



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

Γεωφυσική διασκόπηση με τη μέθοδο του γεωραντάρ στα υπεδάφεια τμήματα των Βυζαντινών Τειχών της πόλης των Χανίων.



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΦΑΝΙΑ Α. ΜΠΙΣΑ

Εξεταστική Επιτροπή:

**Αντώνιος Βαφείδης, (Επιβλέπων), Καθηγητής
Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Αναπληρωτής Καθηγητής
Σπανουδάκης Νικόλαος, Δρ. Μηχανικός Ορυκτών Πόρων**

**Χανιά
Ιούλιος, 2009**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την εφαρμογή γεωφυσικής διασκόπησης με τη μέθοδο του γεωραντάρ στα Βυζαντινά Τείχη της Παλαιάς πόλης των Χανίων Κρήτης, στην οδό Σήφακα, για τον εντοπισμό θαμμένων τοιχοδομών και κυρίως για τον εντοπισμό και χαρτογράφηση του προτεινόμενου του Βυζαντινού Τείχους στην εν λόγω περιοχή. Εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η γεωφυσική έρευνα περιλάμβανε τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων με τις μεθόδους του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας, σε τμήμα της οδού Σήφακα διαστάσεων 63x10 m. Διασκοπήθηκαν 126 γραμμές μελέτης, διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ, 14 γραμμές διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ, με τη μέθοδο του γεωραντάρ, καθώς και 5 γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας ΝΑ-ΒΔ και 2 γραμμές διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ.

Η γεωφυσική διασκόπηση, με τη μέθοδο του γεωραντάρ στην οδό Σήφακα, οδήγησε στον εντοπισμό της ζώνης Δ1 που αποδίδεται στο προτείχισμα. Τη μέθοδο του γεωραντάρ στην εν λόγω περιοχή, συμπλήρωσαν μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη ανωμαλιών με υψηλή τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίστοιχες ανωμαλίες εμφανίζονται στις τομές γεωραντάρ και αποδόθηκαν σε ανθρωπογενείς δομές.

Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι το προτείχισμα αναμένεται να βρίσκεται κοντά στο πεζοδρόμιο της οδού Σήφακα, σε βάθος 0.5-1.75 m, με διεύθυνση νοτιοδυτικά-βορειοανατολικά. Επίσης στις καταγραφές του γεωραντάρ είναι εμφανείς ανωμαλίες που αποδίδονται σε τμήμα των θεμελίων του Βυζαντινού τείχους καθώς και σε θαμμένα ερείπια.

Η παρούσα διπλωματική απέδειξε ότι η συνδυασμένη εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, συμβάλλει στην ανάδειξη ανωμαλιών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος και ειδικότερα στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη θέση των θαμμένων κτισμάτων σε τμήμα της οδού Σήφακα. Οι τομές γεωραντάρ προσφέρουν καλύτερη ανάλυση για μικρά βάθη, σε σχέση με τις γεωηλεκτρικές τομές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους διάβασαν την εργασία αυτή και έκαναν διορθώσεις, σχόλια και παρατηρήσεις.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Βαφείδη Αντώνιο, για την ανάθεση του θέματος, καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις και σχόλια που έκανε στο κείμενο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δρ. κύριο Σπανουδάκη Νικόλαο, για τη βοήθεια που μου προσέφερε στη συγκέντρωση υλικού, διορθώσεις, παρατηρήσεις στο κείμενο και γενικότερα για την πολύτιμη βοήθεια του για τη διεκπεραίωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλω στον καθηγητή κύριο Μανούτσογλου Εμμανουήλ, ο οποίος με τίμησε αποδεχόμενος να συμμετάσχει ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Επίσης ευχαριστώ τον προϊστάμενο της 28^{ης} Εφορείας Βυζαντινών Αρχαιοτήτων, αρχαιολόγο Α΄, κύριο Ανδριανάκη Μιχαήλ, για τη χορήγηση άδειας διεξαγωγής της γεωφυσικής έρευνας, καθώς και την αρχαιολόγο κυρία Μπούρμπου Χρύσα, για τις πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα αρχαιολογικά στοιχεία της περιοχής.

αφιερώνεται
στους γονείς μου
Σ.Μ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ.....	1
1.3 Εφαρμογές του γεωραντάρ.....	2
1.3.1 Παραδείγματα εφαρμογών του γεωραντάρ.....	3
1.4 Η συνεισφορά του γεωραντάρ στην αρχαιολογία.....	6
1.4.1 Περιορισμοί του γεωραντάρ στην αρχαιολογία.....	8
1.5 Δομή εργασίας.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	10
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Ιστορική αναδρομή των Βυζαντινών οχυρώσεων των Χανίων.....	10
2.2.1 Το Βυζαντινό τείχος σήμερα.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	15
3.1 Εισαγωγή.....	15
3.2 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.....	15
3.3 Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	17
3.4 Περιβάλλον διασκόπησης.....	18
3.5 Μέθοδοι διασκόπησης του γεωραντάρ (GPR).....	18
3.6 Παράμετροι διασκόπησης.....	21
3.6.1 Συχνότητα εκπομπής.....	21

3.6.2	Ολικός χρόνος καταγραφής.....	22
3.6.3	Διάστημα δειγματοληψίας.....	22
3.6.4	Βήμα διασκόπησης.....	22
3.6.5	Απόσταση των κεραιών.....	23
3.6.6	Κατακόρυφη υπέρθεση.....	23
3.6.7	Προσανατολισμός κεραιών.....	24
3.7	Τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ.....	24
3.7.1	Απεικόνιση των δεδομένων.....	25
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΛΛΟΓΗ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ		
ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ		27
4.1	Εισαγωγή.....	27
4.2	Σχεδιασμός διασκόπησης.....	27
4.3	Επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων του γεωραντάρ.....	33
4.4	Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης.....	37
4.5	Σύγκριση τομών γεωραντάρ-και γεωηλεκτρικών τομών.....	38
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ		
ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ		43
5.1	Εισαγωγή.....	43
5.2	Τομές γεωραντάρ (K2).....	43
5.3	Οριζόντιες τομές γεωραντάρ.....	51
5.4	Τρισδιάστατη απεικόνιση δεδομένων γεωραντάρ.....	64
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ		
6.1	Συμπεράσματα.....	70
6.2	Προτάσεις.....	70
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		72
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κάνναβος γεωραντάρ K1 διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ.....		77
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κάνναβος γεωραντάρ K₂ διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ.....		99

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Κάνναβος ηλεκτρικής τομογραφίας διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ.....	106
--	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

3.1	Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ (Annan, 2002).....	16
3.2	Πορεία διάδοσης των κυριότερων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	17
3.3	Μέθοδος ανάκλασης (α) και τομογραφίας (β) σε γεώτρηση.....	19
3.4	Διασκόπηση με τη μέθοδο της ανάκλασης, στο σχήμα παρατηρούνται και μερικές από τις παραμέτρους διασκόπησης (Annan, 2005).....	19
3.5	Διασκόπηση με τη μέθοδο κοινού ενδιάμεσου σημείου, όπου T1, T2, T3 είναι η κεραία του πομπού και R1, R2, R3 είναι η κεραία του δέκτη αντίστοιχα (Annan, 2005).....	20
3.6	Προσανατολισμοί κεραιών με το ηλεκτρικό τους πεδίο κάθετο στον κύριο άξονα τους.....	24
4.1	Ο κάνναβος K1 του γεωραντάρ στην οδό Σήφακα. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης διεύθυνσης NA-BΔ με μπλε χρώμα	30
4.2	Ο κάνναβος K2 του γεωραντάρ στην οδό Σήφακα. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ με κόκκινο χρώμα	31
4.3	Οι γραμμές μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας στην οδό Σήφακα με πράσινο χρώμα και συγκεκριμένα οι T1 (0 m), T2 (5 m) και T3 (10 m).....	32
4.4	Ακατέργαστη τομή γεωραντάρ f001. Προέκυψε από μετρήσεις με κεραίες των 400 MHz και διάστημα δειγματοληψίας 0.146 ns.....	34
4.5	Η τομή γεωραντάρ f001 μετά από την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow στα αρχικά δεδομένα.....	35
4.6	Η τομή γεωραντάρ f001 μετά από την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow και του φίλτρου ενίσχυσης (SEC).....	35
4.7	Εφαρμογή του φίλτρου μέσης τιμής στην τομή του σχήματος 4.6.....	36
4.8	Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB (dB instantaneous envelope) της τομής f001.....	36
4.9	Βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων (F:/CRINNO EMMERIC.htm)	38
4.10	(α) Γεωηλεκτρική τομή στα 0 m. Καταγράφονται υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης (κόκκινο-πορτοκαλί χρώμα) με μαύρους κύκλους. (β) Τομή	

	γεωραντάρ f001, καταγραφή ισχυρών ανακλάσεων (μπλε κύκλοι) στους χρόνους 10-35 ns και βάθος 0.5-1.75 m.....	39
4.11	(α) Γεωηλεκτρική τομή στα 5 m. (β) Τομή γεωραντάρ f011, διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ (Κ ₁). Καταγράφονται οι υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις και τα ισχυρά ανακλώμενα και περιθλώμενα κύματα με κύκλους.....	40
4.12	(α) Γεωηλεκτρική τομή στα 10 m και (β) τομή γεωραντάρ f021, διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ (Κ ₁). Διακρίνονται υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης και ισχυρές ανακλάσεις με κύκλους πάνω στις τομές.....	41
5.1	Τομή γεωραντάρ f001 (Κ ₂).....	44
5.2	Τομή γεωραντάρ f002 (Κ ₂).....	45
5.3	Τομή γεωραντάρ f003 (Κ ₂).....	45
5.4	Τομή γεωραντάρ f004 (Κ ₂).....	46
5.5	Τομή γεωραντάρ f005 (Κ ₂).....	46
5.6	Τομή γεωραντάρ f006 (Κ ₂).....	47
5.7	Τομή γεωραντάρ f007 (Κ ₂).....	47
5.8	Τομή γεωραντάρ f008 (Κ ₂).....	48
5.9	Τομή γεωραντάρ f009 (Κ ₂).....	48
5.10	Τομή γεωραντάρ f010 (Κ ₂).....	49
5.11	Τομή γεωραντάρ f011 (Κ ₂).....	49
5.12	Τομή γεωραντάρ f012 (Κ ₂).....	50
5.13	Τομή γεωραντάρ f013 (Κ ₂).....	50
5.14	Τομή γεωραντάρ f014 (Κ ₂).....	51
5.15	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 10 ns.....	53
5.16	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 15 ns.....	53
5.17	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 20 ns.....	54
5.18	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 25 ns.....	54
5.19	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 30 ns.....	55
5.20	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 35 ns.....	55
5.21	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 40 ns.....	56
5.22	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 45 ns.....	56
5.23	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ ₁) στα 50 ns.....	57
5.24	Απεικόνιση οριζόντιων τομών γεωραντάρ σε διαδοχικά βάθη (Κ ₁), για χρόνους διαδρομής από 0-35 ns.....	58

5.25	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 10 ns.....	59
5.26	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 15 ns.....	59
5.27	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 20 ns.....	60
5.28	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 25 ns.....	60
5.29	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 30 ns.....	61
5.30	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 35 ns.....	61
5.31	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 40 ns.....	62
5.32	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 45 ns.....	62
5.33	Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K_2) στα 50 ns.....	63
5.34	Απεικόνιση οριζόντιων τομών γεωραντάρ σε διαδοχικά βάθη (K_2), για χρόνους διαδρομής από 0-40 ns.....	64
5.35	(α), (β) Τρισδιάστατη Γ4 απεικόνιση όγκου των δεδομένων, από άλλη οπτική γωνία. Διακρίνονται δύο οριζόντιες τομές στα 10 ns και στα 35 ns περίπου, καθώς και δύο κάθετες στα 10 m και στα 50 m από την αρχή του καννάβου K1.....	67
5.36	Τρισδιάστατη απεικόνιση όγκου των δεδομένων. Διακρίνονται δύο οριζόντιες τομές στα 10 ns και στα 25 ns, καθώς και τρεις κάθετες στα 5 m, στα 30 m και στα 50 m.....	68
5.37	Τρισδιάστατη απεικόνιση όγκου των δεδομένων του γεωραντάρ. Διακρίνονται δύο οριζόντιες τομές στα 10 ns και στα 35 ns περίπου, καθώς και δύο κάθετες στα 10 m και στα 50 m από την αρχή του καννάβου K1.....	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1.1	Διασκόπηση με γεωραντάρ στο Βόρειο Οντάριο του Καναδά (κεραίες των 50 MHz, Annan, 2005).....	3
1.2	(α) Τομή γεωραντάρ με κεραίες των 50 MHz κατά μήκος μιας λωρίδας εδάφους. (β) Ίδια τομή γεωραντάρ πέντε χρόνια αργότερα (Annan, 2005).....	4
1.3	Εφαρμογή του GPR στην επιστήμη μελέτης των πάγων (δεδομένα από το Πανεπιστήμιο Carleton, τομέας γεωλογίας, Καναδά), (Annan, 2001).....	5
1.4	Εφαρμογή του GPR στην οδοποιία (Annan, 2001).....	6
2.1	Απεικόνιση του βυζαντινού τείχους από τον F. Basilicata, 1618.....	11
2.2	Το τείχος στην οδό Σήφακα όπως σώζεται σήμερα (www.chania.gr/city/monuments/byzantine-wall.html).....	13
2.3	(α), (β). Η ανασκαφή στη νότια πλευρά του Βυζαντινού Τείχους, στη συμβολή των οδών Καραολή Δημητρίου και Κατρέ όπου διακρίνεται και ο ορθογώνιος πύργος (πριν την ανασκαφή) 2005.....	14
2.4	Το προτείχισμα που αποκαλύφθηκε στη νότια πλευρά του Βυζαντινού Τείχους, στην οδό Καραολή Δημητρίου και Κατρέ (ανασκαφή 2005).....	14
4.1	Αεροφωτογραφία της πόλης των Χανίων στην οδό Σήφακα, όπου οριοθετείται η περιοχή μελέτης (www.google-earth.gr).....	29

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

3.1	Ενδεικτικές τιμές του βάθους διασκόπησης συναρτήσει της συχνότητας (Annan, 2001).....	21
3.2	Η προτεινόμενη απόσταση των κεραιών για διάφορες τιμές της συχνότητας (Σπανουδάκης, 2001).....	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά πληροφορίες για την ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ, τα πεδία εφαρμογής του και πιο συγκεκριμένα για τη συνεισφορά του γεωραντάρ στην αρχαιολογία. Παρατίθενται επίσης παραδείγματα από τη χρήση του γεωραντάρ για τον εντοπισμό ρυπασμένων εδαφών, για ανίχνευση ρωγμών σε πάγους, καθώς και για ανίχνευση ρωγμών στην οδοποιία.

1.2 Ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ

Το γεωραντάρ είναι υψηλής ευκρίνειας ηλεκτρομαγνητική τεχνική, η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία 30 χρόνια κυρίως για τη μελέτη του ρηχού υπεδάφους, τον έλεγχο του οδοστρώματος και την εξέταση αστοχιών σε γέφυρες και κατασκευές. Επίσης χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρωγμών και αστοχιών σε πετρώματα (Toshioka et al., 1995), στον προσδιορισμό της στρωματογραφίας (Davis and Annan 1989, Dominic et al., 1995), στην αρχαιολογική έρευνα (Sternberg 1995), στον έλεγχο της ποιότητας ασφαλοτάπητα (Hugenschmidt et al., 1998), στη διάβρωση σκυροδέματος (Lorenzo et al., 2001), στον προσδιορισμό της διαπερατότητας (Corbeanu et al., 2002), στον εντοπισμό υγρών ρύπων στο υπέδαφος (Greenhouse and Brewster 1993, Brewster and Annan, 1994, Benson and Stubben, 1997, Orlando 2002), στον εντοπισμό εγχοίλων (Spanoudakis et al., 2004) και σε άλλες εφαρμογές. Ο Olhoeft (1988) παρέχει εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα για τις χρήσεις του γεωραντάρ.

Το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα γεωραντάρ παρουσιάστηκε από τους Moffat και Puskar το 1976. Το σύστημα αυτό περιλάμβανε βελτιωμένη κεραία με αποτέλεσμα να λαμβάνονται πιο ακριβείς μετρήσεις και χρησιμοποιήθηκε σε πληθώρα εφαρμογών όπως στον προσδιορισμό υπόγειων ανωμαλιών, τούνελ, ορυχείων καθώς και της περιεχόμενης υγρασίας των εδαφών. Επιπλέον συνεισφορά των Moffat και Puskar (1976) αποτέλεσε η ανάπτυξη μεθόδων υπολογισμού της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Το 1982 ο Ulriksen και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν βελτιωμένες μεθόδους ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων του γεωραντάρ, ενώ η εξέλιξη της τεχνολογίας είχε ως επακόλουθο και την περαιτέρω βελτίωση αυτών των μεθόδων (Smemoe, 2000).

1.3 Εφαρμογές του γεωραντάρ

Η γεωφυσική μέθοδος του γεωραντάρ είναι μία μη καταστρεπτική μέθοδος με μεγάλο πεδίο εφαρμογών. Εξαιτίας των τεχνικής και οικονομικής φύσεως πλεονεκτημάτων, παρέχουν σύντομη μελέτη με άμεσα αποτελέσματα ερευνών, αποφυγή άσκοπων εργασιών, ευκολία μετακίνησης μηχανήματος σε οποιονδήποτε χώρο και επιφάνεια, προστασία περιβάλλοντος από λανθασμένες ενέργειες καθώς και οικονομία χρόνου και χρήματος.

Οι εφαρμογές του γεωραντάρ μπορούν να διακριθούν ουσιαστικά σε τρεις κατηγορίες: α) Για γεωλογικούς σκοπούς, όταν το βάθος διασκόπησης είναι σημαντικότερο από την διακριτική ικανότητα, γι' αυτό χρησιμοποιούνται κεραίες συχνότητας 2 MHz έως 50 MHz. β) Για εφαρμογές στην αρχαιολογία, όπου χρησιμοποιούνται κεραίες συχνότητας 50 MHz–500 MHz. γ) Για εφαρμογές στις επιστήμες των μηχανικών και στις μη καταστροφικές δοκιμές (Non Destructive Testing, NDT), όπου η διακριτική ικανότητα είναι το ζητούμενο, γι' αυτό χρησιμοποιούνται κεραίες συχνότητας 500 MHz-2000 MHz (Σπανουδάκης, 2002).

Τομείς εφαρμογής του γεωραντάρ αποτελούν οι ακόλουθοι:

- **Γεωλογία:** απεικόνιση των γεωλογικών σχηματισμών μέχρι το βάθος των 50 m, εντοπισμός και καταγραφή στοών, σπηλαίων.
- **Αρχαιολογία:** εντοπισμός θαμμένων αρχαίων κτισμάτων, εντοπισμός θεμελίων και πιθανών διαβρώσεων σε αναδειχθέντα κτίσματα, έρευνα κάτω από υπάρχοντα αρχαιολογικά μνημεία ή κτίσματα χωρίς την παραμικρή παρέμβαση σε αυτά.
- **Οδοποιΐα:** χαρτογράφηση πάχους ασφάλτου και των επιστρώσεων.
- **Κατασκευές:** ανάλυση στρωματογραφίας σε δρόμους, ανίχνευση αστοχιών/κενών, απεικόνιση του οπλισμού στο τσιμέντο και υπόγειων σωλήνων και καλωδίων.

- **Περιβαλλοντικές:** στο λατομικό και μεταλλευτικό τομέα, διαχείριση απορριμμάτων και υπολειμμάτων (πχ. θαμμένα απόβλητα), καθώς και για εντοπισμό κατάλληλου υπεδάφους για χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (www.geoanalysis.gr).

1.3.1 Παραδείγματα εφαρμογών του γεωραντάρ

Στη συνέχεια αναλύονται τρία παραδείγματα της χρήσης του γεωραντάρ στη χαρτογράφηση μολυσμένων περιοχών, στην ανίχνευση ρωγμών στη βάση των παγετώνων και στον εντοπισμό ρωγμών στην επιφάνεια δρόμου.

- **Παράδειγμα εντοπισμού ρύπανσης**

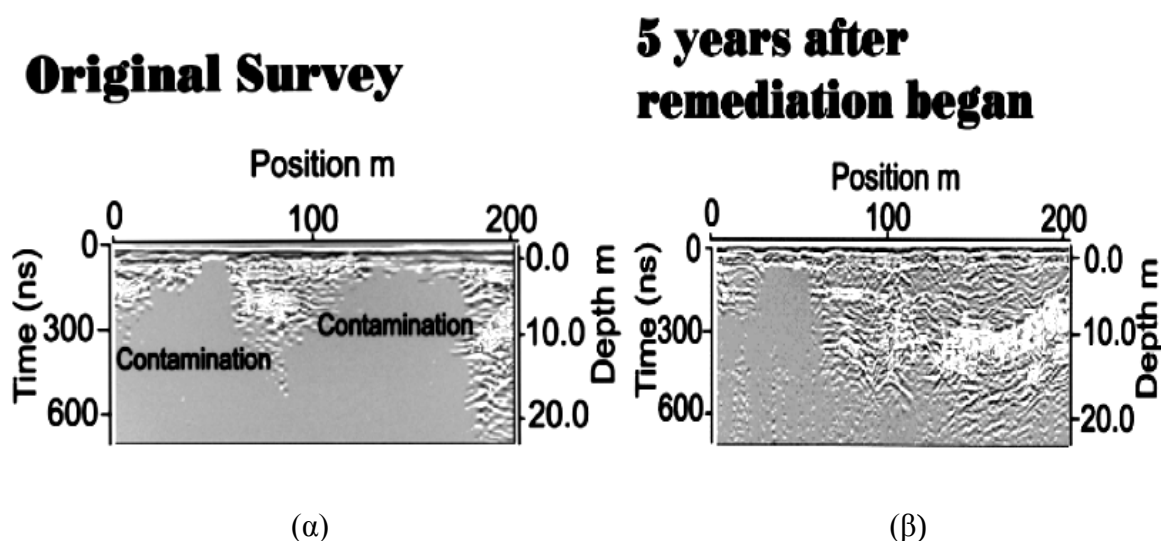
Στο βόρειο Ontario μία χωματερή αποτέλεσε κατάλληλο παράδειγμα της χρήσης του γεωραντάρ για την καταγραφή των αλλαγών σε σχέση με το χρόνο (εικόνα 1.1). Με το πέρασμα του χρόνου τα ρευστά αποστράγγισης εισχώρησαν στα υποκείμενα στρώματα και μόλυναν τον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής.



Εικόνα 1.1: Διασκόπηση με γεωραντάρ στο Βόρειο Οντάριο του Καναδά (κεραίες των 50 MHz, Annan, 2005).

Στην εικόνα 1.2 (α), απεικονίζονται τα αποτελέσματα της έρευνας με γεωραντάρ με τη χρήση κεραιών των 50 MHz κατά μήκος μίας λωρίδας εδάφους που διέσχισε τη μολυσμένη περιοχή με κατεύθυνση προς τη χωματερή. Τα αρχικά δεδομένα, που συλλέχθηκαν το 1985, δείχνουν ζώνες υψηλής εξασθένισης των Η/Μ κυμάτων στην περιοχή μελέτης, οι οποίες αποδίδονται στην ύπαρξη μόλυνσης.

Μετά την αρχική έρευνα έγιναν εργασίες με τη χρήση γεωτρήσεων άντλησης, ώστε να μειωθεί η εισροή μολυσμένου υλικού στο υπόγειο σύστημα υδάτων. Η ίδια έρευνα πραγματοποιήθηκε ξανά μετά από 5 χρόνια και παρατηρήθηκε ότι οι ζώνες εξασθένισης συρρικνώθηκαν (σχήμα 1.2 (β)).



Εικόνα 1.2: (α) Τομή γεωραντάρ με κεραιές των 50 MHz κατά μήκος μιας λωρίδας εδάφους. (β) Ίδια τομή γεωραντάρ πέντε χρόνια αργότερα (Annan, 2005).

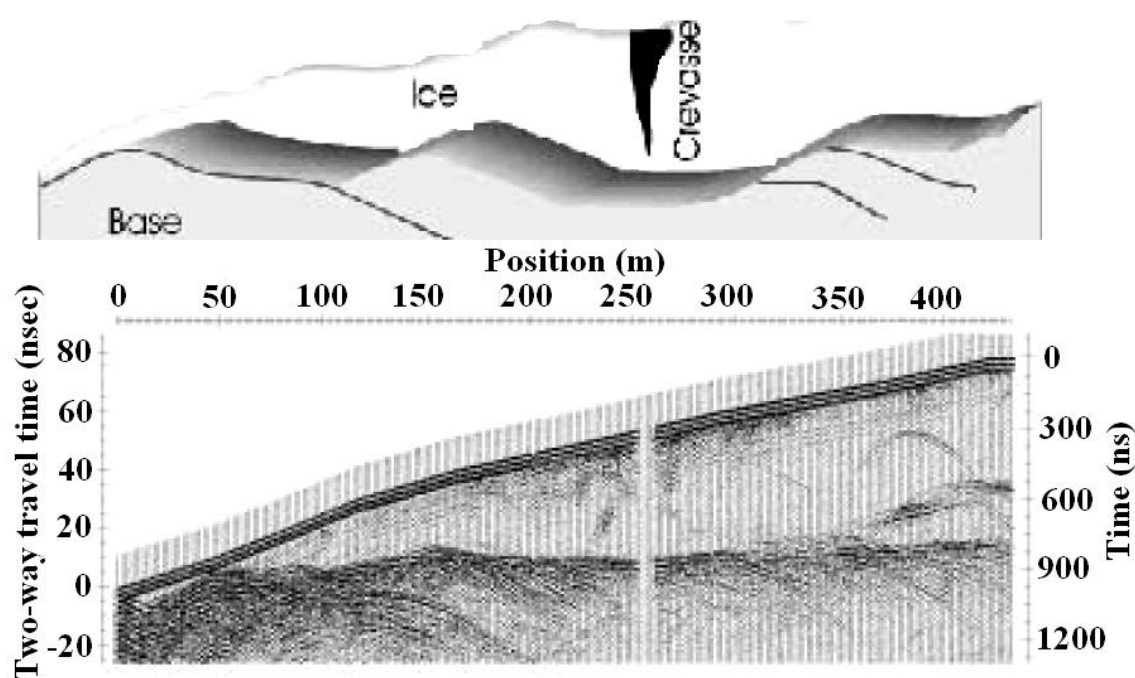
Η εισαγωγή μεγάλης ποσότητας διαλυμένων στερεών TADS (Total Dissolved Solids), κυρίως ιόντα χλωρίου, μεγάλωσε την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία ουσιαστικά αύξησε την εξασθένιση του σήματος του γεωραντάρ, οδηγώντας στη μείωση του πλάτους των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Annan, 2005).

- **Παράδειγμα ανίχνευσης ρωγμών σε περιοχές καλυμμένες από πάγο**

Ιδανική μέθοδο για την ανίχνευση ρωγμών σε περιοχές καλυμμένες από πάγο, αποτελεί η μέθοδος του γεωραντάρ. Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε στο νησί

Bylot, του Καναδά χρησιμοποιώντας το σύστημα ραντάρ pulseEKKO με κεραίες των 50 MHz. Σε περιοχές καλυμμένες από πάγο, η γνώση του πάχους και της κατάστασης των στρωμάτων πάγου είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό της εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν γρήγορα και εύκολα, χρησιμοποιώντας έλκηθρο για την επίσπευση των εργασιών. Από την τομή γεωραντάρ προσδιορίστηκε το πάχος του πάγου και εντοπίστηκαν ρωγμές στον υπερκείμενο πάγο (Annan, 2001).



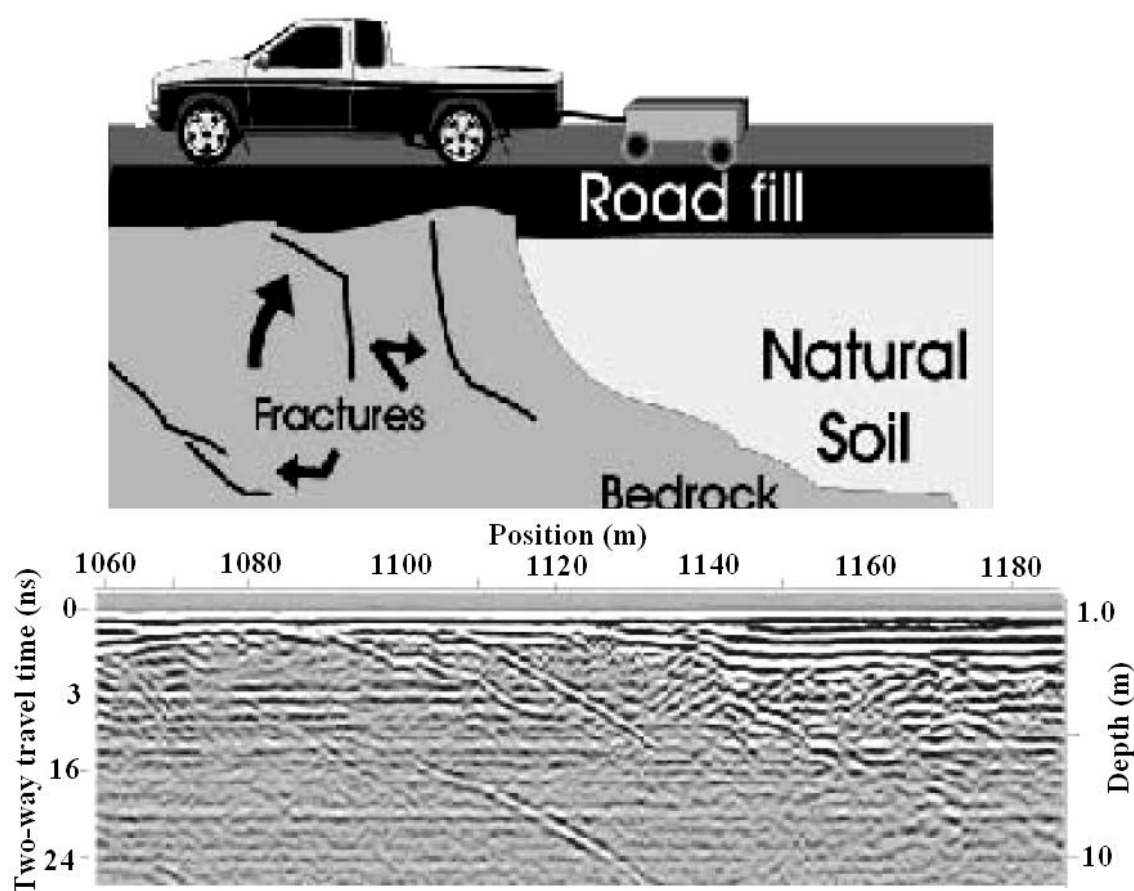
Εικόνα 1.3: Εφαρμογή του GPR στην επιστήμη μελέτης των πάγων (δεδομένα από το Πανεπιστήμιο Carleton, τομέας γεωλογίας, Καναδά), (Annan, 2001).

- **Παράδειγμα ανίχνευσης ρωγμών στην οδοποιία**

Το γεωραντάρ είναι αποτελεσματικό για τον προσδιορισμό ενδεχομένων προβλημάτων κάτω από την επιφάνεια δρόμων. Τα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν γρήγορα με μηχανοκίνητο σύστημα και μπορούν να περιγράψουν επακριβώς τις αστοχίες του οδοστρώματος.

Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε στη Σουηδία, για τον εντοπισμό αστοχιών στο πεζοδρόμιο (λιθόστρωμα). Η διασκόπηση πραγματοποιήθηκε με το σύστημα

pulseEKKO 1000 με κεραία 900 MHz για τη μελέτη της επιφάνειας του δρόμου και του πεζοδρομίου. Τα δεδομένα του γεωραντάρ έδειξαν την ύπαρξη ρωγμών στο λιθόστρωμα που σχετίζονται με διαφορές στο υποκείμενο εδαφικό στρώμα. Δηλαδή ένα τμήμα του πεζοδρομίου και του δρόμου περίπτωση βρίσκεται πάνω από το βράχο, ενώ το υπόλοιπο πάνω από χαλαρό εδαφικό σχηματισμό. Οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν επέτρεψαν την έγκαιρη συντήρηση και αποκατάσταση του οδοστρώματος (Annan, 2001).



Εικόνα 1.4: Εφαρμογή του GPR στην οδοποιία (Annan, 2001).

1.4 Η συνεισφορά του γεωραντάρ στην αρχαιολογία

Η αρχαιολογική κοινότητα γρήγορα αντιλήφθηκε τις δυνατότητες της χρήσης του γεωραντάρ τόσο στον εντοπισμό και στη χαρτογράφηση θαμμένων ανθρωπογενών δομών, όσο και στη συσχέτιση των στρωμάτων του εδάφους. Μία από τις πρώτες εφαρμογές του στην αρχαιολογία έγινε στο φαράγγι Chaco, Νέο Μεξικό (Vickers και Dolphin 1975), όπου ανιχνεύθηκαν θαμμένοι τοίχοι σε βάθος μεγαλύτερο του ενός

μέτρου. Ακολούθησαν πολυάριθμες μελέτες, όπου με τη χρήση του γεωραντάρ ανιχνεύθηκαν επιτυχώς θαμμένοι τοίχοι αχυρώνων, λίθινοι τοίχοι και υπόγειοι αποθηκευτικοί χώροι (Bevin και Canyon 1975; Canyon 1977). Σε αυτές τις μελέτες αυτό που χαρακτηριζόταν ως «θόρυβος», διαπιστώθηκε ότι παραγόταν από τις κορυφές των θαμμένων τοίχων. Έτσι έγιναν εκτιμήσεις για το βάθος διασκόπησης χρησιμοποιώντας κατά προσέγγιση την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων σε παρακείμενα εδάφη.

Επιτυχείς ήταν και οι διασκοπήσεις που πραγματοποιήθηκαν το 1979 στο Hale-Sultan-Take στην Κύπρο (Fischer et al., 1980) και στην τοποθεσία CERN στο Ελ Σαλβαδόρ (Sheets et al., 1985). Και στις δύο περιπτώσεις συλλέχθηκαν δεδομένα ανάκλασης, τα οποία επιτυχώς κατέδειξαν θαμμένους τοίχους σε σειρά και θεμέλια σπιτιών.

Μία σειρά από διασκοπήσεις γεωραντάρ διεξήχθησαν στην Ιαπωνία στα μέσα της δεκαετίας του '80, για τον εντοπισμό θαμμένων σπιτιών του 6^{ου} αιώνα και θολωτών τάφων (Imai et al., 1987). Σε αυτές τις έρευνες εξακριβώθηκαν επιτυχώς αρχαία οικοδομήματα με αργιλικά πατώματα, τα οποία ήταν συνήθως σκεπασμένα μέχρι και δύο μέτρα από κίσσηρη. Τα πατώματα που καλύπτονταν από ελαφρόπετρα έδωσαν ανακλάσεις οι οποίες ήταν πολύ εύκολο να αναγνωριστούν.

