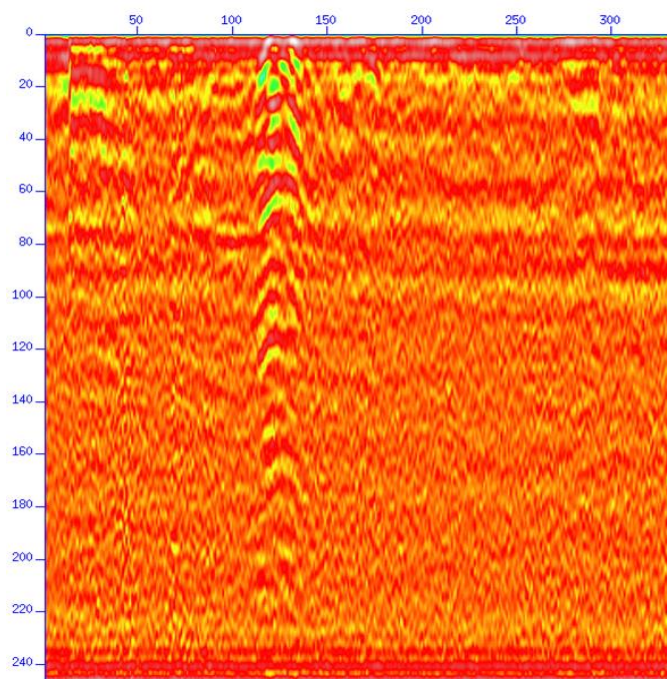




ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Μετρήσεις γεωραντάρ για τον ακριβή εντοπισμό αβαθούς γραμμικού στόχου.



Διπλωματική εργασία

ΚΩΝΣΤΑΝΤΕΛΛΟΥ ΜΑΡΙΑ-ΕΛΕΝΗ

ΜΑΡΙΝΟΥ ΕΙΡΗΝΗ

ΦΟΙΤΗΤΡΙΕΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΑΘΗΝΑ 2018

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	6
2.1	ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ.....	6
2.2	ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	6
2.3	ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	13
2.3.1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	14
2.3.2	ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ- ΑΝΤΕΝΝΑ.....	16
2.3.3	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ.....	20
2.3.4	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ-ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΡΑΔΙΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ (RADARGRAMS)	22
2.3.5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	24
3	ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	26
3.1	ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	26
3.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	29
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	36

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της μόνιμης συνεργασίας του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών με το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ). Υπεύθυνος για την παρακολούθηση της εργασίας ήταν ο Καθηγ. Νικόλαος Βούλγαρης και από πλευράς ΓΙ/ ΕΑΑ υπεύθυνος για την παρακολούθηση των εργασιών ήταν ο Δρ. Β. Κ. Καραστάθης , Διευθυντής Ερευνών ΓΙ/ΕΑΑ.

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας ήταν η πραγματοποίηση μετρήσεων γεωραντάρ για τον εντοπισμό στόχου σε μικρό βάθος εντός του χώρου του Εθνικού Αστεροσκοπείου (Εικόνα 1-2). Πιο συγκεκριμένα μετά την χρήση του περιβόλου του Εθνικού Αστεροσκοπείου για έκθεση γλυπτικής, και την διαμόρφωση χώρου, που έγινε μεταξύ Μαΐου 2017-Σεπτεμβρίου 2017, αποφασίστηκε η επαναφύτευση του περιβάλλοντος χώρου. Σε έναν μικρό κήπο διαστάσεων (4x8 m) που επρόκειτο να επαναδιαμορφωθεί υπήρχε θαμμένο ένα μαγνητόμετρο τύπου “search coil, το οποίο χρησιμοποιείται για μετρήσεις πρόγνωσης σεισμού (Εικόνα 3). Για να μην γίνει κατά τύχη παράπλευρη ζημιά στο μαγνητόμετρο, κατά την διάρκεια των σκαπτικών εργασιών επαναφύτευσης από τους εργάτες, ήταν χρήσιμο να τους υποδειχθεί η ακριβής θέση του οργάνου αυτού, η οποία βρέθηκε με την χρήση του Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR).

Το γεωραντάρ που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Pulse EKKO-PRO της Sensors & Software του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου.



Εικόνα 1. Με κόκκινο χρώμα οριοθετείται ο ευρύτερος χώρος όπου και εντοπίζεται το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Το βέλος υποδεικνύει τον χώρο όπου έγιναν οι μετρήσεις.



Εικόνα 2. Ο χώρος που πήραμε τις μετρήσεις.

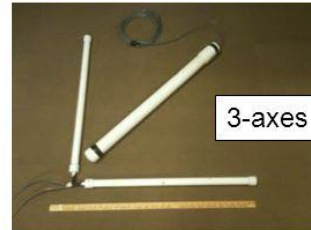


QF Magnetometer Instrument Description

QF-2010 Magnetometer Instrument Specifications 3/8/11

Magnetometers: (3)

Type: Search Coil-Induction Magnetometers
Length: 76.2 cm (30 In.)
Width: 3.8 cm (1.5 In.)
Weight: 0.927 kg. (2lb. 0.7 oz)
Frequency Range: 0.01 to 12 Hz (low pass filter @12 Hz)
Sensitivity @1Hz: 1.0 Volt per nT
Noise Level: 0.1pT per root Hz @1 Hz; 0.02pT per root Hz@10Hz
Sampling Rate: 50 sps
Analog Filters: 100db for 60 Hz suppression
Output range: +/- 40 V (differential coupled)



3-axes

Air Conductivity Sensors: (2) 1 positive ions; 1 negative ions

Type: "Gerdien Tube", with a fan which draws air at a calibrated rate
Unit is enclosed in a static-shielded, PVC tube with cover for rain
Air Ion Counter -10°C to 50°C, Wind Speeds < 15 km/hr (9mph)
Range/Resolution: 1 million (ions per cc per sec)/500 ions/cc/sec
Accuracy: +/- 25% of reading
Noise: 10 ions/cc (2 second averaging)



Communications:

Raven XE Cell Modem

Heartbeat: 1 per 15 sec.: Data File 30 MB per day per site (1+ MB per Hr.)

Εικόνα 3. Το μαγνητόμετρο τύπου "Search Coil", το οποίο χρησιμοποιείται για μετρήσεις πρόγνωσης σεισμού.

2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

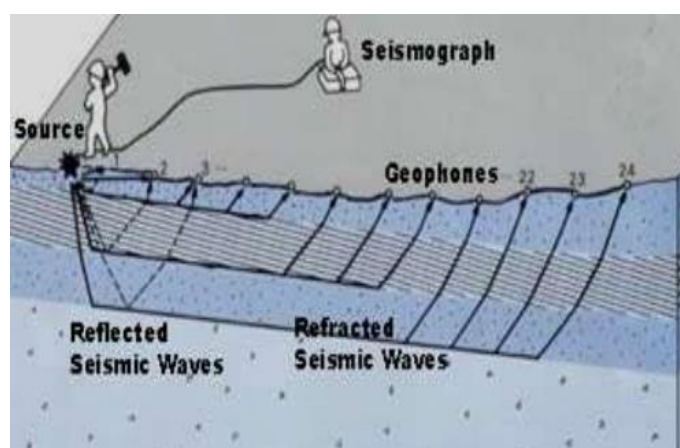
Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική είναι η επιστήμη που μελετά την δομή και την σύνθεση των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού, με την χρήση μεθόδων που βασίζονται στην εφαρμογή θεμελιωδών νόμων της φυσικής. Τα γεωφυσικά πεδία στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζονται από τις γεωφυσικές ιδιότητες βαθύτερων δομών, τις οποίες οι κλασικές γεωλογικές μέθοδοι δεν μπορούν να αποκαλύψουν. Ένα μεγάλο μέρος των γεωφυσικών μεθόδων χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση και υποστήριξη των γεωλογικών, γεωτεχνικών, υδρογεωλογικών, περιβαλλοντικών, γεωθερμικών, γεωαρχαιολογικών ερευνών κλπ. Σπουδαιότερη εφαρμογή ωστόσο είναι ο εντοπισμός ορυκτών πρώτων υλών, όπως κοιτασμάτων υδρογονανθράκων και μεταλλευμάτων.

2.2 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Βασική προϋπόθεση για τον εντοπισμό ενός στόχου, εκτός από τις διαστάσεις του, είναι το κατά πόσο υπάρχουν διαφορές στις φυσικές ιδιότητες του (όπως ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ταχύτητα σεισμικών κυμάτων, πυκνότητα) με αυτές του περιβάλλοντος γεωλογικού σχηματισμού. Ωστόσο, η διακριτική ικανότητα μιας γεωφυσικής μεθόδου, δεν εξαρτάται μόνο από τις διαστάσεις και τις γεωφυσικές ιδιότητες του στόχου, αλλά και από τον τρόπο που θα επιλεγθεί να γίνουν οι μετρήσεις (απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης). Επιπλέον, εξίσου σημαντικό όταν πραγματοποιείται έρευνα σε μια εκτεταμένη περιοχή με γεωφυσικά προφίλ, είναι η διασφάλιση τέτοιας διεύθυνσης (προτιμάται εγκάρσια στην παράταξη των γεωλογικών σχηματισμών) και απόστασης μεταξύ των προφίλ, ώστε να υπάρχουν περισσότερες πιθανότητες εντοπισμού του στόχου.

