



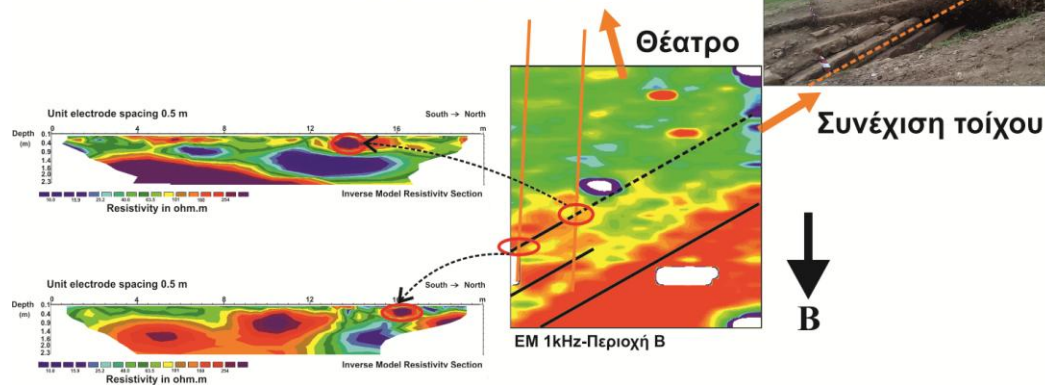
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΓΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

### Διπλωματική Εργασία

«Γεωφυσική διασκόπηση στο ρωμαϊκό θέατρο των Απτέρων,  
Χανίων»



ΠΑΓΑΝΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

#### ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Καθηγητής (Επιβλέπων)

ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Καθηγητής

ΣΠΑΝΟΥΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΔΙΠ

Χανιά 2015

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε σε συνεργασία με την Εφορεία Αρχαιοτήτων Χανίων. Αντικείμενο της εργασίας είναι η παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή γύρω από το ρωμαϊκό θέατρο των Αρχαίων Απτέρων, Χανίων. Σκοπός της έρευνας ήταν ο εντοπισμός πιθανών θέσεων θαμμένων αρχαιοτήτων γύρω από το θέατρο, όπως το αρχαίο πλακόστρωτο μονοπάτι που συνέδεε την πόλη με αυτό, καθώς και την λιθόχτιστη τοιχοδομή που το περιέβαλλε. Χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι γεωραντάρ, κινούμενου πομπού-δέκτη, μαγνητικής βαθμίδας και ηλεκτρικής τομογραφίας σε πέντε διαφορετικούς κάρναβους μετρήσεων.

Η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ έγινε στο λογισμικό GPR-PRO 14 και περιλάμβανε: εφαρμογή φίλτρων και ενίσχυσης, υπολογισμό μιγαδικών χαρακτηριστικών (attributes), κατασκευή οριζοντίων τομών (slice) σε διαδοχικά βάθη, καθώς και τρισδιάστατη απεικόνιση στο λογισμικό T3D. Για την επεξεργασία των μαγνητικών και ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Transform, όπου έγινε εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης. Η επεξεργασία των ηλεκτρικών τομογραφιών έγινε στο λογισμικό Res2DInv. Συνολικά καλύφθηκε έκταση 2720 m<sup>2</sup> με τη μέθοδο κινούμενου πομπού-δέκτη, 2128 m<sup>2</sup> με τη μέθοδο γεωραντάρ, 1140 m<sup>2</sup> με τη μέθοδο μαγνητικής βαθμίδας, καθώς και 2 ηλεκτρικές τομές.

Μετά τη συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων, εντοπίστηκε η θαμμένη λιθόχτιστη τοιχοδομή που περιβάλλει το θέατρο, στον κάρναβο βόρεια του θεάτρου και πιθανόν και στα ανατολικά. Επιτεύχθηκε επίσης ο εντοπισμός πιθανών θαμμένων τοίχων καθώς και άλλων ανθρωπογενών δομών στις υπόλοιπες περιοχές. Τέλος, προτείνονται νέες περιοχές για περαιτέρω γεωφυσική έρευνα εντός του αρχαιολογικού χώρου.

## Πρόλογος

Στο σημείο αυτό, μετά το πέρας της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον καθηγητή κ. Βαφείδη Αντώνιο, για την πολύτιμη καθοδήγηση και παρακίνηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής, μέσα σε άψογο κλίμα συνεργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, όπως και για τις πολύτιμες συμβουλές του ως καθηγητή. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σπανουδάκη Νικόλαο, ΕΔΙΠ, για την άψογη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθειά και διάθεση του χρόνου του, σε όλα τα στάδια της εργασίας, όπως και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω:

Τον κ. Ανδρονικίδη Νικόλαο, ΕΤΕΠ, για την αρχική παρακίνηση του στην επιλογή του θέματος, καθώς και τη βοήθειά του κατά τη λήψη των μετρήσεων και όποτε άλλοτε χρειάστηκε, τον κ. Οικονόμου Νικόλαο, ΕΔΙΠ για τη βοήθεια κατά τη λήψη των μετρήσεων και τη λύση αποριών, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

Την Εφορεία Αρχαιοτήτων Χανίων για τη χορήγηση της άδειας δημοσίευσης των αποτελεσμάτων και για την παροχή πληροφοριών σχετικά με την εξέλιξη της ανασκαφής.

Τους φίλους μου και συμφοιτητές Μαύρη Μάριο και Αλλοίμονο Νίκο, για την πολύτιμη βοήθειά και συμπαράστασή τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής, όπως και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Επίσης, τους φίλους μου Ηλία, Σωκράτη, Δημήτρη και Πάνο για τη στήριξή τους.

Και τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους γονείς μου Γιάννη και Ευγενία, για τη συνεχή υποστήριξη που μου παρείχαν, είτε υλική είτε ηθική, και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, όπου χωρίς αυτά δεν θα είχα καταφέρει να τις ολοκληρώσω.

**Αφιερώνεται**

*Στα ξαδέρφια μου Χριστίνα και Σάκη, και  
στον αδερφό μου Παναγιώτη.*





ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Υπουργείο Πολιτισμού  
Παιδείας & Θρησκευμάτων

Χανιά, 28.05.2015

Γενική Διεύθυνση Αρχαιοτήτων &  
Πολιτιστικής Κληρονομιάς  
Εφορεία Αρχαιοτήτων Χανίων  
Τμήμα Προϊστορικών και Κλασικών  
Αρχαιολογικών Χώρων, Μνημείων,  
Αρχαιολογικής Έρευνας και Μουσείων

Αριθ. Πρωτ.: 3349

Ταχ. Δ/ση : Στοά Βαρδινογιάννη (4<sup>ος</sup>)  
Ταχ. Κώδικας : 731 34, Χανιά Κρήτης  
Πληροφορίες : Κ. Τζανακάκη  
Τηλέφωνο : 2821044418, 2821094487  
Fax : 2821044418

ΠΡΟΣ: καθ. Κ. Βαφείδη,  
Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών  
Πόρων  
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης  
Γεωφυσικής -Χανιά

ΚΟΙΝ.: ✓ Δρ Νικ. Σπανουδάκη  
Πολυτεχνείο Κρήτης  
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης  
Γεωφυσικής

Email : efacha@culture.gr

ΘΕΜΑ: Έγκριση ή μη αιτήματος άδειας δημοσίευσης αποτελεσμάτων γεωφυσικής διασκόπησης στη  
αρχαία Απτέρα του καθ. Α. Βαφείδη

Α Π Ο Φ Α Σ Η

Έχοντας υπόψη :

1. Τις διατάξεις του άρθρου 39, του Ν.3028/2002 «Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς» (ΦΕΚ 153/28-6- 2002/Α'),
2. Την με αριθμ. ΥΠΠΟΑ/ΓΔΔΥ/ΔΟΕΠΥ/275923/40952/379/24.10.2014 (ΦΕΚ 2891/Β/29-10-2014) Απόφαση μεταβίβασης αρμοδιοτήτων του Υπουργού Πολιτισμού και Αθλητισμού στις Περιφερειακές και Ειδικές Περιφερειακές Υπηρεσίες και στα Δημόσια Μουσεία αρμοδιότητας της Γενικής Διεύθυνσης Αρχαιοτήτων και Πολιτιστικής Κληρονομιάς και στις Περιφερειακές Υπηρεσίες αρμοδιότητας της Γενικής Διεύθυνσης Αναστήλωσης, Μουσείων και Τεχνικών Έργων του Υπουργείου Πολιτισμού, όπως συμπληρώθηκε και ισχύει με την αριθμ. ΥΠΠΟΑ/ΓΔΔΥΗΔ/ΔΔΥΟΝΕ/ΤΝΕ/295789/3260/37/5/14-11-2014 (ΦΕΚ3114/Β/20-11-2014) Απόφαση
3. Την με αριθμ. 1271/22-1-2004 Εγκύκλιο της Γενικής Γραμματέως του ΥΠ.ΠΟ., με θέμα «Αρμοδιότητες των Κεντρικών Συμβουλίων και των Τοπικών Συμβουλίων Μνημείων, κατ' εφαρμογή των διατάξεων του Ν.3028/2002 και του περιεχομένου των φακέλων που υποβάλλονται προς τα Συμβούλια».
4. Το με αριθμ. εισερχ. 1780/19-03-2015 αίτημα του κ. Α. Βαφείδη με τη συνημμένη έκθεση γεωφυσικής έρευνας,
5. Το με αριθμ. εισερχ. 5720/2-10-2014 αίτημα του κ. Ν. Σπανουδάκη,
6. Την με αριθμ. 227/27-01-2014 Απόφαση της ΚΕ' ΕΠΚΑ με θέμα «Έγκριση δαπάνης για τις εργασίες γεωφυσικής διασκόπησης στο έργο «Αποκατάσταση του αρχαίου θεάτρου της Απτέρας»»,
7. Την με αριθμ. 6459π.ε./19-1-2012 Απόφαση της ΚΕ' ΕΠΚΑ με θέμα «Γεωφυσικές μετρήσεις στο χώρο του Εθνικού Σταδίου Χανίων και στην αρχαία Απτέρα»,

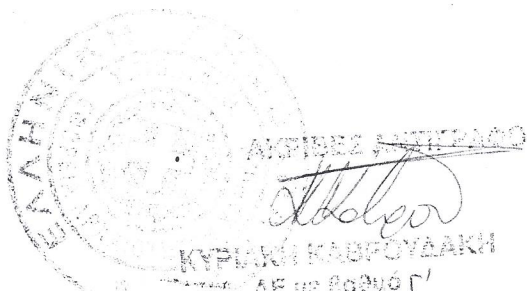
8. Την με αριθμ. 7352/11-11-2009 Απόφαση της ΚΕ΄ ΕΠΚΑ με θέμα «Διενέργεια γεωφυσικών διασκοπήσεων στην Απτέρα Δήμου Σούδας από τον κ. Α. Βαφείδη καθηγητή στο Πολυτεχνείο Κρήτης»,
9. Την με αρ. πρωτ. 1780 /07.04.2015 εισήγηση της ΕΦΑ Χανίων,
10. Την με αρ.4/27.04.2015 ομόφωνη γνωμοδότηση του Τοπικού Συμβουλίου Μνημείων Κρήτης, που μας διαβιβάστηκε με το αρ. 155/11.05.2015 έγγραφο και παραλάβαμε με το αρ. πρωτ. εισ. 3349/15.05.2015 ΕΦΑ Χανίων.

### **Αποφασίζουμε**

Την έγκριση της δημοσίευσης των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής διασκόπησης στην αρχαία Απτέρα του καθ. Α. Βαφείδη με τους ακόλουθους όρους:

1. Να προκύπτει στη μελέτη – δημοσίευση η συνεργασία με την Εφορεία μας. Κατ' αυτό τον τρόπο στον τίτλο, στο κείμενο, σε βιβλιογραφική παραπομπή να αναφέρεται ως φορέας εκτέλεσης το **Πολυτεχνείο Κρήτης σε συνεργασία με την Εφορεία Αρχαιοτήτων Χανίων.**
2. Να κατατεθεί αντίγραφο της μελέτης και της δημοσίευσης στη βιβλιοθήκη της Εφορείας Αρχαιοτήτων Χανίων.

Η Προϊσταμένη της Εφορείας  
Ελένη Παπαδοπούλου  
Αρχαιολόγος



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	ii
Πρόλογος.....	iii
Περιεχόμενα.....	v
 ΚΕΦ.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	 1
1.1    Εισαγωγή.....	1
1.2    Γεωλογικά δεδομένα.....	2
1.3    Αρχαία Άπτερα.....	3
1.4    Το θέατρο της πόλης.....	5
1.5    Ο ρόλος της γεωφυσικής στην αρχαιολογία.....	6
1.6    Γεωφυσικές μέθοδοι στην αρχαιολογία.....	7
 ΚΕΦ. 2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	 8
2.1    Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	8
2.1.1    Αρχή ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων.....	8
2.1.2    Διαφορά φάσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.....	9
2.1.3    Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη.....	10
2.2    Μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης.....	11
2.2.1    Ηλεκτρική τομογραφία.....	14
2.2.2    Κατασκευή ψευδοτομής.....	14
2.2.3    Ειδική ηλεκτρική αντίσταση εδαφών.....	16
2.3    Μέθοδος του γεωραντάρ.....	17
2.3.1    Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.....	17

2.4	Μέθοδος μαγνητικής βαθμίδας.....	18
2.4.1	Γήινο μαγνητικό πεδίο.....	19
ΚΕΦ.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....		21
3.1	Εισαγωγή.....	21
3.2	Περιοχές διασκόπησης.....	21
3.3	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων H/M μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη.....	23
3.3.1	Επεξεργασία δεδομένων κινούμενου πομπού-δέκτη.....	24
3.3.2	Εξομάλυνση ηλεκτρομαγνητικών χαρτών.....	26
3.3.3	Βελτίωση του έγχρωμου χάρτη.....	28
3.4	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων μαγνητικής βαθμίδας.....	28
3.4.1	Σύνδεση καννάβων.....	29
3.5	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ.....	30
3.5.1	Γενικά.....	31
3.5.2	GPR-PRO.....	32
3.5.3	Εφαρμογή ενίσχυσης και φίλτρων.....	33
3.5.4	Μιγαδικά χαρακτηριστικά (attributes).....	37
3.5.5	Τρισδιάστατη απεικόνιση.....	40
3.6	Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας.....	42
3.6.1	Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας.....	42
ΚΕΦ.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....		44
4.1	Περιοχή Α.....	44
4.1.1	Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη.....	45

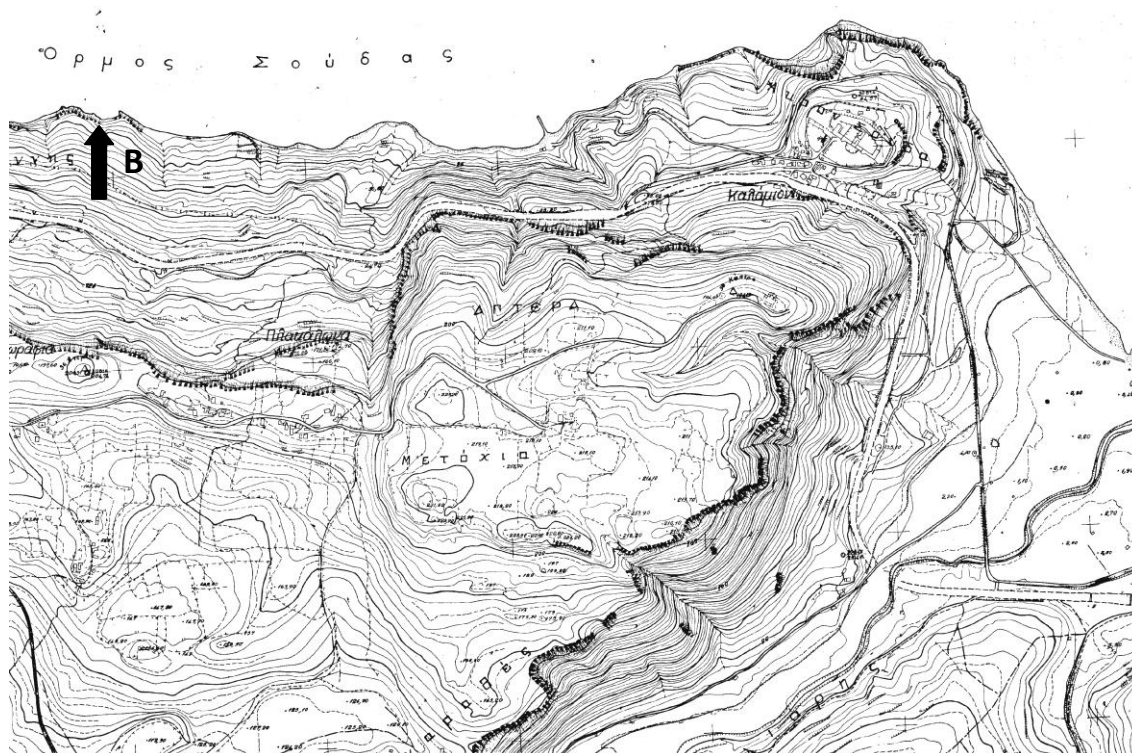
4.1.2	Μέθοδος μαγνητικής βαθμίδας.....	46
4.2	Περιοχή Β.....	47
4.2.1	Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη.....	48
4.2.2	Μέθοδος γεωραντάρ.....	49
4.2.3	Μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας.....	51
4.3	Περιοχή Γ.....	53
4.3.1	Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη.....	54
4.3.2	Μέθοδος γεωραντάρ.....	55
4.4	Περιοχή Δ.....	57
ΚΕΦ.5	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	61
5.1	Εισαγωγή.....	61
5.2	Ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων.....	61
5.2.1	Περιοχή Α.....	61
5.2.2	Περιοχή Β.....	65
5.2.3	Περιοχή Γ.....	68
5.2.4	Περιοχή Δ.....	71
ΚΕΦ.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	73
6.1	Συμπεράσματα.....	73
6.2	Προτάσεις.....	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		122

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ**

### **1.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στην τοποθεσία καθώς και στην ιστορική εξέλιξη των Αρχαίων Απτέρων. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στη γεωγραφική θέση του υπό ανασκαφή αρχαιολογικού χώρου και στο γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής, καθώς και στα εντυπωσιακά για την κατασκευή και το μέγεθος σωζόμενα αρχαία οικοδομήματα στον αρχαιολογικό χώρο, με έμφαση στο αρχαίο ρωμαϊκό θέατρο, γύρω του οποίου διεξήχθη η γεωφυσική έρευνα.

Ο αρχαιολογικός χώρος των Απτέρων βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νομού Χανίων. Βρίσκεται περίπου 14 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης των Χανίων. (Σχήμα 1.1).

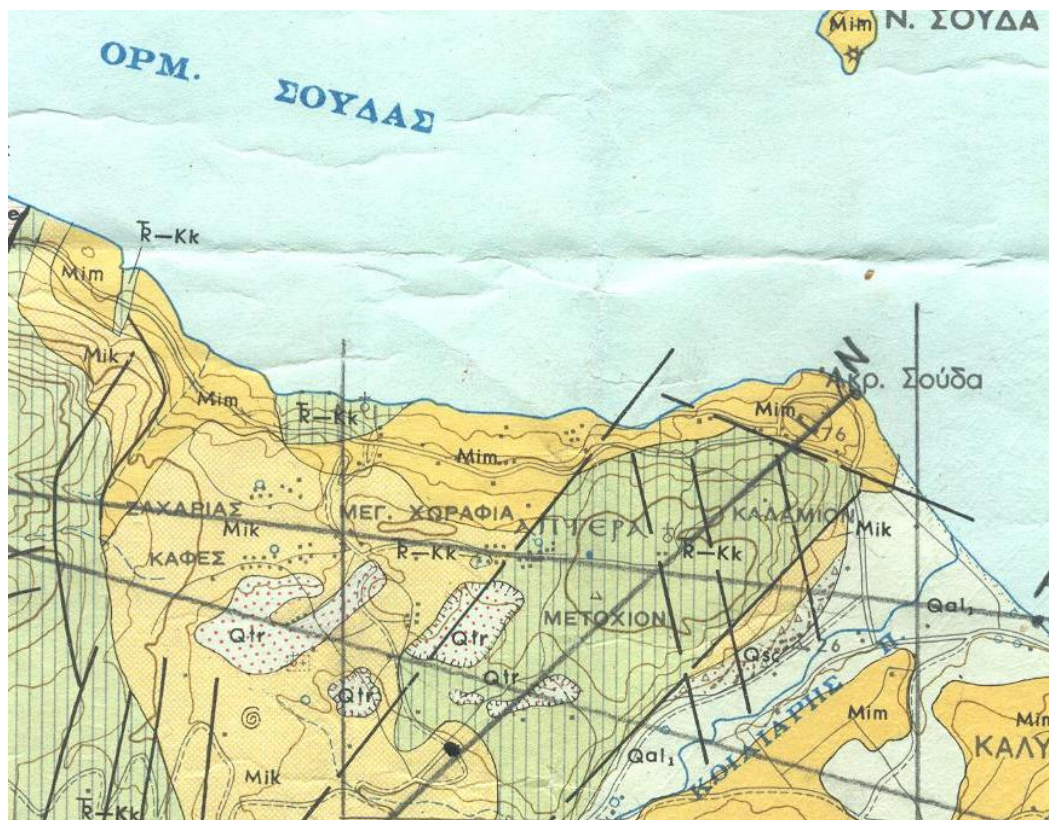


*Σχήμα 1.1: Τοπογραφικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής των αρχαίων Απτέρων, όπου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα.*



## 1.2 Γεωλογικά δεδομένα

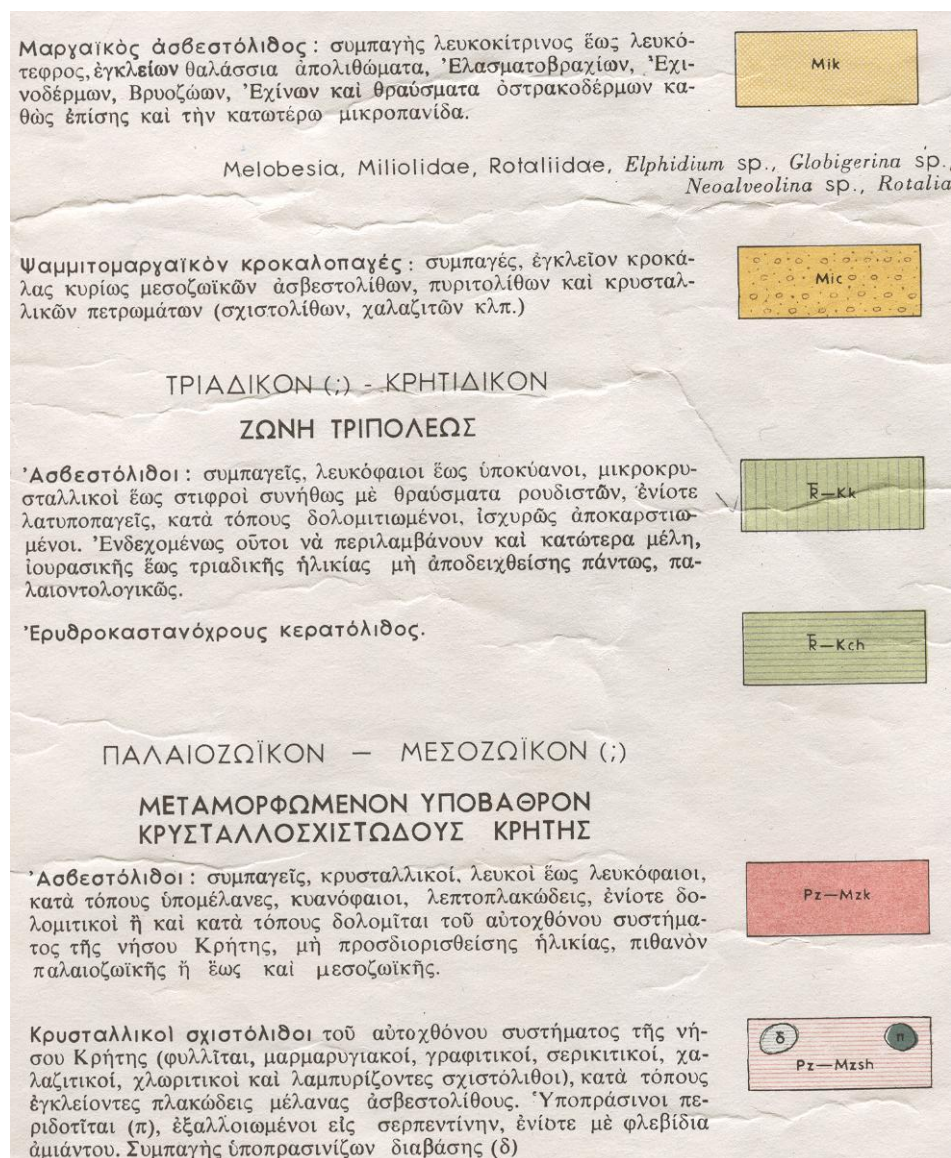
Οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στον αρχαιολογικό χώρο των Απτέρων περιγράφονται στον ακόλουθο γεωλογικό χάρτη (Σχήμα 1.2α):



**Σχήμα 1.2α :** Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής των αρχαίων Απτέρων, όπου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα.

Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη του σχήματος 1.2α και το τμήμα του υπομνήματος του (Σχήμα 1.2β), το γεωλογικό υπόβαθρο στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου των Απτέρων αποτελείται από ασβεστόλιθους του Κρητιδικού και ενδεχομένως και του Τριαδικού. Επίσης κατά τόπους εμφανίζεται επιφανειακά ο μαργαϊκός ασβεστόλιθος.

Το πεδίο όπου πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική έρευνα, ήταν καλυμμένο από λεπτό εδαφικό κάλυμμα αργιλικών ορυκτών. Οι περισσότερες αρχαίες δομές εδράζονται στον ασβεστόλιθο.



Σχήμα 1.2β : Μέρος του υπομνήματος του γεωλογικού χάρτη του σχήματος 1.2α.

### 1.3 Αρχαία Άπτερα

Η αρχαία πόλη των Απτέρων εκτείνεται στο χαμηλό ύψωμα Παλαιόκαστρο (υψόμετρο 200μ.) 14km νοτιοανατολικά των Χανίων, νότια της Σούδας. Η στρατηγική θέση της πόλης με τα δυο λιμάνια της, τη Μινώα ( σημερινό Μαράθι ) και την Κίσαμο ( κοντά στις σημερινές Καλύβες ) στην είσοδο του φυσικού κόλπου, που εξασφάλιζε τη δυνατότητα του ελέγχου στη διακίνηση του εμπορίου, ευνόησε την ανάπτυξη της. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίστηκε από τον ιστορικό Γ. Σβορώνο η πιο εμπορική πόλη της Κρήτης και στις περιόδους ακμής της, μία από τις πιο ισχυρές.



*Η περίοδος της μεγαλύτερης ακμής της τοποθετείται στον 4ο αι. π.Χ., εποχή κατά την οποία ανέπτυξε την εμπορική της δραστηριότητα, κυρίως μέσω του ελέγχου του κόλπου της Σούδας, αλλά και την εσωτερική και εξωτερική πολιτική, όπως μαρτυρούν οι επιγραφές. Η περίοδος της ρωμαιοκρατίας άλλαξε το χαρακτήρα της πόλης, αλλά, όπως προκύπτει σιγά-σιγά από τις ανασκαφές, διήνυσε νέα περίοδο ακμής σε επίπεδο ανοικοδόμησης τουλάχιστον, κατά τον 1ο -2ο αι. μ.Χ. Ο σεισμός του 365μ.Χ. που κατέστρεψε όλη την Κρήτη, ισοπέδωσε και τα Απτερα.*

*Λίγο μετά τα μέσα του 4<sup>ου</sup> αιώνα π. Χ. η πόλη οχυρώθηκε με ισχυρό τείχος μήκους 3.480m., το οποίο περιβάλλει ολόκληρο το πλάτωμα του λόφου.*



*Εικόνα 1.1: Το ρωμαϊκό λουτρό και μέρος του σωζόμενου τείχους.*

*Οι μέχρι τώρα έρευνες δείχνουν ότι η συνέχεια της κατοίκησης είναι συρρικνωμένη, μέχρι τον επόμενο σεισμό του 7ου αι. μ.Χ. και τελικά τις επιδρομές των Σαρακηνών που ήταν η αιτία της εγκατάλειψής της ως πόλης. Τα εντυπωσιακότερα αρχιτεκτονικά λείψανα είναι: η οχύρωση του 4ου αι. π.Χ., με καλύτερα σωζόμενο το δυτικό της τμήμα, εν μέρει ανακταμένο στο πλαίσιο του Γ'ΚΠΣ-ΠΕΠ Κρήτης, ταφικά μνημεία, ηρώο, δύο μεγάλες ρωμαϊκές δεξαμενές, οι οποίες αντίστοιχα τροφοδοτούσαν δύο μεγάλα ρωμαϊκά βαλανεία, ένας δίχωρος ναός του 5ου π.Χ αι. και μια ρωμαϊκή οικία με περίστυλη αυλή. Σώζονται επίσης, πλησίον των αρχαιοτήτων δύο φρούρια εξαιρετικού ιστορικού ενδιαφέροντος που κατασκευάστηκαν την περίοδο της Τουρκοκρατίας το φρούριο "Παλαίικαστρο" το οποίο κτίστηκε από τους Τούρκους με αφορμή την*

επανάσταση του 1866 και το φρούριο “Ιτζεδίν” στην τοποθεσία Καλάμι το οποίο κτίστηκε το 1872 και διέθετε στρατώνες, νοσοκομείο και άλλες εγκαταστάσεις. (Νινιού 2011)



Εικόνα 1.2: Η θολωτή τρίκλιτη δεξαμενή και το εσωτερικό της

#### 1.4 Το θέατρο της πόλης

Το θέατρο των αρχαίων Απτέρων είναι κατασκευασμένο σε φυσική πλαγιά, στραμμένο προς νότο με άπλετη θέα προς τα Λευκά Όρη. Βρίσκεται κοντά στο νότιο τείχος της πόλης και σε κοντινή απόσταση από τη νοτιοανατολική της είσοδο. Το μνημείο έχει εν μέρει αποκαλυφθεί, ενώ παράλληλα οι εργασίες ανασκαφής και συντήρησης συνεχίζονται. Ανήκει στη ρωμαϊκή φάση, αλλά έχουν εντοπιστεί και ίχνη της ελληνιστικής περιόδου. Έχει υποστεί σοβαρές ζημιές σε νεότερα χρόνια, από τη λειτουργία κυκλικής ασβεστοκαμίνου που είναι κατασκευασμένη με πρόχειρη λασπόχτιστη αργολιθοδομή. Σε σημεία της υπάρχουν ενσωματωμένα αρχιτεκτονικά μέλη του θεάτρου, μεταξύ των οποίων και μια επιγραφή της ελληνιστικής περιόδου. Μετά το πέρας της αποκατάστασης, το αρχαίο θέατρο θα μπορεί να φιλοξενεί έως και 300 θεατές. (Νινιού 2011)



*Εικόνα 1.3: Το ρωμαϊκό θέατρο των Αρχαίων Απτέρων.*

### **1.5 Ο ρόλος της γεωφυσικής στην αρχαιολογία**

Η προσεκτική και διακριτική ανασκαφή των αρχαιολογικών χώρων που απαιτείται στις αρχαιολογικές μελέτες, απαιτεί χρόνο, ο οποίος συνήθως δεν είναι διαθέσιμος στους αρχαιολόγους για να μπορέσουν να αξιολογήσουν καλύτερα το πεδίο. Αποτέλεσμα είναι η ανάγκη διεξαγωγής περισσότερων αρχαιολογικών τομών, αυξάνοντας το κόστος. Επίσης στην αρχαιολογία υπάρχει το παράδοξο, ότι για την προσεκτική ανάκτηση των υποεπιφανειακών δεδομένων απαιτείται και η συστηματική καταστροφή του γύρω πεδίου, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια σημαντικών πληροφοριών. Η γεωφυσική έρευνα προηγείται της ανασκαφής και συμβάλλει στην αντιμετώπιση και των τριών αυτών προβλημάτων: υψηλά κόστη, έλλειψη χρόνου, και καταστροφή του πεδίου.

Οι μη καταστροφικές γεωφυσικές μέθοδοι, όπως είναι η μέθοδος του γεωραντάρ, αποτελούν ένα γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο απεικόνισης των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, προσφέροντας σημαντική βοήθεια στον εντοπισμό πιθανών αρχαιολογικών στοιχείων. Στο πεδίο, η γεωφυσική χαρτογράφηση δίνει τη δυνατότητα στον αρχαιολόγο να μελετήσει την περιοχή και να ξεχωρίσει τις περιοχές ενδιαφέροντος. Αυτό τον βοηθάει να καθορίσει τις προτεραιότητες στην ανασκαφή που θα παράξουν τα περισσότερα πολιτισμικά δεδομένα στο βέλτιστο χρόνο και κόστος.

Σε περιπτώσεις όπου τα αρχαιολογικά πεδία ή στοιχεία είναι ήδη γνωστά, η λεπτομερής δισδιάστατη η τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την αδιατάρακτη ή *in situ* διαμόρφωση των αρχαιοτήτων καθώς και για την στρωματογραφία της τοποθεσίας.

Ορισμένοι αρχαιολογικοί χώροι δεν δύναται να ανασκαφούν. Το πεδίο είναι πιθανό να έχει καλυφθεί από μοντέρνα ανάπτυξη, είτε να είναι δεσμευμένο για μελλοντική δόμηση, είτε να είναι ιστορικής και πολιτισμικής σημασίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι απεικονίσεις που παρέχουν οι μη καταστροφικές γεωφυσικές μέθοδοι μπορεί να είναι ο μόνος τρόπος αναγνώρισης και καταγραφής του υποεπιφανειακού χώρου.

## **1.6 Γεωφυσικές μέθοδοι στην αρχαιολογία**

Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην αρχαιολογία, είναι κατά βάση όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στη γεωλογία, τη μηχανική και την αναζήτηση κοιτασμάτων. Ωστόσο, οι αρχαιολογικές εφαρμογές παρουσιάζουν ξεχωριστές ιδιομορφίες, που απαιτούν κατάλληλο σχεδιασμό της γεωφυσικής διασκόπησης και ανάλογη ρύθμιση του εξοπλισμού.

Συνήθως, οι θαμμένες αρχαιολογικές κατασκευές βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια σε μικρό βάθος, πράγμα που καθιστά ευνοϊκή τη ρύθμιση του εξοπλισμού έτσι ώστε να περιορίζεται το βάθος διασκόπησης και να αυξάνεται η ευκρίνεια, εν αντιθέσει με τις γεωλογικές εφαρμογές, που στοχεύουν στον εντοπισμό μεγάλων δομών και συνιστούν μεγάλα βάθη διασκόπησης.

Οι πιο συνήθεις μέθοδοι που εφαρμόζονται στην αρχαιολογία και που εφαρμόστηκαν και στην παρούσα διασκόπηση είναι:

- Μαγνητική μέθοδος
- Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος
- Μέθοδος του γεωραντάρ
- Μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, κατά τη γεωφυσική διασκόπηση γύρω από το ρωμαϊκό θέατρο στον αρχαιολογικό χώρο των Απτέρων.

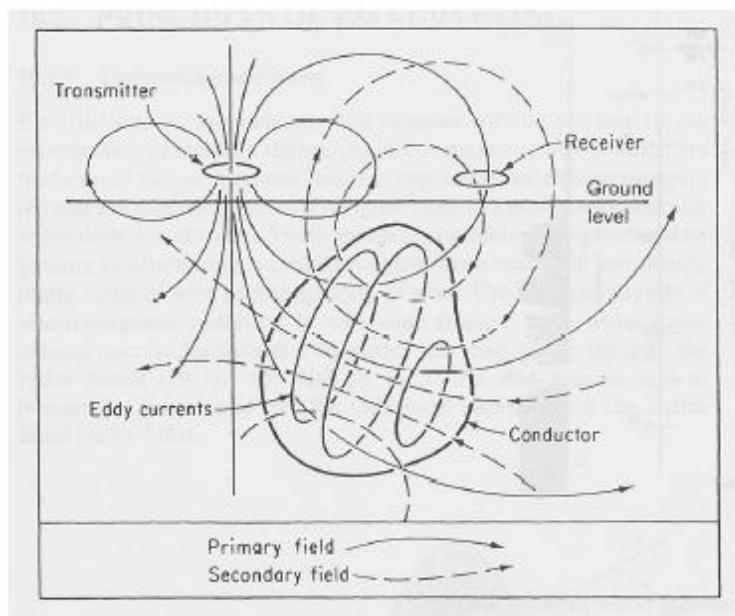
#### **2.1 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος**

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος του κινούμενου πομπού-δέκτη χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να χαρτογραφηθούν τα επιφανειακά στρώματα του υπεδάφους και να επισημανθούν οποιεσδήποτε αξιοσημείωτες μεταβολές που παρατηρούνται στην τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά γρήγορη και προσφέρει άμεσα συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα φυσικά συσχετίζονται με τις υπόλοιπες γεωφυσικές τεχνικές ώστε να προκύψουν τελικά οι περιοχές ενδιαφέροντος.

##### **2.1.2 Αρχή Ηλεκτρομαγνητικών Μεθόδων**

Κατά την εφαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων παράγεται στην επιφάνεια της γης (φυσικά ή τεχνητά) πρωτεύον ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο φθάνει απευθείας σε δέκτη στην επιφάνεια της γης. Παράλληλα, το κύμα συνεχίζει την πορεία του μέσα στο υπέδαφος και σε περίπτωση που συναντήσει ηλεκτρικά αγώγιμο σώμα, επάγει σε αυτό ηλεκτρικό ρεύμα με αποτέλεσμα τη γένεση δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό κύμα φθάνει επίσης στο δέκτη και συμβάλλει με το πρωτεύον (Εικόνα 2.1).

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ το δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει την ίδια συχνότητα με το πρωτεύον, έχει πολύ μικρότερο πλάτος, διαφορετική διεύθυνση και παρουσιάζει διαφορά φάσης. Αυτά τα μεγέθη επηρεάζονται από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα επιφανειακά κυρίως στρώματα του φλοιού της γης.



**Εικόνα 2.1:** Δημιουργία δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος από αγώγιμο σώμα.

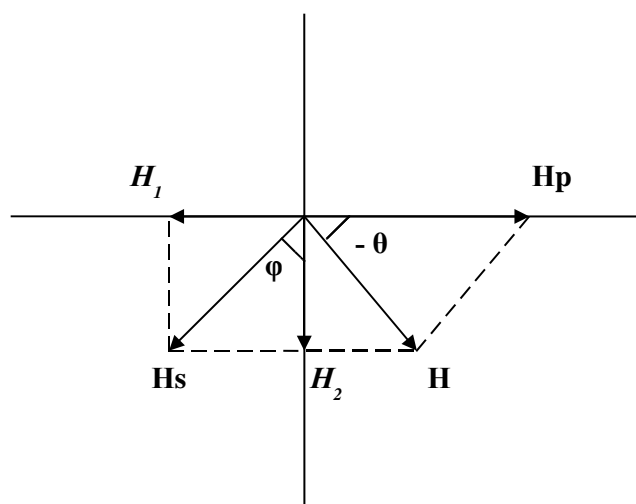
Ο πομπός των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, το αγώγιμο ηλεκτρικό σώμα μέσα στη γη και ο δέκτης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων θεωρούνται ως πηνία. Το πηνίο του πομπού διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και παράγει το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο το οποίο έχει ορισμένη ένταση  $H_p$  στη θέση του πομπού. Το πρωτεύον πεδίο έντασης  $H_p$  επάγει ηλεκτρικό ρεύμα στο αγώγιμο σώμα μέσα στο έδαφος το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί δευτερογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $H_s$ , διαφορετικής φάσης, διεύθυνσης και πλάτους από το πρωτεύον. Στη συνέχεια το συμβαλλόμενο πρωτεύον και δευτερογενές μαγνητικό πεδίο επάγει ρεύμα στο πηνίο του δέκτη το οποίο ρεύμα έχει μέγιστη τιμή όταν το επίπεδο του πηνίου είναι κάθετο στη συνισταμένη  $H$  των διανυσμάτων  $H_s$  και  $H_p$ .

### 2.1.3 Διαφορά Φάσης μεταξύ Πρωτεύοντος και Δευτερεύοντος Μαγνητικού Πεδίου

Η διαφορά φάσης  $\Phi$  μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου (της έντασής των) εξαρτάται από τη γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους. Για αυτό το λόγο, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι που στοχεύουν στη μέτρηση της διαφοράς φάσης  $\Phi$ .



Στο διάγραμμα φάσεων (Σχήμα 2.1) το διάνυσμα  $H_p$  αντιστοιχεί στη διεύθυνση της έντασης του πρωτεύοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος, το  $H_s$ , του δευτερεύοντος και το  $H$  της συνισταμένης αυτών. Η προβολή του  $H_s$  στη διεύθυνση του  $H_p$  έχει μέτρο  $H_1$ , διαφορά φάσης  $\pi$  με την  $H_p$  και καλείται πραγματική συνιστώσα (in phase) του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου. Η προβολή του  $H_s$  πάνω στην κάθετη στο  $H_p$  ευθεία έχει μέτρο  $H_2$ , παρουσιάζει διαφορά φάσης  $\pi/2$  με την  $H_p$  και ονομάζεται φανταστική συνιστώσα (quadrature) του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα φάσεων.

#### 2.1.4 Μέθοδος Κινούμενου Πομπού – Δέκτη

Στη μέθοδο του κινούμενου πομπού – δέκτη μελετάται η χρονική μεταβολή του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το όργανο μετράει την πραγματική και φανταστική συνιστώσα του δευτερογενούς μαγνητικού πεδίου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος γραμμών μελέτης ή σε κάνναβο. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετακινείται όλη η μονάδα, η οποία περιλαμβάνει το πομπό και το δέκτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Η φανταστική συνιστώσα που μετράται με το όργανο δίνει πληροφορίες για την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους και χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση αυτού, ενώ η πραγματική συνιστώσα παρέχει περισσότερα στοιχεία για την ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων (καλώδια, σωλήνες, βαρέλια) στο υπέδαφος. Η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που υπολογίζεται είναι σε mSiemens/m.

## 2.2 Μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν σαν στόχο τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Η μετρούμενη ποσότητα είναι η ηλεκτρική τάση, από την οποία επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη από τις ηλεκτρικές μεθόδους τόσο από τη λειτουργική πλευρά όσο και από τη θεωρητική πλευρά. Η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος που προκύπτει από αυτή τη μέθοδο, ονομάζεται γεωηλεκτρική δομή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία τεχνητού ηλεκτρικού πεδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους. Επομένως από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

όπου  $R$  = αντίσταση κυλινδρικού αγωγού στα άκρα του οποίου εφαρμόζεται ρεύμα έντασης  $I$ .

$A$  = εμβαδόν επιφάνειας αγωγού.

$L$  = μήκος κυλινδρικού αγωγού.

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, είναι το  $\Omega m$  (ohm·meter). Μερικές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα  $1 \Omega cm$  όπου  $1 \Omega m = 100 \Omega cm$ . Το αντίστροφο,  $\sigma = 1/\rho$ , της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα το Siemens/m.

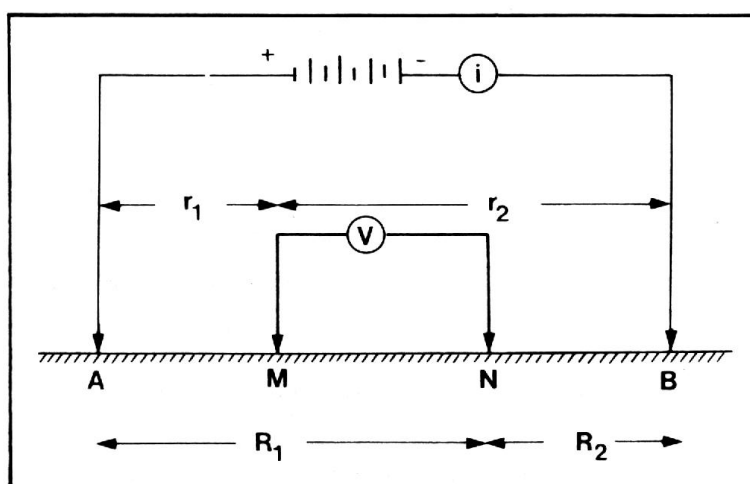
Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται τυπική διάταξη ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Υπάρχουν τα ηλεκτρόδια ρεύματος  $AB$  που είναι συνδεδεμένα με το αμπερόμετρο για την μέτρηση της έντασης του



ρεύματος που εισάγεται στο έδαφος, ενώ τα ηλεκτρόδια MN είναι τα ηλεκτρόδια τάσης, που συνδέονται με βολτόμετρο για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Εφαρμόζοντας το νόμο του ohm προκύπτει ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = 2\pi \frac{V_{MN}}{I} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$$

Η παραπάνω σχέση προέκυψε θεωρώντας ότι τα επιφανειακά στρώματα της Γης είναι ομογενή, αυτό όμως δεν ισχύει καθώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι σταθερή σε αυτά. Η αντίσταση που υπολογίζεται από την προηγούμενη σχέση εκφράζει το μέσο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, και ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ( $\rho_a$ ).

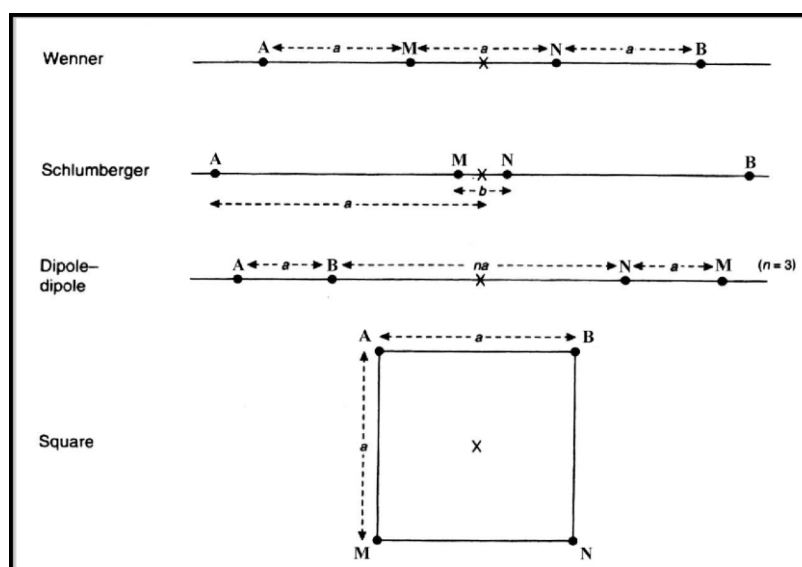


**Σχήμα 2.2:** Διάταξη ηλεκτροδίων ρεύματος ( $A, B$ ) και δυναμικού ( $M, N$ ).

Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος και από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός και οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων.

Στη διάταξη Wenner ισχύει  $AM = MN = NB = a$  δηλαδή τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις (Σχήμα 2.3). Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$



Σχήμα 2.3 : Διατάξεις ηλεκτροδίων (Reynolds, 1997).

Στη διάταξη διπόλου – διπόλου (Σχήμα 2.3) τα ηλεκτρόδια ρεύματος σχηματίζουν το δίπολο ρεύματος και απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $a$ . Αντίστοιχα, τα ηλεκτρόδια δυναμικού σχηματίζουν το δίπολο δυναμικού με απόσταση  $a$ . Η απόσταση των διπόλων είναι  $na$  (ακέραιο πολλαπλάσιο του  $a$ ). Ισχύει ότι

$$\rho_a = \pi a n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}$$

όπου ο γεωμετρικός συντελεστής είναι  $\pi a n(n+1)(n+2)$ .

Οι κυριότεροι παράγοντες για την επιλογή της διάταξης στην ηλεκτρική τομογραφία είναι το μέγιστο βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα. Οι διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται δίπολα (διπόλου – διπόλου, πόλου – διπόλου) έχουν μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων σε σχέση

με τις υπόλοιπες μεθόδους. Οι διατάξεις Wenner, Schlumberger και διπόλου – διπόλου έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα.

### 2.2.1 Ηλεκτρική τομογραφία

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι μεταβολές κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως ρήγματα.

Μία σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Συλλέγονται επομένως τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της γραμμής μελέτης και για διάφορα βάθη. Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

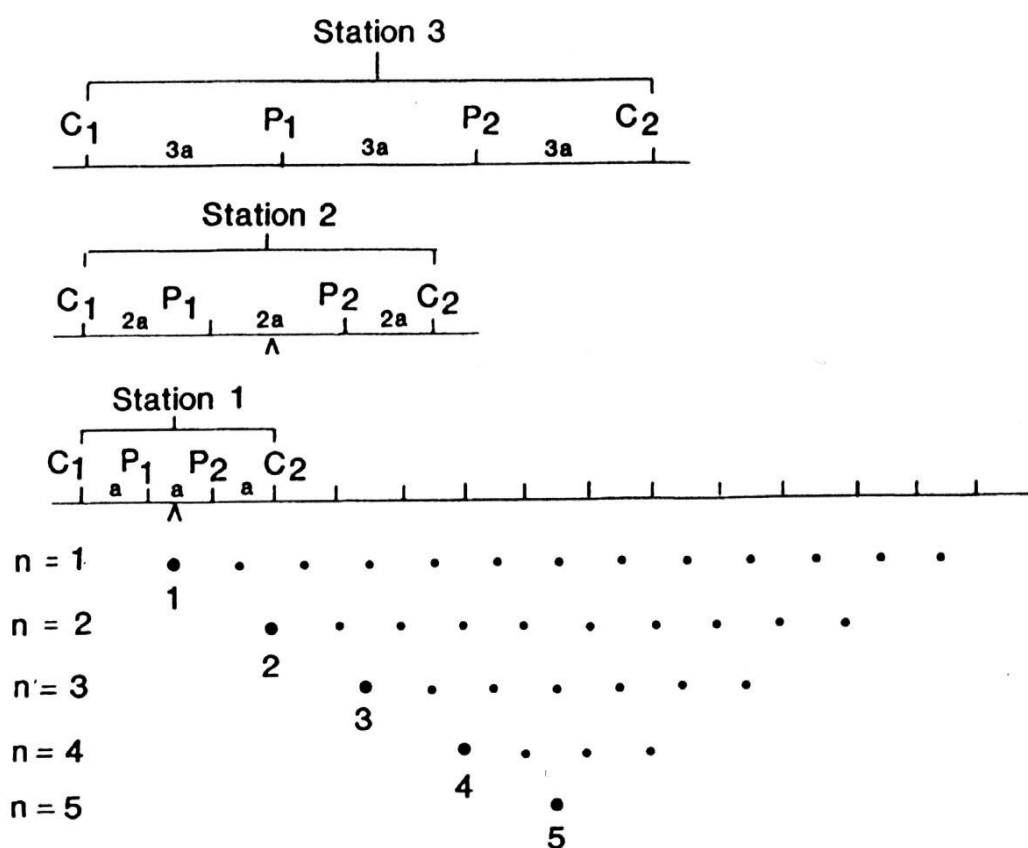
Στη συγκεκριμένη διασκόπηση για την πραγματοποίηση των μετρήσεων επιλέχτηκε η διάταξη διπόλου – διπόλου λόγω του ότι περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τις άλλες υπάρχουσες διατάξεις.

### 2.2.2 Κατασκευή ψευδοτομής

Για τη συλλογή των τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στη διάταξη διπόλου – διπόλου, ηλεκτρόδια τοποθετούνται κατά μήκος ευθείας γραμμής με αριθμητική σειρά, διατηρώντας σταθερή απόσταση  $a$  μεταξύ τους. Για την πρώτη μέτρηση τα ηλεκτρόδια 1 και 2 αποτελούν το δίπολο ρεύματος, ενώ τα 3 και 4 αποτελούν το δίπολο δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των δύο διπόλων είναι  $a$ . Στη συνέχεια τα ηλεκτρόδια 2 και 3 αποτελούν το δίπολο ρεύματος και τα 4 και 5 το δίπολο δυναμικού, και ούτω καθεξής μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλα τα ηλεκτρόδια.

Οι τιμές που συλλέχθηκαν μέχρι τώρα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Η απόσταση που χωρίζει τα δύο δίπολα είναι πάντα ακέραιο πολλαπλάσιο του  $a$  ( $na$ ). Αυξάνοντας την απόσταση αυτή, οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετούνται σε επίπεδο που βρίσκεται βαθύτερα από το προηγούμενο. Στην περίπτωση αυτή, τα ηλεκτρόδια 1 και 2 αποτελούν το δίπολο ρεύματος και τα ηλεκτρόδια 4 και 5 αποτελούν το δίπολο δυναμικού. Η συλλογή των δεδομένων συνεχίζεται μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλα τα ηλεκτρόδια και στη συνέχεια αυξάνεται ξανά η απόσταση μεταξύ των διπόλων, όπου λαμβάνονται τα δεδομένα βαθύτερου επιπέδου. (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Σχηματική παράσταση κατασκευής ψευδοτομής (Reynolds, 1997)

Επειδή το δίπολο δυναμικού σταδιακά απομακρύνεται από το δίπολο ρεύματος, οι μετρήσεις αρχίζουν να περιέχουν όλο και περισσότερο θόρυβο. Για αξιόπιστα αποτελέσματα η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του  $n$  είναι 8. Τα δεδομένα τοποθετημένα σε επίπεδο αποτελούν την ψευδοτομή του υπεδάφους

Το επόμενο βήμα είναι η αντιστροφή των δεδομένων με την οποία γίνεται ο υπολογισμός των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις.

### 2.2.3 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση εδαφών

Οι χαρακτηριστικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι οποίες προέκυψαν από γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις αναφοράς σε θέσεις όπου τα πετρώματα εμφανίζονται στην επιφάνεια καθώς και από προηγούμενες μελέτες (Βαφείδης και συνεργάτες, 1991, Βαφείδης και Αμολοχίτης 1992), συνοψίζονται στον πίνακα 1.

*Πίνακας 1: Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων*

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ( $\Omega\text{m}$ )
<b>ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ</b>	80-250
<b>ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ</b>	
Άργιλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
<b>ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ</b>	
Φλύσσης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500

## 2.3 Μέθοδος του γεωραντάρ

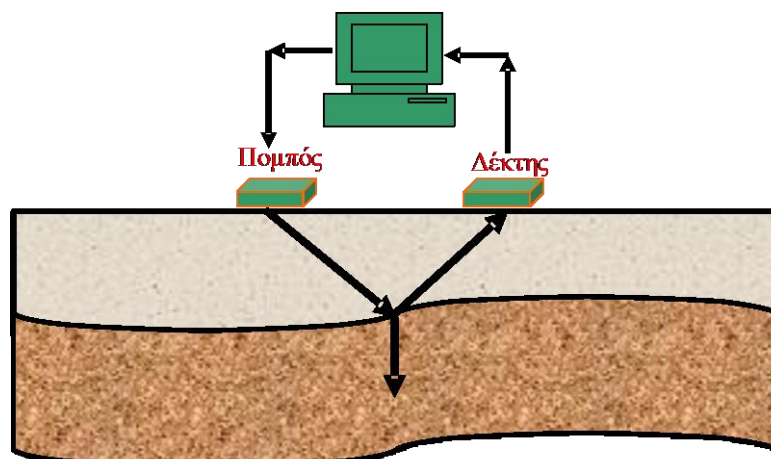
Το γεωραντάρ είναι μια υψηλής ευκρίνειας ηλεκτρομαγνητική τεχνική η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία 30 χρόνια κυρίως για τη μελέτη του ρηχού υπεδάφους, τον έλεγχο του οδοστρώματος, την εξέταση αστοχιών σε γέφυρες και κατασκευές. Η βασική αρχή λειτουργίας καθώς και η θεωρία του γεωραντάρ παρουσιάζουν πολλά κοινά με τις σεισμικές μεθόδους.

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν να διακριθούν ουσιαστικά σε δύο κατηγορίες. Για γεωλογικούς σκοπούς, όπου το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα και όπου χρησιμοποιούνται κεραίες των 50MHz ή και μεγαλύτερες. Για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing, NDT) όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο χρησιμοποιούνται κεραίες των 500-2000MHz.

Η ικανότητα του γεωραντάρ να προσφέρει λεπτομερείς πληροφορίες για το ρηχό υπέδαφος έχει αναφερθεί σε πλήθος εφαρμογών. Αυτές αφορούν στον εντοπισμό ρωγμών και αστοχιών σε πετρώματα, τον προσδιορισμό την στρωματογραφίας, αρχαιολογική έρευνα, τον έλεγχο της ποιότητας ασφαλοτάπητα, διάβρωση, προσδιορισμό της διαπερατότητας, εντοπισμό υγρών ρύπων στο υπέδαφος, τον εντοπισμό εγχοίλων και άλλες.

### 2.3.1 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Το γεωραντάρ εκπέμπει μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό από κεραία-πομπό, ο οποίος ταξιδεύει στο υπέδαφος με ταχύτητα η οποία εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού (είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ηλεκτρικής διαπερατότητας). Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο υπέδαφος ωσότου συναντήσει αντικείμενο με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες σε σχέση με το περιβάλλον του. Το κύμα ανακλάται στο αντικείμενο και φτάνει στην κεραία-δέκτη όπου και καταγράφεται (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη ανεξαρτήτως της διαδρομής του, ονομάζεται διπλός χρόνος διαδρομής (Two-Way Travel Time). Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νάνο-δευτερόλεπτο (ns). Αν ο δέκτης αρχίσει να καταγράφει τη στιγμή που εκπέμπει ο πομπός, δυο κύρια είδη κυμάτων πρόκειται να καταγραφούν. Το πρώτο είδος αφορά το κύμα που ταξιδεύει απ' ευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Αυτό το κύμα αφενός μεν φτάνει πρώτο επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου δε έχει μεγάλο πλάτος αφού δεν υφίσταται εξασθένιση. Το δεύτερο είδος κύματος που καταγράφεται αφορά αυτό που διαδίδεται στο υπέδαφος. Η καταγραφή του πλάτους των κυμάτων ονομάζεται ίχνος και αποτελεί το ιστορικό της διαδρομής τους από τον πομπό στον δέκτη δια μέσου του υλικού, περιλαμβάνοντας όλες τις διαδρομές που ακολούθησε.

Όπως αναφέρθηκε, όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα αλλάζει κατεύθυνση δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει εμπόδια τα οποία το αναγκάζουν να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντήχηση συμβαίνει όταν το κύμα παγιδευτεί σε κάποιο γεωλογικό στρώμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κύμα ανακλάται πολλές φορές με συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών ανακλάσεων.