Στο τέλος της δεκαετίας του 1980 και αρχές του 1990 το γεωραντάρ συνέχισε να χρησιμοποιείται επιτυχώς σε πολλές αρχαιολογικές μελέτες. Το 1993, μία σειρά από έρευνες διεξήχθησαν στην Ιαπωνία από τον Goodman και τους συνεργάτες του (Goodman 1994; Goodman και Nishimura 1993; Goodman et al. 1994; Goodman et al. 1995;), όπου χαρτογραφήθηκαν θαμμένα σπίτια και θολωτοί τάφοι. Αυτές οι έρευνες ήταν επιτυχείς, καθώς εκείνη περίπου την περίοδο οι κατασκευαστές του γεωραντάρ ανέπτυξαν ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία μπορούσαν να αποθηκεύσουν τα δεδομένα σε ψηφιακά αρχεία, επιτρέποντας τη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων για μετ' έπειτα ψηφιακή ανάλυση. Οι πρωτοποριακές έρευνες του Goodman και των συνεργατών του (Goodman et al. 1994;) οδήγησαν σε σημαντικές τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων, ενώ οι οριζόντιες τομές οι οποίες αποτελούν χάρτες κατανομής των ανακλάσεων μίας περιοχής, έγιναν κατανοητές από την αρχαιολογική κοινότητα. Μία πολύ σημαντική εξέλιξη αφορούσε στην παραγωγή συνθετικών δεδομένων για μοντέλα θαμμένων αρχαιοτήτων, τα οποία βοηθούν την κατανόηση των πραγματικών δεδομένων (Conyers και Canyon 1998).

1.4.1 Περιορισμοί του γεωραντάρ στην αρχαιολογία

Παρ' όλο που το γεωραντάρ είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την απεικόνιση και χαρτογράφηση του υπεδάφους, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί στην εφαρμογή του στην αρχαιολογία. Από τους πιο προφανείς περιορισμούς είναι το βάθος ανίχνευσης. Όσο μειώνεται η κεντρική συχνότητα εκπομπής τόσο αυξάνεται το βάθος διασκόπησης. Αντίθετα όσο αυξάνεται η κεντρική συχνότητα, τόσο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα.

Το έδαφος μπορεί να είναι επίσης περιοριστικός παράγοντας στις μελέτες του γεωραντάρ. Οποιοδήποτε ηλεκτρικά αγωγίμο εδαφικό υλικό όπως κάποιες υγρές άργιλοι ή εδάφη με υψηλό περιεχόμενο σε ηλεκτρολύτες, εξασθενούν την ενέργεια των H/M κυμάτων.

1.5 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην εφαρμογή της γεωφυσικής μεθόδου του γεωραντάρ για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά πληροφορίες για την ιστορική εξέλιξη του γεωραντάρ, για τα πεδία εφαρμογής τους και πιο συγκεκριμένα για τη συνεισφορά του γεωραντάρ στην αρχαιολογία.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά την περιοχή μελέτης. Δίνονται πληροφορίες για τα ιστορικά στοιχεία των Βυζαντινών οχυρώσεων των Χανίων, καθώς επίσης πως σώζονται τα τείχη σήμερα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας του γεωραντάρ, οι μέθοδοι διασκόπησης, οι παράμετροι που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνικών επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία των μετρήσεων της γεωφυσικής έρευνας στην περιοχή Σήφακα, η οποία περιλάμβανε μετρήσεις με το γεωραντάρ και την ηλεκτρική τομογραφία. Εφαρμόζονται φίλτρα στις αρχικές μετρήσεις, είτε για αφαίρεση θορύβου, είτε για βελτίωση των χαρακτηριστικών της εικόνας. Επίσης γίνεται σύγκριση μεταξύ των δεδομένων του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής έρευνας.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ερμηνεία των δεδομένων του γεωραντάρ και στην απεικόνιση του προτειχίσματος των Βυζαντινών Τειχών της πόλης των Χανίων στις τομές γεωραντάρ, στις οριζόντιες τομές, καθώς και στο τρισδιάστατο συνδυασμό αυτών των τομών.

Τέλος, το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα γεωφυσική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

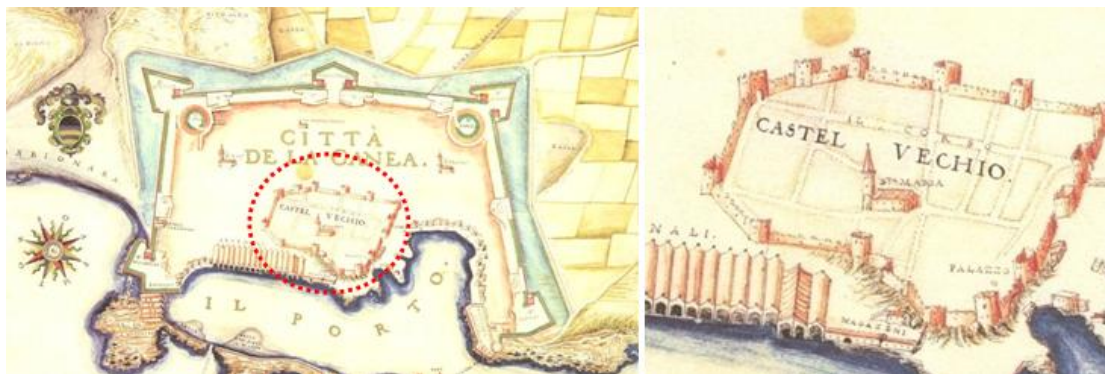
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά ιστορικά στοιχεία σχετικά με το Βυζαντινό Τείχος της Παλαιάς πόλης των Χανίων, το πως σώζεται σήμερα καθώς και φωτογραφικό υλικό.

2.2 Ιστορική αναδρομή των Βυζαντινών οχυρώσεων των Χανίων

Στη θέση των Χανίων, ο σχετικά προστατευμένος κόλπος και η ύπαρξη του φυσικού οχυρού λόφου Καστέλι, ήταν οι λόγοι της πρώτης κατοίκησης κατά τα νεολιθικά χρόνια. Κατά τη μινωική περίοδο στο λόφο αναπτύσσεται ένας εξαιρετικής σημασίας οικισμός. Η πρώτη οχύρωση του λόφου Καστέλι χρονολογείται από την ελληνιστική περίοδο, ενώ κατά τον 6ο ή 7ο αιώνα (Α' βυζαντινή περίοδο) ο λόφος οχυρώνεται ξανά με ισχυρό τείχος. Η πόλη διανύει την Αραβική και τη Β' Βυζαντινή περίοδο κλεισμένη μέσα στην περιτείχισή της. Πιθανότατα σε αυτήν την περίοδο χτίζεται το βυζαντινό τείχος (εικόνα 2.1), με οικοδομικό υλικό από την αρχαία Κυδωνία. Με την οριστική κατάληψη από τους Βενετούς το 1252, η πόλη ανοικοδομείται στα όρια της οχύρωσής της. Στα μέσα του 16^{ου} αιώνα οι Βενετοί κατασκευάζουν νέες οχυρώσεις στις πόλεις καθώς και σε άλλα καίρια σημεία της πολύτιμης αποικίας τους. Η πόλη διατηρεί τη σημασία της για την οθωμανική αυτοκρατορία, στην οποία περιέρχεται το 1645 και οι οχυρώσεις διατηρούνται αν και χωρίς φροντίδα. Το 1913, η ανάγκη σύνδεσης της πόλης με τις εκτός τειχών επεκτάσεις της και τους γύρω οικισμούς οδηγεί σε τμηματικές κατεδαφίσεις της περιτείχισης, που δεν εξυπηρετεί πλέον αμυντικές ανάγκες.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση του βυζαντινού τείχους από τον F. Basilicata, 1618.

2.2.1 Το Βυζαντινό τείχος σήμερα

Το βυζαντινό τείχος ήδη είχε αχρηστευθεί από τα χρόνια της βενετοκρατίας, καθώς ήταν αναποτελεσματικό και οι νέες οχυρώσεις προστάτευαν πλέον την πόλη. Με το πέρασμα του χρόνου, ο χώρος του προτειχίσματος και της τάφρου μετατράπηκε σε οικοπέδα και το τείχος σχεδόν εξαφανίστηκε από τα κτίσματα που ακουμπούν πάνω του. Το ίδιο συμβαίνει και στην εσωτερική πλευρά, με αποτέλεσμα το τείχος αν και σώζεται σε μεγάλη έκταση, να μην είναι ορατό σε πολλά σημεία. Στην πρώτη φάση οικοδόμησης χρησιμοποιήθηκαν μεγάλοι ορθογώνιοι δόμοι από ψαμμίτη ή πωρόλιθο και υλικό από τα κτίσματα της πόλης. Οι μεταγενέστερες φάσεις διακρίνονται από τη χρήση μικρότερων δόμων από πωρόλιθο. Το πάχος της τοιχοποιίας είναι ενιαίο σε όλο της το ύψος και η θεμελίωση του τείχους δεν είναι βαθιά. Το σχήμα του τείχους, όπως φαίνεται σήμερα, παρά τις μεταγενέστερες επεμβάσεις ή καταστροφές, είναι ακανόνιστο, ωσειδές, με κατεύθυνση Α-Δ και ακολουθεί το σχήμα του λόφου. Στη βόρεια και εν μέρει την ανατολική και τη δυτική πλευρά, το τείχος συμπληρώνει τα κενά του φυσικού βράχου, ενώ στο νότιο τμήμα του το τείχος υψώνεται από το επίπεδο του εδάφους. Ο οχυρωματικός περίβολος αποτελείται από ορθογώνιους ή πεντάπλευρους πύργους, που ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα μεταπύργια.

Ο μεγάλος ορθογώνιος πύργος που προστάτευε τη νότια πλευρά της δυτικής πύλης, μετασκευάστηκε σε τριώροφη κατοικία, όπως τελικά διαμορφώθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Προς τα ανατολικά, κατά μήκος της σημερινής οδού Καραολή

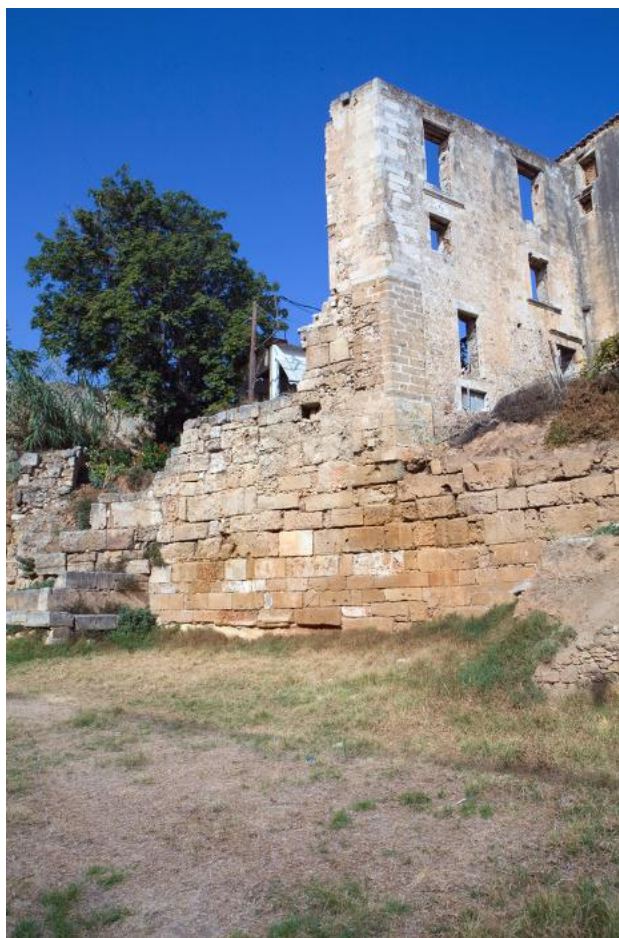
Δημητρίου και Σήφακα (εικόνα 2.2), μεγάλα τμήματα του αρχικού τείχους και πύργοι είναι ορατά. Το τείχος στρέφεται στην οδό Δασκαλογιάννη βόρεια προς τη θάλασσα. Η βόρεια πλευρά του τείχους σώζεται περίπου στην αρχική μορφή ως το μεγάλο νεώριο της πλατείας Κατεχάκη, καλυμμένο κατά ένα μέρος από σειρά σπιτιών. Από τη δυτική πλευρά (παράλληλα στην οδό Αφεντούλιεφ) υπάρχει πέτρινη σκάλα, η οποία οδηγούσε στη βόρεια μικρή πύλη του Καστελίου και το συγκρότημα των Τούρκικων φυλακών με ενσωματωμένο μέρος του τείχους στην αντηρίδα της βάσης του. Το τείχος κατά ένα μεγάλο μέρος ανακατασκευασμένο ακολουθεί την οδό Σουμερλή και καταλήγει στη δυτική πύλη στην πλατεία του Συντριβανίου. Συνεχείς σπηλαιώδεις κοιλότητες, διαμορφωμένες μεταγενέστερα σε καταστήματα παρατηρούνται σε αυτή τη διαδρομή. Η διαμόρφωση της περιοχής άλλαξε μετά το 1936, όταν μια πυρκαγιά κατέστρεψε τα κτίσματα της πλατείας, η οποία πήρε τη σημερινή μορφή της.

Αρχαιολογικές και ιστορικές έρευνες των τελευταίων χρόνων οδηγούν σε πρώιμη χρονολόγηση (6^{ος}-7^{ος} αι.) για τον τρόπο κατασκευής του τείχους. Η οργάνωση ενός ευρύτερου οχυρωτικού σχεδίου (οχυρώσεις πόλεων με στόχο την θωράκιση των μεγάλων αστικών κέντρων, ίδρυση φρουρίων για έλεγχο των οδών, διατειχίσματα μεγάλου μήκους για την εξασφάλιση στοιχειώδους προστασίας ολόκληρων περιοχών), παρατηρείται από τον 3^ο αι. μ.Χ. Το μεγαλύτερο σε έκταση οχυρωτικό σχέδιο πραγματοποιείται στα χρόνια του Ιουστινιανού. Την περίοδο αυτή, το σύστημα των οχυρώσεων γύρω από τον αστικό πυρήνα περιλαμβάνει διαδοχικά τάφρο, προτειχίσμα με ή χωρίς πύργους, τείχος με πύργους, ακρόπολη και φυσικά πύλες, που διαθέτουν τη δική τους οχύρωση ακριβώς επειδή είναι ευάλωτες ως σημεία πρόσβασης.

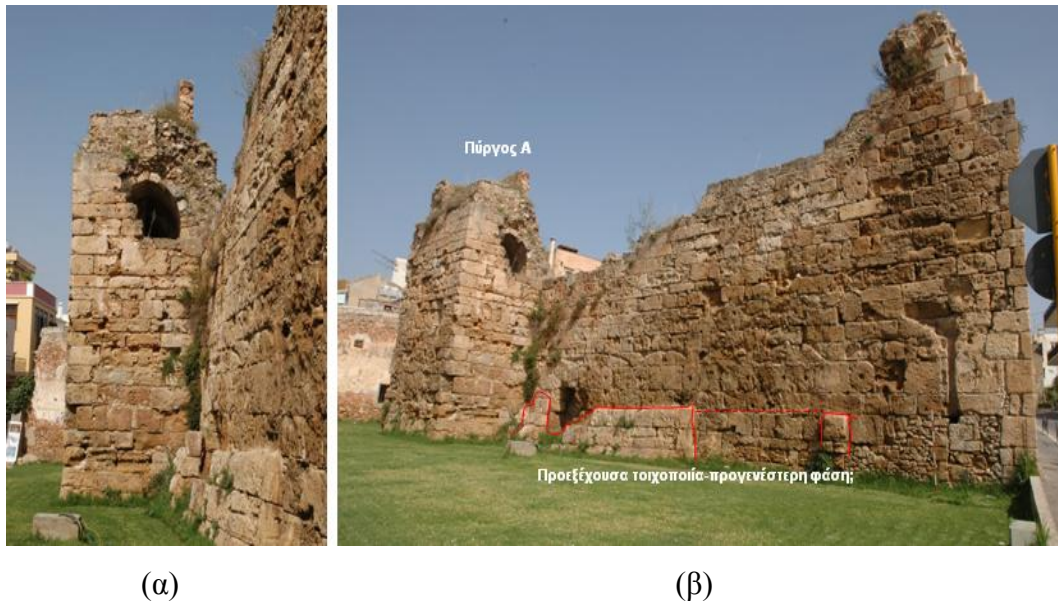
Πρόσφατη ανασκαφή (2005) στην νότια πλευρά του βυζαντινού τείχους που διενεργήθηκε από το Γραφείο Τειχών (εικόνα 2.3), αποκάλυψε την ύπαρξη προτειχίσματος σε αυτή την πλευρά (εικόνα 2.4). Παρά τις καταστροφές από μεταγενέστερες επεμβάσεις και τις δυσκολίες για την πλήρη αποκάλυψη του, καθώς υπάρχουν πάνω σε αυτό νεότερες κατασκευές, υπάρχει μία σχετικά πλήρης εικόνα για τη μορφή του. Ο τρόπος δόμησης διαφέρει, καθώς η τοιχοποιία είναι από μικρότερους λίθους που συνδέονται με κονίαμα, και η κλίση που παρουσιάζει, πιθανόν παραπέμπουν σε μεταγενέστερη κατασκευή που επιβλήθηκε για την ενίσχυση του ήδη υπάρχοντος συστήματος οχυρώσεως. Το μέγιστο ύψος που σώζεται

είναι περίπου 2 μ και το μέγιστο πάχος περίπου 80 εκ. Από την εσωτερική (βόρεια) πλευρά η επιμελημένη τοιχοποιία αντικαθίσταται από αργολιθοδομή, ιδιαίτερα σαθρή και πρόχειρα φτιαγμένη. Κατά μήκος της νότια πλευράς του προτειχίσματος παρατηρούνται στην ίδια ευθεία οπές (διαστάσεων 10x18εκ), προφανώς αποστραγγιστικού χαρακτήρα. Επίσης κατά την ίδια ανασκαφή, ερευνήθηκε καλύτερα η θεμελίωση τόσο του τείχους, όσο και του πύργου που σώζεται στη συγκεκριμένη πλευρά. Για τη θεμελίωση του πύργου, δεν παρατηρείται καμία ιδιαίτερη φροντίδα, καθώς αποτελείται από μικρούς ακατέργαστους λίθους.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να απομακρυνθούν όλες οι μεταγενέστερες κατοικίες και τα καταστήματα που εφάπτονται στο βυζαντινό τείχος και να διευρυνθεί η ανασκαφική έρευνα και σε άλλα σωζόμενα τμήματα, ιδιαίτερα της νότιας πλευράς, με σκοπό να αναδειχθεί ένα από τα πιο σημαντικά μνημεία της βυζαντινής περιόδου (Ανδριανάκης, 1997).



Εικόνα 2.2: Το τείχος στην οδό Σήφακα όπως σώζεται σήμερα (www.chania.gr/city/monuments/byzantine-wall.html).



Εικόνα 2.3: (α), (β). Η ανασκαφή στη νότια πλευρά του Βυζαντινού Τείχους, στη συμβολή των οδών Καραολή Δημητρίου και Κατρέ όπου διακρίνεται και ο ορθογώνιος πύργος (πριν την ανασκαφή) 2005.



Εικόνα 2.4: Το προτείχισμα που αποκαλύφθηκε στη νότια πλευρά του Βυζαντινού Τείχους, στην οδό Καραολή Δημητρίου και Κατρέ (ανασκαφή 2005).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ****3.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας του γεωραντάρ, οι μέθοδοι διασκόπησης, οι παράμετροι που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνικών επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ.

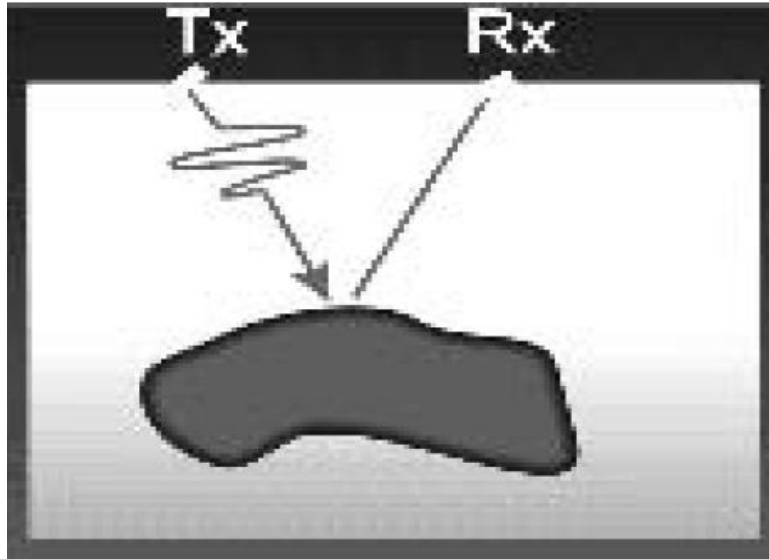
3.2 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Η μέθοδος γεωραντάρ στηρίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής συχνότητας στο υπέδαφος και στην καταγραφή των επιστρεφόμενων κυμάτων. Η κεραία του γεωραντάρ εκπέμπει μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό, ο οποίος ταξιδεύει στο υπέδαφος με ταχύτητα η οποία εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού (είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της ηλεκτρικής διαπερατότητας). Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο υπέδαφος μέχρι να συναντήσει διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ γεωλογικών σχηματισμών διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς (σχήμα 3.1). Το κύμα ανακλάται, φτάνει στην κεραία του δέκτη και προωθείται στη μονάδα ελέγχου, όπου καταγράφεται ο χρόνος διαδρομής (χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη ανεξαρτήτως της διαδρομής του) και το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο χρόνος διαδρομής του ανακλώμενου παλμού ισούται με:

$$t_r = (4D^2 + X^2)/v \quad (3.1)$$

όπου X είναι η απόσταση πομπού-δέκτη, D το βάθος της επιφάνειας ανάκλασης και v η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νανο-δευτερόλεπτο ($1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ sec}$).

Η καταγραφή του πλάτους των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε σχέση με το χρόνο ονομάζεται ίχνος.

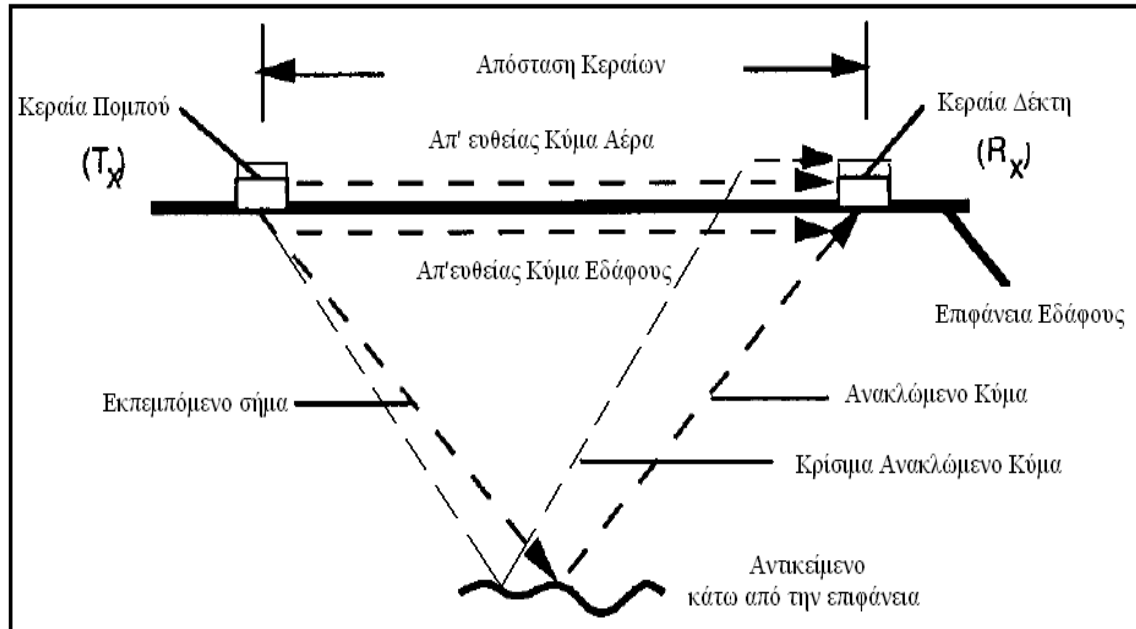


Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ (Annan, 2002).

Δύο είδη κυμάτων καταγράφει το όργανο (σχήμα 3.2). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν κύματα που ταξιδεύουν απ' ευθείας από τον πομπό στο δέκτη μέσω του αέρα, τα οποία ονομάζονται **απ' ευθείας κύματα αέρα**. Αυτά τα κύματα, αφενός φτάνουν πρώτα, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου έχουν μεγάλο πλάτος, αφού δεν υφίστανται απόσβεση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν κύματα που διαδίδονται από τον πομπό στο δέκτη μέσω του υπεδάφους, γνωστά ως **απ' ευθείας κύματα εδάφους**.

Όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα, αλλάζει κατεύθυνση, δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τα **ανακλώμενα κύματα** όπως έχει ήδη αναφερθεί. Άλλη μία κατηγορία κυμάτων αποτελούν τα **κρίσιμα διαθλώμενα κύματα**, τα οποία κατοπτρεύονται από το δέκτη όταν η απόσταση πομπού-δέκτη υπερβεί μία κρίσιμη τιμή X_c . Τα κύματα αυτά ανακλώνται στην πρώτη διεπιφάνεια που θα συναντήσουν, διαθλώνται στην επιφάνεια του εδάφους και διαδίδονται στον αέρα.

Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ του εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου παλμού εξαρτάται από την ταχύτητα διάδοσης κατά μήκος της διαδρομής που αυτός ακολούθησε, όπως διαπιστώνεται από τη σχέση (3.1). Αν η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι γνωστή μπορεί να υπολογιστεί το βάθος του ανακλαστήρα.



Σχήμα 3.2: Πορεία διάδοσης των κυριότερων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Fisher, Stewart, Jol, 1992).

3.3 Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθορίζει το βάθος της διασκόπησης. Εξαρτάται από τις ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών (ηλεκτρική αγωγιμότητα, μαγνητικές ιδιότητες, πορώδες, συγκέντρωση ιόντων αλάτων στα ρευστά), τη γεωμετρία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη συχνότητα εκπομπής. Γενικά η εξασθένιση αυξάνεται στις υψηλές συχνότητες εκπομπής.

Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει τις ακόλουθες συνέπειες:

- α) Μείωση του πλάτους, καθώς το πλάτος του κύματος A μειώνεται από την αρχική του τιμή A_0 έχοντας διανύσει απόσταση β στο μέσο διάδοσης ($A = A_0 e^{-\alpha\beta}$).
- β) Μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας. Η κεντρική συχνότητα φάσματος της ακτινοβολίας που δέχεται η κεραία του δέκτη είναι χαμηλότερη από την κεντρική συχνότητα εκπομπής.
- γ) Μικρότερο βάθος διασκόπησης, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένιση τόσο μικρότερο θα είναι το βάθος διεξόδου του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (Βαφείδης, 2001).

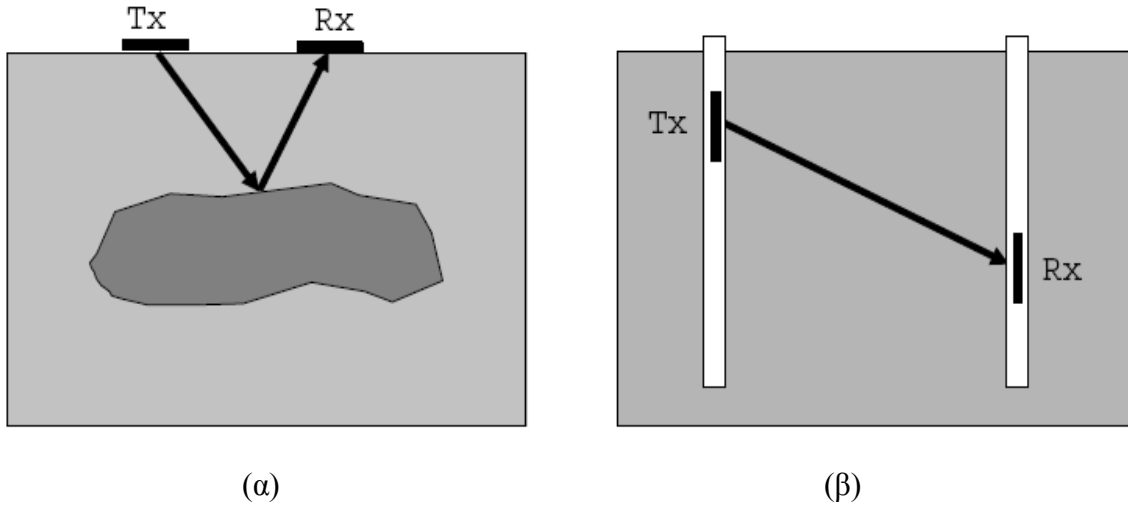
3.4 Περιβάλλον διασκόπησης

Το περιβάλλον διασκόπησης είναι σημαντικό για την επιτυχία της έρευνας. Περιοχές οι οποίες θεωρούνται ακατάλληλες είναι οι παρακάτω :

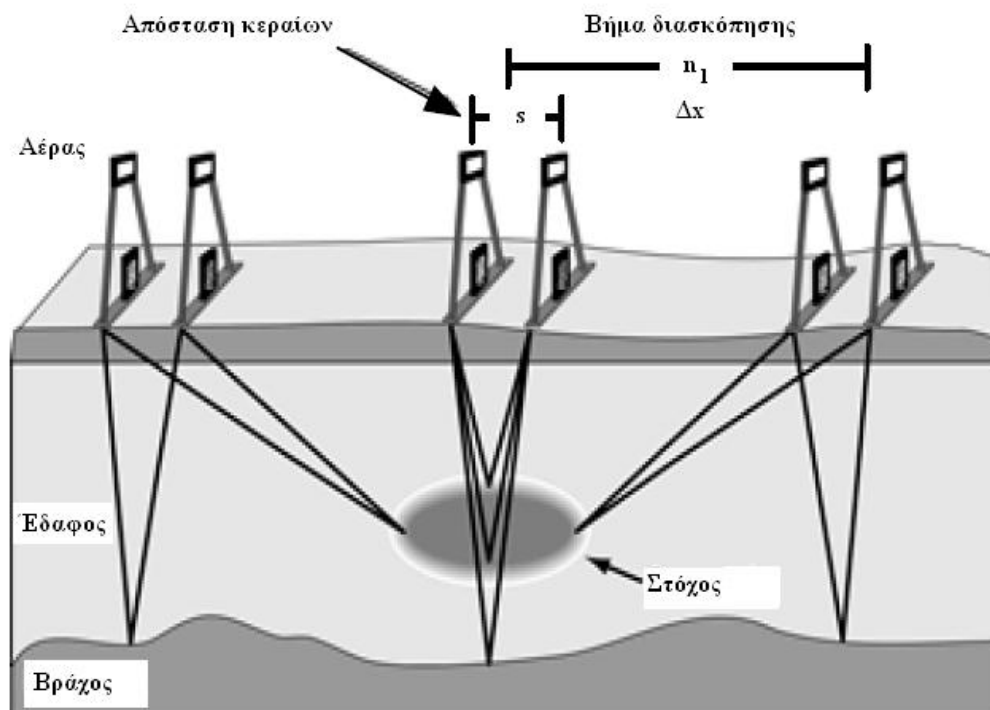
- Περιοχές με μεταλλικές κατασκευές. Ισχυρές ανακλάσεις που προέρχονται από αυτές τις κατασκευές αλλοιώνουν την ποιότητα των μετρήσεων.
- Περιοχές κοντά σε πηγές ραδιοκυμάτων (αναμεταδότες τηλεόρασης, ηλεκτροφόρα καλώδια, κεραίες κινητής τηλεφωνίας, ραντάρ κλπ). Ο ευαίσθητος δέκτης του γεωραντάρ κατοπτρεύει τόσο τα ανακλώμενα κύματα από το στόχο όσο και τα ισχυρότερα από τη γύρω περιοχή.
- Περιβάλλον υπό βρόχινες συνθήκες και υψηλή υγρασία θεωρείται ακατάλληλο καθώς οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αέρα βελτιώνονται, με συνέπεια μέρος του μεταδιδόμενου παλμού να διαχέεται σ' αυτόν.

3.5 Μέθοδοι διασκόπησης του γεωραντάρ (GPR)

Οι μέθοδοι διασκόπησης του GPR διαιρούνται σε δύο κατηγορίες, ανάκλασης και τομογραφίας, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 3.3. Διασκόπηση με χρήση ενός πομπού και ενός δέκτη είναι η πιο συνήθης, αντί αυτής με πολλούς πομπούς και δέκτες.



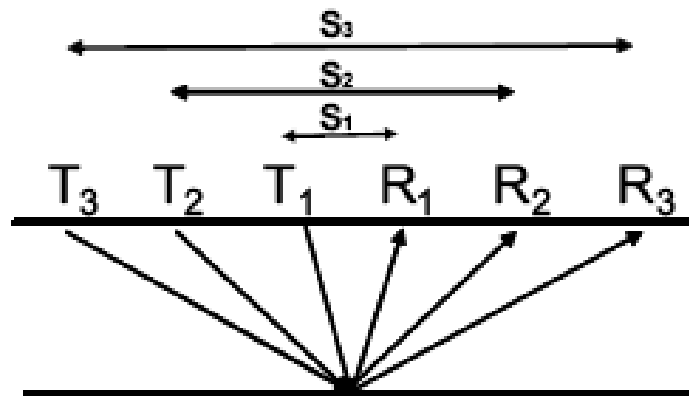
Σχήμα 3.3: Μέθοδος ανάκλασης (α) και τομογραφίας (β) σε γεώτρηση (Annan, 2005).



Σχήμα 3.4: Διασκόπηση με τη μέθοδο της ανάκλασης, στο σχήμα παρατηρούνται και μερικές από τις παραμέτρους διασκόπησης (Annan, 2005).