Οι κύριες γεωφυσικές μέθοδοι είναι οι σεισμικές, οι γεωηλεκτρικές, οι βαρυτικές, οι μαγνητικές, οι ηλεκτρομαγνητικές, η μέθοδος των γεωφυσικών διαγραφιών, η μέθοδος επιφανειακού πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού και η ραδιομετρία.¹

Οι σεισμικές μέθοδοι κάνοντας χρήση τόσο τεχνητών σεισμικών πηγών (εκρήξεις, σφυρί, πίπτον βάρος) όσο και φυσικών πηγών (σεισμοί, θόρυβος) καθιστούν δυνατή την αποτύπωση γεωλογικών δομών του υπεδάφους. Είναι από τις πρώτες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα υδρογονανθράκων, ενώ επίσης έχουν βρει μεγάλη εφαρμογή σε γεωτεχνικές και γεωλογικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ελαστικών παραμέτρων των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών, ο εντοπισμός γεωλογικών ρηγμάτων, η έρευνα υδροφόρων στρωμάτων, ο εντοπισμός υπογείων εγκοίλων κ.α.

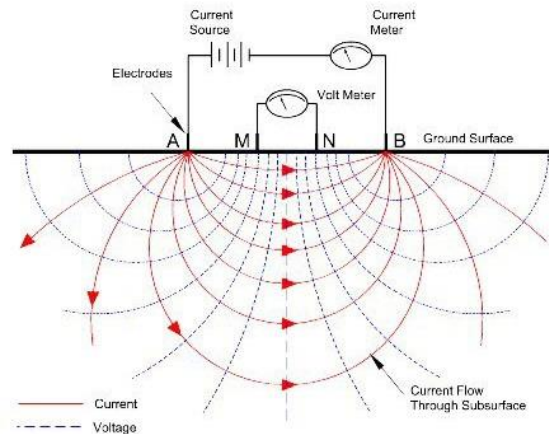


Εικόνα 4. Απεικόνιση της σεισμικής μεθόδου.

Η γεωηλεκτρική μέθοδος αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους διερεύνησης και έχει ως στόχο την μέτρηση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Βασιζόμενη στους νόμους που διέπουν τον ηλεκτρισμό, χρησιμοποιείται για την επίλυση πληθώρας προβλημάτων στην υδρογεωλογία (εύρεση βάθους υδροφόρου ορίζοντα, εντοπισμός εγκοίλων και ζωνών διαρροής από ταμειυτήρες κ.α.), τεχνική γεωλογία (εντοπισμός ασταθών περιοχών κατά την διάνοιξη μιας σήραγγας, αποτύπωση υποβάθρου σε περιπτώσεις θεμελίωσης κ.α.),

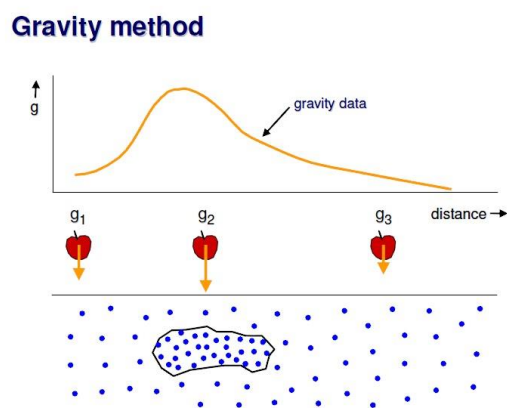
¹ Τσελέντης Α., Παρασκευόπουλος Π., (ΑΘΗΝΑ 2013) Τίτλος : «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική»

μεταλλευτική έρευνα (εντοπισμός συμπαγών μεταλλευτικών δομών), γεωθερμία, αρχαιολογία, περιβαλλοντική γεωλογία (εντοπισμός χώρου εναπόθεσης στερεών αποβλήτων) κλπ.



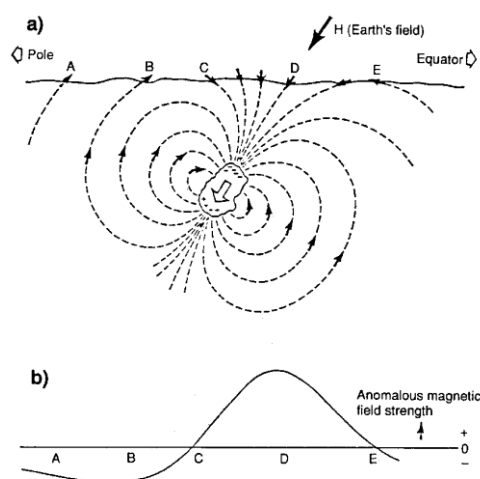
Εικόνα 5. Απεικόνιση της γεωηλεκτρικής μεθόδου, ενδεικτικά επιλογή μίας διάταξης της Wenner. (https://openei.org/wiki/Direct-Current_Resistivity_Survey)

Η βαρυτική μέθοδος μας δίνει πληροφορίες για την κατανομή των υπεδαφικών σχηματισμών μέσω της καταγραφής των βαρυτικών δυνάμεων στην επιφάνεια του εδάφους, λόγω της διαφορετικής πυκνότητας που εμφανίζουν οι σχηματισμοί αυτοί. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογές στην μεταλλευτική έρευνα (εντοπισμός κοιτασμάτων κιμπερλίτη, αιματίτη, αλίτη κ.α.) και στην τεχνική γεωλογία (υδρογεωλογικές εφαρμογές, εντοπισμός υπόγειων εγκοίλων, αποτύπωση ασθενών περιοχών για την σχεδίαση σήραγγας).



Εικόνα 6. Απεικόνιση της βαρυτικής μεθόδου.

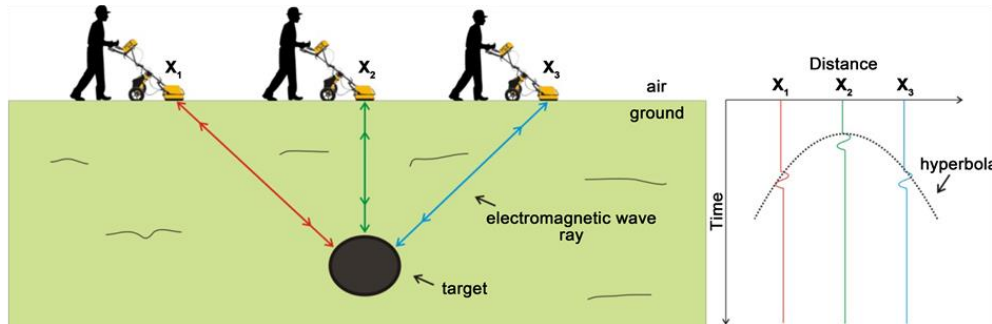
Η μαγνητική μέθοδος αξιοποιώντας το γεγονός ότι οι διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες των γεωλογικών υλικών προκαλούν ανωμαλίες στο μαγνητικό πεδίο της Γης, μας δίνει πληροφορίες για τις υπεδαφικές δομές. Η χρήση της μεθόδου είναι αρκετά διαδεδομένη καθώς είναι οικονομική και γρήγορη στην εφαρμογή της. Η μέθοδος αυτή έχει ευρύ πεδίο εφαρμογών όπως στην μεταλλευτική έρευνα (εντοπισμός κοιτασμάτων σιδήρου), στις αρχαιολογικές έρευνες (εντοπισμός αρχαίων κτισμάτων και αντικειμένων), στην χαρτογράφηση ναρκοπεδίων, στον εντοπισμό θαμμένων μεταλλικών στόχων (μεταλλικές δεξαμενές και θαμμένα ενεργά πυρομαχικά όπως νάρκες και σφαίρες) και τέλος στην χαρτογράφηση ηφαιστειακών πετρωμάτων.



Εικόνα 6. Απεικόνιση της μαγνητικής μεθόδου.

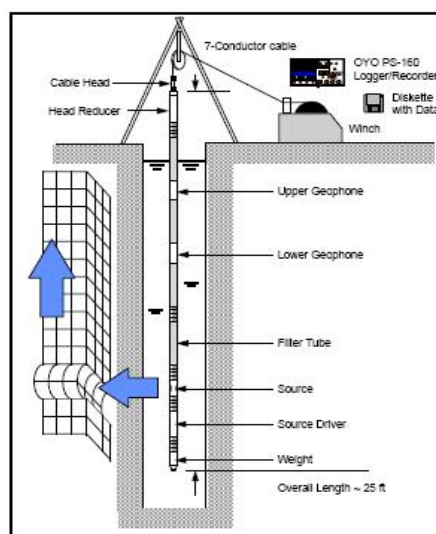
Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι μέσω των ιδιοτήτων του μετρούμενου HM πεδίου, έχουν ως στόχο τον προσδιορισμό της κατανομής της ειδικής αντίστασης/αγωγιμότητας του υπεδάφους. Η ταξινόμηση και ο διαχωρισμός τους μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, όπως σε μεθόδους όπου η καταγραφή των δεδομένων γίνεται σε συνάρτηση με τον χρόνο (TEM, Time Domain) ή σε μεθόδους που καταγράφουν με χρήση μίας ή περισσότερων συχνοτήτων (FEM, Frequency Domain), με βάση τον τύπο μετρήσεων που πραγματοποιούνται από τον δέκτη σε γωνία, φάσης και έντασης, με βάση την πηγή HM ενέργειας σε παθητικές και ενεργητικές και τέλος ανάλογα με τον τρόπο διάταξης κατά την διερεύνηση σε σταθερής και κινητής πηγής. Οι μέθοδοι αυτοί αναφέρονται σε μια ομάδα μεθόδων που χρησιμοποιούν

εναλλασσόμενα ΗΜ πεδία, τα οποία επάγονται στην Γη χωρίς την χρήση ηλεκτροδίων.



Εικόνα 7. Απεικόνιση της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.

