



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων
σε Δύο Διαστάσεις

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον"

Εμμανουήλ Μαθιουδάκης

Εξεταστική επιτροπή

Αντώνιος Βαφείδης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Εμμανουήλ Στειακάκης, Αν. Καθηγητής

Ιωάννης Τσομπανάκης, Καθηγητής

Χανιά, Μάιος 2023

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εργασία αυτή κλείνει και αισίως ένας πολύ σημαντικός κύκλος. Καθώς στη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών συνέβησαν διάφορες αλλαγές κυρίως λόγω της πανδημίας, απώλειες και αλλά και εξελίξεις, νιώθω πραγματική ανάγκη να ευχαριστήσω ανθρώπους που συνέβαλαν στην μέχρι τώρα προσωπική μου πορεία.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή Αντώνιο Βαφείδη. Η εμπιστοσύνη και υπομονή που έδειξε απέναντί μου χωρίς να είμαι προπτυχιακός του φοιτητής, οι συμβουλές και παρατηρήσεις στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής αλλά και σε ευρύτερα ζητήματα του πεδίου της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής χρήσιμα σε επαγγελματικό επίπεδο, είναι μερικά μόνο από τα χαρακτηριστικά για τα οποία του είμαι βαθιά ευγνώμων.

Ο Δρ. Γεώργιος Κρητικάκης είναι ο άνθρωπος με την συμβολή του οποίου η παρούσα εργασία δεν θα είχε περατωθεί αισίως. Συνέβαλε στην επίλυση ζητημάτων του κώδικα, στην εμβριθή αξιολόγηση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, και στην άοκνη διόρθωση επιστημονικών και συντακτικών σημείων του κειμένου, προσδίδοντας έτσι αξία στην προσπάθειά μου. Οι συζητήσεις μας με βοήθησαν να κατανοήσω εις βάθος διάφορες πλευρές του αντικειμένου με το οποίο επέλεξα να ασχοληθώ. Τον ευχαριστώ ειλικρινά και αναγνωρίζω τη σημαντική βοήθειά του.

Οι Καθηγητές Εμμανουήλ Στειακάκης και Ιωάννης Τσομπανάκης, που έχω την τιμή να είναι στην εξεταστική μου επιτροπή, με βοήθησαν σε ακαδημαϊκό επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Οι τυχαίες συναντήσεις μας ήταν πάντοτε ευχάριστες και εύχομαι να επαναληφθούν κάποια στιγμή στα πάτρια εδάφη της ανατολικής Κρήτης.

Επιπλέον, κομβικό ρόλο είχαν ερευνητές του εξωτερικού. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Sylvain Pasquet για την παραχώρηση των συνθετικών δεδομένων και την άμεση βελτίωση του κώδικα του λογισμικού. Ευχαριστώ επίσης τους Marc Wathelet και John Stockwell Jr. για την άμεση ανταπόκρισή τους μέσω των forum για την επίλυση τεχνικών ζητημάτων των απαιτούμενων λογισμικών. Μπορεί όσα γράφω να τους *φαίνονται* όλα ελληνικά, εκείνοι όμως έθεσαν τα θεμέλια του πειραματικού τμήματος της παρούσας εργασίας.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω την αναφορά στον Γιάννη Μπριντάκη, M.Sc. Μηχανικό Ορυκτών Πόρων. Συνηθεύοντας μαζί του με επηρέασε να επιλέξω το συγκεκριμένο μεταπτυχιακό, και εξαιτίας του οδηγήθηκα τελικά να διευρύνω τις γνώσεις μου σε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον πεδίο, παντελώς νέο σε μένα μέχρι τότε. Τον ευχαριστώ πολύ.

Οφείλω όμως να αναγνωρίσω τη συνεισφορά κάποιων ανθρώπων στην μέχρι τώρα πορεία μου. Ευχαριστώ τον Ηλία Παπαγεωργίου, Μεταλλειολόγο Μηχανικό, για την εμπειρία στα υπόγεια έργα και την διαπίστωση ότι η ευθύνη είναι η σημαντικότερη πλευρά του επαγγέλματος του Μηχανικού. Ευχαριστώ τον Λευτέρη Δασκαλάκη, Πολιτικό Μηχανικό, για την εμπειρία που απέκτησα στο πεδίο, την εμπιστοσύνη και την υποστήριξή του. Ευχαριστώ τον Στρατή Ευστρατιάδη, Πολιτικό Μηχανικό, για την υποστήριξη και τη εισαγωγή στο αντικείμενο του Δομοστατικού Μηχανικού. Ευχαριστώ επίσης τον Ken Hurst, Μηχανικό και Γεωλόγο, για την καθοδήγηση στα πλαίσια του προγράμματος InSightSeers. Τέλος, ευχαριστώ τους Καθηγητές Ευστάθιο Σιδερή και Βαγγέλη Πλεύρη, για την ανιδιοτέλεια και τις συζητήσεις μας, καθώς αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στους γονείς και την οικογένεια μου. Η συνεχής υποστήριξή τους σε όλα τα επίπεδα μου επέτρεψε να εξελιχθώ και ολοκληρώσω πολλές προσπάθειές μου. Τους είμαι ειλικρινά ευγνώμων για τα ανεκτίμητης αξίας εφόδια που μου έχουν προσφέρει.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τη Δέσποινα, για την συνεχή της υποστήριξη σε συναισθηματικό και πρακτικό επίπεδο, την ενθάρρυνση, την κατανόηση και το γεγονός ότι συμμερίζεται τις επιλογές μου.

Περίληψη

Η μέθοδος της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (MASW) αποτελεί μια σεισμική μέθοδο διερεύνησης των μηχανικών χαρακτηριστικών του ρηχότερου εδάφους με πληθώρα εφαρμογών. Από τη συμβατική εφαρμογή της MASW, προκύπτει η μεταβολή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων V_S σε σχέση μόνο με το βάθος (1D), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη και να αποδίδονται οι πλευρικές μεταβολές της σεισμικής ταχύτητας που εγγενώς υπάρχουν σε ένα ανομοιογενές υπέδαφος. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε η μελέτη και η διερεύνηση των δυνατοτήτων του λογισμικού ανοιχτού κώδικα SWIP (Surface-Wave Inversion and Profiling), το οποίο εισάγει μια καινοτόμο μεθοδολογία παραθυρικής εφαρμογής της μεθόδου MASW, προκειμένου να εκτιμηθεί η μεταβολή της ταχύτητας V_S σε δύο διαστάσεις (2D).

Ύστερα από μια σύντομη επισκόπηση του θεωρητικού υποβάθρου της μεθόδου, καθώς και περιγραφής άλλων αντίστοιχων τεχνικών εξαγωγής της V_S σε δύο διαστάσεις, περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που υιοθετείται σε αυτή την εργασία. Το SWIP, χρησιμοποιεί τεχνικές παραθυρικής εξαγωγής και υπέρθεσης, ώστε να ανακατασκευάσει 2D μοντέλα ταχύτητας V_S από διαδοχικές 1D αντιστροφές. Αξιοποιεί όλες τις διαθέσιμες σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής και περιλαμβάνει την εξαγωγή καταγραφών από πολλαπλά παράθυρα μεταβλητού μεγέθους. Τα αντίστοιχα πεδία διασποράς ανθροίζονται με συντελεστές βαρύτητας, ανάλογα με το μέγεθος του παραθύρου από το οποίο αυτά έχουν προκύψει.

Προκειμένου να διερευνηθούν οι δυνατότητες και η αξιοπιστία της εν λόγω μεθοδολογίας, αρχικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε συνθετικά δεδομένα, των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίνονται και αξιολογούνται σε σχέση με την καθιερωμένη MASW. Για τα μονοδιάστατα αποτελέσματα που αποδίδονται από το SWIP, το ενδιαφέρον της μελέτης εστιάζεται στη βέλτιστη παραμετροποίηση της μεθοδολογίας επεξεργασίας και την διερεύνηση των διαφορετικών τρόπων υπέρθεσης των δεδομένων. Τα συνθετικά δεδομένα χρησιμοποιούνται τελικά για την εκτίμηση της μεταβολής της ταχύτητας V_S σε δύο διαστάσεις, με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Αξιοποιώντας πλήρως τη μεθοδολογία της παραθυρικής εφαρμογής της MASW, όπως αυτή υλοποιείται από τους αλγόριθμους του SWIP, πραγματοποιείται στη συνέχεια η επεξεργασία καταγραφών πεδίου. Στην περίπτωση αυτή, διαθέσιμα αποτελέσματα από άλλες γεωφυσικές μεθόδους λαμβάνονται υπόψη τόσο στην αντιστροφή των επιφανειακών κυμάτων, όσο και στην αξιολόγηση των τελικών μονοδιάστατων και δισδιάστατων μοντέλων ταχύτητας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μελετούμενης μεθοδολογίας, παρουσιάζουν πολύ καλή ομοιότητα με αυτά

άλλων μεθόδων γεωφυσικής, ενώ τα πάχη των στρωμάτων που προσδιορίστηκαν, ταυτίζονται σε εξαιρετικό βαθμό με τη στρωματογραφία γεωτρητικών δεδομένων. Με βάση τα αποτελέσματα των πραγματικών δεδομένων, πραγματοποιείται τέλος ο χαρακτηρισμός του εδάφους σύμφωνα με τα σύγχρονα κανονιστικά αντισεισμικά πρότυπα, με το έδαφος να εμπίπτει στην κατηγορία Β.

Abstract

The multichannel analysis of surface waves (MASW) is a widely applied seismic method for investigating the mechanical characteristics of the subsoil. MASW describes the variation of the shear waves velocity V_S , related only to the depth (1D), without taking into account any lateral variation of the seismic velocity which intrinsically exists at a non-homogenous subsoil. The present study investigates the capabilities of Surface-Wave Inversion and Profiling (SWIP) software, which introduces a novel windowing approach in MASW method, in order to estimate the variation of V_S velocity in two dimensions (2D).

After a brief overview of MASW theoretical background, along with reviewing other similar techniques providing two-dimensional V_S results, the adopted methodology is analytically described. SWIP utilizes windowing and stacking techniques, in order to reconstruct 2D V_S models by successive 1D inversions. It uses available common shot gathers and includes data extraction over multiple windows of variable size. The corresponding dispersion images are stacked with weight associated to the size of the window from which they have emerged.

In order to investigate the capabilities and the reliability of this methodology, analysis is carried out on synthetic data. The results are compared and assessed with those from established MASW procedure. For the one-dimensional results provided by SWIP, the study is concentrated on the optimized parameterization and the analysis of different data stacking techniques. The synthetic data are eventually used to estimate the V_S variation over two dimensions, with satisfactory results.

Subsequently, the windowing application of MASW is fully utilized, as implemented into SWIP algorithms, by processing field data sets. Available results from other geophysical methods are taken into account, both for inversion of surface waves, as for the assessment of one- and two-dimensional velocity models. The results present are in accordance with those from other geophysical methods. The thickness of defined layers is particularly coincident with stratigraphy from geological borehole data. Based on the field data set results, site is finally characterized according to modern earthquake design standards and categorized as type B.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	iii
Abstract	v
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Πινάκων	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xv
1 Δυναμικές ιδιότητες του εδάφους	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Περιγραφή εργασίας	5
2 Η πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων - MASW	7
2.1 Ιδιότητες κυμάτων	7
2.2 Πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων	11
2.2.1 Συλλογή δεδομένων	12
2.2.2 Επεξεργασία καταγραφών και καμπύλες διασποράς	15
2.2.3 Αντιστροφή και κατανομή ταχύτητας Vs με το βάθος	16
3 Εφαρμογή της MASW στις δύο διαστάσεις	19
3.1 Σύντομη περιγραφή των τεχνικών 2D MASW	19
3.1.1 Κύλιση αναπτύγματος πηγής - δεκτών	19
3.1.2 Αναδιάταξη των δεδομένων σε καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου με ετεροσυσχέτιση των σεισμικών ιχνών	20
3.1.3 Παραθυρική MASW	21

3.1.4	Αντιστροφή πλήρους κυματικού πεδίου	24
3.2	Το λογισμικό SWIP	25
3.2.1	Παραθυρική εξαγωγή καμπύλων διασποράς	26
3.2.2	Παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου	31
3.2.3	Αντιστροφή καμπύλων διασποράς	33
3.2.4	Εξαγωγή αποτελεσμάτων σε 1 και 2 διαστάσεις	37
4	Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων	40
4.1	Παραθυρική εξαγωγή σεισμικών δεδομένων	43
4.1.1	Δεδομένα χωρίς υπέρθεση	43
4.1.2	Δεδομένα με υπέρθεση	45
4.2	Επιλογή καμπύλων διασποράς	48
4.2.1	Δεδομένα χωρίς υπέρθεση	49
4.2.2	Δεδομένα με υπέρθεση	52
4.3	Επιλογή αρχικού μοντέλου - παραμετροποίηση	56
4.4	Αντιστροφή και αποτελέσματα	58
4.5	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	67
4.6	Αποτέλεσμα σε δύο διαστάσεις	75
5	Δεδομένα πεδίου	83
5.1	Παραθυρική εξαγωγή δεδομένων και επιλογή καμπύλων διασποράς	85
5.2	Παραμετροποίηση και αντιστροφή	89
5.3	Αποτελέσματα δύο διαστάσεων	91
5.4	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και κατηγοριοποίηση εδάφους	97
6	Συμπεράσματα & προτάσεις	109
	Αναφορές	123

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Παράμετροι αρχικού μοντέλου του kriSIS για τις δύο θέσεις διερεύνησης.	56
4.2	Παράμετροι αρχικού μοντέλου του SWIP για τις δύο θέσεις διερεύνησης.	58
4.3	Αποτελέσματα αντιστροφής του SWIP: αποδεκτά μοντέλα, ελάχιστο παρατηρούμενο σφάλμα και χρόνος αντιστροφής, για όλες τις περιπτώσεις υπέρθεσης.	61
4.4	Μέση τετραγωνική διαφορά για τις καμπύλες διασποράς χωρίς υπέρθεση ($st=0$), μεταξύ kriSIS (ως $V_{\Phi 1}$) και SWIP (ως $V_{\Phi 2}$).	68
4.5	Μέση τετραγωνική διαφορά για τις καμπύλες διασποράς με υπέρθεση: απλή - $st1$ και σταθμισμένη - $st3$, μεταξύ του SWIP και του kriSIS, με τιμές αναφοράς την καμπύλη του SWIP - $st3$ (ως $V_{\Phi 1}$).	69
5.1	RMS διαφορά V_S μεταξύ διαφορετικών μεθόδων και του βέλτιστου αποτελέσματος του SWIP για τη θέση $X_{mid}=33m$ της τομής S2, σε όρους ταχύτητας και ποσοστού.100	
5.2	Ευρήματα γεωλογικών σχηματισμών ερευνητικής δειγματοληπτικής γεώτρησης. . .	102

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Κύματα ελαστικού ομογενούς υλικού μέσου. (a) Αριστερά, κύματα χώρου: (A) P-κύματα και (B) S-κύματα. (b) Δεξιά, κύματα στην επιφάνεια ημιχώρου: (A) κύματα Rayleigh και (B) κύματα Love. Πηγή: Reynolds (2011)	9
2.2	Προσδιορισμός διασποράς επιφανειακών κυμάτων. Πηγή: Foti et al. (2011)	10
2.3	Θεμελιώδης και ανώτερης τάξης καμπύλες διασποράς. Η χρωματική κλίμακα απεικονίζει την κανονικοποιημένη σεισμική ενέργεια. Πηγή: Κρητικάκης (2010)	11
2.4	Επισκόπηση της μεθόδου MASW. Πηγή: Olafsdottir et al. (2018b)	13
3.1	Η διαδικασία ταξινόμησης δεδομένων CMPCC. (Li et al., 2021)	21
3.2	Το διάγραμμα ροής εξαγωγής καμπύλων διασποράς. (Pasquet and Bodet, 2017) .	29
3.3	Η παραθυρική επιλογή και υπέρθεση σεισμικών δεδομένων. (Pasquet et al., 2021)	31
3.4	Τυπική γεωμετρία κελιών Voronoi.	35
3.5	Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αντιστροφής των καμπύλων διασποράς. (Pasquet and Bodet, 2017)	36
3.6	Παράδειγμα αποτελέσματος αντιστροφής 1D του αλγόριθμου NA. Συνολικά μελετήθηκαν 11350 μοντέλα, εκ των οποίων τα 8030 θεωρήθηκαν αποδεκτά (με χρώμα) ενώ τα υπόλοιπα απορρίφθηκαν (με κλίμακα του γκρι).	38
4.1	Το συνθετικό μοντέλο 3 εδαφικών στρωμάτων. (Pasquet et al., 2021)	41
4.2	Τα σεισμικά ίχνη για το σύνολο των δεκτών. Πηγή στη θέση $x=0m$	41
4.3	Το συνθετικό εδαφικό μοντέλο. Σημειώνονται με μαύρες γραμμές οι θέσεις διερεύνησης X_{mid} 30m και 80m, καθώς και οι πηγές της μη-παραθυρικής εξαγωγής δεδομένων: στα 0 και 60m για X_{mid30} , και στα 40 και 120m για X_{mid80}	43

4.4	Επιλεγμένες καταγραφές για τη θέση Xmid30m. Εξαγωγή σεισμικών δεδομένων από πολλαπλά παράθυρα μεταβλητού μεγέθους: (a)-(d) με 3, 19, 35 και 59 ίχνη, αντίστοιχα. Πηγή 'R' στη θέση x=40m (a)-(b), x=50m (c) και x=60m (d). . . .	47
4.5	Αποτέλεσμα μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου, με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες διασποράς από (a) το kriSIS, και (b) το SWIP. Θέση διερεύνησης Xmid=30m, πηγή στα 60m ('R'), δεδομένα χωρίς υπέρθεση.	50
4.6	Αποτέλεσμα μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου, με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες διασποράς από (a) το kriSIS, και (b) το SWIP. Θέση διερεύνησης Xmid=80m, πηγή στα 40m ('L'), δεδομένα χωρίς υπέρθεση.	51
4.7	Πεδία διασποράς με απλή υπέρθεση (st1) για τη θέση Xmid30m. Δεδομένα με πηγή στα δεξιά 'R' για παράθυρα με 3, 19, 35 και 59 σεισμικά ίχνη (a-d), αντίστοιχα.	53
4.8	Αθροισμένα πεδία διασποράς με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες από το SWIP. Θέση διερεύνησης Xmid=30m, πηγές εκατέρωθεν ('B'), δεδομένα με (a) απλή υπέρθεση - st1 και (b) σταθμισμένη υπέρθεση - st3.	54
4.9	Αθροισμένα πεδία διασποράς με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες από το SWIP. Θέση διερεύνησης Xmid=80m, πηγές εκατέρωθεν ('B'), δεδομένα με (a) απλή υπέρθεση - st1 και (b) σταθμισμένη υπέρθεση - st3.	55
4.10	Αποτέλεσμα 1D αντιστροφής του αλγόριθμου NA, για τη θέση Xmid=80m με απλή υπέρθεση (st1). Οι υπολογισμένες καμπύλες διασποράς (a) και οι αντίστοιχες κατανομές ταχύτητας με το βάθος (b). Συνολικά παρήχθησαν 11350 μοντέλα, εκ των οποίων τα 5329 θεωρήθηκαν αποδεκτά (με χρώμα) ενώ τα υπόλοιπα απορρίφθηκαν (με κλίμακα του γκρι), όπως σημειώνεται και στην κλείδα των τιμών σφάλματος (misfit). Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή οριοθετείται το βέλτιστο μοντέλο με την ελάχιστη τιμή σφάλματος (best model).	60

- 4.11 Υπολογισμένες καμπύλες διασποράς για (a) τη θέση Xmid30m και (b) για Xmid80m από το kriSIS (διακεκομμένη γραμμή) και το SWIP (συμπαγής γραμμή). Περιλαμβάνονται οι θεωρητικές καμπύλες χωρίς υπέρθεση (st0), όπου σημειώνονται με κόκκινο χρώμα για πηγές αριστερά (L), και με μπλε για δεξιά (R). Το μωβ χρώμα αντιστοιχεί σε απλή υπέρθεση (st1) και το πράσινο σε σταθμισμένη (st3), με πηγές εκατέρωθεν (B). Τα αποτελέσματα του SWIP αφορούν τα μοντέλα με την ελάχιστη τιμή σφάλματος. 62
- 4.12 Κατανομή ταχύτητας V_S σε σχέση με το βάθος για (a) τη θέση Xmid30m και (b) για Xmid80m από το kriSIS (διακεκομμένη γραμμή) και το SWIP (συμπαγής γραμμή). Περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα αντιστροφής από δεδομένα χωρίς υπέρθεση (st0), όπου σημειώνονται με κόκκινο χρώμα για πηγές αριστερά (L) και με μπλε για δεξιά (R). Το μωβ χρώμα αντιστοιχεί σε απλή υπέρθεση (st1) και το πράσινο σε σταθμισμένη (st3), με πηγές εκατέρωθεν (B). Τα αποτελέσματα του SWIP αφορούν τα μοντέλα με την ελάχιστη τιμή σφάλματος. 63
- 4.13 Αποτελέσματα από το SWIP μεταβολής ταχύτητας V_S συναρτήσει του βάθους, θέση Xmid30m. Παρουσιάζονται, επί του πραγματικού μοντέλου ταχύτητας εδάφους, τα μοντέλα μέσης τιμής και τα σταθμισμένα, για στρωματοποιημένη και ομαλή μεταβολή της ταχύτητας, τα οποία περικλείονται από τα όρια του αρχικού παραμετρικού χώρου. Δεδομένα (a) με απλή και (b) με σταθμισμένη υπέρθεση. . . 65
- 4.14 Αποτελέσματα από το SWIP μεταβολής ταχύτητας V_S συναρτήσει του βάθους, θέση Xmid80m. Παρουσιάζονται, επί του πραγματικού μοντέλου ταχύτητας εδάφους, τα μοντέλα μέσης τιμής και τα σταθμισμένα, για στρωματοποιημένη και ομαλή μεταβολή της ταχύτητας, τα οποία περικλείονται από τα όρια του αρχικού παραμετρικού χώρου. Δεδομένα (a) με απλή και (b) με σταθμισμένη υπέρθεση. 66
- 4.15 Ψευδοτομές ταχύτητας φάσης V_Φ συναρτήσει του μήκους κύματος και των θέσεων διερεύνησης (Xmids): Ταχύτητα φάσης (a) επιλεγμένων καμπύλων διασποράς (b) υπολογισμένων καμπύλων διασποράς από το SWIP. (c) Διαφορά της V_Φ (%) μεταξύ των προφίλ (a) και (b). 78

4.16	Αποτελέσματα αντιστροφής σε προφίλ δύο διαστάσεων. (a) Βέλτιστο (best) μοντέλο κατανομής ταχύτητας V_S , (b) τυπική απόκλιση της V_S σε μορφή ποσοστού (%) και (c) το πραγματικό μοντέλο ταχύτητας.	79
4.17	Ποιοτικά χαρακτηριστικά αντιστροφής, για κάθε θέση X_{mid} του συνθετικού μοντέλου 3 εδαφικών στρωμάτων. (a) Η κατανομή της τιμής του ελαχίστου σφάλματος και (b) ο αριθμός των αποδεκτών μοντέλων του αλγορίθμου NA σε κάθε θέση X_{mid}	80
5.1	Περιοχή μελέτης: κοινότητα Σίβας του Δήμου Φαιστού, ΠΕ Ηρακλείου στην Κρήτη. Σημειώνονται επί του χάρτη οι θέσεις των γεωφυσικών μετρήσεων.	84
5.2	Γεωμετρία διάταξης σεισμικών καταγραφών. (a) Γραμμή μελέτης S1 και (b) γραμμή μελέτης S2. Αναγράφονται οι αποστάσεις μεταξύ των γεωφώνων, οι θέσεις των πηγών και οι συντεταγμένες της αρχής και του τέλους του αναπτύγματος, με τον προσανατολισμό κάθε άκρου.	84
5.3	Παράθυρα σεισμικών δεδομένων, τομή S2. (a) $X_{mid}=3$ στα 15m, παράθυρο 6 ιχνών, πηγή 824 στα 68m. (b) $X_{mid}=6$ στα 33m, παράθυρο 12 ιχνών, πηγή 822 στα -6m.	86
5.4	Στιγμιότυπα πεδίων διασποράς κατά την υπέρθεση, τομή S2, θέση $X_{mid}6$ στα 33m, πηγή 822 στα -6m. (a)-(d) Πεδία διασποράς απλής (st1) υπέρθεσης διαφράγματος 2, 4, 8 και 12 ιχνών, αντίστοιχα. (e) Τελικό πεδίο διασποράς σταθμισμένης (st3) υπέρθεσης, όπου με λευκό χρώμα απεικονίζεται η επιλεγμένη καμπύλη. (f) Εικόνα διασποράς χωρίς υπέρθεση (st0) από το kriSIS από την ίδια σεισμική πηγή, με την επιλεγμένη καμπύλη.	88
5.5	Η μεταβολή της ταχύτητας των P-κυμάτων, όπως προέκυψε από τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης, (a) για την τομή S1 και (b) για την τομή S2.	90
5.6	Αποτέλεσμα 1D αντιστροφής του αλγορίθμου NA, για τη θέση $X_{mid}=6$ στα 33m της τομής S2. Οι υπολογισμένες καμπύλες διασποράς (a) και οι αντίστοιχες κατανομές ταχύτητας με το βάθος (b), με την κλείδα της χρωματικής απόδοσης τιμών σφάλματος.	91

5.7	Ψευδοτομές ταχύτητας φάσης V_{Φ} σε όρους μήκους κύματος και όδευσης θέσεων διερεύνησης (Xmids), τομή S2. Ταχύτητα φάσης (a) επιλεγμένων και (b) υπολογισμένων καμπύλων διασποράς. (c) Διαφορά της V_{Φ} (%) μεταξύ των προφίλ (a) και (b).	93
5.8	Αποτελέσματα σε προφίλ δύο διαστάσεων, τομή S2. (a) Κατανομή ταχύτητας V_S , (b) τυπική απόκλιση της V_S σε μορφή ποσοστού (%) και (c) τομή ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT).	94
5.9	Τομή S2: ποιοτικά χαρακτηριστικά αντιστροφής για κάθε θέση Xmid. (a) Η ελάχιστη τιμή σφάλματος για το εξομαλυμένο μοντέλο μέσω των τιμών (average smooth), και (b) ο αριθμός των αποδεκτών μοντέλων.	95
5.10	Αποτελέσματα σε προφίλ δύο διαστάσεων, τομή S1. (a) Κατανομή ταχύτητας V_S , (b) τυπική απόκλιση της V_S σε μορφή ποσοστού (%) και (c) τομή ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT).	96
5.11	Πεδίο διασποράς για τη θέση στα 33m της τομής S2, σεισμική πηγή 822 (στα -6m) από σταθμισμένη υπέρθεση του SWIP, επί του οποίου παρουσιάζονται οι επιλεγμένες καμπύλες από kriSIS (μπλε διακεκομμένη γραμμή) και από το SWIP (γκρι γραμμή με μπάρες σφάλματος). Παρατίθεται επίσης η υπολογισμένη καμπύλη διασποράς του SWIP για το βέλτιστο (best) μοντέλο, καθώς επίσης αναγράφεται και το σχετικό σφάλμα μεταξύ των επιλεγμένων καμπύλων. Κλίμακα συχνότητας οριζοντίου άξονα σε λογαριθμική μορφή.	97
5.12	Σύγκριση κατανομής V_S σε σχέση με το βάθος, μεταξύ διαφόρων σεισμικών μεθόδων, για το μέσον του αναπτύγματος της τομής S2.	99

1 Δυναμικές ιδιότητες του εδάφους

1.1 Εισαγωγή

Το έδαφος, θεωρώντας το ως ελαστικό υλικό μέσο, χαρακτηρίζεται από μεγέθη που είναι δυναμικά, δηλαδή χρονικώς μεταβλητά. Η διατμητική μετατόπιση των υλικών σημείων του εδάφους που συμμετέχουν στη διάδοση των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων, είναι ένα από αυτά. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων S (V_S) συνδέεται άμεσα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τις δομές του υπεδάφους. Η ανάγκη εύρεσης της μεταβολής της, προκύπτει από τη θεώρησή της ως βασική παράμετρο εισαγωγής σε πληθώρα μελετών, μοντέλων, προσεγγίσεων, και μεθοδολογιών σε πολλά επιστημονικά πεδία, όπως αυτό της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, της Υδρογεωλογίας, της Τεχνικής Γεωλογίας και της Περιβαλλοντικής Μηχανικής.

Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική και συγκεκριμένα οι σεισμικές μέθοδοι διερεύνησης του ρηχού τμήματος του εδάφους, προσφέρουν τη δυνατότητα προσδιορισμού της ταχύτητας V_S με αξιοπιστο και καθιερωμένο πλέον τρόπο. Η ανάλυση των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων και η μελέτη της διασποράς της ταχύτητάς τους, αξιοποιεί σεισμικές καταγραφές, ώστε να προσδιοριστεί η μεταβολή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε σχέση με το βάθος. Η αντιστροφή των καμπύλων διασποράς των επιφανειακών κυμάτων αποτελεί μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια της επιστήμης της Σεισμολογίας (Πιτιλάκης, 2010). Η πηγή των κυμάτων μπορεί να είναι ενεργή, όπως μια τεχνητή σεισμική πηγή, ή παθητική, από περιβαλλοντικό μικροθόρυβο. Την πρώτη περίπτωση αξιοποιεί η μέθοδος της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW) (Park et al., 1999), στην οποία βασίζεται και η παρούσα εργασία. Όσο για τις μετρήσεις από περιβαλλοντικές δονήσεις, έχουν εξίσου αναπτυχθεί μέθοδοι αντιστροφής των ιδιοτήτων των επιφανειακών κυμάτων με σκοπό την απόκτηση της διακύμανσης της

ταχύτητας V_S και του προσδιορισμού της στρωματογραφίας, όπου η καταγραφή τους γίνεται είτε από συστοιχία δεκτών (Wathelet et al., 2008) ή από έναν μόνο δέκτη, ακόμα και σε περίπτωση πλανητικών αποστολών (Hobiger et al., 2021).

Ταυτόχρονα με τον υπολογισμό της μεταβολής της V_S σε σχέση με το βάθος, από την ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων, μπορεί να εκτιμηθεί το πάχος και ο αριθμός των εδαφικών στρωμάτων, αφού σχηματισμοί διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών επιτρέπουν την διέλευση σεισμικών κυμάτων με διαφορετική ταχύτητα. Μάλιστα, η μεταβολή της ταχύτητας συμβαίνει με χαρακτηριστικό τρόπο στις μεταξύ τους διεπιφάνειες. Με τον προσδιορισμό λοιπόν της στρωματογραφίας του υπεδάφους, αλλά και την ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων εντός των στρωμάτων αυτών, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου ταλάντωσης της εδαφικής στήλης (Kramer, 1996; Pitilakis et al., 2013), σύμφωνα με την σχέση:

$$T = \frac{4 \cdot h_i}{V_{S,i}} \quad (1.1)$$

όπου h_i και $V_{S,i}$ είναι το πάχος και η ταχύτητα του i στρώματος, αντίστοιχα. Επίσης, στις δυναμικές ιδιότητες του εδάφους συγκαταλέγεται το μέγιστο μέτρο διάτμησης G_{max} για μικρές παραμορφώσεις (τάξεως του 10^{-5}), και συνδέεται άμεσα με την τιμή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, μέσω της σχέσης:

$$G_{max} = \rho V_S^2 \quad (1.2)$$

όπου το ρ αντιστοιχεί στην πυκνότητα του εδαφικού υλικού. Μαζί με την διατμητική παραμόρφωση του εδάφους γ (%) και την απόσβεση του υλικού D (%), μπορούν να υπολογιστούν οι καμπύλες $G/G_{max} - \gamma - D$, οι οποίες αποτελούν τη βάση για αναλύσεις της δυναμικής απόκρισης του εδάφους, η οποία οφείλεται στην επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών (Πιτιλάκης, 2010).

Σύμφωνα με τον ισχύοντα Ευρωπαϊκό Κανονισμό για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κτιρίων (CEN, 2004), το έδαφος αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού. Προσδιορίζοντας την κατηγορία εδάφους, ορίζονται ανάλογα συντελεστές για την εκτίμηση της σεισμικής δράσης, κατά μελέτη νέων και υφιστάμενων κατασκευών, μέσω του ελαστικού φάσματος απόκρισης. Η κατηγοριοποίηση

αυτή, δύναται να πραγματοποιηθεί μέσω των παραμέτρων του αριθμού χρούσεων της πρότυπης δοκιμής διείσδυσης, N_{SPT} , της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους, c_u , καθώς και της $V_{s,30}$, δηλαδή της μέσης τιμής της ταχύτητας διάδοσης των S-κυμάτων, στα ανώτερα 30m της εδαφικής τομής (CEN, 2004). Νεότερα σχήματα κατηγοριοποίησης των εδαφών έχουν προταθεί (Pitilakis et al., 2013), όπου αντί της απλής θεώρησης της $V_{s,30}$ και πέραν των καθιερωμένων γεωτεχνικών παραμέτρων, λαμβάνονται υπόψη το πάχος των εδαφικών στρωμάτων, η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος ταλάντωσης του εδάφους (Εξίσωση 1.1), καθώς και η μέση τιμή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων έως το βραχώδες υπόβαθρο, όπου η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων είναι ίση ή μεγαλύτερη από 800m/s. Οι παράμετροι αυτές για τον χαρακτηρισμό του εδαφικού πεδίου, αξιοποιούνται στον καθορισμό των συντελεστών σεισμικής ενίσχυσης πεδίου, στα φάσματα απόκρισης, και στον καθορισμό της αντίστοιχης μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (peak ground acceleration - PGA) (Foti et al., 2009, 2011, 2018), κατά τη μελέτη και το σχεδιασμό των κτιριακών έργων και έργων υποδομών. Κατά την αναθεώρηση λοιπόν του σχετικού Ευρωπαϊκού Κανονισμού (Pitilakis et al., 2019), μερικές από τις παραπάνω δυναμικές ιδιότητες του εδαφικού μέσου έχουν πλέον συμπεριληφθεί, προσδιορίζοντας την κατηγορία εδάφους σύμφωνα με την ταχύτητα $V_{s,H}$, όπου H το βάθος στο οποίο εντοπίζεται το σεισμικό υπόβαθρο (CEN, 2022). Μάλιστα, στην έκδοση υπό αναθεώρηση του Ευρωκώδικα 8, γίνεται ξεχωριστή μνεία (§ 5.1.2(8)) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας V_S και του σχηματισμού που αποτελεί το σεισμικό υπόβαθρο, μέσω της μη-καταστροφικής μεθόδου της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων.

Καθώς ο συσχετισμός των τοπικών εδαφικών συνθηκών με την ενίσχυση της σεισμικής δράσης, η οποία επηρεάζεται και από την τοπογραφία της περιοχής, έχει προ καιρού παρατηρηθεί (Bouckovalas and Kouretzis, 2001), πλέον οι μελέτες απόκρισης πεδίου (site response analysis) υπολογίζουν την εδαφική επιτάχυνση λόγω σεισμικής διέγερσης για εδαφική στήλη με συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, των οποίων οι τιμές μπορούν να προέρχονται από σεισμικές, μη-καταστροφικές μεθόδους ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (Anbazhagan and Sitharam, 2008; Bard et al., 2010; Pelekis and Athanasopoulos, 2013). Μέσω καθιερωμένων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. QUAD4M (Hudson et al., 1994) και ABAQUS), η δυναμική προσομοίωση και η (γραμμική ή μη-γραμμική) ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους επιτυγχάνεται, ορίζοντας κυρίως και αρχικά, το πλήθος, το πάχος, το μέτρο διάτμησης και την πυκνότητα, για τα αντίστοιχα εδαφικά

στρώματα, (Πιτιλάκης, 2010; Jia, 2018).

Επίσης, σε μελέτες αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης σε αστικές περιοχές, όπως για παράδειγμα στα Χανιά (Koutsoupakis et al., 2021) ή στη Θεσσαλονίκη (Pitilakis et al., 2006), ο προσδιορισμός των εδαφικών συνθηκών με σκοπό την εκτίμηση της τοπικής σεισμικότητας, γίνεται μεταξύ άλλων, κυρίως μέσω σεισμικών μεθόδων απόδοσης της V_S . Επιπρόσθετα, πραγματοποιούνται μικροζωνικές μελέτες και αναλύσεις απόκρισης πεδίου όπου λαμβάνονται υπόψη οι τοπικές εδαφικές συνθήκες, και οι οποίες βασίζονται σε δεδομένα ταχύτητας διατμητικών κυμάτων που προκύπτουν από μεθόδους ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (Pelekis and Athanasopoulos, 2013; Martínez-Pagán et al., 2014; Caruso et al., 2016). Μάλιστα, σεισμικές μέθοδοι επιφανειακών κυμάτων έχουν αξιοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση του εδάφους στις θέσεις των μόνιμων επιταχυνσιογράφων, τον γεωλογικό χαρακτηρισμό των περιοχών αυτών, και του υπολογισμού της ενίσχυσης των σεισμικών κραδασμών, όπως συμβαίνει στις μελέτες των Savvaidis et al. (2014) και Hollender et al. (2018). Επιπλέον, έχει γίνει σύγκριση της ταχύτητας V_S που προκύπτει από τη MASW, με τα αποτελέσματα εργαστηριακών δυναμικών δοκιμών και επί τόπου καθιερωμένων τεχνικών (Steiakakis et al., 2019), με τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων να προκύπτει ικανοποιητική για ιζηματογενείς εδαφικές αποθέσεις. Τέλος, τα αποτελέσματα της μεθόδου MASW έχουν συνδυαστεί και συνεκτιμηθεί με επιτυχία με αυτά από άλλες γεωφυσικές μεθόδους, για αρχαιολογικές μελέτες (Papadopoulos et al., 2012; Kritikakis et al., 2015) αλλά και για υδρογεωλογικές μελέτες (Konstantaki et al., 2013; Pasquet et al., 2021; Alcalá et al., 2021; Pasquet et al., 2022).

Η MASW μπορεί να συμπεριληφθεί στις μη-καταστροφικές δοκιμές (Non-destructive Testing), καθώς δεν απαιτείται διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους. Το γεγονός αυτό, την καθιστά μια οικονομικά και χρονικά αποδοτική τεχνική (Socco et al., 2010; Πιτιλάκης, 2010; Caruso et al., 2016; Olafsdottir et al., 2020) που μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα και σε αστικό περιβάλλον, όπου οι δυνατότητες για γεώτρηση και απευθείας διερεύνηση του εδάφους μπορεί να είναι αρκετά περιορισμένες. Μπορεί επίσης να ειπωθεί, πως αποτελεί μια ήπια (soft) τεχνική με ελάχιστη διατάραξη του εξεταζόμενου μέσου για την εκτέλεσή της, καθώς και με μηδαμινές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases - GHGs) αλλά και πολύ χαμηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια, συγκρίνοντας το εύρος του τελικού αποτελέσματος σε σχέση με άλλες, καθιερωμένες γεωτεχνικές μεθόδους. Έχοντας

υπόψη τα παραπάνω, η MASW μπορεί να συγκαταλεχθεί στις περιβαλλοντικά φιλικές μεθόδους, και να υιοθετηθεί όλο και περισσότερο για γεωτεχνικές, περιβαλλοντικές και υδρογεωλογικές μελέτες και έρευνες, μελλοντικά.

Στην πλειοψηφία των παραπάνω περιπτώσεων, το αποτέλεσμα της MASW αντιστοιχεί στο μέσον της γραμμής μελέτης (Luo et al., 2009), με την μεταβολή της ταχύτητας των S-κυμάτων να προκύπτει για ένα μονοδιάστατο, οριζόντια στρωματωμένο εδαφικό μέσο. Η επέκταση του αποτελέσματος της μεθόδου σε δύο διαστάσεις, δηλαδή ο προσδιορισμός της μεταβολής της ταχύτητας V_S πλευρικά, κατά την οριζόντια διεύθυνση, πέραν από την μεταβολή της ως προς το βάθος, θα μπορούσε να προσφέρει μια πιο γενική θεώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους, καθώς και να βοηθήσει στην μελέτη του εδάφους ως ετερογενές υλικό με πλευρικές μεταβολές, όπως δηλαδή εγγενώς συναντάται στη Φύση. Ο προσδιορισμός μάλιστα των πλευρικών μεταβολών της ταχύτητας V_S , ώστε αυτές να λαμβάνονται υπόψη στο τελικό αποτέλεσμα, θεωρείται πως μπορεί να βελτιώσει πληθώρα εφαρμογών, όπως αυτές αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς αυτή η προσέγγιση απόδοσης αποτελεσμάτων ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματική κατάσταση. Σε αυτά τα πλαίσια κινείται η παρούσα η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, όπου μελετάται η διασπορά των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh με σκοπό τον προσδιορισμό της μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων σε δύο διαστάσεις, με βάση τη μέθοδο MASW.

1.2 Περιγραφή εργασίας

Το κίνητρο λοιπόν της εργασίας είναι να μελετηθεί και να αξιολογηθεί μια νέα προσέγγιση για την απόδοση των πλευρικών μεταβολών των δομών του υπεδάφους, μέσα από καθιερωμένη μέθοδο ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, επεκτείνοντας έτσι την αξιοπιστία και τις δυνατότητές της. Η πληρέστερη αυτή πληροφορία μπορεί να αξιοποιηθεί για τη διεύρυνση των αποτελεσμάτων της MASW και τον ακριβέστερο προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους, συμβάλλοντας έτσι στην περαιτέρω χρήση της μεθόδου σε γεωτεχνικές, γεωλογικές, υδρογεωλογικές και περιβαλλοντικές μελέτες, μέσω ενός αποτελεσματικότερου και πιο οικονομικού τρόπου, φιλικότερου προς στο περιβάλλον.

Η εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια (συμπεριλαμβανομένου του παρόντος) και επί μέρους ενότητες. Παρακάτω, σκιαγραφούνται περιληπτικά τα περιεχόμενα κάθε κεφαλαίου:

- Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται βασικοί ορισμοί και περιγράφονται θεμελιώδεις έννοιες της μεθόδου που αξιοποιείται στα πλαίσια της εργασίας, δηλαδή της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (MASW)
- Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε προσεγγίσεις και τεχνικές που αποδίδουν την πλευρική μεταβολή της ταχύτητας των S-κυμάτων σε δύο διαστάσεις, βασιζόμενες στην μέθοδο MASW. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μεθοδολογία που αξιοποιείται στην παρούσα εργασία και υλοποιείται με τους αλγορίθμους του SWIP, όπου περιγράφονται με περισσότερη λεπτομέρεια τα βήματα επεξεργασίας της παραθυρικής εξαγωγής και στάθμισης των δεδομένων, καθώς και οι δυνατότητες παραμετροποίησης της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η επεξεργασία συνθετικών σεισμικών δεδομένων με τη χρήση, τόσο της παραθυρικής όσο και της κλασικής MASW. Αφού συγκριθούν τα μονοδιάστατα (1D) αποτελέσματα αυτών, εκτιμάται η μεταβολή της V_S σε δύο διαστάσεις (2D). Από την παραπάνω διαδικασία επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη βέλτιστη χρήση του λογισμικού, ώστε η εμπειρία και οι καλές πρακτικές παραμετροποίησης να μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικά δεδομένα πεδίου.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται επεξεργασία σε σεισμικές καταγραφές πεδίου και οι δυνατότητες του SWIP αξιοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό, εξάγοντας αποτελέσματα της V_S σε δύο διαστάσεις. Λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις άλλων γεωφυσικών μεθόδων, τα αποτελέσματα του λογισμικού συν-αξιολογούνται με αυτές, ενώ τελικά προσδιορίζεται η κατηγορία του εδάφους σύμφωνα με κανονιστικά πρότυπα.
- Στο 6^ο Κεφάλαιο, τέλος, συνοψίζονται τα ευρήματα και τα συμπεράσματα από την επεξεργασία τόσο των συνθετικών όσο και των πραγματικών καταγραφών, αξιολογώντας έτσι συνολικά τη μελετούμενη μεθοδολογία, βάσει των συγκεκριμένων δεδομένων. Σταχυολογούνται τα σημεία ενδιαφέροντος και αναδεικνύονται καλές πρακτικές χρήσης, ενώ γίνεται αναφορά σε δυνατότητες επέκτασης της μεθοδολογίας, μελλοντικά.

2 Η πολυκάνναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων - MASW

Το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η σύντομη παρουσίαση των ιδιοτήτων των σεισμικών κυμάτων, ώστε να περιγραφεί στη συνέχεια η μέθοδος που χρησιμοποιείται στον πυρήνα της παρούσας εργασίας.

2.1 Ιδιότητες κυμάτων

Σε ένα ομογενές, ισότροπο υλικό μέσο, οι δυνάμεις που ασκούνται στα υλικά του σημεία κατά τη διάδοση σεισμικών κυμάτων είναι κατά κανόνα μικρές, ώστε οι τάσεις και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις να υπαχούν στον ελαστικό νόμο του Hooke. Σε ένα τέτοιο, πλήρως ελαστικό υλικό, οι παράμετροι που καθορίζουν το μέτρο ελαστικότητας, συνδέονται γραμμικά μέσω του λόγου Poisson ν , μέσω της σχέσης:

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2.1)$$

όπου λ και μ οι σταθερές του Lamé (Geldart and Sheriff, 2004). Το έδαφος μπορεί για μικρές, ελαστικές παραμορφώσεις να θεωρηθεί ως ένα τέτοιο (γεω)υλικό μέσο, το οποίο μπορούν να διαπερνούν σεισμικά (μηχανικά) κύματα με την μορφή ταλάντωσης των υλικών του σωματιδίων, τα οποία αποτελούνται από μικροσκοπικά πακέτα ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης και τα οποία προέρχονται από κάποια (σεισμική) πηγή. Τα είδη των κυμάτων που διαδίδονται στο χώρο διακρίνονται σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα. Τα πρωτεύοντα κύματα (Primary ή P-), ή κύματα

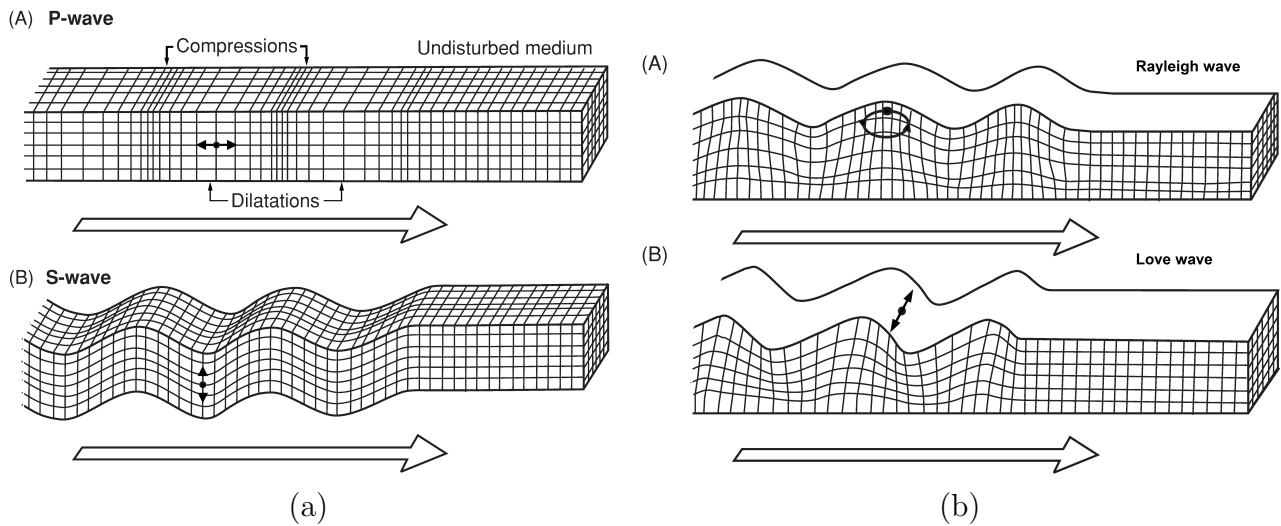
πίεσης (Pressure) ή διαμήκη κύματα, για τα οποία η ταλάντωση των σωματιδίων του μέσου είναι διαμήκης ως προς τη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων αυτών. Τα δευτερεύοντα (Secondary), ή διατμητικά (Shear) ή S-κύματα, για τα οποία η ταλάντωση των σωματιδίων του μέσου πραγματοποιείται εγκάρσια ως προς τη διεύθυνση διάδοσής τους. Τα P- και S-κύματα, αναπαρίστανται γραφικά στο Σχήμα 2.1a A και B, αντίστοιχα. Η ταχύτητα V με την οποία τα κύματα αυτά διέρχονται, καθορίζεται και σχετίζεται άμεσα με τις ελαστικές σταθερές και τις πυκνότητες του μέσου από το οποίο διέρχονται (Reynolds, 2011), σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.3)$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού. Καθώς οι σταθερές λ και μ είναι θετικές, η ταχύτητα των P-κυμάτων V_P είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την ταχύτητα των S-κυμάτων V_S , ενώ σε ομοιογενές ελαστικό μέσο, αμφότερα τα κύματα P και S διαδίδονται με τις αντίστοιχες ταχύτητες ίδιες σε όλες τις συχνότητες (Hobiger, 2011). Σημειώνεται πως, η σταθερά μ αναφέρεται και ως ελαστικό μέτρο διάτμησης, με την Εξίσωση 2.3 να ταυτίζεται πρακτικά με την Εξίσωση 1.2. Επίσης, ισχύει $\mu=0$ για υγρό μέσο, καθώς τα υγρά δεν υποστηρίζουν διατμητική παραμόρφωση (Reynolds, 2011), και ως εκ τούτου τα κύματα S κινούνται μόνο εντός στερεών υλικών. Τα κύματα αυτά μπορούν πάντοτε να αναλυθούν σε κάθετη πόλωση ως προς την διεύθυνση διάδοσής τους, και διακρίνονται σε δύο είδη: τα SV και SH κύματα, με κατακόρυφη και οριζόντια πόλωση, αντίστοιχα.

Η ύπαρξη ελεύθερης επιφάνειας ενός ομογενούς (ή όχι) μέσου, όπως η επιφάνεια της Γης, αποτελεί ένα φυσικό σύνορο για τα σεισμικά κύματα. Στην διεπιφάνεια αυτή του ημιχώρου (θεωρώντας πως το έδαφος έχει άπειρο βάθος), δημιουργούνται τα επιφανειακά κύματα, τα οποία διαδίδονται παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους. Η συμβολή κατά μήκος ελεύθερης επιφάνειας των P- και SV- κυμάτων, συνθέτει τα κύματα Rayleigh V_R , η ταχύτητα διάδοσης των οποίων είναι περίπου ίση με $0.92V_S$, για ομογενή ημίχωρο με λόγο Poisson ίσο με 0.25. Τα υλικά σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους διαγράφουν ελλειπτική κίνηση αντίθετη στη φορά του ρολογιού (Σχήμα 2.1b A), της

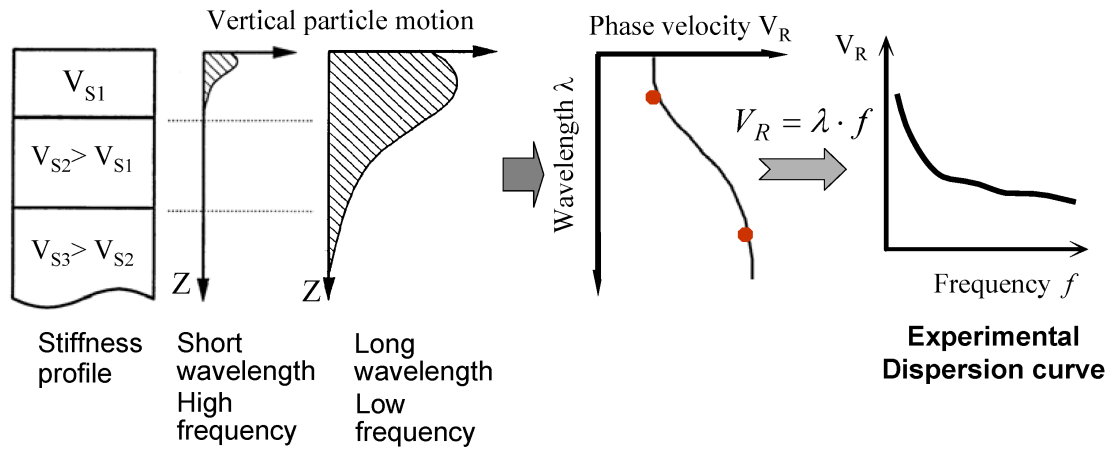


Σχήμα 2.1: Κύματα ελαστικού ομογενούς υλικού μέσου. (a) Αριστερά, κύματα χώρου: (A) P-κύματα και (B) S-κύματα. (b) Δεξιά, κύματα στην επιφάνεια ημιχώρου: (A) κύματα Rayleigh και (B) κύματα Love. Πηγή: Reynolds (2011)

οποίας το πλάτος μειώνεται εκθετικά και εξασθενεί σε σχέση με το βάθος (Κρητικιάκης, 2010). Στην περίπτωση λεπτού και χαλαρού επιφανειακού εδαφικού στρώματος, υπερκείμενου σε στιφρό ημιχώρο, τότε η ανάκλαση των κυμάτων οριζόντια πόλωσης SH στη διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων, καθώς και η παγίδευσή τους στο ανώτερο εδαφικό στρώμα, δημιουργεί τα κύματα Love (Σχήμα 2.1b B). Καθώς το πλάτος των κυμάτων Rayleigh και Love είναι πολύ μεγαλύτερο στην επιφάνεια του εδάφους, η ενέργειά τους μειώνεται λιγότερο κατά την απομάκρυνσή τους από την πηγή σε αντίθεση με τα κύματα χώρου, τα οποία παρουσιάζουν, ωστόσο, μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης. Ως εκ τούτου, σε σεισμικά φαινόμενα, τα επιφανειακά κύματα προκαλούν υλικές ζημιές σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το επίκεντρο, καθώς μεταφέρουν περισσότερη ενέργεια σε μεγαλύτερη απόσταση (Hobiger, 2011), αλλά και λόγω της μορφής της ταλάντωσής τους.

Μια ακόμα εξέχουσα ιδιότητα των επιφανειακών κυμάτων, είναι η διασπορά (dispersion) που παρουσιάζουν κατά τη διάδοσή τους, δηλαδή η μεταβολή της ταχύτητάς τους συναρτήσει της συχνότητας. Η συχνότητα f και η ταχύτητα V διάδοσης (έστω των Rayleigh) κυμάτων, σχετίζονται με απλό τρόπο μέσω της θεμελιώδους εξίσωσης της κυματικής:

$$V_R = f \cdot \lambda_R \quad (2.4)$$



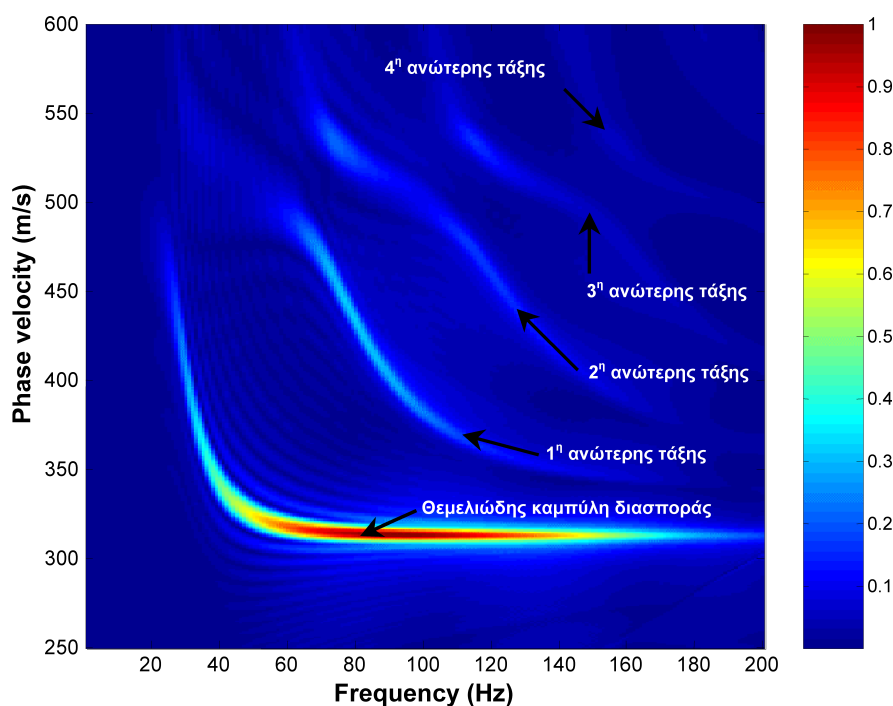
Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός διασποράς επιφανειακών κυμάτων. Πηγή: Foti et al. (2011)

όπου λ το μήκος κύματος. Το φαινόμενο της διασποράς οφείλεται κυρίως στις γεωμετρικές μεταβολές των γεωλογικών σχηματισμών και των ιδιοτήτων τους (Κρητικάκης, 2010; Foti et al., 2011), αφού το έδαφος είναι ένα (κυρίως κατακόρυφα) ανομοιογενές μέσο. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος διαπερνούν το έδαφος σε μεγαλύτερο βάθος, ενώ τα μικρότερα μήκη κύματος διεισδύουν στο πιο ρηχό τμήμα του.

