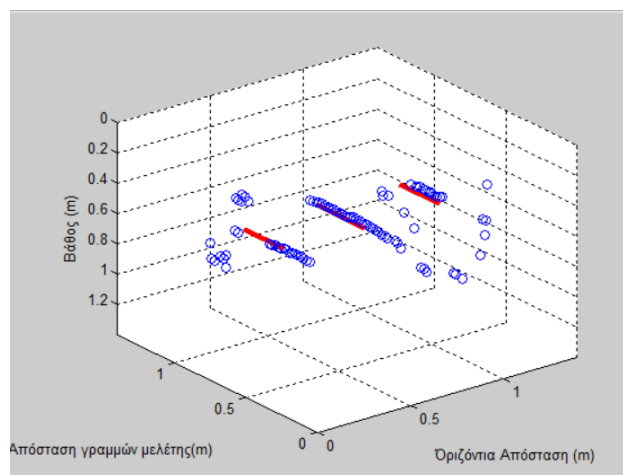


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθοδολογίας ανάλυσης ταχύτητας διάδοσης περιθλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από δεδομένα GPR για την απεικόνιση θαμμένων σωλήνων



Διπλωματική εργασία

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΡΟΥΜΠΗΣ

Εξεταστική επιτροπή

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ , Καθηγητής Π.Κ (επιβλέπων)

ΠΑΡΤΣΙΝΕΒΕΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ , Καθηγητής Π.Κ.

ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΕΛΕΝΗ , Καθηγήτρια ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Χανιά

Ιούνιος, 2025

Η συγκεκριμένη διπλωματική εκπονήθηκε στην σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, στο τμήμα Γεωφυσικής με επικεφαλής και επιβλέποντα τον κ. Βαφείδη Αντώνιο, τον οποίο και θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την συνεργασία μας και την συμβολή του στην διπλωματική αλλά και καθ'όλη την πορεία μου στον Πολυτεχνείο. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Οικονόμου Νικόλαο για την συνεισφορά του στην διπλωματική και για την προθυμία να βοηθήσει σε κάθε πρόβλημα που προέκυψε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρονικίδη Νικόλαο και τον κ. Σπανουδάκη Νικόλαο για όλες τις συμβουλές που μου έδωσε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και την οικογένειά μου για την στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια και ειδικά για την απόφασή μου να σπουδάσω στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζεται μεθοδολογία ανάλυσης ταχύτητας διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από δεδομένα γεωραντάρ (GPR) για την απεικόνιση θαμμένων σωλήνων στο πείραμα SandBox. Πιο συγκεκριμένα η προτεινόμενη μεθοδολογία στοχεύει στην αυτόματη εκτίμηση του βάθους και του μήκους σωλήνων. Απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση της ακτίνας των σωλήνων.

Αρχικά παρουσιάζονται στοιχεία της θεωρίας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η μέθοδος του γεωραντάρ. Αναφέρονται η πορεία και τα βήματα του αλγορίθμου που τροποποιήθηκε σε λογισμικό MATLAB. Στην συνέχεια περιγράφονται οι προτεινόμενες αλλαγές στον αλγόριθμο ανάλυσης ταχύτητας με την μέθοδο συνάφειας για την ακριβέστερη εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που προέρχονται από το πάνω όριο σωλήνων. Έπειτα εξετάζονται ξεχωριστά οι τρεις περιπτώσεις διασκόπησης για το σύνολο των σωλήνων, με τελικό σκοπό την τρισδιάστατη απεικόνιση τους. Οι προκύπτουσες εκτιμήσεις της ταχύτητας, συγκρίνονται με αυτές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο χωροθέτησης στο πλαίσιο παλαιότερης διπλωματικής που εξέταζε το ίδιο πείραμα.

Η μέθοδος προσέφερε αρκετά καλά υποσχόμενα αποτελέσματα, ωστόσο υπάρχουν και κάποιες ιδέες ώστε τα αποτελέσματα να βελτιωθούν περαιτέρω. Για αρχή προτείνεται η χρήση κόφτη για να αποκλεισθούν τιμές βάθους, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από την μέση τιμή (για απόκλιση στο βάθος μεγαλύτερη της ακτίνας του σωλήνα). Επίσης προτείνεται να εξαιρεθούν θέσεις οι οποίες αποκλίνουν από τη ευθύγραμμη εξάπλωση του σωλήνα, καθώς και θέσεις όπου τα ζεύγη τιμών διπλού κατακόρυφου χρόνου ανακλώμενων κυμάτων και ταχύτητας δεν συνάδουν με το μέσο διάδοσης και με παρατηρήσεις στα πρωτογενή δεδομένα του γεωραντάρ. Τέλος, για τη βελτίωση της τρισδιάστατης απεικόνισης των θαμμένων σωλήνων προτείνεται να διερευνηθεί η επιρροή της προσθήκης του τυχαίου θορύβου στα δεδομένα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες	2
Περίληψη.....	3
Πίνακας εικόνων	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Γεωραντάρ	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Εφαρμογές και πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα	7
1.3 Ιστορικά γεγονότα	8
1.4 Αρχή λειτουργίας.....	9
1.5 Γιατί μας ενδιαφέρει εμάς και πως αξιοποιείται?	9
1.6 Διατάξεις πομπού - δέκτη / Μέθοδοι διασκόπησης	9
1.7 Παράγοντες που συμβάλλουν στην εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων	10
1.8 Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα διάδοσης των Η/Μ κυμάτων	10
1.9 Υπολογισμός της U (ταχύτητας) από δεδομένα γεωραντάρ.....	11
1.10 Επεξεργασία με λογισμικό σε περιβαλλον Matlab	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΕΙΡΑΜΑ SANDBOX.....	15
2.1 Πείραμα Sandbox	15
2.2.1 Συνθετικά δεδομένα	17
2.2.2 Επεξεργασία πριν την εφαρμογή (πραγματικά δεδομένα).....	19
2.3 Σύγκριση τομών με matgpr	28
2.4 Σύγκριση ταχυτήτων με matgpr.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Τρισδιάστατη απεικόνιση	32
3.1 3D Απεικόνιση – χωροθέτηση μέσω Matlab	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	41
Παράρτημα εικόνων & πινάκων.....	42

ΕΙΚΟΝΑ 1.3.1 (ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ PULSEΚΚΟ ΓΙΑ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ)	8
ΕΙΚΟΝΑ 1.10.1 (ΕΝΤΟΛΗ ΣΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΜΑΤΛΑΒ ΜΕ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΟΜΗ) 11	
ΕΙΚΟΝΑ 1.10.2 (SCRIPT ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΚΑΘΕ ΤΟΜΗΣ)	12
ΣΧΗΜΑ 1.10.3 (RISTIC ET AL,2009)	12
ΕΙΚΟΝΑ 1.10.4 (ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ <i>CMP 1420</i> (ΑΡΙΣΤΕΡΑ). Ο ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΣ ΑΞΟΝΑΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΗ ΜΕΣΗ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ V_{rms} ΚΑΙ Ο ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΣ ΣΤΟΝ ΔΙΠΛΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΧΡΟΝΟ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ $t(0)$, ΕΝΩ Η ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΕ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ ΥΨΗΛΕΣ ΤΙΜΕΣ). ΊΧΝΗ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥΝ ΣΤΟ <i>CMP 1420</i> (ΜΕΣΗ)) .. 14	
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.1 (ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΑΙ ΒΑΘΟΣ ΕΝΤΑΦΙΑΣΜΟΥ)	15
ΕΙΚΟΝΑ 2.1.2 (ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ)	16
ΕΙΚΟΝΑ 2.1.3 (ΚΑΤΟΨΗ ΔΟΧΕΙΟΥ ΜΕ ΤΙΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΝΑ ΑΝΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΑΝΑ ΔΥΟ, 71 ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΑ).....	16
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.1.1 (ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ, STEEL)	17
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.1.2 (ΠΛΑΣΤΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΜΕ ΑΕΡΑ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ, APVC)	18
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.1.3 (ΠΛΑΣΤΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ, EPVC)	18
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.1.4 (ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕ ΤΟΥΣ 3 ΣΩΛΗΝΕΣ)	18
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.1.5 (ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ EXCEL ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΤΡΕΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ)	19
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.1.6 (ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΤΡΕΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ).....	19
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.1 (PD05, ΤΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΜΗ ΝΟΥΜΕΡΟ 5 ΣΤΙΣ 71)	20
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.2 (P7205, ΤΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΜΕ ΝΕΡΟ ΕΩΣ 72 CM ΒΑΘΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΜΗ ΝΟΥΜΕΡΟ 5 ΣΤΙΣ 71)	21
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.3 (P4805, ΤΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΜΕ ΝΕΡΟ ΕΩΣ 48 CM ΒΑΘΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΜΗ ΝΟΥΜΕΡΟ 5 ΣΤΙΣ 71)	21
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.4 (ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΥ ΕΧΟΥΜΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ, ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΔΙΑΚΡΙΝΟΥΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ)	22
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.5 (PD05, ΤΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΜΗ ΝΟΥΜΕΡΟ 5 ΣΤΙΣ 71, ΣΤΗΝ ΚΟΚΚΙΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΚΡΙΝΕΤΑΙ Ο ΧΡΟΝΟΣ DELAY ΠΟΥ ΑΝΑΦΕΡΟΥΜΕ ΟΤΙ ΑΦΑΙΡΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΚΑΘΕ ΤΟΜΗ PD ΣΤΗΝ ΠΡΟΚΕΙΜΕΝΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΣΤΙΣ ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ ΤΟΜΕΣ)	23
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.6 (ΣΗΜΑ ΤΟΜΗΣ ΝΟΥΜΕΡΟ PD35 ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΔΙΝΟΝΤΑΣ ΤΟ ΚΑΛΥΤΕΡΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΠΟ ΑΠΟΨΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΘΟΡΥΒΟ ΓΙΑ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ)	23
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.7(ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΥ ΕΧΟΥΜΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 72 CM , ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΔΙΑΚΡΙΝΟΥΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ)	24
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.8 (ΣΗΜΑ ΤΟΜΗΣ ΝΟΥΜΕΡΟ P7235 ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΔΙΝΟΝΤΑΣ ΤΟ ΚΑΛΥΤΕΡΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΠΟ ΑΠΟΨΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΘΟΡΥΒΟ ΓΙΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 72 CM, ΟΠΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΚΡΙΝΟΥΜΕ ΤΗΝ ΣΤΑΘΜΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ)	24
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.9 (ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΕ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΥ ΕΧΟΥΜΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 48 CM , ΧΩΡΙΣ ΝΑ ΔΙΑΚΡΙΝΟΥΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ)	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.2.2.10 (ΣΗΜΑ ΤΟΜΗΣ ΝΟΥΜΕΡΟ P4835 ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΔΙΝΟΝΤΑΣ ΤΟ ΚΑΛΥΤΕΡΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΠΟ ΑΠΟΨΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΘΟΡΥΒΟ ΓΙΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 48 CM, ΟΠΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΚΡΙΝΟΥΜΕ ΤΗΝ ΣΤΑΘΜΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ)	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2.2.11 (ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ).....	27
ΕΙΚΟΝΑ 2.3.1 (ΤΟΜΗ 25 ΓΙΑ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ, ΑΡΙΣΤΕΡΑ : MATGPR, ΔΕΞΙΑ: MATLAB).....	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.3.2 (ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ ΟΠΟΥ ΑΠΟ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΤΟΥΣ ΤΑ ΔΕΞΙΑ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΧΟΥΜΕ ΤΗΝ ΤΟΜΗ 25 ΚΑΙ ΤΗΝ ΤΟΜΗ 36).....	29
ΕΙΚΟΝΑ 2.3.3 (ΤΟΜΗ 36 ΓΙΑ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ, ΑΡΙΣΤΕΡΑ : MATGPR, ΔΕΞΙΑ: MATLAB).....	29
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.1 (PD, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ)	32
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.2 (PD, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ)	33

ΕΙΚΟΝΑ 3.1.3 (PD, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ)	33
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.4 (PD, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ)	34
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.5 (PD, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΞΗΡΗ ΑΜΜΟ)	35
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.6 (P72, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 72CM).....	35
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.7 (P72, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 72 CM)	36
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.8 (P48, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 72 CM)	37
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.9 (P48, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 48 CM)	38
ΕΙΚΟΝΑ 3.1.10 (P48, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ ΑΜΜΟ ΣΕ ΝΕΡΟ ΒΑΘΟΥΣ 48 CM)	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γεωραντάρ ή G.P.R. (Ground Penetrating Radar) αποτελεί μια γεωφυσική μη καταστρεπτική μέθοδο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Είναι μια μέθοδος σχετικά καινούργια αλλά ταυτόχρονα καινοτόμα καθώς εκμεταλλεύεται και αξιοποιεί τις ιδιότητες των υλικών που είναι μοναδικές σε κάθε περίπτωση , σε συνδυασμό με αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού. Θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει ότι αποτελεί και εξέλιξη των γεωφυσικών μεθόδων και ειδικότερα της σεισμικής ανάκλασης που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην αναζήτηση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων . Εξαιτίας των οποίων αλλά και της προόδου της τεχνολογίας, προκύπτουν αυτοματοποιημένα συστήματα ανάλυσης και επεξεργασίας της πληροφορίας . Ωστόσο δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η βασική διαφορά της σεισμικής ανάκλασης με το γεωραντάρ έγκειται στα μετρούμενα μεγέθη.

1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ/ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Έναντι άλλων συνηθέστερων μεθόδων , το γεωραντάρ είναι μια οικονομικότερη εναλλακτική στο τεχνικό μέρος της έρευνας με πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα. Με κύρια πλεονεκτήματα , την φορητότητα του εξοπλισμού σε περιοχές ενδιαφέροντος αλλά και του μεγέθους του (δεν απαιτείται ειδικό όχημα ή ειδική άδεια), όπως επίσης δεν απαιτεί ιδανικές συνθήκες λειτουργίας μιας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους χώρους και επιφάνειες. Οι ιδιαιτερότητες και μειονεκτήματα τέτοιου είδους εξοπλισμού, είναι ότι σε περιπτώσεις υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους μειώνεται η εδαφική διείσδυση του σήματος καθώς εξασθενεί γρηγορότερα όπως επίσης και η μεγάλη ευαισθησία στον θόρυβο (παρεμβολές στο σήμα). Τέλος για την επεξεργασία απαιτείται σχετικά καλή γνώση των τεχνικών τόσο για την σωστή ερμηνεία όσο και για την διεξαγωγή των ερευνών.

Διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες εφαρμογών του γεωραντάρ κατατάσσοντας τις , βάσει της συχνότητας εκπομπής κεραιών:

Γεωλογία : 2 - 50 MHz (με προτεραιότητα του βάθους διασκόπησης αντί της διακριτικής ικανότητας)

Αρχαιολογία : 50 - 500 MHz

Μη καταστρεπτικές δοκιμές : 500 - 2000 MHz (Σπανουδάκης,2002)

Επιπλέον χρησιμοποιούνται και για στρατιωτικές εφαρμογές όπως ο εντοπισμός στρατιωτικού εξοπλισμού και ναρκών.

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ

Η τεχνολογία του γεωραντάρ αναπτύχθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα όταν και έγινε πιο συστηματική μελέτη της διάδοσης ραδιοκυμάτων. Ωστόσο οφείλεται και στην τάση της εποχής για νέες μεθόδους έρευνας τόσο σε εμπορικό και ερευνητικό επίπεδο όσο και σε στρατιωτικό, ιδιαίτερα μετά το τέλος του β' Παγκοσμίου Πολέμου. Η τεχνολογία της εταιρείας G.S.S.I. (Geological Survey Systems Inc) που αναπτύχθηκε για τον στρατό των Η.Π.Α βρήκε πλέον νέες εφαρμογές. Μόλις μια δεκαετία από τις αρχές (1910) του αιώνα και κατατίθεται το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τους Gotthelf Leimbach και Heinrich Löwy για σύστημα που χρησιμοποιεί κεραίες τεχνολογίας ραντάρ. Την οποία έρχεται να βελτιώσει δέκα χρόνια αργότερα ο Dr. Hülsenberck ως προς την ανάλυση βάθους, την αδυναμία δηλαδή που είχε, παρόλο που ο σκοπός της ευρεσιτεχνίας ήταν ο εντοπισμός θαμμένων στόχων. Αφού πέρασαν αρκετά χρόνια και φτάνοντας στο 1974, εμφανίζεται και επίσημα το όνομα Ground Penetrating Radar (G.P.R.), το οποίο αποτελεί πλέον το γεωφυσικό σύστημα που βασίζεται σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Τέλος το 1988 κάνει την εμφάνιση της η εταιρεία Sensors and Software η οποία εμπορεύεται την τεχνολογία γεωραντάρ pulseEKKO (νεότερο μοντέλο χρησιμοποιείται στην εν λόγω παρουσίαση παρακάτω για το πείραμα sandbox).



Εικόνα 1.3.1 (Εξοπλισμός pulseEKKO για διασκοπήσεις γεωραντάρ)

1.4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το γεωραντάρ εκπέμπει βραχείς παλμούς ραδιοκυμάτων, χρησιμοποιώντας διάταξη που συνήθως αποτελείται από μια κεραία-πομπό και έναν δέκτη. Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος εξαρτάται από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Έτσι λοιπόν ενόσω το σήμα διαδίδεται διαμέσου εδαφικού στρώματος, όταν θα συναντήσει διαχωριστική επιφάνεια με διαφορετικές ιδιότητες τότε έχουμε το φαινόμενο της ανάκλασης, με την καταγραφή αυτή να την ονομάζουμε ίχνος. Η αλλαγή κατεύθυνσης του κύματος μπορεί να αποδοθεί ως ανάκλαση ή διάθλαση. Ωστόσο υπάρχει και η περίπτωση το κύμα να συναντήσει κάποιον σημειακό στόχο, με αποτέλεσμα να υπάρξει περίθλαση, δηλαδή διάδοση του κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις. Όλα αυτά βασίζονται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία και τις εξισώσεις του Maxwell (Haliday et al, 2009).

1.5 ΓΙΑΤΙ ΜΑΣ ΕΝΔΙΑΦΕΡΕΙ ΕΜΑΣ ΚΑΙ ΠΩΣ ΑΞΙΟΠΟΙΕΙΤΑΙ?

Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να μπορέσουμε με την κατάλληλη επεξεργασία να αποκτήσουμε δισδιάστατη ή ακόμα και τρισδιάστατη απεικόνιση της υπό εξέταση περιοχής. Βασιζόμενοι στο μέσο διάδοσης και με την βοήθεια της σεισμικής ανάκλασης μπορούμε σχετικά γρήγορα και οικονομικά να επιβεβαιώσουμε την διαφορετική στρωματογραφία, λαμβάνοντας επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τον κορεσμό του εδάφους σε νερό ή την ρηγμάτωσή τους. Τέλος σημαντικό είναι να αναφέρουμε το γεγονός ότι οι πολλαπλές σαρώσεις βοηθούν στην επεξεργασία ειδικότερα με τεχνικές αφαίρεσης θορύβου και ενίσχυσης σήματος, δίνοντας μας την δυνατότητα να εξάγουμε και να ερμηνεύσουμε καλύτερα την πληροφορία που συλλέξαμε από την διασκόπηση.

1.6 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΟΜΠΟΥ - ΔΕΚΤΗ / ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Για την επίτευξη γεωφυσικής διασκόπησης υπάρχουν διατάξεις και τεχνικές οι οποίες αποσκοπούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Πρώτη και σημαντικότερη είναι η μέθοδος της ανάκλασης η οποία χρησιμοποιεί διάταξη πομπού - δέκτη σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους πάνω σε γραμμή μελέτης, με σκοπό την χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων. Αξίζει να αναφέρουμε ότι η μέθοδος αυτή αποτελεί την βάση για την επόμενη. Έτσι λοιπόν άλλη μια συνήθης διάταξη αποτελεί αυτή του κοινού ενδιάμεσου σημείου κατά την οποία πομπός και δέκτης απομακρύνονται εκατέρωθεν σταθερού σημείου πάνω σε γραμμή μελέτης που έχουμε ορίσει ώστε επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης συναρτήσει του βάθους. Τέλος υπάρχει και η μέθοδος της τομογραφίας. Μια μέθοδος διαφορετική από τις προηγούμενες ως προς την αρχή λειτουργίας της καθώς δεν έχουμε ανάκλαση αλλά

διέλευση των κυμάτων διαμέσου του υλικού. Με την τοποθέτηση των κεραιών σε θέσεις εκατέρωθεν η μια της άλλης, λαμβάνοντας δεδομένα σχετικά με τις μεταβολές της δομής του υλικού.

1.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΛΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν διαδίδονται παντού με την ίδια ταχύτητα αλλά επηρεάζονται από τις ιδιότητες του μέσου που ταξιδεύουν, καθώς η ενέργεια των Η/Μ κυμάτων εξασθενεί. Στην προκειμένη περίπτωση που αναφερόμαστε σε εδάφη, η κατάσταση περιπλέκεται καθώς το έδαφος παρόλο στερεό μπορεί να είναι κορεσμένο σε νερό οπότε και θα επηρεάσει διαφορετικά σε περίπτωση που είναι ακόρεστο. Αυτό οφείλεται στην σημαντικότερη ιδιότητα των γεωλογικών σχηματισμών, που είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα η οποία μας δείχνει πόσο αγωγίμο είναι ένα έδαφος. Έτσι λοιπόν ισχύει ότι όσο πιο αγωγίμο είναι το μέσο διάδοσης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η εξασθένιση (Βαφείδης, 2001). Με το πορώδες του υλικού αλλά και με τα ρευστά που περιέχονται σε αυτό να επιδεινώνουν την εξασθένιση, ειδικά στην περίπτωση που έχουμε πολλά διαλυμένα άλατα σε αυτά. Σε συνέχεια, λοιπόν των παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι και η γεωμετρία διάδοσης αποτελεί άλλον έναν παράγοντα στην διάδοση των κυμάτων. Καθώς πιθανές ασυνέχειες στην δομή ή ακόμα και «στόχοι» σημειακοί μπορούν να την επηρεάσουν. Τέλος, σημαντικό ρόλο έχει και η συχνότητα εκπομπής ειδικά αν ενδιαφερόμαστε για διασκοπήσεις μεγαλύτερου βάθους ή σε δομές με υψηλή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Γενικά όμως γνωρίζουμε ότι οι υψηλότερες συχνότητες εκπομπής, αυξάνουν τον βαθμό εξασθένισης.

1.8 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ Η/Μ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα Η/Μ κύματα δεν διαδίδονται παντού με την ίδια ταχύτητα καθώς υπάρχουν παράγοντες που την μεταβάλλουν. Ένας παράγοντας λοιπόν, είναι το πορώδες και τα ρευστά που περιέχονται σε αυτό, όπως και στην εξασθένιση. Παρόλα αυτά την εξασθένιση την επηρεάζουν τυχόν διαλυμένα ιόντα ενώ την ταχύτητα όχι και αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί από την βιβλιογραφία σχετικά με τις τιμές που αναγράφονται για υφάλμυρα και μη νερά. Άλλη μια διαφορά παρατηρείται και στην συχνότητα όπου η εξασθένιση σχετίζεται με την συχνότητα εκπομπής, ενώ η ταχύτητα στις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν και μελετάμε δεν εμφανίζουν καμία επίδραση. Τέλος την σημαντικότερη παράμετρο αποτελεί η σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r με τον Maxwell να είναι αυτός που συνδύασε ηλεκτρισμό και μαγνητισμό (τύπος ταχύτητας με διηλεκτρική σταθερά, με τυπικές τιμές 1 – 10 για πετρώματα και άλλα είδη ρευστών $u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$). Με τις τιμές συνήθως να ξεκινάνε από 0.6 έως 17.5 cm/ns ενώ στον αέρα φτάνουν μέχρι και 30 cm/ns, δηλαδή την ταχύτητα του φωτός.

1.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ U (ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ) ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Ο υπολογισμός απαιτεί επιλογή χρόνων από τομή σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη, με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Η εξίσωση που τα περιγράφει είναι της μορφής $(t^2 = t_0^2 + 4 \frac{x^2}{u^2})$, όπου t : διπλός χρόνος διαδρομής, t_0 : διπλός κατακόρυφος χρόνος, x : οριζόντια απόσταση από σημειακό ανακλαστήρα και u : ταχύτητα διάδοσης περιθλώμενων κυμάτων. Η διαδικασία ξεκινάει έχοντας τομή γεωραντάρ πλούσια σε περιθλώμενα κύματα σε καρτεσιανό σύστημα αξόνων με τον άξονα Ox , να είναι η οριζόντια απόσταση και τον άξονα Ot , να είναι ο χρόνος διαδρομής. Δηλαδή ορίζουμε ένα τοπικό σύστημα αναφοράς με το μηδέν να είναι η κορυφή της περίθλασης (παραβολική μορφή). Παράλληλα όσες τιμές χρόνου και απόστασης καταγράφονται δεξιά από το σημείο μηδέν που ορίσαμε, υψώνονται στο τετράγωνο. Όπου σε επόμενο στάδιο δημιουργείται διάγραμμα $t^2 - x^2$ όπου τα δεδομένα ορίζουν ευθεία γραμμή. Από την κλίση της ευθείας αυτής που είναι της μορφής $(y = ax+b)$, προκύπτει η τιμή της ταχύτητας διάδοσης στο συγκεκριμένο μέσο.