Στις έρευνες με τη μέθοδο ανάκλασης (Reflection mode), ο σκοπός είναι η γεωλογική χαρτογράφηση του υπεδάφους. Χρησιμοποιείται ένας πομπός και ένας δέκτης με σταθερή τη μεταξύ τους απόσταση σε κάθε μέτρηση. Οι κεραίες είναι τοποθετημένες με συγκεκριμένη γεωμετρία και οι μετρήσεις γίνονται με σταθερό βήμα διασκόπησης (σχήμα 3.4). Όταν τα ίχνη απεικονίζονται το ένα δίπλα στο άλλο, σχηματίζεται η τομή γεωραντάρ (GPR section). Αν είναι γνωστή η διηλεκτρική σταθερά του υπεδάφους, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό της ταχύτητας χρησιμοποιείται η διάταξη κοινού ενδιάμεσου σημείου (common depth point-CDP), όπου επιλέγεται στην επιφάνεια του εδάφους κάποιο σταθερό σημείο, εκατέρωθεν του οποίου τοποθετούνται πομπός και δέκτης (σχήμα 3.5) σε απόσταση ίση με το βήμα δειγματοληψίας και με τα ηλεκτρικά τους πεδία παράλληλα. Κάθε κεραία απομακρύνεται κατά μήκος της γραμμής μελέτης κατά $n_x/2$. Η μέγιστη απόσταση δεν πρέπει να ξεπεράσει το βάθος του ανακλαστήρα. Τέλος αναφέρεται η μέθοδος της τομογραφίας (Transillumination), όπου πομπός και δέκτης τοποθετούνται ξεχωριστά σε κοντινές γεωτρήσεις εκατέρωθεν του υπό μελέτη υλικού. Σε αυτή τη μέθοδο τα κύματα δεν ανακλώνται αλλά διέρχονται από το μέσο.



Σχήμα 3.5: Διασκόπηση με τη μέθοδο κοινού ενδιάμεσου σημείου, όπου T1, T2, T3 είναι η κεραία του πομπού και R1, R2, R3 είναι η κεραία του δέκτη αντίστοιχα (Annan, 2005).

3.6 Παράμετροι διασκόπησης

Υπάρχουν επτά παράμετροι που προσδιορίζουν μία συνήθη διασκόπηση με γεωραντάρ. Αυτές είναι: η κεντρική συχνότητα εκπομπής, ο ολικός χρόνος καταγραφής, το διάστημα δειγματοληψίας, το βήμα διασκόπησης, η απόσταση των κεραιών, η κατακόρυφη υπέρθεση και ο προσανατολισμός των κεραιών. Οι τρεις τελευταίες παράμετροι δεν απασχολούν σημαντικά την παρούσα διπλωματική.

3.6.1 Συχνότητα εκπομπής

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους το βάθος διείσδυσης του Η/Μ κύματος συνδέεται άμεσα με τη διακριτική ικανότητα και τη συχνότητα εκπομπής. Έτσι λοιπόν η επιλογή μεγάλης συχνότητας συνεπάγεται μεγάλη διακριτική ικανότητα και μικρό βάθος διείσδυσης. Το αντίθετο θα συμβεί επιλέγοντας μικρή συχνότητα εκπομπής.

Ο πίνακας 3.1 βοηθά στην επιλογή της συχνότητας. Οι τιμές του αντιστοιχούν σε διακριτική ικανότητα ίση με το 25% του βάθους.

Πίνακας 3.1: Ενδεικτικές τιμές του βάθους διασκόπησης συναρτήσει της συχνότητας (Annan, 2001).

Βάθος (m)	Κεντρική συχνότητα f (MHz)
0.5	1000
1.0	500
2.0	200
7.0	100
10.0	50
30.0	25
50.0	10

Καλύτερος τρόπος επιλογής της συχνότητας θεωρείται η επιτόπου δοκιμή.

3.6.2 Ολικός χρόνος καταγραφής

Ο ολικός χρόνος καταγραφής σχετίζεται άμεσα με το βάθος διείσδυσης (σχέση 3.2):

$$W = 1.3x[2 d_{\max}/v] \quad (3.2)$$

όπου $d_{\max}$ το μέγιστο βάθος και $v_{\min}$ η ελάχιστη ταχύτητα. Η παραπάνω σχέση δίνει χρόνο καταγραφής αυξημένο κατά 30% για τα σφάλματα στην ταχύτητα και στο βάθος.

3.6.3 Διάστημα δειγματοληψίας

Η καταγραφή των δεδομένων δεν είναι συνεχής διαδικασία. Έτσι ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο μετρήσεων. Αν αυτό το χρονικό διάστημα είναι μεγάλο τότε πολλές πληροφορίες χάνονται, εάν είναι πολύ μικρό ο συνολικός όγκος των δεδομένων είναι υπερβολικά μεγάλος.

Ο υπολογισμός του διαστήματος δειγματοληψίας βασίζεται στη συχνότητα Nyquist f_N , η οποία πρέπει να είναι το πολύ ίση με το μισό της υψηλότερης συχνότητας που εκπέμπεται. Το φάσμα εκπομπής του γεωραντάρ κυμαίνεται από $0.5f$ έως $1.5f$ της κεντρικής συχνότητας εκπομπής.

3.6.4 Βήμα διασκόπησης

Το βήμα δειγματοληψίας-διασκόπησης ορίζει την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις. Το μέγιστο βήμα διασκόπησης (n_x) ισούται με το $1/4$ του μήκους κύματος:

$$n_x = \lambda/4 = 75/(\epsilon_r)^{1/2} f \quad (3.3)$$

όπου f είναι η κεντρική συχνότητα της κεραίας (Mz) και ϵ_r είναι η διηλεκτρική σταθερά (Σπανουδάκης, 2001). Ένα μεγάλο βήμα διασκόπησης δε δίνει επαρκή αποτελέσματα. Αντίθετα ένα υπερβολικά μικρό βήμα επιβαρύνει την παραγωγικότητα. Ο όγκος των δεδομένων και ο χρόνος διασκόπησης μειώνονται όσο αυξάνεται το βήμα.

3.6.5 Απόσταση των κεραιών

Στα περισσότερα συστήματα γεωραντάρ η ικανότητα αλλαγής της απόστασης των κεραιών αποτελεί σημαντική βοήθεια για την ανίχνευση συγκεκριμένου τύπου στόχων. Μία εκτίμηση της βέλτιστης απόστασης των κεραιών δίνεται από τον τύπο (3.4)

$$S = 2d_{\text{στόχου}} / (\epsilon_r - 1)^{1/2} \quad (3.4)$$

Αυξάνοντας την απόσταση των κεραιών αυξάνεται η γωνία ανάκλασης και ο συντελεστής ανάκλασης αντίστοιχα. Συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένισης του κύματος αφού αυτό έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση.

Στον πίνακα 3.2 δίνονται τιμές προτεινόμενης απόστασης των κεραιών σε σχέση με την κεντρική συχνότητα εκπομπής.

Πίνακας 3.2: Η προτεινόμενη απόσταση των κεραιών για διάφορες τιμές της συχνότητας (Σπανουδάκης, 2001).

Κεντρική συχνότητα							
(MHz)	900	450	225	110	50	25	10
Ελάχιστη απόσταση							
κεραιών (m)	0.17	0.25	0.5	1	2	4	8

3.6.6 Κατακόρυφη υπέρθεση

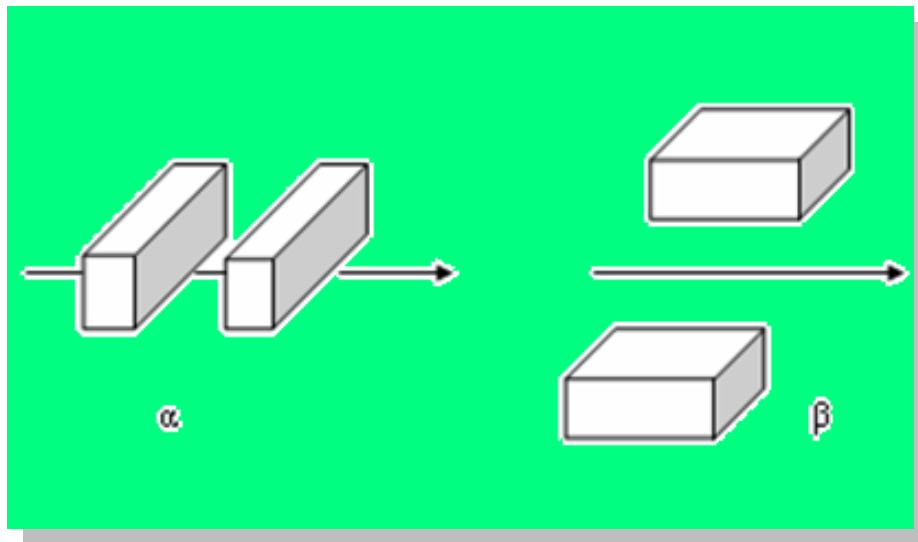
Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιούνται αυτόματα πολλαπλές μετρήσεις σε κάθε σημείο της γραμμής μελέτης ώστε να αυξηθεί ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο. Έτσι τα πλάτη των ανακλώμενων κυμάτων αθροίζονται αφού η φάση των κυμάτων παραμένει ίδια σε κάθε επανάληψη και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Ο θόρυβος εξαλείφεται λόγω του ότι είναι τυχαίος και τα σήματα που προέρχονται από αυτόν αλληλοαναιρούνται.

Η διαδικασία της υπέρθεσης βελτιώνει την ποιότητα των δεδομένων, ταυτόχρονα όμως αυξάνει σημαντικά το χρόνο της διασκόπησης. Οι τιμές που δίνουν ικανοποιητικό

αποτέλεσμα χωρίς να επιβαρύνεται σημαντικά ο συνολικός χρόνος των εργασιών πεδίου είναι οι 8, 16, 32 (Σπανουδάκης, 2001).

3.6.7 Προσανατολισμός κεραιών

Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στο γεωραντάρ είναι ωμικές, διπολικές. Συχνά είναι προσανατολισμένες έτσι ώστε το ηλεκτρικό τους πεδίο να πολώνεται κάθετα στον κύριο άξονα τους (σχήμα 3.6). Εάν ο στόχος είναι ίσων διαστάσεων δεν προτείνεται κάποιος συγκεκριμένος προσανατολισμός. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι καλύτερο να συλλεχθούν δύο πακέτα δεδομένων με ορθογώνια κατεύθυνση των κεραιών ώστε να εξαχθούν πληροφορίες για το στόχο. Συνήθως πραγματοποιούνται μετρήσεις και με τους δυο προσανατολισμούς ώστε να συλλεχθούν το δυνατό περισσότερες πληροφορίες.



Σχήμα 3.6: Προσανατολισμοί κεραιών με το ηλεκτρικό τους πεδίο κάθετο στον κύριο άξονα τους.

3.7 Τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων του γεωραντάρ

Οι χρήστες του γεωραντάρ εκμεταλλεύονται πολλές από τις εξελίξεις που πραγματοποιούνται στην ανάλυση σεισμικών δεδομένων (Yilmaz, 1987). Οι τεχνικές της

ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι πολύ συνηθισμένες στην επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων. Σκοπός της ψηφιακής ανάλυσης είναι να τονίσει κάποια χαρακτηριστικά της εικόνας που δεν είναι άμεσα αντιληπτά. Οι κύριες τεχνικές επεξεργασίας των σημάτων του γεωραντάρ είναι οι τεχνικές αφαίρεσης του θορύβου και ενίσχυσης των δεδομένων (gain), καθώς και η τεχνική εξαγωγής των χαρακτηριστικών του σήματος του γεωραντάρ (GPR attributes).

Η αρχική επεξεργασία στοχεύει στην απαλοιφή του θορύβου και στην ενίσχυση των ασθενών καταγραφών. Αρχικά εφαρμόζεται φίλτρο απαλοιφής της επαγωγικής συνιστώσας (**dewowing**). Έπειτα ακολουθεί η εφαρμογή φίλτρου αντιστάθμισης της εξασθένησης του H/M κύματος (**SEC**) και φίλτρου κινητού μέσου όρου (**down the trace average**) για την εξομάλυνση των δεδομένων. Για την απομάκρυνση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που καταγράφονται ταυτόχρονα σε όλα τα ίχνη της τομής γεωραντάρ εφαρμόζεται φίλτρο αποκοπής συστηματικού θορύβου (**background noise removal**).

Στη συνέχεια ακολουθεί υπολογισμός των μιγαδικών χαρακτηριστικών (**attributes**) του γεωραντάρ, μία τεχνική που αναδεικνύει την τοπική λεπτομέρεια και έχει ως αποτέλεσμα το φυσικό διαχωρισμό του πλάτους και της φάσης μιας κυματομορφής (Balch 1970, Taner και συνεργάτες 1979). Το χαρακτηριστικό πλάτος αναφέρεται ως ισχύς ανάκλασης ή στιγμιαίο πλάτος του σήματος, ενώ η φάση αναφέρεται ως στιγμιαία φάση. Η στιγμιαία φάση αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της στιγμιαίας συχνότητας, ενώ συνδυασμοί των παραπάνω δίδουν χρήσιμα χαρακτηριστικά για την ερμηνεία των δεδομένων γεωραντάρ (Barnes 1998).

3.7.1 Απεικόνιση των δεδομένων

Η σωστή απεικόνιση των δεδομένων του γεωραντάρ διευκολύνει την ερμηνεία τους. Τα δεδομένα απεικονίζονται σε διάγραμμα απόστασης (m) στον οριζόντιο άξονα και διπλό χρόνο διαδρομής (nsec) στον κατακόρυφο άξονα. Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται τομή γεωραντάρ και καθιστά ευκολότερη την ερμηνεία. Το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορεί επίσης να κωδικοποιηθεί με χρώματα.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων προϋποθέτει την πραγματοποίηση μετρήσεων σε παράλληλες και ισαπέχουσες γραμμές μελέτης. Τα δεδομένα που

προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο είναι ψευδο-τρισεδιάστατα. Χρήσιμο εργαλείο για την απεικόνιση τρισεδιάστατων δεδομένων αποτελεί και η οριζόντια τομή (slices) στην οποία αντιστοιχούν δεδομένα από διαφορετικά ίχνη που έχουν ίδιο χρόνο καταγραφής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΛΛΟΓΗ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στην οδό Σήφακα, στην Παλαιά πόλη των Χανίων. Η γεωφυσική έρευνα περιλάμβανε μετρήσεις με το γεωραντάρ και την ηλεκτρική τομογραφία. Ακολουθεί επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ κατά την οποία εφαρμόζονται φίλτρα στα δεδομένα, για αφαίρεση θορύβου, αποκοπή χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, ώστε να τονιστούν χαρακτηριστικά της εικόνας που δεν είναι άμεσα αντιληπτά.

4.2 Σχεδιασμός διασκόπησης

Η γεωφυσική διασκόπηση που αναφέρεται στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σε τμήμα της οδού Σήφακα, διαστάσεων 63x10 m (εικόνα 4.1). Οι γεωφυσικές έρευνες που παρουσιάζονται στη συνέχεια, εκτός από τις 7 γραμμές της ηλεκτρικής τομογραφίας, έχουν επικεντρωθεί στη διασκόπηση της περιοχής με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Συγκεκριμένα, η γεωφυσική έρευνα περιλάμβανε:

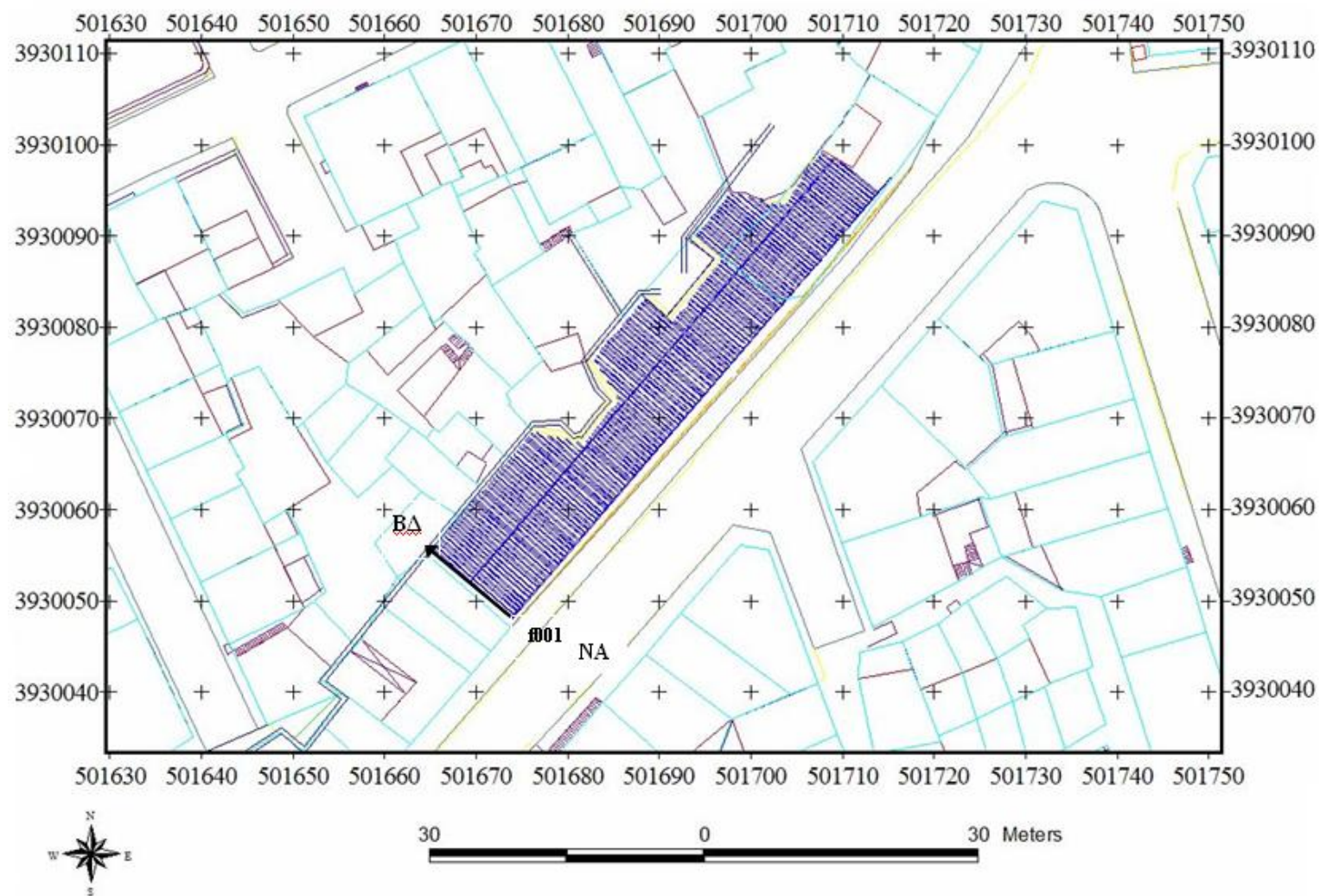
- Συλλογή των δεδομένων γεωραντάρ, η οποία έγινε με τη μέθοδο της ανάκλασης με το σύστημα γεωραντάρ SIR-3000 της εταιρείας GSSI. Χρησιμοποιήθηκαν κεραιές των 400 MHz, προσανατολισμένες παράλληλα μεταξύ τους, με το μεγάλο τους άξονα κάθετο προς τη γραμμή μελέτης, δηλαδή με την ηλεκτρική συνιστώσα (E) να πολώνεται κάθετα ως προς τη γραμμή μελέτης. Σχεδιάστηκε κάμματος διαστάσεων 63x10 m, στον οποίο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 126 παράλληλες γραμμές μελέτης διεύθυνσης νοτιοανατολικά-βορειοδυτικά (NA-BΔ, K1, σχήμα 4.1). Διασκοπήθηκαν επίσης 14 γραμμές μελέτης με διεύθυνση νοτιοδυτικά-βορειοανατολικά (ΝΔ-ΒΑ, K2, σχήμα 4.2). Το βήμα διασκόπησης ήταν ίσο με

5 cm, το διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 0.146.5 ns, ενώ η ισαπόσταση των γραμμών ίση με 0.5 m.

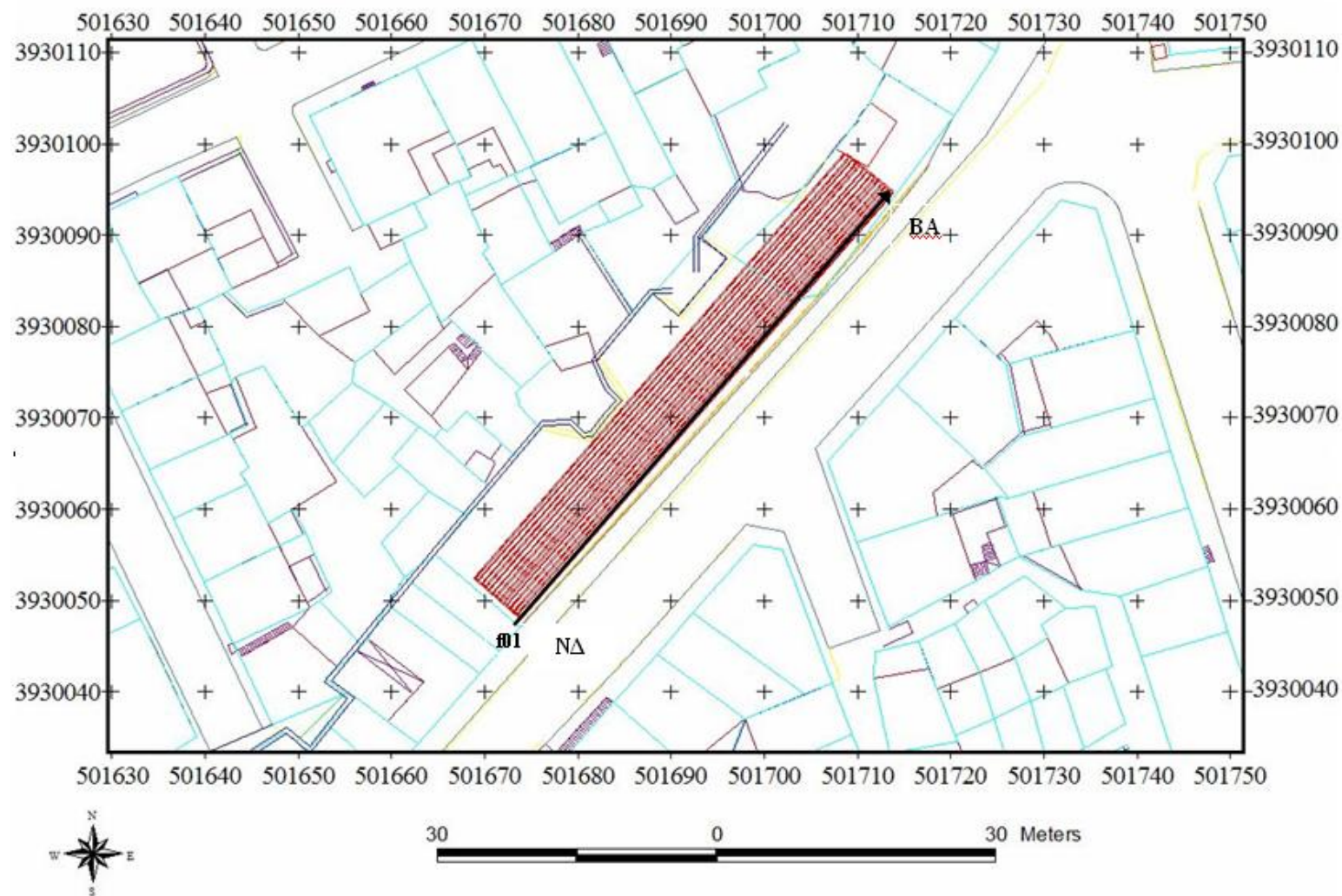
- Συλλογή των δεδομένων με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και τη διάταξη διπόλου - διπόλου, κατά την οποία η απόσταση διπόλων ρεύματος και δυναμικού αυξανόταν με βήμα 0.40 m. Διασκοπήθηκαν 5 γραμμές μελέτης μήκους 10 m η κάθε μία, διεύθυνσης νοτιοανατολικά-βορειοδυτικά (NA-BΔ) και 2 γραμμές μήκους 63 m η κάθε μία, διεύθυνσης νοτιοδυτικά-βορειοανατολικά (NΔ-BA), από τις οποίες παρουσιάζονται και σχολιάζονται στην εργασία οι 3 γραμμές της τομογραφίας του καννάβου K1 (σχήμα 4.3). Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την εν λόγω περιοχή κυμαίνονται από 13-600 Ωm περίπου.



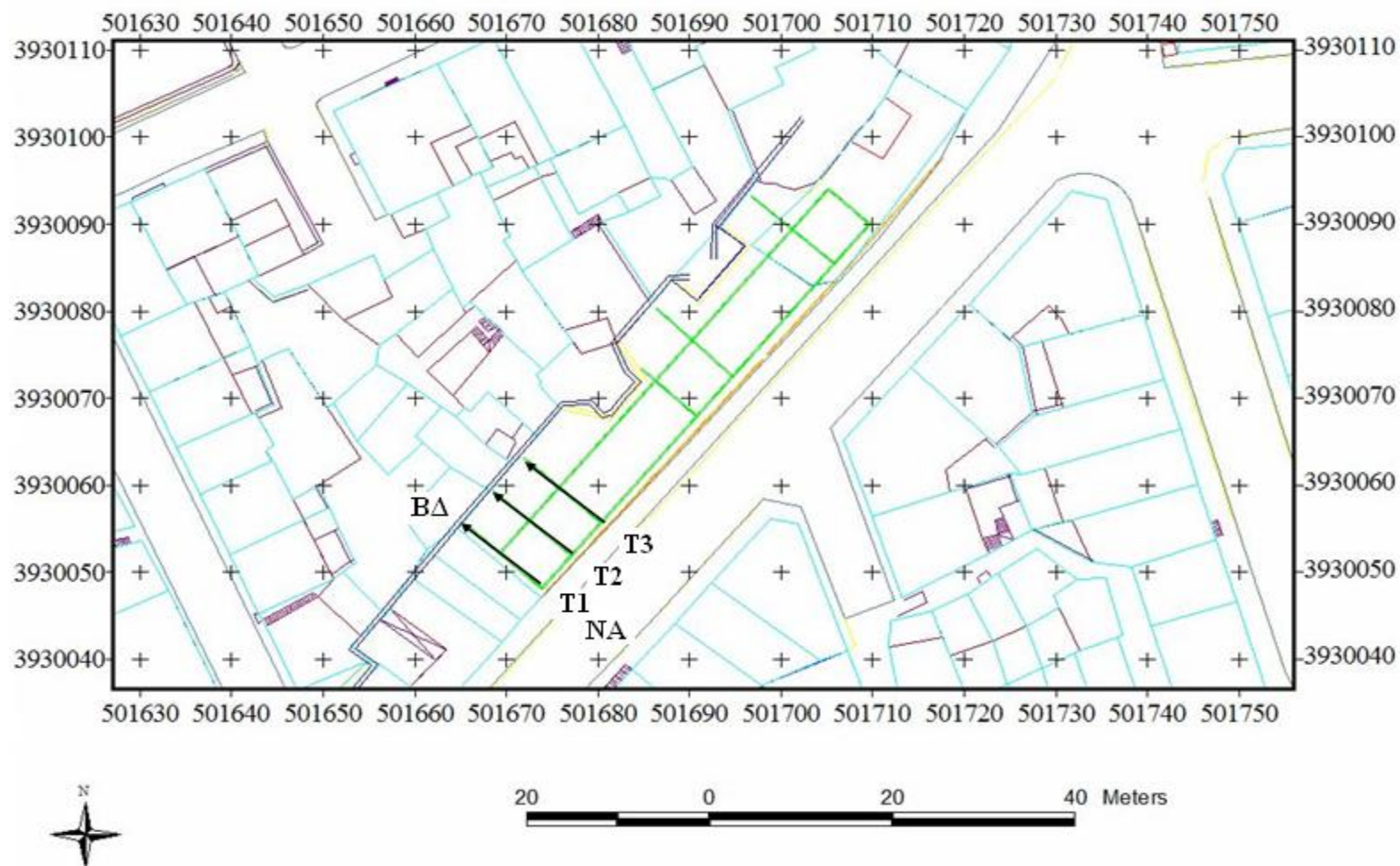
Εικόνα 4.1: Αεροφωτογραφία της πόλης των Χανίων στην οδό Σήφακα, όπου οριοθετείται η περιοχή μελέτης (www.google-earth.gr).



Σχήμα 4.1: Ο κάρναβος K1 του γεωραντάρ στην οδό Σήφακα. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης διεύθυνσης NA-BΔ με μπλε χρώμα.



Σχήμα 4.2: Ο κάνναβος K2 του γεωραντάρ στην οδό Σήφακα. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ με κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 4.3: Οι γραμμές μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας στην οδό Σήφακα με πράσινο χρώμα και συγκεκριμένα οι T1 (0 m), T2 (5 m) και T3 (10 m).

4.3 Επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων του γεωραντάρ

Η επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος GPR PRO. Με την εφαρμογή διαφόρων φίλτρων που αναφέρονται παρακάτω, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του θορύβου και η ανάδειξη ανακλώμενων κυμάτων από θαμμένες ανθρωπογενείς δομές (π.χ. τοιχοδομές).

Εφαρμόστηκαν τα παρακάτω φίλτρα:

1. Το μονοδιάστατο φίλτρο αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (**dewow**) για απομάκρυνση της επαγωγικής συνιστώσας.
2. Το φίλτρο εκθετικής ενίσχυσης των δεδομένων (**SEC**), για την ανάδειξη των ασθενικών ανακλώμενων κυμάτων, που δε διακρίνονται καθαρά στα αρχικά δεδομένα.
3. Το φίλτρο μέσης τιμής (**average**) για την εξομάλυνση των δεδομένων.

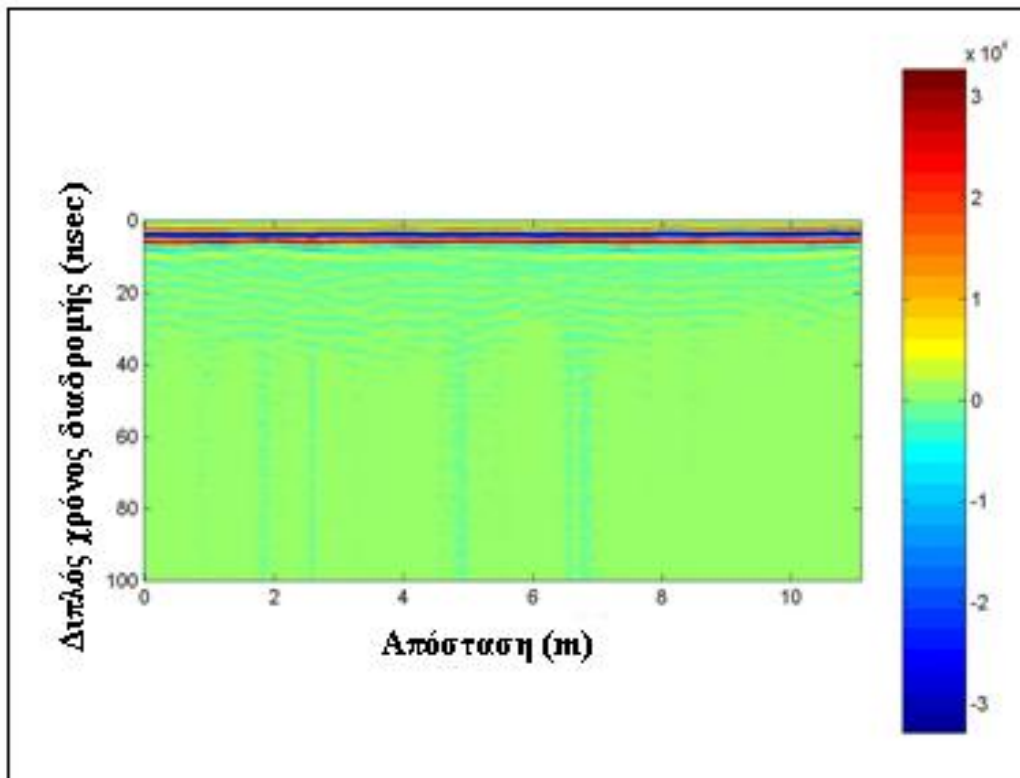
Από τα επεξεργασμένα δεδομένα υπολογίστηκε το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB (**dB instantaneous envelope**, Σπανουδάκης, 2001).

Στην συνέχεια επιλέχθηκε όμως η τομή γεωραντάρ f001 για την παρουσίαση των επεξεργασμένων τομών γεωραντάρ:

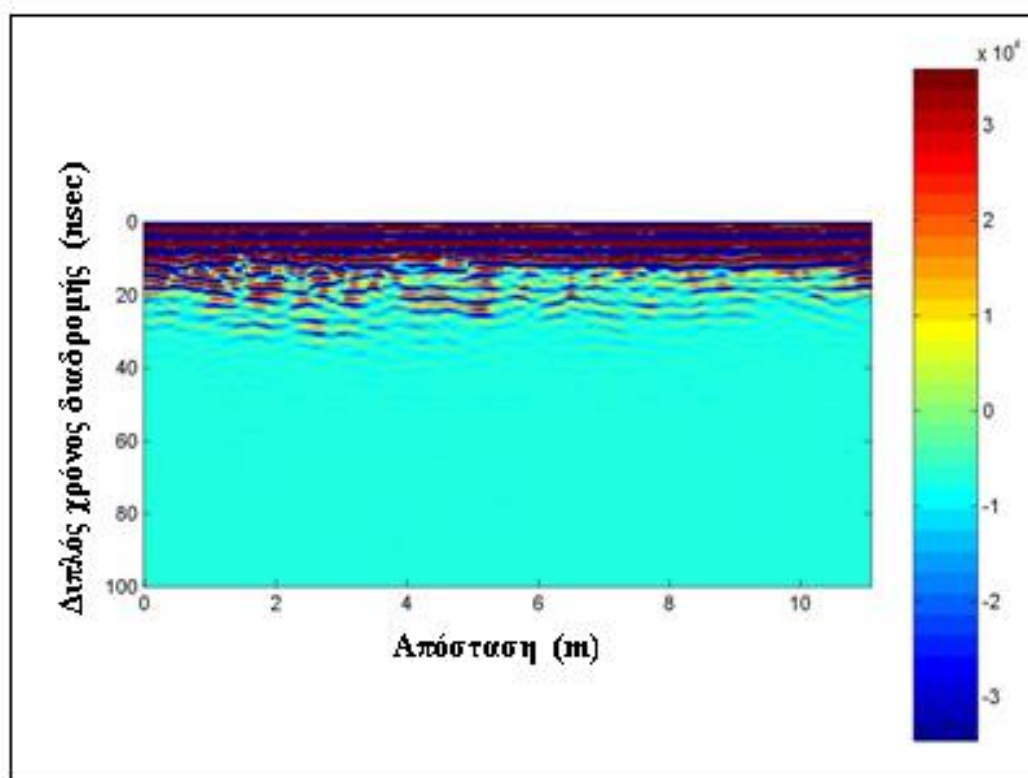
- Στην ακατέργαστη τομή του γεωραντάρ f001 (σχήμα 4.4), από 0 έως 10 ns παρατηρούνται τα απευθείας κύματα καθώς και τα κύματα αέρα και εδάφους. Τα μεγάλα πλάτη αυτών των κυμάτων δεν επιτρέπουν την εμφάνιση ανακλώμενων κυμάτων.
- Με την εφαρμογή του φίλτρου Dewow (σχήμα 4.5) και του φίλτρου ενίσχυσης SEC στα δεδομένα (σχήμα 4.6) εμφανίζονται ανακλώμενα κύματα για χρόνο καταγραφής μέχρι τα 35 ns περίπου.

