



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΜΑΡΑΓΚΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ  
ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΟΠΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ  
ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: *‘ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ’*,

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: *‘ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ’*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
Μάρτιος, 2022





ΜΑΡΑΓΚΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ  
ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΟΠΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΤΟΥ  
ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία', Κατεύθυνση 'Εφαρμοσμένη Γεωφυσική και Σεισμολογία'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 01/04/2022

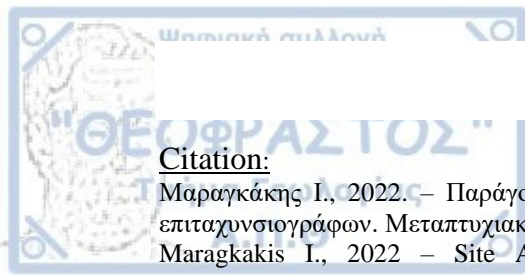
**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

**Κατζηδημητρίου Παναγιώτης**  
**Θεοδολίδης Νικόλαος**  
**Τριανταφυλλίδης Πέτρος**

Επιβλέπων  
Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής  
Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

© Μαραγκάκης Ιωάννης, Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, 2022  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.  
Παράγοντες ενίσχυσης τοπικών συνθηκών σταθμών του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Maragkakis Ioannis, Mineral Resources Engineer  
All rights reserved.  
Site Amplification Factors in stations of the National Network of Accelerometers in Greece – *Master Thesis*



Citation:

Μαραγκάκης Ι., 2022. – Παράγοντες ενίσχυσης τοπικών συνθηκών σταθμών του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., σελ.. 130.  
Maragkakis I., 2022 – Site Amplification Factors in stations of the National Network of Accelerometers in Greece. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 130 pp.

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

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



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία» με ειδίκευση στον τομέα της «Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και Σεισμολογίας». Αξίζει να σημειωθεί ότι η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό έργο με τίτλο «Rapid Earthquake Damage Assessment Consortium: REDACT, eMS Code: BSB966» του οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).

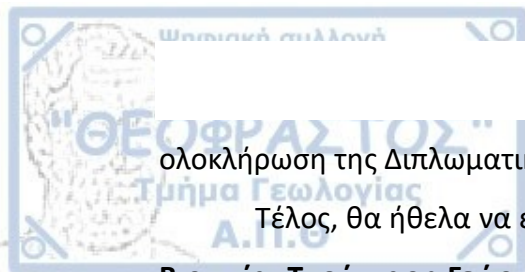
Κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό το ενδιαφέρον μου για την επιστήμη της Γεωφυσικής και πιο συγκεκριμένα για την κατεύθυνση της Σεισμολογίας. Ο συνδυασμός αυτής με τη γλώσσα προγραμματισμού Python, για την επεξεργασία και την ανάλυση σεισμολογικών δεδομένων, συντέλεσε στην επιλογή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Όσον αφορά τη γλώσσα προγραμματισμού Python, αποδείχτηκε εξαιρετικά χρήσιμη, χρησιμοποιώντας διάφορες βιβλιοθήκες αυτής, για την ανάλυση των δεδομένων (*Pandas, NumPy, re, os, glob* κ.λπ.), την επεξεργασία κυματομορφών (*Obspy*), την απεικόνιση των δεδομένων (*Matplotlib, pyqtgraph*), την δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (*tkinter, PyQt5*) καθώς και την χαρτογράφηση του ελληνικού χώρου (*Cartopy*).

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. **Χατζηδημητρίου Παναγιώτη** καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ. **Θεοδουλίδη Νικόλαο** και κ. **Τριανταφυλλίδη Πέτρο** για την πολύτιμη συμβουλή τους, που συντέλεσαν στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, μεγάλο μέρος αυτής της προσπάθειας την οφείλω στον Διδακτορικό φοιτητή **Ιωάννη Γρένδα** που η καθοδήγησή του για το θεωρητικό αλλά και το προγραμματιστικό μέρος της εργασίας, αποδείχτηκε εξαιρετικά χρήσιμη.

Πρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Αντώνιο και Ευαγγελία Μαραγκάκη, καθώς και τις αδερφές μου Αντωνία και Γεωργία που με υπομονή και κουράγιο, πρόσφεραν την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση για την



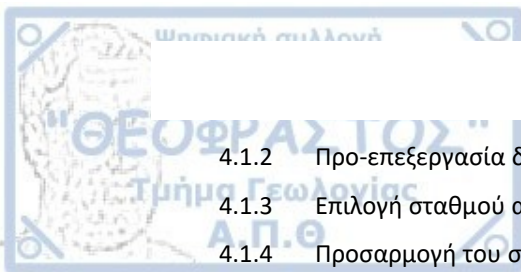
ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μεταπτυχιακούς φοιτητές **Ιερεμιάδου Βιργινία, Τσούγγαρη Γεώργιο, Παπαδόπουλο Γεώργιο** και **Γιαμαλή Σταύρο** για την συμπαράσταση και την υποστήριξή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>	<b>5</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b>7</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>11</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>6</b>
<b>2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b>	<b>11</b>
2.1 Υπολογισμός του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (HSAF)	11
2.2 Αντιστροφή δεδομένων (Generalized Inversion Technique: GIT)	14
<b>3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ</b>	<b>20</b>
3.1 Δημιουργία ενός ενιαίου καταλόγου σεισμών	20
3.1.1 Περίοδος 1973 – 1999	20
3.1.2 Περίοδος 2000 – 2009	20
3.1.3 Περίοδος 2010 – 2018	21
3.1.4 Τελικός κατάλογος σεισμών	21
3.2 Συλλογή και προ-επεξεργασία των καταγραφών του δικτύου επιταχυνσιογράφων	23
3.2.1 Διαχωρισμός αρχείων	24
3.2.2 Επεξεργασία αρχείων GCF	24
3.2.3 Μετατροπή των αρχείων GCF σε ASCII	26
3.2.4 Μετατροπή των αρχείων EVT, GSR, ASC σε μορφή ASCII	28
3.2.5 Μετατροπή καταγραφών αρχείων V2 σε ASCII	28
3.3 Επεξεργασία δεδομένων	29
3.3.1 Αντιστοίχιση σεισμών – καταγραφών	29
3.3.2 Πρόγραμμα επιλογής των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων	30
3.3.3 Επιλογή των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων	34
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	<b>39</b>
4.1 Εφαρμογή της ιαπωνικής συνάρτησης διόρθωσης στα ελληνικά δεδομένα	39
4.1.1 Κριτήρια επιλογής δεδομένων	42



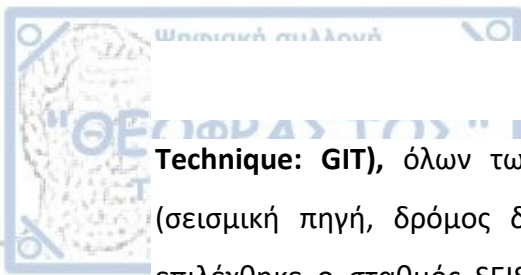
4.1.2	Προ-επεξεργασία δεδομένων	45
4.1.3	Επιλογή σταθμού αναφοράς	47
4.1.4	Προσαρμογή του σταθμού αναφοράς σε πραγματικό σεισμικό υπόβαθρο	48
<b>4.2</b>	<b>Αποτελέσματα Αντιστροφής</b>	<b>54</b>
4.2.1	Παράγοντας σεισμικής πηγής	54
4.2.2	Παράγοντας απόσβεσης των κυμάτων	56
4.2.3	Παράγοντας ενίσχυσης των τοπικών συνθηκών	63
<b>4.3</b>	<b>Υπολογισμός της συνάρτησης διόρθωσης του κατακόρυφου παράγοντα ενίσχυσης για τον ελληνικό χώρο</b>	<b>70</b>
4.3.1	Κατηγοριοποίηση των σταθμών με βάση τη δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα και το μέγιστο πλάτος της καμπύλης HVSR	71
4.3.2	Υπολογισμός της μέσης συνάρτησης διόρθωσης	74
4.3.3	Προσδιορισμός της εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης ανά κατηγορία σταθμών, ανάλογα με το πλάτος της καμπύλης eHVSR και τη δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα	79
4.3.4	Εκτίμηση του παράγοντα οριζόντιας ενίσχυσης (HSAF) με χρήση των εμπειρικών συναρτήσεων διόρθωσης (VACFs)	82
4.3.5	Εκτίμηση του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης σε σταθμούς που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην αντιστροφή	85
<b>5.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b>	<b>91</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>94</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	<b>100</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</b>	<b>111</b>





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται, στην εκτίμηση του φασματικού παράγοντα ενίσχυσης της οριζόντιας συνιστώσας (**Horizontal Site Amplification Factor: HSAF**) σε θέσεις σταθμών επιταχυνσιογράφων, λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση της διάχυσης της σεισμικής ενέργειας (**Diffuse Field Assumption: DFA**). Η προσέγγιση αυτή, βασίζεται στην εκτίμηση της συνάρτησης διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης (**Vertical Amplification Correction Function: VACF**), η οποία πολλαπλασιάζεται με το λόγο των φασμάτων Fourier της οριζόντιας προς την κατακόρυφη σεισμική κίνηση (**earthquake Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio: eHVSr**) σε μια θέση, μπορεί να εκτιμήσει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική ενίσχυση της οριζόντιας συνιστώσας της σεισμικής κίνησης (HSAF). Αρχικά, εξετάσθηκε σε επιλεγμένες θέσεις σταθμών επιταχυνσιογράφων του ελληνικού χώρου η εφαρμογή της ήδη προτεινόμενης συνάρτησης διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης η οποία προτάθηκε για την περιοχή της Ιαπωνίας. Λόγω μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, αποφασίσθηκε η εκτίμηση αντίστοιχης συνάρτησης βασισμένης σε δεδομένα του ελληνικού χώρου. Για το σκοπό αυτόν, σε πρώτο στάδιο δημιουργήθηκε ένας ενιαίος κατάλογος σεισμών στον ευρύτερο ελληνικό χώρο για την περίοδο 1973-2018, εντός της οποίας υπήρχαν καταγραφές επιταχυνσιογράφων του εθνικού δικτύου. Στη συνέχεια, συλλέχθηκαν και επεξεργάσθηκαν κατάλληλα τα δεδομένα επιταχυνσιογράφων. Σε επόμενο στάδιο, αντιστοιχήθηκαν οι καταγραφές επιταχυνσιογράφων με τα στοιχεία των σεισμών από τους οποίους έχουν προέλθει και επιλέχθηκαν οι χρόνοι άφιξης των κυμάτων χώρου (P & S-waves). Τελικά, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας επιλέχθηκαν καταγραφές στις οποίες εφαρμόστηκε η απαραίτητη προεπεξεργασία και επιλέχθηκαν παράθυρα των εγκαρσίων κυμάτων (S-waves) προκειμένου να ενταχθούν στο τελικό αξιόπιστο δείγμα δεδομένων της εργασίας αυτής. Στη συνέχεια, για τα προκαθορισμένα παράθυρα των επιλεγμένων κυματομορφών, υπολογίσθηκαν τα φάσματα Fourier των οριζοντίων και κατακόρυφων συνιστωσών και εξ αυτών ο λόγος eHVSr. Κατόπιν, εφαρμόστηκε η διαδικασία της ταυτόχρονης παραμετρικής αντιστροφής (**Generalized Inversion**

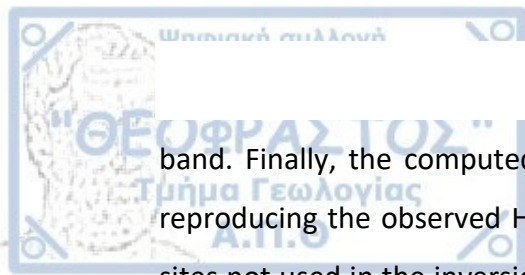


**Technique: GIT**), όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη σεισμική κίνηση (σεισμική πηγή, δρόμος διάδοσης, τοπικές συνθήκες). Ως σταθμός αναφοράς επιλέχθηκε ο σταθμός SEIS (θέση επιταχυνσιογράφου στο σεισμολογικό σταθμό Θεσσαλονίκης) λόγω της επιφανειακής εμφάνισης του γεωλογικού υποβάθρου του (πρασινογενέσιου), της σχεδόν επίπεδης καμπύλης του λόγου eHVSr με πλάτη  $< 2$  και του ικανοποιητικού αριθμού καταγραφών σε αυτόν. Πριν την εισαγωγή των δεδομένων του SEIS στον κώδικα της αντιστροφής, οι καταγραφές του σταθμού αναφοράς προσαρμόστηκαν σε συνθήκες πραγματικού σεισμικού υποβάθρου ( $V_s \geq 3 \text{ km/sec}$ ), προσδιορίζοντας τον ορίζοντα του βραχώδους υποβάθρου και το μονοδιάστατο μοντέλο ταχυτήτων στη θέση SEIS με βάση την υπόθεση της ισοκατανομής της σεισμικής ενέργειας (Diffuse Field Assumption) και μετρήσεις εδαφικού μικροθορύβου στη συγκεκριμένη θέση. Η προσαρμογή έγινε στο πεδίο των συχνοτήτων των φασμάτων Fourier τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη συνιστώσα. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της ταυτόχρονης αντιστροφής οριζόντιων και κατακόρυφων συνιστωσών και των υπολογισμένων φασματικών λόγων eHVSr για το σύνολο των σταθμών επιταχυνσιογράφων, εξήχθησαν δύο κατηγορίες εμπειρικών συναρτήσεων διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης (VACFs): (α) μία μέση συνάρτηση, χρησιμοποιώντας τις καμπύλες eHVSr όλων των σταθμών επιταχυνσιογράφων και (β) επτά ανεξάρτητες συναρτήσεις, ταξινομώντας τις θέσεις ανάλογα με το μέγιστο πλάτος και τη δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα του λόγου eHVSr. Προκειμένου να τεκμηριωθούν οι προτεινόμενες, συναρτήσεις διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης (VACFs), επιχειρήθηκε η εκτίμηση των φασματικών ενισχύσεων της οριζόντιας σεισμικής κίνησης (HSAF) σε επιλεγμένες θέσεις σταθμών επιταχυνσιογράφων τα δεδομένα των οποίων, δεν συμπεριλήφθηκαν στην διαδικασία της γενικευμένης αντιστροφής και για ορισμένους από αυτούς υπήρχαν υπολογισμένοι φασματικοί λόγοι της οριζόντιας σεισμικής κίνησης από ανεξάρτητες μεθόδους (π.χ. κλασικού φασματικού λόγου-SSR). Η καλή συμφωνία των παραπάνω συγκρίσεων ενισχύει την ορθότητα των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής, ενθαρρύνοντας την εφαρμογή των προτεινόμενων VACFs στον ελληνικό χώρο.

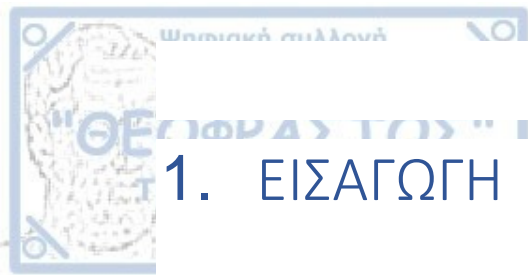


# ABSTRACT

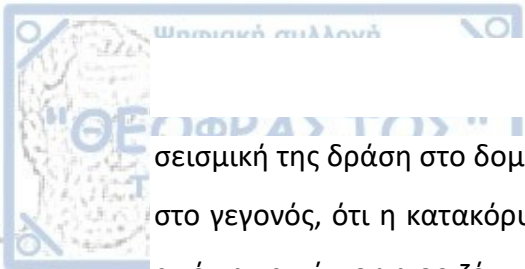
This diploma thesis refers to the evaluation of the Horizontal site Amplification Factor (**HSAF**) in stations of the National Accelerometers Network, based on the Diffuse Field Assumption (**DFA**) theory and simultaneous Generalized Inversion of horizontal and vertical ground motion. The HSAF at a site can be obtained from the multiplication of the Vertical Amplification Correction Function (**VACF**) with the Horizontal to Vertical Spectral Ratio from earthquake records (**eHVSR**). Initially, the Japanese VACFs were used to evaluate the HSAF in selected accelerometer stations in Greece. However, due to the unsatisfying results, the urge to calculate local VACFs was deemed necessary. For this purpose, all available accelerograms for the period 1973-2018 were matched to shallow depth earthquakes of the broader Aegean area. After the matching of earthquakes with records the selection of P and S wave arrivals took place for its individual time history. Before application of the Generalized Inversion of horizontal and vertical ground motion, several criteria were used to filter out reliable records from the dataset and the waveforms were processed, computing the mean horizontal and vertical Fourier spectra on the S wave time window. Then average eHVSR ratio was calculated for each station and a generalized spectral inversion technique (**GIT**) was used to evaluate properties of strong motion factors that affect the seismic-wave propagation (source, path, and site factor). The SEIS station (accelerometer at the seismological station of Thessaloniki) was used as the reference station due to its flat eHVSR curve (amplitude  $<2$ ), its location on the exposed bedrock on the surface and the large number of records. Spectra of this reference station were corrected for the horizontal and the vertical amplification due to the shallow weathered layers, after estimating the 1D, S wave velocity model below the station SEIS. Such an adaption was based on the DFA theory and microtremor recordings. Using the results of the simultaneous inversion of the horizontal and the vertical ground motion as well as the calculated eHVSR ratios, two categories of Greek VACFs in Greece were proposed: (a) one category for the mean VACF using the eHVSR curves of all the stations, (b) seven other categories, classifying the stations according to the peak eHVSR values and their frequency



band. Finally, the computed VACFS in Greece were evaluated by the capability of reproducing the observed HSAF from the eHVSR using both categories of VACFs, in sites not used in the inversion process and for which horizontal amplification factors (HSAFs) were calculated by an independent method (e.g., Standard Spectral Ratio).



Η ισχυρή σεισμική κίνηση στην επιφάνεια της Γης, επηρεάζεται σημαντικά από τρεις βασικούς παράγοντες: τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής που την προκάλεσε, τις ιδιότητες του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, καθώς και τη γεωλογική δομή του υπεδάφους στη θέση καταγραφής. Η συμβολή των τριών αυτών παραγόντων διαμορφώνει τη σεισμική εδαφική κίνηση η οποία, μπορεί να προκαλέσει δυσμενή αποτελέσματα στο δομημένο και φυσικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση είναι γνωστή εδώ και πολλά χρόνια και έχει μελετηθεί για διάφορους σεισμούς ανά τον κόσμο (Macmurdo, 1824; WOOD, 1908; Borchardt, 1970; Bonilla et al., 1997). Κατά συνέπεια, πλήθος επιστημονικών εργασιών (Drouet et al., 2008; Kawase, Mori and Nagashima, 2018; Ito et al., 2020, μεταξύ άλλων) έχουν εκπονηθεί για τον υπολογισμό της ενίσχυσης της εδαφικής κίνησης που μπορεί να προκύψει λόγω των γεωλογικών συνθηκών σε μία περιοχή και μπορεί να ενισχύσει δραστικά τη σεισμική κίνηση στην επιφάνεια. Σχετικές εργασίες (π.χ. BOORE, 2004) δείχνουν ότι οι εδαφικές μεταθέσεις σε αλλουβιακές αποθέσεις μπορούν να είναι μέχρι και 10 φορές μεγαλύτερες των αντίστοιχων μεταθέσεων σε σκληρά πετρώματα. Το πλέον επιφανειακό στρώμα όπου θεμελιώνονται οι τεχνικές κατασκευές επηρεάζει τη σεισμική κίνηση, λόγω της συνήθως μικρής δυσκαμψίας του εδάφους αυτού, που έχει ως συνέπεια όχι μόνο την αύξηση των πλατών των σεισμικών κυμάτων αλλά και την πρωτογενή παραμόρφωσή του (διαρρήξεις του εδάφους, ρευστοποίηση, κλπ.). Ιδιαίτερη, είναι η περίπτωση, όταν η θέση που εξετάζεται υπέρκειται μίας λεκάνης ιζημάτων όπου τα κύματα χώρου παγιδεύονται εντός της λεκάνης κατά την διάδοσή τους από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια και μπορούν να δημιουργήσουν επιφανειακά κύματα προκαλώντας σημαντικές ενισχύσεις και επιμήκυνση διάρκειας της σεισμικής διέγερσης, σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων (Helmberger and Vidale, 1988). Η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής κίνησης ενισχύεται γενικά σε μικρότερο βαθμό από την οριζόντια συνιστώσα με συνέπεια η



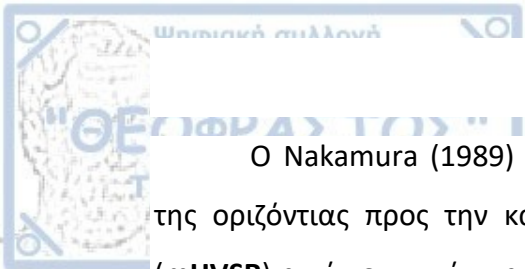
σεισμική της δράση στο δομημένο περιβάλλον να είναι χαμηλότερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η κατακόρυφη σεισμική δόνηση είναι γενικά μικρότερη σε πλάτος από την αντίστοιχη οριζόντια, με εξαίρεση κοντά στο σεισμικό ρήγμα. Η γνώση του παράγοντα της οριζόντιας εδαφικής ενίσχυσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για διάφορες γεω-επιστήμες και ιδιαίτερα για τη Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική και την Τεχνική Σεισμολογία. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίος ο κατά το δυνατόν ακριβέστερος υπολογισμός του, σε σχέση με τη γεωλογική δομή της εξεταζόμενης περιοχής, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διάφορες ειδικότητες επιστημόνων και να βελτιωθούν οι ήδη υπάρχουσες εκτιμήσεις της οριζόντιας σεισμικής δράσης.

Σχετικά με τις διάφορες μεθόδους εκτίμησης της οριζόντιας εδαφικής ενίσχυσης, η θεωρητική προσέγγιση (Nagashima et al., 2014; Nagashima, Kawase and Matsushima, 2017; Takahashi and Hirano, 1941) προϋποθέτει την καλή γνώση της γεωλογικής δομής του υπεδάφους (γεωλογικά δεδομένα, γεωτρήσεις κλπ.). Ωστόσο, μειονεκτεί, καθώς είναι δύσκολο να υπολογιστούν οι ταχύτητες των εγκαρσίων κυμάτων έως το σεισμικό υπόβαθρο, όπου η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων είναι  $V_s \geq 3.0 \text{ km/sec}$ . Παράλληλα, άλλες εμπειρικές μέθοδοι προϋποθέτουν την χρήση του λόγου των φασμάτων Fourier στην επιφάνεια του εδάφους και μέσα σε γεώτρηση (Kitagawa et al., 1988; Satoh et al., 1995) ή στην επιφάνεια του εδάφους και σε μία κοντινή θέση αναφοράς που βρίσκεται πάνω σε βράχο (Borcherdt, 1970; Lermo and Chávez-García, 1993; Field and Jacob, 1995; Bonilla et al., 1997). Παρόλα αυτά, η μέθοδος που βασίζεται σε ένα σταθμό αναφοράς πάνω σε σκληρό βραχώδες υπόβαθρο, έχει το μειονέκτημα ότι συνήθως είναι δύσκολη η εύρεση τέτοιου σταθμού κοντά στην περιοχή μελέτης, αλλά και στην περίπτωση που θα βρεθεί, δεν είναι βέβαιο ότι μπορεί να θεωρηθεί βραχώδες υπόβαθρο χωρίς ενίσχυση της σεισμικής κίνησης. Επίσης, στη μέθοδο που χρησιμοποιεί τον φασματικό λόγο μέσα σε γεώτρηση, δεν υπάρχει μεν το πρόβλημα της απόστασης καθώς η οριζόντια απόσταση μεταξύ των μετρήσεων στην επιφάνεια και στην γεώτρηση είναι πολύ μικρή, επηρεάζεται όμως από τα ανακλώμενα κύματα που καταγράφονται από το σεισμόμετρο μέσα στη γεώτρηση (Steidl, 1996; Satoh, Kawase and Sato, 1997), ενώ το κόστος της γεώτρησης και του εξοπλισμού είναι πολύ υψηλό.

Μία ακόμη εμπειρική μέθοδος, αποτελεί η εφαρμογή των σχέσεων πρόβλεψης της ισχυρής σεισμικής κίνησης (GMPEs) στην οποία χρησιμοποιούνται οι μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης (peak ground acceleration, **PGA**), της ταχύτητας (peak ground velocity, **PGV**) και οι τιμές των φασμάτων απόκρισης (response spectra) ως παράμετροι έντασης της ισχυρής κίνησης. Η εδαφική ενίσχυση, με αυτόν τον τρόπο, σχετίζεται με την κατηγοριοποίηση του εδάφους χρησιμοποιώντας την παράμετρο,  $V_{s30}$ , δηλαδή τη μέση ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων στα επιφανειακά 30m των γεωλογικών σχηματισμών (Borcherdt and Glassmoyer, 1992; Borcherdt, 1994; Douglas and Edwards, 2016) ή/και με παραμέτρους όπως η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα  $f_0$  και το πάχος των εδαφικών αποθέσεων έως το σεισμικό υπόβαθρο της εξεταζόμενης θέσης (Luzi et al., 2011; Héloïse et al., 2012; Baram et al., 2020).

Η τεχνική της Γενικευμένης Αντιστροφής (Generalized Inversion Technique, **GIT**) φασμάτων Fourier σεισμικών καταγραφών, η οποία προτάθηκε και εφαρμόστηκε σε σεισμολογικές μελέτες από τους Andrews (1986), IWATA and IRIKURA (1988), Castro et al. (1990) μπορεί να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό τον παράγοντα ενίσχυσης της οριζόντιας κίνησης, αν έχουν καταγραφεί αρκετοί σεισμοί σε διάφορους σταθμούς καθώς λαμβάνει υπόψη και την απόσβεση των σεισμικών κυμάτων. Οι Nakano et al. (2015) υπολόγισαν βάσει της GIT τους παράγοντες που επηρεάζουν την εδαφική κίνηση χρησιμοποιώντας τα φάσματα Fourier των S κυμάτων από καταγραφές επιτάχυνσης των δικτύων K-NET, KiK-net, JMA (Japan Meteorological Agency) και Shindokey της Ιαπωνίας, για συχνότητες από 0.15 μέχρι 20 Hz. Εφάρμοσαν την ίδια τεχνική αντιστροφής με τους Kawase and Matsuo (2004) και χρησιμοποίησαν τον ίδιο σταθμό αναφοράς (YMGH01) αλλά καταγραφές διαφορετικού χρονικού διαστήματος (1996-2011 αντί 1996-2002).

Μία άλλη, ευκολότερη στην εφαρμογή της τεχνική χρησιμοποιεί τον λόγο της οριζόντιας προς την κατακόρυφη φασματική συνιστώσα σεισμικών καταγραφών (**eHVS**R) στην ίδια θέση και έχει ευρεία εφαρμογή διεθνώς (Nakamura 1989; Lermo and Chávez-García, 1993; Theodulidis and Bard, 1995; Haghshenas et al. 2008, μεταξύ άλλων). Για το λόγο αυτό, είναι εξαιρετικά χρήσιμος ο προσδιορισμός μίας συνάρτησης διόρθωσης του φασματικού λόγου eHVS R που θα εκτιμά με ικανοποιητική ακρίβεια την οριζόντια ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε μια θέση.



Ο Nakamura (1989) πρότεινε την χρήση του λόγου των φασμάτων Fourier της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα, από μετρήσεις μικροθορύβου (**mHVSR**) αντί σεισμικών καταγραφών, θεωρώντας όμως, ότι δεν υπάρχει ενίσχυση στην κατακόρυφη συνιστώσα και συνεπώς ο φασματικός λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα στο σεισμικό υπόβαθρο (**H<sub>b</sub>V<sub>b</sub>R**) είναι μονάδα. Ωστόσο, έχει προταθεί ότι οι λόγοι mHVSR και eHVSR, αν και παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες σε ορισμένες συχνότητες, διαφέρουν μεταξύ τους και οι παράγοντες eHVSR και HSAF δεν είναι ίδιοι (Haghshenas et al. 2008; Nakano, Matsushima and Kawase, 2015; Kawase et al. 2018)

Πολλές εργασίες έχουν αναπτυχθεί για τα δύο αυτά ερωτήματα (αν οι λόγοι mHVSR και eHVSR είναι ίδιοι, αν οι παράγοντες eHVSR και HSAF διαφέρουν μεταξύ τους). Οι, Kawase et al. (2018) χρησιμοποίησαν το φασματικό λόγο mHVSR από μετρήσεις μικροθορύβου και από καταγραφές σεισμών και υπολόγισαν διάφορες κατηγορίες του λόγου **EMR** (Earthquake to Microtremor Ratio), ανάλογα με την ιδιοσυχνότητα των καμπυλών HVSR. Παρατήρησαν, ότι ο ψεύδο-φασματικός λόγος **peHVSR** υπολογισμένος χρησιμοποιώντας το EMR έχει καλύτερη συσχέτιση με το πραγματικό eHVSR σε σχέση με το mHVSR και ότι οι τελευταίοι λόγοι (eHVSR, mHVSR) διαφέρουν σημαντικά, κυρίως σε συχνότητες μεγαλύτερες της ιδιοσυχνότητας. Έτσι, κατέληξαν, ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός του παράγοντα της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση από τον λόγο mHVSR αφού γίνει η διπλή διόρθωσή του χρησιμοποιώντας το EMR και το **VVR** (vertical to vertical spectral ratios), δηλαδή την κατακόρυφη φασματική ενίσχυση της σεισμικής κίνησης από το σεισμικό υπόβαθρο στην επιφάνεια του εδάφους.

Πιο συγκεκριμένα, άλλες εργασίες συγκρίνουν τον λόγο των φασμάτων Fourier eHVSR, με τον φασματικό λόγο **HHR** (horizontal to horizontal spectral ratio), δηλαδή τον λόγο των φασμάτων Fourier της οριζόντιας συνιστώσας στην επιφάνεια του εδάφους, προς την οριζόντια συνιστώσα σε ένα σταθμό αναφοράς. Οι Lermo and Chávez-García (1993) παρατήρησαν σε διάφορες περιοχές στο Μεξικό καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο φασματικών λόγων, τόσο στη συχνότητα όσο και στα πλάτη τους. Οι Parolai et al. (2000) υπολόγισαν μικρότερο πλάτος του λόγου eHVSR, που προέκυψε από την μέθοδο της αντιστροφής, με δεδομένα για την κεντρική Ιταλία. Οι Satoh et al., (2001), διεξήγαγαν μία πιο λεπτομερή μελέτη



χρησιμοποιώντας σταθμούς στην περιοχή Sendai στην Ιαπωνία και βρήκαν ότι όταν η δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα των φασματικών λόγων eHVSr και mHVSr, είναι μικρότερη του 1Hz, τότε είναι παρόμοια με αυτήν του λόγου HHR, ενώ το πλάτος τους, δεν συμφωνεί με το αντίστοιχο, του HHR. Επίσης οι, Field and Jacob (1995) υπολόγισαν μικρότερες τιμές πλατών του λόγου eHVSr σε σύγκριση με τον λόγο HHR, σε αντίθεση με τους Rodríguez and Midorikawa (2003) που βρήκαν μεγαλύτερες για την περιοχή της Yokohama. Παράλληλα, οι Haghshenas, Bard and Theodulidis (2008) χρησιμοποίησαν το λόγο των φασμάτων Fourier από μετρήσεις μικροθορύβου (mHVSr) για την εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών συνθηκών σε διάφορες περιοχές με βάση ένα μεγάλο αριθμό παγκόσμιων δεδομένων. Συμπέραναν ότι οι μέθοδοι eHVSr και mHVSr προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα σε θέσεις που βρίσκονται πάνω σε μαλακές αποθέσεις αλλά δεν μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα για τον υπολογισμό της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης και ότι το μέγιστο πλάτος των μεθόδων HVSr είναι, για το ~80% των εξεταζόμενων θέσεων, μικρότερο από το αντίστοιχο πλάτος που υπολογίζεται με τη μέθοδο SSR. Πολλές άλλες εργασίες έχουν επίσης δημοσιευτεί σχετικά με τη σύγκριση των λόγων eHVSr και mHVSr (Bonnefoy-Claudet *et al.*, 2006; Cultrera *et al.*, 2014). Η διαφοροποίηση των λόγων HHR και eHVSr, οφείλεται στο ότι, ο λόγος HHR εξαρτάται από την ενίσχυση στην οριζόντια διεύθυνση σε ένα σταθμό αναφοράς, ενώ ο λόγος eHVSr εξαρτάται από την ενίσχυση στην κατακόρυφη συνιστώσα στη θέση μελέτης. Αν ο σταθμός αναφοράς δεν βρίσκεται σε βραχώδες υπόβαθρο, τότε η ενίσχυση στην οριζόντια συνιστώσα του σταθμού αναφοράς μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την ενίσχυση στην κατακόρυφη συνιστώσα στη θέση μελέτης και κατά συνέπεια, ο λόγος HHR θα είναι μικρότερος από το λόγο eHVSr (Ito *et al.*, 2020).



## 2.1 Υπολογισμός του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (HSAF)

Οι Ito et al. (2020) λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση της διάχυσης του κυματικού πεδίου των σεισμικών κυμάτων (Diffuse Field Assumption: **DFA**) η οποία αναπτύχθηκε από τους Wesley (1982); Sánchez-Sesma et al. (2008, 2011); Kawase et al. (2011), πρότειναν τον υπολογισμό του παράγοντα οριζόντιας ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης (Horizontal Site Amplification Factor: **HSAF**), χρησιμοποιώντας το φασματικό λόγο της οριζόντιας προς τη κατακόρυφη συνιστώσα, από καταγραφές σεισμών (**eHVSR**) και μία συνάρτηση διόρθωσης. Η συνάρτηση αυτή, διορθώνει τον φασματικό λόγο eHVSR, αφαιρώντας την επίδραση της κατακόρυφης ενίσχυσης, η οποία εμπεριέχεται στον παρανομαστή του λόγου. Με τον τρόπο αυτόν, ο διορθωμένος λόγος eHVSR μπορεί να θεωρηθεί ως η οριζόντια φασματική ενίσχυση, HSAF.

Σύμφωνα με τη θεωρία διάχυσης των σεισμικών κυμάτων (DFA), η ενέργεια ενός κύματος κατανέμεται ομοιόμορφα στις 3 συνιστώσες σε όλη τη διαδρομή από την εστία μέχρι και το σεισμικό υπόβαθρο μίας θέσης. Οι Kawase et al. (2011) έδειξαν ότι ο θεωρητικός φασματικός λόγος των S-κυμάτων ενός σεισμού, μεταξύ της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνάρτηση μεταφοράς (transfer function), στην επιφάνεια (eHVSR), ισούται με το γινόμενο της τετραγωνικής ρίζας του λόγου των ταχυτήτων των επιμήκων προς των εγκαρσίων κυμάτων και του λόγου της απόλυτης τιμής των συναρτήσεων μεταφοράς (Transfer Functions) της οριζόντιας και κατακόρυφης φασματικής συνιστώσας, σύμφωνα με τη σχέση:



$$eHVSR = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \frac{|TF_{horizontal}(\omega)|}{|TF_{vertical}(\omega)|} \quad (2-1)$$

Η τετραγωνική ρίζα στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης, εκφράζει το λόγο των φασμάτων Fourier των S-κυμάτων ενός σεισμού, μεταξύ της κατακόρυφης και της οριζόντιας συνιστώσας,  $V_b H_b R$ , στο σεισμικό υπόβαθρο (bedrock):

$$\frac{H_b}{V_b} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \Rightarrow \frac{V_b}{H_b} = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} \Rightarrow V_b H_b R = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} \quad (2-2)$$

όπου,

- $\alpha, \beta$  η ταχύτητα των επιμήκων και των εγκάρσιων κυμάτων, αντίστοιχα.
- $H_b, V_b$  η οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα του φάσματος Fourier στο σεισμικό υπόβαθρο (bedrock)
- $TF_{horizontal}(\omega), TF_{vertical}(\omega)$  η οριζόντια και η κατακόρυφη συνάρτηση μεταφοράς (transfer function), όπου  $\omega = 2\pi f$ .

Ο όρος  $V_b H_b R$  αντιστοιχεί επομένως με την τετραγωνική ρίζα του λόγου της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων προς την ταχύτητα των επιμήκων κυμάτων και ισούται περίπου με **0.76** (Kawase et al. 2018; Ito et al., 2020).

Η σεισμική κίνηση που καταγράφεται σε μία θέση  $j$  ως αποτέλεσμα ενός σεισμού  $i$ , μπορεί να θεωρηθεί ως ένας σύνθετος μηχανισμός, αρχικά της γένεσης των σεισμικών κυμάτων στην εστία του σεισμού, της διάδοσή τους μέσα από τον φλοιό της Γης και της ενίσχυσής τους στα επιφανειακά γεωλογικά στρώματα. Ο μηχανισμός αυτός ως φυσικό μέγεθος (εδafική ταχύτητα, επιτάχυνση ή μετάθεση) που καταγράφεται σε έναν σταθμό  $j$  μπορεί να αναπαρασταθεί ως το γινόμενο των φασμάτων Fourier της πηγής του σεισμού  $i$  ( $S_i$ ), του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων ( $P_{ij}$ ) και της επίδρασης των επιφανειακών γεωλογικών στρωμάτων ( $H_j$  ή  $V_j$ ) στη θέση καταγραφής. Έτσι, τα φάσματα Fourier της οριζόντιας ( $F_{ij}$ ) και της κατακόρυφης ( $G_{ij}$ ) κίνησης εκφράζονται από τις παρακάτω σχέσεις (Ito et al., 2020):



$$F_{ij} = S_i \cdot P_{ij} \cdot H_j \quad (2-3)$$

$$G_{ij} = S_i \cdot P_{ij} \cdot [V_b H_b R \cdot V_j] \quad (2-4)$$

Οι σχέσεις (2-3) και (2-4) προϋποθέτουν ότι η σεισμική κίνηση διαδίδεται ως εγκάρσια κύματα από τη σεισμική πηγή μέχρι να φτάσει στο σεισμικό υπόβαθρο κάτω από την εξεταζόμενη θέση και στη συνέχεια αυτά τα εγκάρσια κύματα (S-waves) μετατρέπονται σε επιμήκη κύματα (P-waves), τα οποία παρατηρούνται ως κατακόρυφη κίνηση στην επιφάνεια του εδάφους. Ο όρος  $V_j$  εκφράζει την κατακόρυφη ενίσχυση στη θέση  $j$ . Ο όρος  $V_b H_b R$  στη σχέση 2-4, είναι συντελεστής μετατροπής του οριζόντιου πλάτους των εγκάρσιων κυμάτων σε κατακόρυφο πλάτος των επιμήκων κυμάτων το οποίο αντιστοιχεί θεωρητικά στο αντίστροφο του λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα του προσπίπτοντος κύματος στο σεισμολογικό υπόβαθρο (σχέση 2-1) υπό το καθεστώς της υπόθεσης διάχυσης του κυματικού πεδίου (DFA), δηλαδή ο όρος της τετραγωνικής ρίζας στη σχέση (2-1). Αυτός ο συντελεστής χρειάζεται επειδή το κύριο μέρος της κυματικής ενέργειας αποτελείται από τα εγκάρσια κύματα που διαδίδονται από το υπόκεντρο έως το σεισμικό υπόβαθρο κάτω από την εξεταζόμενη θέση  $j$  ενώ ο όρος  $V_j$  αντιπροσωπεύει τον κατακόρυφο παράγοντα ενίσχυσης των επιμήκων κυμάτων από το σεισμικό υπόβαθρο έως την επιφάνεια. Οι παράγοντες  $H_j$  και  $V_j$  αποτελούν την ενίσχυση στην οριζόντια και κατακόρυφη σεισμική κίνηση, αντίστοιχα. Από τις Σχέσεις (2-3) και (2-4) ο λόγος eHVSr προκύπτει από το πηλίκο του οριζόντιου προς το κατακόρυφο φάσμα Fourier:

$$eHVSr = \left\langle \frac{F_{ij}}{G_{ij}} \right\rangle \xleftrightarrow[\text{διαδρομής}]{\text{ίδια πηγή και δρόμος}} eHVSr = \left\langle \frac{H_j}{V_j \cdot V_b H_b R} \right\rangle \quad (2-5)$$

$$= \frac{\langle H_j \rangle}{\langle V_j \cdot V_b H_b R \rangle}$$

οπότε ο παράγοντας ενίσχυσης προκύπτει ως:



$$\langle H_j \rangle = HSAF = eHVSR \cdot \langle V_j \cdot V_b H_b R \rangle \quad (2-6)$$

Ο δείκτης  $b$  δηλώνει το σεισμικό υπόβαθρο (*bedrock*), ο δείκτης  $R$  τον λόγο μίας ποσότητας (*ratio*), οι παράγοντες  $HSAF$ ,  $VSAF$  την οριζόντια και κατακόρυφη εδαφική ενίσχυση και ο συμβολισμός  $H$ ,  $V$  το φάσμα Fourier της οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας, αντίστοιχα.

Ο συμβολισμός  $\langle \rangle$  περιλαμβάνει το μέσο όρο των λογαρίθμων της ποσότητας που περιέχει για όλους τους σεισμούς που καταγράφηκαν στη θέση,  $j$ . Τελικά, προκύπτει ότι ο παράγοντας της οριζόντιας ενίσχυσης μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω σχέση:

$$HSAF = eHVSR \cdot VACF \quad (2-7)$$

όπου  $VACF$  η συνάρτηση διόρθωσης του παράγοντα κατακόρυφης ενίσχυσης. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να υπολογιστεί είτε από το γινόμενο του παράγοντα κατακόρυφης ενίσχυσης ( $VSAF$ ) και του λόγου  $V_b H_b R$  (Ito *et al.*, 2020), είτε από τον λόγο του παράγοντα οριζόντιας ενίσχυσης ( $HSAF$ ), ο οποίος προκύπτει από την αντιστροφή των δεδομένων (Generalized Inversion Technique, βλέπε ενότητα 2.2) και του φασματικού λόγου  $eHVSR$ , χρησιμοποιώντας την Σχέση 2-7:

$$VACF = \frac{HSAF}{eHVSR} \quad (2-8)$$

Συμπερασματικά, ο παράγοντας της οριζόντιας εδαφικής ενίσχυσης μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο του  $eHVSR$  με τη συνάρτηση διόρθωσης  $VACF$ .

## 2.2 Αντιστροφή δεδομένων (Generalized Inversion Technique: GIT)

Για τον υπολογισμό της συνάρτησης διόρθωσης  $VACF$ , χρησιμοποιείται ο παράγοντας της οριζόντιας ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης ( $HSAF$ ). Για την εκτίμηση του  $HSAF$ , εφαρμόζεται η μέθοδος της αντιστροφής των δεδομένων ( $GIT$ ) η οποία εφαρμόστηκε αρχικά από τους Andrews (1986); Iwata and Irikura (1988) και

Castro et al. (1990). Η μέθοδος αυτή, στοχεύει στην εκτίμηση των τριών παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται η σεισμική κίνηση (σεισμική πηγή,  $S_i$ , απόσβεση των σεισμικών κυμάτων,  $P_{ij}$  και επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών  $H_j$  και  $V_j$  για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα, αντίστοιχα). Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη λύση ενός συστήματος εξισώσεων βάσει των (2-3) και (2-4) χρησιμοποιώντας για δεδομένα τα φάσματα Fourier των S κυμάτων των καταγραφών της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας ( $F_{ij}$  και  $G_{ij}$  αντίστοιχα).

Ο αλγόριθμος της αντιστροφής που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή είναι εκείνος των Grendas et al. (2021), ο οποίος βασίζεται στον αλγόριθμο της μη-γραμμικής, επαναληπτικής, **Gauss-Newton** αντιστροφής. Η λύση τους συστήματος των εξισώσεων βασίζεται στη χρήση αρχικών-λογικών τιμών των παραμέτρων που εξετάζονται και των αντίστοιχων τιμών μεταβλητότητάς τους, επιδιώκοντας να μειωθεί η συνάρτηση μέσης διαφοράς (misfit function), μεταξύ των υπολογισμένων τιμών των παραμέτρων και των αρχικών-λογικών τιμών, καθώς και των πραγματικών δεδομένων με τα συνθετικά, από τις υπολογισμένες παραμέτρους. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου της αντιστροφής, νέες παράμετροι υπολογίζονται, έως ότου σταθεροποιηθεί η συνάρτηση μέσης διαφοράς σε μία ελάχιστη δυνατή τιμή. Το πρόγραμμα της αντιστροφής βασίζεται στη χρήση των λογαριθμικών τιμών των φασμάτων Fourier των επιταχύνσεων ( $F_{ij}$  και  $G_{ij}$  αντίστοιχα, για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα),  $y_{i,j,k}$ , μέσω της παρακάτω παραμετρικής εξίσωσης που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία των Grendas et al. (2021):

$$y_{ijk} = m_{0i} - \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{f_k}{f_{ci}} \right)^2 \right] - \gamma(r_{ij}) \cdot \log_{10}(r_{ij}) - \sum_1^n \left( \frac{\pi \cdot r_{ijn} \cdot f_k}{\ln(10) \cdot Q_{sn} \cdot f_k^{a_n} \cdot v_{sn}} \right) + S_{jk} \quad (2-9)$$

όπου,



$$m_{0i} = \log_{10} \left( M_{0i} \cdot \frac{2 \cdot R_{\theta\phi}}{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \beta^3} \right) \quad (2-10)$$

$$y_{ijk} = \log_{10}(A_{ijk}) \quad (2-11)$$

$$s_{jk} = \log_{10}(S_{jk}(f_k)) \quad (2-12)$$

και ο παράγοντας:

- $A_{ijk}$  αποτελεί το πλάτος του φάσματος μετατόπισης των εγκαρσίων κυμάτων (*S-wave displacement spectra*).
- $M_0$ , εκφράζει τη σεισμική ροπή.
- $\gamma$ , εκφράζει τη γεωμετρική διασπορά.
- $V_s$ , αποτελεί τη μέση ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων κατά μήκος του δρόμου διάδοσης ( $V_s = 3500 \text{ m/sec}$ ).
- $\beta = V_s$ , ισούται με την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων στην πηγή.
- $r_{ij}$ , αποτελεί την υποκεντρική απόσταση μεταξύ του σεισμού  $i$  και του σταθμού  $j$ .
- $f_k$ , οι  $k$  διακριτές συχνότητες μελέτης
- $R_{\theta\phi}$ , συντελεστής ακτινοβολίας της πηγής και λαμβάνεται ίσο με **0.55** (Boore and Boatwright, 1984).
- $\rho$ , εκφράζει τη μέση πυκνότητα του μέσου διάδοσης στη σεισμική πηγή και λαμβάνεται ίση με  $\rho = 2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $n$ , δείκτης που αφορά κάθε "κελί" (cell) που μελετάται για τον παράγοντα της ανελαστικής απόσβεσης, στον εξεταζόμενο χώρο
- $Q_{sn}$ , ο παράγοντας ποιότητας για κάθε «κελί»,  $n$
- $a_n$  η παράμετρος που ελέγχει την εξάρτηση του παράγοντα ποιότητας με τη συχνότητα, για κάθε «κελί»,  $n$ .

Οι πρώτοι δύο όροι του δεξιού μέλους της εξίσωσης, αποτελούν παράγοντες της σεισμικής πηγής, οι επόμενοι δύο έχουν να κάνουν με την απόσβεση της σεισμικής κίνησης και ο τελευταίος παράγοντας περιλαμβάνει την επίδραση του εδάφους. Οι

άγνωστοι παράμετροι που υπολογίζονται από την διαδικασία της αντιστροφής είναι οι  $m_{0i}, f_{ci}, Q_{sn}, a_n, \gamma(r_{ij}), s_{jk}$ .

Σχετικά με τις αρχικές τιμές του μεγέθους ροπής ( $M_w$ ) των σεισμών που εξετάζονται, θεωρήθηκε ότι  $M_w = M_L$ , όπου  $M_L$  το τοπικό μέγεθος των αντίστοιχων σεισμών, όπως δίνεται από τους καταλόγους ([AUTH-SS](#), [GI-NOA](#)), με τυπική απόκλιση  $\sigma_{M_L} = 0.2$ . Οι αρχικές τιμές της γωνιακής συχνότητας ( $f_c$ ) υπολογίζονται σύμφωνα με την Σχέση 2-13 (Brune, 1970) σε σχέση με τη σεισμική ροπή ( $M_o$ ) ως:

$$f_c = 0.37 \cdot \beta \cdot \left( \frac{16 \cdot \Delta\sigma \cdot 10^5}{7 \cdot M_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2-13)$$

για τιμές πτώσης τάσης  $\Delta\sigma = 1 \text{ bar}$  και με μεγάλη τυπική απόκλιση ( $\sigma f_c = \pm 500$ ) εξαιτίας των άγνωστων αρχικών τιμών, ώστε να υπάρξουν περιθώρια για περαιτέρω ανάλυση αυτής. Η σεισμική ροπή ( $M_o$ ) προκύπτει από τη Σχέση 2-14 ως:

$$M_o = 10^{1.5M_w + 9.1} \quad (2-14)$$

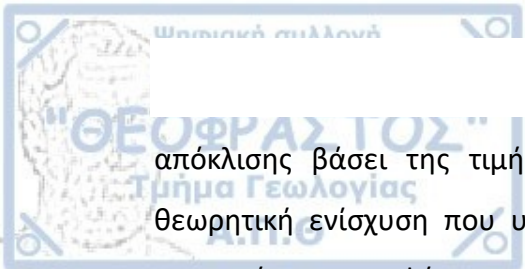
Όσον αφορά το παράγοντα της γεωμετρικής διασποράς ( $\gamma(r_{ij})$ ), διάφορες τιμές αυτού εξετάστηκαν για διαφορετικές υποκεντρικές αποστάσεις, ανά  $40 \text{ km}$  με αρχικές τιμές  $1 \pm 0.5$  (Πίνακας 2.2-1). Για τον παράγοντα της ανελαστικής απόσβεσης ο συνολικός ελληνικός χώρος, χωρίστηκε σε  $n = 285$  κελιά (υπο-περιοχές) με μέγεθος  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (γεωγραφικό μήκος  $19^\circ - 29.2^\circ$  και γεωγραφικό πλάτος  $33^\circ - 42^\circ$ , Σχήμα 4.2-3 για τα οποία υπολογίστηκαν οι τιμές των  $\log_{10} Q_0$  και  $\log_{10} \alpha$ . Οι αρχικές τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων, για όλες τις υπο-περιοχές, βασίστηκαν στις τιμές  $Q_0 = 100$  και  $\alpha = 0.3$  και με τυπικές αποκλίσεις  $std_{\log_{10}(Q_0)} = 1$  και  $std_{\log_{10}(\alpha)} \sim 0.48$ , έτσι ώστε το βασικό εύρος διακύμανσης των  $Q_0$  και  $\alpha$  κατά την αντιστροφή να είναι  $10 - 1000$  και  $0.1 - 0.9$ , αντίστοιχα.



