



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ
(ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ) ΣΤΗΝ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

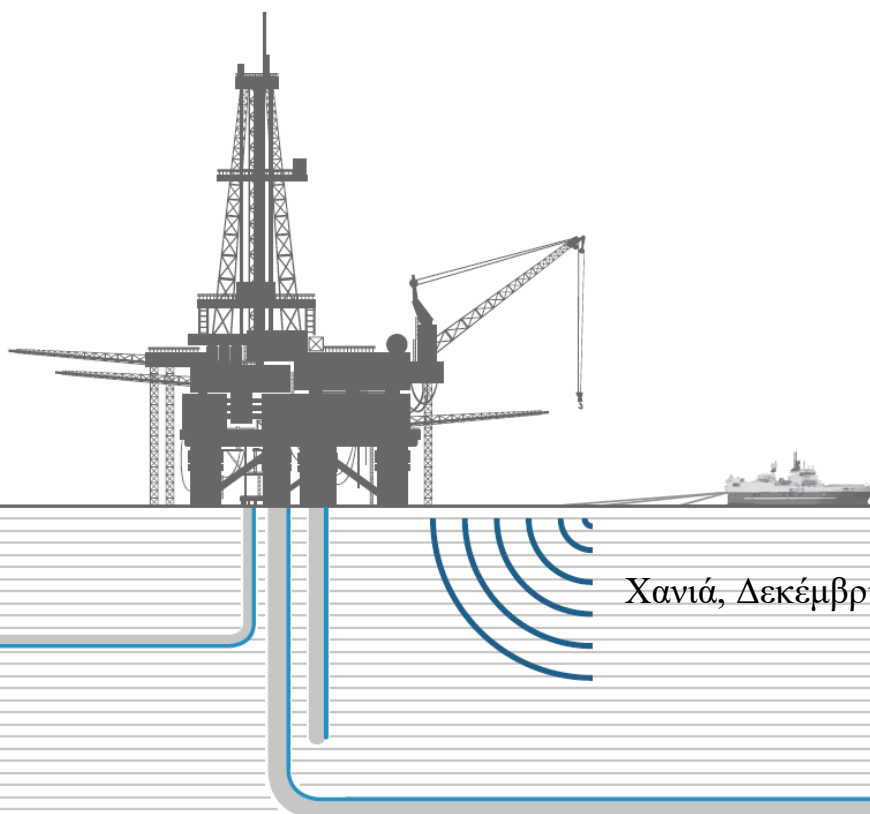
ΜΑΡΙΟΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΑΚΡΙΤΙΔΗΣ

Εξεταστική Επιτροπή

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης (επιβλέπων)

ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, Αν. Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

ΚΡΗΤΙΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Ε.ΔΙ.Π. Πολυτεχνείου Κρήτης



Χανιά, Δεκέμβριος 2018

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.



Πρόλογος

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Αντώνιου Βαφείδη. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται την δημιουργία, επεξεργασία και ερμηνεία συνθετικών δεδομένων για την προσομοίωση ενός μοντέλου πραγματικής κατολίσθησης στο όρος Tegelberg, στις Βαυαρικές Άλπεις.

Στην ολοκλήρωση της εργασίας καταλυτικό ρόλο έπαιξε ο επιβλέπων Καθηγητής Βαφείδης Αντώνιος, ο οποίος με την καθοδήγησή του και τις εύστοχες παρατηρήσεις του, αποτέλεσε σημαντικό στήριγμα στις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν. Για τον λόγο αυτό, αλλά και για την αμέριστη συμπαράσταση που μου έδειξε κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, τον ευχαριστώ θερμά.

Ειδικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον βοηθό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, Δρ. Κρητικάκη Γεώργιο για την συνεχή παρακολούθηση της εξέλιξης της εργασίας καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του, τόσο κατά την διάρκεια της μελέτης και προσομοίωσης στο χώρο του εργαστηρίου όσο και κατά την διάρκεια της συγγραφής της, την περίοδο της στρατιωτικής μου θητείας στην Κύπρο.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Ανδρονικίδη για την συνολική βοήθεια και την άριστη συνεργασία που είχαμε, καθώς και τον Αν. Καθηγητή Εμμανουήλ Στειακάκη, για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, τόσο για την οικονομική, όσο και για την ηθική στήριξη που μου έδωσαν από τα πρώτα κιόλας χρόνια της εκπαίδευσής μου.



Abstract

The present thesis examines the application of the new distributed acoustic sensing technology (DAS) and compares it with the conventional method of seismic tomography. More specifically, DAS technology is being studied and compared to the existing conventional seismic tomography technology, in the subsurface imaging for landslide monitoring.

To achieve the above, a seismic refraction survey simulation was performed. A four-layer model corresponding to a geological section of the Bavarian Alps was used. The characteristics of this section have been determined by the combined interpretation of the ground-penetrating radar (GPR), electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction (SR) methods.

In particular, the interpreted geophysical section from the study area was digitized, and then the algorithm PSV_SYNTHETICS_VER11, developed in the Laboratory of Applied Geophysics of the Technical University of Crete in Matlab, was used to simulate the two-dimensional (2D) seismic tomography experiment. Synthetic data was generated for 5 different source locations along the model. Subsequently, the first arrivals were selected and processed using the SeisImager software (Plotrefa program). For the representation of the conventional method of seismic tomography and DAS technology, receivers spacing were set at 6m and 1m, respectively.

In summary, it is concluded that the distributed acoustic sensing (DAS) is superior to conventional seismic tomography regarding the ability to distinguish the layers of the model. Fiber optics allows the detailed examination of the subsurface as it functions as an array of receivers located in very small distances. Additionally, the DAS methodology can be applied in cases where the implementation of conventional seismic tomography is impossible, for practical as well as economic reasons.



Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εφαρμογή μιας νέας τεχνολογίας κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (οπτικής ίνας) και συγκρίνεται με την συμβατική μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η τεχνολογία DAS και συγκρίνεται με την υπάρχουσα συμβατική τεχνολογία της σεισμικής τομογραφίας, στην απεικόνιση του υπεδάφους για την παρακολούθηση κατολισθήσεων.

Για την επίτευξη των παραπάνω, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση διασκόπησης σεισμικής διάθλασης. Χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων που αντιστοιχεί σε τομή υπεδάφους από την περιοχή των Βαυαρικών Άλπεων. Τα χαρακτηριστικά της τομής έχουν προσδιορισθεί από την συνδυαστική ερμηνεία των μεθόδων γεωραντάρ (GPR), ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) και σεισμικής διάθλασης (SR).

Ειδικότερα, ψηφιοποιήθηκε η ερμηνευμένη γεωφυσική τομή από την περιοχή μελέτης και στη συνέχεια, για την προσομοίωση του πειράματος σεισμικής τομογραφίας στις δύο διαστάσεις (2D), χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *PSV_SYNTHETICS_VER11* που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης σε περιβάλλον Matlab. Δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα για 5 διαφορετικές θέσεις πηγών κατά μήκος του μοντέλου. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η επιλογή των πρώτων αφίξεων και η επεξεργασία τους με τη χρήση του λογισμικού SeisImager (πρόγραμμα Plotrefa). Για την αναπαράσταση της συμβατικής μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας και της τεχνολογίας DAS χρησιμοποιήθηκαν δέκτες σε ισαποστάσεις των 6m και 1m, αντίστοιχα.

Εν κατακλείδι, συμπεραίνεται ότι η τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων οπτικής ίνας (DAS) υπερέχει σε σχέση με την συμβατική σεισμική τομογραφία ως προς την ικανότητα διάκρισης των στρωμάτων του μοντέλου. Οι οπτικές ίνες επιτρέπουν την εξέταση του υπεδάφους σε όλο το μήκος του πεδίου ενδιαφέροντος καθώς λειτουργούν ως μια συστοιχία δεκτών τοποθετημένων σε πολύ μικρές ισαποστάσεις, γεγονός που παρέχει μια σαφώς λεπτομερέστερη εικόνα του υπεδάφους. Επιπλέον, η μεθοδολογία DAS δύναται να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση της συμβατικής σεισμικής τομογραφίας αδυνατεί, τόσο για πρακτικούς όσο και για οικονομικούς λόγους.



Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Abstract	iv
Περίληψη.....	v
Κατάλογος Πινάκων	ix
Κατάλογος Σχημάτων	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Περίγραμμα διπλωματικής	2
1.2 Περιοχή μελέτης	3
1.3 Κατολισθήσεις	5
1.3.1 Τύποι και ταχύτητα κατολισθήσεων.....	6
1.3.2 Παρακολούθηση κατολισθήσεων.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ & ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	9
2.1 Μέθοδος της σεισμικής διάθλασης	9
2.1.1 Είδη σεισμικών κυμάτων	10
2.1.2 Διάδοση σεισμικών κυμάτων	12
2.1.3 Περιορισμοί της μεθόδου.....	14
2.2 Μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS.....	17
3.1 Οπτικές ίνες	17
3.1.1 Καλώδια πολύτροπων οπτικών ινών (Multimode fiber).....	22



3.1.2 Καλώδια μονότροπων οπτικών ινών (singlemode fiber)	24
3.2 Τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (DAS)	25
3.2.1 Μέθοδος VSP vs DAS	26
3.2.2 Καταγραφή σε μονότροπες και πολύτροπες οπτικές ίνες	27
3.2.3 Τεχνική ελάττωσης του ηλεκτρονικού θορύβου	28
3.2.4 Μόνιμη παρακολούθηση ταμιευτήρα με την τεχνολογία DAS	29
3.2.5 Διατάξεις εγκατάστασης του καλωδίου οπτικής ίνας και σεισμικές πηγές	31
3.2.6 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της τεχνολογίας DAS	32
3.2.7 Εφαρμογές της τεχνολογίας DAS	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	36
4.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών	36
4.2 Οριοθέτηση και ψηφιοποίηση αρχικού μοντέλου	37
4.3 Περιγραφή της προσομοίωσης	39
4.3.1 Ορισμός των διαστάσεων του μοντέλου	42
4.3.2 Ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων (Vs)	42
4.3.3 Κυρίαρχη συχνότητα της σεισμικής πηγής	43
4.3.4 Ισαπόσταση των δεκτών	44
4.3.5 Αναζήτηση και εκτέλεση των αρχείων του PSV_SYNTHETICS	44
4.3.6 Ορισμός των αρχικών παραμέτρων του μοντέλου	46
4.3.7 Διαδικασία προσομοίωσης	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	52



5.1 Επιλογή των πρώτων αφίξεων	52
5.2 Δημιουργία μοντέλου ταχύτητας	54
5.3 Υπέρθεση στρωμάτων αρχικού μοντέλου στα μοντέλα ταχύτητας	59
5.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας	60
5.4.1 Ισαπόσταση δεκτών 1m	61
5.4.2 Ισαπόσταση δεκτών 2m	64
5.4.3 Ισαπόσταση δεκτών 6m	67
5.5 Σύγκριση μοντέλων σεισμικής τομογραφίας και τεχνολογίας DAS	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	72
6.1 Συμπεράσματα	72
6.2 Προτάσεις	73
Βιβλιογραφία	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄	80



Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης των πρανών (Στειακάκης, 2012, Varnes, 1978).....	7
Πίνακας 4. 1. Ταχύτητα διαμήκων (V_p) και εγκάρσιων (V_s) κυμάτων, πυκνότητα (ρ) και λόγος Poisson (ν) για κάθε στρώμα.....	41
Πίνακας 4. 2. Παράμετροι πηγών.....	48



Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. 1. Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται περιοχές μελέτης κατολισθήσεων στις Βαυαρικές Άλπεις. Το κόκκινο βέλος υποδεικνύει το όρος Tegelberg στο οποίο βρίσκεται η κατολίσθηση που μελετάται στην εν λόγω διπλωματική εργασία (Sass and Krautblatter, 2007).	3
Σχήμα 1. 2. Αρχικό μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων από την περιοχή των Βαβαρικών Άλπεων, στο όρος Tegelberg, το οποίο προέκυψε από συνδυασμό των μεθόδων Γεωραντάρ, Ηλεκτρικής και Σεισμικής Τομογραφίας (Schrott and Sass, 2008.).	4
Σχήμα 1. 3. Παραδείγματα διαφορετικών τύπων κατολισθήσεων (Wieczorek and Snyder, 2009, Cruden and Varnes, 1996).....	6
Σχήμα 2. 1. Σεισμικές ακτίνες των απευθείας κυμάτων, των διαθλώμενων κυμάτων και των ανακλώμενων κυμάτων. Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών (Βαφείδης, 2011).	10
Σχήμα 2. 2. Σχηματική παράσταση των τριών περιπτώσεων πρόσπτωσης μιας σεισμικής ακτίνας σε μια διεπιφάνεια. Κατά την πρόσπτωση υπό γωνία: a) μικρότερη της ορικής, δημιουργούνται ανακλώμενα και διαθλώμενα κύματα, b) ίση με την ορική γωνία, δημιουργούνται ανακλώμενα και μετωπικά κύματα και c) με γωνία μεγαλύτερη της ορικής, παρατηρείται ολική ανάκλαση (Βαφείδης, 2011).	13
Σχήμα 2. 3. Σχηματική παράσταση της δημιουργίας των μετωπικών κυμάτων (Reynolds, 1997).....	13
Σχήμα 2. 4. Αναλυτικό διάγραμμα ροής για την περιγραφή της σεισμικής τομογραφίας (Κρητικάκης, 2008).	16
Σχήμα 3. 1. Γραφική παράσταση μήκους κύματος που εκπέμπει μια πηγή φωτός (Τάτσης, 2015.).	17
Σχήμα 3. 2. Καλώδιο οπτικής ίνας (Silixa Ltd).....	18
Σχήμα 3. 3. Πολύτροπη (Multimode) και μονότροπη (Single-Mode) οπτική ίνα (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).	19
Σχήμα 3. 4. Τα 5 μέρη της οπτικής ίνας (Τάτσης, 2015.).....	20
Σχήμα 3. 5. Σφιχτός και χαλαρός σχεδιασμός οπτικών ινών (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).....	21
Σχήμα 3. 6. Κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης σε πολύτροπη οπτική ίνα (Τάτσης, 2015).	22
Σχήμα 3. 7. Διάμετρος των πυρήνων πολύτροπων (multimode) και μονότροπων (single-mode) οπτικών ινών (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).	24



Σχήμα 3. 8. Αρχή λειτουργίας iDAS (Johannessen et al., 2012).	25
Σχήμα 3. 9. Σχηματική διάταξη της θέσης πηγής και γεωφώνου σε πείραμα με τη κλασική μέθοδο μέτρησης ταχύτητας (VSP) στα αριστερά και η νέα τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (DAS) στα δεξιά (Milne, 2014).	27
Σχήμα 3. 10. Ταυτόχρονα καταγεγραμμένα δεδομένα από μονότροπες (αριστερά) και πολύτροπες (δεξιά) ίνες στην ίδια γεώτρηση (Silixa Ltd.).	28
Σχήμα 3. 11. Τεχνική ελάττωσης του ηλεκτρονικού θορύβου της Silixa (Milne, 2014).	29
Σχήμα 3. 12. Βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων από την εταιρεία Silixa Ltd για τα έτη 2012-2014 ενισχύοντας τη σχέση σήματος προς θόρυβο (Silixa Ltd.).	31
Σχήμα 3. 13. Εφαρμογή της τεχνολογίας DAS σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων (Silixa Ltd.).	35
Σχήμα 4. 1. Μοντέλο οριοθετημένο σε παραλληλόγραμμο και στραμμένο κατά 16.7°.	38
Σχήμα 4. 2. Μοντέλο οριοθετημένο σε παραλληλόγραμμο, στραμμένο κατά 16.7° με σημεία (σταυρονήματα) που ακολουθούν τις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων.	39
Σχήμα 4. 3. Διακριτοποίηση ενός μοντέλου σε 10 κελιά (cells) στον κατακόρυφο (Z) και 20 κελιά στον οριζόντιο (X) άξονα. Κάθε κελί, συνορεύει με τα γειτονικά του μέσω των κόμβων (nodes) του μοντέλου (Κρητικάκης, 2016).	40
Σχήμα 4. 4. Αναζήτηση των αλγόριθμων του PSV_SYNTHETICS στο Current Directory.	45
Σχήμα 4. 5. Εισαγωγή αρχικών παραμέτρων του μοντέλου στο PSV_SYNTHETICS.	47
Σχήμα 4. 6. Διάγραμμα χρονικής μεταβολής του κυματιδίου της πηγής (Κρητικάκης, 2016).	48
Σχήμα 4. 7. Απεικόνιση πηγής – γεωφώνων και του μοντέλου βάθους, όπου φαίνεται η θέση της πηγής στα 195m, τα γεώφωνα ανά 10cm (μαύρη γραμμή), καθώς και τα απορροφητικά όρια.	49
Σχήμα 4. 8. Στιγμιότυπα διάδοσης των κυμάτων στο μοντέλο, από την χρονική στιγμή 0ms μέχρι και 80ms ανά 5ms, για την πηγή στα 52.5m.	50
Σχήμα 4. 9. Συνθετικά δεδομένα της σεισμικής πηγής στα 100m.	50
Σχήμα 5. 1. Παραδείγματα περιπτώσεων αναγνώρισης και επιλογής των πρώτων αφίξεων (Κρητικάκης, 2008).	52
Σχήμα 5. 2. Επιλογή των πρώτων αφίξεων σε περιβάλλον Matlab.	53



Σχήμα 5. 3. Ορισμός των παραμέτρων του αρχικού εδαφικού μοντέλου.....	55
Σχήμα 5. 4. Αρχικό μοντέλο ταχυτήτων. Παράλληλα στρώματα που ακολουθούν το ανάγλυφο.	56
Σχήμα 5. 5. Επιλογή των παραμέτρων αντιστροφής.....	57
Σχήμα 5. 6. Το δρομοχρονικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και υπολογισμένων χρόνων διαδρομής των πρώτων αφίξεων (πάνω), καθώς και το τελικό εδαφικό μοντέλο με το τελικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (κάτω), για ισαπόσταση γεωφώνων 1m.	58
Σχήμα 5. 7. Ψηφιοποιημένο αρχικό μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων σε περιβάλλον MS Excel.	59
Σχήμα 5. 8. Τελικό μοντέλο με ισαπόσταση δεκτών 1m όπου φαίνεται η ταύτιση των τεσσάρων στρωμάτων του αρχικού μοντέλου.	60
Σχήμα 5. 9. Δρομοχρονικό διάγραμμα των 5 πηγών για το μοντέλο με ισαπόσταση δεκτών 1m.....	61
Σχήμα 5. 10. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 1m.....	62
Σχήμα 5. 11. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 1m, με σεισμικές ακτίνες.....	63
Σχήμα 5. 12. Δρομοχρονικό διάγραμμα των 5 πηγών για το μοντέλο με ισαπόσταση δεκτών 2m.....	64
Σχήμα 5. 13. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 2m.....	65
Σχήμα 5. 14. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 2m, με σεισμικές ακτίνες.....	66
Σχήμα 5. 15. Δρομοχρονικό διάγραμμα των 5 πηγών για το μοντέλο με ισαπόσταση γεωφώνων 6m.	67
Σχήμα 5. 16. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση γεωφώνων 6m.	68
Σχήμα 5. 17. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση γεωφώνων 6m, με σεισμικές ακτίνες.....	69
Σχήμα 5. 18. Σύγκριση των μοντέλων ταχύτητας της τεχνολογίας DAS με ισαπόσταση δεκτών 1m (κάτω) και 6m (πάνω).	70





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σεισμικά γεωτρήσεων ήταν και συνεχίζουν να είναι ένας σημαντικός παράγοντας πολλών προγραμμάτων χαρακτηρισμού ταμιευτήρων στις μέρες μας. Είτε πρόκειται για ρύθμιση σεισμικών επιφανείας, απεικόνιση της γεωλογικής δομής πλησίον της γεώτρησης ή εκτίμηση των πετροφυσικών αλλαγών κατά τη διάτρηση, οι συμβατικές μέθοδοι κυριαρχούν ακόμα και στην σημερινή τεχνολογία.

Οι αισθητήρες (γεώφωνα) και η συνδεδεμένη με αυτούς τηλεμετρία, έχουν βελτιωθεί σε σχέση με την ποιότητα του σήματος και την αξιοπιστία, γεγονός που έχει οδηγήσει σε μια μετατόπιση από την μετάδοση από ένα μόνο γεώφωνο μέσα στο φρέαρ σε διατάξεις αρκετών γεωφώνων ικανές για πολύ μεγαλύτερη κάλυψη της γεώτρησης. Ωστόσο, υπάρχουν πρακτικές δυσκολίες ειδικά όταν πρόκειται για διατάξεις δεκάδων ή ακόμη και εκατοντάδων γεωφώνων μέσα στη γεώτρηση, όπως το σημαντικό κόστος, και έτσι μόνο ένα μικρό ποσοστό των πιθανών εφαρμογών είναι οικονομικά βιώσιμες με την σημερινή συμβατική τεχνολογία.

Τα τελευταία χρόνια τα σεισμικά γεωτρήσεων έχουν επανέλθει ως μια καθιερωμένη έρευνα με την ανάπτυξη και προώθηση εφαρμογών όπως, η απόκτηση σεισμικών δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (time-lapse seismic), σεισμικές διασκοπήσεις σε πολλές παρακείμενες γεωτρήσεις με χρήση κοινής πηγής (cross-well seismic), 3DVSP και παρακολούθηση υδραυλικής ρωγμάτωσης (hydraulic fracture monitoring).

Η τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (Distributed Acoustic Sensing – DAS) αποτελεί το πιο σημαντικό βήμα ανάπτυξης στην τεχνολογία των σεισμικών ερευνών σε γεωτρήσεις μέχρι σήμερα. Ο όρος DAS είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια τεχνολογία οπτικής ίνας που έχει πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Ερευνώντας εκτενώς την βιβλιογραφία παρατηρήσαμε ότι δεν έχουν δημοσιευτεί εργασίες για την παρακολούθηση κατολισθήσεων με χρήση οπτικών ινών, ενώ αναφέρεται ότι η τεχνολογία DAS (Silixa Ltd.) δύναται να εμαρμόσθει για την παρακολούθηση τέτοιων φαινομένων. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική



εργασία εξετάζεται η εφαρμογή της τεχνολογίας DAS στην απεικόνιση του υπεδάφους για την παρακολούθηση κατολισθήσεων και συγκρίνεται με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας.

Η ανάγκη ουσιαστικής έρευνας των κατολισθητικών φαινομένων και η λήψη μέτρων για την προστασία ή, όπου είναι εφικτό, ακόμα και την αποφυγή του προβλήματος φάνηκε από τις αρχές, κιόλας, του 20^{ου} αιώνα με δημοσιεύσεις εργασιών περιγραφικού χαρακτήρα, για κατολισθήσεις εκείνης της εποχής.

1.1 Περίγραμμα διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εφαρμογή μιας νέας τεχνολογίας κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (οπτικής ίνας) και συγκρίνεται με την συμβατική μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η τεχνολογία DAS και συγκρίνεται με την υπάρχουσα συμβατική τεχνολογία της σεισμικής τομογραφίας.

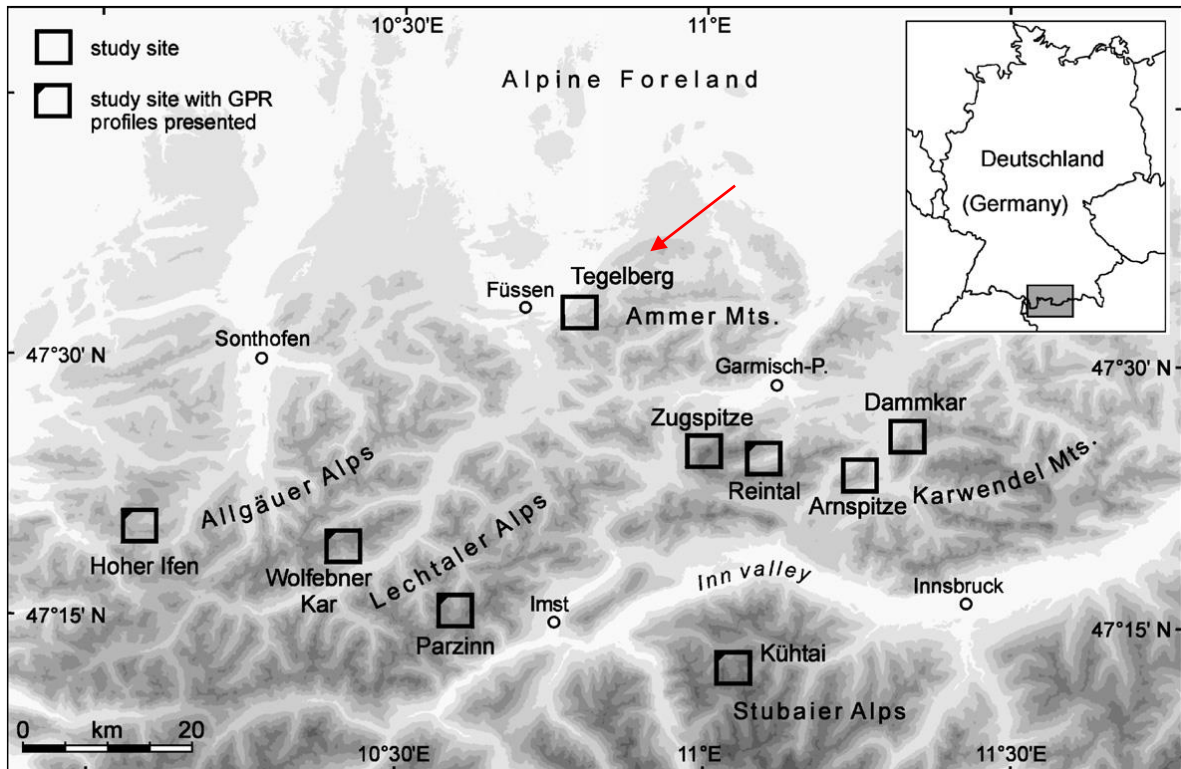
Για την επίτευξη των παραπάνω, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση διασκόπησης σεισμικής διάθλασης. Χρησιμοποιήθηκε μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων που αντιστοιχεί σε τομή υπεδάφους από την περιοχή των Βαυαρικών Άλπεων. Τα χαρακτηριστικά της τομής έχουν προσδιορισθεί από την συνδυαστική ερμηνεία των μεθόδων γεωραντάρ (GPR), ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) και σεισμικής διάθλασης (SR).

Ειδικότερα, ψηφιοποιήθηκε η ερμηνευμένη γεωφυσική τομή από την περιοχή μελέτης και στη συνέχεια, για την προσομοίωση του πειράματος σεισμικής τομογραφίας στις δύο διαστάσεις (2D), χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *PSV_SYNTHETICS_VER11* που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης σε περιβάλλον Matlab. Δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα για 5 διαφορετικές θέσεις πηγών κατά μήκος του μοντέλου. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η επιλογή των πρώτων αφίξεων και η επεξεργασία τους με τη χρήση του λογισμικού SeisImager (πρόγραμμα Plotrefa). Για την αναπαράσταση της συμβατικής μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας και της τεχνολογίας DAS χρησιμοποιήθηκαν δέκτες σε ισαποστάσεις των 6m και 1m, αντίστοιχα.



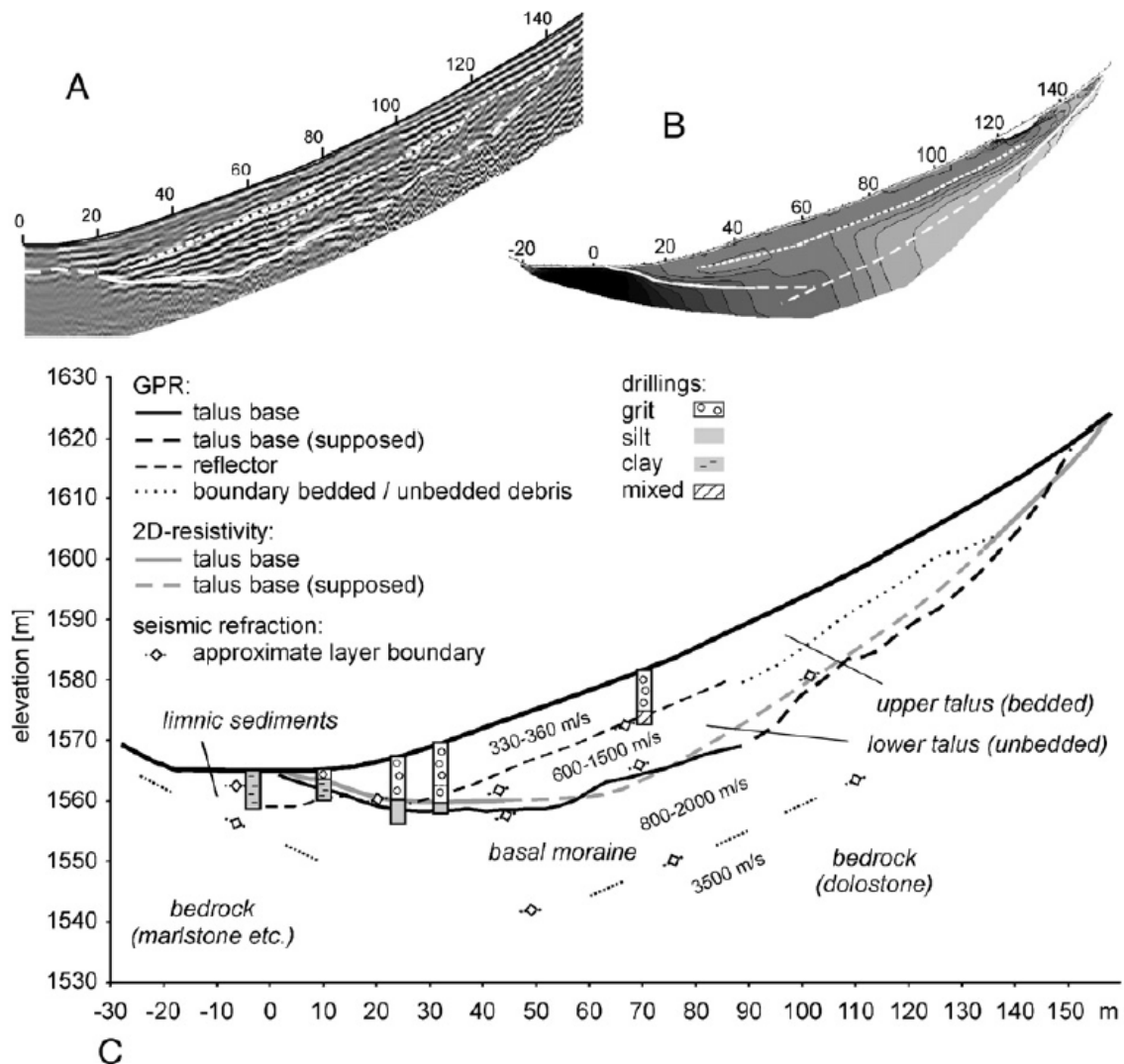
1.2 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης που εξετάζεται στην εν λόγω διπλωματική εργασία, βρίσκεται στις Βαυαρικές Άλπεις και ειδικότερα στο όρος Tegelberg (υψόμετρο 1881m), στη Νότια Γερμανία (Σχήμα 1.1). Στην περιοχή αυτή διεξήχθη σεισμική διάθλαση σε μέτρια απόκρημνη πλαγιά (21°) με πλευρικά κορήματα. Για την σεισμική έρευνα χρησιμοποιήθηκε το σεισμικό σύστημα Bison Galileo 24 καναλιών και ως σεισμική πηγή μια βαριά 5kg. Η ισαπόσταση των γεωφώνων ήταν 3m καταλήγοντας σε ένα ανάπτυγμα 69m.



Σχήμα 1. 1. Χάρτης στον οποίο απεικονίζονται περιοχές μελέτης κατολισθήσεων στις Βαυαρικές Άλπεις. Το κόκκινο βέλος υποδεικνύει το όρος Tegelberg στο οποίο βρίσκεται η κατολίσθηση που μελετάται στην εν λόγω διπλωματική εργασία (Sass and Krautblatter, 2007).

Το αρχικό μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων από την περιοχή των Βαυαρικών Άλπεων, στο όρος Tegelberg, το οποίο προέκυψε από συνδυασμό των μεθόδων γεωραντάρ, ηλεκτρικής τονογραφίας και σεισμικής διάθλασης, παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1. 2. Αρχικό μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων από την περιοχή των Βαβαρικών Άλπεων, στο όρος Tegelberg, το οποίο προέκυψε από συνδυασμό των μεθόδων Γεωραντάρ, Ηλεκτρικής και Σεισμικής Τομογραφίας (Schrott and Sass, 2008.).

Η εν λόγω εργασία βασίστηκε στο παραπάνω μοντέλο, το οποίο εισήχθη σε κατάλληλο πρόγραμμα σχεδίασης για να τροποποιηθεί και να ψηφιοποιηθεί και στη συνέχεια να γίνουν οι απαραίτητες εργασίες για την προσομοίωση του με την δημιουργία συνθετικών δεδομένων, χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους του PSV_SYNTHETICS, σε περιβάλλον Matlab.



1.3 Κατολισθήσεις

Οι φυσικές καταστροφές που πλήττουν τον πλανήτη μας αποτελούν βασική αιτία απώλειας ανθρώπινων ζώων και περιουσιών με σημαντικές κοινωνικό-οικονομικές επιπτώσεις. Τις σπουδαιότερες φυσικές καταστροφές συνιστούν οι σεισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι πλημμύρες και οι τυφώνες, και φυσικά οι κατολισθήσεις. Σε πολλές χώρες του κόσμου, οι κατολισθήσεις κατέχουν την πρώτη θέση ανάμεσα στα φυσικά καταστροφικά φαινόμενα από άποψη πρόκλησης ζημιών. Με την αύξηση του πληθυσμού, την ανάπτυξη και την δημιουργία νέων αστικών κέντρων και την κατασκευή τεχνικών έργων παρατηρήθηκε αύξηση των φαινομένων αστάθειας τόσο σε φυσικά όσο και σε τεχνητά πρανή.

Οι επιπτώσεις αυτών των φαινομένων αστάθειας μπορούν να διακριθούν σε άμεσες, όπως απώλεια ανθρώπινων ζώων και καταστροφή περιουσιών, και σε έμμεσες, όπως πλήρωση λεκανών και ταμιευτήρων, αποφράξεις ρεμάτων, καταστροφή δρόμων και αγροτικών εκτάσεων, κ.λ.π.