1.10 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

Έχοντας πλέον τα δεδομένα για την κεραία κεντρικής συχνότητας 1200MHz, κάνοντας κάποιες μικρές αλλαγές ώστε να έχουμε τα αρχεία έτοιμα για επεξεργασία και ανατρέχοντας στην σχετική βιβλιογραφία, καταλήξαμε στην μέθοδο επεξεργασίας που ακολουθήσαμε ως εξής:

Πρώτο βήμα ήταν να ανατρέξουμε και να βρούμε σχετικό κώδικα ώστε με την κατάλληλη προσαρμογή του να επιτύχουμε αυτό ακριβώς που θέλουμε. Έτσι λοιπόν δανειστήκαμε ανοιχτό κώδικα από το πανεπιστήμιο του Κάλγκαρι (Αλμπέρτα, Καναδάς) και σχετικές βιβλιοθήκες για την ανάλυση ταχυτήτων διάδοσης περιθλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Δεύτερο βήμα ήταν να συμβουλευθούμε την μεταπτυχιακή διατριβή του κ. Κλουβιδάκη Εμμανουήλ όπου, αναλύει ταχύτητες διάδοσης περιθλώμενων κυμάτων για συνθετικά δεδομένα. Ωστόσο επειδή στην δικιά μας περίπτωση αναφερόμαστε σε πραγματικά δεδομένα έπρεπε να γίνουν κατάλληλες αλλαγές.

```
% function pou ypologizei pinakes semblance, uncorrelated kai taxyhtwn
%[semb,seml,vels]=VelocityAnalysis2(IPD.d, IPD.tt2w, midoffset1.*2, 0.08, 0.16, 0.001);close
%[M,I]=max(semb); % I einai h taxyhtes se kathe offset
[semb,seml,vels]=VelocityAnalysis2(test(40:200,:), IPD.tt2w(40:200)-4, midoffset1.*2, 0.08, 0.16, 0.001);clos
[M,I]=max(semb);
semb(find(isnan(semb))) = 0;
```

Εικόνα 1.10.1 (Εντολή σε λογισμικό matlab με τροποποιήσεις για την εξαγωγή δεδομένων για κάθε τομή)

```

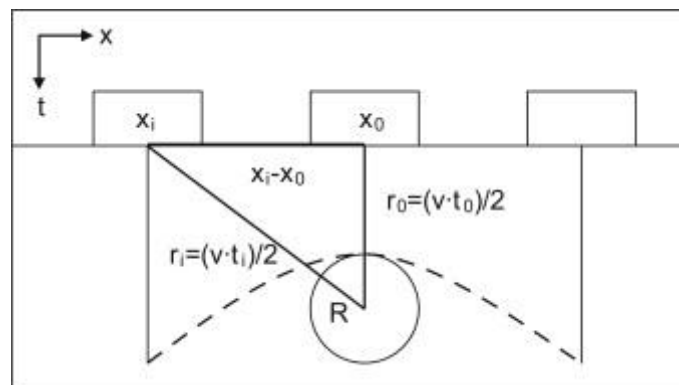
sz=size(P4831.d)
S=sum(P4831.d,2)./sz(2);

for i= 1:71
    test(40:200,i)=P4831.d(40:200,i)-S(40:200);
end

```

Εικόνα 1.10.2 (Script για την αφαίρεση του συναφούς θορύβου κάθε τομής)

Τρίτο βήμα ήταν η κατάλληλη επεξεργασία του κώδικα στο κομμάτι των εξισώσεων υπολογισμού ταχύτητας καθώς δεν αναφερόμαστε πλέον σε σημειακούς στόχους αλλά σε σωλήνες. Για παράδειγμα ο διπλός χρόνος διαδρομής περιθλώμενου κύματος για σημειακό στόχο δίνεται από την εξίσωση $t^2 = t_0^2 + 4 \frac{x^2}{u^2}$, παρόλα αυτά δεν καλύπτει την περίπτωση μας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.10.3 εφόσον η αλληλεπίδραση του αντικειμένου με το κύμα γίνεται στην επιφάνειά του και όχι απ' το κέντρο του κυλίνδρου. Έτσι λοιπόν η εξίσωση που θα χρησιμοποιήσουμε θα έχει αυτή την μορφή: $t_i = \frac{2}{u} (\sqrt{(\frac{ut_0}{2} + R)^2 + (x_i - x_0)^2} - R)$ (Ristic et al, 2009).



Σχήμα 1.10.3 Χρόνος διαδρομής ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από σωλήνα ακτίνας R (Ristic et al, 2009)

Όπου R θα είναι η ακτίνα του κυλίνδρου, ώστε να βρεθεί σωστά η θέση του αντικειμένου.

Στο τέταρτο βήμα τα δεδομένα της τομής γεωραντάρ που έχουμε συλλέξει και αποθηκεύσει σε μορφή αρχείου MatLab, μπορούμε να τα επεξεργαστούμε κατάλληλα μέσω ορισμένων scripts που θα αναφέρουμε αναλυτικότερα παρακάτω:

Διάγραμμα ροής

Δημιουργία πινάκων μέγιστης συνάφειας και ταχύτητας H/M κυμάτων όπου το πλήθος των στηλών ισούται με το πλήθος των ιχνών της τομής γεωραντάρ και το

πλήθος των γραμμών, με το πλήθος των δειγμάτων του κάθε ίχνους. Κάθε στήλη προκύπτει από τα παρακάτω βήματα:

1. Ορίζεται τοπικό σύστημα με αρχή την συντεταγμένη του αντίστοιχου στην στήλη ίχνους
2. Επιλογή της ακτίνας του σωλήνα-στόχου
3. Χάρτης συνάφειας συναρτήσει των (V, t_0) χρησιμοποιώντας όλα τα ίχνη και το τοπικό σύστημα (στο script `maxrapos2.m`, μπορούμε να καλέσουμε υποσυνάρτηση `VelocityAnalysis2.m` μέσω της οποίας θα κατασκευαστούν χάρτες συνάφειας)
4. Επιλογή των τοπικών μεγίστων της συνάφειας (μέχρι πχ 5) και των (V, t_0) από τον χάρτη συνάφειας.
5. Συμπλήρωση της αντίστοιχης στήλης των πινάκων μέγιστης συνάφειας και ταχύτητας H/M κυμάτων και των αντίστοιχων γραμμών της για τις επιλεγμένες τιμές της t_0 (το script `maxrapos2.m` μας επιστρέφει έναν πίνακα μέγιστης συνάφειας με την αντίστοιχη ταχύτητα και χρόνο για κάθε ίχνος).

Επιλογή τοπικών μεγίστων στο πίνακα μέγιστης συνάφειας από τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή της μέγιστης τιμής συνάφειας και των αντίστοιχων (x, t_0, V)
2. Επιλογή του επόμενου τοπικού μέγιστου της συνάφειας
3. Υπολογισμός του βάθους $z=1/2 t_0 * V$
4. Αποκλεισμός τοπικού μέγιστου γειτονικών θέσεων (x,z)
5. Επανάληψη βημάτων 2 - 4 μέχρι την επιλογή πχ 5 τοπικών μεγίστων

Το script `runlocalmax.m` καλεί την υποσυνάρτηση `localmax`, η οποία “πηγαίνει” και βρίσκει την μέγιστη συνάφεια από αυτά που έχουν ήδη την μέγιστη συνάφεια (`max of max`).

Δημιουργία πίνακα με το t_0 ή το βάθος, z και την οριζόντια θέση, x των στόχων (τοπικά μέγιστα συνάφειας) από την τομή γεωραντάρ

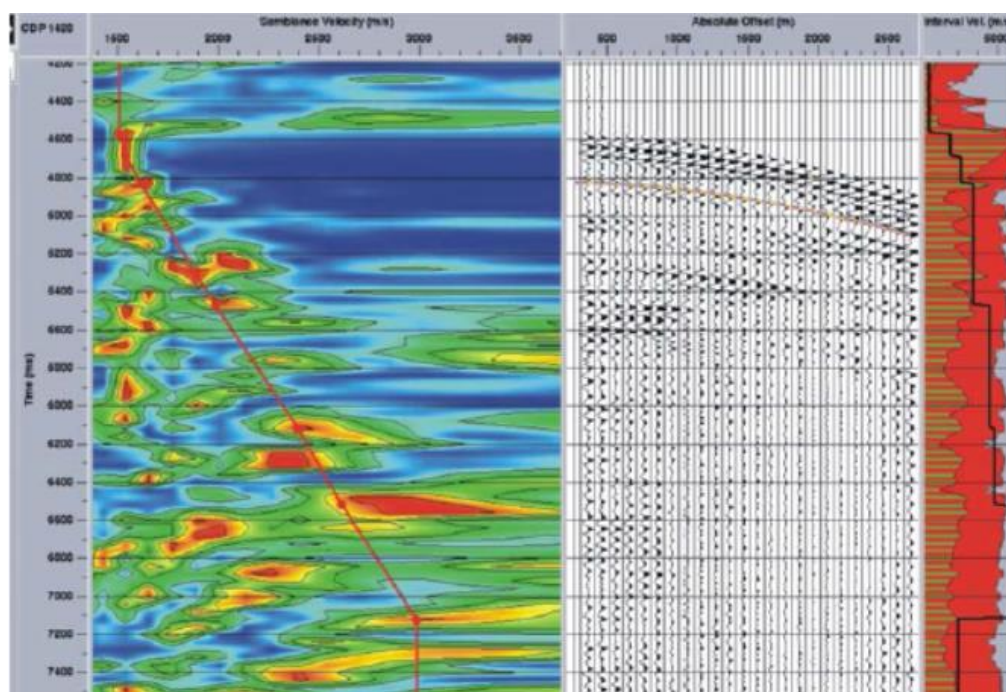
Το script `runlocalmax.m` επιστρέφει πίνακες `max of max` συνάφειας και της αντίστοιχης ταχύτητας, ίδιων διαστάσεων με αυτές της τομής γεωραντάρ.

Από την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας σε τομές γεωραντάρ κατά μήκος παράλληλων γραμμών μελέτης προκύπτει πίνακας εξάπλωσης των στόχων στον χώρο

Έτσι συνοψίζοντας η μεθοδολογία που στηρίχθηκε ο αλγόριθμος μας είχε ως εξής: Αρχικά πηγαίνει και δημιουργεί ένα τοπικό σύστημα πάνω από την κορυφή υπερβολής και δημιουργεί έναν χάρτη συνάφειας. Από εκεί επιλέγεται το semblance μέγιστης συνάφειας. Έπειτα γίνεται αντιστοίχιση στο semblance $(X, T_{(0)})$ με τις αντίστοιχες ταχύτητες $(V(X, T_{(0)}))$ για κάθε σωλήνα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται

από την αρχή για όλα τα x της τομής γεωραντάρ. Στην συνέχεια δημιουργούνται δύο ξεχωριστοί χάρτες, ένας συνάφειας και ένας ταχύτητας. Έτσι επιλέγονται οι μέγιστες τιμές συνάφειας και ταχύτητας συνδυάζοντας τους σε έναν χάρτη, εκτιμώντας το βάθος από την σχέση $ΒΑΘΟΣ = (1/2) * T_{(0)} * V$. Με τελικό αποτέλεσμα να έχουμε ένα χάρτη με την οριζόντια απόσταση και το βάθος, τον οποίο για να τον απεικονίσουμε τρισδιάστατα συνδυάζουμε και το βάθος σε αυτόν οπότε και έχουμε την τελική μορφή σε απεικόνιση στην οριζόντια απόσταση, το βάθος και την απόσταση γραμμών μελέτης.

Άξιο αναφοράς είναι ότι για την ανάλυση ταχυτήτων που χρησιμοποιήσαμε, την μέθοδο της συνάφειας. Ο χάρτης συνάφειας που δημιουργεί ο αλγόριθμος έχει στον οριζόντιο άξονα την μέση τετραγωνική ταχύτητα (V_{RMS}) και στον κατακόρυφο άξονα, τον διπλό κατακόρυφο χρόνο διαδρομής (t_0). Στην σεισμική ανάκλαση τοπικά μέγιστα συνάφειας αντιστοιχούν σε ανακλάσεις και υπερβολικού τύπου καμπύλες. Έτσι λοιπόν εκτιμάται η ταχύτητα διάδοσης σεισμικών κυμάτων σε επιλεγμένα κοινά ενδιάμεσα σημεία (CMPs). Αφού γίνει η επιλογή ζευγών μέσης τετραγωνικής ταχύτητας – διπλού κατακόρυφου χρόνου, η συνάφεια εντοπίζεται με την μορφή των τοπικών μεγίστων στις υπερβολικού τύπου καμπύλες. Όπου με την σειρά τους, αυτά τα ζεύγη τιμών μας εκτιμάνε την τμηματική ταχύτητα κάθε στρώματος. Ουσιαστικά, λοιπόν η συνάφεια αποτελεί ποσοτικό μέγεθος, δηλαδή μας δείχνει πόσο καλά ταιριάζει η υπερβολικού τύπου καμπύλη που έχουμε την εκάστοτε φορά, με τους εκάστοτε χρόνους διαδρομής ανακλώμενων κυμάτων από τον ίδιο ανακλαστήρα.



Εικόνα 1.10.4 (Διάγραμμα συνάφειας για τα δεδομένα του κοινού ενδιάμεσου σημείου *CMP* 1420 (αριστερά). Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στη μέση τετραγωνική ταχύτητα V_{rms} και ο κατακόρυφος στον διπλό κατακόρυφο χρόνο διαδρομής των κυμάτων $t(0)$, ενώ η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί σε τιμές της συνάφειας (κόκκινο χρώμα υψηλές τιμές). Ίχνη που αντιστοιχούν στο *CMP* 1420 (μέση))

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΕΙΡΑΜΑ SANDBOX

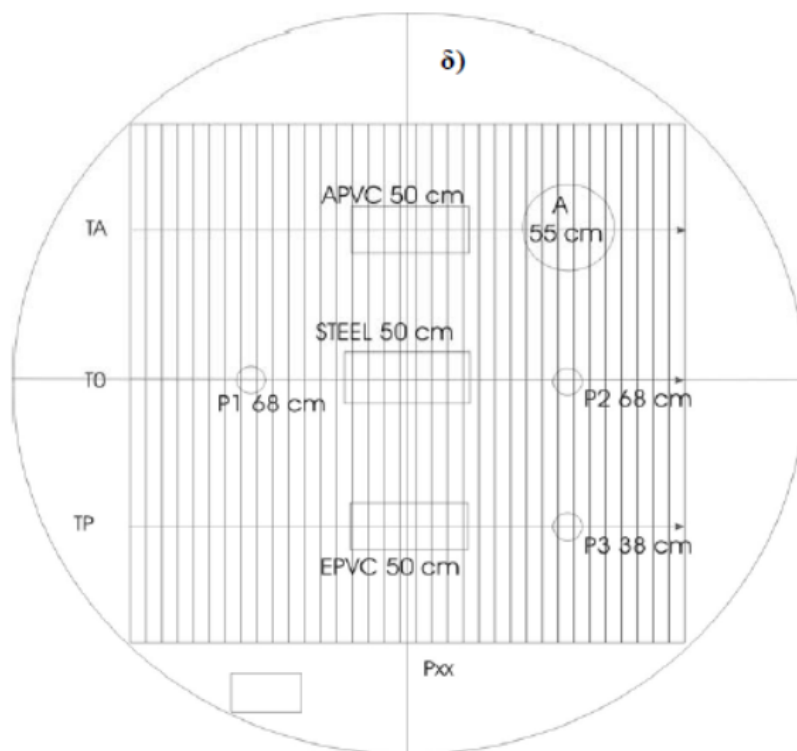
2.1 ΠΕΙΡΑΜΑ SANDBOX

Στα πλαίσια του προγράμματος HYGEIA, ενός project της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σχετικά με την αξιολόγηση των κινδύνων από μολυσμένες περιοχές με υβριδικές γεωφυσικές τεχνολογίες, διεξήχθη το πείραμα Sandbox στο πανεπιστήμιο του Στρασβούργου. Όπου και μελετήθηκε η επίδραση του νερού στην διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του γεωραντάρ. Για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε γεωραντάρ Pulse Ekk1000 της Software & Sensors, με κεραία κεντρικής συχνότητας 1200MHz. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για 71 παράλληλες γραμμές με ισαπόσταση 2 cm και χρόνο δειγματοληψίας 0.1 ns. Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε πλαστικό κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 2 m και ύψους 0.98 m. Το δοχείο πληρώθηκε με άμμο όπου και τοποθετήθηκαν : ένας πλαστικός σωλήνας πληρωμένος με νερό (WPVC) , ένας κενός πλαστικός σωλήνας (APVC) , ένας μεταλλικός σωλήνας (STEEL), τρεις μεταλλικές σφαίρες και ένα αργιλικό στρώμα (Σπανουδάκης, 2002, Οικονόμου, 2010). Αναλυτικότερα στοιχεία στον Πίνακα 2.1.1 που ακολουθεί (Loeffler and Bano, 2004).

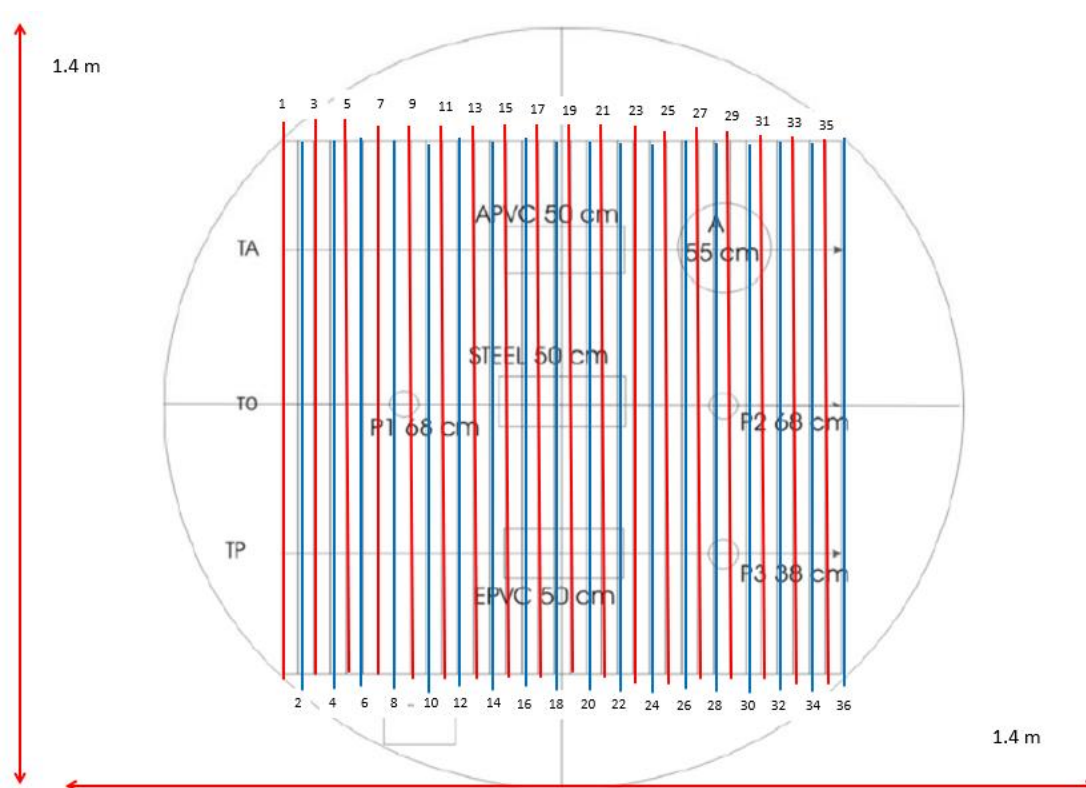
Αντικείμενα	Μήκος (m)	Διάμετρος (m)	Βάθος (m)
Σιδερένιος σωλήνας (Steel)	0.316	0.140	0.50
Πλαστικοί σωλήνες (APVC , EPVC)	0.298	0.126	0.50

Πίνακας 2.1.1 (Περιγραφή διαστάσεων σωλήνων και βάθος ενταφιασμού)

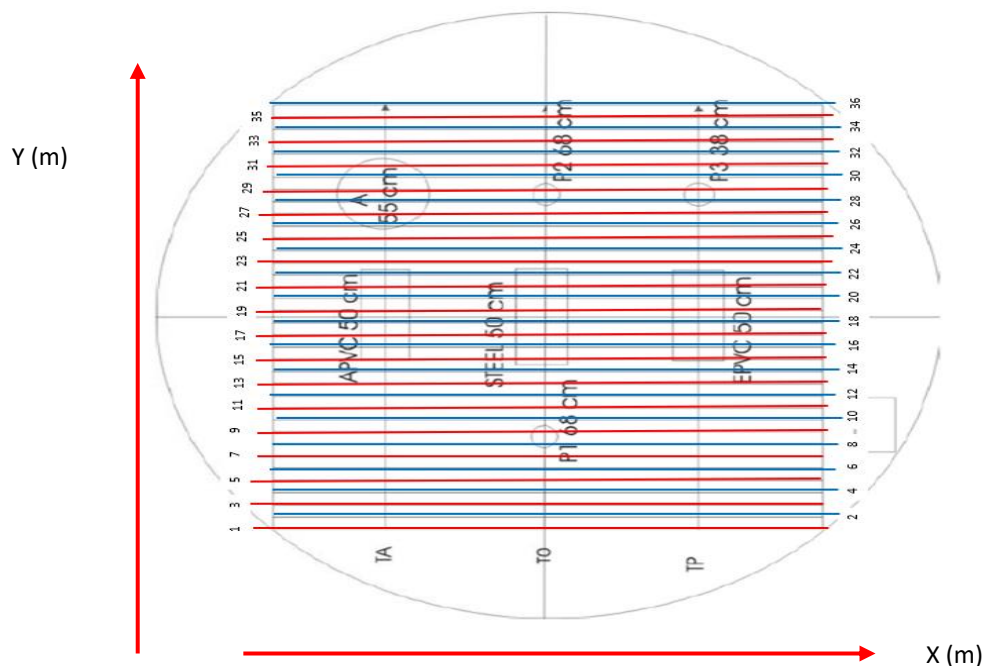
Ωστόσο να σημειωθεί εδώ , ότι στην συγκεκριμένη εργασία μας ενδιαφέρουν μόνο οι σωλήνες και όχι τα υπόλοιπα αντικείμενα (π.χ. μεταλλικές σφαίρες και mud cake). Οι εικόνες 2.1.2 και 2.1.3 δείχνουν τις γραμμές μελέτης (στην Εικόνα 2.1.3, απεικονίζονται οι μισές γραμμές μελέτης) και την θέση των σωλήνων.



Εικόνα 2.1.2 (Κάτοψη του δοχείου με τις θέσεις των σωλήνων και των υπόλοιπων αντικειμένων)



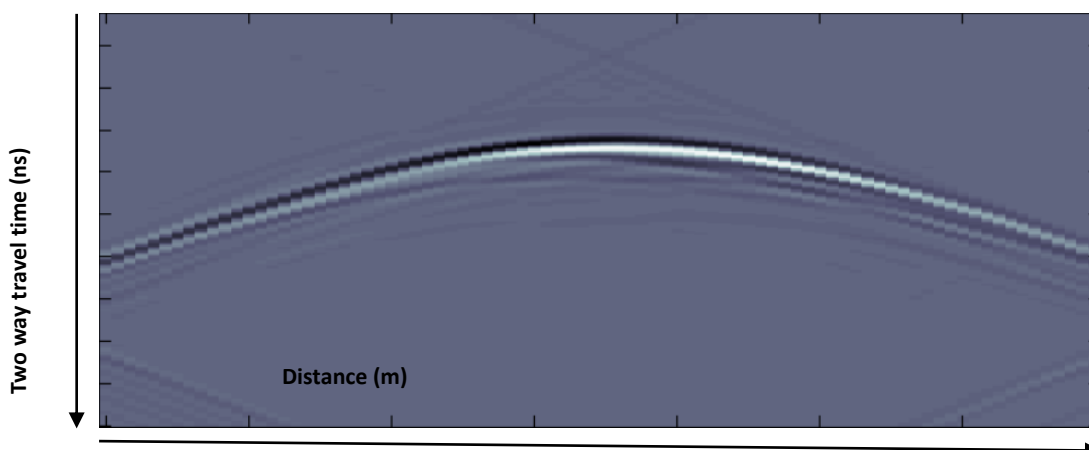
Εικόνα 2.1.3 (Κάτοψη δοχείου με τις γραμμές μελέτης να αναγράφονται ανά δύο, 71 γραμμές μελέτης συνολικά)



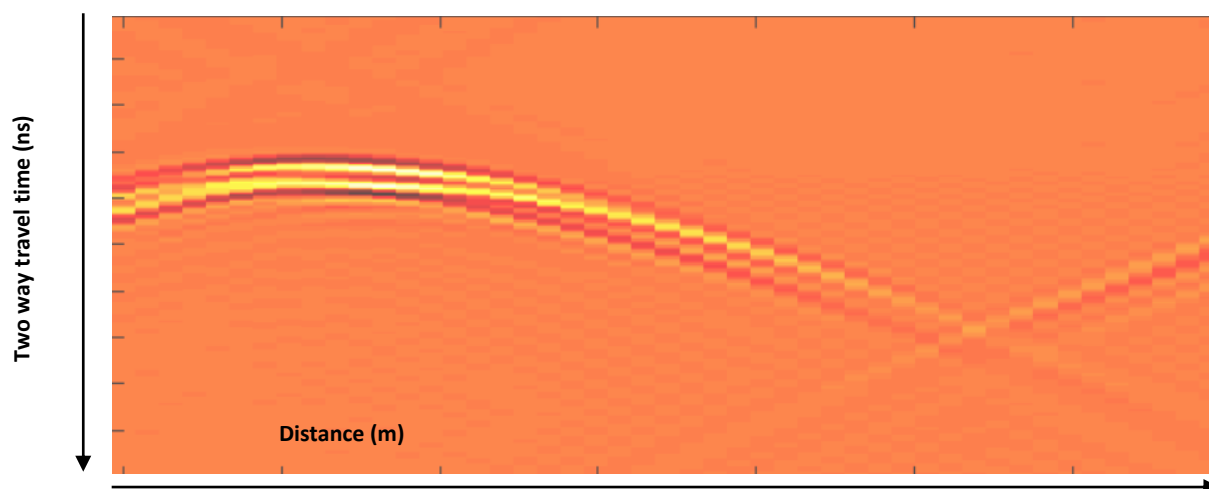
Εικόνα 2.1.4 (Κάτοψη δοχείου με τις γραμμές μελέτης να αναγράφονται ανά δύο, 71 γραμμές μελέτης συνολικά)

2.2.1 ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

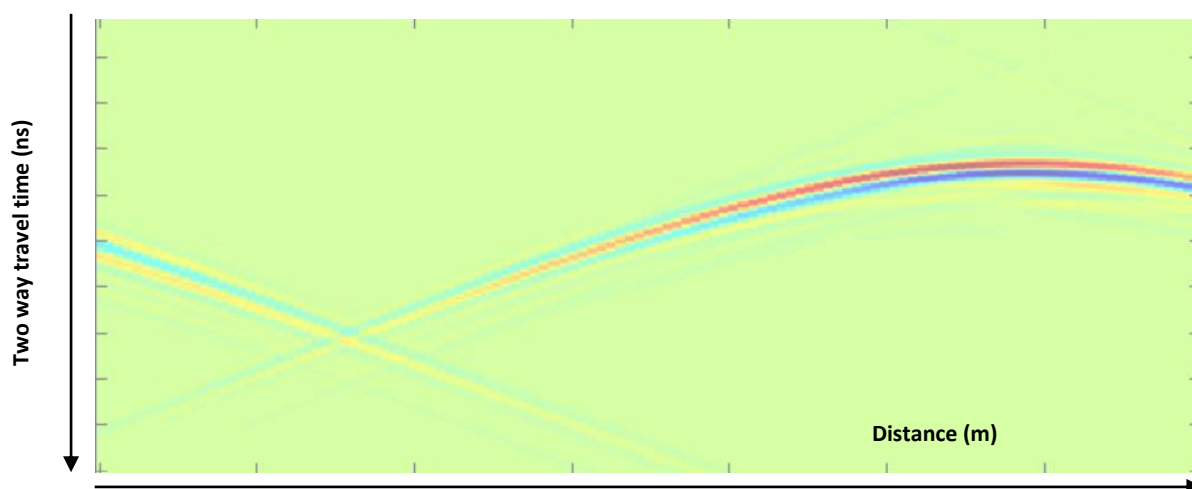
Γνωρίζοντας λοιπόν τις ακριβείς θέσεις των σωλήνων, δημιουργήσαμε μέσω του προγράμματος MATGPR συνθετικά δεδομένα για την ερμηνεία των πραγματικών δεδομένων. Επιπλέον μας βοήθησε να καταλάβουμε τι πρέπει να περιμένουμε και πως ίσως χρειαστεί να διαχειριστούμε το πρόγραμμα για να έχουμε κοντινά αποτελέσματα. Τέλος καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το υλικό κατασκευής παίζει σημαντικό ρόλο και επηρεάζει τις μετρήσεις μας όπως και η πλήρωση με νερό σε συνδυασμό με το υλικό.