Για χρόνο καταγραφής από 50 ns μέχρι 60 ns διακρίνονται αμυδρά H/M κύματα από οριζόντιο ανακλαστήρα (σχήμα 4.6). Για τυπική ταχύτητα διάδοσης των H/M κυμάτων 0.1 m/ns, προκύπτει ότι αυτός ο ανακλαστήρας βρίσκεται σε βάθος 2.5-3 m.

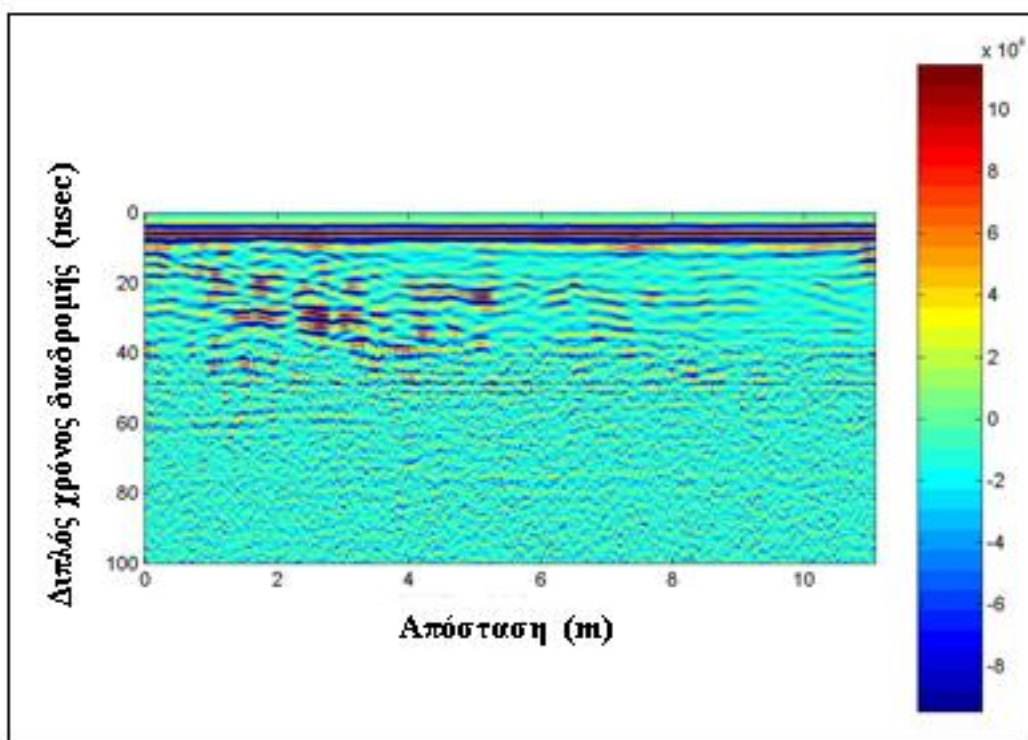
- Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ μετά από την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow και του φίλτρου ενίσχυσης (SEC).
- Στην τομή του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB (σχήμα 4.8), απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα τα απ'ευθείας κύματα καθώς και ανακλώμενα κύματα (χρόνος καταγραφής 10-35 ns).



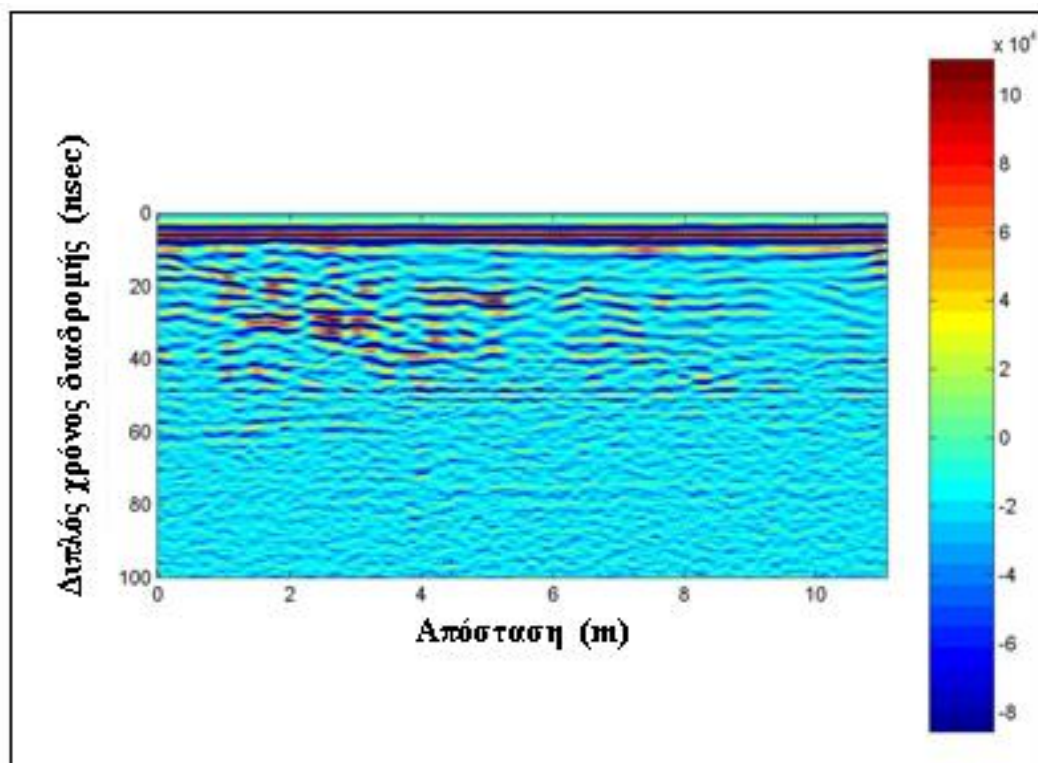
Σχήμα 4.4: Ακατέργαστη τομή γεωραντάρ f001. Προέκυψε από μετρήσεις με κεραίες των 400 MHz και διάστημα δειγματοληψίας 0.146 ns.



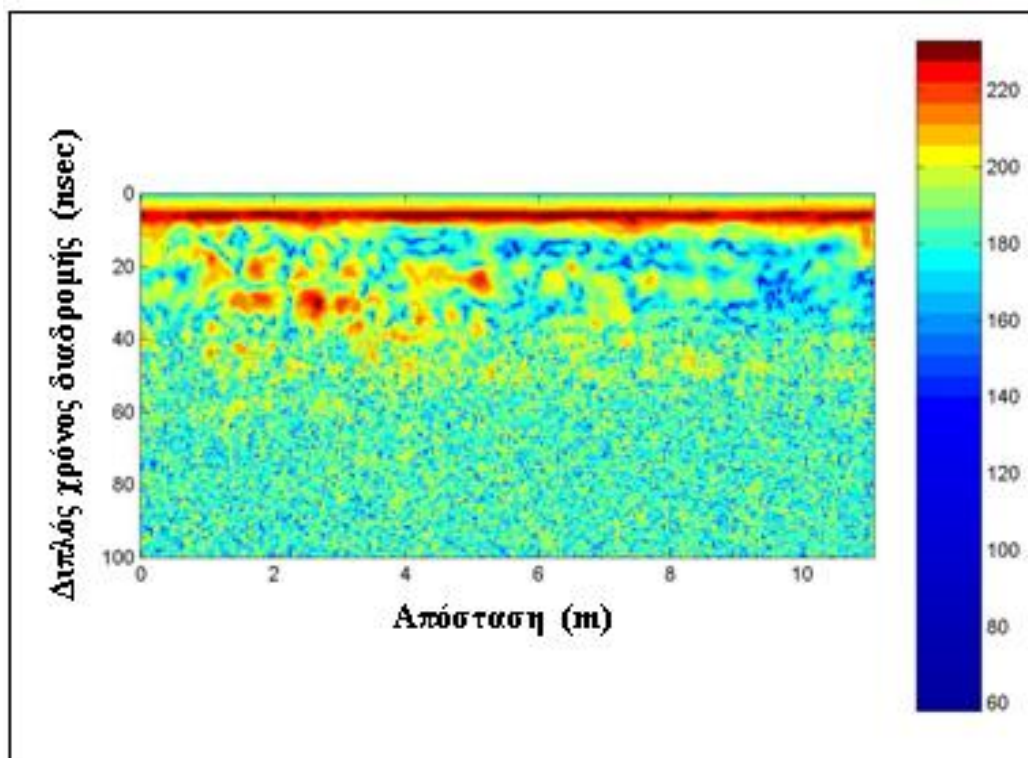
Σχήμα 4.5: Η τομή γεωραντάρ f001 μετά από την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow στα αρχικά δεδομένα.



Σχήμα 4.6: Η τομή γεωραντάρ f001 μετά από την εφαρμογή του φίλτρου διόρθωσης Dewow και του φίλτρου ενίσχυσης (SEC).



Σχήμα 4.7: Εφαρμογή του φίλτρου μέσης τιμής στην τομή του σχήματος 4.6.



Σχήμα 4.8: Το στιγμιαίο πλάτος σε κλίμακα dB (dB instantaneous envelope) της τομής f001.

4.4 Ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης

Μία από τις γεωφυσικές τεχνικές που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη διασκόπηση και στον εντοπισμό "ρηχών δομών", είναι η ηλεκτρική μέθοδος. Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι ο καθορισμός της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής του, πραγματοποιώντας μετρήσεις από την επιφάνεια της Γης.

Στη γεωηλεκτρική διασκόπηση ο βασικός εξοπλισμός περιλαμβάνει ένα όργανο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης, ατσάλινους πασσάλους και καλώδια σύνδεσης αυτών με τα καλώδια μεταφοράς ρεύματος, μπαταρία (V, A) για αυτονομία στην ύπαιθρο και καλώδιο μεταφοράς δεδομένων από το σύστημα καταγραφής στον υπολογιστή.

Ηλεκτρικό ρεύμα εισάγεται στο υπέδαφος μέσω δύο ηλεκτροδίων (ηλεκτρόδια ρεύματος A, B) και μετριέται η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπέδαφος ρεύμα, σε δύο άλλα ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια δυναμικού M, N) τα οποία εισέρχονται στο έδαφος σε βάθος μερικών εκατοστών (~ 10 cm, σχήμα 4.9) και σε αποστάσεις που ποικίλουν από μερικά μέτρα έως μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει τη δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μία ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους.

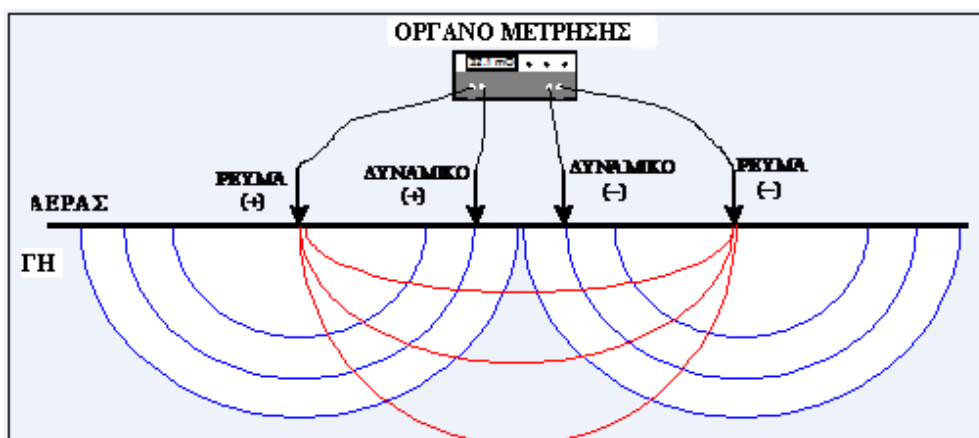
Από τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και τις διαφορές δυναμικού υπολογίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_w , η οποία εξαρτάται όχι μόνο από την ειδική αντίσταση των πετρωμάτων (σχέση 4.1) αλλά και από τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού (Βαφείδης, 2001). Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων όπως είναι η ορυκτολογική σύστασή του, η χημική σύσταση του νερού, το πορώδες, η θερμοκρασία και η πίεση.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι διάταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του εδάφους. Μία από τις πιο διαδεδομένες η οποία εφαρμόστηκε στην παρούσα διπλωματική, είναι η διάταξη διπόλου - διπόλου. Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια ρεύματος αποτελούν το δίπολο ρεύματος και τα ηλεκτρόδια δυναμικού σχηματίζουν το δίπολο δυναμικού με ανάπτυγμα a . Η απόσταση των διπόλων είναι

να και η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ_a δίνεται από τη σχέση (5.1, Βαφείδης, 2001):

$$\rho_a = \pi a n(n+1)(n+2)(\Delta V/I) \quad (4.1)$$

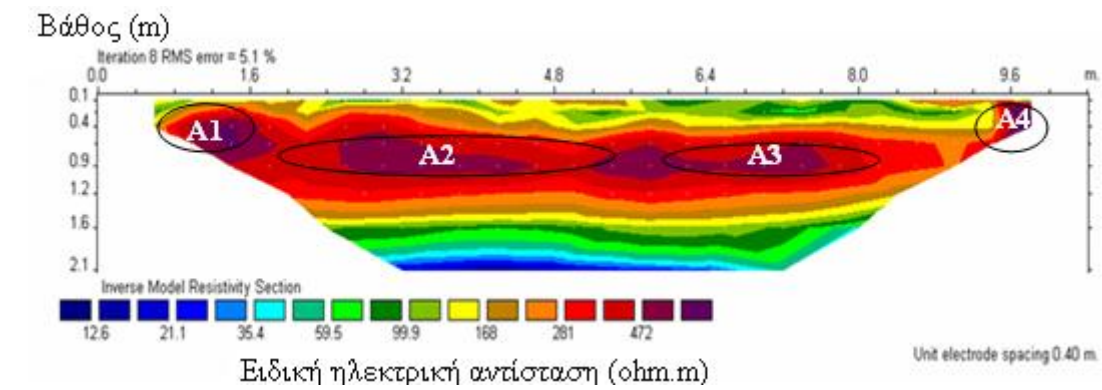
όπου ΔV είναι η τάση και I η ένταση του ρεύματος.



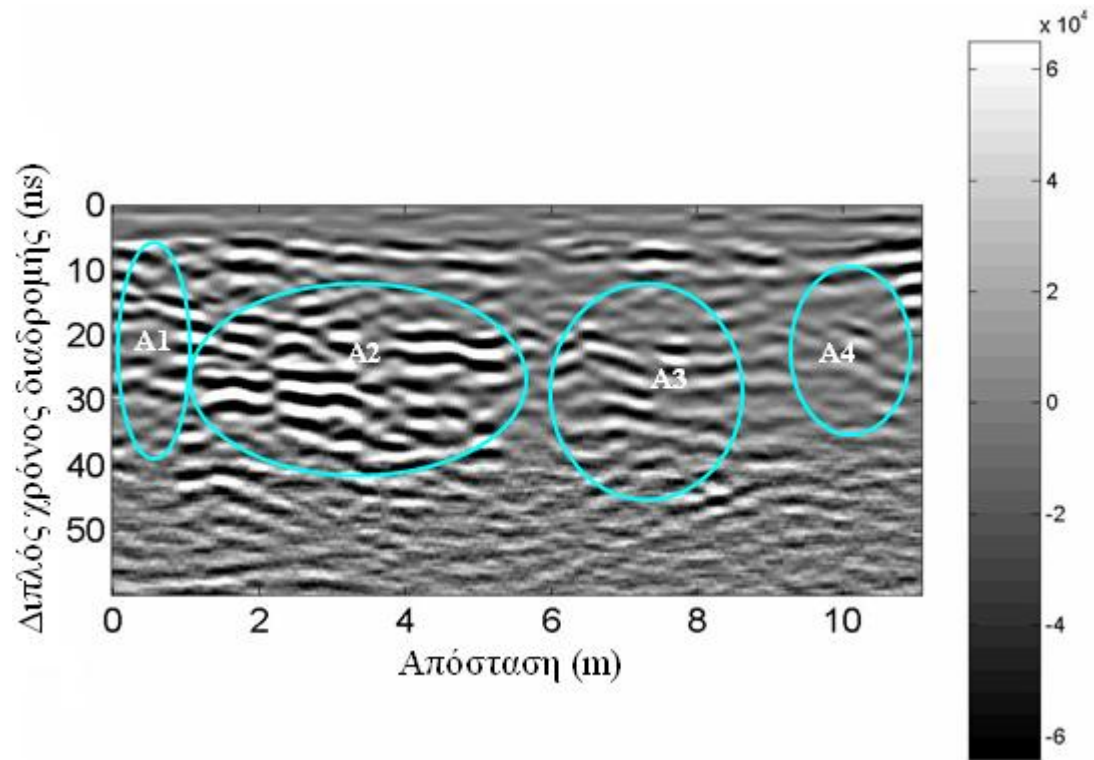
Σχήμα 4.9: Βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων (F:/CRINNO EMMERIC.htm).

4.5 Σύγκριση τομών γεωραντάρ-και γεωηλεκτρικών τομών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ηλεκτρικής αντίστασης που προέκυψαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, παρουσιάζονται στα σχήματα 4.10α, 4.11α, 4.12α και στο παράρτημα Γ. Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση της τομής γεωραντάρ και της γεωηλεκτρικής τομής για τις γραμμές μελέτης στα 0 m, 5 m και 10 m από την αρχή του καννάβου K1 (σχήμα 4.10β, 4.11β και 4.12β). Τα ψυχρά χρώματα στη γεωηλεκτρική τομή αντιπροσωπεύουν μικρότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στις τομές του γεωραντάρ f001, f011 και f021 παρουσιάζονται τα επεξεργασμένα δεδομένα. Η επεξεργασία τους συμπεριλάμβανε τεχνικές αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (dewow), ενίσχυσης των δεδομένων (SEC), εξομάλυνσης των δεδομένων καθώς και τεχνικές αποκοπής συναφούς θορύβου.

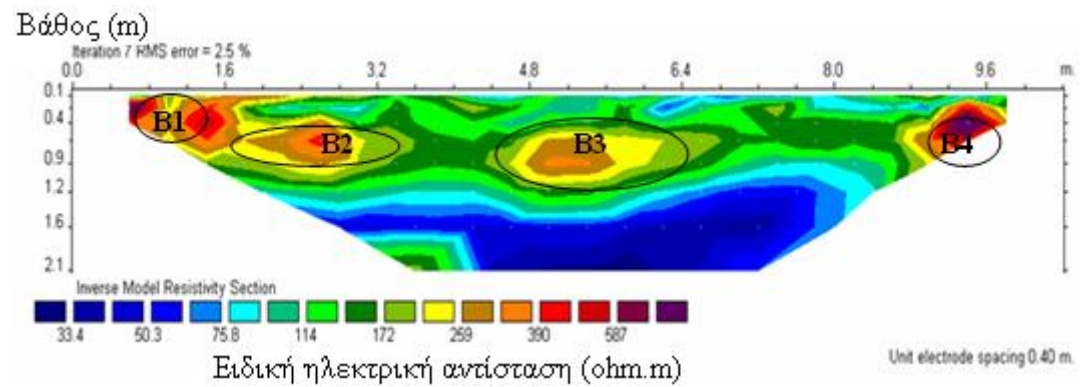


(α)

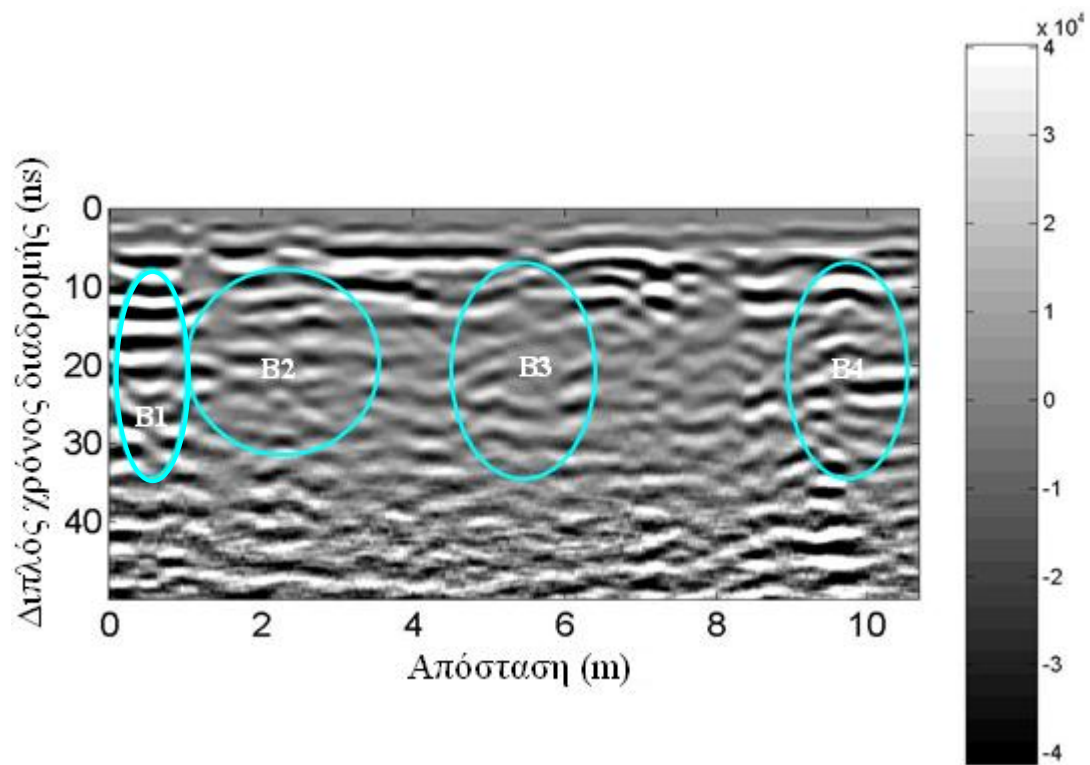


(β)

Σχήμα 4.10: (α) Γεωηλεκτρική τομή στα 0 m. Καταγράφονται υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης (κόκκινο-πορτοκαλί χρώμα) με μαύρους κύκλους. (β) Τομή γεωραντάρ f001, καταγραφή ισχυρών ανακλάσεων (μπλε κύκλοι) στους χρόνους 10-35 ns και βάθος 0.5-1.75 m.

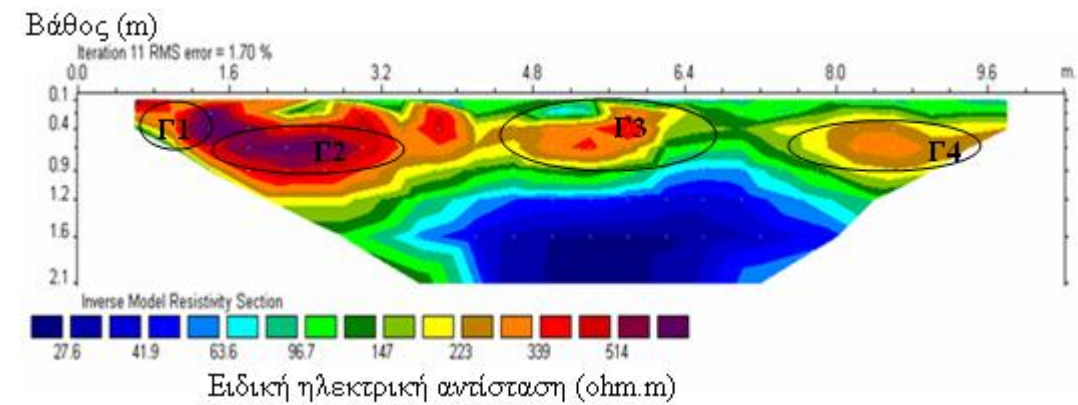


(α)

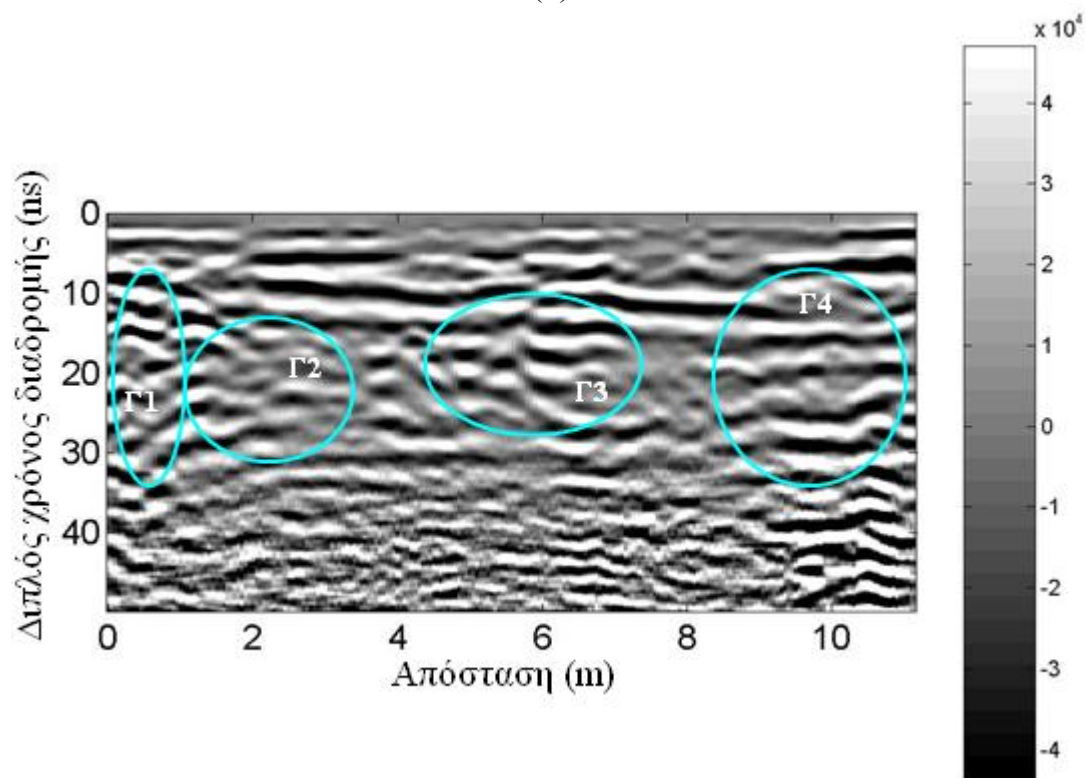


(β)

Σχήμα 4.11: (α) Γεωηλεκτρική τομή στα 5 m. (β) Τομή γεωραντάρ f011, διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ (Κ1). Καταγράφονται οι υψηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις και τα ισχυρά ανακλώμενα και περιθλώμενα κύματα με κύκλους.



(α)



(β)

Σχήμα 4.12: (α) Γεωηλεκτρική τομή στα 10 m και (β) τομή γεωραντάρ f021, διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ (Κ1). Διακρίνονται υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης και ισχυρές ανακλάσεις με κύκλους πάνω στις τομές.

Στη γεωηλεκτρική τομή των 0 m (σχήμα 4.10α) εμφανίζονται υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης (κόκκινο-πορτοκαλί χρώμα) κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Αντίστοιχα στην τομή γεωραντάρ (σχήμα 4.10β) ανακλώμενα

ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ζώνες A1, A2, A3 και A4) καταγράφονται κυρίως στα 10-35 ns (βάθος 0.5-1.75 m).

Στο σχήμα 4.11α παρατηρούνται δύο ζώνες (B1 και B4) αυξημένης τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης. Η ζώνη B1 στην αρχή της γραμμής μελέτης έως τα 1.5 m περίπου. Αντίστοιχα, στην τομή γεωραντάρ (σχήμα 4.11β) καταγράφονται ανακλώμενα κύματα στους χρόνους διαδρομής 10-35 ns, σε βάθος 0.5-1.75 m (ζώνη B1), τα οποία αποδίδονται στην ύπαρξη του προτειχίσματος.

Όμοια παρατηρώντας τη γεωηλεκτρική τομή στα 10 m (σχήμα 4.12α) διακρίνονται τέσσερις ζώνες με υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Στα 10 ns της αντίστοιχης τομής γεωραντάρ (σχήμα 4.12β) καταγράφονται ανακλώμενα κύματα από το πάνω όριο του στρώματος υψηλής ειδικής αντίστασης.

Άρα, διαπιστώθηκε ότι τα ανακλώμενα κύματα των τομών του γεωραντάρ (σε χρόνους 10-35 ns και βάθος 0.5-1.75 m), προέρχονται από ζώνες υψηλότερης ειδικής αντίστασης στις γεωηλεκτρικές τομές (σχήματα 4.10α, 4.11α και 4.12α). Οι ζώνες αυτές αποδίδονται σε ανθρωπογενείς δομές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

5.1 Εισαγωγή

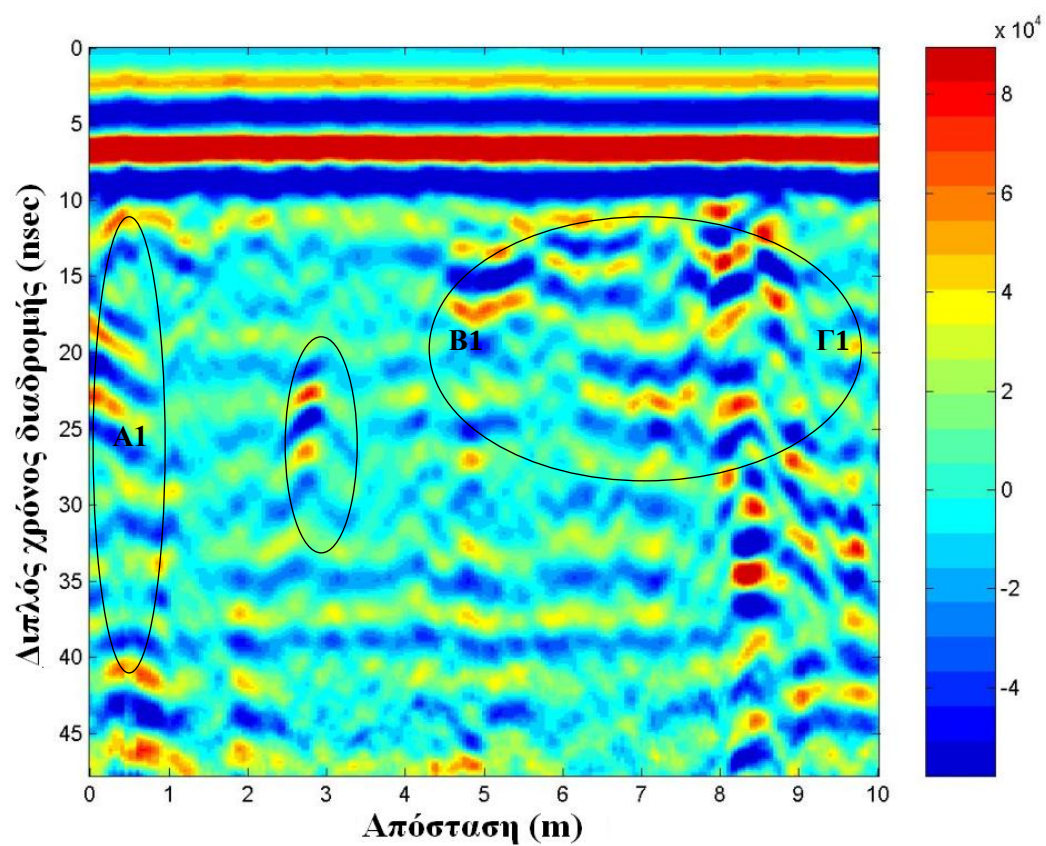
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται και ερμηνεύονται οι επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ του καννάβου K2, οι οριζόντιες τομές των καννάβων K1 και K2, καθώς επίσης ο συνδυασμός τομών γεωραντάρ και οριζόντιων τομών. Η παρούσα διαδικασία υπέδειξε την πιθανή θέση του προτειχίσματος του βυζαντινού τείχους στην οδό Σήφακα.

5.2 Τομές γεωραντάρ (K2)

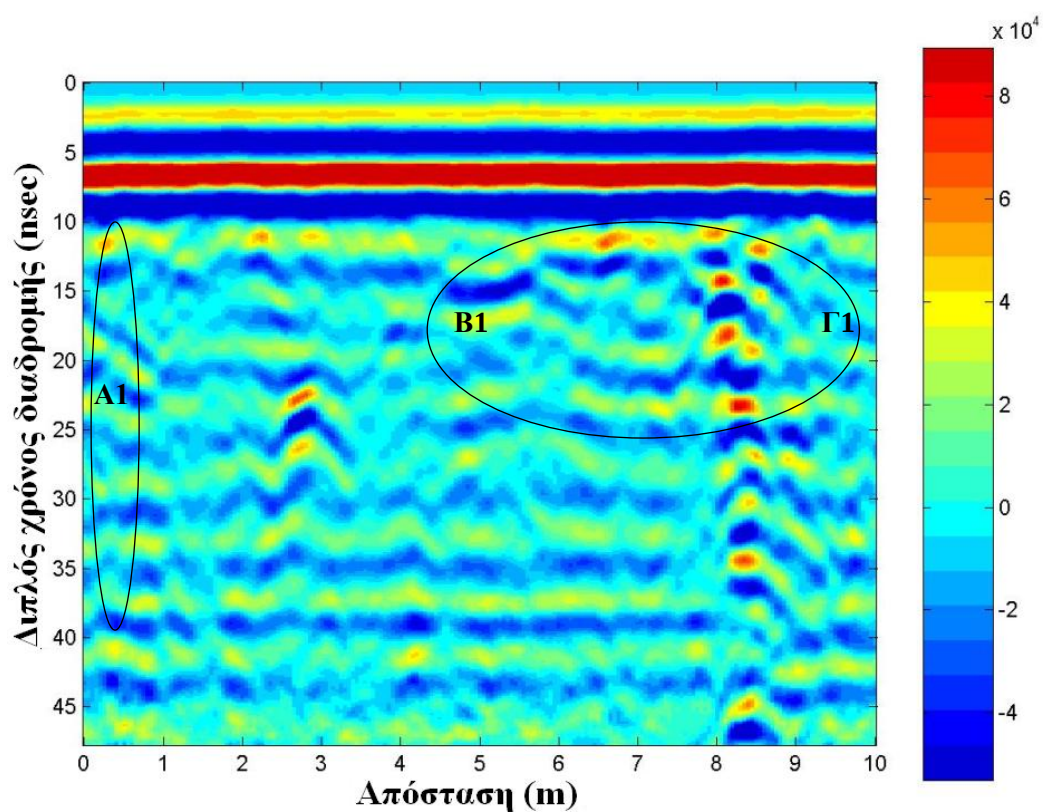
Τα δεδομένα των τομών γεωραντάρ στα σχήματα 5.1-5.14 είναι επεξεργασμένα (με φίλτρα αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (dewow), ενίσχυσης των δεδομένων (SEC) καθώς και με το φίλτρο μέσης τιμής (average)). Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται τμήμα της κάθε τομής γεωραντάρ (από την αρχή έως τα 10 m).

