



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Μεταπτυχιακή εργασία

Συμβολή της σεισμικής ανάκλασης στην απεικόνιση σύνθετων γεωλογικών
δομών στη Δυτική Ελλάδα

Αγγέλη Μαγδαληνή
Διπλ.Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

Εξεταστική Επιτροπή

Αντώνης Βαφείδης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Παντελής Σουπιός, Καθηγητής

Εμμανουήλ Μανούτσογλου, Καθηγητής

Χανιά,

Οκτώβριος , 2017

Περίληψη

Σε πολύπλοκες γεωλογικές δομές, οι γεωτρήσεις συχνά χάνουν το στόχο. Η περιοχή μελέτης είναι η Monkman, στους πρόποδες των Καναδικών Βραχωδών Όρεων. Πρόκειται για μια περιοχή τοπογραφικά δύσκολη, και στρωματογραφικά περίπλοκη. Χαρακτηρίζεται από μια ζώνη πτύχωσης-επώθησης, που είναι αποτέλεσμα της επικάθησης μιας σειράς εξωτικών τεκτονο-στρωματογραφικών πεδίων στο περιθώριο Ειρηνικού τύπου στη Βόρεια Αμερική. Η περιοχή αυτή έχει διερευνηθεί από πολλές εταιρείες από τα τέλη της δεκαετίας του '50, και έχουν ανακαλυφθεί αρκετά εμπορικά κοιτάσματα φυσικού αερίου σε ανθρακικούς σχηματισμούς. Στόχος είναι το ρηχό τμήμα των αντίκλινων, όπου η θραύση είναι διάχυτη και ενισχύεται το ποσοστό ροής του φυσικού αερίου. Ωστόσο, τα φρέατα των γεωτρήσεων χάνουν συχνά τη προτεινόμενη θέση στόχευσης, εξαιτίας των δύσκολων αυτών συνθηκών.

Το παράδειγμα που παρουσιάζεται, είναι μιας γεώτρησης που διανοίχθηκε το 1993, και εγκαταλείφθηκε λόγω της μεγάλης απόκλισης από το στόχο. Η απόκλιση προκλήθηκε από τους έντονα πτυχωμένους σχιστόλιθους πριν το ρηχό τμήμα. Η αρχική γεώτρηση είχε βασιστεί σε σεισμικά δεδομένα και επιφανειακή γεωλογία.

Αντικείμενο της διατριβής, αποτέλεσε η κατασκευή σεισμικού μοντέλου που προσομοιάζει τις γεωλογικές συνθήκες αυτής της γεώτρησης. Τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο είναι το πάχος των στρωμάτων, η πυκνότητά τους και οι σεισμικές ταχύτητες. Στο μοντέλο τοποθετήθηκαν 26 πηγές στην επιφάνεια και 15 γεώφωνα μέσα στη γεώτρηση (διάταξη VSP). Στη συνέχεια για κάθε πηγή σχεδιάστηκαν οι σεισμικές ακτίνες προς τα γεώφωνα. Από τις συντεταγμένες της πορείας της ακτίνας και πιο συγκεκριμένα από τα σημεία ανάκλασης, δημιουργήθηκε ένα προφίλ κοινού σημείου ανάκλασης-χρόνου (VSP-CDP). Σε αντίθεση με τα συμβατικά σεισμικά που εμφανίζουν μειωμένη διακριτική ικανότητα, ο μετασχηματισμός VSP-CDP απεικονίζει με λεπτομέρεια δομές κοντά στη γεώτρηση. Σε περίπλοκες γεωλογικές δομές, η καταγραφή των ανακλώμενων κυμάτων είναι περιορισμένη δημιουργώντας περιοχές σκιών. Η μεθοδολογία VSP-CDP, μπορεί να προσδιορίσει αυτές τις ζώνες και να βελτιώσει την ποιότητα της σεισμικής εικόνας.

Ο καθορισμός της πορείας των σεισμικών ακτίνων και ο υπολογισμός του χρόνου διαδρομής κάθε ακτίνας, προσδιορίζουν τη δομή του υπεδάφους, εκατοντάδες μέτρα μακριά από το φρέαρ της γεώτρησης. Η κατασκευή του μοντέλου, η

προσομοίωση των σεισμικών ακτίνων και η μετατροπή VSP-CDP έγιναν με αλγόριθμους της Matlab.

Η μεθοδολογία αυτή, μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με παρόμοια τεκτονική εξέλιξη, όπως στην περιοχή της Δυτικής Ελλάδος, για τον εντοπισμό κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ζώνης πτυχών και επωθήσεων στον Ελληνικό χώρο είναι η ζώνη της Πίνδου. Οι επωθήσεις της ζώνης της Πίνδου επί της ζώνης Γαβρόβου και της Ιόνιας ζώνης, είναι αποτέλεσμα των τεκτονικών διαδικασιών κατά τη σύγκρουση της Απούλιας πλάκας και της Πελαγονικής.

Η εξερεύνηση και η απόκτηση σεισμικών δεδομένων σε ζώνες πτύχωσης-επώθησης, αποτελεί πρόκληση εξαιτίας της γεωλογικής πολυπλοκότητας και του αυξημένου κόστους. Νέες μέθοδοι, και τεχνικές επεξεργασίας, συμβάλλουν στη λεπτομερή απεικόνιση σύνθετων δομών. Η μέθοδος VSP, μπορεί να δώσει την ευκαιρία για εμπορική επιτυχία, σε αρχικά ανεπιτυχείς γεωτρήσεις.

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή με τίτλο «Συμβολή της σεισμικής ανάκλασης στην απεικόνιση σύνθετων γεωλογικών δομών στη Δυτική Ελλάδα» εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η διατριβή είναι δομημένη στα εξής κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της σεισμικής τομογραφίας VSP και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματά της συγκριτικά με τις επιφανειακές μετρήσεις.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η οπτική μέθοδος VSP, βασικές έννοιες στα οπτικά δίκτυα, και αισθητήρες οπτικών δικτύων στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται δύο παραδείγματα εφαρμογής της σεισμικής μεθόδου VSP σε αρχικά ανεπιτυχείς γεωτρήσεις στην περιοχή Monkman. Η ιστορία της παραγωγής και οι επιπτώσεις στις επιχειρήσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της παθητικής τομογραφίας στην Ήπειρο και συγκρίνεται με τη μέθοδο VSP.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παραθέτονται οι παράμετροι κατασκευής σεισμικών μοντέλων σε πολύπλοκες γεωλογικές συνθήκες και το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθοδολογίας προσομοίωσης με τη χρήση σεισμικών ακτίνων.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, ακολουθεί το μοντέλο που κατασκευάστηκε, ο αλγόριθμος του καθορισμού της πορείας των σεισμικών ακτίνων καθώς τα αποτελέσματα και η ερμηνεία τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Δρ. Κρητικάκη Γεώργιο και Δρ. Οικονόμου Νικόλαο, για τις συμβουλές τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων Καθηγητή Βαφείδη Αντώνιο, για την καθοδήγηση και τη συνεχή βελτιστοποίηση του κώδικα ώστε να προσαρμοστεί σε ένα απαιτητικό μοντέλο.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1.....	12
1.1 Εισαγωγή	12
1.2 Σεισμική μέθοδος V.S.P ή Down – Hole	12
1.2.1 Σεισμική μέθοδος VSP με ολίσθηση (Offset VSP).....	13
1.2.2 Σεισμική μέθοδος VSP μηδενικής ολίσθησης (Zero-offset VSP).....	14
1.2.3 Σεισμική μέθοδος VSP μετατόπισης (Walkaway vsp).....	15
1.2.4 Ανάστροφη σεισμική μέθοδος VSP (Reverse VSP)	15
1.3 Θεμελιώδη χαρακτηριστικά της VSP	16
1.4 Εφαρμογές της VSP	20
Κεφάλαιο 2.....	21
2.1 Οπτική σεισμική μέθοδος VSP	21
2.2 Βασικές έννοιες στα οπτικά δίκτυα	22
2.2.1 Γεωμετρία της οπτικής ίνας	23
2.2.2 Βασικά Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα	26
2.2.3 Φαινόμενα που επηρεάζουν τη μετάδοση του φωτός	29
2.3 Τα οπτικά δίκτυα στην έρευνα υδρογονανθράκων	36
2.3.1 Αισθητήρας κατανεμημένης ανίχνευσης θερμοκρασίας DTS	36
2.3.2 Κατανεμημένη ακουστική ανίχνευση DAS	40
2.3.3 Ευφρές σύστημα παρατήρησης αγωγών (iPSS).....	45
Κεφάλαιο 3.....	46
3.1 Παράδειγμα εφαρμογής VSP μεθόδου στους πρόποδες της Βρετανικής Κολούμπια.46	46
3.2 Στρωματογραφία περιοχής.....	47
3.3 Ιστορία της εξερεύνησης	48
3.4 Περίπτωση μελέτης 1: Γεώτρηση Talisman Burlington Wolverine b-30-C/093-P-03 49	49
3.4.1 Συμβολή της σεισμικής μεθόδου VSP στη γεώτρηση Talisman.....	50
3.4.2 Μελέτη Περίπτωσης 1:	51
3.5 Μελέτη Περίπτωσης 2:.....	53
Η PCP Shell Boulder γεώτρηση, b-22-J 93- O-08.....	53
3.5.1 Το μετέπειτα στρωματογραφικό μοντέλο της αρχικής γεώτρησης	54
3.5.2 Σχεδιασμός της οριζόντιας γεώτρησης	55
3.5.3 Στρωματογραφικό μοντέλο της νέας γεώτρησης	58
3.5.4 Η ιστορία παραγωγής της γεώτρησης	59
3.5.5 Μελέτη Περίπτωσης 2: Οικονομικά στοιχεία	59
3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	60
Κεφάλαιο 4.....	62
4.1 Σύγκριση μεθόδου VSP με παθητική τομογραφία στη Δυτική Ελλάδα	62
4.2 Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδος.....	62
4.3. Εξωτερικές Ελληνίδες	67
4.3.1 Ιόνια ζώνη	67
4.3.2 Ζώνη Πίνδου ή Ζώνη Πίνδου-Ωλονού	72

4.3.3 Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολεως.....	75
4.4 Τεκτονική ζώνη της Πίνδου	76
4.5. Γεωτεκτονική εξέλιξη στη ζώνη της Πίνδου	78
4.6 Παθητική σεισμική τομογραφία.....	80
4.6.1 Παράδειγμα εφαρμογής παθητικής σεισμικής τομογραφίας στην Ήπειρο	81
4.6.2 Επεξεργασία δεδομένων	83
4.7 Σύγκριση της παθητικής σεισμικής τομογραφίας με τη γεωλογία της περιοχής.....	84
4.8 Σύγκριση της μεθόδου της παθητικής σεισμικής τομογραφίας με τη σεισμική μέθοδο VSP	94
Κεφάλαιο 5.....	97
5.1 Σεισμικά μοντέλα σε πολύπλοκες γεωλογικές δομές.....	97
5.1.1 Προβλήματα λόγω τοπογραφικού αναγλύφου	97
5.1.2 Προβλήματα κάτω από την επιφάνεια	98
5.2 Μέθοδοι δημιουργίας σεισμικού μοντέλου	99
5.2.1 Μέθοδος βασισμένη στις διεπιφάνειες.....	100
5.2.2 Μέθοδος βασισμένη σε κάρναβο ή κελιά	100
5.3 Προσομοίωση με τη χρήση σεισμικών ακτίνων (Ray tracing)	101
5.3.1 Τεχνική της σκόπευσης (Shooting method)	104
5.4 VSP-CDP μετασχηματισμός.....	105
5.4.1 Διαδραστική VSP-CDP απεικόνιση σε πολύπλοκες στρωματογραφικά δομές	110
Κεφάλαιο 6.....	117
6.1 Κατασκευή μοντέλου	117
6.2 Σχεδίαση σεισμικής ακτίνας σε μέσο μεταβαλλόμενης ταχύτητας $v(z)$.	125
6.2.2 Υπολογισμός της παραμέτρου ακτίνας p	127
6.2.3 Τα εργαλεία σε περιβάλλον Matlab, για μέσο μεταβαλλόμενης ταχύτητας.	128
6.2.4 Διόρθωση χρόνου ανάκλασης σε απλό κατακόρυφο χρόνο.....	132
6.2.5 Μετασχηματισμός VSP-CDP.....	134
6.3 Συμπεράσματα.....	138
Βιβλιογραφία	140
Παράρτημα	146

Κατάλογος σχημάτων

Εικόνα 1: Σεισμική μέθοδος VSP με ολίσθηση Borehole seismic services, Halliburton.com	14
Εικόνα 2: Σεισμική μέθοδος VSP μηδενικής ολίσθησης (K.Saud University)	14
Εικόνα 3: γεωμετρία μεθόδου VSP (K.Saud University)	15
Εικόνα 4: Σεισμική τομή μηδενικής μετατόπισης (K.Saud University)	15
Εικόνα 5: υπολογισμός ταχύτητας στρώματος. Η ευθεία των χρόνων διαδρομής του απευθείας κύματος (direct ray) έχει κλίση χρόνος/βάθος= 1/ταχύτητα, ενώ του ανακλώμενου (reflected ray) χρόνος/βάθος=-1/ταχύτητα.(King Saud University).....	20
Εικόνα 6-7: σεισμική καταγραφή μιας offset-vsp και καταγραφή κυμάτων (K.S.University).....	20
Εικόνα 8-9: παραδείγματα εφαρμογών της μεθόδου σε θαλάσσια περιοχή και στην ξηρά (King Saud University).....	21
Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση της οπτικής ίνας, (Κωτσίδης 2012)	23
Εικόνα 11: Δεκτή γωνία πρόσπτωσης-διάδοση σε οπτική ίνα (coolweb.gr).....	24
Εικόνα 12: Είδη οπτικών ινών, ανάλογα με τον αριθμό των καταστάσεων(mode) (Data Communication Technology Ltd).....	26
Εικόνα 13: Αντιστάθμιση απώλειας με οπτικό ενισχυτή, (Αβραμόπουλος ΕΜΠ).	30
Εικόνα 14: Διάταξη οπτικής ζεύξης, (Αβραμόπουλος ΕΜΠ).	31
Εικόνα 15: Ο μηχανισμός της Διασποράς (Τσαλαμάνης, 2011)	32
Εικόνα 15: Διεύρυνση του παλμού λόγω αυτοδιαμόρφωσης φάσης και διασποράς, (Αβραμόπουλος).	35
Εικόνα 16: DTS Σύστημα Brown, (Schlumberger 2014).	37
Εικόνα 17: μετρήσεις DTS από τη γεώτρηση Bunga Raya. Η θερμοκρασία μειώνεται από 116°C, σε 107° C, λόγω της παρουσίας φυσικού αερίου (Schlumberger 2014).....	39
Εικόνα 18: (Α)Μετρήσεις DTS σε οριζόντια γεώτρηση (Β) Τρισδιάστατη απεικόνιση θερμοκρασίας (Schlumberger 2014).....	40
Εικόνα 19: γεωμετρία εφαρμογής iDAS, σε επιφανειακές μετρήσεις, (Parker,Sergey,Farhadiroushan 2014).	42
Εικόνα 20: Δεδομένα iDAS από τα κανάλια 230 και 858, (Parker,Sergey,Farhadiroushan 2014).	43
Εικόνα 21: Επιφανειακή σεισμική δοκιμή iDAS, όπου η οπτική ίνα είναι συμμετρική γύρω από το κανάλι 544 , (Parker,Sergey,Farhadiroushan 2014).	44
Εικόνα 22: Σύγκριση δεδομένων iDAS, γεωφώνων σε μικρό βάθος και επιφανειακών γεωφώνων, (Parker,Sergey,Farhadiroushan 2014).	44
Εικόνα 23: στρωματογραφία περιοχής(Cooper,2004).....	47
Η γεώτρηση Talisman Burlington Wolverine είναι βορειοανατολικά του ποταμού Murray. Η γεώτρηση διανοίχθηκε το 1993 για να προσδιορισθεί η δομή με δισδιάστατα σεισμικά δεδομένα. Το στρωματογραφικό μοντέλο πριν την διάτρηση βασίστηκε σε σεισμικά δεδομένα και επιφανειακή γεωλογία. Η αρχική διάτρηση είχε εγκαταληφθεί λόγω της υπερβολικής ροπής στους συμπιεσμένους σχιστόλιθους του σχηματισμού Fernie.	49
Εικόνα 24: Στρωματογραφικό μοντέλο της γεώτρησης βασισμένο σε σεισμικά δεδομένα και επιφανειακή γεωλογία (Cooper,2004).	49
Εικόνα 25: VSP δεδομένα χωροθέτησης από την αρχική γεώτρηση (Cooper,2004).....	51

Εικόνα 26: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Boulder, με τις θέσεις των πηγών και τις δισδιάστατες σεισμικές γραμμές μελέτης (Cooper,2004).	53
Εικόνα 29: Ερμηνεία των τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων της Shell, πριν από την οριζόντια γεώτρηση. Με πορτοκαλί είναι η κορυφή του Τριαδικού σχηματισμού. Η εικόνα είναι κατά μήκος του προτεινόμενου αξιμουθίου της οριζόντιας γεώτρησης (Cooper,2004).	55
Εικόνα 30: Η σεισμική γραμμή κατά μήκος του αξιμουθίου της οριζόντιας γεώτρησης, από όπου ελήφθησαν τρισδιάστατα δεδομένα (Cooper,2004).	56
Εικόνα 31: Στρωματογραφική απεικόνιση πριν την οριζόντια γεώτρηση με δεδομένα από την αρχική γεώτρηση. Επιλέχθηκε η γωνία απόκλισης των 80° (Cooper,2004).	57
Εικόνα 32: Στρωματογραφική απεικόνιση, μετά την οριζόντια γεώτρηση. Η κλίση των στρωμάτων άλλαξε βαθμιαία στο τέλος της γεώτρησης, όπου η γεώτρηση διασχίζει από την κορυφογραμμή στο έμπροσθεν της δομής (Cooper,2004).	57
Εικόνα 33: Η ανύψωση της γεώτρησης Boulder (60 m) λόγω της πτύχωσης. Η επιφάνεια φυσικού αερίου-νερού (GWS Gas-Water Contact) βρίσκεται -1400 m από τη μέση στάθμη της θάλασσας. MSS: υψόμετρο από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Cooper, 2004).	58
Εικόνα 34: Οι διαδρομές των σεισμικών ακτίνων για γεωτρήσεις που βρίσκονται μπροστά και πίσω από την κορυφή της πτύχωσης. Η θέση της γεώτρησης σε σχέση με τη δομή είναι σημαντική για να απεικονιστούν οι σεισμικές ακτίνες της VSP (Cooper, 2004).	61
Εικόνα 35:Χάρτης γεωτεκτονικών ζωνών (Mountrakis et. Al 1983). Pa= ζώνη Παϊίκου, Ι= Ιόνια ζώνη, G= ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, Ρ= ζώνη Ωλονού-Πίνδου, Ρκ = ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, Sp = Υποπελαγονική ζώνη, Pl= Πελαγονική ζώνη, Al = ζώνη Αλμωπίας, Pa = ζώνη Παϊίκου, Ρe = ζώνη Παιονίας, Sm =Σερβομακεδομική μάζα, Rh = μάζα Ροδόπης, Cr= Περιροδοπική ζώνη, Ac= Αττικοκυκλαδική ζώνη, Ρx=ζώνη Παξών.	66
Εικόνα 36: Εξέλιξη των Εξωτερικών Ελληνίδων (Jones and Robinson,1991)	68
Εικόνα 38: Στρωματογραφική κολώνα της Ιόνιας ζώνης (Karakitsios 1995) 1:πηλίτες και ψαμμίτες, 2: ασβεστόλιθοι με chert, 3: πελαγικοί ασβεστόλιθοι με.....	71
κλαστικό υλικό, 4: πελαγικοί ασβεστόλιθοι με chert, 5: άργιλοι με chert, 6 έως 10:	71
πελαγικοί ασβεστόλιθοι, 11: ασβεστόλιθοι πλατφόρμας, 12: ασβεστόλιθοι μαύροι, 13: 71 γύψος και άλας, 14: δολομίτες, 15: λατυποπαγή, 16: filaments, 17: ammonites, 18:brachiopods	71
Εικόνα 39: Στρωματογραφική κολώνα Πίνδου (Σωτηρόπουλος 2004)	74
Εικόνα 40: Τεκτονικός χάρτης της Ζώνης της Πίνδου, όπου εμφανίζονται οι επωθήσεις και οι προεξοχές των επωθήσεων. (Σκουρλής 2002)	77
Εικόνα 41: Τροποποίηση του ανατολικού περιθωρίου της Απούλιας στη ΒΔ Ελλάδα εικόνα επάνω (ΑΑ', Doutsos et al. 1993) και στη Πελοπόννησο (ΒΒ', Doutsos et al. 2000).	79
Εικόνα 42: Η περιοχή μελέτης (Μαρτάκης, 2003).	81
Εικόνα 43: Το δίκτυο των σταθμών στην Ήπειρο. Με κίτρινο εμφανίζονται οι σταθμοί που μεταφέρθηκαν τον τελευταίο μήνα της καταγραφής. Με κόκκινο απεικονίζονται τα επίκεντρα των 434 σεισμών (Μαρτάκης, 2003).	82

Εικόνα 44: Κατανομή βάθους των μικροσεισμών κατά μήκος της τομής AA'.	
Παρατηρείται η απουσία σεισμικότητας στη δομή του εβαπορίτη. (Martakis, Tselentis, Karotas 2003).	85
Εικόνα 46: Μοντέλο απεικόνισης των ταχυτήτων V_p και του λόγου V_p/V_s σε βάθος 0 km (Μαρτάκης, 2003).	87
Εικόνα 47: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 1 και 2 km (Μαρτάκης, 2003).	87
Εικόνα 48: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 3 και 4 km (Μαρτάκης, 2003).	88
Εικόνα 49: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 5 και 6 km (Μαρτάκης, 2003).	88
Εικόνα 50: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 7 και 8 km (Μαρτάκης, 2003).	89
Εικόνα 51: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 9 και 10 km (Μαρτάκης, 2003).	89
Εικόνα 52: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της σεισμικής παθητικής τομογραφίας με τη γεωλογία της περιοχής. P: Παραμυθία, B: Βοτσαράς, K: κουρέντων-Κασιδιάρης, I: Πεδίο Ιωαννίνων, M: Μιτσικέλι, V: Βοϊδομάτης (Μαρτάκης, 2003).	91
Εικόνα 53: Εγκάρσιες τομές V_p (Μαρτάκης, 2003).	92
Εικόνα 54: Εγκάρσιες τομές V_p/V_s (Μαρτάκης, 2003).	93
Εικόνα 55: Η θέση της γεώτρησης, και του σεισμικών σταθμών στην περιοχή μελέτης. Οι κόκκινες γραμμές είναι σεισμικές γραμμές (Μαρτάκης, 2003).	94
Εικόνα 56: Σύγκριση της παθητικής σεισμικής τομογραφίας (V_p) της σεισμικής γραμμής με τη μέθοδο VSP (σε μεγέθυνση εικόνα κάτω). Το κόκκινο πλαίσιο οριοθετεί την περιοχή της γεώτρησης (Μαρτάκης, 2003).	95
Εικόνα 57: Σύγκριση της παθητικής σεισμικής τομογραφίας (V_p/V_s) της σεισμικής γραμμής με τη μέθοδο VSP (σε μεγέθυνση εικόνα κάτω). Το κόκκινο πλαίσιο οριοθετεί την περιοχή της γεώτρησης (Μαρτάκης, 2003).	96
Εικόνα 58: Σεισμική τομή από τη Νορβηγική θάλασσα Barents. (Alaëi 2005).	98
Εικόνα 59: Γεωμετρία VSP (a) πορείες των σεισμικών ακτίνων (b) ίχνος κάθε γεωφώνου στο χώρο βάθους-χρόνου (Yilmaz 2001)	106
Εικόνα 60: Δεδομένα μηδενικής-ολίσθησης VSP, σε διάφορα στάδια επεξεργασίας (a) αρχικά δεδομένα (b)ανοδικά κύματα, (c)μετά από στατικές διορθώσεις, ακολουθεί αποσυνέλιξη και φίλτρο συχνοτήτων (d) προσθετικό ίχνος. TT' είναι σωληνοκύματα που διαδίδονται μέσα στη γεώτρηση. (Data courtesy Amoco Europe and West Africa, Inc.)	107
Εικόνα 61: (a) γεωμετρία πηγής-γεωφώνου για VSP με ολίσθηση (b) VSP-CDP μετατροπή (Yilmaz 2001)	108
Εικόνα 62: (d)ανοδικά κύματα μετά την αποσυνέλιξη (e) VSP-CDP μετασχηματισμός των ανοδικών κυμάτων, πάνω στη χωροθετημένη επιφανειακή σεισμική τομή για σύγκριση (Adapted from Alam and Millahn, 1986; data courtesy Shell, U.K.)	109
Εικόνα 63: Μοντέλο ταχύτητας-βάθους από το οποίο παράγονται τα συνθετικά δεδομένα VSP για τα ανοδικά κύματα. Οι γραμμές απεικονίζουν την κάλυψη των σημείων ανάκλασης. Σε μεγαλύτερα βάθη η κάλυψη αυτή μειώνεται (Cassell 1984).	112

Εικόνα 64: (a) Συνθετικά VSP δεδομένα από το μοντέλο της εικόνας 63, (b) VSP-CDP μετασχηματισμός μετά τη πρώτη επανάληψη, βασισμένος σε μοντέλο με οριζόντια στρώματα (Cassell 1984).	113
Εικόνα 65: (a) Συνθετικά VSP δεδομένα εικόνας 64(a) (b) VSP-CDP μετασχηματισμός, μετά τη δεύτερη επανάληψη. Τροποποιήθηκε η κλίση του ανακλαστήρα για να προβλεφθεί το μεσαίο γεγονός (Cassell 1984).	114
Εικόνα 66: (a) Συνθετικά VSP δεδομένα (b) VSP-CDP μετασχηματισμός, μετά τη τρίτη επανάληψη (Cassell 1984).	115
Εικόνα 67: Σεισμική τομή VSP, μετά τη τελευταία επανάληψη. Τα δεδομένα των ιχνών υπερθέτονται σε κατακόρυφες στήλες. Το αποτέλεσμα συμφωνεί με το σεισμικό μοντέλο (Cassell 1984).	116
Εικόνα 68: Το στρωματογραφικό μοντέλο στην περιοχή της γεώτρησης Talisman Burlington Wolverine.	117
Εικόνα 69: Το σεισμικό μοντέλο. Η χρωματική διαβάθμιση απεικονίζει τον αριθμό των στρωμάτων.	120
Εικόνα 70: Η γεωμετρία του πειράματος στο οποίο γεώφωνα κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας τοποθετήθηκαν σε 15 θέσεις μέσα στη γεώτρηση, ενώ η σεισμική πηγή, σε 26 θέσεις στην επιφάνεια εκατέρωθεν της γεώτρησης.	121
Εικόνα 71: Τμηματικές ταχύτητες στους σχηματισμούς του μοντέλου.	122
Εικόνα 72: Κατανομή της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας.	122
Εικόνα 73: Σεισμικές συνθετικές καταγραφές (κατακόρυφη συνιστώσα) της πρώτης πηγής, όπου ο οριζόντιος άξονας είναι τα βάθη των γεωφώνων σε m, και ο κατακόρυφος ο χρόνος καταγραφής σε ms.	123
Εικόνα 74: Σεισμική εικόνα από την πηγή 19, 100 m πριν τη γεώτρηση. Ο οριζόντιος άξονας είναι τα βάθη των γεωφώνων σε m, και ο κατακόρυφος ο χρόνος καταγραφής σε msec.	124
Εικόνα 75: Σεισμική εικόνα από την πηγή 20, 100 m μετά τη γεώτρηση. Ο οριζόντιος άξονας είναι τα βάθη των γεωφώνων σε m, και ο κατακόρυφος ο χρόνος καταγραφής σε msec.	125
Εικόνα 76: Κατά τη διάδοση σε μοντέλο με πολλά στρώματα διαφορετικής ταχύτητας, οι διεπιφάνειες είναι οριζόντιες και η διάδοση των ακτίνων απλή.	126
Εικόνα 77: Σχεδιασμός ανακλώμενων σεισμικών ακτίνων για τη πηγή 12 στη θέση ($x=2400$ m, $z=0$ m) και οριζόντιο ανακλαστήρα στα 500 m.	130
Εικόνα 78: Διάταξη P-P κυμάτων. Η πορεία των σεισμικών ακτίνων από την πρώτη πηγή(a), και η καταγραφή του συνολικού χρόνου για κάθε ακτίνα (b).	131
Εικόνα 79: Διάταξη P-S κυμάτων, Η πορεία των σεισμικών ακτίνων από την πρώτη πηγή(a) και η καταγραφή του συνολικού χρόνου για κάθε ακτίνα (b).	132
Εικόνα 80: Διόρθωση χρόνου σε απλό κατακόρυφο χρόνο για πηγή και γεώφωνο στην επιφάνεια, και ένα ανακλαστήρα.	132
Εικόνα 81: Διόρθωση χρόνου σε απλό κατακόρυφο χρόνο για πηγή στην επιφάνεια, και γεώφωνο σε κάποιο βάθος.	133
Εικόνα 82: Αρχική εικόνα της πηγής 21 αριστερά, διόρθωση όλων των σεισμικών ιχνών κατά dt εικόνα δεξιά. Στον οριζόντιο άξονα είναι τα βάθη των γεωφώνων και στον κατακόρυφο ο χρόνος καταγραφής σε ms.	134
Εικόνα 83: (a) καταγραφές για κάθε σημείο ανάκλασης για τον πρώτο ανακλαστήρα στα 500 m, (b) μετά την εφαρμογή του φίλτρου medfilt2, για την απαλοιφή των καθοδικών	

κυμάτων. Στον οριζόντιο άξονα, είναι το σημείο ανάκλασης σε m, και στον κατακόρυφο ο χρόνος καταγραφής σε msec.....	135
Εικόνα 84: Μετατροπή VSP-CDP για το μοντέλο της γεώτρησης. Στον άξονα x είναι τα σημεία ανάκλασης (που είναι η αρχή του οριζόντιου άξονα σε σχέση με το σεισμικό μοντέλο), ενώ στον κατακόρυφο ο διορθωμένος χρόνος ms.....	136
Εικόνα 85: Υπέρθεση της απεικόνισης VSP-CDP, πάνω στο μοντέλο. Στον άξονα x είναι τα σημεία ανάκλασης σε (m), ενώ στον κατακόρυφο ο διορθωμένος χρόνος ms.....	137
Πίνακας 6.1: Πίνακας ταχυτήτων και πυκνότητας σε κάθε σχηματισμό.	118
Πίνακας 6.2: Διαστάσεις και παράμετροι μοντέλου.....	120
Πίνακας 6.3: Στοιχεία για τις θέσεις της σεισμικής πηγής.	121
Πίνακας 6.4: Οι συντεταγμένες της πορείας των ακτίνων σε πέντε γεώφωνα και για τη πηγή 12 στη θέση ($x=2400$ m, $z=0$ m) και οριζόντιο ανακλαστήρα στα 500 m	130

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Οι σεισμικές έρευνες ανήκουν στην κατηγορία των γεωφυσικών μεθόδων και εφαρμόζονται στην εξερεύνηση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ένας μεγάλος αριθμός κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου έχει ανακαλυφθεί σε δομές οι οποίες έχουν επιλεγεί από τις σεισμικές μεθόδους. Τις τελευταίες δεκαετίες, ουσιαστική πρόοδος έχει επιτευχθεί στην ανάπτυξη οργάνων, μεθόδων συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων που απαιτούνται στην σεισμική έρευνα. Η πρόοδος αυτή, αποδίδεται στην πειραματική μελέτη των σεισμικών κυμάτων για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Μέχρι πρότινος, η πειραματική μελέτη με τις σεισμικές μεθόδους βασιζόταν στην ανάλυση των κυμάτων στην επιφάνεια. Αυτή ήταν αρκετά αποτελεσματική για απλές γεωλογικές δομές. Σε πιο περίπλοκες γεωλογικές συνθήκες, τα δεδομένα συνδύεταν με δυναμικές και κινηματικές πτυχές των κυμάτων και όπως καταγράφονταν στην επιφάνεια, ήταν ανεπαρκή για την κατανόηση της φύσης της διάδοσης των κυμάτων. Σε αυτή την κατεύθυνση, κινήθηκε το Ινστιτούτο Φυσικής της Γης της Ακαδημίας Επιστημών του USSR όπου το 1959 οδήγησε στην ανάπτυξη της σεισμικής μεθόδου VSP.

1.2 Σεισμική μέθοδος V.S.P ή Down – Hole

Στην VSP μέθοδο το σεισμικό κύμα το οποίο παράγεται στην επιφάνεια της γης καταγράφεται από γεώφωνα μέσα στη γεώτρηση. Τα γεώφωνα βρίσκονται σε διάφορα βάθη, σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και καταγράφουν τους χρόνους των πρώτων αφίξεων. Αποδίδει σεισμική τομή (vertical seismic profile-VSP), και χρησιμοποιεί κύματα χώρου P (διαμήκη), SV (εγκάρσια κατακόρυφα πολωμένα) και SH (εγκάρσια οριζόντια πολωμένα). Ακόμη, αξιοποιεί τα σωληνοκύματα, και τα κύματα Stoneley με την μέθοδο της αντιστροφής.[1]

Ενώ το γεώφωνο τοποθετείται πολύ κάτω από την επιφάνεια της γης κατά την καταγραφή των VSP δεδομένων, αποκρίνεται και σε ανοδικά και καθοδικά σεισμικά γεγονότα. Τα δεδομένα που καταγράφονται, μπορούν να δώσουν γνώσεις πάνω σε θεμελιώδεις ιδιότητες γένεσης σεισμικών κυμάτων και στην κατανόηση των διαδικασιών

ανάκλασης και μετάδοσης στην γη. Μια κύρια χρήση των δεδομένων VSP είναι ποια γεγονότα τα οποία φτάνουν στην επιφάνεια είναι πρωτογενείς ανακλάσεις και ποια πολλαπλές.

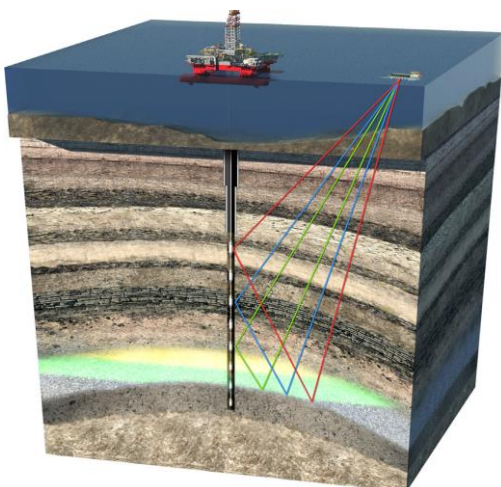
Η θέση της πηγής σε σχέση με τα γεώφωνα, καθορίζει τις διατάξεις VSP. Η **αζιμουθιακή σεισμική τομή** (azimuthal VSP), προκύπτει όταν η πηγή κινείται προς διάφορες διευθύνσεις. Στην περίπτωση όπου η πηγή τοποθετείται στην γεώτρηση και τα γεώφωνα στην επιφάνεια, τότε ορίζεται η **ανάστροφη σεισμική μέθοδος VSP** (reversed VSP - Up Hole).

Η ανάστροφη VSP πλεονεκτεί έναντι της μεθόδου VSP, καθώς τα δεδομένα από την ανάστροφη συλλέγονται πιο γρήγορα (Chen,1990). Τα σεισμικά κύματα στην μέθοδο VSP αποσβένονται από το επιφανειακό στρώμα. Στην ανάστροφη, αποσβένονται αφού διανύσουν το μεγαλύτερο μέρος του σχηματισμού, βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος, καθώς αυξάνει ο λόγος σήματος προς θόρυβο.

Check Shots- έρευνα με βολές ελέγχου

Είναι η πιο βασική μέθοδος VSP. Μια τυπική έρευνα ελέγχου, περιλαμβάνει την τοποθέτηση γεωφώνου ή υδρόφωνου στη γεώτρηση και της πηγής στην επιφάνεια. Τις περισσότερες φορές είναι αεροβόλο ή εκρηκτική πηγή. Τα γεώφωνα τοποθετούνται με απόσταση εκατοντάδων μέτρων μεταξύ τους ώστε να καταγράφουν μόνο τα απευθείας. Οι πρώτες αφίξεις δίνουν την πληροφορία χρόνου-βάθους.[

1.2.1 Σεισμική μέθοδος VSP με ολίσθηση (Offset VSP)



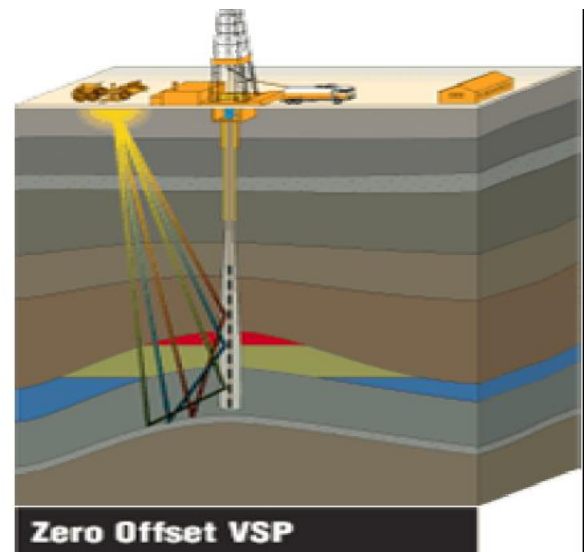
Στη μέθοδο VSP με ολίσθηση (offset VSP), χρησιμοποιείται γεωμετρική διάταξη, στην οποία η απόσταση της πηγής από την κεφαλή του φρέατος μεταβάλλεται. Πρόκειται για τη διάταξη όπου η πηγή και οι θέσεις των γεωφώνων δεν βρίσκονται σε κατακόρυφη ευθυγράμμιση[1].

Εικόνα 1: Σεισμική μέθοδος VSP με ολίσθηση Borehole seismic services, Halliburton.com

Αυτή η γεωμετρία υπάρχει όπου είναι απαραίτητο να διαμεριστεί το κυματικό πεδίο προκειμένου να απομονωθεί ένα συστατικό του κυματικού πεδίου σε ένα ενιαίο κανάλι δεδομένων. Χρησιμοποιείται για τοπική, απεικόνιση υψηλής ανάλυσης. Επίσης είναι συνήθης η εφαρμογή αυτής της μεθόδου σε γεωτρήσεις που παρεκκλίνουν γεωμετρικά.

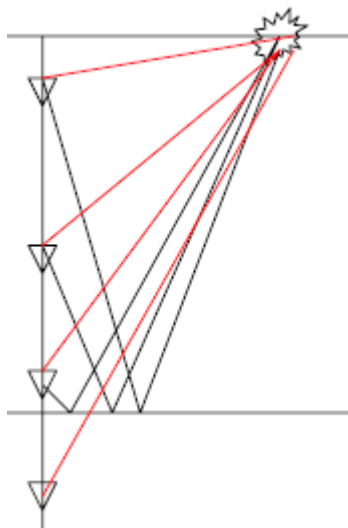
1.2.2 Σεισμική μέθοδος VSP μηδενικής ολίσθησης (Zero-offset VSP)

Σε αυτή τη διάταξη η θέση της πηγής σε σχέση με τα γεώφωνα μπορεί να θεωρηθεί σε κατακόρυφη ευθυγράμμιση. Υπάρχει μόνο μια πηγή στην επιφάνεια, όσο το δυνατόν πιο κοντά στη κορυφή της γεώτρησης [1].



Εικόνα 2: Σεισμική μέθοδος VSP μηδενικής ολίσθησης (K.Saud University)

Είναι η καλύτερη και πιο άμεση μέθοδος, καθώς συνδέει ένα τρισδιάστατο σεισμικό γεγονός με δεδομένο ότι έχει το ίδιο εύρος συχνοτήτων (20-200 Hz) όπως και με τα επιφανειακά δεδομένα, τα σεισμικά κύματα διέρχονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του φρέατος και δεν επηρεάζονται από προβλήματα του φρέατος.



Η μέθοδος VSP χρησιμοποιεί αυτή τη γεωμετρία: σεισμική πηγή στην επιφάνεια

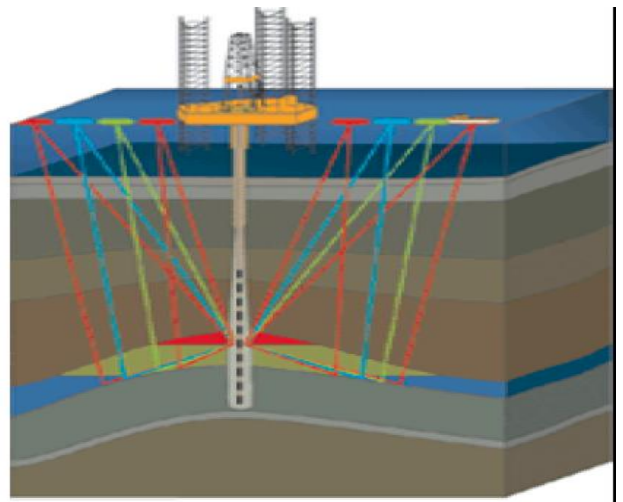
τα γεώφωνα μέσα στην γεώτρηση, οι κόκκινες σεισμικές ακτίνες περιγράφουν τα απευθείας κύματα, ενώ οι μαύρες, τα ανακλώμενα.

Εικόνα 3: γεωμετρία μεθόδου VSP (K.Saud University)

1.2.3 Σεισμική μέθοδος VSP μετατόπισης (Walkaway vsp)

Είναι η διάταξη κατά την οποία η πηγή κινείται προοδευτικά μακρύτερα στην επιφάνεια από τις προηγούμενες μεθόδους, ενώ τα γεώφωνα παραμένουν σε σταθερές θέσεις στη γεώτρηση. Παράγει υψηλότερης ανάλυσης αποτελέσματα από τις επιφανειακές σεισμικές

μετρήσεις, μεγαλύτερη και συνεχή κάλυψη σε σχέση με τη σεισμική μέθοδο VSP με ολίσθηση. Η μέθοδος εφαρμόζεται πολλές φορές για να βαθμονομεί επιφανειακά σεισμικά δεδομένα τοποθετώντας τα γεώφωνα πάνω από τον ταμιευτήρα.



Εικόνα 4: Σεισμική τομή μηδενικής μετατόπισης (K.Saud University)

1.2.4 Ανάστροφη σεισμική μέθοδος VSP (Reverse VSP)

Οι σεισμικές έρευνες στοχεύουν σε υψηλής ανάλυσης σεισμική απεικόνιση του ταμιευτήρα. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με καταγραφές και δειγματοληψίες από τις γεωτρήσεις, για πιο ακριβή απεικόνιση του στόχου. Τα επιφανειακά σεισμικά δεδομένα δεν μπορούν να απεικονίσουν στρώματα με πάχος μικρότερο από 10-12 m. Αντίθετα, οι καταγραφές μέσα στη γεώτρηση, μπορούν να απεικονίσουν δομές με πάχος περίπου 30 cm. Οι γεωφυσικές μετρήσεις μέσα στη γεώτρηση μπορούν να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα από τα σεισμικά δεδομένα στην

επιφάνεια. Τα βάθη των γεωφώνων στη γεώτρηση είναι γνωστά και τα χαρακτηριστικά του σχηματισμού, συνδέονται με μετρήσεις επί τόπου. Οι έρευνες check-shot ελέγχουν τους χρόνους καταγραφής από την πηγή στα γεώφωνα σε συγκεκριμένα βάθη. Οι χρόνοι σε συνδυασμό με τις διαφοροποιήσεις του βάθους, δίνουν τις τμηματικές ταχύτητες. Αντίθετα τα δεδομένα VSP εμπεριέχουν πληροφορίες ανάκλασης, όχι μόνο χρόνους άφιξης για να παρουσιάσουν μια εικόνα κοντά στη γεώτρηση.

Μια νέα τεχνική είναι να χρησιμοποιούνται οι δονήσεις από το διατρητικό για να παραχθούν δεδομένα ανάστροφης VSP. Η μεθοδολογία αυτή δεν απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό μέσα στη γεώτρηση και δεν καθυστερεί την διατρητική διαδικασία. Είναι πιο οικονομική μέθοδος, και επιτρέπει στον ερευνητή να λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο για την πορεία της γεώτρησης, στο πεδίο. Τα συνεχή σήματα που παράγονται από το διατρητικό παρακολουθούνται από αισθητήρες στην κορυφή της γεώτρησης, και συσχετίζονται με τις καταγραφές των γεωφώνων στην επιφάνεια [3]. Στη συνέχεια εφαρμόζεται αποσυνέλιξη για να περιορίσει τις επιδράσεις από την απόσταση από την πηγή. Πολλές εφαρμογές VSP που πριν ήταν υψηλού κόστους, τώρα είναι μικρότερου κόστους. Περιορισμοί που υπήρχαν με μια συμβατική VSP πλέον είναι εφικτό να ξεπεραστούν.

Οι εταιρείες που χρησιμοποιούν VSP δεδομένα για την έρευνα πετρελαίου φυσικού αερίου, προσπαθούν να αναπτύξουν τεχνολογίες, όπου ο όγκος των δεδομένων VSP θα καταγράφεται σε μια γεώτρηση μελέτης με το χαμηλότερο κόστος. Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται η αντίστροφη VSP. Στη VSP μέθοδο, η σεισμική πηγή τοποθετείται στην επιφάνεια και το γεώφωνο τοποθετείται σε διαφορετικά βάθη μέσα στη γεώτρηση, καταγράφοντας την ανακλώμενη ενέργεια. Στην ανάστροφη VSP, τα γεώφωνα τοποθετούνται στην επιφάνεια και η πηγή σε διαφορετικά βάθη μέσα στη γεώτρηση [4].

Ένα πλεονέκτημα της ανάστροφης VSP, είναι ότι πιο εύκολα και πιο οικονομικά τοποθετείται μεγάλος αριθμός γεωφώνων σε ανάπτυσμα στην επιφάνεια, από ότι πηγές. Αυτή την ανάγκη καλύπτει η ανάστροφη VSP, της απόκτησης μεγαλύτερου όγκου δεδομένων σε μικρότερο χρόνο και με μικρότερο κόστος.

1.3 Θεμελιώδη χαρακτηριστικά της VSP

Τα χαρακτηριστικά της VSP σε σχέση με τις επιφανειακές μετρήσεις:

1) Σε αντίθεση με τις μετρήσεις επιφάνειας, όπου μελετάται το κυματικό πεδίο στην επιφάνεια της γης, η VSP επιτρέπει παρακολούθηση της διαδικασίας γένεσης και διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο πραγματικό μέσο [4]. Κατά τη διάδοση του παλμού σε ομογενές απορροφητικό μέσο μόνο η μορφή του μεταβάλλεται. Σε ανομοιογενές μέσο, δευτερογενή κύματα δημιουργούνται στα όρια της ετερογένειας όπου λαμβάνει χώρα η ανακατανομή της ενέργειας των κυμάτων. Η VSP επιτρέπει την μελέτη των διαδικασιών ανάκλασης, διάθλασης των δευτερογενών κυμάτων.

Οι παρατηρήσεις στο εσωτερικό του μέσου, επιτρέπουν την παρακολούθηση αυτής της διαδικασίας. Προσεγγίζοντας την ζώνη των χαμηλών ταχυτήτων, στην επιφάνεια, τα κύματα ανακλώνται και καταδύονται.

2) Στις μετρήσεις επιφάνειας, όλοι οι ορίζοντες βρίσκονται κάτω από τα σεισμόμετρα. Αντίθετα στη μέθοδο VSP, οι ορίζοντες βρίσκονται κάτω και πάνω από τα σεισμόμετρα, έτσι ώστε η σεισμική μέθοδος VSP να λαμβάνει την καταγραφή των κυμάτων τα οποία προέρχονται τόσο από κάτω όσο και από την επιφάνεια.. Τα καταδυόμενα κύματα, όπως έχει αποδειχθεί εμπειρικά από τη VSP, χαρακτηρίζονται από υψηλή ένταση και μπορούν να παρατηρηθούν αξιόπιστα από την επιφάνεια. Σε πρακτικά προσβάσιμα βάθη -μέχρι 4000 m- η επιφάνεια και το πάνω μέρος της εγκάρσιας τομής επηρεάζουν σημαντικά το πεδίο του κύματος.

3) Η ευαισθησία των οργάνων τοποθετημένων στην επιφάνεια της γής περιορίζεται από τον εδαφικό θόρυβο βάθους[4]. Στα εσωτερικά σημεία του μέσου ο εδαφικός θόρυβος μειώνεται με το βάθος, έτσι ώστε η ευαισθησία των οργάνων να είναι υψηλότερη κατά πολύ από τις επιφανειακές παρατηρήσεις. Η VSP είναι ιδιαίτερης σημασίας, όχι μόνο λόγω της απομάκρυνσης από την επιφάνεια της γης, αλλά και επειδή παρέχει την δυνατότητα καταγραφής κυμάτων που εμφανίζονται στα όρια των σχηματισμών. Αυτό αποτελεί και ένα συγκριτικό πλεονέκτημα της VSP σε σχέση με τις επιφανειακές μετρήσεις.

Πρόσθετα γνωρίσματα των VSP δεδομένων:

Εύρος συχνότητας: Το εύρος συχνότητας των VSP δεδομένων είναι συχνά μέχρι 200 Hz και 400 Hz είναι πιθανόν. Στα 200 Hz το μήκος σεισμικού κύματος είναι περίπου 15 m και στα 400 Hz 8 m. Ακουστικές ιδιότητες όπως η εξασθένηση είναι πιο

εύκολο να μετρηθεί επι τόπου από VSP δεδομένα από τη στιγμή που το φάσμα της συχνότητας του VSP εκτείνεται μερικές οκτάβες.

Κόστος VSP έρευνας: Το κόστος της έρευνας εξαρτάται από παράγοντες όπως, το κόστος κινητοποίησης, τον τύπο της πηγής, το βάθος της γεώτρησης και την κατακόρυφη απόσταση των παρατηρήσεων. Ένας καλός σχεδιασμός μπορεί να μειώσει σημαντικά την δαπάνη.

Είδη πηγών κυμάτων: Η φύση των τύπων πηγών κυμάτων είναι το πιο σημαντικό στην διαδικασία συλλογής των σεισμικών δεδομένων και στην ερμηνεία τους. Τα είδη των πηγών που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια σεισμικής διασκόπησης είναι, το αεροβόλο (Airgun), υδροβόλο (Watergun) ο υδραυλικός ταλαντωτής (Vibrator), ο δυναμίτης (Dynamite) και ο πιεζοηλεκτρικός καμπτήρας (Piezoelectric bender). Για υψίσυχο περιεχόμενο, τότε προτιμάται η έκρηξη, ενώ για χαμηλόσυχο περιεχόμενο η μηχανική πηγή. [1]

Η διάμετρος του φρέατος γεώτρησης πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος τύπος γεωφώνου.

Ανεπιθύμητα κύματα

Οι παρατηρήσεις στα φρέατα γεώτρησης σχετίζονται με την ύπαρξη μεγάλης ποικιλίας ανεπιθύμητων κυμάτων. Η ένταση κάποιων από αυτών ουσιαστικά υπερβαίνει εκείνη των ζητούμενων κυμάτων.

Τα ανεπιθύμητα κύματα που παρατηρούνται στη μέθοδο VSP μπορεί να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες: κύματα τα οποία συνδέονται με συγκεκριμένες συνθήκες σε γεωτρήσεις και κύματα τα οποία ρυθμίζονται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των κυματομορφών των εσωτερικών σημείων της γεώτρησης. Τα πρωτογενή ανεπιθύμητα

κύματα που συνδέονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φρέατος γεώτρησης είναι τα σωληνοκύματα κύματα και τα κύματα που υπαγορεύονται από την γεωμετρία της γεώτρησης [6]. Σε αυτά τα κύματα μπορούν να προστεθούν και κύματα τα οποία διαδίδονται στο γεωτρητικό ρευστό. Κύματα που εγγράφονται πριν τις πρώτες αφίξεις, είναι εύκολο να μελετηθούν. Αυτά τα κύματα ευθύνονται για την μείωση της ακρίβειας στον προσδιορισμό της σεισμικής ταχύτητας.

Τα γεώφωνα στην γεώτρηση

Το μέγεθος των γεωφώνων στην γεώτρηση εξαρτάται από το γεγονός ότι η συσκευή θα πρέπει να αντέχει την υψηλή πίεση του περιβάλλοντος της γεώτρησης. Ένα VSP γεώφωνο μπορεί να υπόκεινται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την διάρκεια καταγραφής δεδομένων [5]. Η θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης μπορεί να φτάσει τους 200° C ή περισσότερο και να μειωθεί στους 0° C ή και λιγότερο στην επιφάνεια.

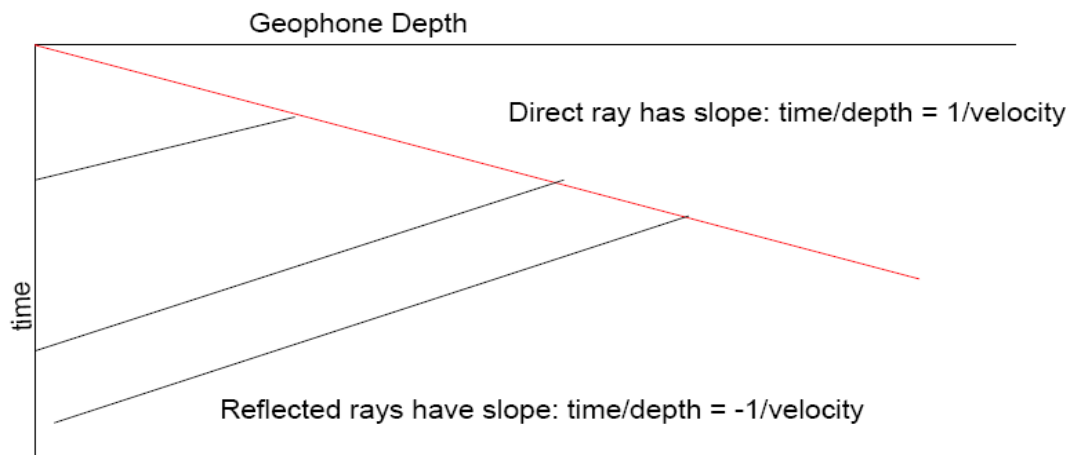
Οι αισθητήρες σε συστοιχία γεωφώνων VSP μπορεί να προνατολισθούν 1) κατακόρυφα 2) σε τρεις κατευθύνσεις XYZ, ή 3) τριών συνιστωσών με κλίση 54°.

Η πιο κοινή κατάσταση είναι να προσανατολισθούν όλα τα στοιχεία του αισθητήρα κατακόρυφα κατά μήκος του γεωφώνου. Αυτή η γεωμετρία γεωφώνων μετράει μόνο την κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης των σωματιδίων.

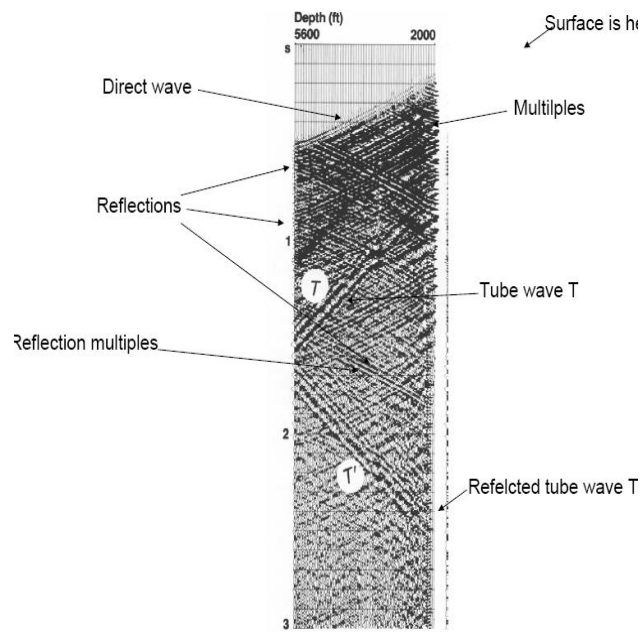
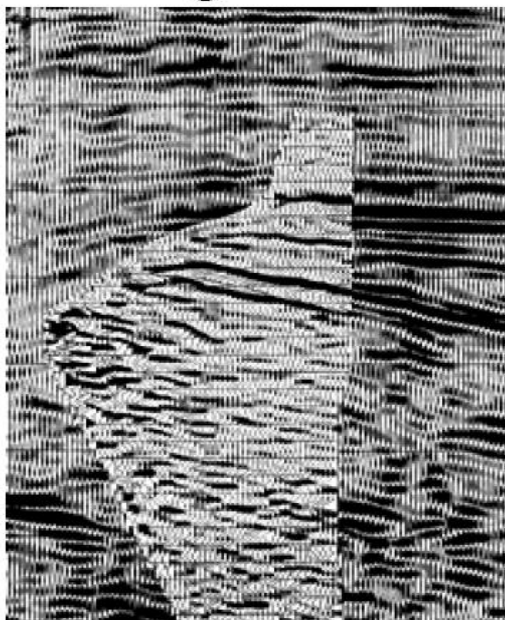
Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για VSP γεώφωνο είναι: αιχμηρό άκρο, μικρή διάμετρος, αναδιπλούμενος βραχίονας ασφάλισης, μικρό μήκος, μικρό βάρος, τριών συνιστωσών γεώφωνα, κατακόρυφο γεώφωνο για βαθμονόμηση, προσανατολισμένο μετρούμενο σύστημα, επιτόπου ψηφιοποίηση όλων των δεδομένων που αποστέλλονται στην επιφάνεια και σύνδεση με άλλα VSP συστήματα γεωφώνων. Η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων θα πρέπει να είναι 15-30 m.

Εκτίμηση της ταχύτητας

Ο υπολογισμός της ταχύτητας γίνεται από την κλίση των απευθείας ή ανακλώμενων κυμάτων.



Εικόνα 5: υπολογισμός ταχύτητας στρώματος. Η ευθεία των χρόνων διαδρομής του απευθείας κύματος (direct ray) έχει κλίση χρόνος/βάθος= 1/ταχύτητα, ενώ του ανακλώμενου (reflected ray) χρόνος/βάθος=-1/ταχύτητα.(King Saud University)



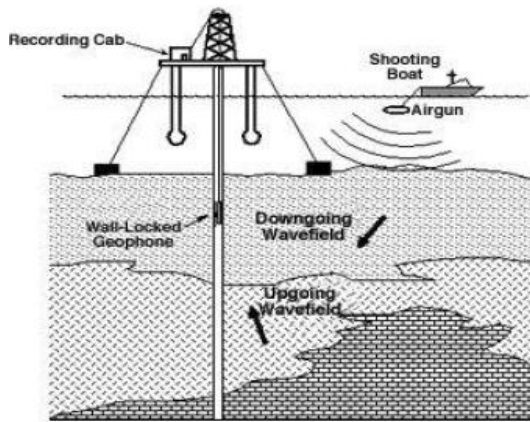
Εικόνα 6-7: σεισμική καταγραφή μιας offset-vsp και καταγραφή κυμάτων (K.S.University).

1.4 Εφαρμογές της VSP

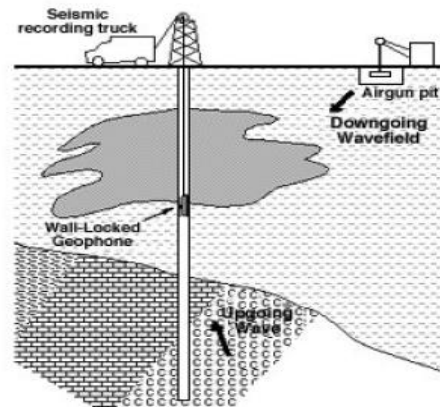
Η μέθοδος VSP, εφαρμόζεται στον εντοπισμό των επιπέδων των ρηγμάτων, στον προσδιορισμό των παραγόντων που επιδρούν στον πολλαπλασιασμό κυμάτων, και στον εντοπισμό ανακλαστήρων μπροστά από το γεωτρύπανο. Ακόμη χρησιμοποιείται στον έλεγχο της εκτίμησης της σεισμικής ταχύτητας από ακουστικές διαγραφίες.

Επίσης συμβάλει στην αντιστοίχιση των επιφανειακών σεισμικών δεδομένων με το βάθος και τον διαχωρισμό των κύριων ανακλάσεων από τις πολλαπλές.

Εφαρμογές της μεθόδου σε θαλάσσια περιοχή



Εφαρμογές στην ξηρά



Εικόνα 8-9: παραδείγματα εφαρμογών της μεθόδου σε θαλάσσια περιοχή και στην ξηρά (King Saud University).

Στην απλούστερη γεωμετρία γεώφωνο κινείται στην γεώτρηση, καθώς η έκρηξη επαναλαμβάνεται στο ίδιο σημείο. Οικονομικά αυτό είναι πολύ αναποτελεσματικό. Κάποιες φορές καλώδια πολλαπλών δεκτών μπορούν να τοποθετηθούν στην γεώτρηση. Είναι όμως πιο δύσκολο, καθώς μηχανικά θα πρέπει να ασφαλισθούν στο φρέαρ της γεώτρησης.

Κεφάλαιο 2

2.1 Οπτική σεισμική μέθοδος VSP

Η διάταξη συμβατικής VSP, περιλαμβάνει σεισμική πηγή που ενεργοποιείται στην επιφάνεια, και γεώφωνα συνδεδεμένα με καταγραφικό.

Τα δεδομένα καταγράφονται τηλεμετρικά σε πραγματικό χρόνο στην σεισμική μέθοδο VSP από πρότυπο καταγραφικό. . Για απλές γεωλογικές δομές απαιτούνται σεισμικές συστοιχίες γεωφώνων, οι οποίες μετακινούνται σε τέσσερα ή οκτώ θέσεις ενώ για πιο πολύπλοκες δομές οι θέσεις μπορεί να είναι 40 ή περισσότερες. Για κάθε θέση σεισμικής συστοιχίας απαιτείται κάποιος χρόνος καταγραφής, και αντίστοιχος χρόνος μετακίνησης. Αυτός ο χρόνος είναι σημαντικός ιδιαίτερα σε εφαρμογές σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Ο χρόνος καταγραφής είναι ένα μειονέκτημα στη VSP [10]. Πολυκάναλοι δέκτες έχουν μειώσει σημαντικά το χρόνο καταγραφής σε απλές εφαρμογές όπως μηδενικής ολίσθησης VSP (zero-offset VSP). Σε πιο πολύπλοκες εφαρμογές η walkaway vsp προβληματίζει λόγω του μεγάλου χρόνου για την απόκτηση δεδομένων. Ακόμη, τα γεώφωνα θα πρέπει να τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις σε σωληνωμένες γεωτρήσεις. Συχνά χρησιμοποιείται μόνο ένα γεώφωνο, για VSP έρευνα, για την αποφυγή της τοποθέτησης πολλών τριαξονικών γεωφώνων στο τοίχωμα του φρέατος. Η ανάγκη για ψηφιοποίηση, αυτοματοποίηση της έρευνας και της παραγωγικότητας οδήγησε στη εφαρμογή των οπτικών δικτύων σε γεωτρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου.

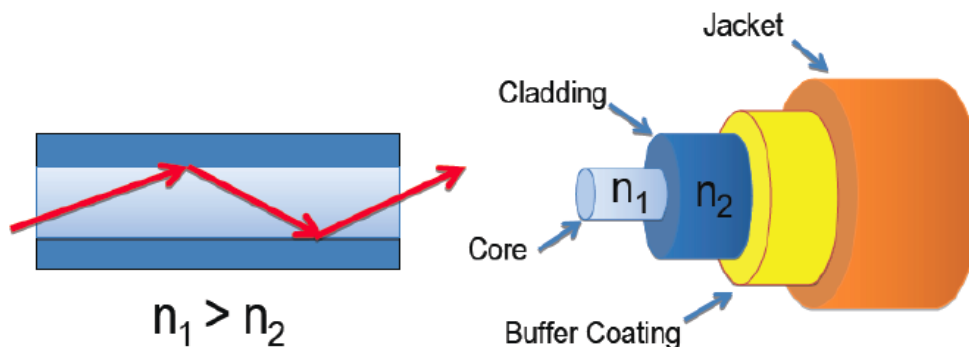
2.2 Βασικές έννοιες στα οπτικά δίκτυα

Τα οπτικά δίκτυα εφαρμόζονται από τη δεκαετία του 1990 στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Έχουν γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, γιατί ικανοποιούν τις απαιτήσεις για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιούν παλμούς φωτός για την μετάδοση πληροφοριών, σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια που μεταφέρουν ηλεκτρικά σήματα. Η φωτεινή πηγή της οπτικής ίνας είναι LED (Light Emmiting Diode) ή Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Η πληροφορία που μπορεί να μεταφέρει κάθε πηγή εξαρτάται από τη φέρουσα συχνότητά της [11]. Τα δίκτυα οπτικών ινών, μπορούν να μεταφέρουν εκατοντάδες εκατομμύρια φορές περισσότερη πληροφορία σε σχέση με τα συμβατικά δίκτυα, καθώς οι πηγές έχουν φέρουσες συχνότητες της τάξης των 10^{14} Hz. Οι συνήθεις πηγές εκπέμπουν σε συχνότητες της τάξης των GHz. Κατά συνέπεια, όση μεγαλύτερη η φέρουσα συχνότητα της πηγής, τόσο περισσότερη πληροφορία μπορεί να

μεταφέρει το σύστημα. Η πηγή Laser, έχει μεγαλύτερη ισχύ της τάξης των Watt σε σχέση με τις πηγές LED που η ισχύς τους φτάνει τα μερικά mW. Επομένως οι πηγές Laser μεταδίδουν την πληροφορία σε πιο μακρινές αποστάσεις με ταχύτητες που ξεπερνούν τα 10 Gbps. Στη συνέχεια ακολουθούν η γεωμετρία της οπτικής ίνας, νόμοι που διέπουν την διάδοση σε οπτικό σύστημα και βασικές αρχές λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών.

2.2.1 Γεωμετρία της οπτικής ίνας

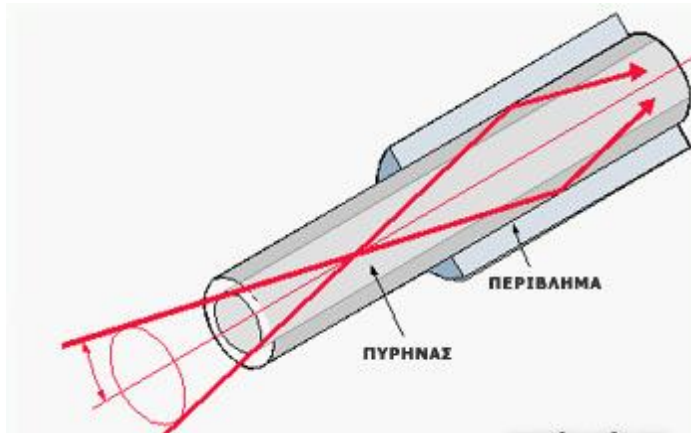
Εσωτερικά, μια οπτική ίνα αποτελείται από υλικά που έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης, ώστε να κατευθύνουν το φως. Η δομή μιας οπτικής ίνας στο εσωτερικό αποτελείται από ομοαξονικά γυάλινα υλικά τον πυρήνα (core) και το περίβλημα ή μανδύα (cladding ή buffer). Εξωτερικά εφαρμόζεται πλαστική επικάλυψη (coating), συνήθως ακρυλική ή πολυαμιδική, για μηχανική προστασία από φθορά και υγρασία όπως και στα ηλεκτρικά καλώδια.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση της οπτικής ίνας, (Κωτσίδης 2012)

Ο πυρήνας και το περίβλημα χαρακτηρίζονται από υψηλής καθαρότητας πυριτικό γυαλί, ικανό να μεταφέρει τη δέσμη φωτός χωρίς απώλειες. Οι πολυμερείς οπτικές ίνες εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρών αποστάσεων. Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός εξαρτάται από τη διάμετρο του πυρήνα. Όσο πιο μικρή η διάμετρος, τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα διάδοσης. Το περίβλημα χαρακτηρίζεται από γυαλί με μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα έτσι ώστε το περίβλημα της ίνας να ανακλά το φως πίσω στον πυρήνα. Η κυματοδότηση βασίζεται

στο φαινόμενο της ολικής ανάκλασης, από μέσο οπτικά πιο πυκνό προς μέσο οπτικά αραιότερο ($n_1 > n_2$). Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία θ_{cr} , τότε δεν υφίσταται διάδοση στο δεύτερο μέσο. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγεται η απώλεια της ισχύος του σήματος. Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα μπορεί να έχει σταθερή τιμή ή να μειώνεται ακτινικά όσο πλησιάζουμε το περίβλημα. Με το φαινόμενο της εσωτερικής ολικής ανάκλασης η οπτική ίνα κατευθύνει το φως στην έξοδο της [12].



Εικόνα 11: Δεκτή γωνία πρόσπτωσης-διάδοση σε οπτική ίνα (coolweb.gr)

Ένας αισθητήρας οπτικής ίνας αποτελείται από πηγή φωτός (Laser ή LED), οπτική ίνα, αισθητήρα που μετατρέπει το μετρούμενο σήμα σε οπτικό και οπτικό ανιχνευτή. Ο οπτικός ανιχνευτής μπορεί να είναι παλμογράφος ή οπτικός αναλυτής.

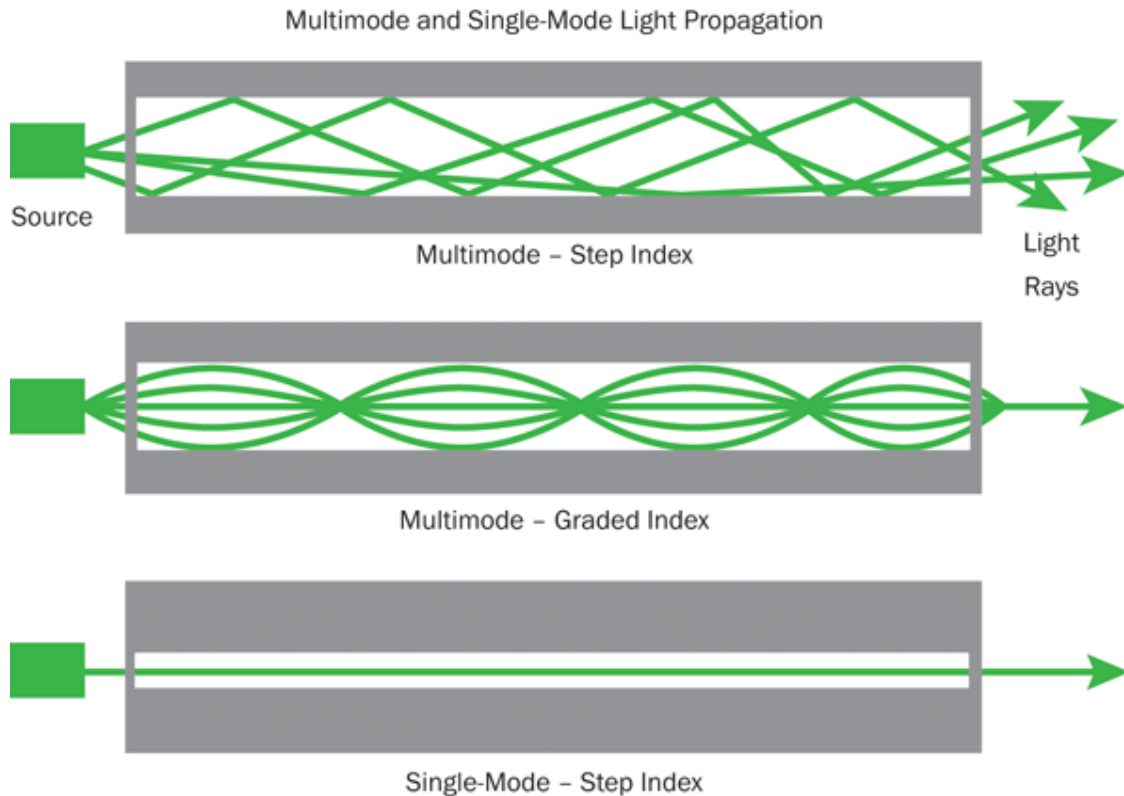
Υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων οπτικών ινών, ανάλογα με την εφαρμογή που καλούνται να υλοποιήσουν. Εφαρμόζονται στη μέτρηση φυσικών και χημικών παραμέτρων, και κατ'επέκταση στην παρακολούθηση κατασκευών, αγωγών, στη βιοϊατρική, την αεροναυπηγική και την άμυνα [13]. Τείνουν να αντικαταστήσουν τους παραδοσιακούς αισθητήρες για τη μέτρηση της υγρασίας, διαρροών, ακουστικής δόνησης, ιξώδους, θερμοκρασίας, παραμόρφωσης και πίεσης. Όταν χρησιμοποιούν μέρος της οπτικής ίνας ως αισθητήριο στοιχείο τότε είναι εσωτερικοί, ενώ όταν απλώς μεταφέρουν τη δέσμη φωτός εξωτερικοί. Οι εσωτερικοί αισθητήρες είναι ευαίσθητοι σε περιβαλλοντικές μεταβολές που μπορούν να διαφοροποιήσουν τη φάση, την ένταση ή την πόλωση της φωτεινής δέσμης. Η διαφοροποίηση αυτή ερμηνεύεται ως μεταβολή της μετρούμενης παραμέτρου στη μετατροπή του σήματος σε οπτικό σήμα. Για κάθε

εφαρμογή θα πρέπει να σχεδιάζεται ένας αισθητήρας ευαίσθητος στη μετρούμενη παράμετρο.

Ανάλογα με το μέγεθος του πυρήνα της οπτικής ίνας, οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε μονότροπες (single mode) ή πολύτροπες (multimode). Οι ίνες με μικρή διάμετρο πυρήνα διαδίδουν το φως γρηγορότερα και ομοιόμορφα, καθώς το φως διέρχεται από ένα μονοπάτι (mode). Ο πυρήνας στα καλώδια πολύτροπων οπτικών ινών έχει μεγαλύτερη διατομή, επιτρέποντας σε περισσότερες ακτίνες να διέλθουν εφόσον η γωνία πρόσπτωσης είναι αποδεκτή. Το φως διέρχεται από περισσότερα μονοπάτια, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Η πολύτροπη ίνα χαρακτηρίζεται από ένα πυρήνα με μη γραμμικό δείκτη διάθλασης. Ο τύπος γυαλιού καλείται graded index (κεκλιμένου βήματος). Ο πυρήνας επομένως δεν έχει σταθερό δείκτη διάθλασης σε όλη τη διατομή της ίνας, μειώνεται βαθμιαία προς την εξωτερική άκρη του. Αυτό συμβαίνει ώστε μια ακτίνα που διαδίδεται στο κέντρο της ίνας και μια που διαθλάται εσωτερικά (ακολουθεί περισσότερες διαδρομές) να φτάσουν ταυτόχρονα στη έξοδο. Η έξοδος της ίνας πρέπει να είναι ένα ισχυρό σήμα [13]. Ένα καλώδιο πολύτροπης οπτικής ίνας έχει τυπικά μεγέθη διαμέτρου πυρήνα/περιβλήματος 50 μm /125 μm , 85 μm /125 μm , 100 μm /140 μm με συνηθέστερο το 62,5 μm /125 μm . Η συνολική διάμετρος μαζί με την εξωτερική επικάλυψη φτάνει τα 900 μm .