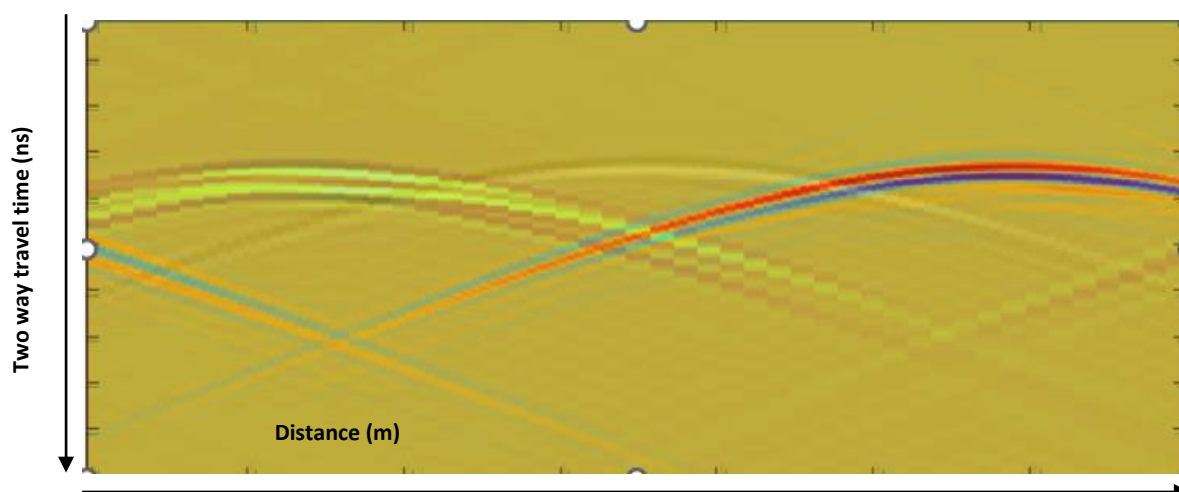
Εικόνα 2.2.1.1 Μεταλλικός σωλήνας σε συνθετικά δεδομένα (STEEL).



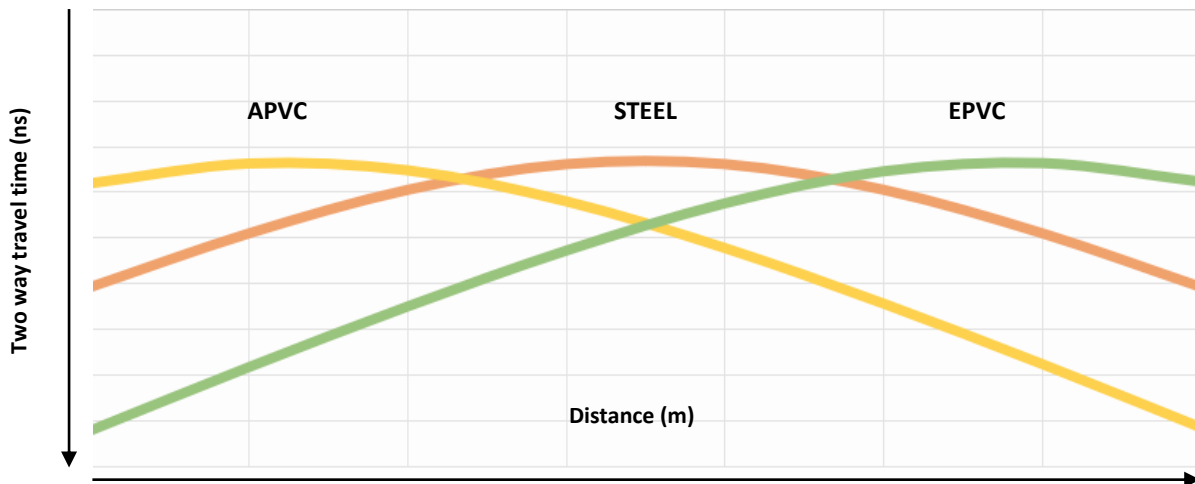
Εικόνα 2.2.1.2 Συνθετικά δεδομένα για πλαστικό σωλήνα με αέρα (APVC).



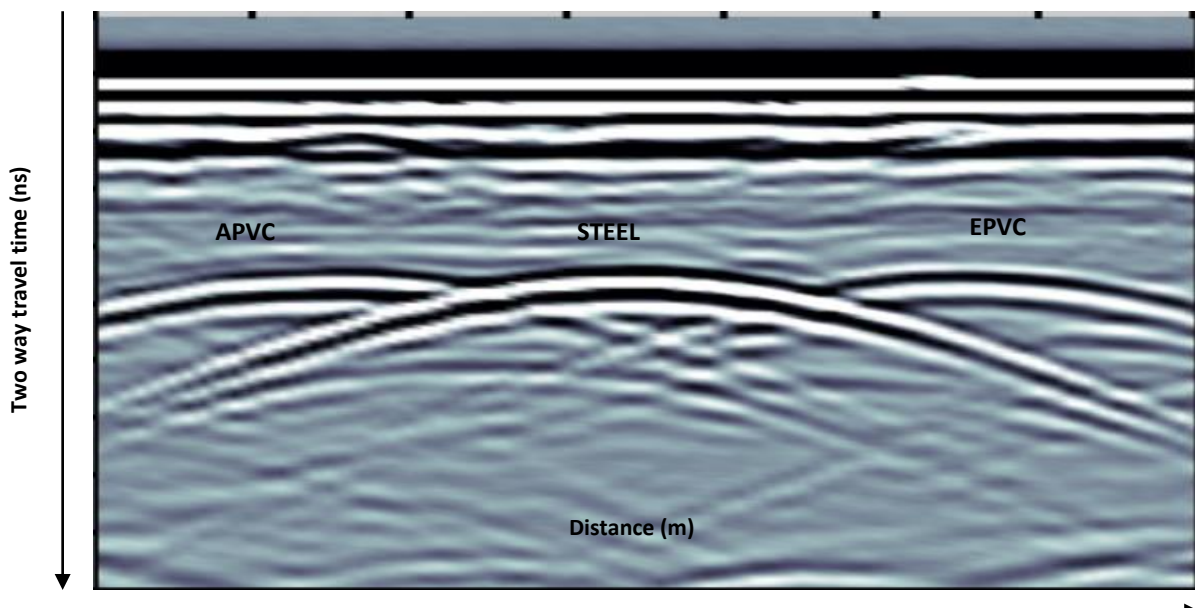
Εικόνα 2.2.1.3 Συνθετικά δεδομένα για πλαστικό σωλήνα με νερό (EPVC).



Εικόνα 2.2.1.4 Συνθετικά δεδομένα και με τους 3 σωλήνες.



Εικόνα 2.2.1.5 Χρόνος διαδρομής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και για τους τρεις σωλήνες.



Εικόνα 2.2.1.6 Πραγματικά δεδομένα και για τους τρεις σωλήνες.

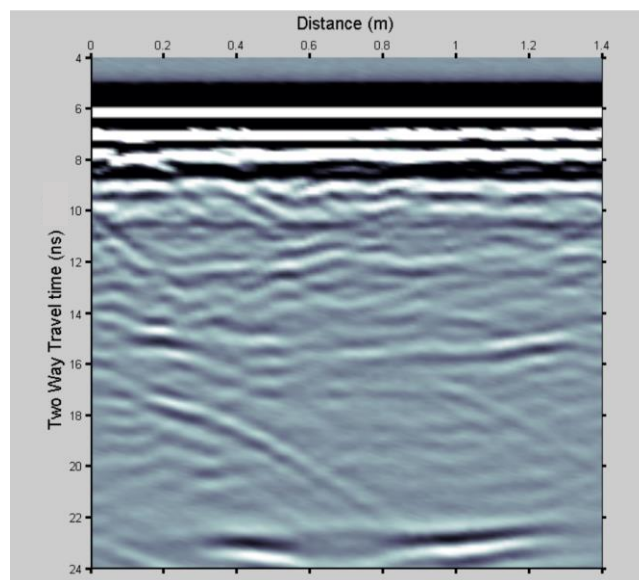
Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η διεύθυνση των σωλήνων ήταν σε οριζόντια θέση και το εδαφικό υλικό μέσα στο οποίο βρισκόντουσαν ενταφιασμένοι δεν αποτελούσαν από πολλαπλά στρώματα ή προσμίξεις υλικών. Επίσης οι διαστάσεις των σωλήνων ήταν παρόμοιες με σημαντικότερο ρόλο να παίζει το υλικό κατασκευής .

2.2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ (ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ)

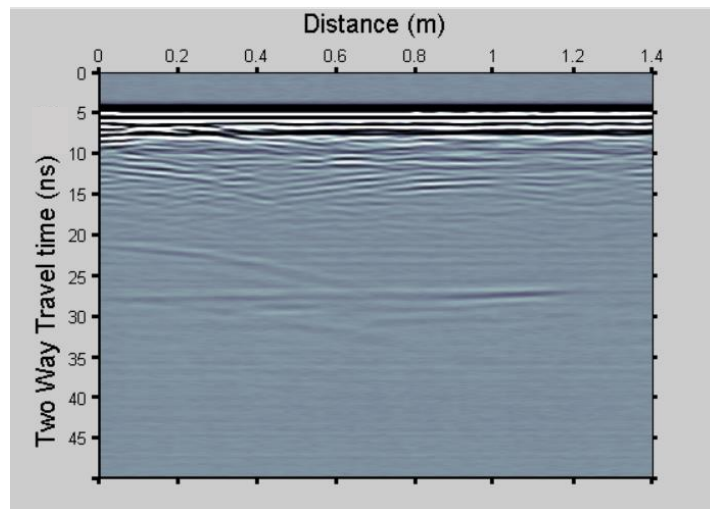
Ιδιαίτερη σημασία εμφανίζει η περίπτωση, μη μηδενικής απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη και σημαντικά μικρότερης του βάθους διασκόπησης, την οποία σωστά θεωρήσαμε αμελητέα από πρακτικής φύσεως. Δηλαδή όταν εξετάζουμε τομή γεωραντάρ για ρηχή διασκόπηση χρησιμοποιούνται κεραίες υψηλής συχνότητας σε αρκετά κοντινές αποστάσεις. Αν τώρα θέλαμε να αυξήσουμε την μεταξύ τους

απόσταση, θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε χαμηλότερης συχνότητας κεραίες , γεγονός που θα βοηθούσε για διασκόπηση σε μεγαλύτερα βάθη όπου η απόσταση μεταξύ πομπού – δέκτη δεν είναι συγκρίσιμη με το βάθος διασκόπησης. Συνεπώς δεν υπάρχει μια καθολική λύση διότι έχουμε δύο διαφορετικές περιστάσεις όπου κάθε φορά ο στόχος είναι διαφορετικός. Εκ των προτέρων δηλαδή, αν γνωρίζουμε τον σκοπό της διασκόπησης, έχουμε ήδη αποφασίσει την απόσταση πομπού-δέκτη. Καταλήγοντας λοιπόν στο συμπέρασμα ότι ειδικά για την δική μας περίπτωση όπου το μέγιστο βάθος είναι 1 μέτρο, οι τιμές μη μηδενικής απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη είναι πραγματικά ασήμαντες.

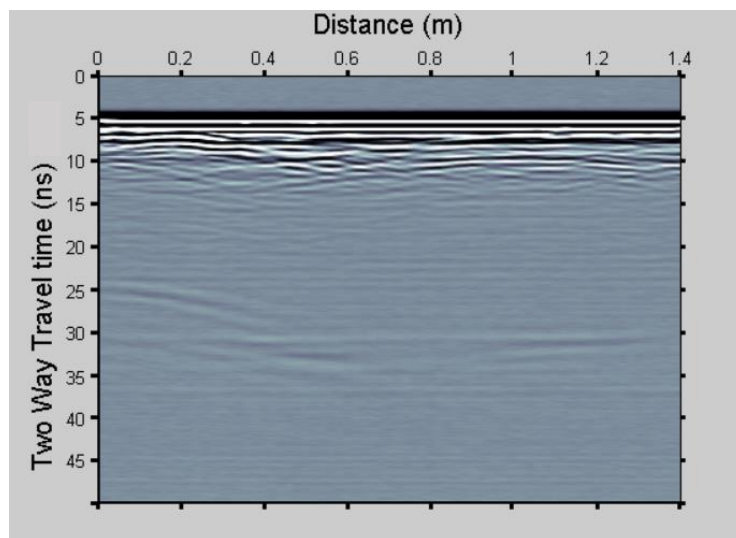
Για την καλύτερη επεξεργασία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προσπαθήσαμε να αφαιρέσουμε τομή γεωραντάρ (Εικόνα 2.2.2.1 - 2.2.2.3) χωρίς στοιχεία (σωλήνες και σφαίρες) από τις υπόλοιπες τομές γεωραντάρ που είχαν ανακλώμενα κύματα λόγω των σωλήνων (ή των σφαιρών και τυχόν σήματα του δοχείου), ούτως ώστε να 'απομακρύνουμε' τον θόρυβο (τα απευθείας κύματα στην δικιά μας περίπτωση) και η συνάφεια από κάθε τομή να είναι αισθητά καλύτερη.



Εικόνα 2.2.2.1 Τομή χωρίς σωλήνες σε ξηρή άμμο (νούμερο 5 στις 71,PD05).

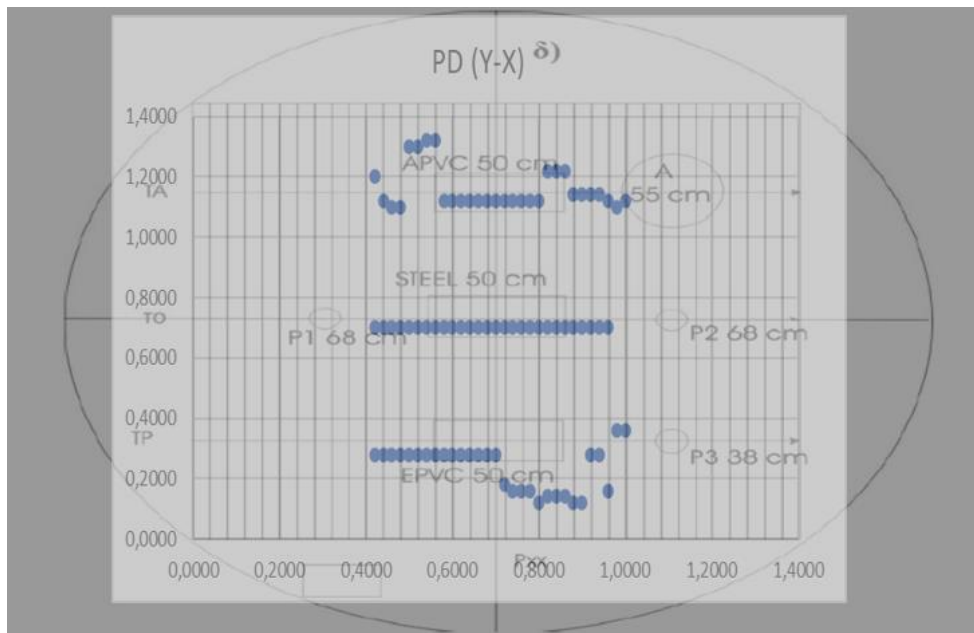


Εικόνα 2.2.2.2 Τομή χωρίς σωλήνες σε κορεσμένη άμμο με νερό έως 72 cm βάθος (νούμερο 5 στις 71,P7205).



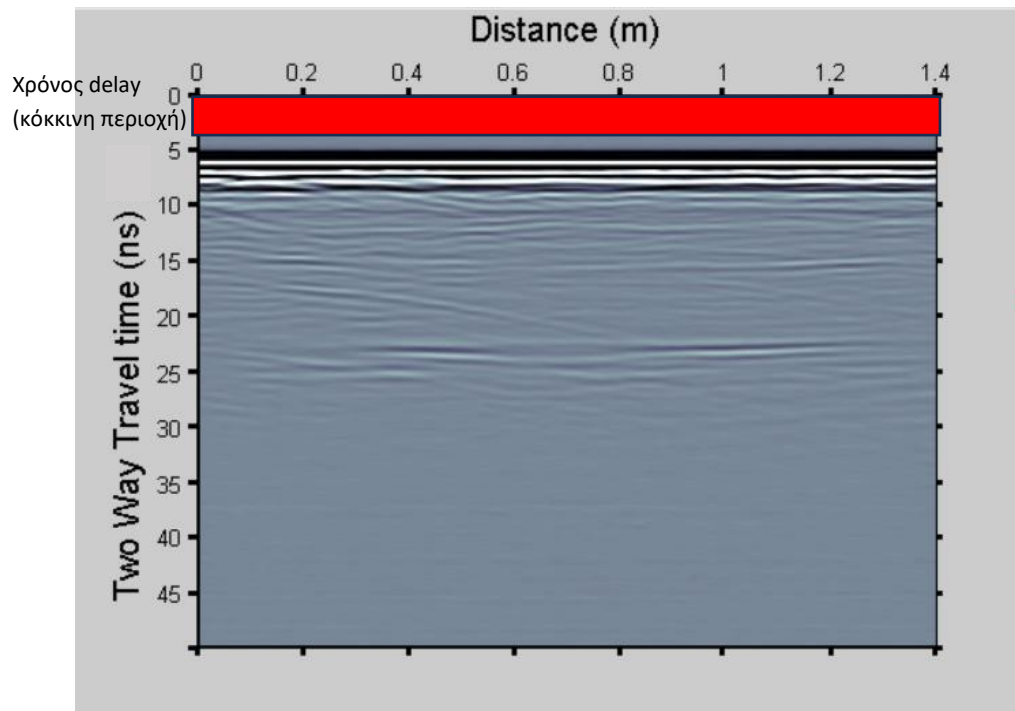
Εικόνα 2.2.2.3 Τομή χωρίς σωλήνες σε κορεσμένη άμμο με νερό έως 48 cm βάθος (νούμερο 5 στις 71, P4805).

Επίσης διορθώσαμε τον αρχικό χρόνο (delay) από την κάθε τομή, καθώς δεν είχαμε κάποια καταγραφή στο συγκεκριμένο διάστημα, ώστε ο αρχικός χρόνος να ταιριάζει όσο καλύτερα γίνεται και περιορίσαμε τα στοιχεία που εξετάσαμε από τα 12 ns στα 20 ns. Ωστόσο παρατηρήσαμε σημαντικές αποκλίσεις στην ταχύτητα. Γι' αυτό στην συνέχεια δοκιμάσαμε από τα 4 ή 5 ns στα 20 ns, με τις αναμενόμενες τιμές κοντά στις πραγματικές. Την ίδια μέθοδο χρησιμοποιήσαμε και για τις τομές P72 και P48, όπου σε αυτές λόγω της ύπαρξης νερού οι τιμές που βγάλαμε είχαν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Όμως για την τιμή P4831 χρειάστηκε να αφαιρέσουμε τον θόρυβο στοχευμένα. Παρατηρήσαμε επίσης ότι τα πλευρικά όρια των σωλήνων εμφανίζουν διαφοροποιήσεις και λόγω ύπαρξης άλλων αντικειμένων αλλά και λόγω του νερού (Εικόνα 2.2.2.7 και 2.2.2.9).

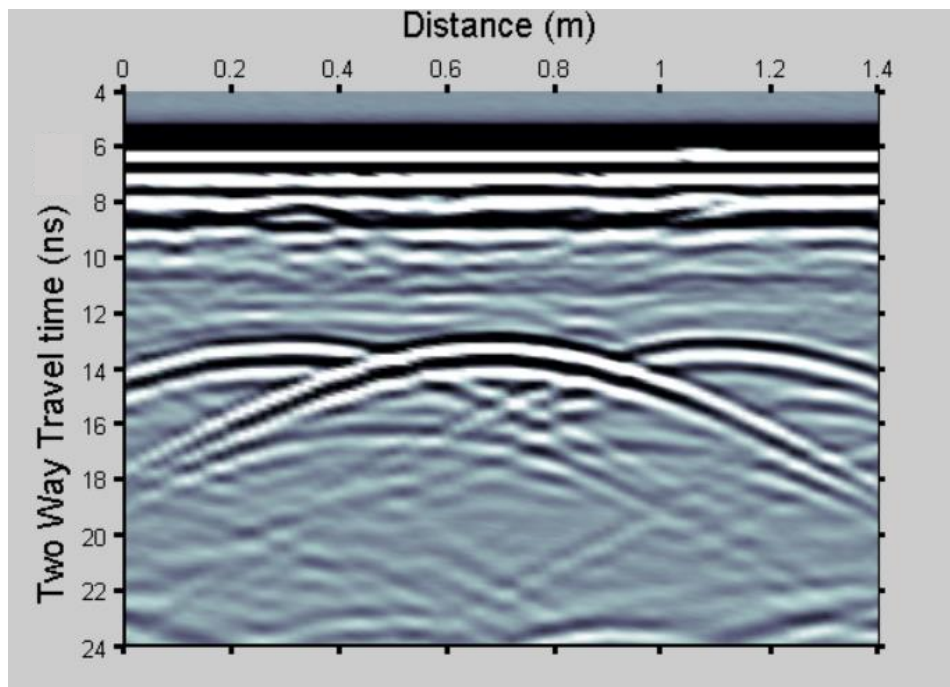


Εικόνα 2.2.2.4 Γραφική αναπαράσταση σε δύο διαστάσεις για τους σωλήνες, στην περίπτωση ξηρής άμμου.

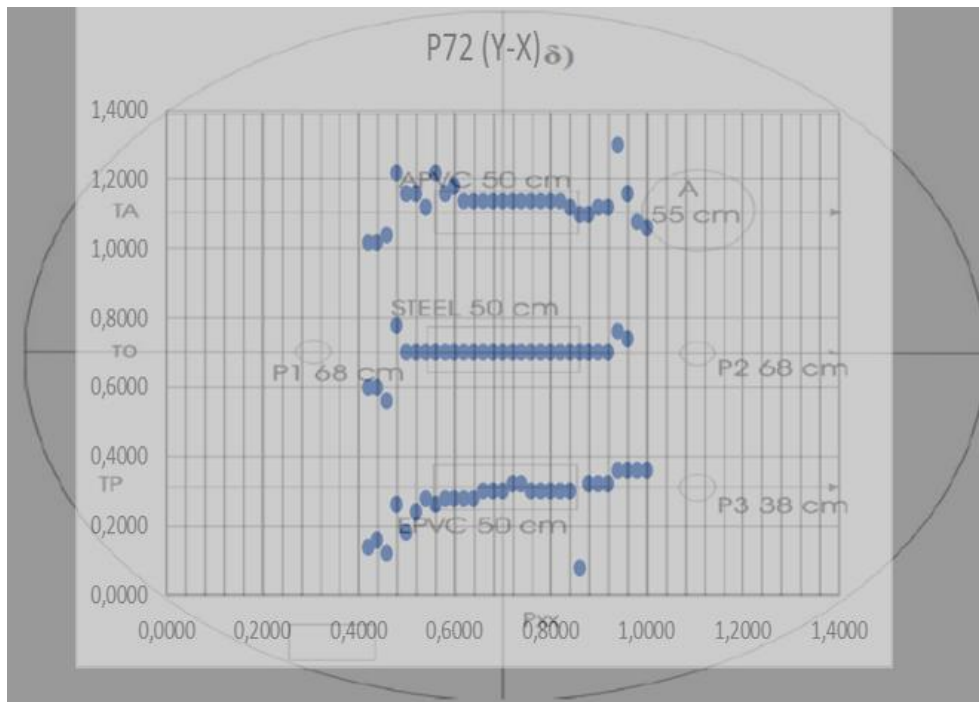
Σημείωση: Στην εικόνα 2.2.2.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας αυτόματης επιλογής της θέσης των σωλήνων όσον αφορά την οριζόντια εξάπλωσή τους στην περίπτωση ξηρής άμμου. Συγκρίνοντας τα με τη κάτοψη των θαμμένων στο Sandbox αντικειμένων, διακρίνεται καλή ταύτιση με τους σωλήνες ιδιαίτερα με το μεταλλικό σωλήνα στην μέση (STEEL). Τιμές στα άκρα αποδίδονται σε μεταλλικά σφαιρίδια που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τους σωλήνες. Ο μεταλλικός σωλήνας (μέση, STEEL) δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα, παρόλα αυτά το αποτέλεσμα παρουσιάζει διακυμάνσεις στην τρίτη διάσταση (βάθος). Για τον σωλήνα PVC με νερό (κάτω, PVC) εμφανίζονται μεγαλύτερες μεταβολές σε σχέση με τον μεταλλικό και τον σωλήνα PVC που είναι πληρωμένος με αέρα (πάνω, APVC).



Εικόνα 2.2.2.5 Τομή χωρίς σωλήνες σε ξηρή άμμο για την τομή νούμερο 5 στις 71, στην κόκκινη περιοχή διακρίνεται το τμήμα της τομής που αφαιρείται από την τομή PD05, στην προκειμένη περίπτωση και αντίστοιχα στις υπόλοιπες τομές.

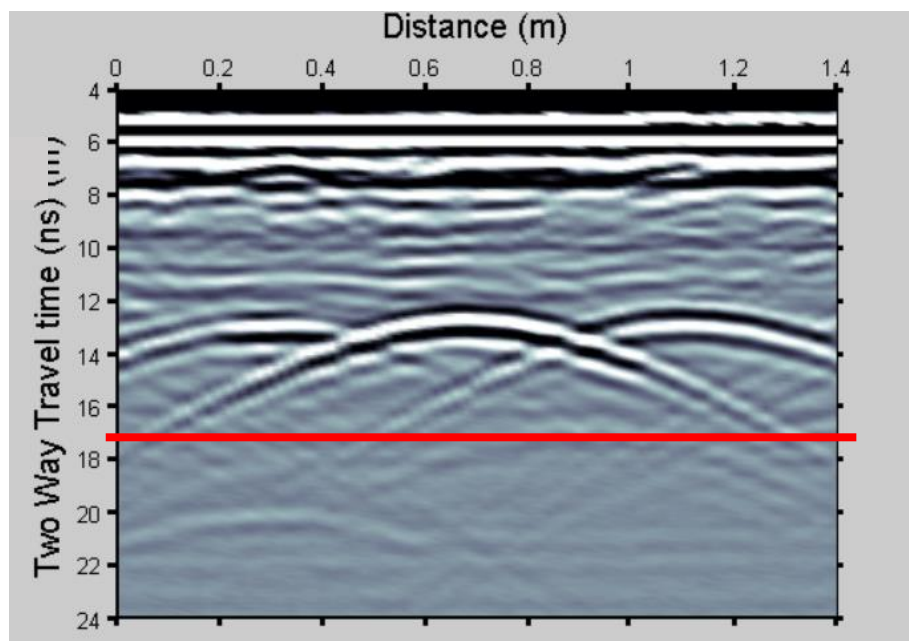


Εικόνα 2.2.2.6 Τομή PD35 ακριβώς πάνω από το κέντρο των σωλήνων δίνοντας το καλύτερο αποτέλεσμα από άποψης λόγου σήματος προς θόρυβο για ξηρή άμμο.

