



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ

ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ



ΕΛΙΔΕΚ.
Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας

**1η Προκήρυξη Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την
ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την
Προμήθεια Ερευνητικού Εξοπλισμού Μεγάλης Αξίας**

**Π1.2 Τεχνική Έκθεση για την Αξιολόγηση και
Βαθμονόμηση της Βάσης Δεδομένων Θορύβου σε
Σχέση με τα Δεδομένα Αναφοράς**

**Μελέτη του Γήινου φλοιού με τη χρήση
τομογραφίας περιβαλλοντικού θορύβου**

PROTECTANT

2924

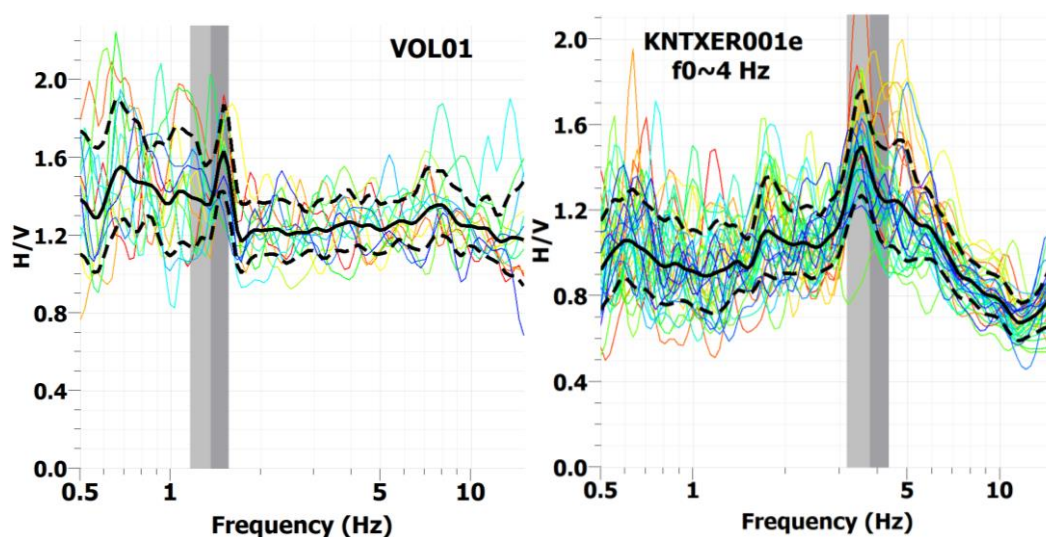
Στόχοι Π1.2

Από την αντιστροφή δεδομένων επιφανειακών κυμάτων ενεργής και παθητικής (περιβαλλοντικού θορύβου) σεισμικής πηγής εκτιμάται το 1D μοντέλο δομής των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) με το βάθος, το οποίο αξιοποιείται για τον έμμεσο καθορισμό των τοπικών εδαφικών συνθηκών, σε γεωτεχνικές μελέτες, στο Eurocode 8 (EN1998-1) κτλ. Στο πλαίσιο του Π1.2 πραγματοποιήθηκε συνδυαστική αντιστροφή δεδομένων θορύβου με σκοπό την βαθμονόμηση των εκτιμώμενων V_s μοντέλων δομής με τα μοντέλα δομής που ήταν διαθέσιμα από ανεξάρτητες τεχνικές και μεθόδους (π.χ. από δοκιμές Crosshole και Downhole) της βάσης αναφοράς. Κατασκευάστηκαν οι καμπύλες σκέδασης των κυμάτων Rayleigh από τις μετρήσεις επιφανειακών κυμάτων θορύβου των ειδικών δικτύων σεισμομέτρων για τουλάχιστον 30 θέσεις του Ελληνικού χώρου (βλέπε παραδοτέο Π1.1, δηλαδή Τεχνική Έκθεση ΠΕ1). Επιπλέον, από τις μετρήσεις θορύβου υπολογίστηκαν οι ιδιοσυχνότητες του εδάφους (f_0), μέσω της ερμηνείας των καμπυλών HVSR, για τις θέσεις των σταθμών των ειδικών αυτών δικτύων (βλέπε τεχνική έκθεση ΠΕ3). Οι καμπύλες σκέδασης των κυμάτων Rayleigh και οι ιδιοσυχνότητες του εδάφους αξιοποιήθηκαν συνδυαστικά στις αντιστροφές με σκοπό τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων τους με τα δεδομένα της βάσης αναφοράς. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν την ελάχιστη δυνατή πληροφορία που μπορεί εύκολα να ανακτηθεί από τις μετρήσεις εδαφικού θορύβου ειδικών δικτύων σεισμομέτρων.

Αντιστροφή δεδομένων θορύβου

Συνολικά συλλέχθηκαν δεδομένα θορύβου με τη χρήση των ειδικών δικτύων σεισμομέτρων από 32 θέσεις. Από αυτές, 4 αποτελούν θέσεις υποβάθρου, ενώ οι υπόλοιπες αποτελούν στην πλειοψηφία τους θέσεις ενδιάμεσης ή υψηλής αντίθεσης εμπέδησης των υπερκείμενων σχηματισμών με το σεισμικό υπόβαθρο. Για όλες τις θέσεις πραγματοποιήθηκε η αντιστροφή της καμπύλης σκέδασης (DC), με στόχο την εκτίμηση της μονοδιάστατης μεταβολής της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων με το βάθος. Οι ταχύτητες των S-κυμάτων εκτιμήθηκαν επίσης από τη συνδυαστική αντιστροφή της καμπύλης σκέδασης με την ιδιοσυχνότητα του εδάφους (DC- f_0) για 30 θέσεις της βάσης δεδομένων. Στις δύο θέσεις υποβάθρου δεν πραγματοποιήθηκε η συνδυαστική αντιστροφή DC- f_0 , καθώς δεν προέκυψε τιμή της f_0 από ερμηνεία καμπυλών HVSR, λόγω της χαρακτηριστικής επίπεδης μορφής τους (π.χ. **Σχήμα 1.2.1** αριστερά). Στις άλλες 2 θέσεις υποβάθρου προέκυψαν καμπύλες HVSR με μικρές αλλά διακριτές κορυφές μεγίστου πλάτους (π.χ. **Σχήμα 1.2.1** δεξιά), επιτρέποντας την εφαρμογή της συνδυαστικής αντιστροφή DC- f_0 .

Στις συνδυαστικές αντιστροφές DC- f_0 χρησιμοποιήθηκε η μέση ιδιοσυχνότητα του εδάφους, όπως εκτιμήθηκε από τον μέσο όρο των επιμέρους ιδιοσυχνοτήτων των σταθμών του κάθε ειδικού δικτύου σεισμομέτρων. Στο **Σχήμα 1.2.2** παρουσιάζεται παράδειγμα με τις επιμέρους καμπύλες HVSR των σταθμών της θέσης VOLVO012a, καθώς και η μέση καμπύλη HVSR, από την οποία προέκυψε η μέση f_0 για αυτή τη θέση. Επίσης, σε 19 θέσεις υπήρχαν διαθέσιμα 1D Vs μοντέλα δομής αναφοράς από δοκιμές Crosshole και Downhole σε γεωτρήσεις, δηλαδή δοκιμές ανεξάρτητες γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιούν επιφανειακά κύματα. Σε 3 θέσεις χωρίς διαθέσιμα μοντέλα αναφοράς, υπήρχαν ανεξάρτητες γεωλογικές πληροφορίες για το βάθος το υποβάθρου, ενώ το βάθος του σεισμικού υποβάθρου ήταν γνωστό για συνολικά 13 θέσεις από αυτές που εξετάστηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θέση KZNKZ013b εξαιρέθηκε από την βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων εξαιτίας της κακής ποιότητας των δεδομένων, καθώς επίσης και η θέση XANTHig1 λόγω της μεγάλης απόστασης των μετρήσεων (~400 m) από τη θέση του μοντέλου αναφοράς.

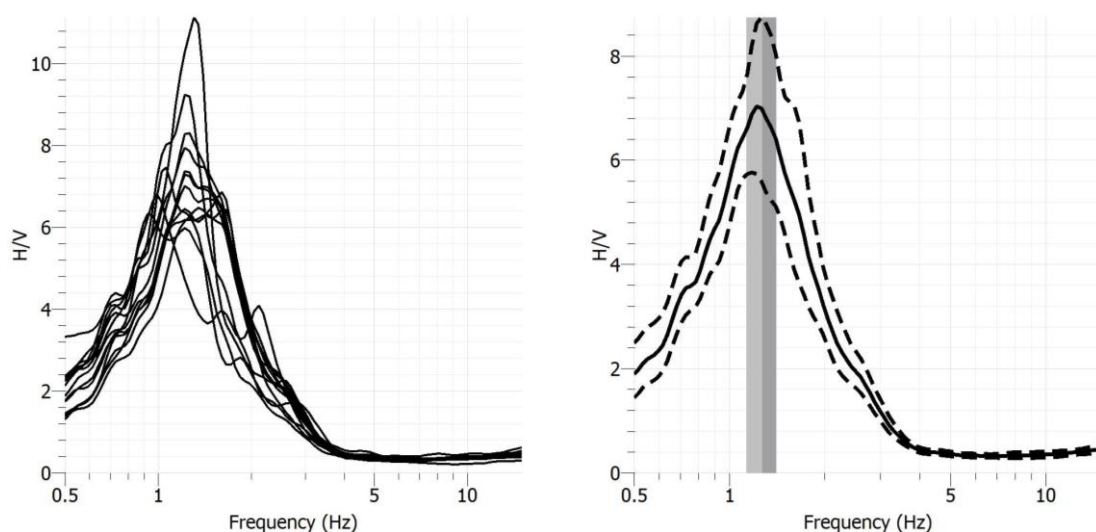


Σχήμα 1.2.1. Αριστερά: Καμπύλη HVSR για τη θέση υποβάθρου VOL01. Δεξιά: Καμπύλη HVSR για τη θέση υποβάθρου KNTXER001e.

