



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΜΑΡΚΕΛΛΑ Κ. ΞΥΔΑ

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΥΠΕΔΑΦΙΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΤΗΝ  
ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GPR)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
2024





ΜΑΡΚΕΛΛΑ Κ. ΞΥΔΑ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5913

## ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΥΠΕΔΑΦΙΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ(GPR)

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,  
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

### Επιβλέπουσα

Δρ. Διαμαντή Νεκταρία



© Μαρκέλλα Κ. Ξύδα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΥΠΕΔΑΦΙΩΝ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ  
ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ(GPR)

– Διπλωματική Εργασία

© Markella K. Xyda, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2024

All rights reserved.

DETECTION OF ANTHROPOGENIC UNDERGROUND STRUCTURES USING  
THE GROUND PENETRATING RADAR (GPR) METHOD– 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.

*Εικόνα Εξωφύλλου:*.....





## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται τον εντοπισμό υπεδάφινων ανθρωπογενών δομών με την μέθοδο του γεωραντάρ ή ραντάρ υπεδάφους (Ground Penetrating Radar – GPR). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο GPR σε πρατήριο καυσίμων για την εύρεση και την χαρτογράφηση δεξαμενών, αγωγών, σωλήνων κλπ. Στόχος της εργασίας είναι η χρήση του εξοπλισμού GPR και η εξοικείωση με προγράμματα επεξεργασίας των δεδομένων που ελήφθησαν και έπειτα η ερμηνεία αυτών. Γίνεται αναφορά στις γεωφυσικές διασκοπήσεις με έμφαση στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο του GPR. Έπειτα, αναλύεται η περιοχή μελέτης, οι μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν, αλλά και η επεξεργασία των δεδομένων GPR, καταλήγοντας στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους.

## Abstract

This bachelor thesis deals with the detection of anthropogenic underground structures using the ground penetrating radar (GPR) method. Specifically, field measurements were carried out employing the GPR method at a gas station to locate and map underground tanks, pipelines, etc. The aim of this thesis is the use of GPR equipment in the field, the familiarization with software for processing the acquired GPR data and finally, their interpretation. Reference is made to geophysical surveys with emphasis on the electromagnetic method of GPR. Then, the study area as well as the field measurements are described, and also the processing of GPR data, concluding with the interpretation of the results.



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
1.Εισαγωγή.....	8
2.Μεθοδολογία.....	9
2.1 Γεωφυσική διασκόπηση.....	9
2.2 Μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης.....	9
3.Μέθοδος γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR).....	12
3.1 Τι είναι το GPR.....	12
3.2 Από τι αποτελείται ένα σύστημα GPR.....	12
3.3 Βασικοί όροι του γεωραντάρ (GPR).....	14
3.3.1 Ηλεκτρική διαπερατότητα.....	14
3.3.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	14
3.3.3 Βάθος διείσδυσης.....	14
3.3.4 Ταχύτητα διάδοσης.....	15
3.3.5 Διατάξεις GPR πομπού – δέκτη.....	15
3.4 Αρχές λειτουργίας GPR.....	17
3.4.1 Τρόπος λειτουργίας.....	17
3.4.2 Βασική επεξεργασία δεδομένων.....	19
3.5 Εφαρμογές GPR.....	19
3.6 Πλεονεκτήματα- μειονεκτήματα GPR.....	20
4.Περιοχή μελέτης.....	21
5.1 Μετρήσεις GPR.....	22
5.2 Εξοπλισμός γεωραντάρ.....	22
6 Επεξεργασία δεδομένων GPR.....	24
6.1 Ραδιογράμματα GPR.....	24
6.2 Κάνναβος μετρήσεων GPR – Τομές βάθους.....	27
6.3 Περιοχή μετρήσεων.....	28
7. Ερμηνεία αποτελεσμάτων GPR.....	30
7.1 Προφίλ / οδεύσεις GPR.....	30
7.2 Τομές βάθους GPR.....	34
7.2.2 Ανάλυση τομών.....	34
7.2.3 Συνδυαστικά παραδείγματα Line/Depth slice.....	37
8. Συμπεράσματα.....	39
9. Βιβλιογραφία.....	40

## 1. Εισαγωγή

Η χρήση των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι διαδεδομένη σε διάφορους τομείς (αρχαιολογία, υδρογεωλογία, εξερεύνηση ορυκτών πόρων κ.α.), διότι παρέχει πληροφορίες σχετικά με χαρακτηριστικά του εδάφους και του περιβάλλοντος που μελετώνται.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος του γεωραντάρ ή ραντάρ υπεδάφους (Ground Penetrating Radar – GPR). Η μέθοδος του γεωραντάρ είναι μια πρόσφατη σχετικά μέθοδος, μη καταστροφική, η οποία μελετά κυρίως τα επιφανειακά στρώματα. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις GPR σε πρατήριο καυσίμων ανατολικά της Θεσσαλονίκης, με σκοπό τον εντοπισμό υπογείων δεξαμενών και υποδομών και την χαρτογράφηση τους. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων, οι πληροφορίες που προκύπτουν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, εκτός από την χαρτογράφηση των θέσεων των υπόγειων δομών, για τον εντοπισμό πιθανής διαρροής για παράδειγμα, σε δεξαμενή, είτε για λόγους προληπτικής συντήρησης των υπεδάφινων δομών, διεξάγοντας διαχρονικές μετρήσεις με στόχο την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των εγκαταστάσεων.



Εικόνα 1: Μετρήσεις GPR στην περιοχή μελέτης



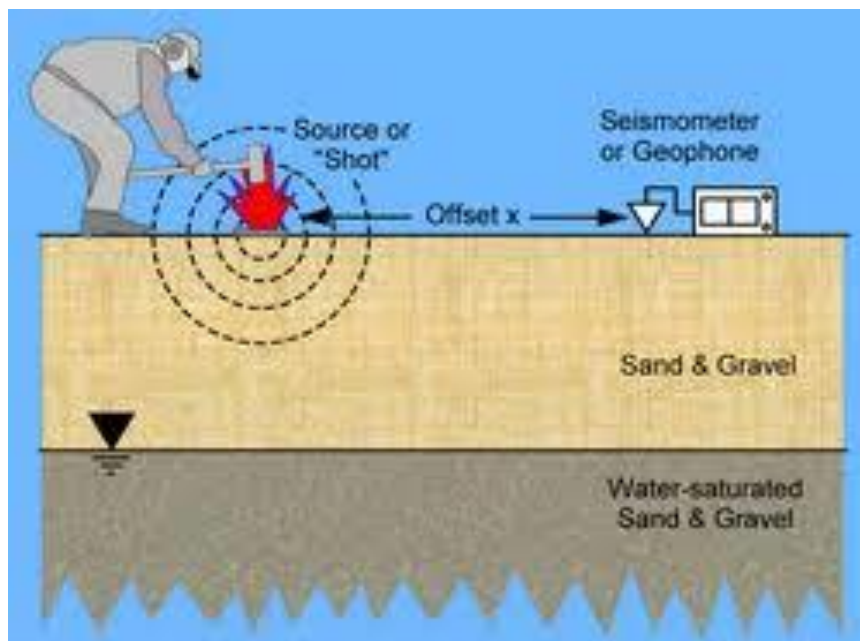
## 2. Μεθοδολογία

### 2.1 Γεωφυσική διασκόπηση

Η γεωφυσική διασκόπηση έχει ως στόχο την μελέτη της δομής των επιφανειακών στρωμάτων, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με την εφαρμογή θεμελιωδών νόμων της φυσικής. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αρχαιολογία με την χαρτογράφηση υπεδάφινων μνημείων, την απεικόνιση του δομημένου χώρου των αρχαιολογικών θέσεων κ.α. Ακόμα, εμφανίζει καθαριστικό ρόλο στην αναζήτηση γεωλογικών δομών οικονομικής σημασίας (κοιτασμάτων πετρελαίου, φυσικού αερίου) και σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές<sup>2</sup>.

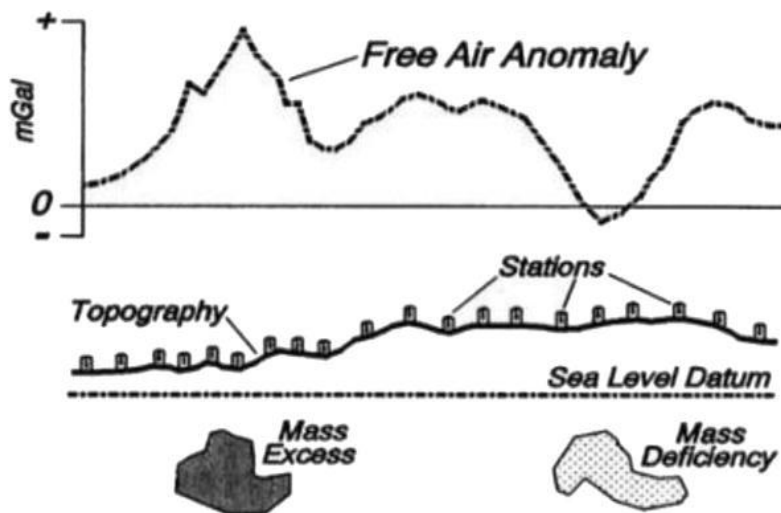
### 2.2 Μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Οι μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης ανάλογα με το σήμα που χρησιμοποιούν φυσικά παραγόμενο ή τεχνητό διακρίνονται σε ενεργητικές και παθητικές αντίστοιχα. Δίνουν πληροφορίες για βάθη λίγων εκατοστών μέχρι πολλών χιλιομέτρων και διακρίνονται σε: σεισμικές, βαρυτικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές, ηλεκτρομαγνητικές, ραδιομετρική και θερμική. Οι σεισμικές μέθοδοι στηρίζονται στην διάδοση μικρού κυρίως πλάτους σεισμικών κυμάτων, που προέρχονται από φυσικές πηγές (σεισμοί, θόρυβος) ή και από τεχνητές (στιγμαία τάση από χτύπημα σφυριού, πτώση βάρους)(Εικόνα 2). Βασικός σκοπός είναι ο προσδιορισμός της πυκνότητας και των ελαστικών σταθερών<sup>4</sup>.



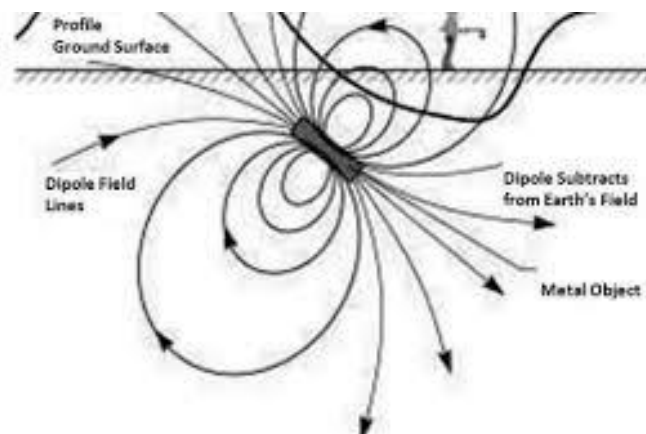
Εικόνα 2 Σεισμική μέθοδος

Η βαρυτική μέθοδος (Εικόνα 3) είναι τεχνική που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της βαρύτητας σε διάφορες περιοχές της γης και για την μελέτη της πυκνότητας των υλικών του υπεδάφους. Η βαρύτητα σε μια περιοχή επηρεάζεται από τα κοιτάσματα, τα ρήγματα αλλά και από δομές όπως τα χαλαρά ή τα συμπαγή γεωλογικά υλικά και έτσι χαρακτηρίζεται παθητική μέθοδος<sup>3</sup>.



Εικόνα 3:Βαρυτική μέθοδος

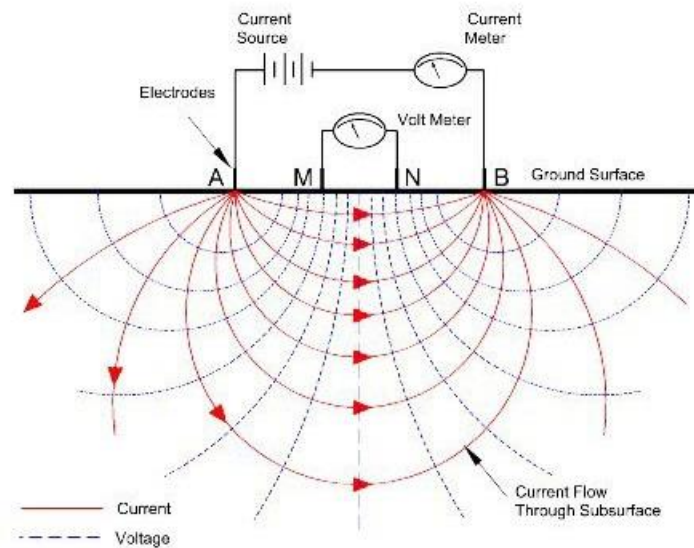
Η μαγνητική (Εικόνα 4) αποτελεί την παλαιότερη γεωφυσική μέθοδο αλλά και συνάμα την πιο διαδεδομένη. Στόχος της είναι ο εντοπισμός των μεταβολών της μαγνήτισης κυρίως πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, εξαιτίας της ύπαρξης μαγνητικών ορυκτών με μετρήσεις μαγνητικών ανωμαλιών στην επιφάνεια της γης. Εφαρμόζεται τόσο σε μικρή τοπική κλίμακα (πχ: αρχαιολογικές και γεωτεχνικές μελέτες), όσο και σε μεγάλη (πχ: εντοπισμός μεγάλων κοιτασμάτων).