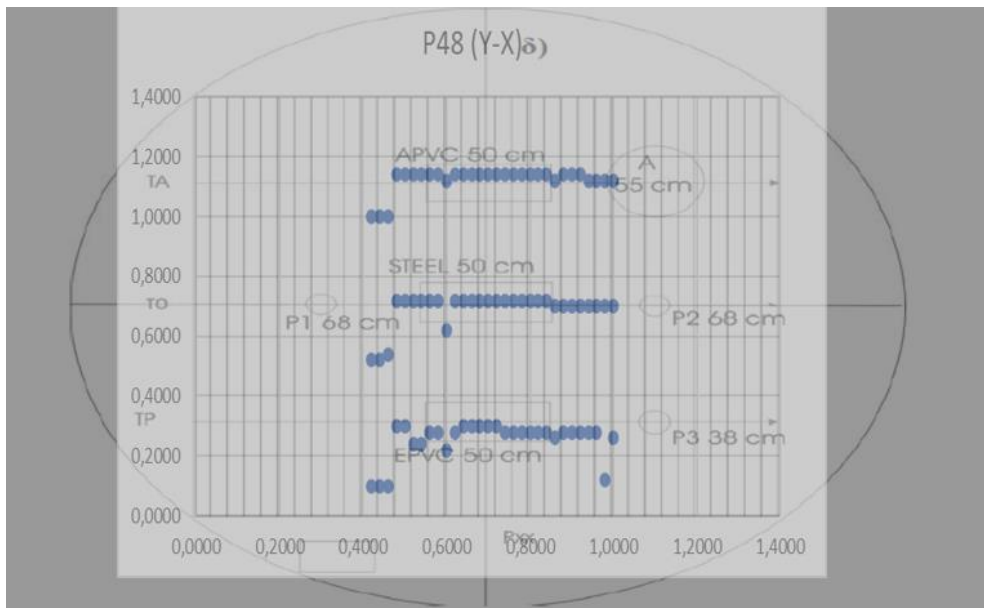


Εικόνα 2.2.2.7 Γραφική αναπαράσταση σε δύο διαστάσεις για τους σωλήνες, στην περίπτωση κορεσμένης άμμου με νερό έως βάθος 72cm.

Σημείωση: Στην εικόνα 2.2.2.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας αυτόματης επιλογής της θέσης των σωλήνων όσον αφορά την οριζόντια εξάπλωση τους για το πείραμα με κορεσμένη άμμο σε νερό σε βάθος μεγαλύτερο των 72cm. Συγκρίνοντας τα με τη κάτοψη των θαμμένων στο Sandbox αντικειμένων, διακρίνουμε μεγαλύτερη διακύμανση στα άκρα. Παρόλο που οι σωλήνες είναι πάνω από το νερό φαίνεται να επηρεάζεται το αποτέλεσμα.

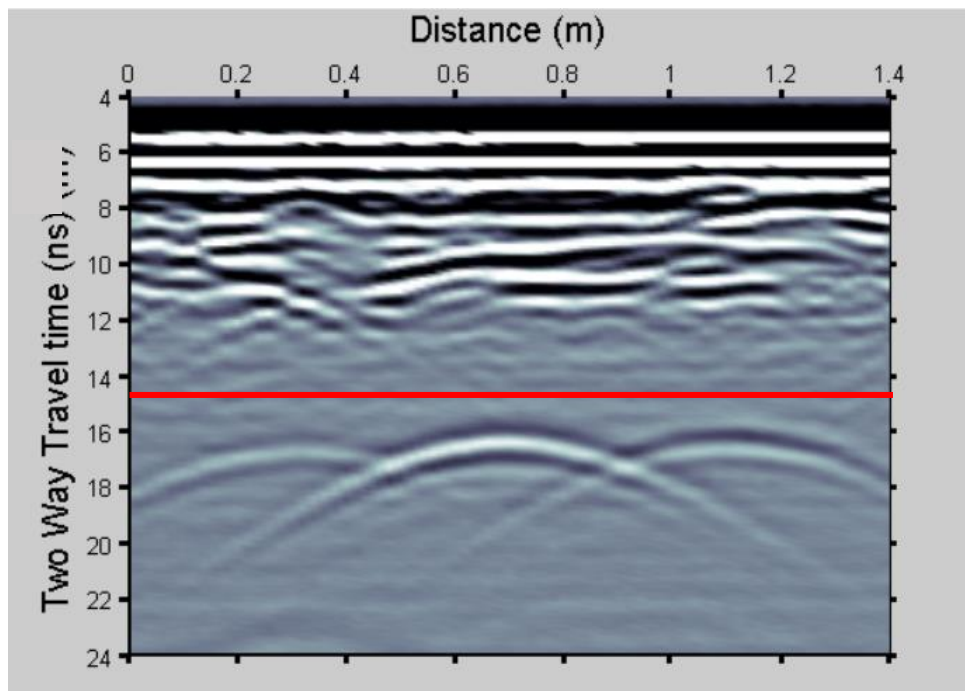


Εικόνα 2.2.2.8 Τομή PD35 ακριβώς πάνω από το κέντρο των σωλήνων δίνοντας το καλύτερο αποτέλεσμα από άποψης λόγου σήματος προς θόρυβο για κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 72cm.



Εικόνα 2.2.2.9 Γραφική αναπαράσταση σε δύο διαστάσεις για τους σωλήνες, στην περίπτωση κορεσμένης άμμου με νερό έως βάθος 48cm.

Σημείωση: Στην εικόνα 2.2.2.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας αυτόματης επιλογής της θέσης των σωλήνων όσον αφορά την οριζόντια εξάπλωση τους για το πείραμα με κορεσμένη άμμο σε νερό σε βάθος μεγαλύτερο των 48cm. Συγκρίνοντας τα με τη κάτοψη των θαμμένων στο Sandbox αντικειμένων, μια σχετικά καλή αναπαράσταση των σημείων αν και το νερό καλύπτει πλήρως τους σωλήνες. Αλλά όπως είναι φυσικό οι σωλήνες PVC όπως και προηγουμένως εμφανίζουν τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις.



Εικόνα 2.2.2.10 Τομή PD35 ακριβώς πάνω από το κέντρο των σωλήνων δίνοντας το καλύτερο αποτέλεσμα από άποψης λόγου σήματος προς θόρυβο για κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 48cm.

Στην συνέχεια για κάθε ίχνος από την γραμμή μελέτης 30 έως και την 50, για την περίπτωση που η δεξαμενή ήταν ξηρή , κορεσμένη σε νερό έως βάθος 48 και 72 εκατοστά αντίστοιχα από την επιφάνεια της δεξαμενής, κατασκευάσαμε πίνακες όπου συγκεντρώσαμε όλα τα αποτελέσματα (Πίνακας 2.2.2.11, Παράρτημα).

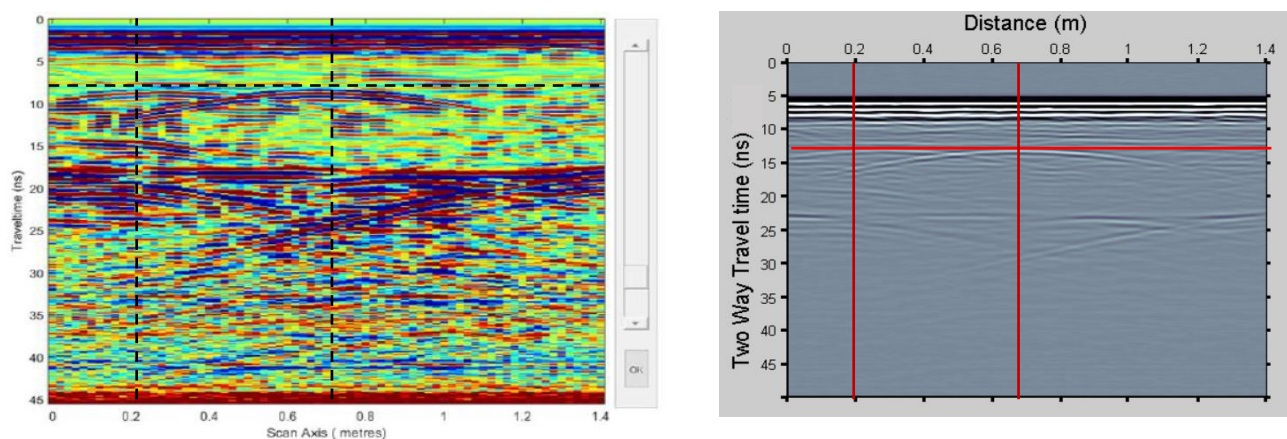
Μετρήσεις σε ξηρή άμμο						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
PD33	0.135	0.70	8.3	7.9	0.66	0.53
	0.130	1.12	8.3	7.9	0.66	0.51
	0.146	0.28	8.2	7.8	0.66	0.57
PD34	0.134	0.70	8.4	8.0	0.68	0.54
	0.131	1.12	8.4	8.0	0.68	0.52
	0.147	0.28	8.2	7.8	0.68	0.57
PD35	0.135	0.70	8.5	8.1	0.70	0.55
	0.128	1.12	8.5	8.1	0.70	0.52
	0.146	0.28	8.3	7.9	0.70	0.58
PD36	0.135	0.70	8.5	8.1	0.72	0.55
	0.130	1.12	8.4	8.0	0.72	0.52
	0.160	0.18	3.8	3.4	0.72	0.27
PD37	0.135	0.70	8.5	8.1	0.74	0.55
	0.129	1.12	8.4	8.0	0.74	0.52
	0.160	0.16	3.8	3.4	0.74	0.27
PD38	0.135	0.70	8.5	8.1	0.76	0.55
	0.130	1.12	8.4	8.0	0.76	0.52
	0.160	0.16	3.8	3.4	0.76	0.27
PD39	0.136	0.70	8.5	8.1	0.78	0.55
	0.149	1.12	11.2	10.8	0.78	0.80
	0.160	0.16	3.8	3.4	0.78	0.27
PD40	0.136	0.70	8.4	8.0	0.80	0.54
	0.127	1.12	8.7	8.3	0.80	0.53
	0.116	0.12	12.9	12.5	0.80	0.73
PD41	0.136	0.70	8.4	8.0	0.82	0.54
	0.160	1.22	14.8	14.4	0.82	1.15
	0.115	0.14	11.8	11.4	0.82	0.66
PD42	0.136	0.70	8.4	8.0	0.84	0.54
	0.158	1.22	14.8	14.4	0.84	1.14
	0.110	0.14	12.9	12.5	0.84	0.69
PD43	0.136	0.70	8.4	8.0	0.86	0.54
	0.158	1.22	14.8	14.4	0.86	1.14
	0.110	0.14	12.8	12.4	0.86	0.68
PD44	0.136	0.70	8.4	8.0	0.88	0.54
	0.159	1.14	9.9	9.5	0.88	0.76
	0.115	0.12	12.8	12.4	0.88	0.71

Πίνακας 2.2.2.11 (Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε ξηρή άμμο). Με κόκκινο χρώμα οι μη αποδεκτές λύσεις λόγω μη αποδεκτών τιμών του διπλού κατακόρυφου χρόνου (t₀).

2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΜΩΝ ΜΕ MATGPR

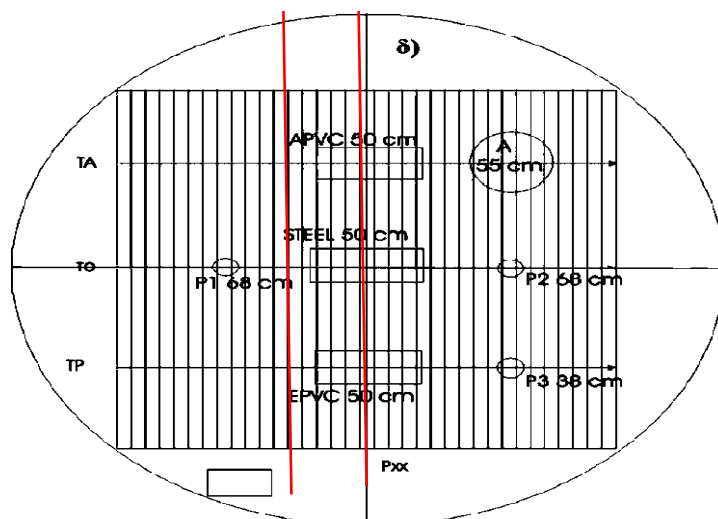
Στην διπλωματική εργασία του Ρώσιου Ηρωδίωνος (2017) γίνεται επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος SANDBOX με το λογισμικό matgpr, ενώ στην προκειμένη περίπτωση γίνεται μέσω της προτεινόμενης μεθόδου (matlab). Έτσι λοιπόν έχει ενδιαφέρον να δούμε κάποια παραδείγματα και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά τους.

Οι τομές matgpr έχουν υποστεί φίλτρο διόρθωσης Dewow και χρονικά μεταβαλλόμενο φίλτρο ενίσχυσης του πλάτους.

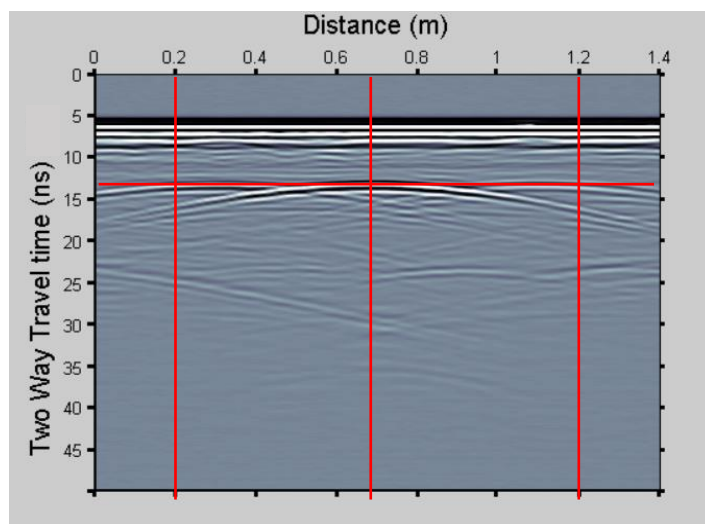
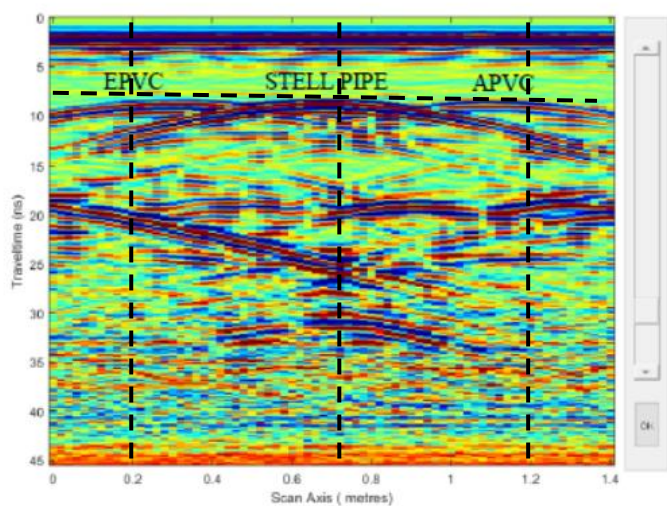


Εικόνα 2.3.1 Τομή 25 για ξηρή άμμο, (αριστερά : matgpr, δεξιά: matlab).

Στην Εικόνα 2.3.1 φαίνεται η τομή 25 για την περίπτωση της ξηρής άμμου, όπου αριστερά έχουμε την τομή από το matgpr ενώ δεξιά την τομή από την matlab. Στις εικόνες παρατηρούμε διαφορές στους διπλούς χρόνους διαδρομής για ανακλώμενα κύματα από τους σωλήνες (8.5 με 9 ns στο matgpr ενώ 12 με 12.5 ns στη matlab). Αν ανατρέξουμε στον Πίνακα (Παράρτημα) θα διαπιστώσουμε ότι ο χρόνος διαδρομής και στις δύο περιπτώσεις είναι περίπου 8.5 με 9 ns (λόγω της διόρθωσης αρχικού χρόνου 4 ns στην τομή από την matlab). Επόμενο παράδειγμα για σύγκριση αποτελεί η τομή 36 που βρίσκεται ακριβώς από πάνω και από τους τρεις σωλήνες (Εικόνα 2.3.3), καθώς και η τομή 25 σε περιοχή χωρίς “στόχους”.



Εικόνα 2.3.2 Σκαρίφημα γραμμών μελέτης όπου από αριστερά τους τα δεξιά με κόκκινη γραμμή έχουμε την τομή 25 και την τομή 36.



Εικόνα 2.3.3 Τομή 36 για ξηρή άμμο, (αριστερά : *matgpr*, δεξιά: *matlab*)

2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΜΕ MATGPR

Στην παρούσα διπλωματική βασιστήκαμε σε μεθοδολογίας εκτίμησης της ταχύτητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ώστε να βρούμε την θέση των σωλήνων. Έτσι μας δίνεται η ευκαιρία να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας με αυτά από την διπλωματική εργασία του Ρώσιου Ηρωδίωνος (2017), στην οποία χρησιμοποιείται διαφορετική μέθοδος και πρόγραμμα για να υπολογίσει την ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για το ίδιο πείραμα (Sandbox).

TOMH PD (Ξηρή άμμος)

	APVC		STEEL		EPVC	
ΣΩΛΗΝΕΣ	(πλαστικός σωλήνας με αέρα)		(μεταλλικός σωλήνας)		(πλαστικός σωλήνας με νερό)	
ΜΕΘΟΔΟΣ	MATLAB	MATGPR	MATLAB	MATGPR	MATLAB	MATGPR
U(m/ns)	0.139	0.116	0.135	0.116	0.142	0.118

Πίνακας 2.4.1 (Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων ταχύτητας σε MATLAB και MATGPR για ξηρή άμμο)

TOMH P78 (κορεσμένη άμμος με νερό έως βάθος 72cm)

	APVC		STEEL		EPVC	
ΣΩΛΗΝΕΣ	(πλαστικός σωλήνας με αέρα)		(μεταλλικός σωλήνας)		(πλαστικός σωλήνας με νερό)	
ΜΕΘΟΔΟΣ	MATLAB	MATGPR	MATLAB	MATGPR	MATLAB	MATGPR
U(m/ns)	0.138	0.116	0.125	0.114	0.140	0.116

Πίνακας 2.4.2 (Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων ταχύτητας σε MATLAB και MATGPR για κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 72cm)

TOMH P48 (κορεσμένη άμμος με νερό έως βάθος 48cm)

	APVC		STEEL		EPVC	
ΣΩΛΗΝΕΣ	(πλαστικός σωλήνας με αέρα)		(μεταλλικός σωλήνας)		(πλαστικός σωλήνας με νερό)	
ΜΕΘΟΔΟΣ	MATLAB	MATGPR	MATLAB	MATGPR	MATLAB	MATGPR
U(m/ns)	0.147	0.082	0.105	0.084	0.117	0.079

Πίνακας 2.4.3 (Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων ταχύτητας σε MATLAB και MATGPR για κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 48cm)

TOMES	PD	P72	P48
TACHYTHTES	U (m/ns)	U (m/ns)	U (m/ns)
APVC (πλαστικός σωλήνας με αέρα)	0.139 ± 0.016	0.138 ± 0.017	0.147 ± 0.023
STEEL (μεταλλικός σωλήνας)	0.135 ± 0.001	0.125 ± 0.007	0.105 ± 0.020
EPVC (πλαστικός σωλήνας με νερό)	0.142 ± 0.015	0.140 ± 0.019	0.117 ± 0.026

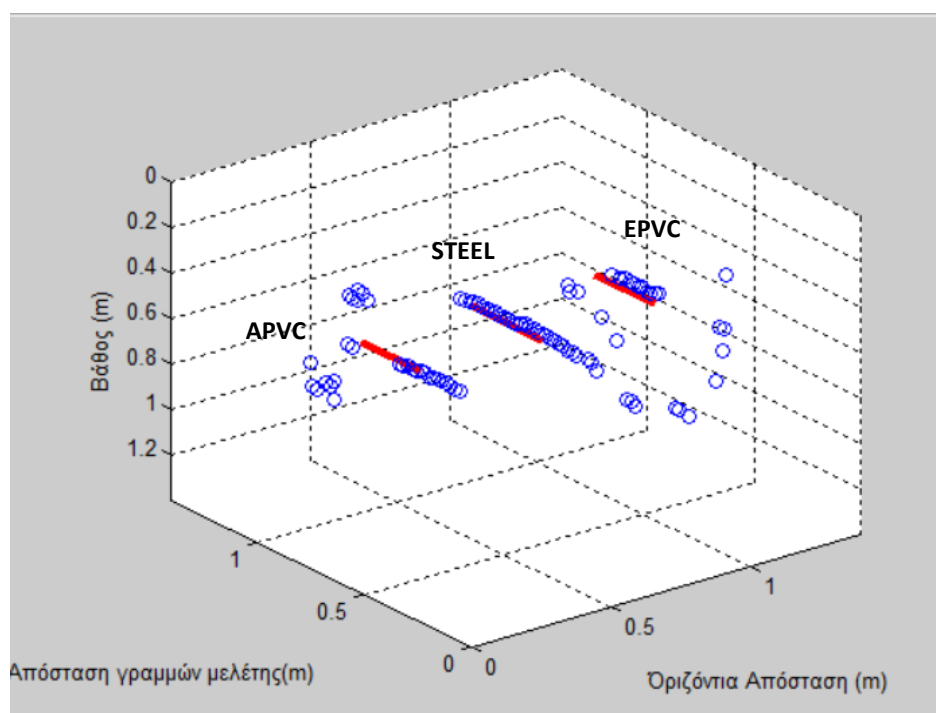
Πίνακας 2.4.4 (Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων ταχύτητας σε MATLAB, για όλες τις περιπτώσεις)

Από τους πίνακες 2.4.1 – 2.4.4 συμπεραίνουμε ότι τα αποτελέσματα από την προτεινόμενη μέθοδο (matlab) ανταποκρίνονται καλύτερα στην πραγματικότητα, καθώς προέρχονται από διαφορετικές τομές γεωραντάρ με διακύμανση στις ταχύτητες μικρότερη του 20% για σωλήνες διαφορετικού υλικού κατασκευής. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι σε ξηρή άμμο έχουμε την μικρότερη διακύμανση στις ταχύτητες (<12%). Στις περιπτώσεις παρουσίας νερού, η ταχύτητα μειώνεται με τις χαμηλότερες ταχύτητες να παρατηρούνται όταν το νερό καλύπτει τους σωλήνες. Επιπλέον παρατηρούμε ότι οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα έχουν διαφορές με την περίπτωση του μεταλλικού σωλήνα να εμφανίζει πιο σταθερά αποτελέσματα. Η άλλη μέθοδος (matlab) εκτιμά την ταχύτητα χωροθέτησης, η οποία κατά κανόνα εμφανίζει μικρότερες τιμές επηρεασμένες κυρίως από την παρουσία του νερού. Τέλος μπορούμε να πούμε ότι και οι δύο μέθοδοι αντιλαμβάνονται την ύπαρξη ύδατος το οποίο μειώνει την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

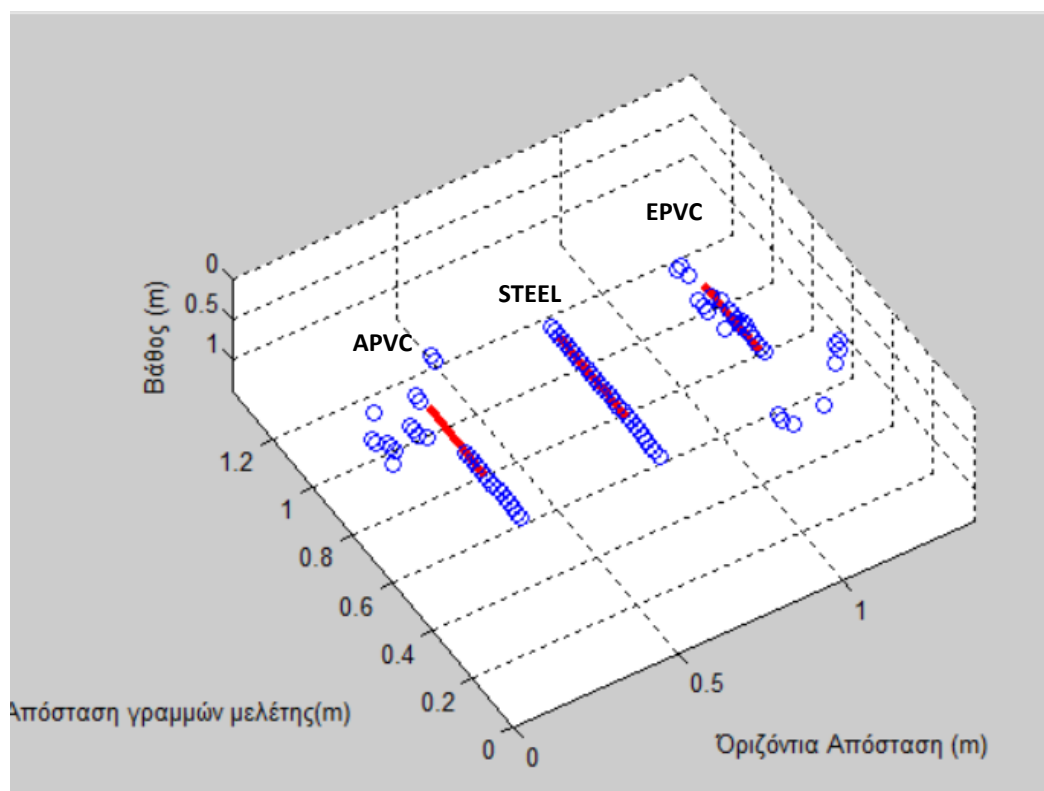
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

3.1 3D ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ – ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΜΕΣΩ MATLAB

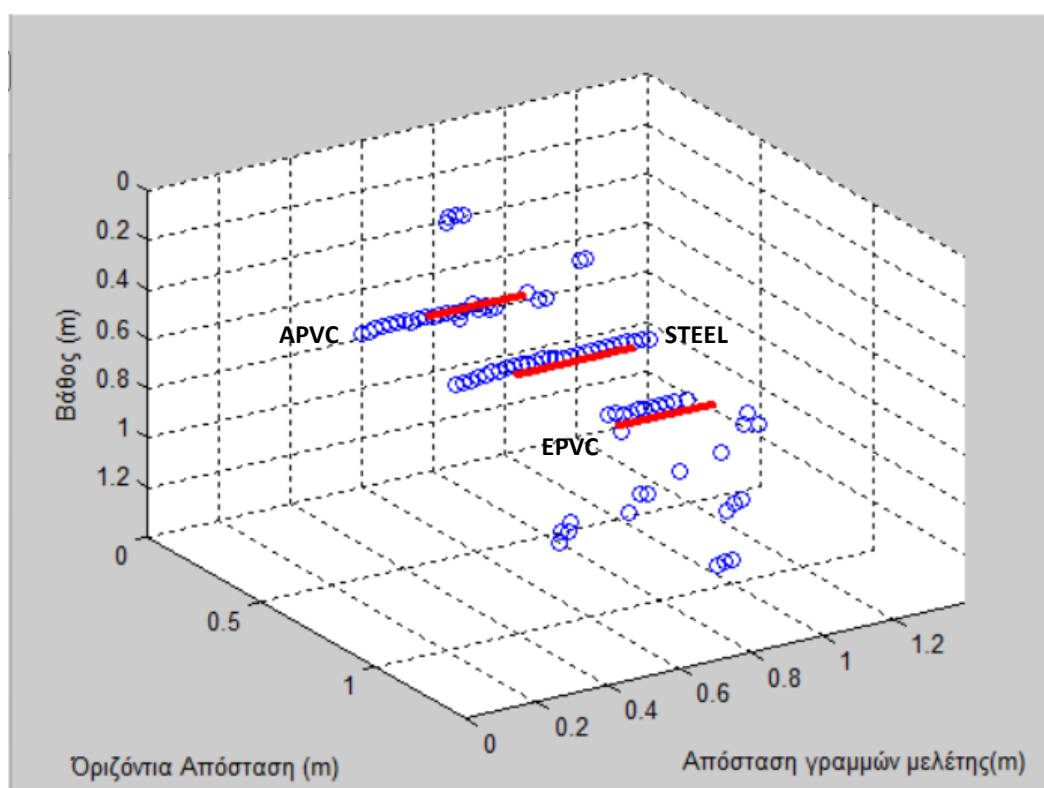
Ολοκληρώνοντας έτσι τον σκοπό που ξεκινήσαμε να περιγράψουμε στην αρχή της διπλωματικής εργασίας, παραθέτουμε παρακάτω τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης απεικόνισης όπου παρατηρούμε κάποιες αποκλίσεις στα άκρα λόγω των σφαιρών αλλά και του νερού. Η εκτίμηση του βάθους είναι χειρότερη για τον πλαστικό σωλήνα με νερό και οφείλεται σε σφάλματα στην εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Δηλαδή, σημαντικό ρόλο παίζει το υλικό και οι διαστάσεις των σωλήνων. Παρόλα αυτά βλέπουμε μια σχετική ακρίβεια στα διαγράμματα με δεδομένα πραγματικά και όχι θεωρητικά. Τέλος αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιήσαμε περίπλοκες τεχνικές αφαίρεσης θορύβου αλλά εκμεταλλευτήκαμε το γεγονός ότι είχαμε τομές χωρίς αντικείμενα – στόχους για κάθε περίπτωση και καταφέραμε έτσι ουσιαστικό αποτέλεσμα. Τέλος, πρέπει να επισημάνουμε ότι προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι τα αποτελέσματα είναι χειρότερα στην περίπτωση που το νερό δεν καλύπτει του σωλήνες σε σχέση με αυτήν όπου το νερό καλύπτει πλήρως τους σωλήνες.



