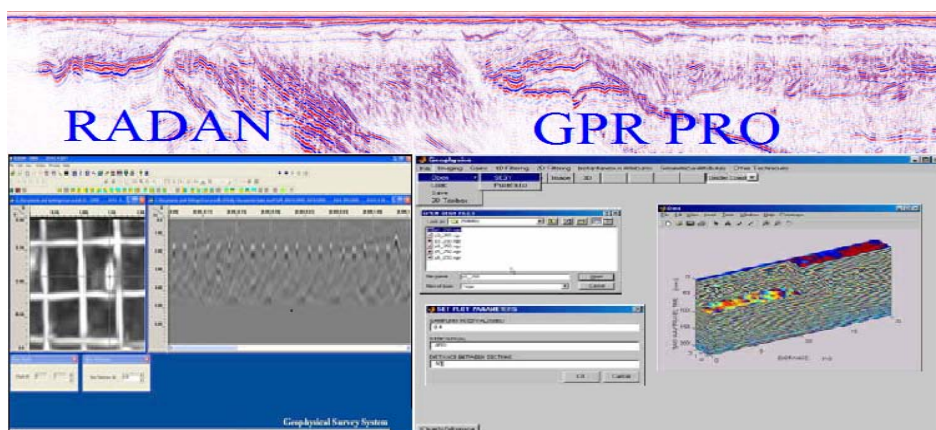


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΘΑΜΜΕΝΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ



ΧΑΤΖΗΓΕΩΡΓΙΟΥ ΜΙΧΑΗΛ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (επιβλέπων), ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΡΗΣΤΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΠΑΝΟΥΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, Δρ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ με τα λογισμικά πακέτα GPR-PRO και RADAN.

Τα δεδομένα που υπέστησαν επεξεργασία προέρχονται από τέσσερεις διαφορετικές περιοχές μελέτης, προκειμένου ο χρήστης να αποκομίσει την καλύτερη δυνατή εικόνα για τα δύο αυτά προγράμματα. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές μελέτης είχαν στόχους τοιχοδομές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος στην πλατεία Αγίου Μάρκου της Παλιάς πόλης των Χανίων Κρήτης, μεταλλικά και πλαστικά αντικείμενα τοποθετημένα εντός κατάλληλα διαμορφωμένου πλαστικού δοχείου πληρωμένο με άμμο, ο πυθμένας της λίμνης Rockwell στο Οχάιο και τέλος θαμμένη αποθηκευτική δεξαμενή καυσίμων.

Η αποσυνέλιξη ανέδειξε ανακλαστήρες με λεπτομέρεια στον πυθμένα της λίμνης Rockwell και τόνισε καλύτερα τα ανακλώμενα κύματα από τις θαμμένες τοιχοδομές στην περιοχή της Μεραρχίας στην παλιά πόλη των Χανίων. Κύριως όμως, βελτίωσε δραστικά την απεικόνιση της μεταλλικής δεξαμενής. Η χωροθέτηση βελτίωσε την απεικόνιση των τριών θαμμένων σωλήνων και του πυθμένα του πλαστικού δοχείου αλλά και του πυθμένα της λίμνης Rockwell.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ομαλή διεξαγωγή και ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Βαφείδη Αντώνιο για την ανάθεση του θέματος και την βοήθεια του για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δρ. κύριο Σπανουδάκη Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθεια του, καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων, καθώς και στο στάδιο της επεξεργασίας τους.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Χρηστίδη Γεώργιο για την συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή.

Τις πρυτανικές αρχές για τη συνεργασία τους, τον προϊστάμενο της 28^{ης} Εφορείας Βυζαντινών αρχαιοτήτων, αρχαιολόγο Α', κύριο Ανδριανάκη Μιχαήλ για την χορήγηση άδειας διεξαγωγής της γεωφυσικής έρευνας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Αλευρά Νικόλαο, Οικονόμου Νικόλαο, Hamdan Hamdan και Ανδρονικίδη Νικόλαο, για την βοήθεια τους στη διεξαγωγή των μετρήσεων και την επεξεργασία τους, καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά την συμφοιτήτριά μου Σάκουλα Ευαγγελία για την συνεργασία μας καθ' όλη την περίοδο διεξαγωγής των μετρήσεων.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν δίπλα μου τους φίλους μου Αθηναίου Ειρήνη, Ανθοπούλου Όλγα, Αποστολάτο Νικόλαο, Γαρίδη Κωσταντίνο, Κωσταντόπουλο Φειδία, Ματιάτο Γιάννη, Πατσόπουλο Νικόλαο, Σιγάλα Γεώργιο, Στεφανόπουλο Γεώργιο, Τάνο Στέργιο και την οικογένεια Σκευοφύλακα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου στην οικογένεια μου για την στήριξή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	IV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	1
1.1 Γεωφυσική Έρευνα και Γεωφυσικές Μέθοδοι - Γενικά.....	1
1.2 Ιστορική Εξέλιξη του Γεωραντάρ	2
1.3 Γενικές Εφαρμογές	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	6
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	6
2.1 Εισαγωγή	6
2.2 Διηλεκτρική σταθερά	7
2.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ	7
2.4 Διατάξεις πομπού δέκτη	9
2.5 Σύστημα TerraSIRch SIR System 3000	10
2.6 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	11
2.7 Μέθοδος της διασκόπησης – Μέθοδος της ανάκλασης	13
2.8 Ηλεκτρομαγνητική εξασθένιση.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	16
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	16
3.1 Εισαγωγή	16
3.2 Λογισμικό πακέτο GPR PRO	17
3.3 Λογισμικό πακέτο RADAN	20
3.4 Κατηγορίες διορθωτικών φίλτρων και επεξεργασία δεδομένων.....	23
3.4.1 Φίλτρο διόρθωσης De-wow.....	23
3.4.2 Εκθετική ενίσχυση δεδομένων	25
3.4.3 Χωροθέτηση	25
3.4.4 Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου	27
3.4.5 Αποσυνέλιξη δεδομένων γεωραντάρ.....	28
3.4.6 Συνοπτική παρουσίαση των φίλτρων	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	32
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	32
4.1 Εισαγωγή	32

4.2 Επεξεργασία των δεδομένων	33
4.3 Απεικόνιση των δεδομένων	34
4.4 Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος.....	35
4.5 Θαμμένες Τοιχοδομές στην περιοχή της Μεραρχίας	36
4.5.1 Συλλογή των δεδομένων.....	40
4.5.2 Επεξεργασία των δεδομένων των θαμμένων τοιχοδομών.....	42
4.6 Θαμμένοι σωλήνες εντός κυλινδρικού πλαστικού δοχείου.....	47
4.6.1 Επεξεργασία των δεδομένων των θαμμένων σωλήνων	50
4.7 Δεξαμενή καυσίμων	55
4.7.1 Επεξεργασία των δεδομένων της δεξαμενής καυσίμων.....	56
4.8 Λίμνη Rockwell στο Οχάιο	62
4.8.1 Επεξεργασία των δεδομένων της λίμνης Rockwell.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	68
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ****1.1 Γεωφυσική Έρευνα και Γεωφυσικές Μέθοδοι – Γενικά**

Η γεωφυσική έρευνα έχει σα στόχο τον εντοπισμό και την μελέτη των ιδιοτήτων των υπόγειων στρωμάτων, ή/και τον εντοπισμό και τη μελέτη ανωμαλιών στο υπέδαφος, είτε αυτές προέρχονται από θαμμένα αντικείμενα, είτε αποτελούν φυσικές ανωμαλίες λόγω π.χ. ρηγμάτων, υπόγειου νερού κ.τ.λ. Ανάλογα με τον τελικό στόχο της έρευνας επιλέγονται: οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί, ο τρόπος εκτέλεσης της γεωφυσικής έρευνας, με στόχο την ακριβή, γρηγορότερη και με το χαμηλότερο δυνατό κόστος εξαγωγή των αποτελεσμάτων-συμπερασμάτων.

Στον κλάδο της Γεωφυσικής, έχοντας υπόψη τον διαθέσιμο εξοπλισμό, οι μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοσθούν είναι οι εξής:

- Η μέθοδος Γεωραντάρ
- Η μέθοδος Σεισμικής Διάθλασης
- Η μέθοδος Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας
- Η Βαρυτομέτρική Μέθοδος
- Η Μαγνητομετρική Μέθοδος
- Η Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

1.2 Ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ

Από τα μέσα της δεκαετίας του '80 το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar GPR) έγινε ιδιαίτερα δημοφιλές στις κοινότητες των γεωφυσικών, των γεωλόγων και των αρχαιολόγων. Εν τούτοις χρησιμοποιείται σε γεωλογικές εφαρμογές από το 1960 σχετικά με την ανάπτυξη της ραδιοανίχνευσης σε παγετώνες. Η μελέτη παγετώνων με τη χρήση του ραντάρ έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό σήμερα.

Το 1910 στη Γερμανία ήταν πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικά (EM) σήματα για τον προσδιορισμό της θέσης θαμμένων αντικειμένων. Η πρώτη φορά που εκδόθηκε η περιγραφή μιας τέτοιας έρευνας ήταν το 1904. Στις έρευνες τότε χρησιμοποιούσαν συνεχή κύματα (CW). Η διάδοση παροδικών κυμάτων εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1926 από τον Hulsenbeck με σκοπό να μελετήσει την φύση των θαμμένων αντικειμένων.

Η τεχνική της διάδοσης κυμάτων σε παλμούς εξελίχθηκε σημαντικά τις επόμενες πέντε δεκαετίες. Έτσι τις δεκαετίες 1960-1970 έγιναν εκτεταμένες μελέτες σε παγετώνες από πολλούς επιστήμονες, ενώ αργότερα το ενδιαφέρον στράφηκε στη μελέτη κατασκευών όπως σήραγγες, δρόμοι κτλ. Οι γεωλογικές εφαρμογές άρχισαν τις δύο τελευταίες δεκαετίες με σκοπό τον καθορισμό της στρωματογραφίας, την έρευνα κοιτασμάτων και τη χαρτογράφηση σπηλαίων. Το γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα σε αρχαιολογικές ανασκαφές για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των θαμμένων ερειπίων.

Πολλές χρήσεις του γεωραντάρ έχουν περιγραφεί στην βιβλιογραφία. Αυτές περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του πάχους στρωμάτων πάγου, την ανίχνευση ρωγμών σε κοιτάσματα αλατιού και τη μελέτη κρυσταλλικών πετρωμάτων. Επίσης χρησιμοποιήθηκε από την αστυνομία για τον εντοπισμό θαμμένων πτωμάτων και αργότερα για τον εντοπισμό πτωμάτων κρυμμένων μέσα σε τσιμεντένιες κατασκευές.

Περαιτέρω εξελίχθηκε από τον Αμερικανικό στρατό κατά τη διάρκεια του πολέμου στο Βιετνάμ με σκοπό τον εντοπισμό του λαβύρινθου από σήραγγες που χρησιμοποιούσαν οι Βιετκόγκ. Μετά το τέλος του πολέμου αναπτύχθηκαν μέθοδοι για αστικούς σκοπούς από την GSSI (Geophysical Survey Systems Inc) η οποία είναι

ακόμα η μεγαλύτερη κατασκευάστρια συστημάτων γεωραντάρ διεθνώς. Τη δεκαετία του 1970 άρχισαν να εμφανίζονται και νέες εταιρίες συστημάτων γεωραντάρ όπως η Sensors and Software Ltd. Άλλες εταιρίες ασχολούνται με την εξέλιξη νέων συστημάτων (ERA Technologies Ltd) και κεραιών για την εφαρμογή τους στα ήδη υπάρχοντα συστήματα (Radarteam AB, Sweden).

1.3 Γενικές εφαρμογές

Η ευκολία στην μεταφορά, η συλλογή δεδομένων με γρήγορο ρυθμό και η ευχρηστία του οργάνου λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών συστημάτων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την επιλογή του γεωραντάρ.

Με βάση την κεντρική συχνότητα εκπομπής το γεωραντάρ μπορεί να εφαρμοστεί για γεωλογικούς σκοπούς που το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα και όπου χρησιμοποιούνται κεραιές των 50MHz ή και μεγαλύτερες. Για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing, NDT) όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο, οι κεραιές που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των 500-2000MHz. Τέλος σε αρχαιολογικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται από 50 έως 500 MHz. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το εύρος χρήσεων του γεωραντάρ δίνοντας έμφαση στις αρχαιολογικές εφαρμογές με βάση τη βιβλιογραφία (Hugenschmidt 1998):

1) Μεταλλευτική Έρευνα:

- Εντοπισμός και χωρική αποτίμηση μεταλλοφόρων ζωνών με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων,
- Σχεδιασμός γεωτρητικών ερευνών, προδιαγραφές εκτέλεσης δειγματοληπτικών γεωτρήσεων, αξιολόγηση πυρήνων

2) Δομή υπεδάφους, και Τεχνικά έργα:

- Στρωματογραφική αποτύπωση του υπεδάφους,
- Εντοπισμός του ανάγλυφου του βραχώδους υποβάθρου, κλίσεις και πτυχώσεις ιζηματογενών σχηματισμών,
- Εντοπισμός και ποιοτική αποτίμηση ζωνών διαφοροποιημένων γεωτεχνικών χαρακτηριστικών στο σταθερό υπόβαθρο (ρηξιγενείς ζώνες, τεκτονισμός, χαλαρότητα),
- Εντοπισμός υπόγειων ανοιγμάτων, έγκοιλα, στοές, εγκαταλειμμένες μεταλλευτικές εγκαταστάσεις, αγωγούς, δεξαμενές, εγκιβωτίσεις,
- Οριοθέτηση υπόγειων όγκων,
- Εντοπισμός πάχους αποθέσεων και αποσαθρωμένων στρωμάτων,
- Ακριβής αποτύπωση στρώσεων οδοποιίας,
- Αποτύπωση οπλισμού σε δομικά στοιχεία κατασκευών και κτηρίων.

3) Υδρογεωλογία και Περιβάλλον:

- Εντοπισμός υδροφόρου ορίζοντα - εκτίμηση υδάτινου δυναμικού (βάθος - έκταση υδατοπερατών ή μη, σχηματισμών του υπεδάφους),
- Διαχείριση υδάτινου δυναμικού (υπεδάφειες ροές, εμπλουτισμός υδροφόρου ορίζοντα - περιπτώσεις λιμνοδεξαμενών ή χαμηλών φραγμάτων),
- Ποιότητα/προστασία υδάτινων πόρων (πιθανή ρύπανση υδροφόρων σχηματισμών λόγω υφαλμύρινσης, γειτνίασης & συσχέτισης υδατοπερατών ζωνών με περιοχές ρύπανσης),
- Εντοπισμός ζωνών διαρροής σε περιπτώσεις φραγμάτων,
- Προκαταρκτική απεικόνιση θέσης, ορίων και μεγέθους όγκων αποβλήτων,
- Εκτίμηση καταλληλότητας θέσεων απόθεσης απορριμμάτων και ΧΥΤΑ.

4) Γεωθερμική έρευνα:

- Εντοπισμός γεωθερμικών πεδίων.

5) Αρχαιολογική έρευνα:

- Εντοπισμός θαμμένων κατασκευών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος,
- Εντοπισμός αρχαίων τάφων,
- Χαρτογράφηση πριν την εκσκαφή,
- Εντοπισμός, χαρτογράφηση αρχαίων δρόμων,
- Εντοπισμός θαμμένων τοιχοδομών, αρχαίων κτισμάτων και προσδιορισμός της θέσης τους,
- Καταγραφή θεμελίων και πιθανών διαβρώσεων σε αναδειχθέντα κτίσματα,
- Έρευνα κάτω από υπάρχοντα αρχαιολογικά μνημεία ή κτίσματα χωρίς την παραμικρή παρέμβαση σε αυτά,
- Εντοπισμός μικροαντικειμένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

2.1 Εισαγωγή

Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar) αποτελεί όργανο γεωφυσικών διασκοπήσεων που και εδώ και μερικά χρόνια χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό υπεδάφινων ανωμαλιών χωρίς να προκαλεί καταστροφή των εδαφών. Η μέθοδος του γεωραντάρ ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές μεθόδους. Το γεωραντάρ αποτελείται από μία κεραία που λειτουργεί σαν πομπός, ο οποίος εκπέμπει έναν μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Ο παλμός αυτός ανακλάται από αντικείμενα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, και κατόπιν λαμβάνεται από κεραία δέκτη. Το πλάτος του ανακλώμενου παλμού εξαρτάται από την διάφορα των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών. Ο συνδιασμός υψηλής ανάλυσης και μεγάλης ταχύτητας στη συλλογή στοιχείων καθιστούν αυτή τη μέθοδο σαν μια από τις πιο κατάλληλες γεωφυσικές μεθόδους για την επίλυση ρηχών γεωτεχνικών προβλημάτων. Μετά τη συλλογή των στοιχείων γίνεται ψηφιακή επεξεργασία του σήματος (χωροθέτηση, αποσυνέλιξη), καθώς και απεικόνιση των δεδομένων του γεωραντάρ. Συνοπτικά κάποιες βασικές πληροφορίες και σημαντικά πλεονεκτήματα του γεωραντάρ είναι:

1. Μη καταστροφική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος
2. Συνεχής συλλογή στοιχείων
3. Υψηλή ανάλυση
4. Δυσδιάστατη και τρισδιάστατη απεικόνιση

2.2 Διηλεκτρική σταθερά

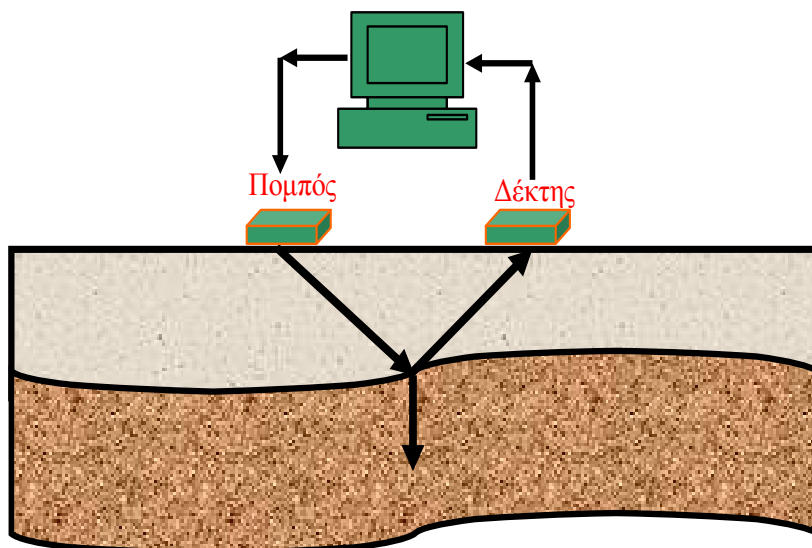
Η ηλεκτρική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά είναι αδιάστατο μέγεθος και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέγεθος στις ηλεκτρομαγνητικές διασκοπήσεις. Ορίζεται από τη σχέση $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, όπου ϵ_0 είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού ($8,854 \times 10^{-12}$ Farad/meter) και ϵ η ηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου. Η διηλεκτρική σταθερά σχετίζεται με την ικανότητα του μέσου διάδοσης να πολώνει ηλεκτρικά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και να ελέγχει την ταχύτητα διάδοσης του. Είναι χαρακτηριστική για κάθε διηλεκτρικό υλικό και εξαρτάται από την συχνότητα (f) του κύματος (αύξηση της συχνότητας συνεπάγεται μείωση της ϵ_r).

2.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται με επιτυχία στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνότητας από 1 έως 2000 MHz. Ένα τυπικό σύστημα γεωραντάρ αποτελείται από μία κονσόλα ή μονάδα ελέγχου, τον υπολογιστή, τις κεραίες διαφόρων συχνοτήτων και την μπαταρία (σχήμα 2.1). Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Η κεραία πομπός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό παλμό διάρκειας μερικών νανοδευτερολέπτων (10^{-9} sec). Ο παλμός θα ταξιδεύσει στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες (ϵ_r). Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο στρώμα και ένα μέρος θα ανακλαστεί στην επιφάνεια και θα επιστρέψει στην κεραία του δέκτη (σχήμα 2.2). Το σήμα που φτάνει στην κεραία δέκτη προωθείται στην μονάδα ελέγχου όπου και καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού.



Σχήμα 2.1: Εξοπλισμός γεωραντάρ (πηγή αρχαιοτηλεπισκοπικά νέα).



Σχήμα 2.2: Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ (Σπανουδάκης 2007).

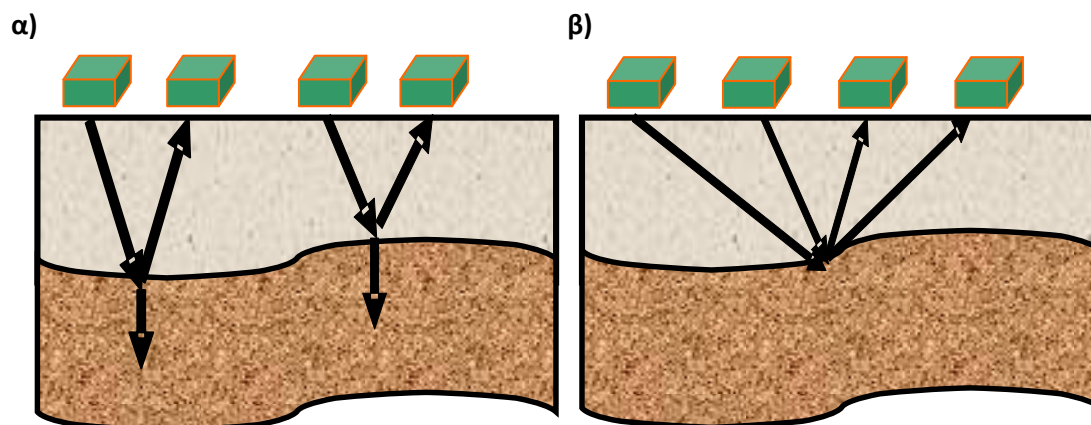
Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη, ονομάζεται χρόνος διαδρομής. Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νανο-δευτερόλεπτο ($1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$). Δυο κατηγορίες κυμάτων καταγράφονται από το δέκτη. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν κύματα που ταξιδεύουν απ' ευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Αυτά τα κύματα,

αφενός μεν φτάνουν πρώτα, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη απ' ότι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου δε έχουν μεγάλο πλάτος, αφού δεν υφίστανται εξασθένιση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κύματα που διαδίδονται στο υπέδαφος. Η καταγραφή του πλάτους των κυμάτων σε σχέση με το χρόνο διαδρομής ονομάζεται ίχνος. Όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα αλλάζει κατεύθυνση, δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει πολύ μικρού μεγέθους εμπόδια, τα οποία το αναγκάζουν να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντήχηση συμβαίνει, όταν το κύμα “παγιδευτεί” σε κάποιο γεωλογικό στρώμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κύμα ανακλάται πολλές φορές με συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών ανακλάσεων (Σπανουδάκης 2007).

2.4 Διατάξεις πομπού - δέκτη

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης πομπού - δέκτη ανάλογα με το σκοπό της έρευνας. Κύρια διάταξη για τη συλλογή δεδομένων γεωραντάρ είναι αυτή της σταθερής απόστασης πομπού δέκτη (common offset) ή ανάκλασης, όπου πομπός και δέκτης κινούνται κατά μήκος γραμμής μελέτης στην επιφάνεια του εδάφους διατηρώντας την μεταξύ τους απόσταση σταθερή (σχήμα 2.3α). Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σταθμών παρατήρησης ονομάζεται ισο-απόσταση ή βήμα διασκόπησης. Όταν τα ίχνη απεικονίζονται το ένα δίπλα στο άλλο, σχηματίζεται η τομή γεωραντάρ (GPR section). Η μέθοδος αυτή χρησιμεύει κυρίως στην χαρτογράφηση του υπεδάφους. Αν είναι γνωστή η ηλεκτρική διαπερατότητα του υπεδάφους, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό της ταχύτητας χρησιμοποιείται η διάταξη κοινού σημείου βάθους (common depth point - CDP), όπου επιλέγεται στη επιφάνεια του εδάφους κάποιο σταθερό σημείο, εκατέρωθεν του οποίου τοποθετούνται πομπός και δέκτης (σχήμα 2.3β). Τέλος, αναφέρεται η μέθοδος της τομογραφίας, όπου πομπός και δέκτης

τοποθετούνται ξεχωριστά σε κοντινές γεωτρήσεις, εκατέρωθεν τοίχων ή στοών μεταλλείων (Σπανουδάκης 2007).