Πίνακας 2.2-1: Αρχικές τιμές της γεωμετρικής διασποράς ( $\gamma$ ), ανάλογα με το εύρος της υποκεντρικής απόστασης για την αντιστροφή (GIT)

No of records	Hyp. dist. (km)	No of records	Hyp. dist. (km)
		652	170.000
145	20.000	699	180.000
290	30.000	604	190.000
414	40.000	712	200.000
338	50.000	680	210.000
344	60.000	692	220.000
422	70.000	649	230.000
676	80.000	496	240.000
738	90.000	670	250.000
646	100.000	584	260.000
722	110.000	467	270.000
916	120.000	474	280.000
772	130.000	605	290.000
588	140.000	543	300.000
642	150.000	0	299.985
656	160.00		

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τις περιοχές, από τις οποίες δεν περνούσαν σεισμικές ακτίνες, δεν πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί. Τέλος, για τις τιμές της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης σε κάθε σταθμό,  $j$  και για κάθε συχνότητα  $f_k$  (για τις οριζόντιες και για τις κατακόρυφες συνιστώσες), θεωρήθηκε αρχική ενίσχυση  $S_{jk}(f_k) = 1$  ( $\log_{10} S_{jk} = 0$ ) για όλους τους σταθμούς, ορίστηκε όμως αρκετά μεγάλο εύρος διακύμανσης βάσει της τυπικής απόκλισης ( $std(\log_{10} S_{jk}) = 3$ ) με τις τιμές της ενίσχυσης να κυμαίνονται από 0.01 – 1000. Για την αντιστροφή χρησιμοποιήθηκε σαν σταθμός αναφοράς, ο σταθμός SEIS (θέση επιταχυνσιογράφου στο σεισμολογικό σταθμό Θεσσαλονίκης) λόγω της επιφανειακής εμφάνισης του γεωλογικού υποβάθρου του (πρασινογενέσιου), της σχεδόν επίπεδης καμπύλης του λόγου eHVSr με πλάτη <2 και του ικανοποιητικού αριθμού καταγραφών σε αυτόν. Η αρχική τιμή της ενίσχυσης για τον σταθμό αναφοράς θεωρήθηκε μοναδιαία (δηλαδή χωρίς ενίσχυση) με εύρος τυπικής



απόκλισης βάσει της τιμής  $\sigma (\log_{10} S_{refk}) = 0.7$ , αφού πρώτα αφαιρέθηκε η θεωρητική ενίσχυση που υπολογίστηκε στην Ενότητα 4.1-4, από τις αντίστοιχες σεισμικές καταγραφές στην οριζόντια και στην κατακόρυφη συνιστώσα.



### 3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

#### 3.1 Δημιουργία ενός ενιαίου καταλόγου σεισμών

Αναπόσπαστο κομμάτι της ανάλυσης των δεδομένων, αποτελεί η δημιουργία ενός ενιαίου καταλόγου σεισμών. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν επιταχυνσιογραφήματα του ελληνικού χώρου που προέκυψαν από τη σύνθεση δεδομένων τριών χρονικών περιόδων και συγκεκριμένα (α) 1973 – 1999, (β) 2000 – 2009 και (γ) 2010 – 2018. Οι σεισμοί που επιλέχθηκαν είχαν μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του τέσσερα ( $M \geq 4$ ) σε γεωγραφικό παράθυρο με συντεταγμένες  $19^\circ - 29^\circ E$  και  $34^\circ - 42^\circ N$ , εντός του οποίου περιλαμβάνεται ο ελληνικός χώρος καθώς και γειτονικές περιοχές.

##### 3.1.1 Περίοδος 1973 – 1999

Οι κατάλογος αυτής της χρονικής περιόδου περιλαμβάνει **318** σεισμούς του ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών, που καταγράφηκαν από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων του Ινστιτούτου Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (Ι.Τ.Σ.Α.Κ) και του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Γ.Ι.Ε.Α.Α.), ενώ οι εστιακές παράμετροι αυτών έχουν επαναπροσδιοριστεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Ανάπτυξη Ενιαίας Βάσης Δεδομένων Ισχυρής Εδαφικής Κίνησης Σεισμών του ελληνικού Χώρου» (Theodulidis et al., 2004).

##### 3.1.2 Περίοδος 2000 – 2009

Ο κατάλογος της χρονικής περιόδου 2000 – 2009, περιλαμβάνει **2139** σεισμούς και οι παράμετροι εστίας αυτών έχουν ληφθεί από τη βάση δεδομένων του Σεισμολογικού Σταθμού του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

(A.U.Th. Seismological Network) και συμπληρωματικά με σχετικές πληροφορίες από τον κατάλογο του Γ.Ι.Ε.Α.Α.. Έτσι, αναπτύχθηκε κώδικας για την εύρεση των σεισμών που υπάρχουν μόνο στον κατάλογο του Γ.Ι.Ε.Α.Α. ώστε να προστεθούν στον κατάλογο του σεισμολογικού σταθμού του Α.Π.Θ.. Κατά την διαδικασία αυτήν, κάθε σεισμός του καταλόγου του Γ.Ι.Ε.Α.Α. συγκρίθηκε με τους σεισμούς του καταλόγου του Σεισμολογικού Σταθμού του Α.Π.Θ.. Όταν η διαφορά των χρόνων γένεσης μεταξύ των συγκρινόμενων σεισμών των δύο καταλόγων ήταν μικρότερη ή ίση των 5 δευτερολέπτων, τότε επρόκειτο για σεισμό που ήταν κοινός και στους δύο καταλόγους. Στην αντίθετη περίπτωση, θεωρούνταν ότι επρόκειτο για διαφορετικό σεισμό με τον οποίο συμπληρώνονταν ανάλογα ο κατάλογος του Σεισμολογικού Σταθμού του Α.Π.Θ..

Παράλληλα, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στην περίπτωση της ύπαρξης σεισμών των δύο καταλόγων που ενώ διέθεταν μικρή διαφορά χρόνων γένεσης ( $< 5 \text{ sec}$ ), η διαφορά του μεγέθους παρουσίαζε μεγάλη απόκλιση ( $\Delta M > 0.3$ ), τότε αυτοί διορθώνονταν με βάση τον πρόσφατο κατάλογο **HELPOS** (*AUTH HELPOS catalogue 550BC-2018*) (Σκορδύλης και συνεργάτες., 2021).

### 3.1.3 Περίοδος 2010 – 2018

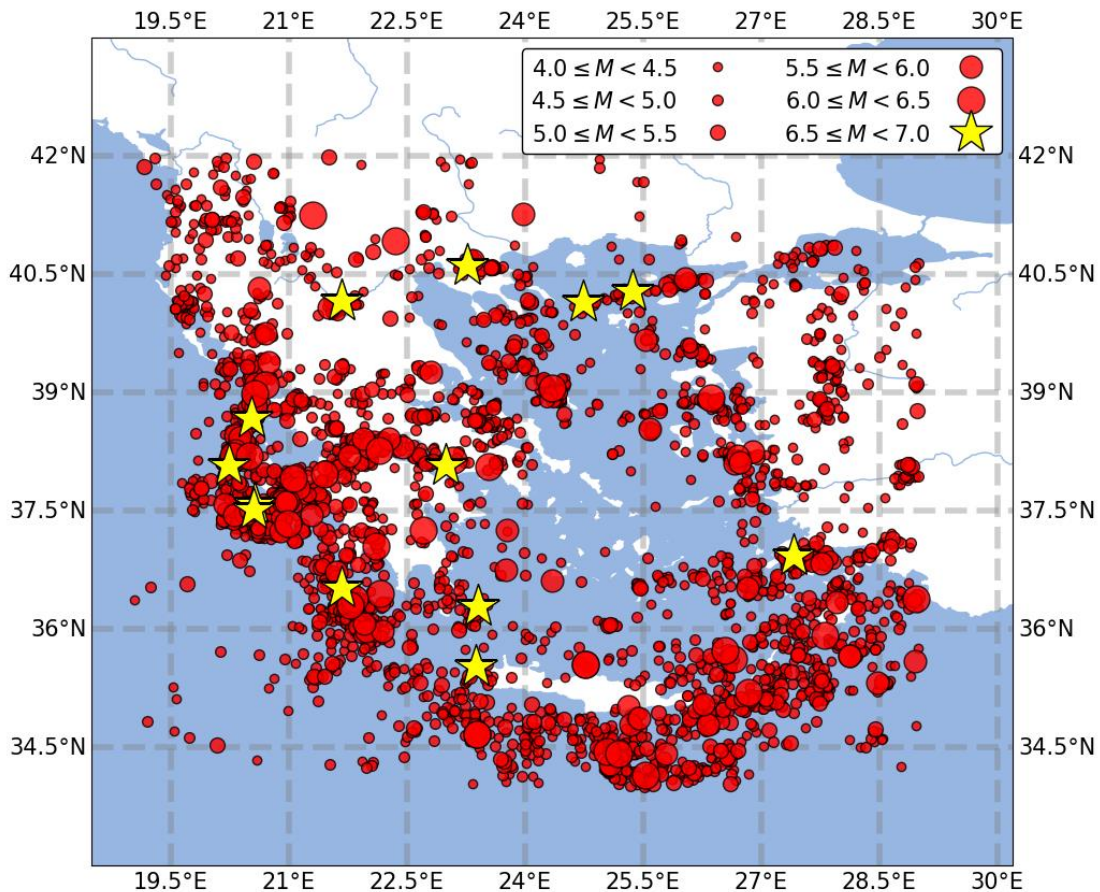
Τέλος, ο κατάλογος της περιόδου 2010 μέχρι 2018, περιλαμβάνει **1198** σεισμούς οι οποίοι, συλλέγονται από τους καταλόγους του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου και του Σεισμολογικού σταθμού της Θεσσαλονίκης των οποίων οι χρόνοι γένεσης συγκρίθηκαν εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία όπως και στον κατάλογο της προηγούμενης περιόδου.

### 3.1.4 Τελικός κατάλογος σεισμών

Ο τελικός κατάλογος που συντάχθηκε, προέρχεται από την σύνθεση των τριών αυτών υπο-καταλόγων και αποτελείται συνολικά από **3655** σεισμούς, με εύρος μεγεθών  $4 \leq M \leq 7$  και με βάρη που κυμαίνονται από **0 – 170km**. Ο αθροιστικός αριθμός τους σε σχέση με το μέγεθος αντιστοιχίζεται ως:

- 3655,  $M \geq 4$
- 1891,  $M \geq 4.5$
- 474,  $M \geq 5$
- 44,  $M \geq 6$

Η γεωγραφική τους κατανομή φαίνεται στο Σχήμα 3.1-1



Σχήμα 3.1-1: Κατανομή των επικέντρων των σεισμών του τελικού καταλόγου με μεγέθη  $M \geq 4.0$  και εστιακά βάθη από 0 – 170km. Το γεωγραφικό παράθυρο που κατανομούνται, είναι  $19^{\circ}E - 29^{\circ}E$  και  $34^{\circ}N - 42^{\circ}N$ .

Οι εστιακές παράμετροι του ενιαίου καταλόγου σεισμών, διορθώθηκαν με βάση τον κατάλογο HELPOS (Σκορδύλης και συνεργάτες., 2021) χρησιμοποιώντας ως συνθήκη, η διαφορά των χρόνων γένεσης μεταξύ των συγκρινόμενων σεισμών να είναι μικρότερη ή ίση των δέκα δευτερολέπτων ( $0 \leq |ET_{TOTALCAT} - ET_{HELPOS}| \leq 10sec$ ).

Τέλος, ο κατάλογος αυτός χωρίζεται σε δύο υπο-καταλόγους, ένας με επιφανειακούς σεισμούς (εστιακού βάρους  $H \leq 40km$ ) και με μεγέθη μεγαλύτερα ή ίσα του 4.5 ( $M \geq 4.5$ ) και ένας με σεισμούς ενδιάμεσου βάρους (εστιακού

βάθους  $40\text{km} < H < 170\text{km}$ ) και μεγέθη μεγαλύτερα ή ίσα του 4.5 ( $M \geq 4.5$ ). Ο συνολικός αριθμός των σεισμών που προέκυψε είναι **1659** και **232** αντίστοιχα.

### 3.2 Συλλογή και προ-επεξεργασία των καταγραφών του δικτύου επιταχυνσιογράφων

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση του ενιαίου καταλόγου σεισμών, ακολουθεί η ανάλυση και επεξεργασία των επιταχυνσιογραφημάτων του Ι.Τ.Σ.Α.Κ. Τα αρχεία προς επεξεργασία ανάλογα με το όργανο καταγραφής, είναι στην πλειονότητά τους, της μορφής **GCF** (*Guralp Compressed Format*), **EVT**, **GSR**, **GBR**, **V2**, **ASC**. Στον Πίνακα 3.2-1 παρουσιάζεται ο τύπος των δεδομένων και το μοντέλο επιταχυνσιογράφου για κάθε μορφή. Ο συνολικός αριθμός των καταγραφών προς επεξεργασία είναι **61.610**.

Πίνακας 3.2-1: Περιγραφή των αρχείων στη βάση δεδομένων

Format	Τύπος/Μοντέλο Επιταχυνσιογράφου	Τύπος δεδομένων	Περιγραφή
<b>GCF</b>	Ψηφιακός / CMG-5TDE	binary	Αδιόρθωτα δεδομένα
<b>GSR &amp; GBR</b>	Ψηφιακός / Geosig GSR-24	binary	Αδιόρθωτα δεδομένα
<b>EVT</b>	Ψηφιακός / QDR ή ETNA ή K2	binary	Αδιόρθωτα δεδομένα
<b>V2</b>	αναλογικός SMA-1 ή Ψηφιακός / QDR ή ETNA ή K2	ASCII	ASCII διορθωμένα δεδομένα
<b>ASC</b>	προέρχονται από όλους τους τύπους των παραπάνω επιταχυνσιογράφων	ASCII	Μετατροπή των binary σε ASCII, διορθωμένα δεδομένα

Κατά τη διάρκεια της διαχείρισης των αρχείων αυτών, προέκυψαν σημαντικά προβλήματα όπως για παράδειγμα ο μεγάλος αριθμός τους (μόνο τα αρχεία GCF ξεπερνούν τις **150.000** συνιστώσες), η διαφορετική μορφή του ονόματος κάθε αρχείου, οι κενές καταγραφές, οι καταγραφές θορύβου, οι

καταγραφές σε γεωτρήσεις οι οποίες δεν αποτελούν αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας και αρκετά άλλα που δυσχεραίνουν την επεξεργασία. Για τους λόγους αυτούς, κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση των σταδίων επεξεργασίας καθώς και των τρόπων επίλυσης των ανωτέρω προβλημάτων.

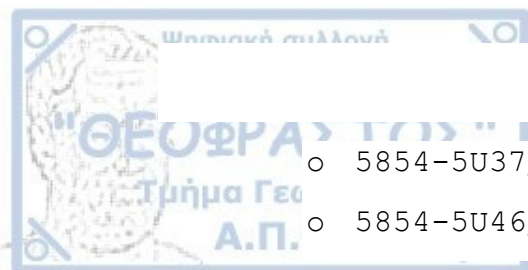
### 3.2.1 Διαχωρισμός αρχείων

Αρχικά, στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός των διαφορετικών τύπων αρχείων με βάση την κατάληξη του ονόματός τους. Τα είδη των αρχείων που προϋπάρχουν, εμφανίζονται με καταλήξεις GCF, GSR, GBR, EVT, ASC, V2. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η εντολή `glob` της βιβλιοθήκης `glob` της γλώσσας προγραμματισμού Python. Αυτή αποσκοπεί στην αναζήτηση κάθε φακέλου και υπο-φακέλου λαμβάνοντας υπόψη ένα συγκεκριμένο μοτίβο (π.χ. `^[0-9a-zA-Z]{1,4}_[0-9]{12}\\.gcf`), το οποίο προκύπτει από τη χρήση χαρακτήρων μπαλαντέρ (wildcards), όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση για την εύρεση κάθε κατάληξης αρχείου (π.χ. `*.GCF`). Έπειτα, ο συνδυασμός της με την βιβλιοθήκη `shutil` και πιο συγκεκριμένα με την εντολή `shutil.move`, φέρει εις πέρας το διαχωρισμό των αρχείων.

### 3.2.2 Επεξεργασία αρχείων GCF

Κατά την διάρκεια επεξεργασίας των αρχείων αυτών, έγινε η απαραίτητη διόρθωση εσφαλμένων ονομάτων σταθμών και αισθητήρων, απομακρύνθηκαν καταγραφές με θόρυβο που δεν προέρχονταν από σεισμό, ή κενές καταγραφές κ.α. Πιο συγκεκριμένα, τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται είναι:

- Λανθασμένη αντιστοίχιση ζευγαριών κωδικού σταθμού-οργάνου καταγραφής:
  - 5854-5U50, διορθώνεται σε AGR2-5U50
  - ALX-5386, διορθώνεται σε ALX1-5386
  - ALX2-T5R9, διορθώνεται σε ALX2-5R94
  - BUT-5624, διορθώνεται σε BUT1-5624
  - 5854-5U15, διορθώνεται σε KAL3-5U15



- 5854-5U37, διορθώνεται σε GTH2-5U37
- 5854-5U46, διορθώνεται σε LEO1-5U46

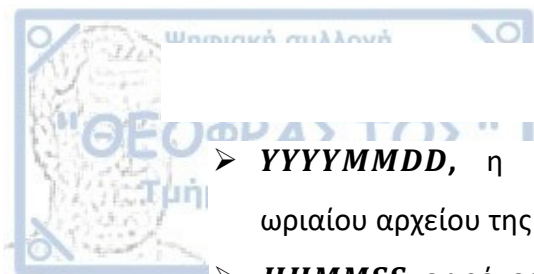
- Λανθασμένη ονομασία σταθμών:
  - BUT, διορθώνεται σε BUT1
  - PRO, διορθώνεται σε PRO1
  - SSt, διορθώνεται σε SEIS
  - PRR, διορθώνεται σε PRR1
  - CHA1, διορθώνεται σε CH01
  - CHN, διορθώνεται σε CH01
  - CHN1, διορθώνεται σε CH01
  - Kalamata2, διορθώνεται σε KAL2
  - STC, διορθώνεται σε STC1
- Εσφαλμένα ζευγάρια σταθμών-οργάνου καταγραφής:
  - MPMHS-CXSW
- Καταγραφές χωρίς κωδικό οργάνου καταγραφής:
  - MET/MET1\_20080305094601\_E0.gcf
- Καταγραφές θορύβου, ενδεικτικά:
  - Ka12/20151126\_1000\_d4k3zg.gcf
  - 20130702\_104544\_KYP2\_ZHW2E4.gcf
  - 20130215\_144258\_STD0\_5E85E2.gcf
- Καταγραφές που δεν προέρχονται από σεισμό:
  - 20090513\_1600m.gcf (αναφέρεται στον έλεγχο της μάζα σεισμομέτρου)
- Πολλαπλά ίδια αρχεία καταγραφών (duplicates)

Στη συνέχεια, λόγω των διαφορετικών χρονικών περιόδων δημιουργίας των αρχείων GCF, τα ονόματα τους δεν ήταν ομοιογενή και δεν συμβαδίζουν με την πλέον πρόσφατη ονοματοδοσία καταγραφών:

*YYYYMMDD\_HHMMSS\_(SN)\_(SC)(CP).gcf*

όπου,





- **YYYYMMDD**, η ημερομηνία (έτος-μήνας-ημέρα) του περιεχομένου ωριαίου αρχείου της καταγραφής
- **HHMMSS**, ο χρόνος (ώρα-λεπτά-δευτερόλεπτα) του περιεχομένου ωριαίου αρχείου της καταγραφής
- **(SN)**, η κωδική ονομασία του σταθμού (station name)
- **(SC)**, ο κωδικός του οργάνου (*station code*, 4 χαρακτήρες),
- **(CP)**, η αντίστοιχη συνιστώσα (E, N, Z ή L, V, T ή X, Y, Z)

Ένα παράδειγμα της τελικής ονομασίας ενός αρχείου μορφής GCF αποτελεί:

20140214\_033825\_AGT1\_5W37N0

Το μεγάλο πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν η συλλογή όλων αυτών των χαρακτηριστικών, καθώς η πληροφορία αυτή βρίσκεται είτε στο όνομα του αρχείου, είτε στο όνομα του φακέλου μέσα στον οποίο βρίσκεται κάθε αρχείο.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε ομάδες ανάλογα με τη μορφή του ονόματος του κάθε αρχείου και παράλληλα αναπτύχθηκαν κώδικες σε γλώσσα προγραμματισμού Python για την επεξεργασία του ονόματος κάθε διακεκριμένης ομάδας ξεχωριστά, έτσι ώστε το όνομα να αποκτήσει μία ενιαία μορφή για τα αρχεία όλων των ομάδων.

### 3.2.3 Μετατροπή των αρχείων GCF σε ASCII

Μετά την τελική μορφοποίηση του ονόματος των αρχείων GCF, ακολούθησε η μετατροπή τους σε μορφή **ASCII** η οποία εμπεριέχει τις επιταχύνσεις σε φυσικές μονάδες ( $\frac{cm}{s^2}$ ) ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους. Αυτό έγινε με το λογισμικό **GCF2ASC** το οποίο χρειάζεται ως είσοδο όλα τα αρχεία GCF, καθώς και το αρχείο με όνομα **calvals**, όπου εμπεριέχονται τα «ζευγάρια» σταθμού–οργάνου (π.χ. *ALX2-5R94*) καθώς και οι μονάδες ευαισθησίας ανά συνιστώσα για την μετατροπή των δυαδικής μορφής δεδομένων (binary format) σε φυσικές μονάδες. Η διαδικασία αυτή δημιούργησε αρχεία ASCII με συγκεκριμένες πληροφορίες στην επικεφαλίδα του καθενός και χρονοϊστορίες επιτάχυνσης σε μονάδες  $\frac{\mu m}{s^2}$ . Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε η συλλογή όλων των «ζευγαριών» σταθμού–οργάνου για

την αντιμετώπιση των παρακάτω θεμάτων:

- Σε ορισμένες περιπτώσεις το όνομα του σταθμού και ο κωδικός του οργάνου που είναι ενσωματωμένα στα αρχικά δυαδικά (binary) αρχεία με κατάληξη GCF, διαφέρουν από τα αντίστοιχα καταχωρημένα στο όνομα του αρχείου
- Κατά τη μετατροπή σε μορφή ASCII εμφανίζονται «κενά» στα δεδομένα, με αποτέλεσμα την αντικατάσταση των τιμών αυτών από το πρόγραμμα με τιμή  $-2147483647$ . Αυτό ενδέχεται να επηρεάσει στη συνέχεια τον υπολογισμό των φασμάτων Fourier σε μεγάλο βαθμό. Το μήνυμα που εμφανίζεται στο παράθυρο εντολών για τα κενά αυτά είναι «*WARNING: Gap in Data detected, padding with -2147483647*»
- Εσφαλμένη καταγραφή ονομάτων σταθμών και κωδικών οργάνων
- Δεν εμφανίζονται όλα τα ζευγάρια στο αρχείο CALVALS με αποτέλεσμα την δημιουργία σφαλμάτων:
  - *WARNING: Mismatched StreamID found in block 1.518000000000000E+0003, skipping*
  - *WARNING: Scale to Ground Movement units requested, but no entry in calvals.txt found for ALX2-T5R942).*

Το πρώτο βήμα για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων περιλαμβάνει τον διαχωρισμό των αρχείων σε φακέλους σε σχέση με το όνομα του σταθμού και τον κωδικό του οργάνου. Για κάθε φάκελο ή ζευγάρι σταθμού-οργάνου, που προϋπάρχει στο αρχείο calvals γίνεται κανονικά η μετατροπή των αρχείων μέσα στον αντίστοιχο φάκελο σε αρχείο ASCII. Για τα υπόλοιπα, που δεν είναι διαθέσιμα, χρειάστηκε διεξοδική αναζήτηση για την εύρεση των αντίστοιχων «ζευγαριών». Η αντιμετώπιση των κενών στα αρχεία, πραγματοποιείται με την εισαγωγή τιμών **NAN**, δηλαδή τιμών που δηλώνουν ότι δεν αποτελούν αριθμούς στις αντίστοιχες θέσεις. Αυτό επιλέχθηκε ως λύση ώστε να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα στην εργασία αυτή, καθώς και σε οποιονδήποτε άλλη χρήση τους.

Επιπλέον, σε κάποια αρχεία δεν ήταν δυνατή η μετατροπή τους σε φυσικές μονάδες, λόγω της έλλειψης των κατάλληλων ζευγαριών (σταθμού-οργάνου). Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα GCF2ASC χωρίς να υπάρχουν τα

χαρακτηριστικά αυτά, μετατρέπονται οι δυαδικές τιμές σε «counts» και όχι σε φυσικές μονάδες. Για το λόγο αυτό, αφού έγινε η μετατροπή των τιμών σε «counts», χρησιμοποιήθηκε ένας παράγοντας (CF), με τον οποίο τα counts μετατράπηκαν εκ νέου σε φυσικές μονάδες. Ο παράγοντας αυτός δίνεται από τη σχέση:

$$CF = \frac{VPC}{G \cdot 1000000} \cdot 100 \quad (3-1)$$

Τα **G**, **VPC** είναι σταθερές του εκάστοτε επιταχυνσιογράφου και αλλάζουν ανάλογα με το όργανο. Οι μονάδες των επιταχύνσεων που προκύπτουν από τον διορθωτικό αυτό παράγοντα είναι σε  $\frac{cm}{s^2}$ .

### 3.2.4 Μετατροπή των αρχείων EVT, GSR, ASC σε μορφή ASCII

Κατά την μετατροπή των αρχείων με κατάληξη EVT, GSR, GBR, ASC σε μορφή ASCII, εμφανίσθηκαν και αντιμετωπίσθηκαν τα παρακάτω προβλήματα:

- Αρχεία με έντονη παρουσία θορύβου, ενδεικτικά:
  - 2003\10\20031029.211552.ITSAK-E01.04.----.asc
  - 2003\10\20031029.211552.ITSAK-TST.04.----.asc
  - 2003\10\20031029.211552.ITSAK-TST.05.----.asc
- Καταγραφές επί κατασκευών, καταγραφές μέσα σε γεώτρηση και γενικά καταγραφές «μη ελευθέρου πεδίου» (*non free-field records*), ενδεικτικά:
  - 2020\12\20201202.105445.ITSAK-KMI.01.C19\_.asc
  - 2020\12\20201202.105445.ITSAK-KMI.01.C1\_1.asc
  - 2020\12\20201202.105445.ITSAK-KMI.02.C2\_8.asc
  - 2011\07\20110725.042451.TST.16.N270.ASC
  - 2011\07\20110725.042451.TST.18.N180.ASC
  - 2011\08\20110807.091553.TST.16.N270.ASC

### 3.2.5 Μετατροπή καταγραφών αρχείων V2 σε ASCII

Τα αρχεία με κατάληξη **V2**, προέρχονται από το ερευνητικό πρόγραμμα «Ανάπτυξη Ενιαίας Βάσης Δεδομένων Ισχυρής Εδαφικής Κίνησης Σεισμών του

ελληνικού Χώρου: **HEAD**), που εκπονήθηκε από το **I.T.S.A.K** σε συνεργασία με το Τμήμα Γεωλογίας **Γ.Ι.Ε.Α.Α.** και το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (**ΕΓΑΠΘ**) (Theodulidis et al., 2004). Κάθε αρχείο περιλαμβάνει τρεις συνιστώσες. Η κάθε μία από αυτές διαθέτει τιμές πλατών για την επιτάχυνση, την ταχύτητα και τη μετάθεση της σεισμικής κίνησης. Οι καταγραφές αυτές καλύπτουν την χρονική περίοδο από το 1973 – 1999. Για την επεξεργασία τους αναπτύχθηκε κώδικας για την επιλογή του χρόνου καταγραφής (**datetime**), του ονόματος του σταθμού (**station**), του διαστήματος δειγματοληψίας (**dt**), καθώς και των τιμών πλάτους της επιτάχυνσης. Για κάθε μία συνιστώσα επιτάχυνσης δημιουργείται ένα αρχείο μορφής ASCII με δομή ίδια με εκείνη των προηγούμενων μορφών αρχείων.

### 3.3 Επεξεργασία δεδομένων

#### 3.3.1 Αντιστοίχιση σεισμών – καταγραφών

Μετά την δημιουργία του ενιαίου καταλόγου και την προ-επεξεργασία των καταγραφών, επόμενο βήμα αποτέλεσε η αντιστοίχιση των σεισμών με τις καταγραφές, δηλαδή η εύρεση του συνόλου των καταγραφών, για κάθε σεισμό. Για την σωστή αντιστοίχιση χρησιμοποιήθηκε ο κατάλογος των επιφανειακών σεισμών, που έχει περιγραφεί στο υπο-κεφάλαιο [3.1](#). Συγκεκριμένα, για κάθε έναν σεισμό του καταλόγου ελέγχθηκε ο χρόνος γένεσής του έτσι ώστε η διαφορά του από το χρόνο έναρξης της αντίστοιχης κυματομορφής να είναι μικρότερος από **150** δευτερόλεπτα.

Στη συνέχεια, η ίδια διαδικασία αντιστοίχισης ακολουθήθηκε χρησιμοποιώντας τον κατάλογο του HELPOS για τους επιφανειακούς σεισμούς με βάθη μικρότερα από  $40\text{ km}$  και  $M \geq 4.5$  (Σκορδύλης και συνεργάτες, 2021). Παράλληλα, προστέθηκαν στον τελικό κατάλογο και κάποιοι σεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο του **5** που δεν υπήρχαν στα αντιστοιχισμένα ζευγάρια σεισμών-καταγραφών του αρχικού καταλόγου. Ο τελικός κατάλογος που προέκυψε μετά τις αντιστοιχίσεις, περιλαμβάνει **20.517** κυματομορφές **772** σεισμών που καταγράφηκαν συνολικά σε **262** σταθμούς.

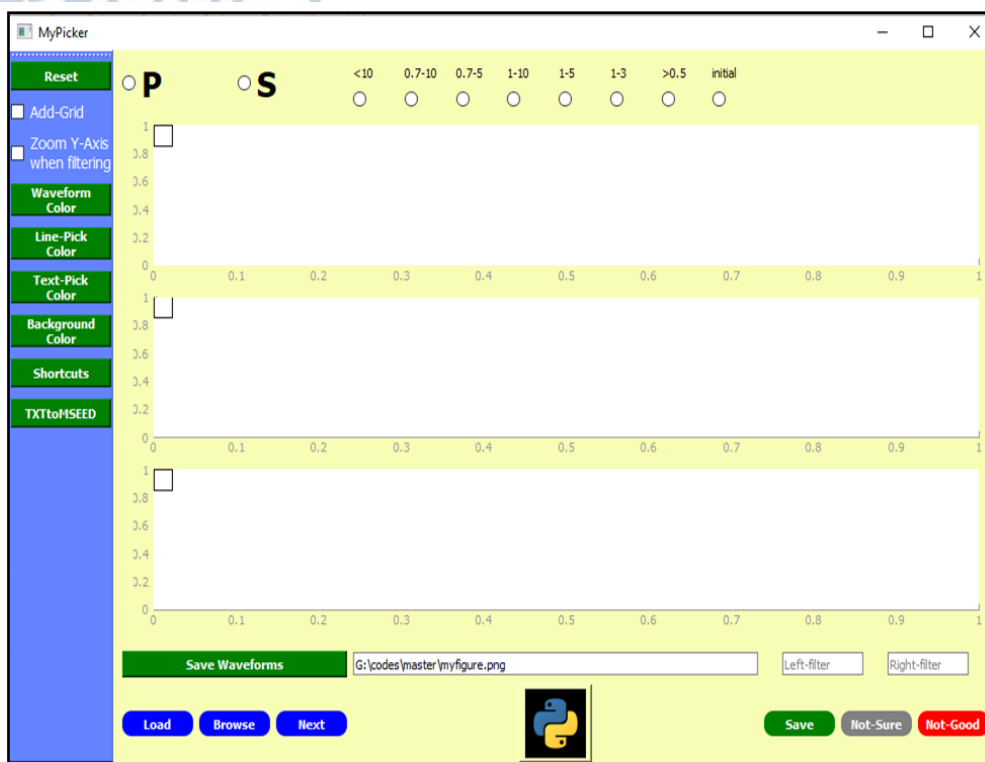
### 3.3.2 Πρόγραμμα επιλογής των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων

Επόμενο βήμα της επεξεργασίας των δεδομένων αποτέλεσε η επιλογή των χρόνων άφιξης των κυμάτων χώρου (P & S-waves). Για την επιλογή αυτή δημιουργήθηκε το πρόγραμμα **MyPicker.py** γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού Python κάνοντας χρήση των βιβλιοθηκών **pyqtgraph** και **PyQt5**. Η τελευταία επιτρέπει την εκτέλεση της βιβλιοθήκης **Qt**, η οποία αποτελεί γραφική εργαλειοθήκη διεπαφής χρήστη και είναι απαραίτητη για την απεικόνιση των κυματομορφών.

Το πρόγραμμα μπορεί να εκτελεστεί γραφικά αλλά για μεγαλύτερη ευκολία κάνοντας χρήση της γραμμής εντολών και ενός οποιουδήποτε συντάκτη κειμένου (code-editor). Για την εκτέλεση του προγράμματος δόθηκε η παρακάτω εντολή σε ένα τερματικό:

```
$python [Πλήρης Διαδρομή]/MyPicker.py
```

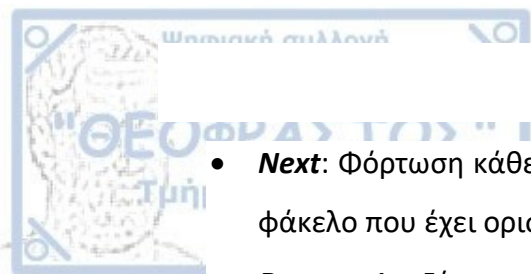
Κατά την εκτέλεση του προγράμματος ανοίγει το γραφικό περιβάλλον (Σχήμα 3.3-1) όπου φαίνονται τα πεδία εμφάνισης των κυματομορφών, καθώς και διάφορες άλλες επιλογές που αφορούν την λειτουργία του. Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι το πρόγραμμα παίρνει ως είσοδο αρχεία **MSEED**, τα οποία αποτελούν υποσύνολο της μορφής **SEED** που χρησιμοποιείται για να αποθηκεύει χρονοϊστορίες κυματομορφών.



Σχήμα 3.3-1: Στιγμιότυπο του προγράμματος MyPicker.py για την επιλογή των αφίξεων των P και S κυμάτων.

Οι διάφορες επιλογές στο αρχικό παράθυρο περιγράφονται παρακάτω:

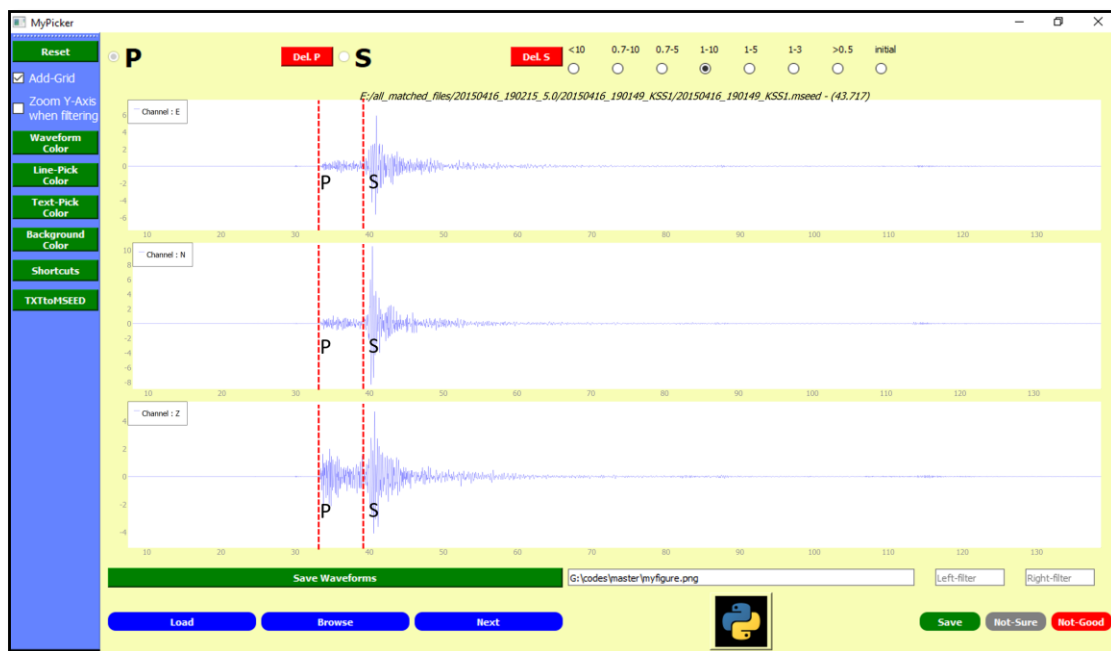
- **Txt2Mseed:** Μετατροπή αρχείων μορφής ASCII, σε αρχεία μορφής MSEED για την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα
- **Add-Grid:** Εισαγωγή ενός πλέγματος (grid) για την ευκολότερη επιλογή των αφίξεων
- **Shortcuts:** Εμφάνιση συντομεύσεων
- **Waveform-Color:** Επιλογή χρώματος κυματομορφής
- **Line-Pick Color:** Επιλογή χρώματος της κατακόρυφης γραμμής-δείκτη του χρόνου άφιξης
- **Text-Pick Color:** Επιλογή χρώματος συμβόλων P, S
- **Background-Color:** Επιλογή χρώματος των πεδίων εμφάνισης των κυματομορφών
- **Zoom Y-axis when filtering:** Αυτόματη μεγέθυνση του πλάτους των κυματομορφών κατά την εφαρμογή φίλτρων
- **Reset:** Επαναφορά των αρχικών ορίων των αξόνων



- **Next:** Φόρτωση κάθε φορά, του πρώτου αρχείου κατάληξης mseed, από τον φάκελο που έχει οριστεί για την επιλογή των αρχείων
- **Browse:** Αναζήτηση κυματομορφής για την εισαγωγή στο πρόγραμμα
- **Load:** Φόρτωση ήδη επιλεγμένης κυματομορφής
- **Save:** Αποθήκευση της τρέχουσας κυματομορφής στο φάκελο *mypicker\_picked*
- **NotGood:** Μετακίνηση της τρέχουσας κυματομορφής (αρχείο mseed) στο φάκελο *mypicker\_notgood\_files*
- **NotSure:** Μετακίνηση της τρέχουσας κυματομορφής (αρχείο mseed) στο φάκελο *mypicker\_for-later*

Κατά την αποθήκευση των αρχείων, αρχικά δημιουργείται ένας φάκελος με όνομα την ημερομηνία έναρξης της κυματομορφής και το σταθμό που την κατέγραψε (YYYYMMDD\_HHDDSS\_STATIONNAME) και στη συνέχεια, το αρχείο MSEED μετακινείται εκεί. Στη συνέχεια, δημιουργούνται μέσα στο φάκελο αυτό δύο αρχεία, ένα που περιέχει τις αφίξεις που έχει επιλέξει ο χρήστης (Σχήμα 3.3-2) για την αντίστοιχη κυματομορφή και όνομα, το όνομα του φακέλου μέσα στον οποίο βρίσκεται, ακολουθούμενο από την κατάληξη *\_arrivals*. Στο δεύτερο αρχείο, αποθηκεύονται οι τιμές της επιτάχυνσης των συνιστωσών της κυματομορφής και όνομα όπως το όνομα του φακέλου μέσα στον οποίο βρίσκεται, ακολουθούμενο από την κατάληξη *\_acceleration*. Επίσης, στην αρχή του περιεχομένου, εμπεριέχονται διάφορες πληροφορίες όπως:

- **starttime:** Η ημερομηνία της κυματομορφής
- **delta:** Το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας
- **npts:** Ο συνολικός αριθμός των σημείων δειγματοληψίας
- **components:** Οι συνιστώσες και η σειρά τους στα πεδία που εμφανίζονται
- **station:** Το όνομα του σταθμού
- **fs:** Η συχνότητα δειγματοληψίας



Σχήμα 3.3-2: Παράδειγμα επιλογής των αφίξεων, των κυμάτων χώρου στην καταγραφή 2015-04-16 19:01:49 KSS1. Διακρίνονται οι τρεις συνιστώσες (E, N, Z) και οι επιλεγμένοι χρόνοι άφιξης (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές).

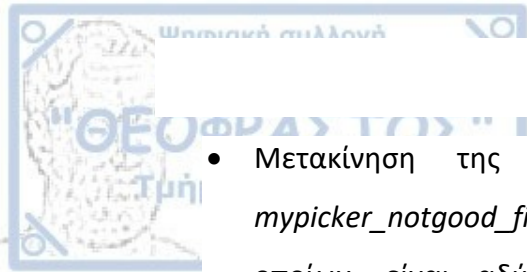
Η εισαγωγή ενός αρχείου εισόδου στο πρόγραμμα μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- Χρήση της επιλογής **Next**: Φόρτωση αρχείων MSEED από την διαδρομή (path), η οποία ορίζεται την πρώτη φορά που θα γίνει η χρήση της επιλογής, *Browse*
- Χρήση της επιλογής **Browse**: Αναζήτηση ενός συγκεκριμένου αρχείου MSEED και αυτόματα η διαδρομή που βρίσκεται ορίζεται ως η προεπιλεγμένη για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την εντολή, *Next*
- Χρήση της επιλογής **Load**: Εισαγωγή ενός αρχείου για το οποίο έχει ήδη γίνει η επιλογή των χρόνων άφιξης

Μόλις εισαχθεί μία καταγραφή στο πρόγραμμα, ο χρήστης έχει τις εξής επιλογές:

- Ορισμό των πρώτων αφίξεων και αποθήκευση αυτών με τη χρήση της επιλογής **Save** στο φάκελο *mypicker\_picked*
- Μετακίνηση της κυματομορφής (αρχείο *MSEED*) στον φάκελο *mypicker\_for-later* για την μετέπειτα επεξεργασία αυτής





- Μετακίνηση της κυματομορφής (αρχείο *MSEED*) στον φάκελο *mypicker\_notgood\_files* στον οποίο βρίσκονται οι κυματομορφές των οποίων, είναι αδύνατη η επεξεργασία για οποιοδήποτε λόγο (π.χ. καταγραφές με θόρυβο, λανθασμένες καταγραφές κ.λπ..)

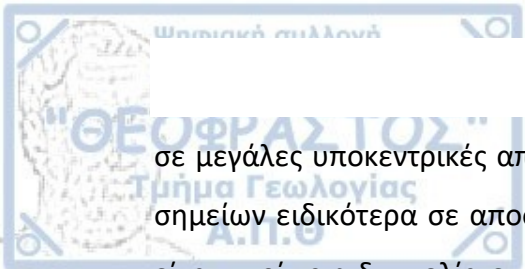
Στη συνέχεια, σημαντικό μέρος του προγράμματος αναπτύσσεται για την διαδραστικότητα του εκάστοτε επιταχυνσιογραφήματος. Συγκεκριμένα έχουν οριστεί ως συντομεύσεις των πλήκτρων του πληκτρολογίου ή/και του ποντικιού (*shortcuts*) προκειμένου να επιτυγχάνεται η μετακίνηση και η τροποποίηση των κυματομορφών κατά την επιλογή των πρώτων αφίξεων. Οι συντομεύσεις αυτές είναι οι εξής:

- Μεγέθυνση / Σμίκρυνση, με τη χρήση των πλήκτρων *<w>*, *<s>* αντίστοιχα στο κέντρο του παραθύρου
- Μετακίνηση δεξιά/αριστερά, με τη χρήση των πλήκτρων *<d>*, *<a>* αντίστοιχα.
- Μεγιστοποίηση του πλάτους, με τη χρήση της ροδέλας του ποντικιού
- Διπλό αριστερό κλικ, ορισμός χρόνου άφιξης
- Διπλό δεξί κλικ, διαγραφή του τελευταίου χρόνου άφιξης
- Μετακίνηση της επιλεγμένης γραμμής/δείκτη χρόνου άφιξης με αριστερό κλικ

Τέλος, κατά την εισαγωγή ενός αρχείου στο πρόγραμμα, εμφανίζεται στο άνω μέρος του παραθύρου του γραφικού περιβάλλοντος, η πλήρης διαδρομή του (*path*).

### 3.3.3 Επιλογή των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων

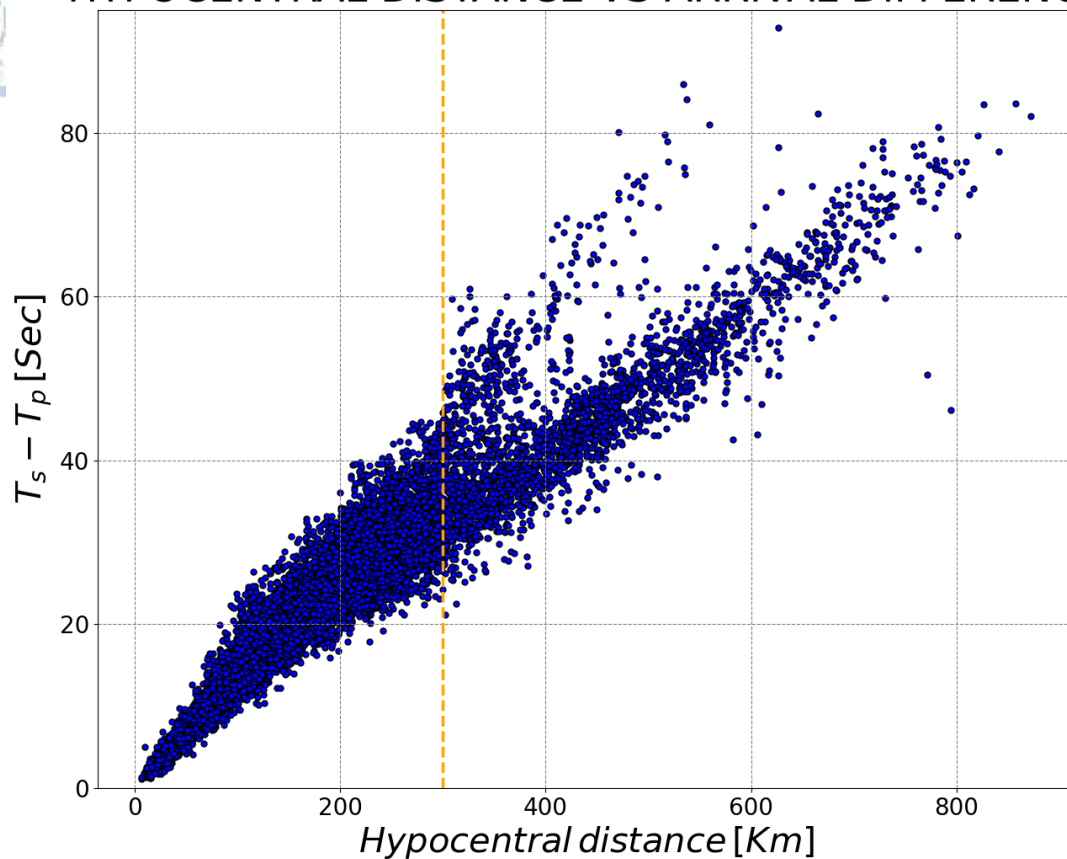
Αρχικά, πριν δημοσιευτεί ο κατάλογος HELPOS, η επιλογή των χρόνων άφιξης πραγματοποιήθηκε οπτικά σε όλες τις καταγραφές ανεξάρτητα από την υποκεντρική απόσταση σεισμού-σταθμού. Για τον έλεγχο της ορθότητας της επιλογής των αφίξεων των P και S κυμάτων δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα (Σχήμα 3.3-3) με την κατανομή της διαφοράς των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων σε συνάρτηση με την υποκεντρική απόσταση. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, φαίνεται ότι



σε μεγάλες υποκεντρικές αποστάσεις αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η διασπορά των σημείων ειδικότερα σε αποστάσεις άνω των  $300\text{km}$ . Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι κυρίως η δυσκολία εντοπισμού του χρόνου άφιξης του τύπου των εγκαρσίων κυμάτων  $S$  ( $S_b$ ,  $S_g$ ,  $S_n$ ) που αντιστοιχούν στις πρώτες αφίξεις των επιμήκων κυμάτων  $P$ , ιδίως σε μεγάλες υποκεντρικές αποστάσεις στις οποίες δεσπάζουν διαφορετικές σεισμικές φάσεις οι οποίες μπορούν να διακριθούν με δυσκολία. Επίσης, παρατηρείται ότι μέχρι την υποκεντρική απόσταση των  $100\text{km}$ , τα σημεία έχουν σχετικά μικρή διασπορά, διότι στις αποστάσεις αυτές δεσπάζουν ευκρινώς τα απευθείας επιμήκη  $P$  και εγκάρσια κύματα  $S$  και καθίσταται σαφής ο προσδιορισμός των αφίξεων τους. Επιπλέον, με δεδομένο ότι οι επιταχυνσιογράφοι είναι εγκατεστημένοι στην πλειοψηφία τους μέσα σε οικισμούς όπου ο εδαφικός θόρυβος είναι αρκετά υψηλός και σε μεγάλες υποκεντρικές αποστάσεις τα πλάτη των εδαφικών επιταχύνσεων είναι σχετικά μικρά λόγω απόσβεσης, είναι αναμενόμενο αυτά να επικαλύπτονται από τα πλάτη του εδαφικού θορύβου.

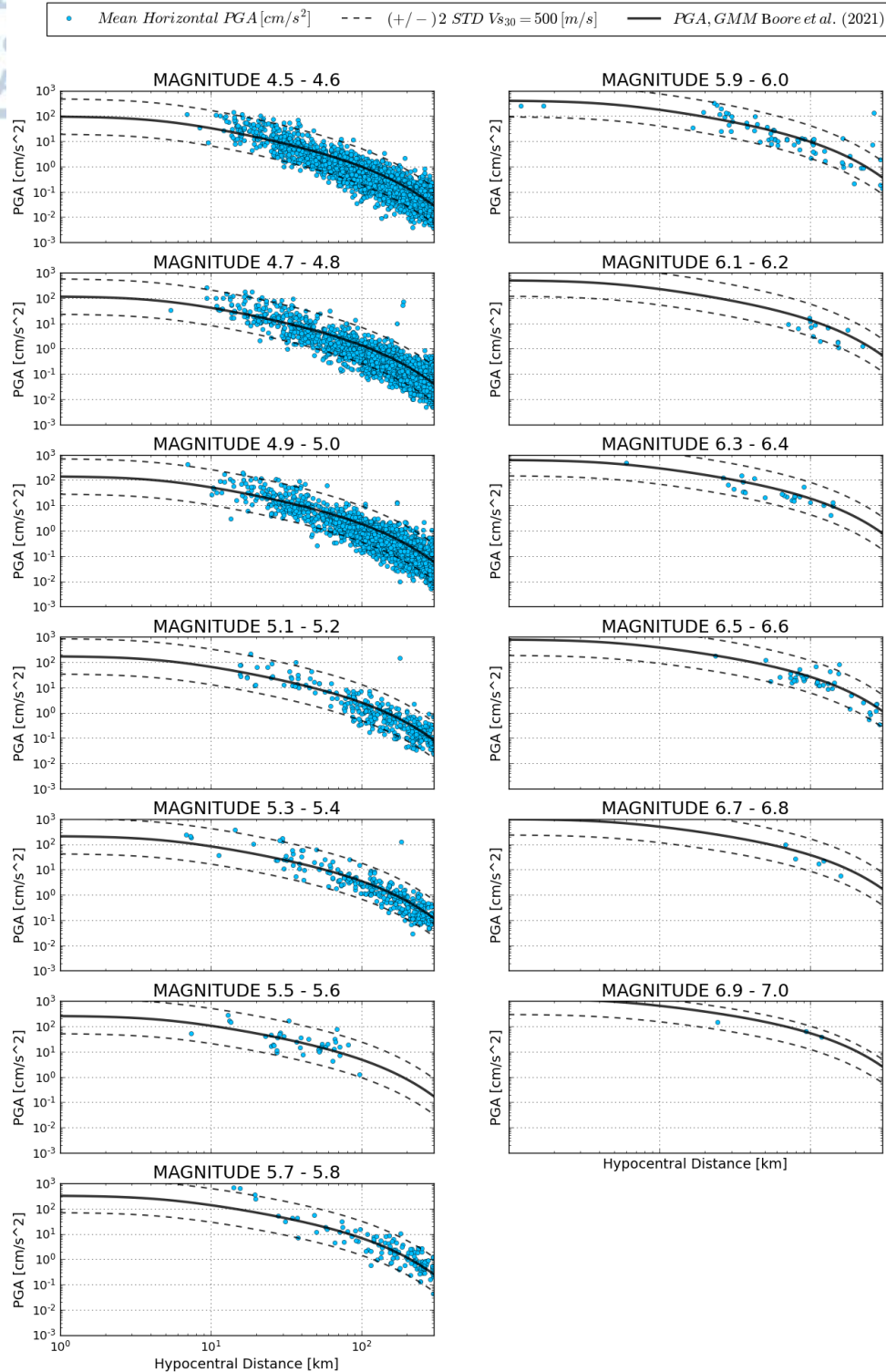
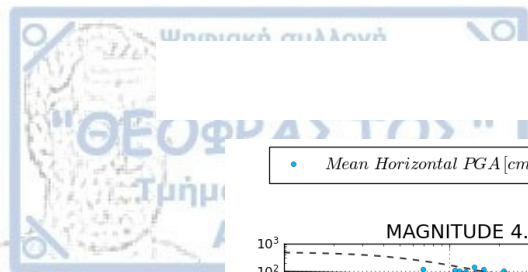
Με βάση τα παραπάνω, αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθούν καταγραφές με υποκεντρικές αποστάσεις μικρότερες ή ίσες των  $300\text{km}$ . Συνολικά επιλέχθηκαν χρόνοι άφιξης επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων σε **9263** κυματομορφές από **686** επιφανειακούς σεισμούς που καταγράφηκαν σε **237** σταθμούς, επιλογή που υποστηρίζεται και από το Σχήμα 3.3-3.

