



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΛΜΠΕΡΤΑ,
ΚΑΝΑΔΑ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΣΕ
ΓΕΩΤΡΗΣΗ**



ΤΣΑΡΟΥΧΗ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ
Α.Μ: 2012020013

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ, ΚΑΘ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ, (Επιβλέπων)
ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΚΑΘ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΟΥΠΙΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ, ΚΑΘ. ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Δημιουργία Συνθετικών Δεδομένων για τον σχεδιασμό πειράματος σεισμικής τομογραφίας στην Αλμπέρτα, Καναδά, με την χρήση τεχνολογίας οπτικών ινών σε γεώτρηση», πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Έχει ως στόχο την δημιουργία σεισμικής τομογραφίας για τον προσδιορισμό της δομής του υπεδάφους σε πεδίο στην Αλμπέρτα, Καναδά, με την χρήση συνθετικών δεδομένων και της τεχνολογίας οπτικών ινών, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους VSP και Cross-hole. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση της τεχνολογίας οπτικών ινών με δεδομένα από συμβατικά γεώφωνα.

Ευχαριστίες

Με αφορμή την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας υπό την επίβλεψη του κου. Βαφείδη Αντώνη, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης στο τμήμα εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες προς το πρόσωπό του τόσο για την εμπιστοσύνη και ενδιαφέρον που μου έδειξε, όσο και για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος το οποίο μου έδωσε την ευκαιρία να εντρυφήσω σε θέματα νέων τεχνολογιών στον χώρο της γεωφυσικής παρακολούθησης ταμειυτήρων πετρελαίου, αλλά και σε σεισμικές μεθόδους απεικόνισης. Ακόμα θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση και τις επιστημονικές γνώσεις που μου μετέδωσε καθ'όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας αλλά και συνολικά κατά την φοίτηση μου στη σχολή.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του τμήματος εφαρμοσμένης γεωφυσικής του πολυτεχνείου Κρήτης, Δρ. Οικονομού Νικόλαο, και Δρ. Κρητικάκη Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή τους στην προετοιμασία, επεξεργασία και διόρθωση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Μανούτσογλου Εμμανουήλ, και τον καθηγητή Σουπιό Παντελή που συμμετέχουν ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής της παρούσας εργασίας,

Τέλος, θα ήταν αδύνατο να παραλείψω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για όλη την αγάπη και την οικονομική, ηθική και ψυχολογική βοήθεια που μου προσέφερε καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι σεισμικές μέθοδοι, χρησιμοποιούνται διεθνώς από τις αρχές του αιώνα (1920) με μεγάλη επιτυχία στην βιομηχανία πετρελαίου.

Πρόσφατες μελέτες τόσο με χρήση τεχνολογίας οπτικών ινών (DAS), όσο και με χρήση συμβατικού εξοπλισμού σεισμικών μεθόδων, αποδεικνύουν την εγκυρότητα της τεχνολογίας DAS, καθιστώντας την πιθανή και κατάλληλη να αντικαταστήσει τον συμβατικό εξοπλισμό.

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση της εφαρμογής της μεθόδου σεισμικής τομογραφίας με τη χρήση οπτικών ινών DAS μέσα σε γεωτρήσεις, στην παρακολούθηση ταμιευτήρα πετρελαίου. Επιπλέον, συγκρίνονται οι σεισμικές μέθοδοι DAS, με αποτελέσματα που έχουν προκύψει από συμβατικές μεθόδους (γεώφωνα). Οι δοκιμές και οι συγκρίσεις αυτές, προσομοιώνονται πάνω σε πραγματικό μοντέλο στην περιοχή Αλμπέρτα του Καναδά. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε μορφή σεισμικής τομογραφίας και παρουσιάζονται οι διάφορες δοκιμές που μελετήθηκαν.

Στόχος της εργασίας, είναι να ερευνηθεί με την προσομοίωση και την επεξεργασία σεισμικών δεδομένων, αν η τεχνολογία οπτικών ινών (DAS), με χρήση σεισμικών μεθόδων, μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στη απεικόνιση της δομής του υπεδάφους σε σχέση με αποτελέσματα που έχουν προκύψει από συμβατικές μεθόδους (γεώφωνα). Σαν αρχικό μοντέλο προσομοίωσης, χρησιμοποιείται ο ταμιευτήρας πετρελαίου Coldlake, στην Αλμπέρτα του Καναδά στον οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι έγχυσης υπέρθερμου ατμού.

Συμπέρασμα της παρούσας εργασίας, είναι ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση τεχνολογίας οπτικών ινών, παρουσιάζουν ποιοτικά καλύτερες απεικονίσεις, με μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο ως προς τη γεωμετρία, όσο και ως προς τις τιμές των ταχυτήτων, από εκείνες που προκύπτουν από συμβατική μέθοδο. Ως σεισμική διάταξη, αποδείχθηκε ότι η VSP προσεγγίζει ορθότερα τις πραγματικές τιμές των ταχυτήτων σε σχέση με την Cross-hole και παρουσιάζει καλύτερες ποιοτικά απεικονίσεις.

ABSTRACT

Seismic methods have been used globally since the beginning of the century (1920) with great success, in the oil industry.

Recent field studies, both, using fiber optic technology (DAS) and conventional seismic methods, prove the validity of DAS technology, making it possible and appropriate to replace the conventional equipment.

The subject of this diploma thesis is to investigate the application of the seismic tomography method, using DAS optical fibers in drilling and monitoring of an oil reservoir. In addition, DAS seismic methods are compared, with results obtained from conventional methods (geophones). These tests and comparisons are simulated on a real model, from a field research in Alberta, Canada. The results are depicted in the form of seismic tomography and the various tests studied are presented.

The aim of this project, is to investigate, with the simulation and processing of seismic data, if the optical fiber technology (DAS), using seismic methods, can give satisfying results in the representation of the subsoil structure compared with the results obtained from conventional methods (geophones). As the initial simulation model, the Coldlake oil reservoir is used, in Alberta, Canada, in which, DAS research has been done for oil recovery using overheat steam injection methods.

Conclusion of the present paper, is that the results obtained using fiber optic technology present better quality imaging, more accurate, both in terms of geometry and speed values than those resulting from a conventional method. As far as the seismic arrangement is concerned, it has been shown that the VSP not only approaches the actual velocities more accurately than Cross-hole, but it also shows better quality imaging.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	3
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	3
2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ VSP.....	4
2.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ CROSSHOLE.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ (DAS).....	7
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	7
3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ iDAS.....	9
3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	12
3.4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ iDAS ΓΙΑ VSP.....	13
3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ DAS-VSP ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΓΕΩΦΩΝΑ.....	14
3.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ DAS.....	15
3.7 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	16
3.8 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	16
3.9 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ DAS ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ.....18

4.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ DAS ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ VSP.....	18
4.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ IDAS ΓΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΗ.....	18
4.1.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ DAS-VSP,ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΑ ΣΕ ΔΥΟ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΒΑΘΕΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	19
4.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ DAS ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΣΑΟΥΔΙΚΗ ΑΡΑΒΙΑ.....	20
4.1.4 ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ DAS.....	20
4.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ DAS-VSP ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ.....	22
4.2.1 ΜΕΛΕΤΗ DAS-VSP/ΟΒΝ ΓΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΗΣΗ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΔΟΜΟ ΑΛΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΚΟΛΠΟ ΤΟΥ ΜΕΞΙΚΟΥ.....	22
4.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ DAS – ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ CCS.....	25
4.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ DAS – ZERO OFFSET,WALK AWAY VSP ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗ CCS.....	25
4.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΗΣΗΣ DAS – ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ VSP ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ PINEDALE.....	29
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....32

5.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	32
5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	33
5.3 ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΒΗΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	34
5.3.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	34
5.3.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΥΘΕΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (FORWARD MODELING).....	34
5.3.2.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ (RAY TRACING).....	35
5.3.2.2 ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ.....	35
5.3.2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ – ΜΕΘΟΔΟΣ RUNG-KUTTA.....	37
5.3.2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ (VIDALE).....	40
5.3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ.....	42
5.3.3.1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (SIRT).....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	44
6.1 ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.....	44
6.2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	46
6.2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ COLD LAKE ΤΟΥ ΚΑΝΑΔΑ.....	46
6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	49
6.3.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ.....	49
6.4 ΜΕΛΕΤΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΘΕΡΜΗΣ ΖΩΝΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	51
6.4.1 ΜΕΛΕΤΗ 1: ΙΣΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΓΩΝ 4 ΜΕΤΡΑ.....	51
6.4.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ.....	51
6.4.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS.....	53
6.4.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ.....	54
6.4.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS.....	56
6.4.2 ΜΕΛΕΤΗ 2: ΙΣΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΓΩΝ 10 ΜΕΤΡΑ.....	58
6.4.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ.....	58
6.4.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS.....	59
6.4.2.3. ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ.....	61
6.4.2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS.....	62
6.4.3 ΜΕΛΕΤΗ 3: ΙΣΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΓΩΝ 1 ΜΕΤΡΟ.....	64
6.4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS.....	64
6.4.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Διάταξη VSP (slideshare.net).....σελ 5	σελ 5
Σχήμα 2.2: Διάταξη Cross-hole (asstgroup, overview of geophysical techniques).....σελ 6	σελ 6
Σχήμα 3.1: Μετρήσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια ζωής μιας γεώτρησης, (D J Hill et al, DAS for permanent downhole monitoring,2013).....σελ 8	σελ 8
Σχήμα 3.2: Αρχή λειτουργίας Idas, (Xiao J. Et al, 2015).....σελ 9	σελ 9
Σχήμα 3.3: Τρόπος εφαρμογής του οπτικού καλωδίου στη γεώτρηση, (Longton,The potential of utilizing intelligent Distributed Acoustic Sensor and existing single- mode and multimode optical fibers for monitoring the reservoir characteristics, 2015).....σελ 10	σελ 10
Σχήμα 3.4: Μονότροπα-Πολύτροπα οπτικά καλώδια,(Longton,The potential of utilizing intelligent Distributed Acoustic Sensor and existing single-mode and multimode optical fibers for monitoring the reservoir characteristics, 2015).....σελ 11	σελ 11
Σχήμα 3.5: Διατάξεις DAS-VSP (Cox et al, Distributed acoustic sensing for geophysical measurment, monitoring and verification,2012).....σελ 12	σελ 12
Σχήμα 3.6: Αρχή λειτουργίας DAS, για VSP (Mateeva et al ,DAS for reservoir monitoring with VSP, 2015).....σελ 13	σελ 13
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα πρώτων δεδομενων με χρήση DAS, (Madsen et al, Simultaneous multiwell VSP using DAS, 2013).....σελ 21	σελ 21
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα δεδομένων DAS με κατακόρυφη και οριζόντια ίνα (Zhan et al, VSP field trials of distributed acoustic sensing in Trinidad and Gulf of Mexico,2013).....σελ 22	σελ 22
Σχήμα 4.3: 3D απεικόνιση τριδιάστατης μελέτης OBN (Zhan et al, VSP field trials of distributed acoustic sensing in Trinidad and Gulf of Mexico, 2013).....σελ 23	σελ 23
Σχήμα 4.4: Σεισμικές τομές από διαφορετικές 3D μελέτες (Zhan et al, VSP field trials of distributed acoustic sensing in Trinidad and Gulf of Mexico, 2015).....σελ 24	σελ 24
Σχήμα 4.5: Χωροθετημένες σεισμικές εικόνες από δεδομένα DAS – συμβατικά γεώφωνα (Longton, The potential of utilizing intelligent Distributed Acoustic Sensor and existing single-mode and multimode optical fibers for monitoring the reservoir characteristics,2015).....σελ 25	σελ 25
Σχήμα 4.6: Σύγκριση δεδομένων και ταχυτήτων DAS – συμβατικά γεώφωνα με Zero-Offset VSP (Cox et al,Distributed acoustic sensing for geophysical measurment, monitoring and verification,2012).....σελ 26	σελ 26
Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα μετά την χωροθέτηση δεδομένων DAS και γεωφώνων (Cox et al,Distributed acoustic sensing for geophysical measurment, monitoring and verification,2012).....σελ 27	σελ 27

Σχήμα 4.8: Δεδομένα DAS VSP στο πεδίο Quest, για το 2010 και 2011 (Cox et al, Distributed acoustic sensing for geophysical measurment, monitoring and verification,2012).....σελ 28	σελ 28
Σχήμα 4.9: Σεισμικές τομές από πείραμα σεισμικής ανάκλασης και από πείραμα DAS VSP,στο πεδίο Pinedale (Mateeva et al, <i>Advances in Distributed Acoustic Sensing for VSP</i> , 2012).....σελ 29	σελ 29
Σχήμα 4.10: Καταγραφή DAS zero-offset VSP στο πεδίο Pinedale, για το 2010 και 2011 (Mateeva et al, <i>Advances in Distributed Acoustic Sensing for VSP</i> , 2012).....σελ 30	σελ 30
Σχήμα 5.1: Σχηματική παράσταση της μεθόδου Runge-Kutta.....σελ 38	σελ 38
Σχήμα 6.1: Η γεωμετρία του μοντέλου του πειράματος του Macrides, (1998).....σελ 45	σελ 45
Σχήμα 6.2: Τοποθεσία και γεωλογία αποθεμάτων πετρελαίου στην Αλμπέρτα,(Macrides, 1998).....σελ 48	σελ 48
Σχήμα 6.3: Δοκιμές με μέθοδο Cross-hole, και συμβατική διάταξη, για ισαπόσταση πηγών 4 μέτρα.....σελ 51	σελ 51
Σχήμα 6.4: Δοκιμές με μέθοδο Cross-hole και διάταξη οπτικών ινών, για ισαπόσταση πηγών 4 μέτρα.....σελ 53	σελ 53
Σχήμα 6.5: Δοκιμές με μέθοδο VSP, και συμβατική διάταξη, για ισαπόσταση πηγών 4 μέτρα.....σελ 54	σελ 54
Σχήμα 6.6: Δοκιμές με μέθοδο VSP, και διάταξη οπτικών ινών για ισαπόσταση πηγών 4 μέτρα.....σελ 56	σελ 56
Σχήμα 6.7: Δοκιμή με μέθοδο Cross-hole, και συμβατική διάταξη για ισαπόσταση πηγών 10 μέτρα.....σελ 58	σελ 58
Σχήμα 6.8: Δοκιμές με μέθοδο Cross-hole, και διάταξη οπτικών ινών για ισαπόσταση πηγών 10 μέτρα.....σελ 59	σελ 59
Σχήμα 6.9: Δοκιμή με μέθοδο VSP και συμβατική διάταξη για ισαπόσταση πηγών 10 μέτρα.....σελ 61	σελ 61
Σχήμα 6.10: Δοκιμές με μέθοδο VSP, και διάταξη οπτικών ινών,για ισαπόσταση πηγών 10 μέτρα.....σελ 62	σελ 62
Σχήμα 6.11: Δοκιμή με μέθοδο Cross-hole και διάταξη οπτικών ινών, για ισαπόσταση πηγών 1 μέτρο.....σελ 64	σελ 64
Σχήμα 6.12: Δοκιμή με μέθοδο VSP, και διάταξη οπτικών ινών, για ισαπόσταση πηγών 1 μέτρο.....σελ 65	σελ 65

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

Εξίσωση 5.1: Εξίσωση που περιγράφει την συμπεριφορά εξιδανικευμένων, ιδεατών καταστάσεων όσον αφορά στο χώρο των δεδομένων και το χώρο του μοντέλου.....σελ 35	σελ 35
Εξίσωση 5.2: Κυματική εξίσωση.....σελ 36	σελ 36
Εξίσωση 5.3: Φ,σειρά απείρων όρων.....σελ 36	σελ 36
Εξίσωση 5.4: Συνάρτηση της φάσης f_nσελ 36	σελ 36
Εξίσωση 5.5: Τελεστής του Laplace.....σελ 36	σελ 36
Εξίσωση 5.6: Διαφορική εξίσωση του Laplace.....σελ 36	σελ 36
Εξίσωση 5.7: Τελεστής του Laplace για $n>3$σελ 37	σελ 37
Εξίσωση 5.8: Εικονική Εξίσωση.....σελ 37	σελ 37
Εξίσωση 5.9: Διαφορική εξίσωση για το πρόβλημα του Cauchy.....σελ 37	σελ 37
Εξίσωση 5.10: Διαφορική εξίσωση του Cauchy με αρχική συνθήκη.....σελ 37	σελ 37
Εξίσωση 5.11: Επίλυση της εξίσωσης με την μέθοδο Rung-Kutta.....σελ 37	σελ 37
Εξίσωση 5.12: Επίλυση της εξίσωσης με την μέθοδο Rung-Kutta.....σελ 37	σελ 37
Εξίσωση 5.13: Κλάσμα ελέγχου της καταλληλότητας του hσελ 39	σελ 39
Εξίσωση 5.14: Σφάλμα μεθόδου Rung – Kutta.....σελ 39	σελ 39
Εξίσωση 5.15: Εικονική Εξίσωση σε ρητή μορφή.....σελ 41	σελ 41
Πίνακας 5.1: Υπολογισμοί αλγορίθμου της μεθόδου Rung – Kutta.....σελ 39	σελ 39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η τεχνολογία οπτικών ινών DAS, η οποία εφαρμόζεται σε σεισμικές μεθόδους με σκοπό την γεωφυσική παρακολούθηση ταμειυτήρα πετρελαίου μέσα από γεωτρήσεις. Επιπλέον, συγκρίνονται οι σεισμικές μέθοδοι DAS, με αποτελέσματα που έχουν προκύψει από συμβατικές μεθόδους (γεώφωνα). Οι δοκιμές και οι συγκρίσεις αυτές, προσομοιώνονται πάνω σε πραγματικό μοντέλο, από έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί σε πεδίο στην περιοχή Αλμπέρτα του Καναδά με σκοπό την ανάκτηση πετρελαίου μέσω μεθόδων έγχυσης υπέρθερμου ατμού. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε μορφή σεισμικής τομογραφίας και παρουσιάζονται οι διάφορες δοκιμές που μελετήθηκαν.

Η αναγκαιότητα μελέτης αυτής της νέας τεχνολογίας οπτικών ινών, προκύπτει από το μεγάλο ενδιαφέρον για αύξηση στην ποιότητα και την πιστότητα των πληροφοριών που λαμβάνονται σχετικά με έναν ταμειυτήρα πετρελαίου, που αποσκοπεί στην ευκολότερη και ακριβέστερη ανάκτηση του. Επιπλέον, η ύπαρξη ενός ενιαίου καλωδίου οπτικών ινών, μειώνει σημαντικά το κόστος της μελέτης και παρακολούθησης φέρνοντας παράλληλα καλύτερα αποτελέσματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο θα συζητηθούν οι σεισμικές μέθοδοι και ειδικότερα οι σεισμικές μέθοδοι VSP και Cross-hole, καθώς είναι εκείνες που θα εξεταστούν περισσότερο στην παρούσα εργασία. Η μέθοδος VSP, χρησιμοποιείται κυρίως για χρήση τεχνολογίας DAS και οι περισσότερες έρευνες και δοκιμές πεδίου έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη μέθοδο. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θα γίνουν δοκιμές, θα μελετηθούν και θα απεικονιστούν η κατανομές της σεισμικής ταχύτητας, τόσο από τη μέθοδο VSP, όσο και τη μέθοδο Cross-hole.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, θα αναλυθεί η τεχνολογία οπτικών ινών DAS, η αρχή λειτουργίας της, και η συσχέτιση της με τις σεισμικές μεθόδους. Επιπλέον θα γίνει σύγκριση με συμβατικές μεθόδους συλλογής δεδομένων (γεώφωνα) και θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί αλλά και οι μελλοντικές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής.

Στο τρίτο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν οι διάφορες δοκιμές πεδίου που έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τεχνολογία οπτικών ινών με σεισμικές μεθόδους με σκοπό την ανάπτυξη αυτού του συστήματος DAS. Επίσης θα παρουσιαστούν δοκιμές πεδίου οι οποίες είχαν στόχο να συγκρίνουν την τεχνολογία αυτή με τα συμβατικά γεώφωνα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, θα αναλυθεί η έννοια της σεισμικής τομογραφίας και ειδικότερα της τομογραφίας των πρώτων αφίξεων που χρησιμοποιείται στην παρούσα

μελέτη και οι βασικές αρχές επεξεργασίας που απαιτούνται για την τελική απεικόνιση. Επίσης θα αναφερθούν οι αλγόριθμοι και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία. Δηλαδή, η εικόνική εξίσωση που προσδιορίζει τον χρόνο διαδρομής των ακτίνων πρώτων αφίξεων και η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών Vidale που την επιλύει και αποτελεί το ευθύ πρόβλημα της σεισμικής τομογραφίας, και η μέθοδος SIRT, που αποτελεί την λύση της αντιστροφής της τομογραφίας,

Στο πέμπτο κεφάλαιο, θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία και θα αναλυθούν εκτενώς τα τρία μοντέλα προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν και οι δοκιμές που έγιναν με χρήση συνθετικών δεδομένων με στόχο την σεισμική απεικόνιση ταμειυτήρα πετρελαίου.

Τέλος, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα από τις παραπάνω μελέτες και δοκιμές και θα γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων, τεχνολογίας οπτικών ινών DAS και συμβατικής μεθόδου γεωφώνων. Επίσης θα γίνει σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών διατάξεων VSP και Cross-hole.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι σεισμικές μέθοδοι στηρίζονται σε νόμους της φυσικής και περιλαμβάνουν ένα πλήθος μεθόδων και τεχνικών. Χρησιμοποιούνται στη γεωτεχνική σεισμική μηχανική, και όχι μόνο καθώς συνδυάζουν ταυτόχρονα τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων ($\rho, V_p, \nu, V_s, E, G_0$) των γεωλογικών σχηματισμών με τη γνώση της γεωμετρίας τους (πάχος, έκταση, μορφολογία).

Είναι μη καταστροφικές μέθοδοι και εν αντιθέσει με τις εργαστηριακές, δίνουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης συνεχών σ'έκταση και σε βάθος διασκοπήσεων, σε μεγάλους όγκους φυσικών εδαφικών και γεωλογικών σχηματισμών. Επιπλέον, επιτρέπουν τον άμεσο προσδιορισμό των εδαφοδυναμικών παραμέτρων που αναφέρθηκαν, και διακρίνονται για την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους.

Οι σεισμικές μέθοδοι, χρησιμοποιούνται διεθνώς από τις αρχές του αιώνα (1920) με μεγάλη επιτυχία για την ανακάλυψη και την εκμετάλλευση κοιτασμάτων πετρελαίου, για τον εντοπισμό αλατούχων δόμων και άλλων ορυκτών ή πετρωμάτων ιδιάζουσας σημασίας, για τον υπολογισμό του βάθους βραχωδών υποστρωμάτων, για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών και της ποιότητας των διαδοχικών φυσικών εδαφικών σχηματισμών, για τον προσδιορισμό των μέτρων των δυναμικών ιδιοτήτων τους, για τον σχεδιασμό των κατασκευών και πολλές άλλες εφαρμογές.

Τα σεισμικά κύματα που δημιουργούνται κατά τη διέγερση δίνουν σημαντικές πληροφορίες για το γεωλογικό μέσο που διατρέχουν κατά τη διάδοσή τους. Η αρχή όλων των σεισμικών μεθόδων διερεύνησης του υπεδάφους, συνίσταται στην παραγωγή σεισμικών διεγέρσεων διαμέσου μιας τεχνητής πηγής (σφύρα, τουφέκι, πίπτον βάρος, εκρηκτικά κ.ά), στη λήψη των σεισμικών σημάτων με κατάλληλες διατάξεις δεκτών, καθώς και στην ανάλυση του δρόμου και του χρόνου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων (Pereira et al, 2010). Ανάλογα με τους δρομο-χρόνους, τον τύπο των κυμάτων καθώς και τη διάταξη πεδίου που χρησιμοποιείται, οι κύριες σεισμικές μέθοδοι διακρίνονται σε αυτές, των σεισμικών εντός ή μεταξύ γεωτρήσεων, της σεισμικής διάθλασης, ανάκλασης και της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ VSP

Το VSP, είναι μια σεισμική μέθοδος που μελετά τα ακουστικά κύματα μεταξύ επιφάνειας και γεώτρησης. Σε αντίθεση με τις επιφανειακές σεισμικές μεθόδους, διακρίνεται για την υψηλότερη ανάλυση και τη δυνατότητα ανάλυσης των κυματομορφών επι τόπου (Insitu) που προσφέρει (Brown II, 1999).

Αναφέρεται σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε μια κατακόρυφη γεώτρηση χρησιμοποιώντας γεώφωνα μέσα σε αυτή και μια πηγή στην επιφάνεια κοντά στη γεώτρηση. Σε γενικότερο πλαίσιο, τα VSP ποικίλουν ανάλογα με τη διαμόρφωση των πηγών, τον αριθμό, τη θέση των πηγών και των γεωφώνων και τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται. Τα περισσότερα VSP χρησιμοποιούν μια επιφανειακή σεισμική πηγή, η οποία είναι συνήθως ένας δονητής στη γη και ένα αεροπίστολο σε υπεράκτια ή θαλάσσια περιβάλλοντα (Αποστολόπουλος, 2013).

Η μέθοδος VSP, παρέχει μια άμεση συσχέτιση μεταξύ στρωματογραφίας και σεισμικής ανάκλασης. Αυτό παρέχει στον επεξεργαστή σεισμικών δεδομένων ένα μέσο βαθμονόμησης σεισμικών δεδομένων στο πεδίο χρόνου-βάθους.

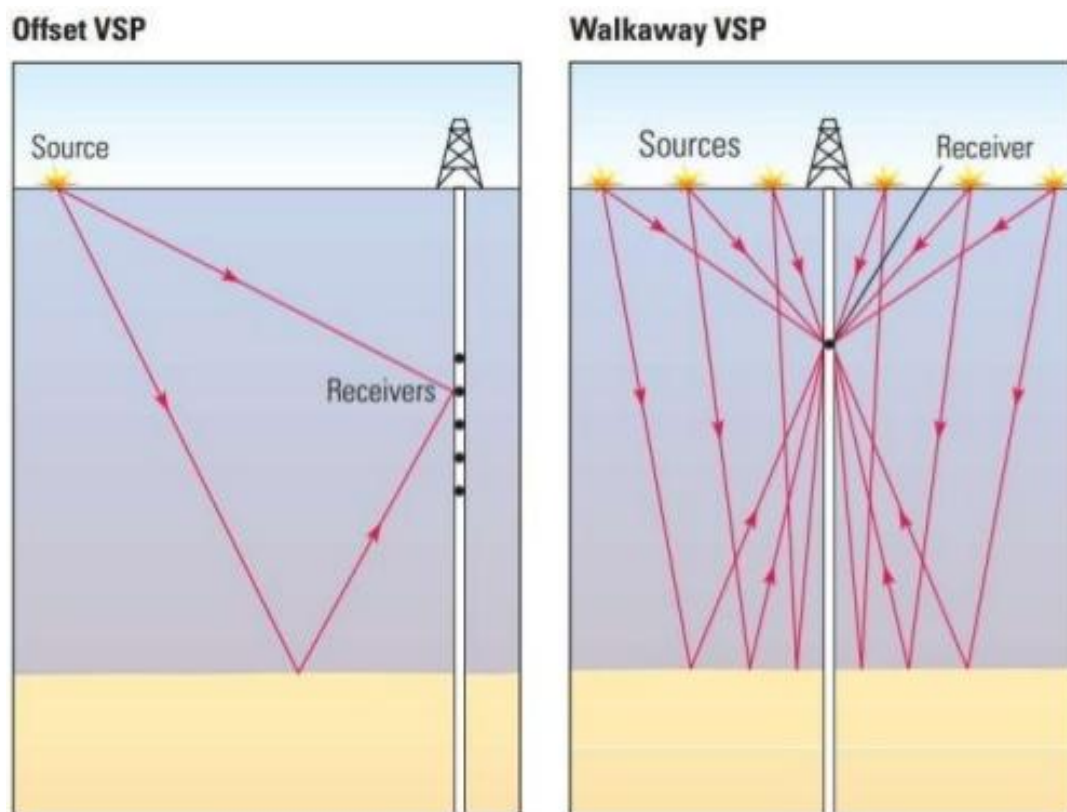
Επιπλέον, λόγω της υψηλής ανάλυσης που διαθέτει, η μέθοδος VSP, έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει δομές κοντά στην γεώτρηση, που διαφορετικά δεν θα μπορούσε να οριστεί με επιφανειακές τεχνικές.

Ωστόσο, παρά τα τόσα πλεονεκτήματα, οι έρευνες VSP, δεν πραγματοποιούνται τόσο εύκολα, καθώς η απόκτηση δεδομένων συνεπάγεται πολύ χρόνο και μεγάλο κόστος.

Η πιο βασική μορφή μιας έρευνας VSP, είναι το check shot το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ταχυτήτων και του χρόνου των πρώτων αφίξεων. Μια τυπική έρευνα, περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός γεωφώνου σε μία γεώτρηση, σε επιλεγμένη θέση, και την μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ένας ακουστικός παλμός ο οποίος παράγεται στην ή κοντά στην κεφαλή της γεώτρησης, για να φτάσει στον δέκτη, δηλαδή τα γεώφωνα. Οι δέκτες, συνήθως ισαπέχουν δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα και καταγράφονται τα απευθείας κύματα.

Η μέθοδος VSP, διακρίνεται σε 2 βασικές διατάξεις ανάλογα με την θέση των πηγών και των γεωφώνων. offset και walk-away. Η απόκτηση δεδομένων είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Στη περίπτωση offset VSP, μια σεισμική πηγή ενεργοποιείται κοντά στην κεφαλή της γεώτρησης (Zero-offset), είτε μακριά από την κεφαλή της γεώτρησης (offset), και δέκτες καταγράφουν το σήμα σε σταθερά βάθη στη γεώτρηση. Πολλές εκπομπές της πηγής καταγράφονται μετακινώντας την πηγή με σταθερή ισαπόσταση. Η ισαπόσταση των δεκτών είναι 15-30 μέτρα (Frignet, 2014).

Αφού καταγραφούν όλες οι θέσεις στον δέκτη, η πηγή στην επιφάνεια, μπορεί να μετακινηθεί κατά μια σταθερή απόσταση από την γεώτρηση και οι ίδιες θέσεις του δέκτη καταγράφονται ξανά. Αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος Walk-away VSP και επιτρέπει την απεικόνιση του υπεδάφους από μεγάλη απόσταση από την γεώτρηση. Η απόκτηση των δεδομένων πρέπει πάντα να περιλαμβάνει μια αρχική έρευνα η οποία προσδιορίζει την κατάλληλη θέση των πηγών που απαιτούνται για να πετύχουν τους υπό μελέτη στόχους στο υπέδαφος.



Σχήμα 2.1: Διατάξεις VSP (slideshare.net)

2.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE

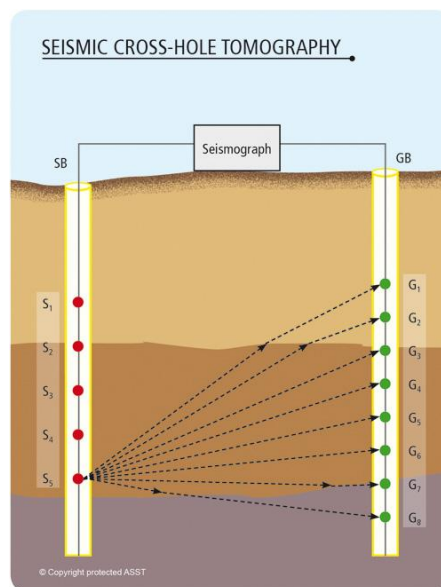
Οι διασκοπήσεις διαμέσου γεωτρήσεων (cross-hole, down-hole, up-hole) αποτελούν την ομάδα των μεθόδων των σεισμικών μεθόδων, που προϋποθέτουν την ύπαρξη σωληνωμένων γεωτρήσεων.