Σχήμα 2.3: Τρόποι συλλογής δεδομένων. α) Η διάταξη σταθερής απόστασης πομπού δέκτη και β) η διάταξη κοινού σημείου βάθους (Σπανουδάκης 2007).

2.5 Σύστημα TerraSIRch SIR System 3000

Το SIR-3000 είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιεί την τελευταία λέξη της τεχνολογίας και αποτελεί την πρώτη επιλογή στη βιομηχανία για την συλλογή στοιχείων εξαιτίας της μεγάλης ακρίβειας.

Εξαιτίας του μικρού του μεγέθους και του μικρού του βάρους, το γεωραντάρ SIR – 3000 αποτελεί ένα εύχρηστο όργανο με κεραίες εύρους από 100 MHz έως 2 GHz (σχήμα 2.4) (www.geophysical.com).



Σχήμα 2.4: TerraSIRch SIR System 3000 και εξοπλισμός γεωραντάρ (www.geophysical.com).

2.6 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει τον χρόνο t_r που χρειάζεται ο παλμός για να ταξιδέψει από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη (σχήμα 2.5). Ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων εξαρτάται από την πορεία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή το είδος των κυμάτων:

- **Ανακλώμενα κύματα:** Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από τον πομπό, διαδίδονται στο μέσο μέχρι να συναντήσουν κάποιο εμπόδιο, όπου ανακλώνται και επιστρέφουν στο δέκτη. Ο χρόνος διαδρομής ισούται με:

$$t_r = (4D^2 + X^2)^{1/2}/v \quad (1.1)$$

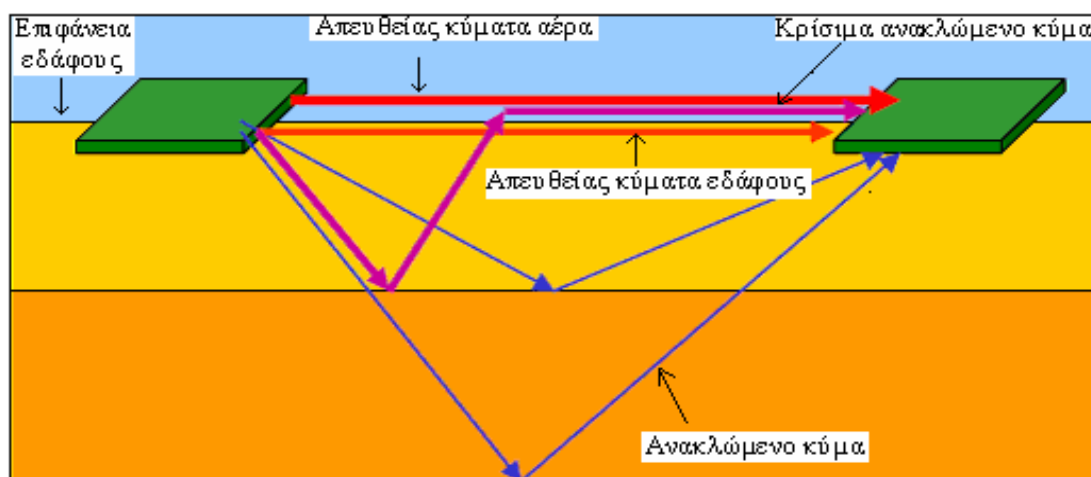
όπου X είναι η απόσταση πομπού-δέκτη, D το βάθος του εμποδίου και v η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

- **Απ' ευθείας κύματα:** Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε κάποια επιφάνεια και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: απ' ευθείας κύματα αέρα και εδάφους. Τα κύματα αυτά διανύουν μικρές αποστάσεις οπότε οι απώλειες είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα. Τα απ' ευθείας κύματα του αέρα φτάνουν πρώτα στο δέκτη, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι η μέγιστη δυνατή. Αμέσως μετά φτάνουν τα απ' ευθείας κύματα εδάφους. Οι εξισώσεις που δίνουν το χρόνο διαδρομής γι' αυτά τα κύματα είναι αντίστοιχα:

$$t = X / v_{\text{αέρα}} \quad (1.2)$$

$$t = X / v_{\text{εδάφους}} \quad (1.3)$$

- **Κρίσιμα διαθλώμενα κύματα:** Όταν σε μία διασκόπηση κοινού ενδιαμέσου σημείου ή σταθερού πομπού κινούμενου δέκτη, η απόσταση πομπού δέκτη υπερβεί μια κρίσιμη τιμή X_c τότε το κύμα ανακλάται στη πρώτη επιφάνεια που θα συναντήσει, διαθλάται στην επιφάνεια και διαδίδεται προς τον πομπό μέσω του αέρα.

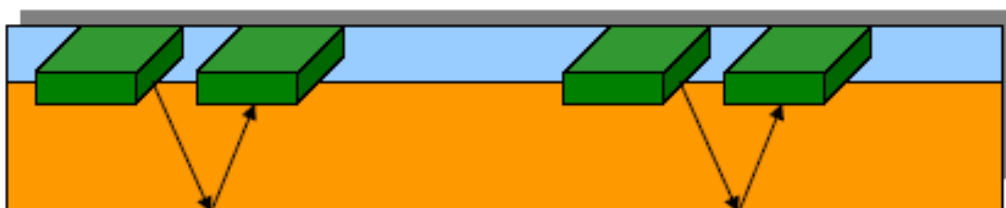


Σχήμα 2.5: Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Βαφειδής 2001, Σπανουδάκης 2001).

2.7 Μέθοδος της διασκόπησης – Μέθοδος της ανάκλασης

Πριν ξεκινήσει η πραγματοποίηση της έρευνας θεωρείται σκόπιμο να μελετηθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που θα καθορίσουν την επιτυχία της έκβαση. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο και πρέπει να γίνει προσεκτικά, ώστε οι μετρήσεις να είναι ακριβείς και να αποφευχθούν σφάλματα τα οποία θα δώσουν λανθασμένες πληροφορίες. Έτσι ο ερευνητής πριν αρχίσει οποιαδήποτε εργασία καλείται να αποσαφηνίσει το πρόβλημα πλήρως και να σχεδιάσει τη διασκόπηση με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο σχεδιασμός αποτελείται από τρία βασικά στάδια:

- Αξιολόγηση του πεδίου της έρευνας
- Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης
- Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης



Σχήμα 2.6: Η μέθοδος της ανάκλασης με σταθερή την σχετική απόσταση πομπού – δέκτη (Σπανουδάκης, 2001).

Για τον εντοπισμό θαμμένων τοιχοδομών στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων Κρήτης εφαρμόστηκε η μέθοδος της ανάκλασης. Οι κεραιές διατηρούνται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους και κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης (σχήμα 2.6). Πολλές φορές πραγματοποιούνται μετρήσεις πάνω στην ίδια γραμμή μελέτης αλλά με διαφορετικό προσανατολισμό των κεραιών ώστε να εξαχθούν το δυνατό περισσότερες πληροφορίες. Οι παράμετροι διασκόπησης που καλείται να ρυθμίσει ο χρήστης είναι (Σπανουδάκης 2001):

- **Η συχνότητα εκπομπής:** Το βάθος διείδσης και η διακριτική ικανότητα συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα. Μεγάλη συχνότητα συνεπάγεται μεγάλη διακριτική ικανότητα, ενώ βάθος διείσδυσης μικρό. Το αντίθετο συμβαίνει επιλέγοντας μικρότερη συχνότητα εκπομπής.
- **Ο ολικός χρόνος καταγραφής:** Σχετίζεται άμεσα με το βάθος διασκόπησης και καθορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία σταματούν οι καταγραφές.
- **Το διάστημα δειγματοληψίας :** Συνδέεται με το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο καταγραφών. Αν το χρονικό διάστημα είναι μεγάλο τότε πολλές πληροφορίες χάνονται, αν είναι πολύ μικρό τότε οι πληροφορίες είναι μεν πολλές αλλά ο συνολικός όγκος των δεδομένων υπερβολικά μεγάλος.
- **Την απόσταση των κεραιών:** Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης και στο συντελεστή ανάκλασης, συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένησης του κύματος αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση.
- **Το βήμα διασκόπησης:** Το βήμα διασκόπησης ορίζει την απόσταση δύο διαδοχικών σταθμών μέτρησης πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις.
- **Την υπέρθεση:** Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους με στόχο την απομάκρυνση του τυχαίου θορύβου.

2.8 Ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση

Η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθορίζει το βάθος διασκόπησης. Η εξασθένηση εξαρτάται από τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών, την γεωμετρία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη συχνότητα εκπομπής τους.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί βασική ιδιότητα των γεωλογικών σχηματισμών και επηρεάζει την ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση. Όσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση που σημειώνεται στην αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης τόσο περισσότερη εξασθένηση παρατηρείται. Άλλες ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζουν την εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι: η μαγνητική διαπερατότητα, η μαγνητική υστέρηση, το πορώδες και τα περιεχόμενα σε αυτό ρευστά, ιδιαίτερα η υψηλή σε αυτά συγκέντρωση ιόντων αλάτων.

Όσον αφορά τις απώλειες ενέργειας που οφείλονται στην μαγνητική διαπερατότητα – μαγνητική υστέρηση, δεν είναι σημαντικές σε μη μαγνητικά υλικά. Στην περίπτωση αυτή η εξασθένηση που παρατηρείται οφείλεται στην περιστροφή των ηλεκτρονίων (spin), στα μοριακά τροχιακά και στην παρουσία σιδήρου και άλλων μετάλλων. Απώλειες ενέργειας έχουμε και εξαιτίας της γεωμετρίας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή της απόστασης που έχει διανύσει το κύμα, καθώς και των διεπιφανειών που συναντάει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

3.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να εισάγει και να εξοικειώσει σταδιακά τον χρήστη με το περιβάλλον εργασίας και τα φίλτρα που προσφέρουν στην επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ τα δύο λογισμικά πακέτα GPR-PRO και RADAN. Στις ενότητες που ακολουθούν ο χρήστης θα αποκομίσει μία πρώτη ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τα προγράμματα. Στην συνέχεια ακολουθεί περιγραφή των ψηφιακών φίλτρων που θα χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία των μετρήσεων, καθώς και των δυνατοτήτων που προσφέρουν στον χρήστη για την βέλτιστη απεικόνιση τους διευκολύνοντας τον εντοπισμό ανακλαστήρων, που ενδεχομένως σχετίζονται με θαμμένες ανθρωπογενείς δομές (π.χ. τοιχοδομές, δεξαμενές).

3.2 Λογισμικό πακέτο GPR PRO

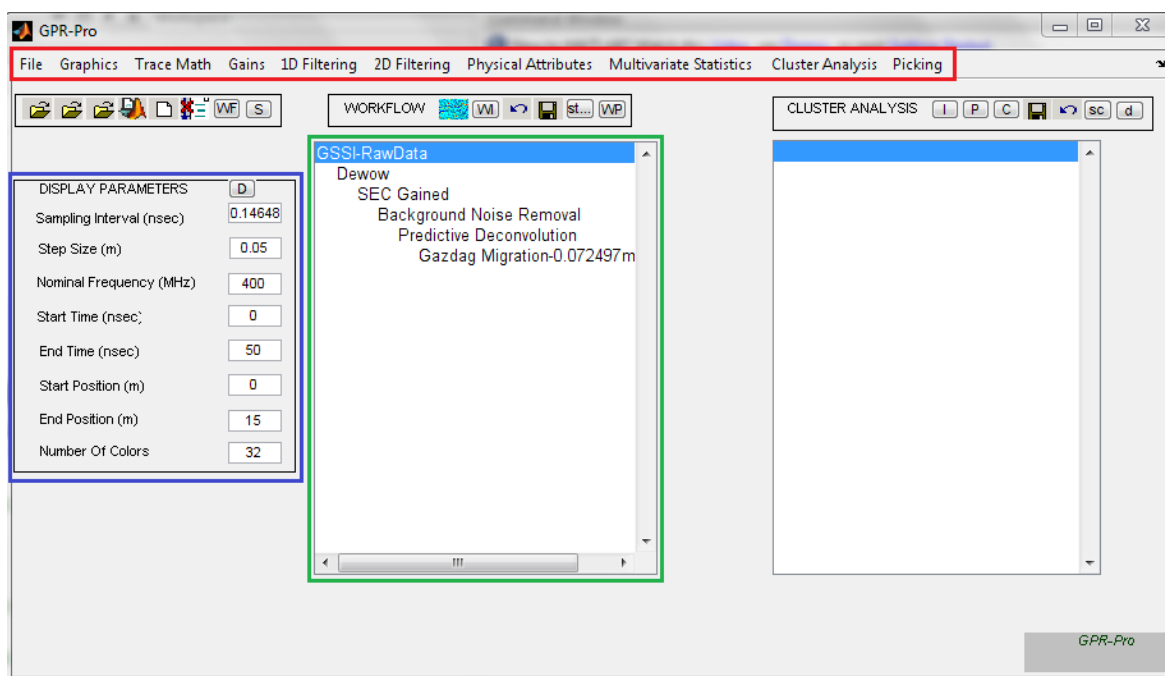
Το λογισμικό πακέτο GPR-PRO παρέχει ένα μεγάλο αριθμό αλγορίθμων, για την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ σε περιβάλλον ανάπτυξης MATLAB. Καλό είναι να υπάρχει ένας “δυνατός” υπολογιστής επειδή μερικοί αλγόριθμοι είναι χρονοβόροι, τα δεδομένα συνήθως έχουν μεγάλο όγκο και τα γραφικά είναι πολύπλοκα.

Το λογισμικό πακέτο GPR-PRO περιέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για επεξεργασία, απεικόνιση, ανάλυση, διόρθωση και παρουσίαση των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Οι πιο βασικές δυνατότητές του είναι:

1. Επιλογή της καταλληλότερης χρωματικής κλίμακας ώστε ορισμένα χαρακτηριστικά των ραδιογραφημάτων να αναδειχθούν (ή και να αποκρυφθούν)
2. Εφαρμογή μονοδιάστατων φίλτρων :
 - Φίλτρα διόρθωσης Deshift και De-wow
 - Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal)
 - Αποσυνέλιξη (Deconvolution)
 - Φίλτρο κινητού μέσου όρου (Down the trace average)
 - Φίλτρο μέσου ίχνους (Trace to trace average)
 - Φίλτρο διαφοράς ιχνών (Trace Difference)
 - Φίλτρο ισοστάθμισης ιχνών (trace equalization)
 - Φίλτρο σταθμισμένου μέσου ίχνους (weighted trace mix)
 - Φίλτρο ενδιάμεσου όρου
3. Εφαρμογή δισδιάστατων φίλτρων
 - Χωροθέτηση (Migration)
 - Ανίχνευση και τονισμός ακμών (Edge detection and enhancement)
 - Ανίχνευση γραμμών (Line Detection)
 - Φίλτρο μέσης τιμής
 - Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων
4. Ενίσχυση των δεδομένων
 - Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC)

- Σταθερή ενίσχυση

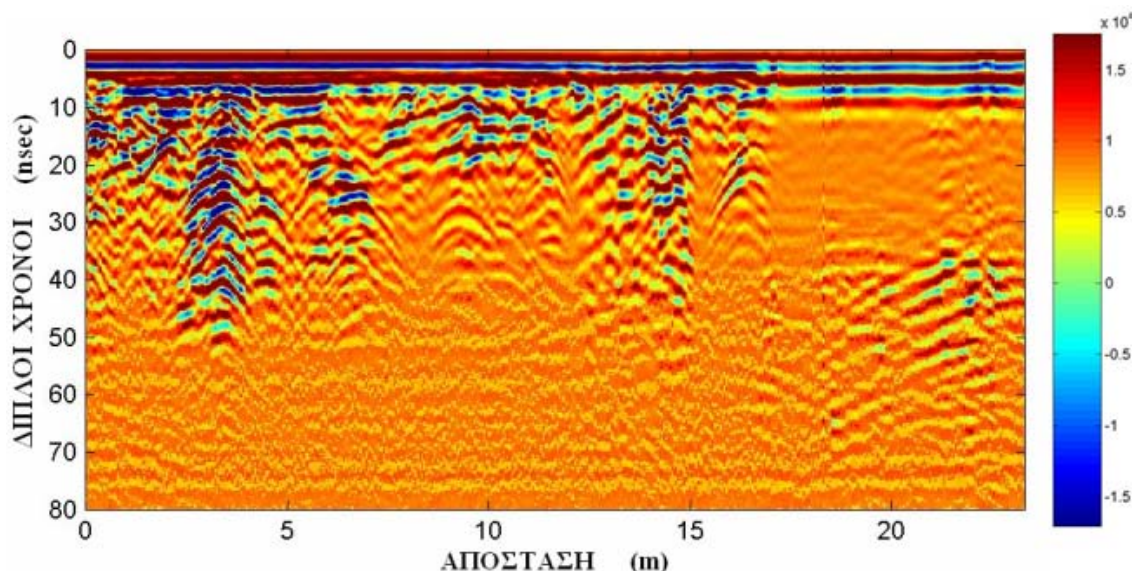
Για να ξεκινήσει και να εισέλθει ο χρήστης στο περιβάλλον του προγράμματος πληκτρολογεί στο “command window” τον κωδικό GPR13 (Ground Penetrating Radar). Στην αρχική βασική εικόνα παρουσιάζονται στα αριστερά σε μπλε φόντο οι παράμετροι των μετρήσεων, όπως το διάστημα δειγματοληψίας (ns), το μέγεθος των βημάτων (m), την ονομαστική συχνότητα (MHz), τον χρόνο έναρξης και λήξης (ns), όπως ακόμη και την θέση έναρξης και λήξης (m) (σχήμα 3.1). Στο κέντρο σε πράσινο φόντο εμφανίζονται τα φίλτρα και με τη σειρά που χρησιμοποιήθηκαν. Για να εισαχθούν και να επεξεργαστούν οι μετρήσεις που έχουν ληφθεί από τη μέθοδο διασκόπησης που έχει εφαρμοστεί, στην περιοχή μελέτης ο χρήστης επιλέγει από τις εντολές που περικλείονται σε κόκκινο φόντο File Open→GSSI. Το είδος των αρχείων που μπορούν να ανοιχθούν είναι σε μορφή .dzt αλλιώς δεν αναγνωρίζονται. Καλύτερα τα δεδομένα κάθε κανάβου διασκόπησης να αποθηκεύονται σε έναν φάκελο με τιτλοδότηση του τμήματος της περιοχής μελέτης όπου πραγματοποιήθηκε η διασκόπηση για αποτελεσματικότερη επεξεργασία από τον χρήστη.



Σχήμα 3.1 : Το περιβάλλον εργασίας του GPR-PRO.

Συγκεκριμένα στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων Κρήτης η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το σύστημα SIR – 3000 της εταιρίας GSSI. Η κεντρική συχνότητα εκπομπής των ραδιοκυμάτων ήταν 400 MHz, το διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 146.5 ps και το βήμα διασκόπησης ίσο με 5 cm, όπως παρουσιάζονται και στην αρχική βασική εικόνα στο κουτί επίδειξης παραμέτρων.

Σχετικά με την απεικόνιση των δεδομένων αφού έχουν διαβαστεί και έχουν οριστεί οι βασικές παράμετροι, πατώντας το πολύχρωμο κουμπί “Scaled Image” από τον πίνακα “Workflow” εμφανίζεται ένα καινούριο παράθυρο επεικόνισης, όπου σε διάγραμμα απόστασης (m) και διπλών χρόνων διαδρομής (ns) απεικονίζονται τα δεδομένα (σχήμα 3.2). Από τις διάφορες επιλογές που υπάρχουν σε αυτό το παράθυρο, είναι δυνατή η εστίαση πάνω στην εικόνα (μεγέθυνση ή σμίκρυνση), η αλλαγή της κλίμακας χρωμάτων από την επιλογή “Colormaps”, ο σχεδιασμός γραμμών ή πολυγώνων σε αυτήν, η μεταβολή της αναλογίας μεγέθους μεταξύ των αξόνων και η αποθήκευση της εικόνας σε μορφή *.jpg, *.tif κ.τ.λ.



Σχήμα 3.2 : Τομή γεωραντάρ στην περιοχή της Μεραρχίας (γραμμή μελέτης f009, κάρναβος 6), όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με διπλό χρόνο διαδρομής μέχρι 50 ns.

3.3 Λογισμικό πακέτο RADAN

Με σκοπό την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων που σχετίζονται με το υπέδαφος έχουν αναπτυχθεί αξιόπιστα συστήματα που μπορούν να επεξεργαστούν δεδομένα. Το Radan δημιουργήθηκε για να καλύψει αυτήν την ανάγκη και να προσφέρει σε έμπειρους αλλά και σε αρχάριους χρήστες την δυνατότητα απεικόνισης δεδομένων γεωραντάρ με εύκολο και απλό τρόπο.

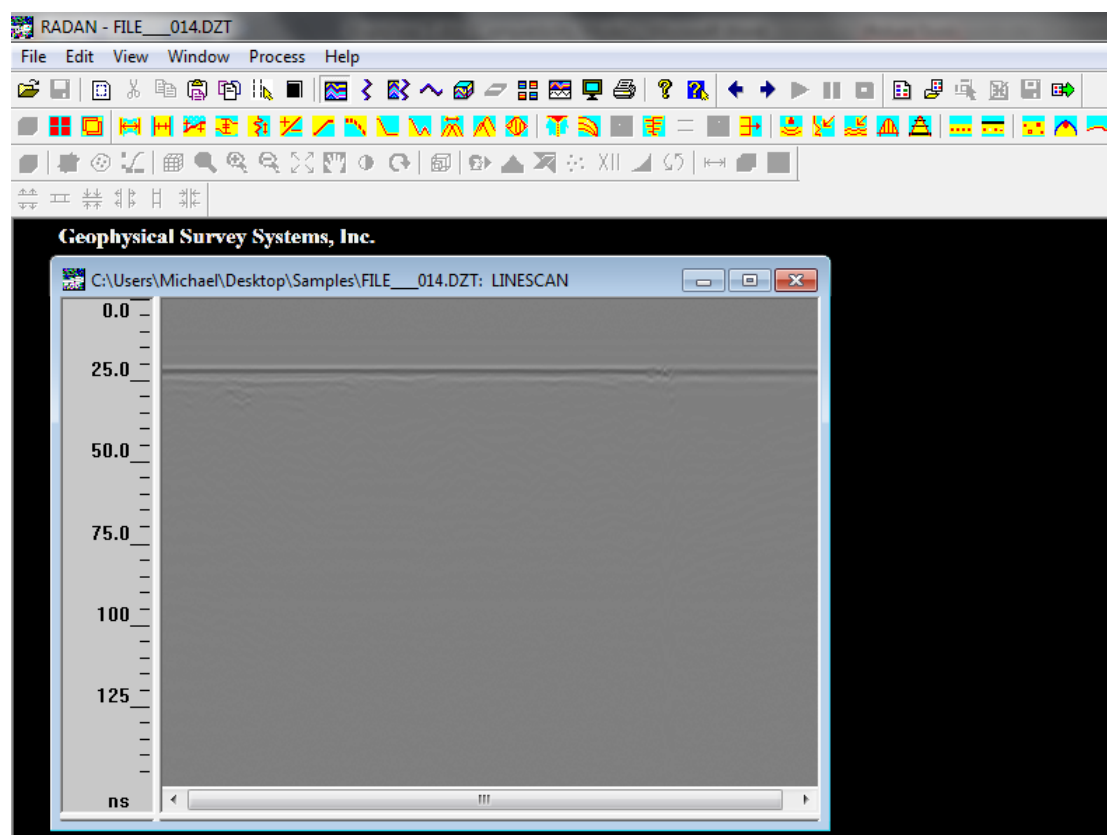
Το λογισμικό Radan παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για επεξεργασία, απεικόνιση, ανάλυση, διόρθωση και παρουσίαση των δεδομένων που συλλέχθηκαν.