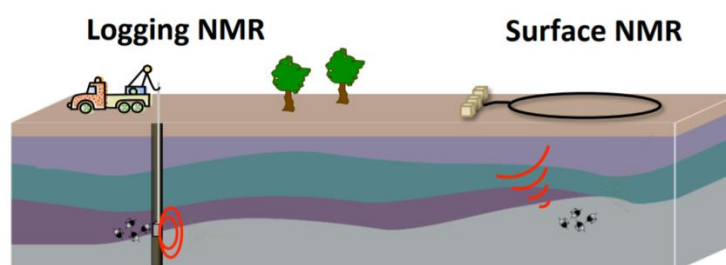
Η μέθοδος των γεωφυσικών διαγραφιών (well logging) βασίζεται στην χρήση διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων, εντός μιας γεώτρησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελεί την μοναδική μέθοδο συλλογής πληροφοριών τόσο για τους γειτονικούς σχηματισμούς μιας γεώτρησης όσο και για τον ευρύτερο περιβάλλοντα χώρο. Στην περίπτωση λήψης αδιατάρακτων δειγμάτων (πυρήνες) παίρνουμε πληροφορίες για τους γειτονικούς σχηματισμούς της γεώτρησης, ενώ στην περίπτωση σωληνωμένων γεωτρήσεων παίρνουμε πληροφορίες για τους σχηματισμούς που περιβάλλουν την γεώτρηση. Οι κυριότερες εφαρμογές είναι ο εντοπισμός υδροφόρων οριζώντων και ζωνών ρηγματώσης, εντοπισμός μεταλλοφορίας, εκτίμηση ποιότητας ύδατος κ.α.



Εικόνα 8. Απεικόνιση της μεθόδου των γεωφυσικών διαγραφιών (well logging).

(<http://www.geovision.com/suspension.php>)

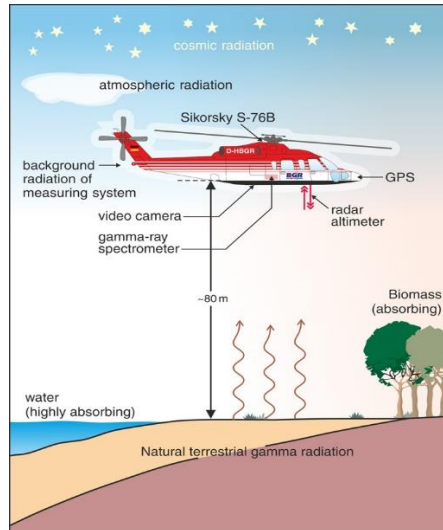
Η μέθοδος επιφανειακού πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (SNMR) ή αλλιώς βυθοσκόπηση πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (MRS) αποτελεί μια νέα μέθοδο με σκοπό την άμεση ανίχνευση ελεύθερου υπεδάφικου νερού, αξιοποιώντας το φαινόμενο του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υδρογεωλογικούς σκοπούς και να δώσει εκτίμηση των ιδιοτήτων του υδροφόρου, όπως την ποσότητα του νερού που περιέχεται σε αυτόν, στο πορώδες και στην υδραυλική αγωγιμότητα.



Εικόνα 9. Απεικόνιση της μεθόδου επιφανειακού πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (SNMR)

(https://waterinthewest.stanford.edu/sites/default/files/related_documents/Dave%20Walsh.pdf)

Οι ραδιομετρικές μέθοδοι δεν είναι τόσο ευρέως διαδεδομένες όσο οι άλλες γεωφυσικές μέθοδοι, καθώς εφαρμόζονται στον εντοπισμό ραδιενεργών πετρωμάτων, αλλά και μη ραδιενεργών τα οποία είτε περιέχουν, είτε περιβάλλονται από ραδιενεργά στοιχεία (τιτάνιο, ζιρκόνιο). Κάθε πέτρωμα έχει την δική του ραδιενεργή υπογραφή, καθιστώντας δυνατή την αναγνώρισή τους σε γεωλογικές χαρτογραφήσεις μεγάλης κλίμακας. Άλλη μια χρήση έγκειται στον εντοπισμό κοιτασμάτων ραδιενεργών ορυκτών.



Εικόνα 10. Απεικόνιση της μεθόδου μέσω αναπαράστασης με την λήψη εναέριων ραδιομετρικών μετρήσεων.

2.3 ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Η μέθοδος του Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar - GPR), ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές μη καταστροφικές, μεθόδους (χωρίς γεώτρηση, εκσκαφή ή δειγματοληψία)². Η απόκριση που λαμβάνουμε από το GPR χαρακτηρίζεται από ιδιότητες του ηλεκτρομαγνητισμού, όπως η διηλεκτρική σταθερά (ϵ), η μαγνητική διαπερατότητα (m) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα³. Πρόκειται για ένα όργανο γεωφυσικών διασκοπήσεων, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει συνεχή τομή υψηλής ανάλυσης που απεικονίζει χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Οι μετρήσεις γίνονται κυρίως επίγεια και κυρίαρχος στόχος είναι ο ακριβής εντοπισμός της θέσης θαμμένων αντικειμένων (σωλήνες, βαρέλια, αρχαιολογικά ευρήματα κ.α.) καθώς και η απεικόνιση των ανώτερων στρωμάτων. Στην περίπτωση έρευνας σε εκτεταμένη περιοχή, οι μετρήσεις λαμβάνονται τόσο με αεροπλάνο όσο και από δορυφόρους.

Ο τρόπος λειτουργίας του γεωραντάρ βασίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών παλμών υψηλής συχνότητας (10 – 10.000 MHz) και μικρής διάρκειας (μερικών nsec). Η μέθοδος βασίζεται στην παραγωγή παλμικών ραδιοκυμάτων από έναν πομπό τα οποία διαδίδονται ως ευρεία δέσμη με ταχύτητα 0,3 mnsec / στον αέρα και σαφώς μικρότερη στο υπέδαφος εξαρτώμενη από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού.⁴

² F. J. Prego, M. Solla, I. Puente, P. Arias (2017 ELSEVIER) at NDT and E International : “ *Efficient GPR data and acquisition to detect underground pipes* ”

³ Alex Martinez* and Alan P. Byrnes Kansas from «Geological Survey» : <http://www.kgs.ku.edu/Current/2001/martinez/martinez.pdf>

⁴ https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6172/2/01_chapter_4.pdf

2.3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ένα σύστημα γεωραντάρ αποτελείται από μια γεννήτρια σήματος, τις κεραίες εκπομπής-λήψης ενέργειας (Εικ.11-12) που ανακλάται προς την επιφάνεια και την ψηφιακή μονάδα ελέγχου καταγραφής (Εικ.13). Πιο συγκεκριμένα, οι κεραίες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, τις μονοστατικές και τις διστατικές.⁵ Στην πρώτη περίπτωση, η κεραία χρησιμοποιείται ως πομπός και ως δέκτης. Στην δεύτερη περίπτωση, έχουμε έναν αριθμό κεραιών εκ των οποίων η μία χρησιμοποιείται ως πομπός και οι υπόλοιπες ως δέκτης. Όσον αφορά την ψηφιακή μονάδα ελέγχου καταγραφής, αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας και οπτικοποίησης των δεδομένων που καταγράφονται από την ύπαιθρο η οποία μπορεί να είναι είτε αναλογική είτε ψηφιακή. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη έρευνα είναι το pulse EKKO PRO της Sensors & Software (Εικ.11).



Εικόνα 11 . Το όργανο GPR ή Γεωραντάρ που χρησιμοποιήθηκε για την διεκπεραίωση της μελέτης.



Εικόνα 12. Οι κεραίες εκπομπής-λήψης της ενέργειας (πομπός-δέκτης).

⁵ http://users.uoa.gr/~atzanis/Y7203/GPR_Supporting_Material/GPR_no_animation.pdf Ανδρέας Τζάνης PhD

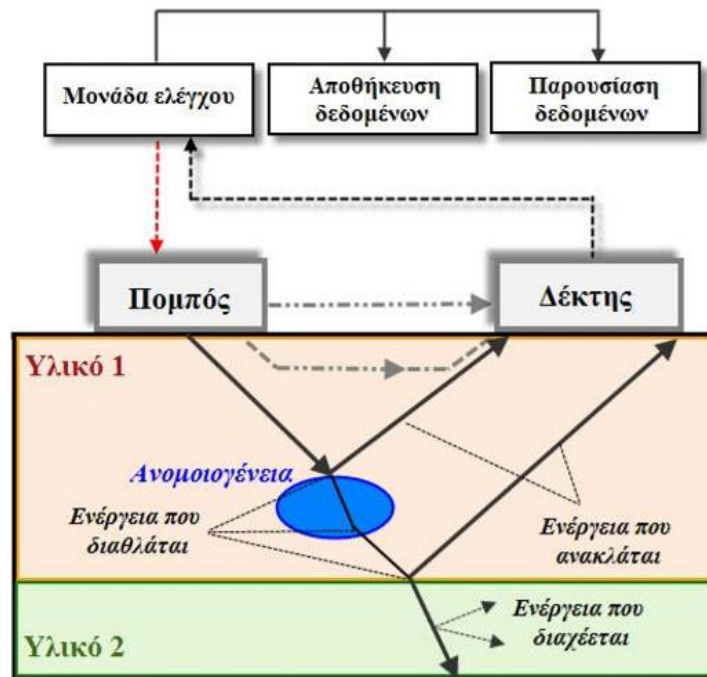


Εικόνα 13. Η ψηφιακή μονάδα ελέγχου καταγραφής και η μπαταρία (1). Η ψηφιακή μονάδα ελέγχου καταγραφής (2).