Οι δοκιμές αυτής της μεθόδου επιτρέπουν τον άμεσο και ακριβή προσδιορισμό των ταχυτήτων των διαμήκων και διατμητικών κυμάτων με το βάθος, με την τοποθέτηση δέκτη και πηγής στο εσωτερικό των γεωτρήσεων. Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στον

υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των απευθείας σεισμικών κυμάτων (μέθοδος cross-hole), ανάμεσα στις δύο (ή περισσότερες) γεωτρήσεις (www.Fugro.com).

Μία σεισμική πηγή τοποθετείται σε γεώτρηση για να παράγει ενέργεια P-κυμάτων και S- κυμάτων σε γνωστό βάθος. Μια σειρά γεωφώνων τοποθετείται σε γειτονικές γεωτρήσεις στο ίδιο βάθος. Τα γεωτρητικά εργαλεία συνδέονται με έναν σειсмоγράφο στην επιφάνεια, ο οποίος μετράει την απόκριση του γεωφώνου λόγω σεισμικής ενέργειας από την πηγή. Επίσης, πραγματοποιούνται μετρήσεις απόκλισης των γεωτρήσεων, για τον ακριβή προσδιορισμό της απόστασης πηγής-δέκτη. Αυτό είναι κρίσιμο έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια στους υπολογισμούς της ταχύτητας.

Η επεξεργασία των δεδομένων, περιλαμβάνει την αναγνώριση και την ανάκτηση των χρόνων διαδρομής των προσπίπτωντων P και S κυμάτων. Τα P-κύματα είναι πρώτες αφίξεις, ενώ τα S-κύματα, φτάνουν μετά τα P. Αυτό μπορεί να επιφέρει δυσκολία στην αναγνώριση των S-κυμάτων λόγω παρεμβολών των P-κυμάτων.



Σχήμα 2.2: Διάταξη cross-hole (asstgroup, overview of geophysical techniques)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ DAS

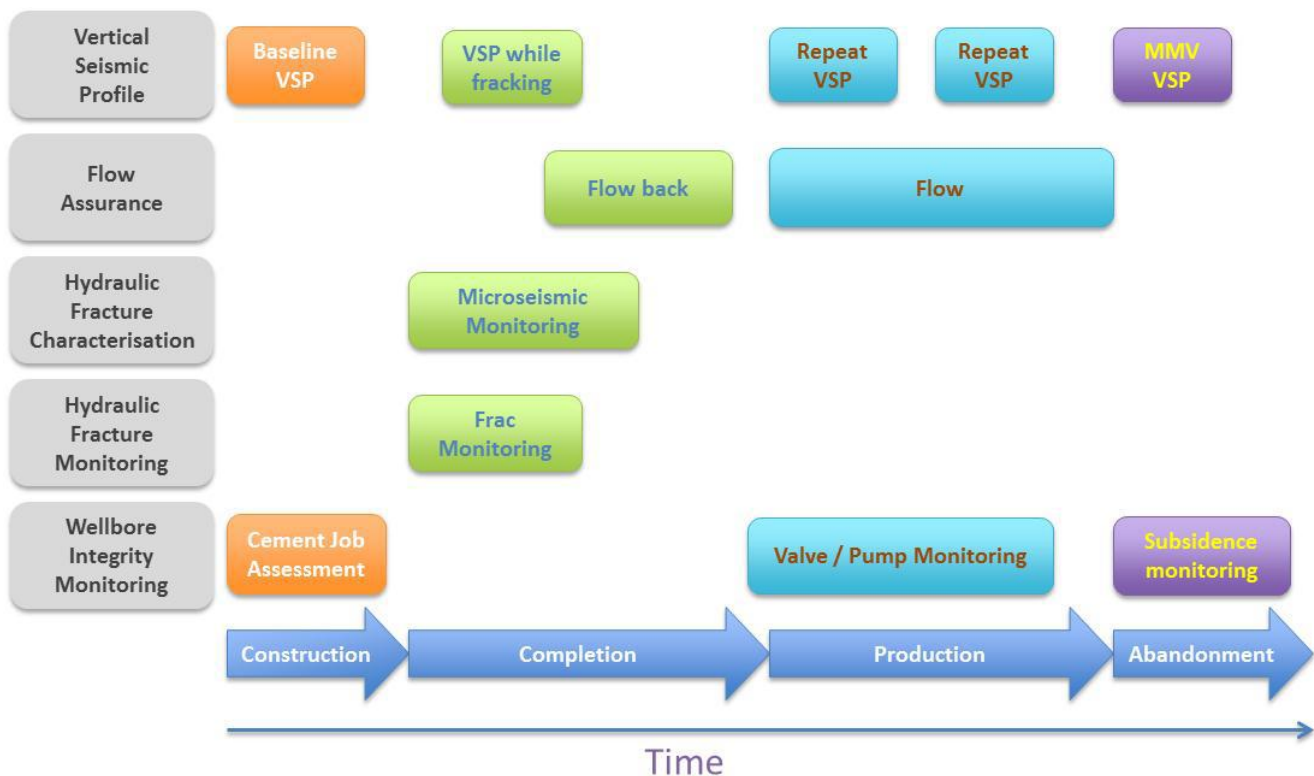
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ψηφιοποίηση και αυτοματοποίηση της τεχνολογίας του πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς και η αυξανόμενη ανάγκη για αποτελεσματικότητα, παραγωγικότητα και ασφάλεια στις επιχειρήσεις, προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες για την χρήση οπτικών ινών στην βιομηχανία αυτή, όπως αναφέρεται σε άρθρο στην ιστοσελίδα rigzone.com.

Οι οπτικές ίνες, χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου από το 1990, εφαρμοζόμενες στην τεχνολογία των κατανεμημένων αισθητήρων DTS (distributed temperature sensing), για μέτρηση της θερμοκρασίας. Η τεχνολογία DTS έχει ήδη καθιερωθεί ως μια τεχνική παρακολούθησης γεωτρήσεων (well monitoring) (Conway,2015).

Ωστόσο, ένα νέο είδος κατανεμημένων ακουστικών αισθητήρων με χρήση οπτικών ινών (DAS) έχει εδραιωθεί τα τελευταία 8 χρόνια, με πολυάριθμες εφαρμογές στον τομέα της παρακολούθησης της καλής λειτουργίας των σωληνώσεων (pipeline surveillance) και των συστημάτων παρακολούθησης, σε γεωφυσική αλλά και εσωτερικά της γεώτρησης παρακολούθηση (in-well monitoring). Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε σε συνεργασία μεταξύ της Shell και της Optasense (Barberan et al,2012).

Η τεχνολογία DAS, εφαρμοζόμενη σε φρεάτια γεωτρήσεων, χρησιμοποιείται για σεισμικές έρευνες (seismic profiling), χαρακτηρισμό της ροής (flow profiling), διαδικασίες ρωγμάτωσης (frack operations), καθώς και για τον εντοπισμό θεμάτων και προβλημάτων σχετικών με την ευστάθεια της γεώτρησης (Σχήμα 3.1) (Hill et al,2013).



Σχήμα 3.1: Πιθανές μετρήσεις που λαμβάνονται κατά την διάρκεια ζωής μιας γεώτρησης όταν ένα σύστημα DAS έχει τοποθετηθεί μόνιμα κατά την διάρκεια της κατασκευής. Αυτές συμπεριλαμβάνουν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις VSP, ώστε να παραχθεί μία εικόνα του ταμιευτήρα κοντά στην γεώτρηση (Hill, et al, 2013).

Το DAS, μετατρέπει οποιοδήποτε καλώδιο οπτικών ινών σε κατανεμημένη συστοιχία ακουστικών αισθητήρων. Τα καλώδια αυτά, μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιοδήποτε είδος γεώτρησης.

Η OptaSense, μια εταιρεία έρευνας που συνεργάζεται με την Shell και άλλες ενεργειακές εταιρείες, δημιουργήθηκε το 2007 με σκοπό να εκμεταλλευτεί τις εφαρμογές της τεχνολογίας DAS. Η εταιρεία, δημιούργησε το πρώτο μόνιμο σύστημα οπτικών ινών DAS για παρακολούθηση της παραγωγής στο εσωτερικό της γεώτρησης (in-well production flow monitoring) σε παγκόσμια κλίμακα, στην βόρεια Αμερική (Hill, Διαδυσκτική ιστοσελίδα www.energy-focus.co.uk).

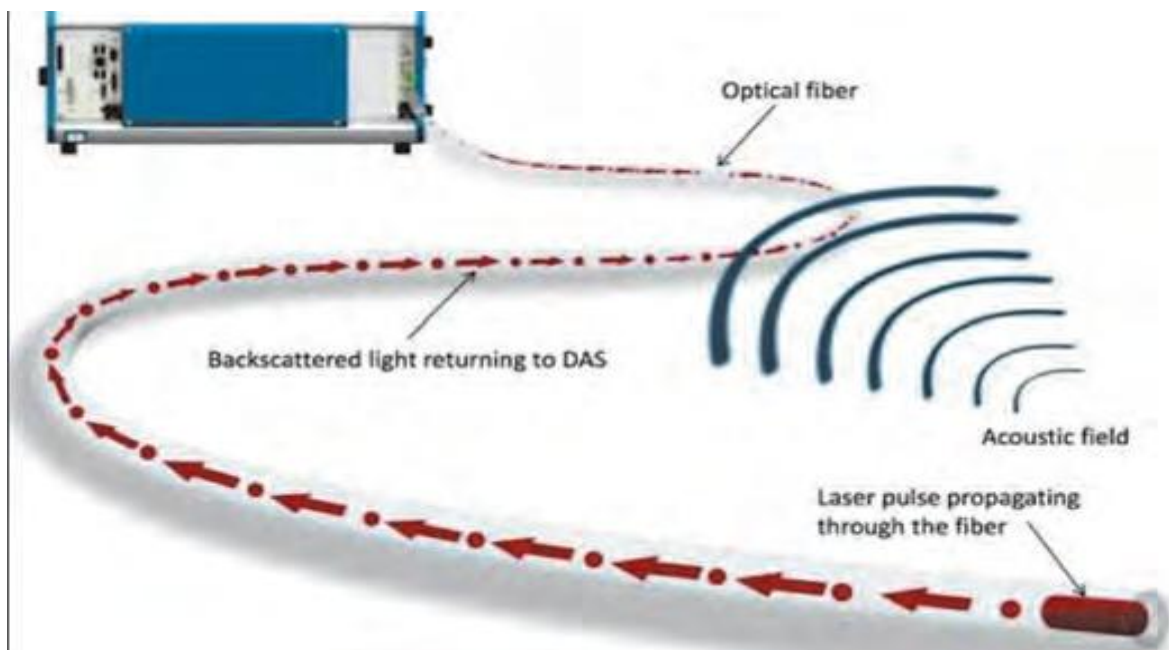
Το κόστος, ο χρόνος και ο κίνδυνος παρέμβασης στη γεώτρηση που σχετίζεται με τα συμβατικά γεώφωνα, παλαιότερα οδηγούσε σε ακριβή και συχνά ανέφικτη παρακολούθηση γεωφυσικών μετρήσεων στο εσωτερικό της γεώτρησης.

Μόνιμα εγκατεστημένα εντός της γεώτρησης (down-hole), τα καλώδια οπτικών ινών, είναι ιδανικά για χαμηλού κόστους, μη παρεμβατική γεωφυσική παρακολούθηση. Μόλις εγκατασταθεί το καλώδιο, δεν απαιτείται καμία περαιτέρω παρέμβαση στη γεώτρηση.

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ iDAS (Intelligent Distributed Acoustic Sensor)

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος iDAS, είναι γνωστή από το σύστημα DTS, το οποίο χρησιμοποιεί την αλληλεπίδραση της πηγής φωτός με θερμικές δονήσεις (σκέδαση Raman), για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας σε όλα τα σημεία κατά μήκος της ίνας (Conway,2015). Επειδή το επίπεδο του φωτός που επιστρέφει είναι πολύ αδύναμο, αυτή η μέτρηση απαιτεί συνήθως μερικά λεπτά κατά μέσο όρο ώστε να πάρει μια λογική αναλογία σήματος / θορύβου.

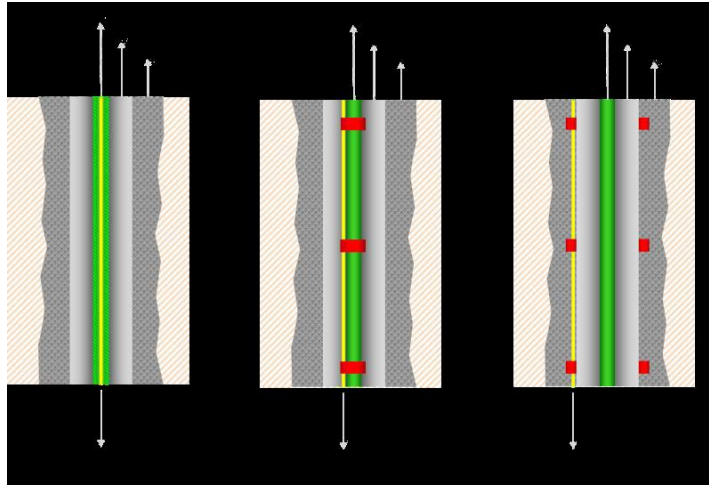
Το εφυές σύστημα κατανεμημένων ηχητικών αισθητήρων (iDAS) επιτρέπει με μοναδικό τρόπο την ταυτόχρονη καταγραφή ακουστικής ενέργειας κατά μήκος πολλών χιλιομέτρων του καλωδίου των οπτικών ινών καθώς αναπτύσσεται κατά μήκος ολόκληρου του φρεατίου της γεώτρησης, αναφέρουν οι Xiao J. et al (Σχήμα 3.2.).



Σχήμα 3.2: Αρχή λειτουργίας iDAS (Xiao J. et al, 2015)

Το iDAS, μπορεί να εκτιμήσει την ταχύτητα με την οποία κινείται το ρευστό σε κάθε επιμέρους σημείο, κατά μήκος του φρεατίου. Ταυτόχρονα, μπορεί να απεικονήσει τον γεωλογικό σχηματισμό γύρω από την γεώτρηση, ενεργώντας ως σεισμικός δέκτης. Δηλαδή με μία μόνο εγκατάσταση καλωδίου οπτικών ινών, είναι δυνατό να ελεγχθεί τόσο η ροή των ρευστών εντός του φρεατίου, όσο και να απεικονιστεί ο περιβάλλον γεωλογικός σχηματισμός.

Μια αξιολόγηση της ανάπτυξης του καλωδίου οπτικών ινών, έδειξε ότι το iDAS,είναι χρήσιμο, ανεξάρτητα από τον τρόπο εφαρμογής (Σχήμα 3.3) (Longton,2015).

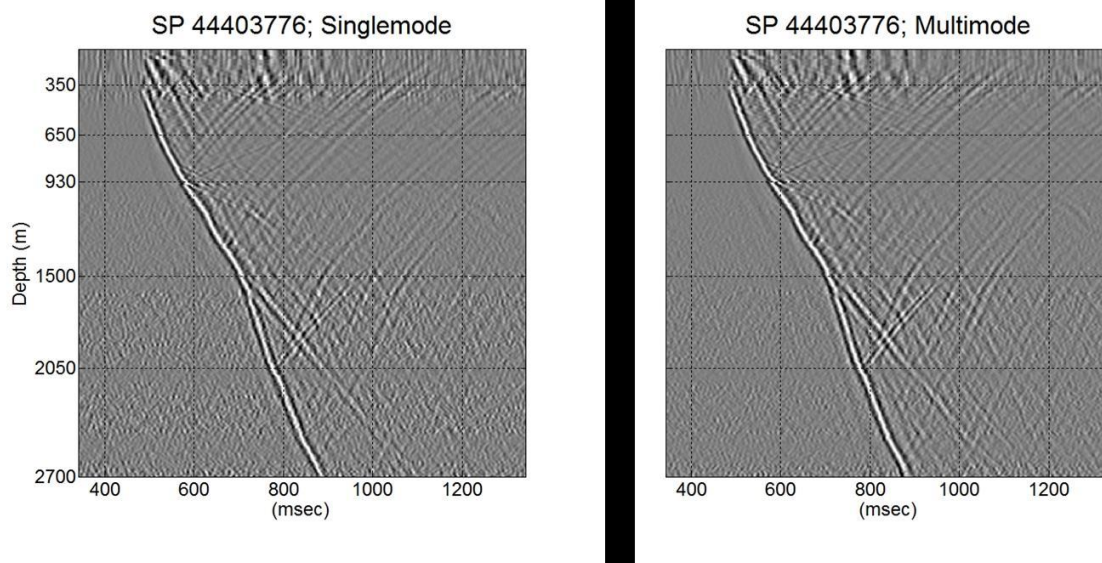


Σχήμα 3.3 Το οπτικό καλώδιο (με κίτρινο χρώμα), μπορεί να τοποθετηθεί είτε εντός της σωλήνωσης παραγωγής (αριστερά), είτε προσδεμένο κατά μήκος της σωλήνωσης παραγωγής (μέση) είτε σταθεροποιημένο με τσιμέντωση έξω από την επένδυση (casing), σε απευθείας επαφή με τον σχηματισμό (δεξιά) (Longton ,2015).

Το σύστημα iDAS, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο με μονότροπο (single mode) καλώδιο οπτικών ινών, όσο και με πολύτροπο (multimode), (blog ενημερωτικού περιεχομένου, Σύγχρονη τεχνολογία, 2015).

Στην πολύτροπη διάδοση ένα φωτεινό σήμα που αποτελείται από πολλές ακτίνες, εισέρχεται στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Η κάθε ακτίνα ανακλάται με διαφορετική γωνία στα τοιχώματα του περιβλήματος και ανάλογα με την γωνία, η κάθε ακτίνα οδεύει κατά μήκος της οπτικής ίνας διανύοντας διαφορετικό δρόμο. Καθώς υπάρχουν πολλοί τρόποι μετάδοσης που αντιστοιχούν στις διαδρομές των ακτίνων, η διάδοση αυτή ονομάζεται πολύτροπη. Όσο μικραίνει η διάμετρος του πυρήνα, τόσο λιγότεροι τρόποι μετάδοσης υπάρχουν. Όταν αυτή η διάμετρος γίνει παραπλήσια με το μήκος κύματος του σήματος, απομένει μόνο ένας τρόπος μετάδοσης, ο αξονικός και η μετάδοση ονομάζεται μονότροπη.

Χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο με SM και MM ίνες και δύο μονάδες ανίχνευσης iDAS καταγράφηκε ταυτόχρονα, το σήμα και των δύο ινών. (Σχήμα 3.4) Σε επόμενη παράγραφο περιγράφεται λεπτομερώς ο μηχανισμός λειτουργίας της οπτικής ίνας σαν δέκτης σεισμικών κυμάτων.



Σχήμα 3.4 Χρήση *Single mode* (αριστερά) και *Multi-mode* (δεξιά) ινών για καταγραφή σεισμικών μετρήσεων, αποδεικνύοντας την αποτελεσματική χρήση και των 2 ειδών ίνας. (Longton 2015).

Καλώδια οπτικών ινών, μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιοδήποτε είδος γεώτρησης και συνήθως πολλαπλές ίνες περιλαμβάνονται σε ένα μόνο καλώδιο το οποίο επιτρέπει μετρήσεις DAS, ταυτόχρονα σε συνδιασμό με DTS. Μόλις το καλώδιο εγκατασταθεί, δεν απαιτείται περαιτέρω παρέμβαση στη γεώτρηση και επαναλαμβανόμενες έρευνες απαιτούν μόνο επιπρόσθετη ενεργοποίηση της σεισμικής πηγής. Συχνά το DAS προσφέρει τη μόνη βιώσιμη εναλλακτική λύση για την συλλογή σεισμικών δεδομένων από γεώτρηση.

Το σύστημα, σύμφωνα με τους Xiao J. Et al (2015), χρησιμοποιεί μια νέα ψηφιακή οπτικό-ηλεκτρονική τεχνική ανίχνευσης, η οποία καταγράφει το πλάτος και την φάση των ακουστικών κυμάτων που παράγονται και πολλαπλασιάζονται κατά μήκος του φρεατίου γεώτρησης, σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων, από 1 kHz έως 100 kHz και με ένα υψηλό δυναμικό με εύρος > 120 dB, δίνοντας δυνατότητα για σεισμικές μετρήσεις.

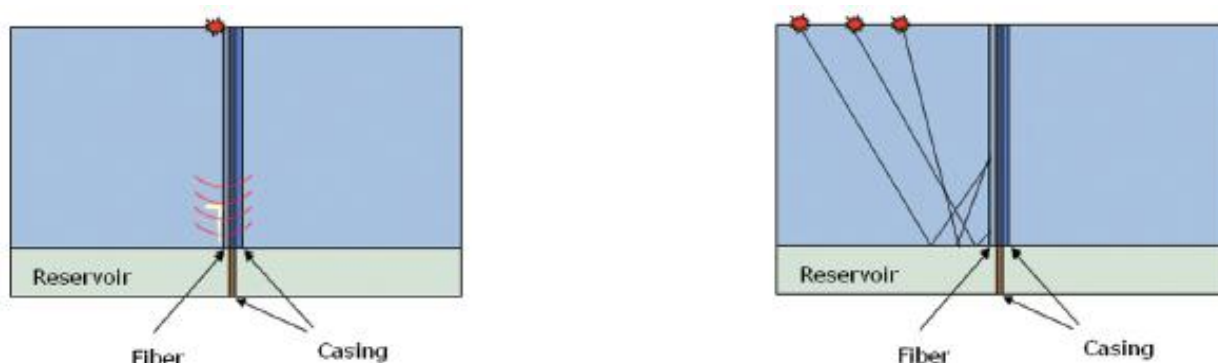
Το iDAS μετράει από το ένα άκρο μιας μονότροπης συμβατικής οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες, χωρίς ειδικά εξαρτήματα στην περίπτωση που η οπτική ία είναι υπο γωνία, όπως σχάρες ινών στην οπτική διαδρομή. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί σε υπάρχοντα καλώδια, αν και τα καλώδια που έχουν φτιαχτεί ακριβώς για αυτό το λόγο, δίνουν καλύτερη απόκριση.

Για να δοκιμαστεί αυτή η τεχνολογία, η Shell και η OptaSense έχουν εκτελέσει δοκιμές πεδίου, σε διάφορες τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο. Η απόδειξη της χρησιμότητας της τεχνολογίας DAS, δόθηκε σε πεδίο φυσικού αερίου στον Καναδά, τον Σεπτέμβριο του

2009, η οποία οδήγησε σε ένα πρόγραμμα για την περαιτέρω ανάπτυξη της μονάδας IU και επιπρόσθετων δοκιμών πεδίου.

3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS ΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Το DAS, θεωρείται ως μια μόνιμη συστοιχία σεισμικών αισθητήρων κατάλληλη να εφαρμοστεί για σεισμικές μελέτες, όπως μηδενικής απόστασης πηγής – γεώτρησης (Zero-Offset), μεταβαλλόμενης απόστασης πηγής – γεώτρησης (Walk-Away), γεώτρησης-γεώτρησης (cross-well) (Σχήμα 3.5), τριών διαστάσεων σεισμικής τομογραφίας (3D-VSPs), σεισμικής διάθλασης (refraction seismic), μικροσεισμικής παρακολούθησης εντός της γεώτρησης (downhole microseismic monitoring), καθώς και για μόνιμο επιφανειακό σύστημα σεισμικής επιτήρησης.



Σχήμα 3.5 , Διάταξη DAS Zero-offset VSP (αριστερά) , Διάταξη DAS Walk-away VSP (δεξιά). Τα κόκκινα σημεία συμβολίζουν της πηγές, και η γκρι γραμμή το καλώδιο οπτικών ινών μέσα στη γεώτρηση. (Cox et al, 2012)

Η τριών διαστάσεων σεισμική τομογραφία (3D-VSP), χρησιμοποιείται για παρακολούθηση της εισ-πίεσης του διοξειδίου το άνθρακα (CO₂) και της παραγωγής με χρήση ατμού (Steam Assisted Gravity Drainage) και ανίχνευση διαρροής σε αγωγό με VSP (Urosevic et al, 2009/ Miller et al, 2016). Στην τελευταία περίπτωση, η τεχνολογία DAS, μπορεί να ανιχνεύσει αρχικά ένα ηχητικό σήμα διαρροής, και διαφορές στην τοπική θερμοκρασία, ειδικά όταν πρόκειται για διαρροές αερίου υψηλής πίεσης.

Το 3D-VSP ως ιδέα έχει θεωρηθεί ιδιαίτερα ελκυστικό για την ανάδειξη στόχων ακόμη και κάτω από σύνθετες δομές υπερκείμενων στρωμάτων. Παρ'όλα αυτά, η ευρεία χρήση του, έχει παρεμποδιστεί από το κόστος και τον κίνδυνο της τοποθέτησης γεωφώνων σε γεώτρηση, καθώς και από την ελάχιστη διαθεσιμότητα προσβάσιμων

γεωτρήσεων. Οι παραπάνω περιορισμοί μειώνονται σε μεγάλο βαθμό όταν αποκτώνται σεισμικές μετρήσεις με DAS έναντι συμβατικών γεωφώνων.

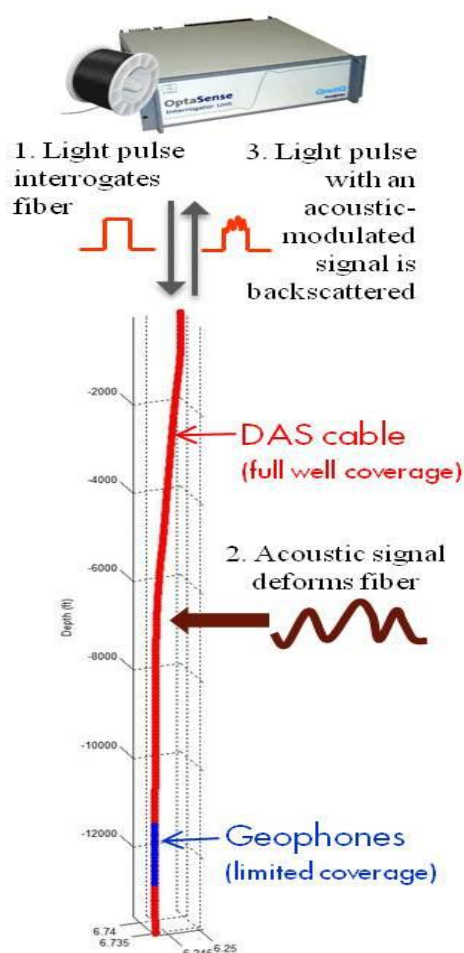
Το DAS, επιτρέπει την παρακολούθηση ταμιευτήρα μέσω τεχνικών VSP, που θεωρούνταν ανέφικτες ή οικονομικά απαγορευτικές με χρήση γεωφώνων. Τέτοιες τεχνικές είναι η συχνή επαναλαμβανόμενη παρακολούθηση σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στην ξηρά, σε βαθέα ύδατα, σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές και ταυτόχρονα σε πολλές γεωτρήσεις για συνολικό πεδίο κάλυψης με 3D-VSP.

Τα τελευταία χρόνια, η Shell, έχει εγκαταστήσει περισσότερα από 20 DAS VSP-s σε όλο τον κόσμο, με σκοπό να δοκιμάσει τις επιδόσεις της τεχνολογίας DAS και την περαιτέρω ανάπτυξή της, πραγματοποιώντας πειράματα ελέγχου της σεισμικής ταχύτητας στους γεωλογικούς σχηματισμούς και δημιουργώντας επαναλαμβανόμενες σεισμικές τομές σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, σε ποικίλες καταστάσεις στο πεδίο.

3.4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ IDAS ΓΙΑ VSP

Όταν παλμός φωτός ξεκινάει σε οπτική ίνα, ένα μικρό ποσοστό του φωτός διαχέεται με φυσικό τρόπο. Το διάχυτο φως, μεταφέρεται πίσω στην μονάδα IU του αισθητήρα. Αναλύοντας αυτές τις ανακλάσεις και μετρώντας τον χρόνο που έκανε ο παλμός να φτάσει και να ληφθεί το σήμα, το iDAS, μπορεί να μετρήσει το σεισμικό σήμα σε όλα τα σημεία και σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της ίνας, δεκάδες χιλιόμετρα μακριά (Mateeva et al,

2015). Δεν υπάρχουν διακριτοί αισθητήρες, εξού και το όνομα κατανεμημένοι ακουστικοί αισθητήρες (distributed acoustic sensing) (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Αρχή λειτουργίας του iDAS για VSP (Mateeva et al ,2015).

Για την καταγραφή δεδομένων, απαιτείται μία συσκευή που ανακρίνει την οπτική ίνα και μεταφράζει τις οπτικές μετρήσεις σε σεισμικά ίχνη, η οποία ονομάζεται οπτική μονάδα ανίχνευσης και επεξεργασίας της οπτικής ίνας (IU) ,αλλά είναι γνωστή και με το όνομα “lightbox”. Πρόκειται ουσιαστικά για οπτική μέτρηση των ακουστικών σημάτων που επηρεάζουν την ίνα. Καλώδιο

μήκους (4 χλμ) επιτρέπει δειγματοληψία με ρυθμό μέχρι και 20kHz. Με τον ρυθμό αυτό, η IU, εκπέμπει παλμούς λέιζερ στην ίνα, και καθώς η ίνα παραμορφώνεται από εξωτερικές ακουστικές διαταραχές, η μονάδα IU επεξεργάζεται και καταγράφει τις αλλαγές στο διάχυτο φως. Κατά την επεξεργασία, η ίνα διαιρείται σε μια κατανεμημένη διάταξη ακουστικών αισθητήρων, καταλήγοντας σε δεδομένα που είναι συγκρίσιμα με συμβατικά σεισμικά δεδομένα καταγεγραμμένα από γεώφωνα.

Τα σήματα μπορούν να καταγραφούν με χωρική ανάλυση περίπου 1 m. Ωστόσο, για σεισμικές εφαρμογές, χρησιμοποιείται συνήθως χωρική ανάλυση των 10 m για την βελτιστοποίηση του λόγου σήμα/ θόρυβος.

3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ DAS-VSP ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΓΕΩΦΩΝΑ

Το DAS, είναι κατάλληλο για παρακολούθηση των διαδικασιών παραγωγής υδρογονανθράκων δεδομένου ότι χρησιμοποιεί με έναν φυσικό τρόπο, ένα μόνιμο δέκτη. Μόλις η ίνα εγκατασταθεί, η απόκτηση δεδομένων DAS, είναι πολύ οικονομικότερη από ότι μια συμβατική μελέτη VSP, διότι κανένα γεώφωνο και χρήση συμβατικού εξοπλισμού δεν είναι απαραίτητα, δεν υπάρχουν καθυστερήσεις κατά την τοποθέτηση του εξοπλισμού (rig time) και η έρευνα είναι ταχύτερη και πιο εκτεταμένη (πλήρης κάλυψη με μία μόνο λήψη) (Frignet,2014).

Εγκατεστημένα μόνιμα στο περίβλημα ή ημι-μόνιμα στο σωλήνα παραγωγής, η ίνα αποκρίνεται σε κύματα που παράγει η σεισμική πηγή. Συμβατικές μετρήσεις VSP, συνήθως πραγματοποιούνται με τοποθέτηση προσωρινών συστοιχιών γεωφώνων σε γεώτρηση παρατήρησης. Αυτή η διαδικασία είναι ακριβή και παρουσιάζει επιπλοκές όσον αφορά στην ασφάλεια, λόγω των απαιτήσεων για περιορισμό της πίεσης κατά την διάρκεια της παρέμβασης.

Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία DAS, οι μόνιμα εγκατεστημένες ίνες δεν απαιτούν περαιτέρω παρέμβαση στην γεώτρηση, καθώς και επιτρέπουν την πραγματοποίηση χαμηλού κόστους επαναλαμβανόμενων μετρήσεων (Mestayer et al,2011).