Οι πιο βασικές δυνατότητές του είναι:

- Επιλογή μεθόδου αναπαράστασης (visualization). Ορισμένοι χαρακτήρες των ραδιογραφημάτων μπορεί να αναδειχθούν με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απεικόνισης και/ή χρωματικής κλίμακας
- Καθορισμός διαστημάτων δειγματοληψίας (ns) και μεγέθους των βημάτων(m)
- Ανασύνταξη (editing) του ραδιογραφήματος με αφαίρεση/διόρθωση προβληματικών ζωνών, αλλαγή ρυθμού δειγματοληψίας (resampling) όπου χρειάζονται τέτοιου είδους επεμβάσεις
- Ανάλυση ταχύτητας. Απαραίτητη για την σωστή ερμηνεία των δεδομένων (εκτίμηση βάθους στόχων, κλίσης ανακλαστήρων κ.τ.λ.)
- Εφαρμογή φίλτρου στο πεδίο συχνότητας – κυματάριθμου (F-K Filtering)
- Φασματικά και χωρικά φίλτρα αφαίρεσης θορύβου
- Διόρθωση της θέσης
- Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου
- Χωροθέτηση (migration)
- Αποσυνέλιξη (deconvolution)
- Ενίσχυση.
- Μετασχηματισμός Hilbert
- Φασματική Ανάλυση

Για να ξεκινήσει και να εισέλθει ο χρήστης στο περιβάλλον του προγράμματος επιλέγει το εικονίδιο που προστέθηκε κατά την εγκατάσταση του λογισμικού πακέτου Radan στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή. Στην αρχική βασική εικόνα

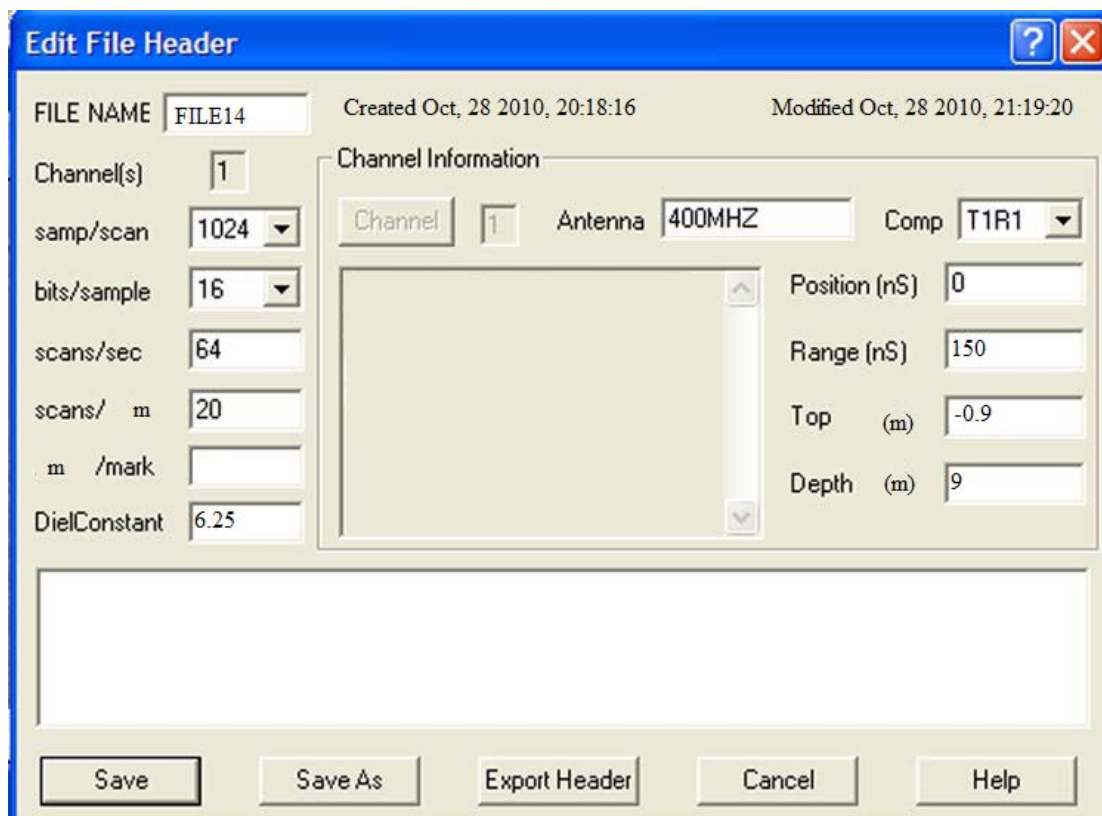
υπάρχουν μεγάλα και ευανάγνωστα εικονίδια και μια μικρή περιγραφή που επεξηγεί την λειτουργία κάθε εικονιδίου που εμφανίζεται όταν ο κέρσορας τοποθετηθεί από πάνω. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις επιθυμητές μονάδες μήκους για τους κάθετους και τους οριζόντιους άξονες. Για να εισαχθούν και να επεξεργαστούν οι μετρήσεις που έχουν ληφθεί από τη μέθοδο διασκόπησης που έχει εφαρμοστεί, στην περιοχή μελέτης ο χρήστης επιλέγει File Open και το είδος των αρχείων που μπορούν να ανοιχθούν είναι σε μορφή .dzt (όπως και στο GPR PRO) (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 : Το περιβάλλον εργασίας του RADAN.

Κάθε αρχείο δεδομένων συνοδεύεται από ένα πρωτεύον αρχείο, το οποίο περιέχει τις βασικές παραμέτρους που καθορίστηκαν στο σύστημα του γεωραντάρ την στιγμή που συλλέχθηκαν τα δεδομένα. Το πρωτεύον αρχείο θα έπρεπε να περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την περιοχή, την κεντρική συχνότητα εκπομπής των ραδιοκυμάτων, ημερομηνία, διάστημα δειγματοληψίας, το βήμα διασκόπησης, το

υλικό που καλύπτει την επιφάνεια ή οποιαδήποτε άλλη πληροφορία χρήσιμη που να αποτελεί χαρακτηριστικό της περιοχής. . Όλες οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης εμφανίζονται επιλέγοντας από την γραμμή εργαλείων του περιβάλλοντος του RADAN Edit→File Header (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 : Όλες οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης όπως παρουσιάζονται στο πρόγραμμα RADAN.

Η προτεινόμενη σειρά επεξεργασίας δεδομένων σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήστη του RADAN είναι:

1. Άνοιγμα αρχείου δεδομένων
2. Έλεγχος και επεξεργασία της επικεφαλίδας αρχείου αν κρίνεται απαραίτητο
3. Επιλογή μεθόδου αναπαράστασης (visualization) προκειμένου ορισμένες καταγραφές να αναδειχθούν με την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απεικόνισης και/ή χρωματικής κλίμακας
4. Επεξεργασία των δεδομένων
5. Αποθήκευση των δεδομένων και προετοιμασία για εκτύπωση

Η επεξεργασία των δεδομένων πρέπει να γίνεται με σκοπό:

- Αφαίρεση ανεπιθύμητων σημάτων (θόρυβος) από τα δεδομένα προκειμένου να επιτευχθεί βελτιωμένη ερμηνεία των δεδομένων
- Διόρθωση γεωμετρικών σφαλμάτων και εστιασμός σε ζώνες ενδιαφέροντος
- Μετατροπή από την μονάδα του χρόνου σε βάθος
- Απεικόνιση που είναι εύκολη στην κατανόηση σε σχέση με την παρουσίαση ακατέργαστων δεδομένων

3.4 Κατηγορίες διορθωτικών φίλτρων και επεξεργασία δεδομένων

Τα φίλτρα διακρίνονται ανάλογα με το είδος της επεξεργασίας που επιδέχονται οι μετρήσεις και τις πληροφορίες που δίνει το καθένα, σε:

1. Μονοδιάστατα φίλτρα, τα οποία επενεργούν κατά τη μία διάσταση είτε αυτή είναι ο χρόνος, λαμβάνοντας υπόψη τις καταγραφές που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, είτε αυτή είναι η απόσταση, λαμβάνοντας υπόψη τις καταγραφές που ανήκουν σε διαφορετικά-γειτονικά ίχνη αλλά αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο.
2. Δισδιάστατα φίλτρα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη μια ομάδα δεδομένων που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη και γειτονικούς χρόνους.

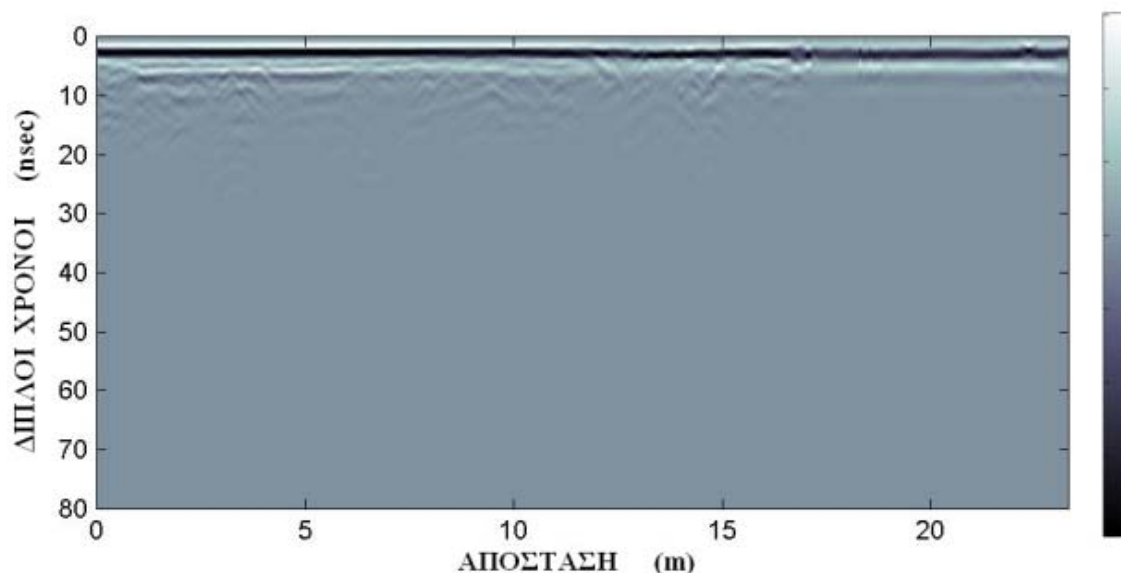
Ακολουθεί εφαρμογή μετασχηματισμών των δεδομένων:

1. Στιγμιαία μιγαδικά χαρακτηριστικά, που βασίζονται στον μετασχηματισμό Hilbert και επενεργούν σε κάθε ίχνος ξεχωριστά.
2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

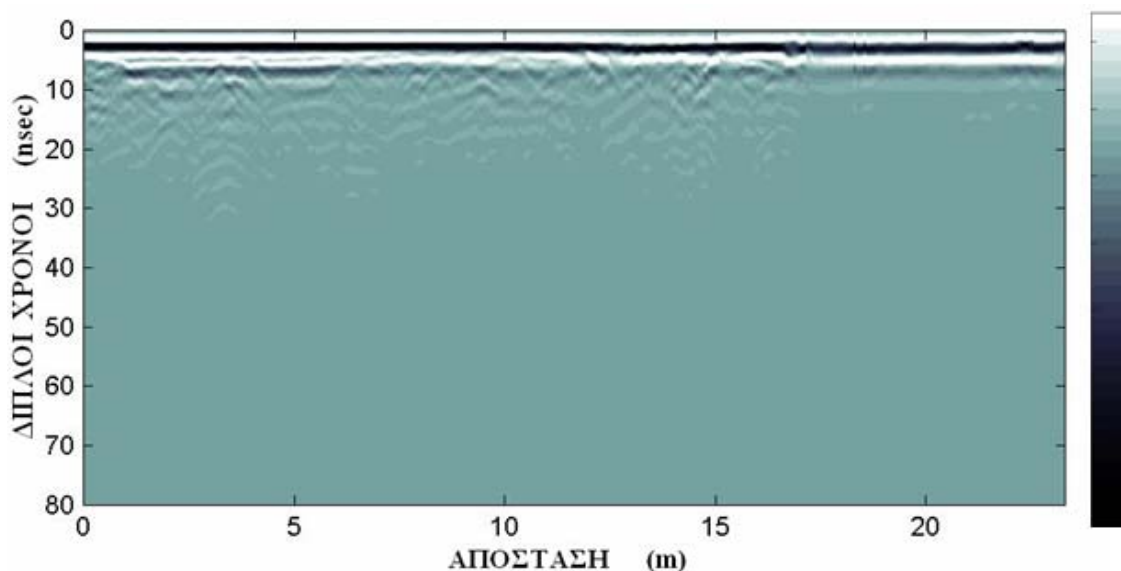
3.4.1 Φίλτρο διόρθωσης De-wow

Το φίλτρο διόρθωσης De-wow υπολογίζει το μήκος του τελεστή από την δωθείσα σχέση $\frac{2}{f \cdot \Delta t}$, όπου f η κεντρική συχνότητα εκπομπής (MHz) και Δt το διάστημα

δειγματοληψίας (ns). Ο τελεστής αυτός υπολογίζει το μέσο όρο των σημείων γύρω από το κεντρικό. Κατόπιν η μέση τιμή αφαιρείται από τα αρχικά δεδομένα. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου De-wow δίνεται στις εικόνες που ακολουθούν (σχήμα 3.5, 3.6).



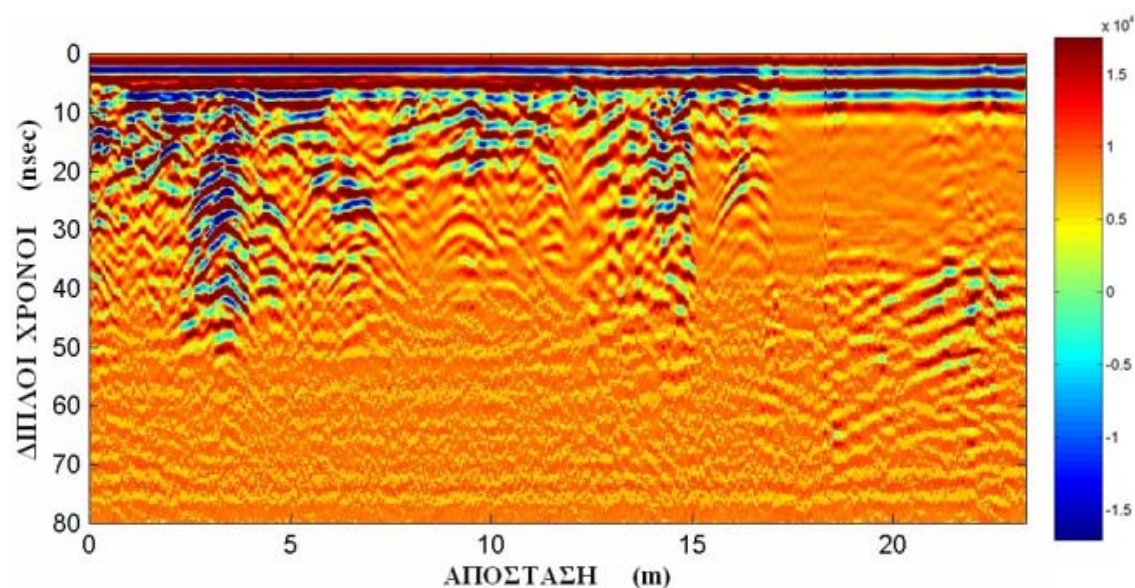
Σχήμα 3.5: Τομή γεωραντάρ στην περιοχή της Μεραρχίας πριν την επεξεργασία (γραμμή μελέτης f009, κάνναβος 6).



Σχήμα 3.6: Τομή γεωραντάρ στην περιοχή της Μεραρχίας στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (Dewow), (γραμμή μελέτης f009, κάνναβος 6).

3.4.2 Εκθετική ενίσχυση δεδομένων

Η ενίσχυση εφαρμόζεται στα δεδομένα για την καλύτερη παρουσίαση ισχυρών και ασθενικών ανακλάσεων, που δεν διακρίνονται καθαρά στα αρχικά δεδομένα (σχήμα 3.7) (Σπανουδάκης, 2002).



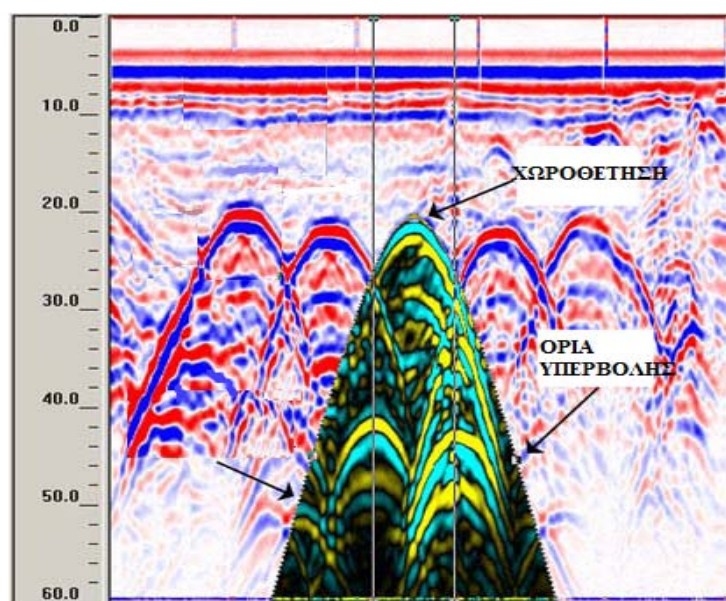
Σχήμα 3.7: Τομή γεωραντάρ στην περιοχή της Μεραρχίας με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων (SEC), (γραμμή μελέτης f009, κάνναβος 6), όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 50 ns.

3.4.3 Χωροθέτηση

Κατά τη χωροθέτηση (migration) η τομή γεωραντάρ, της οποίας ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το χρόνο t , μετατρέπεται σε τομή γεωραντάρ, της οποίας ο

κάθετος άξονας πλέον απεικονίζει το βάθος. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται γνωρίζοντας τις ταχύτητες διάδοσης (από την ανάλυση ταχυτήτων).

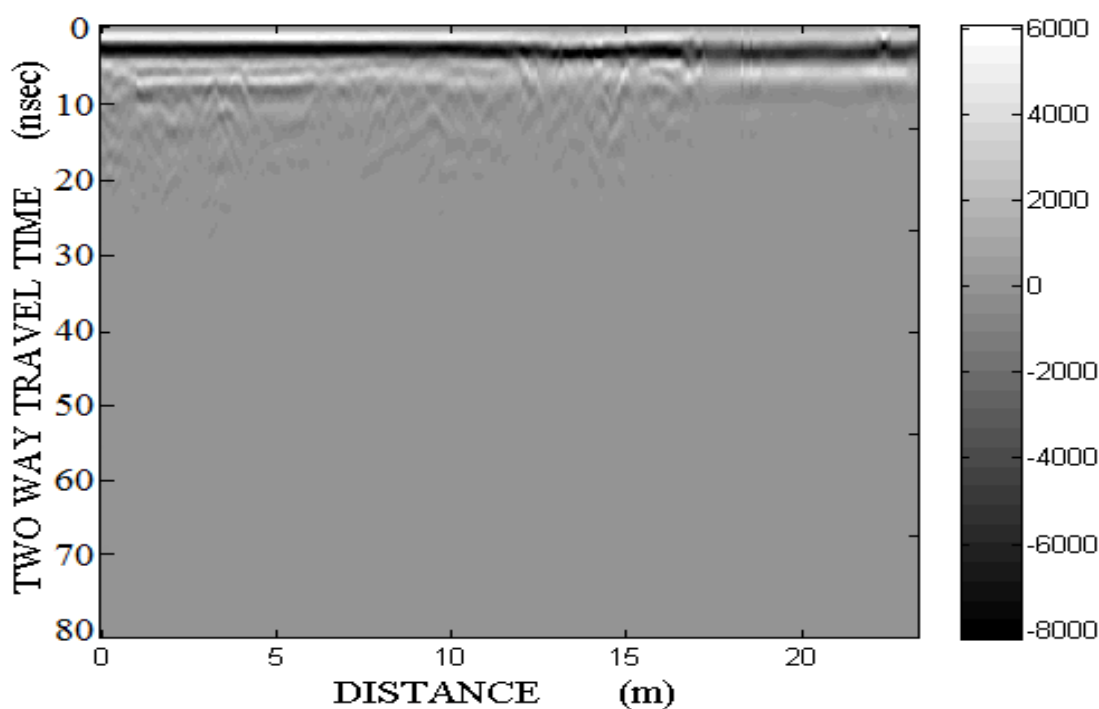
Η χωροθέτηση χρησιμοποιείται για την αφαίρεση περιθλάσεων και για την διόρθωση της κλίσης των στρωμάτων. Η κεραία του γεωραντάρ μπορεί να εκπέμψει ένα ευρύ φάσμα ενέργειας με στόχο την ανίχνευση μετόπων αντικειμένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιθανή απεικόνιση των αντικειμένων πεπερασμένων διαστάσεων ως ανακλαστήρες με τη μορφή υπερβολής αποκρύπτοντας σημαντικές πληροφορίες. Αντικείμενα που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος μπορούν να μην ανιχνεύονται εξαιτίας πολυάριθμων αντικειμένων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους επειδή προκαλούν τη δημιουργία περιθλάσεων ή να αποτελέσουν την αιτία για λάθος ερμηνεία της θέσης, του μεγέθους και της γεωμετρίας των θαμμένων αντικειμένων. Η χωροθέτηση είναι μία τεχνική που επανατοποθετεί ανακλαστήρες προς τις πραγματικές τους θέσεις κάτω από την επιφάνεια και αφαιρεί τις περιθλάσεις.



Σχήμα 3.8: Τομή γεωραντάρ όπου πολυάριθμα αντικείμενα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους εμποδίζουν την ανίχνευση αντικειμένων που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος στο πρόγραμμα RADAN.

3.4.4 Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου

Το φαινόμενο της αντήχησης των κεραιών (antenna ringing) προκαλεί στα δεδομένα την εμφάνιση σημάτων που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες. Οι χρήστες του γεωραντάρ, τα ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες και δέκτες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούν σημαντικές επιδράσεις στο σήμα που καταγράφεται. Με την εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου επιτυγχάνεται η εξάλειψη των παραπάνω φαινομένων (σχήμα 3.9). Για να υλοποιηθεί αυτό υπολογίζεται ένα νέο ίχνος, που αποτελεί το μέσο όρο όλων των ιχνών μιας τομής, το οποίο μέσο ίχνος αφαιρείται από κάθε ίχνος (Σπανουδάκης 2002).



Σχήμα 3.9: Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου στην τομή γεωραντάρ από την περιοχή της Μεραρχίας (γραμμή μελέτης f009, κάνναβος 6), όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 35 ns.

3.4.5 Αποσυνέλιξη δεδομένων γεωραντάρ

Η αποσυνέλιξη είναι μια διαδικασία που βελτιώνει τη χρονική (temporal) ανάλυση των δεδομένων, συμπιέζοντας την κυματομορφή της πηγής (source wavelet). Η αποσυνέλιξη, έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για την απόσβεση πολλαπλών ανακλάσεων στα σεισμικά δεδομένα. Επίσης έγινε προσπάθεια να εφαρμοσθεί και σε δεδομένα γεωραντάρ (Turner, 1994) για τον ίδιο σκοπό.