Η διασπορά των κυμάτων Rayleigh αποτυπώνεται μέσω των χαρακτηριστικών καμπύλων διασποράς (Dispersion Curves - DC), οι οποίες προκύπτουν από ανάλυση σεισμικών καταγραφών. Αναφέρονται και αντιστοιχούν, στα ενεργειακά μέγιστα των επιφανειακών κυμάτων, όπου η συχνότητα (ή το μήκος κύματος) αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη, διακριτή ταχύτητα διάδοσης V_R ή ταχύτητας φάσης c , δηλαδή ταχύτητας διάδοσης κάθε αρμονικής: υψηλότερες ταχύτητες φάσης αντιστοιχούν σε χαμηλές συχνότητες, ενώ χαμηλότερες ταχύτητες φάσης αντιστοιχούν σε υψηλές συχνότητες. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας φάσης, δεν υπάρχει μοναδική λύση της κυματικής εξίσωσης, παρά ένας πεπερασμένος αριθμός λύσεων για κάθε διακριτή τιμή του κυματάριθμου k , για δεδομένη γωνιακή συχνότητα ω , όπου $k=1/\lambda$ (Κρητικάκης, 2010). Ως εκ τούτου, τα κύματα Rayleigh διαδίδονται σε διακριτούς, διαφορετικούς αρμονικούς τρόπους κίνησης (modes), λαμβάνοντας διαφορετική ταχύτητα φάσης για συγκεκριμένη συχνότητα:

$$c_n = \frac{\omega}{k_n} = \lambda \cdot f_n \quad \text{με } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

Η μορφή με την οποία η ταχύτητα φάσης λαμβάνει την μικρότερη τιμή της ($n=0$), ονομάζεται



Σχήμα 2.3: Θεμελιώδης και ανώτερης τάξης καμπύλες διασποράς. Η χρωματική κλίμακα απεικονίζει την κανονικοποιημένη σεισμική ενέργεια. Πηγή: Κρητικάκης (2010)

θεμελιώδης καμπύλη διασποράς (fundamental mode), ενώ οι υπόλοιπες ($n=1,2,\dots$) ονομάζονται (καμπύλες) ανώτερης τάξης. Με τις συχνότητες της θεμελιώδους καμπύλης να αντιστοιχούν πάντοτε στις χαμηλότερες ταχύτητες (Reynolds, 2011), παρουσιάζονται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.3 οι θεμελιώδης και τέσσερις ανώτερης τάξης καμπύλες διασποράς.

Προκύπτει λοιπόν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των ιδιοτήτων αυτών από πληθώρα εφαρμογών, αφού μέσω εκτίμησης της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων, και συγκεκριμένα μέσω της διαδικασίας αντιστροφής των καμπύλων διασποράς τους, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η μεταβολή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε σχέση με το βάθος, ώστε να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία για τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τη δομή του υπεδάφους.

2.2 Πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων

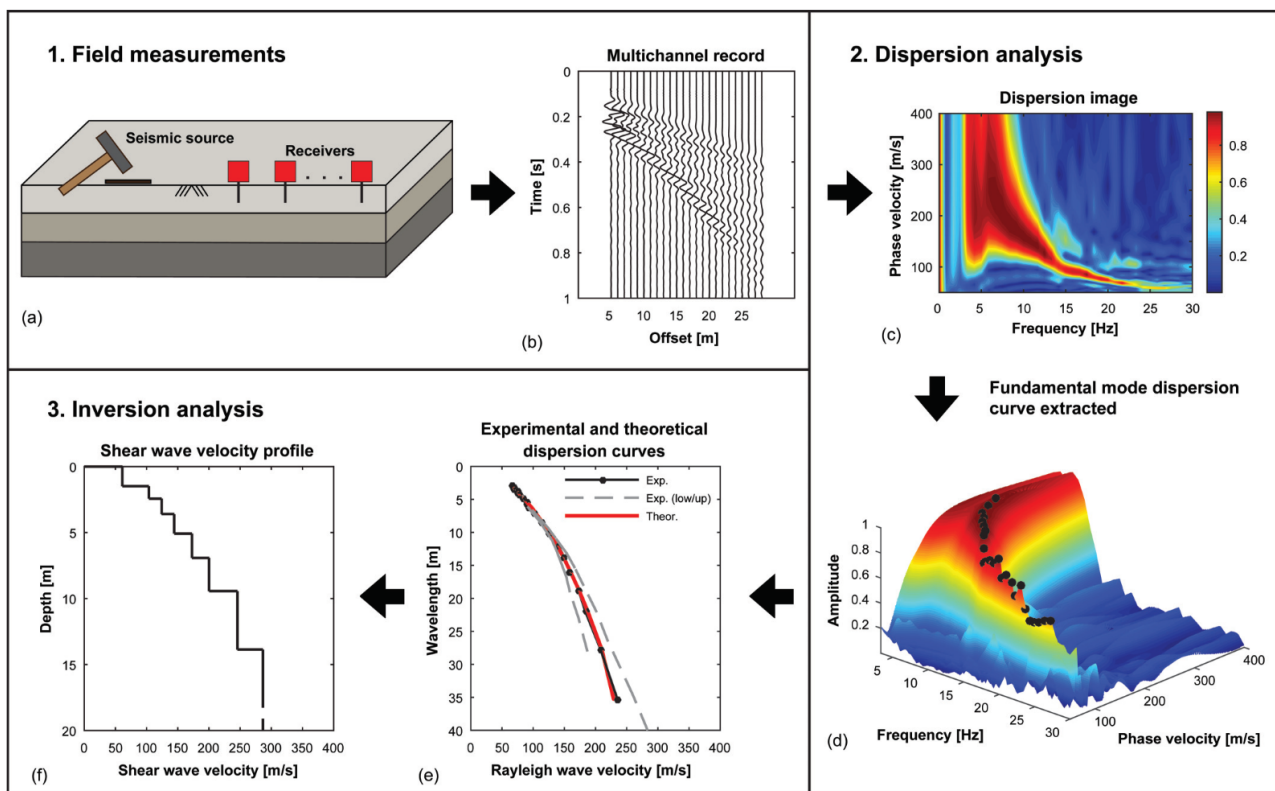
Λόγω της πολυπλοκότητας που υπάρχει στην διαδικασία ερμηνείας των επιφανειακών κυμάτων αλλά και στην αλληλεπίδραση των σεισμικών κυμάτων με το έδαφος εν γένει, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες προσεγγίσεις που βασίζονται σε διαφορετικές μεθόδους καταγραφής, σεισμικής πηγής, ανάλυσης,

καθώς και βάθους αλλά και έκτασης του αποτελέσματος. Μια αρκετά διαδεδομένη μέθοδος για την εκτίμηση της ταχύτητας V_S σε σχέση με το βάθος, είναι η πολυκάναλη μέθοδος ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW). Πρόκειται για μια μέθοδο που χρησιμοποιεί πολλά κανάλια (δέκτες) για την καταγραφή των σεισμικών κυμάτων, τα οποία προέρχονται από ενεργητική πηγή. Έχει αναπτυχθεί περίπου τα τελευταία 20 χρόνια από τους Park et al. (1999) και αποτελεί επέκταση της μεθόδου φασματικής ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων (Spectral Analysis of Surface Waves - SASW) (Stokoe et al., 1994), η οποία υπολογίζει τη διαφορά φάσης των ταχυτήτων V_R μεταξύ μόνο δύο σεισμικών ιχνών. Καθότι πρόκειται για την μέθοδο που βρίσκεται στον πυρήνα των αναλύσεων των σεισμικών καταγραφών στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα περιγραφούν στη συνέχεια τα βασικά βήματα που ακολουθούνται για την συλλογή, την επεξεργασία και την εξαγωγή του αποτελέσματος. Θα μπορούσε λοιπόν να ειπωθεί ότι μέθοδος χωρίζεται σε τρία διαδοχικά βήματα: (i) μετρήσεις πεδίου και απόκτηση σεισμικών δεδομένων πλούσιων σε καταγραφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, (ii) επεξεργασία καταγραφών και προσδιορισμός πειραματικών καμπύλων διασποράς και (iii) επίλυση του ευθέως και αντιστρόφου προβλήματος και εξαγωγή αποτελέσματος, κατανομής δηλαδή της V_S με το βάθος. Τα στάδια αυτά αναπαρίστανται συνοπτικά στο Σχήμα 2.4, και περιγράφονται περιληπτικά στις ακόλουθες υποενότητες.

2.2.1 Συλλογή δεδομένων

Όπως υποδηλώνει η ονομασία της μεθόδου που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, τα σεισμικά δεδομένα λαμβάνονται στο πεδίο από πολλά κανάλια (N), δηλαδή δέκτες. Οι δέκτες αυτοί καταγράφουν την προερχόμενη από ενεργή σεισμική πηγή, κατακόρυφη συνιστώσα της ταλάντωσης του εδάφους, ως πλάτος μετακίνησης ή ταχύτητας. Οι καταγραφές του πλάτους των σεισμικών κυμάτων αποτυπώνονται στο πεδίο απόστασης - χρόνου, με το πλάτος της ταλάντωσης να αποδίδεται από κάθε δέκτη (γεώφωνο) συναρτήσεως του χρόνου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4b. Η καταγραφή κάθε σημείου (που αντιστοιχεί σε γεώφωνο διαφορετικής θέσης) ονομάζεται σεισμικό ίχνος (seismic trace).

Οι δέκτες και η πηγή διατάσσονται σε γραμμικό ανάπτυγμα επί του εδάφους, με τα γεώφωνα συνήθως να ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση Δx (m), ενώ η πηγή τοποθετείται πριν από το



Σχήμα 2.4: Επισκόπηση της μεθόδου MASW. Πηγή: Olafsdottir et al. (2018b)

πρώτο ή μετά από το τελευταίο γεώφωνο, σε απόσταση $n\Delta x$, όπου n μικρός ακέραιος αριθμός (1,2,...). Τα γεώφωνα που χρησιμοποιούνται έχουν όσο το δυνατόν πιο χαμηλή ιδιοσυχνότητα, για παράδειγμα από 4.5 έως 10Hz, και τοποθετούνται με ισαπόσταση μερικών μέτρων, αναλόγως του αριθμού των καναλιών και του μέγιστου επιθυμητού βάθους διασκόπησης. Συνήθως, το ανάπτυγμα αποτελείται από 12, 24 ή 48 κανάλια καταγραφικού, η καταγραφή διαρκεί 1-2s, με ρυθμό δειγματοληψίας 1-2ms (Foti et al., 2018). Σε (πολλαπλές) καταγραφές κοινής πηγής, ενδέχεται η σεισμική πηγή να μετακινείται σε κάθε καταγραφή, τοποθετούμενη και μεταξύ των γεωφώνων. Αναλόγως την επιθυμητή κατά μήκος κάλυψη του υπεδάφους, καθώς ανάλογα και την τεχνική συλλογής δεδομένων, ενδέχεται το ανάπτυγμα να αναδιατάσσεται μαζί με την πηγή με απόσταση σταθερού βήματος.

Η σεισμική πηγή είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα των μετρήσεων. Ως ενεργή πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί υδραυλικός ταλαντωτής (seismic vibrator), υδραυλικός δονητής συμπύκνωσης εδαφών (tamping rammer) (Alcalá et al., 2021), συσκευή πίπτοντος βάρους (accelerated weight drop), ή πιο συνηθισμένα σφύρα χειρός (βαριοπούλα - sledgehammer). Σκοπός είναι να παράγονται επιφανειακά κύματα με την ενέργεια να κατανέμεται

σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Στην περίπτωση της παθητικής MASW ή άλλων παθητικών μεθόδων ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, ως σεισμική πηγή αξιοποιούνται οι μικρο-δονήσεις του εδάφους και ο περιβαλλοντικός θόρυβος (ambient noise) από την κίνηση οχημάτων, τον άνεμο και την κρούση θαλάσσιων κυμάτων, κ.ά.

Καθοριστικής σημασίας για το μέγιστο βάθος διασκόπησης, είναι το μήκος του αναπτύγματος των γεωφώνων, και η μεταξύ τους απόσταση Δx σε μέτρα. Ως καλή πρακτική, το μήκος αναπτύγματος επιλέγεται να είναι ίσο με 1 έως 3 φορές το μέγιστο επιθυμούμενο βάθος διασκόπησης. Το μέγιστο μήκος κύματος (λ_{max}) που μπορεί να καταγραφεί (άρα και αυτό που αντιστοιχεί στο βαθύτερο τμήμα λόγω χαμηλότερης συχνότητας) ισούται με το $1/3$ έως το $1/2$ μήκους του αναπτύγματος (Foti et al., 2018), ή εξίσου, το ελάχιστο καταγεγραμμένο μήκος σεισμικού κύματος (λ_{min}) θα ισούται με το διπλάσιο της ισαπόστασης των δεκτών (Δx) (Κρητικιάκης, 2010). Επίσης, η ανάλυση της ταχύτητας φάσης Δ_c , μπορεί οριστεί ως:

$$\Delta_c = f N_x \Delta x \quad (2.6)$$

όπου N_x ο αριθμός των γεωφώνων (Pasquet and Bodet, 2017). Από την Εξίσωση 2.6 διαπιστώνεται ότι η ανάλυση στην εικόνα της διασποράς σχετίζεται άμεσα με το μήκος του αναπτύγματος και τη συχνότητα f . Παρότι ανεξάρτητη από την ταχύτητα φάσης, η ανάλυση μειώνεται με την συχνότητα. Ταυτόχρονα, και για συγκεκριμένη συχνότητα, η ανάλυση είναι υψηλότερη για κύμα που διαδίδεται σε χαμηλότερη ταχύτητα. Επιπρόσθετα, επειδή το χαμηλόσυχο τμήμα της διασποράς επηρεάζεται και αντιστοιχεί στις ιδιότητες των βαθύτερων στρωμάτων, το μέγιστο βάθος διασκόπησης συνδέεται άμεσα με την ανάλυση, και συνεπώς και με το μήκος του αναπτύγματος (Pasquet and Bodet, 2017). Αντίστοιχα, υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ διακριτικής ικανότητας κυματαριθμών k , ισαπόστασης Δx και αριθμού δεκτών (Κρητικιάκης, 2010; Foti et al., 2011).

Η γεωμετρία λοιπόν της διάταξης των μετρήσεων, η οποία είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται μέθοδο της σεισμικής διάθλασης/ ανάκλασης (Foti et al., 2011), καθορίζει σημαντικά την ποιότητα των καταγραφών, αφού η ευκρίνεια με την οποία θα αποδοθούν οι διαφορετικοί τρόποι διασποράς των επιφανειακών κυμάτων, επηρεάζει την μετέπειτα επεξεργασία τους. Εάν για παράδειγμα μια ανώτερης τάξης καμπύλη θεωρηθεί ως η θεμελιώδης, τότε το αποτέλεσμα της

ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων θα είναι εσφαλμένα υψηλό (Reynolds, 2011).

Τέλος, σημειώνεται πως τα σεισμικά δεδομένα μπορούν να προκύψουν και με συνθετικό τρόπο από κατάλληλους προσομοιωτές, όπως για παράδειγμα το SW4 (Petersson and Sjogreen, 2017). Για καθορισμένες μηχανικές και γεωμετρικές ιδιότητες ενός θεωρητικού μοντέλου το οποίο αναπαριστά ένα εξιδανικευμένο τμήμα υπεδάφους, προσομοιώνεται υπολογιστικά (αριθμητικά) η διάδοση σεισμικών κυμάτων σε αυτό, και παράγονται σεισμικές καταγραφές από συνθετική πηγή, συνήθως κάποιου παλμού Ricker.

2.2.2 Επεξεργασία καταγραφών και καμπύλες διασποράς

Το επόμενο στάδιο επεξεργασίας των σεισμικών καταγραφών, αποσκοπεί στον προσδιορισμό και την επιλογή των πειραματικών καμπύλων διασποράς. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι και τεχνικές για την εξαγωγή των πεδίων διασποράς, με τις συνηθέστερες να βασίζονται στον μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου. Τα πειραματικά δεδομένα είναι καταγεγραμμένα στο πεδίο απόστασης-χρόνου, και συνήθως με επεξεργασίας μέσω κάποιου διπλού μετασχηματισμού Fourier (Foti et al., 2018), αυτά μετατρέπονται σε συχνοτικά πεδία ή ανάλογο φασματικό χώρο.

Συγκεκριμένα, διακρίνονται κυρίως οι ακόλουθοι τρόποι μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου: (i) βραδύτητας-συχνότητας (p - ω transformation ή slant-stack) (McMechan and Yedlin, 1981; Russell, 1987), (ii) μετάθεσης της φάσης (phase-shift) (Park et al., 1999), και (iii) συχνότητας-κυματαριθμού (f - k) (Tselentis and Delis, 1998; Foti et al., 2002). Παρακάτω, γίνεται αναφορά στην 1^η μέθοδο, καθότι αυτή χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των σεισμικών καταγραφών στην παρούσα εργασία.

Η συμμετοχή των επιφανειακών κυμάτων $S(x, t)$ στα σεισμικά δεδομένα που καταγράφονται στο πεδίο απόστασης-χρόνου, μπορεί να περιγραφεί ως η υπέρθεση άπειρων αριθμών μορφών διάδοσης (Russell, 1987), σύμφωνα με τη σχέση:

$$S(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_m A_m(\omega, x) e^{i(\omega t - k_m(\omega)x)} d\omega \quad (2.7)$$

όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα, $A_m(\omega, x)$ το φασματικό πλάτος του σεισμικού σήματος και

$k_m(\omega)$ ο κυματαριθμός της μορφής διάδοσης m . Η ταχύτητα φάσης c και η βραδύτητα φάσης p ορίζονται για κάθε τρόπο διάδοσης και σχετίζονται ως:

$$c_m(\omega) = \frac{1}{p_m(\omega)} = \frac{\omega}{k_m(\omega)} \quad (2.8)$$

Για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων διάδοσης στο πεδίο συχνότητας-ταχύτητας φάσης, αξιοποιείται η μέθοδος υπέρθεσης ακτίνων (slant stack) στο χώρο των συχνοτήτων (p - ω), και η υπέρθεση των επιφανειακών κυμάτων πολλών μορφών διάδοσης, περιγράφεται από τη σχέση:

$$U(\omega, p) = \sum_{n=1}^N \frac{A(\omega, x_n) e^{i(\phi_n + \omega p x_n)}}{A(\omega, x_1) e^{i(\phi_1)}} \quad (2.9)$$

όπου $A(\omega, x_n)$ είναι το φάσμα πλάτους του n σεισμικού ίχνους σε απόσταση x_n , και ϕ_n είναι το φάσμα φάσης, με $n = 1, 2, \dots, N_x$. Ο παρανομαστής της Εξίσωσης 2.9 κανονικοποιεί το φάσμα κάθε ίχνους ως προς το πλάτος και τη φάση του 1^{ου} ίχνους. Τελικά, η εικόνα διασποράς που προκύπτει, αναπαριστά τα τοπικά μέγιστα τα οποία αντιστοιχούν στις μορφές διάδοσης με κυκλική συχνότητα ω και για βραδύτητα p (Pasquet and Bodet, 2017). Η ισοδύναμη απόδοση της μορφής αυτής σε όρους συχνότητας f (Hz) και ταχύτητας φάσης V_ϕ (m/s), με τα τοπικά τους μέγιστα, αναπαρίσταται ενδεικτικά στα Σχήματα 2.4c και 2.4d. Η αναγνώριση και επιλογή της πειραματικής (θεμελιώδους) καμπύλης διασποράς, αποτελεί ουσιαστικά την επιλογή των ζευγών f - V_ϕ με το μέγιστο πλάτος, από το πεδίο διασποράς. Η επιλογή αυτή συνοδεύεται από αβεβαιότητα για το κάθε σημείο (ζεύγος τιμών), λόγω της ανάλυσης και της ευκρίνειας κάθε φορά του εύρους που αποδίδεται η συγκεντρωμένη σεισμική ενέργεια.

2.2.3 Αντιστροφή και κατανομή ταχύτητας V_s με το βάθος

Η διαδικασία της αντιστροφής (των επιφανειακών κυμάτων) αποσκοπεί στην εύρεση κατάλληλου μοντέλου εδάφους, για το οποίο το αποτέλεσμα της επίλυσης του ευθέως προβλήματος της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων, ταυτίζεται με την πειραματική καμπύλη διασποράς, ώστε να προκύψει τελικά η κατανομή της ταχύτητας V_s με το βάθος. Συγκεκριμένα, το στάδιο αυτό της

ανάλυσης, περιλαμβάνει ως βήματα την παραμετροποίηση ενός οριζόντια στρωματωμένου μέσου ως αρχικό εδαφικό μοντέλο, την επίλυση του ευθέως προβλήματος, καθώς και την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος με απώτερο στόχο την εξαγωγή ενός βέλτιστου εδαφικού μοντέλου, το οποίο θα ανταποκρίνεται καλύτερα στο μετρούμενο γεωφυσικό μέγεθος, δηλαδή την διασπορά των επιφανειακών κυμάτων.

Η παραμετροποίηση αφορά σε απόδοση ιδιοτήτων σε μοντέλο στρωματομένου εδάφους. Σε αυτό το βήμα, καθορίζονται ο αριθμός n και το πάχος h των στρωμάτων, η πυκνότητα ρ του υλικού για το κάθε στρώμα, καθώς και οι ταχύτητα των S- και P- κυμάτων, V_S και V_P , αντίστοιχα. Σημειώνεται πως στο θεωρητικό αυτό μοντέλο, το τελευταίο εδαφικό στρώμα αναπαριστά τον ημί-χωρο. Κατά μία έννοια, η παραμετροποίηση αποτελεί τα όρια περιορισμού (constrains) της αντιστροφής (Foti et al., 2018), με το πάχος και την ταχύτητα V_S να αποτελούν τις παραμέτρους που κυρίως καθορίζουν τη διασπορά των επιφανειακών κυμάτων, καθώς επίσης αυτά συνθέτουν και το τελικό αποτέλεσμα της MASW. Στο σημείο αυτό, γίνεται η βασική παραδοχή της μεθόδου, δηλαδή η υιοθέτηση ενός οριζόντια στρωματομένου και ισότροπου εδάφους, του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες έχουν πλευρική ομοιογένεια (Foti et al., 2011), ενώ αυτές μεταβάλλονται μόνο ως προς το βάθος, δηλαδή κατά μία διάσταση (1D).

Ωστόσο, η παραπάνω απλοποίηση είναι απαραίτητη για την επίλυση του ευθέως προβλήματος με έναν αξιόπιστο και άμεσο τρόπο. Κατά την επίλυση αυτή, υπολογίζονται οι ταχύτητες και τα πλάτη της καμπύλης (ή των καμπύλων) διασποράς του αρχικού θεωρητικού μοντέλου, όπως αυτές αναμένονται κατά τη θεμελιώδη μορφή (ή τις μορφές ανώτερης τάξης) διάδοσης των κυμάτων Rayleigh. Υπάρχουν πολλές τεχνικές υπολογισμού με αναλυτικό και ημι-αναλυτικό τρόπο (Pasquet and Bodet, 2017), μεταξύ των οποίων η μέθοδος Thomson-Haskell (Thomson, 1950; Haskell, 1953), η οποία έχει αξιοποιηθεί και στην παρούσα εργασία. Αναφερόμενη και ως μέθοδος πίνακα διάδοσης (matrix propagator), υπολογίζει μέσω επίλυσης ενός γραμμικού συστήματος διαφορικών εξισώσεων τις θεωρητικές καμπύλες διασποράς, οι οποίες αποτελούν τις θεωρητικές λύσεις της διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων σε οριζόντια ομοιογενές μέσο με γνωστές παραμέτρους.

Η διαδικασία της αντιστροφής είναι το τελευταίο στάδιο στην πολυκάναλη ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων, καθώς το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής αποτελεί τον προσδιορισμό της

μεταβολής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων από τις καμπύλες διασποράς. Πρόκειται για μια μεθοδολογία που εφαρμόζεται στην πλειοψηφία των γεωφυσικών μεθόδων (Κρητικιάκης, 2010), καθώς έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των παραμέτρων που αναπαράγονται και παρατηρούνται από τα διάφορα μετρούμενα γεωφυσικά μεγέθη. Η επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος στην μέθοδο MASW, αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ θεωρητικής και πειραματικής καμπύλης διασποράς (Σχήμα 2.4e), τροποποιώντας επαναληπτικά τις παραμέτρους του αρχικού εδαφικού μοντέλου. Αφορά μη-γραμμικό, ασθενώς τοποθετημένο (ill-posed) μαθηματικό πρόβλημα, το ποίο χαρακτηρίζεται από μη μοναδική λύση (Foti et al., 2009, 2018). Ως εκ τούτου, προτείνεται η λύση να αποδίδεται σε συνδυασμό με μια ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που προκύπτει από τη φύση του προβλήματος. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές αντιστροφής για τον προσδιορισμό των παραμέτρων οι οποίες θα αναπαριστούν τα πραγματικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Αυτές, θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν στις μεθόδους τοπικής αναζήτησης (local search methods) και καθολικής αναζήτησης (global search methods). Στην πρώτη κατηγορία εντοπίζονται οι γραμμικής ανάλυσης τεχνικές υπό ή χωρίς περιορισμούς, τεχνικές ελαχίστων τετραγώνων, η αντιστροφή με απόσβεση, η ανάλυση πινάκων SVD (Κρητικιάκης, 2010), κ.α., οι οποίες αποσκοπούν στην εύρεση τοπικά βέλτιστης λύσης, η οποία βασίζεται στο αρχικό μοντέλο και το οποίο προοδευτικά τροποποιείται. Εναλλακτικά, οι καθολικές μέθοδοι αναζήτησης, όπως η μέθοδος Monte Carlo, οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms), η προσομοίωση απόψησης (simulated annealing), αποτελούν στοχαστικές διαδικασίες διευρυμένης αναζήτησης των βέλτιστων παραμέτρων του εδαφικού μοντέλου για την εύρεση του ολικού ελάχιστου μιας αντικειμενικής συνάρτησης, εν προκειμένω της σύγκλισης της θεωρητικής καμπύλης διασποράς με την πειραματική. Σε αντίθεση με τις μεθόδους τοπικής αναζήτησης, οι καθολικές μέθοδοι αποδίδουν ένα πλήθος αποδεκτών εδαφικών προφίλ αντί μοναδικού αποτελέσματος (Foti et al., 2018). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αξιοποιείται για την διαδικασία της αντιστροφής μια τέτοια μέθοδος. Σε κάθε περίπτωση, το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι η μεταβολή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε σχέση με το βάθος, με την τιμή της V_s να διαφοροποιείται σε κάθε εδαφικό στρώμα όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4f. Αποδίδονται τελικά σε μία διάσταση, τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η στρωματογραφία στη θέση του εξεταζόμενου εδάφους, με το αποτέλεσμα να αντιστοιχεί στο μέσον του αναπτύγματος των γεωφώνων (Luo et al., 2009).

3 Εφαρμογή της MASW στις δύο διαστάσεις

3.1 Σύντομη περιγραφή των τεχνικών 2D MASW

3.1.1 Κύλιση αναπτύγματος πηγής - δεκτών

Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση για απεικόνιση των πλευρικών μεταβολών της ταχύτητας V_S μέσω της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, πραγματοποιείται με την τεχνική καταγραφής κύλισης του αναπτύγματος πηγής-δεκτών (roll-along). Πρόκειται για διάταξη πολλαπλών σεισμικών καταγραφών, όπου πηγή και δέκτες μετακινούνται με σταθερό βήμα σε κάθε καταγραφή. Για την διευκόλυνση και επιτάχυνση μάλιστα της τεχνικής roll-along, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ειδική συστοιχία γεωφώνων, σε μορφή ταινίας (land streamer), και η οποία σύρεται επί του εδάφους σε κάθε νέα καταγραφή (Martínez-Pagán et al., 2014). Τα αποτελέσματα της αντιστροφής προέρχονται από πολλαπλές καταγραφές, δηλαδή η μονοδιάσταση (1D) κατανομή της V_S σε σχέση με το βάθος αντιστοιχεί στο μέσον κάθε σεισμικής καταγραφής (Luo et al., 2009). Τα 1D αποτελέσματα παρατίθενται διαδοχικά, απεικονίζοντας ψευδοτομή (2D) της ταχύτητας (Alcalá et al., 2021). Εμπορικά λογισμικά όπως για παράδειγμα τα SurfSeis3 (Kansas Geological Survey) και ParkSEIS (ParkSeismic LLC), έχουν ενσωματωμένα εργαλεία και γραφικό περιβάλλον για την επεξεργασία, αντιστροφή και προβολή της ψευδοτομής του υπεδάφους. Η τεχνική αυτή απαιτεί σχετικά απλή επεξεργασία δεδομένων, όμως μπορεί να παρουσιάσει δυσκολία κατά την εφαρμογή της, ειδικά σε ανώμαλο και με πυκνή βλάστηση έδαφος όπου η χρήση του land streamer δεν είναι εφικτή.

3.1.2 Αναδιάταξη των δεδομένων σε καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου με ετεροσυσχέτιση των σεισμικών ιχνών

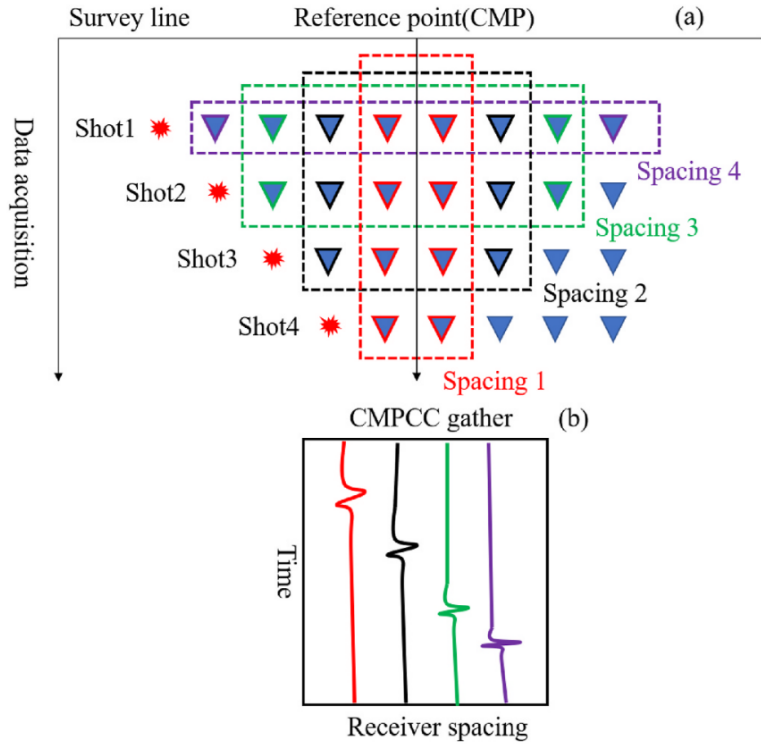
Η παραπάνω τεχνική προσφέρει μικρή υπεδραφική κάλυψη στα άκρα της γραμμής μελέτης, και τα αξιόπιστα αποτελέσματα εντοπίζονται στο κέντρο. Οι Hayashi and Suzuki (2004) επέλεξαν διαφορετικό τρόπο επεξεργασίας των σεισμικών δεδομένων υιοθετώντας τεχνικές της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης. Αυτό, το πραγματοποίησαν αναδιατάσσοντας τις καταγραφές κοινής πηγής σε καταγραφές κοινού ενδιαμέσου σημείου (Common Mid-Point - CMP), υπολογίζοντας επιπλέον την ετεροσυσχέτιση (Cross-Correlation - CC) μεταξύ των διαδοχικών σεισμικών ιχνών των καταγραφών CMP (CMPCC).

Κατά τη μέθοδο αυτή, υπολογίζεται η ετεροσυσχέτιση για κάθε ζεύγος σεισμικών ιχνών κοινής πηγής, και στη συνέχεια ομαδοποιούνται τα ίχνη που έχουν κοινό ενδιαμέσο σημείο. Ακολούθως, τα συσχετισμένα ίχνη που έχουν ίση απόσταση αθροίζονται στο πεδίο του χρόνου. Τα ομαδοποιημένα σε κοινό ενδιαμέσο σημείο και ετεροσυσχετισμένα πλέον ίχνη (CMP cross - correlation gathers), έχουν όμοια όψη με καταγραφές κοινής πηγής. Τέλος, η επεξεργασία των καταγραφών αυτών είναι παρόμοια με αυτή της συμβατικής μεθόδου MASW.

Σχετικά με τον τρόπο της καταγραφής των δεδομένων, αυτή δύναται είτε να έχει σταθερό ανάπτυγμα δεκτών και μετακινούμενη πηγή, είτε να μετακινούνται τόσο η πηγή όσο και οι δέκτες συνολικά ως γεωμετρία (roll-along), ειδικά εάν είναι επιθυμητή μεγαλύτερη εδαφική κάλυψη.

Η εφαρμογή της μεθόδου σε συνθετικά δεδομένα, παράγει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα από τη συμβατική MASW, ιδιαίτερα σε όρους χωρικής ανάλυσης (Hayashi and Suzuki, 2004), ενώ για τα πραγματικά δεδομένα της ίδιας μελέτης, η CMPCC φαίνεται να συμπίπτει καλύτερα με τα αποτελέσματα της πρότυπης δοκιμής διεύθυνσης (SPT) και τα γεωλογικά δεδομένα. Παρ' όλα αυτά, η τελική ψευδοτομή V_S αποτελεί εξομαλυσμένο αποτέλεσμα της ταχύτητας. Βέβαια, η επαναλαμβανόμενη μετακίνηση πηγής και η επανατοποθέτηση του τελευταίου δέκτη ως πρώτου, όπως στη τεχνική roll-along, αυξάνει προφανώς τον χρόνο διεξαγωγής των καταγραφών στο πεδίο.

Η παραπάνω μέθοδος (CMPCC) επεκτάθηκε από τους Li et al. (2021), οι οποίοι προχώρησαν σε υπέρθεση καταγραφών από αναπτύγματα μικρότερου μήκους (Short Array Stacked Correlation Gather - SCG-MASW). Σκοπός της μεθόδου ήταν να βελτιωθεί η πλευρική ανάλυση με μειωμένο



Σχήμα 3.1: Η διαδικασία ταξινόμησης δεδομένων CMPCC. (Li et al., 2021)

όμως ανάπτυγμα δεκτών, χωρίς την αντίστοιχη μείωση στην ακρίβεια των καμπύλων διασποράς και στο βάθος διασκόπησης. Τα αποτελέσματα σε συνθετικά δεδομένα πράγματι δεν παρουσιάζουν μειωμένο βάθος σε σχέση με τη συμβατική MASW, ενώ σε όρους πλευρικής ανομοιογένειας, η ψευδοτομή δείχνει ελάχιστα βελτιωμένη εικόνα, υπερεκτιμώντας όμως την ταχύτητα στο βαθύτερο στρώμα. Για τα πραγματικά δεδομένα στην σύγκριση με τη συμβατική MASW, η SCG-MASW δεν δείχνει να αποτυπώνει καλύτερα την πλευρική μεταβολή στη δομή του υπεδάφους, λόγω παρουσίας υπόγειου αγωγού.

3.1.3 Παραθυρική MASW

Μια άλλη διαδεδομένη προσέγγιση για αναπαράσταση των δομών του εδάφους σε δύο διαστάσεις, μέσω της αντιστροφής της καμπύλης διασποράς της ταχύτητας των επιφανειακών κυμάτων, είναι η εξαγωγή καμπύλων διασποράς από χωρικά τμήματα του συνόλου του αναπτύγματος των δεκτών. Σε αντίθεση με την μετακίνηση δεκτών και πηγών, η προσέγγιση αυτή συνιστά ανάπτυγμα δεκτών το οποίο παραμένει στην ίδια θέση, ενώ σεισμικά δεδομένα λαμβάνονται από πολλές πηγές κατά μήκος του αναπτύγματος.

Για παράδειγμα, οι Bergamo et al. (2012) χρησιμοποίησαν τα χωρικά παράθυρα για τον υπολογισμό πολλών καμπύλων διασποράς, με σκοπό την ανακατασκευή δομών του υπεδάφους σε 2 διαστάσεις. Συγκεκριμένα, εξήγαγαν ένα σετ πολλών "τοπικών" καμπύλων διασποράς μέσω παραθύρων Γκαουσιανής μορφής. Αυτές οι καμπύλες αντιστοιχούν σε θέσεις κατά μήκος του αναπτύγματος των δεκτών. Κατά την αντιστροφή τους έγινε χρήση του σχήματος των πλευρικών περιορισμών (lateral constraints inversion scheme), όπως αυτό περιγράφεται από τους Socco et al. (2009). Οι μονοδιάστατες κατανομές της ταχύτητας V_S , παρατίθενται διαδοχικά και ανακατασκευάζουν τελικά ψευδοτομές των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους και των πλευρικών τους μεταβολών.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, τα αποτελέσματα τόσο από συνθετικά όσο και πραγματικά δεδομένα δείχνουν ικανοποιητική αναπαράσταση της πλευρικής μεταβολής της ταχύτητας, πλην όμως των σημείων που εντοπίζεται πολύ απότομη πλευρική μεταβολή αυτής. Αυτό, συμβαίνει λόγω της φτωχότερης φασματικής ανάλυσης στην περίπτωση μικρών παραθύρων, τα οποία όμως είναι απαραίτητα ώστε να αναδεικνύονται καλύτερα οι απότομες πλευρικές μεταβολές. Οι Bergamo et al. (2012) επισημαίνουν την ανάγκη για ισορροπία μεταξύ της ανάλυσης καμπύλων διασποράς και κυματερυθμού. Όσο πιο "τοπικές" είναι οι καμπύλες διασποράς, μέσω δηλαδή στενού παραθύρου εξαγωγής, τόσο ακριβέστερη είναι η αναπαράσταση της πλευρικής μεταβολής, υστερώντας όμως σε ακρίβεια της εκτιμώμενης καμπύλης διασποράς. Αντίθετα, η χρήση μεγαλύτερων παραθύρων εξασφαλίζει καλύτερη φασματική ανάλυση και διάκριση των καμπύλων διασποράς, εξομαλύνοντας όμως την πλευρική μεταβολή των υπεδάφιων δομών.

Επίσης, καταλήγουν στο συμπέρασμα πως, οι πλευρικοί περιορισμοί της τεχνικής της αντιστροφής θα έπρεπε να είναι λιγότεροι αυστηροί όπου αναμένονται πλευρικές ανομοιογένειες, άρα και στα πιο 'στενά' παράθυρα, ενώ να ενισχύονται όπου αναμένεται λιγότερη μεταβλητότητα. Αυτό, σημειώνουν, μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη προγενέστερη διαθέσιμη γνώση ή εφαρμόζοντας μεθόδους που δεν απαιτούν υπολογισμό καμπύλων διασποράς (Bergamo et al., 2012).

Οι Hu et al. (2021) προσέγγισαν με πιο σύνθετο τρόπο την ανάκτηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε δύο διαστάσεις, από τα επιφανειακά κύματα Reyleigh. Αρχικά, όπως υποδηλώνει και το όνομα της προτεινόμενης μεθόδου (Multiscale Window Analysis of Surface Waves - MWASW), γίνεται επιλογή των σεισμικών ιχνών από παράθυρα μεταβλητού μεγέθους τα οποία

έχουν ίδιο ενδιαμέσο σημείο και παράγονται πολλαπλές καμπύλες διασποράς. Για τον μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου και την παραγωγή θεωρητικών καμπύλων διασποράς με σκοπό την επίλυση του ευθέως προβλήματος, γίνεται χρήση της τεχνικής beamforming, όπου αναζητούνται στο χώρο συχνότητας-κυματάριθμου τα τοπικά μέγιστα της κανονικοποιημένης έντασης της διαφοράς φάσης μεταξύ διαδοχικών ιχνών. Οι καμπύλες διασποράς, οι οποίες προκύπτουν από τα μεταβλητά παράθυρα με το ίδιο ενδιαμέσο σημείο, αθροίζονται ώστε να προκύψει μια εικόνα 'τοπικής' καμπύλης διασποράς με υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο. Για όλες τις θέσεις κατά μήκος της γραμμής μελέτης που έχουν προκύψει οι αθροισμένες 'τοπικές' καμπύλες, δημιουργείται αρχικό μοντέλο και υπολογίζονται οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς με τη μέθοδο Thomson-Haskell. Σημειώνεται πως η επιλογή των παραμέτρων σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας, γίνεται με δοκιμές.

Για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος, αντιστρέφονται ταυτόχρονα όλες οι 'τοπικές' καμπύλες, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι πλευρικές μεταβολές. Κατά την αντιστροφή χρησιμοποιείται η μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης Gauss - Newton, η οποία ενημερώνει τις παραμέτρους του αρχικού μοντέλου με επαναληπτικό τρόπο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εισαγωγή της μεθόδου της ομαλοποίησης της ολικής διακύμανσης (total variation regularization) ως πλευρικός περιορισμός, με σκοπό να μετριαστεί η μη-μοναδικότητα της λύσης του αντιστρόφου προβλήματος, να σταθεροποιηθεί η διαδικασία της αντιστροφής και να διατηρούνται απότομες πλευρικές μεταβολές της V_S . Επίσης, προηγείται η στάθμιση μέσω μητρώων βαρύτητας, ώστε να αποτραπεί η επικράτηση των υψίσυχνων δεδομένων στη διαδικασία της αντιστροφής. Στο άρθρο των Hu et al. (2021), περιγράφεται αναλυτικά το μαθηματικό υπόβαθρο των υπολογισμών, οι τεχνικές και οι μέθοδοι που ακολουθούνται σε όλα τα βήματα. Οι συγγραφείς καταλήγουν πως τα δεδομένα από μεγαλύτερα χωρικά παράθυρα είναι προτιμότερα, παρά το αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Επίσης, λόγω της μη μοναδικότητας της λύσης από την αντιστροφή των επιφανειακών κυμάτων, η MWASW δείχνει να υστερεί ως προς την εκτίμηση της ταχύτητας σε μικρά βάθη όπου η ταχύτητα δεν υπερεκτιμάται, και δεν αναπαριστώνται σωστά οι διεπιφάνειες των στρωμάτων. Αυτό θα μπορούσε να μετριαστεί με την εφαρμογή αλγορίθμου εύρεσης του ολικού ελαχίστου κατά την αντιστροφή, όπως για παράδειγμα οι γενετικοί αλγόριθμοι (Hu et al., 2021).

Οι τελικές τομές 2 διαστάσεων δείχνουν να απεικονίζουν με ιδιαίτερη ακρίβεια τις πλευρικές και

απότομες πλευρικές μεταβολές της ταχύτητας του εκάστοτε εξεταζόμενου μέσου. Όμως, τα αποτελέσματα από συνθετικά δεδομένα και καταγραφές πεδίου (Hu et al., 2021), αφορούν σχετικά ρηχή διερεύνηση του εδάφους, σε βάθος μέχρι τα 12 και 6m, αντίστοιχα. Επιπλέον, στο παραπάνω άρθρο, η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων μεταβάλλεται ελάχιστα μεταξύ των εναλλασσόμενων στρωμάτων, ενώ οι περιπτώσεις που εξετάζονται αφορούν μόνο χαλαρά εδάφη. Για τα τρία συνθετικά μοντέλα, η V_S παίρνει τιμές από 80 έως 270 m/s, με και χωρίς πλευρικές μεταβολές σε 3 στρώματα, ενώ για τις δύο καταγραφές πεδίου, η V_S μεταβάλλεται από 75 έως 300 m/s για την 1^η περίπτωση (CNR - Τορίνο), και μεταξύ 75 έως 175 m/s στην 2^η (ShanghaiTech University - Σανγκάη). Παρουσιάζονται δηλαδή αποτελέσματα που αφορούν το ανώτερο στρώμα του εδαφικού μέσου, όπου οι διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα μεταξύ των στρωμάτων δεν είναι μεγάλες, και ως εκ τούτου, το προκύπτον κυματικό πεδίο έχει καλύτερη ανάλυση. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα προφίλ της V_S σε κάθε μοντέλο (συνθετικά και πεδίου) από την προτεινόμενη μέθοδο MWASW με αυτά της 'κλασικής' MASW (όπως περιορισμένα αναγράφεται χωρίς καμία περαιτέρω αναφορά για το λογισμικό και την προσέγγιση που ακολουθήθηκε). Για τα συνθετικά δεδομένα γίνεται και ποσοτική σύγκριση μέσω των δεικτών RMS (m/s) και residuals (%) για τις ταχύτητες φάσης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως παρόμοιας φιλοσοφίας είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, δηλαδή με παραθυρική εξαγωγή πολλών "τοπικών" καμπύλων διασποράς, και η οποία περιγράφεται αναλυτικότερα παρακάτω, στην ενότητα 3.2.

3.1.4 Αντιστροφή πλήρους κυματικού πεδίου

Εναλλακτική πρόταση για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδωσης των κυμάτων S από τα Rayleigh και Love, αποτελεί η προσέγγιση της αντιστροφής του πλήρους κυματικού πεδίου (Full Waveform Inversion - FWI). Κατά τη FWI πραγματοποιείται μοντελοποίηση και αντιστροφή των επιφανειακών κυμάτων σε 2 ή και 3 διαστάσεις, χωρίς απαραίτητα την υιοθέτηση μονοδιάστατου (1D) εδαφικού μέσου, με αποτέλεσμα να αναπαρίστανται με υψηλή ακρίβεια οι πλευρικές μεταβολές του υπεδάφους (Pérez Solano et al., 2014; Groos et al., 2017; Pan et al., 2018). Η μέθοδος χρησιμοποιεί καταγραφές πολλών πηγών και δεκτών, αξιοποιεί ολόκληρη την πληροφορία που εμπεριέχεται στις σεισμικές καταγραφές, εφαρμόζεται σε οριζόντια, κεκλιμένα και ανώμαλα εδάφη. Τόσο τα συνθετικά όσο και τα δεδομένα από καταγραφές πεδίου, ανακατασκευάζουν με εξαιρετική

ευκρίνεια απότομες μεταβολές και υπεδάφειες δομές στα πρώτα δεκάδες μέτρα (Li et al., 2017, 2019), σε 2D και 3D απεικονίσεις. Το βασικότερο μειονέκτημα της FWI παραμένει η μοντελοποίηση που απαιτεί σύνθετες κυματικές εξισώσεις, και συνεπάγεται εξαιρετικά υψηλό υπολογιστικό κόστος. Αυτό, μεταξύ άλλων, έχει οδηγήσει σε αναζήτηση πιο πρακτικών και αποδοτικών μεθόδων για τη διερεύνηση των πλευρικών μεταβολών του εδάφους, βασιζόμενοι στη προσέγγιση που συστήνει η MASW (Pasquet and Bodet, 2017; Hu et al., 2021).

3.2 Το λογισμικό SWIP

Το πακέτο Surface-Wave Inversion and Profiling (SWIP) (Pasquet and Bodet, 2017) αποτελείται από κώδικες γραμμένους σε περιβάλλον MATLAB, είναι ανοιχτού κώδικα και ελεύθερα προσβάσιμο (<https://github.com/SWIPdev/SWIP/>). Χρησιμοποιεί σεισμικές καταγραφές επιφανειακών κυμάτων Rayleigh ή Love ώστε να εξάγει την κατανομή της ταχύτητας V_S τόσο σε μία (1D) όσο και σε δύο διαστάσεις (2D). Οι κώδικές του αναπτύχθηκαν αρχικά για την εκτίμηση του λόγου V_P/V_S και του λόγου Poisson για υδρογεωλογικές έρευνες (Pasquet et al., 2015, 2016), με σκοπό την συνεκτίμηση αποτελεσμάτων σεισμικής διάθλασης, επιφανειακών κυμάτων και ηλεκτρικής τομογραφίας για τον χωρικό προσδιορισμό υδροθερμικών συστημάτων και της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Στις μελέτες αυτές, η τομή της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων και ταχύτητας φάσης από αντιστροφή των επιφανειακών κυμάτων, αναδεικνύει πλευρικές ανομοιογένειες και ταυτίζεται ικανοποιητικά με τις δομές που προκύπτουν από ηλεκτρική τομογραφία. Τα σεισμικά δεδομένα προέρχονται από καταγραφές κοινής πηγής με γραμμικά αναπτύγματα γεωφώνων, καθώς και από την τεχνική roll-along, με πηγές εκτός και εντός του αναπτύγματος των γεωφώνων, και γενικά με διατάξεις όμοιες με αυτές που εφαρμόζονται στην κλασική μέθοδο MASW.

Το SWIP πραγματοποιεί παραθυρική εξαγωγή των καμπύλων διασποράς, υπολογίζοντας πολλές καμπύλες για κάθε πολυκάναλη διάταξη καταγραφών. Επιλέγοντας συγκεκριμένο αριθμό σεισμικών ιχνών ως τμήμα του συνόλου των καταγραφών, περιορίζει το πλευρικό αποτύπωμα της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων για το υποσύνολο των δεδομένων, και υιοθετεί την παραδοχή του μονοδιάστατου εδαφικού μέσου κάτω από το υπό εξέταση ενδιαμέσο σημείο του αναπτύγματος των γεωφώνων. Στη συνέχεια, τα σεισμικά δεδομένα μετασχηματίζονται στο πεδίο των συχνοτήτων -

ταχύτητας φάσης ($f - V_{\Phi}$), επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο αφ' ενός την ξεκάθαρη απεικόνιση και αφ' εταίρου την υπέρθεσή τους (stacking). Μέσω της υπέρθεσης των καμπύλων διασποράς για κάθε εξεταζόμενο σημείο, αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N), περιορίζεται η επιρροή των σημάτων εγγύς πεδίου και αυξάνεται το βάθος διασκόπησης (Depth Of Investigation - DOI), έχοντας πλέον πρόσβαση σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή (picking) των καμπύλων διασποράς, λαμβάνοντας υπόψη το σφάλμα στην V_{Φ} κατά την επιλογή.

Οι ανθροισμένες (stacked) και επιλεγμένες (picked) καμπύλες αντιστρέφονται για κάθε παράθυρο με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, επιτρέποντας στον χρήστη να υιοθετήσει διάφορα αρχικά μοντέλα και τιμές παραμετροποίησης. Τα μοντέλα (ταχύτητας V_S) των οποίων οι θεωρητικές DCs ταυτίζονται εντός κάποιου σφάλματος - εύρους αβεβαιότητας με τις πειραματικές DCs, επιλέγονται ώστε να προκύψει το τελικό μοντέλο, διάμεσο ή σταθμισμένο, εκτιμώντας επίσης το μέγιστο βάθος διασκόπησης. Τα σετ μονοδιάστατων μοντέλων V_S που προκύπτουν για κάθε παράθυρο σεισμικών ιχνών, συνενώνονται ώστε τελικά να παραχθεί η ψευδο-τομή 2 διαστάσεων της V_S (Pasquet and Bodet, 2017), αναπαριστώντας έτσι τις διακυμάνσεις της ταχύτητας V_S τόσο πλευρικά όσο και ως προς το βάθος.

Το SWIP αποτελείται από 5 βασικές ενότητες κώδικα, μία για κάθε στάδιο επεξεργασίας της πολυκάναλης καταγραφής σεισμικών δεδομένων και εξαγωγής χρήσιμων για την αξιολόγηση πληροφοριών: i) καμπύλες διασποράς, ii) αρχικό μοντέλο, iii) αντιστροφή, iv) 1D αποτελεσμάτων και v) 2D αποτελεσμάτων. Έχοντας σκιαγραφήσει στην παρούσα ενότητα το γενικό περίγραμμα που ακολουθεί το SWIP, παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα επεξεργασίας, η συμμετοχή του χρήστη στην επιλογή των καμπύλων, την παραμετροποίηση και την αντιστροφή, οι αυτοματοποιημένοι κώδικες για την αντιστροφή και γενικότερα η ροή εργασιών που ακολουθείται μέχρι την εξαγωγή τελικών προφίλ.

3.2.1 Παραθυρική εξαγωγή καμπύλων διασποράς

Η διαχείριση των σεισμικών καταγραφών γίνεται μέσω του πακέτου SU (Seismic Un*x) το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Center of Wave Phenomena (CWP) του Colorado School of Mines (Stockwell Jr, 1999). Πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα, ελεύθερα προσβάσιμο (<https://>

github.com/JohnWStockwellJr/SeisUnix), βασισμένο σε περιβάλλον συστημάτων Unix (Stockwell Jr and Cohen, 2019). Χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς επεξεργασίας σεισμικού σήματος, χωρίς να περιορίζεται μόνο σε αυτά, καθώς δύναται να επεξεργαστεί και δεδομένα γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar - GPR). Το SWIP αξιοποιεί τους κώδικες του SU ώστε να συνθέσει και να μετατρέψει σεισμικά δεδομένα διάταξης πολλαπλών πηγών και δεκτών, από τα συνήθη format *.SEG Y* και *.SEG2* σε 1 συγκεντρωτικό αρχείο μορφής **.su*, το οποίο χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου. Η μετατροπή των σεισμικών καταγραφών σε μορφή **.su* για εισαγωγή στο SWIP γίνεται και μέσω του λογισμικού Geopsy (Wathelet et al., 2020). Το Geopsy αποτελεί ευέλικτο πακέτο ανοιχτού κώδικα για την επεξεργασία ρηχών σεισμικών δεδομένων από διάφορες μεθόδους, στοχεύοντας σε μελέτες χαρακτηρισμού εδαφικού πεδίου, και περιέχει πληθώρα εργαλείων και κωδίκων για την επεξεργασία, την αντιστροφή σεισμικών δεδομένων και την απεικόνιση των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Η διαδικασία που ακολουθείται αρχικά στο SWIP, αποτελεί τμήμα της μονάδας *A_SWIPdisp.m* του κώδικα για την παραθυρική εξαγωγή σεισμικών δεδομένων και την υπέρθεσή τους. Απεικονίζεται ως διάγραμμα ροής στο Σχήμα 3.2 καθώς και ως σκαριφηματική αναπαράσταση στο Σχήμα 3.3, και περιγράφεται ως εξής:

- (i) Επιλογή υποσυνόλου σεισμικών δεδομένων (windowing). Το χωρικό παράθυρο είναι κεντραρισμένο σε συγκεκριμένη θέση (X_{mid}). Το μέγεθος των παραθύρων ορίζεται από το διάνυσμα $nWvec$ που περιέχει n αριθμό ιχνών.
- (ii) Αναγνώριση και επιλογή (picking) των σεισμικών πηγών εντός συγκεκριμένου εύρους (εκτός του παραθύρου που επιλέχθηκε προηγουμένως) μεταξύ ενός ελάχιστου dS_{min} και μέγιστου dS_{max} αριθμού ιχνών.
- (iii) Εξαγωγή επιλεγμένων υποσυνόλων των καταγραφών, για κάθε ζεύγος παραθύρου - πηγής.
- (iv) Μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου για το επιλεγμένο υποσύνολο δεδομένων, από το πεδίο απόστασης - χρόνου στο πεδίο συχνότητας - ταχύτητας φάσης και απεικόνιση πεδίων καμπύλων διασποράς.
- (v) Κανονικοποίηση του φάσματος πλάτους σε κάθε συχνότητα, για κάθε πεδίο καμπύλων δι-

ασποράς.