## 2.4 – Μέθοδος μαγνητικής βαθμίδας

Οι μαγνητικές μέθοδοι βασίζονται στη θεωρία δυναμικών πεδίων. Αντίθετα από την βαρυτική θεωρία, στη μαγνητική θεωρία η ένταση του μαγνητικού πεδίου όπου είναι

το μετρούμενο μέγεθος, είναι χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος. Η μαγνητική μέθοδος διασκόπησης βασίζεται στη μέτρηση των μαγνητικών ανωμαλιών που οφείλονται σε διαφορές της μαγνήτισης των διαφόρων πετρωμάτων. Μαγνητικές δυνάμεις δεν ασκούνται σε όλα τα σώματα. Έτσι είναι δυνατόν μαγνητισμένα σώματα, να διακριθούν από τα περιβάλλοντα πετρώματα, με τη μέτρηση των μαγνητικών τους ιδιοτήτων.

Η μαγνήτιση των σωμάτων οφείλεται τόσο στη μόνιμη μαγνήτισή τους όσο και από την επίδραση του γήινου μαγνητικού πεδίου. Στην εφαρμογή στην αρχαιολογία συνήθως πραγματοποιούνται μετρήσεις της κατακόρυφης συνιστώσας ή της πρώτης παραγώγου της (μαγνητική βαθμίδα) του τοπικού μαγνητικού πεδίου της γης. Έτσι είναι δυνατό να ανιχνευθούν μεταλλικά αντικείμενα καθώς και αντικείμενα με αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα.

Η βασική μονάδα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου είναι το nanoTesla/m :  $1\text{nT}=10^{-9}\text{T}=1\gamma=10^{-5}\text{Oersted}=10^{-5}\text{Gauss}$ .

#### 2.4.1 Γήινο μαγνητικό πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο της Γης (Σχήμα 2.6) έχει διεύθυνση από βορρά προς νότο και μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και από τόπο σε τόπο. Αποτελείται από τρία μέρη : το κύριο μαγνητικό ή εσωτερικό πεδίο (που οφείλεται σε διεργασίες στο εσωτερικό της γης), το εξωτερικό ή περιφερειακό πεδίο και το τοπικό πεδίο. Το εσωτερικό πεδίο μεταβάλλεται πολύ αργά ως προς το χρόνο, ενώ το περιφερειακό πιο γρήγορα. Από την άλλη πλευρά το τοπικό πεδίο είναι σταθερό. Αυτό που ενδιαφέρει τις μαγνητικές διασκοπήσεις είναι ο διαχωρισμός του τοπικού από το περιφερειακό πεδίο, γιατί περιέχει τη σημαντική πληροφορία. Αρκετές μέθοδοι επεξεργασίας γεωφυσικών δεδομένων έχουν αυτό το στόχο.

Το εσωτερικό πεδίο οφείλεται σε διεργασίες στο εσωτερικό της γης και το περιφερειακό στην δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το τοπικό πεδίο σχετίζεται με μαγνητικές ανωμαλίες που υπάρχουν στα ανώτερα στρώματα του φλοιού της γης ( $\sim < 40\text{ Km}$ ). Είναι φανερό λοιπόν πως η μέτρηση του τοπικού πεδίου είναι σημαντική και οι τοπικές μαγνητικές ανωμαλίες αποτελούν στόχο των μαγνητικών διασκοπήσεων. Σε τοπική κλίμακα, αβαθή





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

### ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται η διαδικασία της συλλογής και η μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων για κάθε γεωφυσική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη γεωφυσική μελέτη γύρω από το ρωμαϊκό θέατρο των Απτέρων, και παρουσιάζεται μέρος των αποτελεσμάτων τους.

Στα πλαίσια της γεωφυσικής έρευνας δημιουργήθηκαν κάρναβοι μετρήσεων σε 4 περιοχές με σκοπό τη διεξαγωγή δύο διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων στην κάθε μία, όπου αυτό ήταν εφικτό, καθώς λόγω φυσικών εμποδίων στο πεδίο, κάποιες περιοχές χαρακτηρίστηκαν δύσβατες και δεν επέτρεψαν τη χρήση συγκεκριμένων μεθόδων. Η διεξαγωγή διαφορετικών μεθόδων σε μια περιοχή εξυπηρετεί στην καλύτερη και πιο εξακριβωμένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Συνολικά, η γεωφυσική έρευνα που διεξήχθη περιλάμβανε τη συνολική κάλυψη έκτασης 3268 m<sup>2</sup> και συγκεκριμένα:

- 2720 m<sup>2</sup> με τη μέθοδο κινούμενου πομπού – δέκτη
- 2128 m<sup>2</sup> με τη μέθοδο γεωραντάρ
- Χαρτογράφηση μαγνητικής βαθμίδας 1140 m<sup>2</sup>
- Δύο συμπληρωματικές Ηλεκτρικές τομογραφίες μήκους 20m η καθεμία.

#### 3.2 Περιοχές διασκόπησης

Η επιλογή των περιοχών διασκόπησης έγινε από τους αρχαιολόγους με σκοπό τον εντοπισμό πιθανών θαμμένων αρχαίων τοιχοδομών ή άλλων ανθρωπογενών δομών, όπως το πλακόστρωτο αρχαίο μονοπάτι που συνέδεε την αρχαία πόλη με το θέατρο. Σημαντικές ενδείξεις για την επιλογή των περιοχών διασκόπησης, αποτέλεσαν συγκεκριμένα ανεσκαμμένα ευρήματα από πραγματοποιημένες επιλεκτικές ανασκαφές, όπως ο τοίχος ο οποίος εμφανίζεται σε βάθος ~0.30m καθώς και το τμήμα του πλακόστρωτου μονοπατιού στην Εικόνα 3.1.



*Εικόνα 3.1: Τμήμα του πλακόστρωτου αρχαίου μονοπατιού (βάθος ~1m) και της διπλανής του αρχαίας τοιχοδομής (βάθος εμφάνισης ~0.30m)*

Σχεδιάστηκαν συνολικά τέσσερις κάνναβοι προσανατολισμού Νότου-Βορρά με προσανατολισμό των γραμμών μελέτης Δύση-Ανατολή και ένας κάνναβος προσανατολισμού Δ-Α με προσανατολισμό των γραμμών μελέτης Ν-Β. Η επιλογή των διαστάσεων των καννάβων έγινε με βάση την επαρκή κάλυψη κάθε περιοχής σε συνδυασμό με τη μορφολογία του χώρου. Ο προσανατολισμός κάθε κάνναβου και ο υπολογισμός των συντεταγμένων των κορυφών του έγινε με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού από τοπογράφο εργαζόμενο στον αρχαιολογικό χώρο. Η επιλογή του βήματος διασκόπησης για κάθε μέθοδο, της ισαπόστασης των γραμμών μελέτης, καθώς και η ρύθμιση των παραμέτρων του εξοπλισμού, έγινε βάση της θεώρησης ότι τα στοιχεία αρχαιολογικού ενδιαφέροντος βρίσκονται σε βάθος έως ενάμιση μέτρο.

Οι περιοχές όπου διεξήχθη η γεωφυσική έρευνα στο θέατρο των Αρχαίων Απτέρων παρουσιάζονται στον ακόλουθο χάρτη:



Σχήμα 3.1: Η περιοχή μελέτης στο χάρτη του Google

### 3.3 Συλλογή και Επεξεργασία δεδομένων Η/Μ μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη.

Η μέθοδος της ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης κινούμενου πομπού-δέκτη εφαρμόστηκε στους καννάβους Α, Β και Γ. Επιλέχθηκαν οι συχνότητες των 1, 9 και 15 kHz αντίστοιχα. Η ιδιότητα του υπεδάφους η οποία υπολογίζεται είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, μέσω της μετρούμενης φανταστικής συνιστώσας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Οι υψηλές συχνότητες επιτυγχάνουν υψηλή ευκρίνεια στην απεικόνιση και μικρότερο βάθος διασκόπησης ενώ οι χαμηλές συχνότητες μεγαλύτερο βάθος και χαμηλότερη ευκρίνεια.

Η συλλογή των δεδομένων έγινε με το όργανο Profiler EMP 400. Το όργανο αποτελείται από δύο πηνία σε σταθερή απόσταση 1.21m και λειτουργεί με μπαταρία λιθίου. Η καταγραφή των δεδομένων γίνεται με ασύρματη συσκευή. Το πηνίο – πομπός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα με τιμές από 1 έως 16 kHz.



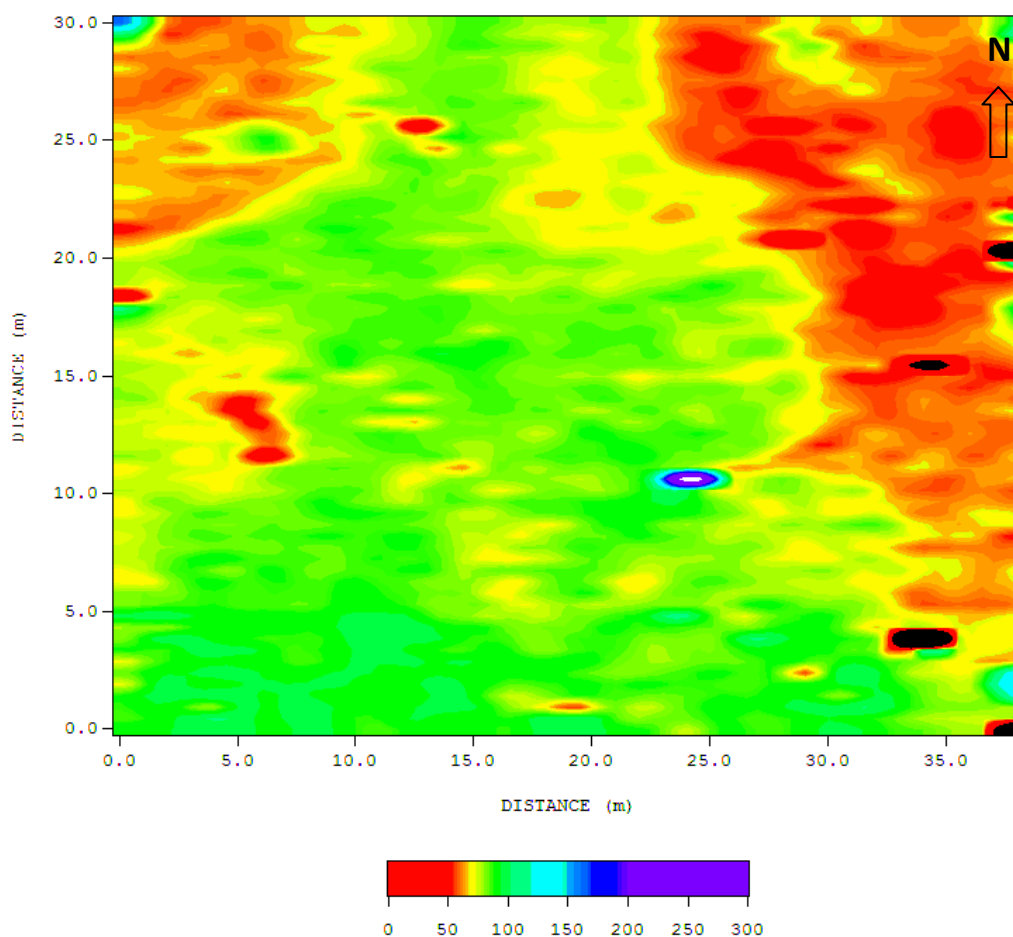
Εικόνα 3.2: Το Profiler EMP-400

### 3.3.1 Επεξεργασία δεδομένων κινούμενου πομπού δέκτη

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα παρουσίασης γεωφυσικών δεδομένων Transform v3.4. Τα δεδομένα που εισάγονται στο Transform είναι οι τιμές της αγωγιμότητας του υπεδάφους σε κάθε σταθμό μέτρησης του καννάβου, με σκοπό τη δημιουργία χαρτών απεικόνισης της γεωηλεκτρικής δομής, χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας εικόνας όπως εφαρμογή φίλτρων και μορφοποίηση της χρωματικής κλίμακας απεικόνισης.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα Transform γίνεται η κατασκευή του χάρτη της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους με τη μέθοδο της παρεμβολής (interpolation). Η μέθοδος της παρεμβολής περιλαμβάνει την εκτίμηση των ενδιάμεσων τιμών σε κάθε σημείο ανάμεσα στις ήδη υπάρχουσες τιμές χρησιμοποιώντας μαθηματικές μεθόδους παρεμβολής, και στη συνέχεια την παρουσίαση τους σε χάρτη υπό χρωματική κλίμακα, όπου κάθε χρώμα της κλίμακας αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή. (Σχήμα 3.2)





Σχήμα 3.2: Χάρτης ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης της περιοχής Α στη συχνότητα του 1kHz.

Έγινε χρήση κατάλληλης χρωματικής κλίμακας έτσι ώστε χαμηλές τιμές της αγωγιμότητας, που υποδεικνύουν μεγάλες αντιστάσεις, να απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι υψηλές αγωγιμότητες (χαμηλές αντιστάσεις) αντίστοιχα με μπλε.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης για την ανάδειξη των τοπικών ανωμαλιών οι οποίες πιθανόν να οφείλονται σε ανθρωπογενείς δομές. Για τη βελτίωση της απεικόνισης κατά την παρουσίαση των χαρτών έγινε μείωση του προκαθορισμένου εύρους τιμών της χρωματικής κλίμακας αναδεικνύοντας τοπικού χαρακτήρα ανωμαλίες. Η διαδικασία της εξομάλυνσης και της βελτίωσης χρωματικής κλίμακας περιγράφονται παρακάτω.

### 3.3.2 Εξομάλυνση ηλεκτρομαγνητικών χαρτών

Με τη διαδικασία της εξομάλυνσης (smoothing) επιτυγχάνεται η μείωση του τυχαίου θορύβου των μετρήσεων και η ανάδειξη πιθανών τοπικών ανωμαλιών που παρουσιάζουν γραμμικότητα. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εξομάλυνσης είναι αυτή του κινητού μέσου.

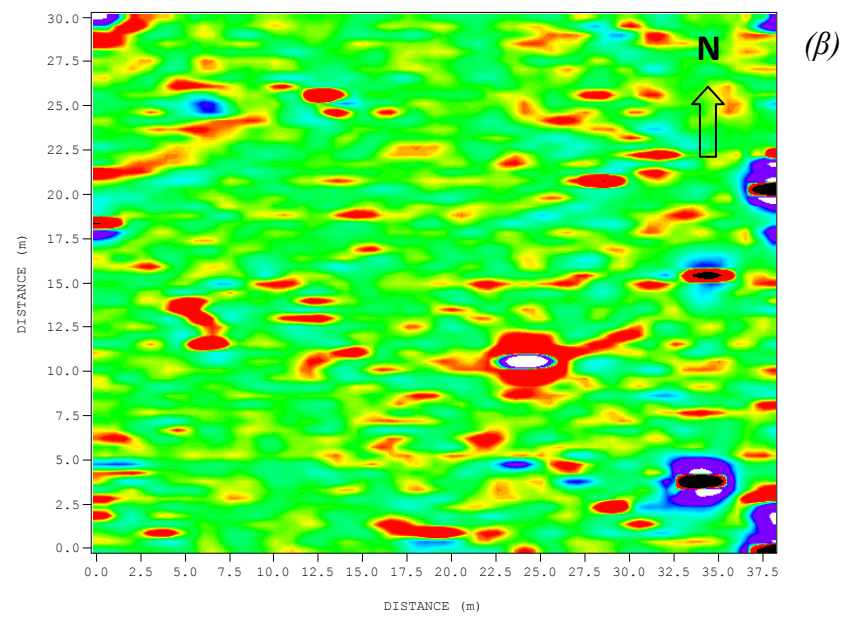
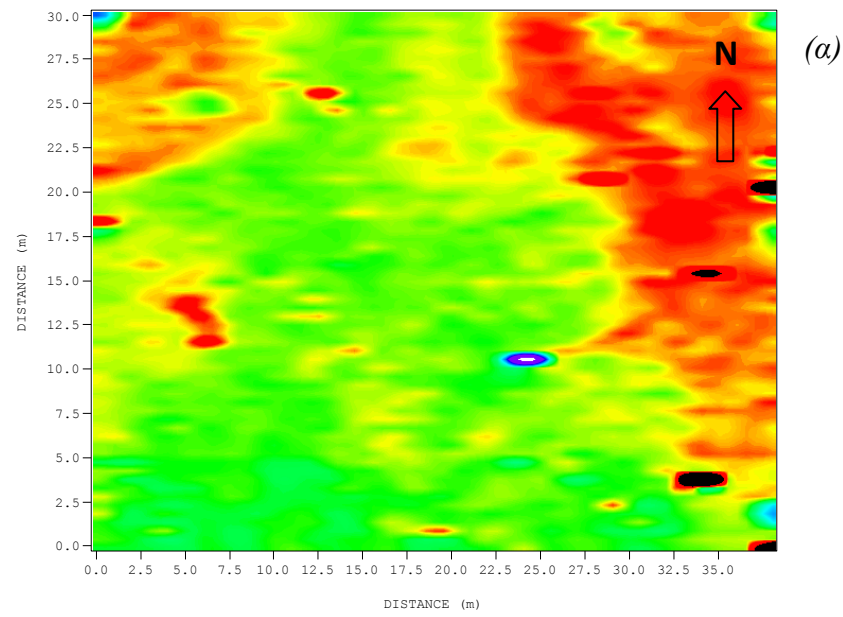
Με τη μέθοδο του κινητού μέσου υπολογίζεται η μέση τιμή σε κάθε κόμβο του καννάβου χρησιμοποιώντας τις τιμές στους γειτονικούς κόμβους. Το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται σε κάθε σημείο του χάρτη. Ο μέσος όρος υπολογίζεται από το άθροισμα των γινομένων των τιμών των γειτονικών σημείων επί το συντελεστή βαρύτητας του καθενός. Ο συντελεστής βαρύτητας του κάθε γειτονικού σημείου είναι αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης του σημείου από το κέντρο.

Η εφαρμογή του φίλτρου γίνεται απευθείας μέσω εντολής του Transform δημιουργώντας ένα νέο πεδίο εξομαλυσμένων τιμών. Στη συνέχεια οι τιμές αυτές αφαιρούνται από τις αντίστοιχες αρχικές και επαναλαμβάνεται η διαδικασία της παρεμβολής στις νέες τελικές τιμές για τη δημιουργία του εξομαλυσμένου χάρτη (Σχήμα 3.3). Κατά την εφαρμογή του φίλτρου δίνεται από το πρόγραμμα η δυνατότητα επιλογής του αριθμού περασμάτων του κινητού μέσου όρου από τα δεδομένα. Ο αριθμός περασμάτων που επιλέχθηκε μετά από δοκιμές ως καταλληλότερος ήταν 5.

Είναι ίσως η πιο απλή μέθοδος επεξεργασίας, η οποία απαλλάσσει το χάρτη από λεπτομέρειες που πιθανόν να σχετίζονται με θόρυβο. Εφαρμόζοντας φίλτρο κινητού μέσου όρου στον αρχικό χάρτη προκύπτει ένας νέος εξομαλυσμένος του οποίου οι τιμές υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho_a(i,j) = \sum_{k,l} a(k,l) \cdot \rho(k-i, l-j)$$

όπου  $i,j$  είναι δείκτης της θέσης της μέτρησης της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho_a$  και  $a(k,l)$  είναι συντελεστές βαρύτητας. Ο συντελεστής βαρύτητας για κάθε σημείο είναι αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης του σημείου από το κεντρικό.



Σχήμα 3.3: Χάρτης ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης στη συχνότητα 1kHz στον κάρναβο Α πριν (α) και μετά (β) την αφαίρεση των εξομαλυσμένων τιμών. Παρατηρείται η εξάλειψη του θορύβου στο ανατολικό τμήμα του χάρτη και η ανάδειξη της γραμμικής ανωμαλίας στα βορειοδυτικά.



### 3.3.3 Βελτίωση του έγχρωμου χάρτη

Η απεικόνιση των δεδομένων σε έγχρωμους χάρτες βοηθά στην ερμηνεία των ηλεκτρικών δεδομένων. Μικρές μεταβολές που σχετίζονται με το στόχο της διασκόπησης τονίζονται με την κατάλληλη επιλογή χρωματικής κλίμακας. Στη χρησιμοποιούμενη χρωματική κλίμακα του Transform, τιμές εκτός προκαθορισμένου εύρους απεικονίζονται με λευκό αν είναι μεγαλύτερες και με μαύρο αν είναι μικρότερες. Με αυτό το τρόπο βελτιώνεται η παρουσίαση του χάρτη ιδίως όταν περιέχει τοπικού χαρακτήρα ανωμαλίες. Η εικόνα βελτιώνεται όταν η κλίμακα των χρωμάτων αντιστοιχεί σε μικρό εύρος τιμών. Αποδίδοντας με χρώματα μόνο τις μεγάλες, τις ενδιάμεσες ή τις μικρές τιμές παρουσιάζονται οι μεταβολές στα διαφορετικά επίπεδα τιμών.

## 3.4 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων μαγνητικής βαθμίδας

Κατά τη διεξαγωγή της γεωφυσικής έρευνας στον αρχαιολογικό χώρο γύρω από το αρχαίο ρωμαϊκό θέατρο των Απτέρων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της μαγνητικής βαθμίδας. Η ευκινησία που παρέχει η συγκεκριμένη μέθοδος κατά τη λήψη των μετρήσεων την κάνει χρήσιμη σε δύσβατες περιοχές, όπου μέθοδοι όπως το γεωραντάρ είναι αρκετά δύσκολο έως αδύνατο να εφαρμοστούν.

Για τη συλλογή των μαγνητικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το διαφορικό μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης ροής. Το όργανο αυτό μετράει την πρώτη χωρική παράγωγο της κατακόρυφης συνιστώσας της έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης. Το συγκεκριμένο διαφορικό μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης ροής του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύονται δομές σε βάθος 1-2 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 3.3: Το διαφορικό μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης ροής

Για την επεξεργασία των δεδομένων της μεθόδου μαγνητικής βαθμίδας χρησιμοποιήθηκε ομοίως το πρόγραμμα Transform v3.4. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στην περιοχή Α , όπου σχεδιάστηκε κάνναβος διαστάσεων 38 x 30 m. Λόγω των μεγάλων διαστάσεων του καννάβου και του βήματος διασκόπησης και ισαπόστασης γραμμών στα 0.5m, προέκυψε μεγάλος όγκος δεδομένων και απαιτήθηκε ο χωρισμός του καννάβου Α σε 2 μέρη και η χωριστή διασκόπηση τους, καθώς η μνήμη του διαφορικού μαγνητόμετρου δεν επαρκούσε για τη συνολική καταγραφή ολόκληρου του καννάβου.

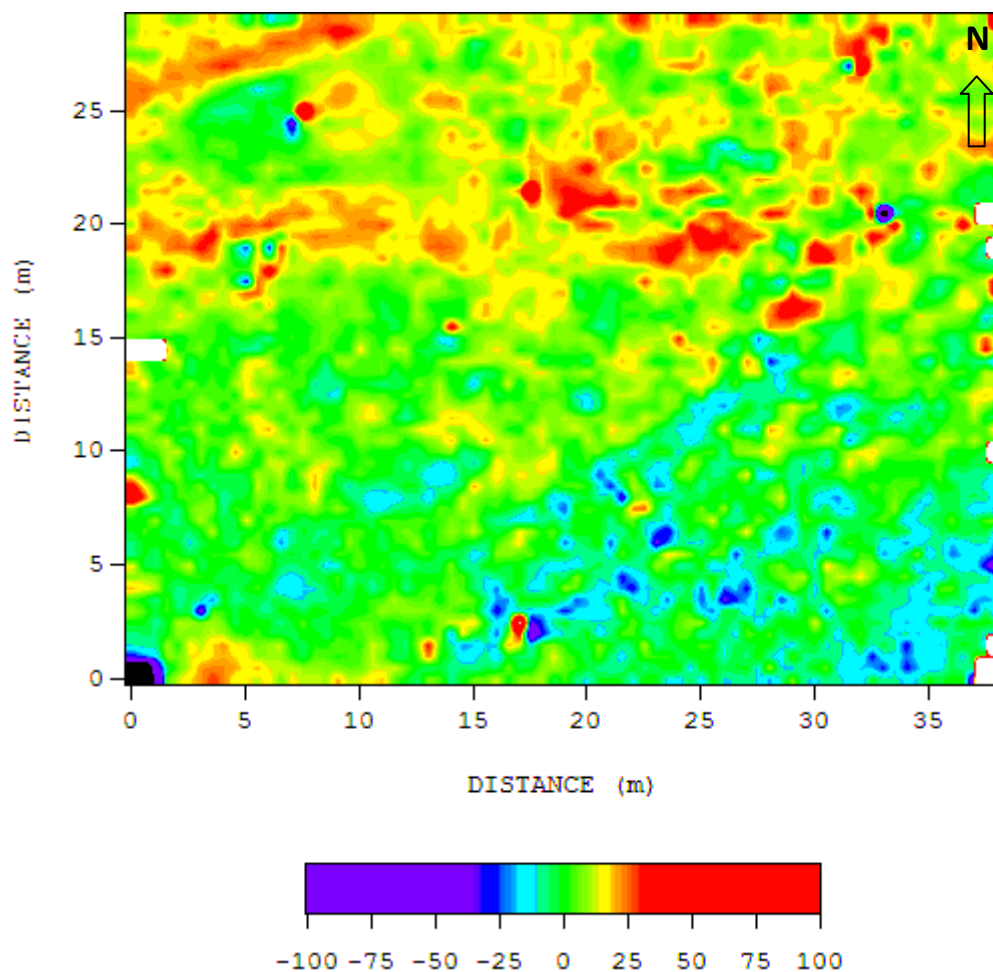
#### 3.4.1 Σύνδεση καννάβων

Επειδή, όπως είναι φυσικό κατά τη διασκόπηση πολλών καννάβων υπάρχει ένα μικρό ή μεγάλο διάστημα ανάπαυλας (π.χ. συνέχιση της λήψης των μετρήσεων την επόμενη μέρα), οι κοινές γραμμές μεταξύ των καννάβων μπορεί να παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικές τιμές. Αυτό συμβαίνει λόγω αλλαγής κάποιας παραμέτρου (π.χ. της θέσης των σταθερών ηλεκτροδίων) (Οικονόμου, 1998).

Για να γίνει σύνδεση των καννάβων αρχικά υπολογίζεται η μέση τιμή σε κάθε κοινή γραμμή μεταξύ των καννάβων. Στην περίπτωση σύνδεσης δυο καννάβων η σύνδεση είναι πολύ απλή αφού απαιτείται μόνο μια πρόσθεση ή αφαίρεση ώστε η μέση τιμή της κοινής γραμμής να αποκτήσει και για τους δυο καννάβους την ίδια τιμή. Η τιμή

που θα προστεθεί ή θα αφαιρεθεί κάθε φορά εφαρμόζεται για όλο τον κάνναβο και όχι μόνο για την κοινή γραμμή.

Η επεξεργασία των μαγνητικών δεδομένων έγινε στο Transform και περιλάμβανε τη σύνδεση των 2 καννάβων και τη δημιουργία του ενοποιημένου χάρτη μαγνητικής βαθμίδας στην περιοχή Α με τη χρήση της παρεμβολής στα ενοποιημένα δεδομένα (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Ενοποιημένος χάρτης μαγνητικής βαθμίδας στην περιοχή Α

### 3.5 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε για τη διασκόπηση των καννάβων Β, Γ, Δ1 και Δ2. Η συλλογή των δεδομένων έγινε σε ισαπέχουσες παράλληλες γραμμές απόστασης 0.5 m σε κάθε κάνναβο, και χρησιμοποιήθηκε το σύστημα γεωραντάρ SIR-3000 της εταιρίας GSSI. Επιλέχθηκε κεραία συχνότητας εκπομπής 400 MHz, βήμα δειγματοληψίας 0.05m και διάστημα δειγματοληψίας 0.146 ns.

### 3.5.1 Γενικά

Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar ή GPR) χρησιμοποιείται εκτενώς για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών σε πολλά διαφορετικά πεδία. Η διαδεδομένη πλέον πρόσβαση σε οικονομικά προσιτές υπολογιστικές μονάδες σημαίνει ότι πραγματοποιείται όλο και περισσότερη επεξεργασία με υπολογιστές στα δεδομένα GPR. Μεγάλος αριθμός εμπορικών πακέτων λογισμικού είναι διαθέσιμος, που επιτρέπει την σχεδόν οποιαδήποτε δυνατή αξιοποίηση των δεδομένων. (Annan 2001)

Η καθιερωμένη απεικόνιση για τα περισσότερα δεδομένα GPR είναι μια δισδιάστατη τομή, με την απόσταση κατά μήκος της γραμμής μελέτης να παρουσιάζεται στον x άξονα και με το διπλό χρόνο διαδρομής (Two Way Travel Time) του H/M κύματος από την εκπομπή του ως τη λήψη του, στον y (ο διπλός χρόνος διαδρομής μπορεί να μετατραπεί και σε βάθος). Οι τομές κατασκευάζονται ενώνοντας μαζί πολλά ίχνη ανάκλασης που λαμβάνονται καθώς η κεραία μετακινείται κατά μήκος της γραμμής. Το κάθε ίχνος είναι μια καταγραφή του πλάτους του κύματος που φτάνει στο δέκτη σε συνάρτηση με το χρόνο (σε ns). Οι τομές ανάκλασης συχνότερα απεικονίζονται σε γκριζα κλίμακα, με τις μεταβολές στα πλάτη των ανακλάσεων να προσδιορίζονται από το εύρος της κλίμακας του γκρι. (Conyers 2012).

Τα ακατέργαστα δεδομένα ανάκλασης (raw data) δεν είναι παρά μια συλλογή καταγραφών πολλών ανεξάρτητων ιχνών που συλλέγονται κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Κάθε ίχνος περιέχει μια σειρά κυμάτων που διαφέρουν σε πλάτος ανάλογα με το ποσό και την ένταση της ενέργειας ανάκλασης σε θαμμένα επίπεδα. Η ύπαρξη θαμμένων αντικειμένων, εκτός από τη μεταβολή της έντασης του ανακλώμενου κύματος, έχει επίσης ως αποτέλεσμα το σχηματισμό υπερβολής στην απεικόνιση καθώς το γεωραντάρ μετακινείται πάνω από το αντικείμενο. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό χρόνο διαδρομής του κύματος καθώς αυτό ανακλάται στο θαμμένο αντικείμενο, σε συνδυασμό με τη μετακίνηση του γεωραντάρ πάνω από αυτό, με τον ελάχιστο χρόνο (peak υπερβολής) να καταγράφεται όταν το γεωραντάρ βρίσκεται ακριβώς πάνω από το αντικείμενο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ροή επεξεργασίας των δεδομένων. Το αρχικό στάδιο των ενεργειών είναι η λήψη των δεδομένων η οποία κανονικά συνοδεύεται

από απεικόνιση πραγματικού χρόνου. Τα δεδομένα καταγράφονται και είναι διαθέσιμα για μετέπειτα επεξεργασία και απεικόνιση. Τα στάδια επεξεργασίας είναι τα ακόλουθα: (Annan 2001)

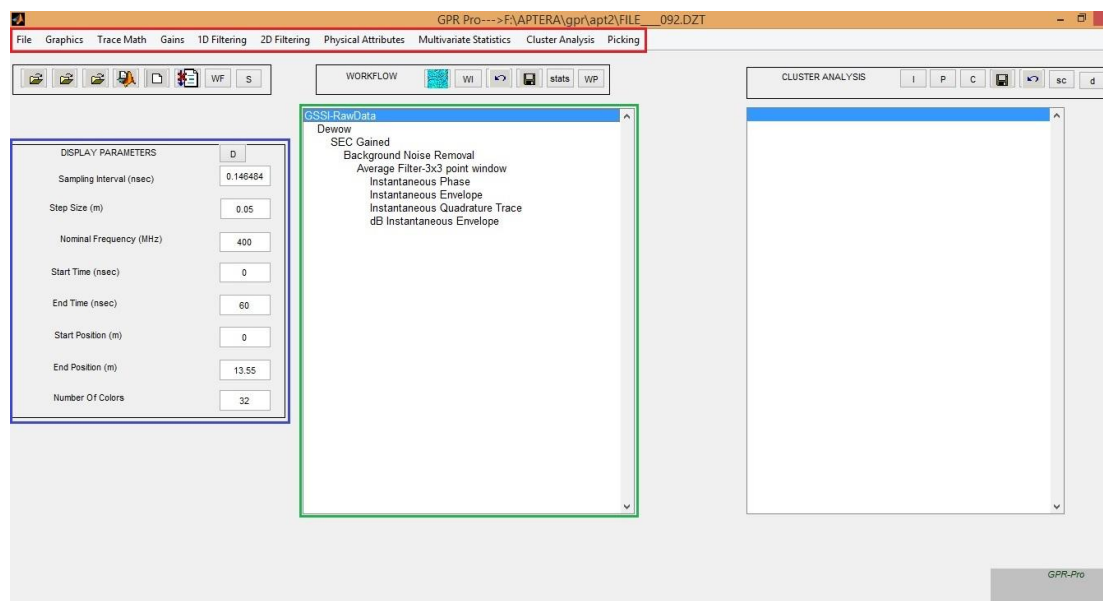
- Οργάνωση των δεδομένων
- Βασική επεξεργασία
- Ειδική επεξεργασία
- Απεικόνιση/ερμηνεία.

Η βασική επεξεργασία περιλαμβάνει τη διαδοχική εφαρμογή φίλτρων και ενίσχυσης στα δεδομένα, με σκοπό την καλύτερη ανάδειξη των τοπικών ανωμαλιών και ανακλάσεων, ενώ η ειδική επεξεργασία η οποία ακολουθεί, περιλαμβάνει την περαιτέρω αναλυτική επεξεργασία των δεδομένων όπως τον υπολογισμό των μιγαδικών χαρακτηριστικών (attributes), με σκοπό τη μέγιστη εξαγωγή πληροφοριών και την καλύτερη δυνατή ερμηνεία.

Η παραπάνω ροή επεξεργασίας είναι συνήθως επαναληπτική διαδικασία. Καθώς το πακέτο δεδομένων περνάει από τις παραπάνω διεργασίες, ο χειριστής παρατηρεί τις μεταβολές στα δεδομένα.

### 3.5.2 GPR-PRO

Η επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων έγινε με το λογισμικό πακέτο GPR-PRO. Το λογισμικό πακέτο GPR-PRO αποτελεί ένα περιβάλλον επεξεργασίας δεδομένων Γεωραντάρ ανεπτυγμένο σε περιβάλλον MATLAB. Το GPR-PRO παρέχει ένα μεγάλο αριθμό αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος όπως εφαρμογή φίλτρων, ενίσχυσης, χωροθέτηση (migration), αποσυνέλιξη (deconvolution), υπολογισμός μιγαδικών χαρακτηριστικών (attributes) κ.ά.. (Spanoudakis, Vafidis 2010)



Εικόνα 3.4: Το περιβάλλον εργασίας του GPR-PRO.

Το γραφικό περιβάλλον αποτελείται από τέσσερα στοιχεία: Το κυρίως μενού, την ετικέτα πληροφοριών, την περιοχή ροής εργασίας και την περιοχή ταξινόμησης.

Τα εργαλεία επεξεργασίας που βρίσκονται στο μενού (εικόνα 3.4 κόκκινο πλαίσιο) δίνουν τη δυνατότητα εισαγωγής και εξαγωγής αρχείων, εφαρμογή φίλτρων, ανάλυσης ιδιοτήτων, στατιστικής, ανάλυση ομαδοποίησης και προσέγγιση συναρτήσεων. Η ετικέτα πληροφοριών (εικόνα 3.4 μπλε πλαίσιο) παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων όπως τη συχνότητα και το βήμα δειγματοληψίας. Οι τιμές αυτές μπορούν να τροποποιηθούν. Στην περιοχή τροποποίησης των δεδομένων (εικόνα 3.4 πράσινο πλαίσιο) ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τη ροή εργασίας προσθέτοντας ή αφαιρώντας ενέργειες που σχετίζονται με την επεξεργασία. (Spanoudakis, Vafidis 2010)

### 3.5.3 Εφαρμογή ενίσχυσης και φίλτρων

Για το λόγο ότι η ένταση του εκπεμπόμενου κύματος του γεωραντάρ γενικά μειώνεται με την αύξηση του χρόνου διαδρομής του στο υπέδαφος, λόγω διαδοχικής εξασθένησης, είναι συχνά απαραίτητο να αυξηθεί η ένταση πιο αδύναμων σημάτων σε μεγαλύτερους χρόνους. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας ενίσχυση στα δεδομένα. Η ενίσχυση είναι μια χρονικά μεταβαλλόμενη διαβάθμιση του πλάτους και μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες διαβαθμίσεις.

Τα φίλτρα σχεδιάζονται για να μεταβάλλουν το σχήμα ανεξαρτήτων ιχνών μέσα από μαθηματικές διεργασίες, τονίζοντας ή εξουδετερώνοντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Συνήθη χαρακτηριστικά που απαιτούν απομάκρυνση από τις καταγραφές του γεωραντάρ αποτελούν οι χαμηλές συχνότητες (wow) και ο θόρυβος περιβάλλοντος ή ο συστηματικός θόρυβος. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο τύποι φίλτρων: τα χρονικά φίλτρα δρουν κατά τη διεύθυνση του χρόνου και εφαρμόζονται σε ανεξάρτητα ίχνη διαδοχικά, ενώ τα χωρικά φίλτρα δρουν κατά την οριζόντια θέση και χρησιμοποιούν διπλανά ίχνη. (Neal 2004, Sensors and Software 1998)

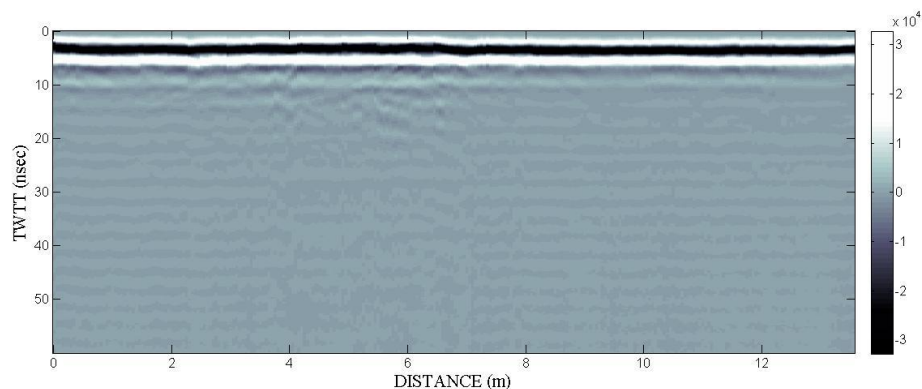
Η εφαρμογή ενίσχυσης και φίλτρων ανήκει στο στάδιο της βασικής επεξεργασίας των δεδομένων και τα αποτελέσματά της καθορίζουν την επιλογή των μετέπειτα τεχνικών που ανήκουν στο στάδιο της ειδικής επεξεργασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα της βασικής επεξεργασίας που έγιναν σε κάθε γραμμή γεωραντάρ, με τη σειρά με την οποία εφαρμόστηκαν.

#### α) Φίλτρο διόρθωσης Dewow

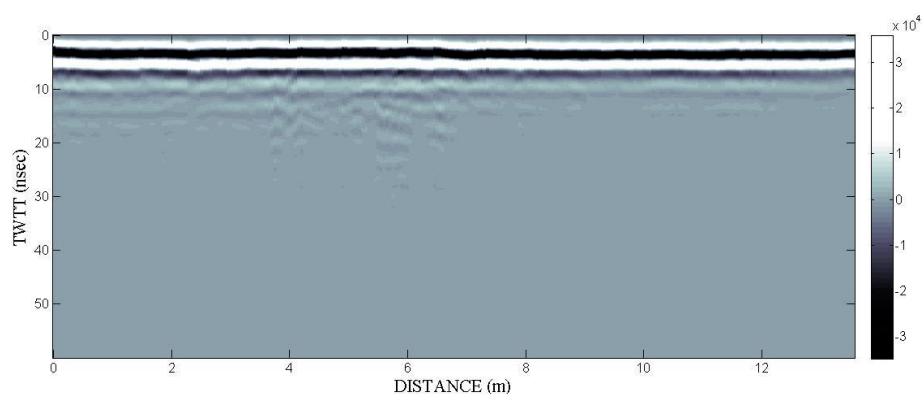
Η διόρθωση Dewow αποτελεί μονοδιάστατο φίλτρο αποκοπής των χαμηλών συχνοτήτων από τα δεδομένα που εφαρμόζεται κατά τον άξονα του χρόνου για κάθε ίχνος χωριστά (χρονικό φίλτρο). Το φίλτρο διόρθωσης Dewow κάνει χρήση ενός τελεστή, του οποίου το μήκος  $M$  υπολογίζεται από τη σχέση  $M = \frac{2}{f \cdot \Delta t}$  όπου  $f$  η συχνότητα εκπομπής (400 MHz) και  $\Delta t$  το διάστημα δειγματοληψίας (0.146 ns). Στη συνέχεια έχοντας υπολογίσει το μήκος του τελεστή, υπολογίζει το μέσο όρο των σημείων γύρω από το κεντρικό και τον αφαιρεί από τα αρχικά δεδομένα. Η γενική μορφή του τελεστή που υπολογίζει τη μέση τιμή είναι: (Σπανουδάκης 2002)

$$\frac{1}{M} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}_{(M \times 1)} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{M} \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(M \times N)}$$

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται εικόνα τομής γεωραντάρ στον κάνναβο B μετά από εφαρμογή φίλτρου Dewow στα ακατέργαστα δεδομένα του σχήματος 3.5.



Σχήμα 3.5: Τομή ακατέργαστων δεδομένων (Κάναβος Β, Γραμμή Β33)

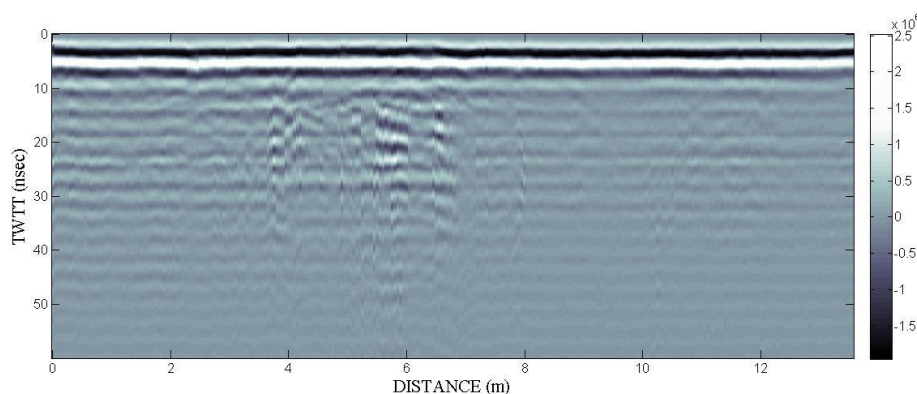


Σχήμα 3.6: Δεδομένα του σχήματος 3.5 μετά από εφαρμογή φίλτρου Dewow.

### β) Ενίσχυση των δεδομένων (SEC Gain)

Το επόμενο βήμα μετά τη διόρθωση Dewow είναι η εφαρμογή ενίσχυσης. Όπως αναφέρθηκε, τα σήματα ραντάρ εξασθενούν ραγδαία κατά τη διάδοσή τους. Ενώ το πλάτος της απεικόνισης σημάτων μικρού βάθους μπορεί να είναι κατάλληλο, γεγονότα από μεγαλύτερα βάθη μπορεί να μην είναι διακριτά, καθώς τα σήματα από μεγαλύτερα βάθη είναι κατά πολύ μικρότερα σε ένταση. Η εξίσωση των πλατών, εφαρμόζοντας κάποιου είδους χρονικά εξαρτώμενη συνάρτηση ενίσχυσης, επανορθώνει για την πτώση του σήματος στα μεγάλα βάθη. (Jol 2009)

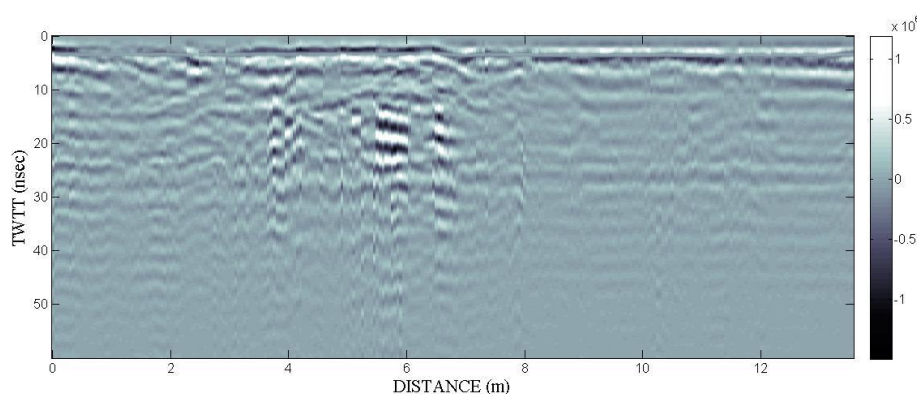




Σχήμα 3.7: Εφαρμογή ενίσχυσης στα δεδομένα του σχήματος 3.6

### γ) Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου (Background noise removal)

Στη συνέχεια εφαρμόζεται το φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου. Το σήμα που καταγράφεται δέχεται σημαντικές επιδράσεις από εξωτερικούς παράγοντες (ηλεκτροφόρα καλώδια, δέκτες κινητής τηλεφωνίας κ.ά.) με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στα δεδομένα σήματα που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες. Το φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου εφαρμόζεται για να εξαλείψει τα παραπάνω φαινόμενα. Λειτουργεί υπολογίζοντας ένα νέο ίχνος το οποίο αποτελεί το μέσο όρο όλων των ιχνών μιας τομής (χωρικό φίλτρο). Στη συνέχεια το νέο ίχνος αφαιρείται από κάθε ίχνος και προκύπτει μια νέα εικόνα απαλλαγμένη από τα παραπάνω φαινόμενα. (Σπανουδάκης 2002)



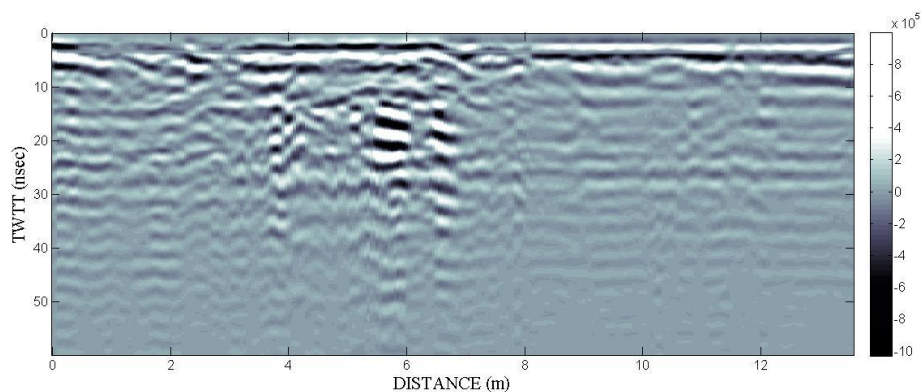
Σχήμα 3.8: Εφαρμογή φίλτρου αποκοπής σημάτων υποβάθρου στο σχήμα 3.7

### δ) Φίλτρο μέσης τιμής

Η εφαρμογή του φίλτρου μέσης τιμής αποτέλεσε το τελικό στάδιο της βασικής επεξεργασίας. Το φίλτρο μέσης τιμής είναι δισδιάστατο φίλτρο και περιλαμβάνει τη χρήση ενός τετραγωνικού τελεστή οι διαστάσεις του οποίου καθορίζονται από το

χρήστη. Υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων και αντικαθιστά το κεντρικό εικονοστοιχείο με τη μέση τιμή. Χρησιμοποιείται σα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Κατά την επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε μήκος τελεστή 3x3. Ο τελεστής που το περιγράφει είναι:

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{N^2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}_{(N \times N)}$$



Σχήμα 3.9: Εφαρμογή φίλτρου μέσης τιμής στο σχήμα 3.8.

### 3.5.4 Μιγαδικά χαρακτηριστικά (attributes)

Οι μετασχηματισμοί δεδομένων από μια μορφή σε μια άλλη είναι συνηθισμένοι στην ανάλυση σημάτων και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές για την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών από χρονοσειρές (σεισμικά δεδομένα, δεδομένα γεωραντάρ κλπ.). Αποτέλεσμα αυτού του τρόπου παρουσίασης δεδομένων είναι η εξαγωγή πληροφοριών και συμπερασμάτων που διαφορετικά δε θα ήταν αντιληπτά.

Η σύνθετη ή μιγαδική ανάλυση σήματος αντιμετωπίζει ένα ίχνος  $x(t)$  σαν το πραγματικό μέρος ενός αναλυτικού σήματος το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$f(t) = x(t) + j x^*(t)$$

Το φανταστικό μέρος  $x^*(t)$  είναι το φασικά μετατοπισμένο κατά  $90^\circ$  πραγματικό μέρος και μπορεί να προσδιοριστεί από το πραγματικό.

Αν θεωρηθεί ότι η  $x(t)$  μπορεί να εκφραστεί από χρονικά μεταβαλλόμενο πλάτος  $E(t)$  και μια χρονικά μεταβαλλόμενη φάση  $\theta(t)$  δηλαδή  $x(t) = E(t)\cos\theta(t)$  τότε η φασικά

μετατοπισμένη κατά  $90^\circ$  κυματομορφή είναι  $x^*(t) = E(t)\sin\theta(t)$  και η σύνθετη κυματομορφή είναι:

$$f(t) = x(t) + jx^*(t) = E(t)[\cos\theta(t) + j\sin\theta(t)] = E(t)e^{j\theta(t)}$$

Αν τα  $f(t)$  και  $f^*(t)$  είναι γνωστά τότε η σχέση μπορεί να επιλυθεί ως προς  $E(t)$  και  $\theta(t)$ :

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + x^{*2}(t)}$$

$$\theta(t) = \tan^{-1}[x^*(t) / x(t)]$$

Το  $E(t)$  είναι το στιγμιαίο πλάτος ενώ το  $\theta(t)$  η στιγμιαία φάση. (Σπανουδάκης 2002).

### ❖ Ο μετασχηματισμός Hilbert

Ο μετασχηματισμός Hilbert ορίζεται ως: (Bracewell 1986):

$$x_B(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\tau - t} d\tau = -x(t) = -x^*(t)$$

Δίδεται το πραγματικό μέρος  $x(t)$  μιας μιγαδικής συνάρτησης η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο και το φανταστικό της μέρος είναι  $x^*(t)$ . Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Hilbert στο σήμα  $x(t)$  προκύπτει η σύνθετη συνάρτηση:

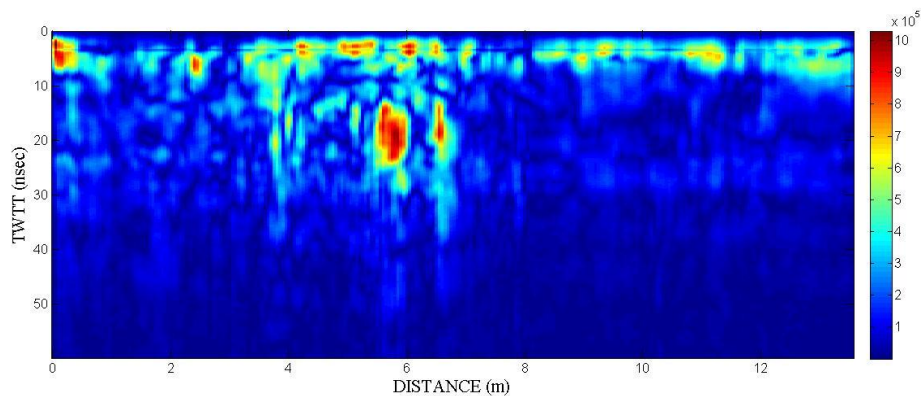
$$f(t) = x(t) - j x_B(t) = x(t) + j x^*(t)$$

Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Hilbert περιλαμβάνει τα 4 παρακάτω στάδια:

1. Η σειρά  $x(t)$  συμπληρώνεται με μηδενικά ώστε ο αριθμός των στοιχείων να είναι δύναμη του δύο ( $2^n$ ) και επιπλέον το μήκος της νέας σειράς να είναι μεγαλύτερο από της αρχικής.
2. Εφαρμόζεται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier.
3. Οι αρνητικές τιμές στις συχνότητες μηδενίζονται ενώ οι θετικές τιμές διπλασιάζονται
4. Εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier.

### ❖ Στιγμιαίο πλάτος (Instantaneous envelope)

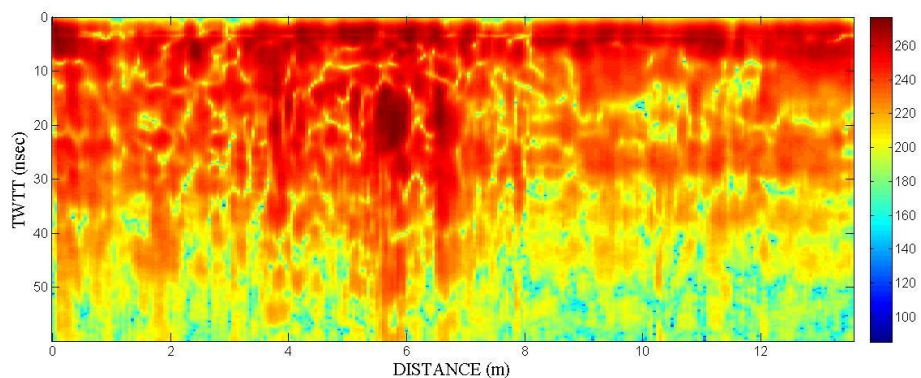
Το στιγμιαίο πλάτος (Instantaneous envelope) αποτελεί ένα βασικό μιγαδικό χαρακτηριστικό που συμβάλλει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες. Το στιγμιαίο πλάτος των δεδομένων του σχήματος 3.9 φαίνεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Στιγμιαίο πλάτος του σχήματος 3.9.

### ❖ Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB

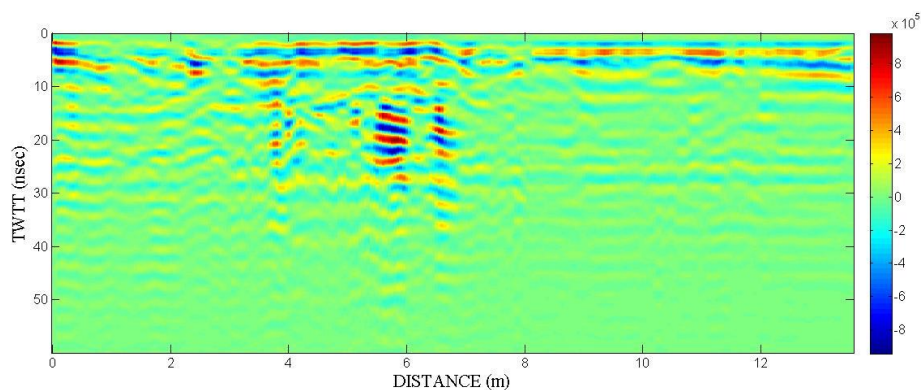
Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB είναι μιγαδικό χαρακτηριστικό το οποίο χρησιμοποιείται για τη μελέτη της μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB. Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB των δεδομένων του σχήματος 3.9 φαίνεται στο σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB του σχήματος 3.9.

### ❖ Στιγμιαία φανταστική συνιστώσα

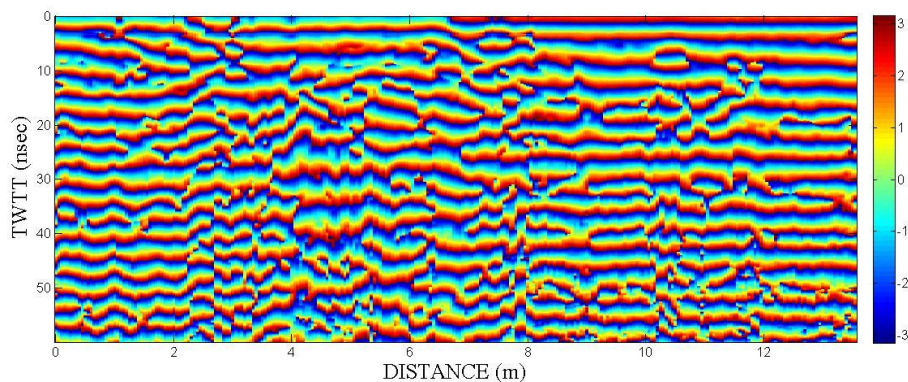
Το φασικά μετατοπισμένο κατά  $90^\circ$  σήμα αποτελεί ένα μιγαδικό χαρακτηριστικό, το οποίο χρησιμεύει στον ποιοτικό έλεγχο της μεταβολής της στιγμιαίας φάσης στο χρόνο. (Σπανουδάκης 2002) Η στιγμιαία φανταστική συνιστώσα των δεδομένων του σχήματος 3.9 φαίνεται στο σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Στιγμιαία φανταστική συνιστώσα του σχήματος 3.9.

#### ❖ Στιγμιαία φάση (instantaneous phase)

Η στιγμιαία φάση είναι ανεξάρτητη από το πλάτος και ενισχύει τους αδύναμους ανακλαστήρες. Η στιγμιαία φάση των δεδομένων του σχήματος 3.9 φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Στιγμιαία φάση του σχήματος 3.9.

