



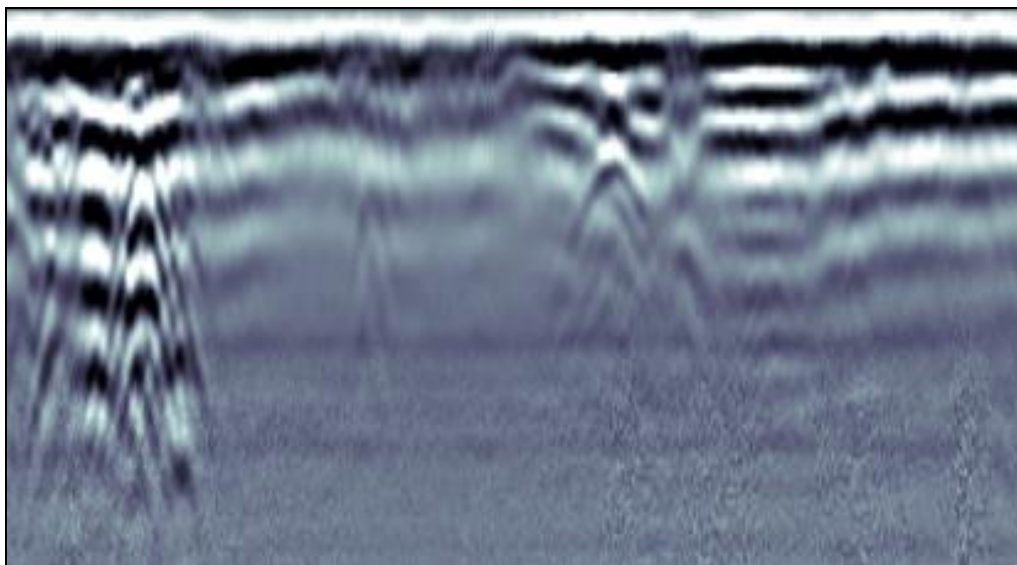
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΣΙΔΕΡΗΣ Χ. ΤΖΙΝΤΡΟΥΔΗΣ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΩ-PANTAP
ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2024



[λευκή σελίδα]



ΣΙΔΕΡΗΣ Χ. ΤΖΙΝΤΡΟΥΔΗΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5771

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέπουσα

Δρ. Νεκταρία Διαμαντή, Ε.ΔΙ.Π. Α.Π.Θ.



© Σιδέρης Τζιντρούδης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GPR) ΓΙΑ ΤΟΝ
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ – *Διπλωματική Εργασία*

© Sideris C. Tzintroudis, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2024

All rights reserved.

GEOPHYSICAL PROSPECTION USING GROUND PENETRATING RADAR TO
LOCATE UNDERGROUND FUEL TANKS – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπεί να αναδείξει τη σημασία χρήσης της μεθόδου του γεω-ραντάρ ή υπεδάφιου ραντάρ (Ground penetrating Radar – GPR) στον εντοπισμό και την έρευνα των υλικών του υπεδάφους αλλά και γενικότερα στην αποτελεσματικότερη μελέτη του τελευταίου. Ειδικότερα, επεξηγείται η μέθοδος GPR, τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία του γεω-ραντάρ εξοπλισμού, καθώς και η αξιοποίηση των ιδιοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η σημασία των ηλεκτρικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τα υλικά του υπεδάφους για την επιτυχημένη εφαρμογή της μεθόδου. Επιπλέον, περιγράφεται αναλυτικά η έρευνα που διεξήχθη σε συγκεκριμένο χώρο με σκοπό την εύρεση μεταλλικών δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στον τρόπο διεξαγωγής της γεωφυσικής έρευνας, στη λήψη των μετρήσεων και την επεξεργασία των δεδομένων GPR. Τέλος, η εργασία καταλήγει σε ερμηνεία και παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων της έρευνας στην περιοχή μελέτης.

Abstract

The present thesis aims to highlight the importance of using the Ground Penetrating Radar (GPR) method for the detection and research of underground materials, as well as for the more effective study of the subsurface in general. Specifically, the structure, characteristics and operation of GPR are explained, along with the utilization of the properties of electromagnetic waves and the significance of the electrical properties of the subsurface materials for the successful application of the method. Additionally, the research conducted in a specific area is described in detail, aiming to locate underground storage tanks. In particular, reference is made to the preparatory process of the geophysical survey, the acquisition of measurements, and the processing of the acquired GPR data. Finally, the thesis concludes with an interpretation and observations on the results of the research process.



1.	Εισαγωγή.....	1
2.	Θεωρία ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου GPR	2
2.1	Εισαγωγή.....	2
2.2	Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των Η/Μ κυμάτων	2
2.3	Αρχές λειτουργίας του γεωραντάρ (GPR).....	4
3	Συλλογή & Επεξεργασία Δεδομένων GPR.....	11
3.1	Διάταξη / συλλογή μετρήσεων GPR	11
3.2	Επεξεργασία δεδομένων GPR	13
3.2.1	Επεξεργασία καννάβου [A]	20
3.2.2	Επεξεργασία καννάβου [B]	24
3.2.3	Επεξεργασία δεδομένων καννάβου [C]	25
3.2.4	Επεξεργασία δεδομένων καννάβου [D]	27
4	Ερμηνεία των επεξεργασμένων δεδομένων GPR.....	30
4.1	Ερμηνεία επεξεργασίας αποτελεσμάτων καννάβου [A]	30
4.2	Ερμηνεία αποτελεσμάτων επεξεργασίας καννάβου [B]	31
4.3	Ερμηνεία αποτελεσμάτων επεξεργασίας καννάβου [C]	33
4.4	Ερμηνεία αποτελεσμάτων επεξεργασίας καννάβου [D]	34
5	Αποτελέσματα – εξαγωγή δεξαμενών.....	36
6	Συμπεράσματα	41
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	42



1. Εισαγωγή

Η πτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί μια γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό υπογείων δεξαμενών καυσίμων, που διεξήχθη σε πρώην στρατόπεδο, το οποίο δόθηκε προς εκμετάλλευση σε δημόσιο φορέα, οπότε και κατατέθηκε το αίτημα για τον εντοπισμό των παλαιών αυτών δεξαμενών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι το γεωραντάρ ή υπεδάφιο ραντάρ (Ground Penetrating Radar), μια μη καταστρεπτική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης με την οποία εκπέμπεται ακτινοβολία προς το υπέδαφος και στη συνέχεια ανιχνεύεται η ανακλώμενη ακτινοβολία που προέρχεται από τα υπόγεια υλικά. Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός αποτελείται από ραδιοκύματα τα οποία όταν συναντήσουν μια ανωμαλία, όπως ένα υλικό με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες από το περιβάλλον του, τότε ένα μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται και συναντά το υλικό επιστρέφει στον δέκτη. Έτσι είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια αρχική εικόνα των διαφορετικών τύπων των υλικών που αποτελούν το υπέδαφος που μελετάται.

Το **Ground Penetrating Radar (GPR)** λειτουργεί με διάφορες διατάξεις όσον αφορά τη γεωμετρία των οργάνων του. Τα δεδομένα που αφορούν την εν λόγω έρευνα, συλλέχθηκαν με την πιο συνήθη διάταξη του GPR, δηλαδή έναν πομπό (transmitter) και έναν δέκτη (receiver) σε προκαθορισμένη απόσταση μεταξύ τους και στη συνέχεια ακολούθησε όδευση επάνω από την περιοχή που ερευνήθηκε.

Στη συνέχεια της εργασίας θα παρουσιαστούν ορισμένες βασικές έννοιες του ηλεκτρομαγνητισμού και της γεωφυσικής για την κατανόηση της διαδικασίας που ακολούθηθηκε και επιπλέον θα αναφερθούν και θα αναλυθούν τόσο η διαδικασία πραγματοποίησης των μετρήσεων, όσο και η διαδικασία επεξεργασίας και ερμηνείας των συλλεχθέντων δεδομένων.

2. Θεωρία ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου GPR

2.1 Εισαγωγή

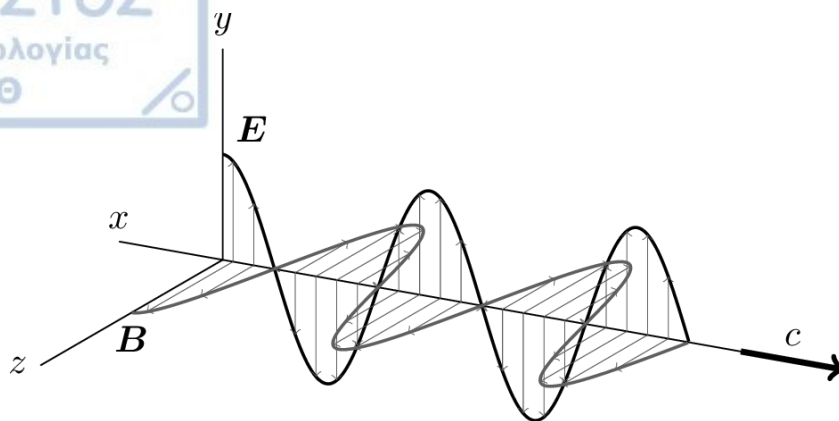
Η γεωφυσική είναι ένας επιστημονικός κλάδος των γεωεπιστημών που εντάσσεται στις φυσικές επιστήμες και μελετά το υπέδαφος με βάση τις φυσικές ιδιότητες των γεωυλικών που το απαρτίζουν. Η προκείμενη εργασία αφορά την εφαρμοσμένη γεωφυσική και πιο συγκεκριμένα τη μελέτη του υπεδάφους με τη χρήση βασικών αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού (H/M), μέσω της εφαρμογής της μεθόδου του γεωραντάρ ή ραντάρ υπεδάφους (GPR).

2.2 Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των H/M κυμάτων

Για την καλύτερη κατανόηση των διεργασιών που πραγματοποιήθηκαν είναι αναγκαία η επεξήγηση ορισμένων εννοιών του ηλεκτρομαγνητισμού που αφορούν την εφαρμοσμένη γεωφυσική.

Αρχικά, η μέθοδος του GPR κάνει χρήση των ιδιοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από την ταλάντωση επιταχυνόμενων ηλεκτρικών φορτίων των οποίων οι ηλεκτρικές και οι μαγνητικές συνιστώσες είναι κάθετες μεταξύ τους και κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

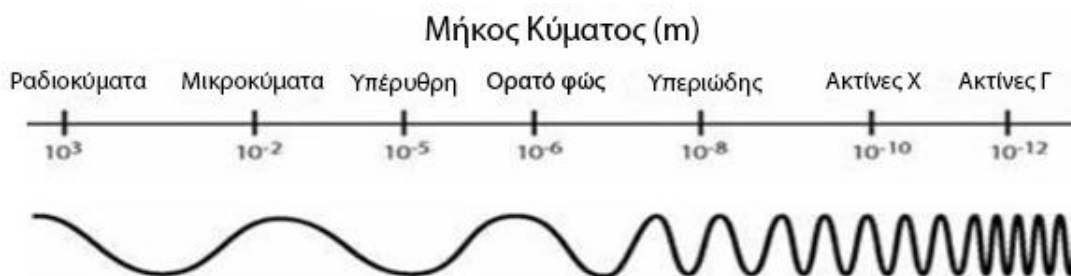
Κύρια χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι το μήκος κύματος (λ) και η συχνότητα (ν ή f) και όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (2.1), το μήκος κύματος έχει μονάδα μέτρησης μήκους και η συχνότητα έχει μονάδα μέτρησης το Hz και ισχύει ότι $1 \text{ Hz} = \frac{1}{T}$ όπου T είναι η περίοδος που χαρακτηρίζει το κύμα (μονάδες μέτρησης της περιόδου είναι οι μονάδες χρόνου).



Εικόνα 2.1: Η διάδοση ενός Η/Μ κύματος

Στο παραπάνω σχήμα (Εικόνα 2.1) απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, όπως αυτό διαδίδεται στο κενό. Συγκεκριμένα στον y-άξονα απεικονίζονται τα ηλεκτρικά πεδία (E) που ταλαντώνονται και στον z- άξονα τα μαγνητικά πεδία (B) που επίσης ταλαντώνονται ενώ στον x- άξονα απεικονίζεται η κατεύθυνση διάδοσης του Η/Μ κύματος που διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός ($c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$). Εάν ο x- άξονας απεικονίζει απόσταση, τότε η απόσταση μεταξύ δύο κορυφών ή δύο κοιλάδων του κύματος προσδιορίζουν το μήκος κύματος (λ) που το χαρακτηρίζει και αντίστοιχα, αν ο x- άξονας απεικονίζει χρόνο, τότε η ίδια απόσταση προσδιορίζει την περίοδο (T) που χαρακτηρίζει το εκάστοτε κύμα (Kimura, W.D., 2017).

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, το κύμα μπορεί να ενταχθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος η οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες ιδιότητες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (2.2).



Εικόνα 2.2: Ο χαρακτηρισμός μιας ακτινοβολίας με βάση το μήκος κύματός της

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός, δηλαδή η ταχύτητα του είναι σταθερή. Είναι γνωστό από τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής ότι η ταχύτητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ισούται με το γινόμενο της συχνότητας επί του μήκους κύματος, δηλαδή

$$υ_{κύματος} (m s^{-1}) = f (Hz) \times \lambda(m).$$

Έτσι συνεπάγεται ότι τα μεγέθη της συχνότητας και του μήκους κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογα και εφόσον η ταχύτητα αποτελεί μια σταθερή συνάρτηση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μια μεταβλητή εάν η άλλη είναι γνωστή. Επίσης, σύμφωνα με την σχέση Planck-Einstein, ισχύει ότι $E (J) = h (J \cdot s) f (Hz)$, όπου E είναι η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα φωτόνιο, f είναι η συχνότητά του και h είναι η σταθερά του Planck ($6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$). Κατ' αυτό τον τρόπο, συμπεραίνεται πως όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος μιας ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητά του, επομένως και η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται μέσω αυτής.

2.3 Αρχές λειτουργίας του γεωραντάρ (GPR)

Κάθε σύστημα GPR απαρτίζεται από ορισμένα κύρια μέρη, όπως το σύστημα ελέγχου, μια κεραία εκπομπής (πομπός) H/M κυμάτων, μια κεραία υποδοχής (δέκτης), έναν φορητό υπολογιστή όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα και μια οθόνη παρακολούθησης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Επίσης σε ορισμένες συνθέσεις του GPR, όπως και σε αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία, περιλαμβάνεται και κάποιο εξάρτημα για τη μέτρηση της απόστασης, συνήθως ένα οδόμετρο σε συνδυασμό με τη χρήση GPS.

Η εφαρμογή του GPR επιτυγχάνεται με την ανίχνευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, συνήθως συχνότητας 10 MHz - 2 GHz (Cassidy, 2009), που ταξιδεύουν από την κεραία εκπομπής, στη συνέχεια ανακλώνται από τα υπόγεια υλικά και εν τέλει ανιχνεύονται από την κεραία υποδοχής. Το αρχικό κύμα διαδίδεται και διασπείρεται στο υπέδαφος μέχρι να συναντήσει ένα αντικείμενο ή μια επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες από το μέσο που το περιβάλλει, δηλαδή διαφορετικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες και διηλεκτρικές σταθερές. Τότε ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται προς την επιφάνεια ενώ η υπόλοιπη συνεχίζει να διαδίδεται μέχρι και την επόμενη ανομοιογένεια στο υπέδαφος. Ουσιαστικά η ανομοιογένεια που χαρακτηρίζει το μέσο είναι και ο κύριος παράγοντας που καθορίζει το συνολικό αριθμό ανακλάσεων που θα καταγραφούν στην τομή (Annan, 2003).



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση των βασικών οργάνων του Γεωραντάρ pulseEKKO PRO της Sensors & Software.