## HYPOCENTRAL DISTANCE VS ARRIVAL DIFFERENCE



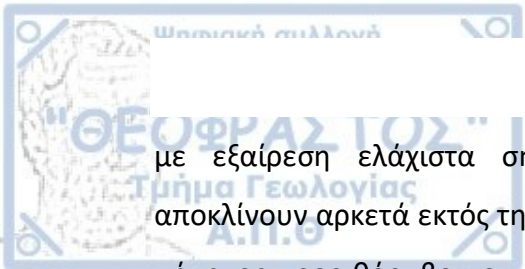
Σχήμα 3.3-3: Κατανομή της διαφοράς των αφίξεων των P και S κυμάτων με την υποκεντρική απόσταση. Εξαιτίας της μεγάλης διασποράς των σημείων σε μεγάλες υποκεντρικές αποστάσεις επιλέχθηκαν καταγραφές με όριο τα 300 km (διακεκομμένη γραμμή).

Αμέσως μετά την επεξεργασία των αρχείων ως προς την επιλογή των αφίξεων των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων, εφαρμόστηκε ένας ακόμη ποιοτικός έλεγχος εξετάζοντας τη μέγιστη παρατηρημένη εδαφική επιτάχυνση (**PGA**) με την υποκεντρική απόσταση για κάθε καταγραφή για όλους τους σεισμούς του δείγματος. Λόγω του όγκου των δεδομένων, ο έλεγχος αυτός έγινε αφού χωρίστηκαν οι παρατηρήσεις ανάλογα με το μέγεθος του κάθε σεισμού ξεκινώντας από την τιμή μεγέθους  $M = 4.5$  μέχρι και  $M = 7$ , με διάστημα μεγέθους **0.1**. Όπως είναι φανερό, όσο αυξάνεται η απόσταση εστίας-σταθμού η μέγιστη επιτάχυνση μειώνεται, λόγω της απόσβεσης των κυμάτων (Σχήμα 3.3-4). Στο ίδιο σχήμα έχει σχεδιαστεί και η σχέση πρόβλεψης της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (**GMPM**) από την εργασία των Boore et al. (2021) για τον ελληνικό χώρο (μαύρη γραμμή) καθώς και το διάστημα εμπιστοσύνης  $\pm 2$  τυπικών αποκλίσεων αυτής (διακεκομμένες μαύρες γραμμές).



Σχήμα 3.3-4: Κατανομή της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) με την υποκεντρική απόσταση για μεγέθη από 4.5 μέχρι 7.0 ανά 0.1. Η μαύρη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζει την σχέση πρόβλεψης (GMM) της ισχυρής σεισμικής κίνησης για τον ελληνικό χώρο (Boore et al., 2021) ενώ οι διακεκομμένες, εύρος 2 τυπικών αποκλίσεων.

Συμπερασματικά, η πλειονότητα των σημείων του Σχήματος 3.3-4, εμπεριέχεται μέσα στη ζώνη των  $\pm 2$  τυπικών αποκλίσεων της σχέσης πρόβλεψης,

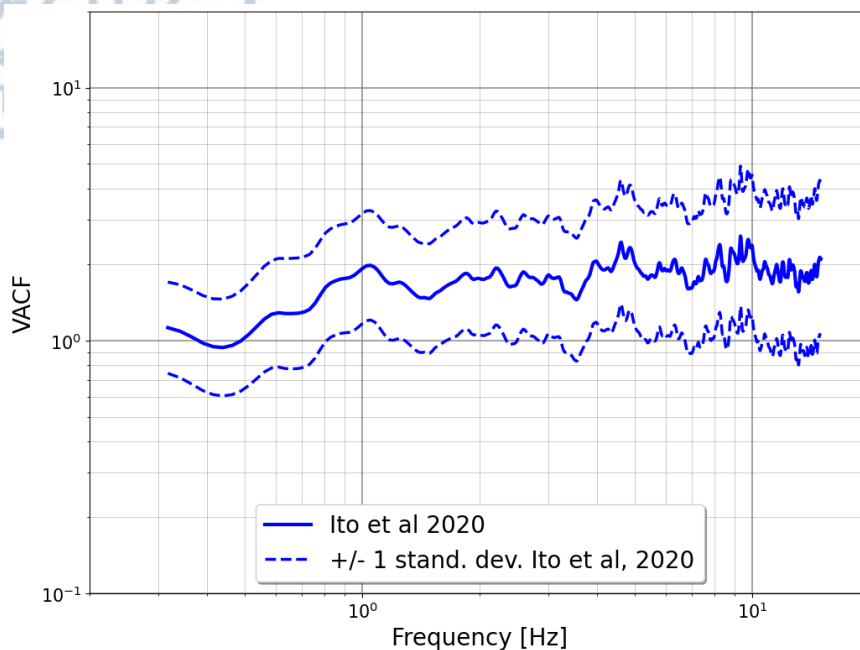


με εξαίρεση ελάχιστα σημεία, σε μεγάλες υποκεντρικές αποστάσεις, που αποκλίνουν αρκετά εκτός της ζώνης αυτής. Αυτό οφείλεται κυρίως στο χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο σε μεγάλες υποκεντρικές αποστάσεις. Παρά το γεγονός ότι έχει εφαρμοστεί φίλτρο διέλευσης συχνοτήτων 0.05 – 20Hz (low & high frequency bandpass filter), με σκοπό τον περιορισμό του επιπέδου θορύβου, σε ελάχιστες περιπτώσεις αυτός εμφανίζεται στην κυματομορφή ως κορυφή (peak), η οποία, δίνει εσφαλμένα υψηλή τιμή μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Τελικά, με τον τρόπο αυτό δείχνεται η επιτυχής μετατροπή και επεξεργασία των πρωτογενών καταγραφών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή.



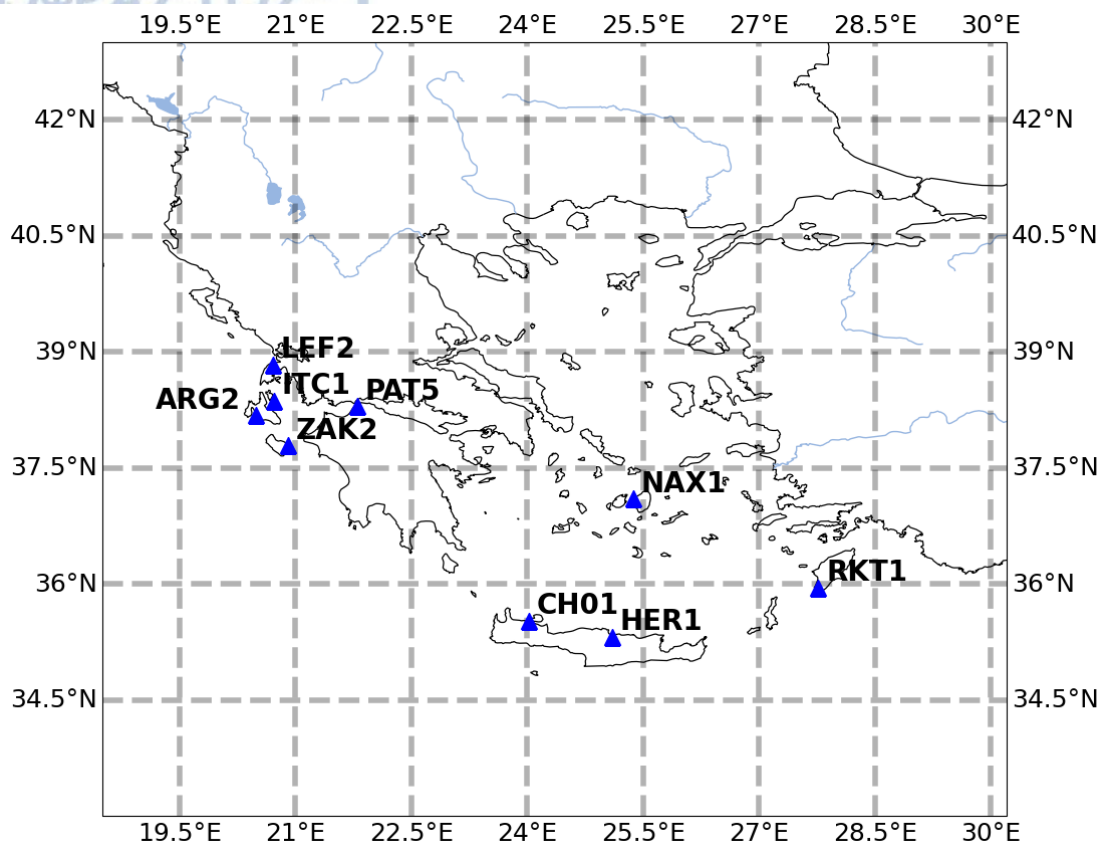
#### 4.1 Εφαρμογή της ιαπωνικής συνάρτησης διόρθωσης στα ελληνικά δεδομένα

Οι Ito et al., 2020 με τη χρήση της θεωρίας διάχυσης των σεισμικών κυμάτων και ισοκατανομής της ενέργειας (Sánchez-Sesma et al., 2011; Kawase et al., 2011) υπολόγισαν μία συνάρτηση διόρθωσης του κατακόρυφου παράγοντα ενίσχυσης για τον χώρο της Ιαπωνίας (Vertical Amplification Correction Function, VACF, Σχήμα 4.1-1). Σύμφωνα με αυτή, διορθώνεται ο φασματικός λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα (eHVSR) από καταγραφές σεισμών, με σκοπό την εκτίμηση του παράγοντα οριζόντιας ενίσχυσης (HSAF). Στην παρούσα εργασία, επιχειρήθηκε κατ' αρχήν η εφαρμογή των ιαπωνικών συναρτήσεων διόρθωσης του κατακόρυφου παράγοντα ενίσχυσης σε θέσεις του ελληνικού χώρου, προκειμένου να εξετασθεί η αξιοπιστία τους.



Σχήμα 4.1-1: Μέση συνάρτηση διόρθωσης του κατακόρυφου παράγοντα ενίσχυσης (VACF), για τον ιαπωνικό χώρο σε συνάρτηση με τη συχνότητα (Ito et al., 2020). Οι διακεκομμένες γραμμές εκφράζουν την  $\pm 1$  τυπική απόκλιση αυτής.

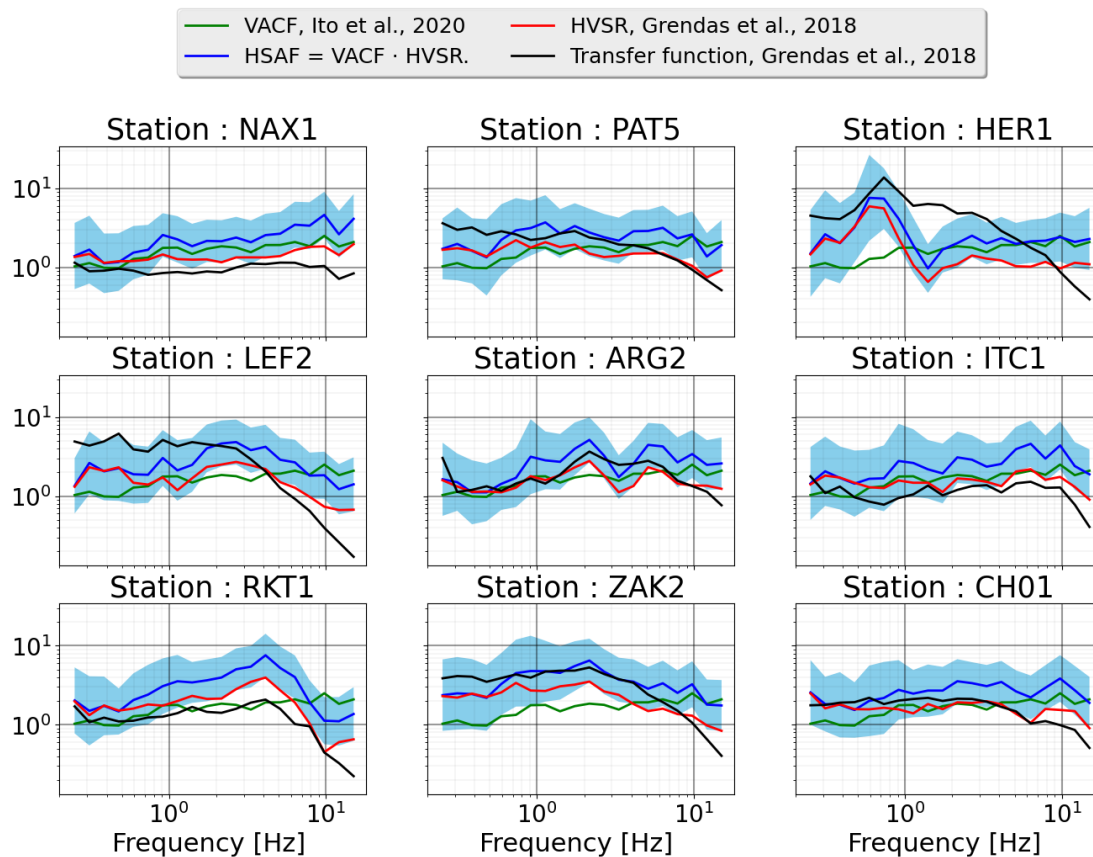
Έτσι, αρχικά εφαρμόσθηκε γραμμική παρεμβολή για την εύρεση του κοινού εύρους συχνοτήτων, μεταξύ της ιαπωνικής συνάρτησης διόρθωσης VACF και του φασματικού λόγου eHVSR στους ελληνικούς σταθμούς επιταχυνσιογράφων. Στη συνέχεια, υπολογίσθηκε η οριζόντια ενίσχυση ( $HSAF = eHVSR \cdot VACF$ ). Τέλος, συγκρίθηκαν οι υπολογισμένοι παράγοντες ενίσχυσης HSAF με τους φασματικούς παράγοντες ενίσχυσης της οριζόντιας σεισμικής δόνησης όπως προέκυψαν από την εργασία των Grendas et al. (2018) με τη μέθοδο της γενικευμένης αντιστροφής. Αυτό έγινε για επιλεγμένους σταθμούς οι οποίοι καλύπτουν διάφορες γεωγραφικές περιοχές και γεωλογικά στρώματα μεταξύ των οποίων οι NAX1, PAT5, HER1, LEF2, ARG2, ITC1, RKT1, ZAK2, CH01 (Σχήμα 4.1-2).



Σχήμα 4.1-2: Θέσεις των σταθμών NAX1, PAT5, HER1, LEF2, ARG2, ITC1, RKT1, ZAK2, CH01 στον ελληνικό χώρο.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.1-3, δεν προκύπτει ικανοποιητική προσέγγιση του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης των ελληνικών δεδομένων επιταχυνσιογράφων κάνοντας χρήση της ιαπωνικής συνάρτησης διόρθωσης και του λόγου eHVSr (πράσινη και κόκκινη γραμμή αντίστοιχα). Ειδικότερα, στους σταθμούς ZAK2, ARG2, CH01 η καμπύλη του υπολογισμένου παράγοντα ενίσχυσης βρίσκεται σε καλή συμφωνία με τον παράγοντα της οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης, με αποκλίσεις εκτός του ενός τυπικού σφάλματος στις υψηλές συχνότητες ( $f > 5\text{Hz}$ ). Στους υπόλοιπους σταθμούς και ιδιαίτερα στους HER1, NAX1, RKT1 παρατηρείται μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Κατά συνέπεια, οι συναρτήσεις διόρθωσης του ιαπωνικού χώρου δεν συμβάλλουν στην ορθή προσέγγιση του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων που εξετάσθηκε. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός νέων συναρτήσεων διόρθωσης, οι οποίες θα βασίζονται αποκλειστικά σε δεδομένα καταγραφών του ελληνικού χώρου.





Σχήμα 4.1-3: Εφαρμογή της ιαπωνικής συνάρτησης διόρθωσης στους σταθμούς NAX1, PAT5, HER1, LEF2, ARG2, ITC1, RKT1, ZAK2, CH01. Η μαύρη και η κόκκινη γραμμή απεικονίζουν τον παράγοντα της οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης και τον φασματικό λόγο eHVSr της εργασίας των Grendas et al. (2018), αντίστοιχα. Η πράσινη γραμμή αναπαριστά τη μέση συνάρτηση διόρθωσης του ιαπωνικού χώρου (Ito et al., 2020). Η μπλε γραμμή είναι η οριζόντια φασματική ενίσχυση που υπολογίζεται από τη σχέση  $HSAF = eHVSr \cdot VACF$  με  $\pm 1$  τυπική απόκλιση (μπλε ζώνη).

#### 4.1.1 Κριτήρια επιλογής δεδομένων

Πριν την εφαρμογή του κώδικα της αντιστροφής στα δεδομένα, επιλέχθηκαν καταγραφές που πληρούν ορισμένα κριτήρια όπως:

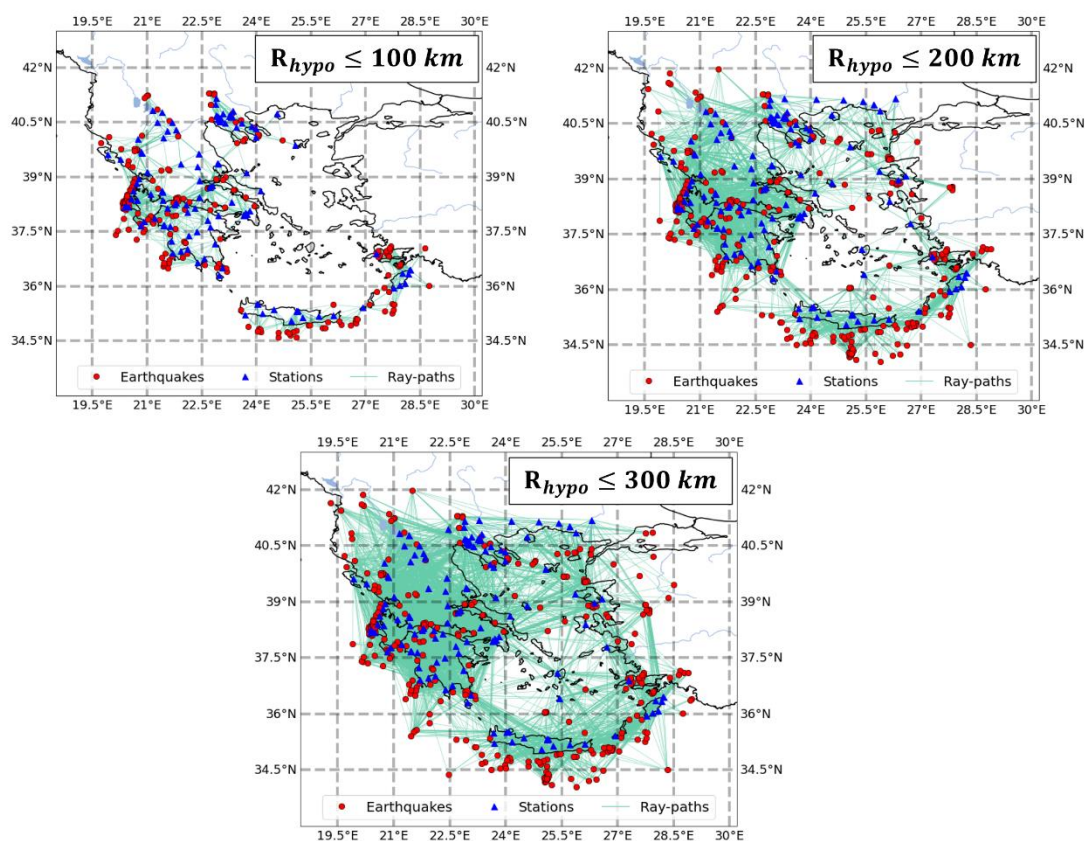
- Τα μεγέθη των σεισμών να είναι στο διάστημα  $4.5 \leq M < 6.0$
- Το εστιακό βάθος,  $D \leq 40km$
- Η υποκεντρική απόσταση,  $12 \leq R_{hypo} \leq 100km, 200km, 300km$
- Η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση,  $PGA \leq 200 \frac{cm}{s^2}$
- Πλήρεις καταγραφές με 3 συνιστώσες
- Ύπαρξη θορύβου πριν την επιλογή των P-κυμάτων (pre-event record)
- Τουλάχιστον 3 σταθμοί να έχουν καταγράψει κάθε σεισμό
- Τουλάχιστον 3 σεισμοί να έχουν καταγραφεί σε κάθε σταθμό

Το εύρος του μεγέθους και του εστιακού βάθους των σεισμών, βασίστηκε στους επιφανειακούς σεισμούς του καταλόγου HELPOS ( $M \geq 4.5, D \leq 40km$ , Σκορδύλης E. et al., 2021). Οι σεισμοί με μεγέθη,  $M \geq 6$  αφαιρέθηκαν από τη βάση δεδομένων, επειδή στα μεγέθη αυτά η πηγή δεν θεωρείται σημειακή και δεν συμφωνεί με το μοντέλο σημειακής πηγής του Brune (1970) που χρησιμοποιείται στην αντιστροφή. Το κάτω όριο της επιλεγμένης υποκεντρικής απόστασης ( $12 km$ ) εφαρμόζεται για να υπάρχει τουλάχιστον ένα μήκος κύματος από την πηγή μέχρι τον σταθμό, σύμφωνα με την κατώτερη συχνότητα που επιλέχθηκε να εξεταστεί ( $f = 0.3Hz$ ), για μέση ταχύτητα εγκαρσίων κυμάτων στον φλοιό  $V_s = 3.5 km/sec$ . Όσον αφορά το πάνω όριο αποστάσεων, εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές και δημιουργούνται τρία δείγματα για υποκεντρικές αποστάσεις  $100km$ ,  $200km$  και  $300km$ . Το κατώφλι που επιλέγεται για την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $PGA$ ), εφαρμόζεται για την αποφυγή μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους σε μεγάλες τιμές επιταχύνσεων. Η επιλογή χρονικού παραθύρου πριν την άφιξη των επιμήκων κυμάτων χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του λόγου, σήματος προς θόρυβο σε μεταγενέστερο στάδιο. Τέλος, ο ελάχιστος αριθμός σεισμών/καταγραφών επιβάλλεται προκειμένου η εφαρμογή της μεθόδου γενικευμένης αντιστροφής να θεωρηθεί αξιόπιστη.

Στη συνέχεια, αμέσως μετά την εφαρμογή όλων των παραπάνω κριτηρίων, σχεδιάστηκαν οι σεισμικές ακτίνες (*ray paths*) των καταγραφών, ξεχωριστά για τα τρία δείγματα που δημιουργούνται (έως  $100 km$ ,  $200 km$ ,  $300 km$ , Σχήμα 4.1-4). Από τα σχήματα αυτά παρατηρείται σημαντική έλλειψη κάλυψης περιοχών του ελληνικού χώρου από τις σεισμικές ακτίνες, για το δείγμα των  $100 km$  λόγω του περιορισμού των δεδομένων σε μικρότερες υποκεντρικές αποστάσεις. Για το λόγο αυτόν, το συγκεκριμένο δείγμα δεν συμπεριλήφθηκε στην περαιτέρω ανάλυση. Τα υπόλοιπα δύο δείγματα ( $R \leq 200 km$ ,  $R \leq 300 km$ ), χρησιμοποιήθηκαν στη γενικευμένη αντιστροφή και τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται σε μετέπειτα στάδιο.

Στο Σχήμα 4.1-5, παρουσιάζονται δύο χάρτες με τις σεισμικές αυτές ακτίνες στον ελληνικό χώρο από δύο διαφορετικές εργασίες. Στον αριστερό χάρτη φαίνονται αυτές, που προκύπτουν στην παρούσα εργασία για υποκεντρικές αποστάσεις,  $R_{hypo} \leq 300km$  και στον δεξιό, οι αντίστοιχες της εργασίας Grendas et

al. (2018) για υποκεντρικές αποστάσεις,  $R_{hypo} \leq 350 km$ . Συνολικά, στον Πίνακα 4-1-1 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά οι συνολικοί αριθμοί των σταθμών (βλέπε Παράρτημα B.2), σεισμών (βλέπε Παράρτημα B.1) και καταγραφών που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό των σεισμικών ακτινών.



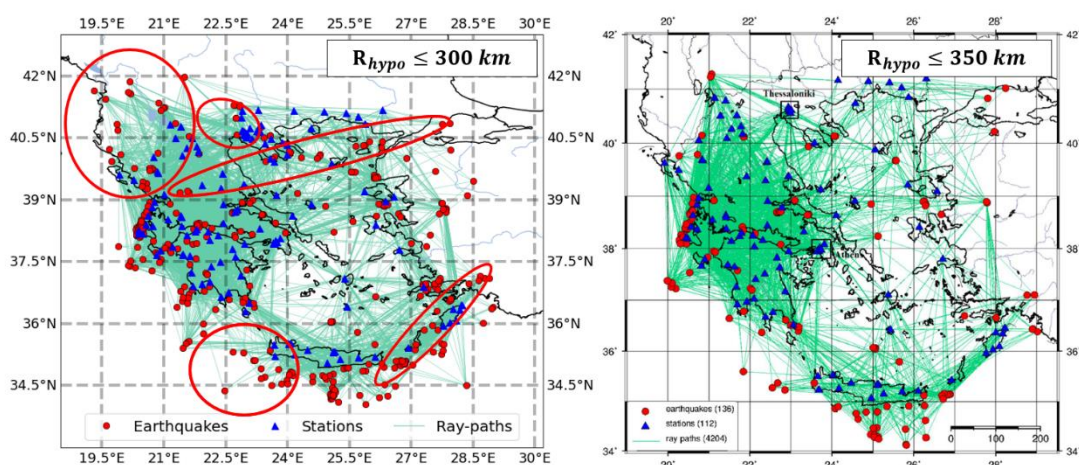
Σχήμα 4.1-4: Σεισμικές ακτίνες (Ray-paths) των δεδομένων της παρούσας εργασίας για υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 100 km$  (πάνω αριστερά),  $R_{hypo} \leq 200 km$  (πάνω δεξιά) και  $R_{hypo} \leq 300 km$  (κάτω).

Πίνακας 4.1-1: Συνολικός αριθμός των σταθμών, σεισμών και καταγραφών για κάθε δείγμα (για υποκεντρικές αποστάσεις  $\leq 100, 200, 300 km$ ) αυτής της εργασίας και των Grendas et al. (2018).

	$R_{hypo} [km]$	Σταθμοί	Σεισμοί	Καταγραφές
<b>Παρούσα εργασία</b>	100	127	224	1858
	200	150	344	5455
	300	152	368	8428
<b>Grendas et al. (2018)</b>	350	112	136	4204

Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρείται υπερ-διπλασιασμός των δεδομένων για μεγάλες υποκεντρικές αποστάσεις ( $\sim 300 km$ ) και διπλάσιος αριθμός σεισμών (και

καταγραφών) της παρούσας εργασίας σε σχέση με εκείνη των Grendas et al. (2018). Παράλληλα, διαπιστώνεται συγκριτικά πυκνότερη κάλυψη του ελληνικού χώρου και γειτονικών περιοχών σε διάφορες, αυξημένου ενδιαφέροντος, γεωγραφικές περιοχές (βλέπε κόκκινες ελλείψεις στο Σχήμα 4.1-5), όπως στο νοτιοδυτικό τμήμα της Κρήτης, κατά μήκος του ρήγματος της Ανατολίας, στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας, στη βορειοδυτική Ελλάδα, στο νοτιοδυτικό τμήμα της Αλβανίας κ.α. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της εκτίμησης των παραγόντων, από τους οποίους εξαρτάται η σεισμική διάδοση.



Σχήμα 4.1-5: Χάρτες με τους σεισμούς (κόκκινοι κύκλοι), τους σταθμούς (μπλε τρίγωνα) και τις σεισμικές ακτίνες των καταγραφών αυτής της εργασίας (αριστερά,  $12\text{km} \leq R_{\text{hypo}} \leq 300\text{km}$ ) και της εργασίας Grendas et al. (2018) (δεξιά,  $20\text{km} \leq R_{\text{hypo}} \leq 350\text{km}$ ). Οι κόκκινες ελλείψεις της παρούσας εργασίας δηλώνουν περιοχές με συγκριτικά πυκνότερη κάλυψη δεδομένων.

#### 4.1.2 Προ-επεξεργασία δεδομένων

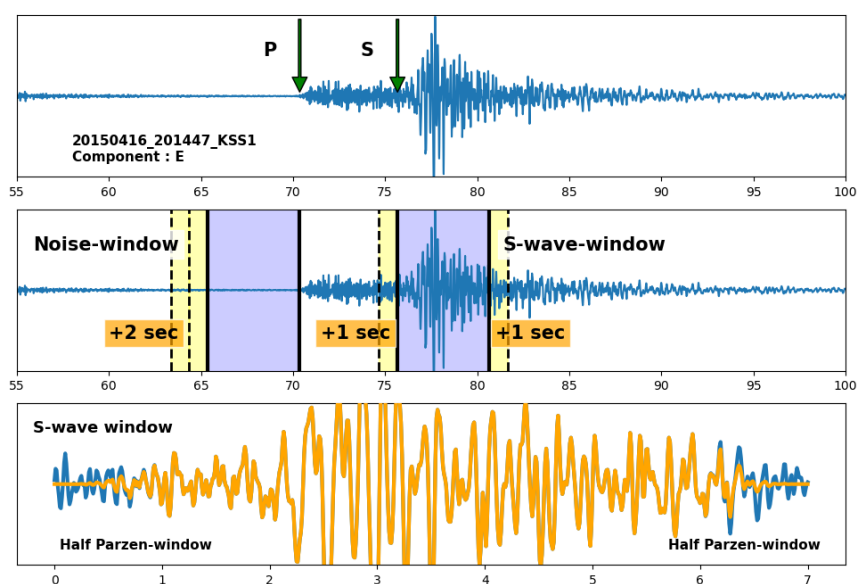
Το τελευταίο βήμα πριν την εφαρμογή του κώδικα της αντιστροφής, αποτελεί η προ-επεξεργασία των κυματομορφών η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1-6:

- Επιλογή παραθύρου των εγκαρσίων κυμάτων (S) και του θορύβου πριν την είσοδο των επιμήκων κυμάτων (P): 5 sec για  $4.5 \leq M \leq 6.0$
- Επέκταση των παραθύρων κατά ένα δευτερόλεπτο αριστερά και δεξιά στο παράθυρο των εγκαρσίων κυμάτων και κατά δύο δευτερόλεπτα αριστερά για το παράθυρο του θορύβου.

- Εφαρμογή συνάρτησης εξομάλυνσης Parzen στο χρονικό παράθυρο των δύο επιπρόσθετων δευτερολέπτων και υπολογισμός των φασμάτων Fourier
- Εφαρμογή συνάρτησης εξομάλυνσης Parzen στα φάσματα Fourier για το εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων από  $0.3 \text{ Hz} - 15 \text{ Hz}$
- Εφαρμογή του λόγου σήματος προς θόρυβο,  $FAS \text{ signal}/FAS \text{ noise} \geq 5$  για την επιλογή αξιόπιστου εύρους συχνοτήτων της καταγραφής
- Υπολογισμός του οριζόντιου φάσματος ως γεωμετρικό μέσο όρο από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες για κάθε καταγραφή

Όσον αφορά την επιλογή της συνολικής διάρκειας των παραθύρων για τον υπολογισμό των φασμάτων Fourier, ακολουθείται η «στρατηγική» που εφαρμόστηκε στην εργασία Nakano et al. (2015) στην οποία, τα παράθυρα μεταβάλλονται ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού (5 sec. για  $M \leq 6$ , 10 sec. για  $6 \leq M \leq 7$  και 15 sec. για  $M \geq 7$ ). Ωστόσο, επειδή έχουν επιλεγεί καταγραφές από σεισμούς με μεγέθη  $4.5 \leq M < 6$ , η χρονική διάρκεια του παραθύρου είναι **5 sec** για όλες τις καταγραφές. Η μέση οριζόντια συνιστώσα του φάσματος Fourier υπολογίζεται από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων αυτών με

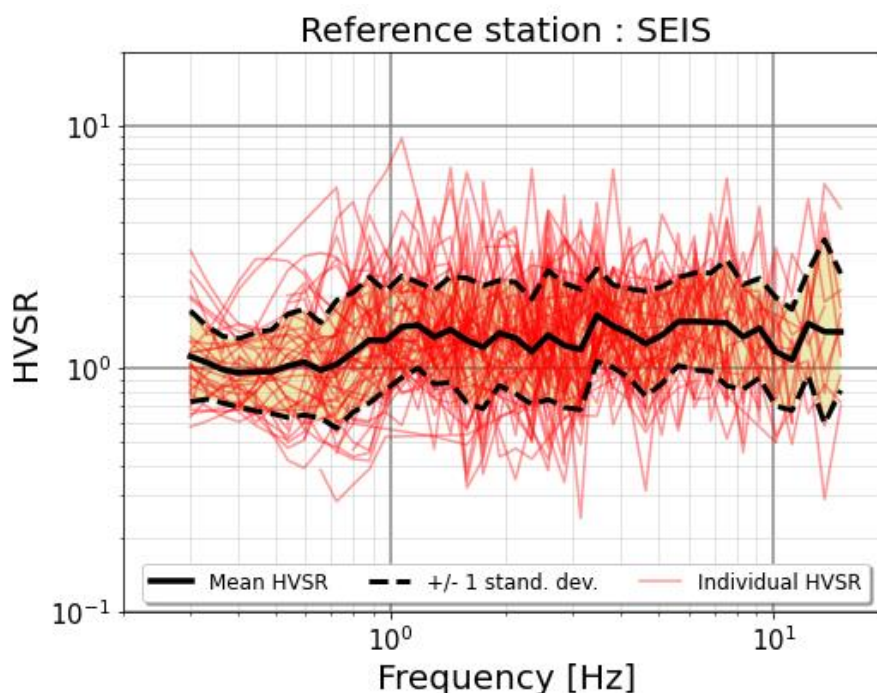
$$\text{βάση τη σχέση } aveFAShor = \left[ \sqrt{\frac{[FAShor1]^2 + [FAShor2]^2}{2}} \right]$$



Σχήμα 4.1-6: Διαδικασία προ-επεξεργασίας των κυματομορφών πριν τον υπολογισμό των φασμάτων Fourier (παράδειγμα η καταγραφή 2015-04-16 20:14:47 KSS1 με,  $M=4.5$ ). Ορισμός των παραθύρων των S-κυμάτων και του θορύβου με συνολική διάρκεια 5 sec έκαστο, επέκταση κατά δύο sec και εφαρμογή εξομάλυνσης Parzen (κυματομορφή με πορτοκαλί χρώμα).

## 4.1.3 Επιλογή σταθμού αναφοράς

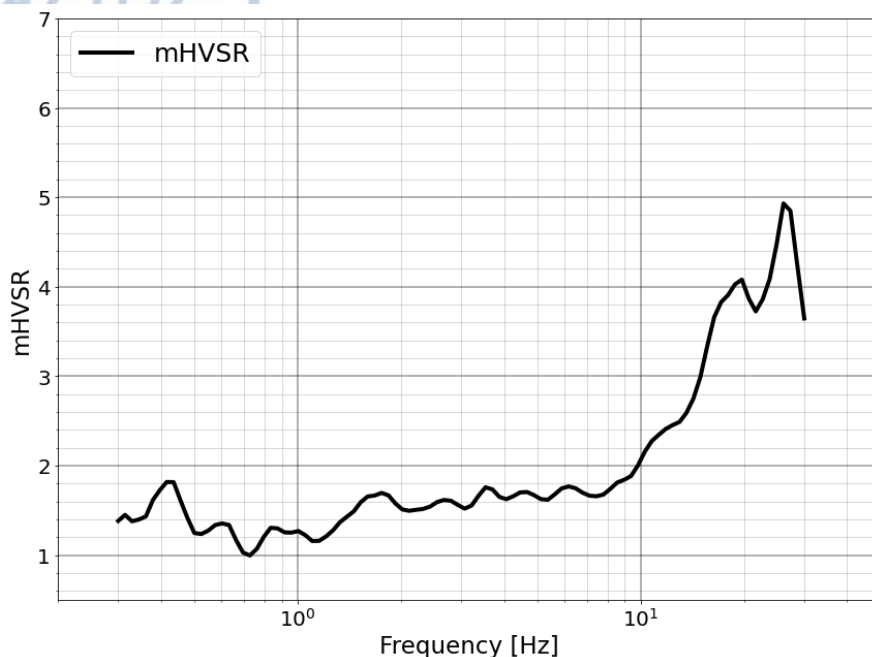
Η διαδικασία της τεχνικής της γενικευμένης αντιστροφής, βασίζεται σε ένα σταθμό αναφοράς, ο οποίος ορίζεται στο αρχικό μοντέλο παραμέτρων. Απαραίτητη προϋπόθεση, αποτελεί η θέση αυτού του σταθμού να είναι σε βραχώδες υπόβαθρο, ώστε να αποφευχθεί η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης, λόγω της επίδρασης των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών. Με την χρήση αυτού, «διευκολύνεται» η αντιστροφή στην εύρεση του βέλτιστου παράγοντα ενίσχυσης στις εξεταζόμενες θέσεις. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκε ο σταθμός **SEIS** (στο σεισμολογικό σταθμό Θεσσαλονίκης) ως σταθμός αναφοράς, λόγω της θέσης του επί γεωλογικού υποβάθρου (πρασινογενέσιος), της επίπεδης καμπύλης eHVSr καθώς και λόγω του σχετικά μεγάλου αριθμού διαθέσιμων καταγραφών σε αυτόν (69 καταγραφές). Ο μέσος λόγος eHVSr (μαύρη γραμμή) καθώς και οι αντίστοιχοι μεμονωμένοι λόγοι που προκύπτουν από κάθε καταγραφή στο σταθμό αναφοράς SEIS (κόκκινες γραμμές), φαίνονται στο Σχήμα 4.1-7.



Σχήμα 4.1-7: Μέσος λόγος (μαύρη γραμμή) των λόγων eHVSr (κόκκινες γραμμές) του σταθμού SEIS και το αντίστοιχο εύρος μιας τυπικής απόκλισης (μαύρες διακεκομμένες γραμμές). Εξαιτίας του σχεδόν επίπεδου σχήματος του μέσου λόγου (flat ratio), ο SEIS επιλέχθηκε κατ' αρχήν ως σταθμός αναφοράς.

#### 4.1.4 Προσαρμογή του σταθμού αναφοράς σε πραγματικό σεισμικό υπόβαθρο

Στη σημείο αυτό, πραγματοποιήθηκε διόρθωση του σταθμού αναφοράς, αφαιρώντας την οριζόντια και την κατακόρυφη ενίσχυση λόγω των επιφανειακών αποσαθρωμένων γεωλογικών στρωμάτων στη θέση SEIS. Με τον τρόπο αυτό, επιχειρήθηκε η προσαρμογή του συγκεκριμένου σταθμού στο σεισμικό υπόβαθρο, δηλαδή σε βάθος όπου η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων είναι  $V_s \geq 3 \text{ km/sec}$ . Για τον υπολογισμό των δύο παραπάνω ενισχύσεων χρησιμοποιείται κατ' αρχήν αλγόριθμος αντιστροφής με το λογισμικό «*HV-Inν*», (García-Jerez et al., 2016) προκειμένου να εκτιμηθεί το μοντέλο ταχυτήτων των επιμήκων (P) και εγκαρσίων (S) κυμάτων με το βάθος καθώς και η μεταβολή της πυκνότητας,  $\rho$ . Το λογισμικό αυτό, λαμβάνει ως είσοδο το μέσο φασματικό λόγο mHVSR στο σταθμό αναφοράς  $\pm 1$  τυπική απόκλιση από μετρήσεις μικροθορύβου (Σχήμα 4.1-8). Η αντιστροφή του λόγου αυτού αποσκοπεί στην εύρεση του μονοδιάστατου μοντέλου δομής της θέσης, βασιζόμενο στη θεωρία διάχυσης των κυμάτων και ισοκατανομής της ενέργειας (Diffuse Field Assumption theory, DFA). Σ' αυτήν, εφαρμόζονται διάφορες γενικευμένες (Montecarlo sampling, Simulated annealing, Modified simulated annealing) και τοπικές μέθοδοι αντιστροφής (Simplex Downhill), για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ της πραγματικής και της συνθετικής καμπύλης μικροθορύβου, mHVSR.



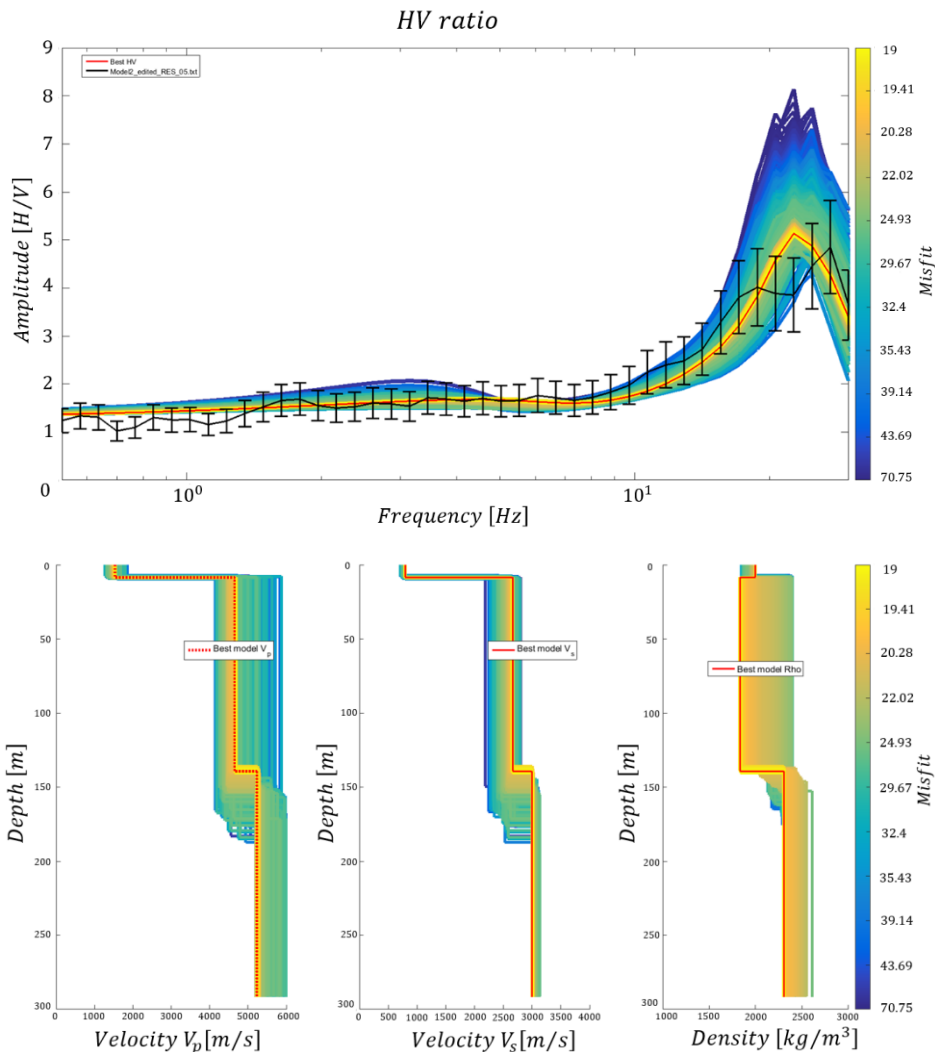
Σχήμα 4.1-8: Μέσος φασματικός λόγος mHVSR στο σταθμό αναφοράς (SEIS), από μετρήσεις μικροθορύβου

Το αρχείο εισόδου, περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές στήλες με τη συχνότητα, το πλάτος του λόγου mHVSR και την τυπική απόκλιση αυτού. Αν δεν συμπληρωθεί η τρίτη στήλη, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής μίας σταθερής επιλογής σφάλματος για όλες τις συχνότητες ή μίας ποσοστιαίας τυπικής απόκλισης, ανάλογα με τις τιμές των δεδομένων. Στην εργασία αυτή προτιμάται η εισαγωγή ποσοστιαίου σφάλματος ( $STD = 40\%$ ). Αρχικά, πριν την εκτέλεση του προγράμματος, εισάγεται η καμπύλη mHVSR από μετρήσεις μικροθορύβου που έγιναν για τον σκοπό αυτόν, στο σταθμό αναφοράς και επιλέχθηκε ο συνολικός αριθμός των μοντέλων (500, initial population) που θα εξεταστούν σε πρώτη φάση κατά την αντιστροφή. Έπειτα, ορίστηκαν οι αρχικές παράμετροι του μοντέλου και η διακύμανση αυτών (ελάχιστη και μέγιστη τιμή), οι οποίες περιλαμβάνουν τον εκτιμώμενο αριθμό των στρωμάτων, το εύρος ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων, το εύρος των πυκνοτήτων μέσα σε αυτά αλλά και το πάχος του κάθε στρώματος. Τέλος, με βάση το μοντέλο αυτό ορίζεται η εκτέλεση μίας αρχικής γενικευμένης μεθόδου αντιστροφής και ο αριθμός των επαναλήψεων. Στην περίπτωσή μας εφαρμόσθηκε η μέθοδος Monte Carlo με 500 επαναλήψεις.

Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της αντιστροφής το πρόγραμμα επιχειρεί να προσομοιάσει την καμπύλη mHVSR, υπολογίζοντας ταυτόχρονα τα βέλτιστα

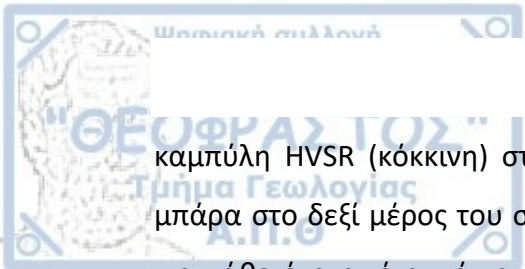


μοντέλα ταχυτήτων των εγκάρσιων και επιμήκων κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος. Το σφάλμα της διαφοράς των μοντέλων αυτών από την πραγματική καμπύλη (misfit) βελτιστοποιείται εφαρμόζοντας μία επιπλέον τοπική αντιστροφή, όπου στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε η Simplex Downhill.



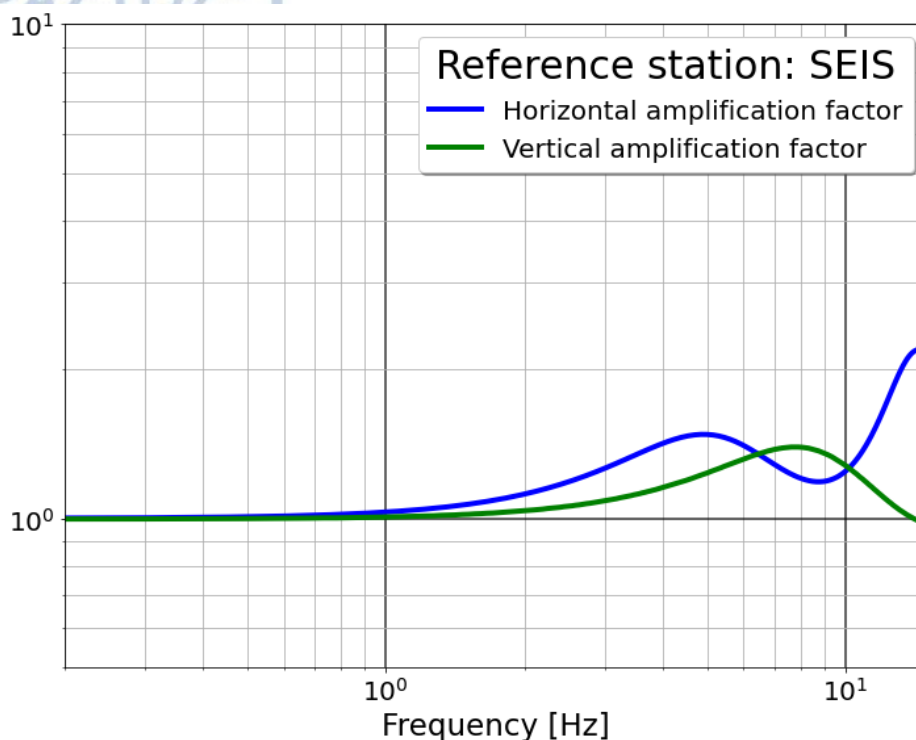
Σχήμα 4.1-9: Αντιστροφή μοντέλου ταχυτήτων για το σταθμό αναφοράς (SEIS). Στο επάνω σχήμα φαίνεται η παρατηρημένη καμπύλη mHVSR από μετρήσεις μικροθρόμβου (μαύρη) και η βέλτιστη, θεωρητική (κόκκινη) που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα της αντιστροφής (HV-Inv). Η μπάρα χρωμάτων δείχνει το συνολικό σφάλμα (Misfit) μεταξύ της πραγματικής καμπύλης και των μοντέλων προς διερεύνηση (πάνω σχήμα). Στο κάτω σχήμα, απεικονίζεται το μοντέλο ταχυτήτων των επιμήκων ( $V_p$ ), των εγκάρσιων ( $V_s$ ) κυμάτων και της μεταβολής της πυκνότητας με το βάθος, στο σταθμό αναφοράς (SEIS). Απ' αυτό εκτιμήθηκε το βάθος του σεισμικού υποβάθρου (με  $V_s > 3$  km/s) χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη καμπύλη (κόκκινη).

Στο Σχήμα 4.1-9 φαίνεται το βέλτιστο μοντέλο που υπολογίζεται για το σταθμό αναφοράς SEIS. Στο πάνω σχήμα, παρουσιάζεται η πραγματική καμπύλη του μέσου φασματικού λόγου mHVSR (μαύρη) μαζί με τις συνθετικές, οι οποίες προέρχονται από τα συνολικά μοντέλα που εξετάζονται, καθώς και η βέλτιστη



καμπύλη HVSR (κόκκινη) στο κέντρο σχεδόν όλων των μοντέλων. Η κατακόρυφη μπάρα στο δεξί μέρος του σχήματος αναπαριστά το σφάλμα, που έχει υπολογιστεί για κάθε ένα από αυτά τα μοντέλα και όπως φαίνεται, το σφάλμα γύρω από την κόκκινη καμπύλη είναι το ελάχιστο. Με βάση αυτό, σχεδιάζεται το δεύτερο σχήμα στο οποίο φαίνεται το μοντέλο ταχυτήτων των εγκαρσίων,  $S$  και των επιμήκων,  $P$  κυμάτων καθώς και της πυκνότητας σε συνάρτηση με το βάθος. Όπως και στο προηγούμενο σχήμα έτσι και εδώ, η κόκκινη μέση καμπύλη απεικονίζει το βέλτιστο μοντέλο και οι υπόλοιπες γύρω από αυτή τα μοντέλα που εξετάζονται. Έτσι, εκτιμάται το βάθος στο οποίο η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων ξεπερνά τα **3 km/sec** υποδεικνύοντας το σημείο που συναντάται το σεισμικό υπόβαθρο. Συνεπώς, προκύπτει ότι το βάθος αυτό για το σταθμό SEIS, είναι  $\approx 140\text{ m}$  από την επιφάνεια.