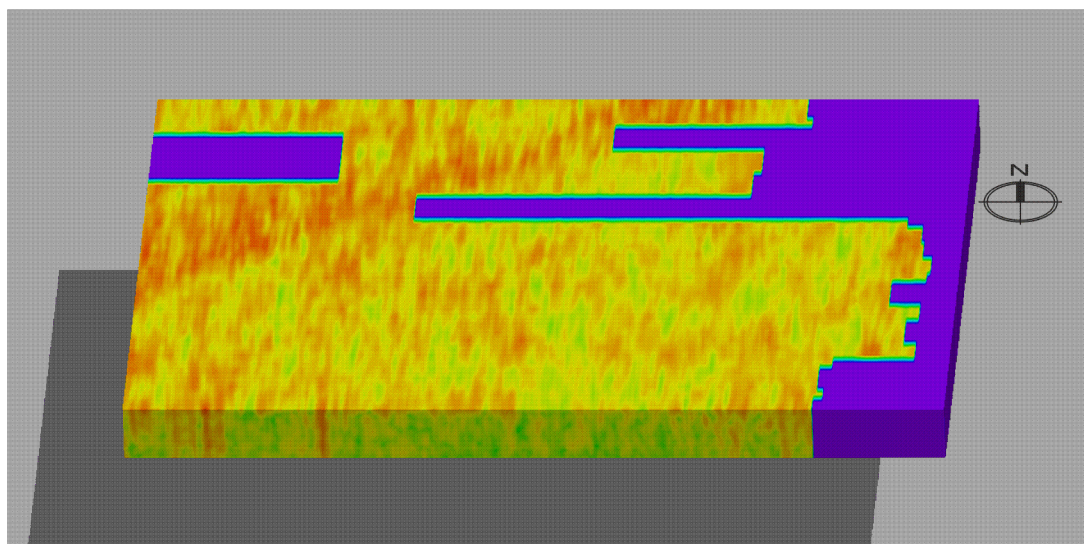
### 3.5.5 Τρισδιάστατη Απεικόνιση

Μετά την επεξεργασία των τομών γεωραντάρ ενός καννάβου, είναι δυνατή η συγχώνευση των δεδομένων των τομών, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο όγκο δεδομένων διαστάσεων  $M \times N \times O$ , όπου  $M$  ο αριθμός των σημείων ανά ίχνος,  $N$  ο αριθμός των ίχνων ανά γραμμή μελέτης και  $O$  ο αριθμός των γραμμών μελέτης. Η



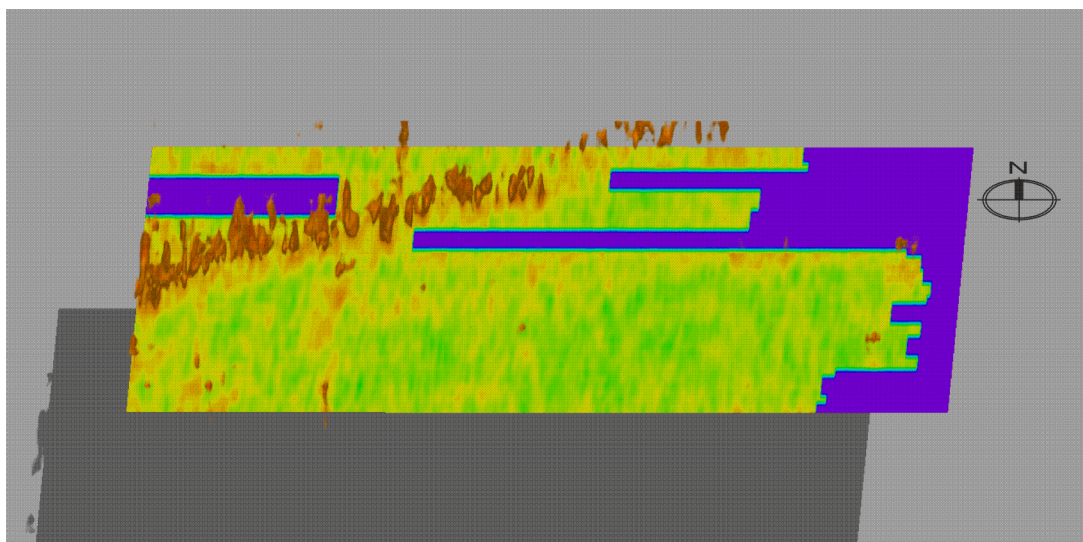
συγχώνευση των δεδομένων έγινε σε περιβάλλον Matlab και συχνότερα χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής (Σπανουδάκης, 2002).

Στη συνέχεια γίνεται απεικόνισή του όγκου σε τρισδιάστατο μοντέλο. Δίνεται επίσης η δυνατότητα κατασκευής και απεικόνισης οριζοντίων τομών (slices) σε ξεχωριστά βάθη (χρόνους διαδρομής). Η τρισδιάστατη απεικόνιση του όγκου δεδομένων για κάθε κάνναβο έγινε με το λογισμικό T3D.



*Εικόνα 3.5: Τρισδιάστατη απεικόνιση όγκου δεδομένων γεωραντάρ στον κάνναβο Β μετά από αποκοπή βάθους στο λογισμικό T3D.*

Στο λογισμικό T3D δίνεται η δυνατότητα μορφοποίησης της απεικόνισης του τρισδιάστατου μοντέλου. Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται ενδεικτικά το τρισδιάστατο μοντέλο για τον κάνναβο Β, όπου έχει γίνει αποκοπή (cropping) του βάθους (χρόνου διαδρομής) έτσι ώστε να προβάλλονται τα δεδομένα έως ένα συγκεκριμένο βάθος στο οποίο παρουσιάζεται το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή οριζόντιας τομής (slice) σε κατάλληλο βάθος σε συνδυασμό με αποκοπή χρωμάτων για καλύτερη παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Τρισδιάστατο μοντέλο δεδομένων γεωραντάρ στον κάρναβο B μετά από αποκοπή βάθους και χρωμάτων σε συνδυασμό με την εισαγωγή slice.

### 3.6 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

Στη συγκεκριμένη γεωφυσική διασκόπηση για την πραγματοποίηση των μετρήσεων με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, επιλέχτηκε η διάταξη διπόλου-διπόλου λόγω του ότι περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σε σχέση με τις άλλες υπάρχουσες διατάξεις. Για τη συλλογή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο STING R1 – Earth Resistivity Meter.



Εικόνα 3.7: Το STING-R1

#### 3.6.1 Επεξεργασία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

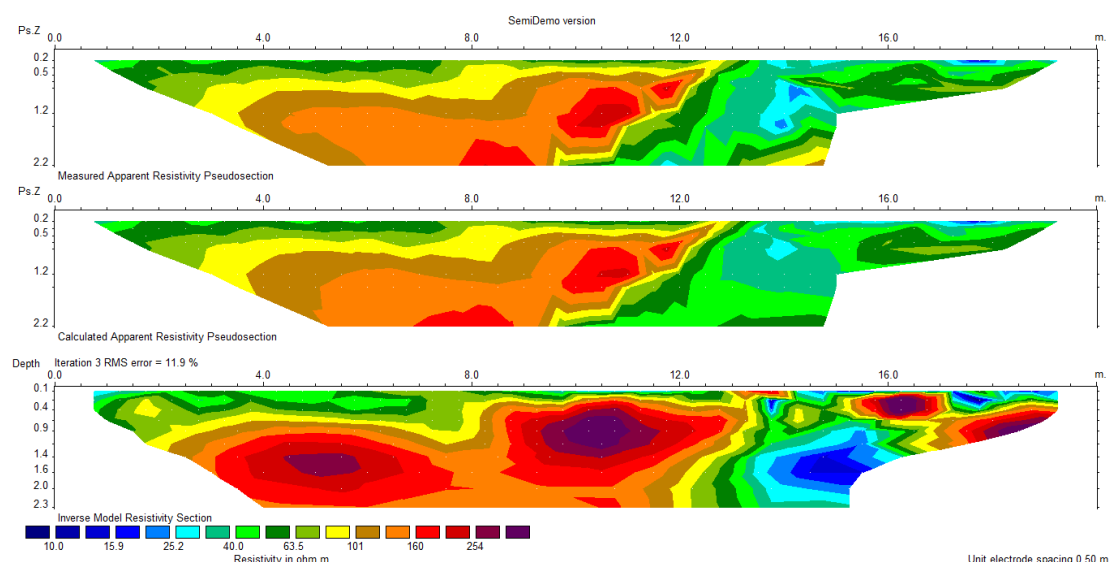
Ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$  επιτυγχάνεται με την χρήση του λογισμικού πακέτου Res2Dinv. Στο πρόγραμμα αυτό θεωρείται ότι κάθε



τομή του υπεδάφους διαιρείται σε τμήματα σχήματος παραλληλόγραμμου. Η πραγματική ειδική αντίσταση θεωρείται σταθερή σε κάθε τμήμα. Ξεκινώντας από αρχικό μοντέλο το οποίο προκύπτει θέτοντας κάποιες τιμές για την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζονται οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό και τις συγκρίνει με τις μετρημένες τιμές της φαινόμενης αντίστασης.

Κάνοντας διαδοχικές επαναλήψεις μειώνεται συνεχώς το σφάλμα που οφείλεται στη διαφορά των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Τελικά επιλέγεται ένα μοντέλο με μικρό σφάλμα όταν οι επόμενες επαναλήψεις δεν μειώνουν σημαντικά το σφάλμα αυτό, δηλαδή όταν η επαναληπτική διαδικασία παρουσιάζει σύγκλιση.

Η εικόνα που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία αποτελείται από τρία διαφορετικά μοντέλα όπου τα δύο πρώτα αποτελούν ψευδοτομές του υπεδάφους και απεικονίζουν φαινόμενες ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις, ενώ το τρίτο αποτελεί τη γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους όπου οι απεικονιζόμενες τιμές αντιστοιχούν στις υπολογιζόμενες πραγματικές ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Ψευδοτομές και γεωηλεκτρική τομή της γραμμής K1

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ**

### **ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων κάθε μεθόδου, σε κάθε περιοχή ξεχωριστά.

Για την παρουσίαση των δεδομένων γεωραντάρ που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες, έγινε επιλογή των πιο αντιπροσωπευτικών τομών σε κάθε κάνναβο σε συνδυασμό με οριζόντια τομή σε κατάλληλο βάθος. Επίσης, στα δεδομένα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, έγινε εφαρμογή φίλτρου εξομάλυνσης και αφαίρεση των εξομαλυσμένων τιμών. Οι εικόνες που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία καθώς και οι επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ σε κάθε περιοχή παρατίθενται στο παράρτημα.

#### **4.1 Περιοχή Α**

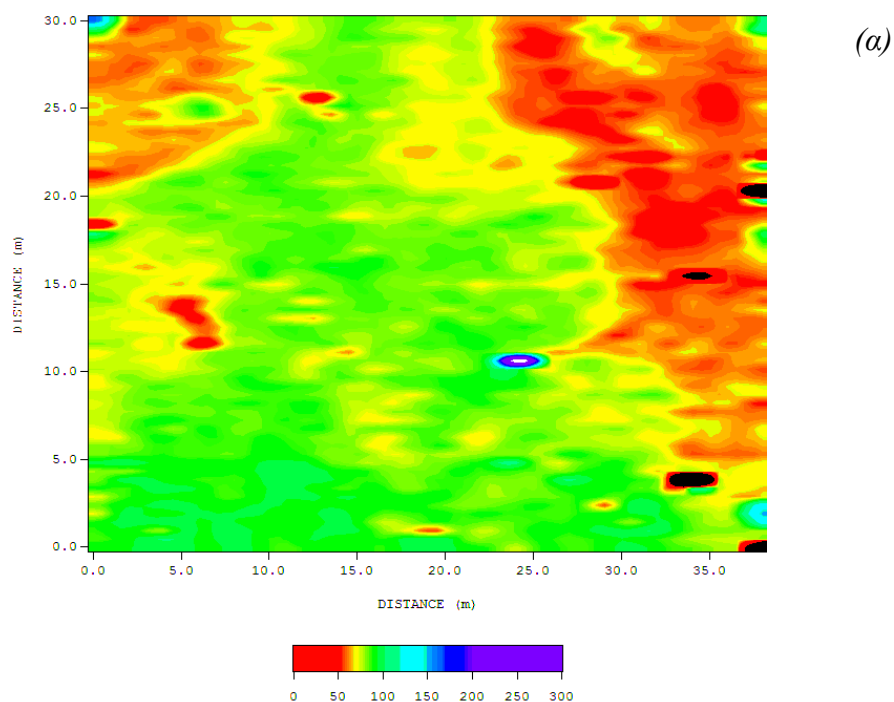
Στην περιοχή Α σχεδιάστηκε κάνναβος διαστάσεων 38x30m (μήκος γραμμώνΧπλάτος καννάβου). Ανατολικά του καννάβου βρίσκεται χαλικόστρωτος δρόμος που εξυπηρετεί τις ανάγκες του εργοταξίου της ανασκαφής. Ο υπόλοιπος χώρος καταλαμβάνεται από ελαιόδεντρα, αρχαία ερείπια, μεγάλες πέτρες, θάμνους και μπάζα της ανασκαφής. Η περιοχή χαρακτηρίζεται δύσβατη. Ως εκ τούτου επιλέχθηκαν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και η μέθοδος της μαγνητικής βαθμίδας. Και με τις δύο μεθόδους συλλέχθηκαν δεδομένα σε ισαπέχουσες (0.5m) παράλληλες γραμμές ανά 0.5m, με διεύθυνση Δ-Α κατά μήκος των γραμμών και ξεκινώντας από Νότια προς Βόρεια.

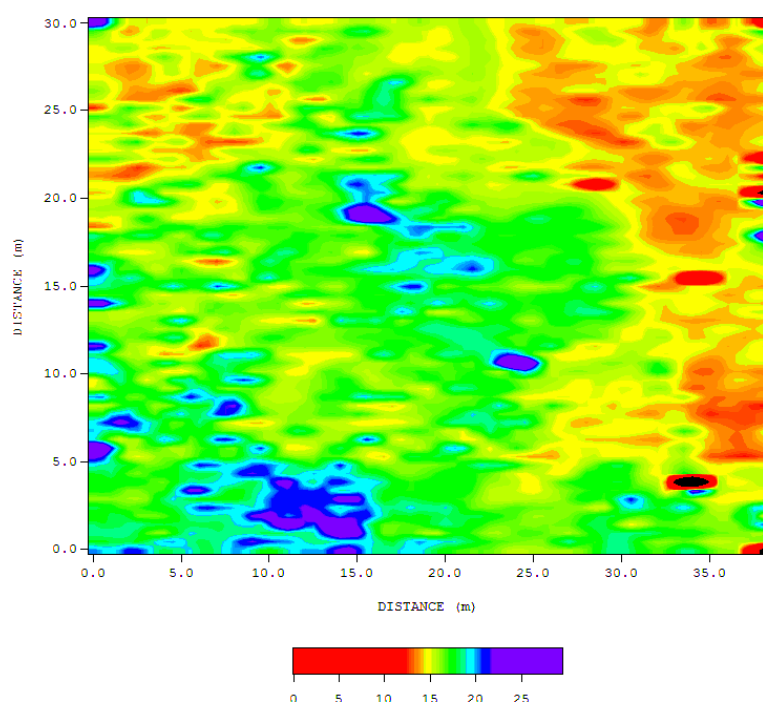


Εικόνα 4.1: Η περιοχή Α από μακρινή νότια λήψη

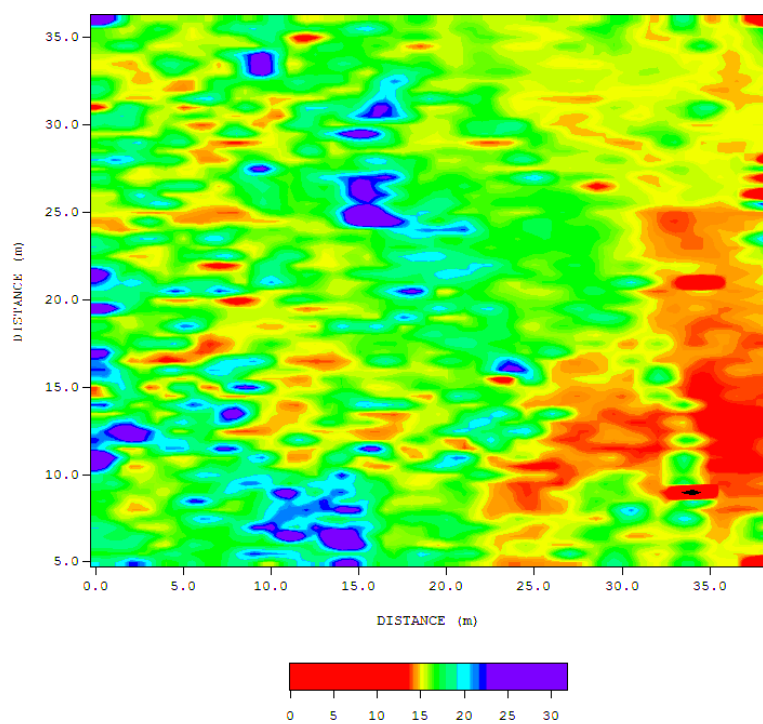
#### 4.1.1 Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη

Τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη για την περιοχή Α παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1 στις συχνότητες 1, 9 και 15 kHz αντίστοιχα..





(β)

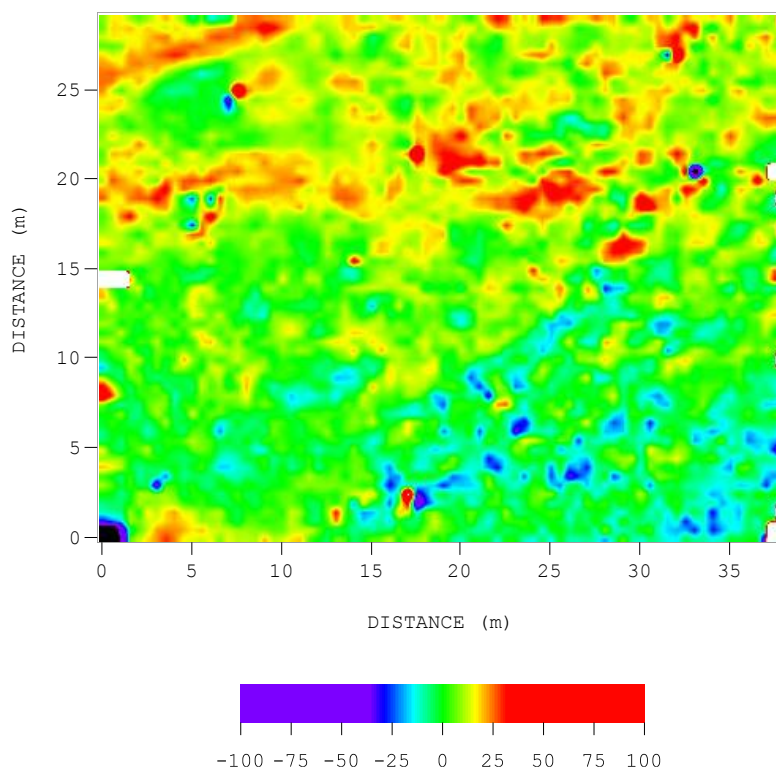


(γ)

Σχήμα 4.1: Χάρτες ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης της περιοχής Α για συχνότητες 1, 9 και 15kHz (α, β, γ) αντίστοιχα.

#### 4.1.2 Μέθοδος μαγνητικής βαθμίδας

Ο ενοποιημένος χάρτης μαγνητικής βαθμίδας που προέκυψε στην περιοχή Α παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Ενοποιημένος χάρτης κατακόρυφης μαγνητικής βαθμίδας στην περιοχή Α

## 4.2 Περιοχή Β

Στην περιοχή Β σχεδιάστηκε κήρυκος διαστάσεων 25m x 20m. Δυτικά του κήρυκου υπάρχουν ελαιόδεντρα ενώ το νοτιοανατολικό του μέρος καταλαμβάνονταν από μπάζα ανασκαφής. Στα νότια και τα ανατολικά βρίσκεται υπό εξέλιξη ανασκαφή η οποία αποκαλύπτει ένα αναλημματικό τοίχο του θεάτρου. Επιλέχθηκαν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και η μέθοδος του γεωραντάρ. Και με τις δύο μεθόδους συλλέχθηκαν δεδομένα σε ισαπέχουσες (0.5m) παράλληλες γραμμές ανά 0.5m για την ΗΜ και 0.05m για το γεωραντάρ, με διεύθυνση Δ-Α κατά μήκος των γραμμών και ξεκινώντας από Νότια προς Βόρεια. Επίσης πραγματοποιήθηκαν δύο (2) ηλεκτρικές τομογραφίες με διεύθυνση Ν-Β

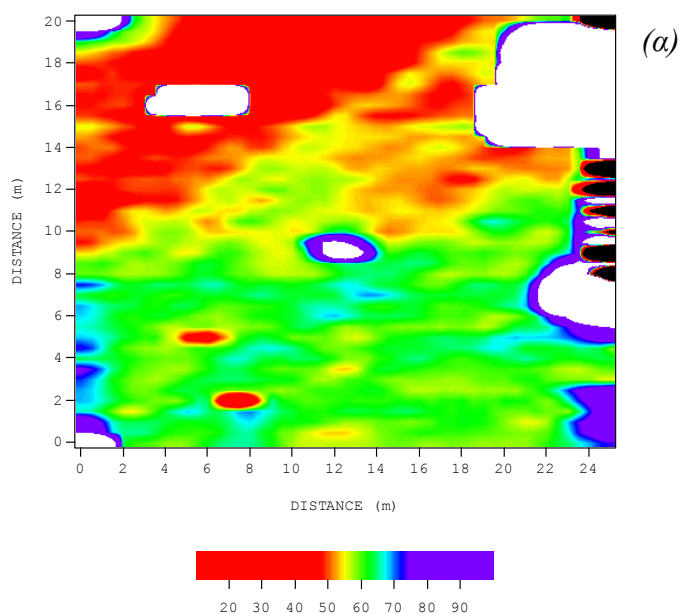


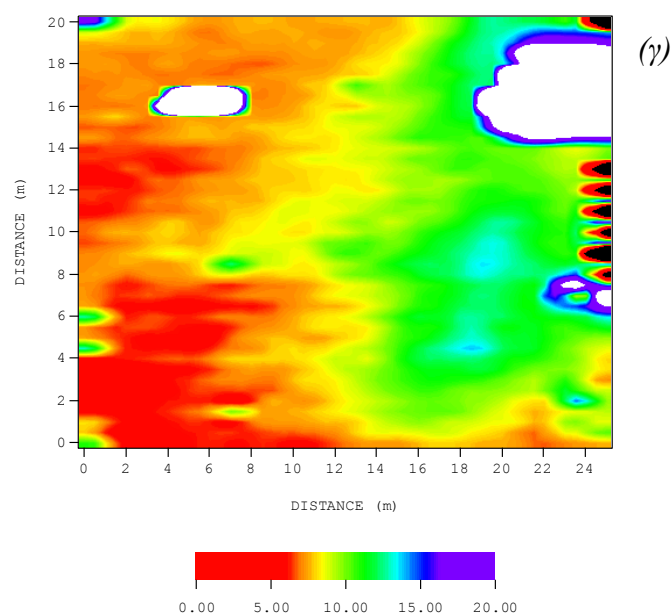
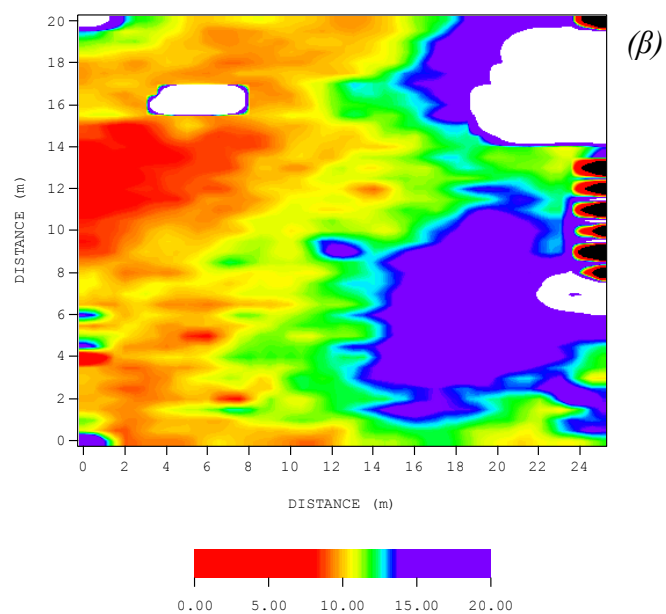


Εικόνα 4.2: Περιοχή B από νότια λήψη κατά την εκτέλεση ηλεκτρικής τομογραφίας διεύθυνσης N-B

#### 4.2.1 Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη

Τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη για την περιοχή B παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4 στις συχνότητες 1, 9 και 15 kHz αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε έγινε χρήση κατάλληλης χρωματικής κλίμακας ώστε οι χαμηλές αγωγιμότητες άρα και υψηλές αντιστάσεις, να απεικονίζονται με κόκκινο ενώ οι υψηλές αγωγιμότητες αντίστοιχα με μπλε. Οι εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή του φίλτρου εξομάλυνσης παρουσιάζονται στο παράρτημα.



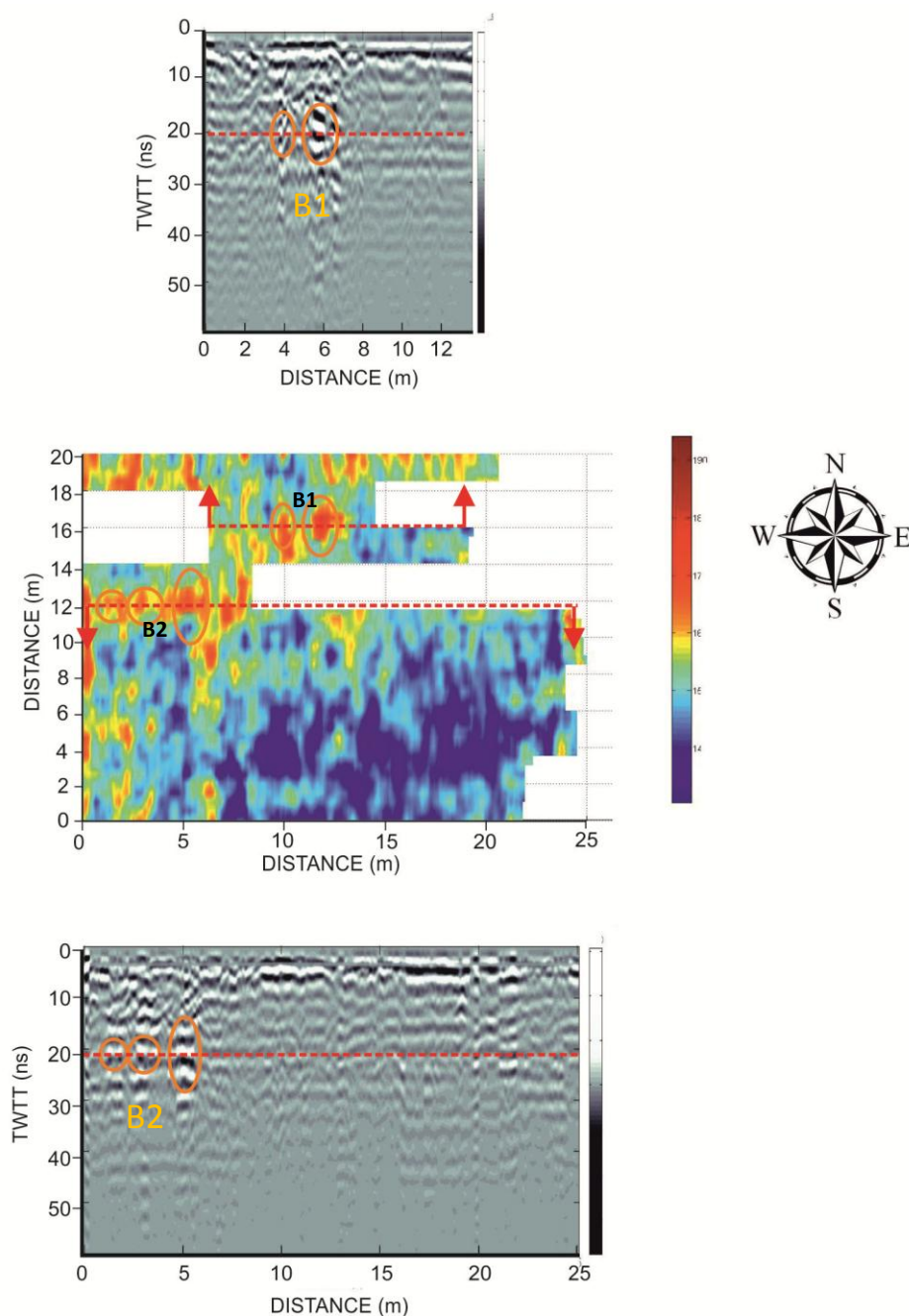


Σχήμα 4.4: Χάρτες ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης της περιοχής B για τις συχνότητες 1, 9 και 15 kHz (α, β, γ) αντίστοιχα. Οι περιοχές με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις.

#### 4.2.2 Μέθοδος γεωραντάρ

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται οριζόντια τομή (slice) γεωραντάρ σε χρόνο διαδρομής 20 ns (βάθος ~1m) για τον κάνναβο B, σε συνδυασμό με δύο επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ της περιοχής στα 12 και στα 16 m αντίστοιχα.





Σχήμα 4.6: Οριζόντια τομή (slice) γεωραντάρ στα 20 ns και τομές γεωραντάρ στα 16 m (πάνω) και 12m (κάτω) στον κάνναβο B.

Στην τομή γεωραντάρ των 16 m παρατηρείται ζώνη ανακλάσεων B1 για χρόνο διαδρομής 20 ns και απόσταση 4-7 m και η ύπαρξη τους μπορεί να σχετίζεται με την ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων. Λόγω φυσικών εμποδίων εντός του καννάβου, η γραμμή μελέτης των 16m ξεκίνησε από τα 6m και είχε μήκος 13.9m. Συνεπώς οι ανακλάσεις της ζώνης B1 παρατηρούνται σε απόσταση 10 – 13m στην οριζόντια τομή των 20 ns.

Στην τομή γεωραντάρ των 12 m παρατηρείται ζώνη ανακλάσεων B2 για χρόνο διαδρομής 20 ns και οριζόντια θέση από 1-5 m. Η δημιουργία αυτών των ανακλάσεων μπορεί να σχετίζεται με την ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων. Το μήκος της γραμμής μελέτης ήταν 25 m και η αρχή της βρίσκεται στα 0 m, συνεπώς οι ανακλάσεις αυτές παρατηρούνται στην ίδια απόσταση στην οριζόντια τομή των 20 ns, με κόκκινο χρώμα.

#### 4.2.3 Μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας

Η γεωφυσική έρευνα γύρω από το αρχαίο ρωμαϊκό θέατρο των Απτέρων περιλάμβανε τη διεξαγωγή δύο παράλληλων ηλεκτρικών τομογραφιών K1 και K2 διεύθυνσης N-B στην περιοχή B. Οι γραμμές ρεύματος αναπτύχθηκαν σε περιοχή όπου αναμενόταν η ύπαρξη θαμμένου αρχαίου αναλληματικού τοίχου, του οποίου τμήμα είχε εμφανιστεί από ανασκαφή στο βορειοανατολικό τμήμα του καννάβου και η προέκταση του οποίου αναμενόταν να διασχίζει το έδαφος κάτω από τον κάνναβο.

Το μήκος των γραμμών ήταν 20m, η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων 0.5m. και η απόσταση μεταξύ των γραμμών 5.2m. Για τη διεξαγωγή και καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο STING R1 – Earth Resistivity Meter.

Στην εικόνα 4.3 παρουσιάζεται η διάταξη των ηλεκτρικών τομογραφιών K1 και K2. Η υπάρχουσα ανασκαφή στα δεξιά της εικόνας έχει αποκαλύψει τμήμα αναλληματικού τοίχου του οποίου η προέκταση αναμένεται κάτω από το έδαφος του καννάβου B, ως φαίνεται.

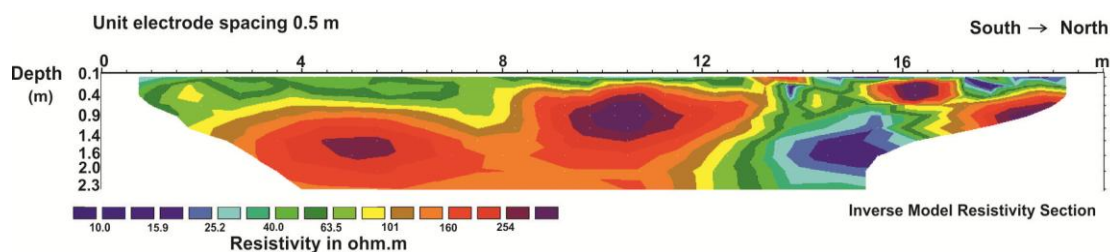


Εικόνα 4.3: Η διάταξη των ηλεκτρικών τομογραφιών K1, K2 στην περιοχή μελέτης

Με το πέρας της επεξεργασίας των ληφθέντων μετρήσεων στο λογισμικό Res2DInv προέκυψαν τα τελικά μοντέλα γεωηλεκτρικών τομών που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

### Ηλεκτρική τομογραφία K1

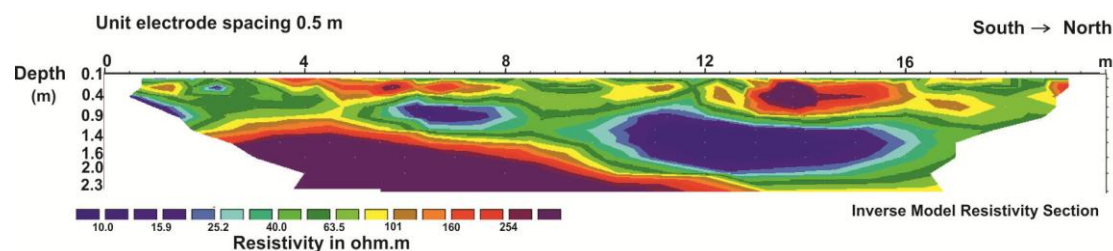
Στο σχήμα 4.7 παρατίθεται εικόνα της γεωηλεκτρικής τομής K1. Το μήκος της γραμμής είναι 20 m και έχει διεύθυνση Νότος-Βορράς με το 0 να βρίσκεται στο Νότο. Το βάθος διασκόπησης αρχικά ήταν 4.5m και τροποποιήθηκε στα 2.5m. Παρατηρείται η εμφάνιση υψηλών αντιστάσεων σε βάθος ~0.1 έως 0.5 m και μήκος από 9-12 m, στο σημείο όπου προβλέπεται η θαμμένη προέκταση του αναλληματικού τοίχου.



Σχήμα 4.7: Γεωηλεκτρική τομή K1

### Ηλεκτρική τομογραφία K2

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται εικόνα της γεωηλεκτρικής τομής K2. Το μήκος της γραμμής μελέτης είναι επίσης στα 20 m όπως και η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων στα 0.5 m. Το βάθος διασκόπησης τροποποιήθηκε στα 2.5 m. Παρατηρούνται υψηλές αντιστάσεις σε απόσταση ~ 13-16 m, και βάθος ~ έως 0.5 m.



Σχήμα 4.8: Γεωηλεκτρική τομή K2

### 4.3 Περιοχή Γ

Στην περιοχή Γ σχεδιάστηκε κάνναβος διαστάσεων 40m x 27m. Στην περιοχή βρίσκονται αραιά δέντρα ενώ στα νότια υπάρχει ένας μεγάλης κλίσης βράχος που οριοθετεί την περιοχή. Στη βόρειο ανατολική πλευρά του καννάβου υπήρχαν μπάζα της ανασκαφής. Επιλέχθηκαν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και η μέθοδος του γεωραντάρ. Και με τις δύο μεθόδους συλλέχθηκαν δεδομένα σε ισαπέχουσες (0.5m) παράλληλες γραμμές ανά 0.5m για την HM μέθοδο και 0.05m για το γεωραντάρ, με διεύθυνση Δ-Α κατά μήκος των γραμμών και ξεκινώντας από Νότια προς Βόρεια.

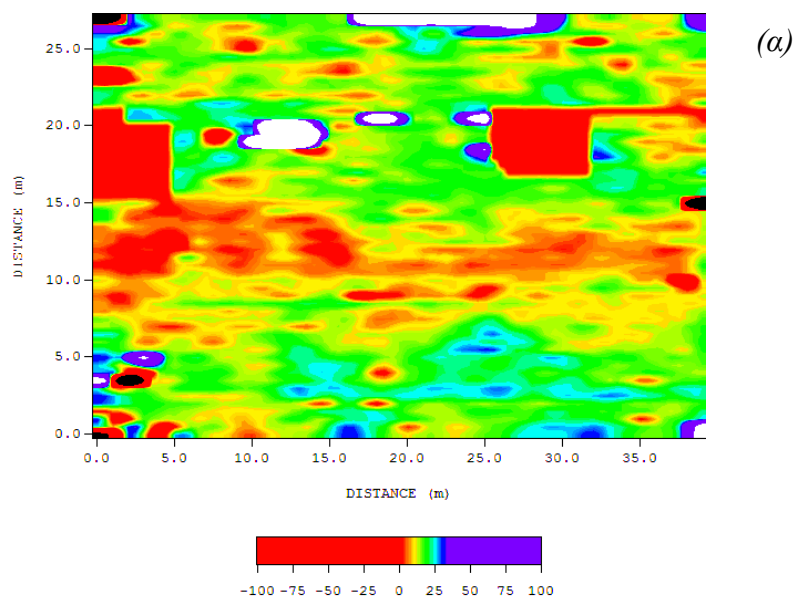


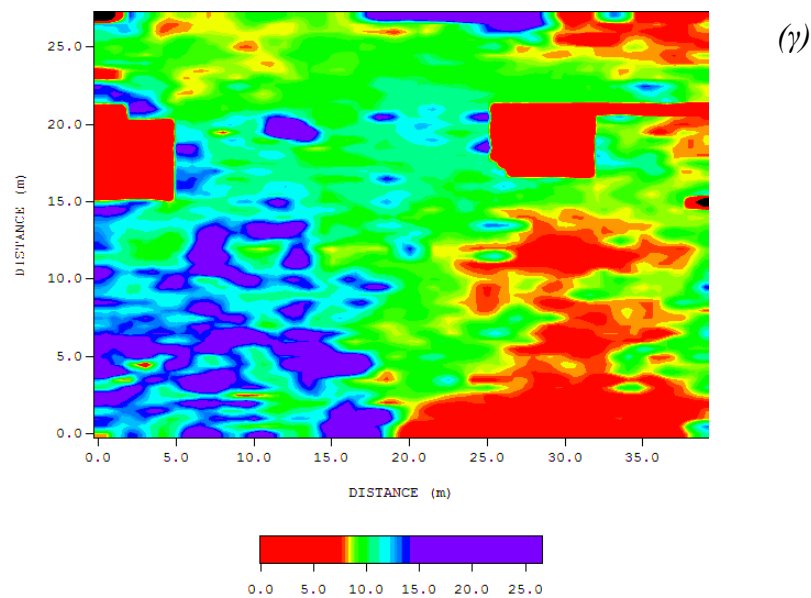
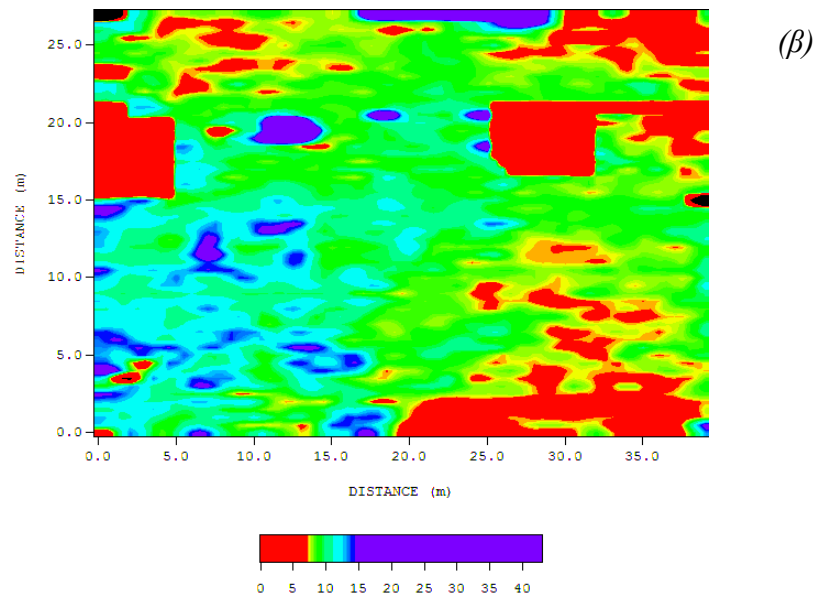


Εικόνα 4.4: Η περιοχή Γ από βορειοδυτική λήψη. Διακρίνεται ο βράχος στα νότια της περιοχής και ο σωρός από μπάζα της ανασκαφής

#### 4.3.1 Μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη

Τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη για την περιοχή Γ παρουσιάζονται στο σχήμα 4.9 στις συχνότητες 1, 9 και 15 kHz αντίστοιχα.

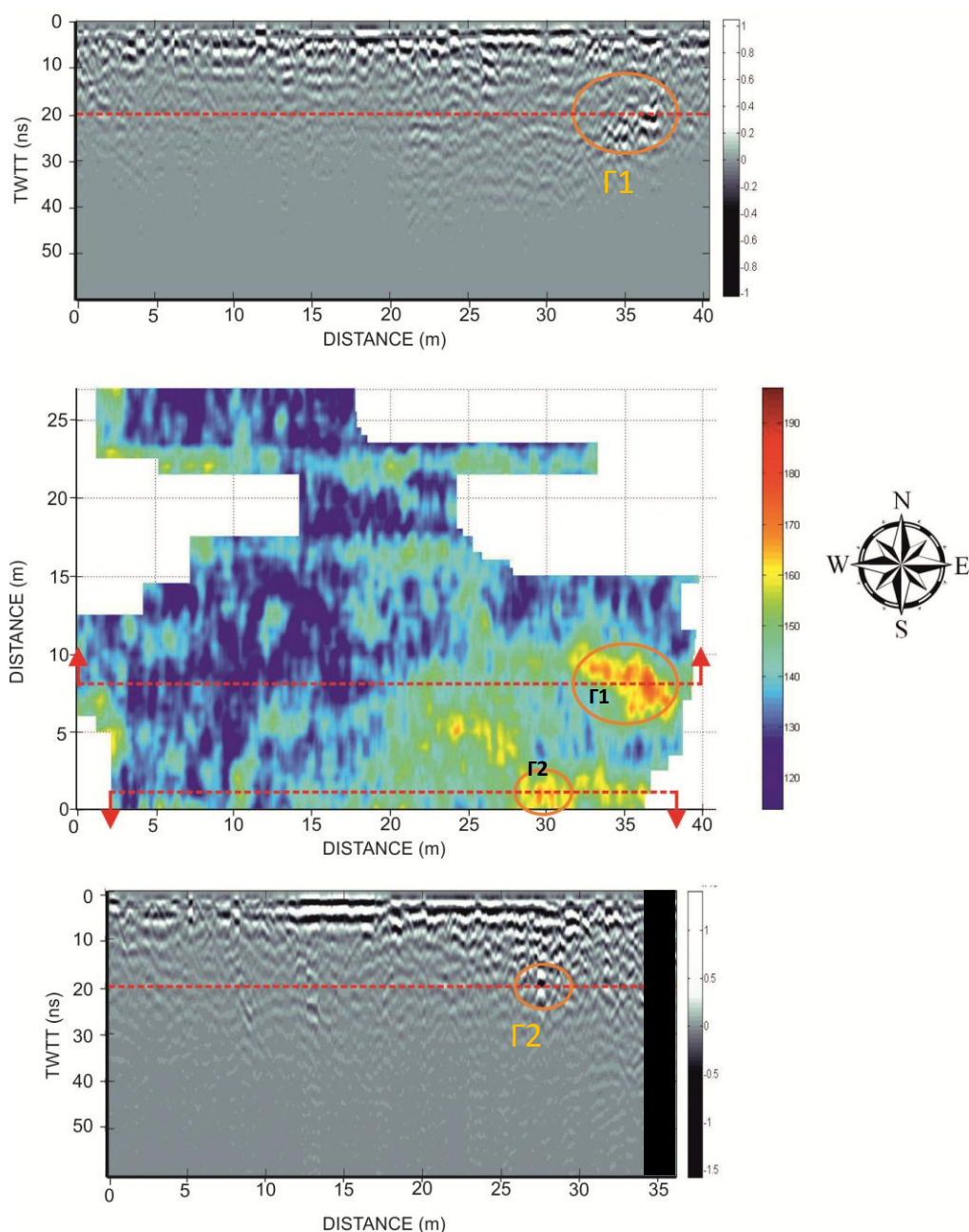




Σχήμα 4.9: Χάρτες ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης της περιοχής Γ για τις συχνότητες 1, 9 και 15 kHz (α, β, γ) αντίστοιχα. Οι περιοχές με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις.

#### 4.3.2 Μέθοδος γεωραντάρ

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται οριζόντια τομή (slice) γεωραντάρ σε χρόνο διαδρομής 20 ns (βάθος ~1m) για τον κάνναβο Γ, σε συνδυασμό με δύο επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ της περιοχής στο 1m και στα 8m αντίστοιχα.



Σχήμα 4.11: Οριζόντια τομή (slice) γεωραντάρ στα 20 ns και τομές γεωραντάρ στα 8m (πάνω) και 1m (κάτω) στον κάνναβο Γ.

Στην τομή γεωραντάρ των 8m παρατηρείται η ζώνη ανακλάσεων  $\Gamma_1$  σε χρόνο διαδρομής 20ns στην οριζόντια θέση των 35m, η οποία μπορεί να σχετίζεται με την ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων. Η ζώνη ανακλάσεων  $\Gamma_1$  παρατηρείται στην οριζόντια τομή των 20ns σε απόσταση 35m με κόκκινο χρώμα. Η γραμμή μελέτης είχε μήκος 40m και ξεκινούσε από τα 0m.

Στην τομή γεωραντάρ του 1m παρατηρείται η ανάκλαση  $\Gamma_2$  σε χρόνο διαδρομής 20 ns στην οριζόντια θέση των ~28m. Η γραμμή μελέτης του 1m στον κάνναβο Γ είχε



μήκος 36m και ξεκινάει από τα 2m, επομένως η ανάκλαση Γ2 παρατηρείται σε απόσταση ~30m στην οριζόντια τομή για τα 20ns με κόκκινο χρώμα.

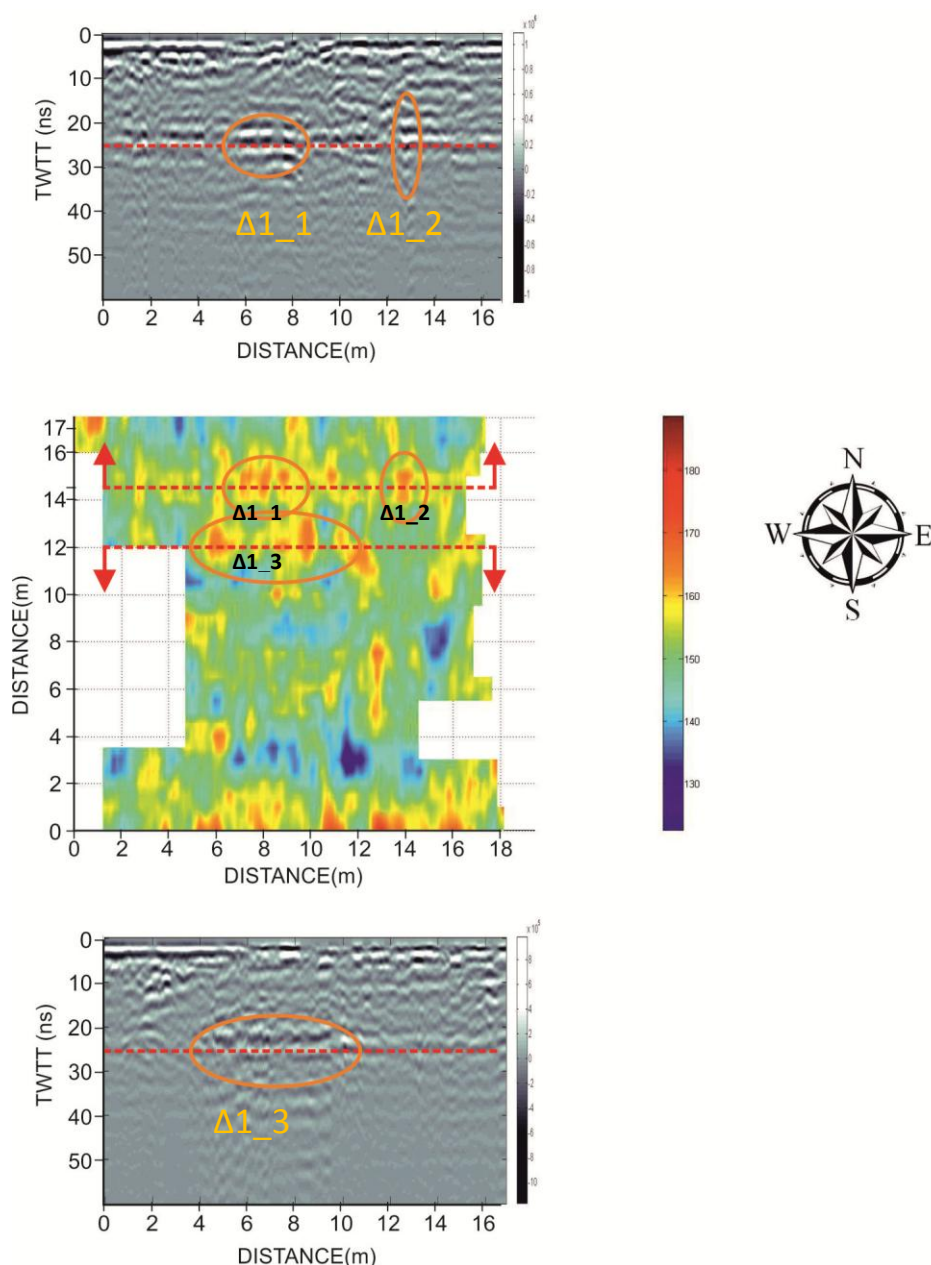
#### 4.4 Περιοχή Δ

Στην περιοχή Δ σχεδιάστηκαν 2 κάρναβοι διαστάσεων 18m x 17.5m (Δ1) και 11m x 22m (Δ2), αντίστοιχα διότι: Στο δυτικό μέρος του κάρναβου βρίσκεται σε εξέλιξη ανασκαφή η οποία τον χωρίζει σε δύο μέρη. Στο ανατολικό μέρος υπάρχει σιδερένιος φράχτης ενώ στο νότιο μέρος του ο χώρος καταλαμβάνεται από ελαιόδεντρα και θάμνους. Επιλέχθηκε η μέθοδος του γεωραντάρ.

##### ➤ Κάρναβος Δ1

Στον κάρναβο Δ1 τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε ισαπέχουσες γραμμές διεύθυνσης Δ-Α, με ισαπόσταση γραμμών 0.5m, ξεκινώντας από Νότο προς Βορρά.

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται οριζόντια τομή γεωραντάρ στον κάρναβο Δ1 για χρόνο διαδρομής 20-25 ns. Η κατασκευή της οριζόντιας τομής έγινε χρησιμοποιώντας το μέσο όρο των δεδομένων από 20 έως 25 ns και παρουσιάζεται σε συνδυασμό με δύο επιλεγμένες τομές γεωραντάρ που παρουσίασαν μεγαλύτερο ενδιαφέρον (12m και 14.5m).



Σχήμα 4.12: Οριζόντια τομή γεωραντάρ για χρόνο διαδρομής 20-25ns και τομές γεωραντάρ στα 14.5m (πάνω) και στα 12m (κάτω) στον κάνναβο Δ1.

Στην τομή γεωραντάρ των 14.5 m παρατηρείται ζώνη ανάκλασεων  $\Delta 1\_1$  καθώς και η ανάκλαση  $\Delta 1\_2$  για χρόνο διαδρομής από 20-25 ns. Η γραμμή μελέτης είχε μήκος ~17m και ξεκινούσε από το 1 m εντός του καννάβου. Η ζώνη ανακλάσεων  $\Delta 1\_1$  παρατηρείται σε απόσταση 6-8 m στην τομή γεωραντάρ και αντίστοιχα σε απόσταση 7-9 m στην οριζόντια τομή των 20-25 ns με κόκκινο χρώμα. Αντίστοιχα η ανάκλαση  $\Delta 1\_2$  παρατηρείται σε απόσταση 13 m στην τομή γεωραντάρ και 14 m στην οριζόντια τομή των 20-25 ns.

Στην τομή γεωραντάρ των 12 m παρατηρείται ζώνη ανακλάσεων Δ1\_3 για χρόνο διαδρομής από 20-25 ns. Το μήκος της γραμμής μελέτης ήταν ~17 m και η αρχή της στο 1 m εντός του καννάβου. Η ζώνη ανακλάσεων Δ1\_3 παρατηρείται σε απόσταση 5-10 m στην τομή γεωραντάρ και αντίστοιχα σε απόσταση 6-11 m στην οριζόντια τομή των 20-25 ns.

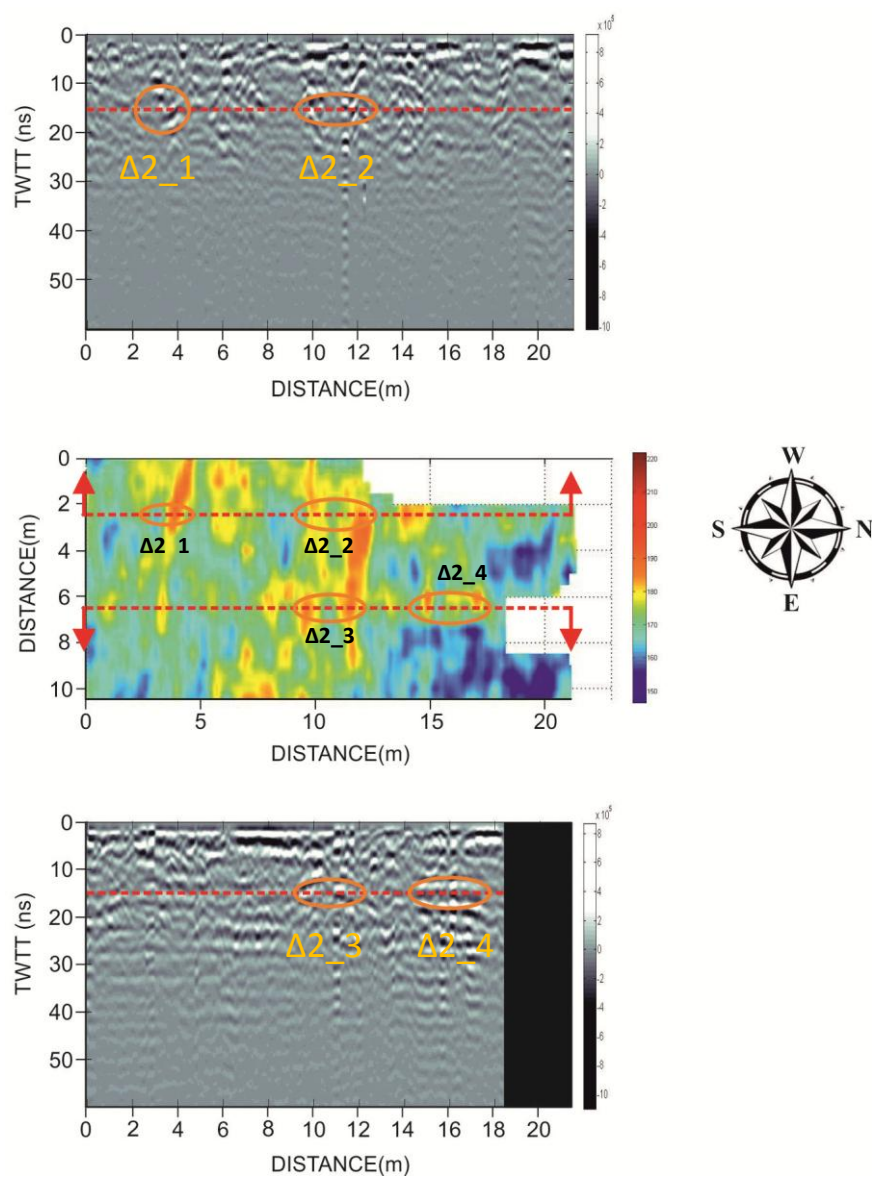
➤ Κάνναβος Δ2

Στον κάνναβο Δ2 τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε ισαπέχουσες γραμμές διεύθυνσης N-B και με ισαπόσταση γραμμών 0.5 m ξεκινώντας από Δύση προς Ανατολή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να προκύψει μικρότερος αριθμός μεγαλύτερου μήκους γραμμών, εξοικονομώντας χρόνο κατά τη λήψη και την επεξεργασία των δεδομένων.

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται οριζόντια τομή γεωραντάρ στον κάνναβο Δ2 για χρόνο διαδρομής 15ns σε συνδυασμό με δύο επιλεγμένες τομές γεωραντάρ που παρουσίασαν μεγαλύτερο ενδιαφέρον (2.5m και 6.5m).

Στην τομή γεωραντάρ των 2.5m παρατηρείται ανάκλαση Δ2\_1 για χρόνο διαδρομής 15ns και απόσταση 3-4 m. Το μήκος της γραμμής μελέτης ήταν 22m και η αρχή της βρισκόταν στο 0, συνεπώς η ανάκλαση Δ2\_1 παρατηρείται στην οριζόντια τομή των 15ns στην ίδια απόσταση με κόκκινο χρώμα. Στην ίδια τομή παρατηρείται και η ανάκλαση Δ2\_2 σε απόσταση 10-12 m, όπου εμφανίζεται στην οριζόντια τομή των 15 ns στην αντίστοιχη απόσταση.

Στην τομή γεωραντάρ των 6.5m παρατηρείται ανάκλαση Δ2\_3 για χρόνο διαδρομής 15ns και απόσταση 10-12m. Το μήκος της γραμμής μελέτης ήταν 22m και η αρχή της βρισκόταν στο 0, με αποτέλεσμα η ανάκλαση Δ2\_3 να παρατηρείται στην οριζόντια τομή των 15ns στην ίδια απόσταση με κόκκινο χρώμα. Τέλος, στην ίδια τομή παρατηρείται και η ανάκλαση Δ2\_4 σε απόσταση 15-17m και στην αντίστοιχη απόσταση στην οριζόντια τομή.



Σχήμα 4.13: Οριζόντια τομή γεωραντάρ για χρόνο διαδρομής 15ns και τομές γεωραντάρ στα 2.5m (πάνω) και στα 6.5m (κάτω) στον κάρναβο Δ2.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ**

### **ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

#### **5.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ερμηνεία των εικόνων που προέκυψαν μετά την επεξεργασία των αρχικών γεωφυσικών δεδομένων σε κάθε περιοχή. Στις περιοχές ενδιαφέροντος που παρατηρήθηκαν υποδεικνύεται με μαύρες γραμμές η διάταξη των πιθανών θαμμένων ανθρωπογενών δομών από τις οποίες δύναται να προκαλούνται οι εκάστοτε ανωμαλίες. Η τελική ερμηνεία σε κάθε περιοχή έγινε συνδυάζοντας τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου όπου διεξήχθη στην περιοχή, με σκοπό να εξαχθούν πιο ακριβή συμπεράσματα.