Η διακριτική ικανότητα του GPR είναι άμεσα συσχετισμένη με το είδος της ακτινοβολίας που επιλέγεται να εκπεμφθεί, δηλαδή με τη συχνότητα της άρα και το μήκος κύματος που τη χαρακτηρίζει. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά ενός κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογα κάτι που πρακτικά σημαίνει πως η επιλογή της συχνότητας γίνεται με γνώμονα τη λεπτομέρεια που απαιτείται για την εκάστοτε έρευνα, με συνέπεια ωστόσο τη μείωση του βάθους της διασκόπησης που προκύπτει με την αύξηση αυτής. Βασικό κριτήριο για την επιλογή της συχνότητας είναι δηλαδή το μέγεθος του στόχου που αναζητείται, αφού για να μπορέσει να καταγραφεί θα

πρέπει να έχει μέγεθος τουλάχιστον 10% του μήκους κύματος της ακτινοβολίας (Utsi, 2017). Κεραίες χαμηλών συχνοτήτων (25-200 MHz) είναι ικανές να καταγράψουν ανακλάσεις μεγάλου βάθους (μεγαλύτερο από 10 μέτρα) ενώ κεραίες με υψηλή συχνότητα (300-1000 MHz) καταγράφουν ανακλάσεις σε μικρότερο βάθος (μικρότερο των 10 μέτρων) με σαφώς μεγαλύτερη λεπτομέρεια (Τσελέντης & Παρασκευόπουλος, 2013). Η διακριτική ικανότητα ωστόσο επηρεάζεται άμεσα και κατά μεγάλο βαθμό από τα υλικά, δηλαδή το μέσο που θα διαδοθεί η ακτινοβολία, καθώς σε υλικά με χαμηλή αγωγιμότητα (π.χ. ξερή άμμος ή γρανίτης) μπορεί να επιτευχθεί η διάκριση στόχων σε βάθος δεκάδων μέτρων ενώ σε άλλα υλικά με υψηλή αγωγιμότητα (π.χ. άργιλος) να εξασθενεί το σήμα και κατ' επέκταση το βάθος διείσδυσης από την επιφάνεια. Με βάση τα παραπάνω, η επιλογή της κεραίας είναι εξαρτώμενη από τον στόχο που ερευνάται, καθώς για τη χρήση του GPR στην έρευνα της γεωλογίας μιας περιοχής όπου αναζητούνται στόχοι μεγάλου μεγέθους (γεωλογικά στρώματα, ρήγματα κλπ) είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί κεραία χαμηλότερων συχνοτήτων ενώ για την έρευνα μικρότερων στόχων (θαμμένα αντικείμενα, σωλήνες, καλώδια κλπ.) κοντά στην επιφάνεια, προτιμάται κεραία υψηλότερων συχνοτήτων.

Τα παραγόμενα κύματα σε ταξιδεύουν με συγκεκριμένη ταχύτητα σε ένα μέσο διάδοσης και ενώ στο κενό η ταχύτητα τους αποτελεί σταθερά, σε ένα μέσο διάδοσης είναι κυρίως συσχετισμένη με την ηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου και σε κάθε περίπτωση μικρότερη από την ταχύτητα τους στο κενό (Daniels, 2000). Η ταχύτητα σε ένα ομογενές μέσο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$u = \sqrt{\frac{2}{\mu\epsilon} \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]^{-\frac{1}{2}}}$$

Όπου

μ: η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, δηλαδή η ικανότητα του υλικού να μαγνητίζεται σε ένα μαγνητικό πεδίο

σ: η ειδική αγωγιμότητα ($\sigma=1/\rho$, όπου ρ η ειδική αντίσταση), η ικανότητα του υλικού να φέρει ηλεκτρικό ρεύμα

ε: η διηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού, το μέτρο της ικανότητας του υλικού να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια όταν βρίσκεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο

ω: η γωνιακή συχνότητα του κύματος.

Είναι ασφαλές να θεωρηθεί πως $\sigma \ll \omega \epsilon$, όταν το μέσο που μελετάμε, δηλαδή το υπέδαφος, εμφανίζει σημαντική αντίσταση. Έτσι μπορεί να γίνει η απλούστευση της παραπάνω σχέσης σε :

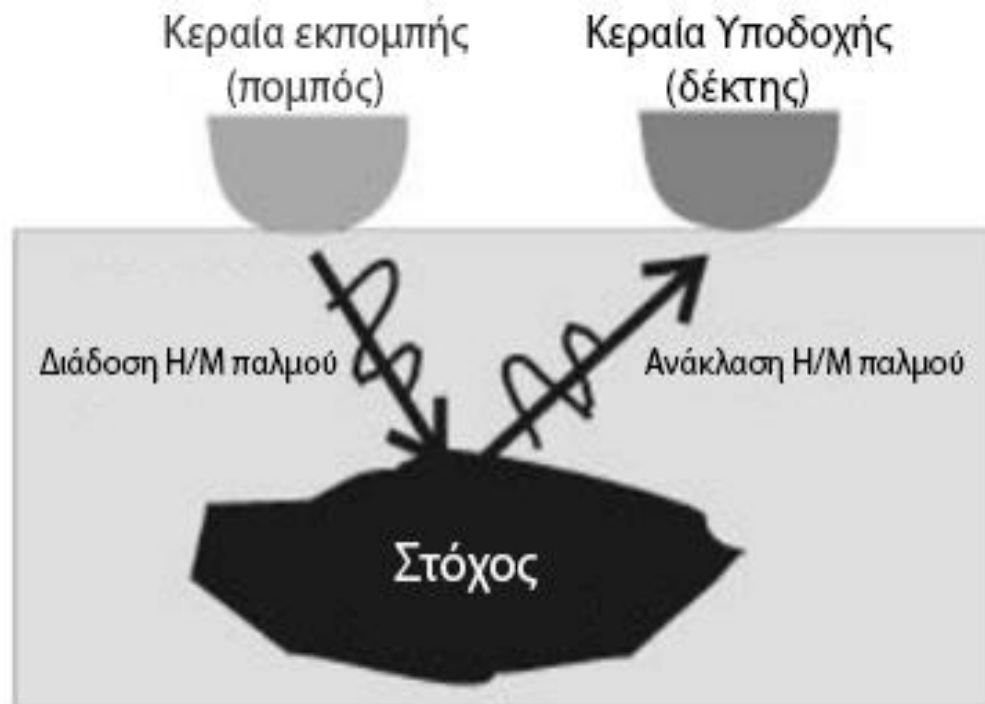
$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}}$$

με c την ταχύτητα του κύματος στο κενό ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s), και μ_r , ε_r την σχετική μαγνητική διαπερατότητα και σχετική διηλεκτρική σταθερά.

Επιπλέον σε μη μαγνητικά υλικά, η μεταβλητή μ_r ισούται με 1 και έτσι η τελική εξίσωση της ταχύτητας μετατρέπεται σε (geosci.xyz, 2023):

$$u = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Κατά κύριο λόγο η μέθοδος που αναλύεται κάνει χρήση των δεδομένων της συνολικής ενέργειας που επιστρέφει στον δέκτη σε συνάρτηση με τον αντίστοιχο χρόνο. Ο χρόνος άφιξης του ανακλώμενου κύματος θα είναι ο διπλάσιος που απαιτείται για να φτάσει το κύμα στον στόχο, αφού η διαδρομή του είναι πομπός-στόχος-δέκτης, δηλαδή δύο φορές η απόστασή του από την επιφάνεια. Όπως φαίνεται σχηματικά παρακάτω (2.4), όταν παρατηρείται μια ετερογένεια, ένα ποσοστό της ακτινοβολίας επιστρέφει στον δέκτη και σχετίζεται άμεσα με τις ιδιότητες του εκάστοτε υλικού. Συνήθως ένα μέρος θα διαπεράσει το υλικό και θα διαθλασθεί προς τα κατόντη ενώ ένα άλλο μέρος θα ανακλαστεί. Παρ' όλα αυτά συγκεκριμένα υλικά όπως τα μεταλλικά, τα οποία και αφορούν την συγκεκριμένη έρευνα, ανακλούν ολόκληρη την ακτινοβολία προς τον δέκτη εμφανίζοντας έτσι στην μονάδα ελέγχου σήματα με αυξημένα πλάτη, ενώ άλλα υλικά με πολύ μεγάλη αγωγιμότητα καθιστούν αυτή τη μέθοδο μη εφαρμόσιμη, καθώς δεν υπάρχει ανακλώμενο σήμα για να μελετηθεί. Η αγωγιμότητα των υλικών είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τους, αφού ισχύει η σχέση $\sigma=1/\rho$ και λαμβάνοντας υπόψιν και τις υπόλοιπες ηλεκτρικές ιδιότητες έχουν υπολογιστεί οι ενδεικτικές τιμές τους για τα συχνότερα γεωλογικά υλικά, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (2.5).



Εικόνα 2.4 : Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας GPR: υλικό/στόχος με διαφορετική σύσταση από το μέσο, που επιστρέφει μέρος της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας.

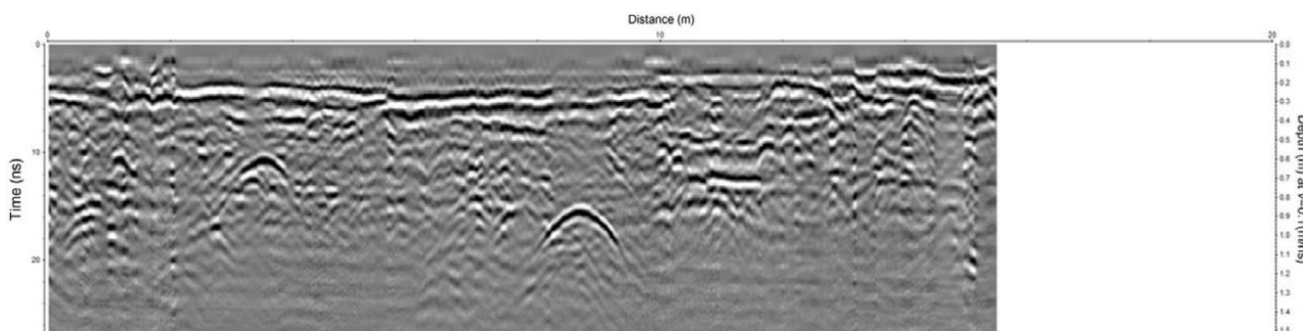
Πίνακας 2.5 Ηλεκτρικές ιδιότητες για γεωλογικά υλικά (από Davis et al., 1989)

Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά	Αγωγιμότητα (mS/m)	Ταχύτητα (m/ns)	Εξασθένηση (dB/m)
Αέρας	1	0	0.3	0
Απιονισμένο νερό	80	0.01	0.033	0.002
Νερό	80	0.5	0.033	0.1
Θαλασσινό νερό	80	30000	0.01	1000
Ξηρή άμμος	3-5	0.01	0.15	0.01
Κορεσμένη άμμος	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Ασβεστόλιθος	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Αργίλος	4-40	2-1000	0.06	1-300
Γρανίτης	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Αλάτι (άνυδρο)	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Πάγος	3-4	0.01	0.16	0.01

Η απεικόνιση του υπεδάφους που θα αναπαραχθεί καθώς το GPR οδεύει επάνω από το στόχο θα είναι δισδιάστατη, με τον x-άξονα να αναπαριστά την οριζόντια απόσταση που διανύεται στην επιφάνεια του εδάφους και τον y-άξονα να απεικονίζει τον χρόνο που απαιτείται για δύο διαδρομές του κύματος: από την κεραία του πομπού προς την ασυνέχεια/στόχο και πάλι πίσω στην κεραία του δέκτη. Εφόσον η ταχύτητα διάδοσης είναι γνωστή, το βάθος μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$D (m) = \frac{1}{2} U \left(\frac{m}{ns} \right) \cdot t (ns)$$

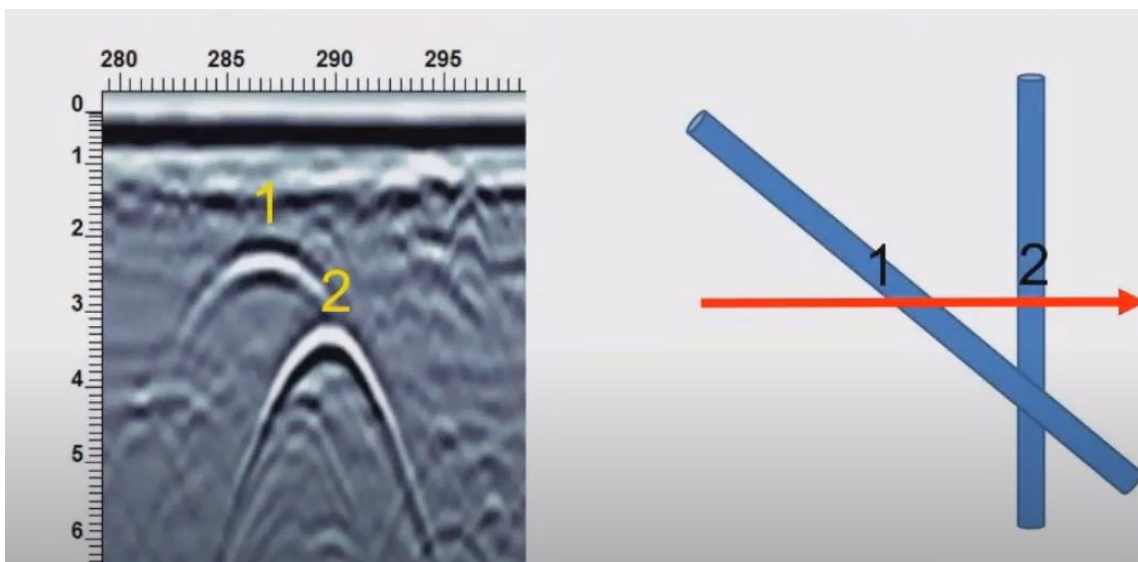
Η παρακάτω εικόνα (2.6) αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα μιας τομής GPR.



Εικόνα 2.6: Τομή GPR (Carrick Utsi, E., 2017)

Όπως φαίνεται και οπτικά λοιπόν (2.6) οι καταγραφές που εμφανίζονται στην τομή έχουν μορφή καμπυλών και κάποιες έχουν μια υπερβολική μορφή. Αυτό συμβαίνει διότι ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός δεν διαδίδεται μόνο κατακόρυφα αλλά γεωμετρικά στο χώρο και καθώς γίνεται η όδευση κατά μήκος ενός άξονα, μια ασυνέχεια θα ανακλάσει την ακτινοβολία σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, με την κορυφή της υπερβολής να αναπαριστά την μικρότερη απόσταση της κεραίας με τον στόχο δηλαδή την πραγματική του θέση. Επιπλέον, η υπερβολή επηρεάζεται σχηματικά και από το βάθος που συναντάται ο στόχος ως προς την εκκεντρότητά της καθώς όσο η δέσμη κυμάτων εμβαθύνεται στο υπέδαφος, οι υπερβολές που απεικονίζονται είναι μεγαλύτερες και πλατύτερες ενώ αντίστοιχα ένας στόχος κοντά στην επιφάνεια θα αποτυπωθεί στην τομή με μικρότερη και στενότερη υπερβολή. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η υπερβολή μπορεί να διαφέρει ακόμη και στο ίδιο βάθος καθώς επηρεάζεται άμεσα από το σχήμα ή/και από τον προσανατολισμό του αντικειμένου που ανιχνεύεται, ιδιαίτερα εφόσον είναι γραμμικό (σωλήνες, καλώδια κλπ.). Η διαφοροποίηση της εικόνας που δημιουργείται οφείλεται στο γεγονός πως εάν η κλίση κατά την οποία οδεύει το γεωραντάρ είναι 90 μοίρες, δηλαδή κάθετα στον προσανατολισμό του στοιχείου, η επιφάνεια επάνω στην οποία θα ανακλαστεί η ακτινοβολία θα είναι μικρότερη σε σχέση με μια όδευση που συναντά το ίδιο στοιχείο

σε διαφορετική κλίση. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 2.7. Επίσης είναι εξαιρετικά σημαντικό η όδευση να μη γίνεται παράλληλα με ένα γραμμικό στοιχείο, διότι η εικόνα που θα αναπαραχθεί θα είναι μια ευθεία γραμμή χωρίς να υποδεικνύεται ξεκάθαρα η θέση του στόχου.



Εικόνα 2.7: Καταγραφή για 2 όμοια αντικείμενα με διαφορετικό προσανατολισμό και βάθος ταφής.