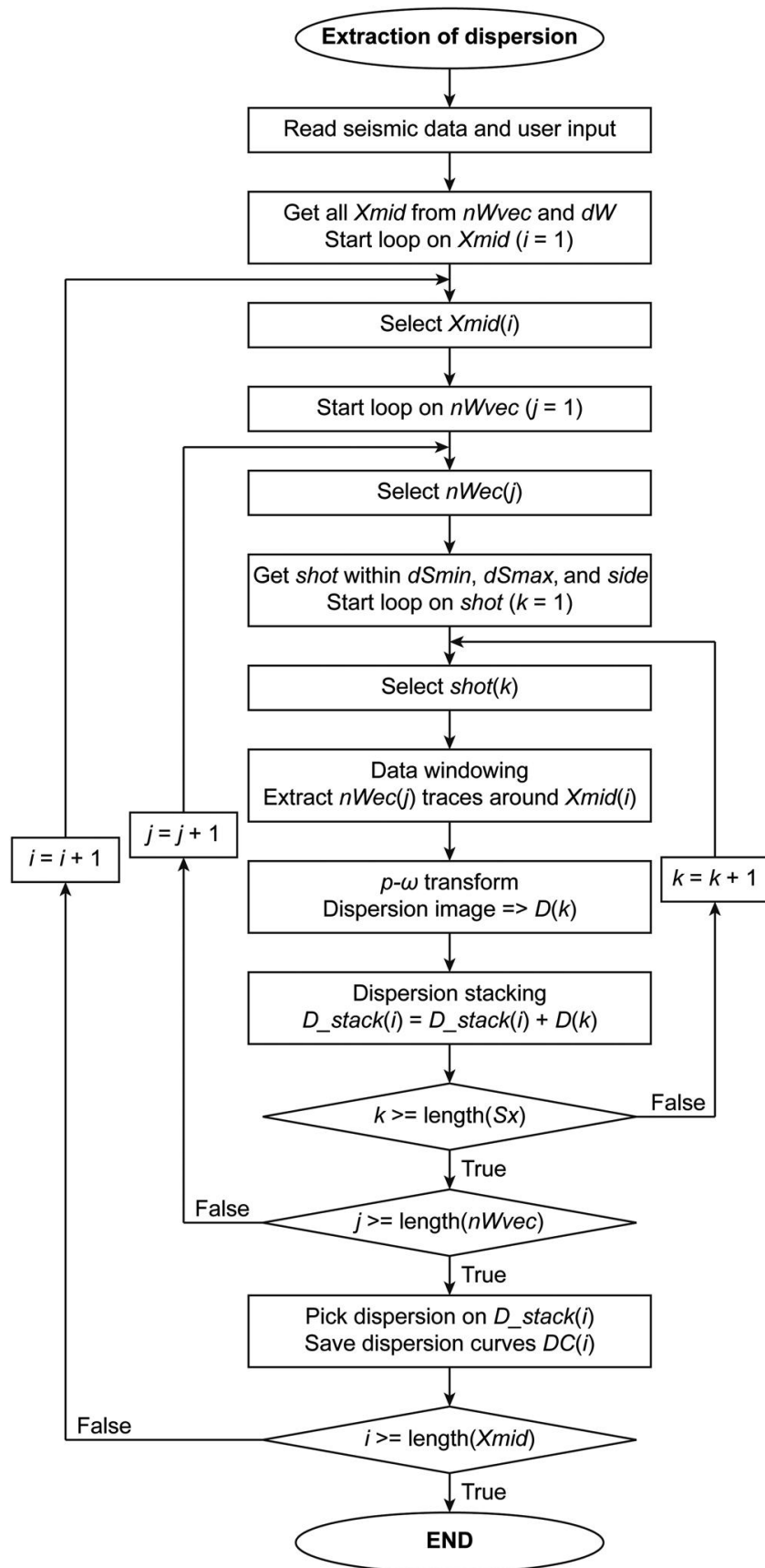
(vi) Υπέρθεση (stacking) όλων των πεδίων των καμπύλων διασποράς που έχουν υπολογιστεί στη συγκεκριμένη θέση X_{mid} .

(vii) Μετακίνηση του παραθύρου κατά διάστημα dW ιχνών, και επανάληψη των βημάτων (i)–(vi).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει πως το κατάλληλο μέγεθος του παραθύρου (nW_{vec}) που θα επιλεγεί, αποτελεί ίσως τη κρισιμότερη παράμετρο της διαδικασίας: καθορίζει ταυτόχρονα το βάθος διασκόπησης και την φασματική και πλευρική ανάλυση, ενώ για κάθε παράθυρο εφαρμόζεται η υπόθεση μονοδιάστατου εδαφικού μέσου. Αυξάνοντας το μήκος του παραθύρου αυξάνεται το βάθος διασκόπησης ενώ μειώνεται η ικανότητα ανάλυσης για τις πλευρικές ανομοιογένειες, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις απότομης μεταβολής των εδαφικών μηχανικών ιδιοτήτων. Αντίθετα, εάν εξάγονται δεδομένα από μικρότερα παράθυρα, οι πλευρικές ανομοιογένειες διακρίνονται με υψηλότερη ανάλυση (Hayashi and Suzuki, 2004), με σημαντική όμως μείωση του βάθους διασκόπησης.

Η ίδια λογική μπορεί να ακολουθηθεί και για την επιλογή ελάχιστου dS_{min} και μέγιστου dS_{max} αριθμού ιχνών, ώστε να αποφεύγεται να χρησιμοποιούνται μακρινές από το κεντρικό σημείο X_{mid} πηγές, διότι εισάγουν θόρυβο αλλοιώνοντας την ποιότητα της τελικής εικόνας διασποράς (far-field effects) (Pasquet and Bodet, 2017). Σημειώνεται επίσης, πως το παράθυρο που περιλαμβάνει τα ίχνη δεν περιέχει ταυτόχρονα και σεισμικές πηγές, καθώς αυτές λαμβάνονται μόνο εκατέρωθεν και εκτός του υπό επεξεργασία παραθύρου, όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 3.3. Τέλος, το βήμα dW της μετακίνησης του X_{mid} μπορεί να πάρει τιμές από ένα ίχνος μέχρι ένα μεγάλο μήκος - πλήθος ιχνών. Εάν χρησιμοποιείται μικρό βήμα τότε υπάρχει μεγάλη αλληλοκάλυψη μεταξύ όμορων ανθρωισμένων παραθύρων, με αποτέλεσμα να εξάγονται εικόνες διασποράς με ομαλή διακύμανση στις καμπύλες τους, γεγονός που βοηθάει στην οπτική αναγνώριση και επιλογή τους.

Μέσω του SWIP μπορεί να γίνει χρήση της τεχνικής της απλής υπέρθεσης (stacking), όπου οι υπολογισμένες καμπύλες διασποράς που έχουν εξαχθεί από παράθυρα μεταβλητού μήκους και διαφορετικές πηγές, αθροίζονται ώστε να ενισχυθεί ο λόγος S/N. Για να αντισταθμιστεί ο παραπάνω εγγενής περιορισμός της μεθόδου, δηλαδή της απώλειας βάθους διασκόπησης όταν επιλέγεται μικρότερο παράθυρο δεδομένων για καλύτερη διάκριση των πλευρικών διακυμάνσεων, οι Pasquet et al. (2021) επέκτειναν τις δυνατότητες του SWIP, εισάγοντας την πολυπαραθυρική σταθμισ-

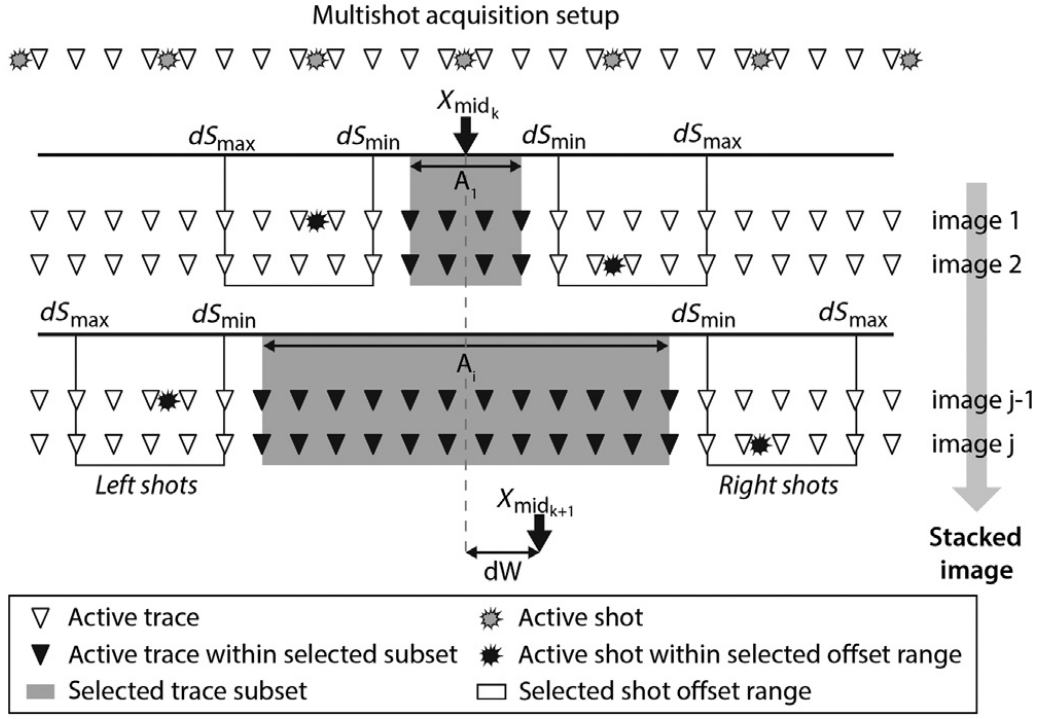


Σχήμα 3.2: Το διάγραμμα ροής εξαγωγής καμπύλων διασποράς. (Pasquet and Bodet, 2017)

μένη υπέρθεση (Multi-Window Weighted Stacking of Surface Waves - MW-WSSW). Πρόκειται για διαδικασία που εισάγει συντελεστή βαρύτητας σε καμπύλες διασποράς που έχουν προκύψει από διαφορετικού μεγέθους παράθυρα - διάφραγμα¹ (A_n - ισοδύναμο με το $nWvec$). Παρεμβάλλεται μεταξύ 4^{ου} και 5^{ου} βήματος της διαδικασίας παραθυρικής εξαγωγής δεδομένων, επιλογής και υπέρθεσης των καμπύλων διασποράς, και προσδίδει περισσότερη βαρύτητα στα μεγαλύτερα μήκη κύματος (τα οποία αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάθη) και λιγότερη στα μικρά μήκη (που αντιστοιχούν στο ρηχότερο τμήμα). Αυτό, επιτυγχάνεται μέσω συνάρτησης Γκαουσιανής μορφής w_n για κάθε διαφορετικό διάφραγμα A_n . Η συνάρτηση αυτή παίρνει τιμές από 0 έως 1, έχει προκαθορισμένο πλάτος και ορίζεται για κεντρικό μήκος κύματος, το οποίο ισούται με το μήκος του διαφράγματος, αυξημένο κατά 50%. Κατά αυτόν τον τρόπο περιορίζονται τα φαινόμενα του σήματος εγγύς πεδίου (near field effects) και αποτρέπεται η υποεκτίμηση της ταχύτητας στις χαμηλές συχνότητες (Pasquet et al., 2021). Για δεδομένο διάφραγμα, ορίζεται επίσης μέσω συνάρτησης, μέγιστο αποδεκτό μήκος κύματος λ_n , το οποίο αντιστοιχεί στο χαμηλότερο όριο της καμπύλης διασποράς. Το μήκος κύματος αυτό αποτελεί σημαντική παράμετρο, διότι ρυθμίζει το εξαγόμενο βάθος διασκόπησης στο τελικό προφίλ V_S . Οι εν λόγω συναρτήσεις μετατρέπονται σε μητρώα βαρύτητας στο πεδίο συχνότητας - ταχύτητας φάσης, και έχουν ίδιες διαστάσεις με το μητρώο της καμπύλης διασποράς.

Για κάθε κεντρικό σημείο X_{mid} και με διαφορετικά διαφράγματα, η κάθε εξαγόμενη καμπύλη διασποράς πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο μητρώο βαρύτητας και τελικώς προστίθεται (stacking) στην προηγούμενη, όπως περιγράφουν τα βήματα 5 και 6 της ροής εργασιών της μονάδας $A_SWIPdisp.m$ του κώδικα. Καθώς η παραπάνω τεχνική βασίζεται στο μήκος κύματος του κάθε διαφράγματος, αυξημένες τιμές συντελεστή βαρύτητας παρουσιάζονται στα μεγάλα μήκη κύματος των μεγάλων παραθύρων, ώστε να προκύψει καλύτερη εικόνα για τα βαθύτερα τμήματα του υπεδάφους, και αντίστοιχα για τα βραχέα μήκη κυμάτων των μικρότερων διαφραγμάτων, που αφορούν τα ρηχότερα τμήματα της διασκόπησης. Η καινοτομία της συγκεκριμένης τεχνικής σε σχέση με την έτερη παραθυρική μέθοδο MWASW (Hu et al., 2021), αλλά και σε σχέση με τη μεθοδολογία που

¹Ο όρος "διάφραγμα" χρησιμοποιείται σε αντιστοιχία με τη θεμελιώδη αρχή που έχει το διάφραγμα του φακού στην ψηφιακή και αναλογική φωτογραφία: μικρής διαμέτρου διάφραγμα επιτρέπει να περάσει λιγότερη ποσότητα φωτός, αλλά αυξάνεται η ευκρίνεια (μεγάλο βάθος πεδίου). Μεγαλύτερης διαμέτρου διάφραγμα επιτρέπει αντίστοιχα να εισέλθει περισσότερη ποσότητα φωτός, με αντάλλαγμα όμως την μειωμένη ευκρίνεια (ρηχό βάθος πεδίου). Στο αρχικό κείμενο αναφέρεται ως *aperture* (Pasquet et al., 2021)



Σχήμα 3.3: Η παραθυρική επιλογή και υπέρθεση σεισμικών δεδομένων. (Pasquet et al., 2021)

περιγράφεται στην εργασία των Bergamo et al. (2012), συνίσταται στο γεγονός ότι διατηρείται και ενισχύεται η πιο αξιόπιστη πληροφορία από το κάθε παράθυρο διαφορετικού μεγέθους. Αντίστοιχης λογικής είναι οι μεθοδολογία που περιγράφεται από τους Olafsdottir et al. (2018a), όπου συνδυάζονται καμπύλες διασποράς διαφορετικού μήκους κύματος από πολλαπλές καταγραφές. Το αποτέλεσμα της V_S επεκτείνεται σε βάθος, βελτιώνονται η ανάλυση του ρηχότερου τμήματος και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, με την διακύμανση της ταχύτητας να παραμένει όμως μονοδιάστατη. Οι Pasquet et al. (2021) καταλήγουν πως σε σχέση με την απλή υπέρθεση, η στάθμιση των πεδίων των καμπύλων διασποράς καταλήγει σε ακριβέστερη πλευρική ανάλυση, βελτιώνει την ανάλυση στα πρώτα μέτρα και αυξάνει το βάθος διασκόπησης, πράγμα το οποίο θα εξεταστεί και στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

3.2.2 Παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου

Η διαδικασία της παραμετροποίησης του μοντέλου αποτελεί θεμελιώδες σημείο της επεξεργασίας, ώστε να γίνει αποτελεσματικά και με επιτυχία η σύγκλιση του αποτελέσματος της αντιστροφής των καμπύλων διασποράς. Ιδανικά, η επιλογή των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου συνήθως

βασίζεται σε υπάρχοντα δεδομένα και προγενέστερη γνώση του υπό μελέτη υπεδάφους. Κατά την παραμετροποίηση ο χρήστης μπορεί να ορίσει αρκετά στρώματα σταθερού ή μεταβλητού πάχους, τις ταχύτητες V_S , V_P και την πυκνότητα ρ του εδαφικού μέσου. Η παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου προηγείται της διαδικασίας αντιστροφής και ο ορισμός των μεταβλητών γίνεται μέσω τροποποίησης του κώδικα της υπο-μονάδας Module B - *B_SWIPparam.m*. Ταυτόχρονα, δίνεται η δυνατότητα για οπτική προεπισκόπηση του αρχικού μοντέλου όπως αυτό καθορίζεται σταδιακά από τον χρήστη. Στον κώδικα SWIP αλλά και κατ'επέκταση στο *dinver* του *geopsy*, οι ταχύτητες και η πυκνότητα δύναται να οριστούν για το κάθε στρώμα με διάφορους σχετιζόμενους με το βάθος τρόπους: ομοιόμορφα, με γραμμική αύξηση ή μείωση και εκθετικά. Το μέγιστο βάθος του ημι-χώρου, το οποίο προκύπτει από τον αριθμό των στρωμάτων και του μέγιστου πάχους τους, αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο, καθώς εξαρτάται από την ελλειπή εκ των προτέρων πληροφορία για το βάθος διασκόπησης της μεθόδου (Pasquet and Bodet, 2017). Κατά τους ίδιους συγγραφείς, το μέγιστο βάθος συνίσταται να ορίζεται ίσο με το μισό του μέγιστου παρατηρούμενου μήκους κύματος, ως πρώτη προσέγγιση. Προτείνεται επίσης να γίνεται χρήση όμοιας στρωματοποίησης για τις ταχύτητες V_S και V_P , ενώ η πυκνότητα μπορεί να θεωρείται ως ομοιόμορφη, καθώς επηρεάζει λιγότερο την αντιστροφή.

Το SWIP προσφέρει επίσης τη δυνατότητα για ημι-αυτόματη θεώρηση αρχικού μοντέλου, η οποία λαμβάνει υπόψη αποτελέσματα ταχύτητας P -κυμάτων (Pasquet and Bodet, 2017). Συγκεκριμένα, η ταχύτητα διάδοσης των P -κυμάτων (V_P) μπορεί να συμπεριληφθεί ως δεδομένο εισόδου κατά την παραμετροποίηση ώστε, οι τιμές αυτής στο αρχικό μοντέλο να βασίζονται σε μέθοδο ανεξάρτητη από τα επιφανειακά κύματα. Μάλιστα, οι V_S και V_P ορίζονται και διαφοροποιούνται ξεχωριστά σε κάθε στρώμα αποσυνδυασμένα μεταξύ τους, και η διαθέσιμη πληροφορία της ταχύτητας V_P εισάγεται δίχως να περιορίζει τη στρωματοποίηση του προφίλ της V_S (Wathelet, 2008). Αυτό, επιτρέπει στον αλγόριθμο αντιστροφής να τροποποιήσει το αρχικό μοντέλο κατά τη παραγωγή των επόμενων, με τιμές ήδη καθιερωμένης και αξιόπιστης μεθόδου, αξιοποιώντας έτσι προγενέστερη γνώση για το υπό εξέταση έδαφος. Εντοπίζεται λοιπόν έτσι μία ακόμα καινοτομία, σε σχέση με τις άλλες παραθυρικές μεθοδολογίες (Bergamo et al., 2012) και λογισμικά (Hu et al., 2021) που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα, και οι οποίες εφαρμόζουν τη μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων.

Στην περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμη η εκ των προτέρων (a-priori) γνώση των εδαφικών συνθηκών, τότε μια δόκιμη τακτική είναι τα μοντέλα ταχύτητας να βασίζονται στην πληροφορία αυτή. Επιλέγοντας αρκετές θέσεις X_{mid} , το εδαφικό μέσο μπορεί αρχικά να μοντελοποιηθεί με μειωμένο πάχος στρωμάτων και εύρος ταχυτήτων σε κάθε θέση. Στη συνέχεια επιλύεται το ευθύ πρόβλημα και γίνεται εκτίμηση εάν οι δομές που έχουν θεωρηθεί αναπαριστούν κατάλληλα τον αριθμό των στρωμάτων και το εύρος των ταχυτήτων. Σε αντίθεση περίπτωση, όπου δεν υφίσταται προϋπάρχουσα πληροφορία για τα εδαφικά στρώματα και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους, οι Pasquet and Bodet (2017) συνιστούν να γίνεται επιλογή αρκετών σημείων X_{mid} με βάση τα μοτίβα των πεδίων καμπύλων διασποράς. Για κάθε σημείο χτίζεται το αρχικό μοντέλο με την απλούστερη δυνατή παραμετροποίηση, δηλαδή με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στρωμάτων. Για κάθε περίπτωση διαθέσιμης πληροφορίας, η αντιστροφή των δεδομένων συστήνεται να πραγματοποιείται σταδιακά, εισάγοντας περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στον αλγόριθμο, είτε μέσω προσαρμογής και κατάλληλης βαθμονόμησης του εύρους των παραμέτρων (όταν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για το υπέδαφος), είτε προσθέτοντας περισσότερα εδαφικά στρώματα και αυξάνοντας το εύρος των τιμών παραμέτρων (στην περίπτωση απουσίας a-priori πληροφορίας). Η πολυπλοκότητα δηλαδή του μοντέλου συστήνεται να αυξάνεται σταδιακά, μέχρις ότου το υπολογιστικό κόστος σε χρόνο να μην υπερβαίνει τα οφέλη της αξιοπιστίας του αποτελέσματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με στόχο οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς να συγκλίνουν ικανοποιητικά με τις πειραματικές, δηλαδή να προκύπτουν μικρότερες τιμές σφάλματος.

3.2.3 Αντιστροφή καμπύλων διασποράς

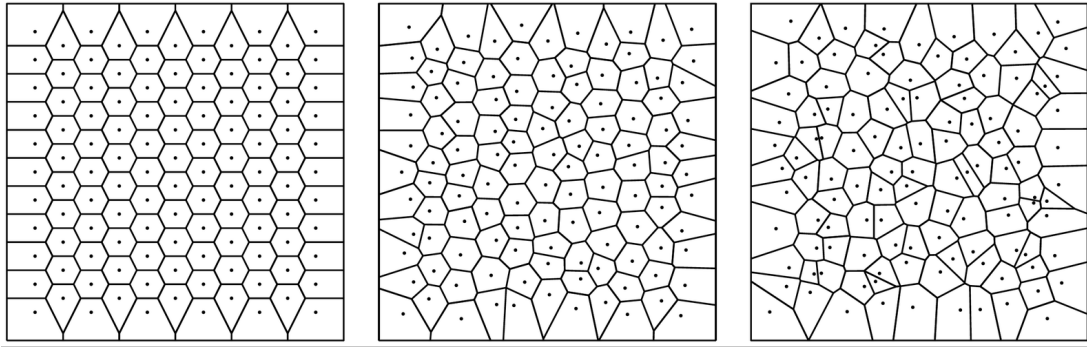
Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, εισάγονται αυτόματα από το SWIP και το περιβάλλον της MATLAB στο λογισμικό geopsy (Wathelet et al., 2020), όπου η επίλυση του ευθέως προβλήματος και η αντιστροφή των δεδομένων, πραγματοποιείται μέσω του εργαλείου *dinver*. Η αντιστροφή πραγματοποιείται ανεξάρτητα για κάθε καμπύλη διασποράς με τον Neighborhood Algorithm (NA) (Sambridge, 1999; Wathelet et al., 2004; Wathelet, 2008), ο οποίος είναι ενσωματωμένος στον κώδικα του εργαλείου *dinver*. Η διαδικασία της αντιστροφής όπου καλούνται οι παραπάνω εξωτερικοί κώδικες, γίνεται μέσω της υπο-μονάδας Module C - *C_SWIPinv.m*. Θεωρώντας οριζόντια στρωματοποιημένο εδαφικό μέσο (1D), πραγματοποιείται μονοδιάστατη αντιστροφή των καμ-

πύλων διασποράς για κάθε σημείο X_{mid} (Pasquet et al., 2015; Pasquet and Bodet, 2017). Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αντιστροφής, απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 3.5. Για μικρό βήμα dW , λόγω μεγάλης αλληλεπικάλυψης μεταξύ διαδοχικών παραθύρων, οι διαδικασίες παραθυρικής υπέρθεσης οδηγούν σε ομαλές πλευρικές αλλαγές στα αποτελέσματα των καμπύλων διασποράς. Εξ' αιτίας αυτού, η χρήση πλευρικών περιορισμών μεταξύ διαδοχικών αντιστροφών δεν είναι απαραίτητη ώστε να προκύψει ομαλή και συνεκτική πλευρική μεταβολή της ταχύτητας V_S (Pasquet and Bodet, 2017).

Οι θεωρητικές καμπύλες διασποράς υπολογίζονται με τα μοντέλα και τη μέθοδο Thomson-Haskell (Wathelet, 2008), ενώ μέσω του αλγόριθμου NA, όπως περιγράφεται παρακάτω, γίνεται χρήση κελιών Voronoi ώστε να ληφθούν δειγματοληπτικά με επαναληπτικό τρόπο οι μεταβλητές του παραμετρικού χώρου (V_P , V_S , ρ και πάχος κάθε στρώματος). Ο αλγόριθμος του *dinver* δημιουργεί κατά την πρώτη επανάληψη n_{s0} μοντέλα με τυχαίο, στοχαστικό τρόπο χάρις στην Monte-Carlo προσέγγιση, τα οποία αποτελούν και τα ακραία μοντέλα, και υπολογίζει στη συνέχεια το σχετικό σφάλμα μέσω της σχέσης:

$$\text{Misfit Function (MF)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_j} \frac{(V_{cal_i} - V_{obs_i})^2}{N_f \sigma_i^2}} \quad (3.1)$$

όπου V_{cal_i} και V_{obs_i} είναι η υπολογισμένη (θεωρητική) και πειραματική ταχύτητα φάσης, αντίστοιχα, για κάθε συχνότητα f_i , N_f είναι ο αριθμός δειγμάτων συχνότητας, και σ_i το σχετικό σφάλμα ως μέτρηση της αβεβαιότητας της ταχύτητας φάσης της καμπύλης διασποράς για την δεδομένη συχνότητα f_i . Ο παραμετρικός χώρος διαιρείται σε n_{s0} αριθμό κελιών Voronoi, με το κέντρο τους να αντιστοιχεί φαινομενικά σε κάθε δημιουργημένο μοντέλο, ενώ τα όρια σε κάθε κατεύθυνση ισαπέχουν από το πλησιέστερο γειτονικό μοντέλο. Επιλέγονται σε κάθε επανάληψη τα βέλτιστα κελιά με τη μικρότερη τιμή της MF συνάρτησης σφάλματος (σχέση 3.1), εντός των οποίων παράγονται με τυχαίο τρόπο n_s/n_r αριθμός νέων μοντέλων. Τα n_s νέα μοντέλα προστίθενται στα προηγούμενα με ανακατανομή των κελιών, μια διαδικασία που επαναλαμβάνεται n_{it} φορές μέχρις ότου να παραχθεί $n_{s0} + n_s n_{it}$ αριθμός μοντέλων (Wathelet, 2008; Pasquet and Bodet, 2017).

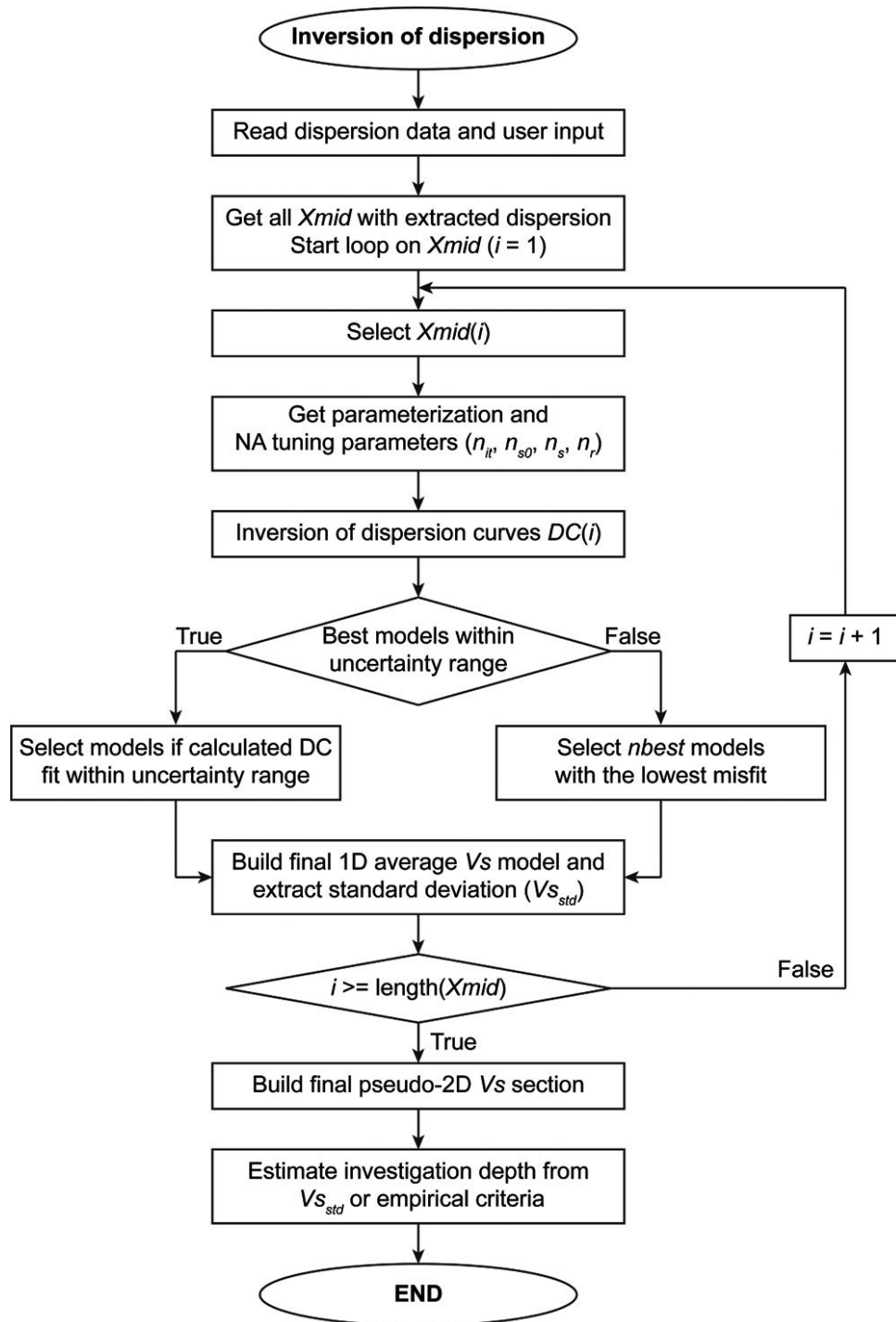


Σχήμα 3.4: Τυπική γεωμετρία κελιών Voronoi.

Σε αντίθεση με τις καθιερωμένες στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως η τεχνική Monte Carlo, οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) και οι αλγόριθμοι προσομοιωμένης ανόπτησης (simulated annealing), οι οποίες αναζητούν βέλτιστα μοντέλα υπό προκαθορισμένες παραμέτρους για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (Κρητικιάκης, 2010), η μέθοδος του NA με τη χρήση των κελιών Voronoi (Σχήμα 3.4) δίνει τη δυνατότητα ώστε οι αρχικές παράμετροι σχεδιασμού να επανεκτιμηθούν και να προσαρμοστούν μέσω διαδοχικών επαναλήψεων, κατά τη διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης (Sambridge, 1999). Η παραγωγή νέων μοντέλων (που οδηγούν σταδιακά στη βέλτιστη λύση) καθοδηγείται επαναληπτικά προς την περιοχή στην οποία προκύπτει μικρότερη η τιμή της συνάρτησης σφάλματος (MF). Κατά συνέπεια, παρόλο που ανήκει στην παραπάνω οικογένεια γενετικών αλγορίθμων (Wathelet, 2008) ο Neighborhood Algorithm δεν αποτελεί καθαρά στοχαστική προσέγγιση, και επιπλέον πλεονεκτεί ως προς το χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με τις αμιγώς στοχαστικές μεθόδους.

Όταν υπάρχει ελάχιστη ή καθόλου προϋπάρχουσα γνώση και το αρχικό μοντέλο έχει περιορισμένες παραμέτρους, τότε ο αλγόριθμος ενδεχομένως να συγκλίνει λανθασμένα σε τοπικά ελάχιστα της αντικειμενικής συνάρτησης σφάλματος. Ως εκ τούτου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συστήνεται κατά τη παραμετροποίηση οι μεταβλητές να παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών, ώστε ο αλγόριθμος να είναι όσο το δυνατόν πιο διερευνητικός (Pasquet and Bodet, 2017). Ακόμα, σε περίπτωση που η σύγκλιση του αλγορίθμου NA σε περιοχές της συνάρτησης σφάλματος παρουσιάζεται επαναλαμβανόμενη, με αυξημένο αριθμό μοντέλων και με μεγάλο παραμετρικό χώρο, τότε το αποτέλεσμα της αντιστροφής βελτιστοποιείται ώστε να βρεθεί συμβιβασμός μεταξύ παραγόμενων μοντέλων και υπολογιστικού χρόνου, αλλά και να παραχθεί τελικά αποτέλεσμα. Το διάγραμμα ροής μιας τέτοιας διαδικασίας, αλλά και των βημάτων που ακολουθείται συνολικά από τον αλγόρι-

θυμο για την αντιστροφή, περιγράφεται στο Σχήμα 3.5. Οι δυνατότητες που προσφέρει σχετικά με τη βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων καθώς και το πλήθος των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με συσχετισμένα χαρακτηριστικά αξιολόγησής τους, καθιστούν τον αλγόριθμο NA ένα ιδιαίτερα ευέλικτο και πρακτικό εργαλείο για σεισμικές μεθόδους επιφανειακών κυμάτων (Sambridge, 1999; Wathelet et al., 2004; Pasquet and Bodet, 2017).

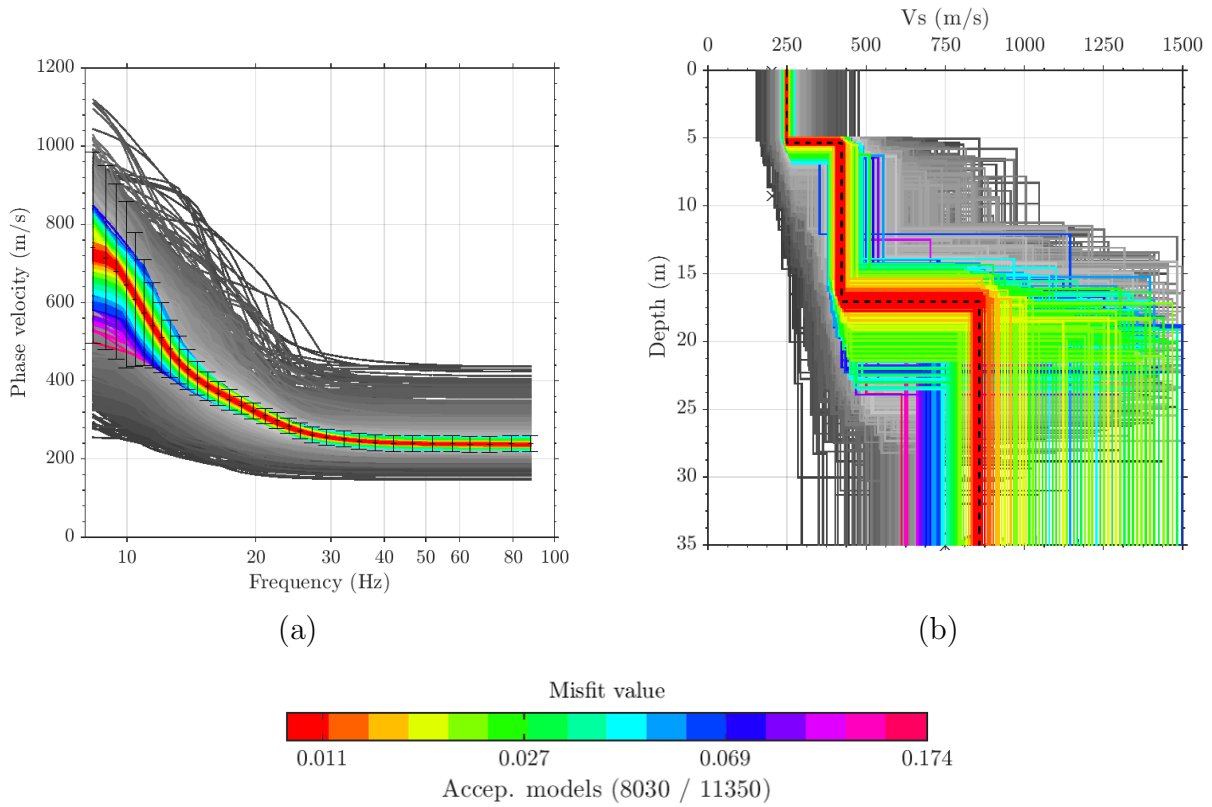


Σχήμα 3.5: Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αντιστροφής των καμπύλων διασποράς. (Pasquet and Bodet, 2017)

3.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων σε 1 και 2 διαστάσεις

Για κάθε θέση X_{mid} το αποτέλεσμα της αντιστροφής του αλγόριθμου NA, παράγει χιλιάδες μονοδιάστατα (1D) μοντέλα κατανομής ταχύτητας V_S σε σχέση με το βάθος, γεγονός που επιτρέπει την εκ των υστέρων εκτίμηση του σφάλματος. Τα δεδομένα διασποράς και τα μοντέλα που έχουν προκύψει παρουσιάζονται σύμφωνα με το σχετικό τους σφάλμα, με κατάλληλη χρωματική κλίμακα για τα αποδεκτά και απορριφθέντα (Pasquet et al., 2015), επιτρέποντας έτσι την οπτική αξιολόγηση και επαρκή ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Δίνεται η δυνατότητα τα αποδεκτά μοντέλα ταχύτητας να επιλέγονται είτε διατηρώντας αυτά που παρουσιάζουν το ελάχιστο σφάλμα, είτε επιλέγοντας τα μοντέλα των οποίων η καμπύλη διασποράς ταυτίζεται με την πειραματική, εντός κάποιου εύρους αβεβαιότητας. Το ενδιάμεσο 1D μοντέλο κατανομής της V_S μπορεί να προκύψει τόσο λαμβάνοντας τη μέση τιμή των παραμέτρων των παραχθέντων μοντέλων, όσο και σταθμίζοντας τις διαφορετικές παραμέτρους κάθε μοντέλου σύμφωνα με την τιμή του σχετικού τους σφάλματος (Σχήμα 3.6). Ο προτεινόμενος αριθμός αποδεκτών μοντέλων για την σωστή εκτίμηση του σφάλματος, προτείνεται να είναι τουλάχιστον μεταξύ 500 και 1000 (Pasquet and Bodet, 2017). Εάν η επιλογή του τελικού 1D μοντέλου ταχύτητας γίνεται εντός κάποιου εύρους αβεβαιότητας, τότε η αντιστροφή συνιστάται να εκτελείται αρκετές φορές και με διαφορετικές παραμέτρους για τον αλγόριθμο NA, μέχρι να προκύψει αποδεκτός αριθμός μοντέλων που να ικανοποιεί τα προκαθορισμένα όρια της αβεβαιότητας αυτής, με την τελευταία να εκφράζεται σε ποσοστιαία μορφή.

Η τέταρτη υπομονάδα του κώδικα του SWIP, δηλαδή το Module D1 - *D1_SWIPmod1d.m* επιτρέπει την απεικόνιση των 1D μοντέλων ταχύτητας και των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών. Η ποιότητα των τελικών V_S μοντέλων σε κάθε θέση X_{mid} , αξιολογείται μέσω απεικόνισης των θεωρητικών καμπύλων διασποράς σε υπέρθεση με τις τιμές του κυματικού πεδίου, στο χώρο συχνότητας - ταχύτητας φάσης (πεδίο διασποράς). Αυτός ο τρόπος απεικόνισης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε περίπτωση παράβλεψης ή παρερμηνείας καμπύλων διασποράς ανώτερης τάξης, οι οποίες θα μπορούσαν να επιλεγούν και να ληφθούν υπόψη στην αντιστροφή. Σημειώνεται πως σε αυτή την υπομονάδα του SWIP, καθορίζεται ο τρόπος της απεικόνισης του τελικού V_S μοντέλου, μεταξύ αυτών με το ελάχιστο σφάλμα, ενδιάμεσου αλλά και σταθμισμένου μοντέλου, τόσο ομαλοποιημένου ως προς το βάθος όσο και με σαφή στρωματοποίηση. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα να παραχθούν



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα αποτελέσματος αντιστροφής 1D του αλγόριθμου NA. Συνολικά μελετήθηκαν 11350 μοντέλα, εκ των οποίων τα 8030 θεωρήθηκαν αποδεκτά (με χρώμα) ενώ τα υπόλοιπα απορρίφθηκαν (με κλίμακα του γκρι).

τα γραφήματα για την 1D κατανομή της ταχύτητας των V_P κυμάτων, του λόγου V_P/V_S καθώς και του λόγου $Poisson$, σε σχέση με το βάθος. Καθώς όμως η V_P και η πυκνότητα επηρεάζουν ελάχιστα την διασπορά των επιφανειακών κυμάτων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως μόνο τα μοντέλα ταχύτητας των S κυμάτων μπορούν να ερμηνεύονται αξιόπιστα από τα αποτελέσματα της αντιστροφής (Pasquet and Bodet, 2017).

Στην τελευταία υπομονάδα του κώδικα, το Module D2 - *B_SWIPmod2d.m*, πραγματοποιείται η σύνθεση των διαδοχικών 1D αποτελεσμάτων, δημιουργώντας τομή 2 διαστάσεων, όπου κάθε μοντέλο μονοδιάστατης κατανομής V_S αναπαρίσεται στην αντίστοιχη θέση X_{mid} (Pasquet and Bodet, 2017; Pasquet et al., 2021), απεικονίζοντας τις μεταβολές της ταχύτητας των S κυμάτων, πλευρικά και σε βάθος. Η μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με το βάθος αναπαρίσεται πλέον με κατάλληλη χρωματική κλίμακα, σε αντίθεση με το μονοδιάστατο μέσο, όπου η τιμή της ταχύτητας σημειώνεται στον οριζόντιο άξονα σε m/s και το βάθος στον κατακόρυφο άξονα, σε μέτρα (m). Επίσης, δίνεται η δυνατότητα οπτικής σύγκρισης των ψευδοτομών πειραματικών και υπολ-

ογισμένων ταχυτήτων φάσης, με ταυτόχρονο υπολογισμό και απεικόνιση της σχετικής τυπικής απόκλισης (standard deviation - V_{Sstd}) και της μεταξύ τους διαφοράς (residuals), εκφραζόμενη σε όρους ταχύτητας (m/s) ή επί τους εκατό (%). Το βάθος διασκόπησης προκύπτει από τα επί μέρους 1D αποτελέσματα, και μπορεί να καθοριστεί είτε από το μέγιστο μήκος κύματος των καταγραφών, είτε μέσω της τυπικής απόκλισης των επιλεγμένων μοντέλων που έχουν προκύψει από την αντιστροφή. Όπως αναφέρουν οι Pasquet et al. (2015), το τελικό 2D αποτέλεσμα αποτελεί ψευδοτομή, η οποία αναπαριστά την ένωση των μέσων τιμών όλων των πιθανών αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει για κάθε θέση, τα οποία ως εκ τούτου έχουν εξομαλυνθεί.

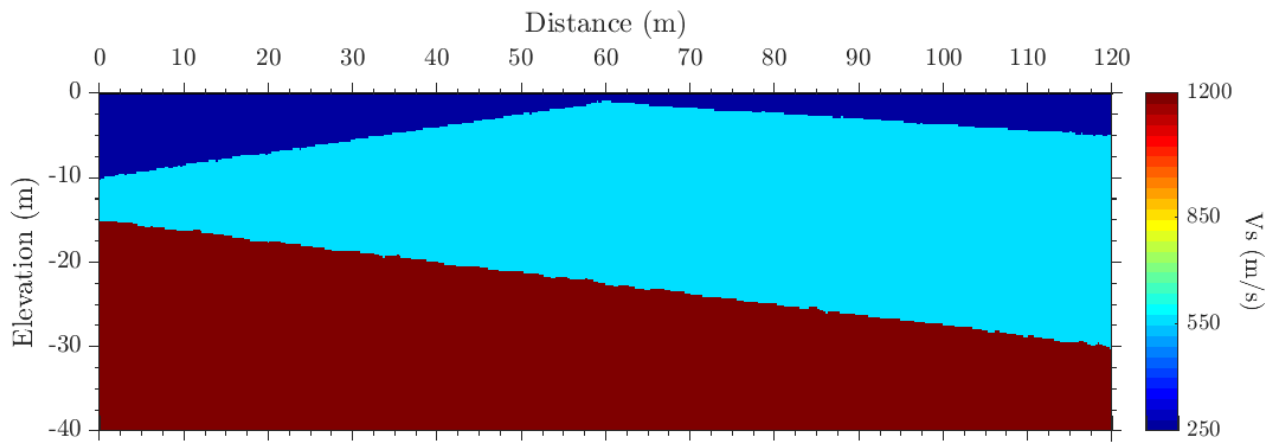
Για τις περισσότερες των περιπτώσεων, το τελικό δισδιάστατο αποτέλεσμα αποτελεί, εξ' ορισμού εκτίμηση της πραγματικής δομής του υπεδάφους και των μηχανικών του χαρακτηριστικών, βασισμένα στην τιμή της V_S . Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα της αντιστροφής μπορούν να αξιοποιηθούν ώστε να προσδιοριστούν το βάθος ή η θέση διεπιφάνειας εδαφικών στρωμάτων με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, ύπαρξη στρωμάτων με μειωμένη ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων (αναστροφή, ζώνες ρηχών ταχυτήτων, κ.ά. ανωμαλίες στη μεταβολή της ταχύτητας), καθώς και να εντοπιστούν περιπτώσεις έντονης πλευρικής μεταβολής.

4 Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων

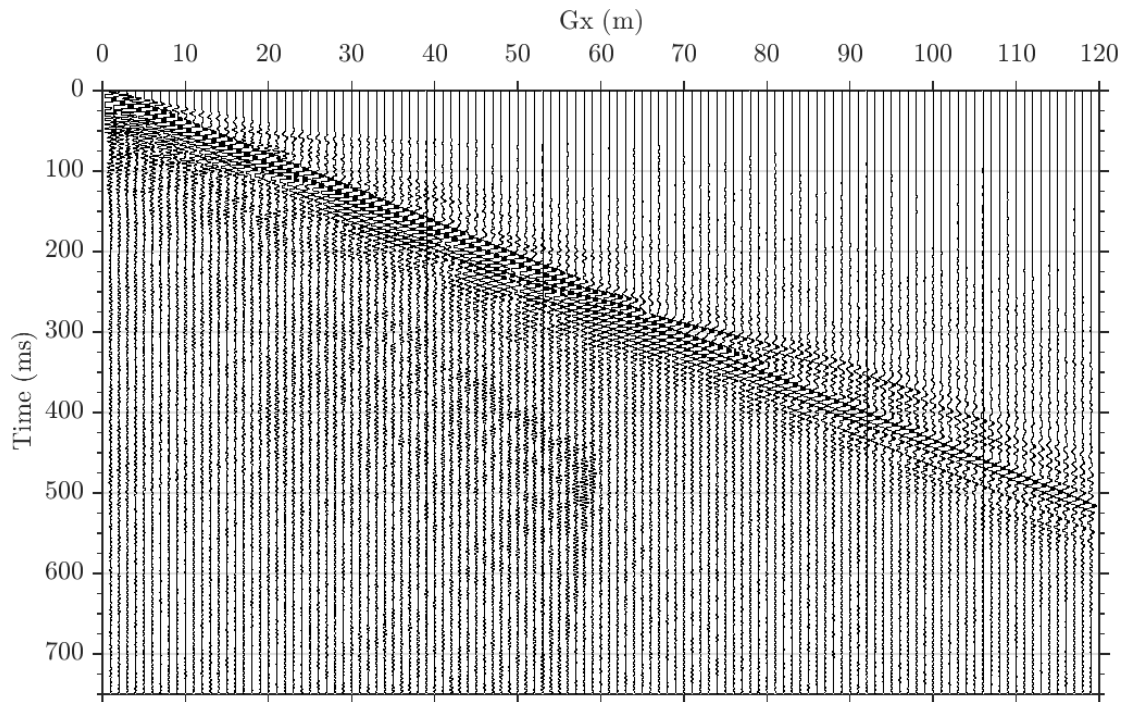
Στην ενότητα αυτή πρόκειται να δοκιμαστούν αρχικά οι λειτουργίες και οι δυνατότητες του SWIP σε συνθετικά δεδομένα και να συγκριθούν τα μονοδιάστατα αποτελέσματα που προκύπτουν, σε σχέση με την καθιερωμένη μέθοδο της MASW. Στη συνέχεια, θα αξιοποιηθεί η δυνατότητα για παραθυρική εξαγωγή καμπύλων διασποράς, με στάθμιση ή χωρίς, ώστε να συγκριθεί εκ νέου το μονοδιάστατο αποτέλεσμα που προκύπτει. Τέλος, θα αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες του λογισμικού για απόδοση προφίλ ταχύτητας σε δύο διαστάσεις, εξάγοντας έτσι χρήσιμα συμπεράσματα και εμπειρία για τη μετέπειτα εφαρμογή του σε πραγματικά δεδομένα πεδίου.

Τα συνθετικά δεδομένα προκύπτουν από το μοντέλο αναφοράς του Σχήματος 4.1. Το εξιδανικευμένο αυτό υπέδαφος αποτελείται από τρία διακριτά στρώματα, για τα οποία αντιστοιχεί ταχύτητα V_S 250, 550 και 1200 m/s, και προέρχεται από τη μελέτη των Pasquet et al. (2021), τους οποίους ευχαριστούμε για την διάθεση των συνθετικών σεισμικών δεδομένων που προκύπτουν για το εν λόγω μέσο. Η πλευρική μεταβολή που παρουσιάζει η V_S , λόγω της κλίσης των εδαφικών στρωμάτων, καθιστά το συγκεκριμένο εδαφικό προφίλ ιδανικό για διερεύνηση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου.

Πρόκειται για διάταξη σταθερού αναπτύγματος γεωγώνων και πολλαπλών πηγών, καθώς κατά μήκος της τομής των 120m αντιστοιχούν 13 σεισμικές πηγές με 10m απόσταση μεταξύ τους, ενώ 121 συνθετικά σεισμικά ίχνη καταγράφονται για κάθε 1m, με διάρκεια καταγραφής 750ms και ρυθμό δειγματοληψίας τα 0.125ms (Σχήμα 4.2). Η διερεύνηση και σύγκριση θα γίνει για 2 σημεία κατά μήκος του μοντέλου, στις θέσεις που αντιστοιχούν τα 30m και τα 80m της τομής (Σχήμα 4.3). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της θέσης των δεκτών ανά 1m, η ονομασία των ενδιάμεσων σημείων (Xmid) και η πραγματική τους απόσταση σε μέτρα, ταυτίζεται.



Σχήμα 4.1: Το συνθετικό μοντέλο 3 εδαφικών στρωμάτων. (Pasquet et al., 2021)



Σχήμα 4.2: Τα σεισμικά ίχνη για το σύνολο των δεκτών. Πηγή στη θέση $x=0\text{m}$

Οι θέσεις στα 30 και 80m επιλέχθηκαν ώστε μεταξύ τους να υπάρχει διαφορά ως προς το πάχος των στρωμάτων, ενώ ταυτόχρονα να διαθέτουν σημαντικό αριθμό ιχνών και πηγών εκατέρωθεν, πλην όμως διαφορετικό μήκος δεκτών, όπως αναπαρίσταται και στο Σχήμα 4.3. Έτσι, θα υπάρξει η δυνατότητα να διαπιστωθεί εάν μεγαλύτερου μήκους παράθυρο σεισμικών δεδομένων οδηγεί σε καλύτερη διάκριση των καμπύλων διασποράς, τυχόν επιπλέον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο, και εάν προκύπτουν ή όχι ποιοτικότερα αποτελέσματα. Επιπλέον, η θέση $X_{mid}=80m$ βρίσκεται κοντά με τη θέση $X_{mid}=75m$ που αναφέρεται στο άρθρο των Pasquet et al. (2021), όπου παρουσιάζονται παραδείγματα εικόνων διασποράς για απλή και σταθμισμένη υπέρθεση, για διάφορα μεγέθη παραθύρων. Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει μέτρο σύγκρισης και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, ιδιαίτερα κατά την μετέπειτα επεξεργασία των σταθμισμένων καμπύλων διασποράς.

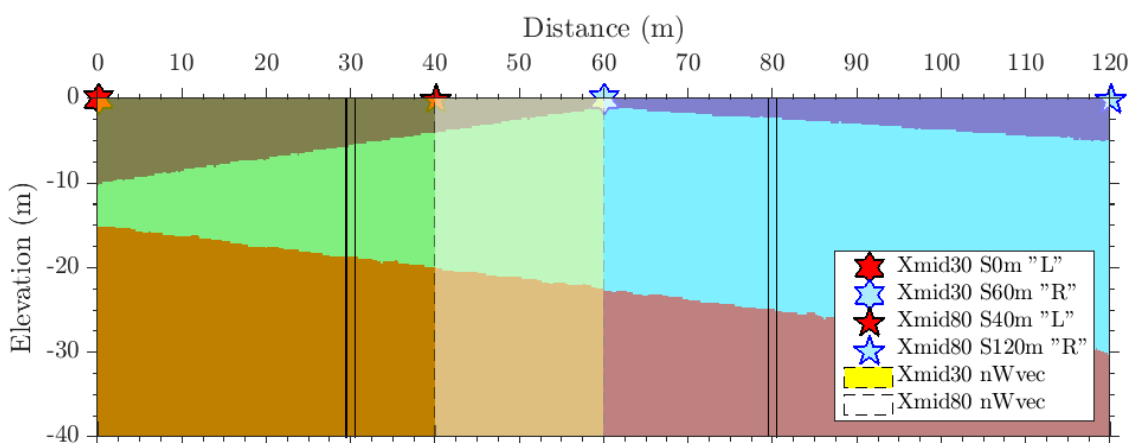
Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό kriSIS για την εφαρμογή της κλασικής μεθόδου MASW, το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Κρητικάκη Γ. Κρητικάκης (2010), και πρόκειται για πακέτο αλγορίθμων ανοιχτού κώδικα, γραμμένων σε MATLAB. Ο πυρήνας της αντιστροφής και της επίλυσης του ευθέως προβλήματος είναι γραμμένος σε FORTRAN. Η ροή εργασιών γίνεται σε γραφικό περιβάλλον, όπου δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει επ' ακριβώς το αρχικό μοντέλο του εδάφους (πάχος και πλήθος στρωμάτων, αλλά και συσχετισμένες σε αυτά γεωτεχνικές παραμέτρους). Με βάση αυτό, στο kriSIS εκτελείται η επίλυση του ευθέως προβλήματος και στην συνέχεια την αντιστροφή με καθαρά ντετερμινιστική προσέγγιση. Η επίλυση του ευθέως προβλήματος (για οριζόντια στρωματομένο μέσο) πραγματοποιείται με τη μέθοδο Thomson-Haskell, ενώ λόγω της γνωστής a-priori πληροφορίας του υπό εξέταση εδαφικού μέσου με διακριτά στρώματα, τέθηκαν ως περιορισμοί στη διαδικασία της αντιστροφής η απόσβεση (damping) και η σταθμισμένη εξομάλυνση (blocky inversion) των γραμμικών εξισώσεων.