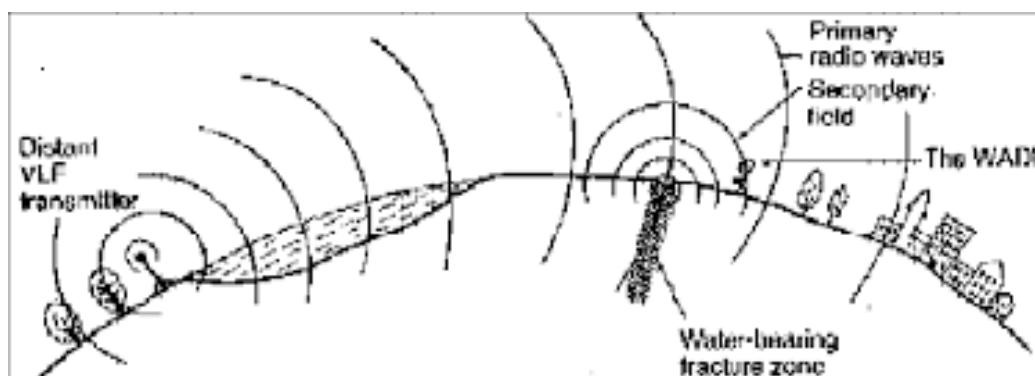
Εικόνα 4:Μαγνητική μέθοδος

Η ηλεκτρική μέθοδος (Εικόνα 5) έχει ως στόχο την διεύρυνση της δομής του υπεδάφους και τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων. Χρησιμοποιείται για την επίλυση πολλών προβλημάτων στην τεχνική γεωλογία (εντοπισμός ασταθών περιοχών κατά την διάνοιξη μιας σήραγγας), στην υδρογεωλογία (εντοπισμός εγκοίλων και ζωνών διαρροής από ταμειυτήρες), στην γεωθερμία και στην αρχαιολογία.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF (Very Low Frequency) όπως και η ηλεκτρική έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και τον προσδιορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Εικόνα 6). Χρησιμοποιεί εναλλασσόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα οποία επάγονται στην γη χωρίς την χρήση ηλεκτροδίων. Σε ειδικές περιπτώσεις πραγματοποιούνται μετρήσεις της φυσικής ραδιενέργειας (ραδιομετρική) ή της θερμοκρασίας(θερμική)<sup>1</sup>.



Εικόνα 5: Ηλεκτρική μέθοδος



Εικόνα 6: Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος VLF



## 3. Μέθοδος γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR)

### 3.1 Τι είναι το GPR

Το γεωραντάρ (GPR) λειτουργεί εκπέμποντας ραδιοκύματα, σε περιοχή συχνοτήτων από 1 έως 1000 MHz τα οποία διαδίδονται στο υλικό που εξετάζεται, έτσι ώστε να ληφθούν οι ανακλώμενοι παλμοί καθώς συναντούν ασυνέχειες. Ως ασυνέχεια ορίζεται ένα όριο μεταξύ υλικών με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά ή ένα υποεπιφανειακό αντικείμενο όπως η αποκόλληση ή η αποδέσμευση. Τα πλάτη των λαμβανομένων παλμών με τους αντίστοιχους χρόνους άφιξης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της φύσης και της θέσης της ασυνέχειας.

### 3.2 Από τι αποτελείται ένα σύστημα GPR

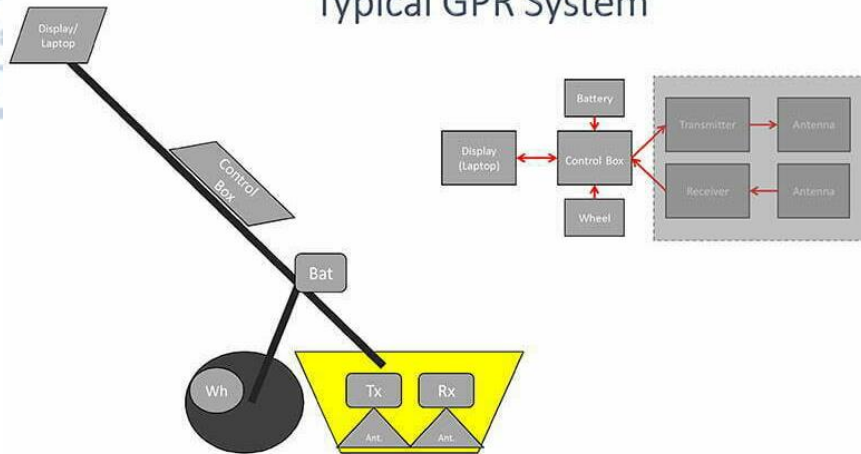
Ένα τυπικό σύστημα GPR (Εικόνα 7) αποτελείται από :

- Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (πηγή) που μπορεί να παράγει χρονικά κυμαινόμενες τάσεις (εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο) στο εκάστοτε απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων με ελεγχόμενο και καταγραφικό τρόπο.
- Μία κεραία εκπομπής (transmitting antenna- Tx) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ραδιοκύματα), τα οποία μπορούν να διεισδύσουν μέσω του υπεδάφους στον στόχο.
- Μία κεραία λήψης (receiving antenna- Rx) που ανιχνεύει τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά σήματα και τα μετασχηματίζει σε ηλεκτρική τάση η οποία μπορεί να καταγραφεί και να αποτελέσει αντικείμενο επεξεργασίας.
- Ένα σύστημα ανίχνευσης, που αποτελείται συνήθως από τα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος που μπορούν να ανιχνεύσουν τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να τα μετασχηματίσουν σε μία ηλεκτρική τάση που μπορεί να καταγραφεί και να επεξεργαστεί.

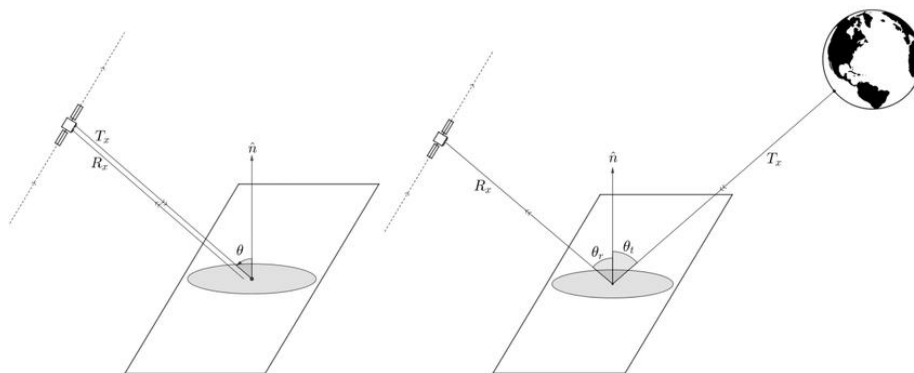
Τα συστήματα γεωραντάρ ανάλογα με το αν η κεραία λειτουργεί και ως πομπός και ως δέκτης διακρίνονται σε :

1. Μονοστατικά (Εικόνα 8): ο πομπός είναι και δέκτης και
2. Διστατικά (Εικόνα 8) :χρήση ξεχωριστών κεραιών  
Τα μονοστατικά συστήματα παρόλο που είναι πιο εύχρηστα και πιο παραγωγικά από τα διστατικά είναι τεχνολογικά πιο περίπλοκα και δεν επιτρέπουν άμεσα την ανάλυση της ταχύτητας των στρωματοειδών σχηματισμών. Για αυτό συνήθως το 90% των συστημάτων που χρησιμοποιούνται είναι διστατικά.

## Typical GPR System



Εικόνα 7:Τυπικό σύστημα GPR



Εικόνα 8: Μονοστατικό σύστημα (αριστερά)-διστατικό (δεξιά)

Μια άλλη διάκριση των συστημάτων είναι το πεδίο που λειτουργούν και χωρίζονται σε :

- I. Γεωραντάρ που λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου (time domain): όπου η λειτουργία τους βασίζεται στη μετάδοση διακριτών παλμών μικρής χρονικής διάρκειας (nsec) από έναν πομπό, με μία δεδομένη συχνότητα επανάληψης και τη καταγραφή του ανακλώμενου σήματος από τον δέκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο καθυστέρησης.
- II. Γεωραντάρ που λειτουργούν στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain): το σήμα μεταδίδεται ως ημιτονοειδές κύμα συνεχούς κυματομορφής και η απόκριση στο πεδίο του χρόνου μπορεί να ληφθεί μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.



### 3.3 Βασικοί όροι του γεωραντάρ (GPR)

#### 3.3.1 Ηλεκτρική διαπερατότητα

Η ηλεκτρική διαπερατότητα αποτελεί σημαντικό όρο στις ηλεκτρομαγνητικές διασκοπήσεις. Η σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά ορίζεται από την σχέση  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ , όπου  $\epsilon_0$  η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού και  $\epsilon$  η ηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου, η οποία εκφράζει την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει και να απελευθερώνει ηλεκτρική ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρικού φορτίου. Η διηλεκτρική σταθερά σχετίζεται με την ικανότητα του μέσου διάδοσης να πολώνει ηλεκτρικά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και να ελέγχει την ταχύτητα διάδοσης του. Αν  $\epsilon_r > 1$ , τότε το υλικό είναι διηλεκτρικό δηλαδή παρατηρείται ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου. Αν  $\epsilon_r = 1$ , το υλικό είναι το κενό<sup>6</sup>.

#### 3.3.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο υλικό σώμα. Η απώλεια ενέργειας είναι η κυρία επίδραση της αγωγιμότητας στους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Σε περιβάλλοντα στα οποία επικρατούν υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (π.χ., νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα, μέταλλα), λόγω των σημαντικών απωλειών που οφείλονται στην θερμότητα, το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μικρό. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης τόσο μικρότερο θα είναι το βάθος διείσδυσης, λόγω της εξασθένησης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Για περιβάλλοντα και υλικά τα οποία έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα μεγαλύτερη ή ίση με 10 mS/m, η χρήση του γεωραντάρ πρέπει να αποφεύγεται.

#### 3.3.3 Βάθος διείσδυσης

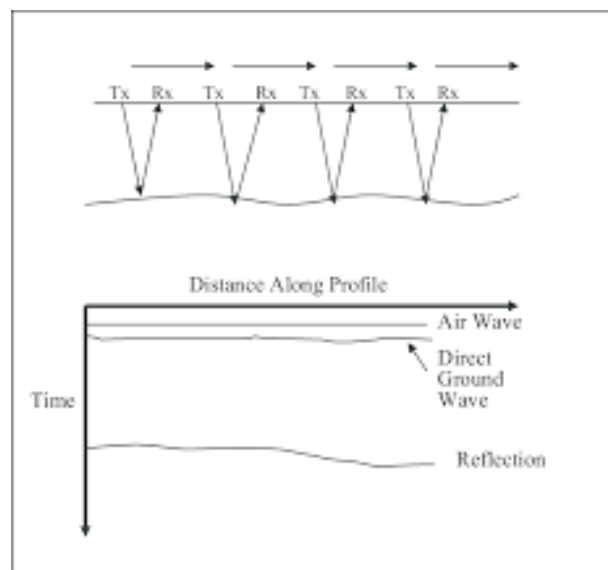
Το βάθος διασκόπησης καθορίζεται από την εξασθένηση που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από το υλικό στο οποίο μεταδίδεται. Συνήθως, τα GPR μπορούν να διεισδύσουν έως μερικές δεκάδες μέτρα, ανάλογα με τις προδιαγραφές τους καθώς και τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Η εξασθένηση του σήματος οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών, η πορεία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η συχνότητα της εκπομπής. Συχνά, οι ίδιοι οι γεωλογικοί σχηματισμοί (ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλεκτρική διαπερατότητα, η ποιότητα του εδάφους, η συγκέντρωση ιόντων αλάτων στα ρευστά) επηρεάζουν την εξασθένηση αυτή. Έτσι, όπως προαναφέρθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητά είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας, γιατί όσο πιο αγώγιμο είναι ένα υλικό τόσο μεγαλύτερη η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πέρασμά τους.

### 3.3.4 Ταχύτητα διάδοσης

Ταχύτητα διάδοσης ορίζεται ως  $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ , όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $\epsilon_r$  η διηλεκτρική σταθερά του υλικού. Έτσι, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο διαδίδεται μέσα σε δύο ή περισσότερα μη μαγνητικά υλικά θα φτάσει στον δέκτη σε διαφορετικούς χρόνους. Η ταχύτητα εξαρτάται από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού και είναι καθορισμένη για κάθε ένα διαφορετικό υλικό.