Όπως πραγματοποιήθηκε και στις αντιστροφές των συνθετικών δεδομένων που παρουσιάζονται στην Τεχνικής Έκθεσης της ΕΕ3 (παραδοτέο Π3.1), έτσι και για τις αντιστροφές της παρούσας έκθεσης επιλέχθηκε ο παραμετρικός χώρος να αποτελείται μόνο από την ταχύτητα των S-κυμάτων (Vs) και το βάθος (D) του κάθε στρώματος και του ημιχώρου. Σε ότι αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους που απαιτούνται για την επίλυση του κάθε ευθέως προβλήματος αυτές υπολογίστηκαν με τη χρήση κατάλληλων ημι-εμπειρικών σχέσεων (Gardner et al., 1974; Brocher, 2005; Boore, 2016). Επίσης, επιλέχθηκαν αρκετά μεγάλα όρια

παραμετρικού χώρου για τις ταχύτητες, V_s , (π.χ. 100-3500 m/sec για τον ημιχώρο), καθώς και για το βάθος του κάθε στρώματος, το οποίο ορίστηκε ώστε να είναι εφικτό να αποκτήσει οποιαδήποτε τιμή από 1m έως 2.5 φορές το αποτέλεσμα της σχέσης $82/f_0$ (Chatzis et al., 2018) όπου f_0 η ιδιοσυχνότητα του εδάφους.

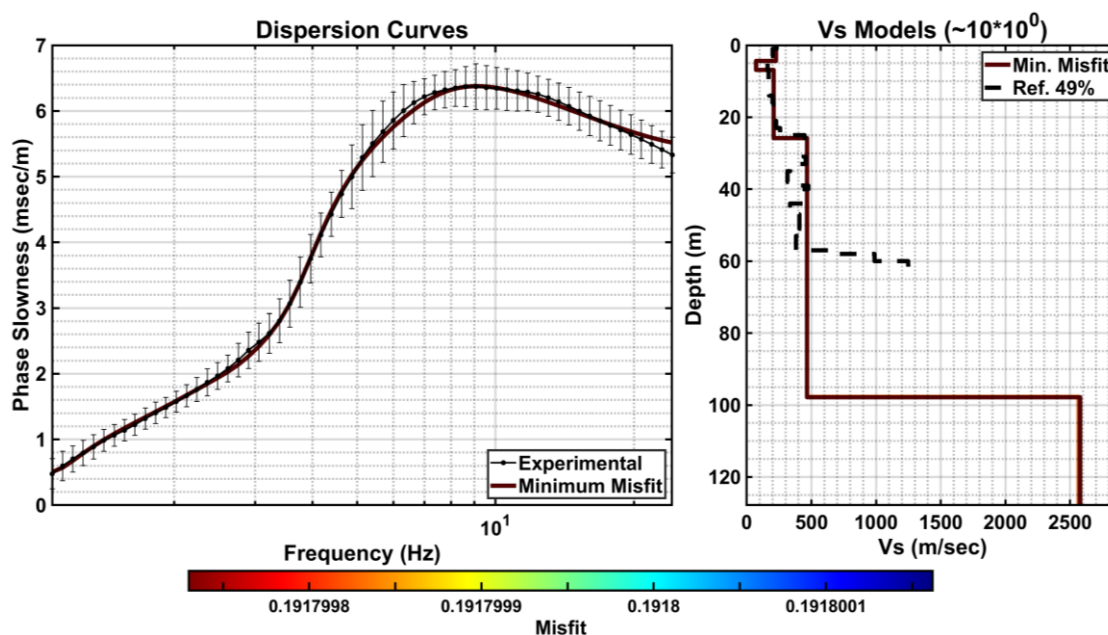
Για τις 5 θέσεις στη Σαντορίνη, το βάθος των πυροκλαστικών αποθέσεων πάνω από το υπόβαθρο εκτιμήθηκε με χρήση της αντίστοιχης σχέσης των Chatzis et al. (2022). Ο κατάλληλος αριθμός στρωμάτων πάνω από ημιχώρο επιλέχθηκε μετά από δοκιμές για κάθε θέση, και σε κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον 5 ίδιες αντιστροφές (runs), ώστε να εξεταστεί και η μεταβλητότητα των λύσεων. Επιπλέον, σε κάθε αντιστροφή εξετάστηκαν τουλάχιστον 70000 παραγόμενα μοντέλα δομής. Για τον υπολογισμό των επιμέρους σφαλμάτων, τόσο των δεδομένων (data misfit) της σκέδασης και της ιδιοσυχνότητας, όσο και του συνδυαστικού σφάλματος, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (1), (2) και (3), αντίστοιχα, της τελικής Τεχνικής Έκθεσης του ΠΕ3 (Παραδοτέο Π3.1). Από κάθε αποτέλεσμα αντιστροφής επιλέχθηκε η λύση με το μικρότερο σφάλμα δεδομένων για τη βαθμονόμηση των τελικών αποτελεσμάτων δομής με την ανεξάρτητη βάση δεδομένων.



Σχήμα 1.2.2. Καμπύλες HVSR από τις μετρήσεις θορύβου ειδικού δικτύου σεισμομέτρων της θέσης VOLVO012a. Αριστερά: Οι επιμέρους καμπύλες HVSR των σταθμών του ειδικού δικτύου. Δεξιά: Η μέση καμπύλη HVSR ($f_0=1.2$ Hz) από τον μέσο όρο των επιμέρους καμπυλών μαζί με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες

Στα παρακάτω Σχήματα, (Σχήμα 1.2.3 έως και Σχήμα 1.2.8) παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα των μονοδιάστατων (1D) βέλτιστων εκτιμώμενων μοντέλων δομής (ταχύτητας εγκαρσίων κυμάτων V_s) από την αντιστροφή της καμπύλης σκέδασης, καθώς και από την συνδυαστική αντιστροφή της καμπύλης αυτής με την ιδιοσυχνότητα του εδάφους. Για τις

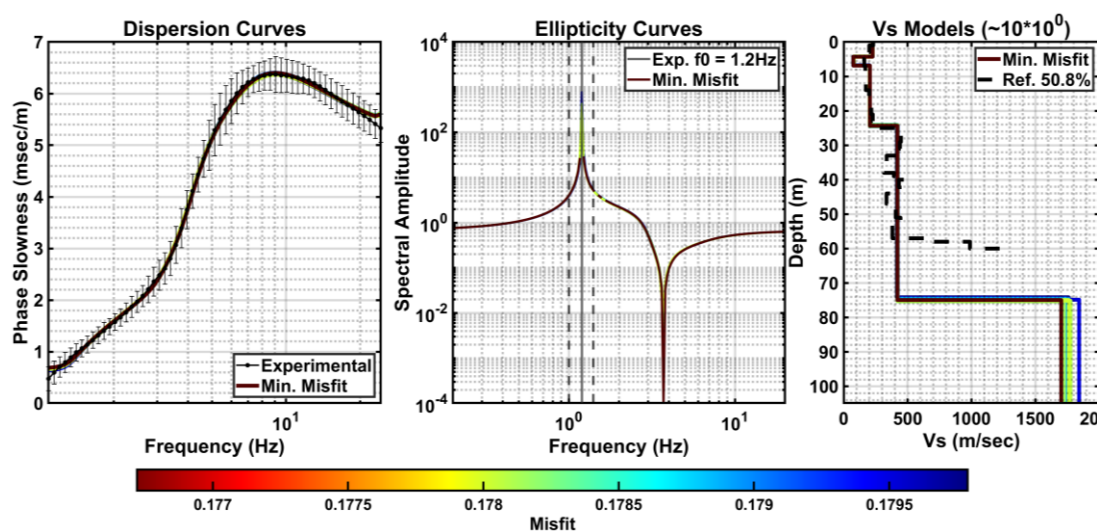
θέσεις με διαθέσιμο Vs μοντέλο δομής αναφοράς υπολογίστηκαν τα σφάλματα των μοντέλων δομής (model misfit) με χρήση της σχέσης (5) της Τεχνικής Έκθεσης του ΠΕ3 (Παραδοτέο Π3.1). Το σφάλμα των μοντέλων δομής υπολογίστηκε μεταξύ του βέλτιστου εκτιμώμενου Vs μοντέλου (από την αντιστροφή) και του Vs μοντέλου δομής αναφοράς, με χρήση των ταχυτήτων από την επιφάνεια μέχρι το μέγιστο βάθος του κάθε μοντέλου αναφοράς. Τα σφάλματα των μοντέλων δομής δίνονται στα υπομνήματα των σχημάτων αυτών.



Σχήμα 1.2.3. Αντιστροφή της καμπύλης σκέδασης των κυμάτων Rayleigh (αριστερά) για την εκτίμηση της 1D μεταβολής της ταχύτητας των S-κυμάτων με το βάθος (δεξιά) της θέσης VOLVO012a. Με μαύρη συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται η «εμπειρική» καμπύλη σκέδασης, ενώ με έγχρωμες γραμμές δίνονται οι συνθετικές καμπύλες που προέκυψαν από την αντιστροφή, οι οποίες αντιστοιχούν στα εκτιμώμενα μοντέλα δομής με το ίδιο χρώμα. Το σφάλμα (misfit) μεταξύ των συνθετικών (από την αντιστροφή) και των «εμπειρικών» δεδομένων απεικονίζεται με τη χρωματική κλίμακα στο κάτω μέρος του Σχήματος. Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή παρουσιάζεται το μοντέλο δομής αναφοράς αυτής της θέσης. Στην λεζάντα του Σχήματος στα δεξιά, δίνεται το σφάλμα (misfit) μεταξύ του μοντέλου δομής αναφοράς και του βέλτιστου (με το μικρότερο σφάλμα δεδομένων) μοντέλου δομής από την αντιστροφή.