Δεδομένου ότι το σύστημα DAS καλύπτει ολόκληρη τη γεώτρηση, ο αριθμός επαναλήψεων εκπομπής της πηγής, μπορεί να εξακολουθεί να είναι μικρότερος από ότι για τα γεώφωνα που πρέπει να μετακινηθούν και η απόκτηση δεδομένων επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η κάλυψη.

Η ποιότητα των δεδομένων DAS, είναι επαρκής για την παραγωγή πειραμάτων ελέγχου της σεισμικής ταχύτητας και εικόνων συγκρίσιμων με αυτών που παράγονται από συμβατικές μετρήσεις VSP, με γεώφωνα μίας συνιστώσας.

Μετρήσεις, μπορούν να πραγματοποιηθούν με σύστημα DAS, σε γεωτρήσεις θερμοκρασίας άνω των 300 °C, σε κεκλιμένες γεωτρήσεις, σε γεωτρήσεις με περιορισμένη πρόσβαση, σε παραγωγικές γεωτρήσεις και γεωτρήσεις έγχυσης, όπου γεώφωνα δεν είναι εφικτό να τοποθετηθούν.

3.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ DAS

Ενα ευρέως βασικό πλεονέκτημα των οπτικών ινών είναι το γεγονός ότι οι οπτικές ίνες δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, σύμφωνα με άρθρο στην ιστοσελίδα rigzone.com.

Επιπλέον, η οπτική ίνα, μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν αισθητήρας, όσο και σαν μέσο μετάδοσης προς και από την μονάδα ανίχνευσης και επεξεργασίας (IU). Η μονάδα IU αναλύει το σήμα οπισθοσκέδασης ως συνάρτηση του χρόνου και ανάλογα με την διαμόρφωση, είναι σε θέση να διακρίνει θερμοκρασία, ή ακουστικό σήμα ως συνάρτηση της απόστασης κατά μήκος της ίνας.

Η χρήση των οπτικών ινών, έχει επίσης μεγαλύτερη σημασία για πολύπλοκες διεργασίες εγκατάστασης στην ανοιχτή θάλασσα και σε υψηλή πίεση, και σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας. Οπτικοί αισθητήρες που έχουν αναπτυχθεί στον πυθμένα της γεώτρησης ή για παρακολούθηση των εξαρτημάτων (asset monitoring), είναι εγγενώς απλοί και αποτελούν ενιαίες κατασκευές έτσι ώστε τα ποσοστά αστοχίας να είναι χαμηλά (Jacobs, 2014).

Σε γενικές γραμμές, τα οικονομικά στοιχεία της διασκόπησης με τη χρήση οπτικών αισθητήρων βελτιώνονται με την αύξηση του αριθμού των σημείων παρατήρησης. Αντίθετα, ενσωματώνοντας συμβατικούς αισθητήρες σε καλώδιο, είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία και αυξάνει το κόστος, μειώνοντας παράλληλα την αξιοπιστία (Jacobs, 2014).

Η συνεχής καταγραφή των χαρακτηριστικών κατά μήκος της γεώτρησης, παρέχει λεπτομερή πλευρική και κατακόρυφη ανάλυση με υψηλή επαναληψιμότητα μεταξύ διαφορετικών μελετών. Ταυτόχρονες λήψεις δεδομένων από πλήθος γεωτρήσεων, μπορούν να αποκτηθούν συγχρονίζοντας τις μονάδες iDAS με ένα εξωτερικό σήμα ενεργοποίησης ή ένα ρολόι GPS. Έτσι, υπάρχει η μέγιστη ακρίβεια καθώς οι παλμοί στις οπτικές ίνες διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.

Η τεκμηριωμένη δυνατότητα χρήσης iDAS σε συνδιασμό με καλώδια πολύτροπης οπτικής ίνας, επιτρέπει, τη ταυτόχρονη διεξαγωγή 3D-VSP ερευνών σε πολλές γεωτρήσεις και κατα συνέπεια την παρακολούθηση πετροφυσικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα.

Δεδομένα που προέκυψαν από σεισμικές έρευνες στην ίδια γεώτρηση σε συνθήκες διακοπής ή μη της ροής με πηγή ακουστικής ενέργειας, έδειξαν ότι παρ'όλο που υπήρχε επιπλέον θόρυβος από την κίνηση των παραγόμενων ρευστών, ένα ακριβές σεισμικό προφίλ, ήταν σε θέση να καταγραφεί με την τεχνολογία DAS.

3.7 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ DAS

Ο μόνος περιορισμός της τεχνολογίας DAS, σε σύγκριση με τα γεώφωνα τριών συνιστωσών, είναι η κατευθυντικότητα. Τα γεώφωνα τριών συνιστωσών, επιτρέπουν τον διαχωρισμό των διαφορετικών ειδών κύματος που λαμβάνει το γεώφωνο όπως κύματα P,S , καθώς επίσης και την κατευθυντικότητα αυτών. Αυτή τη δυνατότητα δεν μπορεί να τη δώσει μέχρι στιγμής η τεχνολογία DAS (Lesnicov et al,2014).

Για να διευκολυνθεί ο περιορισμός της μίας συνιστώσας της τεχνολογίας DAS, είναι επιθυμητή περαιτέρω ανάπτυξη των οπτικών καλωδίων ώστε να επιτρέπουν μεγαλύτερη ευαισθησία.

3.8 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Στο εγγύς μέλλον, τεχνικές βελτίωσης της τεχνολογίας DAS, θα είναι απαραίτητες σε δύο τομείς. Στην πιστότητα του βάθους και στην αναλογία σήματος προς θόρυβο (Lesnicov et al,2014).

Ο ακριβής προσδιορισμός του αποτελεσματικού βάθους σε ένα κανάλι DAS, δεν είναι ασήμαντος. Μεταξύ των πρακτικών προκλήσεων, είναι και η γνώση της ακριβούς θέσης ενός καλωδίου σε μία γεώτρηση και η ακριβής μέτρηση του χρόνου διάδοσης (time-of-flight) για τον παλμό λέιζερ συναρτήσει της απόστασης κατά μήκος του καλωδίου επι τόπου(*in-situ*), ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητα των δεδομένων. Πολλές αριθμητικές προσομοιώσεις έχουν διεξαχθεί για να κατανοηθεί η συμπεριφορά του καλωδίου όταν αυτό εμβαπτίζεται στη γεώτρηση. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία ελέγχου της κατάσταση του καλωδίου απαιτεί πολύ χρόνο και επεξεργαστική ισχύ για να είναι αποτελεσματική και δεν είναι εφικτή η εφαρμογή της κατά την διάρκεια μιας έρευνας VSP. Επιπλέον, η πραγματική

θέση ενός καναλιού DAS, περιέχει στατιστικό σφάλμα που σχετίζεται με το πώς λαμβάνονται οι μετρήσεις της οπισθοσκέδασης. Όλες αυτές οι αβεβαιότητες, πρέπει να γίνουν καλύτερα κατανοητές και να ποσοτικοποιηθούν με κατάλληλη βαθμονόμηση (Constantinou,2016).

Δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι ούτε τα συμβατικά γεώφωνα δεν επηρεάζονται από αβεβαιότητες βάθους, καθώς τα σύρματα μεταξύ των αισθητήρων μπορεί να τεντώσουν ή να χαλαρώσουν, προκαλώντας σφάλματα στον εντοπισμό θέσης που είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν.

Ο λόγος σήματος/θορύβου των πρώτων δεδομένων DAS, εξακολουθεί να είναι μικρότερος από τον λόγο σήματος/θορύβου των πρώτων; δεδομένων από γεώφωνα. Κατά συνέπεια, τα αδύναμα σήματα επισκιάζονται πιο εύκολα.

3.9 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ενώ η πλειοψηφία των εφαρμογών της τεχνολογίας DAS, μέχρι σήμερα ήταν στη στεριά, μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί και σε υπεράκτιες γεωτρήσεις. Με χρήση ίνας προσκολλημένης στον σωλήνα παραγωγής, είναι πλέον εφικτό να γίνονται θαλάσσιες VSP μετρήσεις. Αυτό έχει τη δυνατότητα να παρέχει παρόμοια αποτελέσματα με μία 4D σεισμική έρευνα σε κλάσμα του κόστους της αντίστοιχης συμβατικής.

Επιπλέον, με την ανάπτυξη καλωδίων οπτικών ινών ειδικά σχεδιασμένων για εφαρμογή DAS, θα πρέπει επίσης να είναι δυνατή η χρήση OBCs (Ocean Bottom Cable) με DAS, σε κλάσμα του κόστους του συμβατικού καλωδίου. Μόλις θαφτούν αυτά τα καλώδια, μπορούν να παρέχουν μια πρόσθετη ικανότητα μόνιμης παρακολούθησης του ταμειυτήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ DAS ΜΕ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ

4.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ DAS ΜΕ ΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ VSP

4.1.1: Εφαρμογή iDAS για θαλάσσια σεισμική διασκόπηση σε γεώτρηση

Το iDAS, χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για απόκτηση θαλάσσιων σεισμικών δεδομένων εντός γεώτρησης σε πείραμα που διεξήγαγαν οι Silixa, Weatherford and Statoil, τον Νοέμβριο του 2011.

Τα δεδομένα αποκτήθηκαν από ένα περίπου 7 χλμ, που είχε τοποθετηθεί μέσα στην περίπου 10 χλμ γεώτρηση, φτάνοντας στον ταμιευτήρα Gulltorp, από την πλατφόρμα Gullfaks A.

Παρόμοια δοκιμή έχει διεξαχθεί από την BP σε γεώτρηση παραγωγής του πεδίου Trinidad Mahogany, χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες σε πίεση/θερμοκρασία αισθητήρες (Hance et al, 2016).

Επιτυχημένα αποτελέσματα από τις δοκιμές, αποδεικνύουν πολλές σημαντικές εφαρμογές της τεχνολογίας DAS.

Η κατανόηση της λεπτομερούς δομής, της συμπίεσης του ταμιευτήρα, και της κίνησης των ρευστών του ταμιευτήρα μέσα από την επαναλαμβανόμενη παρακολούθηση είναι μόνο μερικά παραδείγματα για το πώς αυτή η τεχνολογία επηρέασε το πρόγραμμα της επιτήρησης αυτών των πεδίων.

Trinidad field trial

Αρχικά, έγιναν δοκιμές σε γεωτρήσεις της BP, στα οποία ήταν ήδη εγκατεστημένα κατάλληλα καλώδια οπτικών ινών με ενεργές σεισμικές ρυθμίσεις.

Τον Μάιο του 2013, αποκτήθηκαν δεδομένα σε μία 3,1 χλμ βαθιά γεώτρηση παραγωγής με τη χρήση σκάφους – πηγής για επιφανειακά σεισμικά (WesternGeco), και DAS. Χρησιμοποιώντας μια οπτική μονάδα IU στην επιφανειακή πλατφόρμα, τροφοδοτώντας το ήδη εγκατεστημένο καλώδιο DTS χρησιμοποιήθηκαν 1800 σεισμικοί

αισθητήρες στη γεώτρηση με 2 μέτρα απόσταση μεταξύ τους, εξοπλίζοντας πλήρως την γεώτρηση, και 4000 εκρήξεις.

4.1.2 Τρισδιάστατη σεισμική διασκόπηση VSP με σύστημα κατανεμημένων ακουστικών αισθητήρων DAS, ταυτόχρονα σε δύο γεωτρήσεις σε ταμιευτήρα βαθέων υδάτων (2012).

Ο αρχικός στόχος του DAS 3D-VSP, ως το πρώτο τεστ DAS βαθέων υδάτων, ήταν η κατανόηση των υπολογιστικών και τεχνικών προκλήσεων που θέτει ένα περιβάλλον βαθέων υδάτων για μια παρακολούθηση VSP.

Ένας δευτερεύων στόχος ήταν η απόκτηση χρήσιμων δεδομένων VSP, για την αύξηση των ανακτήσιμων αποθεμάτων. Η σεισμική τομή που προκύπτει θα μπορούσε να είναι χρήσιμη σαν σημείο αναφοράς για την παρακολούθηση της έγχυσης νερού εντός της γεώτρησης, όταν η μελέτη DAS-VSP επαναλαμβάνεται για να ελεγχθούν οι καινούργιες συνθήκες που έχουν δημιουργηθεί στο σύστημα. Αποκτήθηκαν δεδομένα VSP υψηλής ποιότητας.

Απόκτηση δεδομένων

Τα καλώδια οπτικών ινών σε αυτές τις γεωτρήσεις, είχαν εγκατασταθεί αρχικά για παρακολούθηση της πίεσης και της θερμοκρασίας, αλλά περιείχαν εφεδρικές ίνες, κατάλληλες για χρήση DAS. Τα καλώδια μετατόπιζαν επίσης όλη την στήλη νερού, καθώς κατευθύνονταν προς την πλατφόρμα. Κατά την διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων, δεν γινόταν έγχυση νερού, παρέχοντας έτσι ένα ήρεμο περιβάλλον γεώτρησης για να διεξαχθεί η δοκιμή DAS.

Έχοντας περισσότερα από 700 κανάλια, σε 8 μέτρα απόσταση σε κάθε ίνα και 50000 εκρήξεις για κάλυψη 117 km^2 ($13 \text{ km} \times 9 \text{ km}$), συλλέχτηκαν 70 εκατομμύρια ίχνη VSP. Οι εργασίες πεδίου διήρκησαν 6 εβδομάδες το 2012.

Συμπεράσματα

Δεδομένα 3D DAS-VSP, μπορούν να αποκτηθούν με ασφάλεια και επιτυχία, ταυτόχρονα σε πολλές γεωτρήσεις βαθέων υδάτων, όπου το καλώδιο της οπτικής ίνας έχει εγκατασταθεί προηγουμένως για άλλους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένων φρεατίων απρόσιτων σε γεώφωνα.

Αυτού του μεγέθους η έρευνα VSP, θα ήταν απαγορευτικά ακριβή με χρήση γεωφώνων. Θα κόστιζε δεκάδες εκατομμύρια δολάρια σε χρόνο συλλογής δεδομένων

λόγω της αυξημένης διάρκειας των εργασιών πεδίου (rig time) μόνο για να καλύψει μία μόνο ρύθμιση των 80 επιπέδων με γεώφωνα. Επιπλέον, η τοποθέτηση γεωφώνων σε φρεάτιο, φέρει τον κίνδυνο, να κολλήσουν τα εργαλεία και συχνά δεν είναι δυνατό αυτό σε φρεάτια ολοκληρωμένα; με σωλήνωση, ή και με πολύπλοκη γεωμετρία.

Επιπλέον, η ολοκλήρωση κεκλιμένων γεωτρήσεων δεν επιτρέπει καν σε τοποθέτηση συμβατικών γεωφώνων. Σε αυτή την περίπτωση, η τεχνολογία DAS, ήταν η μόνη δυνατή λύση.

Τα δεδομένα αυτά απέδειξαν ότι η τεχνολογία DAS, είναι βασικός καταλύτης για την απόκτηση δεδομένων 3D και 4D-VSP σε βαθέα ύδατα.

4.1.3 Εφαρμογή DAS σε γεωτρήσεις στη Σαουδική Αραβία.

Όπως αναφέρουν οι Xiao J. Et al (2015), δοκιμές της τεχνολογίας iDAS, έχουν διεξαχθεί σε πολλαπλά φρεάτια στην Σαουδική Αραβία με σκοπό την παρακολούθηση του ακουστικού σήματος τόσο στο εσωτερικό μιας γεώτρησης, όσο και στο γεωλογικό σχηματισμό χρησιμοποιώντας καλώδια οπτικών ινών που είχαν τοποθετηθεί στο εξωτερικό του σωλήνα παραγωγής για την ταυτόχρονη παρακολούθηση της ροής και την σεισμική απεικόνιση.

Αυτά τα φρεάτια, διέφεραν μεταξύ τους ως προς την χρήση τους, την κατασκευή τους και τον τύπο καλωδίου οπτικών ινών μέσα στα οποία είχαν εγκατασταθεί.

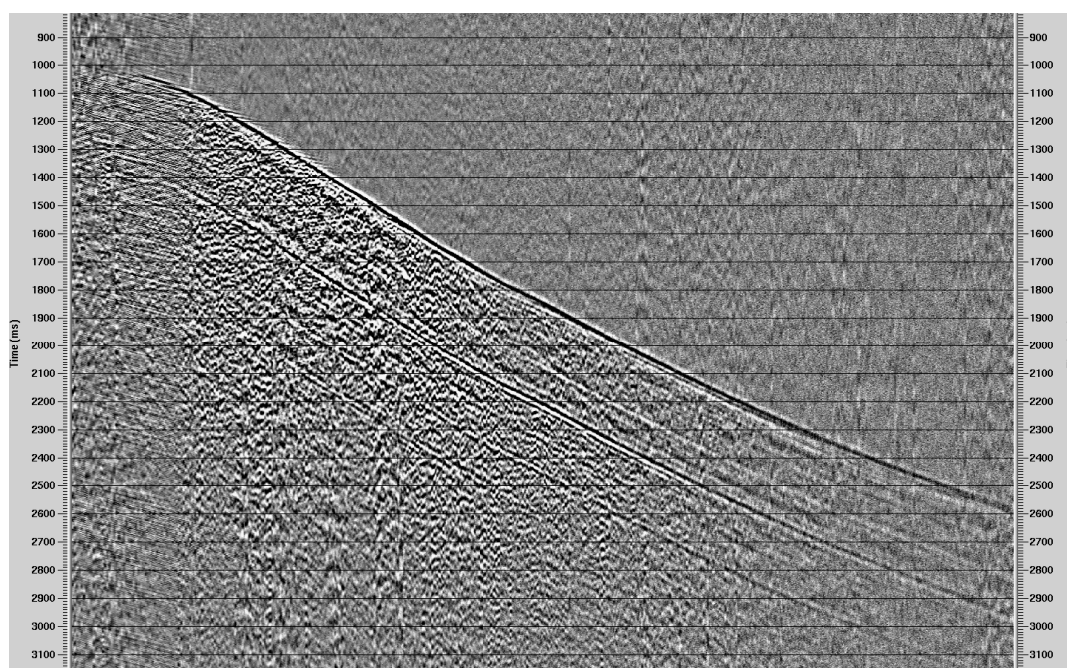
Τα δεδομένα αποκτήθηκαν σε 3 στάδια. Το σύστημα iDAS προσαρμόστηκε στα ήδη εγκατεστημένα καλώδια οπτικών ινών μέσα στις γεωτρήσεις. Κατά την διάρκεια του προγράμματος απόκτησης δεδομένων για κάθε γεώτρηση, με διαφορετική ροή. Το iDAS αποδείχθηκε ικανό να μετρήσει το σήμα του ήχου SoS (signal of the sound) εντός γεώτρησης όταν υπήρχε επαρκής μετάδοση ακουστικής ενέργειας.

4.1.4 Ταυτόχρονη πολλαπλή απόκτηση σεισμικών δεδομένων.

Ταυτόχρονη πολλαπλή απόκτηση σεισμικών δεδομένων υλοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2012 (Madsen et al, 2013) . 4 μονάδες iDAS μετασκευάστηκαν από ήδη υπάρχουσες οπτικές ίνες σε 3 γεωτρήσεις, και ταυτόχρονα κατέγραψαν ακουστικά σήματα που είχαν παραχθεί από σεισμική πηγή στην επιφάνεια. Η δοκιμή διεξήχθη χωρίς να διαταραχθεί η κανονική λειτουργία των γεωτρήσεων.

Για την δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ένα σκάφος για την μεταφορά της σεισμικής πηγής που είχε ήδη κινητοποιηθεί για σεισμική έρευνα OBC (καλώδιο με αισθητήρες στον πυθμένα) στην περιοχή, χρησιμοποιώντας την ίδια πηγή.

Μετά την δοκιμή, οι ίνες τοποθετήθηκαν ξανά σε κανονική λειτουργία. Το σχήμα 4.1, δείχνει ένα παράδειγμα αρχικών δεδομένων από έκρηξη που καταγράφηκε από οπτική ίνα σε μία από τις 3 γεωτρήσεις. Ένα ίχνος καταγραφόταν για κάθε 1 μέτρο του καλωδίου. Η βολή διεξήχθη από την επιφάνεια και σε απόσταση περίπου 750 μέτρων από την πλατφόρμα. Απευθείας κύμα καθώς και κάποια μετωπικά και ανακλώμενα φαίνονται καθαρά στο σχήμα 4.1. Η γεώτρηση είχε κανονική παραγωγή κατά την διάρκεια της απόκτησης δεδομένων, και ο θόρυβος από την παραγωγή είναι μέρος των δεδομένων, όπως και το σεισμικό σήμα. Από τον θόρυβο παραγωγής, ήταν δυνατό να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την ροή μέσα στην γεώτρηση. Από σεισμικής άποψης, ήταν απαραίτητη η αφαίρεση του θορύβου, ώστε να αυξηθεί ο λόγος σεισμικού σήματος/θορύβου, και να προετοιμαστούν τα δεδομένα για χωροθέτηση.



Σχήμα 4.1 παράδειγμα πρώτων δεδομένων που αποκτήθηκαν με την χρήση οπτικών ινών (DAS) εγκατεστημένων σε μια γεώτρηση παραγωγής. (Madsen et al 2013).

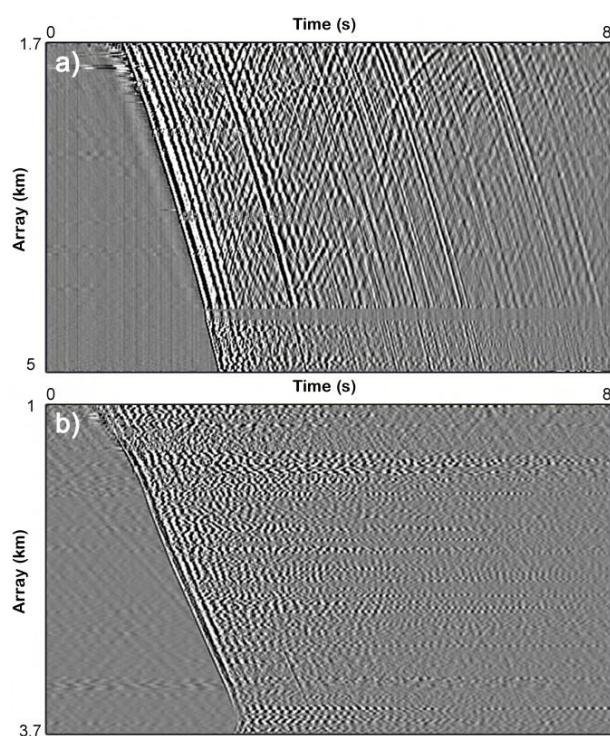
4.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ DAS - VSP ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ

4.2.1 Μελέτη DAS-VSP/OBN για απεικόνιση κοιτάσματος κάτω από δόμο άλατος στον κόλπο του Μεξικού

Το 2013, σύμφωνα με τους Zhan et al (2015), χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα 3D DAS-VSP, που αποκτήθηκαν από την OptaSense στο πεδίο Mars που ανήκει στη Shell στον κόλπο του Μεξικού. Τα δεδομένα είχαν αποκτηθεί το 2012, σε δύο γεωτρήσεις ταυτόχρονα με σεισμική διασκόπηση στον βυθό του ωκεανού (OBN), χρησιμοποιώντας επιφανειακή πηγή – σκάφος.

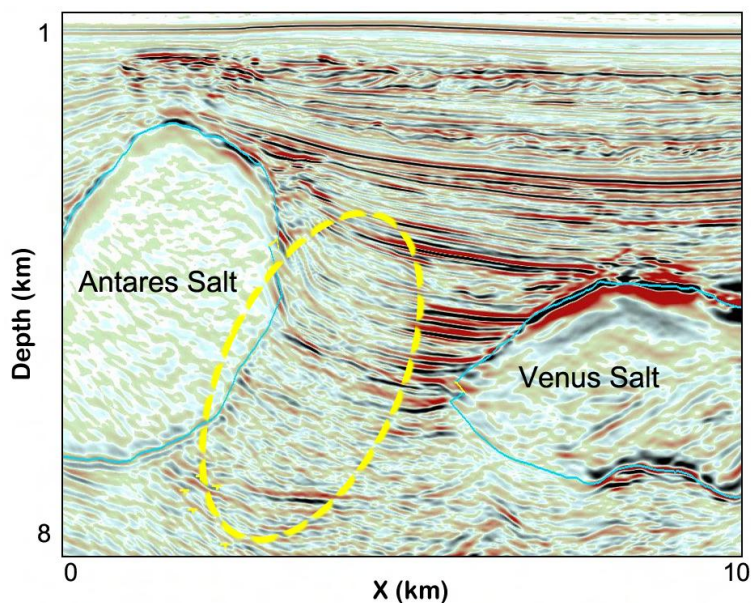
Η επαναλαμβανόμενη παρακολούθηση ταμειυτήρα χρησιμοποιώντας σεισμικές τομές, μπορεί να μας δώσει σημαντικές πληροφορίες για να καθοδηγήσει την τοποθέτηση παραγωγικών γεωτρήσεων και γεωτρήσεων έγχυσης σε υψηλής αξίας ταμειυτήρες. Εγινε καταγραφή τόσο με κατακόρυφη όσο και με οριζόντια οπτική ίνα (Σχήμα 4.2).

Ωστόσο, στο κοιτάσμα Mars, που βρίσκεται κάτω από δόμο άλατος (Antares salt), οι στο πυθμένα σεισμικές έρευνες (OBN), δεν έδωσαν την απαιτούμενη ανάλυση της μορφολογίας του ταμειυτήρα. Επιπλέον η αναλογία σήματος/θορύβου, σε επαναλαμβανόμενες σεισμικές μετρήσεις, ήταν κακή, λόγω των δύο διαδρομών διαμέσου του δόμου άλατος (Σχήμα 4.3).



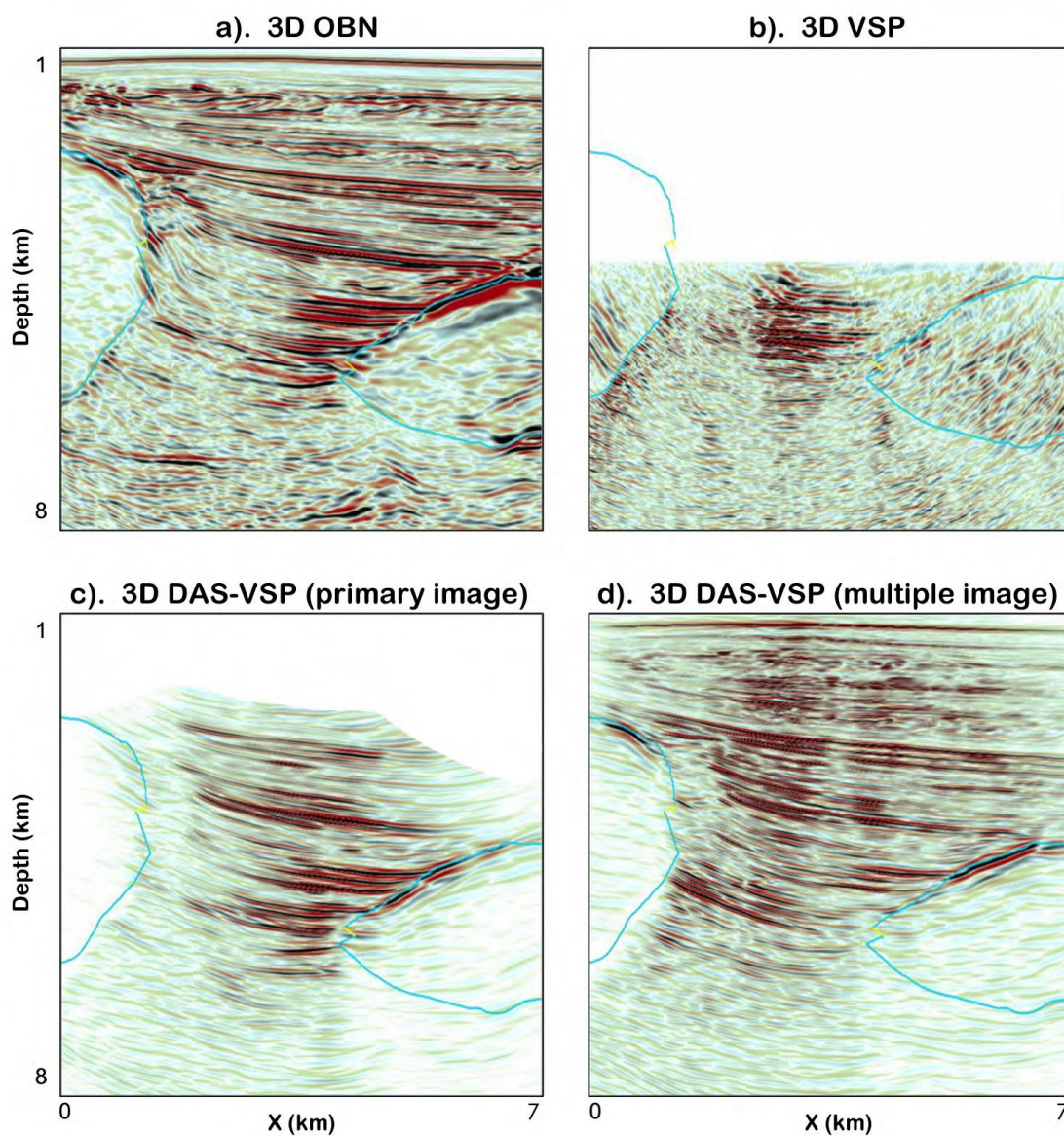
Σχήμα 4.2 Τα δεδομένα που καταγράφηκαν από την κατακόρυφη ίνα (α), φαίνεται να έχουν καλύτερη ποιότητα από την καταγραφή με οριζόντια ίνα (β). (Ge Zhan et al, 2015)

Η ανάλυση από τα δεδομένα DAS, δείχνει καθαρά και τις 2 απεικονίσεις συγκρίσιμες μεταξύ τους και υψηλότερη ποιότητα εικόνας από ότι οι σεισμικές ή OBC/OBN σεισμικές εικόνες.



Σχήμα 4.3 Τμήμα σεισμικών τομών από μια 3D απεικόνιση μιας τρισδιάστατης μελέτης OBN (αισθητήρες που τοποθετούνται στον πυθμένα) στον κόλπο του Μεξικού. Φαίνεται ότι ο δόμος άλατος Antares πάνω από τον ταμιευτήρα, δημιούργησε σκιερή ζώνη (κίτρινη έλλειψη) και δυσκόλεψε την απόκτηση καθαρής εικόνας από τα δεδομένα (OBN). Σε αυτή την περιοχή η τεχνολογία DAS – VSP θα βοηθούσε. (Zhan et al, 2015).

Τα καλώδια οπτικών ινών που αρχικά είχαν τοποθετηθεί σε γεωτρήσεις παραγωγής για μετρήσεις πίεσης/θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκαν για να μετατρέψουν τις γεωτρήσεις σε γιγάντιες κεραίες ανίχνευσης ώστε να απεικονίσουν και να παρακολουθήσουν τον ταμιευτήρα (Σχήμα 4.4).

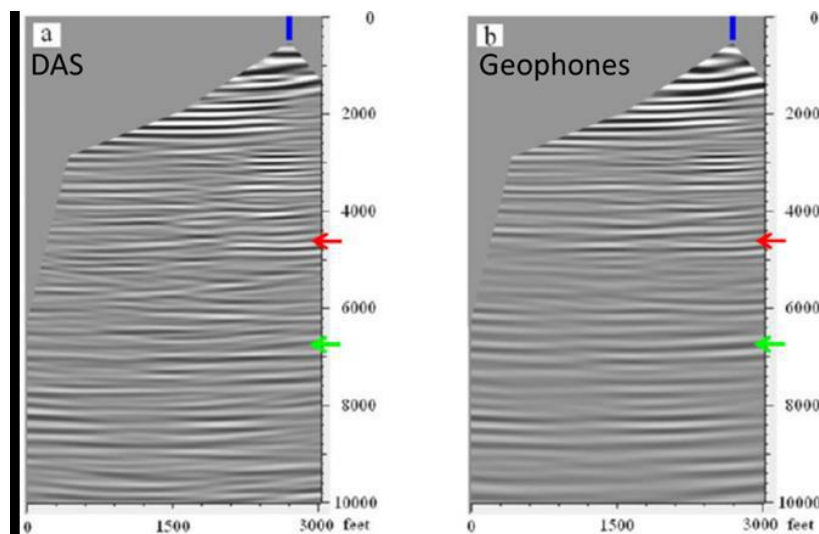


Σχήμα 4.4 Σεισμικές τομές, από τις διαφορετικές 3D μελέτες (Zhan et al, 2015).