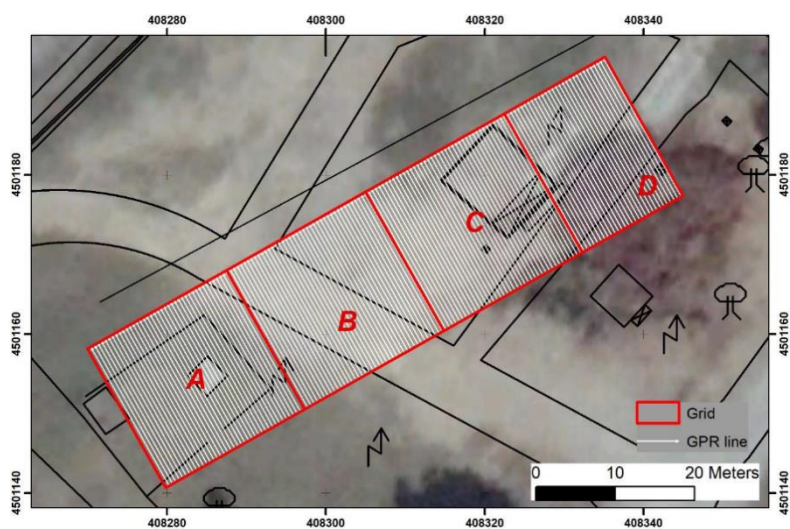
3 Συλλογή & Επεξεργασία Δεδομένων GPR

3.1 Διάταξη / συλλογή μετρήσεων GPR

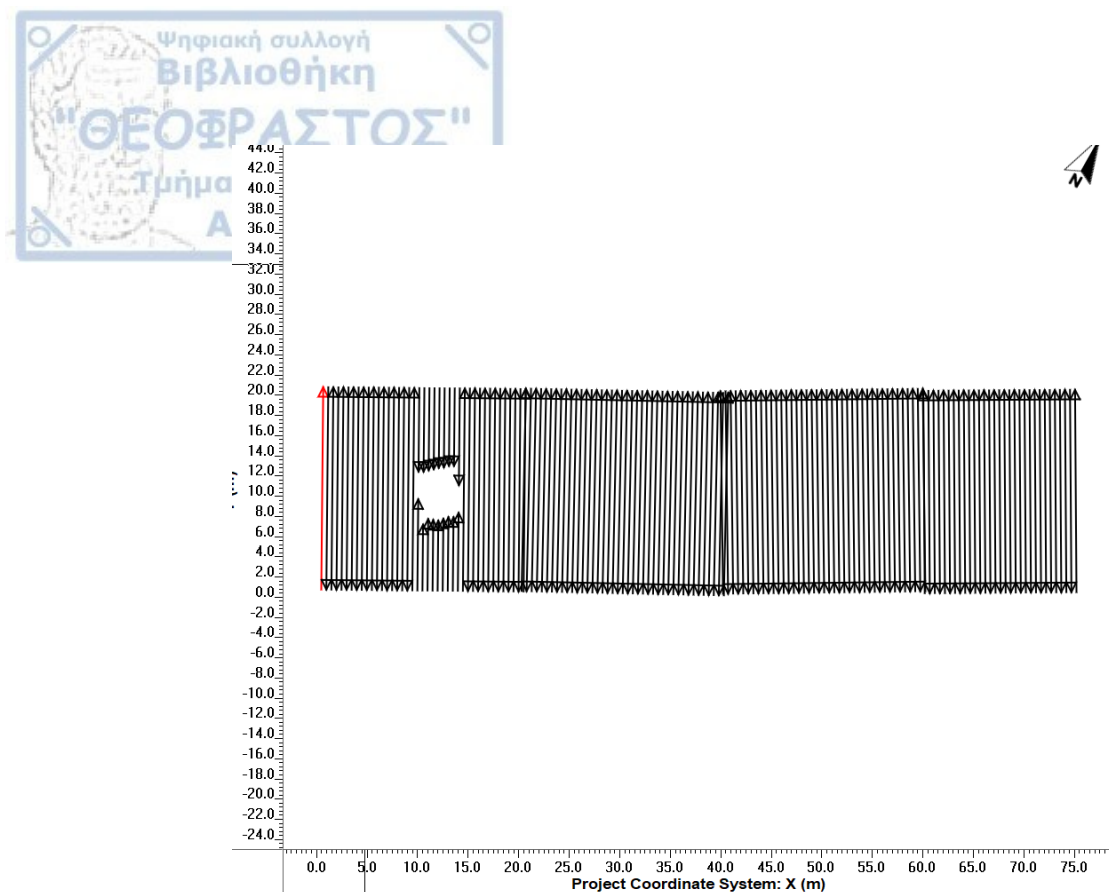
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο εντοπισμός υπογείων στόχων με μεταλλικές ιδιότητες σε ένα συγκεκριμένο χώρο. Για την εφαρμογή του Ground Penetrating Radar, αρχικά έγινε η οριοθέτηση του χώρου που ήταν προς μελέτη για τον εντοπισμό των παλαιών δεξαμενών καυσίμων (Εικόνα 3.1) και στη συνέχεια χωρίστηκε σε τέσσερις επιμέρους καννάβους των οποίων οι διαστάσεις είναι $20 \times 20 (m^2)$ για τους τρεις πρώτους (A,B,C) ενώ για τον τελευταίο (D) $20 \times 15 (m^2)$ (Εικόνα 3.2). Έπειτα για τη συνολική μελέτη του χώρου πραγματοποιήθηκαν αλληπάλληλες οδεύσεις GPR κατά τον κάθετο άξονα με σταθερή απόσταση μεταξύ τους 0.5 m , ώστε με την κατάλληλη επεξεργασία να αποτυπωθεί μια τρισδιάστατη αναπαράσταση των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους από τη σύνθεση πολλών δισδιάστατων τομών. Οι μετρήσεις έγιναν με σταθερή διεύθυνση, δηλαδή παράλληλα στον κατακόρυφο άξονα και όπως φαίνεται σχηματικά (3.3), η κατεύθυνση της όδευσης άλλαζε σε κάθε μέτρηση. Ο λόγος που προτιμάται η λήψη μετρήσεων μόνο κατά τον ένα άξονα σε μια μελέτη είναι για λόγους ταχύτητας αφού η περιοχή της έρευνας είναι αρκετά μεγάλη, με την προϋπόθεση η κατεύθυνση των αντικειμένων που αναζητούνται να είναι γνωστή ή να μην επηρεάζουν την έρευνα. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης έρευνας το σχήμα των στόχων δεν είναι αποτρεπτικό για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου αφού δεν αποτελούν γραμμικά στοιχεία τα οποία μπορεί να είναι προσανατολισμένα παράλληλα με τις μετρήσεις.



Εικόνα 3.1: Πανοραμική εικόνα της περιοχής της μελέτης



Εικόνα 3.2: Η περιοχή μελέτης χωρισμένη σε καννάβους



Εικόνα 3.3: Οι γραμμές που υποδεικνύουν την πορεία του GPR

3.2 Επεξεργασία δεδομένων GPR

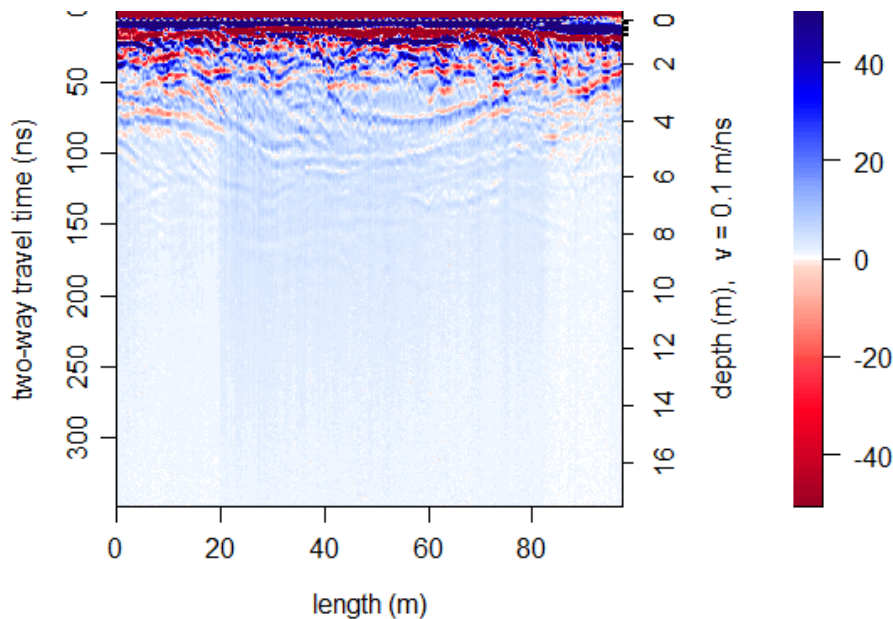
Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της λήψης μετρήσεων GPR στη συνέχεια θα πρέπει να επεξεργαστούν τα δεδομένα για να προκύψει τελικά η ερμηνεία τους.

- Αρχικά γίνεται έλεγχος πως τα δεδομένα που υπάρχουν στις ρυθμίσεις, ταυτίζονται με τα δεδομένα που έγιναν οι μετρήσεις.
- Στη συνέχεια θα πρέπει να επεξεργαστεί το σήμα ώστε να είναι ξεκάθαρες οι καταγραφές των ανακλώμενων κυμάτων (**dewow, gain, time zero correction**).
- Έπειτα γίνεται επιλογή φίλτρου εφόσον κριθεί χρήσιμο για τον συγκεκριμένο κάνναβο (**background subtraction**).
- Τέλος πρέπει να εντοπιστεί ένα γραμμικό στοιχείο το οποίο μια από τις οδεύσεις θα το καταγράψει με ορθή γωνία διότι είναι δυνατό να υπολογιστεί η ταχύτητα των κυμάτων στο υπέδαφος με βάση τη γεωμετρία των υπερβολών που καταγράφονται (**hyperbola velocity calibration**). Επιλέγεται δηλαδή μια ευκρινής υπερβολή και

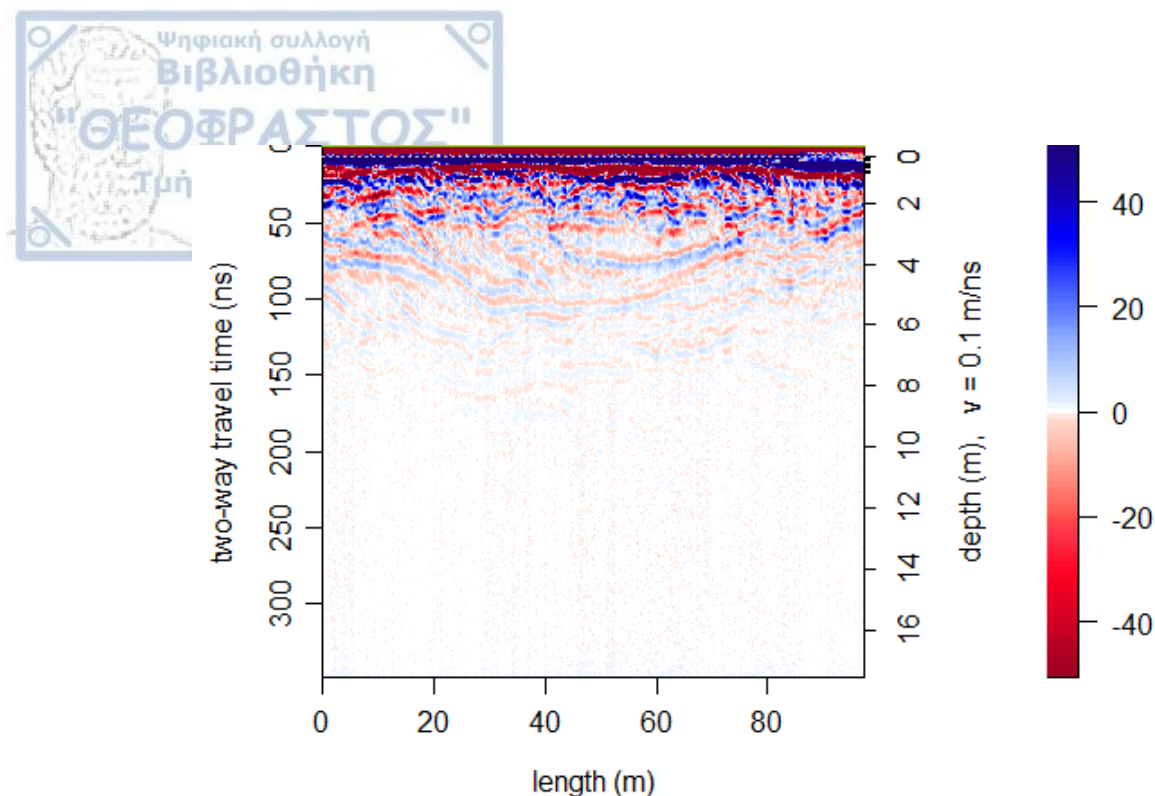
έπειτα με τη χρήση του λογισμικού σχεδιάζεται μια υπερβολή που ταυτίζεται μια την πραγματική με σκοπό τον υπολογισμό της ταχύτητας.

Παρακάτω περιγράφονται κάποια βασικά βήματα επεξεργασίας σε δεδομένα GPR.

Dewow: Αποτελεί συνήθως το αρχικό στάδιο επεξεργασίας και είναι ένα φίλτρο που αφαιρεί τις πολύ χαμηλές συχνότητες από τα δεδομένα και αναφέρεται συχνά ως όρος dewowing. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση μια τομής όπως φαίνεται χαρακτηριστικά παρακάτω (3.4), όπου αρχικά εμφανίζονται τα δεδομένα μιας όδευσης χωρίς την εφαρμογή του φίλτρου των χαμηλών συχνοτήτων, ενώ στο επόμενο σχήμα (3.5) φαίνεται η διαφορά μετά την εφαρμογή του.