Ο τρόπος λειτουργίας του Γεωραντάρ βασίζεται στην εκπομπή παλμών (1-20ns) ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας (HM ενέργεια μικροκυμάτων) στην περιοχή συχνοτήτων από 10MHz-1GHz.⁶ Ο ηλεκτρομαγνητικός αυτός παλμός εκπέμπεται από μία κεραία-πομπό με τη μορφή λοβών στο υπέδαφος, όπου έρχεται σε επαφή με θαμμένα αντικείμενα (σωλήνες, βαρέλια κ.α.) ή διεπιφάνειες που χαρακτηρίζονται από διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές και διαφορετικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες (εναλλαγή στρωμάτων). 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 (για τα περισσότερα γεωλογικά υλικά οι ταχύτητες κυμαίνονται μεταξύ 0.6 έως 0.175m/ns)⁷. Το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας διαθλάται σε βαθύτερα στρώματα στο γεωλογικό υπόβαθρο, μέχρι να συναντήσει την επόμενη αλλαγή ιδιοτήτων στο μέσο διάδοσης. Ο αριθμός των ανακλάσεων που θα καταγραφούν εξαρτάται από την ανομοιογένεια του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται η ενέργεια. Ο ρόλος της ψηφιακής μονάδας ελέγχου έγκειται στην ενίσχυση και καταγραφή του σήματος που λαμβάνεται, σε σχέση με τον χρόνο διπλής διαδρομής. Με την ολοκλήρωση της πρώτης μέτρησης στο συγκεκριμένο σημείο, το Γεωραντάρ μετακινείται στην επόμενη θέση που έχει οριστεί είτε χειροκίνητα είτε με κάποιο όχημα, με σταθερή ταχύτητα.

⁶ F. J. Prego, M. Solla, I. Puente, P. Arias (2017 ELSEVIER) at NDT and E International : “Efficient GPR data and acquisition to detect underground pipes”

⁷ Τσελέντης Α., Παρασκευόπουλος Π., (ΑΘΗΝΑ 2013) Τίτλος : «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική»



Εικόνα 14. Αρχή λειτουργίας του Γεωραντάρ.

(https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6172/2/01_chapter_4.pdf)

2.3.2 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ- ANTENNA

Γενικά, το βάθος διείσδυσης στο οποίο μπορούν να φτάσουν τα κύματα του GPR εξαρτάται από τον τύπο του υπεδάφους και το είδος της αντένας που θα χρησιμοποιηθεί.



Αρχικά, όσον αφορά τον τύπο του εδάφους, βασικός παράγοντας είναι η αγωγιμότητα των σχηματισμών. Αυτό μεταφράζεται ως η δυσκολία ή ευκολία διαφόρων μορφών ενέργειας, στην προκειμένη περίπτωση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, να διαδίδονται δια μέσω των σχηματισμών. Επομένως, σε υλικά που χαρακτηρίζονται από χαμηλή αγωγιμότητα, όπως ο γρανίτης και η στεγνή άμμος, το σήμα του GPR μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 30 μέτρα βάθος. Αντιθέτως, υλικά που χαρακτηρίζονται από υψηλή αγωγιμότητα, όπως ο υγρός άργιλος και ο σχιστόλιθος, μπορούν να εξασθενίσουν το σήμα ή ακόμα και να το απορροφήσουν μειώνοντας έτσι δραστικά το βάθος διείσδυσης στο 1 μέτρο.⁸

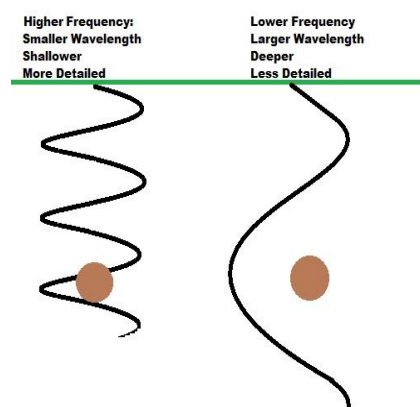
Εν συνεχεία, όσον αφορά την συχνότητα της αντέννας παρατηρούμε τα παρακάτω. Γενικά, η αντέννα ενός GPR μπορεί να είναι 12.5, 25, 50, 100, 250, 500, 1000 MHz. Συγκεκριμένα οι 50, 100,250, 500, 1000 MHz είναι πιο ευρέως διαδομένες εξαιτίας της σχέσης βάθους- ανάλυσης που παρουσιάζουν⁹. Οι αντέννες με χαμηλή συχνότητα (25-200MHz) συνδέονται με μεγαλύτερη διείσδυση και επομένως εξασφαλίζουν ανακλάσεις από μεγαλύτερα βάθη (25-30 μέτρα). Επιπλέον, εμφανίζουν μεγαλύτερα μήκη κύματος και άρα μικρότερη ανάλυση και λεπτομέρεια. Οι αντέννες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για να ερευνησουμε την γεωλογία και το υπόβαθρο μίας περιοχής, για να εντοπίσουμε καταβόθρες, για τον εντοπισμό βαθιών χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και τον εντοπισμό βαθιά θαμμένων αντικειμένων. Αντίστοιχα, οι αντέννες με μεγάλη συχνότητα (300-1000MHz) συνδέονται με μικρότερη διείσδυση και επομένως μας δίνουν ανακλάσεις από μικρότερα βάθη (0-5 μέτρα), έχουν μικρότερο μήκος κύματος και άρα μεγαλύτερη ανάλυση. Τέτοιου είδους αντέννες χρησιμοποιούνται για την έρευνα επιφανειακών και ρηχών υπεδαφικών εδαφών, για τον εντοπισμό ρηγά θαμμένων αντικειμένων, όπως σωλήνες, χωματερές και αρχαιολογικούς χώρους.

Ωστόσο, οι όροι αυτοί περιπλέκονται καθώς, μία μικρή αντέννα δεν μπορεί να μεταδώσει έναν παλμό μεγάλου μήκους κύματος, αλλά μία αντέννα χαμηλής συχνότητας έχει την δυνατότητα αυτή. Οι αντέννες με συχνότητα 12.5MHz έχουν

⁸ (<https://geomodel.com/methods/ground-penetrating-radar/>)

⁹ <http://gprtrainingcourses.com/gpr-limitations-considerations/gpr-antennas/> GPR TRAINING COURSES

μήκος μόλις 8 μέτρα, ενώ οι αντέννες με συχνότητα 250MHz έχουν μήκος μόνο 0.5 μέτρο.



Εικόνα 15. Παράδειγμα όπου γίνεται ο διαχωρισμός υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων και την λεπτομέρεια σε πληροφορία που αποδίδει η κάθε μία.

Στο παραπάνω παράδειγμα, φαίνεται ότι ο στόχος εντοπίστηκε μόνο από την αντέννα με την υψηλή συχνότητα (μικρότερο μήκος κύματος, πιο ρηχά, μεγαλύτερη λεπτομέρεια), ενώ η αντέννα με την πιο χαμηλή συχνότητα προσπέρασε τον στόχο. Παρ' όλα αυτά φαίνεται ότι η ενέργεια της χαμηλής συχνότητας, έφτασε πιο βαθιά και απορροφήθηκε μικρότερο ποσοστό της από τους γύρω σχηματισμούς.

Επομένως, τα κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης αντέννας είναι το μέγεθος του μικρότερου αντικειμένου που μπορεί να εντοπιστεί, ο τύπος του εδάφους και οι σχηματισμοί που αποτελούν την περιοχή έρευνας.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι διάφοροι τύποι Κεραιών (Αντέννα) :

➤ 12.5 MHz

Μήκος Κεραίας : 8m

Χωρική διακριτική ανάλυση : 2m

Εφαρμογές : Γεωλογικές εφαρμογές μεγάλου βάθους



➤ 25 MHz

Μήκος Κεραίας: 4m

Χωρική διακριτική ανάλυση : 1m

Εφαρμογές : Γεωλογικές εφαρμογές



➤ 50 MHz

Μήκος Κεραίας : 2m

Χωρική διακριτική ανάλυση : 0.5m

Εφαρμογές : Γεωλογικές εφαρμογές, Γεωτεχνικές εφαρμογές,

Υδρογεωλογικές εφαρμογές



➤ 100 MHz

Μήκος Κεραίας: 1m

Χωρική διακριτική ανάλυση : 0.25m

Εφαρμογές : Γεωλογικές εφαρμογές , Γεωτεχνικές εφαρμογές



➤ 200 MHz

Μήκος Κεραίας: 0.5m

Χωρική διακριτική ανάλυση : 0.125m

Εφαρμογές : Γεωτεχνικές εφαρμογές, Αρχαιολογικές εφαρμογές



2.3.3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

Η διηλεκτρική συμπεριφορά ενός γεωλογικού υλικού περιγράφεται με βάση την ηλεκτρική διαπερατότητα (ϵ) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ).

Η ηλεκτρική διαπερατότητα αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα του κάθε διηλεκτρικού μέσου η οποία εκφράζει την ικανότητα του να αποθηκεύει και να απελευθερώνει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρικού φορτίου. Η

Γεωραντάρ, GPR, Υπεδαφική έρευνα

ηλεκτρική διαπερατότητα επηρεάζει σε πολύ σημαντικό βαθμό τη διάδοση του Η/Μ κύματος από την άποψη της ταχύτητας, της ενδογενούς εμπέδησης και της ανακλαστικότητας. Πολύ συχνά, ο όρος αυτός αναφέρεται και ως σχετική διαπερατότητα ή επιτρεπτότητα ή σχετική διηλεκτρική σταθερά. Οι τιμές της κυμαίνονται από 1 για τον αέρα έως 81 για το νερό, αν και η πλειονότητα των γεωλογικών υλικών χαρακτηρίζεται από 3-30. Οι τιμές αυτές μπορούν να μεταβληθούν είτε λόγω της ανομοιογένειας των υλικών είτε λόγω την ύπαρξης νερού (ελεύθερου ή δεσμευμένου). Για παράδειγμα, υλικά με περισσότερη υγρασία έχουν μεγαλύτερη τιμή ϵ , συνεπώς καλύτερη κατακόρυφη διακριτική ικανότητα και μικρότερο βάθος διείσδυσης, σε αντίθεση με τα άνυδρα υλικά¹⁰.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) εκφράζει την ικανότητα ή την ευκολία διέλευσης ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων από ένα υλικό λόγω εφαρμοζόμενου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Σε περιβάλλοντα με υψηλές τιμές αγωγιμότητας συμβαίνουν σημαντικές απώλειες ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας, με αποτέλεσμα το βάθος διείσδυσης των η/μ κυμάτων σε τέτοια μέσα να είναι μικρό. Όσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση που σημειώνεται στην αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξασθένηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που παρατηρείται.