Όταν ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός σε όλη τη διατομή του πυρήνα, τότε η ίνα καλείται σταθερού βήματος. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει μια απότομη μεταβολή στο δείκτη διάθλασης -της τάξης του 10%- μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος. Η πορεία των ακτίνων παρουσιάζεται στην εικόνα 12.

Εκτός από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μιας οπτικής ίνας, το μήκος κύματος και ο τρόπος μετάδοσης συμβάλλουν στην απόδοσή της. Στις μονότροπες οπτικές ίνες το εύρος του μήκους κύματος είναι μεταξύ 1310-1550 nm, αντίθετα στις πολύτροπες τα μήκη κύματος είναι μεταξύ 850-1300 nm. Το στενότερο εύρος στις μονότροπες οπτικές ίνες επιτρέπει τη μετάδοση σε μεγαλύτερη απόσταση από τις πολύτροπες. Οι μονότροπες μπορούν να υπερβούν και αποστάσεις 10 km, ενώ οι πολύτροπες μόλις 3 km. Οι μονότροπες επιτυγχάνουν αυτές τις αποστάσεις καθώς καθοδηγούνται από πηγή Laser, ενώ οι πολύτροπες χρησιμοποιούν πηγές LED.



Εικόνα 12: Είδη οπτικών ινών, ανάλογα με τον αριθμό των καταστάσεων(mode) (Data Communication Technology Ltd).

2.2.2 Βασικά Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Οι αισθητήρες οπτικών ινών παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με μη-οπτικούς αισθητήρες, ώστε σε ορισμένες εφαρμογές να αποτελούν τη μόνη επιλογή για τη μετάδοση δεδομένων. Τα περισσότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναλύονται παρακάτω:

1. Μικρό μέγεθος και βάρος.

Ένα καλώδιο οπτικών ινών είναι 4 φορές πιο ελαφρύ από ένα χάλκινο καλώδιο. Οι μικρές του διαστάσεις το καθιστούν χρήσιμο για μετρήσεις σε περιορισμένο χώρο.

2. Οι μικρές απώλειες στη διάδοση του σήματος.

Εξαιτίας της μικρής εξασθένισης του σήματος, οι οπτικές ίνες είναι σε θέση να καλύψουν μεγαλύτερες αποστάσεις με υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Η πηγή και ο οπτικός αισθητήρας μπορεί να βρίσκονται σε απόσταση ακόμη και χιλιομέτρων. Το

γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγάλο εύρος ζώνης που είναι περίπου στα 25 THz στη φασματική περιοχή του 1,5 μm . Η οπτική ίνα κατά τη μετάδοσή της παρουσιάζει ένα μικρό ρυθμό σφάλματος (Bit Error Rate) της τάξης του 10^{-9} , όταν για το χάλκινο μέσο είναι της τάξης του 10^{-5} . Το εύρος της ζώνης καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης με τον οποίο μπορούν να μεταφερθούν δεδομένα. Ο επιθυμητός αυτός ρυθμός σε μια οπτική ίνα μπορεί να επιτευχθεί με οπτική ενίσχυση, αποφεύγοντας αλγόριθμους διόρθωσης σφαλμάτων. Ακόμη, δεν απαιτούνται αλγόριθμοι συμπίεσης των δεδομένων εξαιτίας του μεγάλου εύρους συχνοτήτων [14].

3. Τεχνική Πολυπλεξίας

Με την τεχνική της πολυπλεξίας, σε καλώδιο οπτικής ίνας μπορούν να τοποθετηθούν πολλοί αισθητήρες και να μεταδώσουν ταυτόχρονα την πληροφορία διαμέσου διαφορετικών καναλιών.

4. Αντοχή σε περιβαλλοντικούς παράγοντες.

ο Θερμοκρασιακό εύρος.

Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας είναι σημαντικό να καθορίζεται σε κάθε εφαρμογή, καθώς οι ακραίες θερμοκρασίες μπορούν να οδηγήσουν σε μια μηχανική κάμψη την οπτική ίνα [12]. Η κάμψη αυτή μπορεί να αυξήσει τις απώλειες του σήματος πάνω από ένα επιτρεπτό όριο. Για λειτουργία σε θερμοκρασίες μέχρι 400°C οι ίνες καλύπτονται από περίβλημα μεταλλικού σωλήνα. Οι οπτικές ίνες μπορούν να αντέξουν σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω του υψηλού σημείου τήξεως του πυριτικού γυαλιού. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, τα καλώδια καλύπτονται από πλαστικά εύκαμπτα περιβλήματα.

ο Αντοχή στην ακτινοβολία

Στην περίπτωση έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία το περίβλημα της οπτικής ίνας είναι από πολυαιθυλένιο (PE), ώστε να απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) και να προστατεύει από τη φθορά την οπτική ίνα [12].

ο Αντοχή σε υγρασία

Σε περιβάλλον με υγρασία όπως αυτό της γεώτρησης ή σε υποθαλάσσιες εφαρμογές πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας ειδικός τύπος καλωδίου. Ένα τέτοιο καλώδιο

αποτελείται από υλικά μπλοκαρίσματος ανάμεσα στους σωλήνες για να είναι στεγανά και υλικά γέμισης μέσα σε κάθε σωλήνα απομονωτή. Εάν αυτός ο παράγοντας δεν ληφθεί υπόψη, τότε το καλώδιο θα καμφθεί και τελικά θα θρυματισθεί έπειτα από μεγάλο διάστημα παραμονής σε υγρό περιβάλλον.

- ο **Αντοχή στη διάβρωση**

Οι οπτικοί αισθητήρες κατασκευάζονται από χημικά αδρανή υλικά [13]. Επομένως, δεν υπάρχει χημική ή ηλεκτρική αλληλεπίδραση σε διαβρωτικό περιβάλλον ή σε περιβάλλον που υπάρχει κίνδυνος έκρηξης λόγω σπινθήρων. Δεν υπάρχει μεταφορά ηλεκτρικού σήματος. Τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προκαλώντας κρουστικό θόρυβο κάτι που δε συμβαίνει με τα φωτόνια.

- ο **Αντίσταση στην αγωγιμότητα**

Τα καλώδια των οπτικών ινών είναι μια διηλεκτρική κατασκευή, που την καθιστά μη αγωγή σε πεδίο υψηλής τάσης. Δεν επηρεάζονται επομένως από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, -σε αντίθεση με τους ηλεκτρικούς αισθητήρες- και δεν έλκουν τους κεραυνούς.

Μειονεκτήματα

- ο **Διασταύρωση της ευαισθησίας.**

Ο οπτικός αισθητήρας δεν μπορεί να μετρήσει μια μεμονωμένη παράμετρο, καθώς επηρεάζεται και από άλλες παραμέτρους [13]. Η διασταύρωση της ευαισθησίας, αποτελεί τη μεγαλύτερη αιτία σφαλμάτων στην έξοδο του οπτικού σήματος.

- ο **Παραμορφώσεις**

Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι οι παραμορφώσεις που μπορεί να υποστεί το οπτικό σήμα από γραμμικά ή μη γραμμικά φαινόμενα διάδοσης και από διπλοθλαστικότητα, όπως αυτά παρουσιάζονται παρακάτω. Οι παραμορφώσεις εξομαλύνονται, όταν χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες ίνες [12].

2.2.3 Φαινόμενα που επηρεάζουν τη μετάδοση του φωτός

Κατά τη μετάδοση του οπτικού σήματος, παρατηρούνται φαινόμενα που προκαλούν απώλειες και περιορισμό του εύρους της ζώνης. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες σε γραμμικά και μη-γραμμικά. Στα γραμμικά φαινόμενα ανήκουν η εξασθένηση του σήματος και η διασπορά παλμών. Τα μη-γραμμικά φαινόμενα εμφανίζονται όταν η ένταση των φωτεινών παλμών είναι μεγαλύτερη από τις συνήθεις τιμές [15]. Στα μη γραμμικά φαινόμενα ανήκουν η μίξη των τεσσάρων κυμάτων, η εξαναγκασμένη σκέδαση Raman και Brillouin, η αυτοδιαμόρφωση και ετεροδιαμόρφωση φάσης.

2.2.3.1 Εξασθένηση- απώλεια σήματος

Κατά τη διάδοση σε οπτικές ίνες παρατηρείται εξασθένηση. Η εξασθένηση είναι ένα γραμμικό φαινόμενο, δεν αλλοιώνει τη μορφή του προκαλεί όμως εκθετική μείωση της ισχύος του φωτός κατά τη διάδοσή του. Είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος εξόδου προς την ισχύ εισόδου. Εκφράζεται ανά μονάδα μήκους της ίνας. Όσο μεγαλύτερο το μήκος της ίνας, τόσο μεγαλύτερη και η εξασθένηση [14].

Η απώλεια διάδοσης στις οπτικές ίνες είναι μικρή. Για παράδειγμα, σε ένα εύρος ζώνης 25THZ, η απώλεια είναι 20 dB/km.

$$P(z) = P(0) \cdot e^{-Az} \quad (2.1)$$

Όπου $P(z)$: η ισχύς σήματος στην έξοδο

$P(0)$: ισχύς σήματος στην είσοδο της ίνας

A : ο συντελεστής εξασθένησης της ίνας (ανα μέτρο)

Για μια οπτική ίνα μήκους L σε m, η εξασθένηση σε είναι:

$$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P(0)}{P(L)} \right) = 10 \cdot \log_{10}(e^{AL}) \quad \text{επειδή } \log_{10} x = \ln x / \ln 10$$

$$\Rightarrow 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P(0)}{P(L)} \right) = 10 \cdot \left\{ \ln(e^{AL}) / \ln 10 \right\} = \{10 / \ln 10\} \cdot AL$$

$$\Rightarrow 4,343 \cdot AL = \frac{a \cdot L}{1000} \Leftrightarrow a = 4343 \cdot A \quad (2.2)$$

a : συντελεστής εξασθένησης της ίνας σε dB/km

A : συντελεστής εξασθένησης της ίνας σε 1/m

Αν το σύστημα μετάδοσης έχει μικρότερο εύρος συχνότητας από το εύρος συχνοτήτων του διαδιδόμενου κύματος, τότε η μορφή του κύματος παραμορφώνεται καθώς ορισμένες συχνότητες κόβονται.

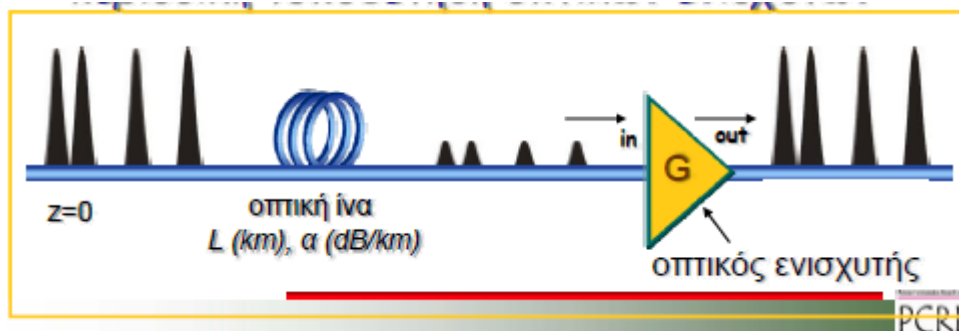
Οι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την εξασθένηση είναι οι ακόλουθοι:

1. Απορρόφηση

Οι ξένες προσμίξεις που υπάρχουν στο γυαλί της οπτικής ίνας, και ιδιαίτερα τα ιόντα OH^- απορροφούν μέρος της μεταδιδόμενης ισχύος [15]. Επίσης απώλειες λόγω απορρόφησης προκαλούνται είτε από ανομοιομορφίες στην κατασκευή της οπτικής ίνας ή έκθεση σε υπεριώδη και υπέρυθη ακτινοβολία.

2. Σκέδαση

Πρόκειται για τη διάχυση που υφίσταται η ακτινοβολία στο μανδύα όταν διαδίδεται στον πυρήνα της ίνας. Οφείλεται σε τοπική διαφοροποίηση του δείκτη διάθλασης. Όταν οι ανωμαλίες αυτές έχουν μέγεθος μικρότερο από το μήκος κύματος ($r < 0.1\lambda$) τότε η σκέδαση ονομάζεται Rayleigh. Η σκέδαση είναι αντίστροφα ανάλογη του μήκους κύματος, $1/\lambda^4$ οπότε είναι μεγαλύτερη σε μικρότερα μήκη κύματος.



Εικόνα 13: Αντιστάθμιση απώλειας με οπτικό ενισχυτή, (Αβραμόπουλος ΕΜΠ).

Για την αντιστάθμιση της εξασθένησης εφαρμόζονται κατά μήκος της ίνας, οπτικοί ενισχυτές. Παλαιότερα σε υποθαλάσσια καλώδια οπτικών ινών, εφάρμοζαν ενισχυτές οι οποίοι λάμβαναν το οπτικό σήμα το μετέτρεπαν σε ηλεκτρονικό, το ενίσχυαν ηλεκτρονικά και το απέδιδαν σε οπτική μορφή [11]. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να

προσθεθεί θόρυβος στο σήμα, να αυξηθεί το κόστος και να απαιτείται συντήρηση. Το σήμα θα πρέπει να παραμένει σε οπτική μορφή σε όλο το μήκος της ίνας και αυτό επιτυγχάνεται με τους οπτικούς ενισχυτές.

Υπάρχουν τρεις τύποι οπτικών ενισχυτών, ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα.

1. Ενισχυτής ισχύος: Τοποθετείται ακριβώς μετά το laser, για να ενισχύσει το σήμα εξόδου.
2. Ενισχυτής γραμμής: Ενισχύει το σήμα τοπικά κατά μήκος της ίνας.
3. Προενισχυτής: Ενισχύει το σήμα πριν από τον δέκτη.



Εικόνα 14: Διάταξη οπτικής ζεύξης, (Αβραμόπουλος ΕΜΠ).

Η μέγιστη συνολική απώλεια της οπτικής ζεύξης a_{link} δίνεται παρακάτω.

$$a_{link} = \frac{P_S}{P_R} \quad (2.3)$$

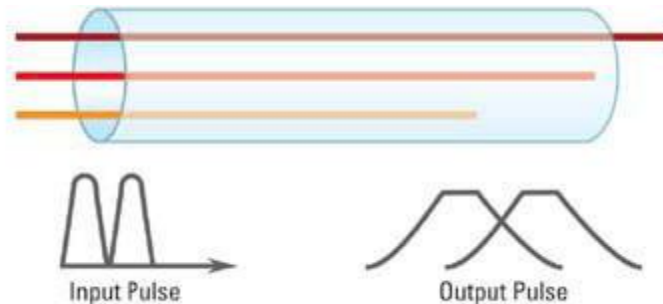
P_S είναι η τιμή ισχύος του οπτικού πομπού σε mW

P_R είναι η τιμή ισχύος που αναγνωρίζει ο δέκτης, σε mW.

2. 2.3.2 Διασπορά

Η διασπορά είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζει το εύρος συχνοτήτων της οπτικής ίνας. Σε αυτό το φαινόμενο διευρύνεται το πλάτος του παλμού, καθώς το κύμα διαδίδεται μέσα στην ίνα. Κατά τη διάδοση, το πλάτος ενός παλμού μπορεί να αλληλεπικαλύπτεται με γειτονικούς παλμούς, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η διάκριση από το δέκτη. Το πόσο ένας παλμός έχει διευρυνθεί εξαρτάται και από την απόσταση που διένυσε στην ίνα. Οι κυριότεροι μηχανισμοί στους οποίους οφείλεται η

διασπορά είναι η χρωματική διασπορά, η διασπορά των τρόπων διάδοσης και η διασπορά των τρόπων πόλωσης [15].



Εικόνα 15: Ο μηχανισμός της Διασποράς (Τσαλαμάνης, 2011)

I. Χρωματική Διασπορά

Η χρωματική διασπορά απαντάται σε όλους τους τύπους των οπτικών ινών. Οφείλεται κυρίως στο εύρος ζώνης της πηγής. Η πηγή μπορεί να είναι τύπου Laser ή φωτοδίοδοι (LED). Οι πηγές LED έχουν χαμηλή οπτική ισχύ και χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις μικρών αποστάσεων. Οι πηγές Laser έχουν υψηλή ισχύ εξόδου. Προτιμούνται σε μεγάλες αποστάσεις καθώς έχουν μια διάταξη που ενισχύει το φως. Και οι δύο αυτές πηγές εκπέμπουν ομάδα συχνοτήτων σε συγκεκριμένο εύρος. Κάθε συχνότητα, ταξιδεύει με διαφορετική ταχύτητα μέσα στην οπτική ίνα, οπότε υπάρχουν διαφορετικές καθυστερήσεις στη διάδοση κάθε συχνότητας. Αυτές οι χρονικές καθυστερήσεις, δημιουργούν τη χρονική διασπορά του παλμού [15]. Η χρονική αυτή διεύρυνση μπορεί να οφείλεται είτε σε ιδιότητες του υλικού του κυματοδηγού Δt , είτε στη διασπορά στη συχνότητα της κυματοδότησης $\delta\omega$. Η συνολική διασπορά είναι $\delta = \Delta t + \delta\omega$.

α) Διασπορά κυματοδηγού

Η διασπορά του κυματοδηγού, εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας και μπορεί να περιοριστεί με την κατάλληλη σχεδίαση της ίνας. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν καθώς όσο μεγαλύτερο το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη και η διάχυση στο περίβλημα. Ο χρόνος διάδοσης επομένως μειώνεται, γιατί η ταχύτητα διάδοσης στο περίβλημα είναι μεγαλύτερη (μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης). Αυτή η χρονική καθυστέρηση είναι υπεύθυνη για τη διαπλάτυνση του παλμού.

$$\Delta\tau_{wg} = -n_2 \cdot \Delta \cdot \frac{L}{c} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot V_D \quad (2.4)$$

Όπου $\Delta\tau_{wg}$: η διαφορική χρονική καθυστέρηση και

V_D : η παράμετρος διασποράς του κυματοδηγού

L : το μήκος της ίνας

$\Delta\lambda$: εύρος ζώνης παλμού

Η διασπορά περιορίζεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό και με την εφαρμογή πηγής στενού εύρους μήκους κύματος. Οι πηγές Laser έχουν εύρος 1-10 nm, ενώ οι πηγές LED έχουν μεγαλύτερο εύρος στα 50-100 nm [15]. Το μεγαλύτερο εύρος ζώνης, αυξάνει το ρυθμό του οπτικού σήματος, οπότε το φαινόμενο γίνεται εντονότερο.

β) Διασπορά υλικού

Η διασπορά υλικού οφείλεται στη σχέση του δείκτη διάθλασης με το μήκος κύματος. Διάφορες χρωματικές συνιστώσες διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα και φθάνουν στην έξοδο της ίνας με διαφορετική χρονική καθυστέρηση.

Μια χρωματική συνιστώσα φτάνει στην έξοδο της ίνας μετά από χρόνο $t=L/v_g$. Η διεύρυνση του παλμού θα είναι $\Delta t=L \cdot D \cdot \Delta\lambda$ (2.5)

Όπου L : το μήκος της ίνας

$\Delta\lambda$: το εύρος της ζώνης του παλμού

Η παράμετρος D δίνει το συντελεστή διασποράς υλικού σε μονάδες ps/(Km·nm).

Για να περιοριστεί το φαινόμενο της χρωματικής διασποράς, έχουν κατασκευαστεί μονότροπες οπτικές ίνες με προφίλ δείκτη διάθλασης ικανό να μηδενίσει τη χρωματική διασπορά, σε συγκεκριμένα μήκη κύματος.

Οι ίνες που έχουν κατασκευαστεί για αυτό το σκοπό είναι:

1) Η ίνα επίπεδης διασποράς (Dispersion Flattened Fiber- DFF)

Σε εύρος μηκών κύματος 1300nm-1700 nm οι ίνες επίπεδης διασποράς, έχουν πολύ μικρό συντελεστή διασποράς περίπου 3psec/nm/km. Στα 1310 nm η χρωματική

διασπορά είναι μηδενική γιατί η διασπορά του κυματοδηγού, εξισορροπεί τη διασπορά υλικού.

2) Η ίνα μετατοπισμένης διασποράς (Dispersion Shifted Fiber- DSF)

Οι ίνες μετατοπισμένης διασποράς εμφανίζουν μηδενική διασπορά στα 1550 nm. Εφαρμόζονται κυρίως σε μεγάλες αποστάσεις.

3) Η ίνα επανόρθωσης της διασποράς (Dispersion Compensation Fiber – DCF)

Η ίνα επανόρθωσης της διασποράς έχει μεγάλο συντελεστή διασποράς D , αλλά με αντίθετο πρόσημο σε σχέση με τη μονότροπη. Εφαρμόζεται κατά τμήματα σε μεγάλες αποστάσεις μονότροπης ίνας, ώστε να περιορίζει το φαινόμενο.

II. Διασπορά των τρόπων διάδοσης

Είναι ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται μόνο σε πολύτροπες ίνες. Σε μια πολύτροπη οπτική ίνα, ο παλμός κατευθύνεται με περισσότερους από ένα τρόπους, ανάλογα με τις διαστάσεις του πυρήνα. Σε αυτές τις πολύτροπες οπτικές ίνες ο δείκτης διάθλασης στον πυρήνα είναι σταθερός. Το φαινόμενο μετριάζεται αν ο δείκτης διάθλασης στον πυρήνα δεν είναι σταθερός, αλλά μειώνεται ακτινικά προς το περίβλημα.

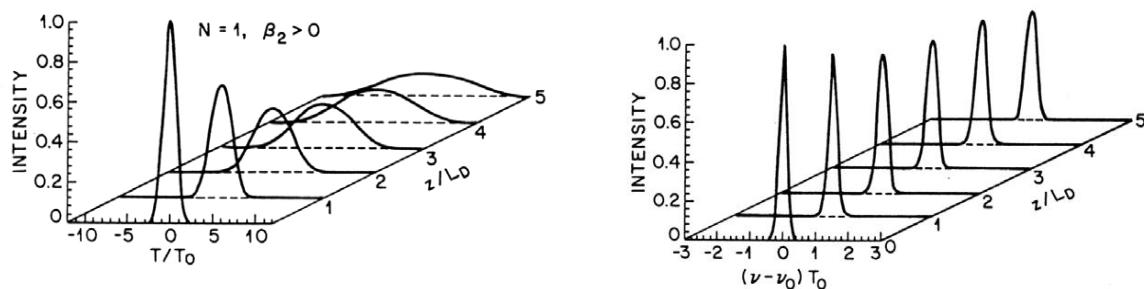
III. Διασπορά των τρόπων πόλωσης

Κάθε διάδοση χαρακτηρίζεται από δύο καταστάσεις πόλωσης, κάθετες μεταξύ τους. Ιδανικά ο πυρήνας κάθε ίνας θα έπρεπε να είναι κυκλικός. Σε αυτή την περίπτωση, οι καταστάσεις πόλωσης θα είχαν την ίδια ταχύτητα. Όμως εξαιτίας των φορτίων που δέχεται η ίνα, ο πυρήνας δεν είναι κυκλικός αλλά ελαφρά ελλειπτικός. Η ίνα έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης για κάθε κατάσταση πόλωσης (διπλοθλαστικότητα). Οι διαφορετικές ταχύτητες στους δύο κάθετους άξονες, οδηγεί σε καθυστέρηση του τρόπου πόλωσης και κατά συνέπεια διασπορά παλμού.

2.2.3.3 Μη γραμμικά φαινόμενα

Για να επιτευχθεί η μεταφορά παλμού σε μεγάλες αποστάσεις, πρέπει να εφαρμοστεί πηγή μεγάλης ισχύος. Η πηγή μεγαλύτερης ισχύος, εμφανίζει μη γραμμικά φαινόμενα που επιδρούν στην μετάδοση των δεδομένων. Τα μη γραμμικά φαινόμενα, χωρίζονται σε φαινόμενα που οφείλονται στη σκέδαση και σε αυτά που οφείλονται στο δείκτη διάθλασης. Τα φαινόμενα που οφείλονται στη σκέδαση είναι η εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin και εξαναγκασμένη σκέδαση Raman [11]. Η εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin προέρχεται από τη σκέδαση του φωτός στα ακουστικά κύματα. Οι ακουστικές δονήσεις επηρεάζουν το δείκτη διάθλασης [16]. Το φαινόμενο περιορίζεται αν μειωθεί η απόσταση μεταξύ των ενισχυτών και αν η ισχύς μειωθεί χαμηλότερα από το κατώφλι της σκέδασης. Η σκέδαση Raman, προκαλείται από ανελαστικές συγκρούσεις των μορίων της οπτικής ίνας με τα φωτόνια. Έχει σαν αποτέλεσμα το φως που σκεδάζεται από μοριακές δονήσεις να διοχετεύεται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αντιμετωπίζεται επίσης με περιορισμό της ισχύος κάτω από το κατώφλι της σκέδασης Raman, και με μείωση των καναλιών σε ένα σύστημα.

Στα μη γραμμικά φαινόμενα που οφείλονται στο δείκτη διάθλασης, είναι η αυτοδιαμόρφωση φάσης, η ετεροδιαμόρφωση φάσης και η μίξη τεσσάρων κυμάτων. Στην αυτοδιαμόρφωση φάσης τροποποιείται ο δείκτης διάθλασης, και μεταβάλλεται στιγμιαία η κεντρική συχνότητα. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη χρωματική διασπορά δηλαδή τη διεύρυνση του παλμού. Όταν η αυτοδιαμόρφωση συνδυάζεται με τη διασπορά, παραμορφώνει το σήμα [18]. Στην αυτοδιαμόρφωση φάσης, η διασπορά είναι πιο έντονη, καθώς δημιουργεί φασματικές συνιστώσες, όπως φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Διεύρυνση του παλμού λόγω αυτοδιαμόρφωσης φάσης και διασποράς, (Αβραμόπουλος).

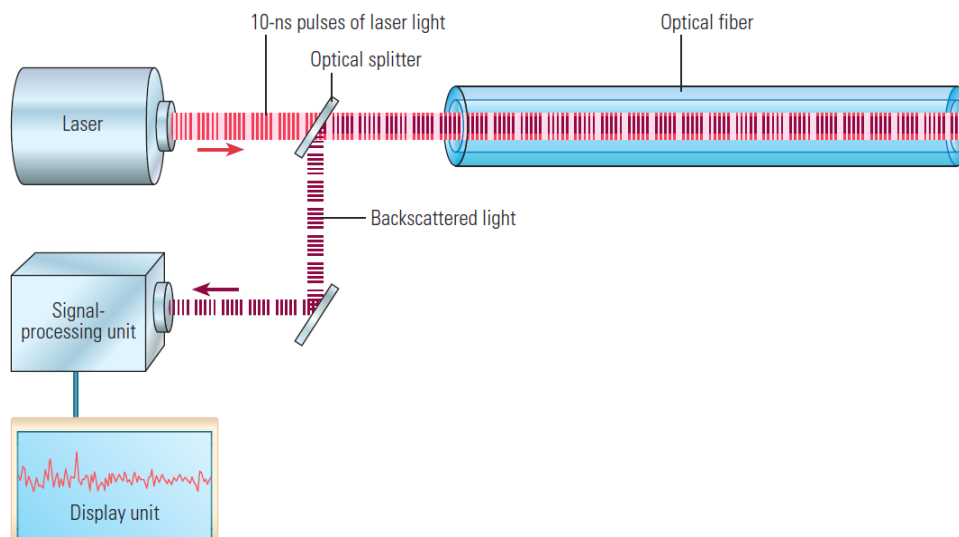
Στην ετεροδιαμόρφωση φάσης ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από τον αριθμό των καναλιών που θα συναντήσει το κύμα μέσα στην ίνα. Η μίξη των τεσσάρων κυμάτων μετατρέπει τα φωτόνια από ένα ή δύο κύματα, σε δύο νέες συχνότητες. Είναι έντονη όταν υπάρχει μεγάλη ισχύς του σήματος, μικρή διασπορά και μικρή απόσταση καναλιών [11].

2.3 Τα οπτικά δίκτυα στην έρευνα υδρογονανθράκων

2.3.1 Αισθητήρας κατανεμημένης ανίχνευσης θερμοκρασίας DTS

Οι κατανεμημένοι αισθητήρες οπτικών ινών, είναι αξιόπιστα εργαλεία στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Εφαρμόζονται στην παρακολούθηση των γεωτρήσεων, αλλά και στην βελτιστοποίηση της παραγωγής. Αρχικά εφαρμόστηκαν με τη μορφή της κατανεμημένης ανίχνευσης θερμοκρασίας (distributed temperature sensing DTS). Η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι απαραίτητη για την κατανόηση των θερμικών διεργασιών και την εξέλιξη της παραγωγής. Από τη δεκαετία του 1930 τα θερμοκρασιακά δεδομένα, συνεισέφεραν στην εκτίμηση της ροής των ρευστών, της επίδρασης των ρωγματώσεων και της εισροής νερού. Στη δεκαετία του '90 άρχισαν να εφαρμόζονται οι οπτικές ίνες ως μέσο για την ανίχνευση θερμοκρασίας [16]. Σε αντίθεση με τα κινούμενα ηλεκτρονικά μέρη, ένα οπτικό σύστημα DTS, είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στις θερμοκρασιακές μεταβολές ανά 1 μέτρο γεώτρησης. Οι μετρήσεις γίνονται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και μπορούν να απεικονίσουν όλες τις διεργασίες εντός της γεώτρησης.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας του συστήματος DTS, και πως η λεπτομερή γνώση των θερμοκρασιών κατά μήκος της οπτικής ίνας, συμβάλλει στην έγκαιρη πρόβλεψη και αντιμετώπιση προβλημάτων στο εσωτερικό της γεώτρησης. Η πληθώρα των εφαρμογών αυτών των δεδομένων, καθιστούν την τεχνολογία των οπτικών ινών, πρωταρχική στην παρακολούθηση της παραγωγής.



Εικόνα 16: DTS Σύστημα Brown, (Schlumberger 2014).

Το σύστημα DTS αποτελείται από πηγή Laser, οπτική ίνα, οπτικό διαχωριστή, μονάδα οπτικό-ηλεκτρονικής επεξεργασίας και μονάδα απεικόνισης (display unit) [16]. Η οπτική ίνα έχει διάμετρο 5-50 μm , και η πηγή διοχετεύει 10 ns παλμούς φωτός. Η διάδοση του κύματος γίνεται με το φαινόμενο της εσωτερικής ολικής ανάκλασης, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Ένα μέρος του φωτός σκεδάζεται καθώς ο παλμός διέρχεται από την ίνα. Η σκέδαση μπορεί να οφείλεται σε ακουστικές δονήσεις (σκέδαση Brillouin) και σε κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις του γυαλιού (σκέδαση Rayleigh).

Για το συγκεκριμένο σύστημα DTS, η πιο σημαντική σκέδαση είναι η Raman. Η σκέδαση Raman, προέρχεται από τη σύγκρουση φωτονίων με μόρια του υλικού της οπτικής ίνας. Ένα σκεδασμένο φωτόνιο μπορεί είτε να αποκτήσει ενέργεια μετακινώντας το μόριο σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση (anti-Stokes σκέδαση), είτε να χάσει ενέργεια μεταφέροντας το μόριο σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο (σκέδαση Stokes). Η σκέδαση Raman, ενδιαφέρει κυρίως γιατί η ενέργεια που μεταφέρεται σχετίζεται με τη θερμοκρασία. Μέρος του σκεδασμένου φωτός ανακλάται πίσω. Ένας διαχωριστής ξεχωρίζει το σήμα εισόδου από το σκεδασμένο προς τα πίσω. Ένας πολύ ευαίσθητος αισθητήρας διαχωρίζει το μήκος κύματος της σκέδασης Raman, από τις σκεδάσεις Rayleigh και Brillouin.

Το σήμα από τη σκέδαση Stokes δεν εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία και είναι μεγαλύτερου μήκους κύματος. Αντίθετα το σήμα από τη σκέδαση anti-Stokes, είναι ευαίσθητο στη θερμοκρασία, και σε μικρότερο μήκος κύματος. Η θερμοκρασία του μέσου προέρχεται από το λόγο των δύο σημάτων. Επειδή ο κάθε παλμός έχει μήκος 10 ns, μπορεί να υπολογιστεί σε ποιο σημείο της οπτικής ίνας παράχθηκε. Επομένως μπορεί να γίνει μια καταγραφή της θερμοκρασίας κατά μήκος της οπτικής ίνας, χωρίς να χρειαστεί βαθμονόμηση.

Με το σύστημα DTS, μπορούν να υπολογιστούν διαφοροποιήσεις από τη γεωθερμική βαθμίδα, σε διάφορα βάθη στη γεώτρηση. Οι διαφοροποιήσεις αυτές, είναι ενδεικτικές των χαρακτηριστικών των ρευστών που υπάρχουν στον ταμιευτήρα. Το θερμοκρασιακό προφίλ μιας γεώτρησης αλλάζει ανάλογα το χρόνο και το ρυθμό παραγωγής, τη διαπερατότητα του ταμιευτήρα, την εισροή ρευστών.

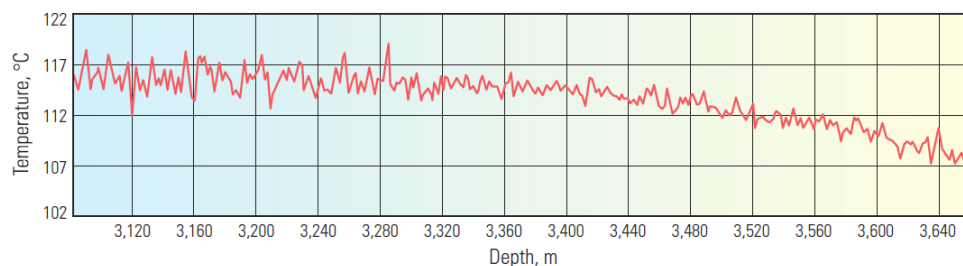
Εκτός από την παραγωγή, συμβαίνουν και άλλες θερμικές διεργασίες ως συνέπεια της ροής ρευστών. Οι διεργασίες αυτές σχετίζονται με την μεταβολή της πίεσης, λόγω ροής ρευστών από τον ταμιευτήρα, στη γεώτρηση. Οι θερμικές αυτές αλλαγές εξηγούνται από το νόμο Joule-Thomson. Η μεταβολή της θερμοκρασίας, σαν αποτέλεσμα της αλλαγής στην πίεση, υπό σταθερή ενθαλπία αναπαριστάται από το συντελεστή Joule-Thomson, που δίνεται από τη μερική παράγωγο.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \quad (2.6) \mu_{JT} \text{ ο συντελεστής Joule-Thomson.}$$

Ενθαλπία είναι η θερμότητα που ανταλλάσσεται κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής, που πραγματοποιείται υπό σταθερή πίεση. Το φαινόμενο Joule-Thomson, εμφανίζεται όταν υπάρχει μια διαδικασία συνεχούς ροής, χωρίς μεταφορά θερμότητας ή σταθερή ενθαλπία. Κατά τη ροή των ρευστών από τον ταμιευτήρα στη γεώτρηση, υπάρχει πτώση πίεσης. Η πτώση της πίεσης προκαλεί αλλαγή στον όγκο του υγρού ή του αερίου [16]. Η μεταβολή αυτή συνοδεύεται από μεταβολή θερμοκρασίας. Με αυτό το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό, εάν στη γεώτρηση έχει εισέλθει φυσικό αέριο (πτώση θερμοκρασίας) ή εάν έχει εισέλθει πετρέλαιο (αύξηση της θερμοκρασίας) [16].

Η μέθοδος DTS εφαρμόστηκε σε παράκτια γεώτρηση όπου η παραγωγή είχε μειωθεί. Η γεώτρηση αυτή ήταν στο πεδίο Bunga Raya στην Μαλαισία. Υπήρχε η υποψία από τους μηχανικούς, ότι η μείωση της παραγωγής οφείλεται στην παρουσία των πολυμερών και των γαλακτωμάτων από ρευστά που παράχθηκαν κατά τη διάνοιξη

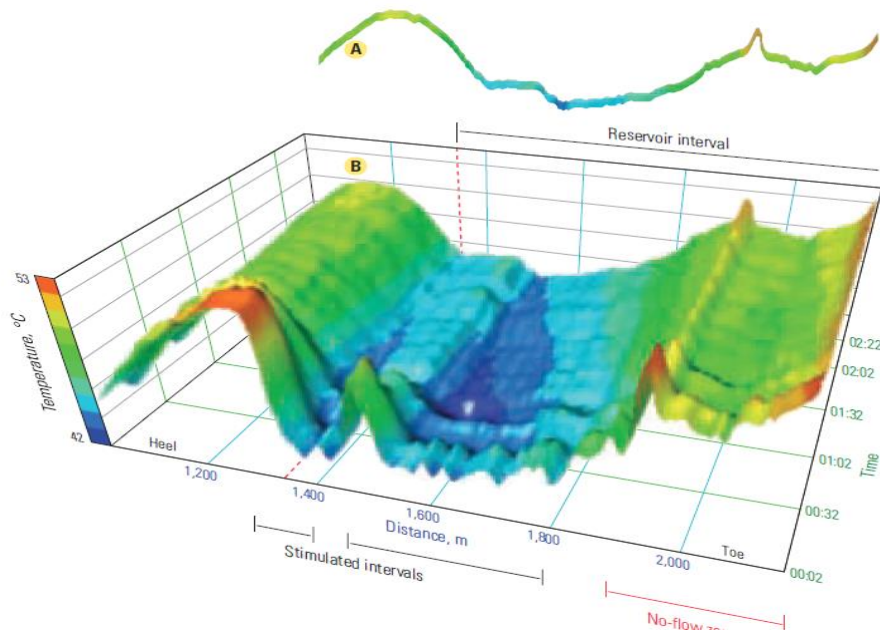
της γεώτρησης. Με τη μέθοδο DTS απέκτησαν κατανεμημένη καταγραφή θερμοκρασίας κατά μήκος της οπτικής ίνας, σε βάθος μέχρι τα 3640 μ. Η θερμοκρασία ήταν χαμηλότερη όσο αυξανόταν το βάθος με πιο χαμηλή τη θερμοκρασία στα 3640 μ. Συνδυαστικά με δεδομένα από αισθητήρα πίεσης, παρατηρήθηκε εισροή νερού στον ταμιευτήρα. Η πτώση της θερμοκρασίας οφείλονταν στην παρουσία φυσικού αερίου που μείωνε την παραγωγή πετρελαίου. Ο συνύπαρξη πετρελαίου φυσικού αερίου και νερού δημιούργησε ένα γαλάκτωμα με μεγάλο ιξώδες που παρεμπόδιζε την παραγωγή της γεώτρησης.



Εικόνα 17: μετρήσεις DTS από τη γεώτρηση Bunga Raya. Η θερμοκρασία μειώνεται από 116°C, σε 107° C, λόγω της παρουσίας φυσικού αερίου (Schlumberger 2014).

Με τη μέθοδο της DTS δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστεί η θέση των θερμικών γεγονότων. Το σύστημα DTS δίνει τη δυνατότητα της προσωρινής ή της μόνιμης παρουσίας αισθητήρων στη γεώτρηση. Με ένα μόνιμο θερμοκρασιακό αισθητήρα, τα δεδομένα αποκτούνται σε πραγματικό χρόνο, και υπάρχει άμεση αντίδραση στις μεταβολές της παραγωγής. Με κατάλληλα επεξεργαστικά εργαλεία μπορεί να υπάρχει τρισδιάστατη απεικόνιση πολλών θερμοκρασιακών γραμμών προσθέτοντας την παράμετρο του χρόνου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ανενεργές γεωτρήσεις στον Καναδά. Οι περισσότερες οπτικές ίνες υπολειτουργούν στην έκθεση του υδρογόνου, και σε υψηλές θερμοκρασίες σε γεωτρήσεις αργού πετρελαίου. Όμως με το σχεδιασμό μιας οπτικής ίνας για δύσκολο περιβάλλον (Wellwatcher Brite Blue optical fiber) μπορεί να αποκτηθεί θερμοκρασιακό προφίλ στη γεώτρηση. Τα δεδομένα που συλλέγονται από μόνιμα εγκατεστημένους αισθητήρες, συμβάλλουν στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής της γεώτρησης και στη μέγιστη αποληψιμότητα. Στην εικόνα 18, παρουσιάζονται τα δεδομένα DTS σε δισδιάστατη απεικόνιση από οριζόντια γεώτρηση (Α). Όταν τα συνεχή δεδομένα καταγράφονται, τότε μπορούν να

απεικονιστούν σε τρισδιάστατα (B). Η DTS καταγράφει την απόκριση του ταμιευτήρα στο διάστημα 1340-2200 μ. Με μπλε παρουσιάζονται οι ζώνες του ταμιευτήρα που έχουν επηρεαστεί από το άζωτο τη χρονική στιγμή 00:02.



Εικόνα 18: (Α)Μετρήσεις DTS σε οριζόντια γεώτρηση (Β) Τρισδιάστατη απεικόνιση θερμοκρασίας (Schlumberger 2014).

Για τις επόμενες δύο ώρες (00:32 με 02:22), τα δεδομένα DTS καταγράφουν ψυχρά και θερμά γεγονότα που προκαλούνται από τη μετακίνηση των ρευστών από τον ταμιευτήρα στη γεώτρηση. Τα δεδομένα δείχνουν δύο μέγιστα διαστήματα, όπου υπήρχε επιτυχής διέγερση από το άζωτο για ροή των ρευστών, αλλά και τον πυθμένα της γεώτρησης όπου δεν παρατηρείται αυτή η ροή.

2.3.2 Κατανεμημένη ακουστική ανίχνευση DAS

Αργότερα αναπτύχθηκε η κατανεμημένη ακουστική ανίχνευση (distributed acoustic sensing DAS) γνωστή και ως παλμική κατανεμημένη ανίχνευση (distributed vibration sensing DVS).

Σε αυτή την τεχνολογία, καλώδιο οπτικών ινών αναπτύσσεται κατά μήκος του φρέατος, και μπορεί να μετατραπεί σε οπτικό αισθητήρα που καταγράφει το σεισμικό προφίλ με μια μόνο ενεργοποίηση της σεισμικής πηγής [17]. Η οπτική μονάδα βρίσκεται στην επιφάνεια και συνδέεται με το καλώδιο της οπτικής ίνας μέσα στο φρέαρ. Παλμοί φωτός laser –σε μικρό εύρος μήκους κύματος- διοχετεύονται μέσα στην οπτική ίνα. Το φως σκεδάζεται σύμφωνα με το νόμο του Rayleigh (το ποσοστό της σκέδασης είναι αντιστρόφως ανάλογο της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος λ , και αναλύεται στην επιστροφή του. Από την ανάλυση προκύπτει τοπική μέτρηση της τάσης παραμόρφωσης της ίνας, μετρούμενη σε όλο το μήκος του καλωδίου.

2.3.2.1 Έξυπνος ακουστικός κατανεμημένος αισθητήρας iDAS

Εκτός από τον αισθητήρα κατανεμημένης θερμοκρασίας, υπάρχει ένας νέος τύπος, ο έξυπνος ακουστικός κατανεμημένος αισθητήρας (Intelligent Distributed Acoustic Sensing iDAS). Εφαρμόζεται στην σεισμική μέθοδο VSP, σε ενεργές και ανενεργές γεωτρήσεις και σε επιφανειακές σεισμικές μετρήσεις. Ο αισθητήρας αυτός, μετράει σε ακουστικές συχνότητες τις μεταβολές της τάσης κατά μήκος της οπτικής ίνας. Με την ταυτόχρονη απόκτηση δεδομένων από χιλιάδες σεισμικά κανάλια, από οπτική ίνα, δημιουργείται η σεισμική εικόνα. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν χωρίς να παρεμποδίζεται η παραγωγή, και σε μη παράλληλη διάταξη.

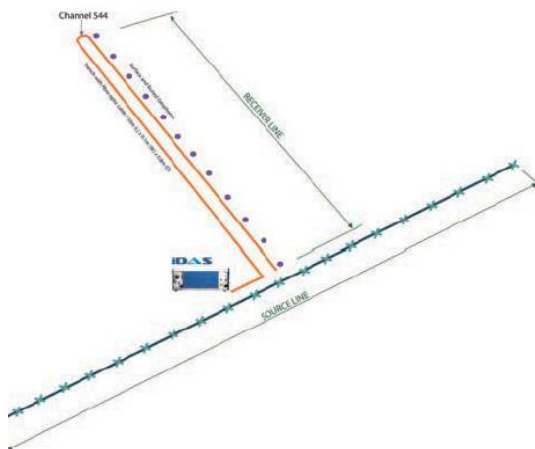
Η τεχνολογία iDAS συνδυάζει την ακρίβεια σημειακού αισθητήρα παρέχοντας εκτενή κάλυψη μέσω κατανεμημένου αισθητήρα. Οι διαφορές σημειακού και κατανεμημένου αισθητήρα είναι ότι ο σημειακός λαμβάνει μετρήσεις μόνο στη θέση του δέκτη. Χρησιμοποιεί την οπτική ίνα για τη μετάδοση του σήματος από τον μετατροπέα στο καταγραφικό σύστημα και αντίστροφα. Ο σημειακός αισθητήρας εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια και γρήγορη μέτρηση. Αντίθετα οι κατανεμημένοι αισθητήρες, χρησιμοποιούν την οπτική ίνα ως αισθητήριο στοιχείο, χωρίς ενδιάμεσους δέκτες. Εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που απαιτείται εκτενής κάλυψη. Η διαδικασία που ακολουθείται σε κατανεμημένο αισθητήρα είναι η εξής: Σειρές παλμού φωτός διοχετεύονται στην οπτική ίνα και το οπισθοσκεδάζόμενο φως καταγράφεται στην μονάδα του χρόνου. Με τον τρόπο αυτό, μετράει σε όλο το μήκος της οπτικής ίνας.

Το σύστημα iDAS καταγράφει όλες τις παραμέτρους του ακουστικού σήματος όπως πλάτος, συχνότητα και φάση σε κάθε σημείο της οπτικής ίνας. Με την ψηφιακή

επεξεργασία σήματος, αυξάνεται η ευαισθησία ανίχνευσης της ακουστικής απόκρισης. Η τεχνολογία iDAS βασίζεται στην ίδια αρχή με τον αισθητήρα DTS. Παλμός φωτός στέλνεται στην οπτική ίνα και διαδίδεται μέσω της ολικής ανάκλασης. Ένα μικρό ποσοστό σκεδάζεται προς τα πίσω. Από το σκεδαζόμενο αυτό φως είναι ικανός ο αισθητήρας iDAS να ανιχνεύσει τις μεταβολές στην τοπική αξονική τάση κατά μήκος της οπτικής ίνας. Καταγράφοντας το χρόνο του επιστρεφόμενου φωτός, μπορεί να καθορίσει τη θέση που το φως αυτό δημιουργήθηκε. Με τη συνεχή καταγραφή σε κάθε σημείο της ίνας, οι μεταβολές της τάσης, καθορίζονται σε ακουστικές ταχύτητες και παράγεται ένα δυναμικό προφίλ της τάσης. Διοχετεύοντας επαναλαμβανόμενους παλμούς στην οπτική ίνα, καταγράφονται οι μεταβολές της τάσης. Στην τεχνολογία iDAS αποφεύγονται οι παρεμβολές, διαδίδοντας μόνο ένα παλμό στην οπτική ίνα κάθε χρονική στιγμή. Η ταχύτητα του φωτός στο γυαλί είναι 200.000.000 m/s το οποίο σημαίνει ότι η μέγιστη ακουστική δειγματοληψία είναι περίπου 100 kHz για 1 km οπτικής ίνας [17]. Είναι εφικτό να αυξηθεί ο ρυθμός δειγματοληψίας, παρεμβάλλοντας παλμούς από πολλαπλά laser σε διαφορετικά μήκη κύματος.

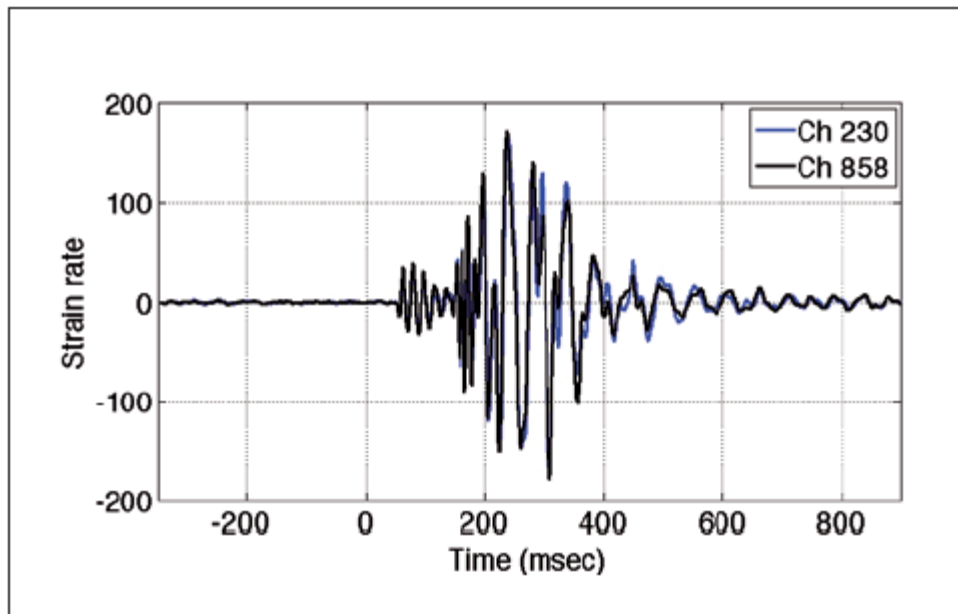
Εφαρμογή iDAS σε επιφανειακές μετρήσεις

Σε αυτό το παράδειγμα τοποθετήθηκε η οπτική ίνα σε χαντάκι βάθους 0,8μ. και αναδιπλώθηκε συμμετρικά γύρω από το κανάλι 544, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Με αυτό τον τρόπο το σήμα που θα λαμβάνεται από τη δεξιά και την αριστερή πλευρά είναι ιδανικό. Η πηγή είναι 720 kg και προκαλεί δόνηση με πτώση του βάρους.

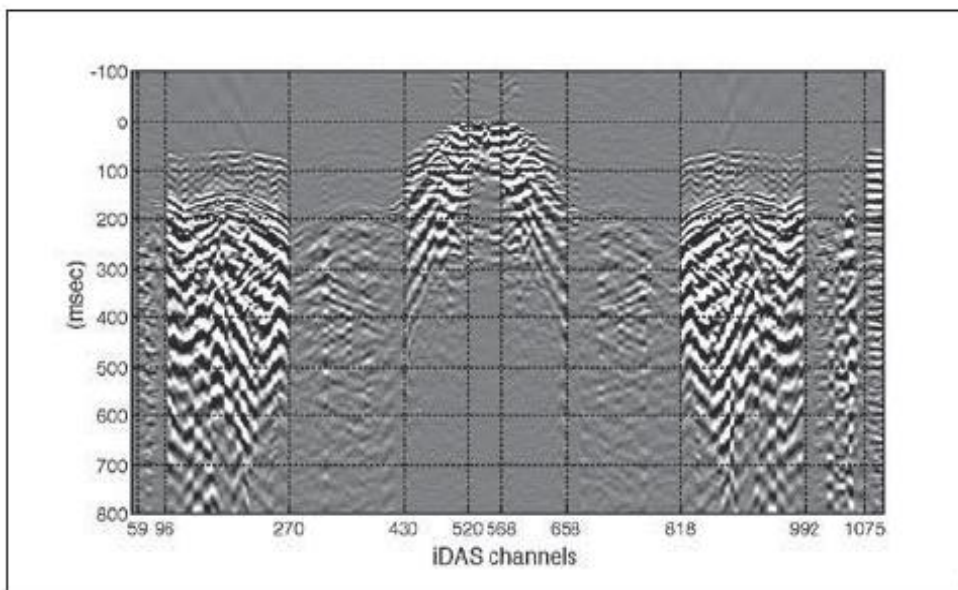


Εικόνα 19: γεωμετρία εφαρμογής iDAS, σε επιφανειακές μετρήσεις, (Parker, Sergey, Farhadiroushan 2014).

Το χρονικό διάστημα που το σήμα θα επαναλαμβάνεται καθορίζεται από τη σύγκριση του σήματος που λαμβάνεται από κανάλια σε διαφορετικά σημεία της ίνας. Τα σήματα από τα κανάλια 230 και 858, εμφανίζουν συμφωνία στη φάση και στη καθυστέρηση.

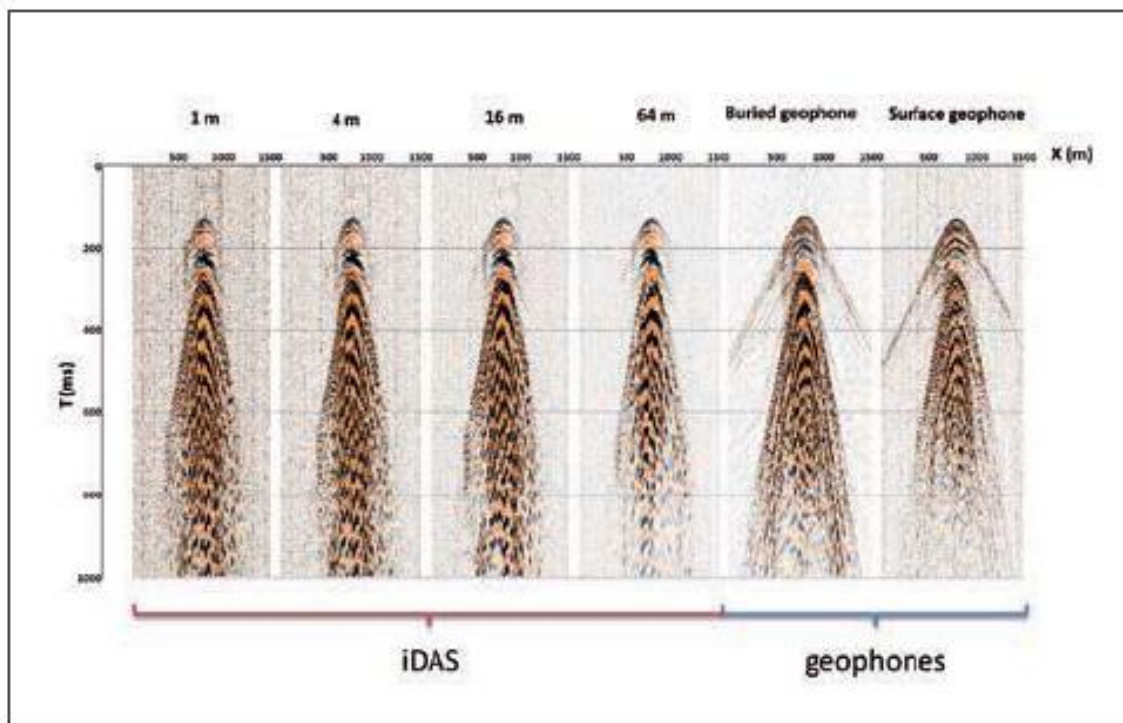


Εικόνα 20: Δεδομένα iDAS από τα κανάλια 230 και 858, (Parker,Sergey,Farhadiroushan 2014).



Εικόνα 21: Επιφανειακή σεισμική δοκιμή iDAS, όπου η οπτική ίνα είναι συμμετρική γύρω από το κανάλι 544 , (Parker,Sergey,Farhadiroushan 2014).

Σε αυτό το παράδειγμα έγινε η σύγκριση μεταξύ μετρήσεων από iDAS, και από γεώφωνα θαμμένα και με επιφανειακά γεώφωνα, με τη διάταξη κοινού γεωφώνου. Στην εικόνα 22 παρουσιάζονται τα δεδομένα iDAS σε αποστάσεις 1m, 4m, 16m και 64m. Η εικόνα δείχνει ότι για κοντινές αποστάσεις τα γεώφωνα και το iDAS εμφανίζουν παρόμοιο λόγο σήματος-θορύβου στα 4 με 16μ. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις καθώς το γεώφωνο και οι γραμμές των πηγών είναι σε ορθογώνια διάταξη, η κατευθυντικότητα του μηχανισμού της οπτικής ίνας είναι πιο φανερή.



Εικόνα 22: Σύγκριση δεδομένων iDAS, γεωφώνων σε μικρό βάθος και επιφανειακών γεωφώνων, (Parker,Sergey,Farhadiroushan 2014).

2.3.3 Ευφυές σύστημα παρατήρησης αγωγών (iPSS)

Το έξυπνο σύστημα επιτήρησης αγωγών (Intelligent Pipeline Surveillance System) χρησιμοποιείται για τη συνεχή παρακολούθηση αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαίου. Οι αγωγοί αυτοί είναι εκτεθειμένοι σε περιβαλλοντικές απειλές και μπορεί να εμφανίσουν αστοχίες. Το σύστημα iPSS χρησιμοποιεί καλώδιο οπτικής ίνας και την τεχνολογία της κατανεμημένης ανίχνευσης. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζει την τεχνολογία της κατανεμημένης ακουστικής και θερμοκρασιακής ανίχνευσης. Για τη θερμοκρασιακή ανίχνευση, χρησιμοποιεί το σύστημα ULTIMA DTS που παρέχει πολυκάναλη δυνατότητα μέχρι 40 km ανά κανάλι σε μονότροπη ή πολύτροπη ίνα [19]. Η ακουστική ανίχνευση βασίζεται στο σύστημα iDAS λειτουργώντας μέχρι τα 40 km, χωρίς ενδιάμεσους σταθμούς αναμετάδοσης. Το σύστημα μετρά το πλήρες ακουστικό κύμα (πλάτος, συχνότητα, φάση) σε κάθε σημείο της οπτικής ίνας, χωρίς παρεμβολές από γειτονικά γεγονότα. Τα δεδομένα ανιχνεύονται και κατηγοριοποιούνται βάσει νευρωνικού δικτύου, και στη συνέχεια αποθηκεύονται. Εάν το γεγονός θεωρηθεί απειλή, τότε ενεργοποιείται σύστημα προειδοποίησης. Σε περίπτωση μικρορωγμάτωσης ή διαρροής ειδοποιείται ο διαχειριστής του συστήματος για το είδος του γεγονότος και τη θέση αυτού στο χάρτη. Είναι σημαντική η έγκαιρη αντιμετώπιση των προβλημάτων σε αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου, ώστε να μειώνονται τα επεμβατικά κόστη.

Το σύστημα iPSS πλεονεκτεί σε σχέση με συμβατικά συστήματα παρακολούθησης γιατί τα γεγονότα καταγράφονται σε πραγματικό χρόνο, και δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστεί η θέση τους. Με αυτό τον τρόπο, η παρακολουθήση εκτείνεται σε όλο το μήκος του αγωγού, χωρίς να υπάρχουν νεκρές ζώνες. Το σύστημα μπορεί να ελέγχει εκατοντάδες km, ενώ μπορεί να ανιχνεύσει ακόμη και μικρο-ρωγμές πριν αυτές γίνουν διαρροές. Σημαντική είναι η μεγάλη ευαισθησία του συστήματος, ακόμα και σε αρχικές ενδείξεις μικρο-μετακινήσεων εδάφους για την αποφυγή διαρροών.

Εφαρμόζεται και σε νέους αγωγούς, αλλά και σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις, ακόμη και σε οπτικές ίνες που εφαρμόζονται στις τηλεπικοινωνίες. Υπάρχει η δυνατότητα της προσωρινής ή της μόνιμης επιτήρησης του αγωγού που εξαρτάται από τις συνθήκες του αγωγού. Το σύστημα iPSS προσφέρει την ευαισθησία και την ακρίβεια εντοπισμού που δεν μπορεί να επιτευχθεί με άλλες τεχνολογίες [19].

Κεφάλαιο 3

3.1 Παράδειγμα εφαρμογής VSP μεθόδου στους πρόποδες της Βρετανικής Κολούμπια.

Στους πρόποδες των Καναδικών βραχωδών Όρεων υπάρχει ένα κλασσικό παράδειγμα λεπτής ζώνης πτύχωσης–επώθησης. Οι σχιστόλιθοι του Ιουρασικού Fernie σχηματισμού, διαχωρίζουν τους έντονα πτυχωμένους και αλληλοκαλυπτόμενους σχηματισμούς του Ιουρασικού και του Κρητιδικού από τις δομές επωθήσεων στους ταμιευτήρες δολομίτη του Τριαδικού και του ανώτερου Παλαιοζωικού.

Η περιοχή Monkam βρίσκεται στους πρόποδες της Βρετανικής Κολούμπια με ένα μεγάλο αριθμό κοιτασμάτων που παράγουν όξινο αέριο από ανθρακικούς σχηματισμούς του ανώτερου Τριαδικού Pardonet και Baldonnel. Η παρούσα φάση της γεώτρησης ξεκίνησε το 1987 και υπήρξε εξαιρετικά επιτυχημένη με πολλές ανακαλύψεις κοιτασμάτων φυσικού αερίου σε ποσοστό επιτυχίας 75%. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και είναι δομικά περίπλοκη με αποτέλεσμα η απόκτηση, επεξεργασία και ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων να είναι τεχνικά δύσκολη και να απαιτεί προσεκτική ανάλυση για να αποδώσει καλά αποτελέσματα. Ο συνδυασμός των σεισμικών και των επιφανειακών γεωλογικών δεδομένων κρίνεται απαραίτητος για τον ακριβή ορισμό των υπογείων στόχων.

Η δομή έχει ερμηνευτεί από στρωματογραφικά δεδομένα, VSP στοιχεία, και λεπτομερή στοιχεία που παρέχονται από εργαλεία απεικόνισης. Η ρωγμάτωση είναι διάχυτη στα άνω άκρα των πτυχώσεων κάτι που ενισχύει τα ποσοστά ροής 40 ft³ την ημέρα αερίου. Το ζητούμενο είναι να απεικονιστούν αυτές οι ζώνες των πτυχώσεων. Ωστόσο αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, καθώς τα φρέατα της γεώτρησης χάνουν συχνά τις δομές.

Η περίπτωση που μελετάται παρουσιάζει πως αναθεωρημένα γεωλογικά μοντέλα από τα αρχικά φρέατα γεωτρήσεων αυξάνουν την πιθανότητα επιτυχίας σε μια προτεινόμενη περιοχή. Η επιτυχία της έρευνας στην περιοχή εξαρτάται από τον εντοπισμό των ζωνών και των δομών πτυχώσεως στο επίπεδο του Τριαδικού. Σε αυτό το παράδειγμα περιγράφονται δύο περιπτώσεις μελέτης γεωτρήσεων που χρησιμοποιούν ολοκληρωμένη γεωλογική και γεωφυσική προσέγγιση για τον εντοπισμό της οροφής της πτύχωσης ακολουθώντας αρχικά ανεπιτυχείς γεωτρήσεις [20].

3.2 Στρωματογραφία περιοχής

Ο πιο παλιός σχηματισμός, σύμφωνα με τον (Davies 1997a) που ανήκει στο Τριαδικό είναι ο σχηματισμός **Montney** που αποτελείται από δολομιτικούς σχιστόλιθους και ιλύ με κατά τόπους λεπτές στρώσεις ψαμμιτών και έχει αποτεθεί σε λεκανοειδές-θαλάσσιο περιβάλλον. Ο σχηματισμός **Halfway** περιλαμβάνει ψαμμίτες, ενώ ο σχηματισμός Charlie lake παριστά ένα μείγμα από αλατούχες ή μη δομές. Οι κυρίαρχες λιθολογίες είναι δολομίτες και σχιστόλιθοι, ιλυόλιθοι με ψαμμίτες, λεπτά δολομιτικά και ασβεστολιθικά στρώματα και δολομίτες με ανυδριτικά στρώματα [20].

Lithology	Formation & Thickness	Map	Series	
	Dunvegan Fm 300 m		Lower Cretaceous	Dunvegan Wedge
	Cruiser Fm 210 m			
	Goodrich Fm 290 m			
	Hasler Fm 300 m			
	Commotion Fm 350 m			
	Moosebar Fm 250 m			
	Gething Fm 400 m		Jurassic	Mannville Wedge
	Cadomin Fm 40 m			
	Nikanassin 1410 m	Bj Mn Bp		
	Monteith Fm 290 m		Triassic	Fernie-Kootenay Wedge
	Fernie Fm 300 m			
	Northern Fm 14 m			
	Pardonet Fm 55 m			
	Baldonnel Fm 65 m			
	Charlie Lake Fm 350 m		Triassic	
	Halfway Fm 7m			
	Montney Fm 450 m			
	Alton Fm 10m		Permian	
	Debolt Fm		Mississippian	

Εικόνα 23: στρωματογραφία περιοχής(Cooper,2004).

Οι κυρίαρχες δομές του ταμιευτήρα, είναι οι βιοκλαστικοί δολομίτες του σχηματισμού **Baldonnel** και ο σχηματισμός **Charlie Lake**. Τα ανθρακικά του σχηματισμού **Pardonet**, συμβάλλουν τοπικά στην παραγωγικότητα κυρίως μέσω δικτύων θραύσης.

Η ζώνη πτυχώσεων-επωθήσεων βρίσκεται ανάμεσα σε σειρές μεγάλων επωθήσεων του Παλαιοζωικού στα δυτικά και στην ιζηματογενή λεκάνη στα ανατολικά. Η ένταση της πτύχωσης και το μέγεθος της επώθησης γενικά μειώνεται προς τα βόρεια. Ακόμη παρατηρούνται ρήγματα οποιουδήποτε μεγέθους του Ιουρασικού-Κρητιδικού στην επιφάνεια και πολυάριθμες πτυχώσεις.

Η στρωματογραφία των μετά-Τριαδικών σχηματισμών σχετίζεται με την ιστορία επικάθησης των νησιωτικών και ηπειρωτικών σχηματισμών που αποτελούν τον κεντρικό πυρήνα της Καναδικής Cordillera (οροσειρά). Αυτές οι δομές παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραμόρφωση των Ιουρασικών και μετέπειτα ιζημάτων.

Η παλαιότερη κλαστική σφήνα αποτελείται από τους σχηματισμούς Fernie και Kootenay (Cant and Stockmal, 1989). Η δομή Kootenay συσχετίζεται με την Nikannassin

στους πρόποδες της Βρετανικής Κολούμπια (Stott, 1968). Η απόθεση του ηπειρωτικού περιθωρίου δημιούργησε ένα κενό ακολουθώντας από ταχεία βύθιση της λεκάνης στην οποία οι σχηματισμοί Nordegg και Fernie απόθεθηκαν. Η σημερινή ενότητα Fernie και Nikanassin διατηρεί την μορφολογία της αρχικής λεκάνης. Η επόμενη κλαστική σφήνα (Cant and Stockmal 1989) ξεκίνησε με υπολείμματα του Σχηματισμού Cadomin που προέρχεται από την προσφάτως αναδυόμενη και ενεργά διαβρωσιγενή ορογενετική ενδοχώρα προς τα δυτικά. Η νεότερες κλαστικές σφήνες εμφανίζουν κυκλικές αλληλουχίες που σχετίζονται με τις αλλαγές του επιπέδου της θάλασσας και τεκτονικά γεγονότα κατά την ορογένεση.

Αποτελέσματα διάτρησης και σεισμικά δεδομένα δείχνουν ότι η κυρίαρχη τεκτονική δομή εντός των στρωμάτων του Τριαδικού, είναι η δομή Montney με ανώτερη την Charlie Lake και δολομίτες του Baldonnel που ελέγχουν την περιοδικότητα των δομών (Cant and Stockmal 1989).

3.3 Ιστορία της εξερεύνησης

Η περιοχή Monkman έχει διερευνηθεί κατά διαστήματα από τα τέλη της δεκαετίας του 1950 (Montgomery, 1994). Η εταιρεία Triad Oil κατά την διάρκεια της αρχικής φάσης εξόρυξης (τώρα Talisman Energy), διάνοιξε τρεις γεωτρήσεις οι οποίες τοποθετήθηκαν με βάση την επιφανειακή γεωλογία.

Η διατρητική δραστηριότητα και τα ποσοστά επιτυχίας έχουν διακυμάνσεις κατά την διάρκεια των χρόνων. Το πρώτο εμπορικά πεδίο φυσικού αερίου (Sukunka) ανακαλύφθηκε το 1965 από επιφανειακή γεωλογία και δεδομένα σεισμικής ανάκλασης (Barss and Montandon, 1981). Σε περίοδο 10 χρόνων έγιναν 12 γεωτρήσεις οι οποίες εγκαταλήφθηκαν εκτός από δύο μη εμπορικές γεωτρήσεις. Αυτό αποδεικνύει τη δυσκολία της εξόρυξης εξ αιτίας των φτωχών σεισμικών δεδομένων της εποχής.

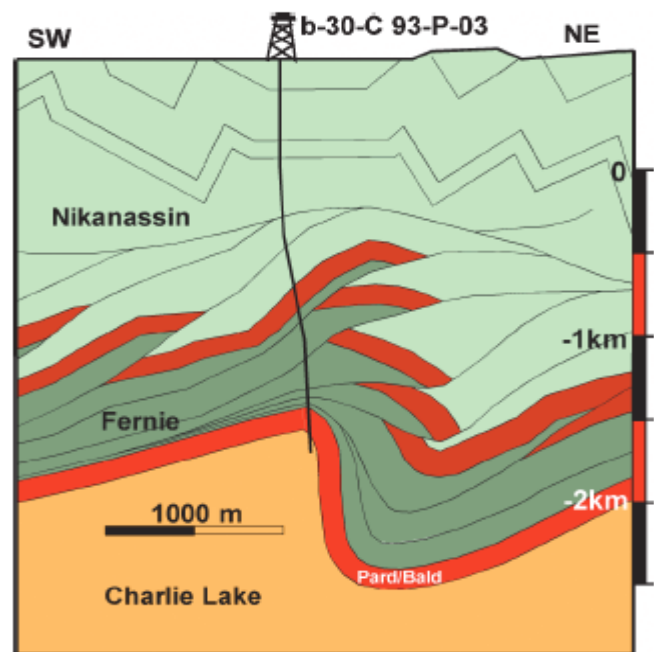
Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 διατρήθηκαν ακόμα 15 γεωτρήσεις, και έξι εμπορικές γεωτρήσεις απέδωσαν επαρκή αποθέματα για να επιτρέψουν την ανάπτυξη των υποδομών. Μια σειρά από μη εμπορικές γεωτρήσεις το 1980 και 1981 σε συνδυασμό με την αδύναμη αγορά φυσικού αερίου, ουσιαστικά σταμάτησαν το έργο. Το 1988 η ανακάλυψη της Shell ανανέωσε το ενδιαφέρον για την εξόρυξη. Την επόμενη δεκαετία είχαν διατρηθεί 76 γεωτρήσεις από τις οποίες οι 20 ήταν μη εμπορικές και 39

ήταν εμπορικές. Δέκα (10) από τις εμπορικές έδωσαν υψηλά ποσοστά ροής μεγαλύτερα των 50 mmscf/d κάτι το οποίο έκανε την επένδυση πιο ελκυστική.

Η διάχυτη ρωγμάτωση παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς το πρωτογενές πορώδες στους ταμιευτήρες κατά μέσο όρο είναι 4%. Ταμιευτήρες με έντονη ρωγμάτωση μπορούν να παράγουν μεγαλύτερα από 50 mmscf/d, ενώ γεωτρήσεις σε θέσεις με λιγότερη ρωγμάτωση είναι συχνά μη εμπορικές. Οι παγίδες βρίσκονται εντός των μεταμορφωμένων σχιστόλιθων του σχηματισμού Fernie. Τα πετρώματα του ταμιευτήρα μπορεί να είναι οι σχηματισμοί Fernie και Nordegg, και εναλλακτικά οι σχιστόλιθοι του Pardonet ή σε βαθύτερους σχηματισμούς του Τριαδικού.

3.4 Περίπτωση μελέτης 1: Γεώτρηση *Talisman Burlington Wolverine b-30-C/093-P-03*

Η γεώτρηση Talisman Burlington Wolverine είναι βορειοανατολικά του ποταμού Murray. Η γεώτρηση διανοίχθηκε το 1993 για να προσδιορισθεί η δομή με δισδιάστατα σεισμικά δεδομένα. Το στρωματογραφικό μοντέλο πριν την διάτρηση βασίστηκε σε σεισμικά δεδομένα και επιφανειακή γεωλογία. Η αρχική διάτρηση είχε εγκαταληφθεί λόγω της υπερβολικής ροπής στους συμπιεσμένους σχιστόλιθους του σχηματισμού Fernie.



Εικόνα 24: Στρωματογραφικό μοντέλο της γεώτρησης βασισμένο σε σεισμικά δεδομένα και επιφανειακή γεωλογία (Cooper, 2004).

Όταν η γεώτρηση αποκαταστάθηκε, τα δεδομένα του βάθους στο χαμηλότερο σημείο της γεώτρησης απέδειξαν ότι η γεώτρηση έχασε το στόχο.

Η ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων για να καθοριστεί η ακριβής τοποθεσία είναι, προσεγγιστική. Τα αποτελέσματα της ανισοτροπίας και της διάθλασης πάνω από το στόχο, δεν μπορούν να προβλεφθούν σε περιοχές με πολύπλοκη γεωλογία.

Η ποιότητα της σεισμικής εικόνας εξαρτάται από την επιλογή των παραμέτρων απόκτησης και το διάγραμμα ροής της επεξεργασίας. Ακόμα, το πεδίο ταχυτήτων δεν μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια. Έτσι, δεν είναι ασυνήθιστο κατά τη διάνοιξη να μην εντοπίσει τον ταμιευτήρα και να προχωρήσει μέχρι να είναι σαφές ότι ο στόχος έχει χαθεί ή ότι η ερμηνεία είναι λανθασμένη. Μία VSP, κλισιμετρικά δεδομένα, και / ή άλλες καταγραφές μπορούν να μειώσουν την αβεβαιότητα σε δομή επαναστόχευσης.

3.4.1 Συμβολή της σεισμικής μεθόδου VSP στη γεώτρηση Talisman

Η σεισμική μέθοδος VSP παρέχει πληροφορίες για τη σεισμική ταχύτητα αρκετά μακριά από το φρέαρ της γεώτρησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε συνδυασμό με κλισίμετρο και άλλες πληροφορίες διαγραφιών. Σημαντικοί παράμετροι είναι η κλίση της γεώτρησης και η θέση της πηγής, η οποία στην περιοχή του Monkman γενικά περιορίζεται από το ανάγλυφο. Μερικά αρχικά μοντέλα πριν από τη συλλογή δεδομένων με τη σεισμική μέθοδο VSP λήφθηκαν υπόψη στον σχεδιασμό του πειράματος.