Ως πρώτο βήμα στην επεξεργασία με το SWIP, θα πρέπει να εισαχθούν τα σεισμικά δεδομένα. Σαν πρώτο βήμα λοιπόν, καλείται μέσω της MATLAB το λογισμικό *Seismic Unix*, εκτελώντας την εντολή `seg2su` ή `ascii2su` αναλόγως του είδους των αρχείων, ώστε το σύνολο των *.dat αρχείων των σεισμικών καταγραφών να μετατραπεί μέσω του λογισμικού σε ένα αρχείο μορφής *.su, το οποίο στη συνέχεια διαβάζει το τμήμα του κώδικα *A_SWIPdisp.m*.

4.1 Παραθυρική εξαγωγή σεισμικών δεδομένων

4.1.1 Δεδομένα χωρίς υπέρθεση

Όπως σημειώνεται και στην ενότητα 3.2.1, το SWIP δίνει τη δυνατότητα για παραθυρική εξαγωγή των καμπύλων διασποράς (windowing) από πολυκάναλες καταγραφές πολλαπλών πηγών, απομονώνοντας ίχνη που αντιστοιχούν σε μεταβαλλόμενο μέγεθος παραθύρου - διαφράγματος. Στη συνέχεια, υπερθέτει τις καμπύλες διασποράς (stacking), είτε απλά είτε με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας (στάθμιση). Στο kriSIS αντίθετα, ο μετασχηματισμός κάθε φορά του κυματικού πεδίου γίνεται από σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής (single shot gather). Ως εκ τούτου, και προκειμένου παραχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ των λογισμικών - μεθόδων, θα πρέπει να οριστούν με κατάλληλο τρόπο η επιλογή των ιχνών στο SWIP, ώστε να ταυτίζονται με αυτά του kriSIS. Σκοπός λοιπόν αρχικά, είναι να αποτυπωθεί "στιγμιότυπο" από τα συνθετικά δεδομένα, που να συνιστά καταγραφή κοινής πηγής από μία μόνο πηγή (single shot gather), ώστε αντιστρέφοντας τα σεισμικά δεδομένα για τις δύο θέσεις Xmid (30 και 80m), τα αποτελέσματα να αντιστοιχούν στο ίδιο σετ δεδομένων. Στη συνέχεια, θα επιτραπεί η παραθυρική εξαγωγή δεδομένων και η υπέρθεσή τους από το SWIP, αξιολογώντας τα αποτελέσματα συνολικά, μαζί με τα προηγούμενα.



Σχήμα 4.3: Το συνθετικό εδαφικό μοντέλο. Σημειώνονται με μαύρες γραμμές οι θέσεις διερεύνησης Xmid 30m και 80m, καθώς και οι πηγές της μη-παραθυρικής εξαγωγής δεδομένων: στα 0 και 60m για Xmid30, και στα 40 και 120m για Xmid80.

Στο Σχήμα 4.3, οι μαύρες κατακόρυφες γραμμές αναπαριστούν τις θέσεις διερεύνησης, X_{mid} 30 και 80m αντίστοιχα, ακολουθώντας τον συμβολισμό του SWIP για τον προσδιορισμό των θέσεων. Κατ' επέκταση, με κίτρινο χρώμα στο Σχήμα 4.3, σημειώνεται το διάνυσμα από το οποίο λαμβάνονται υπόψη τα σεισμικά ίχνη για τη θέση $X_{mid}=30m$, με μήκος παραθύρου $nW_{vec}=60$ ίχνη, (τα οποία εν προκειμένω ταυτίζονται με την απόσταση σε μέτρα), από τη θέση $x=0$ έως $x=60m$. Αντίστοιχα, στο ίδιο σχήμα, σημειώνεται με λευκό χρώμα το παράθυρο των 80 ιχνών (=μέτρων) για τη θέση $X_{mid}=80m$, μεταξύ των ιχνών που αντιστοιχούν στις θέσεις από 40 έως 120m. Τα δεδομένα των παραπάνω παραθύρων, ως υποσύνολα των συνθετικών σεισμικών καταγραφών για ολόκληρο το μοντέλο αναφοράς του Σχήματος 4.1, θα χρησιμοποιηθούν προς επεξεργασία και με τα δύο λογισμικά-μεθόδους. Σε κάθε περίπτωση, δεν λαμβάνεται υπόψη σεισμικό ίχνος επί του οποίου αντιστοιχεί πηγή, και το παράθυρο περιλαμβάνει κάθε φορά τις πηγές που βρίσκονται "εξωτερικά" του παραθύρου των ιχνών.

Για την σύγκριση των μεθόδων, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σεισμικές καταγραφές με 1 πηγή εκατέρωθεν των σημείων διερεύνησης. Στο kriSIS, αυτό γίνεται με επιλογή σεισμικών δεδομένων των καταγραφών κοινής πηγής που αντιστοιχούν σε πηγές αριστερά και δεξιά του αναπτύγματος των γεωφώνων (σημειώνονται εφ' εξής ως "L" και "R", αντίστοιχα). Επιλέγονται λοιπόν οι σεισμικές καταγραφές για πηγή στα 0m (αριστερά - "L") και στα 60m (δεξιά - "R") για τη θέση X_{mid} 30, ενώ για τη θέση X_{mid} 80, επιλέγονται οι καταγραφές για πηγές στα 40m (αριστερά - "L") και στα 120m (δεξιά - "R") (Σχήμα 4.3). Για τις καταγραφές της θέσης $X_{mid}30$ με σεισμική πηγή από τα αριστερά - "L" (στα 0m) και από τα δεξιά - "R" (στα 60m), τα ίχνη που λαμβάνονται υπόψη ορίζονται από 2 έως 58m, ώστε να μην συμπίπτουν με τη θέση των πηγών (Σχ. 4.2).

Στο SWIP, η ισοδύναμη επιλογή σεισμικών δεδομένων επιτυγχάνεται ορίζοντας αφ' ενός το μέγεθος του παραθύρου - διαφράγματος σε συγκεκριμένο αριθμό ιχνών, και αφ' ετέρου περιορίζοντας το μήκος του παραθύρου από το οποίο μπορούν να συμπεριλαμβάνονται οι σεισμικές πηγές, ορίζοντας δηλαδή κατάλληλα το ελάχιστο και μέγιστο εύρος (σε όρους αριθμού ιχνών) για τις μεταβλητές dS_{min} και dS_{max} (βλ. υποενότητα 3.2.1). Για τη θέση X_{mid} 30, το διάνυσμα είναι της μορφής $nW_{vec}=[59:1:59]$, με το ελάχιστο και μέγιστο μέγεθος παραθύρου να ταυτίζονται στα 59 ίχνη. Το βήμα ορίζεται τυπικά ίσο με 1 ίχνος. Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος παραθυρικής εξαγωγής του SWIP τερματίζει στην πρώτη επανάληψη, χωρίς να προχωρήσει σε κάποιου είδους υπέρθεση,

έχοντας απομονώσει 59 σεισμικά ίχνη. Το πρώτο ίχνος του παραθύρου του σημείου διερεύνησης Xmid 30, αντιστοιχεί στη θέση $x=1m$ και το τελευταίο στη $x=59m$. Με αντίστοιχο τρόπο, το διάστημα της θέσης Xmid 80 ορίζεται ως $nWvec=[79:1:79]$, επιλέγοντας έτσι 79 ίχνη, με το πρώτο να προκύπτει για τη θέση $x=41m$ και το τελευταίο στη θέση $x=119m$. Το εύρος από το οποίο λαμβάνονται οι σεισμικές πηγές, και το οποίο δεν μπορεί να ταυτίζεται και να βρίσκεται "εντός" του διανύσματος των ιχνών, ορίζεται από την ελάχιστη απόσταση $dSmin=1$ και τη μέγιστη $dSmax=10$, σε όρους σεισμικών ιχνών. Τέλος γίνεται επιλογή με πηγές εκατέρωθεν των σημείων διερεύνησης, όπου για κάθε θέση Xmid ορίζεται κατάλληλα στον κώδικα του SWIP η μεταβλητή *side* ίση με 'L' και 'R', ώστε να εξαχθούν σεισμικά δεδομένα με πηγή από τα αριστερά και τα δεξιά, αντίστοιχα. Σημειώνεται πως, οι παραπάνω μεταβλητές καθορίζονται στο κομμάτι του κώδικα *A_SWIPdisp.m*. Επίσης, η μικρή αναντιστοιχία στην επιλογή αριθμού ιχνών μεταξύ kriSIS και SWIP, 58 έναντι 59 ιχνών για τη θέση στα 30m, και 76 έναντι 79 ιχνών για τη θέση στα 80m, αντίστοιχα, απαιτείται ώστε να διατηρηθεί ίδιο το ενδιαμέσο σημείο διερεύνησης Xmid.

Σχετικά με την σύγκριση του αποτελέσματος στις θέσεις διερεύνησης, έχουν προκύψει 4 σετ σεισμικών δεδομένων, τόσο για το SWIP όσο και για το kriSIS. Στα δεδομένα χωρίς υπέρθεση και για μία σεισμική πηγή σε κάθε καταγραφή κοινής πηγής, εφαρμόστηκε μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου και επιλέχθηκαν οι καμπύλες διασποράς. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου και τελικά, σύγκριση του αποτελέσματος ταχύτητας V_S .

4.1.2 Δεδομένα με υπέρθεση

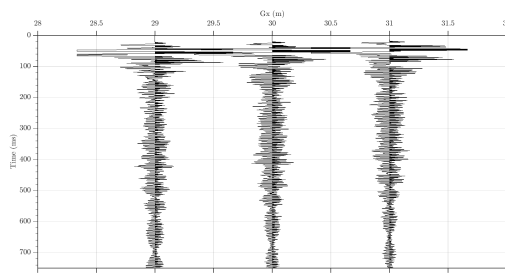
Το SWIP, όπως περιγράφηκε και στην υποενότητα 3.2.1, προσφέρει τη δυνατότητα για εξαγωγή των δεδομένων με παράθυρα μεταβλητού εύρους, προκειμένου να πραγματοποιήσει υπέρθεση των καμπύλων διασποράς με ή χωρίς στάθμιση. Υπενθυμίζεται πως, για τη σταθμισμένη υπέρθεση, λαμβάνεται με μεγαλύτερη βαρύτητα το υψίσυχνο τμήμα των καμπύλων διασποράς που προκύπτουν από τα παράθυρα μικρού μήκους αναπτύγματος, το οποίο αφορά και σε ρηχότερα τμήματα του εδάφους. Αντίστοιχα, το χαμηλόσυχο τμήμα των καμπύλων, λαμβάνει βαρύτητα/ διεύρυνση ανάλογη με το μήκος των μεγαλύτερων παραθύρων από τα οποία αυτές προέρχονται. Αυτή η τεχνική στάθμισης αναφέρεται ως MW-WSSW (βλ. Σχήμα 2 από Pasquet et al. (2021)). Η απλή υπέρθεση (standard stacking), αθροίζει εξίσου τις καμπύλες διασποράς, ανεξαρτήτως του

μεγέθους του παραθύρου των σεισμικών δεδομένων από το οποίο προκύπτει.

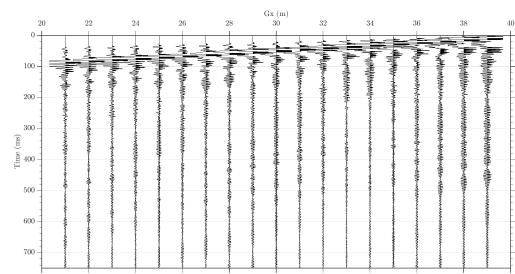
Ως εκ τούτου, και προκειμένου αθροιστούν με στάθμιση τα δεδομένα των πεδίων διασποράς, θα πρέπει να οριστεί αρχικά στο SWIP να εκτελέσει παραθυρική επιλογή και εξαγωγή των σεισμικών καταγραφών. Αυτό, καθορίζεται από την τιμή της μεταβλητής *stack*, όπου για απλή υπέρθεση (standard stacking) λαμβάνει την τιμή 1, ενώ για σταθμισμένη υπέρθεση (weighted stacking - WSSW) ορίζεται η τιμή ίση με 3. Κατ' επέκταση και για λόγους διάκρισης αλλά και σύντμησης, τα δεδομένα και αποτελέσματα από το SWIP, θα αναφέρονται εφ' εξής και θα σημειώνεται επ' αυτών, ο όρος *st=0* για δεδομένα χωρίς υπέρθεση, *st=1* και *st=3* για δεδομένα με απλή και σταθμισμένη υπέρθεση, αντίστοιχα. Τα δεδομένα που επεξεργάστηκαν, τόσο με την απλή όσο και με την σταθμισμένη υπέρθεση, αφορούν στο ίδιο ανάπτυγμα των σεισμικών ιχνών όπως περιγράφηκε νωρίτερα για τη μη-παραθυρική επιλογή χωρίς υπέρθεση, δηλαδή 59 traces για *Xmid30* και 79 traces για *Xmid80*. Για το σημείο διερεύνησης *Xmid30*, το διάνυσμα επιλογής των δεδομένων ορίζεται ως *An=[3:4:59]*, όπου με κεντρικό σημείο τη θέση *x=30m* λαμβάνονται αρχικά 3 σεισμικά ίχνη, και με βήμα 4, δηλαδή $2 + 2$ σεισμικά ίχνη για κάθε πλευρά, το διάνυσμα φτάνει να επιλέξει τον μέγιστο αριθμό των 59 ιχνών. Με αντίστοιχη λογική στη θέση *Xmid80*, το διάνυσμα ορίζεται ως *An=[3:4:79]*. Σημειώνεται πως, προκειμένου να επισημανθεί η εξαγωγή των δεδομένων από μεταβλητού μήκους πολλαπλά παράθυρα, το διάνυσμα θα σημειώνεται εφεξής ως *An*, ακολουθώντας την ορολογία των συγγραφέων Pasquet et al. (2021) και υιοθετώντας έτσι τη λογική του "διαφράγματος".

Το εύρος των πηγών από τις οποίες λαμβάνονται υπόψη τα σεισμικά δεδομένα, παραμένει όμοιο με αυτό της μη-παραθυρικής εξαγωγής δεδομένων, ήτοι μεταξύ *dSmin=1* ως ελάχιστο και *dSmax=10*. Πλέον, για κάθε παράθυρο-διάφραγμα, θέλουμε να εισάγουμε δεδομένα με σεισμικές πηγές τόσο εκ των δεξιών του διαφράγματος, όσο και εκ των αριστερών, πάντοτε εντός του εύρους των 10 σεισμικών ιχνών που θεωρήσαμε προηγουμένως. Προς τούτο, ορίζουμε στην μεταβλητή *side* του κώδικα *A_SWIPdisp.m*, ίση με 'B'. Τέλος, η μετατόπιση του ενδιαμέσου σημείο μεταξύ διαδοχικών παραθύρων σε όρους σεισμικών ιχνών, ορίζεται στο 1 ίχνος αλλά ταυτόχρονα και 1 μέτρο (για την συγκεκριμένη περίπτωση δεδομένων, όπου αυτά ταυτίζονται), θέτοντας στην μεταβλητή την τιμή *dW=1*.

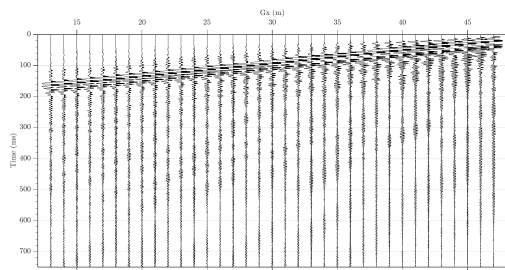
Για το σύνολο των καταγραφών κοινής πηγής που προκύπτουν, το SWIP δημιουργεί ένα τελικό αρχείο *.su το οποίο περιλαμβάνει όλα τα σεισμικά δεδομένα, για κάθε θέση Xmid. Παραθέτουμε στη συνέχεια (Σχήμα 4.4) μερικά ενδεικτικά δεδομένα τέτοιων καταγραφών κοινής πηγής για τη θέση Xmid=30m, όπως αυτά προέκυψαν από τα πολλαπλά παράθυρα μεταβλητού μεγέθους. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται 4 από τις 30 εικόνες σεισμικών καταγραφών, οι οποίες προέρχονται από σεισμικές πηγές εκ των δεξιών - 'R'.



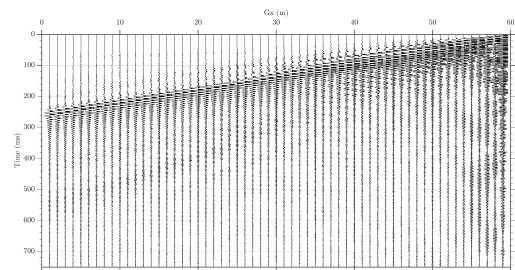
(a)



(b)



(c)



(d)

Σχήμα 4.4: Επιλεγμένες καταγραφές για τη θέση Xmid30m. Εξαγωγή σεισμικών δεδομένων από πολλαπλά παράθυρα μεταβλητού μεγέθους: (a)-(d) με 3, 19, 35 και 59 ίχνη, αντίστοιχα. Πηγή 'R' στη θέση x=40m (a)-(b), x=50m (c) και x=60m (d).

4.2 Επιλογή καμπύλων διασποράς

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα κυματικά πεδία των καμπύλων διασποράς, όπως αυτά προέκυψαν από τον μετασχηματισμό των επεξεργασμένων σεισμικών δεδομένων, τόσο για το kriSIS όσο και για το SWIP. Αρχικά, παρατίθενται και γίνεται σύγκριση των εικόνων για δεδομένα χωρίς υπέρθεση, όπως αυτές προέκυψαν από το κάθε λογισμικό. Στη συνέχεια περιλαμβάνονται ενδεικτικές εικόνες των πεδίων διασποράς για δεδομένα με απλή και σταθμισμένη υπέρθεση, στις ίδιες θέσεις διερεύνησης Xmid30 και Xmid80, όπως αυτές παρήχθησαν από το SWIP. Έχοντας πραγματοποιήσει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς θέσης διερεύνησης-πηγών-στάθμισης, για την κάθε εικόνα πεδίου που ενδεικτικά παρουσιάζεται, σημειώνεται η πειραματική καμπύλη διασποράς που έχει επιλεγεί (picked) μαζί με τη σχετική διακύμανση.

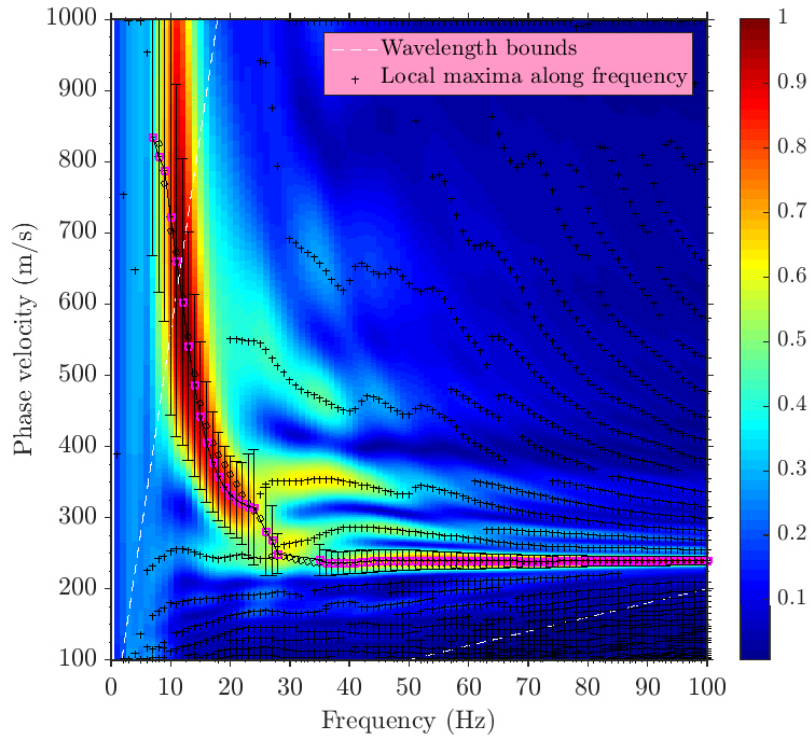
Κατά το μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου με τη μέθοδο μετάθεσης της φάσης (phase-shift) στο kriSIS (Κρητικάκης, 2010) και την βραδύτητας-συχνότητας - p - ω (slank-stack) για το SWIP (Russell, 1987; Pasquet and Bodet, 2017), τα καταγεγραμμένα σεισμικά δεδομένα μετατρέπονται από το πεδίο χρόνου-απόστασης στο πεδίο συχνότητας-ταχύτητας φάσης, όπου και καθίσταται δυνατή η αναγνώριση της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh από το τοπικό μέγιστο της ενέργειας. Τα κυματικά πεδία παρουσιάζονται για όλες τις περιπτώσεις υπέρθεσης με γραμμική κλίμακα και στους δύο άξονες, καθώς και με την ίδια χρωματική κλίμακα απόδοσης της ενέργειας. Τέλος, επιλέγεται σε κάθε περίπτωση η θεμελιώδης καμπύλη διασποράς (fundamental mode). Η επιλεγμένη ταχύτητα φάσης V_ϕ (m/s) αποθηκεύεται σε απλό αρχείο κειμένου με μορφή στηλών, μαζί με την αντίστοιχη συχνότητα και την εκάστοτε διακύμανση, και για τα δύο λογισμικά.

Αναφορικά με το SWIP, η επιλογή των καμπύλων έχει γίνει με χειροκίνητο τρόπο (pick=1), με ενεργές τις επιλογές του κώδικα για υποβοηθούμενη (pickstyle=0) και ομαλή (smoothpick=1) επιλογή, ώστε να εντοπιστούν με ακρίβεια τα ενεργειακά μέγιστα και να αποφευχθούν απότομες διακυμάνσεις την καμπύλη. Δεν ενεργοποιήθηκαν φίλτρα συχνότητας, ενώ για τις ρυθμίσεις διακύμανσης επιλέχθηκε ως ελάχιστο όριο αβεβαιότητας κατά Lorentz (Pasquet and Bodet, 2017), τα 20 m/s. Για τα παραθυρικά δεδομένα με ή χωρίς υπέρθεση, επιλέχθηκε ως αριθμός δειγμάτων ταχύτητας η τιμή nray=500 από 100 έως 1200m/s, το οποίο αντιστοιχεί σε διάστημα δειγματοληψίας $\delta V_\phi=2.2$ m/s, ενώ ορίστηκε εύρος συχνοτήτων μεταξύ 0 και 100Hz.

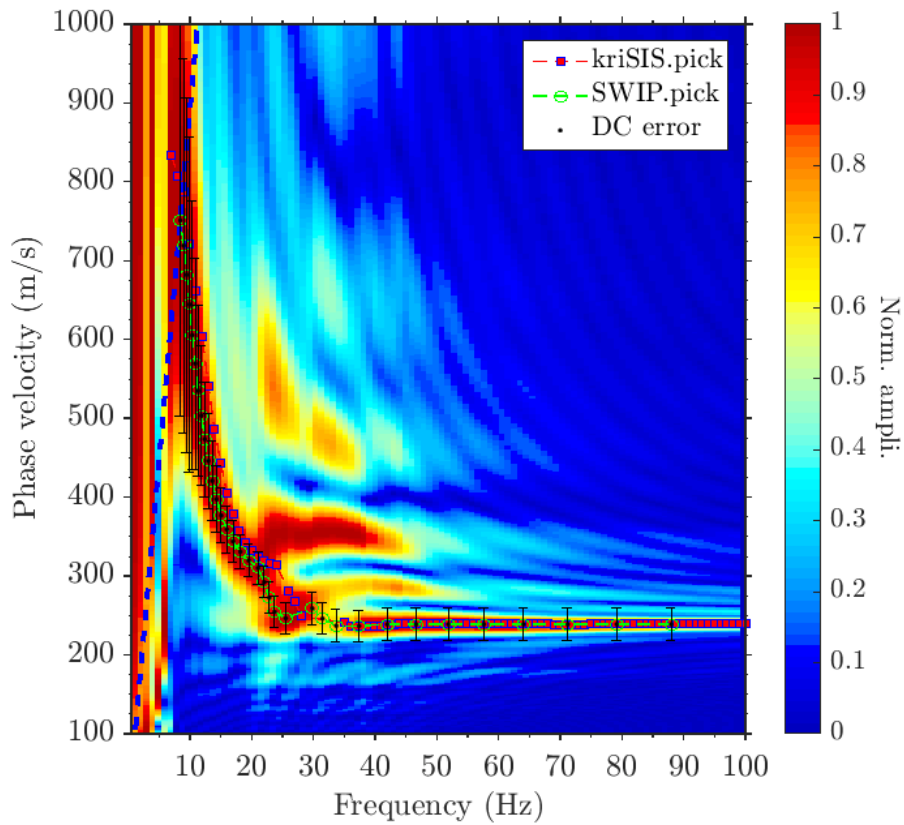
4.2.1 Δεδομένα χωρίς υπέρθεση

Στα Σχήματα 4.5 και 4.6 απεικονίζονται τα κυματικά πεδία για τις θέσεις διερεύνησης, όπου σημειώνεται με (a) το αποτέλεσμα του SWIP και με (b) το αντίστοιχο αποτέλεσμα του kriSIS, ενώ για τις επιλεγμένες καμπύλες διασποράς περιλαμβάνεται και η διακύμανσή τους. Το Σχήμα 4.5 αφορά το πεδίο που προκύπτει για τη θέση Xmid30, από τα σεισμικά δεδομένα με πηγή στα 60m - δεξιά ('R'), ενώ το Σχήμα 4.6 αντιστοιχεί στη θέση Xmid80, με την πηγή των σεισμικών δεδομένων από τα αριστερά ('L'), στα 40m. Καθώς πρόκειται για δεδομένα χωρίς υπέρθεση, το πεδίο διασποράς στο Σχήμα 4.5a, προέρχεται από την καταγραφή του Σχήματος 4.3h με τα 59 σεισμικά ίχνη. Αντίστοιχα πεδία διασποράς έχουν προκύψει για τη θέση Xmid30 με σεισμική πηγή στα αριστερά ('L' - 0m) και για τη θέση Xmid80 με πηγή στα δεξιά ('R' - 120m). Γενικώς, για τα πεδία διασποράς από τα δύο λογισμικά και για τις δύο θέσεις στα 30 και 80m, από τα συγκεκριμένα συνθετικά δεδομένα, προκύπτει ιδιαίτερη ομοιότητα. Πιο συγκεκριμένα, το kriSIS φαίνεται να αποδίδει καλύτερα τα τοπικά μέγιστα στις χαμηλές συχνότητες κάτω από το όριο του μήκους κύματος ($< 9\text{Hz}$), ενώ το SWIP εμφανίζει με μεγαλύτερη ενέργεια το υψίσυχο τμήμα της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς (Σχ. 4.6b).

Η βασική διαφορά συνίσταται στην "αποκοπή" της καμπύλης του ενεργειακού μεγίστου. Όπως διακρίνεται και για τις δύο θέσεις, ιδιαίτερα όμως για την Xmid=80m (Σχ. 4.6), η καμπύλη διακόπτεται περί τα 250m/s στην περιοχή των 30Hz (Σχ. 4.5a) και 4.5b), και μεταξύ 300-400m/s από τα 30Hz και άνω (Σχ. 4.6a). Αυτό, οφείλεται αφενός στη σχετικά χαμηλή φασματική ανάλυση και την παρουσία θορύβου λόγω μακρινής σεισμικής πηγής, και αφετέρου, αλλά κυρίως, στην ανάδειξη και λάθος αναγνώριση των καμπύλων διασποράς ανώτερης τάξης. Όπως αναφέρουν οι Boaga et al. (2013), σε εδαφικά προφίλ με ιδιαίτερα έντονη αντίθεση των μηχανικών χαρακτηριστικών μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων, είναι πολύ πιθανό να προκύψει σημείο συνεπαφής, όπου η καμπύλη διασποράς 1^η ανώτερης τάξης, εμφανίζεται πολύ κοντά με τη θεμελιώδη, δίνοντας μάλιστα την εντύπωση πως αυτές τέμνονται. Το φαινόμενο αυτό έχει εξ'ορισμού σχέση με της ιδιότητες των επιφανειακών κυμάτων, όπως η ελλειπτικότητα των κυμάτων Rayleigh (Wathelet et al., 2004; Boaga et al., 2013; Hobiger et al., 2021). Έτσι, για Xmid=80m στο SWIP επιλέχθηκε θεμελιώδης καμπύλη με χαμηλότερη ταχύτητα στο υψίσυχο τμήμα, αφού στο kriSIS συναντάται δυσκολία στον εντοπισμό της, επιλέγοντας εσφαλμένα την 1^η ανώτερης τάξης καμπύλη, για το τμήμα 30 - 70Hz.

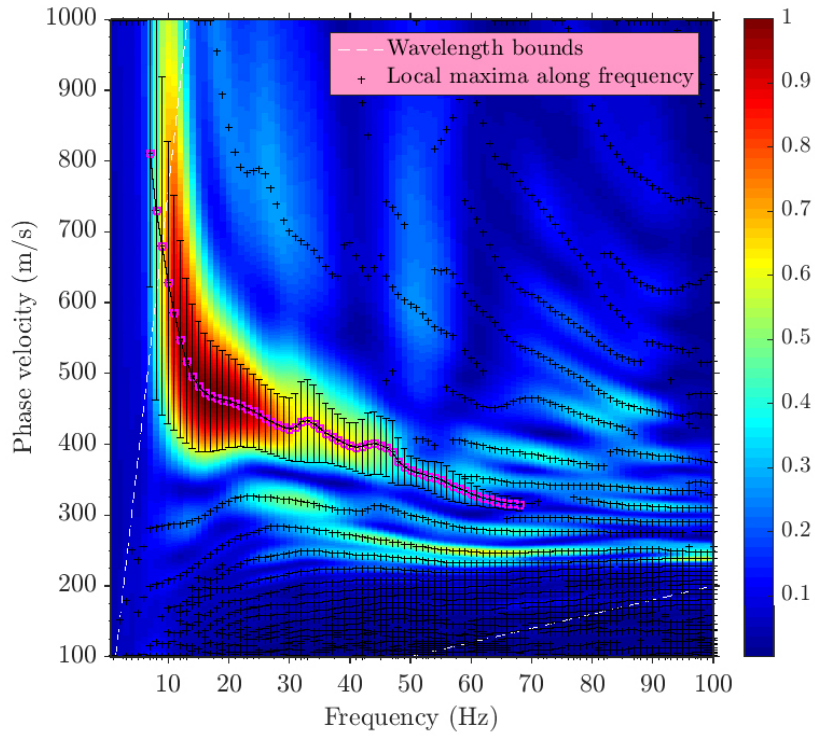


(a)

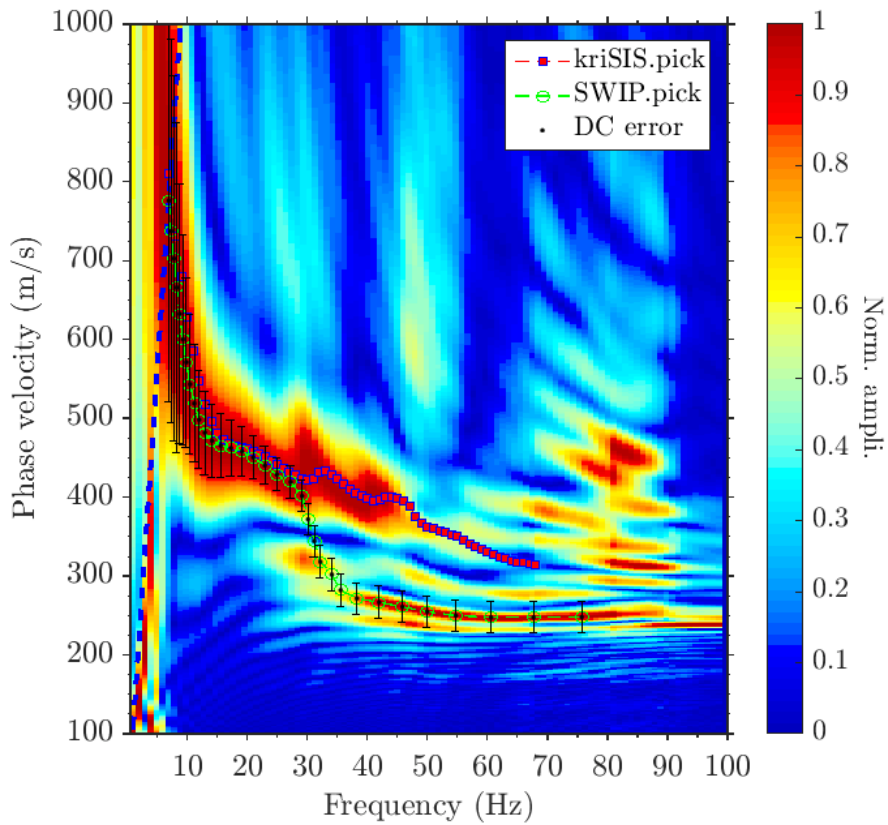


(b)

Σχήμα 4.5: Αποτέλεσμα μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου, με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες διασποράς από (a) το kriSIS, και (b) το SWIP. Θέση διερεύνησης $X_{mid}=30m$, πηγή στα $60m$ ('R'), δεδομένα χωρίς υπέρθεση.



(a)



(b)

Σχήμα 4.6: Αποτέλεσμα μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου, με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες διασποράς από (a) το kriSIS, και (b) το SWIP. Θέση διερεύνησης $X_{mid}=80m$, πηγή στα $40m$ ('L'), δεδομένα χωρίς υπέρθεση.

4.2.2 Δεδομένα με υπέρθεση

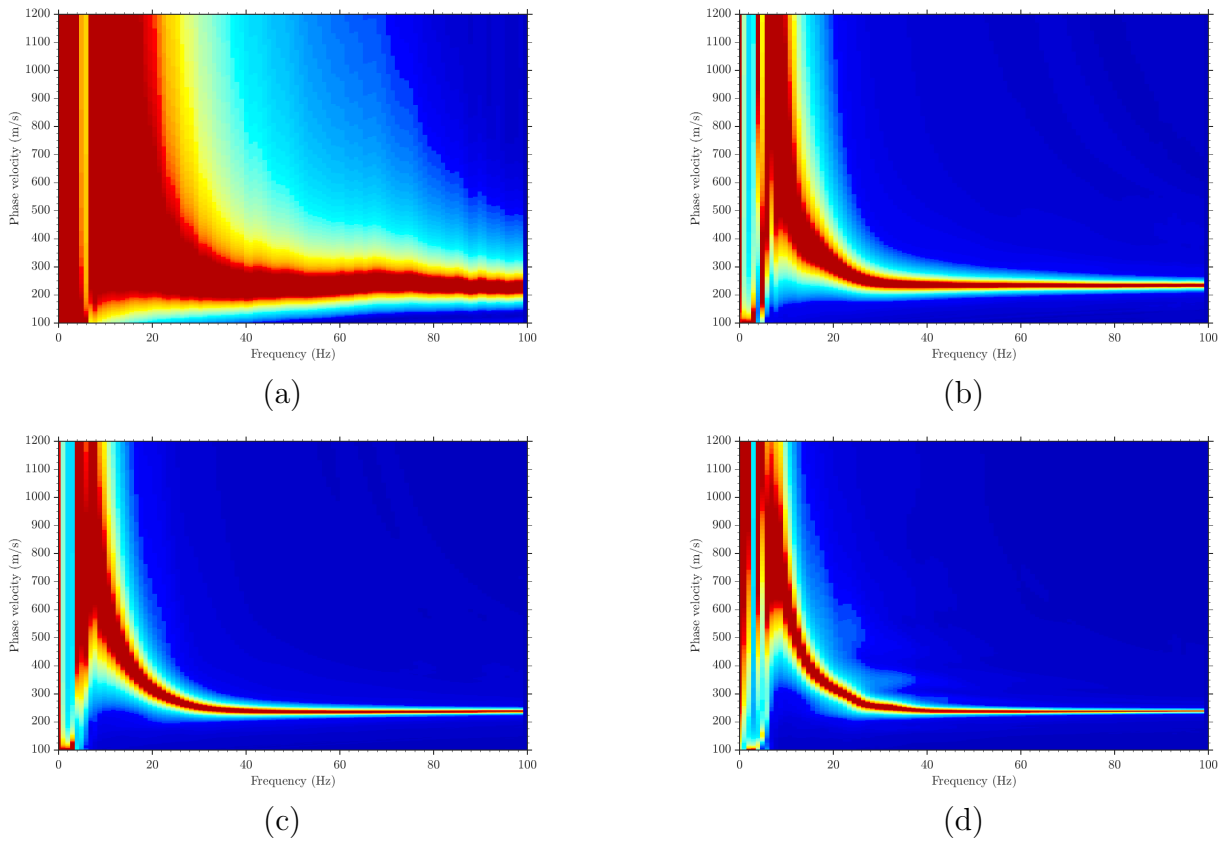
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα πεδία διασποράς όπως αυτά προέκυψαν από το SWIP για απλή και σταθμισμένη υπέρθεση από καταγραφές μεταβλητού μεγέθους παραθύρων και πολλές πηγές εκατέρωθεν του αναπτύγματος των δεκτών (MW-WSSW). Αρχικά, παρατίθενται στο Σχήμα 4.7 για τη θέση $X_{mid}=30m$ ενδεικτικά στιγμιότυπα από τις εικόνες διασποράς όπως αυτές αθροίζονται με απλή υπέρθεση ($st1$), για τα αντίστοιχα παράθυρα των σεισμικών καταγραφών του Σχήματος 4.4. Στη συνέχεια, απεικονίζονται τα αθροισμένα κυματικά πεδία για τις θέσεις διερεύνησης $X_{mid}=30m$ και $X_{mid}=80m$, στα Σχήματα 4.8 και 4.9, αντίστοιχα, όπου σημειώνεται με (a) το αποτέλεσμα της απλής υπέρθεσης ($stack=1$) και με (b) η σταθμισμένη υπέρθεση ($stack=3$). Τόσο οι παράμετροι για τον μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου, όσο και οι ρυθμίσεις για την επιλογή, παρέμειναν ίδιες όπως και στην περίπτωση των δεδομένων χωρίς υπέρθεση.

Σε σχέση με την περίπτωση χωρίς υπέρθεση, για την υπέρθεση και για τις δύο θέσης μελέτης, παρατηρείται γενικά πιο ομαλό κυματικό πεδίο με μικρότερη διακύμανση της καμπύλης διασποράς με λιγότερο θόρυβο, και πιο διευρυμένο το παράθυρο που εμφανίζονται τα ενεργειακά μέγιστα, το οποίο αποτελεί και την καμπύλη διασποράς. Όπως αναμενόταν αλλά και περιγράφεται στην μελέτη των Pasquet et al. (2021), για τη σταθμισμένη υπέρθεση προκύπτουν αποτελέσματα με πιο διευρυμένο το υψίσυχο τμήμα (Σχ. 4.8b και 4.9b), που αντιστοιχεί στο ρηχότερο εδαφικό τμήμα, σε σχέση με τα αποτελέσματα των κυματικών πεδίων που προέρχονται από δεδομένα χωρίς υπέρθεση.

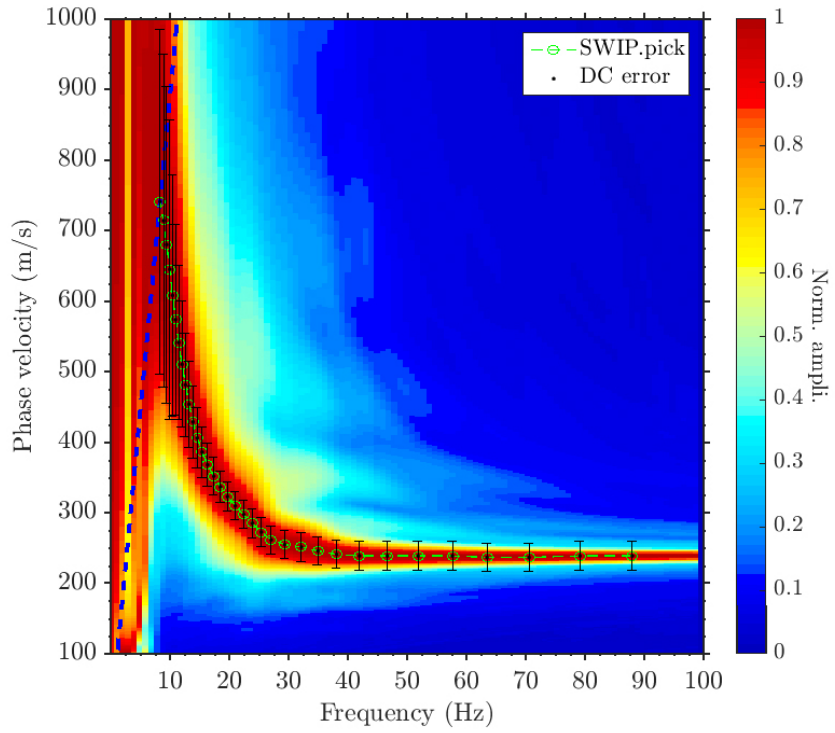
Για τη θέση $X_{mid}=30m$ η επιλογή της ταχύτητας φάσης δεν διαφοροποιείται μεταξύ των τεχνικών υπέρθεσης. Άλλωστε, η εικόνα που παρουσιάζει το κυματικό πεδίο σε αυτό το σημείο του μοντέλου, είναι πιο ομαλή και ξεκάθαρη ήδη από τα δεδομένα χωρίς υπέρθεση (Σχήμα 4.5), εν αντιθέσει με το σημείο στα 80m (Σχήμα 4.6).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το κυματικό πεδίο και η καμπύλη διασποράς στη θέση $X_{mid}=80m$, όταν εφαρμόζεται απλή ή σταθμισμένη υπέρθεση, σε σχέση με τα δεδομένα χωρίς υπέρθεση. Για το πεδίο σταθμισμένης υπέρθεσης στο Σχήμα 4.9b, παρατηρείται εμφανής συγκέντρωση στην ενέργεια, αλλά με μεγαλύτερο εύρος για τα τοπικά μέγιστα, κυρίως σε σχέση με την εικόνα χωρίς υπέρθεση του Σχήματος 4.6b, αλλά και σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με την εικόνα απλής υπ-

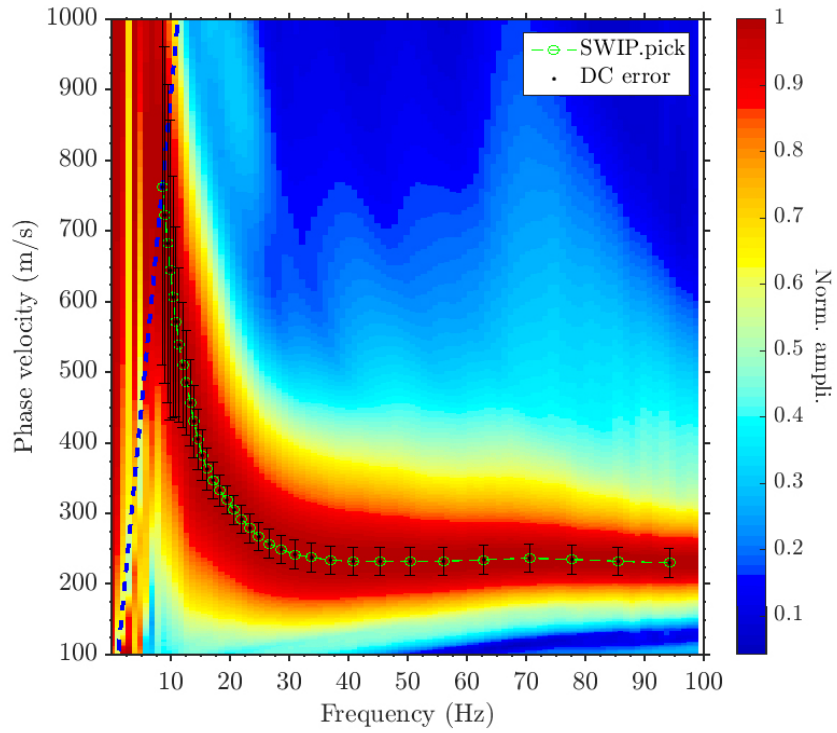
έρθεσης, στο Σχήμα 4.9a. Επίσης, για την εικόνα διασποράς με απλή υπέρθεση παραμένουν οι ενεργειακές ασυνέχειες, ενώ για το πεδίο με σταθμισμένη υπέρθεση η καμπύλη διασποράς είναι συνεχόμενη, χωρίς ασυνέχειες στη συγκέντρωση ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, για τα πεδία με υπέρθεση προκύπτει καλύτερη φασματική ανάλυση, επιτρέποντας έτσι την επιλογή της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς με πιο ξεκάθαρο τρόπο, καθώς ταυτόχρονα απομειώνεται η ενέργεια που κατανέμεται στην καμπύλη 1^{ης} ανώτερης τάξης. Ως αποτέλεσμα, περιορίζεται το φαινόμενο συνεπαφής που περιγράφηκε νωρίτερα για τις καμπύλες διασποράς χωρίς υπέρθεση. Μάλιστα, η σταθμισμένη υπέρθεση (MW-WSSW), αποδίδει το πεδίο διασποράς με μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας φάσης στο τμήμα μεταξύ 20 έως 45Hz περίπου, πάντοτε σε σχέση με την καμπύλη της απλής υπέρθεσης (Σχ. 4.9a) και αυτής χωρίς υπέρθεση (Σχ. 4.6b). Βέβαια, αυτή η εξομαλυμένη εικόνα διασποράς ενδέχεται να αλλοιώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου εδαφικού μέσου, και το αποτέλεσμα σε όρους V_S μπορεί να αποκλίνει περισσότερο από αυτό της απλής ή της καθόλου υπέρθεσης, σε σχέση με το πραγματικό. Αυτή η υπόθεση μένει να διερευνηθεί από τα αποτελέσματα της αντιστροφής που θα εξεταστούν σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 4.7: Πεδία διασποράς με απλή υπέρθεση (st1) για τη θέση Xmid30m. Δεδομένα με πηγή στα δεξιά 'R' για παράθυρα με 3, 19, 35 και 59 σεισμικά ίχνη (a-d), αντίστοιχα.

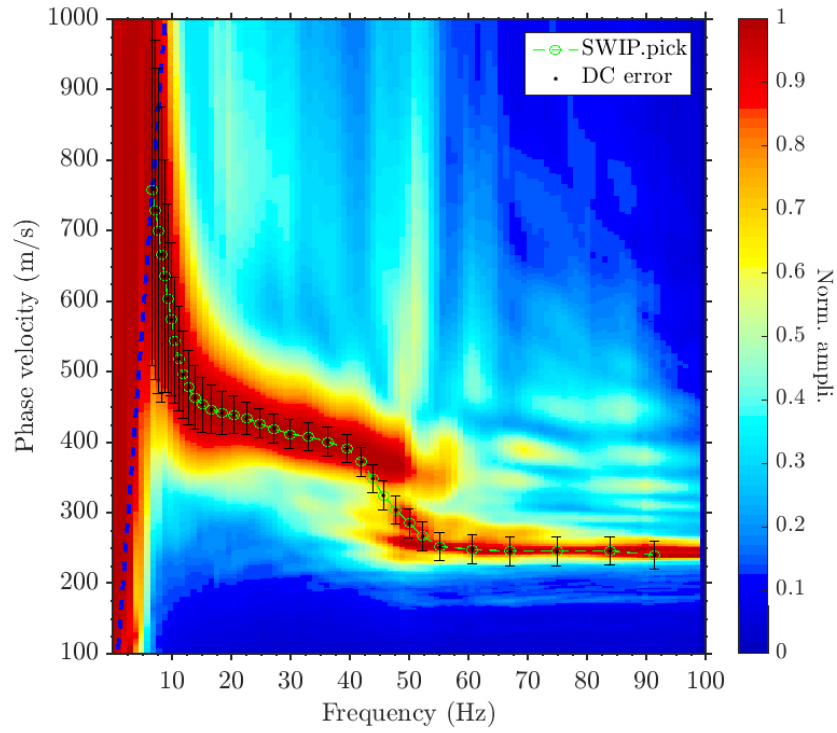


(a)

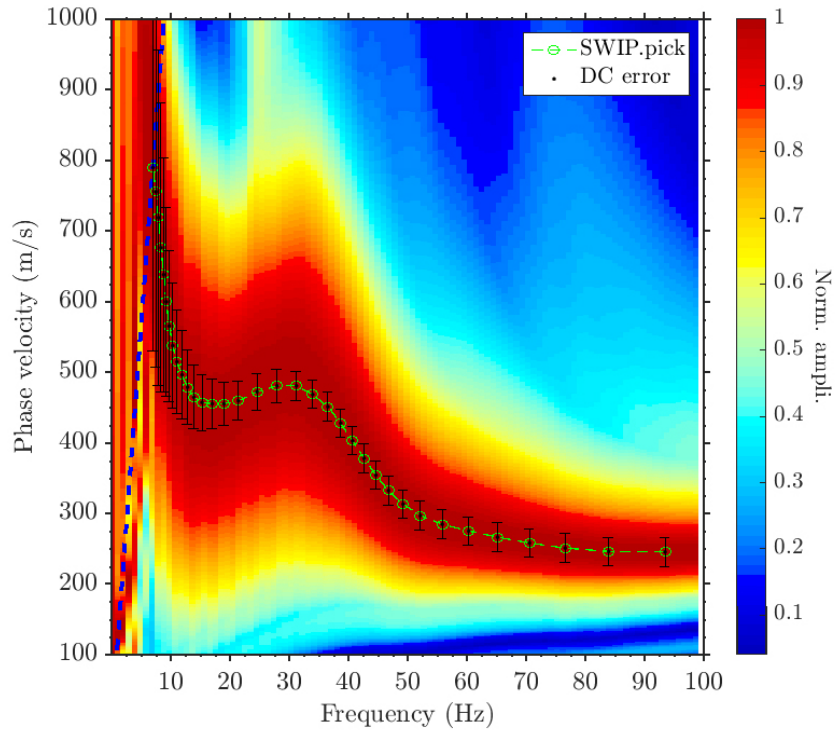


(b)

Σχήμα 4.8: Αθροισμένα πεδία διασποράς με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες από το SWIP. Θέση διερεύνησης $X_{mid}=30m$, πηγές εκατέρωθεν ('B'), δεδομένα με (a) απλή υπέρθεση - st1 και (b) σταθμισμένη υπέρθεση - st3.



(a)



(b)

Σχήμα 4.9: Αθροισμένα πεδία διασποράς με τις επιλεγμένες πειραματικές καμπύλες από το SWIP. Θέση διερεύνησης $X_{mid}=80m$, πηγές εκατέρωθεν ('B'), δεδομένα με (a) απλή υπέρθεση - st1 και (b) σταθμισμένη υπέρθεση - st3.

4.3 Επιλογή αρχικού μοντέλου - παραμετροποίηση

Η επιλογή των παραμέτρων του εδαφικού μοντέλου για την επίλυση του ευθέως προβλήματος και στη συνέχεια για την επίλυση του αντιστρόφου, αποτελεί πολλές φορές σύνθετο και όχι σαφώς καθορισμένο βήμα της επεξεργασίας, κατά το οποίο στους αλγορίθμους του SWIP περιλαμβάνεται μια αναστοχαστική διαδικασία δοκιμής (εύρους) τιμών, όπου κάποιες παράμετροι χρειάζεται να αναθεωρούνται κάθε φορά σύμφωνα με το προκύπτον αποτέλεσμα, ώστε αυτό να βελτιστοποιείται. Οι τιμές των ταχυτήτων V_S και V_P για κάθε στρώμα μαζί με την πυκνότητα ρ , το πάχος d του κάθε στρώματος καθώς και ο αριθμός τους, αποτελούν τις παραμέτρους του μοντέλου. Καθώς οι ακριβείς τιμές των ταχυτήτων και το πάχος των στρωμάτων στις θέσεις διερεύνησης του υπό εξέταση μοντέλου είναι γνωστές (Σχ. 4.1), το αρχικό μοντέλο θα παραμετροποιηθεί αντίστοιχα, ως εάν υπήρχε διαθέσιμη η αντίστοιχη a-priori πληροφορία.

Στο kriSIS οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου προσδιορίζονται με ημιαυτόματο τρόπο, καθώς δίνεται η δυνατότητα να οριστούν ο αριθμός των στρωμάτων, το πάχος τους, καθώς και εάν τα στρώματα είναι ισοπαχή ή μεταβλητού πάχους. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων V_S εκτιμάται αρχικά σε σχέση με την παρατηρούμενη ταχύτητα φάσης, ενώ μέσω σταθερού λόγου του Poisson για όλα τα στρώματα, προσδιορίζεται και η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων V_P , ενώ η πυκνότητα προσδιορίζεται εμπειρικά (Κρητικιάκης, 2010). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ορίστηκαν σταθερές τιμές των ταχυτήτων για κάθε ένα από τα 3 στρώματα (2 στρώματα συν ο ομοιογενής ημιχώρος), και σταθερή τιμή πυκνότητας, με το πάχος των στρωμάτων και τις τιμές των παραμέτρων, όπως αυτές συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1:

Αριθμός στρώματος No	Πάχος στρώματος (m)	V_S (m/s)	V_P (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν (-)
		Xmid	30 m		
1	5.50	250.0	520.4	1825	0.350
2	13.20	550.0	1144.9	1981	
3	0.00	1200.0	2498.0	2109	
		Xmid	80 m		
1	2.30	250.0	520.4	1892	0.350
2	22.60	550.0	1144.9	1995	
3	0.00	1200.0	2498.0	2097	

Πίνακας 4.1: Παράμετροι αρχικού μοντέλου του kriSIS για τις δύο θέσεις διερεύνησης.

Για το SWIP από την άλλη, η παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου ακολουθεί τη λογική που απαιτείται για την εισαγωγή των δεδομένων στον Neighborhood Algorithm (NA). Ακολουθώντας μάλιστα και τις οδηγίες από Pasquet and Bodet (2017) και Wathelet (2008), στην περίπτωση γνωστής a-priori πληροφορίας καθώς και για τη βέλτιστη ρύθμιση του αλγορίθμου NA (ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο διερευνητικός στις πιθανές λύσεις), εκκινώντας με το απλούστερο δυνατόν θεωρητικό μοντέλο, και με τον ελάχιστον αριθμό στρωμάτων. Με τις τιμές ταχύτητας που επικρατούν για τις θέσεις διερεύνησης να είναι γνωστές, ορίζεται το εύρος των μεταβλητών στην υπομονάδα *B_SWIPparam.m*.

Αρχικά, για το εξιδανικευμένο εδαφικό μοντέλο επί του οποίου γίνεται η επεξεργασία των συνθετικών σεισμικών καταγραφών, διατηρείται στον κώδικα ο προ-επιλεγμένος τύπος παραμετροποίησης `paramtype=0`, δηλαδή κρατώντας την ίδια παραμετροποίηση για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις *Xmid*. Σημειώνεται πως δεν θα εισαχθούν τιμές ταχύτητας διαμήκων κυμάτων V_P από το αντίστοιχο μοντέλο-προφίλ του Σχήματος 4.1, παρότι γνωστές, διότι σκοπός είναι να εξεταστεί σε πρώτη φάση η δυνατότητα αντιστροφής του SWIP με την ταχύτητα V_S να συνεισφέρει και να επηρεάζεται από τη διαδικασία. Χωρίς να επιτρέπονται ζώνες ανάστροφης/ χαμηλότερης ταχύτητας, η μεταβλητή `lvz` λαμβάνει μηδενική τιμή, και με τη διακύμανση της ταχύτητας εντός κάθε στρώματος να είναι σταθερή, ορίζεται `shape=1` (uniform). Επιλέγεται επίσης οι τιμές των V_P , ρ και ν να συνδέονται με αυτή της V_S στην παραμετροποίηση του αλγορίθμου `dinver` (Wathelet et al., 2020), θέτοντας την τιμή `likned=1` στα αντίστοιχα πεδία. Τελευταίο αλλά σημαντικότερο, ορίζονται τρία εδαφικά στρώματα μέσω της μεταβλητής `nlay=3` (2 στρώματα συν τον ομοιογενή ημιχώρο), ενώ επειδή δεν είναι επιθυμητό αυτά να διαιρεθούν σε επί μέρους στρώματα, έτσι ώστε υπάρχει η καλύτερη δυνατή βάση για τη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των λογισμικών, η τιμή στην μεταβλητή `nsublay` παραμένει ίση με 0. Παρατίθεται στον Πίνακα 4.2 το εύρος των τιμών των παραμέτρων, όπως αυτές ορίστηκαν στο SWIP, όπου μεταξύ άλλων σημειώνονται το ελάχιστο και μέγιστο πάχος των στρωμάτων. Αξίζει να ειπωθεί πως αυτές είναι οι τελικές τιμές των παραμέτρων, όπου μαζί με την επανεπιλογή των χαμπύλων διασποράς, κατέληξαν να είναι οι βέλτιστες στην προσπάθεια εύρεσης καλύτερου αποτελέσματος αντιστροφής στην κάθε θέση, όπως περιγράφεται και στην επόμενη ενότητα. Τέλος, σημειώνεται πως οι παράμετροι των μοντέλων του παρακάτω Πίνακα, διατηρήθηκαν ίδιες για όλες τις περιπτώσεις υπέρθεσης.