MATERIAL	K	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Air	1	0	0.30	0
Distilled Water	80	0.01	0.033	2×10^{-3}
Fresh Water	80	0.5	0.033	0.1
Sea Water	80	3×10^3	.01	103
Dry Sand	3-5	0.01	0.15	0.01
Saturated Sand	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Limestone	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Shales	5-15	1-100	0.09	1-100
Silts	5-30	1-100	0.07	1-100
Clays	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granite	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Dry Salt	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Ice	3-4	0.01	0.16	0.01

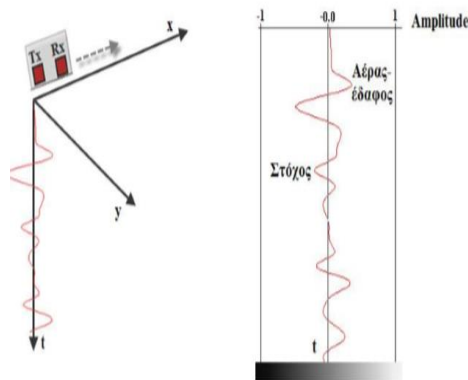
Εικόνα 16. Ηλεκτρικές ιδιότητες για γεωλογικά υλικά. (από Davis et al.,1989)

¹⁰ Τσελέντης Α., Παρασκευόπουλος Π., (ΑΘΗΝΑ 2013) Τίτλος : «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική»

2.3.4 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ-ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΡΑΔΙΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ (RADARGRAMS)

Τα δεδομένα που ανακτώνται από τις μετρήσεις με γεωραντάρ μπορούν να παρουσιαστούν με διάφορους τρόπους, με κυριότερους αυτούς των μονοδιάστατων ίχνων, δισδιάστατων τομών και τρισδιάστατων αναπαραστάσεων.

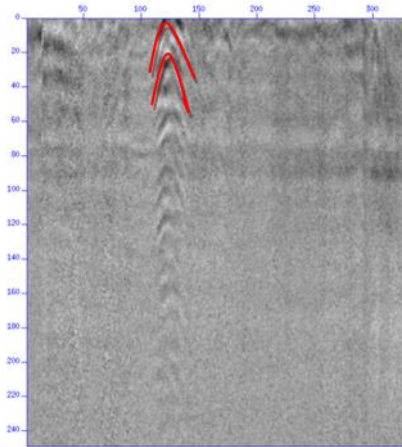
Αρχικά, το διάγραμμα καταγραφής ενός μονοδιάστατου ίχνους γεωραντάρ (Εικόνα 17), το οποίο αναφέρεται για ένα μοναδικό σημείο στην επιφάνεια, αναπαριστά το εύρος του σήματος (amplitude) συναρτήσει του χρόνου διπλής διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που αντιστοιχεί σε βάθος. Στον οριζόντιο άξονα καταγράφεται η πολικότητα της κεραίας και στον κατακόρυφο ο χρόνος.



Εικόνα 17. Σχηματική αναπαράσταση ενός μονοδιάστατου ίχνους γεωραντάρ.

Εν συνεχεία, πραγματοποιώντας μία οριζόντια σάρωση κατά μήκος ενός γραμμικού προφίλ στον άξονα x, επιτυγχάνεται η συλλογή δισδιάστατων (2D) δεδομένων τα οποία προκύπτουν από τα επιμέρους μονοδιάστατα ίχνη που ανακτώνται κατά μήκος της διαδρομής της κεραίας. Τα ανακτώμενα δεδομένα μπορούν να απεικονιστούν ως εικόνα δύο διαστάσεων μέσω της χρήσης μίας προκαθορισμένης χρωματικής κλίμακας ή παλέτας (συνήθως διαβαθμίσεων του γκριζου), αντιστοιχίζοντας την ισχύ του καταγεγραμμένου σήματος με συγκεκριμένη απόχρωση της παλέτας που έχει επιλεγεί. Η εικόνα αυτή, η οποία αναφέρεται και ως 2D προφίλ σάρωσης ή αλλιώς ραδιογράμμα, αναπαριστά μία κάθετη διατομή στο έδαφος, όπου ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στη θέση της κεραίας κατά μήκος της σάρωσης και ο κατακόρυφος άξονας στον χρόνο της διπλής διαδρομής

ηλεκτρομαγνητικού κύματος που αντιστοιχεί σε βάθος. Οι ανακλάσεις που προέρχονται από μικρούς ή σημειακούς σκεδαστές-στόχους που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους εμφανίζονται στο ραδιόγραμμα ως περιθλάσεις υπερβολικής μορφής (diffraction hyperbolas), όπως φαίνεται στην Εικόνα 18.

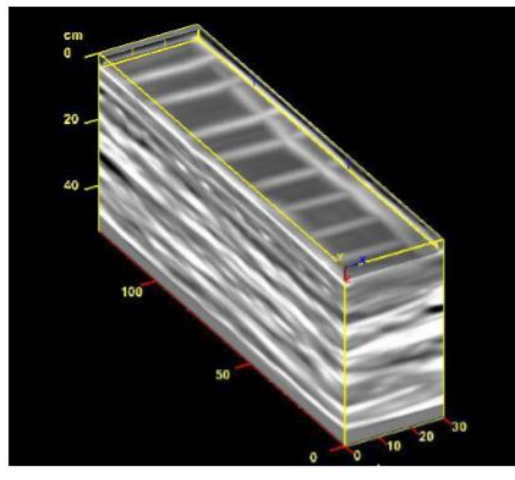


Εικόνα 18. Απεικόνιση της τομής 61, παράδειγμα από τα δεδομένα που λήφθηκαν μέσω των μετρήσεων, σε κλίμακα διαβαθμίσεων του γκριζου. Φαίνονται χαρακτηριστικά οι περιθλάσεις υπερβολικής μορφής (diffraction hyperbolas).

Το σχήμα της ανακτώμενης υπερβολής εξαρτάται από τη διάταξη της κεραίας, το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο σκεδαστής, την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος, καθώς και το διάστημα μεταξύ των σαρώσεων (το βήμα) που επιλέγεται από τον χειριστή. Σε μεγαλύτερα βάθη οι υπερβολές εμφανίζουν μεγαλύτερο μέγεθος γιατί αποτελούνται από περισσότερες σαρώσεις. Επιπλέον, υψηλότερη ταχύτητα η/μ κυμάτων (χαμηλότερη σχετική διηλεκτρική σταθερά) παράγει ευρύτερες υπερβολές και αντίστροφα. Επίσης, όσο μικρότερο είναι το διάστημα επιλογής μεταξύ των σαρώσεων (που ισοδυναμεί με μεγαλύτερο αριθμό σαρώσεων ανά μονάδα μήκους οριζόντιας απόστασης), τόσο ευρύτερες είναι οι υπερβολές που καταγράφονται από τους σημειακούς στόχους. Η ανάκλαση προέρχεται πάντα από την κορυφή του σημειακού στόχου, και το μέγιστο (κορυφή) της καταγεγραμμένης καμπύλης υπερβολής αντιστοιχεί ακριβώς στη θέση στην οποία βρίσκεται ο στόχος. Συνήθως, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος ενός σημειακού σκεδαστή, τόσο πιο ισχυρή (μεγαλύτερου εύρους) είναι η παραγόμενη υπερβολική ανάκλαση.

Τέλος, πραγματοποιώντας πολλαπλές οριζόντιες σαρώσεις σε ένα xy αξονικό επίπεδο συντεταγμένων υπό μορφή πλέγματος, επιτυγχάνεται η συλλογή ενός τρισδιάστατου σετ δεδομένων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων του υπεδάφους. Η συλλογή 3D δεδομένων απαιτεί τη χρήση

κατάλληλα σχεδιασμένου κάρναβου μετρήσεων, του οποίου οι διαστάσεις και η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών γραμμών σάρωσης σε κάθε άξονα ορίζονται από τον χρήστη. Ουσιαστικά, με αυτού του τύπου τις σαρώσεις επιτυγχάνεται η χαρτογράφηση της υπεδαφικής περιοχής ενδιαφέροντος παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τη θέση, το βάθος αλλά και τον προσανατολισμό των εσωτερικών ανακλαστήρων. Σήμερα τα περισσότερα λογισμικά επεξεργασίας με τα οποία είναι εξοπλισμένα τα συστήματα γεωραντάρ παρέχουν τη δυνατότητα απεικόνισης των 3D δεδομένων με διάφορους τρόπους.



Εικόνα 19. Απεικόνιση ενός συμπαγούς όγκου σε 3D αναπαράσταση.