Παρατηρείται πως η τοποθέτηση μεγάλων συστοιχιών δεκτών μόνιμα εγκατεστημένων σε γεωτρήσεις, κάτω από δομές υπερκείμενων δόμων άλατος, είχε την δυνατότητα να παρέχει την απαιτούμενη ανάλυση και να καταστεί δυνατή η παρακολούθηση στον ταμειευτήρα.

4.2.2 Σύγκριση σεισμικών ερευνών DAS - συμβατικών μεθόδων για αναζήτηση CCS

Για μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2014 με σκοπό την αναζήτηση CCS (Carbon CO₂ Storage) έγινε σύγκριση σεισμικών ερευνών μεταξύ DAS, και συμβατικών μεθόδων, σε πεδίο με γεώφωνα μόνιμα εγκατεστημένα εντός του φρεατίου της γεώτρησης, καθώς επίσης και μεταξύ συμβατικών συστοιχιών γεωφώνων. Αυτό επέτρεψε την άμεση σύγκριση μεταξύ DAS και των γεωφώνων μετά την χωροθέτηση των δεδομένων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 (Longton 2015)



Σχήμα 4.5: Χωροθέτηση σεισμικής τομής, χρησιμοποιώντας δεδομένα DAS (αριστερά), συγκρίνεται με μετεγκατεστημένο; σύνολο δεδομένων με την χρήση συμβατικών γεωφώνων (δεξιά). (Longton, 2015).

Η απόκριση του DAS – VSP φαίνεται να είναι ισοδύναμη με αυτή που δίδεται από συμβατικά γεώφωνα -- VSP. Επιπλέον, όταν η μέτρηση πραγματοποιήθηκε ξάνα μετά από 1 χρόνο, υπήρχε μία μόνο μικρή διαφορά στην απόκριση ινών με την τεχνολογία DAS, αποδεικνύοντας ότι ήταν κατάλληλο για μακροπρόθεσμα επαναλαμβανόμενα πειράματα σε διαφορετική χρονική στιγμή.

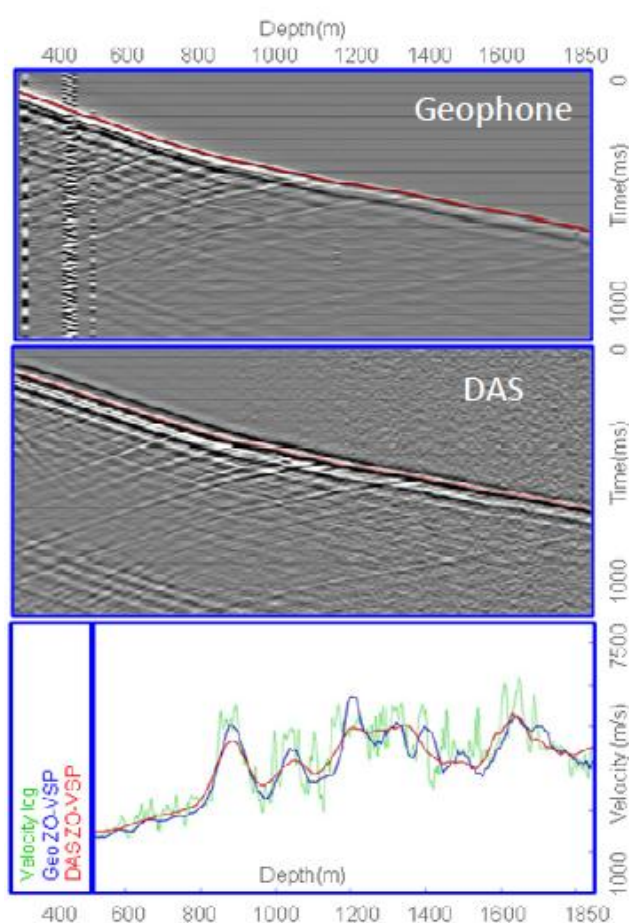
4.2.3 Σύγκριση DAS– Zero-Offset, Walk-away VSP με συμβατικά γεώφωνα για μελέτη CCS

Το 2010, σε αυτό το πεδίο δοκιμής, αποκτήθηκαν δεδομένα Zero-Offset VSP (μηδενικής απόστασης πηγής-γεώτρησης) και Walk-Away VSP (μεταβαλλόμενης απόστασης πηγής – γεώτρησης) με σκοπό να αξιολογηθεί η σκοπιμότητα παρακολούθησης της αποθήκευσης CO₂ (Cox et al, 2012 / Mestayer et al, 2012).

Παρακάτω φαίνεται η καταγραφή δεδομένων VSP και δεδομένων DAS, για το Quest CCS Project το 2010.

Διασκόπηση μηδενικής απόστασης πηγής – γεώτρησης για διάταξη κοινής πηγής (Zero-Offset CSG).

Μετά την καταγραφή, τα δεδομένα από το σύστημα DAS και από τα γεώφωνα, συσχετίζονται με την κυματομορφή του υδραυλικού ταλαντωτή (vibrator sweep) για να παράξουν διάταξη κοινής πηγής (CSG), όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.6. Το σχήμα παρουσιάζει την σύγκριση μεταξύ των δεδομένων από συμβατικά γεώφωνα (πάνω) και των δεδομένων DAS (μέση) για τη μελέτη Zero-Offset CSG.



Σχήμα 4.6 Πάνω : Καταγράφονται δεδομένα ZO-VSP, χρησιμοποιώντας μια σειρά γεωφώνων (ισαπόσταση 7.5 μέτρων μεταξύ τους, μετακίνηση 3 φορές για να καλύψουν όλη τη γεώτρηση).

Μέση : Καταγράφονται δεδομένα ZO-VSP, χρησιμοποιώντας μια σειρά DAS, (ισαπόσταση 10 μέτρων μεταξύ των καναλιών, κάλυψη ολόκληρης της γεώτρησης). Έχει εφαρμοστεί αυτόματη ενισχυση (AGC), και στις δύο ZO-VSP καταγραφές. Οι κόκκινες γραμμές δείχνουν τα πρώτα σημεία άφιξης που επιλέγονται για να υπολογιστούν οι ταχύτητες.

Κάτω : Σύγκριση των ταχυτήτων που αποκτούνται από DAS ZO-VSP (κόκκινη), από γεώφωνα ZO-VSP (μπλε) και την ακουστική διαγραφή (πράσινη). (Cox et al, 2012).

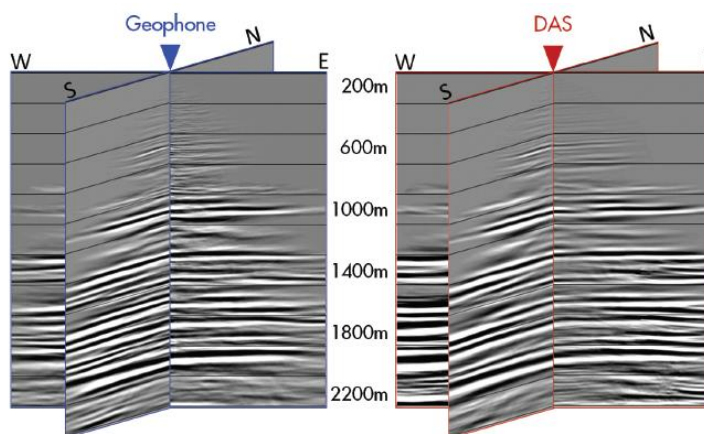
Παρατηρείται ότι το προφίλ των γεωφώνων, παρουσιάζει ανώμαλες κορυφές γύρω στα 1200 και 1400 μέτρα βάθος, εξαιτίας των πολλαπλών ρυθμίσεων στη συνδεσμολογία των γεωφώνων. Κατά την μετάβαση από την μία συστοιχία στην επόμενη, μπορεί να διαφέρει η πραγματική ισαπόσταση μεταξύ των δεκτών (receiver spacing) από την τιμή των 7,5 μ, προκαλώντας ανωμαλίες στην ταχύτητα, καθώς αυτές υπολογίζονται με βάση το βάθος / παραγόμενου χρόνου. Το προφίλ ταχυτήτων του DAS, δεν εμφανίζει αυτά τα προβλήματα, καθώς το καλώδιο DAS, είναι μια ενιαία, μόνιμως τοποθετημένη συστοιχία δεκτών που δεν απαιτεί μετακίνηση.

Δηλαδή από αυτή την σύγκριση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Οι πρώτες αφίξεις του DAS, είναι ευδιάκριτες στο πραγματικό βάθος (2 Km)
- Ισχυρές ανακλάσεις παρόμοιες στην DAS και στα συμβατικά γεώφωνα
- Ο λόγος σήματος / θόρυβο είναι μικρότερος στην DAS σε αντίθεση με τα γεώφωνα
- Τα φάσματα συχνοτήτων των γεωφώνων και του DAS, είναι συγκρίσιμα, όμως τα δεδομένα γεωφώνων έχουν ελαφρώς υψηλότερη συνεκτικότητα; στη συχνότητα.

Σεισμική διασκόπηση μεταβαλλόμενης απόστασης πηγής – γεώτρησης με χρήση σεισμικής τομογραφίας (Walk-Away VSP)

Το πεδίο Quest, περιέχει δύο σειρές μετρήσεων VSP μεταβαλλόμενης απόστασης πηγής - γεώτρησης: Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης. Τα επεξεργασμένα δεδομένα Walk-Away VSP, παρείχαν αποτελεσματικά μια σύντομη δυσδιάστατη σεισμική γραμμή με επίκεντρο το φρεάτιο της γεώτρησης. Το σχήμα 4.7, δείχνει τα αποτελέσματα μετά την επεξεργασία και χωροθέτηση των δεδομένων DAS και γεωφώνων, με τον ακριβώς ίδιο τρόπο.



Σχήμα 4.7 Με κατεύθυνση Βορρά–Νότο και Ανατολή - Δύση, απεικονίζονται δεδομένα Walk-Away VSP, ως αποτέλεσμα της χωροθέτησης του κυματικού πεδίου. VSP εικόνα γεωφώνων (αριστερά), DAS-VSP εικόνα (δεξιά) (Cox et al, 2012)

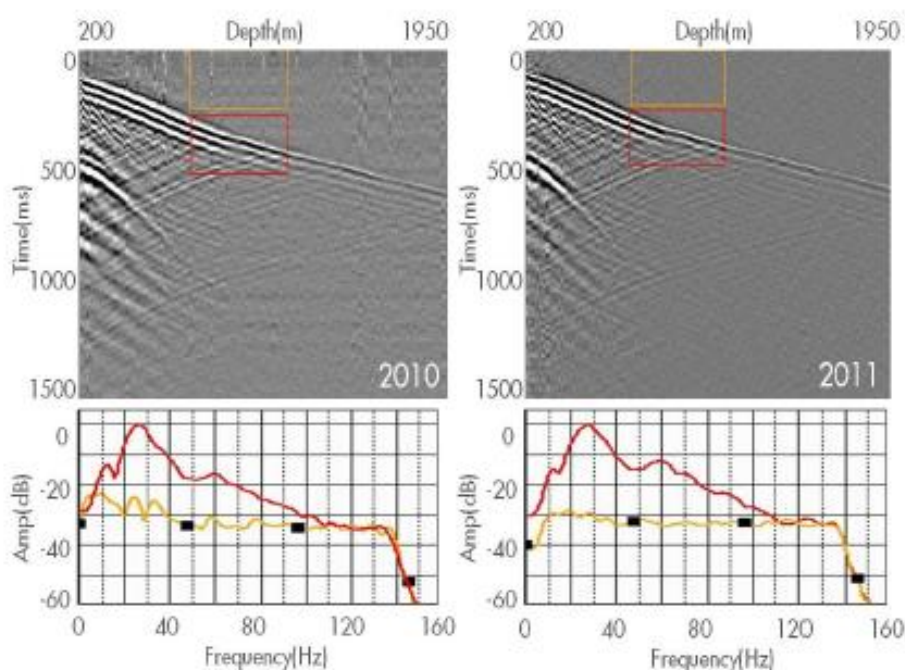
Από αυτό το σχήμα, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Η σεισμική τομή που προκύπτει από την DAS και από τα γεώφωνα, είναι παρόμοια.
- Το φασματικό περιεχόμενο της εικόνας DAS VSP, είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτήν των γεωφώνων, το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς η συνοχή της συχνότητας των πρώτων δεδομένων DAS, ήταν επίσης μικρότερη.
- Οι τομές και των δύο μεθόδων είναι ομαλές διότι εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής ανακλαστών μεγάλης κλίσης, ώστε να αποτρέψει τον θόρυβο που εισάγει η χωροθέτηση στην απεικόνιση.

- Οι γραμμές Βορρά – Νότου και Ανατολής – Δύσης, συνδιάζονται, γεγονός που αποδεικνύει ότι τα επεξεργασμένα δεδομένα και των δύο γραμμών, ταιριάζουν.

Συνολικά, φαίνεται πως η τεχνολογία DAS, μπορεί να αντικαταστήσει τα συμβατικά γεώφωνα στην μελέτη Quest MMV. Η Zero-Offset VSP με χρήση DAS, είναι ικανή να βγάξει ένα καλό προφίλ ταχυτήτων και στην Walk-Away VSP, η σεισμική τομήDAS, είναι παρόμοια με την τομή που δίνουν τα γεώφωνα.

Το 2011, βελτιωμένα αποτελέσματα ελήφθησαν στο project Quest (Canada) (Σχήμα 4.8). Τα αρχικά δεδομένα του 2010 εκεί, έδειχναν εξ αρχής ανακλάσεις αλλά οι τομές του 2011 δείχνουν καθαρότερες. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα νέα σύνολα δεδομένων, έχουν μικρότερη ισαπόσταση δέκτη, δηλαδή, ένα μήκος καναλιού 8 μέτρων σε αντίθεση με το προηγούμενο 10 μέτρων.



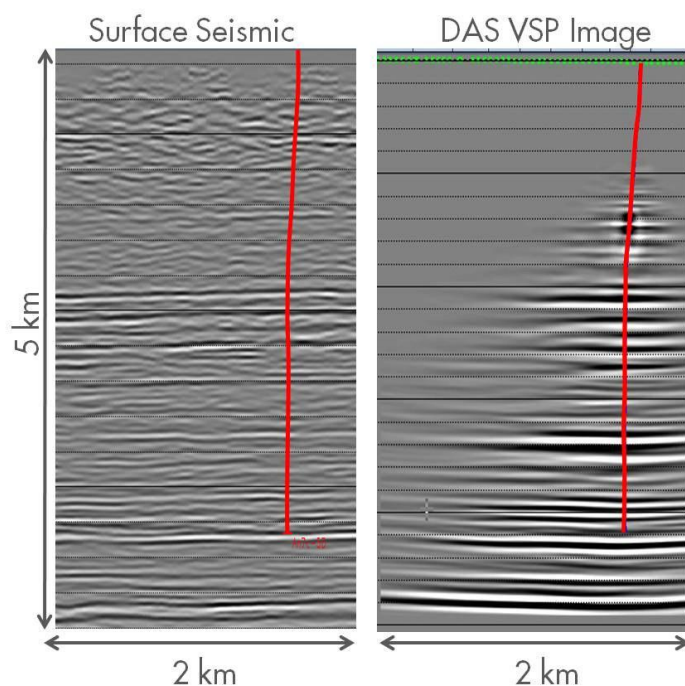
Σχήμα 4.8: DAS VSP στο πεδίο Quest: πάνω αριστερά – 2010, πάνω δεξιά – 2011.

Από κάτω είναι το φάσμα πλάτους σήματος και θορύβου που εκτιμήθηκε από τα δεδομένα στα κόκκινα και κίτρινα κουτάκια αντίστοιχα. Τα δεδομένα του 2011 φαίνεται να έχουν ένα μεγαλύτερο λόγο σήματος/θορύβου S/N. (Cox et al, 2012).

4.2.4 Σύγκριση σεισμικής απεικόνισης DAS - συμβατική μέθοδο VSP στο πεδίο Pinedale

Έχει αποδειχθεί ότι η τεχνολογία DAS μπορεί να παράγει τομές VSP πανομοιότυπες με εκείνες των γεωφώνων, σε περιοχές με καλή ποιότητα σήματος, όπως πχ. Quest. Ωστόσο, σε βαθείς γεωτρήσεις με ετερογενής δομές υπερκείμενων στρωμάτων όπως πχ. Pinedale, οι ανακλάσεις DAS, δεν ήταν αρκετά ισχυρές ώστε να παράγουν μία χρήσιμη τομή, μέχρι πριν λίγο διάστημα (Mateeva et al, 2012).

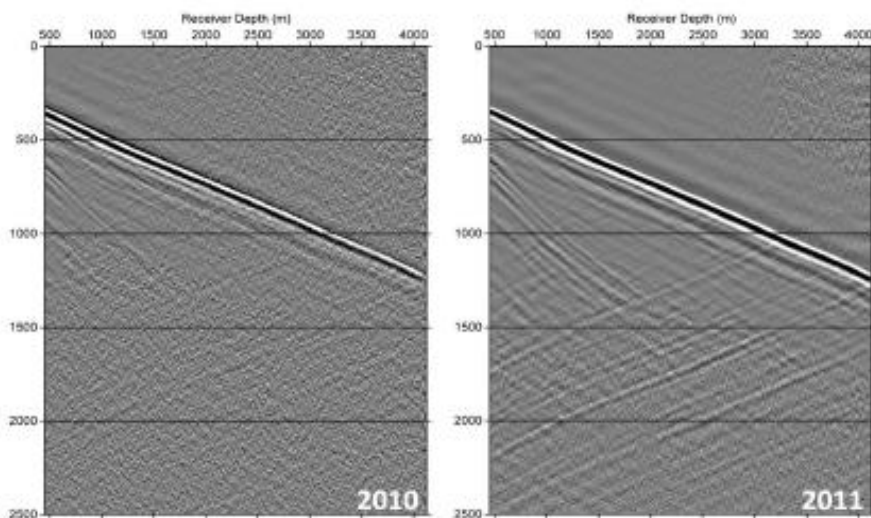
Η αρχική απεικόνιση, παρουσιάζει καλή συμφωνία με τα επιφανειακά σεισμικά μέχρι βάθος των 4 -5 χλμ. Η σεισμική τομή από το VSP θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω με την εφαρμογή της χωροθέτησης, χρησιμοποιώντας ένα πιο λεπτομερές μοντέλο ταχυτήτων το οποίο προέκυψε από πείραμα ελέγχου της ταχύτητας με τεχνολογία DAS όπου στην συνέχεια έγινε εξισσορόπιση του φασματικού περιεχομένου των επιφανειακών σεισμικών και των μετρήσεων VSP (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9 Σεισμική τομή που προέρχεται από τρισδιάστατο πείραμα σεισμικής ανάκλασης (αριστερά) – σεισμική τομή από πείραμα VSP με την τεχνολογία DAS στο πεδίο Pinedale (δεξιά (Mateeva et al, 2012)

Δεδομένα που λήφθηκαν το 2010, (SEG; 2011), ήταν κατάλληλα για την παραγωγή πειραμάτων ελέγχου της ταχύτητας και σε πολλές περιπτώσεις καθιστώντας τις τομές VSP, συγκρίσιμες με αυτές από συμβατικά γεώφωνα. Νεότερη έκδοση της μονάδας IU αναπτύχθηκε το 2011 απέδωσε ακόμα καλύτερα δεδομένα. Ένα παράδειγμα από το πεδίο Pinedale field (onshore US) φαίνεται στο σχήμα 4.10. Παρατηρούνται καθαρά οι ανακλάσεις στα δεδομένα του 2011, σε αντίθεση με τα αρχικά δεδομένα του 2010, όπου δεν είναι εμφανείς. Η αποκάλυψη των δεδομένων του 2011, οφείλεται κυρίως σε μια μέτρια αύξηση (~5dB) της αναλογίας σήματος/θορύβου. Ένας επιπλέον παράγοντας μπορεί να ήταν μια αύξηση στην συνάφεια του σεισμικού σήματος.

Τα νέα σύνολα δεδομένων, έχουν μικρότερη ισαπόσταση δέκτη, δηλαδή, ένα μήκος καναλιού 8 μέτρων σε αντίθεση με το προηγούμενο 10 μέτρων.



Σχήμα 4.10 Καταγραφή DAS, για μέτρηση Zero-offset VSP στο πεδίο Pinedale : αριστερά– δεδομένα 2010, δεξιά - δεδομένα 2011 (Mateeva et al, 2012).

4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εμπιστοσύνη στην τεχνολογία DAS, για την καταγραφή χρήσιμων δεδομένων έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία 3 χρόνια. Καθώς έχουν εγκατασταθεί καλώδια σε πολλές γεωτρήσεις, δίνεται η ευκαιρία σήμερα να επαναξιολογηθεί η δυναμικότητα του πεδίου; χρησιμοποιώντας σεισμικές έρευνες και επίσης να καθοριστούν συγκεκριμένα προφίλ παραγωγής.

Το κόστος για όλη αυτή την συλλογή δεδομένων, είναι πολύ μικρότερο από τις εταιρείες παροχής υπηρεσιών και για αυτό το λόγο, είναι ιδανικό να υιοθετηθούν αυτές οι τεχνικές που περιορίζουν τον χρόνο διακοπής της παραγωγής.

Με την χρήση DAS, καλώδια εγκατεστημένα σε υπάρχουσες γεωτρήσεις για μελέτη DTS, είναι πλέον αποτελεσματικά σαν λειτουργία “ μικροφώνων μέσα στον ταμιευτήρα”. Πιο συγκεκριμένα, ένας μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων έχει πλέον γίνει βιώσιμος για έρευνες 3D-VSP, για παρακολούθηση των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα σε μια μεγάλη περιοχή μελέτης.

Η απόκτηση δεδομένων DAS εντός μιας γεώτρησης, είναι εγγενώς απλούστερη από την απόκτηση με συμβατικά γεώφωνα, καθώς ολόκληρη η γεώτρηση καλύπτεται με μια μόνο έκρηξη της πηγής. Με γεώφωνα, απαιτούνται πολλές εκρήξεις. Η μία μόνο κάλυψη, οδηγεί σε μειωμένη έκθεση σε κινδύνους που σχετίζονται με την ασφάλεια και την υγιεινή) και μείωση του κόστους σε σχέση με την συλλογή δεδομένων από τη γεώτρηση, ενοικίαση εξοπλισμού (πηγή - δέκτης), χρόνος εργατικού προσωπικού και χρόνος εγκατάστασης εξοπλισμού. Η απόκτηση δεδομένων σε όλη την γεώτρηση με μία μόνο βολή, βελτιώνει την επαναληψιμότητα και ως εκ τούτου την ευαισθησία. Επιπλέον, ορισμένα χρήματα από την παραπάνω εξοικονόμηση κατά την απόκτηση δεδομένων DAS, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν υψηλή υπεδαφική κάλυψη και περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας δεδομένων DAS.

Το σύστημα DAS, μπορεί να πραγματοποιήσει το όραμα μιας πλήρους εξοπλισμένης γεώτρησης από την επιφάνεια μέχρι το τελικό βάθος. Καθίσταται προφανές, ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου το DAS, είναι η μόνη βιώσιμη εναλλακτική για γεωφυσική επιτήρηση σε γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου, ή σε γεωτρήσεις στις οποίες δεν μπορούν να εισαχθούν τα καλώδια οπτικών ινών χωρίς μετακίνηση του εξοπλισμού ολοκλήρωσης της κατασκευής της γεώτρησης (completion equipment) ή όπου μεγάλες συστοιχίες μπορεί να μην είναι ασφαλές να αναπτυχθούν (πχ. μεγάλες οριζόντιες γεωτρήσεις). Βελτιωμένη επαναληψιμότητα είναι πιθανή με την χρήση συγκριτικά φθηνότερων μόνιμα εγκατεστημένων ινών, από ότι πολλαπλά αναπτυγμένα γεώφωνα. Ως εκ τούτου, ενώ φαίνεται ότι οι μετρήσεις DAS μπορεί να μην μπορούν να πετύχουν την υψηλή πιστότητα των γεωφώνων, δηλαδή το επίπεδο θορύβου να είναι υψηλότερο σε σχέση με τα συμβατικά γεώφωνα και το φασματικό περιεχόμενο χαμηλότερο, ωστόσο το χαμηλό κόστος, η απλότητα και οι μη παρεμβατικές τεχνικές του συστήματος DAS, μπορεί να είναι κατά περίπτωση λύση για εφαρμογές παρακολούθησης ταμειευτήρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

5.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Η σεισμική τομογραφία είναι από τις πλέον κατάλληλες γεωφυσικές μεθόδους ανάλυσης σεισμικών δεδομένων και χρησιμοποιείται για την περαιτέρω επεξεργασία της πληροφορίας που λαμβάνεται από τις γεωτρήσεις. Συμβάλλει στην λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους χρησιμοποιώντας ελάχιστα δαπανηρές γεωτρήσεις διότι εκτός από τις σεισμικές καταγραφές, σαν δεδομένα χρησιμοποιούνται και γεωλογικές πληροφορίες. Η πυκνότητα και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι κάποια από τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι πετροφυσικές παράμετροι των γεωλογικών σχηματισμών.

Επιπλέον, είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Το υπέδαφος απεικονίζεται σαν συνάρτηση των σεισμικών ταχυτήτων διάδοσης, μέσω του μεγάλου όγκου των χρόνων διαδρομής ανακλώμενων κυμάτων από διαφορετικές διαχωριστικές επιφάνειες και τις αντίστοιχες αποστάσεις πηγής- γεωφώνου.

Χάρη στην αξιοποίηση ταχύτερων τεχνικών διάδοσης των σεισμικών ακτίνων, ο υπολογιστικός χρόνος μειώνεται σημαντικά και γίνεται πιο εύχρηστη η προτεινόμενη μέθοδος.

Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθεί ότι οι σεισμικές εικόνες ταχύτητας πρέπει να ερμηνεύονται και όχι απλά να γίνονται αποδεκτές ως σαφή δεδομένα της δομής του υπεδάφους. Η ερμηνεία απαιτεί κάποια κατανόηση των περιορισμών αυτής της μεθόδου εξερεύνησης. Υπάρχουν τρεις ουσιαστικές απαιτήσεις, για μια επιτυχή σεισμική τομογραφική έρευνα:

1. Καλή κάλυψη σεισμικών ακτίνων μεταξύ των θέσεων πηγής και δεκτών πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος.
2. Τα δεδομένα θα πρέπει να είναι υψηλής συχνότητας (μικρό μήκος κύματος σχετικά με το μέγεθος των θαμμένων δομών).
3. Καλή αναλογία του σήματος σε σχέση με την διαταραχή των στοιχείων.

Η σεισμική τομογραφία έχει αποδειχθεί ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο απεικόνισης σε πολλές εφαρμογές. Είναι κατάλληλη τόσο για εφαρμογές υπογείων έργων, όσο και στην περίπτωση ταμειωτήρων υδρογονανθράκων, καθώς, από τη λεπτομερή χαρτογράφηση των πετροφυσικών παραμέτρων αυξάνεται το ποσοστό απόληψης πετρελαίου. Με τη σεισμική τομογραφία οι παραπάνω σχηματισμοί εντοπίζονται και χαρτογραφούνται με αποτέλεσμα την βελτισποίηση του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης. (Βαφείδης, 1993)

Σε περίπτωση μελέτης των ανακλώμενων σεισμικών κυμάτων, πρόκειται για τομογραφία ανάκλασης (reflection tomography). Στην τομογραφία διάδοσης (transmission tomography) μελετώνται τα σεισμικά κύματα που διαδίδονται χωρίς αυτά να υφίστανται ανάκλαση (Σουπιός,1997). Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η τομογραφία χρόνων διαδρομής των διαθλώμενων κυμάτων ή αλλιώς η σεισμική τομογραφία πρώτων αφίξεων.

Μια τυπική διάταξη γεώτρησης-γεώτρησης(Crosshole) τοποθετεί την υπό μελέτη περιοχή ανάμεσα στις δύο γεωτρήσεις. Στη μία είναι τοποθετημένη η πηγή και στην άλλη τα γεώφωνα. Ενεργοποιείται η πηγή και αναγράφονται οι χρόνοι άφιξης των σεισμικών κυμάτων στα γεώφωνα. Στη συνέχεια η πηγή τοποθετείται σε άλλη θέση. Ενεργοποιείται ξανά και καταγράφονται οι χρόνοι άφιξης στα γεώφωνα. Η πηγή μετακινείται, έως ότου το δίκτυο των σεισμικών ακτίνων να καλύψει όλη την υπο μελέτη περιοχή. Η μελέτη συνεχίζεται μετακινώντας τη διάταξη των γεωφώνων προς τα πάνω ή προς τα κάτω.

Στην σεισμική τεχνική VSP, (Κ.Σ.Τ.) τα γεώφωνα είναι τοποθετημένα μέσα στη γεώτρηση και η πηγή στην επιφάνεια της γης έτσι ώστε πηγή και γεώφωνα να βρίσκονται πάντα στο ίδιο κάθετο επίπεδο. Στην ανεστραμμένη τεχνική RVSP (Α.Κ.Σ.Τ.) τα γεώφωνα είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια της γης και η πηγή στην γεώτρηση.

Οι τρεις αυτοί διαφορετικοί τρόποι διεξαγωγής του πειράματος σεισμικής τομογραφίας διάδοσης εφαρμόζονται ξεχωριστά ο καθένας ή σε συνδιασμό δύο ή τριών. Στο πείραμα γεώτρησης – γεώτρησης, οι ακτίνες των σεισμικών κυμάτων δεν περνούν διαμέσω του αποσαθρωμένου επιφανειακού στρώματος όπου παρατηρείται έντονη απόσβεση των σεισμικών κυμάτων. Από το στρώμα αυτό περνούν οι ακτίνες των άλλων δύο διατάξεων με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια της μεθόδου.

5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Το βασικό αντικείμενο αυτής της μεθόδου, είναι ο προσδιορισμός της τρισδιάστατης ($V(x,y,z)$) ή δισδιάστατης ($V(x,y)$) κατανομής των ταχυτήτων των κυμάτων χώρου(body-waves) μέσα στη Γη, χρησιμοποιώντας τις πρώτες αφίξεις των χρόνων διαδρομής, μεταξύ πηγών και γεωφώνων, οι θέσεις των οποίων είναι γνωστές στο χώρο.

Η υπό μελέτη περιοχή διαιρείται σε δίκτυο από μικρά τετράγωνα σταθερής ταχύτητας. Κάθε μικρό τέτοιο τετραγώνάκι ονομάζεται κελί (Παγκράτης,2012). Οι διαστάσεις των κελιών, καθορίζουν την λεπτομέρεια στην απεικόνιση. Με την αύξηση του αριθμού των κελιών παρατηρείται μείωση του αριθμού των ακτίνων που περνούν απο κάποιο κελί και μείωση της ακρίβειας της σεισμικής ταχύτητας αυτού του κελιού. Η

διαφοροποίηση στις ταχύτητες σε δύο κελιά μπορεί να σημαίνει διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς ή μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων του ίδιου σχηματισμού.

Οι ταχύτητες των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων εξαρτώνται από τις ιδιότητες των πετρωμάτων (λιθολογία, πορώδες, είδος και θερμοκρασία των περιεχόμενων ρευστών, ελαστικές σταθερές, πυκνότητα και κατάσταση ρηγμάτωσης, βάθος και διαφορική πίεση, δηλαδή διαφορά της ολικής πίεσης του σχηματισμού μείον την πίεση των ρευστών), του υπο μελέτη σχηματισμού (Μπριντάκης, 2016, / Παγιαλάκης, 2014)).