Στα Σχήματα 1.2.3 και 1.2.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC και DC- f_0 , αντίστοιχα, για τη θέση VOLVO012a, η οποία αποτελείται από αμμώδεις και αργιλικούς εδαφικούς σχηματισμούς πάνω από ασβεστολιθικό υπόβαθρο. Για τις αντιστροφές αυτές επιλέχθηκε το 2^ο στρώμα να έχει μικρότερη ταχύτητα από το 1^ο (αντιστροφή ταχύτητας), καθώς το πρώτο στρώμα αποτελείται από μάζα μεγαλύτερης ταχύτητας από τον υποκείμενο

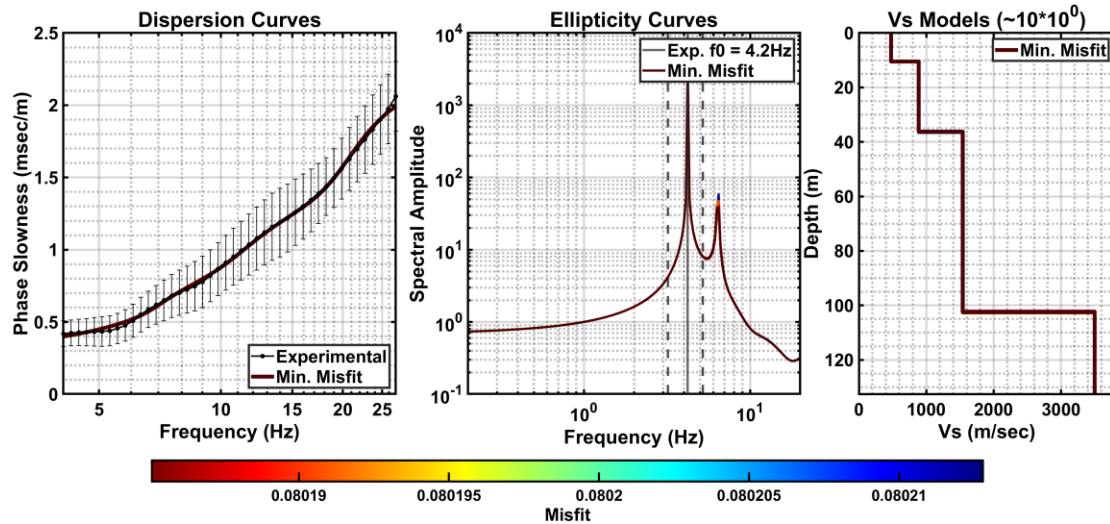
σχηματισμό. Το βάθος του (ασβεστολιθικού) υποβάθρου δίνεται από το μοντέλο αναφοράς στα ~60 m. Από τις αντιστροφές DC και DC- f_0 το βάθος του υποβάθρου εκτιμήθηκε στα ~95 και ~75 m, αντίστοιχα. Το σφάλμα των μοντέλων δομής είναι περίπου ~50 % και από τις δύο αντιστροφές.



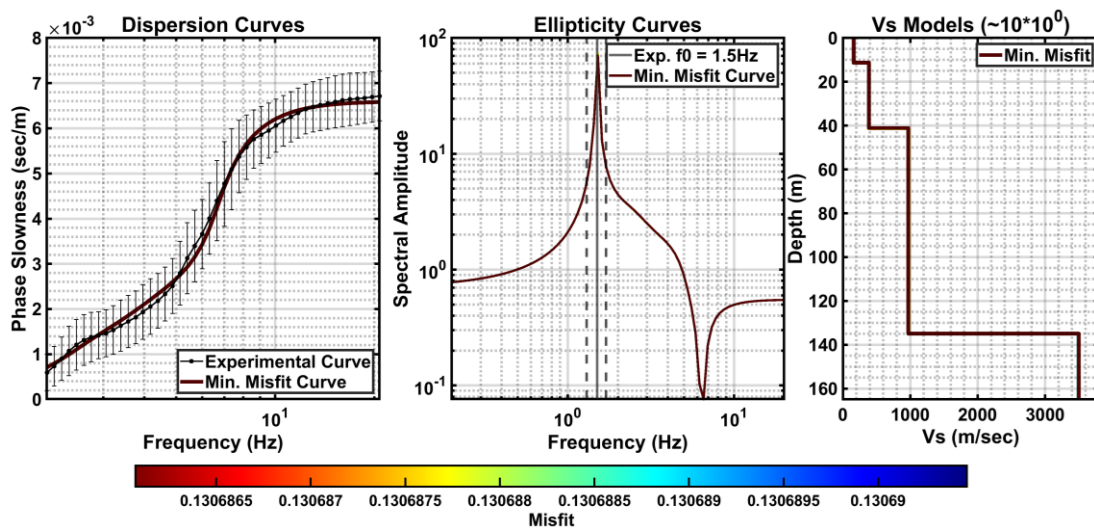
Σχήμα 1.2.4. Συνδυαστική αντιστροφή (DC- f_0) της καμπύλης σκέδασης των κυμάτων Rayleigh (αριστερά, μαύρη γραμμή) και της ιδιοσυχνότητας ($f_0=1.2$ Hz, κέντρο, γκρι συνεχόμενη γραμμή) για την εκτίμηση της 1D μεταβολής της ταχύτητας των S-κυμάτων με το βάθος (δεξιά) της θέσης VOLVO012a. Τα «εμπειρικά» δεδομένα δίνονται μαζί με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες. Με έγχρωμες γραμμές δίνονται οι συνθετικές καμπύλες από την αντιστροφή, οι οποίες αντιστοιχούν στα βέλτιστα μοντέλα δομής με το ίδιο χρώμα. Με τη χρωματική κλίμακα στο κάτω μέρος του Σχήματος απεικονίζεται το συνδυαστικό σφάλμα ($\text{misfit}_{\text{joint}}$) των επιμέρους σφαλμάτων της σκέδασης και της f_0 . Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή παρουσιάζεται το μοντέλο δομής αναφοράς αυτής της θέσης. Στην λεζάντα του Σχήματος στα δεξιά δίνεται το σφάλμα (misfit) μεταξύ του μοντέλου δομής αναφοράς και του βέλτιστου (με το μικρότερο σφάλμα δεδομένων) μοντέλου δομής από την αντιστροφή.

Στο **Σχήμα 1.2.4** δίνεται παράδειγμα συνδυαστικής αντιστροφής σκέδασης με την ιδιοσυχνότητα του εδάφους ($f_0=4.2$, $A_0^{\text{HV}}=1.4$) για τη θέση υποβάθρου KNTXER001e, η οποία αποτελείται από γνεύσιους της Σερβομακεδονικής Μάζας. Από τα αποτελέσματα της αντιστροφής παρουσιάζεται ένα 1^ο στρώμα με σχετικά χαμηλή Vs ταχύτητα (~420 m/sec) πάχους 10m πάνω από το σεισμικό/γεωλογικό υπόβαθρο ($V_s > 800$ m/sec). Αυτό το πρώτο στρώμα πιθανότατα αντιστοιχεί σε αποσπασμένο γνεύσιο, ο οποίος σταδιακά αποκτάει μεγαλύτερες Vs ταχύτητες με την αύξηση του βάθους. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών περιορίζεται στην αξιολόγηση των θεωρητικών καμπυλών ελλειπτικότητας και

εδαφικής απόκρισης, καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμο μοντέλο δομής αναφοράς, πέρα από την περιγραφή της επιφανειακής γεωλογίας που αναφέρθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 1.2.5. Όπως το **Σχήμα 1.2.4** για τη συνδυαστική αντιστροφή ($DC-f_0$) της καμπύλης σκέδασης των κυμάτων Rayleigh (αριστερά, μαύρη γραμμή) και της ιδιοσυχνότητας ($f_0=4.2$ Hz, κέντρο, γκρι συνεχόμενη γραμμή) για την εκτίμηση της 1D μεταβολής των ταχυτήτων των S-κυμάτων με το βάθος (δεξιά) της θέσης KNTXER001e.

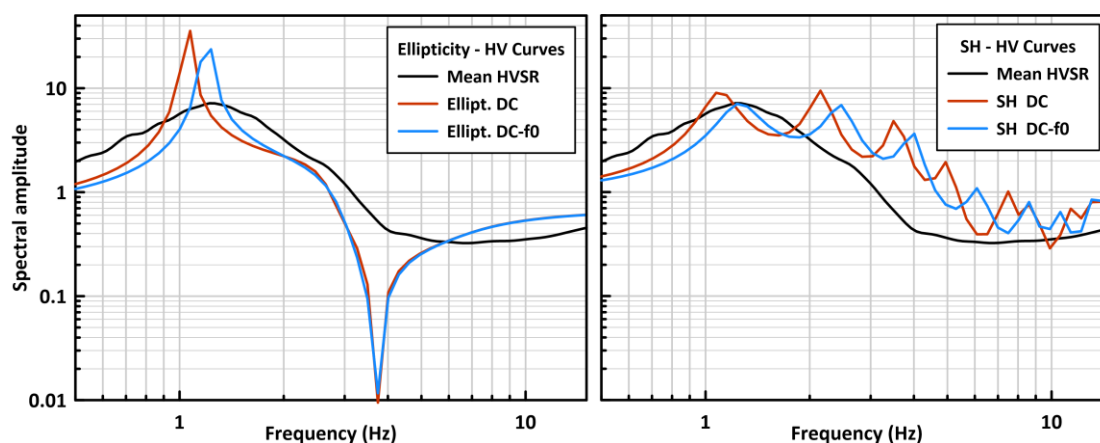


Σχήμα 1.2.6. Όπως το **Σχήμα 1.2.4** για τη συνδυαστική αντιστροφή ($DC-f_0$) της καμπύλης σκέδασης των κυμάτων Rayleigh (αριστερά, μαύρη γραμμή) και της ιδιοσυχνότητας ($f_0=1.5$ Hz, κέντρο, γκρι συνεχόμενη γραμμή) για την εκτίμηση της 1D μεταβολής των ταχυτήτων των S-κυμάτων με το βάθος (δεξιά) της θέσης KAVALA.

Στο **Σχήμα 1.2.6** παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της συνδυαστικής αντιστροφής DC-f₀ για τη θέση KAVALA, η οποία αποτελείται από Ολοκαινικά ιζημάτα πάνω από γρανίτη της Μάζας της Ροδόπης. Για τη θέση αυτή δεν υπάρχει διαθέσιμο μοντέλο αναφοράς με ταχύτητες Vs, αλλά υπάρχουν διαθέσιμες γεωλογικές πληροφορίες από στρωματογραφία γεώτρησης. Στη γεώτρηση παρουσιάζονται εναλλαγές ιζημάτων συνολικού πάχους ~38m πάνω από τον υποκείμενο γρανοδιορίτη. Το βάθος του υποβάθρου εκτιμήθηκε από την αντιστροφή στα ~40m, τιμή η οποία είναι σε εξαιρετική συμφωνία με την παρατηρούμενη στρωματογραφία της γεώτρησης.