Στην τομή γεωραντάρ f01 (σχήμα 5.1) αξίζει να σημειωθούν οι ζώνες A1, B1 και Γ1. Αυτές οι ζώνες εξαιτίας του μεγάλου πλάτους των ανακλώμενων κυμάτων, αποδίδονται στο προτείχισμα (μαύρος κύκλος), όπως έχει διαπιστωθεί και από τις τομές γεωραντάρ στον κάνναβο K1 και τις γεωηλεκτρικές τομές (σχήμα 4.10, 4.11 και 4.12).

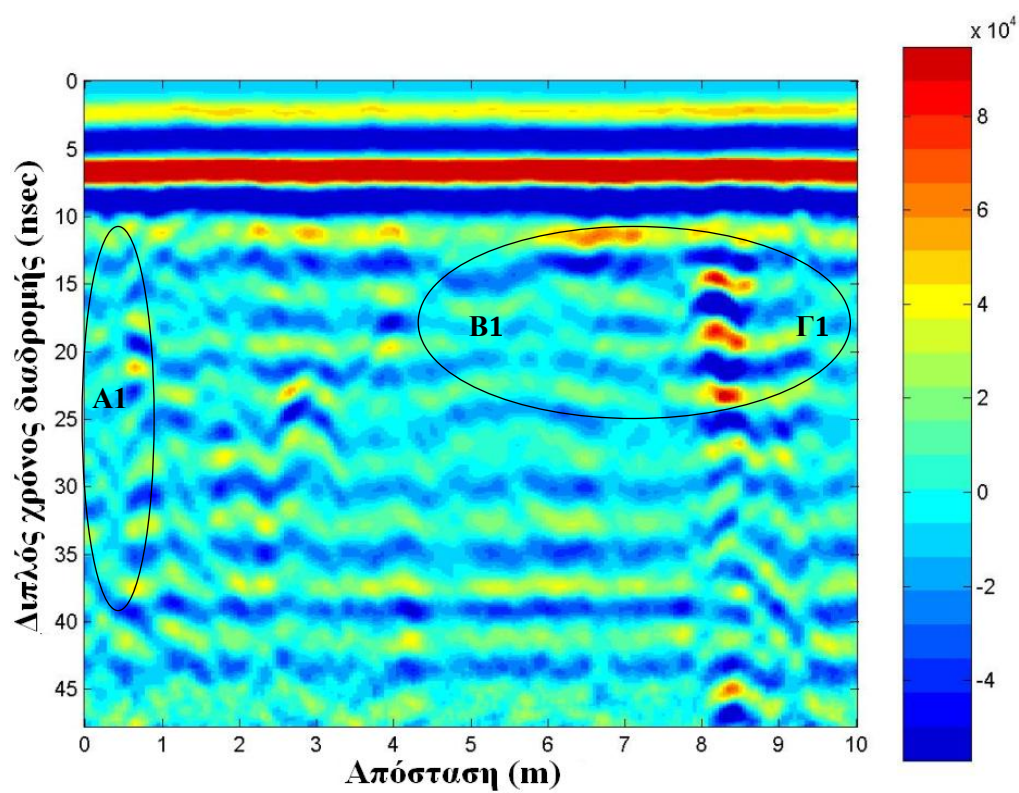
Οι προαναφερθείσες ζώνες εμφανίζονται και στις γειτονικές τομές γεωραντάρ f02, f03 και f04 (σχήματα 5.2-5.4). Στις υπόλοιπες τομές γεωραντάρ (σχήματα 5.5-5.14) οι ζώνες που υποδεικνύονται αντιστοιχούν σε ζώνες με το ίδιο σύμβολο τόσο στις γεωηλεκτρικές τομές όσο και στις τομές γεωραντάρ στον κάνναβο K1.



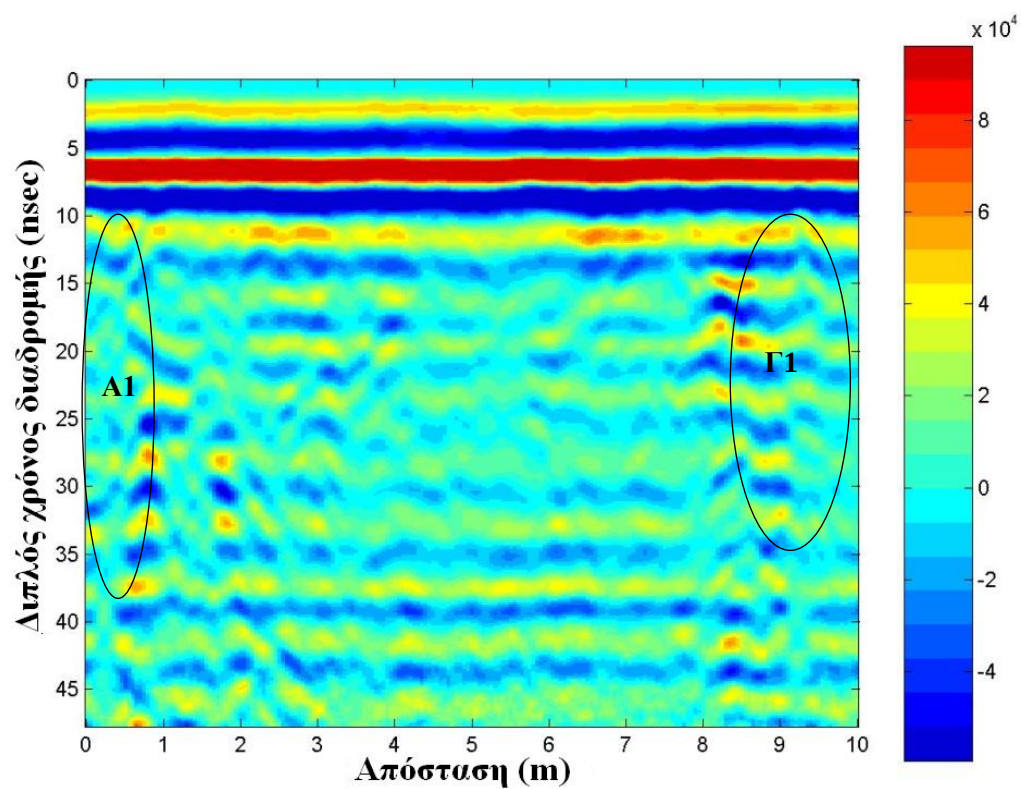
Σχήμα 5.1: Τομή γεωραντάρ f01 (K2).



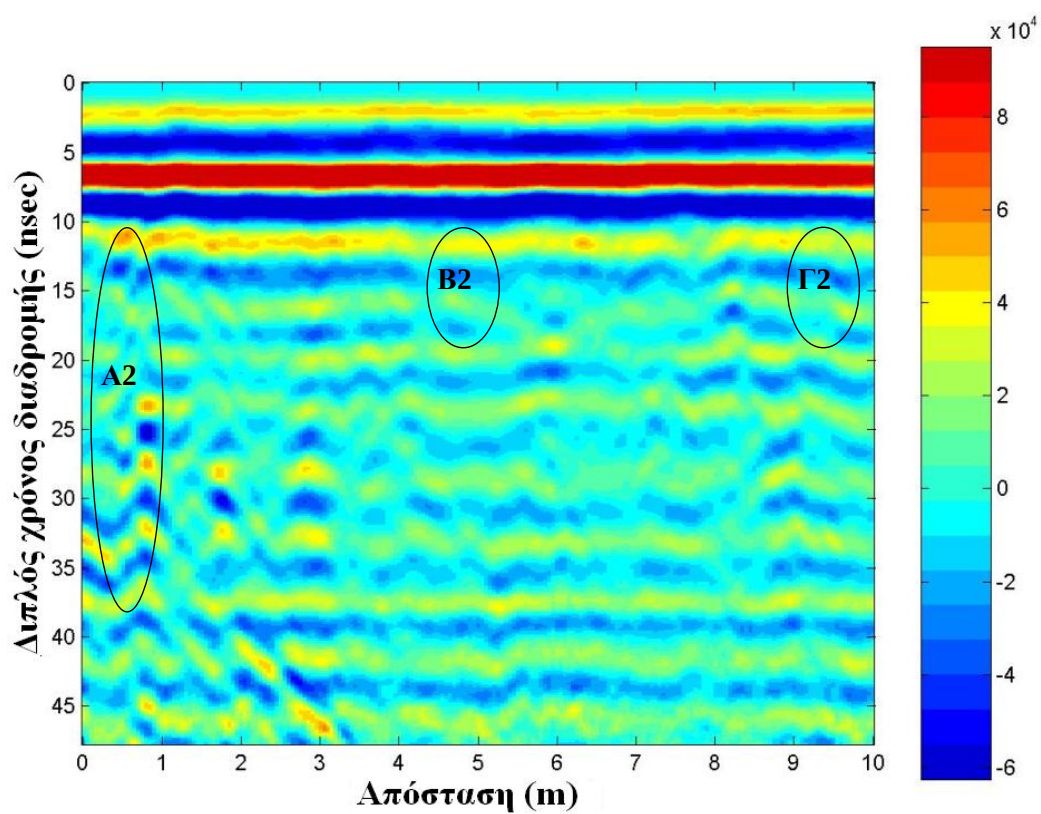
Σχήμα 5.2: Τομή γεωραντάρ f02 (K2).



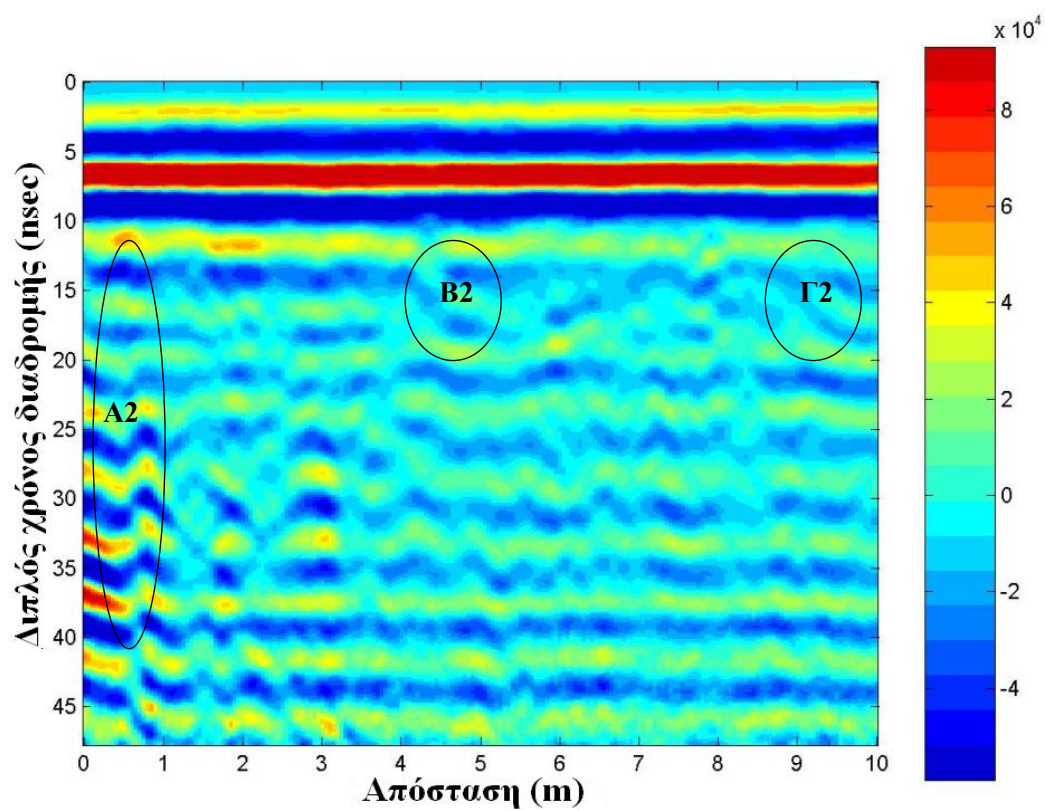
Σχήμα 5.3: Τομή γεωραντάρ f03 (K2).



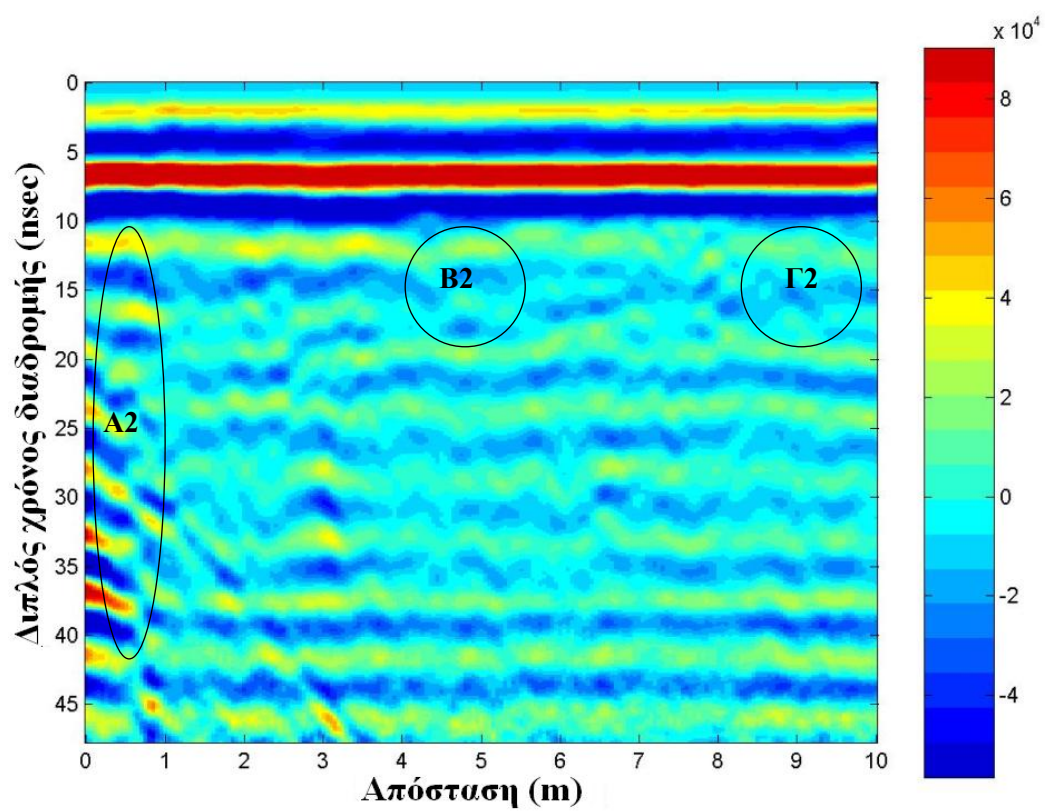
Σχήμα 5.4: Τομή γεωραντάρ f04 (K2).



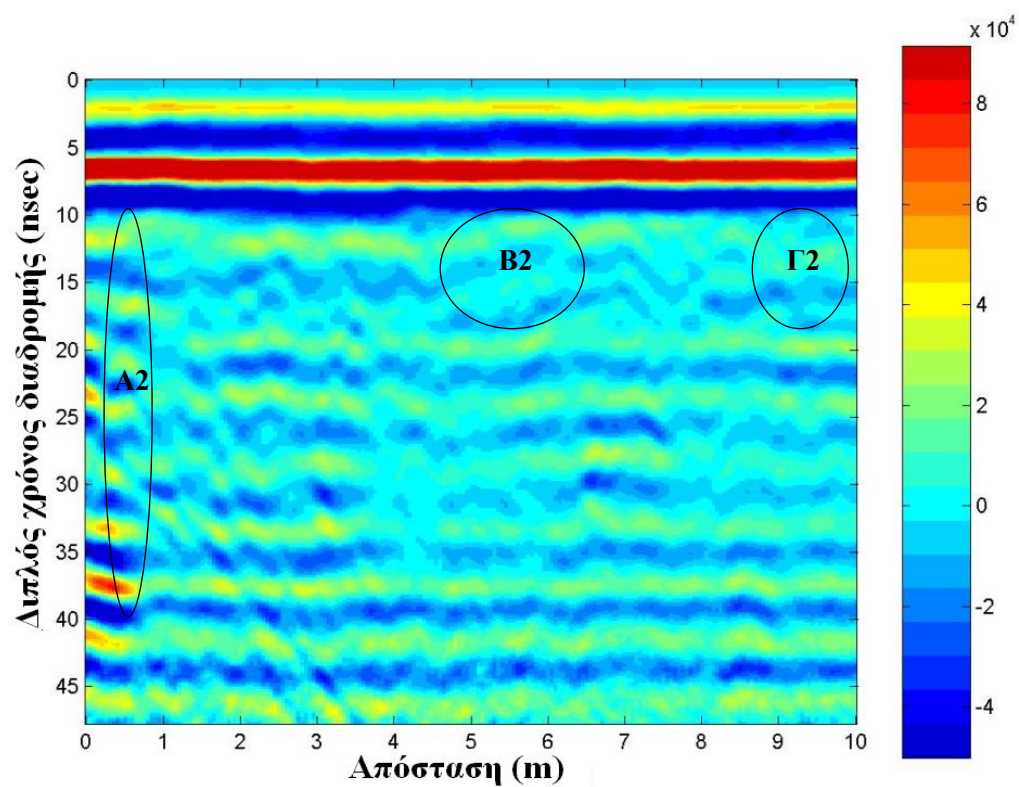
Σχήμα 5.5: Τομή γεωραντάρ f05 (K2).



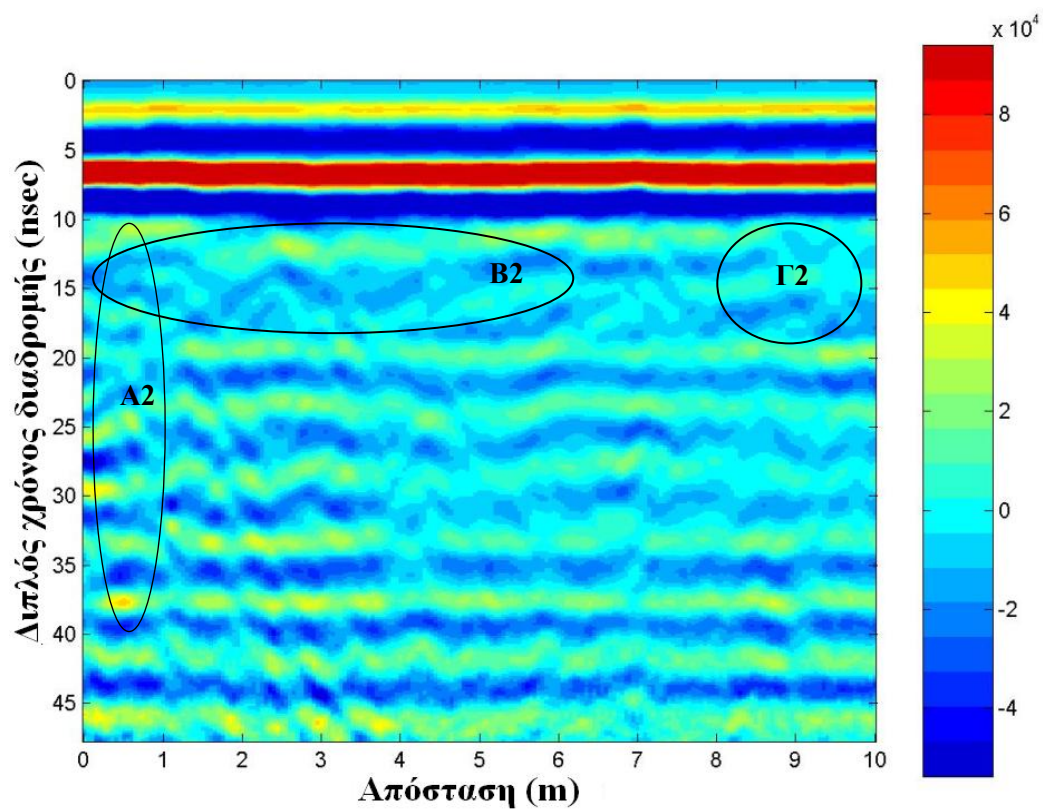
Σχήμα 5.6: Τομή γεωραντάρ f06 (K2).



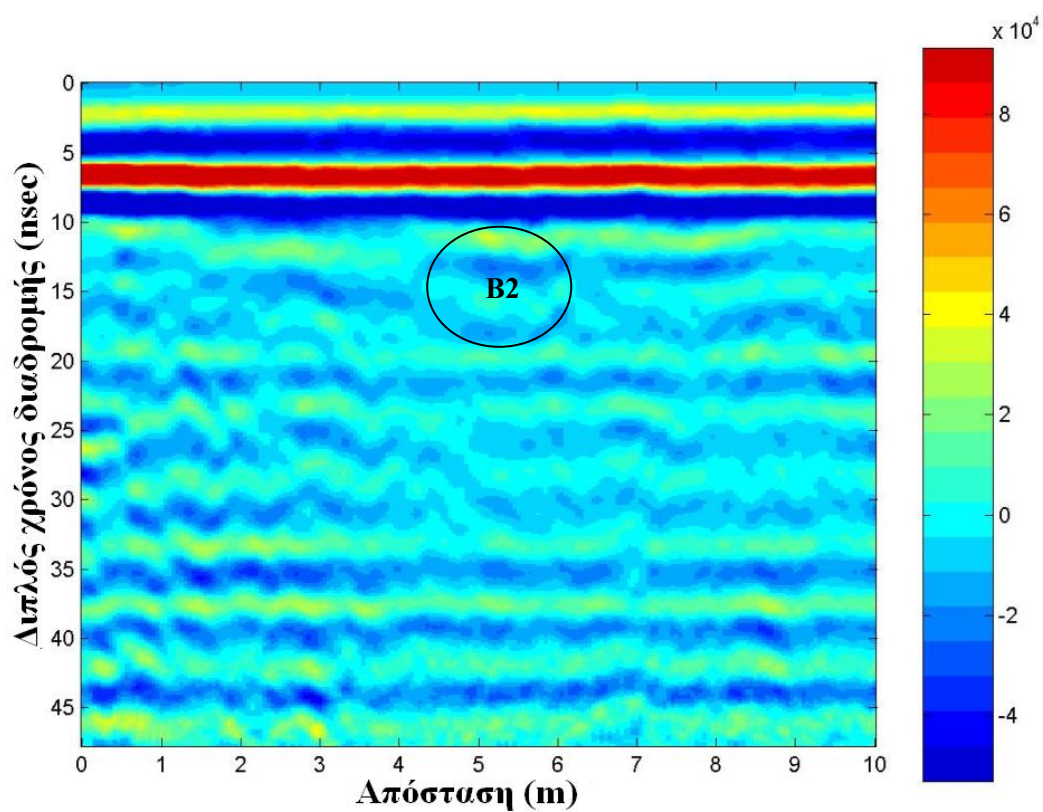
Σχήμα 5.7: Τομή γεωραντάρ f07 (K2).



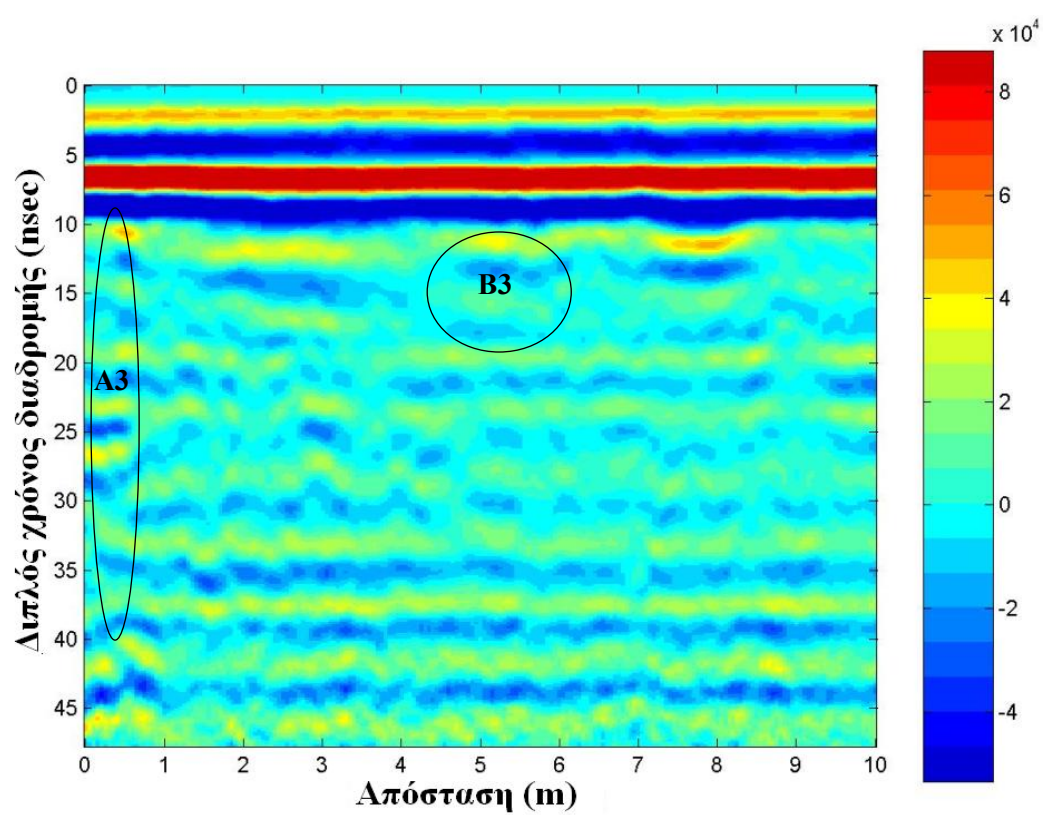
Σχήμα 5.8: Τομή γεωραντάρ f08 (K2).



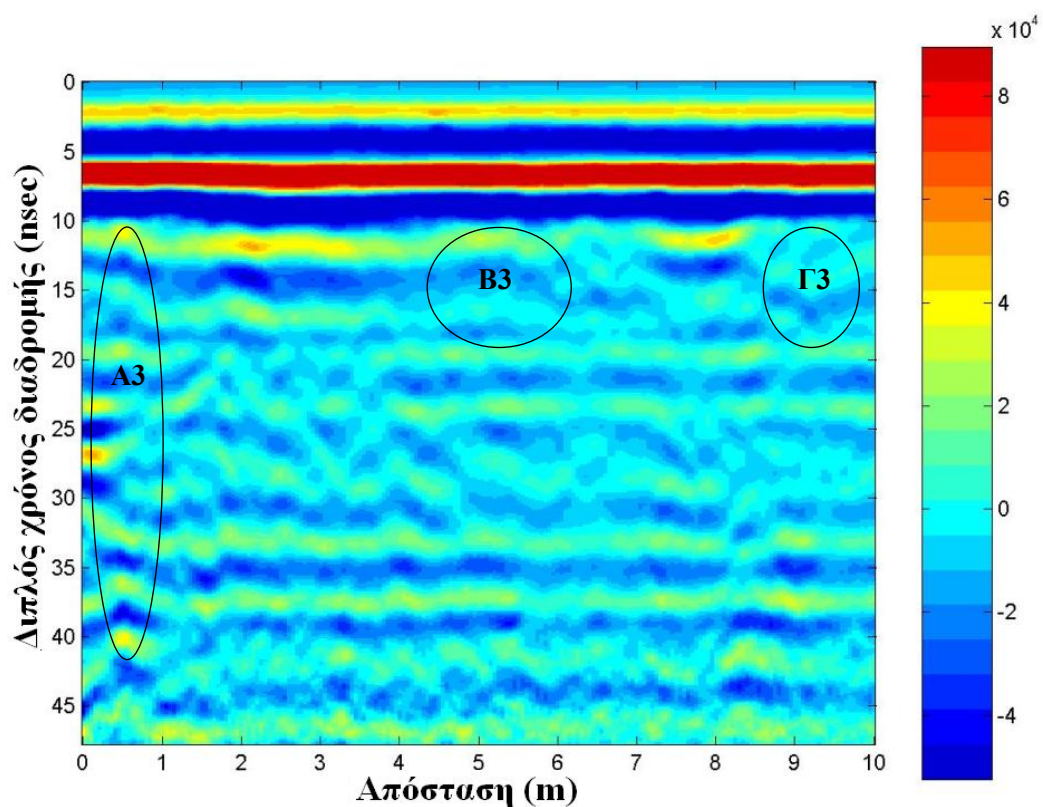
Σχήμα 5.9: Τομή γεωραντάρ f09 (K2).



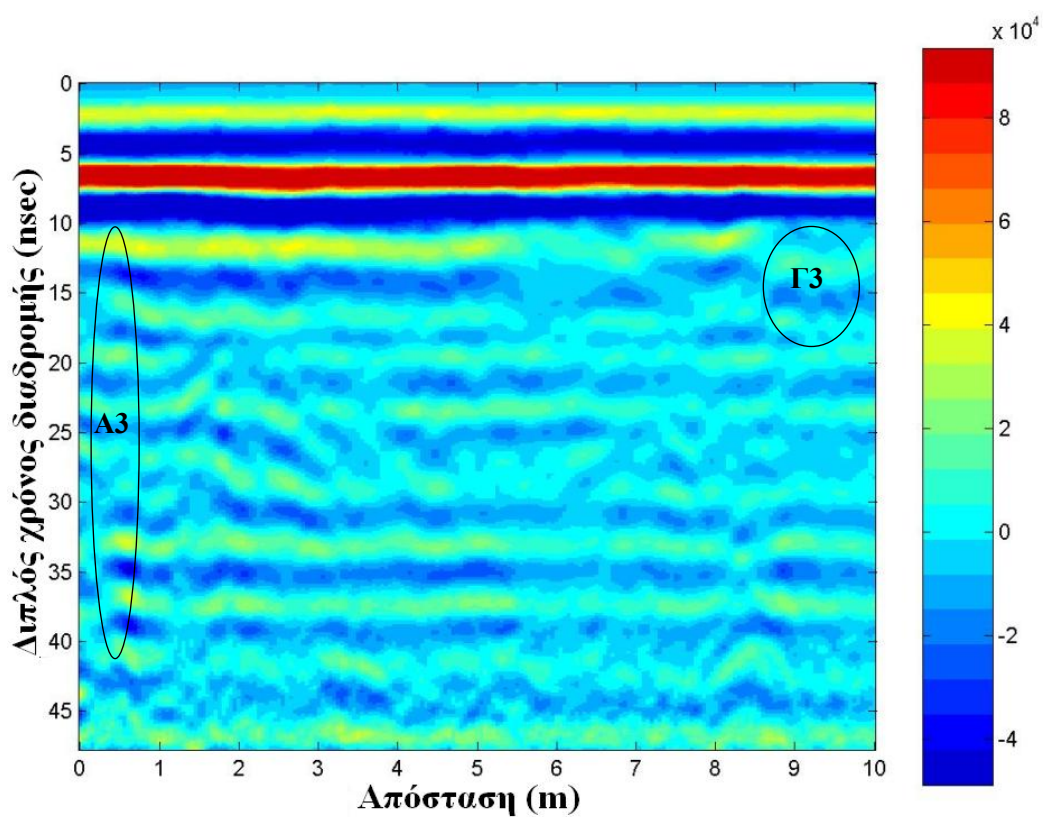
Σχήμα 5.10: Τομή γεωραντάρ f10 (K2).



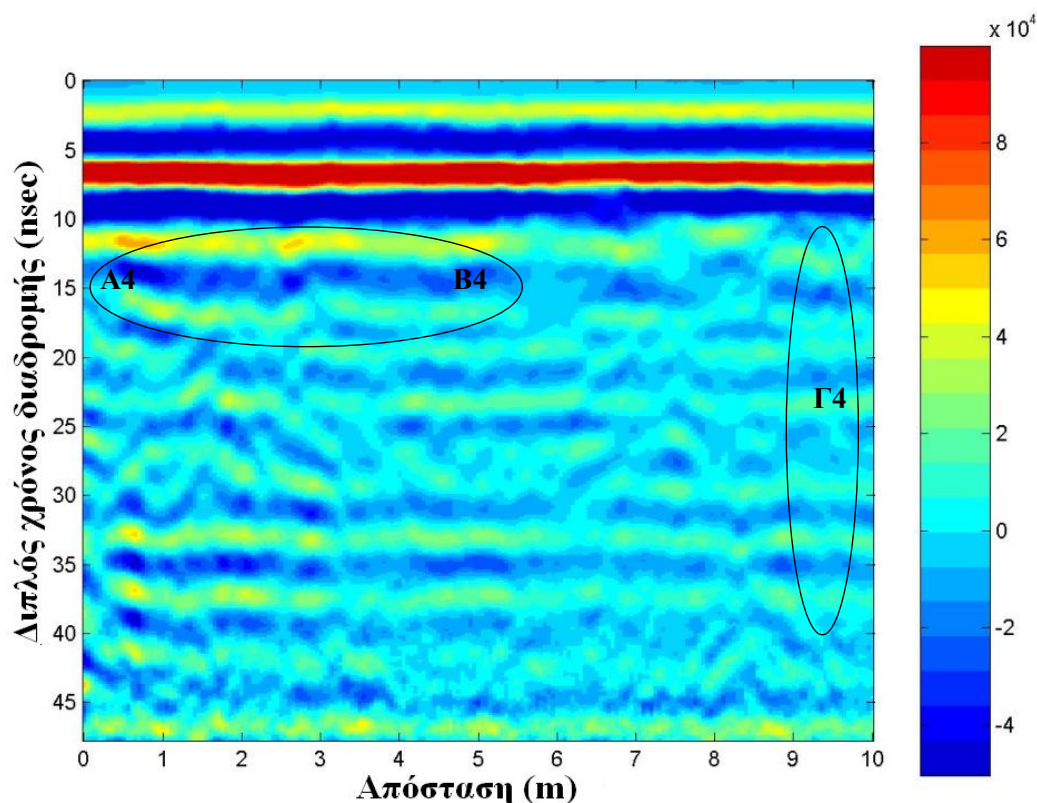
Σχήμα 5.11: Τομή γεωραντάρ f11 (K2).



Σχήμα 5.12: Τομή γεωραντάρ f12 (K2).



Σχήμα 5.13: Τομή γεωραντάρ f13 (K2).