Αριθμός στρωμάτων No		Ελάχιστο πάχος στρώματος (m)	Μέγιστο πάχος στρώματος (m)	V_S (m/s)	V_P (m/s)	ρ (kg/m ³)	ν (-)
Xmid 30 m							
3	min	5.00	15.00	250.0	500.0	1800	0.3
	max	6.00	20.00	1500.0	2500.0	2100	0.4
Xmid 80 m							
3	min	2.00	20.00	250.0	500.0	1800	0.3
	max	5.00	25.00	1500.0	2500.0	2100	0.4

Πίνακας 4.2: Παράμετροι αρχικού μοντέλου του SWIP για τις δύο θέσεις διερεύνησης.

4.4 Αντιστροφή και αποτελέσματα

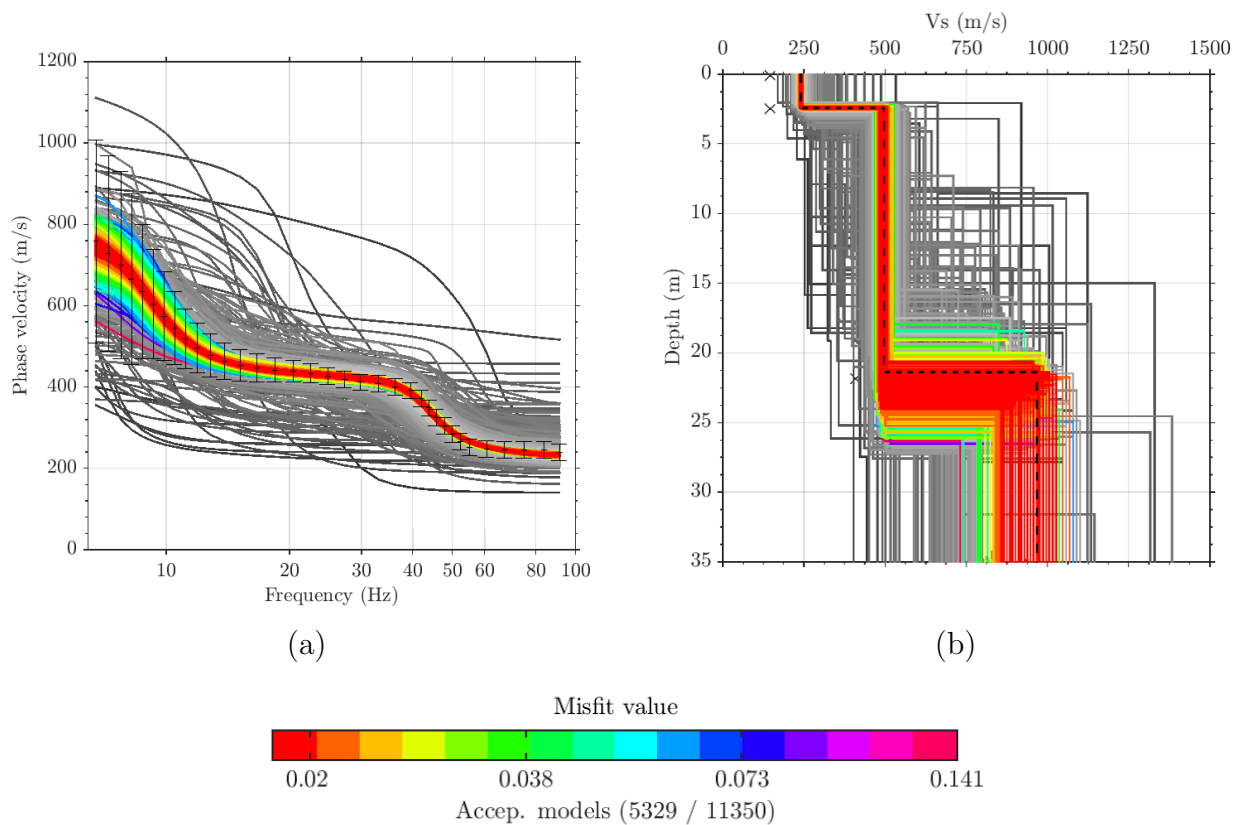
Στην παρούσα ενότητα, αρχικά θα περιγραφούν οι παράμετροι της αντιστροφής σε κάθε λογισμικό, ενώ στη συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτής, για κάθε είδος υπέρθεσης. Η επίλυση του ευθέως προβλήματος, δηλαδή του υπολογισμού των καμπύλων διασποράς οι οποίες αντιστοιχούν στα μοντέλα (Πίνακας 4.1 και Πίνακας 4.2), πραγματοποιείται εξίσου για το kriSIS και το SWIP με τη μέθοδο Thomson-Haskel (Κρητικάκης, 2010; Pasquet and Bodet, 2017).

Οι ρυθμίσεις και η εκτέλεση της αντιστροφής στο SWIP γίνεται μέσω της υπομονάδας του κώδικα *C_SWIPinv.m* αφορούν στο 'εύρος' διερεύνησης που θα επιτραπεί να έχει ο αλγόριθμος NA, το οποίο αποτελεί εργαλείο του *dinver* στο λογισμικό *geopsy*. Αρχικά, θα πρέπει να εξασφαλιστεί πως ο τύπος της αντιστροφής ταυτίζεται με αυτόν της προηγούμενης ενότητας, ορίζοντας δηλαδή *paramtype=0*, ώστε να ταυτίζονται ο τρόπος με τον οποίο έχουν καθοριστεί οι μεταβλητές του θεωρητικού μοντέλου νωρίτερα στην υπομονάδα *B_SWIPparam.m*, με το είδος του μοντέλου για την αντιστροφή. Ο αλγόριθμος NA εφαρμόστηκε μία φορά, θέτοντας *nrun=1*, εκτελώντας 150 επαναλήψεις γέννησης μοντέλων (κελιά Voronoi) (*itmax=150*), ενώ επιλέχθηκε να παραχθούν 75 μοντέλα σε κάθε επανάληψη μέσω της μεταβλητής *ns*, στην οποία εισήχθη η αντίστοιχη τιμή. Τα αρχικά μοντέλα μέσω του αλγορίθμου Monte-Carlo καθορίζουν τα όρια του παραμετρικού χώρου (*ns0=100*), ενώ ορίζονται 50 κελιά για επανάληψη της δειγματοληψίας (*nr=50*) προκειμένου να

δημιουργηθεί νέος παραμετρικός υπο-χώρος, του οποίου το μοντέλο γίνεται αποδεκτό ύστερα από 2 τυχαίες διαδρομές εύρεσης βέλτιστης λύσης εντός του (βλ. Σχήμα 1 από μελέτη του Wathelet (2008)). Οι παραπάνω ρυθμίσεις παραμένουν ίδιες σε κάθε περίπτωση υπέρθεσης (st0-1-3). Τελικά παράγονται 11450 μοντέλα ($=100+150 \times 75+2 \times 50$), εκ των οποίων τα 11350 προέρχονται από τον NA αλγόριθμο και είναι αυτά που χρησιμοποιούνται ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Στο Σχήμα 4.10, παρατίθεται ενδεικτικά το αποτέλεσμα της αντιστροφής για την θέση διερεύνησης $X_{mid}=80m$ και την απλή υπέρθεση των δεδομένων. Παρουσιάζονται τόσο οι καμπύλες διασποράς όσο και η αντίστοιχη κατανομή της V_S με το βάθος. Στο σχήμα αυτό, απεικονίζεται το σύνολο των 11350 μοντέλων που έχουν προκύψει από τον αλγόριθμο αντιστροφής, με την χρωματική κλίμακα να αποδίδει τα 5329 αποδεκτά μοντέλα, όπως αυτή προέκυψε από την τιμή της συνάρτησης σφάλματος (MF), ενώ η μαύρη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο βέλτιστο μοντέλο, δηλαδή σε αυτό με την ελάχιστη τιμή σφάλματος. Κατ' επέκταση, τα υπόλοιπα μοντέλα που αποτυπώνονται με κλίμακα του γκρι, έχουν απορριφθεί από τον αλγόριθμο NA. Αξίζει να σημειωθεί πως το αντίστοιχο αποτέλεσμα της θέσης $X_{mid}30$, το οποίο αφορά επίσης δεδομένα απλής υπέρθεσης (st1), απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων της αντιστροφής με το SWIP, για κάθε περίπτωση υπέρθεσης δεδομένων και σε κάθε θέση διερεύνησης, ενώ περιλαμβάνεται επίσης το πλήθος των αποδεκτών μοντέλων με την αντίστοιχη ελάχιστη τιμή σχετικού σφάλματος, καθώς και ο χρόνος που απαιτήθηκε για την αντιστροφή. Τα δεδομένα αφορούν τόσο περιπτώσεις αντιστροφής χωρίς υπέρθεση (st0), όσο και αυτές με υπέρθεση, απλή (st1) και σταθμισμένη (st3). Γίνεται διακριτή η μείωση στα αποδεκτά μοντέλα της θέσης $X_{mid}80$, όπου η καμπύλη διασποράς παρουσιάζει λιγότερο ομαλή διακύμανση προς το υψίσυχνο τμήμα της.

Σημειώνεται εδώ πως η επεξεργασία των δεδομένων, η αντιστροφή και η παραγωγή των αποτελεσμάτων, τόσο για τα συνθετικά δεδομένα όσο και για τα δεδομένα πεδίου του επόμενου κεφαλαίου, εκτελέστηκαν σε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή 8 πυρήνων Intel® i5-8265U στα 1.60GHz, 8GB DDR4 μνήμη RAM στα 2666MHz, δίσκο SSD M.2 PCIe NVMe, σε λειτουργικό σύστημα Linux Ubuntu 22.04.1 LTS. Επίσης, έγινε χρήση της R2014b έκδοσης της MATLAB™, ενώ η έκδοση του κώδικα SWIP που ήταν η 2.2.1b, και του geopsy η 3.3.3, με την έκδοση 5.15 για τις Qt βιβλιοθήκες, ενώ το λογισμικό SU είχε την έκδοση 4426R.



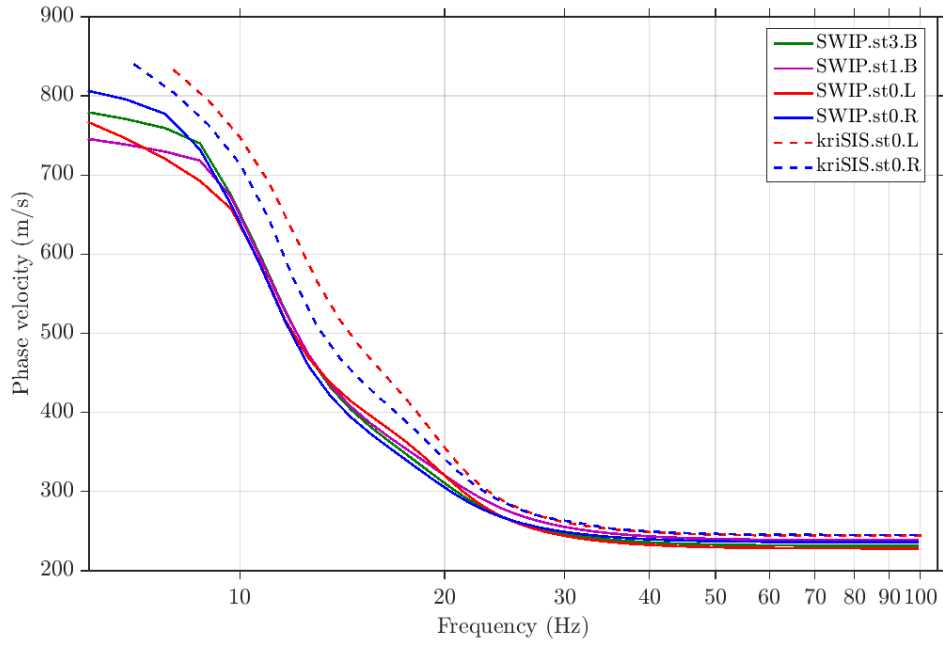
Σχήμα 4.10: Αποτέλεσμα 1D αντιστροφής του αλγόριθμου NA, για τη θέση $X_{mid}=80m$ με απλή υπέρθεση (st1). Οι υπολογισμένες καμπύλες διασποράς (a) και οι αντίστοιχες κατανομές ταχύτητας με το βάθος (b). Συνολικά παρήχθησαν 11350 μοντέλα, εκ των οποίων τα 5329 θεωρήθηκαν αποδεκτά (με χρώμα) ενώ τα υπόλοιπα απορρίφθηκαν (με κλίμακα του γκρι), όπως σημειώνεται και στην κλείδα των τιμών σφάλματος (misfit). Με μαύρη διακεκομμένη γραμμή οριοθετείται το βέλτιστο μοντέλο με την ελάχιστη τιμή σφάλματος (best model).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής από το kriSIS και το SWIP. Με την συγκεντρωτική απεικόνιση, επιτρέπεται η οπτική αξιολόγηση με εποπτικό τρόπο, καθώς για κάθε θέση να συγκρίνεται ταυτόχρονα οποιαδήποτε αποτέλεσμα μεταξύ διαφορετικών προσεγγίσεων. Στο Σχήμα 4.11 περιλαμβάνονται οι υπολογισμένες καμπύλες διασποράς από τα δύο λογισμικά, για τις θέσεις $X_{mid}30$ και $X_{mid}80$. Τα δεδομένα χωρίς υπέρθεση σημειώνονται ως *.st0.* και με κατάληξη 'R' ή 'L' ανάλογα με τη θέση της πηγής, ενώ τα δεδομένα με υπέρθεση που προέρχονται από το SWIP, αναγράφονται ως *.st1.* και *.st3.*, ανάλογα την υπέρθεση, ενώ η κατάληξη 'B' υποδηλώνει τις εκατέρωθεν πηγές.

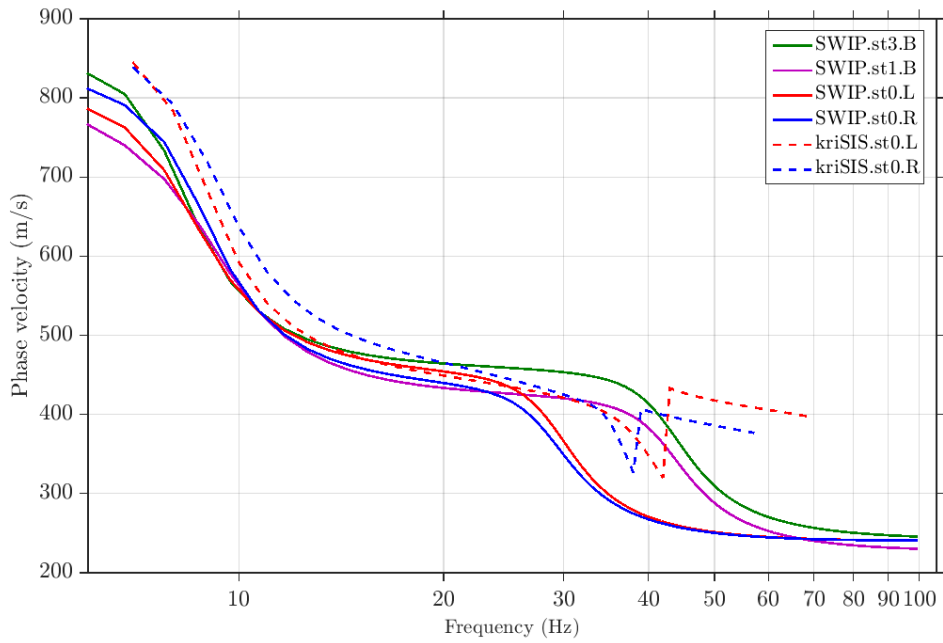
Υπέρθεση πεδίων	Πηγή	Αποδεκτά μοντέλα No	Ελάχιστο σφάλμα (-)	Χρόνος αντιστροφής (sec.)
Xmid 30 m				
st0	'L'	2402	0.028	43.1
	'R'	5537	0.023	44.7
st1	'B'	8030	0.011	46.8
st3		8097	0.016	47.0
Xmid 80 m				
st0	'L'	2446	0.018	45.3
	'R'	931	0.021	42.4
st1	'B'	5329	0.016	45.8
st3		143	0.024	42.2

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα αντιστροφής του SWIP: αποδεκτά μοντέλα, ελάχιστο παρατηρούμενο σφάλμα και χρόνος αντιστροφής, για όλες τις περιπτώσεις υπέρθεσης.

Σημειώνεται για την απεικόνιση των καμπύλων διασποράς (Σχ. 4.11), έγινε επιλογή λογαριθμικής κλίμακας για τον οριζόντιο άξονα της συχνότητας, προκειμένου να αναδειχθεί με περισσότερη λεπτομέρεια η διαφοροποίηση μεταξύ των, αφού στο υψίσυχνο τμήμα τους παρατηρείται γενικότερα σύγκλιση. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.12 περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα με την κατανομή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε σχέση με το βάθος, με τον συμβολισμό των λογισμικών και κάθε διαφορετικής προσέγγισης να παραμένει ο ίδιος, όπως στο Σχήμα 4.11. Όμοια, για τη θέση Xmid30 αντιστοιχεί το Σχήμα 4.12a και για τη θέση Xmid80, το 4.12b, παραθέτοντας επιπλέον και την πραγματική κατανομή της V_S , όπως ακριβώς προκύπτει για τις θέσεις διερεύνησης του συνθετικού μοντέλου των τριών εδαφικών στρωμάτων (Σχήμα 4.1).

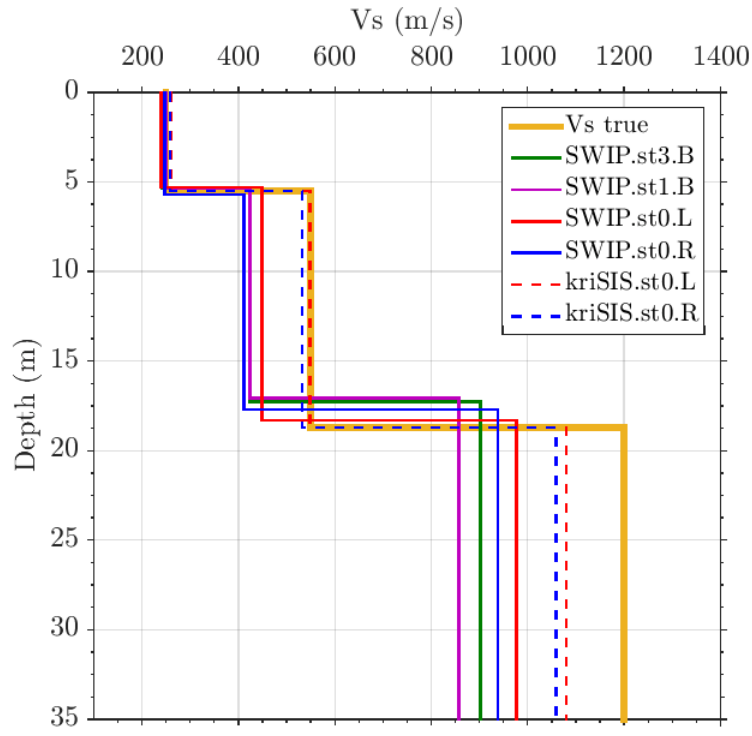


(a)

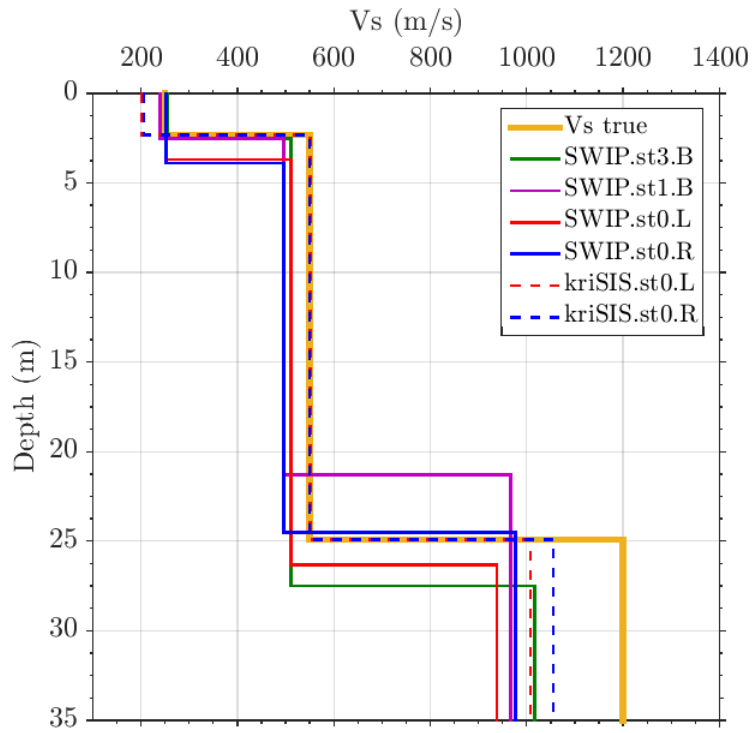


(b)

Σχήμα 4.11: Υπολογισμένες καμπύλες διασποράς για (a) τη θέση Xmid30m και (b) για Xmid80m από το kriSIS (διακεκομμένη γραμμή) και το SWIP (συμπαγής γραμμή). Περιλαμβάνονται οι θεωρητικές καμπύλες χωρίς υπέρθεση (st0), όπου σημειώνονται με κόκκινο χρώμα για πηγές αριστερά (L), και με μπλε για δεξιά (R). Το μωβ χρώμα αντιστοιχεί σε απλή υπέρθεση (st1) και το πράσινο σε σταθμισμένη (st3), με πηγές εκατέρωθεν (B). Τα αποτελέσματα του SWIP αφορούν τα μοντέλα με την ελάχιστη τιμή σφάλματος.



(a)

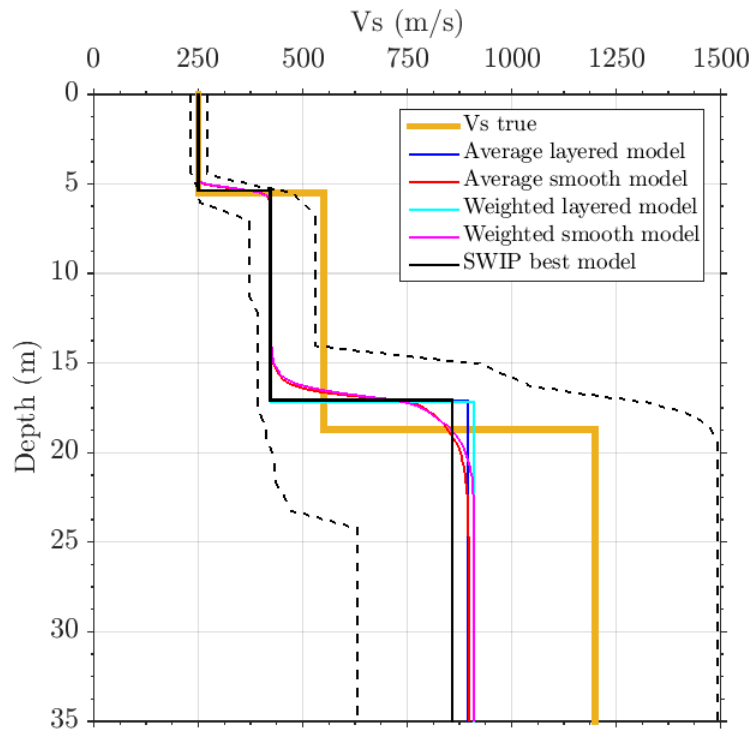


(b)

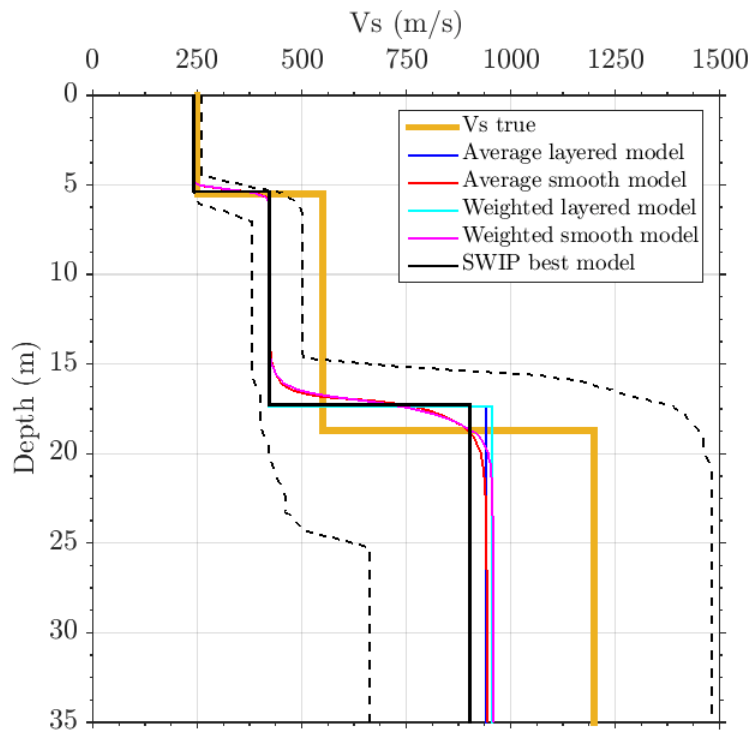
Σχήμα 4.12: Κατανομή ταχύτητας V_s σε σχέση με το βάθος για (a) τη θέση X_{mid30m} και (b) για X_{mid80m} από το kriSIS (διακεκομμένη γραμμή) και το SWIP (συμπαγής γραμμή). Περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα αντιστροφής από δεδομένα χωρίς υπέρθεση (st0), όπου σημειώνονται με κόκκινο χρώμα για πηγές αριστερά (L) και με μπλε για δεξιά (R). Το μωβ χρώμα αντιστοιχεί σε απλή υπέρθεση (st1) και το πράσινο σε σταθμισμένη (st3), με πηγές εκατέρωθεν (B). Τα αποτελέσματα του SWIP αφορούν τα μοντέλα με την ελάχιστη τιμή σφάλματος.

Στο σημείο αυτό, συμπεριλαμβάνεται ένας ακόμη τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων από το SWIP. Πέραν από το βέλτιστο μοντέλο ταχύτητας (best model) το οποίο αντιστοιχεί στη χαμηλότερη τιμή σφάλματος, υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστούν και να εξαχθούν τα μοντέλα μέσης τιμής (average) και σταθμισμένα (weighted) μοντέλα ταχύτητας, για στρωματοποιημένα (layered) αλλά και ομαλή (smooth) μεταβολή της. Αυτό, μπορεί παραχθεί για το κάθε εξεταζόμενο ενδιαμέσο σημείο Xmid. Στην πράξη προκύπτει, πως αυτός ο τρόπος απόδοσης των αποτελεσμάτων είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την σύνθεση πολλών διαδοχικών μονοδιάστατων αποτελεσμάτων σε τομή δύο διαστάσεων. Καθώς στο βέλτιστο μοντέλο (best), η ταχύτητα V_S ενδέχεται και προβλέπεται να μεταβάλλεται με κλιμακωτή και απότομη μορφή, ο ομαλός (smooth) τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων επιτρέπει καλύτερα την αναγνώριση δομών και πλευρικών μεταβολών. Αυτό ενδέχεται να μην ήταν εφικτό εάν τα αποτελέσματα που προέρχονται από το βέλτιστο μοντέλο, έχουν διακριτή μορφή της ταχύτητας, σε κάθε διαδοχικό σημείο Xmid κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.13 και 4.14 για τις θέσεις Xmid30 και Xmid80, αντίστοιχα, για δεδομένα απλής (st1) και σταθμισμένης (st3) υπέρθεσης, ενώ την αξιοποιείται σε επόμενη ενότητα και κεφάλαιο, για την παρουσίαση αποτελεσμάτων σε δύο διαστάσεις. Προφανώς, ο συγκεκριμένος τρόπος απόδοσης της κατανομής της V_S , δεν αφορά μόνο τα δεδομένα με υπέρθεση, καθώς μπορεί να αποδοθεί και στην περίπτωση των δεδομένων χωρίς υπέρθεση (SWIP.st0*).

Τέλος, ο τρόπος αυτός απόδοσης της διακύμανσης της ταχύτητας, επιτρέπει να αποτυπωθούν τα όρια του αρχικού παραμετρικού χώρου που ορίζεται από τα ακραία μοντέλα ταχύτητας, ο οποίος προκύπτει από την Monte-Carlo. Στο Xmid30 του Σχήματος 4.13 παρατηρείται μια πιο διευρυμένη κατανομή του παραμετρικού χώρου για το βαθύτερο εδαφικό στρώμα, τόσο για απλή όσο και για σταθμισμένη υπέρθεση. Αυτό το μοτίβο δυναμικής κλιμάκωσης των πιθανών αποτελεσμάτων σε κάθε επανάληψη (άρα και διεύρυνσης του παραμετρικού χώρου) από τον αλγόριθμο NA, περιγράφεται στην εργασία του Wathelet (2008). Αποτελεί ένδειξη καλύτερης διερεύνησης με λιγότερο αυστηρά παραμετρικά όρια, τα οποία μάλιστα μπορούν να ξεπεραστούν από αυτά που έχουν οριστεί από τον αρχικό παραμετρικό χώρο της Monte-Carlo. Αντίστοιχα, για την σταθμισμένη υπέρθεση στο Xmid80 (Σχ. 4.14(b)), περιλαμβάνεται στον παραμετρικό χώρο η πραγματική V_S για όλα τα στρώματα, με την κατανομή να συμπίπτει καλύτερα σε σχέση με την απλή υπέρθεση.

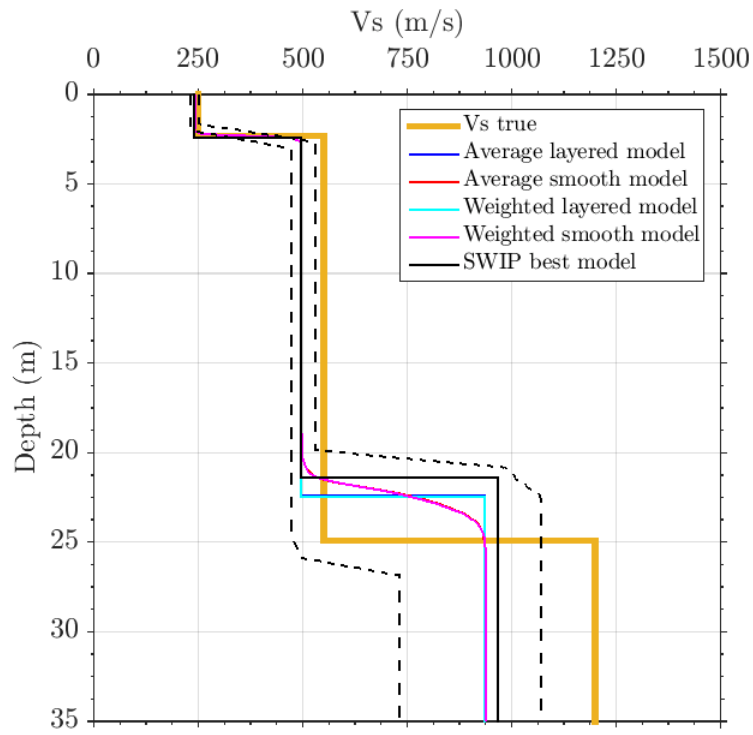


(a)

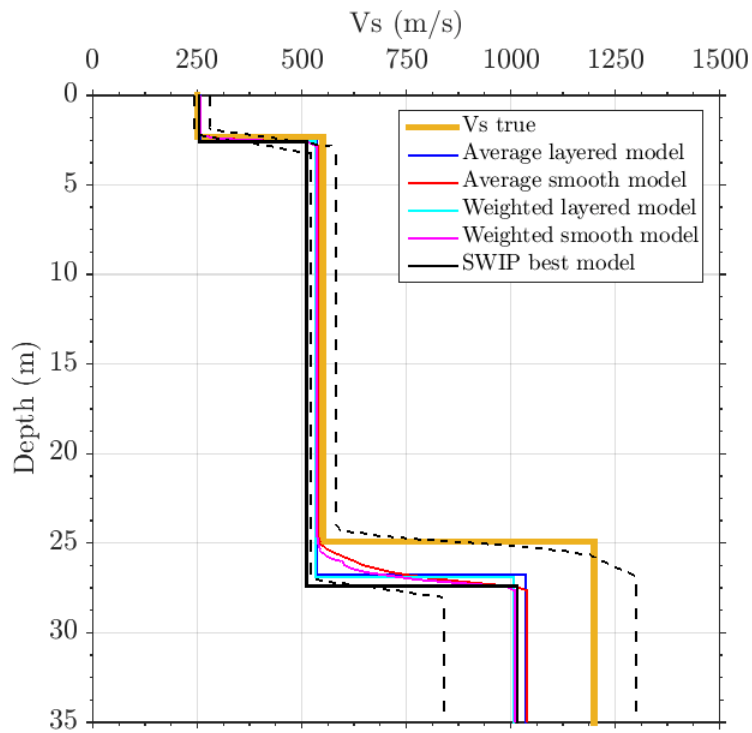


(b)

Σχήμα 4.13: Αποτελέσματα από το SWIP μεταβολής ταχύτητας V_s συναρτήσει του βάθους, θέση X_{mid30m} . Παρουσιάζονται, επί του πραγματικού μοντέλου ταχύτητας εδάφους, τα μοντέλα μέσης τιμής και τα σταθμισμένα, για στρωματοποιημένη και ομαλή μεταβολή της ταχύτητας, τα οποία περιλαμβάνονται από τα όρια του αρχικού παραμετρικού χώρου. Δεδομένα (a) με απλή και (b) με σταθμισμένη υπέρθεση.



(a)



(b)

Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα από το SWIP μεταβολής ταχύτητας V_s συναρτήσει του βάθους, θέση X_{mid80m} . Παρουσιάζονται, επί του πραγματικού μοντέλου ταχύτητας εδάφους, τα μοντέλα μέσης τιμής και τα σταθμισμένα, για στρωματοποιημένη και ομαλή μεταβολή της ταχύτητας, τα οποία περιλαμβάνονται από τα όρια του αρχικού παραμετρικού χώρου. Δεδομένα (a) με απλή και (b) με σταθμισμένη υπέρθεση.

4.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή θα σχολιαστούν και θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τις δύο θέσεις διερεύνησης, όπως αυτά προέκυψαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω. Αρχικά, θα εξεταστούν οι καμπύλες διασποράς που επιλέχθηκαν και υπολογίστηκαν, με ποσοτική εκτίμηση της μεταξύ τους διαφοράς. Στη συνέχεια θα μελετηθούν τα αποτελέσματα κατανομής της V_S , εστιάζοντας στο πως αυτά διαφοροποιούνται από τις τεχνικές υπέρθεσης του SWIP. Τέλος, θα γίνει μια συνολική επισκόπηση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε.

Προκειμένου να αποτιμηθεί η διαφορά μεταξύ των υπολογισμένων καμπύλων διασποράς που προέρχονται από διαφορετική προσέγγιση, δηλαδή χωρίς υπέρθεση (st0), με απλή (st1) και σταθμισμένη (st3) υπέρθεση, καθώς και να ποσοτικοποιηθεί η μεταξύ τους απόκλιση (Σχήμα 4.11), θα υπολογιστεί η μέση τετραγωνική τους διαφορά σε όρους m/s, σύμφωνα με τη Σχέση 4.1:

$$\text{RMS}(m/s) = \sqrt{\frac{1}{n_{V_{\Phi 1}}} \sum_1^{n_{V_{\Phi 1}}} (V_{\Phi 1} - V_{\Phi 2})^2} \quad (4.1)$$

όπου $V_{\Phi 1}$ η ταχύτητα φάσης αναφοράς με την οποία συγκρίνεται η προσαρμογή της $V_{\Phi 2}$, και $n_{V_{\Phi 1}}$ είναι το σύνολο των παρατηρούμενων τιμών της $V_{\Phi 1}$. Επιπλέον, θα υπολογιστεί η μέση εκατοστιαία τετραγωνική διαφορά, όπως εκφράζεται από τη Σχέση 4.2, ώστε να εκτιμηθεί η απόκλιση σε ποσοστιαίο μέγεθος και ανεξαρτήτως του μεγέθους των μετρούμενων τιμών. Έτσι, κατ' επέκταση της 4.1, θα ισχύει:

$$\text{RMSpe}(\%) = \sqrt{\frac{1}{n_{V_{\Phi 1}}} \sum_1^{n_{V_{\Phi 1}}} \left(\frac{V_{\Phi 1} - V_{\Phi 2}}{V_{\Phi 1}} \right)^2} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Σημειώνεται πως ο υπολογισμός του RMS έπρεπε να γίνει σε δεδομένα με διαφορετικό αριθμό στοιχείων, αφού το πλήθος των τιμών των θεωρητικών καμπύλων μεταξύ του kriSIS και του SWIP διέφερε, καθώς το δεύτερο παράγει πιο "πυκνά" αποτελέσματα, αφού διακριτοποιεί το κάθε στρώμα σε μικρότερα μεσοδιαστήματα δz , πάχους 0.2m. Ως εκ τούτου, προηγήθηκε γραμμική παρεμβολή στα δεδομένα τιμών ταχύτητας V_S με τον λιγότερο αριθμό στοιχείων (kriSIS) ώστε να ορίζονται και να υπολογίζονται για τις αντίστοιχες τιμές που προέρχονται από το SWIP. Ο

Πίνακας 4.4 αντιστοιχεί στη σύγκριση των καμπύλων διασποράς χωρίς υπέρθεση (st0), και ο Πίνακας 4.5, στην σύγκριση των καμπύλων διασποράς με απλή (st1) και σταθμισμένη υπέρθεση (WSSW-st3).

Για την περίπτωση χωρίς υπέρθεση (st0), συγκρίνονται κάθε φορά οι καμπύλες διασποράς από τα δύο λογισμικά, με τιμές αναφοράς την ταχύτητα φάσης του kriSIS, όπως αυτές προέκυψαν για κάθε θέση πηγής (αριστερά - 'L' και δεξιά - 'R'). Αναφορικά με τη δεύτερη περίπτωση, παρατίθεται στον Πίνακα 4.5. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε θέση Xmid γίνεται σύγκριση της καμπύλης διασποράς (SWIP) από σταθμισμένη υπέρθεση (st3), απλή υπέρθεση (st1), και χωρίς υπέρθεση (st0) τόσο για το SWIP όσο και για το kriSIS, οι οποίες προέρχονται από τις αντίστοιχες πηγές αριστερά - 'L' και δεξιά - 'R'. Και για τους δύο Πίνακες, οι συγκρίσεις παρατίθενται σε όρους ταχύτητας (m/s) και ποσοστιαία (%) για κάθε θέση Xmid, όπου σημειώνεται στην αρχή κάθε στήλης η θέση της σεισμικής πηγής. Υπενθυμίζεται πως τα δεδομένα με υπέρθεση προέρχονται από μεταβλητού μεγέθους πολλαπλά παράθυρα, με τις πηγές να προέρχονται εκατέρωθεν του σημείου αναφοράς, οπότε σημειώνονται ως 'B' (Both) την αντίστοιχη στήλη. Οι σχετικές διαφορές σαφώς μεγαλύτερες για τη θέση Xmid80 και στους δύο Πίνακες, στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 20 και 45Hz (Σχ. 4.9), αποδίδονται στο φαινόμενο της συνεπαφής, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 4.2.1, και όπως αυτό αποδόθηκε από το μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου καθώς και την υπέρθεση των πεδίων διασποράς. Συγκρίνοντας τις καμπύλες με σταθμισμένη υπέρθεση (Πίνακας 4.5), παρατηρούνται γενικά μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ δεδομένων χωρίς υπέρθεση (st0), σε σχέση με την απλή υπέρθεση (st1), αφού η στάθμιση τροποποιεί σε μεγάλο βαθμό τις καμπύλες διασποράς, προκειμένου να ανταποκρίνονται καλύτερα στην πλευρική ανομοιογένεια του μέσου.

Xmid (m)	RMS			
	(m/s)		(%)	
	L	R	L	R
30	37.94	24.62	8.44	5.89
80	114.42	95.44	27.71	23.84

Πίνακας 4.4: Μέση τετραγωνική διαφορά για τις καμπύλες διασποράς χωρίς υπέρθεση (st=0), μεταξύ kriSIS (ως $V_{\Phi 1}$) και SWIP (ως $V_{\Phi 2}$).

Προσέγγιση	L	RMS			RMS		
		(m/s)		B	B		B
		R			L	R	
Xmid 30 m							
SWIP - st1			12.45				3.16
SWIP - st0	10.34	9.51		1.97	2.01		
kriSIS - st0	35.31	24.36		7.87	6.47		
Xmid 80 m							
SWIP - st1			25.30				6.43
SWIP - st0	58.78	61.50		14.58	15.31		
kriSIS - st0	82.76	53.75		20.25	13.10		

Πίνακας 4.5: Μέση τετραγωνική διαφορά για τις καμπύλες διασποράς με υπέρθεση: απλή - st1 και σταθμισμένη - st3, μεταξύ του SWIP και του kriSIS, με τιμές αναφοράς την καμπύλη του SWIP - st3 (ως $V_{\Phi 1}$).

Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την αντιστροφή στο SWIP (Πίνακας 4.3), είναι παραπλήσιος σε όλες τις περιπτώσεις υπέρθεσης, με μέσο όρο τα 45 δευτερόλεπτα. Σημειώνεται πως ο χρόνος αυτός αφορά μόνο την διαδικασία της αντιστροφής, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα υπόλοιπα στάδια επεξεργασίας. Ο απαιτούμενος χρόνος αντιστροφής αυξάνεται από τα 46.8 στα 47.0 δευτερόλεπτα, όπου εντοπίζεται μεγαλύτερο πλήθος αποδεκτών μοντέλων, και ισούται με 8030 (απλής υπέρθεσης) και με 8097 (σταθμισμένης υπέρθεσης), για τη θέση Xmid30. Αντίθετα, στην θέση Xmid80, όπου το πλήθος των αποδεκτών μοντέλων ισούται με 931 (χωρίς υπέρθεση με πηγή στα δεξιά), και με 143 (σταθμισμένη υπέρθεση), προκύπτουν 42.4 και 42.2 δευτερόλεπτα, αντίστοιχα. Αυτό, αποδεικνύει πως στην περίπτωση μιας πιο ομαλά μεταβαλλόμενης καμπύλης διασποράς, όπως για τη θέση Xmid30m, ο αλγόριθμος NA γίνεται πιο διερευνητικός και παράγει περισσότερα μοντέλα για τα οποία η καμπύλη διασποράς συγκλίνει στην παρατηρούμενη, εντός των αποδεκτών ορίων. Ως εκ τούτου, ο υπολογιστικός χρόνος προκύπτει μεγαλύτερος. Στην περίπτωση της θέσης Xmid80m, ο αλγόριθμος καταλήγει σε συντομότερο χρόνο στο τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης σφάλματος (MF), καθώς, λόγω της δυσκολότερης προσαρμογής μεταξύ παρατηρούμενης και υπολογιζόμενης καμπύλης διασποράς, παράγονται λιγότερα αποδεκτά μοντέλα που.

Για τη θέση διερεύνησης στα 30m προκύπτουν σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3 περισσότερα αποδεκτά μοντέλα για την περίπτωση με υπέρθεση σε σχέση με αυτή χωρίς υπέρθεση. Στη θέση Xmid80, μπορεί να παρατηρηθεί πιο ιδιαίτερη διακύμανση, και περισσότερα αποδεκτά μοντέλα εντοπίζονται μόνο για την απλή υπέρθεση (st1), ενώ για τη σταθμισμένη (st3), παρατηρούνται τα λιγότερα

αποδεκτά μοντέλα από κάθε περίπτωση υπέρθεσης και για τις δύο θέσεις διερεύνησης. Καθώς οι παράμετροι αντιστροφής παραμένουν ίδιες για όλες τις προσεγγίσεις υπέρθεσης της θέσης Xmid80, όπως συμβαίνει και για τη θέση Xmid30, αυτό αποδίδεται στην ιδιαίτερη μορφή της σταθμισμένης (WSSW) καμπύλης διασποράς που έχει επιλεγεί (Σχ.4.9). Όμως, το μοντέλο αυτό (st3) παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση από την πραγματική κατανομή της V_S (Σχ. 4.12b) σε σχέση με τα υπόλοιπα του SWIP για τη θέση αυτή. Αυτό προκύπτει λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη και το Σχήμα 4.14b, όπου τόσο η περιβάλλουσα όσο και οι διαφορετικές αποδόσεις της κατανομής της V_S , προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματική V_S , σε σχέση με την απλή υπέρθεση (st1 - Σχ. 4.14a).

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ξανά πως οι μέθοδοι αντιστροφής των δύο λογισμικών είναι διαφορετικές: το kriSIS χρησιμοποιεί μια αιτιοκρατική προσέγγιση ενώ το SWIP αξιοποιεί μια, κατά βάση, στοχαστική. Ως εκ τούτου, είναι αναμενόμενο και λογικό, τα μεταξύ τους αποτελέσματα να διαφέρουν ως προς την κατανομή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, όπως αποτυπώνεται άλλωστε και το Σχήμα 4.12. Γενικά στο σύνολό τους, τα αποτελέσματα της κατανομής της ταχύτητας για τη θέση Xmid30 (Σχ. 4.12a), παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια σε σχέση με αυτά της θέσης Xmid80 (Σχ. 4.12b), παρά το γεγονός ότι μπορεί να προέρχονται από διαφορετική προσέγγιση στα δεδομένα, δηλαδή χωρίς ή με υπέρθεση, τόσο για το kriSIS όσο και για το SWIP. Αυτό, ήταν αναμενόμενο λόγω της ομοιότητας των αντίστοιχων πεδίων διασποράς, (Σχήματα 4.6 και 4.8), όπου για τη θέση Xmid30, παρατηρείται πιο ομαλή μετάβαση της καμπύλης διασποράς από τις χαμηλές συχνότητες προς τις υψηλές. Επιπλέον, στη θέση των 30m, η ταχύτητα στο πρώτο στρώμα και το πάχος του 1^{ου} στρώματος, ταυτίζεται εξαιρετικά για όλες τις προσεγγίσεις των δύο λογισμικών (Σχ. 4.12a).

Σε σχέση με την πραγματική κατανομή της ταχύτητας ως προς το βάθος, όπως αυτή απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα στο Σχήμα 4.12, μπορεί να ειπωθεί πως το kriSIS γενικά έχει αποδώσει καλύτερα την τιμή της V_S σε σχέση με το SWIP, ιδίως για το 2^ο και 3^ο εδαφικό στρώμα, και στις δύο θέσεις διερεύνησης. Η συγκεκριμένη παρατήρηση ήταν αναμενόμενη, αφού στο αρχικό μοντέλο του kriSIS έχει οριστεί το ακριβές πάχος και ο αριθμός των στρωμάτων, όπως αυτά σημειώνονται στον Πίνακα 4.1. Εν αντιθέσει, το SWIP πρακτικά αντιστρέφει (εκτός από την ταχύτητα V_S) και για το πάχος του προκαθορισμένου αριθμού στρωμάτων, όπως ορίστηκε στην περίπτωση των

συνθετικών δεδομένων.

Αναφορικά με το SWIP, παρατηρείται σταθερό μοτίβο μείωσης της ταχύτητας στο 3^ο στρώμα για τη θέση διερεύνησης των 30m, στα μοντέλα χωρίς υπέρθεση προς τα μοντέλα με υπέρθεση, με αυτό της σταθμισμένης υπέρθεσης (st3) να υπερτερεί αυτού της απλής (st1), αποδίδοντας καλύτερα την ταχύτητα και το βάθος στο οποίο εντοπίζεται το τρίτο στρώμα. Για το δεύτερο στρώμα στη θέση αυτή, όλα τα μοντέλα διαφορετικής προσέγγισης του SWIP φαίνεται πως έχουν υποεκτιμήσει την ταχύτητα, αφού από τα 550m/s της πραγματικής τιμής, αυτή κυμαίνεται μεταξύ 400-450m/s.

Στη θέση $X_{mid}=80m$, για το SWIP παρουσιάζεται μια πιο διαφοροποιημένη εικόνα μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων υπέρθεσης των δεδομένων, κάτι το αναμενόμενο λαμβάνοντας υπόψη την διαφοροποίηση των υπολογισμένων καμπύλων διασποράς (Σχήμα 4.11). Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.12b, η καλύτερη απόδοση της V_S προκύπτει για το παράθυρο των σεισμικών δεδομένων χωρίς υπέρθεση, με την πηγή να βρίσκεται στα 120m, δηλαδή δεξιά. Για την προσέγγιση αυτή, το αποτέλεσμα του SWIP κατάφερε να ανακτήσει ταυτόχρονα την ταχύτητα και το πάχος των στρωμάτων, με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την πραγματική τους τιμή. Αυτό, μπορεί να το αποδοθεί στο γεγονός ότι, στο εξιδανικευμένο εδαφικό προφίλ η ταχύτητα και το πάχος των στρωμάτων μεταβάλλονται μονοσήμαντα από τα δεξιά της θέσης $X_{mid}80$, ενώ αυτά διαφοροποιούνται πιο περίπλοκα από τα αριστερά. Με άλλα λόγια, το εδαφικό μέσο δεξιά της θέσης στα 80 μέτρα παρουσιάζει "απλούστερη" πλευρική μεταβολή της ταχύτητας V_S .

Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του kriSIS για το 1^ο στρώμα, η αντιστροφή από το SWIP για όλες τις προσεγγίσεις υπέρθεσης, έδωσε τιμές ταχύτητας οι οποίες πρακτικά ταυτίζονται με την πραγματική, στα 250m/s. Μάλιστα, τα αποτελέσματα του SWIP για δεδομένα από απλή και σταθμισμένη υπέρθεση, έχουν καταφέρει να ανακτήσουν σωστά και το βάθος της διεπιφάνειας μεταξύ του πρώτου και δεύτερου εδαφικού στρώματος. Παραδόξως, για τη θέση στα 80m, οι περιπτώσεις χωρίς υπέρθεση με πηγή στα δεξιά (SWIP.st0.R) και σταθμισμένης υπέρθεσης (SWIP.st3.B), παρόλο που παρήγαν τα λιγότερα αποδεκτά μοντέλα, αυτές αντιθέτως παρουσιάζουν καλύτερο αποτέλεσμα ως προς την πραγματική κατανομή της ταχύτητας. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος, ως προς την ταύτιση δηλαδή με τις πραγματικές τιμές της ταχύτητας V_S του υπό εξέταση εδαφικού μέσου, μπορεί είναι ανεξάρτητη του αριθμού των

αποδεκτών μοντέλων. Παρατηρείται, τέλος, υποεκτίμηση της ταχύτητας στο 3^ο εδαφικό στρώμα και από τα δύο λογισμικά, τόσο στη θέση των 30m όσο και στα 80m.

Έχοντας μέχρι στιγμής βασιστεί και κάνει συγκρίσεις μόνο για τα βέλτιστα (best) μοντέλα του SWIP, αξίζει να μελετηθούν και άλλοι τρόποι απόδοσης του αποτελέσματος. Προσφέρεται έτσι η δυνατότητα, να μελετηθούν άλλωστε τα αποτελέσματα της κατανομής της ταχύτητας V_S που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, στο τελικό στάδιο της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων, ως ένα εύρος πιθανών λύσεων. Αυτό προκύπτει λόγω της στοχαστικής προσέγγισης του Neighborhood Algorithm, το οποίο ως λογική συμπίπτει με την μη-μοναδικότητα της λύσης που εμπεριέχεται στην επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος της μεθόδου MASW. Θα μπορούσε κανείς, γενικώς, να ανατρέξει στα αποδεκτά μοντέλα της κατανομής της V_S για κάθε θέση, όπως αυτά αντίστοιχα παρουσιάζονται (ενδεικτικά για απλή υπέρθεση) για τις θέσεις στα 30 και 80m, στα Σχήματα 3.6b και 4.10b, αντίστοιχα. Στα Σχήματα αυτά μάλιστα, σημειώνεται με μαύρη διακεκομμένη γραμμή το βέλτιστο μοντέλο, κάτι που επιτρέπει την εκτίμηση της διεύρυνσης του αποτελέσματος. Συμπληρωματικά και αντ' αυτού, τα Σχήματα 4.13 και 4.14 για τη θέση Xmid30 και Xmid80, αντίστοιχα, δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης του αποτελέσματος, με πιο στοχευμένο όμως τρόπο. Ενδεικτικές του εύρους των αποτελεσμάτων του SWIP, είναι οι διακεκομμένες μαύρες γραμμές, δηλαδή τα όρια του παραμετρικού χώρου (model bounds), τα οποία αποτελούν τα ακραία μοντέλα που αρχικά και τυχαία παρήχθησαν από τον αλγόριθμο Monte-Carlo. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα όρια αυτά περιλαμβάνουν την πραγματική τιμή της V_S για κάθε είδος υπέρθεσης, με μοναδική εξαίρεση το 2^ο στρώμα της θέσης Xmid80m για απλή υπέρθεση (Σχ. 4.14a), και το 2^ο στρώμα της θέσης Xmid30m, για απλή (Σχ. 4.13a) και σταθμισμένη υπέρθεση (Σχ. 4.13b). Αυτό, συμβαίνει διότι ο αλγόριθμος NA δεν περιορίζεται στα αρχικά όρια που έχουν τεθεί, κατά την εξερεύνηση της βέλτιστης λύσης. Αντιθέτως, ο παραμετρικός χώρος των μοντέλων αναπροσαρμόζεται σε κάθε επανάληψη μέσω της τεχνικής της δυναμικής κλιμάκωσης (dynamic scaling) (Wathelet, 2008). Ως εκ τούτου, και βάσει της επιλεγμένης καμπύλης διασποράς, η βέλτιστη λύση για τμήματα του μοντέλου ταχύτητας δύναται να εντοπιστεί σε περιοχή που βρίσκεται εκτός του αρχικού ορίου του μοντέλου, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση όπου η πραγματική V_S εντοπίζεται οριακά εκτός των ορίων αυτών.

Παρά ταύτα, το αποτέλεσμα της μεταβολής της ταχύτητας μεταξύ απλής και σταθμισμένης υπέρ-

θέσης για τη θέση Xmid30 (Σχ. 4.13), παρουσιάζει εξαιρετική ομοιότητα με πολύ μικρές διαφορές. Ταυτόχρονα, για τη θέση Xmid80 και σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του Σχήματος 4.12b, μπορεί να παρατηρηθεί πως η αντιστροφή έχει καταφέρει να εκτιμήσει την πραγματική κατανομή της ταχύτητας, σε ικανοποιητικό βαθμό. Συγκεκριμένα, το τελικό μοντέλο της σταθμισμένης υπέρθεσης του SWIP στη θέση Xmid80 (Σχ. 4.14b), έχει αποδώσει εντός του εύρους του την V_S για όλα τα στρώματα, με την ταχύτητα στο βαθύτερο στρώμα να υπολείπεται της πραγματικής μόνο κατά 100m/s περίπου (π.χ. για τα σταθμισμένα μοντέλα και αυτά της μέσης τιμής, με την ομαλή μεταβολή), ενώ τα ακραία μοντέλα περικλείουν την πραγματική τιμή της ταχύτητας. Επιπλέον, η απόδοση των μοντέλων μέσης τιμής (average) και των σταθμισμένων (weighted) μοντέλων ταχύτητας σε στρωματοποιημένη (layered) αλλά και ομαλή (smooth) μεταβολή της ταχύτητας, μπορεί να μην φαίνεται εκ πρώτης όψης χρήσιμη για τον μονοδιάστατο προσδιορισμό της V_S , καθώς το βέλτιστο (best) μοντέλο δείχνει πιο σαφές. Όμως, όπως θα καταστεί εμφανές σε επόμενη ενότητα και κεφάλαιο, ο τρόπος αυτός απόδοσης της μεταβολής των τιμών της ταχύτητας, είναι εξαιρετικά χρήσιμος για τομές δύο διαστάσεων, όπως αυτές θα προκύψουν για τα συνθετικά δεδομένα, αλλά και για τα δεδομένα πεδίου.