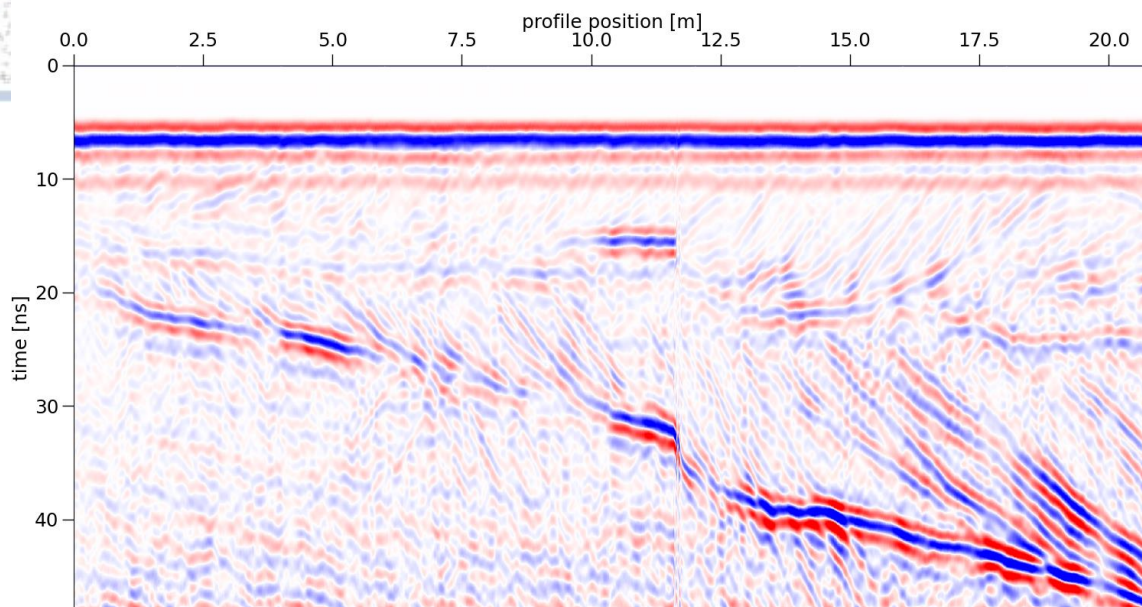


Εικόνα 3.4 Η αρχική απεικόνιση τομής GPR χωρίς επεξεργασία dewow

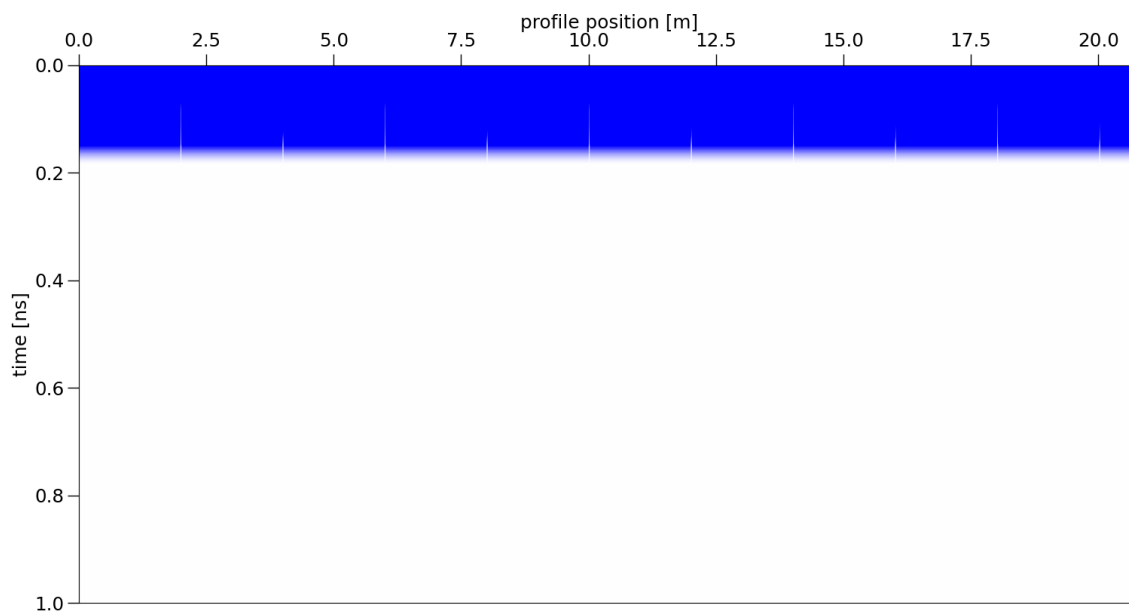


Εικόνα 3.5 Η ίδια τομή μετά την εφαρμογή φίλτρου (dewow)

Time zero correction and/or truncation: Η επεξεργασία «time zero correction» αποτελεί μια απαραίτητη διόρθωση – επεξεργασία στο σύνολο των δεδομένων του GPR και ουσιαστικά είναι η επιλογή ενός αρχικού χρονικού σημείου t_0 για κάθε ίχνος. Αυτό συμβαίνει διότι παρατηρούνται χρονικές μετατοπίσεις στο χρόνο του άφιξης του απευθείας κύματος καθώς πριν από το πρώτο σήμα, η διάδοση γίνεται εσωτερικά του γεωραντάρ και δε σχετίζεται με το υπέδαφος. Επίσης, πολλές φορές απομακρύνεται/αφαιρείται ένα μικρό χρονικό διάστημα στην αρχή της καταγραφής (time truncation), με απώτερο σκοπό το παρατηρούμενο βάθος των στόχων να μην αποκλίνει από το πραγματικό ανάλογα με την τιμή του t_0 .

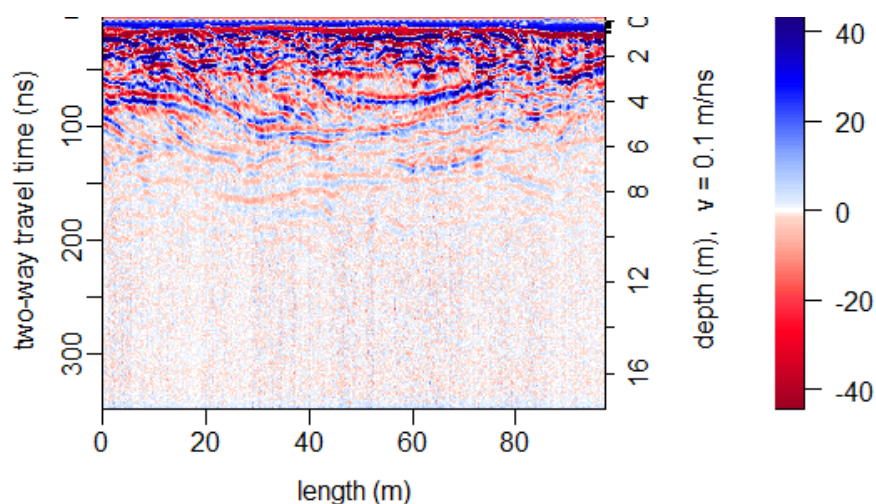


Εικόνα 3.6 Τομή GPR χωρίς διόρθωση t_0 (Plattner, AM.,2020)

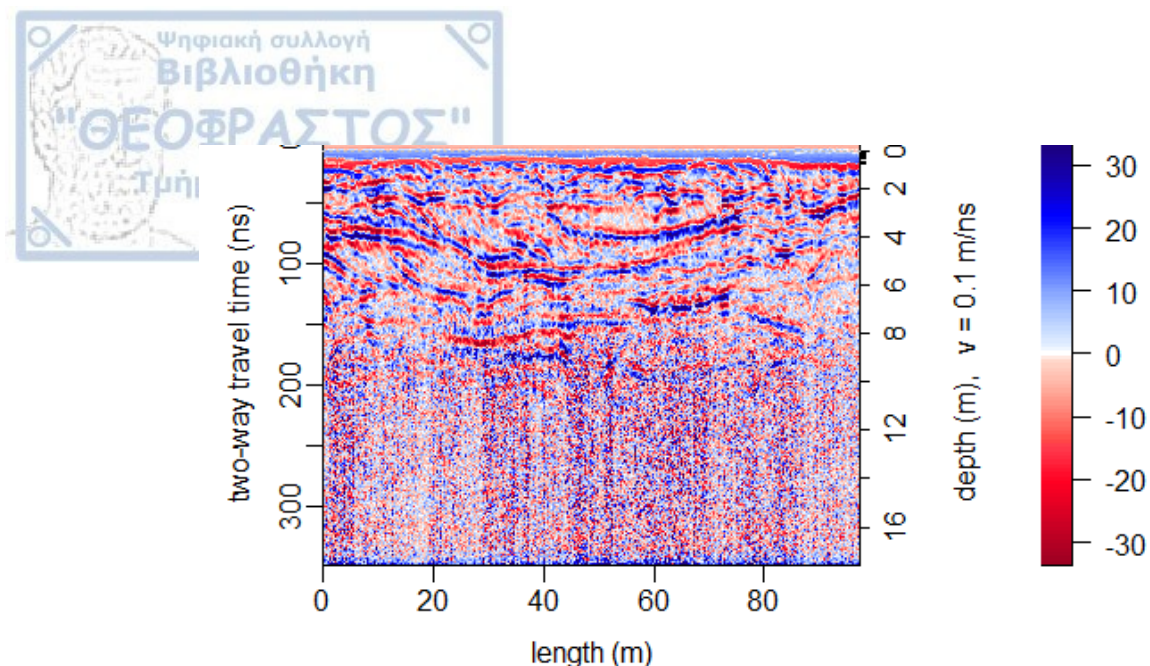


Εικόνα 3.7 Η τομή της εικόνας 3.6 με χρονικό εύρος 0-1 ns για τη διόρθωση του t_0

Ενίσχυση / Gain : Καθώς τα GPR σήματα διαδίδονται στο υπέδαφος, ένα μέρος τους εξασθενεί και χάνεται (αποσβένει). Έτσι για να υπάρχει η δυνατότητα της διάκρισης ενός στόχου στα μεγαλύτερα βάθη εφαρμόζεται ενίσχυση των δεδομένων (gain). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης του εξασθενημένου σήματος οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με την ηλεκτρομαγνητική ανταπόκριση του εδάφους (Annan, 2009), το βάθος και έως ένα βαθμό, το εκάστοτε σύστημα GPR. Η ενίσχυση συνήθως αναφέρεται ως time – based gain (εξαρτώμενη από το χρόνο) και υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εφαρμογή της αν και οι δύο κύριες μέθοδοι είναι η **γραμμική**, δηλαδή η εφαρμογή σταθερού gain στο σήμα για ολόκληρο το βάθος διασκόπησης και η **εκθετική** όπου το gain αυξάνεται όσο αυξάνεται και το βάθος. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να γίνουν ορατοί, όσο είναι εφικτό, όλοι στόχοι χωρίς να αυξηθεί κατά πολύ ο θόρυβος στο σύνολο των δεδομένων (Utsi, 2017).

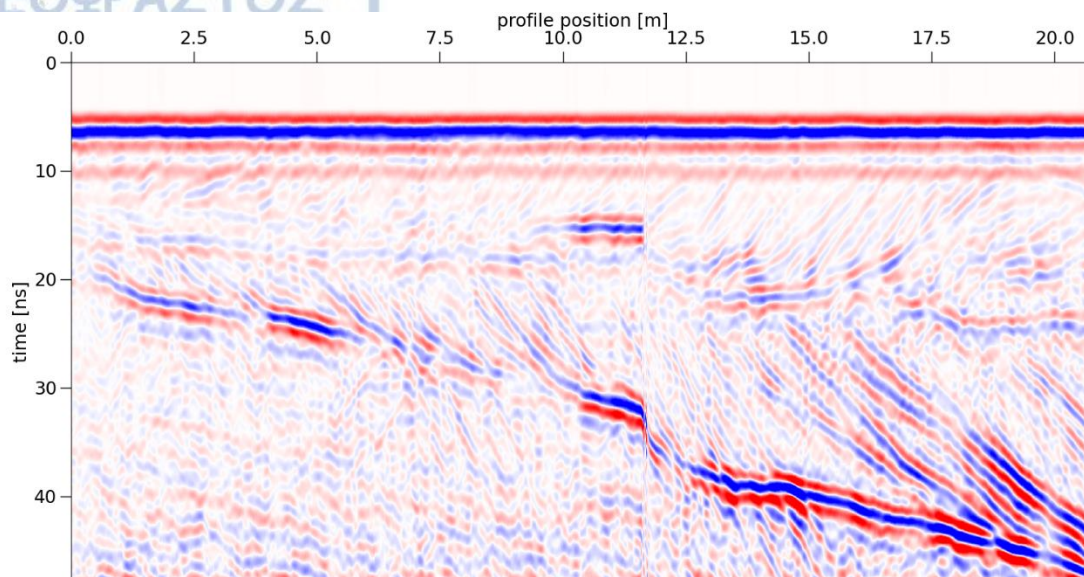


Εικόνα 3.8 Γραμμικό Gain (linear gain)

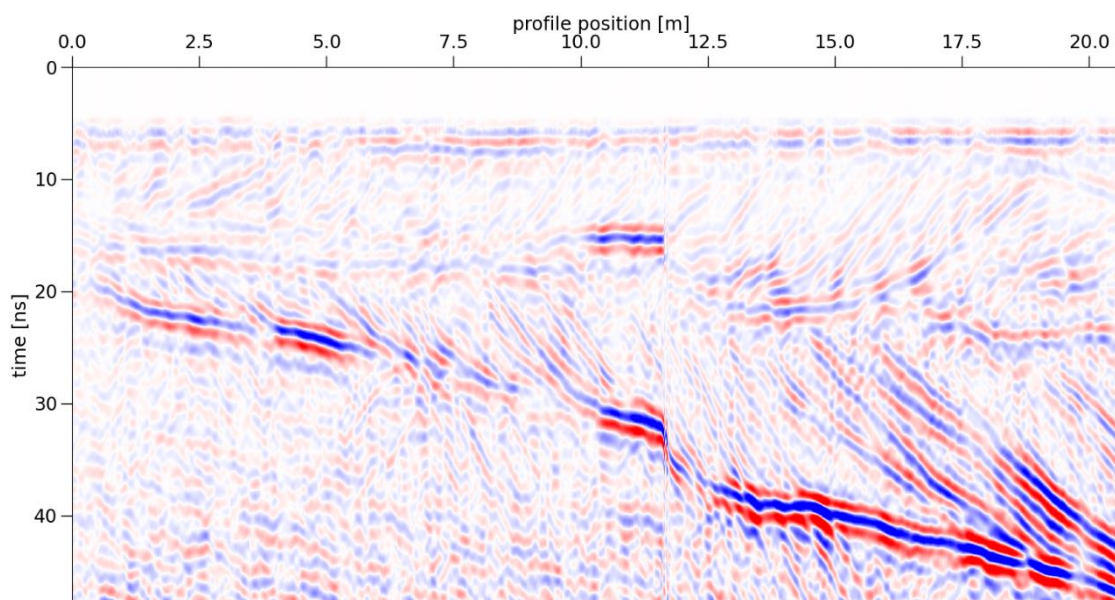


Εικόνα 3.9 Εκθετικό Gain (exponential gain)

Background subtraction: Αποτελεί ένα φίλτρο το οποίο εφαρμόζεται για την αφαίρεση του θορύβου από το περιβάλλον υπόβαθρο. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την εφαρμογή του, με την πιο συχνή να είναι η αφαίρεση μέσου όρου, δηλαδή εκτιμάται πως το υπόβαθρο είναι ο μέσος όρος των τιμών από όλα τα ίχνη και στη συνέχεια αφαιρείται από τα δεδομένα. Με την εφαρμογή του φίλτρου είναι πιθανό να υπάρξει απώλεια πληροφορίας, κυρίως εάν υπάρχουν οριζόντιοι ανακλαστήρες που μπορεί να αφαιρεθούν από τα δεδομένα, παρ' όλα αυτά τα παραμένοντα σήματα που αποτελούν στόχο ενδιαφέροντος γίνονται πιο ευκρινή (Cassidy, N.J. 2009).

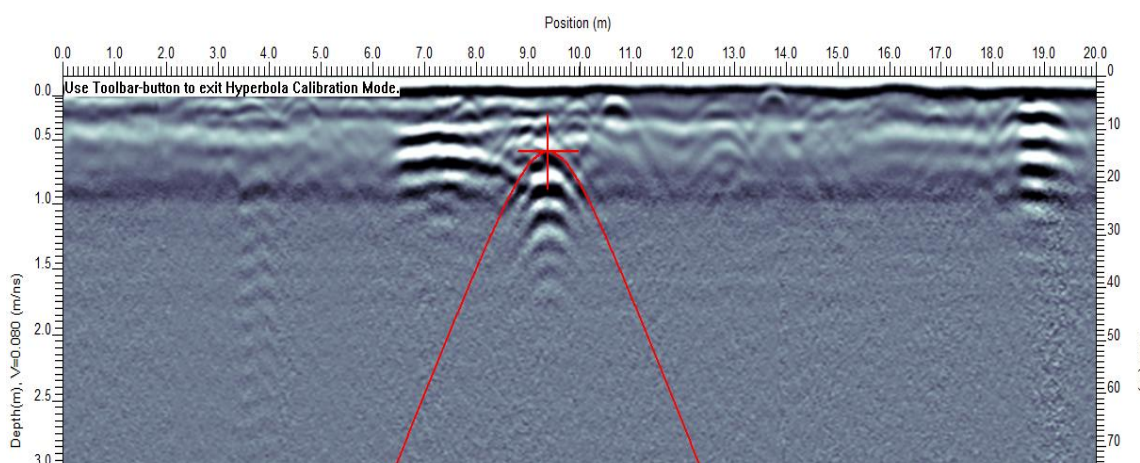


Εικόνα 3.10 Τομή GPR χωρίς την εφαρμογή Background Subtraction (Plattner, AM.,2020)



Εικόνα 3.11 Τομή GPR με την εφαρμογή Background Subtraction (Plattner, AM.,2020)

Hyperbola velocity calibration : Αποτελεί μια μέθοδο υπολογισμού της ταχύτητας στο μέσο διάδοσης. Η ταχύτητα της διάδοσης του H/M κύματος εξαρτάται αποκλειστικά από τις ιδιότητες του υπεδάφους και το σχήμα κάθε υπερβολής αποτελεί μια συνάρτηση του βάθους της με την ταχύτητα της διάδοσης στο μέσο. Εφόσον δηλαδή το βάθος είναι γνωστό, το σχήμα της υπερβολής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης στο υπόβαθρο. Με την εφαρμογή της μεθόδου σε προγράμματα επεξεργασίας, δημιουργείται μια τεχνητή υπερβολή στα δεδομένα ώστε να ταυτίζεται με μια πραγματική και στη συνέχεια αυτομάτως υπολογίζεται και η ταχύτητα διάδοσης του GPR κύματος στο υπέδαφος.