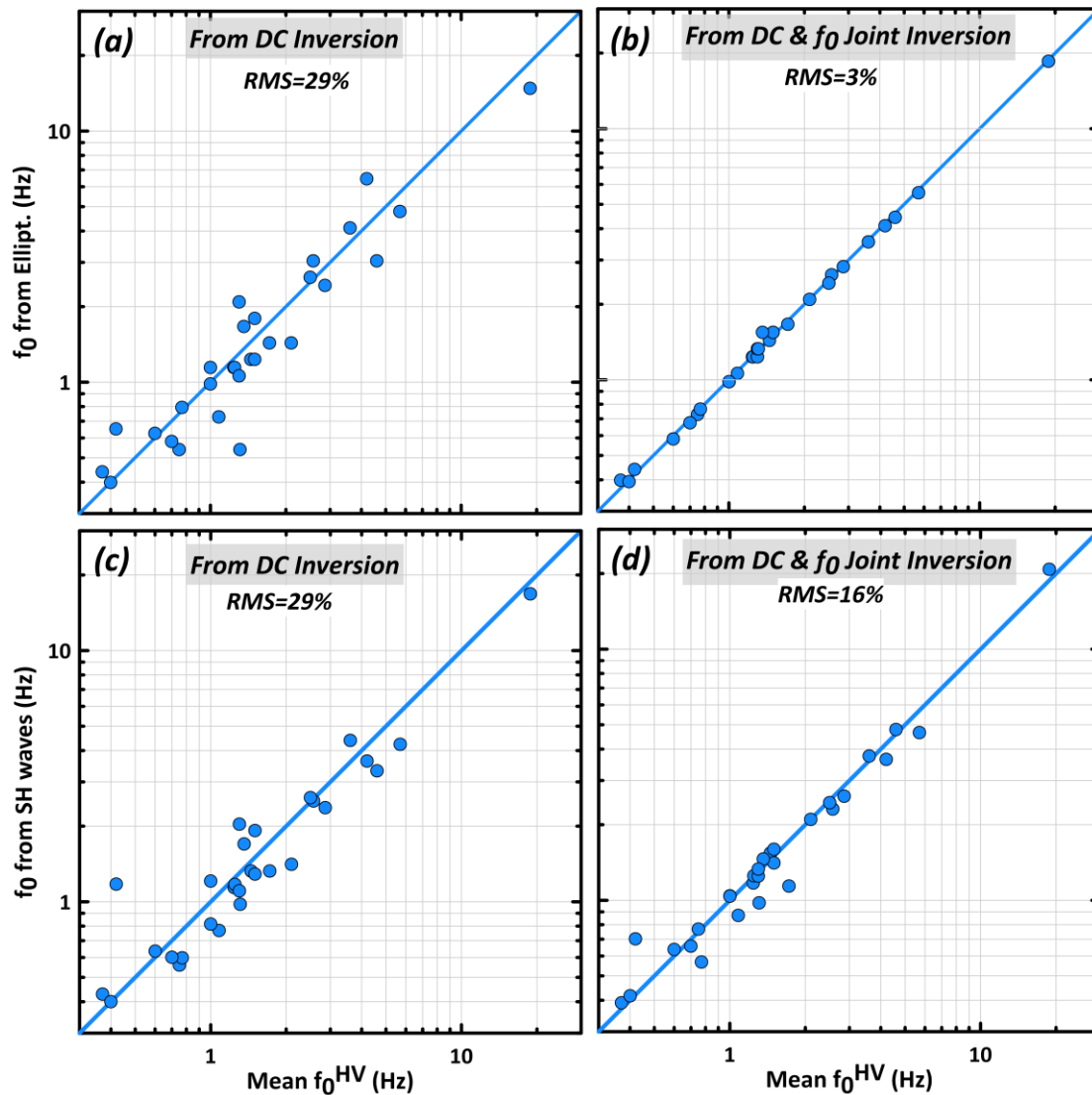
Αξιολόγηση και βαθμονόμηση αποτελεσμάτων αντιστροφής

Τα εκτιμώμενα μοντέλα δομής της ταχύτητας Vs από τις αντιστροφές DC και από τις συνδυαστικές αντιστροφές DC-f₀ αξιοποιήθηκαν, τόσο για την αξιολόγηση των θεωρητικών καμπυλών ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh και εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων, όσο και για τη βαθμονόμησή τους σε σχέση με τα μοντέλα δομής αναφοράς. Αρχικά παρουσιάζονται συγκρίσεις μεταξύ στοιχείων των θεωρητικών καμπυλών σε σχέση με στοιχεία των καμπυλών HVSR και SSR, όπως π.χ. της ιδιοσυχνότητας του εδάφους. Η βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της σύγκρισης των εκτιμώμενων Vs ταχυτήτων από τις αντιστροφές με τις ταχύτητες των μοντέλων αναφοράς.



Σχήμα 1.2.7. Θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh (αριστερά) και εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων (δεξιά) από την αντιστροφή DC (κόκκινες καμπύλες) και τη συνδυαστική αντιστροφή DC-f₀ (μπλε καμπύλες) για τη θέση VOLVO012a. Επίσης, απεικονίζεται με μαύρο χρώμα η μέση καμπύλη HVSR του **Σχήματος 1.2.2**.

Από τα εκτιμώμενα μοντέλα δομής υπολογίστηκαν οι θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh και εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων. Στοιχεία από αυτές τις θεωρητικές καμπύλες, όπως αυτά της ιδιοσυχνότητας και του μέγιστου πλάτους, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα στοιχεία των πειραματικών καμπυλών HVSR και SSR.

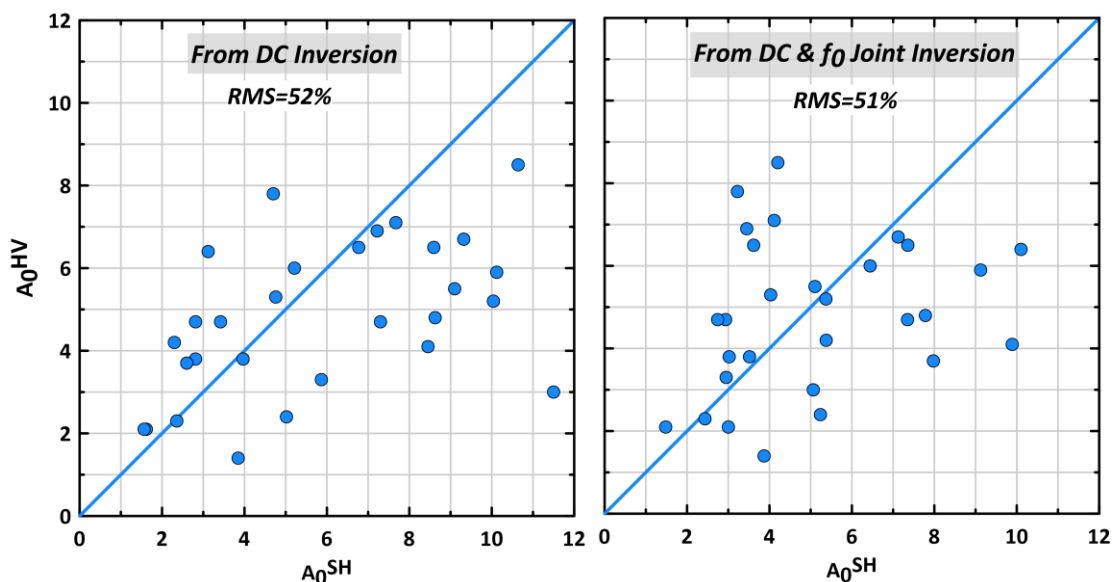


Σχήμα 1.2.8. Η ιδιοσυχνότητα τους εδάφους από τις θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας των κυμάτων Rayleigh (a και b) και εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων (c και d) σε σχέση με τη μέση ιδιοσυχνότητα του εδάφους των σταθμών του κάθε ειδικού δικτύου σεισμομέτρων. Οι θεωρητικές καμπύλες προκύπτουν από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC (a και c), καθώς και των συνδυαστικών αντιστροφών DC- f_0 (b και d). Επίσης δίνεται το μέσο σχετικό τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ των θεωρικών και πειραματικών λογαριθμικών (\ln) τιμών.

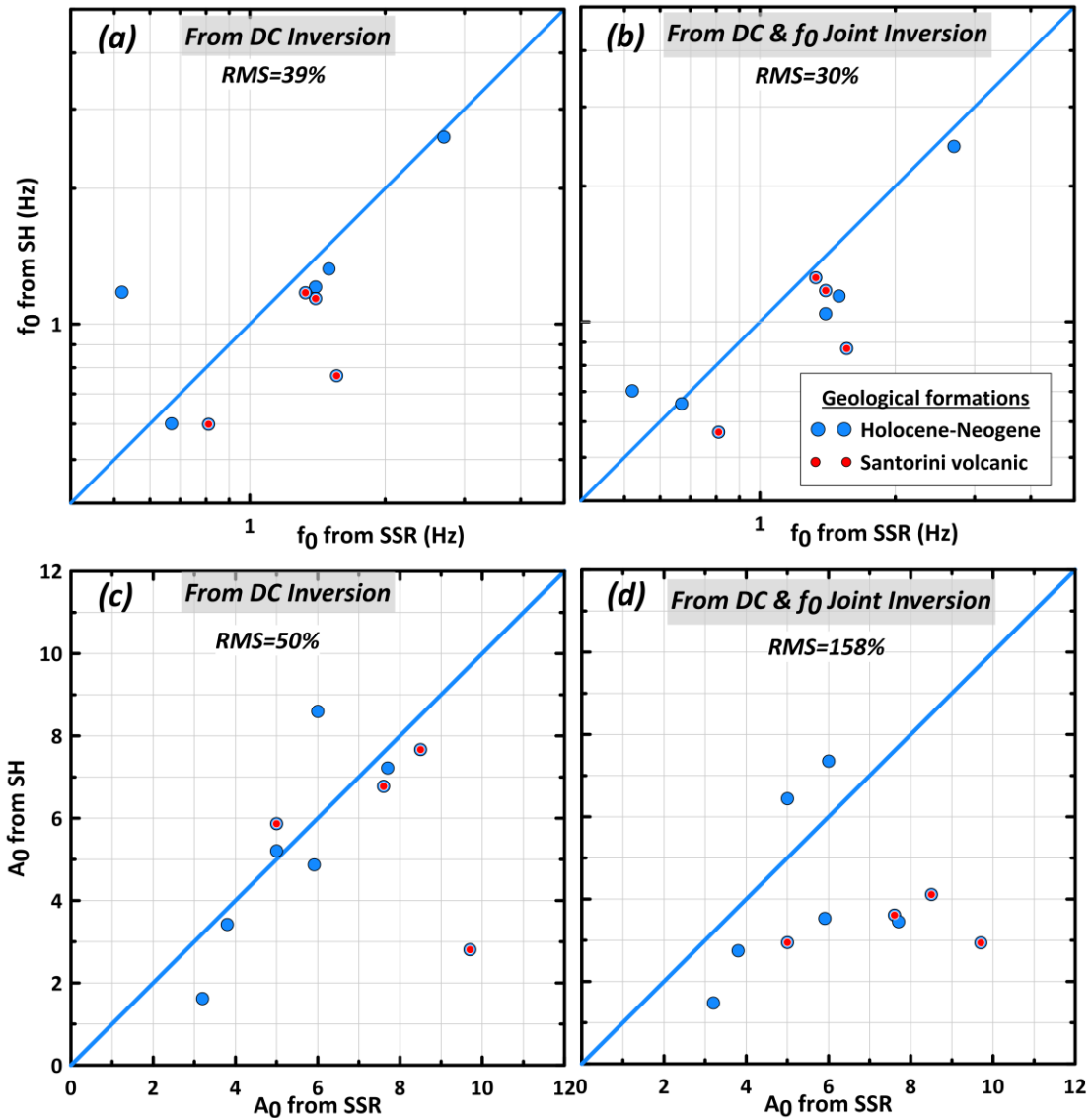
Στο **Σχήμα 1.2.7** παρουσιάζονται οι καμπύλες ελλειπτικότητας και εδαφικής απόκρισης από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC και DC- f_0 της θέσης VOLVO012a, μαζί με την μέση καμπύλη HVSR αυτής της θέσης. Οι θεωρητικές καμπύλες ελλειπτικότητας παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερες μέγιστες τιμές σε σχέση με το αντίστοιχο πλάτος της καμπύλης HVSR, αλλά υπάρχει μερική συμφωνία σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα των καμπυλών αυτών. Επίσης, παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των καμπυλών SH και της μέσης καμπύλης HVSR.