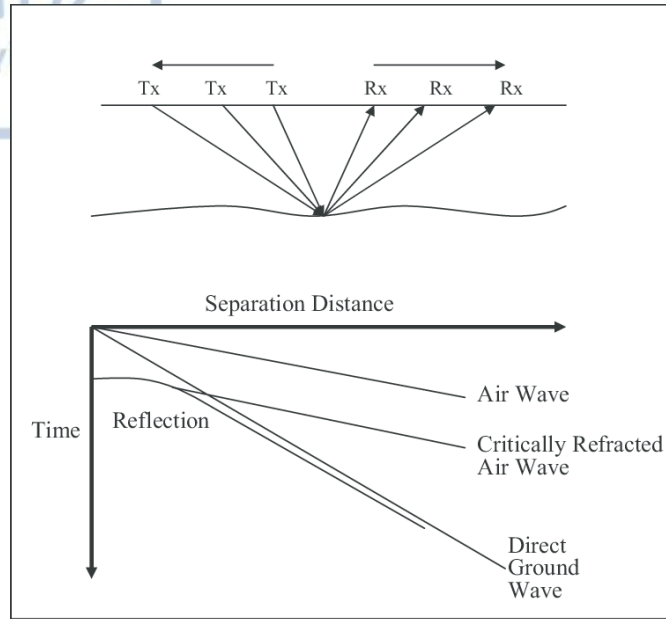
### 3.3.5 Διατάξεις GPR πομπού – δέκτη

Η διάταξη πομπού- δέκτη κατά την χρήση του γεωραντάρ είναι κρίσιμη για την λήψη ακριβών και αξιόπιστων μετρήσεων και εξαρτάται από τον σκοπό της έρευνας. Η πιο κοινή διάταξη είναι αυτή της σταθερής απόστασης (common offset)(Εικόνα 9), όπου πομπός και δέκτης διατηρούν σταθερή απόσταση μεταξύ τους, ενώ η κίνηση και των δυο γίνεται κατά μήκος μιας γραμμής διασκόπησης. Έτσι, δημιουργείται μια τομή χρονικών καταγραφών (GPR section) από τα ίχνη, τα οποία βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο.



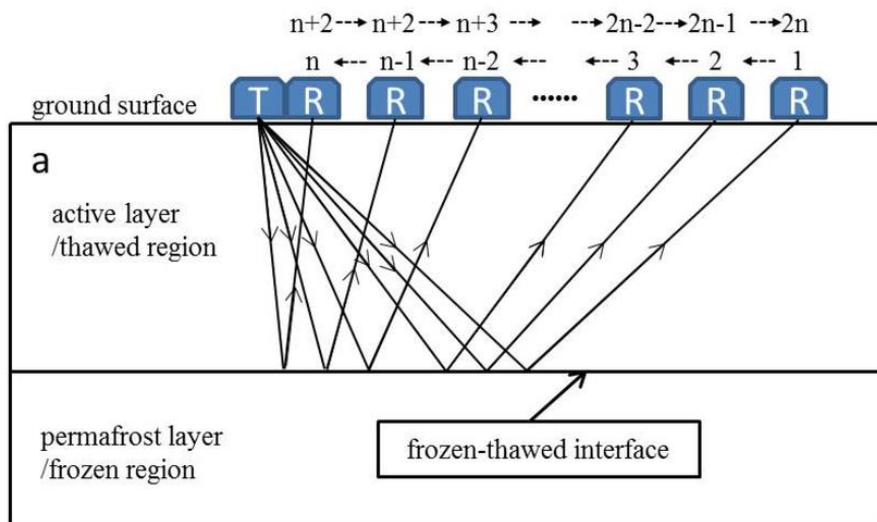
Εικόνα 9:Διάταξη σταθερής απόστασης

Μια άλλη κύρια μέθοδος διάταξης είναι η κοινού σημείου βάθους (CMP, Common – midpoint)(Εικόνα 10),η οποία είναι χρήσιμη για την εύρεση της ταχύτητας συναρτήσεως του βάθους. Επιλέγεται ένα σταθερό σημείο στο έδαφος, πομπός και δέκτης τοποθετούνται εκατέρωθεν του σημείου αυτού και με κέντρο το κοινό σημείο αρχίζει και μεταβάλλεται η απόσταση τους σταδιακά. Έτσι, μετρώντας τις μεταβολές του χρόνου από και προς το σημείο ανάκλασης που πραγματοποιούνται κατά τις μετρήσεις υπολογίζεται η ταχύτητα.



Εικόνα 10: Διάταξη κοινού σημείου βάθους

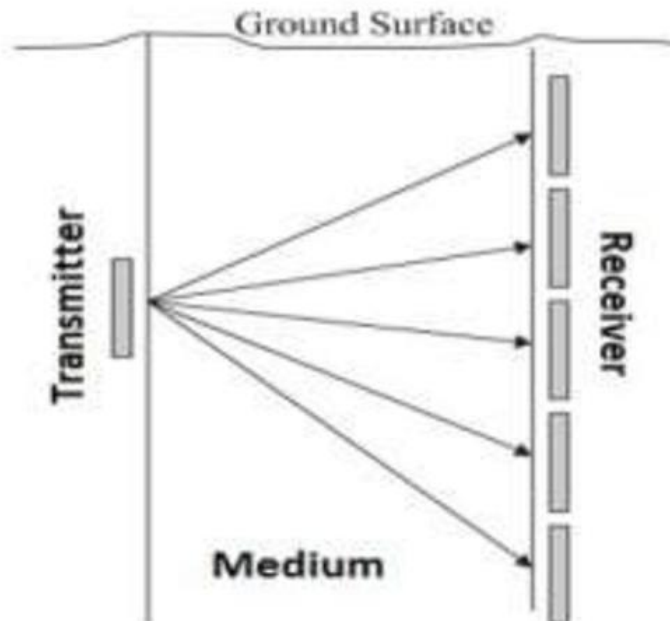
Στην διάταξη ευρείας γωνίας ανάκλασης (WARR, Wide Angle Reflection)(Εικόνα 11) ισχύει ότι παραμένει σταθερή ή η κεραία του πομπού ή του δέκτη και ο άλλος μετακινείται κατά την λήψη των μετρήσεων.



Εικόνα 11: Διάταξη ευρείας γωνίας ανάκλασης

Τέλος, μια ειδική περίπτωση διάταξης είναι αυτή της ενδοσκόπησης (transillumination)(Εικόνα 12), η οποία χρησιμοποιείται για έρευνες σε ορυχεία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι μετρήσεις γίνονται είτε μετακινώντας πομπό και δεκτή ταυτόχρονα είτε μόνο τον πομπό ή μόνο τον δέκτη από τον στόχο.





Εικόνα 12: Ενδοσκόπηση

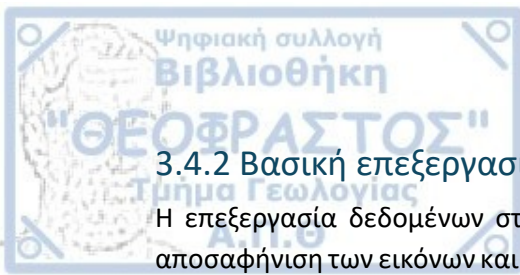
### 3.4 Αρχές λειτουργίας GPR

#### 3.4.1 Τρόπος λειτουργίας

Ο τρόπος λειτουργίας του GPR στηρίζεται στην εκπομπή παλμών ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας στην περιοχή συχνοτήτων από 10MHz-1GHz. Το ηλεκτρομαγνητικό σήμα διαδίδεται στο υπέδαφος και όταν συναντήσει μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ υλικών, τότε ένα μέρος της ενέργειάς του ανακλάται ή διαχέεται πίσω προς την επιφάνεια, ένα διαθλάται, και η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διέρχεται από τη διεπιφάνεια προς βαθύτερους ορίζοντες. Η ανακλώμενη αυτή ενέργεια επιστρέφει στην επιφάνεια όπου βρίσκεται η κεραία-δέκτης και καταγράφεται από αυτόν με μία καθορισμένη ταχύτητα. Η ταχύτητα διάδοσης του σήματος εξαρτάται κυρίως από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού (Εικόνα 13). Ο αριθμός των ανακλάσεων που καταγράφονται εξαρτάται από την ανομοιογένεια του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται η ενέργεια. Αφού, ολοκληρωθεί η πρώτη μέτρηση, το γεωραντάρ μετακινείται στην επόμενη θέση που έχει οριστεί. Τέλος τα δεδομένα επεξεργάζονται και δίνουν μια εικόνα του υπεδάφους.

Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r$	Ταχύτητα Η/Μ παλμού (m/nsec)	Αγωγιμότητα (mS/m)
Αέρας (κενό)	1	0.3	0
Αποσταγμένο νερό	81	0.033	0.01
Φρέσκο νερό	81	0.033	0.5
Θαλασσινό νερό	81	0.01	300000
Άμμος ξηρή	3-5	0.12-0.17	0.01
Άμμος κορεσμένη	20-30	0.06	0.1-1
Πάγος	3-4	0.16	0.01
Γρανίτης	4-6	0.106-0.13	0.01-1
Ασβεστόλιθος	4-8	0.1-0.12	0.5-2
Σχιστόλιθος	5-15	0.09	1-100
Ξηρό Άλας	5-6	0.13	0.01-1
Ίλύς	5-30	0.07	1-100
Δολομίτης	6.8-8	0.106-0.115	
Χαλαζίας	4	0.145	
Έδαφος (μέσος όρος)	16	0.075	
Κάρβουνο	4-5	0.134-0.150	
Άργιλος	5-40	0.06	2-1000
Τσιμέντο (ξηρό)	5-10	0.055-0.120	1-10
Άσφαλτος	3-5	0.134-0.173	

Εικόνα 13: Προσεγγιστικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες διάφορων υλικών



### 3.4.2 Βασική επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία δεδομένων στοχεύουν στην βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων, την αποσαφήνιση των εικόνων και την ευκολία της ερμηνείας τους. Έτσι, εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ενίσχυσης πληροφοριών που έχουν καταγραφεί όπως:

- Ενίσχυση σήματος (Gain): το σήμα αποσβένει κατά την διάδοση του στο υπέδαφος, χρειάζεται να ενισχυθεί για να ερμηνευθούν τα βαθύτερα στρωμάτα. Η ενίσχυση αυτή πρέπει να γίνεται ορθολογικά, διότι οποιαδήποτε υπερενίσχυση μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.
- Φίλτρα αποκοπής δεδομένων με βάση τη συχνότητα (Low/High pass filters). Γίνεται φιλτράρισμα των δεδομένων ανάλογα με την συχνότητα που θα επιλεχτεί ( χαμηλή ή υψηλή αντίστοιχα). Τα παραπάνω φίλτρα χρησιμοποιούνται στα δεδομένα και στους δύο άξονες (κατακόρυφα-χρόνος και οριζόντια-γεωμετρία) και βοηθούν στην επιλεκτική διατήρηση χρήσιμων δεδομένων.
- Φίλτρα επανατοποθέτησης ιχνών (Migration). Φέρει τους υπεδάφους ανακλαστήρες στην πραγματική τους θέση.
- Φίλτρα σωρείωσης (Stacking) και αφαίρεσης σήματος υποβάθρου (Background Removal).

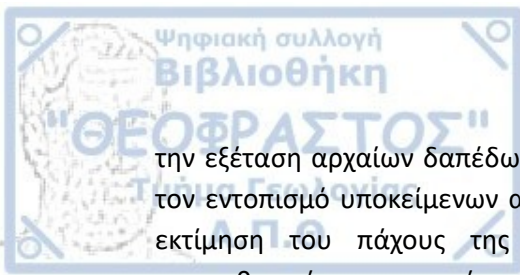
## 3.5 Εφαρμογές GPR

Το GPR αποτελεί πυλώνα για πληθώρα ερευνητικών τομέων και επιστημονικών κλάδων όπως γεωλογικές και περιβαλλοντικές μελέτες, έλεγχος κατασκευών και αρχαιολογικές έρευνες.

Όσον αφορά τις γεωλογικές-περιβαλλοντικές μελέτες, λόγω των μεγάλων βαθών διασκόπησης που τις χαρακτηρίζει χρειάζονται κεραιές χαμηλών κεντρικών συχνοτήτων (<250MHz). Συνεπώς, η μέθοδος χρησιμοποιείται για την χαρτογράφηση γεωλογικών δομών και ιζηματογενών ακολουθιών, τον έλεγχο κοιτασμάτων και την αξιολόγηση ορυκτών πόρων, την ανίχνευση εγκοίλων, ρηγματώσεων, την χαρτογράφηση επιπέδων ασυνεχειών και υπεδάφινων ρύπων, τον εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων, την ανίχνευση διαρροών και την ανίχνευση και εκτίμηση του βάθους υδροφόρων οριζόντων.

Εξίσου σημαντική είναι και η χρήση της μεθόδου στον έλεγχο της δομικής ορθότητας κατασκευών όπως οδοστρωμάτων, γεφυρών, επενδύσεων σηράγγων και υπονόμων, τοιχοποιιών. Ωστόσο, εδώ είναι σημαντικότερη η διακριτική ικανότητα σε σχέση με το βάθος διασκόπησης που αναφέρθηκε προηγουμένως, για αυτό απαιτούνται κεραιές υψηλών συχνοτήτων (>250MHz), παρέχοντας πληροφορίες για τον εντοπισμό υπεδάφινων δικτύων, την ανίχνευση πιθανών υποεπιφανειακών αστοχιών, ρηγματώσεων και κενών χώρων, την χαρτογράφηση του πάχους ασφάλτου και αποτύπωση της στρωματογραφίας σε δρόμους, τον προσδιορισμό της θέσης και της διάταξης του μεταλλικού οπλισμού στο σκυρόδεμα, την αποτύπωση στοιχείων και εκτίμηση της εσωτερικής δομής τοιχοποιίας.