Για την μέτρηση των ταχυτήτων χρησιμοποιούνται οι χρόνοι διαδρομής (travel times) των σεισμικών κυμάτων. Συνήθως υπολογίζονται οι χρόνοι διαδρομής των πρώτων αφίξεων των επιμήκων κυμάτων (Ρ-κυμάτων) (Τσούσης, 2007). Μεταγενέστερες αφίξεις των Ρ-κυμάτων είναι πιο δύσκολο να αναγνωρισθούν. Τα εγκάρσια κύματα (S-κύματα), χρησιμοποιούνται λιγότερο στη σεισμική τομογραφία, λόγω του ότι υπάρχει δυσκολία στην επιλογή των χρόνων άφίξής τους, διότι φθάνουν μετά από τα Ρ-κύματα και σε χρόνο παρόμοιο με αυτό των μεταγενέστερων (ανακλάσεις αφίξεων Ρ-κυμάτων).

5.3 ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΒΗΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

5.3.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Αρχικά συλλέγονται τα δεδομένα (data gathering step), όπου γίνεται η αναγνώριση των σεισμικών κυμάτων και η επιλογή των χρόνων διαδρομής. Η συλλογή των δεδομένων αποτελεί το πιο χρονοβόρο βήμα. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια των μετρήσεων των χρόνων διαδρομής. Μιά πολύ μικρή μεταβολή στη τιμή του χρόνου μπορεί να δώσει ένα τελείως διαφορετικό μοντέλο ταχυτήτων.

5.3.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΥΘΕΩΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ (forward modeling)

Αφού έχει επιλεγεί το αρχικό μοντέλο, γίνεται η επίλυση του ευθέως προβλήματος (forward modeling). Υπολογίζεται η σεισμική ακτίνα μεταξύ κάθε ζεύγους πηγής και δέκτη (κάνοντας χρήση κάποιου αλγορίθμου προσδιορισμού της τροχιάς της σεισμικής ακτίνας (ray tracing) και κατόπιν υπολογίζεται ο χρόνος διαδρομής ως ολοκλήρωμα κατά μήκος της σεισμικής ακτίνας.

Η επίλυση του ευθέως προβλήματος, έχει στόχο την δημιουργία μαθηματικού μοντέλου το οποίο να περιγράφει όσο το δυνατόν καλύτερα το φαινόμενο που θα μελετηθεί. Επομένως, θεωρείται ένα σύνολο παραμέτρων μοντέλου, **m**, οι οποίες προσομοιάζουν και περιγράφουν τη πραγματικότητα, καθώς και ένα σύνολο δεδομένων,

d. Το ευθύ πρόβλημα τότε έγκειται στην εύρεση ενός τελεστή **G** ο οποίος όταν θα εφαρμόζεται στο μοντέλο, θα παράγει τα παρατηρούμενα δεδομένα. Δηλαδή μιά εξίσωση της μορφής:

$$d = G(m) \quad (5.1)$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση περιγράφει την συμπεριφορά εξιδανικευμένων, ιδεατών καταστάσεων όσον αφορά το χώρο των δεδομένων και όσον αφορά το χώρο του μοντέλου.

5.3.2.1 Προσδιορισμός της τροχιάς της Σεισμικής Ακτίνας (Ray Tracing)

Ο προσεγγιστικός καθορισμός της σεισμικής ακτίνας, αποτελεί από τις πιο χρονοβόρες (υπολογιστικά) διαδικασίες κατά την σεισμική τομογραφία ή αντιστροφή χρόνων διαδρομής. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντική η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η εικονική εξίσωση για τον προσδιορισμό της σεισμικής ακτίνας (Σουπιός, 1997).

Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου συνδέεται στενά με την επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα δοθεί το μοντέλο. Τρεις είναι οι πιο συνηθισμένοι τρόποι παρουσίασης του μοντέλου :

- α) Κελιά δύο ή τριών διαστάσεων σταθερής τιμής βραδύτητας
- β) Ένας ορθογώνιος κάρναβος στους κόμβους του οποίου ορίζονται οι τιμές καθυστέρησης του μοντέλου, ενώ οι τιμές καθυστέρησης για το εσωτερικό των κελιών υπολογίζονται με μεθόδους γραμμικής παρεμβολής
- γ) Άθροιση ενός συνόλου συναρτήσεων βάσης των οποίων οι συντελεστές ερμηνεύουν το μοντέλο.

5.3.2.2 ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ

Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος δηλαδή για να προσδιοριστεί ο τρόπος διάδοσης και ο χρόνος άφιξης του σεισμικού κύματος από την πηγή που το παράγει σε κάποιον δέκτη σε δεδομένη απόσταση από την πηγή, χρησιμοποιούνται είτε η ακτινική θεωρία (ray tracing), είτε η κυματική θεωρία (wave theory). Τέσσερις γνωστές τεχνικές καθορισμού της πορείας των σεισμικών ακτίνων οι οποίες βασίζονται στην ακτινική θεωρία είναι : η τεχνική της σκόπευσης (shooting), της κατεύθυνσης (bending), διαταραχής (perturbation) και πλέγματος (grid based). Αυτές οι τεχνικές είναι πολύ γρήγορες αλλά σε μερικές περιπτώσεις αποτυγχάνουν να περιγράψουν την διάδοση των

σεισμικών κυμάτων. Οι τεχνικές που βασίζονται στην κυματική θεωρία περιγράφουν με καλύτερη ακρίβεια την μετατόπιση των υλικών σημείων γύρω από τη θέση ισορροπίας τους κατά την διάδοση της κύμανσης αλλά απαιτούν περισσότερο υπολογιστικό

Σύμφωνα με την ακτινική θεωρία, όπως αναφέρει ο Βαφείδης στη μονογραφία του, (1996), η πορεία των σεισμικών κυμάτων περιγράφεται από τις σεισμικές ακτίνες. Στην ασυμπτωτική ακτινική θεωρία, το κυματικό πεδίο αναλύεται σε σειρά απείρων όρων οι οποίοι αντιστοιχούν σε διαφορετικές σεισμικές ακτίνες. Αν Φ είναι η συνάρτηση δυναμικού που επαληθεύει την κυματική εξίσωση,

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (5.2)$$

και αναπτυχθεί η Φ σειρά απείρων όρων

$$\Phi(x_m, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(x_m) f_n(t - \tau(x_m)) \quad (5.3)$$

όπου τ είναι ο χρόνος διαδρομής της ακτίνας, t και x_m , $m=1,2,3$ είναι χρόνος και χωρικές συντεταγμένες αντίστοιχα και A είναι το πλάτος του σεισμικού κύματος και f η φάση. Τα πλάτη υπολογίζονται με την αντικατάσταση της σειράς 5.3, στην κυματική εξίσωση 5.2. Η συνάρτηση της φάσης, f_n επαληθεύει την παρακάτω σχέση:

$$f'_n(\xi) = \frac{df_n(\xi)}{d\xi} = f_{n-1}(\xi) \quad (5.4)$$

Το πλάτος είναι ανεξάρτητο από το χρόνο και ο τελεστής του Laplace υπολογίζεται ως εξής :

$$\nabla^2 \Phi = \nabla^2 \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} A_n f_n(t - \tau) \right\} = \nabla \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} [-A_n f_{n-1} \nabla \tau + \nabla A_n f_n] \right\} = - \sum_{n=0}^{\infty} f_{n-2} A_n (\nabla \tau)^2 - \sum_{n=0}^{\infty} f_{n-1} [2 \nabla \tau \nabla A_n + A_n \nabla^2 \tau] + \sum_{n=0}^{\infty} f_n \nabla^2 A_n \quad (5.5)$$

όπου $f_{-1} = f'_0$, $f_{-2} = f'_{-1} = f''_0$ και ο τόνος συμβολίζει μερική παράγωγο ως προς χρόνο. Λόγω του ότι

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{n-2} A_n \quad (5.6)$$

Αντικαθιστώντας στην 5.2, προκύπτει ότι για $n > 3$ και οποιοδήποτε f_n , ισχύει:

$$f_n \left\{ \left[(\nabla \tau)^2 - \frac{1}{v^2} \right] A_{n+2} - \left[2 \nabla \tau \nabla A_{n+1} + A_{n+1} \nabla^2 \tau \right] + \nabla^2 A_n \right\} = 0 \quad (5.7)$$

Αν $A_0 \neq 0$ στην ασυμπτωτική σειρά 5.3 από την 5.4, προκύπτει η εικονική εξίσωση για $n = -2$

$$(\nabla \tau)^2 = \frac{1}{v^2} \quad (5.8)$$

η οποία περιγράφει τα κινηματικά χαρακτηριστικά του σεισμικού κύματος (Lin et al, 2009).

Στην παρούσα εργασία, η εικονική εξίσωση επιλύεται με την μέθοδο Runge-Kutta.

5.3.2.3. Επίλυση εικονικής εξίσωσης : Μέθοδος Runge-Kutta

Η μέθοδος Runge – Kutta είναι μια κλασική μέθοδος με πολύ καλή ακρίβεια και χρησιμοποιείται ευρύτατα στις διαφορικές εξισώσεις.

Ας θεωρήσουμε το πρόβλημα του Cauchy για μία διαφορική εξίσωση

$$y' = f(x, y) \quad (5.10)$$

με αρχική συνθήκη

$$y(x_0) = y_0 \quad (5.11)$$

Έστω y_i η προσεγγιστική λύση της εξίσωσης στο σημείο x_i . Σύμφωνα με τη μέθοδο Runge-Kutta η τιμή του y_{i+1} στο επόμενο σημείο $x_{i+1} = x_i + h$ υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις, (Butcher, 1963):

$$\left. \begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + \Delta y_i \\ \Delta y_i &= \frac{1}{6} \left(K_1^{(i)} + 2K_2^{(i)} + 2K_3^{(i)} + K_4^{(i)} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3) \quad (5.12)$$

όπου:

$$\left. \begin{aligned} K_1^{(i)} &= hf(x_i, y_i) \\ K_2^{(i)} &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_1^{(i)}}{2}\right) \\ K_3^{(i)} &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_2^{(i)}}{2}\right) \\ K_4^{(i)} &= hf(x_i + h, y_i + K_3^{(i)}) \end{aligned} \right\} \quad (4) \quad (5.13)$$

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι υπολογισμοί που περιγράφονται στον παρακάτω αλγόριθμο.

Ο πίνακας σχηματίζεται με τον εξής τρόπο:

1. Γράφονται οι τιμές των x_o, y_o στην πρώτη γραμμή του πίνακα.
2. Υπολογίζεται η τιμή $f(x_o, y_o)$, πολλαπλασιάζεται με το h και το αποτέλεσμα εισάγεται στον πίνακα ως $K_1^{(0)}$.
3. Γράφονται οι τιμές των $x_o + \frac{h}{2}, y_o + \frac{K_1^{(0)}}{2}$ στη δεύτερη γραμμή.
4. Υπολογίζεται η τιμή $f\left(x_o + \frac{h}{2}, y_o + \frac{K_1^{(0)}}{2}\right)$, πολλαπλασιάζεται με το h και το αποτέλεσμα εισάγεται στον πίνακα ως $K_2^{(0)}$.
5. Γράφονται οι τιμές των $x_o + \frac{h}{2}, y_o + \frac{K_2^{(0)}}{2}$ στη τρίτη γραμμή.
6. Υπολογίζεται η τιμή $f\left(x_o + \frac{h}{2}, y_o + \frac{K_2^{(0)}}{2}\right)$, πολλαπλασιάζεται με το h και το αποτέλεσμα εισάγεται στον πίνακα ως $K_3^{(0)}$.
7. Γράφονται οι τιμές των $x_o + h, y_o + K_3^{(0)}$ στη τέταρτη γραμμή του πίνακα.
8. Υπολογίζεται η τιμή $f(x_o + h, y_o + K_3^{(0)})$, πολλαπλασιάζεται με το h και το αποτέλεσμα εισάγεται στον πίνακα ως $K_4^{(0)}$.
9. Τοποθετούνται οι αριθμοί $K_1^{(0)}, 2K_2^{(0)}, 2K_3^{(0)}, K_4^{(0)}$ στη στήλη Δy .
10. Το άθροισμα των στοιχείων της στήλης Δy διαιρείται με το 6, και εισάγεται το αποτέλεσμα ως Δy_o .
11. Υπολογίζεται το $y_1 = y_o + \Delta y$

Έπειτα συνεχίζονται οι υπολογισμοί με τον ίδιο τρόπο, λαμβάνοντας το ζεύγος (x_1, y_1) ως αρχικό σημείο.

i	x	y	$K = hf(x, y)$	Δy
0	x_o	y_o	$K_1^{(0)}$	$K_1^{(0)}$
	$x_o + \frac{h}{2}$	$y_o + \frac{K_1^{(0)}}{2}$	$K_2^{(0)}$	$2K_2^{(0)}$
	$x_o + \frac{h}{2}$	$y_o + \frac{K_2^{(0)}}{2}$	$K_3^{(0)}$	$2K_3^{(0)}$
	$x_o + h$	$y_o + K_3^{(0)}$	$K_4^{(0)}$	$K_4^{(0)}$
				Δy_o
1	x_1	y_1		

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Σχηματική παράσταση της μεθόδου Runge-Kutta.

Το βήμα των υπολογισμών μπορεί να είναι μεταβλητό από σημείο σε σημείο. Για να ελεγχθεί η καταλληλότητα του h υπολογίζεται το παρακάτω κλάσμα:

$$\theta = \left| \frac{K_2^{(i)} - K_3^{(i)}}{K_1^{(i)} - K_2^{(i)}} \right| \quad (5) \quad (5.14)$$

Η ποσότητα θ δεν θα πρέπει να ξεπερνά μερικά εκατοστά, διαφορετικά επιβάλλεται η μείωσή του. Η τάξη ακρίβειας της μεθόδου Runge-Kutta είναι h^4 σε ολόκληρο το διάστημα $[x_o, X]$. Το σφάλμα εκτιμάται δύσκολα αυτή τη μέθοδο και μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\left| y_n^* - y(x_n) \right| \approx \frac{|y_n^* - y_n|}{15} \quad (5.15)$$

όπου $y(x_n)$ είναι η ακριβής λύση της εξίσωσης (1) για το σημείο x_n , και y_n^*, y_n οι προσεγγιστικές τιμές που επιτυγχάνονται με $\frac{h}{2}$ και h αντίστοιχα.

Στην παρούσα εργασία, για την επίλυση του ευθέως προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος πλέγματος (grid) που βασίζεται στην ακτινική θεωρία. Οι μέθοδοι αυτές μοντελοποιούν το χώρο με την μορφή πλέγματος (grid) και δεδομένης της πηγής του κύματος υπολογίζουν τους χρόνους άφιξης του σε όλα τα υπόλοιπα σημεία του πλέγματος αυτού.

Ειδικότερα, για τον καθορισμό της σεισμικής ακτίνας, χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση εκείνη η οποία επιλύει αριθμητικά την Εικονική Εξίσωση ως Μερική Διαφορική Εξίσωση, με τον αλγόριθμο των πεπερασμένων διαφορών (Vidale Method), (Vidale 1988,1990).

Οι προσεγγιστικές μέθοδοι καθορισμού της σεισμικής ακτίνας, βρίσκουν δύσκολα την πραγματική σεισμική ακτίνα ελάχιστου χρόνου διαδρομής ιδιαίτερα στη περίπτωση όπου οι δομές ταχύτητας είναι πολύπλοκες. Αντίθετα, η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών μπορεί να υπολογίσει τον χρόνο διαδρομής πρώτων αφίξεων των απευθείας, διαθλώμενων, ανακλώμενων και περιθλώμενων κυμάτων σε πολύπλοκα μοντέλα ταχύτητας.

5.3.2.4 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Vidale Method)

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών που περιγράφεται εδώ, δεν έχει τίποτα κοινό με την μέθοδο των φαινομενικών διαφοροποιήσεων για την επίλυση γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, όπως η εξίσωση ακουστικού κύματος, ή η ελαστοδυναμική εξίσωση. Συνήθως ορίζεται στη σεισμολογική βιβλιογραφία ως η επίλυση πεπερασμένων διαφορών της εικονικής εξίσωσης. Αυτό ωστόσο δεν σημαίνει ότι η κλασσική μέθοδος πεπερασμένων διαφορών εφαρμόζεται στην εικονική εξίσωση. Η εικονική εξίσωση είναι μια γραμμική εξίσωση και επομένως η άμεση λύση πεπερασμένων διαφορών δεν είναι απλή. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιεί ορισμένες σημαντικές συνέπειες της εικονικής εξίσωσης, καθώς και τις συνέπειες ορισμένων άλλων εννοιών (όπως η αρχή Huygens). Η άμεση αριθμητική λύση της εικονικής εξίσωσης χρησιμοποιήθηκε μόνο για λεπτομέρειες, περιγραφή του αλγορίθμου και αριθμητικά παραδείγματα εφαρμογών, σημειώνει ο Cerveny (2001).

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό των χρόνων διαδρομής πρώτων αφίξεων κατά μήκος ενός αναπτυσσόμενου τετραγώνου (σε 2-D) και κατά μήκος ενός αναπτυσσόμενου κύβου (σε 3-D), προτάθηκε από τον Vidale (1988, 1990). Στη μέθοδο, οι χρόνοι διαδρομής πρώτων αφίξεων σε σημεία που βρίσκονται στο τετράγωνο

(κύβος), υπολογίζονται από τους χρόνους διαδρομής πρώτων αφίξεων που είναι γνωστοί σε σημεία που βρίσκονται στα αρχικά τετράγωνα (κύβοι). Οι εξισώσεις επέκτασης είναι διαφορετικές, ανάλογα με την θέση του σημείου στο τετράγωνο και την απόσταση από την πηγή. Σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή, η επέκταση πραγματοποιείται με τοπική προσέγγιση επίπεδων κυμάτων.

Οι βασικές αρχές του υπολογισμού των πεπερασμένων διαφορών των χρόνων διαδρομής πρώτων αφίξεων, μπορούν να αποδειχθούν πολύ απλά στην περίπτωση ενός διευρυνόμενου μισού χώρου. Οι Reshef και Kosloff (1986), ήταν οι πρώτοι που πρότειναν αυτόν τον αλγόριθμο, κυρίως για εφαρμογές σε μεθόδους σεισμικής ανάκλασης. Θεωρούν μόνο μια μονόδρομη διάδοση (forward continuation). Σε 2-D, η εικονική εξίσωση $(T,x)^2 + (T,z)^2 = V^{-2}$ εκφράζεται σε ρητή μορφή, σύμφωνα με τον Cerveny, (2001).

$$T, z = +[1/V^2 - (T, x)^2]^{1/2} \quad (5.16)$$

Το σύμβολο +, αντιστοιχεί στην συνέχιση προς τα εμπρός, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να αποδίδει τους χρόνους διαδρομής πρώτων αφίξεων. Ο αλγόριθμος για την επίλυση της (5.16), ακολουθεί :

a) Την παράγωγο $T, x = \partial T(x, z) / \partial x$ κατά μήκος του επιπέδου $z = \text{const}$. Υπολογίζεται με πεπερασμένες διαφορές υποθέτοντας ότι το $T(x, z)$ κατά μήκος αυτού του επιπέδου είναι γνωστό.

b) Η συνέχιση του βάθους (κατά μήκος του z), πραγματοποιείται από το ένα επίπεδο στο άλλο με την μέθοδο Runge – Kutta τς τέταρτης τάξης.

Οι αρχικές τιμές του T για $z=0$ θα στην μορφή $T(x, z=0)=T_0(X)$ (Οι αρχικές καμπύλες χρόνου διαδρομής ή η πηγή). Η συνάρτηση $T_0(X)$ μπορεί να ληφθεί με την τυπική ανίχνευση ακτίνων στο γνωστό μοντέλο. Ο ίδιος αλγόριθμος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αντίστροφη συνέχιση (μείωση του χρόνου). Στην περίπτωση αυτή, θα ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί το σύμβολο μείον. (5.16). Η μέθοδος επεκτάθηκε σε 3-D από τον Reshef (1991). Η υπόθεση της απλής διάδοσης εξαλείφει αυτόματα τα κύματα που διαδίδονται προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Αρχικά η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό των πρώτων αφίξεων. Κατόπιν οι Podvin και Lecomte (1991) και οι Matsuoka και Ezaka (1992), εφάρμοσαν τη μέθοδο για τον υπολογισμό των ανακλώμενων κυμάτων διακριτοποιώντας τον ανακλαστήρα και υπολογίζοντας το χρόνο διαδρομής για κάθε ζεύγος πηγής-γεωφώνου. Οι Li και Ulrych (1993) παρουσίασαν δισδιάστατο αλγόριθμο όπου αυξήθηκε η

ακρίβεια ενώ μειώθηκε αισθητά ο χρόνος που απαιτείται για τους υπολογισμούς. Το μειονέκτημα της μεθόδου των Li και Ulfrych είναι ότι η μέθοδος δεν εφαρμόζεται με ευκολία στις τρεις διαστάσεις (Σουπιός, 1997).

5.3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

Ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής (inversion), με την οποία δημιουργείται ένα βελτιωμένο σεισμικό μοντέλο. Η διαδικασία συνεχίζεται, υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο, χρόνους διαδρομής (ευθύ προβλημα), οι οποίοι με τη σειρά τους συγκρίνονται με τους παρατηρούμενους. Αν η διαφορά τους είναι μεγαλύτερη από συγκεκριμένη τιμή, επαναλαμβάνουμε την διαδικασία της αντιστροφής. Το ανακατασκευασμένο πεδίο των ταχυτήτων ονομάζεται τομόγραμμα (tomogram).

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης επιμήκων κυμάτων ακολουθούνται δύο βασικά στάδια. Στο πρώτο στη περιοχή μελέτης τοποθετείται πλέγμα και σημειώνονται οι θέσεις πηγών και γεωφώνων. Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η τομογραφική ανακατασκευή. Κατασκευάζεται δηλαδή το άγνωστο πεδίο ταχυτήτων χρησιμοποιώντας τους μετρούμενους χρόνους διαδρομής και τη γεωμετρία πηγής – γεωφώνων.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου γίνεται στην αρχή ανακατασκευή του πεδίου των ταχυτήτων, θεωρώντας ότι τα σεισμικά κύματα ακολουθούν ευθύγραμμη πορεία. Στη συνέχεια το πεδίο σεισμικών ταχυτήτων διορθώνεται.

Η ταχύτητα σε κάθε κελί προκύπτει από τη λύση της $T = DS$

Για την επίλυση του υπερκαθορισμένου συστήματος $T = DS$ υπάρχει μια ποικιλία από αλγόριθμους. Οι Phillips και Fehler (1991) πραγματοποίησαν σύγκριση των πιο δημοφιλών αλγόριθμων. Αναζητώντας τον καλύτερο αλγόριθμο προτάθηκαν και αξιολογήθηκαν οι εξής (Σουπιός, 1997):

- τεχνικές ελαχίστων τετραγώνων
- τεχνική αλγεβρικής ανακατασκευής
- τεχνική ταυτόχρονης επαναληπτικής ανακατασκευής (SIRT)
- τεχνική συζυγούς βαθμίδας
- τεχνική Lanczos
- τεχνική LSQR

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης επιμήκων κυμάτων, χρησιμοποιήθηκε ένας από τους πιο γνωστούς αλγόριθμους επαναληπτικής επίλυσης ο οποίος

εφαρμόστηκε και στο συγκεκριμένο πείραμα και είναι αυτός της ταυτόχρονης επαναληπτικής ανακατασκευής (SIRT).

5.3.3.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ SIRT

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται η αντιστροφή πινάκων, αλλά ο απλός πολλαπλασιασμός αυτών, ο οποίος φυσικά γίνεται ανά γραμμή. Στη εφαρμοσμένη γεωφυσική όπου οι περισσότεροι πίνακες προς αντιστροφή είναι αραιοί (sparse), η μέθοδος αυτή προσφέρει ταχύτητα στους υπολογισμούς αφού ενεργεί μόνο στα μη μηδενικά στοιχεία. Η εφαρμογή της μεθόδου στη σεισμική τομογραφία έγινε από τους Clayton και Comer (1983) και από τον Nolet (1985). Από τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η χαμηλή ταχύτητα σύγκλισης της λύσης (VanDecar and Snieder 1994). Οι VanDecar και Snieder (1994) τροποποίησαν τη μέθοδο, αναπτύσσοντας τελεστή ο οποίος αυξάνει κατά πολύ την ταχύτητα σύγκλισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

6.1 ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη προσομοίωσης σεισμικής τομογραφίας, στην παρούσα εργασία, πάρθηκε από μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Αλμπέρτα του Καναδά με αποθέματα ασφαλτούχου άμμου (Διδακτορική διατριβή του Costas Macrides, 1998). Η μελέτη αυτή, είχε ως σκοπό να αποδείξει τη σκοπιμότητα της χρήσης μιας τεχνικής σεισμικής απεικόνισης με χρήση μετρήσεων από πείραμα Cross-hole (γεώτρηση-γεώτρηση), με στόχο την παρακολούθηση των τεχνικών θερμικής ανάκτησης του πετρελαίου και ειδικότερα της διαδικασίας έγχυσης ατμού στο κοίτασμα της περιοχής Cold Lake. Επίσης πραγματοποιήθηκε πειραματική προσέγγιση με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων τηλεπισκόπησης.

Στη μελέτη του C.Macrides, προτείνεται μια πυκνή τομογραφική σεισμική κάλυψη της υπό έρευνα περιοχής. Οι σεισμικές πηγές και οι δεκτές τοποθετούνται βαθιά μέσα στις γεωτρήσεις παρατήρησης, επομένως αποφεύγεται η παρεμβολή των εξαιρετικά εξασθενημένων επιφανειακών στρωμάτων.

Σε αντίθεση με το συνηθισμένο πρόβλημα γεωφυσικής αντιστροφής που επιδιώκει να δημιουργήσει ένα πολυστρωματικό μοντέλο, ο κύριος σκοπός της εργασίας του, είναι η απεικόνιση υψηλής ανάλυσης των ανωμαλιών μέσα σε ένα μοντέλο του οποίου οι μέσες ταχύτητες και η θέση των ανακλαστήρων είναι ήδη γνωστές σε κάποιο βαθμό. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τη δυνατότητα της διαφορικής ανάλυσης δεδομένων συγκρίνοντας τα σεισμικά δεδομένα πριν και μετά την υπερχειλίση με ατμό. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξέταση πειραματικών γεωμετριών που είναι πρακτικές στον τομέα και είναι σύμφωνες με υπάρχοντες γεωλογικούς, λειτουργικούς και οικονομικούς περιορισμούς.

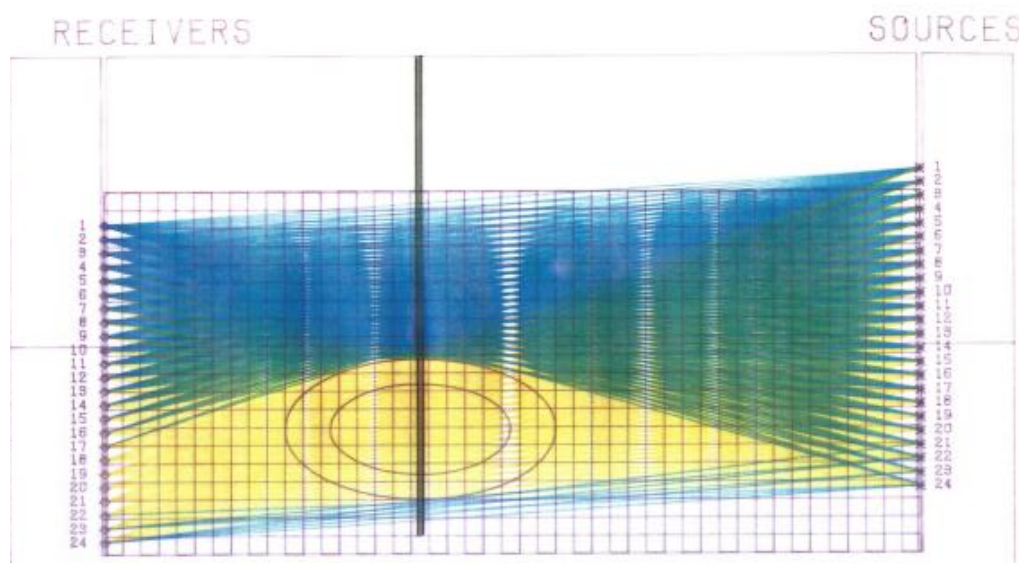
Κατά τη μελέτη του C.Macrides, συνοψίζονται οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας και του μεταβαλλόμενου κορεσμού ρευστού και ατμού σε σεισμικά κύματα σε τέτοια μέσα και αναλύονται τα δεδομένα μιας απλής σεισμικής έρευνας γεώτρησης-γεώτρησης πριν και μετά την έγχυση ατμού, χρησιμοποιώντας μια μόνο πηγή.

Με βάση τα ληφθέντα αποτελέσματα, σχεδιάστηκε ένα πείραμα σεισμικής τομογραφίας και πραγματοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση της προτεινόμενης γεωμετρίας, υποθέτοντας διάφορα σχήματα της ζώνης ατμού. Προτάθηκε ένα σύστημα αντιστροφής βασισμένο σε μια "τεχνική αλγεβρικής ανασυγκρότησης".

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν τα δεδομένα του πραγματικού πειράματος τομογραφίας (presteam) τα οποία και επεκτάθηκαν στις πειραματικές διαδικασίες. Έτσι εκτιμήθηκε η

εσωτερική εξασθένηση του σχηματισμού clearwater. Επίσης υπολογίστηκε η εσωτερική εξασθένηση κυμάτων p και s της ζώνης ατμού χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση φασματικής αναλογίας και καθορίστηκε ο λόγος του poisson μέσα στη ζώνη. Τέλος, εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με τη φύση της θερμαινόμενης ζώνης του εγχυτήρα ατμού, κατά τη στιγμή των πειραμάτων.

Η γεωμετρία του μοντέλου παρουσιάζεται παρακάτω στο σχήμα 6.1. Δύο γεωτρήσεις σε διάταξη γεώτρησης- γεώτρησης (Cross-hole), η μία περιλαμβάνει τους δέκτες και η άλλη περιλαμβάνει τις πηγές. Τόσο οι συστοιχία των πηγών όσο και η συστοιχία των δεκτών έχουν ισαπόσταση 4 μέτρα. Η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων είναι 180 μέτρα και εκτείνονται σε βάθος 70 μέτρων. Δύο στρώματα θεωρήθηκαν. Ένα εξωτερικό στρώμα του περιβάλλοντος του σχηματισμού με ταχύτητα 2400 m/s, και ένα στρώμα της ζώνης υπέρθερμου ατμού με ταχύτητα 2000 m/s.



Σχήμα 6.1 : Η γεωμετρία του μοντέλου του πειράματος του C.Macrides. (C. Macrides, 1998)

6.2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Τα κοιτάσματα ασφαλτούχων αμμών (tar sand) που υπάρχουν στον κόσμο, κυρίως στον Καναδά και την Βενεζουέλα, έχουν αποκτήσει μεγάλη σημασία. Τα αποθέματα ανέρχονται σε περίπου 2,5 τρισεκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου ανα τοποθεσία. Αυτό είναι σχεδόν τόσο όσο όλο το σύνολικό πετρέλαιο που έχει ανακαλυφθεί, και σήμερα εξαντλούνται ραγδαία τα μέσα και ελαφριά κλάσματα .

Σημαντικά προβλήματα ανάκτησης μπορούν να ενταχθούν σε αυτές τις συγκεντρώσεις ασφαλτούχων αμμών, καθώς το πετρέλαιο σε πολλές περιοχές, έχει πολύ υψηλό ιξώδες και είναι πρακτικά ακίνητο μέσα στους γεωλογικούς σχηματισμούς όπου εμφανίζεται. Ωστόσο, το ιξώδες των υγρών ασφαλτούχων αμμών, μειώνεται δραματικά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από εκείνες σε συνθήκες ταμιευτήρα και επομένως, τεχνικές θερμικής ανάκτησης πετρελαίου είναι εφικτές.