Αμέσως μετά την εξαγωγή του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων ακολουθεί ο υπολογισμός της οριζόντιας και κατακόρυφης φασματικής συνάρτησης μεταφοράς (transfer function) στη θέση του σταθμού SEIS. Η οριζόντια συνάρτηση μεταφοράς η οποία αντιστοιχεί κυρίως στα εγκάρσια κύματα ( $SH$  &  $SV$  – waves), σχεδόν κατακορύφως προσπίπτοντα στην επιφάνεια, υπολογίσθηκε με το πρόγραμμα *NRATTLE* του Boore ([NRATTLE software](#)) και βασίσθηκε στη θεωρία μητρώων διάδοσης σεισμικών κυμάτων σε οριζόντιας διάστρωσης, μονοδιάστατους γεωλογικούς σχηματισμούς (Thomson, 1950; Haskell, 1953).



Σχήμα 4.1-10: Οριζόντια (μπλε) και κατακόρυφη (πράσινη) συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) στο σταθμό αναφοράς SEIS.

Το πρόγραμμα αυτό, απαιτεί δεδομένα εισόδου τα οποία περιέχουν ιδιότητες των στρωμάτων που υπολογίζονται από τον κώδικα αντιστροφής, «*HV-Inn*» και πιο συγκεκριμένα τις ταχύτητες των εγκάρσιων κυμάτων, το πάχος κάθε στρώματος, τις πυκνότητες καθώς και τον παράγοντα  $1/Q_s$ , ο οποίος υπολογίζεται κατ' εκτίμηση με τη σχέση:

$$Q_s \approx \frac{V_s}{10} \Rightarrow \frac{1}{Q_s} \approx \frac{10}{V_s} \quad (4-1)$$

Με αυτόν τον τρόπο, το πρόγραμμα υπολογίζει τη οριζόντια ενίσχυση σε ένα εύρος συχνοτήτων (Σχήμα 4.1-10, μπλε γραμμή).

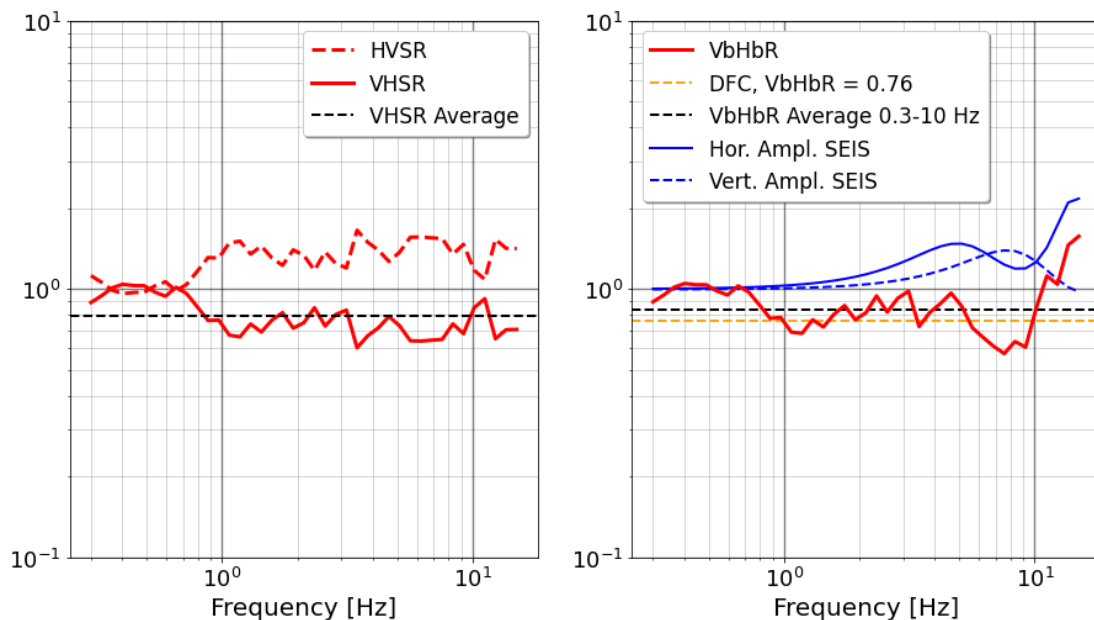
Η κατακόρυφη συνάρτηση μεταφοράς η οποία, αντιστοιχεί κυρίως στα επιμήκη κύματα (P-waves), τα οποία προσπίπτουν σχεδόν κατακόρυφα στην επιφάνεια, υπολογίσθηκε με το πρόγραμμα *PSVSD-1D* (Bard P.-Y. 2021 προσωπική επικοινωνία) και βασίζεται στη μέθοδο της ανακλαστικότητας των σεισμικών κυμάτων (reflectivity method, Kennett, 1974). Τα δεδομένα εισόδου είναι παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της οριζόντιας συνάρτησης μεταφοράς.

Έτσι, αφού εκτιμήθηκαν η οριζόντια και η κατακόρυφη συνάρτηση μεταφοράς στο σταθμό αναφοράς SEIS, αφαιρέθηκε η ενίσχυση από τα παρατηρημένα, στην επιφάνεια, φάσματα των καταγραφών των σεισμών. Με τον τρόπο αυτό έγινε η αναγωγή των φασμάτων του SEIS σε σταθμό αναφοράς επί του σεισμικού υποβάθρου με ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων  $V_s \geq 3 \frac{km}{sec}$ .

Στη συνέχεια, σύμφωνα με τη θεωρία DFA ο θεωρητικός φασματικός λόγος της κατακόρυφης προς την οριζόντια φασματική συνιστώσα στο σεισμικό υπόβαθρο ( $V_b H_b R$ , δηλαδή η τετραγωνική ρίζα της Σχέσης 2-1) για μέσες τιμές διάδοσης των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων  $V_p = 5.5 km/sec$  και  $V_s = 3.2 km/sec$ , ισούται με **0.76** (Ito et al., 2020). Συνεπώς, συγκρίνεται η θεωρητικά αναμενόμενη αυτή τιμή αφού γίνει η διόρθωση του eVHSR δηλαδή του αντίστροφου φασματικού λόγου του eHVSr, σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_b H_b R = \frac{eVHSR}{VSAF} \times HSAF \quad (4-2)$$

#### STATION : SEIS



Σχήμα 4.1-11: (Αριστερά) Απεικόνιση του φασματικού λόγου HVSr του σταθμού αναφοράς SEIS (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή) και του αντίστροφου λόγου VHSr (κόκκινη συνεχόμενη γραμμή). (Δεξιά) Διόρθωση του σταθμού αναφοράς SEIS, με τη Σχέση 4-2. Παρουσιάζεται, η μέση τιμή του διορθωμένου λόγου ( $V_b H_b R$ , κόκκινη γραμμή, δεξιά), για εύρος συχνοτήτων 0.3–10 Hz (μαύρη οριζόντια διακεκομμένη γραμμή).

Στην παραπάνω σχέση το HSAF εκφράζει την οριζόντια και το VSAF την κατακόρυφη

μονοδιάστατη συνάρτηση μεταφοράς στο σταθμό SEIS, όπως υπολογίσθηκε θεωρητικά από το μονοδιάστατο μοντέλο ταχυτήτων. Από το Σχήμα 4.1-11 παρατηρείται :

- a) η θεωρητική τιμή του  $V_b H_b R$  με βάση την υπόθεση της DFA (πορτοκαλί διακεκομμένη οριζόντια γραμμή), η οποία έχει τιμή **0.76**
- b) ο υπολογισμένος λόγος  $V_b H_b R$  στο δεξί τμήμα του σχήματος (κόκκινη γραμμή) όπως προκύπτει από τη Σχέση 4-2. Ο λόγος αυτός ( $V_b H_b R$ ) έχει μέση τιμή **0.82**, για το εύρος συχνοτήτων  $0.3\text{Hz} - 10\text{Hz}$ , δηλαδή βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή για το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

## 4.2 Αποτελέσματα Αντιστροφής

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων ακολουθούν τα αποτελέσματα της ταυτόχρονης αντιστροφής των οριζοντίων και των κατακόρυφων συνιστωσών των επιλεγμένων εγκαρσίων κυμάτων. Με την αντιστροφή εκτιμώνται οι ιδιότητες της σεισμικής πηγής, του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων καθώς και η επίδραση των εδαφικών συνθηκών στη θέση του σταθμού καταγραφής.

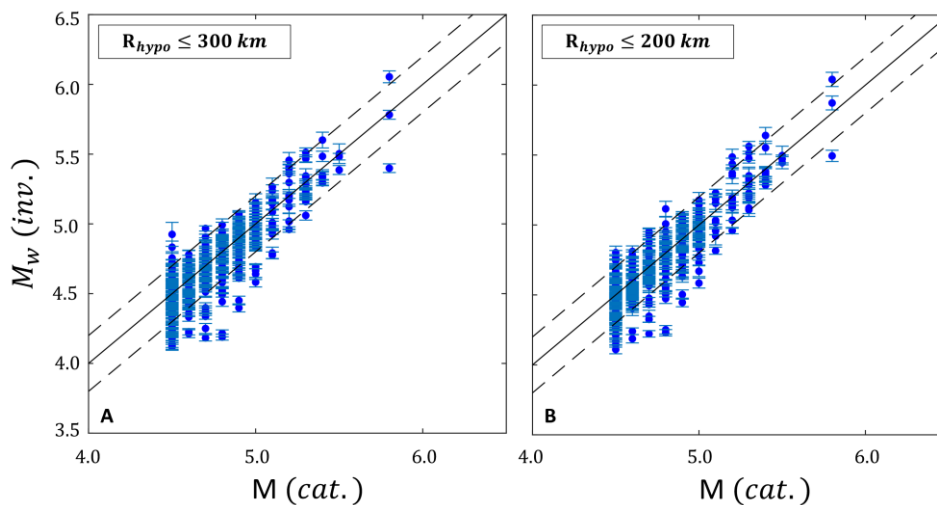
### 4.2.1 Παράγοντας σεισμικής πηγής

Όσον αφορά τον παράγοντα της σεισμικής πηγής, στο Σχήμα 4.2-1 συγκρίνεται το μέγεθος από τους καταλόγους ( $M_{cat.}$ ) και το αντίστοιχο υπολογισμένο από την αντιστροφή ( $M_w Inv.$ ), για τα δύο δείγματα δεδομένων με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300\text{ km}$  και  $R_{hypo} \leq 200\text{ km}$ . Σχετικά με το μέγεθος ροπής, η υπολογισμένη από την αντιστροφή ποσότητα  $\log_{10} M_0$  (σεισμική ροπή) μετατρέπεται σε μέγεθος σεισμικής ροπής ( $M_w$ ) χρησιμοποιώντας τη σχέση (Hanks and Kanamori, 1979):



$$\log_{10} M_0 = 1.5 \cdot M_w + 9.1 \quad (4-3)$$

Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν το εύρος σφάλματος των μεγεθών του καταλόγου ( $\pm 0.2$ ). Οι υπολογισμένες από την αντιστροφή, τιμές του μεγέθους ροπής είναι μέσα στο εύρος σφάλματος με εξαίρεση ελάχιστες από αυτές. Ωστόσο, είναι φανερό ότι ο παράγοντας της πηγής δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αντιστροφή των δύο δειγμάτων δεδομένων.

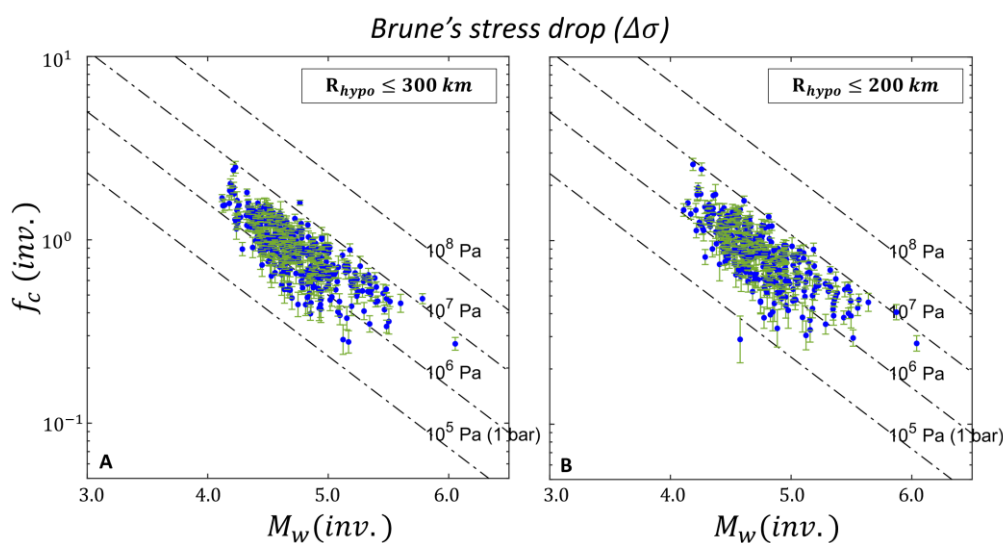


Σχήμα 4.2-1: Σύγκριση του μεγέθους ροπής των καταλόγων ( $M$ -cat.) και του αντίστοιχου που υπολογίζεται από την αντιστροφή ( $M_w$ -inv) του δείγματος με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300 \text{ km}$  και  $R_{hypo} \leq 200 \text{ km}$ . Οι διακεκομμένες απεικονίζουν το σφάλμα εκτίμησης των μεγεθών των καταλόγων ( $\pm 0.2$ ).

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 4.2-1 συγκρίνονται οι υπολογισμένες τιμές από την αντιστροφή, της γωνιακής συχνότητας ( $f_c$ ) και του μεγέθους ροπής, για υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300 \text{ km}$  και  $R_{hypo} \leq 200 \text{ km}$ . Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν την πτώση τάσης, υπολογισμένη από την παρακάτω σχέση του Brune, 1970:



$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot M_0 \cdot \left( \frac{f_c}{0.37 \cdot \beta} \right)^3 \quad (4-4)$$



Σχήμα 4.2-2: Σύγκριση του μεγέθους ροπής και της γωνιακής συχνότητας ( $f_c$ -inv.) υπολογισμένα από την αντιστροφή για υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypoc} \leq 300$  km και  $R_{hypoc} \leq 200$  km. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν την πτώση τάσης από την Εξίσωση (4-4).

Από το Σχήμα 4.2-2, παρατηρείται ότι η πλειονότητα των σημείων βρίσκεται σε ένα εύρος πτώσης τάσης μεταξύ 10 – 100 bar, το οποίο συμφωνεί ικανοποιητικά με τη μέση πτώση τάσης του ελληνικού χώρου  $\approx 50$  bar για σεισμούς μετρίου μεγέθους ( $5.5 \leq M \leq 6.5$ ) (Margaris and Boore, 1998; Margaris and Hatzidimitriou, 2002).

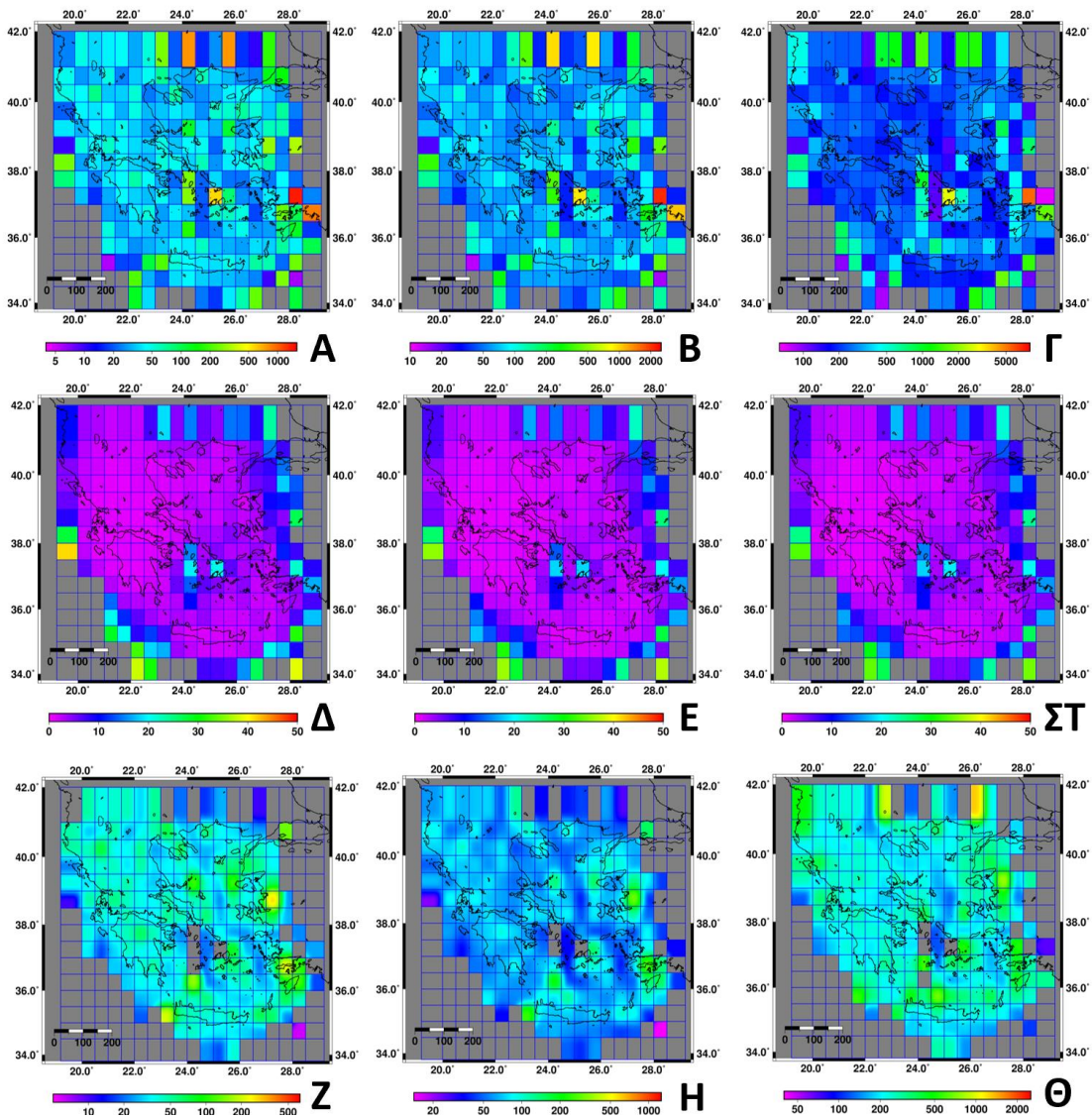
#### 4.2.2 Παράγοντας απόσβεσης των κυμάτων

Όσον αφορά την απόσβεση των σεισμικών κυμάτων, ο ελληνικός χώρος χωρίστηκε σε μία περιοχή μελέτης, με γεωγραφικό πλάτος  $34.5^\circ - 41^\circ$  βόρεια και γεωγραφικό μήκος  $20^\circ - 28.5^\circ$  ανατολικά. Η περιοχή αυτή διακρίθηκε σε υπο-περιοχές ανά 0.5 μοίρες που συνολικά σχηματίζουν 285 τετράγωνα κελιά. Όπως είναι φανερό, οι σεισμικές ακτίνες των δύο δειγμάτων δεδομένων δεν διασχίζουν όλες τις υπο-περιοχές στον ελληνικό χώρο λόγω έλλειψης δεδομένων. Συνεπώς, από τις 285 περιοχές μελετώνται μόνο οι 241 και υπολογίζεται ο παράγοντας απόσβεσης  $Q$ . Στο Σχήμα 4.2-3 απεικονίζονται οι υπολογισμένες τιμές του  $Q$  στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, σε χρωματική κλίμακα για το δείγμα δεδομένων με υποκεντρικές αποστάσεις,  $R_{hypoc} \leq 300$  km. Οι στήλες ([A – Δ – Ζ], [B – E – H],

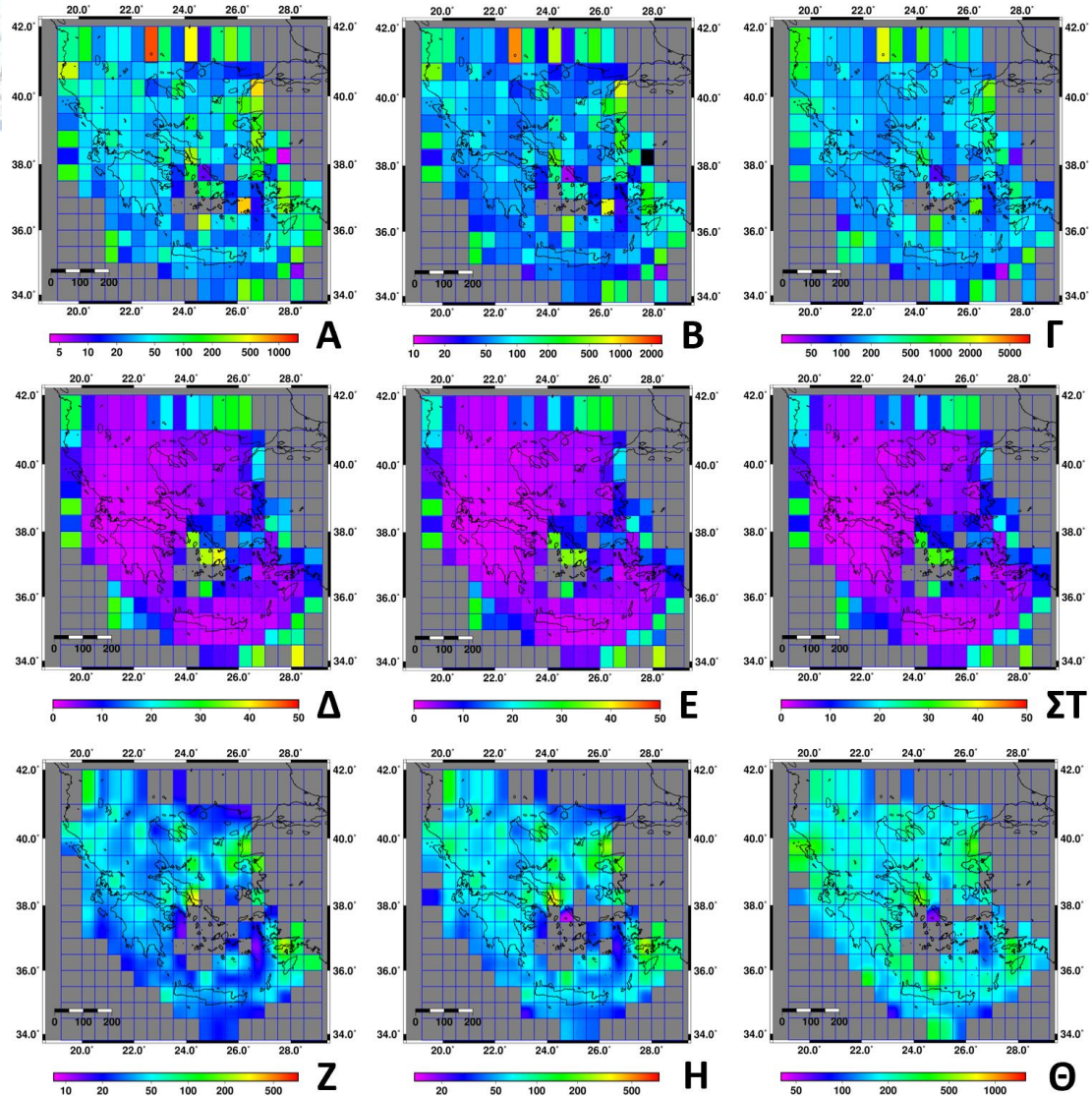
[ $\Gamma - \Sigma T - \Theta$ ]) αναπαριστούν τον υπολογισμό για συχνότητες 0.5 Hz, 1 Hz και 5 Hz (από αριστερά προς τα δεξιά, αντίστοιχα).

Η πρώτη γραμμή [ $A - \Gamma$ ], παρουσιάζει τις τιμές του Q όπως αυτές που υπολογίσθηκαν ανεξάρτητα από την αβεβαιότητά τους. Η δεύτερη γραμμή [ $\Delta - \Sigma T$ ] δείχνει τον ποσοστιαίο (%) συντελεστή διακύμανσης, CV (Coefficient of Variation) αυτών. Ο συντελεστής διακύμανσης εκφράζεται σε επί τις εκατό (%) και είναι συνεπώς ανεξάρτητος από τις μονάδες μέτρησης παριστάνοντας ένα μέτρο σχετικής και όχι της απόλυτης διακύμανσης των τιμών. Εκφράζει δηλαδή, τη μεταβλητότητα των δεδομένων απαλλαγμένη από την επίδραση της μέσης τιμής. Μικρότερες τιμές του συντελεστή αυτού, σηματοδοτούν μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Τέλος, η τρίτη γραμμή [ $Z - \Theta$ ] εκφράζει τις αντίστοιχες τιμές του Q αλλά για  $CV < 10\%$  και με εξομαλυμένες τιμές στα όρια των υπο-περιοχών. Παράλληλα, στο Σχήμα 4.2-4 φαίνεται η αντίστοιχη κατανομή για το δείγμα δεδομένων με υποκεντρικές αποστάσεις,  $R_{\text{hypo}} \leq 200$  km.





Σχήμα 4.2-3: Κατανομή του παράγοντα απόσβεσης,  $Q$  για το δείγμα δεδομένων με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hγρo} \leq 300$  km. Οι τρεις στήλες απεικονίζουν τις τιμές του  $Q$  (από αριστερά προς τα δεξιά) για τις διαφορετικές συχνότητες που εξετάζονται (0.5Hz, 1Hz, 5Hz). Οι γραμμές (από πάνω προς τα κάτω) εκφράζουν, τις αρχικά υπολογισμένες τιμές του παράγοντα  $Q$ , τις τιμές του συντελεστή διακύμανσης (CV) για κάθε κελί και τις αντίστοιχες εξομαλυμένες τιμές του  $Q$  αλλά για  $CV < 10\%$ , αντίστοιχα.

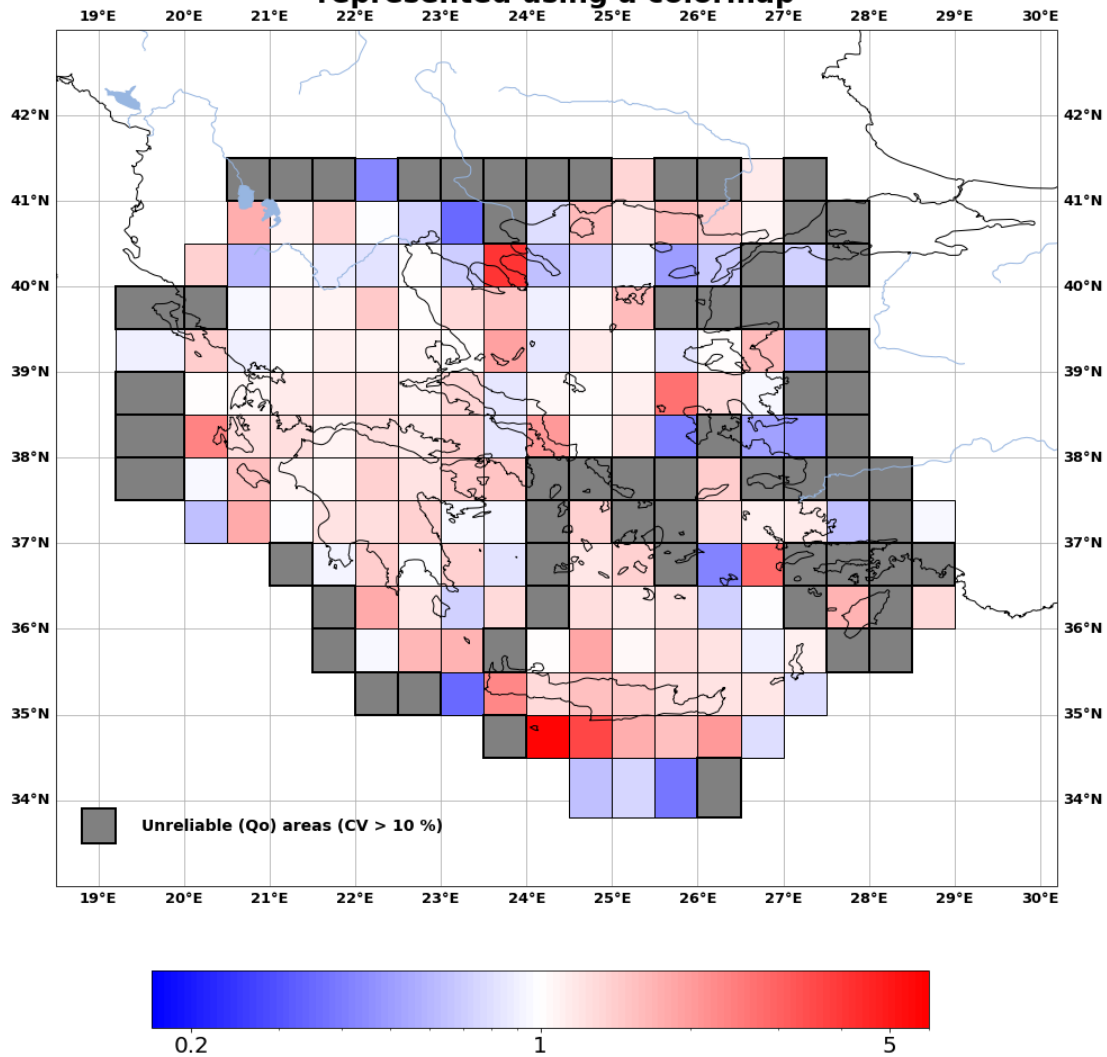


Σχήμα 4.2-4: Κατανομή του παράγοντα απόσβεσης,  $Q$  για το δείγμα δεδομένων με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{\text{ηγρο}} \leq 200 \text{ km}$ . Οι τρεις στήλες απεικονίζουν τις τιμές του  $Q$  (από αριστερά προς τα δεξιά) για τις διαφορετικές συχνότητες που εξετάζονται ( $0.5\text{Hz}$ ,  $1\text{Hz}$ ,  $5\text{Hz}$ ). Οι γραμμές (από πάνω προς τα κάτω) εκφράζουν, τις αρχικά υπολογισμένες τιμές του παράγοντα  $Q$ , τις τιμές του συντελεστή διακύμανσης ( $CV$ ) για κάθε κελί και τις αντίστοιχες εξομαλυμένες τιμές του  $Q$  αλλά για  $CV < 10\%$ , αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.2-5 παρουσιάζονται οι λόγοι των τιμών του παράγοντα απόσβεσης  $Q$ , που υπολογίστηκαν στην εργασία των Grendas et al. (2021) και των αντίστοιχων αυτής της εργασίας, για συχνότητα  $1\text{Hz}$  και για το δείγμα των  $R \leq 300\text{km}$ . Κάθε υπο-περιοχή στον χάρτη (τετράγωνα), εκφράζει το πηλίκο των αντίστοιχων τιμών των δύο εργασιών. Οι λόγοι αυτοί, εκφράζονται με διαφορετικό χρώμα στη χρωματική κλίμακα ανάλογα με την τιμή. Οι λευκές περιοχές εκφράζουν μικρή ή καθόλου διαφορά αυτών (με τιμές κοντά στη μονάδα), οι κόκκινες περιοχές εκφράζουν υψηλότερες τιμές στην εργασία Grendas et al. (2021), ενώ οι μπλε περιοχές εκφράζουν υψηλότερες τιμές στην εργασία αυτή. Για

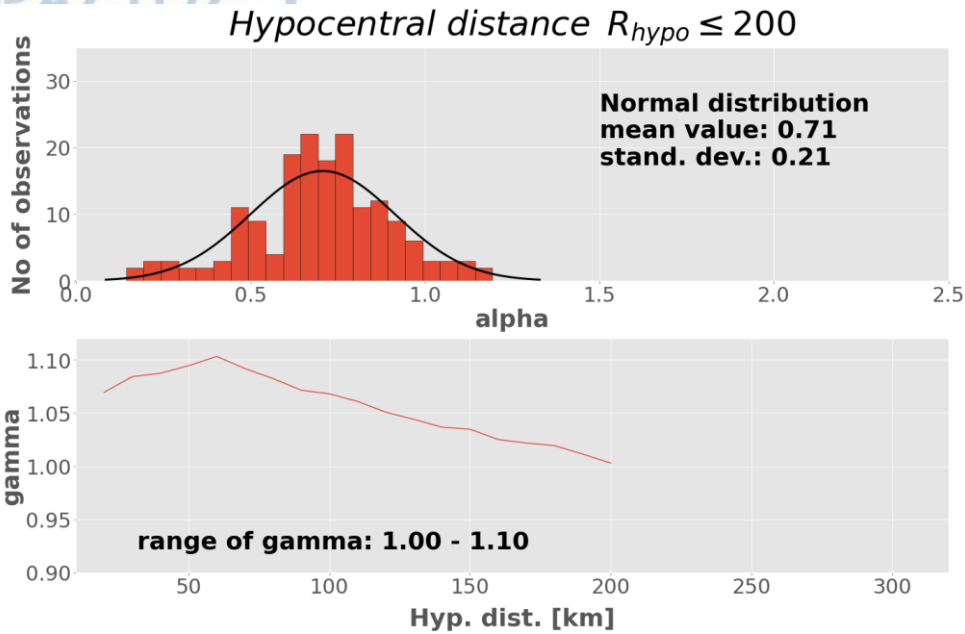
την αναπαράσταση των υπο-περιοχών που έχουν μεγάλη αβεβαιότητα των δεδομένων, χρησιμοποιείται ο συντελεστής διακύμανσης  $CV$ . Οι περιοχές με υψηλές τιμές του συντελεστή αυτού ( $CV > 10\%$ ) τουλάχιστον σε μια από τις δύο εργασίες, χρωματίζονται με γκρι χρώμα. Έτσι, παρατηρούνται αρκετές τέτοιες υπο-περιοχές, κυρίως στο κεντρικό Αιγαίο, στη Δυτική Τουρκία, στη Βόρεια Ελλάδα, δηλαδή σε περιοχές που δεν διασχίζονται από αρκετές σεισμικές ακτίνες τουλάχιστον σε μια από τις δύο εργασίες. Από τη σύγκριση αυτή, προκύπτει ότι η πλειονότητα των υπο-περιοχών του εξεταζόμενου χώρου, δείχνει ότι οι τιμές της απόσβεσης της εργασίας αυτής είναι γενικά χαμηλότερες έως και 5 φορές από τις αντίστοιχες των Grendas et al. (2021). Ωστόσο, υπάρχουν και περιοχές στις οποίες παρατηρείται το αντίθετο (π.χ. νότια της Κρήτης, βόρεια Ελλάδα κ.α.)

### Q0 value differences between data of GRENDA and MARAGKAKIS represented using a colormap

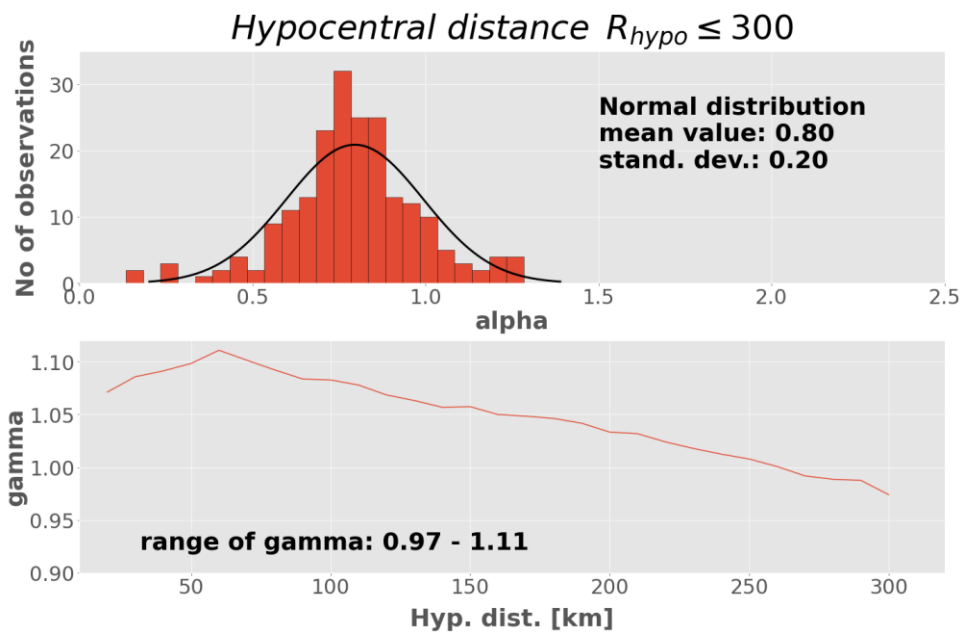


Σχήμα 4.2-5: Κατανομή του λόγου των τιμών του παράγοντα απόσβεσης  $Q$  μεταξύ της εργασίας Grendas et al. (2021) και της εργασίας αυτής, για συχνότητα 1 Hz. Η χρωματική κλίμακα αποτυπώνει περιοχές, με παρόμοιες τιμές  $Q$  (λευκές περιοχές), περιοχές με μεγαλύτερες (κόκκινα σημεία) και μικρότερες (μπλε σημεία) τιμές της εργασίας Grendas et al. (2021). Τα γκριζα κελιά, εκφράζουν περιοχές για τις οποίες δεν μπορούσε να γίνει σύγκριση.

Στη συνέχεια, στα Σχήματα 4.2-6 και 4.2-7 απεικονίζονται οι τιμές του παράγοντα  $\alpha$  (alpha, παράμετρος που ελέγχει την εξάρτηση του  $Q$  με τη συχνότητα) καθώς και του  $\gamma$  (συντελεστής γεωμετρικής διασποράς) για τα δύο δείγματα δεδομένων.



Σχήμα 4.2-6: Ιστογράμμο του παράγοντα απόσβεσης,  $\alpha$  (πάνω) και της γεωμετρικής διασποράς,  $\gamma$  (κάτω) σε συνάρτηση με την υποκεντρική απόσταση (κάτω), για το δείγμα με  $R_{hypo} \leq 200$  km. Παρατηρείται ότι οι τιμές του παράγοντα  $\alpha$  ακολουθούν μία κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση, που δίνονται στο σχήμα.



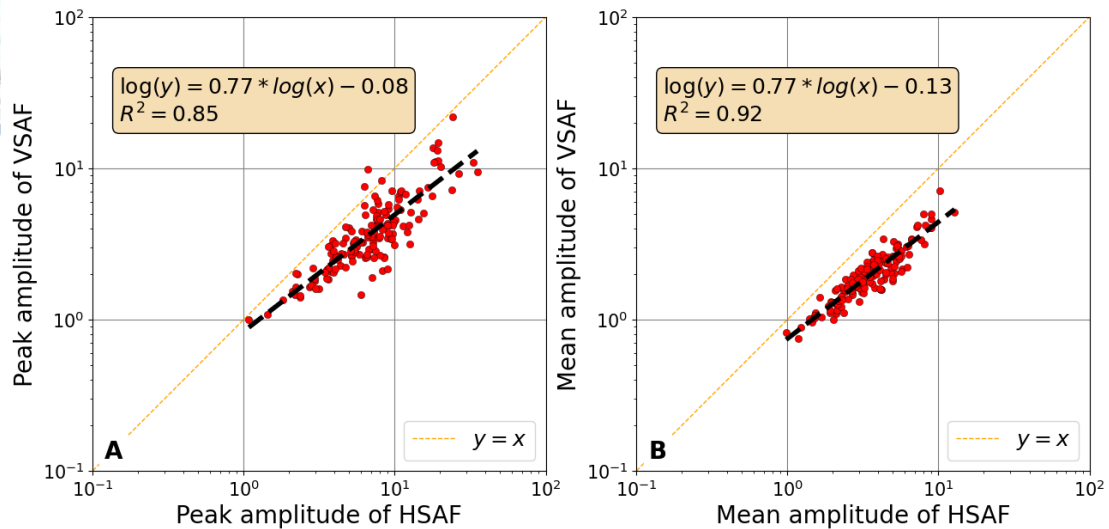
Σχήμα 4.2-7: Ιστογράμμο του παράγοντα απόσβεσης,  $\alpha$  (πάνω) και της γεωμετρικής διασποράς,  $\gamma$  (κάτω) σε συνάρτηση με την υποκεντρική απόσταση (κάτω), για το δείγμα με  $R_{hypo} \leq 300$  km. Παρατηρείται ότι οι τιμές του παράγοντα  $\alpha$  ακολουθούν μία κανονική κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση, που δίνονται στο σχήμα.

Παρατηρείται ότι οι δύο παράμετροι δεν μεταβάλλονται σημαντικά σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τα διαφορετικά δείγματα δεδομένων ( $R \leq 200$  km,  $R \leq 300$  km). Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του παράγοντα  $\alpha$  ακολουθούν μία κανονική

κατανομή με μέση τιμή και τυπική απόκλιση που δεν διαφέρουν στα δύο δείγματα, με ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή του παράγοντα  $\alpha$  για το δείγμα δεδομένων με  $R_{hypro} \leq 300 \text{ km}$ . Παράλληλα, η γεωμετρική διασπορά κυμαίνεται κοντά στην μονάδα.

#### 4.2.3 Παράγοντας ενίσχυσης των τοπικών συνθηκών

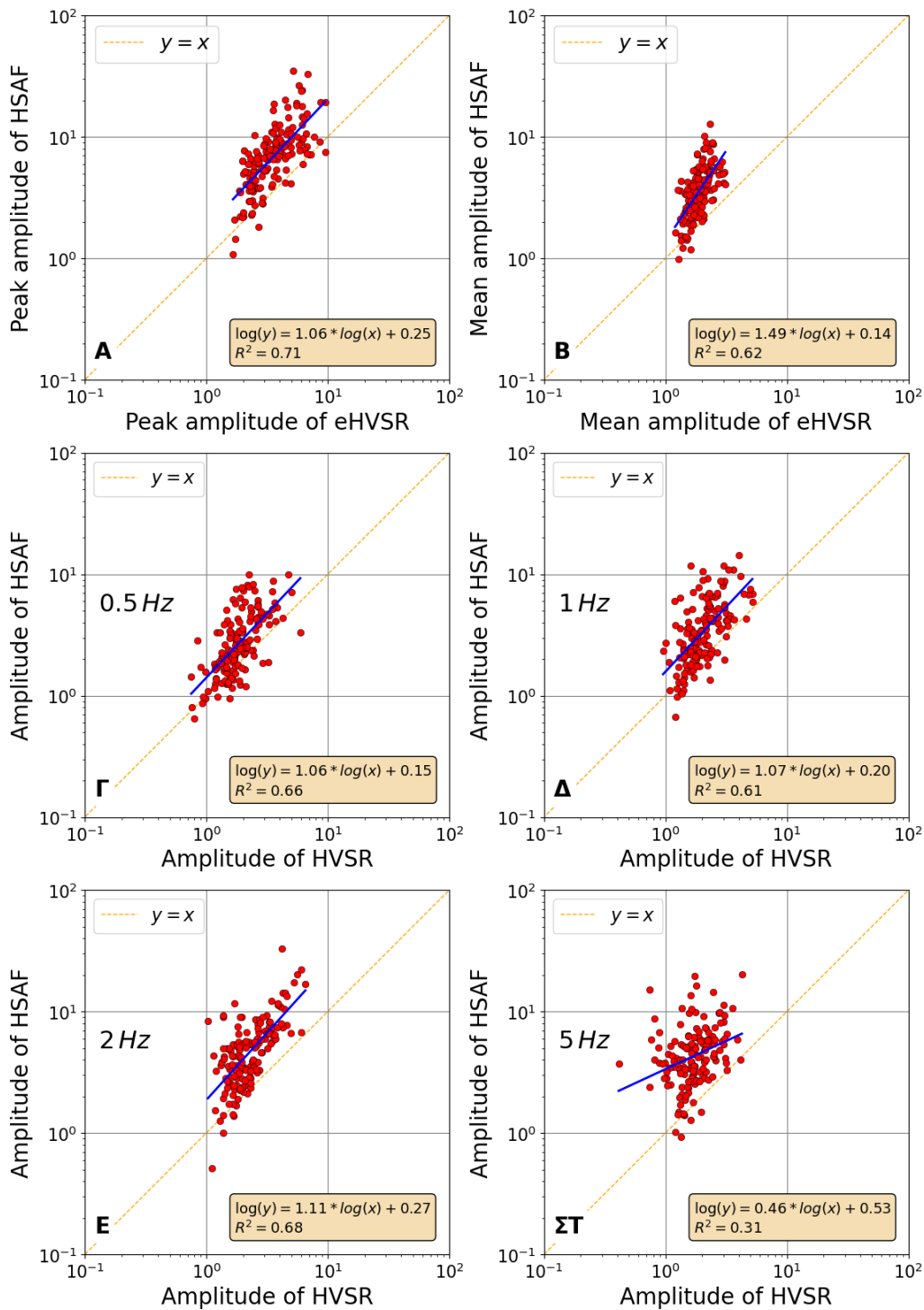
Στο Σχήμα 4.2-8 συγκρίνεται η μέγιστη τιμή του παράγοντα οριζόντιας ενίσχυσης με την αντίστοιχη της κατακόρυφης, οι οποίοι έχουν υπολογιστεί από την ταυτόχρονη αντιστροφή, για το δείγμα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypro} \leq 300 \text{ km}$ . Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.2-8 (A) παρουσιάζεται το μέγιστο πλάτος του οριζόντιου (άξονας τετμημένων) και του κατακόρυφου (άξονας τεταγμένων) παράγοντα ενίσχυσης για κάθε σταθμό, σε όλο το εύρος των εξεταζόμενων συχνοτήτων ( $0.3\text{Hz} \leq f \leq 15\text{Hz}$ ). Στα σημεία αυτά, σχεδιάζεται η ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων (μαύρη γραμμή). Παράλληλα, στο ίδιο σχήμα φαίνονται η εξίσωση της ευθείας και ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient,  $R^2$ ). Επιπλέον, στο Σχήμα 4.2-8 (B) πεικονίζεται η μέση τιμή του πλάτους του οριζόντιου και του κατακόρυφου παράγοντα ενίσχυσης σε κάθε σταθμό για όλο το εύρος των συχνοτήτων ( $0.3\text{Hz} \leq f \leq 15\text{Hz}$ ). Γενικά, παρατηρείται ότι ο κατακόρυφος παράγοντας ενίσχυσης παρουσιάζει τιμές μεταξύ 75% και 45% του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης για πλάτη από 1 έως 10, αντίστοιχα. Στο Παράρτημα A.1 απεικονίζονται, για κάθε σταθμό του δείγματος των  $R_{hypro} \leq 300 \text{ km}$ , οι καμπύλες της οριζόντιας και της κατακόρυφης ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης, υπολογισμένες από την αντιστροφή καθώς και η καμπύλη του φασματικού λόγου eHVSR.



Σχήμα 4.2-8: Σύγκριση του οριζόντιου (HSAF) με τον κατακόρυφο (VSAF) παράγοντα ενίσχυσης, οι οποίοι προέκυψαν από την αντιστροφή, για το δείγμα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300 \text{ km}$ . Στο σχήμα (A) συγκρίνεται η μέγιστη τιμή του πλάτους αυτών για κάθε σταθμό, ενώ στο (B) το μέσο πλάτος τους. Στα ίδια σχήματα σχεδιάζεται και η ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) και δίνεται η σχέση που προκύπτει και ο συντελεστής συσχέτισης ( $R^2$ ).

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.2-9 συγκρίνεται, ο οριζόντιος παράγοντας ενίσχυσης ο οποίος έχει προκύψει από την αντιστροφή, σε συνάρτηση με το πλάτος του φασματικού λόγου eHVSR, για το δείγμα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300 \text{ km}$ . Στο πρώτο Σχήμα (4.2-9, A) γίνεται η συσχέτιση της μέγιστης τιμής του πλάτους του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (άξονας τεταγμένων), με την αντίστοιχη μέγιστη τιμή του φασματικού λόγου eHVSR (άξονας τετμημένων) για όλους τους σταθμούς, ενώ στο δεύτερο (4.2-9, B), η σύγκριση των μέσων τιμών τους. Στα επόμενα σχήματα (4.2-9, Γ, Δ, Ε, ΣΤ), συσχετίζονται τα πλάτη του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης και του φασματικού λόγου eHVSR, για συγκεκριμένες συχνότητες (0.5 Hz, 1 Hz, 2Hz, 5 Hz). Σε όλα τα σχήματα, επιχειρείται εφαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων (μπλε γραμμή). Η σχέση αυτής και ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  δίνονται εντός του αντίστοιχου σχήματος.

Από το Σχήμα 4.2-9 παρατηρείται, ότι ο παράγοντας οριζόντιας ενίσχυσης, είναι συστηματικά μεγαλύτερος έως και 2 φορές από τα αντίστοιχα πλάτη του λόγου eHVSR. Εξαιρέση αποτελεί η συσχέτιση του Σχήματος 4.2-9 (ΣΤ) όπου φαίνεται ότι η διασπορά των σημείων για τη συχνότητα των 5 Hz οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή συσχέτισης με αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή να μην προκύπτει ασφαλές συμπέρασμα.

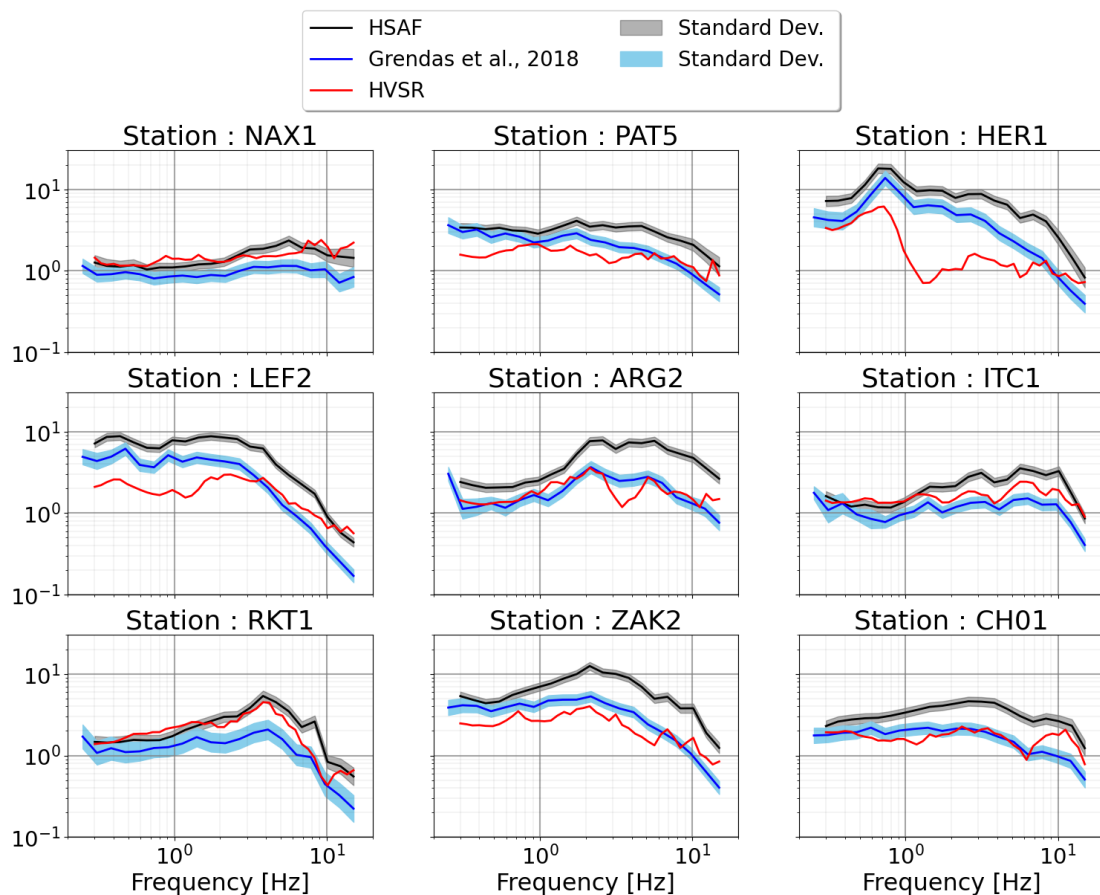


Σχήμα 4.2-9: Συσχέτιση του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης HSAF που προκύπτει από την αντιστροφή και του φασματικού λόγου eHVSR (άξονας τετμημένων), για το δείγμα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hγρο} \leq 300$  km. Στα πρώτα δύο σχήματα φαίνονται οι μέγιστες (σχήμα A) και οι μέσες τιμές (σχήμα B) του πλάτους αυτών για όλους τους σταθμούς (κόκκινα σημεία). Στα υπόλοιπα σχήματα (Γ, Δ, E, ΣΤ) παρουσιάζονται οι τιμές του πλάτους των αντίστοιχων παραγόντων για συγκεκριμένες συχνότητες (0.5 Hz, 1 Hz, 2Hz, 5 Hz). Σε όλα τα σχήματα σχεδιάζεται και η αντίστοιχη ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων (μπλε γραμμή) και δίνεται η σχέση που προκύπτει και ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$ .