Εν κατακλείδι, και αναφορικά με το σύνολο της επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων από το SWIP, σημειώνονται τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η μελέτη, και τα οποία αξιοποιούνται στη συνέχεια για την παραγωγή ψευδοτομών, τόσο για τα συνθετικά όσο και για τα δεδομένα πεδίου. Αυτά, αφορούν σε όλες τις περιπτώσεις υπέρθεσης (χωρίς, με απλή ή σταθμισμένη), ισχύουν, δε, και για τις δύο θέσεις διερεύνησης.

Αρχικά, αναφορικά με την επιλογή των σεισμικών πηγών στις καταγραφές κοινής πηγής, και για το κατά πόσο είναι προτιμότερο τα δεδομένα να προέρχονται από πηγές εκ των αριστερών, εκ των δεξιών ή ταυτόχρονα εκατέρωθεν του ενδιαμέσου σημείου διερεύνησης (Xmid), σύμφωνα με τα όσα παρατηρήθηκαν από την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων, προκύπτει το εξής παρακάτω συμπέρασμα. Η μελέτη σε πρώτη φάση των των δεδομένων χωρίς υπέρθεση, ίσως αξίζει να πραγματοποιηθεί επιλεκτικά, και τα αποτελέσματα αυτά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα τα οποία και να αξιοποιηθούν στη συνέχεια για την επεξεργασία δεδομένων με υπέρθεση. Για παράδειγμα, διερευνώντας ξεχωριστά το αποτέλεσμα με πηγές μόνο από αριστερά (L) και μόνο από δεξιά (R) κατά τη διαδικασία παραθυρικής εξαγωγής των δεδομένων, ίσως

προκύπτουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση ενδεχομένως περιπτώσεων όπου υπάρχει γνωστή εκ των προτέρων πληροφορία για την κατανομή της ταχύτητας σε σχέση με το βάθος. Εάν παρατηρηθεί καλύτερη ταύτιση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από διαφορετική πηγή, τότε η προσέγγιση αυτή, δηλαδή συμπερίληψης μόνο των πηγών από την μια πλευρά, ίσως αξίζει να υιοθετηθεί γενικότερα, χωρίς να είναι απαραίτητη ή εξ' ορισμού καλύτερη η προσέγγιση με πηγές εκατέρωθεν (B).

Στη συνέχεια, μπορεί να σημειωθεί πως όσο περιορίζονται οι παράμετροι του αρχικού μοντέλου και γίνεται προσπάθεια οι τιμές αυτές να ταυτιστούν με τις πραγματικές, ειδικότερα αυτές που αφορούν το πάχος των στρωμάτων, ο αλγόριθμος αντιστροφής παράγει λιγότερα αποδεκτά μοντέλα και με την τιμή της V_S να αποκλίνει περισσότερο από την πραγματική. Αυτό, επιβεβαιώνεται από όσα αναφέρουν οι Pasquet and Bodet (2017) και οι Wathelet et al. (2004) για τη καλύτερη απόδοση του γενετικού αλγορίθμου NA, πως θα πρέπει δηλαδή να παραμετροποιείται με το κατά δυνατόν, και κατά περίπτωση, πιο ευρύ φάσμα τιμών. Η παρατήρηση αυτή ήρθε ως αποτέλεσμα της προσπάθειας να ταυτιστεί το βέλτιστο αποτέλεσμα του SWIP με την πραγματική κατανομή της ταχύτητας. Πέραν λοιπόν του επανακαθορισμού των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου, χρειάστηκε να επαναληφθεί ένα προηγούμενο βήμα της επεξεργασίας, και να γίνει εκ νέου επιλογή των καμπύλων διασποράς. Αυτό μάλιστα, αποδείχθηκε το πιο καθοριστικό βήμα της διαδικασίας. Έχοντας μεγάλο εύρος τιμών στο αρχικό μοντέλο, παρατηρήθηκε πως η ελάχιστη διαφοροποίηση στην επιλογή ταχύτητας φάσης του πεδίου διασποράς, οδηγούσε σε περισσότερα ή λιγότερα αποδεκτά μοντέλα κατά την αντιστροφή, και προφανώς σε διαφορετικό αποτέλεσμα κατανομής της V_S . Μάλιστα, σε περιπτώσεις με αρκετά πιο ξεκάθαρη περιοχή των ενεργειακών μεγίστων του κυματικού πεδίου, δηλαδή για τα δεδομένα χωρίς υπέρθεση, η επίπτωση στο αποτέλεσμα από την επιλογή της καμπύλης διασποράς, αποδείχθηκε αρκετά ευαίσθητη. Αντίστοιχα, για τη θέση $X_{mid}=80m$, και ειδικότερα για τα δεδομένα με σταθμισμένη υπέρθεση, κάθε εκ νέου επιλογή της φαινομενικά "δύσκολης" καμπύλης διασποράς, επηρέαζε σε κάθε αντιστροφή το αποτέλεσμα σε σημαντικό βαθμό.

Ως εκ τούτου, θα πρέπει κανείς να λαμβάνει υπόψη το χρόνο που απαιτείται κάθε φορά για την σωστή επιλογή της καμπύλης διασποράς, από τον χρήστη. Αξιοποιώντας τη λειτουργία του SWIP για υποβοηθούμενη επιλογή (`pickstyle=1` και `smoothpick=1`), κατά μέσο όρο χρειάζονται 50

έως και 90 δευτερόλεπτα για κάθε σημείο X_{mid} . Ενώ δεν αποτελεί απαγορευτικό χρόνο από τον χρήστη, η επιδίωξη για το βέλτιστο αποτέλεσμα ως μια επαναληπτική διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε απαίτηση σημαντικού χρόνου, συνολικά.

Δεδομένου λοιπόν πως ο αλγόριθμος αντιστροφής βασίζεται σε στοχαστική διαδικασία γένεσης νέων μοντέλων και πιθανών λύσεων, αξίζει ολοκληρώνοντας να σημειωθεί ότι, κάθε νέα εφαρμογή της αντιστροφής επέστρεφε ελαφρώς διαφορετικό αριθμό αποδεκτών μοντέλων και ελάχιστη τιμή σφάλματος, παρόλο που η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς και η παραμετροποίηση παρέμεναν ίδιες. Ως εκ τούτου, η προσπάθεια για την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου, μέσα από επαναληπτική στοχαστική διαδικασία υπολογισμού ενός προβλήματος με μη-μοναδική λύση, ίσως περιέχει ένα ανυπέρβλητο όριο στην ακρίβεια του αποτελέσματος που προκύπτει. Μετριάζοντας λοιπόν τις προσδοχίες, ίσως το ζητούμενο να είναι ένα σύνολο πιθανών τιμών διακύμανσης της ταχύτητας, το οποίο όμως να βρίσκεται εντός κάποιων αποδεκτών ορίων, και η διαφορά μεταξύ επιλεγμένης και υπολογισμένης καμπύλης διασποράς, να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

4.6 Αποτέλεσμα σε δύο διαστάσεις

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των συνθετικών δεδομένων σε τομή δύο διαστάσεων. Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα και την εμπειρία από την επεξεργασία των δεδομένων σε μία διάσταση, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, πλέον θα γίνει προσπάθεια για πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του SWIP για την παραθυρική εξαγωγή, επιλογή, υπέρθεση, παραμετροποίηση και αντιστροφή των συνθετικών σεισμικών δεδομένων που προκύπτουν για όλες τις θέσεις X_{mid} του εξιδανικευμένου εδαφικού προφίλ του Σχήματος 4.1, καθώς και της σύνθεσης της 2D ψευδοτομής της ταχύτητας V_S , τελικά.

Αρχικά, θα πρέπει γίνει επιλογή όλων των θέσεων X_{mid} στις ρυθμίσεις της υπομονάδας του κώδικα *A_SWIPdisp.m*, αφήνοντας την παράμετρο *Xmidselec* κενή. Επιλέγεται η σταθμισμένη υπέρθεση (WSSW), αφενός διότι θεωρείται πως μπορεί να αποδώσει καλύτερα την κατανομή της V_S , και αφετέρου ώστε να επαληθευτεί η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από τους Pasquet et al. (2021), ώστε να την εφαρμοστεί τελικά με βεβαιότητα στα πραγματικά δεδομένα πεδίου του επόμενο κεφαλαίου. Το διάφραγμα επιλογής των σεισμικών ιχνών ορίζεται

ως $nWvec=[3:4:79]$, όπου για κάθε θέση $Xmid$, επιλέγονται αρχικά 3 ίχνη και με βήμα 4, φτάνουν μέχρι το παράθυρο των 79 ιχνών, ενώ το βήμα μεταξύ διαδοχικών θέσεων $Xmid$ και επανάληψης της παραθυρικής εξαγωγής δεδομένων ορίζεται στο 1 σεισμικό ίχνος. Σε αντίθεση με την επεξεργασία των μονοδιάστατων αποτελεσμάτων στις δύο θέσεις διερεύνησης, για το αποτέλεσμα σε δύο διαστάσεις θα ληφθούν υπόψη οι σεισμικές πηγές σε εύρος από 1 έως 20 σεισμικά ίχνη ($dSmin$ και $dSmax$ ίσο με 1 και 20, αντίστοιχα), όπως άλλωστε προτείνεται και στην παραπάνω εργασία, ενώ αυτές θα βρίσκονται εκατέρωθεν της εκάστοτε θέσης $Xmid$ ($side=B$).

Πλέον, και λόγω του μεγάλου πλήθους των θέσεων διερεύνησης (120 σημεία - $Xmids$), η επιλογή των καμπύλων διασποράς θα γίνει σε πρώτη φάση αυτόματα από τον αλγόριθμο, θέτοντας $pick=2$. Σημειώνεται πως αυτή η λειτουργία απαιτεί πρωτίστως να γίνει χειροκίνητη επιλογή καμπύλης από τον χρήστη, τουλάχιστον για 1 σημείο. Η επιλογή των καμπύλων διασποράς έγινε σε δεύτερο χρόνο με χειροκίνητο τρόπο, μόνο όμως για τις θέσεις $Xmid$ όπου το αποτέλεσμα δεν ήταν ικανοποιητικό, δηλαδή προέκυπταν κατά πολύ λιγότερα αποδεκτά μοντέλα, η τιμή του σχετικού σφάλματος ήταν υψηλή, και υπήρχε σημαντική απόκλιση μεταξύ παρατηρούμενης και υπολογισμένης καμπύλης διασποράς.

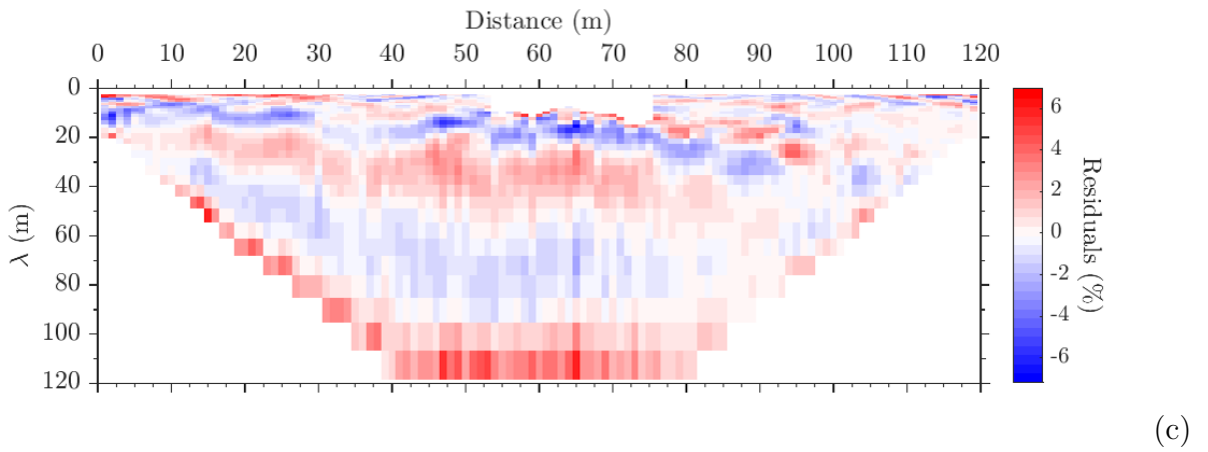
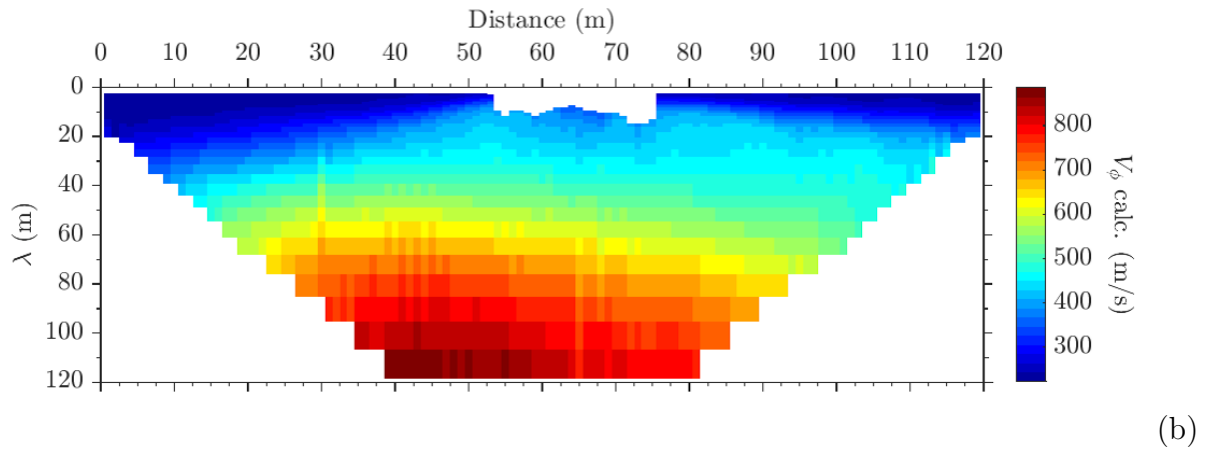
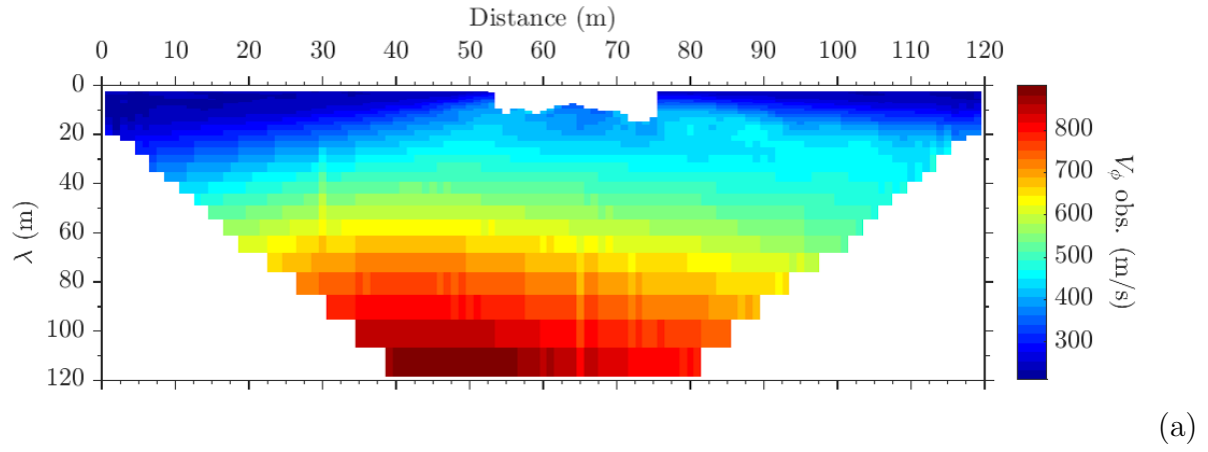
Η παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου θα παραμείνει ίδια με αυτή που ορίστηκε για τις θέσεις στα 30 και 80m, πλην όμως θα πρέπει να δοθεί άλλο εύρος στο πάχος των στρωμάτων. Διατηρώντας το πλήθος τους σε τρία, θέτοντας το εύρος του ελάχιστου εδαφικού στρώματος ίσο με $thmin=[0.5:5.0]$, ενώ για το μέγιστο πάχος θέτουμε $thmax=[5.0:25.0]$. Με αυτό τον τρόπο, δίνουμε τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να μπορεί να ανακατασκευάσει τη στρωματοποίηση με τα μεγαλύτερα σε πάχος στρώματα, τα οποία εντοπίζονται στα άκρα του εδαφικού προφίλ. Τα παχύτερα αυτά στρώματα εντοπίζονται "εκτός" των προηγούμενων θέσεων διερεύνησης: αριστερά από τη θέση $Xmid30$ και δεξιά από τη θέση $Xmid80$, και πιο συγκεκριμένα στις περιοχές από 0 έως 30m και από 90 έως 120m. Τέλος, η ρύθμιση των παραμέτρων της αντιστροφής παραμένει η ίδια, με την μοναδική διαφορά πως διατηρούμε το πεδίο $Xmidselec$ κενό, ώστε ο αλγόριθμος να τρέξει για όλες τις θέσεις $Xmid$.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ταχύτητα φάσης V_Φ και την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων V_S . Στο Σχήμα 4.15a, παρουσιάζεται αρχικά σε ψευδοτομή η ταχύτητα

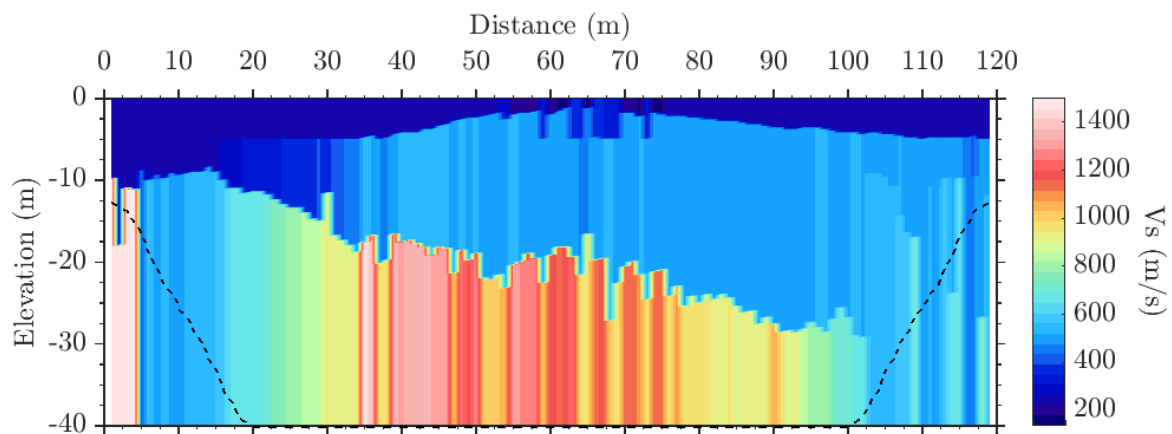
φάσης των επιλεγμένων καμπύλων διασποράς για κάθε σημείο X_{mid} , και στη συνέχεια η υπολογισμένη V_{Φ} (Σχ. 4.15b), ενώ περιλαμβάνεται και η μεταξύ τους διαφορά (υπόλοιπα - residuals) σε ποσοστιαία μορφή (Σχ. 4.15c). Στη συνέχεια, παρατίθενται στο Σχήμα 4.16, το αποτέλεσμα της ταχύτητας V_S , μαζί με την τυπική απόκλιση σε μορφή ποσοστού (Standard deviation). Τέλος, παρουσιάζονται τα κριτήρια αξιολόγησης του αποτελέσματος: η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης σφάλματος (misfit) καθώς και ο αριθμός των αποδεκτών μοντέλων, στο Σχήμα 4.17c, όπως αυτά υπολογίστηκαν σε κάθε θέση X_{mid} για το βέλτιστο μοντέλο (best) από τον αλγόριθμο NA.

Ο μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου και η αυτόματη επιλογή των καμπύλων διασποράς για κάθε θέση X_{mid} , από τα πεδία διασποράς με διαφράγματα πολλαπλών παραθύρων μεταβλητού μήκους και με σταθμισμένη (st3-WSSW) υπέρθεση, των συνθετικών σεισμικών δεδομένων του προφίλ του Σχήματος 4.1, διήρκεσε 1 ώρα, 19 λεπτά και 33.5 δευτερόλεπτα. Για την αντιστροφή συνολικά όλων των θέσεων της τομής, απαιτήθηκε 1 ώρα, 24 λεπτά και 25 δευτερόλεπτα, δηλαδή κατά μέσο όρο 42.6 sec για κάθε θέση X_{mid} . Αναφέρεται ξανά, πως στις θέσεις X_{mids} όπου παρατηρούνταν υψηλές τιμές διαφοράς ταχύτητας φάσης (Σχ. 4.15c) και σφάλματος (Σχ. 4.16c) από την αντιστροφή, σε συνδυασμό με λιγότερα αποδεκτά μοντέλα (Σχ. 4.16d) σε σχέση με τις όμορες θέσεις X_{mid} , τότε χρειάστηκε να επαναληφθεί με χειροκίνητο τρόπο η επιλογή και στη συνέχεια η αντιστροφή σε αυτά τα σημεία. Ως εκ τούτου, στα παραπάνω θα πρέπει να συνυπολογιστεί ένας πρόσθετος χρόνος, για κάθε περίπτωση που απαιτείται επιπλέον επεξεργασία που δεν μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί, καθώς έτσι η ροή εργασιών μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές.

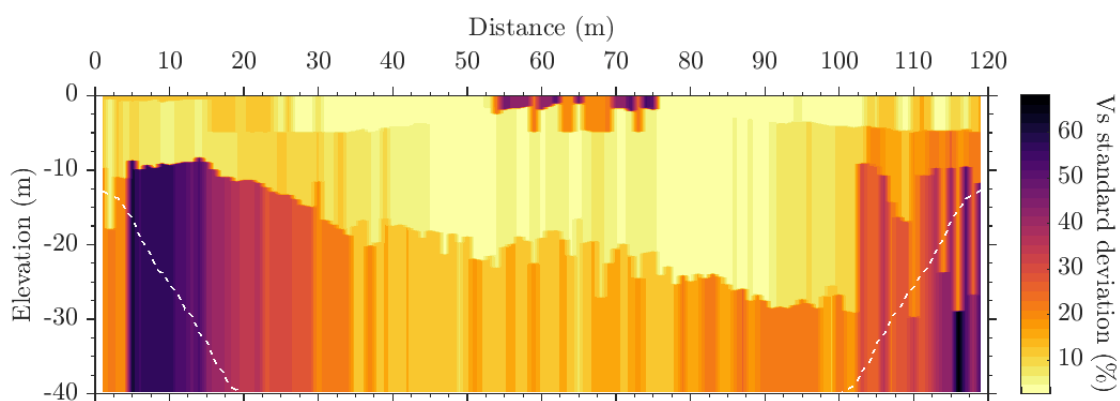
Δεν θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι, στο Σχήμα 4.15 διακρίνεται μια έλλειψη δεδομένων για τα μικρότερα μήκη κύματος ($\leq 20m$), μεταξύ των θέσεων X_{mid} από 54 έως και 75m. Αυτό, προέκυψε λόγω της χειροκίνητης επιλογής των καμπύλων διασποράς για κάθε μια από αυτές τις θέσεις, όπου με σκοπό να προκύψει καλύτερο αποτέλεσμα (σ.σ. περισσότερα αποδεκτά μοντέλα και χαμηλότερη τιμή ελαχίστου σφάλματος), επιλέχθηκαν καμπύλες με λιγότερα δεδομένα στο υψίσυχνο τμήμα τους. Σημειώνεται επίσης, πως ο τίτλος του κατακόρυφου άξονα που αντιστοιχεί στο βάθος, σημειώνεται ως "Elevation" λαμβάνοντας αρνητικές τιμές, αφού δύναται η δυνατότητα να εισαχθεί το ανάγλυφο της γραμμής μελέτης, ως απόλυτη ή σχετική υψομετρική διαφορά κατά την εισαγωγή των σεισμικών καταγραφών. Για τα συνθετικά δεδομένα, δεν υφίσταται διαφορά στον κατακόρυφο άξονα μεταξύ των δεκτών.



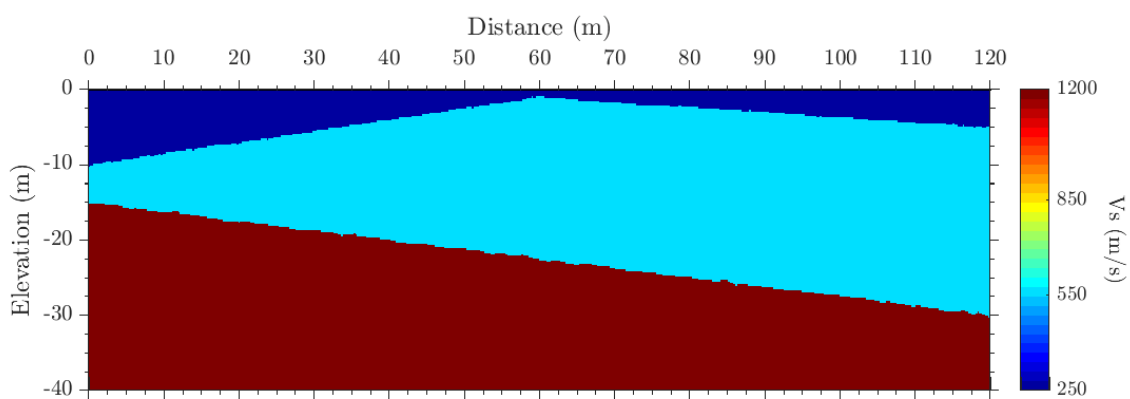
Σχήμα 4.15: Ψευδοτομές ταχύτητας φάσης V_Φ συναρτήσει του μήκους κύματος και των θέσεων διερεύνησης (Xmids): Ταχύτητα φάσης (a) επιλεγμένων καμπύλων διασποράς (b) υπολογισμένων καμπύλων διασποράς από το SWIP. (c) Διαφορά της V_Φ (%) μεταξύ των προφίλ (a) και (b).



(a)

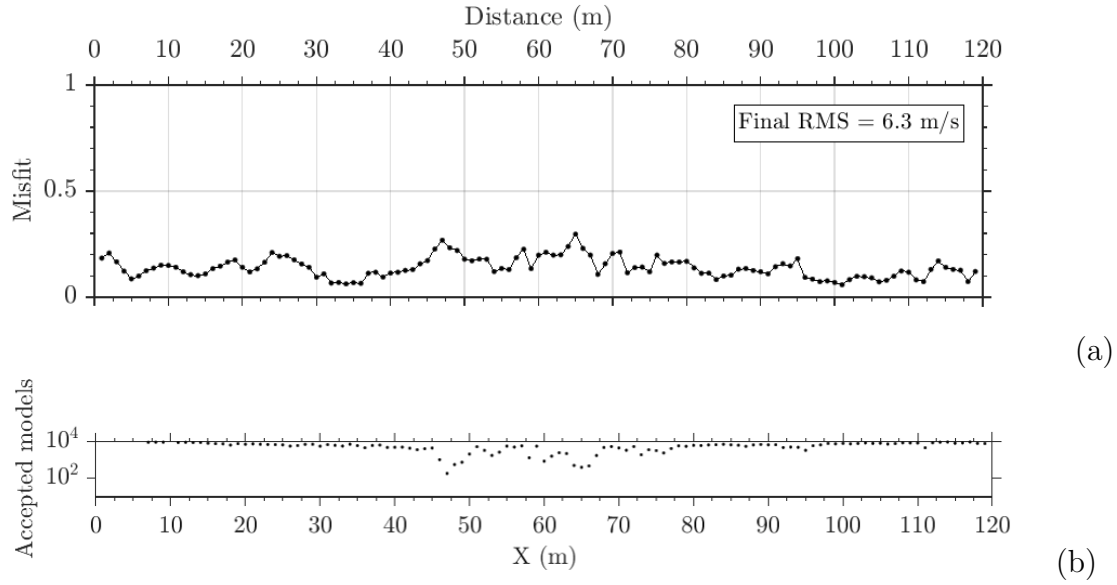


(b)



(c)

Σχήμα 4.16: Αποτελέσματα αντιστροφής σε προφίλ δύο διαστάσεων. (a) Βέλτιστο (best) μοντέλο κατανομής ταχύτητας V_s , (b) τυπική απόκλιση της V_s σε μορφή ποσοστού (%) και (c) το πραγματικό μοντέλο ταχύτητας.



Σχήμα 4.17: Ποιοτικά χαρακτηριστικά αντιστροφής, για κάθε θέση X_{mid} του συνθετικού μοντέλου 3 εδαφικών στρωμάτων. (a) Η κατανομή της τιμής του ελαχίστου σφάλματος και (b) ο αριθμός των αποδεκτών μοντέλων του αλγορίθμου NA σε κάθε θέση X_{mid} .

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.15, παρατηρείται μια ικανοποιητική ψευδοτομή για τις υπολογισμένες ταχύτητες φάσης, σε σχέση με τις επιλεγμένες V_F . Πέρα από την οπτική εκτίμηση, αυτό προκύπτει και από το χαμηλό ποσοστό της μεταξύ τους απόκλισης, σύμφωνα με το Σχήμα 4.15c. Σχετικά με την κατανομή της V_S στην τομή του Σχήματος 4.16a, αυτή χαρακτηρίζεται ως αποδεκτή ως προς τις τιμές της ταχύτητας και τις πλευρικές μεταβολές, σε σύγκριση με το πραγματικό εδαφικό μοντέλο του Σχήματος 4.1. Μάλιστα, η τομή ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με αυτή της μελέτης των Pasquet et al. (2021), παρά τις ελάχιστα διαφοροποιημένες ρυθμίσεις από αυτές που προτείνονται από τους εν λόγω συγγραφείς. Η τιμή της ταχύτητας των S-κυμάτων ανακτήθηκε σωστά στο μεγαλύτερο τμήμα των πρώτων δύο στρωμάτων, και στο κεντρικό τμήμα του βαθύτερου στρώματος, περίπου από τη θέση $x=30m$ έως και τη θέση στα $90m$. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί τόσο οπτικά, όσο και ποσοτικά από την τιμή της τυπικής απόκλισης του Σχήματος 4.16b. Επιπλέον για τις παραπάνω περιοχές, η πλευρική μεταβολή της ταχύτητας είναι αρκετά κοντά στην πραγματική, αποδίδοντας τις κλίσεις των διεπιφανειών των στρωμάτων αρκετά πιστά. Χαμηλότερης αξιοπιστίας αποτέλεσμα, προκύπτει για τα άκρα της ψευδοτομής, αλλά και για το κεντρικό τμήμα της, μεταξύ 60 και $70m$, όπου επιλέχθηκαν καμπύλες διασποράς με περιορισμένο το υψίσυχνο τμήμα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το ποσοστό της τυπικής απόκλισης, έχει αντίστοιχα υψηλότερη τιμή σε αυτές τις

θέσεις. Παρόμοιο είναι το αποτέλεσμα για τη σταθμισμένη υπέρθεση στη μελέτη των Pasquet et al. (2021).

Επιπρόσθετα, ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα Σχήματα 4.17a και 4.16b, στα οποία παρατηρείται η τάση καθώς αυξάνεται το ελάχιστο σφάλμα να μειώνεται ο αριθμός των αποδεκτών μοντέλων. Όμως, αυτό δεν ισχύει για τα άκρα του προφίλ, ιδιαίτερα για τα πρώτα 25m. Μπορεί λοιπόν να εντοπίζεται αυξημένη τιμή σφάλματος σε σχέση με τις χαμηλότερες παρατηρούμενες τιμές γενικά, αλλά να προκύπτει ταυτόχρονα πολύ μεγάλος αριθμός αποδεκτών μοντέλων. Μάλιστα, στις ίδιες περιοχές των άκρων παρατηρείται το μεγαλύτερο ποσοστό τυπικής απόκλισης, διότι οι καμπύλες διασποράς προέρχονται από μικρότερου μήκους παράθυρα, με αντίστοιχα μικρότερο παρατηρούμενο μήκος κύματος, αλλά και μεγαλύτερη διακύμανση των σεισμικών ενεργειακών μεγίστων. Η διακεκομμένη γραμμή του μέγιστου βάθους διασκόπησης (DOI) στα Σχήματα 4.16a και 4.16b, βοηθάει ώστε να διαπιστωθεί ακριβώς αυτό. Υπολογίζεται και εκτυπώνεται από το SWIP για το μέγιστο παρατηρούμενο μήκος κύματος (λ), για να ξεχωρίσουν οι πλέον αξιόπιστες περιοχές τις τομές, από τις λιγότερο αξιόπιστες. Σημειώνουμε πως το λ_{max} ορίστηκε ίσο με τα $2/3$ του παρατηρούμενου μήκους κύματος. Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα η διαχωριστική αυτή γραμμή-περιοχή, να οριστεί σύμφωνα με το ποσοστό της τυπικής απόκλισης.

Τέλος, το μεγάλο πλήθος των αποδεκτών μοντέλων και η μικρή τιμή σφάλματος, δεν αντιστοιχίζονται απαραίτητα σε καλύτερη εκτίμηση της κατανομής της V_S . Αυτό, υπόκειται κατά κύριο λόγο στην ορθή απόδοση του πεδίου διασποράς. Ακόμα και με ταύτιση της υπολογισμένης καμπύλης ως προς την επιλεγμένη, εάν η δεύτερη έχει προέλθει από μια περιοχή με μεγάλη πλευρική ανομοιογένεια ως προς τις ταχύτητες V_S , ενδεχομένως και με χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), τότε ενδέχεται ο αλγόριθμος να εξάγει μοντέλα ταχύτητας με πολύ καλά στατιστικά κριτήρια για την ποιότητα του αποτελέσματος, τα οποία όμως δεν θα αντιστοιχούν στην πραγματική κατάσταση.

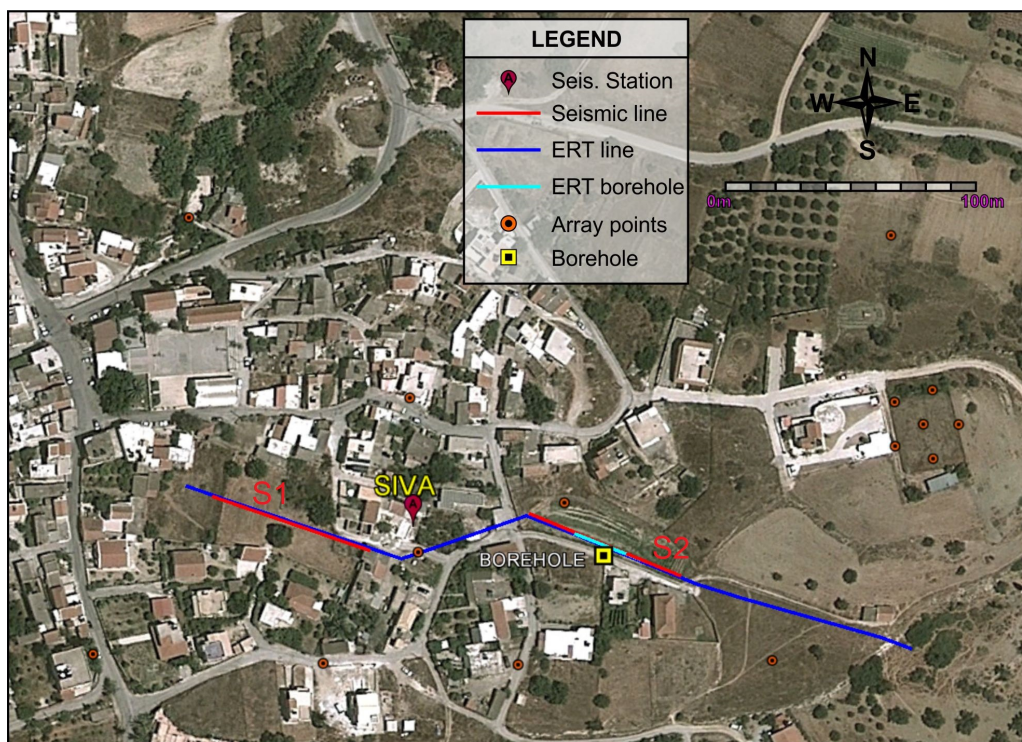
Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, θα πρέπει να έχει κανείς υπόψη, πως η αξιολόγηση του λογισμικού SWIP, αφορά σε γνωστό εδαφικό μέσο. Αυτό, δημιουργεί ενδεχομένως ψευδή εντύπωση για την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων, καθώς υπήρχε διαθέσιμη, και ως μέτρο σύγκρισης, η πραγματική τομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_S). Συνυπολογίζοντας

ότι το SWIP εκτελεί την αντιστροφή κάνοντας χρήση στοχαστικού αλγορίθμου (Neighborhood Algorithm), καθώς και το γεγονός ότι η λύση του προβλήματος της αντιστροφής των επιφανειακών κυμάτων είναι εξ ορισμού μη μοναδική, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα πως η προσέγγιση του προβλήματος με ένα εύρος πιθανών λύσεων, ίσως να είναι πιο δόκιμη. Συνδυάζοντας λοιπόν τα αποτελέσματα αυτά με άλλες καθιερωμένες γεωφυσικές μεθόδους, δύναται να αποτιμηθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι δομές του υπεδάφους με τον πλέον ικανοποιητικό τρόπο, προσεγγίζοντας μάλιστα το ζήτημα πιο ολιστικά. Εξετάζοντας δηλαδή και λαμβάνοντας υπόψη και άλλες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας θα γίνει προσπάθεια να εφαρμοστούν τα παραπάνω, σε πραγματικά δεδομένα πεδίου.

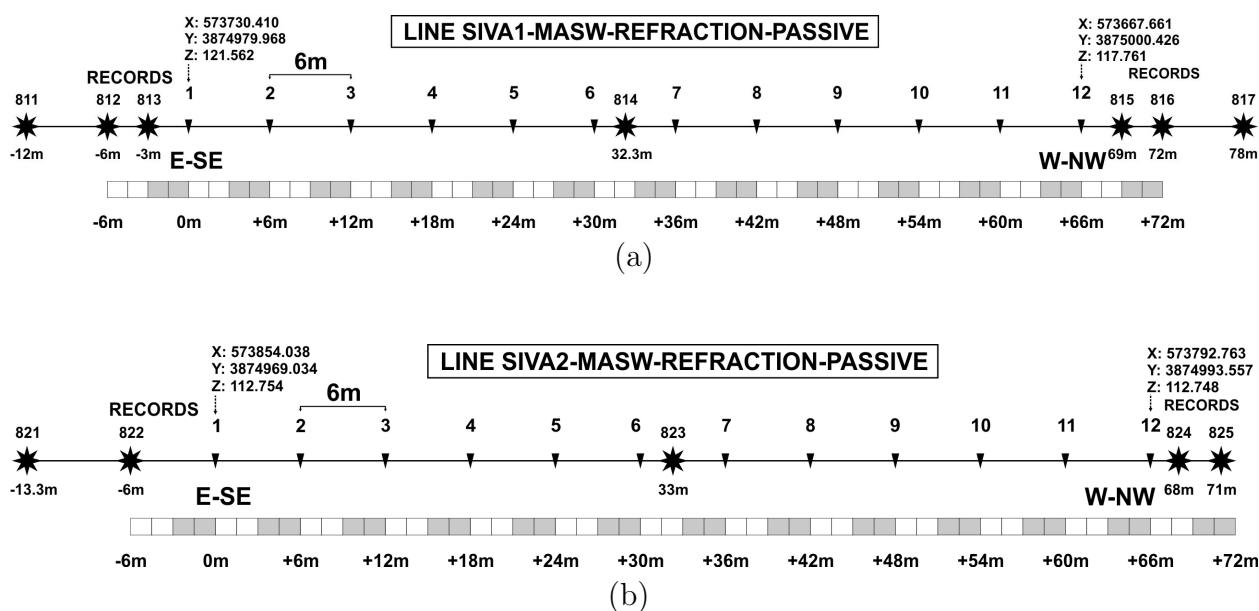
5 Δεδομένα πεδίου

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων από καταγραφές πεδίου, αξιοποιώντας πλήρως τις δυνατότητες του SWIP για την κατανομή της ταχύτητας σε προφίλ δύο διαστάσεων. Τα δεδομένα αυτά, προέρχονται από ένα σύνολο γεωφυσικών διασκοπήσεων διαφόρων μεθόδων και γεωτεχνικών ερευνών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην Κρήτη την περίοδο μεταξύ 2011 και 2013, στα πλαίσια γεω-χαρακτηρισμού διαφόρων περιοχών όπου βρίσκονται τοποθετημένοι επιταχυνσιογράφοι του Εθνικού Δικτύου του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου (Savvaidis et al., 2014). Συγκεκριμένα, θα γίνει επεξεργασία σεισμικών καταγραφών επιφανειακών κυμάτων από την κοινότητα Σίβας του Δήμου Φαιστού, της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου. Θα ληφθούν επίσης υπόψη τα αποτελέσματα από σεισμική διάθλαση και τομογραφία ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ERT), παθητικών επιφανειακών κυμάτων μικροθορύβου (passive MASW) και κατακόρυφου σεισμικού προφίλ γεώτρησης Down-hole (DH)/ Vertical Seismic Profiling (VSP).

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστεί η επεξεργασία των μετρήσεων που αφορούν την πολυκάναλη μέθοδο ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων, θα γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παραθυρικής εξαγωγής δεδομένων σε δύο διαστάσεις από το SWIP, και αυτά θα συγκριθούν σε σχέση με την κατανομή της V_S από άλλες τεχνικές, ενώ θα γίνει προσπάθεια ερμηνείας τους σε παράθεση με αυτά από διαφορετικές μεθόδους. Τέλος, θα γίνει εκτίμηση της κατηγορίας του εδάφους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Παρουσιάζεται λοιπόν στο Σχήμα 5.1, η δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης, σημειώνοντας τις θέσεις των διαφορετικών γεωφυσικών μετρήσεων. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στις σεισμικές γραμμές μελέτης S1 και S2, ενώ το μπλε στην όδευση της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας. Στο μέσον του ανατολικού αναπτύγματος της σεισμικής γραμμής (S2), σημειώνεται με κίτρινο χρώμα η θέση της γεώτρησης (Borehole).



Σχήμα 5.1: Περιοχή μελέτης: κοινότητα Σίβας του Δήμου Φαιστού, ΠΕ Ηρακλείου στην Κρήτη. Σημειώνονται επί του χάρτη οι θέσεις των γεωφυσικών μετρήσεων.



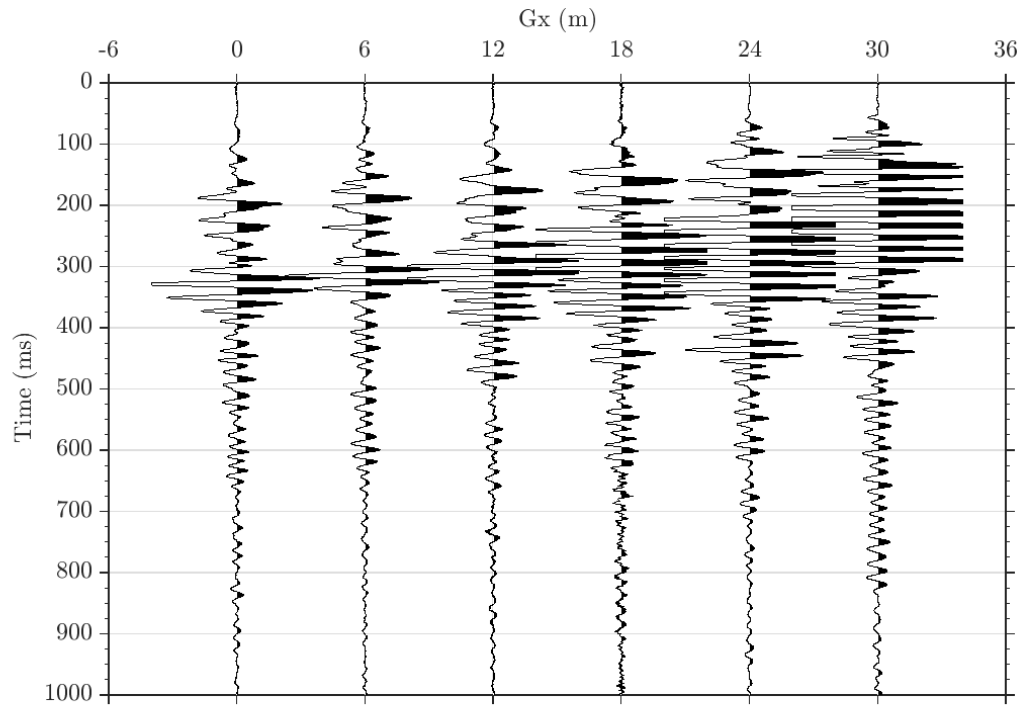
Σχήμα 5.2: Γεωμετρία διάταξης σεισμικών καταγραφών. (a) Γραμμή μελέτης S1 και (b) γραμμή μελέτης S2. Αναγράφονται οι αποστάσεις μεταξύ των γεωφώνων, οι θέσεις των πηγών και οι συντεταγμένες της αρχής και του τέλους του αναπτύγματος, με τον προσανατολισμό κάθε άκρου.

5.1 Παραθυρική εξαγωγή δεδομένων και επιλογή καμπύλων διασποράς

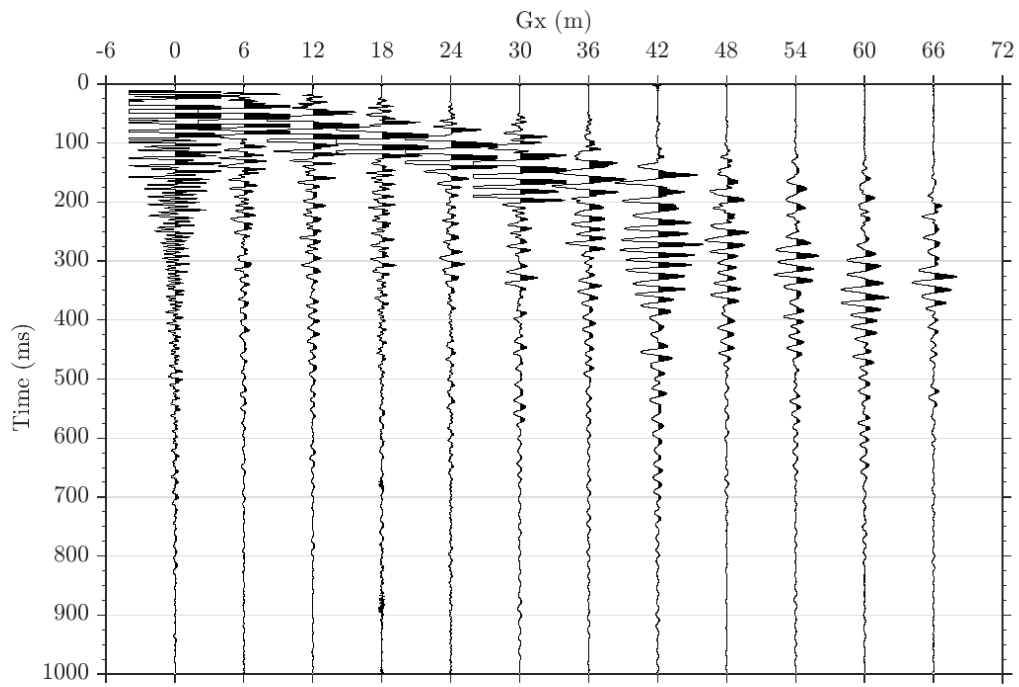
Στο Σχήμα 5.2 περιγράφεται η γεωμετρία των σεισμικών καταγραφών των γραμμών μελέτης S1 και S2. Αφορά μονά αναπτύγματα 12 γεωφώνων κατακόρυφης συνιστώσας ιδιοσυχνότητας 45Hz, τοποθετημένα ανά 6m και με συνολικό μήκος τα 66m, σε έδαφος χωρίς ιδιαίτερο ανάγλυφο. Οι σεισμικές πηγές προέρχονται από κρούση σφύρας χειρός σε μεταλλική πλάκα επί εδάφους, και εντοπίζονται εντός (1 πηγή στο μέσον) και εκτός (3 πηγές για την S1 και 2 πηγές για την S2, εκατέρωθεν) του αναπτύγματος. Ο συνολικός χρόνος καταγραφής είναι 1000ms με ρυθμό δειγματοληψίας τα 0.125ms. Το σύνολο των 7 και 5 καταγραφών για την S1 και S2, αντίστοιχα, αναγνώστηκε μέσω του λογισμικού SU (Stockwell Jr and Cohen, 2019) όπου και προέκυψε ένα αρχείο *.su για την κάθε τομή, το οποίο και στη συνέχεια επεξεργάστηκε από το SWIP.

Το διάφραγμα επιλογής των δεδομένων για την εξαγωγή πολλαπλών πεδίων διασποράς, ορίζεται ως $nWvec=[2:2:12]$, ώστε εκκινώντας από τον ελάχιστο αριθμό των 2 σεισμικών ιχνών και με βήμα 2, να συμπεριλαμβάνονται τα περισσότερα ίχνη που είναι εφικτό κάθε φορά αναλόγως της θέσης, έως ότου ληφθεί υπόψη το σύνολο αυτών. Σε αντίθεση με τα συνθετικά δεδομένα όπου η αρίθμηση των σημείων Xmids συνέπεσε με την απόσταση σε μέτρα, στα συγκεκριμένα δεδομένα πεδίου δεν ισχύει η ταύτιση αυτή, και η αρίθμηση των θέσεων διερεύνησης ακολουθεί την λογική της παραθυρικής εξαγωγής των δεδομένων. Ως εκ τούτου, στη θέση 3m αντιστοιχεί το Xmid=1, στα 9m το Xmid=2, στα 15m το Xmid=3, κ.ο.κ. Αντίστοιχα, θέλοντας να ληφθούν καταγραφές από όλες τις πηγές, όπως αυτό καθίσταται εφικτό για κάθε θέση Xmid, το παράθυρο επιλογής τους θα οριστεί μεταξύ 1 και 12, ορίζοντας τις τιμές αυτές στις αντίστοιχες μεταβλητές. Στο Σχήμα 5.3 παρατίθενται ενδεικτικά παράθυρα εξαγωγής δεδομένων για την γραμμή μελέτης S2.

Τόσο για τα δεδομένα της γραμμής μελέτης S1 όσο και για τα δεδομένα της S2, η επεξεργασία των δεδομένων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων εκτελέστηκε για απλή (st1) και σταθμισμένη (WSSW - st3) υπέρθεση των πεδίων διασποράς. Επειδή σε κάθε περίπτωση το τελικό αποτέλεσμα για τις υπολογισμένες ταχύτητες φάσης V_Φ όσο και της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων V_S , προέκυπτε με καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά για τα δεδομένα με σταθμισμένη υπέρθεση, θα γίνει παρουσίαση μόνο αυτών.



(a)



(b)

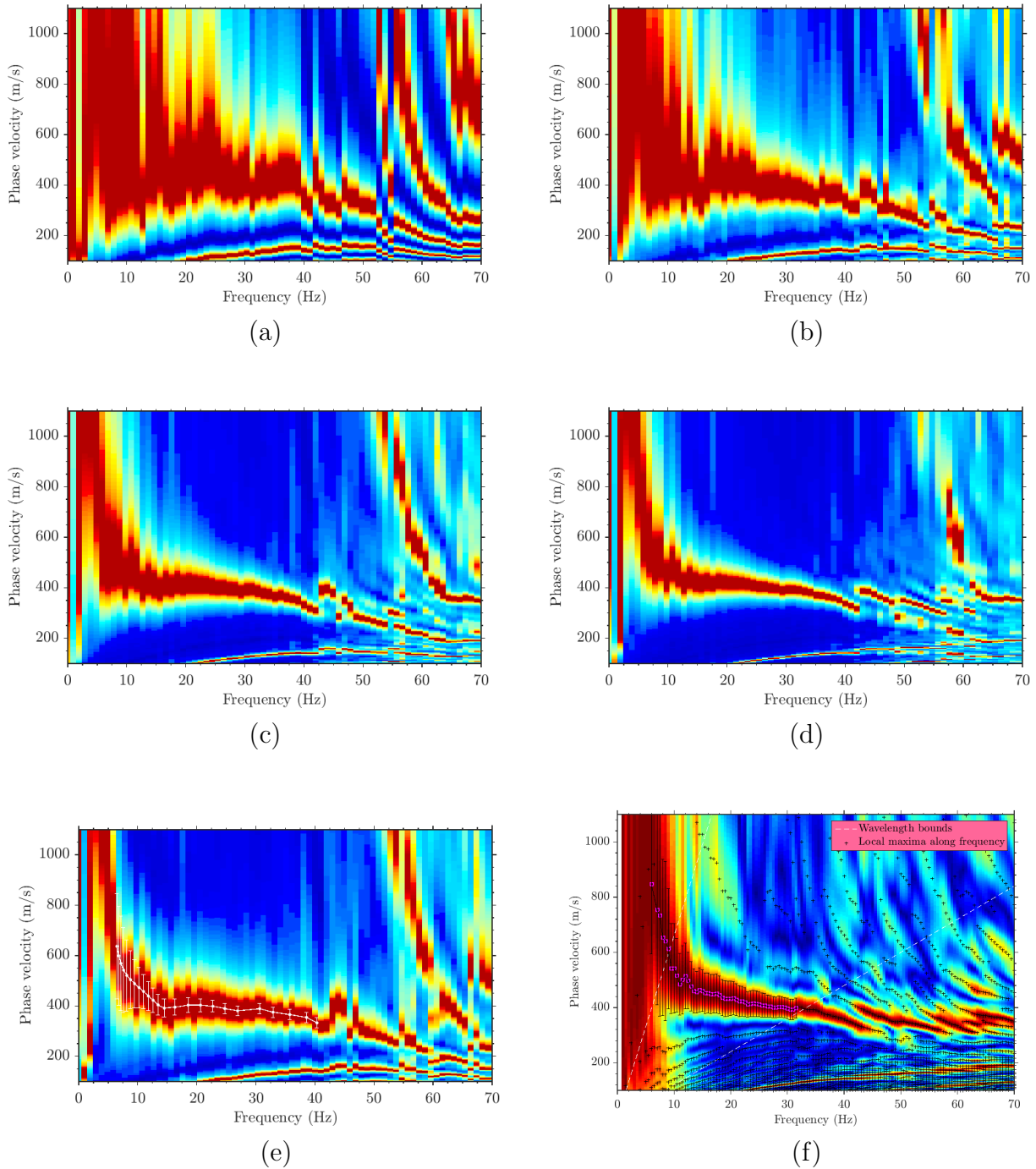
Σχήμα 5.3: Παράθυρα σεισμικών δεδομένων, τομή S2. (a) $X_{mid}=3$ στα 15m, παράθυρο 6 ιχνών, πηγή 824 στα 68m. (b) $X_{mid}=6$ στα 33m, παράθυρο 12 ιχνών, πηγή 822 στα -6m.