Στο **Σχήμα 1.2.8** παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες των θεωρητικών καμπυλών ελλειπτικότητας και εδαφικής απόκρισης των αντιστροφών DC και DC- f_0 σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες των μέσων καμπυλών HVSR. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται σχετικά καλή συμφωνία. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των f_0 του **Σχήματος 1.2.8** οφείλεται στο ότι οι συχνότητες f_0 της θεωρητικής ελλειπτικότητας συγκρίνονται με τις f_0 που χρησιμοποιήθηκαν στις συνδυαστικές αντιστροφές DC- f_0 .

Παρόλα αυτά, καλύτερη συμφωνία μεταξύ των f_0^{SH} - f_0^{HV} παρατηρείται από τα αποτελέσματα της αντιστροφής DC- f_0 (**Σχήμα 1.2.8d**) σε σχέση με τα αποτελέσματα της αντιστροφής μόνο της καμπύλης σκέδασης, δείχνοντας ότι η χρήση της ιδιοσυχνότητας στις αντιστροφές βελτιώνουν τα εκτιμώμενα μοντέλα δομής.



Σχήμα 1.2.9. Μέγιστο φασματικό πλάτος των καμπυλών HVSR του κεντρικού σταθμού του ειδικού δικτύου σεισμομέτρων της κάθε θέσης σε σχέση με το αντίστοιχο μέγιστο πλάτος των θεωρητικών καμπυλών εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων. Επίσης δίνεται το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ των θεωρικών και πειραματικών τιμών.



Σχήμα 1.2.10. Επάνω: Ιδιοσυχνότητες των θεωρητικών καμπυλών εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων από τις αντιστροφές DC (a) και DC- f_0 (b) σε σχέση με τις ιδιοσυχνότητες των καμπυλών SSR. Κάτω: Μέγιστα φασματικά πλάτη των θεωρητικών καμπυλών εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων από τις αντιστροφές DC (c) και DC- f_0 (d) σε σχέση με τα μέγιστα φασματικά πλάτη των καμπυλών SSR. Επίσης δίνεται το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ των θεωρικών και πειραματικών τιμών.

Στο **Σχήμα 1.2.9** παρουσιάζεται το μέγιστο φασματικό πλάτος των καμπυλών HVSR του κεντρικού σταθμού της κάθε θέσης σε σχέση με το αντίστοιχο πλάτος των θεωρητικών καμπυλών SH από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC και DC- f_0 . Με βάση τα συμπεράσματα των Haghshenas et al. (2008) το μέγιστο πλάτος των καμπυλών HVSR αποτελεί μία ελάχιστη εκτίμηση της πραγματικής ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης των καμπυλών SSR. Ωστόσο, τα μέγιστα πλάτη των καμπυλών HVSR του **Σχήματος 1.2.9** παρουσιάζουν διάσπαρτη

κατανομή γύρω από την διχοτόμο των επιμέρους σχημάτων με μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS) ~52% και ~51% για τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC και DC- f_0 , αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η αντιστροφή της καμπύλης σκέδασης και η συνδυαστική αντιστροφή της καμπύλης αυτής με την ιδιοσυχνότητα του εδάφους δεν επαρκούν για την εκτίμηση μοντέλων δομής, από τα οποία να προκύπτουν θεωρητικές ενισχύσεις της σεισμικής κίνησης σε συμφωνία με τις εμπειρικές.

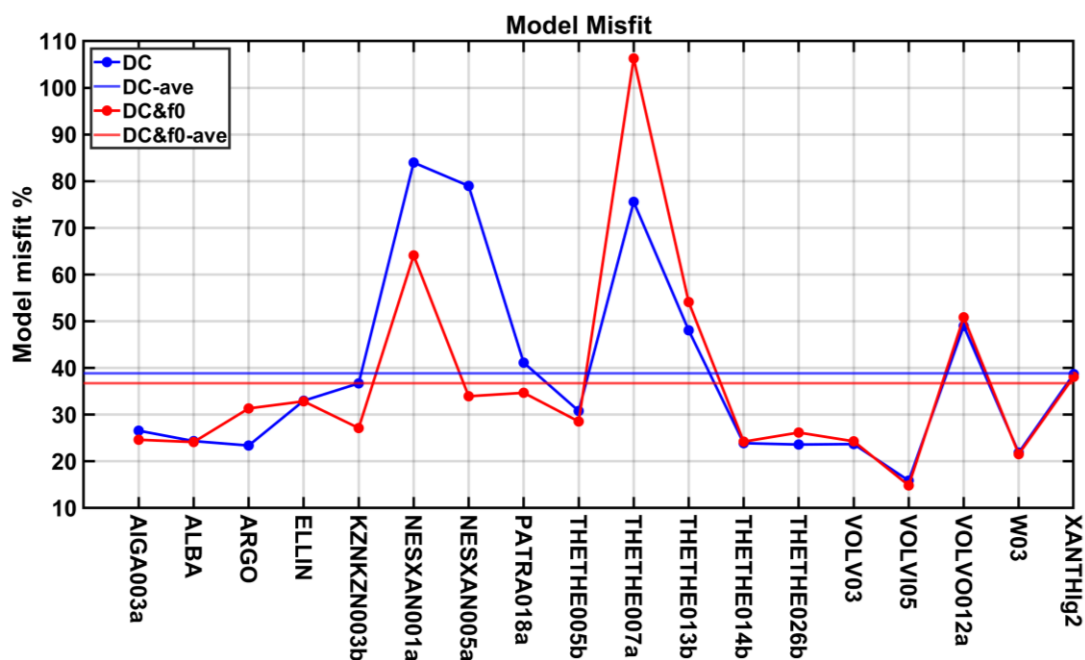
Στο **Σχήμα 1.2.10** παρουσιάζονται συγκρίσεις μεταξύ των στοιχείων (f_0 , A_0) των θεωρητικών καμπυλών εδαφικής απόκρισης των SH κυμάτων από τα εκτιμώμενα μοντέλα δομής με τα αντίστοιχα στοιχεία των εμπειρικών καμπυλών SSR, για τις θέσεις με διαθέσιμες καταγραφές σεισμών. Στα επιμέρους σχήματα (a) και (b) δίνονται τα f_0^{SH} σε σχέση με τα f_0^{SSR} από τις αντιστροφές DC και DC- f_0 , αντίστοιχα, και στα (c) και (d) δίνονται τα A_0^{SH} σε σχέση με τα A_0^{SSR} των αντιστροφών αυτών. Με βάση τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (RMS), οι ιδιοσυχνότητες είναι καλύτερα προσδιορισμένες από τις καμπύλες SH των συνδυαστικών αντιστροφών DC- f_0 (RMS~30%) από ότι των καμπυλών SH των αντιστροφών DC (RMS~39%). Αντίθετα, τα μέγιστα φασματικά πλάτη των ενισχύσεων των καμπυλών SH, συμφωνούν περισσότερο με τα αντίστοιχα των καμπυλών SSR από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC (RMS~50%).

Η καλύτερη συμφωνία των θεωρητικών μέγιστων πλατών ενισχύσεων σε σχέση με τα αντίστοιχα εμπειρικά πλάτη οφείλεται στις αρκετά υψηλότερες ταχύτητες V_s , οι οποίες εκτιμήθηκαν για τους ημιχώρους από τις αντιστροφές DC (π.χ. **Σχήματα 1.2.4** και **1.2.5**), οδηγώντας σε μοντέλα δομής υψηλότερης αντίθεσης εμπέδησης και σε θεωρητικές καμπύλες εδαφικής απόκρισης με υψηλότερα μέγιστα πλάτη ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης. Παρόλα αυτά, οι υψηλότερες αυτές ταχύτητες δεν μπορούν να τεκμηριωθούν για αρκετές θέσεις, καθώς οι καμπύλες σκέδασης δεν παρουσιάζουν τόσο χαμηλές τιμές βραδύτητας φάσης, πιθανώς λόγω έλλειψης της χαμηλόσυχνης πληροφορίας. Με βάση τα παραπάνω, αλλά και το πολύ υψηλό RMS (~158%) του **Σχήματος 1.2.10d**, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι η αντιστροφή της DC ή των DC και f_0 δεν επαρκεί για τον καθορισμό της ενίσχυσης της σεισμικής κίνησης, δηλαδή η εκτίμηση αποκλειστικά μέσω της αξιοποίησης και ερμηνείας των γεωφυσικών μοντέλων δομής.

Στο **Σχήμα 1.2.11** παρουσιάζονται τα σφάλματα των μοντέλων δομής (model misfit) σε σχέση με το κωδικό όνομα της κάθε θέσης. Τα σφάλματα αυτά υπολογίστηκαν μεταξύ των εκτιμώμενων V_s ταχυτήτων από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC και DC- f_0 και των ταχυτήτων αναφοράς της κάθε θέσης. Στις περισσότερες θέσεις προκύπτουν αρκετά κοντινές τιμές σφαλμάτων από τις αντιστροφές DC με τις DC- f_0 , ενώ σε μερικές θέσεις παρατηρούνται

έντονες διαφορές (π.χ. NESXAN001a). Οι μέση τιμή των σφαλμάτων των μοντέλων δομής είναι περίπου ~37%, τόσο από τις αντιστροφές DC, όσο και από τις συνδυαστικές αντιστροφές DC-f₀.