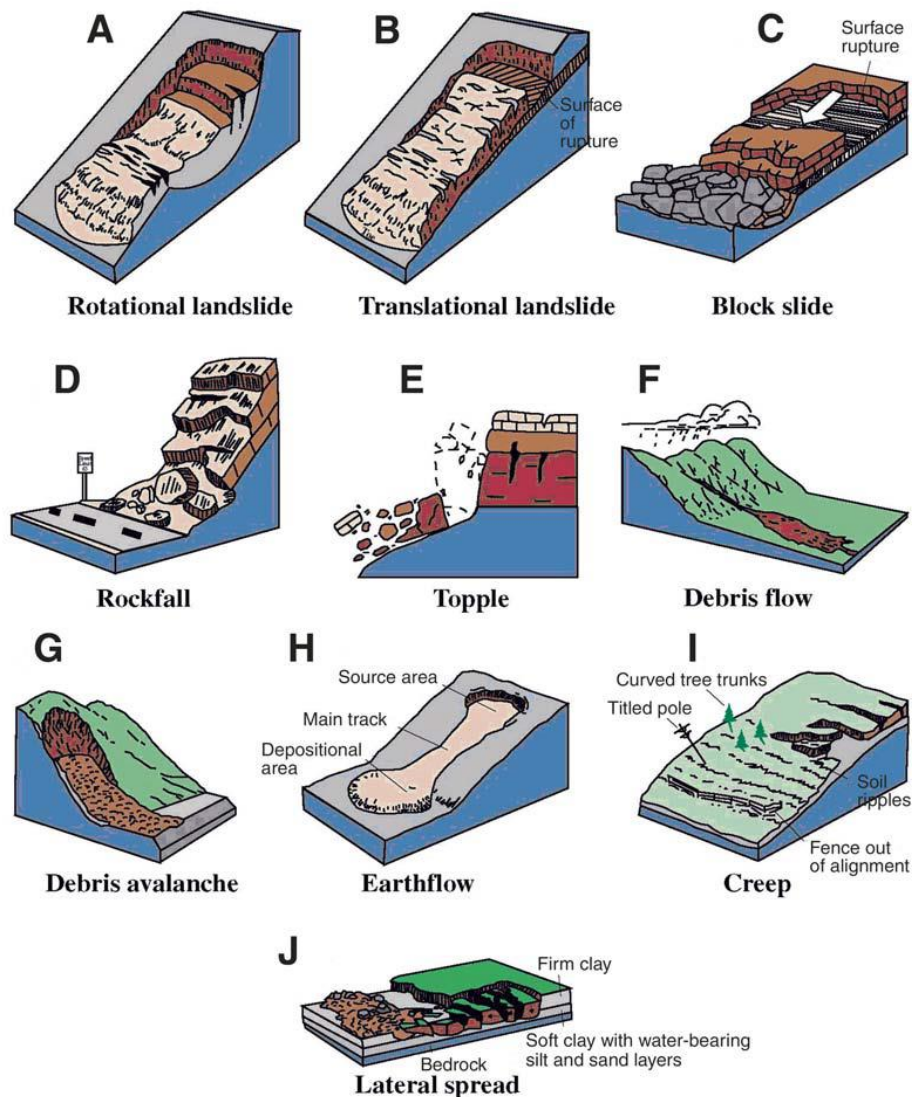
Τα αίτια αυτών είναι πολλά και εξαρτώμενα από γεωλογικούς, τεκτονικούς, υδρογεωλογικούς, τοπογραφικούς, ακόμα και κλιματικούς παράγοντες που συνδυάζονται ποικιλοτρόπως με τον ανθρωπογενή παράγοντα ώστε να προκαλέσουν τη γένεση των αστοχιών. Οι πρώτες οργανωμένες προσπάθειες για τη μελέτη και έρευνα των κατολισθήσεων ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1950, με πολλές αναθεωρήσεις και βελτιώσεις έκτοτε.

Ιδιαίτερα η Ελλάδα, υποφέρει συχνά από κατολισθήσεις, καθώς τέτοιου είδους φαινόμενα ευνοούνται από τη λιθολογική σύσταση, την τεκτονική και την γεωμορφολογία της χώρας σε ευρεία κλίμακα. Το πρόβλημα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ιδιαίτερης σημασίας τόσο κοινωνικά όσο και οικονομικά, αφού οι πιο συχνά απαντώμενες επιπτώσεις αφορούν σε καταστροφές οδικών δικτύων και των συνοδών τους τεχνικών έργων, καθώς και στη μη βιωσιμότητα ολόκληρων οικισμών λόγω επισφαλών συνθηκών.



1.3.1 Τύποι και ταχύτητα κατολισθήσεων

Οι κατολισθήσεις είναι μετακινήσεις βράχων ή εδαφών που λαμβάνουν χώρα σε κεκλιμένες μορφολογικά επιφάνειες, με την επίδραση της βαρύτητας. Παραδείγματα διαφορετικών τύπων κατολισθήσεων απεικονίζονται παρακάτω (Σχήμα 1.3). Ειδικότερα, στο Σχήμα 1.3-F παρουσιάζεται κατολίσθηση τύπου ροής πλευρικών κορημάτων, τύπος ο οποίος μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Σχήμα 1. 3. Παραδείγματα διαφορετικών τύπων κατολισθήσεων (Wieczorek and Snyder, 2009, Cruden and Varnes, 1996).



Η επικινδυνότητα μιας κατολίσθησης, εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται. Σύμφωνα με τον Varnes (1978), οι κατολισθήσεις διακρίνονται με βάση την ταχύτητα εξέλιξης τους, σε αργές, μέτριες και γρήγορες (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1. Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης των πρανών (Στειακάκης, 2012, Varnes, 1978).

Ταχύτητα μετακίνησης	Χαρακτηρισμός της μετακίνησης
-----3m/sec	έξαιρετικά γρήγορη
-----0,3m/min	πολύ γρήγορη
-----1,5m/d	γρήγορη
-----1,5m/μήνα	μέτρια
-----1,5m/χρόνο	αργή
-----0,6m/χρόνο	πολύ αργή
	έξαιρετικά αργή

Είναι γεγονός ότι πολλές κατολισθήσεις, ανεξάρτητα του μεγέθους τους, παρουσιάζουν κατά τη διάρκεια της εξέλιξης τους μικτούς χαρακτήρες, δηλαδή τμήματα (ή και το σύνολο) της κατολισθαίνουσας μάζας παρουσιάζουν διαφορετικές ταχύτητες μετακίνησης.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό των κατολισθήσεων αφορά το μέγεθος μετακίνησης της κατολισθαίνουσας μάζας, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τις κατασκευές και τα τεχνικά έργα που γίνονται για την προστασία των πρανών. Η μετακίνηση μπορεί να κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά χιλιόμετρα και θα πρέπει πάντα να εξετάζεται σε συνδυασμό με την ταχύτητα εξέλιξης και τις διαστάσεις (σε όγκο) της κατολίσθησης.



Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι οι κατολισθήσεις μεγάλης έκτασης, δεν αφορούν συνήθως μια κατολίσθηση, αλλά σμήνος μικρών και μεγάλων ομοειδών κατολισθήσεων, οι οποίες επειδή βρίσκονται κάτω από τους ίδιους ή παρεμφερείς μηχανισμούς γένεσης, εξελίσσονται ομαδικά ή αλυσιδωτά (Στειακάκης, 2012).

1.3.2 Παρακολούθηση κατολισθήσεων

Η παρακολούθηση των κατολισθήσεων αποτελεί ένα μεγάλης σημασίας επιστημονικό πεδίο, δεδομένου της επικινδυνότητας μιας κατολίσθησης και των ατυχημάτων που συνδέονται με αυτές. Ειδικότερα, για την παρακολούθηση χρησιμοποιούνται διάφορες γεωφύσικες μέθοδοι όπως, η μέθοδος του γεωραντάρ και οι μέθοδοι σεισμικής και ηλεκτρικής τομογραφίας (Sass and Krautblatter, 2007, Schrott and Sass, 2008). Ακόμα, με την ανάπτυξη των συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού, χρησιμοποιείται η μέθοδος Παγκόσμιου Δορυφορικού Προσδιορισμού Θέσης (GPS) για την παρακολούθηση μετακινήσεων στην επιφάνεια της Γης (Savvaidis, 2003., Wiczorek and Snyder, 2009).

Πιο συγκεκριμένα, για την ενόργανη παρακολούθηση των κατολισθήσεων χρησιμοποιούνται:

- Τοπογραφικά όργανα - Ολικός Γεωδαιτικός Σταθμός (Total Station) και GPS
- Κλισιόμετρα/αποκλισιόμετρα (Inclinometers)
- Επιμηκυνσιόμετρα (Extensometers)
- Πιεζόμετρα (Piezometers)
- Ρωγμόμετρα (Crackmeters)
- Ραντάρ (Radar)
- Γεώφωνα (Geophones)
- Οπτικές ίνες (Optic fibers)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΘΛΑΣΗ & ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η Γεωμετρική Οπτική και η Κυματική Θεωρία αποτελούν τις δύο κύριες θεωρίες που περιγράφουν τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης. Όπως στην Οπτική χρησιμοποιούνται οι φωτεινές ακτίνες για να δείξουν την πορεία που ακολουθεί το φως, έτσι και στις σεισμικές μεθόδους η πορεία των σεισμικών κυμάτων περιγράφεται από τις σεισμικές ακτίνες.

Οι σεισμικές μέθοδοι επιφανείας διακρίνονται στις εξής:

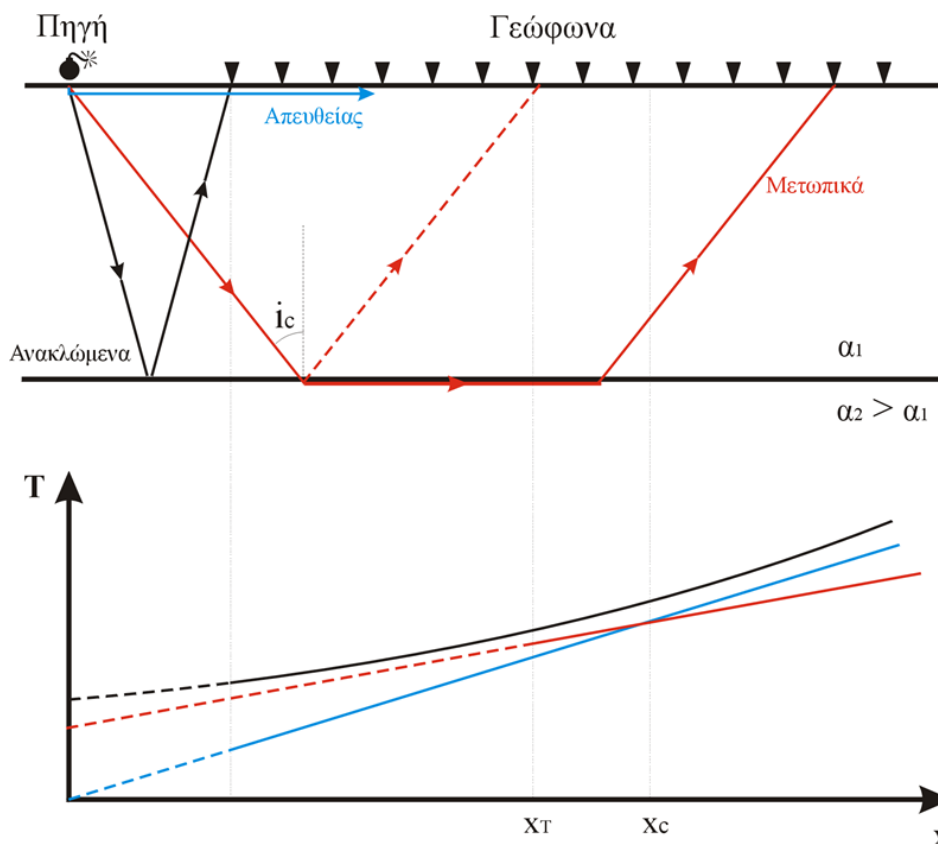
- Μέθοδος σεισμικής ανάκλασης
- Μέθοδος σεισμικής διάθλασης

Παρακάτω γίνεται εκτενής αναφορά στην μέθοδο της σεισμικής διάθλασης και τομογραφίας, που αποτελεί βασικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.1 Μέθοδος της σεισμικής διάθλασης

Η αρχή της μεθόδου αυτής βασίζεται στον πειραματικό προσδιορισμό των χρόνων διαδρομής των απευθείας κυμάτων και των κυμάτων διάθλασης και στη χρησιμοποίηση, κατόπιν, των καμπύλων των χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών, για τον καθορισμό της ταχύτητας των κυμάτων στα επιφανειακά στρώματα με θεωρητικές σχέσεις.

Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο απευθείας κύματα εννοούμε αυτά τα οποία φεύγουν από την σεισμική πηγή και κατευθύνονται προς τα γεώφωνα χωρίς να προσπέσουν σε διαχωριστική επιφάνεια και να ανακλαστούν. Αντίθετα, με τον όρο διαθλώμενα ή μετωπικά κύματα εννοούμε αυτά που έχουν προσπέσει σε μια διαχωριστική επιφάνεια και μετά από διάδοση παράλληλα στη διαχωριστική επιφάνεια αναδύονται και καταγράφονται από τα γεώφωνα. Παρακάτω απεικονίζονται οι πορείες των απευθείας, ανακλώμενων και μετωπικών κυμάτων καθώς και οι χρόνοι διαδρομής αυτών (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2. 1. Σεισμικές ακτίνες των απευθείας κυμάτων, των διαθλώμενων κυμάτων και των ανακλώμενων κυμάτων. Καμπύλες χρόνων διαδρομής των κυμάτων αυτών (Βαφείδης, 2011).

Σκοπός της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας της περιοχής, όπου έγιναν οι μετρήσεις και ο υπολογισμός της ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων, με στόχο τελικά τον καθορισμό της δομής του υπεδάφους.

Η μέθοδος της διάθλασης παρουσιάζει δυσκολίες κατά τη λήψη των μετρήσεων, καθώς τα γεώφωνα κατανέμονται σε μεγάλες σχετικά αποστάσεις, ενώ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μετρήσεις που έγιναν σε περιοχές με μορφολογικές ανωμαλίες.

2.1.1 Είδη σεισμικών κυμάτων

Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε διαφορετικά είδη ανάλογα με τα χαρακτηριστικά διάδοσής τους. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες: στην πρώτη ανήκουν



τα κύματα χώρου και στην δεύτερη τα επιφανειακά κύματα. Στα κύματα χώρου η διαταραχή διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις στερεού σώματος π.χ. της γης, ενώ στα επιφανειακά κύματα η διαταραχή διαδίδεται σε διαχωριστικές επιφάνειες όπως η επιφάνεια της Γης.

Κύματα χώρου είναι τα διαμήκη και τα εγκάρσια. Το χαρακτηριστικό των διαμήκων κυμάτων είναι, ότι η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων (μετατόπιση) συμπίπτει με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα διαμήκη κύματα συμβολίζονται με το "P" από το λατινικό Primus (πρώτο), Καθώς λόγω του ότι διαδίδονται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, φθάνουν στο σταθμό παρατήρησης πριν από τα άλλα είδη σεισμικών κυμάτων.

Η ταχύτητα διάδοσης (α) των διαμήκων κυμάτων εξαρτάται από τις σταθερές του Lamé, λ και μ και από τη πυκνότητα ρ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

Τα κύματα P καταφθάνουν στους δέκτες πρώτα κι έτσι είναι ευκολότερο να αναγνωρισθούν και γι'αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις σεισμικές μεθόδους για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης.

Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των υλικών σημείων είναι κάθετη προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης (β) των εγκαρσίων κυμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Τα εγκάρσια κύματα μπορούν να διαδοθούν σε οποιοδήποτε μέσο, αρκεί να παρουσιάζει έστω και την ελάχιστη αντίσταση στην κάμψη δηλαδή ο συντελεστής ακαμψίας μ (ή το μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης) να είναι διάφορος του μηδενός. Στα ρευστά ισχύει ότι $\mu=0$ και η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων είναι ίση με μηδέν. Δηλαδή, τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται στα ρευστά (υγρά και αέρια).



Από τη σύγκριση των (2.1) και (2.2) προκύπτει ότι η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων. Γι αυτό, τα εγκάρσια κύματα φθάνουν σε ορισμένο σταθμό μετά τα διαμήκη κύματα και συμβολίζονται με το "S" από το λατινικό *Secundus* (δεύτερο).

2.1.2 Διάδοση σεισμικών κυμάτων

Κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης ισχύουν οι αρχές του Fermat και του Huygens, καθώς και ο νόμος του Snell. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τις αρχές των Fermat και Huygens, όταν ένα κύμα διαδίδεται σε υλικό μέσο, ακολουθεί τη διαδρομή του ελάχιστου χρόνου καθώς και ότι κάθε σημείο του διαθλώμενου μετώπου κύματος αποτελεί δευτερεύουσα πηγή σεισμικών κυμάτων, αντίστοιχα.

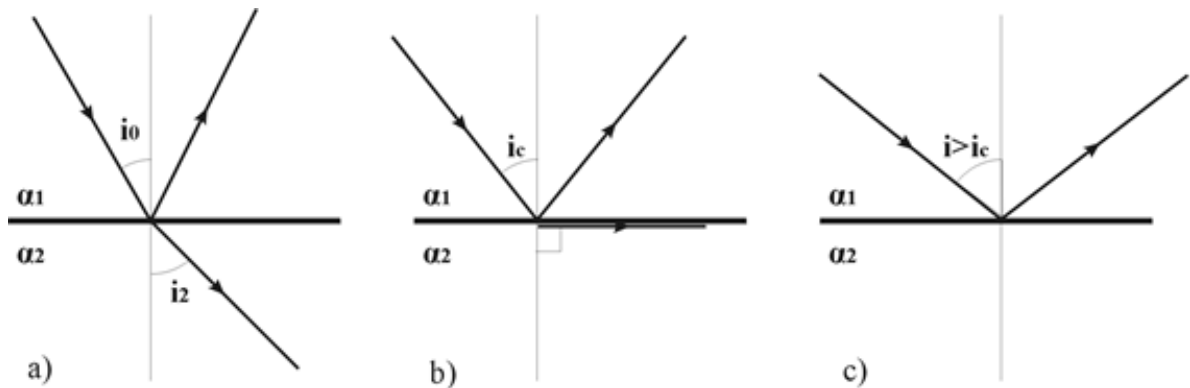
Η πορεία της σεισμικής ακτίνας αλλάζει, λόγω διαδοχικών διαθλάσεων στις διαχωριστικές επιφάνειες ή σε μέσο (στρώματα) όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται με το βάθος. Η γωνία πρόσπτωσης i_0 , η γωνία διάθλασης i_2 , και οι ταχύτητες a_1 και a_2 στα δύο επιφανειακά στρώματα συνδέονται από το νόμο του Snell (2.3):

$$p = \frac{\sin(i_0)}{a_1} = \frac{\sin(i_2)}{a_2} \quad (2.3)$$

όπου p είναι η παράμετρος της σεισμικής ακτίνας.

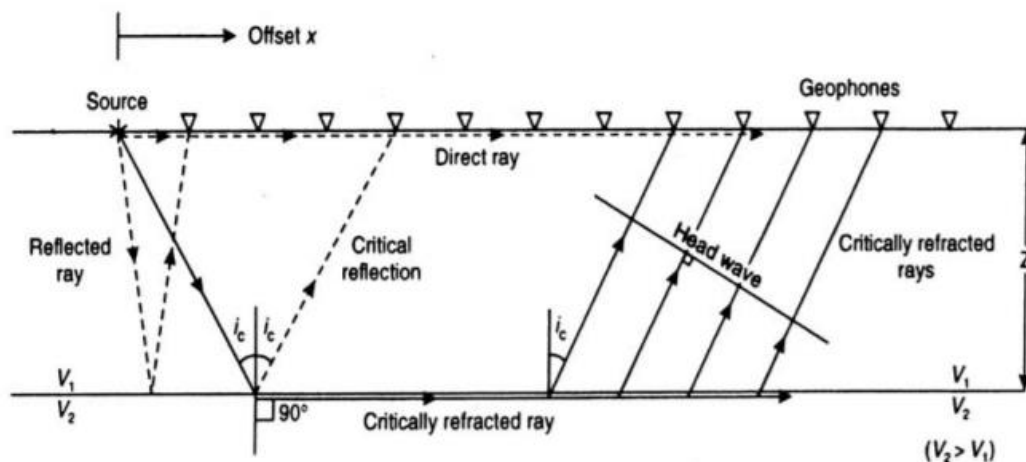
Η σεισμική ακτίνα προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια υπό ορική γωνία, όταν η διαθλώμενη ακτίνα έχει διεύθυνση παράλληλη προς τη διαχωριστική επιφάνεια. Σε μια τέτοια περίπτωση ο νόμος του Snell γίνεται (2.4):

$$\sin(i_c) = \frac{a_1}{a_2} \quad (2.4)$$



Σχήμα 2. 2. Σχηματική παράσταση των τριών περιπτώσεων πρόσπτωσης μιας σεισμικής ακτίνας σε μια διεπιφάνεια. Κατά την πρόσπτωση υπό γωνία: a) μικρότερη της ορικής, δημιουργούνται ανακλώμενα και διαθλώμενα κύματα, b) ίση με την ορική γωνία, δημιουργούνται ανακλώμενα και μετωπικά κύματα και c) με γωνία μεγαλύτερη της ορικής, παρατηρείται ολική ανάκλαση (Βαφειδής, 2011).

Ειδικότερα, όταν σεισμική ακτίνα προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια υπό ορική γωνία, τότε το διαθλώμενο κύμα διαδίδεται στο δεύτερο στρώμα παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, κάθε σημείο του διαθλώμενου μετώπου κύματος αποτελεί δευτερεύουσα πηγή σεισμικών κυμάτων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σεισμικά κύματα τα οποία προέρχονται από τις δευτερεύουσες αυτές πηγές και αναδύονται στο πρώτο στρώμα. Η γωνία των αναδυόμενων προς την επιφάνεια σεισμικών ακτίνων με την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια είναι ίση με την ορική γωνία. Αυτά τα αναδύόμενα σεισμικά κύματα ονομάζονται μετωπικά κύματα (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2. 3. Σχηματική παράσταση της δημιουργίας των μετωπικών κυμάτων (Reynolds, 1997).



2.1.3 Περιορισμοί της μεθόδου

Για ικανοποιητικά αποτελέσματα με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης απαιτείται να ληφθούν υπόψη κάποιοι περιορισμοί. Κατ' αρχήν, είναι αναγκαίο η ταχύτητα σε κάθε στρώμα να είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα στο υπερκείμενο στρώμα. Ακόμα τα πάχη των στρωμάτων πρέπει να είναι σχετικά μεγάλα.

Γενικότερα το φαινόμενο της τυφλής ζώνης είναι υπεύθυνο έτσι ώστε η μέθοδος να καταστεί αδύναμη για τον εντοπισμό κάποιου ενδιάμεσου στρώματος. Κάποια φαινόμενα της τυφλής ζώνης παρουσιάζονται παρακάτω:

- Όταν η ταχύτητα του υπερκείμενου στρώματος είναι μεγαλύτερη από του υποκείμενου. Τότε η ακτίνα διάθλασης (σύμφωνα με το νόμο του Snell) αποκλίνει από την διαχωριστική επιφάνεια, ώστε να μην δημιουργούνται μετωπικά κύματα στη διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων.
- Όταν κάποιο στρώμα έχει ταχύτητα περίπου ίδια με την ταχύτητα στο αμέσως υπερκείμενο στρώμα. Τότε δεν είναι δυνατή η δημιουργία μετωπικών κυμάτων λόγω μικρής αντίθεσης των ταχυτήτων των δύο στρωμάτων.
- Όταν κάποιο στρώμα έχει πολύ μικρό πάχος σε σχέση με το υποκείμενο και το υπερκείμενό του στρώμα. Τότε τα μετωπικά κύματα από το υποκείμενο στρώμα καταγράφονται πριν από τα αντίστοιχα κύματα του λεπτού στρώματος.
- Όταν το πρώτο γεώφωνο είναι τοποθετημένο μακριά από την πηγή. Τότε τα μετωπικά κύματα από το δεύτερο στρώμα καταγράφονται μετά από τα αντίστοιχα κύματα του τρίτου στρώματος.

Στην εν λόγω εργασία, όλοι οι παραπάνω περιορισμοί έχουν ληφθεί υπόψη κατά την προσομοίωση του μοντέλου (Σχήμα 1.2) στη Matlab (R2014b) με τους αλγόριθμους του «*PSV_SYNTHETICS_VER11*».

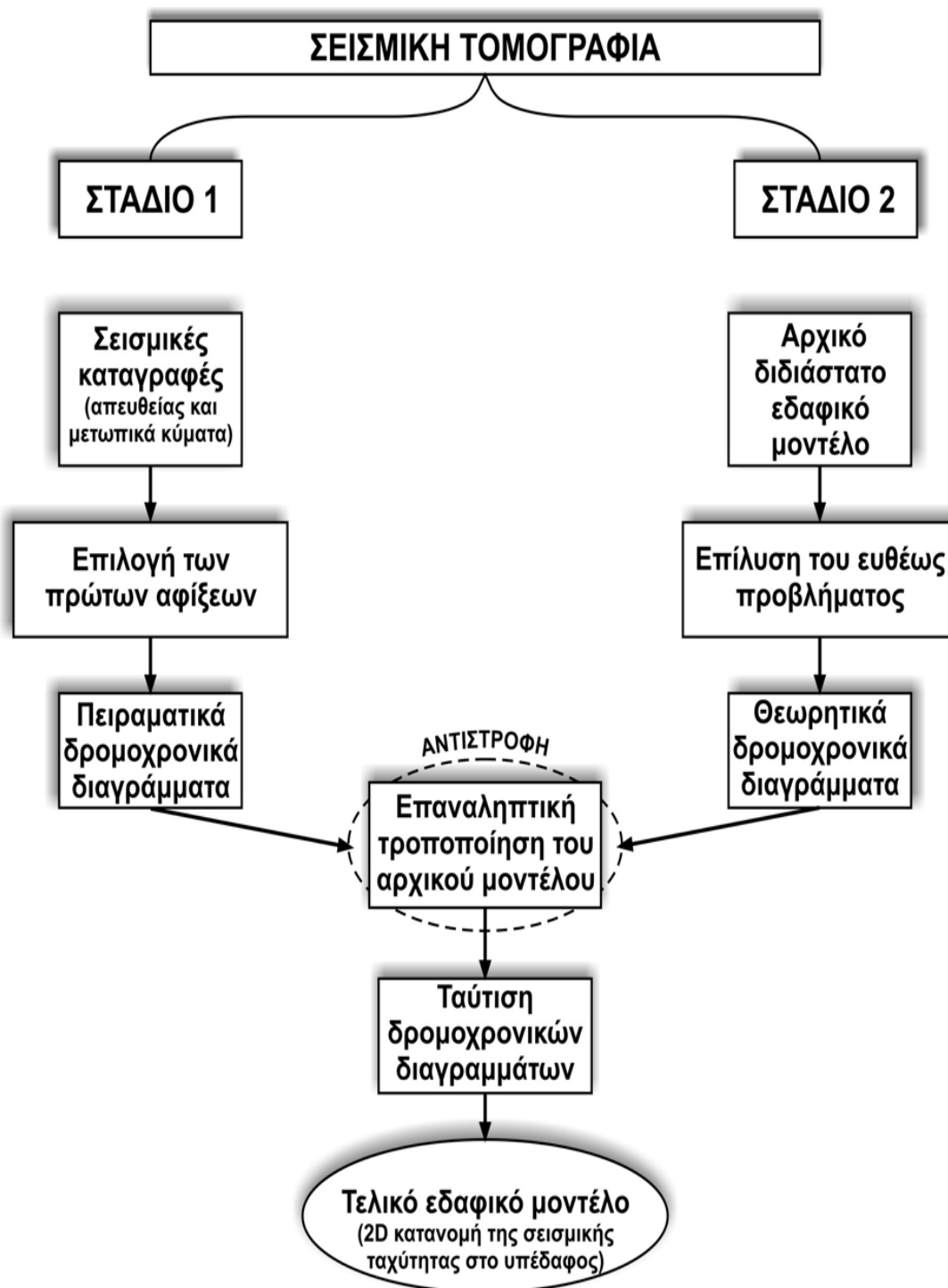


2.2 Μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας

Για την επεξεργασία των δεδομένων της σεισμικής διάθλασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επεξεργασίας της σεισμικής τομογραφίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιοχές στις οποίες υπάρχει έντονο ανάγλυφο, όταν υπάρχει πλευρική μεταβολή της σεισμικής ταχύτητας ή όταν υπάρχει βαθμιαία μεταβολή στην ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων με το βάθος. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια δισδιάστατη κατανομή της ταχύτητας στο υπέδαφος. Αρχικά, η επιλογή των πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab με χρήση του PSV_SYNTHETICS, ενώ για την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Plotrefa.

Η μέθοδος της σεισμικής τομογραφίας βασίζεται στην σύγκριση των πειραματικών χρόνων πρώτων αφίξεων (που προέκυψαν από το picking των καταγραφών) και των θεωρητικά υπολογισμένων χρόνων πρώτων αφίξεων που προκύπτουν από ένα αρχικό δισδιάστατο μοντέλο ταχυτήτων. Τροποποιώντας επαναληπτικά το αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, πραγματοποιείται η «ταύτιση» (στα όρια κάποιου αποδεκτού σφάλματος) των συγκρινόμενων χρόνων πρώτων αφίξεων (δρομοχρονικά διαγράμματα). Το τελικό εδαφικό μοντέλο που προκύπτει (δισδιάστατη κατανομή της σεισμικής ταχύτητας στο υπέδαφος), θεωρείται ότι απεικονίζει την πραγματική κατανομή της σεισμικής ταχύτητας στο υπέδαφος, κάτω από την σεισμική γραμμή μελέτης.

Έτσι, απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία της μεθόδου είναι η εισαγωγή από το χρήστη ενός αρχικού μοντέλου βάθους και των αντίστοιχων σεισμικών ταχυτήτων των στρωμάτων. Στο λογισμικό SeisImager και ειδικότερα κατά την επεξεργασία των πρώτων αφίξεων με τη μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ως αρχικό μοντέλο το μοντέλο βάθους και τις σεισμικές ταχύτητες που προέκυψαν από προγενέστερη επεξεργασία (π.χ. από την επεξεργασία με την μέθοδο Time – Term Inversion – TTI). Παρακάτω, παρατίθεται διάγραμμα ροής στο οποίο παρουσιάζεται η επεξεργασία δεδομένων της σεισμικής τομογραφίας (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2. 4. Αναλυτικό διάγραμμα ροής για την περιγραφή της σεισμικής τομογραφίας (Κρητικάκης, 2008).



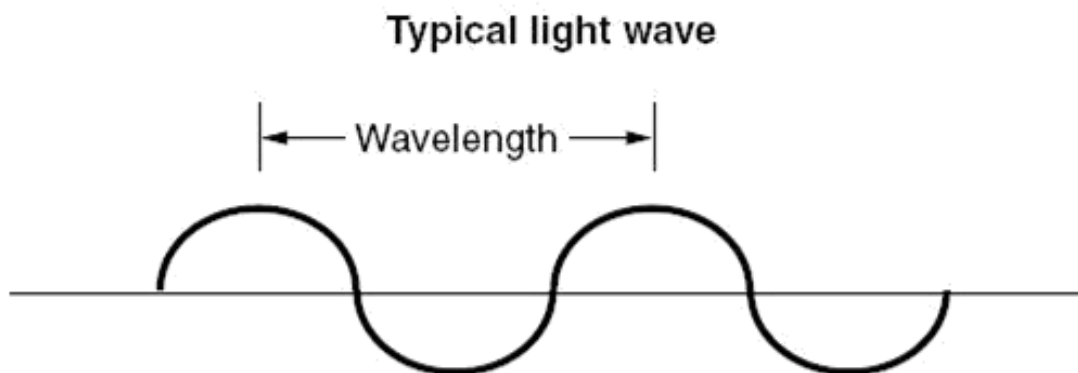
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η τεχνολογία των οπτικών ινών και εξετάζεται η εφαρμογή μιας νέας τεχνολογίας κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (DAS) με διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

3.1 Οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες (optic fibers) αποτελούν μια μέθοδο μετάδοσης πληροφοριών με την μορφή παλμών φωτός και γι' αυτό η τεχνολογία τους είναι πιο περίπλοκη από αυτήν των χάλκινων καλωδίων. Η φωτεινή πηγή είναι είτε laser είτε κάποιο είδος δίοδου εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode – LED). Τα οπτικά καλώδια χρησιμοποιούν συγκεκριμένα μήκη κύματος φωτός (Randy, 2000). Το μήκος κύματος μιας συγκεκριμένης πηγής φωτός είναι το μήκος, υπολογισμένο σε nanometers, μεταξύ δύο συνεχόμενων κορυφών ενός κύματος φωτός που εκπέμπει η πηγή.

Η χρήση παλμών φωτός για μεταφορά πληροφοριών εξυπηρετεί τους ίδιους στόχους με το χάλκινο καλώδιο, που μεταφέρει ηλεκτρικά σήματα. Οποιοσδήποτε τύπος ηλεκτρικού σήματος που μπορεί να μετατραπεί σε παλμούς φωτός μπορεί να μεταδοθεί μέσα σε ένα καλώδιο οπτικών ινών (Nellist, 2001).



Σχήμα 3. 1. Γραφική παράσταση μήκους κύματος που εκπέμπει μια πηγή φωτός (Τάτσης, 2015.).



Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες για τη μέτρηση της τάσεως παραμόρφωσης, της θερμοκρασίας, της πίεσης και άλλων παραμέτρων. Το μικρό μέγεθος και το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι απαραίτητη δίνει στην ίνα οπτικού αισθητήρα το πλεονέκτημα σε σχέση με τους συμβατικούς ηλεκτρικούς αισθητήρες, σε ορισμένες εφαρμογές.

Τα καλώδια οπτικών ινών (Σχήμα 3.2) έχουν παρόμοια συστατικά στην κατασκευή τους με τα χάλκινα καλώδια. Η κύρια διαφορά είναι ότι τα καλώδια οπτικών ινών χρησιμοποιούν γυαλί για μετάδοση παλμών φωτός, ενώ τα χάλκινα καλώδια χρησιμοποιούν κάποια μορφή χάλκινου αγωγού για μετάδοση ηλεκτρικών σημάτων. Τα καλώδια οπτικών ινών έχουν επίσης κάποια μορφή προστατευτικού μονωτικού υλικού που καλύπτει τις γυάλινες οπτικές ίνες και ένα περίβλημα που καλύπτει όλη την συγκρότηση του καλωδίου. Ορισμένα καλώδια οπτικών ινών περιλαμβάνουν μια θωράκιση καλωδίου. Οι θωρακίσεις είναι ένα προαιρετικό συστατικό και περιλαμβάνονται μόνο σε μερικούς τύπους καλωδίων οπτικών ινών.

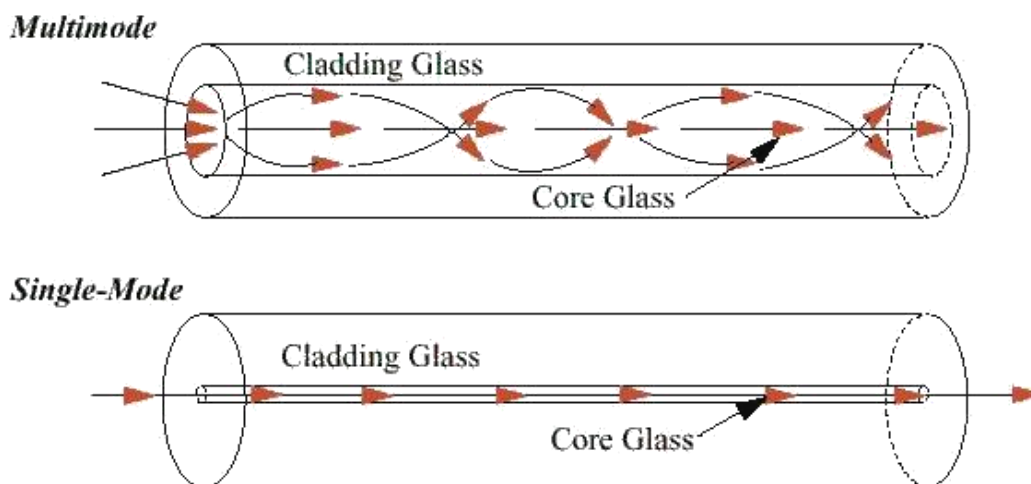


Σχήμα 3. 2. Καλώδιο οπτικής ίνας (Silixa Ltd).

Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες οπτικών ινών (Σχήμα 3.3) που διαχωρίζονται κυρίως με βάση το μέγεθος του πυρήνα της οπτικής ίνας (Παπαϊωάννου και

Πλιάκας, 2017, Hayes, 2005). Φυσικά λόγω του μεγέθους της οπτικής ίνας η μετάδοση στις δύο κατηγορίες πραγματοποιείται με διαφορετικό τρόπο που θα αναλυθεί παρακάτω και που μπορεί να αποτελέσει ένα ακόμα τρόπο διαχωρισμού μεταξύ των δύο κατηγοριών. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι οι εξής:

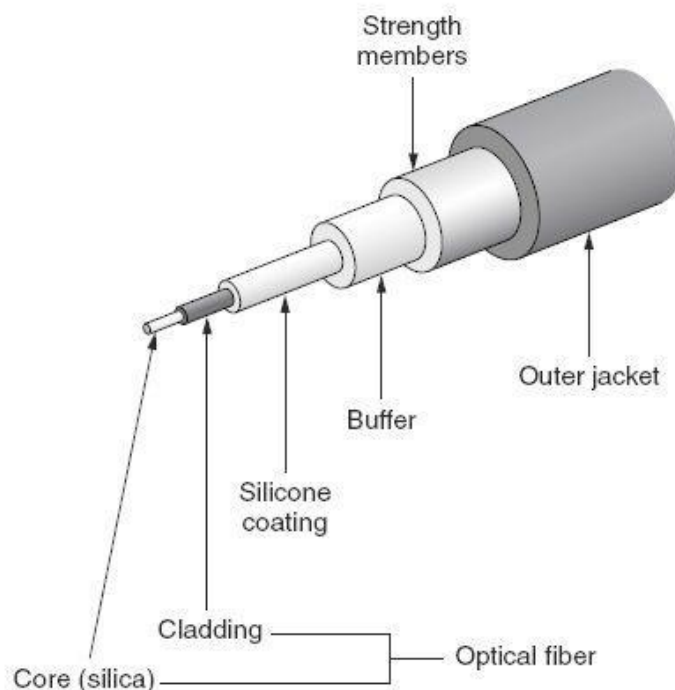
- Καλώδια πολύτροπων οπτικών ινών (Multimode fiber)
- Καλώδια μονότροπων οπτικών ινών (Single-Mode fiber)



Σχήμα 3. 3. Πολύτροπη (Multimode) και μονότροπη (Single-Mode) οπτική ίνα (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).

Η οπτική ίνα καθοδηγεί το φως μέσω του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται μία οπτική ίνα είναι από διάφορα υλικά, τα οποία έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης ώστε να περιορίζουν – να καθοδηγούν δηλαδή – το φως. Συνήθως το οπτικό καλώδιο απαρτίζεται από 5 μέρη (Σχήμα 3.4):

- Τον πυρήνα (core)
- Τον μανδύα (cladding)
- Την προστατευτική επικάλυψη (buffer)
- Τα ανθεκτικά μέλη (strength members)
- Μια εξωτερική προστασία (outer jacket)



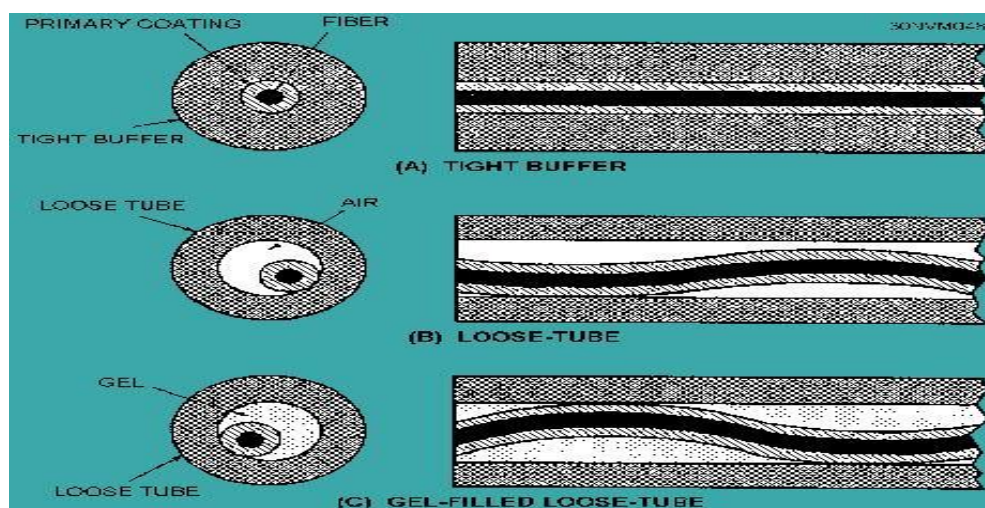
Σχήμα 3. 4. Τα 5 μέρη της οπτικής ίνας (Τάτσης, 2015.)

Ο πυρήνας περιβάλλεται από τον μανδύα (cladding). Η εργασία του μανδύα είναι να κρατά το φως μέσα στον πυρήνα. Το υλικό από το οποίο φτιάχνεται ο μανδύας είναι ίδιο με αυτό του πυρήνα αλλά με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης. Ο πυρήνας έχει πάντα υψηλότερο δείκτη διάθλασης από τον μανδύα. Αυτό βοηθάει να μένουν οι ακτίνες φωτός μέσα στον πυρήνα, επειδή το φως τείνει να κυρτώνει φυσικά προς το υλικό με τον υψηλότερο δείκτη διάθλασης. Το πολύτροπο καλώδιο οπτικής ίνας αποτελεί τον πιο κοινό τύπο καλωδίων οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται στα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (Local Area Networks – LANs). Ένα τυπικό πολύτροπο καλώδιο οπτικής ίνας χρησιμοποιεί οπτική ίνα με πυρήνα διαμέτρου 62.5 ή 50 μm και μανδύα διαμέτρου 125 μm (62.5/125 ή 50/125).

Ο μανδύας περιβάλλεται από μια προστατευτική επικάλυψη (buffer) το υλικό της οποίας είναι συνήθως πλαστικό. Αυτό το υλικό βοηθάει στην προστασία του πυρήνα και του μανδύα από πιθανές ζημιές. Υπάρχουν δύο βασικοί σχεδιασμοί καλωδίων ο ένας είναι ο χαλαρός σχεδιασμός (loosetube) και ο άλλος ο σφιχτός σχεδιασμός tight-buffered.

Τα tight-buffered καλώδια (Σχήμα 3.5.A) έχουν πολύ μικρό μέγεθος και αυτό τα κάνει ιδιαίτερα εύκαμπτα, δηλαδή εύκολα στην εγκατάσταση. Ο σφιχτός σχεδιασμός παρέχει εξαιρετική αντίσταση σε συγκρούσεις αλλά δεν προστατεύει το γυαλί της οπτικής ίνας και δεν παρέχει αντοχή σε εναλλαγές θερμοκρασίας. Γι' αυτούς τους λόγους τα tight-buffered καλώδια χρησιμοποιούνται κυρίως για εσωτερικές εγκαταστάσεις.

Αντίθετα η τεχνολογία loose-tube (Σχήμα 3.5.B) παρέχει καλύτερη προστασία σε περιπτώσεις ακραίων εναλλαγών θερμοκρασίας. Οι περισσότεροι κατασκευαστές καλωδίων εγχύουν ένα ζελέ για προστασία από το νερό μέσα στους σωλήνες χαλαρής μόνωσης για να προστατεύουν την οπτική ίνα από καταστροφή από το νερό (Σχήμα 3.5.C). Γι' αυτούς τους λόγους τα loose-tube καλώδια χρησιμοποιούνται για εξωτερικές εγκαταστάσεις.



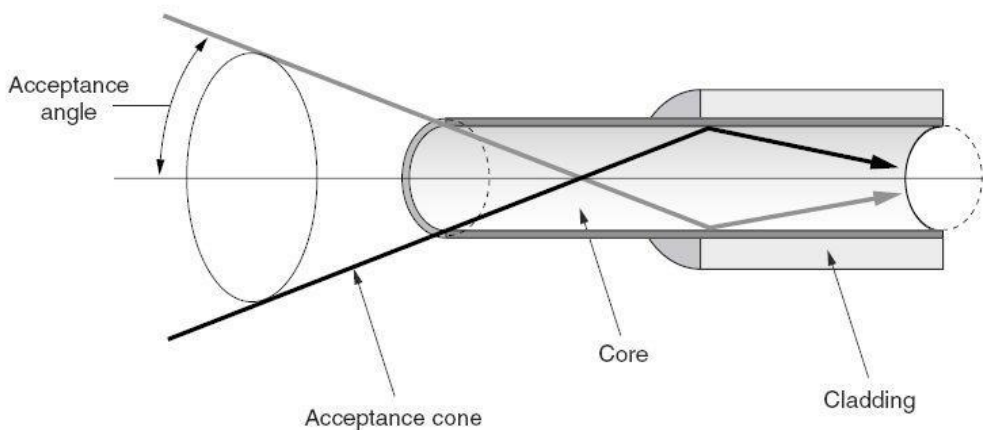
Σχήμα 3. 5. Σφιχτός και χαλαρός σχεδιασμός οπτικών ινών (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).

Τα ανθεκτικά μέλη (strength members) που περιβάλλουν το buffer προστατεύουν το καλώδιο από κακομεταχείριση, όπως για παράδειγμα απότομο τράβηγμα. Το υλικό που συχνά χρησιμοποιείται εδώ είναι το kevlar που επίσης χρησιμοποιείται και στην παραγωγή των αλεξίσφαιρων γιλέκων.

Το τελευταίο μέρος του οπτικού καλωδίου είναι η εξωτερική προστασία ή αλλιώς το περίβλημα του καλωδίου (outer jacket) που προστατεύει την ίνα από γδαρσίματα, διαλυτικές ουσίες κ.α.

3.1.1 Καλώδια πολύτροπων οπτικών ινών (Multimode fiber)

Το στοιχείο της οπτικής ίνας μέσω του οποίου ταξιδεύουν οι ακτίνες φωτός όπως προαναφέρθηκε ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας στα καλώδια πολυτρόπων οπτικών ινών έχει μεγάλο μέγεθος και αυτό επιτρέπει σε πολλές ακτίνες φωτός να εισέλθουν σε αυτόν ταυτόχρονα. Οι ακτίνες φωτός μπορούν να εισέλθουν στον πυρήνα μόνο αν η γωνία τους είναι μικρότερη της κρίσιμης γωνίας πρόσπτωσης (Σχήμα 3.6). Έπειτα, αφού οι ακτίνες έχουν εισέλθει στον πυρήνα της ίνας, υπάρχει περιορισμένος αριθμός από οπτικά μονοπάτια που μια ακτίνα φωτός μπορεί να ακολουθήσει. Αυτά τα οπτικά μονοπάτια ονομάζονται modes. Αν η διάμετρος του πυρήνα της ίνας είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπάρχουν πολλά μονοπάτια τα οποία να μπορούν να διασχίσουν οι ακτίνες φωτός τότε η οπτική ίνα ονομάζεται πολύτροπη "multimode" ίνα. Η μονότροπη "single-mode" ίνα έχει πολύ μικρότερο πυρήνα και επιτρέπει στις ακτίνες φωτός να ταξιδεύουν μέσα σε αυτόν μέσω ενός μόνο mode.



Σχήμα 3. 6. Κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης σε πολύτροπη οπτική ίνα (Τάτσης, 2015).

Κάθε καλώδιο οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται στην δικτύωση αποτελείται από δύο ίνες οι οποίες εγκλείονται σε διαφορετικές θήκες. Αν υποθέσουμε πως έχουμε δύο συσκευές Α και Β η επικοινωνία μεταξύ τους επιτυγχάνεται ως εξής: η μία ίνα μεταφέρει δεδομένα από την συσκευή Α στην συσκευή Β ενώ η άλλη μεταφέρει δεδομένα από την συσκευή Β στην συσκευή Α. Οι ίνες λειτουργούν παρόμοια με δύο μονόδρομους που έχουν αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτό το γεγονός παρέχει επικοινωνία και προς τις δύο



κατευθύνσεις ταυτόχρονα (full-duplex). Τα χάλκινα καλώδια συνεστραμμένων ζευγών χρησιμοποιούν ένα ζευγάρι καλωδίων για να αποστέλλουν δεδομένα και ένα άλλο ζευγάρι καλωδίων για να λαμβάνουν δεδομένα. Έτσι και τα κυκλώματα των οπτικών ινών χρησιμοποιούν την μία ίνα για αποστολή και την άλλη για λήψη δεδομένων. Τυπικά αυτές οι δύο ίνες εγκλείονται σε ένα απλό εξωτερικό κάλυμμα μέχρι να φτάσουν στο σημείο που γίνεται η σύνδεση των συνδέσμων (connectors).

Μέχρι την σύνδεση των συνδέσμων δεν υπάρχει η ανάγκη για προστατευτικό κάλυμμα επειδή το φως δεν μπορεί να δραπετεύσει όταν βρίσκεται μέσα στην ίνα. Οι ίνες μπορούν να μεταφέρουν πολύ περισσότερα bits ανά δευτερόλεπτο και σε μεγαλύτερες αποστάσεις απ' ότι ο χαλκός.

Ο πυρήνας αποτελεί το μέσο της μεταφοράς του φωτός και βρίσκεται στο κέντρο της οπτικής ίνας. Όλα τα φωτεινά σήματα ταξιδεύουν μέσω του πυρήνα. Ο πυρήνας ουσιαστικά είναι γυαλί φτιαγμένο από έναν συνδυασμό διοξειδίου πυριτίου (silica) και άλλων στοιχείων. Η πολύτροπη ίνα χρησιμοποιεί για τον πυρήνα της ένα τύπο γυαλιού που ονομάζεται graded index. Αυτό το γυαλί έχει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης προς την εξωτερική άκρη του πυρήνα. Επομένως η εξωτερική περιοχή του πυρήνα είναι λιγότερο οπτικά πυκνή από αυτήν στο κέντρο με αποτέλεσμα το φως να ταξιδεύει γρηγορότερα στο εξωτερικό μέρος του πυρήνα. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιείται επειδή μια ακτίνα φωτός που ακολουθεί διαδρομή στο κέντρο του πυρήνα υφίσταται μεγαλύτερη εξασθένιση και διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με μια ακτίνα που η διαδρομή της οριοθετείται με διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της ίνας. Ωστόσο, όλες οι ακτίνες που διέρχονται στην ίνα υπό γωνία, πρέπει να φτάσουν στο τέρμα της ταυτόχρονα έτσι ώστε ο παραλήπτης να λαμβάνει μια ισχυρή λάμψη φωτός και όχι ένα αδύναμο παλμό μεγάλης χρονικής διάρκειας. Τα πιο συχνά μεγέθη πυρήνα που υπάρχουν στις τηλεπικοινωνίες σήμερα είναι 8.3 μm (μονότροπες ίνες), 50 μm και 62.5 μm (πολύτροπες ίνες).

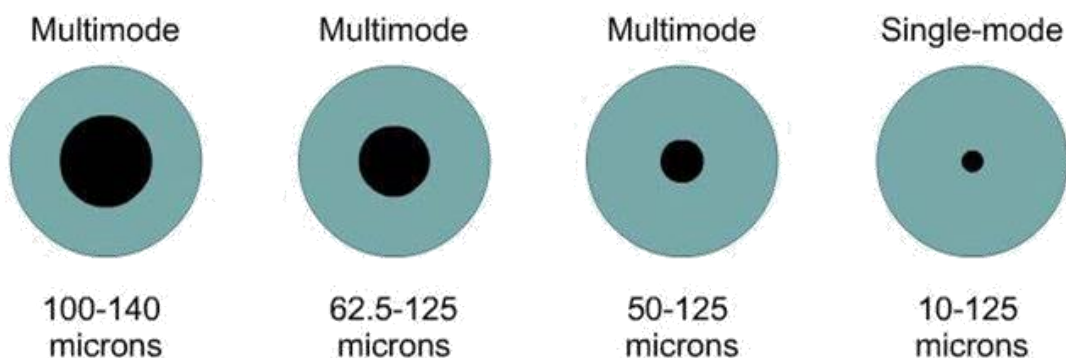
Στις πολύτροπες οπτικές ίνες συνήθως χρησιμοποιούνται οι εξής δύο πηγές φωτός : Infrared Light Emitting Diodes (LEDs) ή Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSELs). Τα LEDs είναι λίγο φθηνότερα αλλά μπορούν να καλύψουν μικρότερες αποστάσεις σε σχέση με τα VCSELs.



3.1.2 Καλώδια μονότροπων οπτικών ινών (singlemode fiber)

Η μονότροπη ίνα αποτελείται από τα ίδια μέρη με την πολύτροπη ίνα με τη διαφορά ότι η εξωτερική προστασία της μονότροπης ίνας είναι συνήθως κίτρινη. Η σημαντικότερη όμως διαφορά μεταξύ πολύτροπης και μονότροπης είναι το γεγονός ότι η δεύτερη επιτρέπει μόνο σε ένα mode φωτός να μεταδίδεται μέσω του πυρήνα της. Ο πυρήνας της μονότροπης ίνας έχει διάμετρο από 8 ως 10 μm . Η πιο κοινή διάμετρος είναι αυτή των 9 μm διάμετρο πυρήνα και 125 μm διάμετρο μανδύα (9/125), τιμή που αναγράφεται στην εξωτερική επιφάνεια της ίνας (Σχήμα 3.7).

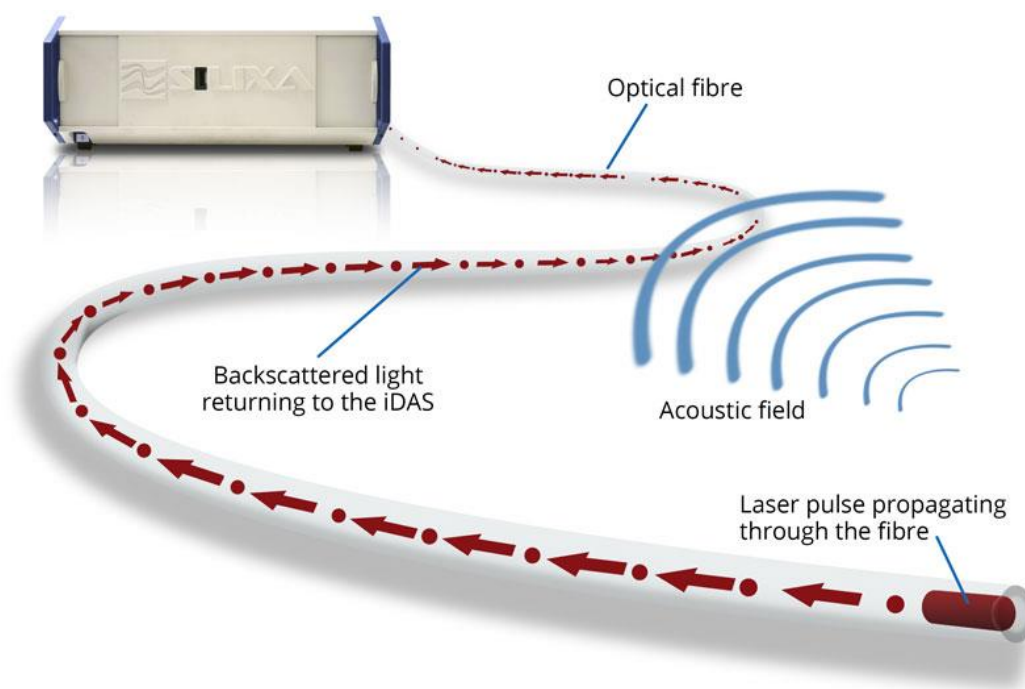
Στις μονότροπες ίνες ως πηγή φωτός χρησιμοποιείται ένα υπέρυθρο laser. Οι ακτίνες φωτός που παράγει εισέρχονται στο κέντρο του πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακτίνα να ακολουθεί μία σταθερή ευθεία πορεία μέσα από το κέντρο του πυρήνα. Αυτό αυξάνει σημαντικά και την ταχύτητα και την απόσταση που μπορούν τα δεδομένα να μεταφερθούν. Εξαιτίας του σχεδιασμού της η μονότροπη ίνα είναι συμβατή με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (bandwidth) και μεγαλύτερες αποστάσεις σε σχέση με την πολύτροπη οπτική ίνα. Η μονότροπη ίνα μπορεί να μεταφέρει δεδομένα σε αποστάσεις μέχρι και τα 3000 μέτρα ενώ η πολύτροπη ίνα μέχρι και τα 2000 μέτρα και με bandwidth μικρότερο από τα 200 mb/sec. Παρά το γεγονός ότι αυτή η απόσταση θεωρείται ικανοποιητική, οι νεότερες τεχνολογίες έχουν αυξήσει αυτές τις αποστάσεις ακόμα και σε δεκάδες χιλιάδες μέτρα (Rassenfoss, 2014., Daley et al., 2013., Milne, 2014.). Τέλος, από άποψη κόστους μεταξύ των δύο τύπων οπτικών ινών, είναι ξεκάθαρο ότι τα laser και οι μονότροπες ίνες είναι πιο ακριβά από τα led και τις πολύτροπες ίνες.



Σχήμα 3. 7. Διάμετρος των πυρήνων πολύτροπων (multimode) και μονότροπων (single-mode) οπτικών ινών (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).

3.2 Τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (DAS)

Όταν ένας παλμός φωτός διαδίδεται σε μια οπτική ίνα, ένα μικρό ποσοστό του φωτός σκεδάζεται φυσικά (με Rayleigh, Brillouin και Raman σκέδαση) και επιστρέφει στην μονάδα του αισθητήρα. Η φύση αυτού του σκεδασμένου φωτός επηρεάζεται από μικροσκοπικές παραμορφώσεις μέσα στην δομή της οπτικής ίνας, οι οποίες προσδιορίζονται από το τοπικό ακουστικό ή σεισμικό κυματικό πεδίο. Καταγράφοντας το σήμα που επιστρέφει έναντι του χρόνου εκπομπής του παλμού laser, προσδιορίζεται το ακουστικό πεδίο κατά μήκος της οπτικής ίνας, που μπορεί να είναι μήκους δεκάδων χιλιομέτρων (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3. 8. Αρχή λειτουργίας iDAS (Johannessen et al., 2012).

Η εταιρεία Silixa Ltd, ως τμήμα μιας ακολουθίας εφαρμογών, βασισμένη στην τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (Distributed Acoustic Sensor - DAS) παρέχει σύστημα πλήρους κάλυψης σεισμικών μετρήσεων υψηλής ανάλυσης το οποίο μπορεί να αξιοποιήσει, να εκμεταλλευτεί και να χρησιμοποιήσει προυπάρχουσες ή νέες εγκαταστάσεις καλωδίων οπτικών ινών.



Ειδικότερα, η μονάδα του DAS ή interrogator, τοποθετείται στην επιφάνεια και χρησιμοποιεί μία οπτική ίνα η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια στον πυθμένα της γεώτρησης. Αυτή η ίνα λειτουργεί σαν μια συνεχής συστοιχία γεωφώνων και έτσι γίνεται απολύτως κατανοητό το όφελος που προκύπτει από την έλλειψη ηλεκτρονικών ή κινούμενων τμημάτων στο βάθος της γεώτρησης. Επιπλέον, καθώς η ίνα είναι ο αισθητήρας, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και στα πιο δύσκολα περιβάλλοντα, χωρίς να παρουσιάζει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές με οικονομικά αποδοτικό κόστος εγκατάστασης και αποδεδειγμένη μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

Ακόμα, το σύστημα έχει τη δυνατότητα διεξαγωγής μετρήσεων σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων από λιγότερο από 1 mHz έως και εκατοντάδες Hz και έτσι εύκολα καταγράφει τις τυπικές συχνότητες ενδιαφέροντος.

3.2.1 Μέθοδος VSP vs DAS

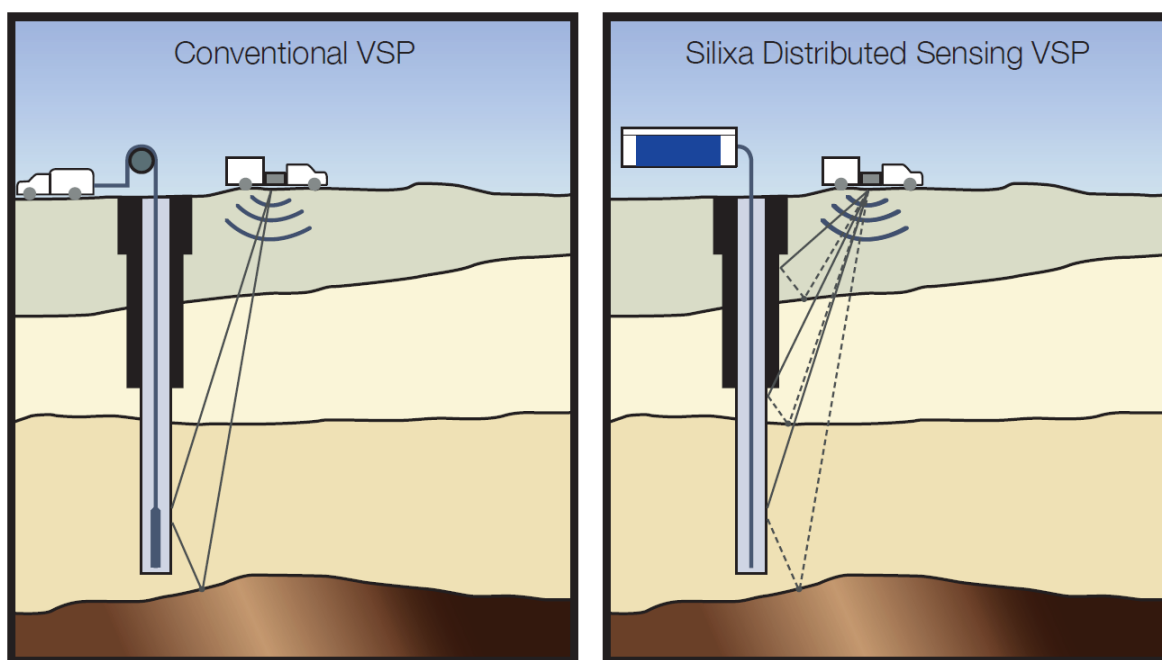
Η κλασική μέθοδος VSP χρησιμοποιείται στην ρύθμιση των σεισμικών ταχυτήτων που προκύπτουν από τις ακουστικές διαγραφίες ή από τις διασκοπήσεις με τη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από γεώφωνο το οποίο καταβιβάζεται σε γεώτρηση και πηγή (συνήθως εκρηκτικά) η οποία τοποθετείται σε ρηχό πηγάδι ή φορτηγό παραγωγής δονήσεων (vibroiseis truck/seismic vibrator) (Σχήμα 3.9). Η πηγή τοποθετείται σε απόσταση μεγαλύτερη των 200 μέτρων από τη γεώτρηση για την αποφυγή διάδοσης σημαντικής σεισμικής ενέργειας μέσω της σωλήνωσης της γεώτρησης. Συχνά στη γεώτρηση καταβιβάζονται περισσότερα του ενός γεώφωνα στα οποία πραγματοποιείται ταυτόχρονη καταγραφή (Vertical Seismic Profile-VSP).

Τα παραγόμενα ελαστικά κύματα καταγράφονται σε γεώφωνο το οποίο μετακινείται σε διαφορετικό βάθος για κάθε έκρηξη. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι ο χρόνος διαδρομής του απευθείας κύματος και η απόσταση του γεώφωνου από το δάπεδο της περιστρεφόμενης τράπεζας του γεωτρήπανου (Kelly Bushing).

Συμβατικά, τα γεώφωνα τοποθετούνται σε ισαποστάσεις 50ft, καθώς το διάστημα αυτό παρέχει επαρκή δείγματα για να περιγραφούν οι τυπικές συχνότητες ενδιαφέροντος. Το οπτικοηλεκτρονικό σύστημα iDAS της Silixa, όταν συνδεθεί με ένα καλώδιο οπτικής

ίνας μήκους ακόμα και δεκάδων χιλιάδων χιλιομέτρων μπορεί να καταγράψει συνεχώς το σεισμικό σήμα κατά μήκος του καλωδίου (Σχήμα 3.9).

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα μετράει με ακρίβεια το πλάτος του σήματος, την συχνότητα και την φάση, που είναι απαραίτητα για καταστήσουν δυνατή την επεξεργασία των δεδομένων αυτών, με συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων. Σήμερα, το σύστημα DAS χρησιμοποιώντας τις οπτικές ίνες ως μια συστοιχία γεωφώνων με πολύ πυκνότερο δίκτυο μετρήσεων, δίνει μια σαφώς λεπτομερέστερη εικόνα του υπεδάφους.



Σχήμα 3. 9. Σχηματική διάταξη της θέσης πηγής και γεωφώνου σε πείραμα με τη κλασική μέθοδο μέτρησης ταχύτητας (VSP) στα αριστερά και η νέα τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων (DAS) στα δεξιά (Milne, 2014).

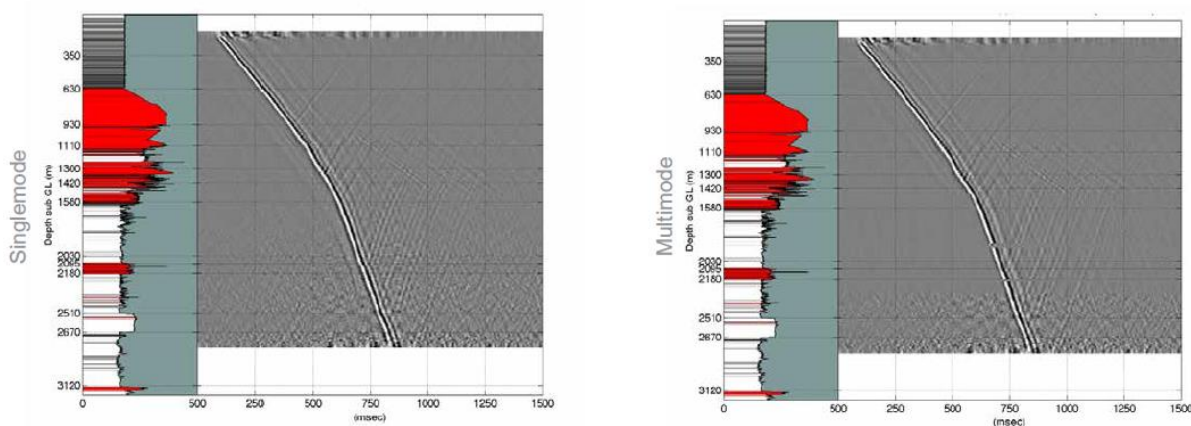
3.2.2 Καταγραφή σε μονότροπες και πολύτροπες οπτικές ίνες

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία DAS έχει δοκιμαστεί στο πεδίο σε διάφορα περιβάλλοντα και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι λειτουργεί εξίσου καλά είτε σε μονότροπες είτε σε πολύτροπες οπτικές ίνες. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες, επιτρέπουν πολλαπλούς



τρόπους μετάδοσης του φωτός ταυτόχρονα και συνήθως δεν χρησιμοποιούνται στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, αλλά συνδέονται με την τεχνολογία DTS (Distributed Temperature Sensing). Αντίθετα, οι μονότροπες οπτικές ίνες, έχουν μικρότερη διάμετρο πυρήνα που συνήθως απαιτείται στα συστήματα DAS.

Το iDAS όμως προσφέρει την ευελιξία να λειτουργεί σε μονότροπη ή σε πολύτροπη ίνα χωρίς την εισαγωγή οποιουδήποτε εξωτερικού ή επιπρόσθετου μηχανισμού και χωρίς απώλεια στην ποιότητα του σήματος, ενώ διατηρεί την πραγματική ακουστική φύση της μέτρησης (Σχήμα 3.10). Το γεγονός αυτό καθιστά το σύστημα ικανό να έχει πρόσβαση και να χρησιμοποιεί παλαιότερες εγκαταστάσεις DTS για νέες σεισμικές έρευνες εντός γεωτρήσεων. Τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν ταυτόχρονα καταγεγραμμένα δεδομένα από μονότροπες και πολύτροπες ίνες.



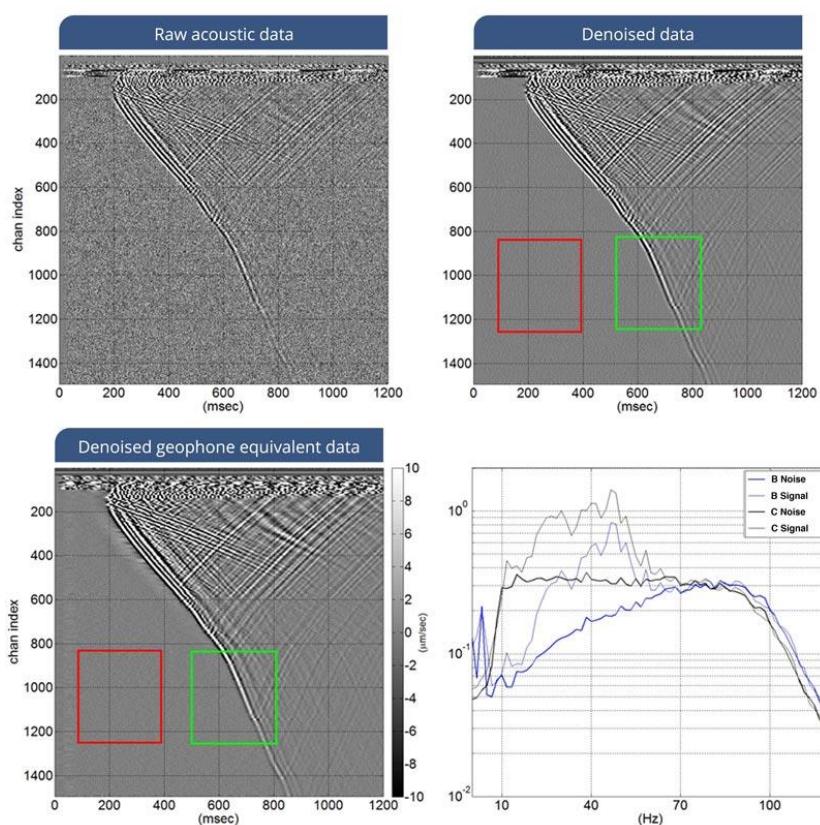
Σχήμα 3. 10. Ταυτόχρονα καταγεγραμμένα δεδομένα από μονότροπες (αριστερά) και πολύτροπες (δεξιά) ίνες στην ίδια γεώτρηση (Silixa Ltd.).

3.2.3 Τεχνική ελάττωσης του ηλεκτρονικού θορύβου

Η Silixa χρησιμοποιεί ένα νέο τρόπο επεξεργασίας των μετρήσεων στο DAS για να βελτιώσει σημαντικά τον λόγο του σήματος προς το θόρυβο (signal to noise ratio). Αρχικά, το iDAS μετράει τον ρυθμό παραμόρφωσης. Στη συνέχεια, αντίστοιχες τεχνικές επεξεργασίας όπως αυτές που χρησιμοποιούνται για επεξεργασία σεισμικών δεδομένων από γεώφωνα, μετατρέπουν το ρυθμό παραμόρφωσης σε ανάλογες μονάδες μέτρησης.



Η ευαισθησία του συστήματος συνεχίζει να αυξάνεται σαν συνάρτηση της βελτίωσης των οπτικοηλεκτρονικών, των τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων και του σχεδιασμού των καλωδίων οπτικών ινών. Ακόμα, η εταιρεία έχει αναπτύξει τεχνικές ελάττωσης του ηλεκτρονικού θορύβου οι οποίες εφαρμόζονται κατά την επεξεργασία των δεδομένων και είναι ικανές για αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο από τα 8dB στα 14dB, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3. 11. Τεχνική ελάττωσης του ηλεκτρονικού θορύβου της Silixa (Milne, 2014).

3.2.4 Μόνιμη παρακολούθηση ταμιευτήρα με την τεχνολογία DAS

Η τεχνολογία DAS παρέχει την δυνατότητα λεπτομερέστερου προσδιορισμού των γεωφυσικών ιδιοτήτων του ταμιευτήρα αυξάνοντας την χωρική πυκνότητα των δεδομένων που αποκτήθηκαν. Ένα μόνιμα εγκατεστημένο καλώδιο οπτικής ίνας μπορεί να



χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση σεισμικών καταγραφών επί τόπου, χωρίς την ανάγκη για δαπανηρές παρεμβάσεις (well interventions) στη γεώτρηση ή/και για διακοπή της παραγωγής.

