



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**<< ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟΝ
ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΛΥΤΤΟΥ ΚΑΣΤΕΛΙΟΥ –
ΠΕΔΙΑΔΟΣ >>**

ΤΤΑΝΟΥ ΚΑΛΛΙΣΘΕΝΗ

Εξεταστική επιτροπή :

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής Π.Κ. (επιβλέπων)

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Αναπληρωτής καθηγητής Π.Κ.

Σουπιός Παντελής, Αναπληρωτής καθηγητής Τ.Ε.Ι Κρήτης

ΧΑΝΙΑ 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δρ. κύριο Οικονόμου Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των μετρήσεων της εργασίας, αλλά και για τις υποδείξεις του κατά τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τον Αναπληρωτή καθηγητή Μανούτσογλου Εμμανουήλ και τον Αναπληρωτή καθηγητή Σουπιό Παντελή για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω τον δρ. Hamdan Hamdan για την βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των μετρήσεων της εργασίας,

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Ιστορικά και αρχαιολογικά στοιχεία.....	1
1.3	Γεωλογία της περιοχής	3
1.4	Εξέλιξη των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην αρχαιολογική έρευνα.....	3

2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1	Η μέθοδος του γεωραντάρ.....	5
2.1.1	Εισαγωγή.....	5
2.1.2	Διηλεκτρική σταθερά.....	6
2.1.3	Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.....	7
2.1.4	Παράμετροι διασκόπησης.....	8
2.1.5	Μέθοδοι διασκόπησης	9
2.1.6	Σύστημα TerraSIRch System 3000.....	10
2.2	Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	11
2.2.1	Εισαγωγή.....	11
2.2.2	Διατάξεις Ηλεκτροδίων	14
2.2.3	Ηλεκτρική χαρτογράφηση	17
2.2.4	Ηλεκτρική τομογραφία.....	17
2.3	Μαγνητικές μεθόδους.....	19
2.3.1	Εισαγωγή.....	19
2.3.2	Μαγνητικό πεδίο.....	19
2.3.3	Αρχαιομαγνητισμός.....	22
2.3.4	Όργανα μέτρησης	22
2.3.5	Συλλογή δεδομένων.....	23

3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΛΥΤΤΟ

3.1	Εισαγωγή.....	25
3.2	Γεωφυσική έρευνα στη Λύττο.....	25
3.3	Ηλεκτρική και μαγνητική χαρτογράφηση.....	26
3.3.1	Εφαρμογή φίλτρων.....	27
3.3.2	Βελτίωση του έγχρωμου χάρτη.....	27
3.3.3	Μέθοδος ανάδειξης τοπικών ανωμαλιών μέσω εξομάλυνσης.....	28
3.3.4	Μέθοδος της οριζόντιας βαθμίδας	30
3.3.5	Παρουσίαση χαρτών.....	30
3.4	Επεξεργασία τω δεδομένων του γεωραντάρ.....	33
3.4.1	Διόρθωση Devow.....	34
3.4.2	Τεχνικές ενίσχυσης του πλάτους του σήματος σε μεγάλους χρόνους.....	35
3.4.3	Χαρακτηριστικά Attributes.....	37
3.4.4	Δημιουργία οριζόντιων τομών.....	41

4 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1	Εισαγωγή.....	44
4.2	Αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας.....	44
4.3	Συνσδιαστική ερμηνεία των οριζόντιων τομών γεωραντάρ	48

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....58**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....59****ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Παρουσίαση κάθετων τομών γεωραντάρ.....61**

A.1	Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db.....	61
A.2	Στιγμιαίο πλάτος	64
A.3	Πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους	67
A.4	Εκθετική ενίσχυση των δεδομένων (sec).....	70
A.5	Στιγμιαίο πλάτος.....	71

A.6 Στιγμιαίο φασματικό εύρος.....	76
A.7 Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας.....	79
A.8 Αποτέλεσμα παραγωγής πραγματικών ιχνών και συνημίτονο φάσης	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: παρουσίαση αλγορίθμων και οριζόντιων τομών γεωραντάρ.....	86
B.1 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζόντιων τομών σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db.....	86
B.2 Οριζόντιες τομών σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db.....	87
B.3 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζ. τομών με ενίσχυση SEC....	89
B.4 Οριζόντιες τομές με ενίσχυση SEC.....	90
B.5 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζ. τομών σε πρώτη παράγωγο του στιγμιαίου πλάτους	92
B.6 Οριζόντιες τομές σε πρώτη παράγωγο του στιγμιαίου πλάτους.....	93
B.7 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζόντιων τομών σε στιγμιαία φάση	95
B.8 Οριζόντιες τομές σε στιγμιαία φάση.....	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ηλεκτρική και μαγνητική χαρτογράφηση.....	98
Γ.1 Ηλεκτρική χαρτογράφηση.....	98
Γ.2 Μαγνητική χαρτογράφηση.....	99
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	
1.1 Κάναβος όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.....	4
2.1 Μέτρηση με GPR πάνω από κενό.....	6
2.2 Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	8
2.3 Η μέθοδος της ανάκλασης.....	9
2.4 Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου.....	10
2.5 Η μέθοδος της τομογραφίας	10
2.6 SIR 3000.....	11
2.7 Μέτρηση με GPR.....	11

2.8 Ηλεκτρικό κύκλωμα, αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου.....	12
2.9 Τυπική διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων A,B (ηλεκτρόδια ρεύματος) και M,N (ηλεκτρόδια δυναμικού).....	14
2.10 Μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης	15
2.11 Μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης	15
2.12 Διατάξεις α) Wenner β) διπόλου-διπόλου γ) δίδυμου ηλεκτροδίου δ) τετραγωνική ε) Schlumberger	16
2.13 Διαγράμματα ροής επεξεργασίας των δεδομένων της ηλ.τομογραφίας.....	18
2.14 Δημιουργία ψευδοτομής φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	19
2.15 Μορφή της μαγνητικής ανωμαλίας.....	21
2.16 Διανυσματική διαφορά μεταξύ μαγνητικής επαγωγής και πετρωμάτων που περιβάλλουν μια δομή.....	21
2.17 Μεταβολή μαγνήτισης λόγω μεταβολής των στοιχείων του μαγνητικού πεδίου της γης.....	21
2.18 Μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης ροής	23
3.1 Τοπογραφικός χάρτης όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.....	26
3.2 Αρχικός χάρτης μαγ.χαρτογράφησης.....	31
3.3 Μαγ.χαρτογράφηση (οριζόντια βαθμίδα).....	31
3.4 Αρχικός χάρτης ηλ.χαρτογράφησης.....	32
3.5 Ηλ.χαρτογράφηση (οριζόντια βαθμίδα).....	32
3.6 Ηλ.χαρτογράφηση μετά από αφαίρεση κινητού μέσου.....	33
3.7 Γραμμές μελέτης.....	34
3.8 Τομή γεωραντάρ με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων.....	38
3.9 Στιγμιαίο πλάτος τομής γεωραντάρ.....	38
3.10 Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομής γεωραντάρ.....	39
3.11 Στιγμιαία φάση.....	39
3.12 Προδθψτ.....	40
3.13 Πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους.....	40
3.14 Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας	41
3.15 Στιγμιαίο φασματικό εύρος.....	41

3.16 Οριζόντια τομή γεωραντάρ σε βάθος α) 0,56m β) 0,76m γ) 1,20m.....	42
3.17 Οριζόντια τομή γεωραντάρ σε βάθος α) 0,56m β) 0,76m γ) 1,20m (μετά από φίλτρο εξομάλυνσης).....	43
4.1 Κάνναβος πραγματοποίησης των μετρήσεων.....	44
4.2 Γραμμές μελέτης ηλ.τομογραφίας	45-46
4.3 Τομή γεωραντάρ και ηλ.τομογραφίας (γραμμή μελέτης στα 3m).....	47
4.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση	48
4.5 Υπέρθωση οριζόντιας τομής γεωραντάρ στα 0,44m-0,64m βάθος περίπου με χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλ.αντίστασης και χάρτη μαγβαθμίδας.....	49
4.6 Υπέρθωση οριζόντια γεωηλεκτρικής τομής στα 0,49m με οριζόντια τομή γεωραντάρ στα 0,44m-0,64m βάθος περίπου.....	50
4.7 Υπέρθωση οριζόντιας τομής γεωραντάρ στα 0,66m-0,86m βάθος περίπου με χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλ.αντίστασης και χάρτη μαγβαθμίδας	51
4.8 Υπέρθωση οριζόντια γεωηλεκτρικής τομής στα 0,69m με οριζόντια τομή γεωραντάρ στα 0,66m-0,86m βάθος περίπου.....	52
4.9 Υπέρθωση οριζόντιας τομής γεωραντάρ στα 1,10m-1,30m βάθος περίπου με χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλ.αντίστασης και χάρτη μαγβαθμίδας.....	53
4.10 Υπέρθωση οριζόντια γεωηλεκτρικής τομής στα 1,29m με οριζόντια τομή γεωραντάρ στα 1,10m-1,30m βάθος περίπου	54
4.11 α) Χάρτης ηλ.χαρτογράφησης β) τομή γεωρανταρ στα 3,5m και 2,5m.....	55
4.12 Γραμμή μελέτης στα 9m και 9,5m.....	56
4.13 Τομή γεωραντάρ στη γραμμή μελέτης στα 12m	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

2.1 Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.....	14
---	----

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα προκαταρκτικής γεωφυσικής έρευνας στην Αρχαία Λύττο. Αυτή η έρευνα συνδυάζει τόσο συμβατικές μεθόδους όπως η ηλεκτρική και η μαγνητική χαρτογράφηση όσο και η μέθοδος υψηλής ανάλυσης όπως το γεωραντάρ και η ηλεκτρική τομογραφία.

Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα της 23^{ης} Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων Ηρακλείου και περιλάμβανε διασκόπηση με την μαγνητική και την ηλεκτρική μέθοδο χαρτογράφησης, το γεωραντάρ και την ηλεκτρική τομογραφία. Η γεωφυσική έρευνα εστιάστηκε στον χώρο ΝΑ του βουλευτηρίου, όπου κάλυψε 219m².

Η συνδυασμένη ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων υπέδειξε γραμμικές ανωμαλίες (Α, Β, Γ και Δ) που αποδίδονται σε αρχιτεκτονικά λείψανα, ιδιαίτερα, οι γραμμικές ανωμαλίες Α και Β εμφανίζονται σε διεύθυνση Α-Δ που ταυτίζεται με αυτή των αρχιτεκτονικών λειψάνων του παρακείμενου βουλευτηρίου.

Η μέθοδος του γεωραντάρ αναδुकνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις ανθρωπογενείς δομές οι οποίες εντοπίστηκαν με τις συμβατικές μεθόδους. Επιπρόσθετα και σε συνδυασμό με την γεωηλεκτρική τομογραφία εκτιμήθηκε και το βάθος στο οποίο βρίσκονται οι δομές που προκαλούν τις ανωμαλίες Α, Β, Γ και Δ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Αρχικά στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχαιολογικά στοιχεία που αφορούν την περιοχή που μελετήθηκε μέσα από μία σύντομη ιστορική αναδρομή της πόλης της Λύττου. Παρατίθενται στοιχεία σχετικά με το τι διασώζεται σήμερα στην πόλη της Λύττου και γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

1.2 Ιστορικά και αρχαιολογικά στοιχεία

Η Λύκτος ή Λύττος, η *lu-ki-to* των πινακίδων της Γραμμικής Β γραφής από την Κνωσό, υπήρξε μια από τις σημαντικότερες πόλεις της Κεντρικής Κρήτης από τους αρχαϊκούς ως τους ύστερους ρωμαϊκούς χρόνους, βρίσκεται στο χώρο βορειοανατολικά του σύγχρονου οικισμού Ξιδάς επαρχίας Πεδιάδος, στις βόρειες υπώρειες της Δίκτης, στο πέρασμα από την Πεδιάδα στο Λασίθι. Τα όρια της πόλης είναι άγνωστα σήμερα, ενώ η έκτασή της εκτιμάται πάνω από 1000 στρέμματα. Το 1970, το 1981 και το 1983 πραγματοποιήθηκαν αρχαιολογικές ανασκαφές στο χώρο της Λύττου, στις οποίες ανακαλύφθηκαν διάφορων ειδών αρχαία οικοδομήματα και μεταξύ αυτών και το βουλευτήριο της πόλης.

Η Λύττος υφίσταται κατά τους ύστερους μινωικούς χρόνους, αλλά δεν έχει καταστεί δυνατός ο ανασκαφικός εντοπισμός της μινωικής Λύττου. Ο Όμηρος τη μνημονεύει ως μια από τις σημαντικές Κρητικές πόλεις που έλαβαν μέρος στον Τρωικό πόλεμο (Ιλ. Β 647-648), ενώ αναφέρεται στον Αριστοτέλη και στον Πολύβιο. Πλήθος είναι, επίσης, οι δημοσιευμένες αλλά και οι αδημοσίευτες επιγραφές από τον χώρο της Λύττου. Από τις ανασκαφικές μαρτυρίες η Λύττος κατοικείται από την αρχαϊκή εποχή στη νότια κλιτύ του λόφου ως την ύστερη ρωμαϊκή περίοδο στη βόρεια, βορειοανατολική και νοτιοανατολική κλιτύ του λόφου, με μεγάλη ακμή κατά την ελληνιστική και ρωμαϊκή περίοδο, οπότε η Λύττος αναβιώνει ως πόλις όπως άλλωστε μαρτυρούν τα σημαντικά μνημειώδη οικοδομήματα που ήρθαν στο φως κατά τις ανασκαφές 1983-1986

(βουλευτήριο, κόγχες, υδραγωγείο, επιγραφές) υποδηλώνοντας τη μεγάλη ακμή και την οικιστική ανάπτυξη της αρχαίας πόλης.

Κατά την ύστερη ρωμαϊκή περίοδο χρονολογείται η λιθόκτιστη οχύρωση που περιβάλλει τον τότε πυρήνα της πόλης ενώ εξαιρετικής σημασίας είναι το επίσης υστερορωμαϊκό δημόσιο κτίριο, πιθανότατα ιερό προς τιμήν του Διός, στο νοτιοανατολικό όριό της. Κατά την παλαιοχριστιανική περίοδο, πιθανότατα τον 5ο αι., ιδρύεται βασιλική στη θέση της σημερινής εκκλησίας του Τιμίου Σταυρού, ενώ μια δεύτερη πιθανολογείται ότι βρισκόταν στον περιβάλλοντα χώρο της εκκλησίας του Αγίου Γεωργίου.

Το ρωμαϊκό βουλευτήριο

Το ρωμαϊκό βουλευτήριο βρίσκεται 100m περίπου νοτιοδυτικά του συγκροτήματος των επίσης ρωμαϊκών κογχών, σε μικρή απόσταση βορειοανατολικά του παρεκκλησίου του Αγίου Γεωργίου στην κορυφή του λόφου. Από έναν αρχαίο αναλημματικό τοίχο μήκους 60m. ξεκινούν κάθετοι τοίχοι που ορίζουν δωμάτια τα οποία συγκροτούν ένα μεγάλο κτιριακό συγκρότημα. Από τον χώρο αυτό συλλέχθηκαν επιγραφές αφιερωμένες στον αυτοκράτορα Αδριανό, συμπεραίνοντας ότι ο χώρος αυτός χρησιμοποιούνταν ως ιερό λατρείας αυτοκρατόρων. Η διεύθυνση του κτιρίου Α-Δ.

Ρωμαϊκές Κόγχες

Το νότιο τμήμα της ελληνιστικής οικίας έχει καλυφθεί από ένα ρωμαϊκό οικοδόμημα, επιβλητικών διαστάσεων σωζόμενου ορατού μήκους 16.20m, πάχους 1m και ύψους 2.5m βόρεια, σωζόμενου ορατού μήκους 75m δυτικά. Παράλληλα με τον δυτικό τοίχο εκτείνεται άλλος θλαστός τοίχος με εννιά τουλάχιστον αψιδωτές κόγχες με στενή είσοδο μέσου ύψους 2.25-2.65m, μήκος χορδής τόξου 3.10-3.15m, άνοιγμα εισόδου 0,60m, ενώ αμέσως ανατολικά τους εκτείνεται πλακόστρωτη πλατεία, πλάτους περίπου 5m. Η νοτιοδυτική γωνία του κτιρίου αυτού δεν έχει εντοπιστεί ακόμη ώστε να μπορεί να υπολογιστεί το μήκος των δύο τοίχων και ακριβής αριθμός των κογχών, ενώ η βορειοδυτική γωνία του ενισχύεται με δύο εξωτερικές παραστάδες σε σχήμα ορθής γωνίας. Οι τοίχοι είναι κατασκευασμένοι από μικρούς και μεσαίους άρτια επεξεργασμένους κυβόλιθους με ένθετους μικρότερους αδρούς λίθους και άφθονο

κονίαμα στο μέσο διάστημα. Η επίχωση αποτελείται από τρία στρώματα μαλακού λιπαρού χώματος με άφθονα όστρακα κυρίως χρηστικών αγγείων, λύχνους, μικροαντικείμενα και μεγάλο αριθμός οστών βοοειδών, αιγοειδών και μικρών ζώων αρκετά από τα οποία φέρουν ίχνη τεμαχισμού με αιχμηρό εργαλείο. Στον εξωτερικό χώρο των κογχών εντοπίστηκαν επίσης οστά ζώων και όστρακα. Προφανώς πρόκειται για κατάλοιπα θυσιών που συσσωρεύτηκαν στο εσωτερικό και στον περιβάλλοντα χώρο των κογχών, μετά από τελετές που συνεβαιναν στο χώρο του επιβλητικού ρωμαϊκού οικοδομήματος.

1.3 Γεωλογία της περιοχής

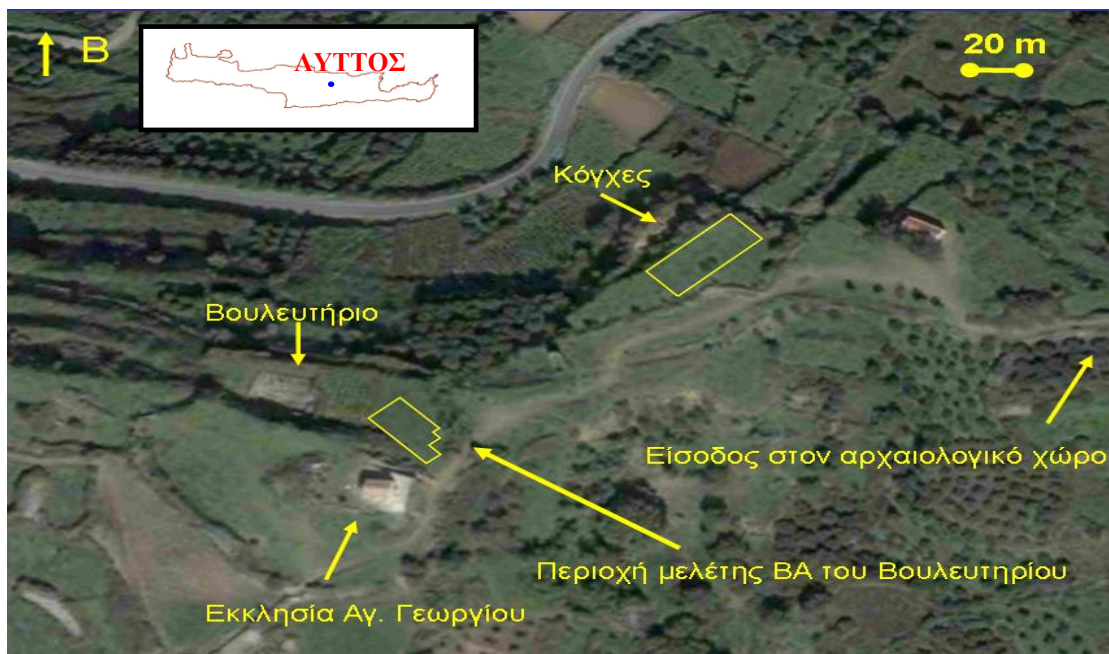
Στην ευρύτερη περιοχή εμφανίζονται κυρίως γεωλογικοί σχηματισμοί της φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς. Στο χώρο έρευνας οι σχηματισμοί αυτοί θεωρούνται το υπόβαθρο στα οποία εδράζονται τα αρχαία οικοδομήματα τα οποία όμως είναι θαμμένα σε αργιλικούς επιφανειακούς σχηματισμούς .

1.4 Εξέλιξη των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην αρχαιολογική έρευνα

Από τα πρώτα βήματα της αρχαιολογίας σαν επιστήμη μερικοί αρχαιολόγοι γνώριζαν ότι οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους είχαν τη δυνατότητα να τους βοηθήσουν να ανακαλύψουν τι βρίσκεται κάτω από αυτό. Για παράδειγμα, χτυπώντας το έδαφος με ένα λοστό και ακούγοντας τις μεταβολές της αντήχησης μπορούσαν να ανιχνεύσουν σε μερικές περιπτώσεις τη διάταξη θαμμένων τάφων κάτω από ασβεστολιθικούς λόφους. Η συστηματική όμως εφαρμογή σύγχρονων γεωφυσικών μεθόδων αρχίζει γύρω στα μέσα περίπου του περασμένου αιώνα με πρώτες τις μαγνητικές διασκοπήσεις, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν μαγνητόμετρα μικρής σχετικής ευαισθησίας. Ακολούθησε η μέτρηση της αντίστασης του εδάφους, η οποία σε συνδυασμό με εναέρια φωτογράφιση, μπορούσε να ανιχνεύσει τις αλλαγές της ποσότητας νερού που περιέχεται στο υπέδαφος. Η παρουσία αρχαιολογικών όγκων στο υπέδαφος κοντά στην επιφάνεια, όπως π.χ. ένα αδιαπέραστο πέτρινο τείχος ή ένα χαντάκι που διατηρεί υγρασία, μεταβάλλει τις ιδιότητες των γύρω υπεδαφών, άρα και την επιφανειακή βλάστηση. Έτσι η ύπαρξη πέτρινου τείχους έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλού σχετικά βαθμού υγρασία, η οποία

μπορεί να εμφανιστεί σαν μία άνυδρη περιοχή ορατή από τον αέρα ή σαν μια ανωμαλία υψηλής ωμικής αντίστασης.(Γιώργος Καλλιγιάς)

Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα στην αρχαιολογία έχουν προσαρμοστεί σε μικρότερη κλίμακα από τις αντίστοιχες μεθόδους που εφαρμόζονται για γεωλογικές απεικονίσεις, εξερεύνηση ορυκτών κοιτασμάτων, για την πολεοδόμηση περιοχών και για την περιβαλλοντική γεωφυσική. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως ενεργητικές είτε ως παθητικές. Οι ενεργητικές μέθοδοι στέλνουν ποσά ενέργειας προς το έδαφος, σαν το λοστό για παράδειγμα και μετρούν την απόκριση στην επιφάνεια. Τέτοιες μέθοδοι είναι η σεισμική διασκόπηση, οι ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές και οι μετρήσεις της ωμικής αντίστασης του εδάφους. Αντίθετα οι παθητικές μέθοδοι μετρούν απλά τις υπάρχουσες φυσικές ιδιότητες του εδάφους και περιλαμβάνουν τη μαγνητομετρία και τη μελέτη της επιτάχυνσης της βαρύτητας.



Σχήμα: 1.1: Κάνναβος όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις (google).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

2.1 Η μέθοδος του γεωραντάρ

2.1.1 Εισαγωγή

Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar GPR) αποτελεί όργανο γεωφυσικών διασκοπήσεων που και εδώ και μερικά χρόνια χρησιμοποιείται στην απεικόνιση του υπεδάφους χωρίς να προκαλεί καταστροφή των εδαφών. Οι εφαρμογές του καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα διαφόρων επιστημών (γεωλογικές, περιβαλλοντικές, αρχαιολογικές κ.α). Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται με επιτυχία στην έρευνα μικρού βάθους. Χρησιμοποιεί ραδιοκύματα συχνότητας από 1 έως 2000 MHz και η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Η κεραία πομπός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό παλμό διάρκειας μερικών νανοδευτερολέπτων (10^{-9} sec), το σήμα που φτάνει στην κεραία δέκτη προωθείται στην μονάδα ελέγχου όπου και καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού παλμού. Κάποιες από τις εφαρμογές του γεωραντάρ είναι:

1. Γεωλογικές και μεταλλευτικές εφαρμογές

- χαρτογράφηση υποβάθρου
- χαρτογράφηση καρστ
- εντοπισμός ζωνών διάρρηξης
- ιζηματολογικές εφαρμογές
- ποτάμια και λιμναία χαρτογράφηση πάχους ιζημάτων
- βαθομετρικές εφαρμογές
- εντοπισμός υπόγειων υδάτινων πόρων
- χαρτογράφηση υπόγειων στοών

2. Περιβαλλοντικές εφαρμογές

- υπόγειοι υδάτινοι πόροι
- περιβαλλοντικός χαρακτηρισμός τοποθεσίας
- απεικόνιση θέσεων ταφής απορριμμάτων
- έλεγχος διαρροών σε υπόγειες δεξαμενές
- εντοπισμός υπόγειων δεξαμενών

3. Γεωτεχνικές εφαρμογές

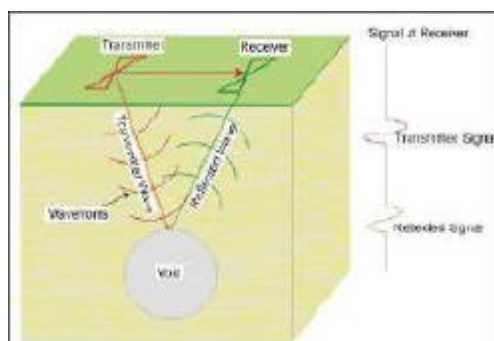
- ποιοτικός έλεγχος σκυροδέματος – οπλισμού

4. Αρχαιολογικές εφαρμογές

- Εντοπισμός θαμμένων τοιχοδομών, αρχαίων κτισμάτων και προσδιορισμός της θέσης τους,
- Καταγραφή θεμελίων και πιθανών διαβρώσεων σε αναδειχθέντα κτίσματα,
- Έρευνα κάτω από υπάρχοντα αρχαιολογικά μνημεία ή κτίσματα χωρίς την παραμικρή παρέμβαση σε αυτά,
- Εντοπισμός μικροαντικειμένων.

5. Άλλες εφαρμογές

- εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων
- ανίχνευση εκρηκτικών (UXO)
- έλεγχος επιχωμάτωσης σε σιδηρογραμμές και δρόμους



Σχήμα: 2.1: Μέτρηση με GPR πάνω από κενό.

2.1.2 Διηλεκτρική σταθερά

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

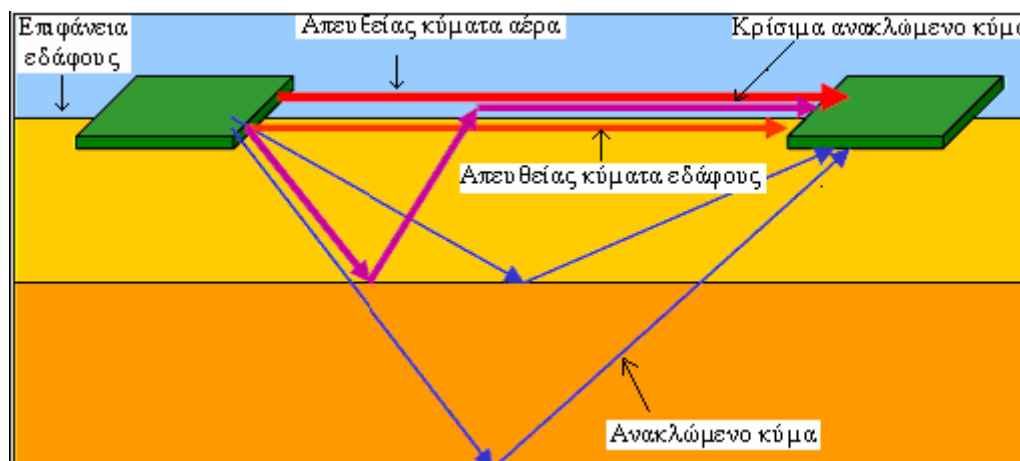
2.1.3 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Η μέθοδος του γεωραντάρ εφαρμόζεται στην έρευνα δομών μικρού βάθους και χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνότητας από 1 έως 2000 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τη μέτρηση, είναι μια τομή της επιφάνειας μελέτης που ονομάζεται ηχόγραμμα και φανερώνει της δομή των υποστρωμάτων.

Το σύστημα του γεωραντάρ εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπό έρευνα υλικό. Ο παλμός, που διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα, θα ταξιδεύσει στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Τότε ένα μέρος της ενέργειας του παλμού θα διαδοθεί στο δεύτερο στρώμα και ένα μέρος θα ανακλαστεί στην επιφάνεια και θα επιστρέψει στην κεραία του δέκτη. Το σήμα που λαμβάνει η κεραία του δέκτη προωθείται στη μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του κύματος. Η διάδοση του παλμού στο υπέδαφος είναι συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης και της εκπομπής της κεραίας. Η μονάδα ελέγχου του γεωραντάρ μετράει το χρόνο t_r που χρειάζεται ο παλμός για να ταξιδέψει από την κεραία του πομπού στην κεραία του δέκτη.

Εκτός από τα ανακλώμενα κύματα η κεραία του δέκτη κατοπτρεύει και τα απευθείας κύματα ή πρώτες αφίξεις. Τα κύματα αυτά διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη χωρίς να ανακλαστούν σε καμία διεπιφάνεια. Εξαιτίας της μικρής διαδρομής που διανύουν καταφθάνουν στη κεραία του δέκτη σε πολύ μικρούς χρόνους και πριν από όλα τα ανακλώμενα κύματα. Οι απώλειες σε ενέργεια των κυμάτων αυτών είναι μικρές και τα πλάτη που καταγράφονται μεγάλα. Οι πρώτες αφήξεις είναι τριών ειδών: αυτά που διαδίδονται στον αέρα και αυτά που διαδίδονται κάτω ακριβώς από την επιφάνεια του εδάφους.

Όταν η απόσταση των κεραιών πομπού – δέκτη υπερβεί μια κρίσιμη τιμή X_c τότε ο δέκτης κατοπτρεύει και τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα του αέρα. Τα κύματα αυτά ανακλώνται στην πρώτη διεπιφάνεια που θα συναντήσουν, διαθλώνται στην επιφάνεια του εδάφους και τελικά διαδίδονται στον αέρα.



Σχήμα 2.2: Κατηγορίες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Βαφείδης 2001, Σπανουδάκης 2001).

2.1.4 Παράμετροι διασκόπησης

Οι παράμετροι διασκόπησης που καλείται να ρυθμίσει ο χρήστης είναι (Σπανουδάκης 2001).

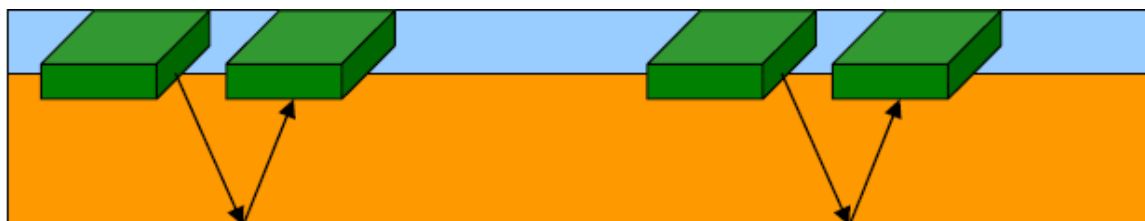
- Συχνότητα εκπομπής: Το βάθος διασκόπησης και η διακριτική ικανότητα συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα. Μεγάλη συχνότητα συνεπάγεται μεγάλη διακριτική ικανότητα ενώ βάθος διασκόπησης μικρό. Το αντίθετο συμβαίνει επιλέγοντας μικρότερη συχνότητα εκπομπής.
- Ο ολικός χρόνος καταγραφής: Σχετίζεται άμεσα με το βάθος διασκόπησης και καθορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία σταματούν οι καταγραφές.
- Το διάστημα δειγματοληψίας : Συνδέεται με το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο καταγραφών. Αν το χρονικό διάστημα είναι μεγάλο τότε πολλές πληροφορίες χάνονται, αν είναι πολύ μικρό τότε οι πληροφορίες είναι μεν πολλές αλλά ο συνολικός όγκος των δεδομένων υπερβολικά μεγάλος.
- Το βήμα διασκόπησης: Το βήμα διασκόπησης ορίζει την απόσταση δυο διαδοχικών σημείων πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις.
- Την απόσταση των κεραιών: Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης και στο συντελεστή ανάκλασης, συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένισης του κύματος αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση.

- Την υπέρθεση: Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους με στόχο την απομάκρυνση του τυχαίου θορύβου.
- Τον προσανατολισμό των κεραιών : Τέλος μελετάται ο προσανατολισμός των κεραιών, δηλαδή τη σχετική μεταξύ τους θέση και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης.

2.1.5 Μέθοδοι διασκόπησης

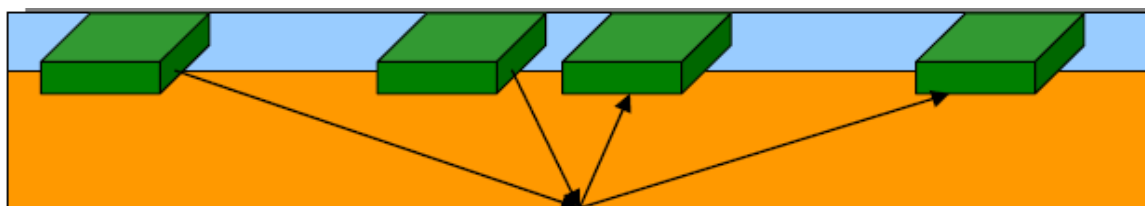
Το γεωραντάρ χρησιμοποιείται με διάφορες τεχνικές για τη συλλογή των δεδομένων. Τρεις από τις πιο συνηθισμένες είναι η μέθοδος της ανάκλασης, η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου και η μέθοδος της τομογραφίας.

- **Η μέθοδος της ανάκλασης :** είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος και εφαρμόζεται στη χαρτογράφηση των γεωλογικών στρωμάτων. Για το σκοπό αυτό οι κεραίες του πομπού και του δέκτη κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης διατηρώντας συγκεκριμένο προσανατολισμό και σταθερή απόσταση.



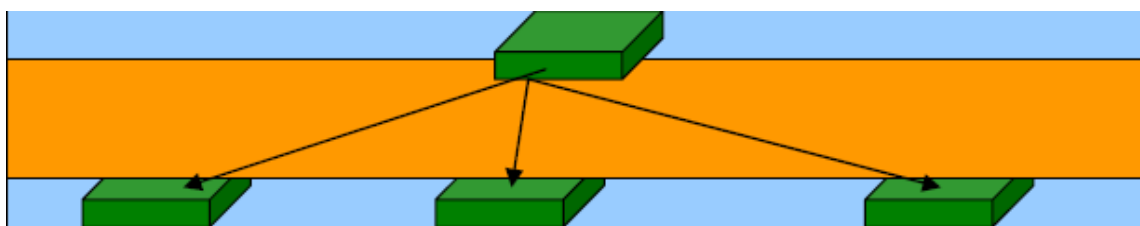
Σχήμα 2.3: Η μέθοδος της ανάκλασης.

- **Μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου (Common Mid Point).** Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο μέσο. Αρχικά προσδιορίζεται κάποιο σημείο του ανακλαστήρα που θα αποτελέσει το ενδιάμεσο σημείο (Σχήμα 2.4) και οι κεραίες τοποθετούνται στην ελάχιστα επιτρεπόμενη απόσταση (ίση με το βήμα δειγματοληψίας Nyquist n) με τα ηλεκτρικά τους πεδία παράλληλα. Κάθε κεραία απομακρύνεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης κατά $n/2$. Η μέγιστη απόσταση δεν πρέπει να ξεπεράσει το βάθος του ανακλαστήρα.



Σχήμα 2.4: Η μέθοδος του κοινού ενδιάμεσου σημείου.

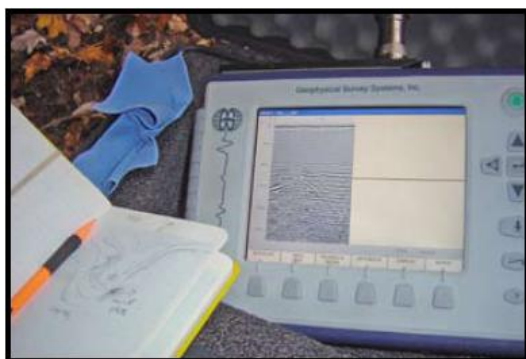
- **Η μέθοδος της τομογραφίας :** η μέθοδος αυτή δε στηρίζεται στην ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως οι προηγούμενες, αλλά στη διέλευση του μέσα από τη μάζα του υλικού μελέτης. Οι κεραίες τοποθετούνται στις δυο απέναντι πλευρές του υλικού του οποίου θέλουμε να μελετήσουμε τις ιδιότητες με τέτοιο τρόπο, ώστε να αντικρίξει η μια την άλλη. Η μελέτη των διερχομένων κυμάτων μέσα από τη μάζα του υλικού θα δώσει πληροφορίες για μεταβολές της δομής του υλικού.



Σχήμα 2.5: Η μέθοδος της τομογραφίας .

2.1.6 Σύστημα TerraSIRch SIR System 3000

Το γεωραντάρ SIR – 3000 είναι μικρό και ελαφρύ, γεγονός που το καθιστά αρκετά εύχρηστο. Έχει το πλεονέκτημα της δημιουργίας τρισδιάστατων εικόνων και χρησιμοποιεί κεραίες από 100 MHz έως 1.2 GHz, γεγονός που το καθιστά οικονομικά προσιτό. Πρόκειται για ένα αξιόπιστο όργανο που συνεχώς βελτιώνεται.



Σχήμα 2.6: SIR3000.



Σχήμα 2.7: Μετρήσεις με GPR.

2.2 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

2.2.1 Εισαγωγή

Βασική επιδίωξη των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Μετρούμενο μέγεθος είναι η ηλεκτρική τάση.

Πιο συγκεκριμένα α) διοχετεύεται ρεύμα (I) και μετράται το ΔV β) πραγματοποιείται αναγωγή της μετρούμενης αντίστασης ($\Delta V/I$) σε φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ανάλογα με την διάταξη των ηλεκτροδίων και γ) υπολογίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης καθώς και η μελέτη των κατακόρυφων ή και πλευρικών μεταβολών αυτής στα επιφανειακά στρώματα.

Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και τον εντοπισμό δομών ενδιαφέροντος.

Για την εφαρμογή των ηλεκτρικών γεωφυσικών μεθόδων απαιτείται σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ στόχου και του ευρύτερου γεωλογικού περιβάλλοντος.

Η χρήση των ηλεκτρικών μεθόδων καλύπτει ένα ευρύ φάσμα των γεωεπιστημών όπως η κοιτασματολογία, η υδρογεωλογία, η τεχνική γεωλογία, η χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών και η αρχαιολογία.

Από τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης οι πιο σημαντικές είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η

μέθοδος των τελλουρικών ρευμάτων. Για τη συλλογή των δεδομένων της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

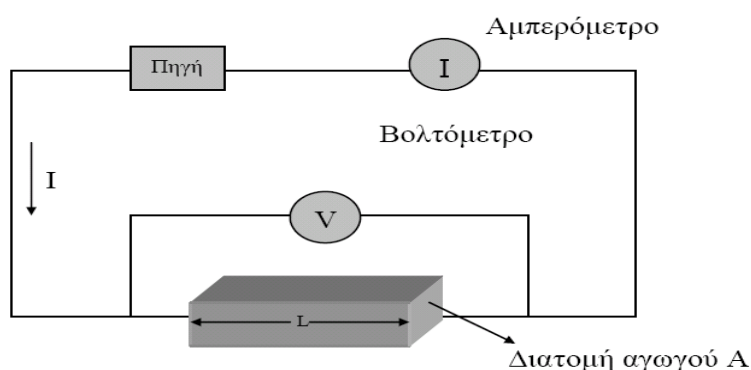
Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον νόμο που διατύπωσε το 1827 ο George Simon Ohm (Robinson, 1988), σύμφωνα με τον οποίο αντίσταση R (σε Ohm) ενός αγωγού ισούται με το σταθερό λόγο της διαφοράς δυναμικού ΔV (σε Volt) που παρουσιάζεται στα άκρα του αγωγού, προς την ένταση I (σε Ampere) του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Επιπλέον, η αντίσταση ενός ομογενούς αγωγού είναι ανάλογη με το μήκος L του αγωγού, αντιστρόφως ανάλογη με το εμβαδόν A της τομής του αγωγού και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία του.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Οπου ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού του αγωγού σε Ohm m.



Σχήμα 2.8: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου.

Οι χαρακτηριστικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, 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).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, δηλαδή το ρεύμα διαρρέει τους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό που βρίσκεται στους πόρους τους. Επομένως η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι

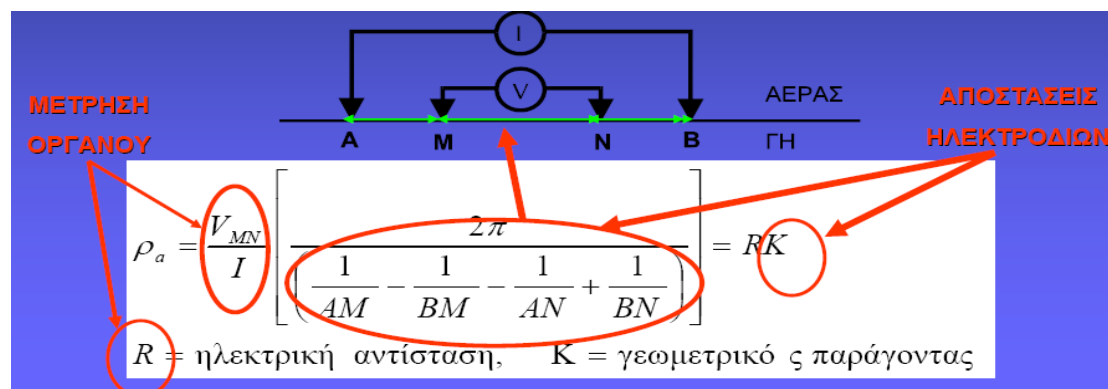
συνδυασμός παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση, σύσταση του νερού που βρίσκεται στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς. Ειδικότερα εξαρτάται από: τις υδρολογικές - υδρογεωλογικές συνθήκες, τη χημική σύσταση του νερού, το μέγεθος των πόρων (πορώδες) των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις – διακλάσεις - ρήγματα των σχηματισμών (δευτερογενές πορώδες), τη θερμοκρασία και την πίεση. Οι διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης για τους ίδιους γεωλογικούς σχηματισμούς έχουν μεγάλο εύρος. Δυο τελείως διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί μπορεί να έχουν παρόμοιες ειδικές αντιστάσεις.

Επειδή η γη είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συναρτήση :

- Από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.
- Από την γεωμετρία των ηλεκτροδίων (θέσεις A,B,M,N) (Σχήμα 2.9)

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της γεωμετρίας εισάγεται ο όρος της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ_a).

Εκφράζει το μέσο σταθμισμένο όρο των τιμών των αντιστάσεων των διαφόρων υλικών. Η μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης οδηγεί στον καθορισμό της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους.



Σχήμα 2.9: Τυπική διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων A, B (ηλεκτρόδια ρεύματος) και M, N (ηλεκτρόδια δυναμικού).

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
<i>ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ</i>	
Μάργες	20-60
Άμμοι και Χαλίκια κορεσμένα	50-500
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαίκοι Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
<i>ΑΙΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ</i>	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι-Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500

Πίνακας 2.1: Τιμές ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πετρωμάτων.

2.2.2 Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Τοποθετώντας δύο ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους συνδεδεμένα με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος δημιουργείται κλειστό κύκλωμα, στο οποίο η γη αποτελεί τον αγωγό του ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή ο αέρας της ατμόσφαιρας είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, όλο το ρεύμα από το ηλεκτρόδιο διαρρέετε στη γη. Για την κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος θα θεωρηθεί ότι η γη είναι ομοιογενείς και ισότροπη ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ .

Για την εκτίμηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών, χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις, τεσσάρων συνήθως ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Αυτές οι διατάξεις αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυο δυναμικού. Είναι οι διάταξεις Wenner , διάταξη διπόλου-διπόλου, τετραγωνική διάταξη, διάταξη Schlumberger και η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου η οποία χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.