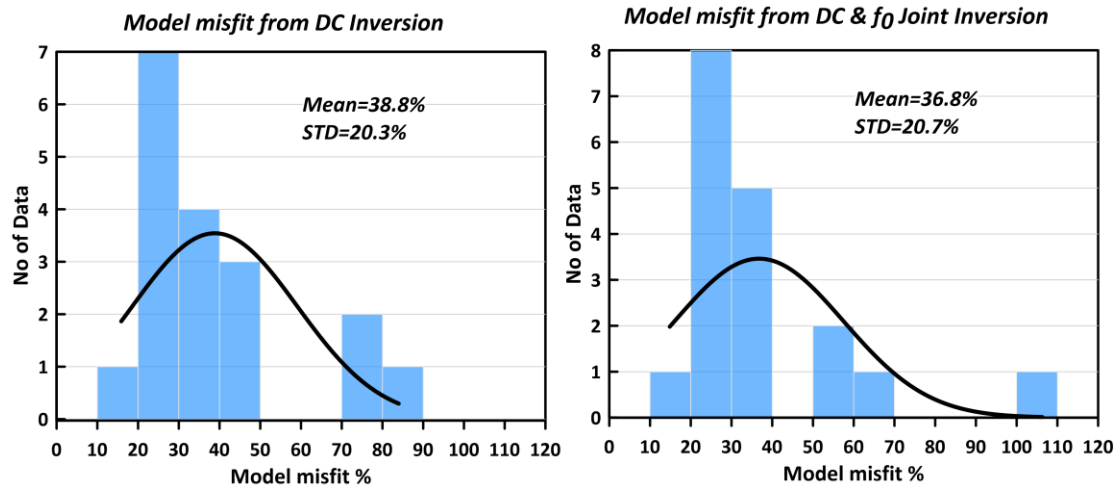
Στο Σχήμα 1.2.12 παρουσιάζεται η κατανομή των παραπάνω σφαλμάτων. Όπως προκύπτει από το σχήμα, οι κατανομές των DC και DC-f₀ παρουσιάζουν θετική λοξότητα. Επιπλέον, η μέση τιμή των σφαλμάτων των μοντέλων δομής είναι περίπου ~37% (όπως προαναφέρθηκε), με τυπική απόκλιση περίπου ~20%, δηλαδή τα εκτιμώμενα μοντέλα δομής από τις αντιστροφές ενδέχεται να διαφέρουν από 17% έως 57% σε σχέση με τα μοντέλα δομής αναφοράς των δοκιμών Crosshole και Downhole σε γεωτρήσεις.



Σχήμα 1.2.11. Σφάλμα μοντέλων δομής (model misfit) σε σχέση με το κωδικό όνομα της κάθε θέσης. Με μπλε χρώμα δίνονται τα σφάλματα των μοντέλων δομής από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC και με κόκκινο από τα αποτελέσματα των συνδυαστικών αντιστροφών DC-f₀. Με οριζόντιες γραμμές απεικονίζονται οι μέσες τιμές των σφαλμάτων, οι οποίες προκύπτουν από τον μέσο όρο των επιμέρους σφαλμάτων των DC και DC-f₀.

Στο Σχήμα 1.2.13α παρουσιάζονται οι μέσες ταχύτητες V_s από τα αποτελέσματα των αντιστροφών σε σχέση με τις μέσες ταχύτητες V_s των μοντέλων αναφοράς. Οι μέσες ταχύτητες V_s υπολογίστηκαν από τον μέσο όρο των ταχυτήτων από την επιφάνεια μέχρι το μέγιστο βάθος z του κάθε μοντέλου αναφοράς. Επιπλέον, υπολογίστηκε το συνολικό σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (relative RMS misfit) των εκτιμώμενων μέσων ταχυτήτων με τις μέσες ταχύτητες αναφοράς, το οποίο είναι περίπου 14% και για τις δύο αντιστροφές DC και

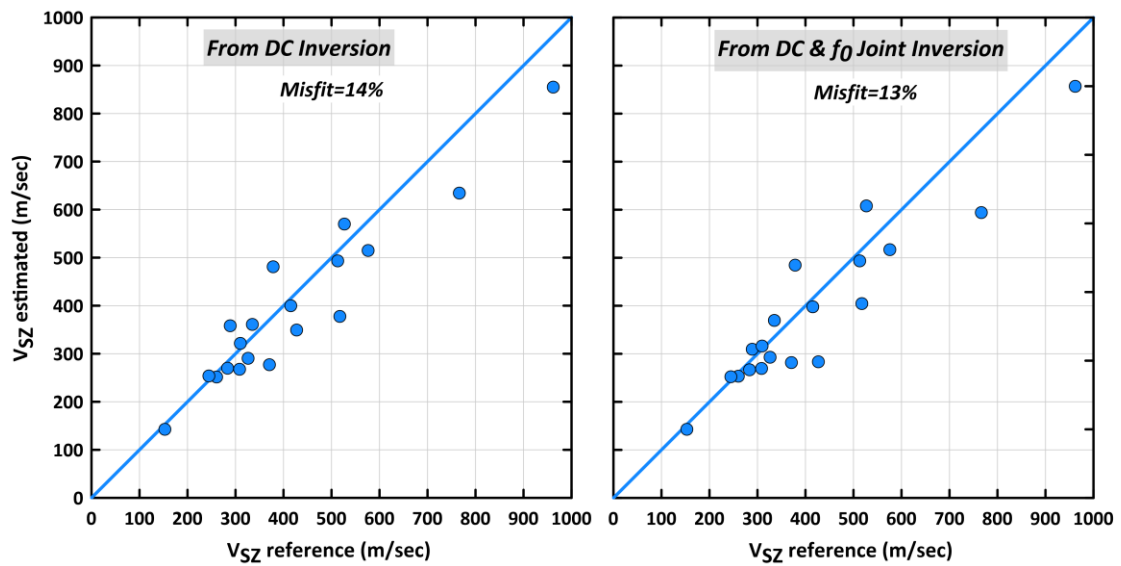
DC- f_0 που εξετάστηκαν. Στο **Σχήμα 1.2.13β** δίνεται η κατανομή των σχετικών σφαλμάτων των μέσων ταχυτήτων V_{sz} . Από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC προκύπτει μέσο σχετικό σφάλμα $\sim 7.5\%$ με τυπική απόκλιση $\sim 16\%$, και από τα αποτελέσματα των συνδυαστικών αντιστροφών προκύπτει ένα μέσο σχετικό σφάλμα $\sim 4\%$, με τυπική απόκλιση $\sim 13\%$.



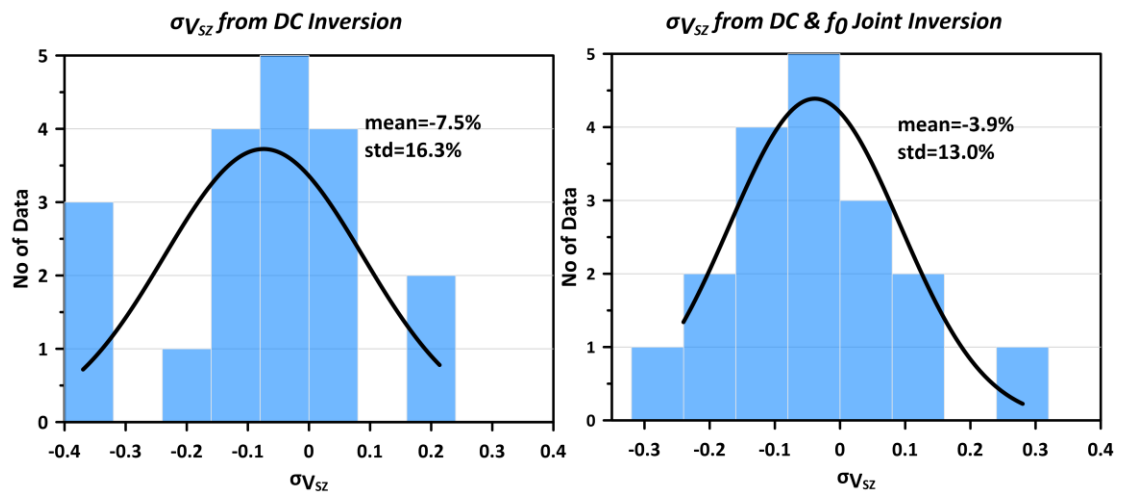
Σχήμα 1.2.12. Κατανομή του σφάλματος των μοντέλων δομής (model misfit) για τις 18 θέσεις με διαθέσιμο 1D μοντέλο ταχυτήτων V_s αναφοράς. Τα σφάλματα των μοντέλων δομής υπολογίστηκαν μεταξύ των μοντέλων αναφοράς και των εκτιμώμενων μοντέλων από την αντιστροφή της DC (αριστερά) και από την συνδυαστική αντιστροφή των DC- f_0 (δεξιά).

Στο **Σχήμα 1.2.14** παρουσιάζονται οι μέσες ταχύτητες V_{s30}^{est} από τα αποτελέσματα των αντιστροφών σε σχέση με τις μέσες ταχύτητες V_{s30}^{ref} των μοντέλων αναφοράς. Οι μέσες ταχύτητες V_{s30} υπολογίστηκαν από τον μέσο όρο των ταχυτήτων V_s των πρώτων 30m. Στην περίπτωση που τα μοντέλα δομής παρουσίαζαν βάθος μικρότερο των 30m, οι μέσες ταχύτητες V_{s30} υπολογίστηκαν με χρήση των εμπειρικών σχέσεων των Stewart et al. (2014) με χρήση της μέσης ταχύτητας V_{sz} , όπου z το μέγιστο βάθος (< 30 m) του μοντέλου δομής. Το συνολικό τετραγωνικό σχετικό σφάλμα (misfit) των εκτιμώμενων μέσων ταχυτήτων V_{s30}^{est} με τις μέσες ταχύτητες V_{s30}^{ref} αναφοράς είναι περίπου $\sim 14\%$ και για τις δύο αντιστροφές DC και DC- f_0 που εξετάστηκαν.

Στο **Σχήμα 1.2.15** δίνεται το σχετικό σφάλμα των μέσων αυτών ταχυτήτων V_{s30} σε σχέση με τον κωδικό όνομα της κάθε θέσης, ενώ στο **Σχήμα 1.2.16** η κατανομή αυτών των σφαλμάτων. Με βάση το μέσο όρο των σχετικών σφαλμάτων, οι μέσες εκτιμώμενες ταχύτητες V_{s30}^{est} απέχουν από τις αντίστοιχες μέσες ταχύτητες των μοντέλων αναφοράς, $V_{s30}^{reference}$, περίπου $\sim 12.5\%$, τιμή που πρέπει να θεωρηθεί ως πολύ ικανοποιητική με δεδομένες τις αβεβαιότητες και των μοντέλων αναφοράς.