Η έγχυση ατμού σε σχηματισμούς βαρέως πετρελαίου (heavy oil) και ασφαλτούχων αμμών, έχει γίνει απαραίτητο κομμάτι των εργασιών θερμικής ανάκτησης πετρελαίου. Από άποψη μηχανικής ταμιευτήρων, είναι πολύ σημαντικό να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερη η παρακολούθηση των αλλαγών που έχουν συμβεί μέσα στον ταμιευτήρα σαν αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής. Συγκεκριμένα, ζητείται να καθοριστεί το μέγεθος, η θέση και οι λεπτομέρειες του σχήματος της ζώνης υπέρθερμου ατμού γύρω από τη γεώτρηση έγχυσης καθώς και η προτιμώμενη κατεύθυνση που θα αναπτυχθεί. Πληροφορίες σχετικά με την κατανομή των ρευστών μέσα στη ζώνη είναι επίσης πολύ επιθυμητές. Η διάγνωση των παραπάνω χαρακτηριστικών θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένες τεχνικές εξόρυξης πετρελαίου.

Ωστόσο, μόνο το 8% των συνολικών αποθεμάτων ασφαλτούχου άμμου (oil sands) στην Alberta θεωρούνται κατάλληλα για οικονομική επιφανειακή εξόρυξη.

Γεωλογία των κοιτασμάτων cold lake

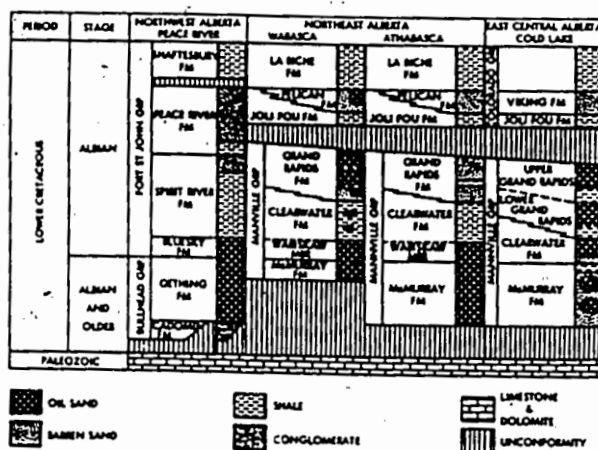
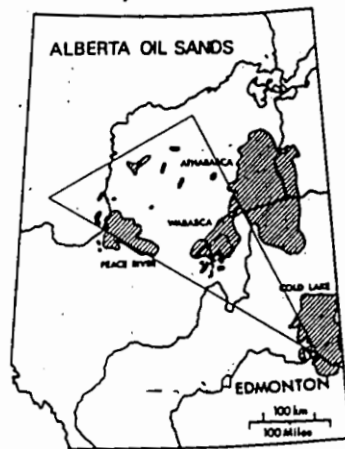
Οι εναποθέσεις κοιτασμάτων ασφαλτούχου άμμου στην alberta έχουν περιγραφεί μέσω της αξιολόγησης των δεδομένων που συλλέχθηκαν σε περίπου 10.000 γεωτρήσεις. Έχουν ταξινομηθεί ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και τη γεωλογική μονάδα της εμφάνισης, όπως αποθέματα της athabasca, cold lake, peace river and wabasca.

Οι ασφαλτούχοι άμμοι είναι άμμος μαζί με άλλα υλικά πετρώματος που περιέχουν ακατέργαστη άσφαλτο και άλλες ορυκτές ουσίες. Αυτός ο ορισμός δεν καθορίζει τον τύπο

του βράχου και υποδηλώνει ότι οι ασφαλούχοι άμμοι μπορεί να μην είναι κλαστικά ιζήματα, ώστε να περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία πετρωμάτων υψηλού πορώδους που περιέχουν ακατέργαστη άσφαλτο. Κοιτάσματα που περιέχουν ακατέργαστη άσφαλτο μπορούν να ονομαστούν ασφαλούχοι άμμοι. Η βιτουμενική άσφαλτος (crude bitumen) ορίζεται ως ένα ιξώδες μίγμα κυρίως λόγω των υδρογονανθράκων βαρύτερων από το πεντάνιο το οποίο μπορεί να περιέχει θειούχες ενώσεις. Στην φυσικώς υπάρχουσα ιξώδη τους κατάσταση δεν μπορούν να ανακτηθούν με οικονομικό ρυθμό μέσω πρωτογενούς παραγωγής. Γενικά, το υλικό αυτό έχει πυκνότητα 0,98 g / cm³, ή και μεγαλύτερη.

Τα αποθέματα cold lake βρίσκονται στην ανατολική-κεντρική Alberta. Οι ακατέργαστες εναποθέσεις ασφάλτου της cold lake, χρονολογούνται στην κατώτερη Κρητιδική περίοδο.

Το σχήμα 6.2, απεικονίζει την τοποθεσία και την γεωλογία των αποθεμάτων oil sands, στην Αλμπέρτα.



Τα αποτελέσματα της μελέτης του Μακρίδη, έδειξαν ότι η ταχύτητα των κυμάτων μειώνεται μέσα στη ζώνη καθώς η έγχυση υπέρθερμου ατμού, ο οποίος είναι πολύ συμπιέσιμος, κάνει και το πέτρωμα πιο συμπιέσιμο. Έτσι η σεισμική ταχύτητα των κυμάτων μειώνεται σταδιακά με το βάθος. Επιπλέον, το υψηλό ιξώδες του κοιτάσματος ασφαλτούχου άμμου, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο υπέρθερμος ατμός που εγχύθηκε στο κοίτασμα, κυμαινόταν σε θερμοκρασίες 200 – 280 °C.

6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Σκοπός των μελετών που έγιναν ήταν η προσομοίωση της τεχνολογίας DAS μέσα από σεισμικές μεθόδους και η σύγκριση με συμβατικά γεώφωνα καθώς επίσης και η σύγκριση μεταξύ δύο σεισμικών μεθόδων, VSP και Crosshole. Πιο συγκεκριμένα, οι μελέτες παρουσιάστηκαν σαν αποτέλεσμα σεισμικής τομογραφίας.

Με βάση το γεωμετρικό μοντέλο του C. Macrides, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα και έγινε προσομοίωση με σκοπό τη σεισμική απεικόνιση. Δοκιμές έγιναν αρχικά με την ίδια μέθοδο Crosshole, στις ίδιες ισαποστάσεις πηγών-δεκτών. Στη συνέχεια, με ίδιες ισαποστάσεις πηγών – δεκτών, έγινε δοκιμή με τη μέθοδο VSP. Τοποθετήθηκαν οι πηγές στην επιφάνεια και οι δέκτες σε γεώτρηση έκτασης 70 μέτρων. Οι δοκιμές αυτές έγιναν προσομοιώνοντας τόσο τις διαδικασίες αυτές με χρήση συμβατικών γεωφώνων, όσο και με τεχνολογία DAS.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τροποποιώντας κάθε φορά παραμέτρους όπως η ισαπόσταση μεταξύ των πηγών και η ισαπόσταση μεταξύ των δεκτών.

6.3.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Για τον σχεδιασμό του μοντέλου ταχυτήτων για δημιουργία συνθετικών δεδομένων πρώτων αφίξεων, δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα που να προσδιορίζουν τις διαφορετικές γεωλογικές τομές εντός αυτού. Θεωρήθηκαν δύο στρώματα. Ένα ενιαίο στρώμα του εξωτερικού περιβάλλοντος σχηματισμού, και ένα στρώμα της δομής ασφαλούχων αμμών που ήταν και η υπέρθερμη ζώνη. Το μοντέλο σχεδιάστηκε με διαστάσεις 200 m μήκος και 70 m βάθος. Η δομή ασφαλούχων άμμων, δηλαδή, η υπέρθερμη ζώνη, σχεδιάστηκε με οριζόντιες διαστάσεις $x = (80, 120)$ και κατακόρυφες διαστάσεις $y = (30, 60)$ και σχήμα καμπυλοειδές, όμοιο με εκείνο του αρχικού μοντέλου στην περιοχή Cold Lake, της Αλμπέρτα του Καναδά, όπως μελετήθηκε από τον Macrides (1998). Ο οριζόντιος άξονας προσδιορίζει την απόσταση και ο κατακόρυφος άξονας προσδιορίζει το βάθος. Ορίστηκαν δύο ταχύτητες που είχαν προσδιοριστεί από την εργασία του Macrides (1998). Η ταχύτητα του περιβάλλοντος εξωτερικά της δομής ασφαλούχων άμμων με τιμή 2400 m/sec, και η ταχύτητα εσωτερικά της δομής που προσδιορίζει την διαφορά στη γεωλογία και μορφολογία του σχηματισμού, δηλαδή, την ύπαρξη κοιτάσματος πετρελαίου, με τιμή 2000 m/sec. Επίσης, ορίστηκαν πυκνότητες για το κάθε στρώμα. 2.2 g/cm^3 για το εξωτερικό στρώμα και 2.4 g/cm^3 για την υπέρθερμη ζώνη.

Στόχος των μοντέλων προσομοίωσης, ήταν να πετύχουν με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν, τις σωστές ταχύτητες εξωτερικά και εσωτερικά της δομής, ώστε να απεικονήσουν ορθότερα τον επιθυμητό σχηματισμό.

Αρχικά, δημιουργήθηκε σεισμική τομή με χαρακτηριστικά ίδια με εκείνα του πειράματος στην Αλμπέρτα του Καναδά. Σε συμβατική διάταξη γεώτρησης- γεώτρησης (Cross-hole), με απόσταση μεταξύ των δύο γεωτρήσεων 180 μέτρα, και έκταση σε βάθος 70 μέτρων. Τόσο οι πηγές στην μία γεώτρηση, όσο και τα γεώφωνα στην άλλη, είχαν μια σταθερή ισαπόσταση 4 μέτρα. Έπειτα, διατηρώντας σταθερή την συστοιχία των πηγών πραγματοποιήθηκε δοκιμή τοποθετώντας τους δέκτες σε ισαπόσταση 10 μέτρων. Στη συνέχεια, για προσομοίωση της τεχνολογίας DAS, ελαττώσαμε την ισαπόσταση των δεκτών κάνοντας την συστοιχία πιο πυκνή, όπως θα ήταν σε ένα καλώδιο οπτικών ινών. Επομένως, διατηρώντας σταθερά τις πηγές στα 4 μέτρα, οι δέκτες τοποθετήθηκαν σε ισαπόσταση 1 και 0.5 μέτρα. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες δοκιμές και για χρήση οπτικών ινών σε διάταξη VSP.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκαν άλλες δύο μελέτες με τις ίδιους παραμέτρους όπως η προηγούμενη, με στόχο την επιβεβαίωση αλλά και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στην πρώτη μελέτη έγιναν επίσης δοκιμές για συμβατική μέθοδο και για χρήση οπτικών ινών σε διάταξη Cross-hole και VSP, με μόνη διαφορά την συστοιχία των πηγών. Σε αυτή την περίπτωση η ισαπόσταση μεταξύ των πηγών ήταν 10 μέτρα, δηλαδή περίπτωση συμβατικής συστοιχίας. Στην τελευταία μελέτη, η ισαπόσταση μεταξύ των πηγών ήταν 1 μέτρο, δηλαδή, πέρα από τους δέκτες προσομοιώθηκε και η συστοιχία των πηγών με χρήση τεχνολογίας οπτικών ινών.

Σε όλες τις δοκιμές, η διακριτοποίηση και ανάλυση των μεθόδων ήταν 1 μέτρο και ο αριθμός επαναλήψεων ήταν 20.

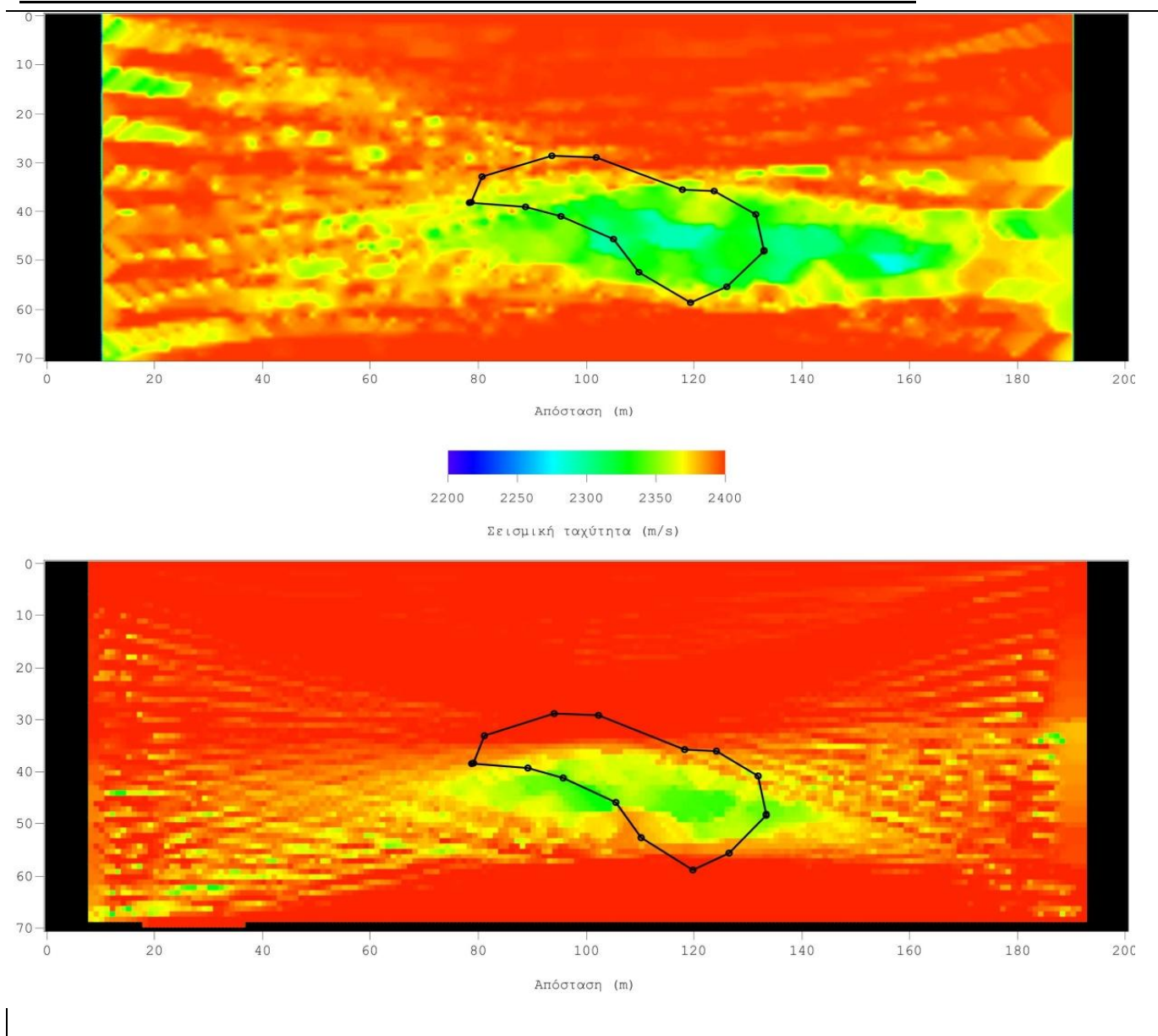
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της σεισμικής τομογραφίας για τις διάφορες μελέτες και δοκιμές.

6.4 ΜΕΛΕΤΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΠΕΡΘΕΡΜΗΣ ΖΩΝΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

6.4.1 ΜΕΛΕΤΗ 1: ΙΣΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΓΩΝ 4 ΜΕΤΡΑ

6.4.1.1 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ

ΔΟΚΙΜΗ 1: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ



ΔΟΚΙΜΗ 2: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ

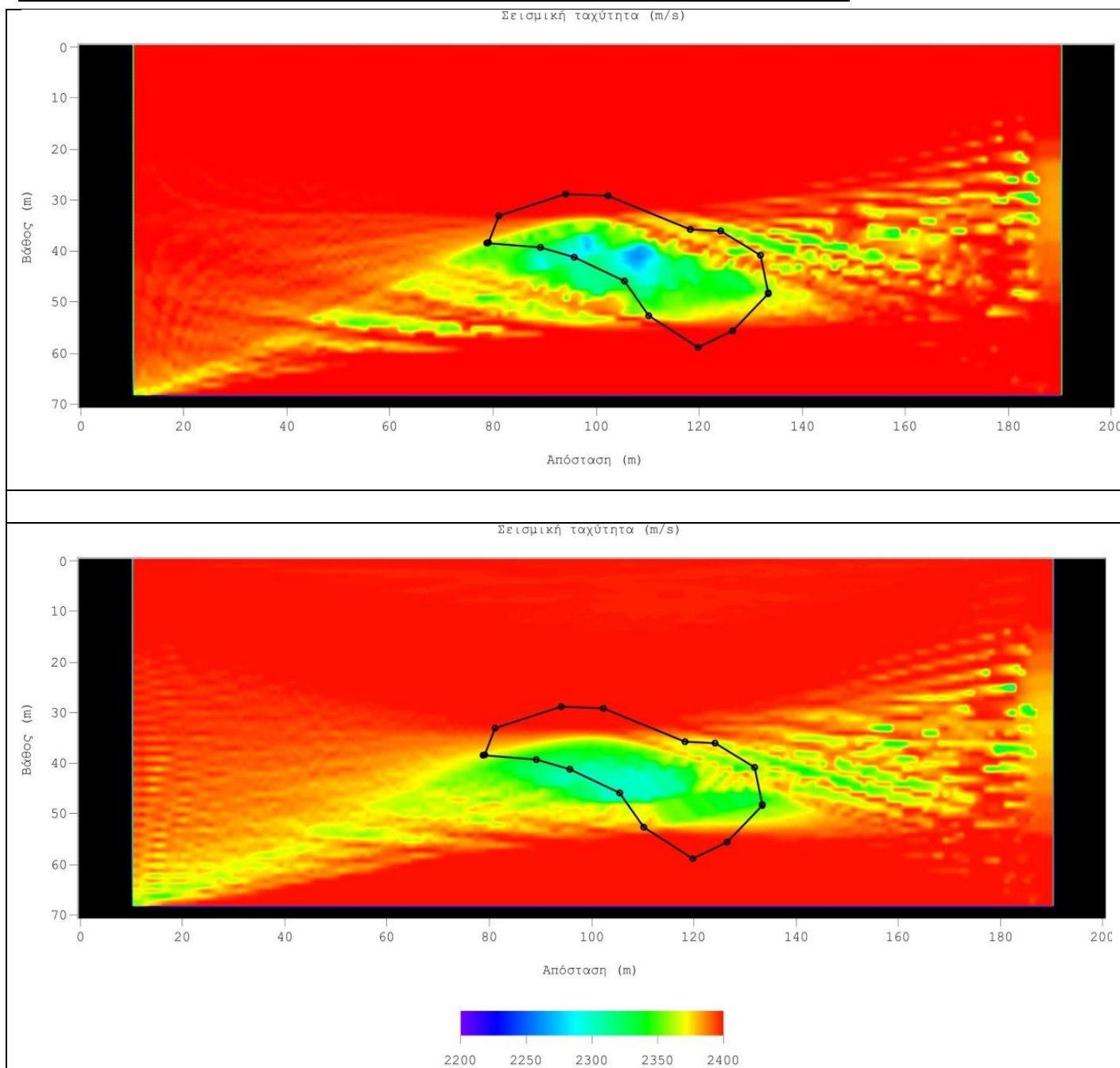
Σχήμα 6.3 : Δοκιμές με μέθοδο Cross-hole, και συμβατική διάταξη

Στην 1^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις στο εξωτερικό στρώμα, φτάνουν με ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ 2380 - 2400 m/s. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν περισσότερα σημεία με ταχύτητα <2400 m/s από ότι στην δοκιμή 2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ισαπόσταση μεταξύ των γεωφώνων είναι πιο μεγάλη (10m αντί για 4m), δηλαδή, οι πρώτες αφίξεις είναι πιο λίγες σε πλήθος και φτάνουν πιο αραιά με αποτέλεσμα η ακρίβεια να μειώνεται σε κάποιο βαθμό. Η ταχύτητα στην υπέρθερμη ζώνη, είναι 2280 m/s. Η απεικόνιση, φαίνεται να έχει μεγάλη ευκρίνεια και ακρίβεια, ωστόσο, η δομή δεν προσδιορίζεται απόλυτα, ως προς τη γεωμετρία, καθώς υπάρχουν δύο σημεία με ταχύτητα 2280 m/s, εξωτερικά της δομής (προς τα δεξιά).

Στην 2^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις στο εξωτερικό στρώμα, φτάνουν με ταχύτητα 2400 m/s, όπως είναι το αναμενόμενο. Η ταχύτητα στην υπέρθερμη ζώνη, κυμαίνεται μεταξύ 2280 - 2290 m/s. Η μείωση της ταχύτητας, αποδεικνύει ότι σε εκείνο το σημείο η συγκέντρωση των πρώτων αφίξεων είναι μεγαλύτερη, σε τέτοιο βαθμό ώστε να διακρίνονται οι γεωλογικές αλλαγές στην απεικόνιση, και κατ'επέκταση να διακρίνεται η δομή ασφαλούχων αμμών. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, οι πρώτες αφίξεις δεν προσδιορίζουν ορθώς την δομή, ως προς τη γεωμετρία, καθώς ίδιες ταχύτητες κυμαίνονται και εξωτερικά της υπέρθερμης ζώνης. Επιπλέον, οι ταχύτητες ναι μεν μειώνονται αισθητά, σε σχέση με τον περιβάλλοντα σχηματισμό, ωστόσο δεν φτάνουν τα 2000 m/s, που θεωρήσαμε στο αρχικό συνθετικό μοντέλο, ενδεχόμενως, λόγω της αραιής εμφάνισης των πρώτων αφίξεων. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η ταχύτητα στο εξωτερικό στρώμα είναι μεγαλύτερη από ότι στο εσωτερικό, και επομένως οι ακτίνες "επιλέγουν" την πιο σύντομη διαδρομή, προσπαθώντας να αποφύγουν την υπέρθερμη ζώνη με τη μικρότερη ταχύτητα. Η ευκρίνεια της απεικόνισης φαίνεται να είναι λιγότερο καλή, το ίδιο και η γεωμετρία της ζώνης υπέρθερμου ατμού, που προσδιορίζεται λιγότερο καλά σε σχέση με την δοκιμή 1.

6.4.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS

ΔΟΚΙΜΗ 3: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ



ΔΟΚΙΜΗ 4: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ –ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 0.5 ΜΕΤΡΑ

Σχήμα 6.4: Δοκιμές με μέθοδο Cross-hole και διάταξη οπτικών ινών

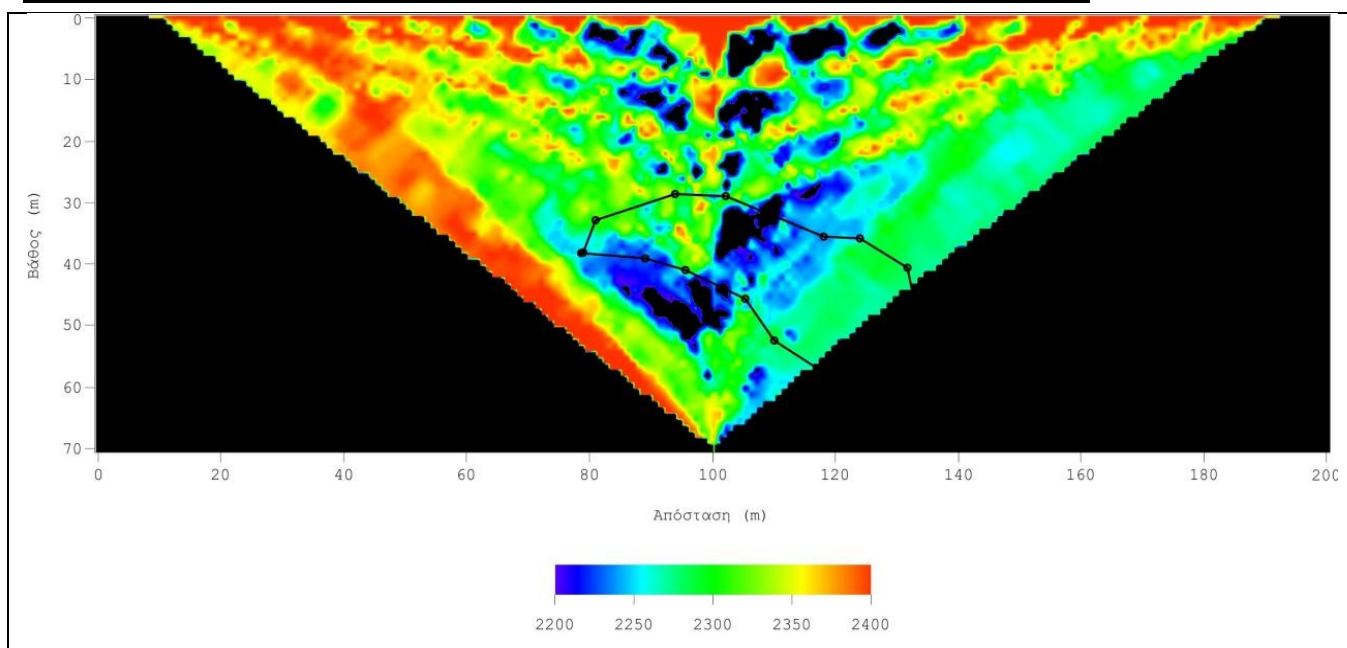
Στην 3^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν με ταχύτητα 2400 m/s στο εξωτερικό στρώμα, όπως είναι το επιθυμητό. Παρατηρούνται κάποια σημεία με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2380 – 2400 m/s, αλλά είναι λιγότερα και η απεικόνιση είναι σαφώς καλύτερη από ότι στις δοκιμές με συμβατική μέθοδο. Στην υπέρθερμη ζώνη οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν με ταχύτητα μικρότερη από ότι στις περιπτώσεις συμβατικής μεθόδου. Η

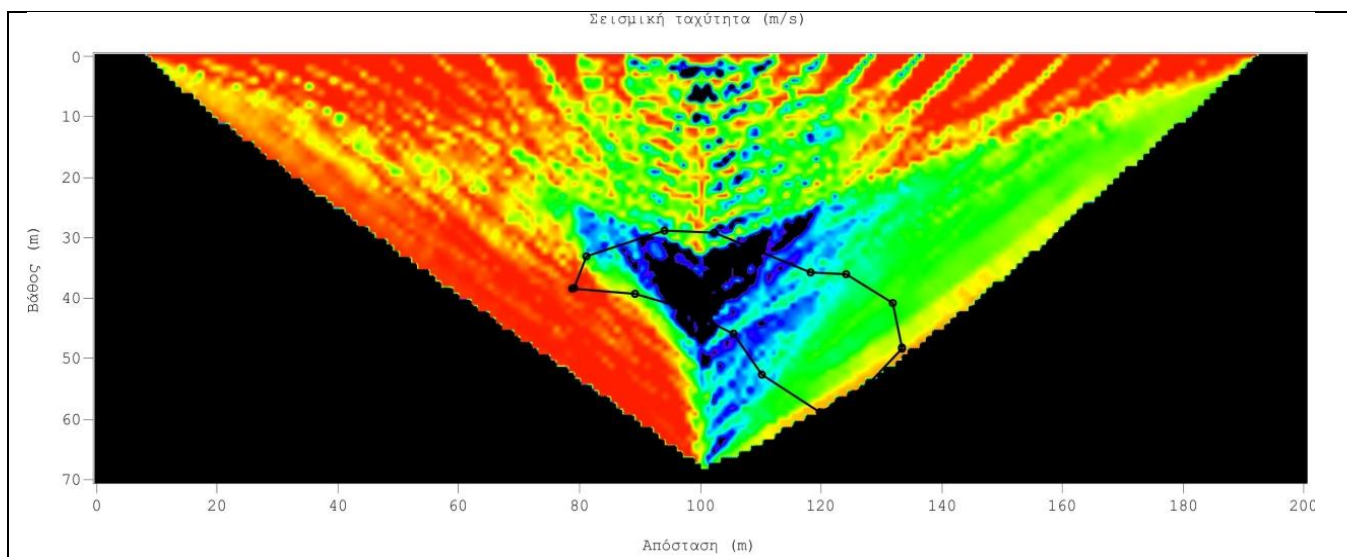
ταχύτητα κυμαίνεται μεταξύ 2240 – 2250 m/s και είναι πιο κοντά στην επιθυμητή (2000 m/s). Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η ισαπόσταση μεταξύ των δεκτών είναι 1 m, πολύ μικρότερη από πριν δηλαδή, και επομένως οι ακτίνες που φτάνουν, είναι πιο πυκνές, και πιο πολλές σε πλήθος. Επίσης, οι ακτίνες όπως φαίνεται και από το σχήμα, συγκεντρώνονται με ταχύτητα 2240 – 2250 m/s μόνο στο κέντρο της δομής. Αυτό δίνει την δυνατότητα για μια ακριβέστερη απεικόνιση, τόσο ως προς την γεωμετρία της δομής, που φαίνεται να προσδιορίζεται σαφώς καλύτερα από ότι στις προηγούμενες δοκιμές, όσο και ως προς την ποιότητα.

Στην 4^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν με ταχύτητα 2400 m/s στο εξωτερικό στρώμα Όπως και στην δοκιμή 3, παρατηρούνται κάποια σημεία με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2380 – 2400 m/s, ωστόσο είναι λιγότερα και η απεικόνιση είναι σαφώς καλύτερα από ότι στις δοκιμές με συμβατική μέθοδο. Στην υπέρθερμη ζώνη, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2280 – 2300 m/s. Σε αυτή την περίπτωση, αν και η ισαπόσταση μεταξύ των δεκτών μειώθηκε περισσότερο, από 1m στα 0.5 m, οι ακτίνες δεν καταφέρνουν να φτάσουν με μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με τις δοκιμές 1,2 (<2800 m/s) ή έστω να πετύχουν τις ταχύτητες της δοκιμής 3 (2240 – 2250 m/s). Ωστόσο, ως προς την γεωμετρία, οι ακτίνες συγκεντρώνονται με μειωμένη ταχύτητα στο κέντρο της δομής μόνο, επομένως, η απεικόνιση φαίνεται να προσδιορίζει καλά την δομή, πετυχαίνοντας παρόμοια αποτελέσματα με την δοκιμή 3.