Στον τομέα της αρχαιολογικής μελέτης το GPR χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θαμμένων κατασκευών και αρχαίων κτισμάτων, την χαρτογράφηση του υπεδάφους πριν την ανασκαφή. Ακόμα, εφαρμόζεται για την έρευνα κάτω από υπάρχοντα αρχαιολογικά μνημεία ή κτίσματα,



την εξέταση αρχαίων δαπέδων μνημείων (ψηφιδωτά δάπεδα) σε αρχαιολογικούς χώρους, τον εντοπισμό υποκείμενων αρχαίων καταλοίπων, την διεύρυνση του υποστρώματος, την εκτίμηση του πάχους της στρωματογραφίας και τέλος την ανίχνευση κενών ή αποσαθρωμένων περιοχών κάτω από το δάπεδο με σκοπό την αποτελεσματική τους συντήρηση.

### 3.6 Πλεονεκτήματα- μειονεκτήματα GPR

Το γεωραντάρ κατά την χρήση του εμφανίζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Αποτελεί μια μη καταστροφική γεωφυσική μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση υλικών ή δομών χωρίς να προκαλεί κάποια ζημιά ή να απαιτεί διεισδυτικές εργασίες. Ακόμα, προσφέρει υψηλή ανάλυση απεικόνισης και ανίχνευσης αντικειμένων, κενών, ρωγμών και άλλων χαρακτηριστικών κάτω από την επιφάνεια. Η συλλογή δεδομένων είναι ταχύτατη και συνεχής, αφού μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορά περιβάλλοντα και για διάφορες εφαρμογές.

Ωστόσο, αρνητικά της χρήσης της μεθόδου είναι η εξάρτηση της από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του εδάφους (πχ: η παρουσία αργίλου μπορεί να μειώσει σημαντικά το βάθος διείσδυσης). Αν και όπως προαναφέρθηκε η μέθοδος μπορεί να εντοπίσει αντικείμενα και δομές κάτω από την επιφάνεια της γης, το βάθος διείσδυσης περιορίζεται συνήθως και μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας του ραντάρ, πράγμα που την καθιστά μη ιδανική για εφαρμογές με μεγάλο βάθος. Επιπλέον, ο εξοπλισμός είναι ακριβός και η ανάλυση δεδομένων είναι πολύπλοκη και απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις.

## 4. Περιοχή μελέτης

Στις 24 Νοέμβριου 2022 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πρατήριο καυσίμων ανατολικά της Θεσσαλονίκης (Εικόνα 14,15). Στην περιοχή αυτή γνωρίζουμε πως υπάρχουν υπόγειες δεξαμενές καυσίμων (πλαστικές ή μεταλλικές), σωληνώσεις για τη ροή των καυσίμων, συστήματα αποχέτευσης καθώς και ηλεκτρικές καλωδιώσεις. Ακόμα, ενδέχεται να υπάρχουν υπολείμματα παλιών εγκαταστάσεων και δομών από προηγούμενες χρήσεις του εδάφους.



Εικόνα 14: Ευρύτερη περιοχή μελέτης

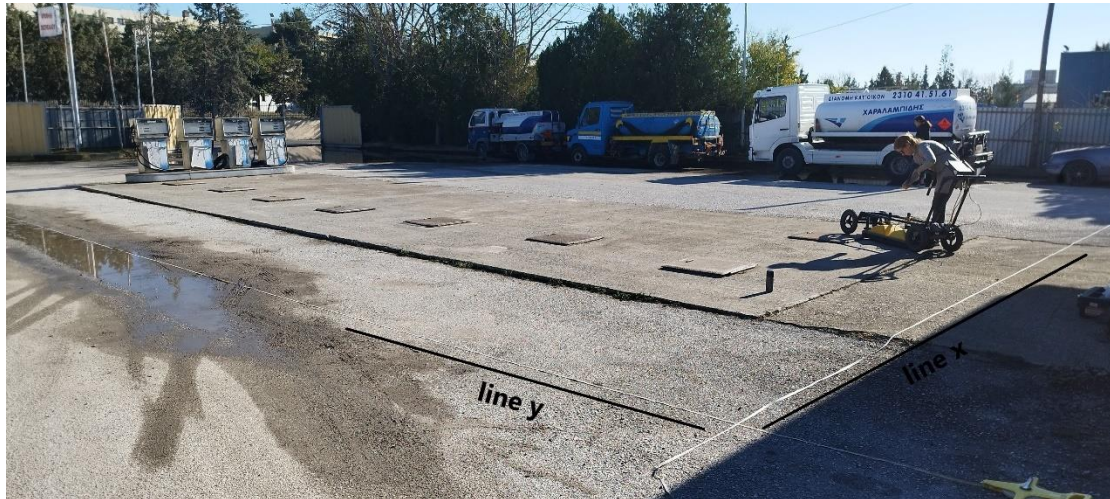


Εικόνα 15: Περιοχή μελέτης



## 5.1 Μετρήσεις GPR

Αφού διαμορφώθηκε μια γενική άποψη για την περιοχή, επιλέχθηκε ο χώρος εργασίας. Οριοθετήθηκε με την χρήση μετροταινίας σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου με μήκος 15 m και πλάτος 17 m (Εικόνα 16). Έτσι, με την χρήση του γεωραντάρ συλλέχθηκαν καταληκτικά 64 τομές σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, εκ των οποίων 30 οριζόντιες και 34 κάθετες.

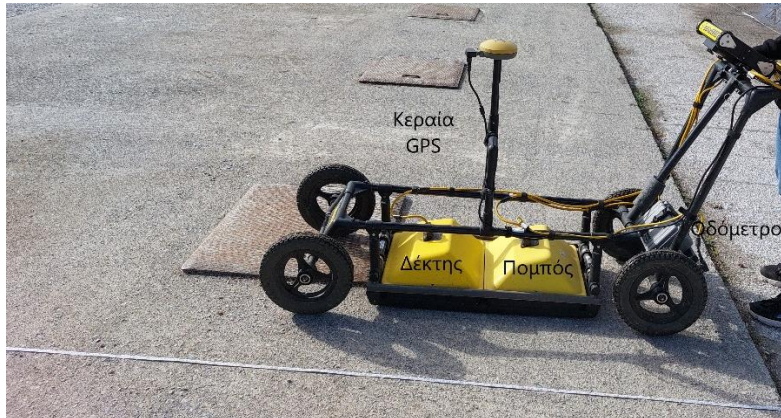


Εικόνα 16: Οριοθετημένη περιοχή

## 5.2 Εξοπλισμός γεωραντάρ

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το γεωραντάρ pulseEKKO PRO της εταιρίας Sensors & Software (Εικόνα 17) σε λειτουργία SmartCart. Το GPR επικοινωνεί με εξοπλισμό GPS έτσι ώστε τα δεδομένα γεωραντάρ να τοποθετούνται στην ακριβή τοποθεσία της μελέτης.

Επιλέχθηκε το time window (χρονικό παράθυρο) η τιμή των 85 ns και για το κενό μεταξύ των γραμμών (line spacing) η τιμή του 0.5m. Η κεντρική συχνότητα ορίστηκε 250 MHz και η μέτρηση του οδομέτρου ανά 0.05 m. Είναι αναγκαία η δοκιμή του οδομέτρου, διότι επαληθεύει ότι το οδόμετρο είναι σωστά βαθμονομημένο. Μετράτε μια συγκεκριμένη απόσταση, στην περίπτωση αυτή ίση με 5 m στην επιφάνεια του εδάφους, και στην συνέχεια μετακινείται το συστήματα GPR κατά μήκος αυτής της απόστασης. Εφόσον, ρυθμίστηκαν οι παράμετροι με την ένδειξη run ξεκίνησε η λήψη των μετρήσεων στην περιοχή.

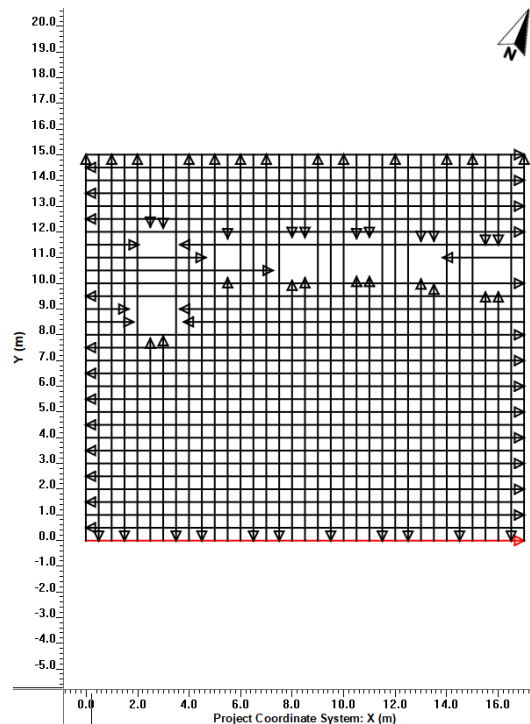


Εικόνα 17: Το GPR pulseEKKO PRO που χρησιμοποιήθηκε

## 6 Επεξεργασία δεδομένων GPR

### 6.1 Ραδιογράμματα GPR

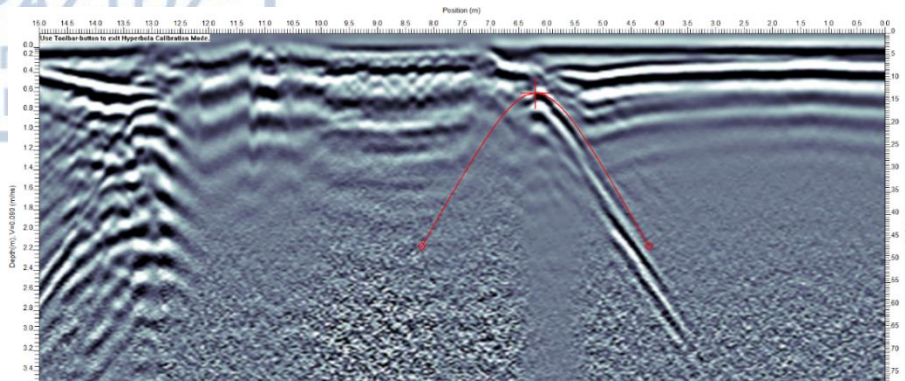
Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις μπορούν είτε να αποσταλούν στον χρήστη με email, το οποίο έχει οριστεί εξ αρχής, είτε με την χρήση USB, ώστε να συνεχιστεί η περαιτέρω μελέτη. Στην παρούσα μελέτη η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό EKKO\_Project 6 της εταιρίας Sensors & Software. Αρχικά, εισήχθησαν τα δεδομένα στο λογισμικό (64 τομές εκ των οποίων 30 κάθετες και 34 οριζόντιες). Το πλέγμα της περιοχής μελέτης όπου μας δείχνει την αντιστοιχία των lines τόσο στον άξονα X όσο και των Y απεικονίζεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Κάνναβος μετρήσεων GPR

Από τον παραπάνω κάνναβο μετρήσεων, για κάθε γραμμή προκύπτει ένα ραδιογράμμα. Για να προκύψει η ταχύτητα διάδοσης των Η/Μ κυμάτων στην περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της «προσαρμογής υπερβολής» (hyperbola fitting – Εικόνα 19). Η ταχύτητα υπολογίστηκε ίση με 0,090 m/ns.

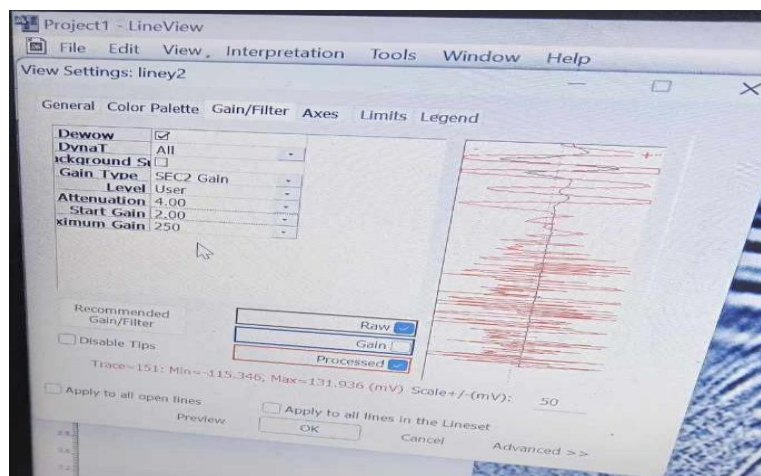




Εικόνα 19: Τοποθέτηση υπερβολής (hyperbola fitting) για την εύρεση ταχύτητας διάδοσης των H/M κυμάτων

Έπειτα, εφαρμόστηκε η μέθοδος ενίσχυσης SEC2, η οποία είναι μια σύνθεση γραμμικής και εκθετικής ενίσχυσης των δεδομένων με τον χρόνο. Αυτή η ενίσχυση προσπαθεί να αντισταθμίσει τις σφαιρικές απώλειες εξάπλωσης και την εκθετική ωμική διασπορά της ενέργειας στο GPR-line. Έτσι, γνωρίζοντας ότι τα δεδομένα γεωραντάρ αποσβένουν εκθετικά, η επιλογή του SEC2 είναι αυτή που ταιριάζει καλύτερα με τις φυσικές παραμέτρους.