Η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου που επινοήθηκε από τους Aspinall και Lynam (1970) χρησιμοποιεί ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος δυναμικού (I_1 και V_1) το οποίο μένει σταθερό κατά την διάρκεια των μετρήσεων ενώ άλλο ζεύγος ηλεκτροδίων (I_2 και V_2) μετακινείται. Το κίνητρο για αυτήν την τροποποίηση είναι η οικονομία. Η διάταξη

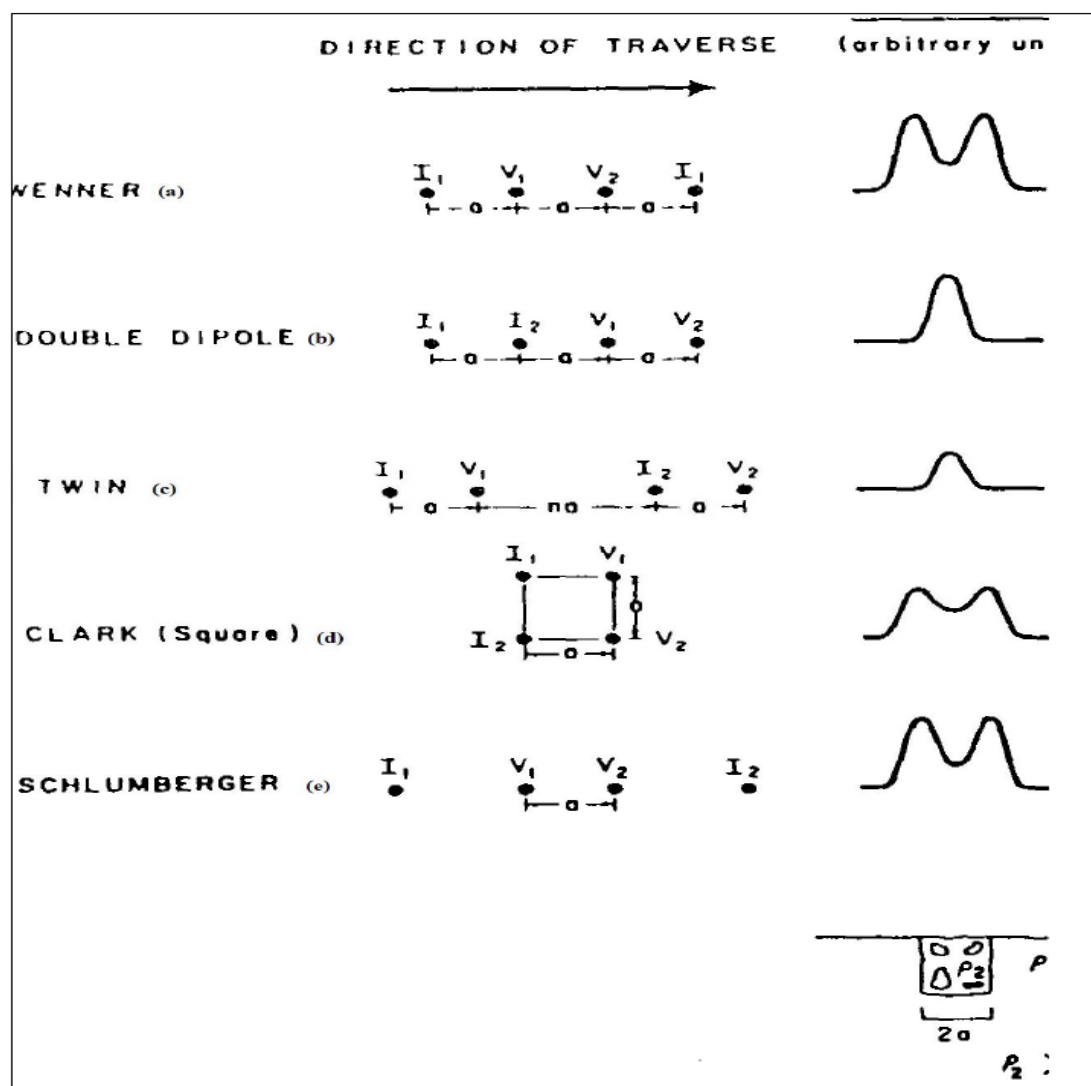
διδύμου ηλεκτροδίου έχει σαν αποτέλεσμα τον μικρότερο αριθμό μετακινήσεων από κάθε άλλη μέθοδο. Η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου έχει επίσης σαν πλεονέκτημα την παραγωγή ενός μέγιστου στις ανωμαλίες. Το βασικό της μειονέκτημα είναι η μειωμένη ευαισθησία σε σχέση με άλλες μεθόδους. Παρ' όλα αυτά σε περιοχές που οι ανωμαλίες αντίστασης είναι μεγάλες η εν λόγω μέθοδος είναι η ιδανική επιλογή. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του n θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 30, αλλιώς θα παρουσιάζονται ανεπιθύμητες επιδράσεις (Σχήμα 2.12c).



Σχήμα 2.10: Μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλ.αντίστασης.



Σχήμα 2.11: Μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλ.αντίστασης.



Σχήμα 2.12: Διατάξεις: α) Wenner β) Διπόλου- Διπόλου γ) Δίδυμου ηλεκτροδίου δ) Τετραγωνική ε) Schlumberger (Οικονόμου, 1998).

Στο Σχήμα 2.12 φαίνονται διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στην αρχαιολογία με μια τυπική ανωμαλία για ιδεατή λιθόκτιστη δομή οριζόντιας διάστασης 2^a , η οποία έχει μεγαλύτερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση από το περιβάλλον έδαφος.

Κάθε διάταξη παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα, ανάλογα με την περιοχή και το σκοπό, για τον οποίο εφαρμόζεται. Η διάταξη Wenner δίνει την πιο έντονη μεταβολή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, αλλά παρουσιάζει το φαινόμενο της διπλής κορυφής, δηλαδή μεγάλη τιμή πριν και μετά τη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τα περιβάλλοντα πετρώματα, ενώ δίνει τοπικό ελάχιστο ακριβώς πάνω από το κέντρο της δομής. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση που η δομή έχει μικρότερη αντίσταση. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζει και η διάταξη Schlumberger με το επιπλέον πρόβλημα του μικρού σήματος, δηλαδή δεν

περιγράφει έντονα τις μεταβολές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με μεγάλη αντίθεση. Βέβαια, παρουσιάζει και ιδιαίτερα πλεονεκτήματα όπως ότι κατά την ηλεκτρική βυθοσκόπηση απαιτείται μετακίνηση μόνο των ηλεκτροδίων ρεύματος και η χρήση σχετικά σταθερού διπόλου τάσης περιορίζει ανεπιθύμητες επιδράσεις από πλευρικές γεωλογικές ασυνέχειες στις μετρήσεις. Το πρόβλημα της διπλής κορυφής δεν εμφανίζεται στις διατάξεις διπόλου – διπόλου και διδύμου ηλεκτροδίου. Η διάταξη διπόλου-διπόλου προσφέρει μεγάλες αντιθέσεις στη μεταβολή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι, επειδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι σχετικά μικρή, περιορίζεται το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρικού ρεύματος και επομένως και η ευαισθησία της μεθόδου με την αύξηση του βάθους.

2.2.3 Ηλεκτρική χαρτογράφηση

Στην ηλεκτρική χαρτογράφηση μελετάται η πλευρική μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να εντοπισθούν ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών.

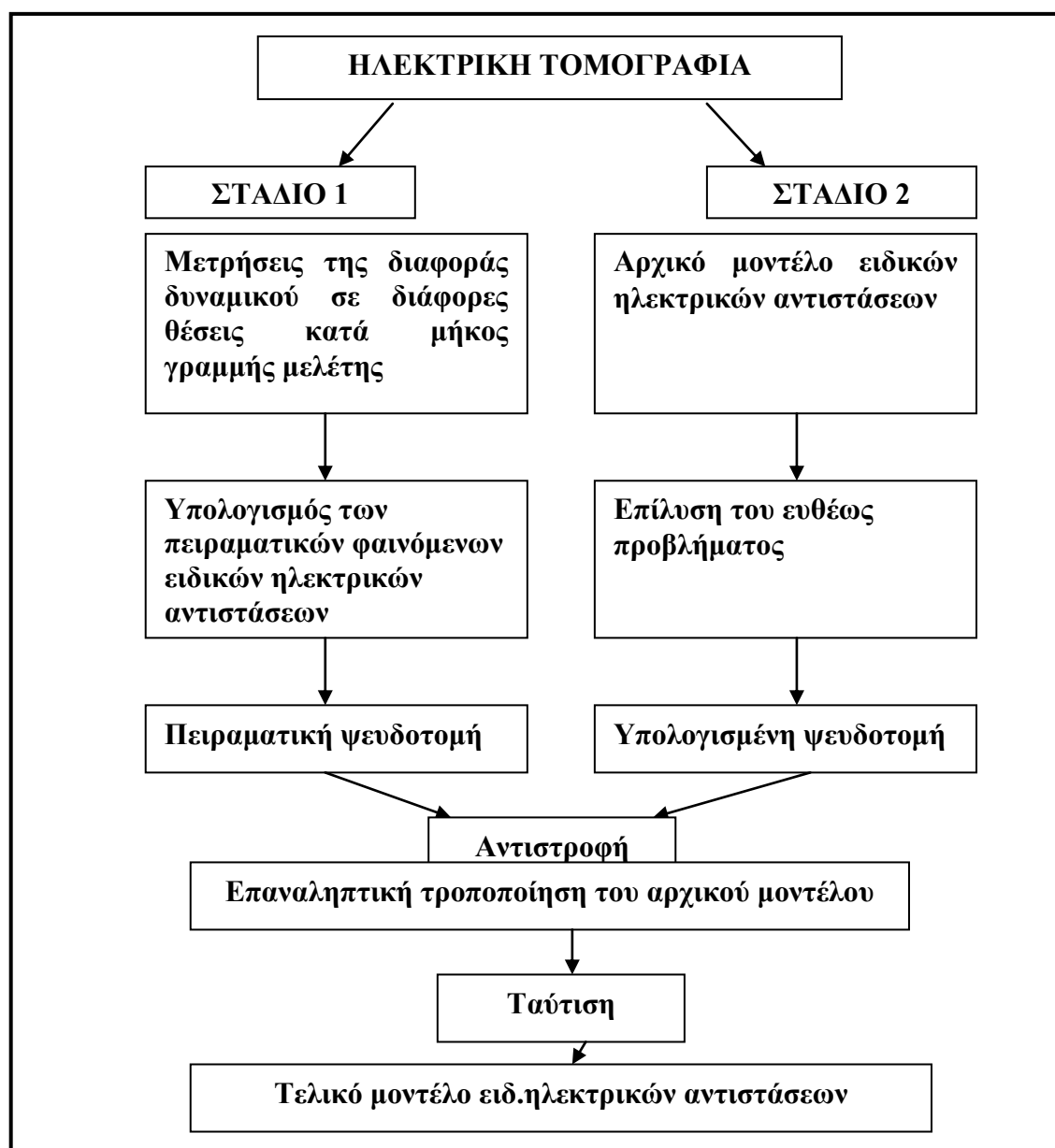
Κατά τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, εκτιμάται η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ_a , για σταθερή τιμή του γεωμετρικού συντελεστή K σε θέσεις κατά μήκος γραμμής μελέτης. Ο γεωμετρικός συντελεστής είναι μια σταθερή ποσότητα η οποία εξαρτάται από το είδος της διάταξης που χρησιμοποιείται.

Κάθε γραμμή μελέτης περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο αριθμό σταθμών μέτρησης. Επειδή η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από το βάθος εισαγωγής των ηλεκτροδίων στο έδαφος θα πρέπει να δίνεται προσοχή να μην υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση του βάθους εισαγωγής τους από θέση σε θέση. Για να επιτευχθεί καλή ακρίβεια στις μετρήσεις, το βάθος εισαγωγής των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι μικρότερο από το 20% της απόστασης των κοντινότερων ηλεκτροδίων.

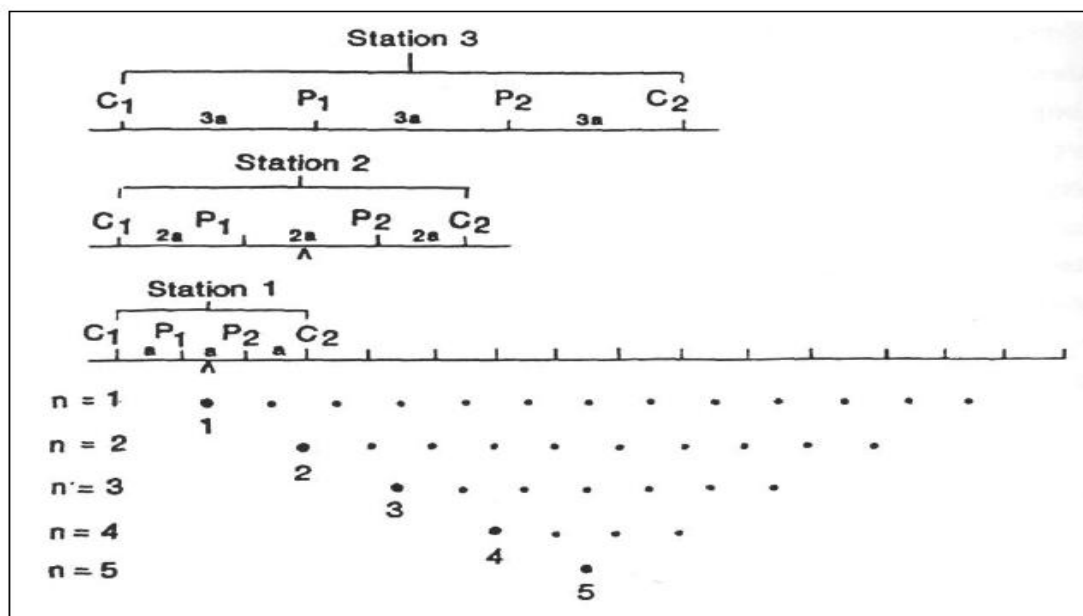
2.2.4 Ηλεκτρική τομογραφία

Με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας επιτυγχάνεται η λεπτομερής απεικόνιση του υπεδάφους καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Ο όρος τομογραφία παράγεται από την λέξη <<τομή>> και σημαίνει απεικόνιση τομής των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Στην ηλεκτρική τομογραφία απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε δυο διαστάσεις. Το

ευθύ πρόβλημα στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης περιλαμβάνει τον υπολογισμό της διαφοράς δυναμικού και εν συνεχεία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από ήδη γνωστές ηλεκτρικές αντιστάσεις. Το αντίστροφο πρόβλημα, περιλαμβάνει τον υπολογισμό των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις μετρούμενες φαινόμενες. Αν και η αντιστροφή είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss-Newton με περιορισμό εξομάλυνσης αποφεύγει της ασταθής λύσεις και συγκλίνει γρήγορα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται περισσότερο από όποια οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα ροής της επεξεργασίας των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας.



Σχήμα 2.14: Δημιουργία ψευδοτομής φαινομένων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.

2.3 Μαγνητικές μέθοδοι.

2.3.1 Εισαγωγή

Ο μαγνητισμός η ιδιότητα φυσικού μαγνήτη να έλκει σιδερένια αντικείμενα είναι γνωστή εδώ και χιλιάδες χρόνια. Οι κινέζοι αξιοποίησαν την ιδιότητα του ραβδόμορφου μαγνήτη να προσανατολίζεται και έφτιαξαν μαγνητικές πυξίδες, οι οποίες καθοδηγούσαν τα πλοία τους στα μακρινά ταξίδια. Αργότερα, ο William Gilbert εξήγησε ότι η αιτία προσανατολισμού της μαγνητικής βελόνας είναι ολόκληρη η γη, η οποία συμπεριφέρεται σαν ένας τεράστιος μαγνήτης. Ο ίδιος για να ενισχύσει τον ισχυρισμό του πραγματοποίησε ένα πείραμα κατά το οποίο χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο σφαιρικό μαγνήτη, έδειξε ότι κάθε μαγνητική βελόνα που θα βρεθεί κοντά του προσανατολίζεται όπως οι βελόνες της πυξίδας γύρω από τη γη.

Οι μαγνήτες έλκουν ορισμένα μόνο υλικά και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι μαγνήτες μπορούν και μαγνητίζουν μόνιμα ορισμένα αντικείμενα, τα μετατρέπουν δηλαδή σε μαγνήτες. Η διαδικασία μετατροπής ονομάζεται μαγνήτιση. Μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με επαφή είτε από απόσταση.

2.3.2 Μαγνητικό πεδίο

Σύμφωνα με τον Gilbert κάθε μαγνήτης περιβάλλεται από μια σφαίρα επιρροής. Ένα σιδερένιο αντικείμενο δέχεται την επίδραση του μαγνήτη εφόσον εισχωρούσε μέσα σ' αυτή τη σφαίρα επιρροής. Δηλαδή κάθε μαγνήτης περιβάλλεται από μαγνητικό πεδίο. Η εμφάνιση ενός μαγνήτη στο χώρο προσδίδει μια ιδιότητα σ' αυτόν, την οποία δε διέθετε προηγουμένως. Τον εξουσιοδοτεί να ασκεί δυνάμεις σε οποιοδήποτε άλλο μαγνήτη βρεθεί στο χώρο αυτό. Χωρίς το μαγνήτη, ο χώρος δε θα είχε αυτή την ιδιότητα. Δηλαδή, η παρουσία του μαγνήτη δημιουργεί ένα πεδίο δυνάμεων.

Το μέγεθος που περιγράφει το μαγνητικό πεδίο λέγεται ένταση του μαγνητικού πεδίου (F) και εκφράζει τη δύναμη ($\mathbf{F}$) ανά μονάδα ποσότητας μαγνητισμού (P) σύμφωνα με τη σχέση : $F = \mathbf{F} / P$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η ασκούμενη σε βόρειο πόλο της γης δύναμη θα έχει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, ενώ η ασκούμενη σε νότιο πόλο της γης δύναμη ($P < 0$) θα έχει, σε σχέση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αντίθετη κατεύθυνση.

Όταν ένα σώμα βρεθεί σε ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο έντασης F , αποκτάει μαγνήτιση J . Η μαγνήτιση του σώματος, συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου με τη σχέση: $J = \kappa F$

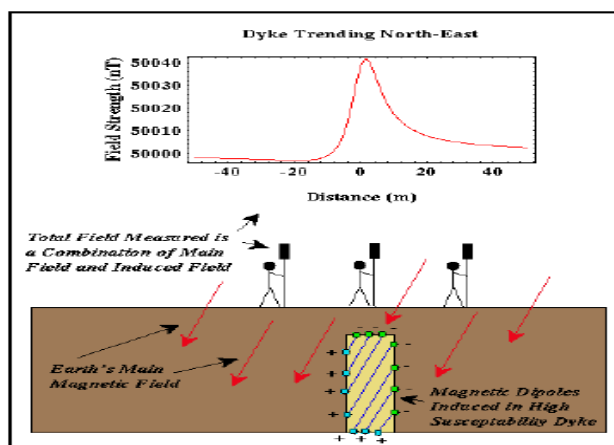
όπου κ είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα. Η μαγνήτιση ενός σώματος είναι διανυσματικό μέγεθος, έχει τη διεύθυνση και τη φορά της συνολικής μαγνητικής ροπής του σώματος και ίδιες μονάδες με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η μαγνήτιση J εξαρτάται από τη μαγνητική επιδεκτικότητα κ και την ένταση F του μαγνητικού πεδίου .

Η μαγνητική επιδεκτικότητα κ εξαρτάται από το υλικό του σώματος, είναι αδιάστατο μέγεθος και συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα με τη σχέση: $\mu = 1 + 4\kappa\pi$

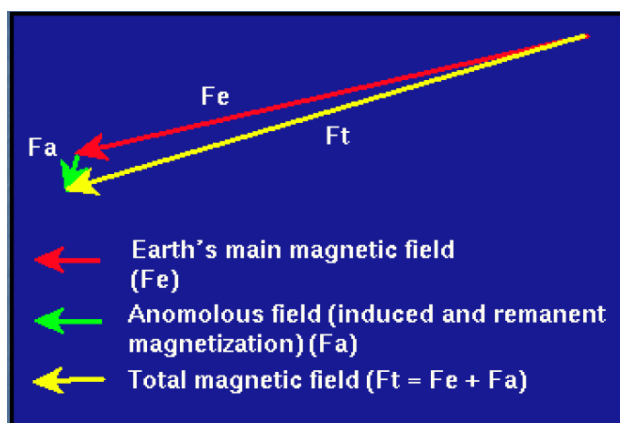
(Η αντίθεση μαγνήτισης μιας δομής εξαρτάται από τη διαφορά μαγνήτισης επιδεκτικότητας δομής – περιβάλλοντος από τη γεωγραφική θέση και το χρόνο μέτρησης). Οι μαγνητικές ανωμαλίες σχετίζονται άμεσα με την μαγνητική επιδεκτικότητα του εδάφους. Περιοχές με αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα (πάντα σε σχέση με το περιβάλλον) εμφανίζονται ως θετικές μαγνητικές ανωμαλίες ενώ αντίθετα περιοχές με μειωμένη μαγνητική επιδεκτικότητα παρουσιάζονται ως αρνητικές ανωμαλίες. Και τα δύο αυτά είδη μαγνητικών ανωμαλιών παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην διαδικασία ερμηνείας των μαγνητικών δεδομένων.

Θετικές τιμές σημαίνει ότι η μαγνήτιση J είναι ομόρροπη προς το πεδίο F . Αρνητικές τιμές δείχνουν πως αυτή είναι αντίρροπη προς το πεδίο F .

Στη μαγνητική διασκόπηση μετράμε μαγνητικές ανωμαλίες δηλαδή διανυσματικές διαφορές μεταξύ μαγνητικής επαγωγής μια δομής και πετρωμάτων που περιβάλλουν τη δομή.

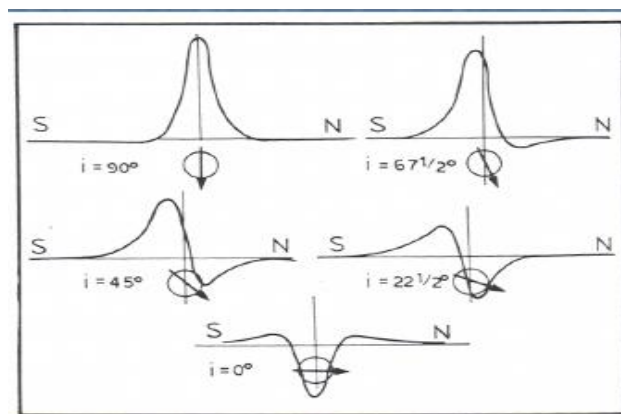


Σχήμα 2.15: Μορφή της μαγνητικής ανωμαλίας.



Σχήμα 2.16: Διανυσματικές διαφορές μεταξύ μαγνητικής επαγωγής μια δομής και πετρωμάτων που περιβάλλουν τη δομή.

Η μαγνητική ανωμαλία εξαρτάται από την αντίθεση μαγνήτισης και γι'αυτό μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή λόγω μεταβολής των στοιχείων του μαγνητικού πεδίου της Γης.



Σχήμα 2.17: Μεταβολή μαγνήτισης λόγω μεταβολής των στοιχείων του μαγνητικού πεδίου της γης.

2.3.3 Αρχαιομαγνητισμός

Πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του μαγνητικού πεδίου της γης «αποθηκεύονται» στην ψημένη άργιλο. Η μαγνήτιση αυτή, που ονομάζεται παραμένουσα (thermoremaned magnetism ή TRM), επάγεται από το γεωμαγνητικό πεδίο στα οξειδία του σιδήρου που βρίσκονται μέσα στην άργιλο καθώς αυτή ψύχεται μετά από θέρμανση στους 700°C . Αυτό σημαίνει ότι η ψημένη άργιλος αποκτά μια μικρή αλλά μόνιμη μαγνήτιση με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης που επικρατούσε κατά την ψύξη (ή στην περίπτωση των διαδοχικών θερμάνσεων κατά την τελευταία ψύξη).

Η παραμένουσα μαγνήτιση της ψημένης αργίλου οφείλεται στις μαγνητικές ιδιότητες του μαγνητίτη (Fe_3O_4) και του αιματίτη ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Η μέση περιεκτικότητα του φλοιού της γης σε οξειδία του σιδήρου είναι 6-8% και τα περισσότερα είδη εδαφών αργίλων (και κάποιων πετρωμάτων) περιέχουν σημαντικές ποσότητες αυτών των ορυκτών με τη μορφή μικρών κόκκων (Βαφείδης, 2001).

2.3.4 Όργανα μέτρησης

Τα τρία βασικά όργανα που χρησιμοποιούνται στην αρχαιολογία είναι το πρωτονικό μαγνητόμετρο, το μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής και το διαφορικό μαγνητόμετρο.

Το διαφορικό μαγνητόμετρο είναι ένα μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης ροής το οποίο, μετρά την διαφορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου, σε δύο σημεία που βρίσκονται σε διαφορετικό ύψος (διαφορά υψομέτρου γύρω στο μισό μέτρο). Η μαγνητική ανωμαλία που οφείλεται σε ρηχή δομή τοπικού πεδίου παρουσιάζει

μεγάλη διακύμανση με το υψόμετρο. Αντίθετα η μαγνητική ανωμαλία από βαθύτερη δομή παρουσιάζει μικρή διακύμανση με το υψόμετρο.

Η απαίτηση για παράλληλη ευθυγράμμιση των μονάδων ανίχνευσης αυξάνει σημαντικά το κόστος του διαφορικού μαγνητομέτρου. Τα μαγνητόμετρα ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής και τα διαφορικά μαγνητόμετρα έχουν υψηλή ευαισθησία και προσφέρουν συνεχείς μετρήσεις.



Σχήμα 2.18: Μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης ροής.

Το διαφορικό μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης ροής του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής έχει δύο αισθητήρες, με διαφορά ύψους 0.5 μέτρα, έτσι ώστε να λαμβάνει μετρήσεις σε διαφορετικό υψόμετρο και να παρουσιάζεται στην του η διαφορά των δύο τιμών αυτών. Αποτέλεσμα αυτής της διάταξης είναι να ανιχνεύονται ανωμαλίες οι οποίες οφείλονται σε δομές που βρίσκονται σε βάθος ένα με δύο μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους.

2.3.5 Συλλογή Δεδομένων

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιούνται μετρήσεις της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε συγκεκριμένα σημεία έτσι ώστε να δημιουργηθεί χάρτης του μαγνητικού πεδίου, της υπό μελέτης περιοχής. Για τη δημιουργία του χάρτη οι μετρήσεις τοποθετούνται σε κάναβο πάνω από τον αρχαιολογικό χώρο. Όταν χρειάζονται περισσότερο από μερικά λεπτά για να ολοκληρωθεί η μέτρηση πρέπει να

διορθωθούν οι μετρήσεις, εξαιτίας της χρονικής μεταβολής του μαγνητικού πεδίου της γης. Χωρίς αυτές τις διορθώσεις ο χάρτης παρουσιάζει ψευδείς ανωμαλίες ιδιαίτερα κατά μήκος γραμμών των μετρήσεων. Όταν υπάρχει μόνο ένα μαγνητόμετρο απλά μπορεί κανείς να πάρει μέτρηση σε κάποιο σταθερό σημείο ακριβώς πριν την αρχή της κάθε γραμμής μετρήσεων και να χρησιμοποιηθούν αυτές οι μετρήσεις σαν βάση για την διόρθωση του μαγνητικού πεδίου της γης λόγω χρονικής μεταβολής. Φυσικά, με δύο μαγνητόμετρα τα πράγματα είναι πιο απλά αφού με το ένα λαμβάνονται μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα στο σταθμό βάσης ενώ το άλλο χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις μέσα στον κάναβο. Έτσι οι διαφορές στις μετρήσεις του σταθερού μαγνητομέτρου, με την προϋπόθεση ότι γίνονται την ίδια στιγμή με το κινητό μαγνητόμετρο, είναι οι ακριβείς διορθώσεις που αφαιρούνται απλώς ή προστίθενται στις τιμές που λαμβάνει το κινητό μαγνητόμετρο. Όμως η δέσμευση δύο μαγνητομέτρων στον ίδιο χώρο κάθε άλλο παρά συμφέρουσα είναι.

Πριν αρχίσουν να πραγματοποιούνται μετρήσεις σε μεγάλης έκτασης αρχαιολογικό χώρο, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν η φύση, το μέγεθος και το βάθος των δομών που ανιχνεύονται όπως και η πιθανή ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων. Καλό θα ήταν ίσως να παίρνονται κάποιες μετρήσεις όπου υπάρχουν εμφανίσεις αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, για να χρησιμοποιηθούν σαν σημεία αναφοράς.

Από τη στιγμή που το εύρος μιας ανωμαλίας αυξάνει όσο αυξάνει και η απόσταση μαγνητισμένου σώματος-αισθητήρα, όταν χρησιμοποιείται μαγνητόμετρο το οποίο δεν είναι διαφορικό, μεγαλύτερο ύψος αισθητήρα θα έχει σαν αποτέλεσμα δυσκολότερο διαχωρισμό ανάμεσα σε ανωμαλίες γειτονικών μαγνητισμένων σωμάτων. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι η απόσταση αισθητήρα- μαγνητισμένου σώματος να μην είναι μεγαλύτερη από την ισαπόσταση των σταθμών. Επιπλέον, το ύψος του αισθητήρα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να μειώνεται ο θόρυβος που οφείλεται στο ότι το έδαφος επίσης είναι ανομοιογενώς μαγνητισμένο. Ο θόρυβος είναι αντιστρόφως ανάλογος του ύψους του αισθητήρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΛΥΤΤΟ

3.1 Εισαγωγή

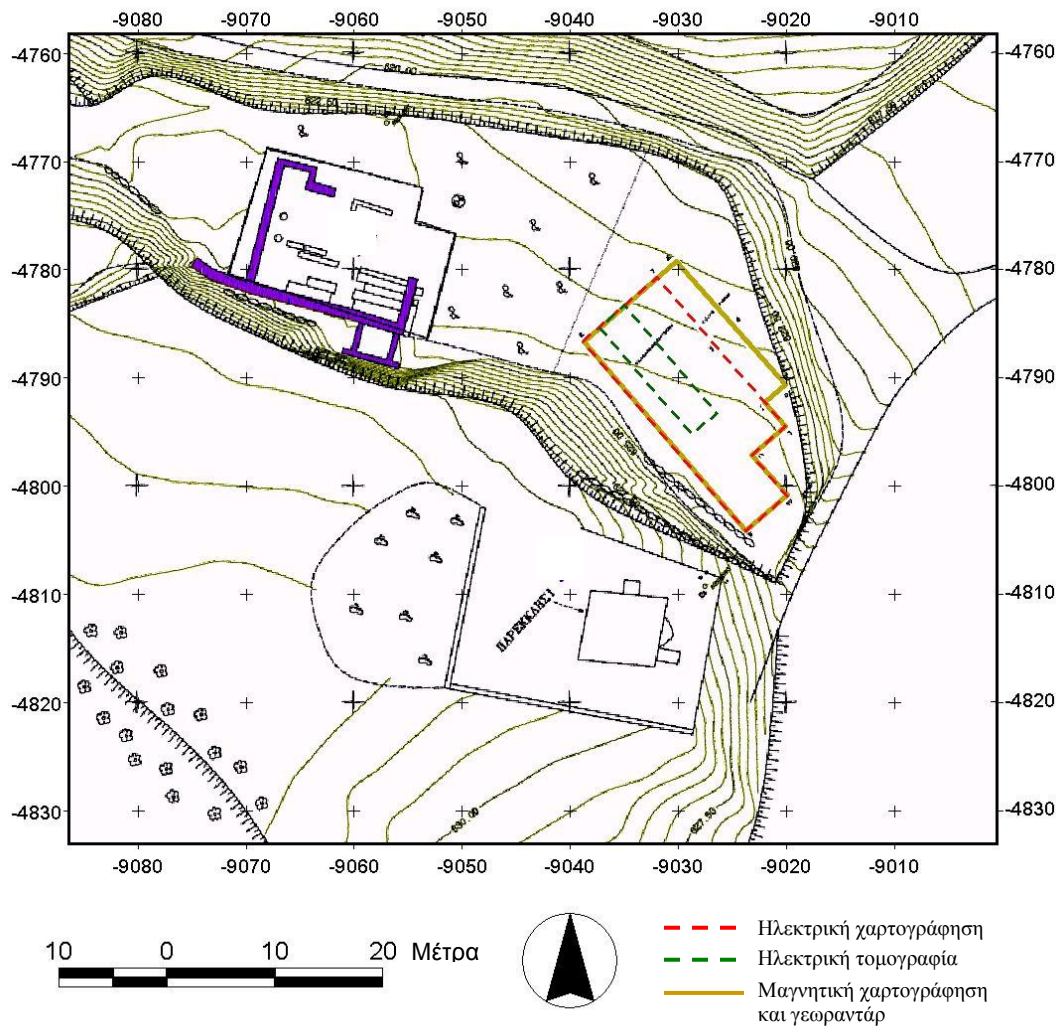
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθώς επίσης και χάρτης της περιοχής στον οποίο παρουσιάζεται ο κάνναβος συλλογής των δεδομένων. Κατόπιν γίνεται παρουσίαση των μεθόδων επεξεργασίας, όπου χρησιμοποιούνται φίλτρα απομάκρυνσης του θορύβου και ενίσχυση, με στόχο την ανάδειξη των ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που με τη σειρά της οδηγεί σε πιο έγκυρα αποτελέσματα. Ακολουθούν οριζόντιες τομές σε διάφορα βάθη και τέλος παρουσιάζεται ο χάρτης στον οποίο δίνονται τα τελικά αποτελέσματα.

3.2 Γεωφυσική έρευνα στην Λύττο

Η γεωφυσική έρευνα αναφέρεται στον χώρο ΝΑ του βουλευτηρίου, όπου πραγματοποιήθηκε πιλοτική γεωφυσική έρευνα με στόχο τον εντοπισμό και χαρτογράφηση ερειπίων αρχαίων κτισμάτων. Εφαρμόστηκε συνδυασμός διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, τόσο συμβατικών όσο και υψηλής ανάλυσης. Η πιλοτική γεωφυσική έρευνα, περιλάμβανε διασκόπηση με την μαγνητική και την ηλεκτρική μέθοδο χαρτογράφησης, το γεωραντάρ και την ηλεκτρική τομογραφία (Σχήμα 3.1). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πρωταρχικά αποτελέσματα της πιλοτικής γεωφυσικής έρευνας στον αρχαιολογικό χώρο της Λύττου, η οποία εντόπισε και χαρτογράφησε ερείπια θαμμένων τοίχων. Η μαγνητική χαρτογράφηση στον κάνναβο κάλυψε 219 τετραγωνικά μέτρα και η ηλεκτρική χαρτογράφηση κάλυψε 182 τετραγωνικά μέτρα (Σχήμα 3.1). Οι μετρήσεις με το γεωραντάρ κάλυψαν όλο τον κάνναβο. Σχεδιάστηκαν οι 24 γραμμές μελέτης ανά 0,5m (Σχήμα 3.7).

Πραγματοποιήθηκε μαγνητική χαρτογράφηση με την συσκευή Geoscan FM 18 και βήμα διασκόπησης 0.5 μέτρου. Η μέθοδος της ηλεκτρικής χαρτογράφησης έγινε με την διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου και ισαπόσταση σταθμών μέτρησης 0.5 μέτρου. Η

διασκόπηση με γεωραντάρ πραγματοποιήθηκε με κεραία κεντρικής συχνότητας 400 MHz , με βήμα σταθμών μέτρησης 10 εκατοστά και η ηλεκτρική τομογραφία όπου χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου διπόλου με ισαπόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων 0.5 μέτρο.



Σχήμα 3.1: Τοπογραφικός χάρης όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις .

3.3 Ηλεκτρική και μαγνητική χαρτογράφηση

Στην γεωφυσική έρευνα για θαμμένες αρχαιότητες μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους είναι η μαγνητική χαρτογράφηση. Τα εδάφη παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές μαγνήτισης σε σχέση με πετρώκτιστες θαμμένες ανθρωπογενείς

κατασκευές (Le Borgne 1955). Αυτό, σε συνδυασμό με τον μικρό χρόνο συλλογής δεδομένων, έχει σαν αποτέλεσμα η μαγνητική χαρτογράφηση να εφαρμόζεται σχεδόν πάντα σε γεωφυσικές έρευνες αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Πραγματοποιήθηκε μαγνητική χαρτογράφηση με την συσκευή Geoscan FM 18 και βήμα διασκόπησης 0.5 μέτρου .

Στον κάναβο εφαρμόστηκε επίσης η μέθοδος της ηλεκτρικής χαρτογράφησης με την διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου και ισαπόσταση σταθμών μέτρησης 0.5 μέτρου. Διαφοροποιήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των εδαφών αναδεικνύουν θαμμένες αρχαιότητες, αφού αναμένεται αυτές να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σε σχέση με τα εδάφη (Weymouth 1985).

3.3.1 Εφαρμογή Φίλτρων

Οι διαβαθμίσεις των χρωμάτων αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές είτε φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είτε μαγνητικής βαθμίδας. Χαμηλές τιμές φαινομένων ειδικών αντιστάσεων απεικονίζονται με μπλε, ενώ υψηλές με κόκκινο.

Με τη διαδικασία αυτή δημιουργήθηκαν οι χάρτες των κανάβων που παρουσιάζονται παρακάτω. Η δημιουργία και η επεξεργασία των χαρτών έγινε με τη χρήση του προγράμματος Transform v3.4.

Κατά την επεξεργασία με το πρόγραμμα Transform v3.4 εφαρμόστηκαν φίλτρα για την ανάδειξη των γραμμικών ανωμαλιών οι οποίες πιθανόν να οφείλονται σε ανθρωπογενείς δομές.

3.3.2 Βελτίωση του Έγχρωμου Χάρτη.

Η απεικόνιση των μετρήσεων 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. Τιμές προκαθορισμένου εύρους απεικονίζονται με κόκκινο αν είναι σχετικά μεγαλύτερες και με μπλε 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.

3.3.3 Μέθοδος Ανάδειξης Τοπικών Ανωμαλιών μέσω Εξομάλυνσης.

Η μέθοδος εξομάλυνσης χρησιμοποιείται κυρίως για τη μείωση του τυχαίου θορύβου των μετρήσεων. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εξομάλυνσης είναι αυτή του κινητού μέσου.

Στη μέθοδο του κινητού μέσου, η μέση τιμή σε κάθε κόμβο του κανάβου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές στους γειτονικούς κόμβους. Αυτό το φίλτρο εφαρμόζεται σε όλα τα σημεία του χάρτη. Ο μέσος όρος υπολογίζεται από το άθροισμα των γινομένων των τιμών των γειτονικών σημείων επί τον συντελεστή βαρύτητας του καθενός. Ο συντελεστής βαρύτητας του κάθε γειτονικού σημείου είναι αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης του σημείου αυτού από το κέντρο.

Για την εφαρμογή αυτού του φίλτρου χρησιμοποιήθηκε απευθείας εντολή μέσω του προγράμματος. Μπορεί κάποιος να επιλέξει τον αριθμό των επαναλήψεων εφαρμογής του φίλτρου. Αυτό σημαίνει, πόσες φορές θα εξομαλυνθεί ο χάρτης. Είναι ίσως η πιο απλή μέθοδος επεξεργασίας, η οποία απαλλάσσει το χάρτη λεπτομέρειες που πιθανόν να σχετίζονται με θόρυβο. Εφαρμόζοντας φίλτρο κινητού μέσου όρου στον αρχικό χάρτη προκύπτει ένας εξομαλυσμένος του οποίου οι τιμές υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

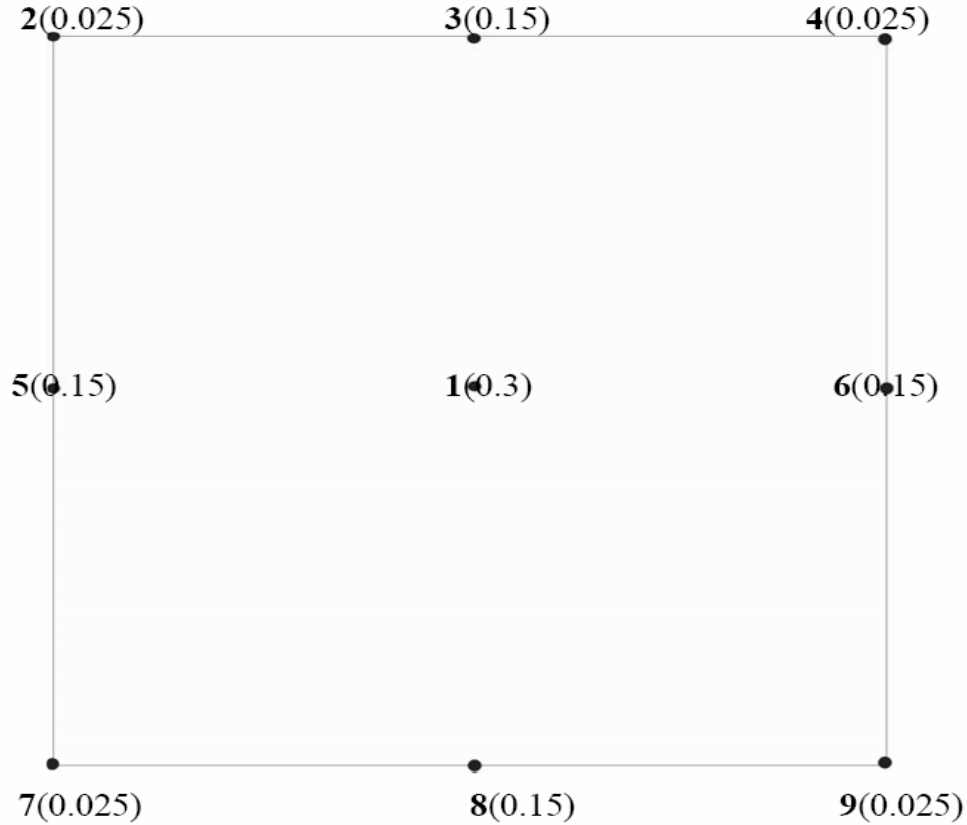
$$\rho_a(i,j) = \sum_{k,\ell} \alpha(k,\ell) \cdot \rho(k-i, \ell-j)$$

όπου i,j είναι δείκτης της θέσης της μέτρησης της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ_a και $\alpha(k,\ell)$ είναι συντελεστές βαρύτητας. Ο συντελεστής βαρύτητας είναι αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης του σημείου από το κέντρο.

Τυπικό φίλτρο εξομάλυνσης είναι το φίλτρο Hanning $\alpha(k,\ell)$ το οποίο δίνεται υπό μορφή 3x3 πίνακα παρακάτω:

0.06	0.10	0.06
0.10	0.36	0.10
0.06	0.10	0.06

Στη συγκεκριμένη εργασία εφαρμόστηκε το φίλτρο του κινητού μέσου:



$$X_{1, \text{μέσο}} = X_1 0.3 + (X_3 + X_5 + X_8 + X_6) 0.15 + (X_2 + X_4 + X_7 + X_9) 0.025$$

Ο δείκτης κάθε σημείου παρατήρησης και ο αντίστοιχος συντελεστής βαρύτητας δίνονται στο παραπάνω γράφημα. Οι συντελεστές βαρύτητας επιλέχθηκαν έτσι ώστε το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα.

Η μέθοδος εξομάλυνσης εφαρμόστηκε στους χάρτες ηλεκτρικής αντίστασης. Η εξομαλυμένη εικόνα αφαιρέθηκε από την αρχική και δημιουργήθηκε έτσι χάρτης ο οποίος τονίζει τις αντιθέσεις που παρουσιάζουν οι τιμές ηλεκτρικής αντίστασης.

3.3.4 Μέθοδος της Οριζόντιας Βαθμίδας.

Η οριζόντια βαθμίδα δείχνει την κατεύθυνση της μέγιστης αύξησης των δεδομένων. Το μέτρο της οριζόντιας βαθμίδας δίνει τον ρυθμό αύξησης κατά μήκος της κατεύθυνσης, στην οποία η αύξηση των δεδομένων είναι μέγιστη.