6.4.1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ

ΔΟΚΙΜΗ 5: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ





ΔΟΚΙΜΗ 6: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ

Σχήμα 6.5: Δοκιμές με μέθοδο VSP, και συμβατική διάταξη

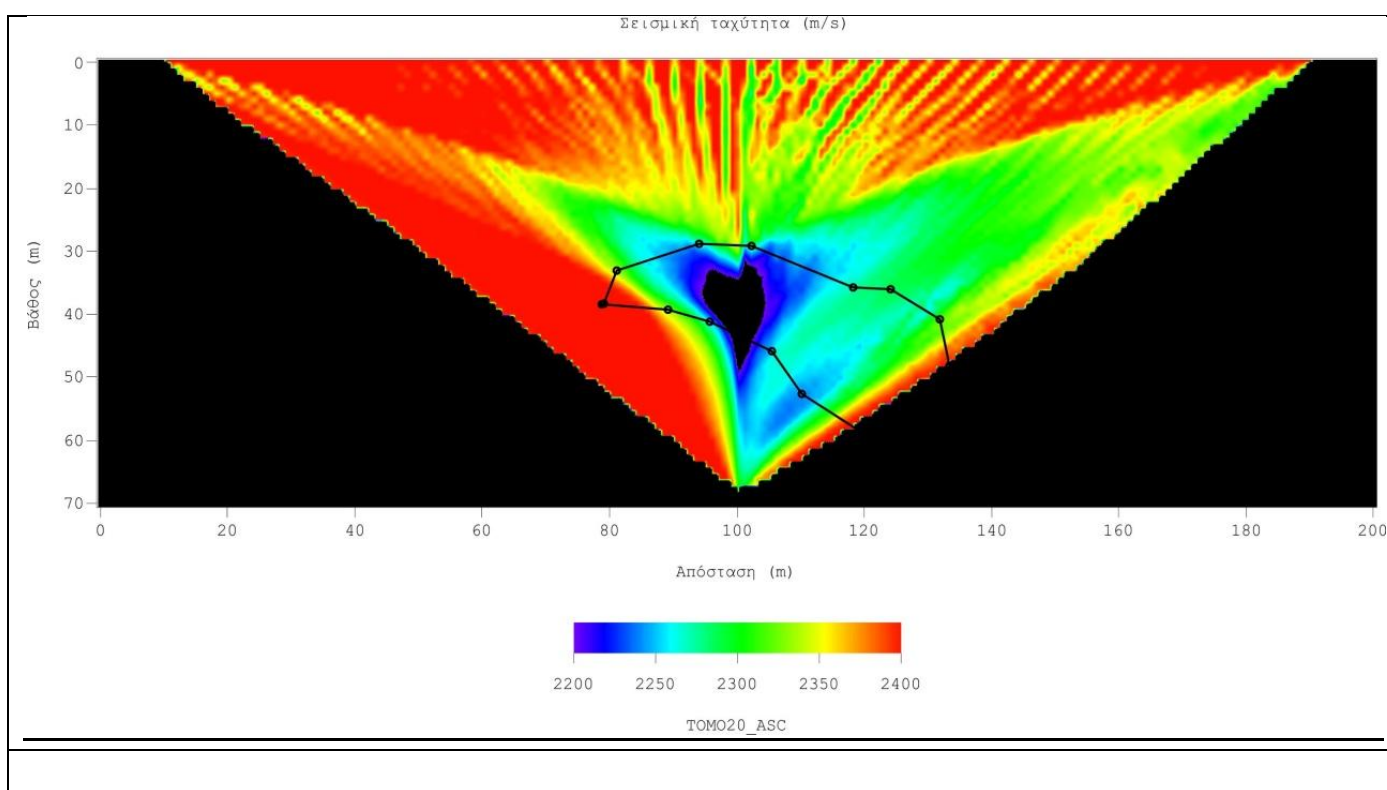
Στην 5^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2200 – 2400 m/s. Στην υπέρθερμη ζώνη, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2250 – 2260 m/s. Υπάρχουν κάποια σημεία όπου οι ακτίνες φτάνουν με ταχύτητα 2200 m/s ή και μικρότερη, λόγω του ότι η γεώτρηση είναι στο κέντρο της δομής. Ωστόσο, οι ταχύτητες αυτές εμφανίζονται τόσο στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης όσο και στο εξωτερικό στρώμα, πιο συγκεκριμένα κάτω και αριστερά της δομής αλλά ακόμα και κοντά στην επιφάνεια όπου βρίσκονται οι πηγές. Αυτό οφείλεται στην αραιή συγκέντρωση των ακτίνων που αποτυγχάνουν να απεικονήσουν ορθώς το μοντέλο, τόσο ως προς τη γεωμετρία, όσο και ως προς την ποιότητα.

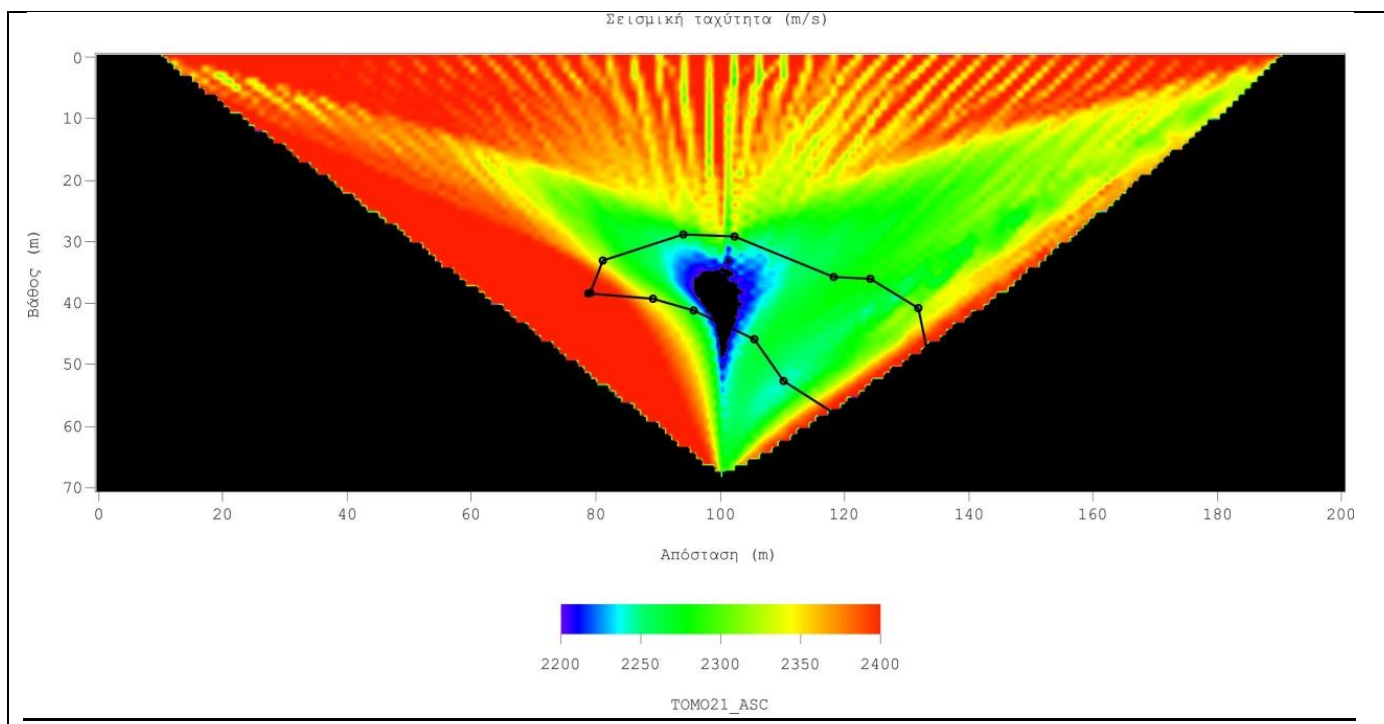
Στην 6^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2300 – 2400 m/s. Παρατηρούμε πως η απεικόνιση δεν καταφέρνει να πετύχει τις ορθές ταχύτητες (2400 m/s). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ισαπόσταση μεταξύ των δεκτών είναι μικρότερη από την δοκιμή 5, όπου από 10m έγινε 4 m και επομένως οι ακτίνες φτάνουν πιο αραιά, και είναι λιγότερες σε πλήθος, αδυνατώντας να “πάρουν” πολλές πληροφορίες και επομένως να προσδιορίσουν σωστά το γεωλογικό στρώμα. Επίσης δεν πρέπει να παραλείψουμε το γεγονός ότι στην διάταξη VSP, η συστοιχία των πηγών βρίσκεται στην επιφάνεια και επομένως οι ακτίνες ξεκινούν από κει για να φτάσουν στην γεώτρηση. Στην υπέρθερμη ζώνη, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν με ταχύτητες φανερά μικρότερες σε σχέση με τις δοκιμές 1-4 όπου είχαμε διάταξη Cross-hole. Οι ταχύτητες εδώ, κυμαίνονται μεταξύ 2200 - 2250 m/s και σε κάποια σημεία είναι ακόμα μικρότερες και από 2200 m/s. Ειδικότερα, στο κέντρο της δομής, η συγκέντρωση των ακτίνων είναι πυκνότερη και επιτυγχάνεται ταχύτητα <2200 m/s, δηλαδή πολύ κοντά στην επιθυμητή 2000 m/s. Η μεγάλη αυτή ακρίβεια στην τιμή της ταχύτητας, πιθανών να

οφείλεται στο γεγονός, ότι η γεώτρηση με τους δέκτες, τοποθετήθηκε ακριβώς στο κέντρο της δομής υπέρθερμης ζώνης και επομένως οι ακτίνες αναγκαστικά πρέπει να περάσουν μέσα από τη δομή χωρίς να μπορούν να την αποφύγουν. Ωστόσο ως προς τη γεωμετρία, δεν επιτυγχάνεται η ορθή απεικόνιση, καθώς τέτοιες ταχύτητες συγκεντρώνονται μόνο στο κέντρο της δομής, χωρίς να απεικονίζουν το καμπυλοειδές σχήμα της.

6.4.1.4 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS

ΔΟΚΙΜΗ 7: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ





ΔΟΚΙΜΗ 8: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 4 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 0.5 ΜΕΤΡΑ

Σχήμα 6.6: Δοκιμές με μέθοδο VSP, και διάταξη οπτικών ινών DAS.

Στην 7^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα 2400 m/s. Υπάρχει μια περιοχή του μοντέλου (δεξιά) όπου η ταχύτητα κυμαίνεται μεταξύ 2300 – 2400 m/s. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι διαφορετικές ταχύτητες διακρίνονται πολύ καλύτερα μεταξύ τους σε σχέση με τις δοκιμές 5,6 όπου είχαμε συμβατική μέθοδο. Σε αυτό ίσως να οφείλεται η μικρότερη ισαπόσταση δεκτών όπου από 4 και 10 m έγινε 1 m., χαρίζοντας μεγαλύτερη ευκρίνεια στην απεικόνιση. Στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2250 – 2270 m/s, με κάποια σημεία όπου η ταχύτητα γίνεται και <2200 m/s. Αυτές οι ταχύτητες, συγκεντρώνονται στο κέντρο και γενικά στο εσωτερικό της δομής, και μόνο σε λίγα σημεία εξωτερικά της δομής (κάτω), αποτυγχάνοντας να απεικονήσει καλά την γεωμετρία της υπέρθερμης ζώνης και να εντοπίσει ορθώς το σχηματισμό ασφαλτούχων άμμων. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διάταξη VSP, δίνει την δυνατότητα για ακριβέστερες τιμές ταχυτήτων, πιο κοντά στις επιθυμητές, καθώς η γεώτρηση βρίσκεται μέσα στο κέντρο της υπο προσδιορισμού δομής. Γενικά, φαίνεται με σαφήνεια, ότι η απεικόνιση είναι πολύ καλύτερη ποιοτικά σε σχέση με την απεικόνιση των δοκιμών 5,6.

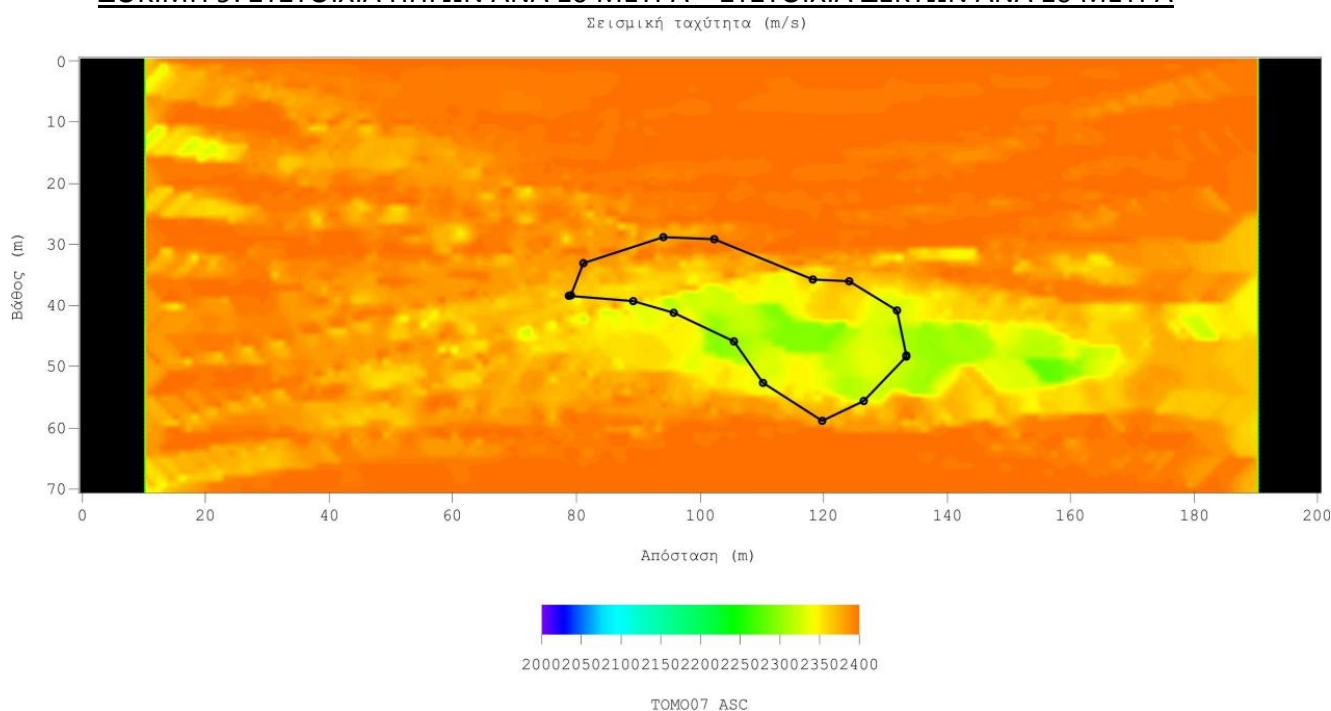
Στην 8^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ 2300 – 2400 m/s. Όπως και στην προηγούμενη δοκιμή, οι διαφορετικές ταχύτητες διακρίνονται πολύ καλύτερα μεταξύ τους σε σχέση με τις δοκιμές 5,6. Στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν με ταχύτητα 2250 m/s έως 2280-2290 m/s. Σε αντίθεση με την δοκιμή 7, μόνο σε ένα σημείο, στο κέντρο της

δομής, οι ταχύτητες που συγκεντρώνονται έχουν τιμή 2200 – 2250 ή και <2200 m/s. Επιπλέον, εξωτερικά της δομής δεν συγκεντρώνονται χαμηλές <2200 m/s. Δηλαδή οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από πριν. Αυτά οφείλονται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση η συστοιχία των δεκτών έχει ακόμη μικρότερη ισαπόσταση από πριν. Ωστόσο, συνολικά, η ποιότητα και ευκρίνεια της απεικόνισης είναι παρόμοια με εκείνης, της δοκιμής 7.

6.4.2 ΜΕΛΕΤΗ 2: ΙΣΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΗΓΩΝ 10 ΜΕΤΡΑ

6.4.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ

ΔΟΚΙΜΗ 9: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ



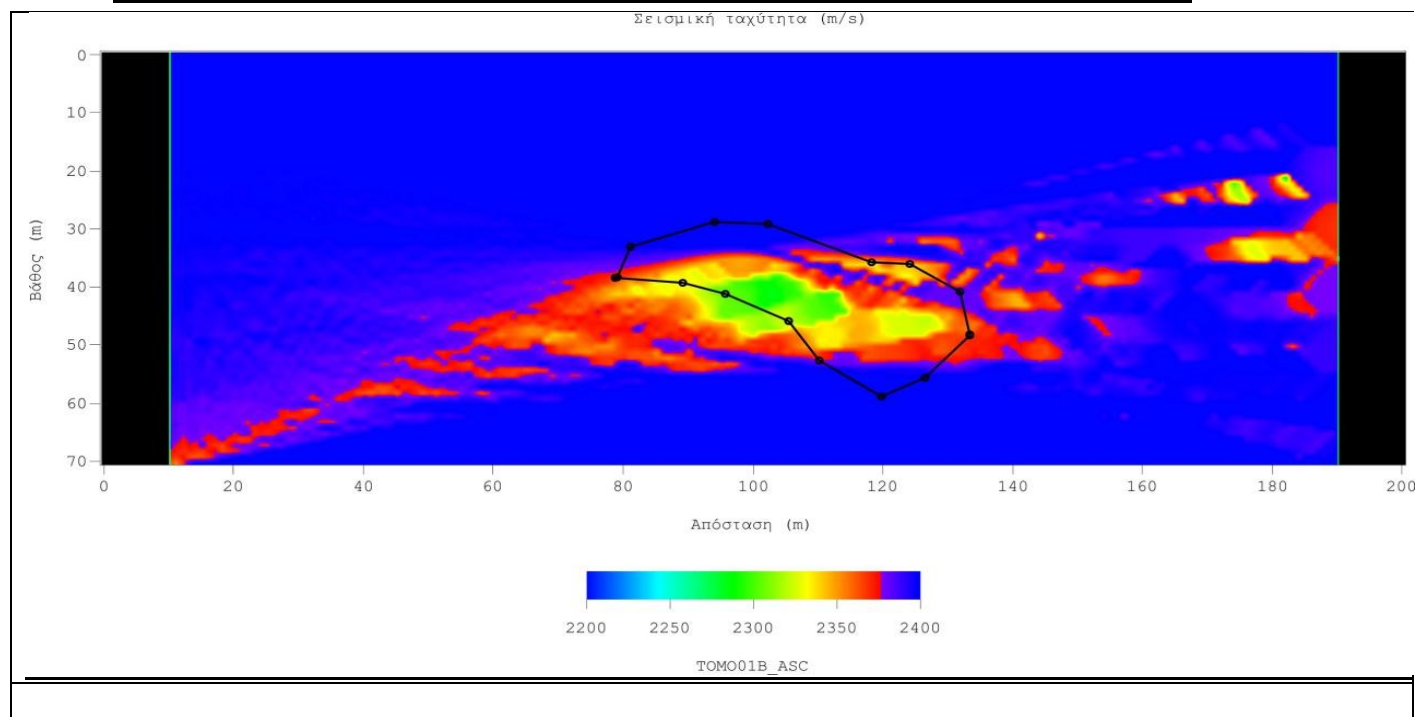
Σχήμα 6.7: Δοκιμή με μέθοδο Cross-hole, και συμβατική διάταξη.

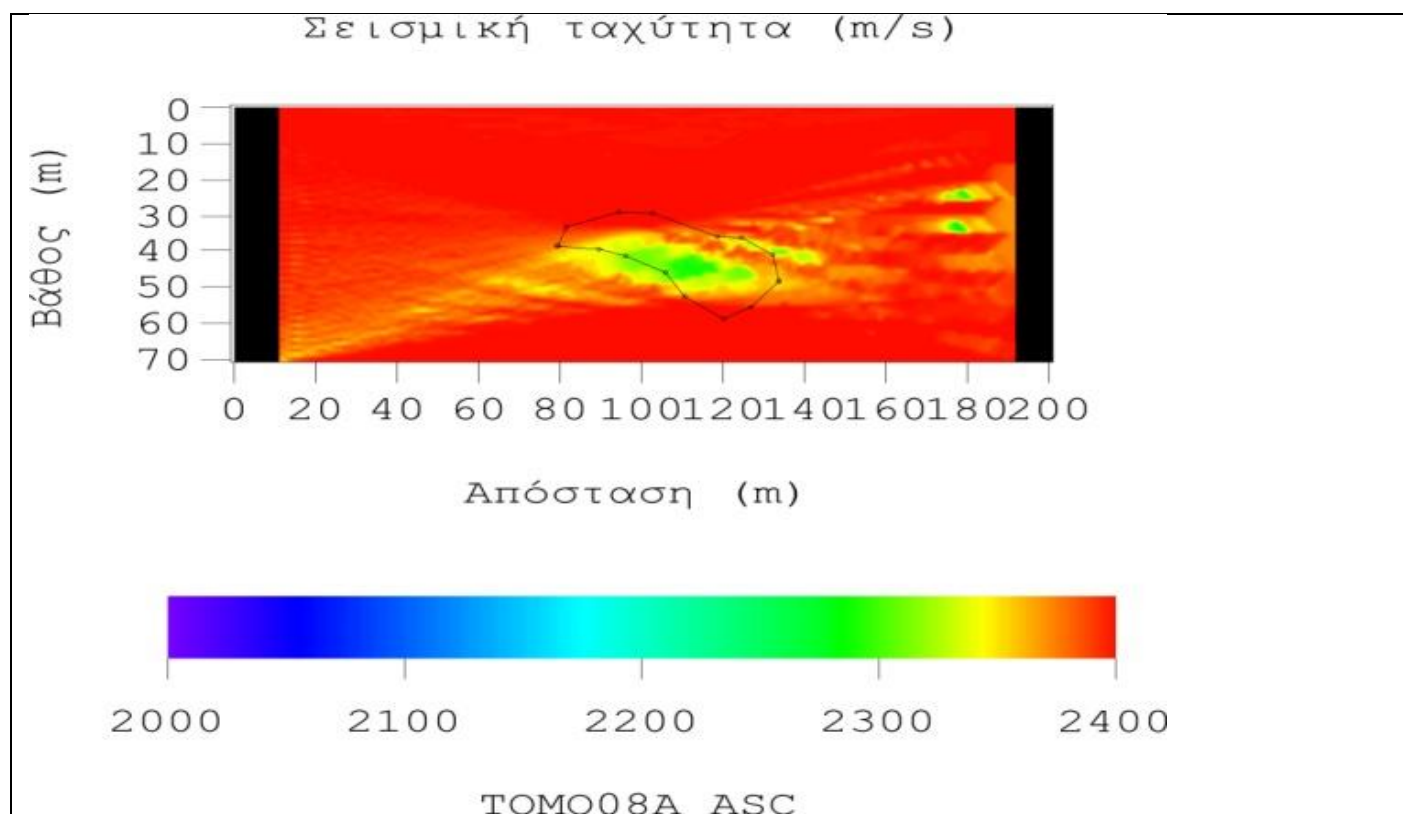
Στην 9^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα 2400 m/s. Ωστόσο, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, κυρίως στην περιοχή μεταξύ της γεώτρησης που βρίσκονται οι πηγές (αριστερά) και της δομής, αλλά και δεξιά της δομής, σε πολλά σημεία η ταχύτητα κυμαίνεται μεταξύ 2350 – 2380 m/s. Αυτό οφείλεται στο ότι στην 2^η μελέτη, η ισαπόσταση μεταξύ των πηγών μεγαλώνει και από 4 m γίνεται 10 m. Δηλαδή, οι ακτίνες είναι πολύ αραιές όχι μόνο κοντά στη γεώτρηση των δεκτών, αλλά και στην γεώτρηση των πηγών από όπου ξεκινάνε. Στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν με ταχύτητα 2250 m/s, αλλά τέτοιες μειωμένες ταχύτητες,

παρατηρούνται και εξωτερικά της δομής (δεξιά). Συνολικά, οι ακτίνες δεν προσδιορίζουν ορθώς τις επιμέρους ταχύτητες και δεν απεικονίζουν με ακρίβεια και ευκρίνεια το μοντέλο. Επίσης, ούτε ο σχηματισμός ασφαλτούχων αμμών προσδιορίζεται με σαφήνεια. Ωστόσο, σε σχέση με τη διάταξη VSP, η μέθοδος Cross-hole, πετυχαίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια την γεωμετρία της ζώνης υπέρθερμου ατμού.

6.4.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS

ΔΟΚΙΜΗ 10: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ





ΔΟΚΙΜΗ 11: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 0.5 ΜΕΤΡΑ

Σχήμα 6.8: Δοκιμές με μέθοδο Cross-hole, και διάταξη οπτικών ινών DAS.

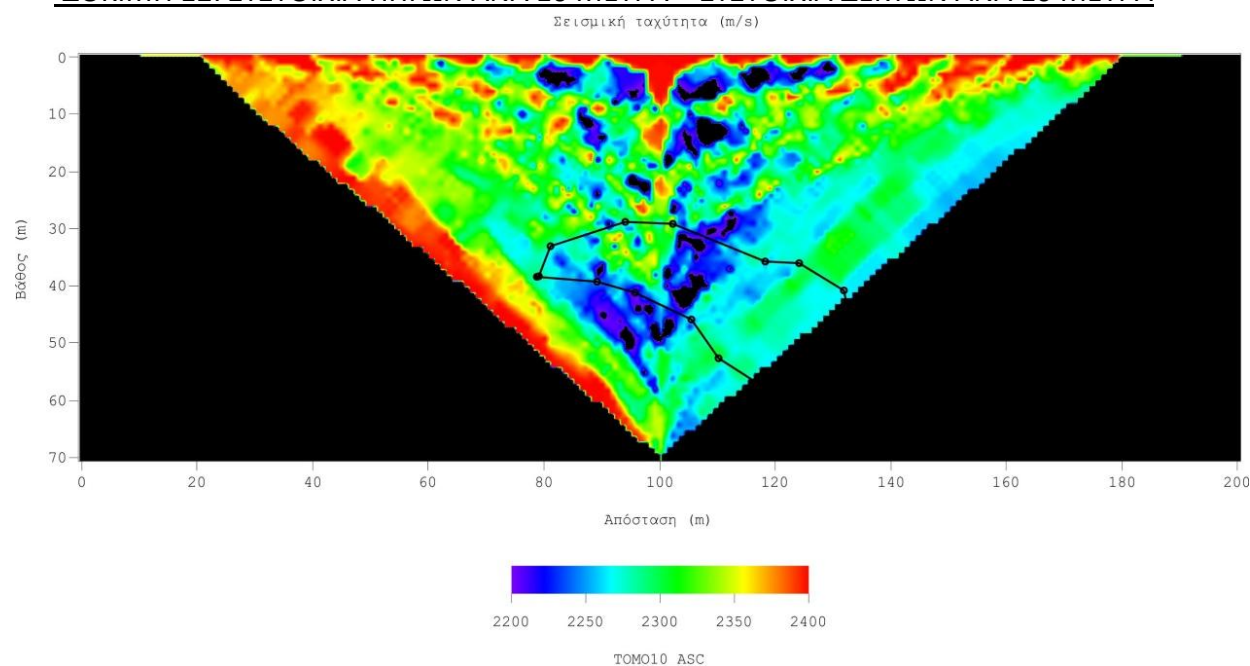
Στην 10^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα 2400 m/s. Μόνο σε μια μικρή περιοχή αριστερά της υπέρθερμης ζώνης, η ταχύτητα των ακτίνων φτάνει τα 2380 m/s. Στο εσωτερικό της δομής πετρελαίου, η ταχύτητα κυμαίνεται μεταξύ 2280 – 2350 m/s. Στο κέντρο της δομής, υπάρχει πιο έντονη συγκέντρωση ακτίνων, με ταχύτητες που κυμαίνονται μεταξύ 2280 – 2300 m/s. Οι ταχύτητες δεν είναι τόσο χαμηλές όσο θα ήταν το επιθυμητό (2000 m/s), κυρίως για μια μελέτη προσομοίωσης DAS όπου η πυκνή συστοιχία των δεκτών θα έπρεπε να αποδίδει με μεγαλύτερη ακρίβεια την τιμή αυτών. Ωστόσο διακρίνονται οι διαφορές στην τιμή τους με μεγάλη σαφήνεια, και επιτυγχάνουν να αποδόσουν την γεωμετρία της δομής και να προσδιορίσουν με καλή ακρίβεια το μοντέλο. Η ποιότητα της απεικόνισης είναι πολύ καλύτερη από ότι στην δοκιμή 9, με συμβατική μέθοδο.

Στην 11^η δοκιμή, οι ταχύτητες τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά της δομής, είναι πανομοιότυπες με εκείνες της προηγούμενης δοκιμής. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται, είναι ότι στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης, η ταχύτητα είναι ελαφρώς μικρότερη. Δηλαδή, κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 2280 – 2300 m/s και σε ελάχιστα σημεία φτάνει τα 2350 m/s. Αποδίδει λίγο καλύτερα την γεωμετρία του σχηματισμού πετρελαίου καθ'όλη την έκταση της και όχι μόνο κεντρικά. Αυτό οφείλεται στο ότι η ισαπόσταση

μεταξύ των δεκτών είναι πιο μικρή από ότι πριν, και άρα οι ακτίνες είναι πιο πυκνές, επομένως και οι πληροφορίες που συλλέγονται. Συνολικά, η ακρίβεια της ποιότητας της απεικόνισης είναι ίδια με την 10^η δοκιμή.

6.4.2.3. ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΓΕΩΦΩΝΑ

ΔΟΚΙΜΗ 12: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ

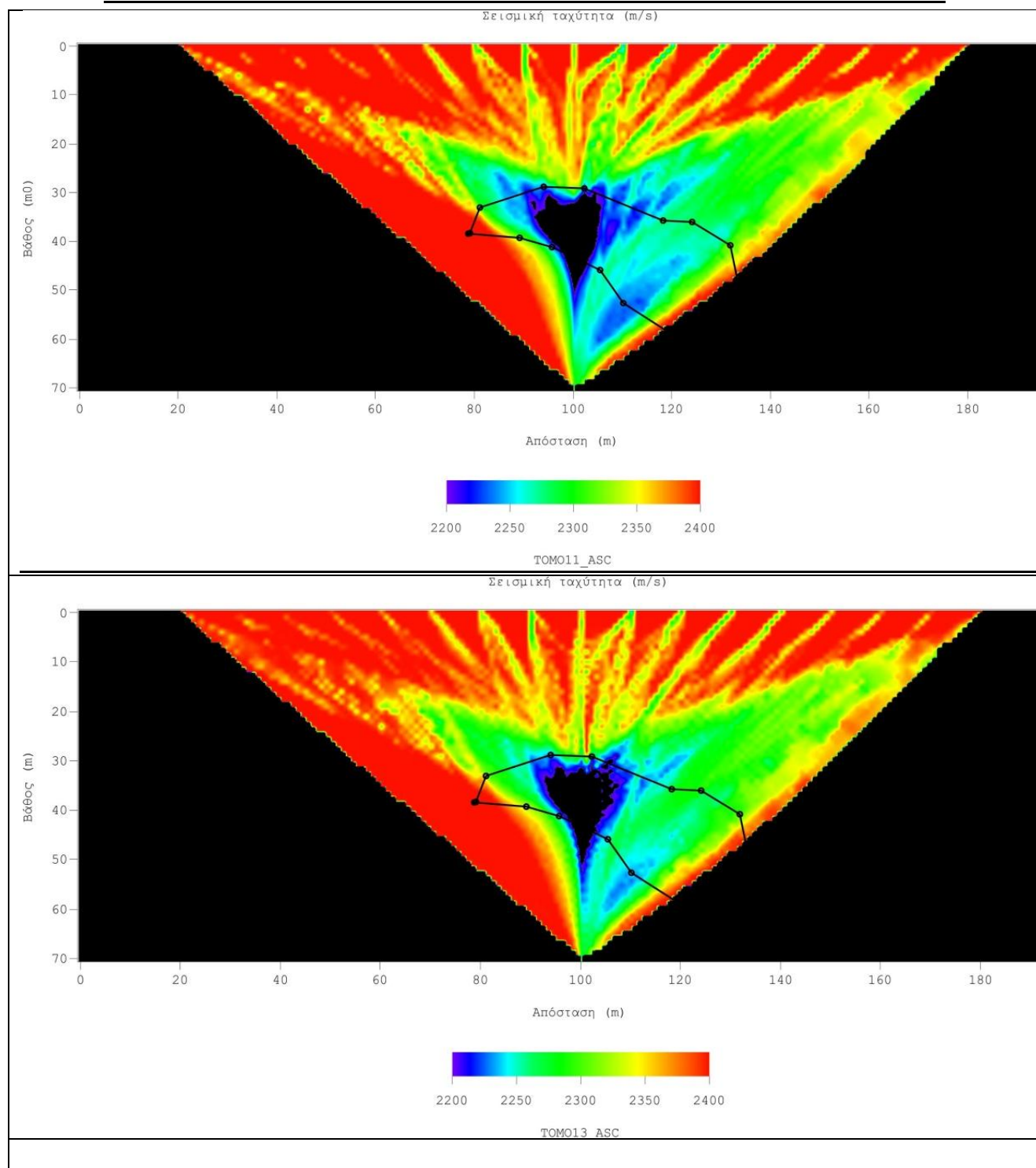


Σχήμα 6.9: Δοκιμή με μέθοδο VSP και συμβατική διάταξη.