Αφού, επιλέχθηκε η ενίσχυση SEC2, τροποποιήθηκαν οι παράμετροι στο υπο-πρόγραμμα LineView ώστε να απεικονιστούν καλύτερα τα αποτελέσματα. Στην κατηγορία gain/filter εμφανίζεται η απόσβεση (attenuation), η αρχική ενίσχυση (start gain), αλλά και η μέγιστη ενίσχυση (maximum gain). Δεξιά από τον πίνακα με τους όρους υπάρχει ένα γράφημα ίχνους καταγραφής. Το γράφημα αυτό καταγράφει την χρονική απόκριση του σήματος GPR και το πλάτος των H/M παλμών. Το θετικό και το αρνητικό όριο δείχνει τα όρια που μπορεί να φτάσει το μέγιστο πλάτος. Στο γράφημα αυτό μπορούν να παρουσιάζονται ακόμα τα πρωτογενή ίχνη με μαύρο χρώμα, τα επεξεργασμένα με κόκκινο και η ενίσχυση με μπλε, εφόσον επιλέγουν από τον χρήστη. Παρακάτω, παρουσιάζεται ένα τυχαίο παράδειγμα από τα προαναφερόμενα (Εικόνα 20) <sup>10,11</sup>.

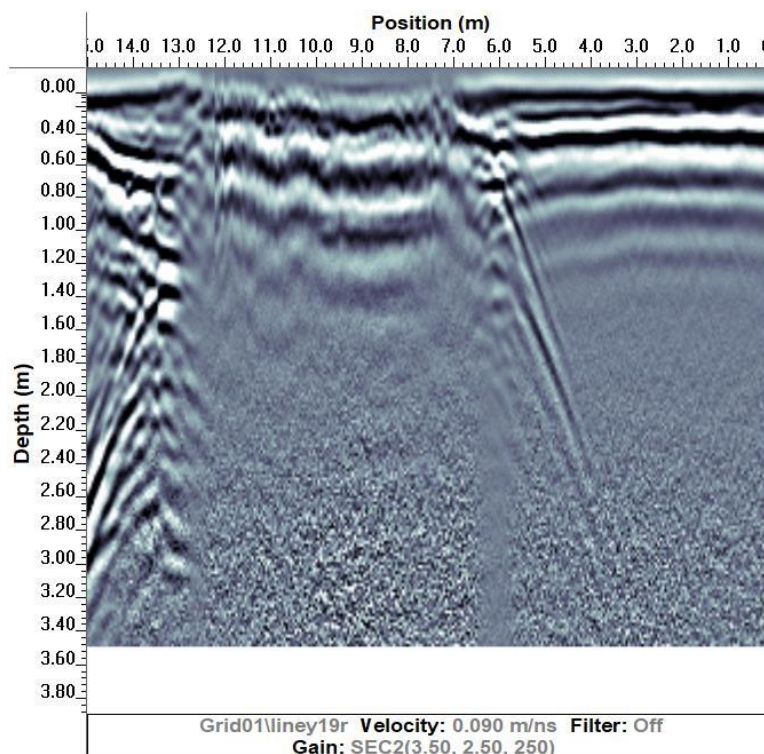


Εικόνα 20: Τροποποίηση όρων στο υπο-πρόγραμμα LineView

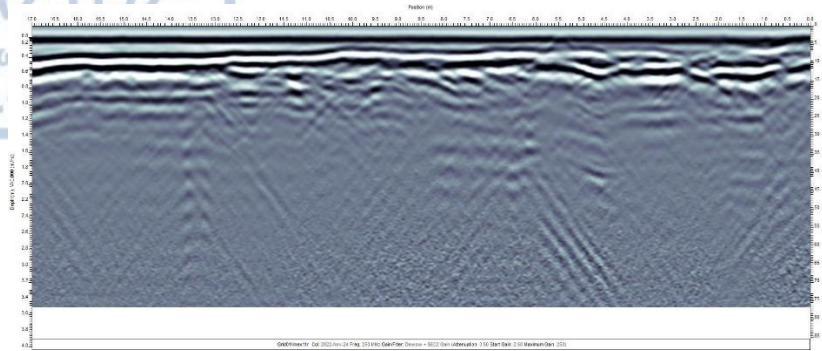
Ο όρος attenuation εκφράζει τον παράγοντα απόσβεσης των κυμάτων που διαδίδονται στο υπέδαφος. Όσο ψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο γρηγορότερα αυξάνεται η εκθετική συνάρτηση και τόσο μεγαλύτερη απόσβεση εφαρμόζεται. Υλικά όπως η άργιλος, σκυρόδεμα απαιτούν μεγάλο παράγοντα ενίσχυσης (10-40), σε σχέση με την άμμο και τον σκληρό βράχο (0-5). Μια τυπική τιμή που χρησιμοποιείται είναι από 0.5-5. Ωστόσο, αυξάνοντας τιμή της απόσβεσης υπάρχει πιθανότητα να υπερενισχυθούν τα δεδομένα, πράγμα που δυσκολεύει την ερμηνεία. Στην συγκεκριμένη μελέτη η τιμή που επιλέχθηκε είναι 3.50dB/m και θα σχολιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Η αρχική ενίσχυση (start gain) είναι μια σταθερή τιμή που προστίθεται στην εκθετική συνάρτηση. Σε περιπτώσεις, όπου απαιτείται περισσότερη ενίσχυση σε πρώιμους χρόνους, η τιμή μπορεί να αυξηθεί ανάλογα. Τυπικές τιμές της είναι 0-10. Εδώ, η τιμή που επιλέχθηκε είναι 2,5. Το ίδιο ισχύει και για την μέγιστη ενίσχυση (maximum gain) με τυπικές τιμές από 50 έως 2000 και η επιλεγόμενη τιμή είναι 250. Οι τιμές αυτές συνδέονται με τον παράγοντα ενίσχυσης γι' αυτό θα πρέπει να επιλέγονται συνδυαστικά.

Ολοκληρώνοντας την τροποποίηση των όρων, οι οποίες ίσχυαν για κάθε γραμμή του άξονα X και Y αντίστοιχα, ακολουθούν μερικά παραδείγματα ραδιογραμμάτων (Εικόνα 21,22), η ανάλυση των οποίων θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.



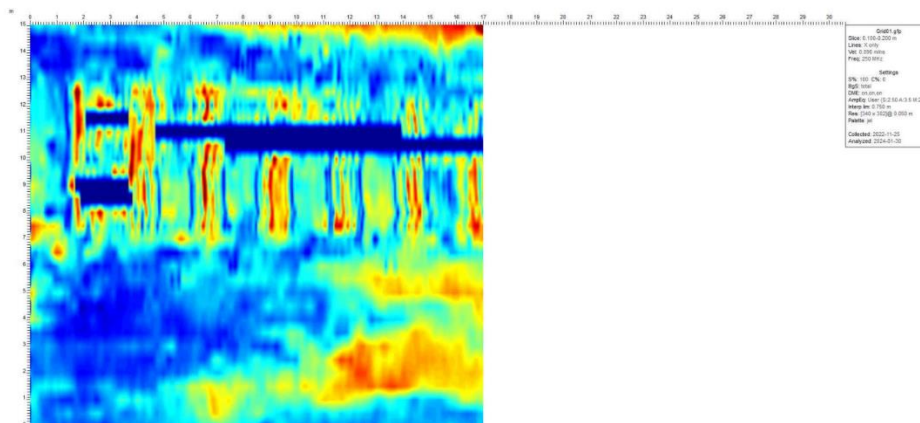
Εικόνα 21: Ραδιόγραμμα liney19r



Εικόνα 22: Ραδιόγραμμα *linex11r*

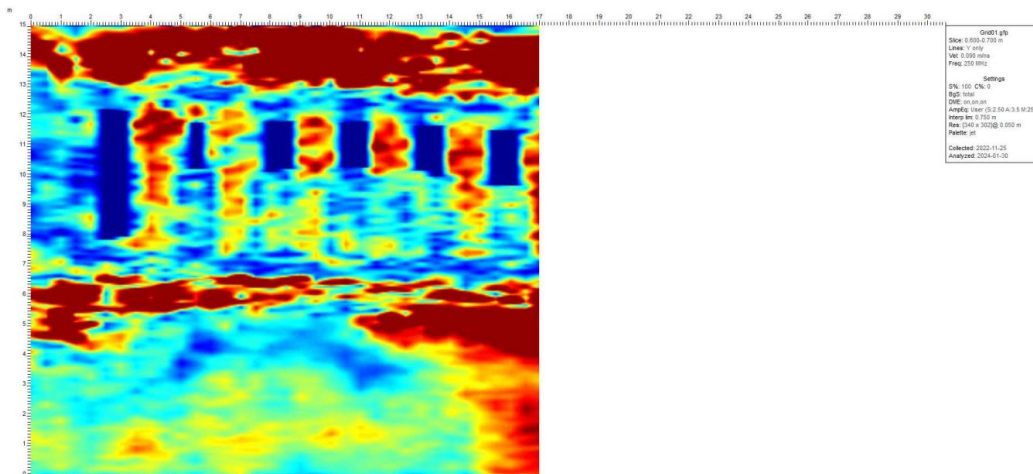
## 6.2 Κάνναβος μετρήσεων GPR – Τομές βάθους

Τα δεδομένα του γεωραντάρ απεικονίζονται και σε Grid Depth Slices (τομές βάθους). Κατά ανάλογο τρόπο πρέπει να οριστούν οι ίδιες τιμές που επιλέχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Εκτός αυτών, εδώ υπάρχει ακόμα η επιλογή από τις ρυθμίσεις του χρώματος της γραμμής, της αντίθεσης και της ευαισθησίας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η τυπική απεικόνιση για αυτά τα δεδομένα, πιο συγκεκριμένα για την χρωματική παλέτα το *jet.cmp*, η τιμή αντίθεσης 0 και της ευαισθησίας 100. Παρακάτω, παρουσιάζονται δυο παραδείγματα (Εικόνα 23,24) από φέτες βάθους 0.1-0.2m και 0.6-0.7m του X και του Y άξονα αντίστοιχα, όπου στον πίνακα δεξιά φαίνονται όλες οι παράμετροι που αναφέρθηκαν και η ημερομηνία λήψης και επεξεργασίας των μετρήσεων. Επεξηγηματική ανάλυση θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 23: Grid-depth slice view 0.1m-0.2m

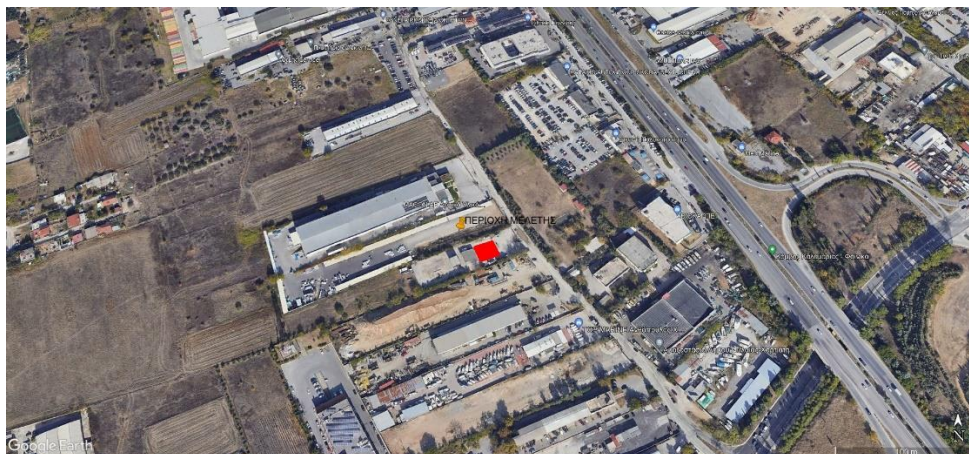




Εικόνα 24:: Grid-depth slice view 0.6m-0.7m

### 6.3 Περιοχή μετρήσεων

Το πρόγραμμα EKKO\_Project δίνει την δυνατότητα παρουσίασης των δεδομένων στο Google Earth. Στις εικόνες 25,26 εμφανίζεται η περιοχή μελέτης με το αντίστοιχο πλέγμα όπως μετρήθηκε χωρίς κάποια τροποποίηση στους όρους.