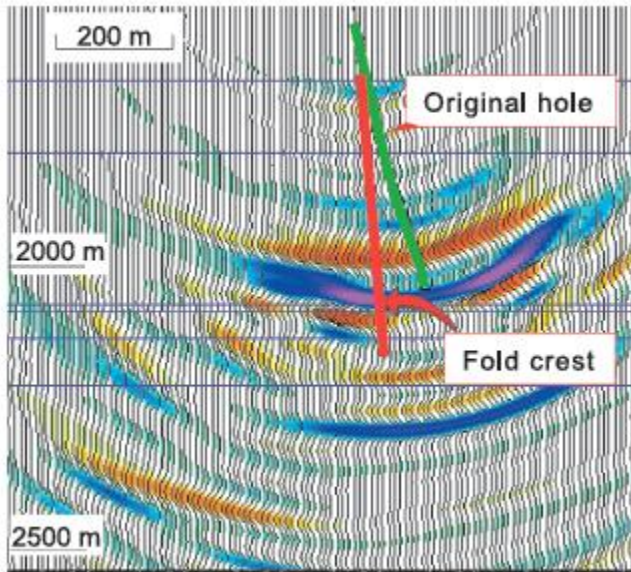
Η θέση της πηγής βορειοανατολικά της γεώτρησης ήταν στο ίδιο επίπεδο με την γεώτρηση. Αυτή η γεωμετρία επιτρέπει τα δεδομένα να υποβάλλονται σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας το VSP αλγόριθμο χωροθέτησης κατά Kirchhoff σε μια προσπάθεια να απεικονιστεί η κορυφή της πτύχωσης (hinge zone) χρησιμοποιώντας την μέθοδο των (Slawinski και Parkin 1996).

Η μέθοδος βασίζεται στη αρχή ότι σεισμική πηγή, δέκτης, και σημειακός σκεδαστής σε ομογενές ιστροπικό μέσο υποδεικνύει ότι οι πιθανές θέσεις του σκεδαστή ορίζουν καμπύλη που είναι τμήμα έλλειψης (Slawinski και Parkin 1996). Το σημείο της φωτίζουσας σεισμικής ενέργειας είναι κορυφή της πτύχωσης στο σχηματισμό Pardonet, ο επιθυμητός στόχος για τη γεώτρηση [20].

Διαφορετικοί συνδυασμοί της θέσης πηγής-δέκτη θα αποδώσει διαφορετικά τμήματα έλλειψης στην χωροθετημένη εικόνα των δεδομένων VSP. Η τομή αυτών των τμημάτων δείχνει την πιθανή θέση του σημειακού σκεδαστή (Slawinski και Parkin, 1996). Η πολυπλοκότητα των δομών στρεβλώνει τις σεισμικές ακτίνες και προκαλεί διακυμάνσεις στο χρόνο από την επιφάνεια προς το στόχο.

Η νέα γεώτρηση σχεδιάστηκε από τα στρωματογραφικά δεδομένα της αρχικής σε συνδυασμό με δεδομένα της VSP. Η νέα γεώτρηση συνάντησε την κορυφή του

Σχηματισμού Pardonet 30 m υψηλότερα από την πρόβλεψη του μοντέλου το οποίο ήταν εξαιρετικά κοντά στην πραγματική γεωμετρία της δομής.



Εικόνα 25: VSP δεδομένα χωροθέτησης από την αρχική γεώτρηση (Cooper, 2004).

3.4.2 Μελέτη Περίπτωσης 1:

Σύμφωνα με τους Cooper et al., 1996; Slawinski and Parkin, 1996; και Morrison et al., 1998 η οριζόντια γεώτρηση επιβεβαίωσε την αξία της VSP στην επίτευξη του στόχου δηλαδή στον εντοπισμό του ταμειυτήρα. Η VSP είναι πιο αποτελεσματική, όταν συνδυάζεται και με άλλα δεδομένα, όπως στρωματογραφικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα από την αρχική γεώτρηση. Ήταν μια τεχνική επιτυχία κατά το ότι ο στόχος επιτεύχθηκε, αλλά και μια εμπορική αποτυχία, λόγω του χαμηλού πορώδους στον ταμειυτήρα. Τα δεδομένα της VSP έχουν χρησιμοποιηθεί πλέον σε αρκετές γεωτρήσεις για την πιο αποτελεσματική στόχευση από αρχικά ανεπιτυχή φρέατα γεώτρησης.

Το αποτέλεσμα είναι πιο αποδοτικό όταν το αρχικό φρέαρ γεώτρησης είναι εσφαλμένα τοποθετημένο σε σχέση με τη δομή.

Οι αιτίες της λανθασμένης θέσης της αρχικής γεώτρησης ποικίλουν και περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1) Η δισδιάστατη χωροθέτηση τείνει να γίνει μακρύτερα και βορειοανατολικά από την οροφή του Τριαδικού ανακλαστήρα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αλγόριθμοι χωροθέτησης δεν είναι ικανοί να χωροθετήσουν σωστά τις απότομες κλίσεις στο άνω άκρο. Η τροποποιημένη μέθοδος VSP σταθερής απόστασης πηγής και γεώτρησης (single-offset) (Slawinski και Parkin 1996), είναι πιο αποτελεσματική στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, εάν το φρέαρ γεώτρησης βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 150m (και κατά προτίμηση < 60 m) της στοχευμένης Τριαδικής ζώνης. Εάν το φρέαρ της γεώτρησης είναι πολύ μακρύτερα η πληροφορία γίνεται πάρα πολύ ασαφής για να είναι αξιόπιστη.

2) Οι γεωτρήσεις είναι στο πίσω μέρος της επώθησης, όπου η θραύση και η παραγωγικότητα είναι πιθανό να είναι φτωχή. Σε αυτή την περίπτωση στην περιοχή Monkman, η VSP είναι περιορισμένης αξίας στο σχεδιασμό της νέας γεώτρησης.

3) Δύσκολες συνθήκες γεωτρήσεων επικρατούν στους σχιστόλιθους του σχηματισμού *Fernie*. οι οποίοι είναι τεκτονικά συμπιεσμένοι και τοπικά μικρορωγματούμενοι ιδίως όσον αφορά το βορειοανατολικό όριο βύθισης. Έτσι, φρέατα που διαπερνούν αυτή τη δομή είναι επιρρεπή σε προβλήματα όπως απόκλιση της γεώτρησης, ή το γεωτρήπανο να κολλήσει. Αυτό οδηγεί συνήθως την γεώτρηση να πρέπει να εγκαταλειφθεί.

4) Διακυμάνσεις στη τμηματική ταχύτητα στην οροφή του σχηματισμού *Pardonet*. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων στα στρώματα από την επιφάνεια στην οροφή του Σχηματισμού *Pardonet* μπορεί να ποικίλει από 3900 m/s έως 4800 m/s. Ως αποτέλεσμα, η εκτίμηση της θέσης του στόχου μπορεί να ποικίλει σημαντικά από την προβλεπόμενη τιμή πριν τη διάτρηση. Σε αυτή την περίπτωση, η εκτίμηση της ταχύτητας από VSP έρευνα μπορεί να είναι αρκετή για να σχεδιαστεί η επόμενη πορεία δράσης.

3.5 Μελέτη Περίπτωσης 2:

Η PCP Shell Boulder γεώτρηση, b-22-J 93- O-08

Η γεώτρηση, βρίσκεται στην ανατολική πλευρά της επιφάνειας της στρωματογραφικής πτύχωσης στο βόρειο τμήμα της Monkman. Είναι νοτιοανατολικά της γεώτρησης 93-O-08 J στο πεδίο Boulder, που ανακαλύφθηκε το 1988. Η γεώτρηση PCP Shell b-22-J 93-O-08, διανοίχθηκε το 1944, με εκτιμώμενη παραγωγή 40 mmcf/d [20].

Η δομή ελέγχθηκε για πρώτη φορά από τη Talisman Ocelot α-88-H93-O-08 γεώτρηση (εικόνα 26). Το στρωματογραφικό μοντέλο πριν τη διάνοιξη της γεώτρησης, προσδιορίστηκε από την επιφανειακή γεωλογία και από 3-D σεισμική έρευνα της εταιρείας Shell. Περιγράφει πτυχωμένα στρώματα του Τριαδικού με τα βορειοανατολικά και νοτιοδυτικά άκρα να αποκόπτονται στους σχιστόλιθους του σχηματισμού Montney. Πάνω από τον σχηματισμό Fernie, ο Nikanassin παραμορφώνεται σε δυσαρμονικές σειρές πτύχωσης με μικρές επωθήσεις.



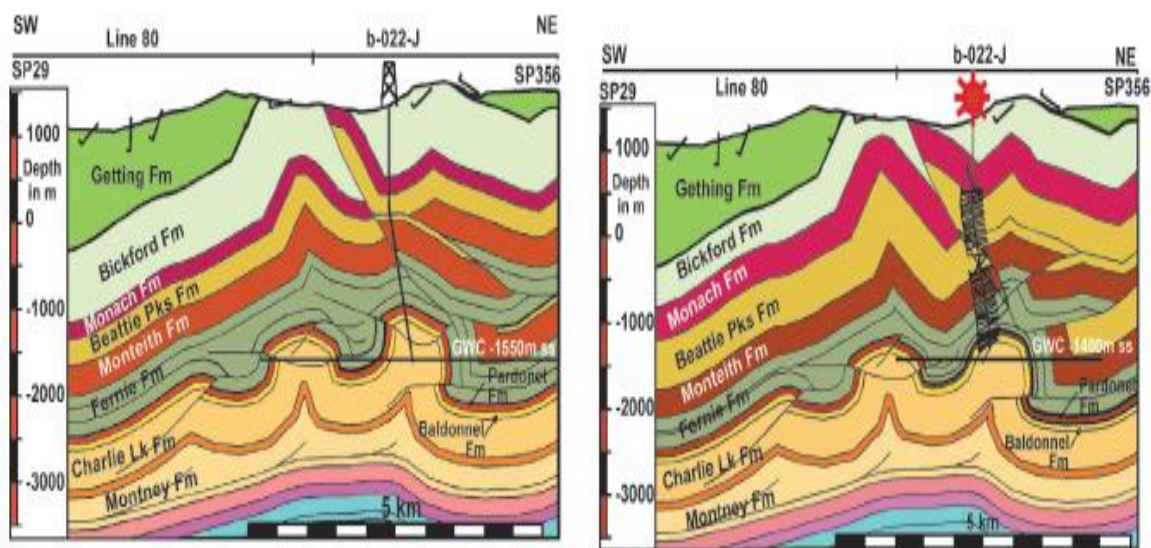
Εικόνα 26: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Boulder, με τις θέσεις των πηγών και τις δισδιάστατες σεισμικές γραμμές μελέτης (Cooper, 2004).

3.5.1 Το μετέπειτα στρωματογραφικό μοντέλο της αρχικής γεώτρησης

Στερεόγραμμα για σχηματισμούς τμήματος του ταμιευτήρα δείχνει ότι η γεώτρηση διεισδύει στο πίσω άκρο της δομής, αντί για το μπροστά τμήμα το οποίο είχε προβλεφθεί αρχικά. Αυτό το σφάλμα θέσης μπορεί να είναι αποτέλεσμα της στρέβλωσης των σεισμικών ακτίνων λόγω των πολύπλοκων δομών οι οποίες διαφοροποιούν τη θέση της δομής στη χωροθετημένη σεισμική τομή.

Η αρχική γεώτρηση έδειξε έντονα διάρρηγμένους σχηματισμούς Baldonnel. Οι διαρρήξεις αυτές ήταν μικρές και στενές με υπολογισμένα υδραυλικά ανοίγματα που σπάνια υπερέβαιναν τα 0,001 mm. Οι διαρρήξεις φαίνεται να είναι διάχυτες και δεν επηρεάζουν σε γενικές γραμμές, τη ταχύτητα ροής. Οι διαγραφίες αναφέρουν υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις παντού, κάτι το οποίο υποδηλώνει ότι δεν παρουσιάζεται ζώνη νερού στην γεώτρηση. Το πορώδες των σχηματισμών του ταμιευτήρα ήταν σημαντικά μεγαλύτερο από ότι είχε προβλεφθεί.

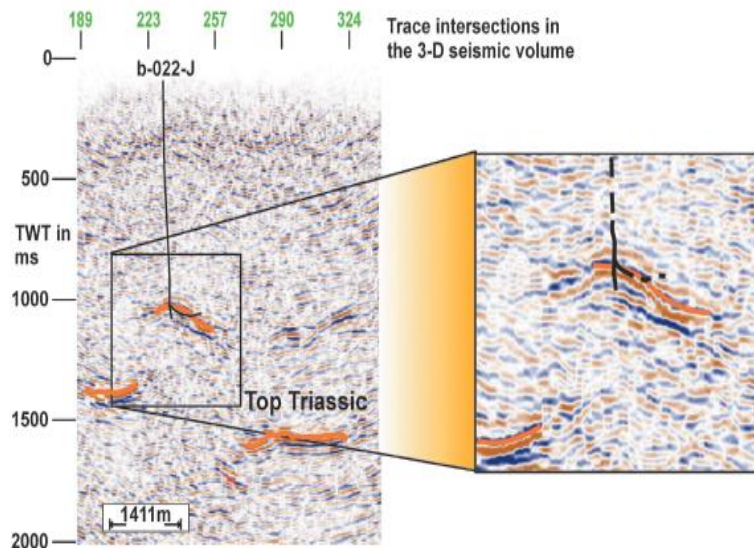
Η διάτρηση έδινε 14,5 mmcf/d φυσικού αερίου στα 7900 kPa. Το αρχείο καταγραφής της παραγωγής του φρέατος κατά τη διάρκεια της δοκιμής ροής έδειξε ότι η πλειοψηφία του αερίου ρέει μέσα από μικρού πάχους ζώνη (Σχηματισμοί Baldonnel). Σε αυτή τη διάτρηση διακρίνεται ότι το παραγωγικό στρώμα είναι διάχυτα μικρορωγματωμένο.



Εικόνες 27-28: Στρωματογραφικό μοντέλο πριν την αρχική γεώτρηση και μετά την οριζόντια (Cooper,2004).

3.5.2 Σχεδιασμός της οριζόντιας γεώτρησης

Ο σχετικά απογοητευτικός ρυθμός ροής του φρέατος οδήγησε στο σχεδιασμό οριζόντιας γεώτρησης που να στοχεύει στην κορυφή της πτυχής, και να τέμνει περισσότερα δίκτυα ρωγμών ώστε να βελτιωθεί η απόληψη. Τα τρισδιάστατα σεισμικά δεδομένα υποδηλώνουν ότι μια μετατόπιση 500 m οριζόντια θα εντοπίσει τον στόχο.

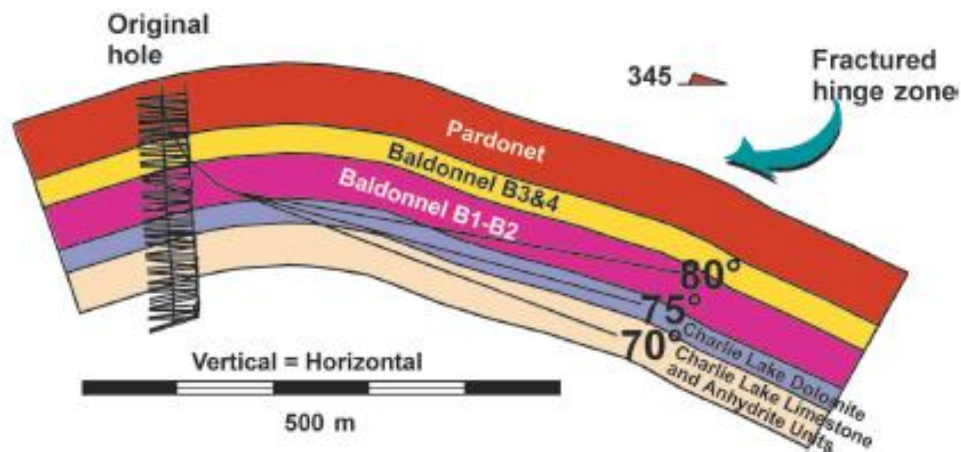


Εικόνα 29:
Ερμηνεία των τρισδιάστατων σεισμικών δεδομένων της Shell, πριν από την οριζόντια γεώτρηση. Με πορτοκαλί είναι η κορυφή του Τριαδικού σχηματισμού. Η εικόνα είναι κατά μήκος του προτεινόμενου

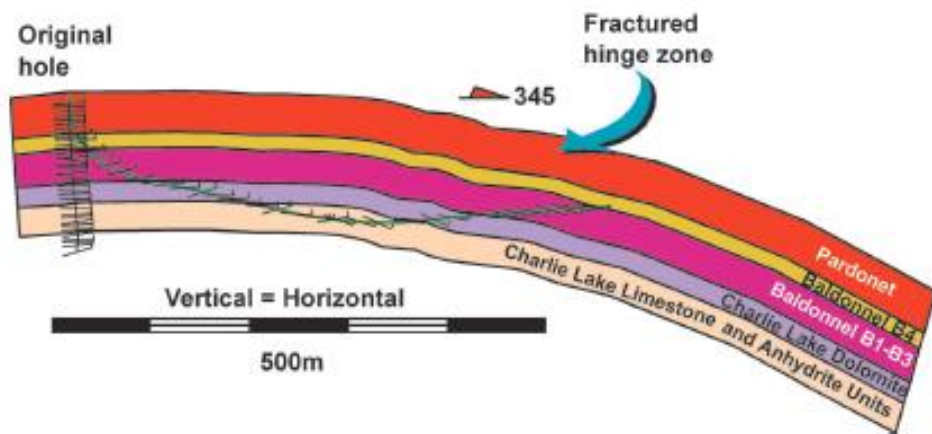
αζιμουθίου της οριζόντιας γεώτρησης (Cooper, 2004).

Το πιο αποτελεσματικό αζιμούθιο για να φτάσουν στο μπροστινό μέρος της δομής από το αρχικό φρέαρ θα ήταν προς τα βορειοανατολικά ωστόσο, αυτό δεν ήταν εφικτό λόγω της εγγύτητας του ανατολικού ορίου της μονάδας φυσικού αερίου.

Αυτά τα όρια έχουν σχεδιαστεί για να αποτραπεί η αθέμιτος παροχή του αερίου, δίπλα στη μονάδα στην οποία εξελίσσεται άλλη παραγωγή. Η γωνία αζιμουθίου για την νέα γεώτρηση επιλέχθηκε στις 345°. Η επιλογή αυτή προέκυψε από τον αναθεωρημένο χάρτη βάθους, τα 3-D σεισμικά δεδομένα, τα δεδομένα της γεώτρησης και τα συστήματα διάρρηξης. Αυτό έδωσε ένα περιθώριο λάθους εάν η γεώτρηση έστριβε προς τα δεξιά όταν το γεωτρήπανο διασχίσει το άνω άκρο [20]. Με αυτά τα δεδομένα, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο κατά μήκος της γραμμής του αζιμουθίου που επιλέχθηκε. Μια γωνία απόκλισης 80° από την κατακόρυφο επιλέχθηκε ως η καταλληλότερη γωνία για την επίτευξη της μέγιστης έκθεσης στον ταμιευτήρα του σχηματισμού Baldonnel.



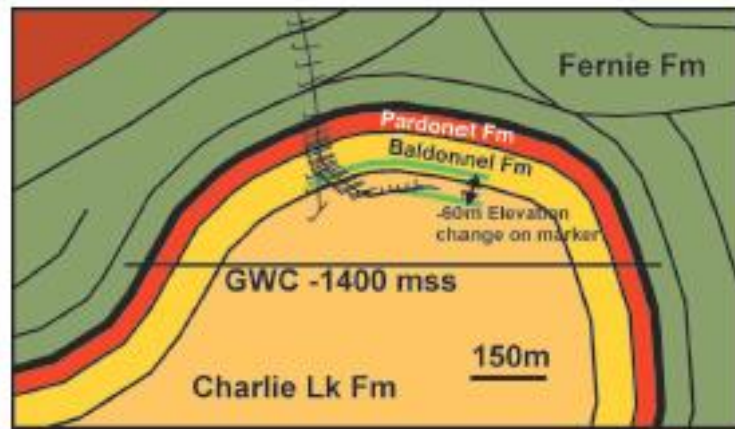
Εικόνα 31: Στρωματογραφική απεικόνιση πριν την οριζόντια γεώτρηση με δεδομένα από την αρχική γεώτρηση. Επιλέχθηκε η γωνία απόκλισης των 80° (Cooper,2004).



Εικόνα 32: Στρωματογραφική απεικόνιση, μετά την οριζόντια γεώτρηση. Η κλίση των στρωμάτων άλλαξε βαθμιαία στο τέλος της γεώτρησης, όπου η γεώτρηση διασχίζει από την κορυφογραμμή στο έμπροσθεν της δομής (Cooper,2004).

3.5.3 Στρωματογραφικό μοντέλο της νέας γεώτρησης

Η γεώτρηση φτάνει στην κορυφή του ανυδρίτη Charlie Lake και στη συνέχεια επαναδιαεισδύει τον Baldonnel σε αντίστροφη σειρά, φθάνοντας συνολικά βάθος 3109 m. Τα τρισδιάστατα δεδομένα ήταν παραπλανητικά και η διάτρηση ακολούθησε τη δυτική πλευρά του σχηματισμού για ένα μεγάλο μέρος του μήκος του πριν από τη διέλευση στην ζώνη στα τελευταία 200 m. Εξαιτίας της πτύχωσης, η οριζόντια γεώτρηση προχώρησε δυτικά για ακόμα 600 m, όπου υπήρξε μια κύρτωση και βρέθηκε δομικά υψηλότερα κατά 60 m. Στην εικόνα 30 φαίνεται το στρωματογραφικό μοντέλο μετά την οριζόντια γεώτρηση.



Εικόνα 33: Η ανύψωση της γεώτρησης Boulder (60 m) λόγω της πτύχωσης. Η επιφάνεια φυσικού αερίου-νερού (GWS Gas-Water Contact) βρίσκεται -1400 m από τη μέση στάθμη της θάλασσας. MSS: υψόμετρο από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Cooper, 2004).

Λόγω της μικρής ακτίνας καμπυλότητας της οριζόντιας γεώτρησης οι επιλογές για την καταγραφή περιορίστηκαν σε μια οπτική καταγραφή και στην καταγραφή ακτίνων-γ. Η διάρρηξη ήταν διάχυτη και αναπτύχθηκε σε όλη τη γεώτρηση με έντονα διηρηγμένες ζώνες. Η ροή της γεώτρησης είναι περισσότερο από 30 mmcf / d σε πιέσεις μεγαλύτερες από 10.000 kPa και τέθηκε στην παραγωγή τον Οκτώβριο του 1995.

3.5.4 Η ιστορία παραγωγής της γεώτρησης

Στη γεώτρηση παρατηρείται μείωση της παραγωγής από 30 mmcf/g /d αρχικά, σταθεροποιήθηκε σε 18 mmcf/g / d για λίγο, και στη συνέχεια μειώθηκε πιο αργά σε ένα ρυθμό 2,8 mmcf/g / d.

Η γεώτρηση παρήγαγε 11,4 bcf του φυσικού αερίου μέχρι το Μάιο του 2000, και από τα διαγράμματα του ρυθμού ροής συνεπάγεται απόλυτο αποθεματικό περίπου 14 bcf από τη γεώτρηση.

Αυτή η δομή ανακαλύφθηκε από τη Talisman Ocelot (γεώτρηση α-88-H 93-O-08), και μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 1999, είχαν παραχθεί 47 bcf με αναφερόμενο ρυθμό 10 mmcf/g /d [20]. Άλλες δύο γεωτρήσεις είχαν εφαρμόσει την οριζόντια γεώτρηση είχαν δύο φορές για να αποκτήσουν εμπορική αξία.

3.5.5 Μελέτη Περίπτωσης 2: Οικονομικά στοιχεία

Τα οικονομικά στοιχεία πριν τη διάνοιξη της γεώτρησης ήταν θετικά, με βάση τα αποθέματα φυσικού αερίου 47 bcf από τα οποία θα μπορούσαν αρχικά να παραχθούν σε 40 mmcf/g / d για τρία χρόνια πριν μειωθεί ο ρυθμός παραγωγής. Η οριζόντια γεώτρηση οδήγησε το κοίτασμα σε οριακό κόστος. Η ιστορία της παραγωγής δείχνει ότι τόσο ο ρυθμός παραγωγής, όσο και τα πραγματικά αποθέματα δεν ανταποκρίθηκαν στις προσδοκίες πριν την διάνοιξη. Αυτή η γεώτρηση ήταν τεχνική επιτυχία σε περιοχή πολύπλοκης δομής με δύσκολες συνθήκες γεωτρήσεων. Ωστόσο, ήταν μια οριακή εμπορική επένδυση.

Οι ρυθμοί ροής των γεωτρήσεων είναι μεταβλητοί και εξαρτώνται σε μεγάλο μέρος από το αν σημαντικό σμήνος ρηγμάτων τέμνεται από το φρέαρ της γεώτρησης. Αυτό θα πρέπει να θεωρείται ως κίνδυνος, επειδή δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα. Παρά το γεγονός ότι τα 3-D σεισμικά δεδομένα θεωρήθηκαν ότι παρέχουν μια αξιόπιστη εικόνα της γεωμετρίας της δομής, σε αυτή τη περίπτωση, ήταν επισφαλής, ακόμα και όταν τα δεδομένα προέρχονταν από το αρχικό φρέαρ.

Ενώ τα σεισμικά δεδομένα υποδείκνυαν ότι η γεώτρηση βρίσκεται στην κορυφή της πτύχωσης, τα κλισιμετρικά στοιχεία έδειχναν καθαρά ότι βρισκόταν στο πίσω μέρος της. Τα 3-D σεισμικά δεδομένα της περιοχής είναι επιρρεπή σε στρεβλώσεις των σεισμικών ακτίνων που οφείλονται στη γεωμετρία του ανακλαστήρα.

3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι δύο μελέτες περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν απεικονίζουν πώς οι νέες τεχνολογίες και η ολοκληρωμένη ανάλυση όλων των διαθέσιμων στοιχείων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την πιθανότητα η γεώτρηση να διεισδύσει στο στόχο ή να βελτιωθεί η απόληψη. Ο επιτυχής σχεδιασμός της οριζόντιας γεώτρησης απαιτεί επίσης την κατασκευή νέου αναθεωρημένου μοντέλου του υπεδάφους και της γεωμετρίας της πτυχής, με πληροφορίες πριν την διάτρηση ή και νέα δεδομένα της αρχικής γεωτρήσεως.

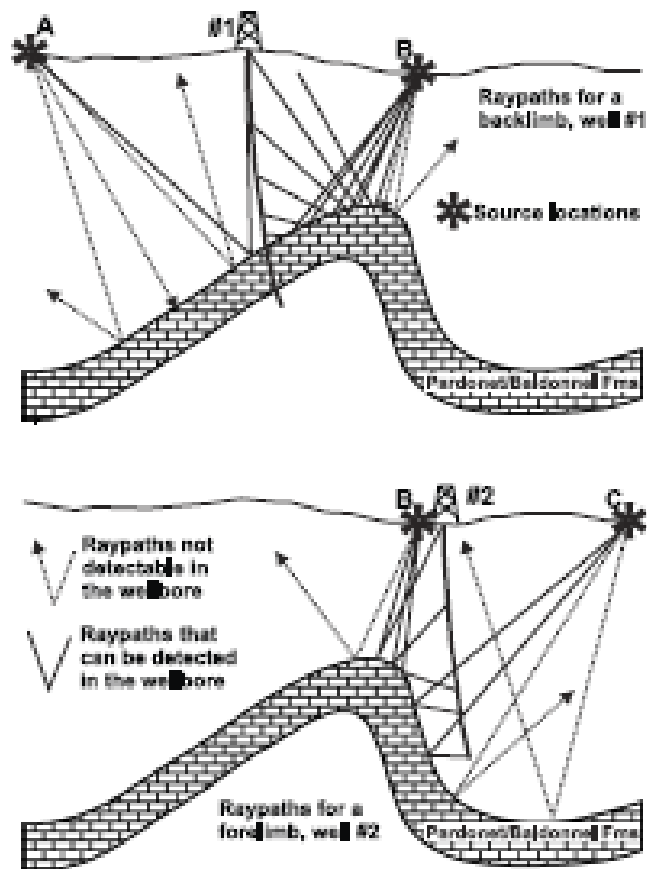
Ο πιο συνηθισμένος λόγος για την κατασκευή οριζόντιας γεώτρησης ήταν ότι η αρχική είχε χάσει τον ταμιευτήρα [20]. Αυτό συνήθως έχει προκληθεί από λανθασμένη ερμηνεία της σεισμικής τομής λόγω φτωχής ποιότητας των δεδομένων, παραπλανητική χωροθετημένη τομή ή περιορισμένο έλεγχο της σεισμικής ταχύτητας. Η αρχική γεώτρηση παρέχει επιπρόσθετα δεδομένα που αναθεωρούν το στρωματογραφικό μοντέλο.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα δεδομένα της VSP μπορούν να αποκτηθούν στην αρχική γεώτρηση για να επιβεβαιώσουν τη θέση της στοχοθετημένης ζώνης, στο νέο στρωματογραφικό μοντέλο όπως στην μελέτη περίπτωσης 1.

Στη μελέτη περίπτωσης 2, η VSP έχει περιορισμένη αξία, καθώς η αρχική γεώτρηση βρίσκεται στο πίσω μέρος της πτυχής. Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος VSP που περιγράφεται στη μελέτη περίπτωσης 1 λειτουργεί μόνο όταν η γεώτρηση είναι επί ή πέραν της κορυφής της πτυχής. Στην περίπτωση 1, η VSP μπορεί να ανιχνεύσει την κορυφή της πτυχής. Όταν το φρέαρ της γεώτρησης είναι στο πίσω μέρος της πτυχής, μπορεί να απεικονίσει μόνο το πίσω μέρος της πτυχής (εικόνα 34).

Μεταξύ 1978 και 1998 30 γεωτρήσεις είχαν επαναπροσανατολιστεί για διάφορους λόγους. Τα αποτελέσματα της οριζόντιας γεώτρησης, είναι μικτά. Σε μερικές περιπτώσεις, μια μη εμπορική γεώτρηση μπορεί να γίνει εμπορική, ή να οδηγήσει σε υψηλή αποληψιμότητα αντίθετα, σε άλλες περιπτώσεις, η οριζόντια γεώτρηση απέτυχε. Το ποσοστό μετατροπής μιας γεώτρησης από περιθωριακή σε γεώτρηση με ικανότητα παραγωγής αερίου σε εμπορικές τιμές, αγγίζει το 47%.

Αυτό υποδηλώνει ότι η οριζόντια γεώτρηση αυξάνει τα ποσοστά επιτυχίας. Έχει καταφέρει να μετατρέψει 14 από 30 αρχικά ανεπιτυχής γεωτρήσεις σε παραγωγικές.



Εικόνα 34: Οι διαδρομές των σεισμικών ακτίνων για γεωτρήσεις που βρίσκονται μπροστά και πίσω από την κορυφή της πτύχωσης. Η θέση της γεώτρησης σε σχέση με τη δομή είναι σημαντική για να απεικονιστούν οι σεισμικές ακτίνες της VSP (Cooper, 2004).

Η Shell Καναδά και Talisman έχουν επιτυχώς διατρέξει οριζόντια και άλλες γεωτρήσεις στην περιοχή Monkman. Η τεχνική επιτυχία των επιχειρήσεων αυτών έχει τονώσει οικονομικά τη Shell, την Talisman, και άλλους για τη διεξαγωγή περαιτέρω οριζόντιων γεωτρήσεων στους πρόποδες των Βραχύδων Ορέων της Βρετανικής Κολούμπια, και της Αλμπέρτα. Τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων, δείχνουν ότι οι οριζόντιες δεν αυξάνουν την περιοχή απόληψης, εκτός αν η γεώτρηση τέμνει ένα μεγάλο σύστημα ρωγμών.

Έτσι, αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση θα μπορούσε να εφαρμοστεί επικερδώς και αλλού για να δοθεί η ευκαιρία για εμπορική επιτυχία σε περιοχές που έχουν μια σύνθετη δομή.

Κεφάλαιο 4

4.1 Σύγκριση μεθόδου VSP με παθητική τομογραφία στη Δυτική Ελλάδα

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ζώνης πτυχών και επωθήσεων στον Ελληνικό χώρο είναι η ζώνη της Πίνδου. Οι επωθήσεις της ζώνης της Πίνδου επί της ζώνης Γαβρόβου και της Ιόνιας ζώνης, είναι αποτέλεσμα των τεκτονικών διαδικασιών κατά τη σύγκρουση της Απούλιας πλάκας και της Πελαγονικής. Και οι τρεις ζώνες ανήκουν στις Εξωτερικές Ελληνίδες. Η έρευνα αποσκοπεί στον εντοπισμό της εμφάνισης των εβαποριτών, που υποδηλώνει την παρουσία υδρογονανθράκων.

Η έντονη σεισμική δραστηριότητα στην Ήπειρο, και η πολυπλοκότητα των γεωλογικών δομών οδήγησαν στην διερεύνηση της περιοχής με τη μέθοδο της παθητικής σεισμικής τομογραφίας. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα δεδομένα της παθητικής τομογραφίας με δεδομένα VSP από γεώτρηση, στην ίδια περιοχή.

4.2 Γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδος

Ο Ελληνίδες οροσειρές και γενικότερα ο Ελληνικός χώρος, αποτελούν συνέχεια των Αλπικών οροσειρών. Οι οροσειρές αυτές δημιουργήθηκαν κατά τις τεκτονικές φάσεις του αλπικού ορογενετικού κύκλου. Από τις αρχές του Μεσοζωικού μέχρι και τη τελική τους πτύχωση, αποτελούσαν μέρος του αλπικού γεωσύγκλινου. Όλα τα ιζήματα που αποτέθηκαν από το Τριαδικό μέχρι το κατώτερο Μειόκαινο, ονομάστηκαν αλπικά ιζήματα. Παρόλο που το μεγαλύτερο μέρος των Ελληνίδων οροσειρών χαρακτηρίζονται από αλπικά πετρώματα, δεν ανήκουν όλα τα πετρώματα στον αλπικό κύκλο. Τα πετρώματα που απαντώνται στην Ελλάδα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: **προαλπικά**, **αλπικά** και **μεταλπικά** πετρώματα. Προαλπικά είναι τα παλαιότερα μεταμορφωμένα των οποίων οι βαθύτεροι ορίζοντες είναι Προκάμβιοι, ενώ τα μεταλπικά είναι ηλικίας νεώτερης του Κατώτερου Μειόκαινου. Αλπικά είναι τα ιζήματα που έχουν ηλικία Τριαδική και νεότερη [21].

Από γεωγραφική άποψη, οι Ελληνίδες οροσειρές βρίσκονται σε παράλληλες ζώνες που έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Στα νότια προς ανατολικά καμπτονται και ενώνονται

με τις Ταυρίδες οροσειρές της Μ.Ασίας. Από το εξωτερικό προς το εσωτερικό του γεωσύγκλινου είναι:

Ζώνη Παξών ή Προαπούλια (Px)

Ιόνιος ζώνη (I)

Ζώνη Γαβρόβου- Τρίπολης (G)

Ζώνη Ωλονού-Πίνδου (P)

Ζώνη Παρνασσού-Γκίωνας (Pk)

Υποπελαγονική ζώνη (Sp)

Πελαγονική ζώνη (PI)

Αττικοκυκλαδική ζώνη (Ac)

Ζώνη Αλμωπίας (Al)

Ζώνη Πάικου (Pa)

Ζώνη Παιονίας (Pe)

Περιοδοτική ζώνη (CR)

Σερβομακεδονική ζώνη (Sm)

Μάζα Ροδόπης (Rh)

Η διαφοροποίηση του Ελληνικού γεωσύγκλινου αρχίζει με την δημιουργία του αύλακα της Πίνδου κατά το Ανώτερο Τριαδικό. Στα περιθώρια της αύλακας εμφανίζονται βασικά ηφαιστειακά πετρώματα ως εκχύσεις μάγματος από τον μανδύα. Αποτέλεσμα αυτής της εξέλιξης, ήταν η δημιουργία ωκεάνιου φλοιού. Η Ιόνιος ζώνη ήταν μια αύλακα (ηπειρωτική λεκάνη) που αναπτύχθηκε πάνω στην Απούλια πλάκα κατά τη διάρκεια του Κατώτερου Ιουρασικού. Η Ιόνιος ζώνη αναδύεται κατά το Μειόκαινο. Η ανάδυση του υβώματος (ανθρακικής πλατφόρμας) των Παξών πρέπει να ξεκίνησε αυτή την περίοδο. Στο τέλος του Ιουρασικού έχουν σχηματιστεί οι ζώνες Γαβρόβου-Τρίπολης και Παξών. Κατά το κατώτερο Κρητιδικό δημιουργείται η Πελαγονική ζώνη και η Υποπελαγονική στα δυτικά της. Αυτό το τεκτονικό γεγονός είχε αποτέλεσμα την ανάδυση των δύο αυτών ζωνών. Το γεγονός αυτό επιτρέπει το διαχωρισμό των ζωνών σε Εσωτερικές και Εξωτερικές. Οι Εσωτερικές έχουν δεχθεί την Κατωκρητιδική πρώιμη ορογένεση αντίθετα με τις Εξωτερικές.

Κατά το Ηώκαινο, η ωκεάνια περιοχή της Πίνδου πληρώνεται από φλύσχη. Η ασβεστολιθική ιζηματογένεση συνεχίζεται στις ζώνες Παξών, Γαβρόβου-Τρίπολης και στην Ιόνιο λεκάνη. Στο τέλος του Ηώκαινου, καταστρέφεται η ωκεάνια περιοχή της Πίνδου και ανυψώνεται η ομώνυμη οροσειρά, ενώ μεταξύ αυτής και της Πελαγονικής

ζώνης αναπτύσσεται μια μολασσική τάφρος γνωστή ως Μεσοελληνική αύλακα. Κατά το τέλος του Ολιγόκαινου στην Πελαγονική ζώνη επιδρά μια νέα ορογενετική φάση με αποτέλεσμα την απόθεση μιας σειράς κροκαλοπαγών στη Μεσοελληνική αύλακα. Μετά την τελική φάση της αλπικής πτύχωσης, δημιουργούνται τεκτονικά βυθίσματα εξαιτίας του έντονου τεκτονισμού, με αποτέλεσμα την απόθεση Νεογενών μεταλπικών ιζημάτων. Αυτές οι μεταλπικές Νεογενείς και Τεταρτογενείς λεκάνες παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον γιατί μεταξύ των ιζημάτων τους εμφανίζονται λιγνιτοφόρα στρώματα. Η διεύθυνση των Ελληνικών ορέων είναι αποτέλεσμα της τεκτονικής εξέλιξης, των ορογενετικών κινήσεων και των επακόλουθων πτυχώσεων που έχουν επιδράσει στον ελληνικό χώρο.

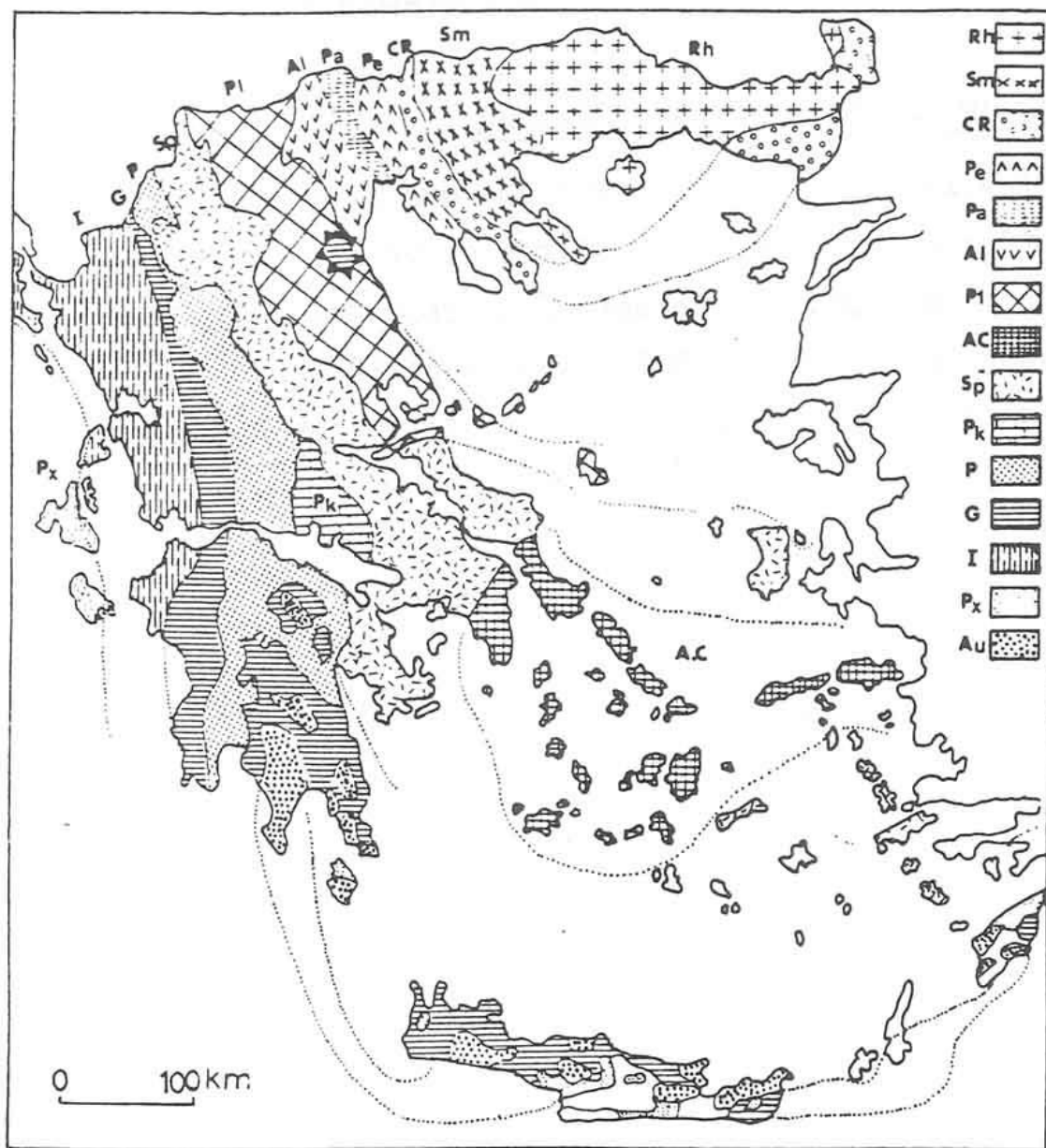
Με βάση τα πετρολογικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων, την παραμόρφωση, και τη μεταμόρφωση οι ζώνες αυτές χωρίστηκαν σε δύο κύριες περιοχές τις Εσωτερικές και Εξωτερικές ζώνες. Οι ζώνες Περιροδοπική, Παιονίας, Πάικου, Αλμωπίας, Πελαγονική, Αττικοκυκλαδική και Υποπελαγονική ανήκουν στις Εσωτερικές. Στις Εξωτερικές Ελληνίδες οι οποίες υπέστησαν τεκτονισμό από το Ηώκαινο και μετά είναι: η Προαπούλια ή ζώνη Παξών, η Ιόνια ζώνη, η ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως, η ζώνη Πίνδου, η ζώνη Παρνασσού και η Βιοτική ζώνη [22]. Οι Εξωτερικές Ελληνίδες κατέχουν τα Εξωτερικά τόξα των Ελληνίδων οροσειρών.

Η διαφορά των Εξωτερικών από των Εσωτερικών ζωνών είναι ότι οι πρώτες είχαν μια συνεχή ιζηματογένεση από το Τριαδικό μέχρι το Τριτογενές. Στο Τριτογενές και κατά την τελική ορογενετική αλπική φάση έγινε ανάδυση των Εξωτερικών ζωνών και η μοναδική πτύχωση των σχηματισμών τους. Αντίθετα οι Εσωτερικές ζώνες, υπέστησαν τη δράση των πρώιμων ορογενετικών αλπικών φάσεων, και κατά συνέπεια παρουσιάζουν πληθώρα μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Τα πετρώματα αυτά έχουν μεταμορφωθεί σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, Κρητιδικής-Παλαιοκαινικής ηλικίας. Οι εξωτερικές ζώνες χαρακτηρίζονται από ιζηματογενή πετρώματα, Μεσοζωικής-Καινοζωικής ηλικίας, ελάχιστα ή ήπια μεταμορφωμένα, και απαρτίζουν περιοχές 'πτυχών και επωθήσεων' Ολιγοκαινικής-Πλειοκαινικής ηλικίας.

Οι Εξωτερικές ελληνίδες πτυχώθηκαν και αναδύθηκαν από τη σύγκρουση της Απούλιας πλάκας με την Πελαγονική. Η ιζηματογένεση στις Εξωτερικές Ελληνίδες είναι νεότερη προς τη δύση και παρουσιάζει μεγάλες επωθήσεις. Με αυτό τον τρόπο, αποδόθηκε ένα ορογενετικό μοντέλο για τις Εξωτερικές Ελληνίδες, όπου η παραμόρφωση μεταναστεύει από την οπισθοχώρα προς την προχώρα (φλυσχική λεκάνη)[24]. Το ανατολικό περιθώριο της Απούλιας στην Βορειοδυτική Ελλάδα

τροποποιήθηκε έντονα από ένα σύστημα επωθήσεων διπλής ροπής, κατά τη διάρκεια του Κάτω Μειόκαινου. Η εξέλιξη αυτή είχε σαν συνέπεια την δημιουργία μιας ενδοηπειρωτικής λεκάνης, στην οποία αποτέθηκαν μολασσικά ιζήματα στο χώρο της Μεσο-ελληνικής αύλακας.

Κάθε ζώνη εξελίχθηκε σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον ιζηματογένεσης, μέχρι ο παλαιογεωγραφικός χώρος στον οποίο αντιστοιχεί να ενσωματωθεί στο σύστημα λεκάνης προχώρας. Μετά την είσοδο στη λεκάνη προχώρας και την απόθεση του φλύσχη ολοκληρώνεται η ιζηματογένεση, και η ζώνη ενσωματώνεται στο ορογενές. Τα απολιθώματα, και τα υπόλοιπα ιζηματολογικά χαρακτηριστικά υποδεικνύουν σε ποια φάση σχηματίστηκαν.



Εικόνα 35:Χάρτης γεωτεκτονικών ζωνών (Mountrakis et. Al 1983). Pa= ζώνη Παϊκού, I= Ιόνια ζώνη, G= ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, P= ζώνη Ωλονού-Πίνδου, P_K = ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, S_P = Υποπελαγονική ζώνη, Pl= Πελαγονική ζώνη, Al = ζώνη Αλμωπίας, Pa = ζώνη Παϊκού, P_e = ζώνη Παιονίας, Sm =Σερβομακεδομική μάζα, Rh = μάζα Ροδόπης, Cr= Περιροδοπική ζώνη, A_c= Αττικοκυκλαδική ζώνη, P_x=ζώνη Παξών.

4.3. Εξωτερικές Ελληνίδες

4.3.1 Ιόνια ζώνη

Η Ιόνια ζώνη καλύπτει κατά μήκος τη δυτική ακτογραμμή της Ηπειρωτικής Ελλάδος από βορρά προς Νότο. Περιλαμβάνει Ήπειρο, Κέρκυρα, κατά τμήματα τα Ιόνια νησιά, και τη Βορειοδυτική Πελοπόννησο. Από την κεντρική Πελοπόννησο και νοτιότερα η σειρά είναι μεταμορφωμένη. Παλαιογεωγραφικά διαιρείται σε τρεις ενότητες: την εσωτερική (η ανατολικότερη), την αξονική και την εξωτερική (δυτική). Και οι τρεις αυτές ενότητες παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στην ιζηματογένεσή τους. Τα παλαιότερα πετρώματα αυτής της ζώνης είναι οι εβαπορίτες, που έχουν εντοπιστεί μόνο από γεωτρήσεις, με ένα συνολικό πάχος μεγαλύτερο των 2000 m. Εντοπίζονται μόνο σε έντονα τεκτονισμένες ζώνες, επιφανειακά, που έχουν μετατραπεί σε λατυποπαγή εβαποριτικής διάλυσης.

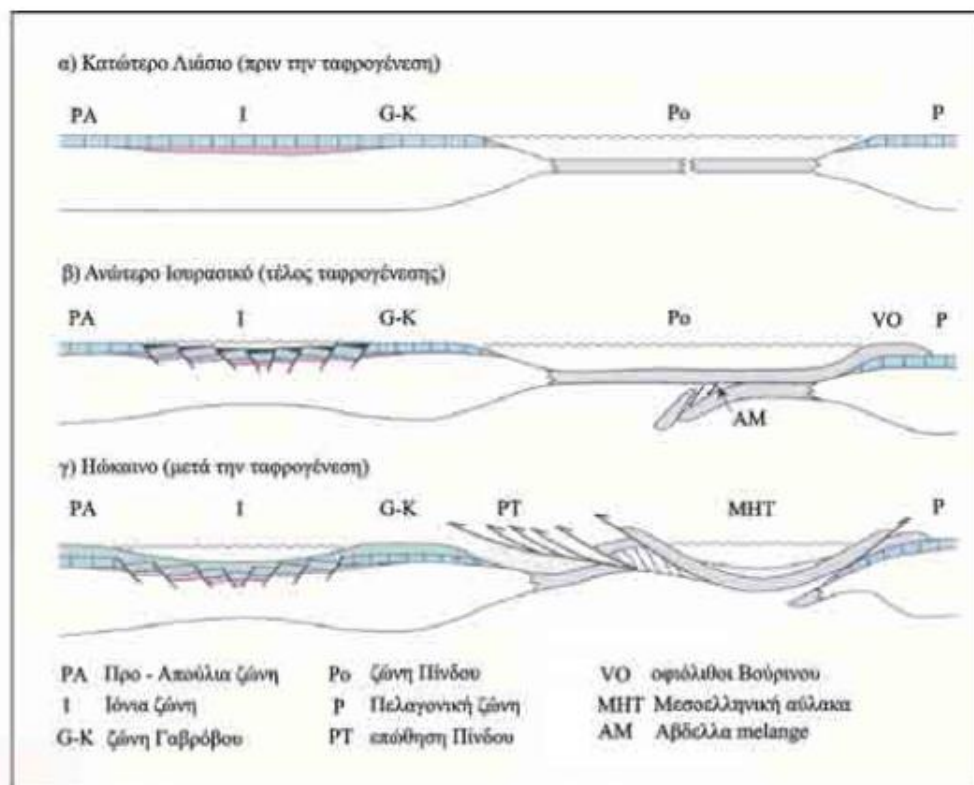
Υπερκείμενοι στους εβαπορίτες, είναι οι ασβεστόλιθοι Φουσταπήδημα, με ηλικία Λαδίνιο-Ραίπιο (πάχος 150-200m). Στην συνέχεια, ακολουθούν οι Ασβεστόλιθοι Παντοκράτορα (νηριτικοί ασβεστόλιθοι Νορίου- Λιασίου) με πάχος μεγαλύτερο των 1000 m. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί είναι πλούσιοι σε φύκη, και έχουν αποτεθεί σε πολύ ρηχό περιβάλλον. Τα ιζήματα αυτά αποτελούν την **προταφροσιγενή ακολουθία** της Ιόνιας σειράς [22].

Η **συνταφροσιγενής ακολουθία** αρχίζει από το Κατώτερο Πλιενσβάχιο. Σε αυτή την περίοδο η αρχική πλατφόρμα υπέστη εφελκυσμό και στη συνέχεια τεμαχισμό. Οι διαδικασίες αυτές οδήγησαν σε γενικότερη βάθυνση του Ιόνιου χώρου και στο σχηματισμό λεκάνης. Η ακολουθία αυτή ξεκινάει με την απόθεση ασβεστολίθων Σινιών και των ισοδύναμων ασβεστολίθων Λούρου, που περικλείουν αμμωνίτες, βραχιονόποδα και Τρηματοφόρα Πλιενσβάχιας ηλικίας των σχηματισμών. Η Ιόνια λεκάνη έπειτα διαμορφώνεται σε μικρότερες παλαιογεωγραφικές ενότητες που τις περισσότερες φορές είναι υπολεκάνες μορφής ημιτάφρου. Αυτή η διαμόρφωση πραγματοποιήθηκε από τον εφελκυσμό και συνδέεται με το άνοιγμα του πινδικού ωκεάνιου κλάδου της Τηθύος, σε συνδυασμό με αλατοκίνηση της εβαποριτικής βάσης της Ιόνιας σειράς.

Στις μικρές υπολεκάνες (εσωτερική και εξωτερική), αποθέτονται κόκκινοι ασβεστόλιθοι με αμμωνίτες της φάσης «Ammonitico Rosso», κατώτεροι σχιστόλιθοι με Ποσειδώνιες (έγχρωμοι αργιλικόι σχιστόλιθοι), ασβεστόλιθοι με filaments και οι ανώτεροι

σχιστόλιθοι με Ποσειδώνιες. Αυτές οι ακολουθίες παρουσιάζουν απότομες μεταβολές του πάχους και ασυμφωνίες, εξαιτίας της διαφορετικής βύθισης στο εσωτερικό κάθε ενότητας. Σε κάθε βυθισμένο τμήμα της ημιτάφρου η ιζηματογένεση είναι συνεχής (συνολικό πάχος 20-200 m), ενώ στο ανυψωμένο παρατηρούνται ασυμφωνίες και στρωματογραφικά κενά (πάχος 0-3 m).

Στη συνέχεια η **μεταταφροσιγενής ακολουθία** ξεκινάει με τους «ασβεστόλιθους Βίγλας» (πελαγικοί ασβεστόλιθοι με ενστρώσεις κερατόλιθων). Η απόθεσή τους γίνεται από το Μάλμιο, το Κάτω, και το Μέσο Κρητιδικό μέχρι τα μέσα Άνω Κρητιδικού και έχουν συνολικό πάχος 400 m.



Εικόνα 36: Εξέλιξη των Εξωτερικών Ελληνίδων (Jones and Robinson, 1991)

Η απόθεση αυτών των ασβεστολίθων γίνεται σε όλη την έκταση της λεκάνης, και εμφανίζουν τοπικές ασυμφωνίες στη βάση τους στις θέσεις που αντιστοιχούσαν στα ανυψωμένα τμήματα των προηγούμενων ημιτάφρων. Η ιζηματογένεση των ασβεστολίθων Βίγλας αντιστοιχεί σε μια γενικότερη ταπείνωση της συνολικής λεκάνης. Η συνέχιση της αλατοκίνησης, δημιουργεί διαφοροποιήσεις στο πάχος των ασβεστολίθων της Βίγλας (από 100-700 m) και συντηρεί τη διαφορεική βύθιση της λεκάνης.

Η ανάδυση της περιοχής της Ιόνιας ζώνης έγινε μετά την ολοκλήρωση της απόθεσης του φλύσχη. Η απόθεσή του γίνεται στο όριο Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου σε συνέχεια με τους ασβεστόλιθους του Ανώτερου Ηώκαινου, μέσω στρωμάτων από μαργαικούς ασβεστόλιθους. Το πάχος του φλύσχη στο ανατολικό τμήμα της ζώνης ξεπερνά τα 3000 m. Η ιζηματογένεση του φλύσχη ολοκληρώνεται στο Ακουϊτάνιο. Στη συνέχεια στα όρια του Βουρδιγαλίου και Μέσου Μειόκαινου στην εξωτερική ζώνη και νωρίτερα στη εσωτερική η ιζηματογένεση του φλύσχη ακολουθείται με ασυμφωνία από σχηματισμούς μολασσικού τύπου, μέχρι το κατώτερο Πλειστόκαινο [22].

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ ΑΠΟ ΚΕΡΚΥΡΑ ΣΤΗΝ ΤΥΜΦΗ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Αεγαγοπόλλης λατιτροπαεύς
- Αεγαγοπόλλης υποαεγαγοπόλλης
- Πλατυφράγμα
- Αεγαγοπόλλης με Filaments
- Αεγαγοπόλλης rosea
- Αεγαγοπόλλης ωοειδής
- Αεγαγοπόλλης κροκαλοπαγής
- Οόλιτες
 - Γαστερόποδα
 - Ρουδιστές
 - Ναυτίδες
 - Κοράλλια
- Αναδονίτες

Τα ιζήματα της Ιόνιας ζώνης έχουν διαμορφωθεί σε μεγάλα σύγκλινα και αντίκλινα. Από ανατολικά προς τα δυτικά τα σημαντικότερα είναι:

Το σύγκλινο Ηπείρου-Ακαρνανίας στο οποίο παρουσιάζονται ιζήματα φλύσχη με συνολικό πάχος 5000 m. Ένα μεγάλο τμήμα αυτού του σύγκλινου καλύπτεται από το επωθημένο κάλυμμα της Πίνδου.

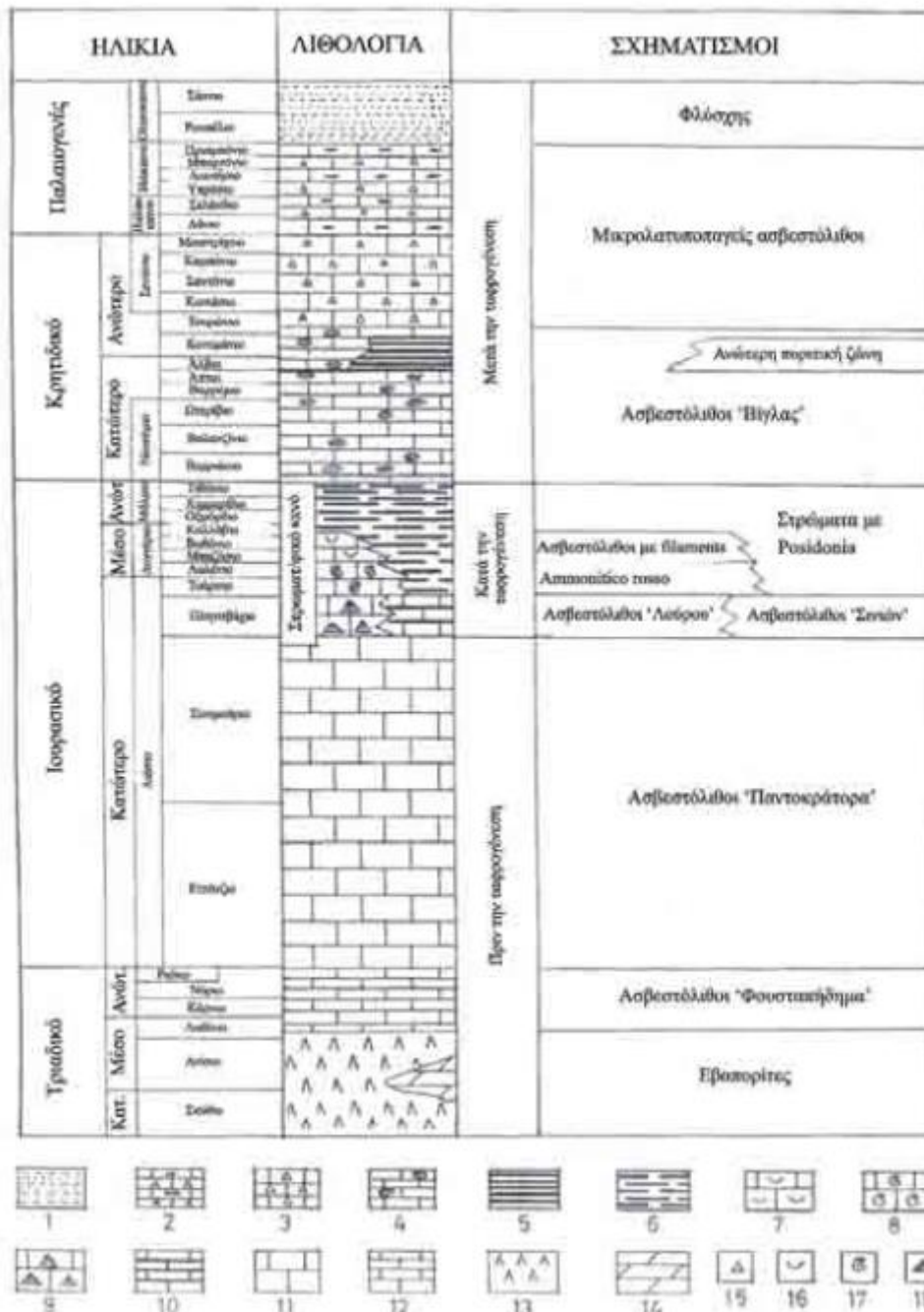
Το εσωτερικό αντίκλινο του Πετουσίου

Το σύγκλινο της Βοτσαράς στον πυρήνα του οποίου υπάρχουν ιζήματα φλύσχη (1200 m)

Το αντίκλινο των ενοτήτων Σουλίου-Παραμυθιάς

Το σύγκλινο της Παραμυθιάς που επιπτεύεται από το αντίκλινο του Σουλίου-Παραμυθιάς και

Το εξωτερικό αντίκλινο από επωθημένες ενότητες του Μαργαριτίου και της Πάργας, οι οποίες συνεχίζονται στην Κέρκυρα. Το πάχος του φλύσχη μειώνεται από την Εσωτερική προς την Κεντρική Ιόνια ζώνη, και αυξάνεται προς την περιοχή της Ανατολικής εξωτερικής ζώνης.



Εικόνα 38: Στρωματογραφική κολώνα της Ιόνιας ζώνης (Karakitsios 1995)

1:πηλίτες και ψαμμίτες, 2: ασβεστόλιθοι με chert, 3: πελαγικοί ασβεστόλιθοι με κλαστικό υλικό, 4: πελαγικοί ασβεστόλιθοι με chert, 5: άργιλοι με chert, 6 έως 10: πελαγικοί ασβεστόλιθοι, 11: ασβεστόλιθοι πλατφόρμας, 12: ασβεστόλιθοι μαύροι, 13: γύψος και άλας, 14: δολομίτες, 15: λατυποπαγή, 16: filaments, 17: ammonites, 18: brachiopods

4.3.2 Ζώνη Πίνδου ή Ζώνη Πίνδου-Ωλονού

Η ζώνη αυτή αποτελεί ένα τεκτονικό κάλυμμα που εμφανίζεται στην ηπειρωτική Ελλάδα, την Πελοπόννησο, την Κρήτη και τα Δωδεκάνησα. Θεωρήθηκε η πιο βαθιά Ελληνική αύλακα, ανάμεσα στα υβώματα Πελαγονικής ή Παρνασσικής πλατφόρμας προς τα ανατολικά και Γαβρόβου προς τα δυτικά.

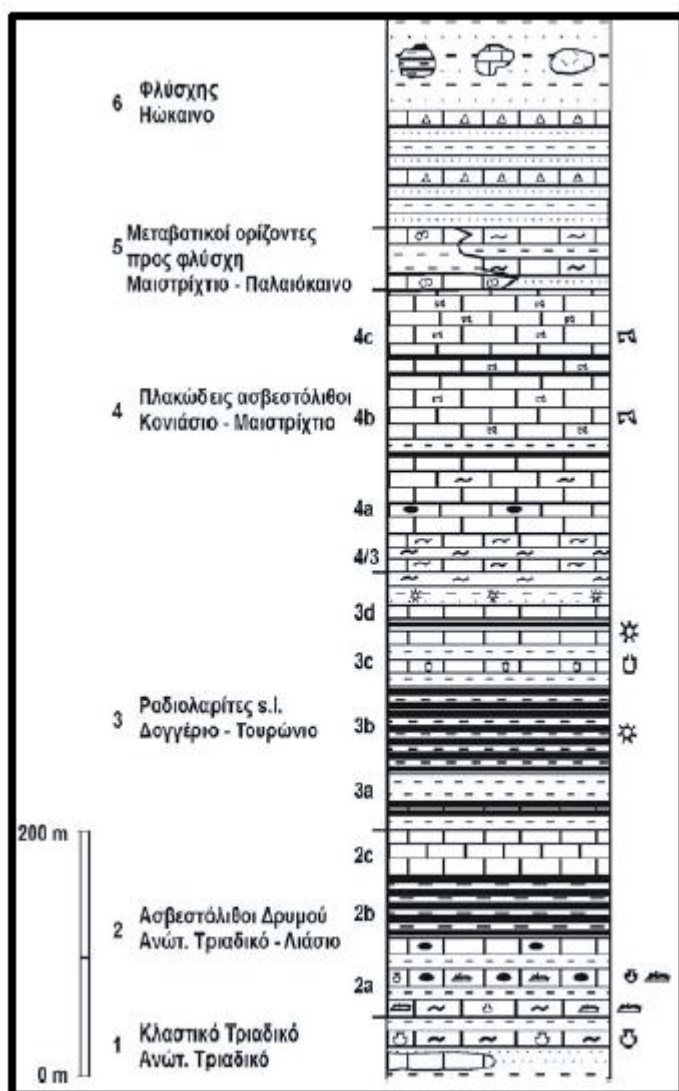
Η ζώνη της Πίνδου είναι λεπτωμένη και επωθημένη πάνω στη ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως, ενώ πάνω στα ιζήματά της είναι επωθημένες οι ζώνες Παρνασσού και Πελαγονική.

Στρωματογραφικά χωρίζεται σε έξι σχηματισμούς, οι οποίοι παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ γειτονικών περιοχών. Από κάτω προς τα πάνω είναι:

1. **Κλαστικά ιζήματα του Τριαδικού:** Αποτελείται από εναλλαγές μαργών, ψαμμιτών και ασβεστολίθων.
2. **Ασβεστόλιθοι του Δρυμού:** Περιλαμβάνει ασβεστόλιθους με ενστρώσεις και κονδύλους πυριτιόλιθων, από το Ανώτερο Τριαδικό έως το Λιάσιο. Αποτελείται από τρία μέρη:
 - 4a. **Κατώτερος Δρυμός.** Εναλλαγή ανοικτόχρωμων ασβεστόλιθων με filaments από Halobia οι οποίοι είναι πλούσιοι σε ακτινόζωα, με στρώματα και κονδύλους πυριτιόλιθων και πηλίτες.
 - 4b. **Ορίζοντας με ιάσπη.** Εναλλαγές πυριτιόλιθων με κόκκινους πηλίτες.
 - 4c. **Ανώτερος δρυμός.** Ασβεστόλιθοι κυρίως κοκκιώδεις, χωρίς Halobia.
3. **Ραδιολαρίτες s.l:** Σχηματισμός του οποίου η ηλικία κυμαίνεται από Τοάρσιο μέχρι Τουρώνιο. Αποτελείται από πυριτικές και πηλιτικές ενστρώσεις με ασβεστολιθικές παρεμβολές. Χωρίζεται σε τέσσερα μέρη από τα κάτω προς τα πάνω:
 - 4a. **Πηλίτες του Καστελλίου.** Στο σχηματισμό αυτό κυριαρχούν οι πηλίτες. Στα κατώτερα στρώματα εμφανίζονται ενστρώσεις κοκκιωδών ασβεστολίθων και ασβεστολίθων με Ακτινόζωα. Η ηλικία του προσδιορίστηκε σε κατώτερο Τοάρσιο Ααλένιο.
 - 4b. **Ραδιολαρίτες s.s.** Στο ανώτερο και στο κατώτερο τμήμα του μέλους υπάρχουν πηλιτικές και ανθρακικές ενδιαστρώσεις.

- 4c. **Ασβεστόλιθοι με Calpionelles.** Μικρού πάχους ροζ και κόκκινοι ασβεστόλιθοι με κόκκινους πηλίτες.
- 4d. **Κόκκινες μάργες με ακτινόζωα.** Κυριαρχούν οι κόκκινοι πηλίτες. Στην κύρια πηλιτική μάζα μπορεί να παρεμβάλλονται μικριτικοί ασβεστόλιθοι με ακτινόζωα, λατυποπαγή και ψαμμιτικοί ορίζοντες.
4. **Πλακώδεις ασβεστόλιθοι.** Συχνά ονομάζονται και ως «ασβεστόλιθοι με Globotruncanes». Οι ασβεστόλιθοι αυτοί έχουν ηλικία Ανώτερο Κρητιδικό, είναι πελαγικοί ασβεστόλιθοι πάχους 150-200 m. πλούσιοι σε Globotruncana. Η συχνή εμφάνιση του σχηματισμού και η δυσκολία στον προσδιορισμό του πάχους, οφείλονται στην έντονη πτύχωση.
- Χωρίζονται σε τέσσερα μέρη:
- 4a. **«Μεταβατικοί ορίζοντες»** Τα στρώματα αυτά είναι μια βαθμιαία μετάβαση από τις «κόκκινες μάργες με Ακτινόζωα» στους τυπικούς πλακώδεις ασβεστόλιθους.
- 4b. **Ροζ ασβεστόλιθοι.** Πρόκειται για λεπτοπλακώδεις ροζ ασβεστόλιθους, χωρίς απολιθώματα με ενδιαστρώσεις κόκκινων πηλιτών και πυριτικών στρωμάτων.
- 4c. **«Ασβεστόλιθοι με Globotruncanes»** Είναι ο πιο απολιθωματοφόρος ορίζοντας. Αποτελείται από λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους, με ενδιαστρώσεις σκούρων πυριτικών και πηλιτικών στρωμάτων.
- 4d. **«Γκρι ασβεστόλιθοι»** Ο σχηματισμός αυτός περιλαμβάνει ανοιχτού γκρι μεσοπλακώδεις ασβεστόλιθους , με τα κατώτερα στρώματα να περιέχουν κονδύλους πυριτιολίθων.
5. **Μεταβατικά προς το φλύσχη στρώματα.** Χαρακτηρίζονται από εναλλαγές πηλιτών και πελαγικών ασβεστόλιθων. Έχουν πάχος περίπου 100 m. Οροφή του σχηματισμού είναι το τελευταίο ασβεστολιθικό στρώμα, ενώ βάση του η πρώτη εμφάνιση ψαμμιτικού στρώματος. Η ηλικία αυτών των ιζημάτων κυμαίνεται από Ανώτερο Μαιστρίχτιο έως Παλαιόκαινο.
6. **Φλύσξης.** Έχει πάχος που μεταβάλλεται από 1000-4000 m. και χαρακτηρίζεται από εναλλαγή ψαμμιτών, πηλιτών με ενδιάμεσες στρώσεις αργιλικών ασβεστολίθων. Η ηλικία του φλύσχη είναι Ηωκαινική, ενώ παρουσιάζει έντονο ετεροχρονισμό στη βάση του. Στο ανώτερο τμήμα απαντάται «άγριος φλύσξης» με μεγάλους όγκους

ολισθόλιθων και αποτελείται από νηρητικούς ασβεστόλιθους, ηφαιστειακά πετρώματα και ραδιολαρίτες μέσα σε κόκκινους και πράσινους αργιλίτες [22].



Εικόνα 39:
Στρωματογραφική
κολώνα Πίνδου
(Σωτηρόπουλος 2004)

4.3.3 Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολεως

Η ζώνη αυτή εμφανίζεται σε όλο το μήκος της δυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας, στην Πελοπόννησο την Κρήτη και τα Δωδεκάνησα. Στην ηπειρωτική Ελλάδα η σειρά δεν εμφανίζει ορίζοντες παλαιότερους από το Κρητιδικό. Στην Πελοπόννησο και στη Κρήτη αναφέρονται οι παλαιότεροι σχηματισμοί αυτής της ζώνης. Στη δυτική Πελοπόννησο και ηπειρωτική Ελλάδα χαρακτηρίζεται ως υποζώνη Γαβρόβου και αποτελείται από παχιά νηρητική ανθρακική ακολουθία ηλικίας από το Ανώτερο Ιουρασικό έως και το Ανώτερο Ηώκαινο. Ενώ στην ηπειρωτική Ελλάδα ο κατώτερος στρωματογραφικός ορίζοντας που εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης είναι Άνω Ιουρασικής ηλικίας στην Πελοπόννησο εμφανίζεται στην επιφάνεια κάτω από την ανθρακική ακολουθία ένας Νεοπαλαιοζωικής-Τριαδικής ηλικίας σχηματισμός τα «στρώματα του Τυρού». Ενώ παρουσιάζει στρωματογραφική συνέχεια με τα ανθρακικά πετρώματα, σε ορισμένες περιπτώσεις η επαφή τους χαρακτηρίζεται τεκτονισμένη δηλώνοντας ολισθήσεις των ανθρακικών ιζημάτων επί των στρωμάτων Τυρού. Στην υπόλοιπη Πελοπόννησο χαρακτηρίζεται ως υποζώνη Τριπόλεως. Η στρωματογραφική κολόνα της υποζώνης Τριπόλεως περιλαμβάνει τρεις σχηματισμούς:

Στρώματα Τυρού- σχηματισμός Ραβδούχων

Πρόκειται για ηφαιστειοιζηματογενή ακολουθία με ηφαιστειακά, ανθρακικά πετρώματα ανωπαλαιοζωικής-ανωτριαδικής ηλικίας

Ανθρακική ακολουθία

Αναφέρεται σε εναλλαγές μεσοπλακωδών και παχυπλακωδών ασβεστολίθων, και δολομιτών ανοιχτού γκρι έως μαύρου χρώματος που αποτέθηκαν σε υπο-υπερπαλαιοζωικό περιβάλλον. Ιζηματολογική μελέτη της ακολουθίας φανερώνει ότι τμήματα της πλατφόρμας αναδύθηκαν επανειλημμένα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από τις ασυμφωνίες και τις βωξιτογενέσεις. Κατά το ανώτερο Ηώκαινο δημιουργούνται μεταβατικά προς τον φλύσχη πετρώματα, από την βύθωση της πλατφόρμας, την απόθεση πλακτονικής μικροπανίδας και αργιλικού υλικού στα ανθρακικά ιζήματα. Τα στρώματα αυτά μπορεί να απουσιάζουν ή να μην εμφανίζονται λόγω ασυμφωνιών.

Φλύσχης

Ο σχηματισμός αυτός είναι γνωστός και ως «άγριος φλύσχης» μαρτυρεί ότι η λεπίωση και η επώθηση του πινδικού καλύμματος πάνω στη ζώνη Τριπόλεως έγινε κατά το Ολιγόκαινο [22].