2.3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Τα Γεωραντάρ τα τελευταία χρόνια ανταποκρίνονται σε έναν αρκετά μεγάλο αριθμό εφαρμογών ανάλυσης του υπεδάφους σε διάφορους ερευνητικούς τομείς και κλάδους των επιστημών, όπως οι γεωλογικές-περιβαλλοντικές μελέτες, οι αρχαιολογικές μελέτες και ο έλεγχος των κατασκευών.

Οι Γεωλογικές-Περιβαλλοντικές μελέτες, εξαιτίας του μεγάλου βάθους διασκόπησης που τις χαρακτηρίζει, απαιτούν συνήθως κεραιές χαμηλών συχνοτήτων (χαμηλότερες των 500 MHz). Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος του Γεωραντάρ εφαρμόζεται για την χαρτογράφηση γεωλογικών δομών και βυθισμάτων, την χαρτογράφηση ιζηματογενών ακολουθιών και τη διάκριση διαφορετικών ιζηματογενών περιβαλλόντων, τον έλεγχο κοιτασμάτων και την αξιολόγηση ορυκτών

πόρων, την ανίχνευση εγκοίλων, ρηγματώσεων και τη χαρτογράφηση επιπέδων ασυνεχειών, την ανίχνευση και εκτίμηση του βάθους υδροφόρων οριζόντων, την χαρτογράφηση ρυπασμένων υπεδαφικών ζωνών (π.χ. μολυσμένων υπόγειων υδάτων), τον εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων όπως βυτίων, σωλήνων και αγωγών δικτύων, την ανίχνευση διαρροών αερίου κ.ά.

Στον τομέα της αρχαιολογικής έρευνας η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θαμμένων κατασκευών και αρχαίων κτισμάτων (όπως τάφων), την χαρτογράφηση του υπεδάφους πριν την εκσκαφή, την έρευνα κάτω από υπάρχοντα αρχαιολογικά μνημεία ή κτίσματα, καθώς και την καταγραφή θεμελίων και πιθανών διαβρώσεων σε αναδειχθέντα κτίσματα.

Ιδιαίτερης σπουδαιότητας είναι η εκτεταμένη εφαρμογή που βρίσκει η μέθοδος του γεωραντάρ στον έλεγχο της κατάστασης και αποτίμησης της δομικής αρτιότητας διαφόρων κατασκευών όπως οδοστρωμάτων, επενδύσεων σηράγγων και υπονόμων, τοιχοποιιών, γεφυρών κλπ. Στις επιθεωρήσεις αυτές, λόγω του ότι η διακριτική ικανότητα είναι σημαντικότερη από το βάθος διασκόπησης, απαιτείται η χρήση κεραιών υψηλών συχνοτήτων της τάξης των 500 MHz και άνω, οι οποίες μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό της θέσης και της διάταξης του μεταλλικού οπλισμού στο σκυρόδεμα και την αποτίμηση της ακεραιότητας του οπλισμένου σκυροδέματος, την ανίχνευση πιθανών υποεπιφανειακών αστοχιών, ρηγματώσεων και κενών χώρων, τη χαρτογράφηση του πάχους ασφάλτου και αποτύπωση της στρωματογραφίας σε δρόμους, τον προσδιορισμό του πάχους επένδυσης σηράγγων και τη διερεύνηση της διεπιφάνειας βραχομάζας-επένδυσης, την αποτύπωση στοιχείων και εκτίμηση της εσωτερικής δομής τοιχοποιιών κ.ά.

Τέλος, σπουδαία είναι η εφαρμογή της μεθόδου στην εξέταση αρχαίων δαπέδων μνημείων όπως ψηφιδωτών δαπέδων σε αρχαιολογικούς χώρους, για τον εντοπισμό υποκείμενων αρχαίων καταλοίπων, στην ιατροδικαστική επιστήμη, στην ανίχνευση θαμμένων πυρομαχικών, στην γεωθερμική έρευνα και στην μεταλλευτική έρευνα και έρευνα κοιτασμάτων,¹¹τη διερεύνηση του υποστρώματος και την εκτίμηση του πάχους της στρωματογραφίας τους, καθώς και την ανίχνευση κενών ή

¹¹ http://users.uoa.gr/~atzanis/Y7203/GPR_Supporting_Material/GPR_no_animation.pdf Ανδρέας Τζάνης PhD

αποσαθρωμένων περιοχών κάτω από το δάπεδο, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τη σωστή και αποτελεσματική συντήρησή τους.

3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Προκειμένου να ξεκινήσει η συλλογή των δεδομένων είναι απαραίτητη η προσαρμογή των ρυθμίσεων του Γεωραντάρ στις ανάγκες της έρευνας. Ενεργοποιώντας το Γεωραντάρ συναντάμε το κύριο μενού όπου επιλέγοντας το System Set up ρυθμίζουμε τις βασικές παραμέτρους του οργάνου, το Time window (τα χρονικά παράθυρα που θα στέλνει το σήμα) και το system stacking (ο αριθμός των μετρήσεων που θα πάρει το όργανο πάνω από ένα σημείο) οι οποίες μπαίνουν αυτόματα. Επόμενη παράμετρος είναι το Acquisition control, όπου στην επιλογή triggering διαλέγουμε την ρύθμιση odometer. Οι παράμετροι beeper και GPS δεν χρησιμοποιούνται καθώς δεν διατίθενται και στην επιλογή odometer set up δεν αλλάζουμε κάτι. Εν συνεχεία, στην επιλογή Survey parameter δεν επεμβαίνουμε και συνεχίζουμε με την παράμετρο GPR Display parameters και πιο συγκεκριμένα στην επιλογή Gain Applied όπου διαλέγουμε το AGC (automatic gain control). Τέλος, πρέπει να επιλέξουμε που επιθυμούμε να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα, κάτι το οποίο πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης File Management → Data storage → External Drive, προκειμένου να μπορούμε να τα εξάγουμε στον υπολογιστή. Εφόσον ολοκληρώσουμε την εφαρμογή των ρυθμίσεων, με την ένδειξη Run μπορούμε να ξεκινήσουμε την λήψη των μετρήσεων στην υπό μελέτη περιοχή. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται μετά την ανεύρεση του κατάλληλου βήματος με βάση το οποίο θα πάρουμε τόσο κάθετες, όσο και οριζόντιες τομές. Το βήμα που επιλέχθηκε αρχικά, ήταν αρκετά μεγάλο προκειμένου με διάφορες δοκιμές να υπάρχει η δυνατότητα ελάττωσής του. Τελικά, καθώς μίκραινε διαπιστώναμε ότι υπήρχε καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Τελικά, το βήμα που επιλέχθηκε ήταν τα 15cm για τις οριζόντιες και τα 30cm για τις κάθετες τομές. Εν συνεχεία, σημαντικό ήταν το μαρκάρισμα δύο διαφορετικών σταθερών στόχων (Marker #1 και Marker #2) σε

τυχαίες θέσεις γύρω από το μαγνητόμετρο, έτσι ώστε να γνωρίζουμε την θέση στην οποία βρισκόμαστε, σε μεταγενέστερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων στον υπολογιστή. Το Marker #1 αντιπροσωπεύει τις πέτρες και το Marker #2 το κέντρο του κομματιού από το μηχάνημα το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια. (βλ. Εικόνα)



Εικόνα 17. Περιοχή έρευνας. Με το κόκκινο περίγραμμα απεικονίζεται το Marker #1 και με το μπλε περίγραμμα απεικονίζεται το Marker #2.

Με την ολοκλήρωση της λήψης των μετρήσεων, προέκυψαν 80 τομές, εκ των οποίων ορισμένες δεν μπόρεσαν να πραγματοποιηθούν λόγω ύπαρξης εμποδίων, καταλήγοντας έτσι σε 54 οριζόντιες και 15 κάθετες τομές. Οι μετρήσεις αυτές συγκεντρώθηκαν και καταγράφηκαν σε δύο πίνακες. (Πίνακας 1α , Πίνακας 1β). Στην πρώτη στήλη αναγράφεται ο αριθμός της Τομής, στην δεύτερη το μήκος της και στην 3 και στην 4 στήλη αντίστοιχα Marker #1 και Marker #2, το σημείο δηλαδή όπου συναντούσαμε κάθε φορά τους σταθερούς στόχους.

Τομή	Μήκος	Marker #1	Marker #2
#25	7.85	3.60	4.95
#26	7.87	3.60	4.95
#27	7.87	3.52	4.86
#28	7.88	3.45	4.84
#29	7.75	3.43	4.78
#30	7.75	3.36	4.75
#31	7.76	3.36	4.68
#32	7.70	3.29	4.64
#33	7.67	3.25	4.65
#34	7.66	3.24	4.65
#35	7.67	3.25	4.65
#36	7.83	3.27	4.65
#37	7.87	3.20	4.60
#38	7.85	3.20	4.60
#39	7.80	3.15	4.55
#40	7.85	3.14	4.54
#41	7.80	3.13	4.50
#42	7.87	3.10	4.45
#43	7.80	3.06	4.44
#44	7.80	3.04	4.37
#45	7.80	3.03	4.35
#46	7.77	3.00	4.35
#47	7.84	3.03	4.30
#48	7.73	2.95	4.23
#49	7.75	2.93	4.17
#50	7.60	2.76	4.10
#51	7.80	2.85	4.05
#52	7.70	2.79	3.95
#53	7.70	2.44	3.55
#54	7.70	2.30	3.40
#55	7.73	2.20	3.30
#56	7.55	2.05	3.17
#57	7.34	1.93	3.00
#58	7.40	1.80	2.90
#59	6.75	1.70	2.68
#60	6.77	1.70	2.67
#61	6.77	1.60	2.60
#62	5.95		1.10
#63	5.95		1.10
#64	5.98		1.03

#65	9.30	6.24	8.75
#66	9.60	6.14	8.68
#67	9.80	6.08	8.65
#68	9.77	5.96	8.56
#69	8.85	5.75	8.20
#70	8.07	5.68	8.00
#71	8.50	5.60	8.15
#72	8.40	5.65	8.10
#73	8.80	5.66	8.20
#74	9.00	4.00	1.28
#75	8.80	3.90	1.23
#76	8.74	3.94	1.26
#77	8.70	4.00	1.27
#78	8.64	3.99	1.26
#79	8.34	3.64	1.05
#80	8.43	3.80	1.15

Πίνακας 1 : 54 οριζόντιες τομές με βήμα 15cm (α), 15 κάθετες τομές με βήμα 30cm (β).