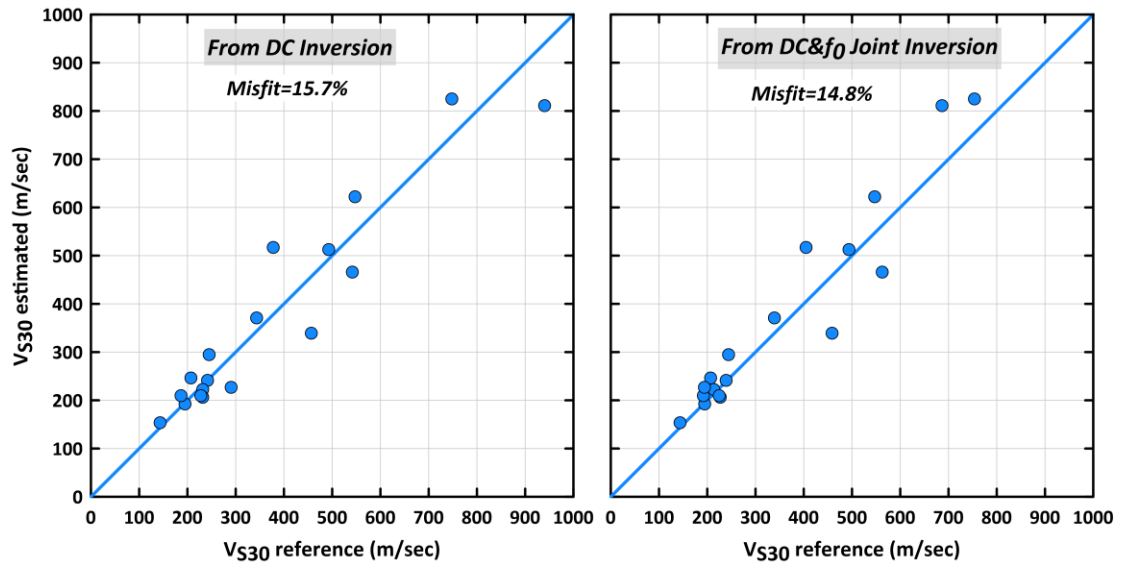


(α)

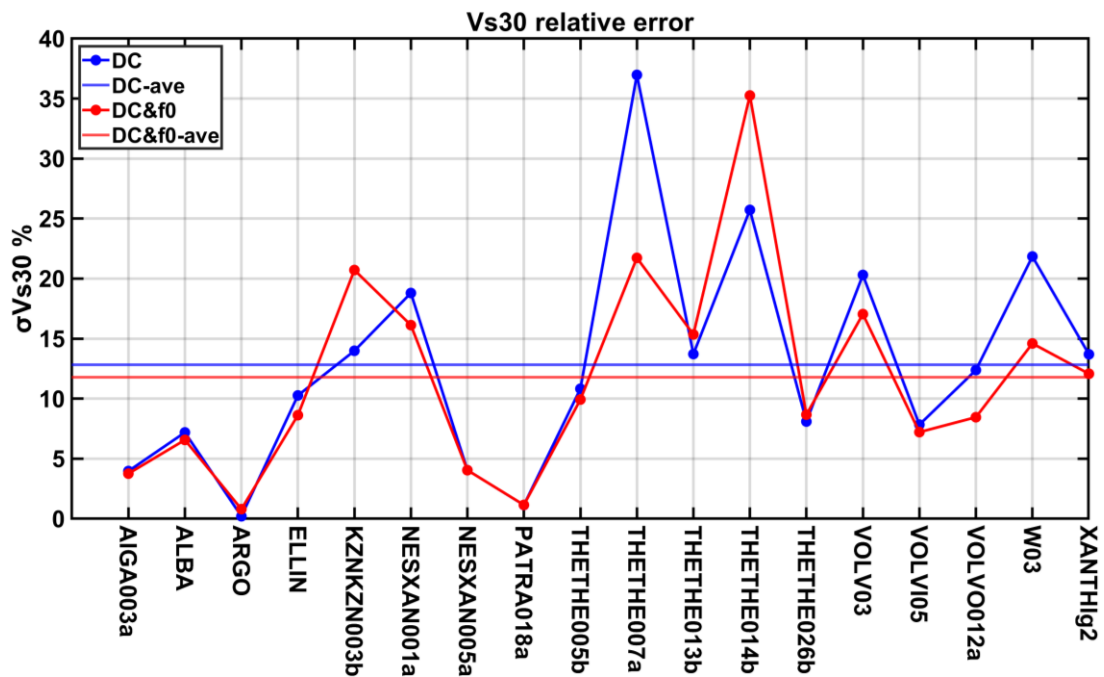


(β)

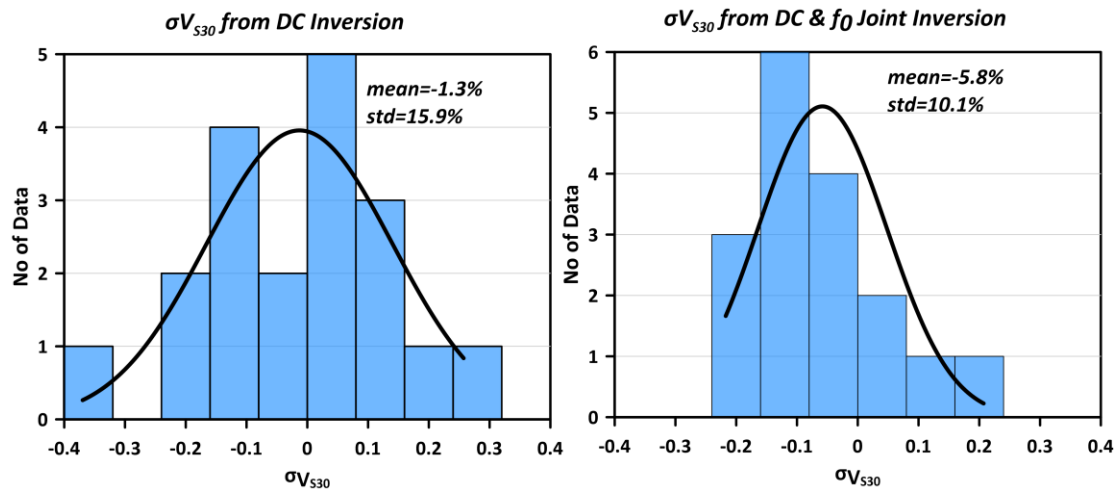
Σχήμα 1.2.13. α) Η μέση ταχύτητα (V_{sz}^{est}) των εγκαρσίων κυμάτων των εκτιμώμενων μοντέλων από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC (αριστερά) και DC- f_0 (δεξιά), σε σχέση με την αντίστοιχη μέση ταχύτητα (V_{sz}^{ref}) των μοντέλων αναφοράς. Τόσο η V_{sz}^{est} όσο και η V_{sz}^{ref} υπολογίστηκαν από τον μέσο όρο των ταχυτήτων από την επιφάνεια μέχρι το μέγιστο βάθος του κάθε μοντέλου αναφοράς. β) Κατανομή του σχετικού σφάλματος των μέσων ταχυτήτων, $\sigma_{V_{sz}}$, για τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC (αριστερά) και των DC- f_0 (δεξιά). Τα σχετικά σφάλματα $\sigma_{V_{sz}}$ υπολογίστηκαν μεταξύ των μέσων ταχυτήτων V_{sz}^{est} των εκτιμώμενων μοντέλων με τις αντίστοιχες μέσες ταχύτητες V_{sz}^{ref} των αντίστοιχων μοντέλων αναφοράς.



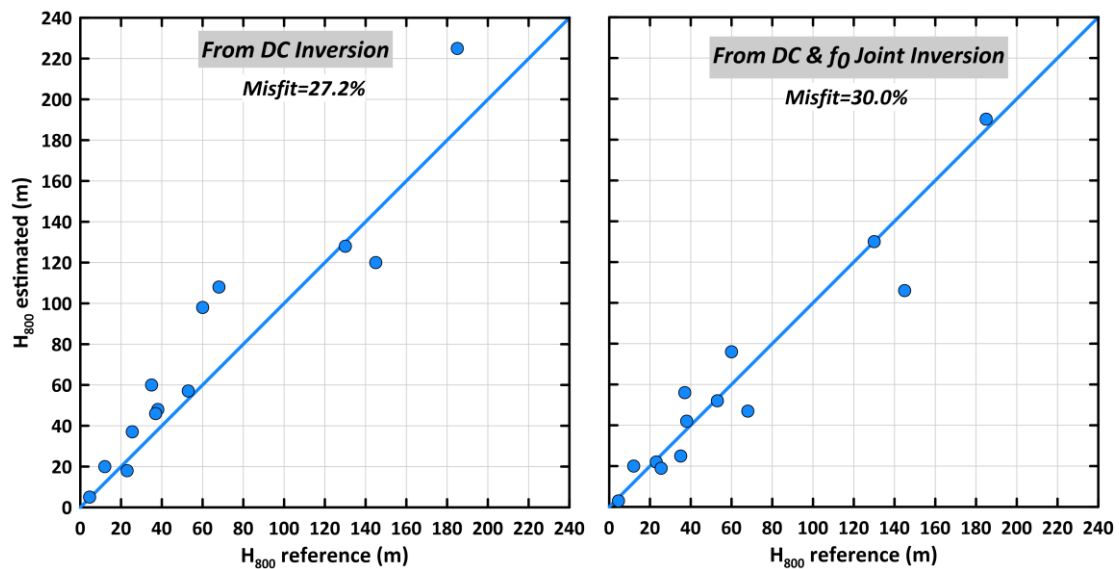
Σχήμα 1.2.14. Η μέση ταχύτητα (V_{s30}^{est}) των εγκάρσιων κυμάτων των πρώτων 30m των εκτιμώμενων μοντέλων από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC (αριστερά) και DC- f_0 (δεξιά), σε σχέση με την αντίστοιχη μέση ταχύτητα (V_{s30}^{ref}) των αντίστοιχων μοντέλων αναφοράς.



Σχήμα 1.2.15. Σχετικό απόλυτο σφάλμα των μέσων ταχυτήτων V_{s30} σε σχέση με το κωδικό όνομα της κάθε θέσης. Το σχετικό σφάλμα υπολογίστηκε μεταξύ των εκτιμώμενων μέσων ταχυτήτων, V_{s30}^{est} , με τις αντίστοιχες μέσες ταχύτητες, V_{s30}^{ref} , των αντίστοιχων μοντέλων αναφοράς.