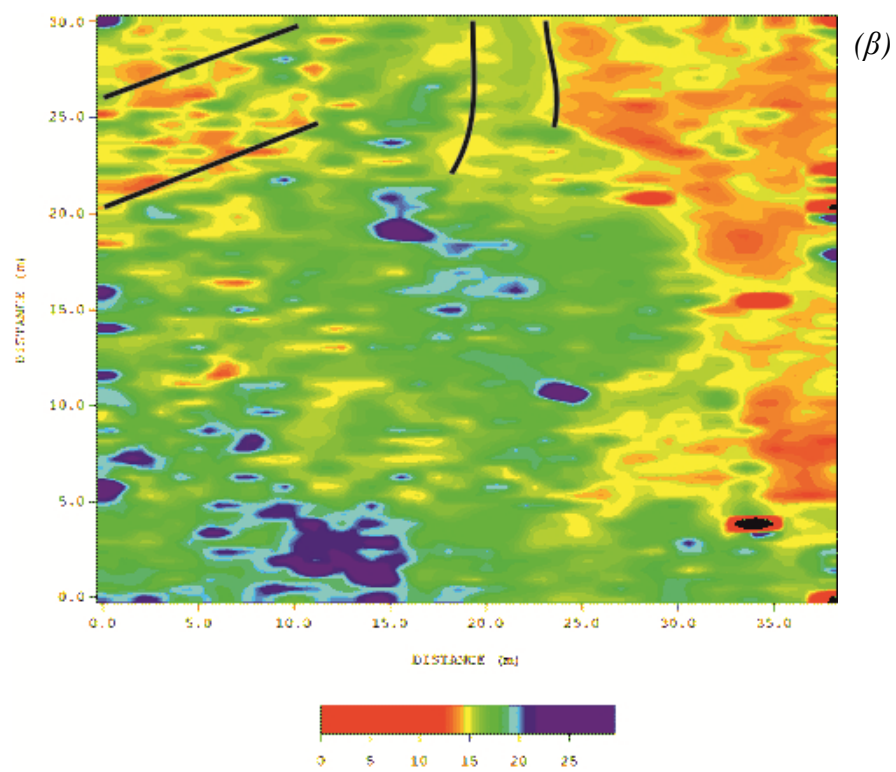
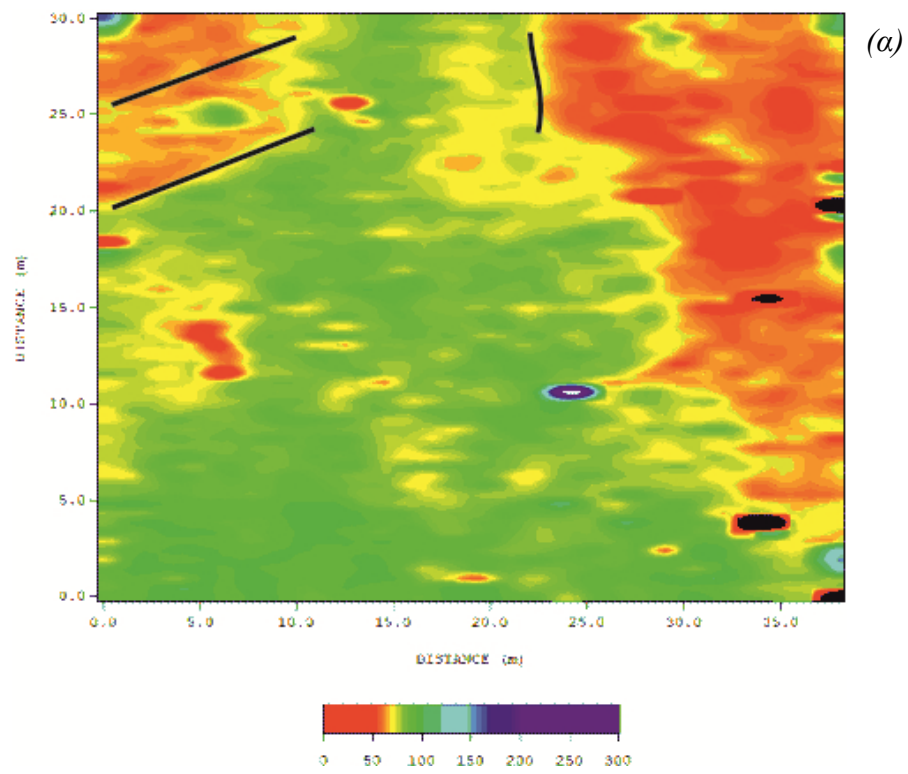
#### **5.2 Ερμηνεία Γεωφυσικών δεδομένων**

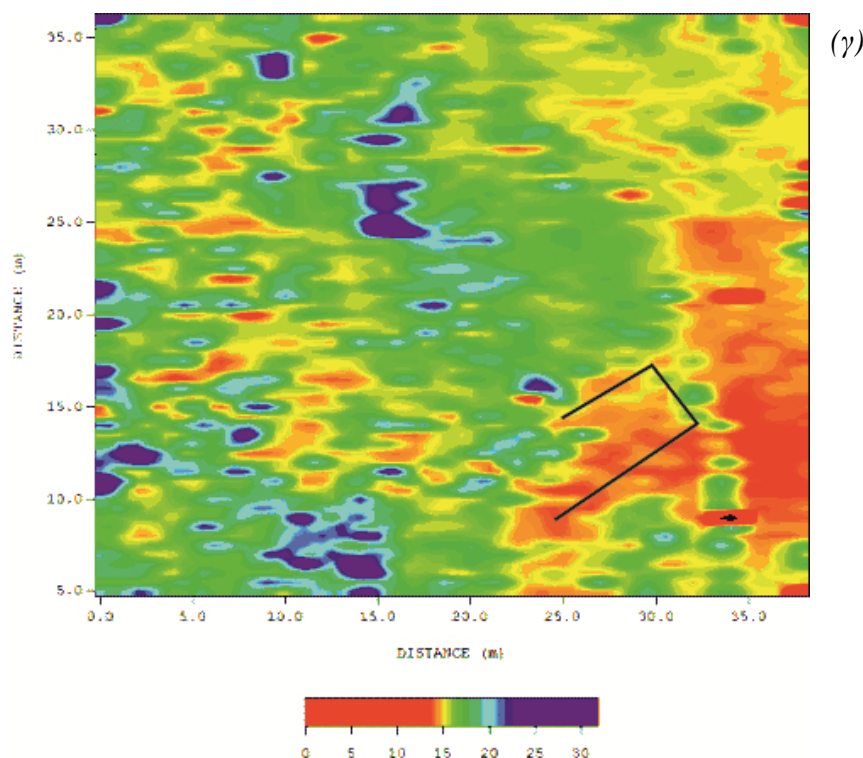
Παρακάτω γίνεται ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων σε κάθε περιοχή, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των μεθόδων που εφαρμόστηκαν, όπως επίσης και τις υπάρχουσες ενδείξεις στον αρχαιολογικό χώρο όπου προσέφεραν σημαντική βοήθεια στην ερμηνεία των εικόνων.

##### **5.2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ Α**

###### **α) Ερμηνεία δεδομένων μεθόδου κινούμενου πομπού δέκτη**

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι εικόνες που προέκυψαν από τα δεδομένα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη στη συχνότητα των 1, 9 και 15 kHz αντίστοιχα στην περιοχή Α, όπου οι περιοχές ενδιαφέροντος έχουν σημειωθεί με μαύρο χρώμα.





Σχήμα 5.1: Ερμηνεία ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης στον καννάβο Α στις συχνότητες 1, 9 και 15 kHz (α, β και γ αντίστοιχα).

Στις συχνότητες των 1 και 9 kHz (α και β) παρατηρούνται γραμμικές ανωμαλίες στο βορειοδυτικό και στο βόρειο τμήμα του καννάβου με κόκκινο χρώμα. Το βάθος διασκόπησης σε αυτές τις συχνότητες είναι ~1.5 και ~1 m αντίστοιχα. Οι ανωμαλίες αυτές παρουσιάζουν χαμηλές αγωγιμότητες άρα και υψηλές αντιστάσεις και πιθανόν να σχετίζονται με την ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων.

Στη συχνότητα των 15 kHz (γ) παρατηρείται γραμμική ανωμαλία στο νοτιοανατολικό τμήμα του καννάβου με κόκκινο χρώμα που πιθανόν να οφείλεται σε θαμμένη δομή μικρού βάθους. Το βάθος διασκόπησης σε αυτή τη συχνότητα είναι 0.5 m. Όπως παρατηρείται στην εικόνα, οι προηγούμενες ανωμαλίες δεν γίνονται εμφανείς, πράγμα που σημαίνει ότι προέρχονται από δομές βάθους μεγαλύτερου των 0.5 m.

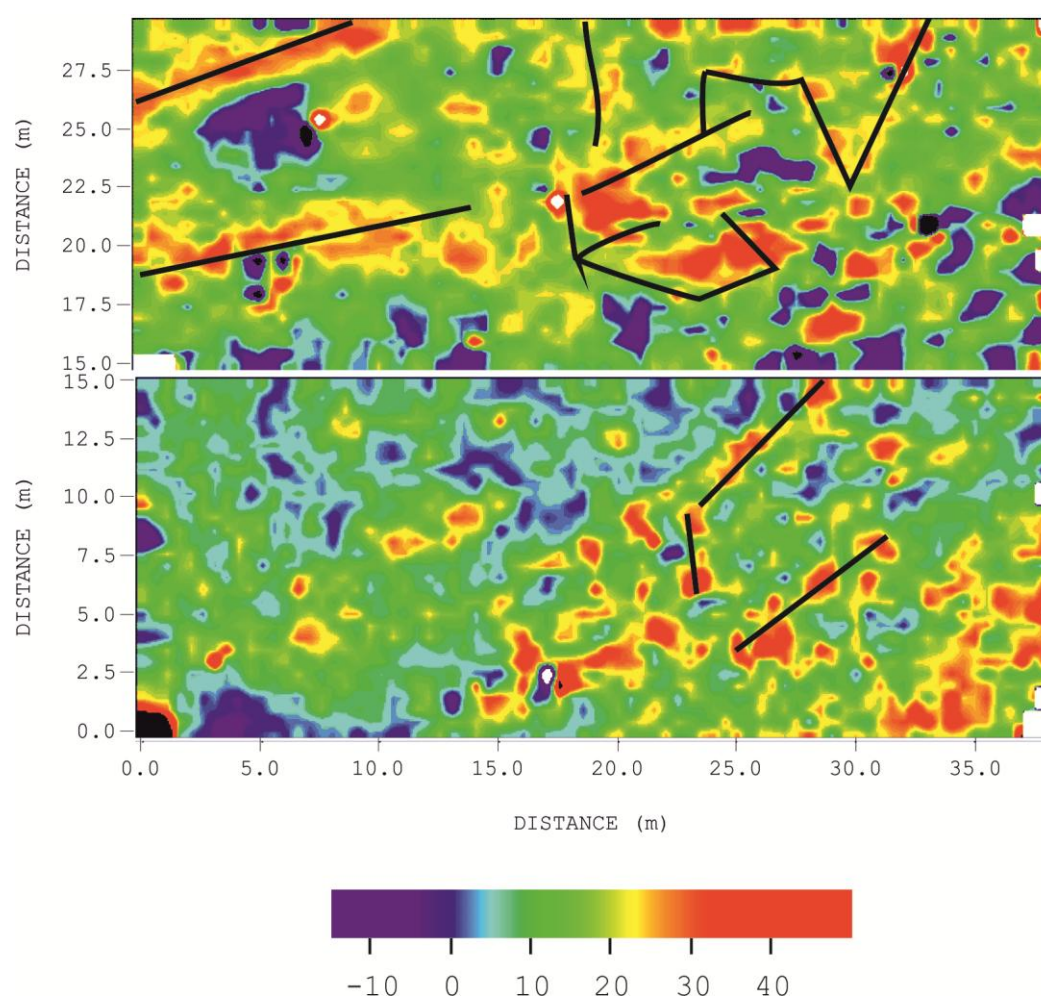
Οι εικόνες της H/M μεθόδου στην περιοχή Α παρουσιάζουν γενικά υψηλές αντιστάσεις λόγω του ότι στην περιοχή υπάρχουν πολλά επιφανειακά και θαμμένα υπολείμματα τοίχων. Περισσότερο ενδιαφέρον υπάρχει στο βόρειο μέρος του καννάβου και ειδικότερα στα βορειοδυτικά. Στα ανατολικά του καννάβου παρουσιάζεται επίσης μεγάλη γραμμική ανωμαλία διεύθυνσης N-B η οποία



αποδίδεται στο επιφανειακό χαλικόστρωτο το οποίο διασκορπίζει την ενέργεια των Η/Μ κυμάτων, καθώς και στον συρμάτινο φράχτη στα ανατολικά του καννάβου.

### β) Ερμηνεία μαγνητικών δεδομένων

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι εικόνες που προέκυψαν από τα δεδομένα της μαγνητικής μεθόδου στην περιοχή Α και οι περιοχές ενδιαφέροντος σημειώνονται με μαύρο χρώμα. Όπως αναφέρθηκε, κατά τη λήψη των μετρήσεων ο κάνναβος χωρίστηκε σε δύο μέρη (0-15 m και 15-30 m), και οι εικόνες που προέκυψαν παρουσιάζονται χωριστά.



Σχήμα 5.2: Ερμηνεία μαγνητικής χαρτογράφησης στα δύο μέρη του καννάβου Α.

Στο νότιο μέρος του καννάβου (0-15 m) παρατηρούνται γραμμικές ανωμαλίες στα ανατολικά με κόκκινο χρώμα, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με την ύπαρξη θαμμένων ανθρωπογενών δομών. Κάνοντας σύγκριση με την εικόνα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου των 15 kHz παρατηρείται ομοιότητα στην ύπαρξη

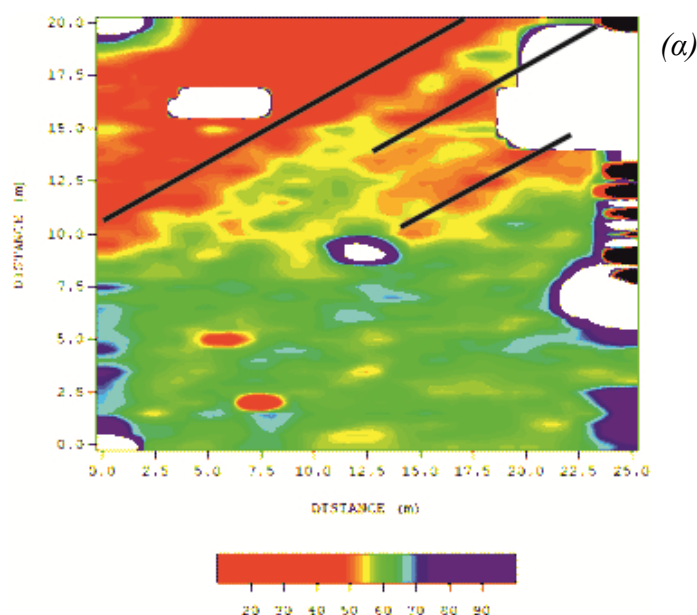
αυτών των ανωμαλιών στη συγκεκριμένη θέση, πράγμα που υποδεικνύει ότι πιθανόν πρόκειται για δομές μικρού βάθους.

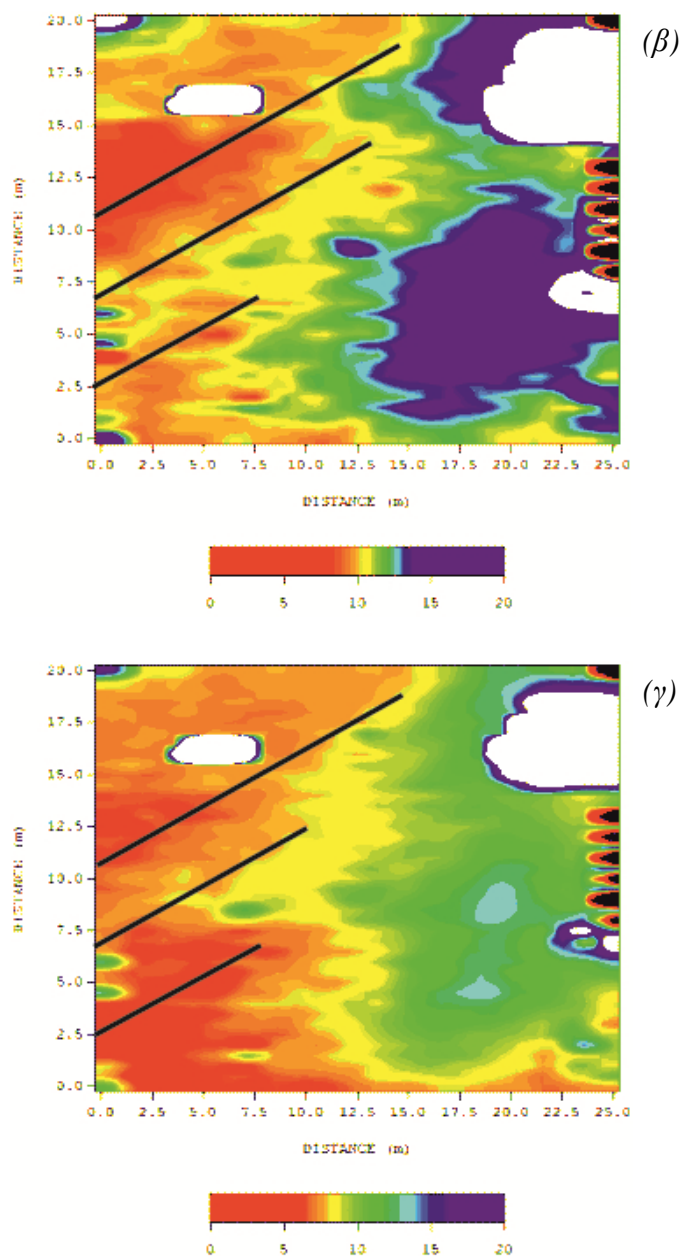
Στο βόρειο μέρος του καννάβου (15-30 m) παρατηρούνται γραμμικές ανωμαλίες στα δυτικά και βορειοανατολικά με κόκκινο χρώμα που μπορεί να σχετίζονται με την ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων. Κάνοντας σύγκριση με τις εικόνες της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου του 1 και των 9 kHz διακρίνεται η ύπαρξη όμοιων ανωμαλιών στα εν λόγω σημεία. Από αυτό το γεγονός συμπεραίνουμε ότι οι πιθανές δομές βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 0.5 m.

### 5.2.2 ΠΕΡΙΟΧΗ Β

#### α) Ερμηνεία δεδομένων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εικόνες που προέκυψαν από τα δεδομένα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη στην περιοχή Β, στις συχνότητες των 1, 9 και 15 kHz. Οι περιοχές ενδιαφέροντος σημειώνονται με μαύρες γραμμές. Στα βορειοανατολικά του καννάβου δε μπόρεσαν να παρθούν μετρήσεις, λόγω της υπάρχουσας ανασκαφής στο σημείο εκείνο το οποίο εμφανίζεται στις εικόνες με άσπρο χρώμα. Η ανασκαφή αυτή είχε αποκαλύψει τοίχο η προέκταση του οποίου περνούσε κάτω από τον κάνναβο.





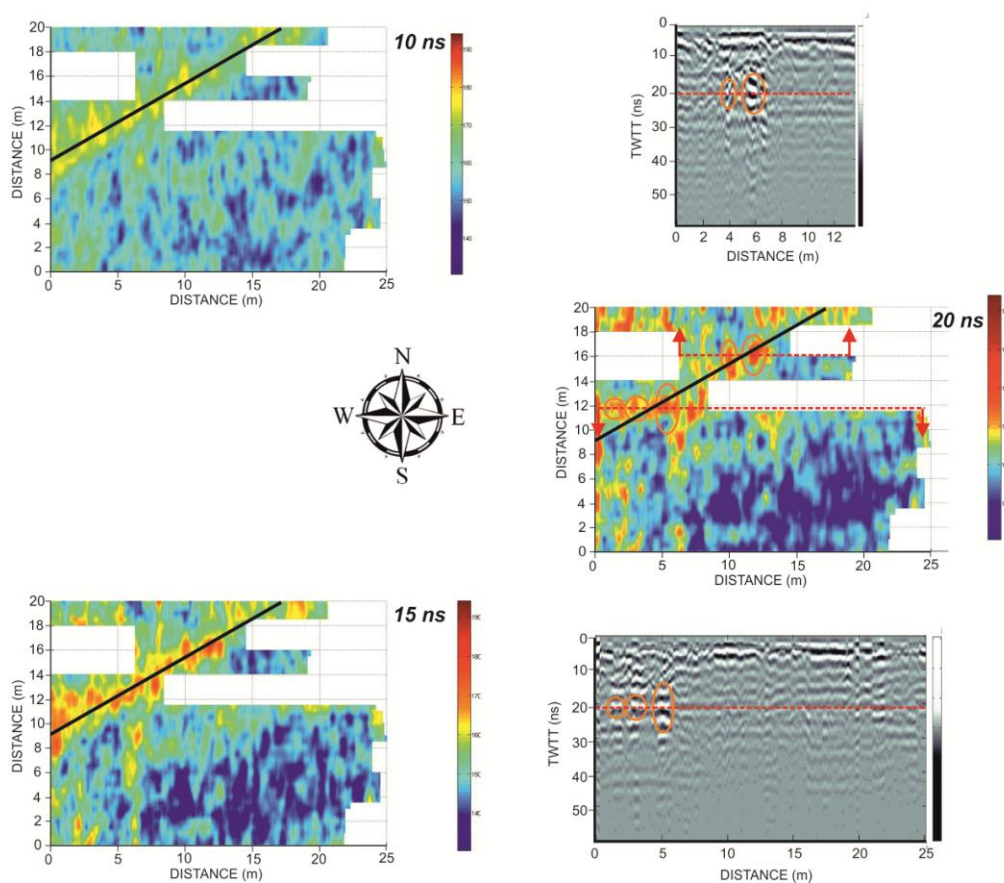
Σχήμα 5.3: Ερμηνεία ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης στον κάνναβο Β στα 1, 9 και 15 kHz (α, β και γ αντίστοιχα)

Στη συχνότητα 1 kHz (α) παρατηρούνται τρεις γραμμικές ανωμαλίες στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα του καννάβου με κόκκινο χρώμα, διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ, που υποδεικνύουν υψηλές αντιστάσεις και πιθανόν σχετίζονται με την ύπαρξη θαμμένων τοιχοδομών. Το βάθος διασκόπησης είναι  $\sim 1.5$  m. Διακρίνεται μεγάλη γραμμική ανωμαλία στα βόρεια, όπου πιθανόν υποδηλώνει την ύπαρξη θαμμένου τοίχου, ενώ η ανωμαλία στα βορειοανατολικά, στο σημείο όπου βρίσκεται η ενδιάμεση γραμμή, πιθανόν οφείλεται στη συνέχιση του τοίχου όπου έχει αποκαλυφθεί και καταλήγει στα νοτιοδυτικά.

Στις συχνότητες των 9 και 15 kHz (β και γ) όπου το βάθος διασκόπησης είναι ~ 1 m και 0.5 m αντίστοιχα, οι συγκεκριμένη ανωμαλίες που διακρίνονται στη συχνότητα 1 kHz, παρατηρούνται στα νοτιοδυτικά του καννάβου και όχι στα βορειοανατολικά, πράγμα που σημαίνει ότι οι πιθανές δομές εμφανίζονται πιο ρηχά στα νοτιοδυτικά, πιθανόν λόγω πιο λεπτού εδαφικού καλύμματος.

### β) Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι οριζόντιες τομές γεωραντάρ για την περιοχή Β σε χρόνους διαδρομής 10, 15 και 20 ns αντίστοιχα. Παρατηρούνται περιοχές με κόκκινο χρώμα, που υποδηλώνει μεγάλα πλάτη ανακλάσεων, οι οποίες παρουσιάζουν γραμμικότητα και μπορεί να οφείλονται σε θαμμένες τοιχοδομές. Το βάθος διασκόπησης στους αντίστοιχους χρόνους διαδρομής είναι ~ 0.5, 0.75 και 1 m αντίστοιχα.



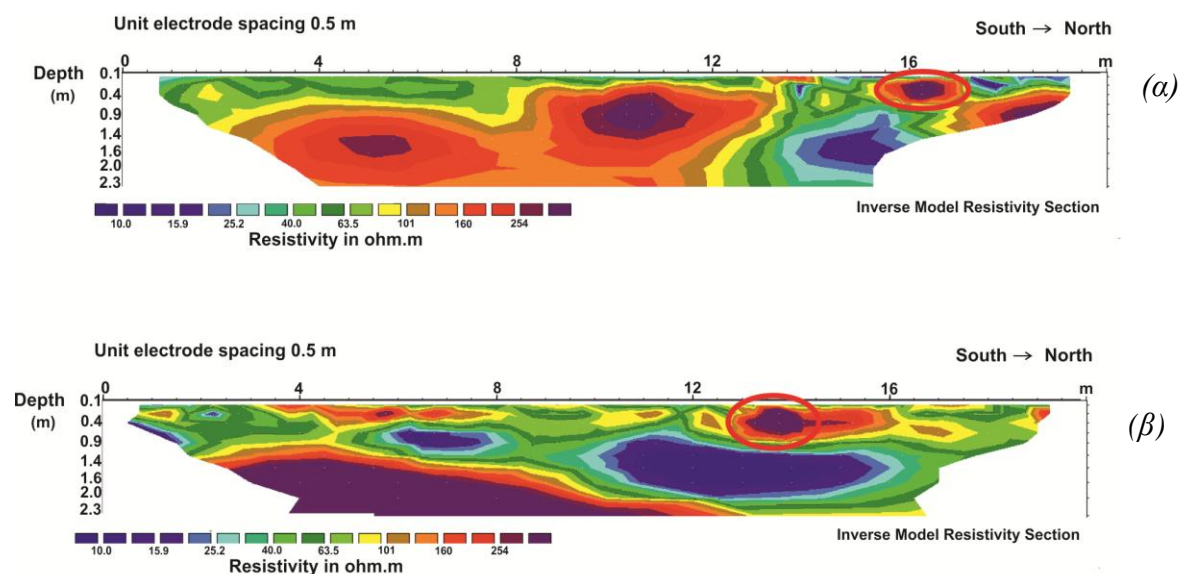
Σχήμα 5.4: Ερμηνεία slice γεωραντάρ στην περιοχή Β σε χρόνους 10, 15 και 20 ns, σε συνδυασμό με απεικόνιση τομών.



Στις οριζόντιες τομές του γεωραντάρ σε χρόνο διαδρομής 10, 15 και 20 ns για τον κάνναβο Β, παρατηρείται γραμμική ανωμαλία με κόκκινο χρώμα, η οποία ξεκινάει από βορειοανατολικά και καταλήγει στα νοτιοδυτικά του καννάβου και πιθανόν οφείλεται στην ύπαρξη του θαμμένου τοίχου.

γ) Ερμηνεία δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομών K1 και K2.



Σχήμα 5.5: Ερμηνεία γεωηλεκτρικών τομών K1 (α) και K2 (β).

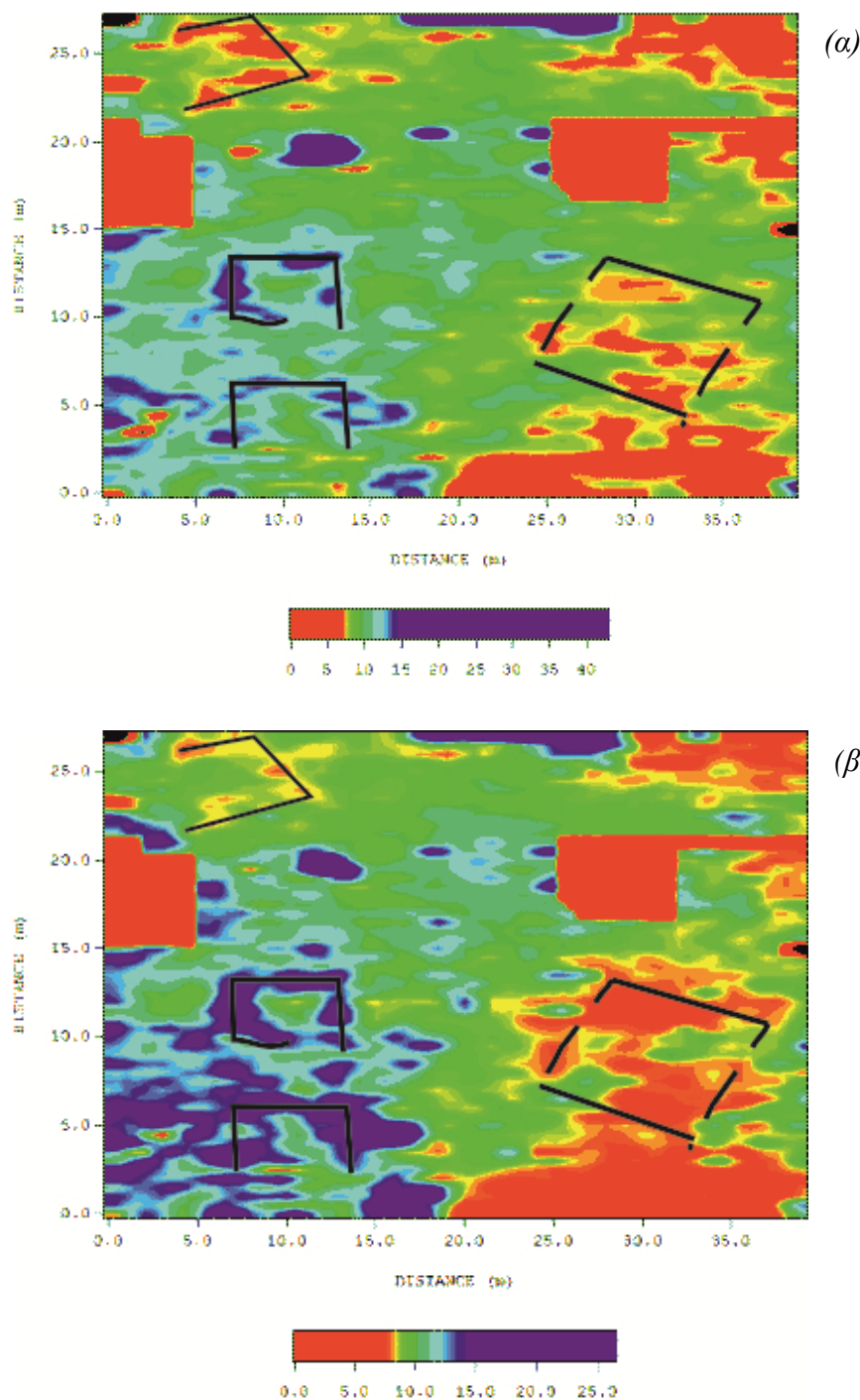
Στην γεωηλεκτρική τομή K1 (α) διακρίνεται η εμφάνιση υψηλών αντιστάσεων σε απόσταση ~15-17 m και βάθος 0.1 – 0.5 m που πιθανόν υποδεικνύει την ύπαρξη του θαμμένου τοίχου. Αυτή επιβεβαιώνεται στη γεωηλεκτρική τομή K2 (β) όπου ομοίως παρατηρούνται υψηλές αντιστάσεις σε μικρότερη απόσταση (~13-15 m) όπως αναμενόταν, δεδομένης της απόστασης των γραμμών και της διεύθυνσης του τοίχου.

### 5.2.3 ΠΕΡΙΟΧΗ Γ

α) Ερμηνεία δεδομένων κινούμενου πομπού-δέκτη

Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι εικόνες των δεδομένων της μεθόδου κινούμενου πομπού δέκτη στην περιοχή Γ, σε συχνότητες 1, 9 και 15 kHz αντίστοιχα, όπου οι περιοχές ενδιαφέροντος σημειώνονται με μαύρο χρώμα. Οι περιοχές με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν υψηλές αντιστάσεις. Οι δύο κόκκινες τετραγωνικές περιοχές στο βορειοανατολικό και βορειοδυτικό τμήμα του καννάβου είναι σημεία όπου δε

λήφθηκαν μετρήσεις λόγω της ύπαρξης σωρού από μάζα ανασκαφής (βορειοανατολικά) και δύσβατης περιοχής (βορειοδυτικά).



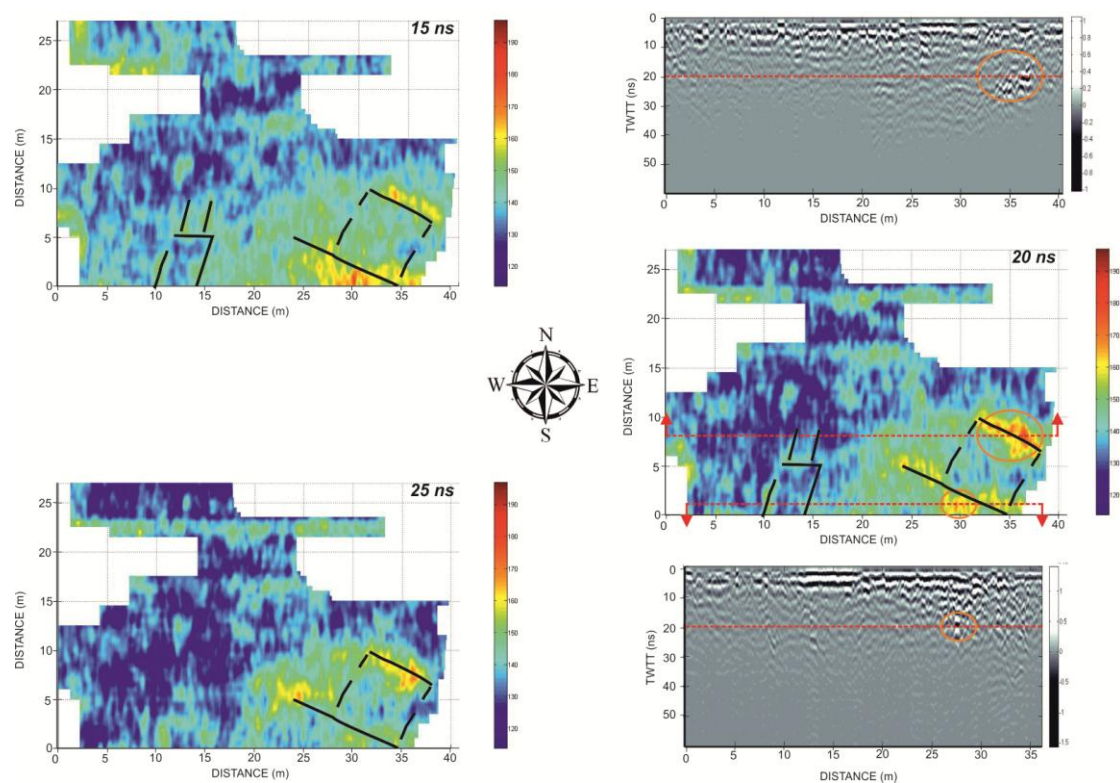
Σχήμα 5.6: Ερμηνεία ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης στον κάνναβο Γ στα 9 και 15 kHz (α και β αντίστοιχα).

Στις συχνότητες των 9 και 15 kHz (α και β) (βάθος 0.5 ως 1 m) διακρίνονται γραμμικές ανωμαλίες στα ανατολικά και βορειοδυτικά του καννάβου με κόκκινο χρώμα που μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη θαμμένων κτισμάτων. Επίσης στα

νοτιοδυτικά διακρίνονται με μπλε χρώμα περιοχές ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν γραμμικότητα και υποδεικνύουν χαμηλότερες αντιστάσεις.

### β) Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ

Στις οριζόντιες τομές γεωραντάρ σε χρόνους διαδρομής 15 ns (0.75 m) και 20 ns (1 m) διακρίνεται με κόκκινο χρώμα γραμμική ανωμαλία διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ στα νοτιοανατολικά του καννάβου, που υποδεικνύει μεγάλα πλάτη ανακλάσεων τα οποία μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη θαμμένων ανθρωπογενών δομών. Αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών, όπου παρατηρούνται υψηλές αντιστάσεις σε όμοια θέση οι οποίες πιθανόν προέρχονται από την ύπαρξη αρχαίων κτισμάτων. Επιπλέον στις τομές του γεωραντάρ διακρίνεται γραμμική ανωμαλία στα νότια – νοτιοδυτικά όμοια με αυτή των ηλεκτρομαγνητικών.



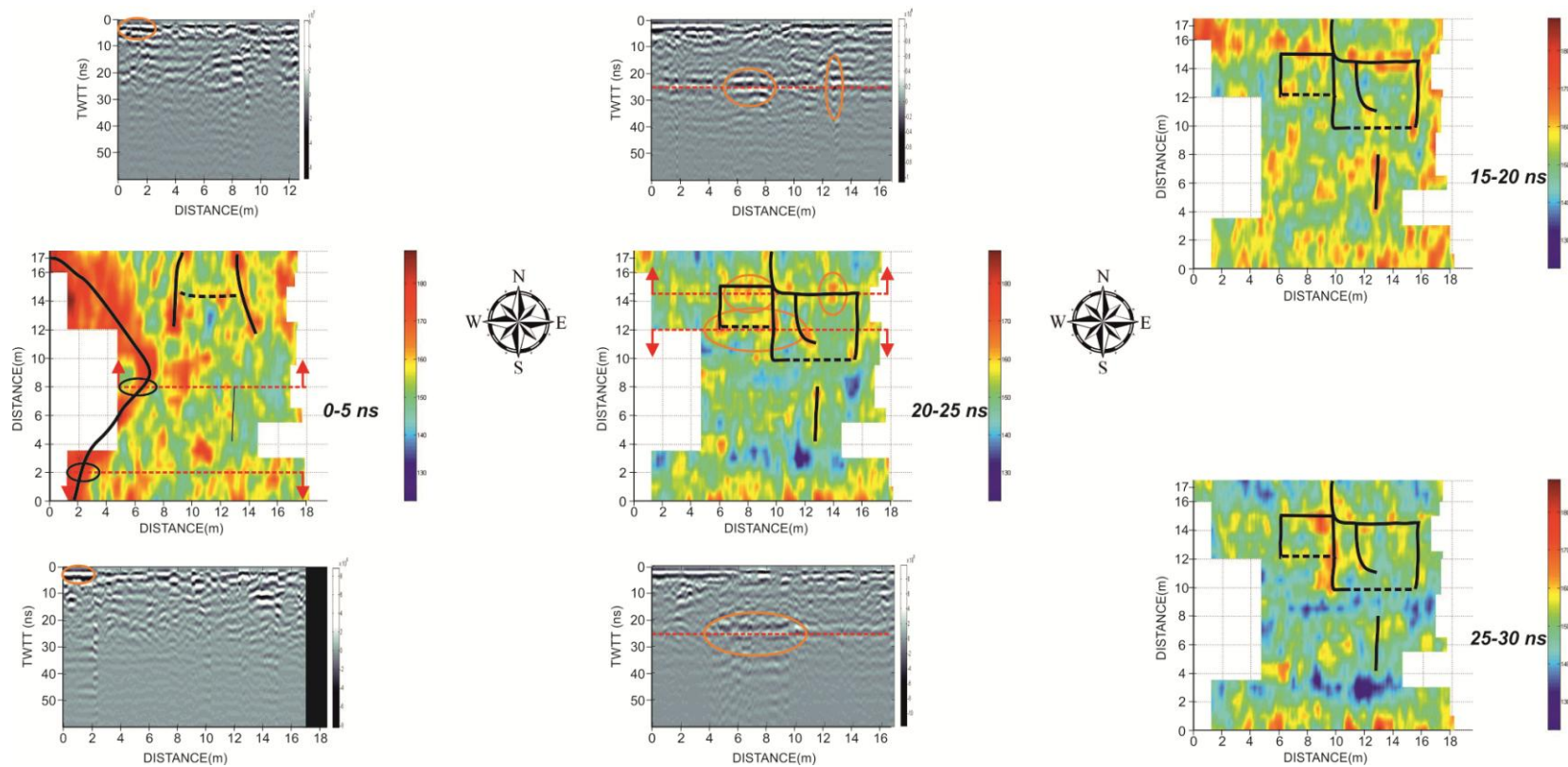
Σχήμα 5.7: Ερμηνεία slice γεωραντάρ στον κάνναβο Γ σε χρόνους 15, 20 και 25 ns, σε συνδυασμό με απεικόνιση τομών.



## 5.2.4 ΠΕΡΙΟΧΗ Δ

## α) Κάνναβος Δ1 – Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζονται οι οριζόντιες τομές γεωραντάρ για τον κάνναβο Δ1 σε χρόνους διαδρομής 0-5, 15-20, 20-25 και 25-30 ns.

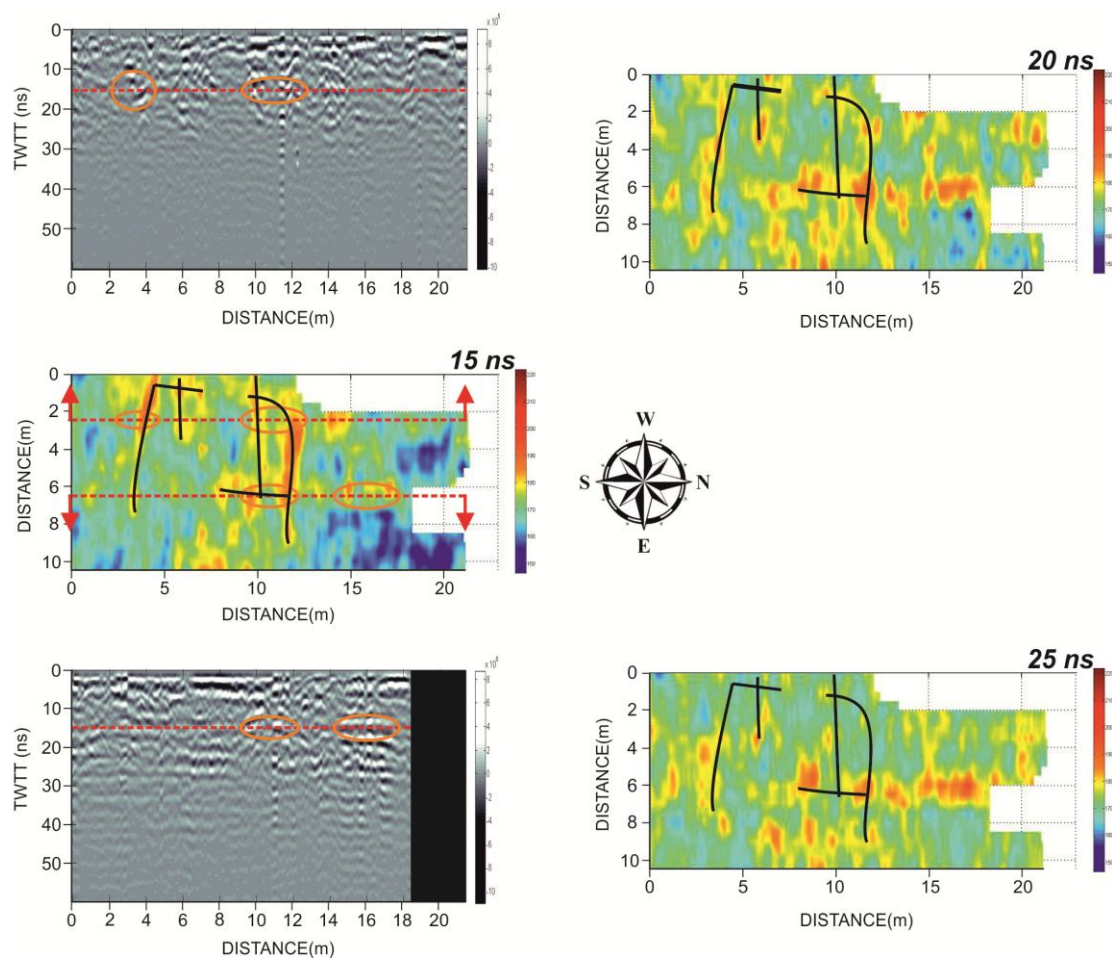


Σχήμα 5.8: Ερμηνεία slice γεωραντάρ στην περιοχή Δ1 σε χρόνους διαδρομής 0-5, 15-20, 20-25 και 25-30 ns, σε συνδυασμό με απεικόνιση τομών

Οι περιοχές με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν μεγάλα πλάτη ανάκλασης και παρουσιάζουν γραμμικότητα, συνεπώς μπορεί να σχετίζονται με την ύπαρξη θαμμένων αρχαίων ανθρωπογενών δομών. Συγκεκριμένα, στην οριζόντια τομή των 0-5 ns ( $\sim 0.25$  m) παρατηρούνται δύο γραμμικές ανωμαλίες στα δυτικά του καννάβου με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και ΝΔ-ΒΑ. Στις υπόλοιπες οριζόντιες τομές ( $\sim 0.75$  m έως  $\sim 1.5$  m) διακρίνονται γραμμικές ανωμαλίες στα βόρεια του καννάβου με διεύθυνση Ν-Β και Δ-Α.

### β) Κάνναβος Δ2 – Ερμηνεία δεδομένων γεωραντάρ

Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι οριζόντιες τομές γεωραντάρ για τον κάνναβο Δ2 σε χρόνους διαδρομής 15, 20 και 25 ns. Παρατηρούνται περιοχές με κόκκινο χρώμα οι οποίες παρουσιάζουν γραμμικότητα μπορεί να σχετίζονται με την ύπαρξη θαμμένων αρχαιοτήτων.



Σχήμα 5.9: Ερμηνεία slice γεωραντάρ στην περιοχή Δ2 σε χρόνους 15, 20 και 25 ns σε συνδυασμό με απεικόνιση τομών.

Στην οριζόντια τομή γεωραντάρ των 15 ns (βάθος 0.75 m) διακρίνονται γραμμικές ανωμαλίες διεύθυνσης Δ-Α στα δυτικά-νοτιοδυτικά του καννάβου. Στις οριζόντιες τομές των 20 και 25 ns διακρίνεται γραμμική ανωμαλία διεύθυνσης Ν-Β.

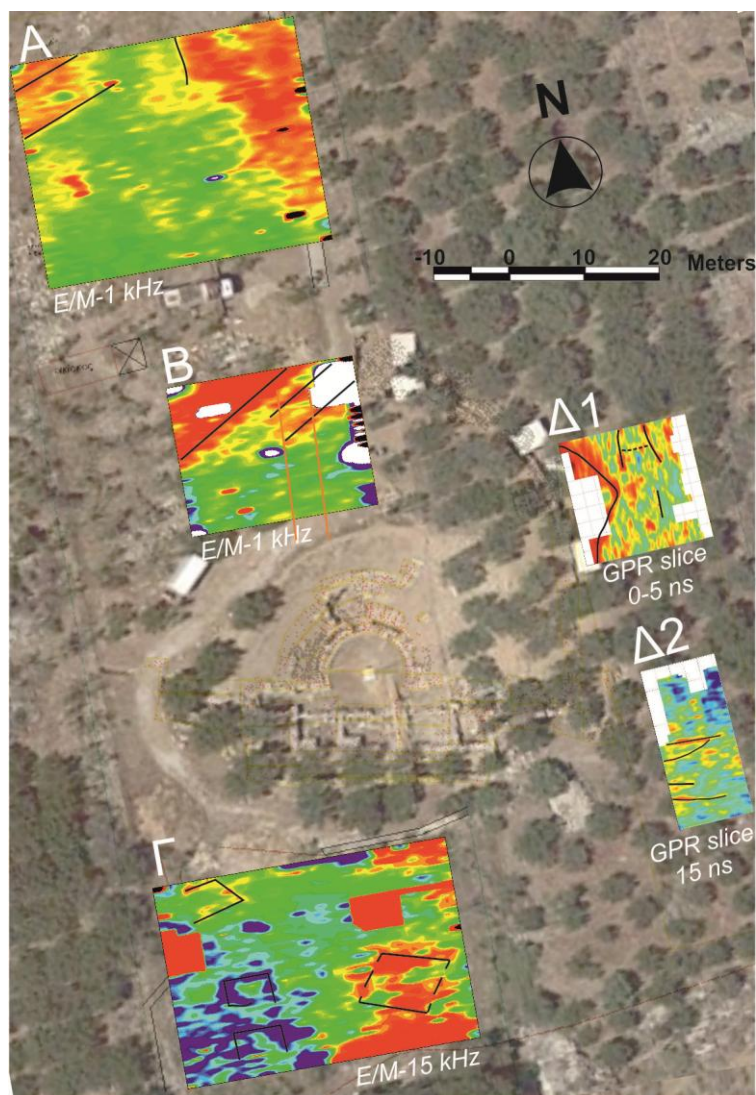
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά το πέρας της παρούσας γεωφυσικής μελέτης, όσον αφορά τις περιοχές ενδιαφέροντος που προέκυψαν καθώς και τα γενικότερα συμπεράσματα της μελέτης. Προτείνονται τοποθεσίες πραγματοποίησης αρχαιολογικών τομών στις περιοχές όπου διασκοπήθηκαν, καθώς και νέες περιοχές για γεωφυσική έρευνα στον αρχαιολογικό χώρο, βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

#### **6.1 Συμπεράσματα**

Αρχικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν ένα γρήγορο και μη καταστροφικό τρόπο εντοπισμού θέσεων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, οι πιθανές αρχαιολογικές δομές εμφανίζονται σε μικρό βάθος (έως ~ 1.5 m), όπως αναμενόταν. Στο σχήμα 6.1a και 6.1b παρουσιάζεται χάρτης της περιοχής σε συνδυασμό με το τοπογραφικό και επιλεγμένες εικόνες από τα αποτελέσματα που προέκυψαν.



Σχήμα 6.1α: Χάρτης (α) του Google σε συνδυασμό με το τοπογραφικό της περιοχής και γεωφυσικές εικόνες.

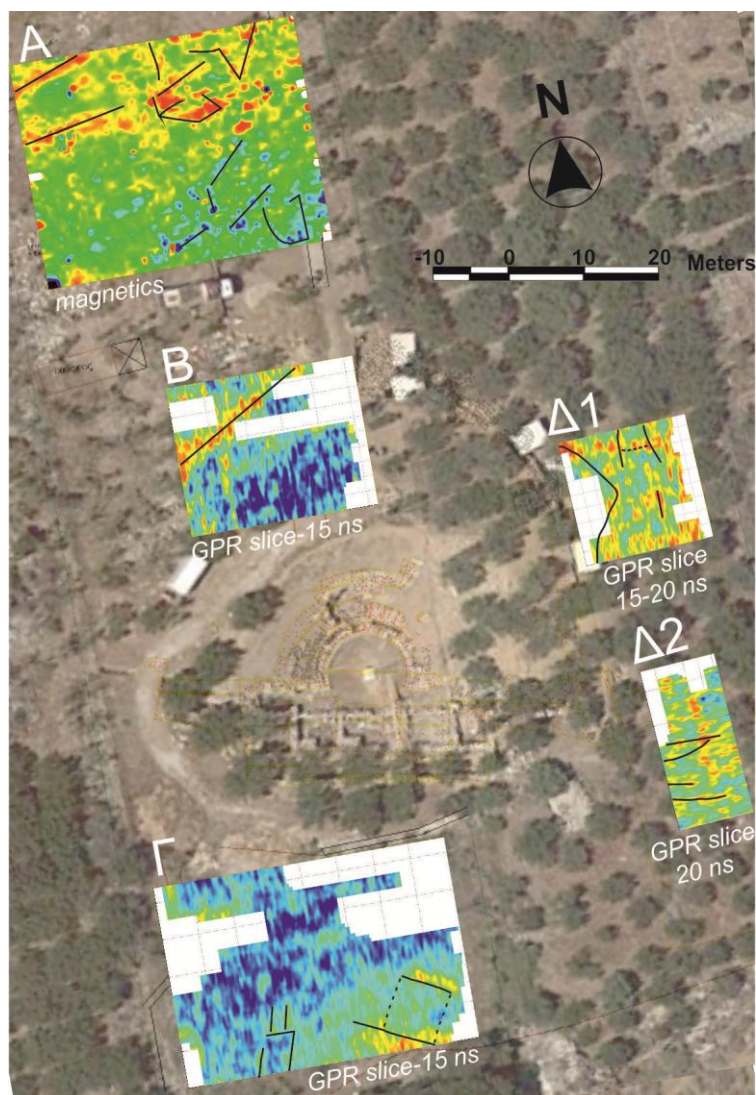
Στην περιοχή Α, η ηλεκτρομαγνητική και η μαγνητική μέθοδος οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν, εντόπισαν πιθανές θέσεις θαμμένων αρχαιοτήτων στα βόρεια-βορειοδυτικά σε βάθος  $>1$  m, καθώς και πιθανές θέσεις θαμμένων ερειπίων στα νοτιοανατολικά οι οποίες εντοπίζονται στα ρηχά, σε βάθος  $\sim 0.5$  m.

Στην περιοχή Β, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου και της μεθόδου γεωραντάρ, εντοπίστηκε η λιθόχτιστη τοιχοδομή που περιβάλλει το θέατρο, διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται με περισσότερη ακρίβεια στην ηλεκτρική τομογραφία. Παρατηρήθηκε κατά περιπτώσεις η αδυναμία να εντοπιστεί ο θαμμένος τοίχος στο αναμενόμενο βάθος γεγονός που αποδίδεται στην εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από το αργιλικό εδαφικό κάλυμμα.

Στην περιοχή Γ, συμπεραίνεται ότι οι παρατηρούμενες ανωμαλίες στα νότια (διεύθυνσης N-B) και νοτιοανατολικά του καννάβου (διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ), οι οποίες γίνονται εμφανείς στα ηλεκτρομαγνητικά και στο γεωραντάρ, προκαλούνται από πιθανές θαμμένες ανθρωπογενείς δομές βάθους έως 1m.

Στους καννάβους Δ1 και Δ2 παρουσιάζονται δομές υψηλού ενδιαφέροντος, αλλά λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκε μόνο η μέθοδος γεωραντάρ, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρουσίασε μεγαλύτερη δυσκολία. Η γραμμική ανωμαλία διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ και ΝΔ-ΒΑ στα δυτικά του καννάβου Δ1 πιθανόν οφείλεται στην ύπαρξη της λιθόχτιστης τοιχοδομής που περιβάλλει το θέατρο, με βάθος εμφάνισης <0.5 m, ενώ παράλληλα και στους δύο καννάβους διακρίνεται ο σχηματισμός πιθανών μονοπατιών.





Σχήμα 6.1b: Χάρτης (b) του Google σε συνδυασμό με το τοπογραφικό της περιοχής και γεωφυσικές εικόνες.

Από τη γεωφυσική μελέτη, συμπεραίνεται ότι η συνδυαστική εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων αποτελεί σημαντική βοήθεια για την ασφαλέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όσον αφορά τις αρχαιολογικές εφαρμογές.

Επιπλέον συμπεραίνεται ότι η μέθοδος του γεωραντάρ δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα στις αρχαιολογικές διασκοπήσεις, αφού παρέχει εικόνες μεγαλύτερης ευκρίνειας και περισσότερες τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων. Στη συγκεκριμένη διασκόπηση χρησιμοποιήθηκε κεραία εκπομπής-λήψης συχνότητας 400 MHz. Επίσης έγινε εμφανής η χρησιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας στην αρχαιολογία, ειδικότερα στον εντοπισμό αρχαίων τοίχων, όταν η διεύθυνση τους είναι κάθετη στη γραμμή μελέτης.

## 6.2 Προτάσεις

Από τη γεωφυσική διασκόπηση γύρω από το ρωμαϊκό θέατρο των Αρχαίων Απτέρων, προκύπτει ότι υπάρχουν περιοχές στις οποίες πρέπει να γίνει επιβεβαίωση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η διεξαγωγή αρχαιολογικών τομών στις προτεινόμενες θέσεις από τα αποτελέσματα της μελέτης, για εξακρίβωση, όπως και εκ νέου ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Επίσης, προτείνεται συμπληρωματική χαρτογράφηση στην περιοχή Δ, για σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά του γεωραντάρ και εκ νέου συνδυαστική ερμηνεία, καθώς και διεξαγωγή διασκόπησης στα ανατολικά της περιοχής Δ, όπου δεν έχει ολοκληρωθεί η απαλλοτρίωση του χώρου. Επιπλέον, στην περιοχή δυτικά του θεάτρου βρίσκεται η αρχαία ρωμαϊκή οικία όπου έχουν βρεθεί τοιχογραφίες και κίονες σε καλή κατάσταση, και η περιοχή αυτή κρίνεται κατάλληλη για περαιτέρω έρευνα στα περίχωρά της.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Βαφείδης, Α., 1993**, *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική – Ι: Σεισμικές Μέθοδοι*, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
2. **Βαφείδης Α., 2001**, *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II*, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
3. **Βαφείδης, Α. και Αμολοχίτης, Γ., 1992**, *Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές και σεισμικές διασκοπήσεις στον οικισμό Άνω Μέρους, Ν. Ρεθύμνης*, Έκθεση, Νομαρχιακό Ταμείο Ρεθύμνης, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ. 9.
4. **Βαφείδης, Α., Μονόπωλης, Λ., Αμολοχίτης, Γ. και Στειακάκης, Μ., 1991**, *Γεωφυσική έρευνα με γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις στην κοιλάδα του Κερίτη ποταμού*, Έκθεση, ΓΓΕΤ, ΟΑΔΥΚ, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ. 11.
5. **Νινιού-Κινδέλη Β., Χατζηδάκης Ν., Χατζηδάκη Ε., 2011**, *Αρχαίο Θέατρο Απτέρας*, Χορηγικός Φάκελος, Υπουργείο Πολιτισμού, ΚΕ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων
6. **Οικονόμου Ν., 1998**, *Γεωφυσική έρευνα στον αρχαιολογικό χώρο της Ιτάνου, Λασιθίου*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά
7. **Σπανουδάκης Ν., 2002**, *Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα*, Μεταπτυχιακή εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
8. **Σπανουδάκης Ν., 2014**, *Γεωφυσική Έρευνα στην περιοχή του θεάτρου της Αρχαίας Απτέρας*, Έκθεση, Ε.Λ.Κ.Ε., Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Πολυτεχνείο Κρήτης.
9. **Annan P. A., 1999**, *Practical Processing of GPR Data*, Sensors and Software Inc., Canada.
10. **Annan P.A., 2001**, *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*, Sensors and Software Inc., Canada.
11. **Conyers B. L., 2012**, *Interpreting Ground-Penetrating Radar for Archaeology*, Left Coast Press, Walnut Creek, California.
12. **Jol M. H., 2009**, *Ground Penetrating Radar, Theory and applications*, Elsevier Science, Oxford OX5 1GB, UK.

13. **Neal A., 2014**, *Ground-Penetrating Radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress*, School of Applied Sciences, University of Wolverhampton, UK.
14. **Reynolds, M. J., 1997**, *An introduction to applied and environmental Geophysics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, ISBN 0-471-95555-8.
15. **Spanoudakis S.N., Vafidis A., 2010**, *GPR-PRO : A Matlab module for GPR data processing*, XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, 21-25 June 2010.