Εικόνα 18. Ενδεικτικά με την πράσινη γραμμή η τοποθέτηση στο πεδίο ενός κάθετου προφίλ σάρωσης (κάθετη τομή) (Εικ.α) και ενός οριζόντιου προφίλ σάρωσης (οριζόντια τομή) (Εικ.β). Διεξαγωγή πολλαπλών κάθετων (κατά τον άξονα y) και οριζόντιων (κατά τον άξονα x) σαρώσεων.

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων ακολούθησε η εξαγωγή τους από το Γεωραντάρ για την περαιτέρω επεξεργασία τους αλλά και αρχειοθέτησή τους. Ακολούθως μετατρέψαμε τα αρχεία διαδοχικά σε μορμάτ SEG-Y και SU, ώστε για την επεξεργασία να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό *Seismic Unix (SU)*. Το SU είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον λογισμικού επεξεργασίας σήματος και ειδικότερα σεισμικών δεδομένων, που δημιουργήθηκε στο Colorado School of Mines (Stockwell, 1999).

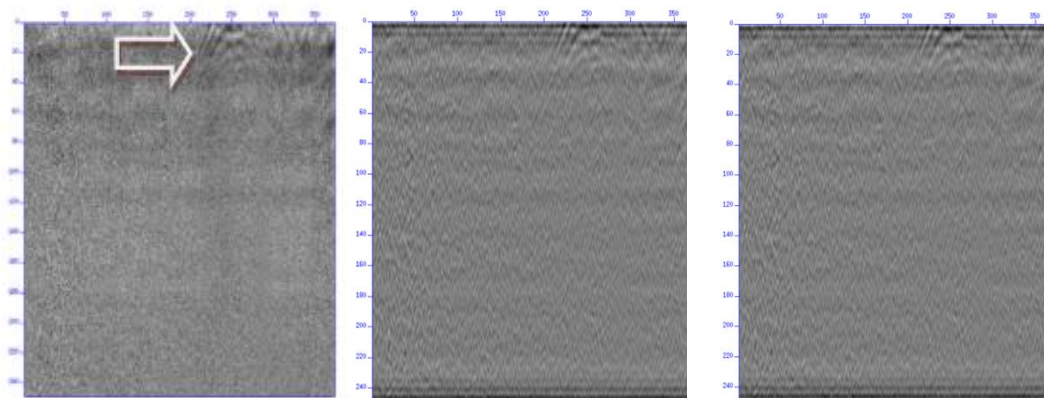
Με τη χρήση του λογισμικού κατορθώσαμε να απεικονίσουμε τα προφίλ σε εικόνα δύο διαστάσεων με τη χρήση προκαθορισμένης χρωματικής κλίμακας ή παλέτας βάσει του πλάτους του σήματος. Η εικόνα αυτή, η οποία αναφέρεται και ως 2D προφίλ σάρωσης ή αλλιώς ραδιόγραμμα, απεικονίζει στοιχεία της κάθετης διατομής στο έδαφος. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στη θέση της κεραίας κατά μήκος της σάρωσης και ο κατακόρυφος άξονας στον χρόνο της διπλής διαδρομής

ηλεκτρομαγνητικού κύματος που αντιστοιχεί υπό μίαν έννοια στο βάθος.¹² Τα προφίλ σάρωσης που προήλθαν από την επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε παρουσιάζονται παρακάτω.

Σκοπός της επεξεργασίας ήταν η βελτίωση των δεδομένων με φιλτράρισμα του θορύβου. Για να γίνει αυτό εφαρμόζουμε συχνοτικά φίλτρα (εντολή SUFILTER). Η εν λόγω εντολή χρησιμοποιεί πολυγωνικά φίλτρα, ζωνοπερατά (amp, 0,1,1,0), αποκοπής χαμηλών ή υψηλών συχνοτήτων.

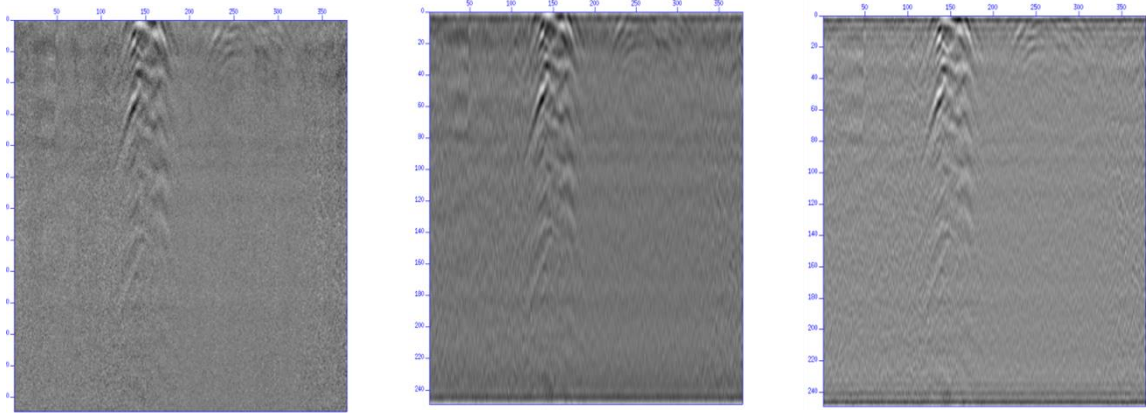
¹² Τίτλος : «Κεφάλαιο 4 : Έλεγχος με Γεωραντάρ» στο :
https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6172/2/01_chapter_4.pdf

Κάνοντας διάφορες δοκιμές, καταλήξαμε ότι το βέλτιστο φίλτρο είναι το 100,200,800,1600. Παρακάτω ακολουθούν κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα τομών (Τομή 41,51,61,62,73) αρχικά χωρίς την εφαρμογή κάποιου φίλτρου και στην συνέχεια με την εφαρμογή των δυο διαφορετικών ομάδων συχνοτήτων.



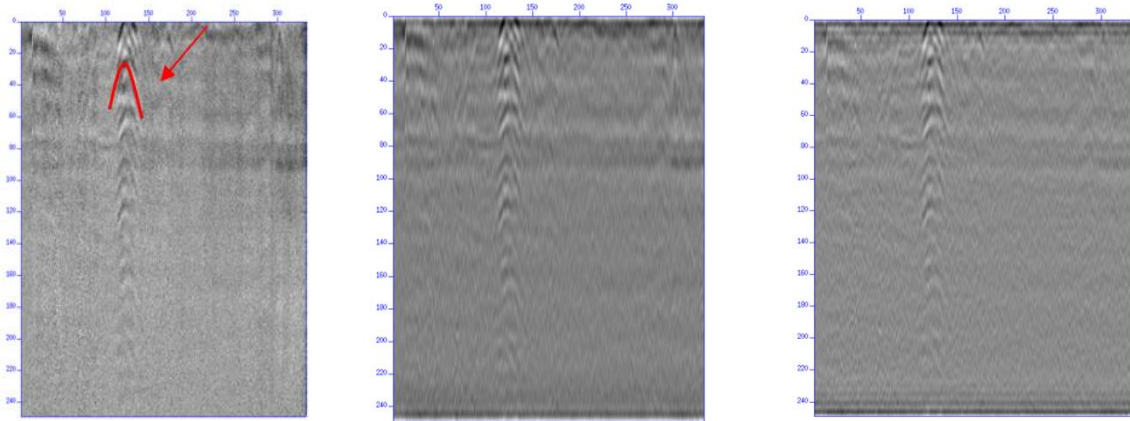
Εικόνα 19. Παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 41). Εφαρμογή διαφορετικών ομάδων συχνοτήτων πριν την εφαρμογή φίλτρου (αριστερά), μετά την εφαρμογή του φίλτρου με συχνότητες 300,600,800,1000 (κέντρο) και με συχνότητες 100,200,800,1000 (δεξιά)

Στην εικόνα 19 παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 41), με τη χρήση του GPR κεντρικής συχνότητας 250 GHz. Η τομή 41 που διακρίνεται στις τρεις εικόνες παρουσιάζεται με διαφορετική λεπτομέρεια κάθε φορά καθώς έχει προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου με διαφορετική ομάδα συχνοτήτων, με στόχο τη βελτίωση της ανάλυσης των δεδομένων της καταγραφής. Η τομή αυτή συμπεριλήφθηκε στα δεδομένα, καθώς πρόκειται για την πρώτη θολή καταγραφή των ανακλάσεων. Οι υπερβολές εντοπίζονται πολύ κοντά στην επιφάνεια, γεγονός που σημαίνει ότι ο στόχος που θέλουμε να εντοπίσουμε είναι επιφανειακός (μαγνητόμετρο).