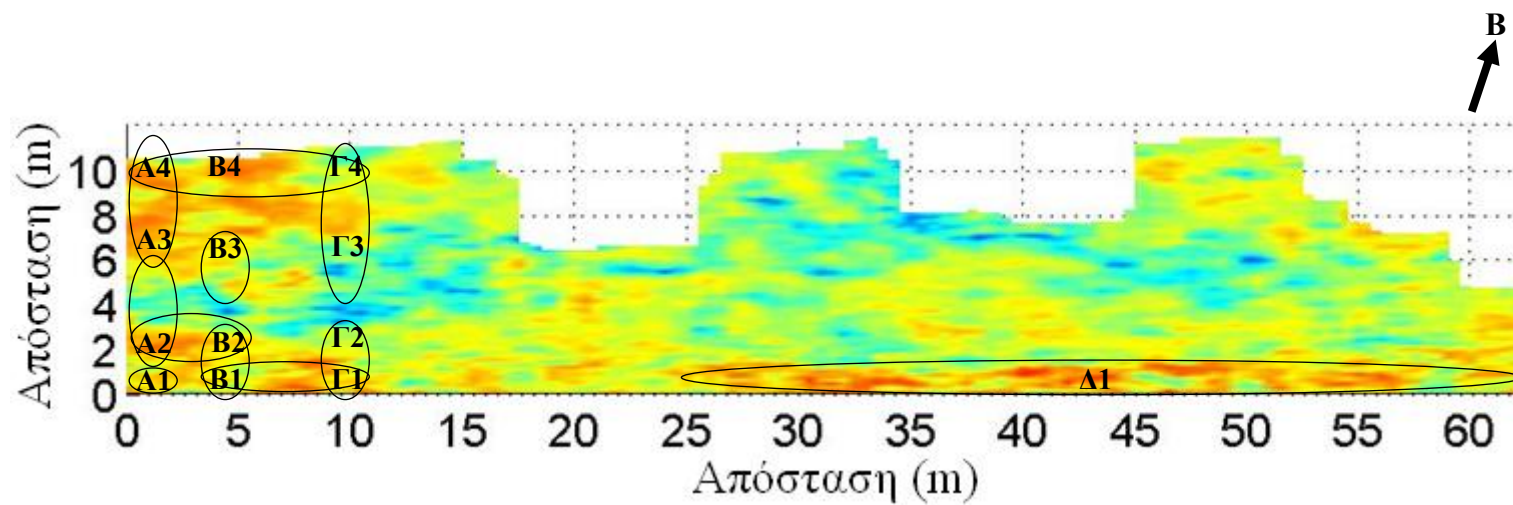
Σχήμα 5.14: Τομή γεωραντάρ f14 (K2).

5.3 Οριζόντιες τομές γεωραντάρ

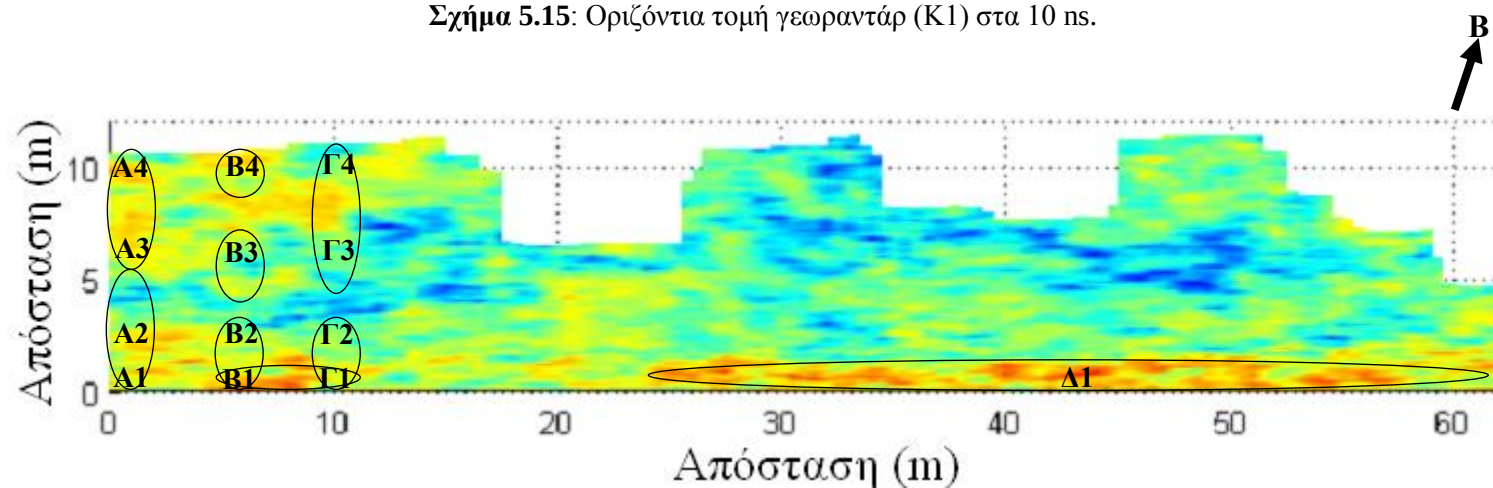
Για τη δημιουργία οριζόντιων τομών γεωραντάρ στην περιοχή Σήφακα, χρησιμοποιήθηκαν επεξεργασμένα δεδομένα γεωραντάρ (φίλτρα αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (dewow), ενίσχυσης (SEC) και εξομάλυνσης (average). Δημιουργήθηκαν οριζόντιες τομές του στιγμιαίου πλάτους σε κλίμακα dB (dB instantaneous envelope) ανά 5 ns (σχήμα 5.15-5.35), για τους καννάβους K1 και K2, στις οποίες σημειώνονται οι περιοχές ενδιαφέροντος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οριζόντιες τομές γεωραντάρ για τους καννάβους K1, K2 και για χρόνους διαδρομής 10-35 ns (ή βάθος 0.5-1.75 m αντίστοιχα). Σε όλες τις οριζόντιες τομές εμφανίζεται η επιμήκης ανωμαλία Δ1 η οποία αποδίδεται στο προτείχισμα. Επιπρόσθετα, στις οριζόντιες τομές γεωραντάρ (K1, σχήματα 5.15-5.24), οι ζώνες που υποδεικνύονται αντιστοιχούν στις ανθρωπογενείς δομές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.5. Μερικές από αυτές τις ζώνες σημειώνονται και στις οριζόντιες τομές γεωραντάρ (K2, σχήματα 5.26-5.34).

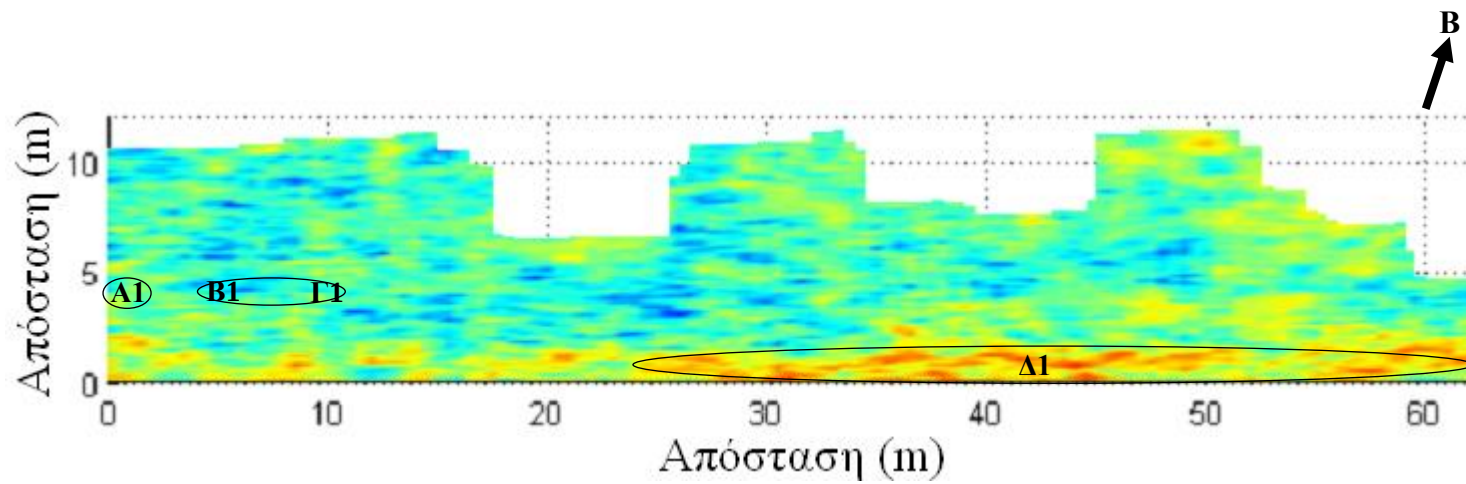
Στα σχήματα 5.25 και 5.35 παρουσιάζονται συγκεντρικά όλες οι οριζόντιες τομές γεωραντάρ για τους καννάβους K1 και K2 αντίστοιχα. Συγκρίνοντας αυτά τα σχήματα προκύπτει ότι η ζώνη Δ1 που αντιστοιχεί στο προτείχισμα διακρίνεται καλύτερα στις οριζόντιες τομές γεωραντάρ K1, ενώ οι αντίστοιχες τομές K2 απεικονίζουν λεπτομερέστερα τη διακύμανση του πάχους της ζώνης Δ1.



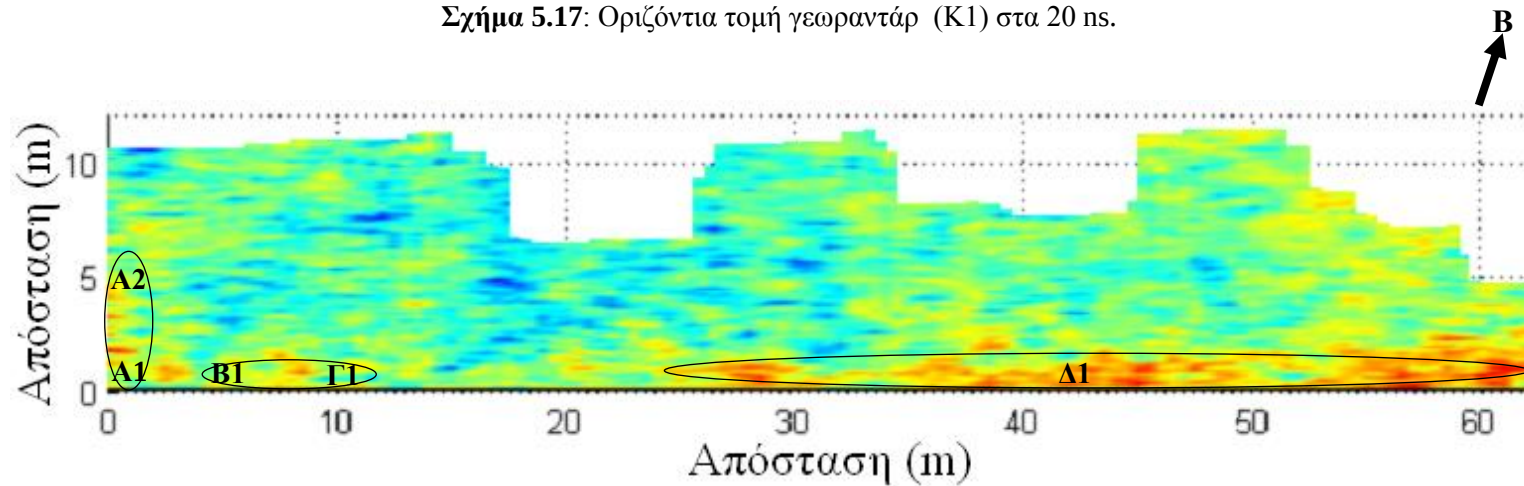
Σχήμα 5.15: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 10 ns.



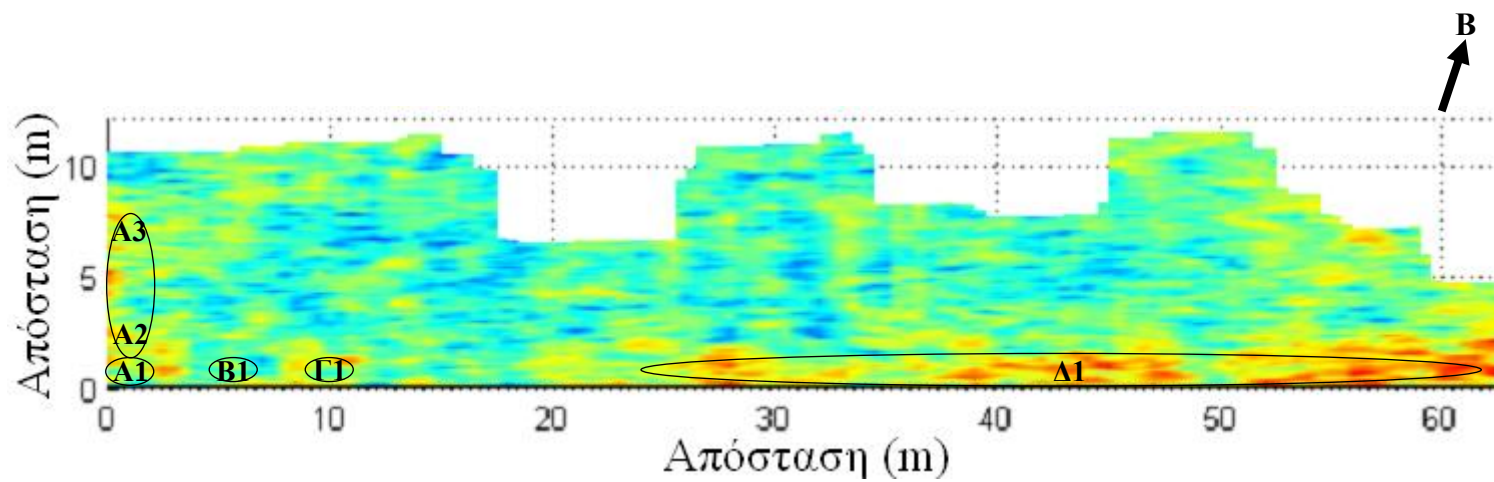
Σχήμα 5.16: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 15 ns.



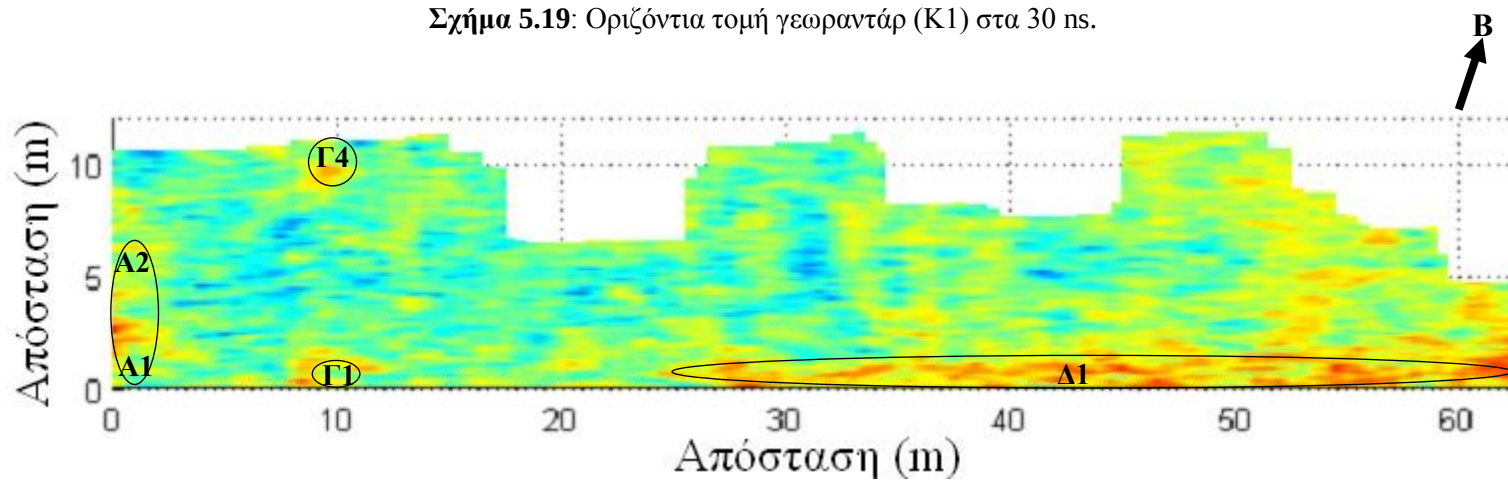
Σχήμα 5.17: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 20 ns.



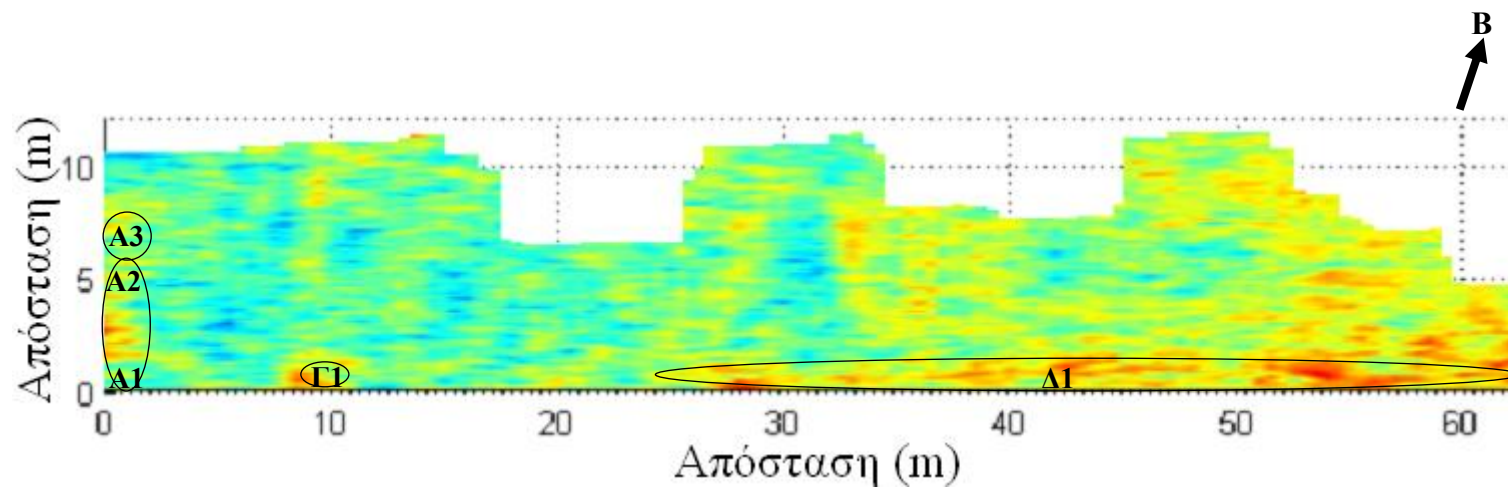
Σχήμα 5.18: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 25 ns.



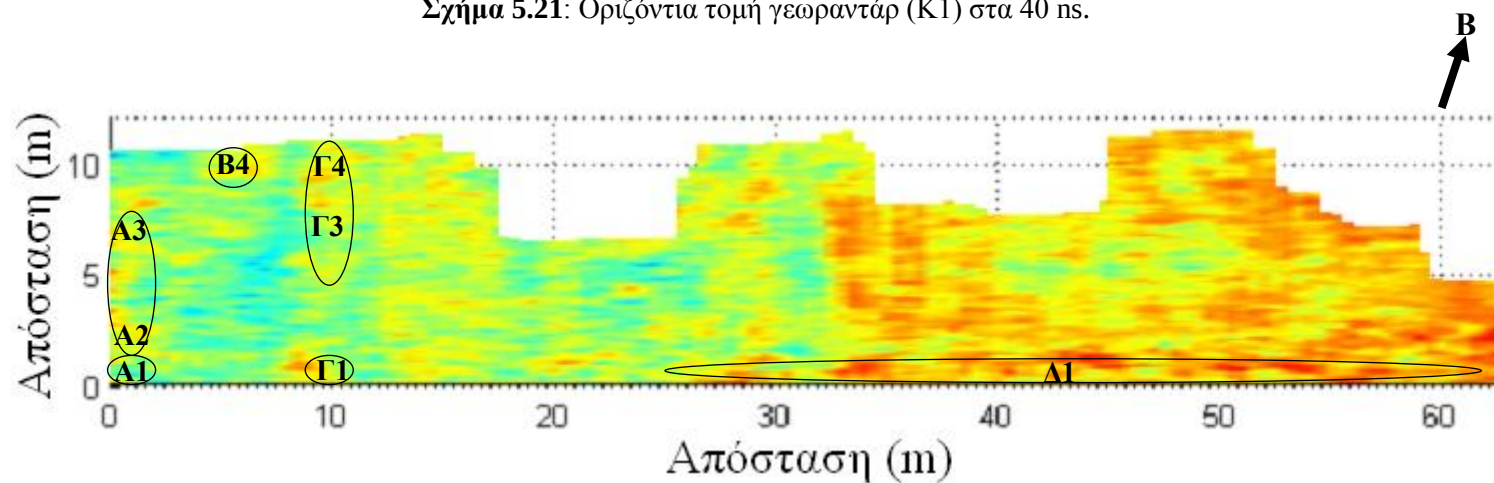
Σχήμα 5.19: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 30 ns.



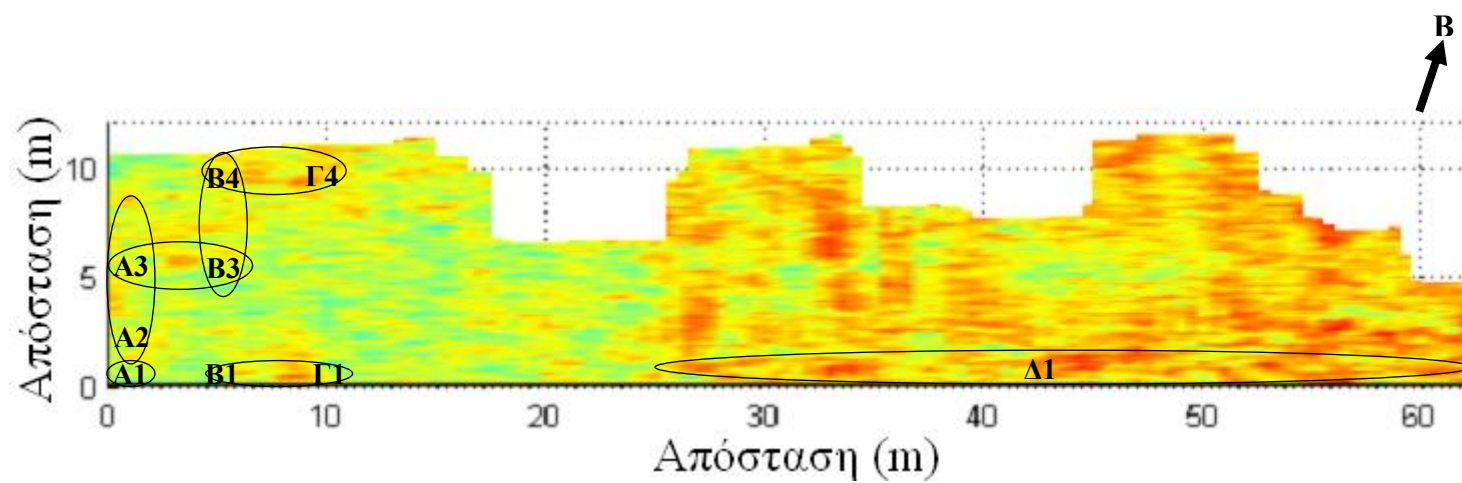
Σχήμα 5.20: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 35 ns.



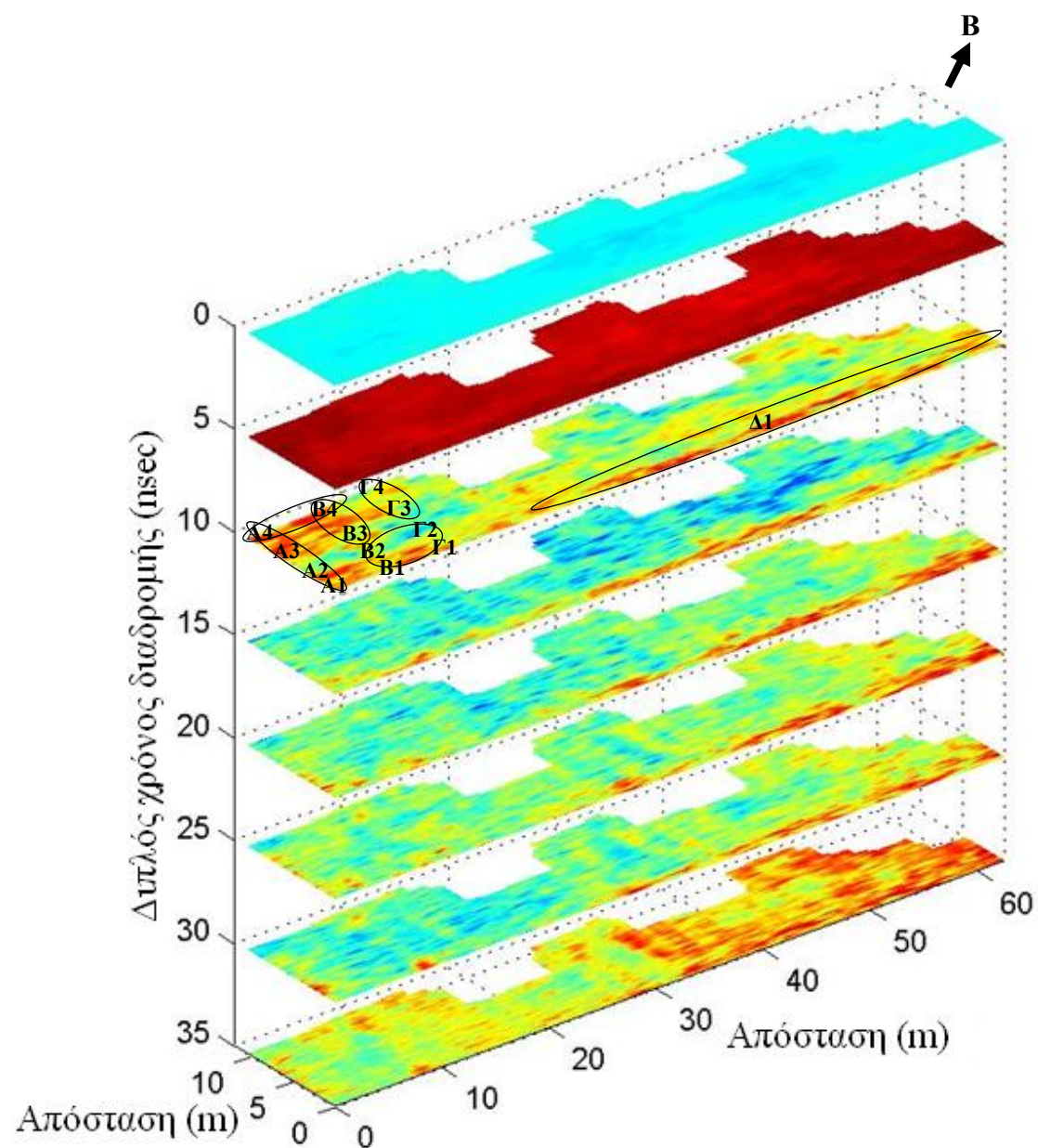
Σχήμα 5.21: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 40 ns.



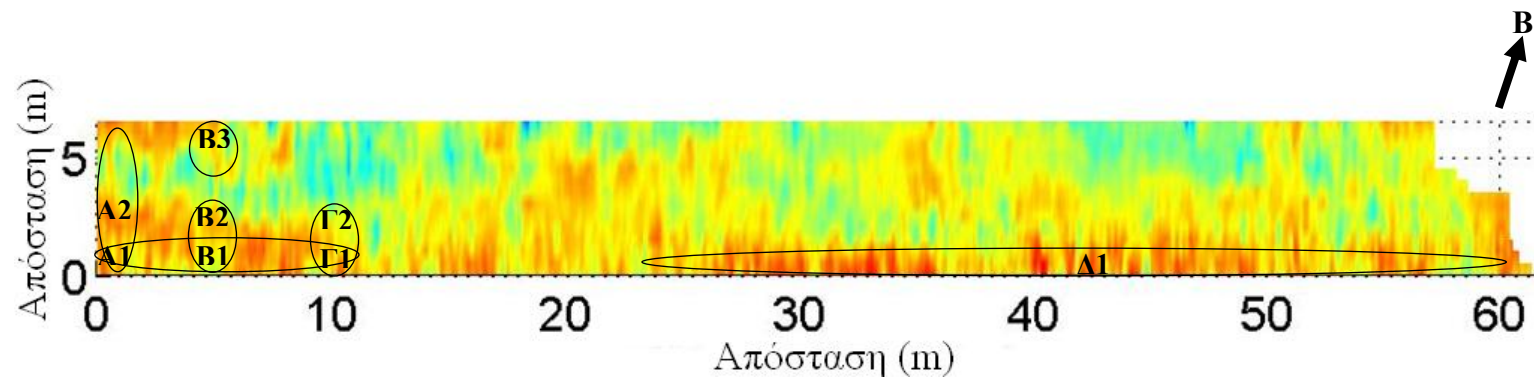
Σχήμα 5.22: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 45 ns.



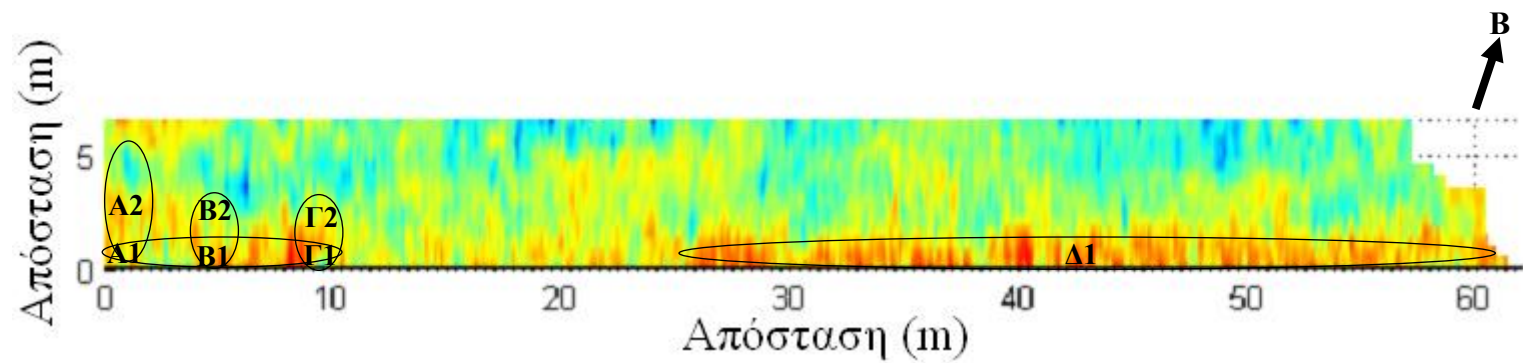
Σχήμα 5.23: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K1) στα 50 ns.



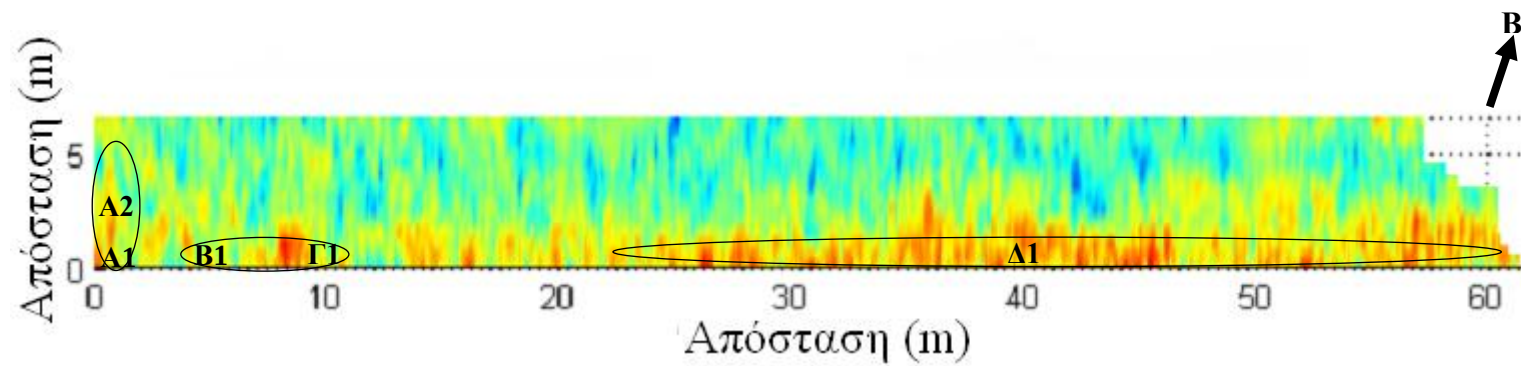
Σχήμα 5.24: Απεικόνιση οριζόντιων τομών γεωραντάρ σε διαδοχικά βάθη (K1), για χρόνους διαδρομής από 0-35 ns.



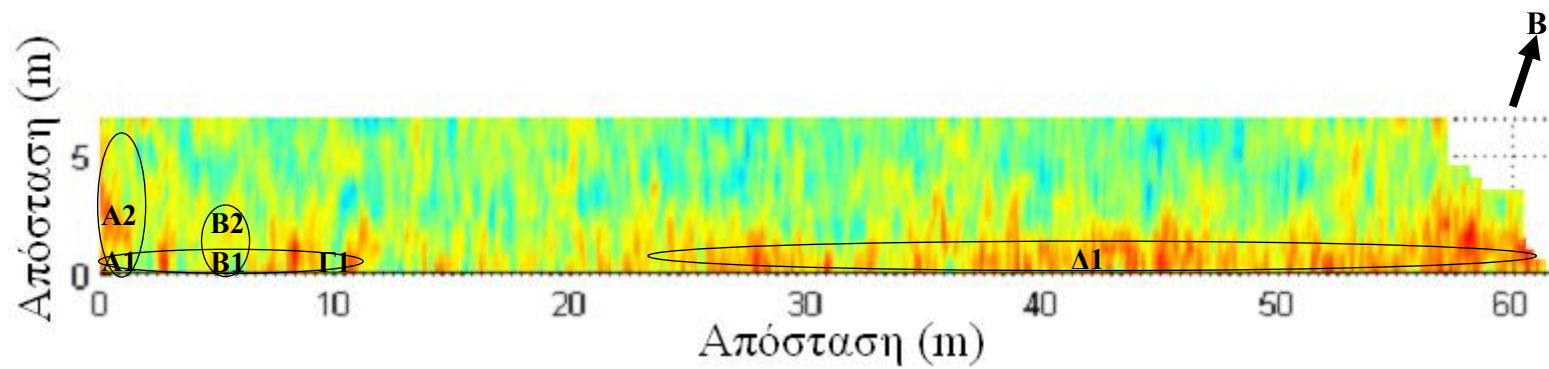
Σχήμα 5.25: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K2) στα 10 ns.