4.4 Τεκτονική ζώνη της Πίνδου

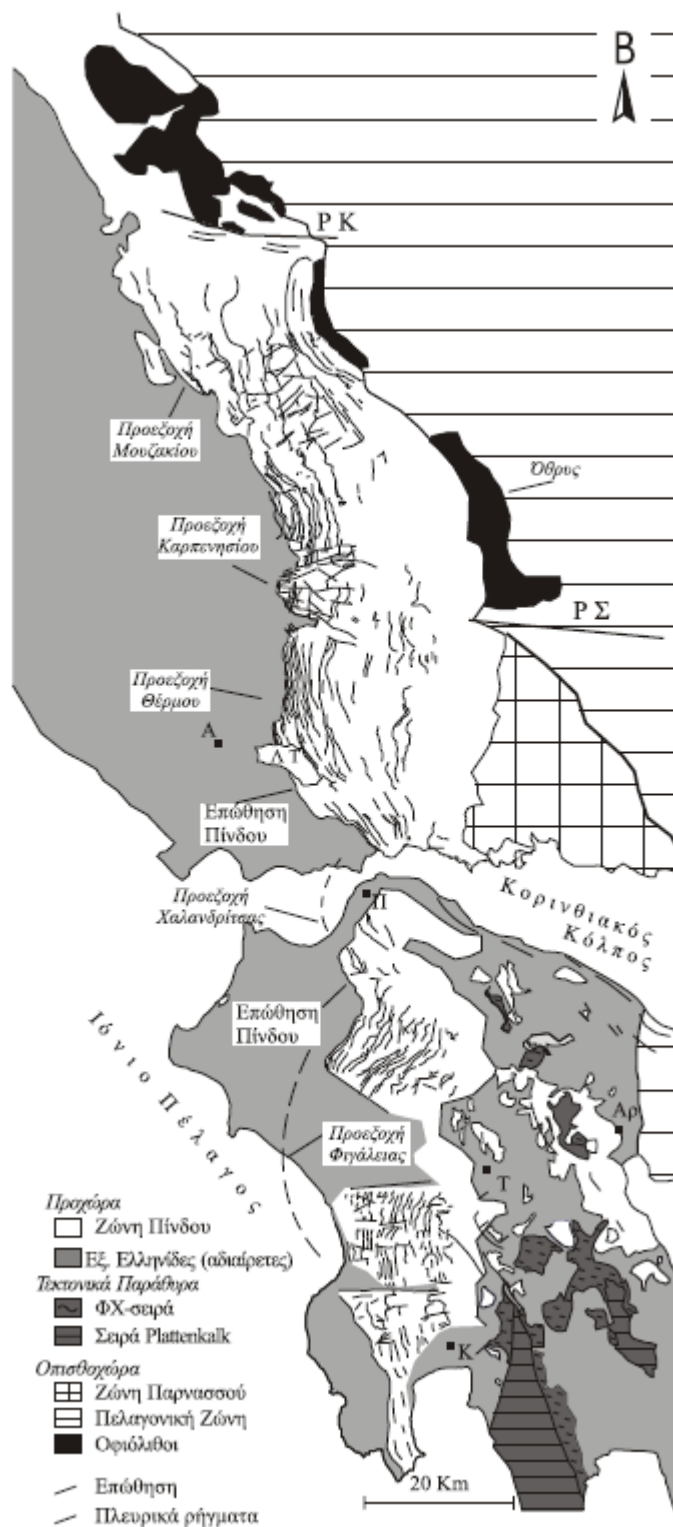
Στα στρώματα της ζώνης Ωλονού-Πίνδου δεν έδρασαν οι πρώιμες ορογενετικές φάσεις.

Κατά τη σύγκρουση της Απούλιας και Πελαγονικής πλάκας το ορογενετικό υπόβαθρο της ζώνης αποκολλάται και σχηματίζει μια ζώνη πτυχών και επωθήσεων. Με αυτή τη φάση πτυχώσεων, η ζώνη επωθήθηκε δυτικά πάνω στη ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως, με τη μορφή τεκτονικού καλύμματος. Στην περιοχή μελέτης τα Τζουμέρκα και στη βόρεια Πίνδο το τεκτονικό κάλυμμα της Πίνδου υπερκάλυψε τη ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως –με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται καθόλου- και εμφανίζεται τοποθετημένο τεκτονικά πάνω στην Ιόνια ζώνη [23].

Οι άξονες των πτυχών έχουν μια ΒΒΔ-ΝΝΑ γενική διεύθυνση και τα αξονικά τους επίπεδα κλίνουν προς τα ΑΒΑ, όπως και τα επίπεδα των μεγάλων επωθήσεων. Αυτές οι διευθύνσεις είναι κάθετες προς τη διεύθυνση κίνησης της ζώνης της Πίνδου (ΔΝΔ). Στο βόρειο τμήμα της ζώνης και στη Στερεά Ελλάδα οι άξονες των πτυχών και τα επίπεδα των μεγάλων επωθήσεων, έχουν ΒΔ/ΝΑ διεύθυνση. Σε κάποιες άλλες περιοχές νοτιότερα παρατηρείται απόκλιση από αυτή τη γενική διεύθυνση. Αυτές οι μεταβολές από τη γενική διεύθυνση έχει σαν αποτέλεσμα η ζώνη της Πίνδου να έχει καμπύλο σχήμα και κάποια τμήματά της να είναι κοίλα και άλλα κυρτά προς την προχώρα.

Ορισμένα τμήματα της ζώνης της Πίνδου έχουν προωθηθεί περισσότερο σε σχέση με άλλα πάνω στη ζώνη της Τρίπολης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να σχηματίζονται κατά μήκος της επώθησης Πίνδου τοξοειδείς προεξοχές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι στην περιοχή της Πελοποννήσου, όπου η ζώνη της Πίνδου έχει προωθηθεί περισσότερο από 50 km πάνω στη ζώνη της Τρίπολης.

Πάνω στα στρώματα της ζώνης της Πίνδου βρίσκονται επωθημένες οφιολιθικές μάζες. Η τοποθέτηση αυτών των μαζών αποτελεί ζήτημα εάν προήλθαν από τη ζώνη Αξιού ή από κατεστραμμένο ωκεάνιο φλοιό μεταξύ Πίνδου και Υποπελαγονικής [23].



Εικόνα 40: Τεκτονικός χάρτης της Ζώνης της Πίνδου, όπου εμφανίζονται οι επωθήσεις και οι προεξοχές των επωθήσεων. (Σκουρλής 2002)

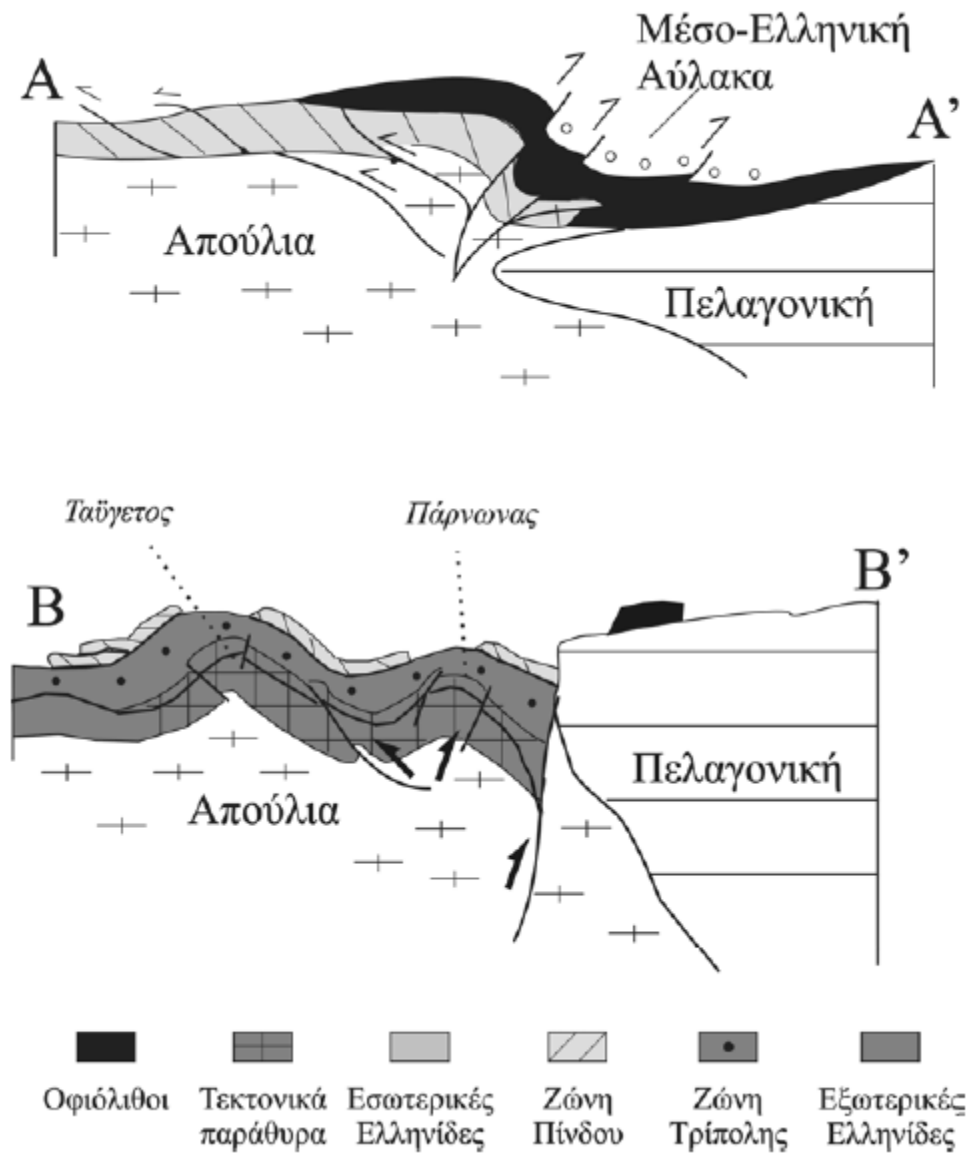
4.5. Γεωτεκτονική εξέλιξη στη ζώνη της Πίνδου

Η φάση της ορογένεσης στις Εξωτερικές ελληνίδες ξεκινά με την δημιουργία της λεκάνης του φλύσχη στη ζώνη της Πίνδου, όπου αποτίθενται προϊόντα διάβρωσης από τις ήδη ανυψωμένες Εσωτερικές ζώνες και δημιουργείται το ορογενετικό πρίσμα της ζώνης της Πίνδου. Στη συνέχεια ακολουθεί η παραμόρφωσή του με έντονη λεπίωση και πτύχωση [24]. Τα τεκτονικά λείπια της Πίνδου είναι επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο, δημιουργούν επαναλήψεις με αποτέλεσμα να αυξάνουν το φαινομενικό τους βάρος. Η διεύθυνσή τους είναι από τα ανατολικά προς τα δυτικά [23].

Κατά τη διάρκεια της πτύχωσης, σχηματίστηκε μεγάλος αριθμός εγκάρσιων ρηγμάτων, τα οποία διακόπτουν την επιμήκη συνέχεια των λεπιών. Στην συνέχεια το ορογενετικό πρίσμα κινείται προς τα δυτικά και τοποθετείται πάνω στη ζώνη της Τρίπολης κατά μήκος της επώθησης της Πίνδου (Εικόνα 41). Πολλές αντικρουόμενες απόψεις υπάρχουν για την αιτιολόγηση της κίνησης, τον τρόπο τοποθέτησης του καλύμματος και τον ορίζοντα της αποκόλλησης. Κατά τους Jacobshagen et al. (1978) η κίνηση αυτή υπερβαίνει τα 80 km, ενώ Xypolias και Doutsos (2000) θεωρούν ότι ο ορίζοντας αποκόλλησης είναι τα πετρώματα που δομούν τη βάση της στρωματογραφικής στήλης της ζώνης της Πίνδου. Σύμφωνα με τον Temple (1968), αποδίδει αυτή την κίνηση μεγάλης κλίμακας σε μηχανισμό βαρυτικής ολίσθησης.

Πέρα από το μηχανισμό της κίνησης, η τοποθέτηση του καλύμματος επί της ζώνης της Τρίπολης είχε ως αποτέλεσμα την καμπύλωση της ζώνης της Τρίπολης υπό το βάρος του καλύμματος. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μια λεκάνη προχώρας στην οποία αποτέθηκαν προϊόντα της διάβρωσης από την ανυψωμένη Πινδική κορδιλιέρα από το Ολιγόκαινο – το Κάτω Μειόκαινο [24].

Στη βόρεια Ηπειρωτική Ελλάδα, κατά το Άνω Ολιγόκαινο-Κάτω Μειόκαινο και ενώ η μετανάστευση κινείται προς τα δυτικά, το ανατολικό περιθώριο της Απούλιας Πλάκας αλλάζει με την δημιουργία μιας φλοιϊκής δομής που χαρακτηρίζεται από σύστημα επωθήσεων αμφίπλευρης ροπής. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στη δημιουργία μιας ενδοηπειρωτικής λεκάνης στη ραφή της Απούλιας με την Πελαγονική γνωστή ως Μεσο-ελληνική αύλακα. Την δημιουργία αυτής της μεγαδομής επηρέασε σημαντικά η παρουσία προεκβολών κατά μήκος της ραφής των δυο συγκρουόμενων πλακών [24].



Εικόνα 41: Τροποποίηση του ανατολικού περιθωρίου της Απούλιας στη ΒΔ Ελλάδα εικόνα επάνω (AA', Doutsos et al. 1993) και στη Πελοπόννησο (BB', Doutsos et al. 2000).

4.6 Παθητική σεισμική τομογραφία

Οι σεισμικές μέθοδοι που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, εφάρμοζαν τεχνητές πηγές σεισμικών κυμάτων (εκρήξεις, δονήσεις), για να παράγουν σεισμικά κύματα (ενεργητική τομογραφία). Ο καθορισμός του χρόνου διαδρομής των σεισμικών κυμάτων, και η μεταβολή των πλατών απέδιδε πληροφορίες για το μέσο διάδοσης.

Όταν η σεισμική πηγή, είναι φυσικός σεισμός, η μέθοδος ονομάζεται παθητική σεισμική τομογραφία (passive seismic tomography). Τα δεδομένα των τοπικών μικροσεισμών καταγράφονται σε σειсмоγράφους και μπορούν να αποδώσουν λεπτομερή εικόνα της δομής του υπεδάφους. Μπορεί να εφαρμοστεί σε τοπική κλίμακα και σε δυσπρόσιτες περιοχές, όπου η εγκατάσταση εξοπλισμού είναι δύσκολη ή σε παγκόσμια κλίμακα για την απεικόνιση του μανδύα.

Η μέθοδος της παθητικής σεισμολογίας πλεονεκτεί έναντι των συμβατικών μεθόδων [26]:

1. Είναι πιο οικονομική στην απεικόνιση μεγάλων εκτάσεων σε γεωλογικά πολύπλοκες δομές (δομές επωθήσεων, επιπτεύσεων, βασαλτικές ζώνες, εβαπορίτες). Το κόστος της διάνοιξης γεώτρησης ή των εκρηκτικών ελαχιστοποιείται με την παθητική σεισμολογία. Απαιτείται μικρότερος αριθμός εργαζομένων, και μικρότερο κόστος μεταφοράς εξοπλισμού αφού η πηγή είναι φυσική.

2. Επειδή η σεισμική ενέργεια προέρχεται κάτω από τις ζώνες μελέτης, μπορεί να απεικονίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια πολύπλοκες γεωλογικές δομές.

3. Εφαρμόζεται σε περιοχές όπου η χρήση των άλλων πηγών θα ήταν αδύνατη.

4. Σε κάθε σεισμό εκπέμπονται διαμήκη και εγκάρσια κύματα. Στην ενεργητική σεισμολογία, η διέγερση των S κυμάτων είναι δύσκολη, αντίθετα στην παθητική μεγάλο μέρος της σεισμικής ενέργειας διαδίδεται με τα εγκάρσια κύματα. Η ικανότητα να μετρηθεί με ακρίβεια ο λόγος V_p/V_s δίνει επιπρόσθετες πληροφορίες για τις υπεδάφικές δομές.

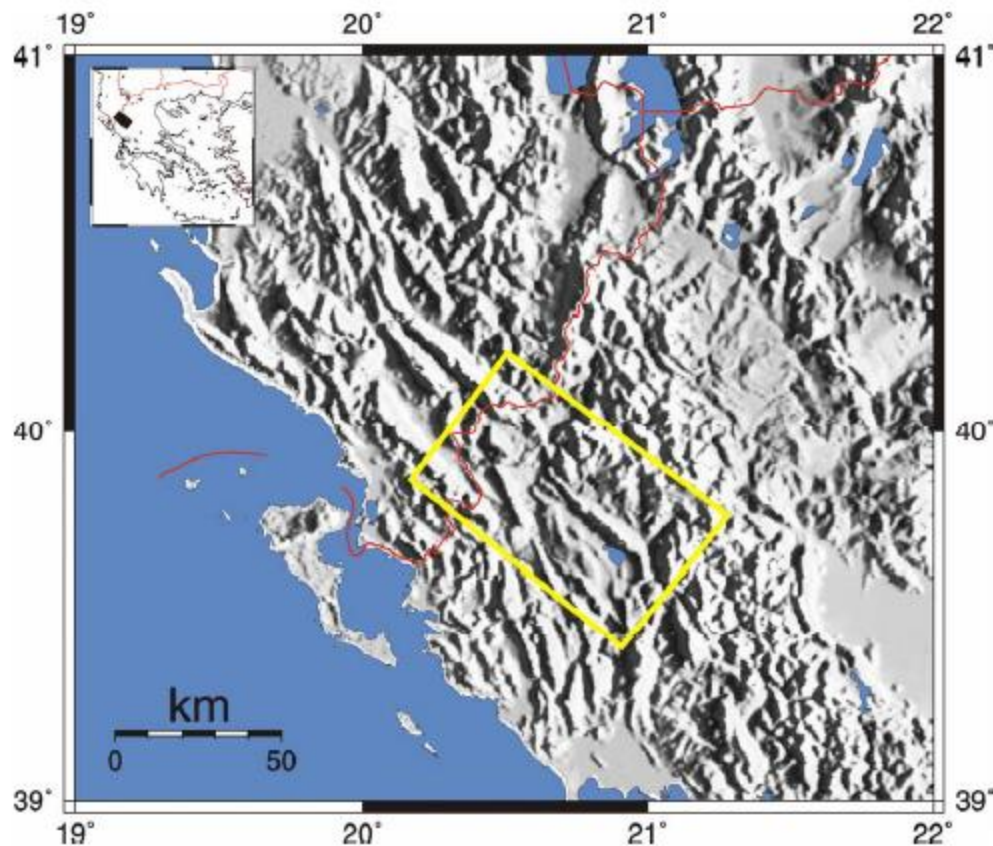
Στα μειονεκτήματα της μεθόδου κατατάσσονται:

1. Η περιοχή μελέτης, θα πρέπει να είναι ενεργή σεισμικά.

2. Δεν είναι γνωστές με ακρίβεια οι συντεταγμένες της εστίας του σεισμού (υπόκεντρο), και ο χρόνος γένεσης του σεισμού. Ο χρόνος γένεσης, μπορεί να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, από ένα πυκνό δίκτυο σειсмоγράφων.

4.6.1 Παράδειγμα εφαρμογής παθητικής σεισμικής τομογραφίας στην Ήπειρο

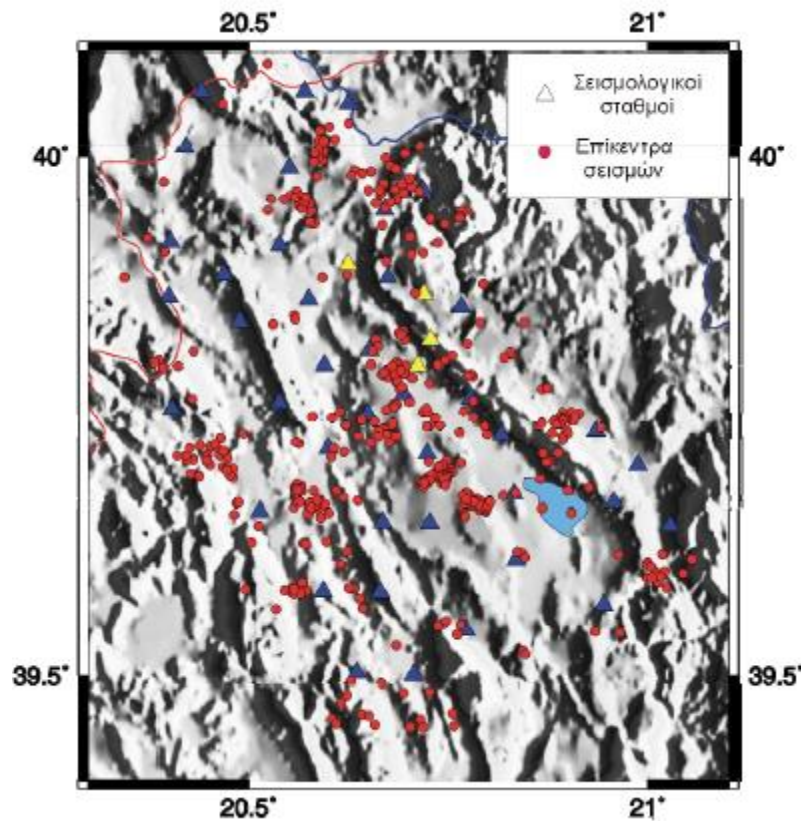
Η περιοχή μελέτης οριοθετείται βόρεια από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα, νότια από το όρος Τόμαρος, ανατολικά από τον Άραχθο και το όρος Μιτσικέλι και δυτικά από τα όρη Φιλιάτες. Γεωτεκτονικά, η περιοχή ανήκει στις Εξωτερικές Ελληνίδες και συγκεκριμένα στην Ιόνια ζώνη.



Εικόνα 42: Η περιοχή μελέτης (Μαρτάκης, 2003).

Το 1998 το εργαστήριο σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών, εγκαθιστά ένα δίκτυο 40 σεισμολογικών σταθμών στην Ήπειρο σε μια έκταση 80x40 km². Η έρευνα πραγματοποιήθηκε για τον εντοπισμό κοιτασμάτων πετρελαίου.

Το δίκτυο λειτούργησε για 10 μήνες και κατέγραψε μεγάλο όγκο σεισμολογικών δεδομένων. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι στα 200 Hz, και η καταγραφή συνεχής στα 100 samples/sec. Από τους 40 σταθμούς, οι 34 αποτελούνται από 24bit σειсмоγράφους τύπου Earthdata PR2400 και σεισμόμετρα 3 συνιστωσών τύπου SIG SR2, ιδιοσυχνότητας 4Hz. Τα σεισμόμετρα τοποθετήθηκαν σε γεωτρήσεις βάθους (5-15 m), για να βελτιώσουν το λόγο σήματος θορύβου (S/N ratio). Οι υπόλοιποι 6 σταθμοί αποτελούνται από 18bit καταγραφικά τύπου Teledyne PDAS100 και 3 σεισμόμετρα Teledyne S13 ιδιοσυχνότητας 1 Hz. Οι σταθμοί απέχουν μεταξύ τους κατά μέσο όρο 10 km. Συγχρονίζονται μέσω GPS, με το οποίο προσδιορίζεται η θέση τους.



Εικόνα 43: Το δίκτυο των σταθμών στην Ήπειρο. Με κίτρινο εμφανίζονται οι σταθμοί που μεταφέρθηκαν τον τελευταίο μήνα της καταγραφής. Με κόκκινο απεικονίζονται τα επίκεντρα των 434 σεισμών (Μαρτάκης, 2003).

4.6.2 Επεξεργασία δεδομένων

Η επιλογή των δεδομένων είναι το πιο σημαντικό βήμα στην επεξεργασία της παθητικής σεισμικής τομογραφίας. Από τα 900 σεισμικά γεγονότα, επιλέχθηκαν 434 σεισμοί οι οποίοι πληρούσαν αυστηρά κριτήρια. Τα σεισμικά γεγονότα πρέπει να βρίσκονται εντός του δικτύου σειсмоγράφου, να έχουν ένα ελάχιστο αριθμό καταγεγραμμένων φάσεων [27]. Τα μεγέθη των σεισμών είναι από 1.1 R έως 4.69 R, με εστιακό βάθος 5-15 km.

Στην επεξεργασία των δεδομένων, ο αριθμός των καταγραφών των αφίξεων P και S κυμάτων κρίνεται σημαντικός για την ποιότητα της καταγραφής. Με έναν αλγόριθμο γίνεται ο διαχωρισμός των P και S κυμάτων ανά γεγονός και ανά σταθμό. Σε επόμενο βήμα, διαχωρίζονται χειρονακτικά οι φάσεις των P και των S κυμάτων και τα δεδομένα ενσωματώνονται για τον υπολογισμό της θέσης του υπόκεντρου και σεισμικών παραμέτρων. Το πρόβλημα εντοπισμού της θέσης των υποκέντρων λύθηκε με έναν αλγόριθμο αντιστροφής που αναπτύχθηκε από την LandTech [26].

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα μονοδιάστατο μοντέλο ταχυτήτων. Το μοντέλο περιέχει στατικές διορθώσεις από την ταυτόχρονη αντιστροφή των χρόνων διαδρομής, γεγονότων με την καλύτερη ποιότητα. Η διαδικασία αυτή γίνεται, για τον αρχικό προσδιορισμό των επικέντρων με το μικρότερο σφάλμα θέσης. Είναι ένα πρωταρχικό μοντέλο για την έναρξη της τρισδιάστατης τομογραφικής αντιστροφής. Τα αρχικά δεδομένα είναι οι αρχικές θέσεις των υποκέντρων, όπως προσδιορίστηκαν προηγουμένως, οι θέσεις των σεισμολογικών σταθμών και οι χρόνοι άφιξης των σεισμικών κυμάτων.

Σε επόμενο βήμα ακολουθεί η παραμετροποίηση του προβλήματος. Στόχος είναι η απεικόνιση της τρισδιάστατης δομής της περιοχής μελέτης. Η παραμετροποίηση υποθέτει ένα συνεχές πεδίο ταχύτητας. Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του κανάβου, χρησιμοποιήθηκαν δυο σχήματα παρεμβολής, για διαφορετικές τεχνικές προσομοίωσης σεισμικών ακτίνων (ray tracing). Εφαρμόστηκαν η γραμμική spline παρεμβολή και η κυβική spline παρεμβολή. Το αρχικό μοντέλο είχε μέγεθος πλέγματος 2x4 km, για μια περιοχή που επιλέχθηκε για την αντιστροφή έκτασης 70x40 km. Το βάθος είναι μέχρι 10 km. Σε περιοχές ενδιαφέροντος το μέγεθος του πλέγματος μειώνεται σε 0.5x0.5 km και οι σταθμοί μετακινούνται ώστε να είναι εντός της κάλυψης των ακτίνων. Η παραμετροποίηση οδήγησε στον υπολογισμό του 3D μοντέλου.

Οι αρχικές ταχύτητες για τα ενδιάμεσα βάθη υπολογίστηκαν από το αρχικό μονοδιάστατο μοντέλο και τη γραμμική παρεμβολή μεταξύ των στρωμάτων.

Για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος, καθοριστικό ρόλο έχει ο παράγοντας απόσβεσης (damping factor). Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το πλήθος των σεισμολογικών δεδομένων και τις διαστάσεις του κανάβου. Στην αρχή υπολογίστηκε ο παράγοντας απόσβεσης για τις ταχύτητες των P κυμάτων και στη συνέχεια για τις ταχύτητες των S κυμάτων, με σταθερό τον παράγοντα απόσβεσης V_p σε κάθε βήμα. Ο υπολογισμός του παράγοντα απόσβεσης είναι σημαντικός, καθώς εσφαλμένη εκτίμηση, μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα για τη δομή.

4.7 Σύγκριση της παθητικής σεισμικής τομογραφίας με τη γεωλογία της περιοχής.

Τα αποτελέσματα της παθητικής σεισμικής τομογραφίας, συμφωνούν με τη γεωλογία και την τεκτονική της περιοχής. Η μελέτη αυτή αποσκοπεί, στην απεικόνιση της δομής του υπεδάφους στην περιοχή της Ηπείρου. Στόχος είναι ο εντοπισμός της εμφάνισης των εβαποριτών, που είναι ενδεικτικές για την ύπαρξη κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.

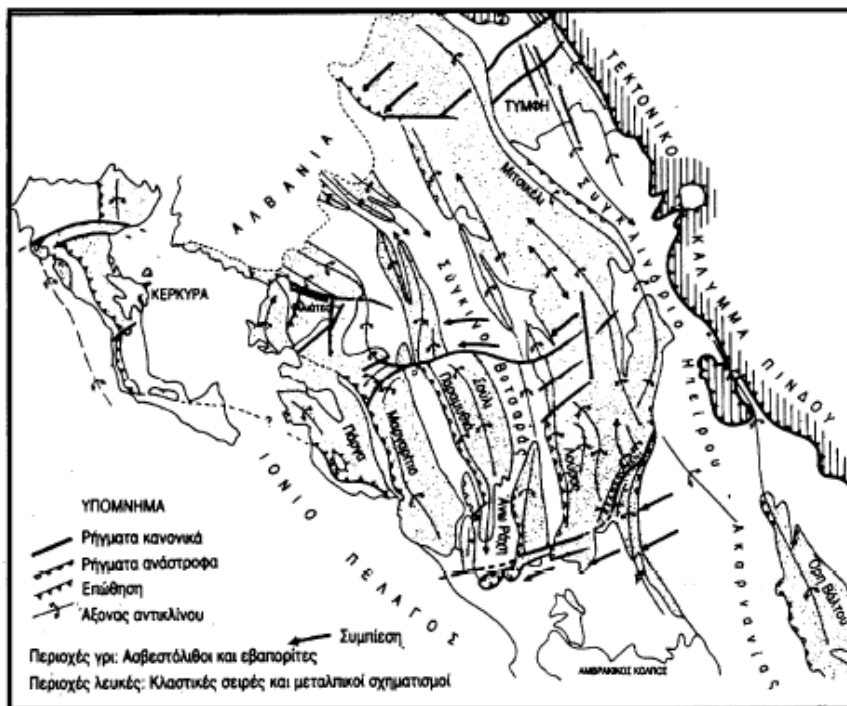
Στην επόμενη εικόνα 44, αναπαριστάται η κατανομή των μικροσεισμών στην περιοχή. Παρουσιάζεται η συσχέτιση των γεωλογικών σχηματισμών με τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων και τον λόγο V_p/V_s . Ο λόγος V_p/V_s εμφανίζει υψηλές τιμές όσο αυξάνεται το βάθος και αυτό οφείλεται στο υψηλό πορώδες των γεωλογικών σχηματισμών, και στην καρστικότητα του ασβεστολίθου. Οι μεταβολές της ταχύτητας υποδεικνύουν μεταβατικές ζώνες και τεκτονικές δομές.

Μέσα στους εβαπορίτες παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σεισμική δραστηριότητα γιατί έχουν πολύ μικρή διατμητική αντοχή.

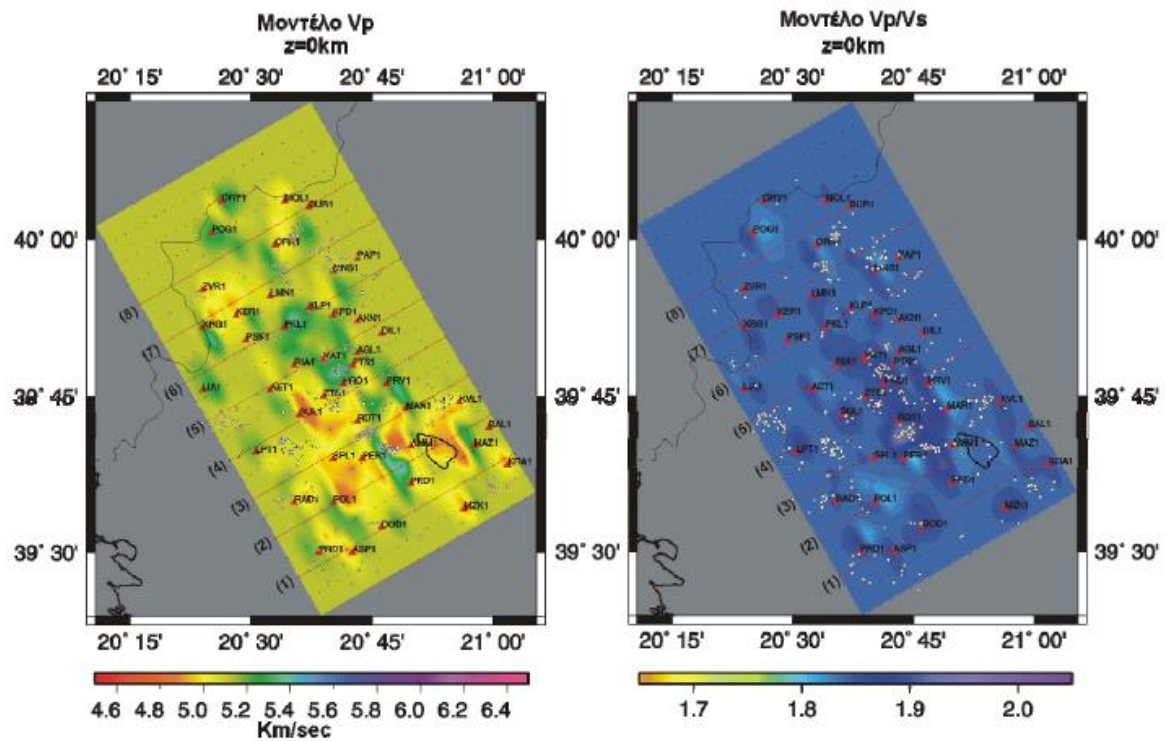
Σε βάθος 2 km, η εμφάνιση του εβαπορίτη είναι σε μεγαλύτερη έκταση, και εντοπίζεται στην λεκάνη των Ιωαννίνων κατά μήκος του ανάστροφου ρήγματος Μιτισκελίου και Κουρέντων-Κασιδιάρη. Το βάθος των 2 km, είναι το μέγιστο βάθος του φλύσχη του συγκλίνου της Βοτσαράς. Στην εικόνα 46, οι ταχύτητες στο μεγαλύτερο ποσοστό αναφέρονται στους ασβεστολίθους του Παντοκράτορα (5.5-5.9 km/sec). Από το βάθος των 2 km και μέχρι τα 10 km, πλευρικά του κανάβου παρατηρείται περιορισμένη κάλυψη από σεισμικές ακτίνες, και η ευκρίνεια της εικόνας είναι μειωμένη.

Σε βάθος 3-6 km, οι υψηλότερες τιμές αναφέρονται στους ασβεστόλιθους του Παντοκράτορα και οι μικρότερες σε διεισδύσεις εβαποριτών. Οι διεισδύσεις εβαποριτών έχουν ταχύτητες V_p 5.1-5.4 km/sec. Τα περιβάλλοντα πετρώματα των εβαποριτών είναι ασβεστόλιθοι και χαρακτηρίζονται από ταχύτητες V_p 5.5-6.2 km/sec. Σε βάθος 6 km, παρατηρείται μικρή άνοδος στις τιμές λόγω της αύξησης του βάθους, αλλά και της σύστασης των εβαποριτών. Ο αλίτης εμφανίζει μικρότερες ταχύτητες σε σύγκριση με τον ανυδρίτη ή τη γύψο [26].

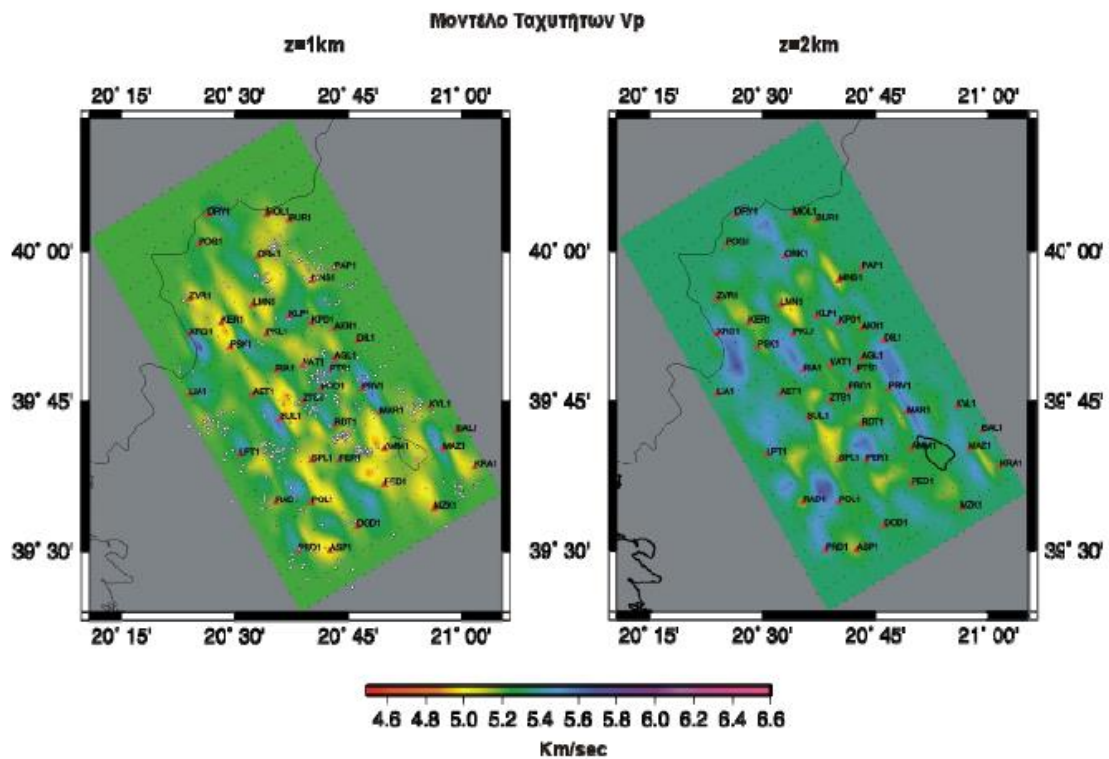
Στα βάθη 7-10 km, οι υψηλότερες ταχύτητες οφείλονται στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο, ενώ οι χαμηλότερες στην ύπαρξη εβαποριτών. Παρατηρείται αύξηση των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων λόγω της αύξησης του βάθους και της πίεσης (5.45-6.5 km/sec). Οι χαμηλές τιμές του λόγου V_p/V_s υποδεικνύει την ύπαρξη εβαποριτών.



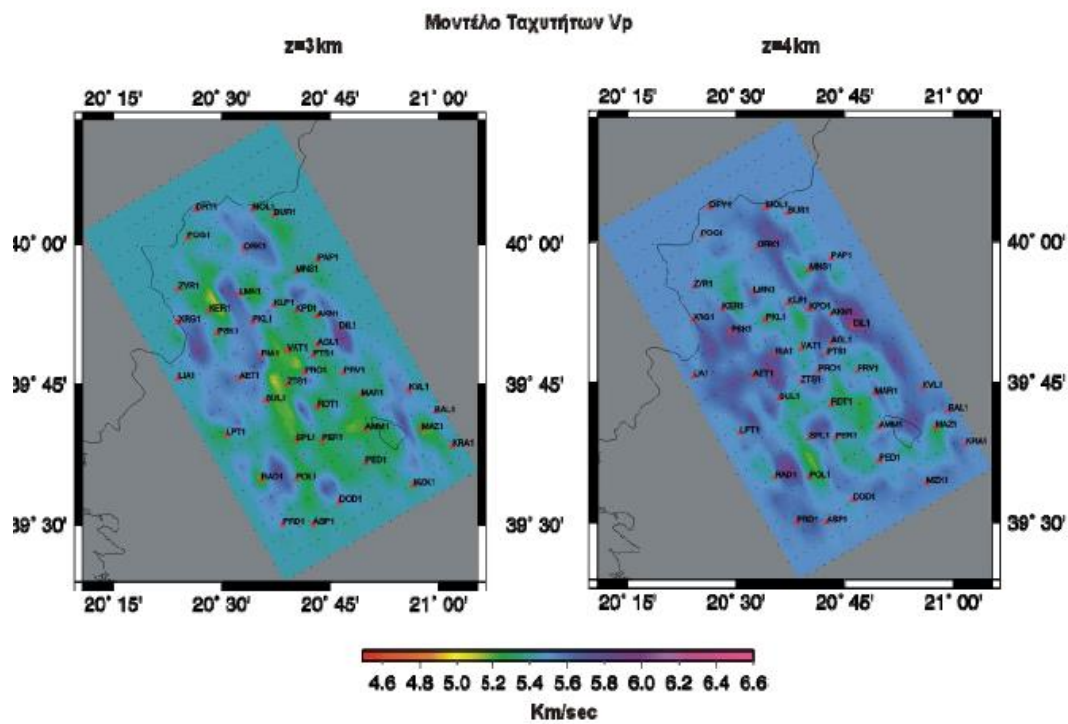
Εικόνα 45:
Τεκτονικός
χάρτης
περιοχής
μελέτης
(Μαρτάκης,
2003).



Εικόνα 46: Μοντέλο απεικόνισης των ταχυτήτων V_p και του λόγου V_p/V_s σε βάθος 0 km (Μαρτάκης, 2003).

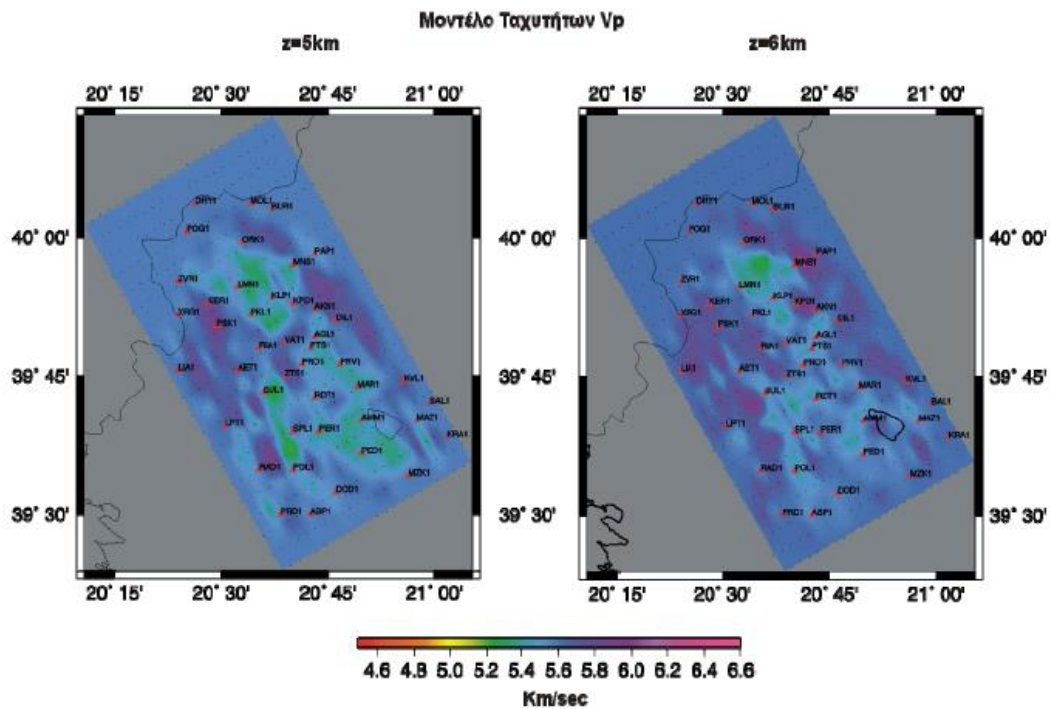


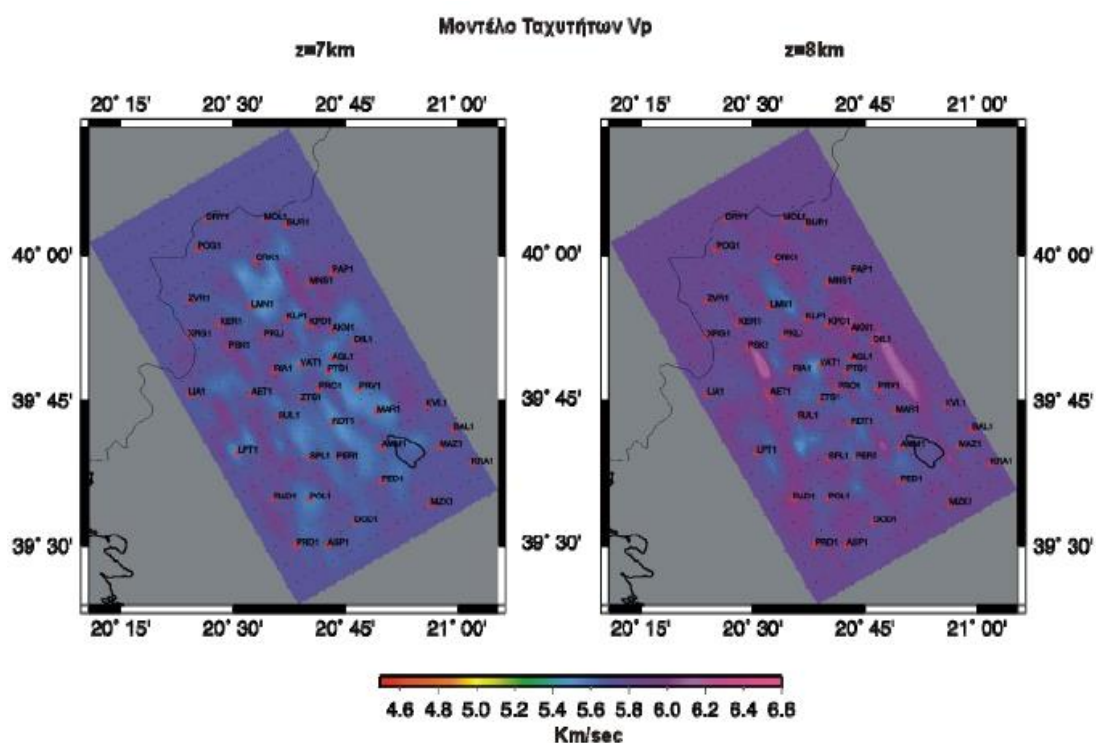
Εικόνα 47: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 1 και 2 km (Μαρτάκης, 2003).



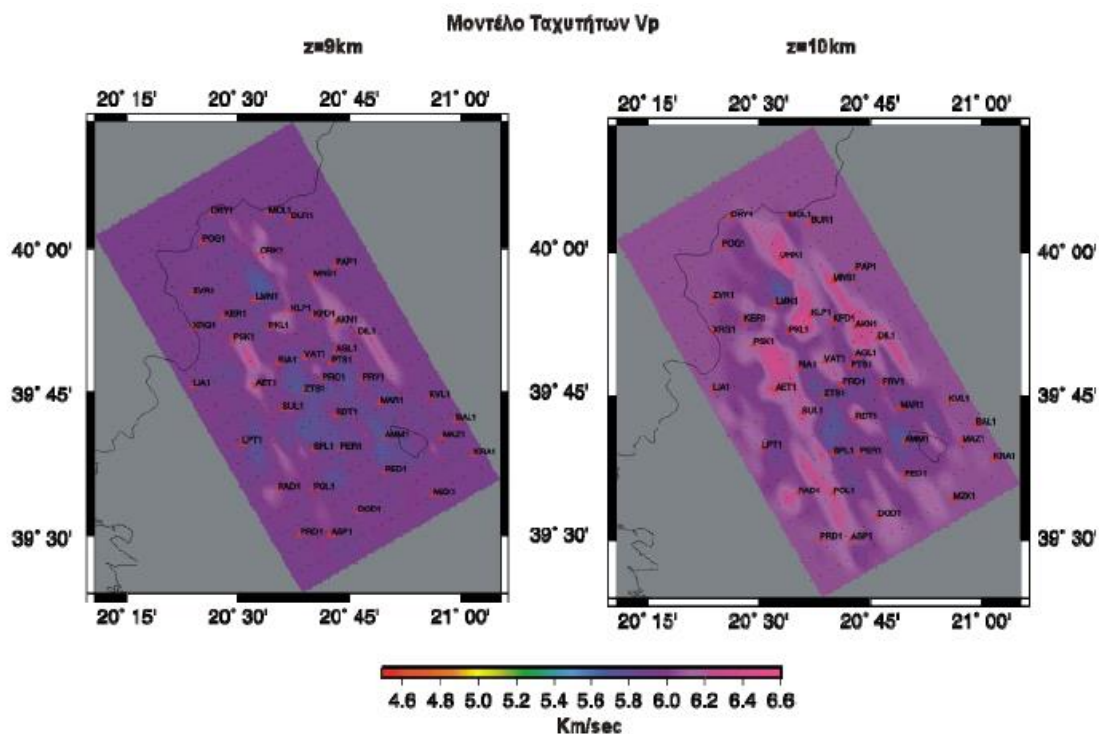
Εικόνα 48: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 3 και 4 km (Μαρτάκης, 2003).

Εικόνα 49: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 5 και 6 km (Μαρτάκης, 2003).





Εικόνα 50: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 7 και 8 km (Μαρτάκης, 2003).



Εικόνα 51: Απεικόνιση των ταχυτήτων των P κυμάτων σε βάθη 9 και 10 km (Μαρτάκης, 2003).

Στην εικόνα 52, απεικονίζονται με άσπρους κύκλους τα επίκεντρα των σεισμών, και οι σταθμοί του δικτύου. Οι αριθμημένες γραμμές αντιστοιχούν σε τομές. Με μαύρες τελείες είναι οι κόμβοι του κανάβου. Η ακρίβεια αυξάνεται σε περιοχές όπου το δίκτυο των σταθμών είναι πιο πυκνό. Από τα 434 σεισμικά γεγονότα, τα 110 εμφανίζονται ανατολικά και δυτικά της λίμνης των Ιωαννίνων, στο κέντρο της περιοχής μελέτης. Το μοντέλο της ταχύτητας των P κυμάτων, παρουσιάζει καλύτερη διακριτική ικανότητα από το μοντέλο του λόγου V_p/V_s εξαιτίας του μεγαλύτερου όγκου δεδομένων των P κυμάτων, και της μεγαλύτερης αξιοπιστίας που αυτά προσφέρουν.

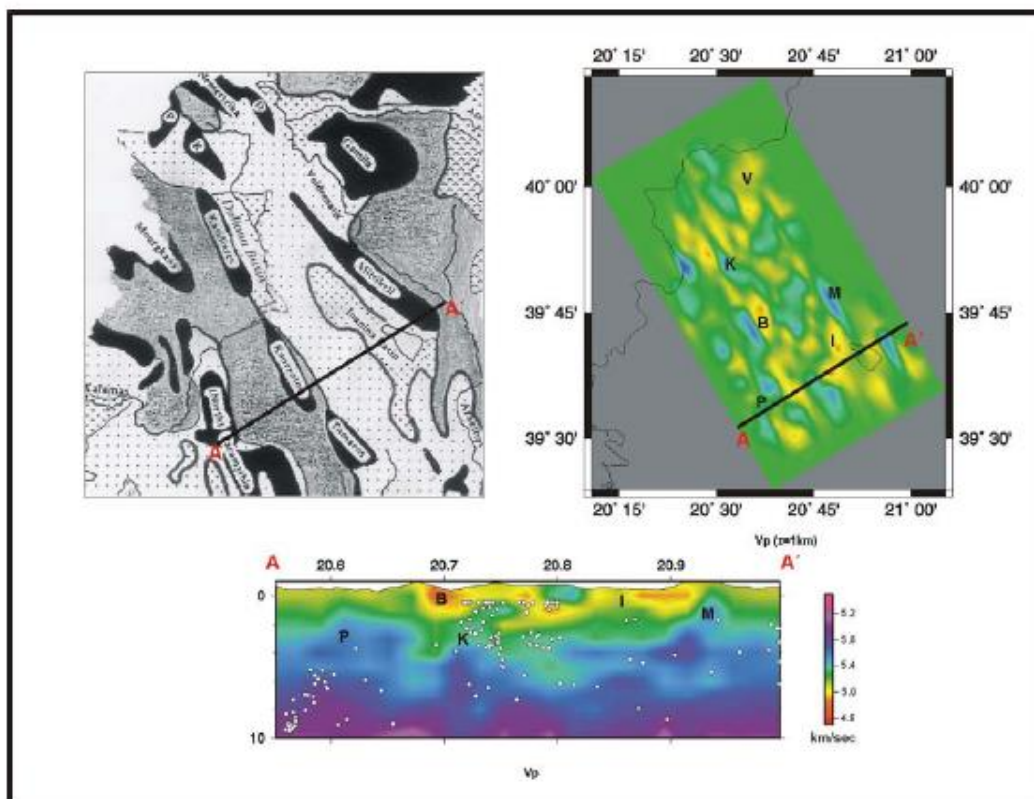
Το σύγκλινο της Βοτσαράς παρουσιάζει μια περιοχή χαμηλών ταχυτήτων, με διεύθυνση BBD-NNA. Το πάχος των αποθέσεων του φλύσχη, μπορεί να ξεπερνά και τα 2 km σε περιοχές που εμφανίζουν πτύχωση.

Ανατολικά το μεγαντίκλινο του Μιτισικελίου, εμφανίζει μια περιοχή υψηλών ταχυτήτων (5.4-5.7 km/sec). Το μεγαντίκλινο προς τα νότια παρουσιάζει εναλλαγές φλύσχη (χαμηλές ταχύτητες) και ασβεστολίθων (υψηλές ταχύτητες).

Στη λίμνη Παμβώτιδα, οι αποθέσεις των Τεταρτογενών και του φλύσχη δημιουργούν χαμηλές ταχύτητες (4.5-5.0 km/sec). Η διεύθυνση του εβαπορίτη σε βάθος 1km, επιβεβαιώνεται από τις χαμηλές τιμές του λόγου V_p/V_s (1.70-1.75). Η ύπαρξη του εβαπορίτη σε αυτό το βάθος φαίνεται πιο έντονα στην δεύτερη εγκάρσια τομή ταχύτητας V_p και του λόγου V_p/V_s .

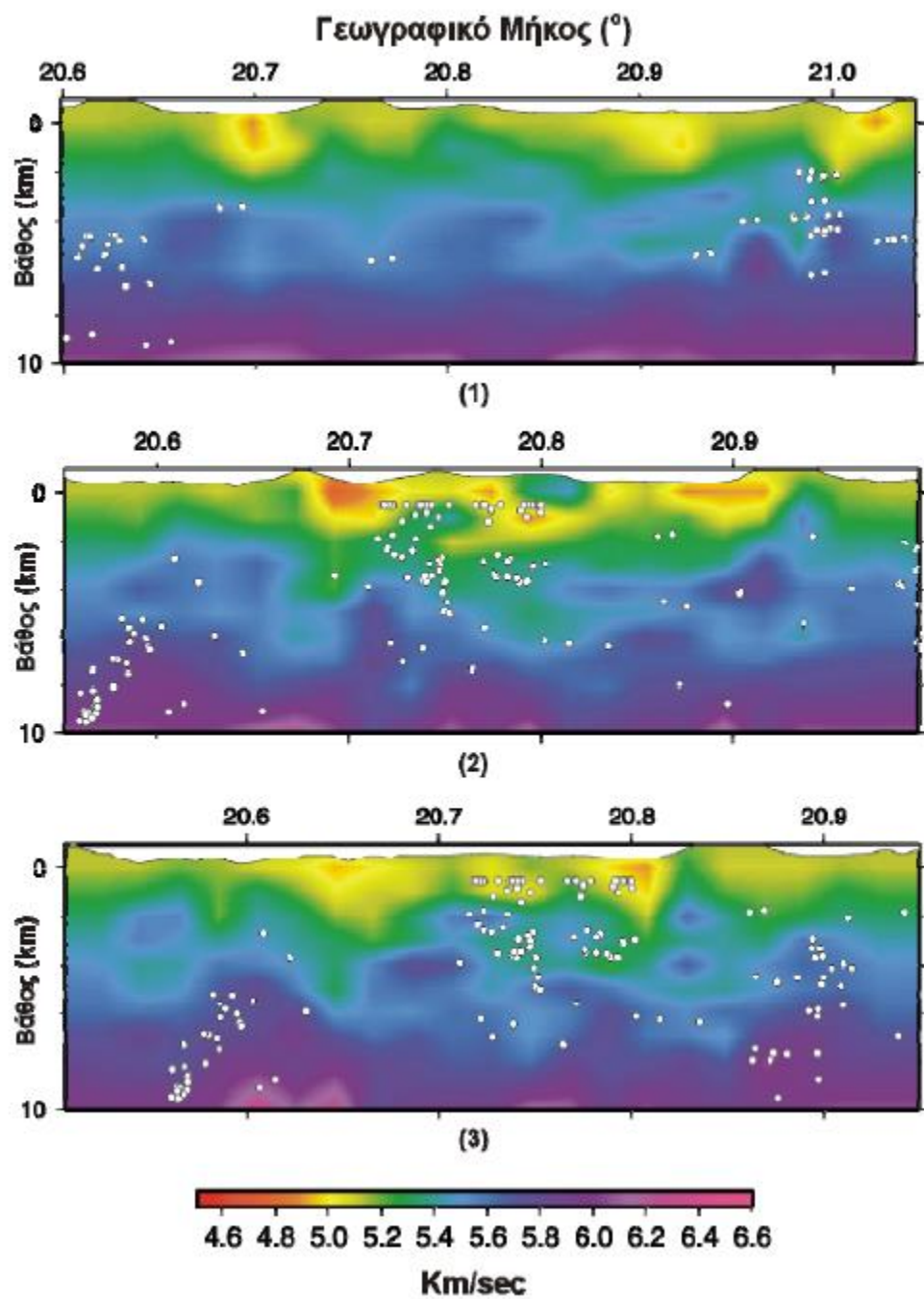
Τεκτονικά από τα ανατολικά παρατηρείται το σύγκλινο Ηπείρου-Ακαρνανίας, το αντίκλινο Μιτισικελίου, τα αντίκλινα Αετοράχης-Τόμαρου, το σύγκλινο του Βοτσαρά και το αντίκλινο της Παραμυθιάς.

Από τα ανατολικά παρατηρούνται το Σύγκλινο Ηπείρου-Ακαρνανίας, το αντίκλινο του Μιτισικελίου, οι αντικλινικές δομές Αετοράχης-Τόμαρου, το σύγκλινο του Βοτσαρά και το βόρειο τμήμα του αντίκλινου της Παραμυθιάς.



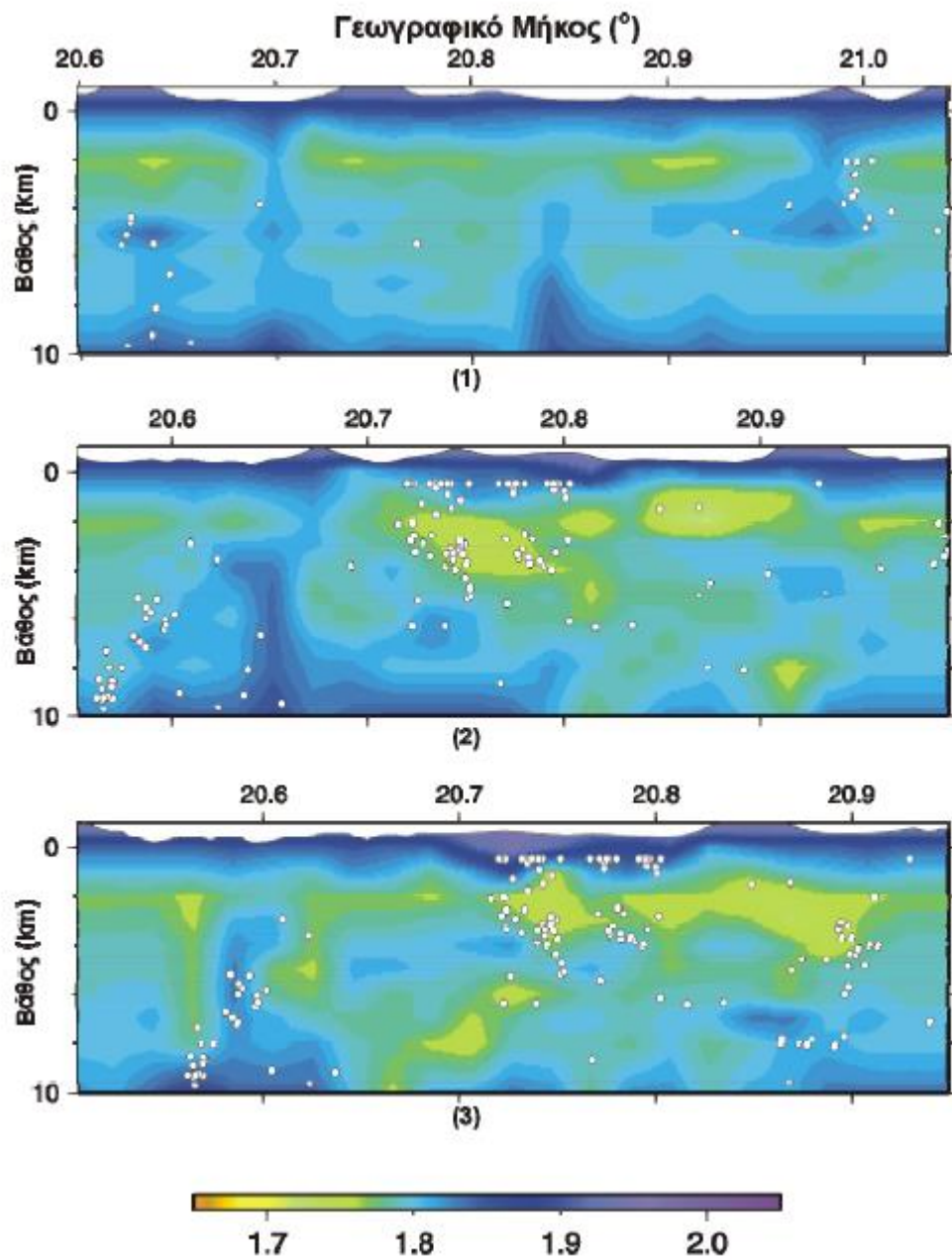
Εικόνα 52: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της σεισμικής παθητικής τομογραφίας με τη γεωλογία της περιοχής. P: Παραμυθία, B: Βοτσαράς, K: κουρέντων-Κασιδιάρης, I: Πεδίο Ιωαννίνων, M: Μπισικέλι, V: Βοϊδομάτης (Μαρτάκης, 2003).

Βόρεια, παρατηρούνται χαμηλές ταχύτητες που σχετίζονται με την εμφάνιση του Τριαδικού (γύψος και λατυποπαγή). Βορειοδυτικά, χαμηλές ταχύτητες οφείλονται σε ιζήματα της κοιλάδας του Αώου-Βοϊδομάτη αλλά και στις εμφανίσεις του φλύσχη στην περιοχή.



Εικόνα 53: Εγκάρσιες τομές Vp (Μαρτάκης, 2003).

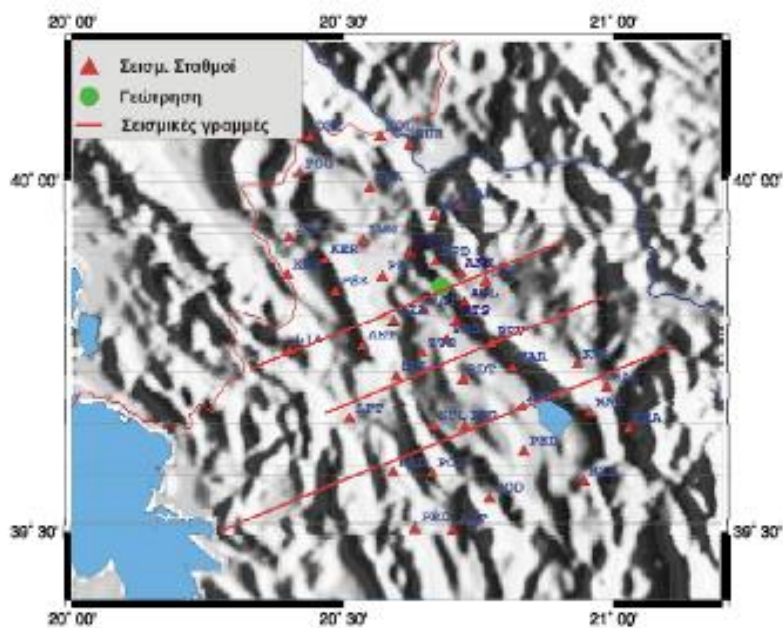
Εγκάρσιες Τομές Vp/Vs



Εικόνα 54: Εγκάρσιες τομές Vp/Vs (Μαρτάκης, 2003).

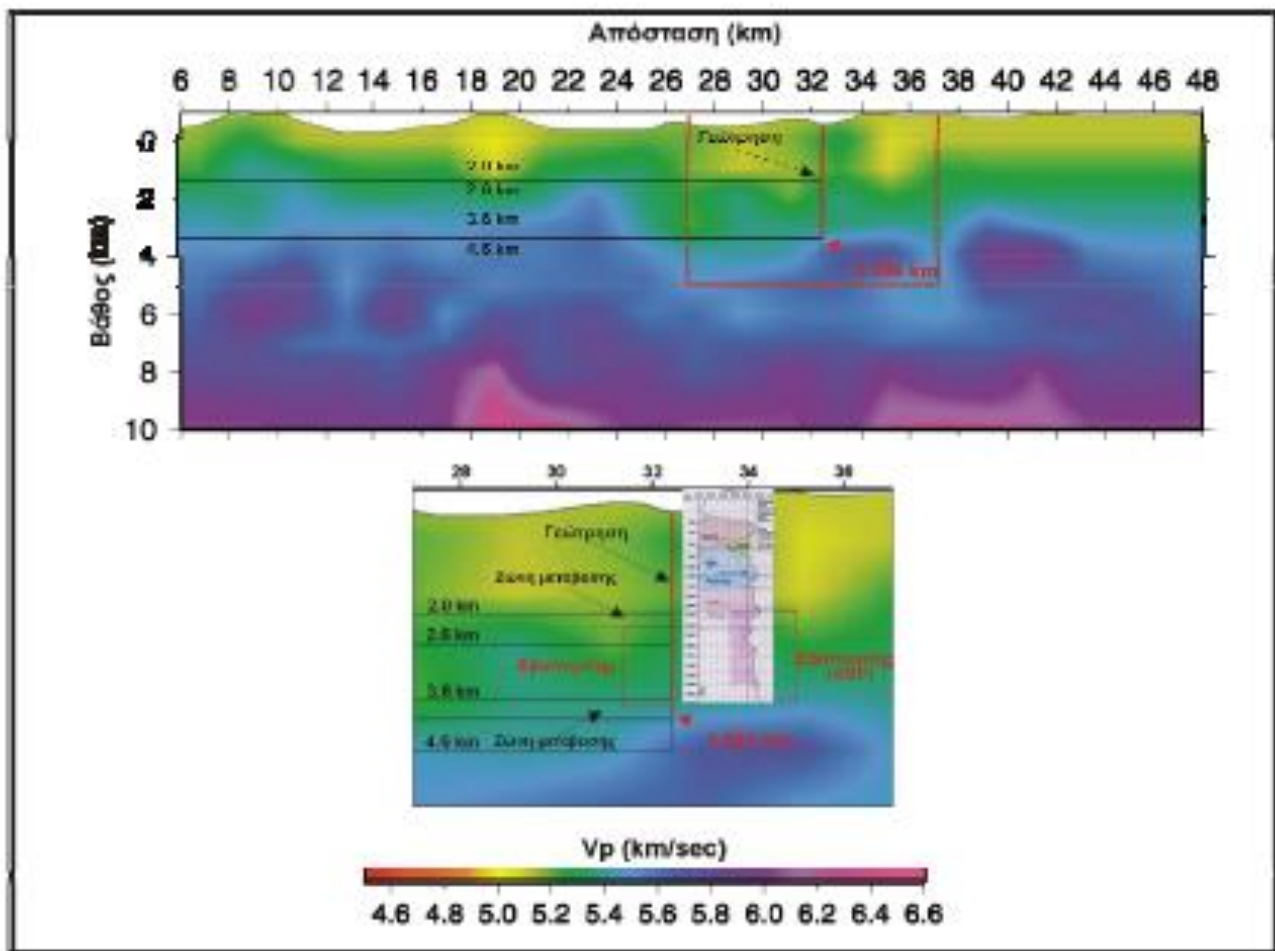
4.8 Σύγκριση της μεθόδου της παθητικής σεισμικής τομογραφίας με τη σεισμική μέθοδο VSP

Στην περιοχή μελέτης διανοίχθηκε γεώτρηση, για την αναζήτηση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων.

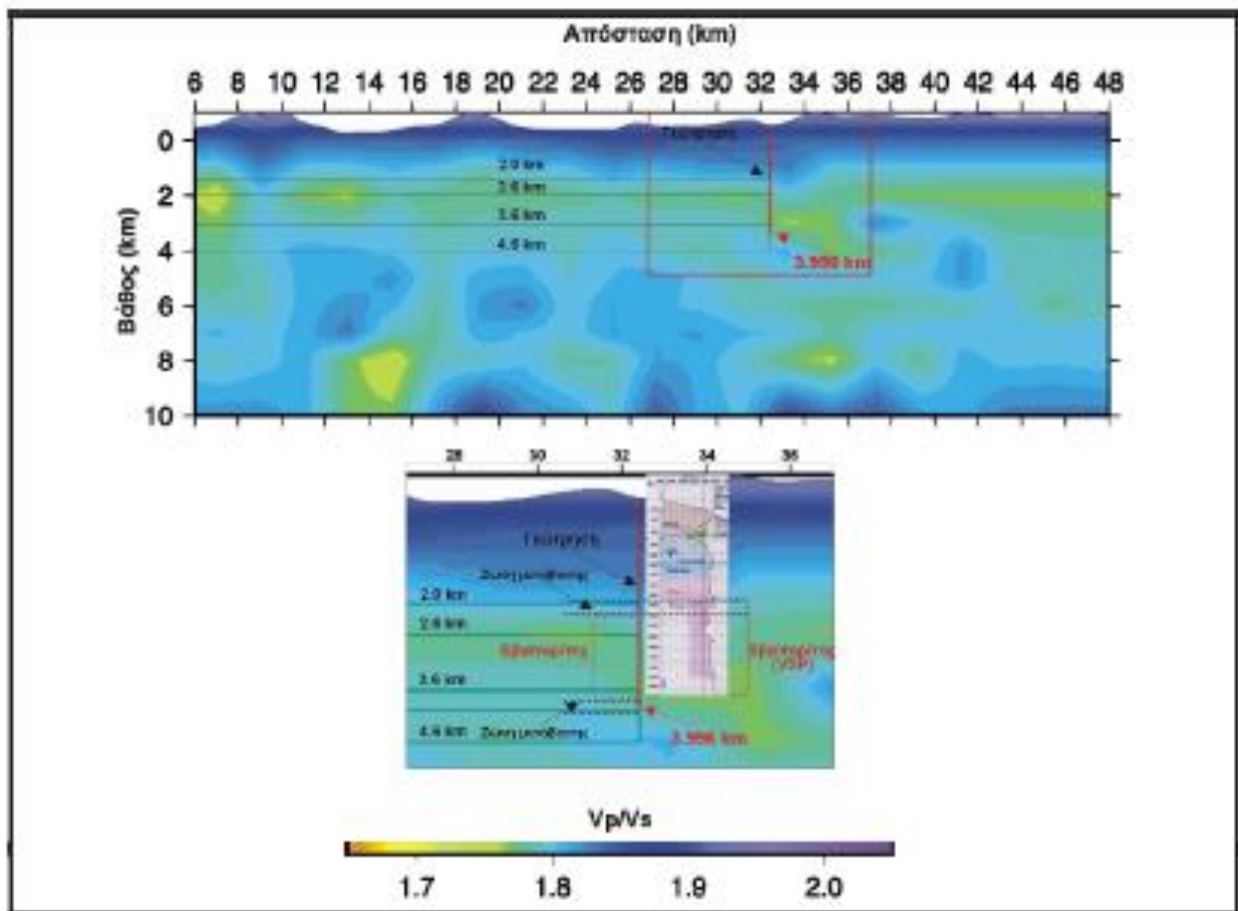


Εικόνα 55: Η θέση της γεώτρησης, και του σεισμικών σταθμών στην περιοχή μελέτης. Οι κόκκινες γραμμές είναι σεισμικές γραμμές (Μαρτάκης, 2003).

Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παθητικής σεισμικής τομογραφίας από τη βορειότερη σεισμική γραμμή με τα αποτελέσματα της σεισμικής μεθόδου VSP της γεώτρησης EntOil.



Εικόνα 56: Σύγκριση της παθητικής σεισμικής τομογραφίας (V_p) της σεισμικής γραμμής με τη μέθοδο VSP (σε μεγέθυνση εικόνα κάτω). Το κόκκινο πλαίσιο οριοθετεί την περιοχή της γεώτρησης (Μαρτάκης, 2003).



Εικόνα 57: Σύγκριση της παθητικής σεισμικής τομογραφίας (V_p/V_s) της σεισμικής γραμμής με τη μέθοδο VSP (σε μεγέθυνση εικόνα κάτω). Το κόκκινο πλαίσιο οριοθετεί την περιοχή της γεώτρησης (Μαρτάκης, 2003).

Στην σύγκριση των αποτελεσμάτων παρατηρείται συμφωνία μεταξύ της μεθόδου VSP και παθητικής τομογραφίας. Σε βάθος 1900 m, υπάρχει η μετάβαση από τους ασβεστολίθους σε εβαπορίτες, η οποία εκφράζεται με τη μεταβολή των ταχυτήτων V_p και του λόγου V_p/V_s . Η ζώνη μετάβασης φτάνει μέχρι το βάθος των 2200 m. Από αυτό το βάθος (2200 m) και μέχρι τα 3600 m παρατηρείται το στρώμα εβαπορίτη. Η γεώτρηση σταματάει στα 3996 m, λόγω υψηλής πίεσης σε μια ζώνη μετάβασης, που παρατηρείται στην τομογραφία [26].

Κεφάλαιο 5

5.1 Σεισμικά μοντέλα σε πολύπλοκες γεωλογικές δομές

Τα σεισμικά μοντέλα χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών όπως στο σχεδιασμό πειράματος απόκτησης σεισμικών δεδομένων, στην ερμηνεία των σεισμικών δεδομένων και στο χαρακτηρισμό ταμιευτήρων. Αυξάνουν τη ακρίβεια της σεισμικής ανάλυσης των δεδομένων. Αποτελούν χρήσιμο εργαλείο στην παρακολούθηση της διάδοσης του σεισμικού κύματος, ειδικά σε πολύπλοκες στρωματογραφικά δομές. Ο όρος «πολύπλοκη» δομή χρησιμοποιείται σε ενότητες που είναι δύσκολο να απεικονιστούν, όπως πτυχώσεις, στρώματα και ρήγματα με απότομη κλίση, ρηγματωμένες και πτυχωμένες δομές άλατος.

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δημιουργεί ένα επιπλέον πρόβλημα στα δεδομένα σεισμικής ανάκλασης [28].

5.1.1 Προβλήματα λόγω τοπογραφικού αναγλύφου

Στρώμα χαμηλής ταχύτητας, κοντά στην επιφάνεια, προκαλεί καθυστέρηση των σεισμικών κυμάτων. Το βασικό πρόβλημα είναι η μεταβολή του πάχους αυτού του στρώματος και της ταχύτητας σε αυτό. Συνήθως τέτοιο στρώμα είναι πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Στους χρόνους διαδρομής των σεισμικών κυμάτων εφαρμόζονται στατικές διορθώσεις για να αντισταθμιστεί η καθυστέρηση στο στρώμα χαμηλής ταχύτητας. Η επιτυχία αυτών των στατικών διορθώσεων εξαρτάται από την ακρίβεια του σεισμικού μοντέλου κοντά στην επιφάνεια [28].