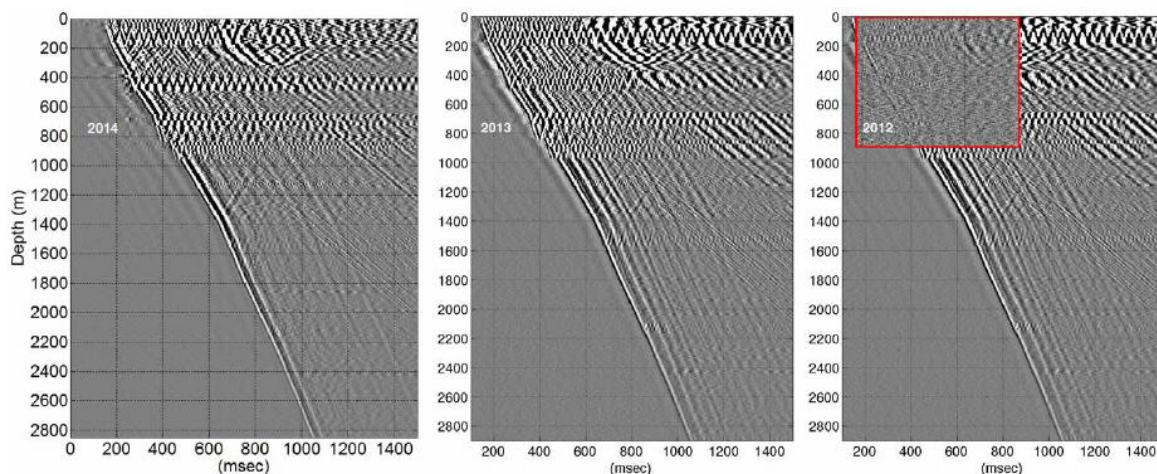
Οι οπτικές ίνες, είναι τοποθετημένες μέσα σε καλώδια τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται συμβατικά όπως τα wireline, να είναι συγκολλημένα εξωτερικά της σωλήνωσης παραγωγής - οπότε και εγκαθίστώνται κατά την διάρκεια της ολοκλήρωσης της γεώτρησης (well completion) - ή και να είναι πακτωμένα πίσω από τη σωλήνωση επένδυσης, προσφέροντας έτσι μόνιμη παρακολούθηση του ταμιευτήρα. Επιλέγοντας τον δεύτερο ή τρίτο τρόπο παρακολούθησης γίνεται δυνατή η απόκτηση σεισμικών δεδομένων κατά μήκος όλης της γεώτρησης επαναλαμβανόμενα σε διάφορες χρονικές στιγμές, χωρίς την ανάγκη για μια δαπανηρή παρέμβαση (wireline intervention) και χωρίς να διακοπεί η παραγωγή.

Η τεχνολογία αυτή παρέχει το τέλειο μέσον για την απόκτηση σεισμικών δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους από μία ή περισσότερες γεωτρήσεις παραγωγής, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στην εκάστοτε εταιρεία να παρακολουθήσει τις αλλαγές που συμβαίνουν στον ταμιευτήρα με την πάροδο του χρόνου, σαν αποτέλεσμα της παραγωγής. Η κατανόηση αυτών των αλλαγών μπορεί να είναι το κλειδί κατά το στάδιο της δευτερογενούς και τριτογενούς παραγωγής βοηθώντας σημαντικά την βελτιστοποίηση των μεθόδων επαυξημένης ανάκτησης (Enhanced Oil Recovery – EOR). Για το λόγο αυτό, ένα μόνιμα εγκατεστημένο σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών διαβεβαιώνει την εταιρεία ότι οι σεισμικές καταγραφές γίνονται σε ακριβώς επαναλαμβανόμενα βάθη, ενισχύοντας την αξιοπιστία των επεξεργασμένων αποτελεσμάτων διαφορετικών χρονικών περιόδων.

Παρακάτω (Σχήμα 3.12), παρουσιάζεται το αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενων ερευνών που διεξήχθησαν μεταξύ του 2012 και 2014, στην ίδια γεώτρηση με χρήση του συστήματος iDAS Seismic της Silixa. Το καλώδιο οπτικής ίνας είναι μόνιμα εγκαταστημένο στο φρέαρ, πακτωμένο εξωτερικά της σωλήνωσης παραγωγής και έτσι είναι δυνατή η επανάληψη της έρευνας χωρίς περαιτέρω εργασίες στην γεώτρηση και με ελάχιστο προσωπικό στο πεδίο. Παρατηρείται, σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος την περίοδο μεταξύ 2012-2013, ενισχύοντας το λόγο του σήματος προς



θόρυβο. Η βελτίωση της αναλογίας αυτής είναι ίσως η σημαντικότερη παράμετρος για την περαιτέρω ανάπτυξη του iDAS Seismic.



Σχήμα 3. 12. Βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων από την εταιρεία Silixa Ltd για τα έτη 2012-2014 ενισχύοντας τη σχέση σήματος προς θόρυβο (Silixa Ltd.).

Επιπλέον, η απουσία ηλεκτρονικών ή κινούμενων τμημάτων στο βάθος της γεώτρησης καθιστά το σύστημα DAS ως ένα ιδιαίτερα εύρωστο και αξιόπιστο σύστημα σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες βασιζόμενες σε γεώφωνα όπου ο ηλεκτρονικός θόρυβος, η αστοχία των εξαρτημάτων και η μηχανική κόπωση επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα των μετρήσεων ή/και τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

3.2.5 Διατάξεις εγκατάστασης του καλωδίου οπτικής ίνας και σεισμικές πηγές

Μέχρι σήμερα η τεχνολογία DAS έχει δοκιμασθεί σε δεκάδες έρευνες και σε διάφορα περιβάλλοντα. Ένα σημαντικό ποσοστό των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τη Silixa προέρχονται είτε από μικροδονήσεις, είτε από σεισμικά επιφανείας (surface seismic) ή υποθαλάσσια σεισμικά (ocean bottom seismic). Περίπου το 1/3 των ερευνών έγινε σε υποθαλάσσιες γεωτρήσεις και περίπου οι μισές από αυτές ήταν κεκλιμένες γεωτρήσεις (μεγάλης κλίσης προς οριζόντιες).



Σε όλες αυτές τις έρευνες οι οπτικές ίνες εγκαταστάθηκαν στη γεώτρηση με διαφορετικό τρόπο. Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο είναι:

- Κρέμασμα μέσα στη σωλήνωση παραγωγής (wireline)
- Συγκόλληση εξωτερικά της σωλήνωσης παραγωγής (production tubing)
- Τσιμέντωση πίσω από το σωλήνωση επένδυσης (casing)

Επιπρόσθετα, ανάλογα με τον τύπο της έρευνας και με το περιβάλλον, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές σεισμικές πηγές. Οι πηγές που έχουν δοκιμασθεί στο πεδίο, σε συνδυασμό με την τεχνολογία DAS είναι:

- Ρίψη βάρους (Weight drop)
- Δυναμίτης (Dynamite)
- Φορτηγό παραγωγής δονήσεων (vibroiseis truck/seismic vibrator)
- Airgun (μικρό και μεγάλο)
- String shots
- Σεισμική πηγή μέσα σε παρακείμενη γεώτρηση (Cross well seismic)
- Σεισμός (παθητική λήψη μετρήσεων)

3.2.6 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της τεχνολογίας DAS

Για την αξιολόγηση μιας επένδυσης που συνδέεται με την μόνιμη εγκατάσταση ενός καλωδίου οπτικής ίνας, πρέπει να λάβουμε υπόψη όλα τα οφέλη/μακροπρόθεσμα πλεονεκτήματα και όχι μόνο τα προφανή που συνδέονται με την σεισμική απόκτηση δεδομένων. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών και της τεχνολογίας DAS είναι:

- Οι οπτικές ίνες καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος ζώνης από 40 έως 150 km, χωρίς να επιτρέπουν παρά την ελάχιστη εξασθένηση (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).



- Είναι πιο εύχρηστες λόγω του μικρού μεγέθους και βάρους τους με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σε πολλές και διαφορετικές εφαρμογές.
- Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στις οπτικές ίνες φθάνει μέχρι τα 40 Gbits/sec σε σύγκριση αυτών των 1 Gbits/sec σε χάλκινα καλώδια, ενώ το διαθέσιμο εύρος ζώνης ξεπερνάει το 1 Tbit/sec (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).
- Η εξασθένιση, η οποία μετριέται σε Db/Km με τυπική τιμή 0,18, είναι ελάχιστη και έτσι είναι δυνατές οι ζεύξεις αρκετών χιλιομέτρων χωρίς την ανάγκη ενισχυτών ή αναμεταδότη (Παπαϊωάννου και Πλιάκας, 2017).
- Η τεχνολογία DAS εξαλείφει την τάση για αστοχία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και των κινούμενων μερών στο βάθος της γεώτρησης.
- Επιτρέπει τις σεισμικές έρευνες σε γεωτρήσεις χωρίς την ανάγκη για παρέμβαση στη γεώτρηση και την διακοπή της παραγωγής.
- Προσφέρει παρόμοια σεισμική απόκριση με τους συμβατικούς αισθητήρες (γεώφωνα) επιτρέποντας να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστες μέθοδοι επεξεργασίας.
- Τα μόνιμα εγκατεστημένα καλώδια διευκολύνουν την απόκτηση σεισμικών δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (time-lapse seismic), με τέλεια επαναλαμβανόμενο βάθος.
- Πλήρης κάλυψη της γεώτρησης με κάθε ενεργοποίηση της πηγής (zero offset)
- Χαμηλό κόστος μέτρησης για την απόκτηση σεισμικών δεδομένων.
- Ιδανικό για σεισμικές διασκοπήσεις με χρήση πηγής σε μία γεώτρηση και παρακολούθηση σε πολλές παρακείμενες γεωτρήσεις (cross-well seismic).
- Ευελιξία για χρήση με οποιονδήποτε τρόπο εγκατάστασης της οπτικής ίνας στη γεώτρηση, όπως η μόνιμη εγκατάσταση της οπτικής ίνας ή οι παρεμβάσεις (wireline) με οπτικές ίνες.
- Συνυπάρχει και με άλλες υψηλής αξίας μετρήσεις χρησιμοποιώντας τις ίδιες οπτικές ίνες και τον ίδιο εξοπλισμό επιφανείας, όπως διαγραφίες παραγωγής (production logging) και παρακολούθηση της ακεραιότητας της γεώτρησης (well integrity monitoring).



- Σύγχρονα οπτικοηλεκτρονικά επιτρέπουν στο iDAS να αποκτά σεισμικά δεδομένα παθητικά (passively) για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνολογία DAS, δεν παύουν να υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα που σχετίζονται με τις οπτικές ίνες:

- Ενώ το υλικό κατασκευής τους είναι φθηνό, το κόστος παραγωγής των οπτικών ινών είναι υψηλό σε σχέση με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά.
- Επίσης το κόστος των ηλεκτρονικών και οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων μπορεί να είναι μεγάλο.
- Θα πρέπει η εγκατάσταση τους να γίνεται με ελαφριά κλίση γιατί διαφορετικά μπορεί να υπάρξει απώλεια δεδομένων.
- Είναι εύθραυστες και όχι πολύ ευλύγιστες.

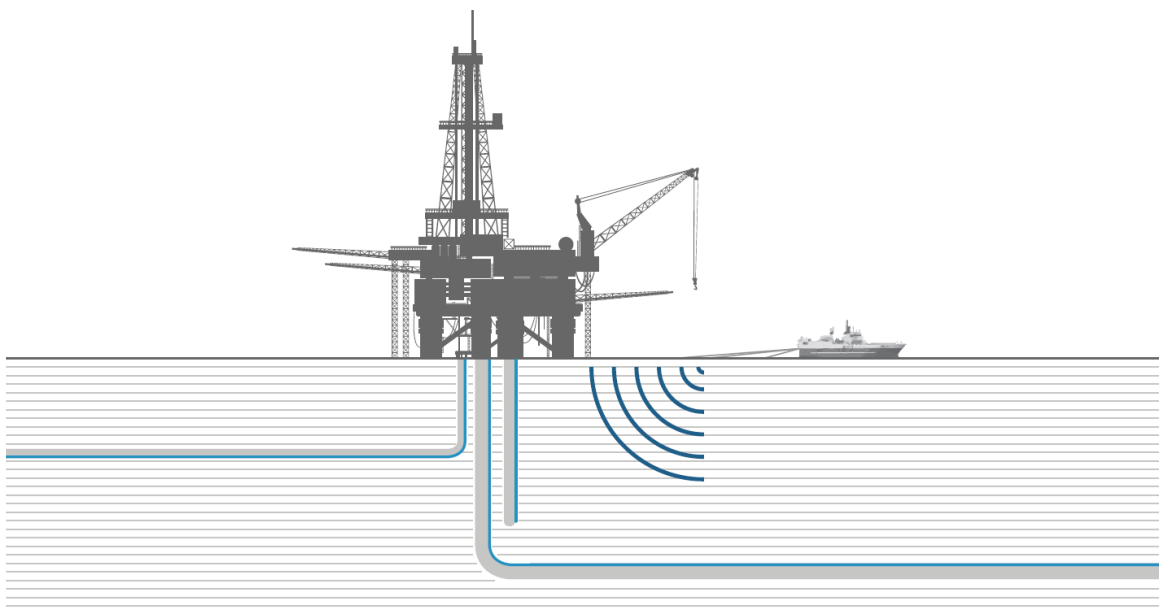
3.2.7 Εφαρμογές της τεχνολογίας DAS

Η τεχνολογία DAS έχει δοκιμασθεί σε πολλά και διαφορετικά περιβάλλοντα, καθώς και σε διαφορετικού τύπου εφαρμογές. Μερικές από τις πολλές βιομηχανικές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής είναι:

- Απεικόνιση ταμιευτήρα
- Επαυξημένη βαθμονόμηση των υπαρχόντων σεισμικών δεδομένων σε γεωτρήσεις και των σεισμικών δεδομένων επιφανείας.
- Απόκτηση σεισμικών δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους για παρακολούθηση του ταμιευτήρα (time-lapse “4D” reservoir monitoring).
- Συγχρονισμένη απόκτηση σεισμικών δεδομένων από πολλές γεωτρήσεις (cross-well seismic) (Σχήμα 3.13).
- Γεωφυσική περιγραφή των σχηματισμών της θέσης της γεώτρησης.



- Παρακολούθηση της ανάπτυξης του μετώπου έγχυσης CO₂ σε ταμειυτήρα (Daley et al.).
- Παρακολούθηση κατολισθήσεων.
- Παρακολούθηση διαρροής φράγματος ή σωλήνα (επιφανειακού ή υποθαλάσσιου).
- Παρακολούθηση υγρασίας εδάφους κ.α.



Σχήμα 3. 13. Εφαρμογή της τεχνολογίας DAS σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων (Silixa Ltd.).

Στα επόμενα κεφάλαια μελετάται ένα μοντέλο μιας κατολίσθησης στην περιοχή των Βαυαρικών Άλπεων, και δημιουργείται προσομοίωση του πειράματος με την μέθοδο της σεισμικής τομογραφίας αλλά και με την τεχνολογία DAS. Η επιλογή της κατολίσθησης ως εφαρμογή για την τεχνολογία DAS και την σύγκριση της με την συμβατική τεχνολογία της σεισμικής τομογραφίας έγινε μετά από διαπίστωση έλλειψης τέτοιων μελετών στη βιβλιογραφία, ενώ παράλληλα βρέθηκαν αναφορές που υποστηρίζουν την δυνατότητα της τεχνολογίας DAS στην απεικόνιση του υπεδάφους για την παρακολούθηση κατολισθήσεων (Silixa Ltd.). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η μονάδα του DAS και οι οπτικές ίνες τοποθετούνται στην επιφάνεια και η σεισμική πηγή θάβεται περίπου 45cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PSV_SYNTHETICS το οποίο έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab, από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι αλγόριθμοι του PSV_SYNTHETICS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της διάδοσης σεισμικών P και SV κυμάτων και κατ' επέκταση για την δημιουργία συνθετικών δεδομένων σε 2 διαστάσεις (2D) με την χρήση πεπερασμένων διαφορών (Vafidis, 1988).

4.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών

Η Γεωφυσική χρησιμοποιεί συνήθως απλοποιημένα προσομοιώματα για το εσωτερικό της Γης. Στην πραγματικότητα, όμως, αυτό αποτελείται από γεωλογικούς σχηματισμούς με πλευρικές ασυνέχειες, των οποίων τα όρια έχουν πολύπλοκη γεωμετρία και η σύστασή τους είναι ανομοιογενής, με αποτέλεσμα οι γεωφυσικές ιδιότητες τους να ποικίλουν ακόμα και μέσα στους ίδιους τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Το γεγονός αυτό δημιουργεί προβλήματα στις γεωφυσικές μελέτες, αφού είναι συνήθως δύσκολο να βρεθούν αναλυτικές λύσεις για τα τρισδιάστατα ή ακόμα και τα δισδιάστατα προσομοιώματα της Γης.

Ένα ιδιαίτερο αντικείμενο των σεισμικών μεθόδων είναι το πρόβλημα της επίλυσης της κυματικής εξίσωσης. Η επίλυσή της με αναλυτικές μεθόδους είναι δυνατή για σχετικά απλά προσομοιώματα της δομής του εσωτερικού της Γης στη μία και στις δύο διαστάσεις. Παρόλα αυτά, για πολύπλοκα ή αρκετά ρεαλιστικά προσομοιώματα της δομής του εσωτερικού της Γης, δεν μπορούν να προσδιοριστούν λύσεις με αναλυτικές μεθόδους. Για την επίλυση όμως αντίστοιχων προβλημάτων εφαρμόζονται προσεγγιστικές-αριθμητικές μέθοδοι.



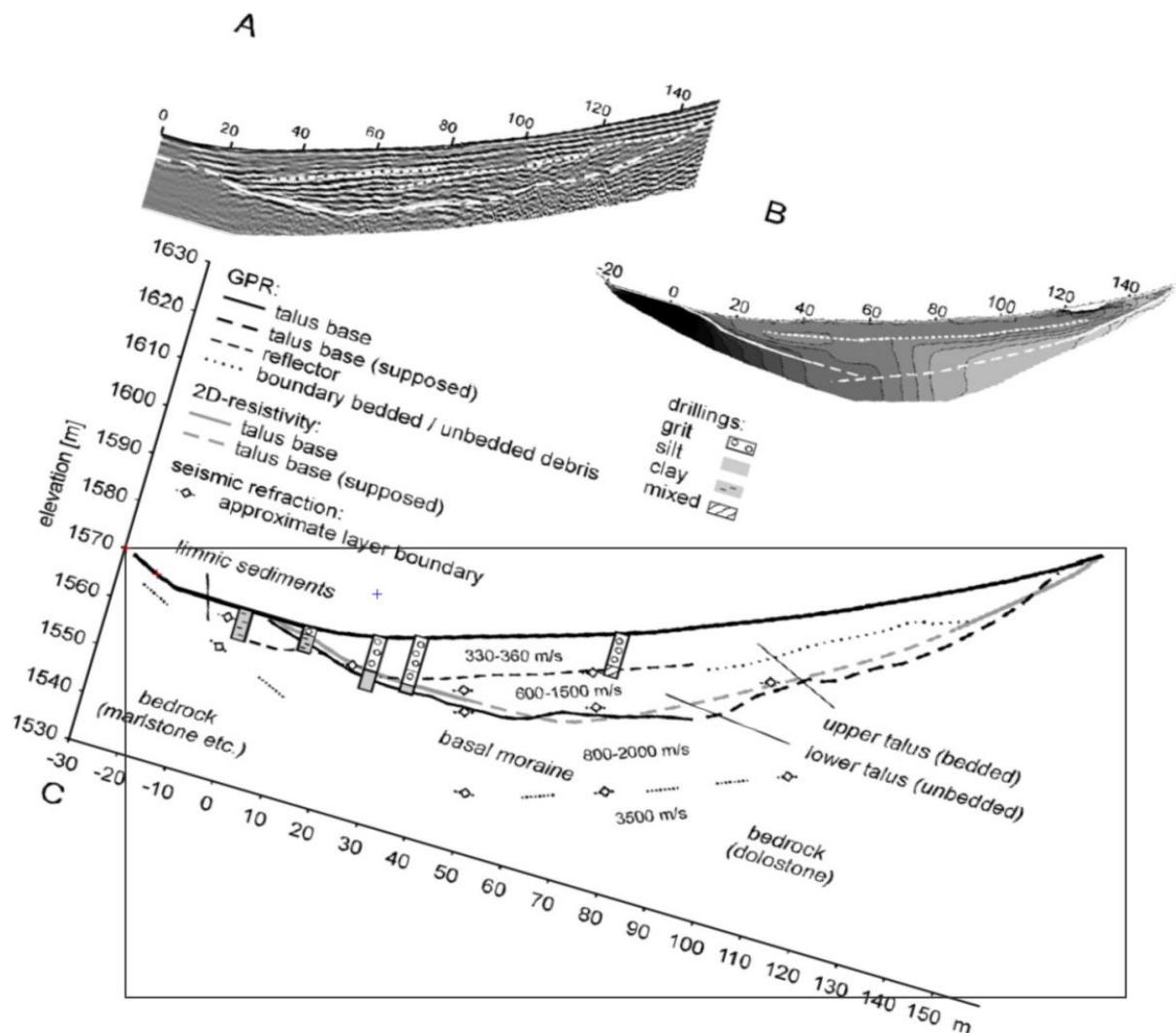
Η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (Π.Δ.) ανήκει στις μεθόδους πλέγματος, άρα για την εφαρμογή της θα πρέπει ο χώρος που θα γίνουν οι υπολογισμοί να καλυφθεί από έναν κάνναβο (grid) στο χώρο και στο χρόνο και κάθε συνεχής συνάρτηση να αναπαριστάται από τις τιμές της στα διάφορα σημεία του καννάβου (Σχήμα 4.3). Η μέθοδος των Π.Δ. αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές αριθμητικές μεθόδους στην προσομοίωση της σεισμικής κίνησης. Το γεγονός οφείλεται στο ότι είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε πολύπλοκα προβλήματα με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και είναι αρκετά αποδοτική υπολογιστικά. Επίσης είναι εύκολο να μετατραπεί σε υπολογιστικό κώδικα, για χρήση σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η απλότητα στην εφαρμογή της, ακόμα και σε πολύπλοκα προβλήματα, κρύβει τον κίνδυνο της μη σωστής εφαρμογής της από χρήστες που δεν γνωρίζουν τα εγγενή μειονεκτήματά της και επιλέγουν τη μέθοδο αυτή με μόνο κριτήριο την απλότητα της. Για παράδειγμα, είναι πολύ σημαντικό ο χρήστης να γνωρίζει το κριτήριο ευστάθειας για να αποφύγει τυχόν αστάθειες στη λύση, όπως και το ελάχιστο βήμα χωρικής διακριτοποίησης που πρέπει να χρησιμοποιήσει σε συνάρτηση με το ελάχιστο μήκος κύματος που θα διαδοθεί στο υπολογιστικό προσομοίωμα για την αποφυγή του φαινομένου της σκέδασης καννάβου (Σκαρλατούδης, 2009).

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία της προσομοίωσης και αναλύονται οι περιορισμοί της μεθόδου Π.Δ. και κατ'επέκταση και των αλγορίθμων του PSV_SYNTHETICS.

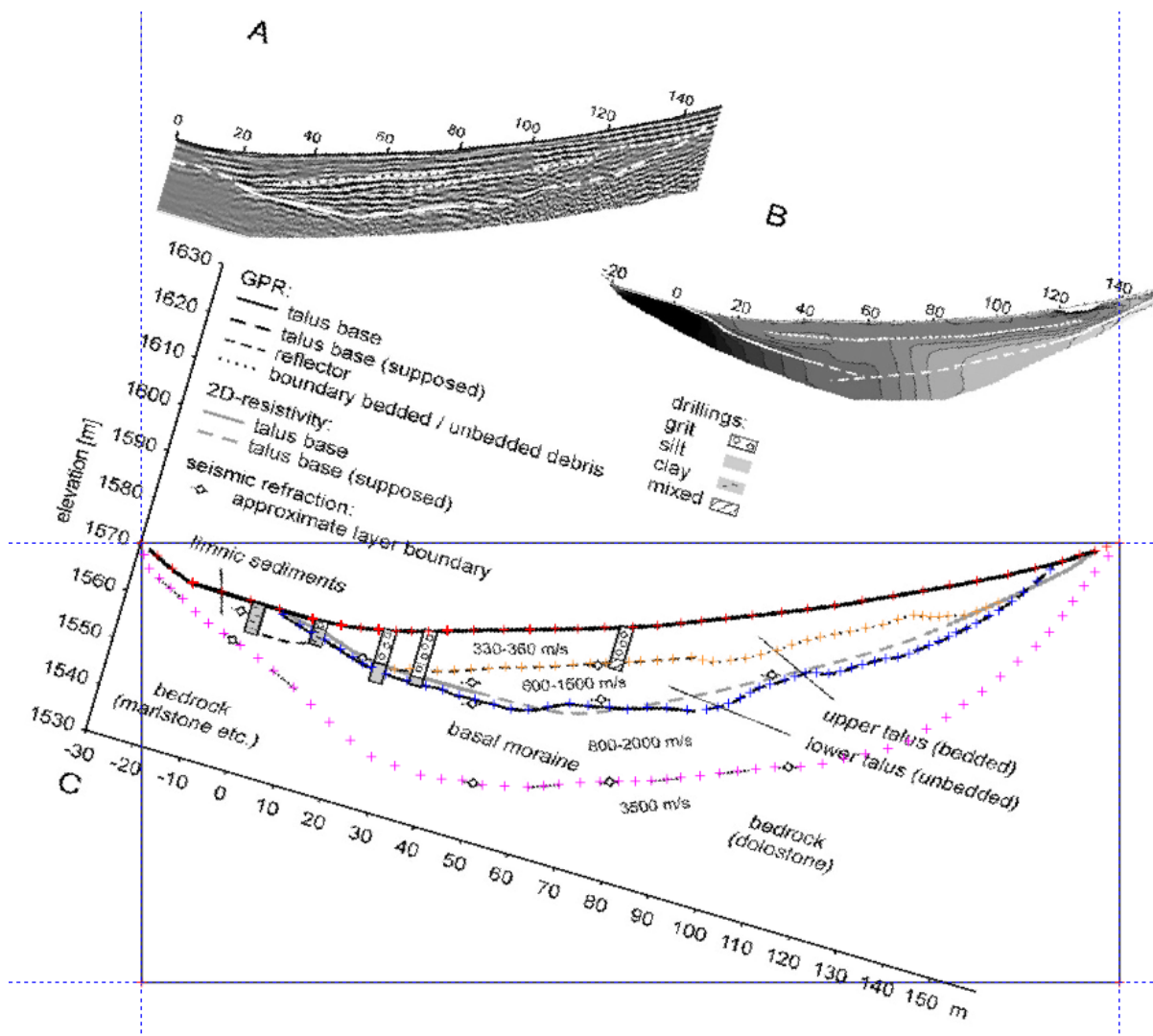
4.2 Οριοθέτηση και ψηφιοποίηση αρχικού μοντέλου

Για την προσομοίωση της διάδοσης σεισμικών P και SV κυμάτων σε 2 διαστάσεις (2D) με την χρήση πεπερασμένων διαφορών είναι αναγκαία η διακριτοποίηση ενός παραλληλόγραμμου (μοντέλο) στο χώρο Z (βάθος) και X (οριζόντια διάσταση) σε επιμέρους κελιά (cells). Για το λόγο αυτό, το μοντέλο (Σχήμα 1.2) εισήχθη σε πρόγραμμα σχεδίασης, οριοθετήθηκε σε παραλληλόγραμμο (Σχήμα 4.1) και στράφηκε κατά 16.7° (Σχήμα 4.2) έτσι ώστε να περιορισθεί η οριζόντια και κατακόρυφη εξάπλωση του.



Σχήμα 4. 1. Μοντέλο οριοθετημένο σε παραλληλόγραμμο και στραμμένο κατά 16.7°.

Στη συνέχεια, το μοντέλο ψηφιοποιήθηκε με σημεία (σταυρονήματα) που ακολουθούν τις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων (Σχήμα 4.2), όπως αυτές είχαν προσδιορισθεί από συνδυασμένες γεωφυσικές μεθόδους. Έπειτα, ήταν αναγκαία η λήψη των συντεταγμένων Z, X για κάθε σταυρόνημα και για όλα τα στρώματα (Πίνακας ΠΑ.1).



Σχήμα 4. 2. Μοντέλο οριοθετημένο σε παραλληλόγραμμο, στραμμένο κατά 16.7° με σημεία (σταυρονήματα) που ακολουθούν τις διαχωριστικές επιφάνειες των στρωμάτων.

4.3 Περιγραφή της προσομοίωσης

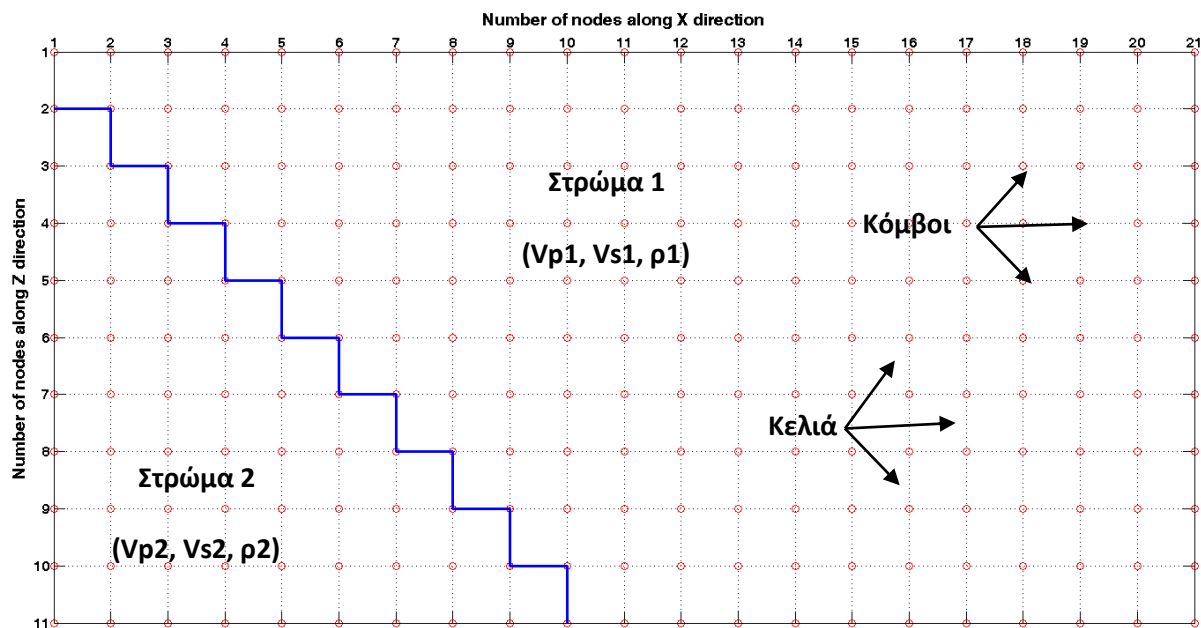
Προηγουμένως, το μοντέλο οριοθετήθηκε και διακριτοποιήθηκε στο χώρο Z, X σε επιμέρους κελιά (cells). Κάθε κελί, συνορεύει με τα γειτονικά του μέσω των κόμβων (nodes) του μοντέλου (Σχήμα 4.3). Κάθε κελί έχει συγκεκριμένη διάσταση (GRID) και είναι ίδια τόσο στην κατακόρυφη (Z) όσο και στην οριζόντια (X) διεύθυνση.



Κάθε κελί προσδιορίζεται από 3 παραμέτρους:

- Την ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων (V_p),
- την ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων (V_s) και
- την πυκνότητα (ρ).

Από κάθε κόμβο διέρχονται οι διαχωριστικές επιφάνειες των διαφορετικών σεισμικών στρωμάτων, οι οποίες όμως δεν μπορούν να διχοτομήσουν ένα κελί. Πάνω στους κόμβους τοποθετούνται υποχρεωτικά οι πηγές και οι δέκτες.



Σχήμα 4. 3. Διακριτοποίηση ενός μοντέλου σε 10 κελιά (cells) στον κατακόρυφο (Z) και 20 κελιά στον οριζόντιο (X) άξονα. Κάθε κελί, συνορεύει με τα γειτονικά του μέσω των κόμβων (nodes) του μοντέλου (Κρητικάκης, 2016).

Επίσης, η διάδοση του κυματικού πεδίου στον χώρο (επίλυση της κυματικής εξίσωσης) πραγματοποιείται σε διακριτά χρονικά στάδια (διάστημα δειγματοληψίας – sampling interval) και ολοκληρώνεται σε συγκεκριμένο χρόνο (διάρκεια καταγραφής).

Για αυτό το λόγο, πριν από την εκτέλεση του PSV_SYNTHETICS, απαιτούνται πληροφορίες τόσο για το σεισμικό μοντέλο, όσο και για τις παραμέτρους καταγραφής των σεισμικών δεδομένων (Πίνακας 4.1).



Ειδικότερα, οι παράμετροι του σεισμικού μοντέλου που απαιτούνται είναι:

- Διαστάσεις μοντέλου (μήκος και βάθος) σε μέτρα
- Γεωμετρία (στις 2 διαστάσεις) των στρωμάτων του μοντέλου
- Ταχύτητες (P και S-κυμάτων) σε m/s και πυκνότητα σε g/cm³ κάθε στρώματος του μοντέλου.

Οι παράμετροι καταγραφής των σεισμικών δεδομένων είναι:

- Κεντρική συχνότητα σεισμικής πηγής (σε Hz)
- Ισαπόσταση (σε m - περίπτωση ενεργοποίησης πολλών πηγών) και θέση των σεισμικών πηγών.
- Ισαπόσταση (σε m - περίπτωση χρήσης πολλών δεκτών) και θέση των δεκτών (γεωφώνων ή υδροφώνων)
- Διάρκεια καταγραφής (σε ms)

Πίνακας 4. 1. Ταχύτητα διαμήκων (V_p) και εγκάρσιων (V_s) κυμάτων, πυκνότητα (ρ) και λόγος Poisson (ν) για κάθε στρώμα.

ΣΤΡΩΜΑ	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (gr/cm ³)	ν
1 (Άνω talus)	350	150	1.5	0.39
2 (Κάτω talus)	1100	332	1.8	0.45
3 (Βασαλτικές Μοραίνες)	1400	572	1.8	0.4
4 (Δολομίτης)	3500	1900*	2.5	0.29**

* Η ταχύτητα V_s για το 4^ο στρώμα (δολομίτης) βρέθηκε από βιβλιογραφία (Mavko, 2009).

** Με βάση την $V_s=1900$ m/s * καταλήγουμε σε λόγο Poisson $\nu=0.29$ από την Εξ. 4.1.

Οι ταχύτητες των διαμήκων κυμάτων χώρου V_p επιλέχθηκαν βάση της μελέτης των Sass and Krautblatter (2007), που παρήγαγε το αρχικό μοντέλο (Σχήμα 22.) και ο λόγος Poisson ν όπως βρέθηκε στη βιβλιογραφία για τα συγκεκριμένα πετρώματα και εδαφικούς σχηματισμούς που απαρτίζουν τα τέσσερα στρώματα που μελετούνται. Εν συνεχεία, οι ταχύτητες των εγκάρσιων κυμάτων χώρου V_s υπολογίστηκαν βάση της σχέσης



υπολογισμού της ταχύτητας V_s (Κρητικάκης, 2016, Sheriff and Geldart, 1995) για κάθε στρώμα (Εξ. 4.1), όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

$$V_s = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{1-\nu}{0.5-\nu}}} \quad (4.1)$$

Όπου V_s η ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων, V_p η ταχύτητα διάδοσης των P-κυμάτων και ν ο λόγος Poisson. Για παράδειγμα στο 1^ο στρώμα η ταχύτητα V_s υπολογίζεται:

$$V_s = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{1-\nu}{0.5-\nu}}} \Rightarrow V_s^2 = \frac{V_p^2}{\frac{1-\nu}{0.5-\nu}} \Rightarrow V_s^2 = \frac{350^2}{\frac{1-0.39}{0.5-0.39}} \Rightarrow V_s = 148.6 \text{ m/s} \approx 150 \text{ m/s}$$

4.3.1 Ορισμός των διαστάσεων του μοντέλου

Δεδομένου του αποθηκευτικού, αλλά κυρίως του υπολογιστικού κόστους της διαδικασίας προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, οι διαστάσεις του μοντέλου θα πρέπει να είναι οι μικρότερες δυνατές.