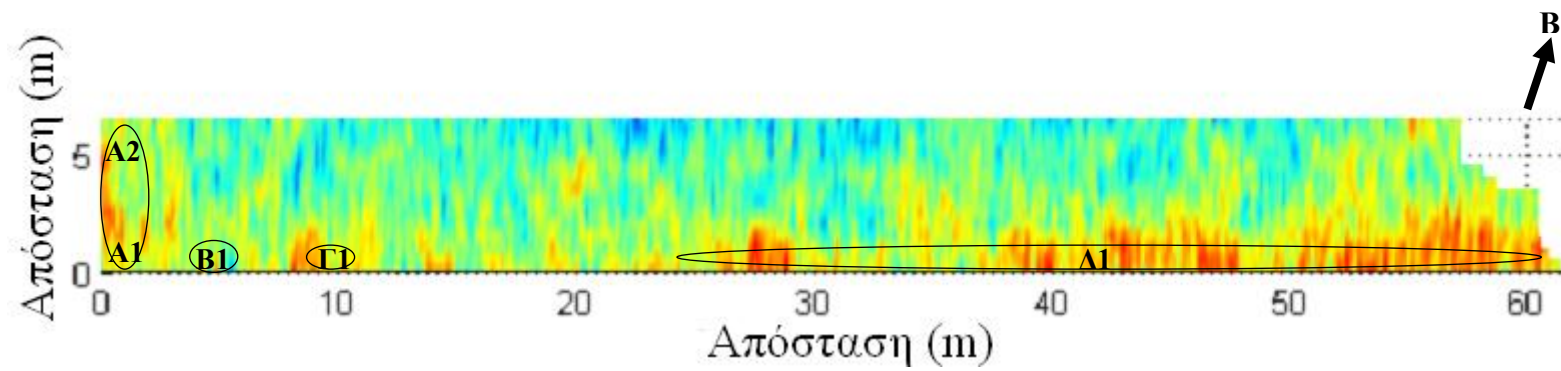
Σχήμα 5.26: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K2) στα 15 ns.



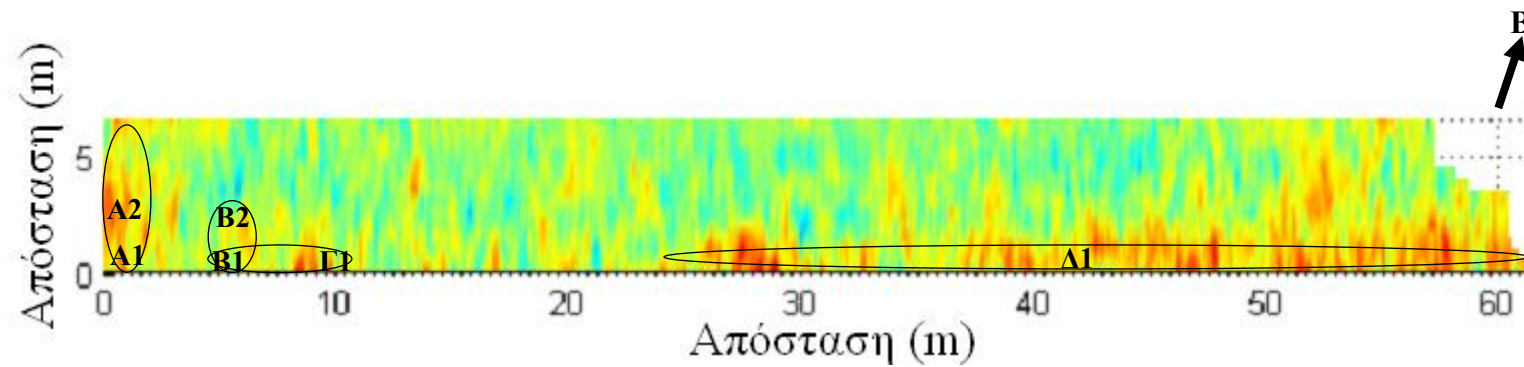
Σχήμα 5.27: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ2) στα 20 ns.



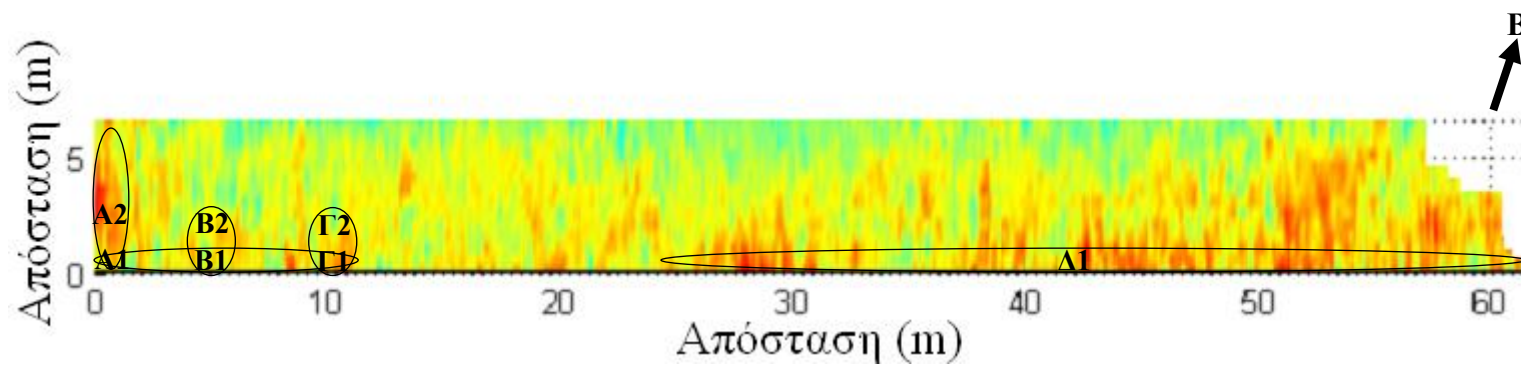
Σχήμα 5.28: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (Κ2) στα 25 ns.



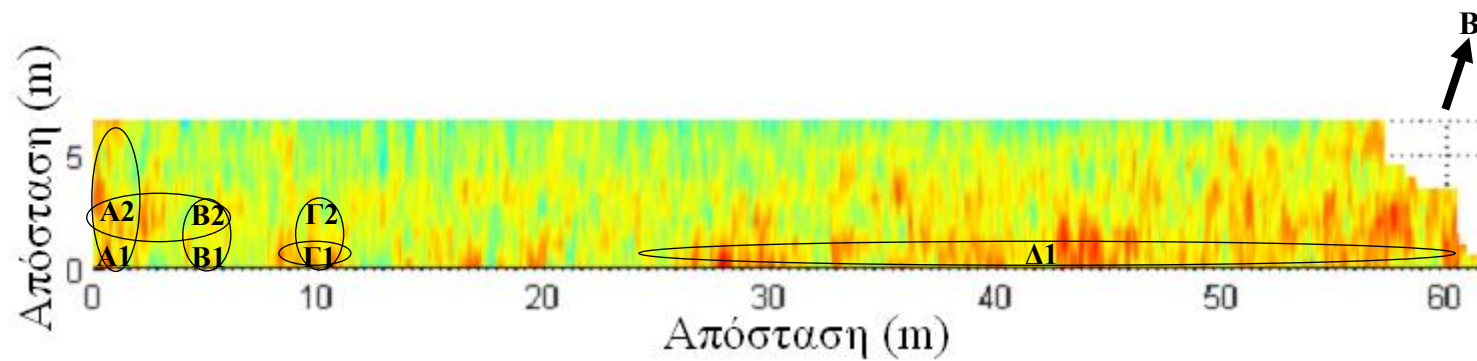
Σχήμα 5.29: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K2) στα 30 ns.



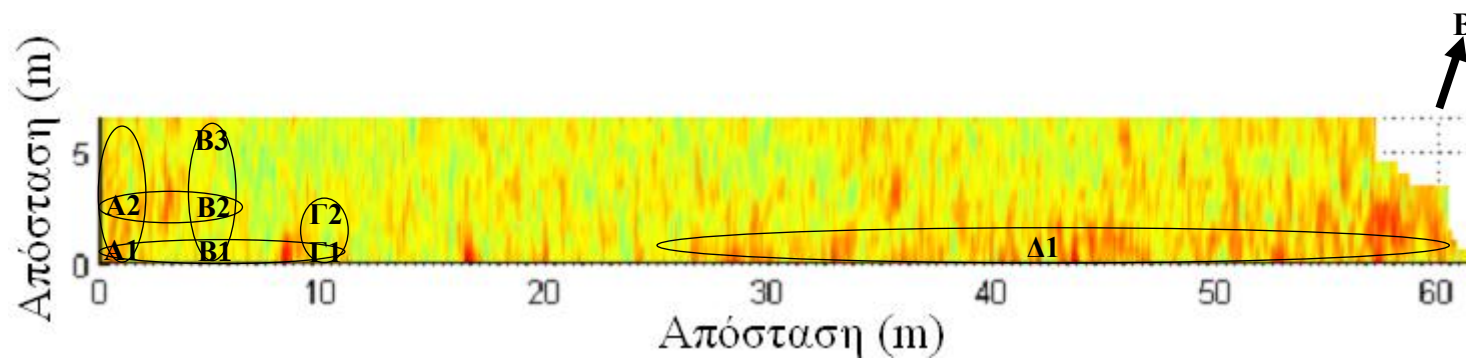
Σχήμα 5.30: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K2) στα 35 ns.



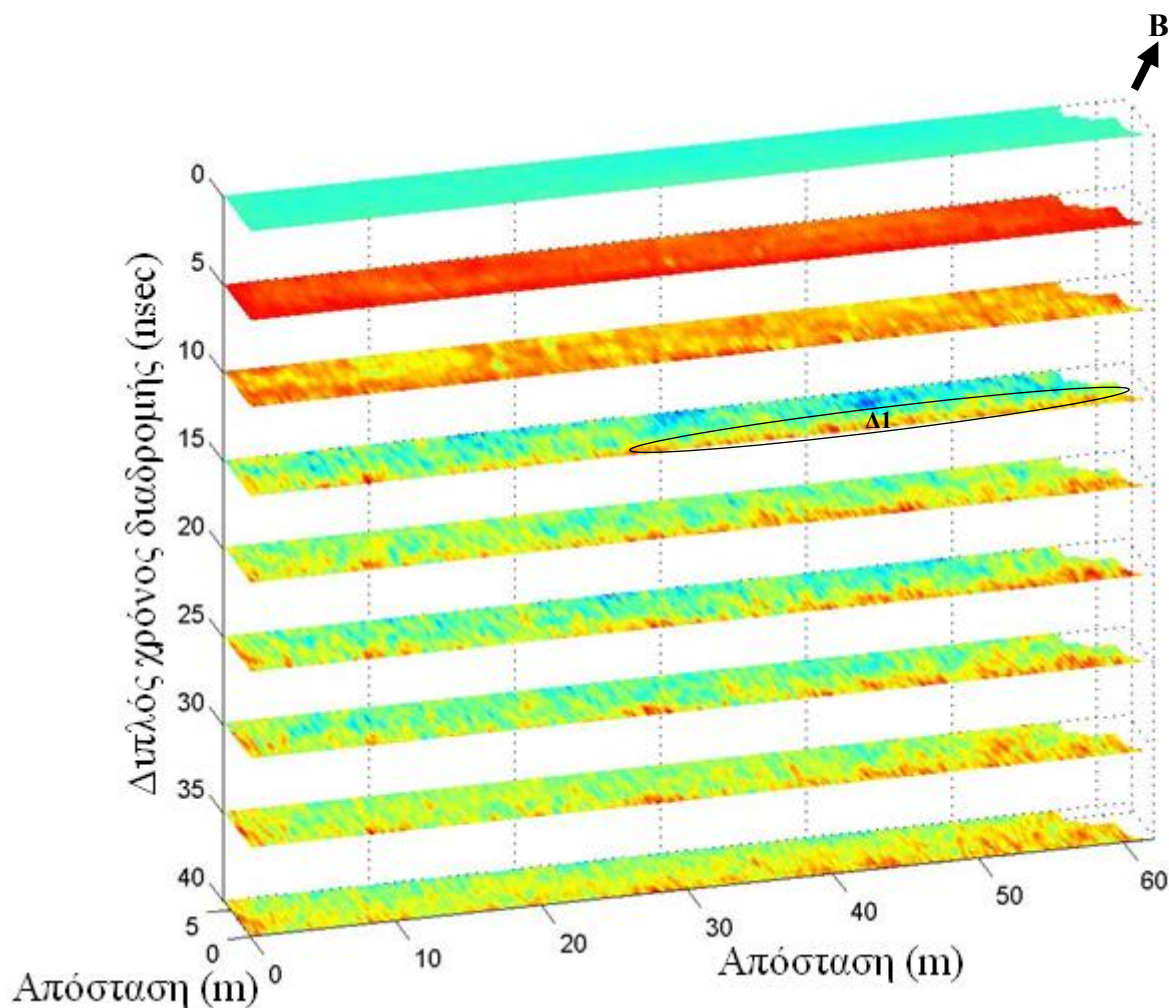
Σχήμα 5.31: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K2) στα 40 ns.



Σχήμα 5.32: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K2) στα 45 ns.



Σχήμα 5.33: Οριζόντια τομή γεωραντάρ (K2) στα 50 ns.



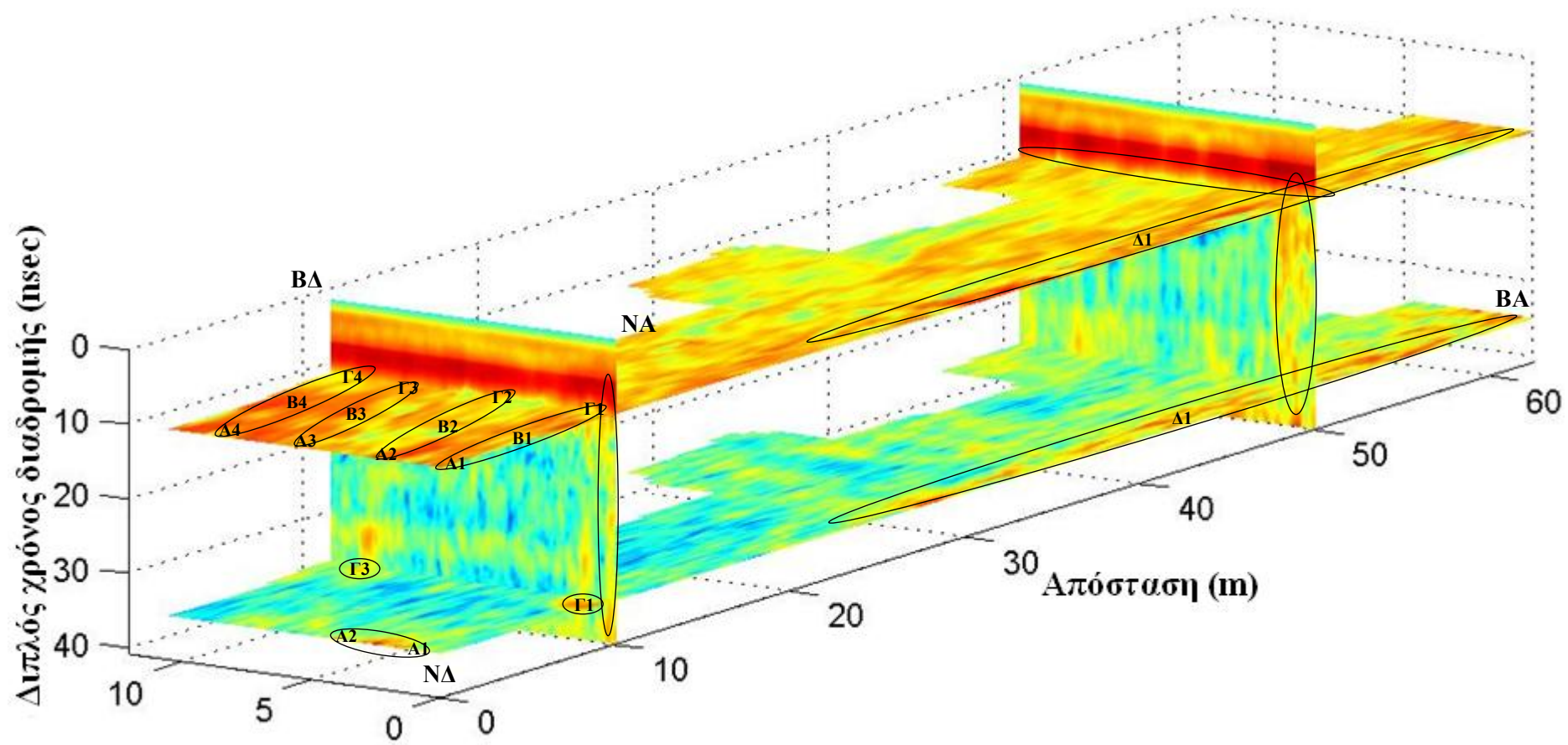
Σχήμα 5.34: Απεικόνιση οριζόντιων τομών γεωραντάρ σε διαδοχικά βάθη, (K2) για χρόνους διαδρομής από 0-40 ns.

5.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση δεδομένων γεωραντάρ

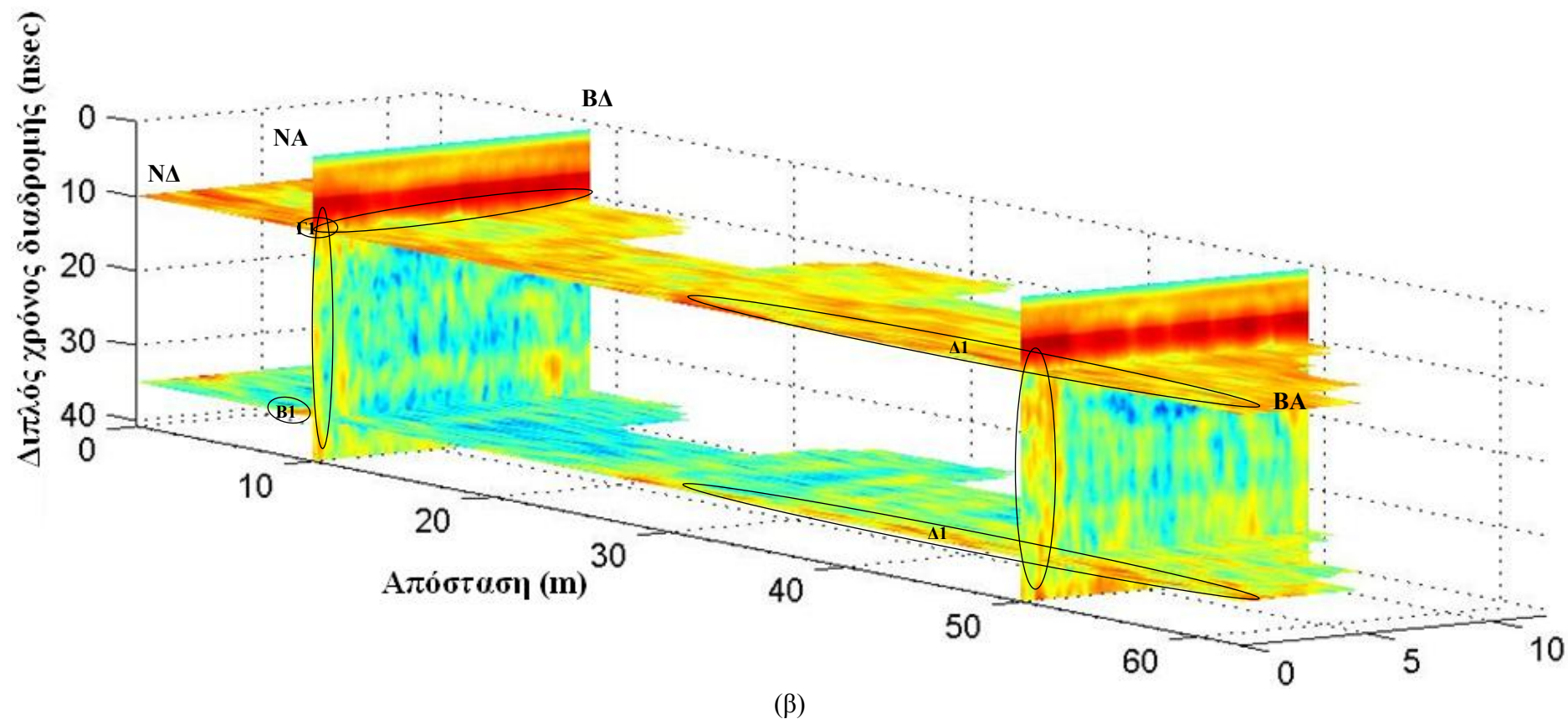
Τα επεξεργασμένα δεδομένα γεωραντάρ (φίλτρα ενίσχυσης SEC και μέσης τιμής Average) από όλες τις γραμμές μελέτης του καννάβου K1, συνδυαστήκαν για τη μελέτη του στιγμιαίου πλάτους στις τρεις διαστάσεις (x-y-t). Στο σχήμα 5.35 παρουσιάζονται δύο οριζόντιες τομές γεωραντάρ (στα 10 ns και 35 ns) και οι τομές γεωραντάρ f021 και f101. Η τρισδιάστατη απεικόνιση αυτών των τομών από δύο προοπτικές (NA και BΔ) περιγράφει την εξάπλωση της ζώνης Δ1, τόσο πλευρικά όσο και με το βάθος (0.5 m έως 2m) ή χρόνο. Σχετικά με τη ζώνη Δ1 που αποδίδεται στο προτείχισμα, διαπιστώνεται το ίδιο και στο σχήμα 5.36 όπου παρουσιάζονται δύο

οριζόντιες τομές γεωραντάρ (στα 10 ns και 25 ns) και οι τομές γεωραντάρ f011, f061 και f101.

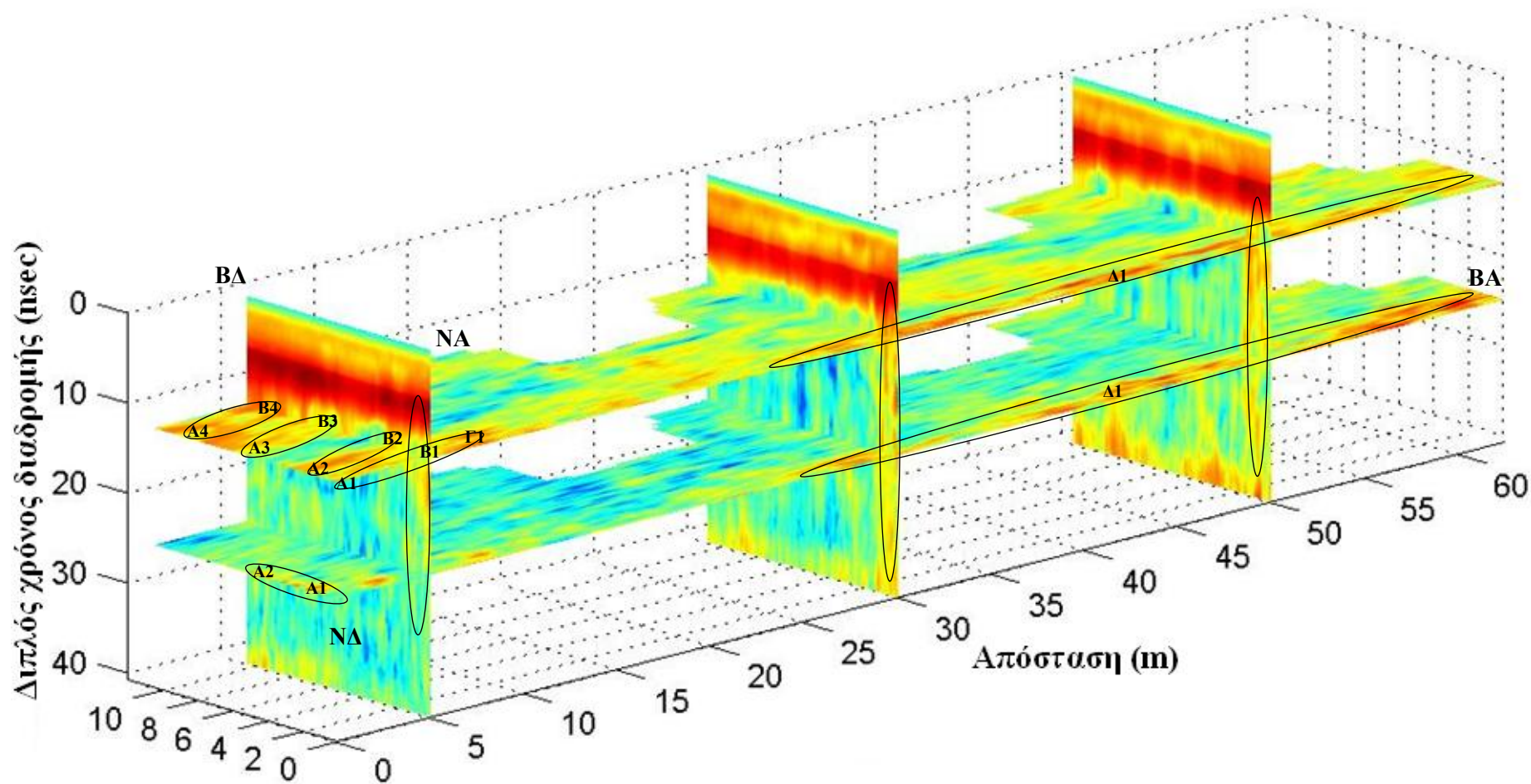
Τα επεξεργασμένα δεδομένα γεωραντάρ του ίδιου καννάβου K1, μετά τη συγχώνευση τους, χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση τους στις τρεις διαστάσεις (x-y-t). Στο σχήμα 5.37 παρουσιάζονται δύο οριζόντιες τομές γεωραντάρ (στα 10 ns και 35 ns) και οι τομές γεωραντάρ f021 και f101, στις οποίες η ζώνη Δ1 διακρίνεται με κόκκινο χρώμα.



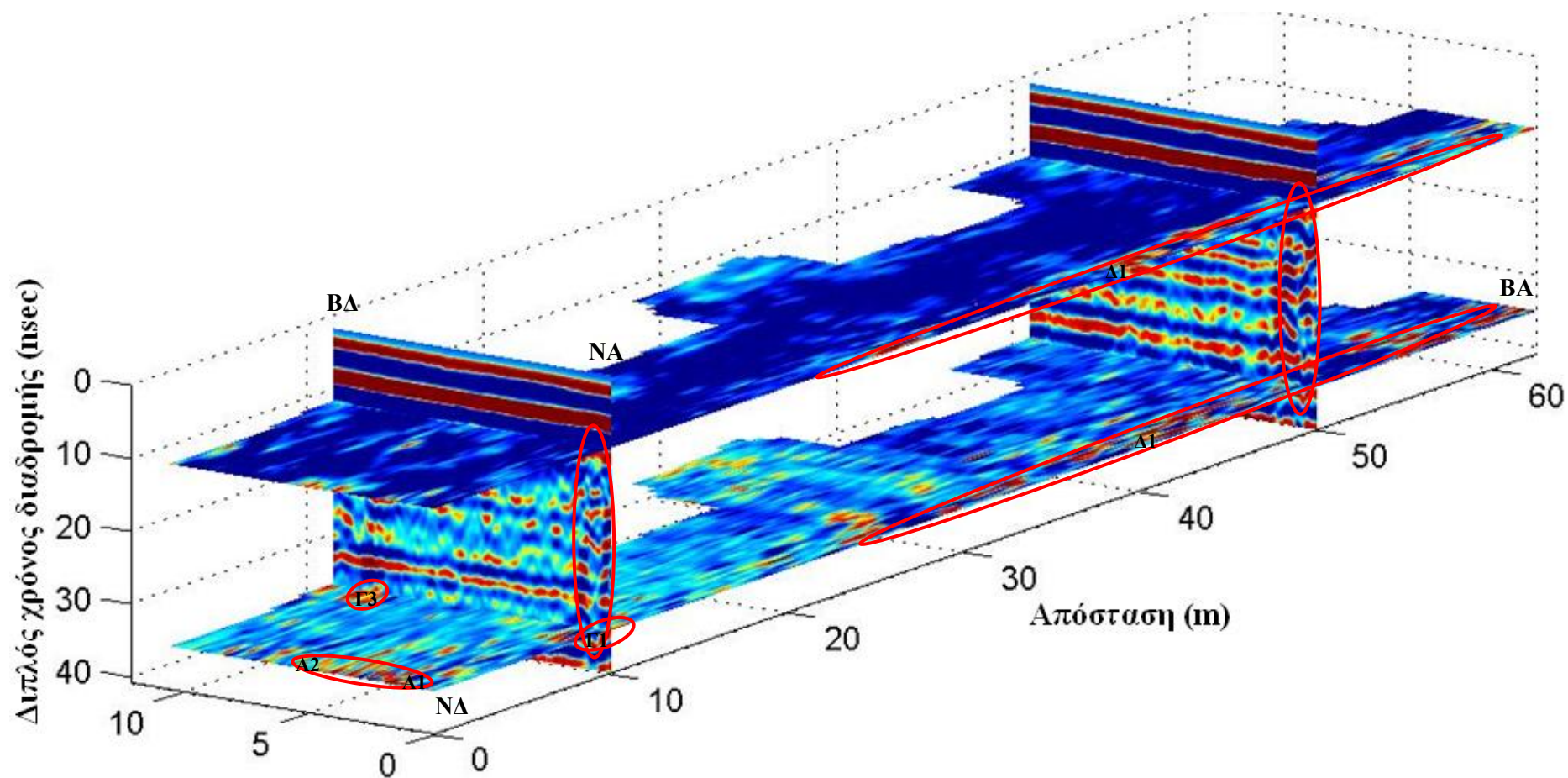
(α)



Σχήμα 5.35: (α), (β) Τρισδιάστατη Γ4 απεικόνιση όγκου των δεδομένων, από άλλη οπτική γωνία. Διακρίνονται δύο οριζόντιες τομές στα 10 ns και στα 35 ns περίπου, καθώς και δύο κάθετες στα 10 m και στα 50 m από την αρχή του καννάβου K1.



Σχήμα 5.36: Τρισδιάστατη απεικόνιση όγκου των δεδομένων. Διακρίνονται δύο οριζόντιες τομές στα 10 ns και στα 25 ns, καθώς και τρεις κάθετες στα 5 m, στα 30 m και στα 50 m.



Σχήμα 5.37: Τρισδιάστατη απεικόνιση όγκου των δεδομένων του γεωραντάρ. Διακρίνονται δύο οριζόντιες τομές στα 10 ns και στα 35 ns περίπου, καθώς και δύο κάθετες στα 10 m και στα 50 m από την αρχή του καννάβου K1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ****6.1 Συμπεράσματα**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με αφορμή τον εντοπισμό τμήματος του προτεινόμενου στη νότια πλευρά του Βυζαντινού Τείχους, στη συμβολή των οδών Καραολή Δημητρίου και Κατρέ στην Παλαιά Πόλη των Χανίων, από πρόσφατη ανασκαφή (2005) που διενεργήθηκε από το Γραφείο Τειχών. Η γεωφυσική διασκόπηση, με τη μέθοδο του γεωραντάρ στην οδό Σήφακα, οδήγησε στον εντοπισμό της ζώνης Δ1 που αποδίδεται στο προτείχισμα. Τη μέθοδο του γεωραντάρ στην εν λόγω περιοχή, συμπλήρωσαν μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Αξιοσημείωτη είναι η ύπαρξη ανωμαλιών με υψηλή τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίστοιχες ανωμαλίες εμφανίζονται στις τομές γεωραντάρ και αποδόθηκαν σε ανθρωπογενείς δομές.

Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι το προτείχισμα αναμένεται να βρίσκεται κοντά στο πεζοδρόμιο της οδού Σήφακα, σε βάθος 0.5-1.75 m, με διεύθυνση νοτιοδυτικά-βορειοανατολικά. Επίσης στις καταγραφές του γεωραντάρ είναι εμφανείς ανωμαλίες που αποδίδονται σε τμήμα των θεμελίων του Βυζαντινού τείχους καθώς και σε θαμμένα ερείπια.

Η παρούσα διπλωματική απέδειξε ότι η συνδυασμένη εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, συμβάλλει στην ανάδειξη ανωμαλιών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος και ειδικότερα στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη θέση των θαμμένων κτισμάτων σε τμήμα της οδού Σήφακα. Οι τομές γεωραντάρ προσφέρουν καλύτερη ανάλυση για μικρά βάθη, σε σχέση με την γεωηλεκτρικές τομές.

6.2 Προτάσεις

Τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στην παρούσα εργασία, αποτελούν σημαντικό κίνητρο για περαιτέρω έρευνα στην περιοχή ενδιαφέροντος, στην οδό Σήφακα, καθώς και στην ευρύτερη περιοχή του Βυζαντινού Τείχους. Τα δεδομένα ανάκλασης του γεωραντάρ, καθώς και τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας, κατέδειξαν πιθανές θέσεις θαμμένων τοίχων και θεμελίων. Με βάση τα αποτελέσματα της παραπάνω

διασκόπησης, προτείνεται διασταύρωση με άλλες γεωφυσικές διασκοπήσεις, π.χ. ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση, καθώς και επαλήθευση με δοκιμαστικές ανασκαφές στην περιοχή κοντά στο πεζοδρόμιο, για την ανάδειξη του προτειχίσματος και τον εντοπισμό άλλων αρχαίων δομών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**Ελληνική**

1. Ανδριανάκης, Μ. (1997). Η παλιά πόλη των Χανίων, Εκδόσεις Αδαή, Αθήνα.
2. Βαφείδης, Α. (2001). Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Σπανουδάκης, Ν. (2001). Εντοπισμός και Χαρτογράφηση DNAPL με τη χρήση του Υπεδάφειου Ραντάρ, Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Γεωϋλικά και Περιβάλλον, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
4. Σπανουδάκης, Ν. (2002). Ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ και εφαρμογή σε περιβαλλοντικά προβλήματα, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
5. Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, F:/CRINNO EMMERIC.htm.

Διεθνής

1. Annan, A. P. (2001). Ground Penetrating Radar. Copyright 2001, Sensors & Software Inc., 1091 Brevik Place, Mississauga, Ontario L4W 3R7, Canada.
2. Annan, A. P. (2002). GPR-History, Trends and Future Developments. Sensors & Software Inc., 1091 Brevik Place, Mississauga, Ontario L4W 3R7, Canada.
3. Annan, A. P. (2005). GPR METHODS FOR HYDROGEOLOGICAL STUDIES. Y. Rubin and Hubbard (eds.), Sensors & Software Inc., 1040 Stacey Court, , Mississauga, ON L4W 2X8, Canada.
4. Benson A., Stubben, M. (1997). Mapping groundwater contamination using DC resistivity and VLF geophysical methods. A case study. Geophysics, Vol. 62, pp. 80-86.