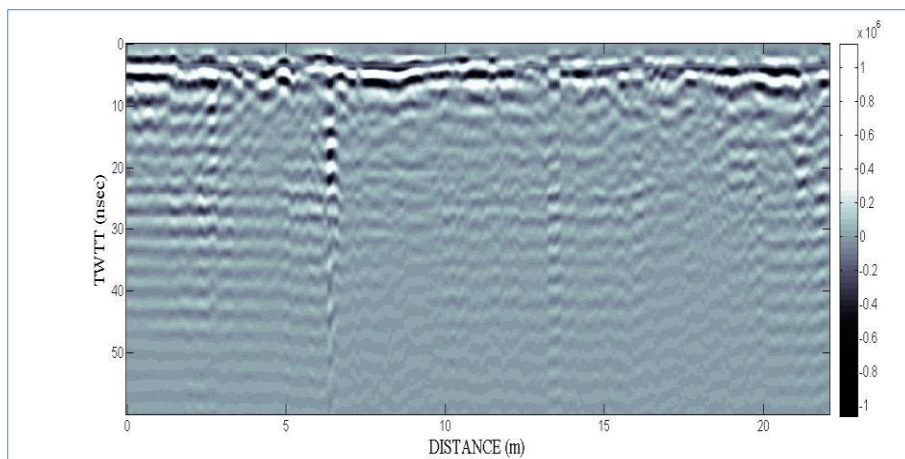
[www.enviroscan.com](http://www.enviroscan.com)

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

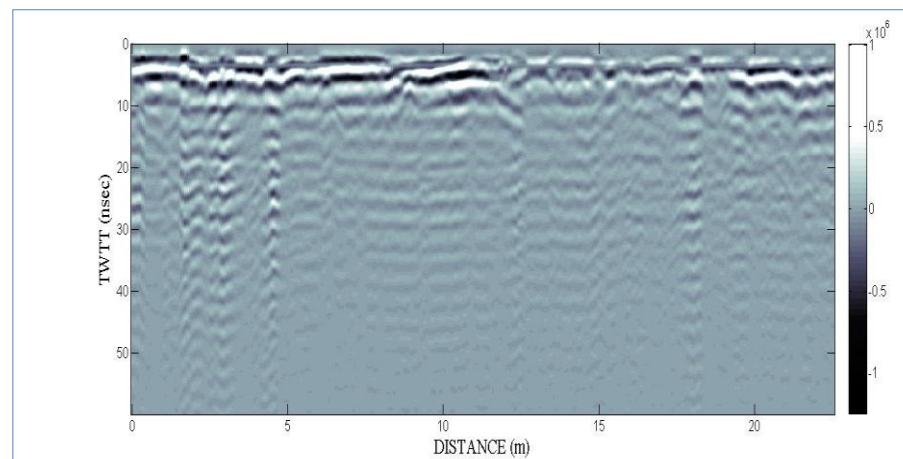
## **ΤΟΜΕΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ**

## Περιοχή Β (Βόρεια του θεάτρου)

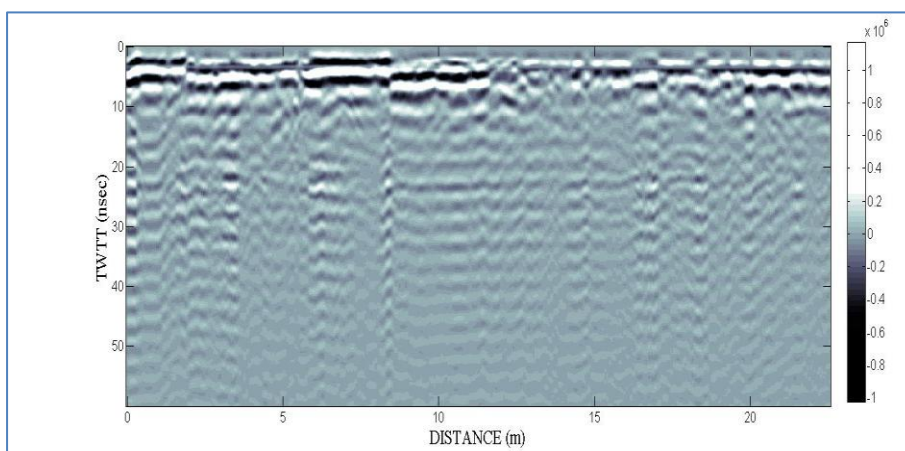
- Γραμμή Β01 (0 m) – Διεύθυνση Δ-Α



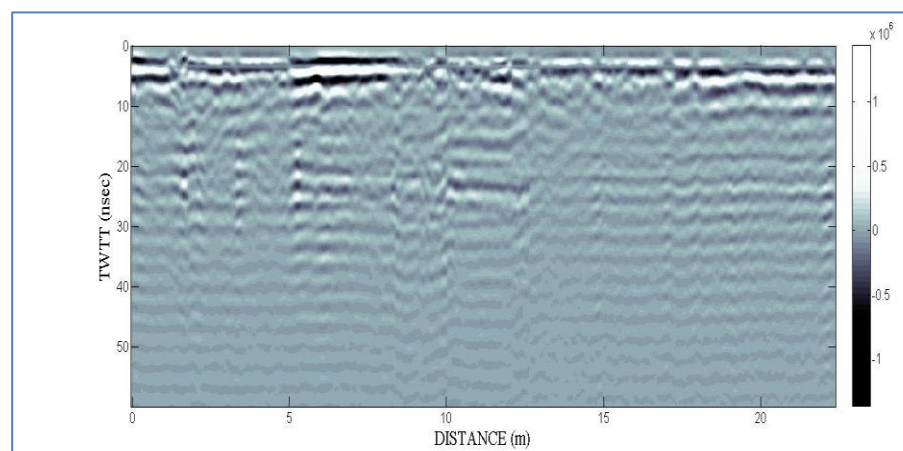
- Γραμμή Β02 (0.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



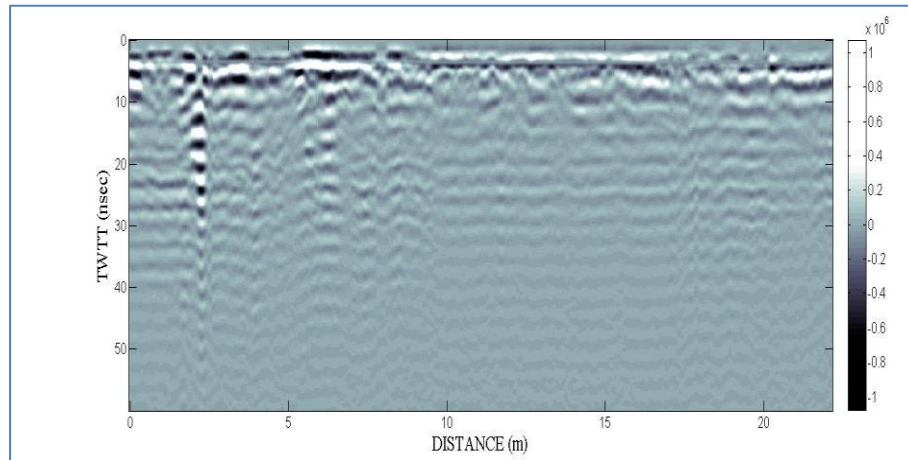
- Γραμμή Β03 (1 m) – Διεύθυνση Δ-Α



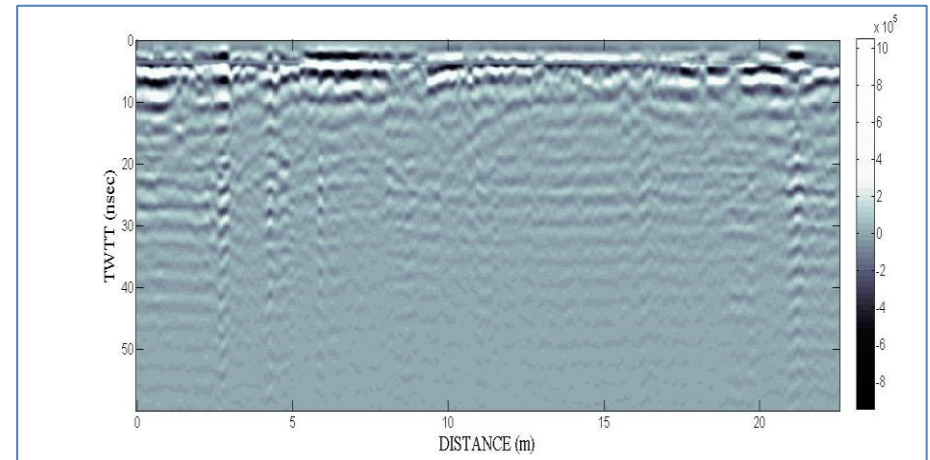
- Γραμμή Β04 (1.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



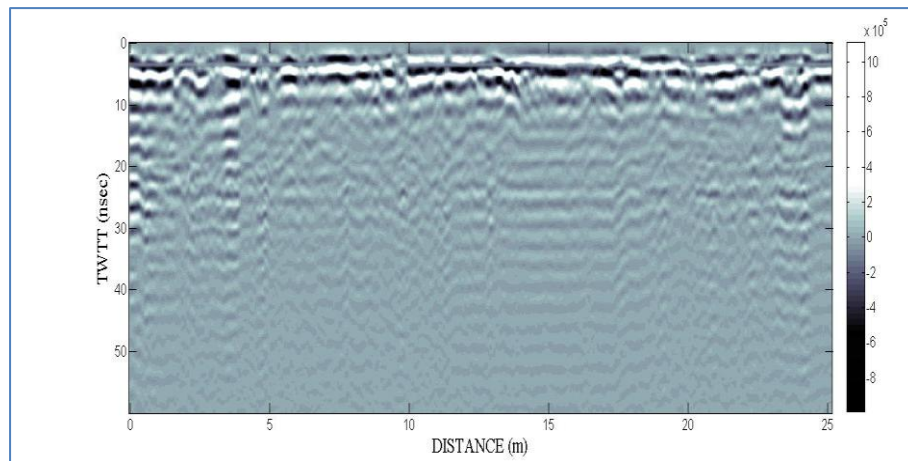
- Γραμμή B05 (2 m) – Διεύθυνση Δ-Α



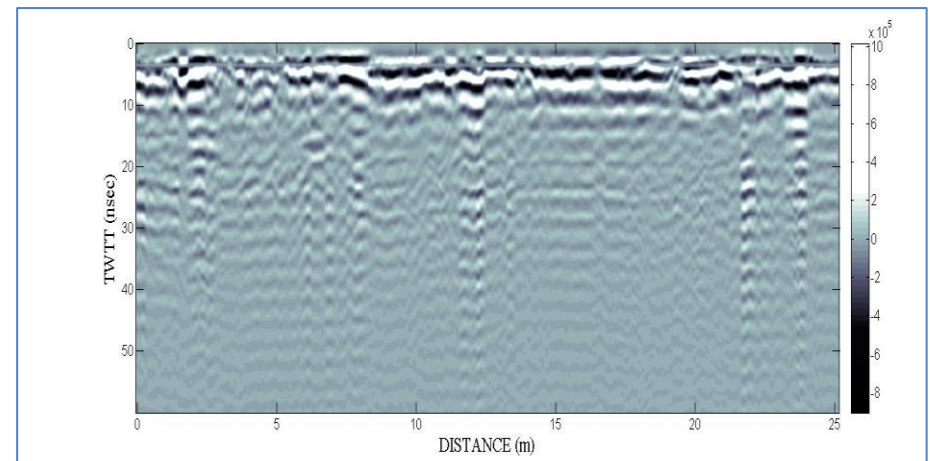
- Γραμμή B06 (2.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή B07 (3 m) – Διεύθυνση Δ-Α

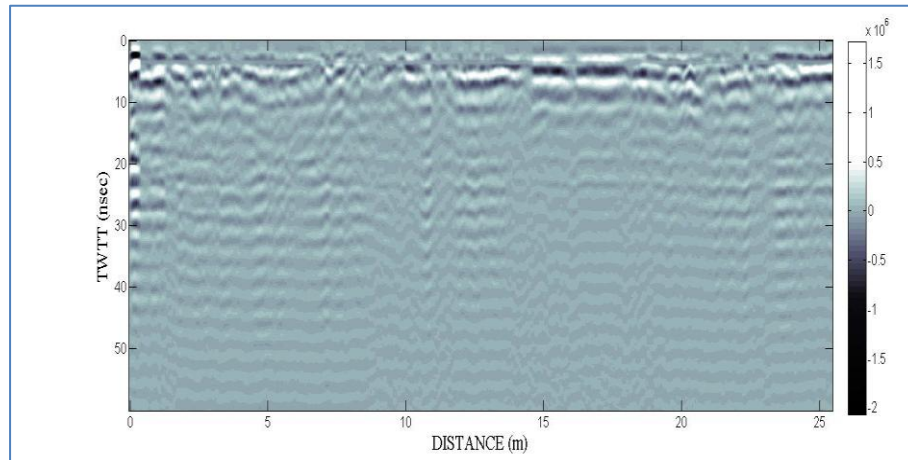


- Γραμμή B08 (3.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

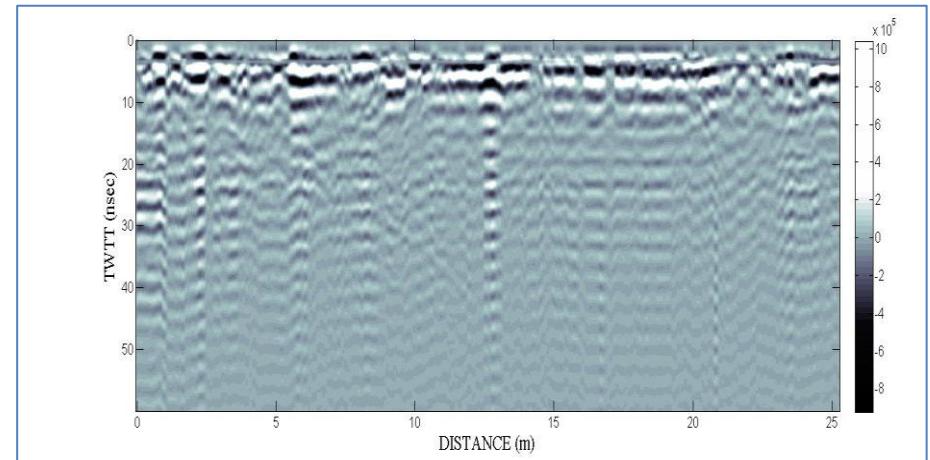




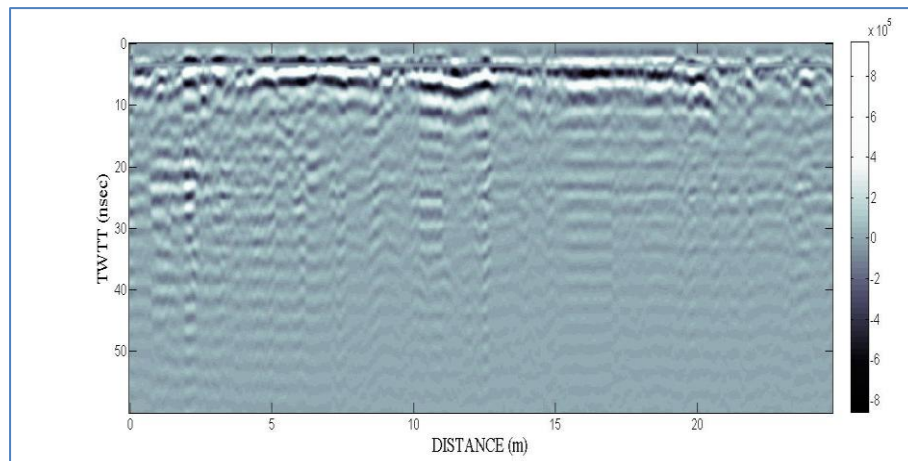
- Γραμμή B09 (4 m) – Διεύθυνση Δ-Α



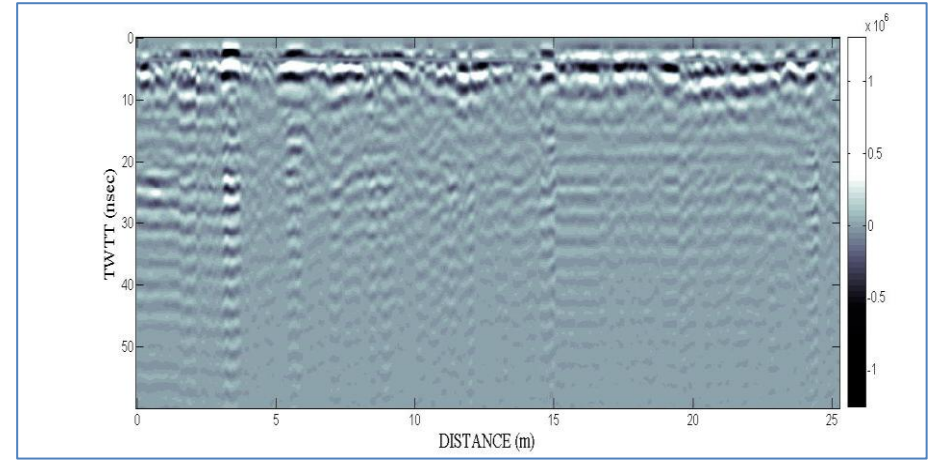
- Γραμμή B10 (4.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή B11 (5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

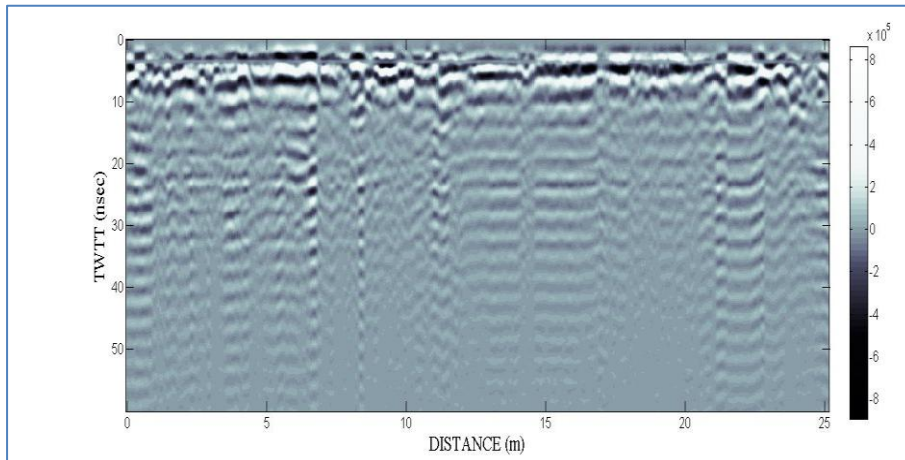


- Γραμμή B12 (5.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

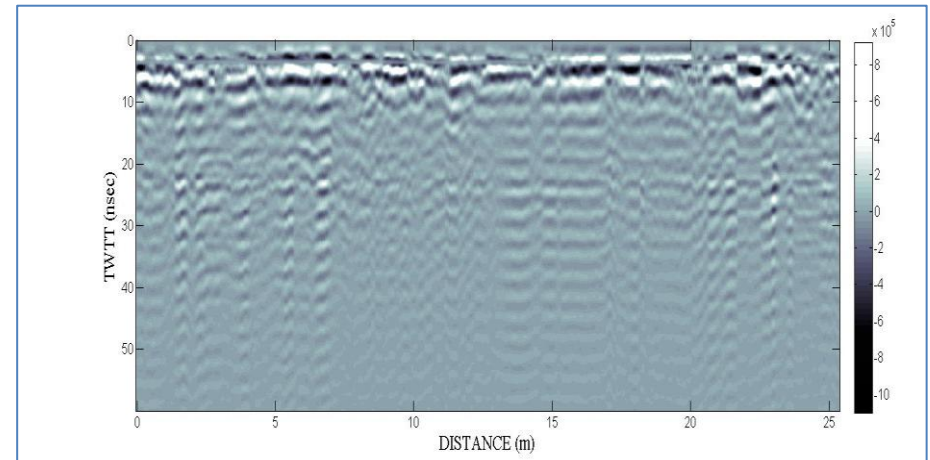




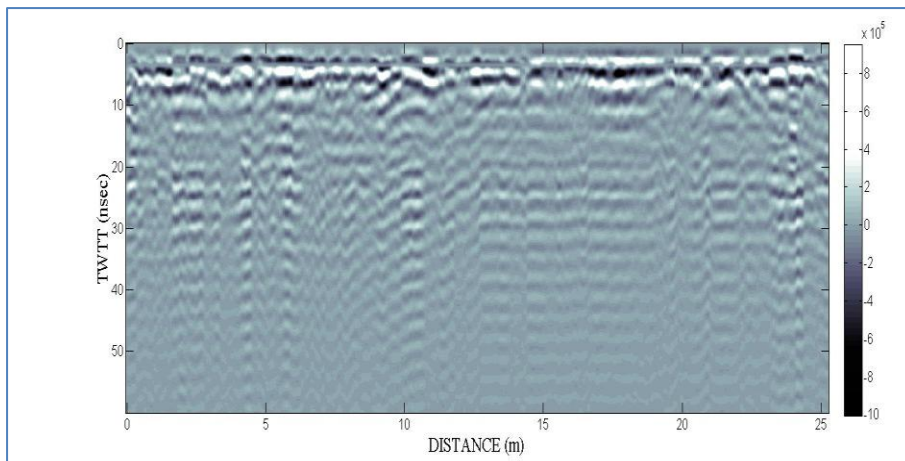
- Γραμμή B13 (6 m) – Διεύθυνση Δ-Α



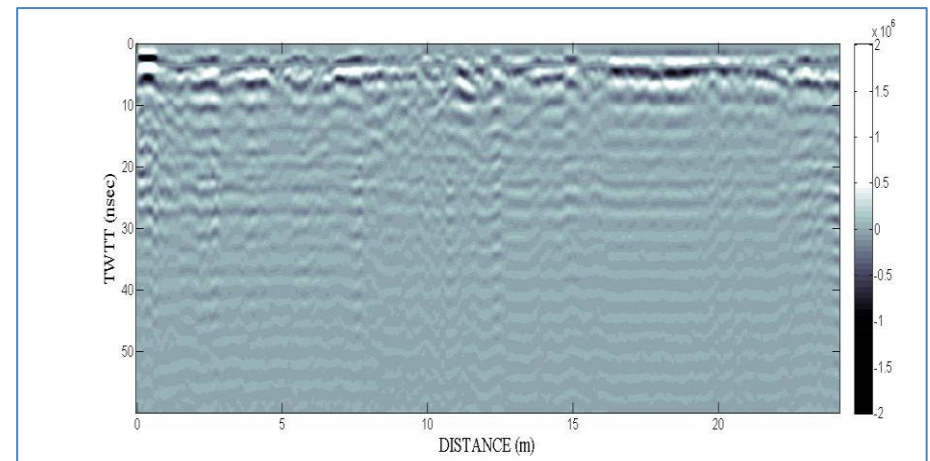
- Γραμμή B14 (6.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



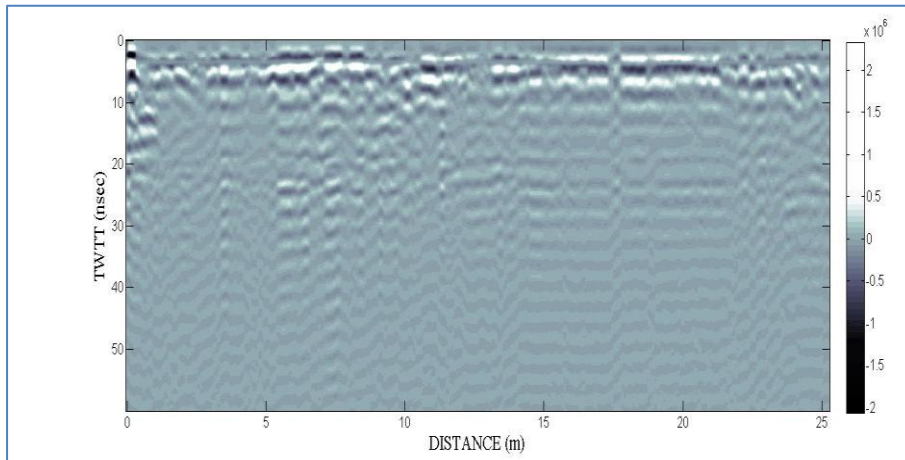
- Γραμμή B15 (7 m) – Διεύθυνση Δ-Α



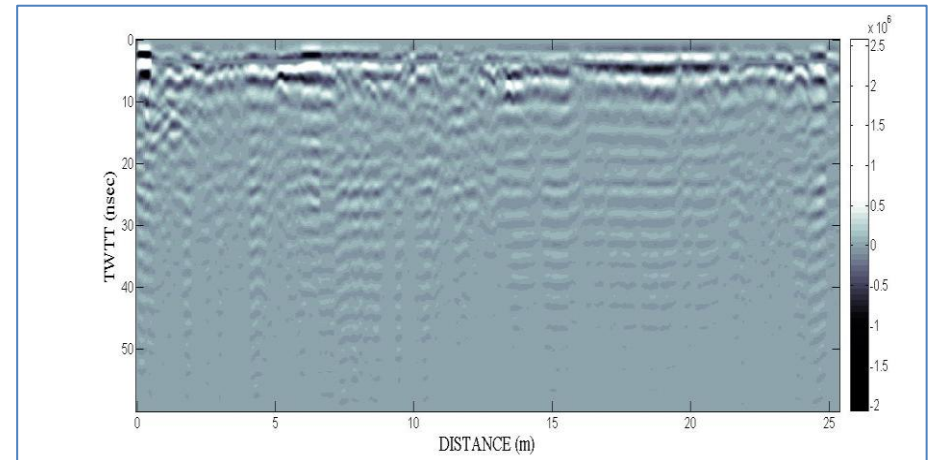
- Γραμμή B16 (7.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



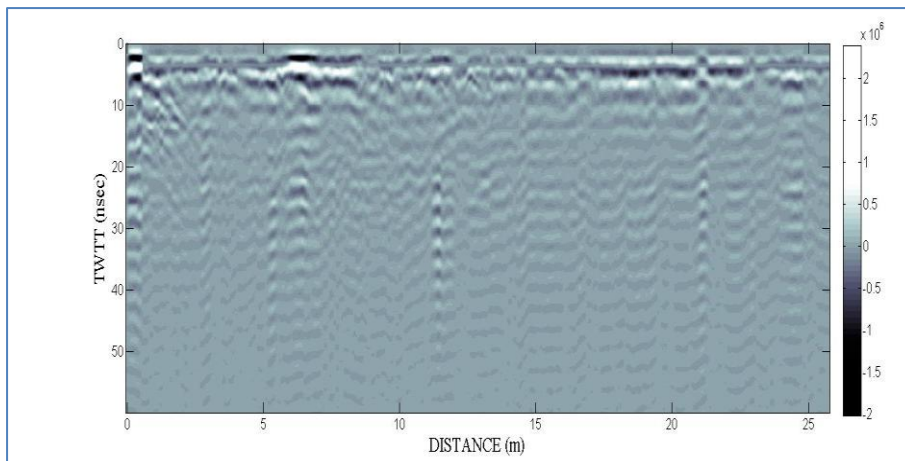
- Γραμμή B17 (8 m) – Διεύθυνση Δ-Α



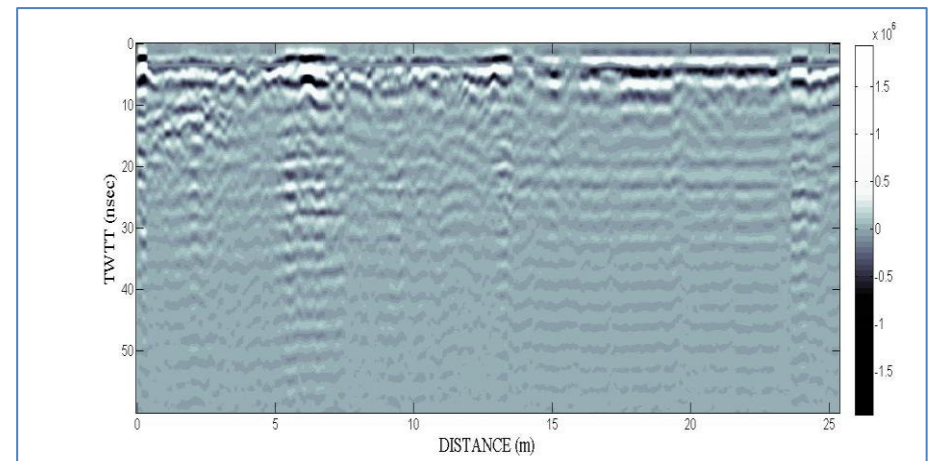
- Γραμμή B18 (8.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή B19 (9 m) – Διεύθυνση Δ-Α

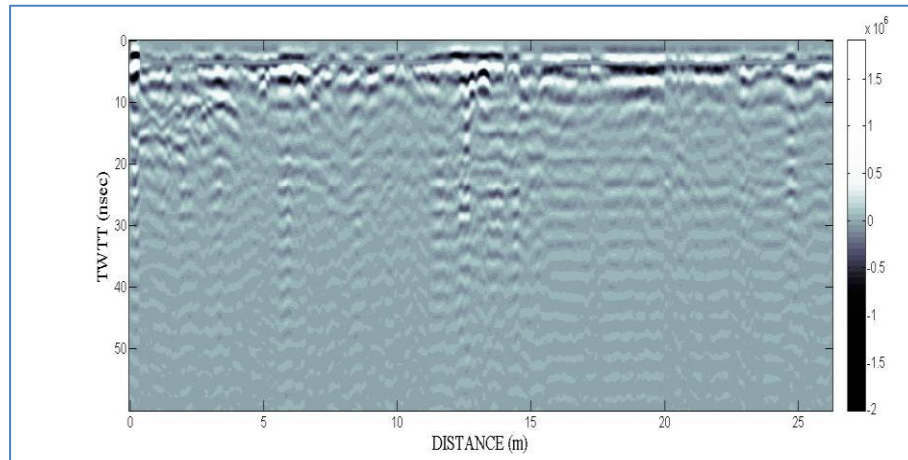


- Γραμμή B20 (9.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

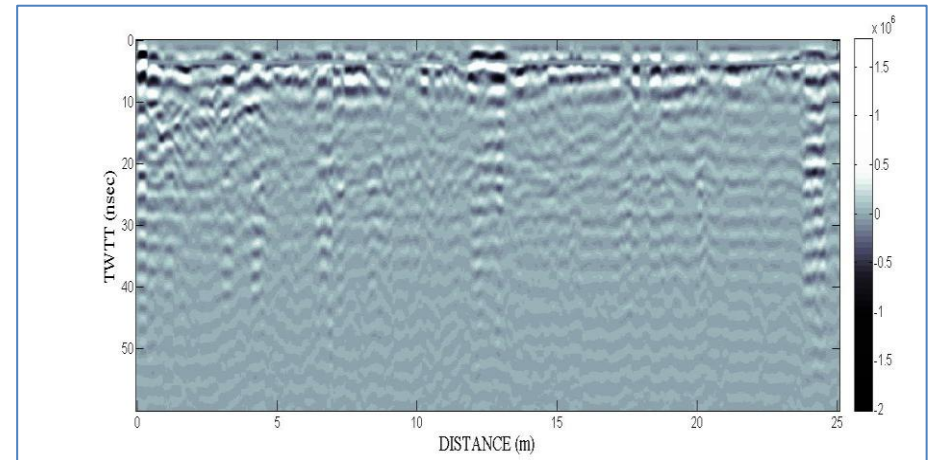




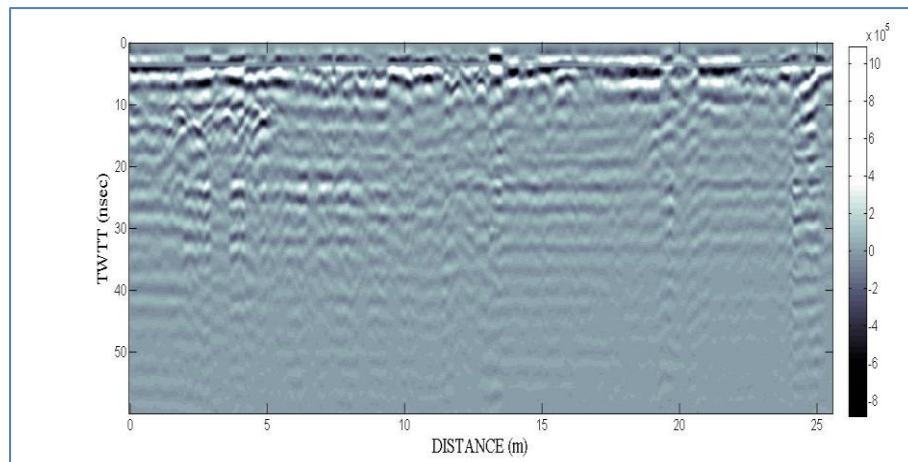
- Γραμμή B21 (10 m) – Διεύθυνση Δ-Α



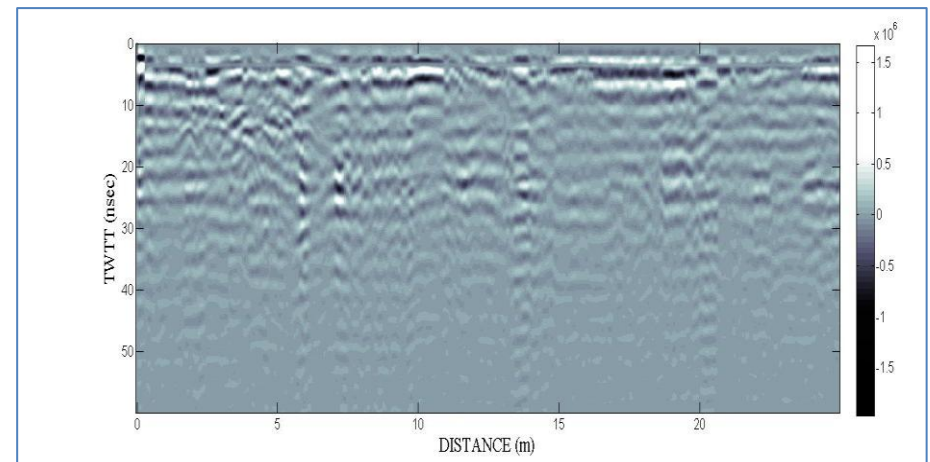
- Γραμμή B22 (10.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



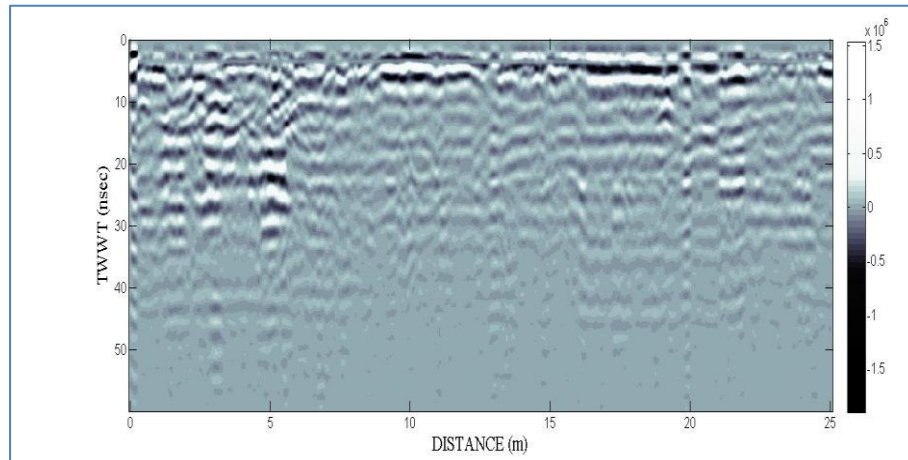
- Γραμμή B23 (11 m) – Διεύθυνση Δ-Α



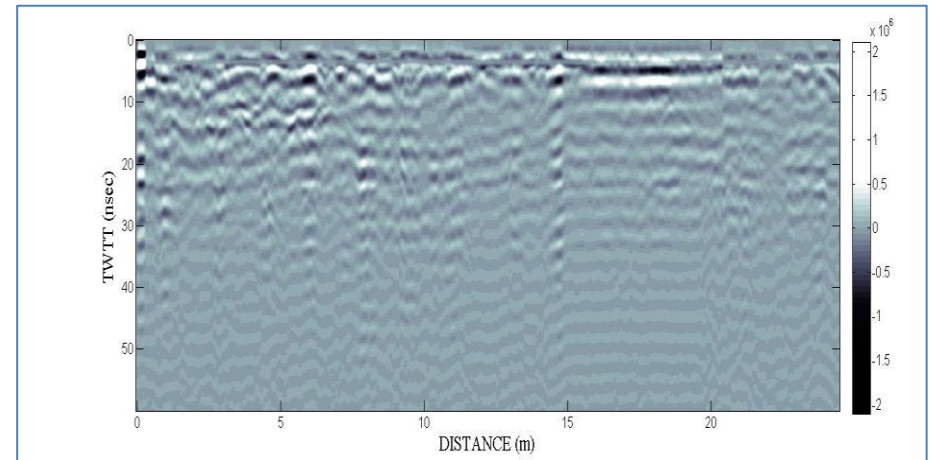
- Γραμμή B24 (11.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



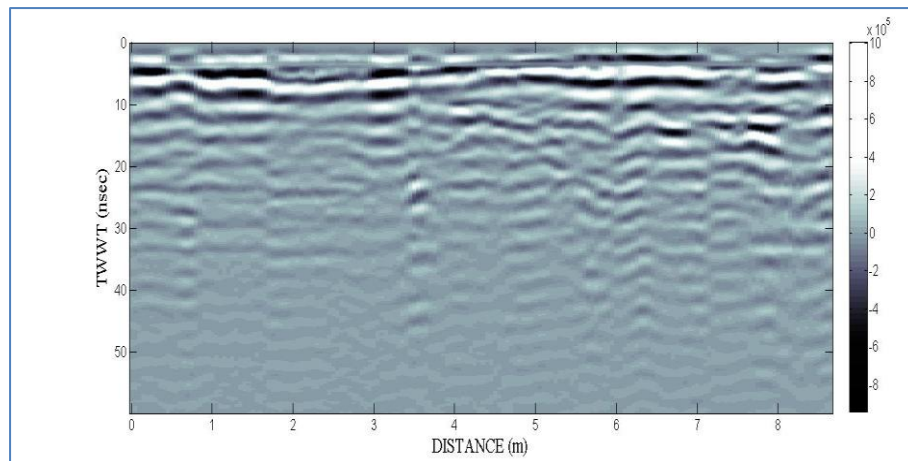
- Γραμμή B25 (12 m) – Διεύθυνση Δ-Α



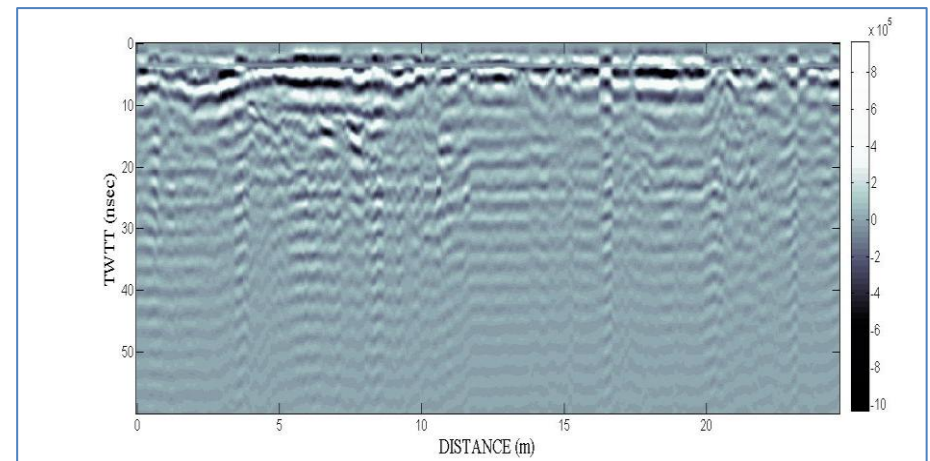
- Γραμμή B26 (12.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή B27 (13 m) – Διεύθυνση Δ-Α

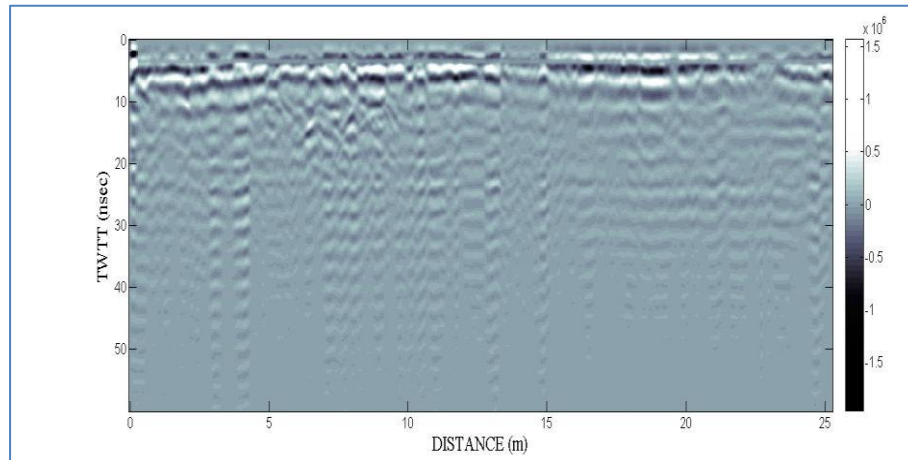


- Γραμμή B28 (13.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

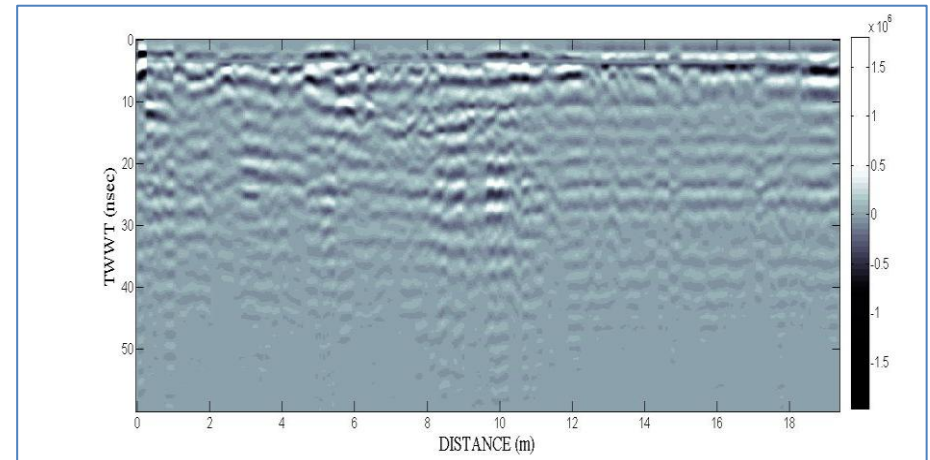




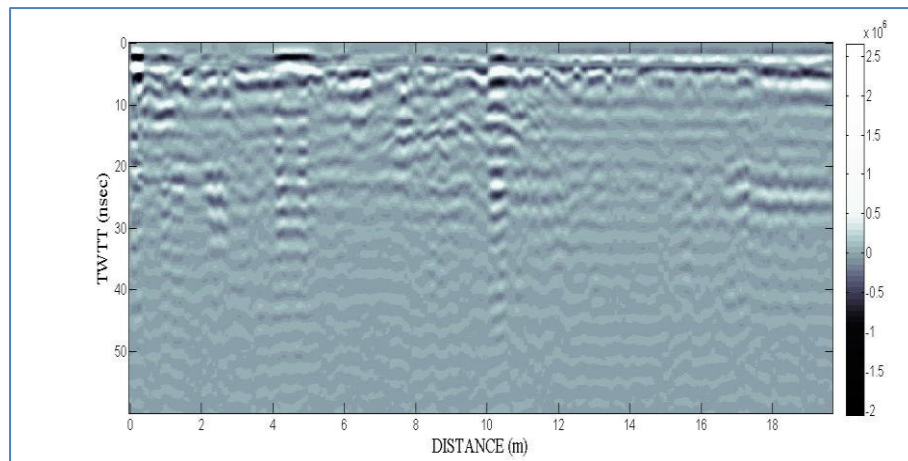
- Γραμμή B29 (14 m) – Διεύθυνση Δ-Α



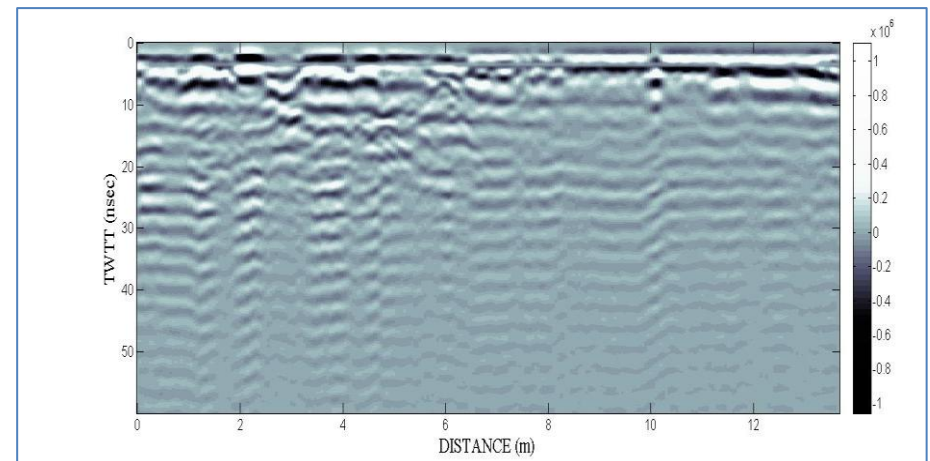
- Γραμμή B30 (14.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



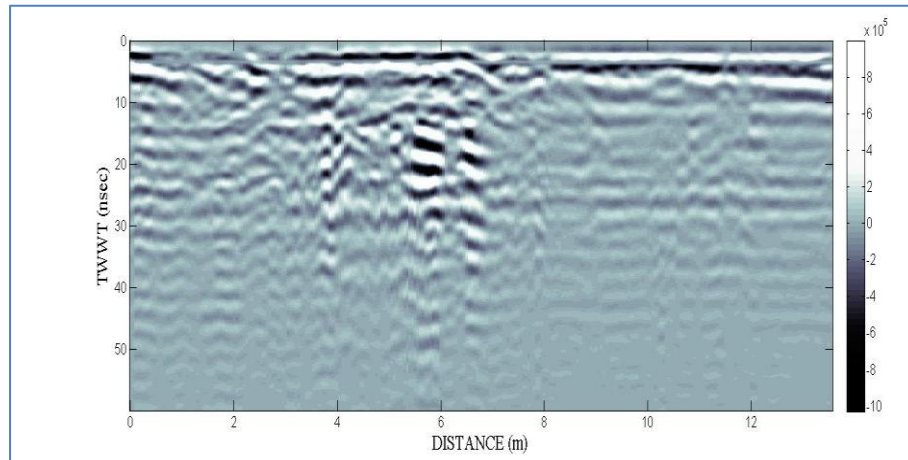
- Γραμμή B31 (15 m) – Διεύθυνση Δ-Α



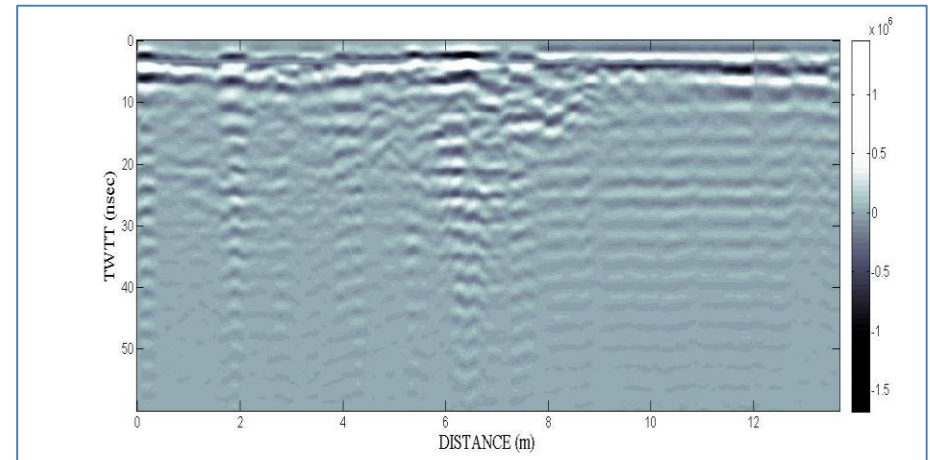
- Γραμμή B32 (15.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



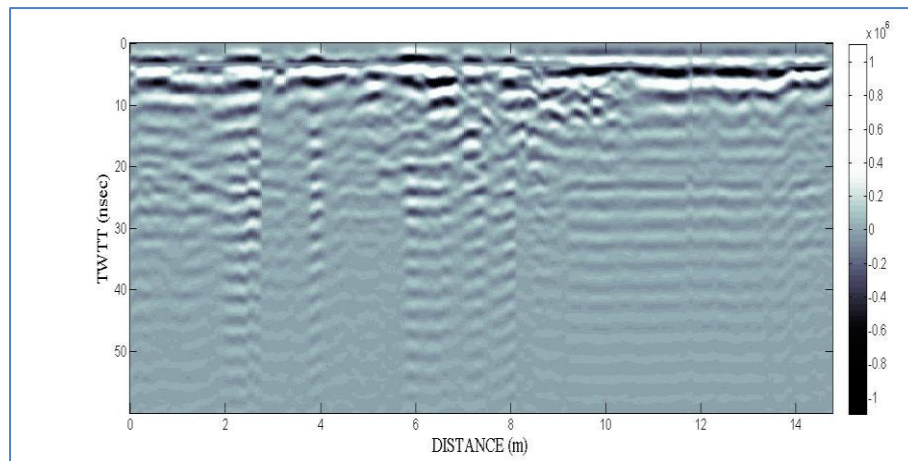
- Γραμμή B33 (16 m) – Διεύθυνση Δ-Α



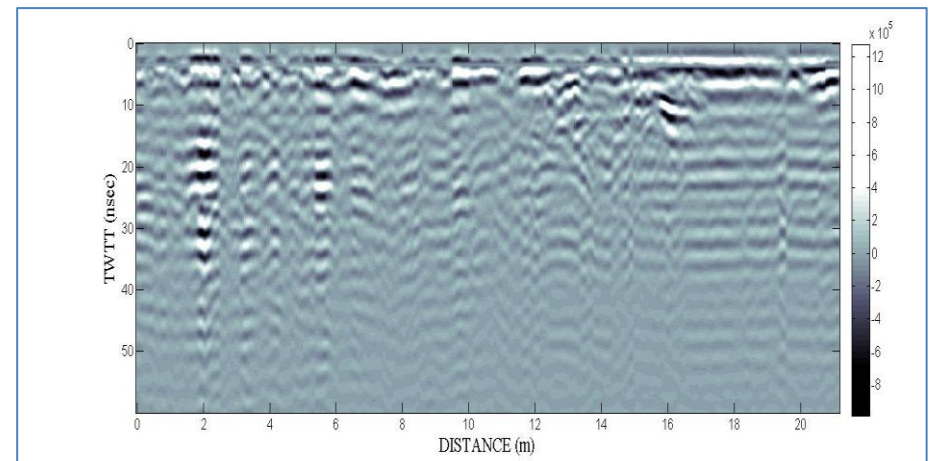
- Γραμμή B34 (16.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή B35 (17 m) – Διεύθυνση Δ-Α

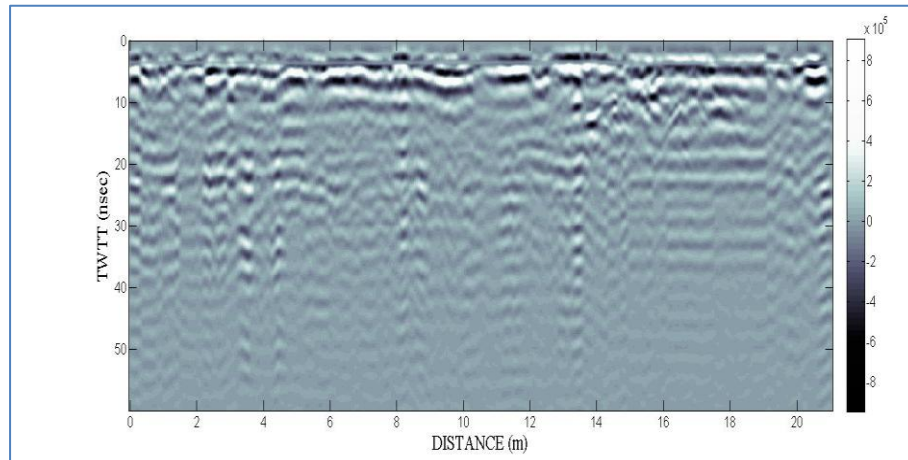


- Γραμμή B36 (17.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

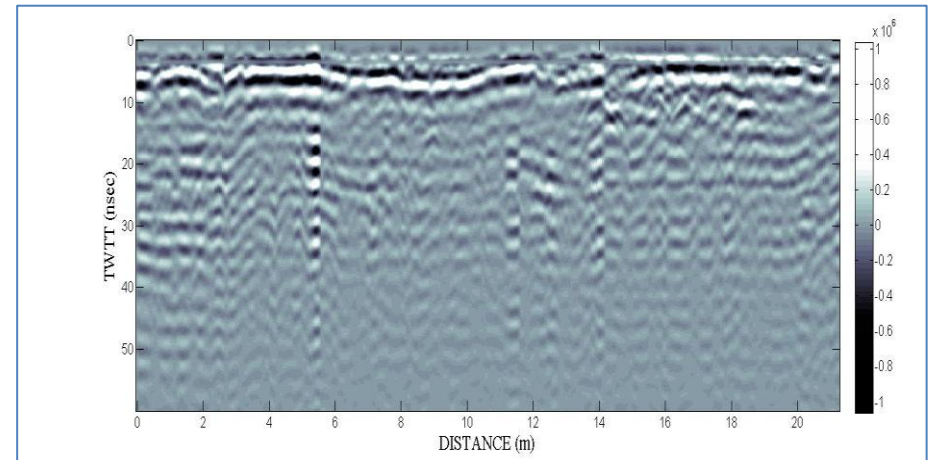




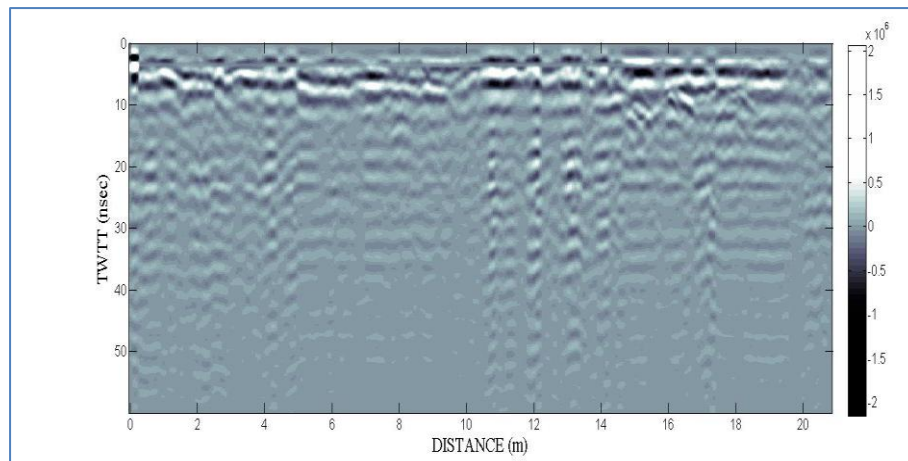
- Γραμμή B37 (18 m) – Διεύθυνση Δ-Α



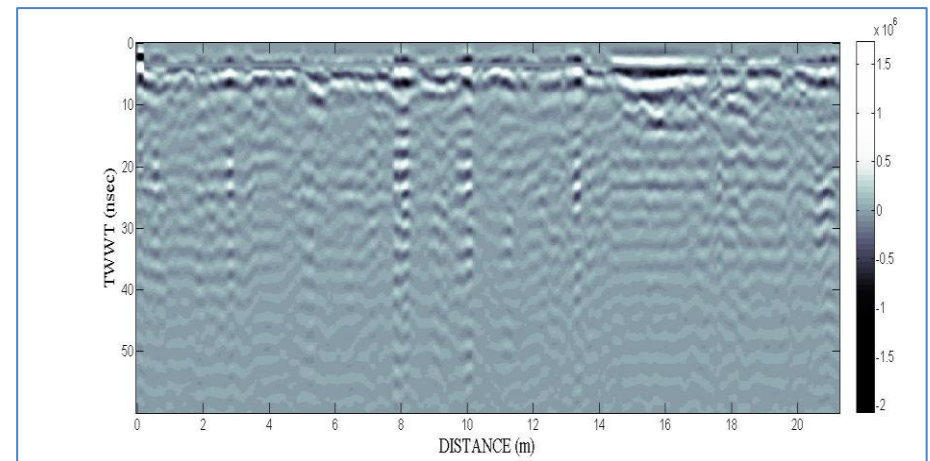
- Γραμμή B38 (18.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



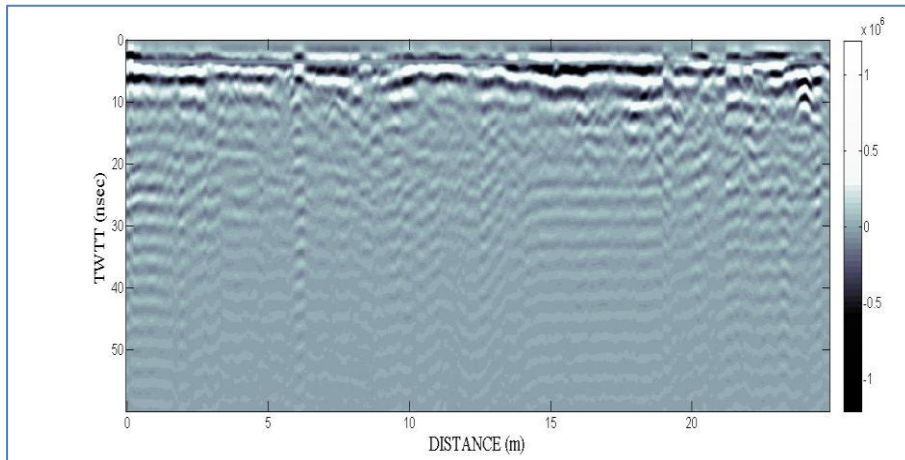
- Γραμμή B39 (19 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή B40 (19.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