Για τον καθορισμό των διαστάσεων του μοντέλου, εκτός από την γεωλογική δομή που επιθυμείται να περιγραφεί, θα πρέπει να συμπεριληφθούν υπόψη και οι παράμετροι (θέσεις πηγών και δεκτών) απόκτησης των σεισμικών καταγραφών. Το μοντέλο θα πρέπει να έχει ικανοποιητικές διαστάσεις, έτσι ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση εντός του μοντέλου όλων των πηγών αλλά και των δεκτών. Για το συγκεκριμένο μοντέλο ορίστηκαν διαστάσεις (Z,X) ίσες με 90x200m.

4.3.2 Ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων (V_s)

Η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων σχετίζεται με τον περιορισμό της αριθμητικής διασποράς που διέπει το σχήμα των πεπερασμένων διαφορών που επιλύουν



την κυματική εξίσωση (Vafidis, 1988, Manning, 2007, Σκαρλατούδης, 2009, Κρητικάκης 2016).

Στην προκειμένη περίπτωση του αλγόριθμου PSV_SYNTHETICS, η μέγιστη τιμή της διάστασης του κελιού (στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση), στα οποία θα πρέπει να διακριτοποιηθεί το μοντέλο έτσι ώστε να πληροί το κριτήριο της αριθμητικής διασποράς, υπολογίζεται από την σχέση (4.2).

$$GRID \leq \frac{\lambda_{min}}{6} = \frac{V_{Smin}}{6 \cdot f_{max}} \approx \frac{V_{Smin}}{6 \cdot 2.5 \cdot f_{dom}} \quad (4.2)$$

Όπου GRID είναι η μέγιστη διάσταση των κελιών του μοντέλου, λ_{min} το ελάχιστο μήκος κύματος των σεισμικών κυμάτων που διαδίδονται στο μοντέλο, V_{Smin} η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων, f_{dom} η κυρίαρχη συχνότητα της σεισμικής πηγής και $f_{max} \approx 2.5 \times f_{dom}$ η μέγιστη συχνότητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Στην παρούσα εργασία όπου, $V_{Smin} = 150$ m/s (1^ο στρώμα), $f_{dom} = 100$ Hz και $f_{max} \approx 2.5 \times 100$ Hz = 250 Hz, η Εξ. 4.2 γίνεται:

$$GRID \leq \frac{\lambda_{min}}{6} = \frac{V_{Smin}}{6 \cdot f_{max}} \approx \frac{150}{6 \cdot 250} = 0,1 \text{ m}$$

4.3.3 Κυρίαρχη συχνότητα της σεισμικής πηγής

Η κυρίαρχη συχνότητα της σεισμικής πηγής σχετίζεται, όπως και η ελάχιστη V_s , με τον περιορισμό της αριθμητικής διασποράς που διέπει το σχήμα των πεπερασμένων διαφορών που επιλύουν την κυματική εξίσωση (Εξ. 4.2). Είναι φανερό ότι μεγάλες τιμές της κυρίαρχης συχνότητας, για δεδομένη ελάχιστη ταχύτητα V_s , μειώνουν το ελάχιστο μήκος κύματος των σεισμικών κυμάτων που διαδίδονται στο μοντέλο (με αποτέλεσμα την αύξηση της διακριτικής ικανότητας των σεισμικών κυμάτων), ενώ αυξάνουν γεωμετρικά τον υπολογιστικό χρόνο και τις απαιτήσεις σε μνήμη, εφόσον απαιτείται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε μικρότερα κελιά.



4.3.4 Ισαπόσταση των δεκτών

Η ισαπόσταση των δεκτών αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο της διαδικασίας προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων με το PSV_SYNTHETICS γιατί επηρεάζει την διακριτοποίηση του μοντέλου.

Στο PSV_SYNTHETICS, κάθε δέκτης και φυσικά κάθε πηγή θα πρέπει υποχρεωτικά να τοποθετείται πάνω σε κόμβο του μοντέλου. Ως εκ τούτου οι θέσεις των δεκτών και των πηγών είναι άρρηκτα συνυφασμένες με την διακριτοποίηση του μοντέλου.

Ειδικότερα, ο αλγόριθμος του PSV_SYNTHETICS επιλέγει την διάσταση των κελιών του μοντέλου (GRID) από τον μέγιστο κοινό διαιρέτη (ΜΚΔ) της ισαπόστασης των δεκτών (dx) και του κριτηρίου που ορίζεται στην Εξ. 4.2 ($\lambda_{min}/6$), χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

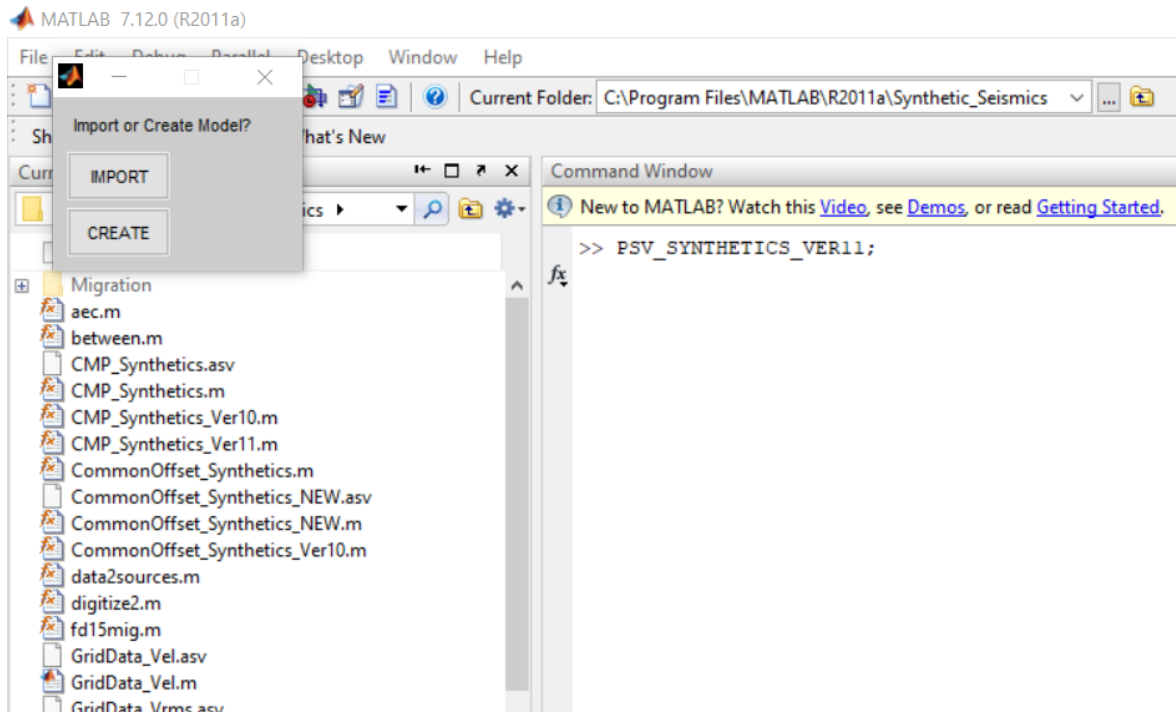
$$GRID = MK\Delta \left\{ dx, \frac{\lambda_{min}}{6} \right\} \quad (4.3)$$

Στο συγκεκριμένο πείραμα απαιτείται υποχρεωτικά συγκεκριμένη ισαπόσταση δεκτών 0,1m, οπότε τροποποιήθηκε η παράμετρος $V_{Smin} = 148,6$ m/s της Εξ. 2.1 προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων με το PSV_SYNTHETICS. Πιο συγκεκριμένα, από την Εξ. 4.2. για $V_{Smin} = 150$ m/s προκύπτει: $\lambda_{min}/6 = 0,1$ m, οπότε ορίζεται η ισαπόσταση δεκτών ίση με 0,1 m.

4.3.5 Αναζήτηση και εκτέλεση των αρχείων του PSV_SYNTHETICS

Για να αναζητήσει και να εκτελέσει η Matlab τους αλγόριθμους (αρχεία *.m) του PSV_SYNTHETICS, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ένα από τα παρακάτω βήματα:

- Όλα τα αντίστοιχα αρχεία να βρίσκονται στο Current Directory. Άρα ορίζεται ως Current Directory τον φάκελο (Synthetic_Seismics) που περιλαμβάνει τα αρχεία αυτά (Σχήμα 4.4.).
- Ορίζουμε τον φάκελο (Synthetic_Seismics) που περιλαμβάνει τα αρχεία αυτά (μαζί με τους υποφακέλους του) ως προεπιλεγμένους φακέλους μέσα στους οποίους η Matlab αναζητά τους αλγόριθμους για να τους εκτελέσει.



Σχήμα 4. 4. Αναζήτηση των αλγόριθμων του PSV_SYNTHETICS στο Current Directory.

Στο Command Window πληκτρολογούμε την ακόλουθη εντολή (Σχήμα 4.4):

```
>> PSV_SYNTHETICS_VER11;
```

Όπου 11 ο αριθμός της τρέχουσας αναβαθμισμένης έκδοσης του PSV_SYNTHETICS.

Μετά το βήμα αυτό, ο χρήστης καλείται να επιλέξει αν θα χρησιμοποιήσει κάποιο ήδη υπάρχον μοντέλο (IMPORT) ή θα δημιουργήσει ένα νέο (CREATE).

Στην περίπτωση δημιουργίας νέου μοντέλου (CREATE), ο χρήστης θα κληθεί να ολοκληρώσει τα ακόλουθα στάδια:

- Ορισμός των αρχικών παραμέτρων του μοντέλου.
- Ορισμός γεωμετρίας κάθε στρώματος του μοντέλου.
- Ορισμός ταχύτητας (P και S-κυμάτων) και πυκνότητας κάθε στρώματος του μοντέλου.



4.3.6 Ορισμός των αρχικών παραμέτρων του μοντέλου

Ο καθορισμός των αρχικών παραμέτρων του μοντέλου (INITIAL MODEL PARAMETERS) είναι ζωτικής σημασίας δεδομένου ότι αυτές θα καθορίσουν, τόσο την διακριτοποίηση του μοντέλου στο χώρο (υπολογισμός ελάχιστης διάστασης των κελιών του μοντέλου - GRID), όσο και την διακριτοποίηση της διαδικασίας διάδοσης της σεισμικής ενέργειας στον χρόνο (διάστημα δειγματοληψίας στον χρόνο – SAMPLING INTERVAL). Οι αρχικές παράμετροι του μοντέλου που πρέπει να οριστούν σε αυτό το στάδιο είναι οι εξής (Σχήμα 4.5):

- *Οριζόντια (μήκος) έκταση του μοντέλου σε μέτρα (HORIZONTAL extend of model in meters): 200m*
- *Κατακόρυφη (βάθος) έκταση του μοντέλου σε μέτρα (VERTICAL extend of model in meters): 90m*
- *Ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων (Vs) σε m/s. Δεν αναφέρεται στην ταχύτητα Vs στρώματος με μηδενική διατμητική αντοχή (π.χ. στρώμα θάλασσας) (minimum S-wave velocity (Vs) of model in m/s. Sea water is excleded): 150m/s*
- *Κυρίαρχη συχνότητα της σεισμικής πηγής σε Hz (dominant frequency of the source in Hz): 100Hz*
- *Ισαπόσταση των δεκτών (γεωφώνων ή υδροφώνων) σε μέτρα (receiver increment in meters): 0.1m*
- *Εφαρμογή απορροφητικών ορίων στην επιφάνεια (Z=0) του μοντέλου (upper surface (Z=0) of model is FREE or ABSORBING boundary?): Ελεύθερη επιφάνεια*
- *Προσδιορισμός του τύπου του μοντέλου (ένα επιφανειακό στρώμα θάλλασας ή όλα τα στρώματα σε ξηρά) (SEA or LAND Survey?): Έρευνα σε ξηρά (LAND)*



INITIAL MODEL PARAMETERS

Enter the HORIZONTAL extend of model in meters
200

Enter the VERTICAL extend of model in meters
90

Enter the minimum S-wave velocity (Vs) of model in m/s. Sea water is excluded
150

Enter the dominant frequency of the source in Hz
100

Enter receiver increment in meters
0.1

The upper surface (Z=0) of model is FREE or ABSORBING boundary ?
FREE

SEA or LAND Survey ?
LAND

OK Cancel

Σχήμα 4. 5. Εισαγωγή αρχικών παραμέτρων του μοντέλου στο PSV_SYNTHETICS.

4.3.7 Διαδικασία προσομοίωσης

Επομένως, αρχικά δημιουργήθηκε το μοντέλο, ορίστηκε μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα των P και S κυμάτων και περιμετρικά σε αυτό εφαρμόστηκαν απορροφητικά όρια (absorbing boundaries) με ελεύθερη την άνω επιφάνεια, για να μην δημιουργηθούν τεχνητές ανακλάσεις. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν 3 ακόμα σώματα εσωτερικά του αρχικού, εισάγοντας τα αντίστοιχα αρχεία .smp, σχηματίζοντας έτσι τα στρώματα του πραγματικού μοντέλου.

Αφού έγιναν οι κατάλληλοι περιορισμοί βάση των παραπάνω κριτηρίων ορίστηκαν οι παράμετροι του πλέγματος και το χρονικό βήμα $\Delta t=0.02\text{ms}$, ενώ οι διαστάσεις του κάθε κελιού καθορίζονται από τις ισαποστάσεις των κόμβων στην X και Z διεύθυνση οι οποίες είναι ίσες με $\Delta x=\Delta z=0,1\text{m}$

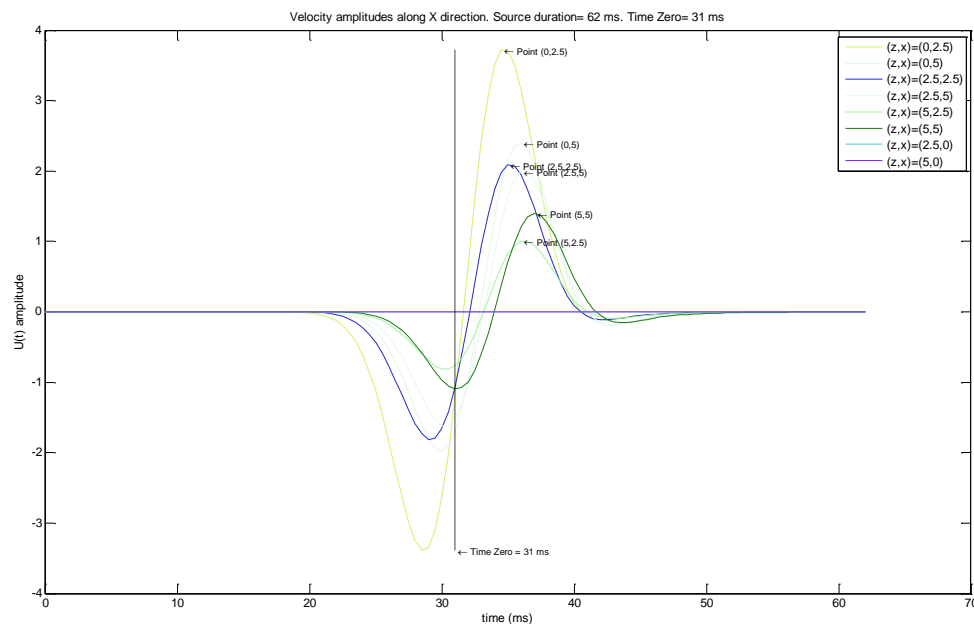


Στο επόμενο βήμα τοποθετήθηκαν γεώφωνα, με ισαπόσταση 0.1m, (το πρώτο γεώφωνο τοποθετήθηκε στα 5m), στην επιφάνεια ($Z=0m$) και οι πηγές με κυρίαρχη συχνότητα 100Hz τοποθετήθηκαν στα 5m, 52.5m, 100m, 147.5m, 195m και σε βάθος 0.45m κάτω από το εκάστοτε υψόμετρο κάθε πηγής (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4. 2. Παράμετροι πηγών.

Θέση πηγής (m)	Βάθος (m)	Συχνότητα (Hz)
5	4.5	100
52.5	18.4	100
100	17.6	100
147.5	12.1	100
195	2.0	100

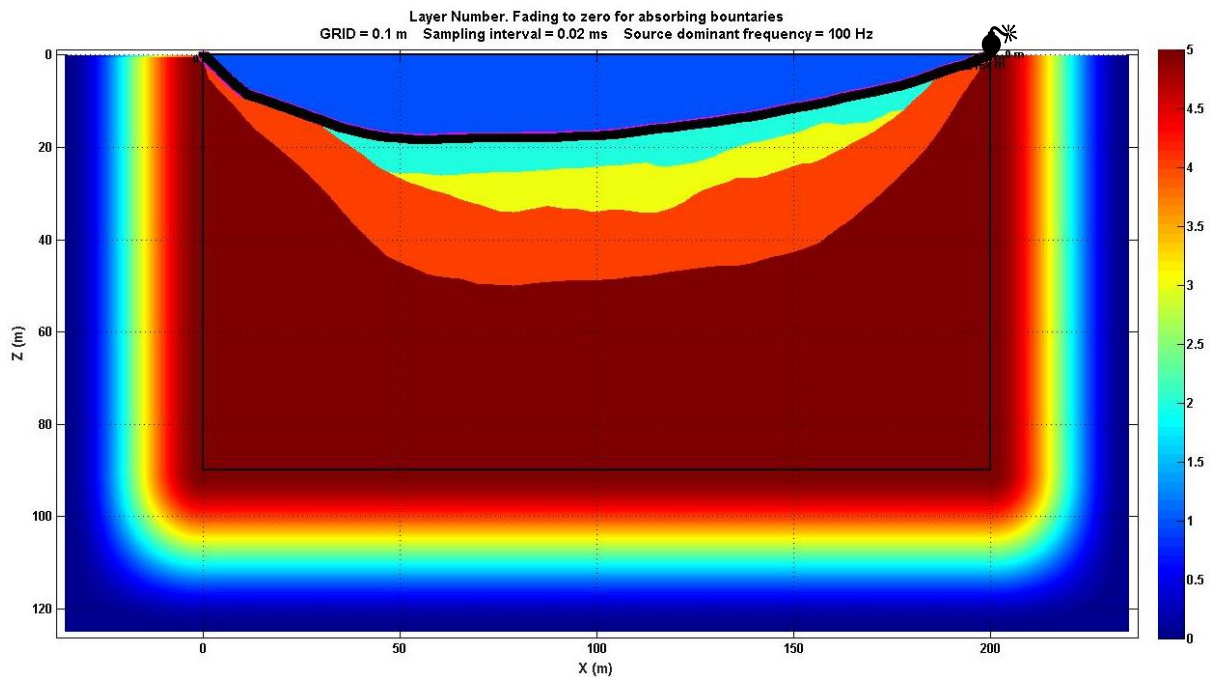
Αναλυτικότερα, για κυρίαρχη συχνότητα πηγής 100Hz, η διάρκεια εκπομπής της πηγής είναι 62ms, ενώ το σημείο αλλαγής πρόσημου της κυματομορφής της σεισμικής πηγής (cross-over) συμπίπτει περίπου με τα ήμισυ της χρονικής της διάρκειας (Time Zero=31ms, Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4. 6. Διάγραμμα χρονικής μεταβολής του κυματιδίου της πηγής (Κρητικάκης, 2016).

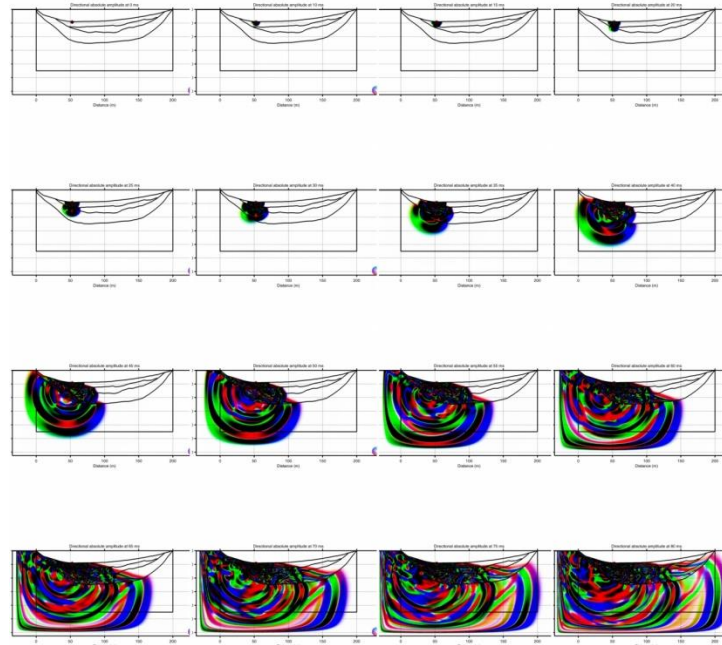


Στο Σχήμα 4.7, απεικονίζεται το μοντέλο βάθους με τα γεώφωνα τοποθετημένα στην επιφάνεια ανά 0.1m και την πηγή στα 195m και περιμετρικά αυτού έχουν εφαρμοσθεί απορροφητικά όρια (absorbing boundaries).



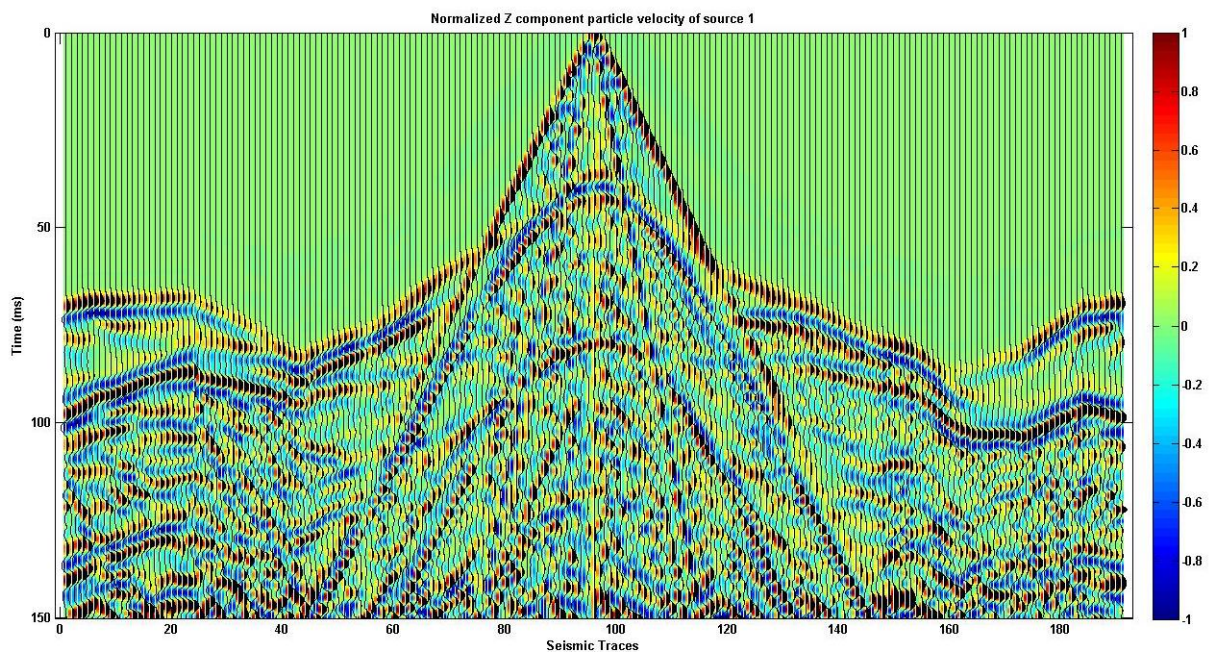
Σχήμα 4. 7. Απεικόνιση πηγής – γεωφώνων και του μοντέλου βάθους, όπου φαίνεται η θέση της πηγής στα 195m, τα γεώφωνα ανά 10cm (μαύρη γραμμή), καθώς και τα απορροφητικά όρια.

Στη συνέχεια, ορίζεται ο συνολικός χρόνος καταγραφής (150ms), καθώς επίσης η απεικόνιση και αποθήκευση στιγμιότυπων (snapshots) του κυματικού πεδίου σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές (Σχήμα 4.8), όπου επιλέχθηκε να καταγράφεται στιγμιότυπο ανά 5ms. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να είναι ευκολότερος ο προσδιορισμός των αφίξεων των σεισμικών κυμάτων στους δέκτες, ο προσομοιωτής επεκτείνει αρχικά τον συνολικό χρόνο καταγραφής κατά το ήμισυ της χρονικής διάρκειας της σεισμικής πηγής, και ακολούθως αφαιρεί τα αρχικά δείγματα που έχουν καταγραφεί στους δέκτες που αντιστοιχούν στο χρόνο αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η άφιξη των σεισμικών κυμάτων να συμπίπτει με το σημείο αλλαγής πρόσημου του κυματιδίου της σεισμικής πηγής (Time-Zero, Σχήμα 4.6.)



Σχήμα 4. 8. Στιγμιότυπα διάδοσης των κυμάτων στο μοντέλο, από την χρονική στιγμή 0ms μέχρι και 80ms ανά 5ms, για την πηγή στα 52.5m.

Εκτελώντας την διαδικασία προσομοίωσης για κάθε σεισμική πηγή ξεχωριστά δημιουργήθηκαν τα συνθετικά δεδομένα (Σχήμα 4.9) για κάθε θέση σεισμικής πηγής.



Σχήμα 4. 9. Συνθετικά δεδομένα της σεισμικής πηγής στα 100m.



Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι ο υπολογιστικός χρόνος για την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων για κάθε πηγή του συγκεκριμένου πολύπλοκου εδαφικού μοντέλου ήταν σχετικά μεγάλος. Ειδικότερα, για την εκπλήρωση της διαδικασίας χρειάστηκαν περίπου 40 ώρες (χωρίς ενδιάμεση αποθήκευση δεδομένων) για μία πηγή και ισαπόσταση γεωφώνων 10cm, σε Η/Υ του Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής Intel Core i7-3770K Quad-Core Processor (3.5 GHz 8 MB Cache LGA 1155)
- Μνήμη RAM 32 GB (4x8GB), 1600 MHz, DDR3 και
- Matlab R2014b.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων με την επιλογή των πρώτων αφίξεων σε περιβάλλον Matlab R2014b και η επεξεργασία τους στο πρόγραμμα Plotrefa, για την δημιουργία του τελικού εδαφικού μοντέλου.

5.1 Επιλογή των πρώτων αφίξεων

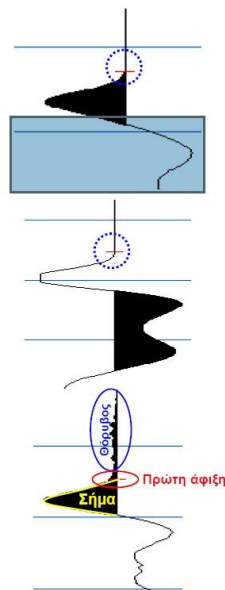
Η επιλογή των πρώτων αφίξεων έγινε μηχανικά σε περιβάλλον Matlab. Ειδικότερα, μετά την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων με τη χρήση του PSV_SYNTHETICS σε περιβάλλον Matlab, κρίθηκε αναγκαίο η επιλογή των πρώτων αφίξεων να γίνει μηχανικά για κάθε άφιξη και για όλες τις πηγές, καθώς η μετατροπή των αρχείων έτσι ώστε να είναι συμβατά με το Plotrefa για αυτόματη επιλογή των πρώτων αφίξεων ήταν αδύνατη.

Γενικά, υπάρχουν 3 κύριες περιπτώσεις για την αναγνώριση και επιλογή των πρώτων αφίξεων (Σχήμα 5.1).

Η αρχική ταλάντωση των σωματιδίων που καταγράφεται στο γεώφωνο έχει θετική φορά (θετικά πλάτη). Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται το σημείο μηδενικού πλάτους, ακριβώς πριν την έναρξη των θετικών τιμών του πλάτους.

Η αρχική ταλάντωση των σωματιδίων που καταγράφεται στο γεώφωνο έχει αρνητική φορά (αρνητικά πλάτη). Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται το σημείο μηδενικού πλάτους, ακριβώς πριν την έναρξη των αρνητικών τιμών του πλάτους.

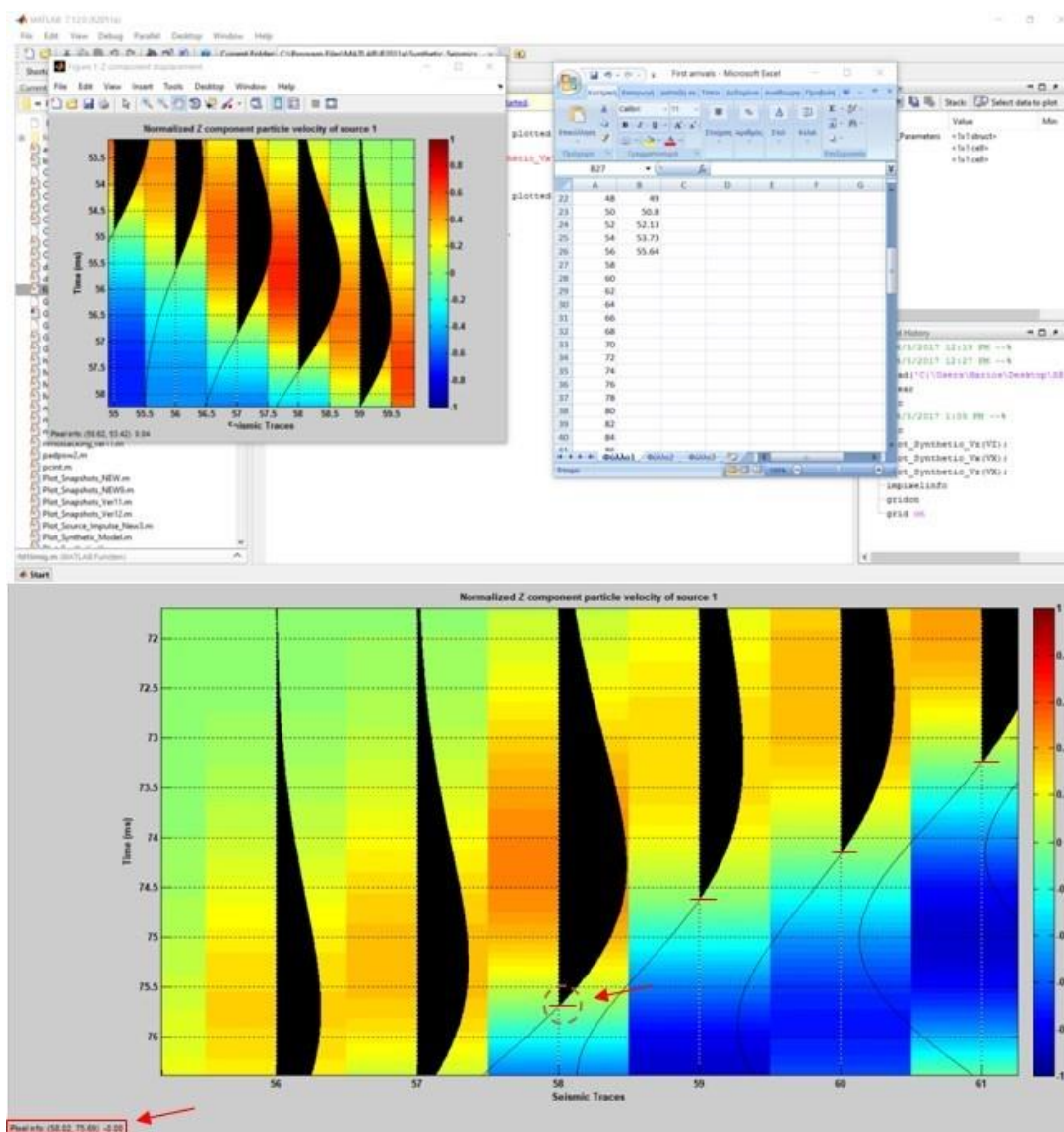
Η αρχική ταλάντωση των σωματιδίων που καταγράφεται στο γεώφωνο έχει θετική (ή αρνητική) φορά, αλλά «μολύνεται» από την ύπαρξη θορύβου. Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται το σημείο προβολής του μηδενικού πλάτους που θα είχε η κυματομορφή χωρίς την ύπαρξη του θορύβου.



Σχήμα 5. 1. Παραδείγματα περιπτώσεων αναγνώρισης και επιλογής των πρώτων αφίξεων (Κρητικάκης, 2008).



Στην συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε το σημείο μηδενικού πλάτους, ακριβώς μετά την λήξη των αρνητικών τιμών του πλάτους (σημείο μηδενισμού – cross-over) (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5. 2. Επιλογή των πρώτων αφίξεων σε περιβάλλον Matlab.

Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των πρώτων αφίξεων για τις καταγραφές που προέκυψαν με την πηγή να βρίσκεται στα 5m (Σχήμα ΠΒ.1), έγινε στους δέκτες από τα 11m έως και τα 195m όπως και για τις καταγραφές που προέκυψαν με την πηγή να



βρίσκεται στα 195m (Σχήμα ΠΒ.5) όπου λήφθηκαν τιμές στους δέκτες από τα 5m μέχρι τα 192m, και όχι σε όλο το μήκος του μοντέλου όπως στις υπόλοιπες τρείς. Στους δέκτες από 5-10m και 193-195m (Πίνακας ΠΒ.1) αντίστοιχα, δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός ευκρινούς σημείου πρώτης άφιξης λόγω της εγγύτητας των εν λόγω δεκτών στις αντίστοιχες πηγές. Ειδικότερα, οι δύο αυτές πηγές βρίσκονται πάνω σε δολομίτη (στρώμα 4) όπως φαίνεται στο μοντέλο βάθους (Σχήμα 4.7), με ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων $V_p=3500$ m/s (Πίνακας 4.1). Για τον λόγο αυτό, τα σεισμικά κύματα καταφθάνουν πολύ γρήγορα στα γεώφωνα που βρίσκονται κοντά στις αντίστοιχες πηγές, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η επιλογή των πρώτων αφίξεων.

5.2 Δημιουργία μοντέλου ταχύτητας

Για την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων μετά την επιλογή των πρώτων αφίξεων σε περιβάλλον Matlab, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Plotrefa. Το Plotrefa έχει την δυνατότητα ανάγνωσης αρχείων πρώτων αφίξεων σε μορφή *.vs.

Η δημιουργία του αρχικού μοντέλου βάθους πραγματοποιείται ακολουθώντας τα βήματα: *Tomography* → *Generate initial model*. Στο παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.3) που εμφανίζεται εισάγονται οι ακόλουθες παραμέτροι:

- ***Use layered model as initial model:*** Η επιλογή αυτή πρέπει να είναι ενεργοποιημένη για να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο βάθους ως αρχικό μοντέλο.
- ***Minimum velocity:*** Αν η προηγούμενη επιλογή είναι ενεργοποιημένη τότε το λογισμικό θα αντικαταστήσει αυτόματα την αναγραφόμενη στο κελί τιμή με την μικρότερη ταχύτητα του μοντέλου βάθους (300 m/s).
- ***Maximum velocity:*** Αντίστοιχο με την επιλογή «*Minimum velocity*» για την μέγιστη παρατηρούμενη ταχύτητα (4000 m/s)..
- ***# of layers:*** Αριθμός των οριζόντιων στρωμάτων στα οποία θα χωρίσει (αυτόματα) το λογισμικό το αρχικό μοντέλο. Επιλέχθηκαν 15 στρώματα.



- **Elevation at the bottom left of the model:** Ορίζεται το υψόμετρο της κάτω αριστερής πλευράς του μοντέλου.
- **Elevation at the bottom right of the model:** Αντίστοιχα, ορίζεται το υψόμετρο της κάτω δεξιάς πλευράς του μοντέλου.
- **Depth to top of lowest layer:** Ορίζεται το βάθος (από την επιφάνεια του εδάφους) στο οποίο απαντάται το τελευταίο στρώμα.