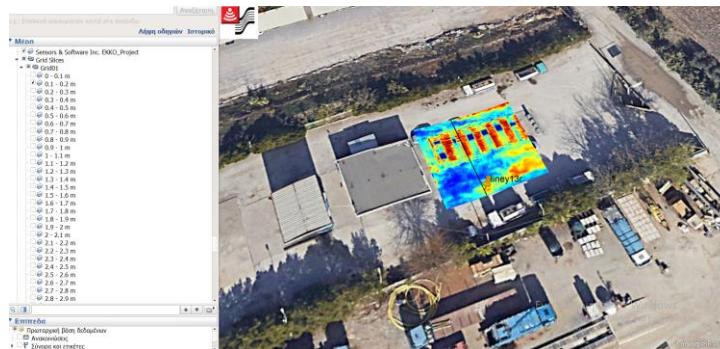


Εικόνα 25: Περιοχή μελέτης

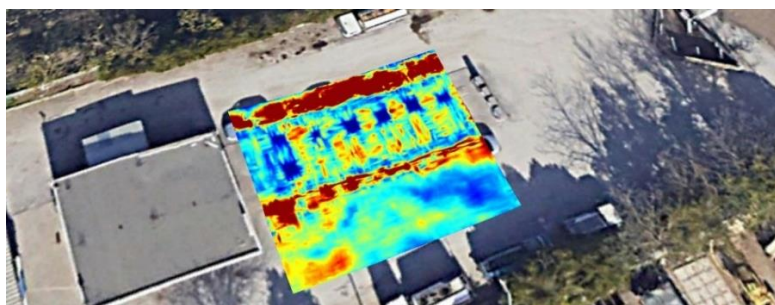


Εικόνα 26: Κάνναβος μετρήσεων GPR στην περιοχή

Στην συνέχεια, αφού ολοκληρώθηκε η επεξεργασία και οι τροποποιήσεις των προηγούμενων ενοτήτων, πάρθηκε ένα αρχείο της μορφής .kmz, το οποίο αντιστοιχεί σε αρχείο Google Earth. Ανοίγοντας το αρχείο, εμφανίζεται στα αριστερά ένας πίνακας (Εικόνα 27), ο οποίος παρουσιάζει τα grid slices και τα προφίλ GPR. Έτσι, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει το βάθος αλλά και την αντίστοιχη γραμμή την οποία θέλει να απεικονίσει. Η Εικόνα 27 παρουσιάζει φέτα στο βάθος 0.1m-0.2m και την γραμμή 13γ. Ακόμα, μπορεί να γίνει εισαγωγή κάποιου συμβόλου σημείου αναφοράς, οπού ο χρήστης χειρίζεται αν θέλει να φαίνεται ή όχι κάθε φορά.



Εικόνα 27: grid slice 0,1-0.2m, liney133r



Εικόνα 28: Grid slice 0.7-0.8m



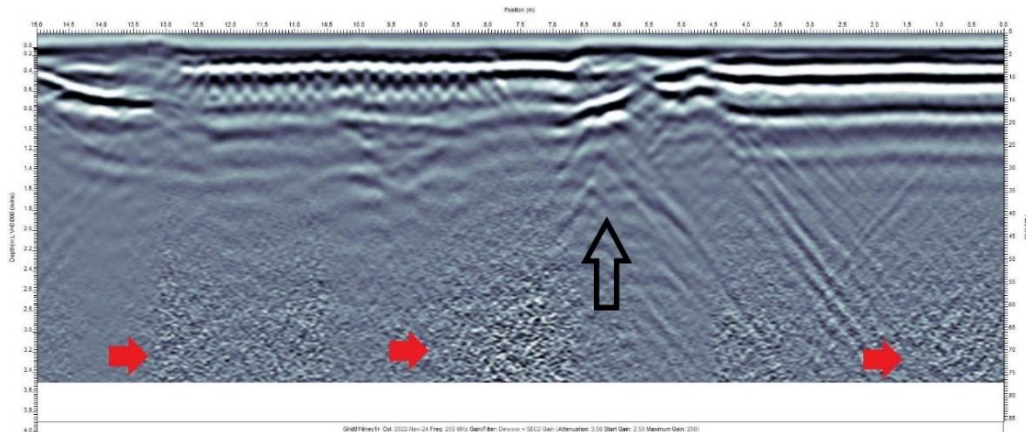
## 7. Ερμηνεία αποτελεσμάτων GPR

### 7.1 Προφίλ / οδεύσεις GPR

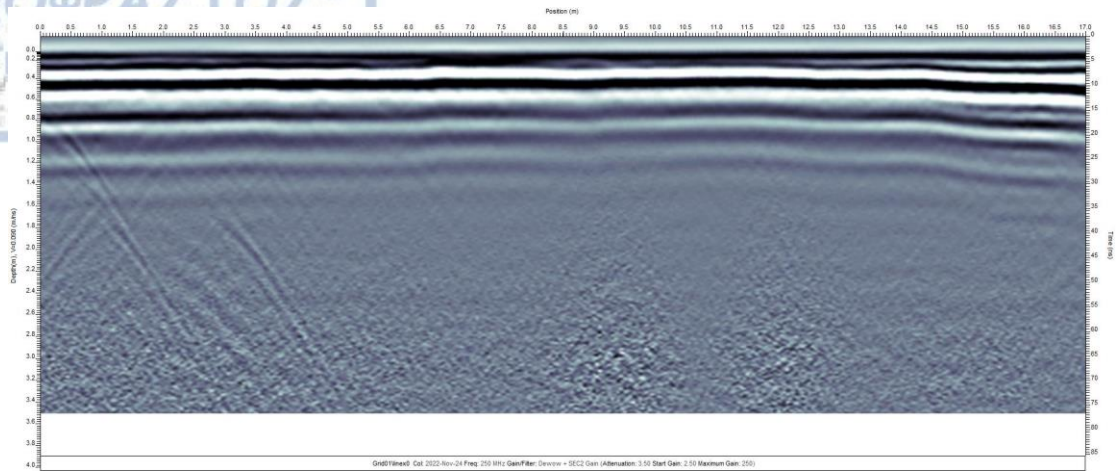
Η ερμηνεία των οδεύσεων GPR (lines) είναι πολύ σημαντική για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα διαγράμματα αυτά έχουν 3 άξονες, πιο συγκεκριμένα στον κατακόρυφο στα αριστερά φαίνεται το βάθος σε m και στα δεξιά ο χρόνος σε ns (nanosec) και στον οριζόντιο άξονα η θέση. Ο άξονας του βάθους δείχνει το πραγματικό βάθος της μελέτης, ενώ ο άξονας του χρόνου δείχνει το χρόνο που χρειάζεται το σήμα να επιστρέψει στην επιφάνεια.

Κύρια χαρακτηριστικά για την ερμηνεία αυτών των τομών είναι :

- Τα ορίζονται στρωματά, τα οποία δείχνουν διαφορετικά στρωματά εδάφους ή υλικών και μπορεί να προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή από φυσικά γεωλογικά φαινόμενα.
- Οι υπερβολές που υποδηλώνουν την παρουσία είτε σημειακών αντικειμένων ή γραμμικών στόχων (σωλήνων) και άλλων θαμμένων αντικειμένων.(μαύρο βέλος: Εικόνα 29)
- Ρήγματα και ανωμαλίες που παρουσιάζουν γεωλογικές ασυνέχειες και μετατόπιση υλικών του υπεδάφους.
- Οι χαοτικές ανακλάσεις δηλώνουν θόρυβο.(κόκκινο βέλος: Εικόνα 29)

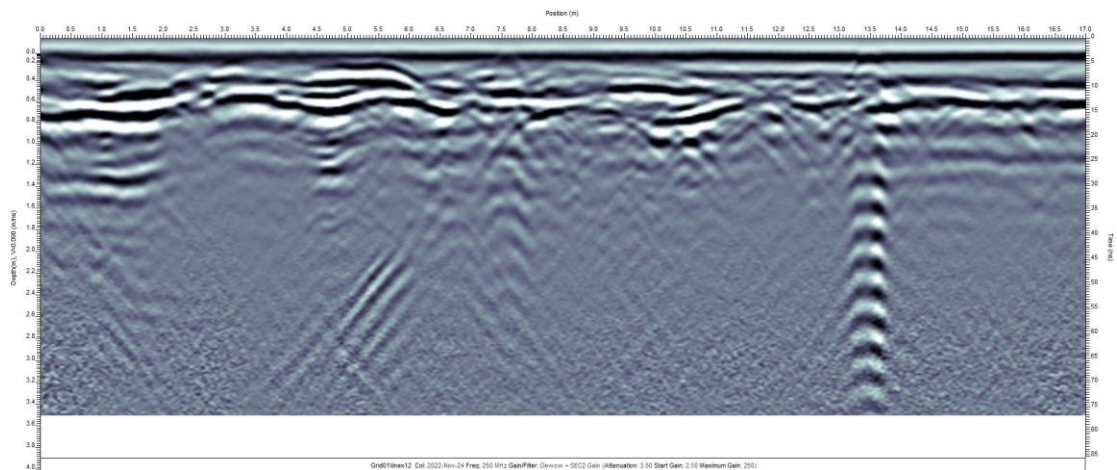


Εικόνα 29: Παράδειγμα LineView



Εικόνα 30:linex0

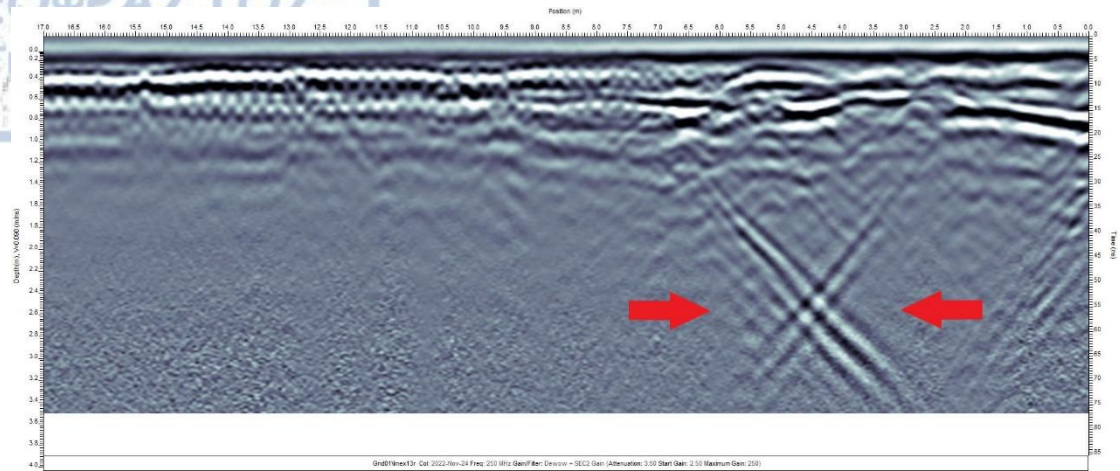
Αρχικά, παρουσιάζεται η τομή για την γραμμή 0 στον άξονα Χ(Εικόνα 30). Στα πρώτα μέτρα χαρακτηριστικές είναι οι οριζόντιες γραμμές που στρωματογραφικούς ορίζοντες.



Εικόνα 31:linex12

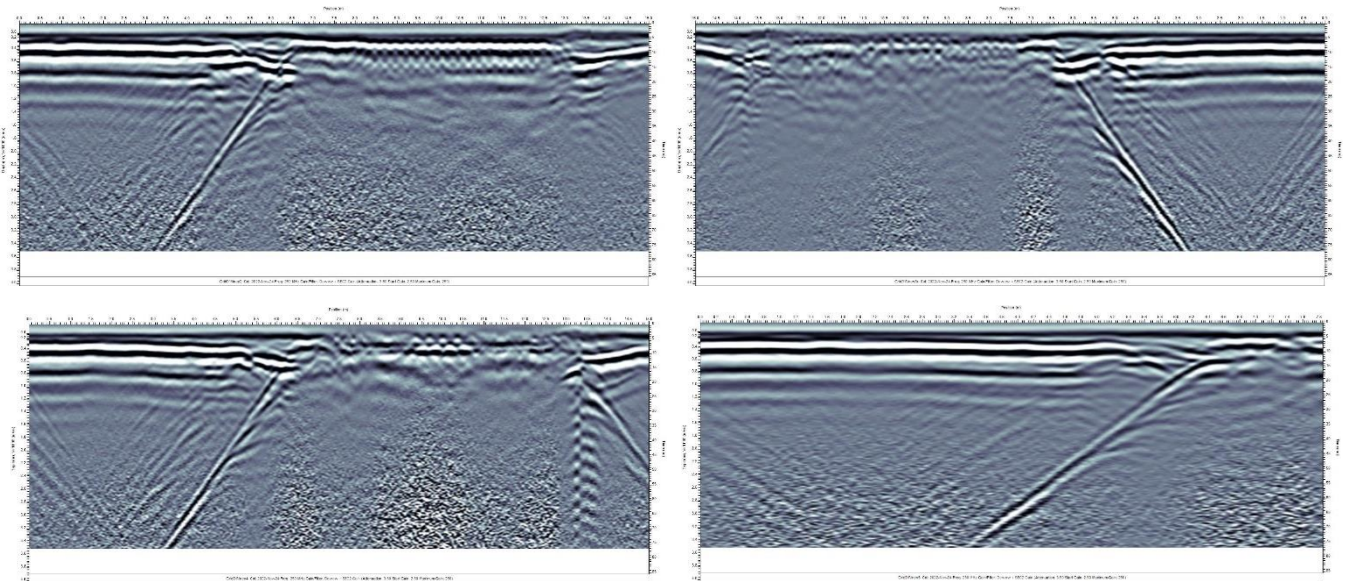
Εδώ (Εικόνα 31), στο αρχικό βάθος παρατηρείται μια ανομοιογένεια των επιφανειακών στρωμάτων, η οποία μπορεί να δηλώνει κάποια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ διαφορετικών υλικών. Στα 13.5-14m στην οριζόντια απόσταση, η έντονη ασπρόμαυρη ανάκλαση δηλώνει την ύπαρξη θαμμένου αντικειμένου.