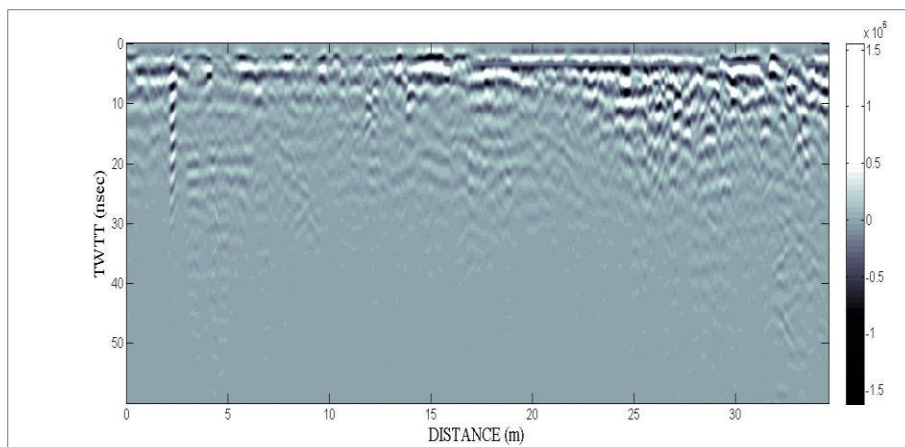


- Γραμμή B41 (20 m) – Διεύθυνση Δ-Α

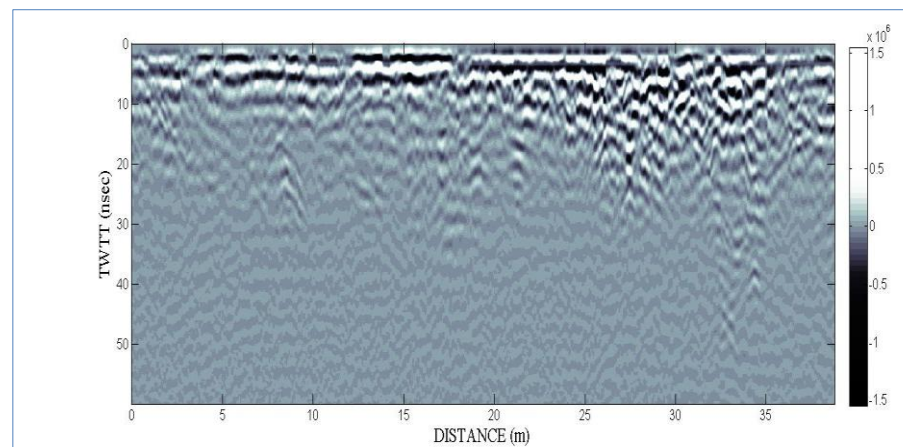


### Περιοχή Γ (Νότια του θεάτρου)

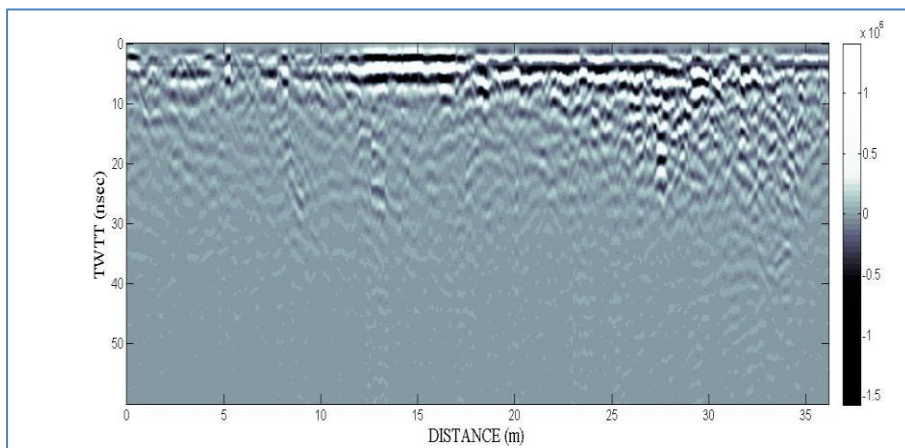
- Γραμμή Γ01 (0 m) – Διεύθυνση Δ-Α



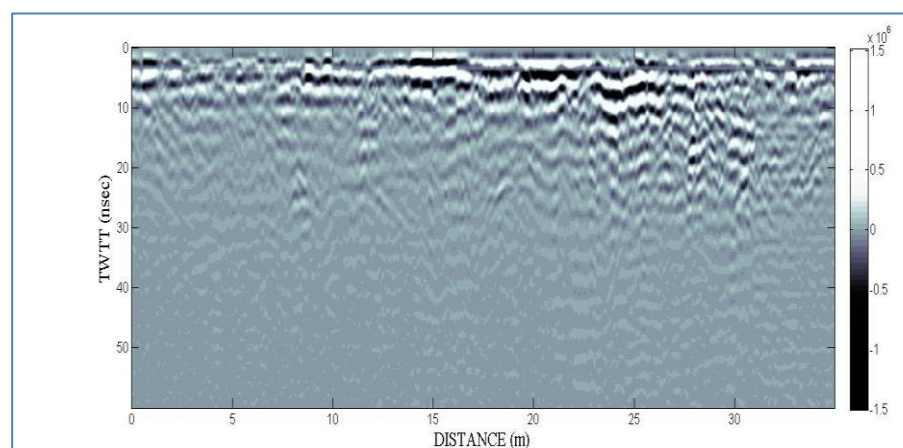
- Γραμμή Γ02 (0.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Γ03 (1 m) – Διεύθυνση Δ-Α

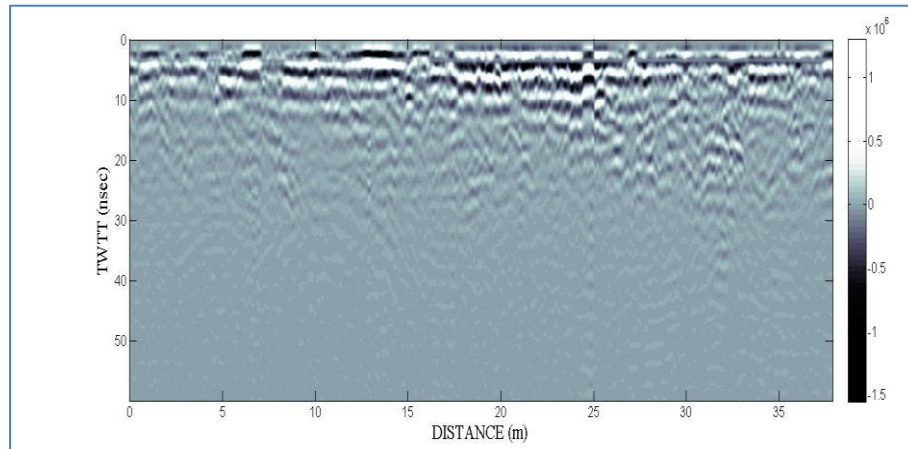


- Γραμμή Γ04 (1.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

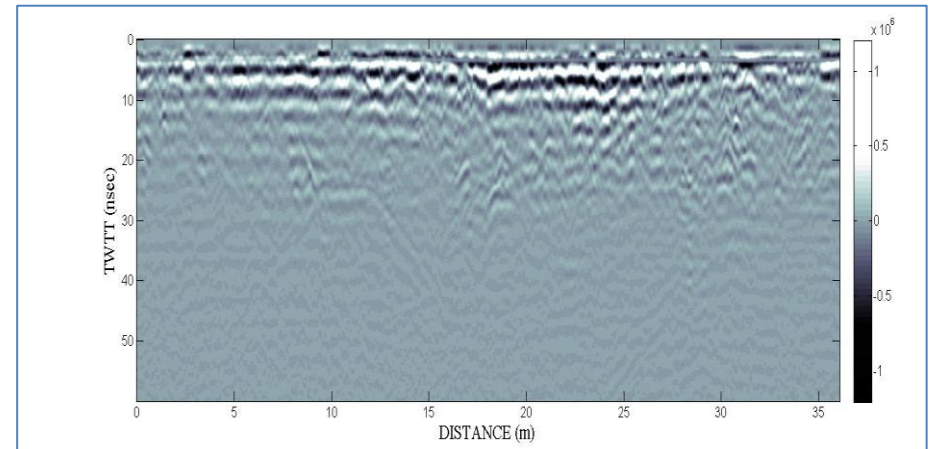




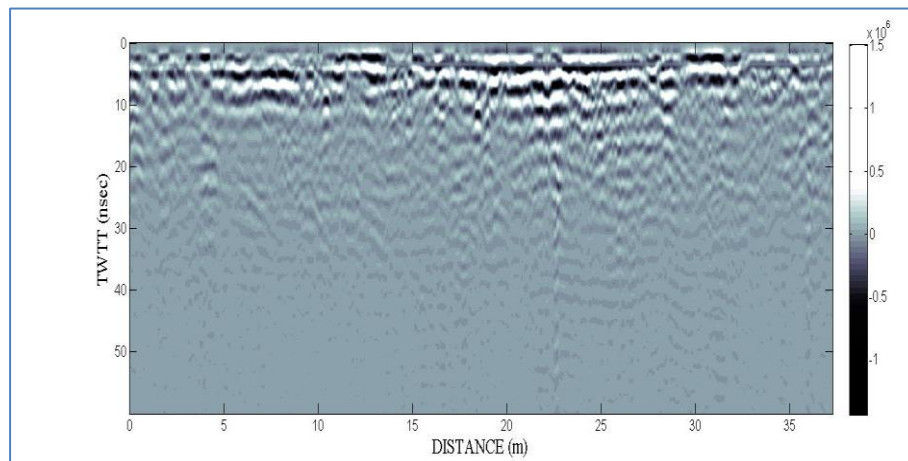
- Γραμμή Γ05 (2 m) – Διεύθυνση Δ-Α



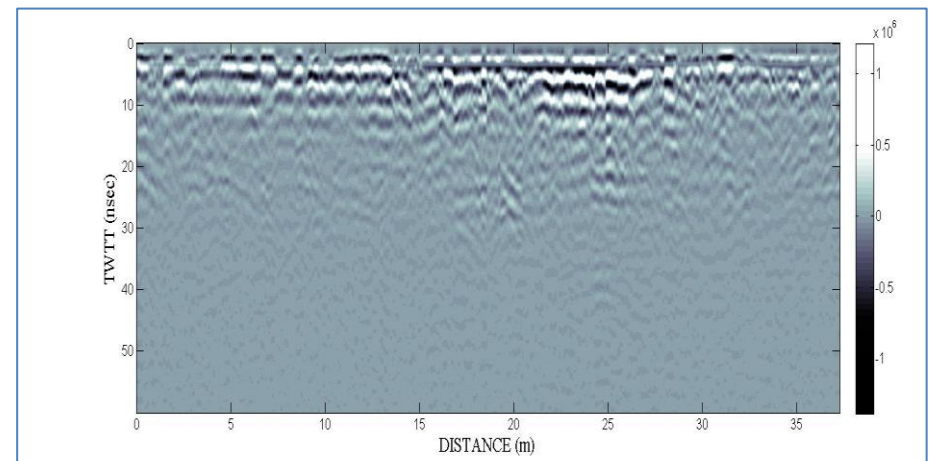
- Γραμμή Γ06 (2.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



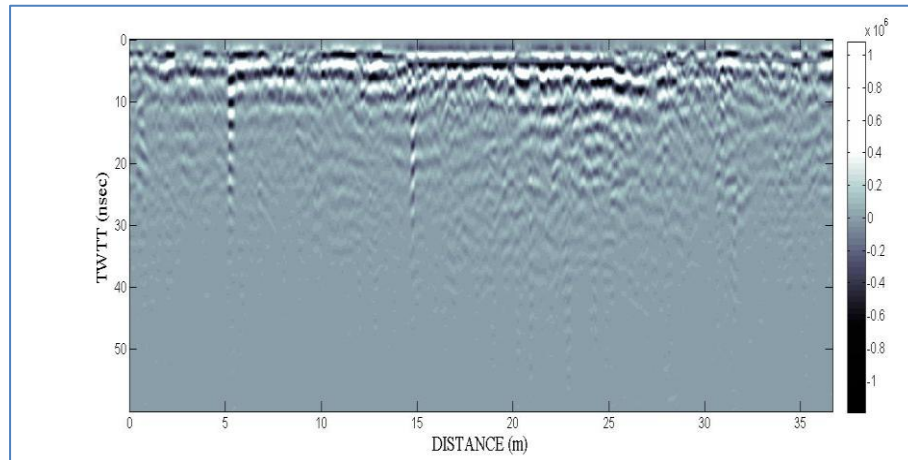
- Γραμμή Γ07 (3 m) – Διεύθυνση Δ-Α



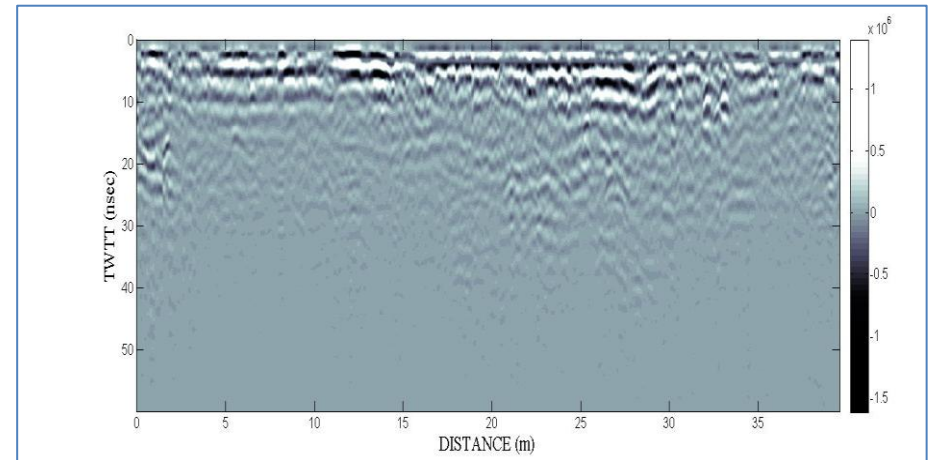
- Γραμμή Γ08 (3.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



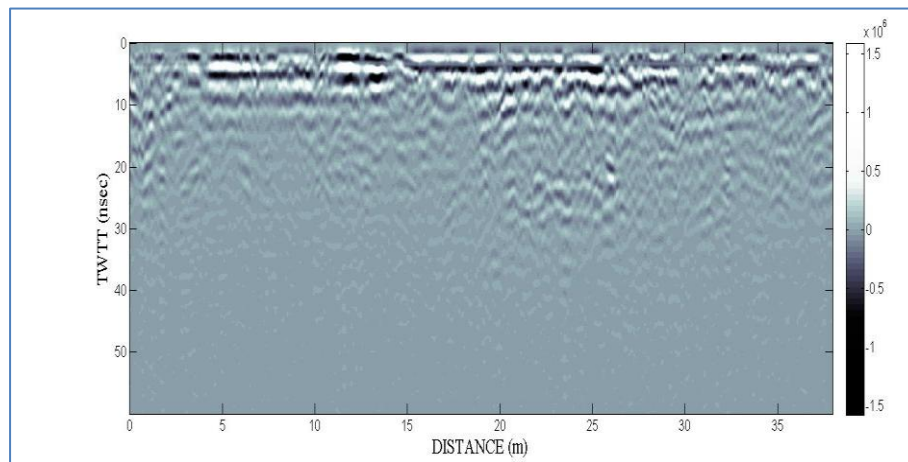
- Γραμμή Γ09 (4 m) – Διεύθυνση Δ-Α



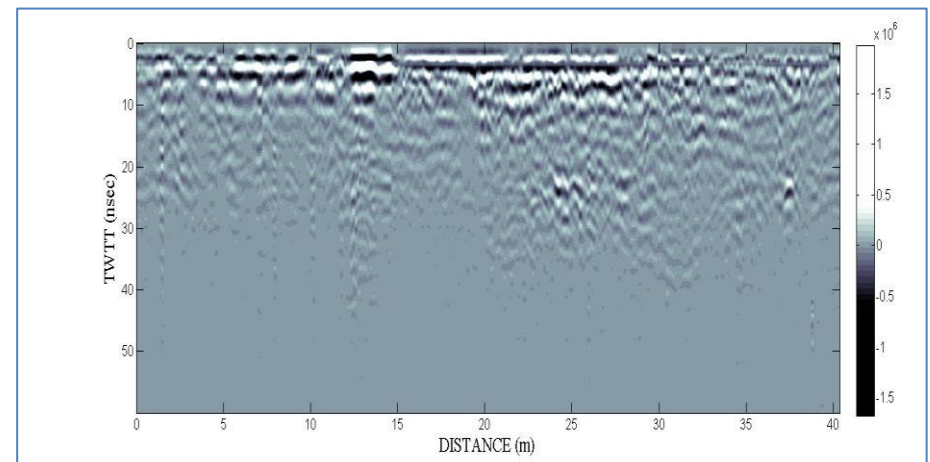
- Γραμμή Γ10 (4.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



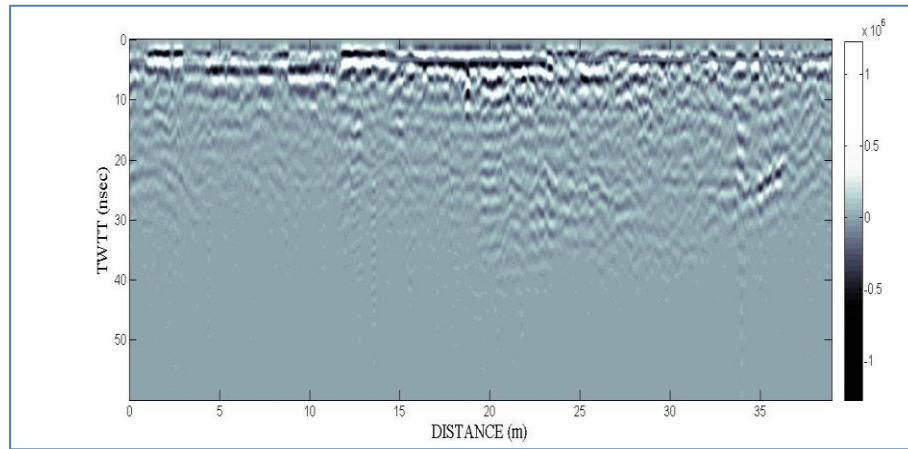
- Γραμμή Γ11 (5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



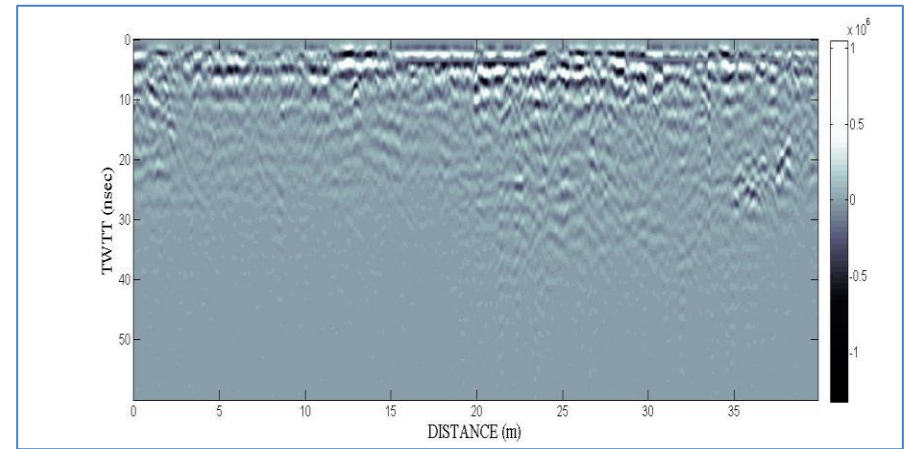
- Γραμμή Γ12 (5.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



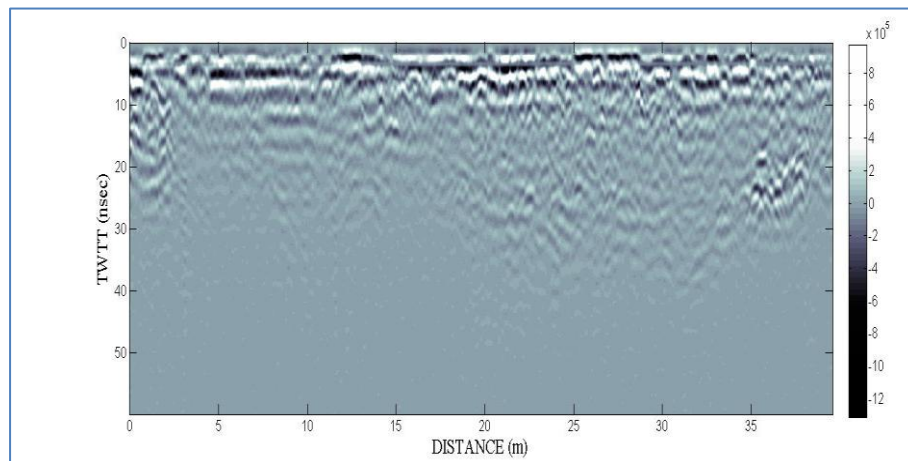
- Γραμμή Γ13 (6 m) – Διεύθυνση Δ-Α



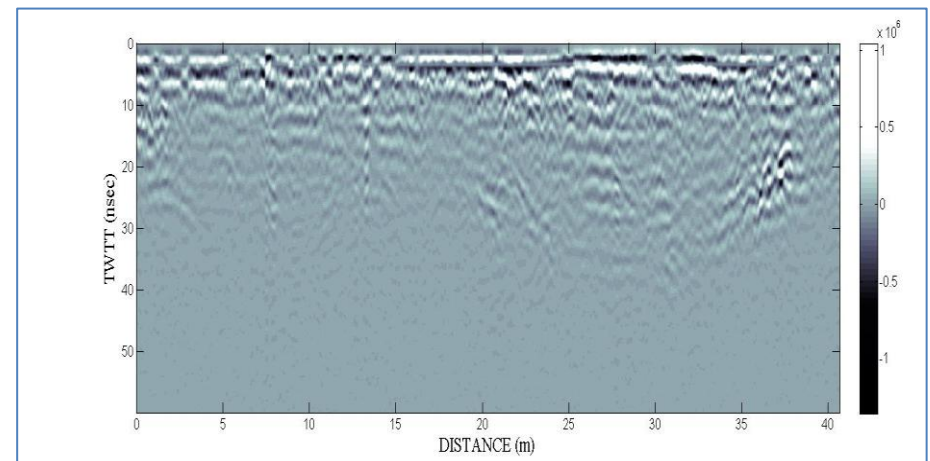
- Γραμμή Γ14 (6.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Γ15 (7 m) – Διεύθυνση Δ-Α

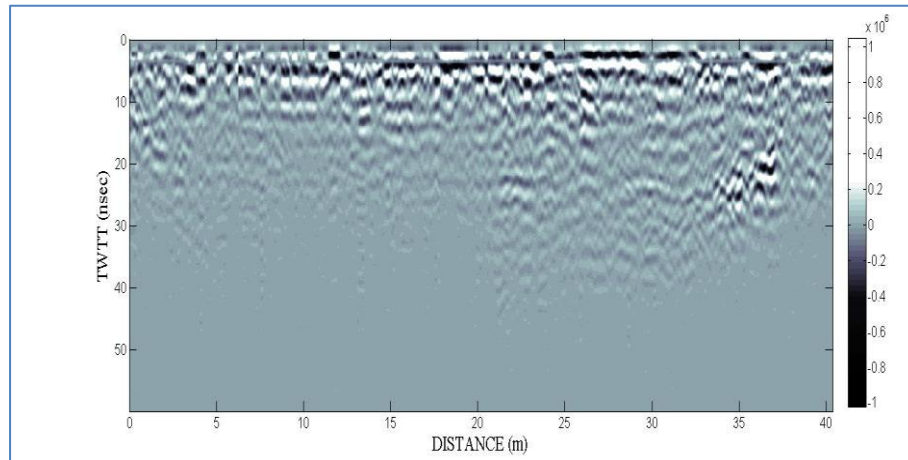


- Γραμμή Γ16 (7.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

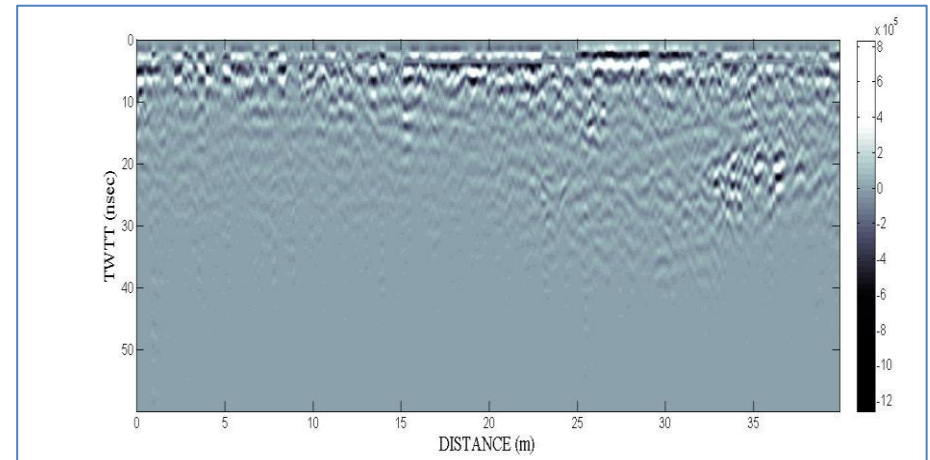




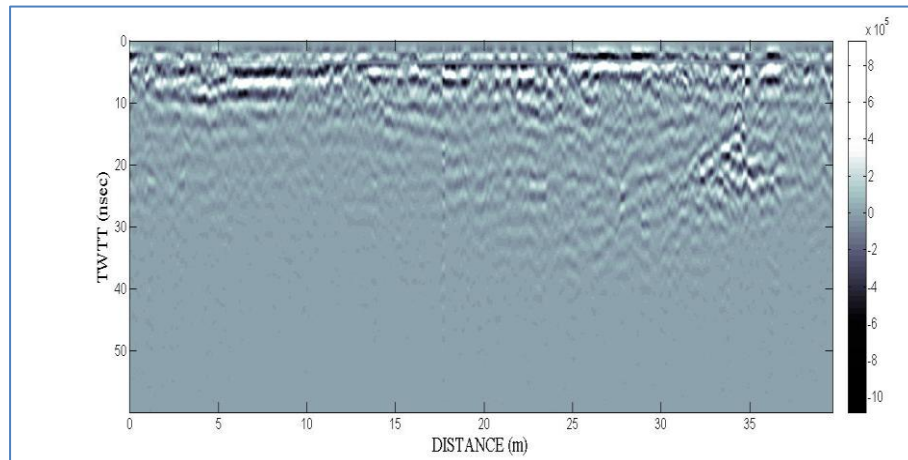
- Γραμμή Γ17 (8 m) – Διεύθυνση Δ-Α



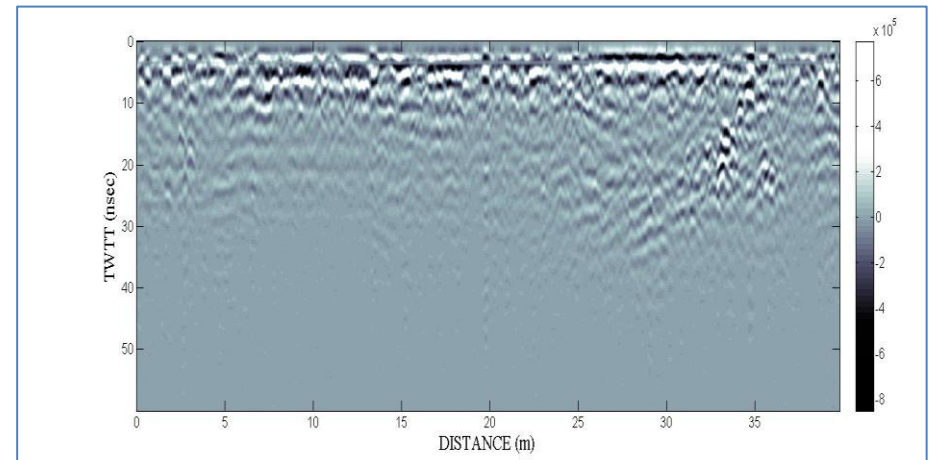
- Γραμμή Γ18 (8.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



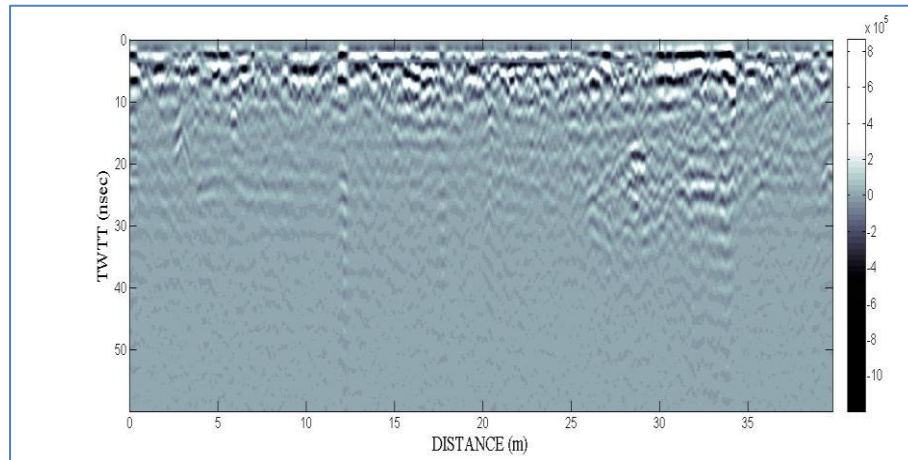
- Γραμμή Γ19 (9 m) – Διεύθυνση Δ-Α



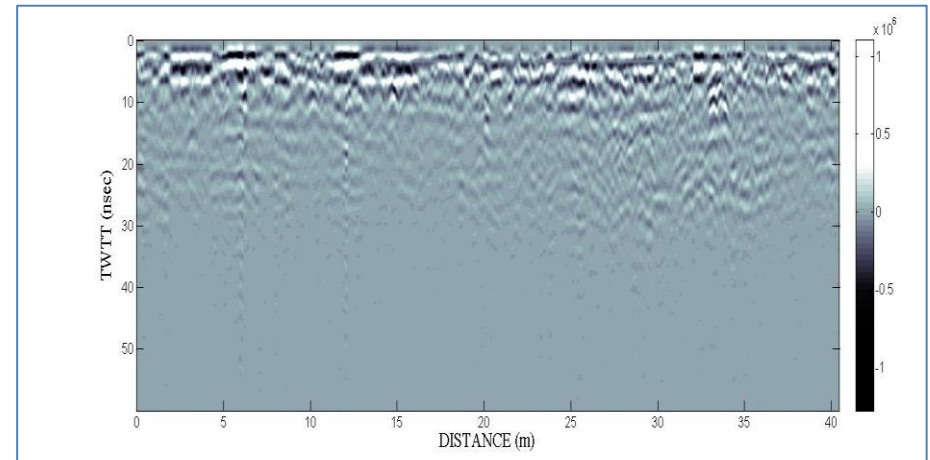
- Γραμμή Γ20 (9.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



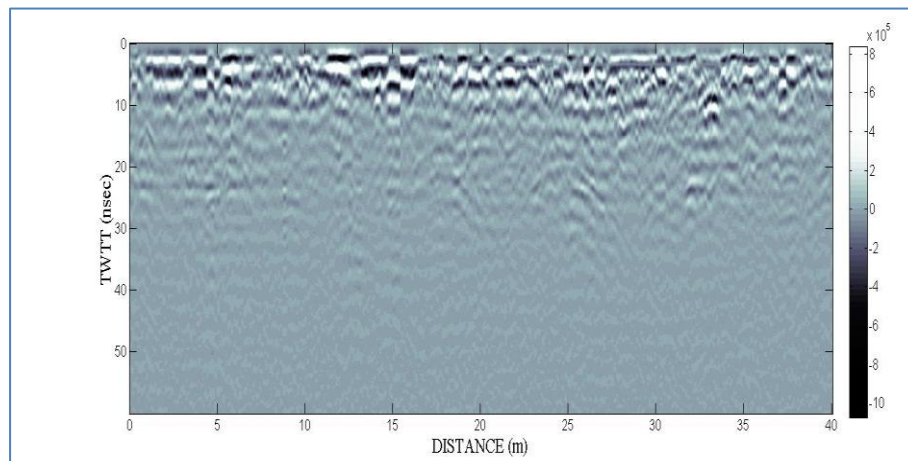
- Γραμμή Γ21 (10 m) – Διεύθυνση Δ-Α



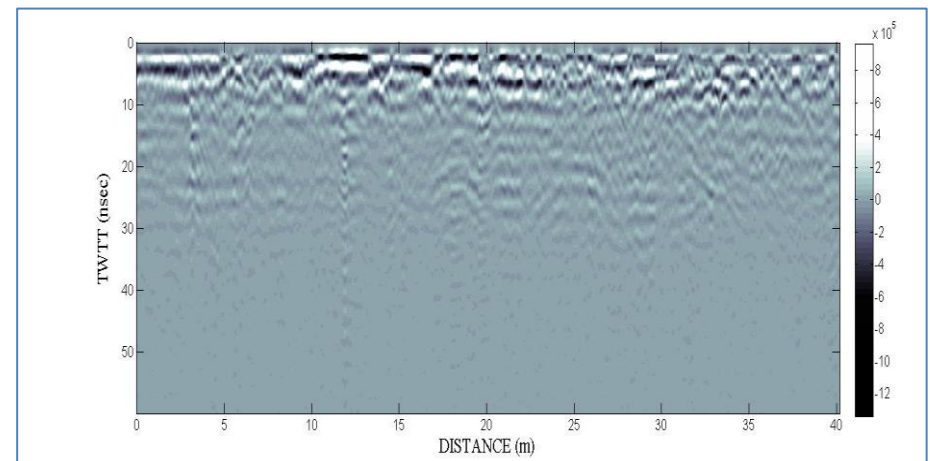
- Γραμμή Γ22 (10.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



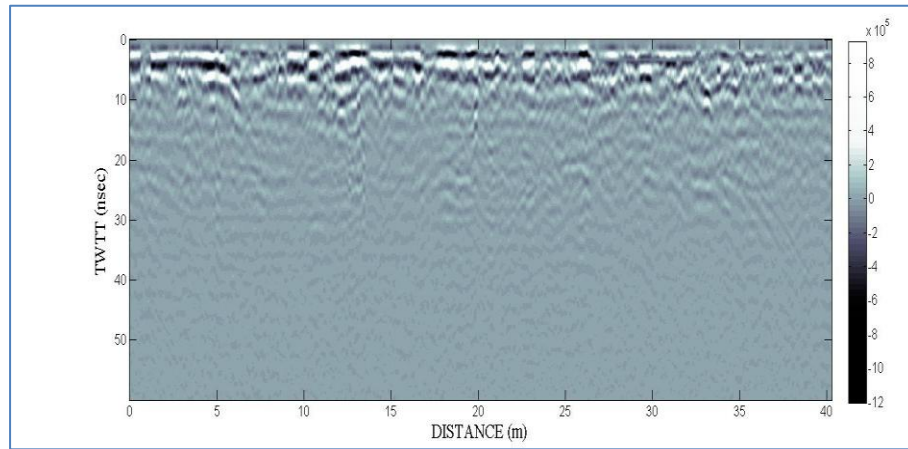
- Γραμμή Γ23 (11 m) – Διεύθυνση Δ-Α



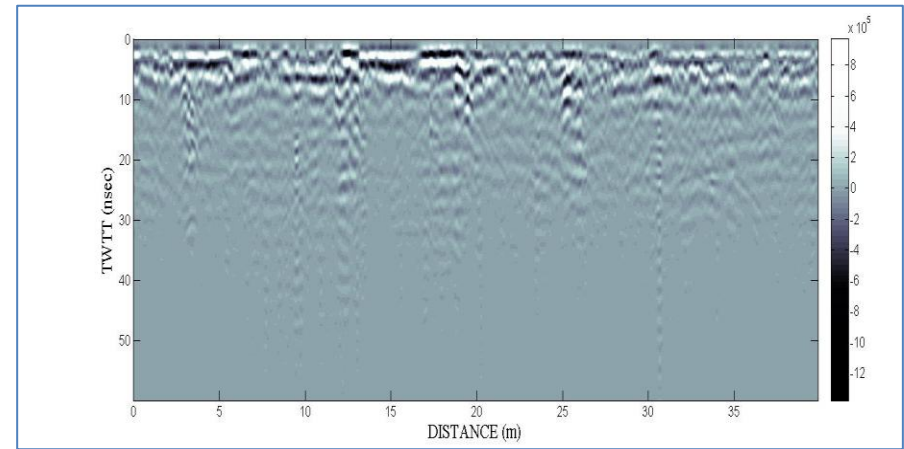
- Γραμμή Γ24 (11.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



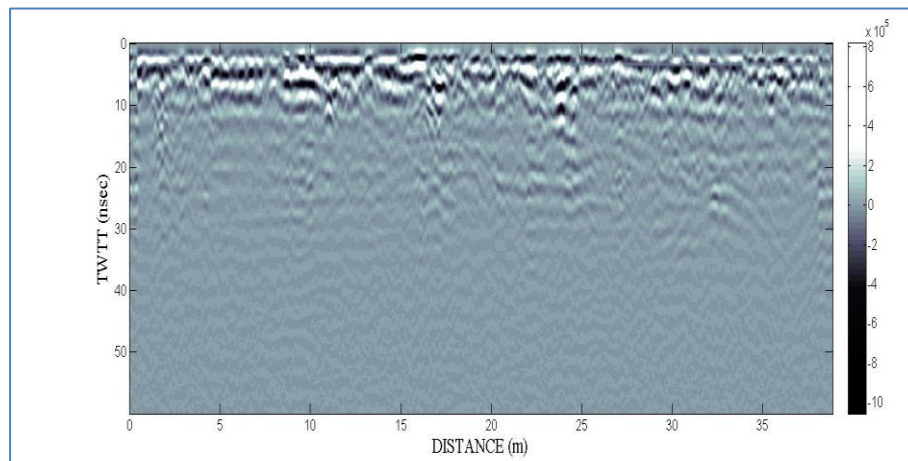
- Γραμμή Γ25 (12 m) – Διεύθυνση Δ-Α



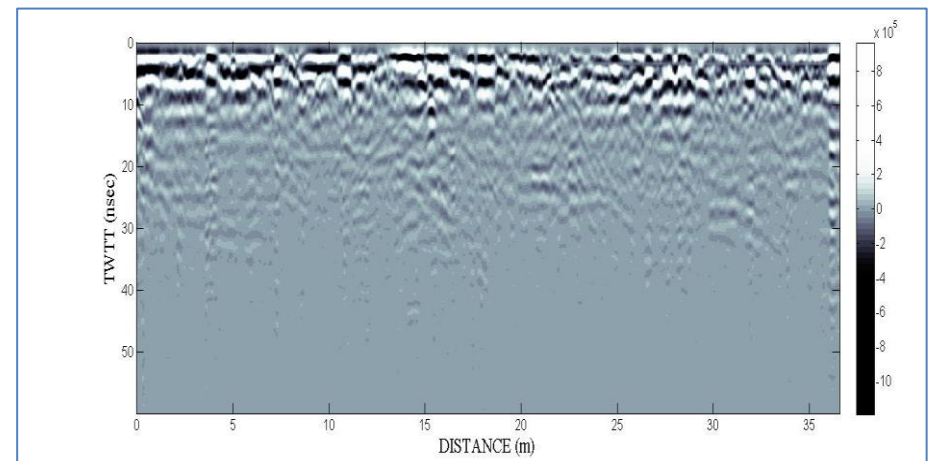
- Γραμμή Γ26 (12.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Γ27 (13 m) – Διεύθυνση Δ-Α

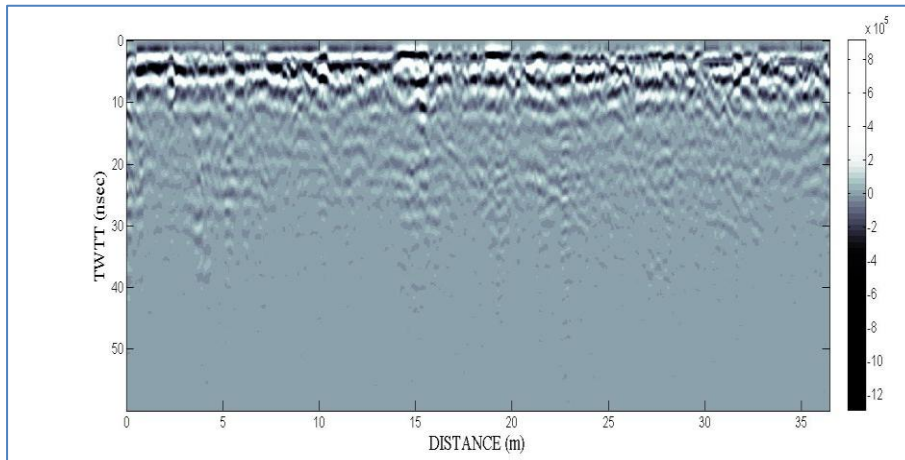


- Γραμμή Γ28 (13.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

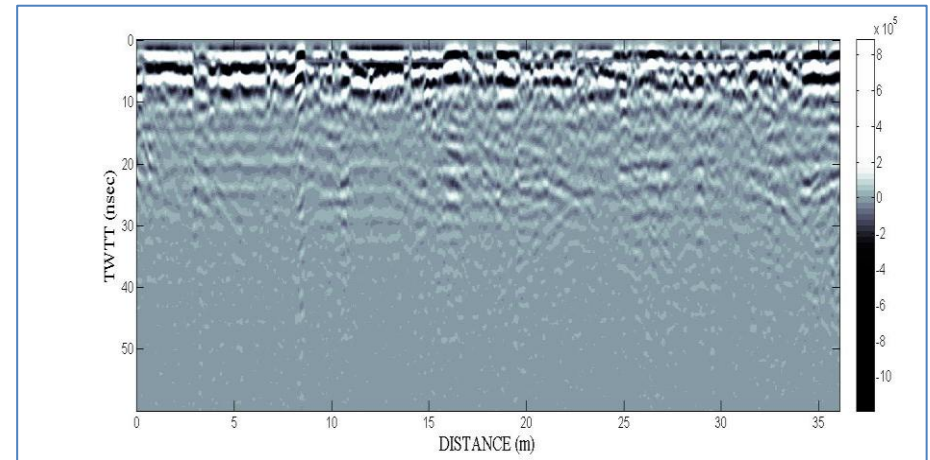




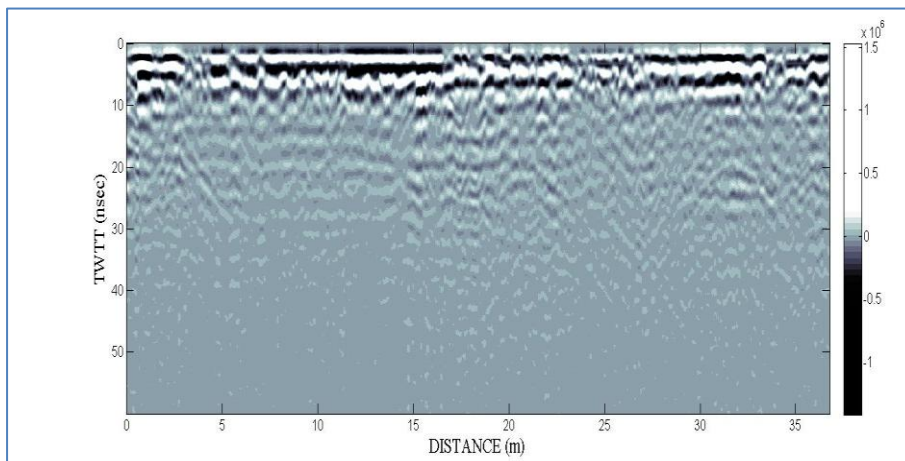
- Γραμμή Γ29 (14 m) – Διεύθυνση Δ-Α



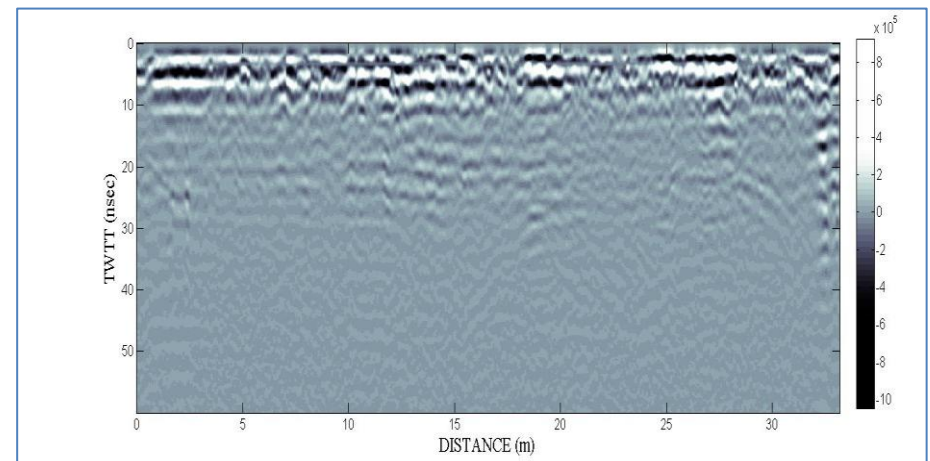
- Γραμμή Γ30 (14.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



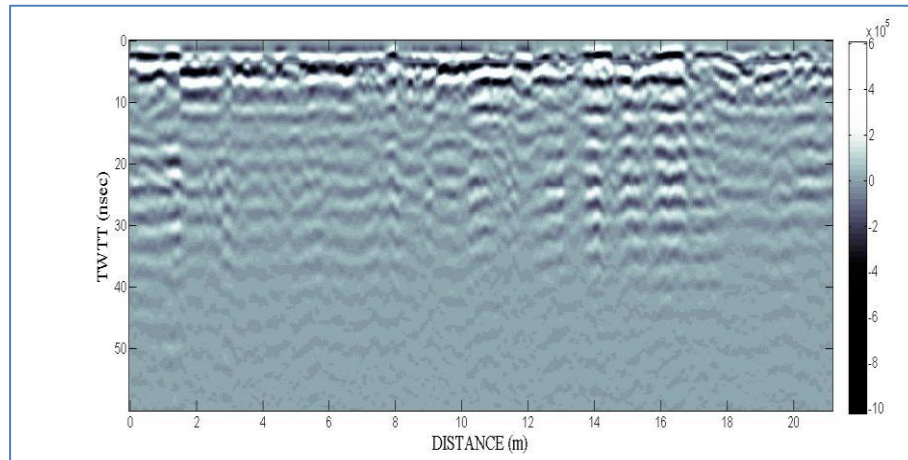
- Γραμμή Γ31 (15 m) – Διεύθυνση Δ-Α



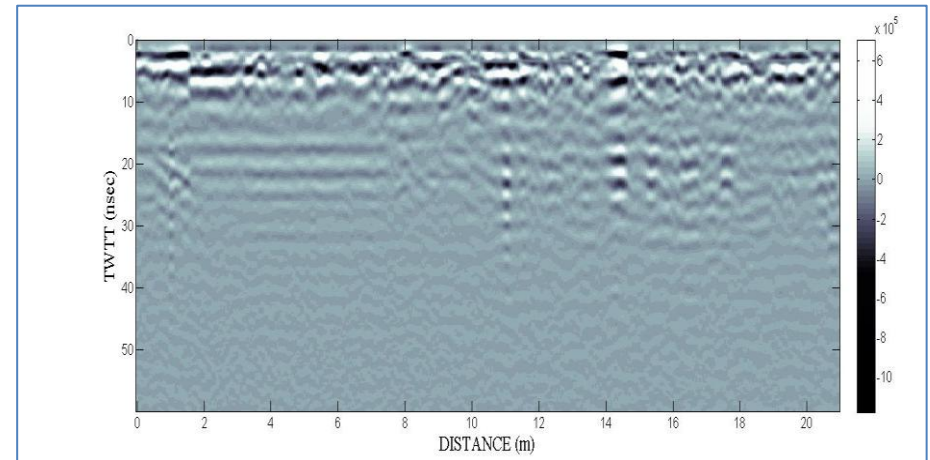
- Γραμμή Γ32 (15.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



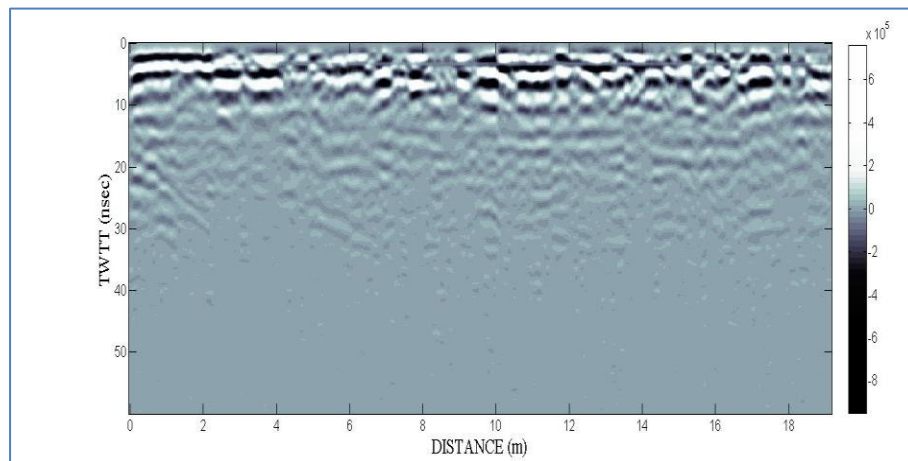
- Γραμμή Γ33 (16 m) – Διεύθυνση Δ-Α



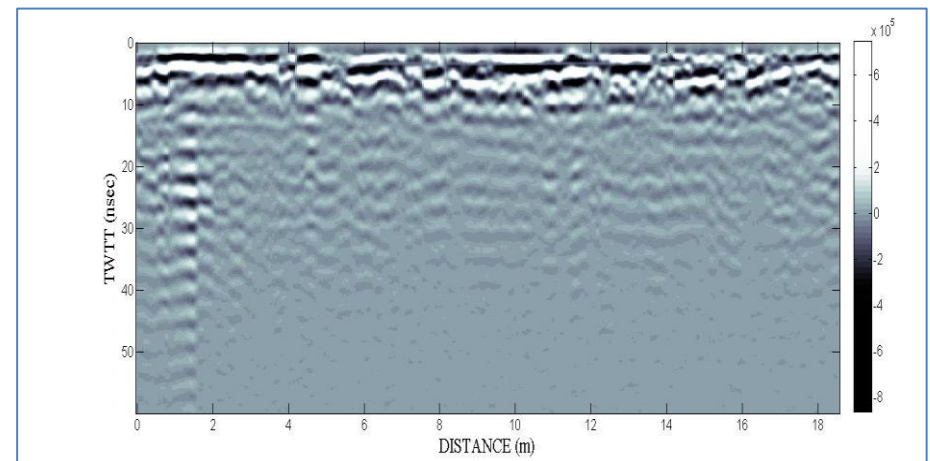
- Γραμμή Γ34 (16.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Γ35 (17 m) – Διεύθυνση Δ-Α

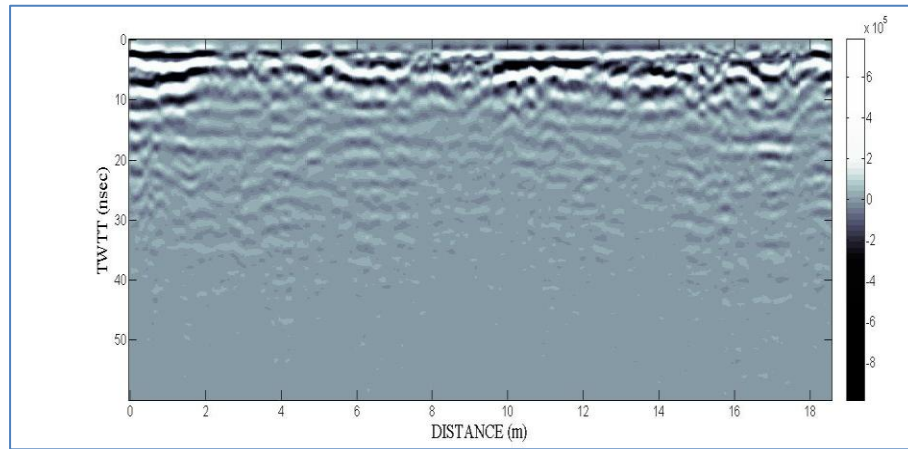


- Γραμμή Γ36 (17.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

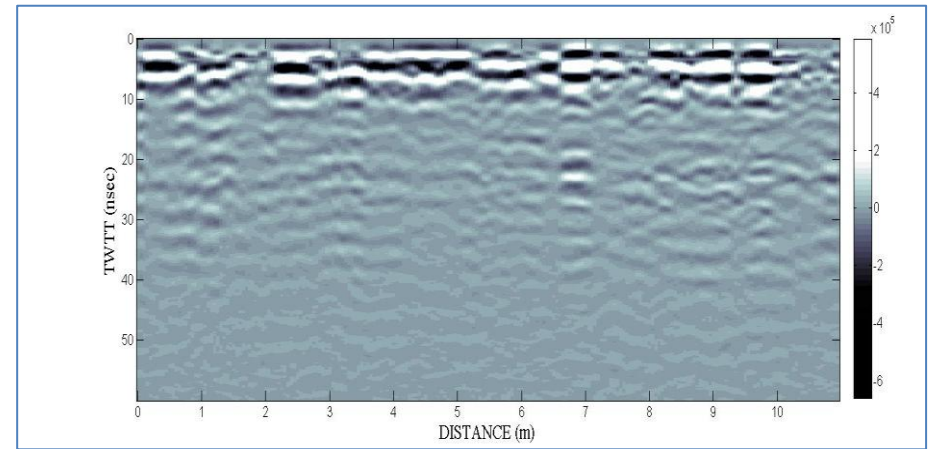




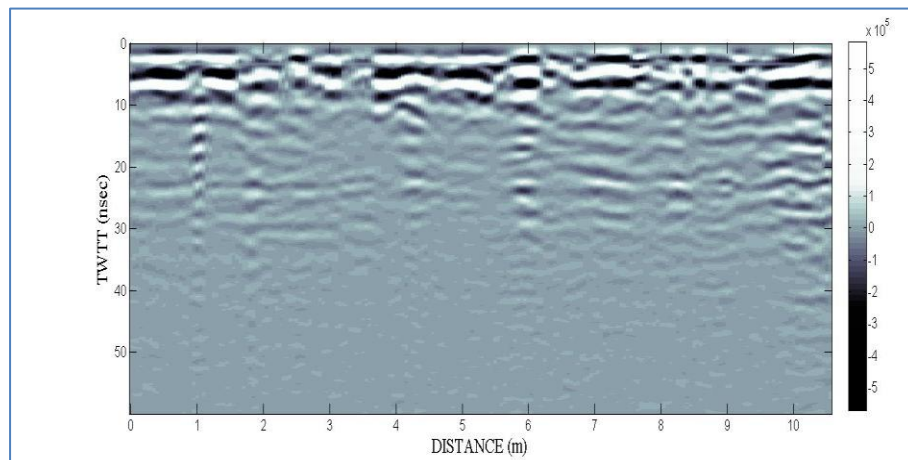
- Γραμμή Γ37 (18 m) – Διεύθυνση Δ-Α



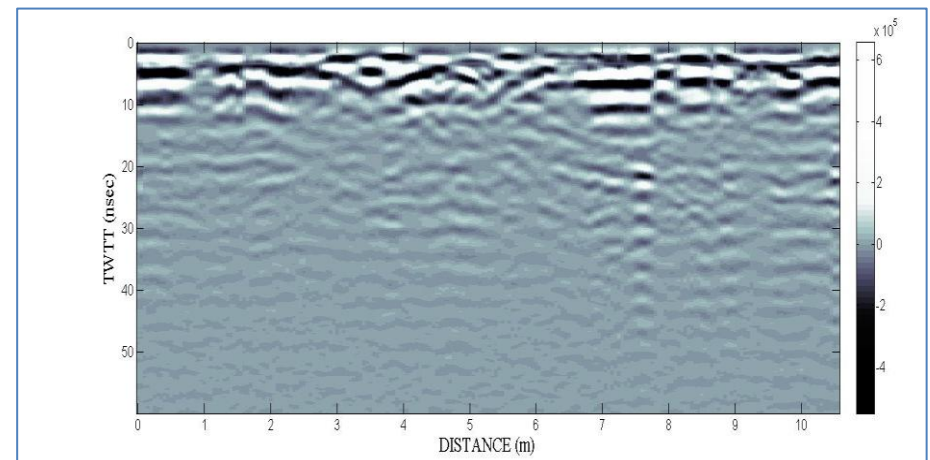
- Γραμμή Γ38 (18.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



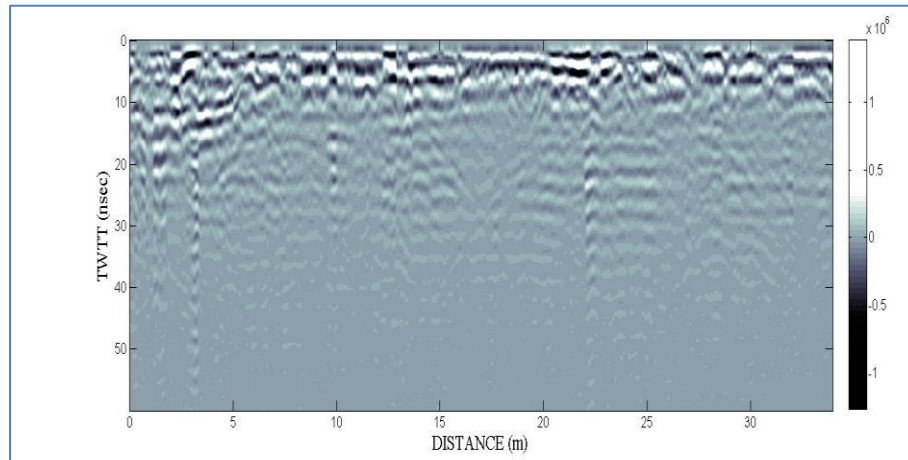
- Γραμμή Γ39 (19 m) – Διεύθυνση Δ-Α



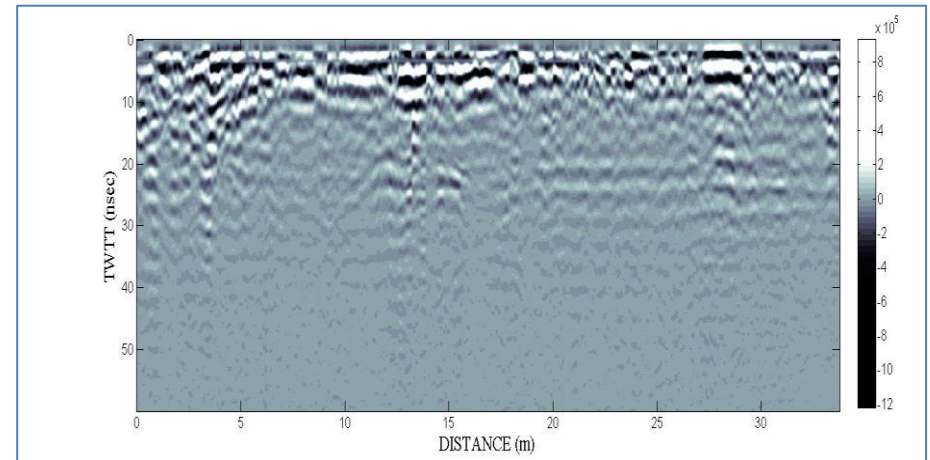
- Γραμμή Γ40 (19.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