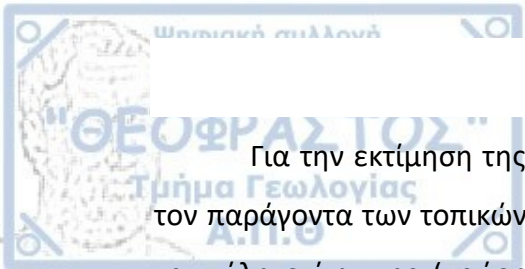
Στο Σχήμα 4.2-10 συγκρίνεται η καμπύλη της οριζόντιας ενίσχυσης που



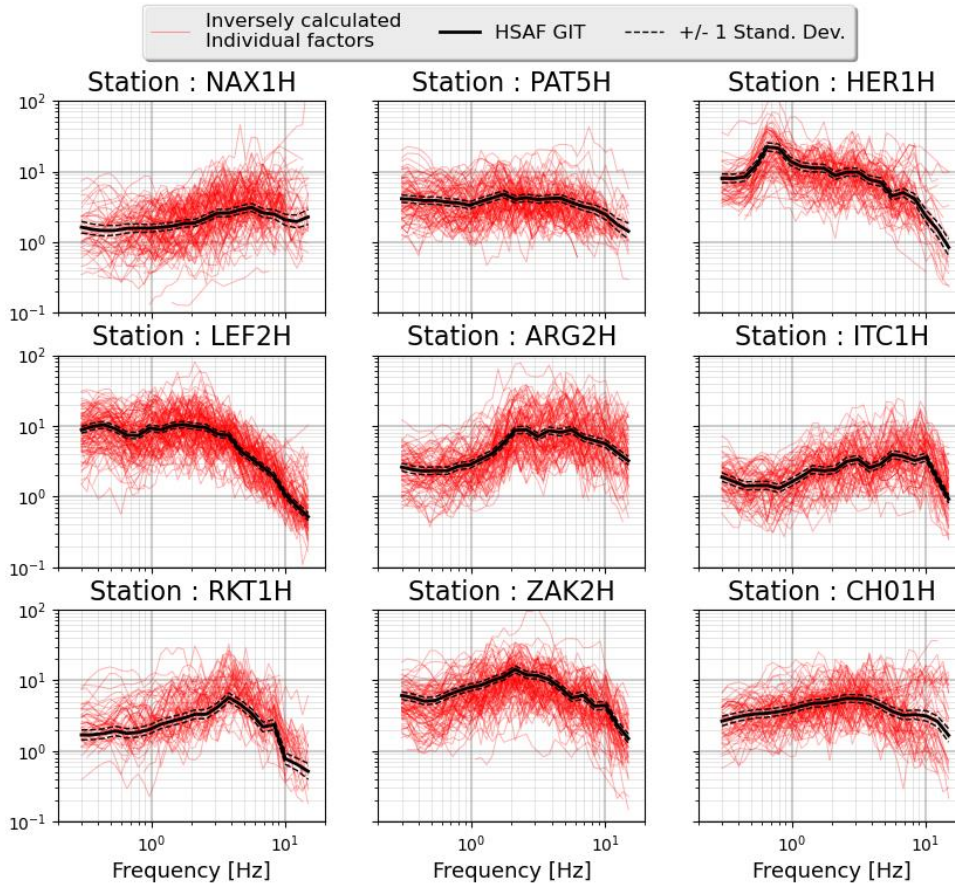
υπολογίζεται στην εργασία αυτή (μαύρη γραμμή) με την αντίστοιχη της εργασίας Grendas et al. (2018) (μπλε γραμμή), για επιλεγμένους κοινούς σταθμούς των δύο εργασιών και συγκεκριμένα για τους *NAX1*, *PAT5*, *HER1*, *LEF2*, *ARG2*, *ITC1*, *RKT1*, *ZAK2*, *CH01*. Αν και οι δύο καμπύλες εμφανίζουν παρόμοιο σχήμα στις περισσότερες των περιπτώσεων, παρατηρείται ότι η καμπύλη HSAF της παρούσας εργασίας δίνει συστηματικά υψηλότερα πλάτη ενίσχυσης. Η διαφορά αυτή οφείλεται πιθανόν τόσο στη διαφορετική και πλέον εμπλουτισμένη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή όσο και στη χρήση σταθμού αναφοράς προσαρμοσμένου σε υπόβαθρο με ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων  $V_s > 3 \text{ km/sec}$  με απομάκρυνση τυχόν ενισχύσεων λόγω επιφανειακής εμφάνισης διαβρωμένου στρώματος του βραχώδους υποβάθρου, το οποίο προσδίδει κατά κανόνα ενίσχυση της σεισμικής κίνησης ιδίως στις υψηλές συχνότητες (Steidl, 1996; Ito et al., 2020).



Σχήμα 4.2-10: Παράδειγμα σύγκρισης της καμπύλης ενίσχυσης που υπολογίστηκε από την αντιστροφή στην συγκεκριμένη εργασία (μαύρη γραμμή) για το δείγμα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300 \text{ km}$ , και της αντίστοιχης από την εργασία Grendas et al. (2018) (μπλε γραμμή) για τους σταθμούς *NAX1*, *PAT5*, *HER1*, *LEF2*, *ARG2*, *ITC1*, *RKT1*, *ZAK2*, *CH01*.



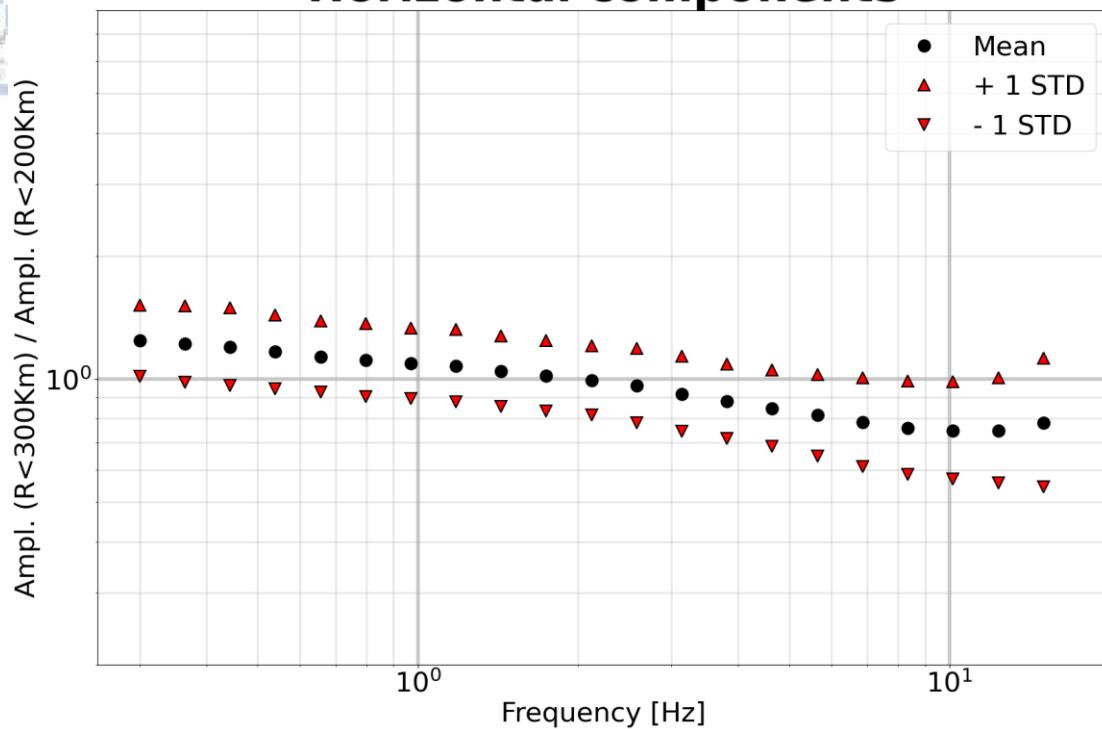
Για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων αντιστροφής ως προς τον παράγοντα των τοπικών συνθηκών, δίνεται στο Σχήμα 4.2-11, η μέση οριζόντια καμπύλη ενίσχυσης (μαύρη γραμμή), που υπολογίζεται από την αντιστροφή για τους σταθμούς *NAX1H*, *PAT5H*, *HER1H*, *LEF2H*, *ARG2H*, *ITC1H*, *RKT1H*, *ZAK2H*, *CH01H* (το γράμμα «H» στους κωδικούς αυτών, υποδεικνύει την οριζόντια κίνηση). Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται κάθε μεμονωμένη καμπύλη (κόκκινη γραμμή) για κάθε έναν σταθμό καταγραφής που προκύπτει από τον αντίστροφο υπολογισμό του παράγοντα ενίσχυσης, λύνοντας ως προς τον παράγοντα  $s_{j,k}$  στη Σχέση 2-9, δηλαδή διορθώνοντας τα φάσματα Fourier για τους παράγοντες της σεισμικής πηγής και του δρόμου διαδρομής. Αν και παρατηρείται ότι ορισμένες καταγραφές, αποκλίνουν αρκετά από τη μέση καμπύλη για κάποιο εύρος συχνοτήτων, είναι εμφανές ότι εν γένει η αντιστροφή έχει υπολογίσει σε ικανοποιητικό βαθμό την μέση καμπύλη οριζόντιας ενίσχυσης που προέκυψε από την γενικευμένη αντιστροφή για το δείγμα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hyro} \leq 300 \text{ km}$ .



Σχήμα 4.2-11: Απεικόνιση του μέσου παράγοντα οριζόντιας ενίσχυσης  $\pm 1$  τυπική απόκλιση που υπολογίζεται από τη αντιστροφή (μαύρη γραμμή, GIT) και των αντίστροφα υπολογισμένων ενισχύσεων (κόκκινες γραμμές) οι οποίες προκύπτουν από τη διόρθωση των φασμάτων Fourier για τους παράγοντες της σεισμικής πηγής και του δρόμου διαδρομής για το δείγμα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300$  km.

Τέλος στα Σχήματα 4.2-12 και 4.2-13 απεικονίζεται, για κάθε διακριτή συχνότητα, ο λόγος των μέσων οριζόντιων και κατακόρυφων φασματικών ενισχύσεων υπολογισμένων από την αντιστροφή για τα δείγματα με υποκεντρικές αποστάσεις  $R \leq 200$  km και  $R \leq 300$  km. Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα μεταβατικό στάδιο στη συχνότητα  $f \approx 2$  Hz, όπου για μικρότερες τιμές συχνοτήτων ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας (έως 35%) ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες η τιμή του λόγου ελαττώνεται κάτω από τη μονάδα (έως 25%). Αυτό υποδεικνύει την μεγαλύτερη τιμή της οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης για το δείγμα των  $R \leq 300$  km σε συχνότητες  $f < 2$  Hz, ενώ παρατηρούνται μικρότερες τιμές αυτής για συχνότητες  $f > 2$  Hz. Σχεδόν παρόμοιο συμπέρασμα προκύπτει και για τις κατακόρυφες φασματικές ενισχύσεις από το Σχήμα 4.2-13.

## Horizontal components

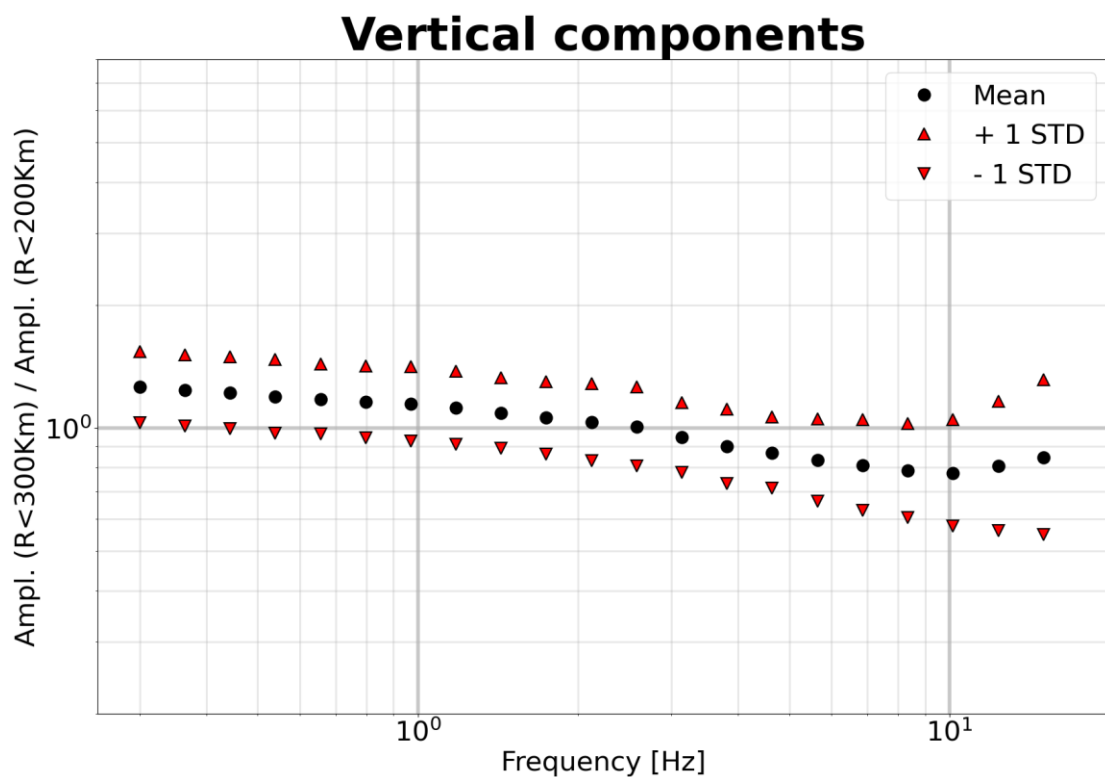


Σχήμα 4.2-12: Μεταβολή του λόγου της οριζόντιας ενίσχυσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα, όπως υπολογίστηκε από την αντιστροφή για τα δύο δείγματα ( $R_{hypo} \leq 200 km$  και  $R_{hypo} \leq 300 km$ ).

Η διαφοροποίηση του παράγοντα ενίσχυσης που παρατηρήθηκε στις θέσεις των σταθμών επιταχυνσιογράφων σε συνάρτηση με τη συχνότητα συνδέεται με τα δύο διαφορετικά δείγματα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, το δείγμα δεδομένων με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 300 km$  έδωσε παράγοντα ενίσχυσης των τοπικών συνθηκών για συχνότητες  $f < 2 Hz$  υψηλότερο έως και 35% από τον αντίστοιχο του δείγματος με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypo} \leq 200 km$ . Το πρώτο εμπεριέχει σεισμικές ακτίνες μεγαλύτερης διαδρομής σε σχέση με το δεύτερο δείγμα. Η παρατήρηση αυτή είναι σε καλή συμφωνία με το γεγονός ότι:

- τα πλάτη της σεισμικής κίνησης στις υψηλές συχνότητες (π.χ.  $f > 2 Hz$ ) αποσβένονται σε μεγαλύτερο βαθμό με την απόσταση από εκείνα στις χαμηλότερες συχνότητες και,
- οι μεγαλύτερες ακτίνες διαδρομής διέρχονται από βαθύτερα στρώματα του φλοιού όπου οι τιμές του παράγοντα απόσβεσης είναι μεγαλύτερες, δηλαδή η ανελαστική απόσβεση μικρότερη.

Συνεπώς, είναι αναμενόμενο η σεισμική κίνηση σε σταθμούς με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hygro} < 200 \text{ km}$ , να έχει υποστεί αναλογικά μικρότερη ανελαστική απόσβεση πλατών στις υψηλές συχνότητες ( $f > 2 \text{ Hz}$ ) με αποτέλεσμα το πλεόνασμα αυτό να ανταλλάσσεται (trade off) κατά την αντιστροφή και να μεταφέρεται στον παράγοντα ενίσχυσης των τοπικών συνθηκών στην εξεταζόμενη θέση του σταθμού και να τον μεγενθύνει. Αντιθέτως, στις χαμηλές συχνότητες  $f < 2 \text{ Hz}$  υπάρχει μεγαλύτερη δυσκολία στην κατανόηση και την ερμηνεία της διακύμανσης του λόγου των ενισχύσεων (οριζόντιων και κατακόρυφων) και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.



Σχήμα 4.2-13: Μεταβολή του λόγου της κατακόρυφης ενίσχυσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα, όπως υπολογίστηκε από την αντιστροφή για τα δύο δείγματα ( $R_{hygro} \leq 200 \text{ km}$  και  $R_{hygro} \leq 300 \text{ km}$ ).

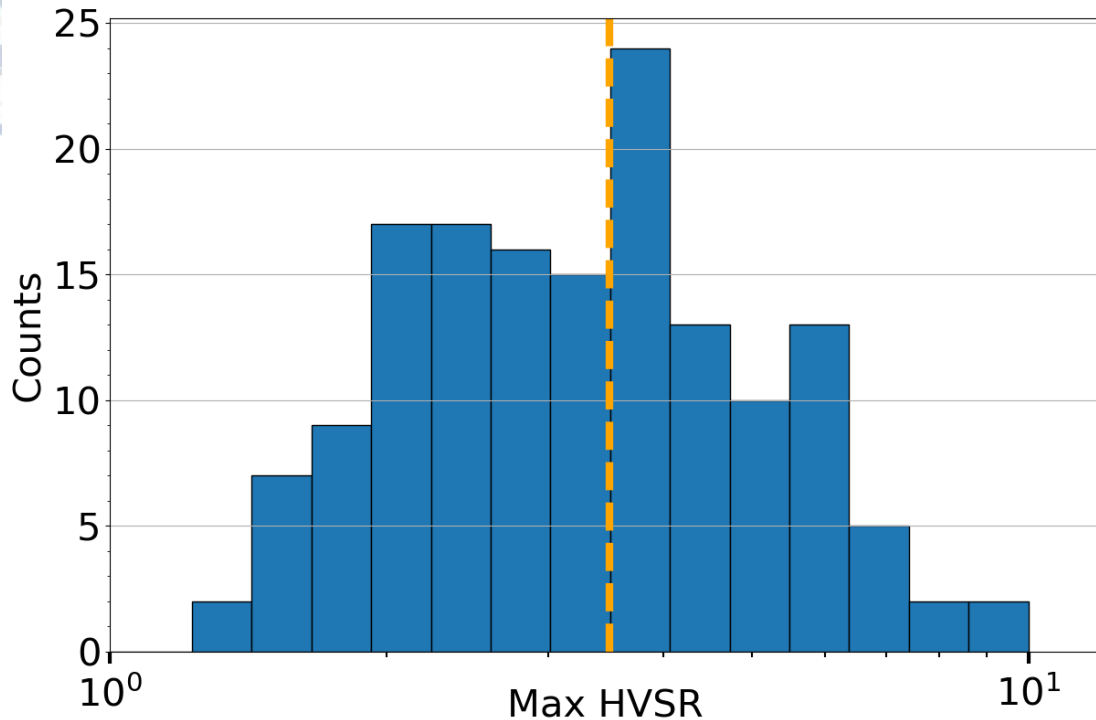
### 4.3 Υπολογισμός της συνάρτησης διόρθωσης του κατακόρυφου παράγοντα ενίσχυσης για τον ελληνικό χώρο

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται ο υπολογισμός της συνάρτησης διόρθωσης (**VACF**) η οποία προκύπτει, από τις σχέσεις (2-7) και (2-8) ως ο

γεωμετρικός μέσος όρος, του λόγου του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (HSAF), υπολογισμένου από την αντιστροφή και του φασματικού λόγου eHVSR. Η προσέγγιση αυτή πραγματοποιείται για δύο περιπτώσεις, είτε συμπεριλαμβάνοντας στο μέσο όρο το φασματικό λόγο eHVSR όλων των σταθμών, υπολογίζοντας έτσι μία μέση καμπύλη διόρθωσης για όλο το δείγμα, είτε ταξινομώντας αυτούς σε διάφορες κατηγορίες, υπολογίζοντας μία μέση καμπύλη διόρθωσης, για κάθε κατηγορία ξεχωριστά. Στο Παράρτημα [B.3](#) παρουσιάζονται, η μέση καθώς και οι κατηγοριοποιημένες καμπύλες διόρθωσης που υπολογίζονται στην παρούσα εργασία. Το δείγμα που υιοθετήθηκε για περαιτέρω υπολογισμούς αφορά, υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hyro} \leq 300km$ .

#### 4.3.1 Κατηγοριοποίηση των σταθμών με βάση τη δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα και το μέγιστο πλάτος της καμπύλης HVSR

Σύμφωνα με τη δεύτερη περίπτωση, ταξινομούνται αρχικά οι σταθμοί ανάλογα με το μέγιστο πλάτος και τη δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα των καμπυλών eHVSR και στη συνέχεια υπολογίζονται οι μέσες καμπύλες διόρθωσης, για κάθε κατηγορία. Όσον αφορά, το μέγιστο πλάτος των καμπυλών, σχεδιάζεται το ιστόγραμμα αυτού (Σχήμα [4.3-1](#)) και με βάση το σχήμα αυτό, επιλέγεται η τιμή **3.5** (πορτοκαλί κατακόρυφη γραμμή) ως το κατώφλι με βάση το οποίο, χωρίζονται οι κατηγορίες στην ταξινόμηση.



Σχήμα 4.3-1: Ιστόγραμμα κατανομής του μέγιστου πλάτους των καμπυλών eHVSΡ όλων των σταθμών που χρησιμοποιούνται στην αντιστροφή. Η κατακόρυφη γραμμή απεικονίζει την τιμή του πλάτους (3.5), που επιλέγεται για την κατηγοριοποίηση των σταθμών.

Έτσι, οι κατηγορίες που προτάθηκαν από την κατηγοριοποίηση των σταθμών, είναι οι εξής:

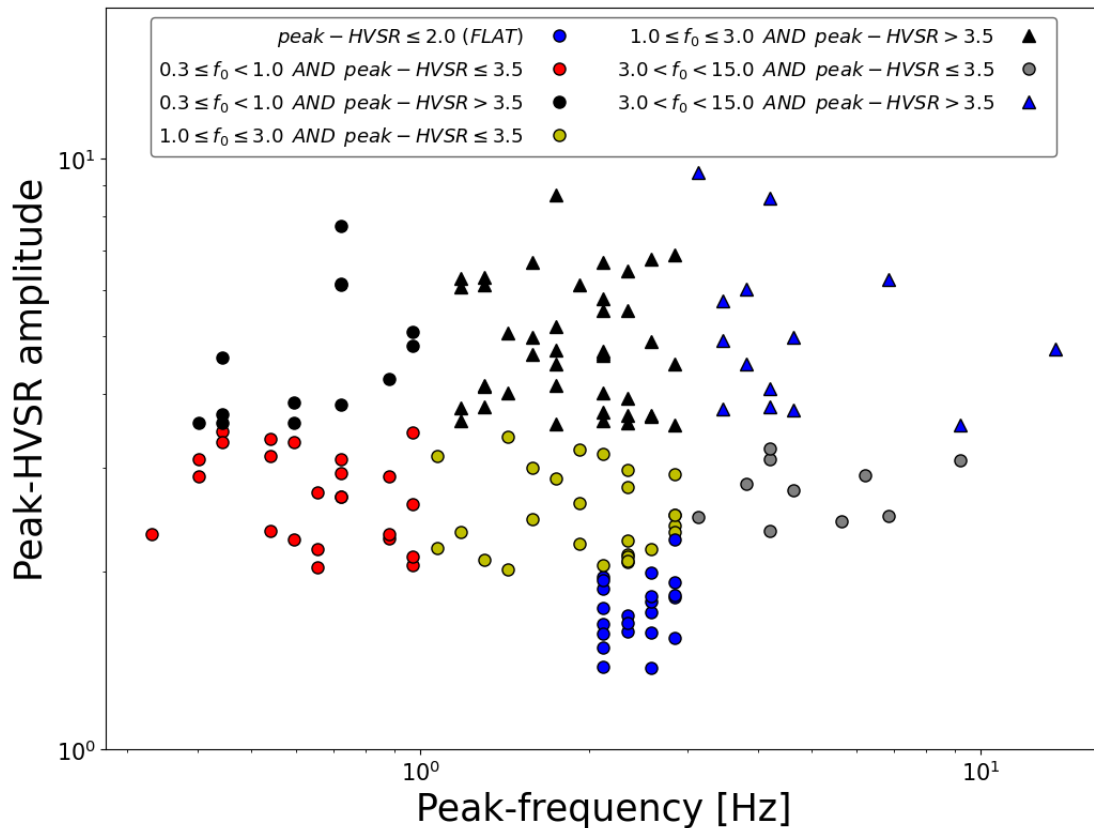
- Κατηγορία 1:
  - Επίπεδο (*flat*) πλάτος καμπύλης eHVSΡ, με μέγιστο πλάτος (peak amplitude)  $\leq 2.0$
- Κατηγορία 2:
  - υπο κατηγορία 2-1:
    - Τιμές ιδιοσυχνότητας,  $0.3\text{Hz} \leq f_0 < 1.0\text{Hz}$  και μέγιστο πλάτος καμπύλης eHVSΡ (peak amplitude)  $\leq 3.5$
  - υπο κατηγορία 2-2:
    - Τιμές ιδιοσυχνότητας,  $0.3\text{Hz} \leq f_0 < 1.0\text{Hz}$  και μέγιστο πλάτος καμπύλης eHVSΡ (peak amplitude)  $> 3.5$
- Κατηγορία 3:
  - υπο κατηγορία 3-1:



- Τιμές ιδιοσυχνότητας,  $1.0\text{Hz} \leq f_0 \leq 3.0\text{Hz}$  και μέγιστο πλάτος καμπύλης eHVSR (peak amplitude)  $\leq 3.5$
  - υπο κατηγορία 3-2:
    - Τιμές ιδιοσυχνότητας,  $1.0\text{Hz} \leq f_0 \leq 3.0\text{Hz}$  και μέγιστο πλάτος καμπύλης eHVSR (peak amplitude)  $> 3.5$
- Κατηγορία 4:
  - υπο κατηγορία 4-1:
    - Τιμές ιδιοσυχνότητας,  $3.0\text{Hz} < f_0 < 15.0\text{Hz}$  και μέγιστο πλάτος καμπύλης eHVSR (peak amplitude)  $\leq 3.5$
  - υπο κατηγορία 4-2:
    - Τιμές ιδιοσυχνότητας,  $3.0\text{Hz} < f_0 < 15.0\text{Hz}$  και μέγιστο πλάτος καμπύλης eHVSR (peak amplitude)  $> 3.5$

Συνολικά, προέκυψαν 7 υπο κατηγορίες χρησιμοποιώντας ως κριτήρια κατάταξης το μέγιστο πλάτος και την δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα κάθε καμπύλης eHVSR. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται μία συνάρτηση διόρθωσης για κάθε μία κατηγορία, ξεχωριστά.





Σχήμα 4.3-2: Απεικόνιση της δεσπόζουσας ιδιοσυχνότητας (dominant frequency) και του μέγιστου πλάτους (Peak-HVSR amplitude) της καμπύλης eHVSR για κάθε σταθμό. Τα διαφορετικά χρώματα και σχήματα απεικονίζουν τις διαφορετικές κατηγορίες που προκύπτουν.

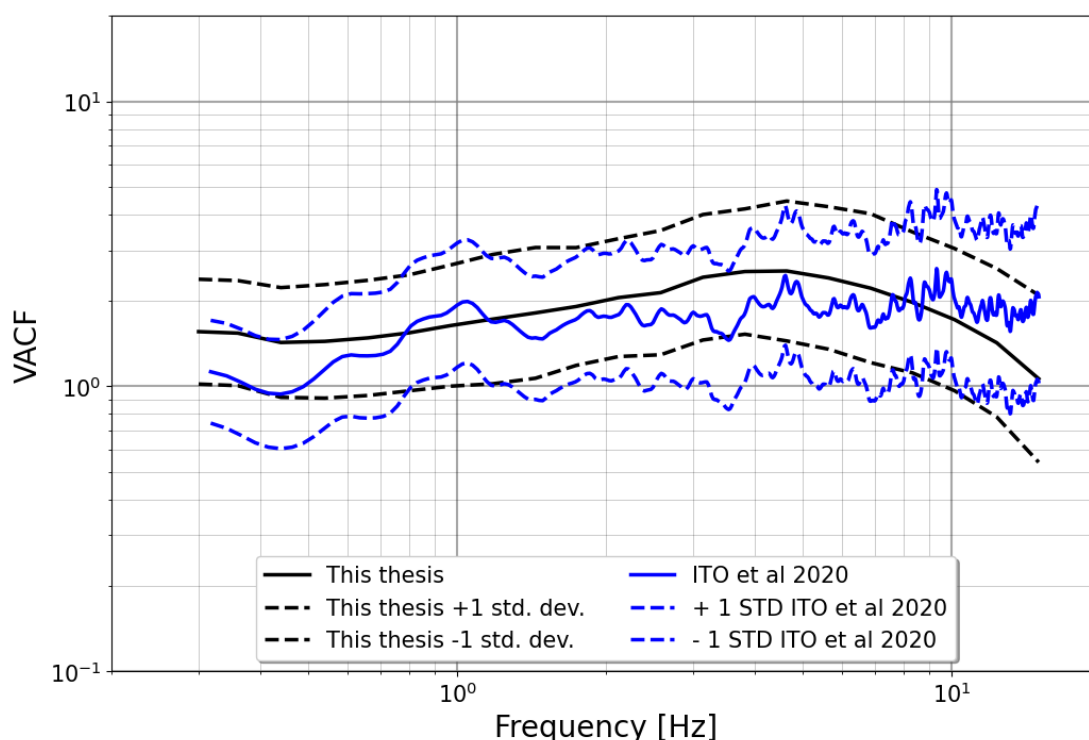
Στο Σχήμα 4.3-2 απεικονίζονται, για κάθε σταθμό, η μέγιστη τιμή του πλάτους και η αντίστοιχη δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα της καμπύλης eHVSR. Ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει αυτός, απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα και σχήμα στο διάγραμμα. Έτσι, διακρίνονται οι επτά (7) διαφορετικές ομάδες που προκύπτουν καθώς και τα όρια αυτών.

#### 4.3.2 Υπολογισμός της μέσης συνάρτησης διόρθωσης

Η μέση καμπύλη της εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης (VACF) με τη χρήση όλων των σταθμών καθώς και το σφάλμα αυτής απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3-3. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται η αντίστοιχη καμπύλη που υπολογίστηκε στην εργασία Ito et al. (2020) για τον ιαπωνικό χώρο. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, γίνεται εμφανής η ομαλότητα της καμπύλης VACF του ελληνικού χώρου, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση καμπύλη για τον ιαπωνικό χώρο. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για

διάφορους λόγους, μεταξύ των οποίων η χρήση του γεωμετρικού μέσου όρου για την εξαγωγή των μέσων καμπυλών eHVSr ή η ομαλότητα που παρουσιάζουν οι καμπύλες της οριζόντιας ενίσχυσης οι οποίες προκύπτουν από την αντιστροφή και συμμετέχουν στον υπολογισμό των VACFs.

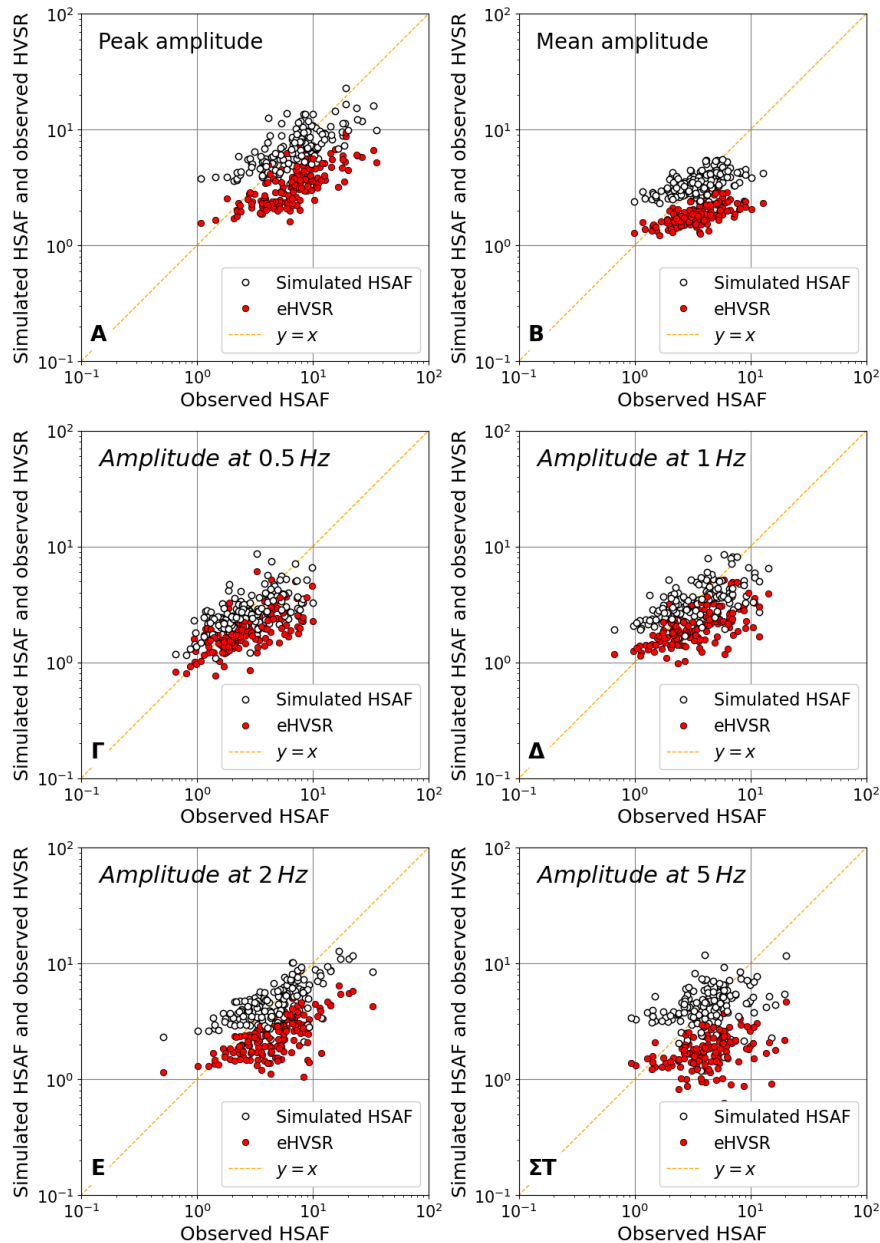
Λαμβάνοντας υπόψη τη μέση εμπειρική συνάρτηση των VACFs για τον ελληνικό χώρο, διαπιστώνεται ότι αυτή παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες για τον ιαπωνικό χώρο, στις χαμηλές συχνότητες ( $0.3\text{Hz} - 0.8\text{Hz}$ ) και στις ενδιάμεσες συχνότητες ( $2.0\text{Hz} - 5.0\text{Hz}$ ), ενώ αντίθετα στις υψηλές συχνότητες ( $9.0\text{Hz} - 15.0\text{Hz}$ ) παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, προκύπτει ότι παρά τις προαναφερθείσες διαφορές οι εμπειρικές VACFs των δύο περιοχών παρουσιάζουν συνολική ικανοποιητική ομοιότητα ως μορφή και επιπλέον ο μέσος όρος κάθε μιας κινείται εντός της ζώνης  $\pm 1$  τυπικής απόκλισης της άλλης.



Σχήμα 4.3-3: Μεταβολή, της υπολογισμένης εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης VACF (μαύρη γραμμή) χρησιμοποιώντας όλους τους σταθμούς του ελληνικού χώρου  $\pm 1$  τυπικής απόκλισης (διακεκομμένες μαύρες γραμμές) για το δείγμα των  $R_{hγρο} \leq 300\text{km}$ . Με μπλε χρώμα δίνεται η αντίστοιχη καμπύλη που υπολογίστηκε για τον ιαπωνικό χώρο (Ito et al., 2020).

Στο Σχήμα 4.3-4 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του φασματικού λόγου eHVSr με την οριζόντια ενίσχυση που προκύπτει από την αντιστροφή (κόκκινοι

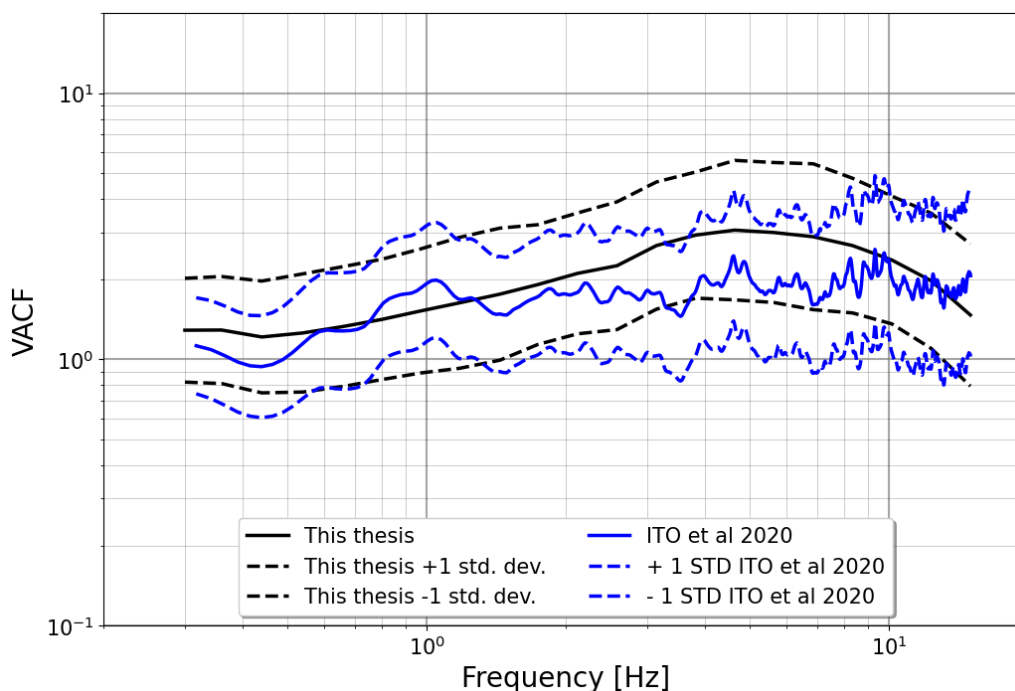
κύκλοι). Στο ίδιο σχήμα, συγκρίνεται ο διορθωμένος λόγος eHVSR, αφού δηλαδή, αφαιρεθεί η κατακόρυφη ενίσχυση χρησιμοποιώντας την συνάρτηση διόρθωσης (διορθωμένη καμπύλη), με την οριζόντια ενίσχυση από την αντιστροφή (λευκοί κύκλοι). Η σχέση μεταξύ τους προκύπτει, είτε συγκρίνοντας τις μέγιστες τιμές αυτών (*max amplitude*, σχήμα A), είτε τις μέσες τιμές αυτών (*mean amplitude*, σχήμα B) είτε για συχνότητες 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 5Hz (σχήματα Γ, Δ, Ε, ΣΤ).



Σχήμα 4.3-4: Σύγκριση του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (*Observed HSAF*, άξονας τετμημένων) που προκύπτει από την αντιστροφή, με την αντίστοιχη διορθωμένη καμπύλη (*Simulated HSAF*,  $HSAF = HVSR \cdot VACF$ , λευκοί κύκλοι). Στο ίδιο σχήμα συγκρίνεται, η οριζόντια ενίσχυση από την αντιστροφή με το φασματικό λόγο eHVSR (κόκκινοι κύκλοι). Στα σχήματα (A) & (B) δίνονται οι μέγιστες και οι μέσες τιμές του πλάτους των παραγόντων ενίσχυσης προς σύγκριση, αντίστοιχα. Στα υπόλοιπα σχήματα (Γ, Δ, Ε, ΣΤ) παρουσιάζονται οι τιμές του πλάτους για συγκεκριμένες συχνότητες (0.5 Hz, 1 Hz, 2Hz, 5 Hz).

Από το σχήμα αυτό, προκύπτει ότι η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση που υπολογίζεται από την αντιστροφή, παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με την διορθωμένη ενίσχυση χρησιμοποιώντας την εμπειρική συνάρτηση διόρθωσης (λευκοί κύκλοι), σε σχέση με τον παρατηρημένο λόγο eHVSR (κόκκινοι κύκλοι). Έτσι, καθίσταται εμφανής η ανάγκη διόρθωσης του τελευταίου, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί ρεαλιστικά ο παράγοντας οριζόντιας ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης στην εξεταζόμενη θέση.

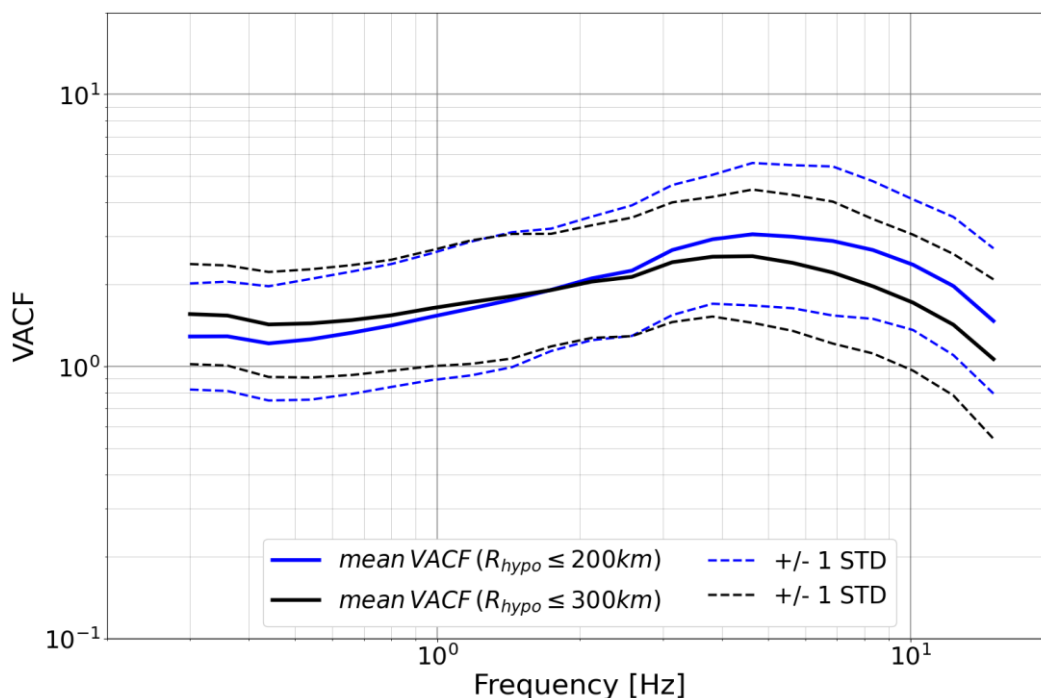
Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.3-5 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μέση καμπύλη διόρθωσης για το δείγμα των  $R_{hypo} \leq 200km$  (μαύρη γραμμή). Στο ίδιο σχήμα, σχεδιάζεται η μέση καμπύλη διόρθωσης του ιαπωνικού χώρου (μπλε γραμμή), καθώς και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών (διακεκομμένες γραμμές). Συγκρίνοντας τις μέσες συναρτήσεις διόρθωσης των δύο δειγμάτων, παρατηρείται ότι παρόλο που υπάρχουν διαφορές στα πλάτη των δύο καμπυλών, το σχήμα τους δεν διαφέρει στο εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 4.3-5: Μεταβολή, της υπολογισμένης εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης VACF (μαύρη γραμμή) χρησιμοποιώντας όλους τους σταθμούς του ελληνικού χώρου  $\pm 1$  τυπικής απόκλισης (διακεκομμένες μαύρες γραμμές) για το δείγμα των  $R_{hypo} \leq 200km$ . Με μπλε χρώμα δίνεται η αντίστοιχη καμπύλη που υπολογίστηκε για τον ιαπωνικό χώρο (Ito et al., 2020).

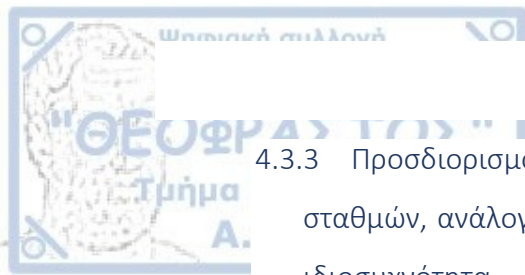
Προκειμένου να είναι εμφανής η σύγκριση μεταξύ των παραγόντων διόρθωσης

VACF που προκύπτουν από τα δύο διαφορετικά δείγματα δεδομένων, δίνεται το Σχήμα 4.3-6, το οποίο περιέχει τις μέσες καμπύλες διόρθωσης των δύο αυτών δειγμάτων καθώς και τις τυπικές αποκλίσεις αυτών. Παρατηρείται, ότι η καμπύλη των  $R_{hypo} \leq 200km$ , εμφανίζει μεγαλύτερα πλάτη της συνάρτησης διόρθωσης στις υψηλότερες συχνότητες ( $f > 2Hz$ ), σε αντίθεση με την καμπύλη των  $R_{hypo} \leq 300km$  η οποία δίνει μεγαλύτερα πλάτη στις χαμηλότερες συχνότητες ( $f < 2Hz$ ).



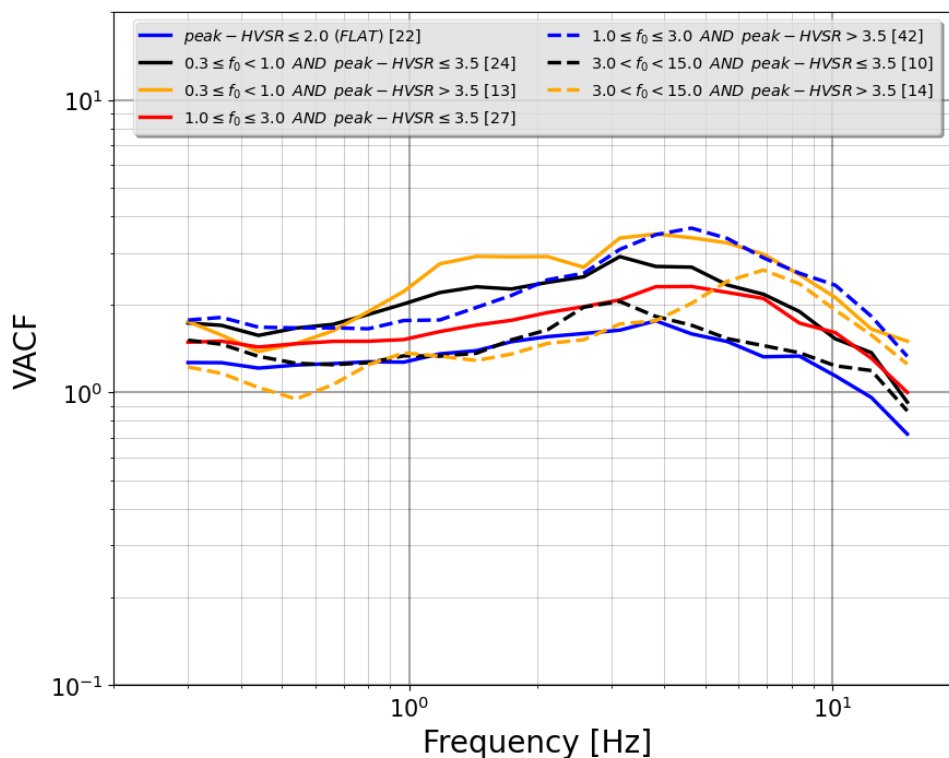
Σχήμα 4.3-6: Σύγκριση των μέσων καμπυλών διόρθωσης (VACFs) του δείγματος των  $R_{hypo} \leq 200km$  (μπλε καμπύλη) και των  $R_{hypo} \leq 300km$  (μαύρη γραμμή). Οι διακεκομμένες γραμμές εκφράζουν τις τυπικές αποκλίσεις αυτών.

Η διαφορά στα πλάτη των καμπυλών, οφείλεται στη διακύμανση των τιμών του λόγου των οριζόντιων και των κατακόρυφων ενισχύσεων της σεισμικής κίνησης για τα δύο δείγματα, σε χαμηλότερες και υψηλότερες συχνότητες από την συχνότητα  $f \approx 2Hz$  (βλέπε Σχήμα 4.2-12). Μετά τη συχνότητα αυτή, η ενίσχυση της σεισμικής κίνησης στην οριζόντια διεύθυνση για το δείγμα των  $R_{hypo} \leq 200km$ , είναι μεγαλύτερη και κατά συνέπεια οδηγεί σε καμπύλες διόρθωσης με μεγαλύτερα πλάτη ( $VACF = HSAF/eHVSF$ ). Το αντίθετο παρατηρείται σε συχνότητες  $f < 2Hz$ , όπου οι καμπύλες διόρθωσης για το δείγμα των  $R_{hypo} \leq 200km$  δίνουν μικρότερα πλάτη.