Είναι :

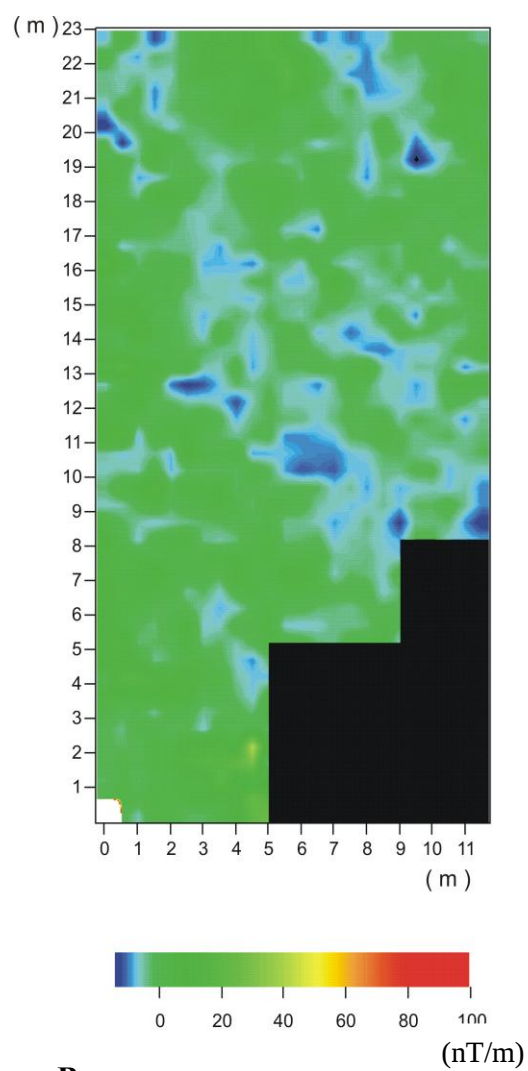
$$\left| \frac{\partial A}{\partial Z} \right| = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial Y} \right)^2}$$

Όπου A: η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Υπολογίζοντας την οριζόντια βαθμίδα των μετρήσεων είναι δυνατός ο εντοπισμός δομών ενδιαφέροντος, επειδή μεγάλη τιμή της οριζόντιας βαθμίδας σχετίζεται με απότομη αλλαγή στην φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

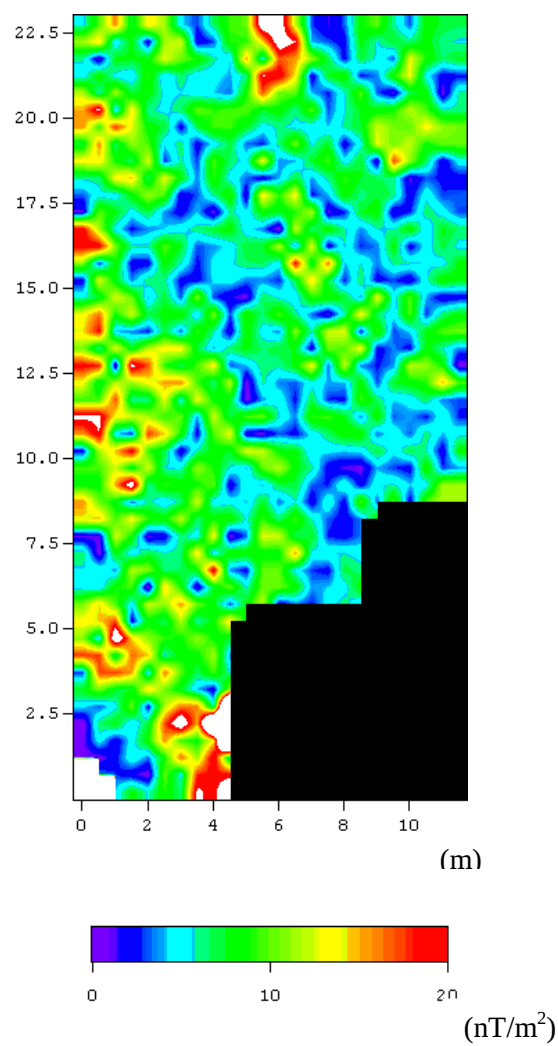
3.3.5 Παρουσίαση Χαρτών

Η επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Transform v.3.4. Για την παρουσίαση των επεξεργασμένων γεωφυσικών χαρτών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Corel Draw.

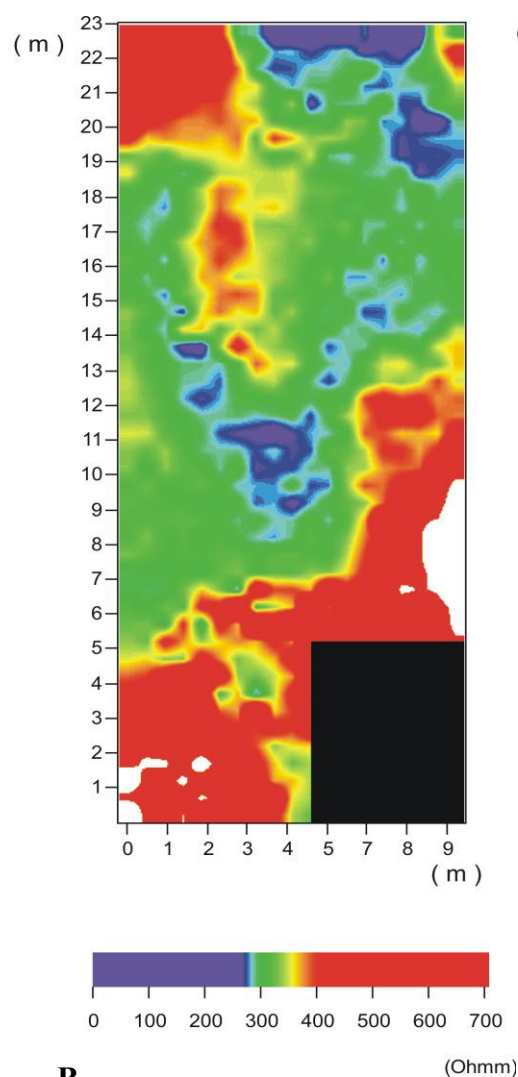


B
↗

Σχήμα 3.2: Αρχικός χάρτη μαγ. χαρτογράφησης.

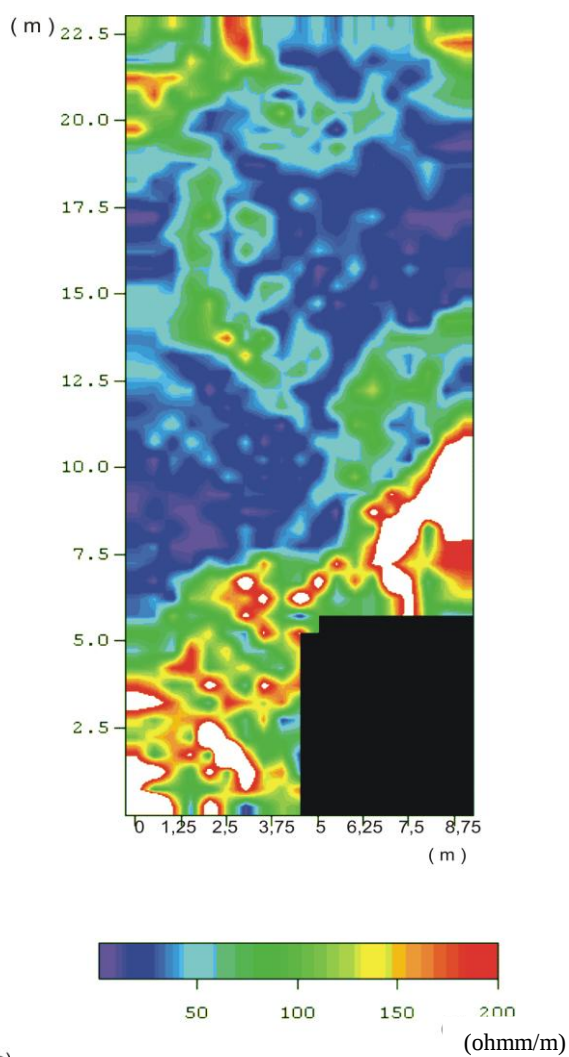


Σχήμα 3.3: Μαγ.χαρτογράφηση (οριζ. βαθμίδα).

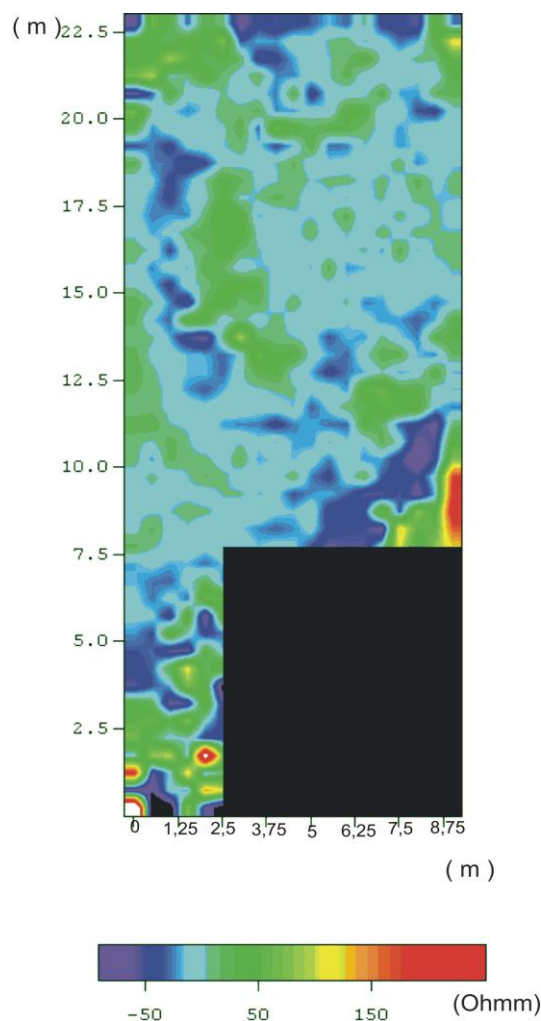


B
↗

Σχήμα 3.4: Αρχικός χάρτης ηλεκ. χαρτογράφησης .



Σχήμα 3.5: Ηλεκ.χαρτογράφηση (οριζ. βαθμίδας) .



B

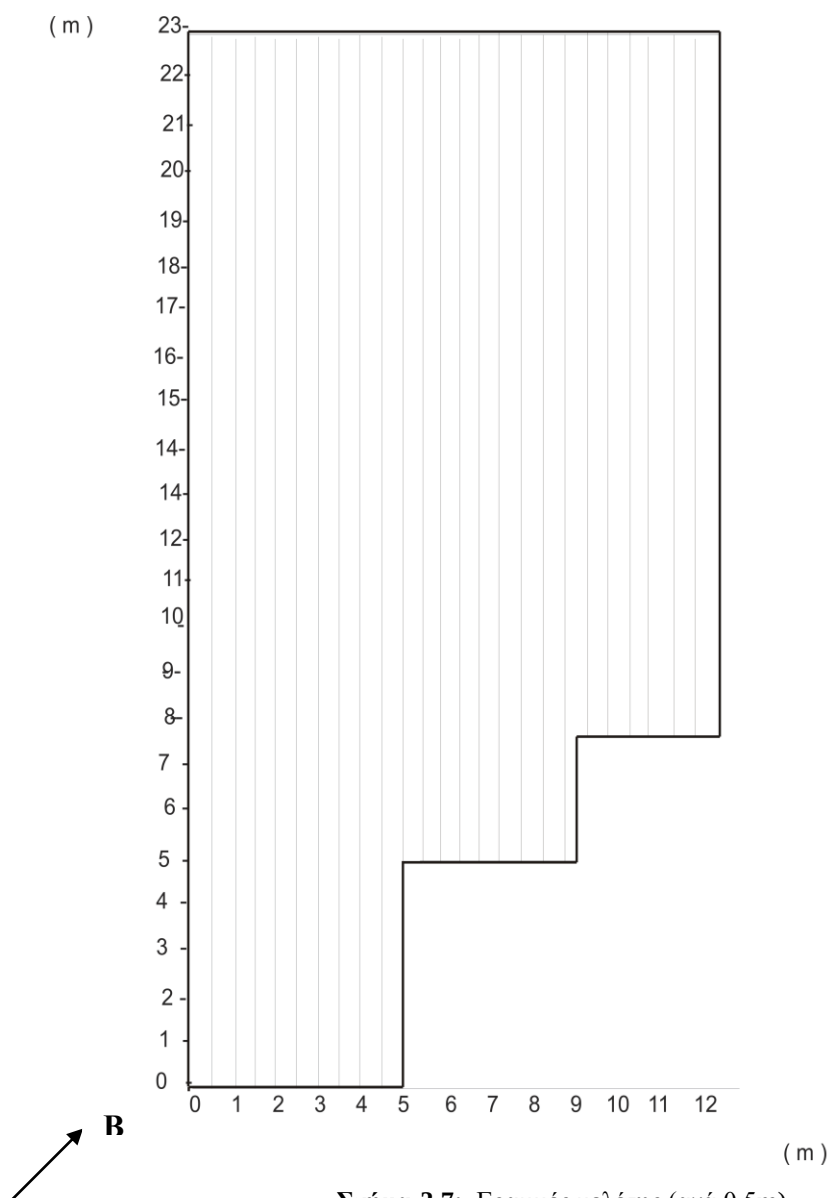
Σχήμα 3.6: Ηλεκτρική χαρτογράφηση μετά από αφαίρεση κινητού μέσου.

3.4 Επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ.

Στην Λύττο η διασκόπηση με γεωραντάρ πραγματοποιήθηκε με κεραία κεντρικής συχνότητας 400 MHz, με βήμα σταθμών μέτρησης 0,1m.

Η επεξεργασία των δεδομένων διευκολύνει τον εντοπισμό των ανακλαστήρων, που ενδεχομένως σχετίζονται με θαμμένες ανθρωπογενείς δομές (π.χ τοιχοδομές). Για το σκοπό αυτό ακολουθήθηκε μια σειρά βημάτων που περιγράφονται αναλυτικά για τη γραμμή μελέτης στο 1,5m.

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με το πρόγραμμα GPR PRO στο MATLAB. Οι ειδικές τεχνικές περιλαμβάνουν την ανάλυση των χαρακτηριστικών των δεδομένων, αποσυνέλιξη, εξασθένιση των πολλαπλών ανακλάσεων, εφαρμογή φίλτρων στο χώρο συχνότητας – κυματοριθμού (FK) και απομάκρυνση του θορύβου υποβάθρου (Σπανουδάκης, 2007).



Σχήμα 3.7: Γραμμές μελέτης (ανά 0,5m).

3.4.1 Διόρθωση Dewow

Το αρχικό στάδιο επεξεργασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή φίλτρων με στόχο να απομακρυνθούν οι πολύ χαμηλές συχνότητες. Αυτό το βήμα είναι γνωστό ως “*dewowing*”. Πρόκειται για ένα φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (high pass ή low cut filter). Η εφαρμογή του φίλτρου επιτρέπει την διέλευση του φάσματος ακτινοβολίας συγκεκριμένης κεντρικής συχνότητας εκπομπής με μεγάλη πιστότητα, ενώ αντίθετα απαγορεύει την διέλευση σημάτων χαμηλών συχνοτήτων. Η λειτουργία του φίλτρου στηρίζεται στη δημιουργία νοητού παραθύρου σε κάθε σημείο του ίχνους. Κατόπιν, υπολογίζεται η μέση τιμή των σημείων που ανήκουν στο παράθυρο η οποία αφαιρείται από την τιμή του κεντρικού σημείου. Στη συνέχεια το παράθυρο μετατοπίζεται κατά ένα σημείο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Το πολύ χαμηλής

συχνότητας σήμα σχετίζεται με επαγωγικά φαινόμενα ή το περιορισμένο δυναμικό εύρος του εξοπλισμού.

3.4.2 Τεχνικές ενίσχυσης του πλάτους του σήματος σε μεγάλους χρόνους

Το επόμενο βήμα της επεξεργασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή φίλτρου ενίσχυσης στα δεδομένα. Η απόδοση του γεωραντάρ συνδέεται στενά με την εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία καθορίζει το βάθος της διασκόπησης. Καθώς ο χρόνος της καταγραφής αυξάνει, τα ανακλώμενα κύματα που καταγράφονται είναι εξασθενημένα, δηλαδή το πλάτος τους μειώνεται. Για την απεικόνιση των αδύνατων σημάτων και τον εντοπισμό ανακλάσεων που προέρχονται από μεγαλύτερα βάθη το σήμα καταγραφής πρέπει να ενισχυθεί (Πουλιούδης, 2001).

Η συνολική εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, επιμερίζεται σε τρεις διαφορετικούς όρους. Ένας όρος αφορά στη γεωμετρική διασπορά του κύματος, που διανύει από την απόσταση πηγής στη θέση παρατήρησης. Ο δεύτερος όρος, εκφράζει την απόσβεση και σχετίζεται με την “ποιότητα” και τη μικροσκοπική δομή του γεωυλικού. Ο τρίτος όρος, οφείλεται σε φαινόμενα περίθλασης ή / και ανάκλασης της ακτινοβολίας, λόγω ετερογενειών και ασυνεχειών των εδαφικών σχηματισμών (Hamdan, 2002).

Η πιο σημαντική ιδιότητα των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζει ιδιαίτερα την εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Όσο πιο αγωγίμο είναι το μέσο διάδοσης, τόσο πιο μεγάλη είναι η εξασθένηση (Πουλιούδης, 2001). Η ηλεκτρομαγνητική εξασθένηση έχει τις ακόλουθες συνέπειες:

α) Την μείωση του πλάτους. Το πλάτος του κύματος A μειώνεται από την αρχική τιμή του A_0 , ως αποτέλεσμα της εξασθένησης, καθώς έχει διανύσει μήκος x στο μέσο διάδοσης:

$$A = A_0 e^{-ax}$$

β) Την μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας. Η κεντρική συχνότητα του φάσματος της ακτινοβολίας που λαμβάνει η κεραία του δέκτη είναι χαμηλότερη από την κεντρική συχνότητα εκπομπής.

γ) Το μικρότερο βάθος διασκόπησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένιση τόσο μικρότερο θα είναι το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Μία εμπειρική σχέση, που συνδέει το μέγιστο βάθος διείσδυσης $d_{\max}$ με τον συντελεστή εξασθένισης α (dB/m) είναι:

$$d_{\max} < \frac{30}{\alpha}$$

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ενίσχυσης, τρεις από τους οποίους είναι: AGC (Automatic Gain Control), SEC (Spreading and Exponential Compensation), ενίσχυση σήματος (Envelope Gain).

Σκοπός της ενίσχυσης AGC είναι η ισοστάθμιση όλων των σημάτων κάθε πλάτους. Η ενίσχυση του σήματος πραγματοποιείται σε κάθε σημείο του ίχνους χωριστά. Για τον σκοπό αυτό θεωρείται παράθυρο επί του ίχνους με κέντρο το σημείο ενίσχυσης και εύρος (window width), το οποίο ορίζεται από τον χρήστη. Στο παράθυρο αυτό υπολογίζεται η μέση τιμή του σήματος λαμβάνοντας υπόψη τα μισά σημεία πριν και τα άλλα μισά μετά το κεντρικό σημείο του παραθύρου. Ακολούθως υπολογίζεται η ενίσχυση, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την μέση ενέργεια του σήματος. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται σε όλα τα σημεία του ίχνους.

Η ενίσχυση SEC αποτελεί σύνθεση γραμμικής και εκθετικής ενίσχυσης που εξαρτάται από τον χρόνο. Ο σκοπός της ενίσχυσης αυτής είναι η αναπλήρωση της ενέργειας των σημάτων από απώλειες που οφείλονται στην γεωμετρική διασπορά και την εκθετική εξασθένιση της ενέργειας των κυμάτων. Η ενίσχυση SEC μέχρι να προσεγγίσει την μέγιστη τιμή της πραγματοποιείται με εκθετικούς ρυθμούς, ενώ στη συνέχεια γραμμικά. Η μέγιστη ενίσχυση προσδιορίζεται από τους δύο τύπους περιορισμού της ενίσχυσης όπως και στην ενίσχυση AGC.

Για την αναπλήρωση της ενέργειας του σήματος λόγω διασποράς, χρησιμοποιείται και η ενίσχυση EG, κατά την οποία υπολογίζεται το μέσο πλάτος του μετασχηματισμού Hilbert του σήματος σε χρονικά παράθυρα αυτού και η υπολογιζόμενη τιμή αντιστοιχείται στο μέσο του κάθε χρονικού παραθύρου. Η μέθοδος ενίσχυσης EG είναι παρόμοια με την μέθοδο AGC, με την διαφορά ότι η πρώτη εφαρμόζεται μετά τον μετασχηματισμό Hilbert του σήματος.

Μερικές φορές είναι σημαντικό να τονιστεί η οριζόντια εξάπλωση κάποιου γεωλογικού σχηματισμού εις βάρος της ακρίβειας. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζεται ο αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (AGC). Εναλλακτικά, εφαρμόζεται ενίσχυση που αντισταθμίζει τη γεωμετρική διασπορά του κύματος (SEC ή EG). Με αυτόν τον τρόπο συμπυκνώνεται το δυναμικό εύρος του παλμού δηλαδή μικραίνει ο λόγος της πιο ισχυρής προς την πιο ασθενή καταγραφή (Annan, 1999). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο ενίσχυσης SEC .

3.4.3 Χαρακτηριστικά Attributes

Ύστερα από την εφαρμογή μονοδιάστατων φίλτρων(φίλτρα τα οποία επενεργούν κατά τη μία διάσταση είτε αυτή είναι ο χρόνος, λαμβάνοντας υπόψη τις καταγραφές που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, είτε αυτή είναι η απόσταση, λαμβάνοντας υπόψη τις καταγραφές που ανήκουν σε διαφορετικά-γειτονικά ίχνη αλλά αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο) έγινε χρήση των φυσικών χαρακτηριστικών (Physical Attributes): (Σπανουδάκης 2002):

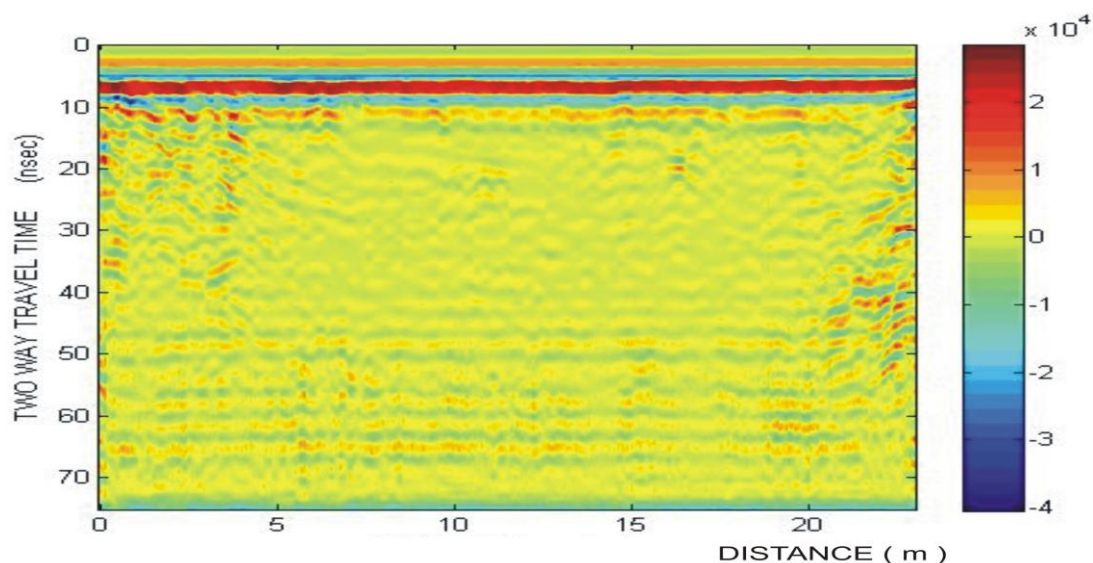
- **Στιγμιαίο πλάτος:** Το στιγμιαίο πλάτος $E(t)$ εκφράζει την ισχύ των ανακλώμενων κυμάτων που καταγράφονται σε χρόνο t .
- **Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB:** Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB δίνεται από τη σχέση $20\log E(t)$, όπου $E(t)$ αντιστοιχεί στο στιγμιαίο πλάτος.
- **Στιγμιαία φάση:** Το χαρακτηριστικό αυτό, χρησιμεύει στον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών στους ανακλαστήρες (π.χ. απευθείας κύμα), που καταγράφεται σε χρόνο t . Το φυσικό αυτό χαρακτηριστικό είναι ανεξάρτητο από το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- **Πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους:** Ο ρυθμός μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους $dE(t)/dt$ δείχνει την ισχύ των ανακλαστήρων και πιθανές περιοχές απορρόφησης της ενέργειας των κυμάτων . Επίσης σχετίζεται με ασυνέχειες όταν υπάρχει πλευρική διακύμανση στις τιμές του.
- **Αποτέλεσμα παραγωγής πραγματικών ιχνών και συνημίτονο φάσης:** (product of real trace and cosine of phase)
- **Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας:** ο στιγμιαίος δείκτης ποιότητας δίνεται από την σχέση :

$$q(t) = \frac{-\pi\omega(t)}{2\pi\sigma_f^2} = \frac{\omega(t)}{2\sigma_f^2}$$

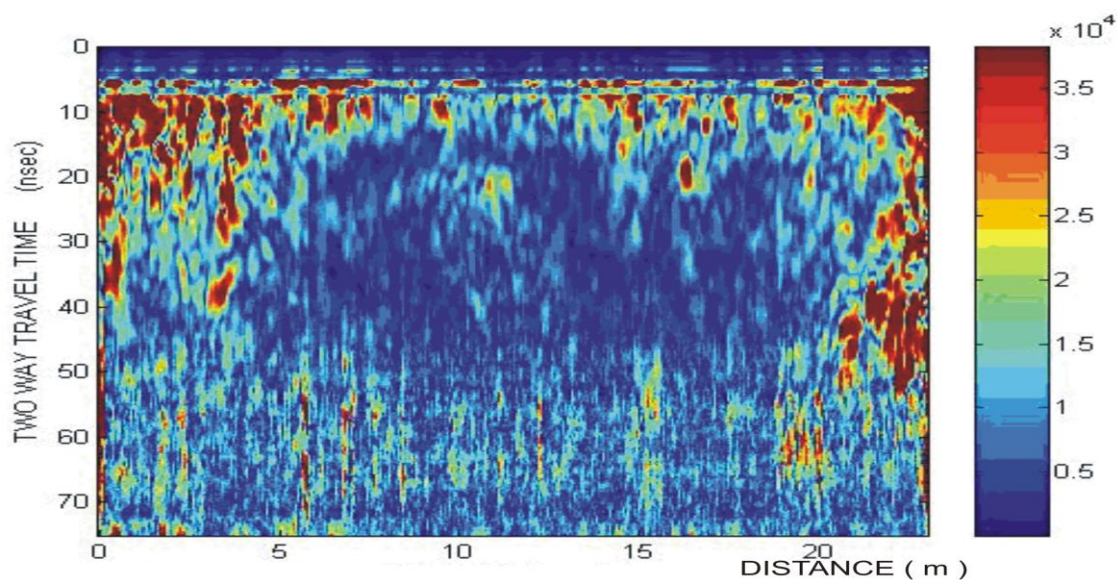
- **Στιγμιαίο φασματικό εύρος:** Το στιγμιαίο φασματικό εύρος δίδεται από σχέση:

$$\sigma_f^2 = \frac{\frac{dE(t)}{dt}}{2\pi E(t)}$$

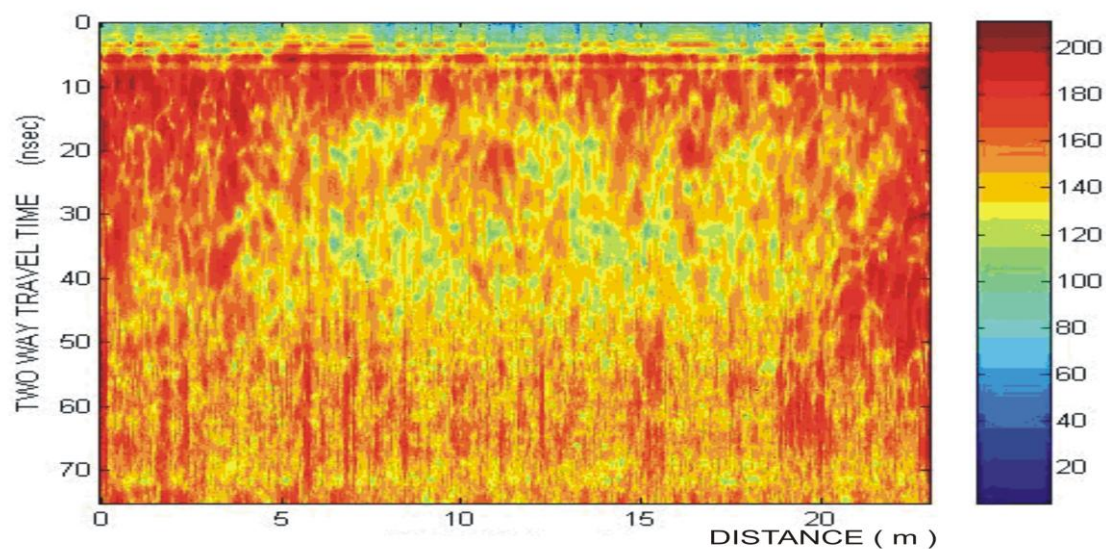
Από τη σχέση αυτή μπορεί να υπολογιστεί η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του στιγμιαίου πλάτους και έχει σαν μονάδα μέτρησης την οκτάβα.



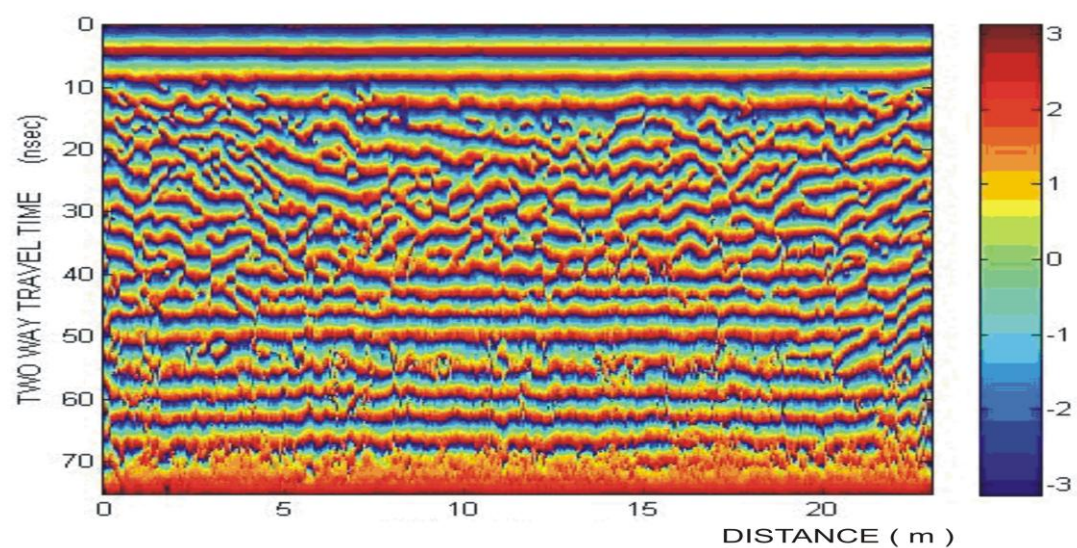
Σχήμα 3.8: Τομή γεωραντάρ με εκθετική ενίσχυση των δεδομένων (Sec), (γραμμή μελέτης 1,5m), όπου αναδεικνύονται ανακλώμενα κύματα με χρόνο διαδρομής (διπλό χρόνο) μέχρι 60ns.



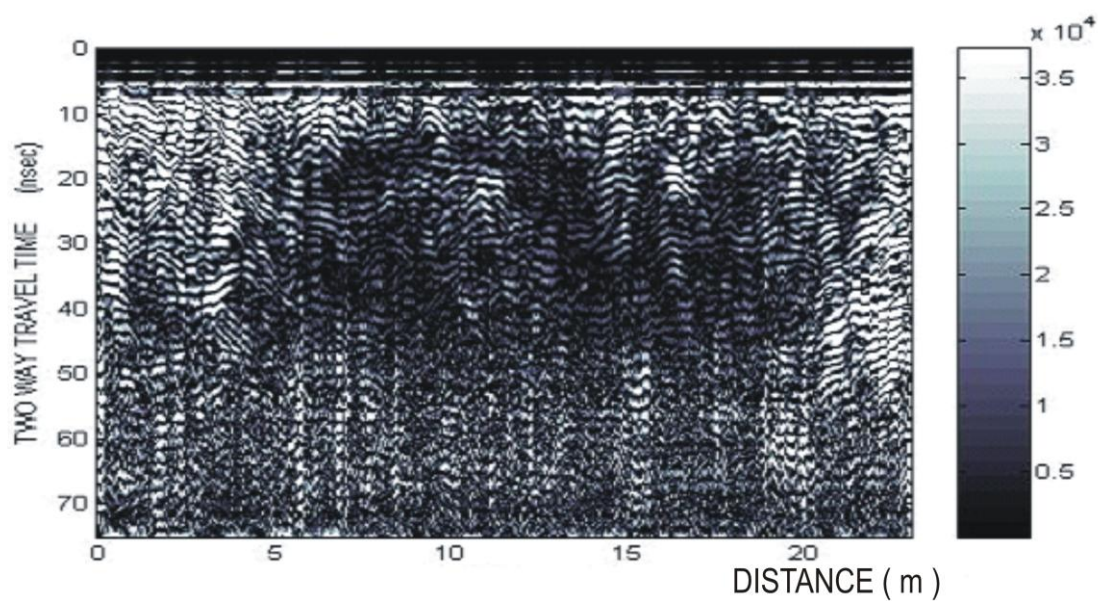
Σχήμα 3.9: Στιγμιαίο πλάτος τομής γεωραντάρ (instantaneous envelope, γραμμή μελέτης 1,5m).



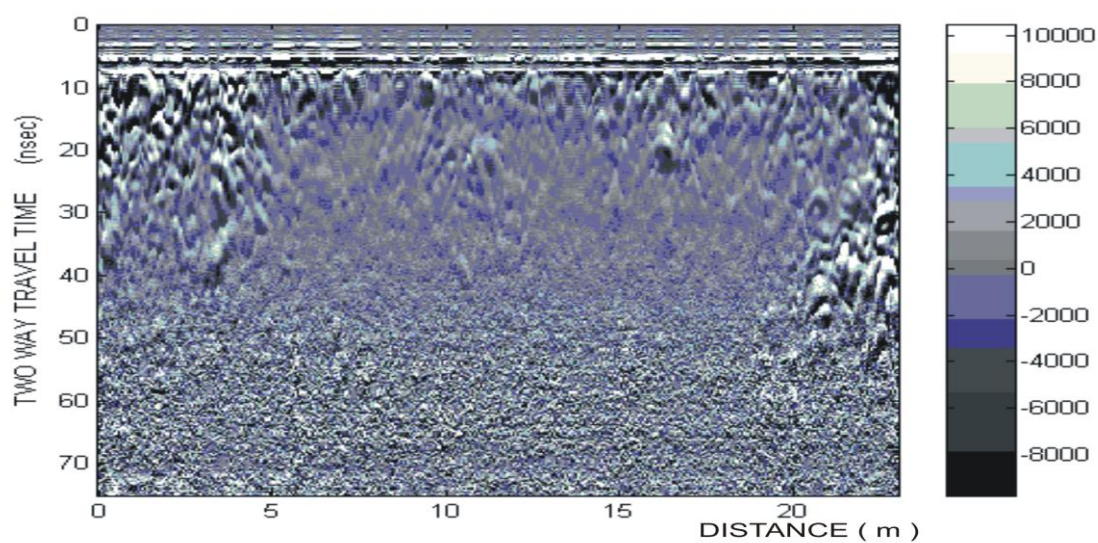
Σχήμα 3.10: Στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB τομής γεωραντάρ (dB instantaneous envelope, γραμμή μελέτης 1,5m).



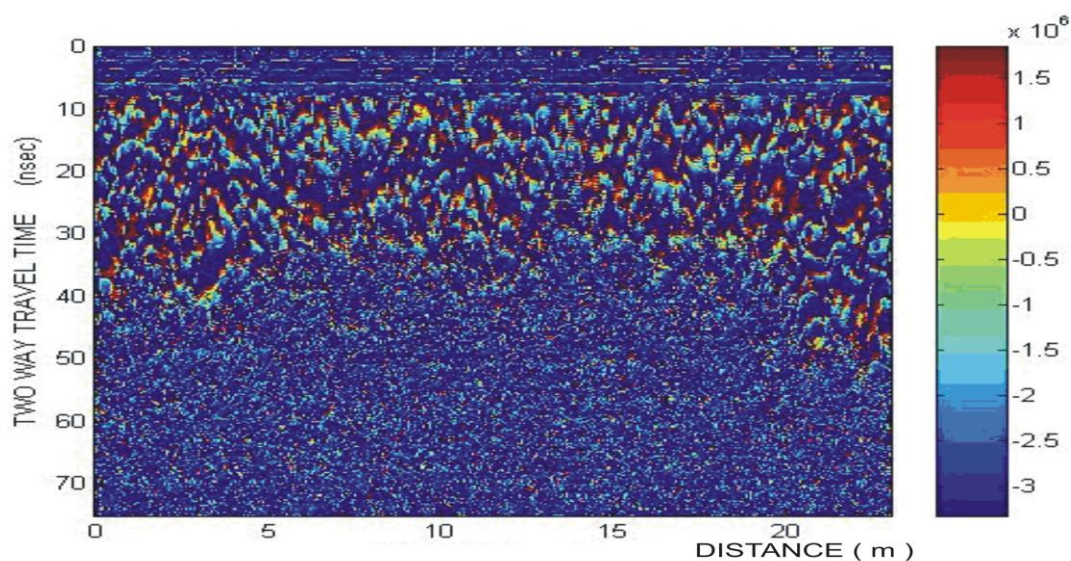
Σχήμα 3.11: Στιγμιαία φάση (γραμμή μελέτης στο 1,5m).



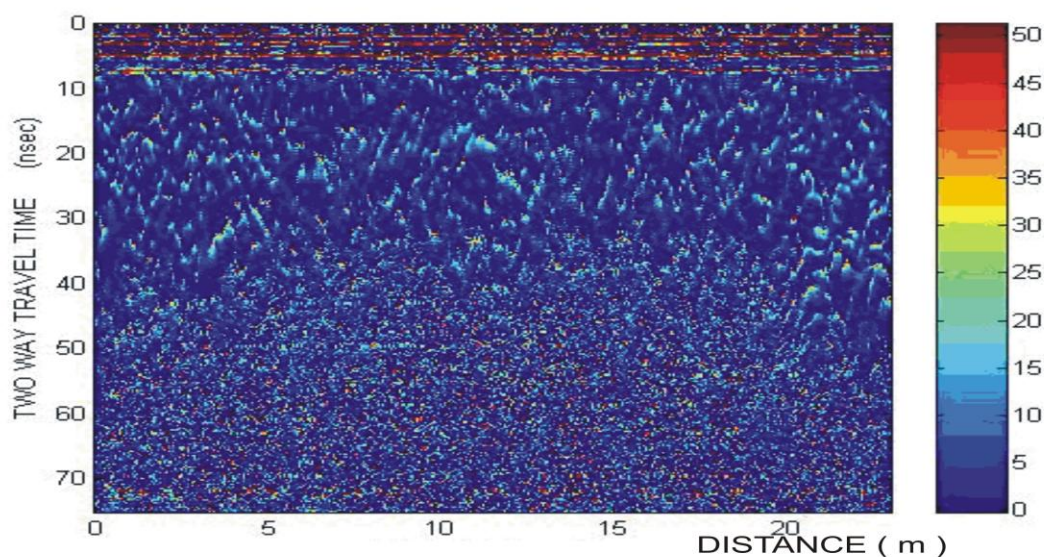
Σχήμα 3.12: Αποτέλεσμα παραγωγής πραγματικών ιχνών και συνημίτονο φάσης (γραμμή μελέτης στο 1,5m).



Σχήμα 3.13: Πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους (γραμμή μελέτης στο 1,5m).



Σχήμα 3.14: Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας (γραμμή μελέτης στο 1,5m).

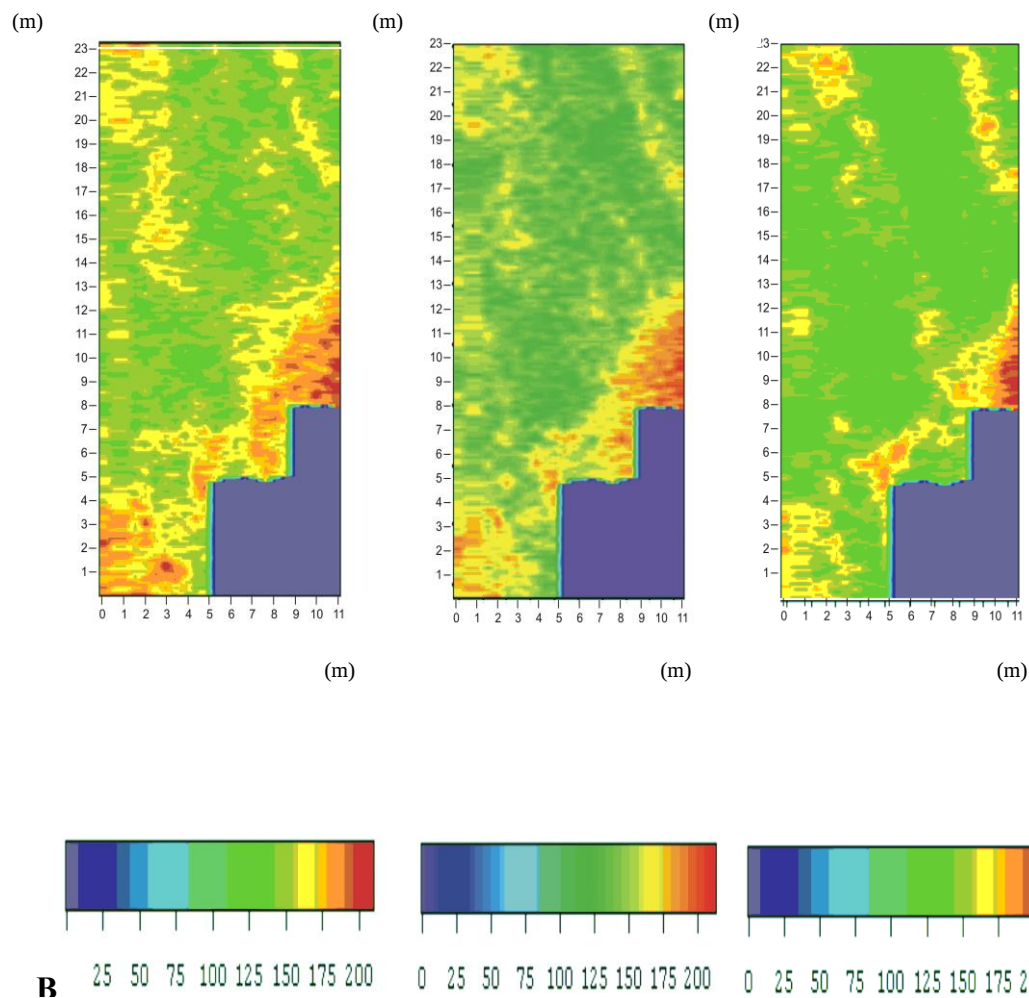


Σχήμα 3.15: Στιγμιαίο φασματικό εύρος (γραμμή μελέτης στο 1,5m).

Έγινε επιλογή ορισμένων Physical Attributes (στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db, στιγμιαία φάση και πρώτη παράγωγο του στιγμιαίου πλάτους) για τη δημιουργία οριζόντιων τομών, τα οποία έδειξαν καλύτερα αποτελέσματα.

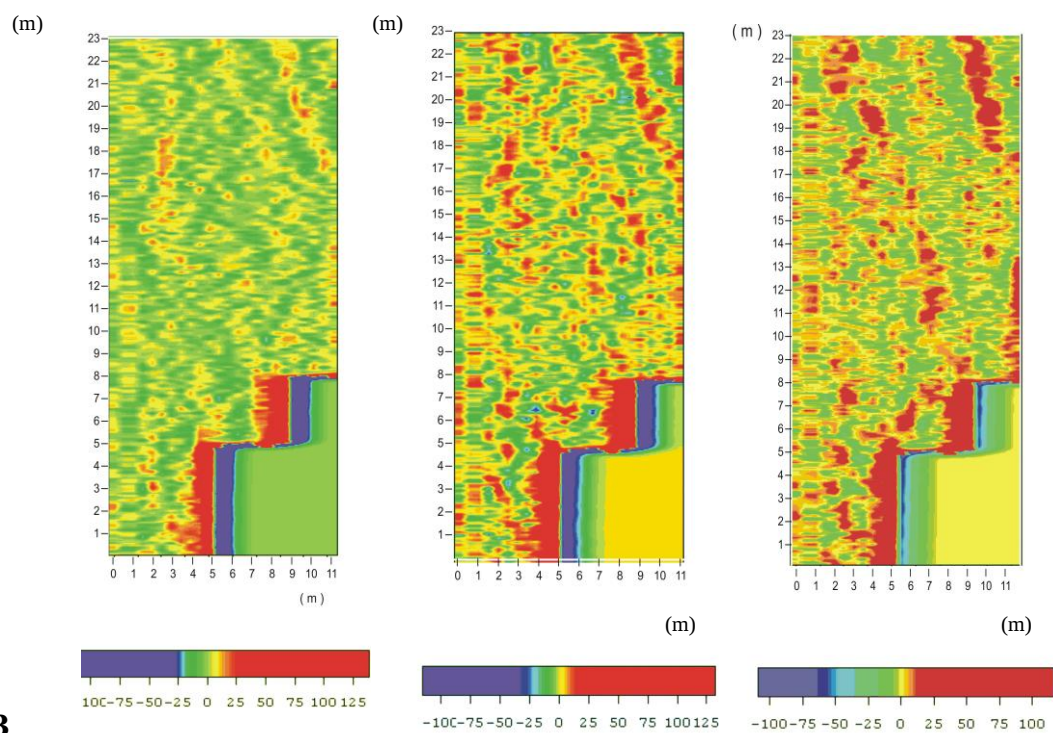
3.4.4 Δημιουργία οριζόντιων τομών

Δημιουργήθηκε αλγόριθμος στο MATLAB για τη δημιουργία οριζόντιων τομών των επεξεργασμένων μετρήσεων στο GPR PRO. Οριζόντιες τομές κατασκευάστηκαν για το μονοδιάστατο φίλτρο SEC και για τα επιλεχθέντα Physical Attributes.