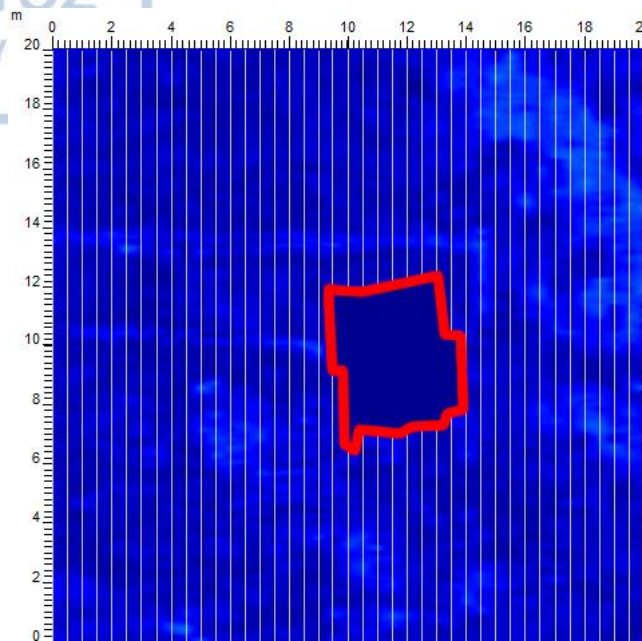


Εικόνα 3.12 Υπολογισμός ταχύτητας διάδοσης με την μέθοδο Hyperbola Velocity Calibration

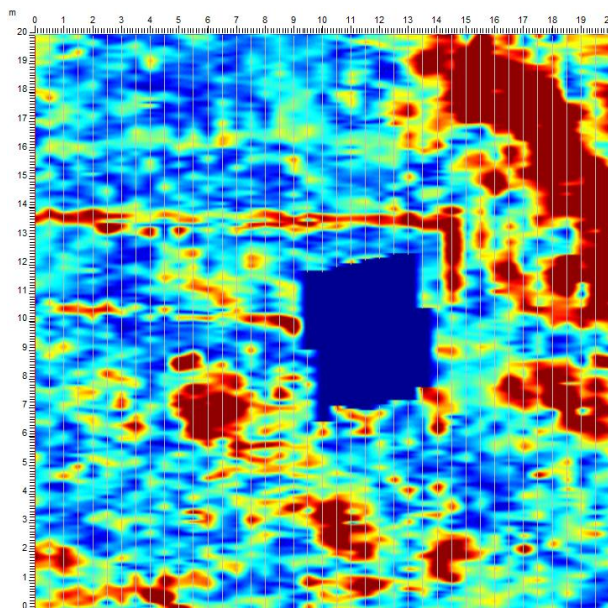
3.2.1 Επεξεργασία καννάβου [A]

Ξεκινώντας από τον πρώτο κατά σειρά κάνναβο, η εικόνα που αποτυπώνει τις καταγραφές όλων των οδεύσεων του καννάβου είναι η παρακάτω (3.13).

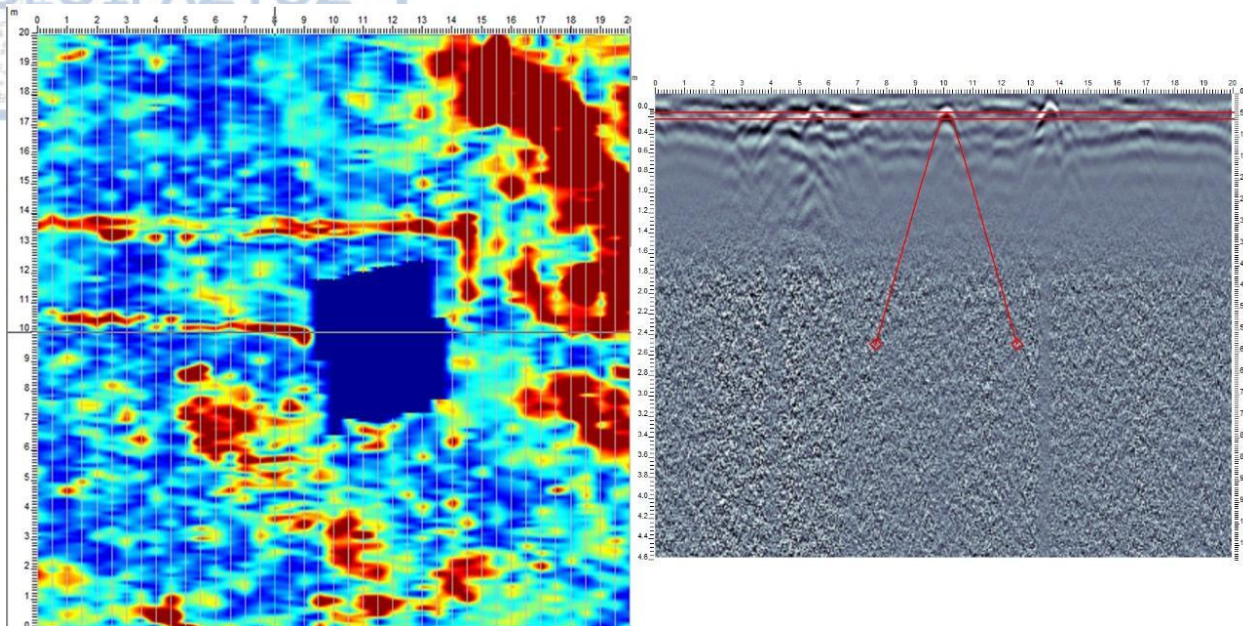
Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν κατάλληλα και αφού ενισχύθηκε το σήμα (**gain**), δημιουργήθηκαν οι τομές βάθους. Μια ενδεικτική, επιφανειακή τομή βάθους (**depth slice**) για $d \sim 0.15\text{m}$ παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.14. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των H/M κυμάτων, επιλέχθηκε μία όδευση που τέμνει κάθετα ένα γραμμικό στοιχείο (συγκεκριμένα, η line 16 περίπου στα 10m του καννάβου στον άξονα – Εικόνα 3.15) και με βάση την υπερβολή που σχηματίστηκε η ταχύτητα που υπολογίζεται είναι 0.084 m/ns .



Εικόνα 3.13: Η αρχική απεικόνιση (depth slice) του καννάβου [A], με κόκκινο περίγραμμα η περιοχή επάνω από την οποία δεν έγινε όδευση λόγω της ύπαρξης επιφανειακών εμποδίων.

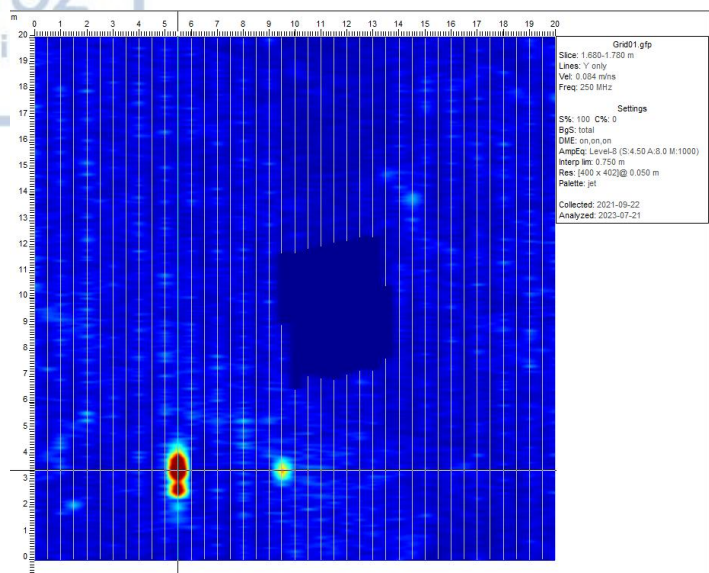


Εικόνα 3.14: Η απεικόνιση του καννάβου [A] μετά την ενίσχυση του σήματος για $d \sim 0.15m$.

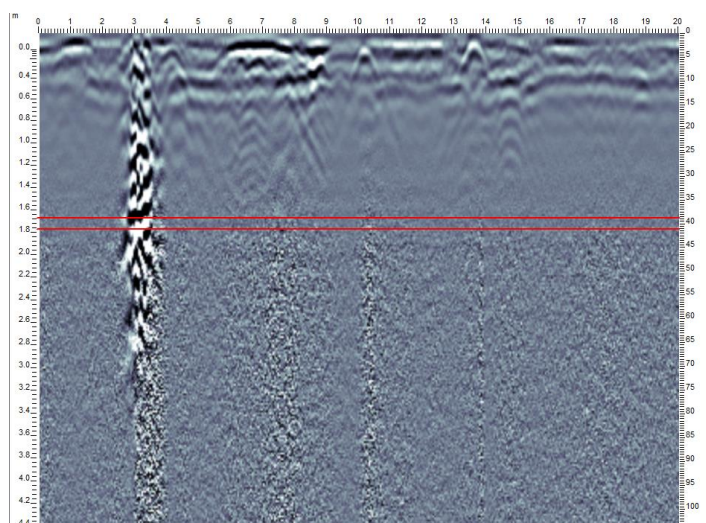


Εικόνα 3.15: Ο υπολογισμός της ταχύτητας με τη χρήση του Hyperbola Velocity Calibration.

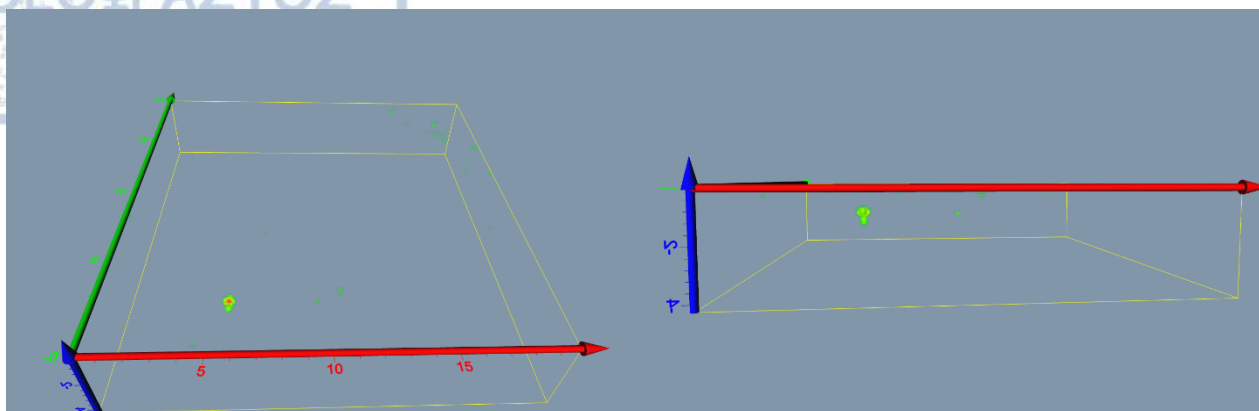
Αφού έγινε η σωστή εισαγωγή των δεδομένων, συνέχεια έχει η εξέταση του καννάβου σε όλα τα βάθη των μετρήσεων, δηλαδή έλεγχος των διαφόρων depth slices. Σε βάθος ~0.40m εμφανίζεται ένα αντικείμενο που προκαλεί σημαντικές καταγραφές (βλ. εικόνα 3.16) οι οποίες παρατηρούνται και σε μεγαλύτερα βάθη (βλ. εικόνα 3.17). Οι καταγραφές αυτές είναι πιθανό να υποδηλώνουν μεταλλικούς στόχους και προκειμένου να οπτικοποιηθούν έγινε εξαγωγή των δεδομένων του καννάβου σε λογισμικό 3D απεικόνισης (Voxler 4) αφού πρώτα εφαρμόστηκε φίλτρο για την αφαίρεση υψηλών συχνοτήτων (βλ. εικόνα 3.18).



Εικόνα 3.16: Depth Slice για 1.68-1.78 m



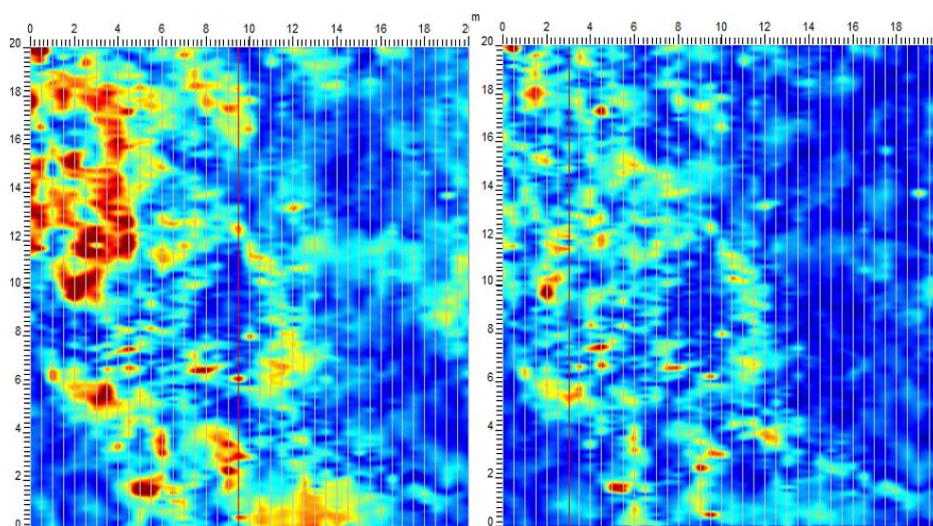
Εικόνα 3.17: Τομή GPR της όδευσης που περνά επάνω από το αντικείμενο



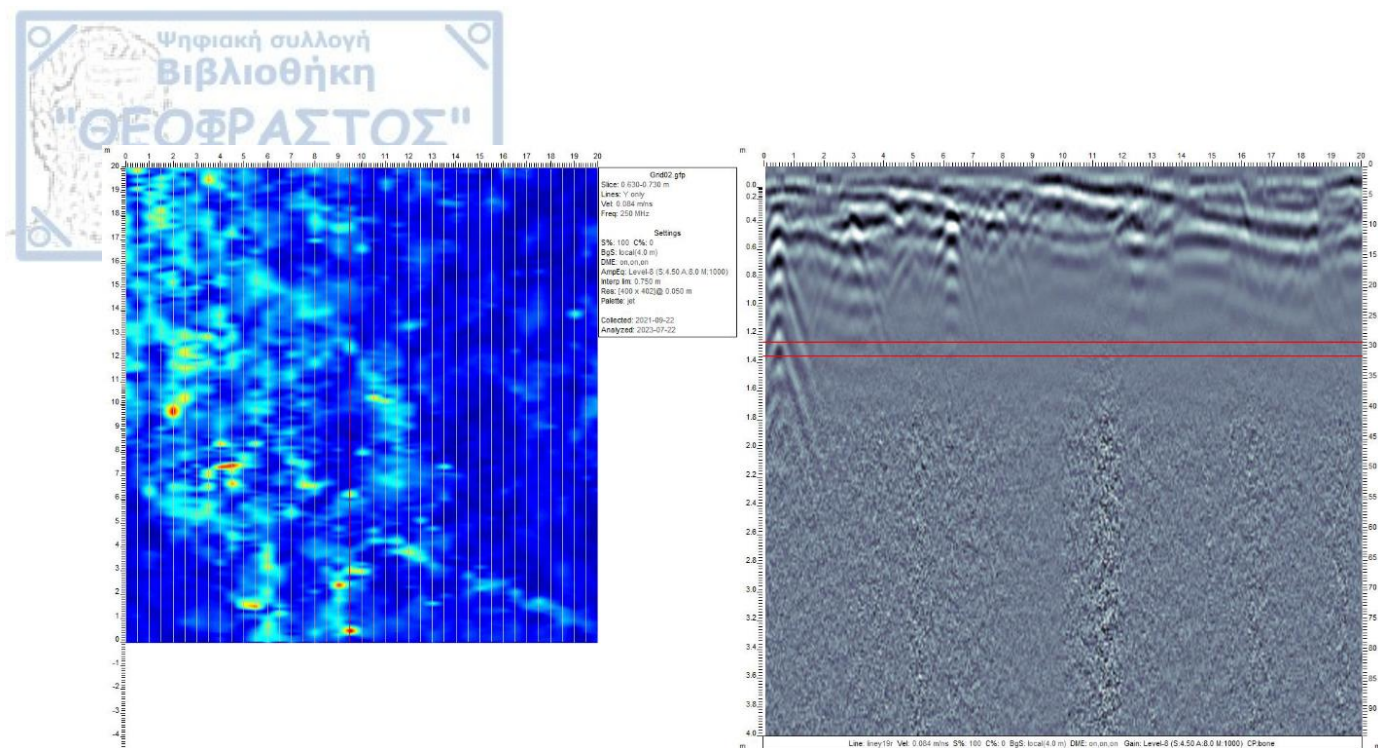
Εικόνα 3.18: Η απεικόνιση του αντικειμένου σε 3 άξονες $[x, y, z]$

3.2.2 Επεξεργασία καννάβου [B]

Συνεχίζοντας με τον δεύτερο κάνναβο, οι μετρήσεις που ελήφθησαν υποδεικνύουν έντονες ανακλάσεις χωρίς όμως να εμφανίζουν υπερβολική μορφή σε βάθος από $d=0.15\text{m}$ μέχρι και $d=0.6\text{m}$. Γι' αυτό το λόγο έγινε εφαρμογή φίλτρου (background subtraction) με σκοπό την αφαίρεση των ανακλάσεων που παραπέμπουν σε επίπεδη επιφάνεια άνω των 4 μέτρων σε μήκος, δηλαδή κάποιο όριο μεταξύ στρωμάτων. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου και τον έλεγχο του καννάβου σε διάφορα βάθη δε φαίνεται να υπάρχει στόχος ανάλογης μορφής με τον προηγούμενο, παρά μόνο κάποιες υπερβολές πιο ασθενούς χαρακτήρα (βλ. εικόνα 3.19).