Initial model for tomography (smooth velocity model)

☒ Use layered model as initial model

Depth to top of lowest layer: 20 m

Minimum velocity: 300 m/sec

Maximum velocity: 4000 m/sec

of layers: 15

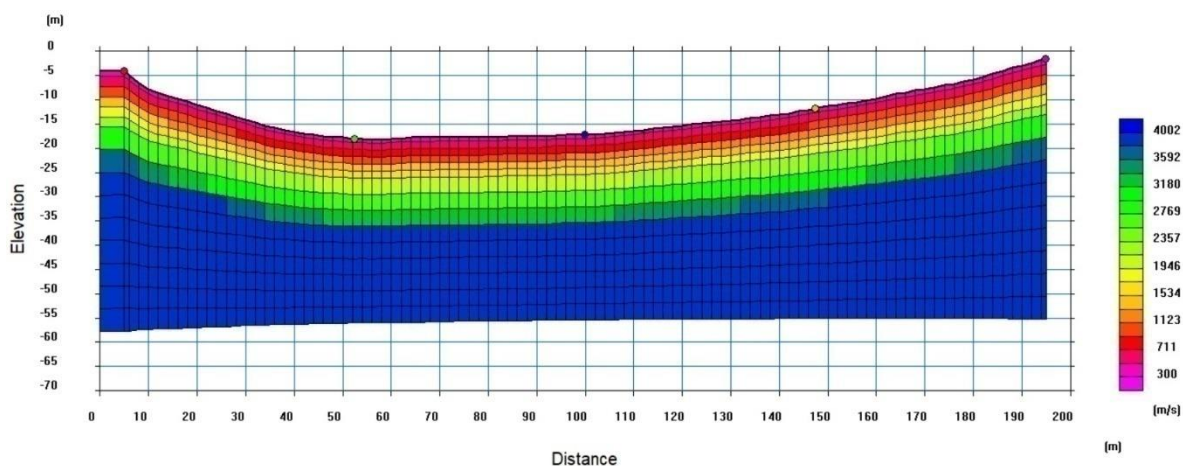
Elevation at the bottom left of the model: -54.2 m

Elevation at the bottom right of the model: -52.6 m

OK Cancel

Σχήμα 5. 3. Ορισμός των παραμέτρων του αρχικού εδαφικού μοντέλου.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε, *Open elevation data file*, καθώς υπάρχουν υψομετρικές διαφορές (ανάγλυφο) μεταξύ των γεωφώνων και των πηγών και έπειτα επιλέχθηκε το αρχείο κειμένου (.txt) το οποίο έχει ήδη δημιουργηθεί, με πληροφορίες για το υψόμετρο και την θέση κάθε γεωφώνου. Τελικά, η διαδικασία καταλήγει στο οριζόντιο στρωματομένο μοντέλο με ανάγλυφο (Σχήμα 5.4). Ειδικότερα, στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται το αρχικό εδαφικό μοντέλο, όπου κάθε κελί θεωρείται ως ένα ομοιογενές τμήμα του υπεδάφους με σταθερή ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα 5. 4. Αρχικό μοντέλο ταχυτήτων. Παράλληλα στρώματα που ακολουθούν το ανάγλυφο.

Για να πραγματοποιήσουμε την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με την μέθοδο της Σεισμικής Τομογραφίας επιλέγουμε: *Tomography* → *Inversion (set parameters manually)*. Στο παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.5) που εμφανίζεται εισάγονται οι ακόλουθες παραμέτρους:

- **Number of iterations:** Αριθμός των επαναλήψεων για την τροποποίηση του αρχικού μοντέλου. Επιλέχθηκαν 10 επαναλήψεις που θεωρούνται ικανοποιητικές.
- **Number of nodes:** Αριθμός των κόμβων κάθε κελιού (Σχήμα 4.3). Κάθε πλευρά ενός κελιού του αρχικού μοντέλου διαιρείται με την χρήση κόμβων προκειμένου να διέρχονται από αυτούς οι υπολογισμένες σεισμικές ακτίνες, κατά την επίλυση του ευθέως προβλήματος (Σχήμα 2.4). Όσο περισσότεροι κόμβοι χρησιμοποιηθούν, τόσο πιο αξιόπιστα θα είναι τα αποτελέσματα της αντιστροφής, σε βάρος βέβαια του υπολογιστικού χρόνου. 3 - 8 κόμβοι θεωρούνται ικανοποιητικοί. Επιλέχθηκαν 5 κόμβοι.
- **Horizontal smoothing:** Μετά από κάθε επανάληψη, το λογισμικό εφαρμόζει κατά την οριζόντια διεύθυνση φίλτρα στις υπολογισμένες ταχύτητες, προκειμένου να εξομαλύνει τυχόν πολύ μεγάλες διαφορές ταχυτήτων σε γειτονικά κελιά. Χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές.



- **Vertical smoothing:** Ορισμός παραμέτρων φίλτρου εξομάλυνσης για την κατακόρυφη διεύθυνση. Χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές.
- **Minimum velocity:** Εισαγωγή της μικρότερης ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης (300 m/s).
- **Maximum velocity:** Εισαγωγή της μεγαλύτερης ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης (4000 m/s).
- **Velocity does not increase with depth:** Χρησιμοποιείται μόνο για περιπτώσεις δεδομένων από πειράματα cross-hole ή VSP. Στην περίπτωση αυτή, η επιλογή παραμένει απενεργοποιημένη.
- **With constraint:** Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει περιορισμούς στην διαδικασία αντιστροφής για τον προσδιορισμό του μοντέλου σε κάθε επανάληψη. Στην περίπτωση αυτή, η επιλογή παραμένει απενεργοποιημένη.

Automatic reconstruction

Number of iterations: 10

Option

Number of nodes: 5

Horizontal smoothing

Number of smoothing passes: 1

Smoothing weight: 0.5 (0.3 to 1.00)

Vertical smoothing

Number of smoothing passes: 0

Smoothing weight: 0.5 (0.3 to 1.00)

Number of layers to be smoothed: 5

Minimum velocity: 300 m/sec

Maximum velocity: 4000 m/sec

☐ Velocity does not increase with depth

☐ With constraint

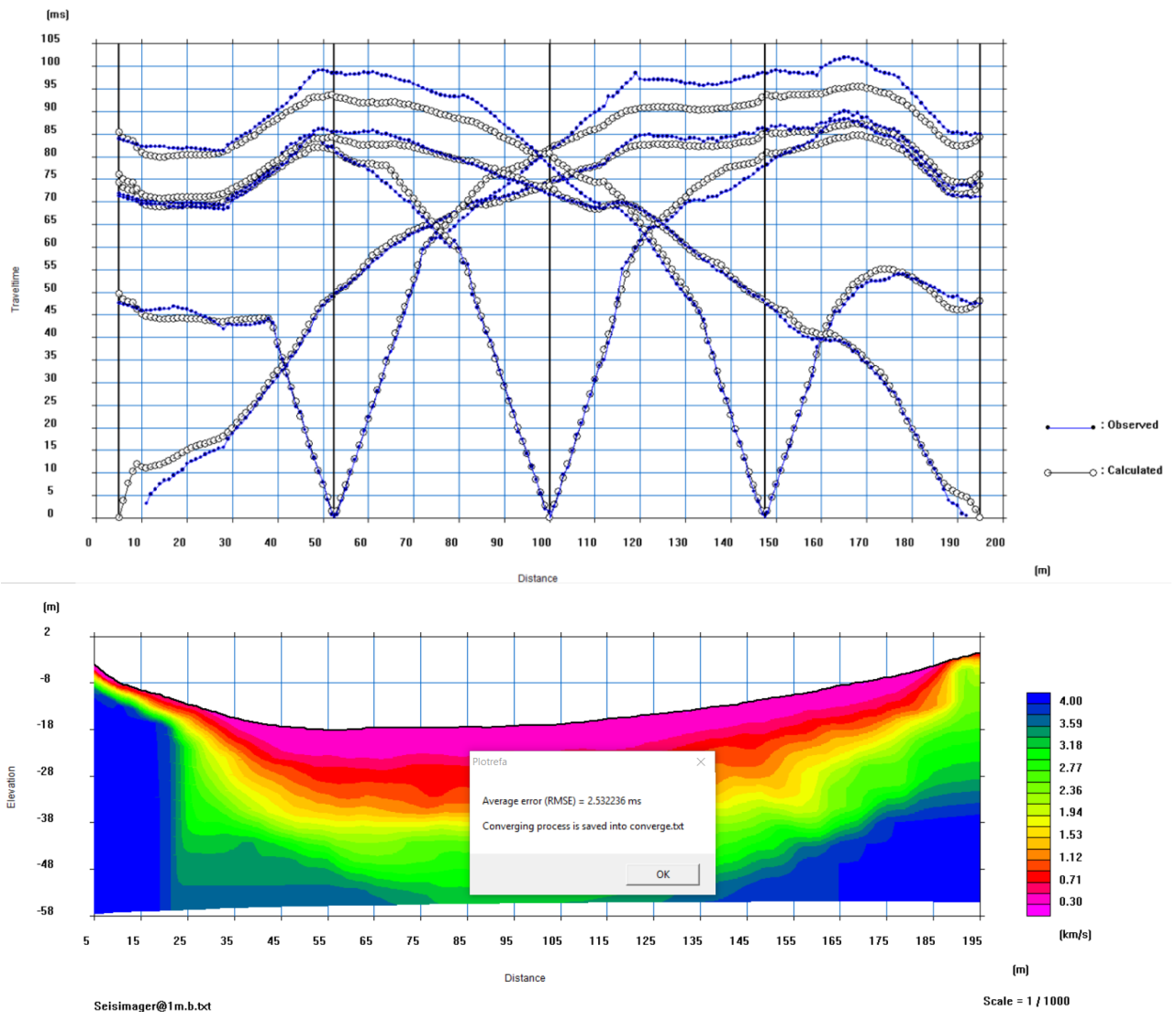
OK

Cancel

Σχήμα 5. 5. Επιλογή των παραμέτρων αντιστροφής.



Μετά το τέλος της διαδικασίας αντιστροφής (η οποία μπορεί να διαρκέσει αρκετά λεπτά) εμφανίζεται στην οθόνη το τελικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα ($RMSE=2.532236$ ms), το δρομοχρονικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και υπολογισμένων χρόνων διαδρομής των πρώτων αφίξεων, καθώς επίσης απεικονίζεται και το τελικό εδαφικό μοντέλο (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5. 6. Το δρομοχρονικό διάγραμμα μεταξύ πειραματικών και υπολογισμένων χρόνων διαδρομής των πρώτων αφίξεων (πάνω), καθώς και το τελικό εδαφικό μοντέλο με το τελικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (κάτω), για ισαπόσταση γεωφώνων 1m.

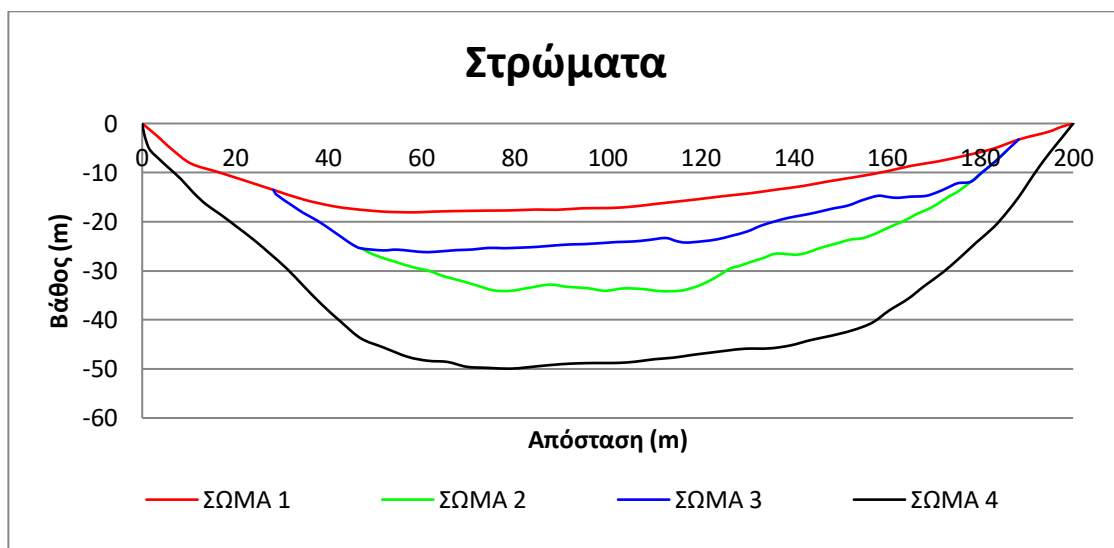


Διαμορφώνοντας κατάλληλα την κλίμακα απεικόνισης, καθώς και το εύρος απεικόνισης των αξόνων επιτυγχάνεται η απεικόνιση του μοντέλου βάθους για οριζόντια απόσταση ίση με αυτή του αναπτύγματος γεωφώνων.

Η αποθήκευση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με την επιλογή: *File* → *Save Plotrefa file*. Το αρχείο που αποθηκεύεται έχει κατάληξη πάλι *.vs, με την διαφορά ότι τώρα πλέον περιλαμβάνει πληροφορίες για το μοντέλο βάθους και όχι για τους χρόνους των πρώτων αφίξεων.

5.3 Υπέρθυση στρωμάτων αρχικού μοντέλου στα μοντέλα ταχύτητας

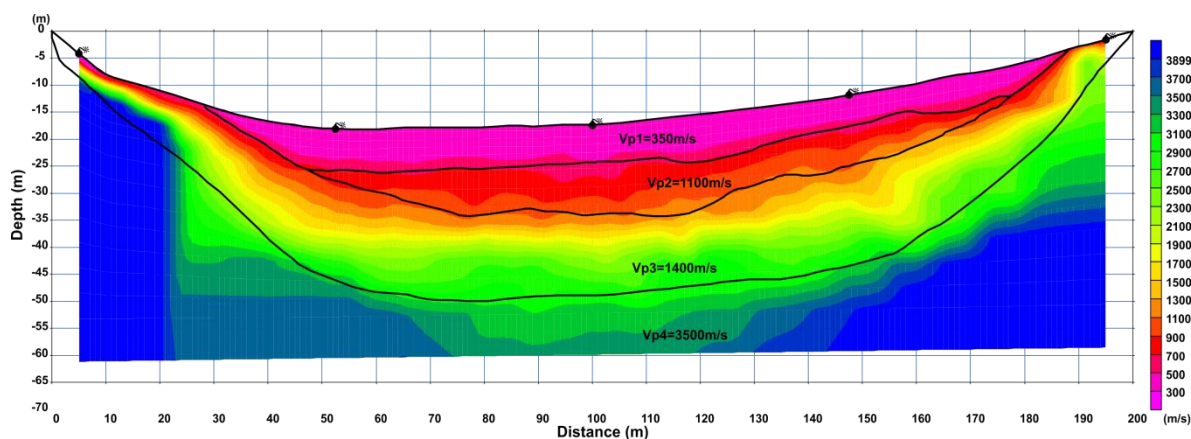
Αρχικά, σε περιβάλλον Microsoft Excel απεικονίσθηκε το ανάγλυφο και οι διεπιφάνειες των στρωμάτων του μοντέλου χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες X,Z (Πίνακας ΠΑ.1) και στη συνέχεια εισήχθη σε κατάλληλο πρόγραμμα σχεδίασης μαζί με όλα τα μοντέλα ταχύτητας. Στο στάδιο αυτό, σκοπός ήταν η σύγκριση του αρχικού εδαφικού μοντέλου όπως προέκυψε από την απεικόνιση του σε περιβάλλον MS Excel (Σχήμα 5.7) με αυτά που περιγράφονται από τα μοντέλα ταχύτητας με σεισμική τομογραφία (ισαπόσταση γεωφώνων 6m) και με την τεχνολογία DAS (ισαπόσταση δεκτών 1m και 2m).



Σχήμα 5. 7. Ψηφιοποιημένο αρχικό μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων σε περιβάλλον MS Excel.



Για τον λόγο αυτό το παραπάνω διάγραμμα αφού εισήχθη σε πρόγραμμα σχεδίασης τροποποιήθηκε κατάλληλα η κλίμακα του, έτσι ώστε να γίνει υπέρθεση στα μοντέλα ταχύτητας. Τέλος, επιλέχθηκαν τα στρώματα ως μονάδα (group) και μεταφέρθηκαν σε κάθε μοντέλο ταχύτητας ξεχωριστά, και ακριβώς στην ίδια θέση έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η ταύτιση και η σύγκριση με το αρχικό μοντέλο (Σχήμα 5.8). Παρακάτω, παρουσιάζεται τυπικά το αποτέλεσμα της υπέρθεσης για ισαπόσταση δεκτών 1m.



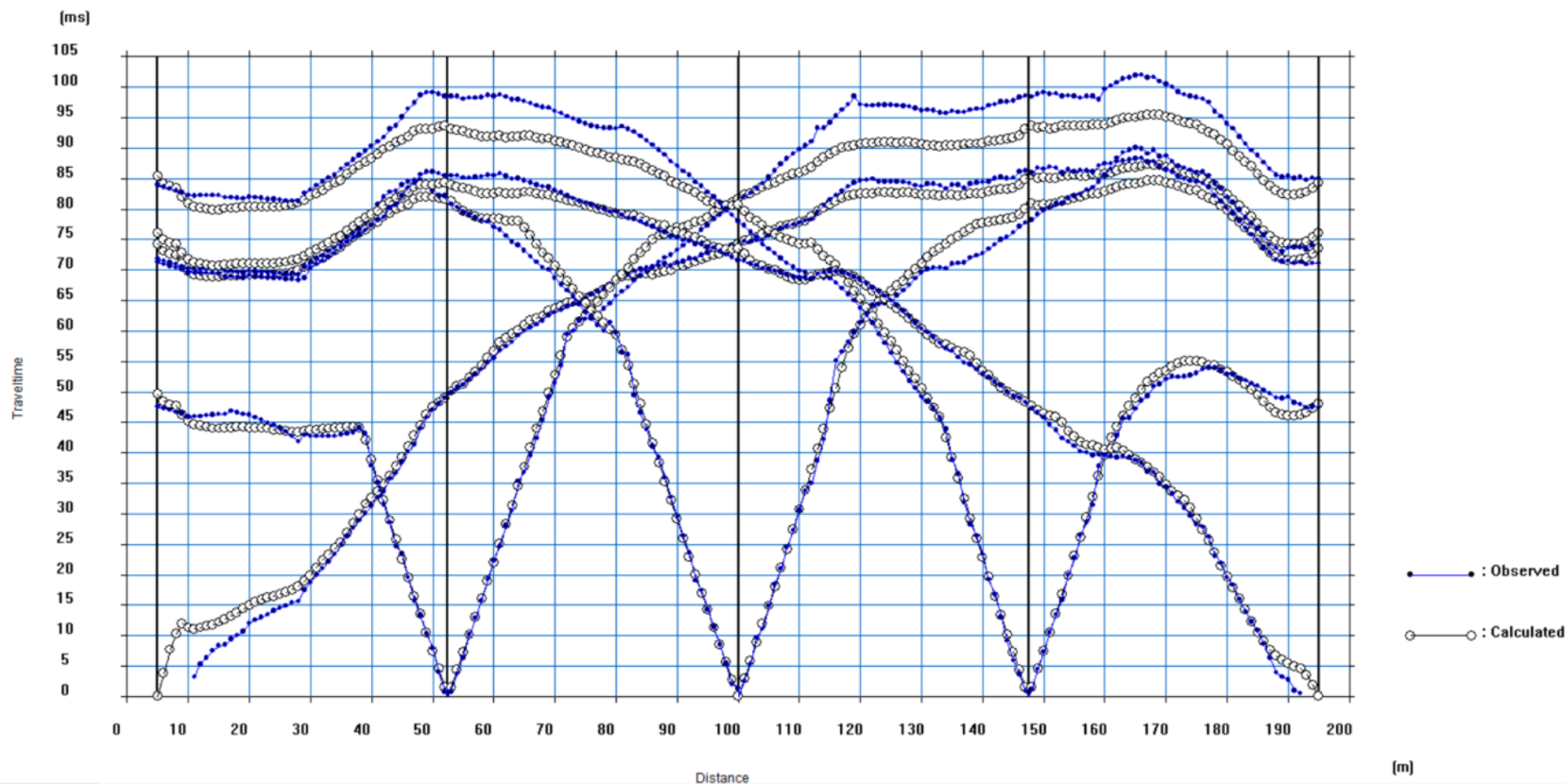
Σχήμα 5. 8. Τελικό μοντέλο με ισαπόσταση δεκτών 1m όπου φαίνεται η ταύτιση των τεσσάρων στρωμάτων του αρχικού μοντέλου.

5.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας

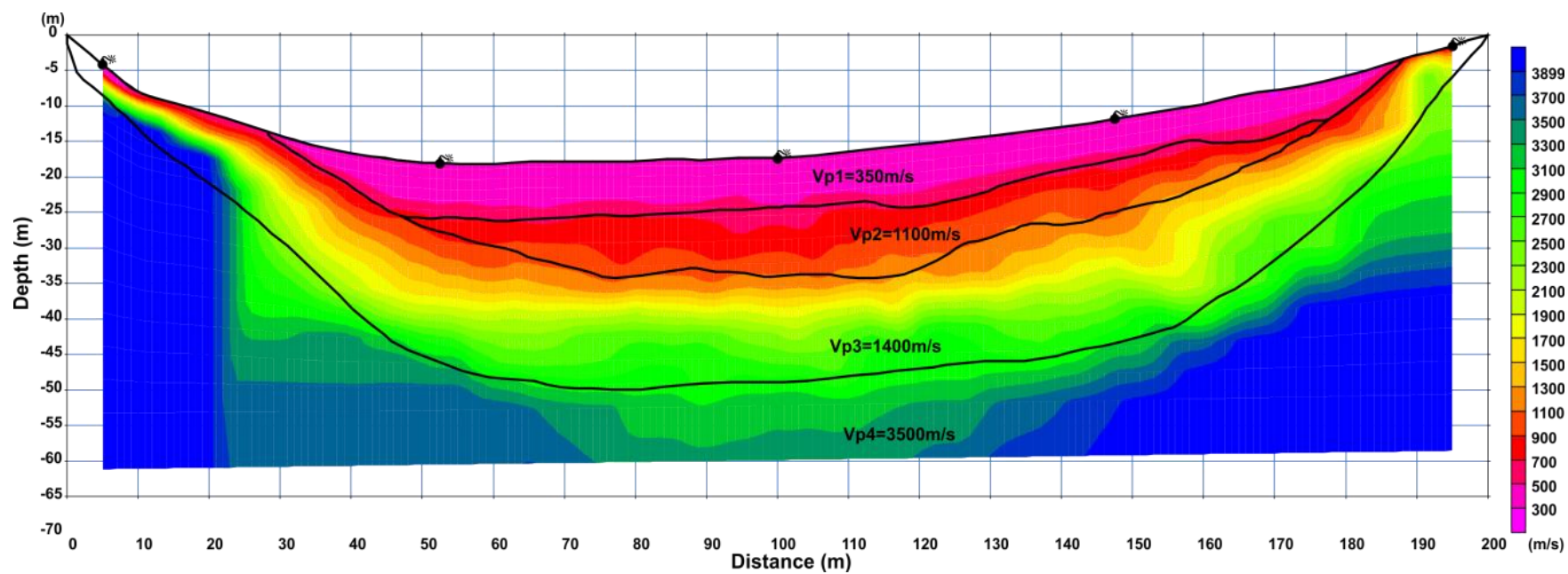
Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων για τις 5 πηγές (5m, 52.5m, 100m, 147.5m, 195m) παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήματα 5.9-5.17.). Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται το δρομοχρονικό διάγραμμα, και τα μοντέλα ταχύτητας χωρίς και με σεισμικές ακτίνες, για ισαπόσταση δεκτών 1m (τεχνολογία DAS - πυκνή διάταξη γεωφώνων), 2m (τεχνολογία DAS - πιο αραιή διάταξη γεωφώνων), και 6m (συμβατικό πείραμα σεισμικής τομογραφίας).



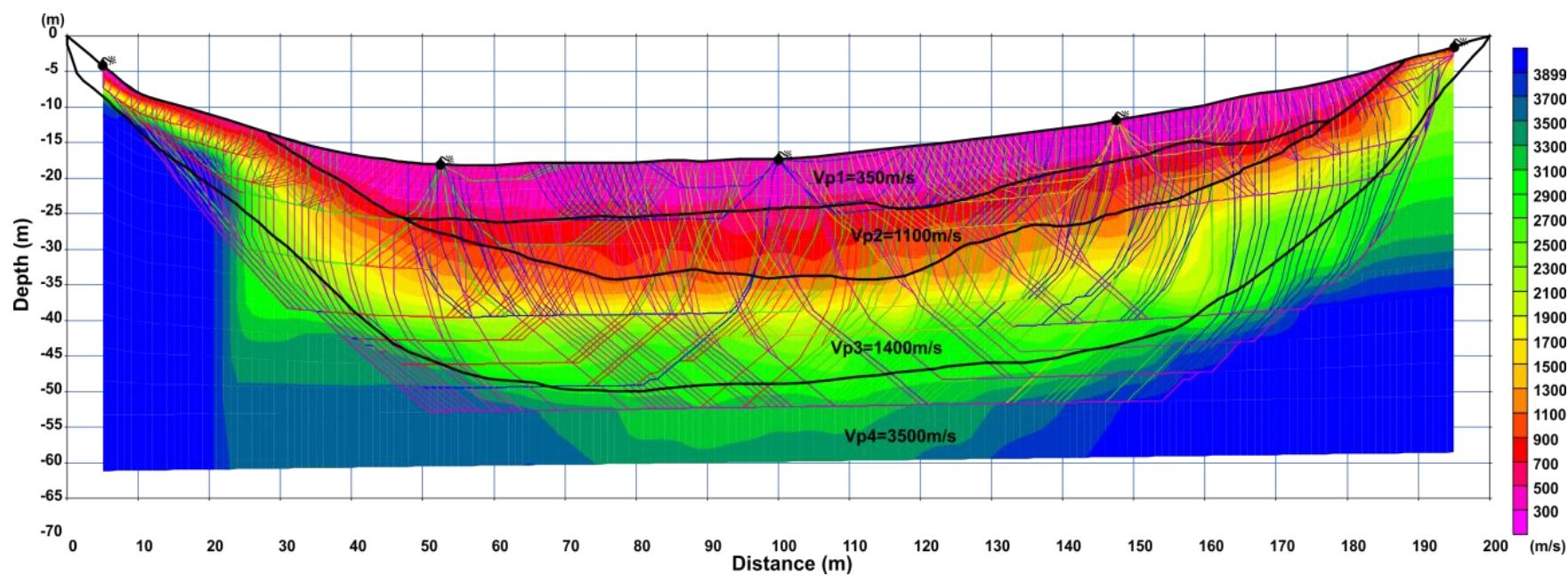
5.4.1 Ισαπόσταση δεκτών 1m



Σχήμα 5. 9. Δρομοχρονικό διάγραμμα των 5 πηγών για το μοντέλο με ισαπόσταση δεκτών 1m.



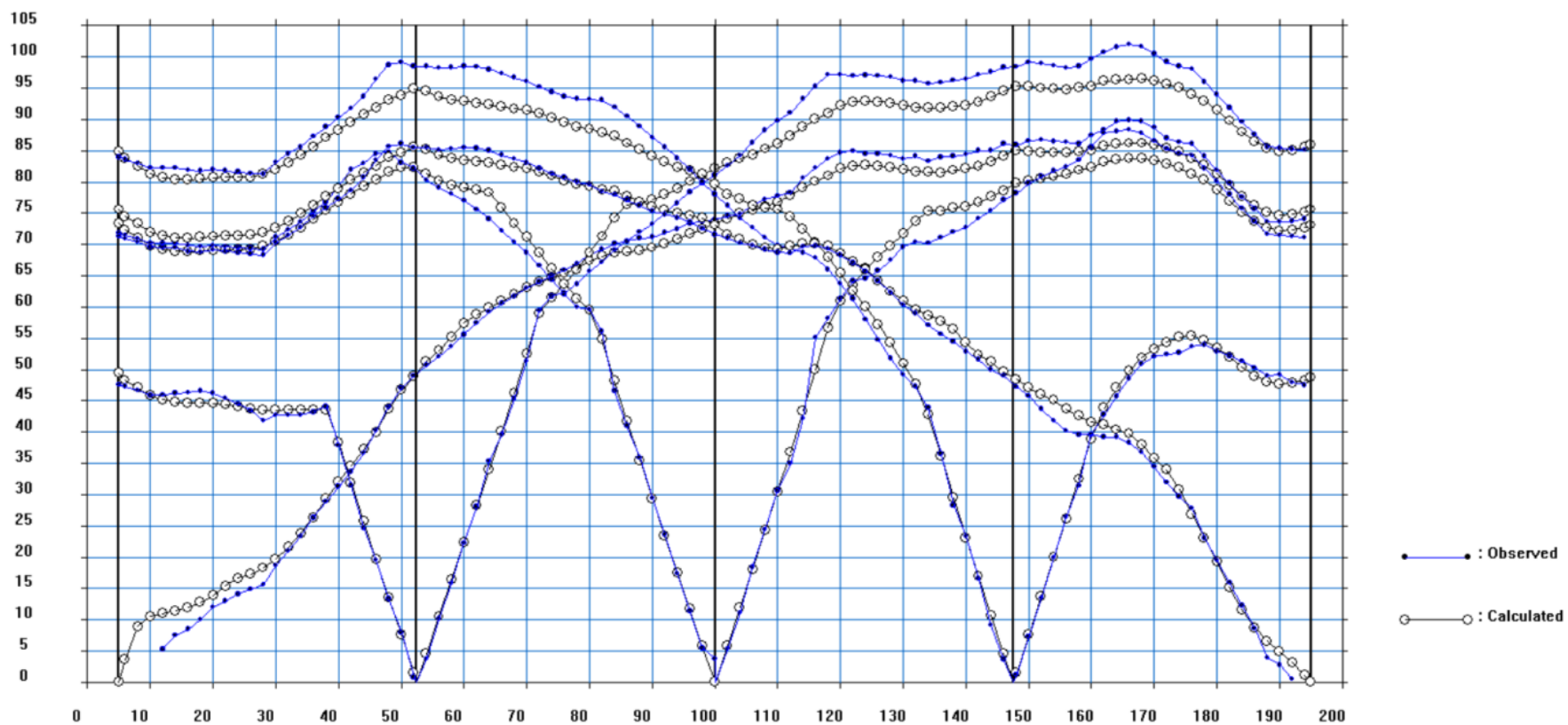
Σχήμα 5. 10. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 1m.



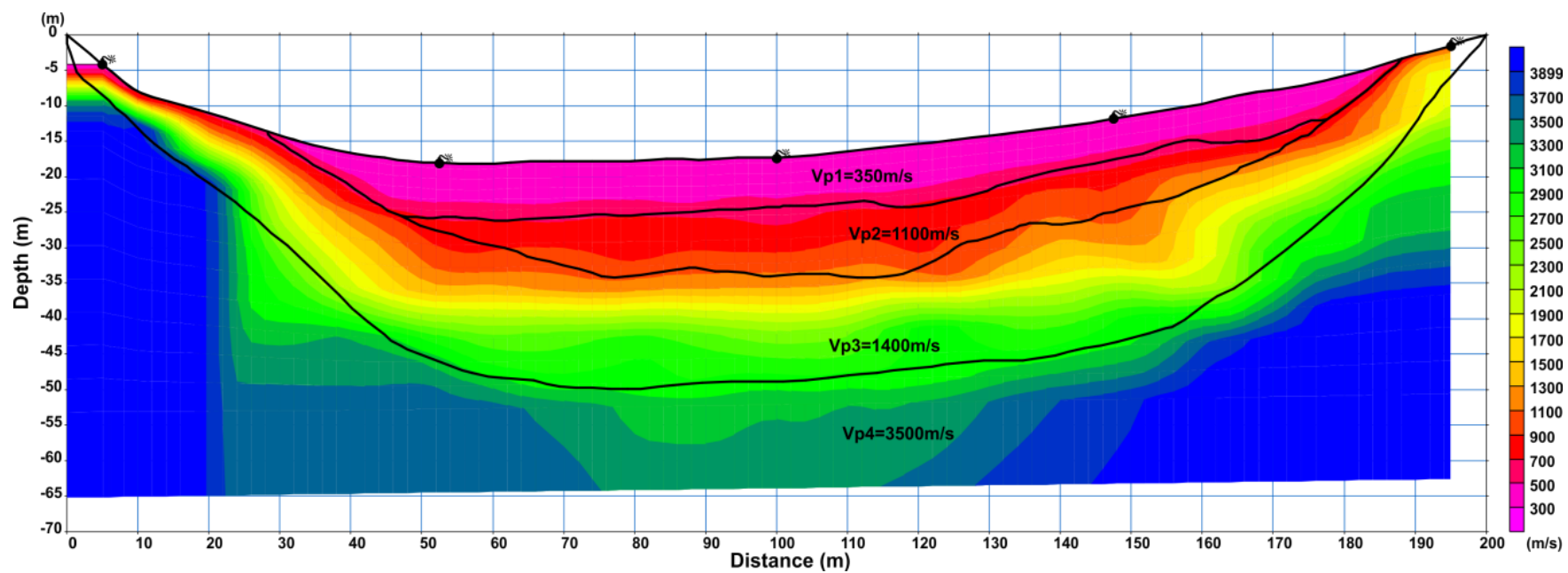
Σχήμα 5. 11. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 1m, με σεισμικές ακτίνες.



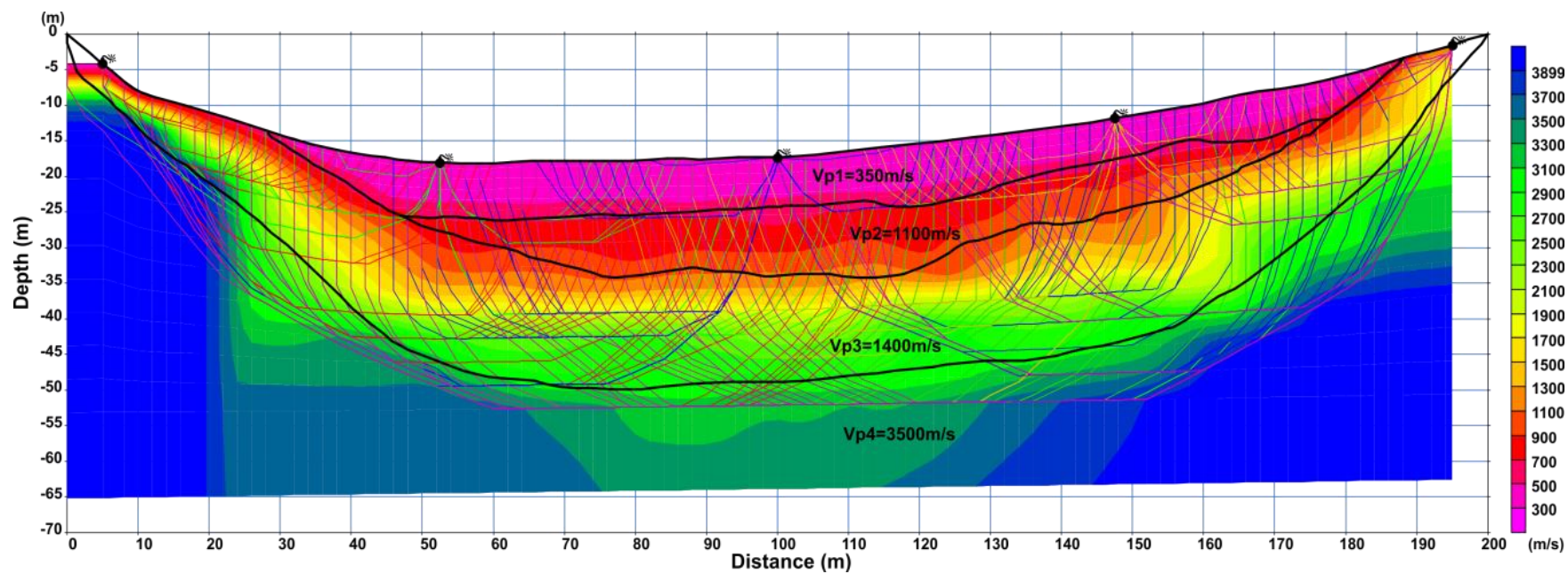
5.4.2 Ισαπόσταση δεκτών 2m



Σχήμα 5. 12. Δρομοχρονικό διάγραμμα των 5 πηγών για το μοντέλο με ισαπόσταση δεκτών 2m.