Εικόνα 32:line13r

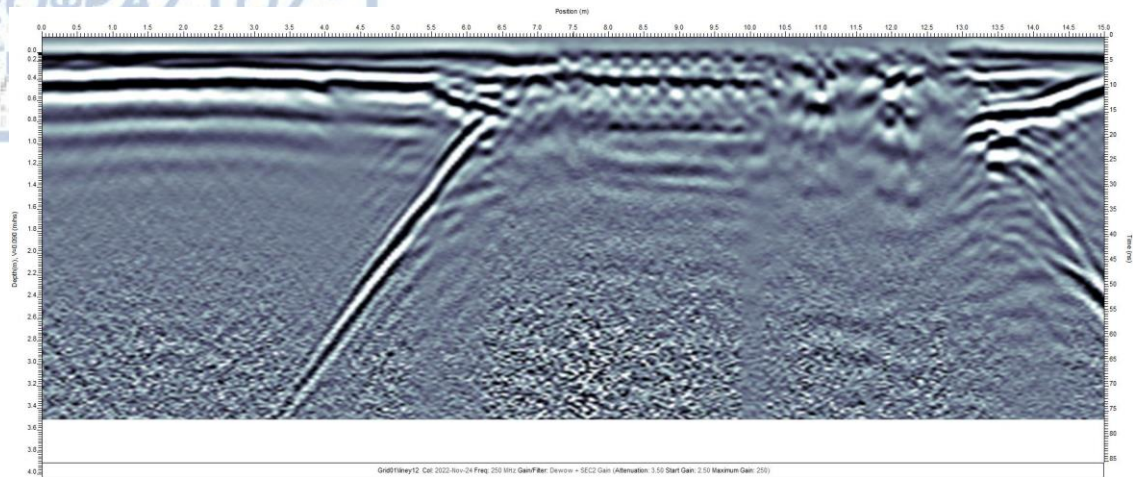
Επιφανειακά, σε όλο σχεδόν το μήκος της τομής υπάρχει υπεδάφιος σπλισμός. Χαρακτηριστικές είναι οι ανακλάσεις που υποδεικνύονται με τα κόκκινα βελόνια (Εικόνα 32) που πιθανά προέρχονται από υπόγειους γωνιακούς ανακλαστήρες.



Εικόνα 33:liney2,3r,4,5

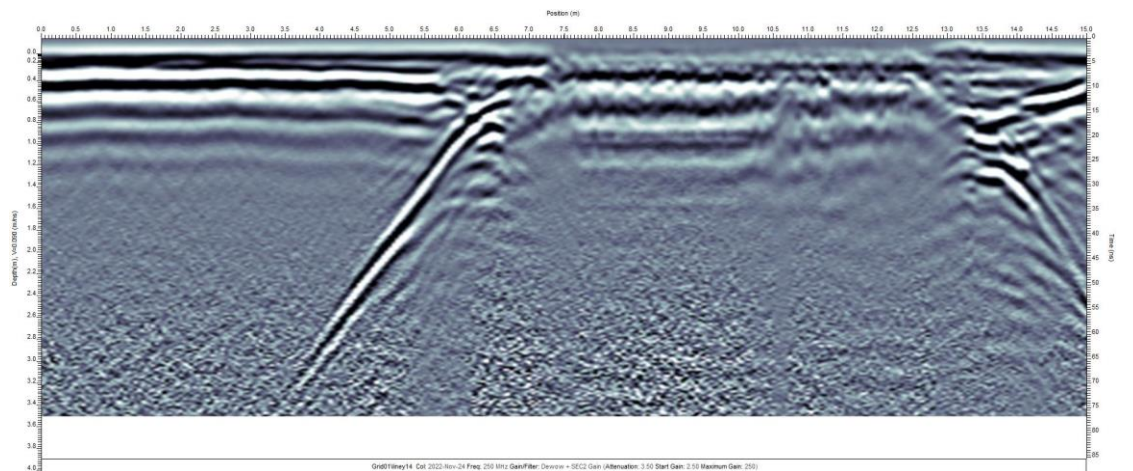
Στις παρούσες τομές (Εικόνα 33) φανερώνεται και στις 4 μια φανερή καμπύλη όπου δείχνει πάλι κάποιον σωλήνα ή ένα μέρος αυτού. Ωστόσο, σε μεγαλύτερα βάθη οι πιο χαοτικές ανακλάσεις δείχνουν ετερογενή υλικά ή θόρυβο.





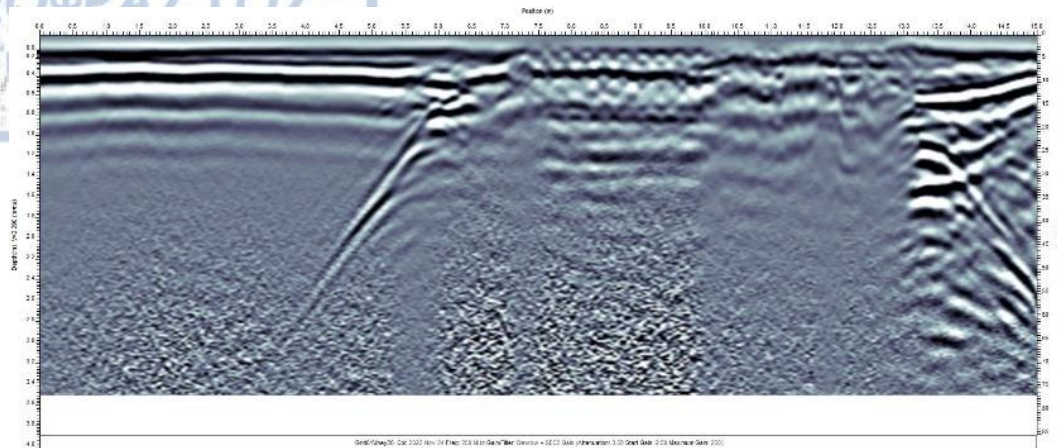
Εικόνα 34:liney12

Αξιοσημείωτο σε αυτό το κομμάτι (Εικόνα 34) είναι η ανωμαλία που δημιουργείται από τα 7 έως τα 11m και αυτό μπορεί να δηλώνει την ύπαρξη υπεδάφιου σπλισμού. Εν συνέχεια, η πλάγια έντονη ασπρόμαυρή γραμμή φανερώνει παρουσία κάποιου μεταλλικού αντικειμένου (σωλήνα) και σε μεγαλύτερα βάθη ο θόρυβος.



Εικόνα 35:liney14

Αρχικά, για τα πρώτα 0.5m ισχύουν τα ίδια με τις άλλες τομές (Εικόνα 35), δηλαδή υποδεικνύουν την παρουσία γεωλογικών σχηματισμών κοντά στο έδαφος. Σε οριζόντια θέση στα 5m κυριαρχεί μια διαγώνια ισχυρή ανάκλαση, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει την παρουσία κάποιου γραμμικού αντικειμένου (αγωγός) το οποίο η όδευση GPR «έκοψε» σχεδόν κάθετα. Από 7.5 -13 m , οι ανακλάσεις προέρχονται από υπεδάφιο σπλισμό.



Εικόνα 36:liney20

Γενικά, ισχύουν τα ίδια με τα προηγούμενα για τα πρώτα επιφανειακά βάθη. Από 13.5 – 15m (Εικόνα 36) παρατηρείται υψηλή ανακλαστικότητα και δηλώνει ανθρωπινή παρεμβασή (σκάμα, για παράδειγμα).

## 7.2 Τομές βάθους GPR

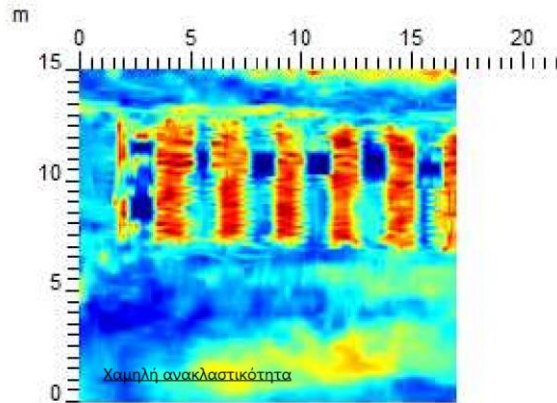
Στην ανάλυση των δεδομένων τα χρώματα που χρησιμοποιούνται στις τομές βάθους, βοηθούν σημαντικά στην ερμηνεία και απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Τα χρώματα αυτά δείχνουν διαφορετικές εντάσεις σήματος ή ανακλάσεις, βοηθώντας στην γρήγορη και αποτελεσματική κατανόηση της σύστασης και της μορφολογίας των υλικών κάτω από την επιφάνεια. Η χρωματική κλίμακα μπορεί να είναι από μονόχρωμη (αποχρώσεις του γκρι), έως πολύχρωμη (κλίμακα θερμοκρασίας). Εδώ χρησιμοποιήθηκε η πολύχρωμη κλίμακα.

Πιο αναλυτικά τα συνηθισμένα χρώματα είναι:

- Μπλε, το οποίο εκφράζει περιοχές με χαμηλή ανακλαστικότητα και ίσως αφορά ομοιογενή υλικά (άμμο, λεπτά ιζηματογενή στρωματά) ή περιοχές με μικρές αλλαγές στις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών .
- Κίτρινο και πράσινο, όπου υποδηλώνουν μέτρια ανακλαστικότητα , δείχνοντας υλικά με σημαντικές διαφοροποιήσεις στη σύσταση, όπως μείγματα διαφορετικών εδαφών.
- Κόκκινο και πορτοκαλί, τα οποία δείχνουν υψηλή ανακλαστικότητα και παρουσιάζουν περιοχές με έντονες διαφοροποιήσεις στην υφή ή τη σύνθεση και μεταλλικά αντικείμενα, πετρώματα ή δομές όπως σωλήνες, καλώδια και υπόγειες κατασκευές.

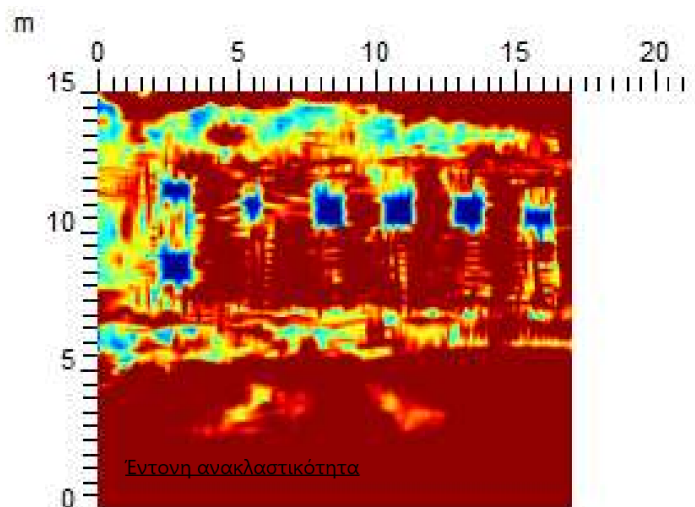
### 7.2.2 Ανάλυση τομών

Μερικά πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα που αφορούν την μελέτη απεικονίζονται παρακάτω:



Εικόνα 37: Grid depth slice 0-0.1m

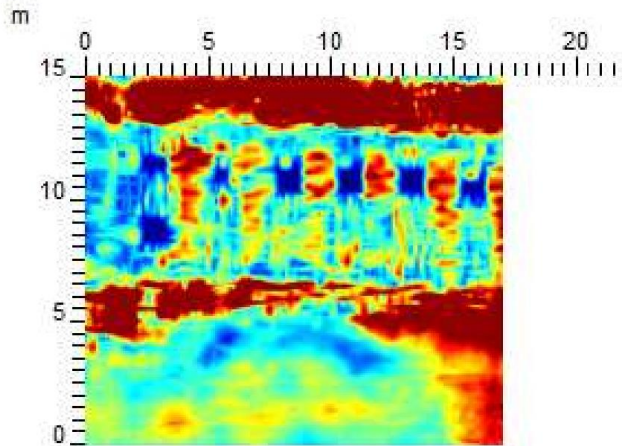
Αρχικά, παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο πλέγμα για βάθος διασκόπησης 0-0.1m (Εικόνα 37). Το μπλε χρώμα δηλώνει χαμηλή ανακλαστικότητα. Κατά διαστήματα έχουμε μέτρια έως υψηλή ανακλαστικότητα, λόγω εμφάνισης του κίτρινου με του πράσινου χρώματος, όπου αρχίζει να φανερώνεται κάποιο αντικείμενο.