Σχήμα 3.16: οριζόντιες σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομές γεωραντάρ σε βάθη 0.56m, 0.76m και 1,20m αντίστοιχα.

Στη συνέχεια η μέθοδος ανάδειξης τοπικών ανωμαλιών μέσω εξομάλυνσης που αναφέρθηκε πιο πάνω εφαρμόστηκε και στις οριζόντιες τομές του γεωραντάρ. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η επιλογή των 6 επαναλήψεων, μετά από δοκιμές, γιατί κρίθηκε η καταλληλότερη.



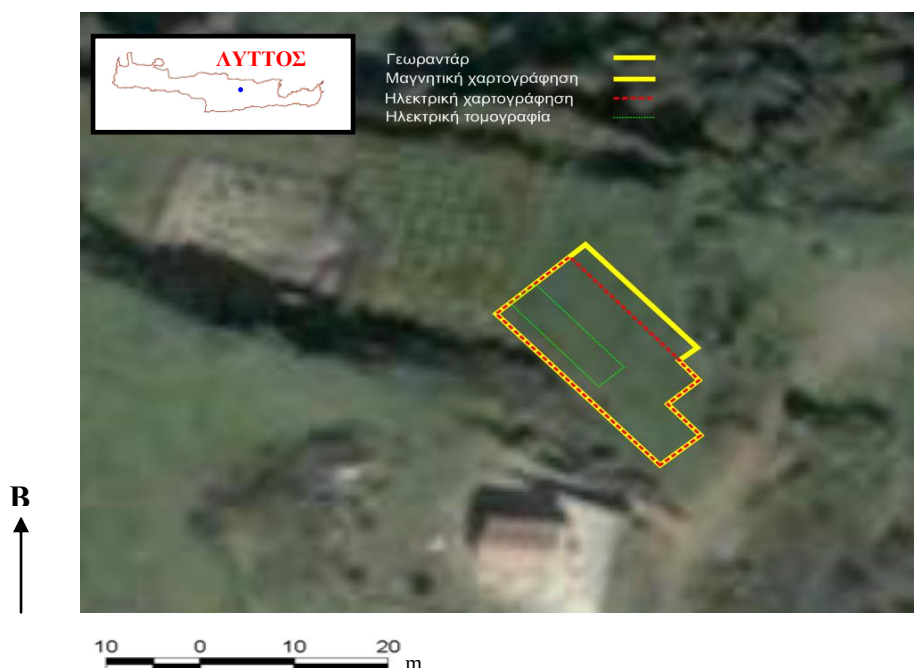
Σχήμα 3.17: οριζόντιες σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομές γεωραντάρ σε βάθος 0.56m, 0.76m και 1,20m αντίστοιχα (μετά από αφαίρεση κινητού μέσου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Εισαγωγή

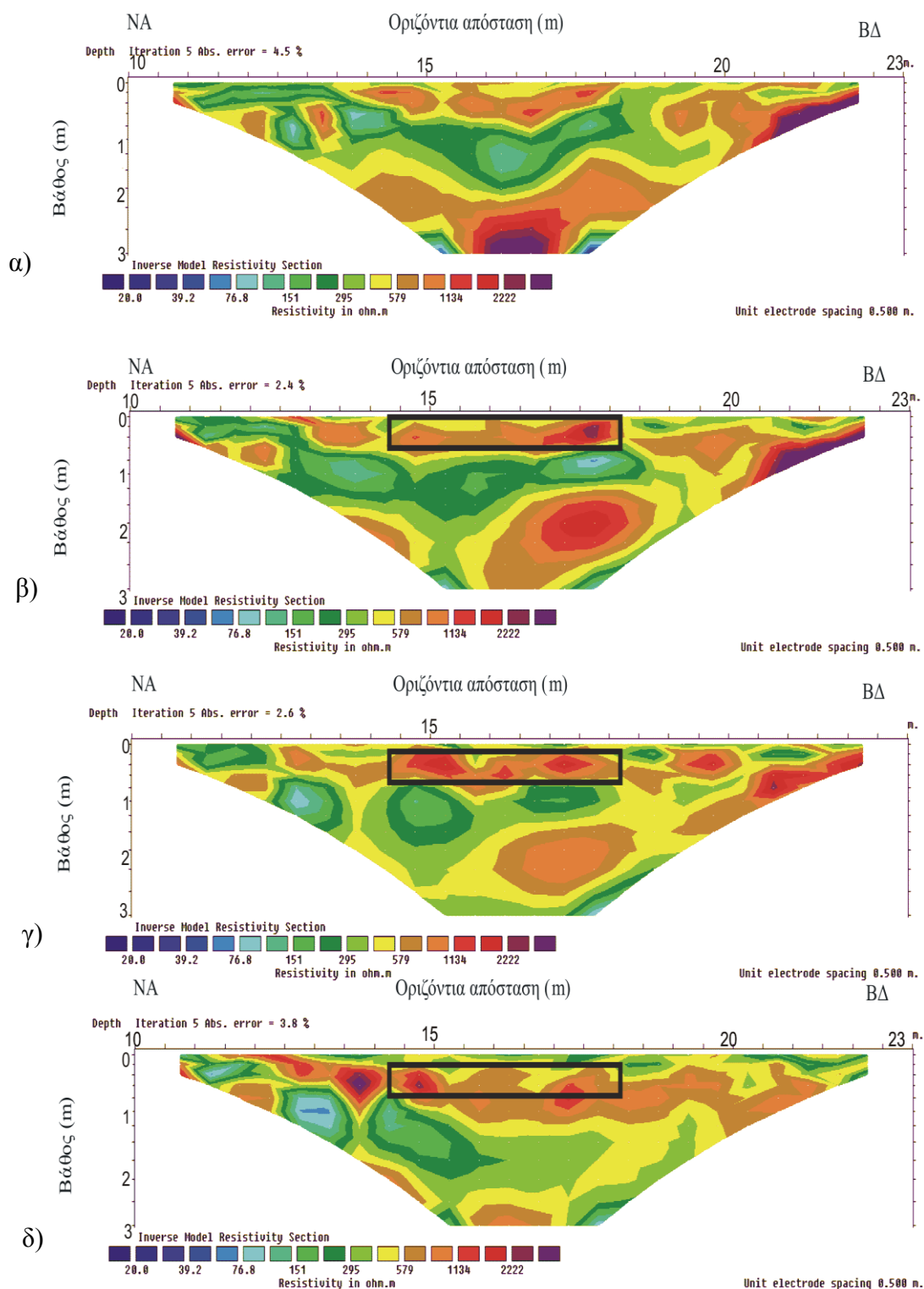
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η συνδυαστική ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων μετά από επεξεργασία. Η ερμηνεία επικεντρώθηκε στις περιοχές που έχουν διασκοπηθεί με περισσότερες από μία γεωφυσικές μεθόδους γιατί αυτό επιτρέπει την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων, αφού η κάθε μέθοδος είναι ευαίσθητη σε διαφορετικές ιδιότητες του υπεδάφους.



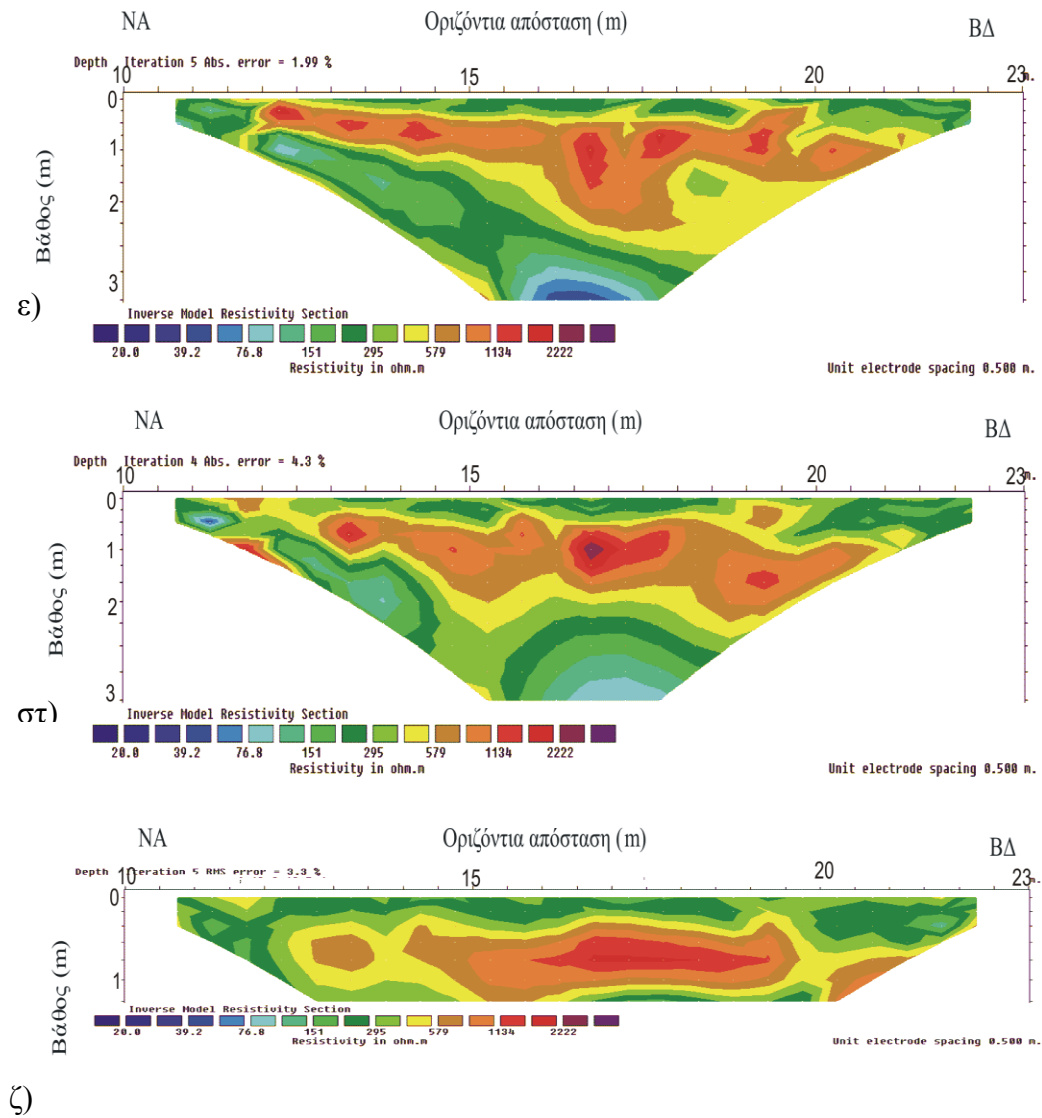
Σχήμα 4.1: Κανάβος πραγματοποίησης των μετρήσεων (google).

4.2 Αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας

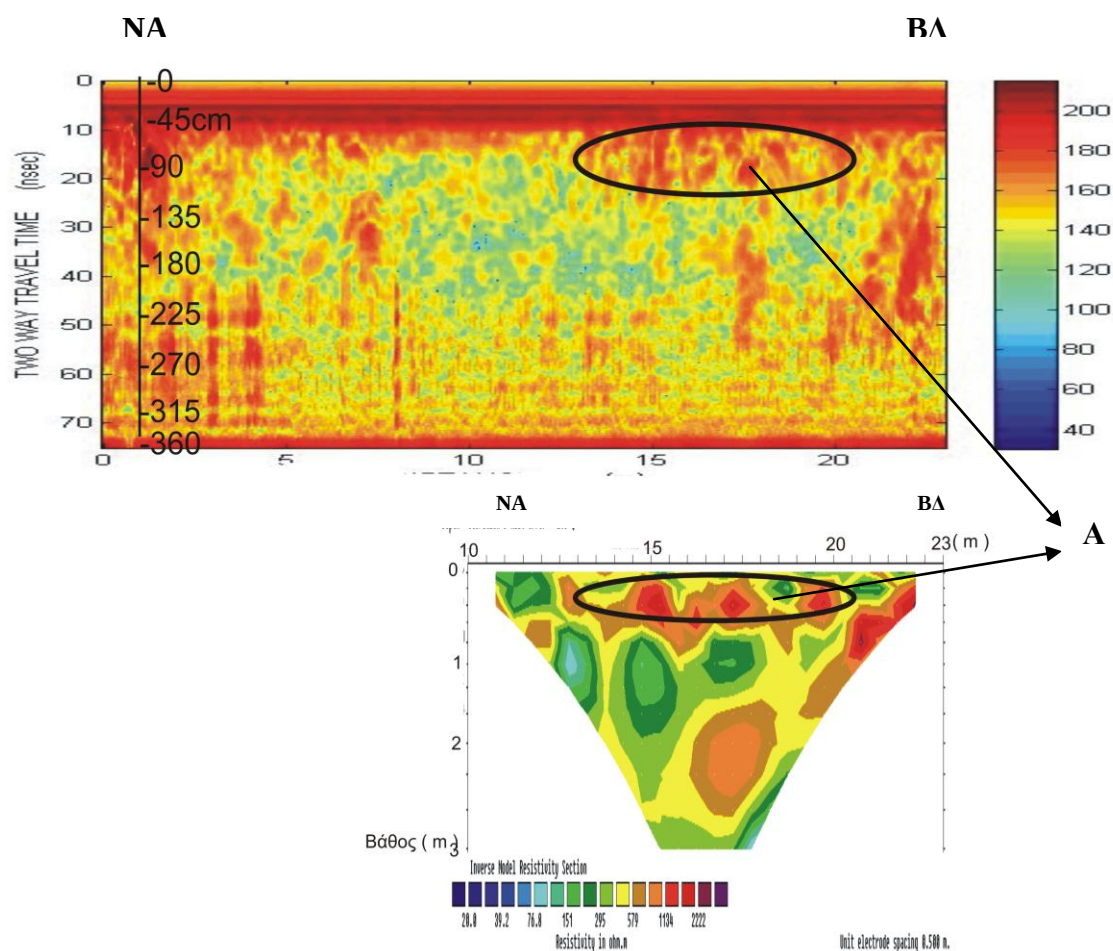
Σε τμήμα του κανάβου (Σχήμα 4.1), πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας σε παράλληλες γραμμές μελέτης (Σχήμα 3.7) που έχουν ισαπόσταση 0,5m μεταξύ τους. Η ισαπόσταση των ηλεκτροδίων ήταν επίσης 0,5m. Συνολικά καλύφθηκαν 39 τετραγωνικά μέτρα. Το μέγιστο βάθος διασκόπησης ήταν 3m.



Σχήμα 4.2: Γραμμές μελέτης ηλ.τομογραφίας στα α) 2m β) 2,5m γ) 3m δ) 3,5m από την αρχή.



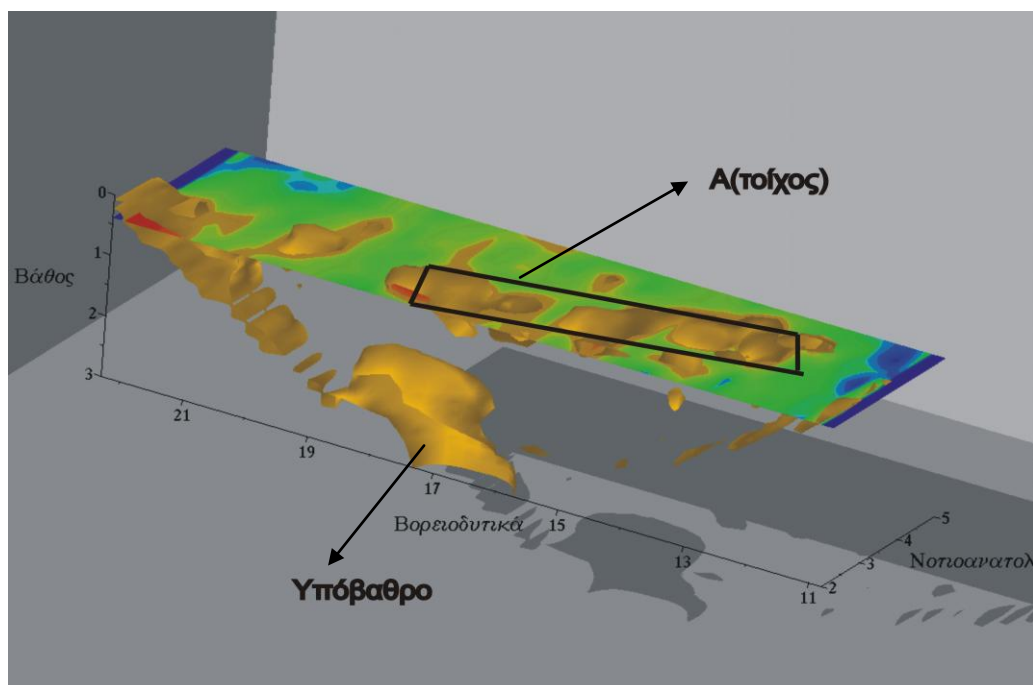
Σχήμα 4.2 (συνέχεια): Γραμμές μελέτης ηλ.τομογραφίας στα ε) 4m στ) 4,5m ζ) 5m από την αρχή.



Σχήμα 4.3 : Στιγμαίο πλάτος τομής γεωραντάρ και ηλ.τομογραφίας (γραμμή μελέτης στα 3m) .

Αξιόλογες ανωμαλίες παρουσιάζονται στις γεωηλεκτρικές τομές στα 2.5m, 3 m και 3.5m όπου διακρίνονται υψηλές τιμές της ηλ.αντίστασης (μαύρο πλαίσιο), σε βάθος μικρότερο του 1m (Σχήμα 4.2). Όπου εμφανίζονται υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στις ανωμαλίες της ηλεκτρικής τομογραφίας, εμφανίζονται μεγάλα πλάτη στις αντίστοιχες τομές γεωραντάρ. Παράδειγμα στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η τομή γεωραντάρ στη γραμμή μελέτης στα 3m στην οποία και εμφανίζονται ισχυρές ανακλάσεις (ανωμαλία A). Στην ίδια θέση η τομή της ηλεκτρικής τομογραφίας εμφανίζει υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

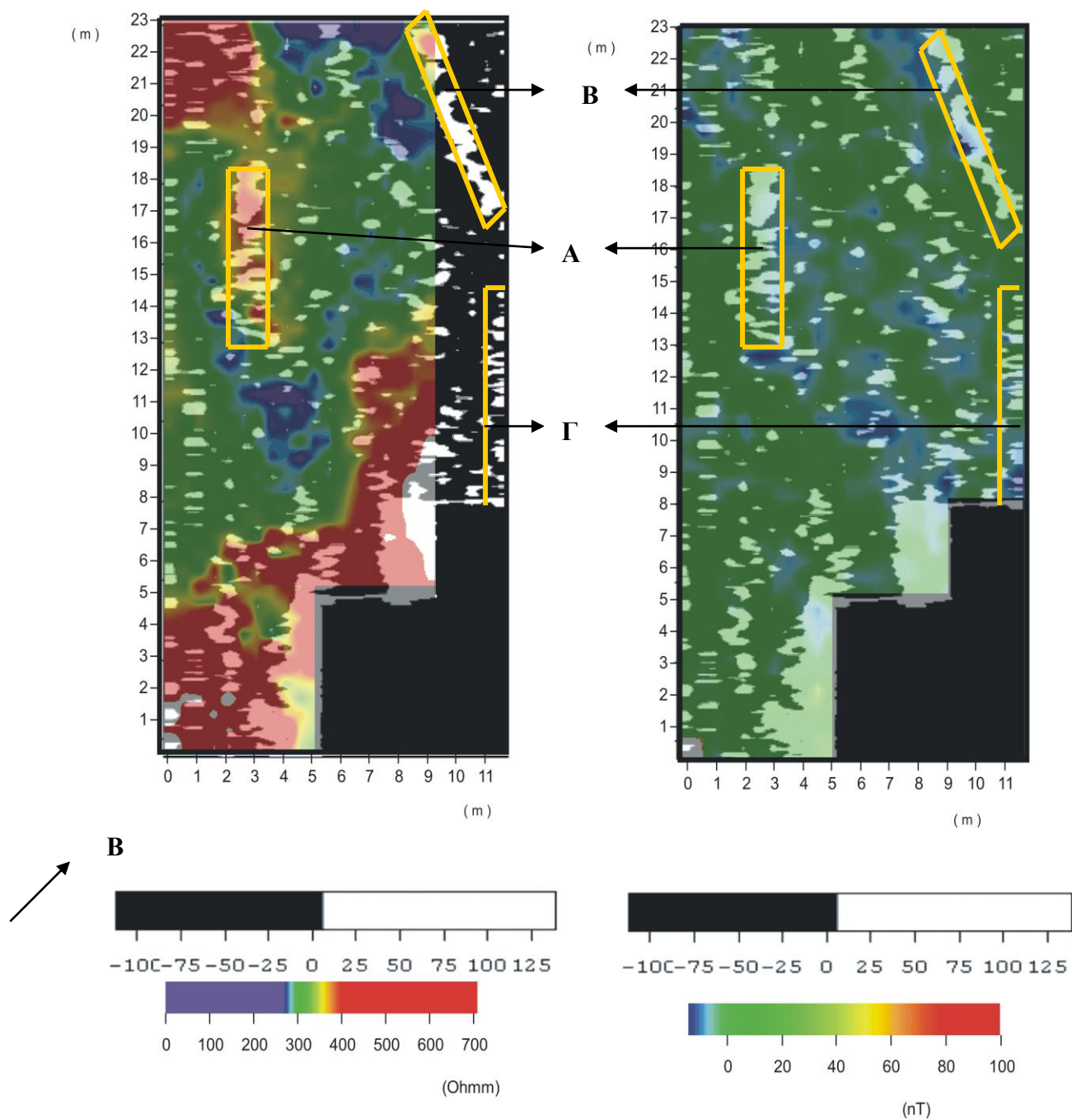
Από τις γεωηλεκτρικές τομές δημιουργήθηκε τρισδιάστατη εικόνα τις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 4.4). Οι υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε μεγαλύτερα βάθη οφείλονται στο σχιστολιθικό υπόβαθρο.



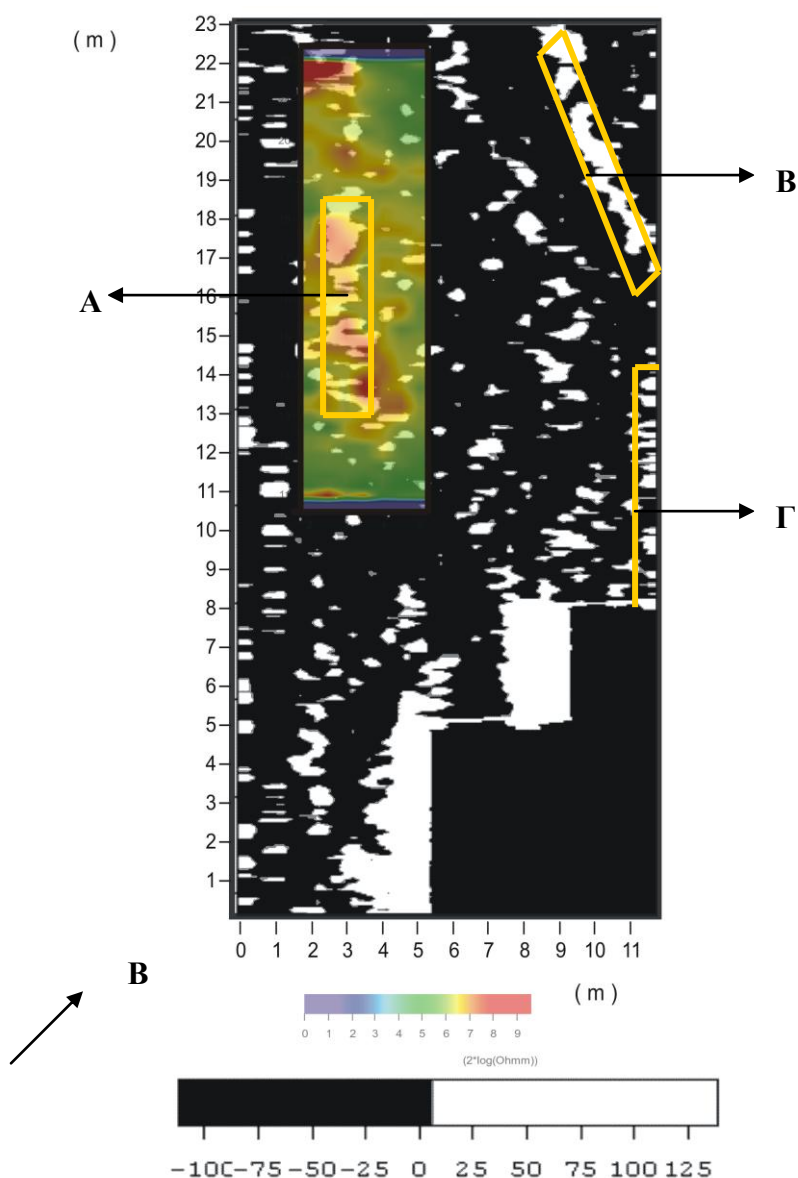
Σχήμα 4.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση των παράλληλων γεωηλεκτρικών τομών.

4.3 Συνδυαστική ερμηνεία των οριζόντιων τομών γεωραντάρ

Δημιουργήθηκαν οριζόντιες τομές ηλεκτρικής τομογραφίας σε βάθη 0.49m, 0.69m και 1.29m. Επίσης πραγματοποιήθηκε υπέρθεση μεταξύ των οριζόντιων τομών γεωραντάρ με τις υπόλοιπες γεωφυσικές μεθόδους που πραγματοποιήθηκαν στην Λύττο. Γίνεται σύγκριση μεταξύ τους στα διάφορα βάθη, όπου παρατηρείται αξιοσημείωτη συμφωνία για συγκεκριμένα τμήματα του κανάβου. Για πιο αποτελεσματική ερμηνεία των αποτελεσμάτων έγινε αλλαγή στην κλίμακα των οριζόντιων τομών γεωραντάρ σε άσπρο-μαύρο για να τονισθούν οι γραμμικές ανωμαλίες (άσπρο χρώμα) οι οποίες πιθανόν σχετίζονται με ανθρωπογενείς σχηματισμούς.



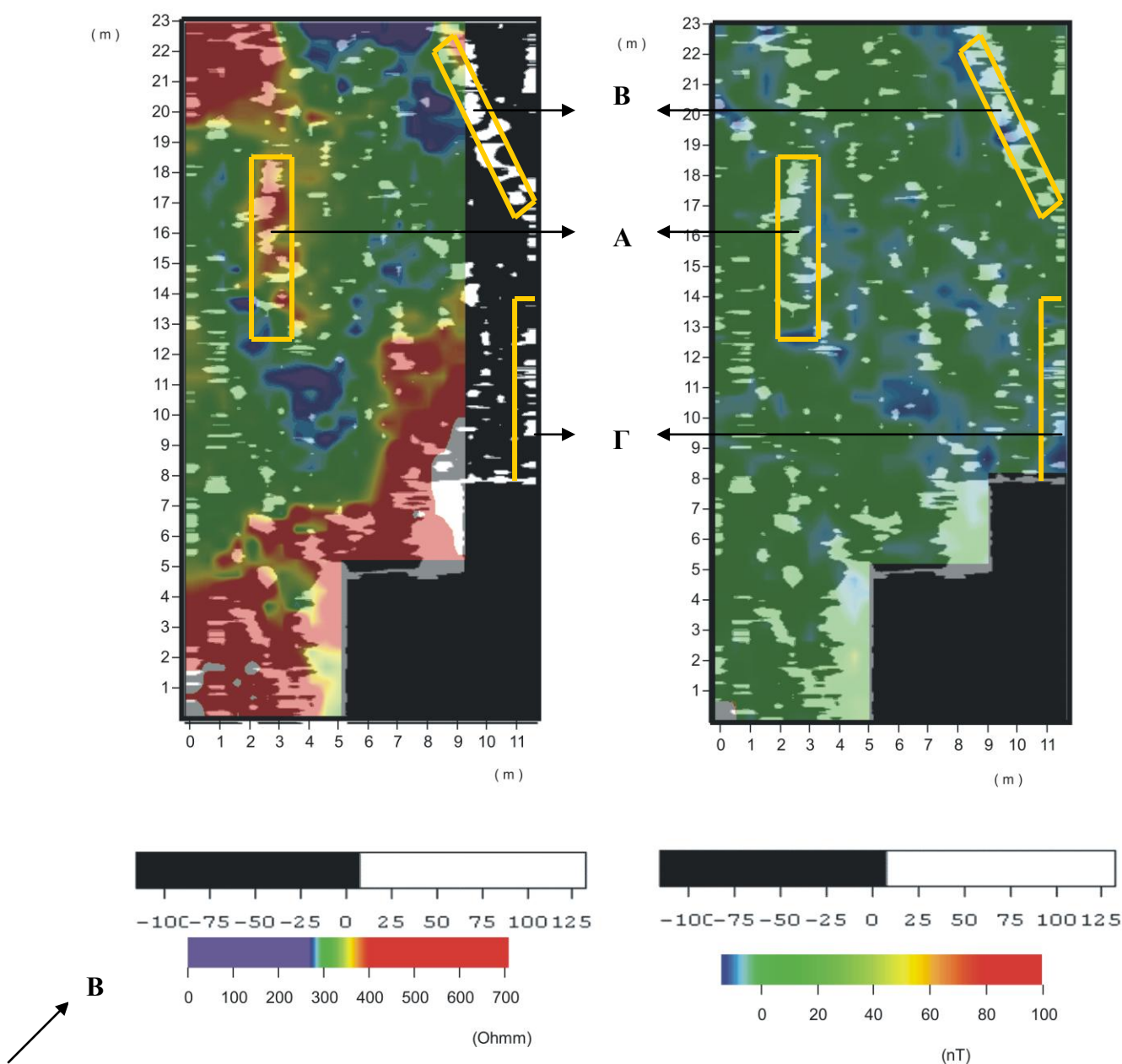
Σχήμα 4.5: Υπέρθυση οριζόντιας σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομής γεωραντάρ (μετά από αφαίρεση κινητού μέσου) στα 0,44-0,64m βάθος περίπου με χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (αριστερά) και χάρτη μαγνητικής βαθμίδας (δεξιά).



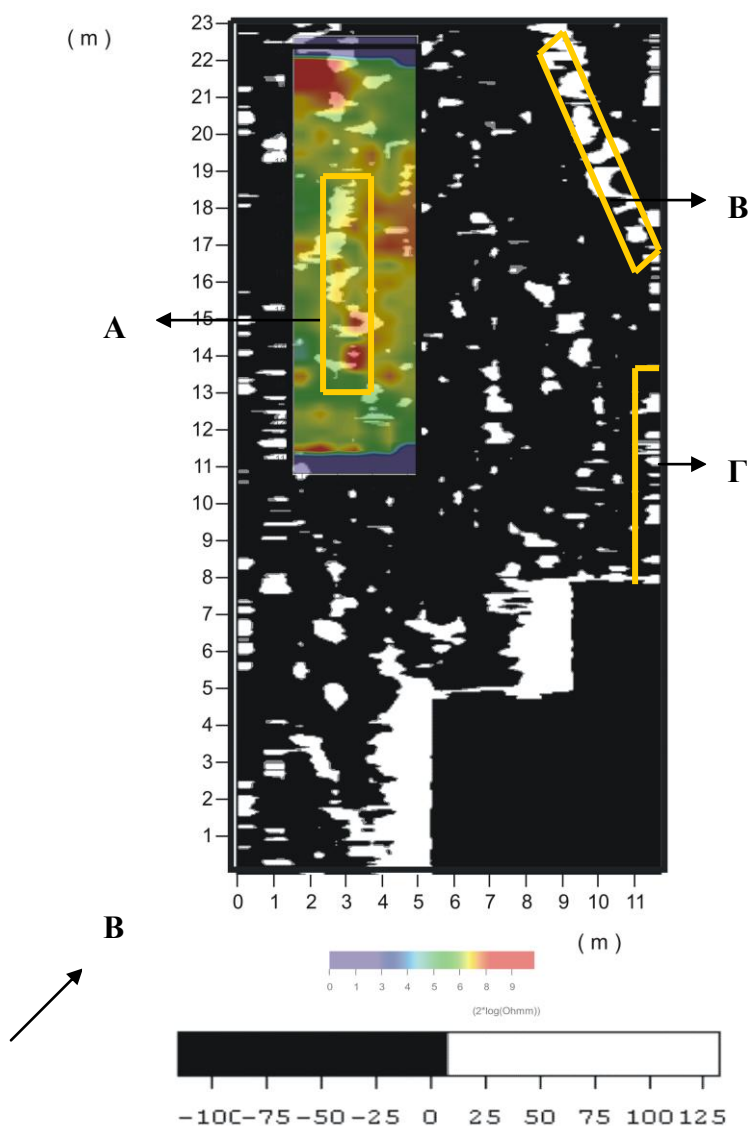
Σχήμα 4.6: Υπέρθεση οριζόντιας γεωηλεκτρικής τομής σε βάθος 0,49m με οριζόντια σε σιγμαίο πλάτος κλίμακας db τομής γεωραντάρ (μετά από αφαίρεση κινητού μέσου) στα 0.44 -0.64m βάθος περίπου.

Ανθρωπογενείς δομές αναμένεται να οριοθετούνται στο κόκκινο χρώμα (υψηλές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) στις ηλεκτρικές μεθόδους ενώ στην μαγνητική χαρτογράφηση αναμένονται οι δομές αυτές να οριοθετούνται από το μπλε χρώμα (χαμηλή μαγνήτιση). Στις οριζόντιες τομές γεωραντάρ οι ίδιες δομές αναμένεται να οριοθετούνται από το άσπρο χρώμα (Σχήμα 4.5). Διακρίνονται τρεις αξιόλογες γραμμικές ανωμαλίες Α, Β και Γ (άσπρο χρώμα) σε βάθος 0,44-0,66m (Σχήμα 4.5 αριστερά). Η δομή Α φαίνεται να εντοπίζεται και από την ηλεκτρική χαρτογράφηση στην ίδια θέση (κόκκινο χρώμα), ενώ οι Β και Γ βρίσκονται εκτός των

ορίων κάλυψης με την συγκεκριμένη μέθοδο. Οι δομές A,B και Γ , ενώ εντοπίζονται με την μαγνητική χαρτογράφηση (Σχήμα 4.5 δεξιά ,μπλε χρώμα), φαίνονται μετατοπισμένες. Σε παρόμοιο βάθος (0,49m) δημιουργήθηκε οριζόντια τομή ηλεκτρικής τομογραφίας και έγινε υπέρθεση της με την αντίστοιχη σε βάθος τομή γεωραντάρ (Σχήμα 4.6). Τα μεγάλα πλάτη (ανωμαλία A, άσπρο χρώμα) περιγράφουν μέρος των αντίστοιχων ανωμαλιών στην ηλεκτρική τομογραφία (κόκκινο χρώμα) . Εντοπίζοντας την ανωμαλία A με όλες τις μεθόδους υποδεικνύεται ότι τα μεγάλα πλάτη των οριζόντιων τομών γεωραντάρ οφείλονται σε ανθρωπογενείς δομές.

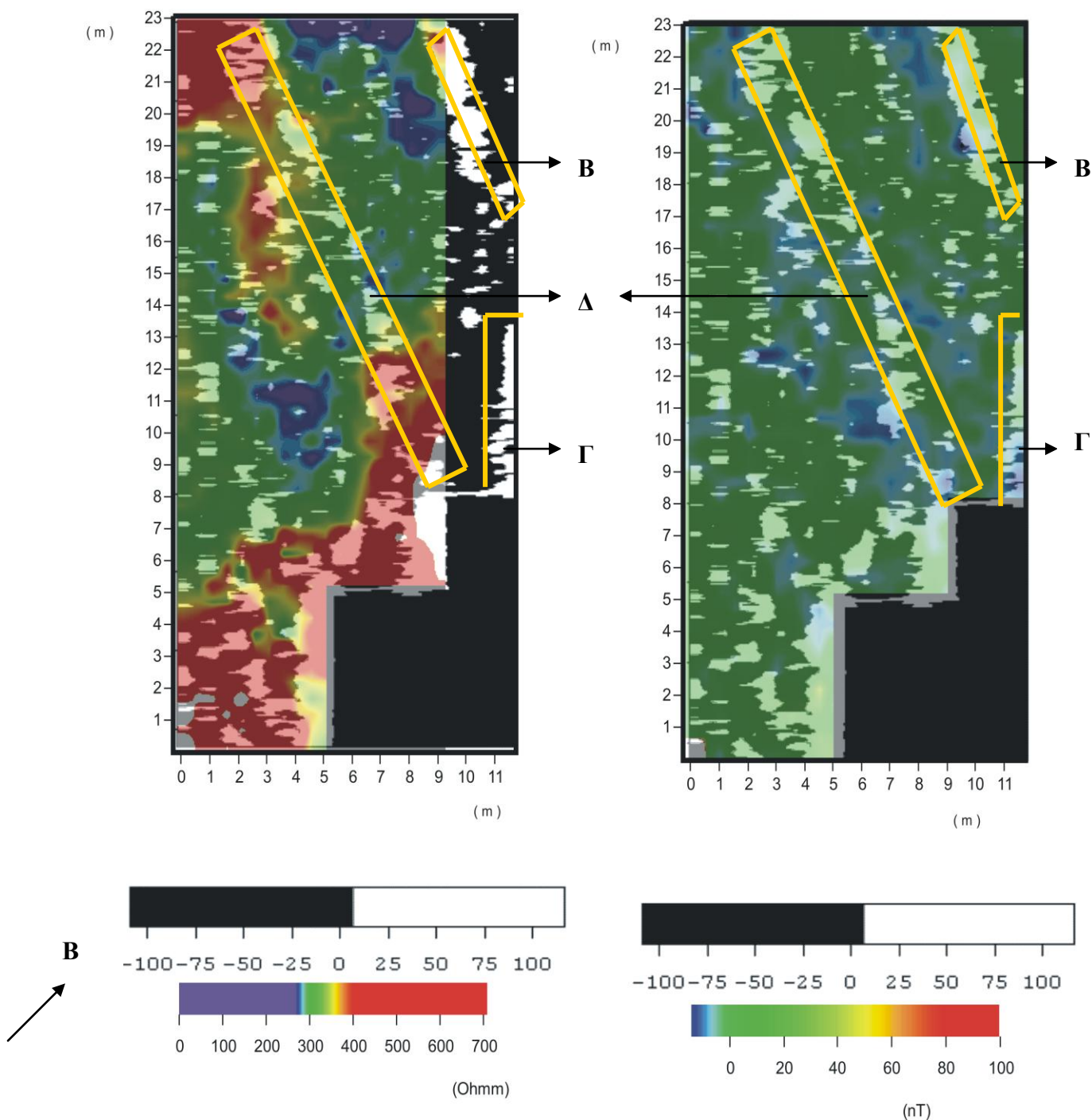


Σχήμα 4.7: Υπέρθεση οριζόντιας σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομής γεωραντάρ (μετά από αφαίρεση κινητού μέσου) στα 0.66-0.86m βάθος περίπου με χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (αριστερά) και χάρτη μαγνητικής βαθμίδας (δεξιά) .

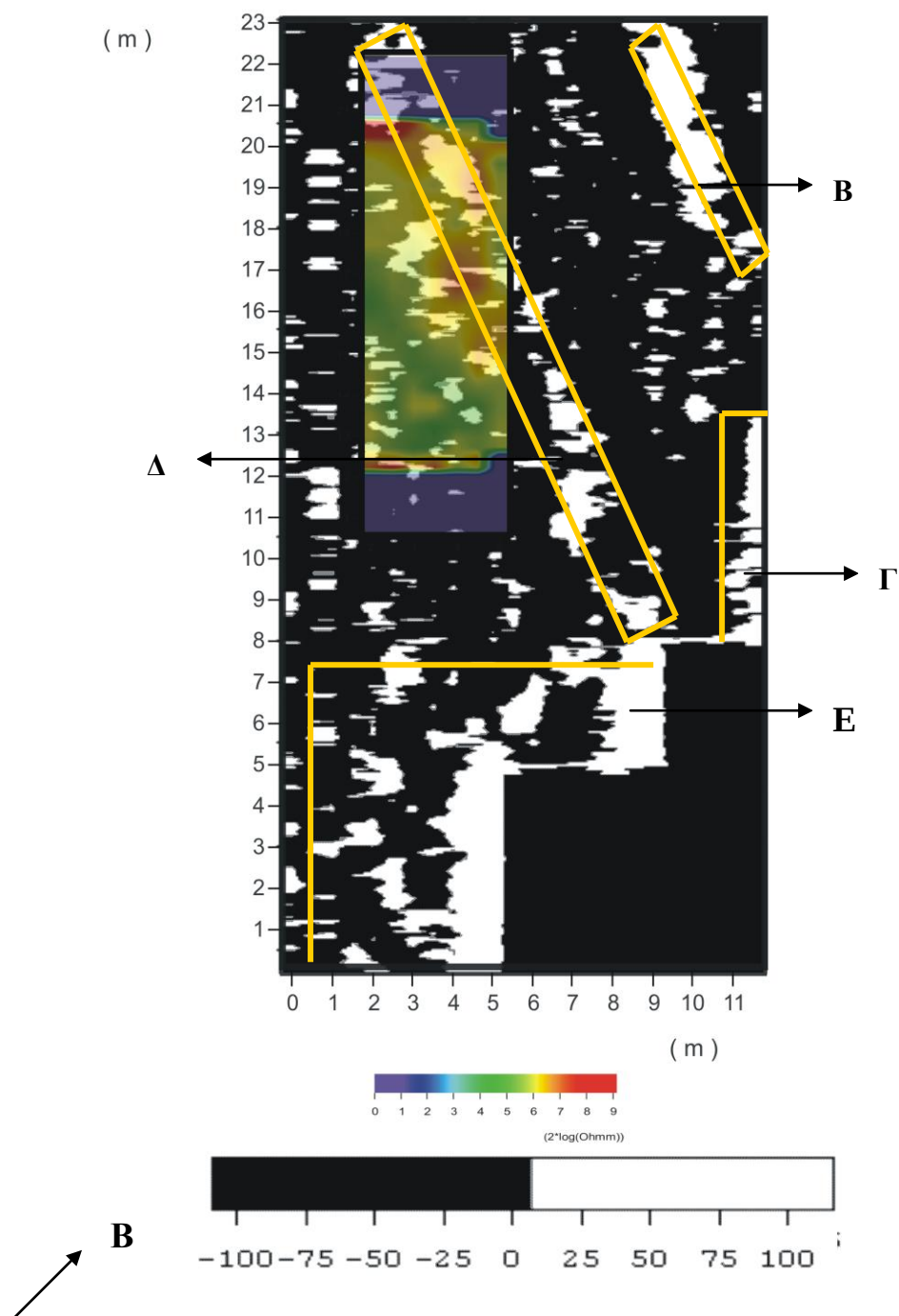


Σχήμα 4.8: Υπέρθεση οριζόντιας γεωηλεκτρικής τομής σε βάθος 0.69m με οριζόντια σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομής γεωραντάρ (μετά από αφαίρεση κινητού μέσου) στα 0.66-0.86m βάθος περίπου.

Σε μεγαλύτερα βάθη (0,66-0,86m) η οριζόντια τομή γεωραντάρ φαίνεται να περιγράφει μέρος της ανωμαλίας A (Σχήμα 4.7, άσπρο χρώμα), ενώ και οι τρεις ανωμαλίες A,B και Γ συμπίπτουν με την αντίστοιχη ανωμαλία χαμηλής μαγνήτισης (Σχήμα 4.7, δεξιά). Υπερθέτοντας την αντίστοιχη οριζόντια τομή ηλ.τομογραφίας (0,69m βάθος) φαίνεται ότι τα μεγάλα πλάτη της οριζόντια τομής γεωραντάρ περιγράφουν μέρος της ανωμαλίας A.



Σχήμα 4.9 : Υπέρθεση οριζόντιας σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομής γεωραντάρ (μετά από αφαίρεση κινητού μέσου) στα 1.10-1.30m βάθος περίπου με χάρτη φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (αριστερά) και χάρτη μαγνητικής βαθμίδας (δεξιά).