Στην 12^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ από 2280 – 2400 m/s. Η έκταση των τιμών είναι μεγάλη και ο διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών ταχυτήτων δεν είναι καλός, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς οφείλεται στην πολύ αραιή διάδοση των ακτίνων, όπως και στην περίπτωση συμβατικής διάταξης μεθόδου Cross-hole (δοκιμή 9). Στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν με ταχύτητες 2200 m/s και μικρότερες αυτής. Υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση ακτίνων με τέτοιες ταχύτητες στο κέντρο της δομής αλλά και σε κάποια σημεία εκτός αυτής. Επομένως, η γεωμετρία δεν προσδιορίζεται με ακρίβεια, και γενικά η απεικόνιση δεν είναι ιδιαίτερα καλή ποιοτικά.

6.4.2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS

ΔΟΚΙΜΗ 13: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ



ΔΟΚΙΜΗ 14: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 10 ΜΕΤΡΑ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 0.5 ΜΕΤΡΑ

Σχήμα 6.10: Δοκιμές με μέθοδο VSP, και διάταξη οπτικών ινών DAS

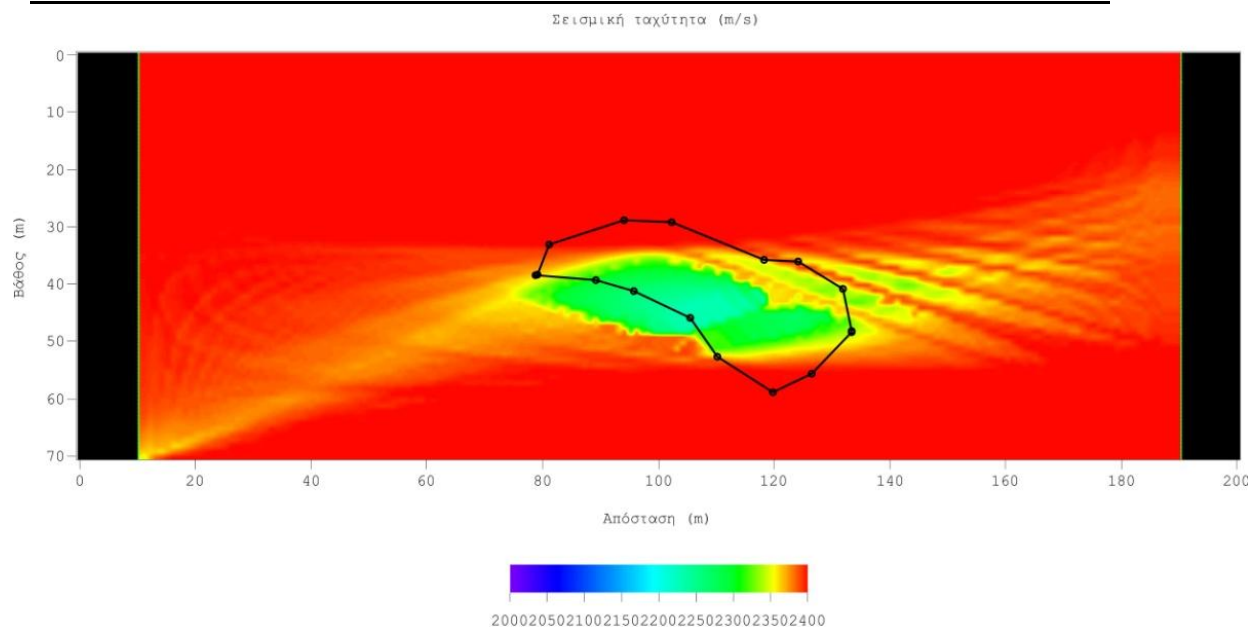
Στην 13^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα 2400 m/s. Η περιοχή μεταξύ γεώτρηση δεκτών και υπέρθερμης δομής, εμφανίζει ταχύτητα μεταξύ 2300 m/s. Ωστόσο, ο διαχωρισμός των ταχυτήτων είναι πολύ ακριβής, λόγω της μικρής ισαπόστασης μεταξύ των δεκτών. Στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν με ταχύτητα <2200 m/s, και συγκεντρώνονται κυρίως στο κέντρο της, ακριβώς μέσα στο κοίτασμα ασφαλούχων αμμών. Αποτέλεσμα πολύ κοντά στο επιθυμητό. Δεν πρέπει να παραλείψουμε βέβαια ότι οι χαμηλές ταχύτητες, αλλά και η ακρίβεια στη γεωμετρία του μοντέλου, όπως και στην 1^η μελέτη, είναι τόσο κόντα στα πραγματικά δεδομένα, λόγω της γεώτρησης των δεκτών που βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο του σχηματισμού πετρελαίου. Συνολικά η ποιότητα της απεικόνισης είναι πολύ καλύτερη από την δοκιμή 12, συμβατικής διάταξης.

Στην 14^η δοκιμή, οι ταχύτητες τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά της υπέρθερμης δομής, είναι πανομοιότυπες. Η μόνη διαφορά με την δοκιμή 13, έγκειται στο εσωτερικό της δομής, όπου ακτίνες που φτάνουν με ταχύτητα <2200 m/s, συγκεντρώνονται ακόμα καλύτερα και πιο πυκνά στο κέντρο του κοιτάσματος ασφαλούχων αμμών. Αυτό οφείλεται στην περαιτέρω μείωση της ισαπόστασης των δεκτών από 1 m στα 0.5 m, και επομένως στην παραπάνω και ακριβέστερη πληροφορία που αποκτήθηκε. Συνολικά η ποιότητα της απεικόνισης είναι ίδια με την παραπάνω δοκιμή με χρήση DAS. Επίσης η γεωμετρία της υπέρθερμης ζώνης προσδιορίζεται το ίδιο με την δοκιμή 13, αλλά λιγότερο καλά σε σχέση με τις αντίστοιχες δοκιμές για διάταξη Cross-hole.

6.4.3 ΜΕΛΕΤΗ 3: ΙΣΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΗΓΩΝ 1 ΜΕΤΡΟ

6.4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS

ΔΟΚΙΜΗ 15: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ

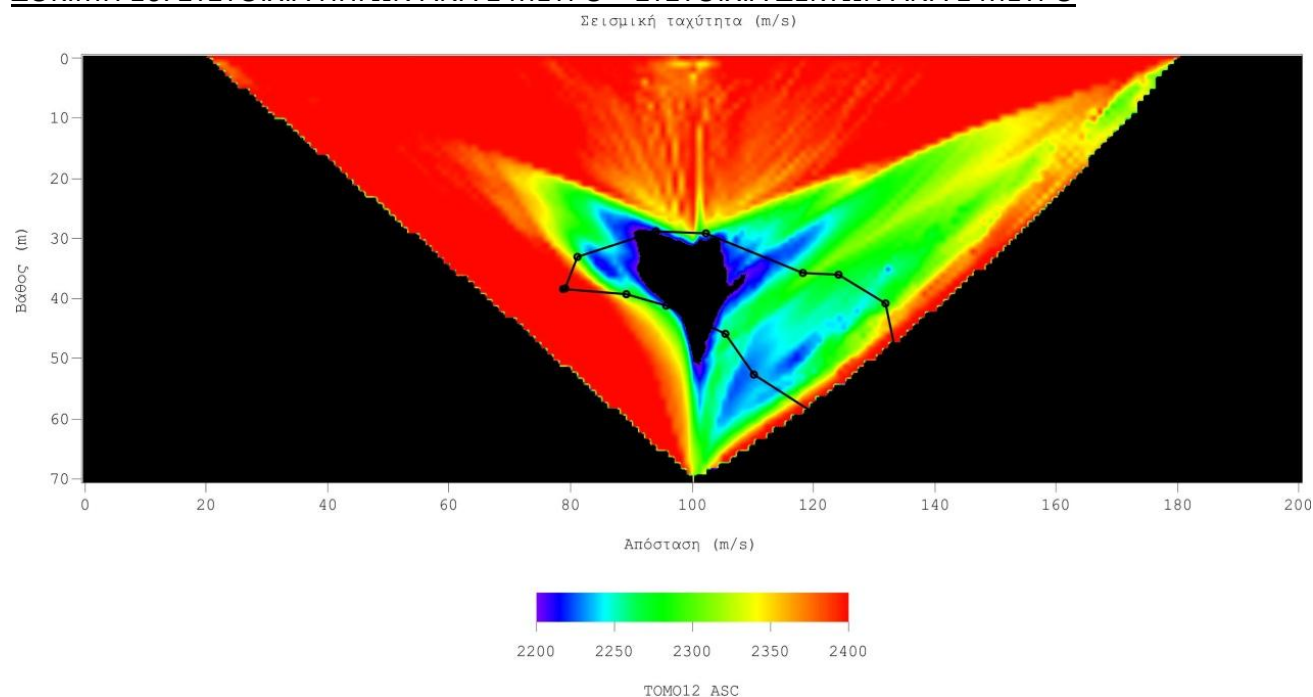


Σχήμα 6.11: Δοκιμή με μέθοδο Cross-hole και διάταξη οπτικών ινών DAS.

Στην 15^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις, φτάνουν στο εξωτερικό στρώμα με ταχύτητα 2400 m/s και στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 2180 έως 2200 – 2300 m/s. Σε σχέση με τις 2 παραπάνω αντίστοιχες μελέτες Cross-hole με χρήση DAS, εδώ παρατηρούμε ότι ο διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών ταχυτήτων είναι ακόμα καλύτερος. Οι τιμές των ταχυτήτων τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά της δομής, πλησιάζουν πολύ τα πραγματικά δεδομένα, και οι ακτίνες με ταχύτητα <2200 m/s, συγκεντρώνονται πιο πυκνά στο κέντρο της δομής προσδιορίζοντας με μεγάλη ακρίβεια την γεωμετρία της. Η ποιότητα συνολικά της απεικόνισης είναι πολύ καλή, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ισαπόσταση είναι 1 m, τόσο μεταξύ των πηγών όσο και μεταξύ των δεκτών. Η ποιότητα της εικόνας παρατηρούμε ότι είναι πολύ καλή.

6.4.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ VSP - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ DAS

ΔΟΚΙΜΗ 16: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΠΗΓΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ – ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΚΤΩΝ ΑΝΑ 1 ΜΕΤΡΟ



Σχήμα 6.12: Δοκιμή με μέθοδο VSP, και διάταξη οπτικών ινών DAS.

Στην 16^η δοκιμή, οι πρώτες αφίξεις φτάνουν στην υπέρθερμη ζώνη, με ταχύτητα 2400 m/s. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, στην περιοχή μεταξύ της γεώτρησης των δεκτών και της δομής, η ταχύτητα παίρνει τιμή 2300 m/s. Αυτό παρατηρείται σε όλες τις τομογραφίες VSP που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια των μελετών. Πιθανών να οφείλεται στην προσπάθεια των ακτίνων να “περάσουν” μέσα από την υπέρθερμη ζώνη με μικρότερη ταχύτητα, και τελικά χάνεται λίγο η ακρίβεια κατά τον διαχωρισμό των διαφορετικών ταχυτήτων. Στο εσωτερικό της δομής πετρελαίου, οι πρώτες αφίξεις συγκεντρώνονται κυρίως στο κέντρο με ταχύτητα <2200 m/s. Συνολικά ο διαχωρισμός των ταχυτήτων είναι πολύ ακριβής, οι τιμές τους πολύ κοντά στα πραγματικά δεδομένα, και η ποιότητα της απεικόνισης πολύ ικανοποιητική. Στο μόνο που υστερεί, είναι στο να απεικονήσει ορθώς την γεωμετρία της ζώνης υπέρθερμου ατμού σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της έγχυσης υπέρθερμου ατμού σε ταμειυτήρα πετρελαίου στην Αλμπέρτα του Καναδά με διαφορετικές μεθόδους και σεισμικές διατάξεις. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση συνθετικών δεδομένων σεισμικής τομογραφίας που δημιουργήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εν λόγω προσομοίωση, βασίστηκε στην θεώρηση ότι αναμένονται παρόμοια ή και καλύτερα αποτελέσματα με χρήση της τεχνολογίας οπτικών ινών αντί με συμβατική μέθοδο γεωφώνων και με διάταξη Cross-hole αντί με VSP.

Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας οπτικών ινών έναντι συμβατικής μεθόδου γεωφώνων, είναι η χρήση ενός μόνο ενιαίου καλωδίου σε γεώτρηση, αντί για τη χρονοβόρα, ακριβή και συνήθως δύσβατη τοποθέτηση γεωφώνων, που έχει στόχο την ύπαρξη περισσότερων και πυκνότερων πληροφοριών στο εσωτερικό της γεώτρησης και οδηγεί σε ακριβέστερη ανάλυση και ποιότητα απεικόνισης ταμειυτήρα πετρελαίου.

Η διάταξη VSP με χρήση οπτικών ινών, σε αντίθεση με την διάταξη Cross-hole, προυποθέτει μια συστοιχία πηγών στην επιφάνεια, και μία συστοιχία δεκτών μέσα σε γεώτρηση και συγκεκριμένα τη γεώτρηση παραγωγής που περνάει μέσα από το υπο μελέτη κοίτασμα πετρελαίου. Επομένως η ακρίβεια των πληροφοριών που λαμβάνονται κοντά στον σχηματισμό, είναι πολύ μεγαλύτερη. Ωστόσο, η διάταξη Cross-hole, προσδιορίζει καλύτερα την γεωμετρία της υπέρεθμης ζώνης, που είναι και το ζητούμενο.

Για να επιτευχθεί ο στόχος της εργασίας, με βάση το γεωμετρικό μοντέλο της περιοχής Αλμπέρτα του Καναδά, δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα με τις ίδιες παραμέτρους και δοκιμές.

1. Στο πρώτο μοντέλο, θεωρήθηκε η ίδια διάταξη με την μελέτη στην Αλμπέρτα. Συμβατική διάταξη Cross-hole, με ισαπόσταση μεταξύ πηγών και γεωφώνων 4 m. Έπειτα για την ίδια ισαπόσταση μεταξύ πηγών (4 m), πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την ίδια διάταξη με ισαπόσταση δεκτών 10 m, αλλά για χρήση οπτικών ινών, δηλαδή με ισαπόσταση δεκτών 1 και 0.5 m. Μετά έγιναν ξανά οι ίδιες δοκιμές, για διάταξη VSP, με συμβατική μέθοδο και με χρήση οπτικών ινών.
2. Στο δεύτερο μοντέλο πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες δοκιμές αλλά με ισαπόσταση πηγών 10 m. Έχοντας δηλαδή, αραιή συστοιχία μεταξύ των

πηγών, καθ'όλη τη διάρκεια της μελέτης, προσομοιώνοντας έτσι συμβατική μέθοδο γεωφώνων.

3. Στο τρίτο μοντέλο πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες δοκιμές αλλά με ισαπόσταση πηγών 1 m. Έχοντας δηλαδή, ενιαία συστοιχία μεταξύ των πηγών, καθ'όλη τη διάρκεια της μελέτης, προσομοιώνοντας έτσι το καλώδιο οπτικών ινών.

Στην κάθε μελέτη ξεχωριστά, όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ τεχνολογίας DAS και συμβατικής μεθόδου, στην ίδια διάταξη, είτε αυτή είναι Cross – hole, είτε VSP, επιβεβαιώθηκε η αρχική θεώρηση ότι με μικρότερη ισαπόσταση μεταξύ δεκτών, δηλαδή προσομοίωση οπτικών ινών, οι πληροφορίες που λαμβάνονται είναι πιο πυκνές, η απεικόνιση είναι πιο ακριβής και η ποιότητα πολύ πιο ικανοποιητική. Οι ταχύτητες προσεγγίζονται με καλύτερη ακρίβεια και πλησιάζουν περισσότερο τις επιθυμητές. Επίσης ο διαχωρισμός μεταξύ των τιμών τους είναι πιο σαφής. Στο εξωτερικό στρώμα οι πρώτες αφίξεις φτάνουν με ταχύτητα 2400 m/s και στην υπέρθερμη ζώνη φτάνουν με μικρότερη ταχύτητα, κοντά στα 2200 m/s ή και μικρότερη αυτής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ακτίνες είναι πυκνότερες και περισσότερες, με αποτέλεσμα να καταφέρνουν να διαδίδονται μέσα από τη δομή και να προσδιορίζουν με ακρίβεια την γεωμετρία της, πολύ περισσότερες ακτίνες, από ότι αν είχαμε αραιότερη ισαπόσταση, όπως σε περίπτωση συμβατικών γεωφώνων. Είναι σημαντικό πλεονέκτημα αν σκεφτούμε ότι οι ακτίνες, “προτιμούν” την σύντομη διαδρομή, αποφεύγοντας έτσι κάθε μικρότερη ταχύτητα. Στην προκειμένη περίπτωση, επιλέγουν να περνούν γύρω και έξω από την υπέρθερμη ζώνη όπου η ταχύτητα είναι 2400 m/s.

Ωστόσο, με χρήση οπτικών ινών μεταξύ διάταξης Cross – hole και VSP, όπως φαίνεται από τα απολέσματα, η διάταξη Cross-hole παρουσιάζει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, με ακριβέστερο προσδιορισμό της γεωμετρίας της υπέρθερμης ζώνης. Ωστόσο, η διάταξη VSP, έχει καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών ταχυτήτων και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γεώτρηση που βρίσκονται οι δέκτες είναι τοποθετημένη ακριβώς στο κέντρο του κοιτάσματος πετρελαίου, και επομένως είναι αναμενόμενο η πληροφορία που λαμβάνεται να είναι καλύτερη. Η ανάλυση και ποιότητα της απεικόνισης είναι ίδια, ανεξαρτήτως διάταξης.

Με συμβατική μέθοδο, για διάταξη VSP, η ανάλυση και ποιότητα της απεικόνισης είναι παρόμοια με την διάταξη Cross-hole. Γενικά, τα απολέσματα δεν είναι τόσο ικανοποιητικά. Η γεωμετρία της δομής του πετρελαίου αλλά και η γεωμετρία του μοντέλου γενικότερα, δεν επιτυγχάνεται με μεγάλη ακρίβεια, ούτε ο διαχωρισμός μεταξύ των ταχυτήτων είναι πολύ καλός. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι ακτίνες είναι αραιές ανά 4 ή 10 m, και δεν περνάνε από όλα τα σημεία του

μοντέλου με αποτέλεσμα η πληροφορία που λαμβάνεται να είναι ελλιπής. Το μόνο πλεονέκτημα της διάταξης VSP έναντι διάταξης Cross-hole είναι ότι στην πρώτη, οι ταχύτητες των ακτίνων στο εσωτερικό της υπέρθερμης ζώνης, είναι σαφώς μικρότερες και πιο κόντα στις πραγματικές. Κυμαίνονται κόντα στα 2200 m/s. Ενώ στη διάταξη Cross-hole, κυμαίνονται μεταξύ 2250 – 2280 m/s. Ωστόσο, με χρήση τεχνολογίας DAS, οι ταχύτητες αυτές είναι ακόμα μικρότερες αντίστοιχα στις δύο διατάξεις.

Τέλος, αν γίνει περαιτέρω σύγκριση μεταξύ των τριών μοντέλων, ανεξαρτήτως διάταξης, επιβεβαιώνεται ότι η μελέτη που χρησιμοποιεί τεχνολογία οπτικών ινών, παρουσιάζει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτή είναι η 3^η μελέτη, καθώς έχουμε προσομοίωση με DAS, τόσο στη συστοιχία των πηγών όσο και στη συστοιχία των δεκτών. Πρέπει να αναφερθεί ότι και στις τρεις μελέτες, οι δοκιμές με χρήση οπτικών ινών βγάζουν παρόμοιες ποιοτικά απεικονήσεις, αλλά όπως είναι λογικό, όταν μειώνεται η ισαπόσταση και των πηγών εκτός από την ισαπόσταση των δεκτών, το αποτέλεσμα έχει ακόμα καλύτερη ακρίβεια.

Επομένως, αν και σε πολλές από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν υπήρχαν αποκλίσεις από τα επιθυμητά αποτελέσματα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι η τεχνολογία οπτικών ινών, συνολικά, χαρίζει καλύτερη ανάλυση, ακρίβεια και ποιότητα στις σεισμικές απεικονίσεις που δημιουργούνται, σε σχέση με την συμβατική μέθοδο γεωφώνων και άρα είναι η καλύτερη επιλογή για χρήση ως μέθοδος έγχυσης ατμού για ανάκτηση πετρελαίου. Αυτό συμβαίνει καθώς το καλώδιο οπτικών ινών είναι ενιαίο και επομένως λαμβάνει μετρήσεις σε όλα τα σημεία κατά μήκος αυτού, σε αντίθεση με τα γεώφωνα που λόγω κόστους ή δυσκολίας τοποθέτησης, δεν μπορούν να καλύψουν όλη την έκταση της γεώτρησης.

Ανάμεσα στις δύο διατάξεις στην παρούσα μελέτη, είναι εμφανές ότι η διάταξη VSP προσεγγίζει με μεγαλύτερη σαφήνεια τις επιθυμητές ταχύτητες, τα πραγματικά δεδομένα του μοντέλου. Ωστόσο, στην συγκεκριμένη εργασία, με την τοποθέτηση της γεώτρησης ακριβώς στο κέντρο του σχηματισμού πετρελαίου, εξαναγκάστηκαν κατά κάποιο τρόπο οι ακτίνες να προσεγγίζουν με τόσο καλή ακρίβεια τις πραγματικές τιμές των ταχυτήτων, και επομένως ίσως να μην είναι τόσο ρεαλιστικά τα αποτελέσματα. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η διάταξη Cross-hole είναι προτιμώμενη καθώς προσδιορίζει την γεωμετρία του κοιτάσματος με καλύτερη προσέγγιση. Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι μέχρι στιγμής σε πραγματικές δοκιμές πεδίου η διάταξη που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο είναι η VSP, τόσο λόγω της καλής ανάλυσης των αποτελεσμάτων, όσο και για την ελάττωση του κόστους που μια δεύτερη γεώτρηση θα επέβαλλε.

Τέλος, θα πρέπει να εξεταστεί η απόκριση του εξοπλισμού σε σχέση με την παράμετρο της θερμοκρασίας της ζώνης υπέρθερμου ατμού. Όπως αναφέρθηκε και στην θεωρία, οι οπτικές ίνες είναι σχεδιασμένες να αντέχουν στις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες ενός ταμιευτήρα στο βάθος μιας γεώτρησης, σε τιμές μεγαλύτερες και από 300 °C. Επομένως, κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας DAS, η απεικόνιση δεν επηρεάζεται από αυτή την παράμετρο. Ωστόσο, τα συμβατικά γεώφωνα έχουν περιορισμούς σε αυτό τον τομέα. Άρα, πέρα από το γεγονός ότι η συμβατική μέθοδος δεν βγάζει τόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα, ο παράγοντας της υψηλής θερμοκρασίας των 280°C που φτάνει ο υπέρθερμος ατμός, είναι επίσης περιοριστικός.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. **Αποστολόπουλος. Γ, 2013**, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, *“Σημειώσεις εφαρμοσμένης γεωφυσικής”*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. **Βαφείδης Α., 1996**, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Μονογραφία *“Σεισμική Τομογραφία Ανάκλασης”*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. **Μεναγιάς Γ., 2014**, Διπλωματική εργασία, *“Σεισμική Διασκόπηση στο οικόπεδο του παλαιού εργοστασίου της ΑΒΕΑ Χανιά”*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. **Μπογιατζής Π. 2006**, Διατριβή Ειδίκευσης, τομέας Γεωφυσικής, *“Δισδιάστατη Αντιστροφή Δεδομένων Τομογραφίας Σεισμικής Διάθλασης”*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Θεσσαλονίκη.
5. **Μπριντάκης Ι., 2016**, Διπλωματική Εργασία, *“Συμβολή της σεισμικής Ανάκλασης στην παρακολούθηση της γεωλογικής αποθήκευσης του Διοξειδίου του Ανθρακα”*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
6. **Παγιαλάκης Μ., 2014**, Διπλωματική εργασία στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, *“Προσομοίωση Δεδομένων Σεισμικής Ανάκλασης για το σχεδιασμό Διασκόπησης στο Θαλάσσιο Χώρο του Πατραϊκού Κόλπου”*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
7. **Παγκράτης, Χ. Π., 2012**, Διπλωματική Εργασία, *“Συμβολή της τρισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας και της ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων στο σχεδιασμό λιμνοδεξαμενής στο οροπέδιο του Ομαλού Χανίων”*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
8. **Σουπιός Π., 1997**, Διατριβή Ειδίκευσης, *“Αντιστροφή των χρόνων άφιξης σε σεισμική τομογραφία μεταξύ γεωτρήσεων”*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Εφαρμοσμένη Γεωφυσικής, Θεσσαλονίκη.

9. **Τσούσης Π. Ν., 2007**, Διπλωματική Εργασία, *“Σεισμική Τομογραφία στο τμήμα Λυγαρία-Περιβόλι του οδικού άξονα Ε65”*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. **Barberan. C., Allanic. C., Avila. D., Billiot. J. H., Hartog. A., Frignet. B., Lees. G., 2012**, 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, *“Multi – offset Seismic Acquisition Using Optical Fiber Behind Tubing ”*, Copenhagen, Denmark.
2. **Brown II. P. J, 1999**, JPJN, Term Project, *“ An Overview of the Vertical Seismic Profiling (VSP) Technique”*
3. **Butcher J. C., 1963**, Journal of the Australian Mathematical Society, *“ Coefficients for the study of Runge-Kutta integration processes ”*, Australia.
4. **Cerveny. V, 2001**, Cambridge University press , *“ Seismic Ray Method ”*, USA.
5. **Constantinou. A., Farahan. A., Cuny. T., Hartog. A., 2016**, *“Improving DAS Acquisition by Real Time Monitoring of Wireline Cable Coupling”*, SEG, International Exposition and 86th Annual Meeting.
6. **Conway C., Mondanos. M., 2015**, 9th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable, Silixa, *“ An introduction to fibre optic Intelligent Distributed Acoustic Sensing (iDAS) technology for power industry applications”*, UK.
7. **Cox. B., Wills. P., Kiyashchenko. D., Mestayer. J., Lopez. J., Bourne. S., Lupton. R., Solano. G., Henderson. N., Hill. D., Roy. J, 2012**, CSEG RECORDER, *“Distributed Acoustic Sensing for Geophysical Measurment, Monitoring and Verification”*, Calgary.
8. **Frignet. B. G., Hartog. A. H, 2014**, SPWLA 55th Annual Logging Symporisum, *“ Optical Vertical Seismic Profile on Wireline Cable ”*, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
9. **Hance. T., Jiang. T, Zhan. G., Kjos. E, Geetan. R, Soulas. S., Thomas. I, 2016**, *“ Learnings from Distributed Acoustic Sensing Data Processing for Seismic Applications - A Case Study from the North Sea”*, Vienna.

10. **Hill. D. J., 2013**, EAGE, Second Workshop on Permanent Reservoir Monitoring *"Distributed Acoustic Sensing for Permanent Downhole Monitoring"*, Stavanger, Norway.
11. **Jacobs, T., 2014**, JPT Technolgy, *"Downhole Fiber-Optic Monitoring : An Evolving Technology"*, OptaSense.
12. **Lesnikov. V., Allanic. C, 2014**, 76th EAGE Conference & Exhibition *"DAS VSP Acquisition - Perspectives and Challenges"*, Amsterdam RAI, The Netherlands.
13. **Lin. F.C, Ritzwoller. M. H, Snieder. R, 2009**, *Geophys. J. Int."**Eikonal tomography: surface wave tomography by phase front tracking across a regional broadband seismic array"*
14. **Longton, M. J., 2015**, GeoConvention: New Horizons, *"The potential of utilizing intelligent Distributed Acoustic Sensor and existing single-mode and multimode optical fibers for monitoring the reservoir characteristics"*, Silixa, UK.
15. **Macrides. C. G., 1987**, PHD Thesis, *"Seismic Tomography in oil sand for monitoring thermal recovery processes"*, The University of Alberta, Canada.
16. **Madsen. K.N, Dümmong. S., Parker. T., Finfer. D., Travis. P.N., Bostick. T., Thompson, M., 2013**, Borehole Geophysics Workshop II 3D VSP: Benefits, Challenges and Potential, EAGE *"Simultaneous Multiwell VSP using Distributed Acoustic Sensing"*, Malta.
17. **Madsen. K.N., Thompson. M., Dümmong. S., Kritski. A., Petersen. Å.S., Finfer. D., Parker. T, 2014**, 76th EAGE Conference & Exhibition, *" Distributed Acoustic Borehole Seismic in Producing Offshore Wells"*, Amsterdam RAI, The Netherlands.
18. **Mateeva. A., Mestayer. J., Cox. B., Kiyashchenko. D., Wills. P., Lopez. J., Grandi. S., Hornman. K., Lumens. P., Franzen. A., Hill. D., Roy. J., 2012**, SEG, *"Advances in Distributed Acoustic Sensing (DAS) for VSP"*, Annual Meeting, Las Vegas.
19. **Mateeva. A., Mestayer. J., Yang. Z., Lopez. J., Wills. P., Roy. J., Bown. T., 2013**, SEG, *"Dual-Well 3D VSP in Deepwater Made Possible by DAS"*, Annual Meeting, Huston.
20. **Mateeva. A., Lopez. J., Detomo. R., Potters. H., Berlang. W., Grandi. S., Mestayer. J., Wills. P., Cox. B., Kiyashchenko. D., 2015**, Geophysical Prospecting, *"Distributed Acoustic Sensing (DAS) for Reservoir Monitoring with VSP"*, EAGE.
21. **Mestayer. J., Grandi K. S., Cox. B., Wills. P., Mateeva. A., Lopez. J., Hill. D., Lewis. A., 2012**, EAGE, Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPE, *"Distributed Acoustic Sensing for Geophysical Monitoring"*, Copenhagen.

22. **Miller. D. E, Daley. T.M., White. D., Freifeld. B.M., Robertson. M., Cocker. J, Craven. M., 2016 , CSEG, “Simultaneous Acquisition of Distributed Acoustic Sensing VSP with Multi-mode and Singlemode Fibre Optic Cables and 3Cgeophones at the Aquistore CO2 Storage Site”, Boston.**
23. **OpenCourseWare, 2009, “Near-Surface Geophysical Imaging”, MIT.**
24. **Pereira. A. M., Jones. M., 2010, Schlumberger, “fundamentals of borehole seismic Technology”, Texas.**
25. **Urosevic. M., Campbell. A. J., Dahlhaus. L., Gendrin. A., Leaney. W. S., Tcherkashnev. S., Verliac. M., 2009, Energy Procedia “ Seismic Monitoring and Verification for the CO2 CRC Otway Basin Project, Part 2: acquisition and analysis of borehole seismic data”, Schlumberger oilfield, Australia.**
26. **Vidale, J, 1988, “Finite-difference calculation of travel times”, BSSA.**
27. **Xiao. J., Farhadiroushan. M., Clarke. Andy., Abdalmohsen. R. A., Al-Alyan. E. M., Parker. T. R., Shawash. J., Milne. H. C., 2015, “Intelligent Distributed Acoustic Sensing for in-well Monitoring”, SAUDI ARAMCO Journal of Technology.**
28. **Zhan. G., Kommedal. Jan., Nahm. J., 2015, SEG, “VSP field trials of distributed acoustic sensing in Trinidad and Gulf of Mexico”, Annual Meeting, New Orleans.**

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

1. **Blog ενημερωτικού περιεχομένου, 2015, Σύγχρονη Τεχνολογία, “Όλα όσα πρέπει να γνωρίζετε για τις οπτικές ίνες ”.**
2. **Fugro, 2015 , “Cross-hole Seismic”, www.fugro.com .**
3. **Hill. D, OptaSense, “ MANAGING OIL AND GAS WITH FIBRE-OPTIC SENSING”, www.energy-focus.co.uk**
4. **RIGZONE article “DAS Technology Expands Fiber-Optic Applications for Oil, Gas Industry”, www.Rigzone.com.**