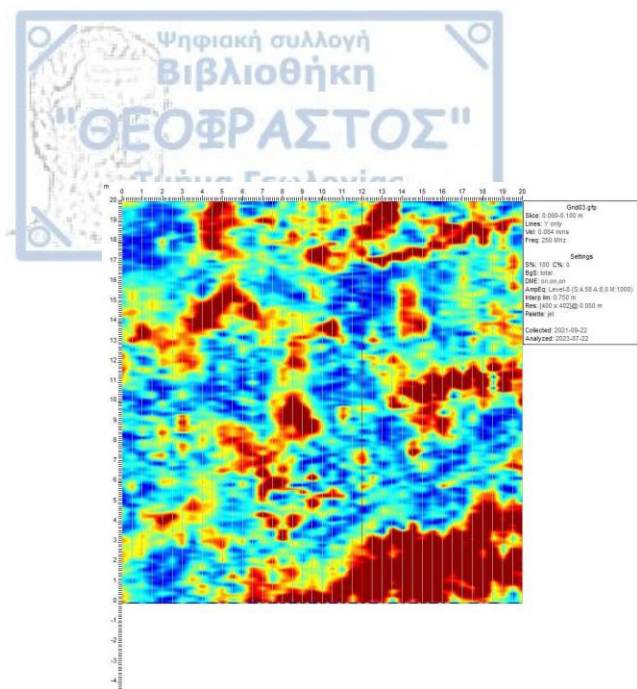
Εικόνα 3.19: Depth Slice βάθους 0.49-0.59 m πριν (αριστερά) και μετά την εφαρμογή φίλτρου (δεξιά)



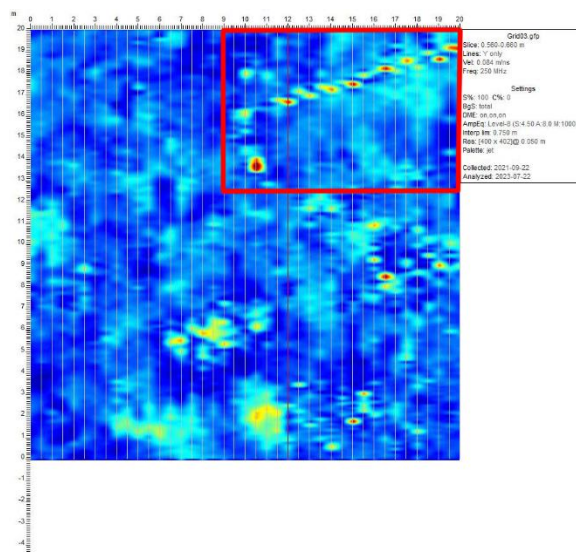
Εικόνα 3.20: Depth slice (αριστερά) και η τομή GPR για την οδό 19

3.2.3 Επεξεργασία δεδομένων καννάβου [C]

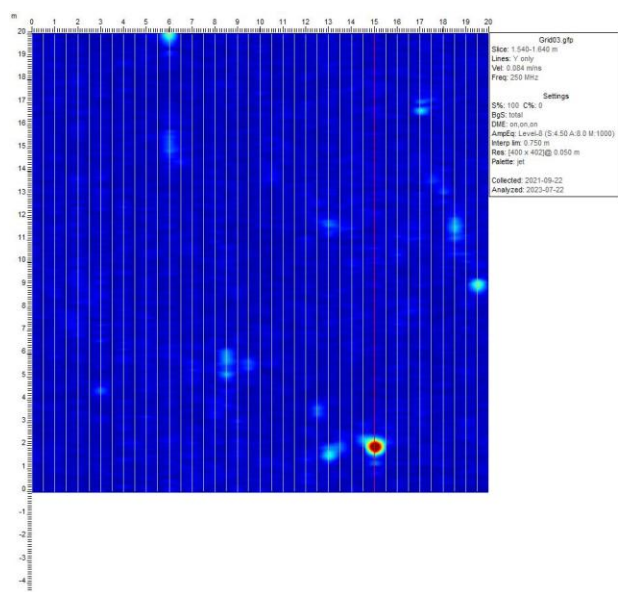
Προχωρώντας στον τρίτο κάνναβο, ξεχωρίζουν οι έντονες επιφανειακές καταγραφές στον οριζόντιο άξονα και πιο συγκεκριμένα από $x=6m$ μέχρι και το τέλος του, δηλαδή $x=20m$ (βλ. εικόνα 3.21). Επιπλέον, εξετάζοντας τον κατά βάθος διακρίνεται μια σειρά από ισχυρές καταγραφές στην ανώτερη περιοχή της εικόνας (βλ. εικόνα 3.22) και μια εξαιρετικά ισχυρή καταγραφή σε βάθος περίπου $0.4m$ (βλ. εικόνα 3.23) η οποία ομοίως με τον κάνναβο [A] φαίνεται να παρουσιάζει ισχυρές καταγραφές και σε μεγαλύτερα βάθη υποδηλώνοντας παρουσία πιθανού μεταλλικού στόχου (βλ. εικόνα 3.24).



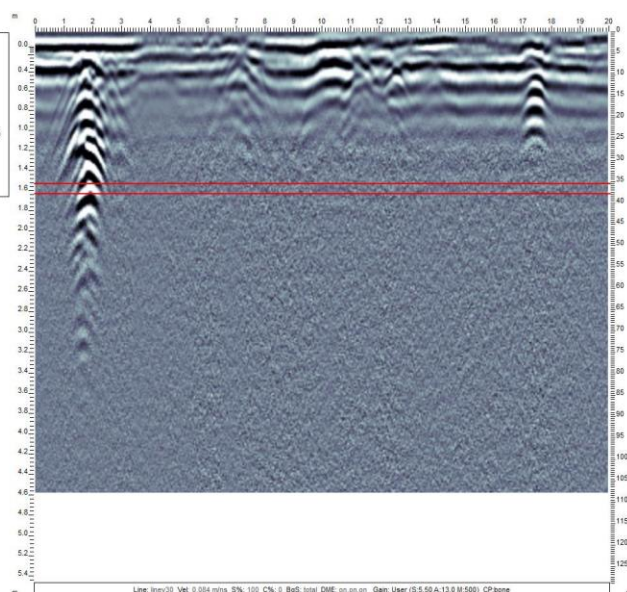
Εικόνα 3.21: Depth Slice για $d=0.15m$



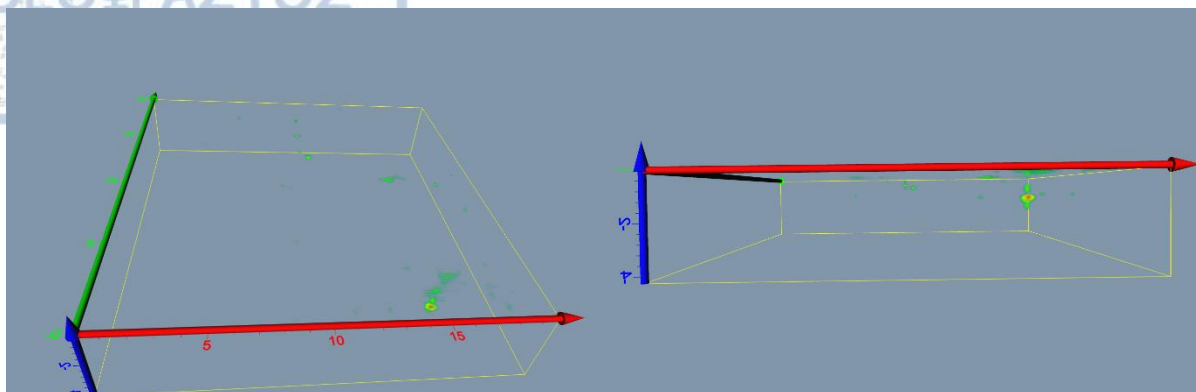
Εικόνα 3.22: Depth slice για $d=0.56-0.66m$



Εικόνα 3.23: Depth Slice για $d=1.54-1.64m$



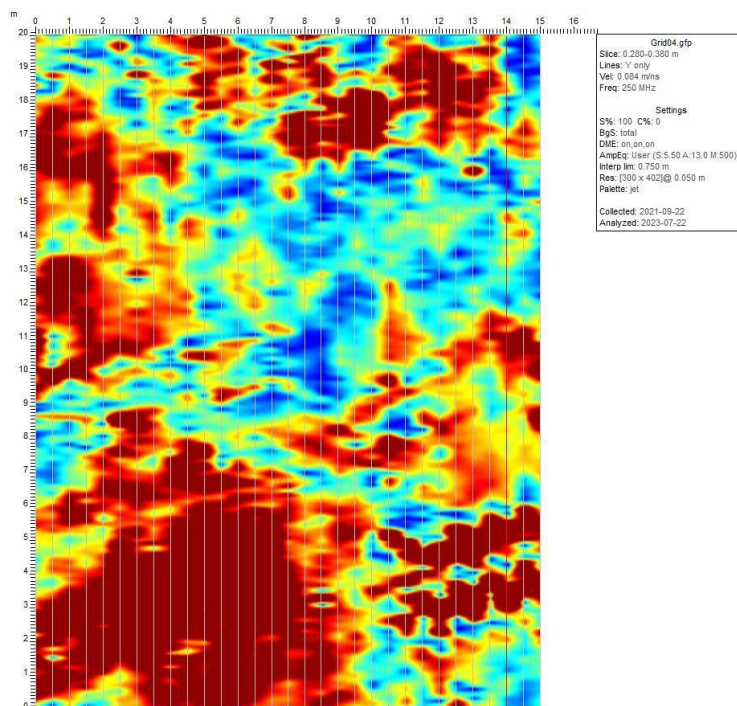
Εικόνα 3.24: Η τομή του GPR που περνάει από το σημείο



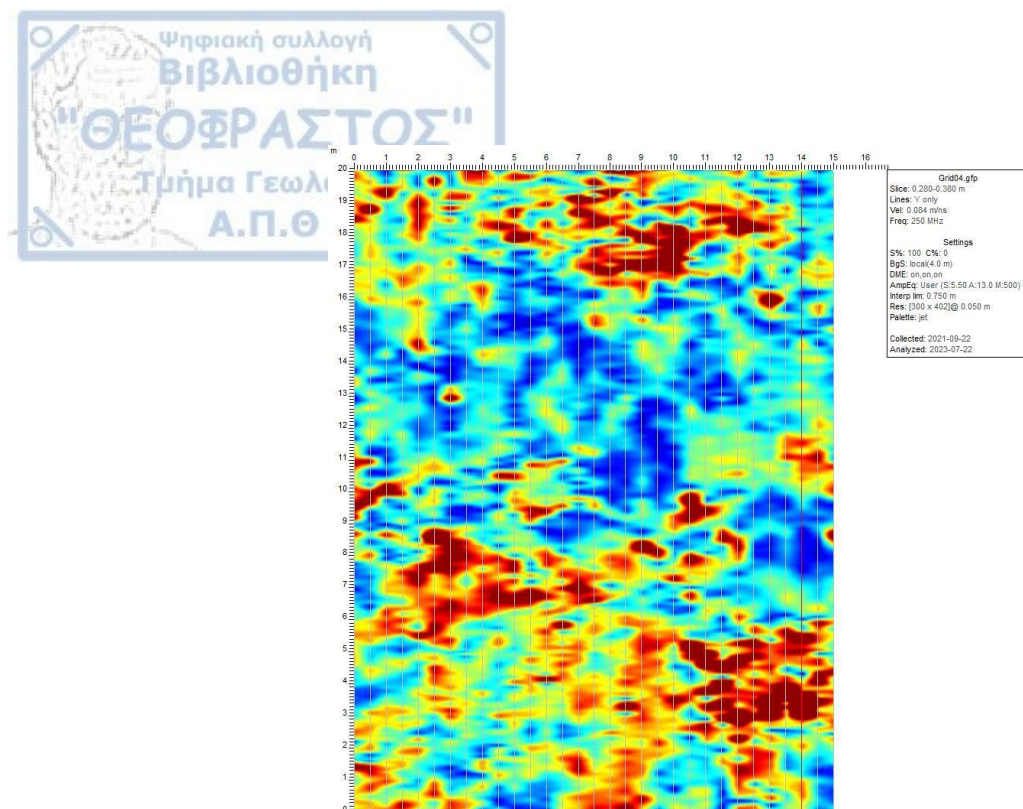
Εικόνα 3.25: Η απεικόνιση του αντικείμενου σε 3 άξονες $[x, y, z]$

3.2.4 Επεξεργασία δεδομένων καννάβου [D]

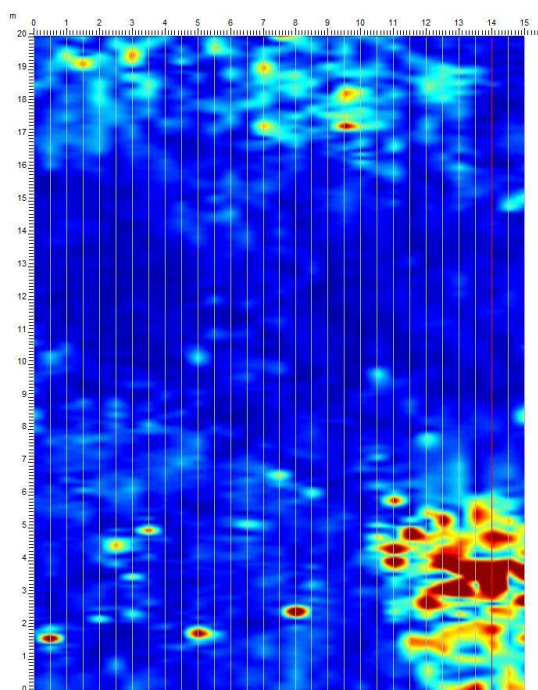
Τέλος, η απεικόνιση των αρχικών μετρήσεων του τέταρτου καννάβου υποδεικνύουν επίσης πολύ ισχυρές επιφανειακές καταγραφές επιφανειών έως το βάθος των 0.5m, οπότε και εφαρμόστηκε φίλτρο για την απαλοιφή αυτών που υπερβαίνουν τα 4 μέτρα σε μήκος. Έπειτα στο άκρο του οριζοντίου άξονα υπάρχουν πολύ έντονες καταγραφές από την επιφάνεια μέχρι και το βάθος των 1.6m.