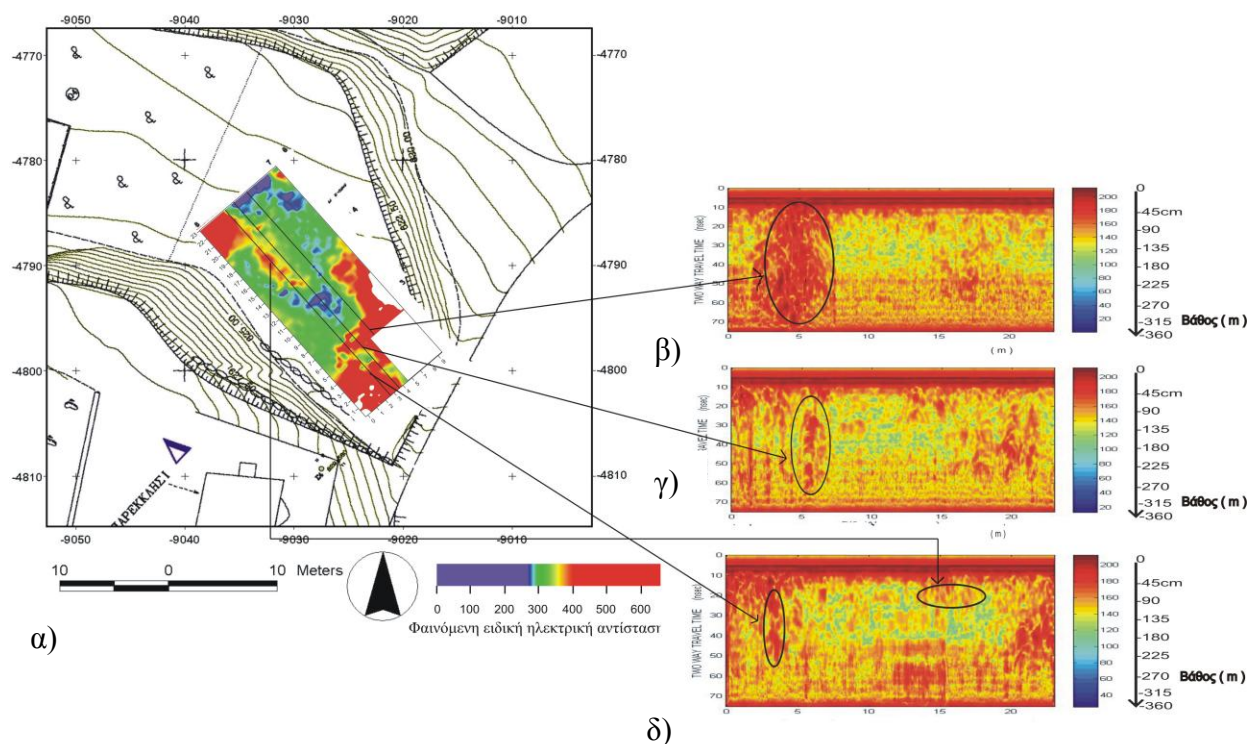


Σχήμα 4.10: Υπέρθεση οριζόντιας γεωηλεκτρικής τομής σε βάθος 1,29m με οριζόντια σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db τομής γεωραντάρ (μετά από αφαίρεση κινητού μέσου) στα 1.10-1.30m βάθος περίπου.

Βαθύτερα (1,10-1,30m) τα μεγάλα πλάτη των οριζόντιων τομών γεωραντάρ περιγράφουν μια μεγάλη κατά μήκος γραμμική ανωμαλία (ανωμαλία Δ) η οποία δεν διακρίνεται στην ηλεκτρική χαρτογράφηση (Σχήμα 4.9,αριστερά). Ένα μέρος της ανωμαλίας Δ διακρίνεται μόνο στον μαγνητικό χάρτη (Σχήμα 4.9, δεξιά). Η

ανωμαλία Δ φαίνεται να ενώνεται με την ανωμαλία Α σε αυτό το βάθος και μέρος της διακρίνεται και στην αντίστοιχη οριζόντια τομή ηλεκτρικής τομογραφίας (βάθος 1,29m) (Σχήμα 4.10). Στη βαθύτερη οριζόντια τομή γεωραντάρ φαίνεται να περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η πάνω επιφάνεια του υποβάθρου (περιοχή Ε).

Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι ο μαγνητικός χάρτης (Σχήμα 4.9) συμπίπτει περισσότερο με τις ανωμαλίες στη βαθύτερη οριζόντια τομή γεωραντάρ.



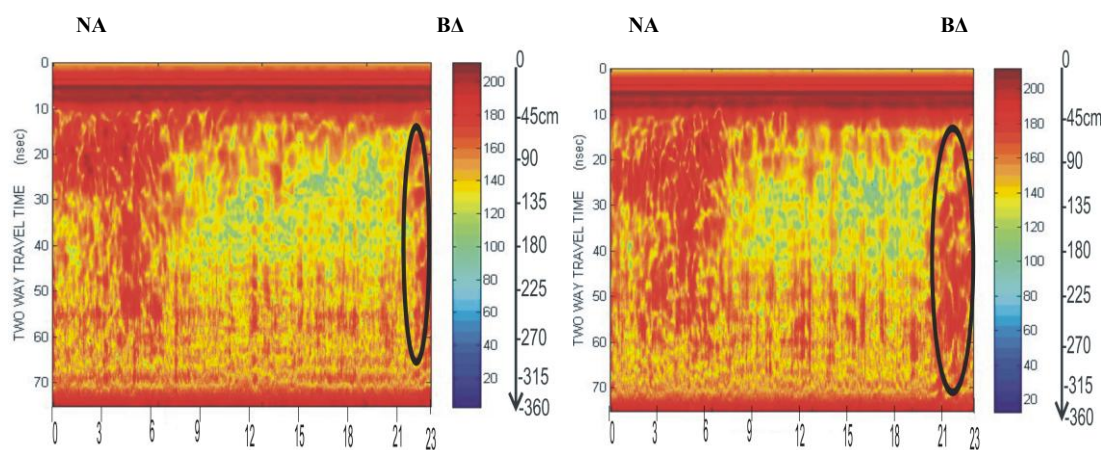
Σχήμα 4.11: α) χάρτης ηλ. χαρτογράφησης , στιγμιαίο πλάτος τομής γεωραντάρ στα β) 5m γ) 3,5m δ) 2,5m.

Συγκρίνοντας τις τομές του γεωραντάρ στις διάφορες γραμμές μελέτης με τον χάρτη της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης παρατηρούνται αυξημένα πλάτη Η/Μ κυμάτων (τομές γεωραντάρ) στις θέσεις όπου η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει αυξημένη τιμή. Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι τομές γεωραντάρ σε στιγμιαίο πλάτος στα 5m , 3.5 m και 2.5m όπου διακρίνονται περιθλώμενα κύματα (μαύρο πλαίσιο) στις θέσεις όπου η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει αυξημένη τιμή.

Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του γεωραντάρ για τα οποία υπάρχουν περισσότερες τομές και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανάλυση.

Στα σχήματα όπου έγινε υπέρθεση των οριζόντιων τομών γεωραντάρ με τις υπόλοιπες γεωφυσικές μεθόδους με μια πρώτη ματιά παρατηρείται πως οι περιοχές με άσπρο χρώμα υποδεικνύουν πιθανές θέσεις θαμμένων τοιχοδομών. Απο τις οριζόντιες τομές και λαμβάνοντας υπόψη τις τομές γεωραντάρ, οι οποίες επισυνάπτονται στο παράρτημα για κάθε γραμμή μελέτης χωριστά, εξάγονται τα αποτελέσματα που ακολουθούν.

Παρατηρούνται γραμμικές ανωμαλίες διεύθυνσεως Δ-Α. Παρατηρώντας τις τομές του γεωραντάρ στα 2m, 2.5m, 3m , 3.5m και τις οριζόντιες τομές γεωραντάρ στην ζώνη Α φαίνεται ανωμαλία η οποία σχετίζεται με ανακλάστηρα σε βάθος 1m (χρόνος καταγραφής 20ns).

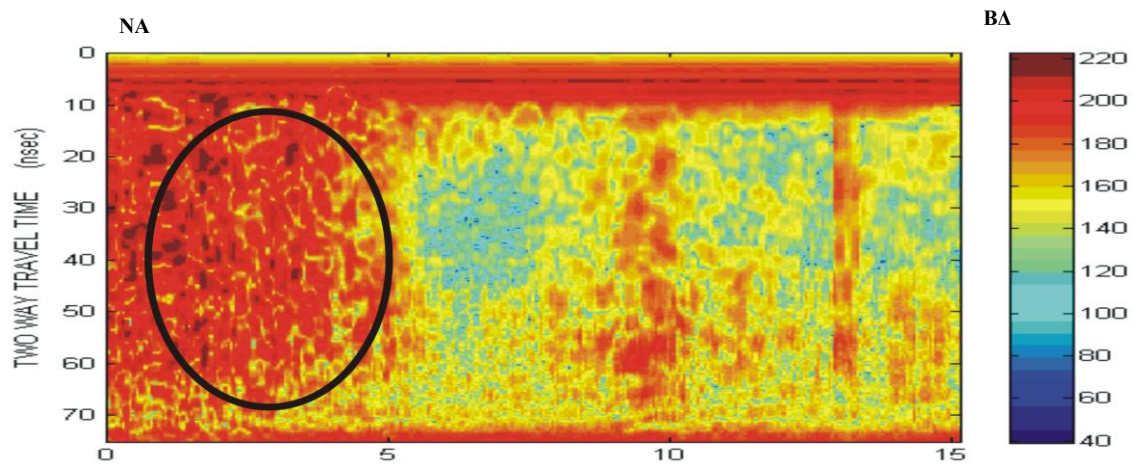


Σχήμα 4.12: Γραμμές μελέτης στα 9m και 9,5m.

Στις οριζόντιες τομές γεωραντάρ φαίνεται η ανωμαλία στη ζώνη Β όπου και στις αντίστοιχες τομές γεωραντάρ εμφανίζονται ανακλώμενα κύματα. Στο Σχήμα 4.12 φαίνονται οι γραμμές μελέτης στα 9m και 9,5m όπου εμφανίζονται ανακλώμενα κύματα σε χρόνο 60ns-65ns. Για ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων 0.11m/ns, το βάθος του ανακλαστήρα κυμένεται από 3.30m-3.50m με μήκος 5m και με διεύθυνση Δ-Α.

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται ανωμαλία στη ζώνη Δ η οποία είναι παράλληλη με την ανωμαλία στη ζώνη Β και έχει μήκος 15m . Έχει διεύθυνση Δ-Α. Στις αντίστοιχες

τομές γεωραντάρ εμφανίζονται ανακλώμενα κύματα σε βάθη που αρχίζουν στο 1m και φτάνουν μέχρι και τα 3,5m .



Σχήμα 4.13: Τομή γεωραντάρ στη γραμμή μελέτης στα 11,5m.

Στο Σχήμα 4.10 παρατηρείται ανωμαλία στη ζώνη Γ η οποία έχει μήκος 5m . Στην αντίστοιχη τομή γεωραντάρ (Σχήμα 4.13) εμφανίζονται ανακλώμενα κύματα σε βάθος μέχρι 3m.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα προκαταρκτικής γεωφυσικής έρευνας στην Αρχαία Λύττο. Αυτή η έρευνα συνδυάζει τόσο συμβατικές μεθόδους όπως η ηλεκτρική και η μαγνητική χαρτογράφηση όσο και η μέθοδος υψηλής ανάλυσης όπως το γεωραντάρ και η ηλεκτρική τομογραφία.

Η συνδυασμένη ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων υπέδειξε γραμμικές ανωμαλίες (Α, Β, Γ και Δ) που αποδίδονται σε αρχιτεκτονικά λείψανα, ιδιαίτερα, οι γραμμικές ανωμαλίες Δ και Β εμφανίζονται σε διεύθυνση Α-Δ που ταυτίζεται με αυτή των αρχιτεκτονικών λειψάνων του παρακείμενου βουλευτηρίου.

Η μέθοδος του γεωραντάρ αναδुकνεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις ανθρωπογενείς δομές οι οποίες εντοπίστηκαν με τις συμβατικές μεθόδους. Επιπρόσθετα και σε συνδυασμό με την γεωηλεκτρική τομογραφία εκτιμήθηκε και το βάθος στο οποίο βρίσκονται οι δομές που προκαλούν τις ανωμαλίες Α, Β, Γ και Δ.

Με βάση τα παραπάνω προτείνεται η γεωφυσική διασκόπηση της ευρύτερης περιοχής της Αρχαίας Λύττου με τη συνδυασμένη τόσο συμβατικών όσο και υψηλής ανάλυσης μεθόδων.

Ειδικότερα, η μεθοδολογία, όσον αφορά την μελλοντική εκτεταμένη γεωφυσική έρευνα, να περιλαμβάνει αρχικά μαγνητική χαρτογράφηση. Σε επόμενο στάδιο θα εφαρμοστεί διασκόπηση με γεωραντάρ, σε περιοχές που θα υποδείξει η μαγνητική χαρτογράφηση. Ηλεκτρική χαρτογράφηση θα εφαρμοστεί σε πολύ περιορισμένη έκταση, λόγω του ότι είναι χρονοβόρα. Τέλος, θα εφαρμοστεί ηλεκτρική τομογραφία, για την τρισδιάστατη απεικόνιση σε θέσεις μεγάλου αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Σε περιοχές, όπου τα ερείπια θαμμένων κτισμάτων αναμένεται να είναι σε βάθος μεγαλύτερο των 2-3 μέτρων, προτείνεται να εφαρμοστεί χαρτογράφηση με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βλάχης Ιωάννης, “Γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο των Άπτερων”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά 2009
2. Βαφειδής, Α., (2001), “Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II”, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Παπαβασιλείου Αγγελική, “Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ με τη χρήση νευρωνικών δικτύων – εφαρμογές σε περιβαλλοντικά προβλήματα”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά 2004.
4. Παπαδόπουλος Δευκαλείων, “Συμβολή των γεωηλεκτρικών μεθόδων στη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρωσης στα Φαλάσαρνα Χανίων”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά 2009
5. Σάκκουλα Ευαγγελία, “Γεωφυσική διασκόπηση στον χώρο στάθμευσης του κτιρίου της διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης με τη μέθοδο του γεωραντάρ”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά 2009
6. Σπανουδάκης Νικόλαος, “Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα”, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά 2002.
7. Loke and Barker 1996: M.H. Loke and R.D. Barker, 1996, “Rapid least squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi Newton method”, *Geophysical Prospecting* **44**, 131-152.
8. Tsokas et al. 1995: G.N. Tsokas, C.B. Papazachos, A. Vafidis, M.Z. Loucoyannakis, G. Vargemezis and K. Tzimeas, 1995, “The detection monumental tombs buried in tumuli by seismic refraction”, *Geophysics* **60**, 1735-1742.
9. Vafidis et al. 2005: A. Vafidis, N. Economou, Y. Ganiatsos, M. Manakou, G. Poulioudis, G. Sourlas, E. Vrontaki, A. Sarris, M. Guy and Th. Kalpaxis, 2005, ‘Integrated geophysical studies at ancient Itanos (Greece)’, *Journal of Archaeological Sciences*, **32** (2005), 1023-1036.

10. Weymouth 1985: J.N. Weymouth and R. Huggins, 1985, “Geophysical Surveying of Archeological Sites, In Archaeological Geology. New Haven”, Yale University Press.

1.http://www.neolithicavgi.gr/wpcontent/uploads/file/Tsokas_et_al_report_Avgi_2004.pdf

2.<http://www.lifewateragenda.org/1-1-1-geophysics.pdf>

3.http://www.neolithicavgi.gr/wpcontent/uploads/file/Tsokas_et_al_report_Avgi_2004.pdf

4. www.ims.forth.gr/newsletters-gr_02.html#1

5. www.geo_analysis.com/index.html

6. www.geophysical.com

7. www.historycooperative.org/journals/sia/31.1/young.html

8. google earth

9. http://www.ims.forth.gr/rg_geophysics-gr.html

10. http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e_lab/PDF/LAB_1_theory.pdf

11.<http://geoservice.gr/application%20areas/civil%20sector/road%20construction/cavity%20mapping/cavities%20mapping.htm>

12. mysite.du.edu/~lonyer/

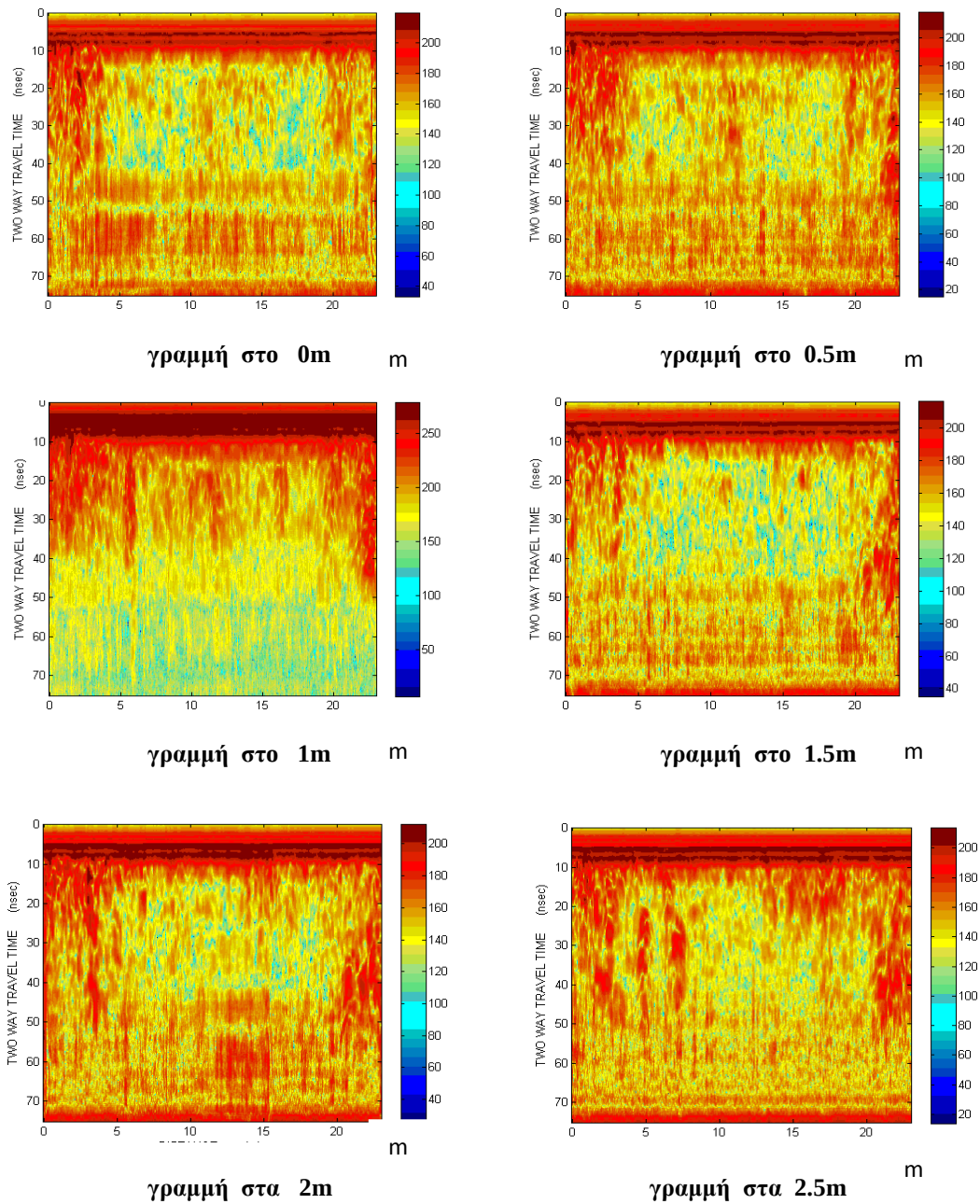
13. www.archaeometry.gr/oldv/publication/arch-tileskopikanea/index.htm

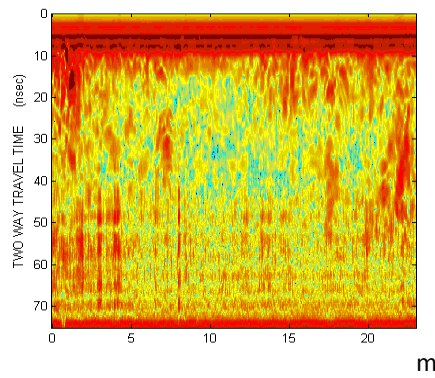
14. www.archeometry.gr/oldv/publication/sybosion/09.htm

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

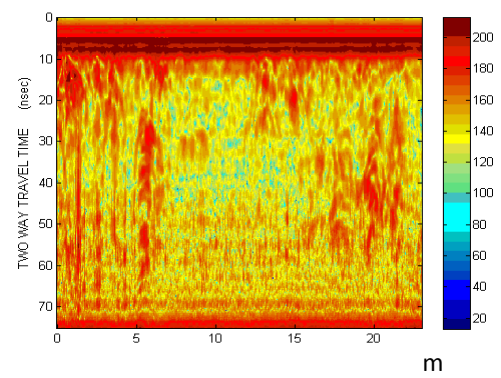
Οι παρακάτω γραμμές έχουν προσανατολισμό ΝΑ-ΒΔ. Η αρίθμηση σε μέτρα είναι σύμφωνα με το Σχήμα 3.7.

Α.1 Στιγμαίο πλάτος σε κλίμακα db

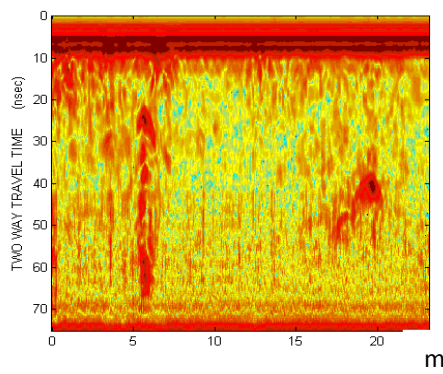




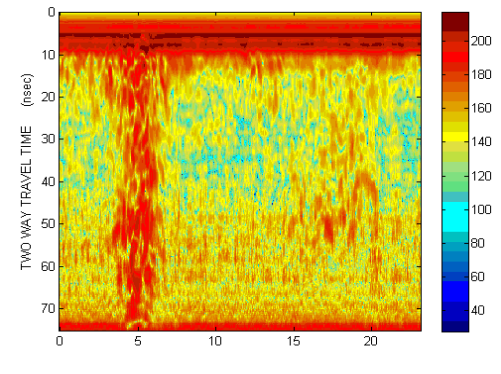
γραμμή στα 3m



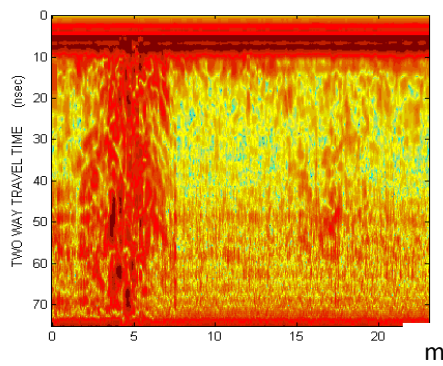
γραμμή στα 3.5m



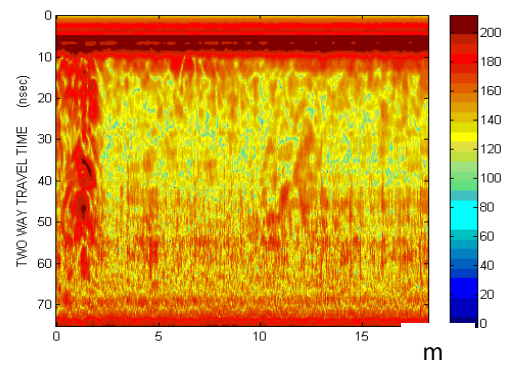
γραμμή στα 4m



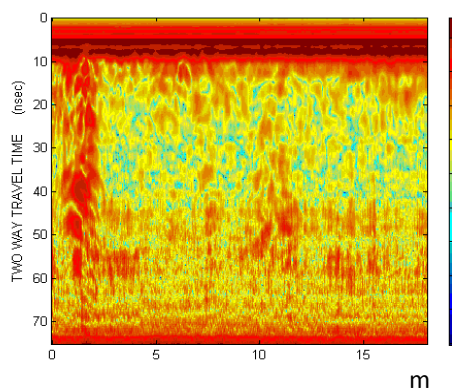
γραμμή στα 4.5m



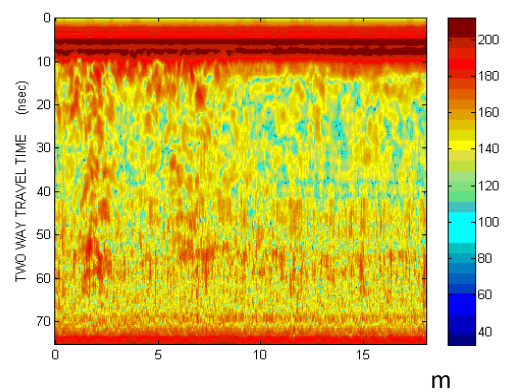
γραμμή στα 5m



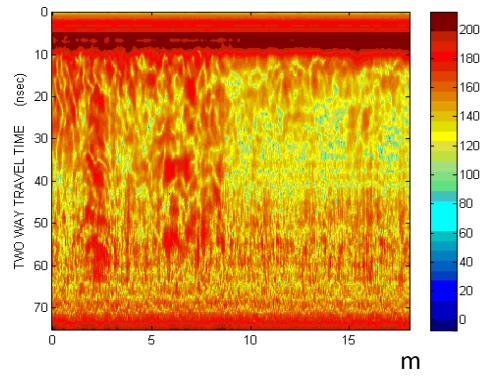
γραμμή στα 5.5m



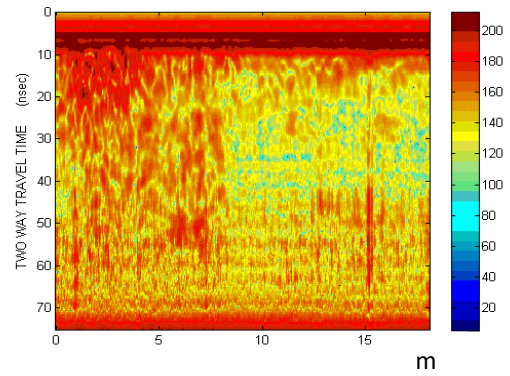
γραμμή στα 6m



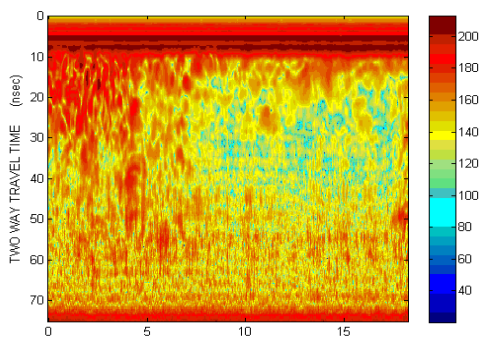
γραμμή στα 6.5m



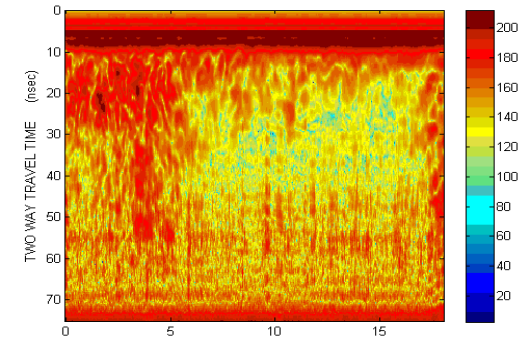
γραμμή στα 7m



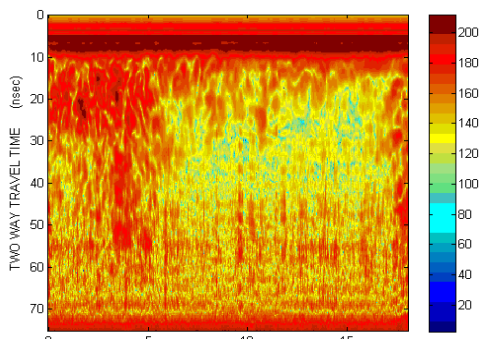
γραμμή στα 7.5m



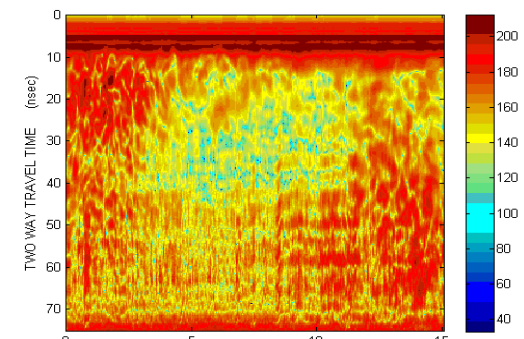
γραμμή στα 8m



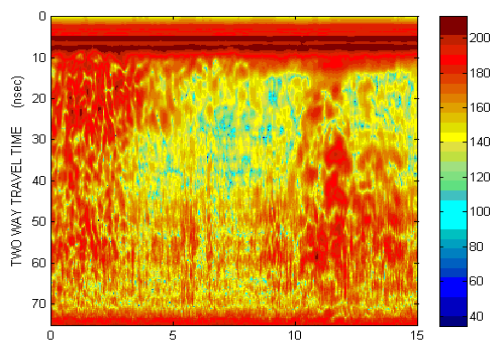
γραμμή στα 8.5m



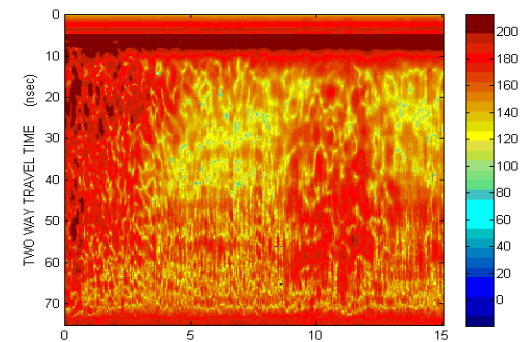
γραμμή στα 9m



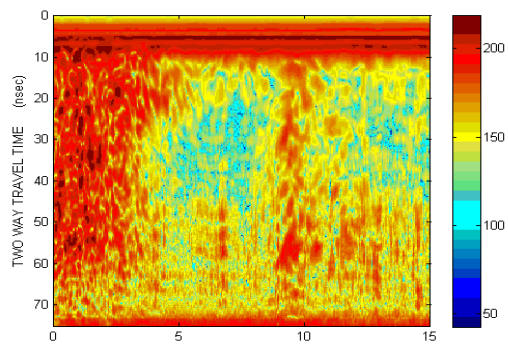
γραμμή στα 9.5m



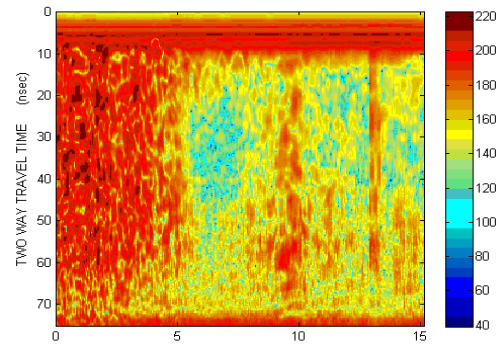
γραμμή στα 10m



γραμμή στα 10.5

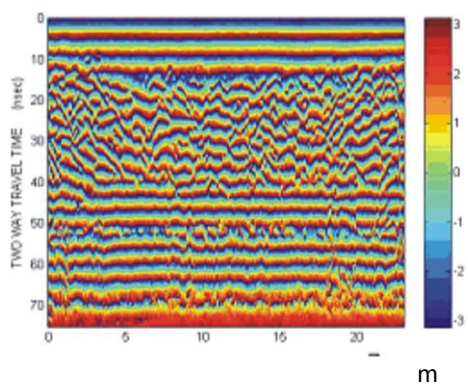


γραμμή στα 11m m

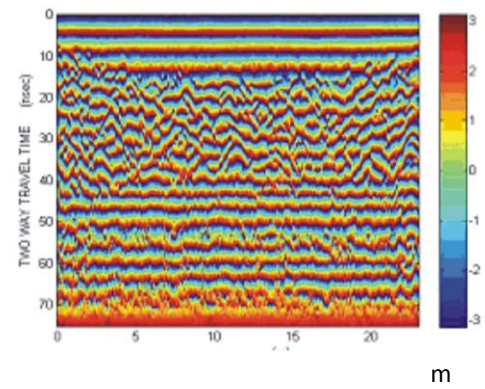


γραμμή στα 11.5m m

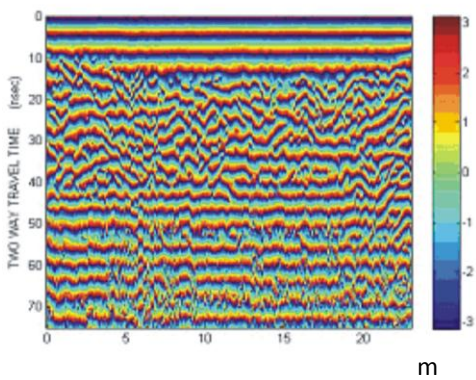
A.2 Στιγμαίο πλάτος



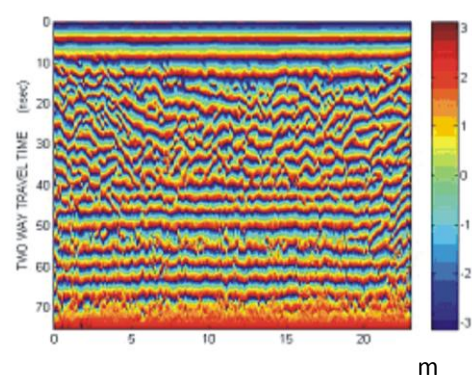
γραμμή στο 0m



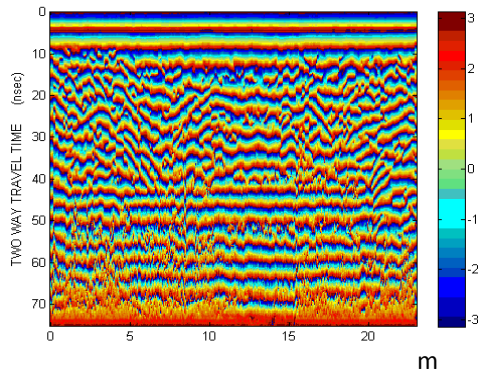
γραμμή στο 0.5m



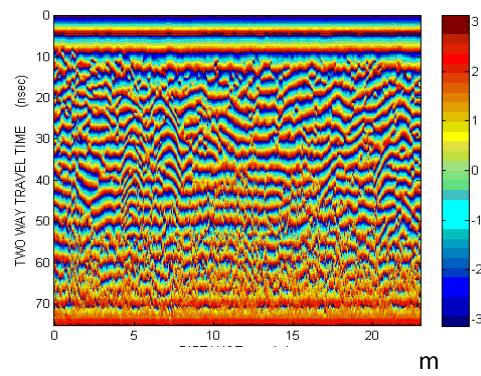
γραμμή στο 1m



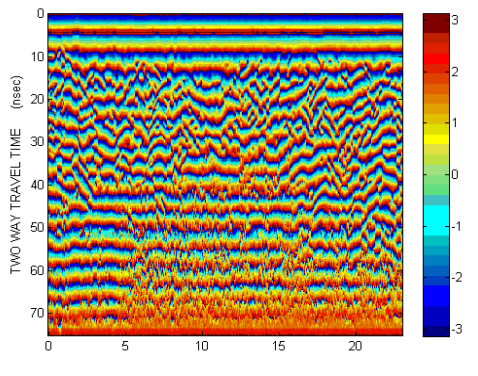
γραμμή στο 1.5m



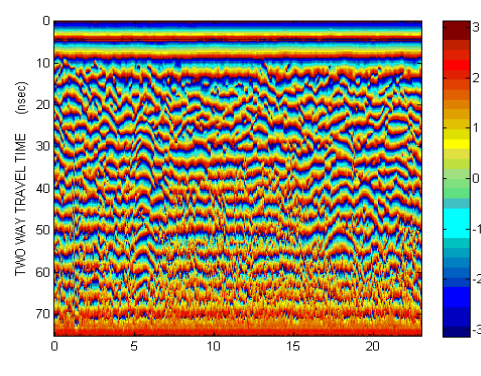
γραμμή στα 2m



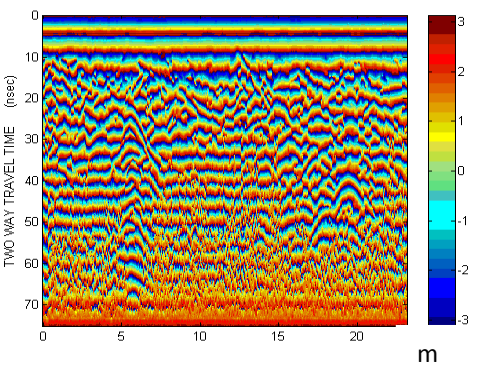
γραμμή στα 2.5m



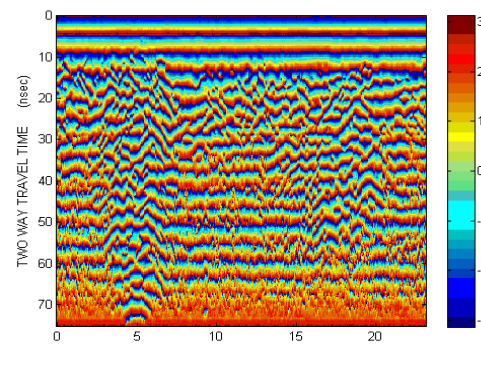
γραμμή στα 3m



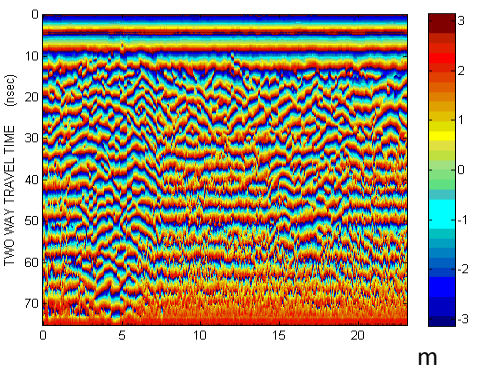
γραμμή στα 3.5m



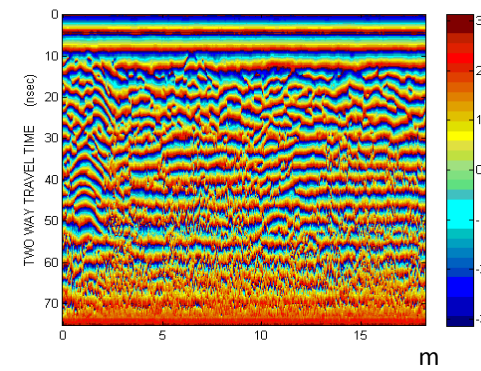
γραμμή στα 4m



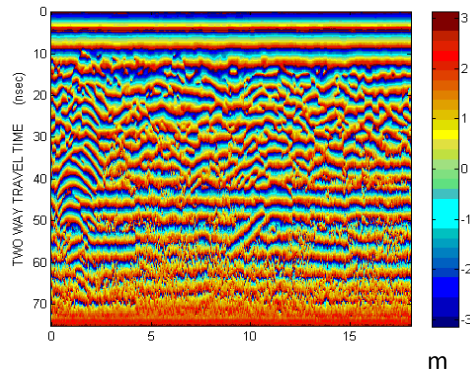
γραμμή στα 4.5m



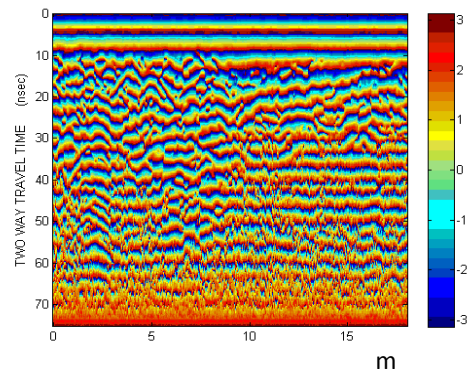
γραμμή στα 5m



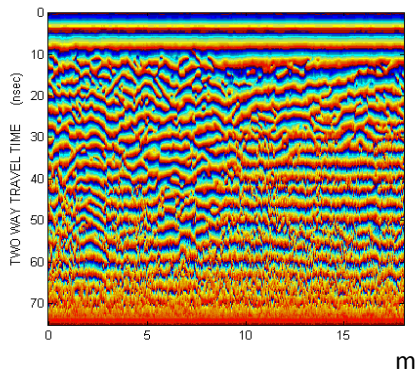
γραμμή στα 5.5m



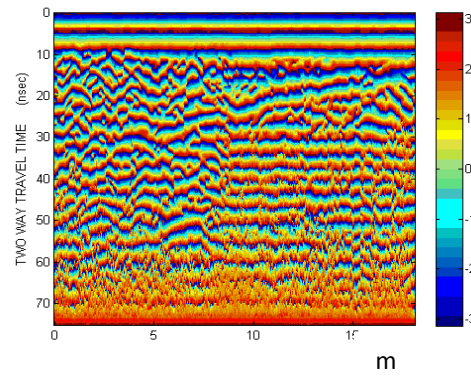
γραμμή στα 6m



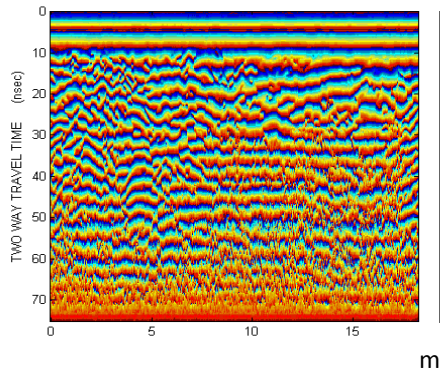
γραμμή στα 6.5m



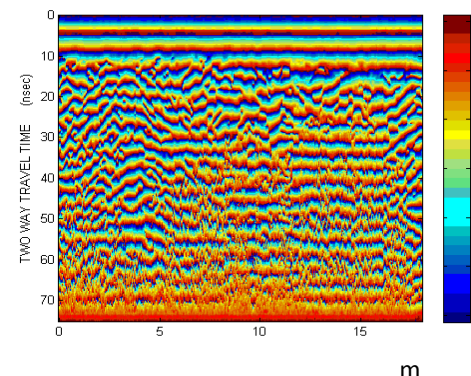
γραμμή στα 7m



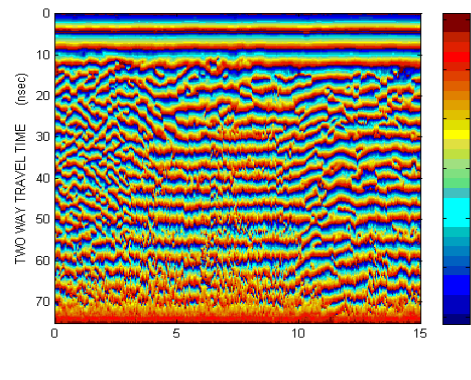
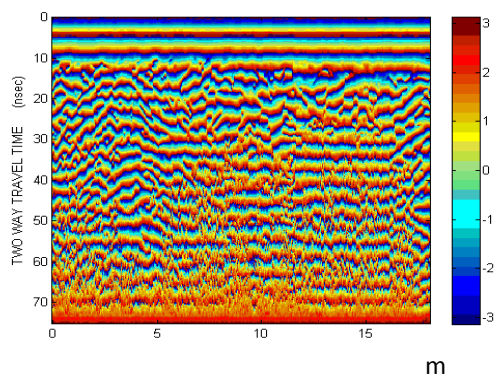
γραμμή στα 7.5m