Εικόνα 3.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες σε ξηρή άμμο (PD). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

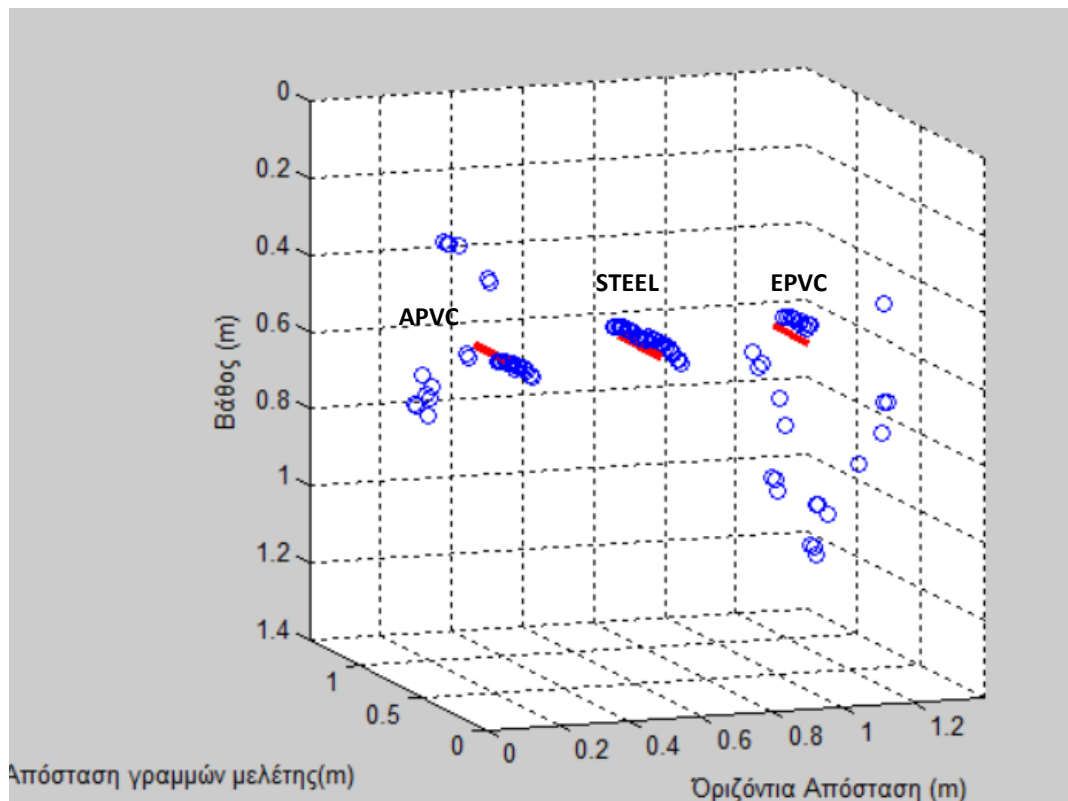


Εικόνα 3.1.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες σε ξηρή άμμο (PD). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

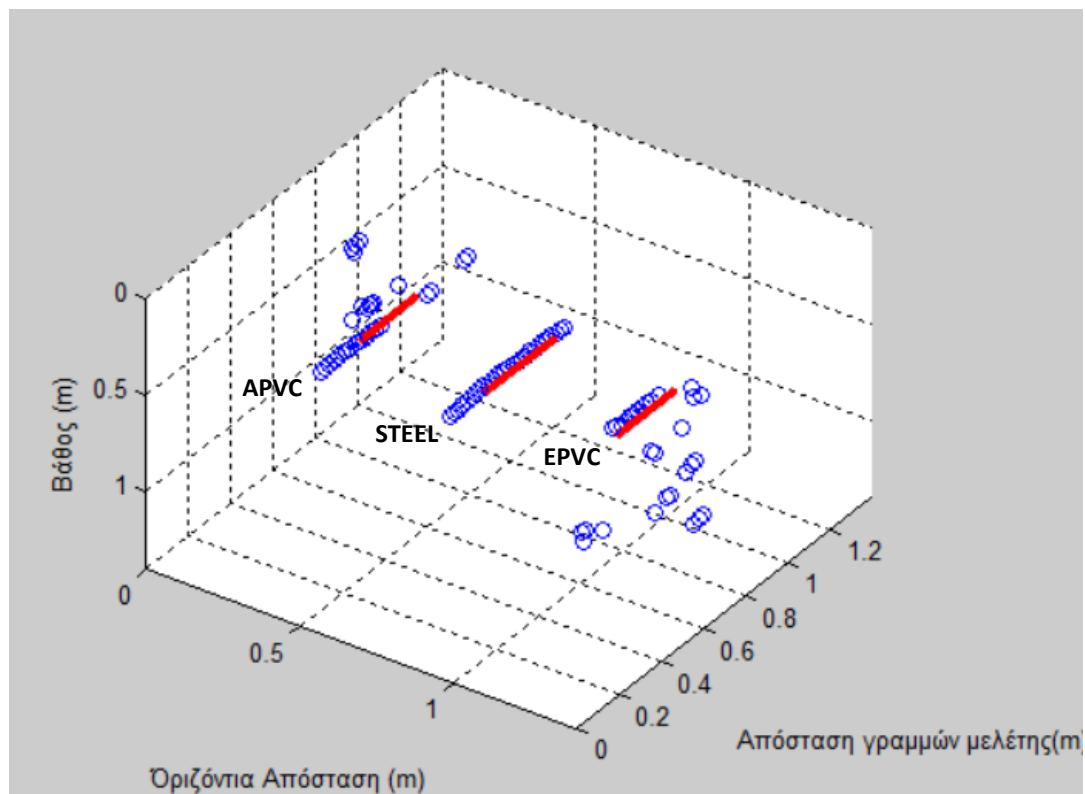


Εικόνα 3.1.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες σε ξηρή άμμο (PD). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

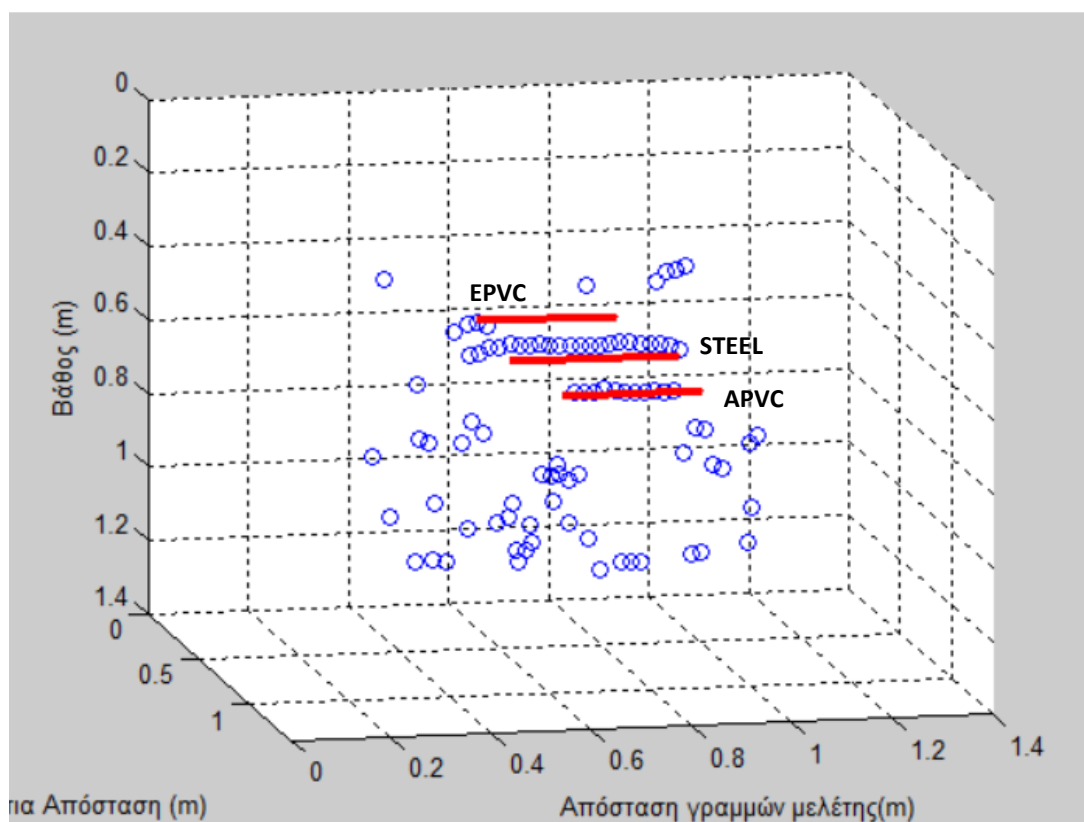
Συγκεκριμένα στις τομές PD (Εικόνα 3.1.1 – Εικόνα 3.1.5) παρατηρούμε ότι για τον μεταλλικό σωλήνα (STEEL, μέση) έχουμε αρκετά καλή ακρίβεια σε σχέση με τους υπόλοιπους σωλήνες, αλλά εμφανίζεται επιμηκυμένος, καθώς επηρεάζεται από δύο μεταλλικές σφαίρες σε θέσεις συμμετρικά δεξιά και αριστερά του σωλήνα σε παραπλήσιο βάθος (55 cm). Ο σωλήνας με την καλύτερη ακρίβεια μετά τον μεταλλικό είναι ο πλαστικός σωλήνας με νερό (APVC), στον οποίο παρατηρούμε κάποιες παρεκκλίσεις εξαιτίας κυρίως του υλικού. Παρόλα αυτά οι μετρήσεις είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα. Τέλος, από την τομή PD προκύπτει ότι ο πλαστικός σωλήνας (EPVC), ο οποίος είναι πληρωμένος με νερό, εμφανίζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις λόγω του υλικού κατασκευής, του νερού που περιέχει αλλά και της παρουσίας μιας μεταλλικής σφαίρας στην μια πλευρά (38 cm βάθος).



Εικόνα 3.1.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες σε ξηρή άμμο (PD). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

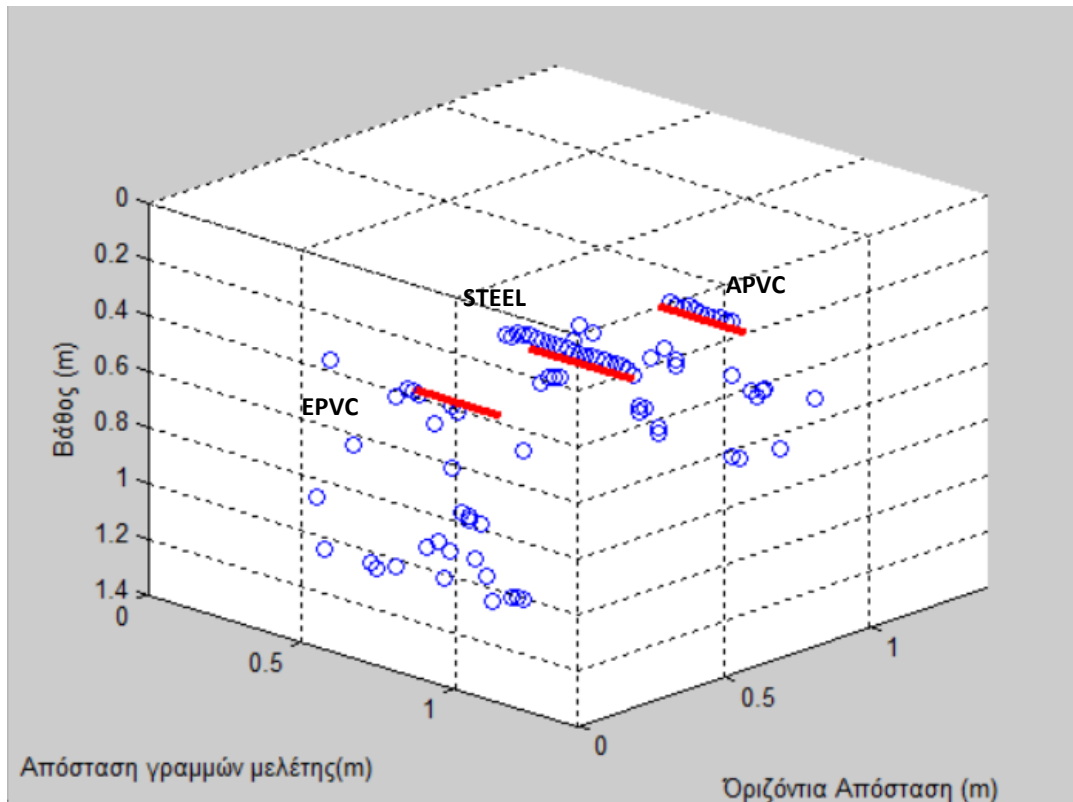


Εικόνα 3.1.5 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες σε ξηρή άμμο (PD). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

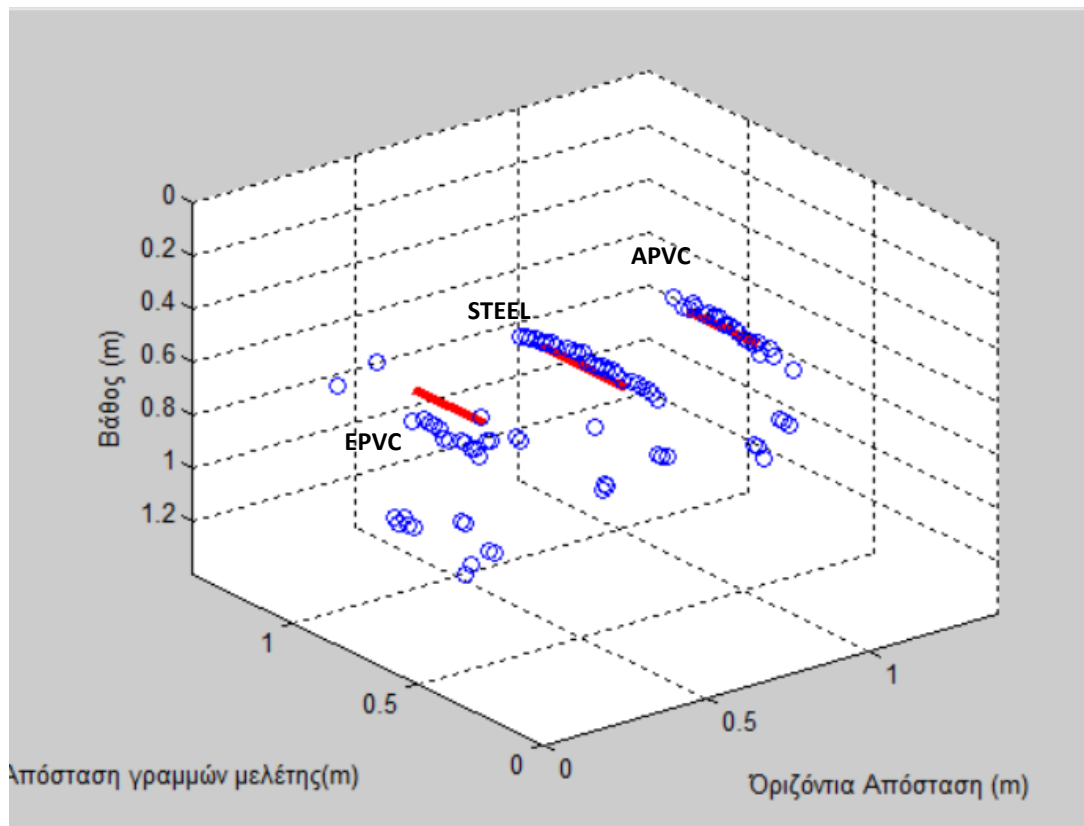


Εικόνα 3.1.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες και κορεσμένη σε νερό άμμο σε βάθος 72 cm (P72). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

Στην περίπτωση της τομής P72, παρατηρούνται τα ίδια αποτελέσματα με την προηγούμενη τομή PD, όμως τώρα υπάρχει το νερό που εμφανίζεται σε βάθος 72cm. Τα αποτελέσματα εμφανίζουν σχετικά μεγαλύτερες παρεκκλίσεις και ειδικά στην περίπτωση του σωλήνα (EPVC) που είναι πληρωμένος με νερό ενώ ο σωλήνας χωρίς νερό (APVC) δεν επηρεάζεται το ίδιο. Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε είναι ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα επηρεάζονται από το νερό και στην συγκεκριμένη περίπτωση ίσως είναι αυτό που προκαλεί προβλήματα μιας και έχουμε λίγο διαφοροποιημένο μέσο (υγρή και ξηρή άμμο).

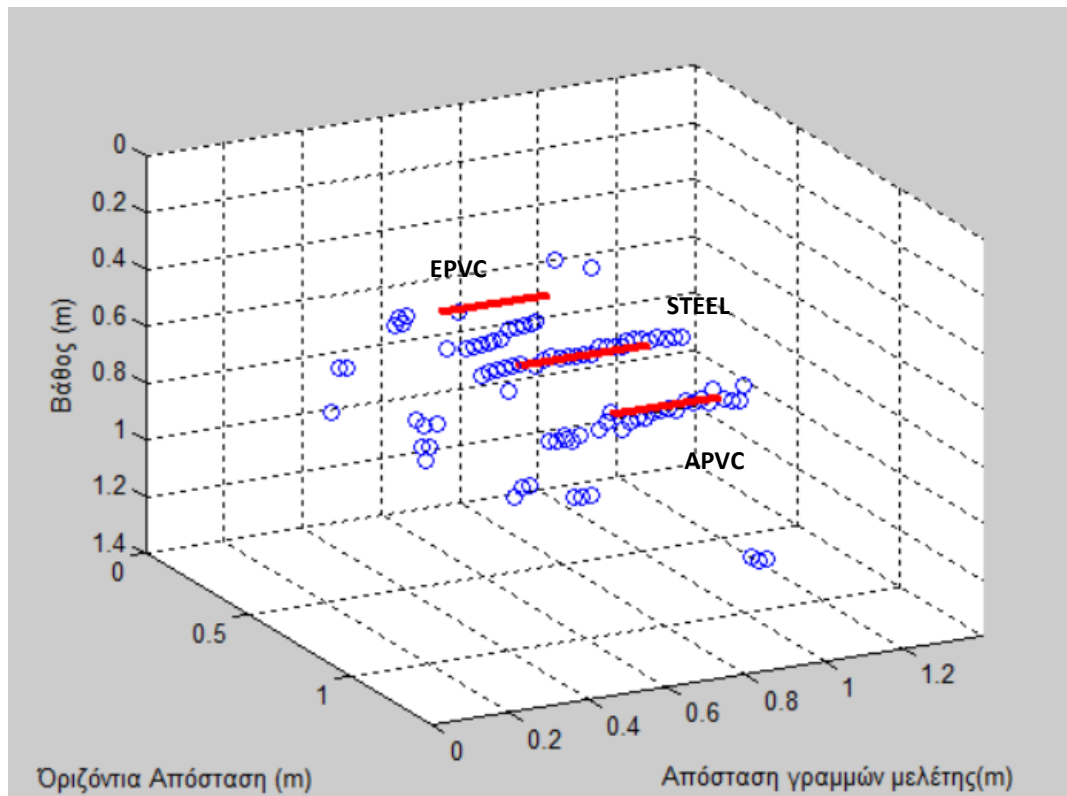


Εικόνα 3.1.7 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες και κορεσμένη σε νερό άμμο σε βάθος 72 cm (P72). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

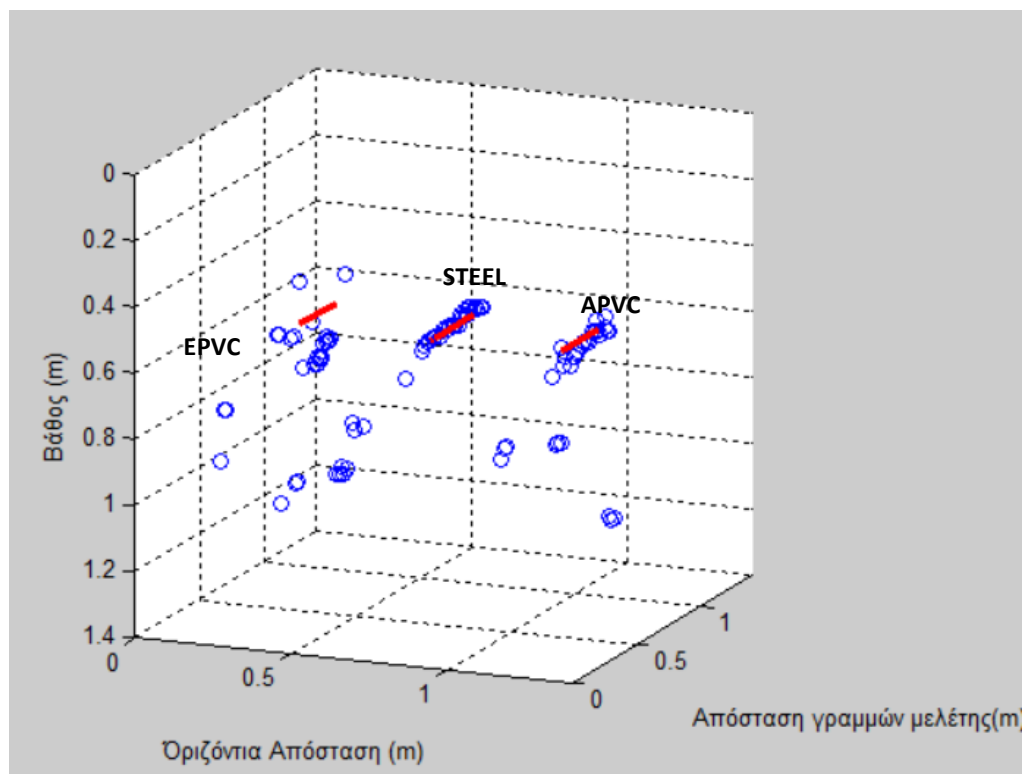


Εικόνα 3.1.8 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες και κορεσμένη σε νερό άμμο σε βάθος 48 cm (P48). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

Στην τελευταία περίπτωση της τομής P48, τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται καλύτερα στην πραγματικότητα σε σχέση με αυτά από την τομή P72. Καθώς, παρατηρούμε παρεκκλίσεις και στους τρεις σωλήνες μιας και οι σωλήνες είναι πλέον καλυμμένοι με νερό. Όπως με τις προηγούμενες τομές, τα αποτελέσματα για τον μεταλλικό σωλήνα (STEEL) εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά όπως και αυτά για τον σωλήνα πληρωμένο με αέρα (APVC) ενώ και πάλι για τον σωλήνα πληρωμένο με νερό (EPVC) εμφανίζονται τα λιγότερο ακριβή αποτελέσματα, με τους λόγους να παραμένουν οι ίδιοι όπως και αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Απλά εδώ εντοπίζεται και η εξής ιδιαιτερότητα ότι η μεταλλική σφαίρα δίπλα από τον σωλήνα EPVC, η οποία δεν καλύπτεται από νερό, έχει μεγάλη επιρροή στο αποτέλεσμα.



Εικόνα 3.1.9 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες και κορεσμένη σε νερό άμμο σε βάθος 48 cm (P48). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.