Για την κατανόηση της αποσυνέλιξης, θα πρέπει πρώτα να εξεταστούν τα διάφορα συστατικά από τα οποία αποτελείται το ίχνος. Η Γη αποτελείται από διάφορα στρώματα πετρωμάτων με διαφορετική λιθολογία και φυσικές ιδιότητες. Έτσι, το γράφημα μπορεί να προκύψει από τη συνέλιξη της απόκρισης του υπεδάφους στο μοναδιαίο παλμό (earth's impulse response) με την κυματομορφή της πηγής. Η απόκριση του υπεδάφους στο μοναδιαίο παλμό περιέχει τις κύριες ανακλάσεις (χρονοσειρά συντελεστών ανάκλασης: reflectivity series) και όλες οι πιθανές πολλαπλές. Ιδανικά, η αποσυνέλιξη θα έπρεπε να συμπίψει την κυματομορφή της πηγής και να απομακρύνει τις πολλαπλές, αφήνοντας μόνο τις κύριες ανακλάσεις στο ίχνος.

Η αποσυνέλιξη βελτιώνει τη χρονική ανάλυση των σεισμικών δεδομένων (Yilmaz, 1987). Το συνελικτικό μοντέλο περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$x(t) = w(t) * e(t) + n(t) \quad (3.1a)$$

όπου:

$x(t)$ = η καταγραφή γεωραντάρ

$w(t)$ = η κυματομορφή της πηγής

$e(t)$ = η απόκριση του υπεδάφους στο μοναδιαίο παλμό

$n(t)$ = τυχαίος θόρυβος

* = συνέλιξη.

Ο Sheriff (Sheriff, 1995) θεωρεί ότι το καταγραφόμενο σήμα είναι το αποτέλεσμα διαδοχικών συνέλιξεων του αρχικού παλμού $w(t)$ (που παράγεται από την πηγή) με ένα αριθμό συναρτήσεων, οι οποίες περιγράφουν διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν το κύμα καθώς διαδίδεται στο υπέδαφος. Το κύμα επηρεάζεται από τα παρακάτω:

- Η ζώνη κοντά στην πηγή όπου η απορρόφηση της ενέργειας είναι τεράστια. Η απόκριση παλμού που προκαλείται από αυτή τη ζώνη συμβολίζεται με $s(t)$.
- Η χρονοσειρά των ανακλαστήρων, ή η απόκριση του υπεδάφους στο μοναδιαίο παλμό $e(t)$.
- Η ζώνη κοντά στην επιφάνεια έχει δυσανάλογη επίδραση η οποία συμβολίζεται με $r(t)$.
- Επιπλέον επιδράσεις που οφείλονται στην απορρόφηση, τις πολλαπλές και τις περιθλάσεις κλπ. Ο συνδυασμός όλων αυτών συμβολίζεται με $p(t)$.

Έτσι η εξίσωση 3.1α μπορεί να γραφτεί και ως εξής (Sheriff, 1995)

$$x(t) = (w(t) * s(t) * r(t) * p(t)) * e(t) \quad (3.1 \beta)$$

όπου:

k ένας πραγματικός αριθμός που δηλώνει την ένταση του παλμού.

Η αποσυνέλιξη έχει στόχο την ανάκτηση της χρονοσειράς των συντελεστών ανάκλασης (απόκριση του υπεδάφους) από το καταγραφόμενο γράφημα, δηλαδή το $e(t)$ στην εξίσωση 3.1. Το μοναδικό γνωστό μέρος της εξίσωσης 3.1 είναι συνήθως το καταγεγραμμένο γράφημα $x(t)$. Η κυματομορφή της πηγής $w(t)$ είναι άγνωστη, εκτός από μερικές περιπτώσεις όπου η μορφή της είναι μερικώς γνωστή, το ίδιο ισχύει και για το τυχαίο θόρυβο. Έτσι, υπάρχουν τρεις άγνωστοι και ένας γνωστός οπότε είναι

αδύνατον να λυθεί η εξίσωση 3.1α. Στην πράξη όμως, η αποσυνέλιξη έχει αποδεχτεί σαν μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος για την βελτίωση της χρονικής ανάλυσης. Για την εύρεση του αγνώστου $e(t)$ στην εξίσωση 3.1α χρησιμοποιούνται δύο υποθέσεις: η τιμή του θορύβου $n(t)$ είναι 0, και η κυματομορφή της πηγής είναι γνωστή.

Συγκεκριμένα, η αποσυνέλιξη πρόβλεψης αποτελεί τμήμα της επεξεργασίας των δεδομένων που στοχεύει στη βελτίωση της χρονικής ανάλυσης, επιτυγχάνοντας εκτίμηση της σειράς των συντελεστών ανάκλασης. Παρακάτω φαίνονται και οι υποθέσεις που αποτελούν την βάση για την λειτουργία της αποσυνέλιξης πρόβλεψης:

- Υπόθεση 1 Το υπέδαφος αποτελείται από οριζόντια στρώματα με σταθερή ταχύτητα
- Υπόθεση 2 Η μορφή της κυματομορφής της πηγής δεν αλλάζει όταν διαδίδεται στο υπέδαφος (είναι στάσιμη).
- Υπόθεση 3 Η συνιστώσα του θορύβου $n(t)$ είναι μηδέν.

3.4.6 Συνοπτική παρουσίαση των φίλτρων

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάστηκαν συνοπτικά όλα τα βασικά φίλτρα που εφαρμόστηκαν στην επεξεργασία των δεδομένων στην παρούσα διπλωματική και ο σκοπός για τον οποίο εφαρμόζονται (πίνακας 3.1).

ΣΚΟΠΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΙ
Εξάλειψη του φαινομένου της αντήχησης των κεραιών	• Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου
Βελτίωση της χρονικής ανάλυσης των δεδομένων	• Αποσυνέλιξη
Αφαίρεση περιθλάσεων και διόρθωση κλίσης των στρωμάτων	• Χωροθέτηση
Βελτιωμένη απεικόνιση ασθενικών και ισχυρών ανακλάσεων	• Εκθετική ενίσχυση
Αφαίρεση θορύβου	• Εφαρμογή φασματικών και χωρικών φίλτρων (Spatial Filter)

Πίνακας 3.1 : Συνοπτική παρουσίαση αντιστοίχισης μεταξύ σκοπού και επιλογής κατάλληλης μεθόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί σύγκριση σε επίπεδο ευχρηστίας και αποτελεσματικότητας μεταξύ δύο λογισμικών πακέτων του GPR PRO και του RADAN μέσω επεξεργασίας δεδομένων που συλλέχθηκαν από τέσσερις ανεξάρτητες περιοχές μελέτης. Με την εφαρμογή φίλτρων που εμπεριέχουν τα προγράμματα θα αναφερθούν διαφορές και ομοιότητες που εντοπίζονται. Τέλος, θα αναφερθεί η γενική εικόνα και εμπειρία που αποκομίζει ο χρήστης. Τα δεδομένα που θα επεξεργαστούν και θα συγκριθούν είναι:

1. Θαμμένες τοιχοδομές στην περιοχή της Μεραρχίας
2. Θαμμένοι σωλήνες εντός κυλινδρικού πλαστικού δοχείου πληρωμένο με άμμο
3. Μεταλλική αποθηκευτική δεξαμενή καυσίμων χωρητικότητας 40.000 γαλονιών κάτω από το έδαφος
4. Λίμνη Rockwell στο Οχάιο.

4.2 Επεξεργασία των δεδομένων

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την εισαγωγή των ακατέργαστων δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από τις περιοχές μελέτης σε κάθε ένα από τα λογισμικά πακέτα GPR PRO και RADAN. Αν επιθυμεί ο χρήστης, μπορεί να δει τις παραμέτρους που ορίστηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης προκειμένου να ανασυντάξει (editing) το ραδιογράφημα με αφαίρεση/διόρθωση προβληματικών ζωνών ή ακόμα και να αλλάξει το ρυθμό δειγματοληψίας όπου χρειάζονται τέτοιου είδους παρεμβάσεις. Οι παράμετροι παρουσιάζονται στο κεντρικό μενού του GPR-PRO, ενώ στο RADAN ο χρήστης πρέπει να επιλέξει Edit→File header για να εμφανιστούν το διάστημα δειγματοληψίας (ns), το μέγεθος των βημάτων (m), η ονομαστική συχνότητα (MHz), ο χρόνος έναρξης και λήξης (ns), όπως ακόμη και η θέση έναρξης και λήξης (m).

Ακολουθεί το στάδιο επεξεργασίας που περιλαμβάνει την εφαρμογή φίλτρων με στόχο να απομακρυνθεί το σήμα στις χαμηλές συχνότητες. Αυτό το βήμα είναι γνωστό ως “dewowing”. Το πολύ χαμηλής συχνότητας σήμα σχετίζεται με επαγωγικά φαινόμενα ή το περιορισμένο δυναμικό εύρος του εξοπλισμού. Στο λογισμικό πακέτο GPR-PRO εφαρμόζεται το φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (De-wow) από το μενού με τα μονοδιάστατα φίλτρα (1D Filtering) για την απαλοιφή του θορύβου. Το επόμενο βήμα της επεξεργασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή φίλτρου ενίσχυσης και συγκεκριμένα την εκθετική ενίσχυση των δεδομένων με στόχο την ανάδειξη των ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αντισταθμίζοντας τη γεωμετρική διασπορά του κύματος. Με αυτόν τον τρόπο συμπυκνώνεται το δυναμικό εύρος του παλμού δηλαδή μικραίνει ο λόγος της πιο ισχυρής προς την πιο ασθενή καταγραφή (Annan 1999).

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή των βασικών φίλτρων με την σειρά που αναφέρονται :

1. Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (background noise removal)
2. Αποσυνέλιξη (deconvolution)
3. Χωροθέτηση (migration)

Αντίθετα, στο πρόγραμμα RADAN εφαρμόζονται τα ίδια βασικά φίλτρα με τις ίδιες παραμέτρους, χωρίς να εφαρμοστεί το φίλτρο De-wow αλλά με ενίσχυση των δεδομένων.

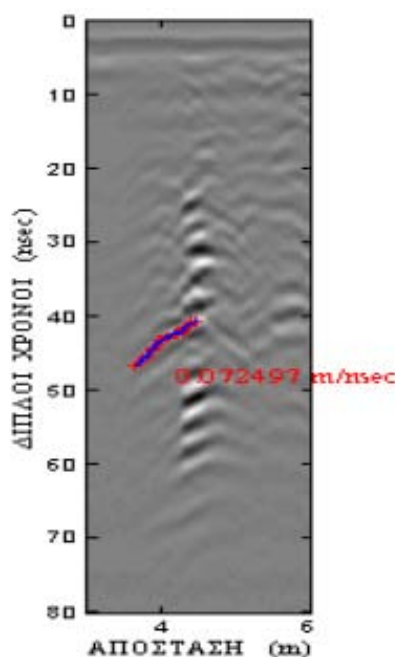
4.3 Απεικόνιση των δεδομένων

Η σωστή απεικόνιση των δεδομένων του γεωραντάρ διευκολύνει την ερμηνεία τους. Η απεικόνιση ενός μοναδικού ίχνους καθιστά την ερμηνεία δύσκολη. Μετακινώντας όμως τις κεραίες στην επιφάνεια του εδάφους με σταθερό βήμα και συνδιάζοντας περισσότερα ίχνη προκύπτει τομή γεωραντάρ, όπου ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην απόσταση σε m, ενώ ο κατακόρυφος στο χρόνο διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ns. Η τομή καθιστά ευκολότερη την ερμηνεία.

Το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί επίσης να κωδικοποιηθεί με χρώματα. Η απλοποίηση της απεικόνισης μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην ερμηνεία των δεδομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας προσεκτικά τη χρωματική κλίμακα και τον αριθμό των χρωμάτων. Το ίδιο επιτυγχάνεται με την απεικόνιση τμήματος των δεδομένων ή την αφαίρεση τμήματος των δεδομένων. Τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας δίνονται στις τομές γεωραντάρ που ακολουθούν.

4.4 Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος

Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος προκύπτει από την μέθοδο $t^2 - x^2$ (σχήμα 4.1). Για περιθλώμενο κύμα από την τομή γεωραντάρ L005, η ταχύτητα αυτή είναι περίπου ίση με 0.07 m/ns.



Σχήμα 4.1: Υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, από περιθλώμενο κύμα που καταγράφεται στα 40 – 50ns στην τομή γεωραντάρ L005.

Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και για δεδομένο χρόνο καταγραφής τους υπολογίζεται εύκολα το βάθος του ανακλαστήρα s (m):

$$v=s/t$$

όπου,

v : Ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (m/ns),

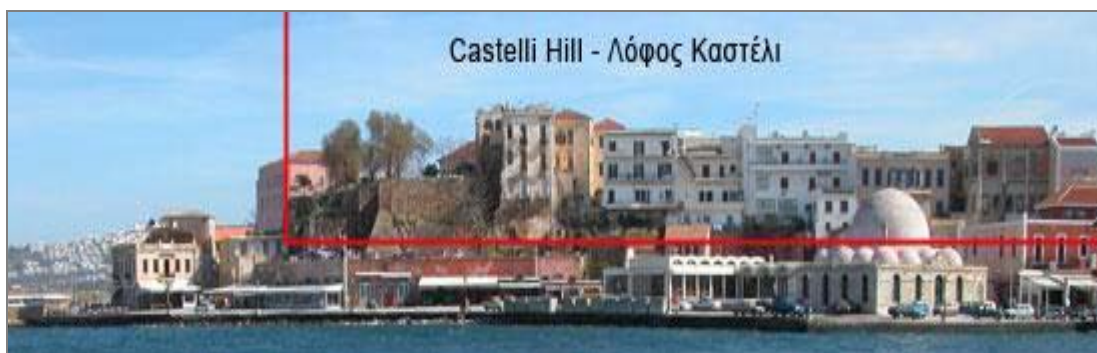
t : Χρόνος καταγραφής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ns).

Αξίζει να σημειωθεί πως το γεωραντάρ καταγράφει διπλούς χρόνους διάδοσης των κυμάτων. Για το λόγο αυτό απαιτείται διαίρεση του με το 2 πριν την χρήση του στην παραπάνω εξίσωση.

4.5 Θαμμένες τοιχοδομές στην περιοχή της Μεραρχίας

Αρχικά παρουσιάζονται αρχαιολογικά στοιχεία που αφορούν την περιοχή που μελετήθηκε μέσα από μία σύντομη ιστορική αναδρομή σχετικά με την χρονολόγηση του βυζαντινού τείχους. Παρατίθενται στοιχεία σχετικά με το πως διασώζεται μέχρι σήμερα το βυζαντινό τείχος, ποια είναι τα ορατά του σημεία και σε ποιες περιοχές εντός των ορίων τους εκτείνεται.

Η ιστορία των Χανίων ξεκινά την νεολιθική εποχή, όταν οι πρώτοι κάτοικοι δημιούργησαν οικισμό πάνω στο χαμηλό λόφο Καστέλι που υψώνεται πάνω από το ενετικό λιμάνι. Ο λόφος Καστέλι επιλέχτηκε κυρίως για τα πλεονεκτήματα που προσέφερε στην άμυνα των κατοίκων. Γενικά, κάθε ύψωμα προσφέρει έγκαιρο εντοπισμό του εχθρού που πλησιάζει και παράλληλα είναι δυσκολότερο να κατακτηθεί, ειδικά αν έχει απόκρημνες πλευρές που κάνουν την πρόσβαση του εχθρού δύσκολη ή αδύνατη. Ο φυσικά οχυρός λόφος του Καστελιού δίπλα στο βενετσιάνικο λιμάνι, κάποια βράχια που παρέχουν στοιχειώδη προστασία στα γενικά αφιλόξενα για πλοία βόρεια παράλια της Κρήτης (σχήμα 4.2), ένας εύφορος κάμπος, τον οποίο διαδέχονται ομαλά επίσης παραγωγικές οροσειρές, αποτέλεσαν τους λόγους επιλογής του χώρου από το αλάνθαστο κριτήριο των πρώτων οικιστών για την κατοίκηση του. Από τότε, για πέντε περίπου χιλιετίες, η πόλη υπάρχει και ακμάζει διαρκώς στον ίδιο χώρο, τη στιγμή που το σύνολο σχεδόν των οικισμών των βόρειων παραλίων της Κρήτης εμφανίζονται για ένα διάστημα και χάνονται ή υποβαθμίζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.2: Φωτογραφία τμήματος του βυζαντινού τείχους και περιοχής μελέτης.

Οι διαδοχικές οχυρώσεις της πόλης, αλλά και το σύστημα οχύρωσης της ευρύτερης περιοχής των Χανίων στα τέλη της βενετοκρατίας (πόλη Χανίων, Κόλπος Σούδας, Κόλπος Χανίων, Κόλπος Κισάμου), παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον για το σχεδιασμό, την υλοποίηση, το ρόλο και τη διατήρηση τους. Η ανάδειξη του συστήματος αυτού αποτελεί ένα σημαντικό στόχο για την έρευνα της εξέλιξης της οχυρωματικής αρχιτεκτονικής στο χώρο της Ανατολικής Μεσογείου.

Τα Χανιά απελευθερώνονται το 961 μ.Χ. όταν οι βυζαντινοί με το Νικηφόρο Φωκά ανακτούν το νησί από τους Άραβες και ξανακτίζουν την πόλη οχυρώνοντας το λόφο Καστέλι με τείχη που τον περιβάλλουν (σχήμα 4.3).

Από τα βυζαντινά τείχη σήμερα σώζεται το βόρειο τμήμα τους προς την πλευρά της θάλασσας και μικρό τμήμα στην οδό Σήφακα. Ειδικά στο τμήμα αυτό φαίνονται εντοιχισμένες βάσεις από κίονες, χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή υλικά δηλαδή από παλιότερα κατεστραμμένα κτίρια.



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση του βυζαντινού τείχους στο κέντρο που περιβάλλεται από το ενετικό (Archivio di Stato, Venezia, 1688).

Το 1204 οι Ενετοί προσαρτούν την Κρήτη στα εδάφη τους. Το 1252 αποφασίζουν να ανοικοδομήσουν και να προστατεύσουν τα Χανιά με φρούριο στο λόφο Καστέλι και ισχυρά τείχη που αγκαλιάζουν σημαντικά μεγαλύτερο τμήμα της πόλης σε σχέση με τα βυζαντινά τείχη. Τα ενετικά τείχη ενισχύονται με τέσσερις προμαχώνες, πύργους και τάφρο εξωτερικά, ώστε να μπορούν να αντέξουν τις επιθέσεις των πειρατών και άλλων εχθρών. Αναπτύσσεται το λιμάνι της πόλης και τα Χανιά αναδεικνύονται σε σημαντικό κέντρο εμπορίου (Ανδριανάκης 1997).

Σήμερα η χάραξη του οχυρωματικού περιβάλλον, όπως τη βλέπουμε και όπως μας είναι γνωστή από σχέδια της όψιμης βενετοκρατίας, είναι ακανόνιστη, περίπου ωοειδής, με κατεύθυνση από Ανατολή προς Δύση, όπου ήταν και οι δυο κύριες πύλες του και ακολουθεί το σχήμα του λόφου. Στη βόρεια και εν μέρει την ανατολική και τη δυτική πλευρά, το τείχος συμπληρώνει απλώς τον φυσικά οχυρό βράχο, ενώ το νότιο τμήμα του, όπου η κλίση του λόφου είναι πιο ομαλή, το τείχος υψώνεται από το επίπεδο έδαφος και τον καλύπτει εξ ολοκλήρου. Ο οχυρωματικός περίβολος αποτελείται

από ορθογώνιους ή πεντάπλευρους πύργους, που ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα μεταπύργια (σχήμα 4.4). Πρόσφατη ανασκαφή στη νότια πλευρά του βυζαντινού περιβόλου αποκάλυψε την ύπαρξη προτειχίσματος και τάφρου. Με τη μέθοδο του γεωραντάρ εντοπίστηκαν θαμμένες τοιχοδομές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων Κρήτης (Ανδριανάκης 2006).



Σχήμα 4.4: Η ανασκαφή στη νότια πλευρά του Βυζαντινού τείχους, συμβολή των οδών Καραολή Δημητρίου & Κατρέ (Ανδριανάκης 2006).

4.5.1 Συλλογή των δεδομένων

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά την περίοδο Μαρτίου-Οκτωβρίου 2007 με χρήση του γεωραντάρ (GPR). Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκαν συνολικά εκατόν τριάντα οχτώ (138) γραμμές, σε έξι καννάβους (Κ1-Κ4 και Κ6-Κ7), με προσανατολισμό διεύθυνσεως Νότου προς Βορρά και ισοαπόσταση μεταξύ των διαδοχικών γραμμών σε κάθε κάνναβο 50cm. Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το σύστημα SIR – 3000 της εταιρίας GSSI. Η κεντρική συχνότητα εκπομπής των ραδιοκυμάτων ήταν 400 MHz, το διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 146.5 ps και το βήμα διασκόπησης ίσο με 5 cm (εικ. 4.5).



Σχήμα 4.5: Μετρήσεις με χρήση του γεωραντάρ κατά την περίοδο Μαρτίου-Οκτωβρίου 2007.

Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων. Στον χάρτη που ακολουθεί (σχήμα 4.6) εντοπίζεται (με κόκκινο πλαίσιο) γεωγραφικά ο τόπος διεξαγωγής των μετρήσεων όπως είναι σήμερα.



Σχήμα 4.6 : Αεροφωτογραφία της πόλης των Χανίων όπου εντοπίζεται (με κόκκινο πλαίσιο) ο χώρος διεξαγωγής των μετρήσεων (Google Earth).

4.5.2 Επεξεργασία των δεδομένων των θαμμένων τοιχοδομών

Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης.

Κεντρική συχνότητα εκπομπής	Βήμα διασκόπησης	Διάστημα δειγματοληψίας	Συνολικός χρόνος καταγραφής
400MHz	0.05 m	146.5 ps	50 ns

Πίνακας 4.1 : Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων στην πλατεία Αγίου Μάρκου στην Παλιά πόλη των Χανίων Κρήτης.