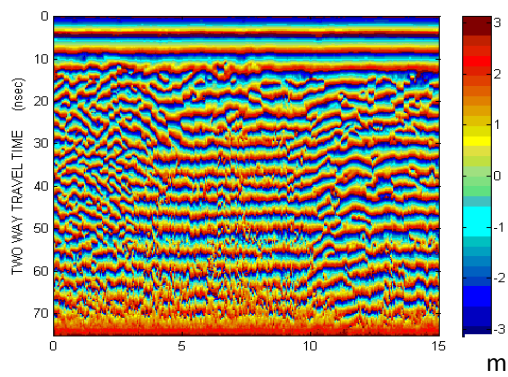
γραμμή στα 8m



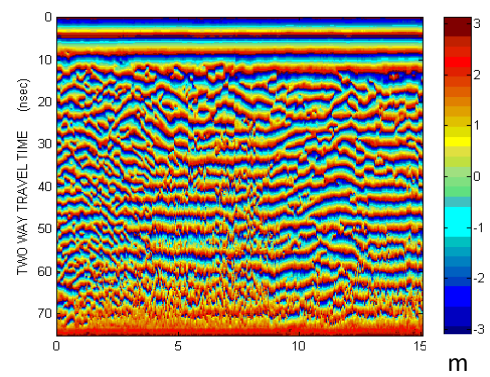
γραμμή στα 8.5m



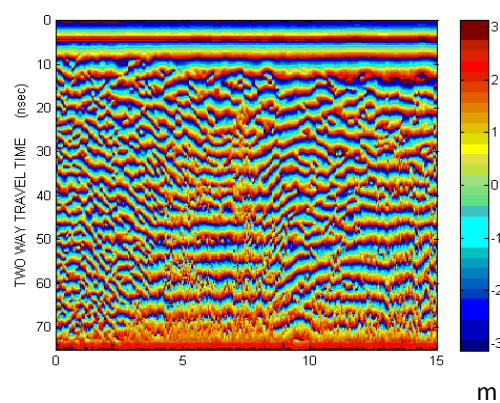
γραμμή στα 9m



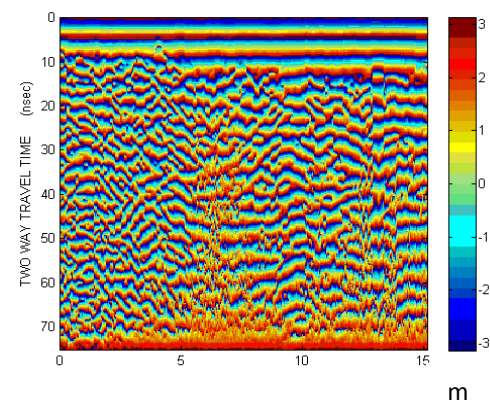
γραμμή στα 9.5m



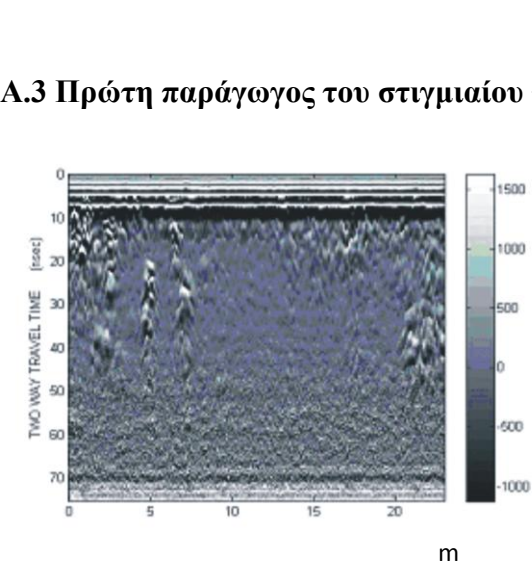
γραμμή στα 10m



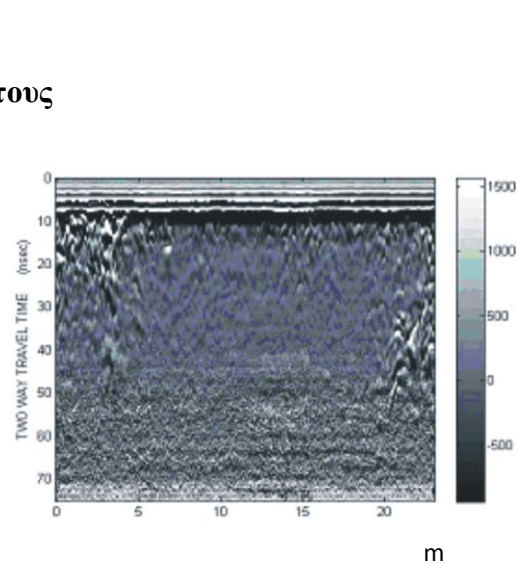
γραμμή στα 10.5



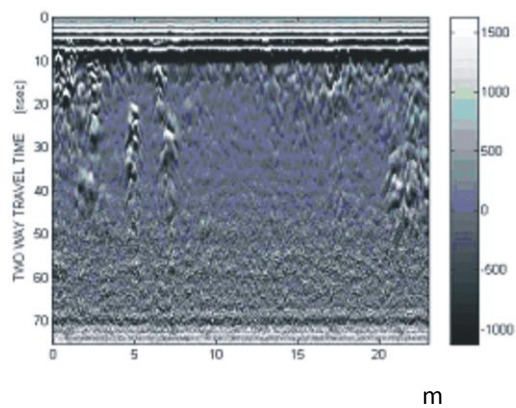
γραμμή στα 11m



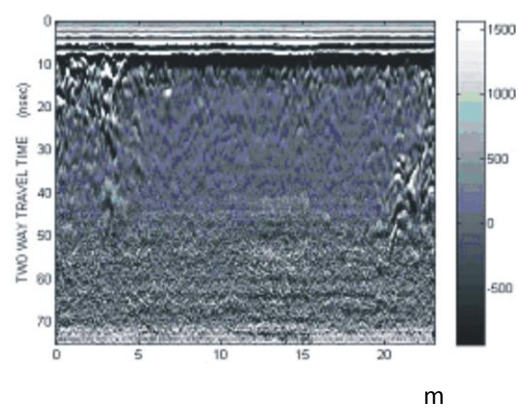
γραμμή στα 11.5m



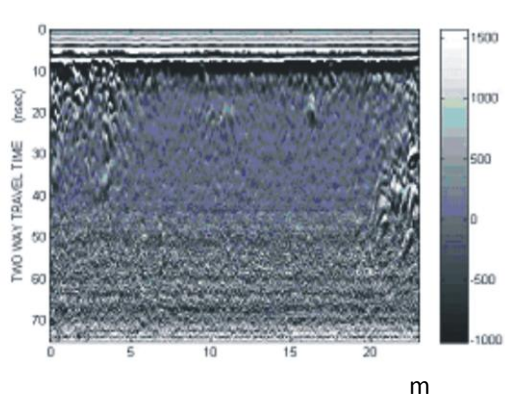
A.3 Πρώτη παράγωγος του στιγμιαίου πλάτους



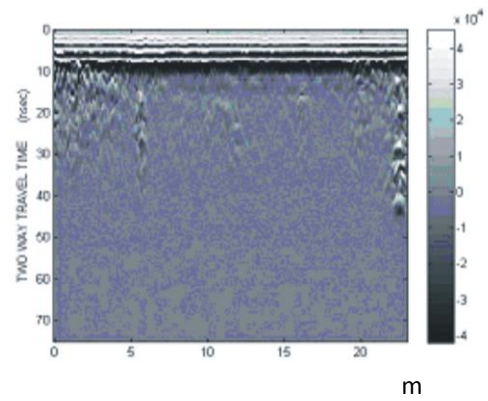
γραμμή στο 0m



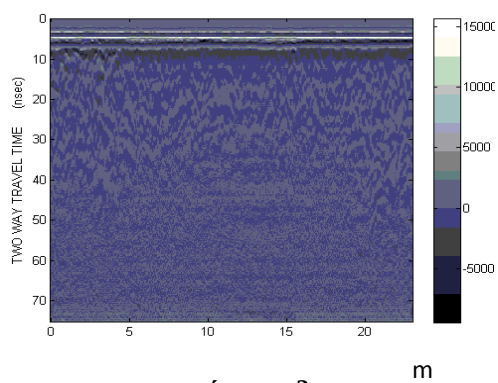
γραμμή στο 0.5m



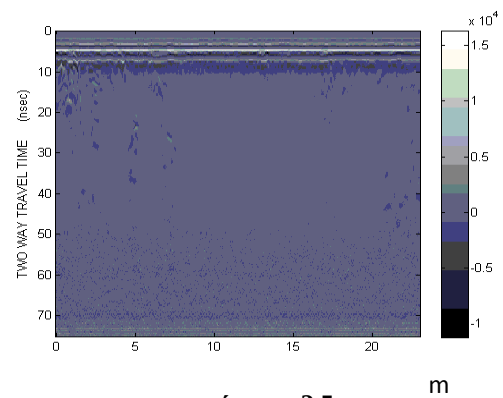
γραμμή στο 1m



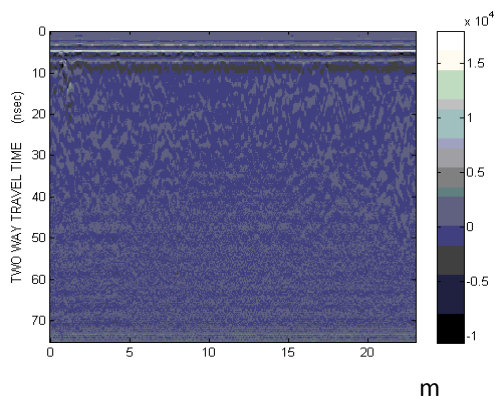
γραμμή στο 1.5m



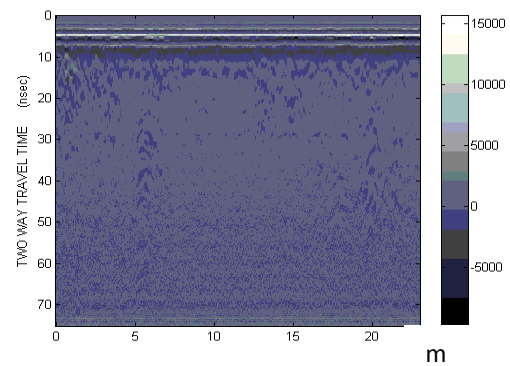
γραμμή στα 2m



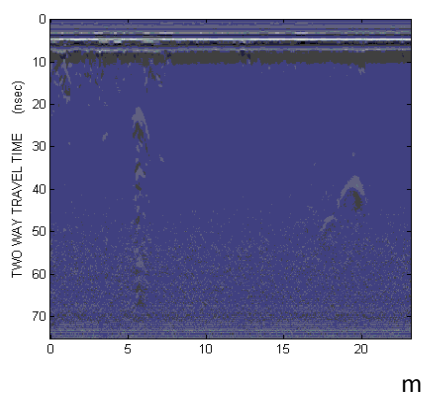
γραμμή στα 2.5m



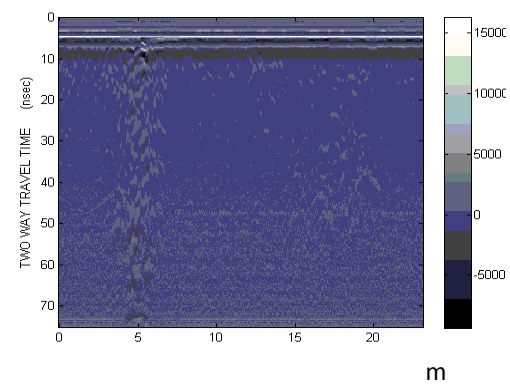
γραμμή στα 3m



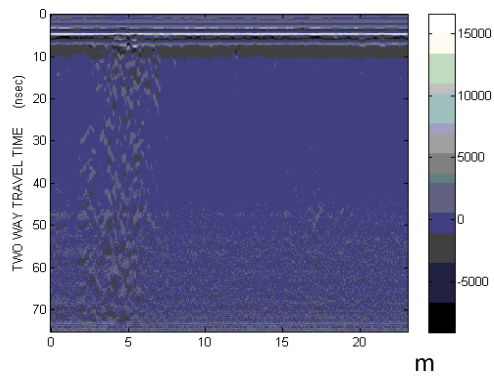
γραμμή στα 3.5m



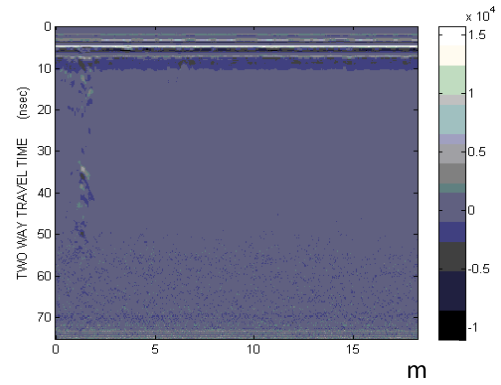
γραμμή στα 4m



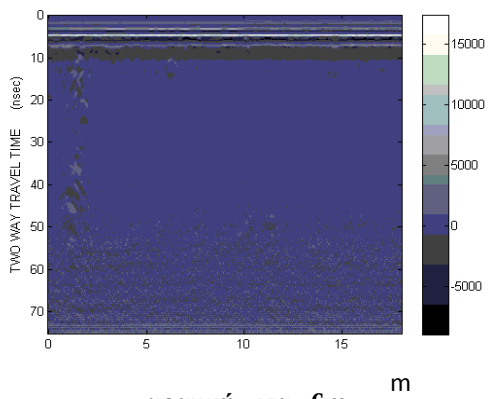
γραμμή στα 4.5m



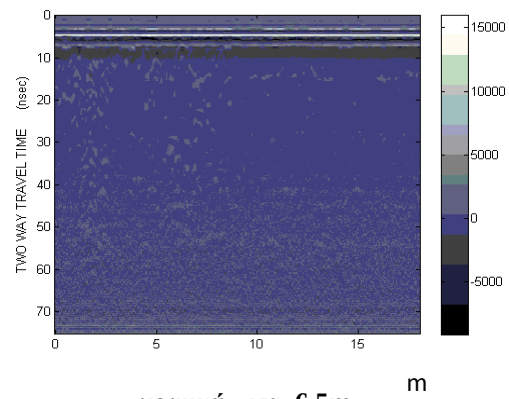
γραμμή στα 5m



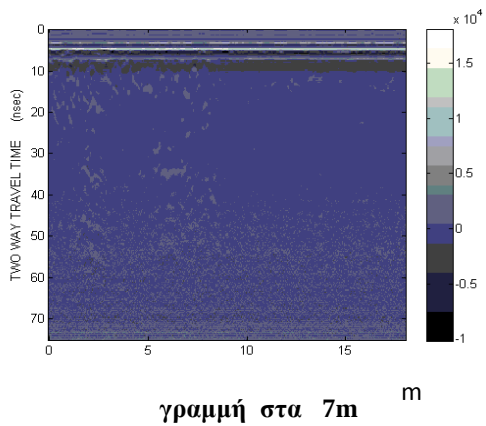
γραμμή στα 5.5m



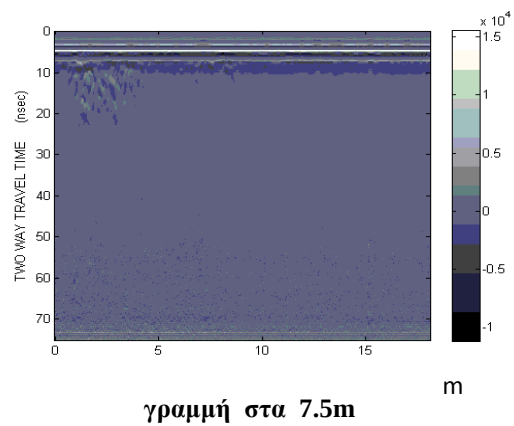
γραμμή στα 6m



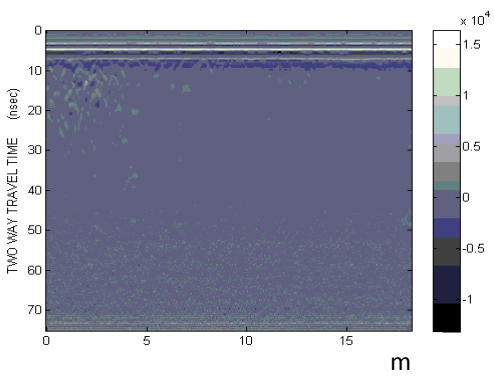
γραμμή στα 6.5m



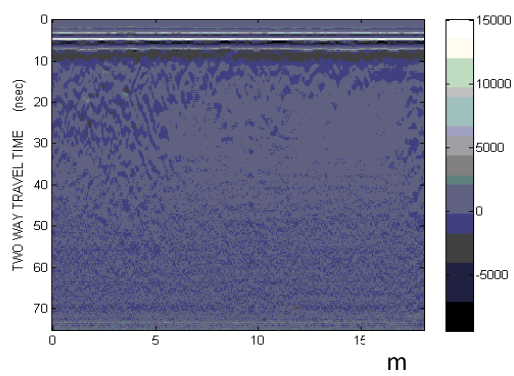
γραμμή στα 7m



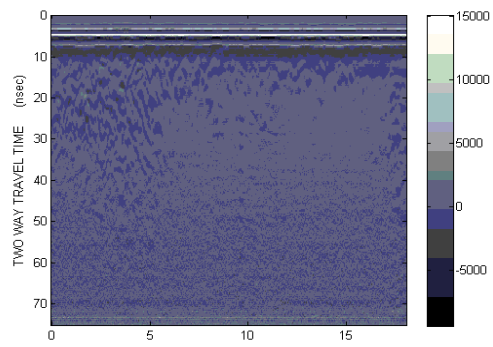
γραμμή στα 7.5m



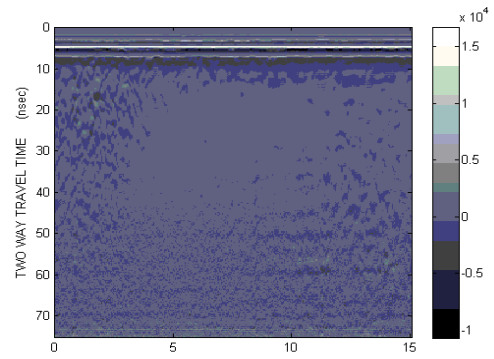
γραμμή στα 8m



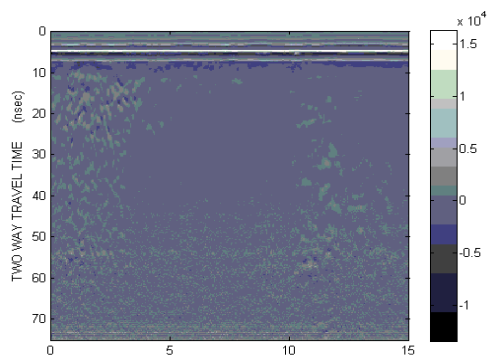
γραμμή στα 8.5m



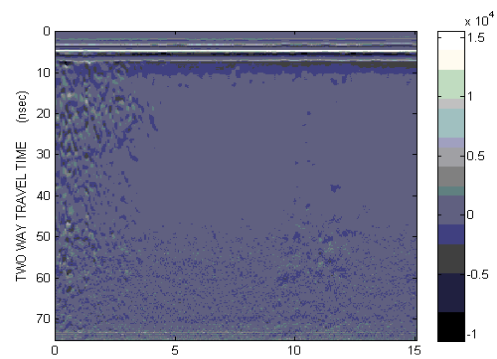
γραμμή στα 9m



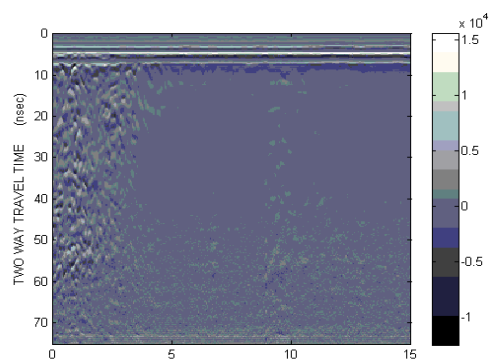
γραμμή στα 9.5m



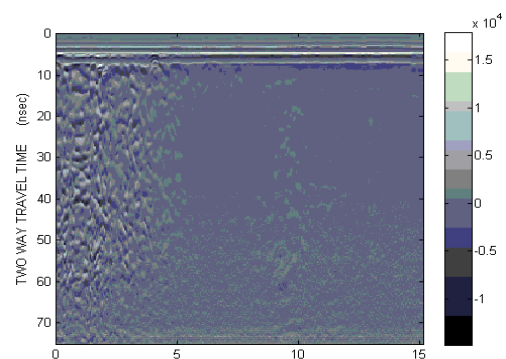
γραμμή στα 10m



γραμμή στα 10.5m

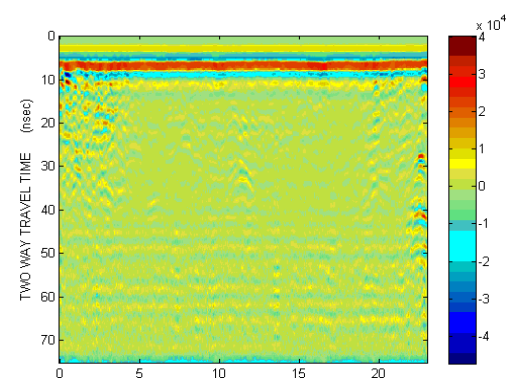
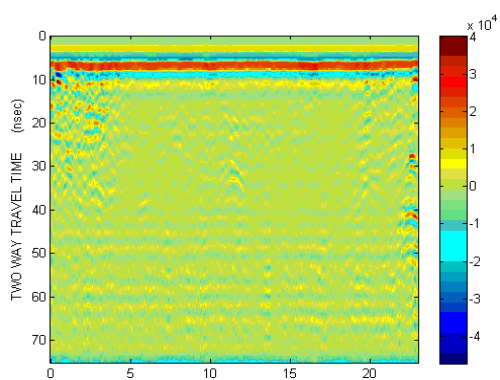


γραμμή στα 11m

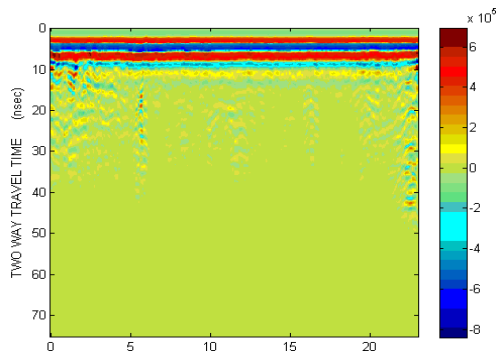


γραμμή στα 11.5m

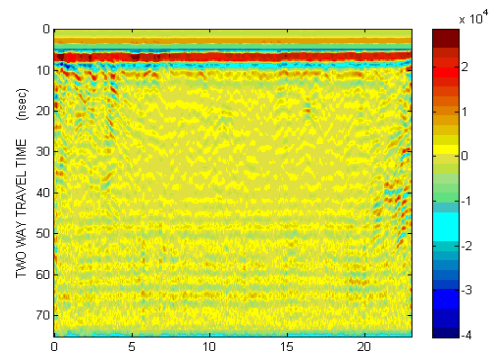
A.4 Εκθετική ενίσχυση των δεδομένων (sec)



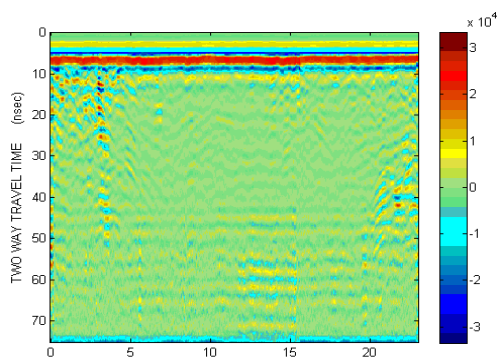
γραμμή στο 0m



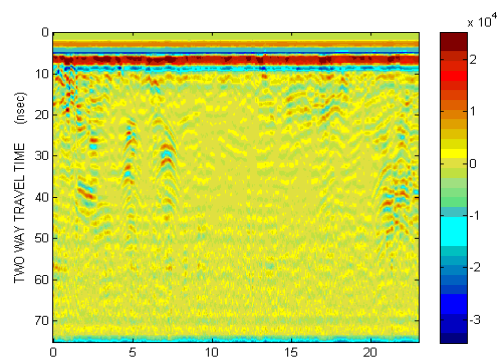
γραμμή στο 0.5m



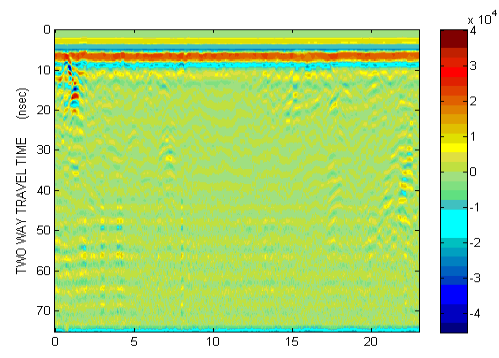
γραμμή στο 1m



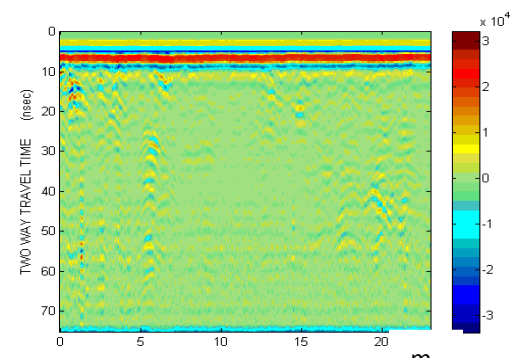
γραμμή στο 1.5m



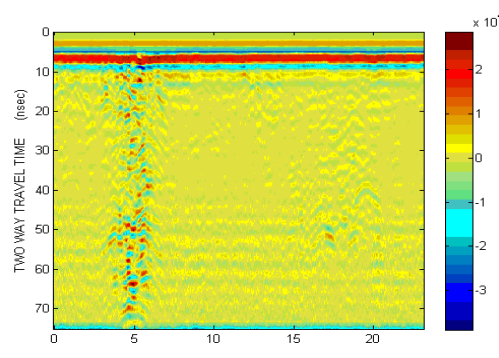
γραμμή στα 2m



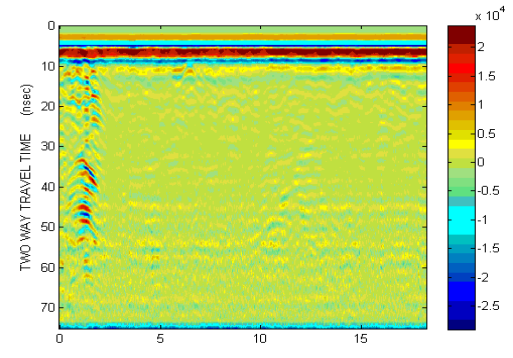
γραμμή στα 2.5m



γραμμή στα 3m



γραμμή στα 3.5

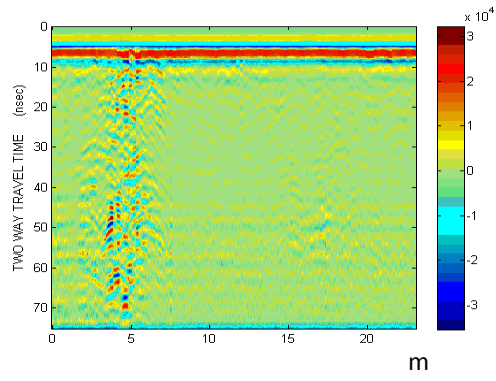


γραμμή στα 4m

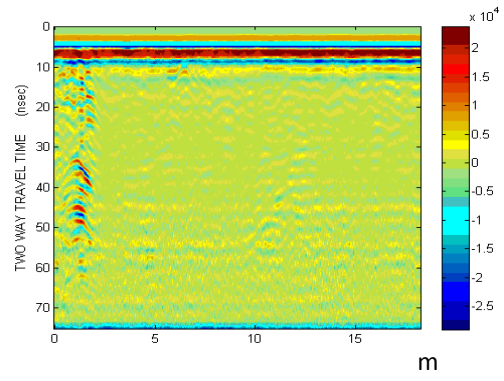


γραμμή στα 4.5m

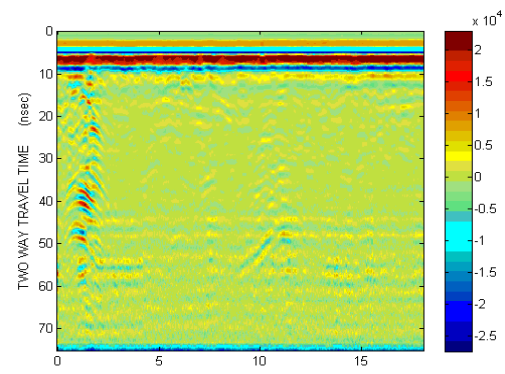




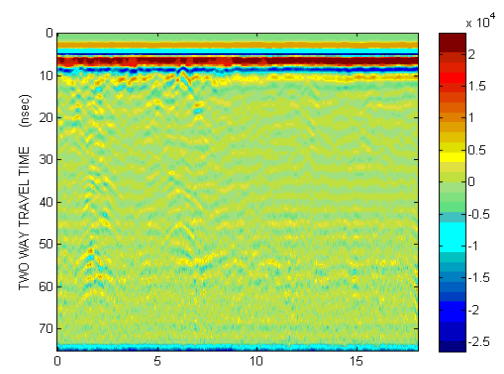
γραμμή στα 5m



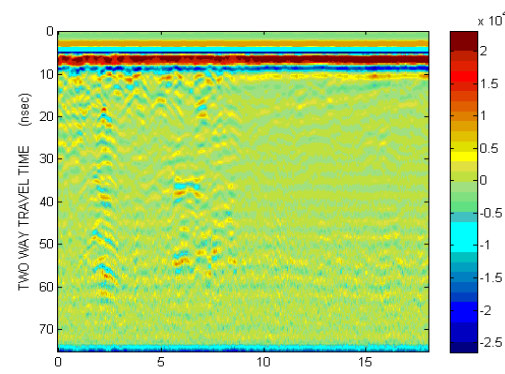
γραμμή στα 5.5m



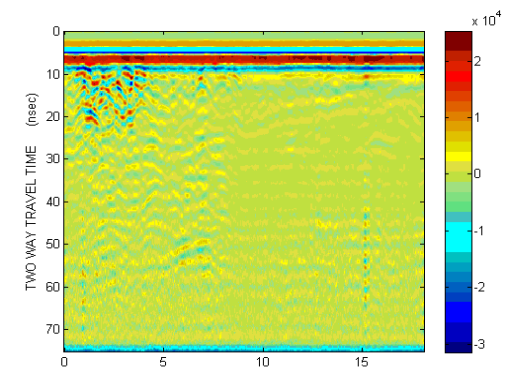
γραμμή στα 6m



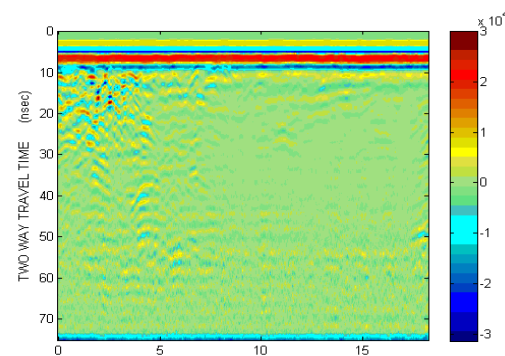
γραμμή στα 6.5m



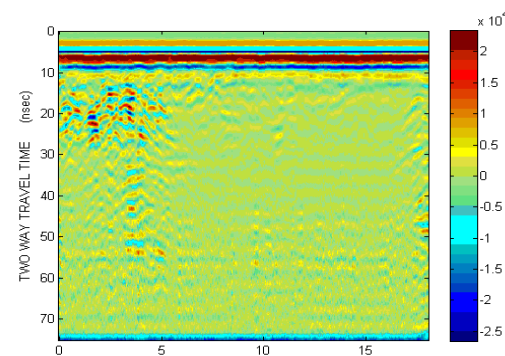
γραμμή στα 7m



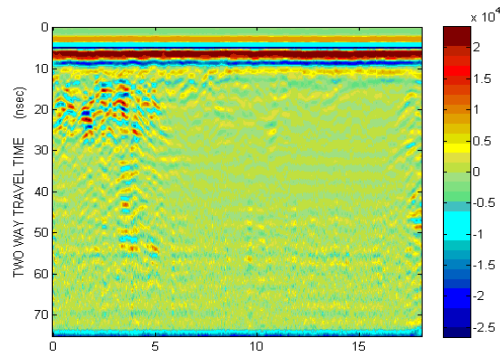
γραμμή στα 7.5m



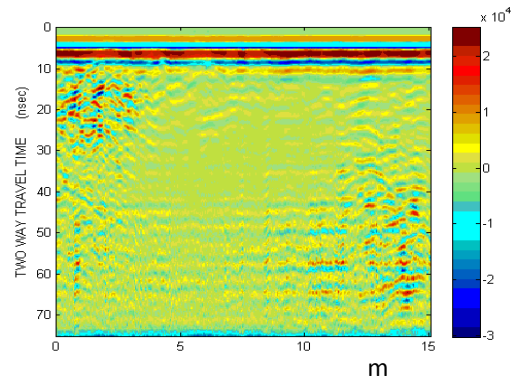
γραμμή στα 8m



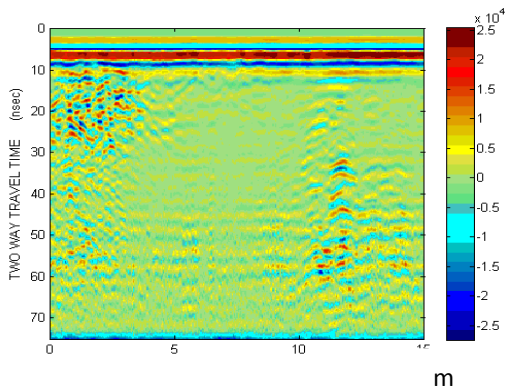
γραμμή στα 8.5m



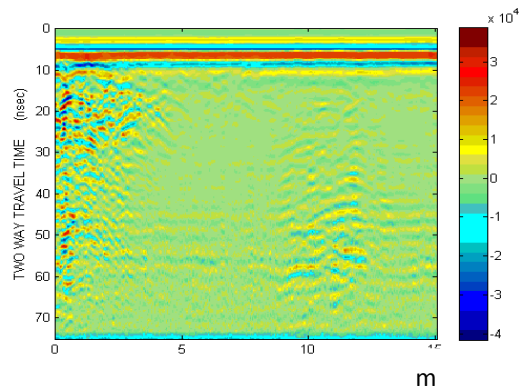
γραμμή στα 9m m



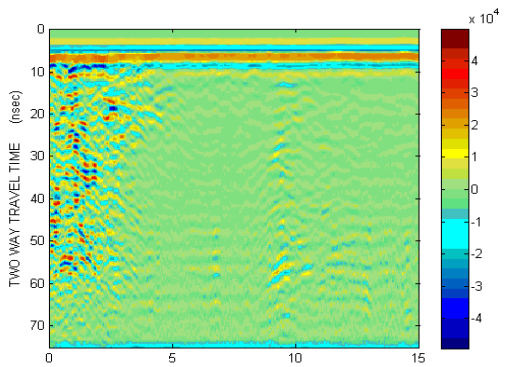
γραμμή στα 9.5m



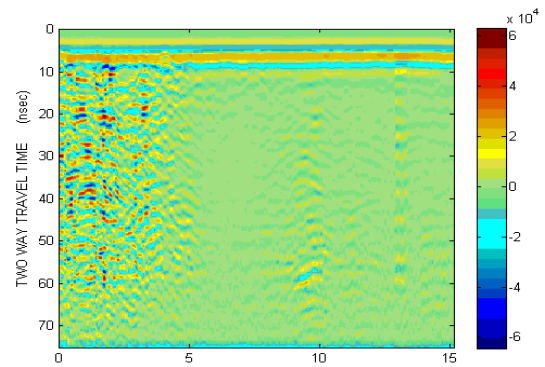
γραμμή στα 10m



γραμμή στα 10.5m

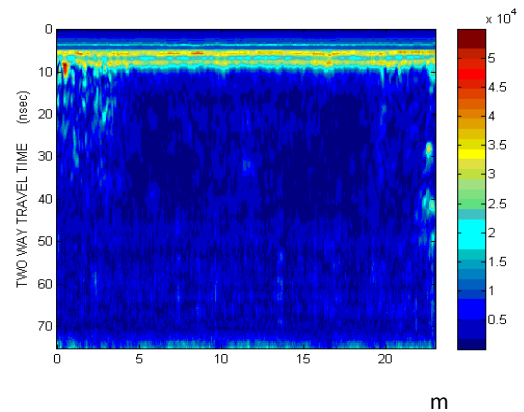
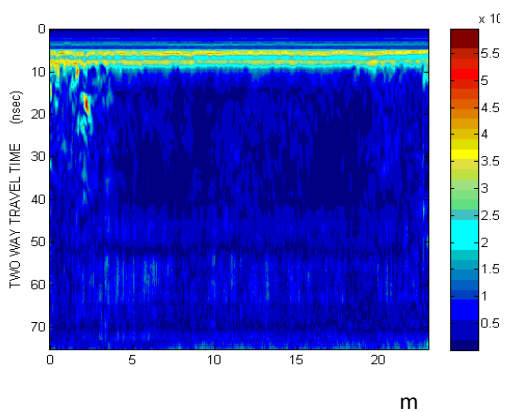


γραμμή στα 11m m

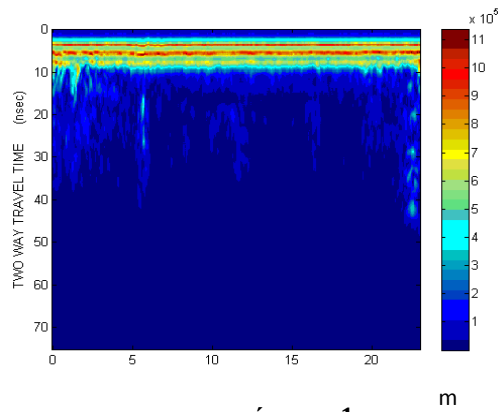


γραμμή στα 11.5m m

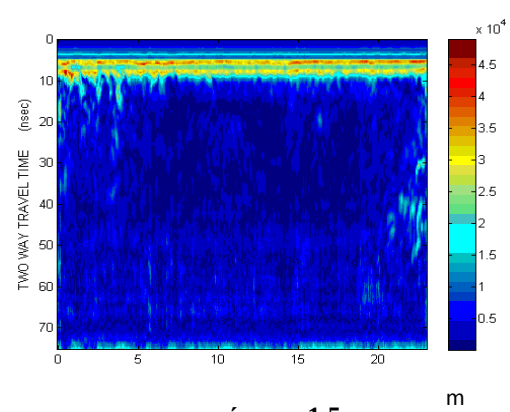
A.5 Στιγμαίο πλάτος



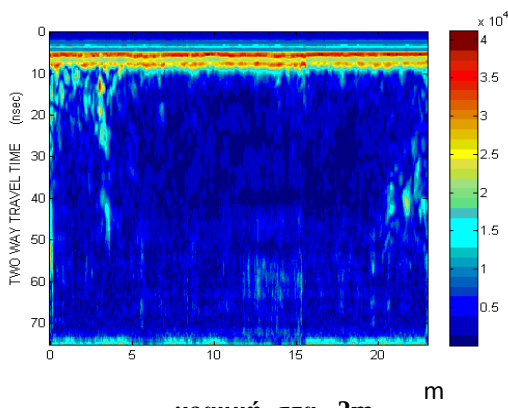
γραμμή στο 0m



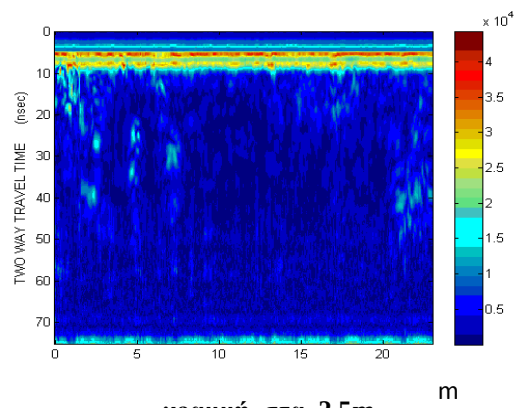
γραμμή στο 0.5m



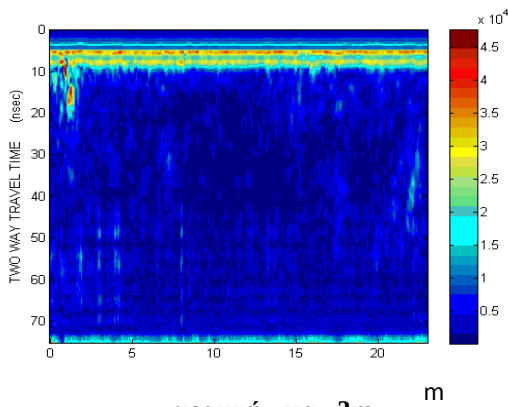
γραμμή στο 1m



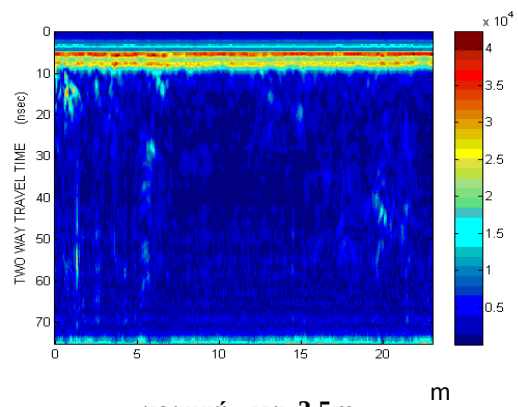
γραμμή στο 1.5m



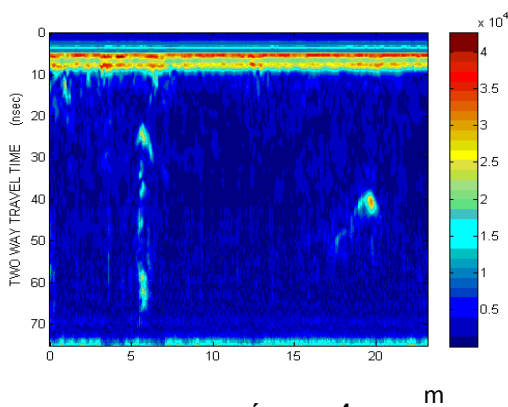
γραμμή στα 2m



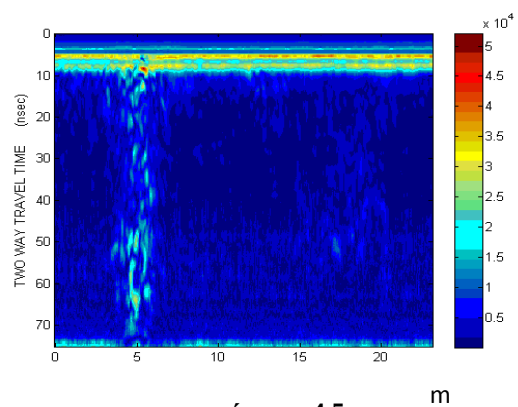
γραμμή στα 2.5m



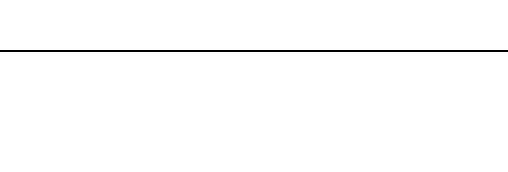
γραμμή στα 3m



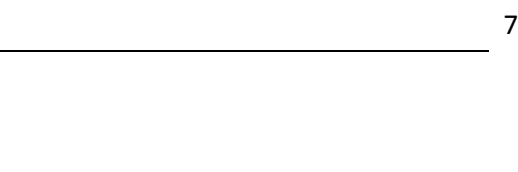
γραμμή στα 3.5m

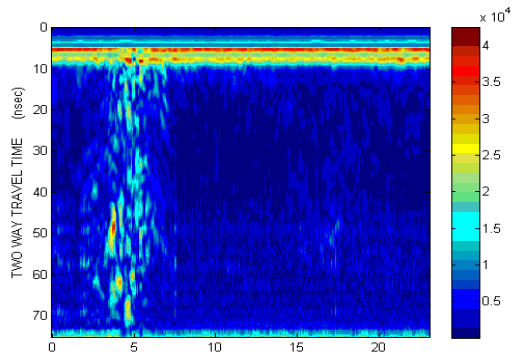


γραμμή στα 4m

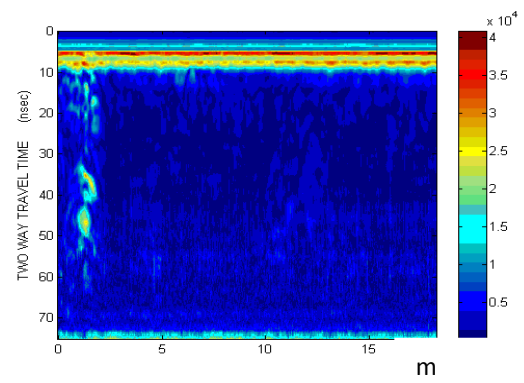


γραμμή στα 4.5m

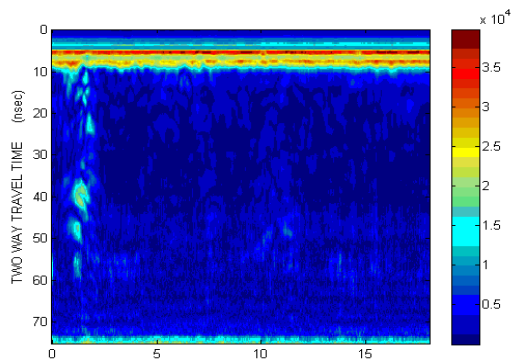




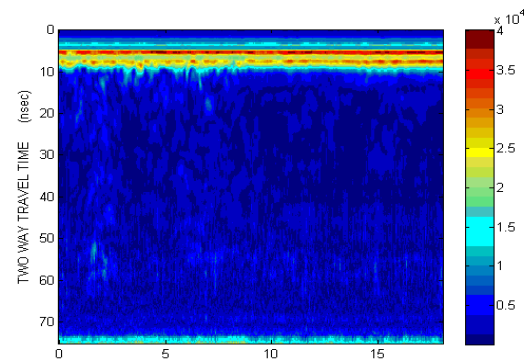
γραμμή στα 5 m



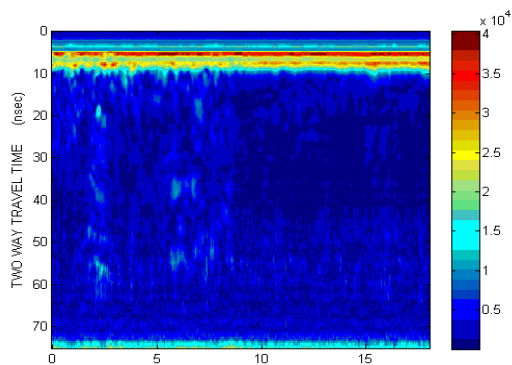
γραμμή στα 5.5m



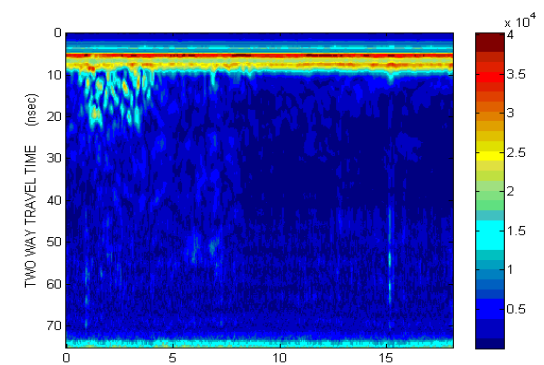
γραμμή στα 6 m



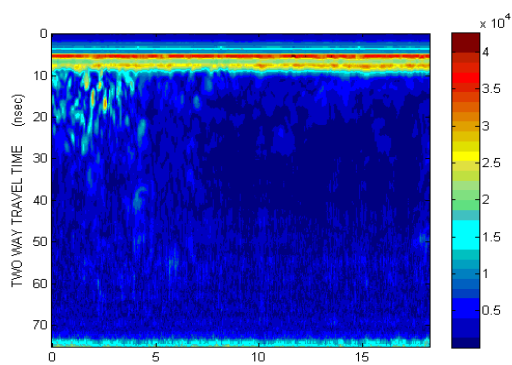
γραμμή στα 6.5m



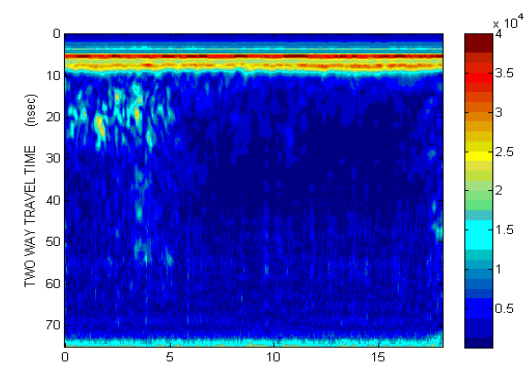
γραμμή στα 7 m



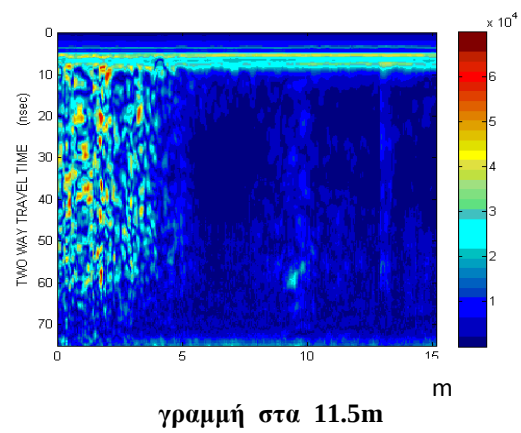
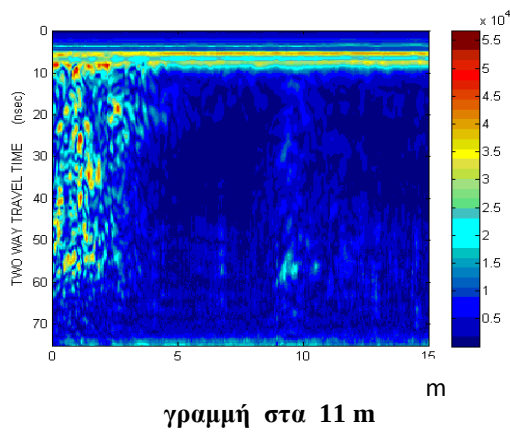
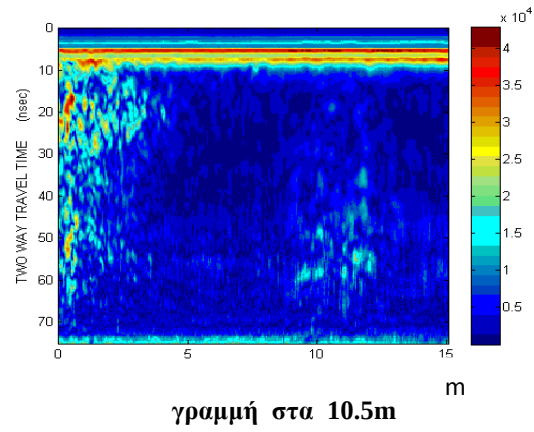
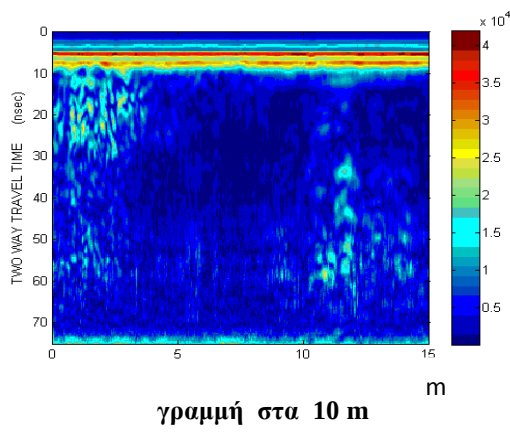
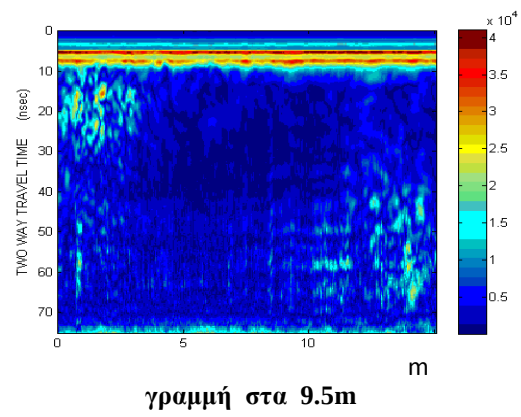
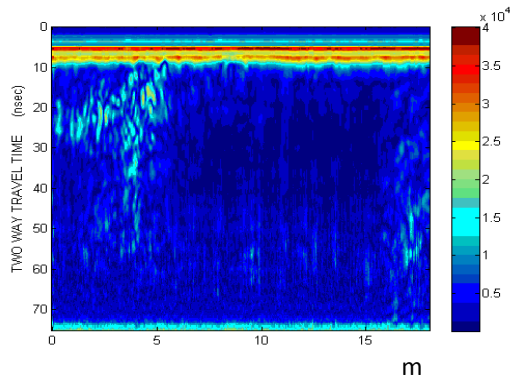
γραμμή στα 7.5m