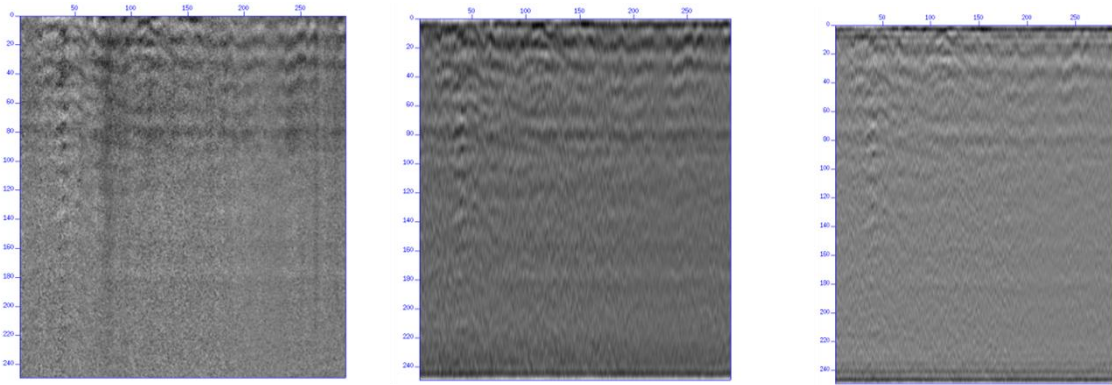
Εικόνα 20. Παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 51), με την εφαρμογή διαφορετικών ομάδων συχνοτήτων πριν την εφαρμογή φίλτρου (αριστερά), μετά την εφαρμογή του φίλτρου με συχνότητες 300,600,800,1000 (κέντρο) και με συχνότητες 100,200,800,1000 (δεξιά).

Στην εικόνα 20 παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 51), με τη χρήση του GPR κεντρικής συχνότητας 250 GHz. Η τομή 51 που διακρίνεται στις τρεις εικόνες παρουσιάζεται με διαφορετική λεπτομέρεια κάθε φορά καθώς έχει προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου με διαφορετική ομάδα συχνοτήτων, με στόχο τη βελτίωση της ανάλυσης των δεδομένων της καταγραφής. Η τομή αυτή συμπεριλήφθηκε στα δεδομένα, καθώς πρόκειται για μία πολύ καλή καταγραφή. Οι υπερβολές του σήματος από το στόχο διακρίνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και πιο έντονες, γεγονός που σημαίνει ότι πλησιάζουμε στον επιφανειακό στόχο (μαγνητόμετρο).



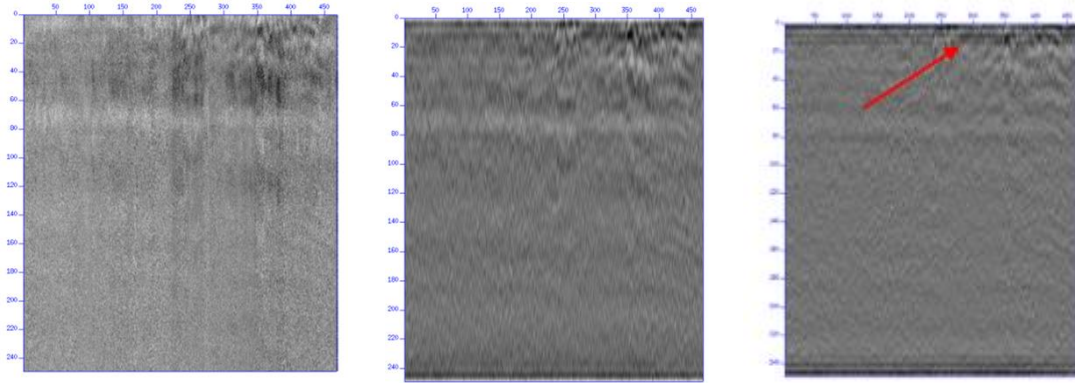
Εικόνα 21. Παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 61), με την εφαρμογή διαφορετικών ομάδων συχνοτήτων πριν την εφαρμογή φίλτρου (αριστερά), μετά την εφαρμογή του φίλτρου με συχνοτήτες 300,600,800,1000 (κέντρο) και με συχνοτήτες 100,200,800,1000 (δεξιά).

Στην εικόνα 21 παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 61), με τη χρήση του GPR κεντρικής συχνότητας 250 GHz. Η τομή 61 που διακρίνεται στις τρεις εικόνες παρουσιάζεται με διαφορετική λεπτομέρεια κάθε φορά καθώς έχει προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου με διαφορετική ομάδα συχνοτήτων, με στόχο τη βελτίωση της ανάλυσης των δεδομένων της καταγραφής. Η τομή αυτή συμπεριλήφθηκε στα δεδομένα, καθώς παρατηρούνται έντονα οι υπερβολές, γεγονός που δείχνει ότι έχουμε πλησιάσει είτε κοντά ή πάνω από τον στόχο.



Εικόνα 22. Παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 62), με την εφαρμογή διαφορετικών ομάδων συχνοτήτων πριν την εφαρμογή φίλτρου (αριστερά), μετά την εφαρμογή του φίλτρου με συχνοτήτες 300,600,800,1000 (κέντρο) και με συχνοτήτες 100,200,800,1000 (δεξιά).

Στην εικόνα 22 παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 62), με τη χρήση του GPR κεντρικής συχνότητας 250 GHz. Η τομή 62 που διακρίνεται στις τρεις εικόνες παρουσιάζεται με διαφορετική λεπτομέρεια κάθε φορά καθώς έχει προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου με διαφορετική ομάδα συχνοτήτων, με στόχο τη βελτίωση της ανάλυσης των δεδομένων της καταγραφής. Η τομή αυτή συμπεριλήφθηκε στα δεδομένα, καθώς πρόκειται για μία ένδειξη σταδιακής απομάκρυνσης από τον στόχο (μαγνητόμετρο).



Εικόνα 23. Παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της οριζόντιας γραμμής διασκόπησης στον άξονα x (τομή 73), με την εφαρμογή διαφορετικών ομάδων συχνοτήτων πριν την εφαρμογή φίλτρου (αριστερά), μετά την εφαρμογή του φίλτρου με συχνοτήτες 300,600,800,1000 (κέντρο) και με συχνοτήτες 100,200,800,1000 (δεξιά).

Στην εικόνα 23 παρουσιάζονται τα 2D προφίλ σάρωσης που λήφθηκαν κατά μήκος της κάθετης γραμμής διασκόπησης στον άξονα y (τομή 73), με τη χρήση του GPR κεντρικής συχνότητας 250 GHz. Η τομή 73 που διακρίνεται στις τρεις εικόνες παρουσιάζεται με διαφορετική λεπτομέρεια κάθε φορά καθώς έχει προκύψει από την εφαρμογή του φίλτρου με διαφορετική ομάδα συχνοτήτων, με στόχο τη βελτίωση της ανάλυσης των δεδομένων της καταγραφής. Η τομή αυτή συμπεριλήφθηκε στα δεδομένα, καθώς πρόκειται για την μοναδική κάθετη τομή όπου έχουμε εμφάνιση του στόχου.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας κατορθώσαμε να εξοικειωθούμε με την χρήση του Γεωραντάρ στην λήψη και επεξεργασία δεδομένων σε σχέση με τον εντοπισμό υπεδαφικών στόχων.

Επιπροσθέτως εξοικειωθήκαμε με το λογισμικό Seismic Unix, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία σεισμικών αλλά και άλλων γεωφυσικών δεδομένων.

Με τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης του θαμμένου στόχου, επετεύχθη ο σκοπός της διπλωματικής. Γνωρίζοντας λοιπόν την έκταση που καταλαμβάνει ο στόχος, ήταν εφικτή η σωστή ενημέρωση των εργατών που είχαν αναλάβει την φυτοκάλυψη του χώρου αυτού. Η έγκυρη ενημέρωση τους ήταν απαραίτητη προκειμένου να αποφευχθεί μια πιθανή βλάβη ή ακόμη και καταστροφή του μαγνητομέτρου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Περάκης Ε. - Γουναροπούλου Α.,(Χανιά 2004) Τίτλος : « *Γεωφυσική διασκόπηση με σκοπό τον εντοπισμό υφαλμύρωσης στην περιοχή Τυμπακίου Κρήτης*» στο :
http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/sefe/sdfp/2014/PerrakisEmmanouil,GounaropoulouAfroditi/attached-document-1411575375-854231-32627/PerrakisEmmanouil_GounaropoulouAfroditi2014.pdf
- 2) F. J. Prego, M. Solla, I. Puente, P. Arias (2017 ELSEVIER) at NDT and E International : “ *Efficient GPR data and acquisition to detect underground pipes*”
- 3) Martinez A. and Alan P. Byrnes Kansas , Τίτλος : «*Geological Survey*» στο :
<http://www.kgs.ku.edu/Current/2001/martinez/martinez.pdf>
- 4) Τζάνης Α. PhD, Τίτλος : “ *Γεωραντάρ*” στο :
http://users.uoa.gr/~atzanis/Y7203/GPR_Supporting_Material/GPR_no_animation.pdf
- 5) <http://www.treecomp.gr/index.php/products/georadar/pulse-ekko-pro-sensors-software-detail>
- 6) Τίτλος “*GPR TRAINING COURSES*” <http://gprtrainingcourses.com/gpr-limitations-considerations/gpr-antennas/>
- 7) Zell H. , Τίτλος : “*SEARCH COIL MAGNETOMETER*”(2007) στο :
https://www.nasa.gov/mission_pages/themis/spacecraft/SCM.html
- 8) Τσελέντης Α., Παρασκευόπουλος Π., (ΑΘΗΝΑ 2013) Τίτλος : «*Εφαρμοσμένη Γεωφυσική*»
- 9) Τίτλος : «*Κεφάλαιο 4 : Έλεγχος με Γεωραντάρ*» στο :
https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6172/2/01_chapter_4.pdf