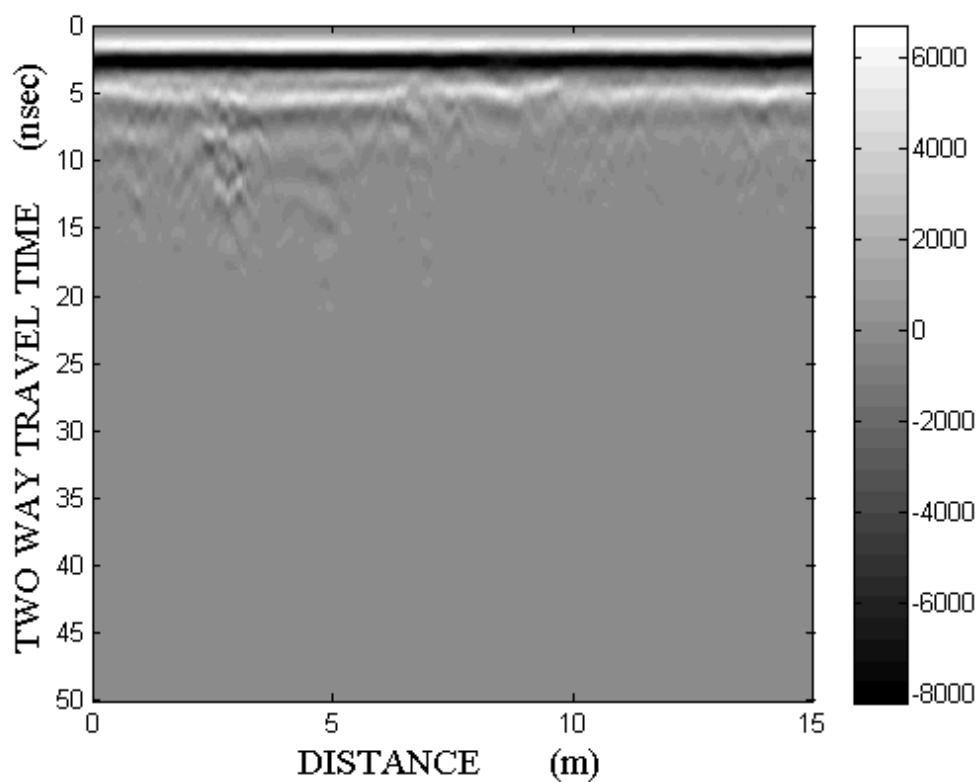
Αρχικά εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (De-wow) για την απαλοιφή του θορύβου σε συνδιασμό με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων (γραμμή μελέτης f014, κάρναβος 6) με στόχο την καλύτερη παρουσίαση ισχυρών και ασθενικών ανακλάσεων. Επόμενο στάδιο της επεξεργασίας ήταν η εφαρμογή των τριών βασικών φίλτρων στα δεδομένα με τη σειρά που αναφέρονται:

1. Εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου όπου έχουν αφαιρεθεί τα απευθείας κύματα και αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 15 ns (σχήμα 4.8). Αντίθετα, στο πρόγραμμα RADAN με εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου τα ανακλώμενα κύματα δεν είναι τόσο ευδιάκριτα (σχήμα 4.9).
2. Εφαρμογή αποσυνέλιξης με μήκος τελεστή 5 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,3 ns και "prewhitening" 8%, διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους και στα δύο προγράμματα, όπου παρατηρείται βελτίωση της χρονικής ανάλυσης των δεδομένων. Καλύτερο αποτέλεσμα αποσυνέλιξης παρατηρείται στο

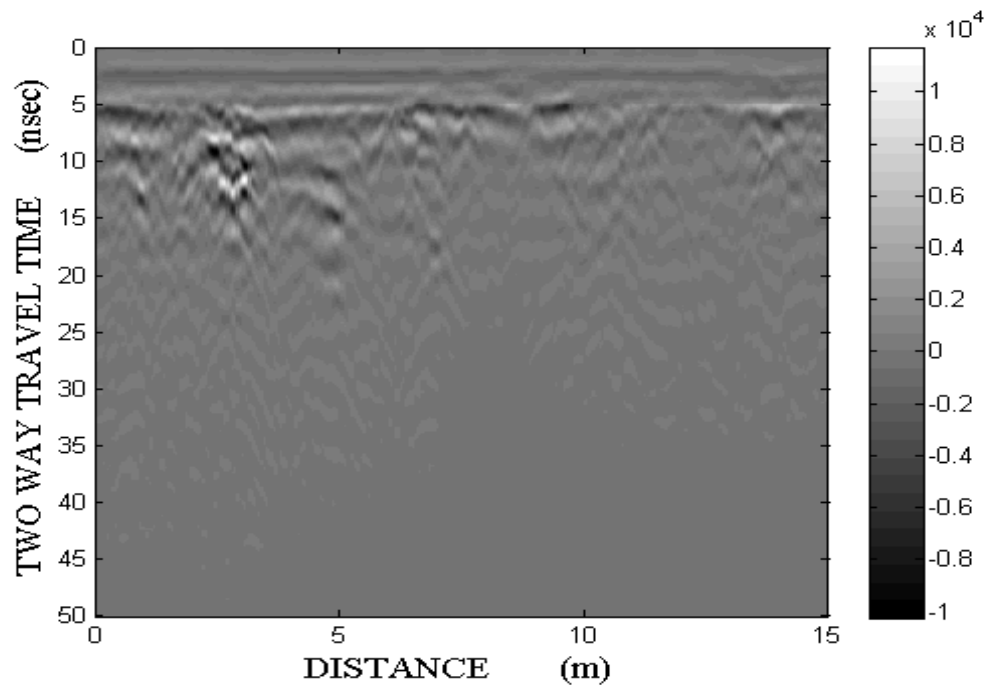
πρόγραμμα GPR-PRO (σχήμα 4.10) όπου έχουν τονιστεί και διακρίνονται τα ανακλώμενα κύματα μέχρι 15 ns σε σχέση με το RADAN (σχήμα 4.11).

3. Χωροθέτηση ορίζοντας την τιμή της ταχύτητας σε 0,07 m/ns και στα δύο προγράμματα. Η χωροθέτηση των δεδομένων δεν ήταν επιτυχής ιδιαίτερα στην τομή από το GPR-PRO (σχήμα 4.12).

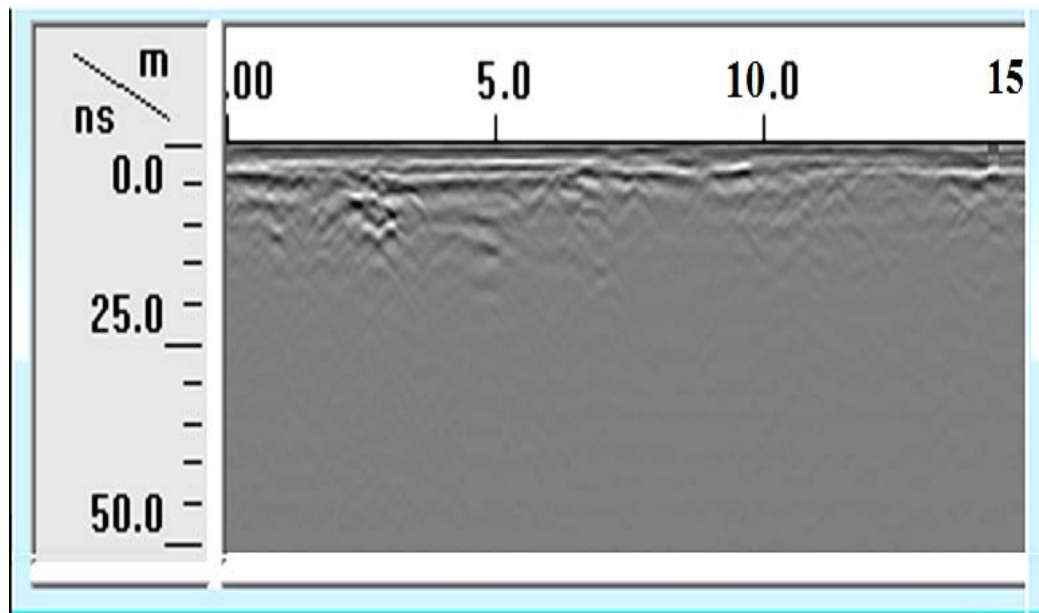
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων ανά δυνάδες .



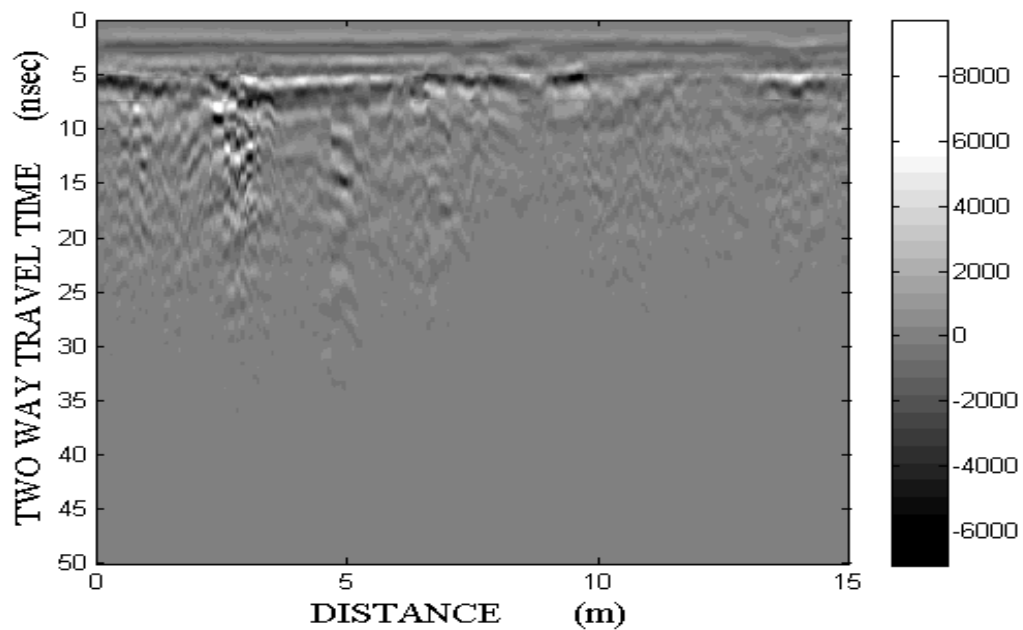
Σχήμα 4.7 : Ακατέργαστη τομή γεωραντάρ όπως προέκυψε από μετρήσεις με κεραίες των 400 MHz, διάστημα δειγματοληψίας 146,5 ps και βήμα διασκόπησης 5 cm.



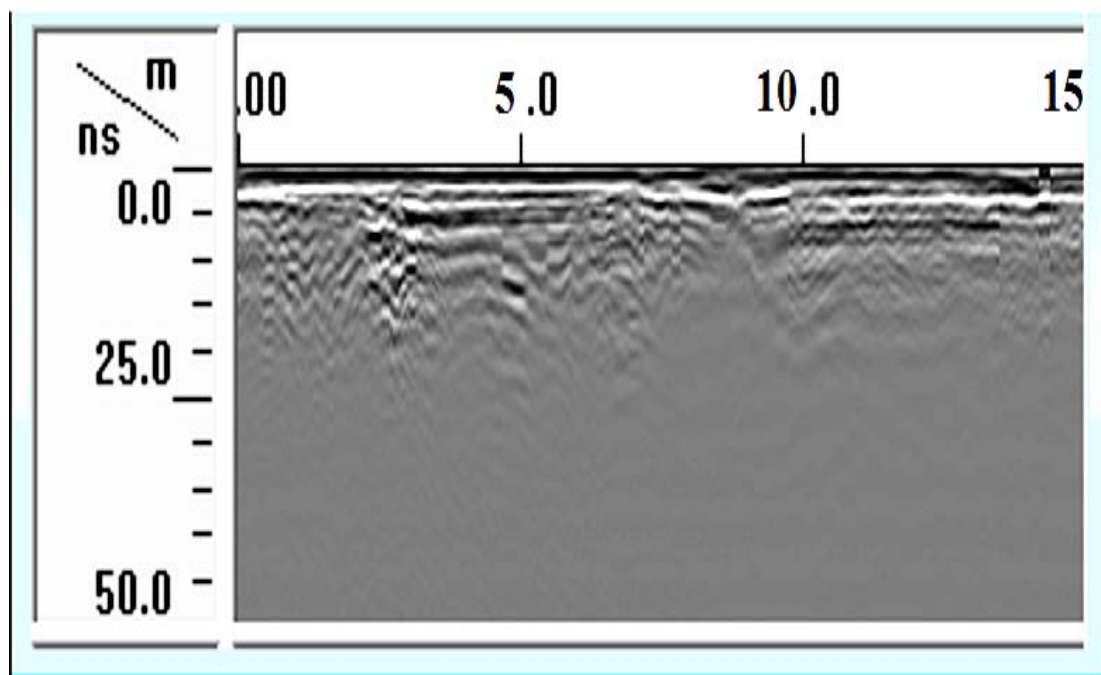
Σχήμα 4.8 : Τα δεδομένα αφού διορθωθούν (διόρθωση De-wow) ενισχύονται εκθετικά και εφαρμόζεται φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα GPR PRO.



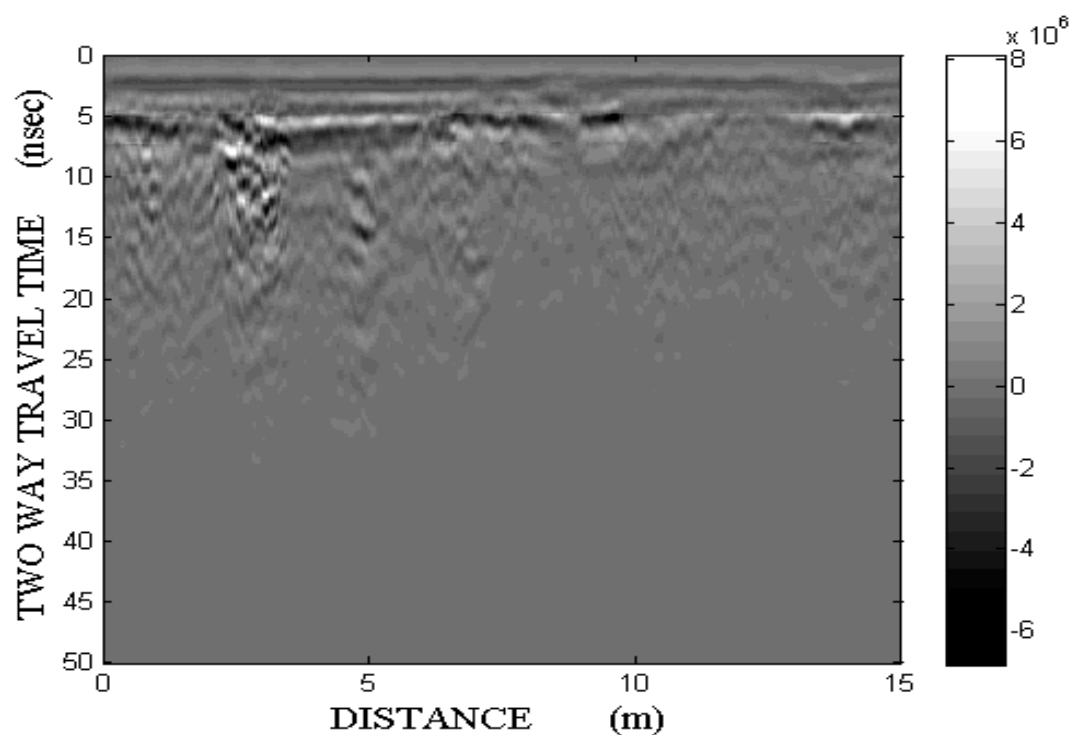
Σχήμα 4.9 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα RADAN.



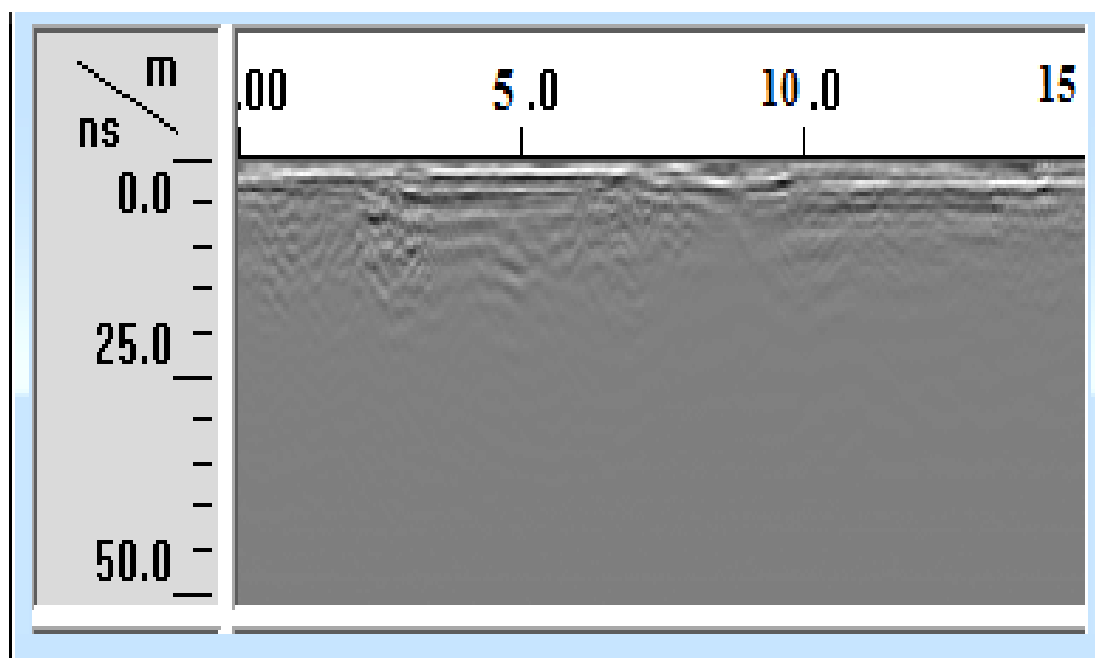
Σχήμα 4.10 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 5 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,3 ns και "prewhitening" 8% στο πρόγραμμα GPR-PRO.



Σχήμα 4.11 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 5 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,3 ns και "prewhitening" 8% στο πρόγραμμα RADAN.



Σχήμα 4.12 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0,07 m/ns στο πρόγραμμα GPR-PRO.



Σχήμα 4.13 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0,07 m/ns στο πρόγραμμα RADAN.

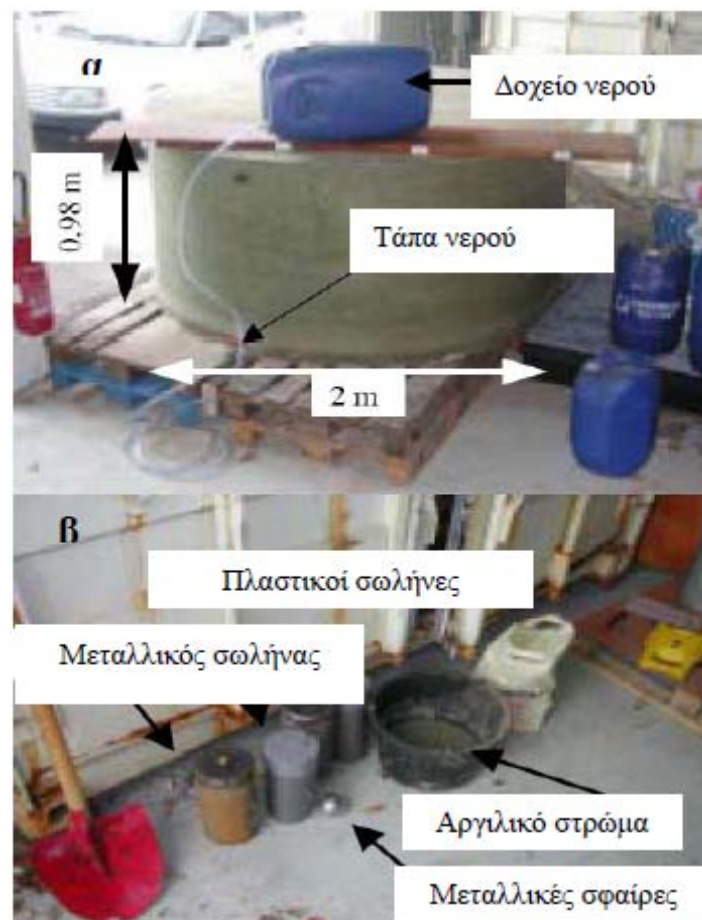
4.6 Θαμμένοι σωλήνες εντός κυλινδρικού πλαστικού δοχείου

Πρόκειται για ελεγχόμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο του Στρασβούργου στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος HYGEIA. Χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό πλαστικό δοχείο διαμέτρου 2 m και ύψους 0,98 m το οποίο πληρώθηκε με κόκκους άμμου διαμέτρου 0.3-0.4 mm. Στο κάτω μέρος του δοχείου υπήρχε στρόφιγγα για την εισαγωγή και εξαγωγή νερού στο δοχείο (σχήμα 4.14α) Μέσα στην άμμο τοποθετήθηκαν διάφορα αντικείμενα (σχήμα 4.14β) όπως ένας πλαστικός σωλήνας πληρωμένος με νερό (WPVC), ένας κενός πλαστικός σωλήνας (APVC), ένας σιδερένιος σωλήνας (Steel), τρεις μεταλλικές σφαίρες (P1, P2, P3) καθώς και ένα αργιλικό στρώμα (A). Οι διαστάσεις και το βάθος ταφής των αντικειμένων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2 (Loeffler και Bano 2004).

Οι μετρήσεις (σχήμα 4.14γ) πραγματοποιήθηκαν με το γεωραντάρ Pulse Ekko1000 (Sensors and Software). Μετά από πειράματα αποφασίστηκε η χρήση κεραιών συχνότητας εκπομπής 1200 MHz, διότι παρέχουν την καλύτερη ανάλυση καθώς και ικανό βάθος διείσδυσης, ώστε να καταγραφεί η ανάκλαση από τον πυθμένα του δοχείου, τουλάχιστον στην περίπτωση που η άμμος ήταν στεγνή. Διασκοπήθηκαν 71 παράλληλες γραμμές μελέτης με βήμα δειγματοληψίας 2 cm και ισοαπόσταση γραμμών ίση με 2 cm (σχήμα 4.15). Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά μήκος τριών κάθετων γραμμών μελέτης. Η πρώτη ομάδα δεδομένων συλλέχθηκε, όταν η άμμος ήταν στεγνή. Έπειτα εισήχθησαν 340 lit νερού και σχηματίστηκε υδροφόρος ορίζοντας σε βάθος 72 cm και έπειτα άλλα 240 lit, οπότε ο υδροφόρος ανέβηκε στα 48 cm. Για κάθε βάθος του υδροφόρου πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες μετρήσεις που είχαν στόχο την εκτίμηση της περιεκτικότητας της άμμου σε νερό. Για την παρουσίαση της μεθοδολογίας επιλέχθηκε η γραμμή μελέτης P36 (σχήμα 4.15) η οποία διασχίζει το δοχείο ακριβώς πάνω από το κέντρο των τριών σωλήνων την περίοδο πριν εκχυθεί οποιαδήποτε ποσότητα νερού ή πετρελαιοειδών. Στόχος είναι η αξιολόγηση των λογισμικών πακέτων ως προς τη δυνατότητα τους να ξεχωρίσουν τους σωλήνες από το περιβάλλον τους με την εφαρμογή διάφορων ψηφιακών φίλτρων, αλλά και μεταξύ τους.

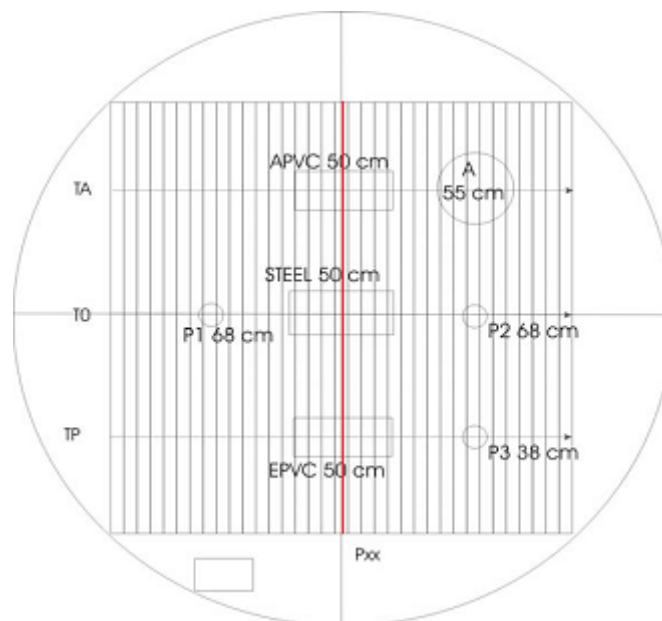
Πίνακας 4.2 Διαστάσεις και βάθος ταφής των αντικειμένων.

Αντικείμενα	Μήκος (mm)	Διάμετρος (mm)	Βάθος (cm)
Σιδερένιος σωλήνας (Steel)	316	140	50
Πλαστικοί σωλήνες (APVC, WPVC)	298	126	50
Μεταλλικές μπάλες (P1,P2, P3)	-	74	38, 68
Αργιλικό στρώμα	80 (πάχος)	230	55

**Σχήμα 4.14:** (α) Το δοχείο μέσα στο οποίο πραγματοποιήθηκε το ελεγχόμενο πείραμα και (β) τα αντικείμενα που τοποθετήθηκαν σε αυτό (Loeffler και Bano, 2004).