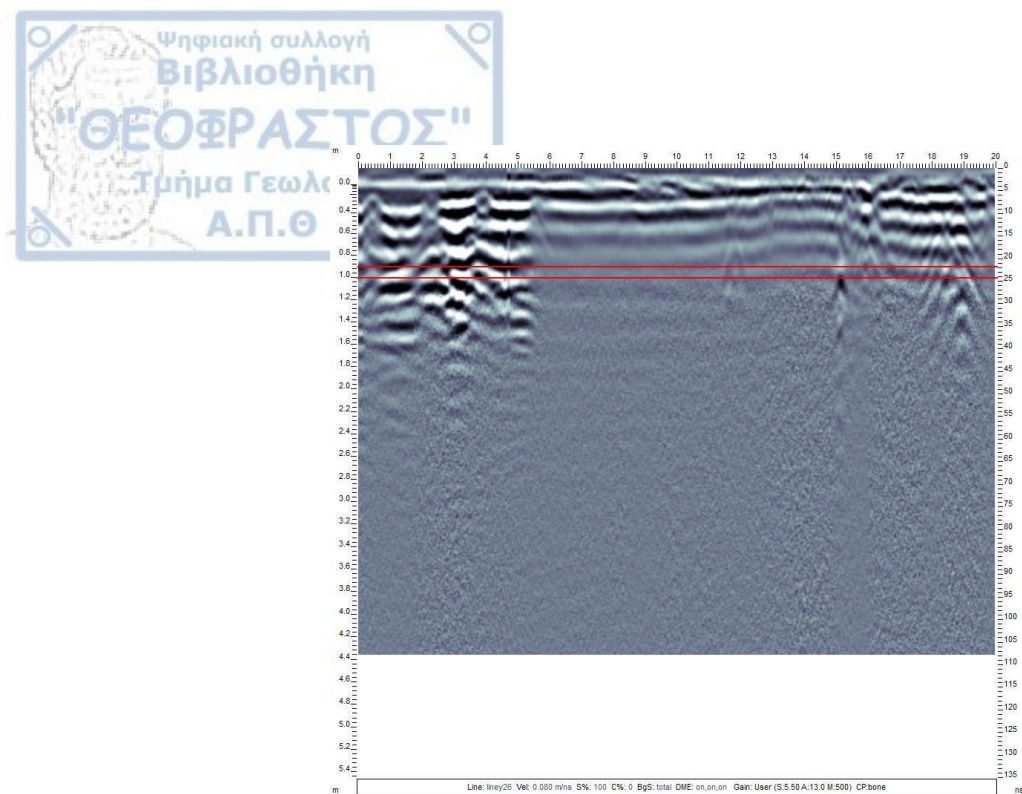
Εικόνα 3.26: Depth Slice για $d=0.28-0.38m$ πριν από την εφαρμογή φίλτρου



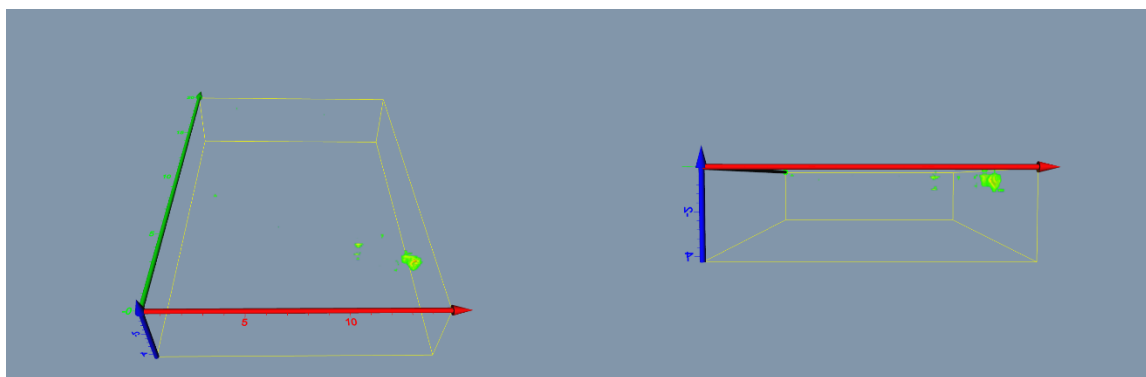
Εικόνα 3.27: Depth Slice για $d=0.28-0.38\text{m}$ μετά από την εφαρμογή φίλτρου



Εικόνα 3.28: Depth Slice για $d= 0.91-1.01\text{ m}$



Εικόνα 3.29: Τομή GPR όδευσης που περνά επάνω από το αντικείμενο



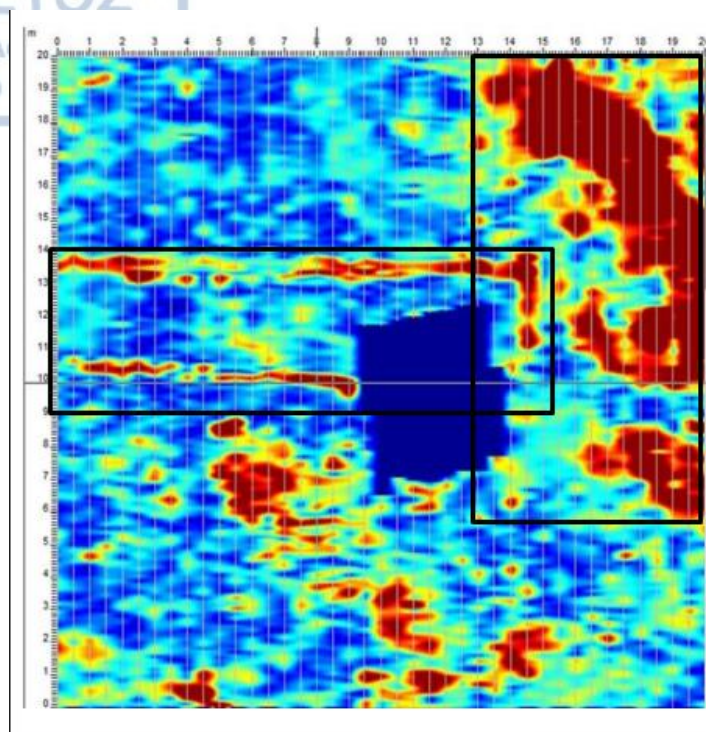
Εικόνα 3.30: Απεικόνιση του αντικείμενου σε 3 άξονες $[x, y, z]$

4 Ερμηνεία των επεξεργασμένων δεδομένων GPR

Μετά από την επεξεργασία των δεδομένων, πλέον υπάρχουν ευκρινείς ανομοιογένειες στο σύνολο των καννάβων. Δεν αρκεί ωστόσο αυτή η διαδικασία και είναι αναγκαίο να γίνει και σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Ο σκοπός της έρευνας είναι ο εντοπισμός μεταλλικών υπεδάφινων στόχων (δεξαμενών), δηλαδή πολύ έντονες ανακλάσεις που αναμένονται να ξεχωρίζουν από το περιβάλλον μέσο και τις υπόλοιπες μικρότερες ανομοιογένειες που εμφανίζονται, παρ' όλα αυτά θα επιχειρηθεί η ερμηνεία του συνόλου των ανομοιογενειών.

4.1 Ερμηνεία επεξεργασίας αποτελεσμάτων καννάβου [Α]

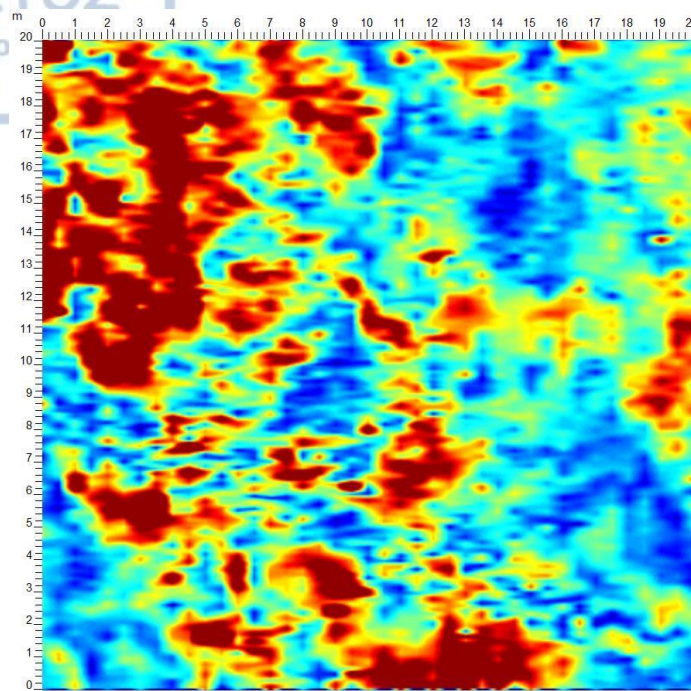
Ξεκινώντας από τον πρώτο κάνναβο, εξετάζοντας τον μετά από την ενίσχυση του σήματος, αρχικά σε βάθος $\sim 0.15\text{m}$ (Εικόνα 4.1), είναι εμφανές πως υπάρχουν πολλές ανομοιογένειες και συνεπώς μια διαταραγμένη επιφάνεια. Μία ερμηνεία αυτής της κατάστασης είναι η παρουσία υλικών που μεταφέρθηκαν εκεί σε δεύτερο χρόνο (δομικά υλικά, καλώδια, σωλήνες κλπ.). Όπως φαίνεται και στο σχήμα, στο χωρικό διάστημα $[x=0\text{m}$ μέχρι $x=10\text{m}]$ στο ύψος $[y=10\text{m}$ μέχρι $y=11\text{m}]$ και $[x=0$ μέχρι $x=14\text{m}]$ και $[y=13\text{m}$ μέχρι $y=14\text{m}]$ υπάρχουν γραμμικά στοιχεία που πιθανώς υποδηλώνουν θαμμένους σωλήνες ή μια δέσμη καλωδίων. Επίσης στην περιοχή $[x=14\text{m}$ μέχρι $x=20\text{m}]$ και $[y=6\text{m}$ μέχρι $y=20\text{m}]$ εμφανίζεται μια έντονη ανομοιογένεια με υψηλές ανακλάσεις η οποία κατά την εμβάθυνση του καννάβου εξαφανίζεται που δηλώνει μια επιφάνεια που χαρακτηρίζεται από διαταράξεις από διάφορα υλικά μεγάλης αντίστασης.



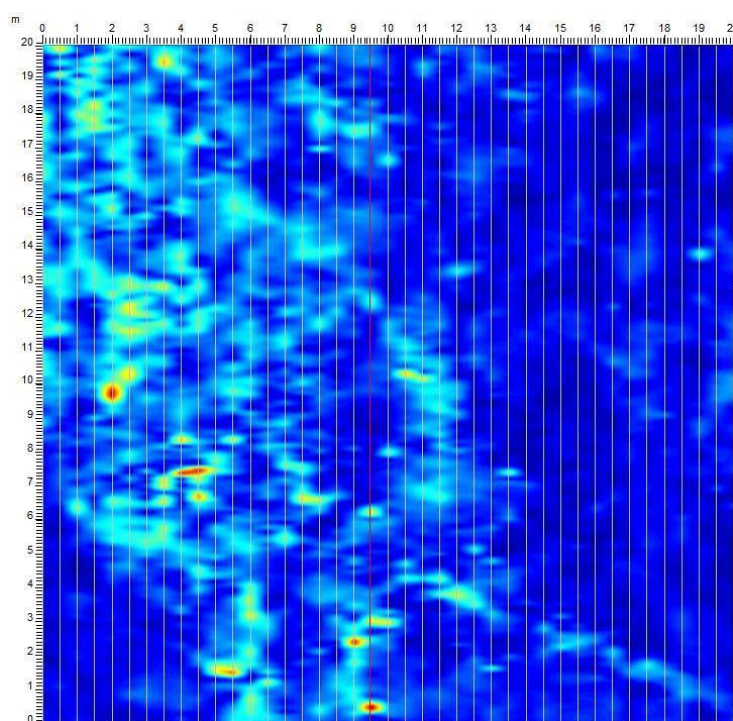
Εικόνα 4.1 Γραμμικά στοιχεία και επιφανειακή ανομοιογένεια καννάβου [A]

4.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων επεξεργασίας καννάβου [B]

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας του καννάβου [B], παρατηρήθηκαν κυρίως εναλλαγές των επιφανειακών υλικών δημιουργώντας ασυνέχειες με αποτέλεσμα να καταγραφούν ανακλάσεις μόνο σε μικρό βάθος. Σε βάθος 0.45m φαίνεται έντονα η ανομοιογένεια των υλικών (βλ. εικόνα 4.2), παρ' όλα αυτά δεν εντοπίστηκε καταγραφή η οποία είναι δυνατόν να αποτελέσει μεταλλικό στόχο που να αφορά τη μελέτη καθώς όπως φαίνεται και σε μεγαλύτερο βάθος (βλ. εικόνα 4.3) δεν παρατηρήθηκαν καταγραφές που να υποδεικνύουν αντικείμενα μεγάλου μεγέθους με μεταλλικές γεωηλεκτρικές ιδιότητες.



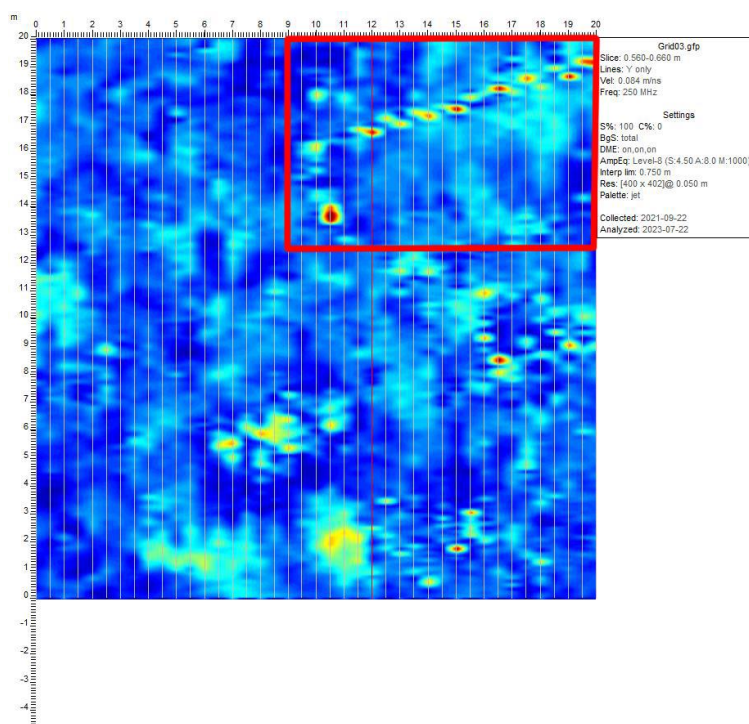
Εικόνα 4.2 Ανομοιογένεια καννάβου [B] για βάθος ~0.45m.



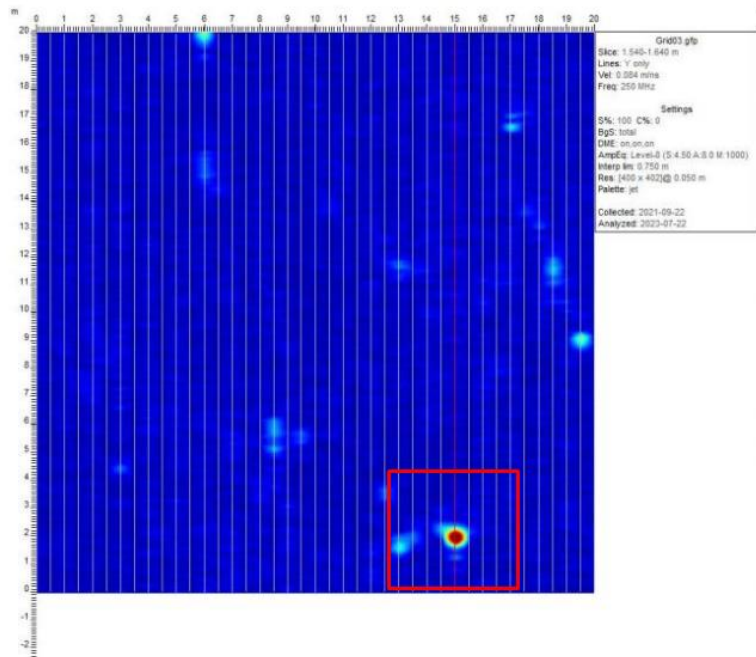
Εικόνα 4.3 Ανομοιογένεια καννάβου [B] για βάθος ~0.65m.