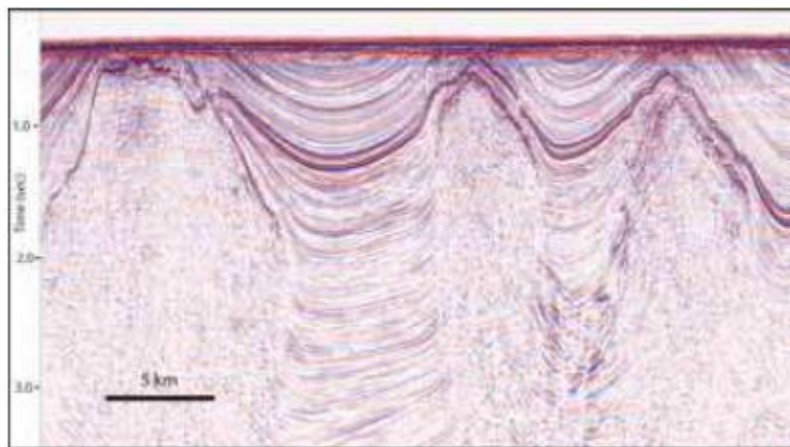
Η πολυπλοκότητα των δομών κοντά στην επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω εξασθένηση ανακλώμενων κυμάτων από βαθύτερους στόχους. Υψηλότερες ταχύτητες κοντά στην επιφάνεια λόγω ανομοιογένειας, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα παρερμηνείας ανακλώμενων κυμάτων. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στη Νορβηγική θάλασσα του Barents, όπου ο ασβεστόλιθος κοντά στο πυθμένα της θάλασσας εμφανίζεται με υψηλή ταχύτητα, ως ένας ισχυρός σκεδαστής, δημιουργώντας προβλήματα στη διάδοση του κύματος.

5.1.2 Προβλήματα κάτω από την επιφάνεια

Σε σχέση με τις υπόλοιπες γεωλογικές δομές, πρόκληση για τη σεισμική έρευνα αποτελούν οι δόμοι άλατος και οι δομές πτυχών και επωθήσεων. Τα σεισμικά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί για να βελτιώσουν την απεικόνιση για αυτές τις δομές (Fagin, 1991).

Αλατούχες ζώνες: Η έντονη αντίθεση σεισμικής ταχύτητας των αλατούχων δομών με τα περιβάλλοντα πετρώματα, σε συσχετισμό με πολύπλοκη γεωλογία προκαλεί πρωτογενείς ανακλάσεις, και περιθλάσεις. Σεισμικά μοντέλα έχουν σχεδιαστεί για έρευνες πάνω από αλατούχες ζώνες, ώστε να βελτιώσουν την διαδικασία απεικόνισης, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 58. Ο λόγος σήματος/θορύβου είναι χαμηλός, ειδικά κάτω από τις αλατούχες δομές. Στην εικόνα απεικονίζεται αυτή η πολυπλοκότητα.

Ζώνες πτυχώσεων και επωθήσεων: Αυτές οι ζώνες συναντώνται στα Καναδικά Όρη και στο ελληνικό ορογενές και δομούνται από σειρές ρηγμάτων επώθησης και βυθιζόμενα στρώματα. Αυτές οι δομές περιπλέκουν την διάδοση του κύματος. Οι σεισμικές τομές από τις δομές πτύχωσης-επώθησης συχνά αποτυγχάνουν να αποδώσουν την πραγματική εικόνα των δομών, όπως έχει αποδειχθεί από τις γεωτρήσεις.



Εικόνα 58: Σεισμική τομή από τη Νορβηγική θάλασσα Barents. (Alaei 2005).

Πρόσφατες μελέτες έχουν αποδείξει ότι η απόκτηση σεισμικών δεδομένων πάνω από ζώνες πτυχώσεων-επωθήσεων, έχει βελτιωθεί (Alaei, 2005). Η γεωμετρία για την

απόκτηση των δεδομένων περιλαμβάνει διάταξη γεωφώνων-πηγής, όπου τα γεώφωνα βρίσκονται από την μια πλευρά της πηγής (end-off array). Έχει αποδειχθεί ότι διάταξη μακριά από την πηγή μπορεί να βελτιώσει τον εντοπισμό του στόχου τοπικά [28]. Παρόλο που οι δισδιάστατες σεισμικές έρευνες είναι αυτές που εφαρμόζονται περισσότερο σε αυτές τις δομές, όταν αυτές αποτυγχάνουν χρησιμοποιούνται οι τρισδιάστατες σεισμικές.

Σκιές ρηγμάτων: Η διάδοση των σεισμικών κυμάτων παρεμποδίζεται κάτω από επίπεδα ρηγμάτων. Οι αλγόριθμοι σεισμικής απεικόνισης, δεν λαμβάνουν υπόψη πλευρικές διαφοροποιήσεις σεισμικής ταχύτητας πάνω από τα συγκεκριμένα επίπεδα με αποτέλεσμα να μην απεικονίζουν σωστά κάτω από αυτά. Η ζώνη χαμηλής ανακλαστικότητας των σεισμικών κυμάτων ονομάζεται σκιά ρήγματος.

Πλευρικές διακυμάνσεις λιθολογίας: Ακόμη και σε απλές στρωματογραφικές δομές η λιθολογική διακύμανση μέσα στην ίδια ενότητα, μπορεί να προκαλέσει έντονη πλευρική διακύμανση της σεισμικής ταχύτητας [28].

5.2 Μέθοδοι δημιουργίας σεισμικού μοντέλου

Οι μέθοδοι δημιουργίας σεισμικού μοντέλου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, στις μεθόδους που βασίζονται στις διεπιφάνειες (Alaei, 2005) και σε αυτές που βασίζονται στον κάνναβο (Mallet, 2002). Οι κύριες παράμετροι του μοντέλου, είναι το μέγεθος του στόχου και το βάθος καθώς και αν θα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο. Δομές που βρίσκονται εκτός του δισδιάστατου προφίλ δεν μπορούν να απεικονιστούν με δισδιάστατη απεικόνιση. Αντίθετα, με την τρισδιάστατη σεισμική απεικόνιση, μπορούν να παρατηρηθούν δομές σε διαφορετικές διευθύνσεις.

Η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου ξεκινά με τις παράμετρους γεωμετρίας που αναφέρθηκαν παραπάνω και συνεχίζεται με την επιλογή ταχύτητας και πυκνότητας για κάθε στρώμα. Στο μοντέλο περιλαμβάνονται στρωματογραφικοί ορίζοντες, όπως η κορυφή και η βάση του ταμιευτήρα, δομές άλατος και άλλες επιφάνειες που προκαλούν διακυμάνσεις ταχύτητας [28]. Ρήγματα και ασυνέχειες μπορούν να προκαλέσουν σκέδαση του σεισμικού κύματος, και επιλέγονται με βάση γεωλογικά δεδομένα στις παραμέτρους δημιουργίας μοντέλου. Δομές όπως πτύχωση και επώθηση, που προκαλούν έντονες διακυμάνσεις ταχύτητας, πρέπει να αναπαρίστανται πιστά στο μοντέλο καθώς εκτρέπουν τα σεισμικά κύματα.

5.2.1 Μέθοδος βασισμένη στις διεπιφάνειες

Έπειτα από τον ορισμό των γεωμετρικών παραμέτρων, ακολουθεί η επιλογή στρωματογραφικών οριζόντων και ρηγμάτων. Οι διεπιφάνειες αυτές, μπορούν να απεικονιστούν με τη μορφή γραμμών ή καμπυλών. Η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το κυρίαρχο μήκος κύματος του σεισμικού σήματος.

Οι ορίζοντες μπορεί να διασταυρώνονται με τα πλευρικά όρια του μοντέλου, ή με άλλους ορίζοντες, συμβάλλοντας στην πολυπλοκότητα του μοντέλου. Σε επόμενο βήμα καθορίζονται οι σεισμικές ταχύτητες (επιμήκη P και διαμήκη S) και η πυκνότητα. Η σεισμική ταχύτητα μπορεί να μεταβάλλεται κατακόρυφα ή οριζόντια.

Δεδομένα σεισμικής ταχύτητας προκύπτουν από ακουστικές διαγραφίες και VSP δεδομένα. Τα δεδομένα VSP συλλέγονται με διάταξη πηγής-γεωφώνων όπου η πηγή είναι στην επιφάνεια και τα γεώφωνα στη γεώτρηση. Η VSP μέθοδος κρίνεται πιο ακριβής, γιατί χρησιμοποιεί πληροφορίες ολόκληρου του ίχνους σε αντίθεση με τη checkshot (έρευνα με βολές ελέγχου), που χρησιμοποιεί μόνο τα δεδομένα των πρώτων αφίξεων. Στη VSP μέθοδο, η διάταξη των γεωφώνων είναι πιο πυκνή, δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα.

5.2.2 Μέθοδος βασισμένη σε κάνναβο ή κελιά

Σε αυτή τη μέθοδο, τα στοιχεία όπως τα ρήγματα και οι στρωματογραφικοί ορίζοντες απεικονίζονται με τριγωνικές επιφάνειες (Mallet,2002). Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από δίκτυο κόμβων. Σε κάθε κόμβο του δικτύου ορίζονται φυσικές παραμέτρους, όπως σεισμική ταχύτητα και πυκνότητα του στρώματος στο οποίο βρίσκεται και οι συντεταγμένες (x,y).

Σύμφωνα με τον (Petersen 1999), για την κατασκευή γεωλογικού μοντέλου, χρησιμοποιούνται σύνθετα μοντέλα, όπου κάθε κελί αναπαριστά περιοχή. Οι φυσικές παράμετροι μπορεί να διαφέρουν σε κάθε κελί. Σε πολύπλοκες στρωματογραφικές δομές, που η εξέλιξη των γεγονότων είναι σημαντική, αυτό το μοντέλο θα αναπαραστήσει την πραγματική γεωλογική δομή. Μοντέλο που δεν έχει δοθεί η απαραίτητη σημασία σε δευτερογενή στρώματα και στις οριοθετήσεις τους, αποτυγχάνει στην αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης [28]. Στρωματογραφικά, περιλαμβάνονται πτυχώσεις και διακλάσεις μικρής κλίμακας. Εάν κάποιο γεγονός

υπερκαλύπτει ένα άλλο, οι παράμετροι που ανήκουν χρονικά στο τελευταίο γεγονός, αντικαθιστούν τους προηγούμενους σε μια συγκεκριμένη θέση στο χώρο. Με αυτό τον τρόπο, περιλαμβάνονται οι παράμετροι του χρόνου και του χώρου στο γεωλογικό μοντέλο. Η γεωμετρία χαρακτηρίζεται από καμπύλες, που μπορούν να πάρουν οποιοδήποτε σχήμα.

5.3 Προσομοίωση με τη χρήση σεισμικών ακτίνων (*Ray tracing*)

Στη συνέχεια ακολουθεί επίλυση του ευθέως προβλήματος. Η σχέση της γεωλογικής δομής με τις μετρούμενες ποσότητες, αποτελεί πρόβλημα που επιλύεται με διάφορες τεχνικές. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται ευθύ πρόβλημα, και η επίλυσή του προβλέπει τιμές πειραματικών ποσοτήτων, όπως ο χρόνος διαδρομής των ανακλώμενων κυμάτων. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται είτε με την Ακτινική θεωρία (*Ray Tracing Theory*), είτε με την Κυματική (*Wave Theory*) [29]. Τα σεισμικά κύματα καθορίζονται από την κυματική εξίσωση, όπου η χωρική παράγωγος της μετατόπισης ψ είναι ανάλογη με την αντίστροφο του τετραγώνου της ταχύτητας, V , και της χρονικής παραγώγου της μετατόπισης ψ [14].

$$\frac{1}{V^2} \bullet \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \psi \quad (5.1)$$

Σε ομογενές μέσο, οι σεισμικές ακτίνες είναι ευθύγραμμες, και η επίλυση της κυματικής εξίσωσης σε μια διάσταση είναι απλή διαδικασία, με μεγάλη ακρίβεια. Σε πιο πολύπλοκες δομές εμπλέκονται περισσότεροι παράγοντες όπως η περιθλαση, η ανισοτροπία και η επίλυση της κυματικής πιο δύσκολη, καθώς απαιτείται μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνος. Η ακτινική θεωρία είναι η πιο συχνή προσέγγιση για την επίλυση του ευθέως προβλήματος. Οι τεχνικές που βασίζονται σε αυτή τη θεωρία, είναι της Σκόπησης, της Συνέχισης και της Κατεύθυνσης [29].

Η ακτινική θεωρία στηρίζεται στην προσέγγιση ότι η σεισμική ενέργεια διαδίδεται με τη μορφή μετώπων κύματος, και τα σεισμικά κύματα ως σεισμικές ακτίνες. Το πρώτο βήμα στην επίλυση του ευθέως προβλήματος είναι ο καθορισμός της πορείας των ακτινών, και ο υπολογισμός των χρόνων διαδρομής (T_i).

$$T_i = \sum_{j=1}^n dij \bullet sj$$

(5.2)

Όπου $s_j=1/v_j$ η βραδύτητα στο κελί, v_j η ταχύτητα στο κελί και dij το διάστημα που η ακτίνα i διατρέχει το κελί j [29]. Από την επίλυση της εξίσωσης ως προς τη βραδύτητα προκύπτει η κατανομή της ταχύτητας των επιμηκών κυμάτων P . Στην ασυμπτωτική ακτινική θεωρία, τα πλάτη των σεισμικών κυμάτων και οι χρόνοι διαδρομής είναι ανεξάρτητοι από τη συχνότητα. Οι χρόνοι διαδρομής δίνονται από την εξίσωση $eikonal$ η οποία προέρχεται από την κυματική.

$$|\nabla T|^2 = \frac{1}{V^2} \quad (5.3)$$

Η εξίσωση $eikonal$, υπολογίζει τη πρώτη άφιξη σε κάθε κόμβο. Η βαθμίδα του παράγοντα T ισούται με τη βραδύτητα του μέσου. Στα μέτωπα κύματος οι τιμές του T είναι σταθερές, ενώ τα διανύσματα παράλληλα στο ∇T είναι οι σεισμικές ακτίνες. Η υψίσυχνη ενέργεια του κυματικού πεδίου καθορίζεται από την πορεία των σεισμικών ακτίνων [29]. Η επίλυση της $eikonal$ επιταχύνει την ταχύτητα των υπολογισμών. Έστω η εξίσωση $x_m = x_m(q)$, όπου $m=1,2,3$ οι σεισμικές ακτίνες με q το μήκος της ακτίνας. Για τον εντοπισμό της πορείας της σεισμικής ακτίνας απαιτούνται οι αρχικές συνθήκες. Οι αρχικές συνθήκες κάθε σεισμικής ακτίνας είναι οι συντεταγμένες του σημείου αναφοράς O_o (x_{m0}), ο χρόνος διαδρομής t_0 , και η αρχική διεύθυνση s_{m0} . Στο σημείο έναρξης της ακτίνας θεωρείται το $q=0$.

Η λύση της διαφορικής εξίσωσης (5.3) δίνεται από την επίλυση παραμετρικών εξισώσεων σύμφωνα με τους Cerveny, Molotkov and Psencik, (1977).

$$\frac{dx_m}{dq} = v s_m, \quad \frac{ds_m}{dq} = \frac{\partial}{\partial x_m} \frac{1}{v} \quad (5.4-5.5)$$

Η παραμετρική αυτή εξίσωση, καθορίζει την πορεία της ακτίνας, όπου s_m είναι το διάνυσμα της βραδύτητας.

Ο χρόνος διαδρομής σεισμικής ακτίνας δίνεται από τη σχέση

$$\frac{dt}{dq} = \frac{1}{v} \quad (5.6)$$

Οι συνιστώσες του αρχικού διανύσματος της βραδύτητας θα πρέπει να επαληθεύουν την *eikonal*.

$$s_{10}^2 + s_{20}^2 + s_{30}^2 = \frac{1}{v_0^2} \quad (5.7)$$

$V_0 = V_0(x_{m0})$. Η αρχική διεύθυνση δίνεται από τις γωνίες δ_0 και ψ_0 .

$$s_{10} = v_0^{-1} \sin \delta_0 \cos \psi_0 \quad (5.8)$$

$$s_{20} = v_0^{-1} \sin \delta_0 \sin \psi_0 \quad (5.9)$$

$$s_{30} = v_0^{-1} \cos \delta_0 \quad (5.10)$$

Η επίλυση της *eikonal* μπορεί να υστερεί σε πληροφορία στο πλάτος των σεισμικών κυμάτων, όμως είναι πιο γρήγορη υπολογιστικά.

Νέες μέθοδοι και αλγόριθμοι υπολογισμού της πορείας των σεισμικών ακτίνων, έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Από τις αριθμητικές μεθόδους η πιο γνωστή είναι η μέθοδος Runge-Kutta. Στη μέθοδο Runge-Kutta η σεισμική ταχύτητα υπολογίζεται στους κόμβους του πλέγματος.

Η χάραξη της πορείας των σεισμικών ακτίνων, είναι η πιο σημαντική διεργασία στην σεισμική τομογραφία και σεισμική αντιστροφή. Η επιλογή της τεχνικής καθορίζει και την ακρίβεια της σεισμικής αντιστροφής, την ακρίβεια του υπολογισμού των χρόνων διαδρομής και του μοντέλου των ταχυτήτων. Η κάθε σεισμική ακτίνα, ξεκινά από τη σεισμική πηγή (αφετηρία), διαδίδεται στο υπέδαφος και καταγράφεται από γεώφωνο που βρίσκεται σε γνωστή θέση. Για την επίλυση του προβλήματος καθορισμού της πορείας της σεισμικής ακτίνας εφαρμόζεται συνήθως η τεχνική της σκόπευσης ή η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών επιλύει την *eikonal*, η οποία για δισδιάστατο μοντέλο ταχύτητας $V(x,z)$ εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 = s(x,z)^2 \quad (5.11)$$

T , είναι ο χρόνος διαδρομής και s η βραδύτητα ($s = \nabla T$).

Το μοντέλο της ταχύτητας σε αυτή τη μέθοδο χωρίζεται σε πλέγμα κόμβων όπου υπάρχει ισαπόσταση μεταξύ τους h [31].

Οι χρόνοι διαδρομής, υπολογίζονται για όλους τους κόμβους του καννάβου, σε αντίθεση με άλλες υπολογιστικές μεθόδους που υπολογίζονται ανά ζευγάρι πηγής-γεωφώνου [33]. Η διάρκεια των υπολογισμών εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων. Για την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών δεχόμαστε ότι το μέτωπο του κύματος είναι επίπεδο, χωρίς να εμφανίζει καμπυλότητα. Το επίπεδο μέτωπο κύματος υπολογιστικά εκφράζει ότι οι κόμβοι βρίσκονται μακριά από την πηγή. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία είναι η τεχνική της σκόπευσης.

5.3.1 Τεχνική της σκόπευσης (Shooting method)

Η τεχνική της σκόπευσης ανήκει στις τεχνικές της ακτινικής θεωρίας. Στη τεχνική αυτή εφαρμόζεται ο νόμος του Snell, για το σχεδιασμό της πορείας της σεισμικής ακτίνας. Σύμφωνα με το νόμο, το ημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης προς την ταχύτητα ισούται με την παράμετρο της ακτίνας p [29].

$$p = \frac{\sin i_1}{v_1} = \frac{\sin i_2}{v_2} = \frac{\sin i_3}{v_3} = \dots \quad (5.12)$$

Στην παραπάνω εξίσωση i_1, i_2, i_3 είναι οι γωνίες πρόσπτωσης και v_1, v_2, v_3 οι ταχύτητες των στρωμάτων αντίστοιχα. Από την αρχική γωνία i_1 , υπολογίζεται η οριζόντια απόσταση πηγής με το σημείο που καταφθάνει η σεισμική ακτίνα στην επιφάνεια. Αν αυτή η απόσταση διαφέρει από τη γνωστή απόσταση πηγής-γεωφώνου, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται για νέα γωνία i_1 . Η νέα γωνία i_1 , προκύπτει από την προηγούμενη προσθέτοντας το βήμα da . Επειδή καμία ακτίνα δεν καταγράφεται ακριβώς στη θέση του γεωφώνου, δεχόμαστε αυτή που έγκειται πλησιέστερα, σε μια απόσταση ανοχής Δx από το γεώφωνο. Η επαναληπτική διαδικασία σταματά, όταν βρεθεί η πρώτη ακτίνα εντός της απόστασης ανοχής. Η τεχνική της σκόπευσης πλεονεκτεί στη χάραξη της πορείας των σεισμικών ακτίνων, καθώς από τη στιγμή που σχεδιαστεί η ακτίνα για το πρώτο γεώφωνο, είναι εύκολο να καθοριστούν οι σεισμικές ακτίνες και για τα υπόλοιπα γεώφωνα. Στα μειονεκτήματα της τεχνικής είναι ότι είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η γωνία i_1 και το βήμα da . Ακόμη, όταν η μέθοδος σταματά στην πρώτη ακτίνα που βρίσκεται στα όρια της ανοχής Δx , μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος, αλλά ελαττώνεται η ακρίβεια του χρόνου t_d [29].

Η γη θεωρείται ανομοιογενές μέσο, όπου η γωνία διάθλασης μεταβάλλεται συνεχώς, λόγω της διαφορετικής ταχύτητας των στρωμάτων. Ένας παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι αν οι σεισμικές ακτίνες θεωρηθούν ευθείες ή καμπυλωμένες. Οι χρόνοι διαδρομής σύμφωνα με το νόμο του Fermat και του Snell, αφορούν καμπυλωμένες ακτίνες. Σε περιοχή υψηλών ταχυτήτων, όπως το μοντέλο που περιγράφεται οι καμπυλωμένες ακτίνες θα συγκεντρωθούν στο χώρο αυτό, ενώ οι ευθείες θα διέλθουν ανεπηρέαστες από την αντίθεση της ταχύτητας. Επομένως με την ανακατασκευή της περιοχής βασισμένη σε ευθείες ακτίνες, θα εμφανίζεται μεγαλύτερη περιοχή υψηλών ταχυτήτων απ' ότι στην πραγματικότητα, μειώνοντας τη διακριτική ικανότητα του μοντέλου [33]. Οι ευθύγραμμες σεισμικές ακτίνες εξαρτώνται μόνο από τις θέσεις πηγής-γεωφώνου. Επομένως οι ευθείες ακτίνες, υπολογίζονται γρηγορότερα.

Η εφαρμογή ευθύγραμμων σεισμικών ακτίνων, προτείνεται σε περιπτώσεις όπου:

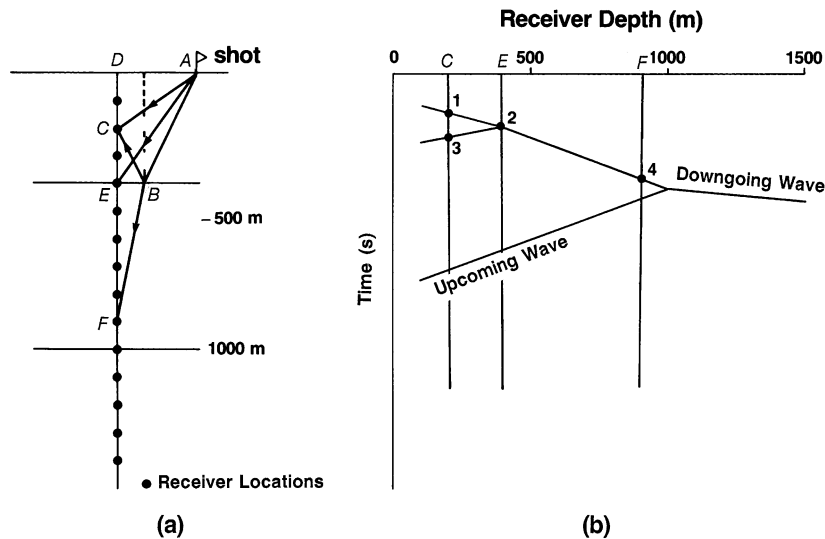
1. υπάρχει μεγάλη αντίθεση ταχύτητας, οι καμπυλωμένες ακτίνες, και η ακτινική θεωρία παραβιάζεται.
2. Στην περίπτωση που απαιτείται μια γενική εικόνα του χώρου, χωρίς μεγάλη διακριτική ικανότητα για τον εντοπισμό ανωμαλίας στην περιοχή.
3. Στην ανακατασκευή ανισότροπου χώρου ταχυτήτων, λόγω της μοναδικότητας που προσφέρει.

5.4 VSP-CDP μετασχηματισμός

Τα δεδομένα της σεισμικής μεθόδου VSP, έχουν καλύτερη συσχέτιση με τις συνθήκες της γεώτρησης, απ' ό,τι συνθετικά σειсмоγράμματα από ακουστικές διαγραφίες. Ο πιο βασικός λόγος είναι ότι τα VSP δεδομένα δεν είναι τόσο ευαίσθητα στις συνθήκες της γεώτρησης. Επιπλέον το σήμα από τα δεδομένα VSP έχει εύρος συχνοτήτων, παρόμοιο με αυτό των σεισμικών δεδομένων από τις ακουστικές διαγραφίες [34]. Στη διάταξη VSP, κάθε ίχνος που καταγράφεται στο ίδιο βάθος γεωφώνου, επεξεργάζεται και αθροίζεται. Το γεωφώνο μετακινείται σε νέο βάθος και η καταγραφή επαναλαμβάνεται. Το αποτέλεσμα είναι αναπαριστάται στο χώρο του βάθους και του χρόνου. Η εικόνα 59, δείχνει τη γεωμετρία απόκτησης δεδομένων VSP. Στην εικόνα 59(a), το σημείο A είναι η θέση της πηγής, ενώ το σημείο D η κεφαλή της γεώτρησης. Τα γεωφώνια βρίσκονται μέσα στη γεώτρηση σε διαφορετικά βάθη.

Τα απευθείας κύματα από την πηγή στα γεωφώνια C και E απεικονίζονται με AC και AE, αντίστοιχα. Για τον ανακλαστήρα στο βάθος του γεωφώνου E παρατηρείται η ανακλώμενη ακτίνα ABC και η διαθλώμενη ABF. Για κάθε θέση γεωφώνου, απεικονίζεται ένα ίχνος στο πεδίο του βάθους και του χρόνου (εικόνα 59b). Στο ίχνος C, αντιστοιχεί το απευθείας κύμα (1), και η άφιξη από την ανάκλαση (3). Το απευθείας κύμα (1 στο γεώφωνο C) και το διαθλώμενο κύμα (4 στο γεώφωνο F), ακολουθούν μόνο καθοδικές πορείες και για αυτό ονομάζονται καθοδικά κύματα (downgoing waves).

Η ανακλώμενη ακτίνα ABC, περιέχει ένα κλάδο με ανοδική πορεία τον BC, επομένως χαρακτηρίζεται ως ανοδικό κύμα. Η άφιξη (2), συμπίπτει με την άφιξη της ανάκλασης (3), και αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι ο ανακλαστήρας βρίσκεται στο βάθος του γεωφώνου E. Τα ανοδικά και καθοδικά κύματα σε αυτό το βάθος συμπίπτουν.



Εικόνα 59: Γεωμετρία VSP (a) πορείες των σεισμικών ακτίνων (b) ίχνος κάθε γεωφώνου στο χώρο βάθους-χρόνου (Yilmaz 2001)

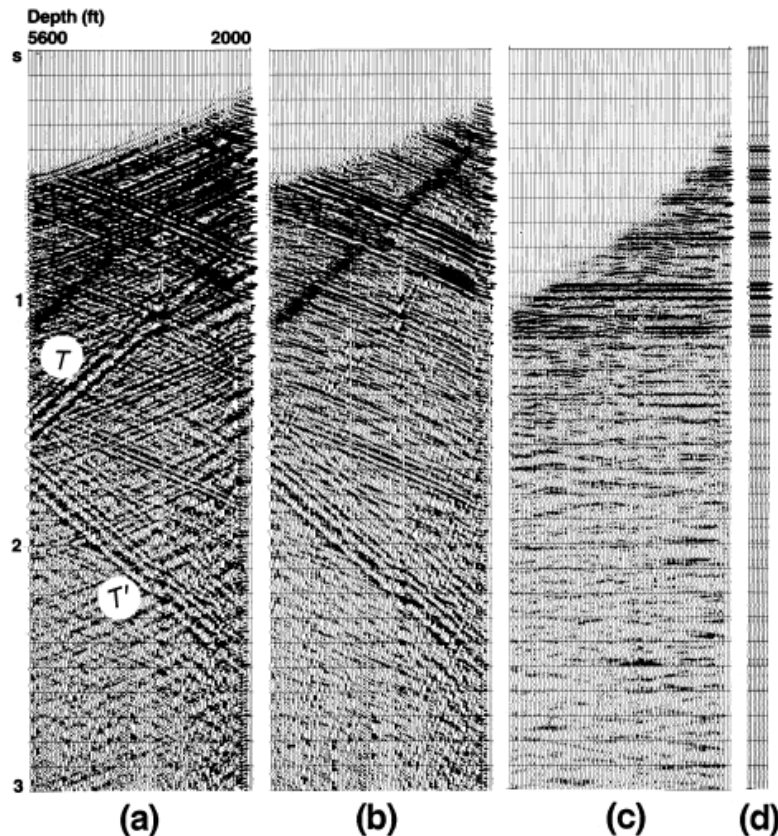
Επεξεργασία των δεδομένων VSP

Έπειτα από τη χάραξη των σεισμικών ακτίνων, ακολουθεί ο διαχωρισμός των ανοδικών και των καθοδικών κυμάτων. Μια τεχνική διαχωρισμού αποτελεί το φίλτρο συχνότητας-κυματάριθμου (f-k filtering). Στην εικόνα 60, παρουσιάζονται δεδομένα VSP, μηδενικής ολίσθησης, σε διάφορα στάδια επεξεργασίας. Παρατηρείται ότι για το κυματικό πεδίο στον χώρο συχνότητας-κυματάριθμου τα ανοδικά και τα καθοδικά κύματα

παριστάνονται με ευθύγραμμα τμήματα αντίθετης κλίσης. Κάθε τύπος κύματος να απεικονίζεται σε διαφορετικό ημιεπίπεδο στο χώρο f-k [29].

Επομένως με φίλτρο f-k τα καθοδικά κύματα συμπιέζονται, αφήνοντας μόνο τα ανακλώμενα και τις πολλαπλές τους που σχετίζονται με τα ανοδικά κύματα.

Το επόμενο στάδιο επεξεργασίας δεδομένων VSP, είναι η τοποθέτηση όλων των γεωφώνων στη κεφαλή της γεώτρησης D (εικόνα 59).



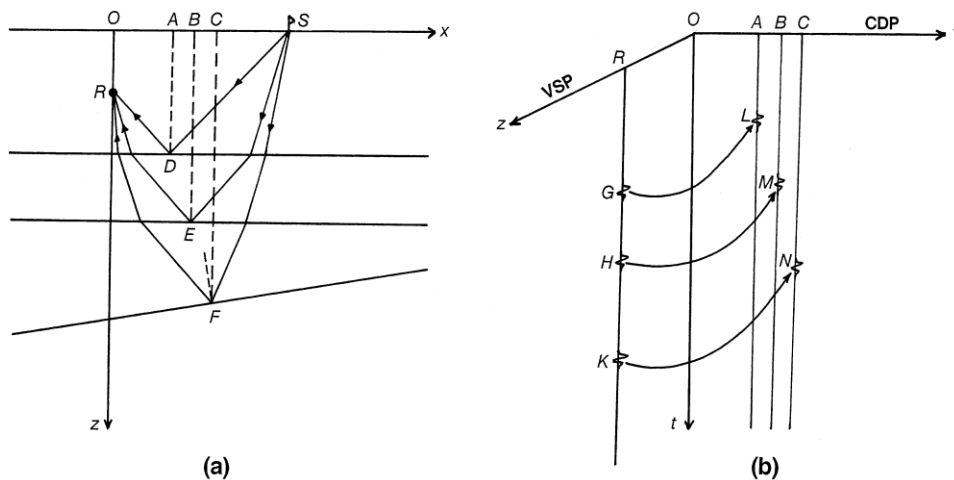
Εικόνα 60: Δεδομένα μηδενικής-ολίσθησης VSP, σε διάφορα στάδια επεξεργασίας (a) αρχικά δεδομένα (b)ανοδικά κύματα, (c)μετά από στατικές διορθώσεις, ακολουθεί αποσυνέλιξη και φίλτρο συχνοτήτων (d) προσθετικό ίχνος. TT' είναι σωληνοκύματα που διαδίδονται μέσα στη γεώτρηση. (Data courtesy Amoco Europe and West Africa,Inc.)

Στην εικόνα 59, αυτή η διόρθωση κάθε ίχνους, ισοδυναμεί, με το χρόνο διαδρομής από την επιφάνεια μέχρι το γεώφωνο. Για παράδειγμα το ίχνος C διορθώνεται με το χρόνο που αντιστοιχεί στη διαδρομή DC. Στη συνέχεια ακολουθεί η αποσυνέλιξη και η εφαρμογή φίλτρου συχνότητας-κυματάριθμου (c). Η αποσυνέλιξη μπορεί να σχεδιαστεί από τα καθοδικά ή τα ανοδικά κύματα. Συνήθως, η αποσυνέλιξη

σχεδιάζεται από τα καθοδικά κύματα, γιατί έχουν πιο ισχυρό σήμα, με πιο χαρακτηριστικές πολλαπλές. Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει υπέρθεση των ιχνών. Η υπέρθεση συνήθως περιλαμβάνει μια στενή καταγραφή στην οποία τα ανοδικά και καθοδικά κύματα συμπίπτουν. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 60 (d). Η διαδικασία υπέρθεσης δεν λαμβάνει υπόψη της πολλαπλές που δεν ενώνονται με τα καθοδικά κύματα. Είναι το πιο βασικό εργαλείο της VSP, καθώς απεικονίζει ίχνος συγκρίσιμο με το συνθετικό σεισμόγραμμα από τις ακουστικές διαγραφίες. Η απεικόνιση αυτή ονομάζεται και ως *corridor stack*, και περιέχει δεδομένα σεισμικής ανάκλασης, καθώς και πληροφορίες του καθοδικού κυματικού πεδίου [36]. Είναι πλήρης απεικόνιση των ανακλαστικών κυμάτων απαλλαγμένη από πολλαπλές.

Μετατροπή VSP-CDP

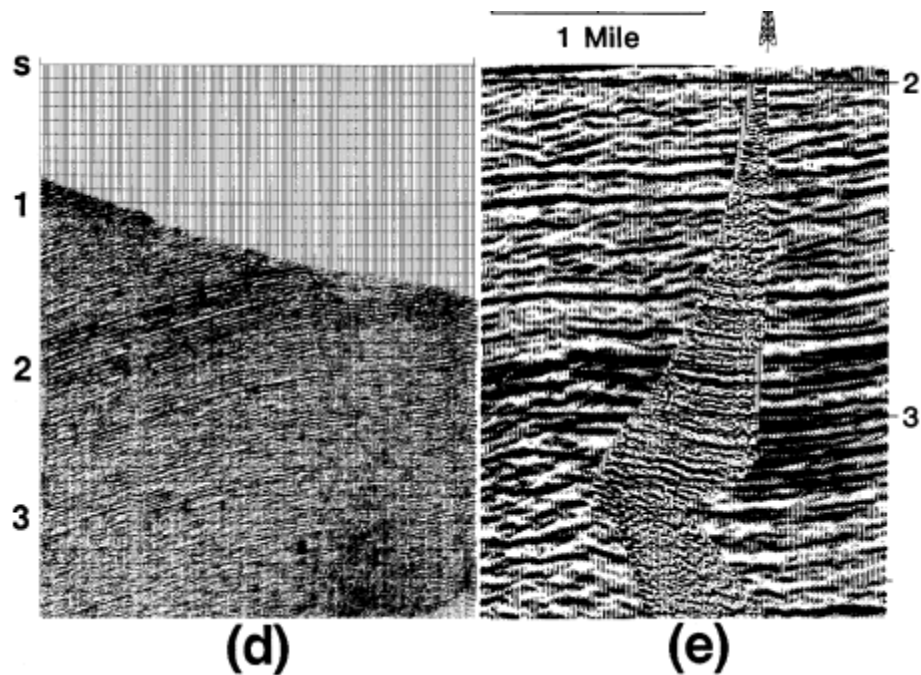
Στην περίπτωση που υπάρχουν διεπιφάνειες με μεγάλη κλίση, η σεισμική τομή VSP πρέπει να χωροθετηθεί και ο ανακλαστήρας να απεικονιστεί στην πραγματική του θέση [34]. Αυτή η διαδικασία μπορεί να συμβεί και σε δεδομένα VSP μηδενικής ολίσθησης. Στην εικόνα 61, φαίνεται η διαδικασία μετατροπής των δεδομένων VSP σε δεδομένα CDP για την απεικόνιση του ανακλαστήρα.



Εικόνα 61: (a) γεωμετρία πηγής-γεωφώνου για VSP με ολίσθηση (b) VSP-CDP μετατροπή (Yilmaz 2001)

Στην εικόνα (61a), η ευθεία Oz απεικονίζει την γεώτρηση, και το σημείο S είναι η θέση της πηγής. Τα σημεία D, E και F, είναι τα σημεία ανάκλασης στους αντίστοιχους ανακλαστήρες. Κάθε ένα από αυτά τα σημεία έχει διαφορετική πλευρική μετατόπιση

ΟΑ,ΟΒ και ΟC από τη γεώτρηση. Η ενέργεια του ανοδικού κύματος από αυτά τα σημεία στους ανακλαστήρες καταγράφεται ως ίχνος VSP στη θέση του γεωφώνου R. Οι χρόνοι καταγραφής RG, RH και RK είναι οι αντίστοιχοι χρόνοι των σεισμικών ακτίνων SDR, SER και SFR. Η απεικόνιση της ενέργειας σε σημεία ανάκλασης, περιέχει μετασχηματισμό συντεταγμένων. Σε αυτή τη μετατροπή, τα πλάτη των ιχνών VSP, απεικονίζονται στο επίπεδο x-t, όπου x είναι η πλευρική απόσταση της προβολής των σημείων ανάκλασης από τη γεώτρηση. Οι χρόνοι RG, RH και RK μετατρέπονται σε διπλούς χρόνους διαδρομής AL, BM, και CN αντίστοιχα. Αυτοί οι χρόνοι συνδέονται με τη πορεία των ακτίνων AD, BE και CF. Στο διάγραμμα της απόστασης και του χρόνου (x,t) οι ακτίνες είναι παρόμοιες με μηδενικής ολίσθησης χωροθετημένη τομή. Για το λόγο αυτό η διαδικασία καλείται μετασχηματισμός VSP-CDP.



Εικόνα 62: (d)ανοδικά κύματα μετά την αποσυνέλιξη (e) VSP-CDP μετασχηματισμός των ανοδικών κυμάτων, πάνω στη χωροθετημένη επιφανειακή σεισμική τομή για σύγκριση (Adapted from Alam and Millahn,1986; data courtesy Shell,U.K).

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει τη μετατροπή των δεδομένων VSP (εικόνα 62d) με το μετασχηματισμό VSP-CDP (εικόνα 62e). Στην εικόνα (e), η προκύπτουσα σεισμική τομή VSP υπερτέθηκε στη σεισμική τομή. Είναι πιο υψίσυχνη, βελτιώνει το αποτέλεσμα

καθώς παρέχει περισσότερη λεπτομέρεια. Για την απεικόνιση του υπεδάφους, θα πρέπει να υπάρχει γνώση του μοντέλου ταχύτητας βάθους περιμετρικά της γεώτρησης, για να καθοριστούν τα σημεία της ανάκλασης. Με δεδομένα το αρχικό μοντέλο ταχύτητας-βάθους, και γνωστή τη διάταξη καταγραφής VSP, μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι για τα ανοδικά κύματα. Αυτοί οι εκτιμώμενοι χρόνοι διαδρομής, συγκρίνονται με τους παρατηρούμενους χρόνους διαδρομής και το μοντέλο ταχύτητας-βάθους αναπροσαρμόζεται αναλόγα των αποκλίσεων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπάρξει μια καλή σχέση ανάμεσα στις εκτιμώμενες και τις παρατηρούμενες τιμές.

Η μετατροπή VSP-CDP, δεν είναι διαδικασία χωροθέτησης [34]. Δεν χρησιμοποιεί περιθλάσεις και μη επίπεδους ανακλαστήρες. Για να απεικονιστούν αυτά τα χαρακτηριστικά, θα πρέπει τα δεδομένα VSP να χωροθετηθούν (Dillon and Thomson, 1983). Η γεωμετρία πηγής γεωφώνων της VSP, παρουσιάζει ομοιότητες με τη διάταξη κοινής πηγής στην σεισμική ανάκλαση, εκτός από το γεγονός ότι ο άξονας της πηγής είναι κάθετος στον άξονα του γεωφώνου.

Η χωροθέτηση των δεδομένων VSP, μπορεί να θεωρηθεί ως η απεικόνιση πλατών κατά μήκος ημιελλειπτικών τροχιών με εστιακά κέντρα τη πηγή και τη θέση των γεωφώνων.

5.4.1 Διαδραστική VSP-CDP απεικόνιση σε πολύπλοκες στρωματογραφικά δομές

Η σεισμική μέθοδος VSP με ολίσθηση (offset VSP), εφαρμόζεται για να απεικονιστούν πολύπλοκες δομές περιμετρικά της γεώτρησης. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για μετασχηματισμό των δεδομένων VSP σε CDP (common depth point- κοινού σημείου ανάκλασης) υπέρθεση. Οι περισσότερες τεχνικές χαρακτηρίζονται από τις εξής παραδοχές:

1. ότι τα γεωλογικά στρώματα είναι οριζόντια, με σταθερή ταχύτητα και οι διακυμάνσεις ταχύτητας μεταξύ των στρωμάτων είναι μικρές ή
2. Οι κλίσεις των στρωμάτων είναι μικρές (μικρότερες από 2°).

Σε αυτές τις συνθήκες, ο χρόνος διαδρομής για τα ανοδικά κύματα από τα δεδομένα VSP, αφού τα καθοδικά κύματα απαλειφθούν, μπορεί να μετατραπεί σε διπλό κατακόρυφο χρόνο διαδρομής από την επιφάνεια. Στην συνέχεια ακολουθεί πλευρική μετατόπιση των δεδομένων ίχνος-με-ίχνος, στο σημείο της ανάκλασης [35].

Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από τη σχέση:

$$x = R(VT / 2 - z) / (VT - z) \quad (5.14)$$

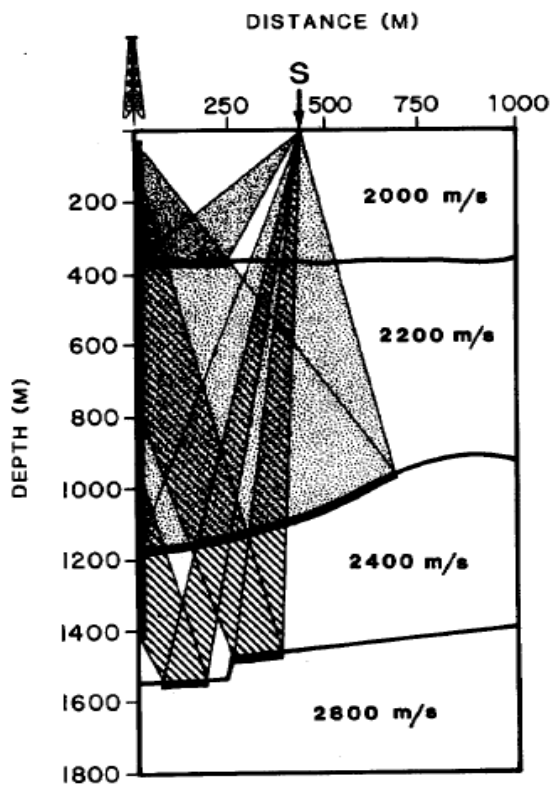
Όπου x είναι η απόσταση της προβολής του σημείου ανάκλασης για κάθε γεώφωνο βάθους z . T είναι ο διπλός χρόνος διαδρομής, V είναι η μέση ταχύτητα μεταξύ της επιφάνειας και του γεωφώνου. R είναι η απόσταση πηγής-γεωφώνου. Αυτή η μέθοδος, μειονεκτεί στον εντοπισμό της θέσης των ασυνεχειών, όταν η ταχύτητα μεταβάλλεται σημαντικά στον κατακόρυφο άξονα, ή όταν οι κλίσεις είναι μεγαλύτερες.

Οι περισσότερες διασκοπήσεις VSP, εφαρμόζονται σε περιοχές με πολύπλοκη γεωλογία, όπου δεν ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις. Ακόμη και όταν ο στόχος είναι οριζόντιος η απεικόνιση μπορεί να αποτύχει λόγω υπερκείμενων στρωματογραφικών ανωμαλιών. Στην σεισμική μέθοδο VSP μηδενικής ολίσθησης, ή VSP με ολίσθηση, ο αριθμός των ιχνών είναι σχετικά μικρός. Τα αποτελέσματα των συμβατικών κυματικών θεωριών χωροθέτησης υποβιβάζονται. Σύμφωνα με τους Wiggins and Levander (1984), εφαρμόζοντας τη χωροθέτηση Kirchhoff, απέδειξαν ότι η κλίση και η θέση των ανακλαστήρων δεν καθορίζονται με σαφήνεια στη χωροθετημένη τομή. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα χωροθέτησης, θα πρέπει να εφαρμοστεί μια τεχνική μετατροπής του χρόνου διαδρομής, που βασίζεται στην αναθεώρηση του αρχικού μοντέλου.

Προσέγγιση βασισμένη στο μοντέλο

Η προσέγγιση ξεκινά από το πρώτο στρώμα και προχωρά στα επόμενα. Διαφορές ανάμεσα στους παρατηρούμενους χρόνους διαδρομής στα δεδομένα VSP και τους αντίστοιχους εκτιμώμενους, για το αρχικό μοντέλο, , μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να το βελτιώσουν. Το αρχικό δισδιάστατο μοντέλο προκύπτει από επιφανειακά σεισμικά ανάκλασης ή ακουστικές διαγραφίες. Εάν μόνο οι πληροφορίες από ακουστική διαγραφή είναι διαθέσιμες, τότε μπορεί να ξεκινήσει ο σχεδιασμός του μοντέλου με οριζόντια στρώματα σταθερής ταχύτητας. Μετά το πέρας της διαδικασίας, το μοντέλο επαναπροσδιορίζεται επιτρέποντας τόσο τη ταχύτητα και όσο και τις διεπιφάνειες να μεταβάλλονται στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Η επαναληπτική διαδικασία περιγράφεται γραφιστικά.

Αρχικά, πραγματοποιείται χάραξη της πορείας των ακτίνων για να υπολογιστούν οι χρόνοι της κύριας ανάκλασης με βάση τη γεωμετρία του πειράματος και το σεισμικό μοντέλο [35].



Εικόνα 63: Μοντέλο ταχύτητας-βάθους από το οποίο παράγονται τα συνθετικά δεδομένα VSP για τα ανοδικά κύματα. Οι γραμμές απεικονίζουν την κάλυψη των σημείων ανάκλασης. Σε μεγαλύτερα βάθη η κάλυψη αυτή μειώνεται (Cassell 1984).

Για κάθε ίχνος VSP, διαμορφώνεται πίνακας συντεταγμένων των σημείων ανάκλασης, καθώς του χρόνου διαδρομής, και του κατακόρυφου διπλού χρόνου διαδρομής για κάθε σημείο ανάκλασης. Οι συντεταγμένες αυτές και οι χρόνοι διαδρομής, διαμορφώνουν ένα πεδίο που θα απεικονίσουν κάθε δεδομένο εισόδου, στη θέση εξόδου (CDP θέση στο χώρο του χρόνου και του βάθους). Για κάθε γεώφωνο, αυτή η πληροφορία καθορίζει μια τροχιά στην οποία, κάθε ίχνος VSP, που είναι να απεικονιστεί, είτε στο πεδίο CDP προς το πεδίο του διπλού χρόνου διαδρομής, ή CDP προς το πεδίο του χρόνου, χωροθετείται. Τα δεδομένα VSP, και η απεικόνιση VSP-CDP παραθέτονται μαζί, δηλαδή τα δεδομένα εισόδου μαζί με τα θεωρητικά γεγονότα της απεικόνισης. Αν γεγονότα του μοντέλου, μαζί με τα πειραματικά βρίσκονται σε αναντιστοιχία, το μοντέλο διαμορφώνεται γραφικά ώστε να συμπίπτει με τα παρατηρούμενα γεγονότα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τη χάραξη ακτίνων για το νέο μοντέλο.

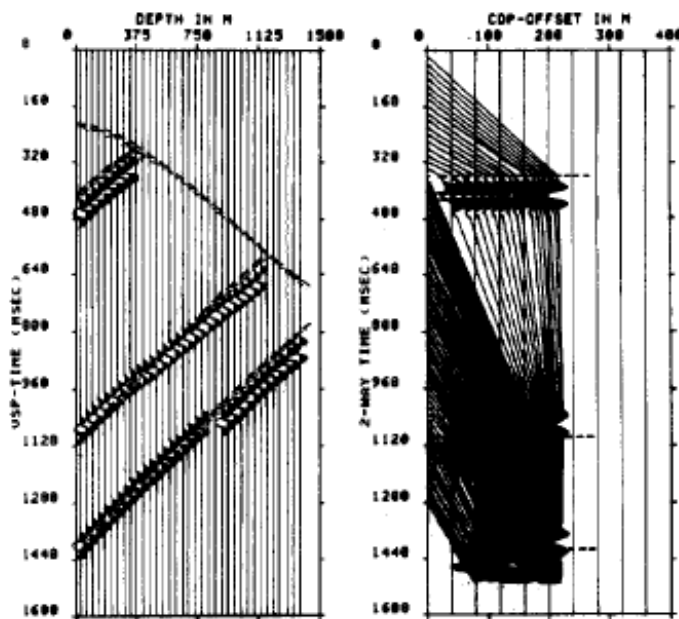
Όσο το μοντέλο πλησιάζει τη πραγματική δομή στο πεδίο CDP-βάθος, οι διαφορές που παρουσιάζει με τα πραγματικά γεγονότα μειώνεται. Όταν το μοντέλο έπειτα από επαναλήψεις προσομοιάζει αρκετά την πραγματικότητα, τότε τα ίχνη των δεδομένων VSP, υπερθέτονται ώστε να κατασκευαστούν τα τελικά βάθους-χωροθετημένα ίχνη.

Η γραφιστική διαδραστική προσέγγιση, έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι της μεθόδου του χρόνου διαδρομής των ελαχίστων τετραγώνων. Πρώτον δίνει στον ερευνητή τη δυνατότητα να περιορίζει το μοντέλο, ώστε να παραμένει σε εύλογα όρια. Ακόμη δίνεται η δυνατότητα να ελέγχει το μέγεθος των αλλαγών που μπορεί να εφαρμόσει στο μοντέλο σε κάθε επανάληψη. Με αυτές τις δυνατότητες ο ρυθμός σύγκλισης του μοντέλου, με τα παρατηρούμενα γεγονότα μπορεί να επιταχυνθεί.

Για παράδειγμα, αλλαγές στην σεισμική ταχύτητα μέσα στα στρώματα που επηρεάζονται από τη μέγιστη ανάκλαση μπορούν να κάμψουν τη τροχιά των ακτίνων. Εάν το μοντέλο δεν απεικονίσει αυτές τις λεπτομέρειες, τότε μειώνει η ακρίβεια του μοντέλου και του μετασχηματισμού VSP-CDP διακινδυνεύεται.

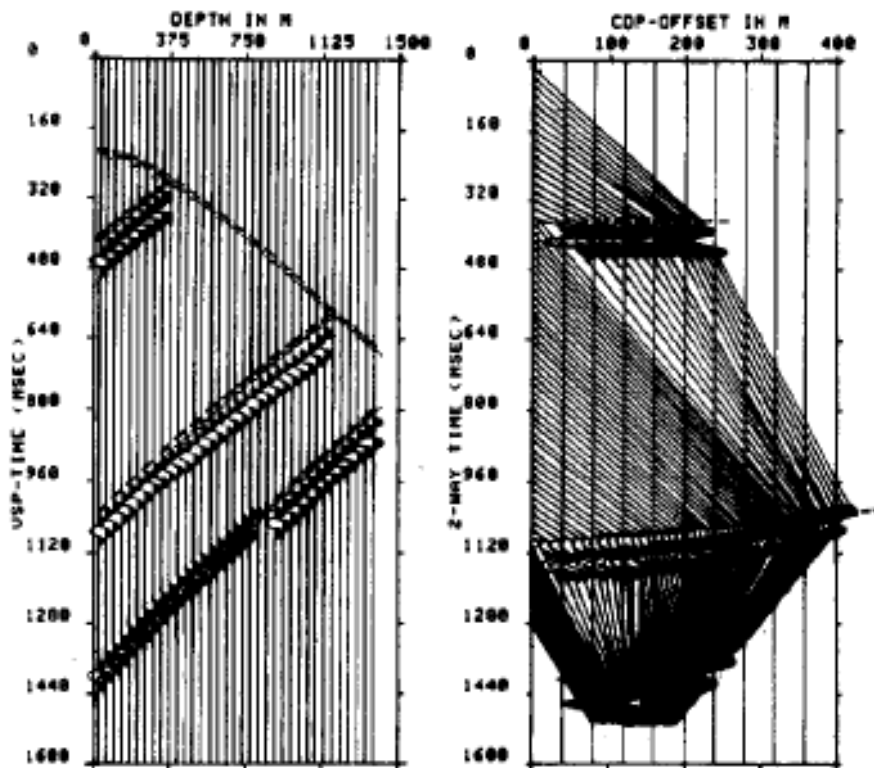
Παράδειγμα συνθετικών δεδομένων

Η τεχνική αυτή, χρησιμοποιεί συνθετικά δεδομένα VSP, όπως δημιουργήθηκαν από το μοντέλο της εικόνας 63. Το αρχικό μοντέλο, ανταποκρίνεται στις ταχύτητες που έχουν καταγραφεί κατά μήκος της γεώτρησης. Για την πρώτη πρόβλεψη, θεωρήθηκε μοντέλο οριζόντιων στρωμάτων.



Εικόνα 64: (α)Συνθετικά VSP δεδομένα από το μοντέλο της εικόνας 63, (β)VSP-CDP μετασχηματισμός μετά τη πρώτη επανάληψη, βασισμένος σε μοντέλο με οριζόντια στρώματα (Cassell 1984).

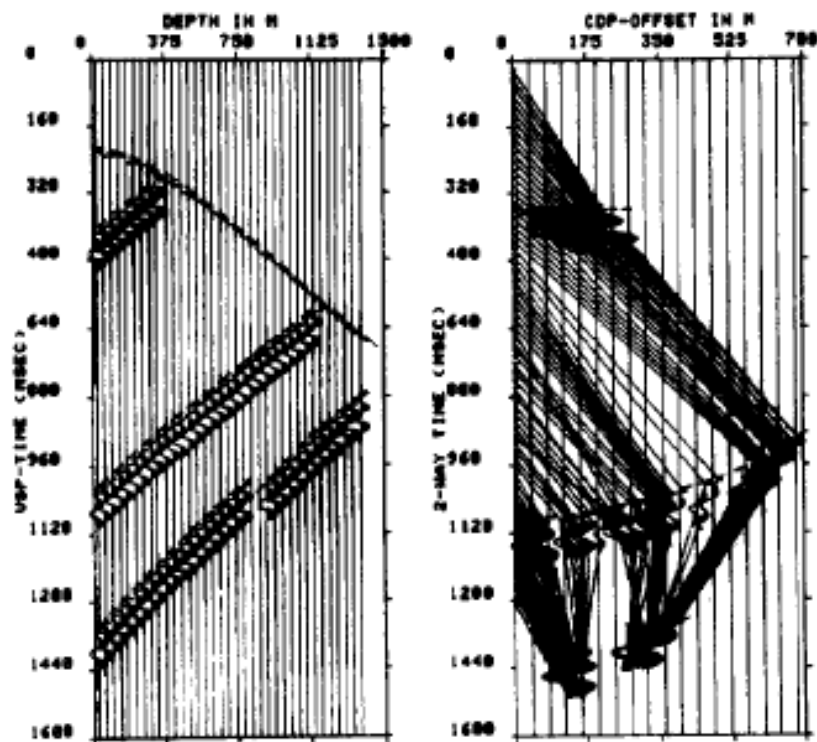
Στην πρώτη εικόνα 64(a), οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν τους χρόνους διαδρομής των ανακλάσεων κατά μήκος της γεώτρησης στην εικόνα 64(b). Το μέγιστο σημείο ανάκλασης, απέχει 500 m πιο πάνω από το πραγματικό σημείο στην εικόνα 63. Επειδή το πρώτο γεγονός απεικονίζεται σωστά, επαναπροσδιορίζεται το μεσαίο γεγονός, με ένα επίπεδο με κλίση, όπως προτείνεται από την εικόνα 64b. Επομένως το μοντέλο πέτυχε να απεικονίσει το ρηχό οριζόντιο ανακλαστήρα, αλλά έχασε το βαθύτερο στόχο συγκριτικά με την πραγματική δομή. Για την επόμενη επανάληψη, διαμορφώνεται η γεωμετρία του βαθύτερου ανακλαστήρα, με πιο απότομη κλίση, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 64b. Το αποτέλεσμα του νέου τροποποιημένου μοντέλου εμφανίζεται στην εικόνα 65b, όπου τα σημεία ανάκλασης βρίσκονται σε κυρτό ανακλαστήρα, σε μεγαλύτερη απόσταση. Ακόμα όμως δεν έχει πλησιάσει ικανοποιητικά το παρατηρούμενο γεγονός.



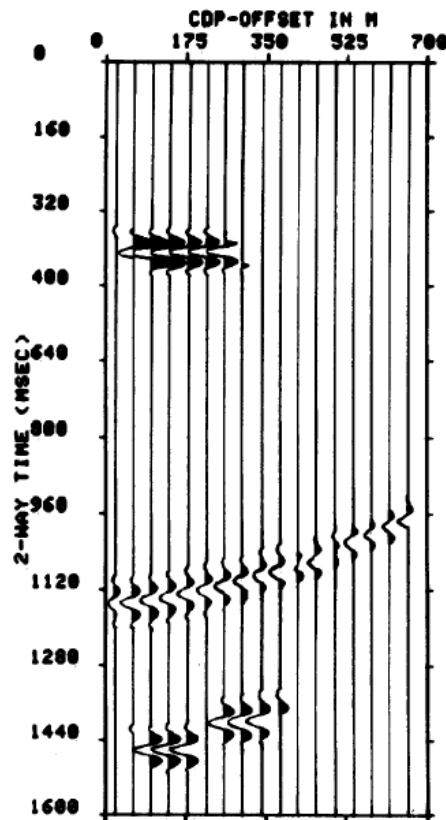
Εικόνα 65: (a) Συνθετικά VSP δεδομένα εικόνας 64(a) (b) VSP-CDP μετασχηματισμός, μετά τη δεύτερη επανάληψη. Τροποποιήθηκε η κλίση του ανακλαστήρα για να προβλεφθεί το μεσαίο γεγονός (Cassell 1984).

Στο τελευταίο βήμα η κυρτότητα του δεύτερου ανακλαστήρα, που παρατηρείται στην εικόνα 65(b), και ένα ρήγμα κοντά πυθμένα εισάγονται στο μοντέλο. Στην επόμενη επανάληψη (εικόνα 66(b)), υπάρχει συμφωνία μεταξύ των χρόνων διαδρομής του μοντέλου και τους παρατηρούμενους. Ο δεύτερος ανακλαστήρας δεν απεικονίστηκε ως συνεχόμενη καμπύλη, αλλά ως σειρά γραμμικών τμημάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μη-συνεχή κατανομή των σημείων ανάκλασης.

Στην εικόνα 67 εμφανίζεται η τελική σεισμική τομή VSP.



Εικόνα 66: (a) Συνθετικά VSP δεδομένα (b) VSP-CDP μετασχηματισμός, μετά τη τρίτη επανάληψη (Cassell 1984).



Εικόνα 67: Σεισμική τομή VSP, μετά τη τελευταία επανάληψη. Τα δεδομένα των ιχνών υπερθέτονται σε κατακόρυφες στήλες. Το αποτέλεσμα συμφωνεί με το σεισμικό μοντέλο (Cassell 1984).

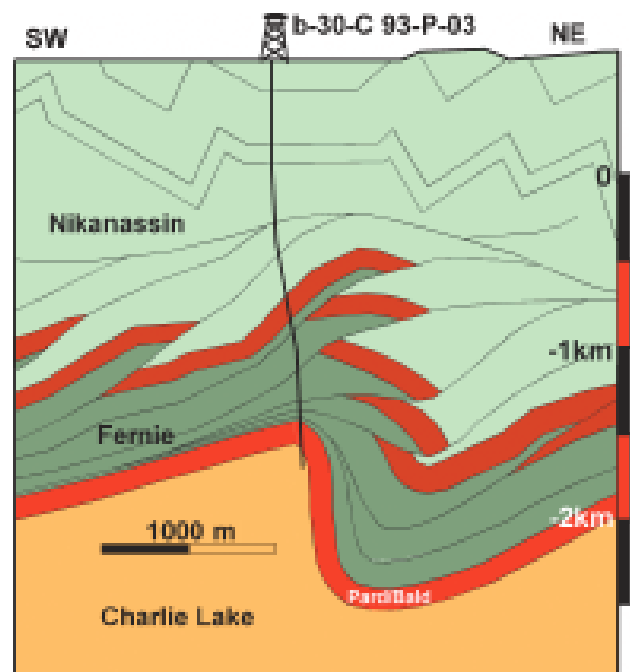
Σε αυτό το παράδειγμα, υπήρχε η παραδοχή ότι οι τμηματικές ταχύτητες που παρατηρήθηκαν στη γεώτρηση είναι γνωστές. Μόνο τα πλευρικά όρια των στρωμάτων μεταβάλλονται. Η επιτυχία της μεθόδου εξαρτάται από την κρίση του ερευνητή στο να περιλάβει κατακόρυφες και πλευρικές διαφοροποιήσεις στο μοντέλο. Το παράδειγμα αυτό, δείχνει ότι η μέθοδος μπορεί να απεικονίσει πιο πολύπλοκες στρωματογραφικά δομές χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό VSP-CDP. Η διόρθωση του μοντέλου ξεκινώντας από το πιο ρηχό στρώμα προς τα βαθύτερα, επιτρέπει στον ερευνητή να εισάγει τη γεωλογική ερμηνεία πλησιάζοντας τη πραγματική δομή.

Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται σε γεωτρήσεις που παρεκκλίνουν και για οποιαδήποτε γεωμετρία VSP.

Κεφάλαιο 6

6.1 Κατασκευή μοντέλου

Στην συνέχεια έγινε η κατασκευή του μοντέλου, που προσομοιάζει τις συνθήκες της γεώτρησης Talisman Burlington Wolverine b-30-C/093-P-03, όπως παρουσιάστηκε στη περίπτωση μελέτης 1, σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το πρόγραμμα PSV της Matlab. Για την κατασκευή του κατάλληλου μοντέλου ταχυτήτων, πρέπει να καθοριστούν οι ασυνέχειες, το πάχος στρωμάτων, η πυκνότητα καθώς και οι σεισμικές ταχύτητες σε κάθε στρώμα. Η γεωμετρία του μοντέλου, η πυκνότητα των κόμβων του καννάβου, ο αριθμός των στρωμάτων καθορίζονται από το είδος της έρευνας. Οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στη γεώτρηση είναι οι Nikanassin (ανθρακικοί σχιστόλιθοι), ο σχηματισμός Pardonet-Baldonnel (βιοκλαστικοί δολομίτες), ο Fernie (σχιστόλιθος) και ο Charlie Lake (ανυδρίτης).



Εικόνα 68: Το στρωματογραφικό μοντέλο στην περιοχή της γεώτρησης Talisman Burlington Wolverine.

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	Density (g/cm ³)
Nikanassin	2200	1300	2.2
Pardonet/Baldonnel	5000	3700	2.7
Fernie	2000	1300	2.1
Charlie Lake	4000	2600	2.3

Πίνακας 6.1: Πίνακας ταχυτήτων και πυκνότητας σε κάθε σχηματισμό.

Οι διαστάσεις του μοντέλου είναι 5000 m σε μήκος με μέγιστο βάθος τα 2700 m. Στόχος της γεώτρησης είναι η κορυφή της πτύχωσης Pardonet σε βάθος 1500 m. Στην πραγματικότητα η γεώτρηση έχασε το στόχο λόγω υπερβολικής αντίστασης στους σχηματισμούς Fernie. Στο μοντέλο τοποθετήθηκαν 26 πηγές στην επιφάνεια ανά 200 m σε όλο το μήκος του μοντέλου. Τα γεώφωνα τοποθετήθηκαν στη γεώτρηση, με την πρώτη πηγή σε βάθος 50 m και τις επόμενες ανά 100 m μέχρι το βάθος των 1450 m. Συνολικά, τα γεώφωνα είναι 15.

Υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην κατασκευή του μοντέλου. Για την επίλυση της διαφορικής κυματικής εξίσωσης με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών θα πρέπει να επαληθεύεται το κριτήριο της ευστάθειας και της αριθμητικής διασποράς. Αναφορές για την διασφάλιση της ευστάθειας το κριτήριο είναι [37]:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} * a_{\max} \leq \frac{2}{3} \quad (6.1)$$

Όπου Δt είναι το βήμα χρονικής διακριτοποίησης και Δx το βήμα χωρικής διακριτοποίησης, a_{\max} είναι η μέγιστη ταχύτητα των P-κυμάτων.

Για τον περιορισμό αριθμητικής διασποράς, όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται με τη συχνότητα, πρέπει να ισχύει το κριτήριο:

$$\frac{\lambda_{\min}}{\Delta x} > 5 \quad (6.2)$$

Όπου $\lambda_{\min} = V_{\min} / f_{\max}$,

V_{\min} : η ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης των S-κυμάτων

f_{\max} : μέγιστη συχνότητα διάδοσης κυμάτων.

Από την (6.2) προκύπτει ότι η απόσταση μεταξύ των κόμβων του κανάβου.

$$Grid \leq \frac{V_{s \min}}{15 \cdot Freq} \quad (6.3)$$

Η πηγή θα πρέπει να τοποθετείται 3 κόμβους μακριά από διεπιφάνεια για να μην μεταβάλλονται οι παράμετροι του μοντέλου (Model Parameters) και οι πλευρικές ταχύτητες V_x και V_z .

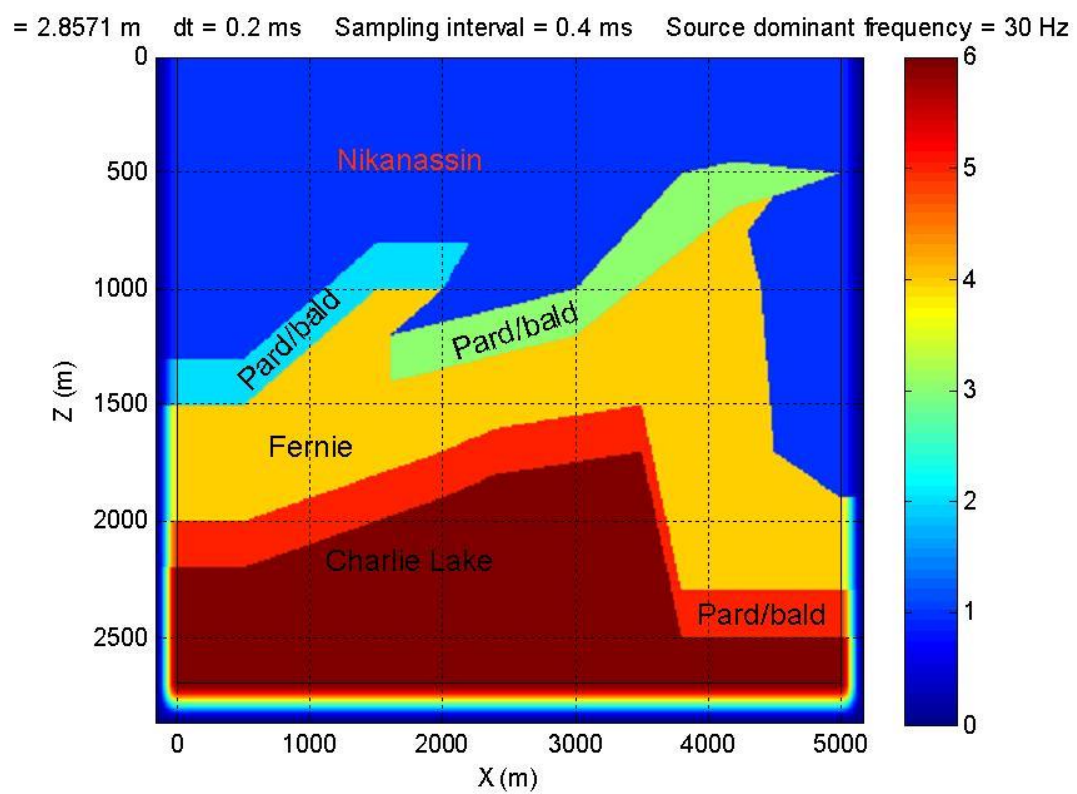
Η κυρίαρχη συχνότητα της κυματομορφής της πηγής είναι 30 Hz, ενώ η απόσταση μεταξύ των κόμβων του καννάβου είναι 2,875 m. Ο κάνναβος αποτελείται από κελιά σταθερής ταχύτητας. Ο συνολικός χρόνος καταγραφής είναι στα 2500.4 ms με διάστημα δειγματοληψίας 0,4 ms. Το πρόγραμμα PSV_Synthetics αποδίδει σε μορφή πινάκων και σε ξεχωριστά αρχεία πληροφορίες για τις παραμέτρους του μοντέλου, για κάθε γεώφωνο και πηγή.

Το μέγεθος του μοντέλου καθορίζεται από τη διαθέσιμη μνήμη που δεσμεύει το πρόγραμμα (java memory). Οι ψευδείς ανακλάσεις που προέρχονται από τα όρια του μοντέλου δημιουργούν προβλήματα στην υπολογιστική διαδικασία. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα, πρέπει να εισαχθούν στις άκρες του μοντέλου απορροφητικές οριακές συνθήκες (absorbing boundaries). Διάφορες τεχνικές εφαρμόζονται όπως η οριακή συνθήκη της κατά προσέγγιση ακτινοβολίας, της ελεύθερης επιφάνειας (μηδενική πίεση) και της άκαμπτης επιφάνειας (μηδενικής ταχύτητας) [32]. Μέθοδοι Σύνθετων ορίων απορρόφησης συνδυάζουν συνθήκες ορίων που βασίζονται στην ανάλυση της μονοδιάστατης κυματικής εξίσωσης το ανισότροπο φίλτρο ή το «φίλτρο σφουγγάρι». Η μέθοδος του ανισότροπου φίλτρου εξαναγκάζει τα κύματα να κινούνται σε κατακόρυφη πορεία (γωνία πρόσπτωσης 90°), η ακτίνα επομένως δεν επιστρέφει. Η μέθοδος του φίλτρου σφουγγάρι υποθέτει ότι το κύμα διαδίδεται σε μια κατεύθυνση και εξασθενεί στην αντίθετη. Με αυτόν τον τρόπο αποσβένει επιλεκτικά τα εισερχόμενα κύματα. Στο μοντέλο αυτό, θεωρείται μια ελεύθερη επιφάνεια η επιφάνεια της γης και 3 επιφάνειες absorbing boundaries. Έξω από αυτά τα όρια η ταχύτητα θεωρείται μηδενική.

Αναφορές

Horizontal extend of model	5000 m
Vertical extend of model	2700 m
Min S-velocity	1300m/s
Dominant frequency	30 Hz
Receiver increment	100 m

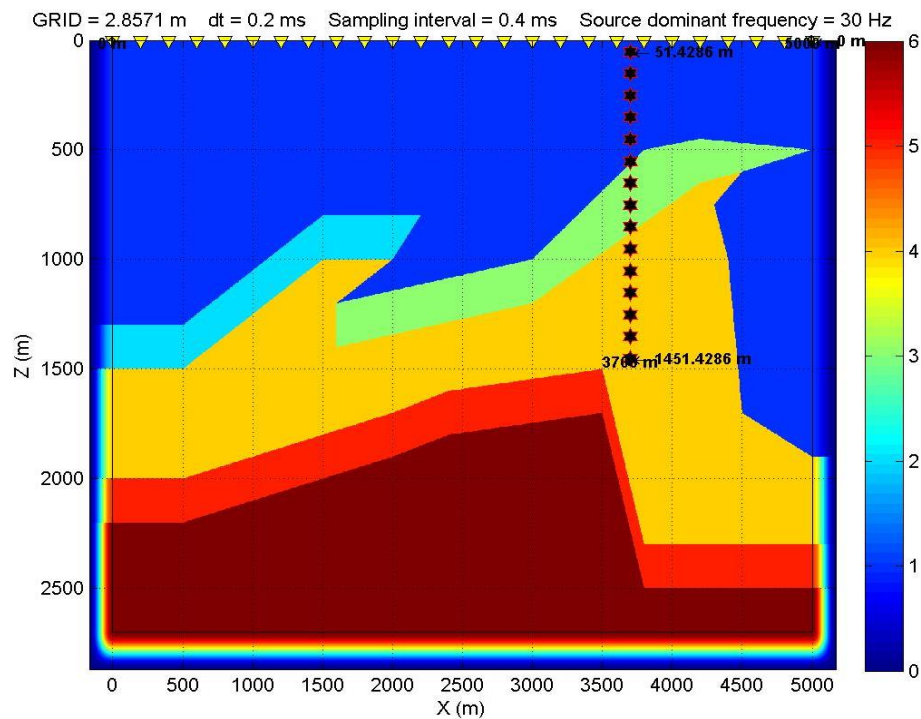
Πίνακας 6.2: Διαστάσεις και παράμετροι μοντέλου.



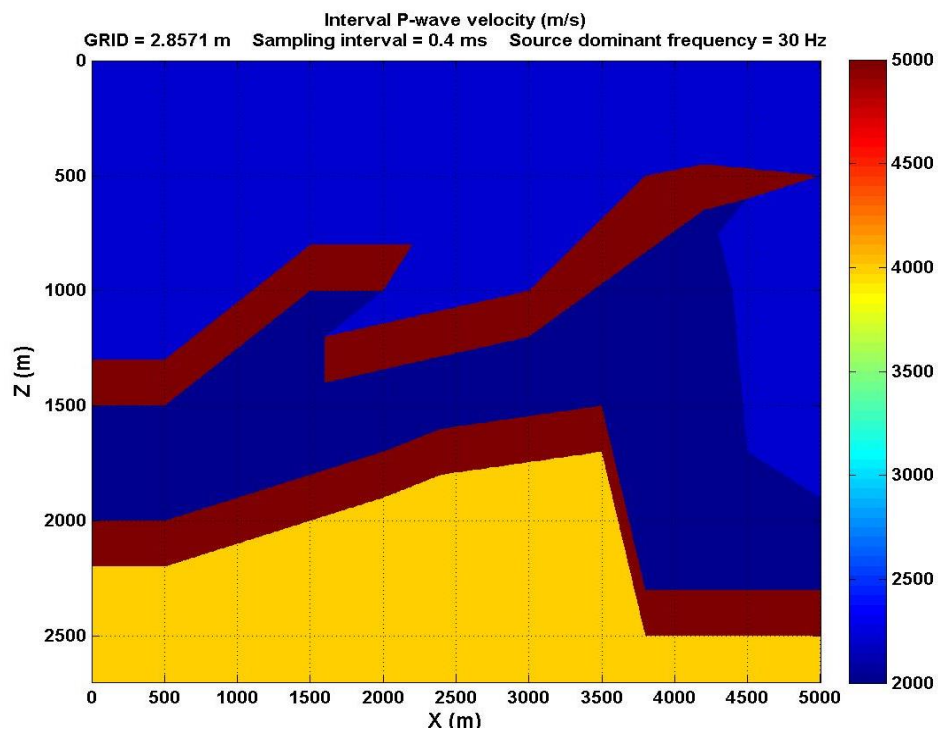
Εικόνα 69: Το σεισμικό μοντέλο. Η χρωματική διαβάθμιση απεικονίζει τον αριθμό των στρωμάτων.