Λόγω των σχετικά περιορισμένων σε πλήθος δεκτών καταγραφής, η παραθυρική εξαγωγή δεδομένων και ο μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου επέτρεψε να γίνει χειροκίνητη επιλογή των καμπύλων διασποράς. Έτσι, για παράδειγμα στο Σχήμα 5.4, παρουσιάζεται αρχικά το κυματικό πεδίο που προκύπτει για απλή υπέρθεση των εικόνων διασποράς (a)-(d) για την γραμμή S2, και στη συνέχεια (e) το κυματικό πεδίο από την σταθμισμένη υπέρθεσή τους, επί του οποίου σημειώνεται η επιλεγμένη καμπύλη. Συγκεκριμένα, παρατίθενται τα πεδία διασποράς από απλή (st1) υπέρθεση, ενδεικτικά για 2, 4, 8 και 12 σεισμικά ίχνη, όπως αυτά προέκυψαν σταδιακά. Η σεισμική πηγή (αρχείο καταγραφής πεδίου 822) είναι τοποθετημένη στα -6m του αναπτύγματος, για κάθε ένα από τα συγκεκριμένα στιγμιότυπα. Η εικόνα (e) του Σχήματος 5.4 προέρχεται από την σταθμισμένη υπέρθεση (WSSW - st3) όλων των πεδίων από όλα παράθυρα μεταβλητού μεγέθους για το $X_{mid}=6$ στα 33m, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πηγές εκατέρωθεν του σημείου αναφοράς, ενώ η (f) το αντίστοιχο πεδίο χωρίς υπέρθεση από το kriSIS, με χρήση της πηγής στα -6m (822). Αξίζει να σημειώσουμε εδώ πως, η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για όλες τις θέσεις X_{mid} και για τις δύο γραμμές μελέτης S1 και S2.

Στα Σχήματα 5.4a έως 5.4d, παρατηρείται πως σταδιακά μειώνεται το εύρος της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς, και επομένως προκύπτουν δεδομένα με μικρότερη διακύμανση. Αυξάνοντας το μέγεθος του διαφράγματος, δηλαδή περιλαμβάνοντας σταδιακά περισσότερα σεισμικά ίχνη με τις πηγές να προέρχονται εκατέρωθεν του ενδιαμέσου σημείου X_{mid} στα 33m, καθίσταται εφικτή η ευκρινέστερη διάκριση της καμπύλης διασποράς, καθώς ενισχύονται τα τοπικά ενεργειακά μέγιστα. Τέλος, η σταθμισμένα αθροισμένη από πολλαπλά παράθυρα μεταβλητού μεγέθους καμπύλη (MW-WSSW, Pasquet et al. (2021)), έχει αποκτήσει τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, και ήταν αναμενόμενη: δίνεται μεγαλύτερος συντελεστής στις υψηλές συχνότητες προερχόμενος από διαφράγματα μικρότερου αριθμού ιχνών, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται και διευρύνεται το τμήμα των χαμηλών συχνοτήτων της καμπύλης.

Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς επί του σταθμισμένου κυματικού πεδίου, έγινε κάθε φορά με χειροκίνητο τρόπο και με επανάληψη τις επιλογές των σημείων, ώστε να προκύπτουν ποιοτικότερα αποτελέσματα. Αυτό έγινε με γνώμονα η αντιστροφή να δίνει υψηλότερο αριθμό αποδεκτών μοντέλων ταυτόχρονα με χαμηλή τιμή του ελάχιστου σφάλματος (misfit). Η διαδικασία αυτή της προσπάθειας εύρεσης του βέλτιστου αποτελέσματος, πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με την

αναθεώρηση των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 5.4: Στιγμιότυπα πεδίων διασποράς κατά την υπέρθεση, τομή S2, θέση Xmid6 στα 33m, πηγή 822 στα -6m. (a)-(d) Πεδία διασποράς απλής (st1) υπέρθεσης διαφράγματος 2, 4, 8 και 12 ιχνών, αντίστοιχα. (e) Τελικό πεδίο διασποράς σταθμισμένης (st3) υπέρθεσης, όπου με λευκό χρώμα απεικονίζεται η επιλεγμένη καμπύλη. (f) Εικόνα διασποράς χωρίς υπέρθεση (st0) από το kriSIS από την ίδια σεισμική πηγή, με την επιλεγμένη καμπύλη.

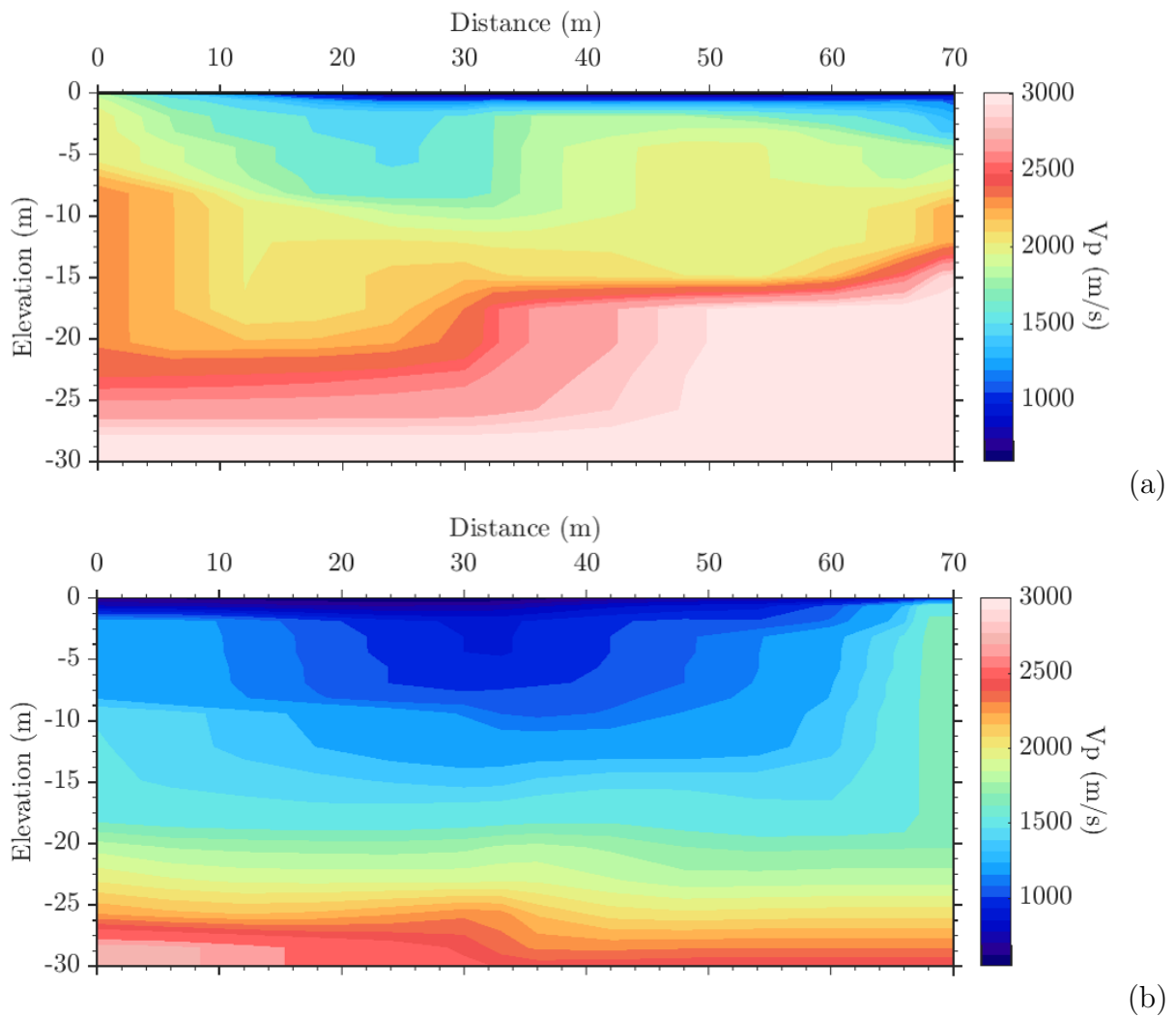
5.2 Παραμετροποίηση και αντιστροφή

Η παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου για τις καταγραφές πεδίου, θα γίνει με διαφορετική προσέγγιση απ' ό,τι στην περίπτωση των συνθετικών δεδομένων. Πλέον, λαμβάνουμε υπόψη στον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου την ταχύτητα των P-κυμάτων, όπως αυτή προέκυψε από την μέθοδο της σεισμικής διάθλασης για κάθε σεισμική τομή. Αυτό, θα γίνει αρχικά ορίζοντας την μεταβλητή `paramtype=2`, δηλώνοντας έτσι στον κώδικα του SWIP να συμπεριλάβει τις διαθέσιμες τιμές της ταχύτητας V_P , οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5.

Ύστερα από δοκιμές και εκκινώντας από μικρότερο πλήθος, τελικά ορίζονται `nlay` 10 εδαφικά στρώματα με επιπλέον `nsublay` 3 στρώσεις εντός κάθε στρώματος. Το ελάχιστο πάχος `thmin` ορίζεται μεταξύ `[0.2:2.0]`, ενώ το μέγιστο πάχος `thmax` ορίζεται μεταξύ `[2.0:10.0]`, σε μέτρα για το κάθε στρώμα. Πλέον, επιτρέπεται η ύπαρξη ζωνών χαμηλής ή ανάστροφης ταχύτητας, θέτοντας την μεταβλητή `lvz=1`. Η ταχύτητα V_S θα μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 200 και 1200m/s με την μεταβολή της ταχύτητας σε συνάρτηση με το βάθος να είναι σταθερή, η πυκνότητα ρ μεταξύ 1900 και 2000 kg/m³, ενώ τέλος ο λόγος Poisson θα κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 0.5. Η ταχύτητα V_P θα ληφθεί αυτόματα μέσω του κώδικα SWIP από κατάλληλο αρχείο εισόδου, βάση της οποίας τροποποιείται το πάχος των στρωμάτων, και συνυπολογίζεται κατά τη διαδικασία της αντιστροφής.

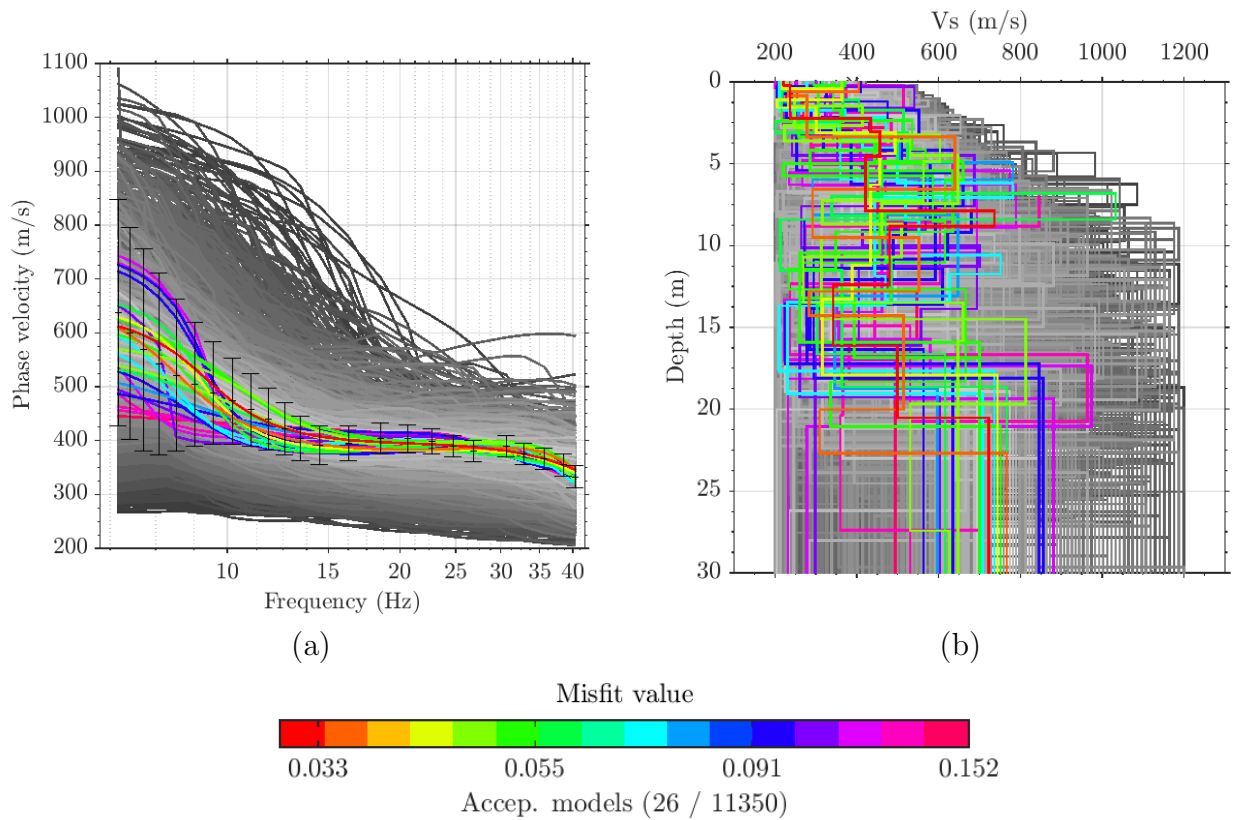
Σχετικά με τις ρυθμίσεις της υπομονάδας του SWIP για την αντιστροφή, παρέμειναν ίδιες με αυτές των συνθετικών δεδομένων, παράγοντας δηλαδή 11350 μοντέλα για κάθε θέση `Xmid`. Η μόνη βασική ρύθμιση που διαφοροποιεί πλέον την διαδικασία της αντιστροφής, αφορά το είδος της παραμετροποίησης. Θέτοντας `paramtype=2`, επιτρέπουμε έτσι στον αλγόριθμο NA να λάβει υπόψη το σύνολο των παραμέτρων και ειδικά την ταχύτητα V_P με τον τρόπο που ορίστηκε.

Για την σεισμική τομή S2, η αντιστροφή και η παραγωγή 1D αποτελέσματος για όλες τις θέσεις `Xmid`, διήρκεσε 13 λεπτά και 39.8 δευτερόλεπτα. Αυτό αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε 1 λεπτό και 14.5 δευτερόλεπτα ανά θέση. Αντίστοιχα, για την τομή S1 απαιτήθηκαν 25 λεπτά και 31.6 δευτερόλεπτα, με αυξημένο ανάλογα τον μέσο όρο στα 2 λεπτά και 19.2 δευτερόλεπτα. Η αύξηση αυτή προκύπτει από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καταγραφών της S1, τα οποία είχαν υψηλότερα επίπεδα θορύβου με πιο "δύσκολες" καμπύλες διασποράς. Στο Σχήμα 5.6, παρατίθεται ενδεικτικά το μονοδιάστατο αποτέλεσμα στα 33 μέτρα (μέσον) της τομής S2.



Σχήμα 5.5: Η μεταβολή της ταχύτητας των P-κυμάτων, όπως προέκυψε από τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης, (a) για την τομή S1 και (b) για την τομή S2.

Στο αποτέλεσμα για την υπολογισμένη καμπύλη διασποράς και την αντίστοιχη κατανομή της ταχύτητας V_S σε σχέση με το βάθος (Σχήμα 5.6), μπορεί να παρατηρηθεί πως προκύπτει μια εικόνα με λιγότερη σαφήνεια, ειδικότερα για την κατανομή της V_S , σε σχέση με τα αντίστοιχα 1D αποτελέσματα των συνθετικών δεδομένων που παρουσιάσαμε σε προηγούμενα κεφάλαια, δηλαδή για τη θέση Xmid30m (Σχ. 3.6) και τη θέση Xmid80m (Σχ. 4.10). Αυτή η τάση είναι εν μέρει αναμενόμενη, καθώς για τις πραγματικές καταγραφές πεδίου υφίσταται γενικά περισσότερος θόρυβος αφενός, και αφετέρου ο αλγόριθμος NA τείνει να είναι εξ ορισμού διερευνητικός. Επιπλέον, ενώ μπορεί για το αποτέλεσμα των 33m της S2, να προκύπτουν μόνο 26 αποδεκτά μοντέλα, αυτά προέρχονται από μια αρκετά καλή ταύτιση της παρατηρούμενης με την υπολογισμένη καμπύλη διασποράς, όπως εμφανώς προκύπτει στις ψευδο-τομές της ταχύτητας φάσης του Σχήματος 5.7.



Σχήμα 5.6: Αποτέλεσμα 1D αντιστροφής του αλγόριθμου NA, για τη θέση $X_{mid}=6$ στα 33m της τομής S2. Οι υπολογισμένες καμπύλες διασποράς (a) και οι αντίστοιχες κατανομές ταχύτητας με το βάθος (b), με την κλείδα της χρωματικής απόδοσης τιμών σφάλματος.

5.3 Αποτελέσματα δύο διαστάσεων

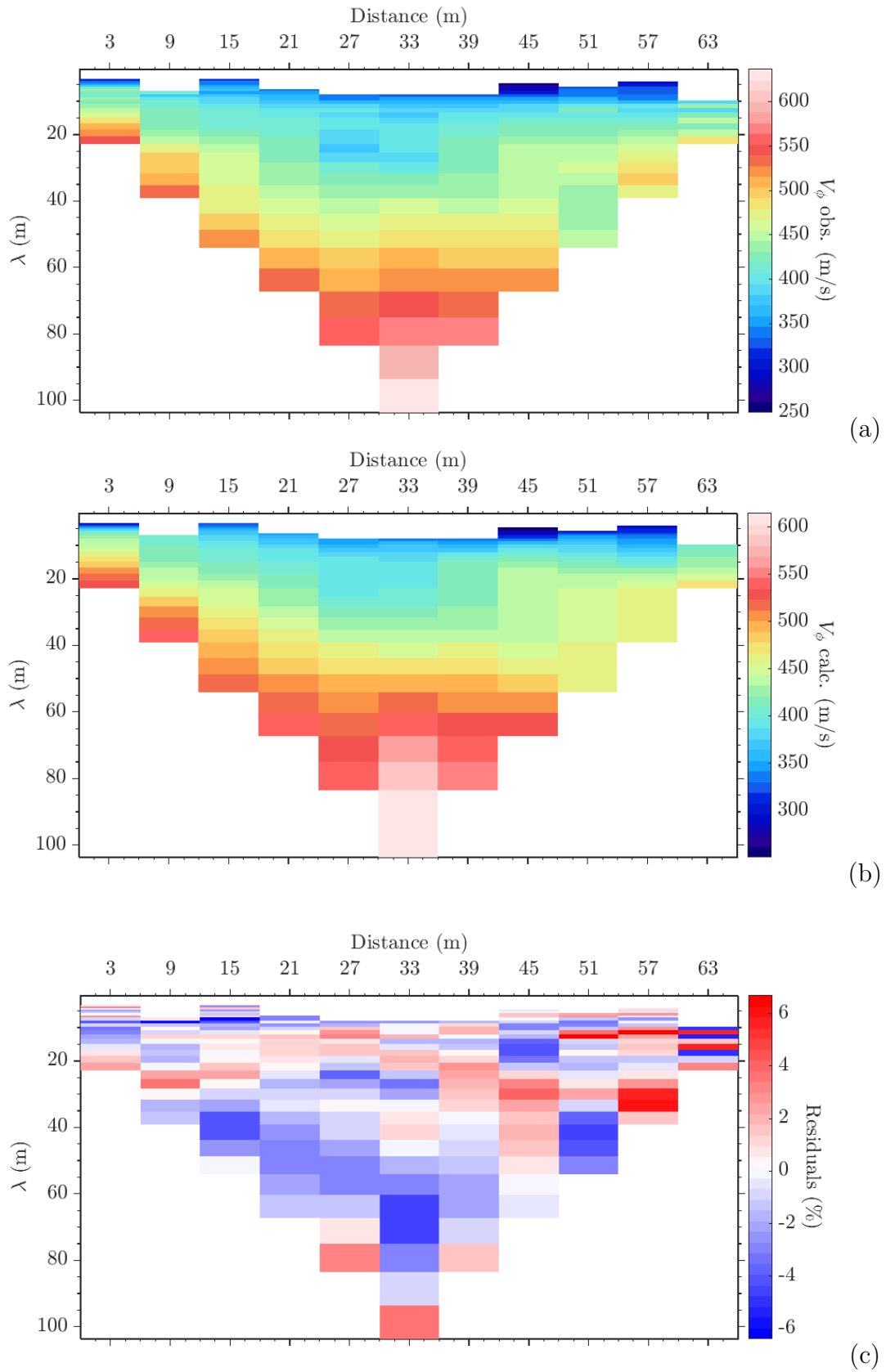
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα προφίλ των τομών διερεύνησης, από αυτό της γραμμής μελέτης S2 και στη συνέχεια της S1. Όλα τα αποτελέσματα αφορούν σεισμικά δεδομένα προερχόμενα από μεταβλητού μεγέθους πολλαπλά διαφράγματα και σταθμισμένη υπέρθεση των πεδίων διασποράς (MW-WSSW (Pasquet et al., 2021)).

Αρχικά, στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται οι ψευδοτομές της ταχύτητας φάσης για την τομή S2, κατά αντιστοιχία με αυτές των συνθετικών δεδομένων στο Σχήμα 4.15. Η υπολογισμένη V_Φ (Σχ. 5.7b) αφορά το βέλτιστο (best) μοντέλο, και παρουσιάζει αρκετά καλή ταύτιση για περισσότερα παρατηρούμενα μήκη κύματος, αφού όπως προκύπτει από την ποσοστιαία μεταξύ τους διαφορά (Σχ. 5.7c), είναι της τάξεως του $\pm 6\%$.

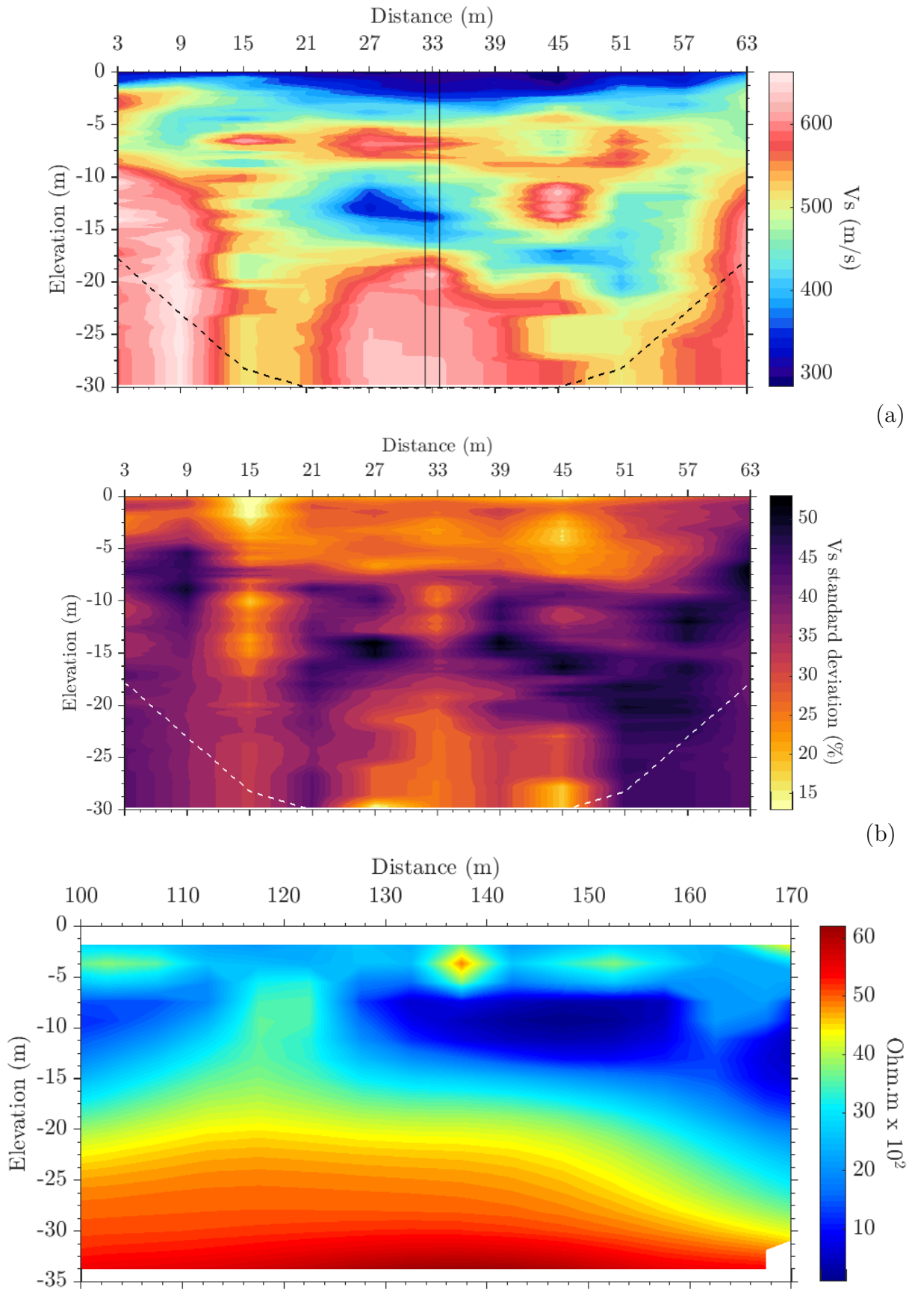
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής για το προφίλ δύο διαστάσεων μεταβολής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, για τη γραμμή μελέτης S2. Στο Σχήμα 5.8a

απεικονίζεται η μεταβολή της V_s τόσο ως προς το βάθος όσο και προς το μήκος, όπως αυτή προέκυψε για το διάμεσο εξομαλυμένο μοντέλο μέσης τιμής (average smooth), ενώ στο Σχήμα 5.8b παρατίθεται η τυπική απόκλιση της ταχύτητας σε ποσοστιαία μορφή. Εξυπακούεται πως υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης τόσο του βέλτιστου (best) όσο και του σταθμισμένου βάσης σφάλματος, εξομαλυμένου (weighted smooth) μοντέλου. Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί το average smooth μοντέλο για την τομή S2, καθώς δίνει το πιο προσιτό αποτέλεσμα, ως πιο εύκολα αναγνωρίσιμο και οπτικά κατανοητό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παράθεση του αποτελέσματος της μεθόδου τομογραφίας ηλεκτρικής αντίστασης (ERT) που φαίνεται στο Σχήμα 5.8c, το οποίο αποτελεί τμήμα της 300 μέτρων συνολικά διαθέσιμης πληροφορίας της ηλεκτρικής τομογραφίας. Το πρώτο γεώφωνο στα 0m της γραμμής μελέτης S2 (Σχ. 5.2b), αντιστοιχεί στα 101 μέτρα της ERT τομής, ενώ το τελευταίο γεώφωνο των 66m, εντοπίζεται στα 167 μέτρα όδευσης της τομής της ηλεκτρικής τομογραφίας.

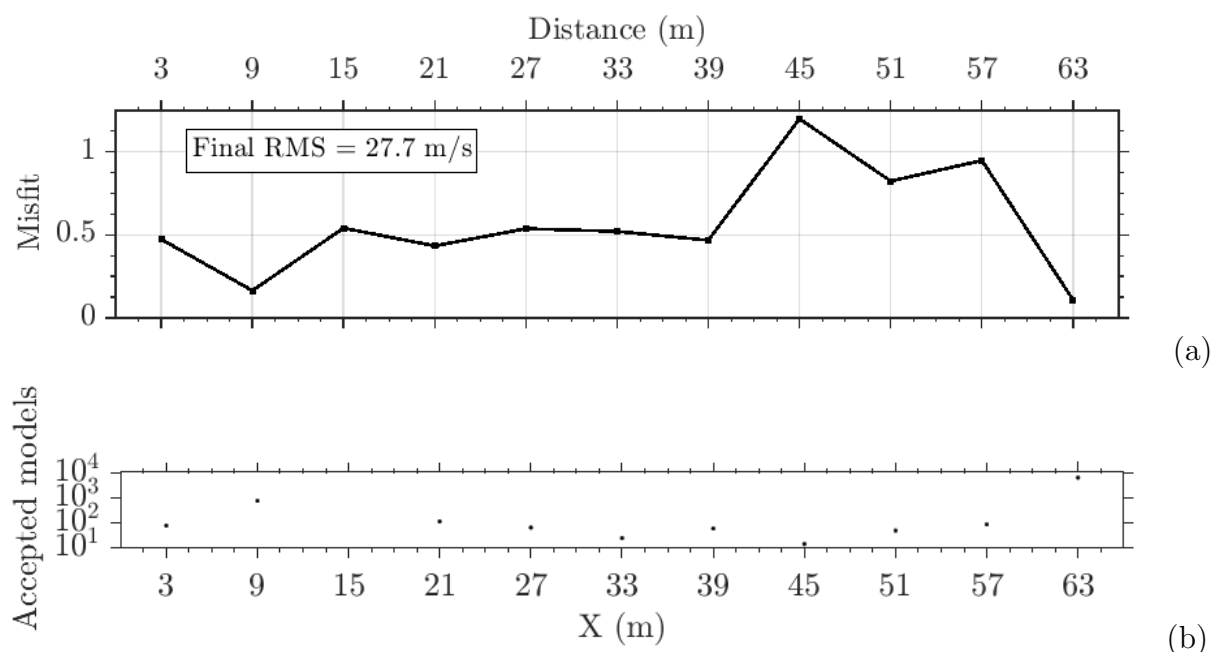
Τέλος, στο Σχήμα 5.9, παρατίθενται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της τομής S2. Η κατανομή της ελάχιστης τιμής σφάλματος, αφορά το εξομαλυμένο μοντέλο μέσων τιμών (average smooth). Αυτός είναι ο λόγος που προκύπτει αυξημένη τιμή σε σχέση με την 0.033, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Εξίσου, διαφοροποιείται και η τιμή του RMS σφάλματος, η οποία για την περίπτωση του βέλτιστου μοντέλου θα ήταν ίση με 10.2 m/s. Σε αντίθεση με την τιμή του σφάλματος η οποία μπορεί να μεταβάλλεται, στο Σχήμα 5.9b απεικονίζεται ο αριθμός των αποδεκτών μοντέλων σε κάθε θέση X_{mid} , όπως προκύπτει από τον αλγόριθμο NA. Παρατηρείται πως στην θέση των 45m ($X_{mid}=8$), εντοπίζονται ταυτόχρονα τόσο η υψηλότερη τιμή σφάλματος όσο και ο χαμηλότερος αριθμός αποδεκτών μοντέλων (15). Το μοτίβο αυτό όμως, δεν επαναλαμβάνεται απαραίτητα και σε άλλες "δύσκολες" θέσεις διερεύνησης. Όπως αναφέρθηκε και στα συμπεράσματα των συνθετικών δεδομένων (ενότητα 4.5), συμβαίνει να προκύπτει υψηλός αριθμός αποδεκτών μοντέλων με χαμηλό μάλιστα σφάλμα, και το αποτέλεσμα αυτό να προέρχεται από κακής ποιότητας καμπύλη διασποράς. Ακριβώς λοιπόν αυτό, μπορεί να παρατηρηθεί για τη θέση $X_{mid}11$ στα 63m, όπου τα σχεδόν 7000 αποδεκτά μοντέλα με 0.056 ελάχιστη τιμή σφάλματος, προκύπτουν για μια κακής ποιότητας υπολογισμένη V_{Φ} με υψηλό ποσοστό διαφοράς (Σχ. 5.7c) για όλα τα μήκη κύματος της καμπύλης διασποράς που επιλέχθηκε.



Σχήμα 5.7: Ψευδοτομές ταχύτητας φάσης V_ϕ σε όρους μήκους κύματος και όδευσης θέσεων διερεύνησης (Xmids), τομή S2. Ταχύτητα φάσης (a) επιλεγμένων και (b) υπολογισμένων καμπύλων διασποράς. (c) Διαφορά της V_ϕ (%) μεταξύ των προφίλ (a) και (b).

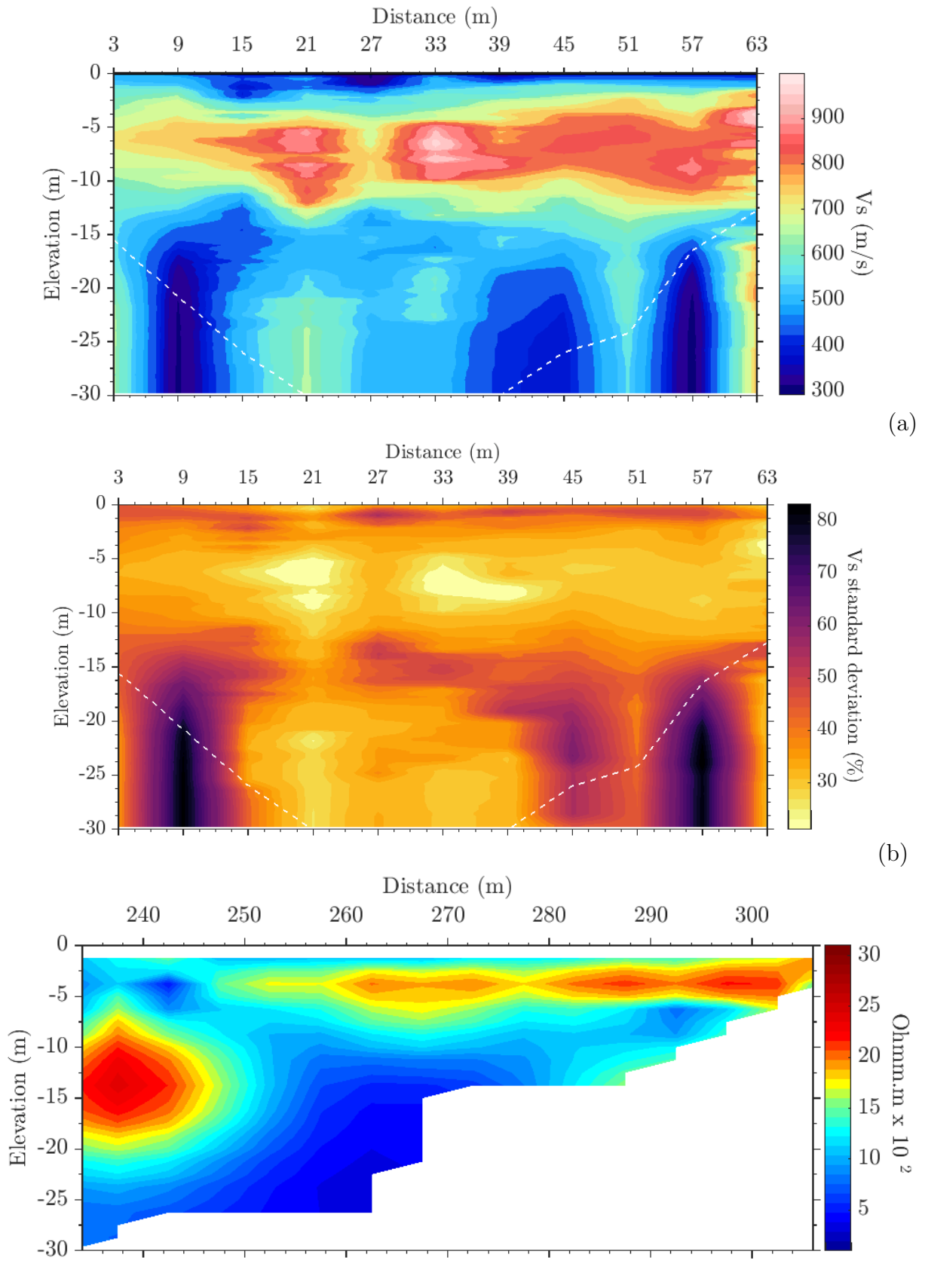


Σχήμα 5.8: Αποτελέσματα σε προφίλ δύο διαστάσεων, τομή S2. (a) Κατανομή ταχύτητας V_S , (b) τυπική απόκλιση της V_S σε μορφή ποσοστού (%) και (c) τομή ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT).



Σχήμα 5.9: Τομή S2: ποιοτικά χαρακτηριστικά αντιστροφής για κάθε θέση Xmid. (a) Η ελάχιστη τιμή σφάλματος για το εξομαλυμένο μοντέλο μέσω των τιμών (average smooth), και (b) ο αριθμός των αποδεκτών μοντέλων.

Στα Σχήματα 5.10a και 5.10b, παρουσιάζονται κατ' αναλογία τα αντίστοιχα αποτελέσματα του προφίλ της ταχύτητας V_S σε δύο διαστάσεις για την τομή S1, μαζί με την τυπική απόκλιση, όπως αυτά προκύπτουν πλέον για το σταθμισμένο εξομαλυμένο μοντέλο (weighted smooth) βάση του ελαχίστου σφάλματος. Καθώς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης σεισμικής τομής δεν είναι τόσο καλά λόγω θορύβου από την καταγραφή του κυματικού πεδίου, επιλέχθηκε να παρουσιαστεί το σταθμισμένο μοντέλο, ως μια πιο "αυστηρή" προσέγγιση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει για την ίδια περιοχή με την γραμμή μελέτης S1, η παράθεση της ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχ. 5.10c). Παρά το γεγονός ότι η διαθέσιμη πληροφορία για την ERT τομή αφορά το άκρο της όδευσης, και ως εκ τούτου το αποτέλεσμα είναι διαθέσιμο για μεγάλο βάθος μόνο σε τμήμα της όδευσης, μπορούν να παρατηρηθούν ομοιότητες μεταξύ των τομών V_S και ERT, ιδιαίτερα στο ρηχότερο τμήμα καθώς και στην πλευρική μεταβολή αυτών των εδαφικών δομών, αν και πιο περιορισμένα. Το πρώτο και το τελευταίο γεώφωνο της γραμμής μελέτης S1 (Σχ. 5.2a) εντοπίζονται αντίστοιχα στα 237m και 303m της τομής ERT.

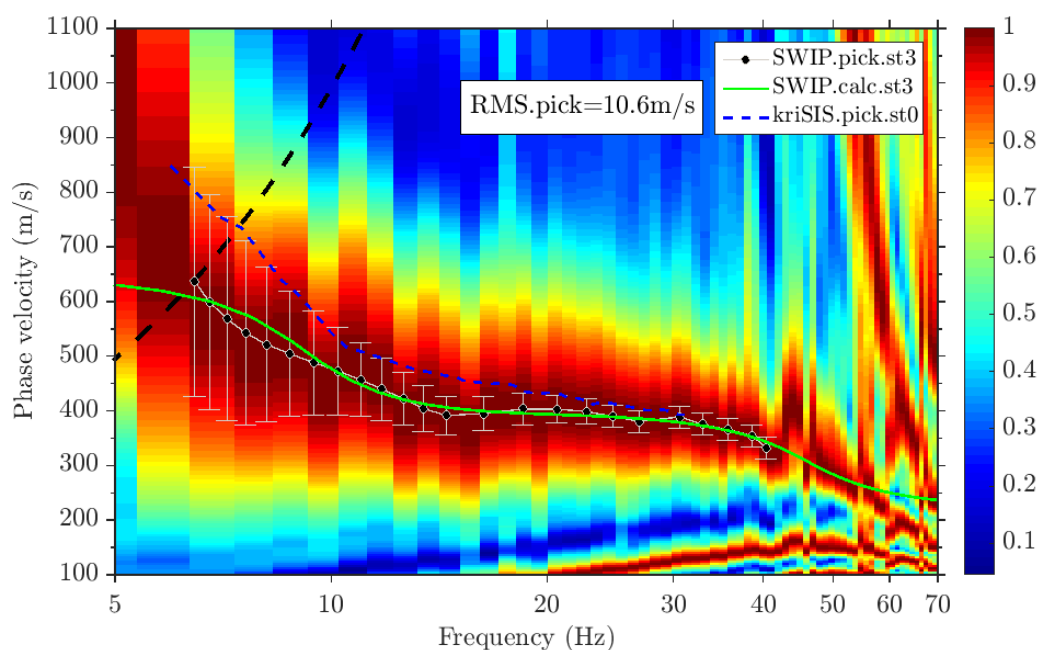


Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα σε προφίλ δύο διαστάσεων, τομή S1. (a) Κατανομή ταχύτητας V_S , (b) τυπική απόκλιση της V_S σε μορφή ποσοστού (%) και (c) τομή ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT).

5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και κατηγοριοποίηση εδάφους

Στην παρούσα ενότητα θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις γραμμές μελέτης S1 και S2, τόσο αμιγώς από την αντιστροφή του SWIP όσο και σε σύγκριση με άλλες γεωφυσικές μεθόδους που είχαν εκτελεστεί στο πεδίο. Αρχικά, θα αξιολογηθεί το μονοδιάστατο αποτέλεσμα που προέκυψε για το μέσον του αναπτύγματος της τομής S2, εξετάζοντας τις επιλεγμένες καμπύλες διασποράς μεταξύ του kriSIS και του SWIP. Στη συνέχεια, θα μελετηθεί η κατανομή της ταχύτητας σε σχέση με το βάθος, συγκρίνοντας το αποτέλεσμα του SWIP με αυτά των ευρύτερα καθιερωμένων σεισμικών μεθόδων που είχαν διενεργηθεί (Σχ. 5.1).

Παρατηρείται λοιπόν στο παρακάτω σχήμα τις επιλεγμένες καμπύλες διασποράς για τη θέση στα 33m (Xmid7) με πηγή στα -6m (822), όπως προέκυψαν από τα δύο λογισμικά: χωρίς υπέρθεση (st0) μέσω της κλασικής MASW από το kriSIS και με σταθμισμένη υπέρθεση (st3) δεδομένων μεταβλητού διαφράγματος από το SWIP, από όπου προέρχεται και το κυματικό πεδίο.

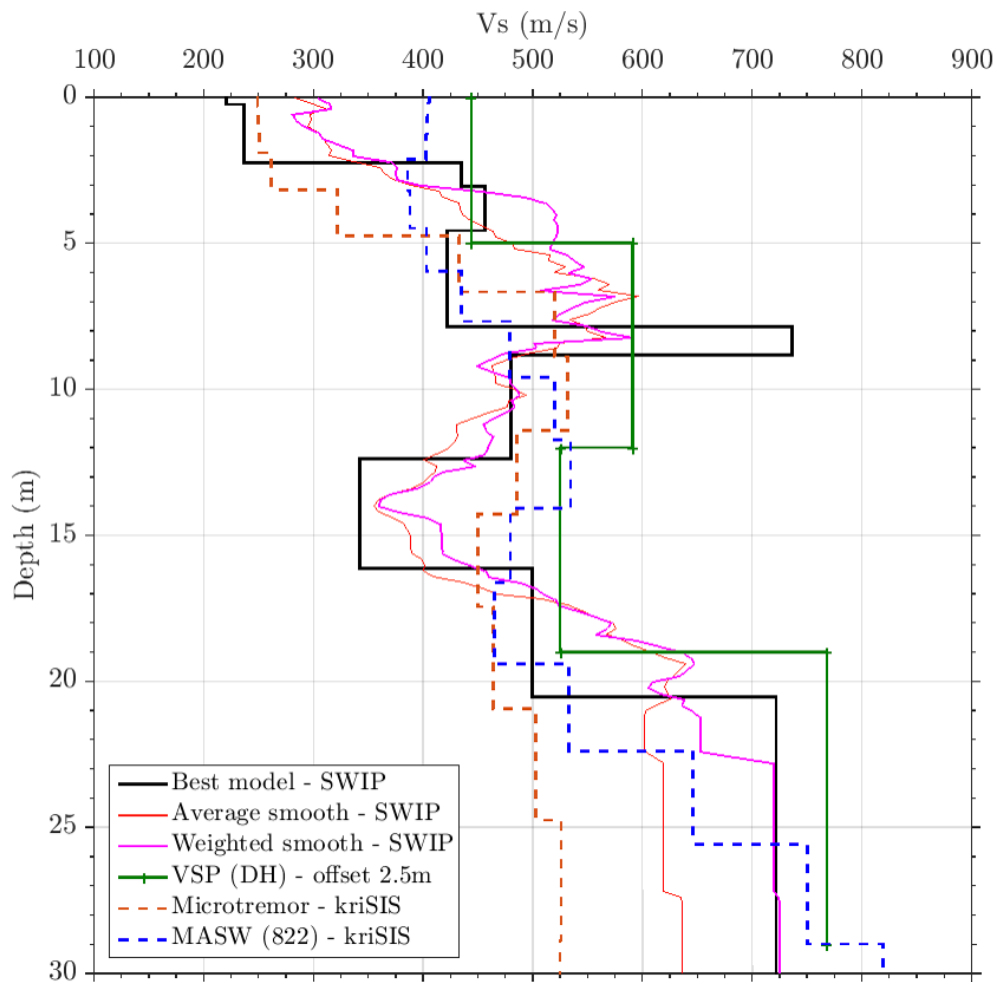


Σχήμα 5.11: Πεδίο διασποράς για τη θέση στα 33m της τομής S2, σεισμική πηγή 822 (στα -6m) από σταθμισμένη υπέρθεση του SWIP, επί του οποίου παρουσιάζονται οι επιλεγμένες καμπύλες από kriSIS (μπλε διακεκομμένη γραμμή) και από το SWIP (γκρι γραμμή με μπάρες σφάλματος). Παρατίθεται επίσης η υπολογισμένη καμπύλη διασποράς του SWIP για το βέλτιστο (best) μοντέλο, καθώς επίσης αναγράφεται και το σχετικό σφάλμα μεταξύ των επιλεγμένων καμπύλων. Κλίμακα συχνότητας οριζοντίου άξονα σε λογαριθμική μορφή.

Όπως μπορεί να γίνει διακριτό από το πεδίο διασποράς του Σχήματος 5.11, οι επιλεγμένες καμπύλες ακολουθούν την ίδια τάση, με αυτή του kriSIS να αντιστοιχεί σε υψηλότερες ταχύτητες φάσης V_Φ , ειδικά στο τμήμα των χαμηλότερων συχνοτήτων. Στο Σχήμα αυτό, ο οριζόντιος άξονας των συχνοτήτων έχει αποδοθεί σε λογαριθμική κλίμακα, ώστε να καθίσταται ευκολότερα αντιληπτές οι διαφορές μεταξύ των καμπύλων. Οι καμπύλες διασποράς του SWIP (με γκρι γραμμή και διακύμανση επιλογής) και του kriSIS (μπλε διακεκομμένη γραμμή), προέρχονται από τα πεδία που απεικονίζονται στα Σχήματα 5.4e και 5.4f, αντίστοιχα, και η μεταξύ τους διαφορά RMS προκύπτει ίση με 61.90 m/s ή 10.58 %. Παρατίθεται επίσης για λόγους πληρότητας της σύγκρισης, η υπολογισμένη καμπύλη διασποράς με πράσινη συμπαγή γραμμή, όπως αυτή προέκυψε για το βέλτιστο μοντέλο του SWIP, και η οποία παρουσιάζει παρόμοια εικόνα.

Πέραν της παραπάνω σύγκρισης των καμπύλων διασποράς που επιλέχθηκαν από το μετασχηματισμό (και την σταθμισμένη υπέρθεση) του κυματικού πεδίου, αξιολογείται στη συνέχεια το αποτέλεσμα της κατανομής της ταχύτητας V_S του SWIP για το μέσον της τομής S2, συγκρίνοντας το με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων μεθόδων και τεχνικών. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.12, παρατίθενται σε κοινό γράφημα οι κατανομές της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, όπως αυτές προέκυψαν από: το βέλτιστο μοντέλο (με μαύρο), τα εξαμολυμένα μοντέλα μέσω των τιμών (με κόκκινο) και σταθμισμένης μεταβολής (με έντονο κόκκινο μωβ χρώμα) του SWIP, τη σεισμική μέθοδο κατακόρυφου προφίλ V_S μέσω γεώτρησης Down-hole (DH)/ Vertical Seismic Profiling (VSP) (με πράσινο), την παθητική MASW - ανάλυση μικροθορύβου (με διακεκομμένη πορτοκαλί) και την κλασική MASW (με διακεκομμένη μπλε) του kriSIS. Σημειώνεται πως στην ανάλυση μικροθορύβου - παθητική MASW, ο μετασχηματισμός του κυματικού πεδίου έγινε με το λογισμικό SeisImager/SW (Geometrics Inc., 2009), ενώ η αντιστροφή πραγματοποιήθηκε με το kriSIS (Κρητικιάκης, 2010). Επιπλέον, στο συγκεκριμένο Σχήμα περιέχεται μόνο το ένα αποτέλεσμα μετρήσεων μέσω VSP (DH), ενώ υφίστανται και άλλα δύο για διαφορετικές κατά μήκος αποστάσεις, οι οποίες ωστόσο περιέχονται σε συγκριτικό Πίνακα, παρακάτω. Τέλος, τα διαθέσιμα αποτελέσματα από την καταγραφή 821 παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα στην μεταβολή της ταχύτητας, αλλά για λόγους απλότητας της σύγκρισης, αυτά παραλήφθηκαν.

Η τάση της μεταβολής της ταχύτητας που παρατηρείται για όλες τις παραπάνω μεθόδους και τεχνικές, καθίσταται εμφανής από το επόμενο γράφημα. Γενικά, παρατηρείται αύξηση στην τιμή της



Σχήμα 5.12: Σύγκριση κατανομής V_S σε σχέση με το βάθος, μεταξύ διαφόρων σεισμικών μεθόδων, για το μέσον του αναπτύγματος της τομής S2.

ταχύτητας V_S στο βάθος περί των 5-7.5m, ύστερα από μια επιφανειακή εδαφική ζώνη χαμηλότερης ταχύτητας. Ύστερα, η ταχύτητα εμφανίζει μείωση στην περιοχή μεταξύ 10-16m βάθους, ενώ στην τελευταία διακριτή περιοχή μεταβολής μετά τα 20m βάθος, η ταχύτητα τελικώς αυξάνεται. Οι διαφορές στην ταχύτητα ποσοτικοποιούνται στον παρακάτω Πίνακα 5.1, όπου έχει υπολογιστεί και παρουσιάζεται η RMS διαφορά σε όρους ταχύτητας και ποσοστού, με τιμή αναφοράς την ταχύτητα που προέκυψε από την εκάστοτε μέθοδο, σε σύγκριση με αυτή του βέλτιστου μοντέλου από το SWIP για τη θέση $X_{mid} = 33m$. Οι διαφορές που παρατηρούνται στην ταχύτητα μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων, είναι της τάξεως του 20-30%, και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως σχετικά μεγάλες. Όμως, αυτές προέρχονται κυρίως από την διαφορά που υπάρχει κοντά στα βάθη μεταβολής της ταχύτητας και πιθανής αλλαγής εδαφικών στρωμάτων, δηλαδή στα σημεία που ορίζεται η μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με το βάθος. Εντούτοις, το SWIP έχει μικρότερες

RMS	DH/VSP			Passive	MASW
	2.5m	4m	6m	MASW	
m/s	114.30	86.17	76.59	136.60	122.33
%	24.34	20.76	20.05	30.71	30.82

Πίνακας 5.1: RMS διαφορά V_S μεταξύ διαφορετικών μεθόδων και του βέλτιστου αποτελέσματος του SWIP για τη θέση $X_{mid}=33m$ της τομής S2, σε όρους ταχύτητας και ποσοστού.

διαφορές σε σχέση με την VSP (DH) από ότι με την παθητική και κλασική MASW. Αυτό, μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το αποτέλεσμα του SWIP, όπως και αυτό της VSP, ίσως είναι πιο αντιπροσωπευτικό για την εν λόγω θέση, δηλαδή στα 33 μέτρα της γραμμής μελέτης S2.

Στο Σχήμα 5.12 διαπιστώνεται μεταξύ άλλων, η δυνατότητα που προσφέρει ο αλγόριθμος NA για τη μοντελοποίηση και το αποτέλεσμα των εδαφικών στρωμάτων, ώστε αυτά να αποτελούνται από στρώματα μεταβλητού και διαφορετικού μεταξύ τους πάχους. Μέσω αυτής της δυνατότητας κατά την παραμετροποίηση, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.2, επιτρέπεται ενδεχομένως πιο ρεαλιστική απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς τα ισοπαχή στρώματα αποτελούν μάλλον μια εξιδανίκευση αυτού. Σε συνέχεια των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών σεισμικών μεθόδων και της σύγκρισης με το αποτέλεσμα του SWIP, παρατίθενται στον Πίνακα 5.2 τα αποτελέσματα της ερευνητικής δειγματοληπτικής γεώτρησης (Savvaidis et al., 2014), που αντιστοιχούν στο μέσον της γραμμής μελέτης S2. Η γεώτρηση εντοπίζεται εξίσου στο μέσον του αναπτύγματος των γεωφώνων της τομής S2, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 με κίτρινο χρώμα και σημειώνεται με κατακόρυφες μαύρες γραμμές στο Σχήμα 5.8a. Μπορεί να διαπιστωθεί πως η μεταβολή της V_S συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με τα βάθη στα οποία εντοπίζονται οι γεωλογικοί ορίζοντες. Συγκεκριμένα, από την επιφάνεια μέχρι και το βάθος των 4.45m, όπου εντοπίζεται αποσπασμένος μανδύας μαργαϊκού φαμμίτη, η ταχύτητα V_S όπως προκύπτει από την μονοδιάστατη κατανομή του SWIP (Σχ. 5.12), κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές, ιδιαίτερα μέχρι τα 2.5m, η οποία όμως προοδευτικά αυξάνεται. Σύμφωνα με τον δεύτερο γεωλογικό σχηματισμό, δηλαδή μεταξύ 4.45 και 10.10 μέτρα βάθους, όπου εντοπίζονται κατακερματισμένοι μαργαϊκοί φαμμίτες και ασβεστόλιθοι (Πίνακας 5.2, η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων παραμένει σχεδόν αμετάβλητη για τα πρώτα μέτρα (βέλτιστο μοντέλο, από τα 5.0 περίπου έως και τα 8.0 μέτρα), ενώ στη συνέχεια αυξάνεται απότομα στο τμήμα μεταξύ 8.0 και 9.0m. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα γεωτρητικά δεδομένα όπου, στον σχηματισμό

αυτό εντοπίζεται κενό καρστικής προέλευσης στα 6.30 έως 6.39m, ενώ ο σχηματισμός είναι έντονα κατακερματισμένος μετά τα 7.70m βάθους. Ταυτόχρονα, σε βάθος που ταυτίζεται περίπου με τα παραπάνω γεωτρητικά αποτελέσματα, τα εξαμολυμένα μοντέλα μέσω των τιμών και σταθμισμένης μεταβολής του SWIP, παρουσιάζουν έντονες αυξομειώσεις στο διάστημα από 6.0 έως 8.0 μέτρα, ενώ μετά τα 8.0m και την έξαρση στην τιμή της ταχύτητας, αυτά τα μοντέλα ταχύτητας παρουσιάζουν φθίνουσα τιμή. Στη συνέχεια, για τη ζώνη αποσάθρωσης των μαργαϊκών φαμιτών, αποτελούμενο από άμμο και για βάθος από 10.10 έως 13.50m, τα μοντέλα ταχύτητας του SWIP συνεχίζουν τη φθίνουσα πορεία της τιμής της ταχύτητας με μικρές διακυμάνσεις, έως το βάθος των 14.0 περίπου μέτρων για τα εξαμολυμένα μοντέλα μέσω των τιμών και σταθμισμένης μεταβολής. Για το βάθος μεταξύ 13.50 έως 20.60 μέτρων, βάσει της περιγραφής της ερευνητικής γεώτρησης του Πίνακα 5.2, εντοπίζεται στιφρή μάργα. Τα εξαμολυμένα μοντέλα ταχύτητας, σταθμισμένης μεταβολής και μέσω των τιμών, σημειώνουν την πιο ευδιάκριτη και με σταθερό τρόπο αύξηση στην τιμή της V_s , για το βάθος από 14.0 έως περίπου 19.50m, ενώ το βέλτιστο μοντέλο παρουσιάζει αντίστοιχα αύξηση, από το βάθος των 16.0m έως και τα 20.50 μέτρα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σημειώνεται μεταξύ 20.60 και 21.60m των αποτελεσμάτων της γεώτρησης, όπου εντοπίζεται ορίζοντας μέτρια συνεκτικού μαργαϊκού φαμιτίτη, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται διακύμανση (μικρή μείωση και στην συνέχεια αύξηση) στην ταχύτητα των εξαμολυμένων μοντέλων, για το τμήμα μεταξύ 19.50 και 20.50 μέτρων βάθους. Τέλος, για το εδαφικό στρώμα της μάργας, από το βάθος των 21.60 έως τα 30 μέτρα της γεώτρησης, σημειώνεται αύξηση στη V_s των μοντέλων ταχύτητας του SWIP, όπως αντίστοιχα μπορεί να παρατηρηθεί και για τις υπόλοιπες σεισμικές μεθόδους, στο Σχήμα 5.12.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διαπιστώνεται λοιπόν η αξιοπιστία των εξαμολυμένων μοντέλων μέσω των τιμών και σταθμισμένης μεταβολής του SWIP, λόγω της ταύτισης που παρουσιάζουν στο βάθος και το πάχος των γεωλο-γικών οριζόντων, όπως αυτά προέκυψαν από την ερευνητική γεώτρηση. Εξίσου, ταυτίζεται και η μεταβολή της τιμής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, αφού για παράδειγμα η V_s παρουσιάζει μείωση στο βάθος που βρίσκεται κατακερματισμένος ή αμμόδης σχηματισμός, από 7.70 έως 13.50m, ενώ σημειώνει αύξηση στον συμπαγή σχηματισμό του τμήματος μεταξύ 13.50 έως 20.60m. Αξίζει τέλος να σημειωθεί πως τα γεωτρητικά δεδομένα βρίσκονται, σε γενικές γραμμές, σε συμφωνία τόσο με τα αποτελέσματα της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) όσο και με τις σεισμικές μεθόδους με τις οποίες έγινε η σύγκριση του αποτελέσματος του SWIP.