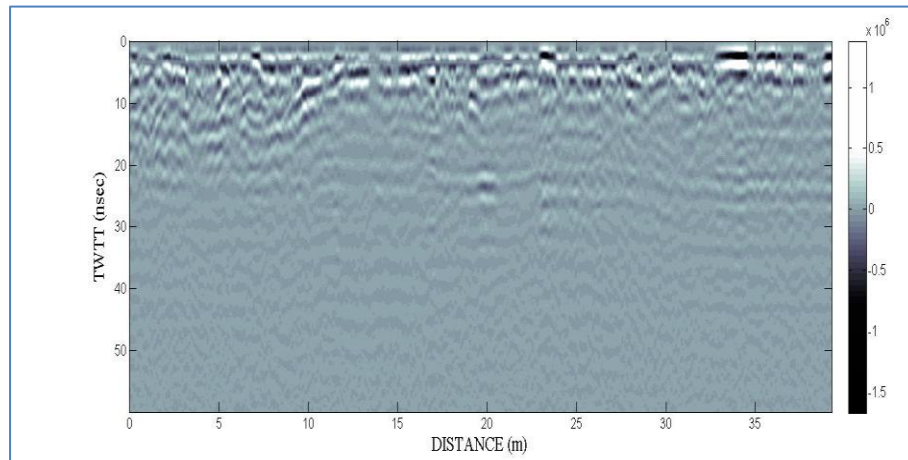
- Γραμμή Γ41 (20 m) – Διεύθυνση Δ-Α



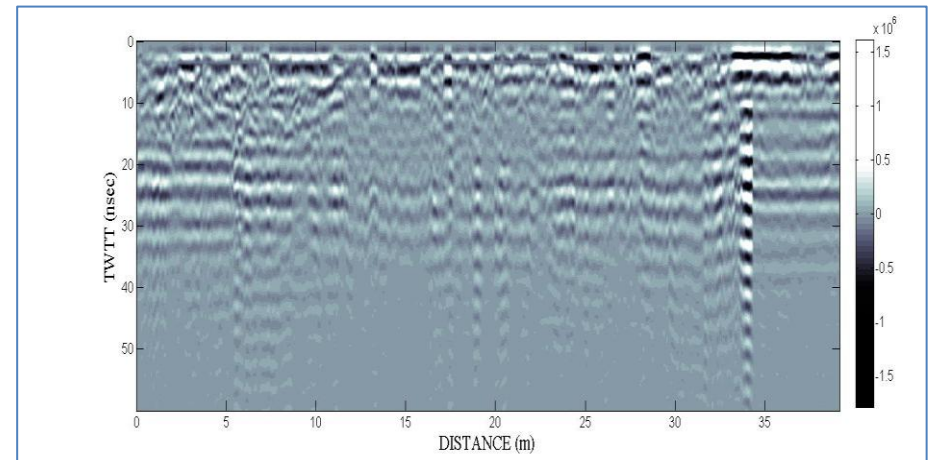
- Γραμμή Γ42 (20.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



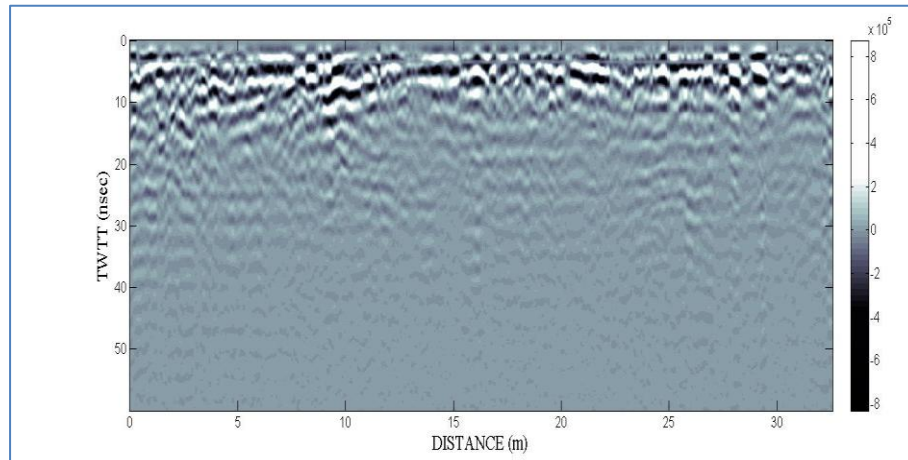
- Γραμμή Γ43 (21 m) – Διεύθυνση Δ-Α



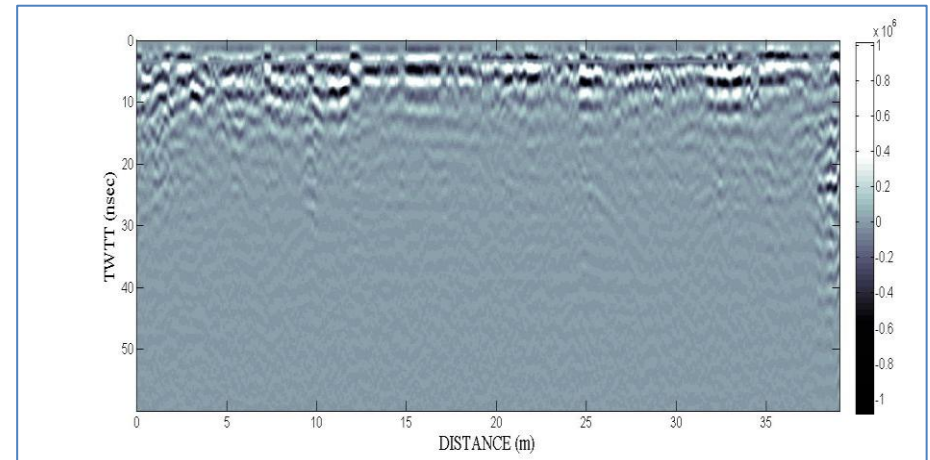
- Γραμμή Γ44 (21.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



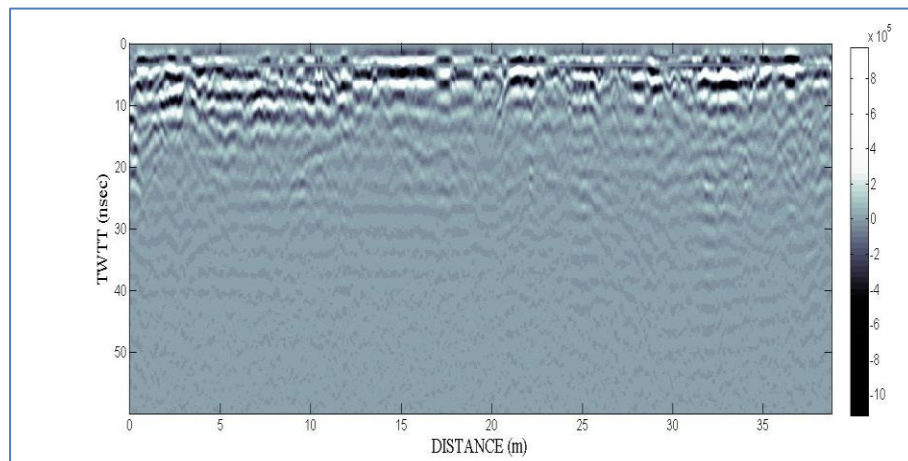
- Γραμμή Γ45 (22 m) – Διεύθυνση Δ-Α



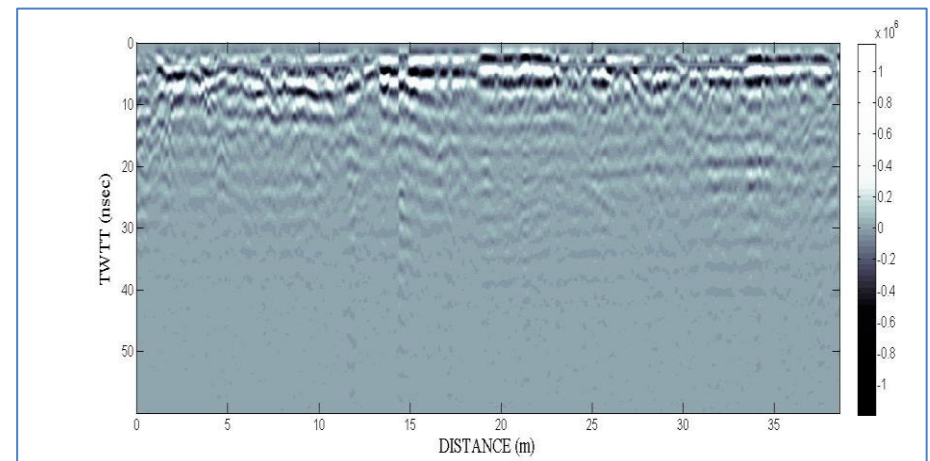
- Γραμμή Γ46 (22.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Γ47 (23 m) – Διεύθυνση Δ-Α

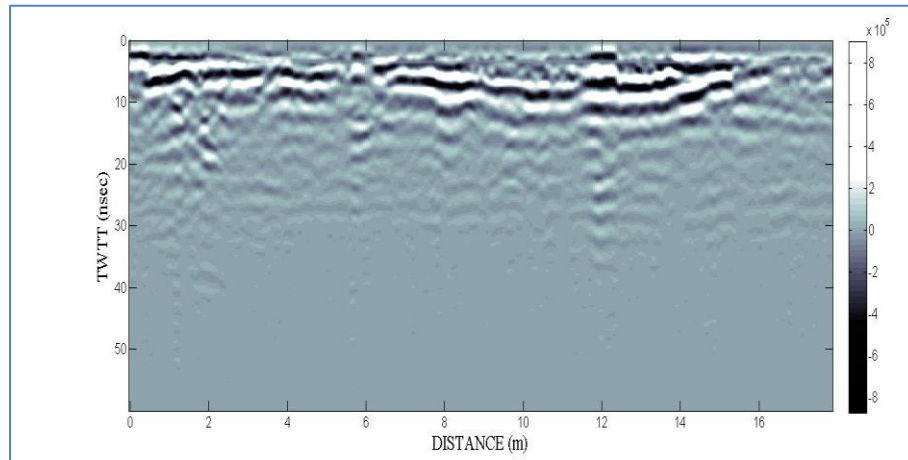


- Γραμμή Γ48 (23.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

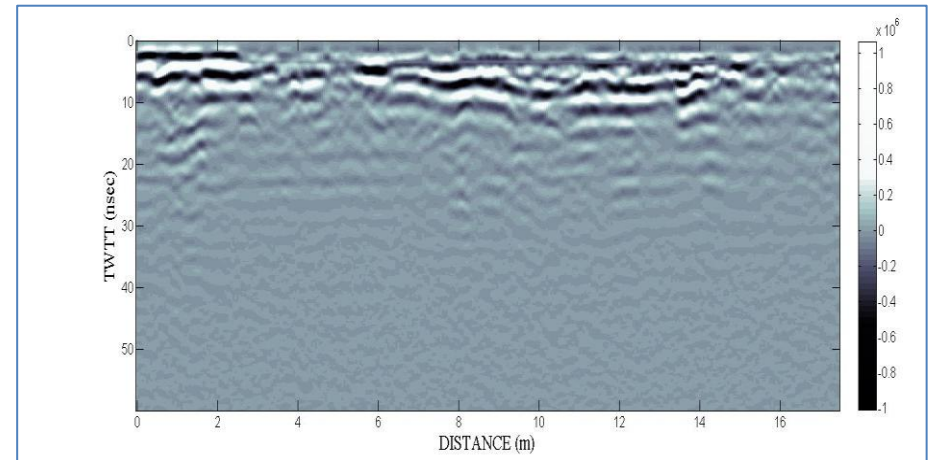




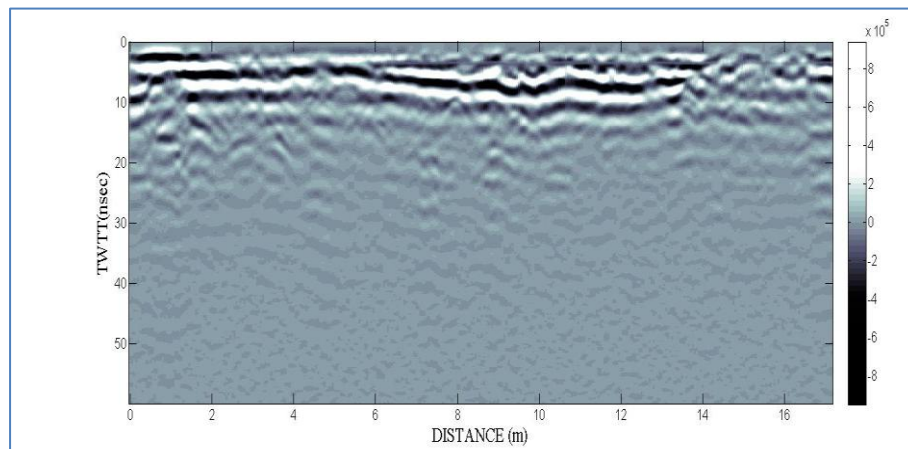
- Γραμμή Γ49 (24 m) – Διεύθυνση Δ-Α



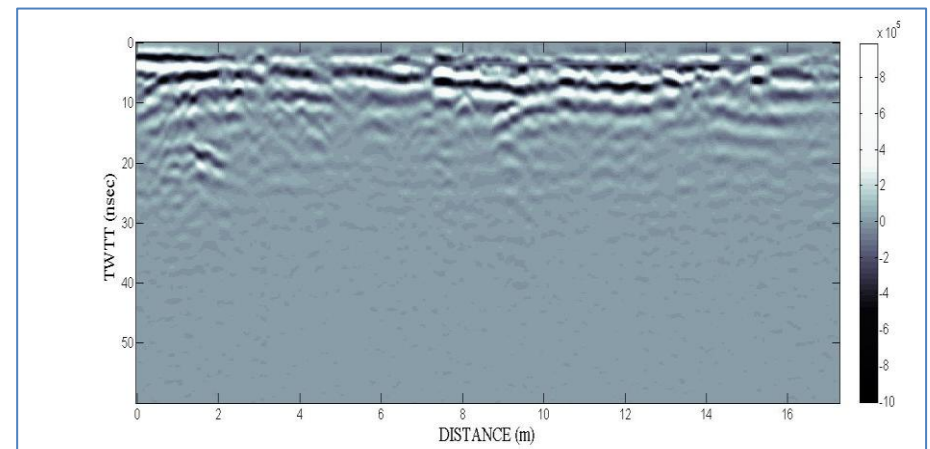
- Γραμμή Γ50 (24.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



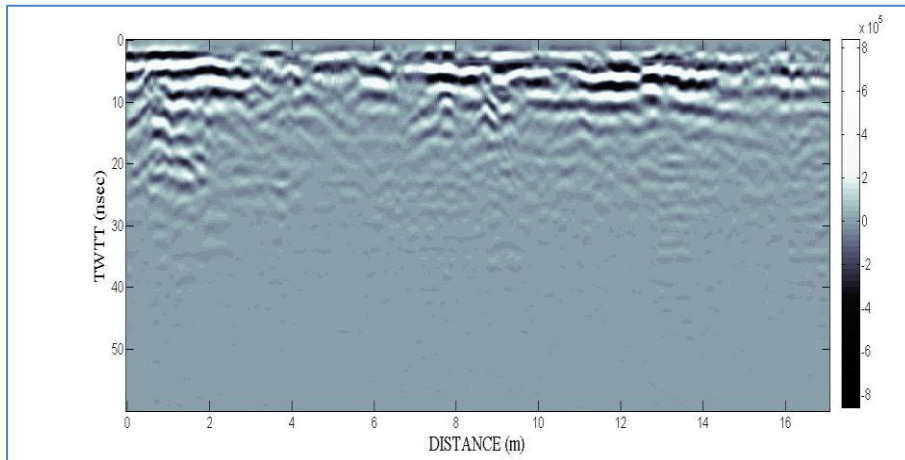
- Γραμμή Γ51 (25 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Γ52 (25.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



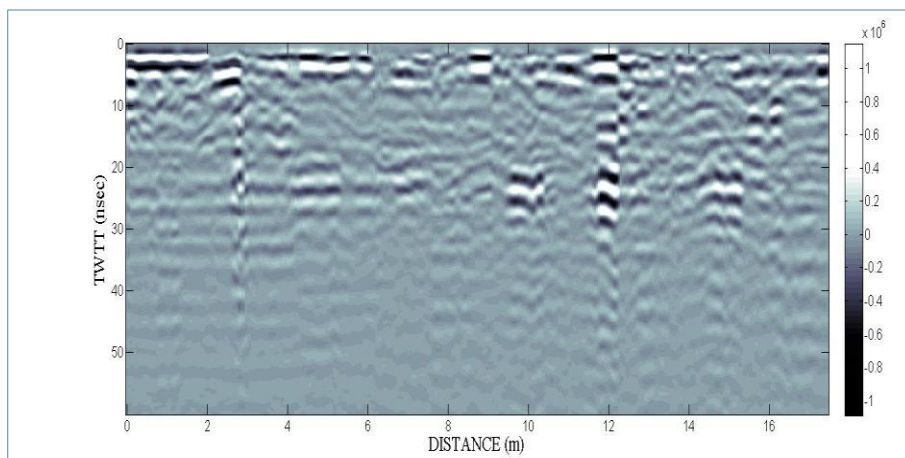
- Γραμμή Γ53 (26 m) – Διεύθυνση Δ-Α



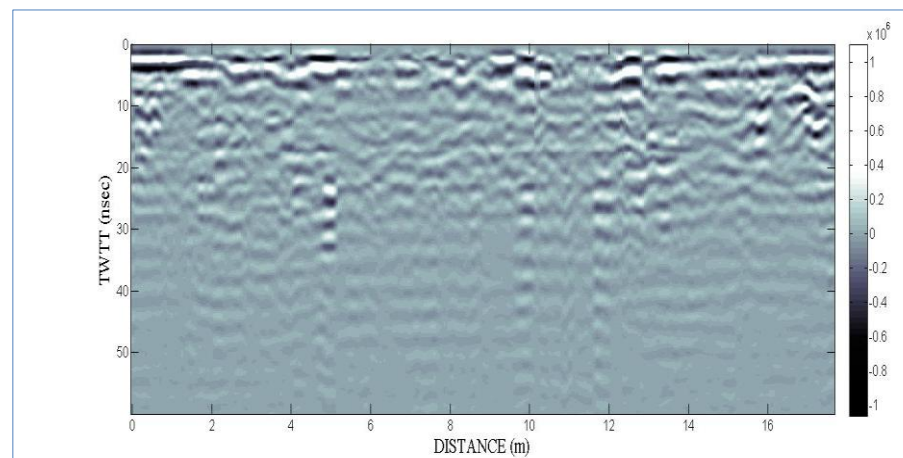


### Περιοχή Δ1 (Βορειοανατολικά του θεάτρου)

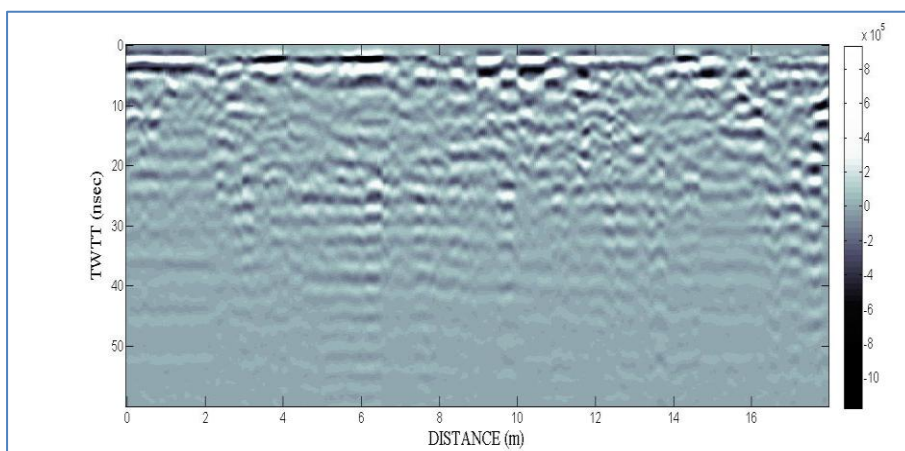
- Γραμμή Δ1\_01 (0 m) – Διεύθυνση Δ-Α



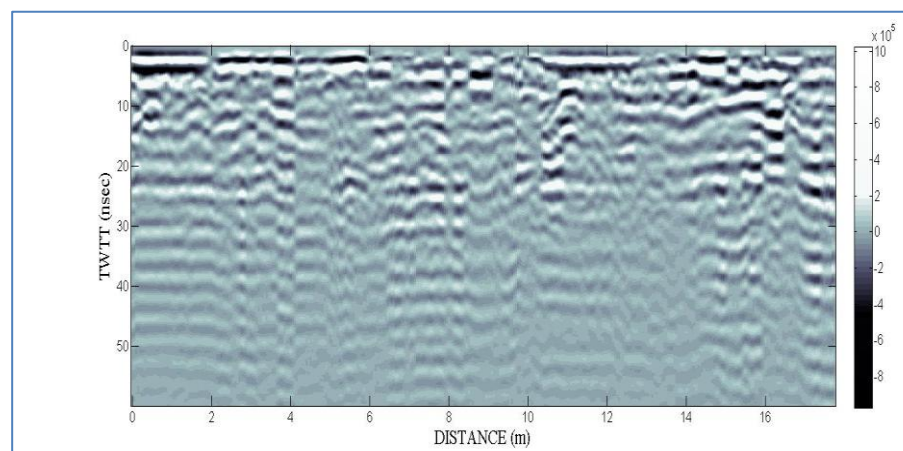
- Γραμμή Δ1\_02 (0.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



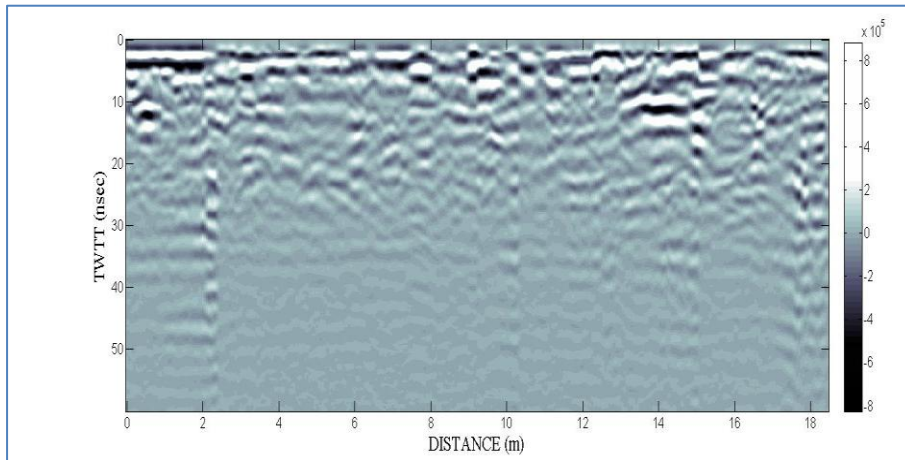
- Γραμμή Δ1\_03 (1 m) – Διεύθυνση Δ-Α



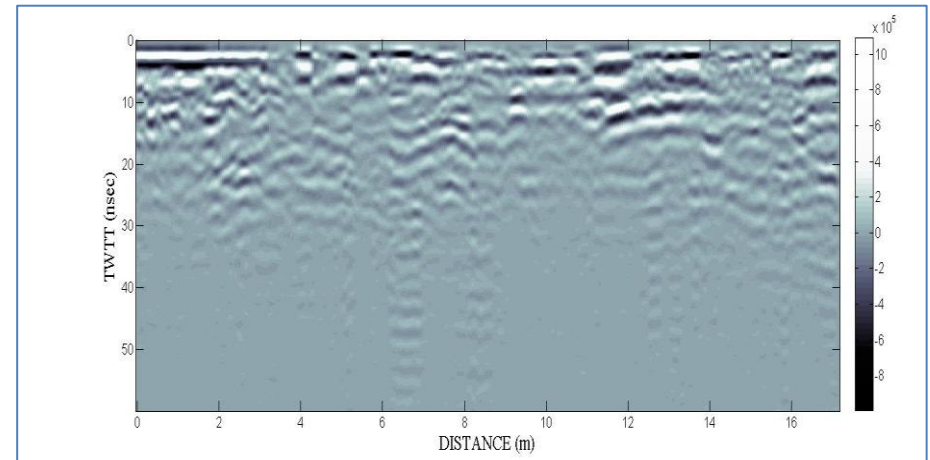
- Γραμμή Δ1\_04 (1.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



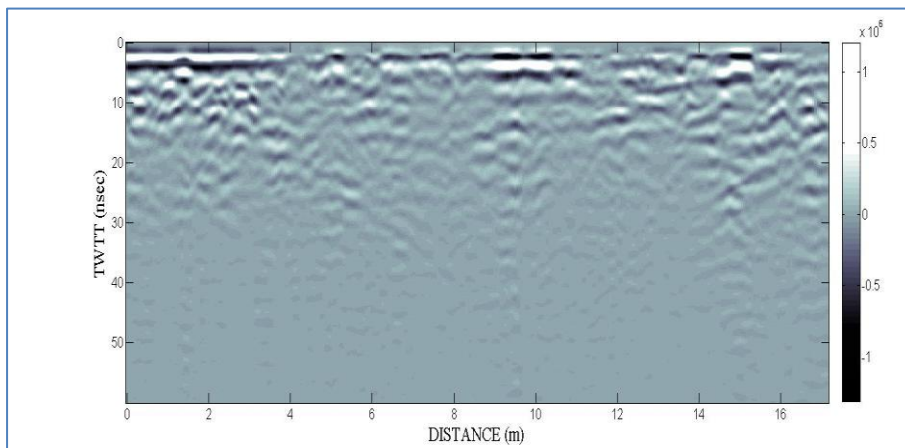
- Γραμμή Δ1\_05 (2 m) – Διεύθυνση Δ-Α



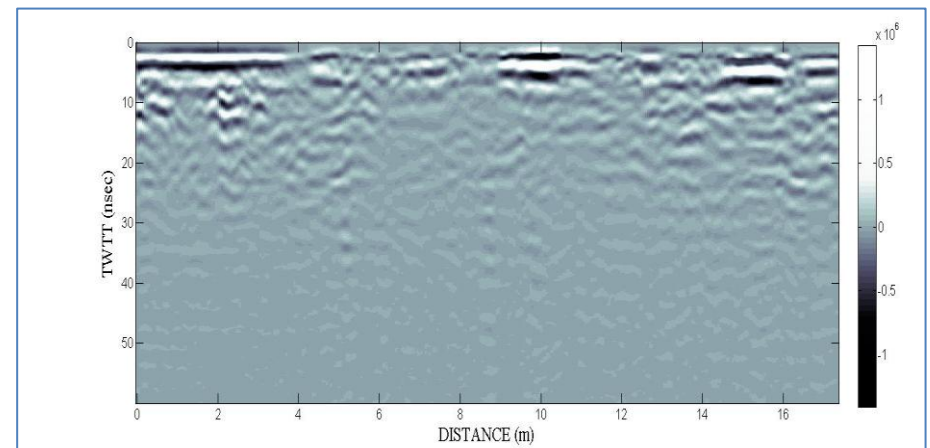
- Γραμμή Δ1\_06 (2.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



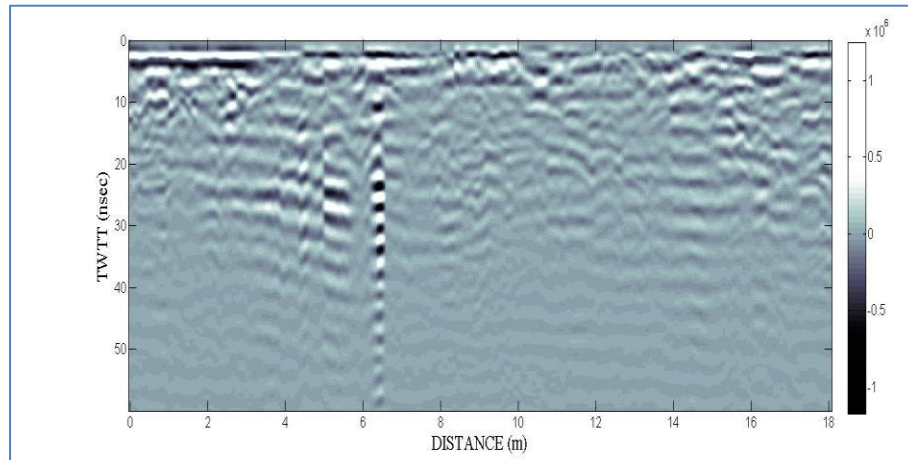
- Γραμμή Δ1\_07 (3 m) – Διεύθυνση Δ-Α



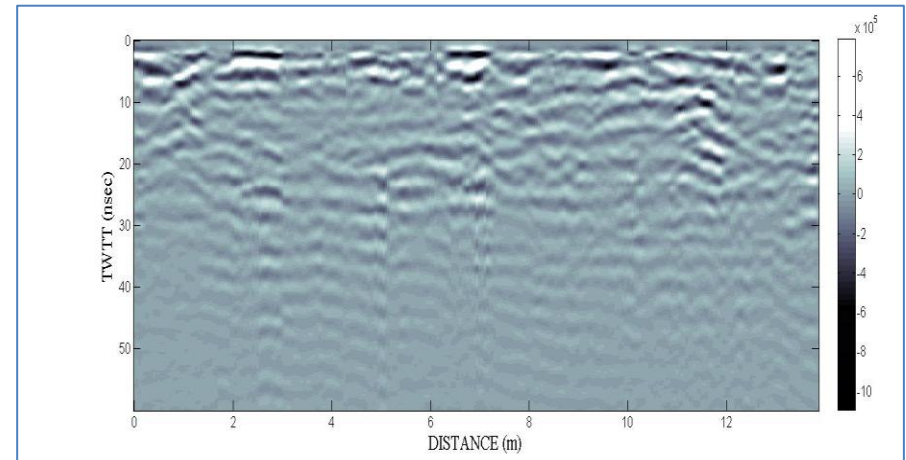
- Γραμμή Δ1\_08 (3.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



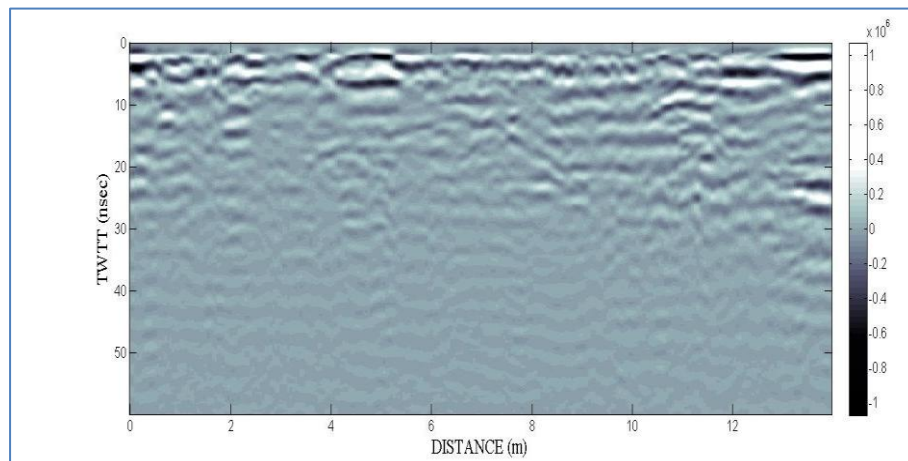
- Γραμμή Δ1\_09 (4 m) – Διεύθυνση Δ-Α



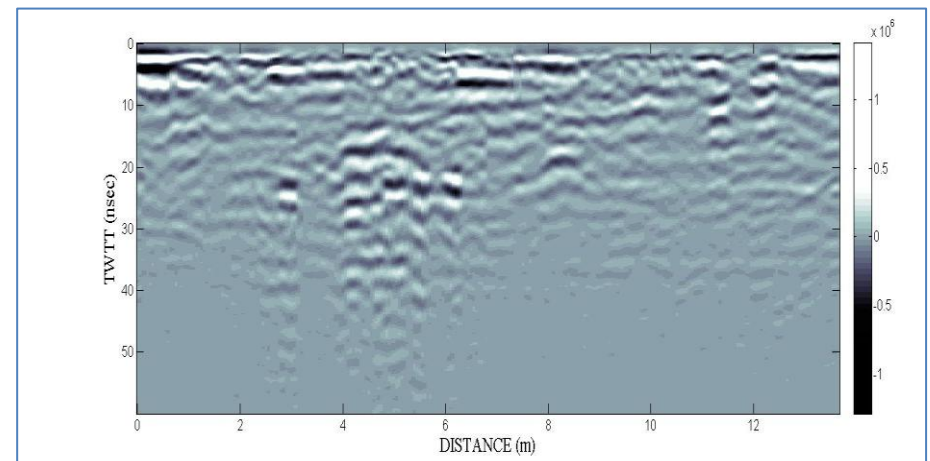
- Γραμμή Δ1\_10 (4.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Δ1\_11 (5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

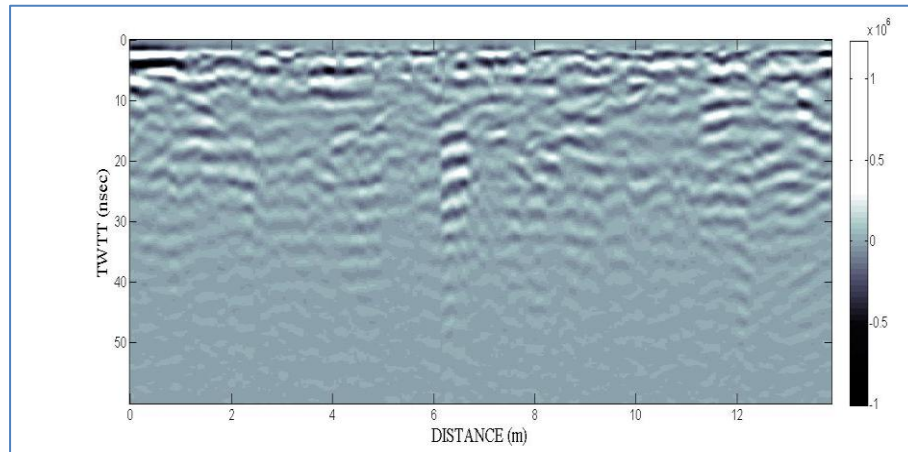


- Γραμμή Δ1\_12 (5.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

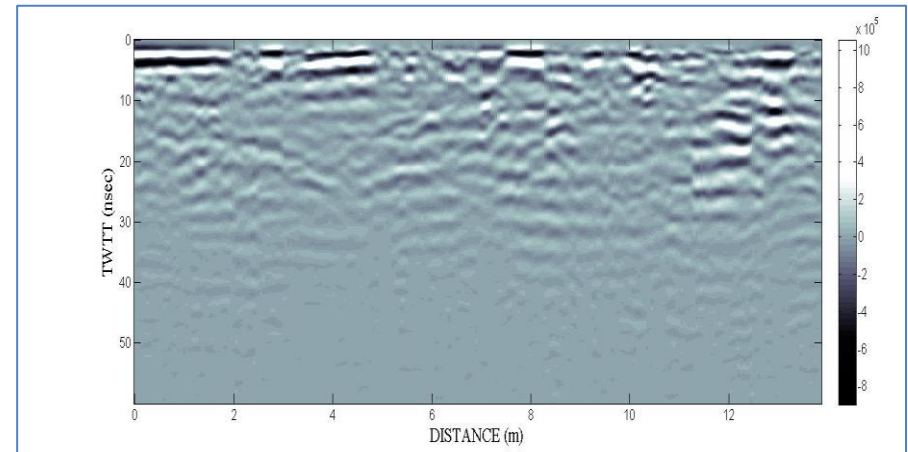




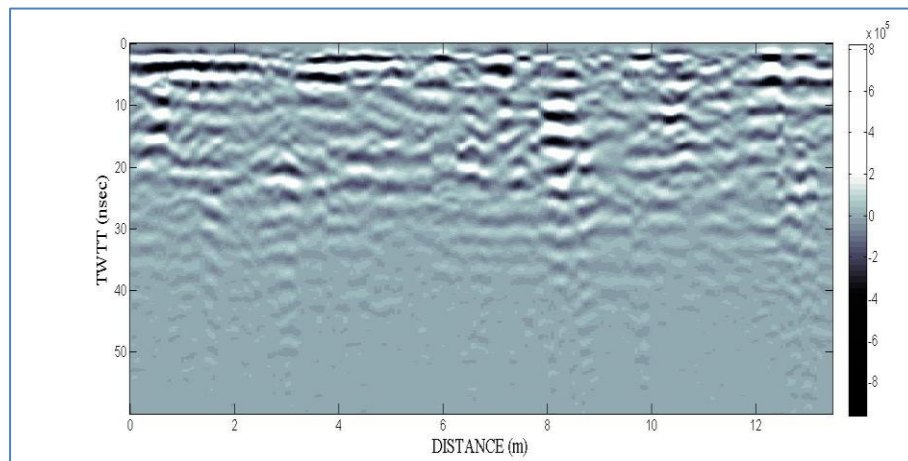
- Γραμμή Δ1\_13 (6 m) – Διεύθυνση Δ-Α



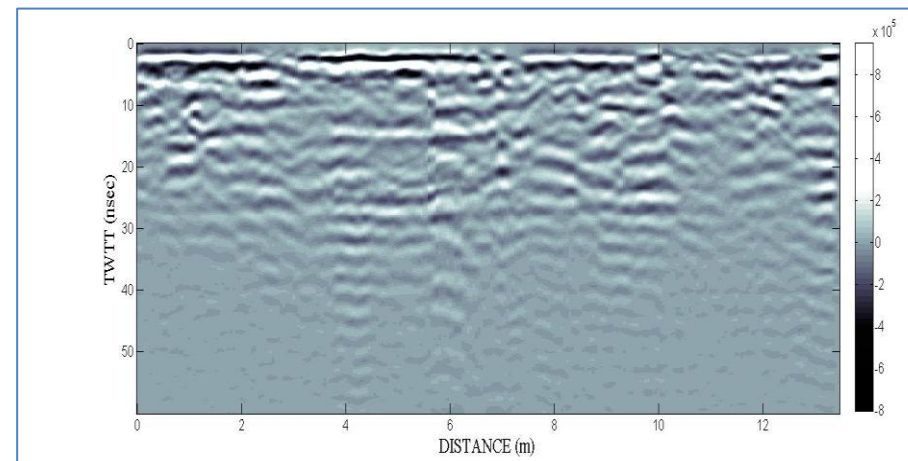
- Γραμμή Δ1\_14 (6.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



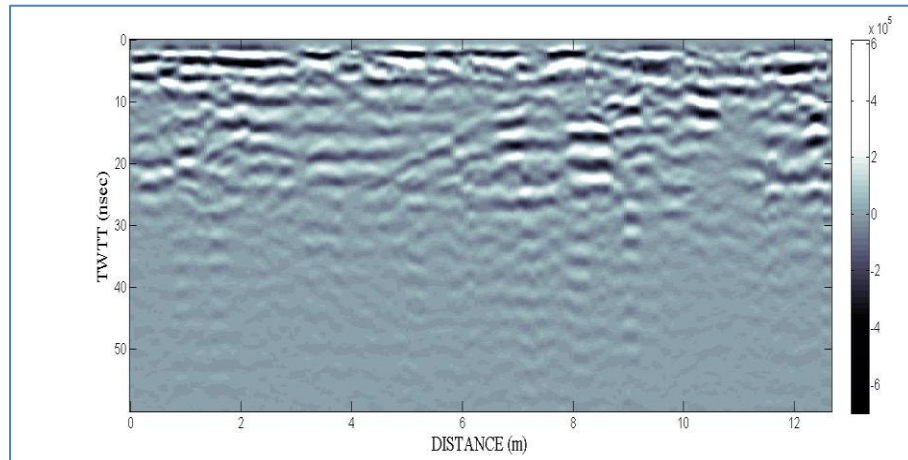
- Γραμμή Δ1\_15 (7 m) – Διεύθυνση Δ-Α



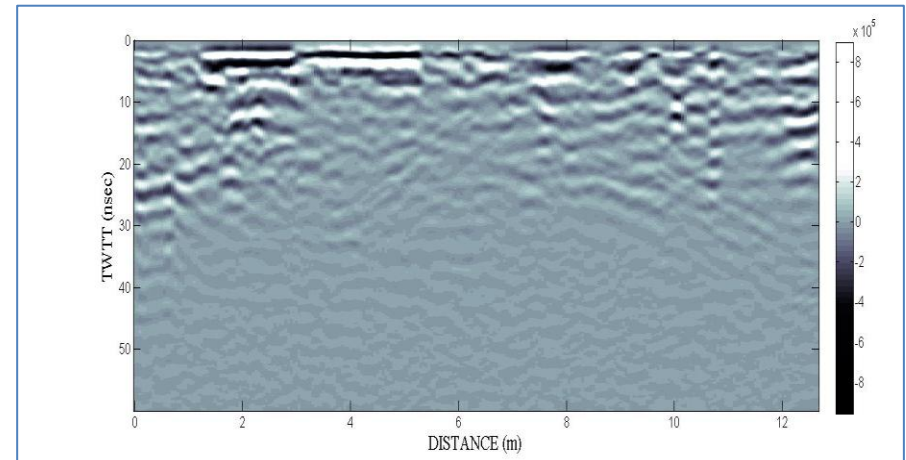
- Γραμμή Δ1\_16 (7.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



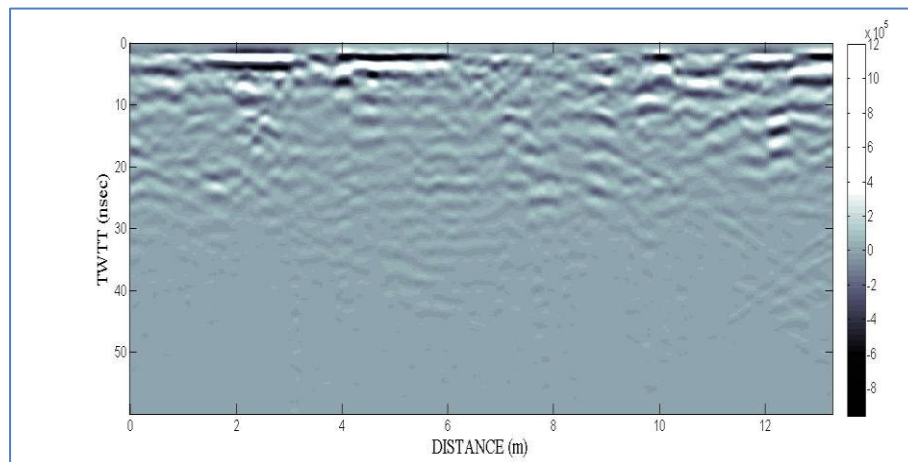
- Γραμμή Δ1\_17 (8 m) – Διεύθυνση Δ-Α



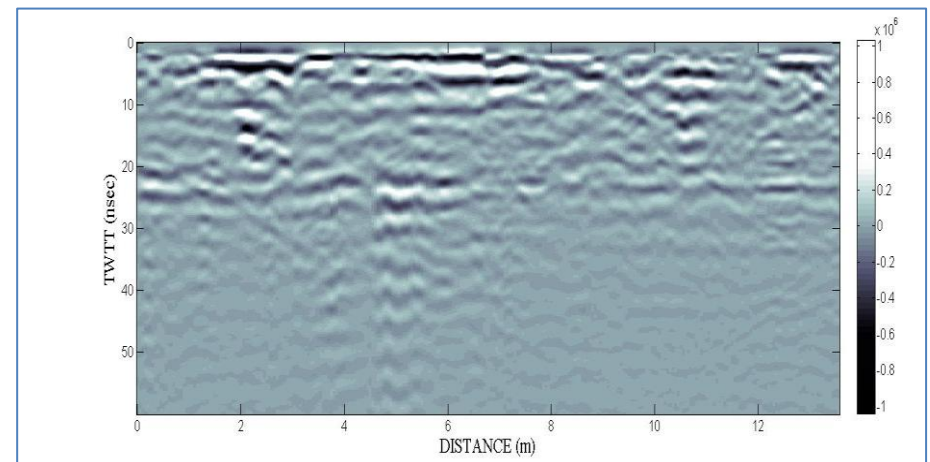
- Γραμμή Δ1\_18 (8.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Δ1\_19 (9 m) – Διεύθυνση Δ-Α

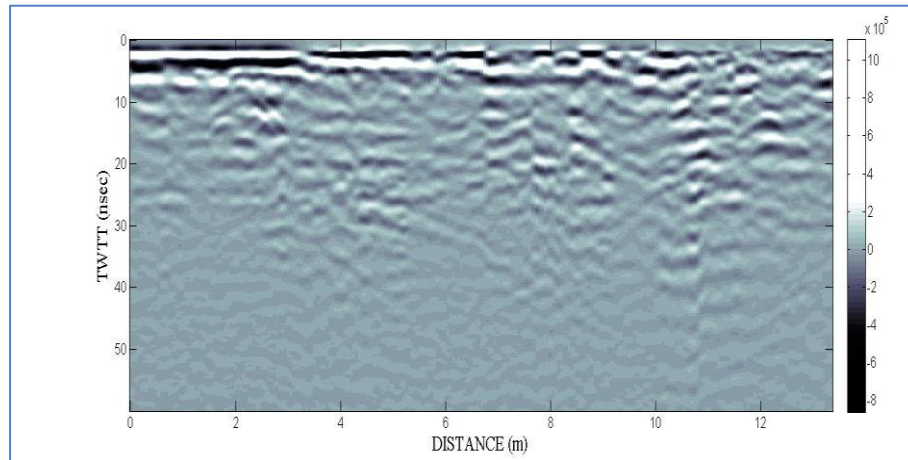


- Γραμμή Δ1\_20 (9.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

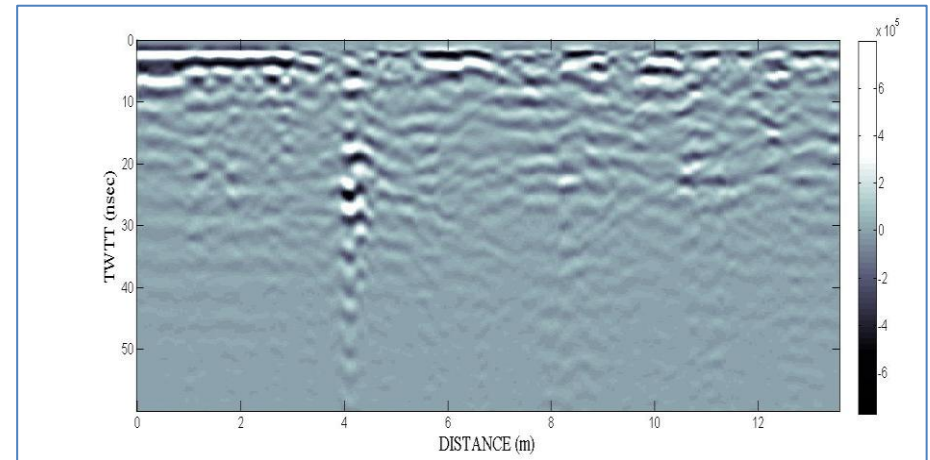




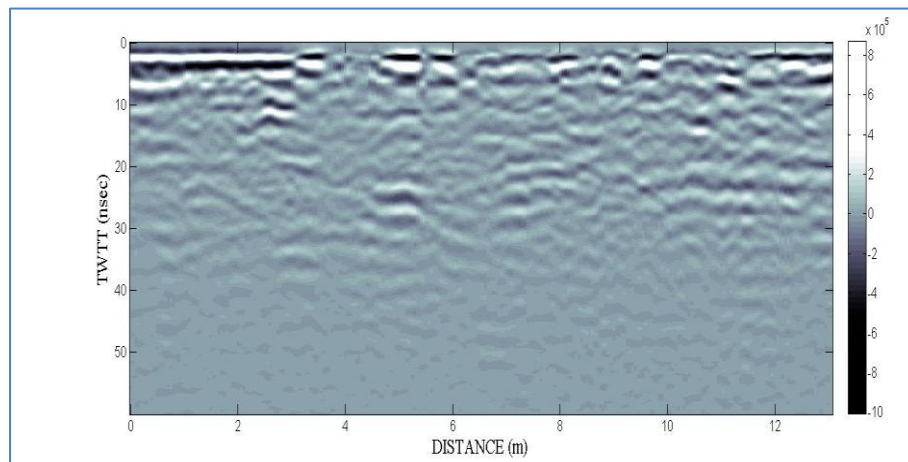
- Γραμμή Δ1\_21 (10 m) – Διεύθυνση Δ-Α



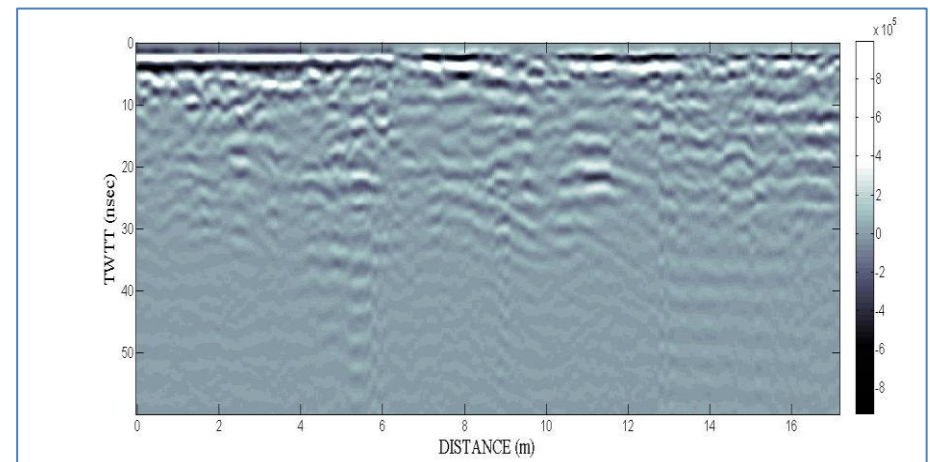
- Γραμμή Δ1\_22 (10.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



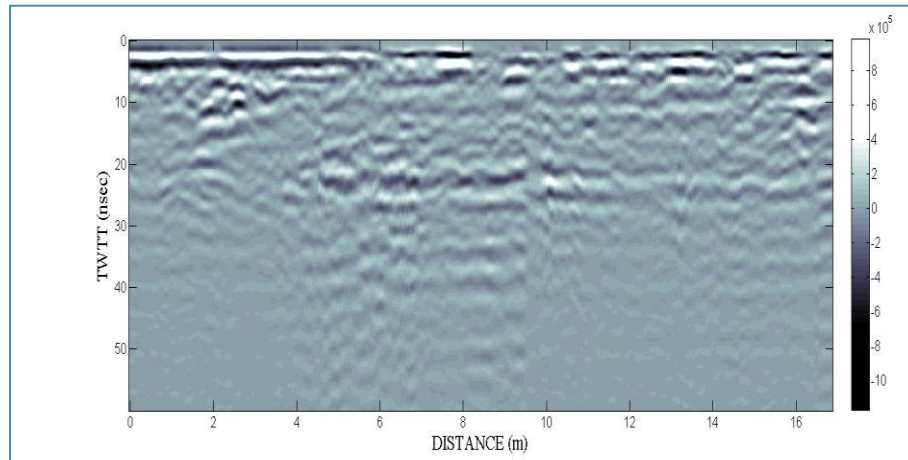
- Γραμμή Δ1\_23 (11 m) – Διεύθυνση Δ-Α



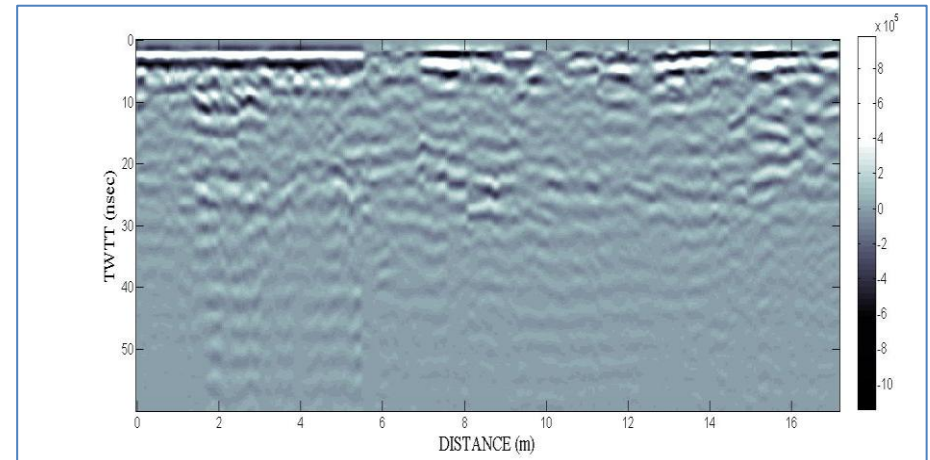
- Γραμμή Δ1\_24 (11.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



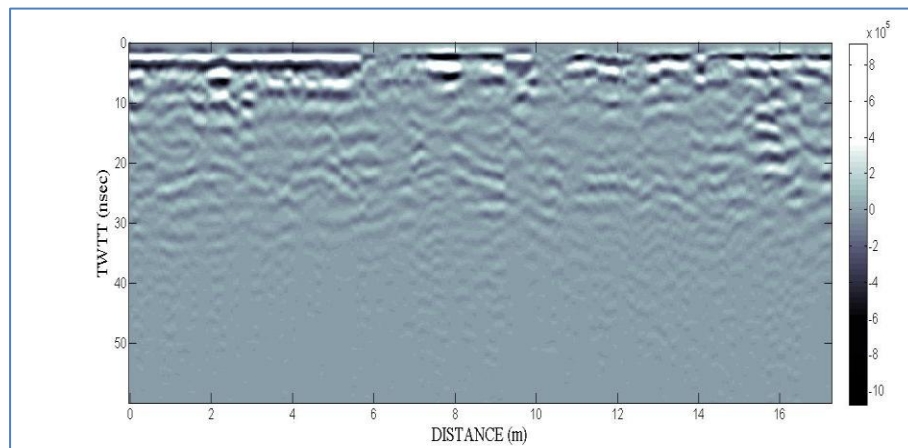
- Γραμμή Δ1\_25 (12 m) – Διεύθυνση Δ-Α



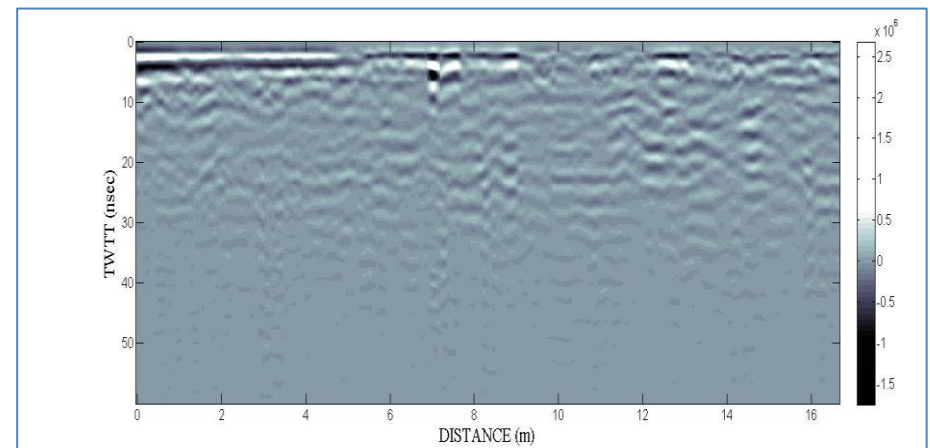
- Γραμμή Δ1\_26 (12.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



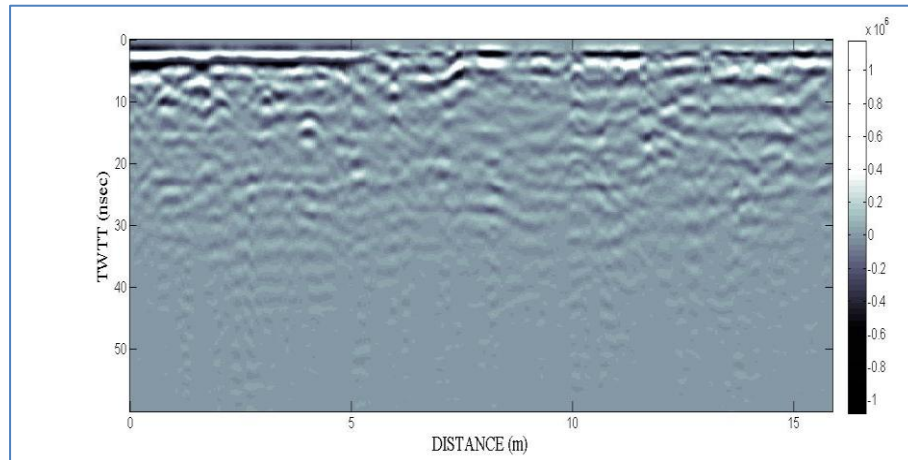
- Γραμμή Δ1\_27 (13 m) – Διεύθυνση Δ-Α



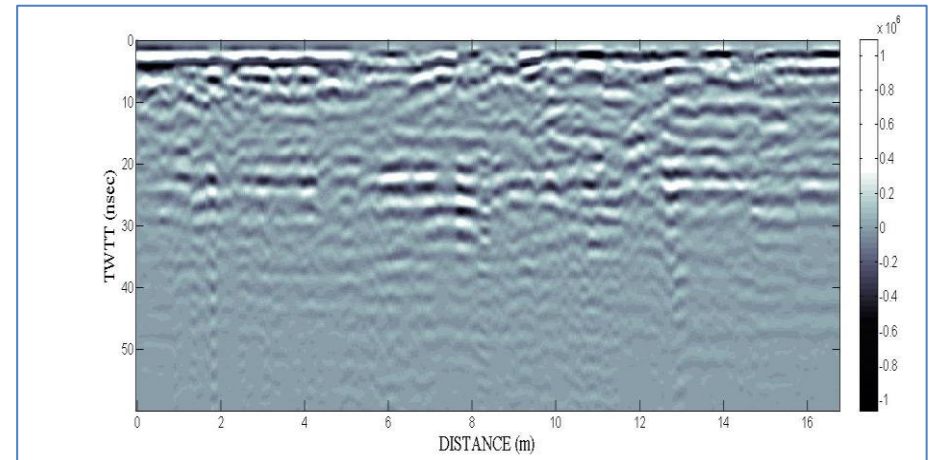
- Γραμμή Δ1\_28 (13.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



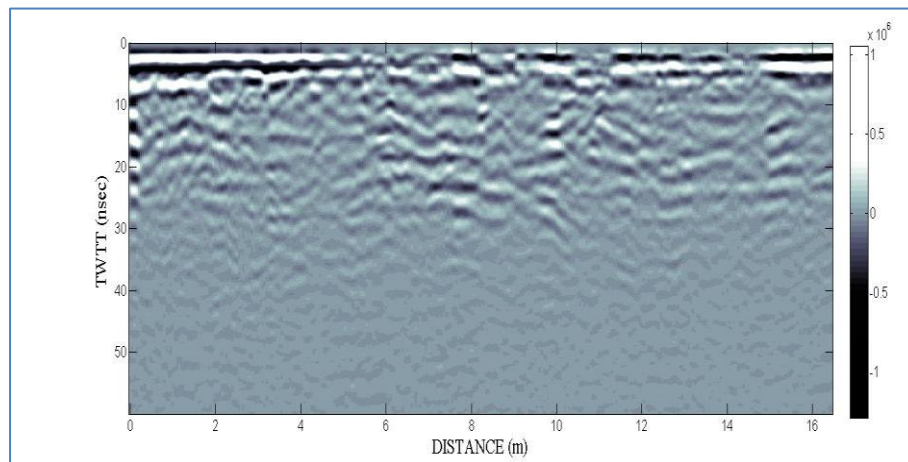
- Γραμμή Δ1\_29 (14 m) – Διεύθυνση Δ-Α



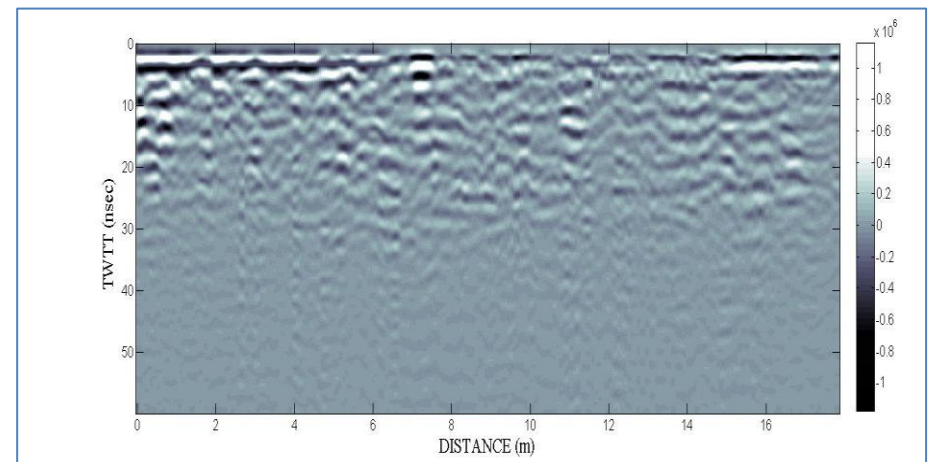
- Γραμμή Δ1\_30 (14.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Δ1\_31 (15 m) – Διεύθυνση Δ-Α