Number of shots	26
Shot increment	200 m
Z coordinate of 1 st source	0 m
X coordinate	3700 m

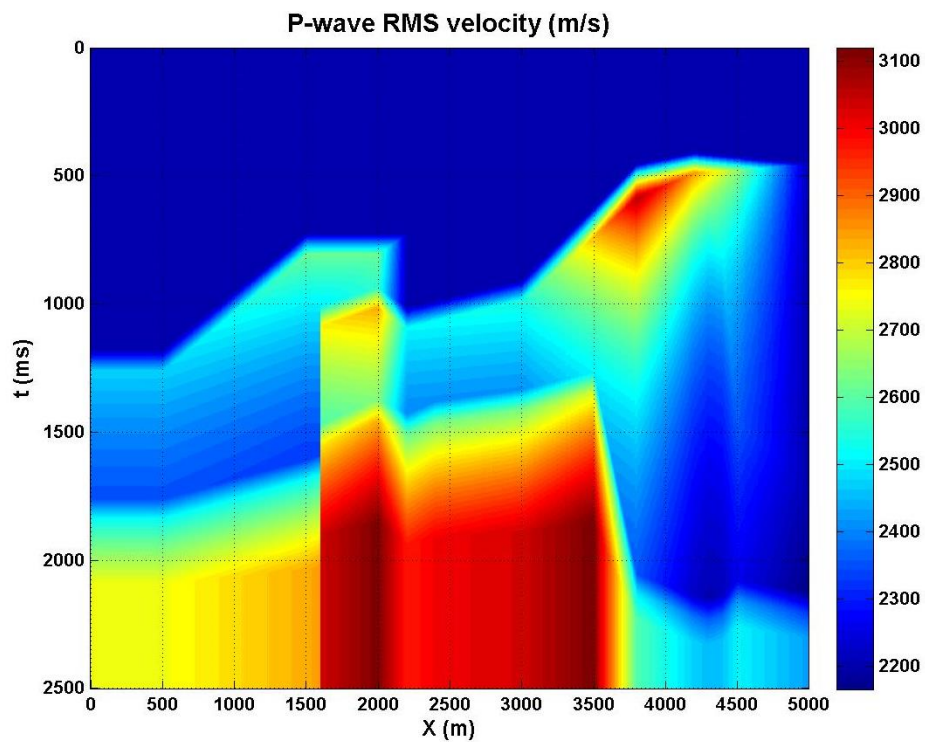
Πίνακας 6.3: Στοιχεία για τις θέσεις της σεισμικής πηγής.



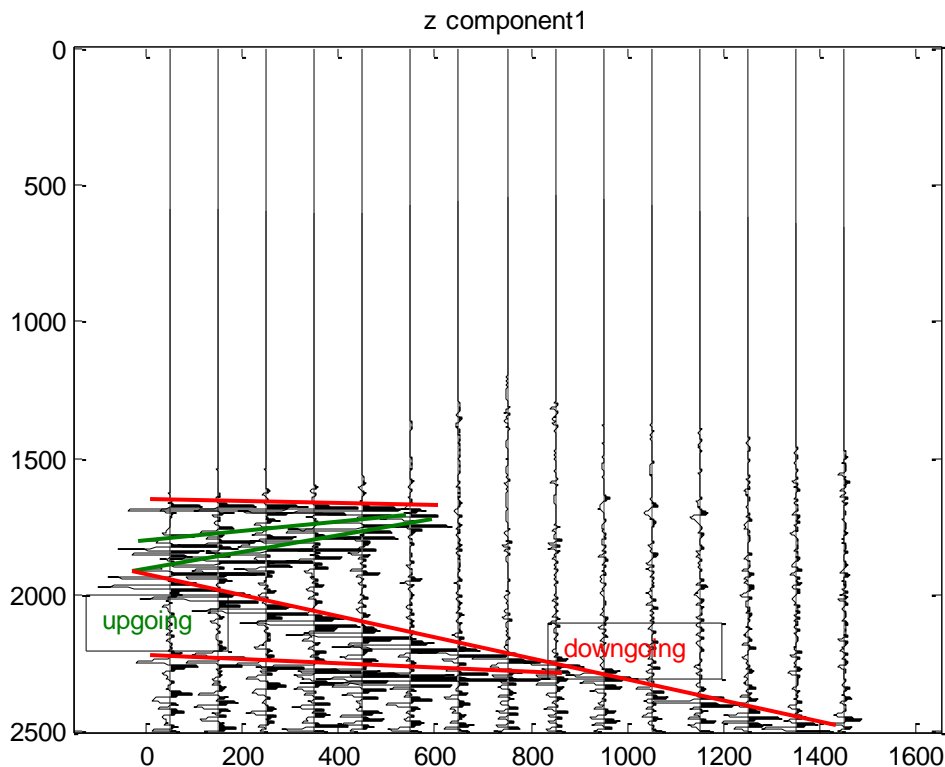
Εικόνα 70: Η γεωμετρία του πειράματος στο οποίο γεώφωνα κατακόρυφης και οριζόντιας συνιστώσας τοποθετήθηκαν σε 15 θέσεις μέσα στη γεώτρηση, ενώ η σεισμική πηγή, σε 26 θέσεις στην επιφάνεια εκατέρωθεν της γεώτρησης.



Εικόνα 71: Τμηματικές ταχύτητες στους σχηματισμούς του μοντέλου.



Εικόνα 72: Κατανομή της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας.

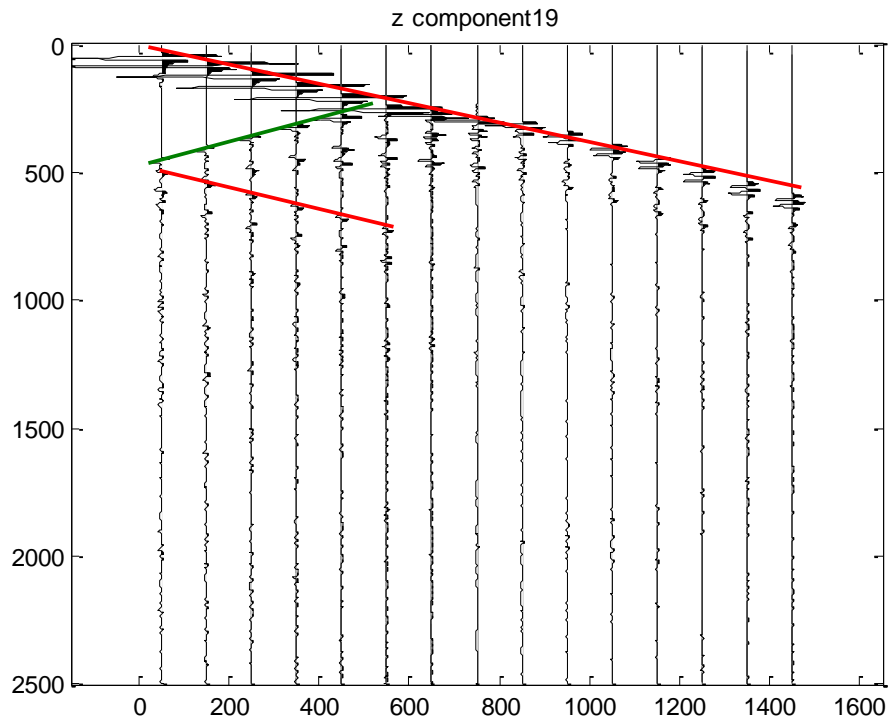


Εικόνα 73: Σεισμικές συνθετικές καταγραφές (κατακόρυφη συνιστώσα) της πρώτης πηγής, όπου ο οριζόντιος άξονας είναι τα βάθη των γεωφώνων σε m, και ο κατακόρυφος ο χρόνος καταγραφής σε ms.

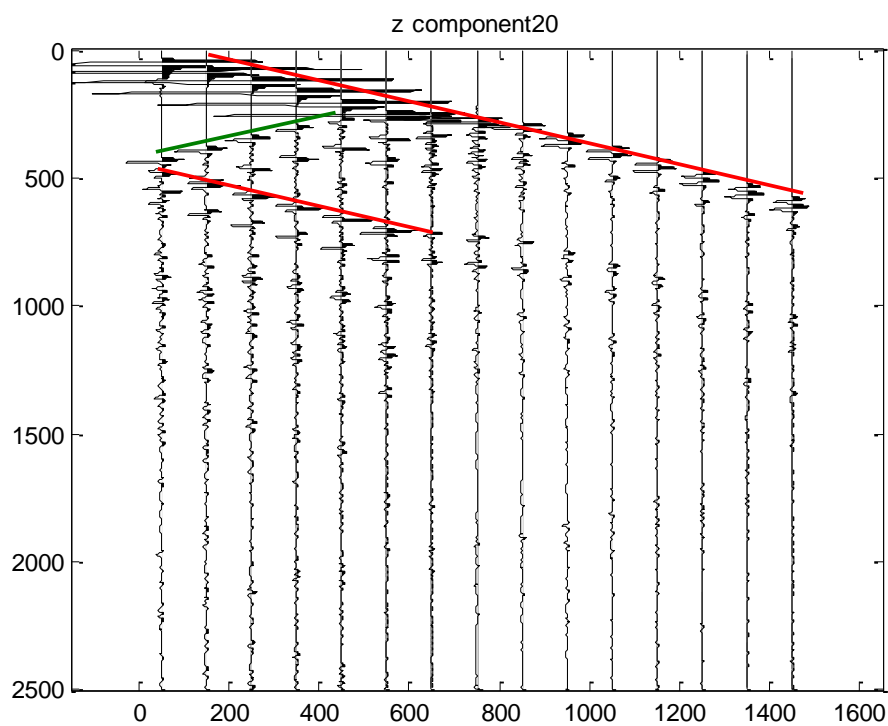
Στην εικόνα 73, τα σεισμικά κύματα που προέρχονται από την πρώτη πηγή όπως αυτά καταγράφονται σε κάθε γεώφωνο. Στον οριζόντιο άξονα δίνεται το βάθος των γεωφώνων με το πρώτο στα 50 m, και τα επόμενα ανά 100 m μέχρι τα 1450 m. Στον κατακόρυφο άξονα δίνεται ο χρόνος καταγραφής σε ms. Διακρίνονται τα καθοδικά (downgoing) και τα ανοδικά (upgoing) κύματα. Το βάθος όπου τα καθοδικά κύματα και τα ανοδικά φθάνουν ταυτόχρονα ισούται με το βάθος ανακλαστήρα. Με γνωστά τη ταχύτητα των P κυμάτων στο στρώμα που βρίσκεται το πρώτο γεώφωνο στα 2200 m/s, και το χρόνο καταγραφής της άφιξης του ανοδικού κύματος στα 1875 ms, υπολογίζεται η θέση του ανακλαστήρα στα 4125 m. Η θέση αυτή αντιστοιχεί σε οριζόντια απόσταση στο μοντέλο. Στο βάθος του πρώτου γεωφώνου, παρατηρείται διάχυση στον ανακλαστήρα.

Στην περίπτωση που υπάρχει αλλαγή κλίσης της ευθείας των απευθείας (downgoing), αυτό υποδηλώνει τα αντίστοιχα γεώφωνα βρίσκονται σε στρώμα διαφορετικής ταχύτητας.

Για πηγή στις θέσεις 19 και 20 εκατέρωθεν της γεώτρησης, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία γιατί απεικονίζεται μόνο ένας ανακλαστήρας. Οι υπόλοιπες συνθετικές καταγραφές παρατίθενται στο Παράρτημα.



Εικόνα 74: Σεισμική εικόνα από την πηγή 19, 100 m πριν τη γεώτρηση. Ο οριζόντιος άξονας είναι τα βάθη των γεωφώνων σε m, και ο κατακόρυφος ο χρόνος καταγραφής σε msec.



Εικόνα 75: Σεισμική εικόνα από την πηγή 20, 100 m μετά τη γεώτρηση. Ο οριζόντιος άξονας είναι τα βάθη των γεωφώνων σε m, και ο κατακόρυφος ο χρόνος καταγραφής σε msec.

6.2 Σχεδίαση σεισμικής ακτίνας σε μέσο μεταβαλλόμενης ταχύτητας $v(z)$.

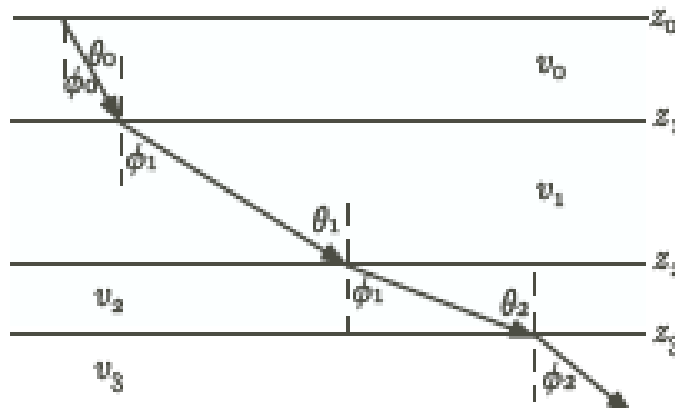
Με τη χρήση του λογισμικού Crewes στη Matlab, και συγκεκριμένα με τον αλγόριθμο `traceray_pp` πραγματοποιήθηκε σχεδίαση των σεισμικών ακτίνων, σε μέσο μεταβαλλόμενης ταχύτητας $v(z)$. Είναι ένας αριθμητικός αλγόριθμος, που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία σεισμικών δεδομένων, ώστε να παράγει εικόνες από την απόκριση του υπεδάφους.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται για τη χάραξη της ανακλώμενης σεισμικής ακτίνας μεταξύ πηγής και γεωφώνου, για ανακλαστήρα σε συγκεκριμένο βάθος.

Δεν υπάρχει γνωστή τεχνική επίλυσης, που να επιλύει αυτό το πρόβλημα σε ένα βήμα.

Αυτοί οι αλγόριθμοι σχεδιάζουν ακτίνες από αρχικό σημείο (πηγή) σε πολλαπλά γεώφωνα. Δεν απαιτείται το βάθος της πηγής να είναι ίσο με το βάθος του γεωφώνου, όμως στην περίπτωση της συστοιχίας των γεωφώνων θα πρέπει να είναι όλα στο ίδιο βάθος [38].

Ένα μέσο μεταβαλλόμενης ταχύτητας είναι ένα μέσο όπου $\theta_{\chi\nu} = \theta_{\gamma\nu} = 0$ και οι ανακλαστήρες είναι οριζόντιοι. Σύμφωνα με το νόμο του Snell, η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του μετώπου του κύματος διατηρείται.



Εικόνα 76: Κατά τη διάδοση σε μοντέλο με πολλά στρώματα διαφορετικής ταχύτητας, οι διεπιφάνειες είναι οριζόντιες και η διάδοση των ακτίνων απλή.

Από την εικόνα 76, και σύμφωνα με το νόμο του Snell, για τη διεπιφάνεια j προκύπτει:

$$\frac{\sin \theta_{j-1}}{v_{j-1}} = \frac{\sin \theta_j}{v_j} \quad (6.4)$$

Επειδή οι ανακλαστήρες είναι οριζόντιοι ισχύει, $\phi_j = \theta_j$, έτσι ώστε η εξίσωση (6.4) να διαμορφώνεται σε:

$$\frac{\sin \theta_{j-1}}{v_{j-1}} = \frac{\sin \theta_j}{v_j} \quad (6.5)$$

Αυτός ο υπολογισμός, επαναλαμβάνεται σε κάθε διαχωριστική επιφάνεια. Η παράμετρος κάθε ακτίνας p , υπολογίζεται ως $p = \sin \theta_j / v_j$. Η παράμετρος της ακτίνας, είναι σταθερή για κάθε ακτίνα.

Το διάνυσμα της απόστασης που διανύει μια ακτίνα ds , με γωνία $\theta(z)$ αναλύεται σε δύο συνιστώσες dz (βάθους) και dx (οριζόντιας απόστασης).

Από την ανάλυση του διανύσματος ds προκύπτει ότι:

$$dx = \tan(\theta(z)) dz \quad \text{όπου} \quad (6.6)$$

$$dt = \frac{ds}{v(z)} = \frac{dz}{v(z) \cdot \cos(\theta(z))} \quad (6.7)$$

Αντικαθιστώντας τις τριγωνομετρικές εξισώσεις με τη σχέση $p v(z) = \sin(\theta(z))$ (6.8), ενσωματώνεται ο νόμος του Snell:

$$dx = \frac{p v(z)}{\sqrt{1 - p^2 v^2(z)}} dz \quad (6.9)$$

$$dt = \frac{dz}{v(z) \sqrt{1 - p^2 v^2(z)}} \quad (6.10)$$

Με δεδομένο την παράμετρο της ακτίνας και τη συνάρτηση της ταχύτητας, μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς η οριζόντια απόσταση (offset) και ο χρόνος διαδρομής για μια ακτίνα μεταξύ δύο σημείων διαφορετικού βάθους.

Για ακτίνα που κινείται μεταξύ σημείων σε βάθη z_1 και z_2 η οριζόντια απόσταση υπολογίζεται:

$$x(p) = \int_{z_1}^{z_2} \frac{pv(z)}{\sqrt{1-p^2v^2(z)}} dz \quad (6.11)$$

και ο συνολικός χρόνος διαδρομής:

$$t(p) = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{v(z)\sqrt{1-p^2v^2(z)}} \quad (6.12)$$

Συνήθως για να χαραχθεί η πορεία ακτίνας η οποία αναδύεται σε συγκεκριμένη θέση, απαιτείται να υπολογιστεί η παράμετρος της ακτίνας. Η δυσκολία έγκειται στο να καθοριστεί η παράμετρος της ακτίνας όταν απαιτείται να χαραχθεί ακτίνα για συγκεκριμένη οριζόντια απόσταση (offset). Οι αποστάσεις παράγονται από μια ομάδα ακτίνων (ray fan), ώστε να υπολογιστούν δύο τιμές παραμέτρων ακτίνων που ικανοποιούν την επιθυμητή απόσταση. Στη συνέχεια μια νέα αναθεωρημένη δέσμη ακτίνων υπολογίζεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου υπολογιστεί η ακτίνα που πλησιάζει την επιθυμητή απόσταση, εντός ενός ανεκτού ορίου (capture radius).

6.2.2 Υπολογισμός της παραμέτρου ακτίνας p

Σε διασκόπηση VSP, η παράμετρος της ακτίνας ανοδικού κύματος, υπολογίζεται από την οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας, κάθε κύματος. Η κρίσιμη γωνία, θ_o μιας ακτίνας που καταφθάνει σε ένα ζεύγος γεωφώνων είναι:

$$\sin \theta_o = \frac{v_o \Delta t}{\Delta r} \quad (6.13)$$

Όπου v_o είναι η στιγμιαία ταχύτητα κάτω από τα γεώφωνα, Δr είναι η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων και Δt είναι η χρονική καθυστέρηση του μετώπου κύματος σε r και $r+\Delta r$. Σύμφωνα με την εξίσωση (6.8), η παράμετρος της ακτίνας ισούται:

$$\frac{\Delta t}{\Delta r} = \frac{1}{v_r} = \frac{\sin \theta_o}{v_o} = p \quad (6.14)$$

όπου v_r είναι η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του κύματος στη μετρούμενη θέση. Γενικά η παράμετρος p , αλλάζει από θέση σε θέση, εξαιτίας της αλλαγής της κρίσιμης γωνίας και των πλευρικών διακυμάνσεων της στιγμιαίας ταχύτητας. Για παράδειγμα, κύματα που ταξιδεύουν κατακόρυφα όταν συναντούν τα γεώφωνα, η παράμετρος είναι 0. Κύματα τα οποία ταξιδεύουν οριζόντια κατά μήκος της συστοιχίας των γεωφώνων στην επιφάνεια της γής έχουν παράμετρο $1/v_0$.

6.2.3 Τα εργαλεία σε περιβάλλον Matlab, για μέσο μεταβαλλόμενης ταχύτητας.

Σε αυτή την περίπτωση, οι υπολογισμοί βασίζονται στις εξισώσεις (6.11) και (6.12). Για γεωμετρίες όπως της VSP, οι υπολογισμοί γίνονται με την χρήση της `traceray_pp` ξεχωριστά για κάθε γεώφωνο σύμφωνα με την οποία επαναλαμβάνεται η διαδικασία σχεδιασμού σεισμικής ακτίνας, μέχρι αυτή να φτάσει εντός ανεκτού ορίου από το γεώφωνο (capture radius). Αυτό το όριο ανεκτικότητας, περιγράφει νοητός κύκλος, γύρω από το γεώφωνο. Εάν η ακτίνα φθάσει εντός του νοητού αυτού κύκλου, τότε θεωρείται αποδεκτή για το γεώφωνο.

Ο αλγόριθμος `traceray_pp` περιγράφει ανάκλαση p-p κυμάτων ή s-s κυμάτων σε ένα ή περισσότερα στρώματα. Στην περίπτωση μας ενδιαφερόμαστε για τα επιμήκη κύματα.

`[t,p,L,raycoord]=traceray_pp(vp,zp,zs,zr,zd,x,xcap,pfan,itermax,optflag,pflag,dflag,kol)`

vp,zp: είναι τα διανύσματα των ταχυτήτων και του βάθους του μοντέλου των επιμηκών κυμάτων p . Βάθος θεωρείται η απόσταση μέχρι την κορυφή του ομογενούς στρώματος.

zs : βάθος της πηγής.

zr : βάθος γεωφώνων.

zd : βάθος ανακλαστήρα.

xoff : οριζόντια απόσταση πηγής-γεωφώνου.

xcap: ανεκτή απόσταση πρόσπτωσης ακτίνας σε γεώφωνο (capture radius).

pfan :διάνυσμα με τις παραμέτρους κάθε ακτίνας για τον αρχικό προσδιορισμό της δέσμης των ακτίνων. Εάν έχει τη τιμή -2, καλεί το πρόγραμμα να ξεκινήσει με τις ακτίνες που προσδιορίστηκαν από την τελευταία επανάληψη.

Intermax : μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, μέχρι την ανεκτή απόσταση (4)

optflag : εάν έχει τη τιμή 1, τότε ο χρόνος διαδρομής και η παράμετρος της ακτίνας, είναι γραμμική παρεμβολή, μεταξύ της ακτίνας που εμπίπτει στο νοητό κύκλο και της επόμενης πλησιέστερης. Εάν έχει τη τιμή 0, τότε λαμβάνει την ακτίνα που εμπίπτει στον κύκλο.

pflag : τιμή διαφορετική από μηδέν δείχνει πληροφορίες για όλες τις ακτίνες.

dflag : με τιμή 1 σχεδιάζει τις ακτίνες σε νέο παράθυρο,
με τιμή 2 στο τρέχον.

kol : το χρώμα των ακτίνων ('κ', μαύρο).

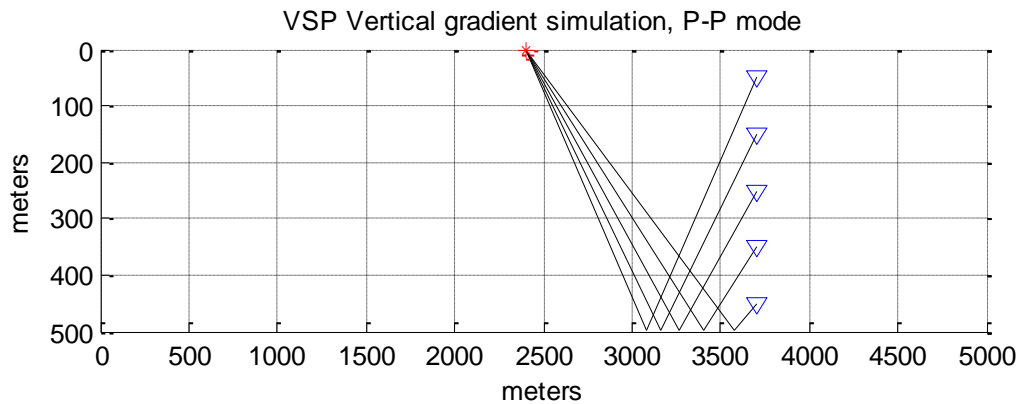
t : το διάνυσμα των χρόνων διαδρομής για κάθε x.

p : οι παράμετροι των ακτίνων για κάθε x.

L: διάνυσμα συντελεστών γεωμετρικής διασποράς για κάθε x.

raycoord: συστοιχία κελιών, όπου η πρώτη στήλη είναι τα βάθη των σημείων ανάκλασης και η δεύτερη οι συντεταγμένες των σημείων αυτών, κατά x.

Για κάθε πηγή, υπολογίζεται ο πίνακας των συντεταγμένων της πορείας της ακτίνας (θέση κατά x και βάθος), για κάθε κλάδο (down leg-up leg). Από τον πίνακα των συντεταγμένων μας ενδιαφέρει το σημείο ανάκλασης, το οποίο εμφανίζεται δύο φορές. Το σημείο ανάκλασης προσδιορίζεται με βάση τη δοθείσα απόσταση πηγής-γεωφώνου (xoff) και το βάθος του ανακλαστήρα. Στην εικόνα 77, απεικονίζονται ανακλώμενες σεισμικές ακτίνες ενδεικτικά για ανακλαστήρα στα 500 m. Η θέση της πηγής είναι στα 2400 m, και η οριζόντια απόσταση πηγής-γεωφώνου στα 1300 m. Ο αλγόριθμος θέτει τον περιορισμό ότι το βάθος του γεωφώνου, πρέπει να είναι μικρότερο από το βάθος του ανακλαστήρα. Τα γεώφωνα βρίσκονται σε βάθος από 50 m μέχρι 450 m ανά 100 m.



Εικόνα 77: Σχεδιασμός ανακλώμενων σεισμικών ακτίνων για τη πηγή 12 στη θέση ($x=2400$ m, $z=0$ m) και οριζόντιο ανακλαστήρα στα 500 m.

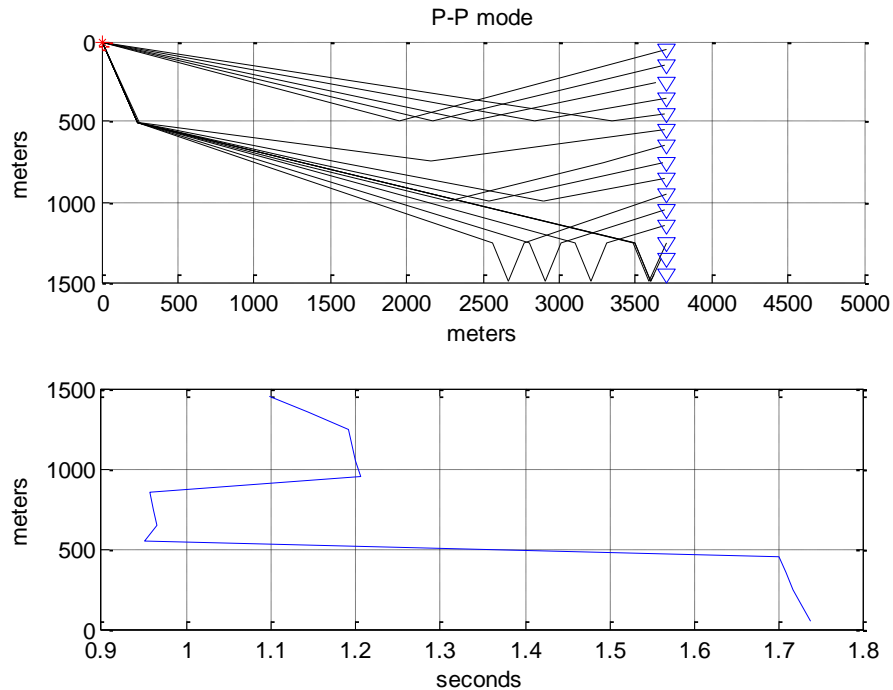
Βάθος γεωφ(m)		1° σημείο(x,z)	2° σημείο(x,z)
50 m	Down leg	(2400,0)	(622.3,500)
	Up leg	(622.3,500)	(1287.6,50)
150m	Down leg	(2400,0)	(544.2,500)
	Up leg	(544.2,500)	(1284.9,150)
250m	Down leg	(2400,0)	(438.1,500)
	Up leg	(438.1,500)	(1292.8,250)
350m	Down leg	(2400,0)	(329.9,500)
	Up leg	(329.9,500)	(1261.2,350)
450m	Down leg	(2400,0)	(202.6,500)
	Up leg	(202.6,500)	(1207.2,450)

Πίνακας 6.4: Οι συντεταγμένες της πορείας των ακτίνων σε πέντε γεώφωνα και για τη πηγή 12 στη θέση ($x=2400$ m, $z=0$ m) και οριζόντιο ανακλαστήρα στα 500 m.

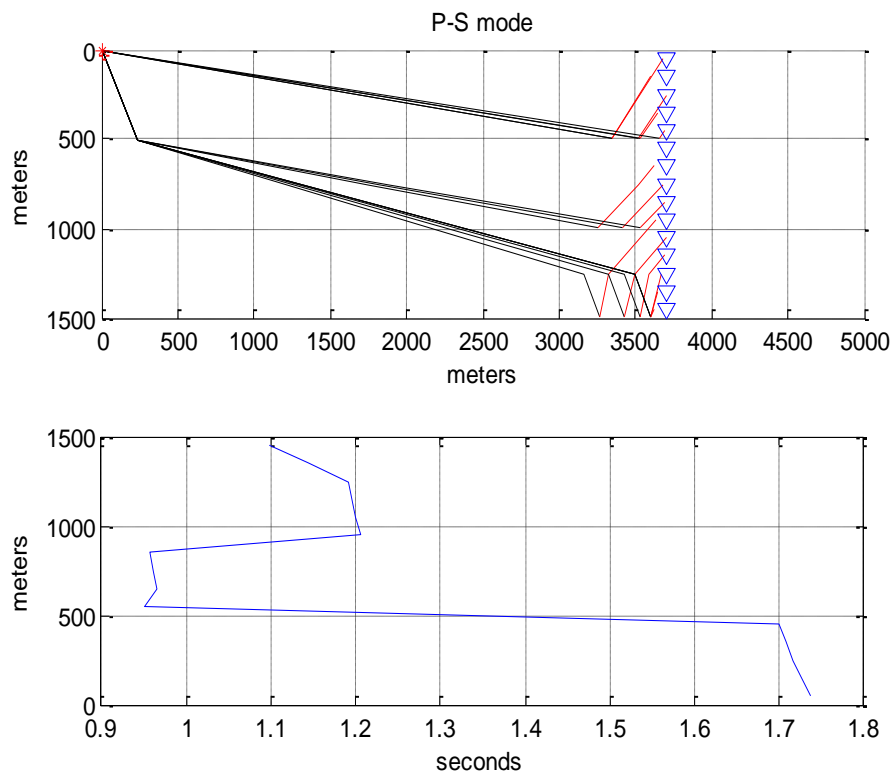
Στην περίπτωση μας, τα γεώφωνα βρίσκονται σε συγκεκριμένα βάθη μέσα στη γεώτρηση, και οι ανακλαστήρες θεωρούνται οριζόντιοι και σε βάθη 500 m, 750 m, 1000m, 1500m.

Στην εικόνα 78a παρουσιάζεται ενδεικτικά η πορεία των σεισμικών ακτίνων από την πηγή στη θέση 0 m. Η οριζόντια απόσταση πηγής-συστοιχίας γεωφώνων είναι στα 3700 m. Στο Σχήμα 78b απεικονίζεται το δρομοχρονικό διάγραμμα για κάθε ακτίνα. Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος σε s, και στον κατακόρυφο το βάθος. Με τη θεώρηση ότι οι ανακλαστήρες είναι οριζόντιοι, οι χρόνοι που αποδίδει ο αλγόριθμος είναι

μικρότεροι σε σχέση με τα προηγούμενα διαγράμματα. Στα πρώτα γεώφωνα και στα μικρότερα βάθη, οι χρόνοι αναφέρονται στα ανοδικά κύματα. Στο Παράρτημα παρατίθενται αντίστοιχα σχήματα για τις υπόλοιπες θέσεις της σεισμικής πηγής.



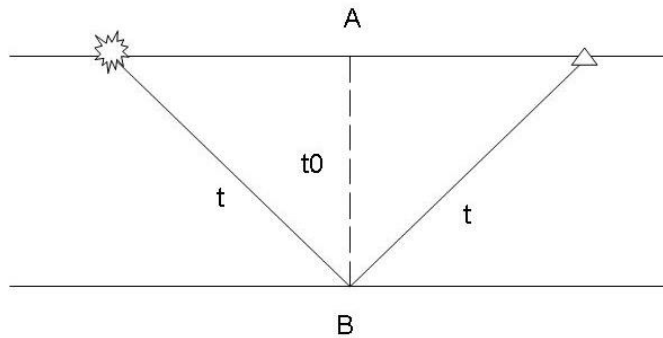
Εικόνα 78: Διάταξη P-P κυμάτων. Η πορεία των σεισμικών ακτίνων από την πρώτη πηγή(a), και η καταγραφή του συνολικού χρόνου για κάθε ακτίνα (b).



Εικόνα 79: Διάταξη P-S κυμάτων, Η πορεία των σεισμικών ακτίνων από την πρώτη πηγή(a) και η καταγραφή του συνολικού χρόνου για κάθε ακτίνα (b).

Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες παρατηρείται ότι το εύρος των P-S ακτίνων είναι μικρότερο, καθώς είναι μικρότερη η γωνία ανάκλασης του εγκάρσιου τμήματος από το επιμήκες. Παρατηρείται ότι τα επιμήκη καταφθάνουν ελάχιστα νωρίτερα από τα εγκάρσια. Στα βάθη 500-1000 m, υπάρχει καθυστέρηση των εγκάρσιων κυμάτων. Στα βάθη 1300-1500 m, εικόνα (a) καταγράφεται ανάκλαση από πολλαπλές.

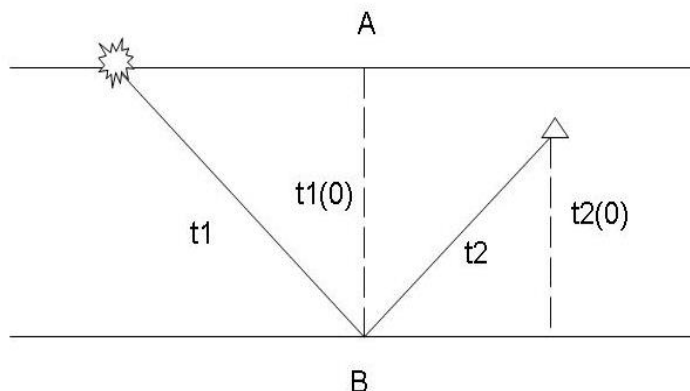
6.2.4 Διόρθωση χρόνου ανάκλασης σε απλό κατακόρυφο χρόνο



Εικόνα 80: Διόρθωση χρόνου σε απλό κατακόρυφο χρόνο για πηγή και γεώφωνο στην επιφάνεια, και ένα ανακλαστήρα.

Σε έναν οριζόντιο ανακλαστήρα, διορθώνουμε τους χρόνους σαν να ήταν η σεισμική ακτίνα η AB. Εάν η πηγή και το γεώφωνο ήταν στην επιφάνεια, η ανάκλαση θα ήταν στο μέσο της απόστασης και ο χρόνος διόρθωσης θα ήταν $\Delta t = t - t_0$ (όπου t_0 ο απλός κατακόρυφος χρόνος).

Εάν η πηγή είναι στην επιφάνεια και το γεώφωνο σε ορισμένο βάθος, τότε η διόρθωση γίνεται σε δύο τμήματα.



Εικόνα 81: Διόρθωση χρόνου σε απλό κατακόρυφο χρόνο για πηγή στην επιφάνεια, και γεώφωνο σε κάποιο βάθος.

$$\Delta t_1 = t_1 - t_1(0) \Rightarrow t_1(0) = t_1 - \Delta t_1 \quad (1)$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_2(0) \Rightarrow t_2(0) = t_2 - \Delta t_2 \quad (2) \quad (t_1 + t_2 = t) \text{ Από (1)+(2)}$$

$$t_1(0) + t_2(0) = t_1 + t_2 - \Delta t_1 - \Delta t_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t_1(0) + t_2(0) = t - \Delta t_1 - \Delta t_2$$

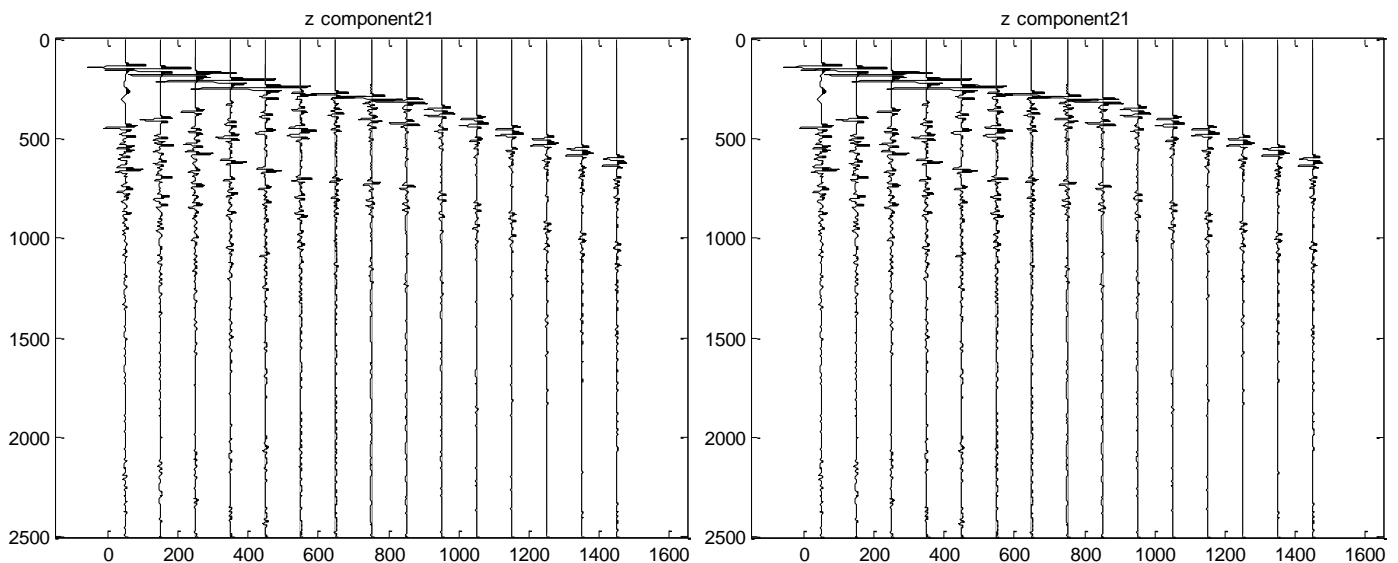
$$\Rightarrow t_1(0) + t_2(0) - t_2(0) = t - \Delta t_1 - \Delta t_2 - t_2(0)$$

$$\Rightarrow \Delta t = t - t_1(0) - t_2(0)$$

$$\Rightarrow \Delta t - t_2(0) = t - t_1(0)$$

$$\Rightarrow \delta(t) = t - t_1(0)$$

Όπου δt η διόρθωση που εφαρμόστηκε στους υπολογιζόμενους χρόνους του αλγορίθμου. Από τον υπολογιζόμενο χρόνο κάθε ακτίνας προς ένα γεώφωνο, αφαιρέθηκε ο απλός χρόνος προς τον ανακλαστήρα και ο απλός χρόνος διαδρομής από το βάθος του γεωφώνου προς τον ανακλαστήρα. Για κάθε ανακλαστήρα, υπολογίζεται διαφορετικός χρόνος διόρθωσης, από το βάθος του ανακλαστήρα προς την ταχύτητα του υπερκείμενου στρώματος.



Εικόνα 82: Αρχική εικόνα της πηγής 21 αριστερά, διόρθωση όλων των σεισμικών ιχνών κατά δt εικόνα δεξιά. Στον οριζόντιο άξονα είναι τα βάθη των γεωφώνων και στον κατακόρυφο ο χρόνος καταγραφής σε ms.

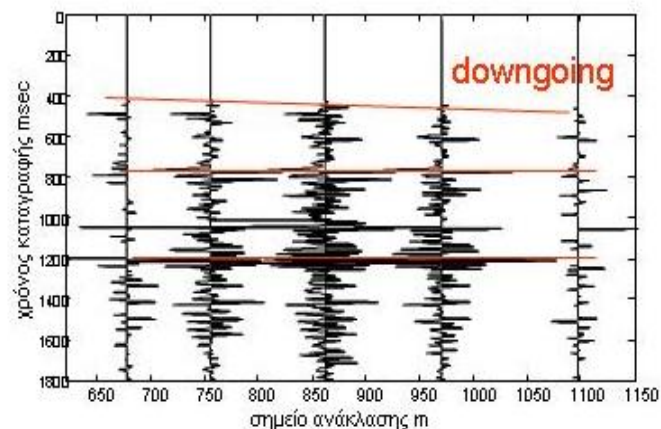
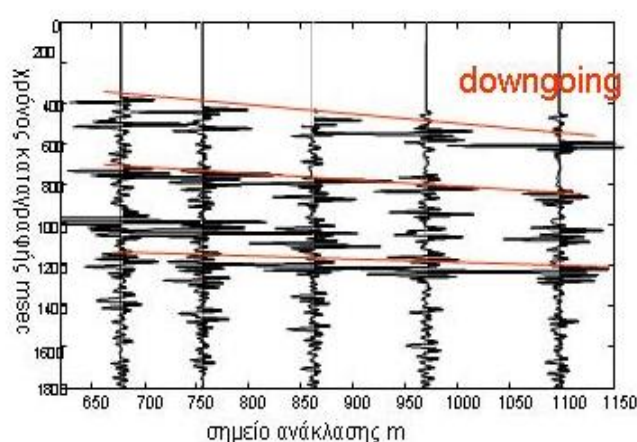
6.2.5 Μετασχηματισμός VSP-CDP

Έπειτα από τον καθορισμό της πορείας των σεισμικών ακτίνων, και τη διόρθωση σε απλό χρόνο διαδρομής ακολουθεί ο διαχωρισμός των ανοδικών από τα καθοδικά κύματα. Η απαλοιφή των καθοδικών κυμάτων έγινε με την εφαρμογή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής `medfilt2(A,[m=1,n])` της Matlab. Το φίλτρο αυτό υπολογίζει την ενδιάμεση τιμή σε συγκεκριμένο χρόνο χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές από γειτονικά ίχνη. Η ενδιάμεση τιμή εξαρτάται από τον αριθμό των ιχνών n . A είναι ο πίνακας των δεδομένων-της εικόνας. Οι ανακλαστήρες στην περίπτωση μας είναι οριζόντιοι και κατά συνέπεια δεν απαιτείται χωροθέτηση των ανοδικών κυμάτων.

Στη συνέχεια της επεξεργασίας, ίχνη που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο ανάκλασης αθροίζονται. Κατά συνέπεια τα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων τα οποία προέρχονται από το ίδιο σημείο ανακλαστήρα αθροίζονται. Το αποτέλεσμα είναι ένα προφίλ στο χώρο του βάθους και του χρόνου. Τα σημεία ανάκλασης είναι τα κοινά σημεία βάθους CDP (Common Depth Points) στη νέα εικόνα.

Στην εικόνα 83a, απεικονίζονται οι καταγραφές για κάθε σημείο ανάκλασης για το πρώτο ανακλαστήρα στα 500 m, για τις πηγές 12-19. Οι πηγές αυτές αντιστοιχούν σε αποστάσεις 2400 m -3600 m (100 m από τη γεώτρηση). Η εικόνα 83b, είναι έπειτα από την εφαρμογή του φίλτρου `medfilt2`, για την απαλοιφή των καθοδικών κυμάτων.

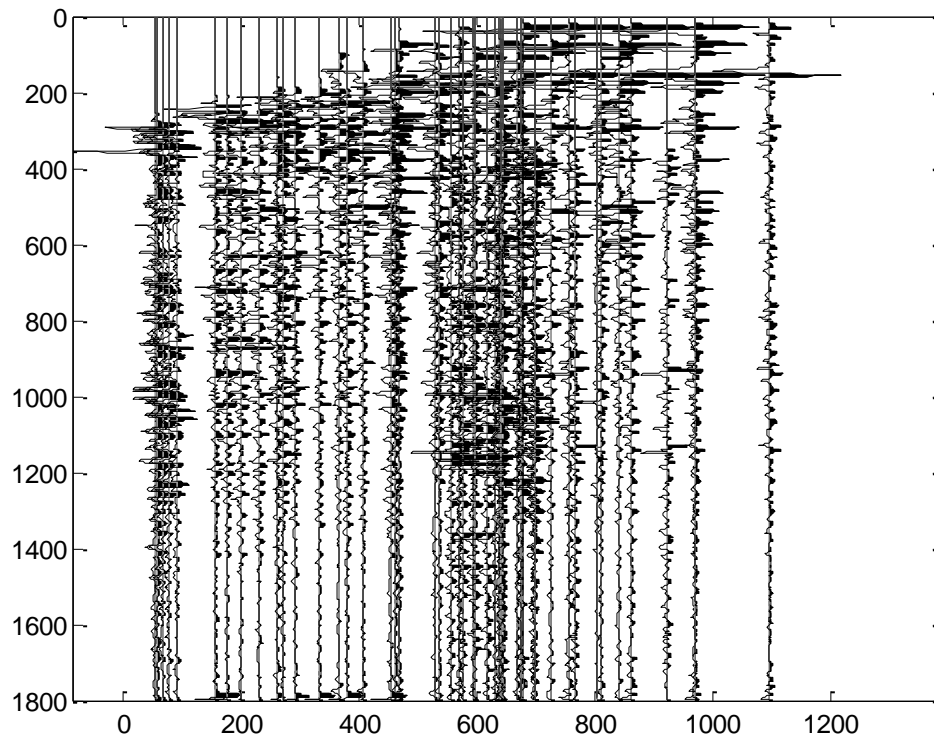
Το φίλτρο `medfilt2`, αφαίρεσε τα καθοδικά κύματα.



Εικόνα 83: (α) καταγραφές για κάθε σημείο ανάκλασης για τον πρώτο ανακλαστήρα στα 500 m, (b)μετά την εφαρμογή του φίλτρου medfilt2, για την απαλοιφή των καθοδικών κυμάτων. Στον οριζόντιο άξονα, είναι το σημείο ανάκλασης σε m, και στον κατακόρυφο ο χρόνος καταγραφής σε msec.

Η εικόνα 84 είναι το προφίλ βάθους (σημείων ανάκλασης)-διορθωμένου απλού κατακόρυφου χρόνου για όλους τους ανακλαστήρες του μοντέλου και τις πηγές 13 έως 19. Οι αποστάσεις πηγής-γεωφώνου είναι από 1300m έως 2000 m. Το σημείο ανάκλασης στα 1100 m αντιστοιχεί στα 200 m απόσταση από τη γεώτρηση. Οι καταγραφές με τα σημεία ανάκλασης μέχρι τα 50 m αντιστοιχούν στην πλησιέστερη πηγή.

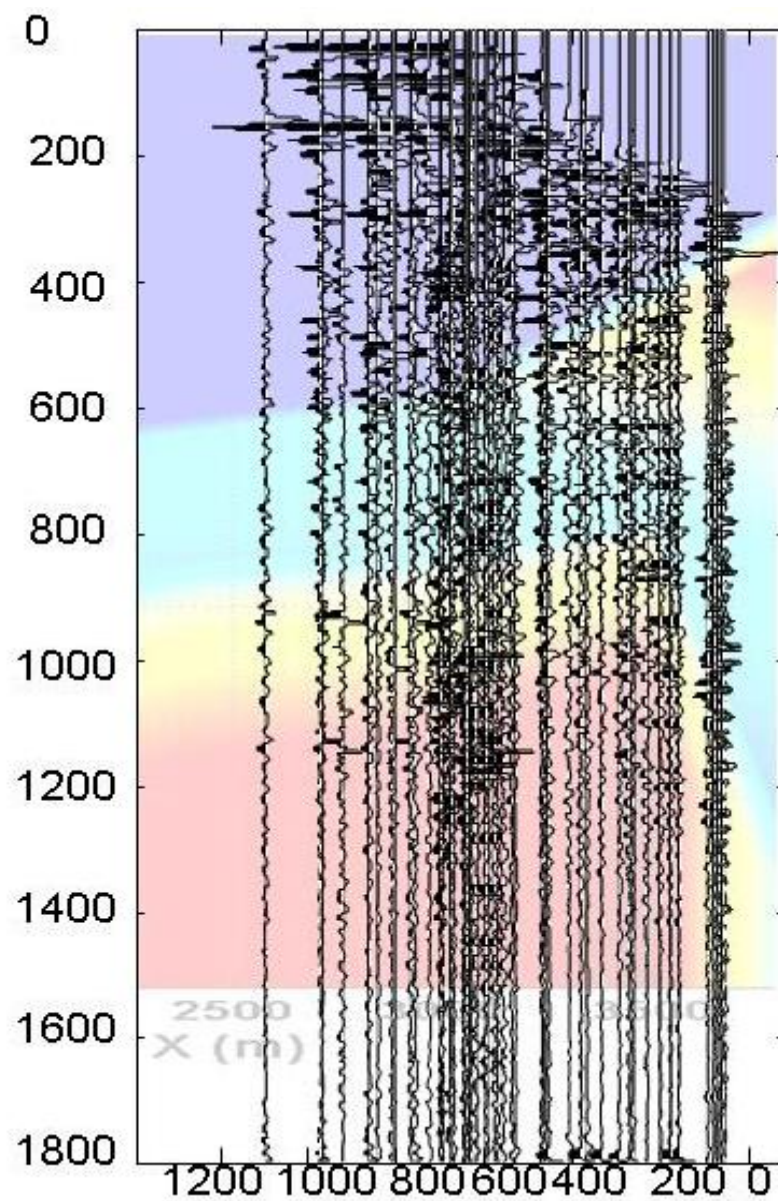
Όσο αυξάνεται το βάθος, πλησιάζοντας προς τη γεώτρηση, ο χρόνος καταγραφής είναι μεγαλύτερος. Καθώς αυξάνεται το βάθος του ανακλαστήρα το τμήμα που απεικονίζεται πρέπει να μικραίνει.



Εικόνα 84: Μετατροπή VSP-CDP για το μοντέλο της γεώτρησης. Στον άξονα x είναι τα σημεία ανάκλασης (που είναι η αρχή του οριζόντιου άξονα σε σχέση με το σεισμικό μοντέλο), ενώ στον κατακόρυφο ο διορθωμένος χρόνος ms.

Στην εικόνα 85, γίνεται υπέρθεση της απεικόνισης VSP-CDP, πάνω στο μοντέλο (εικόνα 72). Στον κατακόρυφο άξονα είναι οι διορθωμένοι χρόνοι σε ms και στον οριζόντιο τα σημεία ανάκλασης (m). Επιλέχθηκε το τμήμα του μοντέλου από τα 2400 m μέχρι τα 3700 m, όπου βρίσκεται η γεώτρηση για τη σύγκριση.

Τα σημεία ανάκλασης που είναι μεταξύ 1200 m και 1000 m, αντιστοιχούν στην πιο απομακρυσμένη πηγή, ενώ αυτά που πλησιάζουν στα 50 m, στην πλησιέστερη πηγή στη γεώτρηση. Ο αριθμός των ιχνών είναι μικρότερος από τον αναμενόμενο, για 7 πηγές και 15 γεώφωνα για κάθε πηγή, επειδή τα ίχνη που αντιστοιχούν στα ίδια σημεία ανάκλασης αθροίζονται. Στα 600 ms, η απεικόνιση VSP-CDP, συμφωνεί με το μοντέλο, όπου εμφανίζεται κεκλιμένος ανακλαστήρας. Όμοια, και στα 1050 m οι καταγραφές υποδεικνύουν τη διαχωριστική επιφάνεια των στρωμάτων.



Εικόνα 85: Υπέρθεση της απεικόνισης VSP-CDP, πάνω στο μοντέλο. Στον άξονα x είναι τα σημεία ανάκλασης σε (m), ενώ στον κατακόρυφο ο διορθωμένος χρόνος ms.

6.3 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή, παρουσιάστηκαν νέες τεχνολογίες και μέθοδοι για την απεικόνιση σύνθετων γεωλογικών δομών και τον εντοπισμό κοιτασμάτων υδρογονανθράκων. Η κατακόρυφη σεισμική τομογραφία VSP, πλεονεκτεί έναντι των επιφανειακών μετρήσεων, καθώς επιτρέπει την παρακολούθηση της δημιουργίας και διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο υπέδαφος. Όταν τα κύματα προσπέσουν σε διαχωριστικές επιφάνειες, τότε υφίσταται ανακατανομή της ενέργειας των κυμάτων. Η μελέτη των διαδικασιών ανάκλασης, διάθλασης αλλά και δευτερευόντων κυμάτων είναι σημαντικές ιδιαίτερα σε σύνθετες γεωλογικές δομές. Ακόμη, είναι μια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια της γεώτρησης (inverse VSP) μειώνοντας το κόστος της έρευνας ή σε αρχικά ανεπιτυχείς γεωτρήσεις, αυξάνοντας τα ποσοστά επιτυχίας της.

Σε αυτή την κατεύθυνση, κατασκευάστηκε μοντέλο που προσομοιάζει τις συνθήκες της γεώτρησης Talisman. Στο μοντέλο τοποθετήθηκαν 26 πηγές στην επιφάνεια, και 15 γεώφωνα στη γεώτρηση. Οι πηγές τοποθετήθηκαν ανα 200 m, και τα γεώφωνα μέσα στη γεώτρηση με το πρώτο σε βάθος 50 m, και τα υπόλοιπα ανά 100 m μέχρι το βάθος των 1450 m. Το μέγεθος του μοντέλου είναι 5000 m σε μήκος και 2700 m σε βάθος. Έπειτα προσδιορίστηκαν οι ασυνέχειες, τα πάχη των στρωμάτων οι σεισμικές ταχύτητες και η πυκνότητα για κάθε στρώμα. Στο μοντέλο τέθηκαν περιορισμοί για τη θέση της πηγής, κριτήριο ευστάθειας, αριθμητικής διασποράς και απορροφητικές οριακές συνθήκες (absorbing boundaries). Με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται η τιμή της άγνωστης συνάρτησης σε κάθε κόμβο. Το μοντέλο αποδίδει σεισμική καταγραφή για κάθε πηγή.

Με γνωστές τις σεισμικές ταχύτητες των στρωμάτων και το χρόνο καταγραφής των αφίξεων, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του ανακλαστήρα, εκατοντάδες μέτρα μακριά από τη γεώτρηση. Με την προσομοίωση των ακτίνων, μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες της πορείας της ακτίνας, και ο συνολικός χρόνος διαδρομής. Από τις συντεταγμένες της διαδρομής της ακτίνας εντοπίζεται το σημείο ανάκλασης και το βάθος του ανακλαστήρα. Με τον περιορισμό που έθετε ο αλγόριθμος για οριζόντιους ανακλαστήρες, οι χρόνοι που υπολόγιζε για την πορεία της ακτίνας ήταν μικρότεροι από ότι σε ένα αντίστοιχο κεκλιμένο ανακλαστήρα και απέδιδε λιγότερα δεδομένα. Οι χρονικές αυτές διαφορές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν ένα μοντέλο, σε μια νέα επανάληψη.

Τα διαθέσιμα εργαλεία (raytracer) για την προσομοίωση της πορείας των σεισμικών ακτίνων, έθεταν τον περιορισμό για οριζόντιους ανακλαστήρες, και τον περιορισμό το βάθος των γεωφώνων και των πηγών να είναι μικρότερο από το βάθος του ανακλαστήρα. Απαιτείται ένας πιο αναπτυγμένος αλγόριθμος που θα προβλέπει την πορεία των ακτίνων από κεκλιμένες επιφάνειες, για τις περιπτώσεις πιο σύνθετων δομών.

Στη συνέχεια έγινε μετατροπή του χρόνου ανάκλασης σε απλό κατακόρυφο χρόνο, για κάθε ανακλαστήρα. Το επόμενο βήμα ήταν ο διαχωρισμός των ανοδικών και των καθοδικών κυμάτων. Η επιλογή των ανοδικών γίνεται γιατί περιέχουν ανακλάσεις. Ο διαχωρισμός έγινε με το φίλτρο ενδιάμεσης τιμής medfilt2. Τα ίχνη που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο ανάκλασης αθροίζονται. Το αποτέλεσμα είναι μια απεικόνιση στο χώρο του βάθους και του χρόνου (μετασχηματισμός VSP-CDP). Το προφίλ VSP-CDP, απεικονίζει με λεπτομέρεια δομές κοντά στη γεώτρηση, σε αντίθεση με τα συμβατικά σεισμικά που εμφανίζουν μειωμένη διακριτική ικανότητα. Οι συμβατικές μέθοδοι είχαν περιορισμένη δυνατότητα να απεικονίσουν δομές από τις οποίες δεν καταγράφονταν ανακλώμενα κύματα (ζώνες σκιών). Ο μετασχηματισμός VSP-CDP μπορεί να προσδιορίσει αυτές τις ζώνες, και να βελτιώσει την ποιότητα της σεισμικής εικόνας.

Η μετατροπή VSP-CDP (κοινού σημείου ανάκλασης), εφαρμόζεται σε πολύπλοκες γεωλογικές δομές, όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται απότομα, η κλίση των στρωμάτων είναι μεγάλη και υπάρχουν ασυνέχειες. Πρόκειται για μια μέθοδο, που δεν επηρεάζεται από την παραδοχή των οριζόντιων στρωμάτων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε γεωμετρία VSP. Οι χρόνοι των ανοδικών κυμάτων που υπολογίζονται στο προφίλ VSP-CDP, μπορούν να συγκριθούν με τους χρόνους που υπολογίζουν τα δεδομένα VSP. Η απεικόνιση των στρωμάτων από το πιο ρηχό στο βαθύτερο, μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για την εικόνα του υπεδάφους.

Βιβλιογραφία

- 1.Π.Παντζέκος (2011) **Συγγραφή αλγόριθμου επίλυσης ευθέος προβλήματος διάδοσης σεισμικών κυμάτων**, διπλωματική εργασία, ΤΕΙ Κρήτης.
- 2.Philip J.Brown II (1999), **An overview of the Vertical Seismic Profiling (VSP) Technique**.
3. J.W.Rector III,B.P. Marion and R.A Hardage (1989) **The use of an active drill bit for inverse VSP measurements** Exploration Geophysics 343-346.
4. Bob A. Hardage (1989) **Inverse VSP-A new technology for Imaging and Monitoring Reservoirs**, Society of Petroleum Engineers.
- 5.E.I.Galperin (1974) **Vertical Seismic Profiling** Society of exploration geophysics, Moscow.
6. E.I.Galperin (1985) **Vertical Seismic Profiling and its exploration potential** Moscow.
7. **Vertical Seismic Profiling** King Saud University.
- 8.Phil,Ireson,Rutherford,Smith,Dodds,Johnston,Schaffer,(1995)**Borehole Seismic Data Sharpen the Reservoir Image**, Oilfield Review.
- 9.S L Sah (2010) **Encyclopedia Of Petroleum Science And Engineering**, Gyan Publishing House.
10. B.G Frignet and A.H.Hartog, Schlumberger (2014) **Optical Vertical Seismic Profile on Wireline Cable**, SPWLA 55th Annual Logging Symposium Abu Dhabi.
11. Ι. Τσαλαμάνης (2011) **Τηλεματική**, Συστήματα Οπτικών Τηλεπικοινωνιών, Τμήμα Βιομηχανικής Πληροφορικής Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών ΤΕΙ Καβάλας.
12. Β.Τάτσης (2015) **Δίκτυα οπτικών ινών**, πτυχιακή εργασία Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής ΤΕΙ Ηπείρου.
13. Η. Κωτσίδης (2012) **Χρήση αισθητήρων οπτικών ινών για τη μέτρηση παραμορφώσεων σε σύνθετα υλικά και συνδέσμους με κολλητικά μέσα**, μεταπτυχιακή εργασία ΕΜΠ.
14. Η.Αβραμόπουλος **Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών**, Ε.Μ.Π Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κ Μηχανικών Υπολογιστών.
- 15.Χ.Ευθυμίου (2011) **Εισαγωγή στις Οπτικές Επικοινωνίες** Τμήμα Πληροφορικής κα Επικοινωνιών Τ.Ε.Ι Σερρών
16. G. Brown (2009) **Downhole Temperatures from Optical Fiber**, Oilfield Review Schlumberger.

17. Tom Parker, Sergey Shatalin and Mahmoud Farhadiroushan (2014) **Distributed Acoustic Sensing-a new tool for seismic applications** EAGE (European Association of Geoscientists and Engineers).
18. Η.Αβραμόπουλος **Φωτονική Τεχνολογία για Επικοινωνίες** Ε.Μ.Π Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κ Μηχανικών Υπολογιστών.
19. Silixa LLC **Intelligent Pipeline Surveillance system (iPSSTM)** 2016.
20. Cooper, Brealey, Fermor, Green, Morrison (2004). **Structural models of subsurface thrust-related Folds in the Foothills of British Columbia** ,Case studies of sidetracked gas wells, in K. R. McClay, ed., Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir 82, p. 579– 597.
21. Α.Τσιραμπίδης,(1999), **Γεωλογία** Εκδόσεις Γιαχούδη Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, Τρίτη έκδοση.
22. Β.Καρακίσιος – Αλ.Ζαμπετάκη-Λέκκα, (2011). **Σημειώσεις Εργαστηρίου Στρωματογραφίας** ΕΚΠΑ, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Αθήνα
23. Εμμ. Μανούσογλου, (2006). **Εισαγωγή στη Γεωλογία** Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
24. Κ. Σκουρλής,(2002). Κινηματική **εξέλιξη του Πινδικού καλύμματος** διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.
25. Σ. Σωτηρόπουλος, (2004). **Στρωματογραφικές και τεκτονικές παρατηρήσεις στο φλύσχη της Νότιας Αιτωλοακαρνανίας.**
26. Ν.Μαρτάκης (2003). **Τομογραφική διερεύνηση της Ηπείρου από μικροσεισμικές καταγραφές**, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.
27. N. Martakis, G-Akis Tselentis, S.Kapotas.,(2003). **Case study in NW Greece of passive seismic tomography: a new tool for hydrocarbon exploration**, technical article, pp: 37-42.
28. Behzad Alaei (2012) **Seismic Modeling of Complex Geological Structures**, Seismic Waves-Research and Analysis Dr Masaki Kanao, Intech.
29. Α.Βαφείδης (1996) **Σεισμική τομογραφία ανάκλασης**, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Πολυτεχνείο Κρήτης.
30. Ν.Βούλγαρης (2006) **Σημειώσεις ειδικών κεφαλαίων σεισμολογίας** Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
31. Φ.Λούης (2006) **Ανάπτυξη λογισμικού για την επίλυση του μη-γραμμικού αντίστροφου σεισμικού προβλήματος με εφαρμογές στην απεικόνιση**

υπεδαφικών δομών, διδακτορική διατριβή τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος ΕΚΠΑ.

32. A. Vafidis (1995) **Seismic Data Processing Techniques for 3-D Complex Media**, Monograph Seismology Laboratory Department of Physics Alberta Canada.

33. Σουππος διατριβή χανια.

34. Oz Yilmaz (2001) **Seismic Data Analysis**,pp.1906-19011 Society of Exploration Geophysicists,USA.

35. B.R.Cassell, M.A.Alam, K.O.Millahn, **Interactive VSP-CDP Mapping in Complex Media** Western Geophysical Co., England

36. Robert J. Brewer (2000) **VSP Data in Comparison to other Borehole Seismic Data**, Halliburton Energy Services, Houston.

37.Δ.Καζαντίδης, (2016) **Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων σεισμικής ανάκλασης για το ορυχείο της Μαυροπηγής Κοζάνης**, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης σελ.20-26

38. Gary F. Margrave, (2001) **Numerical Methods of Exploration Seismology with algorithms in matlab**, Department of Geology and Geophysics, University of Calgary p.45-64.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Alaei, B.2005. Seismic forward modeling of two fault related folds from Dezful embayment of the Iranian Zagros Mountains, Journal of Seismic Exploration, 14, pp.13-30

Alam, A. and Millahn, K., 1986, Interactive model-based VSP-CDP transform: Presented at the Symp. on Practical Aspects of Modeling in Exploration and Development, Kristiansand, Norway

Barss,D.L. and F.A. Montandon,1981,Sukunka-Bullmoose gas fields: models for a developing trend in the southern Foothills of northeast British Columbia: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v.29, p.293-333.

Cant, D. J., and G. S. Stockmal, 1989, The Alberta foreland basin: relationship between stratigraphy and Cordilleran terrane-accretion events: Canadian Journal of East Sciences, v.26, p. 1964-1975.

Cerveny,V.Molotkov,I.A. and Psencik,I 1977 Ray method in Seismology, Universita Karlova, Praha.

Chen, S. T., Zimmerman, L. J., and Tugnait, J. K., 1990.Subsurface imaging using reversed vertical seismic profiling and crosshole tomographic methods, Geophysics.

Cooper,M.A.,1996, Passive-roof duplexes, and pseudopassive-roof duplexes at mountain fronts: a review: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v.44, p.410-421.

Cox M. 1999. Static Corrections for Seismic Reflection Surveys. Society of Exploration Geophysicists.

Davies,G. R.,1997a, The Triassic of the Western Canada Sedimentary Basin: tectonic and stratigraphic framework, paleogeography, paleoclimate and biota: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v.45, p.434-460.

Dillon, P. B. and Thomson, R.C., 1983 Image reconstruction for offset source VSP surveys: Presented at the 45th Ann. Eur. Assoc. Expl. Geophys. Mtg.

Doutsos T, Pe-Piper G, Boronkay K, Koukouvelas I,1993 Kinematics of the Central Hellenides. *Tectonics* 12: 936-953.

Doutsos T, Koukouvelas I, Poulimenos G, Kokkalas S, Xypolias P, Skourlis K., 2000. An exhumation model of the south Peloponnesus, Greece. *Int J Earth Sci* 89: 350-365.

Fagin, S.W. 1991. Seismic Modeling of Geologic Structures: Applications to Exploration Problems. Geophysical Development series, 2. Society of Exploration Geophysicists.

Jacobshagen V, Durr S, Kockel F, Kopp KO, Kowalczyk G with contributions of Berckheimer H, Buttner D.,1978. Structure and evolution of the Aegean Region. In: Closs H, Roeder D, Schmidt K (eds) *Alps-Apennines-Hellenides* Schweizerbart Stuttgart, pp 537-564.

Jacobshagen,V., 1986. Geologie von Griechenland. Berlin: *Gebruder Bornträger*,363pp.

Jones, G., Robertson, A. H. F. 1991. Tectonostratigraphy and evolution of the Mesozoic Pindos ophiolite and related units, northwestern Greece. *Journal of the Geological Society, London* **148**, 267-288.

Karakitsios, V. 1995. The influence of preexisting structure and halokinesis on organic matter preservation and thrust system evolution in the Ionian Basin, Northwest Greece. *American Association of Petroleum Geology, Bulletin* **79**, 960-980.

Mallet,J-L.2002 Geomodeling. Oxford University Press.

Montgomery, S., 1994, Sukunka Bullmoose gas play: A frontier in Northeast British Columbia: *Petroleum Frontiers*, v.11, pt. 3,105 p.

Morrison, M., D. Mitchell, and R. Green, 1998, Analysis of well data to design side-tracks in structurally complex areas: case studies from the Monkman Triassic play-trend, NE British Columbia: Canadian Society of Petroleum Geologists Annual Convention Abstracts, p.281.

Mountrakis, D., Sapountzis, E., Kiliass, A., Elefteriadis, G. & Christofides, G. 1983. Paleogeographic conditions in the western pelagonian margin in Greece during the initial rifting of the continental area. *Canadian Journal of Earth Sc.*,

Petersen, S.A. 1999. Compound modeling, a geological approach to the construction of shared earth models. 61th EAGE Technical Conference, Helsinki.

Slawinski, M. A., and J. M. Parkin, 1996, Migration of a multioffset VSP: a case study in NE British Columbia: Canadian Journal of Exploration Geophysics, v.32, p.104-112.

Snieder, R., and Trampert, J., 1999. Inverse problems in geophysics. in Wavefield inversion, Springer Verlag, p 199-190.

Stott, D.F., 1968, Lower Cretaceous Bullhead and Fort St. John Groups, between Smoky and Peace Rivers, Rocky Mountain Foothills, Alberta and British Columbia: Geological Survey of Canada, Bulletin 152, 273 p.

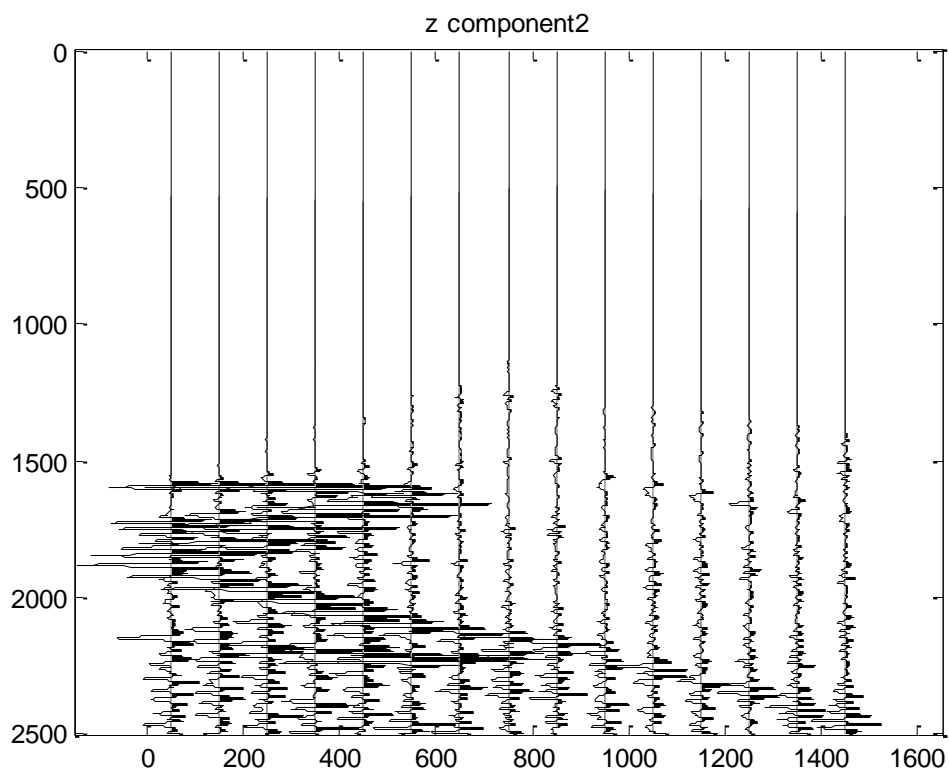
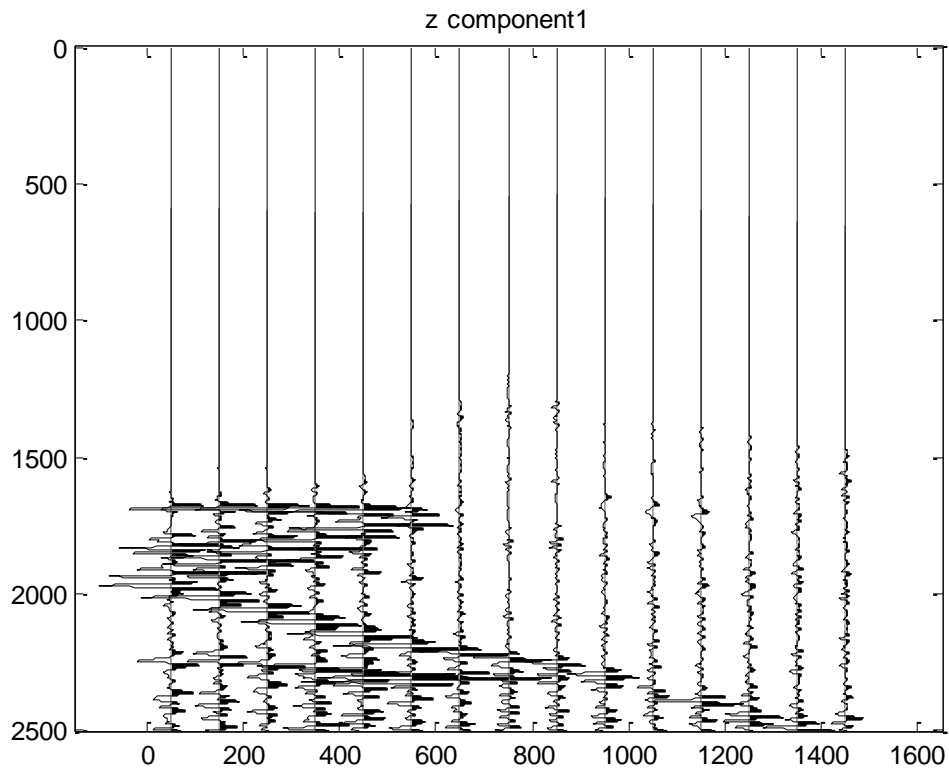
Temple PO, 1968. Mechanics of large-scale gravity sliding in the Greek Peloponnesos. Bull Geol Soc Am 79: 689-700.