Εικόνα 38: Grid depth slice 0.4-0.5m

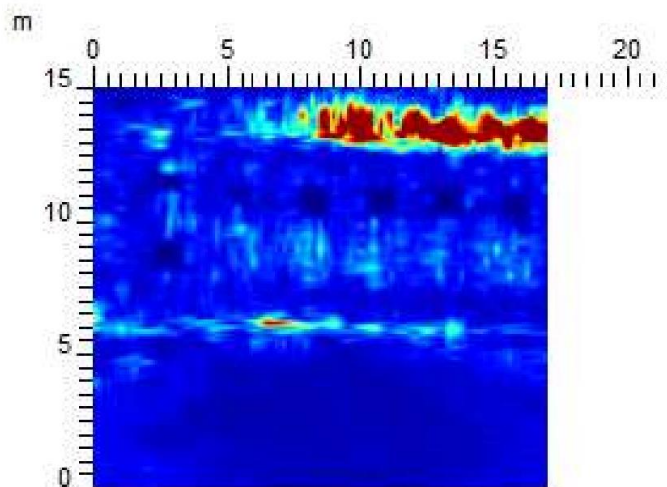
Εδώ, γίνεται λόγος για το βάθος 0.4-0.5m (Εικόνα 38). Στον άξονα X από 0-6m φαίνεται ότι κυριαρχεί το κόκκινο χρώμα, άρα γίνεται λόγος για περιοχή με έντονη ανακλαστικότητα. Ακόμα, με έντονο μπλε χρώμα μεταξύ 8-9m στον άξονα των X και 11-12m, είναι περιοχές που δεν συλλέξαμε δεδομένα GPR λόγω της ύπαρξης υπέργειων εμποδίων.





Εικόνα 39:Depth slice 0.6-0.7m

Από 0,6m και πάνω για τα πρώτα 5 μετρά στον Χ άξονα (Εικόνα 39) από κόκκινο χρώμα μετατρέπεται σε μπλε, δηλαδή από έντονα υψηλή ανακλαστικότητα μετατρέπεται σε μέτρια έως χαμηλή ανακλαστικότητα. Αυτό οφείλεται σε αυτή την περίπτωση στην εξασθένηση του σήματος με το βάθος (attenuation), διότι καθώς περνά από τα διάφορα στρωματά των πετρωμάτων το σήμα χάνει περισσότερη ενέργεια.



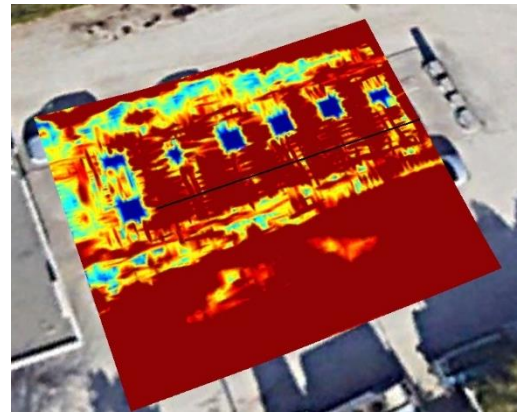
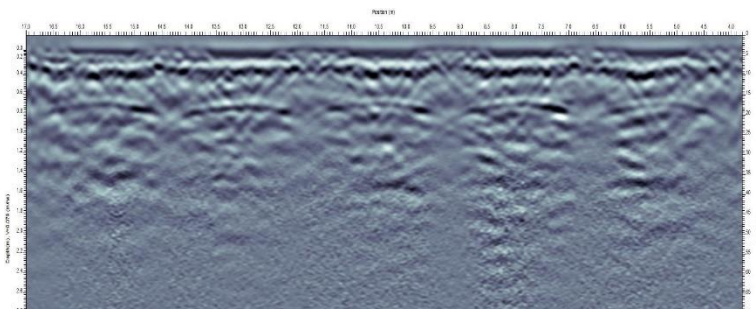
Εικόνα 40:Depth slice 1.5-1.6

Στο συγκεκριμένο slice (Εικόνα 40) από 9 έως 17m κυριαρχεί ένα έντονο κόκκινο χρώμα, όπου δηλώνει σημείο με έντονη ανακλαστικότητα, πράγμα που μπορεί να σημαίνει την συνέχεια κάποιας δεξαμενής ή σωλήνα που προαναφέρθηκε. Έπειτα, επικρατεί το μπλε χρώμα (χαμηλή ανακλαστικότητα), που με την αύξηση του βάθους κυριαρχεί σε όλη σχεδόν την περιοχή μελέτης. Αυτό, διότι καθώς το σήμα διαδίδεται μέσω των γεωλογικών στρωμάτων, ένα μέρος της ενέργειας απορροφάτε από τα υλικά. Αυτό οδηγεί σε μείωση της έντασης του

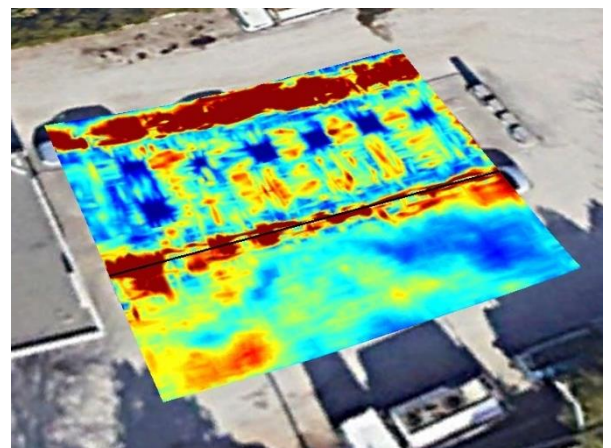
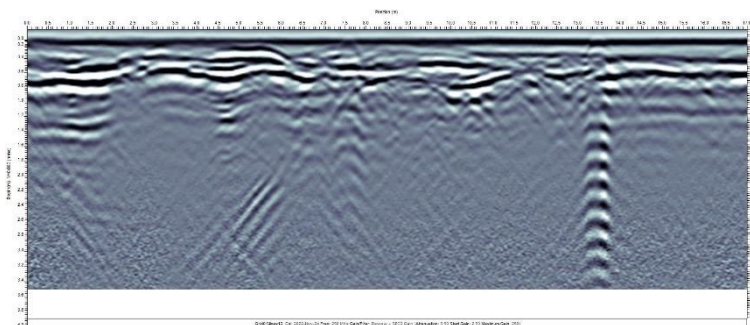
σήματος και κατά συνέπεια, σε χαμηλότερη ανακλαστικότητα σε μεγαλύτερα βάθη. Ακόμα, η επίδραση του θορύβου, ο οποίος μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές (γεωλογικές δομές, εργαλεία μέτρησης, εξωτερικές πηγές) καθιστά πιο αδύναμο το σήμα και την ανακλαστικότητα με το βάθος.

### 7.2.3 Συνδυαστικά παραδείγματα Line/Depth slice

Το ραδιόγραμμα που παρουσιάζεται αφορά την γραμμή 17 (linex17r)(Εικόνα 41), η οποία αντιστοιχεί στην μαύρη οριζόντια γραμμή στην δεξιά εικόνα. Στο ραδιόγραμμα για βάθος 0.4-0.5m φανερώνεται μια έντονη ανάκλαση. Αυτό το επιβεβαιώνει το depth slice, όπου στην συγκεκριμένη περιοχή κυριαρχεί το έντονο κόκκινο χρώμα, το οποίο δηλώνει την ύπαρξη οριζώντις στρωματογραφίας.

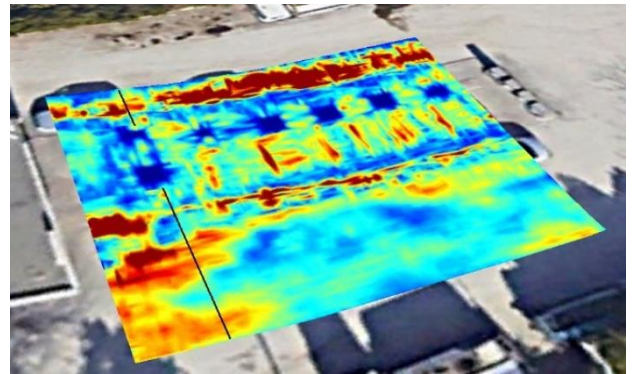
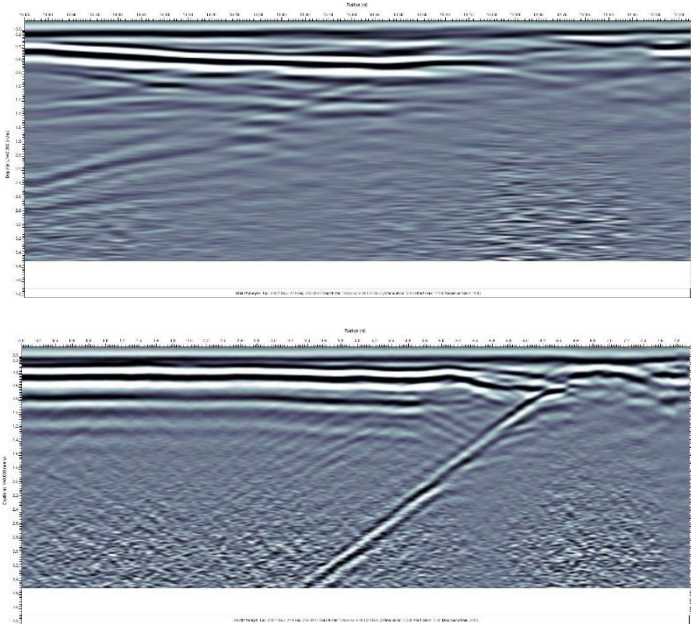


Εικόνα 41:Αριστερά linex17r/ Δεξιά grid slice(0.4-0.5m)



Εικόνα 42:: Αριστερά linex12/ Δεξιά grid slice (0.7-0.8m)

Στο διάγραμμα του grid η μαύρη οριζόντια γραμμή αντιπροσωπεύει την γραμμή 12(Εικόνα 42) για τον άξονα X και το αντίστοιχο ραδιόγραμμα της εμφανίζεται στα αριστερά. Για βάθος 0.6-0.7m η γραμμή αυτή φανερώνει έναν γραμμικό στόχο, ο οποίος φαίνεται και στα δυο σχήματα και εκφράζει μάλλον την ύπαρξη σωλήνα στην θέση εκείνη .



Εικόνα 43: Αριστερά line slices liney6r,6/ Δεξιά grid slice (0.8-0.9m)

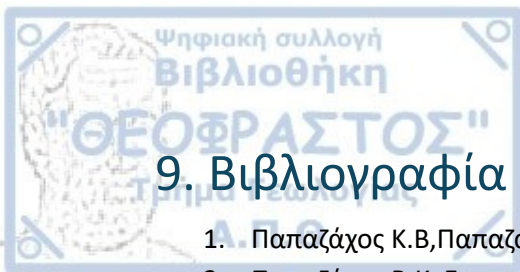


## 8. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της εργασίας ήταν η χρήση και η εξοικείωση με την μέθοδο του GPR. Σκοπός ήταν ο ακριβής εντοπισμός στόχων και πιο συγκεκριμένα αγωγών και δεξαμενών σε χώρο περιβάλλοντα πρατηρίου καυσίμων. Η χρήση του GPR είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για το βάθος διασκόπησης που τέθηκε και για τον χώρο εργασίας. Η μέθοδος είναι ικανή για την εξαγωγή κάποιων αρχικών, γρήγορων αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Ο συνδυασμός των προφίλ GPR, ή αλλιώς οδεύσεων ή ραδιογραμμάτων που συλλέχθηκαν σε κάρναβο (σε δύο κάθετους άξονες), οδήγησε στη δημιουργία «φετών» βάθους (depth slices) οι οποίες βοήθησαν στην καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία των δεδομένων (για παράδειγμα, αν πρόκειται για έναν γραμμικό ή σημειακό στόχο, στρωματογραφία, κλπ.). Η δυνατότητα για την απεικόνιση των δεδομένων σε Google Earth διευκόλυε ακόμα περισσότερο την μελέτη και την τοποθέτησή τους στον πραγματικό χώρο συλλογής τους.





## 9. Βιβλιογραφία

1. Παπαζάχος Κ.Β, Παπαζάχος Β.Κ Εισαγωγή στην γεωφυσική ,Θεσσαλονίκη, Ζήτη.
2. Παπαζάχος Β.Κ, Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική, Θεσσαλονίκη , Ζήτη .
3. Τσούρλος, Π., Βαργεμέζης, Γ., Διαμαντή Ν.(2019), Ηλεκτρονικές Παρουσιάσεις μαθήματος Η/Μ μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, Α.Π.Θ
4. Τσελέντης Α, Παρασκευόπουλος Π , Εφαρμοσμένη γεωφυσική, liberal books
5. Γραβαλάς Τ, Διεύρυνση εδαφικών ρωγμών με γεωφυσικές μεθόδους, μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ΑΠΘ
6. Αγγέλης Δ, Γεωφυσικές μετρήσεις τοίχων και θεμελιώσεων μνημείων , μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης ΑΠΘ
7. Kouι, Maria Avdelidis, Nikolaos Theodorakeas, Panagiotis Cheilakou, Eleni, Έλεγχος με Γεωραντάρ
8. Παναγιωτόπουλος Δ, Σταμπολίδης Α, Ηλεκτρονικές Παρουσιάσεις μαθηματος σεισμικών μεθόδων, ΑΠΘ
9. Ηλεκτρονικές Παρουσιάσεις μαγνητικών μεθόδων, πανεπιστήμιο Πατρών
10. Ekko project, slice view module, <https://www.senssoft.ca/wp-content/uploads/2018/04/SliceView-Users-Guide.pdf>
11. Ekko project, processing module, <https://www.senssoft.ca/wp-content/uploads/2018/04/Processing-Module-Users-Guide.pdf>
12. Μουσκάι Ι, Εφαρμογή της τεχνικής γεωραντάρ (GPR) στην αρχαιολογική έρευνα της περιοχής Πλάσι, Μαραθώνα (Αττική), ΕΚΠΑ