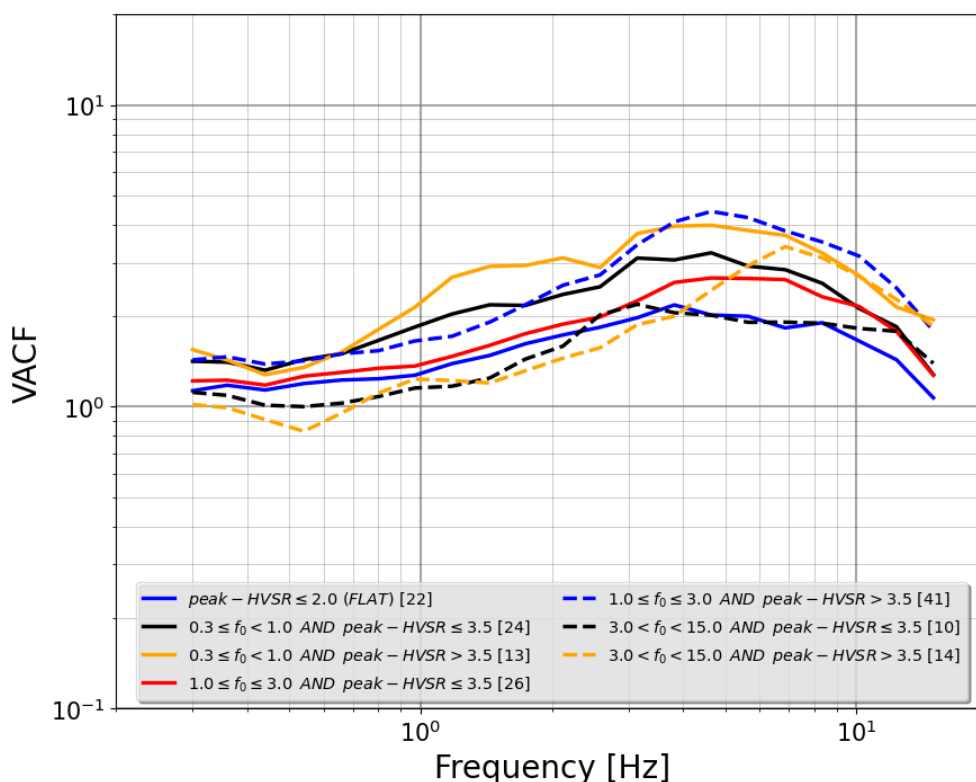
#### 4.3.3 Προσδιορισμός της εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης ανά κατηγορία σταθμών, ανάλογα με το πλάτος της καμπύλης eHVSr και τη δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα

Πρόσθετα, υπολογίσθηκαν οι εμπειρικές καμπύλες της συνάρτησης διόρθωσης (VACFs) για το δείγμα των  $R_{hygro} \leq 300km$ , ανάλογα με την κάθε κατηγορία που έχει προταθεί (βλέπε Σχήμα 4.3-2) και απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3-7. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες των VACFs δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους με εξαίρεση ορισμένες που διορθώνουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις ενδιάμεσες ( $1.0Hz \leq f_0 \leq 3.0Hz$ ) και υψηλές ( $3.0Hz \leq f_0 < 7.0Hz$ ) συχνότητες. Ειδικότερα, η καμπύλη η οποία προκύπτει από σταθμούς με επίπεδες καμπύλες eHVSr, κυμαίνεται ελάχιστα επάνω από τη μονάδα (έως  $\sim 1.6$ ) για μεγάλο εύρος συχνοτήτων ( $0.3 - 12 Hz$ ) και μόνο στις πολύ υψηλές συχνότητες ( $f > 12 Hz$ ) έχει τιμές ελάχιστα μικρότερες της μονάδας (έως  $\sim 0.7$ ), με αποτέλεσμα να μην διορθώνει σε μεγάλο βαθμό τις καμπύλες του λόγου eHVSr.



Σχήμα 4.3-7: Καμπύλες της εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης για επτά κατηγορίες σταθμών με βάση τη μέγιστη τιμή του πλάτους και την δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα κάθε καμπύλης eHVSr, για το δείγμα των  $R_{hygro} \leq 300km$ . Ο αριθμός των σταθμών που χρησιμοποιούνται σε κάθε κατηγορία δίνεται μέσα στις αγκύλες.

Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στο Σχήμα 4.3-8, το οποίο απεικονίζει τις εμπειρικές καμπύλες της συνάρτησης διόρθωσης VACFs για το δείγμα των  $R_{hyro} \leq 200km$ , για κάθε κατηγορία που έχει δημιουργηθεί. Όπως και στην μέση καμπύλη διόρθωσης, οι κατηγοριοποιημένες καμπύλες του δείγματος των  $R_{hyro} \leq 200km$  περιλαμβάνουν μεγαλύτερα πλάτη στις υψηλές συχνότητες ( $f > 2Hz$ ) σε σχέση με αυτές του δείγματος των  $R_{hyro} \leq 300km$ , ενώ το αντίθετο παρατηρείται σε μικρές συχνότητες ( $f < 2Hz$ ).



Σχήμα 4.3-8: Καμπύλες της εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης για επτά κατηγορίες σταθμών με βάση τη μέγιστη τιμή του πλάτους και την δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα κάθε καμπύλης eHVSr, για το δείγμα των  $R_{hyro} \leq 200km$ . Ο αριθμός των σταθμών που χρησιμοποιούνται σε κάθε κατηγορία δίνεται μέσα στις αγκύλες.

**Από το σημείο αυτό, οι υπολογισμοί θα γίνονται με βάση το δείγμα των  $R_{hyro} \leq 300km$ . Δηλαδή, η εκτίμηση της διορθωμένης ενίσχυσης καθώς και η επαλήθευση των αποτελεσμάτων σε μετέπειτα στάδιο, θα πραγματοποιηθούν λαμβάνοντας υπόψη την μέση και την κατηγοριοποιημένη συνάρτηση διόρθωσης του δείγματος με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hyro} \leq 300km$ .**

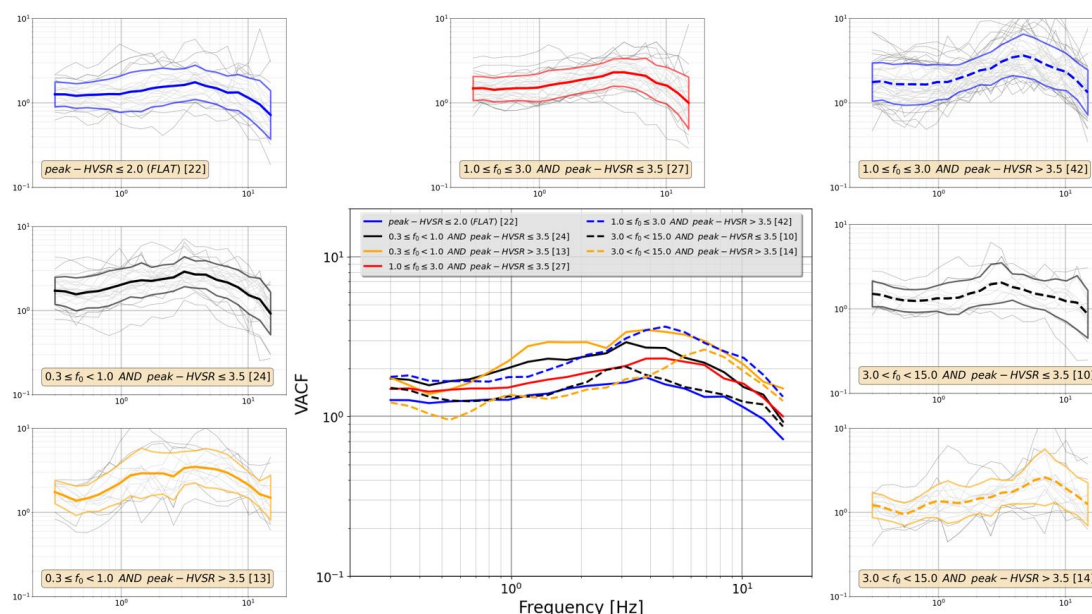
Στον Πίνακα 4.3.1 παρουσιάζονται, ο συνολικός αριθμός των σταθμών, το μέσο

μέγιστο πλάτος καθώς και η μέση δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα των καμπυλών eHVSF για κάθε κατηγορία του δείγματος των  $R_{hygro} \leq 300km$ , στην οποία εντάχθηκαν οι θέσεις των σταθμών επιταχυνσιογράφων.

Πίνακας 4.3-1: Χαρακτηριστικά των εμπειρικών καμπυλών διόρθωσης (VACFs) ανά κατηγορία για το δείγμα των  $R_{hygro} \leq 300km$

Εύρος ιδιοσυχνότητας καμπυλών HVSR	Εύρος μέγιστου πλάτους καμπυλών HVSR	Συνολικός αριθμός σταθμών	Μέση ιδιοσυχνότητα καμπυλών HVSR	Μέσο μέγιστο πλάτος καμπυλών HVSR
-	$peak - HVSR \leq 2.0$	22	2.44	1.731
$0.3 \leq f_0 < 1.0$	$peak - HVSR \leq 3.5$	24	0.675	2.729
$0.3 \leq f_0 < 1.0$	$peak - HVSR > 3.5$	13	0.664	4.677
$1.0 \leq f_0 \leq 3.0$	$peak - HVSR \leq 3.5$	27	2.059	2.518
$1.0 \leq f_0 \leq 3.0$	$peak - HVSR > 3.5$	42	1.925	4.927
$3.0 < f_0 < 15$	$peak - HVSR \leq 3.5$	10	5.213	2.76
$3.0 < f_0 < 15$	$peak - HVSR > 3.5$	14	5.193	5.301

Στο Σχήμα 4.3-9 απεικονίζεται η καμπύλη διόρθωσης κάθε κατηγορίας, μαζί με τις μεμονωμένες καμπύλες (λόγος HSAF/eHVSF) όλων των σταθμών που ανήκουν στην αντίστοιχη κατηγορία, καθώς και τα σφάλματα αυτών για το δείγμα δεδομένων με  $R_{hygro} \leq 300km$ .



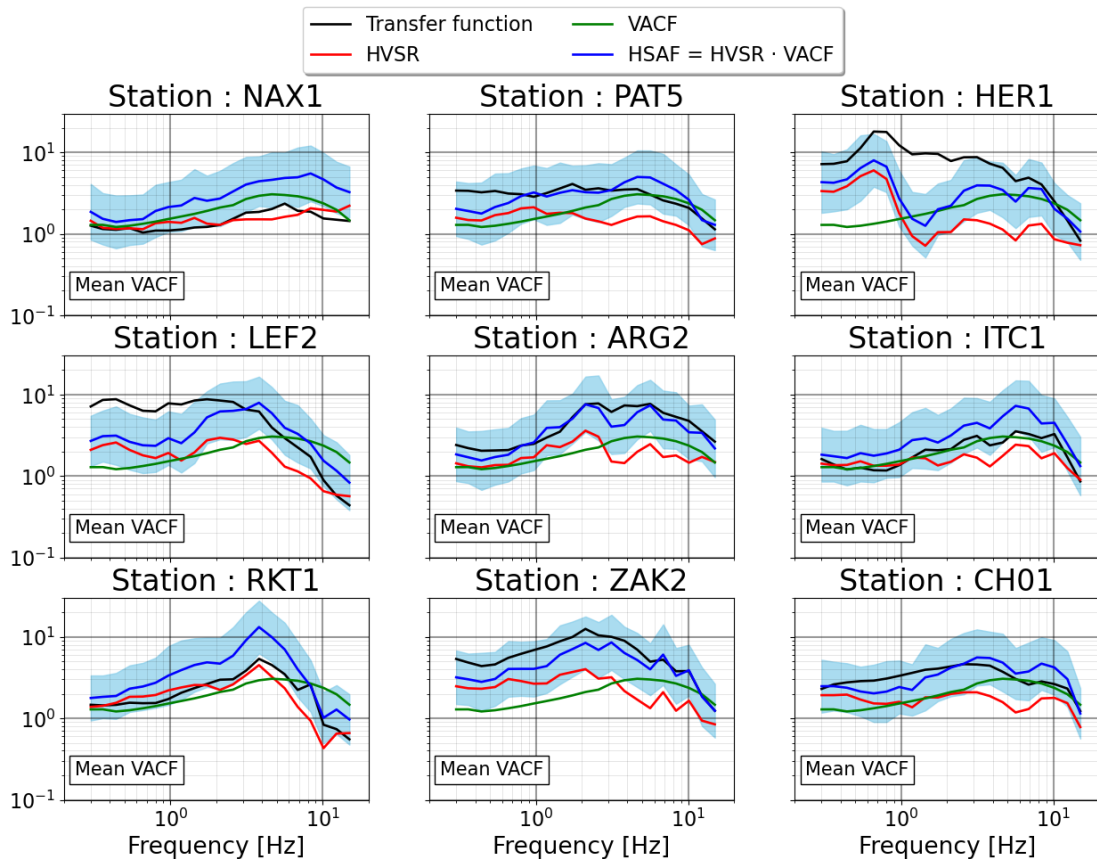
Σχήμα 4.3-9: Απεικόνιση της μέσης καμπύλης διόρθωσης κάθε κατηγορίας, μαζί με τις μεμονωμένες καμπύλες (γκρι γραμμές) που προκύπτουν από τον λόγο HSAF/eHVSF κάθε σταθμού στην αντίστοιχη κατηγορία, για το δείγμα των  $R_{hygro} \leq 300km$ . Οι καμπύλες πάνω και κάτω από τις μέσες εμπειρικές συναρτήσεις διόρθωσης, εκφράζουν την  $\pm 1$  τυπική απόκλιση αυτών.



#### 4.3.4 Εκτίμηση του παράγοντα οριζόντιας ενίσχυσης (HSAF) με χρήση των εμπειρικών συναρτήσεων διόρθωσης (VACFs)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εκτίμηση του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (HSAF), λαμβάνοντας υπόψη τις εμπειρικές συναρτήσεις διόρθωσης, VACFs του ελληνικού χώρου, για το δείγμα των  $R_{\mu\gamma\rho} \leq 300\text{km}$ . Η εκτίμηση αυτή προκύπτει ως το γινόμενο του φασματικού λόγου eHVSR για το συγκεκριμένο σταθμό και της αντίστοιχης συνάρτησης διόρθωσης (VACF). Οι σταθμοί στους οποίους εκτιμάται η ενίσχυση στην συγκεκριμένη ενότητα, προέρχονται από το δείγμα που πληροί τα κριτήρια της αντιστροφής (4.1.1-Κριτήρια επιλογής δεδομένων) και τα δεδομένα των οποίων έχουν χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των εμπειρικών συναρτήσεων διόρθωσης. Έτσι, ο οριζόντιος παράγοντας ενίσχυσης υπολογίζεται για δύο περιπτώσεις. Αρχικά, χρησιμοποιείται η μέση συνάρτηση διόρθωσης του συνόλου των σταθμών του ελληνικού χώρου και σε επόμενο στάδιο οι αντίστοιχες μέσες συναρτήσεις διόρθωσης των επτά (7) κατηγοριών, ανάλογα με το μέγιστο πλάτος και την δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα των λόγων eHVSRs.

Στο Σχήμα 4.3-10 παρουσιάζεται η πρώτη περίπτωση, δηλαδή υπολογίζεται η οριζόντια φασματική ενίσχυση, χρησιμοποιώντας τη μέση καμπύλη διόρθωσης. Η εκτίμηση αυτή εφαρμόζεται ως παράδειγμα, για τους σταθμούς *NAX1*, *PAT5*, *HER1*, *LEF2*, *ARG2*, *ITC1*, *RKT1*, *ZAK2*, *CH01*. Στο σχήμα αυτό δίνεται με κόκκινη γραμμή ο μέσος φασματικός λόγος eHVSR για κάθε σταθμό, με πράσινη η μέση συνάρτηση διόρθωσης (VACF) και με μπλε η οριζόντια ενίσχυση HSAF που προκύπτει από το γινόμενο του λόγου eHVSR με τη συνάρτηση VACF (προσομοίωση της οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης).

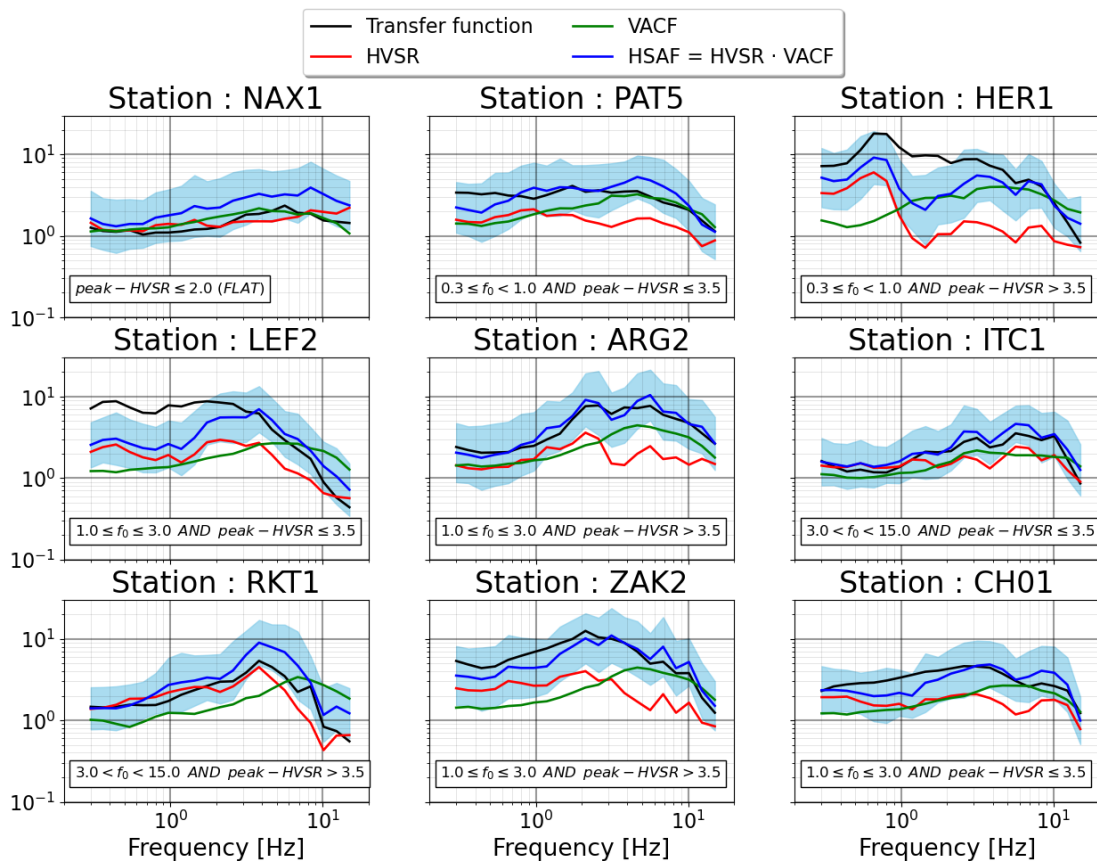


Σχήμα 4.3-10: Παράδειγμα, υπολογισμού της διορθωμένης καμπύλης του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (μπλε γραμμή) χρησιμοποιώντας την μέση συνάρτηση διόρθωσης VACF (Σχήμα 4.3-3), για τους σταθμούς NAX1, PAT5, HER1, LEF2, ARG2, ITC1, RKT1, ZAK2, CH01. Στο ίδιο σχήμα δίνεται η μέση συνάρτηση διόρθωσης (πράσινη γραμμή), ο μέσος φασματικός λόγος eHVSr (κόκκινη γραμμή) και η οριζόντια φασματική ενίσχυση που εξάγεται από την αντιστροφή των δεδομένων (μαύρη γραμμή).

Παράλληλα, στο ίδιο σχήμα σχεδιάζεται η αντίστοιχη φασματική ενίσχυση της οριζόντιας κίνησης (μαύρη γραμμή) που εκτιμήθηκε από την αντιστροφή. Είναι φανερό ότι η προσομοίωση της οριζόντιας ενίσχυσης (μπλε γραμμή) είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με την οριζόντια φασματική ενίσχυση που προέκυψε από την αντιστροφή (μαύρη γραμμή) για την πλειονότητα των επιλεγμένων σταθμών με την τελευταία να βρίσκεται κοντά ή μέσα στη ζώνη της  $\pm 1$  τυπικής απόκλισης της προσομοιωμένης οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης. Σημαντική εξαίρεση αποτελούν οι σταθμοί HER1 (Ηράκλειο) και LEF2 (Λευκάδα) οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε λεκάνη πρόσφατων γεωλογικών αποθέσεων όπου φαινόμενα 2D/3D επίδρασης των εδαφικών συνθηκών δεν μπορούν να αποκλειστούν. Δεδομένου ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση του παράγοντα διόρθωσης της κατακόρυφης σεισμικής κίνησης (VACF) βασίζεται στην υπόθεση της μονοδιάστατης (1D) διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, δικαιολογείται η παρατηρημένη μη

ικανοποιητική συμφωνία. Προφανώς, απαιτείται παραπέρα έρευνα για βελτίωση των VACFs σε τέτοια περιβάλλοντα που δεν ικανοποιούν τη συνθήκη της μονοδιάστατης (1D) σεισμικής απόκρισης.

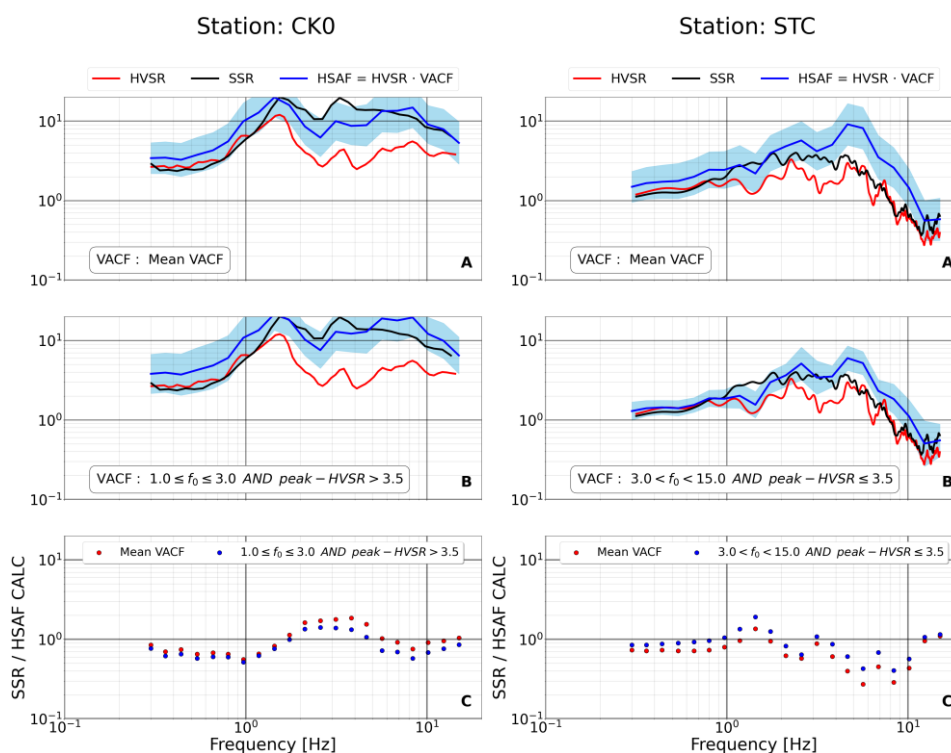
Επιπλέον στην δεύτερη περίπτωση εξετάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης αφού γίνει χρήση των κατηγοριοποιημένων καμπυλών διόρθωσης (Σχήμα 4.3-11). Όπως είναι φανερό, στην περίπτωση αυτή, η καμπύλη VACF δεν είναι ίδια για όλους τους σταθμούς καθώς ο καθένας ανήκει σε διαφορετική κατηγορία, η οποία φαίνεται στον υπόμνημα των σχημάτων. Παρατηρείται η βελτίωση εκτίμησης της οριζόντιας ενίσχυσης, αφού προηγηθεί ορθά η κατηγοριοποίηση των εξεταζόμενων σταθμών. Ωστόσο, και στην περίπτωση αυτή η σύγκριση για τους σταθμούς HER1 και LEF2 παραμένει μη ικανοποιητική για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 4.3-11: Παράδειγμα, υπολογισμού της διορθωμένης καμπύλης του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης (μπλε γραμμή) χρησιμοποιώντας την κατηγοριοποιημένη συνάρτηση διόρθωσης (Σχήμα 4.3-7), για τους σταθμούς NAX1, PAT5, HER1, LEF2, ARG2, ITC1, RKT1, ZAK2, CH01. Στο ίδιο σχήμα δίνεται η συνάρτηση διόρθωσης (πράσινη γραμμή), ο μέσος φασματικός λόγος eHVSr (κόκκινη γραμμή) και η οριζόντια φασματική ενίσχυση που εξάγεται από την αντιστροφή των δεδομένων (μαύρη γραμμή).

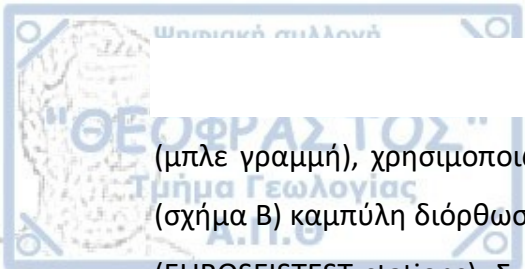
#### 4.3.5 Εκτίμηση του οριζόντιου παράγοντα ενίσχυσης σε σταθμούς που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην αντιστροφή

Η τελευταία ενότητα της εργασίας αποσκοπεί στην επαλήθευση των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής και συγκεκριμένα στη δυνατότητα προσομοίωσης της οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης σε θέσεις για τις οποίες έχει υπολογιστεί ο μέσος φασματικός λόγος eHVSF μόνο από καταγραφές σεισμών. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η φασματική ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής κίνησης σε θέσεις σταθμών του ελληνικού χώρου οι οποίοι δεν χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα της αντιστροφής και συγκρίνεται με τον παράγοντα της οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης που έχει υπολογιστεί με ανεξάρτητη μέθοδο (π.χ. του κλασικού φασματικού λόγου SSR), ώστε να γίνει ο έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων (βλέπε Παράρτημα A.2).

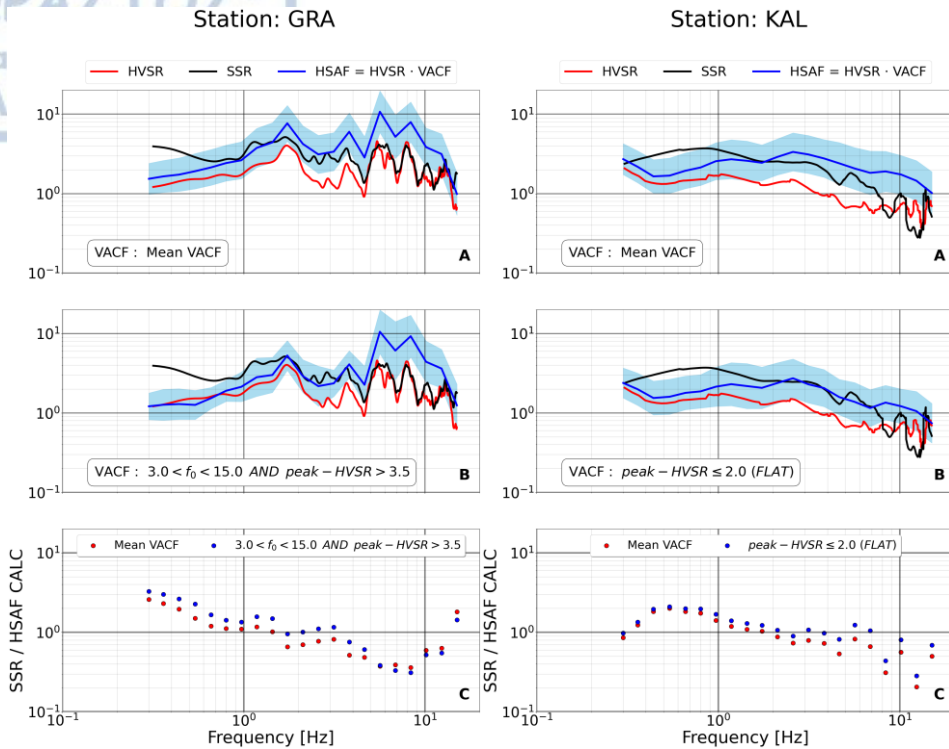


Σχήμα 4.3-12: Σύγκριση της διορθωμένης καμπύλης ενίσχυσης χρησιμοποιώντας την μέση και την ταξινομημένη συνάρτηση διόρθωσης (μπλε γραμμή  $\pm 1$  τυπική απόκλιση, A, B αντίστοιχα) με τον κλασικό φασματικό λόγο SSR (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς CKO (αριστερά) και STC (δεξιά). Στο σχήμα C, απεικονίζεται ο λόγος φασματικής ενίσχυσης του SSR με τη διορθωμένη οριζόντια φασματική ενίσχυση, σε συνάρτηση με την συχνότητα (κόκκινοι κύκλοι: διόρθωση με μέση συνάρτηση διόρθωσης, μπλε κύκλοι: διόρθωση με κατηγοριοποιημένη συνάρτηση διόρθωσης).

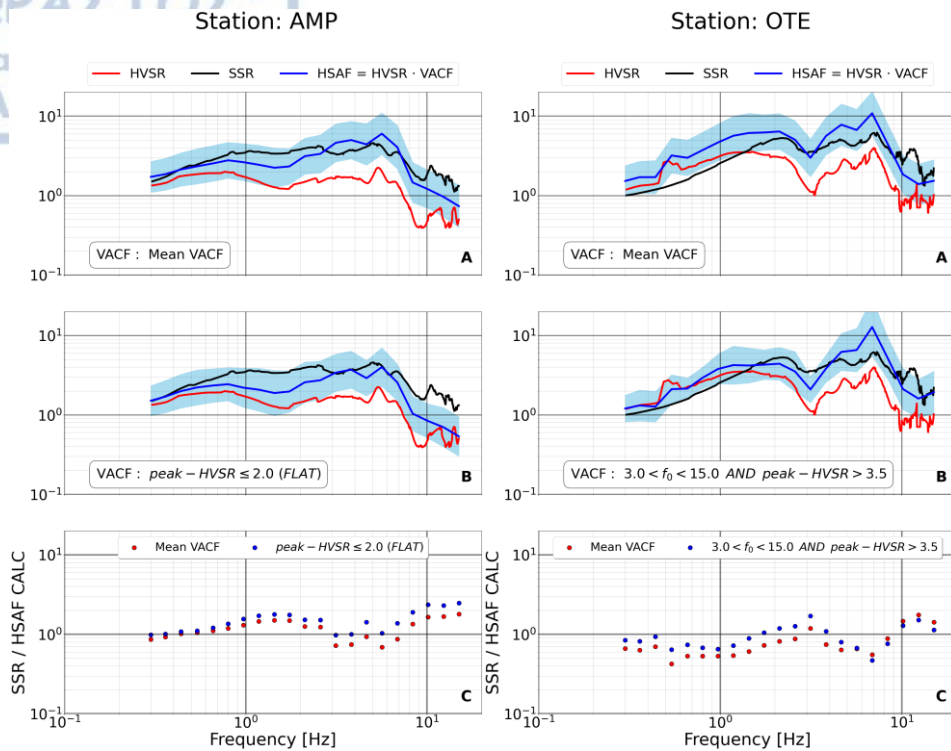
Στο Σχήμα 4.3-12, απεικονίζεται ο διορθωμένος παράγοντας φασματικής ενίσχυσης



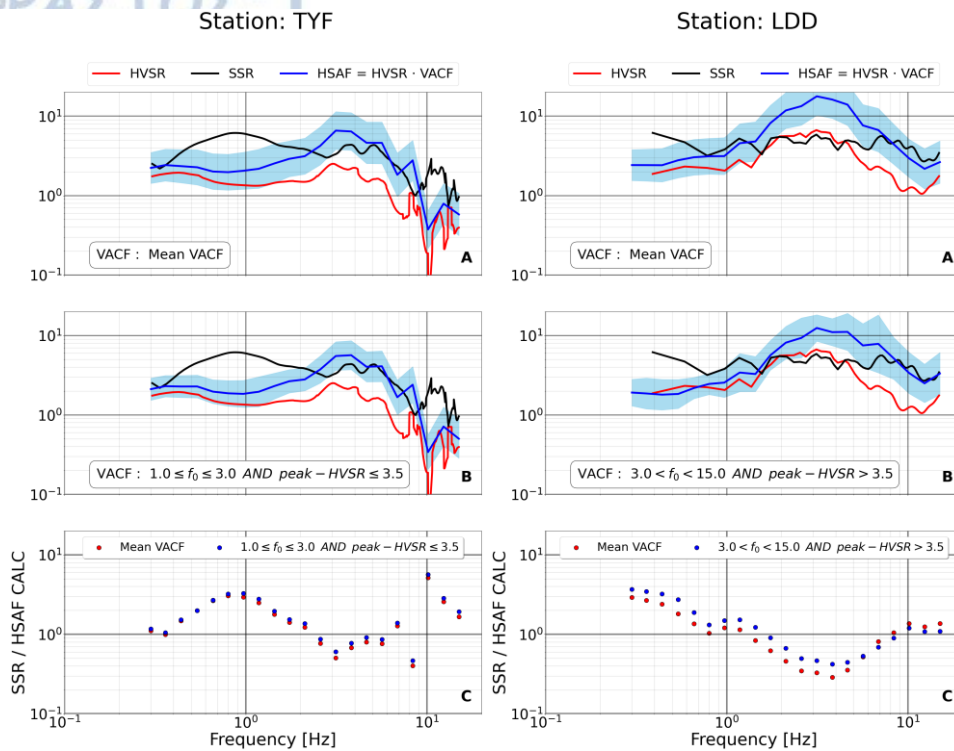
(μπλε γραμμή), χρησιμοποιώντας την μέση (σχήμα A) και την κατηγοριοποιημένη (σχήμα B) καμπύλη διόρθωσης του ελληνικού χώρου για τους σταθμούς CK0 και STC (EUROSEISTEST stations). Στο ίδιο σχήμα σχεδιάζεται ο παράγοντας ενίσχυσης του κλασσικού φασματικού λόγου SSR (μαύρη γραμμή) των σταθμών καθώς και ο αντίστοιχος φασματικός λόγος eHVSR (κόκκινη γραμμή) (Raptakis et al., 1998). Στο σχήμα C παρουσιάζεται για τη μέση και την κατηγοριοποιημένη καμπύλη διόρθωσης του αντίστοιχου σταθμού, ο λόγος των πλατών της καμπύλης SSR προς την διορθωμένη καμπύλη οριζόντιας ενίσχυσης, σε συνάρτηση με τη συχνότητα με κόκκινα και μπλε σημεία αντίστοιχα. Συγκρίνοντας, την μπλε και την μαύρη γραμμή στους σταθμούς αυτούς, παρατηρείται ότι η διόρθωση του λόγου eHVSR χρησιμοποιώντας την κατηγοριοποιημένη καμπύλη διόρθωσης, επιφέρει ορθότερη εκτίμηση της ενίσχυσης σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Παράλληλα, στους σταθμούς GRA και KAL (Σχήμα 4.3-13) η χρήση της μέσης καμπύλης διόρθωσης, προσεγγίζει καλύτερα την ενίσχυση για συχνότητες  $< 2 \text{ Hz}$ , ενώ στους σταθμούς AMP και OTE (Σχήμα 4.3-14) σε υψηλότερες συχνότητες ( $> 5 \text{ Hz}$ ).



Σχήμα 4.3-13: Σύγκριση της διορθωμένης καμπύλης ενίσχυσης χρησιμοποιώντας την μέση και την ταξινομημένη συνάρτηση διόρθωσης (μπλε γραμμή  $\pm 1$  τυπική απόκλιση, A, B αντίστοιχα) με τον κλασικό φασματικό λόγο SSR (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς GRA (αριστερά) και KAL (δεξιά). Στο σχήμα C απεικονίζεται ο λόγος φασματικής ενίσχυσης του SSR με τη διορθωμένη οριζόντια φασματική ενίσχυση σε συνάρτηση με την συχνότητα (κόκκινοι κύκλοι: διόρθωση με μέση συνάρτηση διόρθωσης, μπλε κύκλοι: διόρθωση με κατηγοριοποιημένη συνάρτηση διόρθωσης).



Σχήμα 4.3-14: Σύγκριση της διορθωμένης καμπύλης ενίσχυσης χρησιμοποιώντας την μέση και την ταξινομημένη συνάρτηση διόρθωσης (μπλε γραμμή  $\pm 1$  τυπική απόκλιση, A, B αντίστοιχα) με τον κλασικό φασματικό λόγο SSR (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς AMP (αριστερά) και OTE (δεξιά). Στο σχήμα C απεικονίζεται ο λόγος φασματικής ενίσχυσης του SSR με τη διορθωμένη οριζόντια φασματική ενίσχυση σε συνάρτηση με την συχνότητα (κόκκινοι κύκλοι: διόρθωση με μέση συνάρτηση διόρθωσης, μπλε κύκλοι: διόρθωση με κατηγοριοποιημένη συνάρτηση διόρθωσης).

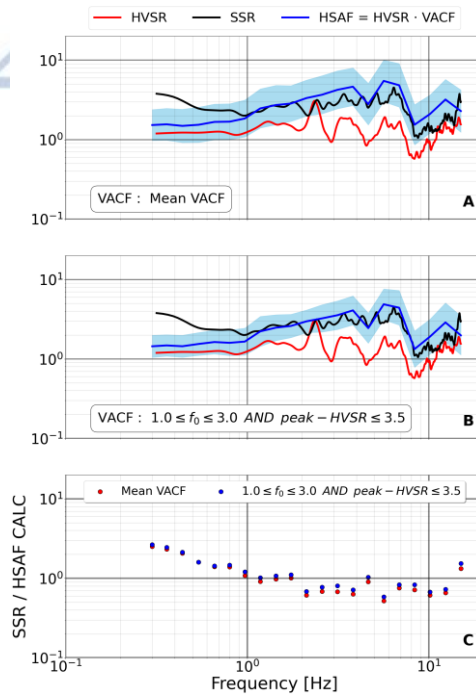


Σχήμα 4.3-15: Σύγκριση της διορθωμένης καμπύλης ενίσχυσης χρησιμοποιώντας την μέση και την ταξινομημένη συνάρτηση διόρθωσης (μπλε γραμμή  $\pm 1$  τυπική απόκλιση, A, B αντίστοιχα) με τον κλασσικό φασματικό λόγο SSR (μαύρη γραμμή) για τους σταθμούς TYF (αριστερά) και LDD (δεξιά). Στο σχήμα C απεικονίζεται ο λόγος φασματικής ενίσχυσης του SSR με τη διορθωμένη οριζόντια φασματική ενίσχυση σε συνάρτηση με την συχνότητα (κόκκινοι κύκλοι: διόρθωση με μέση συνάρτηση διόρθωσης, μπλε κύκλοι: διόρθωση με κατηγοριοποιημένη συνάρτηση διόρθωσης).

Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις (Σχήμα 4.3-15), όπως αυτές των σταθμών TYF και LDD όπου η καμπύλη διόρθωσης δεν μπορεί να εκτιμήσει ικανοποιητικά την φασματική ενίσχυση της οριζόντιας σεισμικής κίνησης, ενώ σε άλλους σταθμούς, όπως για παράδειγμα στον σταθμό STE (Σχήμα 4.3-16), και οι δύο καμπύλες διόρθωσης (μέση και ταξινομημένη) οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα.



Station: STE



Σχήμα 4.3-16: Σύγκριση της διορθωμένης καμπύλης ενίσχυσης χρησιμοποιώντας την μέση και την ταξινομημένη συνάρτηση διόρθωσης (μπλε γραμμή  $\pm 1$  τυπική απόκλιση, A, B αντίστοιχα) με τον κλασικό φασματικό λόγο SSR (μαύρη γραμμή) για το σταθμό STE. Στο σχήμα C απεικονίζεται ο λόγος φασματικής ενίσχυσης του SSR με τη διορθωμένη οριζόντια φασματική ενίσχυση σε συνάρτηση με την συχνότητα (κόκκινοι κύκλοι: διόρθωση με μέση συνάρτηση διόρθωσης, μπλε κύκλοι: διόρθωση με κατηγοριοποιημένη συνάρτηση διόρθωσης).

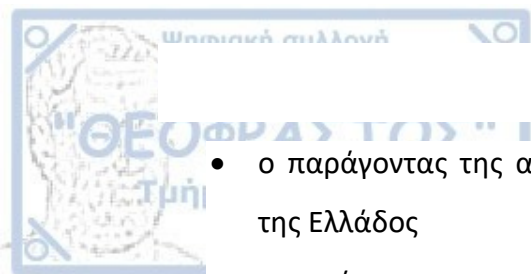
## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι Ito et al. (2020) βασιζόμενοι στη θεωρία Diffuse Field Assumption (DFA) και ισοκατανομής της σεισμικής ενέργειας (Sánchez-Sesma et al., 2011), πρότειναν μία εμπειρική συνάρτηση διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης (VACF) με βάση την οποία, η οριζόντια ενίσχυση της σεισμικής κίνησης μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από το φασματικό λόγο *eHVS*R, αφού αφαιρεθεί η κατακόρυφη ενίσχυση η οποία εμπεριέχεται στον παρανομαστή του λόγου αυτού. Η διόρθωση αυτή πραγματοποιείται, με τη χρήση αυτής της εμπειρικής συνάρτησης η οποία πολλαπλασιαζόμενη με το φασματικό λόγο *eHVS*R μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την οριζόντια φασματική ενίσχυση για την περιοχή της Ιαπωνίας.

Στην παρούσα εργασία με τη χρήση **152** σταθμών επιταχυνσιογράφων του εθνικού δικτύου και **8428** καταγραφών από **368** σεισμούς με  $4.5 \leq M \leq 6$ , επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός αντίστοιχης εμπειρικής συνάρτησης διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης για τον ελληνικό χώρο.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό αυτής της συνάρτησης, χρησιμοποιήθηκε η οριζόντια και κατακόρυφη φασματική ενίσχυση της σεισμικής κίνησης, χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ταυτόχρονης αντιστροφής των δεδομένων της οριζόντιας και κατακόρυφης κίνησης. Πριν την αντιστροφή, εφαρμόστηκαν ορισμένα κριτήρια επιλογής δεδομένων. Σύμφωνα με αυτά, τα δεδομένα χωρίζονται σε τρία δείγματα ανάλογα με την υποκεντρική απόσταση: από 12 – 100 km, από 12 – 200 km και από 12 – 300 km, εκ των οποίων το πρώτο δεν αναλύθηκε λόγω του μικρού αριθμού καταγραφών και περιορισμένων διαδρομών σεισμικών ακτίνων (ray paths). Τα υπόλοιπα δύο δείγματα αναλύονται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής τους. Σύμφωνα με αυτά, παρατηρείται ότι η επιλογή δείγματος με διαφορετικές υποκεντρικές αποστάσεις και μεγαλύτερους δρόμους διαδρομής:

- δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα για τον παράγοντα της σεισμικής πηγής



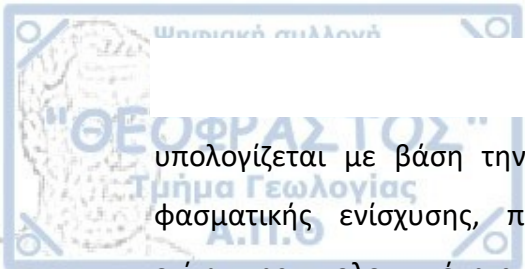
- ο παράγοντας της απόσβεσης,  $Q$  διαφοροποιείται για ορισμένες περιοχές της Ελλάδος
- ο παράγοντας της γεωμετρικής διασποράς,  $\gamma$  παραμένει κοντά στην μονάδα και τα όρια διακύμανσης του παράγοντα  $\alpha$  παραμένουν επίσης αμετάβλητα
- το δείγμα δεδομένων με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypro} \leq 300 \text{ km}$  έδωσε παράγοντα οριζόντιας και κατακόρυφης ενίσχυσης των τοπικών συνθηκών για συχνότητες  $f < 2 \text{ Hz}$ , υψηλότερο έως και 35% από τον αντίστοιχο του δείγματος με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypro} \leq 200 \text{ km}$ . Το πρώτο δείγμα εμπεριέχει σεισμικές ακτίνες μεγαλύτερης διαδρομής σε σχέση με το δεύτερο δείγμα. Η εικόνα αυτή αντιστρέφεται για συχνότητες  $f > 2 \text{ Hz}$ .

Με βάση την τελευταία παρατήρηση:

- τα πλάτη της σεισμικής κίνησης στις υψηλές συχνότητες (π.χ.  $f > 2 \text{ Hz}$ ) αποσβένονται σε μεγαλύτερο βαθμό με την απόσταση από εκείνα στις χαμηλότερες συχνότητες και
- οι ακτίνες μεγαλύτερης διαδρομής διέρχονται από βαθύτερα στρώματα του φλοιού όπου οι τιμές του παράγοντα απόσβεσης είναι μεγαλύτερες.

Συνεπώς, είναι αναμενόμενο, η σεισμική κίνηση σε σταθμούς με υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{hypro} < 200 \text{ km}$ , να έχει υποστεί αναλογικά μικρότερη ανελαστική απόσβεση πλατών στις υψηλές συχνότητες ( $f > 2 \text{ Hz}$ ) με αποτέλεσμα το πλεόνασμα αυτό να ανταλλάσσεται (trade off) κατά την αντιστροφή και να μεταφέρεται στον παράγοντα ενίσχυσης των τοπικών συνθηκών στην εξεταζόμενη θέση του σταθμού και να τον αυξάνει. Αντιθέτως, στις χαμηλές συχνότητες  $f < 2 \text{ Hz}$  αν και έχει ήδη πραγματοποιηθεί μία διερεύνηση για την μεταβολή του παράγοντα απόσβεσης  $Q$  σε χαμηλά εύρη συχνοτήτων (Grendas *et al.*, 2022), υπάρχει μεγαλύτερη δυσκολία στην κατανόηση και την ερμηνεία της διακύμανσης των ενισχύσεων και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Μετά την αντιστροφή, οι σταθμοί διακρίθηκαν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το μέγιστο πλάτος της καμπύλης eHVSr καθώς και την δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα και υπολογίσθηκε μία εμπειρική συνάρτηση διόρθωσης της κατακόρυφης ενίσχυσης για κάθε κατηγορία καθώς και μία μέση από όλο το δείγμα των σταθμών. Παρατηρείται ότι, η διορθωμένη καμπύλη ενίσχυσης που



υπολογίζεται με βάση την εμπειρική συνάρτηση διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης, παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με την καμπύλη ενίσχυσης υπολογισμένη από την αντιστροφή, σε αντίθεση με την συσχέτιση του φασματικού λόγου eHVS. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη διόρθωσης αυτού, ώστε να μπορεί να προσεγγίσει ρεαλιστικά την οριζόντια φασματική ενίσχυση της σεισμικής κίνησης.

Τελικά, προτείνεται η χρήση της μέσης καμπύλης διόρθωσης για τον υπολογισμό της οριζόντιας φασματικής ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης διότι δεν είναι στατιστικά ικανοποιητική η δημιουργία κατηγοριών καμπυλών διόρθωσης εξαιτίας του σχετικά μικρού αριθμού σταθμών ανά κατηγορία. Έτσι, χρησιμοποιώντας την μέση καμπύλη, μπορεί κάποιος να προσεγγίσει την ενίσχυση της οριζόντιας φασματικής σεισμικής κίνησης, γνωρίζοντας τον φασματικό λόγο eHVS του σταθμού που εξετάζεται. Για το λόγο αυτόν προτείνεται ο εμπλουτισμός του αριθμού των σταθμών που θα χρησιμοποιηθούν σε μελλοντική αναθεώρηση των συναρτήσεων διόρθωσης της κατακόρυφης φασματικής ενίσχυσης για τον ελληνικό χώρο.

Τέλος, επισημαίνεται ότι λόγω της βασικής θεώρησης των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή ότι η σεισμική απόκριση των γεωλογικών σχηματισμών είναι μονοδιάστατη (1D), η χρήση του εμπειρικού παράγοντα διόρθωσης της οριζόντιας σεισμικής ενίσχυσης ισχύει ικανοποιητικά μόνον σε θέσεις που πληρούν το κριτήριο της μονοδιάστατης (1D) απόκρισης των τοπικών εδαφικών συνθηκών και δεν επηρεάζονται από πλευρικές (δισδιάστατες και τρισδιάστατες) ετερογένειες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ Andrews, D.J. (1986) "Objective Determination of Source Parameters and Similarity of Earthquakes of Different Size," in, pp. 259–267. doi:10.1029/GM037p0259.
- ❖ Baram, A., Yagoda-Biran, G. and Kamai, R. (2020) "Evaluating Proxy-Based Site Response in Israel," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(6), pp. 2953–2966. doi:10.1785/0120200140.
- ❖ Bonilla, L.F. *et al.* (1997) "Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of site-effect estimation using the *S*-wave, coda, and *H/V* methods," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), pp. 710–730. doi:10.1785/BSSA0870030710.
- ❖ Bonnefoy-Claudet, S. *et al.* (2006) "H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations," *Geophysical Journal International*, 167(2), pp. 827–837. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x.
- ❖ BOORE, D.M. (2004) "CAN SITE RESPONSE BE PREDICTED?," *Journal of Earthquake Engineering*, 8(sup001), pp. 1–41. doi:10.1080/13632460409350520.
- ❖ Boore, D.M. and Boatwright, J. (1984) "Average body-wave radiation coefficients," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), pp. 1615–1621. doi:10.1785/BSSA0740051615.
- ❖ Boore, D.M. *et al.* (2021) "A Ground-Motion Prediction Model for Shallow Crustal Earthquakes in Greece," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(2), pp. 857–874. doi:10.1785/0120200270.
- ❖ Borchardt, R.D. (1970) "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay\*," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), pp. 29–61. doi:10.1785/BSSA0600010029.
- ❖ Borchardt, R.D. (1994) "Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)," *Earthquake Spectra*, 10(4), pp. 617–653. doi:10.1193/1.1585791.
- ❖ Borchardt, R.D. and Glassmoyer, G. (1992) "On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California," *Bulletin of the*

*Seismological Society of America*, 82(2), pp. 603–641.  
doi:10.1785/BSSA0820020603.

- ❖ Brune, J.N. (1970) “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes,” *Journal of Geophysical Research*, 75(26), pp. 4997–5009. doi:10.1029/JB075i026p04997.
- ❖ Castro, R.R., Anderson, J.G. and Singh, S.K. (1990) “Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(6A), pp. 1481–1503. doi:10.1785/BSSA08006A1481.
- ❖ Cultrera, G. *et al.* (2014) “Statistical correlation of earthquake and ambient noise spectral ratios,” *Bulletin of Earthquake Engineering* [Preprint]. doi:10.1007/s10518-013-9576-7.
- ❖ Douglas, J. and Edwards, B. (2016) “Recent and future developments in earthquake ground motion estimation,” *Earth-Science Reviews*, 160, pp. 203–219. doi:10.1016/j.earscirev.2016.07.005.
- ❖ Drouet, S. *et al.* (2008) “Simultaneous Inversion of Source Spectra, Attenuation Parameters, and Site Responses: Application to the Data of the French Accelerometric Network,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), pp. 198–219. doi:10.1785/0120060215.
- ❖ Field, E.H. and Jacob, K.H. (1995) “A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4), pp. 1127–1143. doi:10.1785/BSSA0850041127.
- ❖ García-Jerez, A. *et al.* (2016) “A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption,” *Computers & Geosciences*, 97, pp. 67–78. doi:10.1016/j.cageo.2016.06.016.
- ❖ Grendas, I. *et al.* (2018) “Determination of source, path and site parameters based on non-linear inversion of accelerometric data in Greece,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(11), pp. 5061–5094. doi:10.1007/s10518-018-0379-8.
- ❖ Grendas, I. *et al.* (2021) “A GIT algorithm for simultaneous estimation of seismic source, site response and regional-distance dependent attenuation parameters: application to synthetic and real data,” *Journal of Seismology*, 25(2), pp. 575–598. doi:10.1007/s10950-020-09975-8.
- ❖ Grendas, I. *et al.* (2022) “Can site effects be estimated with respect to a distant reference station? Performance of the spectral factorization of coda

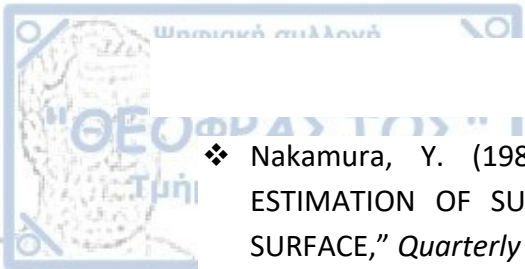
waves,” *Geophysical Journal International* [Preprint].  
doi:10.1093/gji/ggac040.