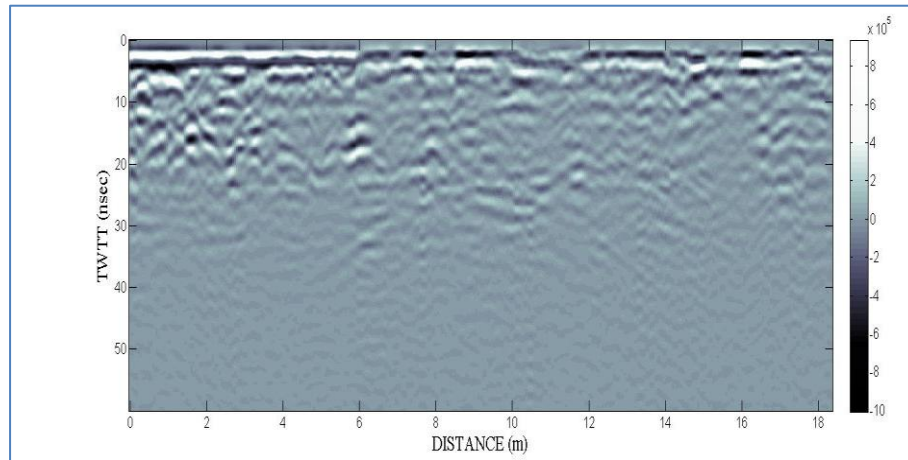


- Γραμμή Δ1\_32 (15.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

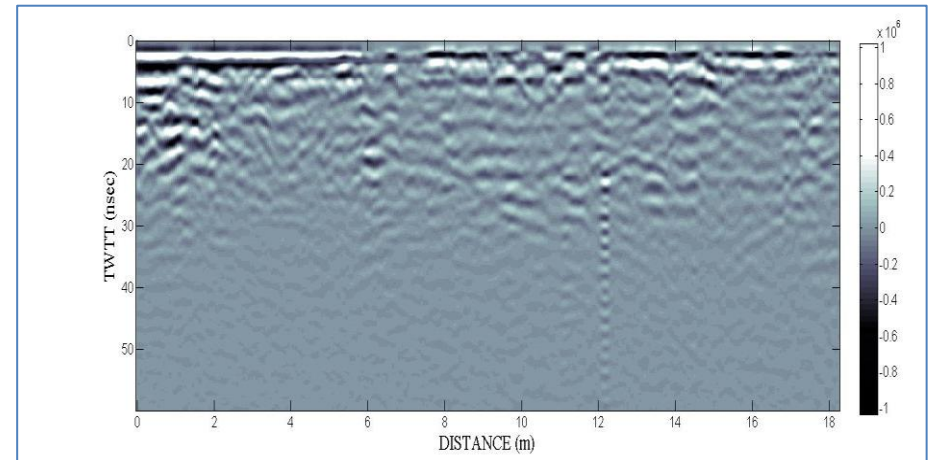




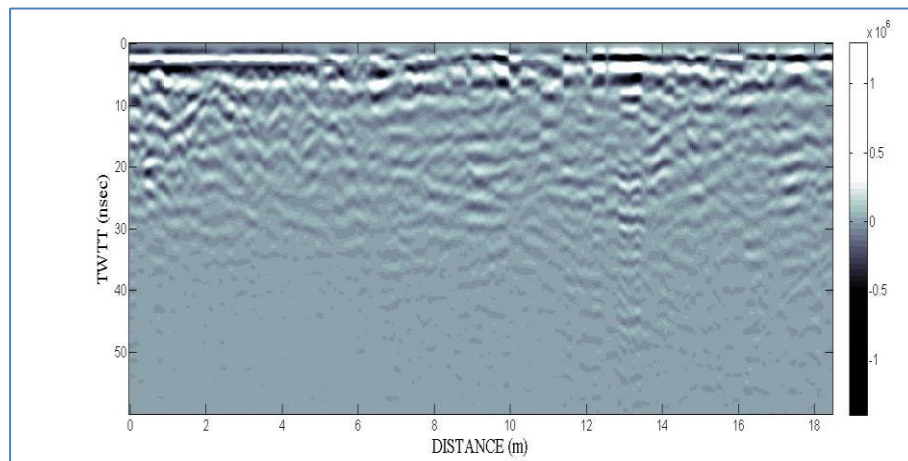
- Γραμμή Δ1\_33 (16 m) – Διεύθυνση Δ-Α



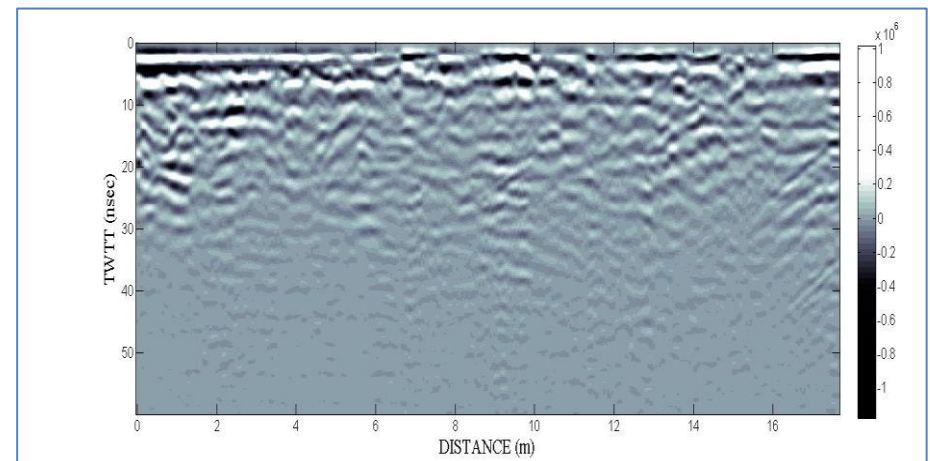
- Γραμμή Δ1\_34 (16.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α



- Γραμμή Δ1\_35 (17 m) – Διεύθυνση Δ-Α

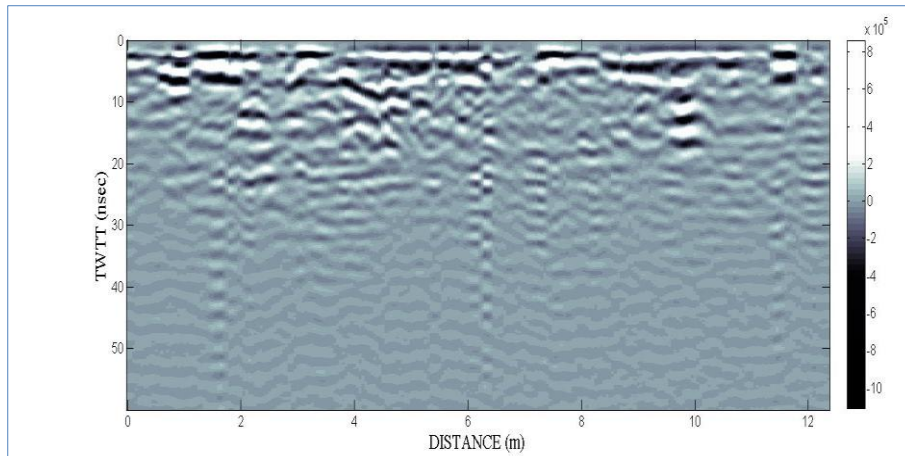


- Γραμμή Δ1\_36 (17.5 m) – Διεύθυνση Δ-Α

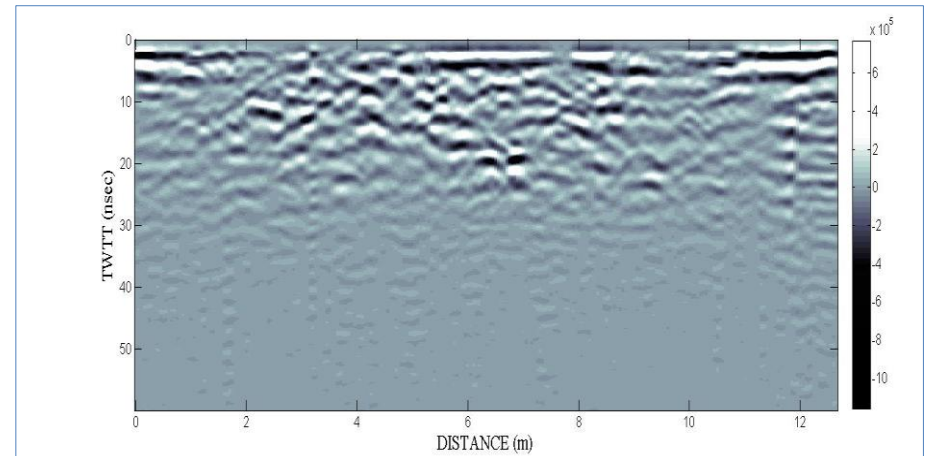


### Περιοχή Δ2 (Ανατολικά του θεάτρου)

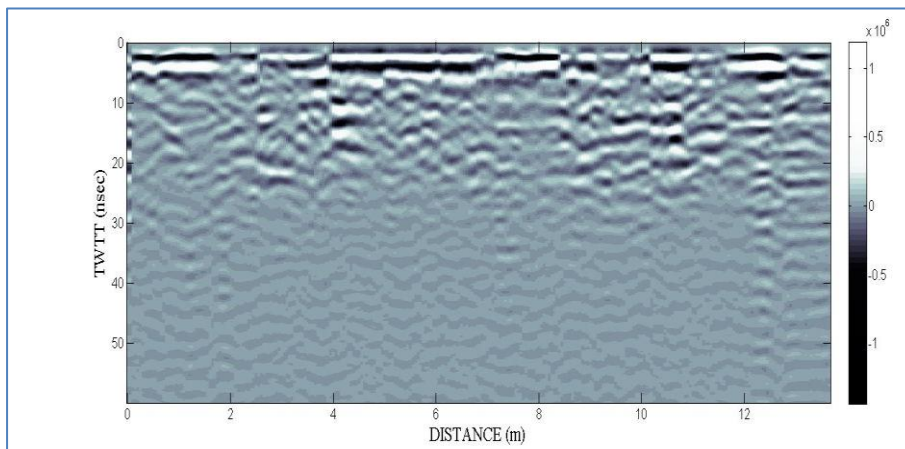
- Γραμμή Δ2\_01 (0 m) – Διεύθυνση N-B



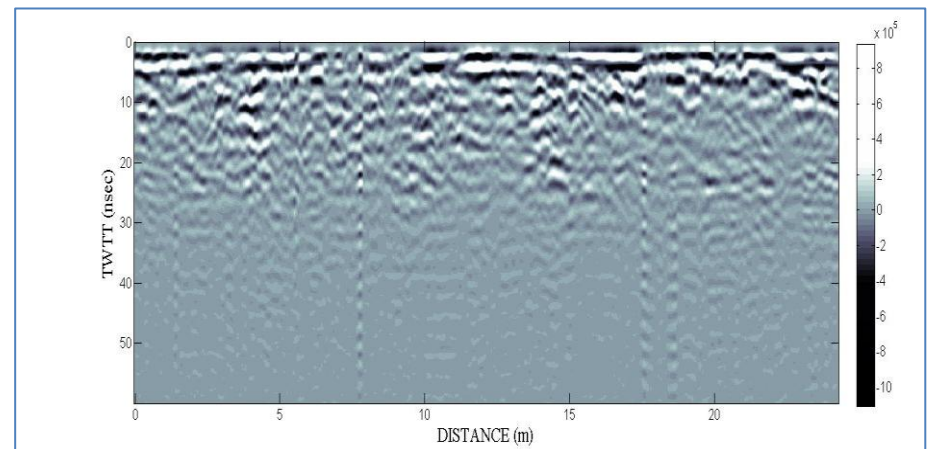
- Γραμμή Δ2\_02 (0.5 m) – Διεύθυνση N-B



- Γραμμή Δ2\_03 (1 m) – Διεύθυνση N-B

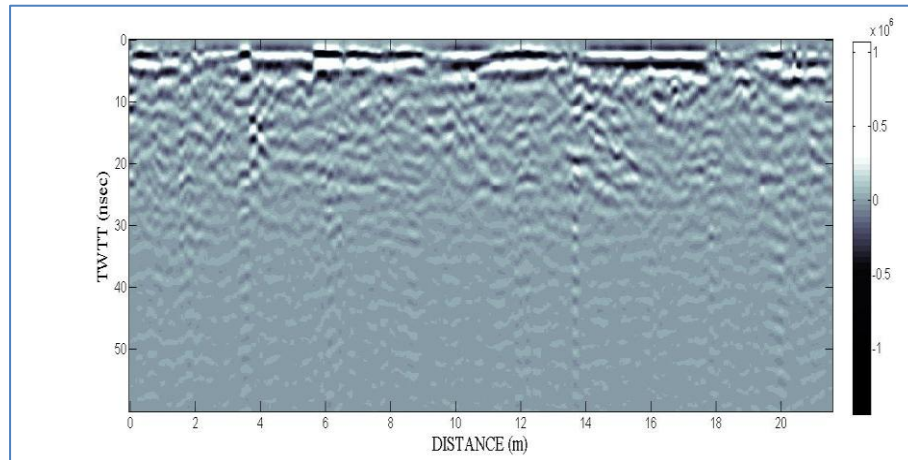


- Γραμμή Δ2\_04 (1.5 m) – Διεύθυνση N-B

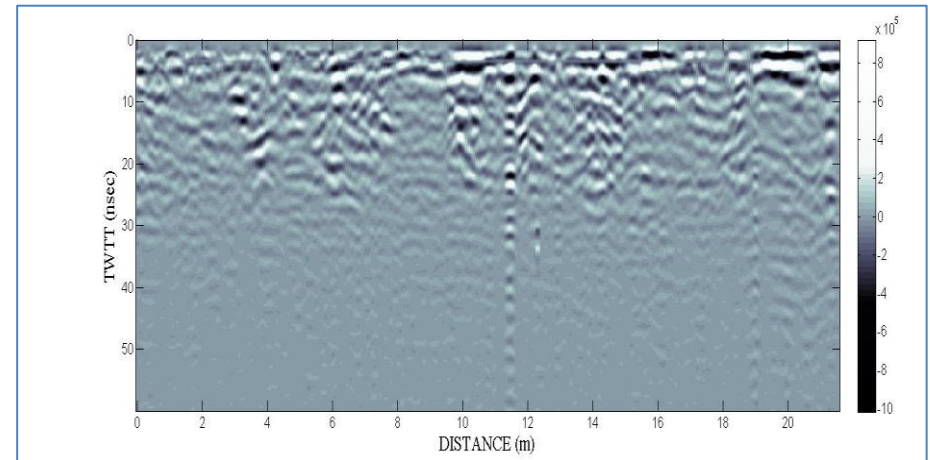




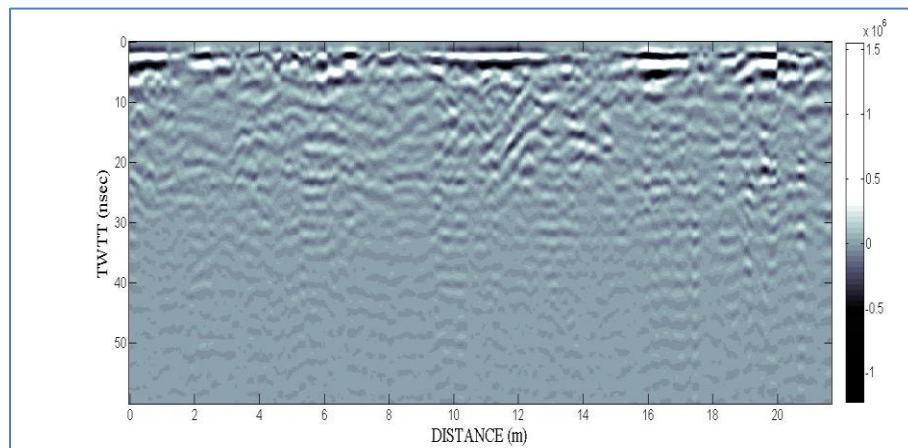
- Γραμμή Δ2\_05 (2 m) – Διεύθυνση N-B



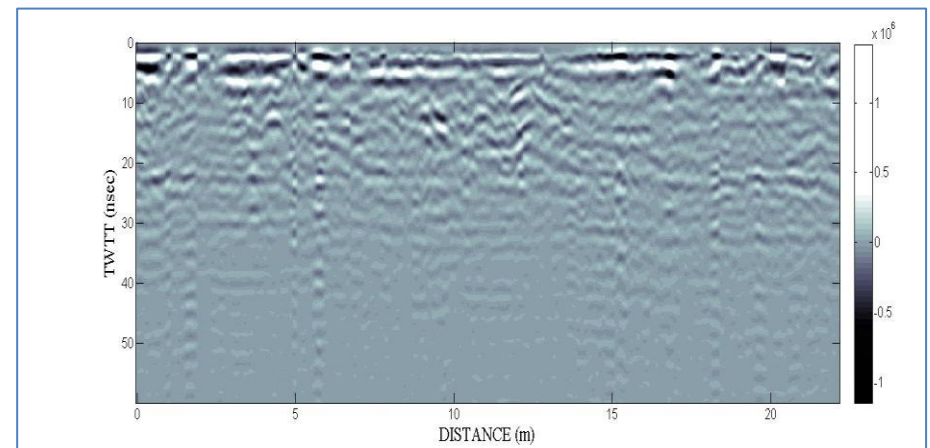
- Γραμμή Δ2\_06 (2.5 m) – Διεύθυνση N-B



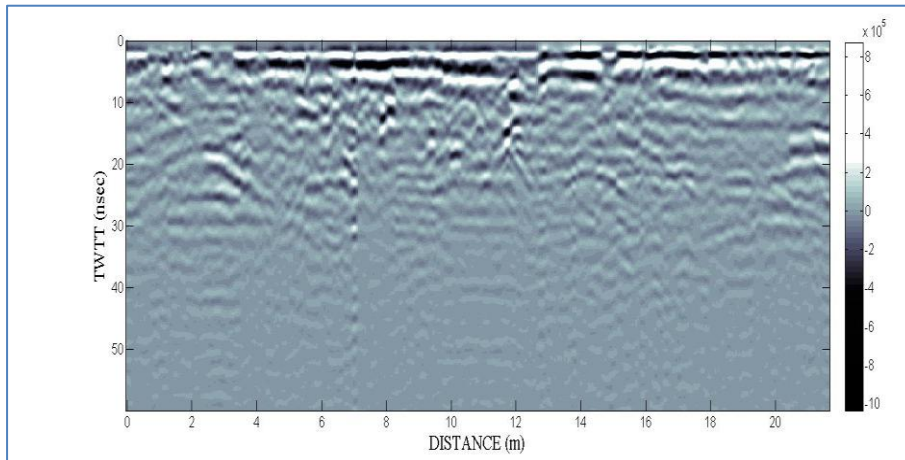
- Γραμμή Δ2\_07 (3 m) – Διεύθυνση N-B



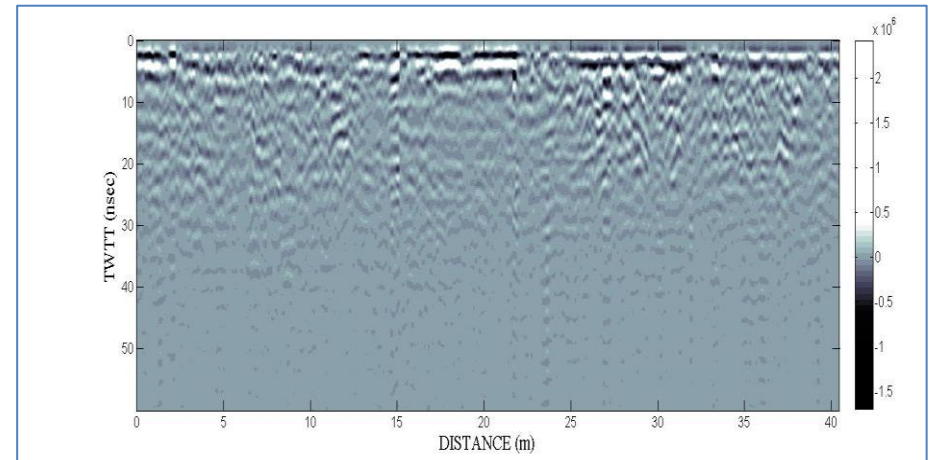
- Γραμμή Δ2\_08 (3.5 m) – Διεύθυνση N-B



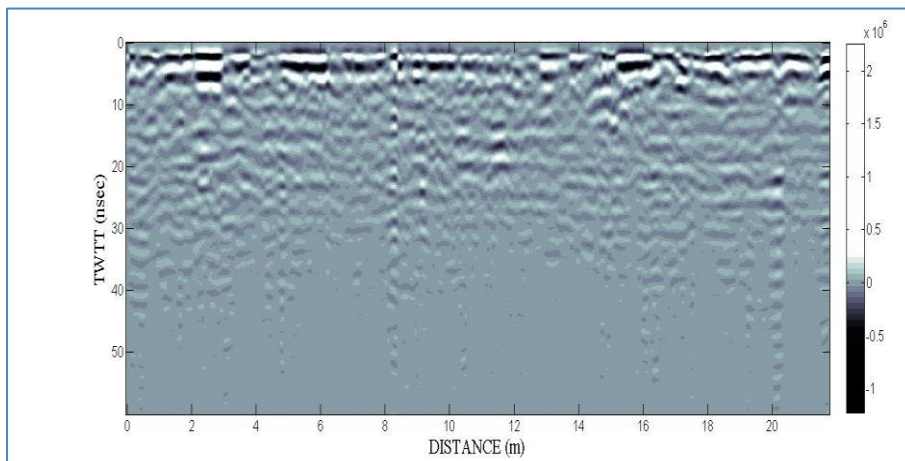
- Γραμμή Δ2\_09 (4 m) – Διεύθυνση N-B



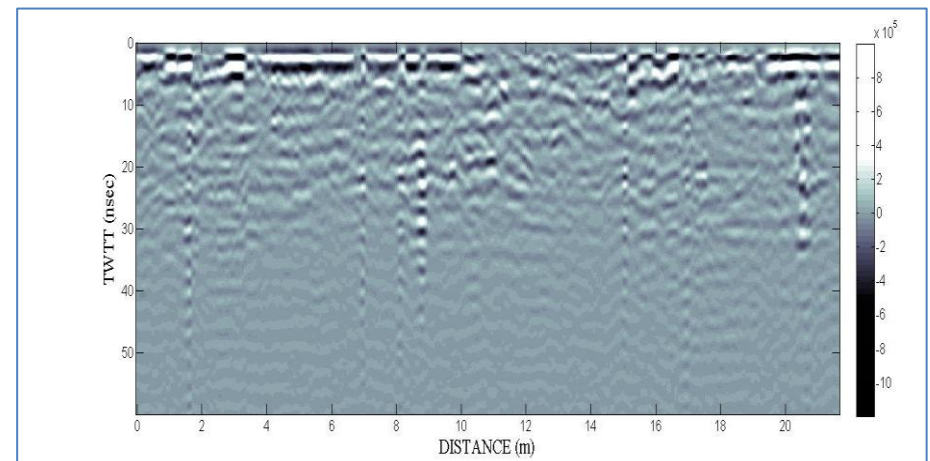
- Γραμμή Δ2\_10 (4.5 m) – Διεύθυνση N-B



- Γραμμή Δ2\_11 (5 m) – Διεύθυνση N-B

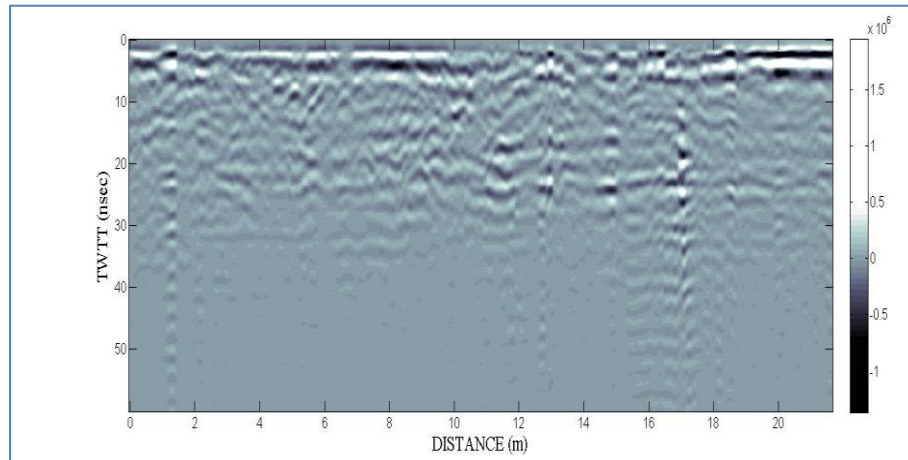


- Γραμμή Δ2\_12 (5.5 m) – Διεύθυνση N-B

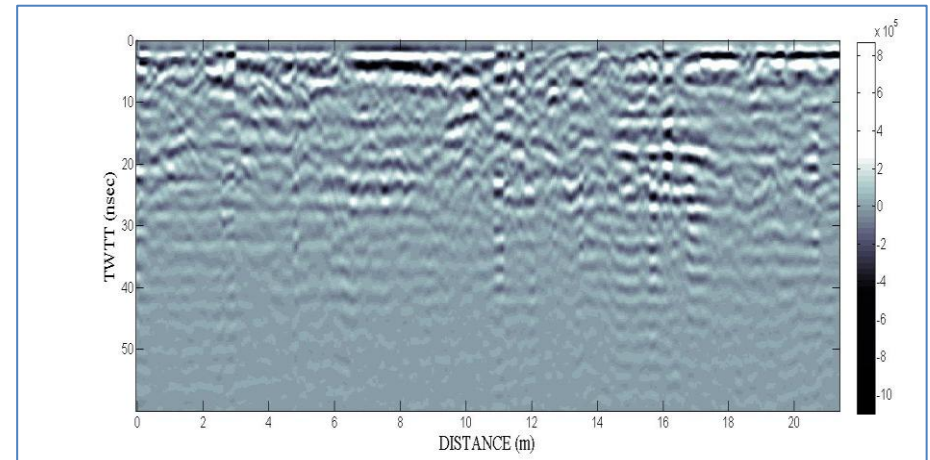




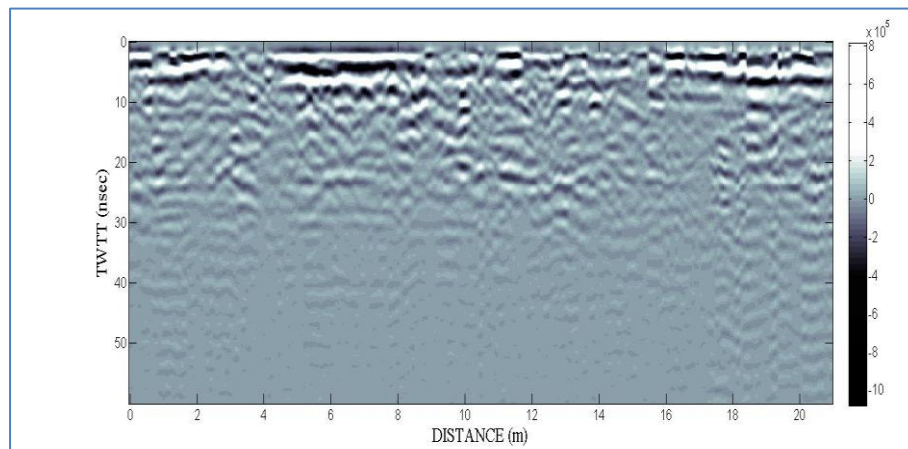
- Γραμμή Δ2\_13 (6 m) – Διεύθυνση N-B



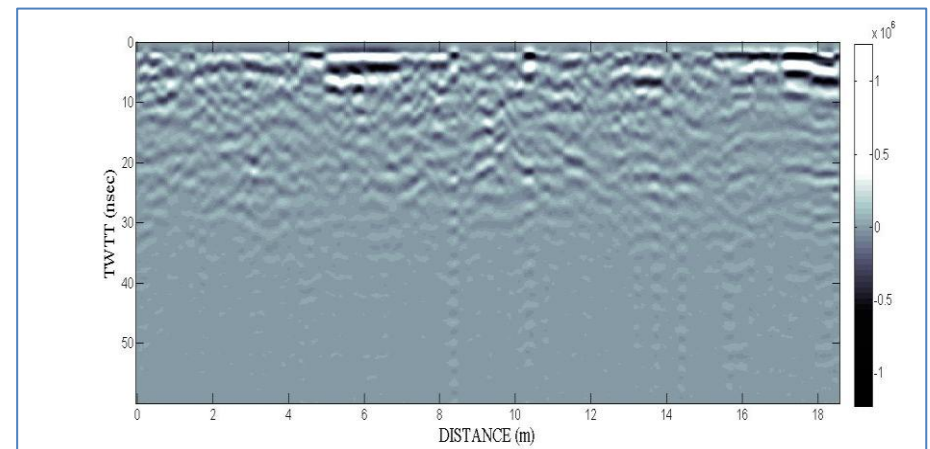
- Γραμμή Δ2\_14 (6.5 m) – Διεύθυνση N-B



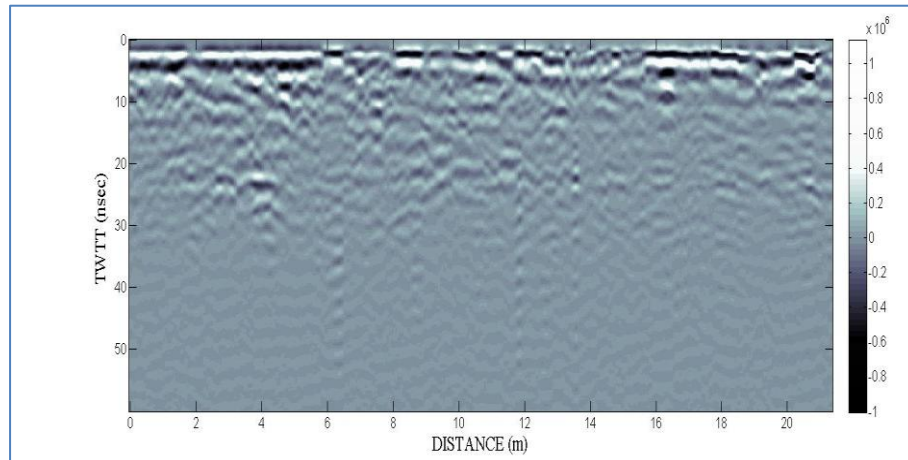
- Γραμμή Δ2\_15 (7 m) – Διεύθυνση N-B



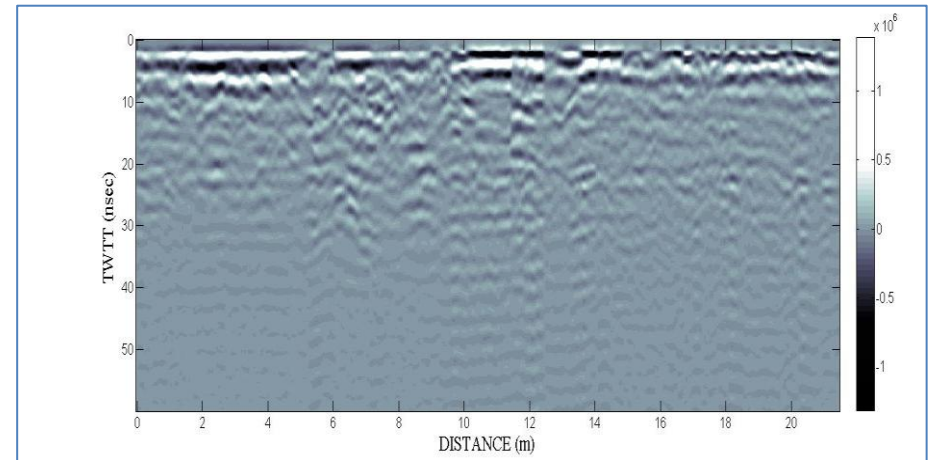
- Γραμμή Δ2\_16 (7.5 m) – Διεύθυνση N-B



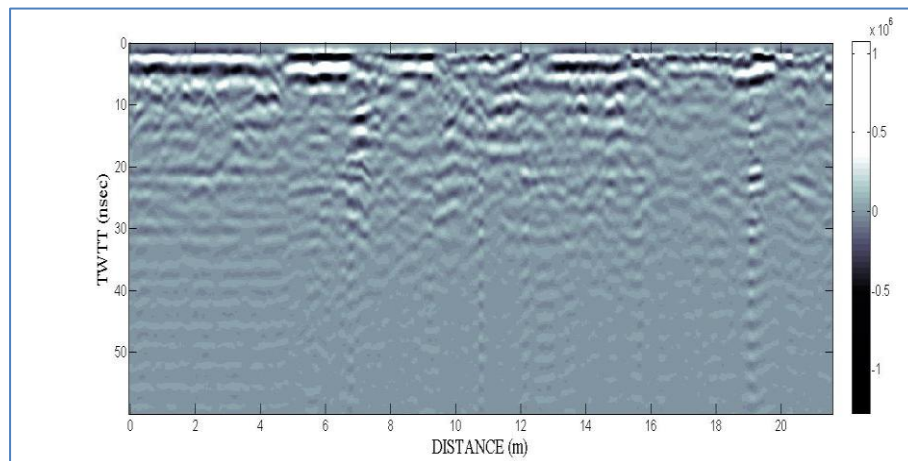
- Γραμμή Δ2\_17 (8 m) – Διεύθυνση N-B



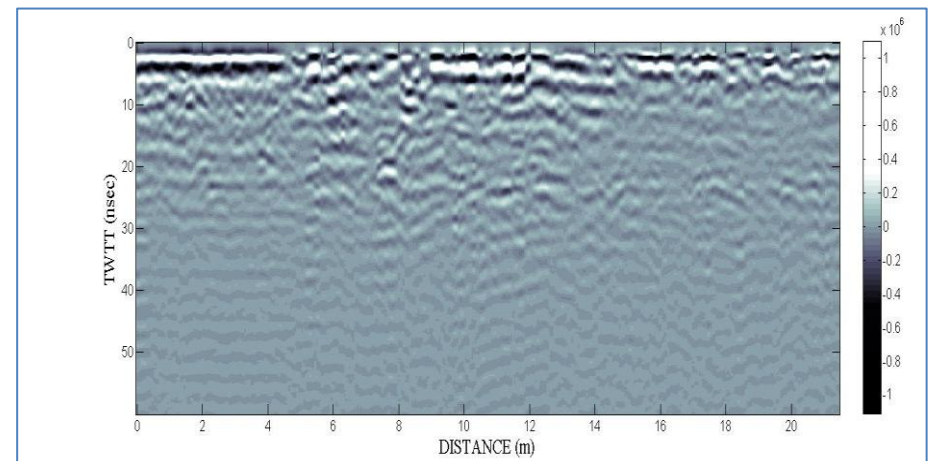
- Γραμμή Δ2\_18 (8.5 m) – Διεύθυνση N-B



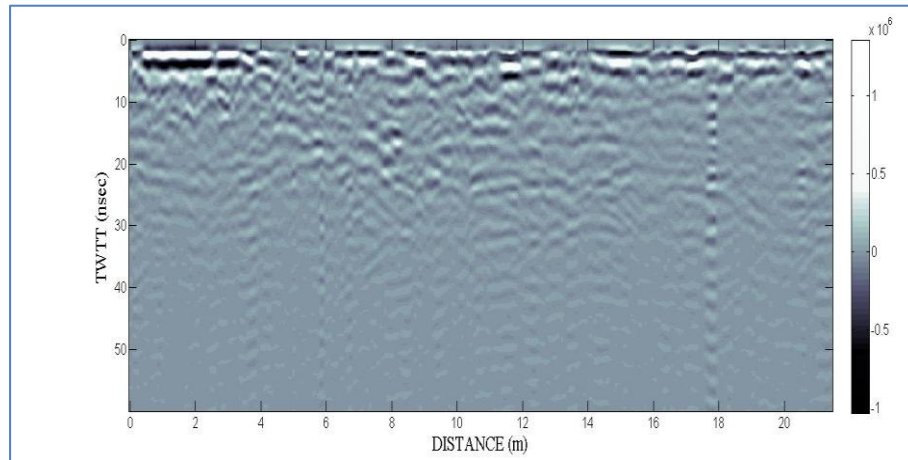
- Γραμμή Δ2\_19 (9 m) – Διεύθυνση N-B



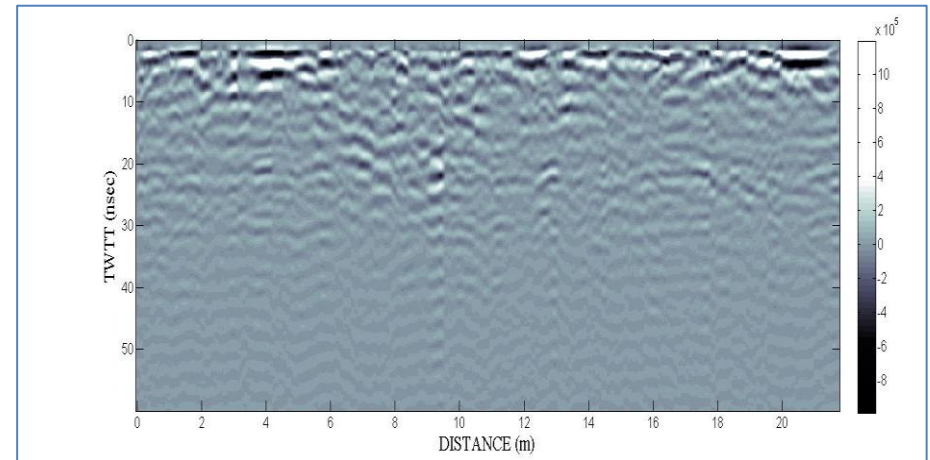
- Γραμμή Δ2\_20 (9.5 m) – Διεύθυνση N-B



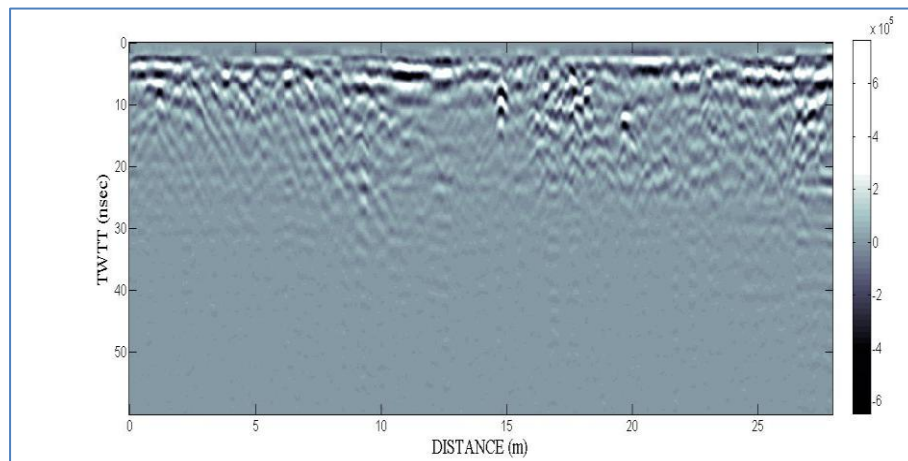
- Γραμμή Δ2\_21 (10 m) – Διεύθυνση N-B



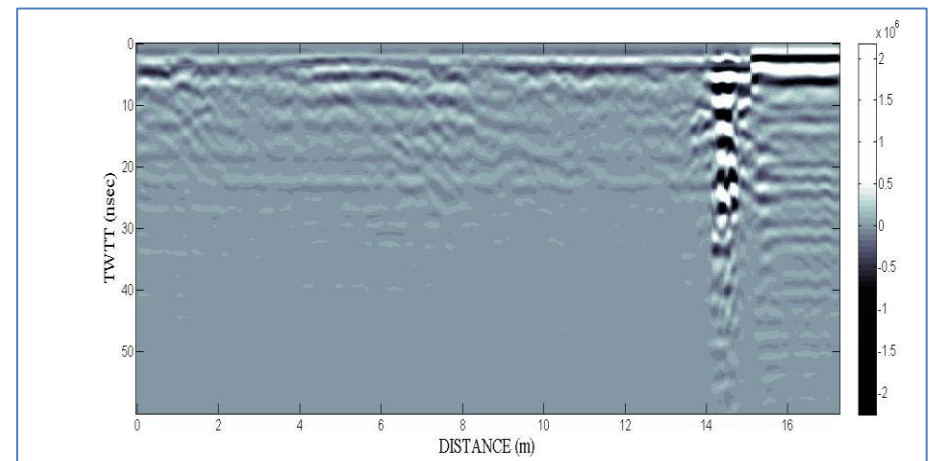
- Γραμμή Δ2\_22 (10.5 m) – Διεύθυνση N-B



- Γραμμή Δ2\_23 (11 m) – Διεύθυνση N-B



- Γραμμή Δ2\_24 (11.5 m) – Διεύθυνση N-B

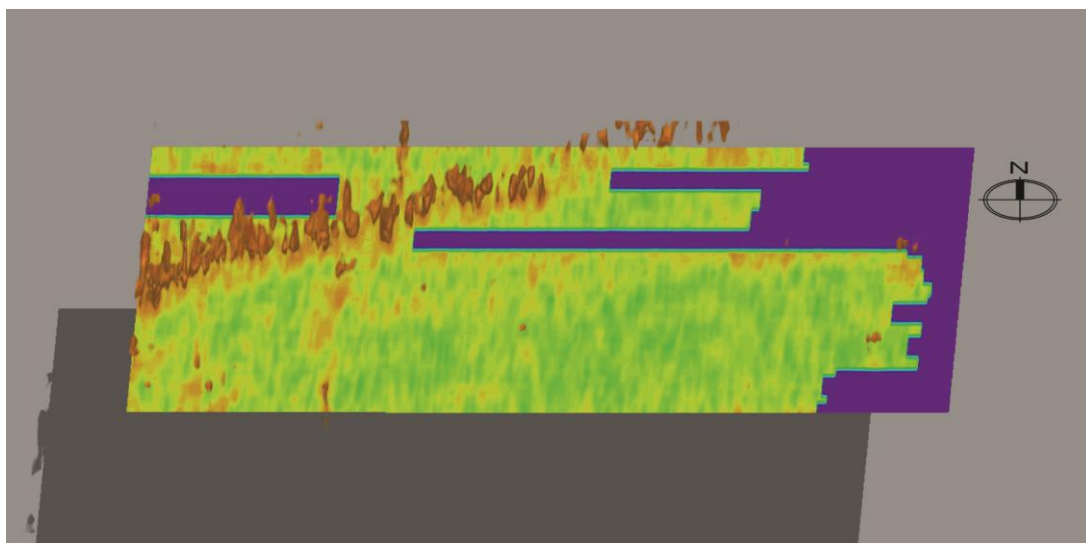




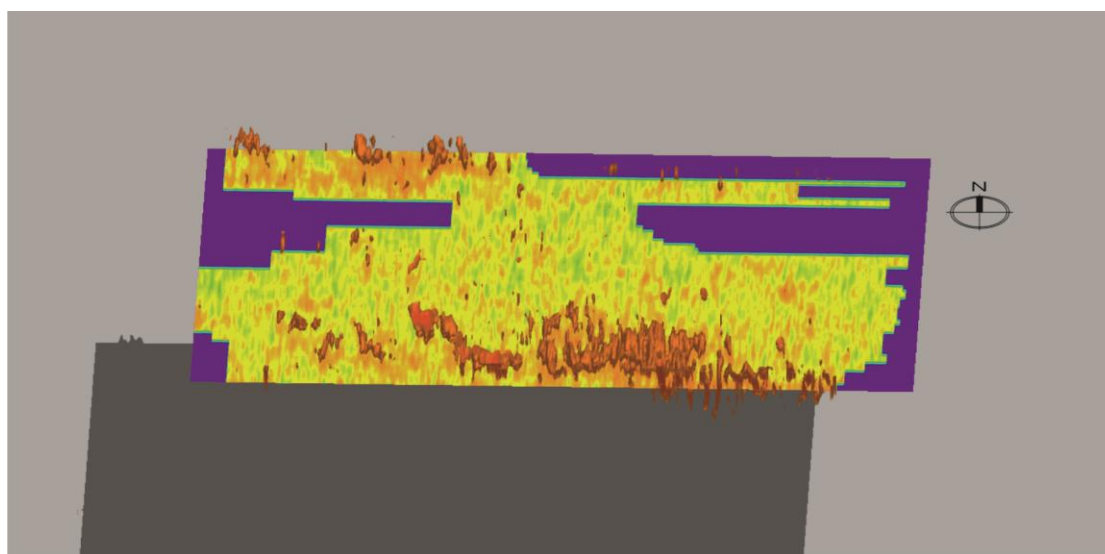


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

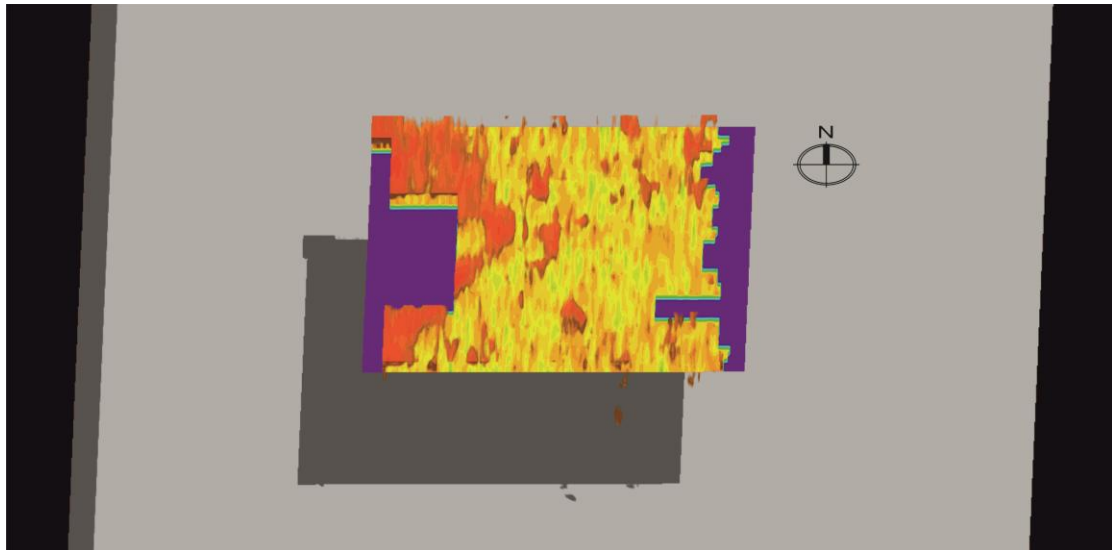
Εικόνες 3D



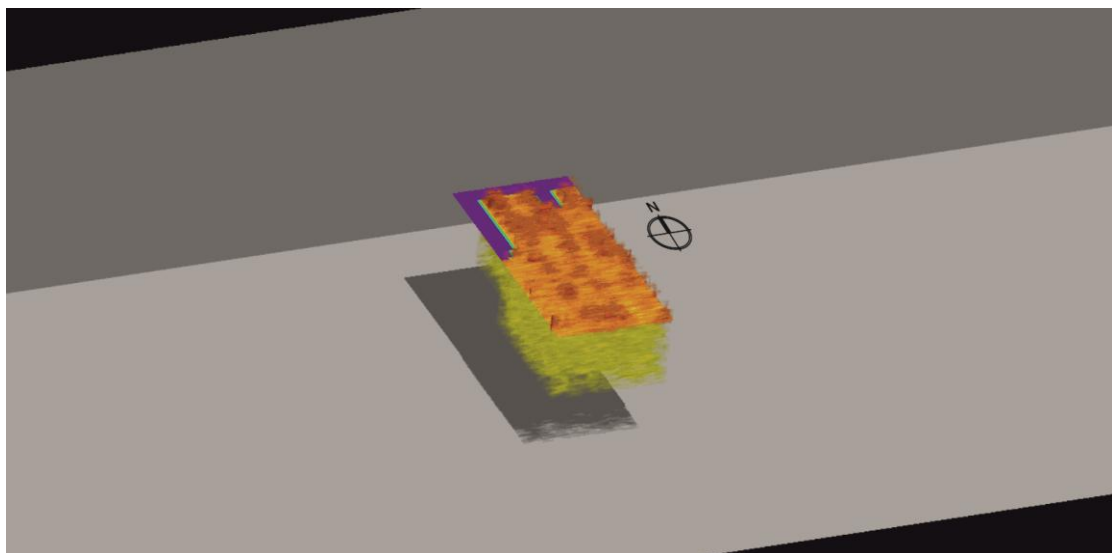
*KANNABOS B*



*KANNABOS Γ*

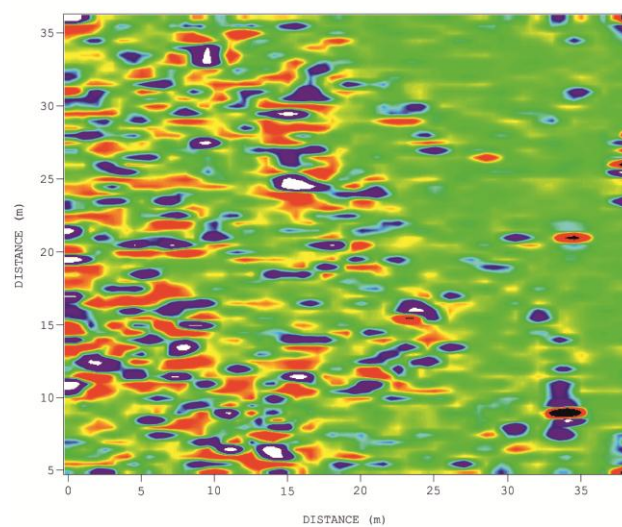
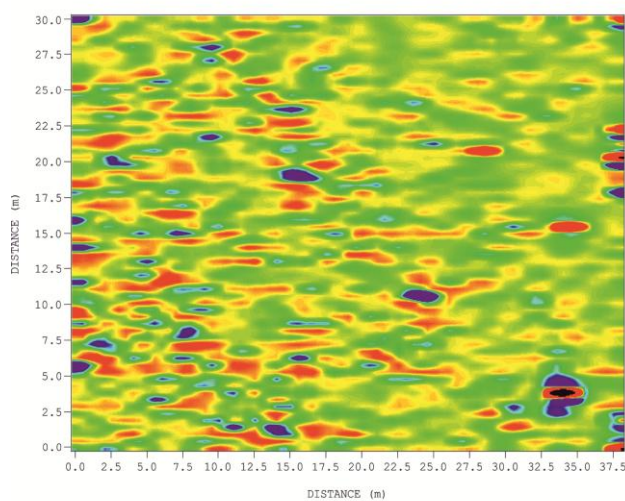
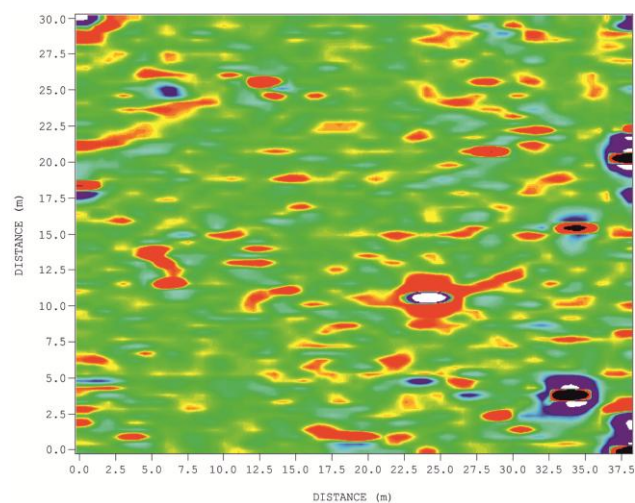


*KANNABOS Δ1*

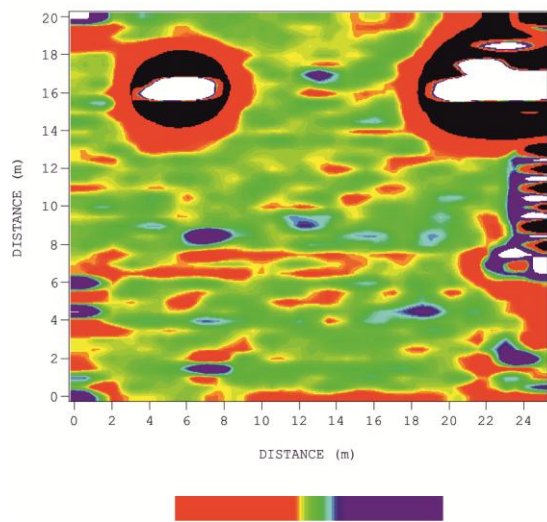
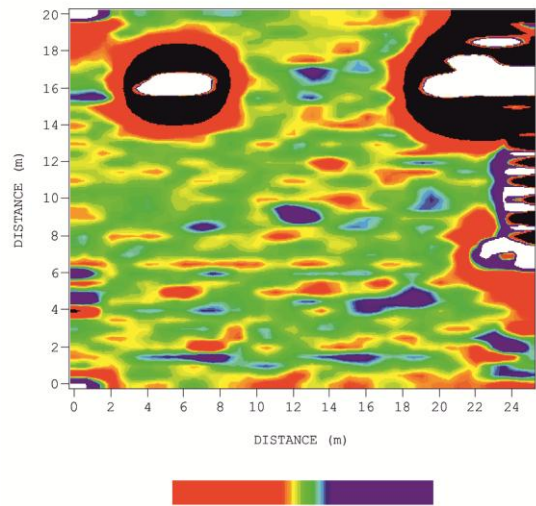
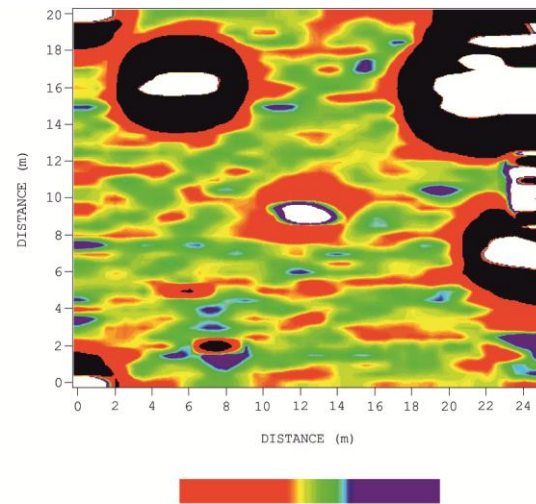


*KANNABOS Δ2*

## ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ

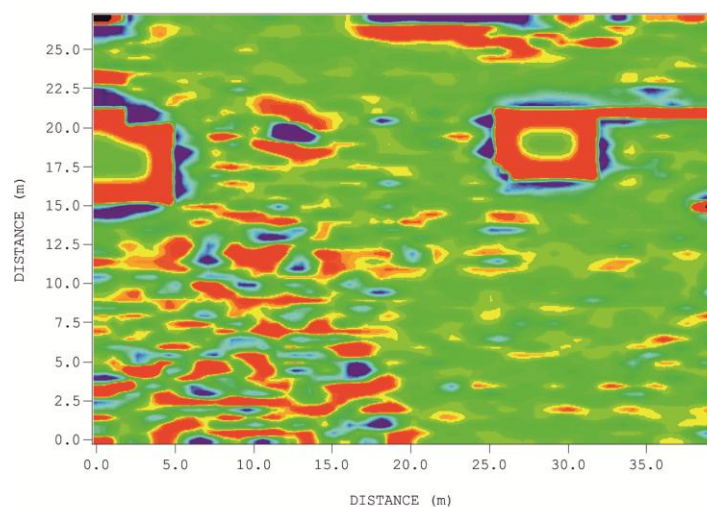
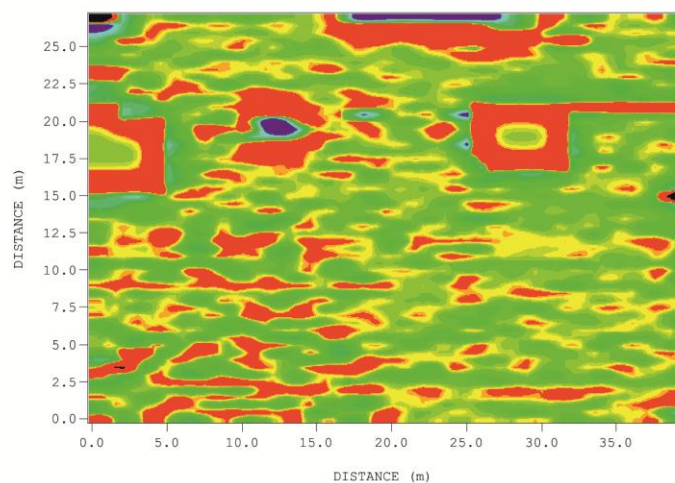
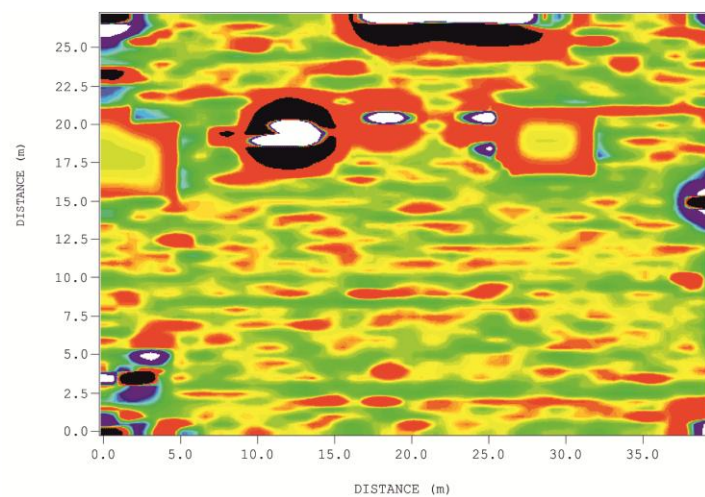


Εξομάλυνση H/M χαρτών στον κάρναβο A στα 1, 9 και 15 kHz.



*Εξομάλυνση H/M χαρτών στον κάνναβο B στα 1, 9 και 15 kHz.*





Εξομάλυνση  $H/M$  χαρτών στον κάρναβο  $\Gamma$  στα 1, 9 και 15 kHz.