Βάθος (m)	Περιγραφή σχηματισμού
0.00 - 0.10	Τεχνητά υλικά οδοστρώματος
0.10 - 4.45	Μανδύας αποσάθρωσης μαργαϊκού ψαμμίτη. Θραύσματα μητρικού πετρώματος και ιλυοαμμώδη υλικά.
4.45 - 10.10	Μαργαϊκοί ψαμμίτες - Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι. Έντονα κατακερματισμένος σχηματισμός από τα 7.70m. Παρουσία κενού καρστικής προέλευσης στο τμήμα από 6.30 έως 6.39m.
10.10 - 13.50	Λεπτόκκοχη έως τοπικά αδρόκκοχη άμμος. Ζώνη αποσάθρωσης μαργαϊκών ψαμμιτών.
13.50 - 20.60	Μελανότεφρη απολιθωματοφόρα μάργα. Στιφρή, τοπικά πλαστική, με μικρά ποσοστά άμμου και ασβεστιτικών συγκριμάτων.
20.60 - 21.60	Μαργαϊκός ψαμμίτης, μέτρια συνεκτικός.
21.60 - 30.00	Μελανότεφρη μάργα, όπως μεταξύ 13.50 - 20.60m.

Πίνακας 5.2: Ευρήματα γεωλογικών σχηματισμών ερευνητικής δειγματοληπτικής γεώτρησης.

Με το 1D αποτέλεσμα του SWIP να παρουσιάζει όμοια μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με τις άλλες σεισμικές μεθόδους αλλά και τα αποτελέσματα της ερευνητικής δειγματοληπτικής γεώτρησης, για το μέσον του αναπτύγματος της τομής S2, στη συνέχεια αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραθυρική εξαγωγή σε δύο διαστάσεις, για τις δύο σεισμικές τομές. Η σύγκριση πλέον αφορά την πλευρική μεταβολή της ταχύτητας V_S , καθώς η μεταβολή αυτή μπορεί να συσχετιστεί με εδαφικούς σχηματισμούς διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών, σχι-αγραφώντας έτσι την στρωματογραφία της υπό εξέταση περιοχής. Μελετώντας λοιπόν την τομή S2, αρχικά μπορεί να ειπωθεί πως στις ψευδοτομές της ταχύτητας φάσης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7, παρουσιάζεται ένα πολύ καλό αποτέλεσμα μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογισμένων τιμών, σύμφωνα πάντα και με την μεταξύ τους ποσοστιαία διαφορά. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της παραθυρικής εξαγωγής σεισμικών δεδομένων, τα μεγαλύτερα μήκη κύματος λ εντοπίζονται προς το κέντρο του αναπτύγματος, ενώ προοδευτικά μικρότερα καταγεγραμμένα μήκη καταγράφονται προς στις ακραίες θέσεις X_{mid} . Για παράδειγμα, τα δεδομένα στις θέσεις των 3 και 63m, έχουν προέλθει από παράθυρα με μόνο 2 σεισμικά ίχνη, αυτά δηλαδή από τους δέκτες στα 0 και +6m για το $X_{mid}=1$, και τους δέκτες στα +60 και +66m, αντίστοιχα.

Πέραν του μικρού εύρους καταγεγραμμένου μήκους κύματος, η θέση X_{mid} στα 63m παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ παρατηρούμενης και υπολογισμένης V_{Φ} για όλα τα καταγεγραμμένα μήκη κύματος, καθώς δεν λήφθηκαν υπόψη οι πηγές 824 και 825 για τα συγκεκριμένα γεώφωνα (στις θέσεις 60 και 61), διότι απορρίφθηκαν από το SWIP λόγω εξαιρετικά θορυβώδους σήματος.

Αναφορικά με την ποιότητα του αποτελέσματος της αντιστροφής, αυτή θα πρέπει να συνεκτιμάται τόσο από την διαφορά των ταχυτήτων φάσης, η οποία απεικονίζεται για την τομή S2 στο Σχήμα 5.7c, όσο και από το ποσοστό της τυπικής απόκλισης (standard deviation), όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8b. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που παρατίθενται στο Σχήμα 5.9, προκύπτει το συμπέρασμα πως το αποτέλεσμα σε μία θέση διερεύνησης δεν μπορεί να χαρακτηριστεί μονοσήμαντα "καλό" ή "λιγότερο καλό" ως προς την ποιότητα και την αξιοπιστία του. Παίρνοντας για παράδειγμα τη θέση $X_{mid}=11$ στα 63m της S2, η οποία συνιστά ένα σημείο διερεύνησης με πολλά αποδεκτά μοντέλα και χαμηλή τιμή ελαχίστου σφάλματος (misfit), όπως προκύπτει από την αντίστοιχη θέση του Σχήματος 5.9. Όμως, η ταχύτητα φάσης για τη θέση αυτή παρουσιάζει τα μεγαλύτερα ποσοστά απόκλισης μεταξύ παρατηρούμενης και υπολογισμένης τιμής για όλα τα επιλεγμένα μήκη κύματος, και αντίστοιχα το ποσοστό της τυπικής απόκλισης προκύπτει υψηλό για όλο το βάθος της ταχύτητας V_S . Αντίθετη εικόνα εντοπίζεται στη θέση των 45m ($X_{mid}=8$), όπου εντοπίζονται ταυτόχρονα τόσο η υψηλότερη τιμή σφάλματος όσο και ο χαμηλότερος αριθμός αποδεκτών μοντέλων (15). Για τη θέση αυτή όμως, η υπολογισμένη ταχύτητα φάσης της καμπύλης διασποράς, παρουσιάζει πολύ μικρές αποκλίσεις από την παρατηρούμενη, ειδικότερα για τα μεγαλύτερα μήκη κύματος τα οποία αντιστοιχούν και στο μεγαλύτερο βάθος, οπότε και μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Μια ενδιαμέση, διαφορετική κατάσταση γίνεται διακριτή για τη θέση στα 39m. Με το σφάλμα να εντοπίζεται κοντά στον μέσο όρο ($\simeq 0.5$) και 63 αποδεκτά μοντέλα, η αντιστροφή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως αποδεκτή, οριακά ικανοποιητική. Όμως, παρατηρώντας κανείς το Σχήμα 5.7c, μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι το αποτέλεσμα της αντιστροφής σε όρους ταχύτητας V_S , προέρχεται από την πλέον καλή σύγκλιση μεταξύ $V_{\Phi obs.}$ και $V_{\Phi calc.}$ μεταξύ των υπολοίπων ταχυτήτων φάσης της ψευδοτομής, όπου μάλιστα είναι καταγεγραμμένο μεγάλο εύρος τιμών μήκους κύματος λ . Καταλήγοντας, υψηλό σφάλμα στην αντιστροφή ή χαμηλός αριθμός αποδεκτών μοντέλων, δεν συνεπάγεται απαραίτητα κακής ποιότητας αποτέλεσμα. Αυτό, μπορεί να ισχύει και αντίστροφα (*visе versa*), καθώς χαμηλής

ποιότητας (υψηλής απόκλισης) και περιορισμένου συχνοτικού εύρους καμπύλη διασποράς, μπορεί να οδηγήσει τον ΝΑ αλγόριθμο σε πολλά αποδεκτά μοντέλα με πολύ χαμηλό σχετικό σφάλμα. Ως συμπέρασμα προκύπτει η ανάγκη για αξιολόγηση τόσο της απόκλισης στην V_{Φ} όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών της αντιστροφής.

Εξετάζοντας το αποτέλεσμα της τομής V_S για την γραμμή μελέτης S2, σε σχέση κυρίως με το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχ. 5.8c), αλλά και σε μικρότερο βαθμό με αυτό της σεισμικής διάθλασης (Σχ. 5.5a), προκύπτει κοινό μοτίβο στην πλευρική μεταβολή των χαρακτηριστικών, καθώς παρατηρείται εδαφική δομή η οποία βυθίζεται προς τα δεξιά. Το χαρακτηριστικό αυτό εκφράζεται ως μείωση στην ταχύτητα των P-κυμάτων σε σχέση με το βάθος, για το υπερκείμενο από αυτό στρώμα, από τα 10 έως τα 60m, καθώς και ως αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση ($Ohm \cdot m$), από την θέση των 120m έως τα 160m, σε σχέση με το βάθος και κατά μήκος της τομής ERT. Ταυτόχρονα, εντοπίζεται στην τομή S2, μια αντίστοιχη μείωση σε σχέση με το βάθος της σχετικά υψηλής ταχύτητας των S-κυμάτων, από τα 3 μέτρα όδευσης έως και τα 57. Το βαθύτερο αυτό εδαφικό στρώμα, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις αυξημένες τιμές τόσο της ηλεκτρικής αντίστασης όσο και της ταχύτητας των S-κυμάτων σε αυτό, αποδίδεται σε βραχώδη σχηματισμό με μικρότερο πορώδες, ίσως ασβεστολιθικής σύστασης, ο οποίος συνιστά και το βραχώδες - σεισμικό υπόβαθρο της εξεταζόμενης περιοχής (seismic bedrock). Επιπλέον, η "έξαρση" που σχηματίζεται στα 120m της ERT, συμπίπτει χωρικά με την πλευρική μείωση της ταχύτητας V_S , από τα 15 έως τα 21 μέτρα της αντίστοιχης ψευδοτομής. Τέλος, η ζώνη με την ιδιαίτερα χαμηλή τιμή αντίστασης που απεικονίζεται στην ERT (Σχ. 5.8c), δηλαδή από τα 6 έως τα 15 μέτρα σε βάθος, και από 126 έως τα 162 μέτρα κατά μήκος, σχεδόν συμπίπτει με την αύξηση που προκύπτει για τα διατμητικά κύματα, για την περιοχή από 5 έως 16 μέτρα βάθους και από τα 21 έως τα 57 μέτρα μήκους, ύστερα από επιφανειακή ζώνη χαμηλότερης ταχύτητας. Οι παραπάνω περιοχές που εκτείνονται κατά μήκος και κατά βάθος των τομών ERT και V_S , και οι οποίες συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση μεταξύ τους, υποδεικνύουν πιθανώς την ύπαρξη διεπιφάνειας μεταξύ εδαφικών στρωμάτων διαφορετικών φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων.

Αναφορικά με το προφίλ ταχύτητας V_S της S1, αυτό προέρχεται από δεδομένα με περισσότερο θόρυβο, όπως σημειώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Αντιθέτως, υπήρχε διαθέσιμη πληροφορία από διαφορετικές σεισμικές μεθόδους για την τομή S2, για την οποία αναλύθηκαν τα βήματα

επεξεργασίας και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα, εκτενέστερα. Ως εκ τούτου, στο Σχήμα 5.10 παρουσιάστηκε μόνο το αποτέλεσμα της αντιστροφής μαζί με την τομή της ERT για λόγους πληρότητας, παραλείποντας τις ψευδοτομές της ταχύτητας φάσης. Μεταξύ του αποτελέσματος της σεισμικής διάθλασης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5a, και του προφίλ της ταχύτητας των S-κυμάτων της τομής S1 (Σχ. 5.10a), παρουσιάζεται επίσης μια κοινή πλευρική μεταβολή στις ταχύτητες. Η ταχύτητα των P-κυμάτων αυξάνεται κατά την οριζόντια διεύθυνση και σχεδόν για όλο το βάθος της τομής, λίγο πριν το μέσον του αναπτύγματος και περί τα 30m όδευσης. Αντίστοιχα, παρατηρείται κατά μήκος μείωση στην V_S από τα 21 μέτρα έως και τα 45, για τα βάθη μεγαλύτερα από 17.5 μέτρα. Επιπλέον, για τη θέση X_{mid} στα 27m μπορεί να διαπιστωθεί πως η V_S λαμβάνει αισθητά χαμηλότερη τιμή, για τη ζώνη μεταξύ 5 έως 10 μέτρων βάθους. Για την ίδια θέση μπορεί επίσης να διαπιστωθεί η έντονη πλευρική μεταβολή της ταχύτητας, μεταξύ των σημείων αμέσως πριν και μετά, δηλαδή στα 21 και 33 μέτρα όδευσης αντίστοιχα, όπου εντοπίζονται μάλιστα και οι υψηλότερες τιμές της ταχύτητας στην εν λόγω ψευδοτομή.

Μελετώντας τώρα την τομή της μεταβολής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε αντιπαράβολή με την ηλεκτρική τομογραφία του Σχήματος 5.10c, αναδεικνύονται τρία κοινά χαρακτηριστικά για τους σχηματισμούς που έχουν προκύψει. Κατά πρώτον, η ρηχή ζώνη αυξημένης ηλεκτρικής αντίστασης που απεικονίζεται σε βάθος κατά μέσο όρο από 2.5 έως 7.5m, και για σχεδόν ολόκληρο το μήκος της τομής που παρατίθεται, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ταυτίζεται με την αντίστοιχη ζώνη αυξημένης ταχύτητας της V_S , η οποία εντοπίζεται σε βάθος από 4.0 έως 10.0 περίπου μέτρα, και για την οριζόντια απόσταση από τα 15 μέτρα έως το τέλος της τομής, όπως διαπιστώνεται και στο Σχήμα 5.5a. Επιπλέον, στην τομή ERT μεταξύ 240 και 260 μέτρων και από βάθος από 2.5 έως περίπου τα 10m, παρατηρείται σχηματισμός με κοινή τιμή ηλεκτρικής αντίστασης, και με κλίση προς τα δεξιά. Στις ίδιες οριζόντιες αποστάσεις και για βάθη μεγαλύτερα μόνο κατά 2.5m, μπορεί να παρατηρηθεί μια όμοιας μορφής πλευρική μεταβολή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, στο προφίλ ταχύτητας. Συγκεκριμένα, από το πρώτο σημείο εξαγωγής αποτελέσματος στα 3m έως τη θέση στα 21m, και για βάθος από 5 έως 12.5 μέτρα αντίστοιχα, μπορεί να εντοπιστεί η συγκεκριμένη κατά μήκος περιοχή, η οποία θα μπορούσε να αποτελεί διεπιφάνεια διαφορετικών εδαφικών σχηματισμών, κατ' επέκταση μάλιστα του πυθμένα της ζώνης που παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή V_S , για το συγκεκριμένο προφίλ. Τέλος, για το αριστερό

τμήμα της ERT στο οποίο παρατηρείται ανωμαλία με σχετικά πολύ υψηλότερες τιμές $Ohm \cdot m$, μπορεί να εντοπιστεί στην αντίστοιχη περιοχή του προφίλ της V_S , μια σημαντική μείωση της ταχύτητας, μεταξύ 9 και 15 μέτρων, και μεταξύ της περιοχής που οριοθετείται πάνω από την λευκή διακεκομμένη γραμμή και κάτω από τα 12.5 μέτρα βάθους.

Γενικώς, τα συγκεκριμένα σεισμικά δεδομένα κυρίως της γραμμής μελέτης S1, αλλά και σε μικρότερο βαθμό και αυτά της S2, χαρακτηρίζονται από θόρυβο. Αυτό, κυρίως οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό δεκτών (12), οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε σχετικά μεγάλες μεταξύ τους αποστάσεις, οπότε τα κυματικά πεδία προκύπτουν με χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Σημειώνεται δε, πως οι συγκεκριμένες σεισμικές καταγραφές δεν λήφθηκαν με την λογική της εξαγωγής πολλαπλών παραθύρων μεταβλητού μεγέθους για την αναπαραγωγή προφίλ ταχύτητας δύο διαστάσεων, αλλά για μονοδιάστατο αποτέλεσμα μεταβολής της V_S , σε σχέση μόνο με το βάθος. Οι λίγες σε πλήθος πηγές που εντοπίζονται κυρίως εκτός του αναπτύγματος του γεωφώνων, καθώς και το μεσοδιάστημα των 6m μεταξύ των δεκτών, αποτελεί διάταξη όχι ιδανική για την παραθυρική προσέγγιση της διασκόπησης και της εξαγωγής αποτελέσματος σε 2 διαστάσεις. Πάρα ταύτα, η παραθυρική εξαγωγή δεδομένων από πολλαπλά διαφράγματα μεταβλητού μεγέθους, καθώς και η σταθμισμένη υπέρθεση των πεδίων διασποράς, επέτρεψαν να εξαχθούν αποτελέσματα σε δύο διαστάσεις, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ως ποιοτικά και αποδεκτά. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τις ομοιότητες που παρουσιάζονται στις δομές του υπεδάφους από τις τομές της σεισμικής διάθλασης και ηλεκτρικής τομογραφίας, αφενός, και αφετέρου από την κοινή τάση που παρουσίασε η μονοδιάστατη μεταβολή της V_S σε σχέση με το βάθος, όπως αυτή προέκυψε για το μέσον της γραμμής μελέτης S2, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του SWIP και άλλων σεισμικών μεθόδων, αλλά και σε σχέση με τα ευρήματα της ερευνητικής γεώτρησης, για το πάχος και το βάθος των σχηματισμών του υπεδάφους στη συγκεκριμένη θέση.

Θεωρώντας λοιπόν ως αντιπροσωπευτική την μονοδιάστατη κατανομή της V_S στο κέντρο του αναπτύγματος των σεισμικών τομών, όπως αυτή έχει προκύψει από την παραθυρική εξαγωγή και σταθμισμένη υπέρθεση των δεδομένων και το βασιζόμενο σε αυτά αποτέλεσμα του SWIP, στη συνέχεια θα εκτιμηθεί η κατηγορία εδάφους σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 1 (CEN, 2004). Θα πρέπει να επισημανθεί πως η αντιπροσωπευτικότητα του αποτελέσματος για το μέσον του αναπτύγματος (Luo et al., 2009), θεωρούμε πως μπορεί να εφαρμοστεί στην

συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς πρόκειται για σεισμικές τομές με μικρό σχετικά αριθμό δεκτών, αραιά τοποθετημένους και χωρίς πλήθος πηγών ενδιάμεσα στα γεώφωνα και κατά μήκος του αναπτύγματος. Η κατηγορία λοιπόν του εδάφους υπολογίζεται από τη μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30m της εδαφικής τομής, από την Σχέση 3.1 της §3.1.2(3) του ισχύοντα κανονισμού, και η οποία είναι:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \quad (5.1)$$

όπου h_i και v_i είναι το πάχος και η ταχύτητα του i στρώματος από το σύνολο των N σχηματισμών έως τα 30 μέτρα βάθους. Η αντίστοιχη έκφραση για την αναθεωρημένη έκδοση του Ευρωκώδικα 8, δηλαδή για στην pr-EN19981-1-1:2022 έκδοση (CEN, 2022), εντοπίζεται στην § 5.1.2(7), περιγράφεται πλέον ως:

$$V_{s,H} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \quad (5.2)$$

όπου $H = \min(30m; H_{800})$ και H_{800} είναι το βάθος του σεισμικού υπόβαθρου το οποίο καθορίζεται από ταχύτητα V_S τουλάχιστον ίση με 800 m/s. Σε περίπτωση που το βάθος H_{800} είναι μεγαλύτερο ή ίσο των 30 μέτρων, τότε η Σχέση 5.2 ταυτίζεται με την 5.1. Σε κανένα από τα προφίλ δύο διαστάσεων της ταχύτητας V_S που αντιστοιχούν στις τομές S1 και S2, δεν προέκυψε ταχύτητα S-κυμάτων ≥ 800 m/s, από τα αποτελέσματα του SWIP. Ως εκ τούτου, και για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις σεισμικών προφίλ, η εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων θα δώσει το ίδιο αριθμητικό αποτέλεσμα, πλην όμως αυτές αναφέρονται σε διαφορετική κατηγοριοποίηση του εδάφους, αφού το υπό έκδοση προσχέδιο του κανονισμού περιέχει διαφορετικά επίπεδα χαρακτηρισμού του εδάφους, ανάλογα το βάθος στο οποίο εντοπίζεται το σεισμικό υπόβαθρο (CEN, 2022).

Για την τομή S2, και σύμφωνα με το βέλτιστο μοντέλο στη θέση Xmid των 33 μέτρων, προκύπτει ταχύτητα $V_{S,30} = 469$ m/s, ενώ αντίστοιχα για την τομή S1, προκύπτει $V_{S,30} = 420$ m/s. Και για τις δύο τομές λοιπόν, το έδαφος μπορεί να έχει κοινό χαρακτηρισμό και να ενταχθεί στην κατηγορία 'B', σύμφωνα και με τις δύο προαναφερθείσες εκδόσεις του Ευρωκώδικα. Σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό, το έδαφος κατηγορίας 'B' περιγράφεται ως "Αποθέσεις πολύ πυκνής

άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος.” Αντιθέτως, το προσχέδιο του νέου Ευρωκώδικα 8 δεν χαρακτηρίζει με περιγραφικό τρόπο την κατηγορία του εδάφους, αλλά το κατηγοριοποιεί ανάλογα τη σκληρότητα και το βάθος του σεισμικού υπόβαθρου, ήτοι όπου εντοπίζεται ταχύτητα $V_S \geq 800\text{m/s}$. Στην περίπτωση λοιπόν των αποτελεσμάτων των τομών S1 και S2 από τον Σίβα, σύμφωνα με το προσχέδιο του prEN1998-1-1, το έδαφος θα χαρακτηριζόταν ως ”σκληρό - *stiff*” και το βάθος του σεισμικού υπόβαθρου ως ”ενδιάμεσο - *intermediate*”, θεωρώντας πως αυτό βρίσκεται μετά τα 30 και πριν τα 100 μέτρα βάθους.

6 Συμπεράσματα & προτάσεις

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η εξαγωγή της μεταβολής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε δύο διαστάσεις, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι πλευρικές ανομοιογένειες του εδάφους, με βάση την μέθοδο της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων MASW.

Προς τούτο, έγινε χρήση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα Surface Wave Inversion and Profiling (SWIP), το οποίο έχει τη δυνατότητα εξαγωγής σεισμικών δεδομένων από πολλαπλά παράθυρα μεταβλητού μεγέθους, καθώς και σταθμισμένης υπέρθεσης των πεδίων διασποράς τους, δίνοντας ανάλογη βαρύτητα με βάση το μέγεθος του παραθύρου από το οποίο τα πεδία αυτά προέκυψαν. Με την διαδοχική παράθεση των μονοδιάστατων αποτελεσμάτων της αντιστροφής, παράγονται προφίλ δύο διαστάσεων μεταβολής της ταχύτητας των S-κυμάτων και της γεωμετρίας του εδάφους, αποτυπώνοντας τις πλευρικές ανομοιογένειες των χαρακτηριστικών του εδάφους.

Από το σύνολο της ροής των εργασιών που ακολουθήθηκε, των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, τόσο για τα συνθετικά όσο και για τα πραγματικά δεδομένα, προκύπτουν ενδιαφέροντα ευρήματα και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την εφαρμογή της MASW στις δύο διαστάσεις, βάσει των τεχνικών και των δεδομένων που λήφθηκαν υπόψη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, και τα οποία παρατίθενται στη συνέχεια.

Αρχικά αξίζει να αναφερθεί, πως το SWIP δοκιμάστηκε για την πλειοψηφία των λειτουργιών του και η μεθοδολογία της περιγραφής του στην ενότητα 3.2, δεν αφορά απλά σε μετάφραση των σχετικών δημοσιευμένων εργασιών (Pasquet and Bodet, 2017; Pasquet et al., 2021) που περιγράφουν τον τρόπο λειτουργίας και τις δυνατότητές του, αλλά αποτελεί προϊόν δοκιμών και εκτενούς πειραματισμού της παραμετροποίησης που αυτό προσφέρει στις επί μέρους μονάδες κώδικα.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του λογισμικού, της διερεύνησης των διαφορετικών προσεγγίσεων και ρυθμίσεων αλλά και των αποτελεσμάτων που αυτές αποδίδουν, χρησιμοποιήθηκε αρχικά συνθετικό μοντέλο εδάφους τριών στρωμάτων με γνωστή γεωμετρία και μεταβολή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, τόσο ως προς το βάθος όσο και πλευρικά. Συγκρίθηκαν σε πρώτη φάση τα αποτελέσματα για μία διάσταση σε ενδεικτικές θέσεις των δεδομένων με γνωστή τη μεταβολή της ταχύτητας V_s , μεταξύ της καθιερωμένης MASW και του SWIP, με τα αποτελέσματα αναφοράς να προέρχονται από τους αλγόριθμους του kriSIS. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα συνθετικά δεδομένα, προσφέρουν ένα ασφαλές περιβάλλον αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, καθώς είναι γνωστές οι παράμετροι και η γεωμετρία το εδαφικού μοντέλου. Διαπιστώθηκε η διαφοροποίηση του αποτελέσματος ανάλογα με τον τρόπο υπέρθεσης των πεδίων διασποράς, σε απλό ή σταθμισμένο, αφού εξετάστηκε η επιρροή της κάθε προσέγγισης τόσο ως προς τις θεωρητικές καμπύλες διασποράς, όσο και προς το τελικό αποτέλεσμα μεταβολής της ταχύτητας με το βάθος. Τα μονοδιάστατα (1D) αποτελέσματα του SWIP δείχνουν να υστερούν ως προς την ακρίβεια, σε σχέση με την πραγματική κατανομή της ταχύτητας αλλά και αυτή που προέκυψε από την κλασική MASW, όχι όμως σε μη αποδεκτό επίπεδο, αφού οι αποκλίσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως σχετικά μικρές. Κατόπιν, τα αποτελέσματα του SWIP επεκτάθηκαν για δύο διαστάσεις (2D) επί των συνθετικών δεδομένων, αποκτώντας παράλληλα εμπειρία και εξοικείωση με την πορεία εργασιών και τις δυνατότητες του λογισμικού για την διαφορετική απόδοση των αποτελεσμάτων. Προκύπτει επίσης πως, όταν κατά την αυτοματοποιημένη διαδικασία επιλογής των καμπύλων διασποράς διαπιστώνονται χαμηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά, θα πρέπει να υπεισέρχεται η ορθή επιλογή τους χειροκίνητα από τον χρήστη.

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, και καθώς το SWIP περιλαμβάνει ένα στοχαστικό αλγόριθμο αντιστροφής που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως, οδηγείται κανείς στο συμπέρασμα ότι η σωστή απόδοση και επιλογή της καμπύλης διασποράς, καθώς και η κατάλληλη παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου, είναι καθοριστικής σημασίας για το τελικό αποτέλεσμα.

Η υπέρθεση των πεδίων διασποράς προηγείται της επιλογής των καμπύλων, και ως εκ τούτου επηρεάζει τα δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη στην αντιστροφή. Σχετικά με την στάθμιση των δεδομένων, ακόμα και η απλή στάθμιση (st1) των πεδίων διασποράς, φάνηκε να αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς αδιαμφισβήτητα προκύπτει πιο καθαρή εικόνα με καλύτερη

συγκέντρωση σεισμικής ενέργειας στις καμπύλες διασποράς. Μάλιστα, με την εξαγωγή σε κάθε θέση διερεύνησης, προοδευτικά περισσότερων σεισμικών ιχνών με παράθυρα μεταβλητού μεγέθους, παρέχεται η δυνατότητα για τη σταθμισμένη υπέρθεση (st3) των πεδίων διασποράς (MW-WSSW), τεχνική που περιγράφεται στο άρθρο των Pasquet et al. (2021). Έτσι, επαληθεύεται η ενίσχυση του τμήματος της καμπύλης, το οποίο προέρχεται από το πιο αξιόπιστο τμήμα του φάσματος κάθε φορά: για το ρηχότερο τμήμα λαμβάνονται με βαρύτητα τα υψίσυχνα δεδομένα, ενώ για το βαθύτερο τμήμα διευρύνονται τα δεδομένα των χαμηλότερων συχνοτήτων των πεδίων διασποράς. Η δυνατότητα αυτή αξιοποιήθηκε και επιβεβαιώθηκε τόσο για τα συνθετικά, όσο και για τα δεδομένα πεδίου. Όστερα από δοκιμές, εξάγεται το συμπέρασμα ότι προσφέρει την βέλτιστη απόδοση ως προς το αποτέλεσμα, ειδικά σε περιοχές με κακή ποιότητα καταγραφών ή περιορισμένου συχνοτικού περιεχομένου καμπύλης διασποράς. Αυτό ισχύει παρά το γεγονός ότι το σταθμισμένο αθροισμένο πεδίο διασποράς που προέρχεται από πολλαπλά παράθυρα διαφορετικών πηγών εκατέρωθεν του σημείου διερεύνησης, μπορεί τελικά να αποδίδει μια εξομαλυμένη καμπύλη που ενδέχεται να οδηγήσει σε αλλοιωμένο αποτέλεσμα της κατανομής της V_S σε σχέση με το βάθος. Η απόδοση όμως του τελικού αποτελέσματος ως εξομαλυμένο μοντέλο μέσω τιμών ή ως σταθμισμένα εξομαλυμένα βάση του ελαχίστου σφάλματος, έρχεται ώστε να μετριάσει το πρόβλημα αυτό, αποδίδοντας τελικά προφίλ ταχύτητας που παρουσιάζουν εξαιρετικές ομοιότητες στη στρωματογραφία των σχηματισμών, σε σχέση με άλλες γεωφυσικές μεθόδους και τεχνικές (ERT, MASW και DH). Το παραπάνω, κατέστη σαφές από τα αποτελέσματα του SWIP για τα πραγματικά δεδομένα πεδίου. Μάλιστα, προέκυψε άμεσος συσχετισμός του 1D αποτελέσματος του SWIP σε σχέση με τη στρωματογραφία των ευρημάτων γεωτρητικών δεδομένων. Με βάση λοιπόν τα ευρήματα της εκτενούς διερεύνησης, τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την αξιοπιστία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, είναι εξαιρετικά ενθαρρυντικά ως προς την περαιτέρω αξιοποίηση της εν λόγω προσέγγισης. Κατόπιν την αξιολόγησης της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του SWIP για τα πραγματικά δεδομένα, έγινε εκτίμηση της κατηγορίας εδάφους σύμφωνα με τα κανονιστικά αντισεισμικά πρότυπα. Η εκτίμηση αυτή, αφορά και λαμβάνει υπόψη το 1D αποτέλεσμα της μεθόδου για το μέσον του αναπτύγματος των γεωφώνων.

Η παραμετροποίηση του αρχικού θεωρητικού μοντέλου στο SWIP, καθώς είναι δομημένη σύμφωνα με τα δεδομένα εισόδου που απαιτεί ο Neighborhood Algorithm, δηλαδή ο αλγόριθμος αντιστροφής

του εργαλείου *dinver* του λογισμού *Geopsy*, προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα. Μερικά εκ των οποίων ξεχώρισαν, σύμφωνα πάντα και με τα σετ δεδομένων που επεξεργάστηκαν, αφορούν την ικανότητα για απόδοση εδαφικών στρωμάτων διαφορετικού μεταξύ τους πάχους, καθώς και τη δυνατότητα λήψης *a-priori* πληροφορίας ως δεδομένα εισόδου, όπως τα αποτελέσματα ταχύτητας των P-κυμάτων από τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης. Επιτρέπεται έτσι κατά την αντιστροφή, να τροποποιηθεί το πάχος των εδαφικών στρώσεων αλλά και η ταχύτητα των S-κυμάτων εντός αυτών, βάση μιας διαφορετικής από τα επιφανειακά κύματα, αλλά καθιερωμένης μεθόδου. Επιπλέον, ακολουθώντας διαφορετική προσέγγιση χωρίς τη γνώση προγενέστερης πληροφορίας, ο αλγόριθμος μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να είναι κατά το δυνατόν πιο διερευνητικός. Η δυναμική κλιμάκωση και η διεύρυνση του αρχικού παραμετρικού χώρου, δίνει τη δυνατότητα στο αποτέλεσμα του *Neighborhood Algorithm* να παρουσιάζεται ως ένα εύρος πιθανών λύσεων, συνοδευόμενο με τη διακύμανση λόγω αβεβαιότητας που προέρχεται από την επιλογή των καμπύλων διασποράς, σε κάθε ενδιαμέσο σημείο διερεύνησης.

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων ως ένα εύρος πιθανών μοντέλων ταχύτητας μοιάζει πιο κατάλληλη. Αυτό είναι τουλάχιστον εφικτό για την αναπαράσταση των 1D αποτελεσμάτων όλων των αποδεκτών μοντέλων σε ένα σημείο διερεύνησης, καθώς και με τα όρια του αρχικού παραμετρικού χώρου και τους διάφορους τρόπους απόδοσης του μοντέλου του *SWIP*. Με αυτόν τον τρόπο αποδίδεται και αξιολογείται η εξ' ορισμού αβεβαιότητα που υπάρχει στην μέθοδο *MASW*, λόγω της μη-μοναδικής λύσης της αντιστροφής, αλλά και της διακύμανσης που εισέρχεται κατά την επιλογή των καμπύλων διασποράς. Ως εκ τούτου, η παρουσίαση μόνο του βέλτιστου μοντέλου ως μοναδικό αποτέλεσμα, μπορεί να θεωρηθεί ως μία μη επαρκής αναπαράσταση της λύσης της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων, ειδικά για μια προσέγγιση που λαμβάνει έμμεσα υπόψη τις πλευρικές ανομοιογένειες του εδαφικού μέσου. Βέβαια, η υιοθέτηση του βέλτιστου μοντέλου για τον προσδιορισμό της στρωματογραφίας ή της ταχύτητας $V_{S,30}$, κρίνεται ως η καλύτερη επιλογή.

Όσο για την ποιότητα των αποτελεσμάτων, αυτή θα πρέπει να συν-αξιολογείται από διάφορα χαρακτηριστικά και ενδείξεις, και δεν θα πρέπει να κρίνεται ως αμιγώς καλό ή κακό ποιοτικά αποτέλεσμα. Αφορμή για αυτό το συμπέρασμα στάθηκαν κυρίως τα αποτελέσματα των συνθετικών δεδομένων, και συγκεκριμένα λόγω απόκλισης μεταξύ υψηλού αριθμού αποδεκτών μοντέλων με ταυτόχρονα υψηλό ποσοστό τυπικής απόκλισης, στην αρχή και το τέλος του εδαφικού

προφίλ. Αντιθέτως, στο κεντρικό τμήμα του προφίλ, παρατηρείται χαμηλό ποσοστό τυπικής απόκλισης, λιγότερα αποδεκτά μοντέλα και ελαφρώς αυξημένη τιμή ελαχίστου σφάλματος σε σχέση με τις χαμηλότερες παρατηρούμενες τιμές γενικά. Σύμφωνα λοιπόν με αυτές τις διαφοροποιήσεις, προκύπτει το συμπέρασμα πως για την εκτίμηση εάν το αποτέλεσμα σε κάθε ενδιάμεσο σημείο διερεύνησης είναι ποιοτικό ή όχι, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το σύνολο των ποιοτικών χαρακτηριστικών για όλο το μήκος του προφίλ. Συγκεκριμένα, χωρίς να ακολουθείται απαραίτητα η σειρά αυτή, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η διαφορά (%) μεταξύ παρατηρούμενης και υπολογισμένης ταχύτητας φάσης V_{Φ} , η τυπική απόκλιση (%) της V_S , το ελάχιστο σφάλμα (misfit) μαζί με το RMS (m/s) σφάλμα, και τέλος τον αριθμό των αποδεκτών μοντέλων κάθε θέσης X_{mid} .

Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω συμπεράσματα, τα οποία αποτελούν έναν μελλοντικό οδηγό καλών πρακτικών για την εφαρμογή της τεχνικής που ακολουθήθηκε, παρατίθενται τέλος μια σειρά από προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επεκτάσεις της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

- Ο έλεγχος της ποιότητας του μοντέλου αλλά και η προσπάθεια βελτιστοποίησης του αποτελέσματος της αντιστροφής, προτείνεται να γίνεται αρχικά για ένα ή δύο σημεία διερεύνησης με γνωστά καλά χαρακτηριστικά του κυματικού πεδίου και της καμπύλης διασποράς, ή για 2-3 διαδοχικά σημεία, ώστε να παράγεται ένα αποτέλεσμα 2 διαστάσεων περιορισμένου όμως οριζόντιου μήκους. Στη συνέχεια, οι ρυθμίσεις αυτές και η παραμετροποίηση του αρχικού μοντέλου να εφαρμόζεται στο σύνολο των ενδιάμεσων σημείων εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση, στο αρχικό μοντέλο εδάφους καλό είναι να αποδίδεται ένα μεγάλο εύρος παραμετρικού χώρου.
- Θα είχε νόημα να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων για μία ή δύο διαστάσεις, επαναλαμβάνοντας 2 ή και 3 φορές την διαδικασία της αντιστροφής από τον αλγόριθμο NA, ενδεχόμενος με διαφορετική διαφορετική παραμετροποίηση κάθε φορά. Έτσι, θα μπορεί να αξιολογηθεί καλύτερα η διακύμανση των μοντέλων που προκύπτουν τελικά. Αυτό όμως απαιτεί ανάλογα περισσότερο υπολογιστικό χρόνο.
- Η σταθμισμένη υπέρθεση των πεδίων διασποράς από καταγραφές πολλαπλών παραθύρων μεταβλητού μεγέθους (διαφραγμάτων), θα είχε ενδιαφέρον να εφαρμοστεί και να εξαχθούν

συγκριτικά αποτελέσματα δύο διαστάσεων, με την υιοθέτηση σεισμικών πηγών μόνο από τα αριστερά ('L') και μόνο από τα δεξιά ('R'). Στην παρούσα εργασία, για τη εξαγωγή των 2D προφίλ μεταβολής της ταχύτητας, έγινε χρήση πηγών εκατέρωθεν ('B') του σημείου διερεύνησης. Ενδεχομένως λοιπόν, η επεξεργασία πραγματικών καταγραφών πεδίου, με τα διαδοχικά πεδία διασποράς να προέρχονται από πηγή σε μία πλευρά, ίσως να αποδίδουν διαφορετικά ή και ενδεχομένως καλύτερα, έντονες πλευρικές μεταβολές της ταχύτητας V_s και των δομών του υπεδάφους. Με αυτόν τον τρόπο, η επίδραση της πλευρικής ανομοιογένειας του υπεδάφους ίσως να μπορεί να εκτιμηθεί καλύτερα. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη την διαφοροποίηση των 1D αποτελεσμάτων των συνθετικών δεδομένων, τα οποία προέρχονται από διαφορετικές πηγές (αριστερά και δεξιά), υπάρχει κάθε λόγος να αξίζει η προσπάθεια μιας τέτοιας συγκριτικής μελέτης.

- Προτείνεται η ενσωμάτωση στους κώδικες του λογισμικού, τεχνικών μη-καθοδηγούμενης μηχανικής μάθησης (unsupervised machine learning) για την επιλογή των καμπύλων διασποράς. Με αυτόν τον τρόπο, η επιλογή των καμπύλων θα γίνεται με έναν αυτόματο μεν, αλλά σαφώς καθορισμένο τρόπο, δε. Προκύπτει ένα διπλό όφελος: αυτό της χειροκίνητης επιλογής αρχικά από τον χρήστη, ενώ στη συνέχεια θα εξοικονομείται χρόνος από μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, η οποία όμως θα καθοδηγείται από το αποτέλεσμα μηχανικής μάθησης, εξασφαλίζοντας έτσι αξιόπιστη επιλογή καμπύλων. Στο σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης (training set) θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν το μοτίβο επιλογής καμπύλων διασποράς, καθώς και η πλειοψηφία των ποιοτικών χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν συνοπτικά παραπάνω.
- Με τη διενέργεια της μεθόδου στα πλαίσια κάποιου επικείμενου τεχνικού έργου, θα μπορούσε να γίνει προσπάθεια σύγκρισης των 2D προφίλ του SWIP με τα ευρήματα της εκσκαφής, δηλαδή τους γεωλογικούς σχηματισμούς και την στρωματογραφία που θα αποκαλύπτονταν. Αυτό, θα επέκτεινε την αξιολόγηση και την αξιοπιστία πέρα από τη σύγκριση με τα ευρήματα γεωλογικών γεωτρήσεων, τα οποία είναι σημειακά. Ως προϋπόθεση θα μπορούσε να τεθεί οι μετρήσεις να πραγματοποιηθούν με κατάλληλη γεωμετρία ώστε να εξασφαλίζεται η παραθυρική εξαγωγή σεισμικών δεδομένων και στη συνέχεια η απόδοση του αποτελέσματος της πλευρικής μεταβολής της ταχύτητας, σε προφίλ δύο διαστάσεων. Μάλιστα, θεωρώντας τις

2D ψευδοτομές της V_S ως δεδομένα εισόδου, θα μπορούσε για το συγκεκριμένο υπέδαφος του έργου να μοντελοποιηθεί η διακύμανση της V_S σε 3 διαστάσεις (3D) με κάποια τεχνική γεωστατιστικής, αξιολογώντας το μοντέλο που θα προκύψει με τα πραγματικά ευρήματα της εκσκαφής.

- Επέκταση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα του SWIP, ώστε να εξάγεται αυτοματοποιημένα η κατηγοριοποίηση του εδάφους σύμφωνα με το προσχέδιο της αναθεώρησης του αντισεισμικού κανονισμού (CEN, 2022), δίνοντας αποτέλεσμα για την $V_{S,H}$, έχοντας όμως λάβει υπόψη με στατιστικό τρόπο την πλευρική διακύμανση της V_S για όλο το μήκος της ψευδοτομής, όπως αυτή προκύπτει από τα αποτελέσματα 2 διαστάσεων. Επιπλέον, καθίσταται εφικτός και ο υπολογισμός της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου απόκρισης της εδαφικής στήλης.
- Τέλος, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε να δίνεται η δυνατότητα στο αποτέλεσμα της παραθυρικής ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων, να αναπροσαρμόζεται ως προς το τελικό μοντέλο ταχύτητας, βάσει της θεμελιώδους συχνότητας συντονισμού του υπό εξέταση εδαφικού μέσου, όπως αυτή προκύπτει από παθητικές μεθόδους ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων και την ελλειπτικότητα που παρουσιάζεται κατά την διάδοσή τους.

Θεωρείται ότι η υιοθέτηση των παραπάνω προτάσεων θα συνεισφέρει στην εξέλιξη της μεθόδου και εφαρμογής των αποτελεσμάτων της, με διεπιστημονική προσέγγιση. Αυτό, θα συντελέσει στην περαιτέρω αξιοποίηση της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων, διευρύνοντας τις πρακτικές της εφαρμογές και καθιστώντας την ακόμα πιο αξιόπιστη. Επίσης, εκτιμάται ότι θα βοηθήσει σε επιπλέον γεφύρωση μεταξύ των πεδίων της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής.

Αναφορές

- Alcalá, F. J., Martínez-Pagán, P., Paz, M. C., Navarro, M., Pérez-Cuevas, J., and Domingo, F. (2021). Combining of MASW and GPR imaging and hydrogeological surveys for the groundwater resource evaluation in a coastal urban area in southern Spain. *Applied Sciences*, 11(7):3154.
- Anbazhagan, P. and Sitharam, T. (2008). Site characterization and site response studies using shear wave velocity. *Journal of seismology and earthquake engineering*, 10(2):53–67.
- Bard, P.-Y., Cadet, H., Endrun, B., Hobiger, M., Renalier, F., Theodulidis, N., Ohrnberger, M., Fäh, D., Sabetta, F., Teves-Costa, P., et al. (2010). From non-invasive site characterization to site amplification: recent advances in the use of ambient vibration measurements. *Earthquake Engineering in Europe*, pages 105–123.
- Bergamo, P., Boiero, D., and Socco, L. V. (2012). Retrieving 2D structures from surface-wave data by means of space-varying spatial windowing. *Geophysics*, 77(4):EN39–EN51.
- Boaga, J., Cassiani, G., Strobbia, C. L., and Vignoli, G. (2013). Mode misidentification in rayleigh waves: Ellipticity as a cause and a cure. *Geophysics*, 78(4):EN17–EN28.
- Bouckovalas, G. and Kouretzis, G. (2001). Stiff soil amplification effects in the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 21(8):671–687.
- Caruso, S., Ferraro, A., Grasso, S., and Massimino, M. (2016). Site Response Analysis in eastern Sicily based on direct and indirect Vs measurements. In *1st IMEKO TC4 International Workshop on Metrology for Geotechnics, MetroGeotechnics*, pages 115–120.

- CEN (2004). EN 1998-1:2004 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. *Brussels: European Committee for Standardization*.
- CEN (2022). DRAFT prEN 1998-1-1:2022 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-1: General rules and seismic action. *Brussels: European Committee for Standardization*.
- Foti, S., Comina, C., Boiero, D., and Socco, L. (2009). Non-uniqueness in surface-wave inversion and consequences on seismic site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(6):982–993.
- Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P.-Y., Comina, C., Cornou, C., Cox, B., Di Giulio, G., et al. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16:2367–2420.
- Foti, S., Parolai, S., Albarello, D., and Picozzi, M. (2011). Application of surface-wave methods for seismic site characterization. *Surveys in geophysics*, 32:777–825.
- Foti, S., Sambuelli, L., Socco, L. V., and Strobbia, C. (2002). Spatial sampling issues in fk analysis of surface waves. In *15th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pages cp–191. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. (2004). *Problems in exploration seismology and their solutions*. Society of Exploration Geophysicists.
- Geometrics Inc. (2009). SeisImager/SW. <https://www.geometrics.com/software/seisimager-2d/>. Τελευταία προσπέλαση 05-2023.
- Groos, L., Schäfer, M., Forbriger, T., and Bohlen, T. (2017). Application of a complete workflow for 2D elastic full-waveform inversion to recorded shallow-seismic Rayleigh waves. *Geophysics*, 82(2):R109–R117.

- Haskell, N. A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media: Bulletin of the Seismological Society of America. *43*, 1:17–34.
- Hayashi, K. and Suzuki, H. (2004). Cmp cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data. *Exploration Geophysics*, 35(1):7–13.
- Hobiger, M. (2011). *Polarization of surface waves: characterization, inversion and application to seismic hazard assessment*. PhD thesis, Université de Grenoble.
- Hobiger, M., Halló, M., Schmelzbach, C., Stähler, S. C., Fäh, D., Giardini, D., Golombek, M., Clinton, J., Dahmen, N., Zenhäusern, G., et al. (2021). The shallow structure of Mars at the InSight landing site from inversion of ambient vibrations. *Nature communications*, 12(1):6756.
- Hollender, F., Cornou, C., Dechamp, A., Oghalaei, K., Renalier, F., Maufroy, E., Burnouf, C., Thomassin, S., Wathelet, M., Bard, P.-Y., et al. (2018). Characterization of site conditions (soil class, Vs30, velocity profiles) for 33 stations from the French permanent accelerometric network (RAP) using surface-wave methods. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16:2337–2365.
- Hu, S., Zhao, Y., Socco, L. V., and Ge, S. (2021). Retrieving 2-D laterally varying structures from multistation surface wave dispersion curves using multiscale window analysis. *Geophysical Journal International*, 227(2):1418–1438.
- Hudson, M., Idriss, I., Beikae, M., et al. (1994). *QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base*. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Berkeley Davis U.S.A.
- Jia, J. (2018). *Site-Response Analysis in Geotechnical Earthquake Engineering-Soil Dynamics and Foundation Modeling*. Springer.
- Kansas Geological Survey (2023). Surfseis. <https://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/index.html>. Τελευταία προσπέλαση 05-2023.

- Konstantaki, L., Carpentier, S., Garofalo, F., Bergamo, P., and Socco, L. (2013). Determining hydrological and soil mechanical parameters from multichannel surface-wave analysis across the Alpine Fault at Inchbonnie, New Zealand. *Near Surface Geophysics*, 11(4):435–448.
- Koutsoupakis, I., Tsompanakis, Y., Soupios, P., Kirmizakis, P., Kaka, S., and Providakis, C. (2021). Seismic Risk assessment of Chania, Greece, using an integrated computational approach. *Applied Sciences*, 11(23):11249.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Kritikakis, G., Papadopoulos, N., Simyrdanis, K., and Theodoulou, T. (2015). Imaging of shallow underwater ancient ruins with ERT and seismic methods. In *8th Congress of the Balkan Geophysical Society*, volume 2015, pages 1–5. EAGE Publications BV.
- Li, H., Tao, C., Liu, C., Huang, G., Yao, Z., Zhang, H., and Wang, X. (2021). Multichannel analysis of surface waves based on short array stacked correlation gather. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146:106747.
- Li, J., Feng, Z., and Schuster, G. (2017). Wave-equation dispersion inversion. *Geophysical Journal International*, 208(3):1567–1578.
- Li, J., Lin, F.-C., Allam, A., Ben-Zion, Y., Liu, Z., and Schuster, G. (2019). Wave equation dispersion inversion of surface waves recorded on irregular topography. *Geophysical Journal International*, 217(1):346–360.
- Luo, Y., Xia, J., Liu, J., Xu, Y., and Liu, Q. (2009). Research on the middle-of-receiver-spread assumption of the masw method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1):71–79.
- Martínez-Pagán, P., Navarro, M., Pérez-Cuevas, J., Alcalá, F., García-Jerez, A., and Sandoval-Castaño, S. (2014). Shear-wave velocity based seismic microzonation of Lorca city (SE Spain) from MASW analysis. *Near Surface Geophysics*, 12(6):739–750.
- McMechan, G. A. and Yedlin, M. J. (1981). Analysis of dispersive waves by wave field transformation. *Geophysics*, 46(6):869–874.

- Olafsdottir, E. A., Bessason, B., and Erlingsson, S. (2018a). Combination of dispersion curves from MASW measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113:473–487.
- Olafsdottir, E. A., Erlingsson, S., and Bessason, B. (2018b). Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2):217–233.
- Olafsdottir, E. A., Erlingsson, S., and Bessason, B. (2020). Open-source MASW inversion tool aimed at shear wave velocity profiling for soil site explorations. *Geosciences*, 10(8):322.
- Pan, Y., Gao, L., and Bohlen, T. (2018). Time-domain full-waveform inversion of Rayleigh and Love waves in presence of free-surface topography. *Journal of Applied Geophysics*, 152:77–85.
- Papadopoulos, N. G., Sarris, A., Salvi, M. C., Dederix, S., Soupios, P., and Dikmen, U. (2012). Rediscovering the small theatre and amphitheatre of ancient Ierapytna (SE Crete) by integrated geophysical methods. *Journal of archaeological science*, 39(7):1960–1973.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3):800–808.
- ParkSeismic LLC (2023). ParkSEIS. <https://www.parkseismic.com/>. Τελευταία προσπέλαση 03-2023.
- Pasquet, S. and Bodet, L. (2017). SWIP: An integrated workflow for surface-wave dispersion inversion and profiling. *Geophysics*, 82(6):WB47–WB61.
- Pasquet, S., Bodet, L., Longuevergne, L., Dhemaied, A., Camerlynck, C., Rejiba, F., and Guérin, R. (2015). 2D characterization of near-surface V_p/V_s : surface-wave dispersion inversion versus refraction tomography. *Near Surface Geophysics*, 13(4):315–332.
- Pasquet, S., Holbrook, W., Carr, B., and Sims, K. (2016). Geophysical imaging of shallow degassing in a yellowstone hydrothermal system. *Geophysical Research Letters*, 43(23):12–027.

- Pasquet, S., Marçais, J., Hayes, J. L., Sak, P. B., Ma, L., and Gaillardet, J. (2022). Catchment-scale architecture of the deep critical zone revealed by seismic imaging. *Geophysical Research Letters*, 49(13):e2022GL098433.
- Pasquet, S., Wang, W., Chen, P., and Flinchum, B. A. (2021). Multiwindow weighted stacking of surface-wave dispersion. *Geophysics*, 86(2):EN39–EN50.
- Pelekis, P. and Athanasopoulos, G. (2013). Seismic microzonation of Chania, Crete (Greece) based on SASW measurements and non-linear site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53:145–159.
- Pérez Solano, C., Donno, D., and Chauris, H. (2014). Alternative waveform inversion for surface wave analysis in 2-D media. *Geophysical Journal International*, 198(3):1359–1372.
- Petersson, N. and Sjogreen, B. (2017). SW4, version 2.01 [software]. computational infrastructure of geodynamics. *Switzerland: Zenodo. doi*, 10:5281.
- Pitilakis, K., Alexoudi, M., Argyroudis, S., and Anastasiadis, A. (2006). Seismic risk scenarios for an efficient seismic risk management: the case of Thessaloniki (Greece). In *Advances in earthquake engineering for urban risk reduction*, pages 229–244. Springer.
- Pitilakis, K., Riga, E., and Anastasiadis, A. (2013). New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(4):925–966.
- Pitilakis, K., Riga, E., Anastasiadis, A., Fotopoulou, S., and Karafagka, S. (2019). Towards the revision of EC8: Proposal for an alternative site classification scheme and associated intensity dependent spectral amplification factors. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 126:105137.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Russell, D. R. (1987). *Multi-channel processing of dispersed surface waves*. PhD thesis, Saint Louis University Saint Louis, Missouri.

- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—i. searching a parameter space. *Geophysical journal international*, 138(2):479–494.
- Savvaidis, A., Margaris, B., Theodoulidis, N., Lekidis, V., Karakostas, C., Loupasakis, C., Rozos, D., Soupios, P., Mangriotis, M., Dikmen, U., et al. (2014). Geo-characterization at selected accelerometric stations in Crete (Greece) and comparison of earthquake data recordings with EC8 elastic spectra. *Open Geosciences*, 6(1):88–103.
- Socco, L. V., Boiero, D., Foti, S., and Wisén, R. (2009). Laterally constrained inversion of ground roll from seismic reflection records. *Geophysics*, 74(6):G35–G45.
- Socco, L. V., Foti, S., and Boiero, D. (2010). Surface-wave analysis for building near-surface velocity models—Established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75(5):75A83–75A102.
- Steiakakis, E., Lazaropoulos, A., Vafidis, A., Agioutantis, Z., and Kritikakis, G. (2019). Determination of shear wave velocities in sediment deposits. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(6):630–640.
- Stockwell Jr, J. W. (1999). The CWP/SU: Seismic Un*x package. *Computers & Geosciences*, 25(4):415–419.
- Stockwell Jr, J. W. and Cohen, J. K. (2019). The New SU User’s Manual. <https://cwp.mines.edu/>. Τελευταία προσπέλαση 09-2022.
- Stokoe, K. H., Wright, S., Bay, J., and Roesset, J. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. In *Geophysical characterization of sites*, pages 15–25.
- Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of applied Physics*, 21(2):89–93.
- Tselentis, G.-A. and Delis, G. (1998). Rapid assessment of S-wave profiles from the inversion of multichannel surface wave dispersion data. *Annali di Geofisica*, 41:1–15.
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35(9).

- Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Giulio, G. D., Guillier, B., Ohrnberger, M., and Savvaidis, A. (2020). Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing. *Seismological Research Letters*, 91(3):1878–1889.
- Wathelet, M., Jongmans, D., and Ohrnberger, M. (2004). Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near surface geophysics*, 2(4):211–221.
- Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M., and Bonnefoy-Claudet, S. (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion. *Journal of Seismology*, 12:1–19.
- Κρητικιάκης, G. (2010). *Επιφανειακά Κύματα: Εφαρμογές σε Περιβαλλοντικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα*. PhD thesis, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πιτιλάκης, K. (2010). *Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