Σχήμα 4.14: (γ) Συλλογή των δεδομένων του πειράματος.



Σχήμα 4.15: Κάτοψη του δοχείου. Διακρίνονται τα αντικείμενα, το βάθος ταφής τους καθώς και οι γραμμές μελέτης (Loeffler και Bano 2004).

4.6.1 Επεξεργασία των δεδομένων των θαμμένων σωλήνων

Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης.

Κεντρική συχνότητα εκπομπής	Βήμα διασκόπησης	Διάστημα δειγματοληψίας	Συνολικός χρόνος καταγραφής
1200MHz	0.02 m	0.1 ns	44.7 ns

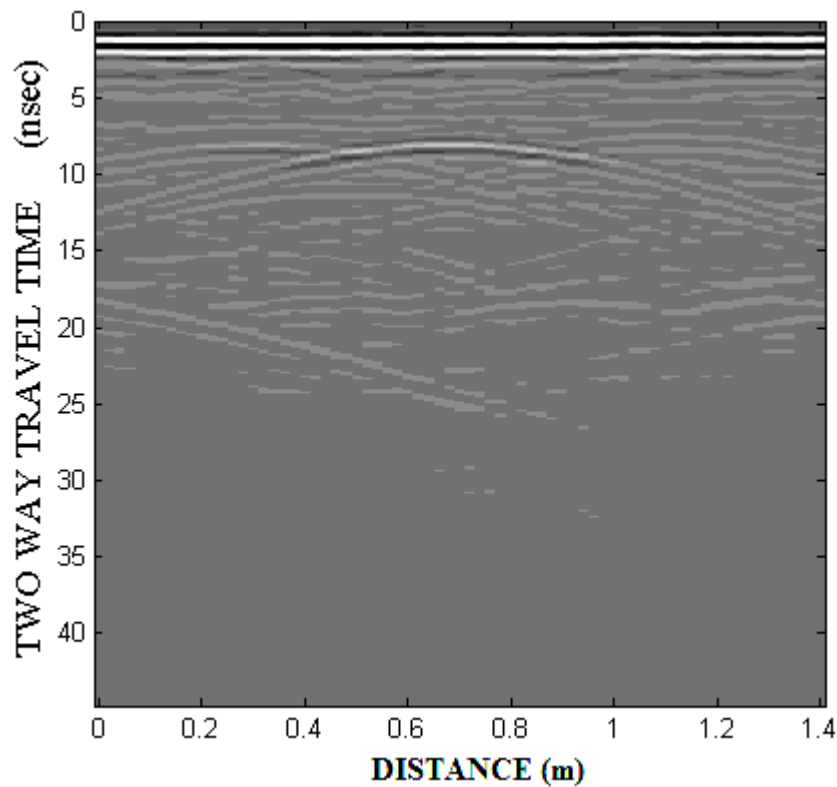
Πίνακας 4.3: Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τη διεξαγωγή του ελεγχόμενου πειράματος εντοπισμού των θαμμένων σωλήνων.

Αρχικά στο πρόγραμμα GPR-PRO στην τομή γεωραντάρ από θαμμένους σωλήνες εντός πλαστικού δοχείου πληρωμένο με άμμο εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (De-wow) για την απαλοιφή του θορύβου με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων. Στα δεδομένα μετά από την εξομάλυνση καθώς και στα χαρακτηριστικά τους, διαπιστώθηκε ότι τα ανακλώμενα κύματα από τους τρεις σωλήνες και το αργιλικό στρώμα παρουσιάζουν μεγάλα πλάτη στα 10 ns και στα 20 ns αντίστοιχα.

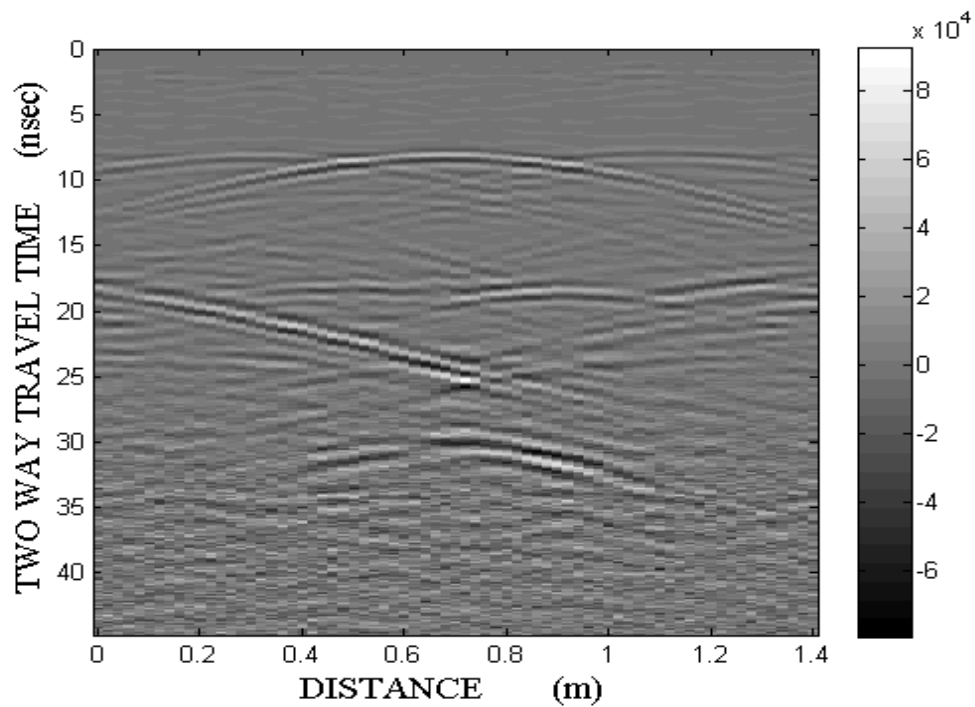
Επόμενο στάδιο της επεξεργασίας ήταν η εφαρμογή των τριών βασικών φίλτρων στα επεξεργασμένα δεδομένα για τα τελικά αποτελέσματα:

1. Εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 35 ns (σχήματα 4.17 και 4.18).
2. Εφαρμογή αποσυνέλιξης με μήκος τελεστή 3,5 ns, χρόνο πρόβλεψης 0,9 ns και "prewhitening" 8%, διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους και στα δύο προγράμματα (σχήματα 4.19 και 4.20).
3. Χωροθέτηση ορίζοντας την τιμή της ταχύτητας σε 0,12 m/ns και στα δύο προγράμματα. Παρατηρείται ειδικά μετά τη χωροθέτηση ότι οι σωλήνες που ήταν θαμμένοι σε βάθος περίπου μισό μέτρο δίνουν καταγραφές που

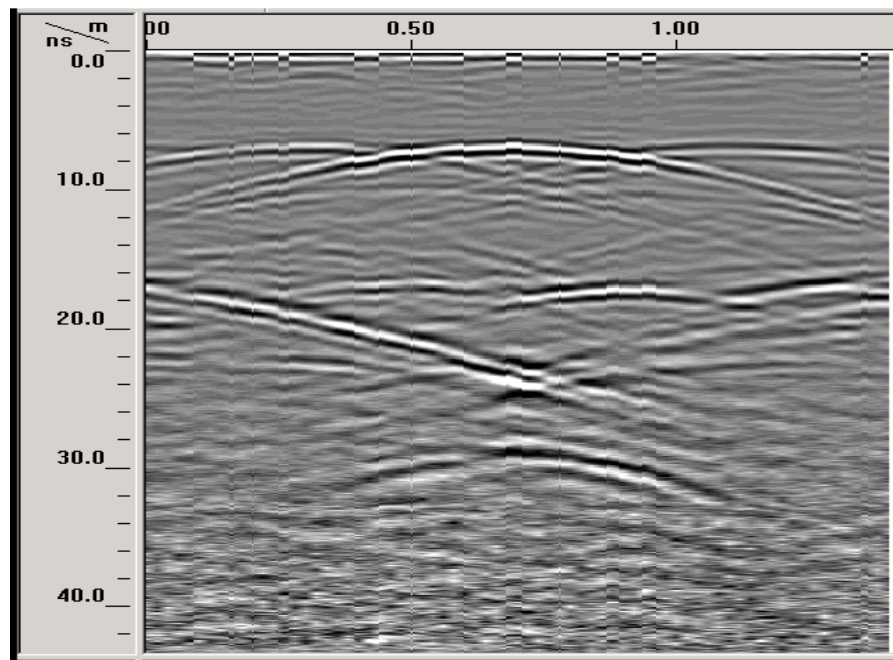
διακρίνονται από την υπόλοιπη τομή του γεωραντάρ (σχήματα 4.21 και 4.22). Η χωροθέτηση στο πρόγραμμα GPR-PRO έχει βελτιώσει την απεικόνιση των σωλήνων αλλά έχει υπερχωροθετήσει την ανάκλαση του πυθμένα. Ενώ στο πρόγραμμα RADAN έχει βελτιωθεί η απεικόνιση του ανακλαστήρα του πυθμένα και έχουν αφαιρεθεί οι πλευρικές ανακλάσεις.



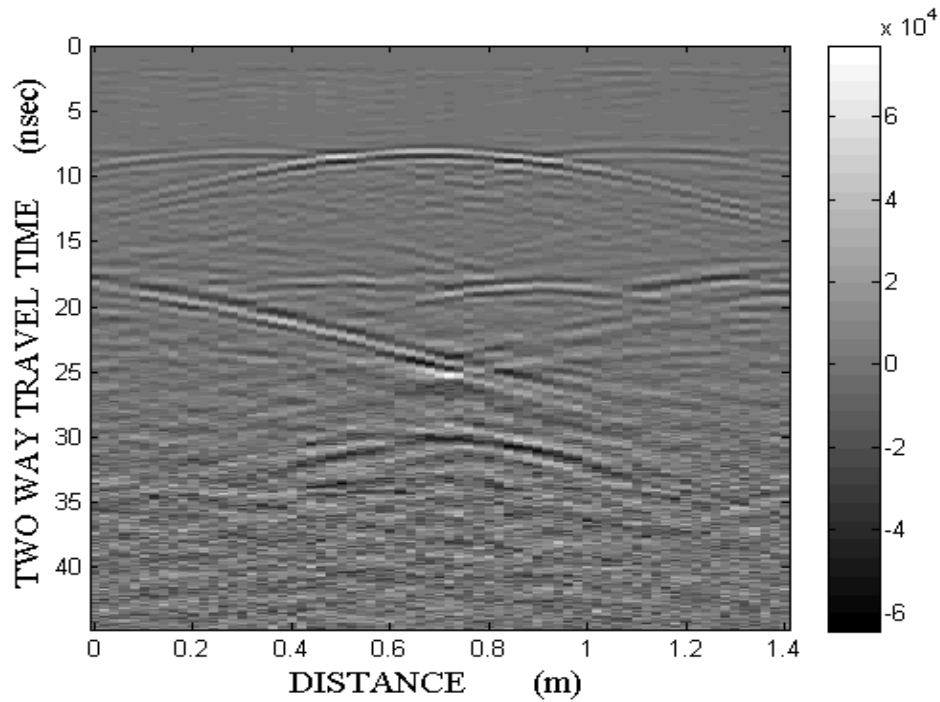
Σχήμα 4.16: Ακατέργαστη τομή γεωραντάρ όπως προέκυψε από μετρήσεις με κεραίες των 1200 MHz, διάστημα δειγματοληψίας 0,1 ns και βήμα διασκόπησης 2 cm.



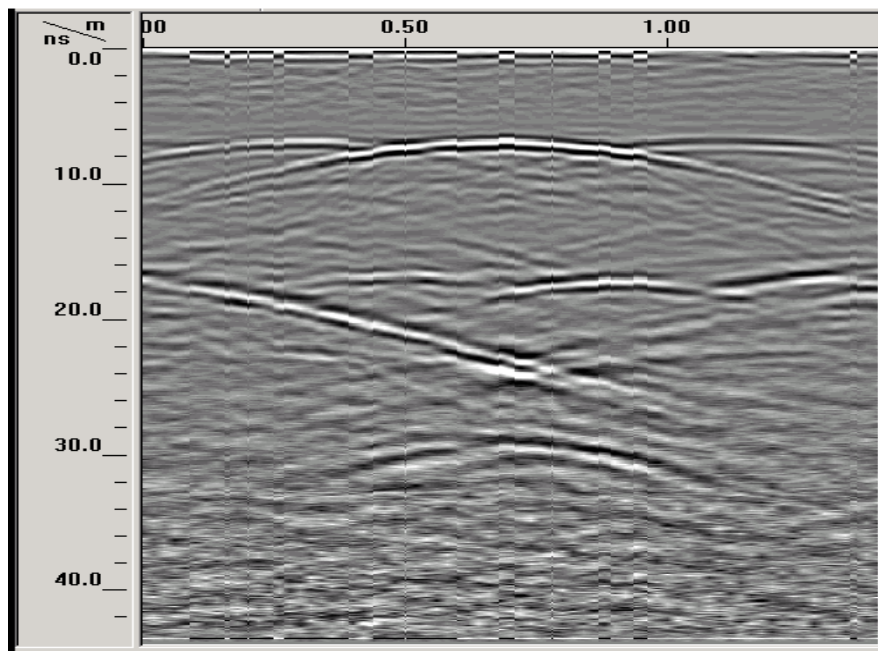
Εικ.4.17 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα GPR-PRO.



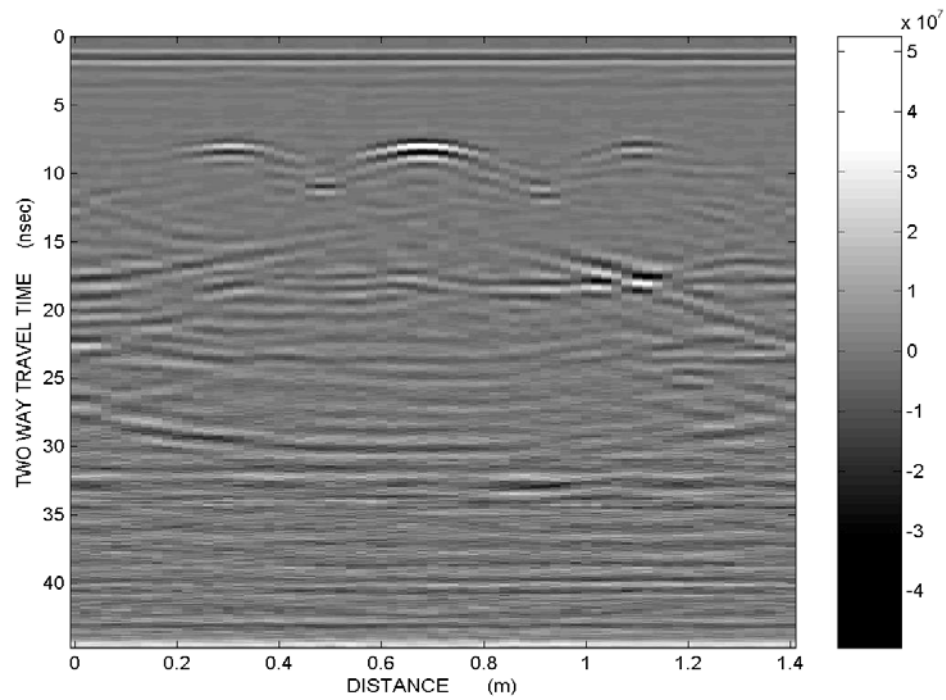
Εικ.4.18 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα RADAN.



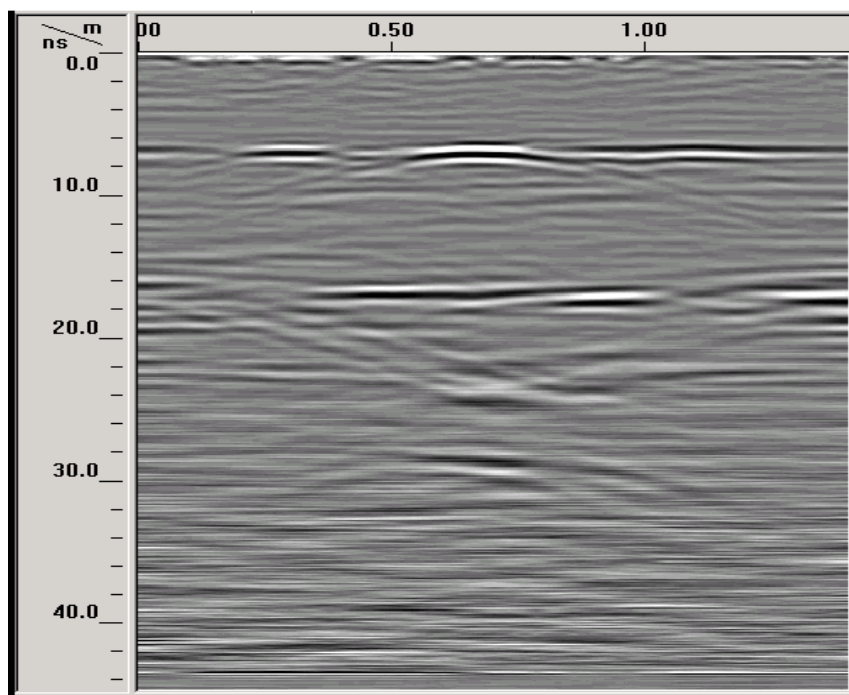
Σχήμα 4.19 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 3,5 ns, χρόνο πρόβλεψης 0,9 ns και "prewhitening" 8% στο GPR-PRO.



Σχήμα 4.20 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 3,5 ns, χρόνο πρόβλεψης 0,9 ns και "prewhitening" 8% στο RADAN.



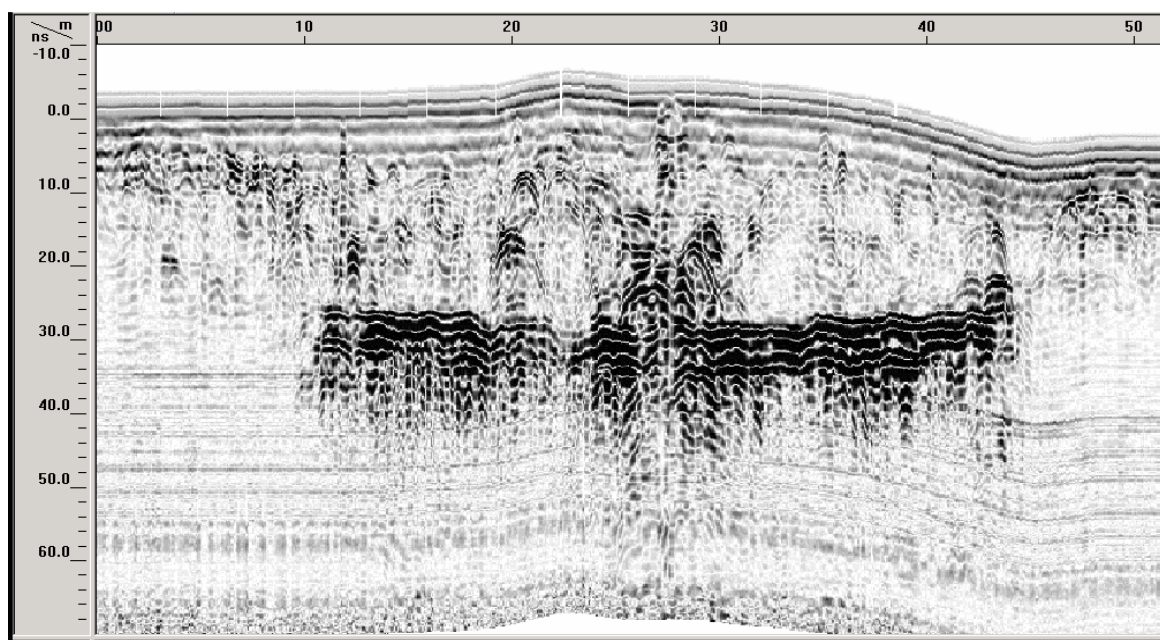
Σχήμα 4.21 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0,12 m/ns στο GPR-PRO.



Σχήμα 4.22 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0,12 m/ns στο πρόγραμμα RADAN.

4.7 Δεξαμενή καυσίμων

Πρόκειται για δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από την περιοχή της Βιρτζίνιας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής προκειμένου να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες θέσης, η χωρητικότητα, τα όρια και οι διαστάσεις μίας μεταλλικής αποθηκευτικής δεξαμενής καυσίμων. Η κλίση που φέρεται να παρουσιάζει η δεξαμενή στη τομή γεωραντάρ οφείλεται στο ανάγλυφο της περιοχής και όχι σε πλευρική μεταβολή της ταχύτητας. Αποφασίστηκε η χρήση κεραιών συχνότητας εκπομπής 500 MHz με διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 156,23 ps και βήμα διασκόπησης 5 cm, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ανάλυση καθώς και ικανό βάθος διείσδυσης, ώστε να καταγραφούν οι ανακλάσεις. Τα τελικά αποτελέσματα της επεξεργασίας δίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Σχήμα 4.23: Τομή γεωραντάρ όπως προέκυψε από μετρήσεις με κεραίες των 500 MHz, διάστημα δειγματοληψίας 156.25 ps και βήμα διασκόπησης 5 cm ύστερα από διόρθωση για το υψόμετρο.

4.7.1 Επεξεργασία των δεδομένων της δεξαμενής καυσίμων

Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης.

Κεντρική συχνότητα εκπομπής	Βήμα διασκόπησης	Διάστημα δειγματοληψίας	Συνολικός χρόνος καταγραφής
500MHz	0.05 m	0.32 ns	79.8 ns

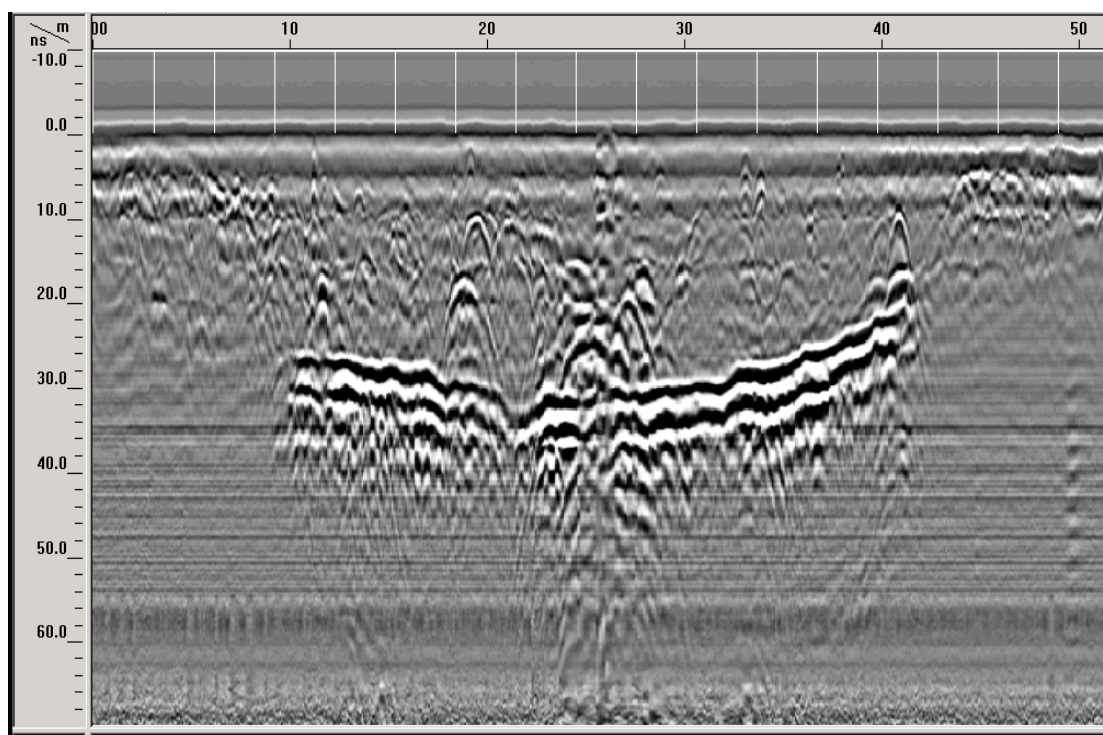
Πίνακας 4.4: Οι παράμετροι που ορίστηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης.