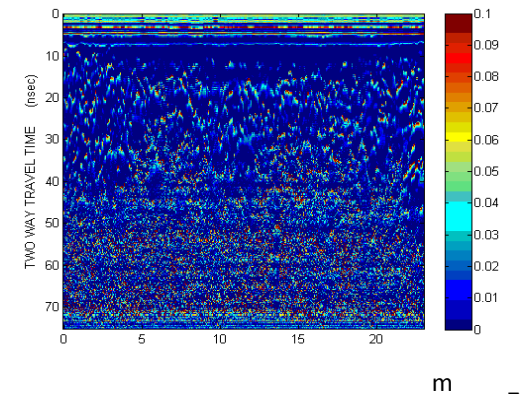
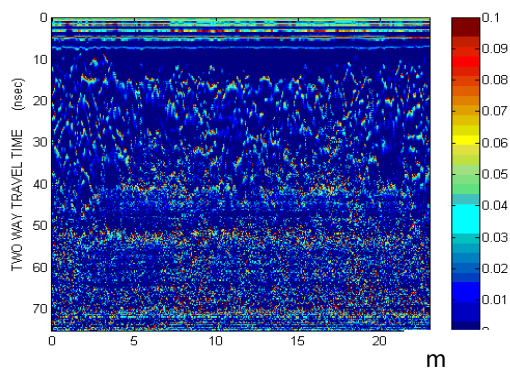
γραμμή στα 8 m



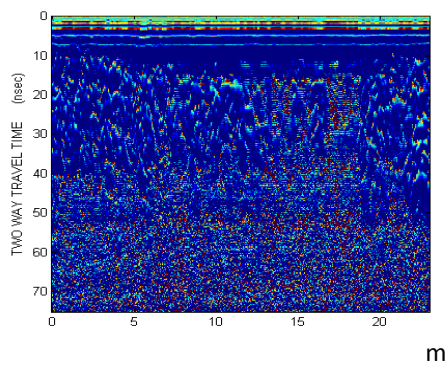
γραμμή στα 8.5m



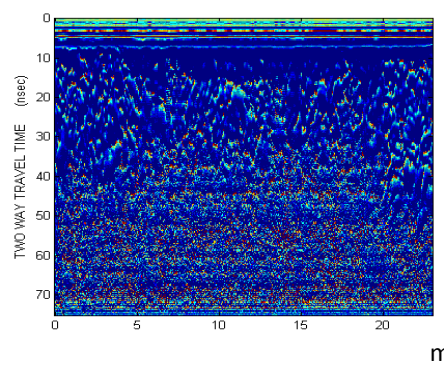
A.6 Στιγμιαίο φασματικό εύρος



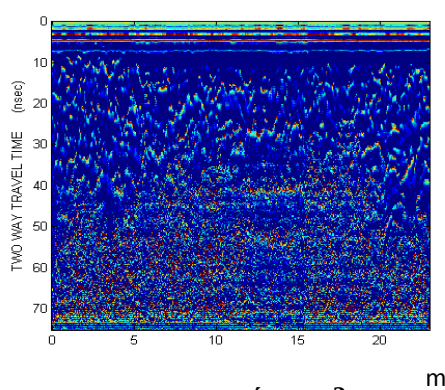
γραμμή στο 0 m



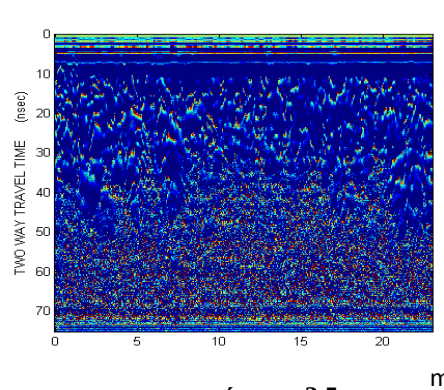
γραμμή στο 0.5m



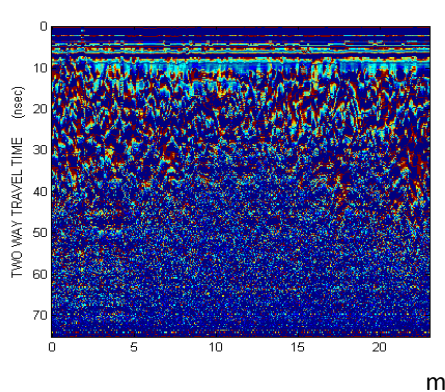
γραμμή στο 1 m



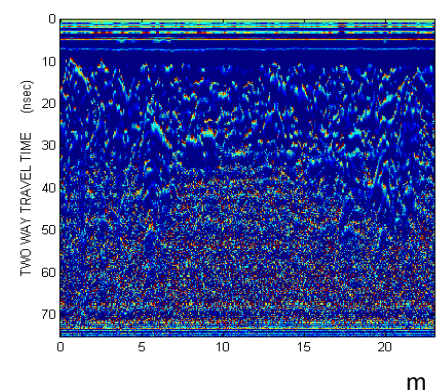
γραμμή στο 1.5m



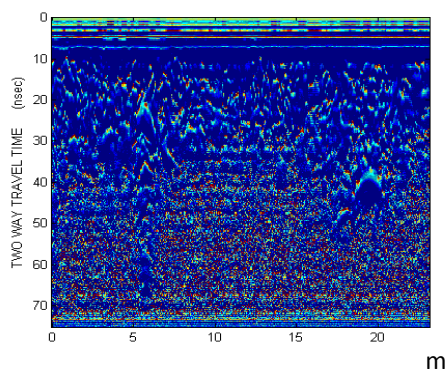
γραμμή στα 2m



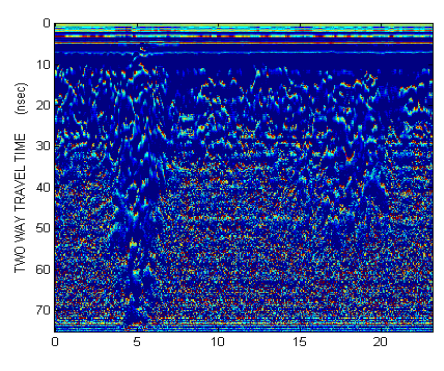
γραμμή στα 2.5m



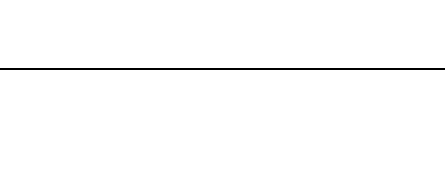
γραμμή στα 3m



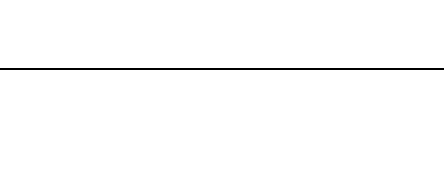
γραμμή στα 3.5m

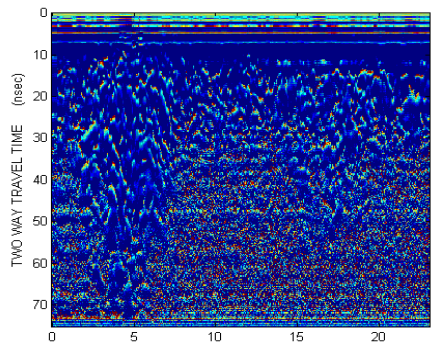


γραμμή στα 4m

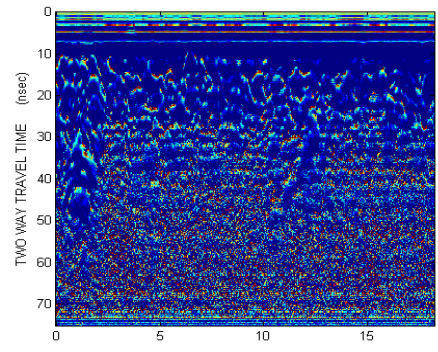


γραμμή στα 4.5m

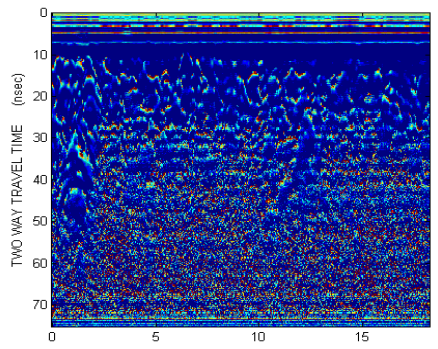




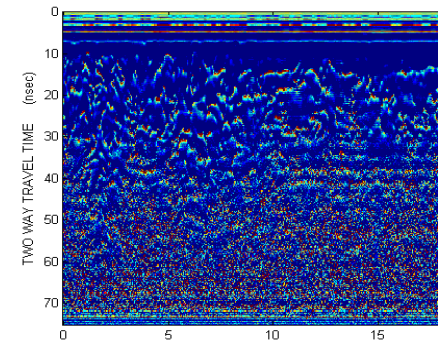
γραμμή στα 5m



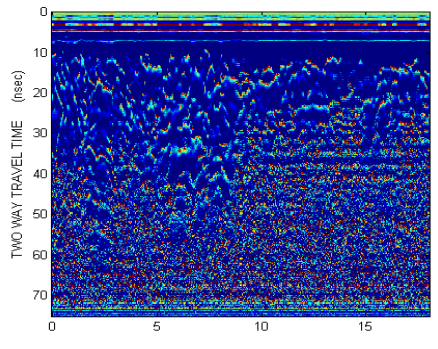
γραμμή στα 5.5m



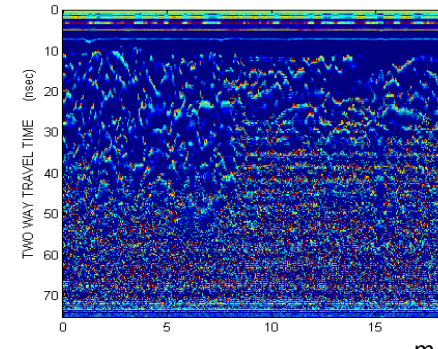
γραμμή στα 6m



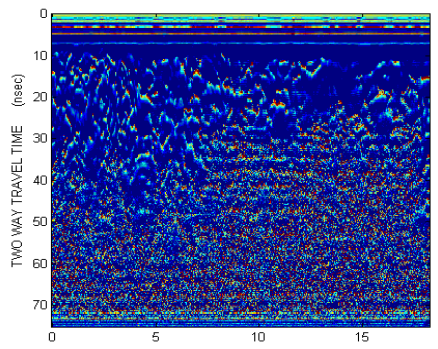
γραμμή στα 6.5m



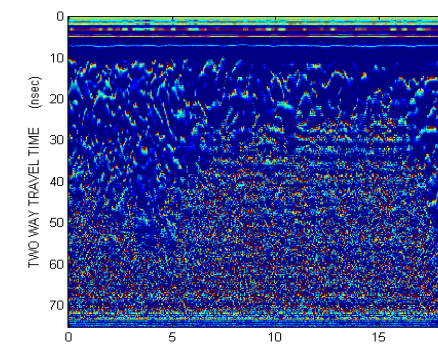
γραμμή στα 7m



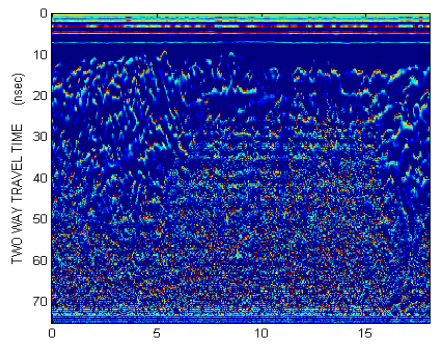
γραμμή στα 7.5m



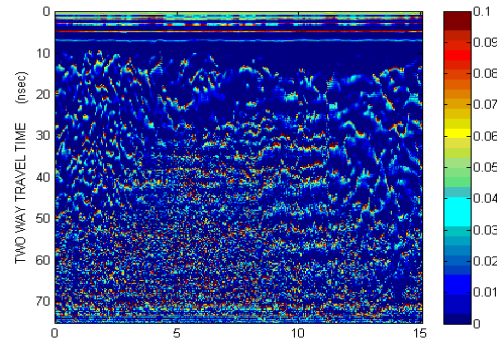
γραμμή στα 8m



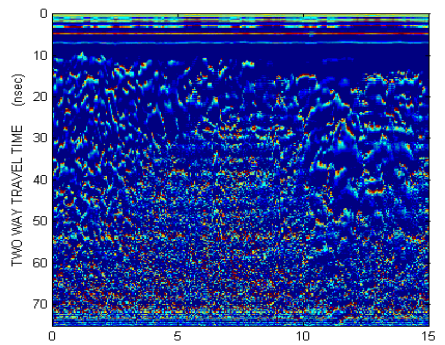
γραμμή στα 8.5m



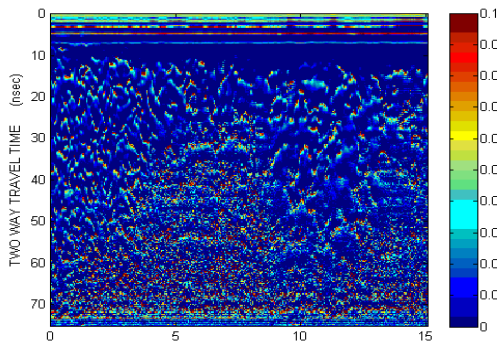
γραμμή στα 9m



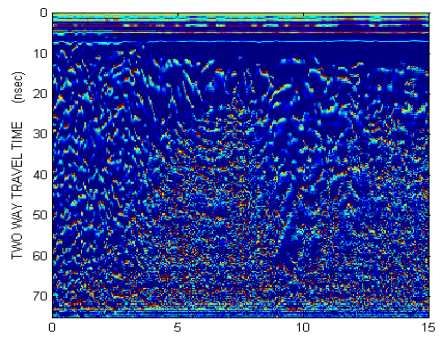
γραμμή στα 9.5m



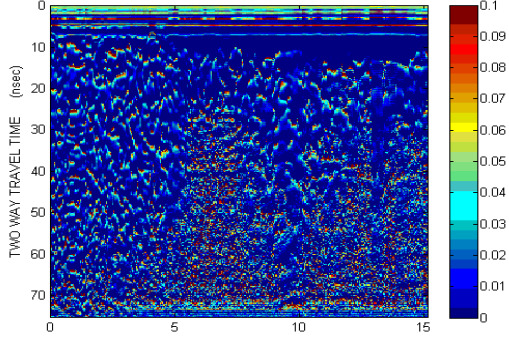
γραμμή στα 10m



γραμμή στα 10.5m

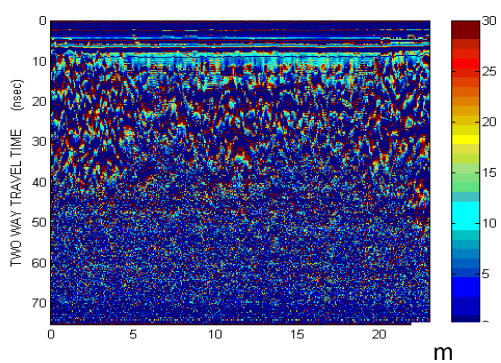
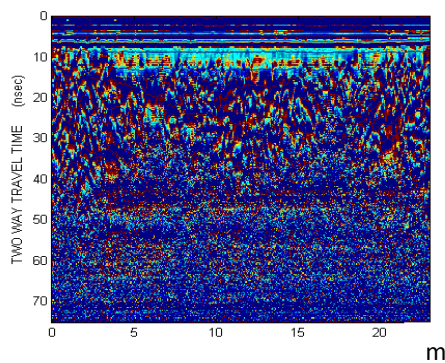


γραμμή στα 11m

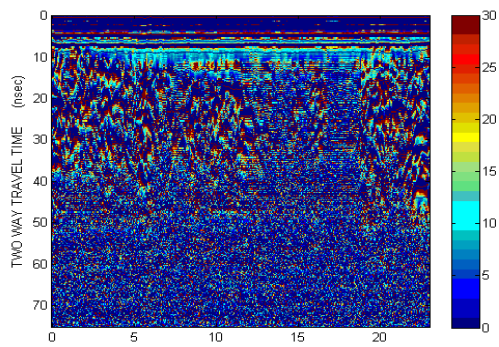


γραμμή στα 11.5m

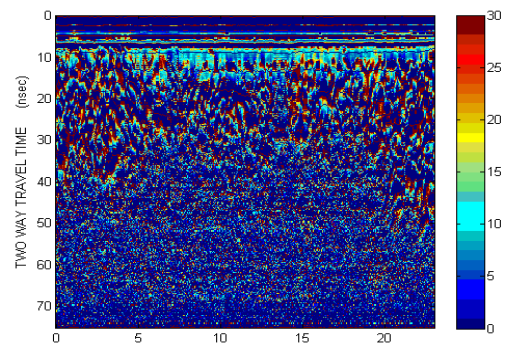
A.7 Στιγμιαίος δείκτης ποιότητας



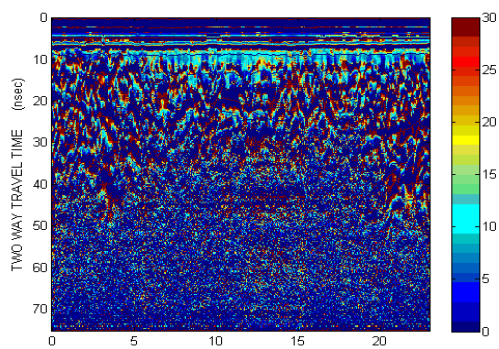
γραμμή στο 0m



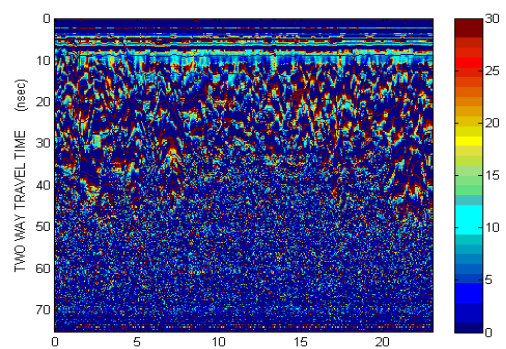
γραμμή στο 0.5m



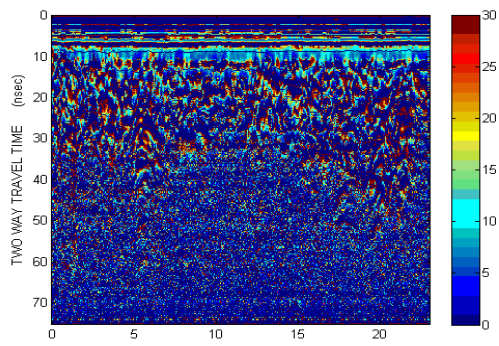
γραμμή στο 1m m



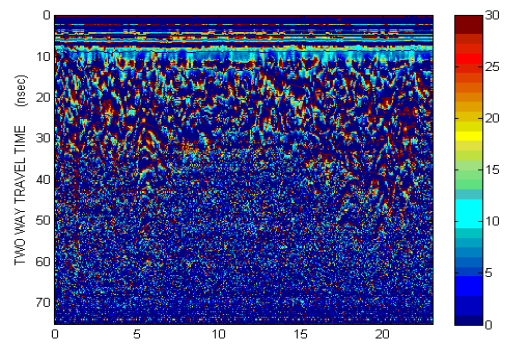
γραμμή στο 1.5m m



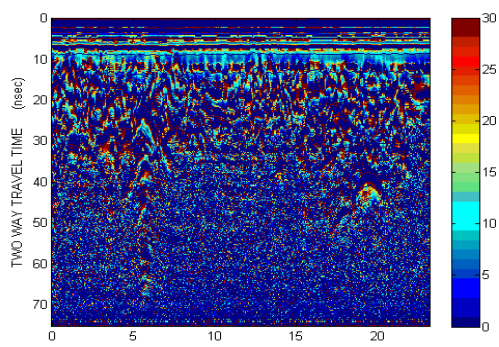
γραμμή στα 2m m



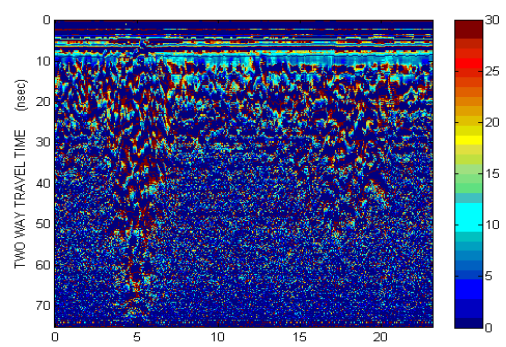
γραμμή στα 2.5m m



γραμμή στα 3m m

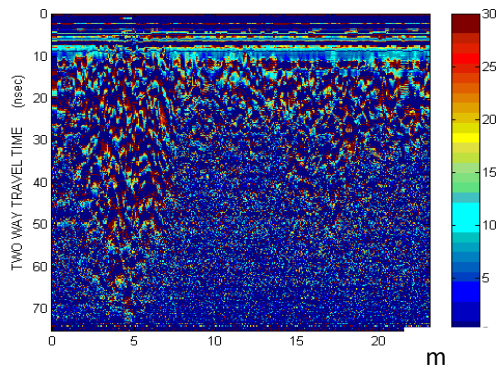


γραμμή στα 3.5m m

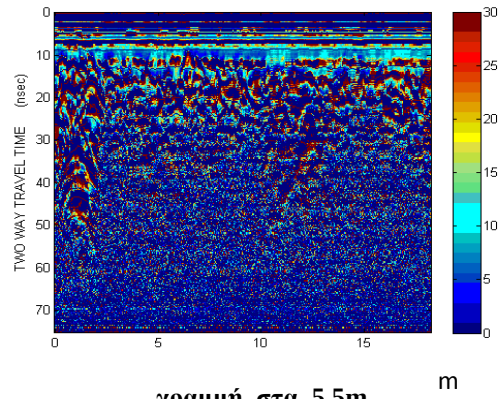


γραμμή στα 4m m

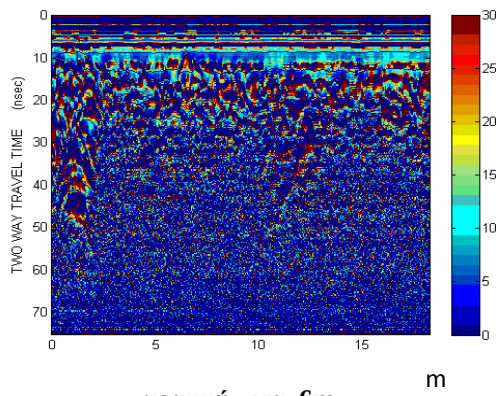
γραμμή στα 4.5m m



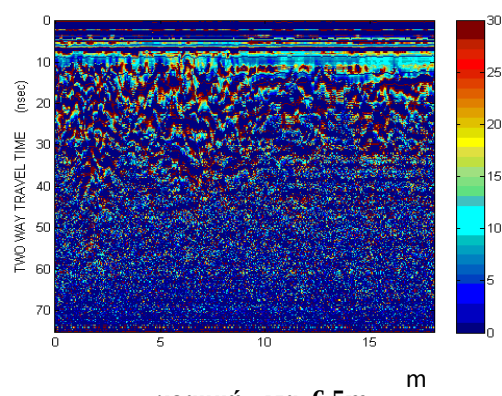
γραμμή στα 5m



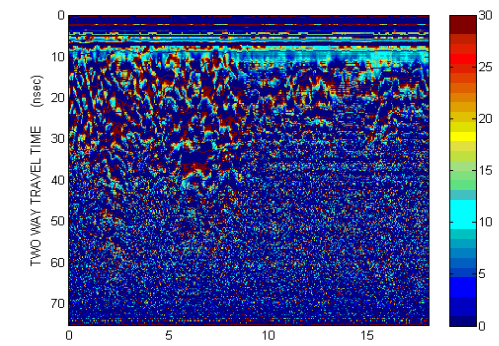
γραμμή στα 5.5m



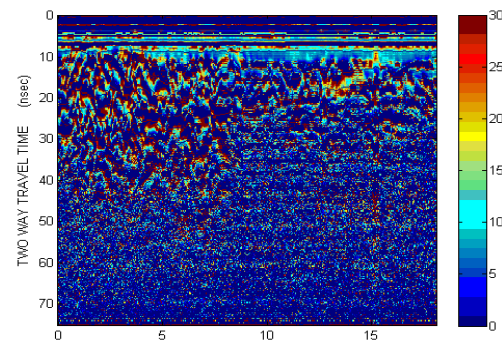
γραμμή στα 6m



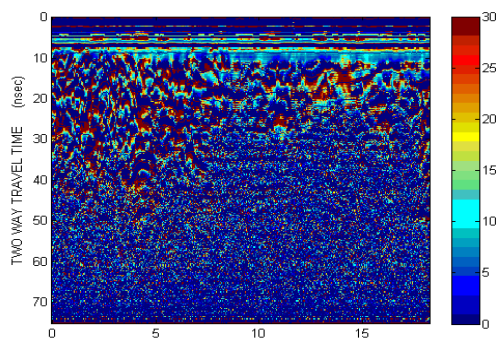
γραμμή στα 6.5m



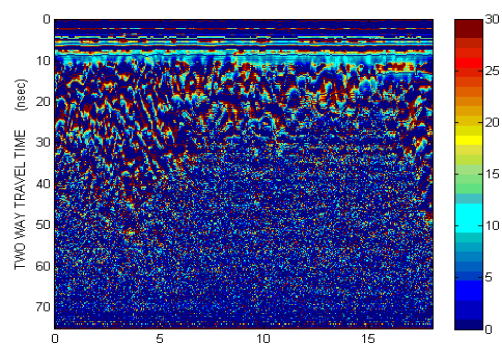
γραμμή στα 7m



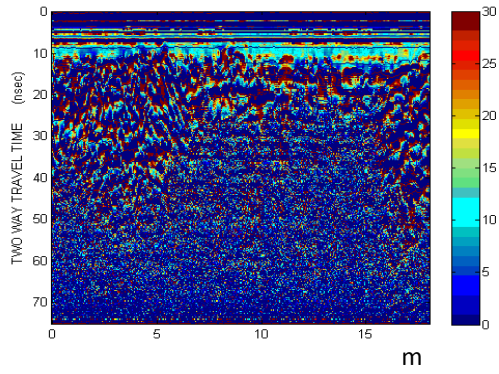
γραμμή στα 7.5m



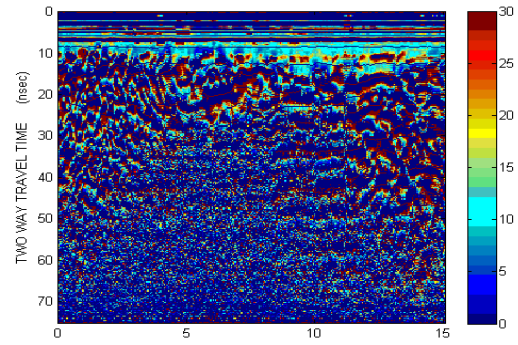
γραμμή στα 8m



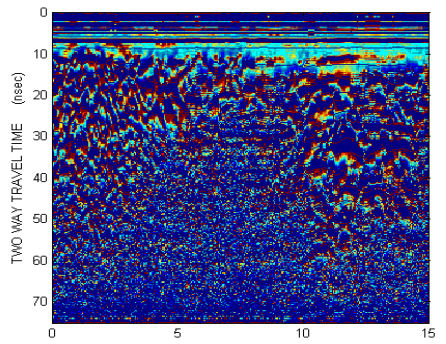
γραμμή στα 8.5m



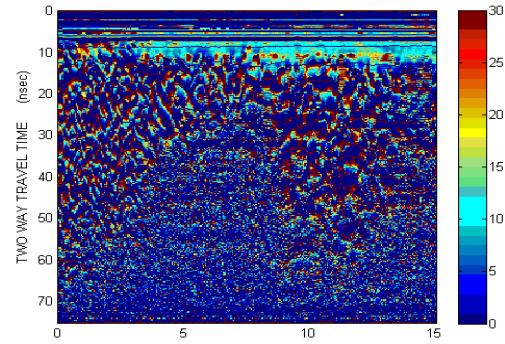
γραμμή στα 9m



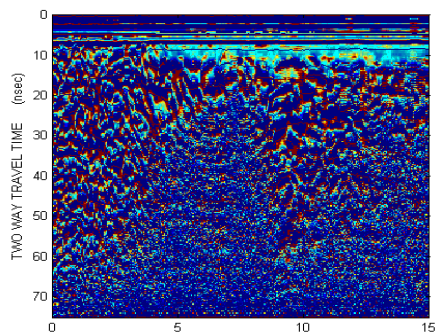
γραμμή στα 9.5m m



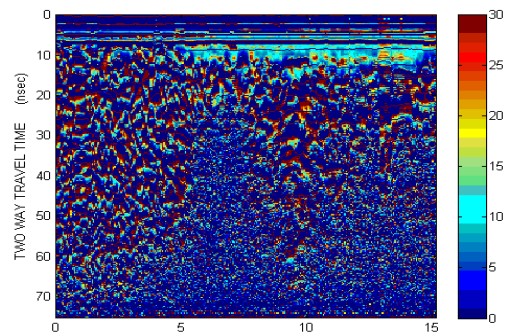
γραμμή στα 10m



γραμμή στα 10.5m m

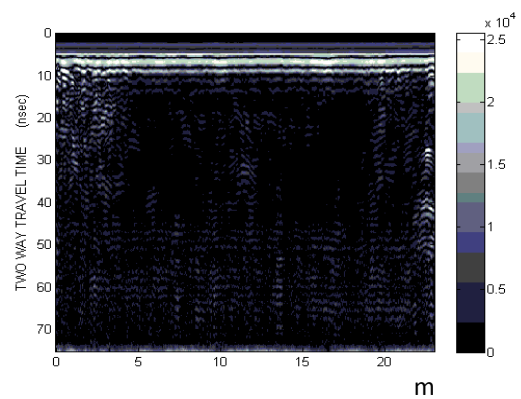
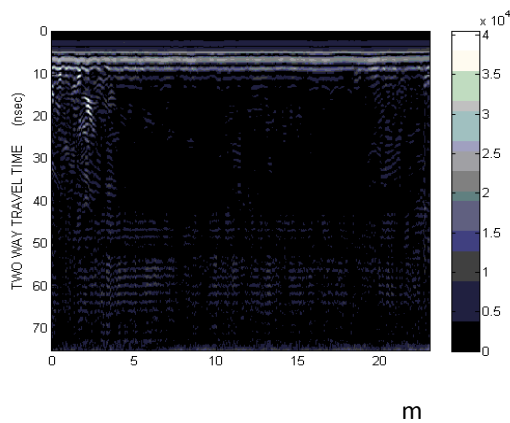


γραμμή στα 11m m

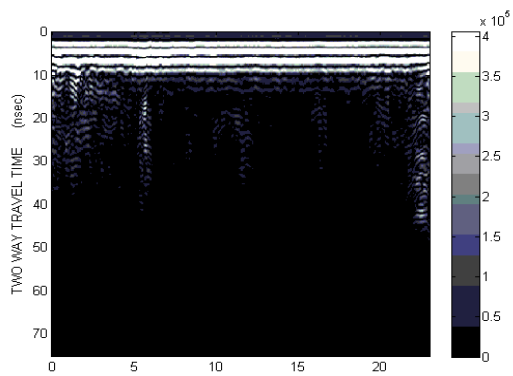


γραμμή στα 11.5m m

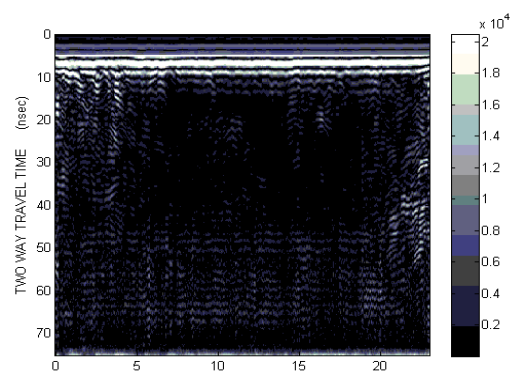
A.8 Product of real trace and cosine of face