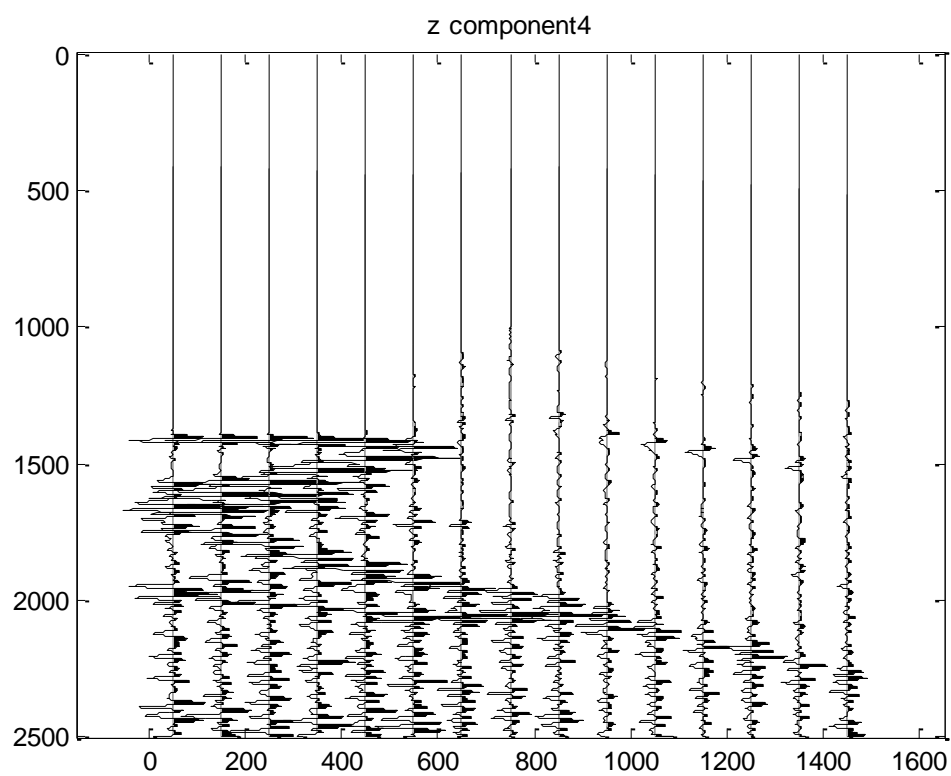
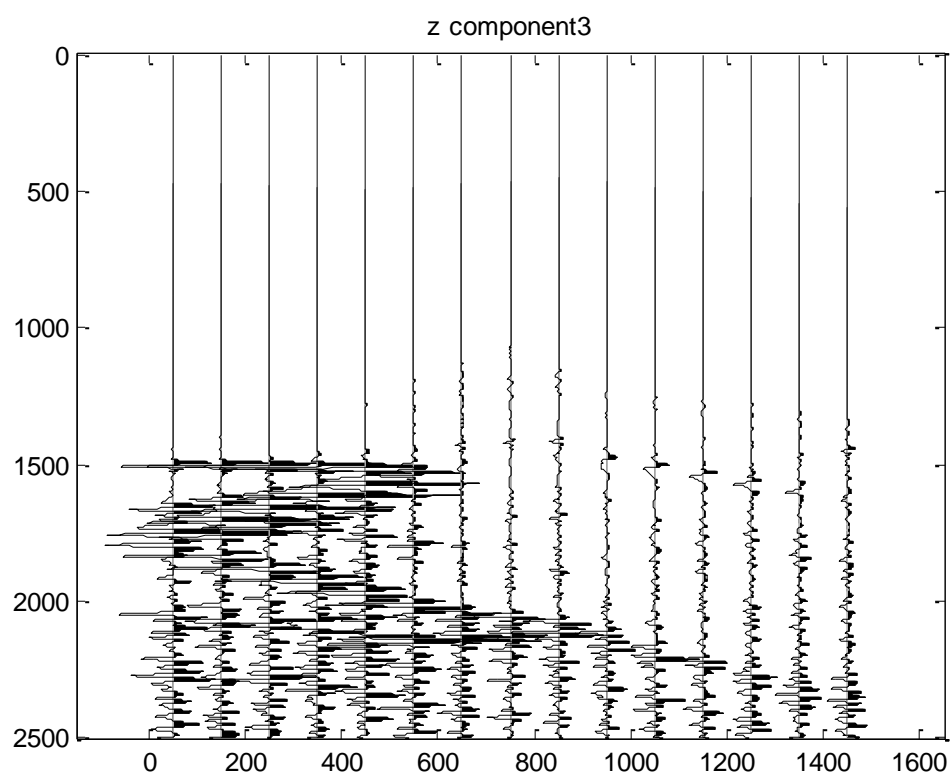
Wiggins, J.W., and Levander, A.R., 1984, Migration of multiple offset synthetic VSP data in complex structure, in Advances in geophysical data processing, v.1: M. Simaan, ed., in press.

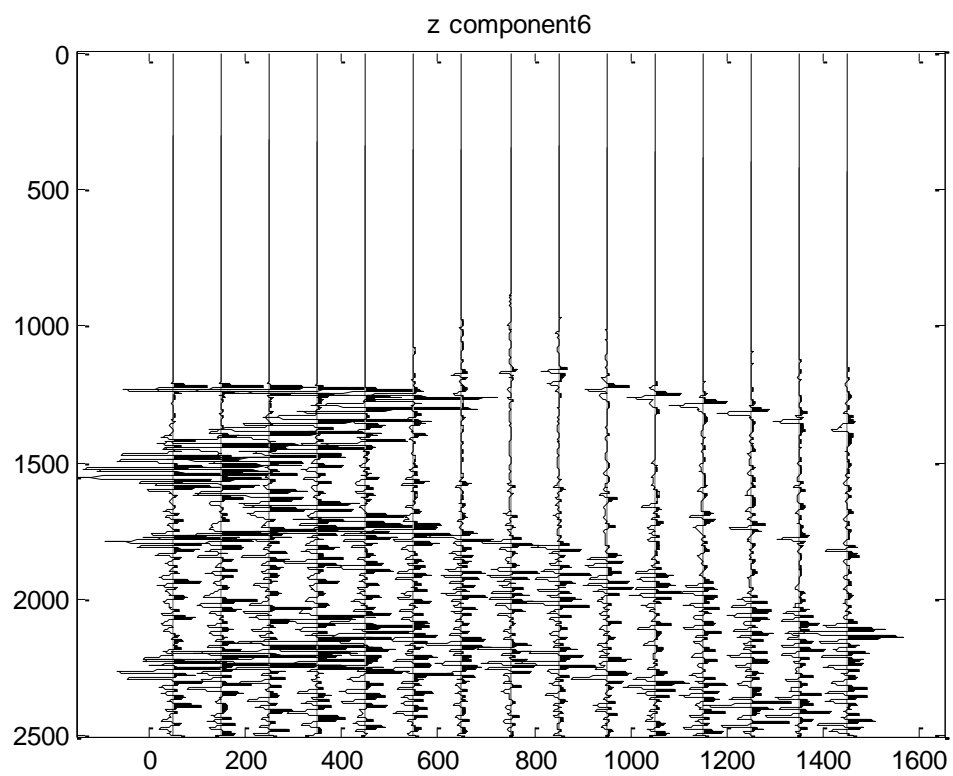
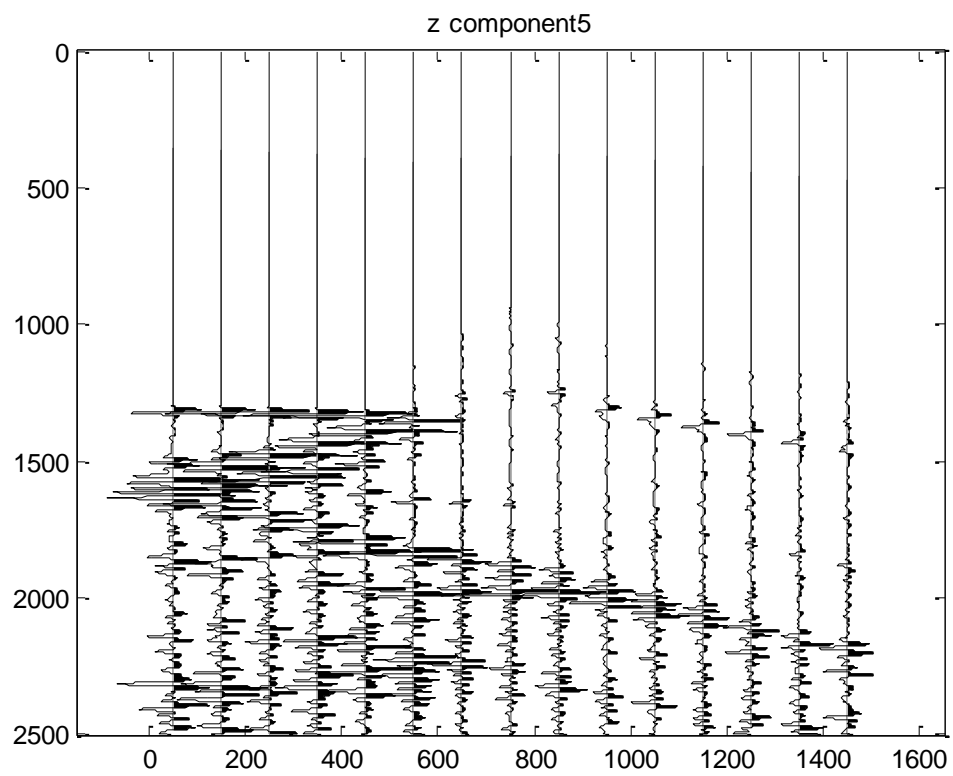
Xypolias P, Doutsos T., 2000. Kinematics of rock flow in a crustal-scale shear zone: Implication for the orogenic evolution of the southwestern Hellenides. Geol Mag 137:81-96.

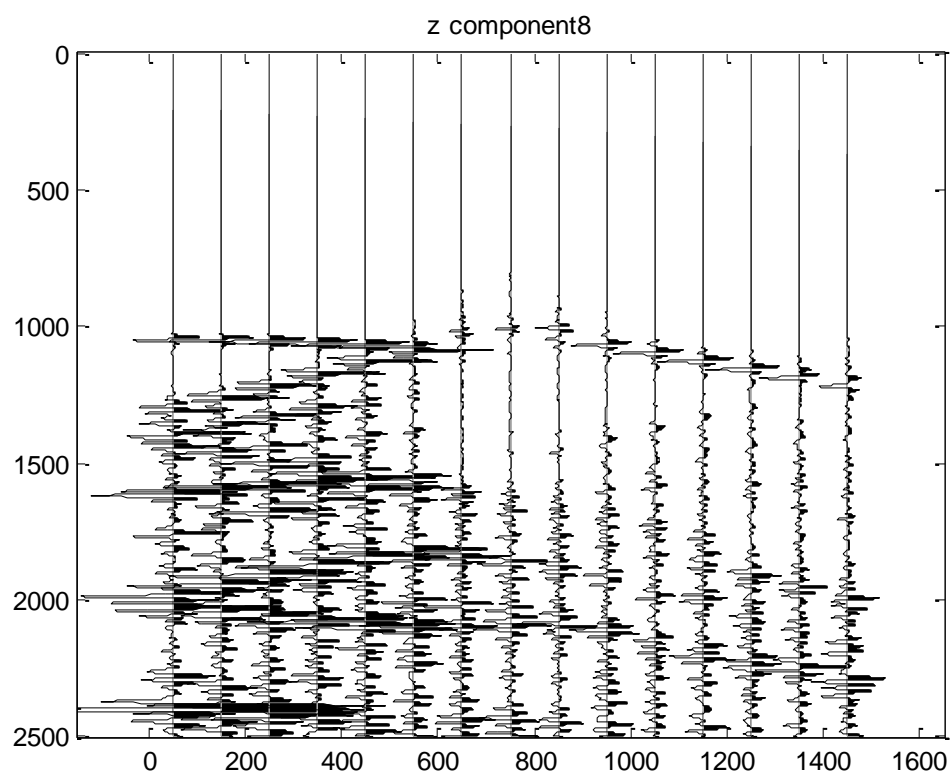
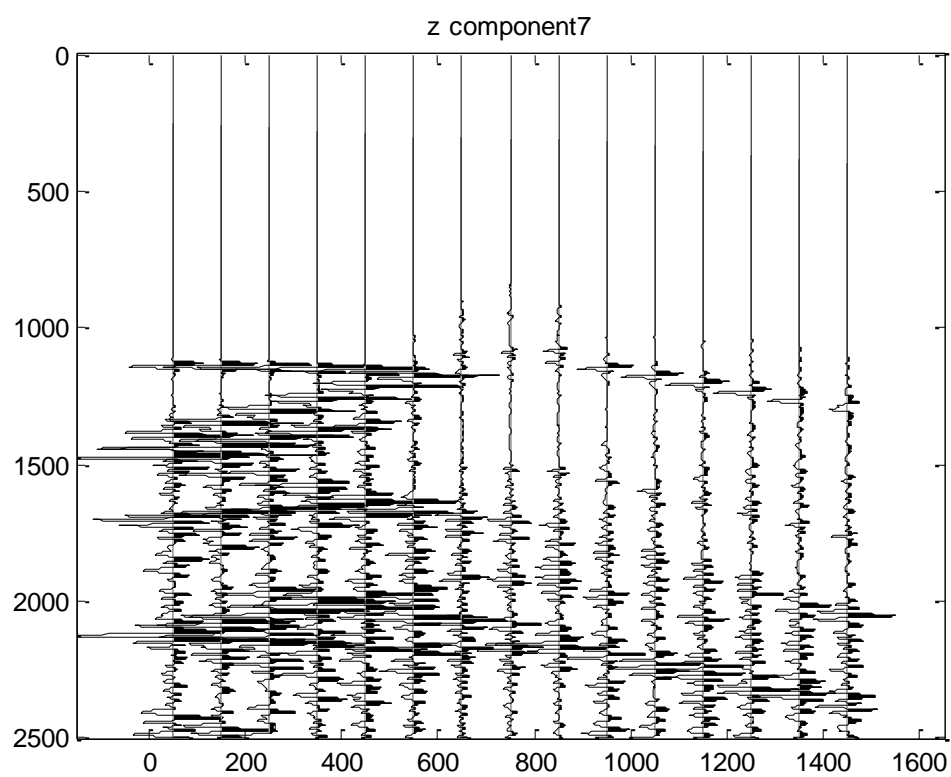
Παράρτημα

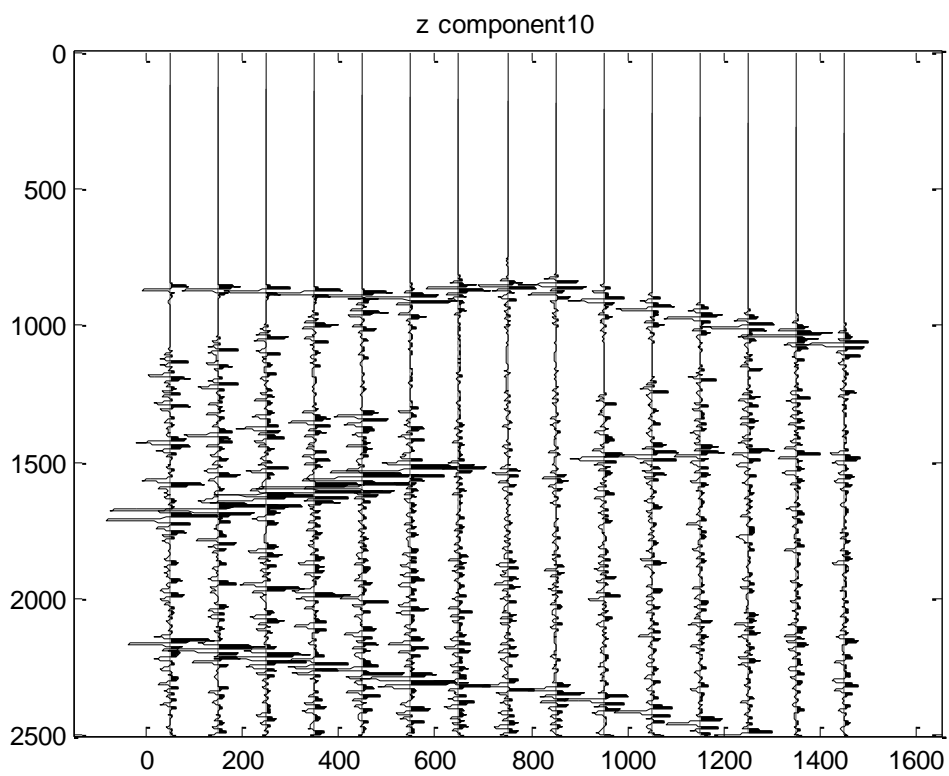
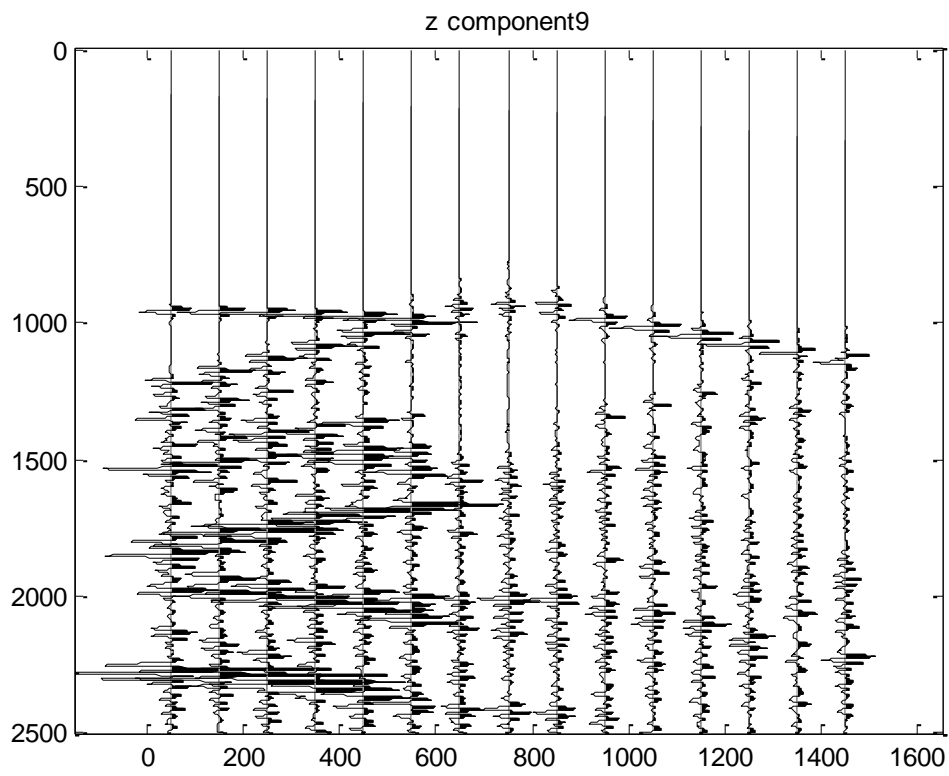
Ακολουθούν οι σεισμικές εικόνες κάθε πηγής. Στον οριζόντιο άξονα είναι τα βάθη των γεωφώνων (m), και στον κατακόρυφο ο χρόνος καταγραφής σε msec.

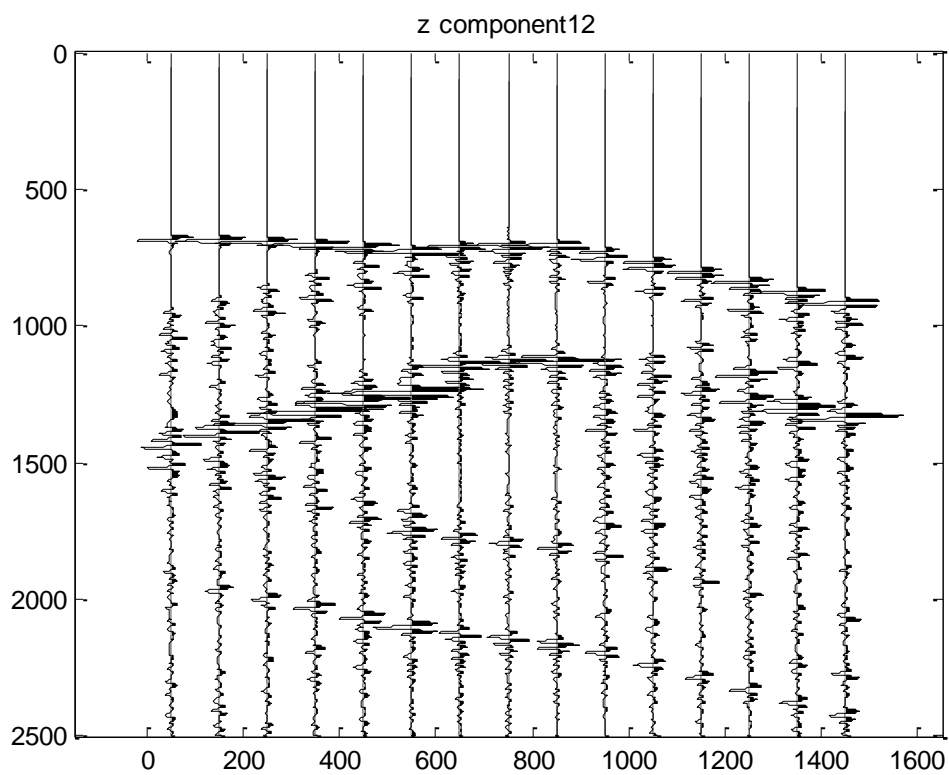
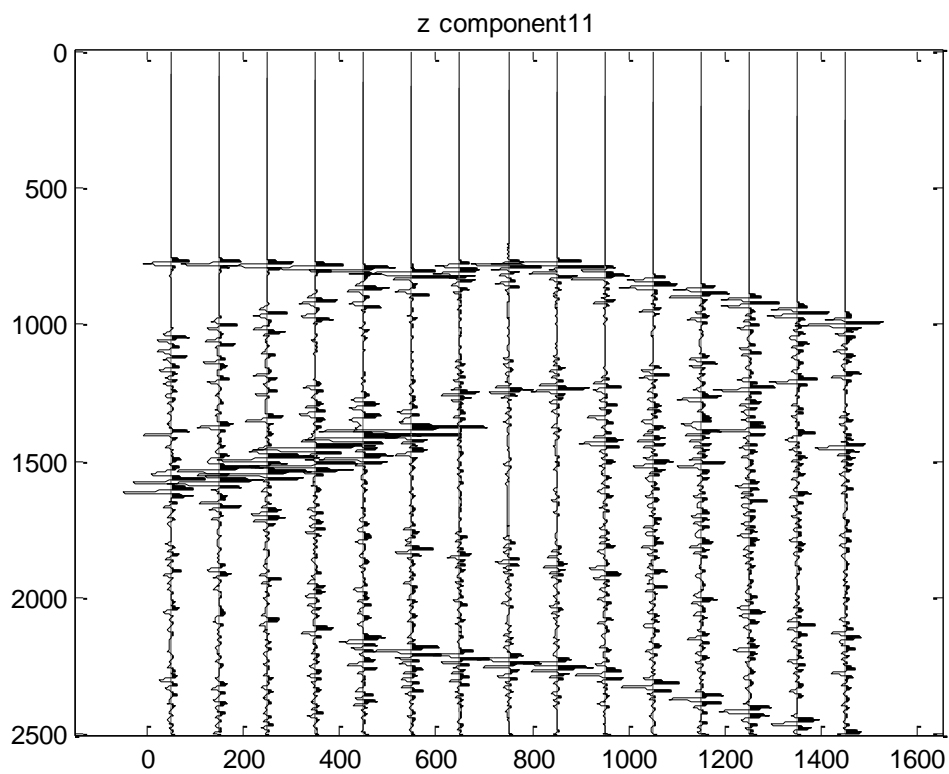


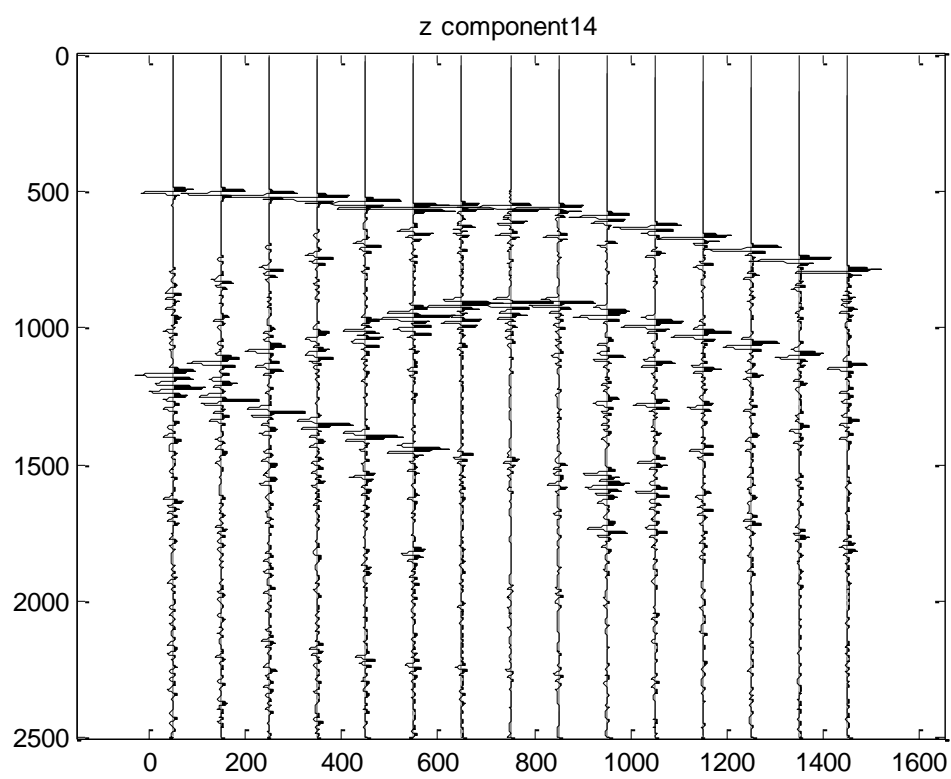
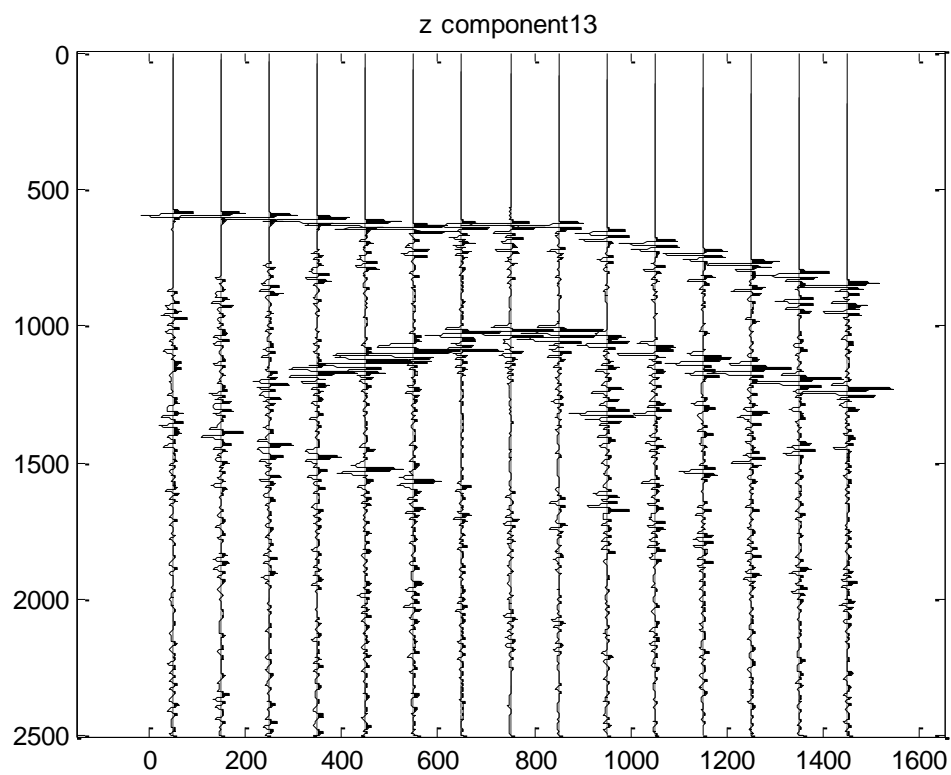


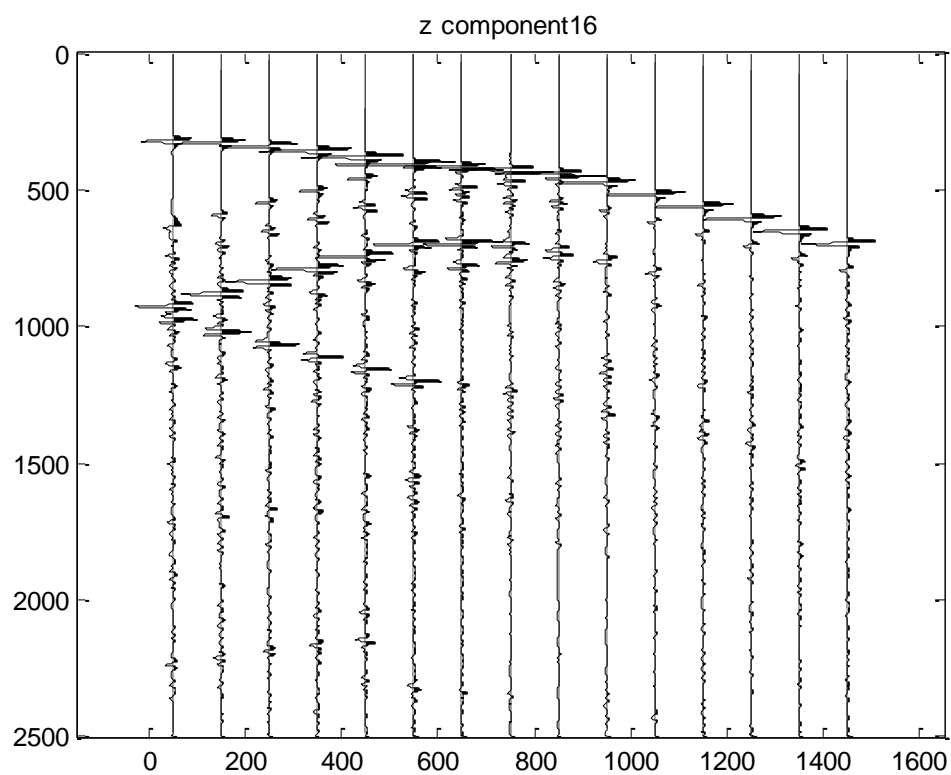
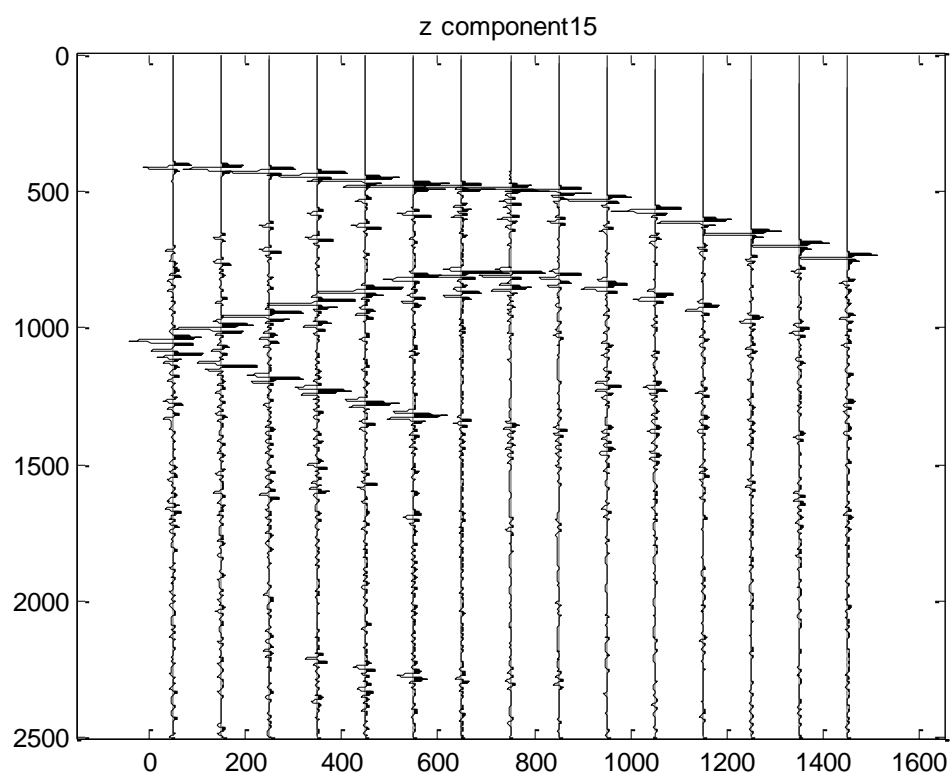


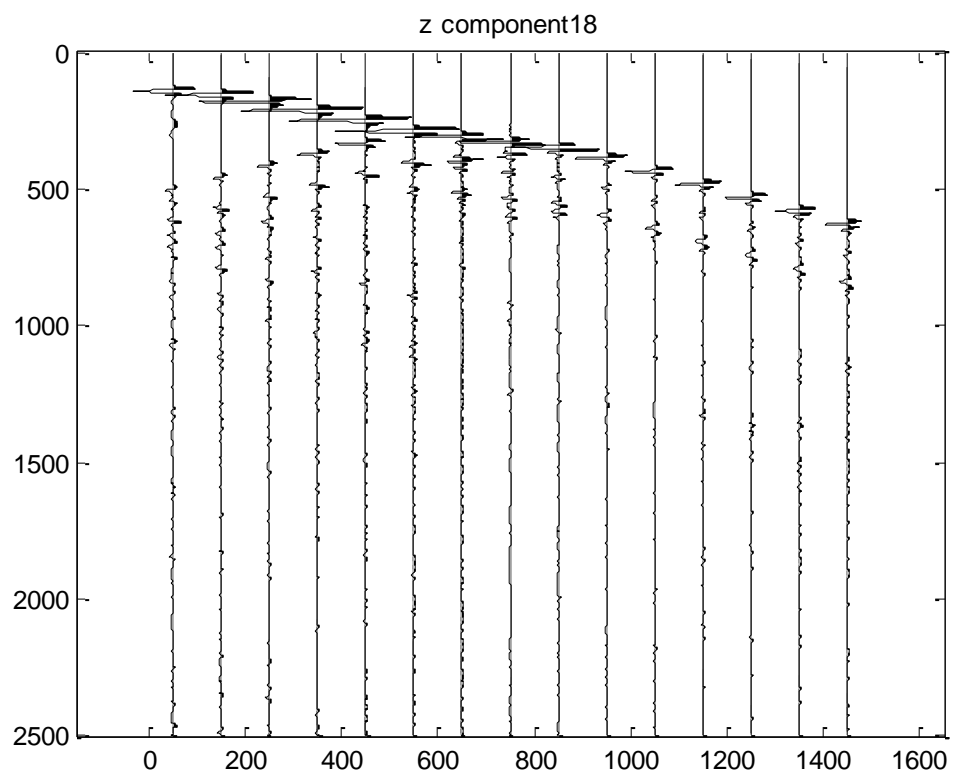
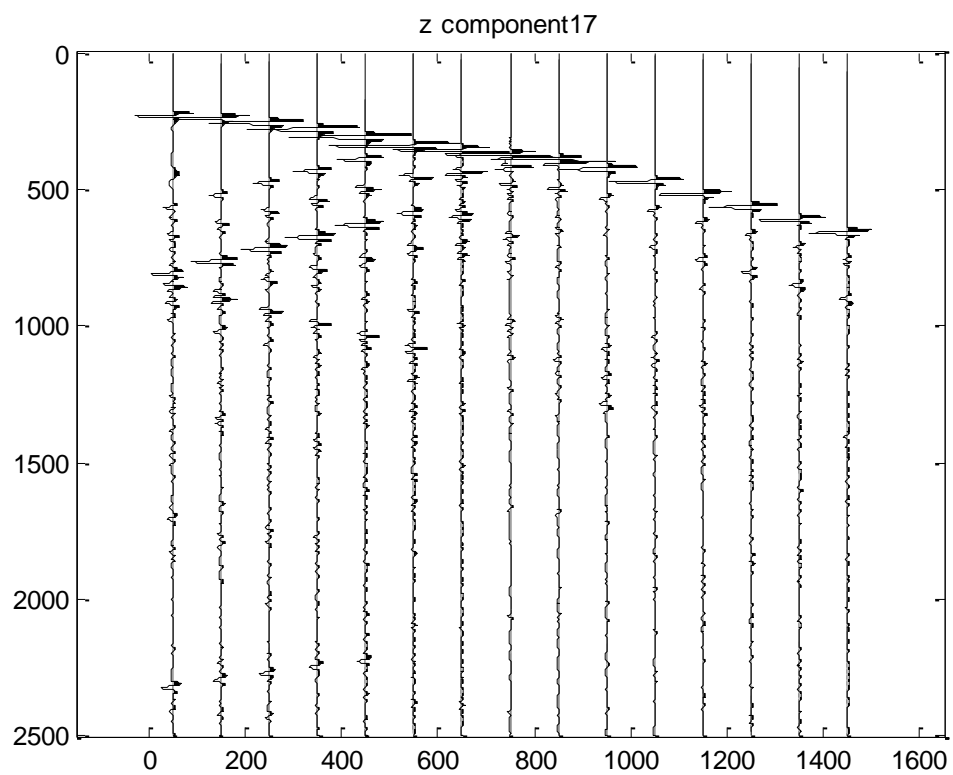


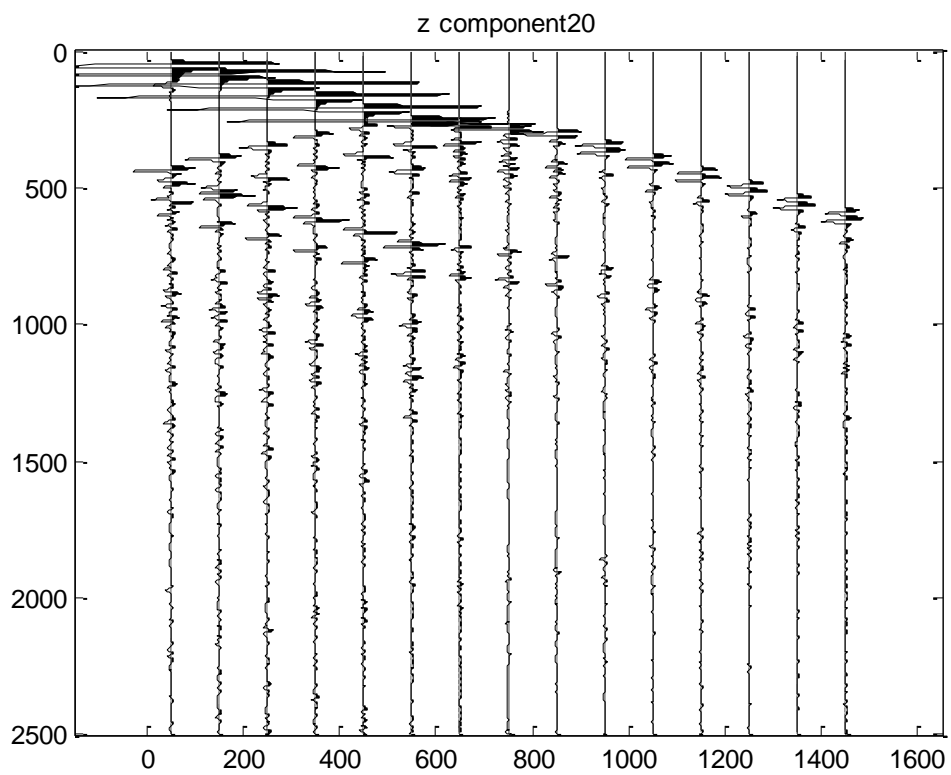
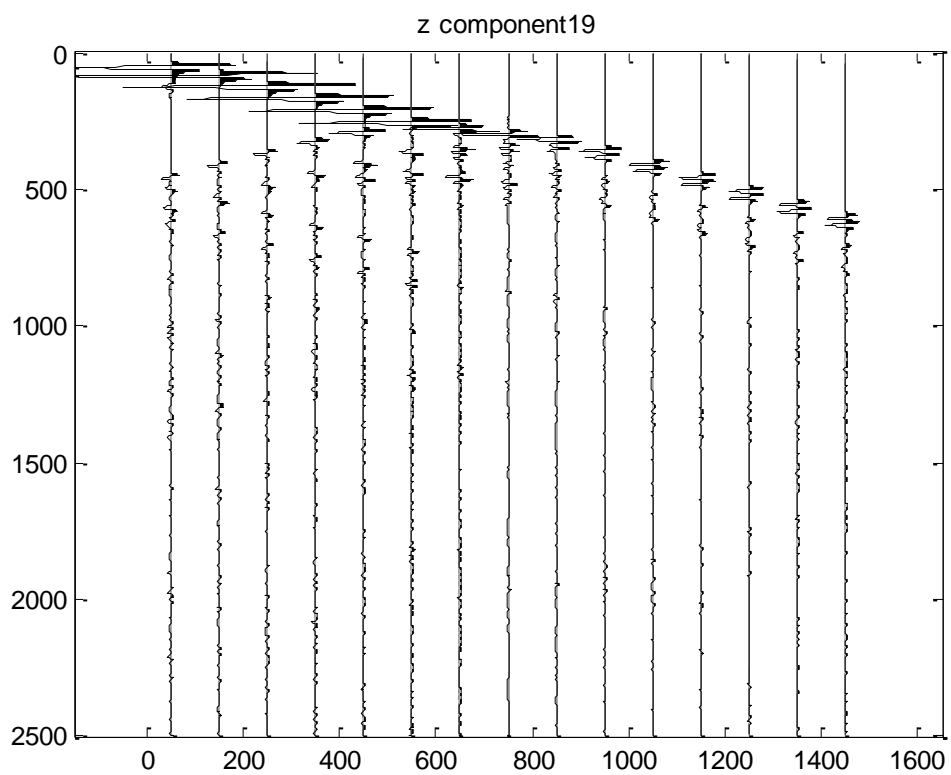


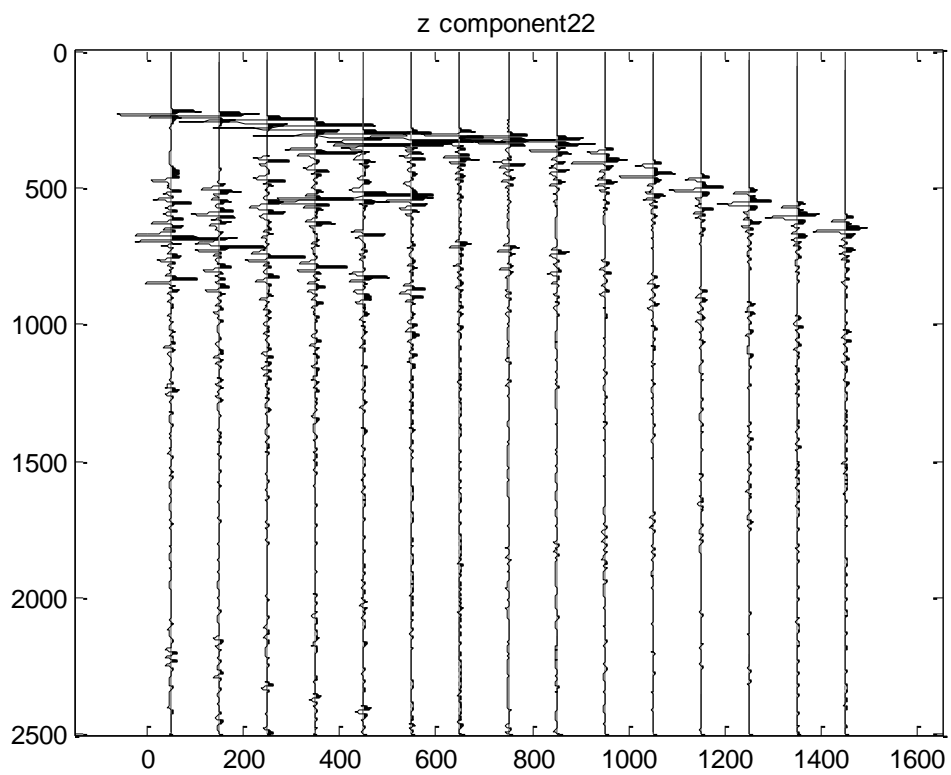
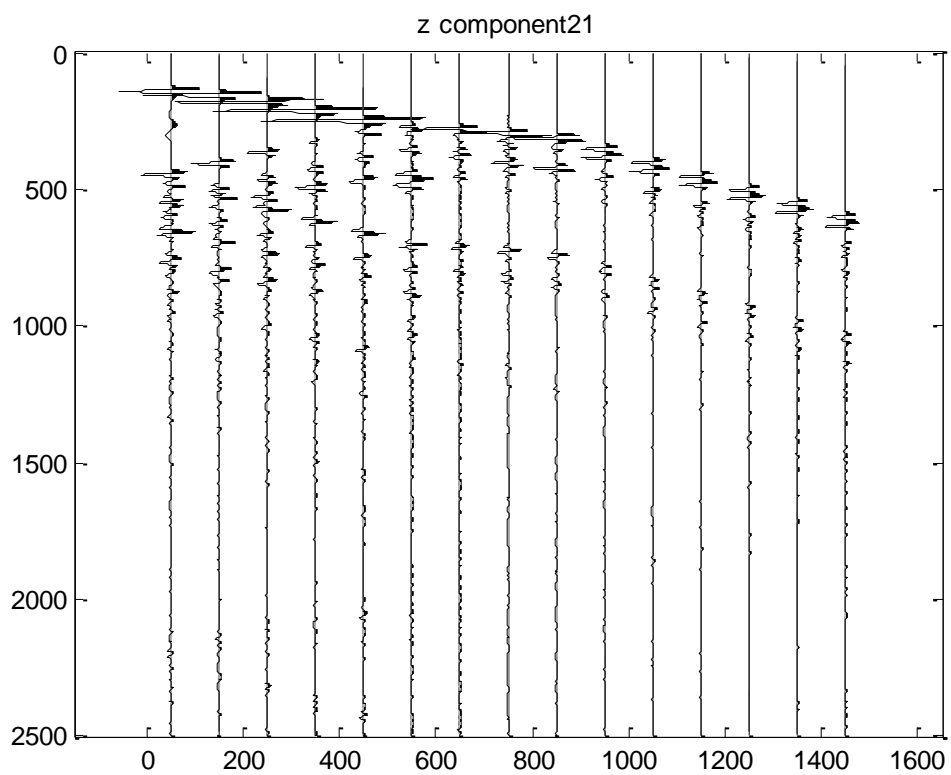


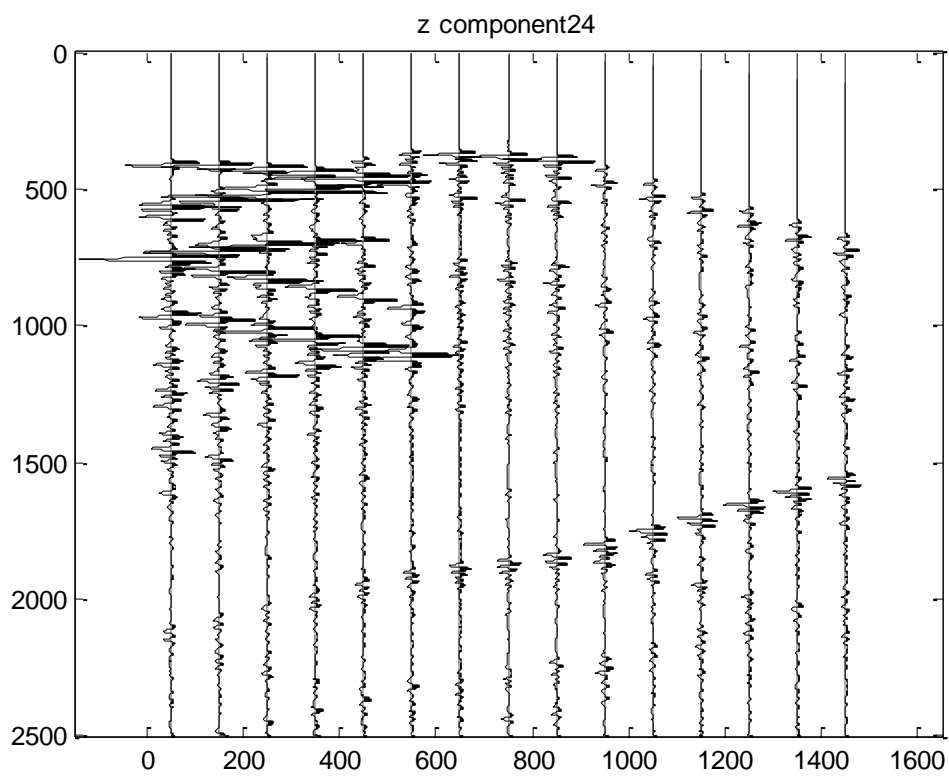
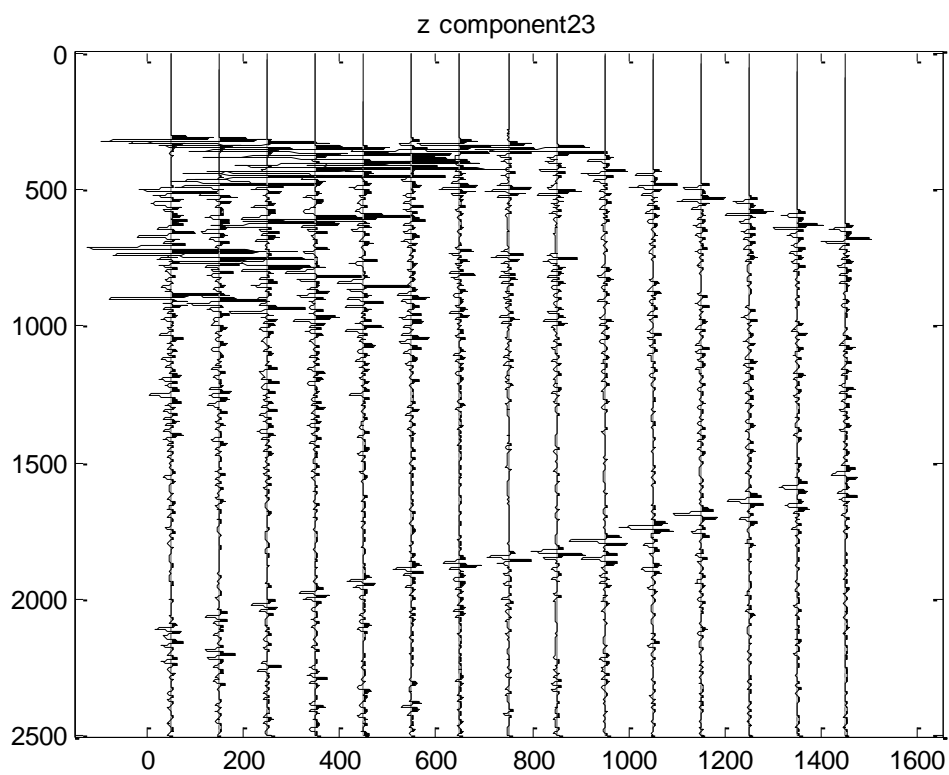


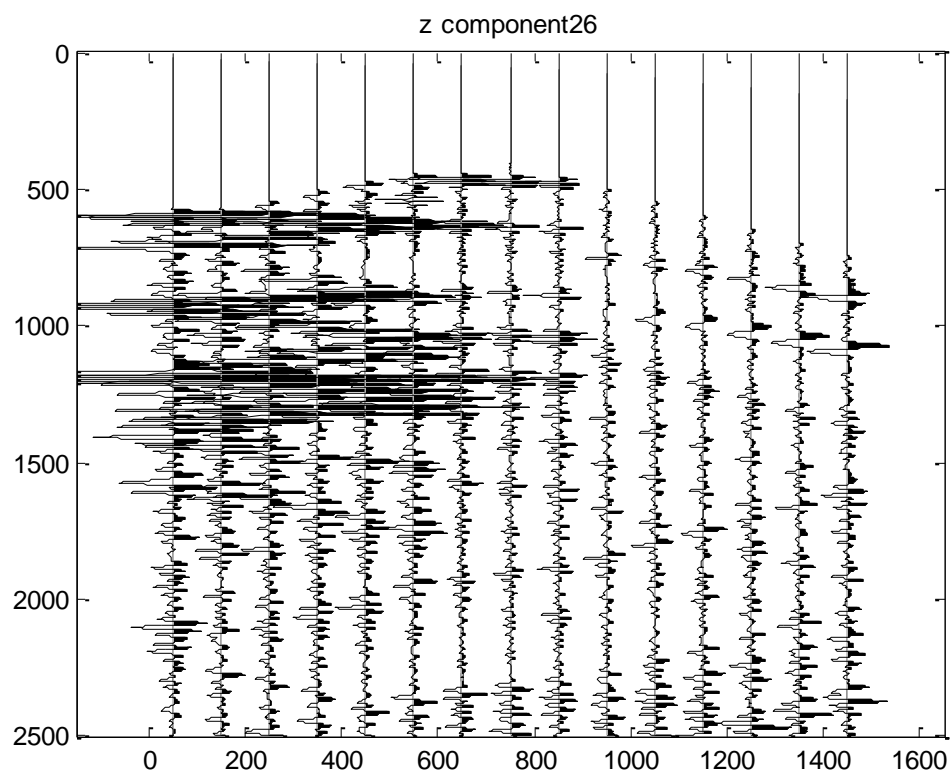
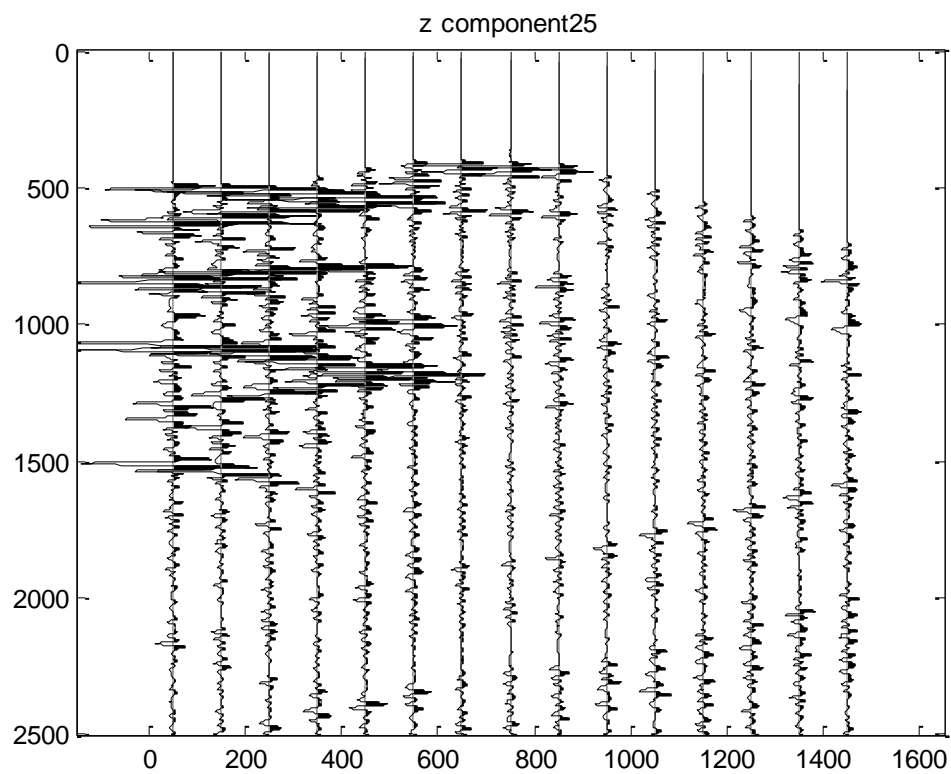




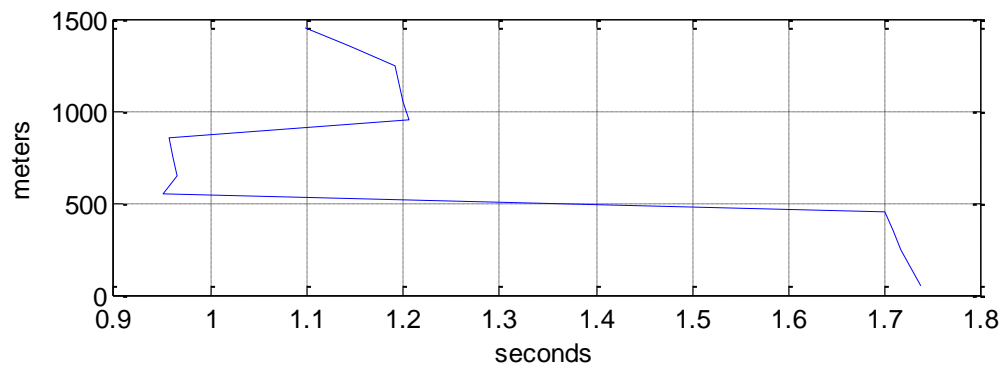
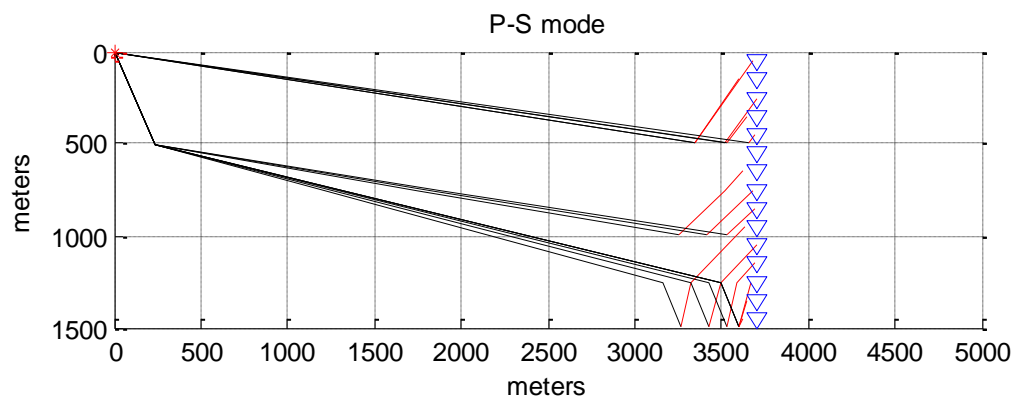
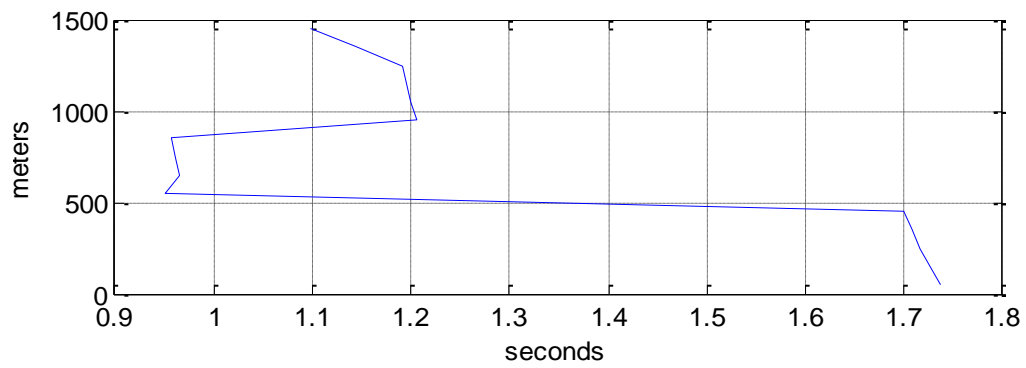
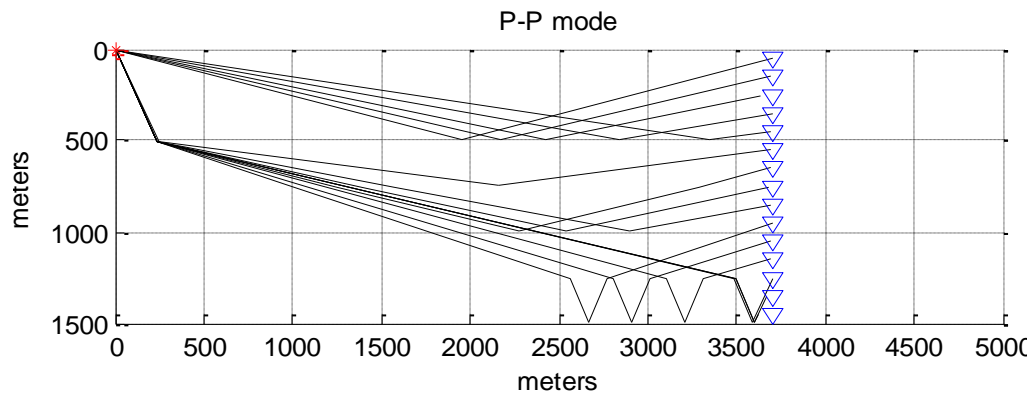


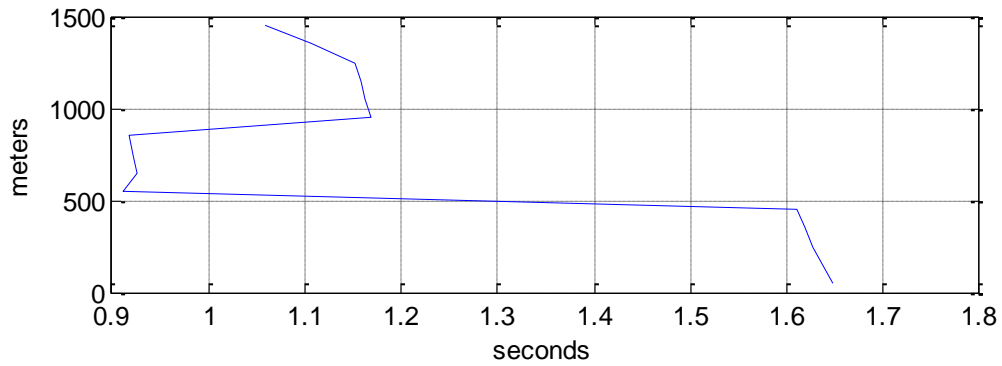
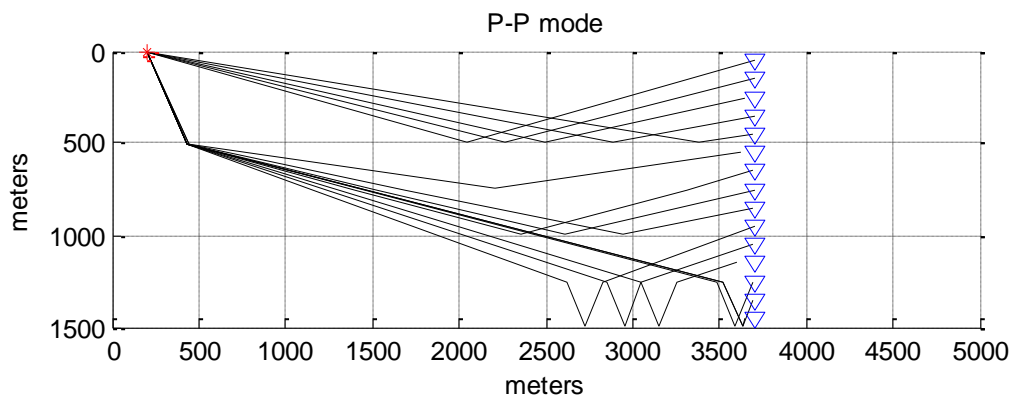




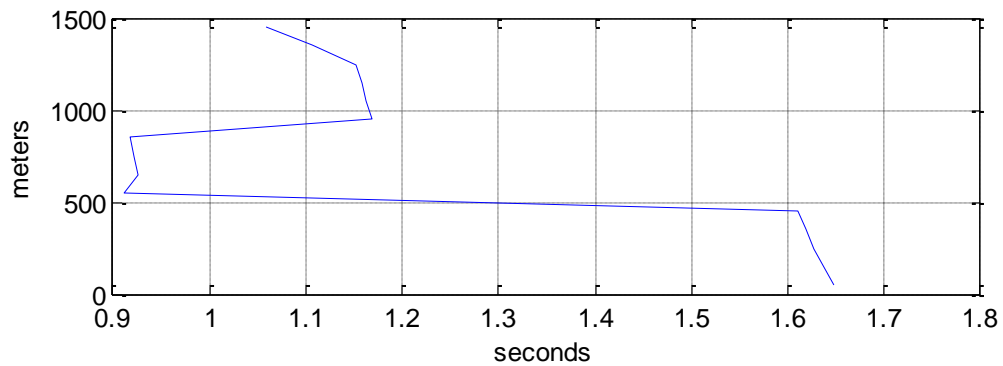
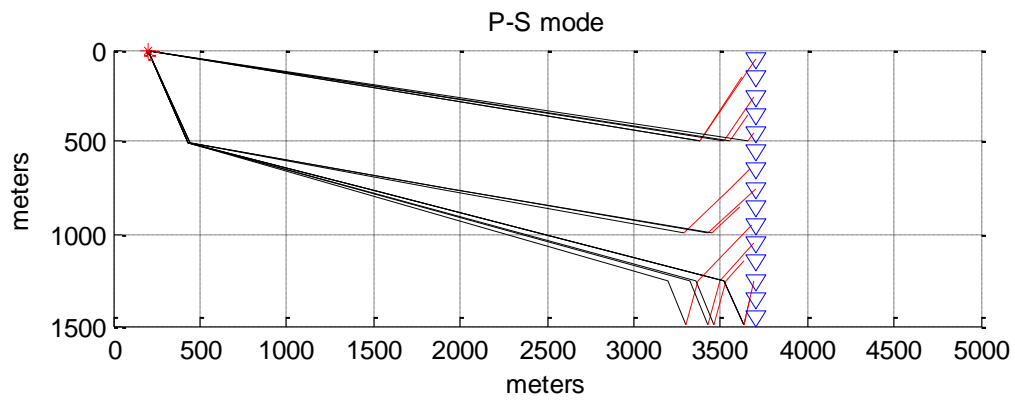


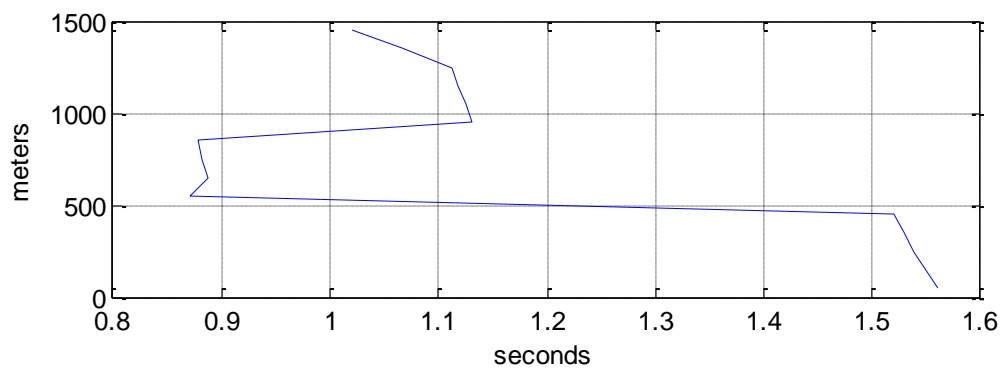
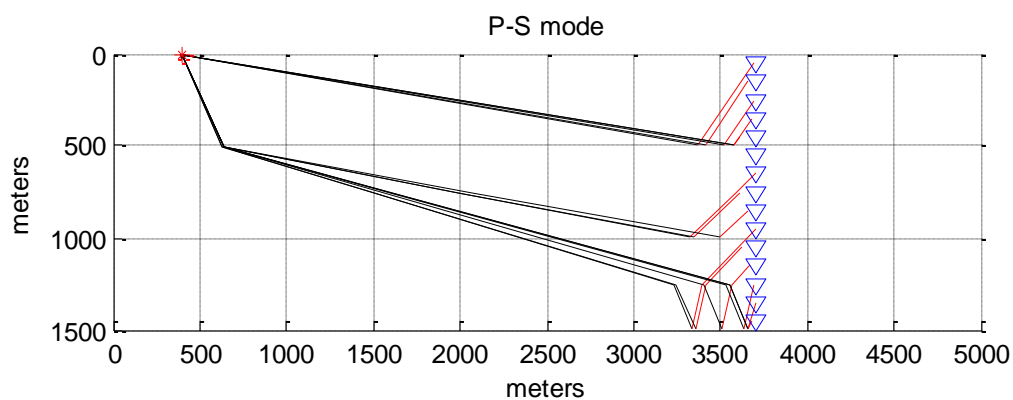
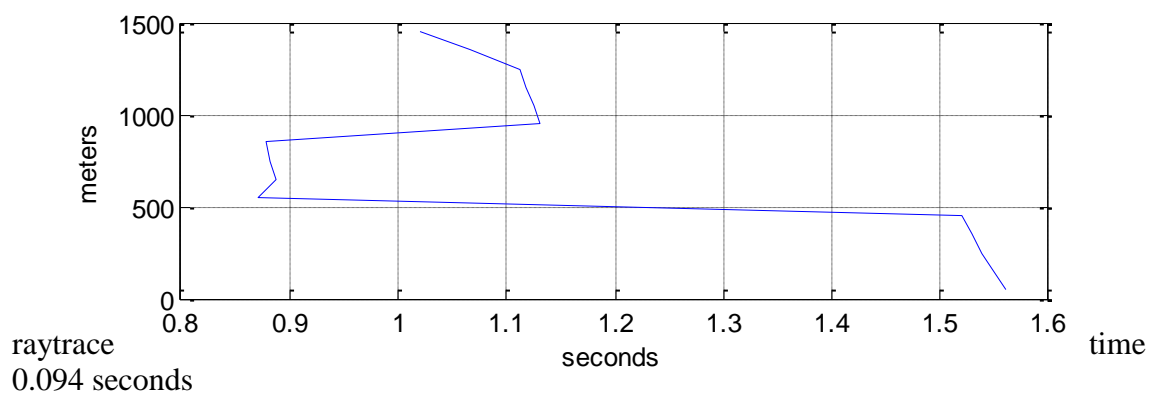
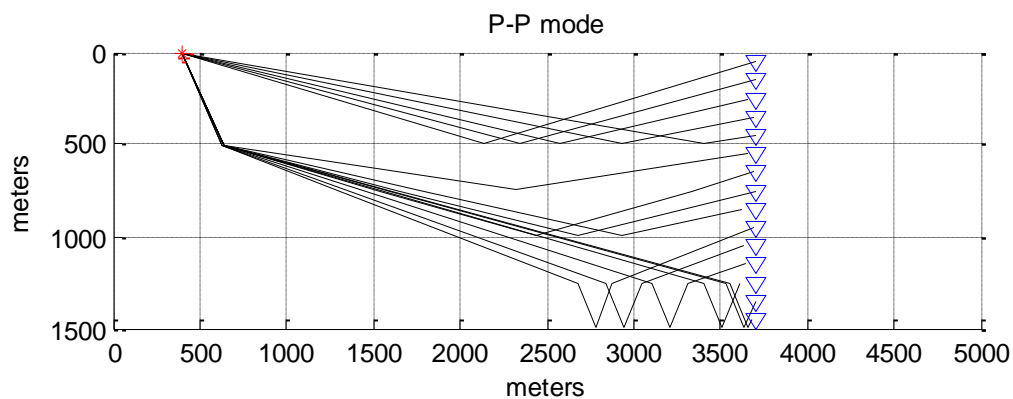
raytrace time 0.11 seconds

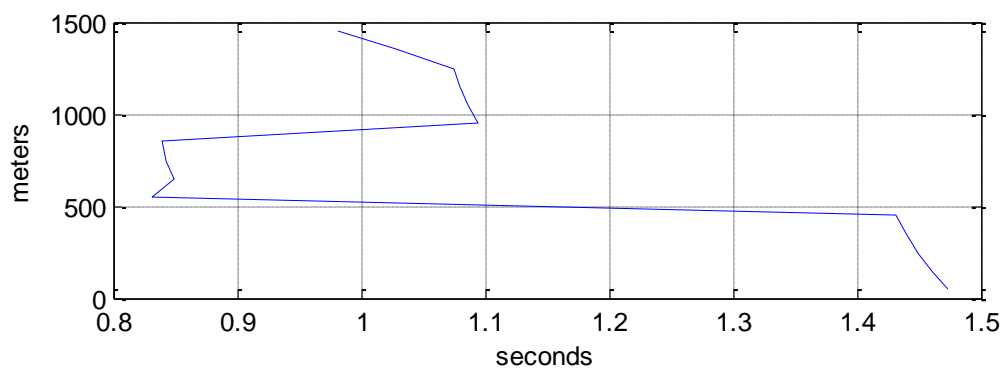
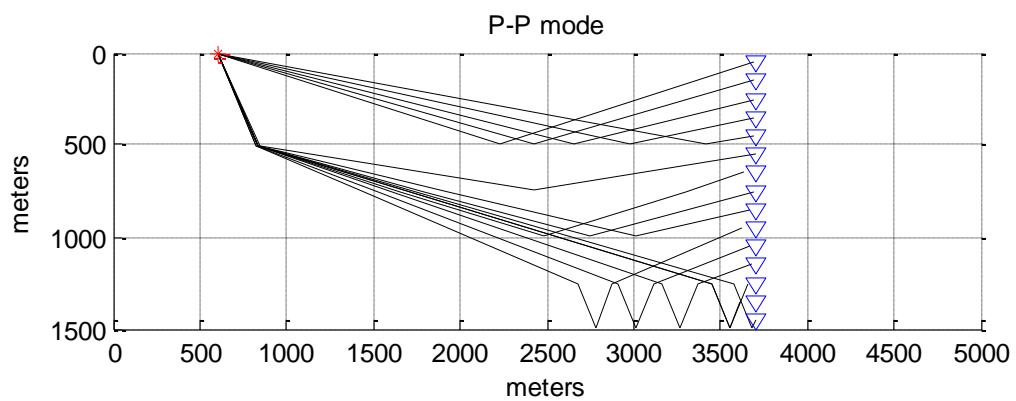




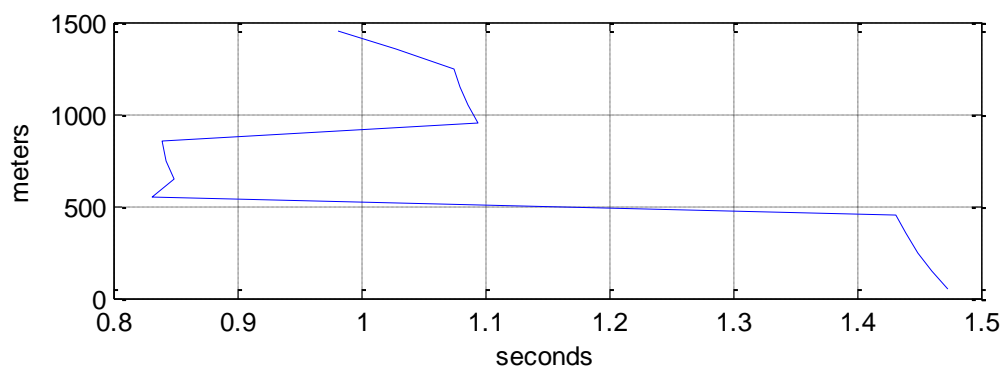
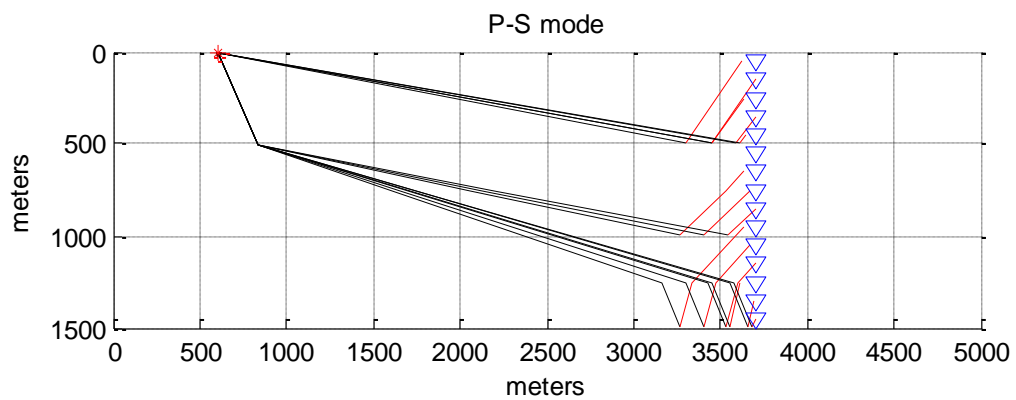
raytrace time 0.11 seconds