Εικόνα 3.1.10 Τρισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου για σωλήνες και κορεσμένη σε νερό άμμο σε βάθος 48 cm (P48). Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν την πραγματική θέση των σωλήνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ακολουθώντας την πορεία της διπλωματικής εργασίας έχει σημασία να σταθούμε σε σημεία «κλειδιά» αυτή της προσπάθειας. Στόχος ήταν η τρισδιάστατη απεικόνιση θαμμένων σωλήνων από δεδομένα γεωραντάρ. Έτσι λοιπόν ξεκινήσαμε την δουλειά μας, έχοντας ένα ελεγχόμενο πείραμα με πραγματικά δεδομένα. Μέσω του οποίου μπορέσαμε ανατρέξουμε για να δούμε τυχόν παραλείψεις ή αδυναμίες στην μεθοδολογία απεικόνισης θαμμένων σωλήνων η οποία είναι βασισμένη στην ανάλυση ταχύτητας διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από δεδομένα GPR για την απεικόνιση θαμμένων σωλήνων. Ο ήδη υπάρχων αλγόριθμος εκτίμησης της ταχύτητας από χάρτες συνάφειας προσαρμόστηκε για την περίπτωση ανακλώμενων κυμάτων από σωλήνες. Ειδικότερα επεκτάθηκε υπάρχουσα μεθοδολογία που είχε αναπτυχθεί για περιθλώμενα κύματα από σημειακούς στόχους και για σωλήνες. Ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί την γνώση της ακτίνας του υπό αναζήτηση σωλήνα. Στην οριακή περίπτωση όπου η ακτίνα είναι μηδενική είναι δυνατόν να απεικονίσει και σημειακούς στόχους. Εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα γεωραντάρ όπου οι γραμμές μελέτης είναι κάθετες στην διεύθυνση των σωλήνων (πείραμα SandBox) για τρεις περιπτώσεις και για τρεις σωλήνες. Από την συνάφεια των δεδομένων γεωραντάρ υπολογίζεται η οριζόντια εξάπλωση του σωλήνα συνδυάζοντας καταγραφές από γειτονικές γραμμές μελέτης και από την ταχύτητα διάδοσης των ΗΜ κυμάτων, το βάθος του σωλήνα. Στην συνέχεια κάνοντας αρκετές δοκιμές «trial and error» με τον κώδικα που συνθέσαμε και διάφορες τροποποιήσεις καταλήγουμε κοντά σε επιθυμητά αποτελέσματα αλλά ακόμα υπάρχει περιθώριο για βελτίωση. Καθώς ένα από τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίσαμε αποτέλεσε ο τυχαίος αλλά και συναφής θόρυβος και πως μπορεί να απομακρυνθεί χωρίς να χαθούν οι χρήσιμες πληροφορίες για τους σωλήνες που μας ενδιέφεραν. Για αυτόν τον λόγο κινηθήκαμε έξυπνα και χρησιμοποιήσαμε τομές όπου γνωρίζαμε ότι δεν υπάρχουν σωλήνες επιβεβαιωμένα ώστε να αφαιρεθούν σήματα από τυχόν άλλες παρεμβολές. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι πέραν των σωλήνων υπήρχαν και μεταλλικές σφαίρες θαμμένες στην δεξαμενή οι οποίες λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών όσο και να μην μας ενδιέφεραν, επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Στην δικιά μας περίπτωση αξίζει να αναφέρουμε ότι εξετάσαμε τρεις περιπτώσεις με τα αποτελέσματα να δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε περιπτώσεις παρουσίας νερού αλλά και λόγω του υλικού των σωλήνων. Αρχικά στην περίπτωση ξηρής άμμου, εμφανίζεται καλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση του βάθους του μεταλλικού σωλήνα αλλά και στην οριζόντια εξάπλωσή του. Ωστόσο λόγω των γειτονικών μεταλλικών σφαιρών εκατέρωθεν του σωλήνα, δημιουργείται απόκλιση στην οριζόντια εξάπλωσή του. Βέβαια η ακρίβεια των αποτελεσμάτων συνεχίζει να είναι καλή και για κορεσμένη άμμο σε νερό όταν η στάθμη του νερού βρίσκεται κάτω από τους

σωλήνες. Τέλος, στην περίπτωση που καλύπτονται οι σωλήνες με νερό παρατηρούμε μια εξίσου καλή ακρίβεια, ωστόσο όπως είναι αναμενόμενο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι πιο εξασθενημένα. Τώρα όσον αφορά τους σωλήνες PVC έχουμε να πούμε τα εξής: Ο πληρωμένος με αέρα πλαστικός σωλήνας (APC) παρόλο που δεν έχει μεταλλικές σφαίρες πλησίον του, εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις στην οριζόντια εξάπλωσή του έναντι του μεταλλικού με τα αποτελέσματα να είναι σχετικά σταθερά και αποδεκτά. Έτσι φτάνουμε στον πιο «προβληματικό» σωλήνα EPVC, ο οποίος είναι από το ίδιο υλικό όπως ο σωλήνας APVC, με την διαφορά ότι είναι πληρωμένος με νερό και βρίσκεται πλησίον μιας μεταλλικής σφαίρας. Όπως παρατηρούμε και στις άλλες περιπτώσεις το νερό επηρεάζει αρκετά τα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση όμως έρχεται να επιδεινώσει την κατάσταση η μεταλλική σφαίρα πλησίον του σωλήνα, όντας πρωτίστως μεταλλική και δευτερεύοντος βρίσκεται πιο ρηχά και σε ξηρή άμμο, άρα τα ανακυκλωμένα από αυτήν κύματα είναι λιγότερο εξασθενημένα λόγω απουσίας νερού. Επιπλέον συγκρίναμε τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής με αυτά από παλιότερη διπλωματική που χρησιμοποιούσε τα ίδια δεδομένα και άλλες μεθόδους επεξεργασίας για να καταλήξουμε στο ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις τιμές της εκτιμώμενης ταχύτητας. Εν κατακλείδι, εκεί που μπορούμε να καταλήξουμε είναι, ότι η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε όπως και η υλοποίηση της μας προσέφεραν αρκετά καλά υποσχόμενα αποτελέσματα, ωστόσο υπάρχουν και κάποιες ιδέες που μπορούμε να προτείνουμε ώστε τα αποτελέσματα να βελτιωθούν περαιτέρω. Για αρχή προτείνεται η χρήση κόφτη για να αποκλείσουμε θέσεις με τιμές βάθους, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από την μέση τιμή (για απόκλιση στο βάθος μεγαλύτερη της ακτίνας του σωλήνα). Όπως θα μπορούσαμε να αποκλείσουμε θέσεις οι οποίες αποκλίνουν από την ευθύγραμμη εξάπλωσή του, καθώς και θέσεις όπου τα ζεύγη τιμών διπλού κατακόρυφου χρόνου ανακλώμενων κυμάτων και ταχύτητας δεν συνάδουν με το μέσο διάδοσης και με παρατηρήσεις στα πρωτογενή δεδομένα του γεωραντάρ. Τέλος για την βελτίωση της τρισδιάστατης απεικόνισης των θαμμένων σωλήνων προτείνεται να διερευνηθεί η επιρροή της προσθήκης του τυχαίου θορύβου στα δεδομένα και να δημιουργηθούν συνθετικά δεδομένα για τις μεταλλικές σφαίρες. Επιπρόσθετα, προτείνεται να εφαρμοσθεί η μεθοδολογία στην περίπτωση που οι γραμμές μελέτης δεν είναι κάθετες στην διεύθυνση των σωλήνων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βαφείδης Α. (2001) , *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II* , Σημειώσεις , Τμήμα Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Καραμούζης Ο. (2020), « *Γεωραντάρ: ιστορικό, χρήσεις και πρακτική εφαρμογή*», Διπλωματική εργασία. Εργαστήριο Οδοποιίας, Τομέας Μεταφορών και Διαχείρισης Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

Κλουβιδάκης Ε. (2022) , «*Ανάλυση ταχύτητας διάδοσης περιθλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με την χρήση δεδομένων γεωραντάρ*», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Μπίσα Α. Στεφάνια (2009) , «*Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ στα υπεδάφεια τμήματα των Βυζαντινών Τειχών της πόλης των Χανίων*», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Οικονόμου Ν. (2010) , «*Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ με την χρήση του μετασχηματισμού S*», Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Ρώσιος Η. (2017), «*Επεξεργασία GPR δεδομένων με τη μέθοδο χωροθέτησης 3D-Kirchhoff: Εφαρμογή σε δεδομένα από πείραμα σε Sandbox*», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

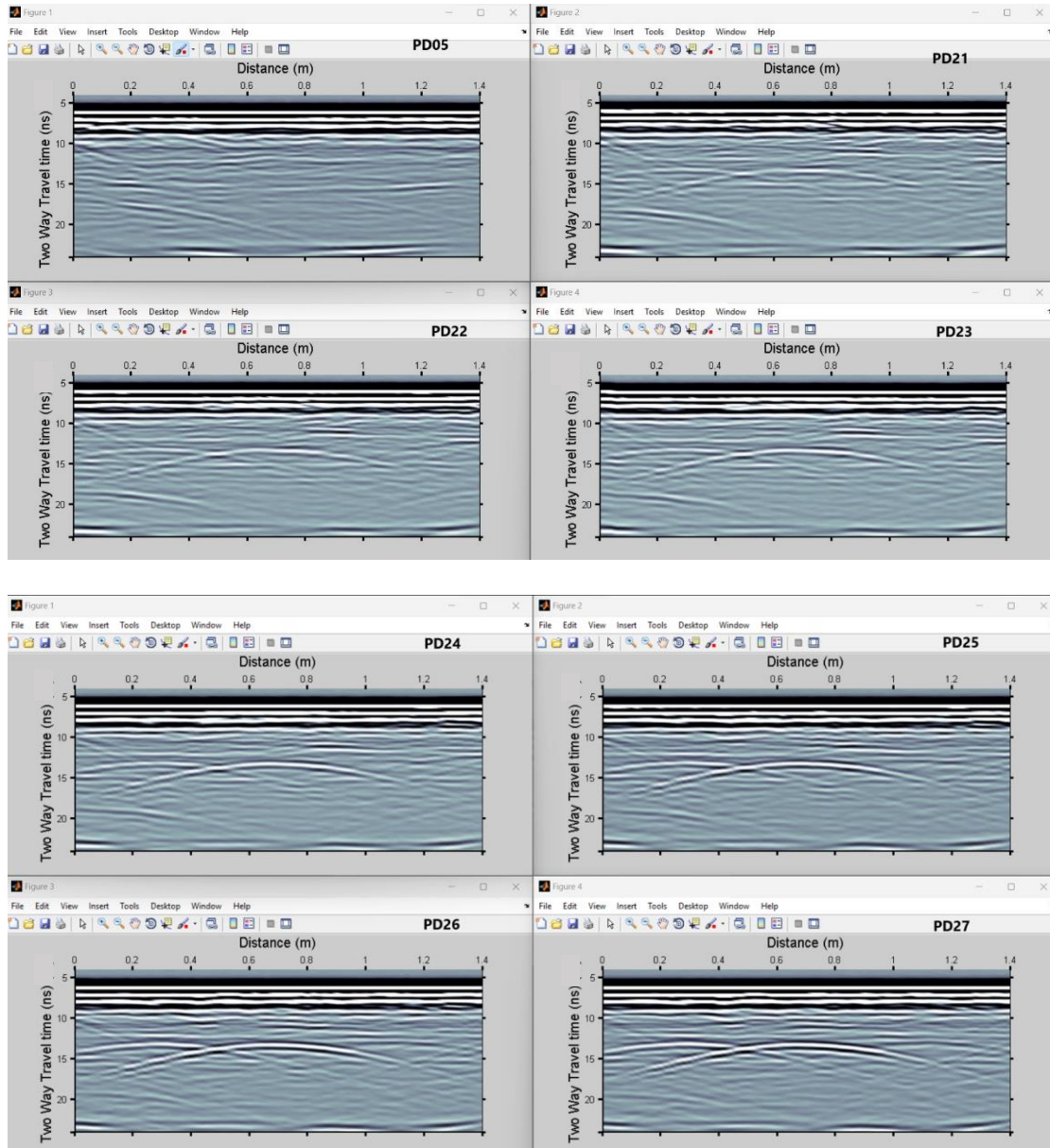
Σπανουδάκης Ν. (2007), «*Συμβολή των μεθόδων ταξινόμησης δεδομένων γεωραντάρ στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων*», Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

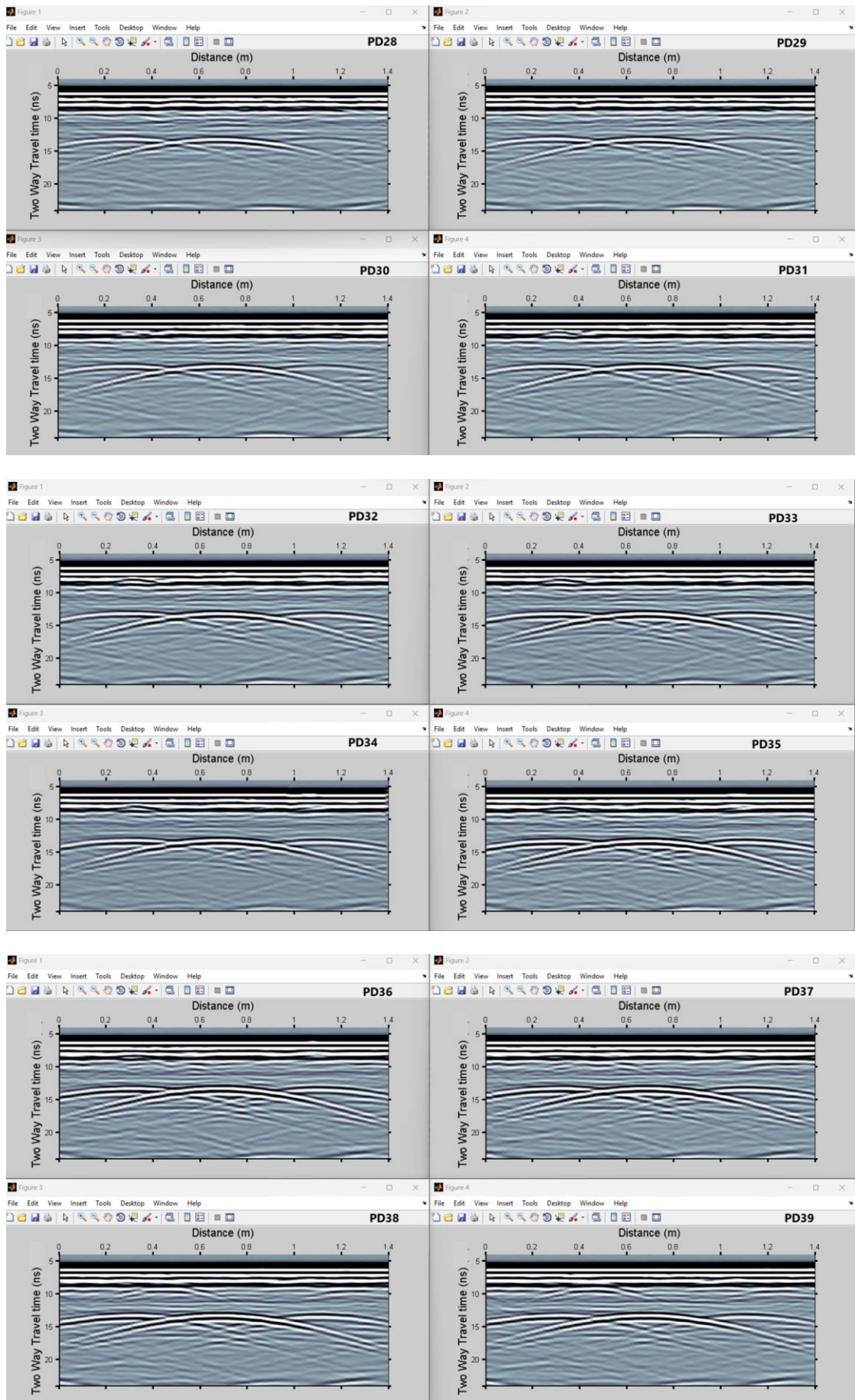
Adam D. Booth, Jamie K. Pringle (2016), «*Semblance analysis to assess GPR data from a five-year forensic study of simulated clandestine graves*», Journal of Applied Geophysics, Volume 125, Pages 37-44

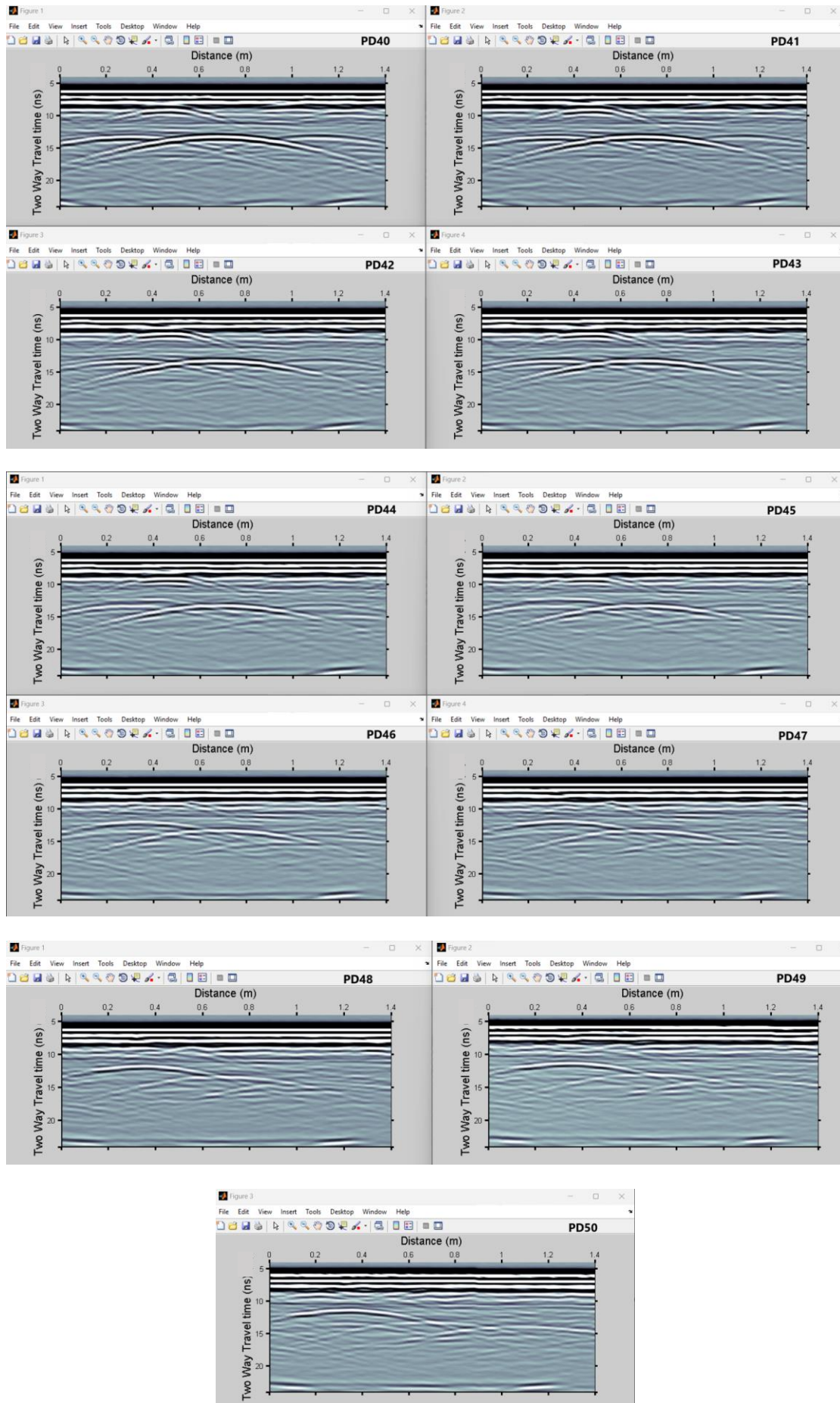
Aleksandar Vaso Ristic, Dusan Petrovacki, Miro Govedarica (2009), «*A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data*», Computers & Geosciences, Volume 35, Issue 8, Pages 1620-1630

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ & ΠΙΝΑΚΩΝ

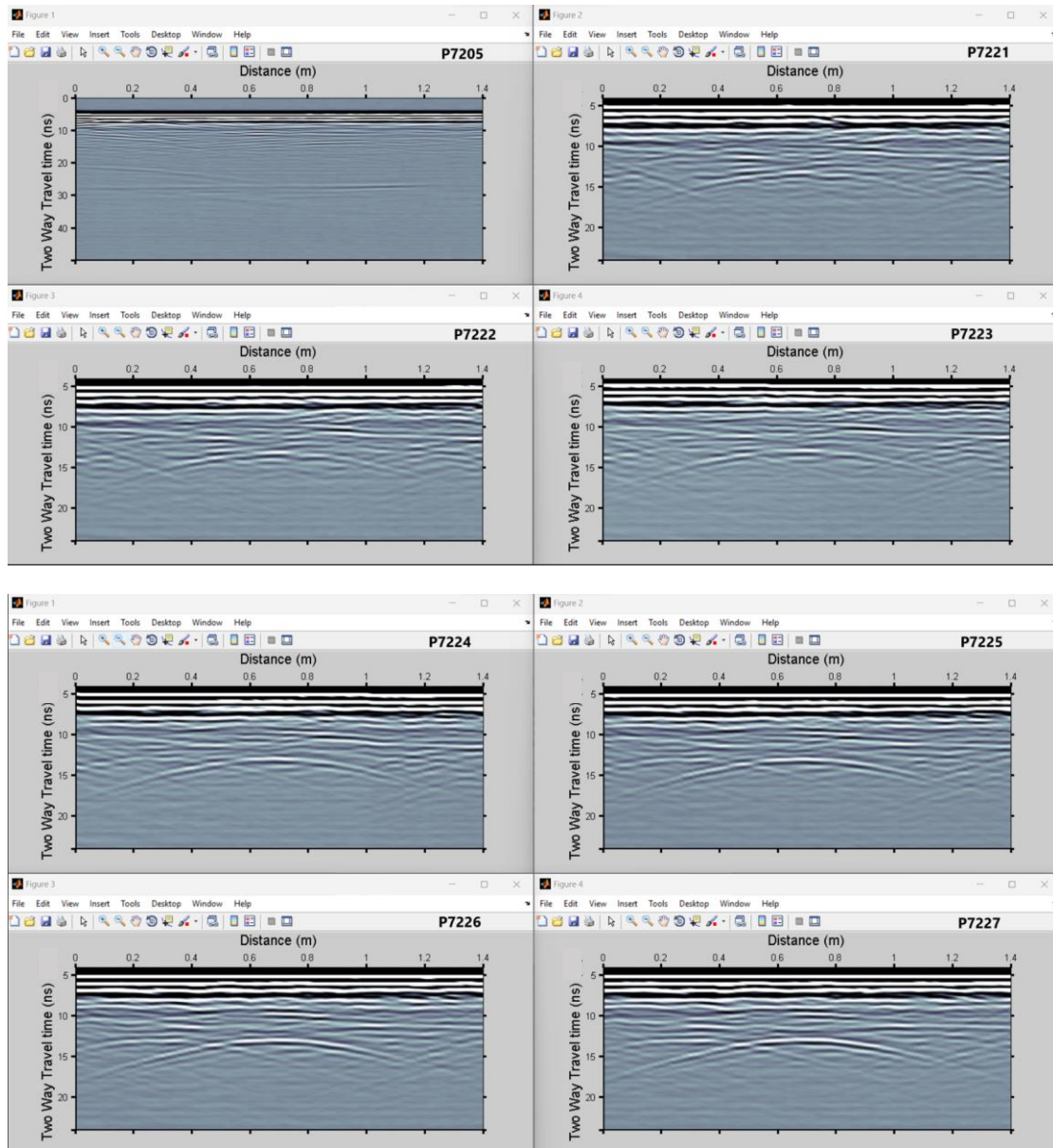
ΤΟΜΕΣ PD (05-50)