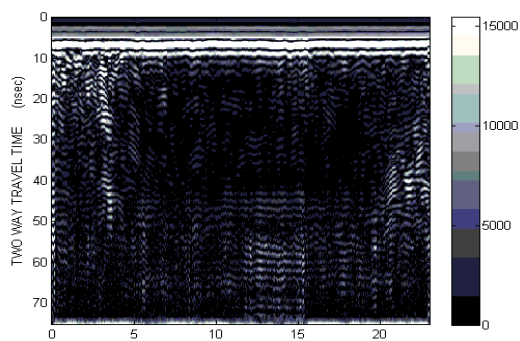
γραμμή στο 0m



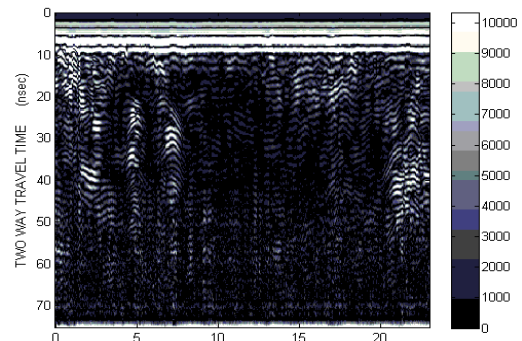
γραμμή στο 0.5m



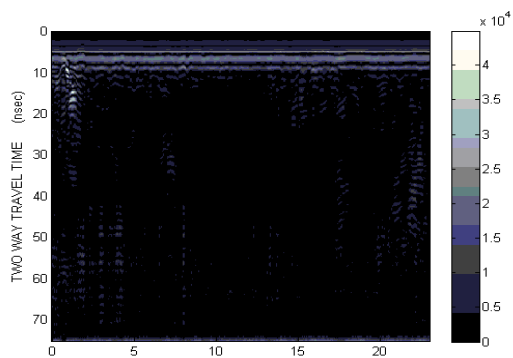
γραμμή στο 1m



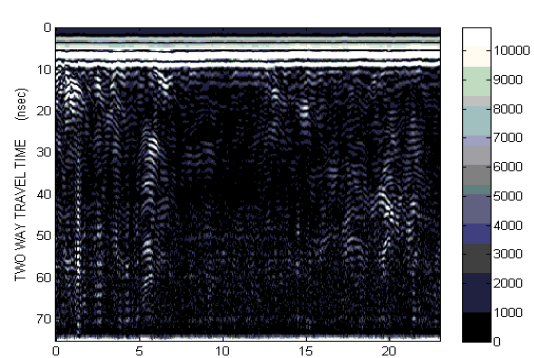
γραμμή στο 1.5m



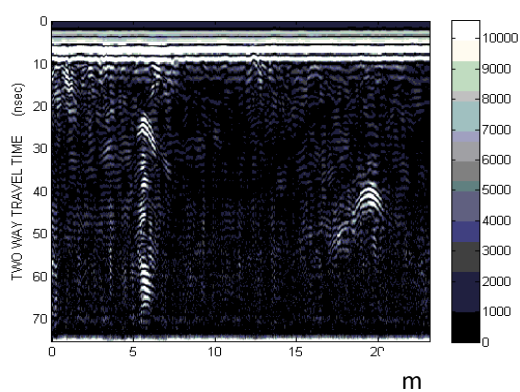
γραμμή στα 2m



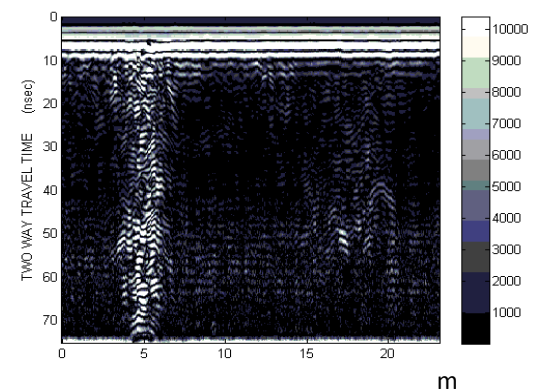
γραμμή στα 2.5m



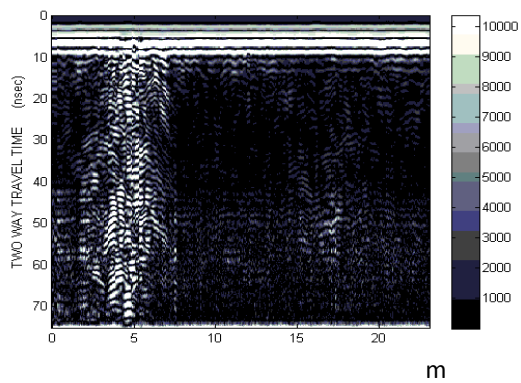
γραμμή στα 3m



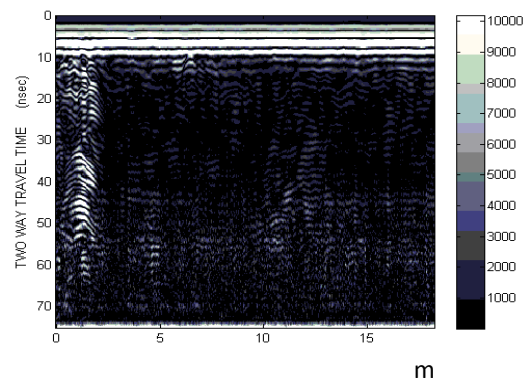
γραμμή στα 3.5m



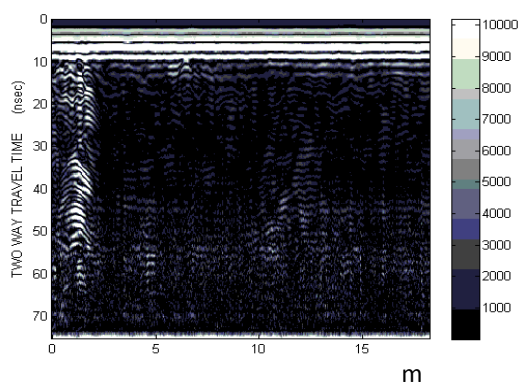
γραμμή στα 4m



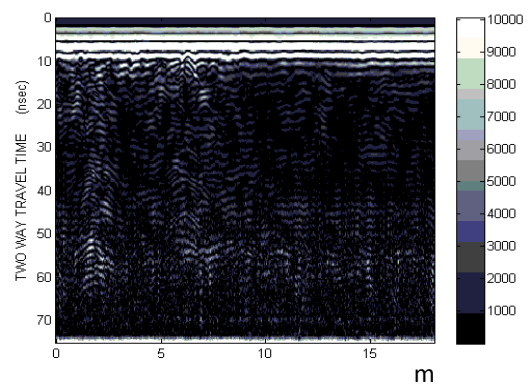
γραμμή στα 4.5m



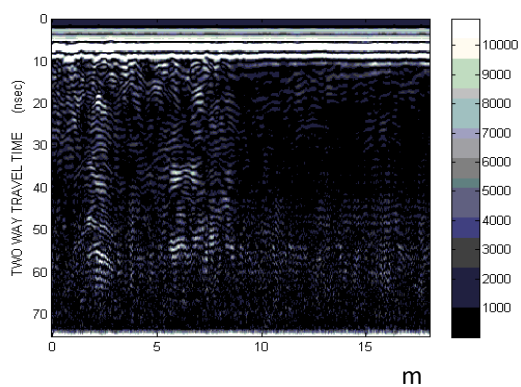
γραμμή στα 5m



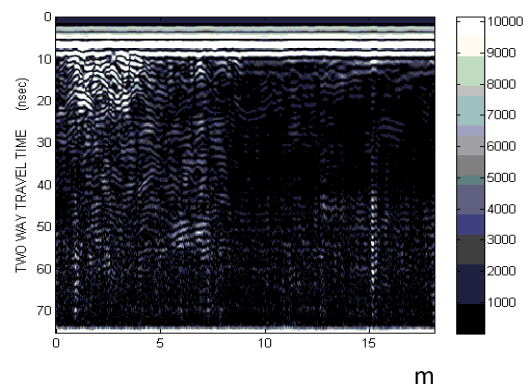
γραμμή στα 5.5m



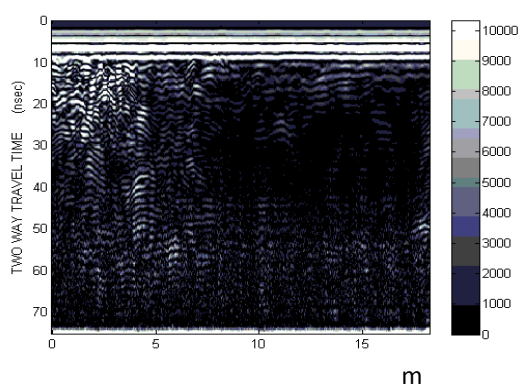
γραμμή στα 6m



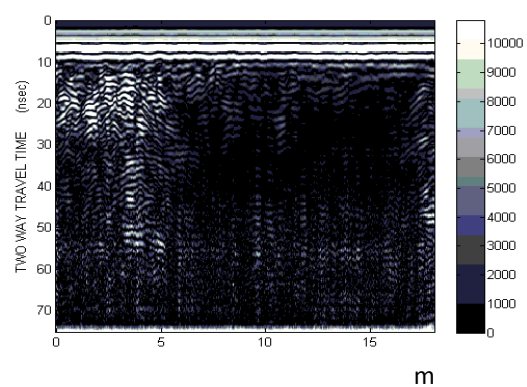
γραμμή στα 6.5m



γραμμή στα 7m

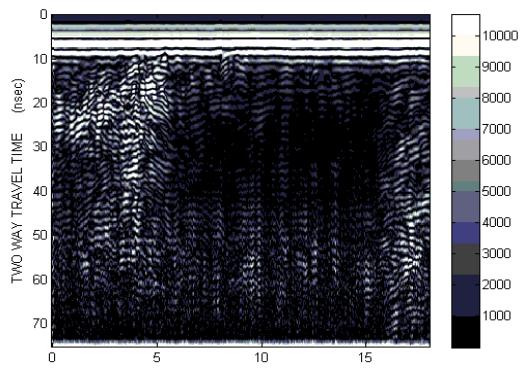


γραμμή στα 7.5m

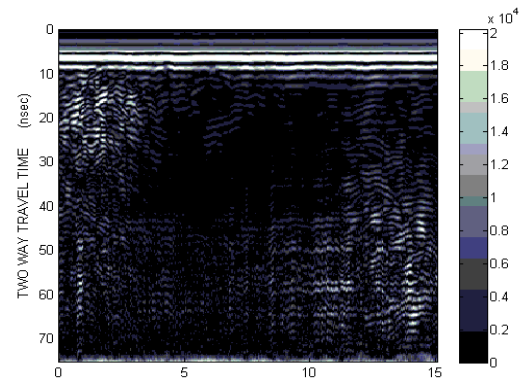


γραμμή στα 8m

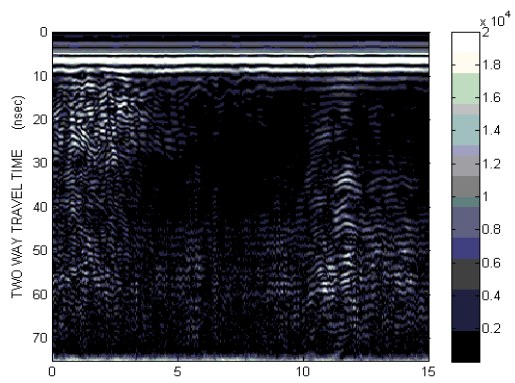
γραμμή στα 8.5m



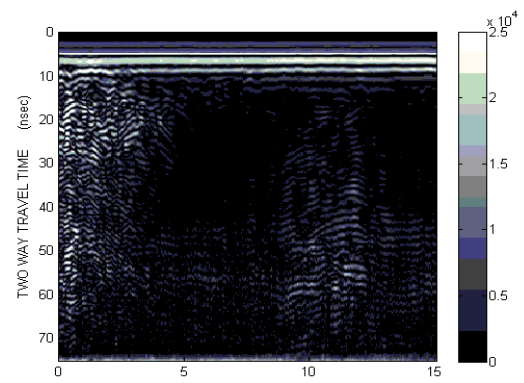
γραμμή στα 9m



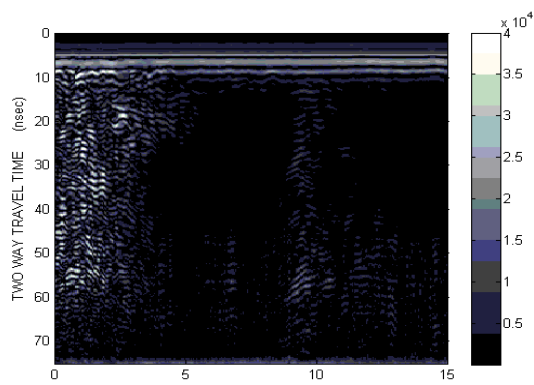
γραμμή στα 9.5m



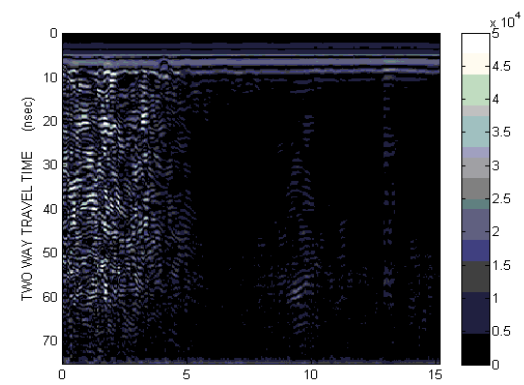
γραμμή στα 10m



γραμμή στα 10.5m



γραμμή στα 11m



γραμμή στα 11.5m

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Β.1 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζόντιων τομών σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db

```

        %Prwta kanoume load ton prwto pinaka
%
%-----
%Dhmiourgia 3D
load db_37.mat;
c=Z1;li=size(Z1);c0=Z1;dt=0.146; % Se ns
for n=38:60;
    a=zeros(li(1),li(2));
        str = ['load db_',num2str(n),'.mat'];eval(str)
        k=['c',num2str(n),'=Z1;'];eval(k);
    %c_name=([num2str(i),'.mat']);c_var=(['c',num2str(i)]);
        g=['sizeZ1=size(c',num2str(n),');'];eval(g);

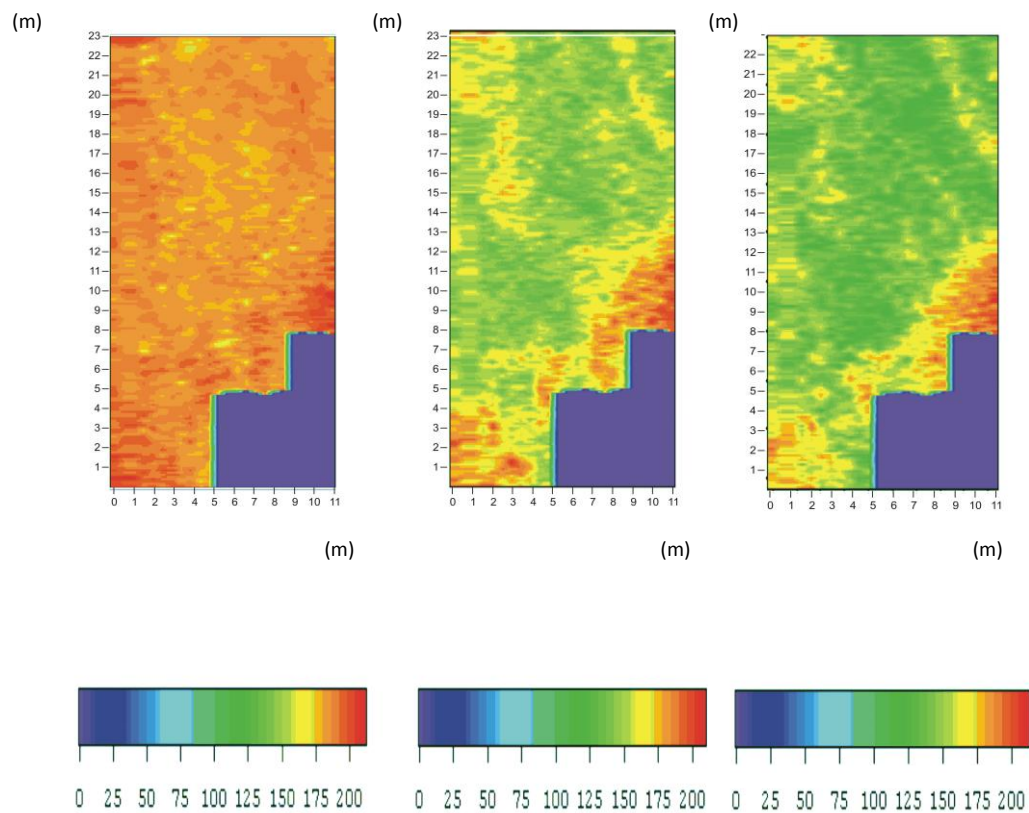
        sizea=size(a);
    if sizeZ1(2)>=li(2);
        r=['a(:,:)=c',num2str(n),'(:,1:li(2));'];eval(r);
    else
        p=['a(:,sizea(2)-sizeZ1(2)+1:sizea(2))=c',num2str(n),';'];
        eval(p);
end
    c=cat(3,c,a);

    end

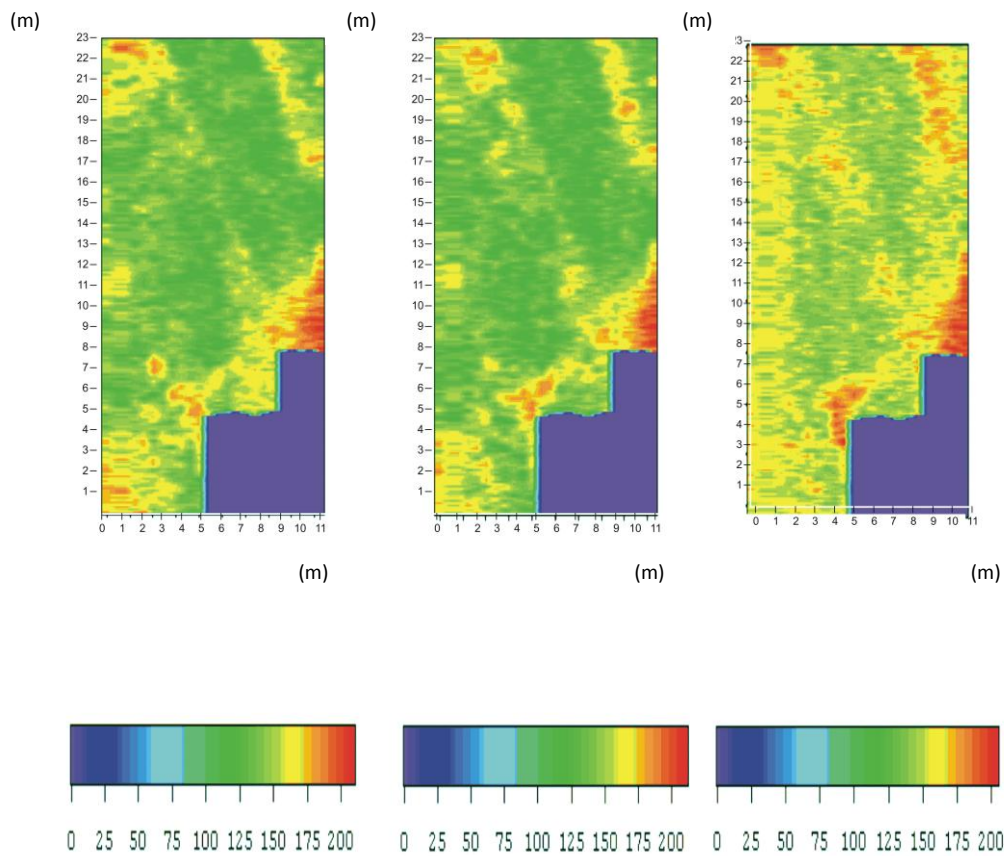
    %Kovw se slices
sizec=size(c);
for k=1:sizec(3);
    for j=1:sizec(2);
        t1=28;
        t2=32;
        d(k,j)=mean(((c(floor(t1./dt):floor(t2./dt),j,k))));
        %d(k,j)=(c(40,j,k));
    end

end

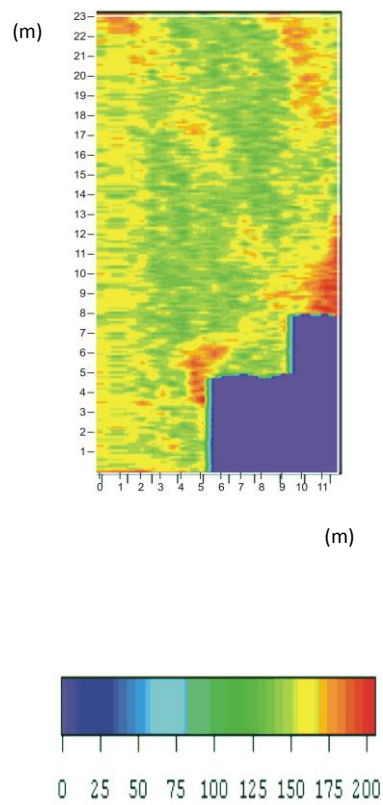
end
% figure;imagesc(fliplr(d));
%colormap(gray);
w=fliplr(d)';
save('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\work\ttanou\gpr\db
m.v\matrix28_32','w','-ASCII')
```

B.2 Οριζόντιες τομών σε στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα db

Οριζόντιες τομές στα 0.33m, 0.56m και 0.76m βάθη περίπου.



Οριζόντιες τομές στα 0.99m, 1.21m και 1.43m βάθη περίπου.



Οριζόντια τομή σε 1.65m βάθος περίπου.

B.3 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζόντιων τομών με ενίσχυση SEC

```
%Prwta kanoume load ton prwto pinaka
%
%Dhmiourgia 3D
load sec37.mat;
c=Z1;li=size(Z1);c0=Z1;dt=0.146; % Se ns
for n=38:60;
    a=zeros(li(1),li(2));
    str = ['load sec',num2str(n),'.mat'];eval(str)
    k=['c',num2str(n),'=Z1;'];eval(k);
    %c_name=( [num2str(i),'.mat']);c_var=(['c',num2str(i)]);
    g=['sizeZ1=size(c',num2str(n),');'];eval(g);

    sizea=size(a);
    if sizeZ1(2)>=li(2);
        r=['a(:,:)=c',num2str(n), '(:,1:li(2));'];eval(r);
    else
        p=['a(:,sizea(2)-sizeZ1(2)+1:sizea(2))=c',num2str(n),';'];
        eval(p);
    end
    c=cat(3,c,a);

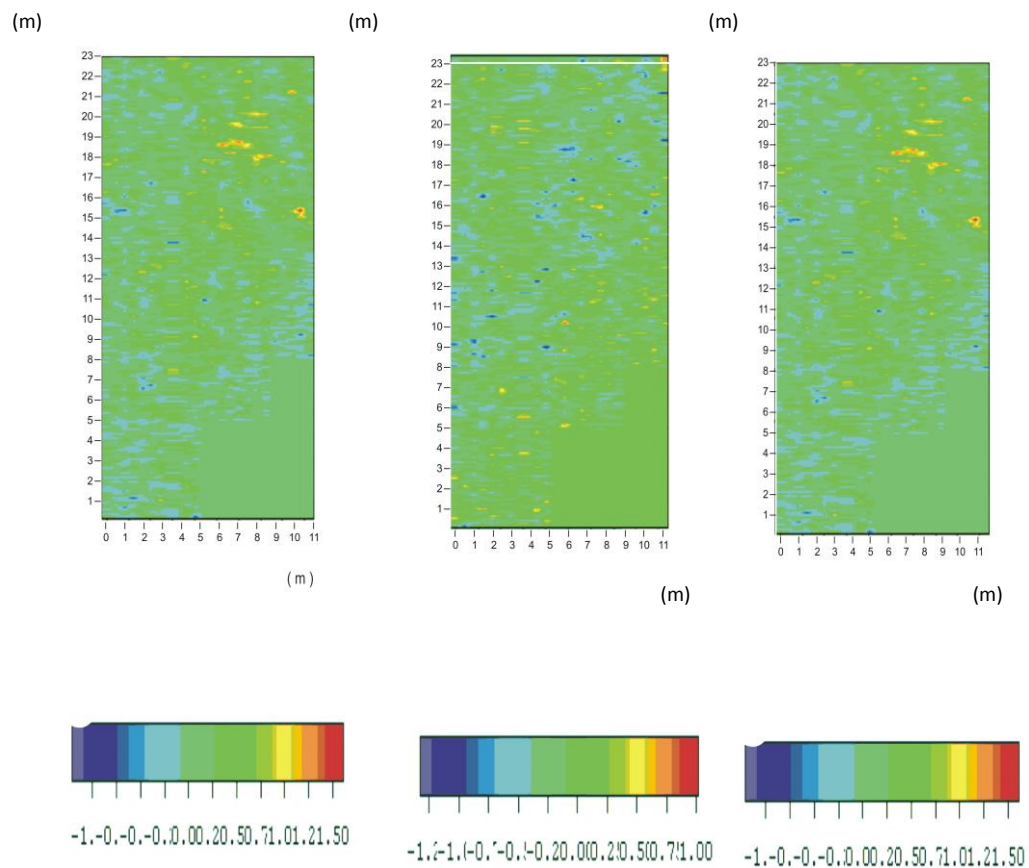
    end

    %Kovw se slices
    sizec=size(c);
    for k=1:sizec(3);
        for j=1:sizec(2);
            t1=28;
            t2=32;
            d(k,j)=max((c(floor(t1./dt):floor(t2./dt),j,k)));
            %d(k,j)=(c(40,j,k));
        end

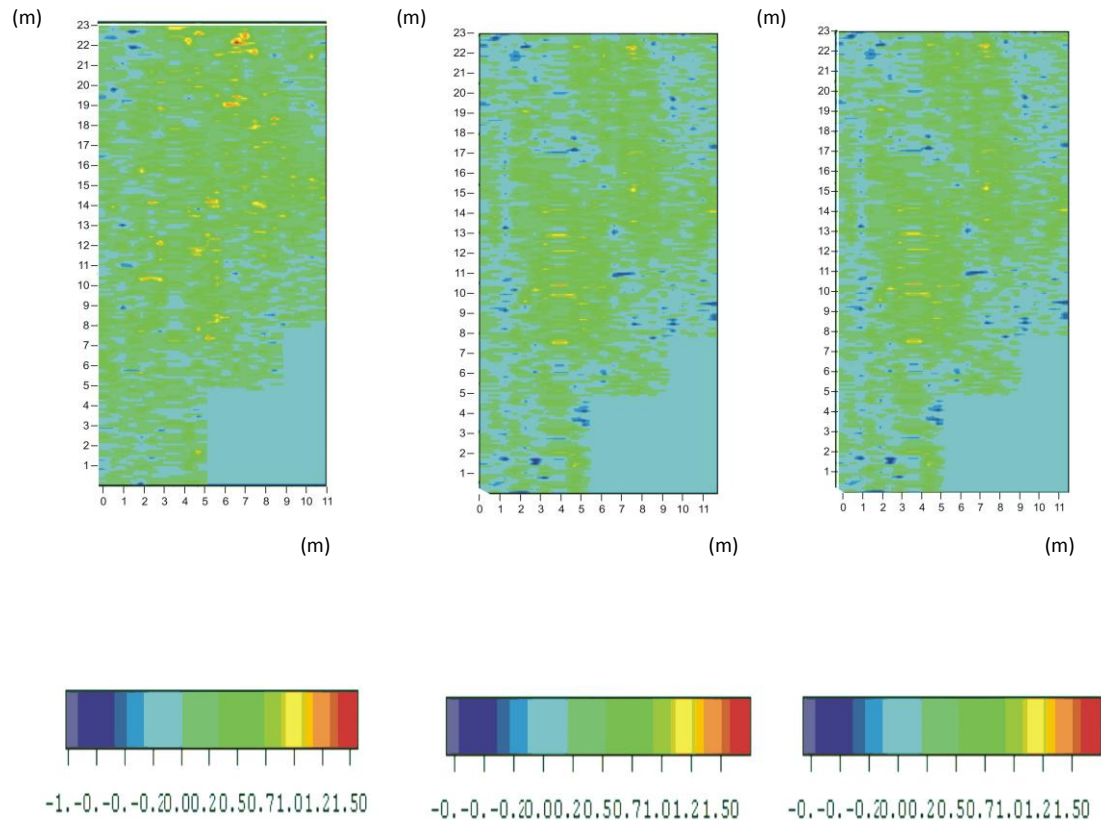
    end

    end
    figure;imagesc(fliplr(d));
    %colormap(gray);
    w=fliplr(d);
```

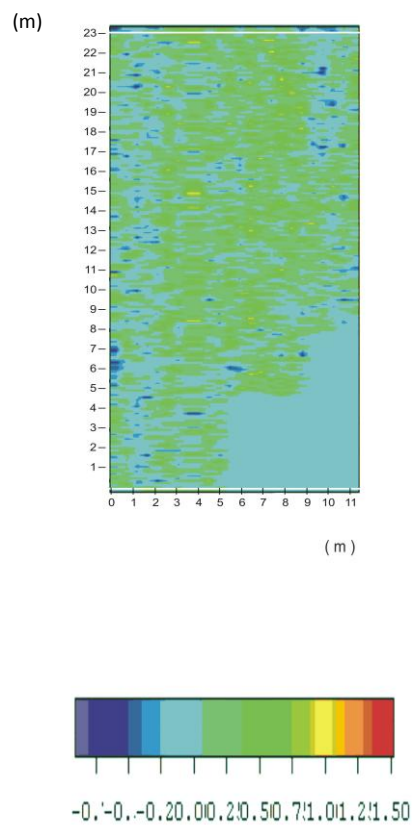
Β.4 Οριζόντιες τομές με ενίσχυση SEC



Οριζόντιες τομές στα 0.33m, 0.56m και 0.76m βάθη περίπου.



Οριζόντιες τομές στα 0.99m, 1,21m και 1,43m βάθη περίπου.



Οριζόντια τομή σε 1.65m βάθος περίπου.

B.5 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζόντιων τομών σε πρώτη παράγωγο του στιγμιαίου πλάτους

```

    %Prwta kanoume load ton prwto pinaka
%
%Dhmiourgia 3D
load td37.mat;
c=Z1;li=size(Z1);c0=Z1;dt=0.146; % Se ns
for n=38:60;
    a=zeros(li(1),li(2));
    str = ['load td',num2str(n),'.mat'];eval(str)
    k=['c',num2str(n),'=Z1;'];eval(k);
    %c_name=( [num2str(i),'.mat']);c_var=(['c',num2str(i)]);
    g=['sizeZ1=size(c',num2str(n),');'];eval(g);

    sizea=size(a);
    if sizeZ1(2)>=li(2);
        r=['a(:,:)=c',num2str(n), '(:,1:li(2));'];eval(r);
    else
        p=['a(:,sizea(2)-sizeZ1(2)+1:sizea(2))=c',num2str(n),';'];
        eval(p);
    end
    c=cat(3,c,a);

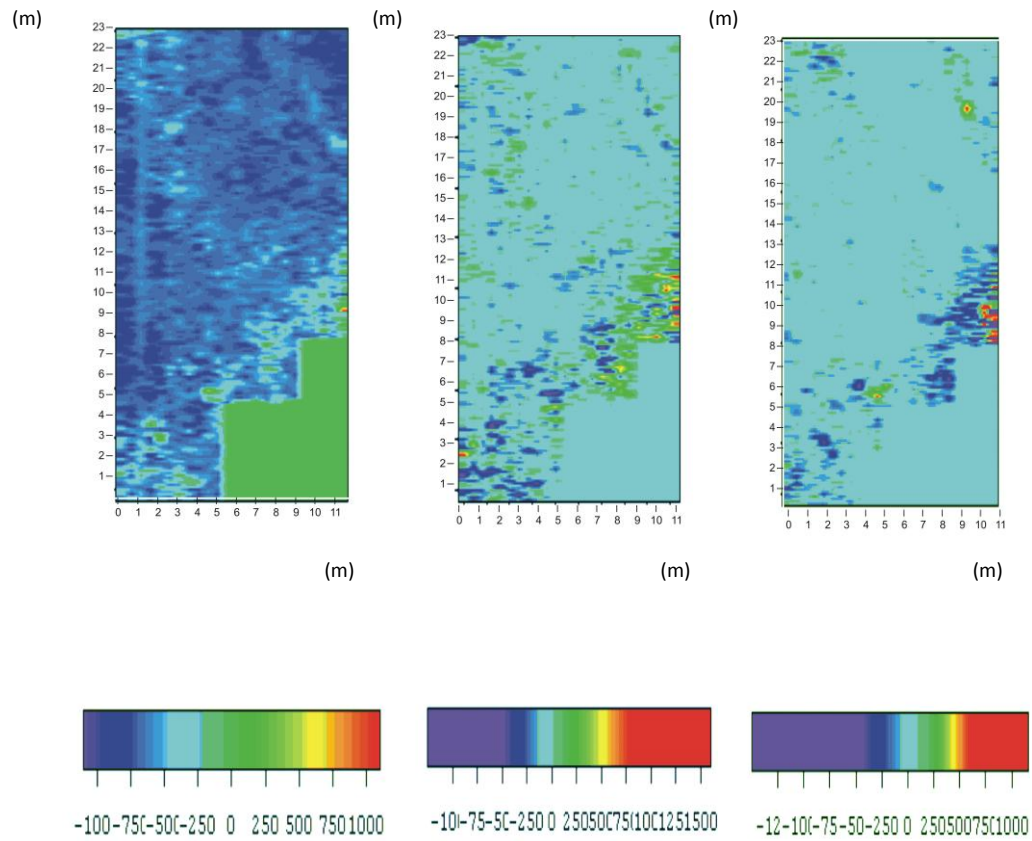
    end

    %Kovw se slices
    sizec=size(c);
    for k=1:sizec(3);
        for j=1:sizec(2);
            t1=28;
            t2=32;
            d(k,j)=mean((c(floor(t1./dt):floor(t2./dt),j,k)));
            %d(k,j)=(c(40,j,k));
        end
    end

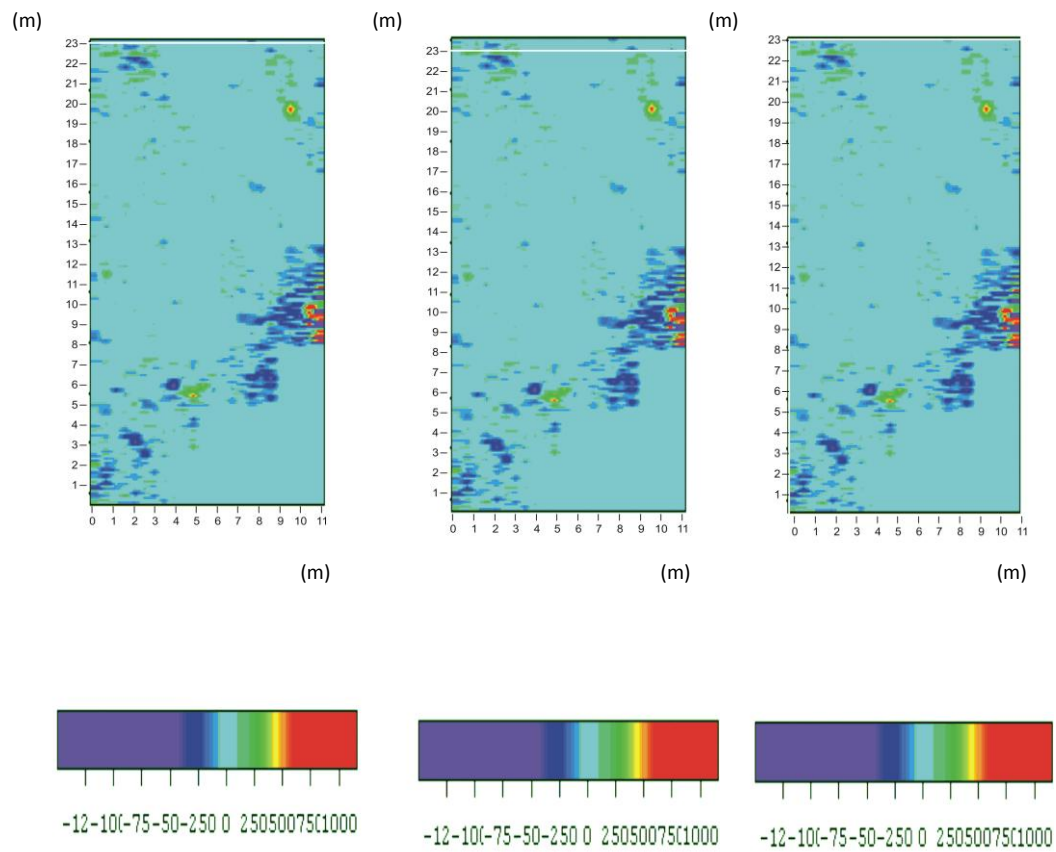
end
figure;imagesc(fliplr(d)');
%colormap(gray);
w=fliplr(d)';
save('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\work\ttanou\gpr\td
m.v\matrix28_32','w','-ASCII')

```

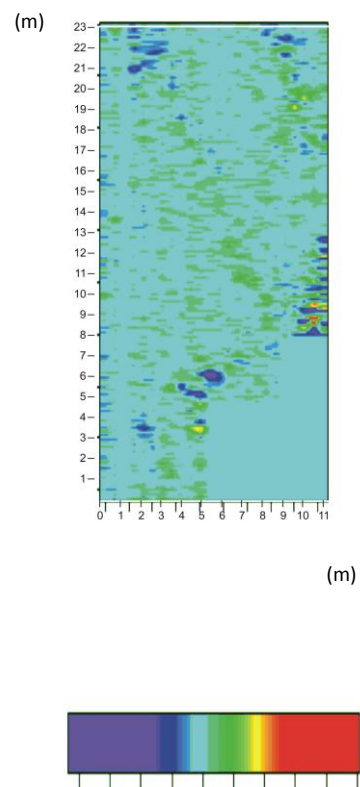
Β.6 Οριζόντιες τομές σε πρώτη παράγωγο του στιγμιαίου πλάτους



Οριζόντιες τομές στα 0.33m, 0.56m και 0.76m βάθη περίπου.



Οριζόντιες τομές στα 0,99m, 1,21m και 1,43m βάθη περίπου.



Οριζόντια τομή σε 1.65m βάθος περίπου.

B.7 Αλγόριθμος στο MATLAB για την δημιουργία οριζόντιων τομών σε στιγμιαία φάση

```

    %Prwta kanoume load ton prwto pinaka
%
%Dhmiourgia 3D
load ip37.mat;
c=Z1;li=size(Z1);c0=Z1;dt=0.146; % Se ns
for n=38:60;
    a=zeros(li(1),li(2));
        str = ['load ip',num2str(n),'.mat'];eval(str)
        k=['c',num2str(n),'=Z1;'];eval(k);
    %c_name=([num2str(i),'.mat']);c_var=(['c',num2str(i)]);
        g=['sizeZ1=size(c',num2str(n),');'];eval(g);

        sizea=size(a);
    if sizeZ1(2)>=li(2);
        r=['a(:,:)=c',num2str(n),':(1:li(2));'];eval(r);
    else
        p=['a(:,sizea(2)-sizeZ1(2)+1:sizea(2))=c',num2str(n),';'];
        eval(p);
    end
    c=cat(3,c,a);

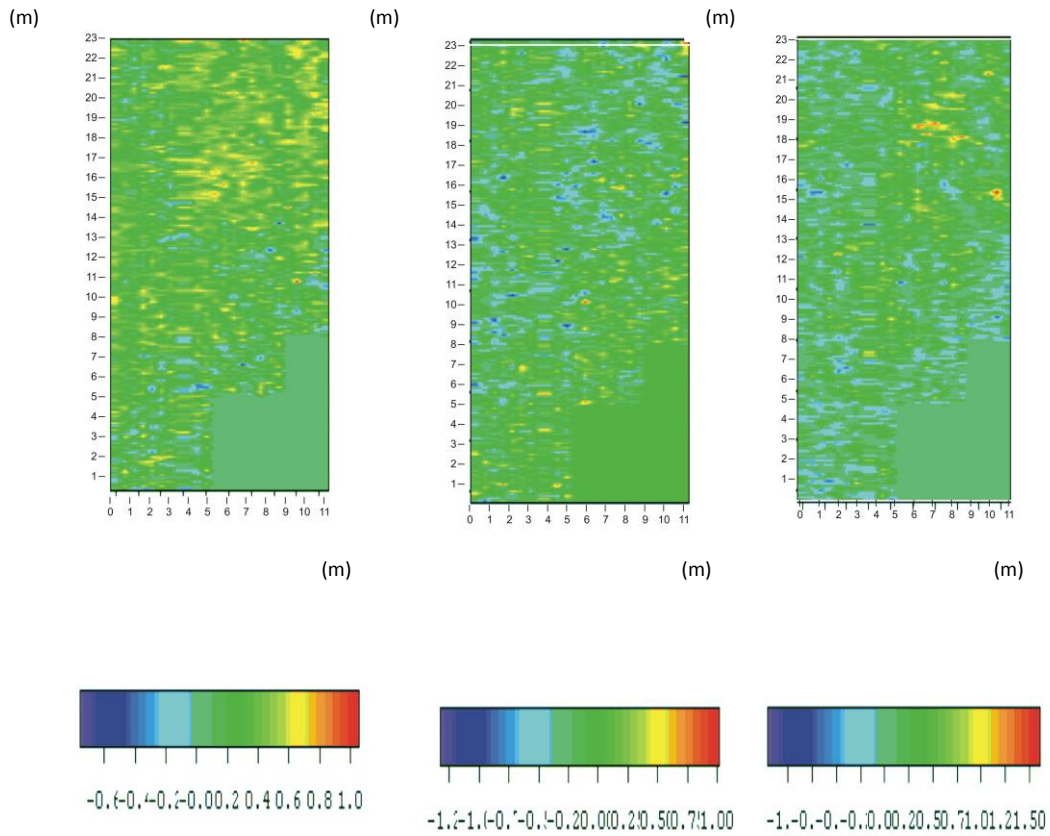
    end

    %Kovw se slices
    sizec=size(c);
    for k=1:sizec(3);
        for j=1:sizec(2);
            t1=28;
            t2=32;
            d(k,j)=mean(((c(floor(t1./dt):floor(t2./dt),j,k))));
            %d(k,j)=(c(40,j,k));
        end
    end

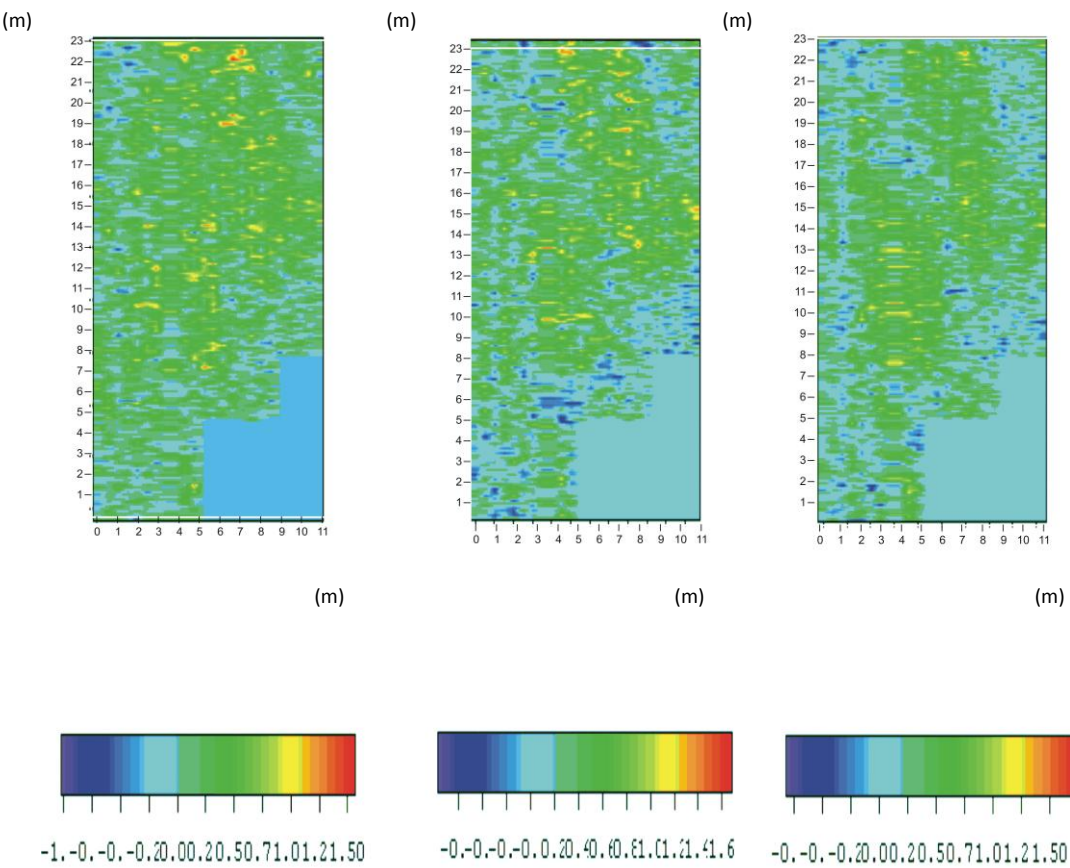
    end
    figure;imagesc(fliplr(d));
    %colormap(gray);
    w=fliplr(d);
    save('C:\Program Files\MATLAB\R2007b\work\ttanou\gpr\td
m.v\matrix28_32','w','-ASCII')

```

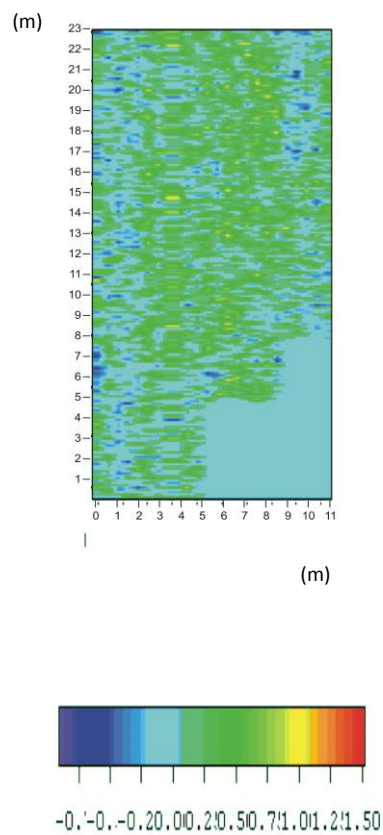
Β.8 Οριζόντιες τομές σε στιγμιαία φάση



Οριζόντιες τομές στα 0.99m, 1.21m και 1.43m βάθη περίπου.



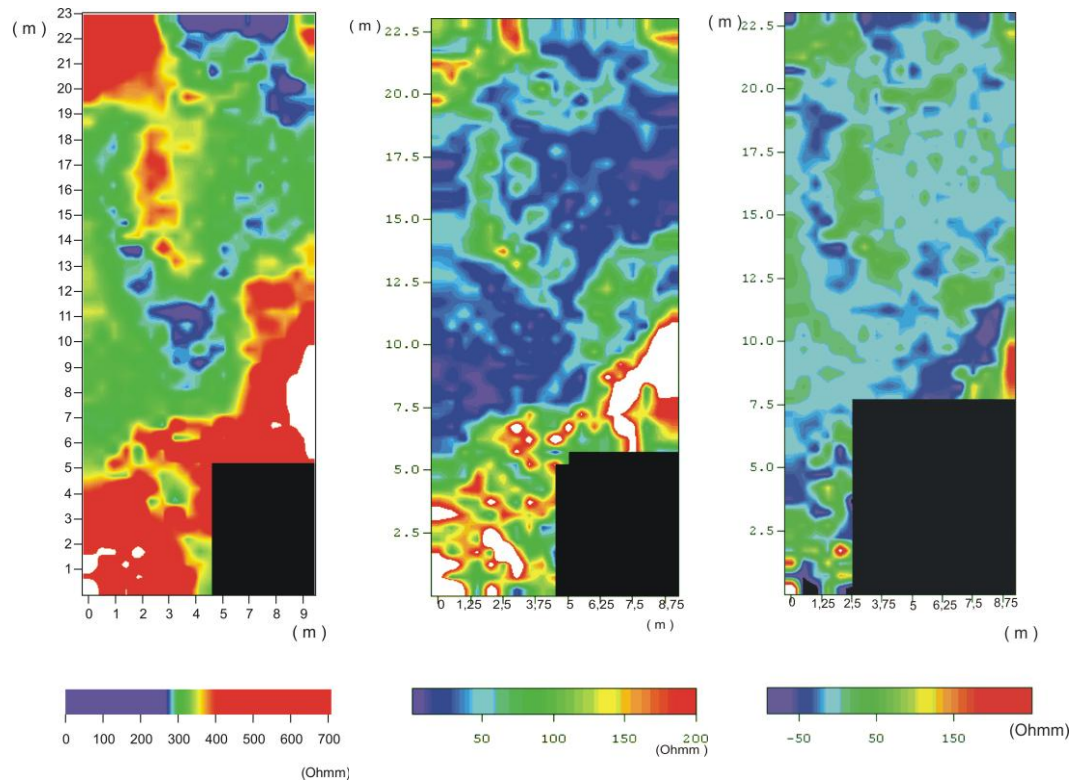
Οριζόντιες τομές στα 0.99m, 1,21m και 1,43m βάθη περίπου.



Οριζόντια τομή σε 1.65m βάθος περίπου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Γ.1 Ηλεκτρική χαρτογράφηση

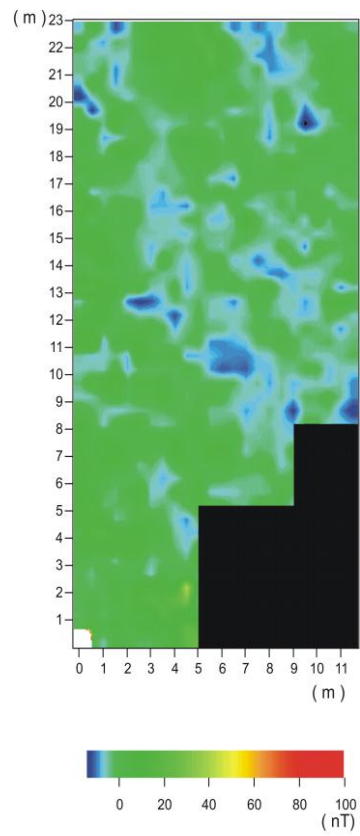


αρχικός χάρτης ηλεκ.
χαρτογράφησης.

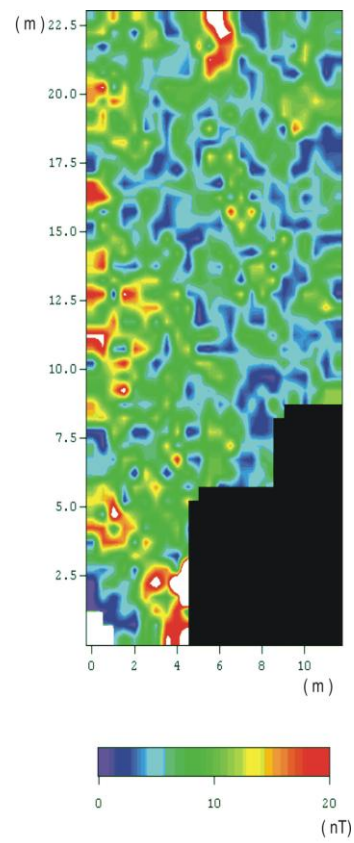
ηλεκ.χαρτογράφηση
(οριζ.βαθμίδα).

ηλεκτρική χαρτογράφηση
μετά απο φιλτράρισμα.

Γ.2 Μαγνητική χαρτογράφηση



αρχικός χάρτης μαγ.
χαρτογράφησης



Χάρτης μαγ.χαρτογράφησης
(οριζ.βαθμίδα)