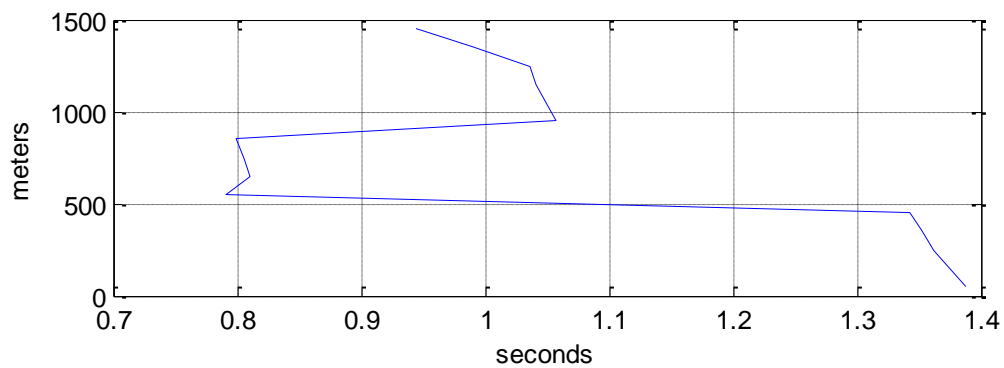
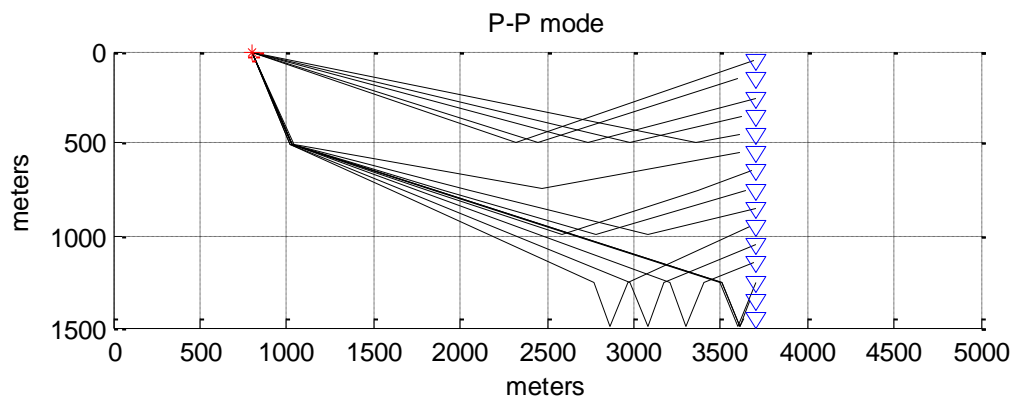




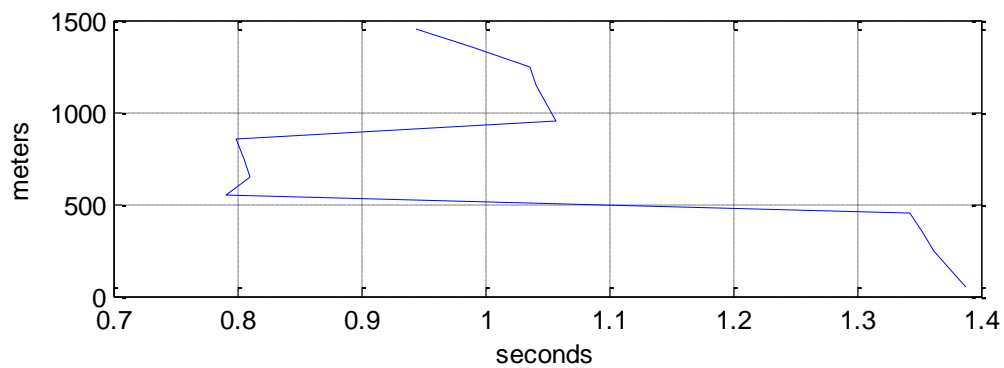
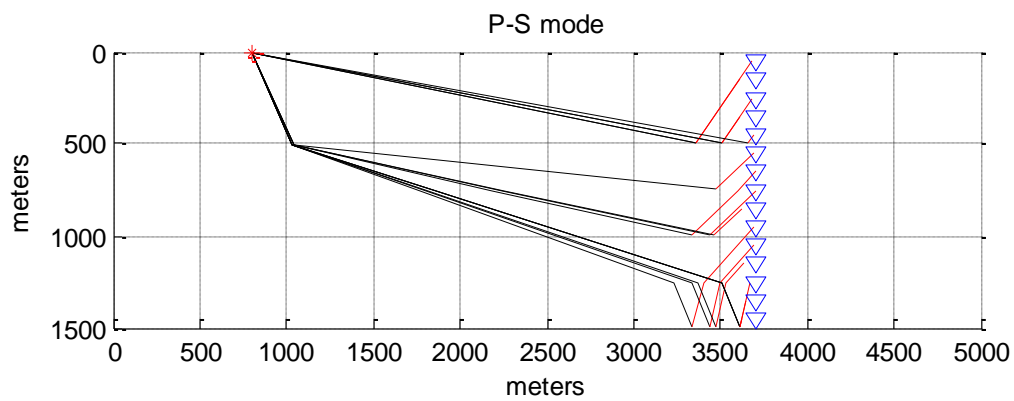


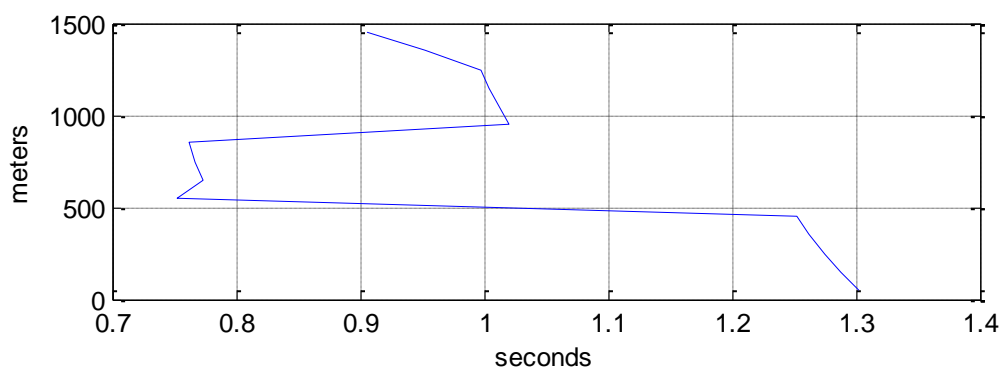
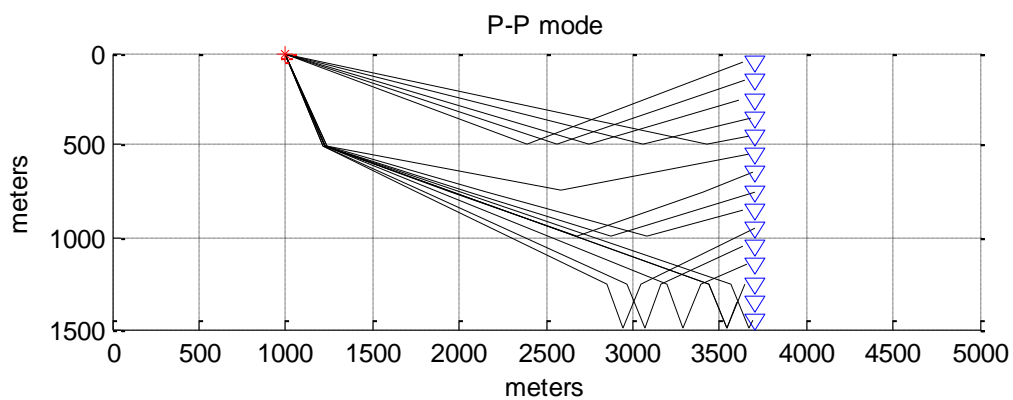
raytrace time 0.109 seconds



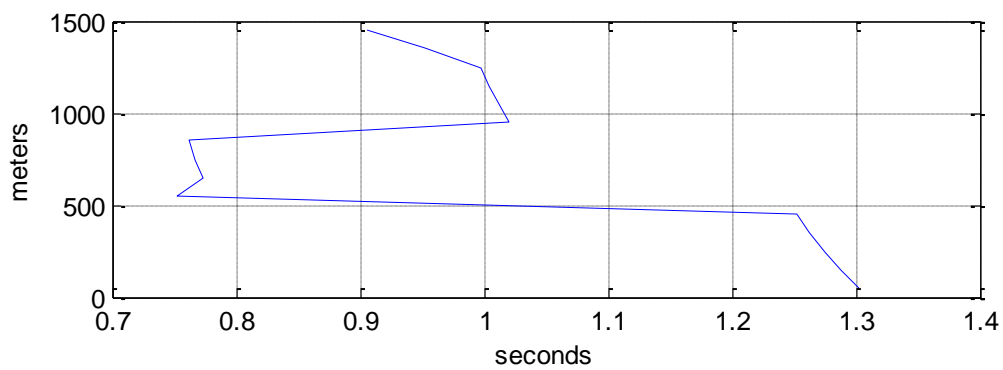
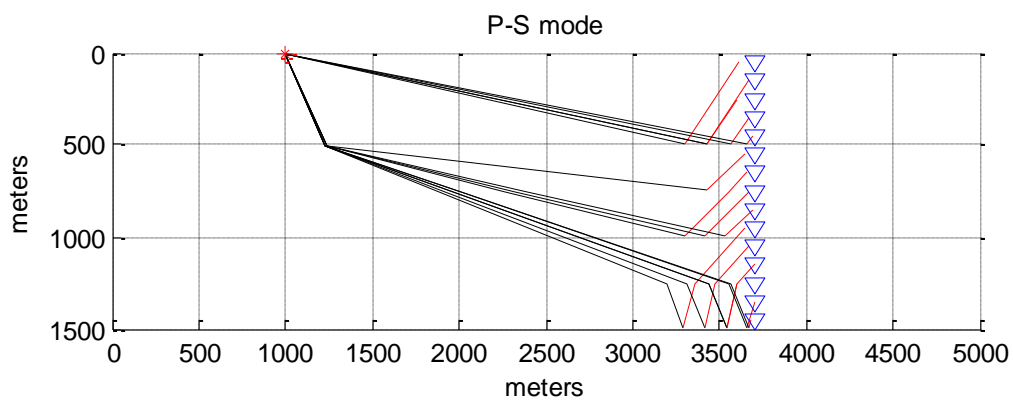


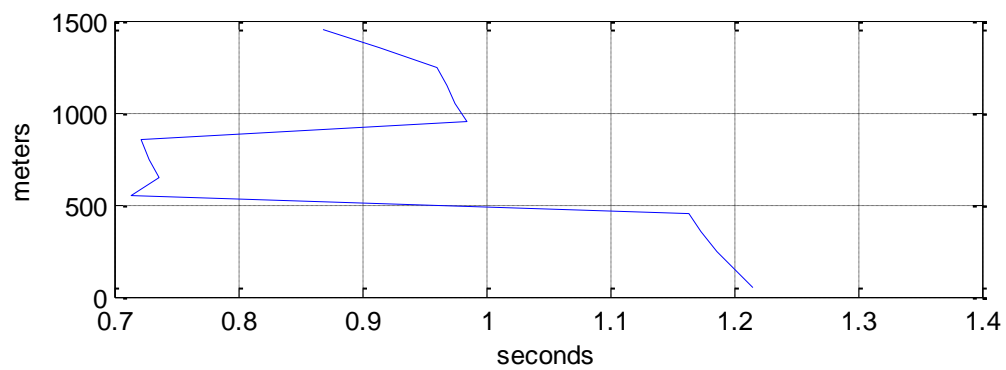
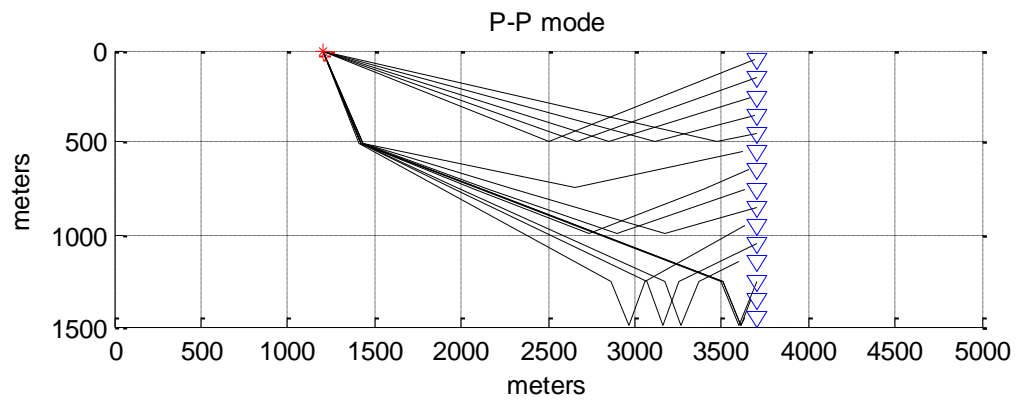
raytrace time 0.093 seconds



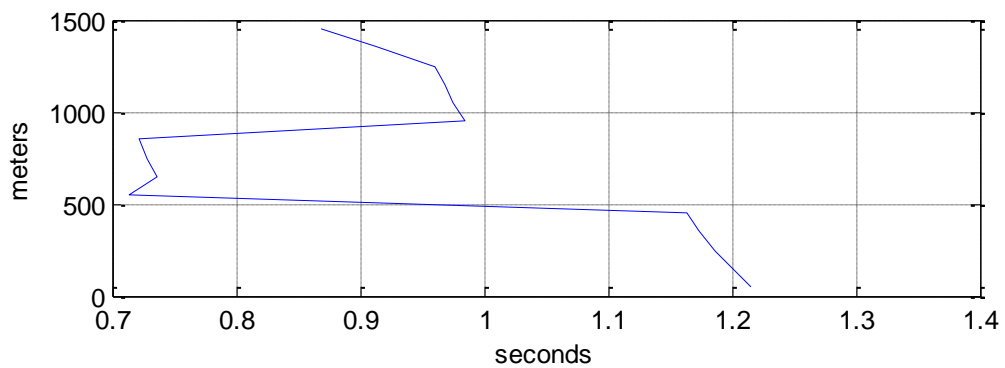
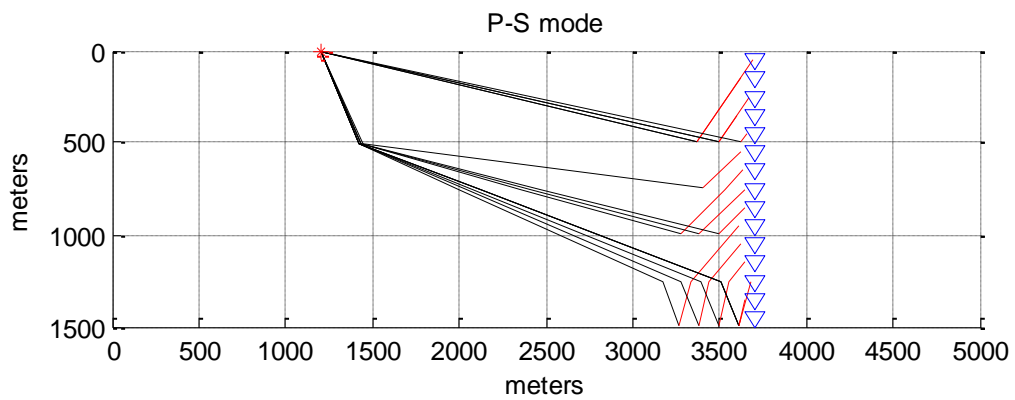


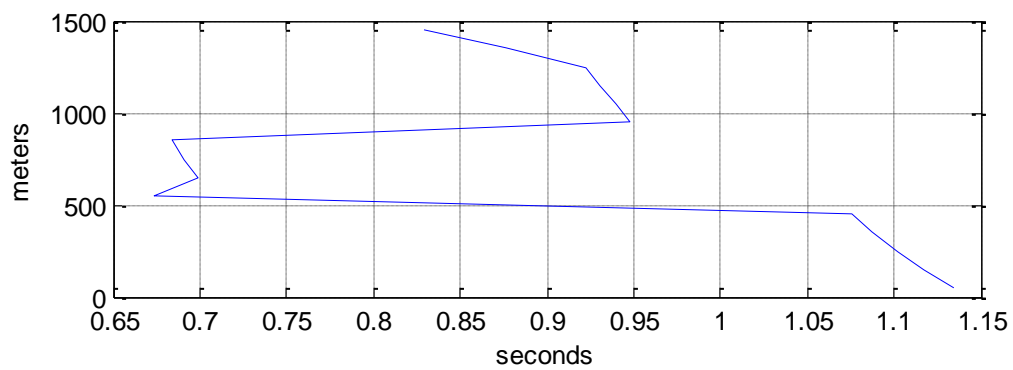
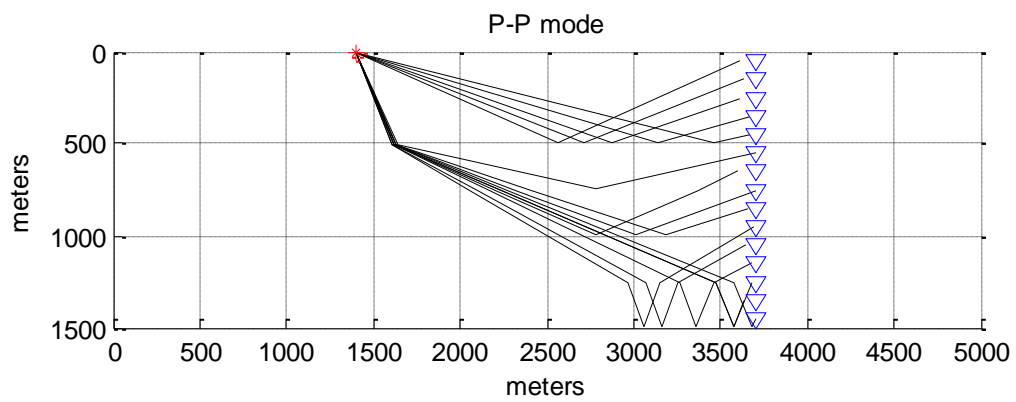
raytrace time 0.094 seconds



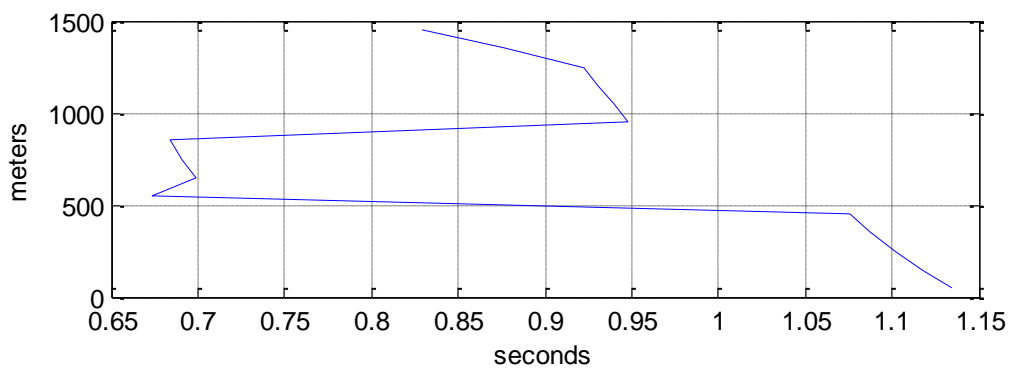
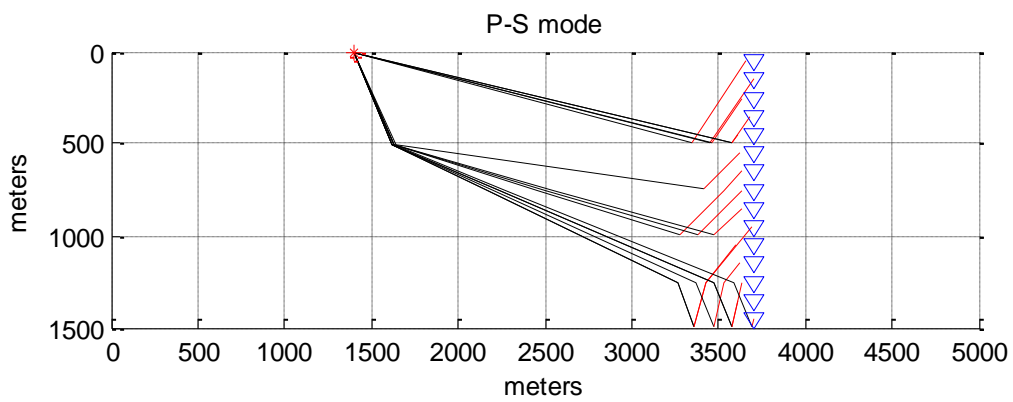


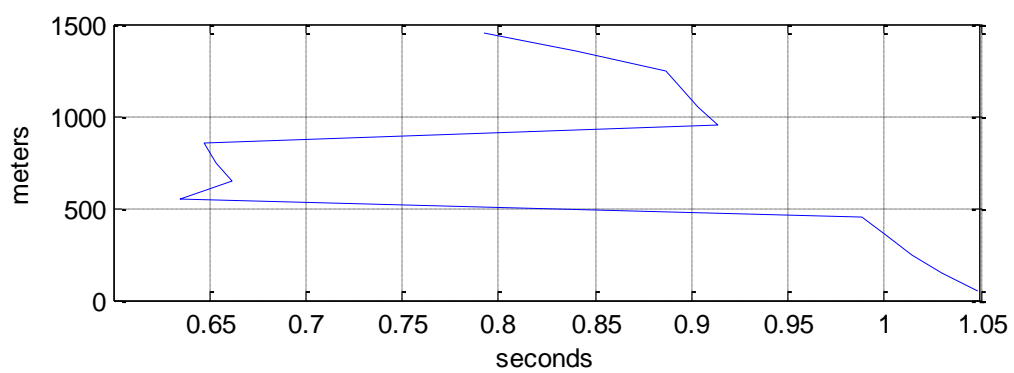
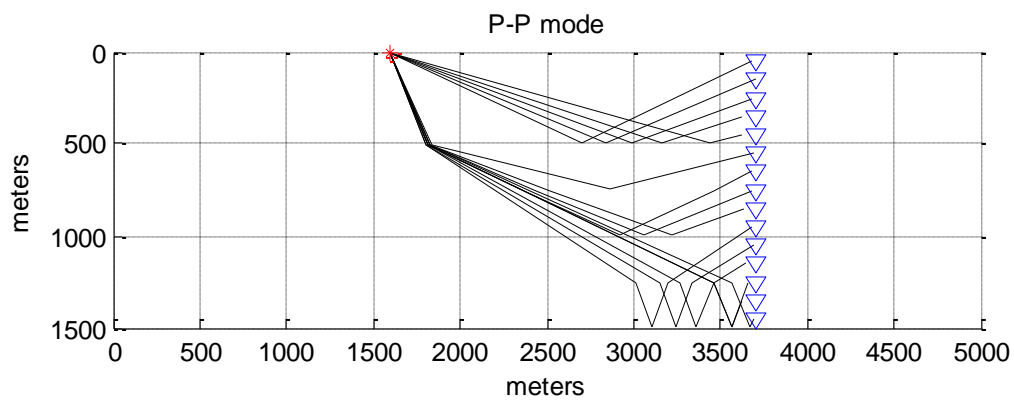
raytrace time 0.094 seconds



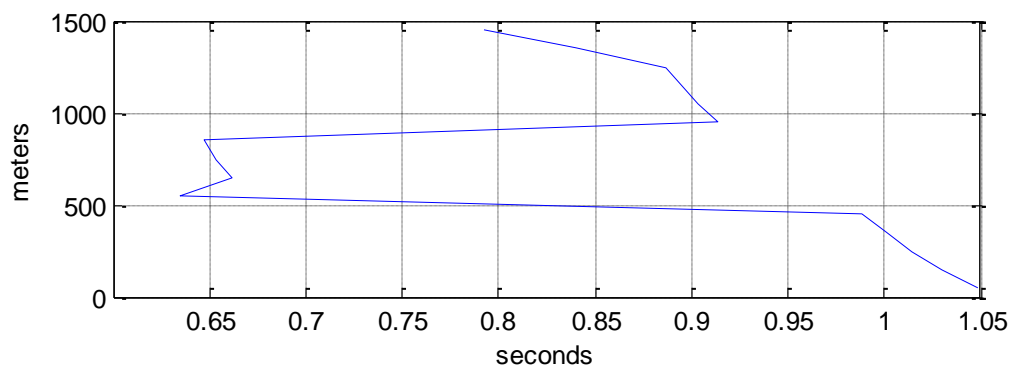
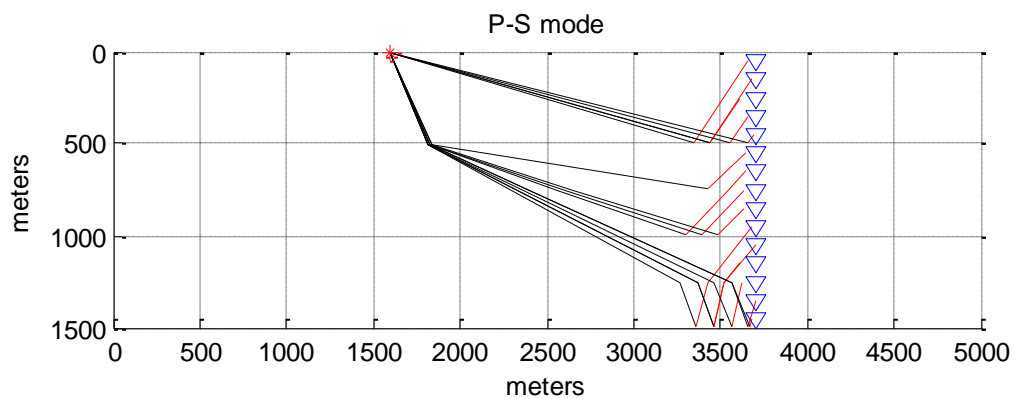


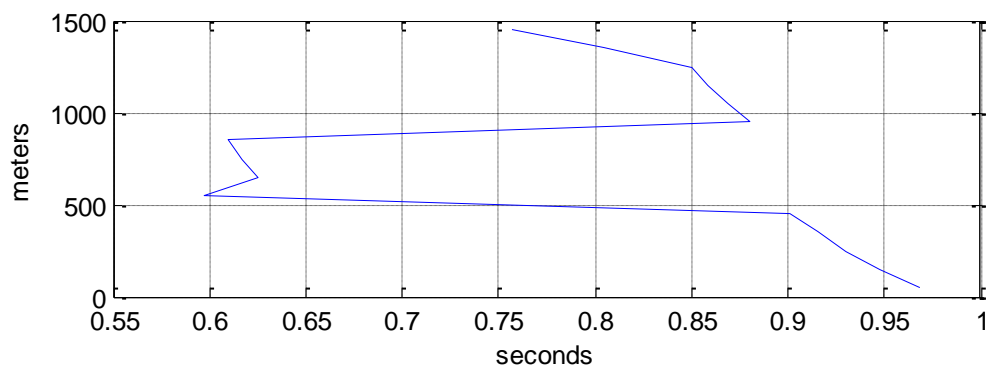
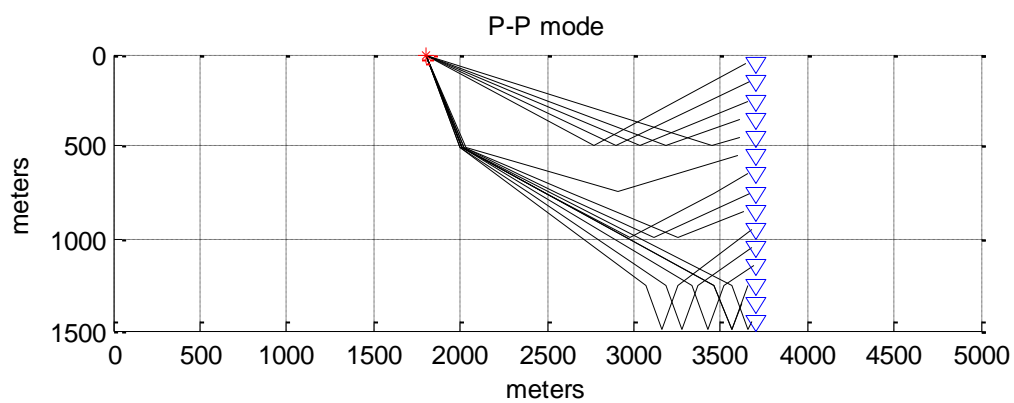
raytrace time 0.093 seconds



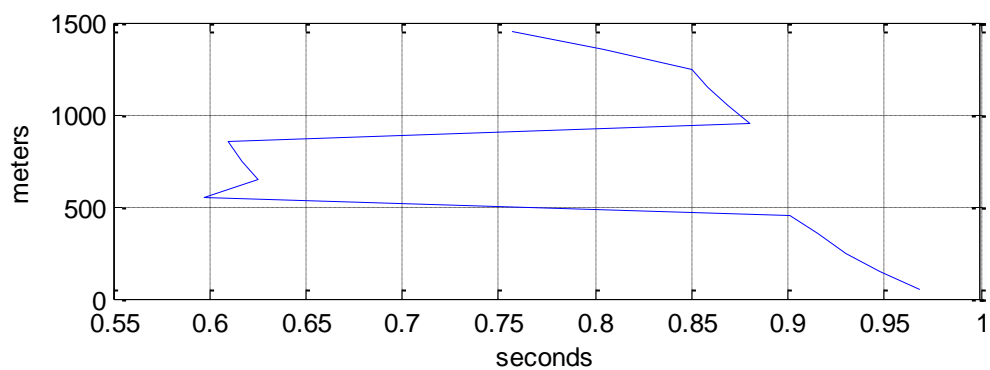
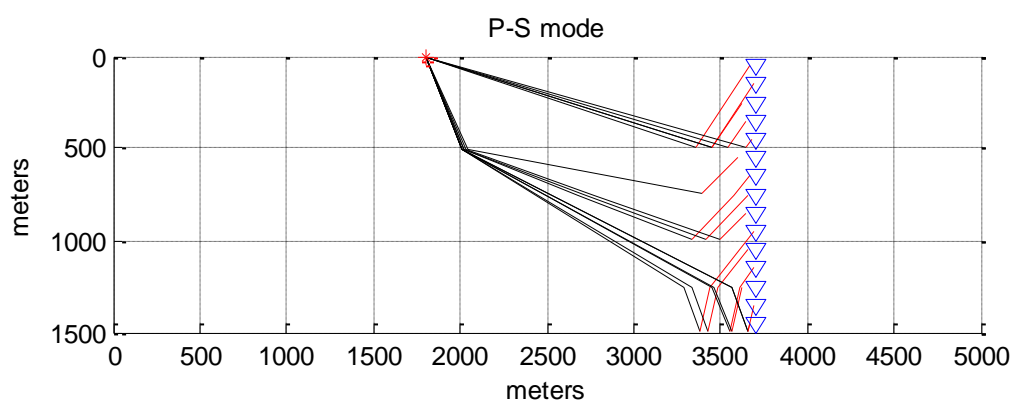


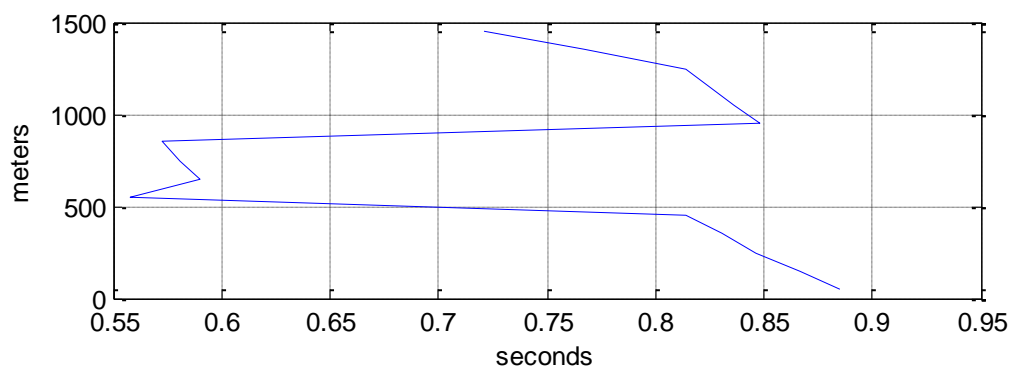
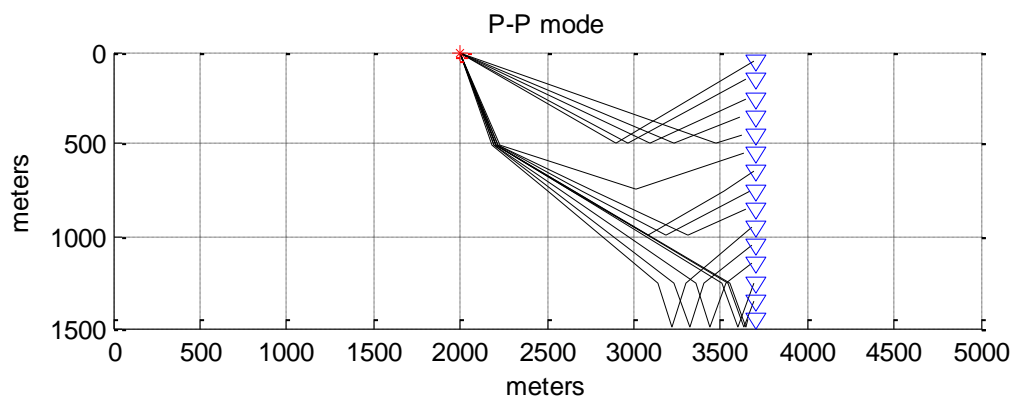
raytrace time 0.093 seconds



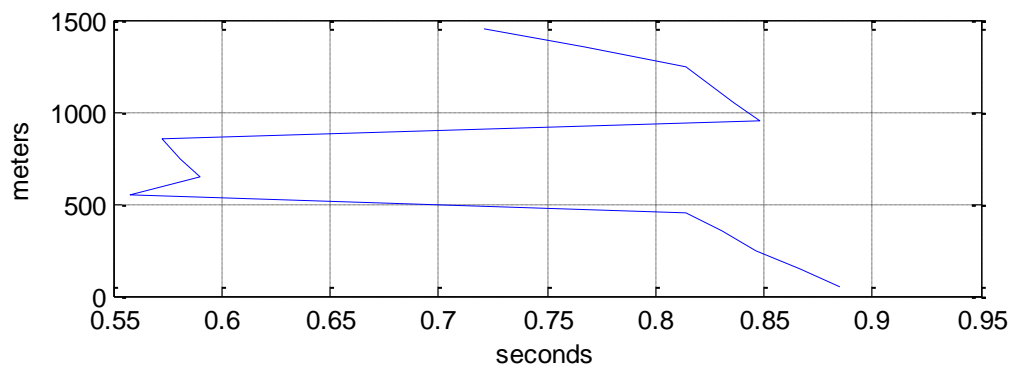
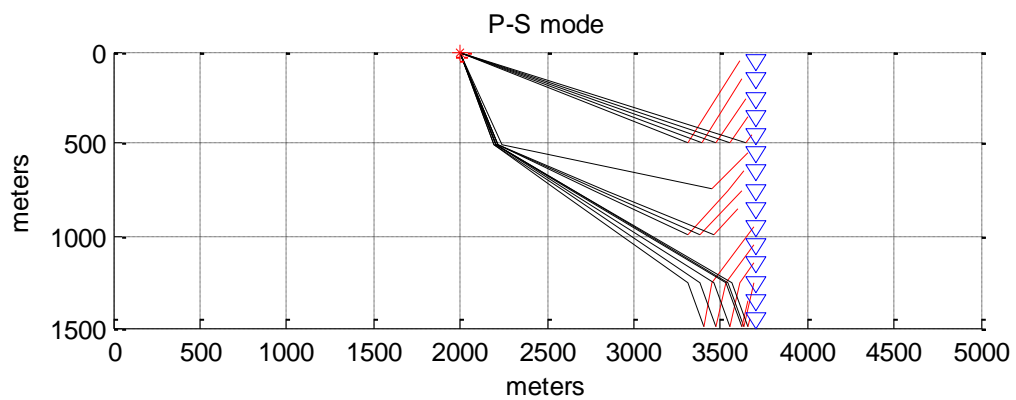


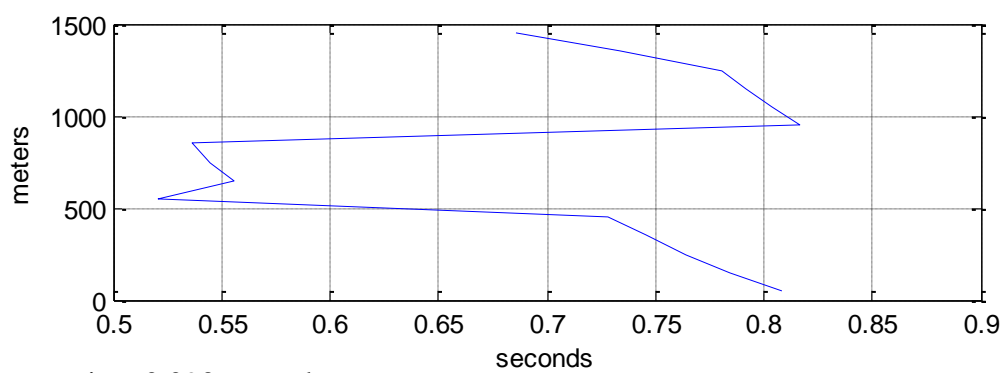
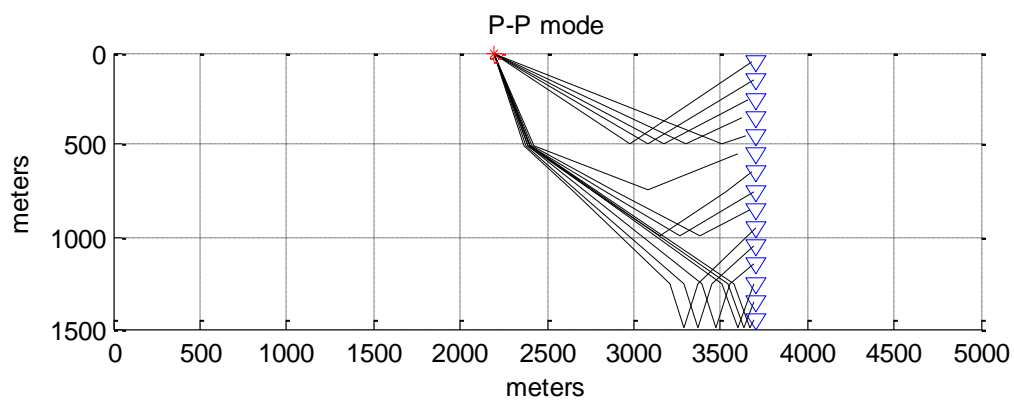
raytrace time 0.093 seconds



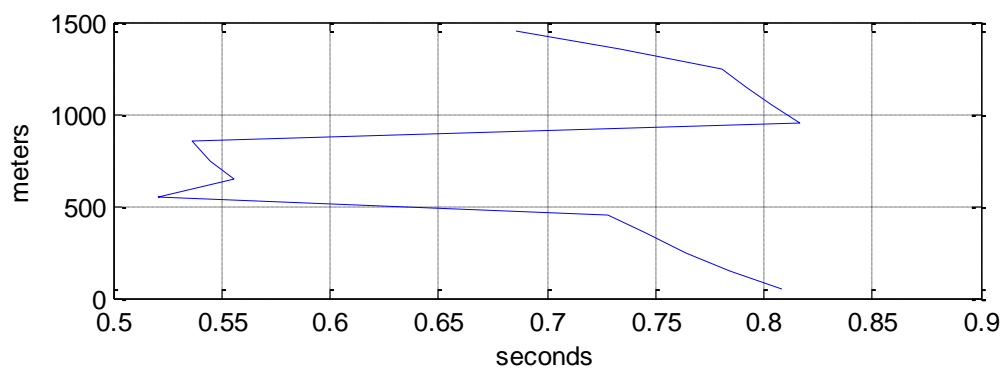
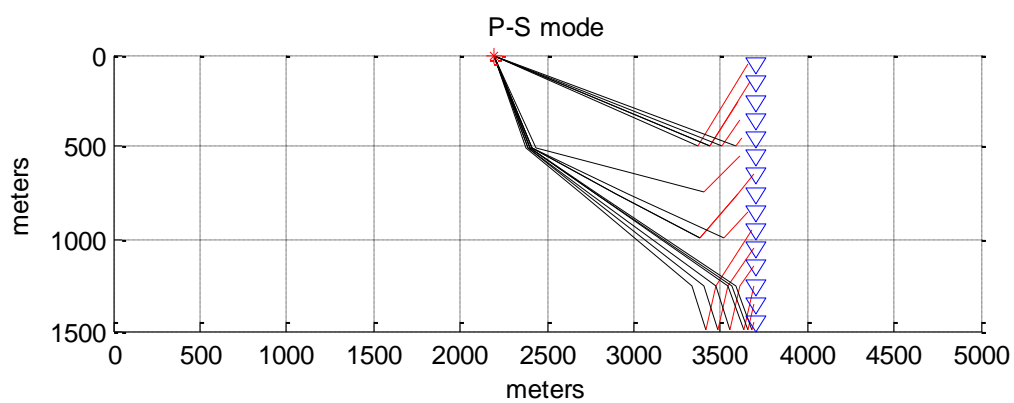


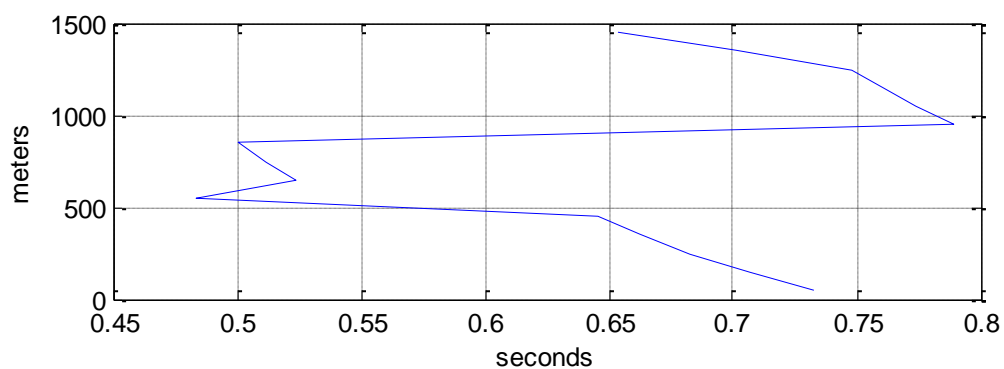
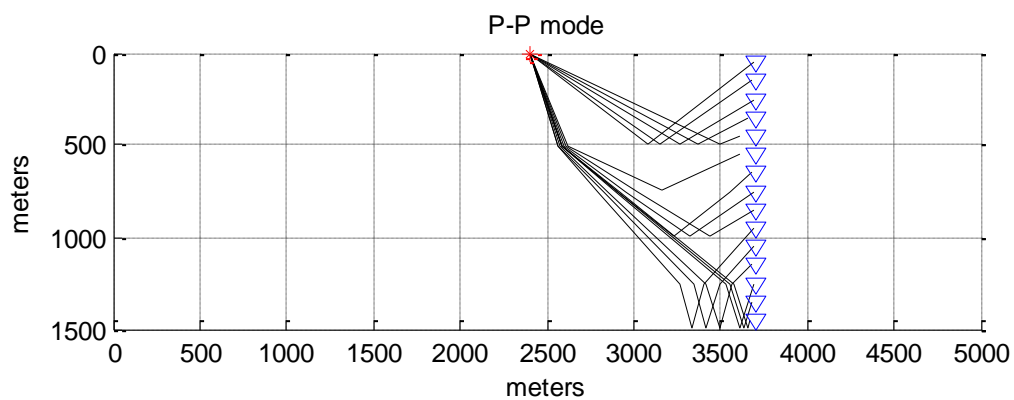
raytrace time 0.078 seconds



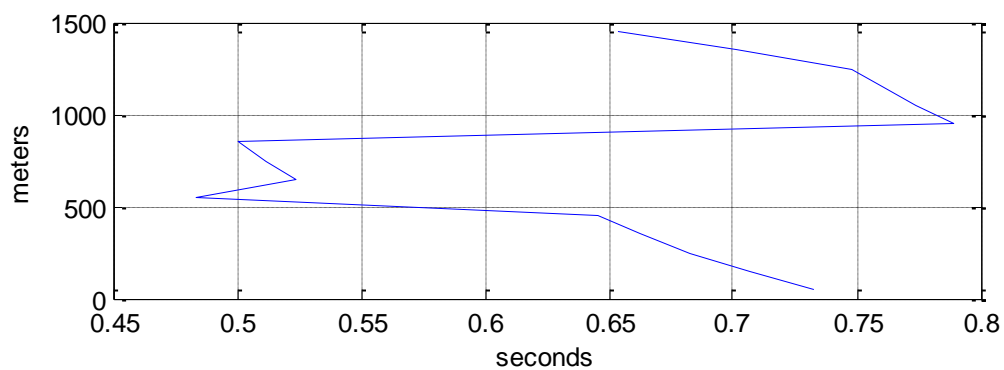
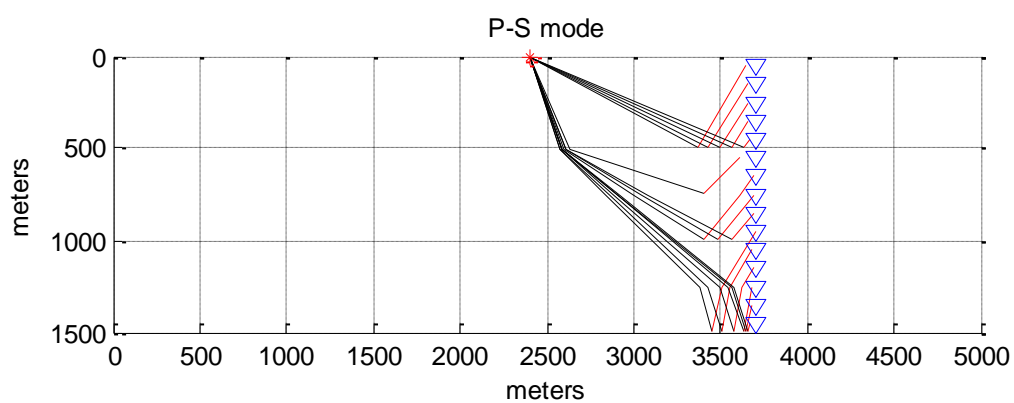


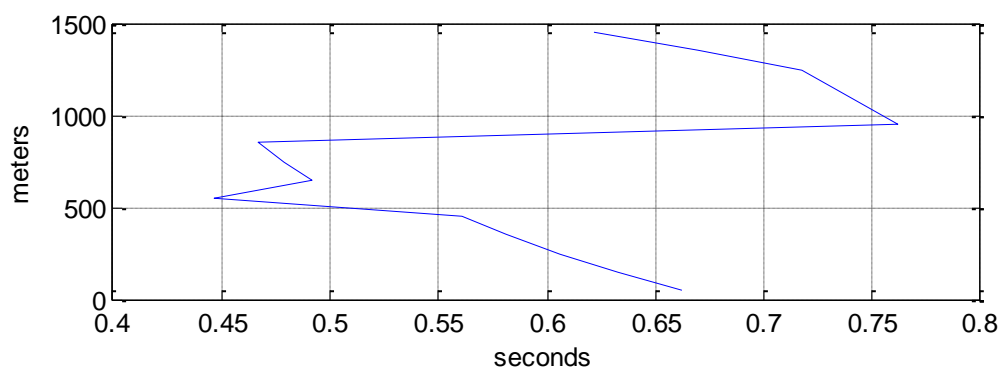
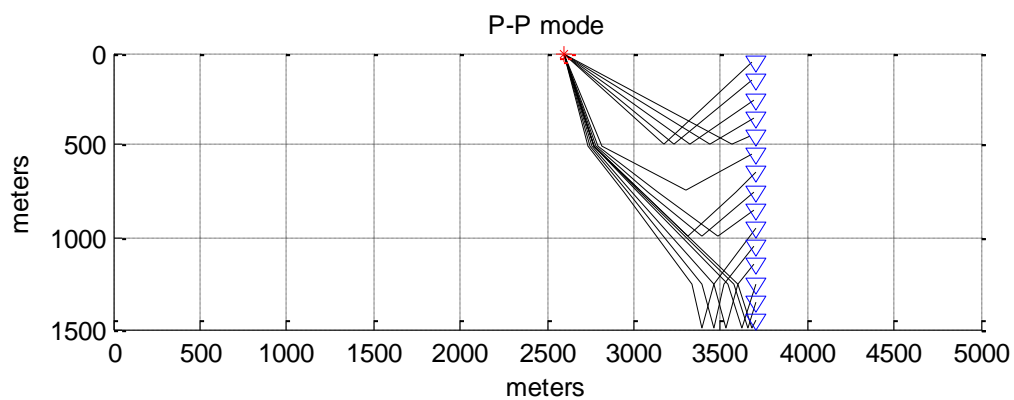
raytrace time 0.093 seconds



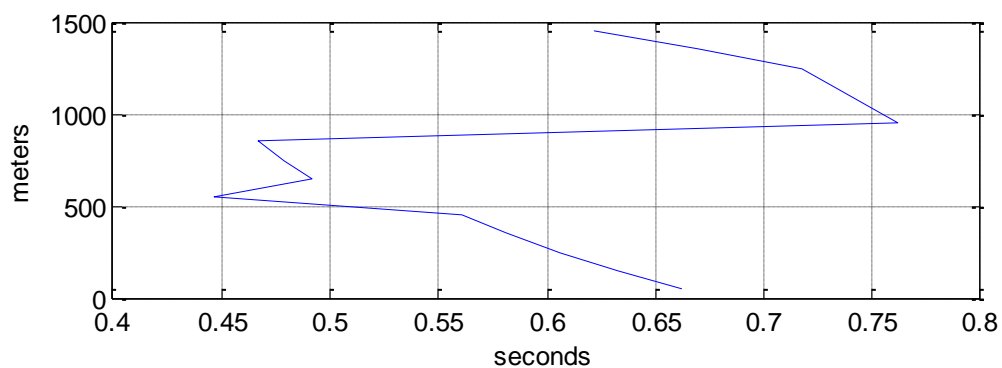
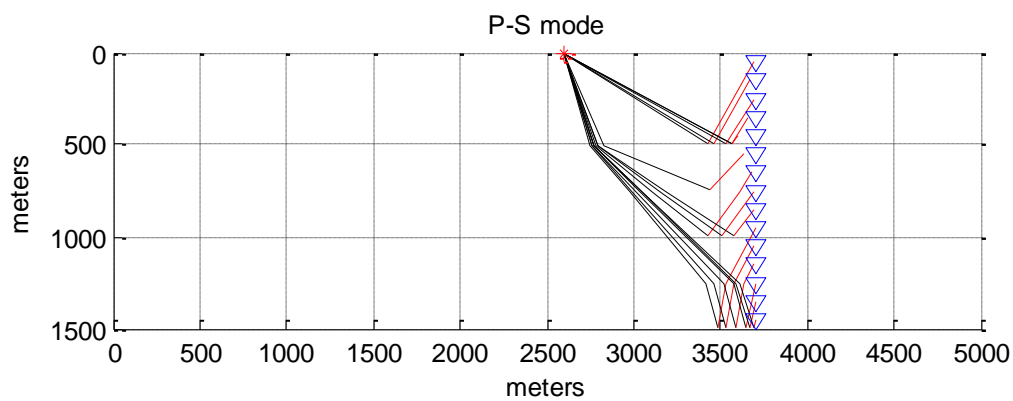


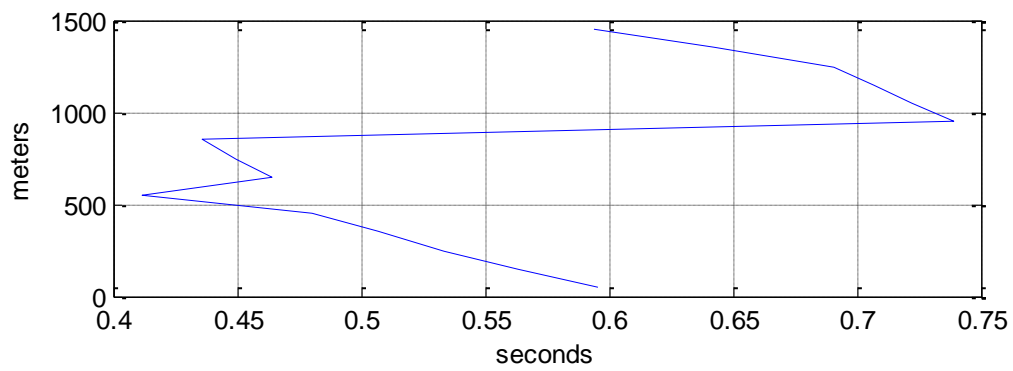
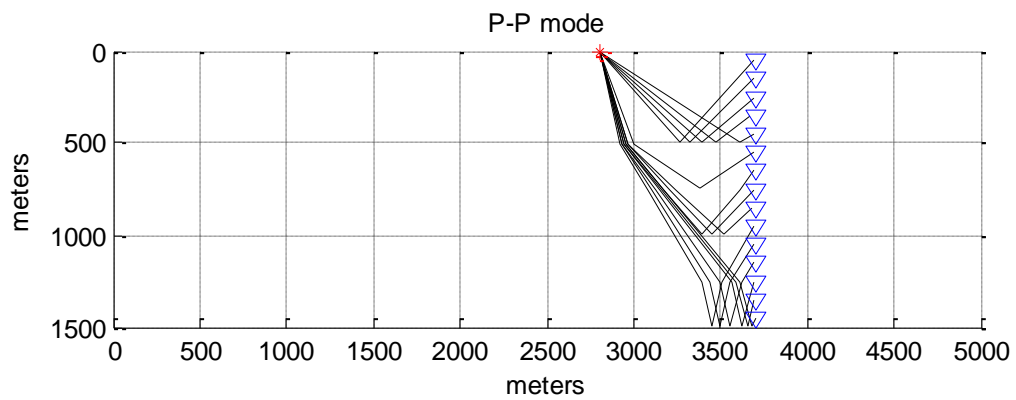
raytrace time 0.093 seconds



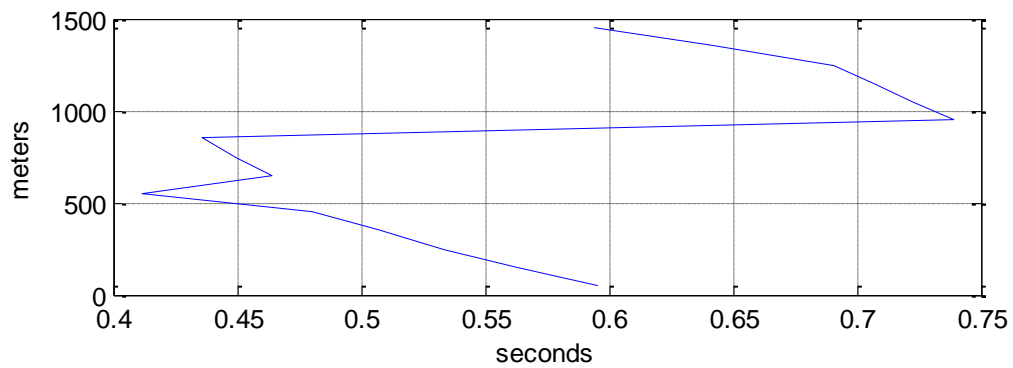
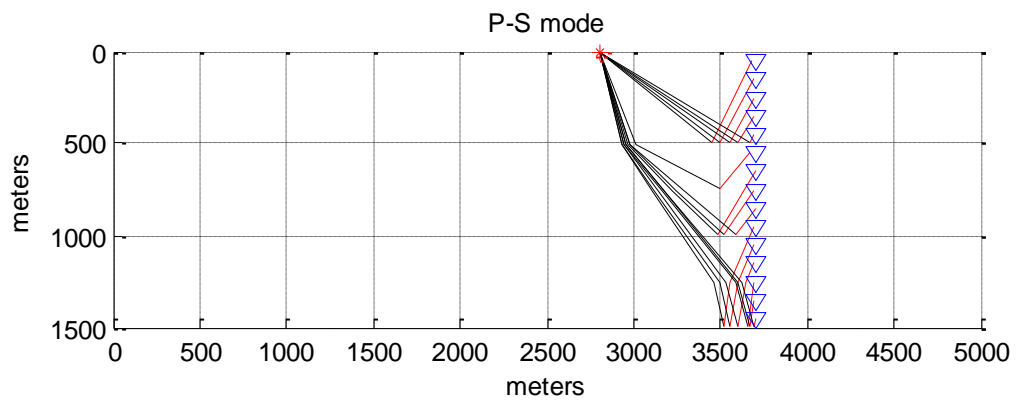


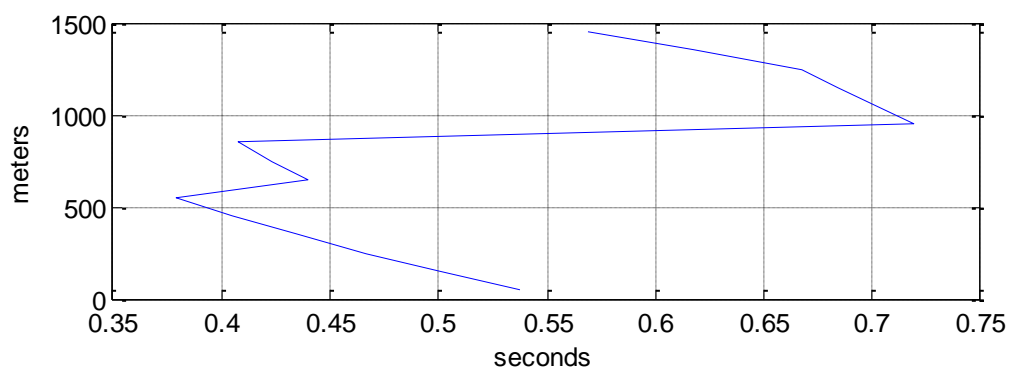
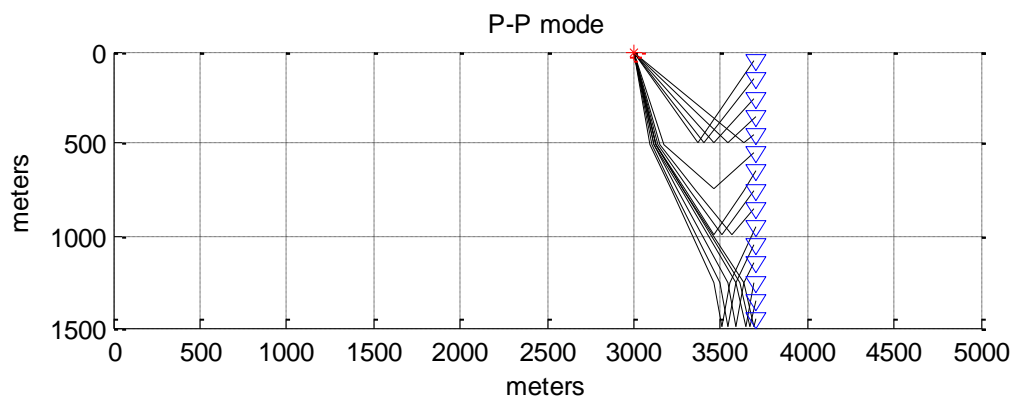
raytrace time 0.078 seconds



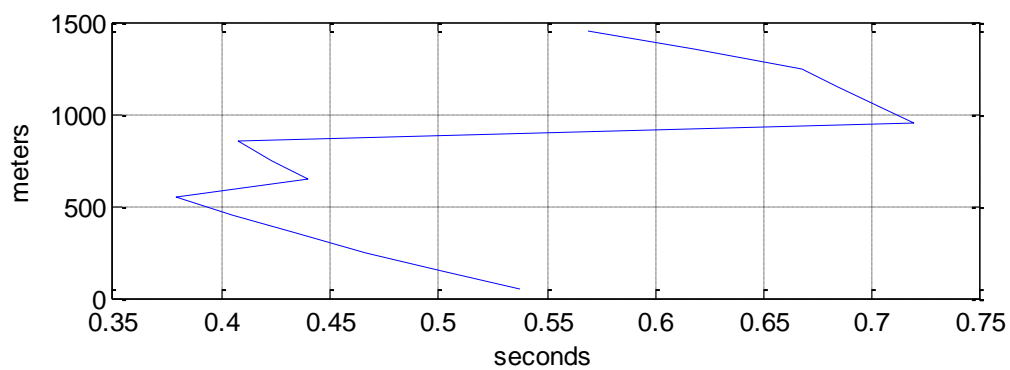
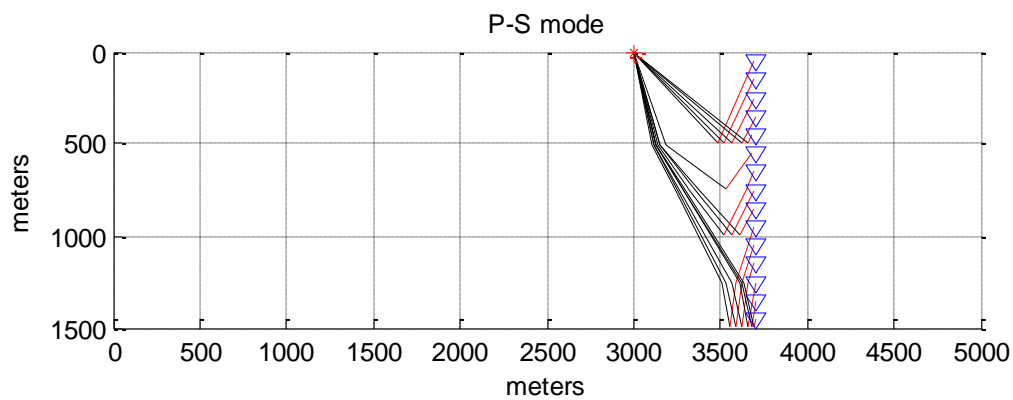


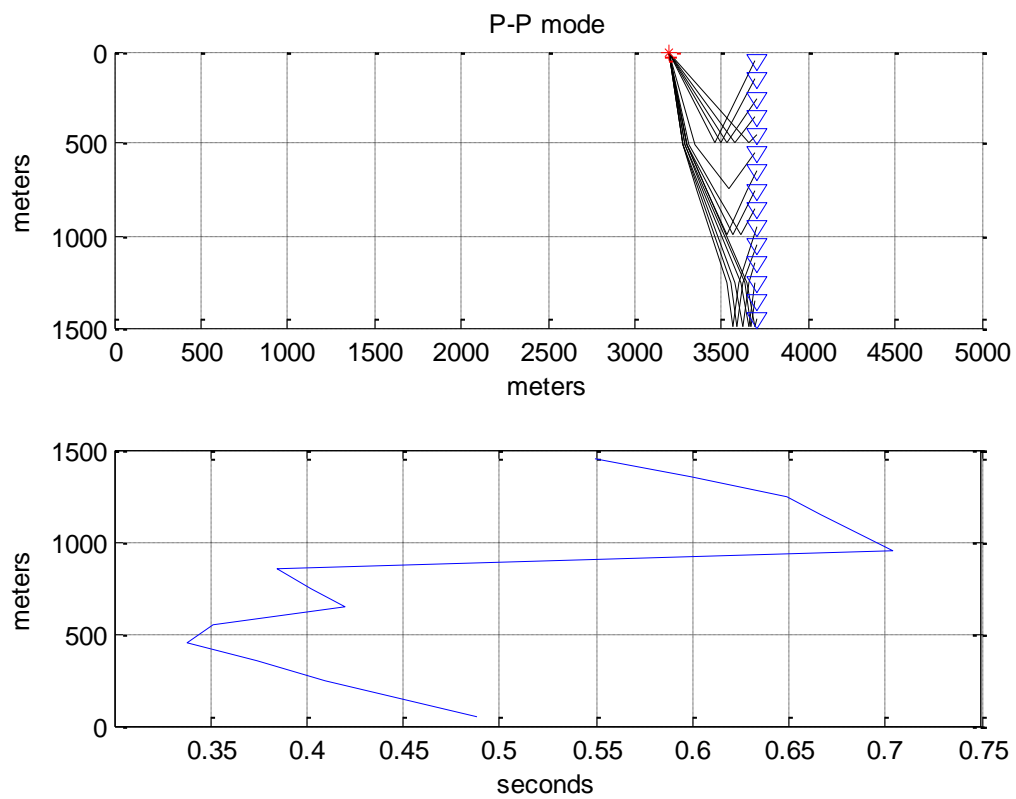
raytrace time 0.078 seconds



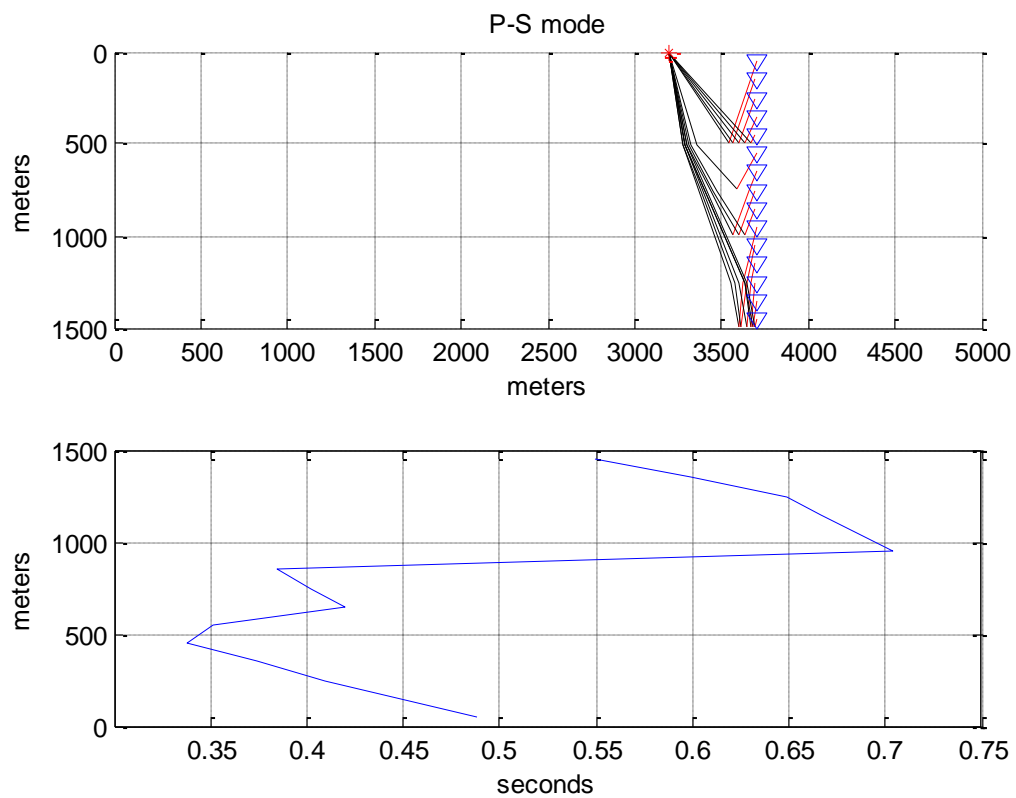


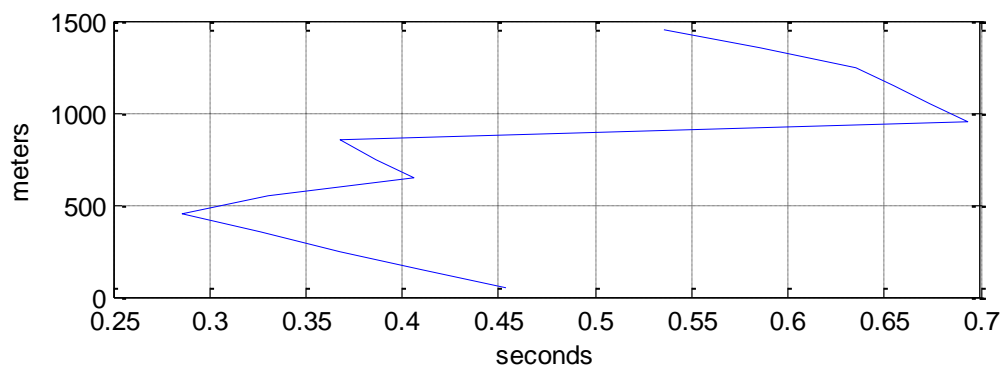
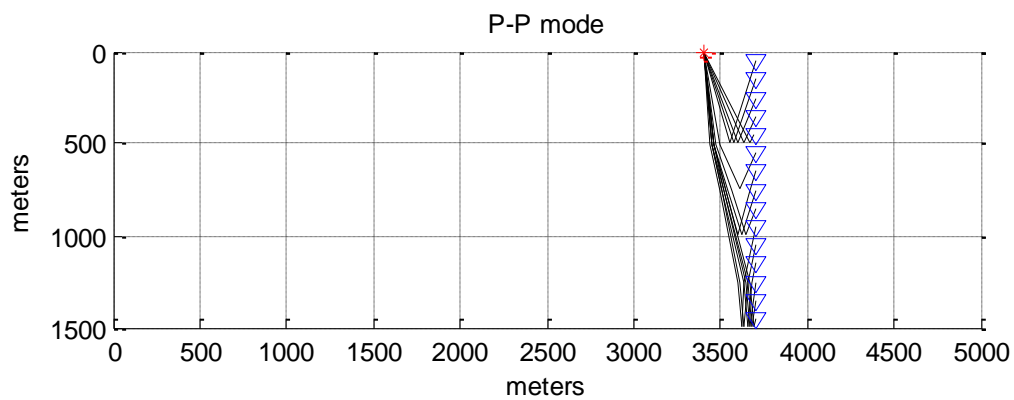
raytrace time 0.078 seconds



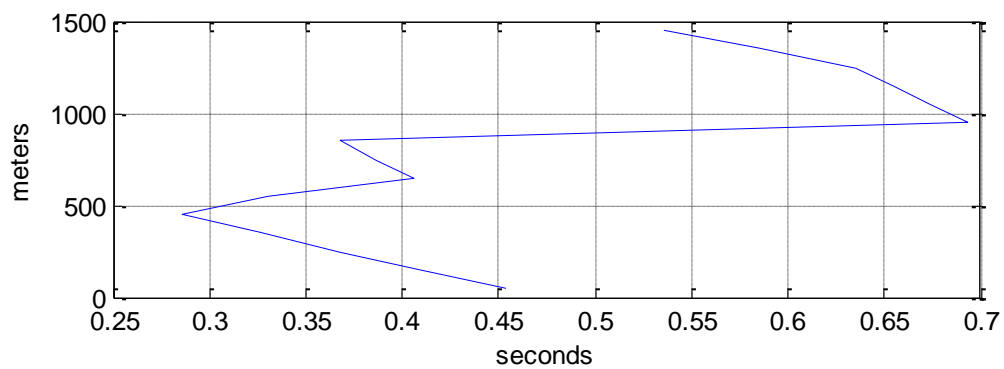
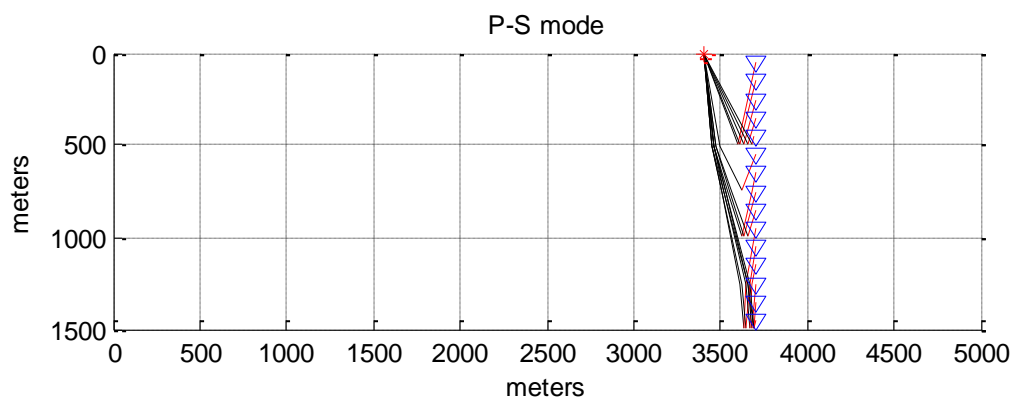


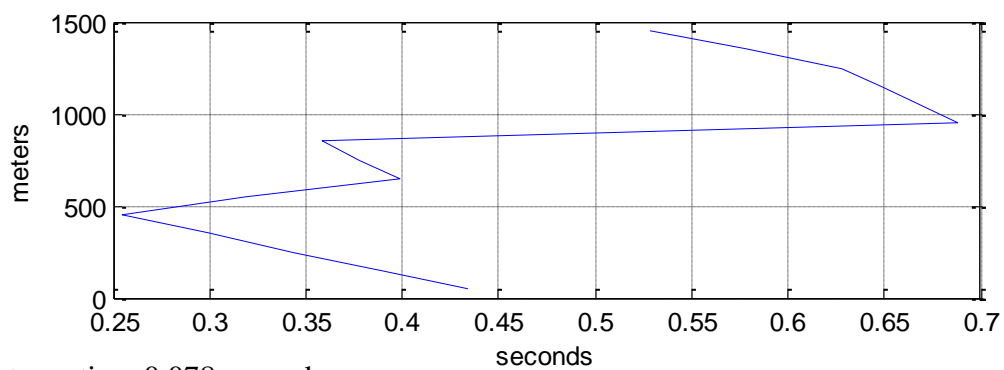
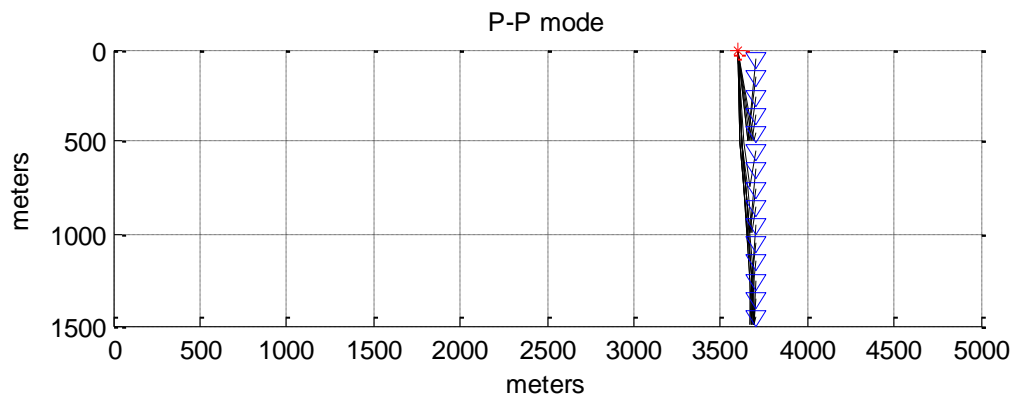
raytrace time 0.093 seconds





raytrace time 0.078 seconds





raytrace time 0.078 seconds