Αρχικά στο πρόγραμμα GPR-PRO στην τομή γεωραντάρ από τη θαμμένη αποθηκευτική δεξαμενή καυσίμων εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (De-wow) για την απαλοιφή του θορύβου με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων. Επόμενο στάδιο της επεξεργασίας ήταν η εφαρμογή των τριών βασικών φίλτρων στα προεπεξεργασμένα δεδομένα για τα τελικά αποτελέσματα:

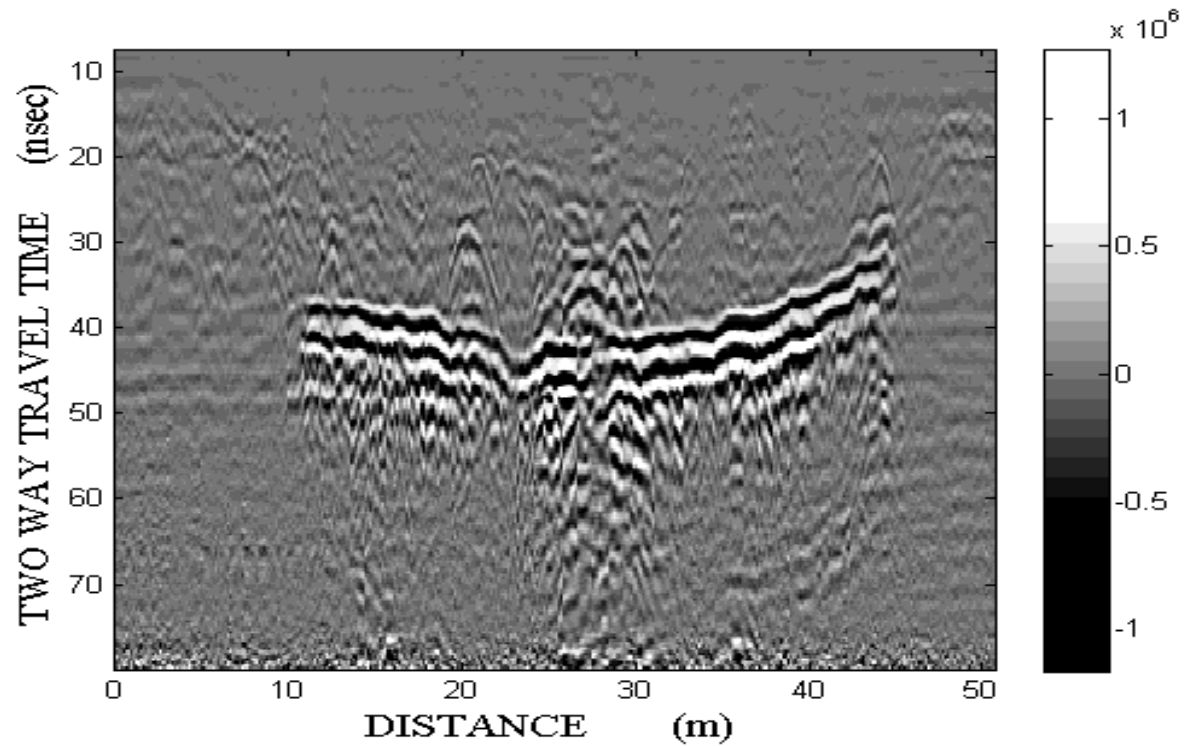
1. Εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 40 ns. Αντίθετα, στο RADAN η εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου επέφερε την εξάλειψη του φαινομένου της αντήχησης των κεραιών σε ικανοποιητικό βαθμό. Και στα δύο προγράμματα παρατηρείται η αφαίρεση των απευθείας κυμάτων (σχήματα 4.25 και 4.26).
2. Εφαρμογή αποσυνέλιξης με μήκος τελεστή 7,59 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,31 ns και ‘‘prewhitening’’ 8%, διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους και στα δύο προγράμματα (σχήματα 4.27 και 4.28). Στην περίπτωση αυτή, η αποσυνέλιξη τόσο στο GPR-PRO όσο και στο RADAN θεωρείται ικανοποιητική καθώς βελτιώνει τη χρονική ανάλυση της καταγραφής.
3. Χωροθέτηση στο πρόγραμμα RADAN χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες. Η επιλογή της σωστής ταχύτητας παίζει σημαντικό ρόλο για να

είναι επιτυχής η εφαρμογή της χωροθέτησης. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή με 0,1 m/ns (σχήμα 4.29) , 0,2 m/ns (σχήμα 4.30) και 0,4 m/ns (σχήμα 4.31) όπου παρατηρείται ότι όταν είναι μεγαλύτερη η ταχύτητα από την πραγματική προκαλείται υπερχωροθέτηση στα δεδομένα. Αυτό αποτελεί και ένδειξη για την επιλογή της σωστής ταχύτητας. Ορίζοντας τη τιμή της ταχύτητας σε 0,1 m/ns απομακρύνονται οι περισσότερες περιθλάσεις και αυτή θεωρείται ως η καταλληλότερη τιμή.

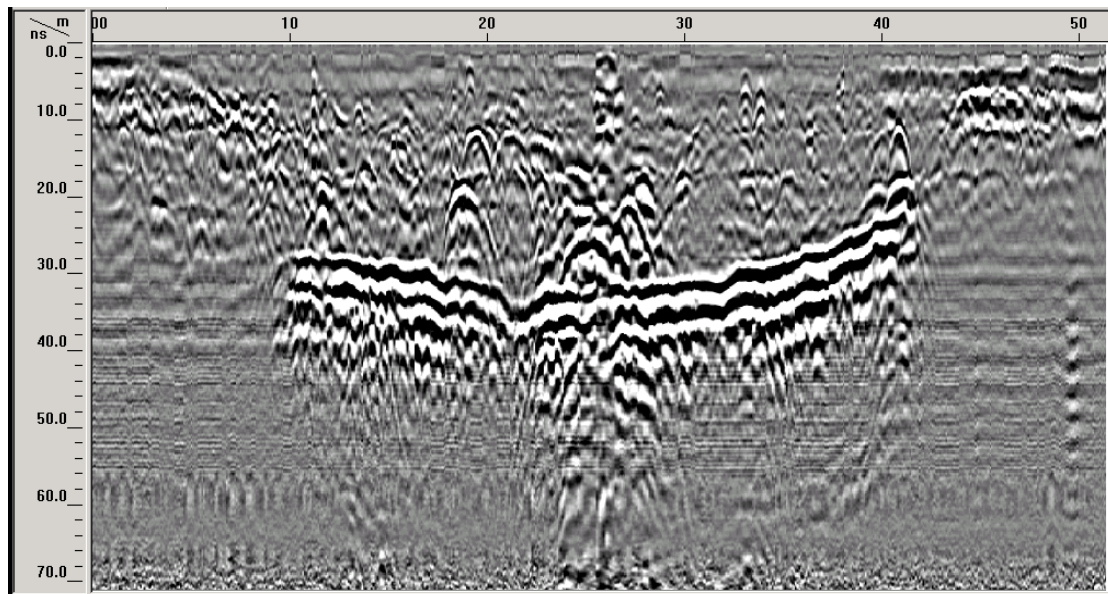
Σύμφωνα με τις εικόνες 4.21 και 4.27 το βάθος ταφής της δεξαμενής κυμαίνεται από 1 μέχρι 1,5 μέτρο.



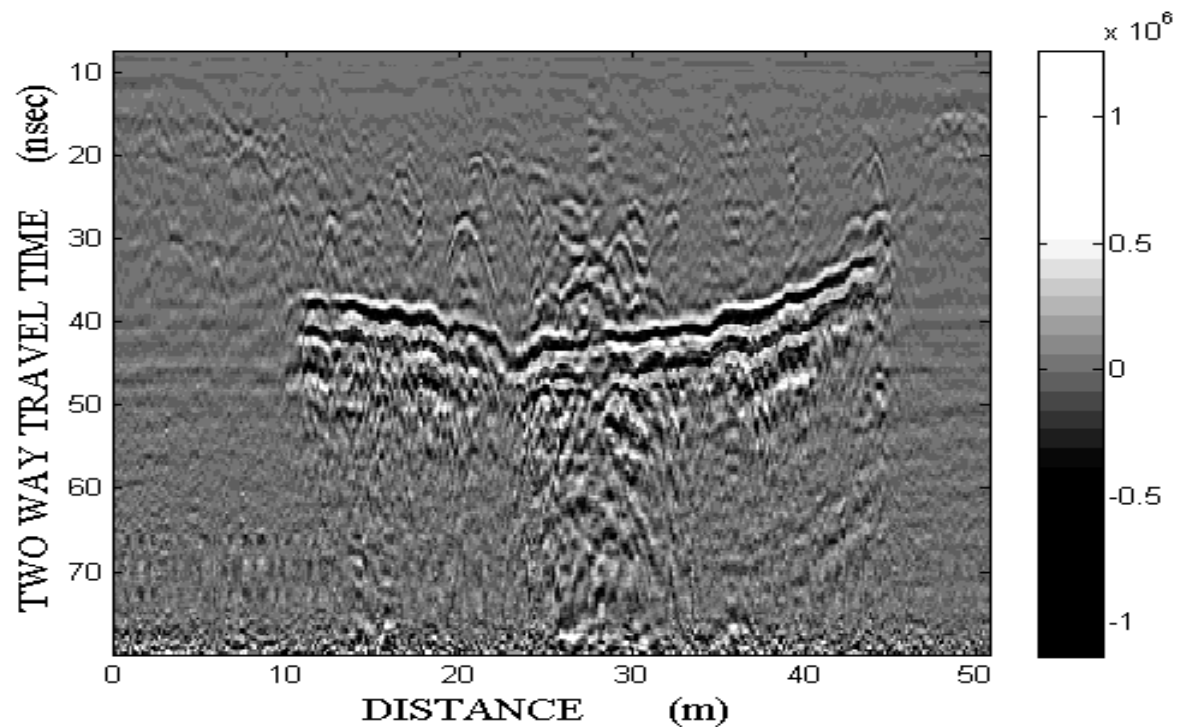
Σχήμα 4.24: Ακατέργαστη τομή γεωραντάρ. Προέκυψε από μετρήσεις με κεραίες των 500 MHz, διάστημα δειγματοληψίας 156.25 ps και βήμα διασκόπησης 5 cm.



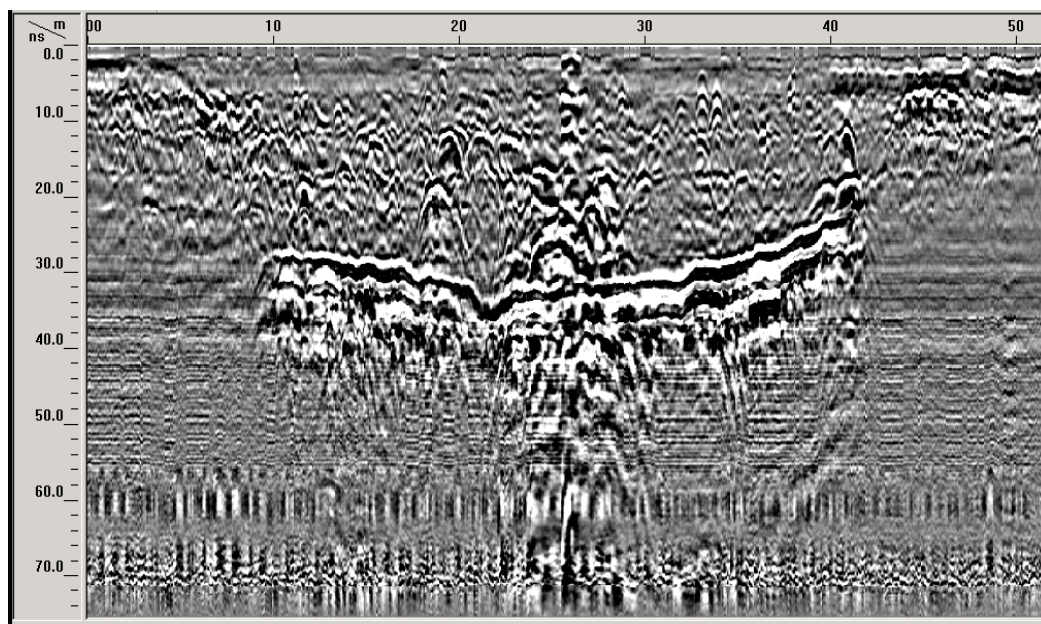
Σχήμα 4.25: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα GPR-PRO.



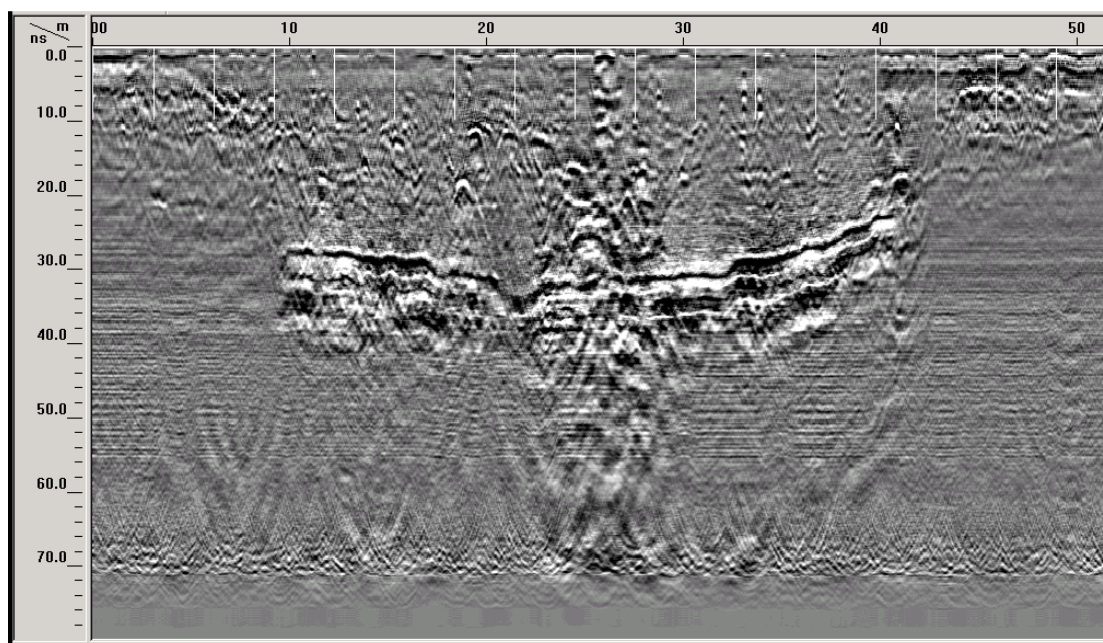
Σχήμα 4.26: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα RADAN.



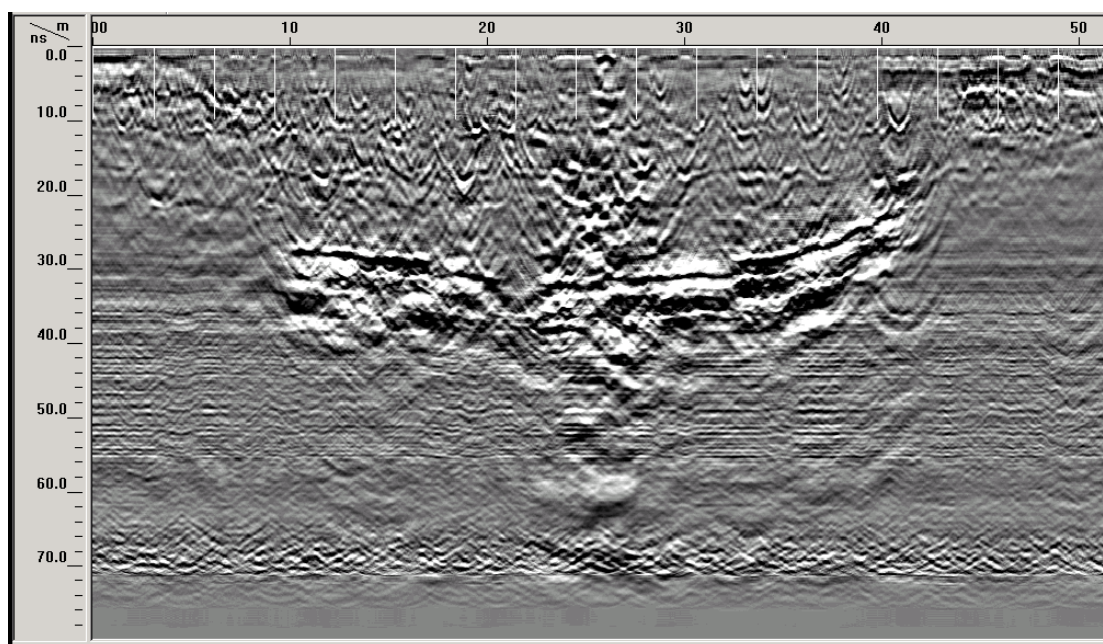
Σχήμα 4.27: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 7,59 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,31 ns και "prewhitening" 8% στο πρόγραμμα GPR-PRO.



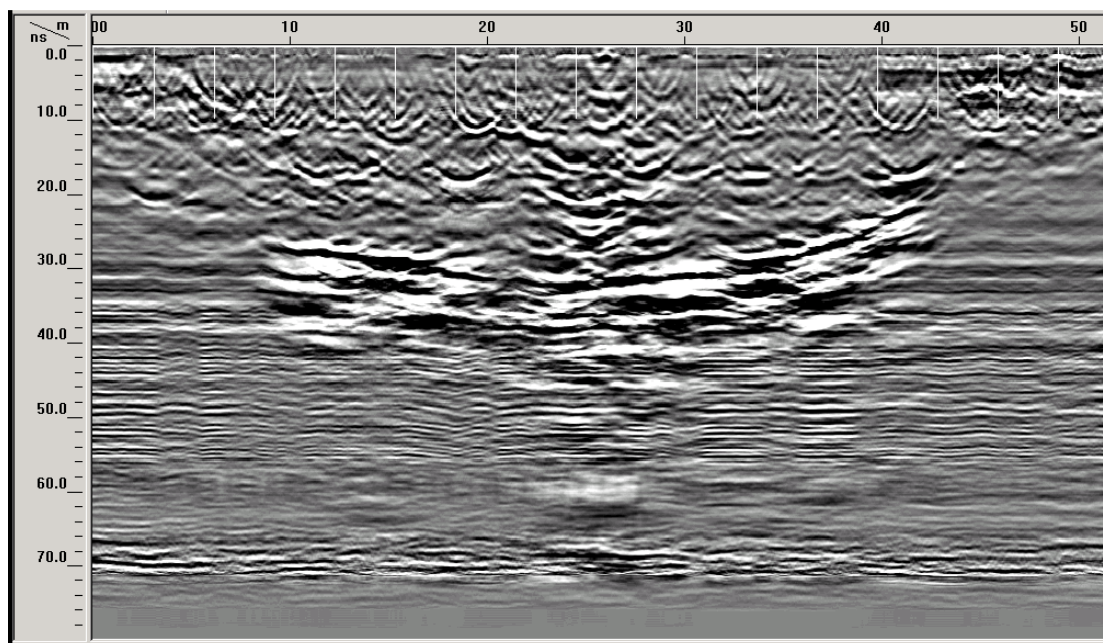
Σχήμα 4.28: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 7,59 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,31 ns και "prewhitening" 8% στο πρόγραμμα RADAN.



Σχήμα 4.29: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0,1 m/ns στο πρόγραμμα RADAN.



Σχήμα 4.30: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0,2 m/ns στο πρόγραμμα RADAN.



Σχήμα 4.31: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0,4 m/ns στο πρόγραμμα RADAN.

4.8 Λίμνη Rockwell στο Οχάιο

Πρόκειται για δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από τη λίμνη Rockwell στο Οχάιο προκειμένου να προσδιοριστεί και να καταγραφεί το ανάγλυφο του πυθμένα της λίμνης.

Στον χάρτη που ακολουθεί (σχήμα 4.32) εντοπίζεται γεωγραφικά ο τόπος διεξαγωγής των μετρήσεων όπως είναι σήμερα.



Σχήμα 4.32: Αεροφωτογραφία της λίμνης Rockwell στο Οχάιο (Google Earth).

4.8.1 Επεξεργασία των δεδομένων της λίμνης Rockwell

Συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διασκόπησης.

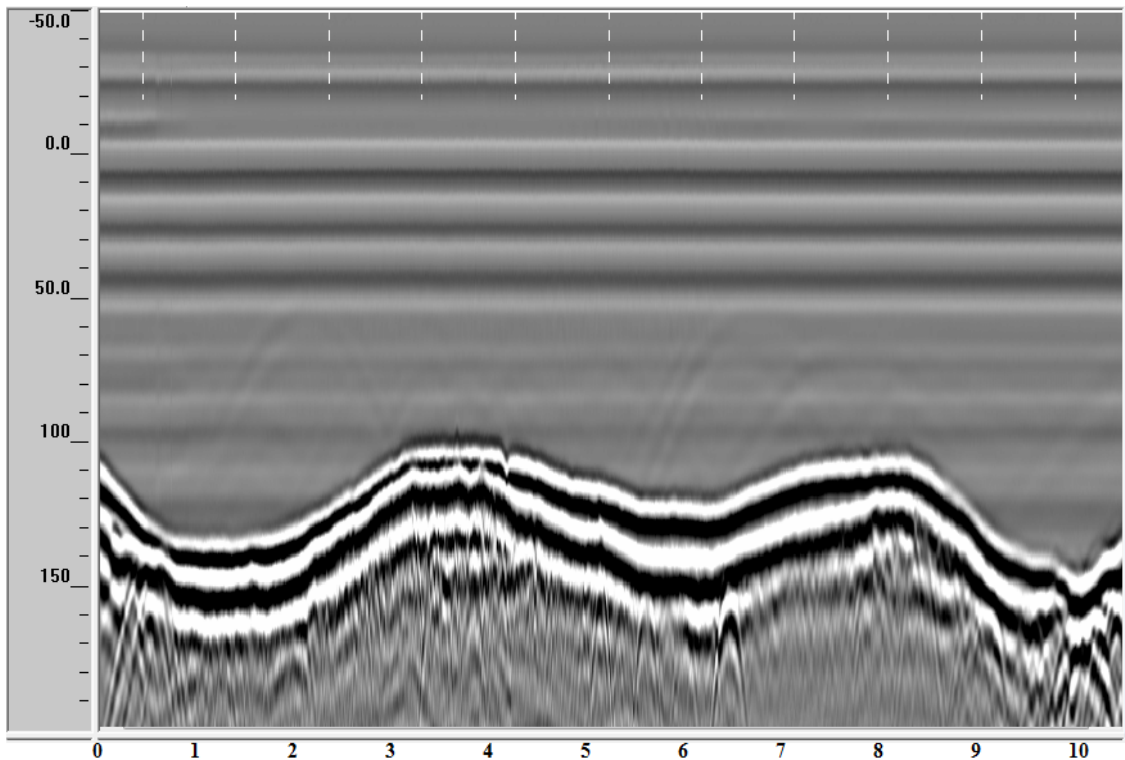
Κεντρική συχνότητα εκπομπής	Βήμα διασκόπησης	Διάστημα δειγματοληψίας	Συνολικός χρόνος καταγραφής
310MHz	0.01 m	488.281 ps	249.512 ns

Πίνακας 4.5 : Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων στη λίμνη Rockwell στο Οχάιο.