- ❖ Haghshenas, E., Bard, P.-Y. and Theodulidis, N. (2008) “Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(1), pp. 75–108. doi:10.1007/s10518-007-9058-x.
- ❖ Hanks, T.C. and Kanamori, H. (1979) “A moment magnitude scale,” *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), p. 2348. doi:10.1029/JB084iB05p02348.
- ❖ Haskell, N.A. (1953) “The dispersion of surface waves on multilayered media\*,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43(1), pp. 17–34. doi:10.1785/BSSA0430010017.
- ❖ Helmberger, D. v. and Vidale, J.E. (1988) “Modeling strong motions produced by earthquakes with two-dimensional numerical codes,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), pp. 109–121. doi:10.1785/BSSA0780010109.
- ❖ Héloïse, C. *et al.* (2012) “Site effect assessment using KiK-net data: part 2—site amplification prediction equation based on  $f_0$  and  $V_{sz}$ ,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2), pp. 451–489. doi:10.1007/s10518-011-9298-7.
- ❖ Ito, E. *et al.* (2020) “A Method to Directly Estimate S -Wave Site Amplification Factor from Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Earthquakes (eHVSRs),” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(6), pp. 2892–2911. doi:10.1785/0120190315.
- ❖ IWATA, T. and IRIKURA, K. (1988) “Source parameters of the 1983 Japan Sea earthquake sequence.,” *Journal of Physics of the Earth*, 36(4), pp. 155–184. doi:10.4294/jpe1952.36.155.
- ❖ Joosten, W.L. (1982) “Seismic telemetry: The future of geophysics,” in *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1982*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 47–48. doi:10.1190/1.1827102.
- ❖ Kawase, H. and Matsuo, H. (2004) “Amplification characteristics of K-NET, KiK-net, and JMA Shindokey network sites based on the spectral inversion technique,” in *13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- ❖ Kawase, H., Mori, Y. and Nagashima, F. (2018) “Difference of horizontal-to-vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse field concept,” *Earth, Planets and Space*, 70(1), p. 1. doi:10.1186/s40623-017-0766-4.
- ❖ Kawase, H., Sanchez-Sesma, F.J. and Matsushima, S. (2011) “The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity

Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5), pp. 2001–2014. doi:10.1785/0120100263.

- ❖ Kennett, B.L.N. (1974) "Reflections, rays, and reverberations," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(6), pp. 1685–1696. doi:10.1785/BSSA0640061685.
- ❖ Kitagawa, Y., Ohkawa, I. and Kashima, T. (1988) "Dense strong motion earthquake seismometer array at site with different topographic and geologic conditions in Sendai," in *Proc. 9th WCEE*, pp. 215–220.
- ❖ Lermo, J. and Chávez-García, F.J. (1993) "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5), pp. 1574–1594. doi:10.1785/BSSA0830051574.
- ❖ Luzi, L. *et al.* (2011) "Proposal for a soil classification based on parameters alternative or complementary to  $V_{s,30}$ ," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6), pp. 1877–1898. doi:10.1007/s10518-011-9274-2.
- ❖ Macmurdo, J. (1824) "XXI. Papers relating to the earthquake which occurred in India in 1819," *The Philosophical Magazine*, 63(310), pp. 105–119. doi:10.1080/14786442408644477.
- ❖ Margaris, B.N. (2002) "Source Spectral Scaling and Stress Release Estimates Using Strong-Motion Records in Greece," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(3), pp. 1040–1059. doi:10.1785/0120010126.
- ❖ Margaris, B.N. and Boore, D.M. (1998) "Determination of  $\Delta\sigma$  and  $\kappa_0$  from response spectra of large earthquakes in Greece," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), pp. 170–182. doi:10.1785/BSSA0880010170.
- ❖ Molnar, S. *et al.* (2018) "Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art," *Surveys in Geophysics*, 39(4), pp. 613–631. doi:10.1007/s10712-018-9464-4.
- ❖ Nagashima, F. *et al.* (2014) "Application of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Ground Motions to Identify Subsurface Structures at and around the K-NET Site in Tohoku, Japan," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), pp. 2288–2302. doi:10.1785/0120130219.
- ❖ Nagashima, F., Kawase, H. and Matsushima, S. (2017) "ESTIMATION OF HORIZONTAL SEISMIC BEDROCK MOTION FROM VERTICAL SURFACE MOTION BASED ON HORIZONTAL-TO-VERTICAL SPECTRAL RATIOS OF EARTHQUAKE MOTIONS," in.

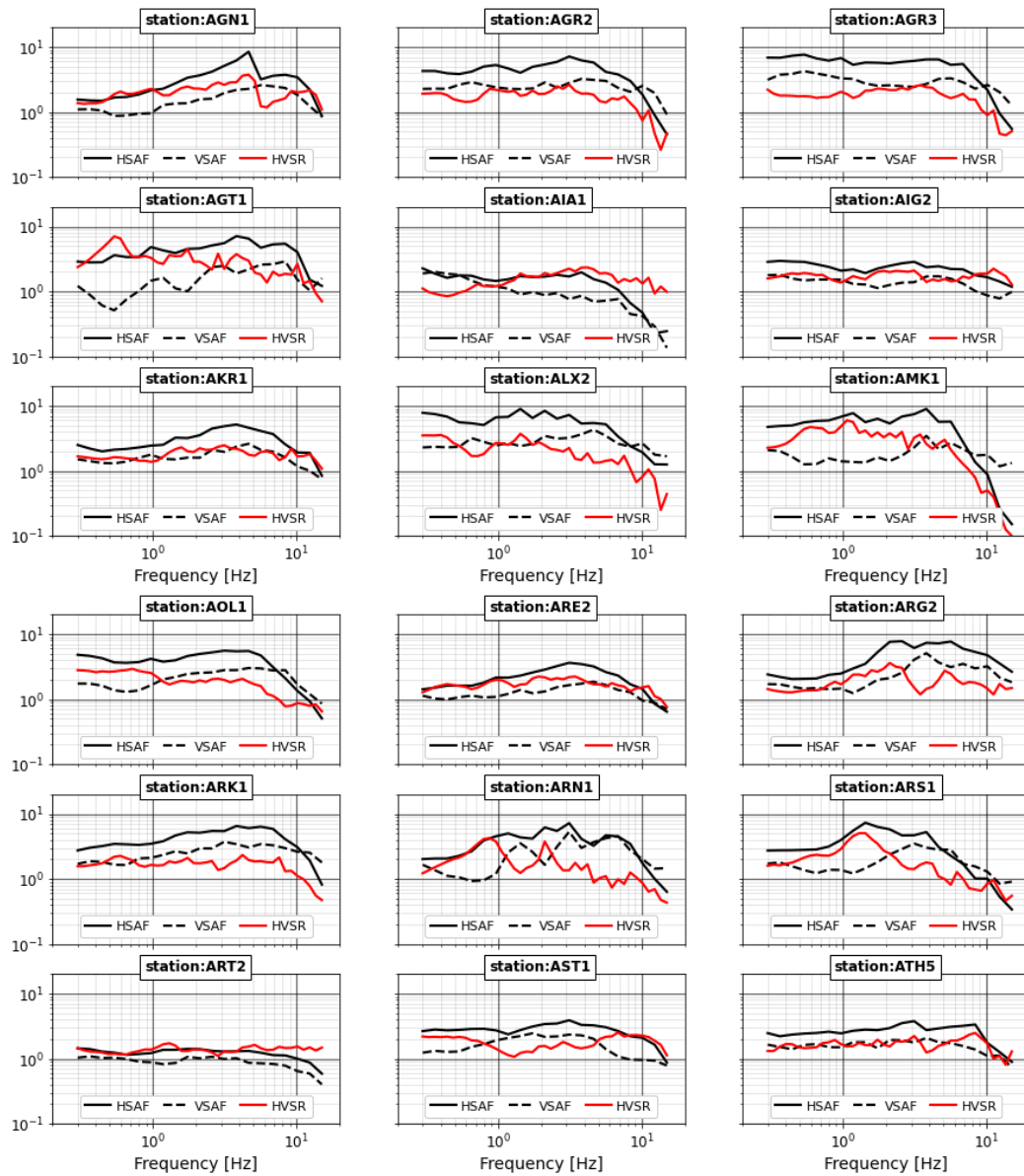


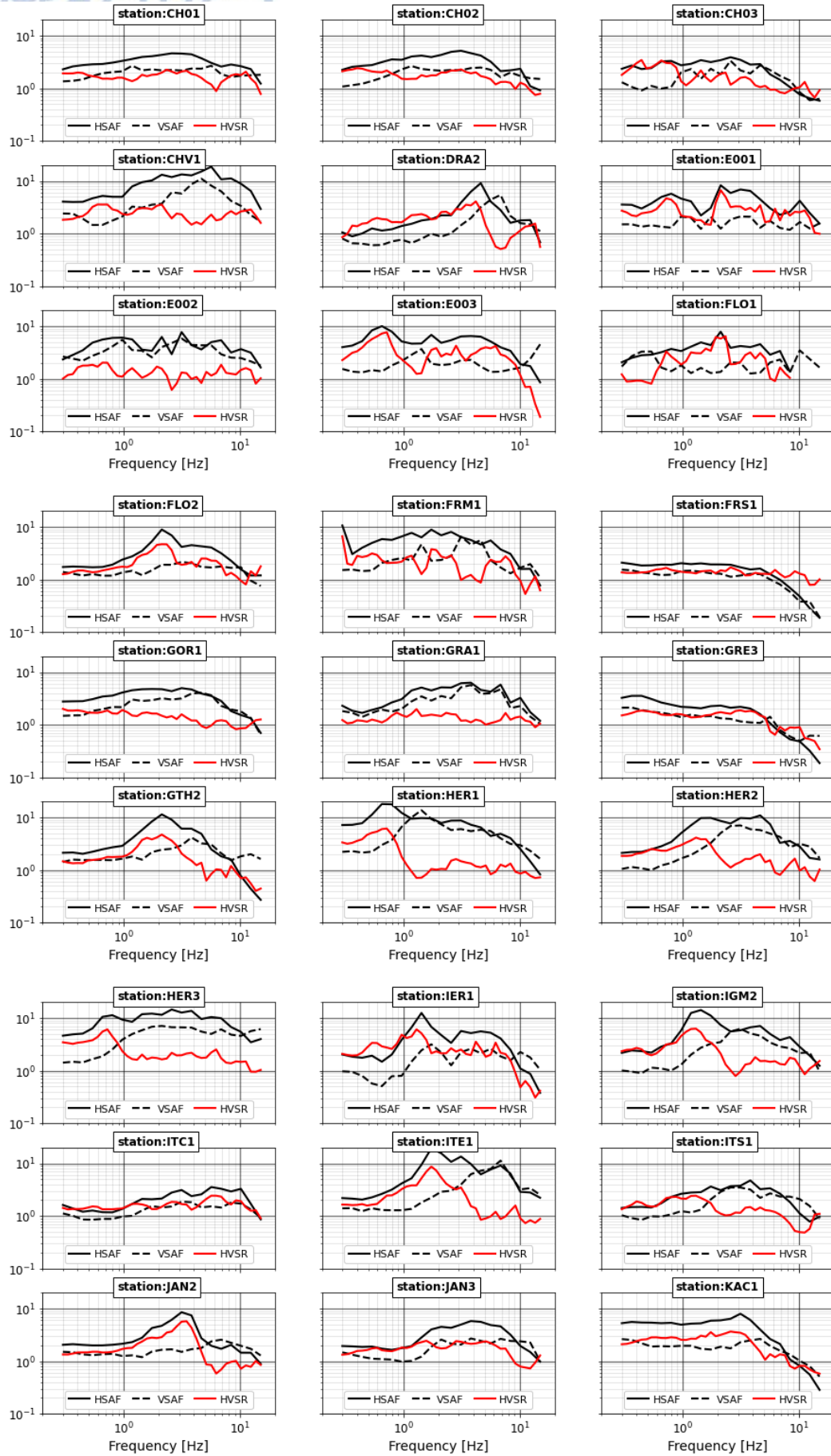
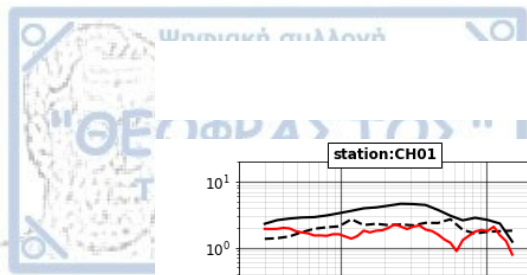
- 
- ❖ Nakamura, Y. (1989) "A METHOD FOR DYNAMIC CHARACTERISTICS ESTIMATION OF SUBSURFACE USING MICROTREMOR ON THE GROUND SURFACE," *Quarterly Report of Rtri*, 30.
  - ❖ Nakano, K., Matsushima, S. and Kawase, H. (2015a) "Statistical Properties of Strong Ground Motions from the Generalized Spectral Inversion of Data Observed by K-NET, KiK-net, and the JMA Shindokey Network in Japan," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(5), pp. 2662–2680. doi:10.1785/0120140349.
  - ❖ Parolai, S., Bindi, D. and Augliera, P. (2000) "Application of the Generalized Inversion Technique (GIT) to a Microzonation Study: Numerical Simulations and Comparison with Different Site-Estimation Techniques," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, pp. 286–297.
  - ❖ 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," *Earthquake Spectra*, 14(1), pp. 203–224. doi:10.1193/1.1585996.
  - ❖ Rodríguez, V.H.S. and Midorikawa, S. (2003) "Comparison of spectral ratio techniques for estimation of site effects using microtremor data and earthquake motions recorded at the surface and in boreholes," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(11), pp. 1691–1714. doi:10.1002/eqe.296.
  - ❖ Sánchez-Sesma, F.J. *et al.* (2008) "Diffuse fields in dynamic elasticity," *Wave Motion*, 45(5), pp. 641–654. doi:10.1016/j.wavemoti.2007.07.005.
  - ❖ Sánchez-Sesma, F.J. *et al.* (2011) "A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium," *Geophysical Journal International*, 186(1), pp. 221–225. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x.
  - ❖ Satoh, T., Kawase, H. and Matsushima, S. (2001) "Differences Between Site Characteristics Obtained From Microtremors, S-waves, P-waves, and Coda," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), pp. 313–334. doi:10.1785/0119990149.
  - ❖ Satoh, T., Kawase, H. and Sato, T. (1995) "Evaluation of local site effects and their removal from borehole records observed in the Sendai region, Japan," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), pp. 1770–1789. doi:10.1785/BSSA0850061770.
  - ❖ Satoh, T., Kawase, H. and Sato, T. (1997) "Statistical spectral model of earthquakes in the eastern Tohoku district, Japan, based on the surface and borehole records observed in Sendai," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2), pp. 446–462. doi:10.1785/BSSA0870020446.

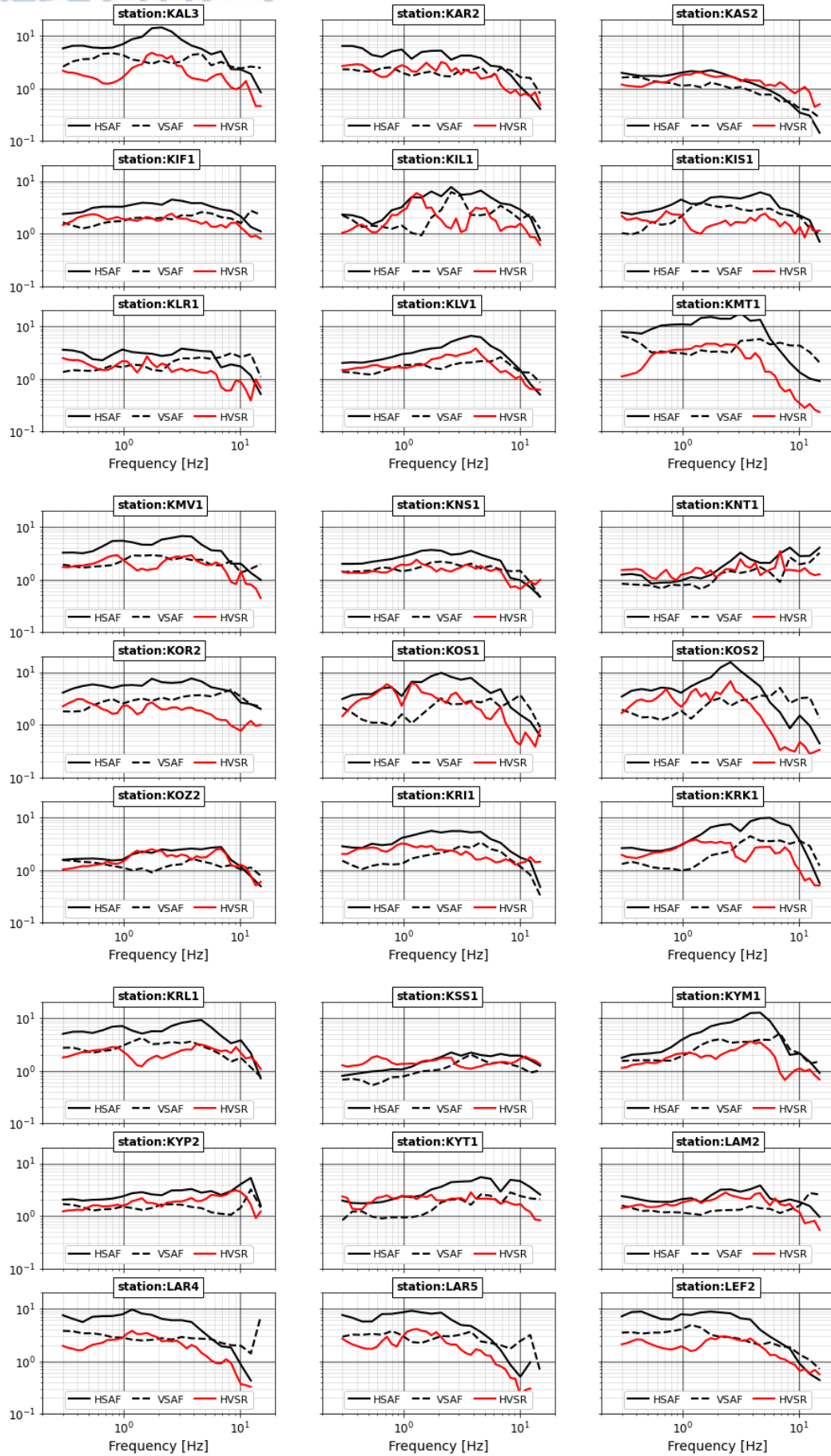
- 
- ❖ Steidl, J.H., Tumarkin, A.G. and Archuleta, R.J. (1996) "What is a reference site?," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), pp. 1733–1748. doi:10.1785/BSSA0860061733.
  - ❖ Takahashi, R. and Hirano (1941) "Seismic vibration of soft ground," *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 19(3), pp. 534–543.
  - ❖ Theodulidis, N. *et al.* (2004) "HEAD 1.0: A Unified Hellenic Accelerogram Database," *Seismological Research Letters*, 75(1), pp. 36–45. doi:10.1785/gssrl.75.1.36.
  - ❖ Theodulidis, N.P. and Bard, P.-Y. (1995) "Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: an analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (SMART-1)," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14(3), pp. 177–197. doi:10.1016/0267-7261(94)00039-J.
  - ❖ Thomson, W.T. (1950) "Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium," *Journal of Applied Physics*, 21(2), pp. 89–93. doi:10.1063/1.1699629.
  - ❖ WOOD, H.O. (1908) "Distribution of apparent intensity in San Francisco, in the California earthquake of April 18, 1906," *Report of the State Earthquake Investigation Commission, Carnegie Institute of Washington, Washington, D.C.*, 1, pp. 220–245.
  - ❖ Παπαζάχος Β. Κ., Καρακαΐσης Γ. Φ., Χατζηδημητρίου Π. Μ., Εισαγωγή στη ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2005.
  - ❖ Σκορδύλης Ε. *et al.* (2021) *Καταλογος Σεισμικότητας του ελληνικού Χώρου, HELPOS project (2017-2021)*.
  - ❖ Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού αστεροσκοπείου Αθηνών <http://www.gein.noa.gr>
  - ❖ Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών κατασκευών <http://www.itsak.gr>
  - ❖ Σεισμολογικός Σταθμός του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης <http://geophysics.geo.auth.gr>

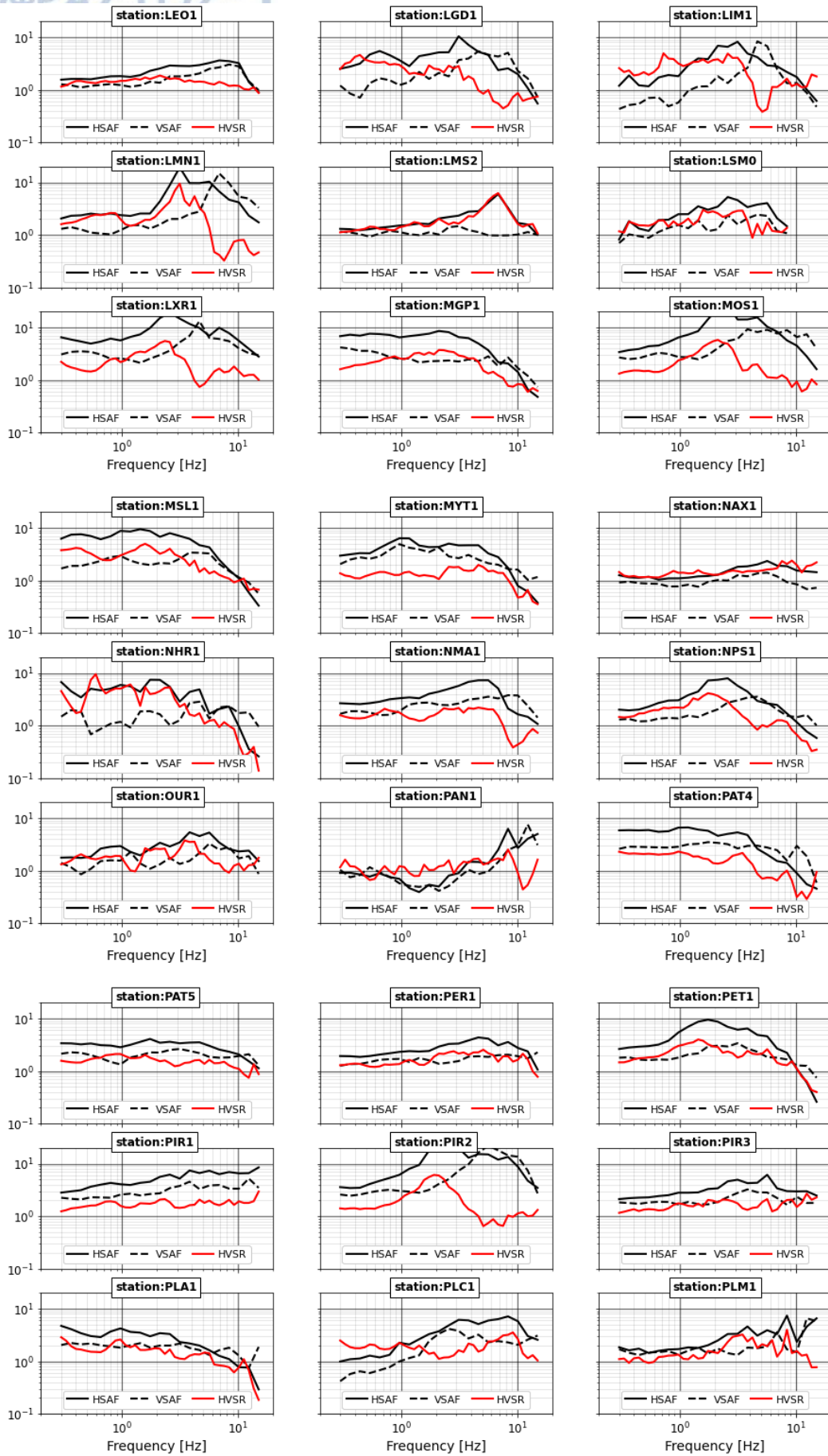
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

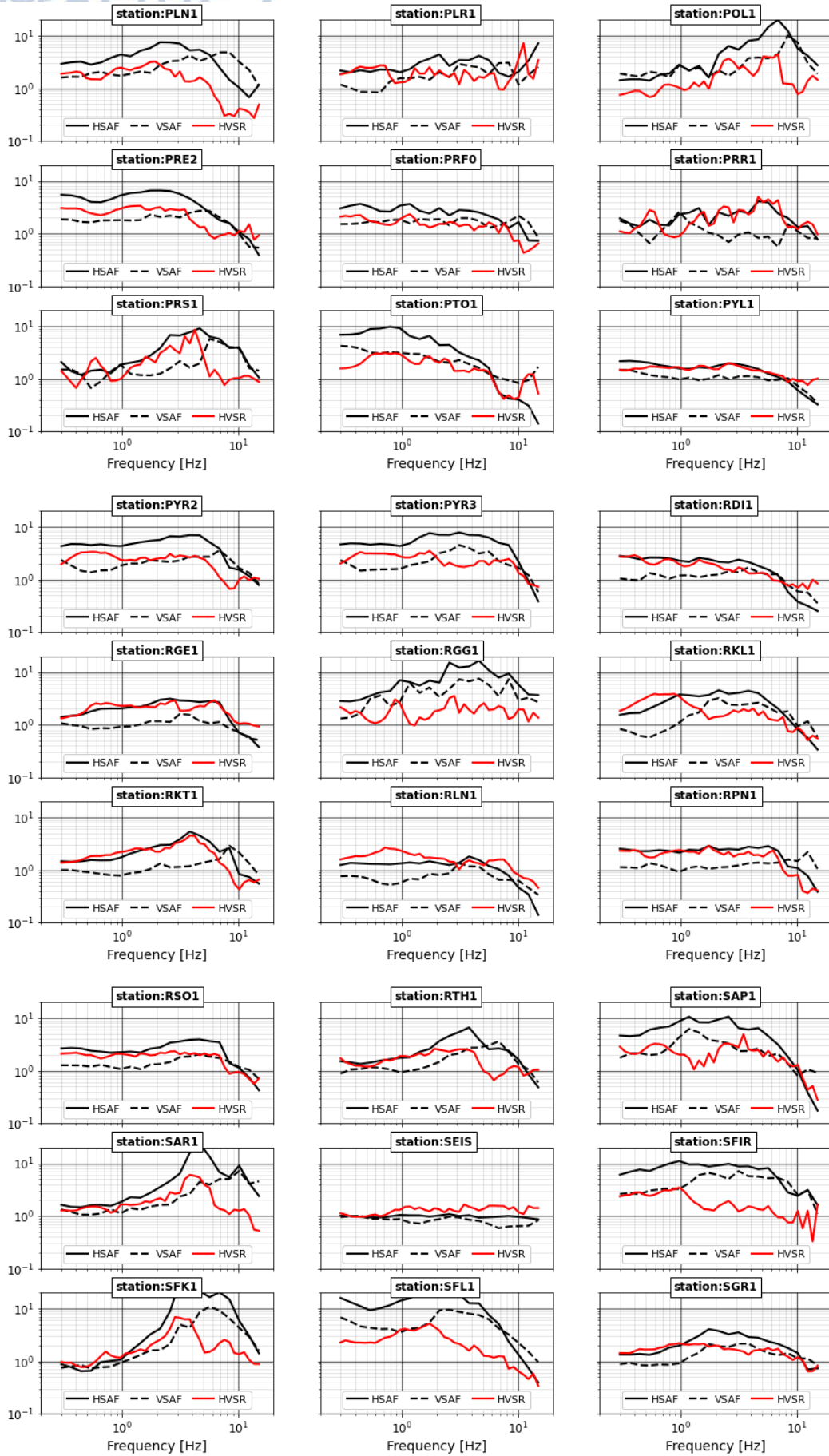
A.1. Σύγκριση των καμπυλών της οριζόντιας (μαύρη γραμμή) και της κατακόρυφης (διακεκομμένη μαύρη γραμμή) ενίσχυσης υπολογισμένες από την αντιστροφή, καθώς και της καμπύλης του φασματικού λόγου  $eHVS$ R (κόκκινη γραμμή) των σταθμών που συμμετέχουν στον κώδικα της αντιστροφής, για υποκεντρικές αποστάσεις  $R_{ηγρο} \leq 300$  km.

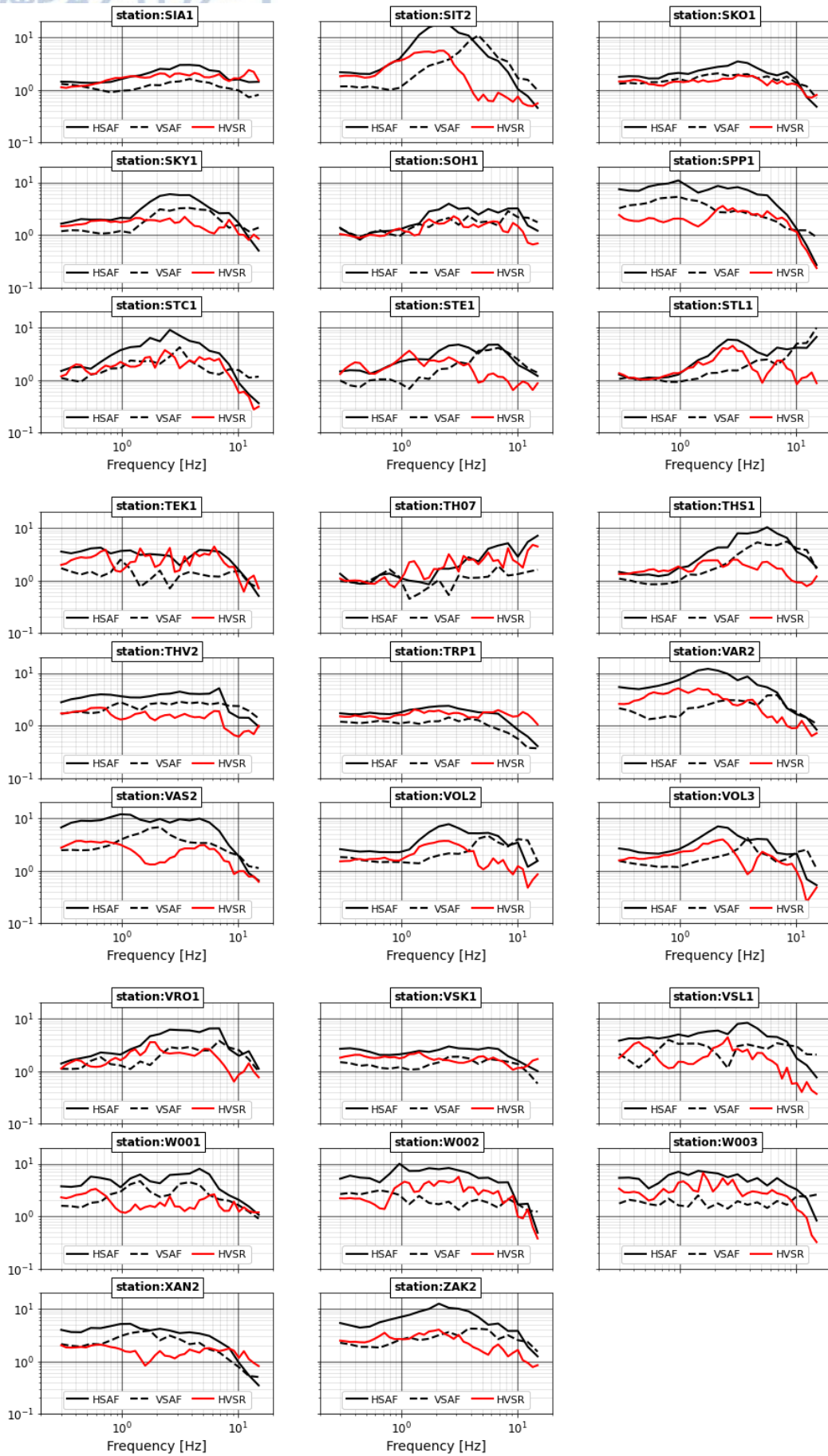
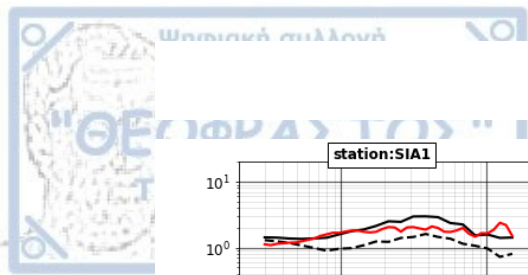






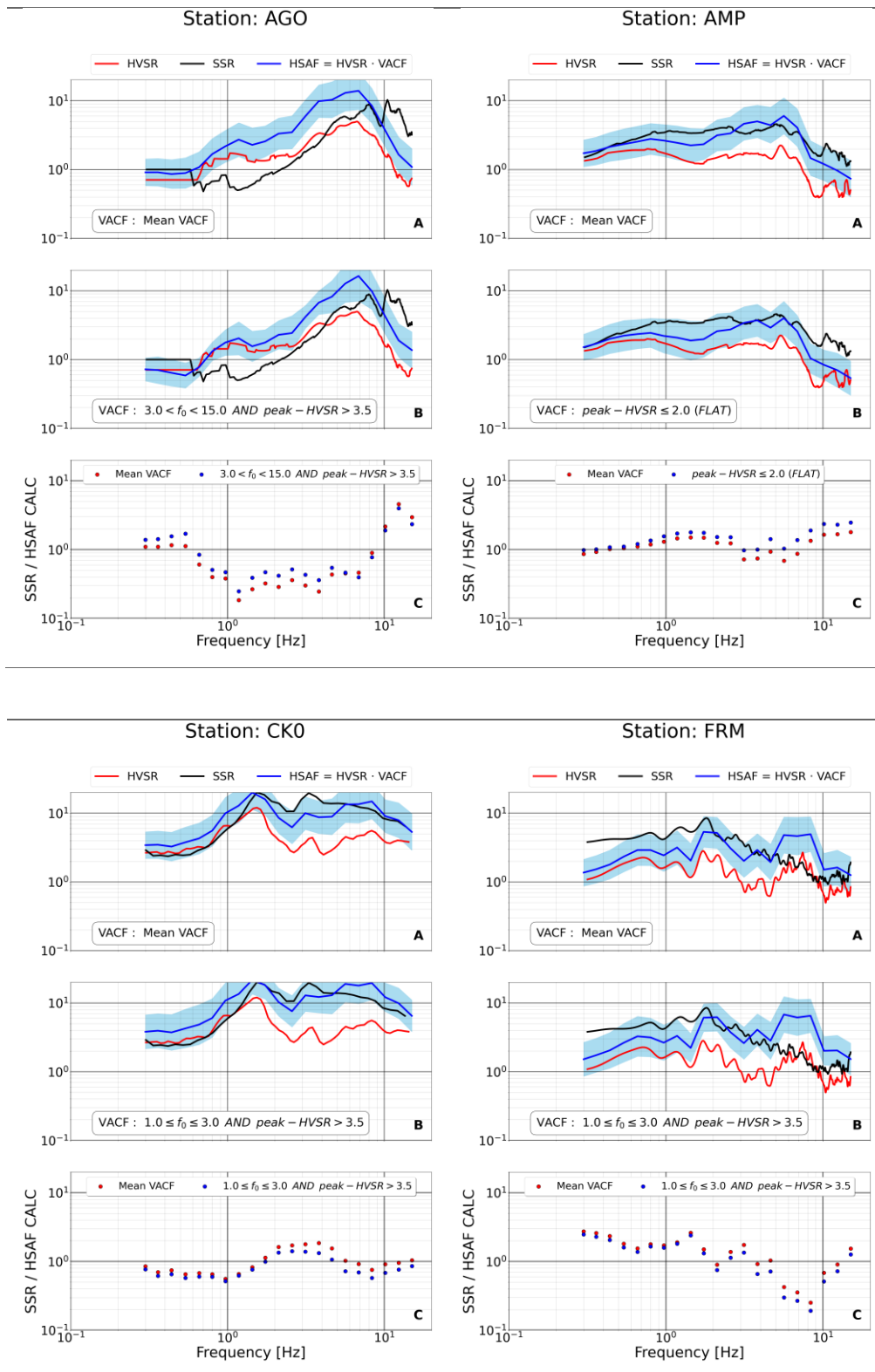


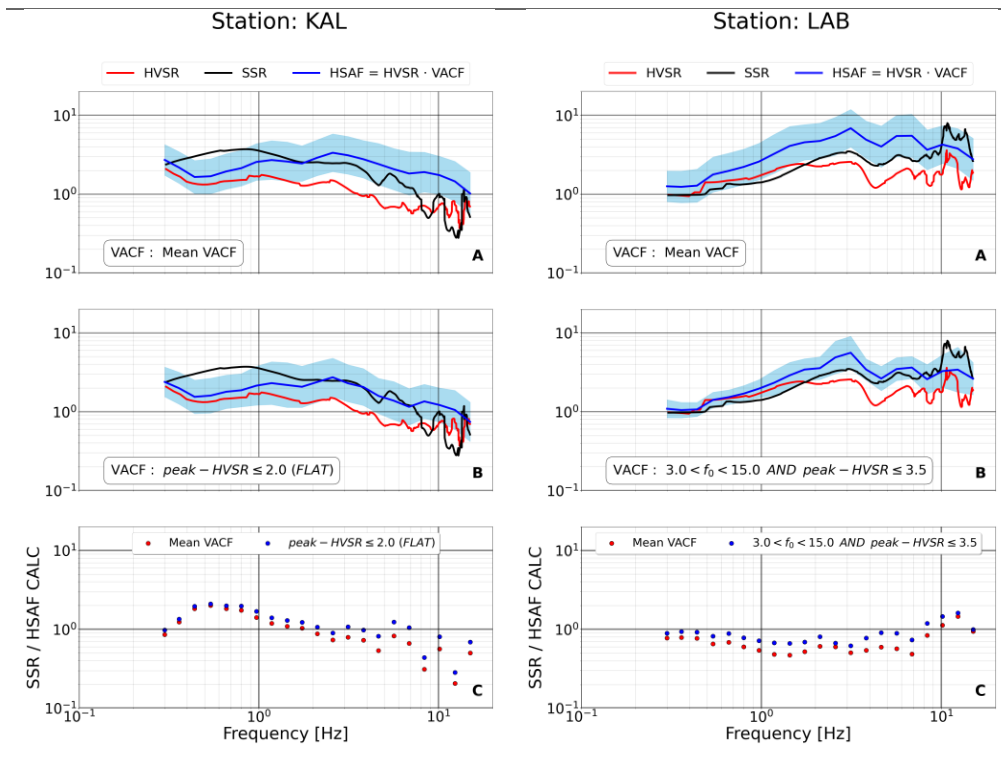
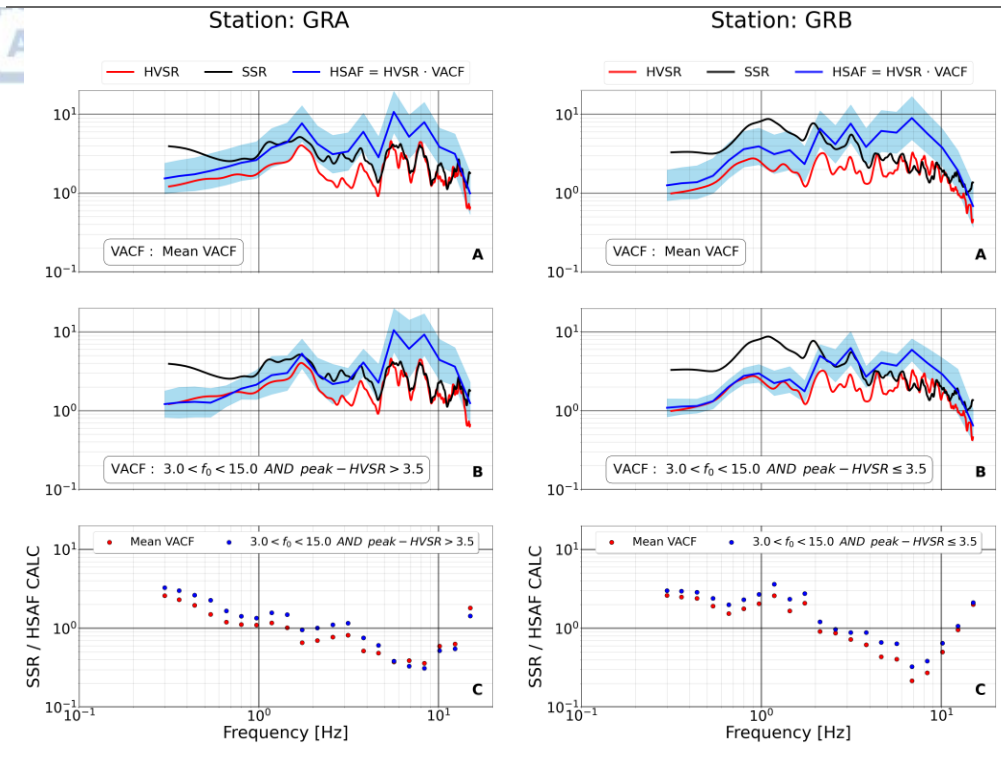


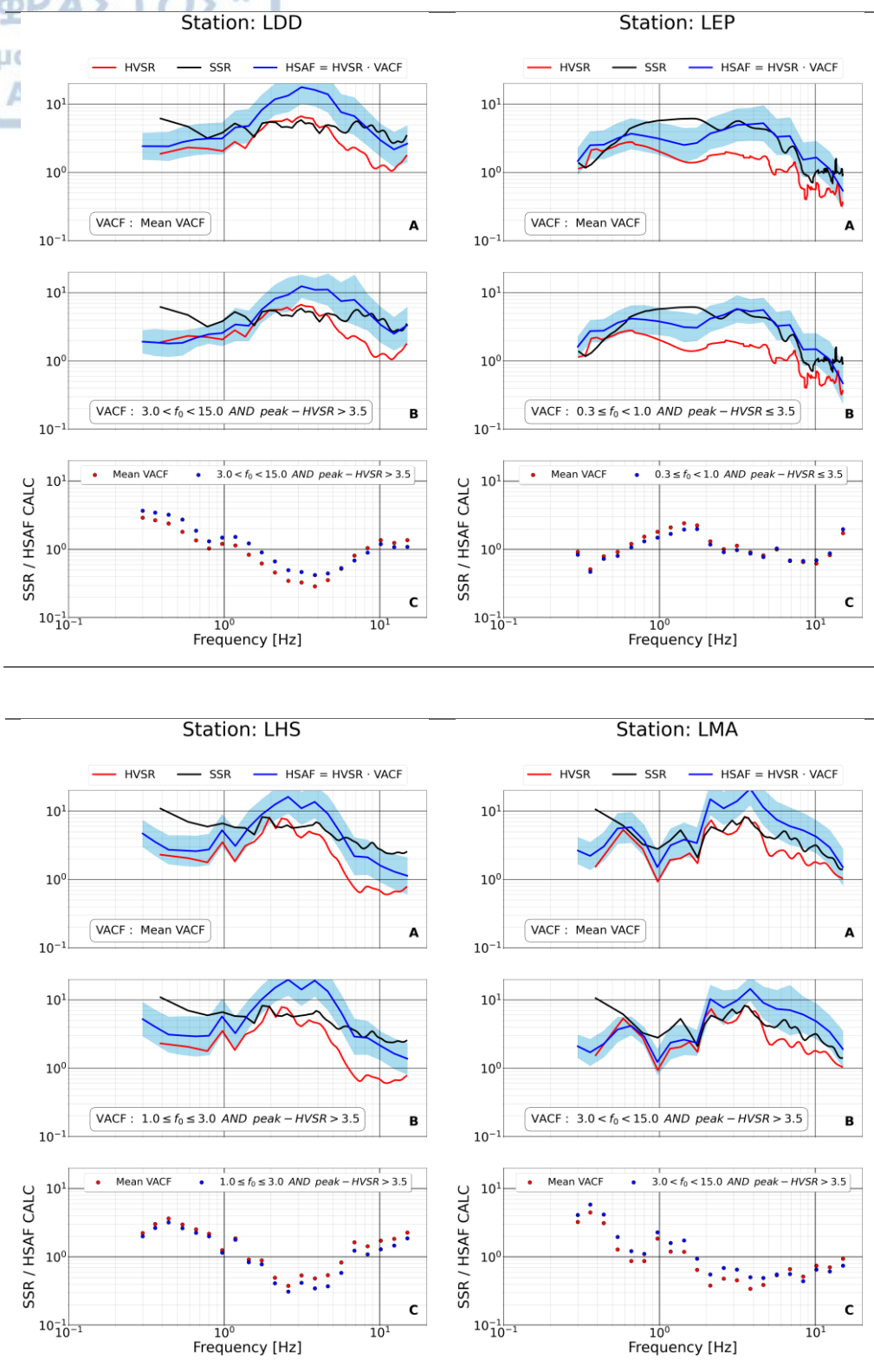
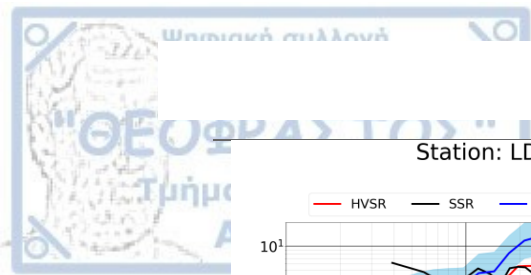


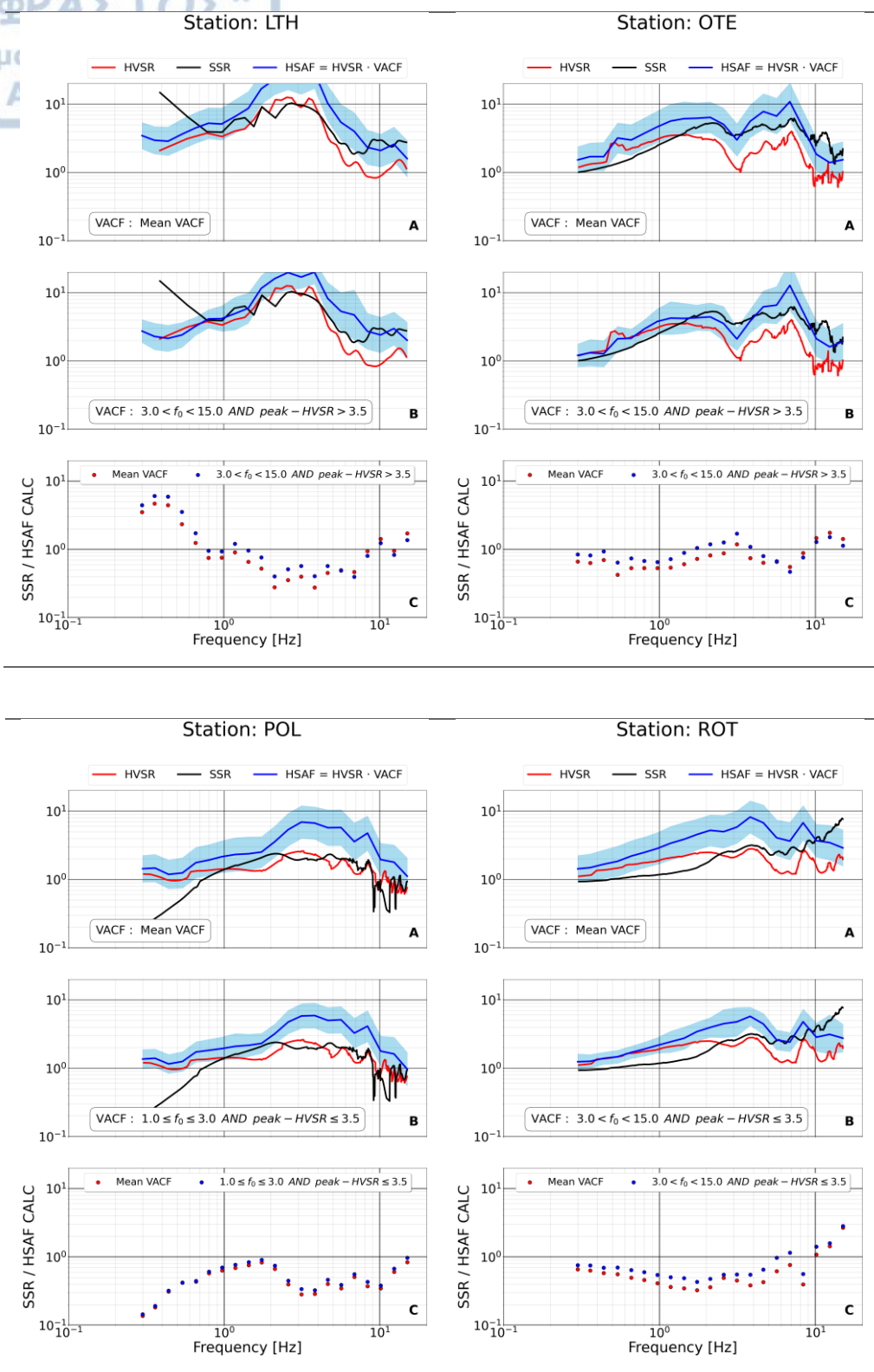
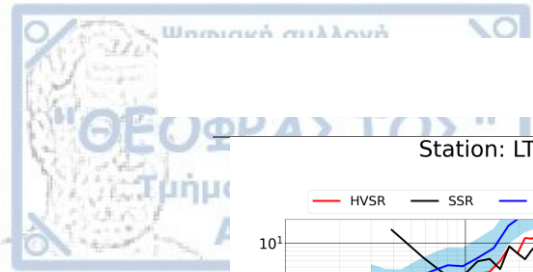


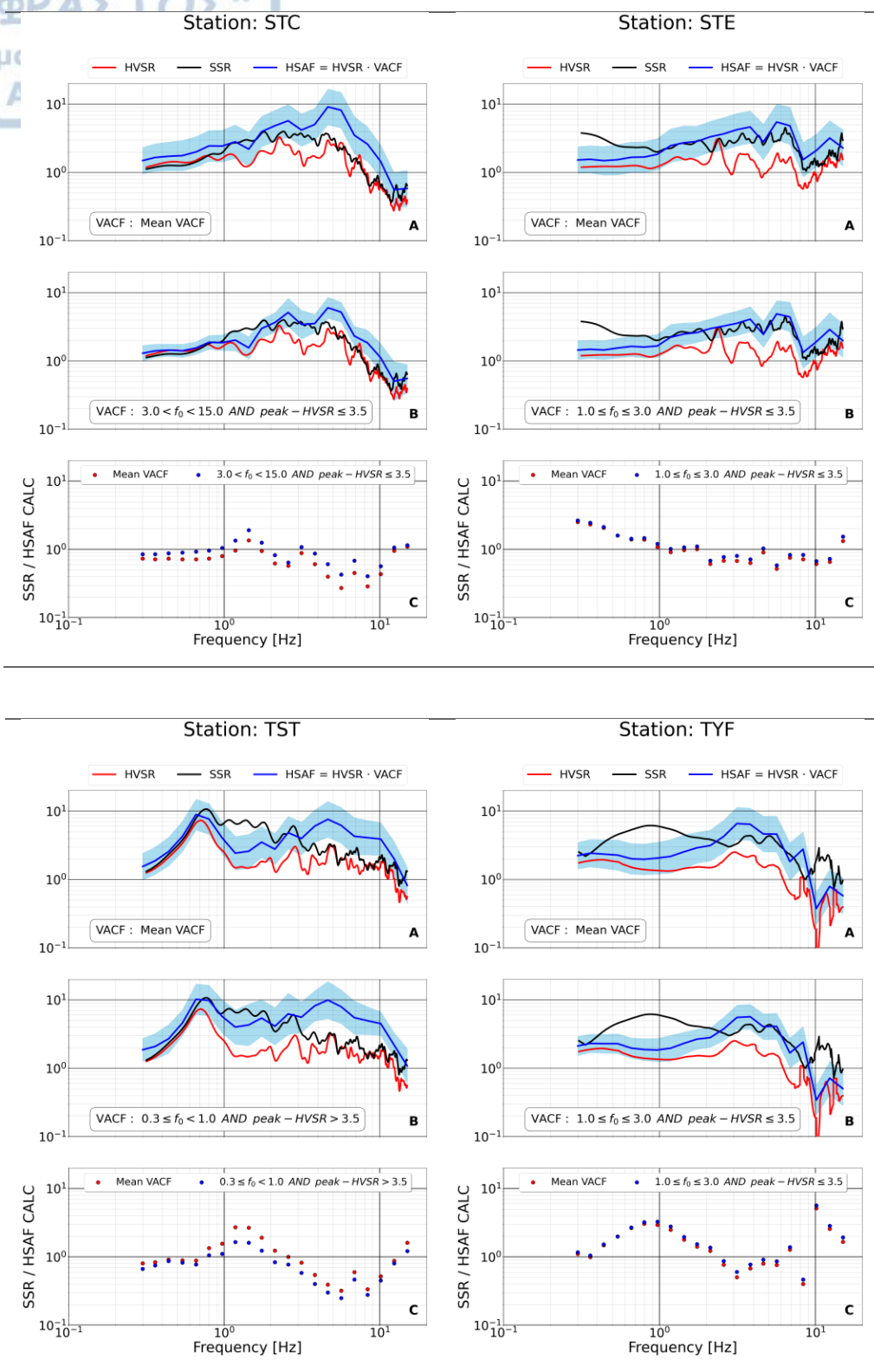
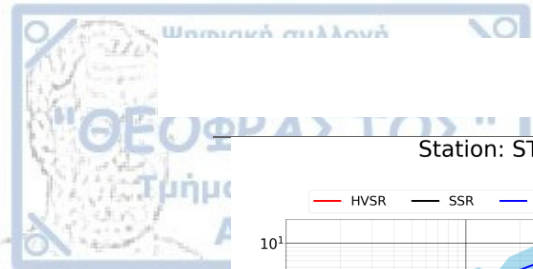
A.2. Σύγκριση της διορθωμένης καμπύλης ενίσχυσης (μπλε γραμμή) με τον παράγοντα φασματικής ενίσχυσης SSR (μαύρη γραμμή), χρησιμοποιώντας την μέση καμπύλη διόρθωσης (σχήμα A) και την κατηγοριοποιημένη καμπύλη (σχήμα B), σε σταθμούς που δεν χρησιμοποιούνται στον κώδικα της αντιστροφής. Η κόκκινη γραμμή εκφράζει το λόγο των φασμάτων Fourier της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας, eHVSr. Στο τελευταίο σχήμα (σχήμα C) παρουσιάζεται ο λόγος του παράγοντα SSR και της διορθωμένης καμπύλης που προκύπτει από την μέση (κόκκινα σημεία) και την κατηγοριοποιημένη (μπλε σημεία) καμπύλη διόρθωσης, σε συνάρτηση με τη συχνότητα.











## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

*Β.1. Πληροφορίες για τους σεισμούς που έχουν αντιστοιχηθεί με καταγραφές στην παρούσα εργασία. Περιλαμβάνεται, η ημερομηνία γένεσης (datetime, YYYY – MM – DD HH:MM:SS), το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του επικέντρου (lat, long), το εστιακό βάθος (depth), το μέγεθος σεισμού από τους καταλόγους (mag), το μέγεθος ροπής που προκύπτει από την αντιστροφή ( $M_w - inv$ ), η γωνιακή συχνότητα που υπολογίζεται από το πρόγραμμα της αντιστροφής ( $f_c - inv$ ) και ο αριθμός των καταγραφών (No of rec.).*

<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i><math>M_w(Invs)</math></i>	<i><math>f_c(Invs)</math></i>	<i>No of rec</i>
2005-09-12 19:08:30	40.745	23.332	10	4.6	4.62	1.0473	7
2006-05-10 07:01:42	40.506	23.426	5	4.8	4.79	0.6694	5
2007-07-18 19:09:29	40.578	22.775	3	4.5	4.24	1.4527	8
2008-12-27 08:27:02	40.116	24.047	3	4.6	4.44	1.4766	3
2008-12-27 20:09:21	40.120	24.058	8	4.5	4.59	1.1869	5
2009-05-24 16:17:50	41.296	22.704	13	5.3	5.19	0.5640	17
2009-05-24 16:23:09	41.289	22.712	10	4.5	4.61	0.9721	13
2009-05-24 19:37:05	41.293	22.694	12	4.8	4.79	0.8497	15
2010-08-08 09:00:28	40.553	23.569	15	4.5	4.62	0.9711	21
2010-08-08 09:14:59	40.550	23.574	14	4.6	4.36	1.1769	18
2010-08-12 02:23:06	39.687	27.578	14	4.9	4.95	1.0177	3
2010-10-09 19:04:49	38.147	22.708	12	4.6	4.49	1.4331	4
2010-10-17 17:55:05	39.390	20.583	16	4.9	4.75	0.8382	5
2010-11-03 02:51:27	40.413	26.296	14	5.3	5.24	0.5147	5
2010-11-11 20:08:01	37.863	27.373	14	4.8	4.74	1.1160	3
2010-12-11 23:02:18	38.481	25.587	11	4.6	4.49	0.9188	5
2010-12-18 06:05:41	37.347	20.294	25	5	4.95	0.8018	7
2010-12-23 01:35:49	40.090	24.794	8	4.6	4.64	0.8781	7
2010-12-23 01:40:16	40.066	24.780	12	4.5	4.42	1.2040	7
2010-12-26 05:08:20	40.322	25.882	13	4.6	4.47	1.5313	6
2011-02-11 17:56:56	38.387	21.798	11	4.5	4.23	1.2642	5
2011-02-20 15:11:30	37.863	19.903	15	4.6	4.43	1.1783	4
2011-02-22 20:37:02	38.847	24.926	7	4.5	4.57	1.1678	12
2011-03-16 16:07:24	38.460	20.449	19	4.7	4.6	1.2234	10
2011-04-03 23:53:39	35.756	21.956	17	4.7	4.81	0.4755	6
2011-04-15 03:18:29	36.603	22.911	11	4.7	4.4	1.1866	11
2011-05-08 06:50:24	36.675	27.216	17	5.2	5.36	0.5395	3
2011-05-25 23:27:50	37.911	21.112	14	5.1	4.93	0.8152	11
2011-05-26 12:56:18	37.920	21.093	10	4.6	4.74	0.8992	12
2011-06-01 17:18:58	36.341	22.257	11	4.7	4.65	0.8743	9
2011-06-09 16:16:34	40.693	19.882	12	4.5	4.54	0.8243	4
2011-06-10 22:47:06	39.106	28.359	13	4.5	4.44	0.9214	3
2011-06-24 06:53:31	37.552	20.932	13	4.6	4.49	1.2140	6

<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2011-07-19 07:13:14	37.393	20.175	15	5.1	5.14	0.6659	17
2011-07-25 17:57:21	40.824	27.747	12	5.1	5.08	0.7026	6
2011-07-28 09:18:10	38.325	21.785	10	4.8	4.44	1.0155	9
2011-07-29 19:52:26	38.319	21.770	11	4.5	4.18	1.5858	7
2011-08-07 14:35:34	38.400	21.827	11	5	4.83	0.8978	34
2011-08-14 01:05:02	37.236	22.007	11	4.9	4.87	0.6454	15
2011-08-20 02:00:24	37.935	21.695	18	5.1	4.77	1.2309	15
2011-09-14 03:35:28	37.196	22.049	10	5.1	4.79	0.6297	13
2011-10-04 09:26:28	39.170	21.600	9	4.8	4.52	1.2486	14
2011-10-10 19:07:01	37.195	22.049	14	4.9	4.83	0.5772	14
2011-11-06 20:56:50	35.788	25.695	28	4.8	4.88	0.9475	10
2011-11-10 17:25:40	38.411	21.835	13	4.9	4.61	1.3471	19
2011-11-23 12:17:54	34.282	25.078	11	5.5	5.5	0.3615	6
2011-12-05 08:17:28	38.846	26.346	19	4.8	4.69	1.0789	9
2011-12-09 08:14:01	34.625	23.986	32	4.7	4.65	0.8434	4
2012-01-26 04:24:59	36.047	25.054	22	5.2	5.45	0.5165	6
2012-01-27 01:33:24	36.056	25.087	19	5.4	5.6	0.4544	7
2012-01-27 19:06:33	36.044	25.091	28	4.6	4.55	0.7433	5
2012-01-28 10:50:55	36.038	25.044	24	4.8	4.85	0.7247	5
2012-01-29 09:55:06	36.048	25.049	20	4.8	4.59	0.7173	6
2012-02-14 01:34:39	40.147	24.075	12	5.2	5.39	0.4600	45
2012-02-14 13:21:43	37.729	20.789	21	4.7	4.56	1.0842	8
2012-02-20 06:34:28	38.148	27.451	9	4.6	4.66	0.6547	3
2012-02-22 02:23:13	37.432	21.631	16	4.5	4.22	1.7889	7
2012-03-04 03:31:08	40.170	24.035	8	5.3	5.48	0.3389	41
2012-03-15 05:40:58	38.688	21.291	17	4.5	4.36	1.3323	7
2012-03-22 00:38:13	35.490	26.119	26	4.5	4.23	2.4914	7
2012-03-25 04:46:54	39.444	20.490	18	5	4.58	0.8461	10
2012-04-16 11:23:42	36.719	21.601	30	5.8	5.4	0.5531	29
2012-04-16 12:02:16	36.550	21.451	33	5	4.64	0.9260	10
2012-04-16 15:06:56	36.612	21.595	34	4.8	4.71	1.0413	9
2012-04-23 22:15:34	34.906	25.361	15	4.9	4.64	1.1643	5
2012-04-25 10:34:12	38.406	21.997	10	4.6	4.41	1.5869	16
2012-05-01 14:48:28	38.670	26.678	13	4.8	4.85	0.7061	8
2012-05-07 07:40:38	36.589	21.470	34	4.9	4.45	1.2561	11
2012-05-28 15:44:13	37.995	21.545	13	4.6	4.42	1.3328	13
2012-06-07 10:17:14	41.339	20.878	11	4.5	4.52	1.3242	7
2012-06-07 20:54:21	40.846	27.934	8	5.1	5.27	0.7063	6
2012-06-10 12:49:37	36.406	28.982	30	5	4.98	0.9354	4
2012-06-17 19:20:43	40.531	21.606	14	4.6	4.48	1.2599	14
2012-06-19 01:48:02	34.091	25.223	30	4.7	4.83	0.4883	7
2012-06-25 13:05:30	36.363	28.945	35	5	5	0.9277	3
2012-06-28 13:11:30	38.999	23.150	10	4.5	4.44	1.3476	9

<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2012-08-10 19:07:15	39.268	20.602	14	4.5	4.25	1.2397	14
2012-08-11 21:54:44	37.688	20.834	26	4.5	4.27	1.3340	12
2012-09-09 19:30:21	40.005	24.713	10	4.5	4.68	0.7641	14
2012-09-12 03:27:47	34.828	24.065	30	5.4	5.33	0.6423	11
2012-09-21 08:47:39	35.318	22.671	32	5	4.94	0.4353	5
2012-09-22 03:52:24	38.098	22.734	19	5	5.14	0.7257	52
2012-09-22 06:15:57	40.126	20.854	6	4.8	4.86	0.6520	37
2012-10-23 15:20:42	38.933	20.644	13	4.8	4.74	0.9876	51
2012-10-26 23:16:45	38.944	22.901	19	4.6	4.61	1.0860	20
2012-11-24 21:04:18	36.552	27.909	11	4.7	4.25	1.2486	8
2012-11-24 21:31:16	36.569	27.948	12	4.5	4.13	1.5352	7
2012-11-26 17:35:41	36.595	27.962	16	4.8	4.83	0.8216	18
2012-12-04 18:59:43	36.922	23.070	20	4.5	4.5	1.4375	9
2013-01-08 14:16:08	39.668	25.537	11	5.8	5.78	0.4788	31
2013-01-09 15:41:33	39.680	25.635	10	4.5	4.67	1.0932	5
2013-01-13 08:55:15	39.670	25.551	15	4.5	4.72	1.3075	26
2013-01-26 05:16:00	34.545	24.003	10	4.5	4.23	1.1436	5
2013-01-29 01:48:58	35.368	27.087	30	4.5	4.53	0.8391	6
2013-02-02 11:33:55	34.283	25.070	24	5	4.93	0.4456	4
2013-02-04 07:56:57	34.752	24.129	28	4.6	4.44	1.4294	9
2013-02-15 14:42:55	40.359	23.944	9	4.6	4.7	1.0805	15
2013-02-17 03:12:56	37.282	20.715	27	5.1	5.18	0.8729	11
2013-04-06 11:26:08	34.823	24.108	32	5.3	5.22	0.6032	15
2013-04-09 03:36:27	36.501	23.016	18	4.9	4.83	1.1913	48
2013-05-09 20:12:06	35.995	21.954	26	4.5	4.26	1.5151	8
2013-05-16 21:21:18	36.977	28.392	13	4.5	4.53	0.6385	3
2013-05-23 04:00:37	34.170	25.053	20	4.5	4.65	0.9326	6
2013-05-23 14:09:05	38.653	20.611	12	4.9	4.98	0.5490	55
2013-06-15 16:23:17	34.287	25.115	33	4.6	4.57	0.9908	8
2013-06-15 16:28:57	34.302	25.048	20	5.2	5.01	0.4738	8
2013-06-15 16:51:16	34.207	25.082	21	4.9	4.88	0.5604	6
2013-06-15 16:59:35	34.223	25.068	27	5	4.9	0.6096	4
2013-06-15 17:22:06	34.221	25.051	23	5	4.92	0.5448	4
2013-06-15 19:04:06	34.336	25.094	24	4.6	4.4	0.9909	6
2013-06-16 00:53:36	34.259	25.130	26	4.6	4.56	0.6649	8
2013-06-16 21:47:39	34.339	25.151	32	5.2	5.12	0.2865	6
2013-06-18 17:18:26	36.901	22.103	16	4.7	4.18	1.8602	15
2013-06-18 22:27:07	34.293	25.025	24	4.9	4.78	0.5983	9
2013-06-19 19:05:08	34.188	25.081	20	4.8	4.87	0.6827	9
2013-06-22 08:41:09	40.233	19.669	21	4.6	4.68	1.1336	12
2013-07-02 10:45:22	40.123	21.844	13	4.9	4.85	0.8336	56
2013-07-03 13:28:23	40.123	21.852	12	4.9	5.06	0.5368	54
2013-07-16 18:57:13	34.269	25.069	26	4.7	4.61	0.6509	4



<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2013-07-30 05:33:09	40.312	25.830	5	5	4.87	0.9068	8
2013-07-31 10:36:21	36.633	21.461	31	4.5	4.4	1.4076	10
2013-08-07 09:02:45	38.700	22.672	12	4.5	4.53	0.8974	25
2013-08-07 09:06:52	38.698	22.680	16	5.4	5.33	0.6133	69
2013-08-07 13:44:32	38.690	22.658	16	4.7	4.97	0.6425	68
2013-08-09 04:19:23	39.331	20.471	9	5	4.85	0.3979	23
2013-08-09 11:49:23	38.702	22.691	13	4.9	5.07	0.5955	63
2013-08-09 13:10:10	38.685	22.659	16	5	4.95	0.7160	65
2013-09-06 02:57:44	34.648	24.932	5	4.9	4.39	1.2466	13
2013-09-08 04:59:27	34.779	25.094	9	4.9	4.87	0.8491	14
2013-09-09 17:35:16	38.002	20.743	15	4.6	4.5	1.3229	22
2013-09-16 14:42:40	38.702	22.719	17	4.8	4.88	0.7803	67
2013-09-16 15:01:14	38.703	22.728	14	5.3	5.24	0.5354	68
2013-09-18 18:32:58	34.251	25.110	31	4.6	4.59	0.8167	5
2013-09-20 02:05:19	38.169	23.132	15	4.5	4.34	1.4450	33
2013-11-12 18:09:28	38.922	23.079	12	4.9	5.04	0.7329	71
2013-11-27 14:21:16	37.304	23.003	19	4.5	4.49	1.4685	27
2013-12-03 16:05:09	35.489	27.099	26	4.6	4.21	2.3998	11
2013-12-10 15:24:28	36.398	21.317	34	4.7	4.83	0.4224	7
2014-01-11 04:12:57	37.837	21.019	13	5	4.87	0.8008	56
2014-01-26 14:08:39	38.188	20.497	19	4.6	4.48	1.5199	4
2014-01-26 14:59:24	38.327	20.338	11	4.7	4.52	1.4273	4
2014-01-26 18:45:08	38.249	20.405	16	5.4	5.29	0.5974	59
2014-01-26 19:12:04	38.235	20.381	13	4.7	4.62	0.8219	17
2014-01-26 21:15:35	38.138	20.346	12	4.8	4.87	0.7955	55
2014-01-26 23:06:54	38.225	20.335	13	4.5	4.42	1.2419	7
2014-01-27 13:05:50	38.246	20.432	11	4.7	4.51	0.7737	15
2014-01-27 15:39:34	38.392	20.413	10	4.5	4.44	0.8700	14
2014-01-28 05:12:54	38.242	20.422	15	4.5	4.44	1.1859	17
2014-01-28 22:22:38	38.413	20.461	14	4.5	4.44	1.0294	14
2014-01-30 11:06:18	38.406	20.471	12	4.8	4.76	0.6555	59
2014-01-31 06:52:47	38.445	20.425	8	4.5	4.57	1.0086	15
2014-01-31 12:45:41	38.427	20.461	13	4.5	4.41	1.2917	15
2014-02-01 08:14:03	38.700	22.747	13	4.9	4.87	0.6702	72
2014-02-01 16:33:38	38.188	20.381	7	4.9	4.84	0.6159	55
2014-02-03 03:08:44	38.267	20.323	9.4	5.8	6.05	0.2732	57
2014-02-04 19:42:12	38.311	20.373	16	4.6	4.43	0.9622	19
2014-02-06 07:58:26	38.703	22.762	13	4.5	4.51	1.2353	29
2014-02-06 19:21:00	38.152	20.344	16	4.7	4.66	0.8897	56
2014-02-07 01:21:53	38.300	21.712	12	4.5	4.46	0.8924	41
2014-02-07 03:26:44	38.332	20.412	13	4.6	4.23	1.2958	23
2014-02-07 08:59:42	38.239	20.437	12	4.5	4.25	1.4965	10
2014-02-09 08:22:59	38.186	20.413	9	4.8	4.64	0.8602	54

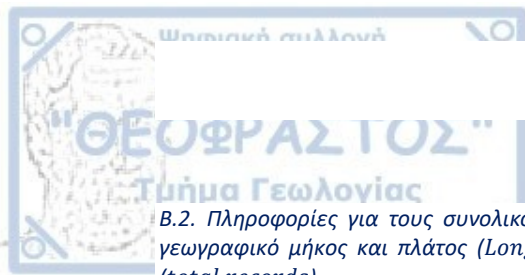
<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2014-02-12 10:34:31	38.188	20.337	10	4.7	4.7	0.8707	55
2014-02-14 03:38:32	38.168	20.347	7	4.8	4.94	0.6191	52
2014-02-15 07:31:17	38.270	20.393	14	4.9	4.95	0.6654	57
2014-02-21 15:18:23	38.193	20.416	16	4.5	4.32	1.3636	21
2014-03-05 12:49:21	38.122	20.346	14	4.9	5	0.5723	24
2014-03-07 17:43:57	36.819	21.674	20	4.8	4.19	2.0291	17
2014-04-14 20:41:25	34.044	25.891	29	5.2	5.03	0.6328	8
2014-04-18 05:07:36	38.434	21.844	11	4.5	4.12	1.6940	32
2014-04-25 02:56:34	35.555	21.571	34	4.9	4.97	0.4447	15
2014-04-25 17:20:33	35.567	21.614	32	4.6	4.7	0.6299	12
2014-05-12 00:54:32	39.765	20.274	15	5.1	4.94	1.0132	32
2014-05-24 11:33:07	40.294	25.660	12	4.5	4.54	0.9362	5
2014-05-24 14:49:14	40.412	25.992	5	4.6	4.62	0.8200	3
2014-05-25 00:07:59	40.029	24.328	8	4.5	4.48	1.0435	4
2014-05-31 22:08:29	34.851	25.823	14	4.5	4.36	1.3725	10
2014-06-01 12:05:51	34.595	24.608	24	4.9	5	0.8526	11
2014-06-27 16:14:27	38.219	25.117	7	4.7	4.78	0.9165	27
2014-07-02 04:01:29	35.514	21.541	17	4.5	4.57	0.5997	17
2014-07-03 05:04:47	40.213	27.960	13	4.5	4.63	0.9162	6
2014-07-11 09:46:05	38.447	23.703	15	4.5	4.34	1.6053	60
2014-07-22 08:04:19	34.206	26.225	30	4.8	4.67	0.6180	16
2014-08-08 08:20:48	34.748	24.840	26	4.7	4.78	1.0518	17
2014-08-13 14:17:43	34.498	28.333	16	4.6	4.62	1.0575	11
2014-08-21 20:37:18	35.516	27.733	13	4.7	4.56	0.8390	17
2014-08-22 04:27:54	39.928	23.471	11	5.2	5.21	0.5639	54
2014-09-21 00:43:40	38.338	21.847	12	5	5.08	0.4080	60
2014-10-03 15:12:11	37.938	21.784	23	4.8	4.67	1.1581	47
2014-10-03 22:20:47	34.514	26.352	14	5	4.98	0.7503	9
2014-10-06 18:08:01	34.932	26.585	19	4.5	4.54	1.2995	15
2014-10-24 23:43:15	38.898	21.154	13	5.3	5.46	0.4186	56
2014-11-07 07:41:39	38.096	20.420	18	5	4.99	0.7024	46
2014-11-07 17:13:00	38.306	22.151	9	5	5.04	0.6441	49
2014-11-08 23:15:42	38.124	20.429	18	5.1	5.16	0.7180	48
2014-11-10 06:16:40	37.092	28.784	8	4.8	4.84	0.6908	7
2014-11-13 09:37:53	38.397	20.468	16	4.6	4.6	1.1593	52
2014-11-17 23:05:56	38.648	23.407	9	5.4	5.29	0.6324	65
2014-11-17 23:09:03	38.642	23.395	11	5.2	5.41	0.4655	59
2014-12-04 21:16:29	38.602	26.149	14	4.5	4.42	1.1397	15
2014-12-06 01:45:07	38.901	26.278	7	5.1	5.24	0.4947	15
2014-12-06 06:20:54	38.888	26.278	20	5	4.84	1.0370	12
2014-12-11 22:24:23	38.377	20.440	28	4.8	4.76	1.5986	58
2014-12-29 20:34:13	41.651	19.316	13	4.8	4.79	0.7460	11
2015-01-02 06:16:31	37.563	20.478	19	4.6	4.68	1.0341	45

<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2015-01-05 11:53:59	34.945	26.332	13	4.5	4.46	1.0716	19
2015-01-28 15:54:35	34.447	25.085	35	5.2	5.29	0.4095	13
2015-02-07 01:56:20	41.864	20.174	18	4.7	4.63	1.1960	15
2015-03-12 00:39:23	35.498	27.796	11	4.7	4.37	1.4718	17
2015-03-13 13:33:09	36.396	23.192	25	4.6	4.55	1.3678	45
2015-03-16 11:18:34	37.403	20.142	25	4.6	4.67	1.0644	32
2015-03-31 15:48:40	38.315	20.488	16	4.8	4.49	1.0927	58
2015-04-04 04:38:20	38.303	20.498	18	4.5	4.44	1.1179	54
2015-04-06 16:42:32	35.315	27.536	27	4.5	4.48	0.8902	17
2015-04-08 13:33:34	35.267	27.735	30	4.5	4.58	1.0336	15
2015-04-14 08:00:06	34.490	26.612	28	4.7	4.56	0.8890	14
2015-04-16 18:50:22	35.021	26.764	31	4.5	4.42	1.0300	14
2015-04-16 19:02:15	35.099	26.864	25	5	5.01	0.6593	16
2015-04-16 20:15:51	35.068	26.855	26	4.5	4.49	1.0589	15
2015-04-17 02:05:42	35.115	26.742	18	5.4	5.48	0.4784	21
2015-04-17 10:23:45	35.036	26.718	25	4.5	4.37	1.2878	18
2015-04-17 11:30:38	35.025	26.846	16	4.5	4.5	0.9046	17
2015-04-17 16:39:43	34.990	26.740	27	4.7	4.59	1.3219	16
2015-04-18 16:46:50	36.494	23.165	27	4.9	4.9	0.8859	44
2015-04-20 07:43:03	35.027	26.790	27	4.6	4.42	1.0549	18
2015-05-04 04:07:38	34.398	25.131	24	4.6	4.56	1.0608	10
2015-05-06 03:49:53	34.592	25.102	30	4.5	4.75	0.8019	6
2015-05-11 05:02:01	35.041	26.830	30	4.5	4.54	1.2060	5
2015-06-02 14:04:21	38.160	20.407	15	4.6	4.67	0.8223	8
2015-06-09 01:09:03	38.644	23.369	11	5.3	5.16	0.7460	65
2015-06-09 21:49:47	35.097	26.778	16	5.4	5.35	0.5059	19
2015-07-24 02:39:43	40.257	26.289	9	4.8	4.69	1.0959	16
2015-08-08 17:22:20	39.182	21.386	10	4.6	4.51	1.0071	61
2015-08-30 13:28:02	37.819	21.328	23	4.6	4.49	1.2043	53
2015-09-10 08:12:44	38.838	26.329	19	4.9	4.7	1.0057	16
2015-09-13 02:57:28	37.093	28.899	13	4.5	4.53	1.0456	8
2015-09-15 05:04:43	34.744	25.016	15	4.5	4.32	1.1990	13
2015-09-16 19:52:11	35.343	27.769	16	5	4.87	1.0029	17
2015-09-29 09:12:40	34.733	24.609	33	4.7	4.57	1.0617	11
2015-11-17 08:33:40	38.670	20.564	10	5.3	5.19	0.5995	61
2015-11-17 11:57:25	38.694	20.584	8	4.7	4.61	0.7627	60
2015-11-17 12:37:56	38.695	20.603	9	4.9	4.73	0.8157	58
2015-11-18 05:18:13	38.519	20.456	10	4.7	4.57	0.8461	55
2015-11-18 12:15:38	38.851	20.618	14	5	5.05	0.6535	58
2015-11-18 13:03:14	38.713	20.572	10	4.9	4.89	0.7035	63
2015-11-20 05:12:24	38.482	20.441	15	5	4.87	0.9450	59
2015-11-20 09:33:14	38.640	20.518	10	4.7	4.85	0.6282	57
2015-11-20 23:37:04	38.706	20.602	8	4.7	4.79	0.5495	63

<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2015-11-21 00:41:56	38.721	20.584	6	4.7	4.84	0.6051	63
2016-01-04 18:00:55	38.624	20.559	16	4.6	4.48	1.0143	58
2016-02-05 23:01:29	34.854	25.901	20	4.7	4.59	1.3529	17
2016-02-15 18:55:00	37.586	21.767	22	5.3	5.33	0.5256	51
2016-03-12 12:40:39	35.348	23.571	14	4.8	4.76	1.0951	26
2016-03-29 01:05:28	37.514	20.191	20	5.4	5.35	0.5772	38
2016-04-03 00:46:15	34.270	25.746	16	4.9	4.94	0.4797	7
2016-05-21 16:33:07	41.242	21.019	20	4.7	4.78	1.1374	27
2016-05-21 16:41:29	41.226	20.986	19	4.8	4.93	0.7360	30
2016-05-25 08:36:15	35.043	26.275	25	5.5	5.39	0.6194	19
2016-06-04 16:38:25	38.138	20.345	19	4.8	4.74	0.9031	55
2016-07-30 17:26:24	35.295	22.936	31	5.2	5.2	0.4323	11
2016-09-11 13:10:08	41.981	21.506	1.4	5	5.13	0.7192	18
2016-09-12 08:26:04	38.919	27.740	7	5.1	4.99	0.7117	12
2016-09-12 09:29:38	38.925	27.745	8	4.7	4.65	0.9738	11
2016-09-13 06:14:51	37.760	21.147	17	4.7	4.39	1.1358	44
2016-09-28 07:17:36	36.777	21.970	37	4.9	5.01	0.9131	37
2016-10-03 02:34:44	37.728	21.175	11	4.5	4.5	0.7652	39
2016-10-15 20:14:50	39.744	20.704	20	5.5	5.48	0.5406	47
2016-10-15 20:18:43	39.738	20.740	17	4.5	4.92	0.4255	19
2016-10-15 23:06:59	39.734	20.715	20	4.5	4.43	1.1103	40
2016-10-16 00:09:59	39.747	20.695	19	4.9	4.73	0.7995	38
2016-10-16 00:41:16	39.763	20.659	16	5.2	4.96	0.8832	38
2016-10-16 00:48:18	39.745	20.710	18	4.9	4.8	0.8836	13
2016-10-16 01:32:06	39.743	20.681	18	4.8	4.52	1.4510	23
2016-10-16 02:21:04	39.734	20.673	17	5	4.91	0.7934	41
2016-10-16 03:40:22	39.772	20.705	20	4.9	4.92	0.8899	44
2016-10-16 05:06:35	39.765	20.657	19	4.7	4.34	1.1899	30
2016-10-17 01:30:31	37.938	26.994	15	4.5	4.63	1.1128	12
2016-10-19 21:23:58	39.716	20.649	13	4.6	4.49	0.9373	44
2016-10-29 20:15:29	39.924	19.738	15	4.6	4.46	1.2865	33
2016-11-10 12:12:43	40.980	22.744	13	4.7	4.75	0.8672	34
2016-11-18 23:22:48	40.974	22.740	11	4.9	4.94	0.8030	39
2016-11-29 00:19:29	34.916	23.363	9	4.5	4.45	0.7111	6
2016-12-02 11:46:04	36.483	21.573	9	4.6	4.6	1.3778	37
2016-12-03 08:35:57	35.851	27.307	10	4.8	4.22	1.9265	18
2016-12-03 13:58:15	34.265	25.095	39	4.6	4.75	0.4467	7
2016-12-03 21:04:36	38.112	22.028	18	4.5	4.59	1.3301	54
2016-12-27 19:31:06	36.616	22.975	10	4.8	4.52	1.4986	42
2017-01-01 13:04:02	34.993	27.038	10	4.9	4.85	0.4544	10
2017-01-09 09:53:17	38.417	21.783	10	4.8	4.75	0.9088	51
2017-01-11 15:50:30	34.372	22.463	22	4.5	4.51	0.7349	4
2017-01-15 03:37:22	35.116	23.165	10	4.8	4.63	0.6573	8

<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2017-01-27 17:07:58	40.833	19.857	5	4.5	4.84	0.6373	25
2017-01-27 20:51:27	36.006	28.749	20	4.8	4.95	0.6888	7
2017-02-07 02:24:04	39.528	26.099	8	5.3	5.22	0.6614	23
2017-02-07 21:00:55	39.569	26.165	6	4.5	4.45	0.9513	14
2017-02-08 01:38:04	39.544	26.172	10	4.5	4.67	0.8130	20
2017-02-10 08:55:26	39.549	26.191	10	4.7	4.67	0.8755	15
2017-02-12 13:48:16	39.600	26.088	6	5.3	5.06	0.6679	17
2017-02-15 23:01:22	34.705	24.902	26	4.5	4.71	1.1080	11
2017-02-16 00:19:00	39.544	26.121	7	4.7	4.62	0.9190	22
2017-02-28 23:27:35	39.521	26.125	9	4.7	4.71	0.7929	17
2017-03-15 23:29:48	35.841	27.645	27	4.7	4.54	1.3112	16
2017-04-05 15:43:29	38.385	21.814	10	4.5	4.56	1.2715	43
2017-04-07 04:43:58	40.044	23.692	10	4.5	4.44	1.1094	29
2017-04-13 16:22:16	37.148	28.669	10	5	5.16	0.3746	10
2017-04-20 14:11:28	39.446	28.499	10	4.5	4.55	1.0468	4
2017-04-21 14:12:22	38.661	27.669	10	5.1	5.01	0.6398	8
2017-04-27 12:04:28	35.398	21.454	10	5	4.99	0.3780	14
2017-05-17 11:30:33	35.966	27.520	13	5	5.12	0.8225	18
2017-05-24 10:30:59	41.565	20.187	10	4.8	4.58	1.2102	16
2017-05-27 15:53:24	38.798	27.837	10	5.2	5.17	0.6807	12
2017-05-28 02:50:27	38.769	27.785	10	4.9	4.84	0.5097	6
2017-05-28 02:52:56	38.781	27.803	10	4.8	4.86	0.5809	11
2017-05-28 04:38:20	38.749	27.837	10	4.6	4.62	0.9277	9
2017-05-28 07:34:04	38.708	27.837	10	4.5	4.38	0.8979	9
2017-05-28 11:04:59	38.764	27.778	3	4.9	5.03	0.4903	12
2017-06-12 14:19:48	38.881	26.320	10	4.6	4.33	1.5248	16
2017-06-14 07:10:06	34.537	23.844	10	4.5	4.39	1.3461	8
2017-06-17 03:40:37	38.899	26.215	10	4.8	4.68	0.9685	14
2017-06-17 19:50:06	38.886	26.419	8	5.3	5.24	0.6101	19
2017-07-03 11:18:21	41.156	20.934	10	5	4.98	0.8672	28
2017-07-03 13:53:44	35.092	26.630	10	4.9	4.68	0.5343	16
2017-07-15 20:30:15	34.925	25.429	10	5.3	5.28	0.5246	17
2017-07-20 22:52:59	36.846	27.411	10	4.6	4.68	0.6919	16
2017-07-20 23:23:52	36.948	27.265	10	5.1	5.1	0.3880	11
2017-07-21 01:35:44	36.875	27.593	10	4.5	4.46	0.8455	14
2017-07-21 02:12:35	36.803	27.345	10	4.6	4.71	0.8142	15
2017-07-21 05:04:01	36.823	27.640	14	5	4.66	0.5375	12
2017-07-21 10:36:54	34.922	25.473	10	4.6	4.41	1.0371	17
2017-07-21 17:09:50	36.907	27.301	10	5	5.09	0.4614	16
2017-07-22 17:09:21	36.960	27.342	10	4.8	4.77	0.7388	17
2017-07-30 17:51:19	36.969	27.653	10	4.8	4.64	0.6937	17
2017-08-07 05:18:48	36.925	27.545	10	4.9	4.65	0.7482	14
2017-08-08 07:42:21	36.965	27.571	10	5.3	5.34	0.3486	19

<i>datetime</i>	<i>lat</i>	<i>long</i>	<i>depth[km]</i>	<i>mag</i>	<i>M<sub>w</sub>(Inv)</i>	<i>f<sub>c</sub>(Inv)</i>	<i>No of rec</i>
2017-08-13 11:16:53	37.051	27.700	5	4.9	4.94	0.5242	17
2017-08-14 02:43:49	37.096	27.699	10	5	4.88	0.5480	15
2017-08-18 03:46:52	34.763	24.034	35	4.5	4.19	1.8056	10
2017-09-11 16:20:15	39.210	21.573	10	5	4.69	1.1546	62
2017-09-16 08:33:55	37.049	27.668	6	4.5	4.29	0.8900	14
2017-09-18 16:47:12	40.091	19.960	16	4.5	4.14	1.5499	39
2017-09-28 10:00:30	37.486	20.883	10	4.5	4.26	1.5517	46
2017-10-11 22:49:44	39.165	24.238	12	5.1	4.97	0.9205	58
2017-10-14 09:55:38	40.843	21.283	10	4.5	4.37	1.3056	32
2017-10-24 09:36:24	36.961	27.353	10	4.7	4.76	0.7676	20
2017-11-22 20:22:52	37.051	28.643	10	5.1	5.16	0.2848	14
2017-11-24 18:51:43	36.890	21.490	10	4.7	4.62	1.0358	40
2017-12-08 05:20:40	36.306	27.620	10	4.6	4.48	1.5078	18
2017-12-13 07:30:07	34.885	23.784	36	4.8	4.99	0.6088	11
2017-12-16 16:57:05	34.240	26.424	10	4.6	4.63	0.7336	14
2017-12-20 04:18:18	34.701	23.453	27	4.7	4.74	0.6283	9
2017-12-25 05:13:50	38.583	26.738	10	4.9	4.66	1.2554	20
2017-12-31 04:02:19	38.243	22.861	10	4.8	4.89	0.6865	61
2018-01-02 04:24:17	41.284	22.835	12	4.9	5.01	0.6507	42
2018-01-02 17:36:34	41.259	22.837	11	4.5	4.25	1.2777	24
2018-01-13 16:30:17	34.672	23.360	34	4.5	4.64	0.5064	10
2018-01-15 20:24:14	38.200	23.935	10	4.5	4.33	1.8090	55
2018-01-23 23:14:04	35.107	23.200	10	4.7	4.61	0.5665	7
2018-02-21 23:44:55	37.854	20.363	20	5	4.87	0.9784	43
2018-03-12 12:35:29	34.510	23.618	10	4.9	4.69	0.4772	6
2018-04-10 15:56:20	36.654	26.140	10	4.6	4.78	1.0290	33
2018-04-21 00:20:07	39.982	23.634	10	4.7	4.91	0.7769	50
2018-05-03 02:04:34	40.008	26.885	10	4.5	4.44	1.2556	12
2018-05-16 22:30:03	36.514	22.913	10	4.7	4.65	1.2477	49
2018-06-05 08:52:40	36.582	22.591	10	4.7	4.71	0.9402	48
2018-06-25 05:14:46	36.779	21.407	30	5.3	5.51	0.4573	44
2018-07-04 09:01:09	41.447	19.583	22	4.9	5.01	0.7727	18
2018-07-13 12:42:40	35.026	25.964	10	4.9	4.68	0.8539	16
2018-08-11 15:38:33	41.600	20.128	10	5	4.89	0.9317	20



B.2. Πληροφορίες για τους συνολικούς σταθμούς που έχουν αντιστοιχηθεί με σεισμούς. Περιλαμβάνεται το γεωγραφικό μήκος και πλάτος (*Longitude, Latitude*) καθώς και οι συνολικές καταγραφές σε κάθε σταθμό (*total records*)

<i>Station</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Total rec.</i>	<i>HER1</i>		
<b>AGN1</b>	35.188	25.716	79	<b>HER1</b>	35.318	25.102 71
<b>AGR2</b>	38.632	21.414	21	<b>HER2</b>	35.338	25.136 78
<b>AGR3</b>	38.589	21.416	52	<b>HER3</b>	35.330	25.107 72
<b>AGT1</b>	38.251	20.384	4	<b>IER1</b>	40.397	23.875 4
<b>AIA1</b>	40.164	21.820	55	<b>IGM2</b>	39.486	20.259 23
<b>AIG2</b>	38.242	22.072	99	<b>ITC1</b>	38.365	20.716 70
<b>AKR1</b>	38.154	22.313	100	<b>ITE1</b>	38.434	22.427 37
<b>ALX2</b>	40.845	25.874	27	<b>ITS1</b>	40.605	23.012 35
<b>AMK1</b>	40.520	22.989	6	<b>JAN2</b>	39.664	20.852 107
<b>AOL1</b>	37.643	21.625	120	<b>JAN3</b>	39.684	20.838 91
<b>ARE2</b>	36.666	22.383	93	<b>KAC1</b>	38.138	21.548 135
<b>ARG2</b>	38.178	20.488	85	<b>KAL3</b>	37.025	22.103 82
<b>ARK1</b>	35.149	25.264	63	<b>KAR2</b>	39.366	21.919 104
<b>ARN1</b>	40.488	23.596	3	<b>KAS2</b>	40.505	21.281 94
<b>ARS1</b>	37.635	22.729	50	<b>KIF1</b>	38.077	23.815 83
<b>ART2</b>	39.148	20.994	100	<b>KIL1</b>	40.990	22.868 5
<b>AST1</b>	38.542	21.090	124	<b>KIS1</b>	35.494	23.659 22
<b>ATH5</b>	37.975	23.737	39	<b>KLR1</b>	40.583	22.950 56
<b>CH01</b>	35.517	24.021	75	<b>KLV1</b>	38.033	22.108 118
<b>CH02</b>	35.515	24.031	75	<b>KMT1</b>	41.116	25.407 35
<b>CH03</b>	35.533	24.070	9	<b>KMV1</b>	38.779	22.785 79
<b>CHV1</b>	38.184	20.382	13	<b>KNS1</b>	40.048	20.752 98
<b>DRA2</b>	41.159	24.148	24	<b>KNT1</b>	41.167	22.900 9
<b>E001</b>	40.671	23.307	8	<b>KOR2</b>	37.940	22.950 79
<b>E002</b>	40.674	23.315	8	<b>KOS1</b>	36.892	27.290 12
<b>E003</b>	40.676	23.324	11	<b>KOS2</b>	36.894	27.289 12
<b>FLO1</b>	40.779	21.400	4	<b>KOZ2</b>	40.305	21.784 95
<b>FLO2</b>	40.780	21.405	68	<b>KRI1</b>	37.662	20.817 73
<b>FRM1</b>	40.655	23.298	8	<b>KRK1</b>	39.618	19.916 97
<b>FRS1</b>	39.293	22.384	101	<b>KRL1</b>	37.795	26.706 65
<b>GOR1</b>	35.058	24.963	69	<b>KSS1</b>	35.419	26.921 40
<b>GRA1</b>	40.675	23.289	11	<b>KYM1</b>	38.634	24.106 84
<b>GRE3</b>	40.085	21.438	96	<b>KYP2</b>	37.250	21.667 84
<b>GTH2</b>	36.760	22.566	67	<b>KYT1</b>	36.299	22.964 10
				<b>LAM2</b>	38.902	22.432 88

<b>LAR4</b>	39.642	22.422	86	<b>RGE1</b>	36.027	27.931	60
<b>LAR5</b>	39.640	22.411	36	<b>RGG1</b>	38.719	22.709	4
<b>LEF2</b>	38.830	20.708	109	<b>RKL1</b>	36.337	28.171	61
<b>LEO1</b>	37.169	22.864	93	<b>RKT1</b>	35.954	27.767	53
<b>LGD1</b>	40.749	23.070	12	<b>RLN1</b>	36.089	28.087	56
<b>LIM1</b>	39.877	25.060	4	<b>RPN1</b>	36.449	28.218	56
<b>LMN1</b>	39.875	25.059	38	<b>RSO1</b>	36.363	28.002	58
<b>LMS2</b>	40.835	21.142	68	<b>RTH1</b>	35.365	24.472	73
<b>LSM0</b>	40.628	22.960	8	<b>SAP1</b>	41.023	25.701	7
<b>LXR1</b>	38.201	20.437	61	<b>SAR1</b>	40.097	23.978	13
<b>MGP1</b>	37.402	22.138	101	<b>SEIS</b>	40.632	22.963	69
<b>MOS1</b>	37.953	23.682	77	<b>SFIR</b>	36.421	25.428	59
<b>MSL1</b>	38.373	21.424	102	<b>SFK1</b>	35.256	24.173	12
<b>MYT1</b>	39.085	26.569	51	<b>SFL1</b>	41.190	26.304	40
<b>NAX1</b>	37.101	25.374	98	<b>SGR1</b>	39.211	25.855	60
<b>NHR1</b>	41.180	23.281	4	<b>SIA1</b>	40.257	21.553	90
<b>NMA1</b>	37.819	22.663	110	<b>SIT2</b>	35.206	26.107	83
<b>NPS1</b>	36.513	23.062	64	<b>SKO1</b>	39.123	23.729	69
<b>OUR1</b>	40.333	23.979	9	<b>SKY1</b>	38.904	24.565	70
<b>PAN1</b>	40.585	23.031	5	<b>SOH1</b>	40.821	23.356	9
<b>PAT4</b>	38.234	21.748	106	<b>SPP1</b>	41.023	25.701	32
<b>PAT5</b>	38.296	21.795	84	<b>STC1</b>	40.649	23.305	5
<b>PER1</b>	38.012	23.703	83	<b>STE1</b>	40.645	23.305	9
<b>PET1</b>	36.964	21.925	95	<b>STL1</b>	40.662	22.935	42
<b>PIR1</b>	37.937	23.643	84	<b>TEK1</b>	40.684	22.891	4
<b>PIR2</b>	37.946	23.671	76	<b>TH07</b>	40.638	22.949	4
<b>PIR3</b>	37.957	23.652	90	<b>THS1</b>	40.738	24.575	54
<b>PLA1</b>	40.556	22.989	22	<b>THV2</b>	38.316	23.320	90
<b>PLC1</b>	35.231	23.683	20	<b>TRP1</b>	37.511	22.363	99
<b>PLM1</b>	38.975	26.369	17	<b>VAR2</b>	37.864	21.208	55
<b>PLN1</b>	39.998	23.575	43	<b>VAS2</b>	38.630	20.608	116
<b>PLR1</b>	39.936	23.677	4	<b>VOL2</b>	39.366	22.951	82
<b>POL1</b>	40.380	23.441	4	<b>VOL3</b>	39.374	22.935	94
<b>PRE2</b>	38.958	20.755	104	<b>VRO1</b>	38.406	26.134	11
<b>PRFO</b>	40.593	22.956	41	<b>VSK1</b>	38.409	20.564	85
<b>PRR1</b>	40.683	23.279	3	<b>VSL1</b>	40.479	23.136	8
<b>PRS1</b>	40.680	23.286	4	<b>W001</b>	40.665	23.274	8
<b>PTO1</b>	40.510	21.682	91	<b>W002</b>	40.661	23.260	11
<b>PYL1</b>	36.914	21.695	101	<b>W003</b>	40.660	23.251	9
<b>PYR2</b>	37.667	21.451	119	<b>XAN2</b>	41.142	24.891	34
<b>PYR3</b>	37.679	21.462	82	<b>ZAK2</b>	37.788	20.900	92
<b>RDI1</b>	36.451	28.224	59				



B.3. Καμπύλες διόρθωσης του κατακόρυφου παράγοντα ενίσχυσης  
(Vertical amplification correction functions, VACFs)

Μέση καμπύλη  
VACF

<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>
0.30	1.556	0.184
0.36	1.537	0.184
0.44	1.425	0.193
0.54	1.438	0.199
0.66	1.479	0.202
0.80	1.541	0.204
0.97	1.634	0.213
1.18	1.722	0.227
1.44	1.810	0.229
1.74	1.906	0.207
2.12	2.048	0.207
2.58	2.132	0.218
3.14	2.414	0.220
3.82	2.529	0.220
4.64	2.540	0.245
5.64	2.401	0.250
6.86	2.211	0.261
8.34	1.969	0.247
10.14	1.714	0.250
12.34	1.422	0.260
15.00	1.063	0.293

Peak HVSR  $\leq 2$

<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>
0.30	1.266	0.147
0.36	1.264	0.141
0.44	1.212	0.145
0.54	1.241	0.149
0.66	1.255	0.164
0.80	1.274	0.179
0.97	1.270	0.214
1.18	1.356	0.231
1.44	1.390	0.242
1.74	1.491	0.221
2.12	1.552	0.223
2.58	1.591	0.199
3.14	1.633	0.194
3.82	1.759	0.203
4.64	1.587	0.185
5.64	1.493	0.189
6.86	1.324	0.198
8.34	1.332	0.213
10.14	1.140	0.240
12.34	0.961	0.283
15.00	0.721	0.287

Peak HVSR  $\leq 3.5$   
 $0.3\text{Hz} \leq f_0 < 1.0\text{Hz}$

<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>
0.30	1.729	0.160
0.36	1.696	0.177
0.44	1.568	0.196
0.54	1.661	0.186
0.66	1.710	0.198
0.80	1.849	0.207
0.97	2.009	0.194
1.18	2.197	0.176
1.44	2.298	0.209
1.74	2.259	0.163
2.12	2.379	0.168
2.58	2.486	0.161
3.14	2.915	0.177
3.82	2.698	0.161
4.64	2.683	0.167
5.64	2.331	0.187
6.86	2.168	0.190
8.34	1.892	0.207
10.14	1.526	0.222
12.34	1.368	0.248
15.00	0.927	0.253

Peak HVSR  $> 3.5$   
 $0.3\text{Hz} \leq f_0 < 1.0\text{Hz}$

<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>
0.30	1.748	0.137
0.36	1.571	0.154
0.44	1.380	0.174
0.54	1.471	0.157
0.66	1.625	0.196
0.80	1.891	0.205
0.97	2.217	0.232

Peak HVSR  $\leq 3.5$   
 $1.0\text{Hz} \leq f_0 \leq 3.0\text{Hz}$

<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>
0.30	1.486	0.144
0.36	1.498	0.136
0.44	1.430	0.141
0.54	1.468	0.146
0.66	1.496	0.146
0.80	1.497	0.153
0.97	1.517	0.164

Peak HVSR  $> 3.5$   
 $1.0\text{Hz} \leq f_0 \leq 3.0\text{Hz}$

<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>
0.30	1.769	0.227
0.36	1.806	0.221
0.44	1.672	0.233
0.54	1.663	0.247
0.66	1.664	0.243
0.80	1.652	0.230
0.97	1.762	0.210

1.18	2.754	0.241	1.18	1.616	0.176	1.18	1.771	0.201
1.44	2.920	0.300	1.44	1.700	0.166	1.44	1.954	0.162
1.74	2.910	0.260	1.74	1.765	0.157	1.74	2.146	0.168
2.12	2.916	0.245	2.12	1.876	0.154	2.12	2.428	0.169
2.58	2.680	0.281	2.58	1.965	0.151	2.58	2.556	0.197
3.14	3.373	0.199	3.14	2.073	0.156	3.14	3.084	0.202
3.82	3.483	0.191	3.82	2.299	0.161	3.82	3.464	0.214
4.64	3.382	0.232	4.64	2.304	0.166	4.64	3.648	0.255
5.64	3.247	0.224	5.64	2.198	0.174	5.64	3.362	0.247
6.86	2.969	0.216	6.86	2.097	0.211	6.86	2.886	0.251
8.34	2.531	0.180	8.34	1.728	0.210	8.34	2.558	0.245
10.14	2.113	0.156	10.14	1.602	0.217	10.14	2.328	0.220
12.34	1.648	0.159	12.34	1.309	0.249	12.34	1.821	0.219
15.00	1.498	0.264	15.00	1.001	0.306	15.00	1.329	0.267

*Peak HVSr ≤ 3.5*

*Peak HVSr > 3.5*

*3.0Hz < f<sub>0</sub> < 15.0Hz*

*3.0Hz < f<sub>0</sub> < 15.0Hz*

<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>	<i>freq</i>	<i>VACF</i>	<i>log_std</i>
0.30	1.509	0.152	0.30	1.223	0.147
0.36	1.462	0.138	0.36	1.163	0.145
0.44	1.329	0.132	0.44	1.040	0.129
0.54	1.258	0.133	0.54	0.950	0.135
0.66	1.245	0.135	0.66	1.064	0.137
0.80	1.264	0.137	0.80	1.244	0.154
0.97	1.335	0.151	0.97	1.366	0.195
1.18	1.332	0.187	1.18	1.332	0.253
1.44	1.362	0.198	1.44	1.286	0.214
1.74	1.513	0.166	1.74	1.353	0.170
2.12	1.638	0.169	2.12	1.472	0.178
2.58	1.958	0.236	2.58	1.515	0.224
3.14	2.048	0.236	3.14	1.714	0.153
3.82	1.820	0.156	3.82	1.760	0.141
4.64	1.699	0.179	4.64	2.019	0.202
5.64	1.528	0.173	5.64	2.403	0.274
6.86	1.446	0.173	6.86	2.622	0.338
8.34	1.367	0.222	8.34	2.353	0.250
10.14	1.234	0.241	10.14	1.914	0.261
12.34	1.189	0.320	12.34	1.573	0.225
15.00	0.865	0.282	15.00	1.252	0.257