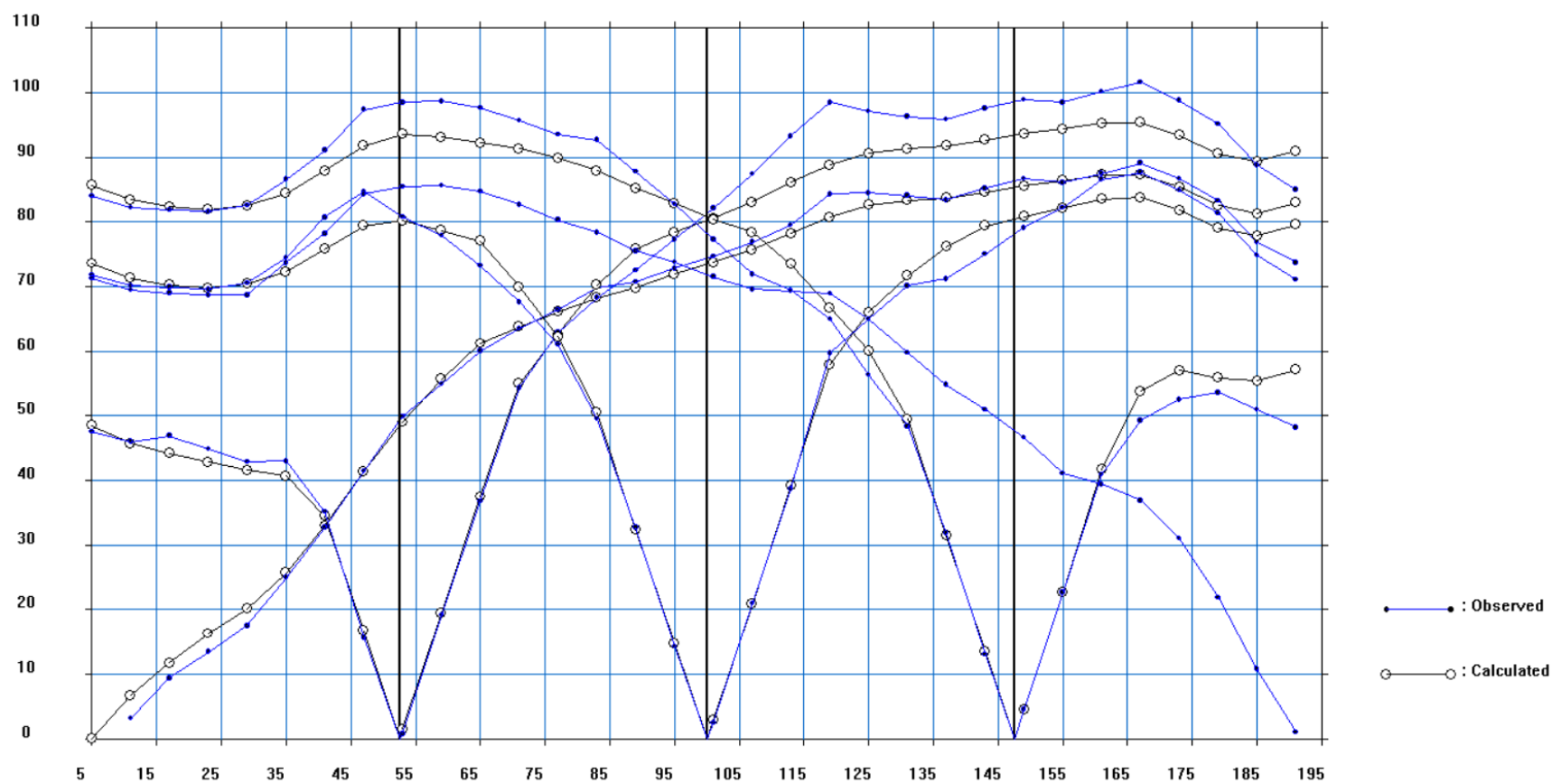
Σχήμα 5. 13. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 2m.



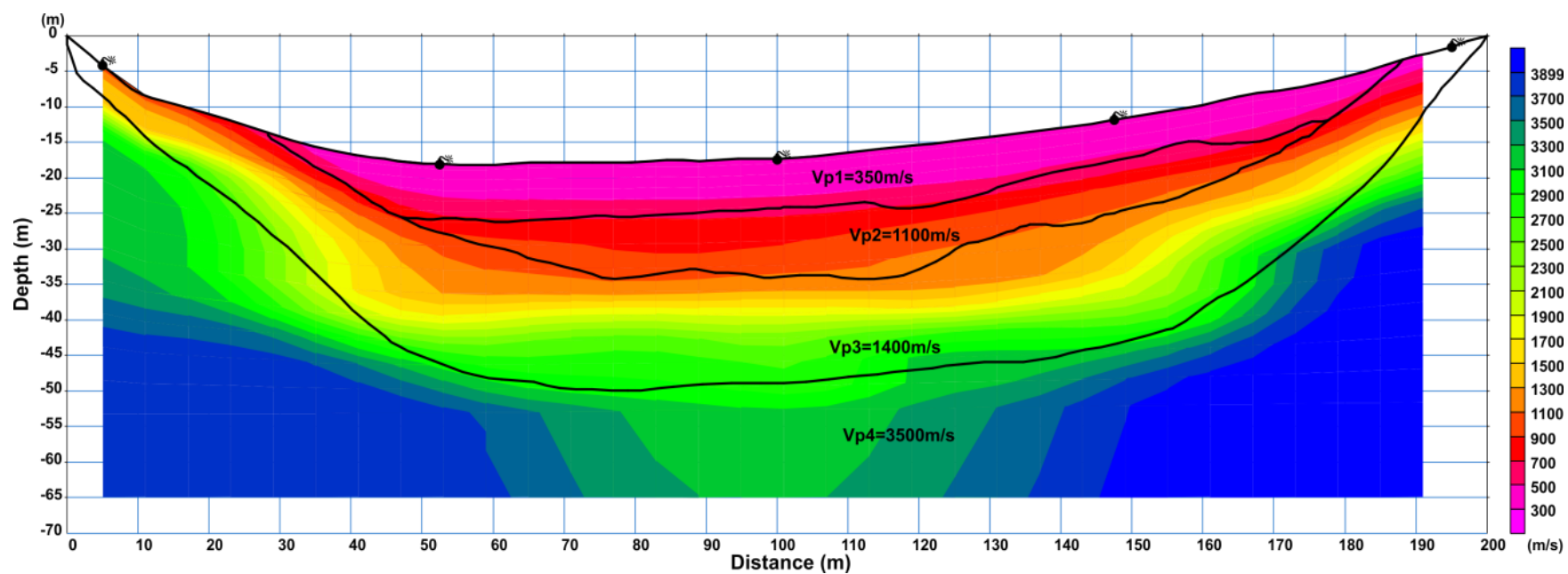
Σχήμα 5. 14. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση δεκτών 2m, με σεισμικές ακτίνες.



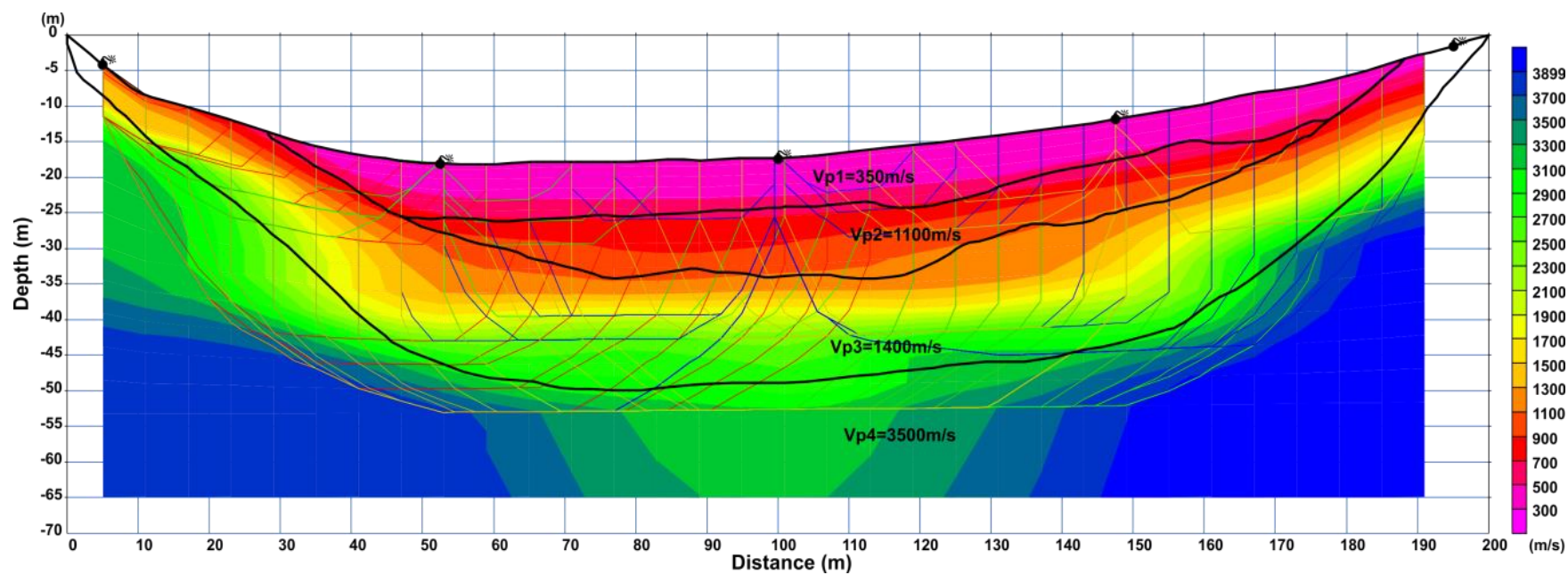
5.4.3 Ισαπόσταση δεκτών 6m



Σχήμα 5. 15. Δρομοχρονικό διάγραμμα των 5 πηγών για το μοντέλο με ισαπόσταση γεωφώνων 6m.



Σχήμα 5. 16. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση γεωφώνων 6m.

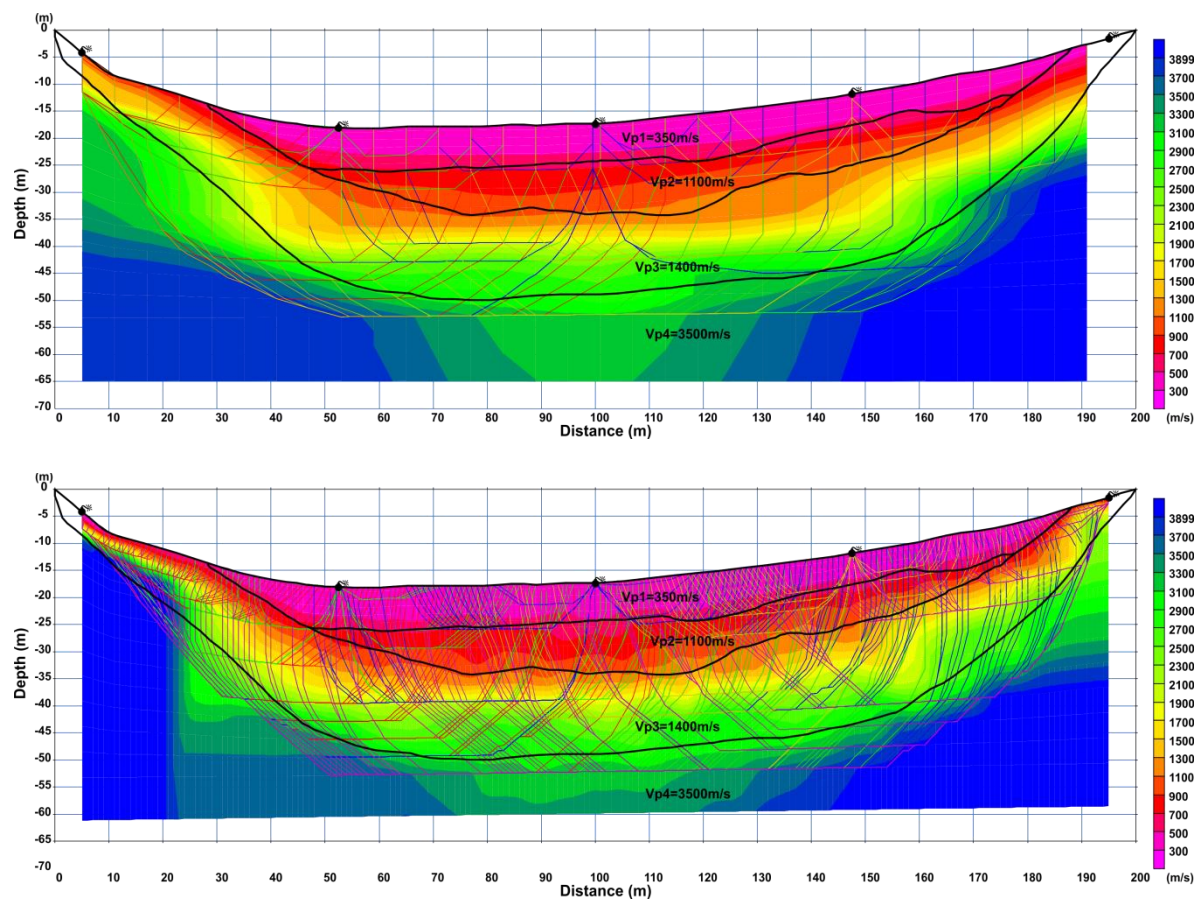


Σχήμα 5. 17. Μοντέλο ταχύτητας με ισαπόσταση γεωφώνων 6m, με σεισμικές ακτίνες.



5.5 Σύγκριση μοντέλων σεισμικής τομογραφίας και τεχνολογίας DAS

Στη συνέχεια, προχωρούμε στην σύγκριση των δύο τεχνολογιών, συμβατικής και νέας, που αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνοντας το μοντέλο ταχύτητας της τεχνολογίας DAS με ισαπόσταση δεκτών 1m (Σχήμα 5.18, κάτω) με το μοντέλο ταχύτητας της συμβατικής σεισμικής τομογραφίας με ισαπόσταση γεωφώνων 6m (Σχήμα 5.18, πάνω), παρατηρούμε ότι το πυκνότερο δίκτυο δεκτών δίνει μια εμφανώς καλύτερη εικόνα. Το γεγονός αυτό, γίνεται σαφές και από το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) του μοντέλου της τεχνολογίας DAS (RMSE=2.532236 ms) έναντι αυτού της συμβατικής σεισμικής τομογραφίας (RMSE=3.286598 ms).



Σχήμα 5. 18. Σύγκριση των μοντέλων ταχύτητας της τεχνολογίας DAS με ισαπόσταση δεκτών 1m (κάτω) και 6m (πάνω).



Αρχικά, παρατηρείται μια γενική ταύτιση των στρωμάτων όπως παρουσιάζονται στα μοντέλα ταχύτητας βάση της χρωματικής κλίμακας, με το ψηφιοποιημένο μοντέλο τεσσάρων στρωμάτων (μαύρες γραμμές) που έχουμε υπερθέσει σε αυτά και με τις δύο τεχνολογίες.

Ειδικότερα, η τεχνολογία DAS (Σχήμα 5.18 κάτω) οριοθετεί καλύτερα το μοντέλο έναντι της συμβατικής μεθόδου απόκτησης δεδομένων σεισμικής τομογραφίας (Σχήμα 5.18 πάνω), πράγμα που φαίνεται τόσο κάτω δεξιά στο μοντέλο όσο και κάτω αριστερά όπου οι σεισμικές ακτίνες (raypaths) είναι πολύ πυκνότερες λόγω του πυκνότερου δικτύου δεκτών και εμπερικλείουν εμφανώς καλύτερα τα κάτω όρια του μοντέλου.

Ακόμα, στο μοντέλο της σεισμικής τομογραφίας (Σχήμα 5.18 πάνω) παρατηρείται μια μεγαλύτερη παρεμβολή στο κέντρο, ενώ στο μοντέλο της τεχνολογίας DAS η παρεμβολή αυτή είναι πιο περιορισμένη.

Επιπλέον, με τη τεχνολογία DAS παρατηρείται απότομη μετάβαση από το πρώτο στο δεύτερο στρώμα και κυρίως από το δεύτερο στο τρίτο, με μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας και με πολύ καλή περιγραφή των διεπιφανειών. Αντιθέτως, στο μοντέλο της συμβατικής μεθοδολογίας οι αλλαγές της ταχύτητας είναι ομαλότερες από το ένα στρώμα στο άλλο, πράγμα μη θεμιτό καθώς τα στρώματα έχουν οριστεί ως ομοιογενή σώματα κατά την διαδικασία της προσομοίωσης.

Αναλυτικότερα, συγκρίνοντας τις τιμές της ταχύτητας διάδοσης των P κυμάτων (V_p) που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση με αυτές από τις δύο μεθόδους, γίνεται ξεκάθαρη η πολύ καλή ταύτιση κοντά στις διεπιφάνειες των στρωμάτων με την τεχνολογία DAS και η αδυναμία της σεισμικής τομογραφίας. Όσο απομακρυνόμαστε από τις διεπιφάνειες στο δεύτερο και τρίτο στρώμα παρατηρούμε αύξηση των τιμών της ταχύτητας και ειδικά στις περιοχές που δεν διέρχονται πολλές σεισμικές ακτίνες ή το δίκτυο δεκτών είναι αραιό (Σχήμα 5.18 πάνω). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει τη σημασία και την αναγκαιότητα ύπαρξης πυκνού δικτύου δεκτών το οποίο θα παράγει περισσότερες σεισμικές ακτίνες και κατ'επέκταση τη βέλτιστη απεικόνιση του υπεδάφους.

Τέλος, βάση όλων των παραπάνω γίνεται σαφές ότι η τεχνολογία DAS υπερτερεί εμφανώς της σεισμικής τομογραφίας, με το πυκνότερο δίκτυο δεκτών να δίνει μια αρκετά λεπτομερέστερη εικόνα του υπεδάφους σε όλο την έκταση του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, αξιολογείται τόσο η διαδικασία προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης όσο και τα αποτελέσματα που λάβαμε μετά την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων. Αναλυτικότερα, παρακάτω εξάγονται συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία και τέλος γίνεται αναφορά σε προτάσεις ως συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

6.1 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για την ευρέα εφαρμογή της τεχνολογίας DAS σήμερα εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στην αλλαγή κατεύθυνσης από την κλασσική σεισμική τομογραφία με χρήση συμβατικών χάλκινων καλωδίων, σε μια νέα καινοτόμα τεχνολογία η οποία δύναται να βελτιστοποιήσει τις υπάρχουσες διαδικασίες, πρακτικές και αποτελέσματα. Είτε πρόκειται για ενεργητική, είτε για παθητική σεισμική έρευνα με την τεχνολογία DAS, τα δεδομένα του DAS θα συνεχίσουν να συγκρίνονται με συμβατικά δεδομένα γεωφώνων, έτσι ώστε να αυξηθεί η εμπιστοσύνη της βιομηχανίας για την αξιοπιστία αυτής της τεχνολογίας.

Συμπερασματικά, όσον αφορά την διαδικασία της προσομοίωσης:

- Η τεχνολογία DAS με πυκνότερο δίκτυο δεκτών δίνει μια εμφανώς καλύτερη εικόνα έναντι της συμβατικής σεισμικής τομογραφίας.
- Ο υπολογιστικός χρόνος για την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων για κάθε θέση πηγής ήταν σχετικά μεγάλος.

Εν κατακλείδι, συμπεραίνεται ότι η τεχνολογία κατανεμημένων αισθητήρων σεισμικών κυμάτων οπτικής ίνας (DAS) υπερέχει σε σχέση με την συμβατική σεισμική



τομογραφία ως προς την ικανότητα διάκρισης των στρωμάτων του μοντέλου. Οι οπτικές ίνες επιτρέπουν την εξέταση του υπεδάφους σε όλο το μήκος του πεδίου ενδιαφέροντος καθώς λειτουργούν ως μια συστοιχία δεκτών τοποθετημένων σε πολύ μικρές ισαποστάσεις, γεγονός που παρέχει μια σαφώς λεπτομερέστερη εικόνα του υπεδάφους. Επιπλέον, η μεθοδολογία DAS δύναται να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις όπου η πραγματοποίηση της συμβατικής σεισμικής τομογραφίας αδυνατεί, τόσο για πρακτικούς όσο και για οικονομικούς λόγους.

6.2 Προτάσεις

Η τεχνολογία DAS ως νέα τεχνολογία έχει πολύ χώρο για ανάπτυξη και ευρεία εφαρμογή στο μέλλον σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, τόσο με την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο όσο και με την γενικότερη ανάπτυξη της τεχνολογίας και των οπτικοηλεκτρονικών συστημάτων. Προτείνονται για μελλοντικές μελέτες και έρευνες:

- Προσθήκη περισσότερων πηγών.
- Μετατροπή των αρχείων των πρώτων αφίξεων σε μορφή .SEG2, ώστε να γίνεται αυτόματη επιλογή των πρώτων αφίξεων στο πρόγραμμα Pickwin.
- Χρήση περισσότερων ή όλων των πρώτων αφίξεων.
- Εξέταση των συνθετικών δεδομένων με θόρυβο.
- Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων ανάκλασης.
- Εκτίμηση της διαφοράς των μοντέλων ταχύτητας για ισαποστάσεις 1m και 6m.
- Απεικόνιση του μοντέλου σε 3D.
- Εξέταση της εφαρμογής της τεχνολογίας DAS σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.



Βιβλιογραφία

1. Βαφείδης Αντώνιος, 2011. Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι: Σεισμικές μέθοδοι, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
2. Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. Landslide Types and Processes, Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75.
3. Daley M. Thomas, Freifeld M. Barry, Ajo-Franklin Jonathan, Dou Shan, Pevzner Roman, Shulakova Valeriya, Kashikar Sudhendu, Miller E. Douglas, Goetz Julia, Henninges Jan, Lueth Stefan, 2013. Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring, The Leading Edge, 936-942.
4. Hayes Jim, 2005. Fiber Optics Technician's Manual: 3rd edition, Thomson Delmar Learning, USA.
5. Johannessen Kjetil, Drakeley Brian, Farhadiroushan Mahmoud, 2012. Distributed Acoustic Sensing - A New Way of Listening to Your Well/Reservoir. Paper SPE149602 presented at the SPE Intelligent Energy International, Utrecht, The Netherlands, March 27-29.
6. Κρητικάκης Γιώργος, 2016. Εγχειρίδιο χρήσης για τους αλγόριθμους δημιουργίας συνθετικών σεισμικών δεδομένων «PSV_SYNTHETICS», Έκδοση 11.1, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
7. Κρητικάκης Γιώργος, 2008. Εγχειρίδιο λειτουργίας του λογισμικού επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων διάθλασης SeisImager, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. Manning, P. M., 2007, Techniques to enhance the accuracy and efficiency of finite-difference modelling for the propagation of elastic waves, PhD thesis, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
9. Mavko Gary, 2009. Conceptual Overview of Rock and Fluid Factors that Impact Seismic Velocity and Impedance, Stanford Rock Physics Laboratory, Stanford University Stanford, CA, USA.
10. Milne Craig, 2014. Silixa's Distributed Seismic Service Expands the Applications of Seismic Acquisition, Seismic Profile Silixa, Issue 9, 32-36.



11. Nellist G. John, 2001. Understanding Telecommunications and Lightwave Systems: an Entry- Level Guide, 3rd Edition, Willey-IEEE Press Understanding Science & Technology Series, USA.
12. Παπαϊωάννου Ιωάννης, Πλιάκας Στυλιανός, 2017. Μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικής ίνας στο σπίτι (FTTH – Fiber to the Home), A.E.I. Πειραιά T.T., Πειραιάς.
13. Randy Frank, 2000. Understanding Smart Sensors, 2nd Edition, Artech House, London.
14. Rassenfoss Stephen, 2014. In search of better reservoir imaging using fiber optic receivers downhole, JPT, 58-65.
15. Reynolds, M. John, 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, England.
16. Sass O. and Krautblatter M., 2007. Debris flow-dominated and rockfall dominated talus slopes: Genetic models derived from GPR measurements, Geomorphology 86, 176–192.
17. Savvaidis P. D., 2003. Existing Landslide Monitoring Systems and Techniques, In proceedings of the conference : From Stars to Earth and Culture, In honor of the memory of Professor Alexandros Tsioumis, School of Rural and Surveying Engineering, The Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece, 242-258
18. Schrott L. and Sass O., 2008. Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies. Geomorphology 93, 176–192.
19. Sheriff R. E., Geldart L. P., 1995. Exploration Seismology 2nd edition, Cambridge University Press, UK.
20. Silixa Ltd. Online at : <https://silixa.com/>
21. Σκαρλατούδης Ανδρέας, 2009. Προσομοίωση της σεισμικής κίνησης με τη χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
22. Στειακάκης Εμμανουήλ, 2012. Τεχνική Γεωλογία – Εδαφομηχανική, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
23. Τάτσης Βασίλειος, 2015. Δίκτυα οπτικών ινών, Τ.Ε.Ι Ηπείρου, Άρτα.
24. Vafidis A., 1988. Supercomputer finite difference methods for seismic wave propagation, PhD thesis, The University of Alberta, Edmonton, Canada.



25. Varnes D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., 11–33.
26. Wieczorek, G.F. and Snyder, J.B., 2009. Monitoring slope movements, Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA, 245–271.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

Πίνακας ΠΑ.1. Συντεταγμένες X(m), Z(m) για όλα τα στρώματα.

ΣΩΜΑ 1 (ΚΟΚΚΙΝΟ)		ΣΩΜΑ 2 (ΜΠΛΕ)		ΣΩΜΑ 3 (ΠΡΑΣΙΝΟ)		ΣΩΜΑ 4 (ΜΑΥΡΟ)	
X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.227	-2.563	3.227	-2.563	3.227	-2.563	0.493	-2.389
6.300	-5.200	6.300	-5.200	6.300	-5.200	1.552	-5.211
10.480	-8.165	10.480	-8.165	10.480	-8.165	3.624	-7.240
16.429	-9.934	16.429	-9.934	16.429	-9.934	5.895	-9.215
22.298	-11.709	22.298	-11.709	22.298	-11.709	8.425	-11.422
28.204	-13.539	28.204	-13.539	28.204	-13.539	11.022	-14.121
34.951	-15.567	28.912	-14.549	28.912	-14.549	13.668	-16.437
40.882	-16.824	32.341	-16.787	32.341	-16.787	16.809	-18.528
44.808	-17.352	34.700	-18.264	34.700	-18.264	20.161	-20.924
48.512	-17.705	37.546	-19.752	37.546	-19.752	23.828	-23.595
52.081	-17.969	40.677	-21.737	40.677	-21.737	26.993	-26.136
55.232	-18.058	43.158	-23.379	43.158	-23.379	31.061	-29.572
58.696	-18.101	45.231	-24.702	45.231	-24.702	34.610	-33.054
62.575	-17.948	47.039	-25.441	47.039	-25.441	38.380	-36.692
67.912	-17.837	51.698	-25.848	49.980	-26.819	42.679	-40.399
74.086	-17.748	54.843	-25.709	54.279	-28.158	46.979	-43.781
79.422	-17.704	60.442	-26.192	58.094	-29.260	51.808	-45.622
84.581	-17.528	63.957	-26.068	61.618	-30.025	57.033	-47.540
89.211	-17.572	67.363	-25.804	64.916	-31.172	61.333	-48.334
94.724	-17.263	70.976	-25.672	68.181	-31.965	65.598	-48.582
100.500	-17.219	74.416	-25.341	72.026	-33.045	69.666	-49.558
105.527	-16.911	77.723	-25.407	75.490	-33.993	74.231	-49.789
110.334	-16.381	81.345	-25.291	79.117	-34.092	78.960	-49.955
114.523	-15.940	84.631	-25.146	83.086	-33.475	82.235	-49.723
119.522	-15.411	88.194	-24.877	87.584	-32.825	85.310	-49.425
124.902	-14.793	91.799	-24.645	91.319	-33.282	89.709	-49.061
130.899	-14.176	94.990	-24.571	95.641	-33.546	93.744	-48.863
136.190	-13.470	99.703	-24.298	99.345	-34.076	97.580	-48.797
141.747	-12.765	102.035	-24.149	103.402	-33.605	100.954	-48.797
147.391	-11.795	105.475	-24.041	107.414	-33.722	104.261	-48.675
153.741	-10.825	108.679	-23.745	111.559	-34.164	107.443	-48.349
159.827	-9.766	112.466	-23.332	115.528	-34.075	110.280	-48.003
165.206	-8.620	114.748	-23.960	117.821	-33.590	114.216	-47.696
170.851	-7.738	116.824	-24.258	120.026	-32.870	118.218	-47.143



177.201	-6.459	120.436	-23.993	122.407	-31.782	121.906	-46.704
182.801	-5.136	123.545	-23.596	124.435	-30.636	125.625	-46.274
188.270	-3.275	126.654	-22.869	126.287	-29.555	129.495	-45.886
191.842	-2.390	129.961	-22.009	128.535	-28.938	134.753	-45.820
194.994	-1.608	132.938	-20.818	131.534	-27.968	139.238	-45.216
197.375	-0.714	136.113	-19.892	133.621	-27.350	143.617	-44.124
200.000	0.000	138.759	-19.231	135.767	-26.557	148.018	-43.240
200.000	-90.000	141.768	-18.701	138.060	-26.556	152.629	-42.122
0.000	-90.000	144.877	-18.106	140.530	-26.733	156.815	-40.594
0.000	0.000	148.118	-17.378	142.911	-26.292	160.500	-38.081
		151.624	-16.717	145.204	-25.498	164.554	-35.706
		154.700	-15.625	147.409	-24.881	168.092	-33.054
		157.925	-14.749	149.934	-24.234	171.896	-30.414
		159.703	-14.887	152.171	-23.646	175.633	-27.365
		161.398	-15.113	154.641	-23.381	179.173	-24.262
		163.093	-15.094	156.934	-22.676	182.909	-21.148
		164.903	-14.914	158.786	-21.882	185.623	-18.243
		168.294	-14.759	160.991	-20.912	188.347	-14.930
		170.749	-14.022	163.019	-20.118	190.464	-11.926
		172.777	-13.184	165.048	-19.148	192.713	-8.800
		175.203	-12.170	166.547	-18.354	194.967	-5.955
		177.998	-11.872	168.778	-17.472	197.708	-2.734
		180.350	-10.020	170.707	-16.458	200.000	0.000
		183.172	-7.815	173.294	-14.871	200.000	-90.000
		185.818	-5.434	175.322	-13.813	0.000	-90.000
		188.270	-3.275	177.998	-11.872	0.000	0.000
		191.842	-2.390	180.350	-10.020		
		194.994	-1.608	183.172	-7.815		
		197.375	-0.714	185.818	-5.434		
		200.000	0.000	188.270	-3.275		
		200.000	-90.000	191.842	-2.390		
		0.000	-90.000	194.994	-1.608		
		0.000	0.000	197.375	-0.714		
				200.000	0.000		
				200.000	-90.000		
				0.000	-90.000		
				0.000	0.000		

* Οι διαφορετικοί χρωματισμοί των αριθμών αναφέρονται στα αντίστοιχα στρώματα του Σχήματος 5.7.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄

Πίνακας ΠΒ.1. Απόσταση (m), Χρόνος (ms) για κάθε πηγή.