4.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων επεξεργασίας καννάβου [C]

Συνεχίζοντας την ερμηνεία των επεξεργασμένων δεδομένων, στον τρίτο κάνναβο συνεχίζεται η παρουσία επιφανειακών διαταραχών με υλικά μικρής αγωγιμότητας και συνεπώς πολύ έντονων ανακλάσεων, ωστόσο ομοίως και με τους προηγούμενους καννάβους καθώς η εξέταση του γίνεται σε μεγαλύτερο βάθος, αρχικά ξεχωρίζει μια καταγραφή στο ανώτερο μέρος του [$x=10\text{m}$ μέχρι $x=20\text{m}$] , [$y=13.5$ μέχρι $y=19.5$] και σε βάθος (0.56-0.66) m, η οποία φαίνεται πως αποτελεί ένα γραμμικό στοιχείο πιθανώς παρουσία καλωδίων ή γραμμικού υπεδάφιου αγωγού (βλ εικόνα 4.4). Έπειτα σε βάθος 0.4m , στην περιοχή [$x=14\text{m}$ μέχρι $x=16\text{m}$] και [$y=1\text{m}$ μέχρι $y=2\text{m}$] εμφανίζεται ένας στόχος με πολύ ισχυρές ανακλάσεις, προφανώς με μεταλλικές ιδιότητες και όμοιος με αυτόν του πρώτου καννάβου στον οποίο μέσω του φαινομένου ring down καταγράφονται υψηλές ανακλάσεις και σε μεγαλύτερα βάθη (βλ. εικόνα 4.5). Εξετάζοντας και την τομή της όδευσης που περνάει επάνω από το στόχο (βλ. 3.24) όπως και την τρισδιάστατη απεικόνιση του (3.25) είναι πολύ πιθανό το συγκεκριμένο αντικείμενο να αποτελεί επίσης έναν στόχο της έρευνας δηλαδή μια μεταλλική δεξαμενή.



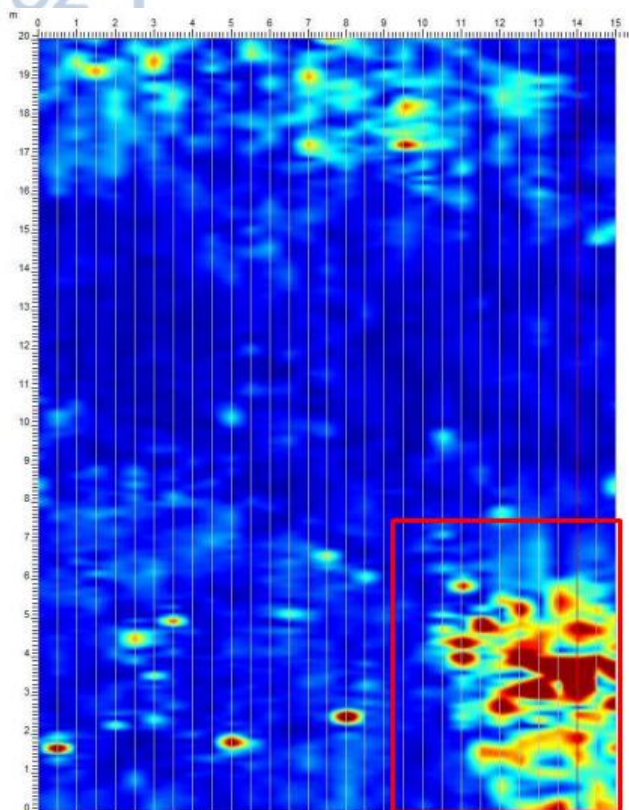
Εικόνα 4.4 Καταγραφές που υποδεικνύουν γραμμικό στοιχείο



Εικόνα 4.5 Περιοχή εμφάνισης στόχου σε βάθος 1.54-1.64m

4.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων επεξεργασίας καννάβου [D]

Τέλος φτάνοντας στον τέταρτο κάνναβο, παρατηρούνται επίσης πολύ ισχυρές επιφανειακές καταγραφές, κυρίως στο κατώτερο και ανώτερο μέρος του καννάβου (βλ. 3.26), οι οποίες μετά την εφαρμογή του φίλτρου ένα μεγάλο μέρος τους αφαιρέθηκε από τα δεδομένα (βλ. 3.27), γεγονός που πιθανώς να υποδηλώνει και πάλι διαταραγμένη επιφάνεια, ωστόσο συνεχίζουν να εμφανίζονται και σε μεγαλύτερο βάθος, περίπου 1m (βλ. 3.29) και ίσως να αποτελούν θαμμένα μεταλλικά υλικά, δομικά υλικά κλπ. Η σημαντικότερη καταγραφή του καννάβου συναντάται στην περιοχή $[x=10\text{m} \text{ μέχρι } x=20\text{m}]$, $[y=0\text{m} \text{ μέχρι } y=6\text{m}]$. Παρατηρούνται εξαιρετικά έντονες ανακλάσεις κατά την όδευση του GPR επάνω από το αντικείμενο (βλ. 3.29) και είναι χαρακτηριστικά μεγαλύτερος στόχος από τους προηγούμενους.



Εικόνα 4.6 Η περιοχή εμφάνισης στόχου σε βάθος 0.91-1.01m

Βάσει των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του στόχου, δηλαδή τις ισχυρές ανακλάσεις του σήματος σε βάθος, είναι εξαιρετικά πιθανό να αποτελεί και αυτός στόχο της έρευνας, τη μεγαλύτερη των μεταλλικών δεξαμενών όπως εμφανίζεται και πολύ χαρακτηριστικά στην τρισδιάστατη απεικόνιση του (βλ. 3.30).

5 Αποτελέσματα – εξαγωγή δεξαμενών.

Στο τελικό στάδιο της έρευνας και αφού εντοπίστηκαν οι στόχοι, σειρά έχει η αποκάλυψη και η εξαγωγή τους. Ξεκινώντας από τον πρώτο κάνναβο, εμφανίζονται τα γραμμικά στοιχεία που χαρακτηρίστηκαν στο κεφάλαιο της ερμηνείας ως μεταλλικοί γραμμικοί στόχοι προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. 5.2).



Εικόνα 5.1 Αποκάλυψη της δεξαμενής του πρώτου καννάβου



Εικόνα 5.2 Αποκάλυψη των γραμμικών στόχων του πρώτου καννάβου

Στη συνέχεια έγινε η αποκάλυψη του στόχου στο χώρο του τρίτου καννάβου (βλ. 5.3) και ακολούθησε η εξαγωγή του, μιας μεταλλικής δεξαμενής μήκους 3.50m και διαμέτρου 2.00m (βλ. 5.4)



Εικόνα 5.3 Αποκάλυψη μεταλλικής δεξαμενής του τρίτου καννάβου.



Εικόνα 5.4 Εξαγωγή μεταλλικής δεξαμενής του τρίτου καννάβου

Τέλος, φτάνοντας στον τέταρτο κάνναβο και με βάση τις ξεκάθαρες ενδείξεις για έναν μεγαλύτερο στόχο, ακολούθησε η αποκάλυψη και του τέταρτου στόχου (βλ. 5.5) όπως και η εξαγωγή του που κατέληξε στην παρουσία μιας μεταλλικής δεξαμενής αρκετά μεγαλύτερων διαστάσεων από τις προηγούμενες, μήκους 8.00m και διαμέτρου 2.20m (βλ. 5.6 και 5.7).



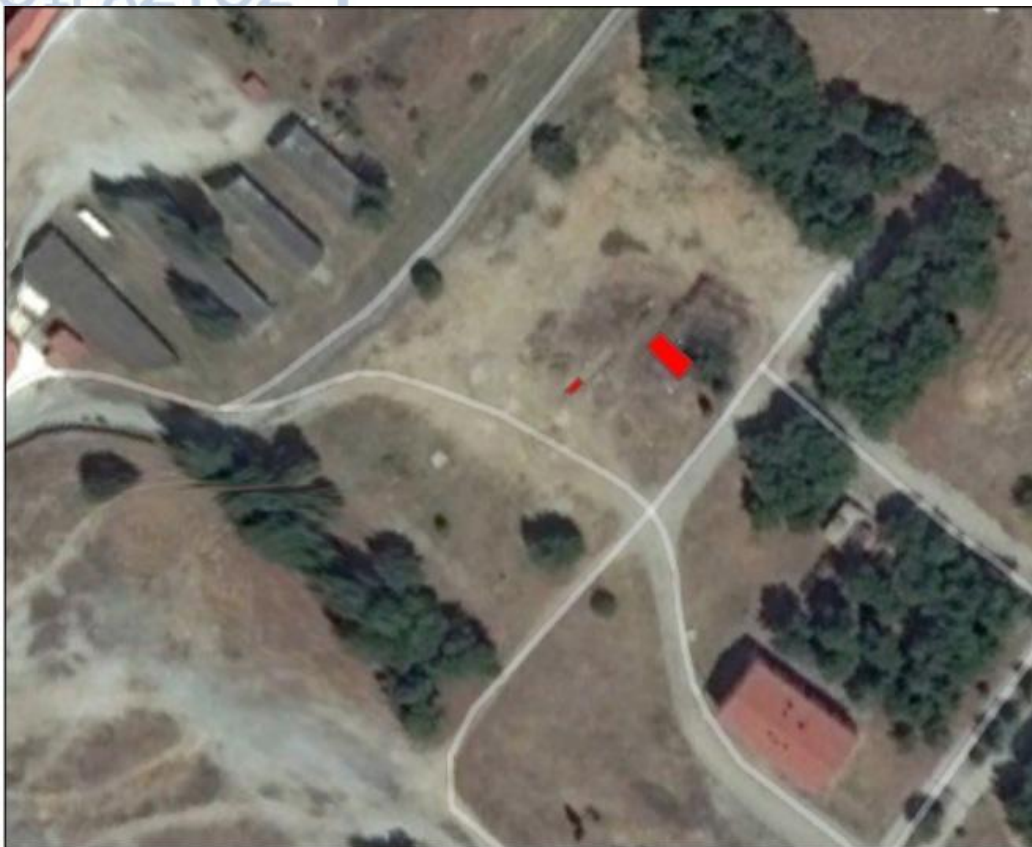
Εικόνα 5.5 Αποκάλυψη της μεταλλικής δεξαμενής του τέταρτου καννάβου



Εικόνα 5.6 Μεταλλική δεξαμενή πριν την εξαγωγή της.



Εικόνα 5.7 Εξαγωγή μεταλλικής δεξαμενής μήκους 8.00m και διαμέτρου 2.20m

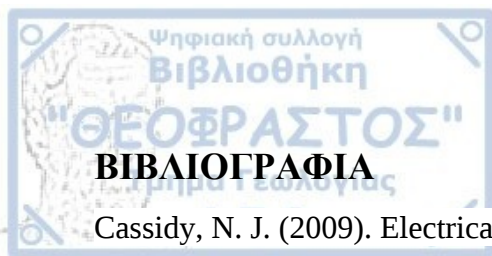


Εικόνα 5.8 Πανοραμική εικόνα της περιοχής της μελέτης με σημειωμένες τις θέσεις των στόχων (κόκκινο χρώμα)

Συνοψίζοντας τη διαδικασία που ακολουθήθηκε, η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει στην αποτελεσματικότητα του γεωραντάρ (GPR) στον εντοπισμό υπόγειων στόχων, συγκεκριμένα υπόγειων δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων, βάσει των φυσικών ιδιοτήτων τους και την απόκριση τους στα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μέσω του λεπτομερούς φιλτραρίσματος και της επεξεργασίας των αρχικών δεδομένων GPR, προέκυψαν σημαντικές πληροφορίες για την ομοιογένεια και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υπεδάφους χωρίς την εφαρμογή κάποιας καταστρεπτικής μεθόδου έρευνας, διατηρώντας την συνοχή της επιφάνειας και του υπεδάφους.

Τα ευρήματα της μελέτης ανέδειξαν τις ηλεκτρικές ανομοιογένειες της περιοχής ως αποτέλεσμα της διαταραγμένης δομής του υπεδάφιου μέσου διάδοσης του σήματος. Στο τελικό στάδιο της επεξεργασίας και της ερμηνείας παρά τις έντονες ανακλάσεις ιδιαίτερα σε μικρά βάθη λόγω των επιφανειακών διαταραχών που αναφέρονται εκτενώς στην εργασία, εντοπίστηκαν ορισμένες καταγραφές των οποίων οι ανακλάσεις προμήνυαν αντικείμενα-στόχους με μεταλλικές ιδιότητες. Τελικά οι ανασκαφές επιβεβαίωσαν την παρουσία των στόχων / δεξαμενών στις θέσεις που επιλέχθηκαν με κριτήριο τις ισχυρότερες ανακλάσεις αναδεικνύοντας την εγκυρότητα της γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή με τη χρήση του GPR.

Ως γενικότερο συμπέρασμα της εν λόγω εργασίας αποτυπώνεται η δυναμική της μεθόδου του GPR όσον αφορά την αποτελεσματική χαρτογράφηση και ερμηνεία υπόγειων δομών και αντικειμένων. Οι δυνατότητες της μεθόδου την καθιστούν πολύτιμο εργαλείο σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών και μηχανικών εφαρμογών, συμβάλλοντας στην καθιέρωση της ως μια σύγχρονη και ωφέλιμη πρακτική σε μελλοντικές γεωφυσικές έρευνες.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cassidy, N. J. (2009). Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In H. M. Jol (Ed.), Ground Penetrating Radar Theory and Applications (pp. 41–72).

Cassidy, N. J. (2009). Chapter 5 - Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. In H. M. Jol (Ed.), Ground Penetrating Radar Theory and Applications (pp. 141–176).

Carrick Utsi, E. (2017). Chapter 1 - Fundamentals of GPR Operation. In E. Carrick Utsi (Ed.), Ground Penetrating Radar (pp. 1–11).

Carrick Utsi, E. (2017). Chapter 2 - Wavelengths and Why They Matter. In E. Carrick Utsi (Ed.), Ground Penetrating Radar (pp. 13–25).

Carrick Utsi, E. (2017). Chapter 5 - Velocity Calibration. In E. Carrick Utsi (Ed.), Ground Penetrating Radar (pp. 51–62).

Carrick Utsi, E. (2017). Chapter 8 - Data Processing. In E. Carrick Utsi (Ed.), Ground Penetrating Radar (pp. 83–92).

Annan, A. P. (2009). Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. Ground Penetrating Radar Theory and Applications (pp. 1–40).

Annan, A.P. (2003). Physical Properties I. Ground Penetrating Radar Principles, Procedures and Applications (pp. 24-41).

Kimura, W. D. (2020). What are electromagnetic waves? In Electromagnetic Waves and Lasers (Second Edition) (pp. 1-1-1–32).

Daniels, Jeffrey. (2000). Ground Penetrating Radar Fundamentals.

Plattner, A. M. (2020). GPRPy: Open-source ground-penetrating radar processing and visualization software. The Leading Edge, 39(5), 332–337.

Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). GROUND-PENETRATING RADAR FOR HIGH-RESOLUTION MAPPING OF SOIL AND ROCK STRATIGRAPHY1. Geophysical Prospecting, 37(5), 531–551.



Τσελέντης, Α., & Παρασκευόπουλος, Π. (2013). ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ, ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ, 461-475.

Ιστοσελίδες:

Basic Principles — GPG 0.0.1 documentation. (n.d.). Ανακτήθηκε 10/07/2023

geosci.xyz ,2023: https://gpg.geosci.xyz/content/GPR/GPR_fundamental_principles.html