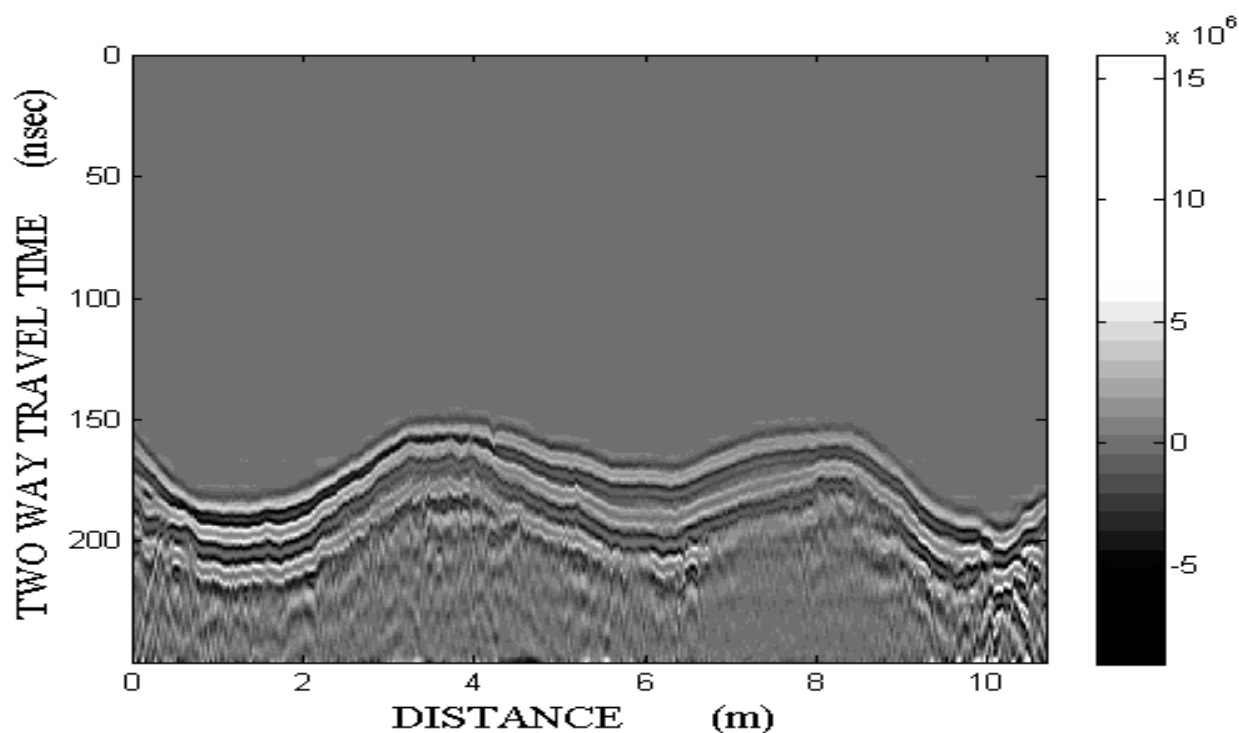
Αρχικά στο πρόγραμμα GPR-PRO στην τομή γεωραντάρ από τη λίμνη Rockwell εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (De-wow) για την απαλοιφή του θορύβου με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων. Επόμενο στάδιο της επεξεργασίας ήταν η εφαρμογή των τριών βασικών φίλτρων στα επεξεργασμένα δεδομένα για τα τελικά αποτελέσματα:

1. Εφαρμογή του φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 180 ns (σχήματα 4.34 και 4.35).
2. Εφαρμογή αποσυνέλιξης με μήκος τελεστή 15 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,4 ns και "prewhitening" 8%, διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους και στα δύο προγράμματα (σχήματα 4.36 και 4.37). Ο πυθμένας μετά την αποσυνέλιξη δείχνει ανακλάσεις από λεπτά στρώματα που είναι οι διαδοχικές στρώσεις των ιζημάτων μέσα στη λίμνη.
3. Χωροθέτηση ορίζοντας την τιμή της ταχύτητας σε 0,03 m/ns και στα δύο προγράμματα. Η χωροθετημένη τομή δείχνει έναν κύριο ανακλαστήρα που αντιστοιχεί στον πυθμένα και απεικονίζει καλύτερα τα τμήματα που είναι οριζόντιος (ζώνη Α και Β) καθώς επίσης και τους κεκλιμένους ανακλαστήρες (ζώνη Γ) (σχήμα 4.39).

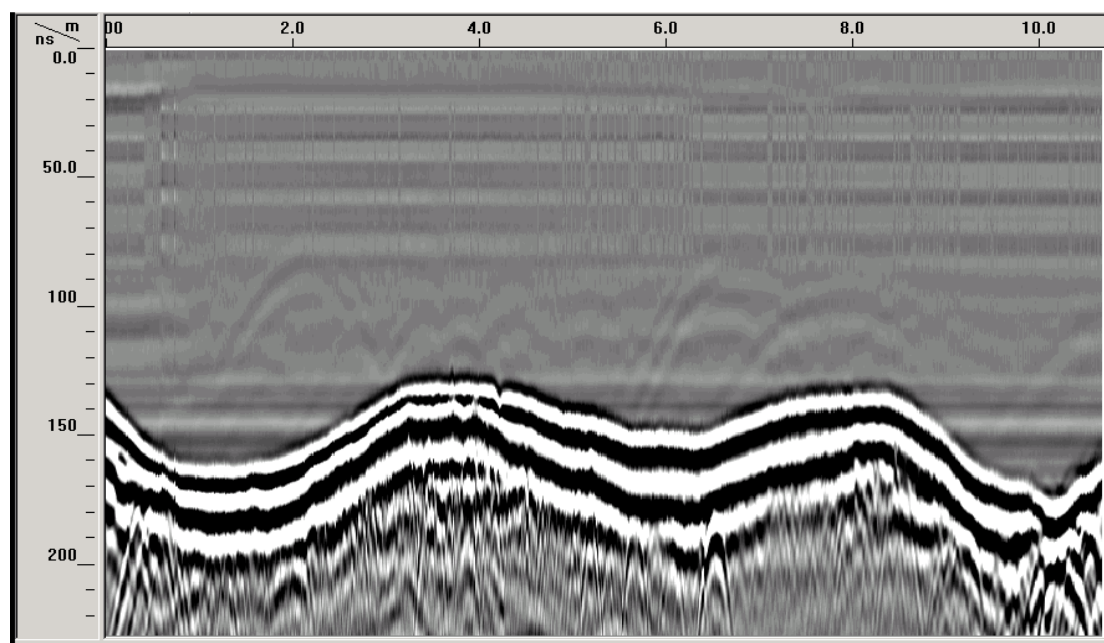
Ύστερα από την εφαρμογή των φίλτρων η οριζόντια μεταβολή είναι πιο έντονη και το τελικό αποτέλεσμα πιο ξεκάθαρο. Στην πραγματικότητα η λίμνη είναι πιο απόκριμη με μεγαλύτερες διακυμάνσεις του βάθους. Το μέσο βάθος της λίμνης εκτιμάται ότι είναι 1.5 μέτρο περίπου.



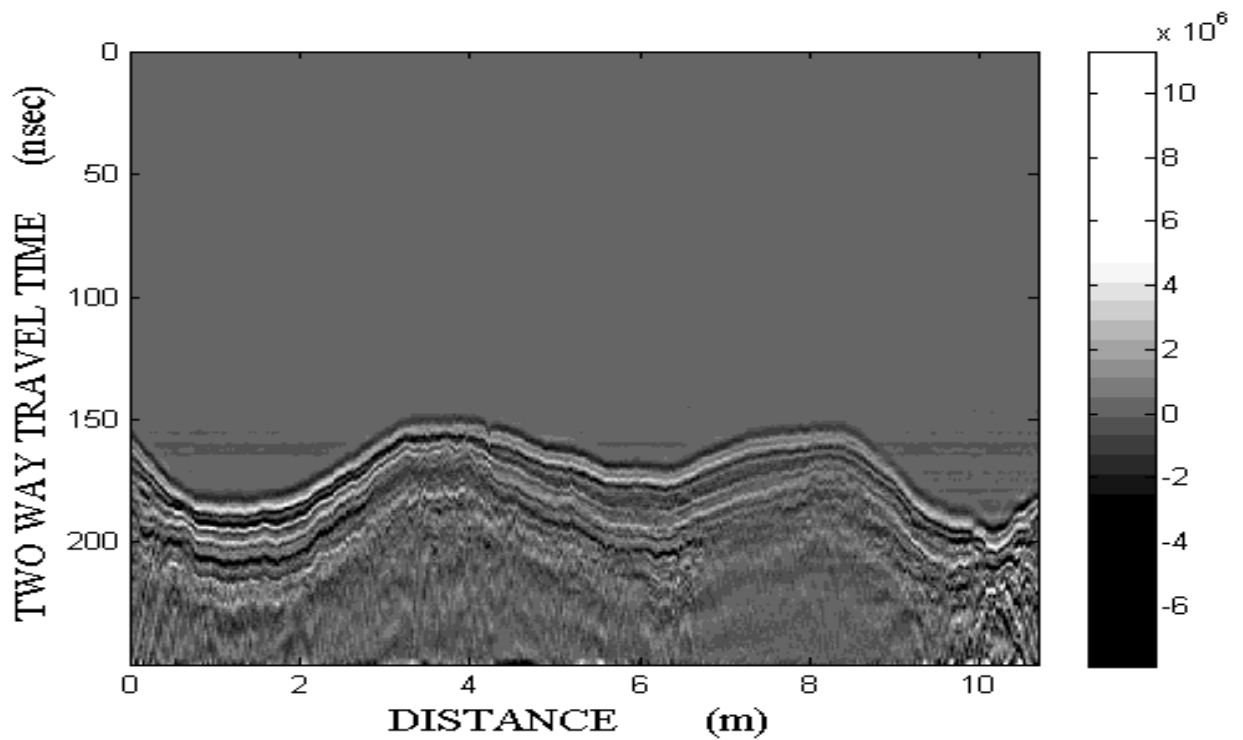
Σχήμα 4.33: Ακατέργαστη τομή γεωραντάρ από τη λίμνη Rockwell. Προέκυψε από μετρήσεις με κεραίες των 310 MHz, διάστημα δειγματοληψίας 488.281 ps και βήμα διασκόπησης 1 cm.



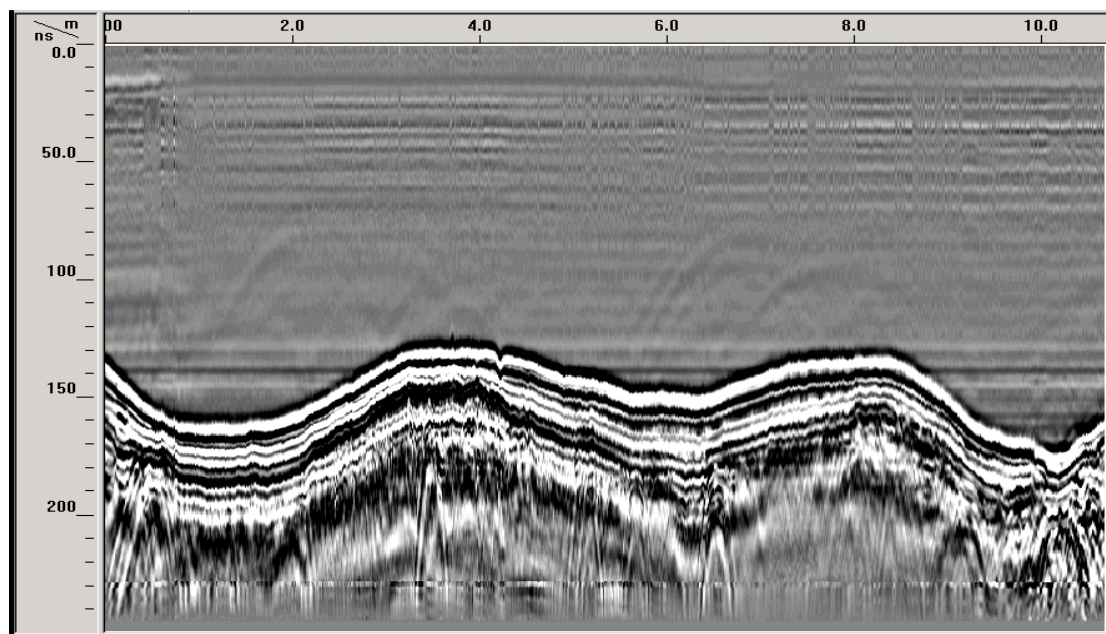
Σχήμα 4.34: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα GPR-PRO.



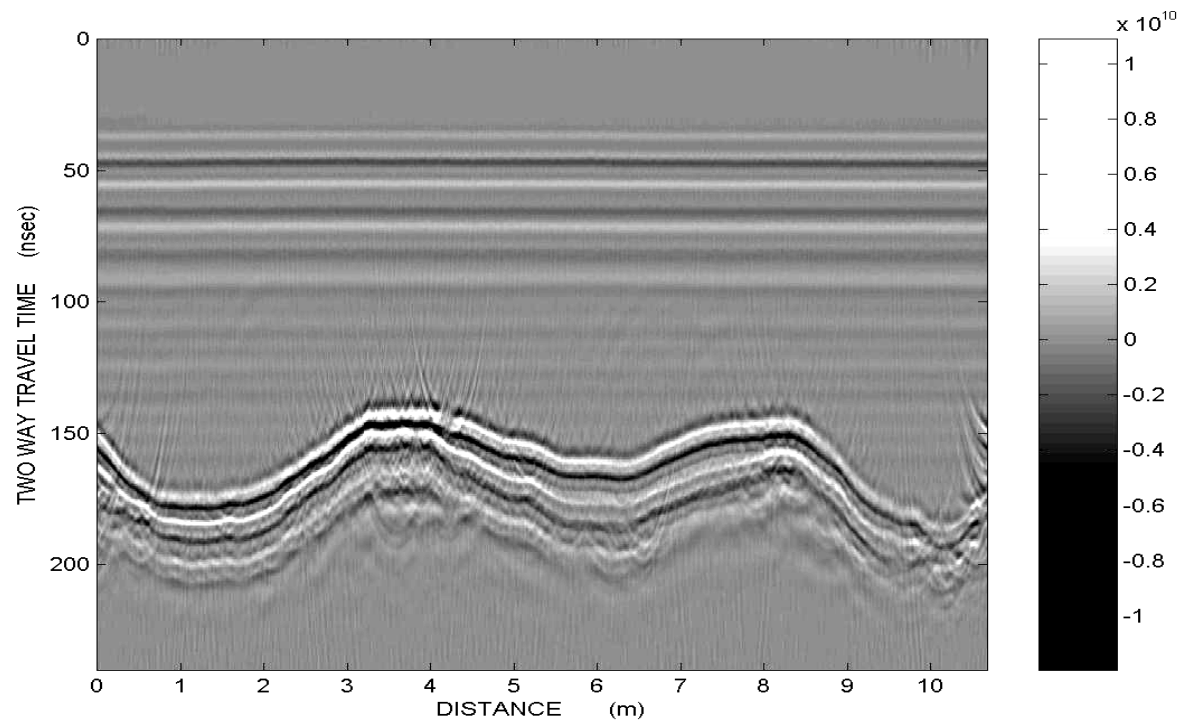
Σχήμα 4.35: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο πρόγραμμα RADAN.



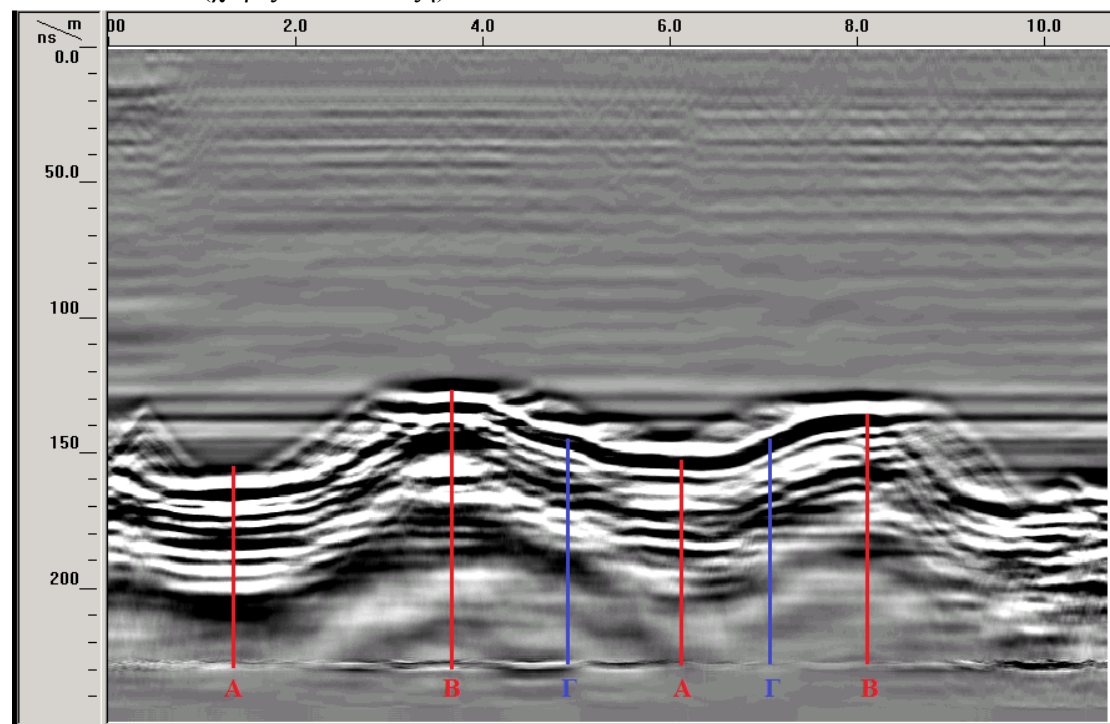
Σχήμα 4.36: Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 15 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,4 ns και "prewhitening" 8% στο πρόγραμμα GPR-PRO.



Σχήμα 4.37 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε αποσυνέλιξη με μήκος τελεστή 15 ns, χρόνο πρόβλεψης 2,4 ns και "prewhitening" 8% στο πρόγραμμα GPR-PRO.



Σχήμα 4.38 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0.03 m/ns στο GPR-PRO (χωρίς αποσυνέλιξη).



Σχήμα 4.39 : Τομή γεωραντάρ στην οποία εφαρμόστηκε χωροθέτηση με ταχύτητα 0.03 m/ns στο πρόγραμμα RADAN.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το λογισμικό πακέτο GPR-PRO παρέχει ένα μεγάλο αριθμό αλγορίθμων, για την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ σε περιβάλλον ανάπτυξης MATLAB. Η πληθώρα των αλγορίθμων κατέστησε άμεση ανάγκη την δημιουργία μιας επιφάνειας εργασίας, για την κατηγοριοποίησή τους και την εύκολη πρόσβαση και χρήση τους. Παρόλο που δεν είναι ένα εμπορικό πακέτο, μπορεί να σταθεί επάξια και να συγκριθεί με άλλα λογισμικά πακέτα επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ, όπως το RADAN.

Κύριο μειονέκτημα του RADAN είναι ο περιορισμένος αριθμός αλγορίθμων που περιλαμβάνει, αλλά και ο τρόπος διαχείρισης των δεδομένων. Αυτός ο τρόπος δεν επιτρέπει στον χρήστη να έχει άμεση πρόσβαση στα ενδιάμεσα αποτελέσματα. Αντίθετα, η διαχείριση των δεδομένων με το GPR-PRO, η οποία είναι εμπνευσμένη από την εξερεύνηση των Windows (Windows Explorer) με την δένδροειδή μορφή παρέχει άμεση πρόσβαση στα ενδιάμεσα και τελικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, η απεικόνιση των δεδομένων με το GPR-PRO είναι πιο αποτελεσματική παρέχοντας άμεσο έλεγχο στην επιλογή χρωματικών κλιμάκων, τον αριθμό των χρωμάτων, αλλά και το μέγεθος της εικόνας. Άλλο ένα πλεονέκτημα του GPR-PRO είναι ότι το λογισμικό πακέτο είναι ανοιχτό, με την έννοια ότι είναι εύκολο να προστεθούν νέοι αλγόριθμοι. Κύριο μειονέκτημά του είναι η έλλειψη εγχειριδίου και η απαίτηση εγκατάστασης του λογισμικού MATLAB (έκδοση 6.5 ή νεότερη) στον υπολογιστή. Εναντιθέση με το RADAN παρέχεται πλήρες εγχειρίδιο που εμπεριέχει το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο και πολυάριθμα παραδείγματα καθοδηγώντας τον χρήστη σε κάθε του βήμα, συνδιάζοντας τη θεωρία με την πράξη.

Στις καταγραφές από την περιοχή της Μεραρχίας στην παλιά πόλη των Χανίων η αποσυνέλιξη με το πρόγραμμα GPR-PRO τονίζει καλύτερα ανακλώμενα κύματα από θαμμένες τοιχοδομές σε σχέση με το αντίστοιχο φίλτρο του RADAN.

Στο ελεγχόμενο πείραμα με τους θαμμένους σωλήνες η χωροθέτηση με το πρόγραμμα GPR-PRO βοήθησε στην καλύτερη απεικόνιση των τριών θαμμένων σωλήνων, ενώ η χωροθέτηση με το πρόγραμμα RADAN απεικόνισε καλύτερα τον πυθμένα του πλαστικού δοχείου.

Στα δεδομένα από τη θαμμένη δεξαμενή καυσίμων η αποσυνέλιξη βελτίωσε δραστικά την απεικόνιση του άνω ορίου της μεταλλικής δεξαμενής. Η χωροθέτηση επέτρεψε την καλύτερη εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Τέλος, στη λίμνη Rockwell η αποσυνέλιξη ανέδειξε με λεπτομέρεια ανακλαστήρες στον πυθμένα, ενώ η χωροθέτηση απεικόνισε καλύτερα τόσο τμήματα των ανακλαστήρων που είναι οριζόντια όσο και αντίστοιχα τμήματα που είναι κεκλιμένα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ανδριανάκης Μιχάλης, “Η παλιά πόλη των Χανίων”, εκδόσεις Αδαή 1997.
2. Ανδριανάκης Μιχάλης, “Το έργο των επιστημονικών επιτροπών αναστήλωσης, συντήρησης και ανάδειξης μνημείων”, Υπουργείο πολιτισμού, Αθήνα 2006.
3. Βαφείδης Αντώνιος, “Σεισμικές μέθοδοι”, Σημειώσεις μαθήματος Γεωφυσικής Ι, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά 1993.
4. Βαφείδης Αντώνιος, “Εφαρμοσμένη Γεωφυσική ΙΙ”, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά 2001.
5. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Η συμβολή του υπεδάφειου ραντάρ στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων” Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2001.
6. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα”, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2002.
7. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Συμβολή των μεθόδων ταξινόμησης δεδομένων γεωραντάρ στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2007.
8. Annan A. P. (1999). Practical Processing of GPR Data.
9. Archivio di stato (foto), Venezia 1688.
10. Gerola, G. Monumenti Veneti nell’ isola di Creta, A, 1. Venezia 1905.
11. Hugenschmidt J., Partl M.N., DeWitte H. (1998). GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland. Journal of Applied Geophysics, Vol. 40, pp. 95-104.

12. Loeffler O., Bano M. (2004). Ground Penetrating Radar Measurements in a Controlled Vadose Zone: Influence of the Water Content. *Vadose Vone Journal.*, Vol. 3. pp. 1082-1092.
13. Sheriff, R., Geldart, L., 1995, Exploration seismology, *University of Cambridge, US*
14. Turner, G., 1994, Subsurface radar Propagation deconvolution, *Geophysics*, V59, No 2, p215-223.
15. Yilmaz, O., 1987, Seismic Data processing, *Society of Exploration Geophysicist, Tulsa.*

1. www.archaeometry.gr/oldv/publication/arch-tileskopikanea/index.htm
2. www.geophysical.com
3. www.googleearth.com