Απόσταση (m)	Χρόνος(ms) Πηγή@5m	Χρόνος(ms) Πηγή@52.5m	Χρόνος(ms) Πηγή@100m	Χρόνος(ms) Πηγή@147.55m	Χρόνος(ms) Πηγή@195m
5		47.68	71.85	84.02	71.35
6		47.33	71.52	83.65	70.97
7		47.01	71.24	83.39	70.76
8		46.7	70.91	83.05	70.42
9		46.41	70.6	82.74	70.03
10		45.99	70.26	82.35	69.66
11	3.29	46	70.18	82.28	69.52
12	5.39	46.07	70.29	82.33	69.53
13	6.48	46.11	70.29	82.37	69.53
14	7.52	46.2	70.25	82.38	69.53
15	8.33	46.34	70.27	82.33	69.47
16	8.52	46.36	69.9	81.91	68.97
17	9.43	46.91	69.92	81.95	69.03
18	10.03	46.63	69.75	81.8	68.84
19	10.78	46.32	69.69	81.71	68.75
20	12.07	46.28	69.93	82.01	69.14
21	12.7	45.87	69.87	81.93	69.05
22	13.07	45.4	69.73	81.8	68.9
23	13.57	44.96	69.64	81.69	68.77
24	14.15	44.52	69.57	81.63	68.72
25	14.59	44.05	69.5	81.55	68.62
26	14.99	43.51	69.41	81.45	68.54
27	15.41	42.76	69.41	81.47	68.56
28	15.7	41.83	69.28	81.32	68.37
29	17.55	42.98	70.59	82.65	68.71
30	18.77	42.79	71.26	83.28	70.33
31	19.98	42.79	71.92	83.94	70.97
32	21.09	42.74	72.47	84.52	71.54
33	22.26	42.78	73.11	85.15	72.17
34	23.36	42.74	73.67	85.7	72.71
35	25.03	43.04	74.53	86.61	73.73
36	26.4	43.27	75.31	87.39	74.52
37	27.67	43.45	76.07	88.11	75.23



38	28.95	44.14	76.89	88.81	75.93
39	30.1	43.3	77.88	89.51	76.59
40	31.36	37.92	79.48	90.3	77.36
41	32.73	35.29	80.76	91.14	78.23
42	33.74	31.51	82.04	91.8	78.79
43	35.74	28.57	82.8	93.15	80.27
44	36.66	24.73	83.03	93.78	80.79
45	38.59	23.43	84.04	95.17	82.25
46	40.24	19.63	84.6	96.42	83.52
47	41.46	15.75	84.72	97.45	84.39
48	44.04	13.46	84.77	98.77	85.72
49	45.82	10.3	84.04	99.13	86.15
50	47.02	7.98	83.14	99.14	86.12
51	48.09	4.1	82.28	98.91	85.85
52	49	0.84	82.28	98.6	85.54
53	49.96	0.89	80.85	98.57	85.53
54	50.8	3.82	80.34	98.53	85.52
55	51.3	6.45	79.58	98.19	85.19
56	52.13	10.11	79.15	98.21	85.19
57	52.9	12.99	78.68	98.25	85.25
58	53.73	15.86	78.15	98.31	85.3
59	54.9	19.27	77.9	98.71	85.69
60	55.64	22.37	77.09	98.56	85.54
61	56.85	24.79	76.65	98.8	85.8
62	57.56	28.14	75.7	98.46	85.41
63	58.23	30.56	74.61	98.08	84.91
64	59.39	35.42	74.16	98.09	85.05
65	60.05	36.83	73.24	97.73	84.72
66	60.64	39.62	72.29	97.35	84.35
67	61.17	42.4	71.33	97.02	84.01
68	61.79	45.35	70.49	96.73	83.71
69	62.69	49.12	70.09	96.63	83.63
70	63.06	51.48	68.71	96.18	83.14
71	63.6	54.35	67.7	95.73	82.71
72	64.08	59.44	66.67	95.25	82.26
73	64.55	60.01	65.62	94.8	81.79
74	65.05	61.77	64.49	94.4	81.4
75	65.47	62.04	63.19	94.08	81.03
76	65.97	62.31	62.06	93.78	80.71
77	66.47	62.91	61.04	93.54	80.37



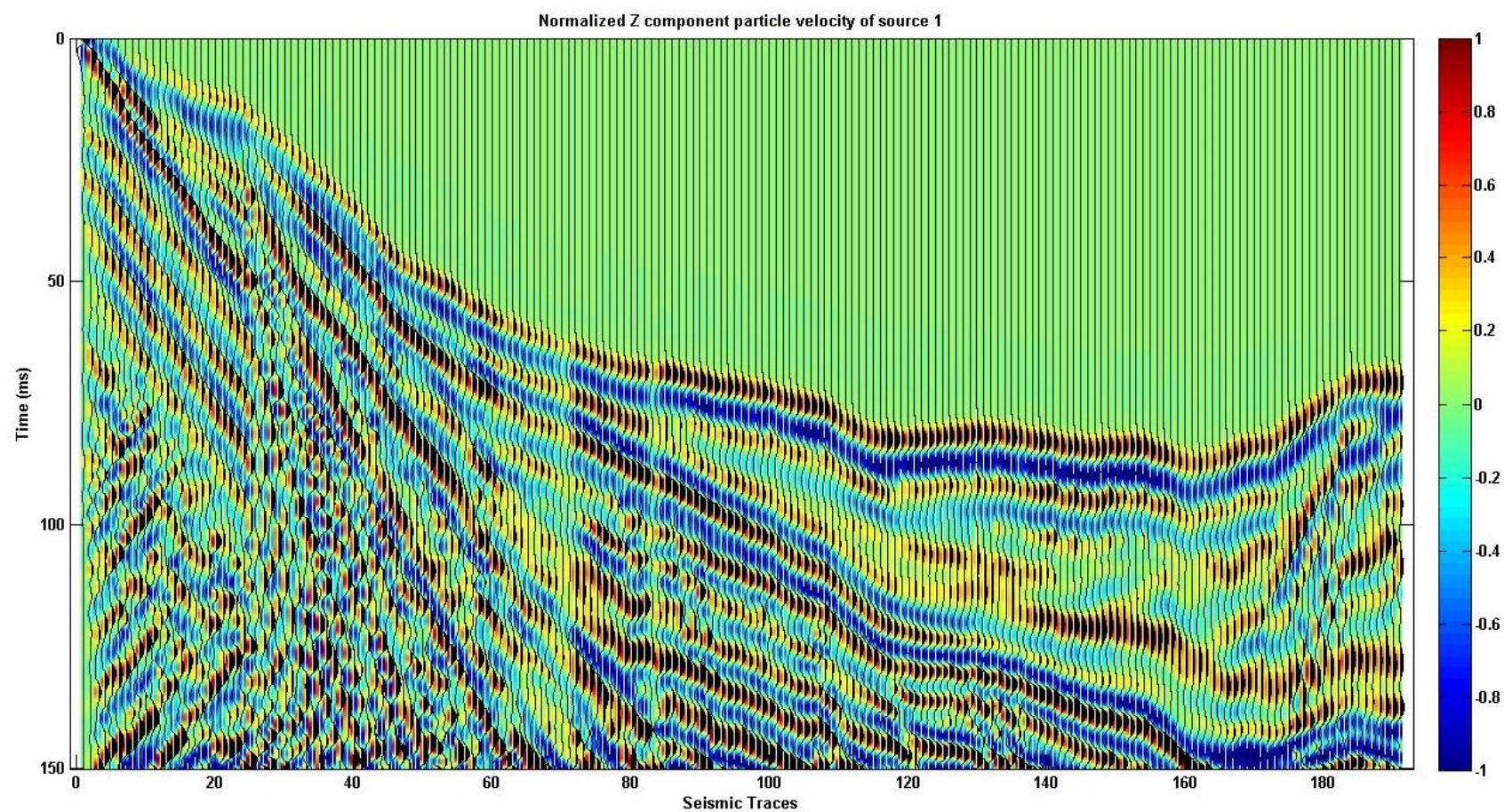
78	67.02	63.7	60.03	93.34	80.03
79	67.62	64.53	61.41	93.3	79.67
80	68.6	65.76	59.64	93.24	79.67
81	68.86	66.46	56.55	93.69	79.05
82	69.29	67.28	56.19	93.15	78.6
83	69.91	68.35	49.6	92.78	78.45
84	70.17	69.12	46.66	92.05	77.99
85	70.4	69.87	43.83	91.29	77.55
86	70.58	70.59	41.05	90.51	77.12
87	70.71	71.3	39.26	89.71	76.65
88	71.03	72.06	35.97	88.95	76.25
89	70.77	72.51	32.75	87.83	75.51
90	71.27	73.39	29.41	87.2	75.33
91	71.4	74.02	26.48	86.28	74.91
92	71.93	75	23.62	85.64	74.84
93	71.83	75.75	19.04	84.48	74.31
94	72.6	76.66	17.49	83.88	74.31
95	72.86	77.39	14.3	82.81	73.85
96	73.42	78.42	11.41	82.08	73.68
97	73.6	79.11	8.54	81.05	73.15
98	73.77	79.81	5.58	80.02	72.66
99	73.91	80.46	2.09	79	72.13
100	74.09	81.13	1.43	78.02	71.68
101	74.75	82.14	2.57	77.35	71.59
102	74.65	82.66	5.49	76.24	71.01
103	75.17	83.55	9.74	75.46	70.81
104	74.96	84.27	11.16	74.22	70.23
105	75.76	85.26	14.95	73.59	70.19
106	76.47	86.39	18.43	72.78	69.99
107	76.91	87.4	21.08	71.96	69.67
108	77.23	88.34	24.46	71.15	69.29
109	77.48	89.14	27.32	70.5	68.97
110	77.8	89.86	30.68	69.99	68.75
111	78.17	90.43	33.83	69.65	68.63
112	78.32	91.14	35.08	69.34	68.64
113	79.56	93.33	38.79	69.59	69.33
114	80.68	93.34	42.24	68.73	69.78
115	81.5	94.29	48.67	68.74	69.87
116	82.33	95.31	55.11	67.95	69.88
117	83.08	96.3	56.66	67.03	69.69



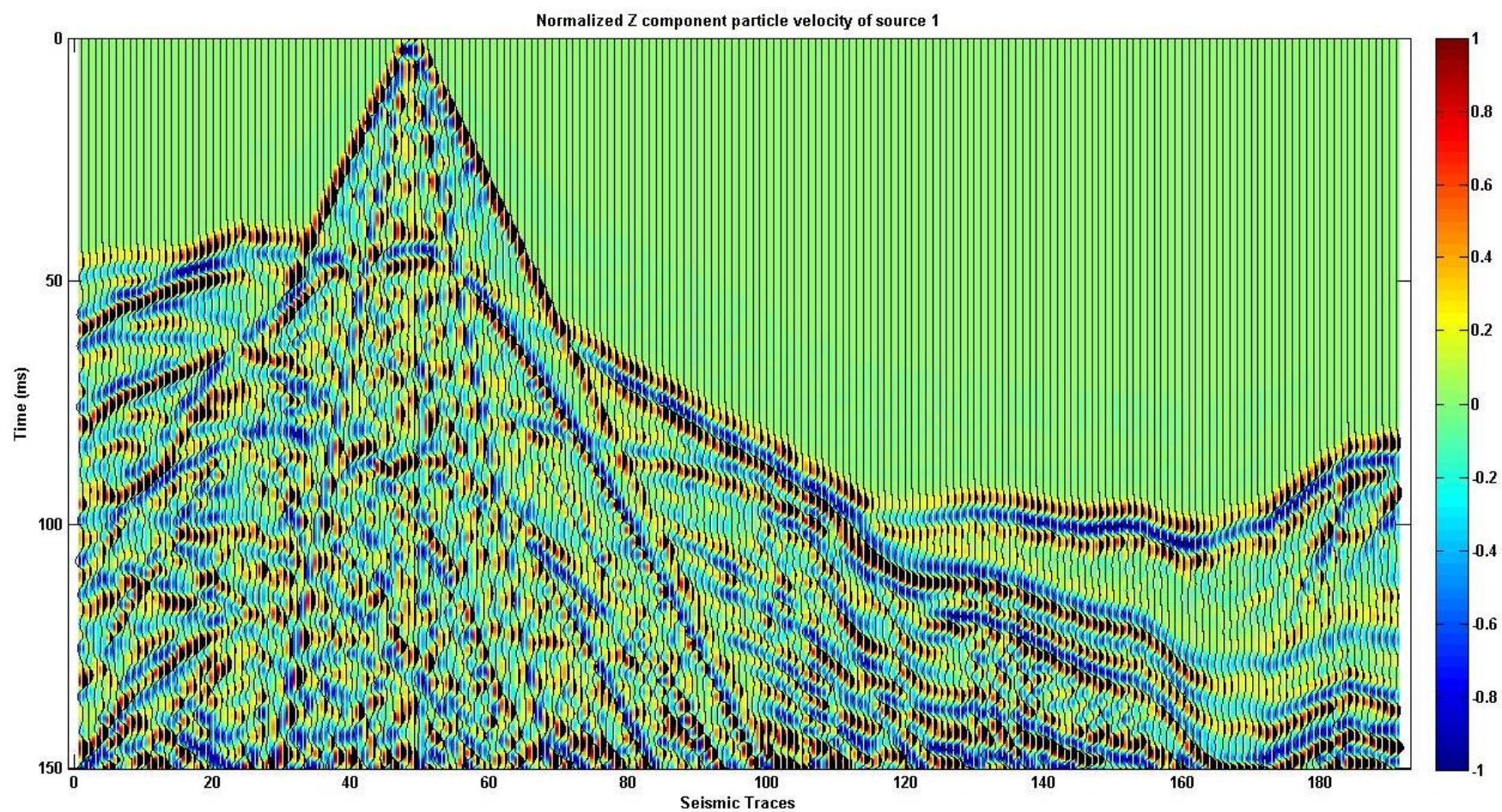
118	83.78	97.28	58.21	66.08	69.33
119	84.37	98.5	59.77	65.05	68.91
120	84.77	97.27	61.33	63.88	68.35
121	84.87	97.1	62.81	62.7	67.81
122	84.92	97.1	64.28	61.39	67.19
123	84.54	97.14	64.45	59.48	66.43
124	84.6	97.19	64.61	58	65.79
125	84.59	97.15	65.1	56.44	65.05
126	84.54	97.07	65.85	54.88	64.24
127	84.41	96.98	66.63	53.33	63.31
128	84.21	96.81	67.54	51.86	62.35
129	83.98	96.55	68.61	50.64	61.35
130	83.75	96.27	69.68	49.3	60.35
131	84.13	96.37	70.17	48.4	59.89
132	84.2	96.22	70.43	47.36	59.07
133	83.96	95.88	70.46	45.71	58.07
134	83.3	95.77	70.27	43.92	57.13
135	84.06	96.15	71.1	38.95	56.77
136	84.02	95.95	71.17	36.52	55.76
137	83.44	95.96	71.25	31.88	54.87
138	84.14	96.37	72.06	28.37	54.55
139	84.37	96.45	72.48	26.42	53.77
140	84.42	96.49	72.78	23.34	52.91
141	84.59	97	73.58	19.2	52.43
142	85.01	97.23	74.23	16.88	51.67
143	85.24	97.61	75	13.2	51.05
144	85.09	97.64	75.45	9.18	50.09
145	85.17	97.84	76.12	5.98	49.35
146	86.17	98.34	77.15	3.79	49.01
147	86.3	98.61	77.88	0.96	48.39
148	85.97	98.49	78.23	1.23	47.29
149	86.78	98.94	79.14	4.52	46.73
150	86.69	99.11	79.82	7.38	45.85
151	86.91	98.96	80.27	10.52	44.65
152	86.74	99.05	80.96	13.52	43.77
153	85.98	98.51	81.02	15.96	42.41
154	86.56	98.66	81.82	19.96	41.83
155	86.17	98.55	82.23	22.74	41.16
156	86.43	98.24	82.47	26.42	40.29
157	86.35	98.52	83.22	28.66	40.09



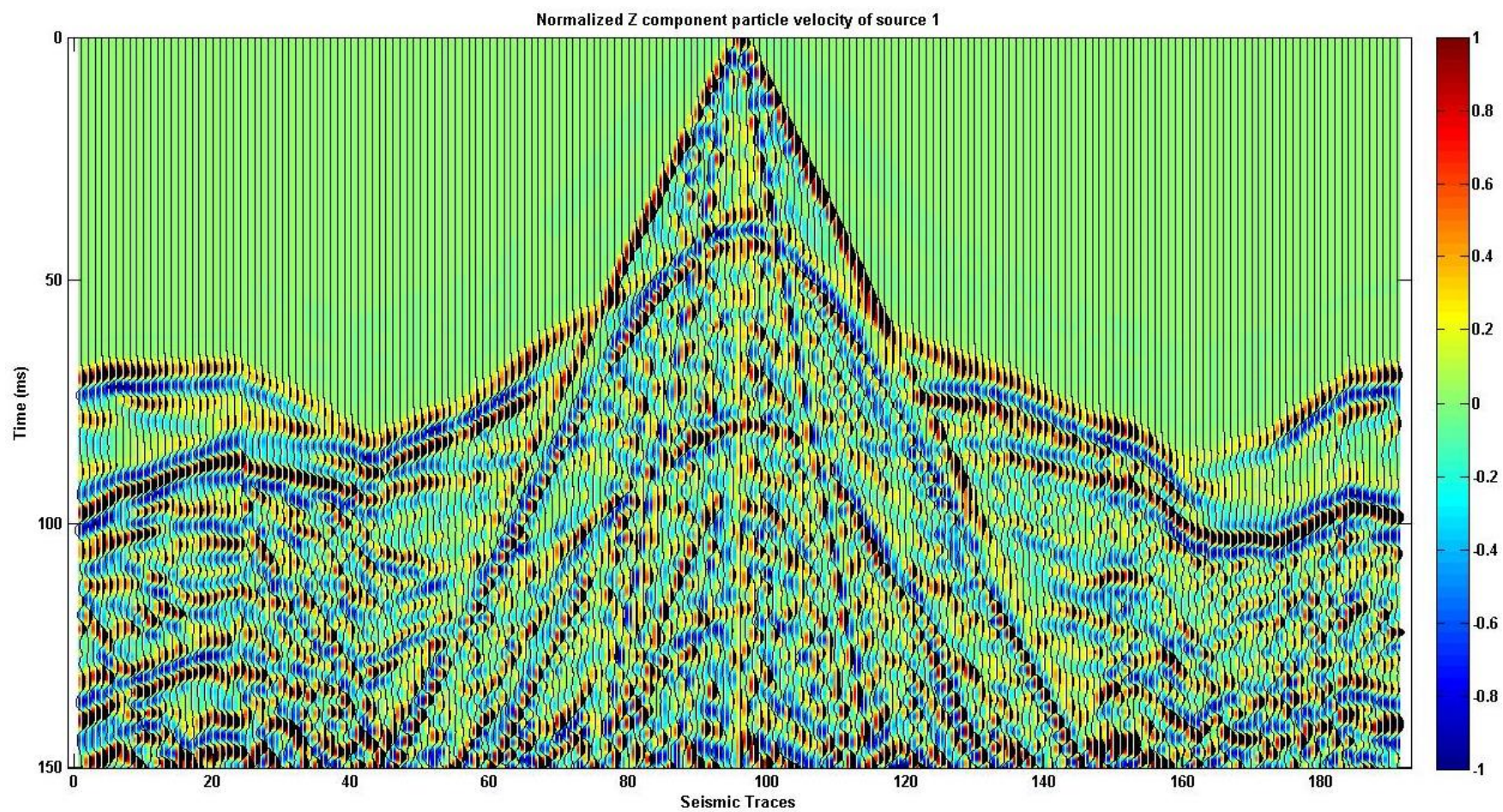
158	86.17	98.53	83.6	31.44	39.65
159	87.2	98.1	84.6	37.85	39.75
160	87.6	99.76	85.62	39.65	39.77
161	87.59	100.28	86.62	40.92	39.49
162	88.43	100.81	87.84	42.85	39.29
163	89.3	101.42	87.99	45.74	39.42
164	89.77	101.68	88.15	45.76	39.22
165	90.19	101.94	88.31	47.22	38.89
166	89.93	102.08	88.46	48.68	38.35
167	89.19	101.62	87.77	49.33	36.99
168	89.73	101.78	87.88	50.96	36.84
169	88.7	100.96	87.05	51.36	34.97
170	88.74	100.56	86.66	52.16	34.52
171	87.89	100.02	86.14	52.55	33.34
172	87.05	99.24	85.39	52.42	32.06
173	86.72	98.85	84.98	52.58	31.01
174	86.41	98.58	84.7	52.74	29.72
175	85.98	98.37	84.54	53.11	28.37
176	86.2	98.16	84.28	53.75	27.84
177	85.57	97.54	83.63	54.11	26.2
178	84.19	96.09	82.22	54.06	23.13
179	83.35	95.24	81.37	53.63	21.95
180	81.94	94.03	80.17	52.94	19.65
181	81.29	93.23	79.36	52.81	18.35
182	79.86	91.92	78.07	52.27	16.04
183	78.7	90.74	76.9	51.92	14.09
184	77.68	89.7	75.83	51.46	12.35
185	76.85	88.84	74.98	51.1	10.85
186	75.77	87.64	73.78	50.32	8.67
187	74.22	86.66	72.8	49.76	6.43
188	73.67	85.64	71.77	49.04	3.9
189	73.07	85.26	71.41	48.97	3.21
190	73.68	85.46	71.59	49.23	2.89
191	73.76	85.06	71.2	48.22	1.03
192	73.79	85.21	71.33	47.94	0.56
193	73.48	84.84	70.98	47.46	
194	74.15	85.11	71.2	47.55	
195	73.81	85.1	71.16	47.44	



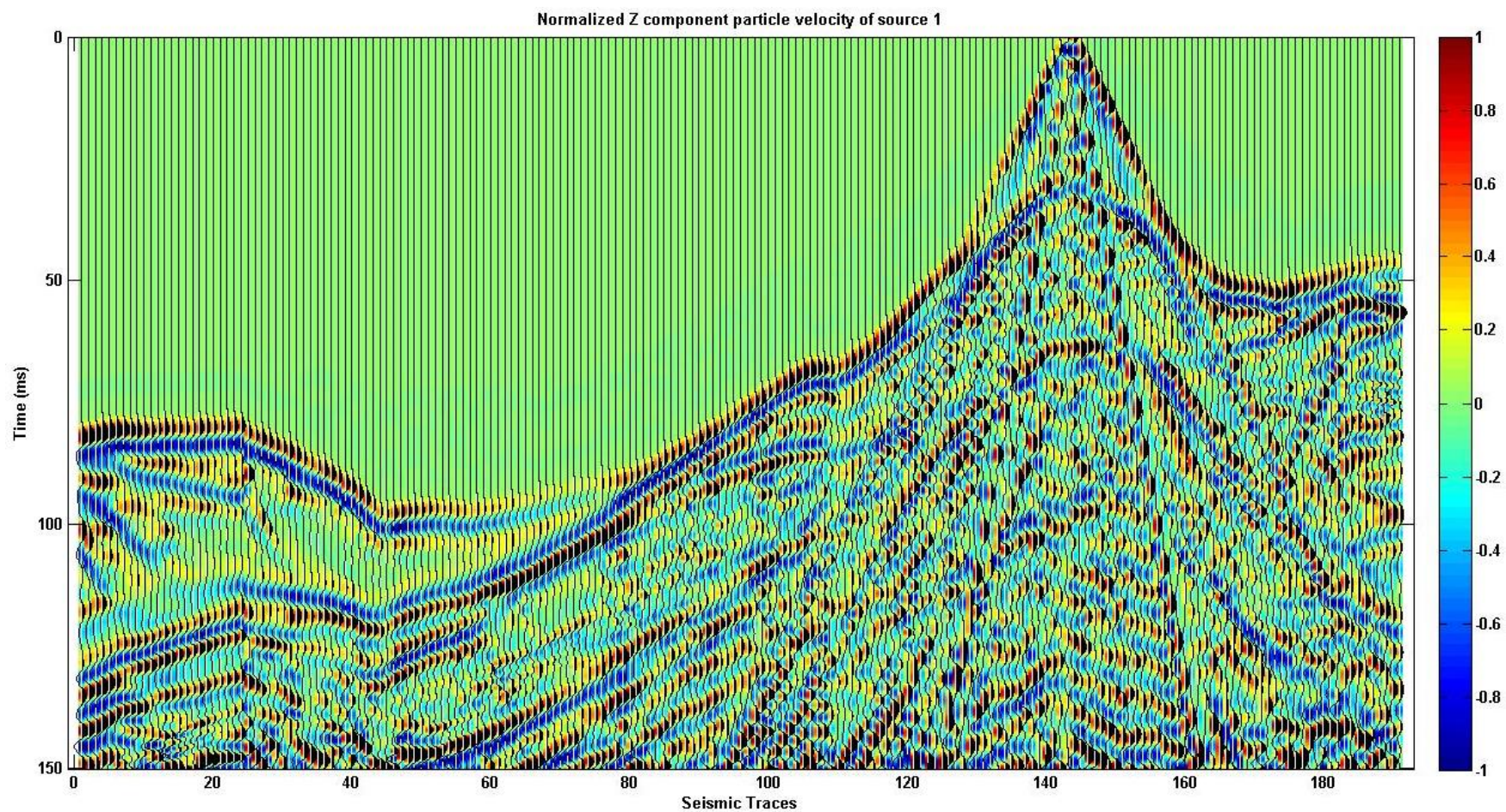
Σχήμα ΠΒ.1. Συνθετικά δεδομένα σεισμικής πηγής στα 5m.



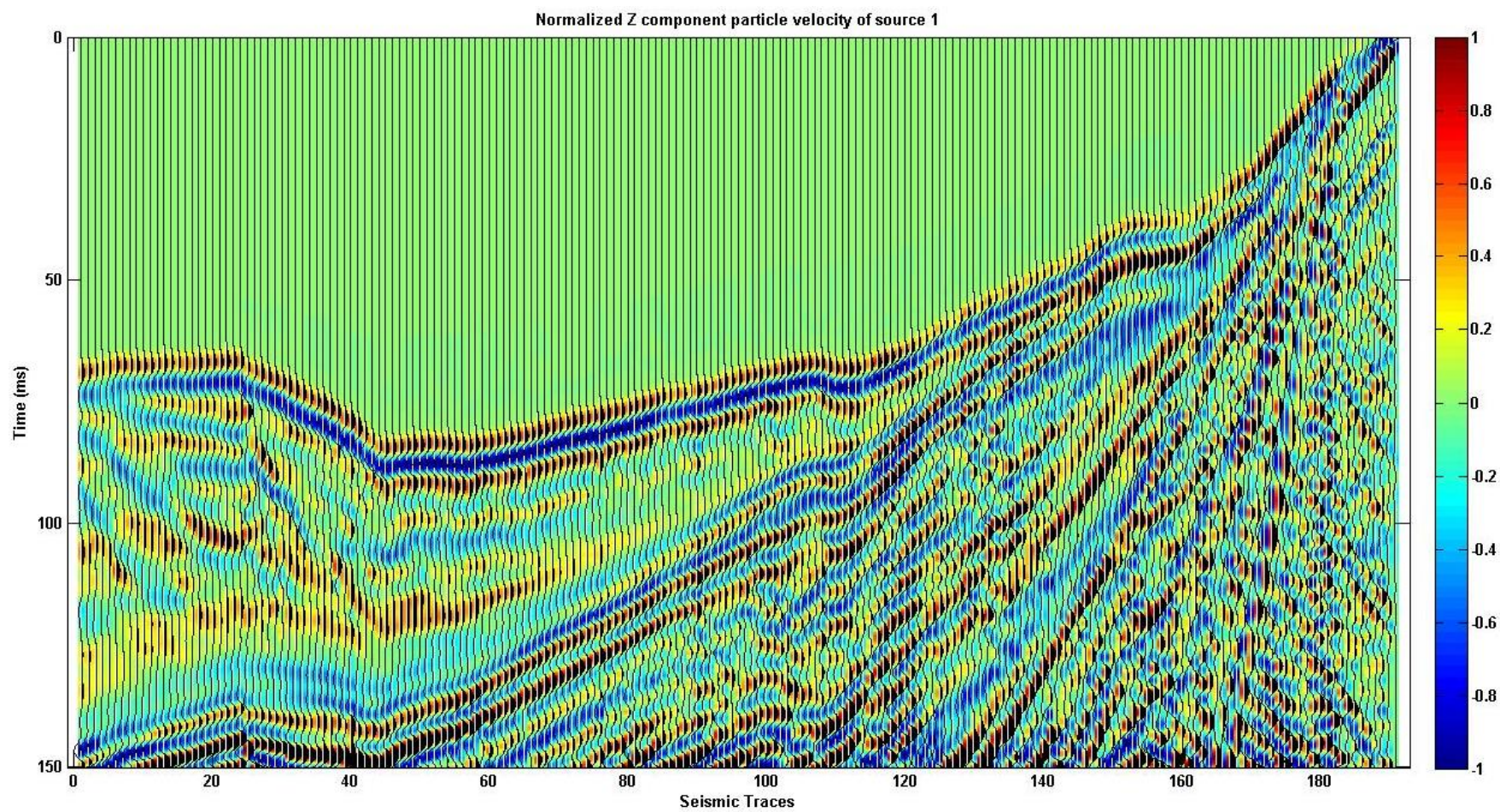
Σχήμα ΠΒ.2. Συνθετικά δεδομένα σεισμικής πηγής στα 52.5m.



Σχήμα ΠΒ.3. Συνθετικά δεδομένα σεισμικής πηγής στα 100m.



Σχήμα ΠΒ.4. Συνθετικά δεδομένα σεισμικής πηγής στα 147.5m.



Σχήμα ΠΒ.5. Συνθετικά δεδομένα σεισμικής πηγής στα 195m.



Πίνακας ΠΒ.2. Θέσεις γεωφώνων ανά 1m - Απόσταση(m), Υψόμετρο(m).

Απόσταση (m)	Υψόμετρο (m)
5	-4.2
6	-5.0
7	-5.8
8	-6.5
9	-7.2
10	-7.9
11	-8.4
12	-8.7
13	-9.0
14	-9.3
15	-9.6
16	-9.8
17	-10.1
18	-10.4
19	-10.7
20	-11.1
21	-11.4
22	-11.7
23	-12.0
24	-12.3
25	-12.6
26	-12.9
27	-13.2
28	-13.5
29	-13.8
30	-14.1
31	-14.4
32	-14.7
33	-15.0
34	-15.3
35	-15.7
36	-15.9
37	-16.1
38	-16.3
39	-16.5
40	-16.7
41	-16.9
42	-17.0
43	-17.2
44	-17.3



45	-17.5
46	-17.6
47	-17.6
48	-17.7
49	-17.8
50	-17.9
51	-18.0
52	-18.1
53	-18.1
54	-18.1
55	-18.2
56	-18.2
57	-18.2
58	-18.2
59	-18.1
60	-18.1
61	-18.0
62	-18.0
63	-17.9
64	-17.9
65	-17.9
66	-17.9
67	-17.9
68	-17.9
69	-17.8
70	-17.8
71	-17.8
72	-17.8
73	-17.8
74	-17.8
75	-17.8
76	-17.8
77	-17.8
78	-17.8
79	-17.8
80	-17.7
81	-17.7
82	-17.7
83	-17.6
84	-17.6
85	-17.6
86	-17.6
87	-17.6
88	-17.6



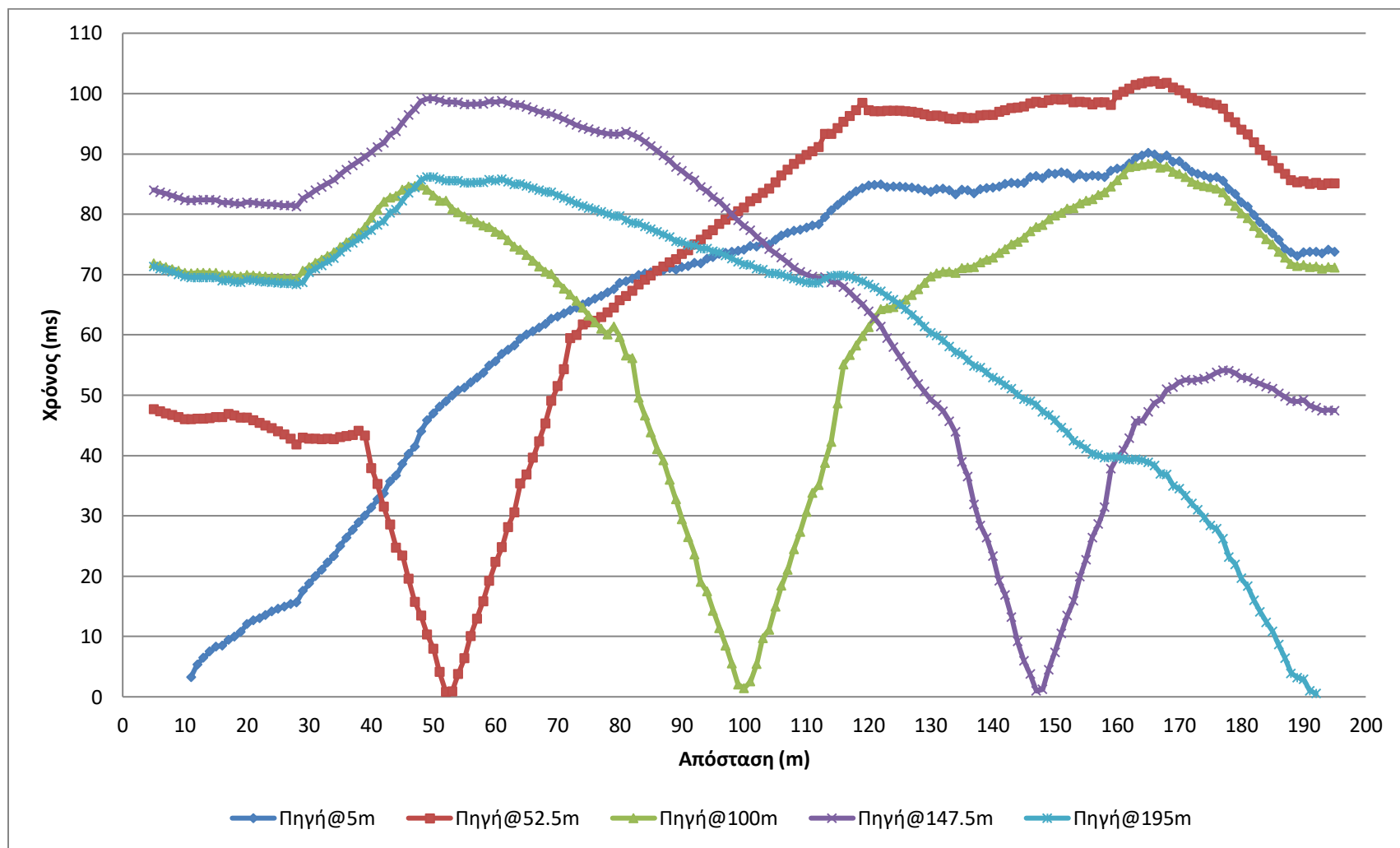
89	-17.7
90	-17.6
91	-17.6
92	-17.5
93	-17.4
94	-17.4
95	-17.4
96	-17.3
97	-17.3
98	-17.3
99	-17.3
100	-17.3
101	-17.2
102	-17.2
103	-17.1
104	-17.0
105	-17.0
106	-16.9
107	-16.8
108	-16.7
109	-16.6
110	-16.5
111	-16.4
112	-16.2
113	-16.1
114	-16.0
115	-15.9
116	-15.8
117	-15.7
118	-15.6
119	-15.5
120	-15.4
121	-15.3
122	-15.2
123	-15.0
124	-14.9
125	-14.8
126	-14.7
127	-14.6
128	-14.5
129	-14.4
130	-14.3
131	-14.2
132	-14.1



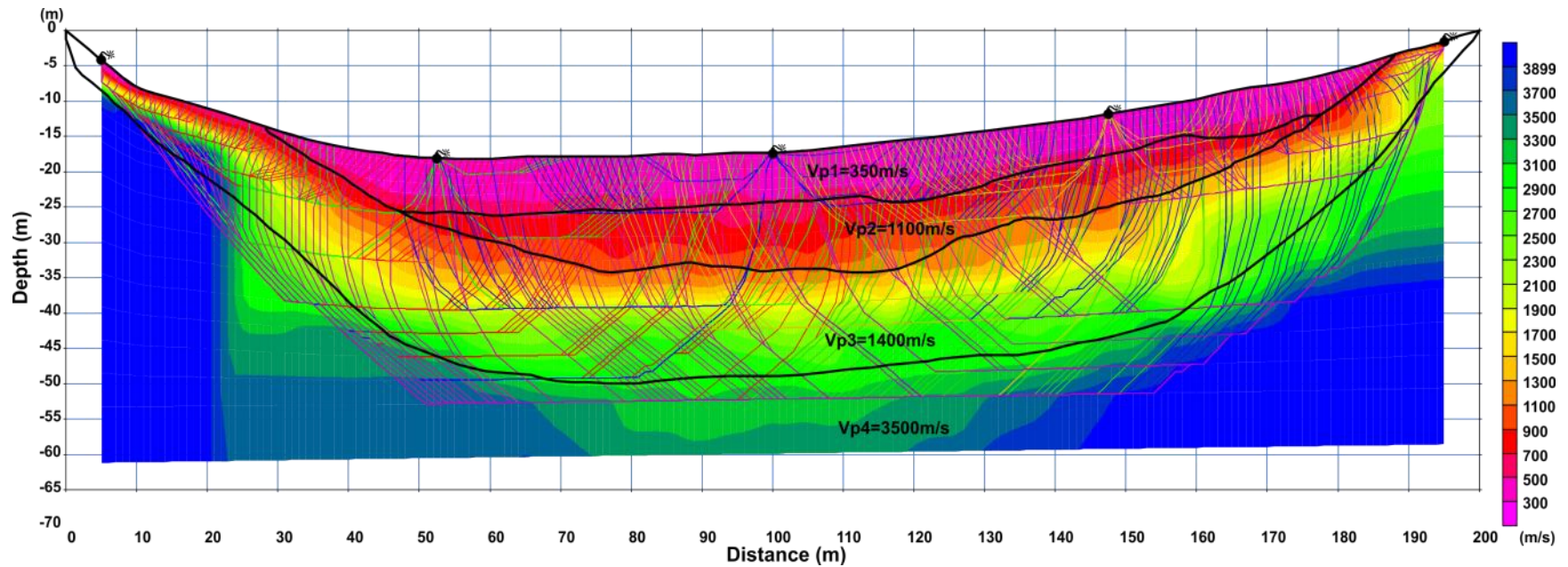
133	-14.0
134	-13.8
135	-13.7
136	-13.6
137	-13.4
138	-13.3
139	-13.2
140	-13.1
141	-12.9
142	-12.8
143	-12.6
144	-12.4
145	-12.2
146	-12.1
147	-11.9
148	-11.7
149	-11.6
150	-11.4
151	-11.3
152	-11.1
153	-10.9
154	-10.8
155	-10.6
156	-10.5
157	-10.3
158	-10.1
159	-10.0
160	-9.8
161	-9.5
162	-9.3
163	-9.1
164	-8.9
165	-8.7
166	-8.5
167	-8.3
168	-8.2
169	-8.0
170	-7.9
171	-7.7
172	-7.5
173	-7.3
174	-7.1
175	-6.9
176	-6.8



177	-6.6
178	-6.3
179	-6.1
180	-5.8
181	-5.6
182	-5.3
183	-5.0
184	-4.7
185	-4.4
186	-4.0
187	-3.7
188	-3.4
189	-3.1
190	-2.9
191	-2.6
192	-2.4
193	-2.1
194	-1.9
195	-1.6



Σχήμα ΠΒ.6. Δρομοχρονικό διάγραμμα για όλες τις πηγές σε περιβάλλον Microsoft Excel.



“Formula for success: Rise early, work hard, strike oil.”

J. Paul Getty

Founder, Getty Oil Company