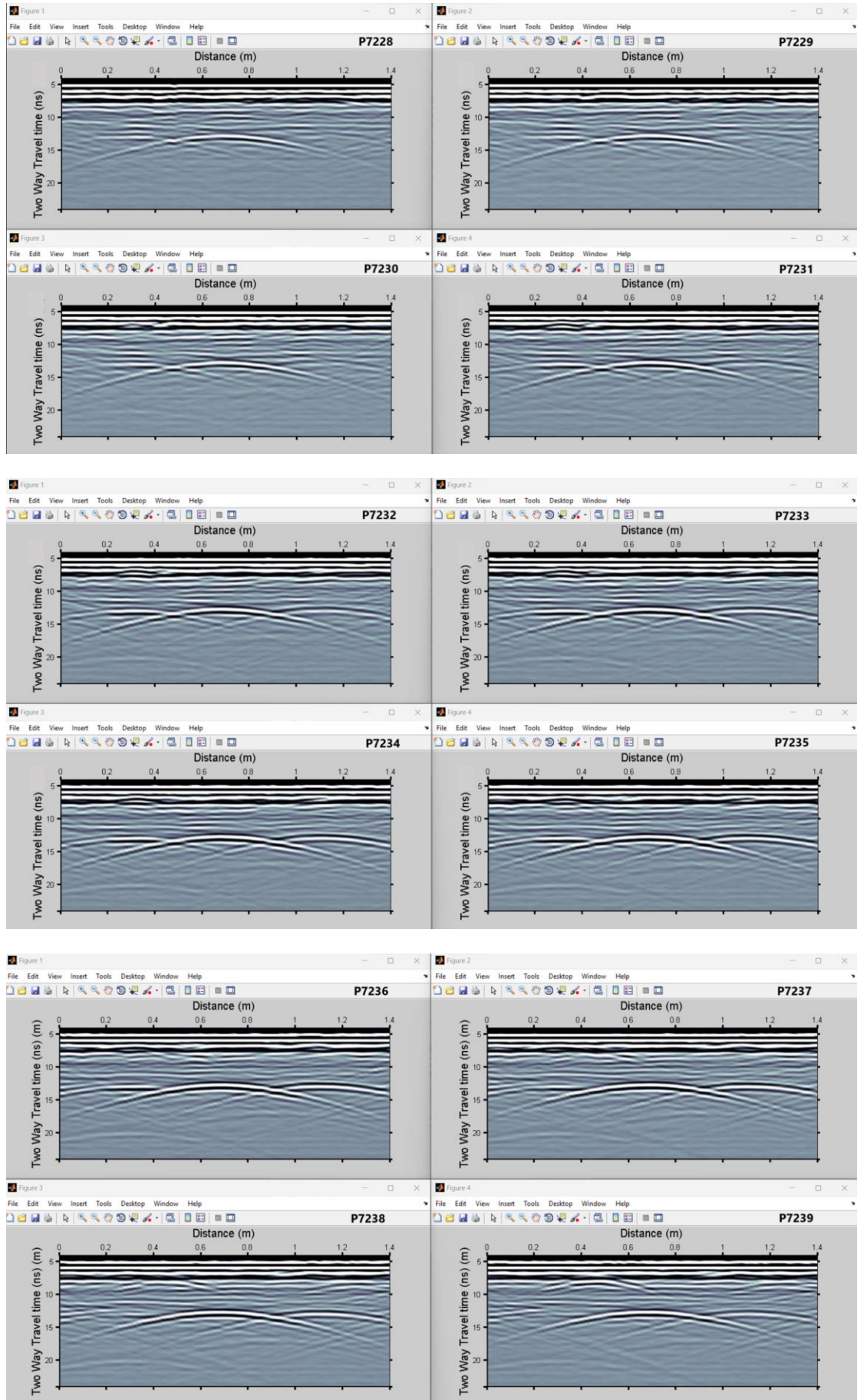


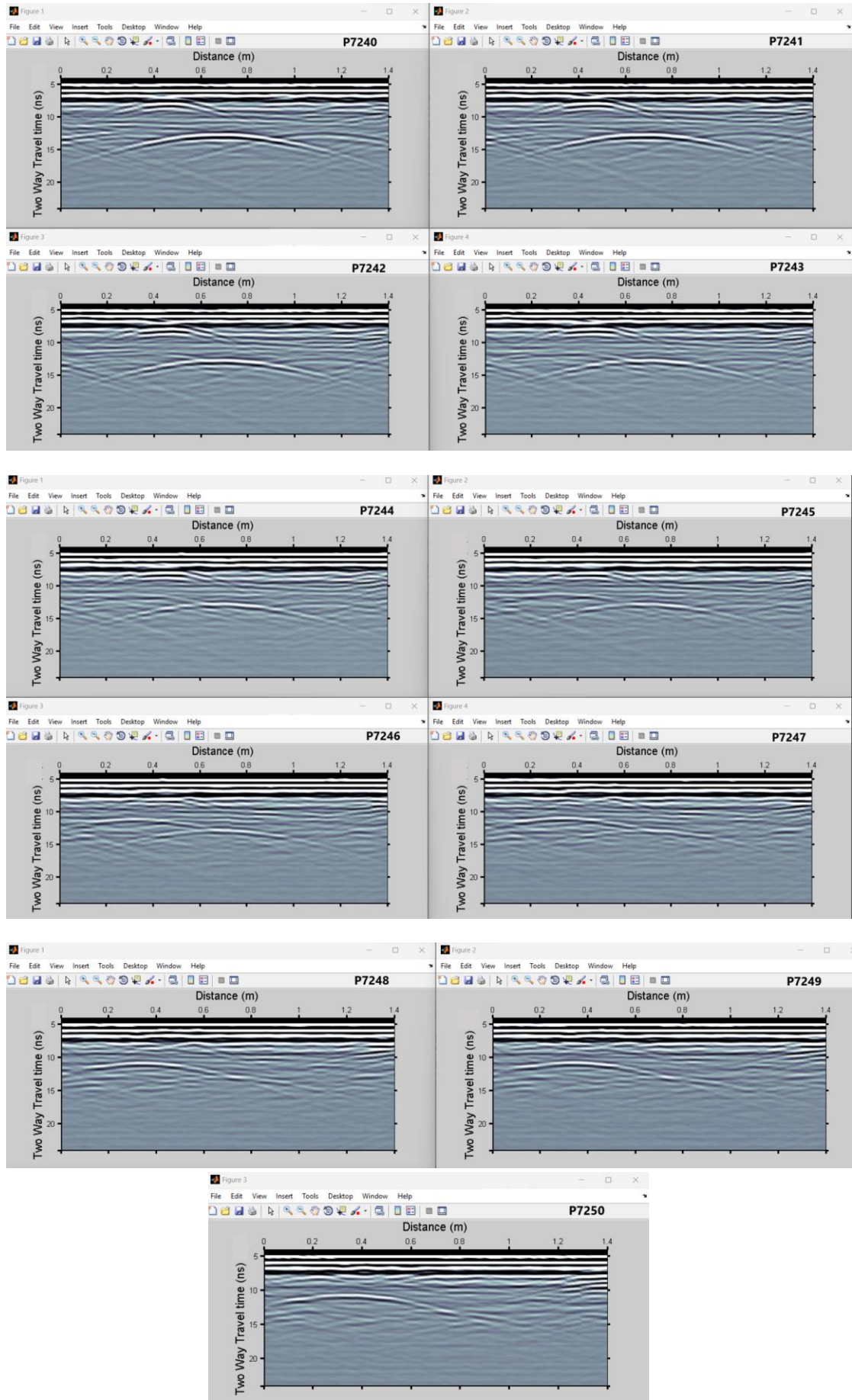




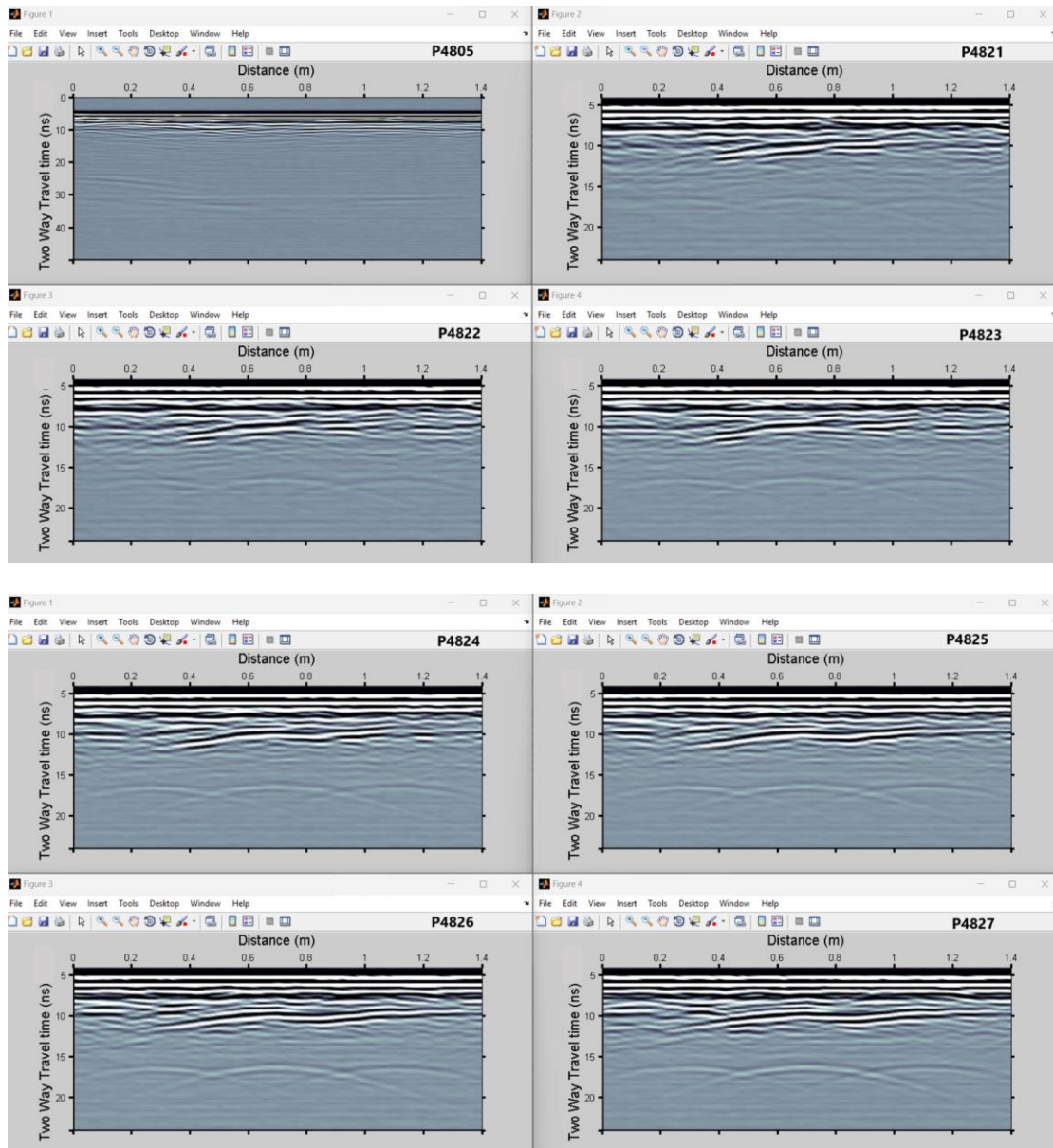
TOMEΣ P72 (05-50)

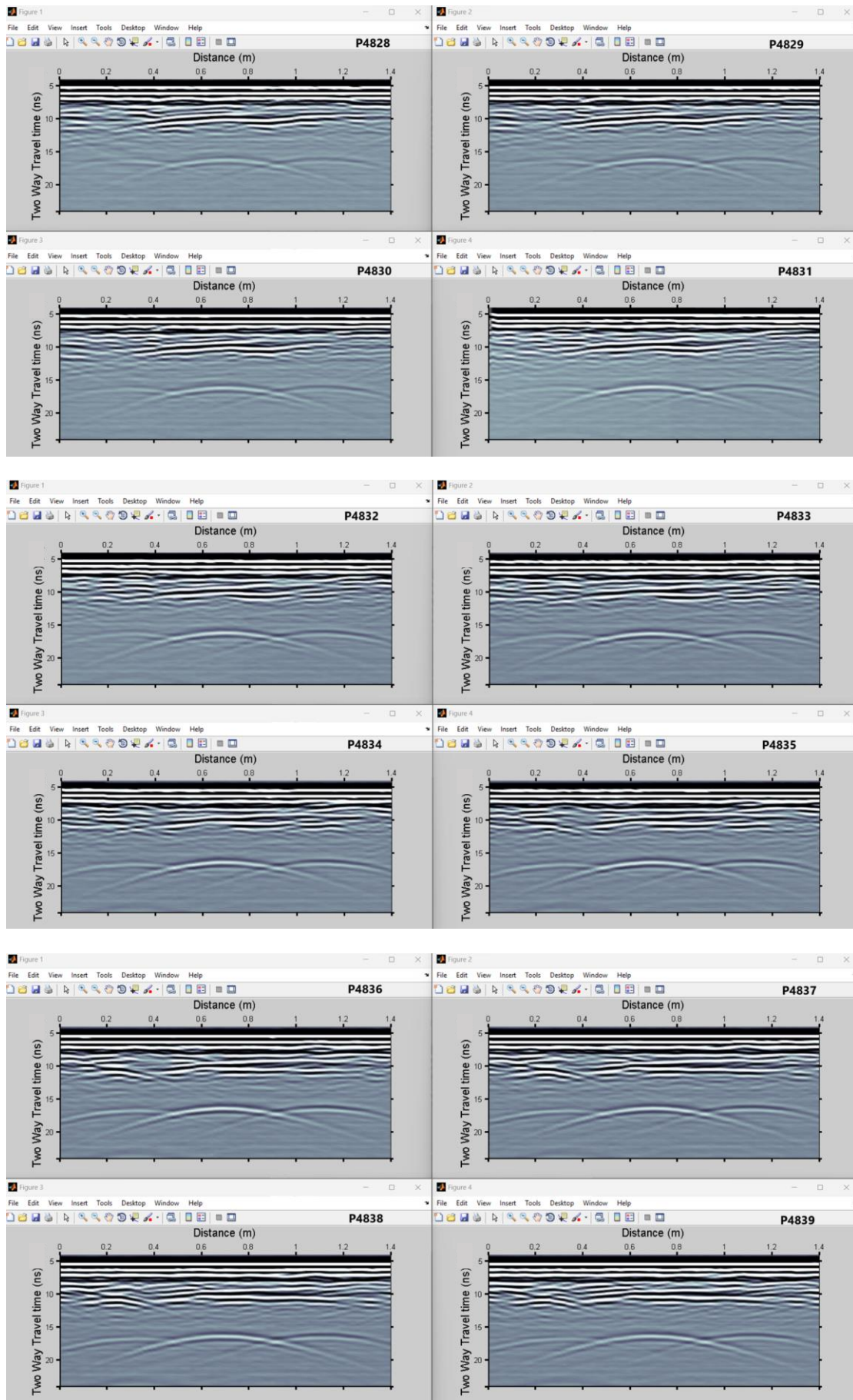


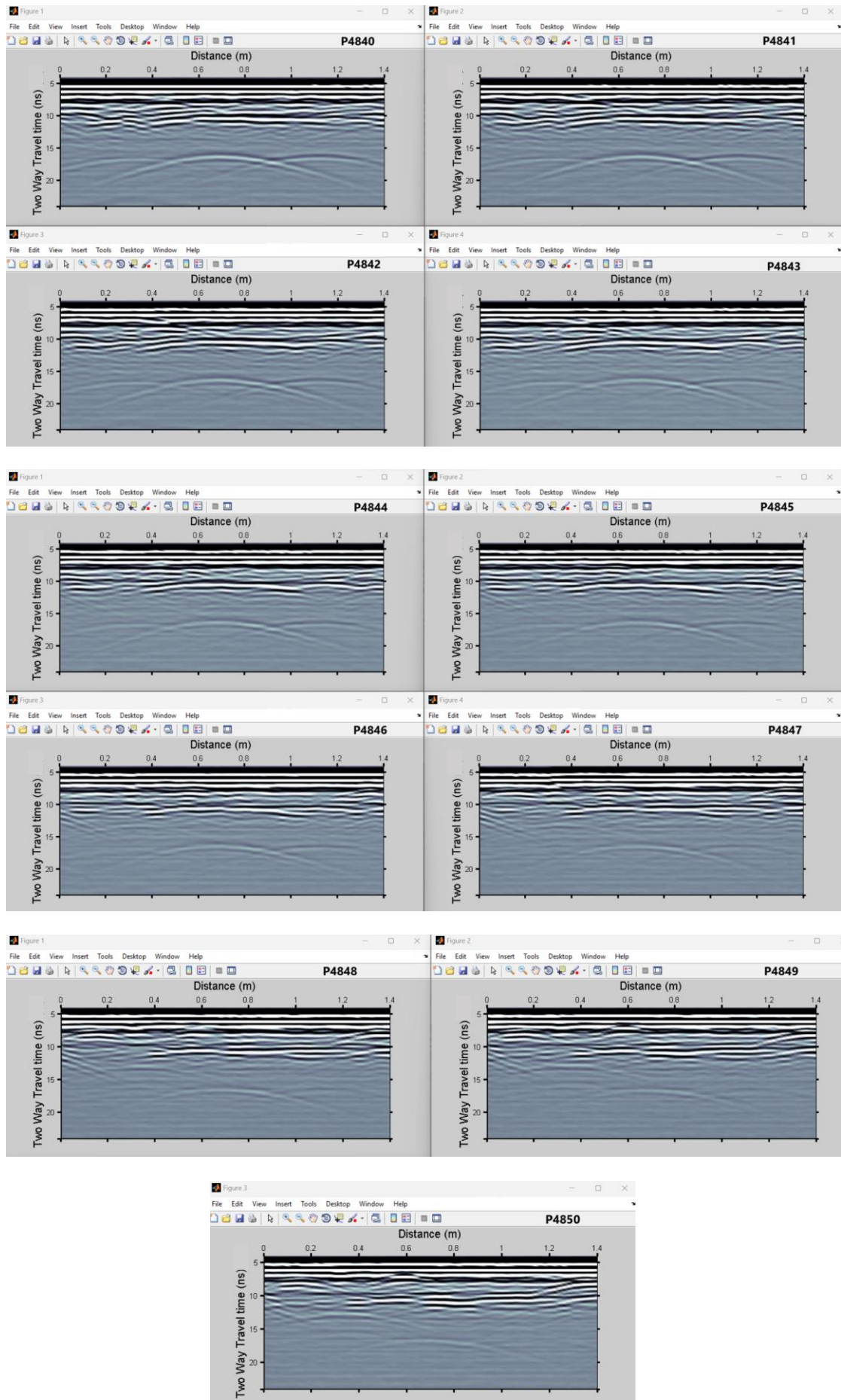




TOMEΣ P48 (05-50)







Μετρήσεις σε ξηρή άμμο						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T(ns)	Y (m)	Z (m)
PD21	0.138	0.70	8.5	8.1	0.42	0.56
	0.149	1.20	11.8	11.4	0.42	0.85
	0.144	0.28	8.3	7.9	0.42	0.57
PD22	0.137	0.70	8.5	8.1	0.44	0.55
	0.142	0.28	8.4	8.0	0.44	0.57
	0.152	1.12	13.3	12.9	0.44	0.98
PD23	0.136	0.70	8.6	8.2	0.46	0.56
	0.141	0.28	8.4	8.0	0.46	0.56
	0.148	1.10	13.3	12.9	0.46	0.95
PD24	0.135	0.70	8.5	8.1	0.48	0.55
	0.142	0.28	8.3	7.9	0.48	0.56
	0.150	1.10	13.2	12.8	0.48	0.96
PD25	0.134	0.70	8.5	8.1	0.50	0.54
	0.142	0.28	8.3	7.9	0.50	0.56
	0.093	1.30	10.2	9.8	0.50	0.46
PD26	0.133	0.70	8.5	8.1	0.52	0.54
	0.142	0.28	8.3	7.9	0.52	0.56
	0.160	1.30	10.3	9.9	0.52	0.79
PD27	0.134	0.70	8.5	8.1	0.54	0.54
	0.142	0.28	8.3	7.9	0.54	0.56
	0.146	1.32	10.2	9.8	0.54	0.72
PD28	0.134	0.70	8.4	8.0	0.56	0.54
	0.143	0.28	8.4	8.0	0.56	0.57
	0.147	1.32	10.2	9.8	0.56	0.72
PD29	0.134	0.70	8.4	8.0	0.58	0.54
	0.144	0.28	8.2	7.8	0.58	0.56
	0.129	1.12	8.3	7.9	0.580	0.51
PD30	0.134	0.70	8.4	8.0	0.60	0.54
	0.145	0.28	8.2	7.8	0.60	0.57
	0.130	1.12	8.3	7.9	0.60	0.51
PD31	0.134	0.70	8.4	8.0	0.62	0.54
	0.146	0.28	8.2	7.8	0.62	0.57
	0.127	1.12	8.7	8.3	0.62	0.53
PD32	0.134	0.70	8.4	8.0	0.64	0.54
	0.127	1.12	8.7	8.3	0.64	0.53
	0.146	0.28	8.2	7.8	0.64	0.57

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε ξηρή άμμο)

Μετρήσεις σε ξηρή άμμο						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
PD33	0.135	0.70	8.3	7.9	0.66	0.53
	0.130	1.12	8.3	7.9	0.66	0.51
	0.146	0.28	8.2	7.8	0.66	0.57
PD34	0.134	0.70	8.4	8.0	0.68	0.54
	0.131	1.12	8.4	8.0	0.68	0.52
	0.147	0.28	8.2	7.8	0.68	0.57
PD35	0.135	0.70	8.5	8.1	0.70	0.55
	0.128	1.12	8.5	8.1	0.70	0.52
	0.146	0.28	8.3	7.9	0.70	0.58
PD36	0.135	0.70	8.5	8.1	0.72	0.55
	0.130	1.12	8.4	8.0	0.72	0.52
	0.160	0.18	3.8	3.4	0.72	0.27
PD37	0.135	0.70	8.5	8.1	0.74	0.55
	0.129	1.12	8.4	8.0	0.74	0.52
	0.160	0.16	3.8	3.4	0.74	0.27
PD38	0.135	0.70	8.5	8.1	0.76	0.55
	0.130	1.12	8.4	8.0	0.76	0.52
	0.160	0.16	3.8	3.4	0.76	0.27
PD39	0.136	0.70	8.5	8.1	0.78	0.55
	0.149	1.12	11.2	10.8	0.78	0.80
	0.160	0.16	3.8	3.4	0.78	0.27
PD40	0.136	0.70	8.4	8.0	0.80	0.54
	0.127	1.12	8.7	8.3	0.80	0.53
	0.116	0.12	12.9	12.5	0.80	0.73
PD41	0.136	0.70	8.4	8.0	0.82	0.54
	0.160	1.22	14.8	14.4	0.82	1.15
	0.115	0.14	11.8	11.4	0.82	0.66
PD42	0.136	0.70	8.4	8.0	0.84	0.54
	0.158	1.22	14.8	14.4	0.84	1.14
	0.110	0.14	12.9	12.5	0.84	0.69
PD43	0.136	0.70	8.4	8.0	0.86	0.54
	0.158	1.22	14.8	14.4	0.86	1.14
	0.110	0.14	12.8	12.4	0.86	0.68
PD44	0.136	0.70	8.4	8.0	0.88	0.54
	0.159	1.14	9.9	9.5	0.88	0.76
	0.115	0.12	12.8	12.4	0.88	0.71

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε ξηρή άμμο)

Μετρήσεις σε ξηρή άμμο						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
PD45	0.136	0.70	8.4	8.0	0.90	0.54
	0.155	1.14	13.3	12.9	0.90	1.00
	0.115	0.12	12.8	12.4	0.90	0.71
PD46	0.136	0.70	8.5	8.1	0.92	0.55
	0.152	1.14	13.2	12.8	0.92	0.97
	0.147	0.28	8.6	8.2	0.92	0.60
PD47	0.136	0.70	8.5	8.1	0.94	0.55
	0.151	1.14	13.2	12.8	0.94	0.97
	0.146	0.28	8.6	8.2	0.94	0.60
PD48	0.136	0.70	8.6	8.2	0.96	0.56
	0.150	1.12	9.4	9.0	0.96	0.68
	0.112	0.16	12.0	11.6	0.96	0.65
PD49	0.138	0.36	6.5	6.1	0.98	0.42
	0.150	1.10	9.0	8.6	0.98	0.65
	-	-	-	-	0.98	-
PD50	0.159	1.12	9.1	8.7	1.00	0.69
	0.135	0.36	6.6	6.2	1.00	0.42
	-	-	-	-	1.00	-

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε ξηρή άμμο)

Όπου U: ταχύτητα διάδοσης κύματος (m/ns), X: θέση σε οριζόντιο άξονα (m), T₀: διπλός κατακόρυφος χρόνος διαδρομής (ns), T: χρόνος διαδρομής (ns), Y: θέση σε κατακόρυφο άξονα (m), Z: θέση βάθους στην δεξαμενή (m).

Μετρήσεις για κορεσμένη άμμο (σε νερό βάθους 72 cm από την επιφάνεια)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P7221	0.121	0.60	13.6	13.2	0.42	0.80
	0.143	1.02	10.3	9.9	0.42	0.71
	0.158	0.14	12.5	12.1	0.42	0.96
P7222	0.123	0.60	13.6	13.2	0.44	0.81
	0.147	1.02	9.2	8.8	0.44	0.65
	0.094	0.16	10.4	10.0	0.44	0.47
P7223	0.157	1.04	9.0	8.6	0.46	0.68
	0.141	0.56	14.4	14.0	0.46	0.99
	0.160	0.12	14.5	14.1	0.46	1.13
P7224	0.144	0.78	14.3	13.9	0.48	1.00
	0.136	1.22	12.5	12.1	0.48	0.82
	0.156	0.26	16.0	15.6	0.48	1.22
P7225	0.119	0.70	9.6	9.2	0.50	0.55
	0.160	1.16	12.5	12.1	0.50	0.97
	0.114	0.18	13.7	13.3	0.50	0.76
P7226	0.119	0.70	9.6	9.2	0.52	0.55
	0.160	1.16	12.5	12.1	0.52	0.97
	0.156	0.24	16.0	15.6	0.52	1.22
P7227	0.123	0.70	9.0	8.6	0.54	0.53
	0.160	1.12	12.4	12.0	0.54	0.96
	0.156	0.28	16.0	15.6	0.54	1.22
P7228	0.123	0.70	9.0	8.6	0.56	0.53
	0.135	0.26	9.2	8.8	0.56	0.59
	0.137	1.22	12.4	12.0	0.56	0.82
P7229	0.123	0.70	8.9	8.5	0.58	0.52
	0.131	0.28	9.1	8.7	0.58	0.57
	0.106	1.16	14.3	13.9	0.58	0.74
P7230	0.124	0.70	8.9	8.5	0.60	0.53
	0.132	0.28	9.0	8.6	0.60	0.57
	0.112	1.18	14.3	13.9	0.60	0.78
P7231	0.124	0.70	8.9	8.5	0.62	0.53
	0.123	1.14	9.3	8.9	0.62	0.55
	0.134	0.28	9.0	8.6	0.62	0.58
P7232	0.124	0.70	8.9	8.5	0.64	0.53
	0.124	1.14	9.3	8.9	0.64	0.55
	0.144	0.28	15.9	15.5	0.64	1.12

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε κορεσμένη άμμο σε νερό βάθους 72 cm)

Μετρήσεις για κορεσμένη άμμο (σε νερό βάθους 72 cm από την επιφάνεια)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P7233	0.125	0.70	8.9	8.5	0.66	0.53
	0.124	1.14	9.3	8.9	0.66	0.55
	0.141	0.30	15.9	15.5	0.66	1.09
P7234	0.125	0.70	8.9	8.5	0.68	0.53
	0.123	1.14	9.2	8.8	0.68	0.54
	0.157	0.30	15.9	15.5	0.68	1.22
P7235	0.125	0.70	8.9	8.5	0.70	0.53
	0.123	1.14	9.3	8.9	0.70	0.55
	0.144	0.30	15.9	15.5	0.70	1.12
P7236	0.126	0.70	8.9	8.5	0.72	0.54
	0.124	1.14	9.3	8.9	0.72	0.55
	0.127	0.32	15.8	15.4	0.72	0.98
P7237	0.126	0.70	8.9	8.5	0.74	0.54
	0.125	1.14	9.3	8.9	0.74	0.56
	0.127	0.32	15.9	15.5	0.74	0.98
P7238	0.126	0.70	8.9	8.5	0.76	0.54
	0.125	1.14	9.3	8.9	0.76	0.56
	0.127	0.30	15.9	15.5	0.76	0.98
P7239	0.126	0.70	8.8	8.4	0.78	0.53
	0.124	1.14	9.3	8.9	0.78	0.55
	0.143	0.30	16.0	15.6	0.78	1.12
P7240	0.126	0.70	8.8	8.4	0.80	0.53
	0.125	1.14	9.3	8.9	0.80	0.56
	0.127	0.30	15.9	15.5	0.80	0.98
P7241	0.126	0.70	8.8	8.4	0.82	0.53
	0.124	1.14	9.3	8.9	0.82	0.55
	0.149	0.30	16.0	15.6	0.82	1.16
P7242	0.126	0.70	8.9	8.5	0.84	0.54
	0.159	0.30	16.1	15.7	0.84	1.25
	0.160	1.12	9.5	9.1	0.84	0.73
P7243	0.126	0.70	8.9	8.5	0.86	0.54
	0.160	1.10	13.0	12.6	0.86	1.01
	0.100	0.08	11.0	10.6	0.86	0.53
P7244	0.126	0.70	8.9	8.5	0.88	0.54
	0.160	1.10	13.0	12.6	0.88	1.01
	0.156	0.32	16.1	15.7	0.88	1.22

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε κορεσμένη άμμο σε νερό βάθους 72 cm)

Μετρήσεις για κορεσμένη άμμο (σε νερό βάθους 72 cm από την επιφάνεια)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P7245	0.126	0.70	9.0	8.6	0.90	0.54
	0.159	1.12	10.0	9.6	0.90	0.76
	0.156	0.32	16.1	15.7	0.90	1.22
P7246	0.127	0.70	9.1	8.7	0.92	0.55
	0.160	1.12	10.1	9.7	0.92	0.78
	0.156	0.32	16.1	15.7	0.92	1.22
P7247	0.126	0.36	7.6	7.2	0.94	0.45
	0.111	0.76	14.0	13.6	0.94	0.75
	0.160	1.30	10.9	10.5	0.94	0.84
P7248	0.130	0.36	7.0	6.6	0.96	0.43
	0.109	0.74	14.4	14.0	0.96	0.76
	0.155	1.16	12.9	12.5	0.96	0.97
P7249	0.130	0.36	6.9	6.5	0.98	0.42
	0.160	1.08	9.4	9.0	0.98	0.72
	-	-	-	-	0.98	-
P7250	0.158	1.06	9.3	8.9	1.00	0.70
	0.129	0.36	6.8	6.4	1.00	0.41
	-	-	-	-	1.00	-

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε κορεσμένη άμμο σε νερό βάθους 72 cm)

Όπου U: ταχύτητα διάδοσης κύματος (m/ns), X: θέση σε οριζόντιο άξονα (m), T₀: διπλός κατακόρυφος χρόνος διαδρομής (ns), T: χρόνος διαδρομής (ns), Y: θέση σε κατακόρυφο άξονα (m), Z: θέση βάθους στην δεξαμενή (m).