Σχήμα 1.2.16. Κατανομή του σχετικού σφάλματος των μέσων ταχυτήτων, σV_{S30} , για τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC (αριστερά) και των DC- f_0 (δεξιά). Τα σχετικά σφάλματα σV_{S30} υπολογίστηκαν μεταξύ των μέσων ταχυτήτων V_{S30}^{est} των εκτιμώμενων μοντέλων, με τις μέσες ταχύτητες V_{S30}^{ref} των αντίστοιχων μοντέλων αναφοράς.

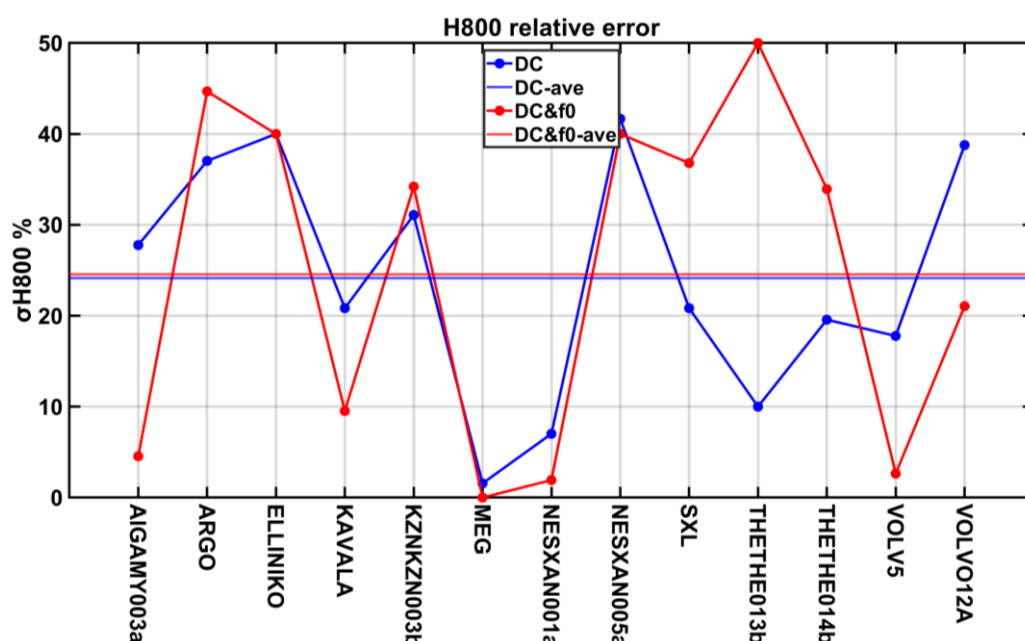


Σχήμα 1.2.17. Το βάθος του σεισμικού υποβάθρου των εκτιμώμενων μοντέλων σε σχέση με αντίστοιχο βάθος των μοντέλων αναφοράς για τις 13 θέσεις με γνωστό αυτό το βάθος από τα μοντέλα αναφοράς. Το βάθος του σεισμικού υποβάθρου ορίστηκε το βάθος που η ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων είναι ίση ή γίνεται μεγαλύτερη των 800 m/sec.

Στο **Σχήμα 1.2.17** παρουσιάζεται το εκτιμώμενο βάθος του σεισμικού υποβάθρου, H_{800} , σε σχέση με το αντίστοιχο βάθος του μοντέλου αναφοράς. Ως βάθος σεισμικού υποβάθρου επιλέχθηκε το βάθος όπου η ταχύτητα V_s είναι ίση ή αποκτά τιμές μεγαλύτερες των 800m/sec, χρησιμοποιώντας την κατάταξη του EN1998-1. Για τρεις θέσεις το βάθος του

σεισμικού υποβάθρου ήταν γνωστό μόνο από ανεξάρτητες γεωλογικές πληροφορίες (π.χ. στρωματογραφία γεωτρήσεων).

Στο **Σχήμα 1.2.18** δίνεται το σχετικό σφάλμα, σ_{H800} , μεταξύ του εκτιμένου βάθους του σεισμικού υποβάθρου, σε σχέση με το βάθος αναφοράς του σεισμικού υποβάθρου, αναφέροντας και το κωδικό όνομα της κάθε θέσης. Το συνολικό τετραγωνικό σχετικό σφάλμα του σεισμικού υποβάθρου είναι 27% από τα αποτελέσματα των αντιστροφών DC και 30% από τις συνδυαστικές αντιστροφές DC- f_0 . Η μέση τιμή του σχετικού σφάλματος του βάθους H_{800} είναι περίπου ~25% και από τις δύο αντιστροφές DC και DC- f_0 που εξετάστηκαν.



Σχήμα 1.2.18. Σχετικό απόλυτο σφάλμα μεταξύ του βάθους του σεισμικού υποβάθρου σε σχέση με τον τύπο της κάθε θέσης. Το σχετικό σφάλμα υπολογίστηκε μεταξύ του βάθους του σεισμικού υποβάθρου του εκτιμώμενου μοντέλου δομής από την αντιστροφή DC (μπλε χρώμα) και από την συνδυαστική αντιστροφή DC- f_0 (κόκκινο χρώμα) με το αντίστοιχο βάθος του μοντέλου αναφοράς. Το βάθος του σεισμικού υποβάθρου ορίστηκε το βάθος που η ταχύτητα των S-κυμάτων είναι ίση ή αποκτά τιμές μεγαλύτερες των 800 m/sec.

Από την βαθμονόμησης των εκτιμώμενων 1D μοντέλων δομής των ταχυτήτων V_s των αντιστροφών DC και DC- f_0 με τα μοντέλα δομής V_s αναφοράς προέκυψαν συνοπτικά τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

- Παρόμοιες μέσες τιμές σφάλματος ταχυτήτων, σ_{Vs2} και σ_{Vs30} προέκυψαν από τις αντιστροφές DC και DC- f_0 . Αυτό μπορεί να οφείλεται στο περιορισμένο βάθος των

μοντέλων αναφοράς, μέχρι το οποίο τα εκτιμώμενα μοντέλα δομής είναι καλά προσδιορισμένα από τις καμπύλες σκέδασης. Η αξιοποίηση της ιδιοσυχνότητας στις συνδυαστικές αντιστροφές συνεισφέρει κυρίως στην εκτίμηση της βαθύτερης δομής, η οποία είναι δύσκολο να εκτιμηθεί από την αντιστροφή μόνο της καμπύλης σκέδασης (DC) λόγω έλλειψης της χαμηλόσυχνης πληροφορίας. Από την άλλη, είναι εμφανές ότι οι αβεβαιότητες της f_0 περιορίζουν τη θετική συνεισφορά της πληροφορίας αυτής στα τελικά μοντέλα δομής, οδηγώντας σε παρόμοιες (συνολικής) αξιοπιστίας αποτελέσματα σε ότι αφορά τις τιμές των S ταχυτήτων.

- Παρόμοιες τιμές μέσου σφάλματος βάθους σεισμικού υποβάθρου ($\sigma_{H_{800}}$) προέκυψαν από τις αντιστροφές DC και DC- f_0 . Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι από την αντιστροφή της DC μπορεί να εκτιμηθεί με επαρκή ακρίβεια το βάθος του σεισμικού υποβάθρου, εφόσον το ανάπτυγμα του ειδικού δικτύου σεισμομέτρων είναι αρκετά μεγάλο ώστε υπολογιστεί η βραδύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh σε αρκετά χαμηλές τιμές συχνότητας.
- Οι ταχύτητες V_s των εκτιμώμενων μοντέλων δομής διαφέρουν κατά $\sim 37\%$ (μέσο σφάλμα μοντέλων) από τις ταχύτητες των μοντέλων αναφοράς.
- Οι μέσες ταχύτητες V_{sz} των εκτιμώμενων μοντέλων δομής διαφέρουν συνολικά ($\text{misfit}_{V_{sz}}$) $\sim 14\%$ από τις αντίστοιχες μέσες ταχύτητες των αντίστοιχων μοντέλων αναφοράς.
- Οι μέσες ταχύτητες V_{s30} των εκτιμώμενων μοντέλων δομής διαφέρουν συνολικά ($\text{misfit}_{V_{s30}}$) $\sim 12.5\%$ από τις αντίστοιχες μέσες ταχύτητες των μοντέλων αναφοράς. Είναι εμφανές ότι με δεδομένη και τις αβεβαιότητες των μοντέλων αναφοράς, η ταχύτητα V_{s30} υπολογίζεται με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας.
- Τα εκτιμώμενα βάθη του σεισμικού υποβάθρου, H_{800} , διαφέρουν συνολικά ($\text{misfit}_{H_{800}}$) κατά $\sim 25\%$ από το αντίστοιχο βάθος των μοντέλων αναφοράς.

Βιβλιογραφία

- Boore, D.M., 2016. Determining generic velocity and density models for crustal amplification calculations, with an update of the Boore and Joyner (1997) generic site amplification for $V_s(z) = m/s$. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 106, 316–320.
- Brocher, T.M., 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 2081–2092.
- Chatzis, N., Klimis, N., Anthymidis, M., 2018. 1D V_s Models By Single-Station Noise Data Inversion and Joint 1D V_s Models By Single-Station Noise Data Inversion. 16th Eur. Conf. Earthq. Eng. (16 ECEE), Thessaloniki, Greece.
- Chatzis, N., Papazachos, C., Theodoulidis, N., Hatzidimitriou, P., Vougioukalakis, G., Paulatto, M., Heath, B., Hooft, E., Toomey, D., Anthymidis, M., Ventouzi, C., 2022. Metamorphic bedrock geometry of Santorini using HVSR information and geophysical modeling of ambient noise and active-source surface-wave data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 432, 107692.
- Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance. Part, 1, 1998-1.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., Gregory, A., 1974. A. r. gregory8. *Geophysics* 39, 770–780.
- Haghshenas, E., Bard, P.Y., Theodoulidis, N., Atakan, K., Cara, F., Cornou, C., Cultrera, G., Di Giulio, G., Dimitriu, P., Fäh, D., De Franco, R., Marcellini, A., Pagani, M., Rovelli, A., Savvaïdis, A., Tento, A., Vidal, S., Zacharopoulos, S., 2008. Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bull. Earthq. Eng.* 6, 75–108.
- Stewart, J.P., Klimis, N., Savvaïdis, A., Theodoulidis, N., Zargli, E., Athanasopoulos, G., Pelekis, P., Mylonakis, G., Margaris, B., 2014. Compilation of a local V_s profile database and its application for inference of V_{s30} from geologic- and terrain-based proxies. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 104, 2827–2841.