Με το μπλε (τομές P7249 – P7250) ξεχωρίζουμε τις τομές οι οποίες εμφανίζουν ελλiptή στοιχεία και κάποιες ιδιαιτερότητες στην γραφική αναπαράσταση

Μετρήσεις για κορεσμένη άμμο (σε νερό βάθους 48 cm από την επιφάνεια)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P4821	0.157	1.00	11.0	10.6	0.42	0.86
	0.155	0.52	10.3	9.9	0.42	0.80
	0.160	0.10	11.9	11.5	0.42	0.95
P4822	0.160	0.52	10.3	9.9	0.44	0.82
	0.153	1.00	10.9	10.5	0.44	0.83
	0.160	0.10	10.0	9.6	0.44	0.80
P4823	0.160	0.54	10.2	9.8	0.46	0.82
	0.153	1.00	10.9	10.5	0.46	0.83
	0.160	0.10	10.1	9.7	0.46	0.81
P4824	0.098	0.72	11.7	11.3	0.48	0.57
	0.098	0.30	11.8	11.4	0.48	0.58
	0.101	1.14	12.1	11.7	0.48	0.61
P4825	0.097	0.72	11.6	11.2	0.50	0.56
	0.154	1.14	10.7	10.3	0.50	0.82
	0.098	0.30	11.7	11.3	0.50	0.57
P4826	0.097	0.72	11.5	11.1	0.52	0.56
	0.147	0.24	7.9	7.5	0.52	0.58
	0.154	1.14	10.7	10.3	0.52	0.82
P4827	0.097	0.72	11.5	11.1	0.54	0.56
	0.148	0.24	7.9	7.5	0.54	0.58
	0.154	1.14	10.7	10.3	0.54	0.82
P4828	0.097	0.72	11.4	11.0	0.56	0.55
	0.101	1.14	11.8	11.4	0.56	0.60
	0.160	0.28	12.9	12.5	0.56	1.03
P4829	0.097	0.72	11.4	11.0	0.58	0.55
	0.098	1.14	11.7	11.3	0.58	0.57
	0.148	0.28	14.0	13.6	0.58	1.04
P4830	0.139	0.62	10.0	9.6	0.60	0.70
	0.095	1.12	11.7	11.3	0.60	0.56
	0.159	0.22	14.0	13.6	0.60	1.11
P4831	0.092	0.72	12.3	11.9	0.62	0.57
	0.101	1.14	12.1	11.7	0.62	0.61
	0.098	0.28	14.3	13.9	0.62	0.70
P4832	0.097	0.72	11.4	11.0	0.64	0.55
	0.100	1.14	11.8	11.4	0.64	0.59
	0.097	0.30	11.6	11.2	0.64	0.56

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε κορεσμένη άμμο σε νερό βάθους 48 cm)

Μετρήσεις για κορεσμένη άμμο (σε νερό βάθους 48 cm από την επιφάνεια)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P4833	0.100	0.72	10.9	10.5	0.66	0.55
	0.103	1.14	11.3	10.9	0.66	0.58
	0.158	0.30	8.8	8.4	0.66	0.70
P4834	0.101	0.72	11.0	10.6	0.68	0.56
	0.102	1.14	11.4	11.0	0.68	0.58
	0.157	0.30	8.9	8.5	0.68	0.70
P4835	0.100	0.72	11.0	10.6	0.70	0.55
	0.101	1.14	11.3	10.9	0.70	0.57
	0.157	0.30	8.8	8.4	0.70	0.69
P4836	0.101	0.72	11.0	10.6	0.72	0.56
	0.157	0.30	8.8	8.4	0.72	0.69
	0.100	1.14	11.3	10.9	0.72	0.57
P4837	0.101	0.72	11.0	10.6	0.74	0.56
	0.160	0.28	8.7	8.3	0.74	0.70
	0.099	1.14	11.3	10.9	0.74	0.56
P4838	0.102	0.72	11.0	10.6	0.76	0.56
	0.101	1.14	11.3	10.9	0.76	0.57
	0.160	0.28	8.7	8.3	0.76	0.70
P4839	0.101	0.72	11.0	10.6	0.78	0.54
	0.160	0.28	8.7	8.3	0.78	0.66
	0.100	1.14	11.3	10.9	0.78	0.55
P4840	0.097	0.72	11.6	11.2	0.80	0.54
	0.160	0.28	8.7	8.3	0.80	0.66
	0.101	1.14	11.4	11.0	0.80	0.56
P4841	0.097	0.72	11.6	11.2	0.82	0.54
	0.100	1.14	11.4	11.0	0.82	0.55
	0.160	0.28	8.7	8.3	0.82	0.66
P4842	0.098	0.72	11.6	11.2	0.84	0.55
	0.103	1.14	11.4	11.0	0.84	0.57
	0.159	0.28	8.7	8.3	0.84	0.66
P4843	0.097	0.70	11.6	11.2	0.86	0.54
	0.096	1.12	11.4	11.0	0.86	0.53
	0.160	0.26	8.7	8.3	0.86	0.66
P4844	0.096	0.70	11.6	11.2	0.88	0.54
	0.097	1.14	11.9	11.5	0.88	0.56
	0.159	0.28	14.0	13.6	0.88	1.08

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε κορεσμένη άμμο σε νερό βάθους 48 cm)

Μετρήσεις για κορεσμένη άμμο (σε νερό βάθους 48 cm από την επιφάνεια)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P4845	0.097	0.70	11.6	11.2	0.90	0.54
	0.099	1.14	11.9	11.5	0.90	0.57
	0.160	0.28	14.0	13.6	0.90	1.09
P4846	0.098	0.70	11.7	11.3	0.92	0.55
	0.098	1.14	12.1	11.7	0.92	0.57
	0.157	0.28	14.0	13.6	0.92	1.07
P4847	0.097	0.70	11.7	11.3	0.94	0.55
	0.097	1.12	11.5	11.1	0.94	0.54
	0.160	0.28	14.1	13.7	0.94	1.10
P4848	0.098	0.70	11.8	11.4	0.96	0.56
	0.157	1.12	15.0	14.6	0.96	1.15
	0.159	0.28	14.0	13.6	0.96	1.08
P4849	0.098	0.70	11.8	11.4	0.98	0.56
	0.160	1.12	14.9	14.5	0.98	1.16
	0.095	0.12	11.7	11.3	0.98	0.54
P4850	0.098	0.70	11.9	11.5	1.00	0.56
	0.160	1.12	14.9	14.5	1.00	1.16
	0.137	0.26	7.8	7.4	1.00	0.51

(Αποτελέσματα για τους σωλήνες σε κορεσμένη άμμο σε νερό βάθους 48 cm)

Όπου U: ταχύτητα διάδοσης κύματος (m/ns), X: θέση σε οριζόντιο άξονα (m), T₀: διπλός κατακόρυφος χρόνος διαδρομής (ns), T: χρόνος διαδρομής (ns), Y: θέση σε κατακόρυφο άξονα (m), Z: θέση βάθους στην δεξαμενή (m).

Μετρήσεις σε ξηρή άμμο (PD)						
APC (πλαστικός σωλήνας με αέρα)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
PD21	0.144	0.28	8.3	7.9	0.42	0.57
PD22	0.142	0.28	8.4	8.0	0.44	0.57
PD23	0.141	0.28	8.4	8.0	0.46	0.56
PD24	0.142	0.28	8.3	7.9	0.48	0.56
PD25	0.142	0.28	8.3	7.9	0.50	0.56
PD26	0.142	0.28	8.3	7.9	0.52	0.56
PD27	0.142	0.28	8.3	7.9	0.54	0.56
PD28	0.143	0.28	8.4	8.0	0.56	0.57
PD29	0.144	0.28	8.2	7.8	0.58	0.56
PD30	0.145	0.28	8.2	7.8	0.60	0.57
PD31	0.146	0.28	8.2	7.8	0.62	0.57
PD32	0.146	0.28	8.2	7.8	0.64	0.57
PD33	0.146	0.28	8.2	7.8	0.66	0.57
PD34	0.147	0.28	8.2	7.8	0.68	0.57
PD35	0.146	0.28	8.3	7.9	0.70	0.58
PD36	0.160	0.18	3.8	3.4	0.72	0.27
PD37	0.160	0.16	3.8	3.4	0.74	0.27
PD38	0.160	0.16	3.8	3.4	0.76	0.27
PD39	0.160	0.16	3.8	3.4	0.78	0.27
PD40	0.116	0.12	12.9	12.5	0.80	0.73
PD41	0.115	0.14	11.8	11.4	0.82	0.66
PD42	0.110	0.14	12.9	12.5	0.84	0.69
PD43	0.110	0.14	12.8	12.4	0.86	0.68
PD44	0.115	0.12	12.8	12.4	0.88	0.71
PD45	0.115	0.12	12.8	12.4	0.90	0.71
PD46	0.147	0.28	8.6	8.2	0.92	0.60
PD47	0.146	0.28	8.6	8.2	0.94	0.60
PD48	0.112	0.16	12.0	11.6	0.96	0.65
PD49	0.138	0.36	6.5	6.1	0.98	0.42
PD50	0.135	0.36	6.6	6.2	1.00	0.42

Μετρήσεις σε ξηρή άμμο (PD)						
STEEL (μεταλλικός σωλήνας)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T(ns)	Y (m)	Z (m)
PD21	0.138	0.70	8.5	8.1	0.42	0.56
PD22	0.137	0.70	8.5	8.1	0.44	0.55
PD23	0.136	0.70	8.6	8.2	0.46	0.56
PD24	0.135	0.70	8.5	8.1	0.48	0.55
PD25	0.134	0.70	8.5	8.1	0.50	0.54
PD26	0.133	0.70	8.5	8.1	0.52	0.54
PD27	0.134	0.70	8.5	8.1	0.54	0.54
PD28	0.134	0.70	8.4	8.0	0.56	0.54
PD29	0.134	0.70	8.4	8.0	0.58	0.54
PD30	0.134	0.70	8.4	8.0	0.60	0.54
PD31	0.134	0.70	8.4	8.0	0.62	0.54
PD32	0.134	0.70	8.4	8.0	0.64	0.54
PD33	0.135	0.70	8.3	7.9	0.66	0.53
PD34	0.134	0.70	8.4	8.0	0.68	0.54
PD35	0.135	0.70	8.5	8.1	0.70	0.55
PD36	0.135	0.70	8.5	8.1	0.72	0.55
PD37	0.135	0.70	8.5	8.1	0.74	0.55
PD38	0.135	0.70	8.5	8.1	0.76	0.55
PD39	0.136	0.70	8.5	8.1	0.78	0.55
PD40	0.136	0.70	8.4	8.0	0.80	0.54
PD41	0.136	0.70	8.4	8.0	0.82	0.54
PD42	0.136	0.70	8.4	8.0	0.84	0.54
PD43	0.136	0.70	8.4	8.0	0.86	0.54
PD44	0.136	0.70	8.4	8.0	0.88	0.54
PD45	0.136	0.70	8.4	8.0	0.90	0.54
PD46	0.136	0.70	8.5	8.1	0.92	0.55
PD47	0.136	0.70	8.5	8.1	0.94	0.55
PD48	0.136	0.70	8.6	8.2	0.96	0.56
PD49	-	-	-	-	-	-
PD50	-	-	-	-	-	-

Μετρήσεις σε ξηρή άμμο (PD)						
EPVC (πλαστικός σωλήνας με νερό)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
PD21	0.157	1.00	11.0	10.6	0.42	0.86
PD22	0.153	1.00	10.9	10.5	0.44	0.83
PD23	0.153	1.00	10.9	10.5	0.46	0.83
PD24	0.101	1.14	12.1	11.7	0.48	0.61
PD25	0.154	1.14	10.7	10.3	0.50	0.82
PD26	0.154	1.14	10.7	10.3	0.52	0.82
PD27	0.154	1.14	10.7	10.3	0.54	0.82
PD28	0.101	1.14	11.8	11.4	0.56	0.60
PD29	0.098	1.14	11.7	11.3	0.58	0.57
PD30	0.095	1.12	11.7	11.3	0.60	0.56
PD31	0.101	1.14	12.1	11.7	0.62	0.61
PD32	0.100	1.14	11.8	11.4	0.64	0.59
PD33	0.103	1.14	11.3	10.9	0.66	0.58
PD34	0.102	1.14	11.4	11.0	0.68	0.58
PD35	0.101	1.14	11.3	10.9	0.70	0.57
PD36	0.100	1.14	11.3	10.9	0.72	0.57
PD37	0.099	1.14	11.3	10.9	0.74	0.56
PD38	0.101	1.14	11.3	10.9	0.76	0.57
PD39	0.100	1.14	11.3	10.9	0.78	0.55
PD40	0.101	1.14	11.4	11.0	0.80	0.56
PD41	0.100	1.14	11.4	11.0	0.82	0.55
PD42	0.103	1.14	11.4	11.0	0.84	0.57
PD43	0.096	1.12	11.4	11.0	0.86	0.53
PD44	0.097	1.14	11.9	11.5	0.88	0.56
PD45	0.099	1.14	11.9	11.5	0.90	0.57
PD46	0.098	1.14	12.1	11.7	0.92	0.57
PD47	0.097	1.12	11.5	11.1	0.94	0.54
PD48	0.157	1.12	15.0	14.6	0.96	1.15
PD49	0.160	1.12	14.9	14.5	0.98	1.16
PD50	0.160	1.12	14.9	14.5	1.00	1.16

Μετρήσεις σε κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 72cm (P72)						
APC (πλαστικός σωλήνας με αέρα)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P7221	0.158	0.14	12.5	12.1	0.42	0.96
P7222	0.094	0.16	10.4	10.0	0.44	0.47
P7223	0.160	0.12	14.5	14.1	0.46	1.13
P7224	0.156	0.26	16.0	15.6	0.48	1.22
P7225	0.114	0.18	13.7	13.3	0.50	0.76
P7226	0.156	0.24	16.0	15.6	0.52	1.22
P7227	0.156	0.28	16.0	15.6	0.54	1.22
P7228	0.135	0.26	9.2	8.8	0.56	0.59
P7229	0.131	0.28	9.1	8.7	0.58	0.57
P7230	0.132	0.28	9.0	8.6	0.60	0.57
P7231	0.134	0.28	9.0	8.6	0.62	0.58
P7232	0.144	0.28	15.9	15.5	0.64	1.12
P7233	0.141	0.30	15.9	15.5	0.66	1.09
P7234	0.157	0.30	15.9	15.5	0.68	1.22
P7235	0.144	0.30	15.9	15.5	0.70	1.12
P7236	0.127	0.32	15.8	15.4	0.72	0.98
P7237	0.127	0.32	15.9	15.5	0.74	0.98
P7238	0.127	0.30	15.9	15.5	0.76	0.98
P7239	0.143	0.30	16.0	15.6	0.78	1.12
P7240	0.127	0.30	15.9	15.5	0.80	0.98
P7241	0.149	0.30	16.0	15.6	0.82	1.16
P7242	0.159	0.30	16.1	15.7	0.84	1.25
P7243	0.100	0.08	11.0	10.6	0.86	0.53
P7244	0.156	0.32	16.1	15.7	0.88	1.22
P7245	0.156	0.32	16.1	15.7	0.90	1.22
P7246	0.156	0.32	16.1	15.7	0.92	1.22
P7247	0.126	0.36	7.6	7.2	0.94	0.45
P7248	0.130	0.36	7.0	6.6	0.96	0.43
P7249	0.130	0.36	6.9	6.5	0.98	0.42
P7250	0.129	0.36	6.8	6.4	1.00	0.41

Μετρήσεις σε κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 72cm (P72)						
STEEL (μεταλλικός σωλήνας)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P7221	0.121	0.60	13.6	13.2	0.42	0.80
P7222	0.123	0.60	13.6	13.2	0.44	0.81
P7223	0.141	0.56	14.4	14.0	0.46	0.99
P7224	0.144	0.78	14.3	13.9	0.48	1.00
P7225	0.119	0.70	9.6	9.2	0.50	0.55
P7226	0.119	0.70	9.6	9.2	0.52	0.55
P7227	0.123	0.70	9.0	8.6	0.54	0.53
P7228	0.123	0.70	9.0	8.6	0.56	0.53
P7229	0.123	0.70	8.9	8.5	0.58	0.52
P7230	0.124	0.70	8.9	8.5	0.60	0.53
P7231	0.124	0.70	8.9	8.5	0.62	0.53
P7232	0.124	0.70	8.9	8.5	0.64	0.53
P7233	0.125	0.70	8.9	8.5	0.66	0.53
P7234	0.125	0.70	8.9	8.5	0.68	0.53
P7235	0.125	0.70	8.9	8.5	0.70	0.53
P7236	0.126	0.70	8.9	8.5	0.72	0.54
P7237	0.126	0.70	8.9	8.5	0.74	0.54
P7238	0.126	0.70	8.9	8.5	0.76	0.54
P7239	0.126	0.70	8.8	8.4	0.78	0.53
P7240	0.126	0.70	8.8	8.4	0.80	0.53
P7241	0.126	0.70	8.8	8.4	0.82	0.53
P7242	0.126	0.70	8.9	8.5	0.84	0.54
P7243	0.126	0.70	8.9	8.5	0.86	0.54
P7244	0.126	0.70	8.9	8.5	0.88	0.54
P7245	0.126	0.70	9.0	8.6	0.90	0.54
P7246	0.127	0.70	9.1	8.7	0.92	0.55
P7247	0.111	0.76	14.0	13.6	0.94	0.75
P7248	0.109	0.74	14.4	14.0	0.96	0.76
P7249	-	-	-	-	-	-
P7250	-	-	-	-	-	-

Μετρήσεις σε κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 72cm (P72)						
EPVC (πλαστικός σωλήνας με νερό)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P7221	0.143	1.02	10.3	9.9	0.42	0.71
P7222	0.147	1.02	9.2	8.8	0.44	0.65
P7223	0.157	1.04	9.0	8.6	0.46	0.68
P7224	0.136	1.22	12.5	12.1	0.48	0.82
P7225	0.160	1.16	12.5	12.1	0.50	0.97
P7226	0.160	1.16	12.5	12.1	0.52	0.97
P7227	0.160	1.12	12.4	12.0	0.54	0.96
P7228	0.137	1.22	12.4	12.0	0.56	0.82
P7229	0.106	1.16	14.3	13.9	0.58	0.74
P7230	0.112	1.18	14.3	13.9	0.60	0.78
P7231	0.123	1.14	9.3	8.9	0.62	0.55
P7232	0.124	1.14	9.3	8.9	0.64	0.55
P7233	0.124	1.14	9.3	8.9	0.66	0.55
P7234	0.123	1.14	9.2	8.8	0.68	0.54
P7235	0.123	1.14	9.3	8.9	0.70	0.55
P7236	0.124	1.14	9.3	8.9	0.72	0.55
P7237	0.125	1.14	9.3	8.9	0.74	0.56
P7238	0.125	1.14	9.3	8.9	0.76	0.56
P7239	0.124	1.14	9.3	8.9	0.78	0.55
P7240	0.125	1.14	9.3	8.9	0.80	0.56
P7241	0.124	1.14	9.3	8.9	0.82	0.55
P7242	0.160	1.12	9.5	9.1	0.84	0.73
P7243	0.160	1.10	13.0	12.6	0.86	1.01
P7244	0.160	1.10	13.0	12.6	0.88	1.01
P7245	0.159	1.12	10.0	9.6	0.90	0.76
P7246	0.160	1.12	10.1	9.7	0.92	0.78
P7247	0.160	1.30	10.9	10.5	0.94	0.84
P7248	0.155	1.16	12.9	12.5	0.96	0.97
P7249	0.160	1.08	9.4	9.0	0.98	0.72
P7250	0.158	1.06	9.3	8.9	1.00	0.70

Μετρήσεις σε κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 48cm (P48)						
APC (πλαστικός σωλήνας με αέρα)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P4821	0.160	0.10	11.9	11.5	0.42	0.95
P4822	0.160	0.10	10.0	9.6	0.44	0.80
P4823	0.160	0.10	10.1	9.7	0.46	0.81
P4824	0.098	0.30	11.8	11.4	0.48	0.58
P4825	0.098	0.30	11.7	11.3	0.50	0.57
P4826	0.147	0.24	7.9	7.5	0.52	0.58
P4827	0.148	0.24	7.9	7.5	0.54	0.58
P4828	0.160	0.28	12.9	12.5	0.56	1.03
P4829	0.148	0.28	14.0	13.6	0.58	1.04
P4830	0.159	0.22	14.0	13.6	0.60	1.11
P4831	0.098	0.28	14.3	13.9	0.62	0.70
P4832	0.097	0.30	11.6	11.2	0.64	0.56
P4833	0.158	0.30	8.8	8.4	0.66	0.70
P4834	0.157	0.30	8.9	8.5	0.68	0.70
P4835	0.157	0.30	8.8	8.4	0.70	0.69
P4836	0.157	0.30	8.8	8.4	0.72	0.69
P4837	0.160	0.28	8.7	8.3	0.74	0.70
P4838	0.160	0.28	8.7	8.3	0.76	0.70
P4839	0.160	0.28	8.7	8.3	0.78	0.66
P4840	0.160	0.28	8.7	8.3	0.80	0.66
P4841	0.160	0.28	8.7	8.3	0.82	0.66
P4842	0.159	0.28	8.7	8.3	0.84	0.66
P4843	0.160	0.26	8.7	8.3	0.86	0.66
P4844	0.159	0.28	14.0	13.6	0.88	1.08
P4845	0.160	0.28	14.0	13.6	0.90	1.09
P4846	0.157	0.28	14.0	13.6	0.92	1.07
P4847	0.160	0.28	14.1	13.7	0.94	1.10
P4848	0.159	0.28	14.0	13.6	0.96	1.08
P4849	0.095	0.12	11.7	11.3	0.98	0.54
P4850	0.137	0.26	7.8	7.4	1.00	0.51

Μετρήσεις σε κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 48cm (P48)						
STEEL (μεταλλικός σωλήνας)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P4821	0.155	0.52	10.3	9.9	0.42	0.80
P4822	0.160	0.52	10.3	9.9	0.44	0.82
P4823	0.160	0.54	10.2	9.8	0.46	0.82
P4824	0.098	0.72	11.7	11.3	0.48	0.57
P4825	0.097	0.72	11.6	11.2	0.50	0.56
P4826	0.097	0.72	11.5	11.1	0.52	0.56
P4827	0.097	0.72	11.5	11.1	0.54	0.56
P4828	0.097	0.72	11.4	11.0	0.56	0.55
P4829	0.097	0.72	11.4	11.0	0.58	0.55
P4830	0.139	0.62	10.0	9.6	0.60	0.70
P4831	0.092	0.72	12.3	11.9	0.62	0.57
P4832	0.097	0.72	11.4	11.0	0.64	0.55
P4833	0.100	0.72	10.9	10.5	0.66	0.55
P4834	0.101	0.72	11.0	10.6	0.68	0.56
P4835	0.100	0.72	11.0	10.6	0.70	0.55
P4836	0.101	0.72	11.0	10.6	0.72	0.56
P4837	0.101	0.72	11.0	10.6	0.74	0.56
P4838	0.102	0.72	11.0	10.6	0.76	0.56
P4839	0.101	0.72	11.0	10.6	0.78	0.54
P4840	0.097	0.72	11.6	11.2	0.80	0.54
P4841	0.097	0.72	11.6	11.2	0.82	0.54
P4842	0.098	0.72	11.6	11.2	0.84	0.55
P4843	0.097	0.70	11.6	11.2	0.86	0.54
P4844	0.096	0.70	11.6	11.2	0.88	0.54
P4845	0.097	0.70	11.6	11.2	0.90	0.54
P4846	0.098	0.70	11.7	11.3	0.92	0.55
P4847	0.097	0.70	11.7	11.3	0.94	0.55
P4848	0.098	0.70	11.8	11.4	0.96	0.56
P4849	0.098	0.70	11.8	11.4	0.98	0.56
P4850	0.098	0.70	11.9	11.5	1.00	0.56

Μετρήσεις σε κορεσμένη άμμο με νερό έως βάθος 48cm (P48)						
EPVC (πλαστικός σωλήνας με νερό)						
	U (m/ns)	X (m)	T ₀ (ns)	T (ns)	Y (m)	Z (m)
P4821	0.157	1.00	11.0	10.6	0.42	0.86
P4822	0.153	1.00	10.9	10.5	0.44	0.83
P4823	0.153	1.00	10.9	10.5	0.46	0.83
P4824	0.101	1.14	12.1	11.7	0.48	0.61
P4825	0.154	1.14	10.7	10.3	0.50	0.82
P4826	0.154	1.14	10.7	10.3	0.52	0.82
P4827	0.154	1.14	10.7	10.3	0.54	0.82
P4828	0.101	1.14	11.8	11.4	0.56	0.60
P4829	0.098	1.14	11.7	11.3	0.58	0.57
P4830	0.095	1.12	11.7	11.3	0.60	0.56
P4831	0.101	1.14	12.1	11.7	0.62	0.61
P4832	0.100	1.14	11.8	11.4	0.64	0.59
P4833	0.103	1.14	11.3	10.9	0.66	0.58
P4834	0.102	1.14	11.4	11.0	0.68	0.58
P4835	0.101	1.14	11.3	10.9	0.70	0.57
P4836	0.100	1.14	11.3	10.9	0.72	0.57
P4837	0.099	1.14	11.3	10.9	0.74	0.56
P4838	0.101	1.14	11.3	10.9	0.76	0.57
P4839	0.100	1.14	11.3	10.9	0.78	0.55
P4840	0.101	1.14	11.4	11.0	0.80	0.56
P4841	0.100	1.14	11.4	11.0	0.82	0.55
P4842	0.103	1.14	11.4	11.0	0.84	0.57
P4843	0.096	1.12	11.4	11.0	0.86	0.53
P4844	0.097	1.14	11.9	11.5	0.88	0.56
P4845	0.099	1.14	11.9	11.5	0.90	0.57
P4846	0.098	1.14	12.1	11.7	0.92	0.57
P4847	0.097	1.12	11.5	11.1	0.94	0.54
P4848	0.157	1.12	15.0	14.6	0.96	1.15
P4849	0.160	1.12	14.9	14.5	0.98	1.16
P4850	0.160	1.12	14.9	14.5	1.00	1.16