5. Bevan, B., and J. Kenyon (1975). Ground Penetrating Radar for Historical Archaeology. *MASCA Newsletter* 11 (2): 2-7.

6. Balch, A.H. (1970), Color sonograms: A new dimension in seismic data interpretation: *Geophysics*, Vol. 36, pp. 1074-1098.

7. Barnes A. E. (1998). The complex seismic trace made simple. *The Leading Edge*. Vol. 17, No 17, pp. 473-476.

8. Corbeanu R. M., McMechan G. A., Szerbiak R. B., Soegard K. (2002). Prediction of 3D fluid permeability and mudstone distribution from ground penetrating radar (GPR) attributes: example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, eastcentral Utah. *Geophysics*, Vol. 67, N. 5, pp. 1495-1504.

9. Conyers, L. B. (1998). Ground-Penetrating Radar Techniques and Three-Dimensional Computer Mapping in the American South West. *Journal of field Archaeology* 25(4):417-430.

10. Conyers, L. B. (2004). *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira, Walnut Creek, California.

11. Davis, J. L., Annan, A. P. (1989), Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospecting*, 37, pp. 531-551.

12. Dominic D.F., Egan K., Carney C., Wolfe P.J., Boardman M.R. (1995).

13. Fisher, C. S., Stewart, R. R. and Jol, H. M. (1992). Processing ground penetrating radar (GPR) data, University of Calgary.

14. Fisher, P. M., S. G. W. Follin and P. Ulriksen (1980). Subsurface Interface Radar Survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. *In Applications of Technical*

- Devices in Archaeology*, edited by Petter M Ficher. *Studies in Mediterranean Archaeology* 63:48-51.
15. Goodman , D. (1994). Ground-Penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology. *Geophysics* 59:224-232.
 16. Goodman , D. and Y. Nishimura (1993). A Ground Radar View of Japanese Burial Mounds. *Antiquity* 67:349-334.
 17. Goodman , D., Y. Nishimura and J. D. Rogers (1995). GPR Time-Slices in Archaeology Prospection. *Archaeology Prospection* 2:85-89.
 18. Greenhouse J., Brewster M. (1993). Geophysics and solvents: The Borden experiment. *The Leading Edge*, pp. 261-267.
 19. Hugenschmidt J., Partl M.N., DeWitte H. (1998). GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 40, pp. 95-104.
 20. Imai, T., T. Sakayama and T. Kanemori (1987). Use of Ground-Penetrating Radar and Resistivity Surveys for Archaeological Investigations. *Geophysics* 52:137-150.
 21. Lorenzo H., Cuellar V., Hernadez M.C. (2001). Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 47, pp. 327-336.
 22. Moffatt D.L., Puskar R.J. (1976). A Subsurface Electromagnetic Pulse Radar. *Journal of Applied Geophysics*.
 23. Olhoeft, G.R. (1988). Selected bibliography on ground penetrating radar. *Proceedings of symposium on Applications of Geophysics in Engineering and Environmental Problems*, Golden. CO, pp. 463-520.

24. Orlando L. (2002). Detection of LNAPL using the instantaneous amplitude and frequency of ground-penetrating radar. *Geophysical prospecting* 50, pp. 27-41.
25. Sheets, P. D., W. M. Loker, H. A. W. Spetzler and R. W. Ware (1985). Geophysical Exploration for Ancient Maya Housing at Ceren, El Salvador. *National Geographic Research Reports* 20:645-656.
26. Smemoe, C. M. (2000). Processing and Visualization of GPR Data for Assessing Natural Hydrogeologic Conditions Term Paper Civil and Environmental Engineering.
27. Spanoudakis S. N., Vafidis A., Papavasiliou A. (2004). Delineating a doline system using 3D Ground Penetrating Radar (GPR) data, complex trace attributes and neural networks: a case study in Omalos Highlands, Chania, Crete. AMIREG (Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology) 1st International Conference, 7-9 June, Hania, Crete, Greece. Sternberg B.K., McGill J.W. (1995). Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33, pp. 209-215.
28. Sternberg B.K., McGill J.W. (1995). Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33, pp. 209-215.
29. Taner M. T., Koehler F., Sheriff R. E. (1979). Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, Vol. 44, No 6, pp. 1041-1063.
30. Toshioka T., Tsuchida T., Sasahara K. (1995). Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33, pp.119-124.

31. Vickers, R. S. and L. T. Dolphin (1975). A Communication on an Archaeological Radar Experiment at Chaco Canyon, New Mexico, *MASCA Newsletter* 11(1):6-8.

32. Yilmaz, O. (1987). Seismic data processing. Society of Exploration Geophysics.

33. http://www.geo-analysis.com/applications_gr.htm.

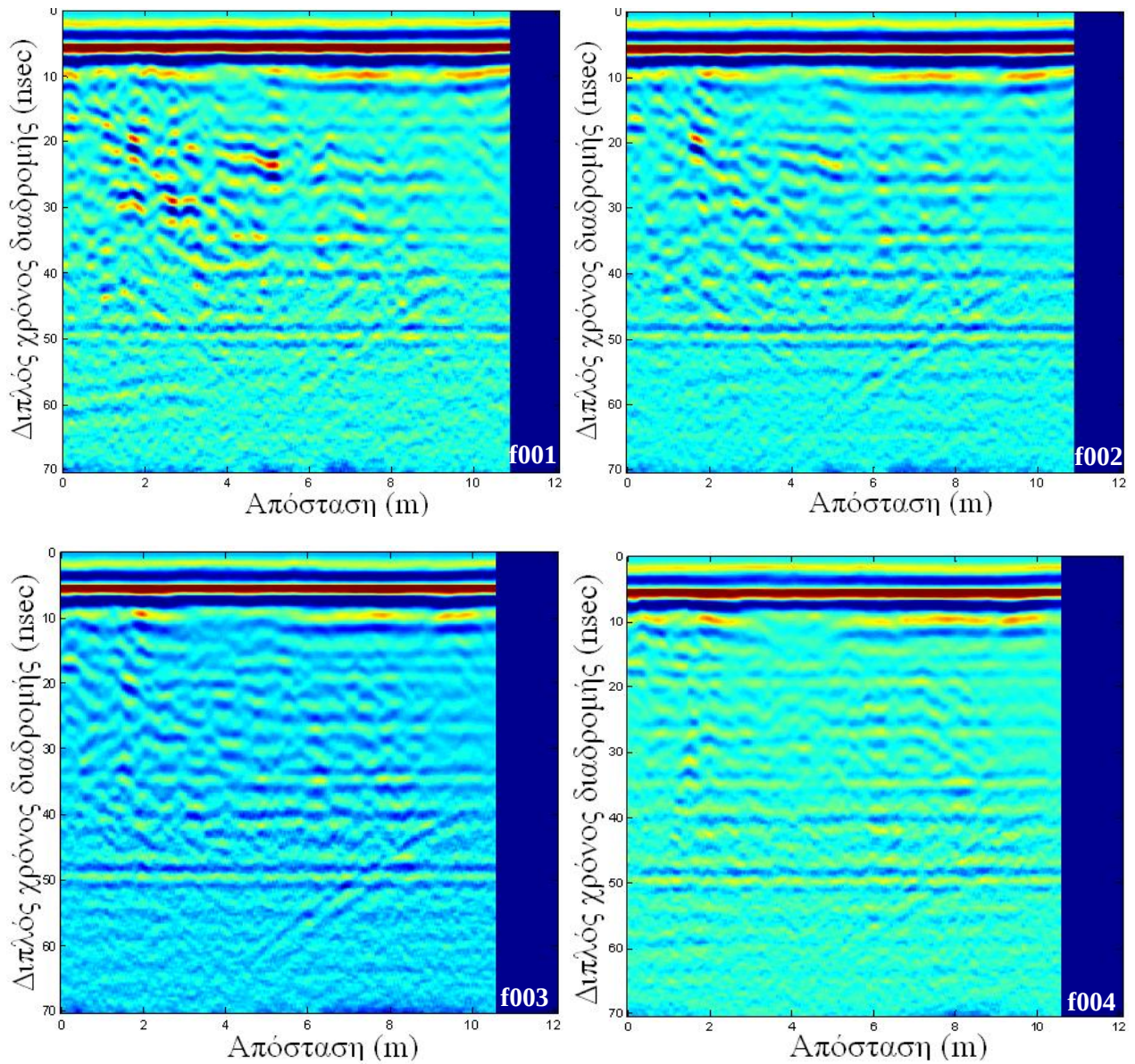
34. <http://www.googlearth.gr>.

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

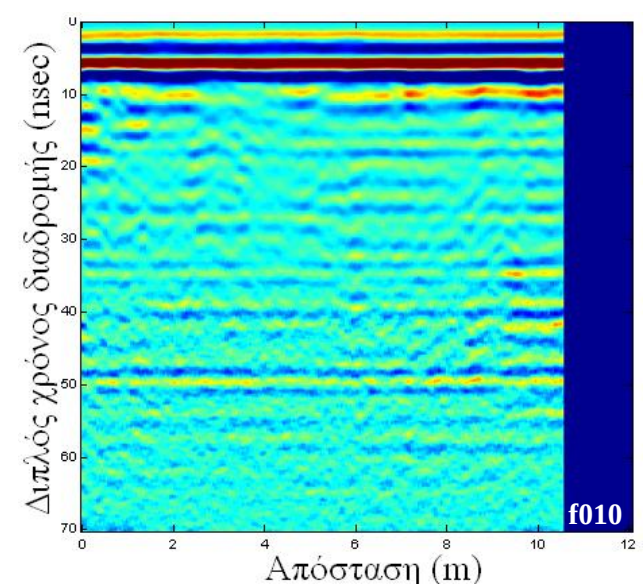
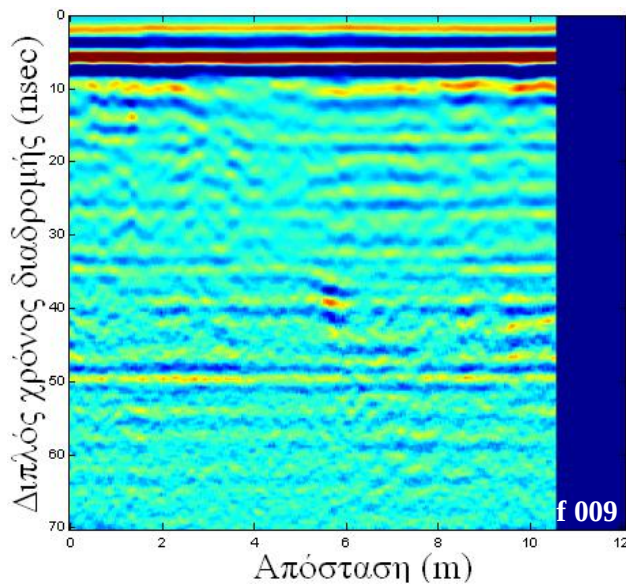
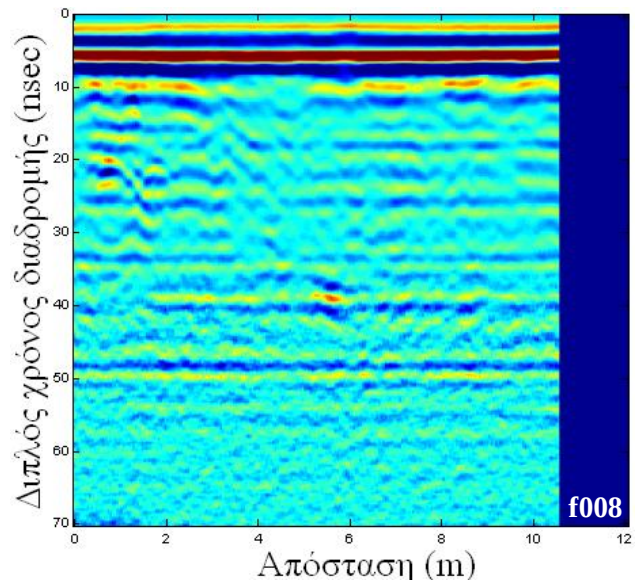
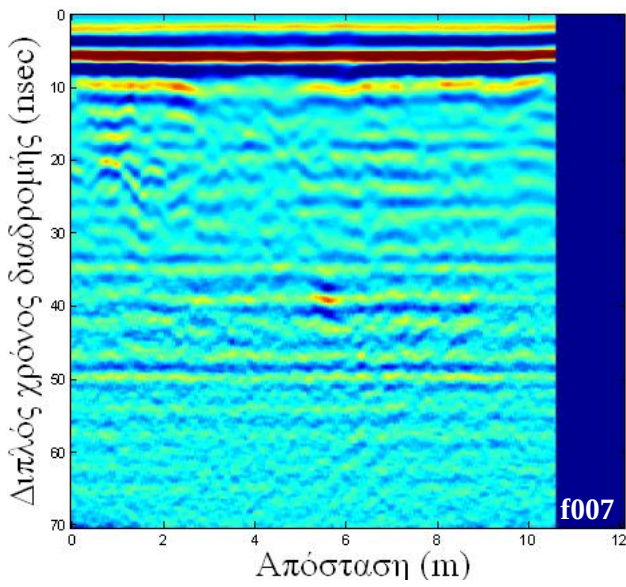
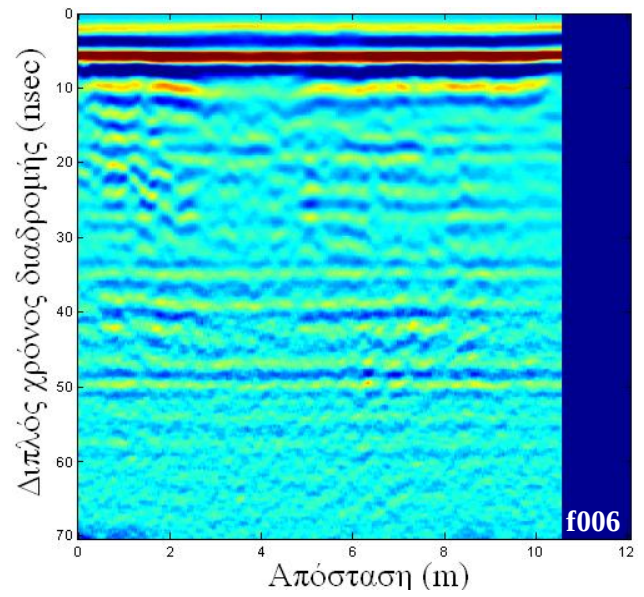
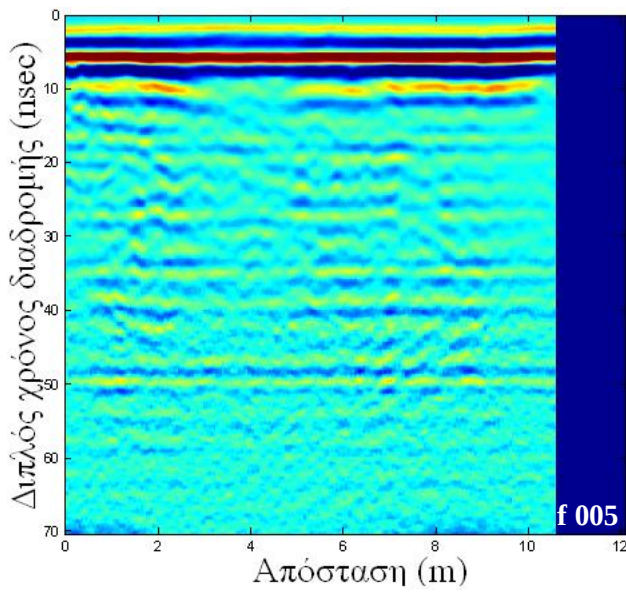
36. <http://www.chania.gr/city/monuments/byzantine-wall.html>.

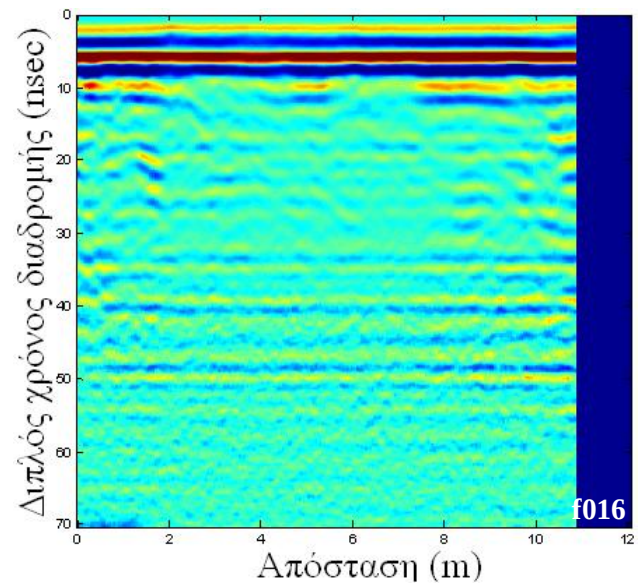
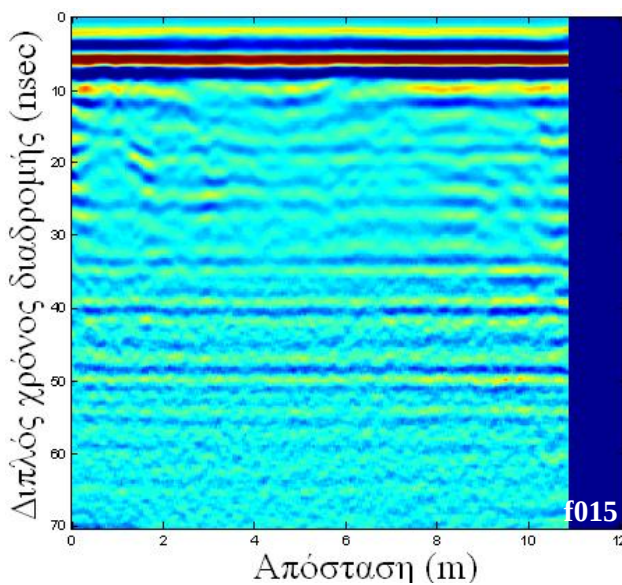
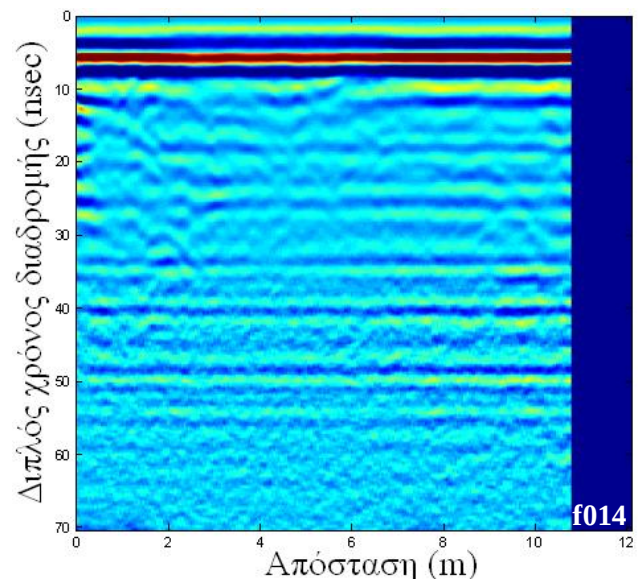
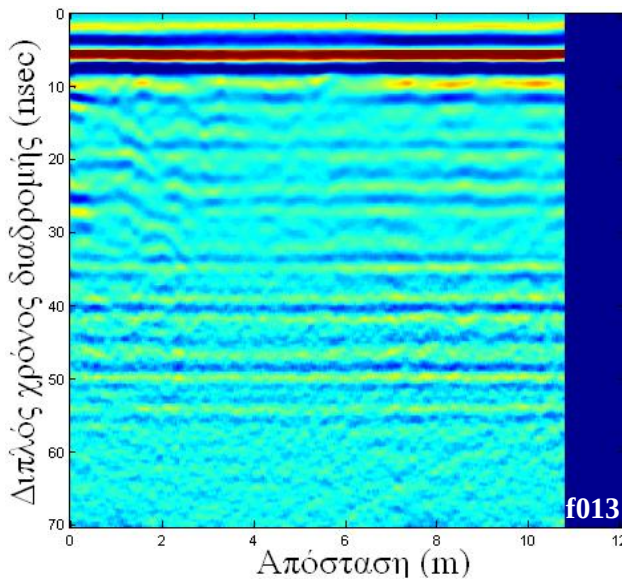
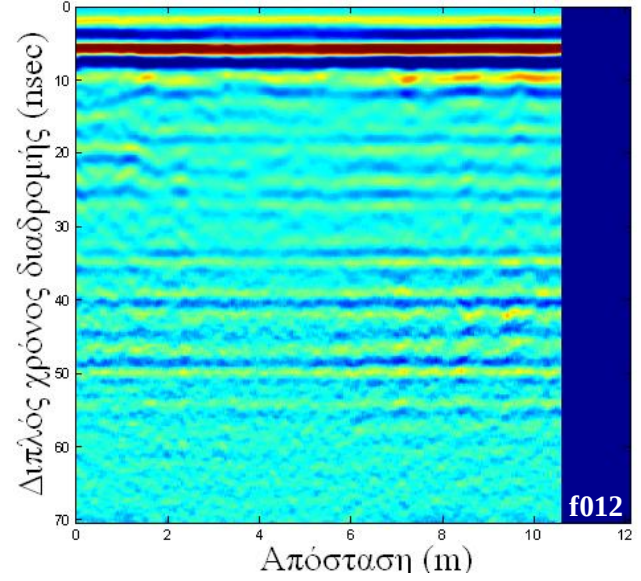
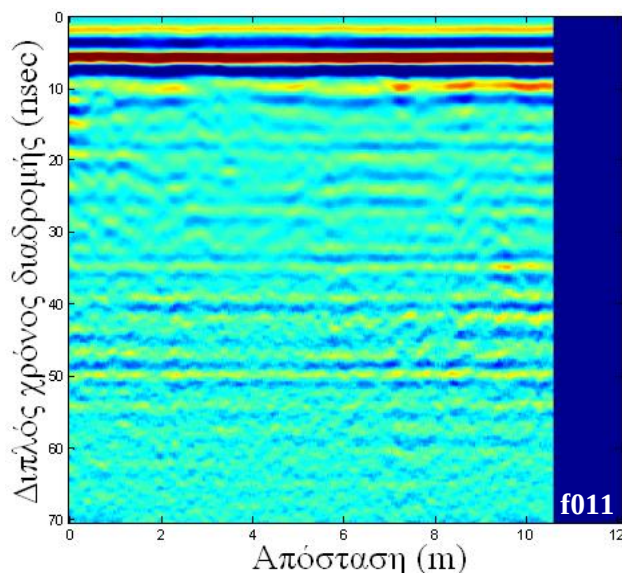
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

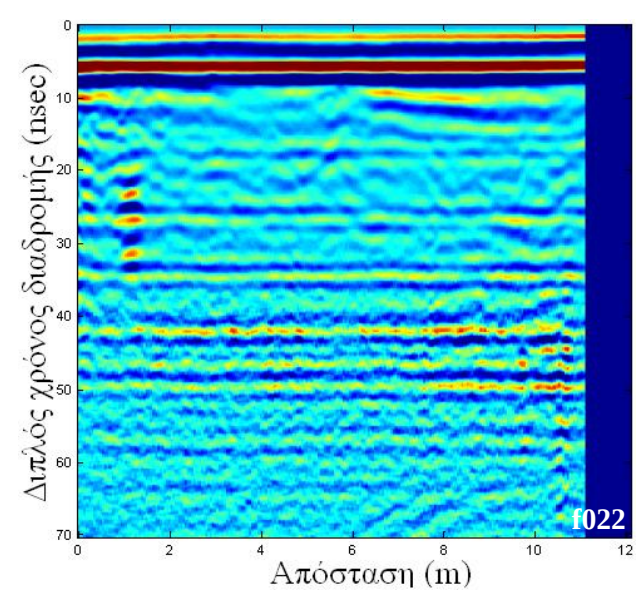
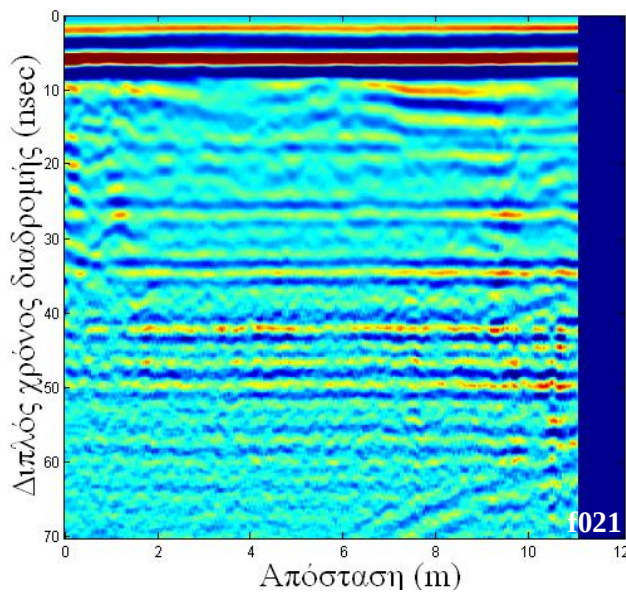
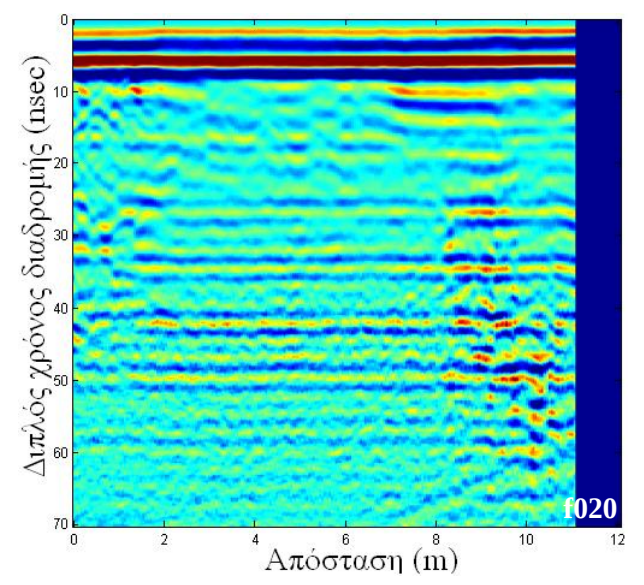
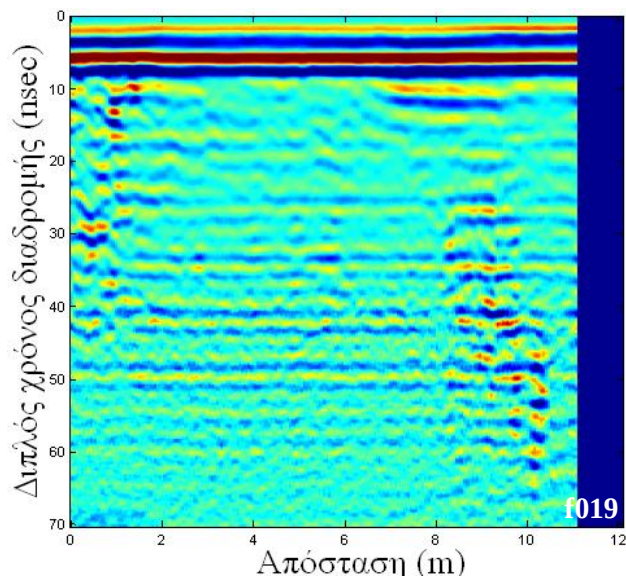
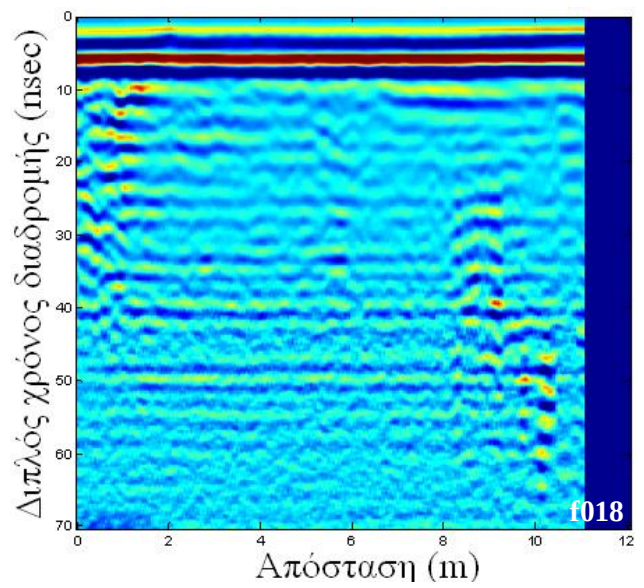
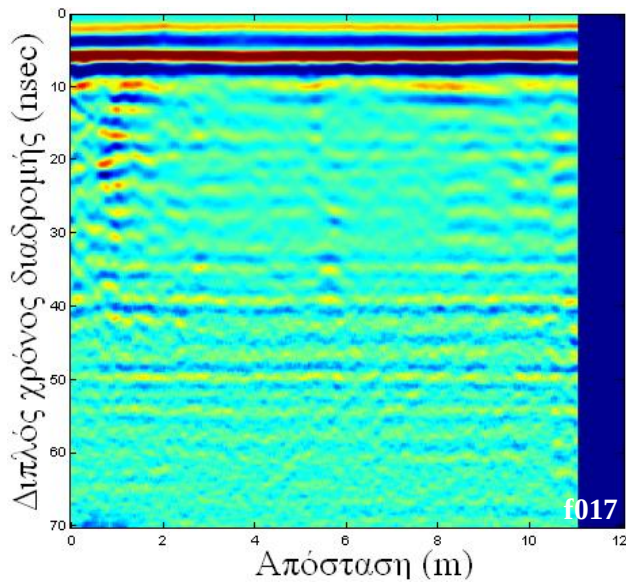
Κάνναβος γεωραντάρ Κ1 διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ

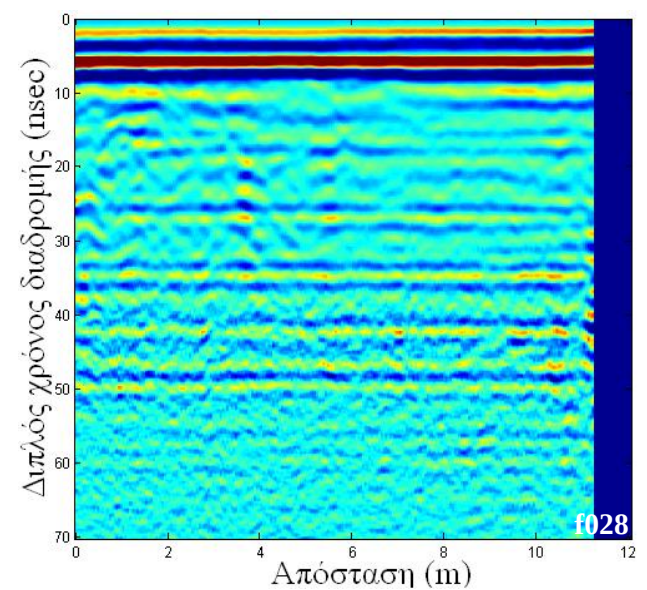
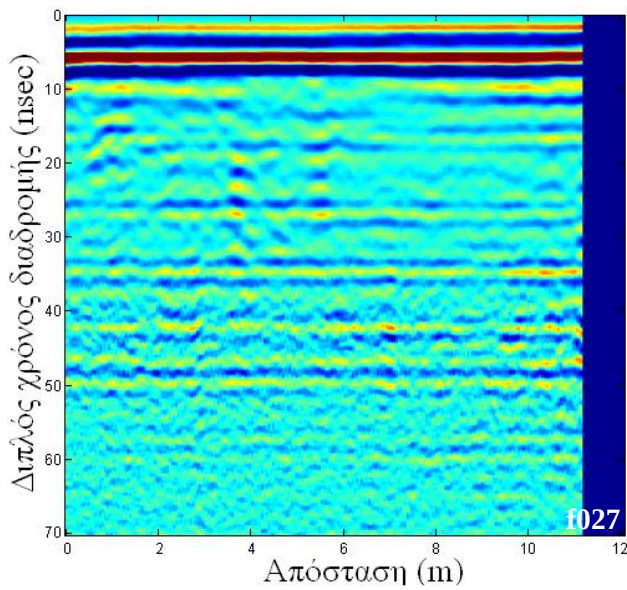
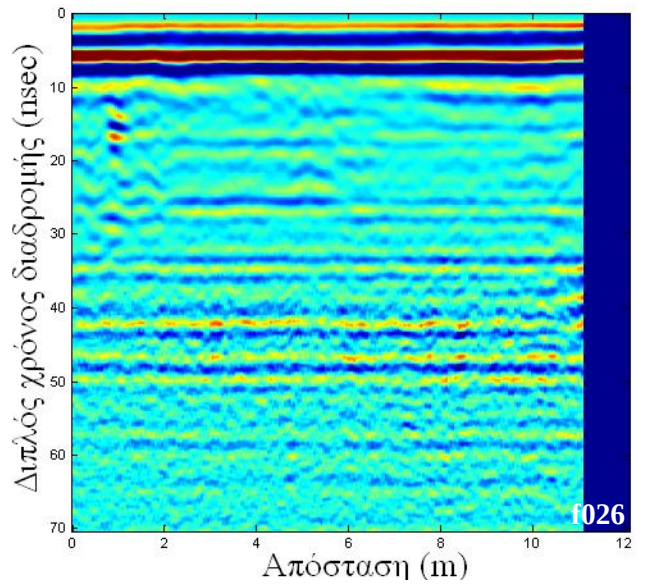
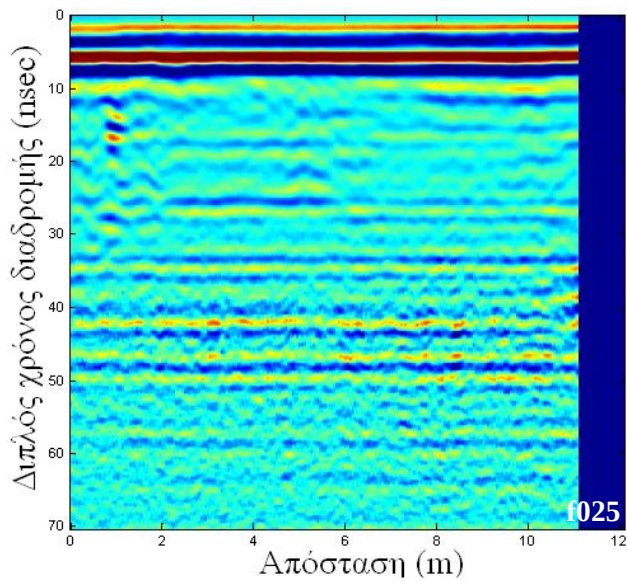
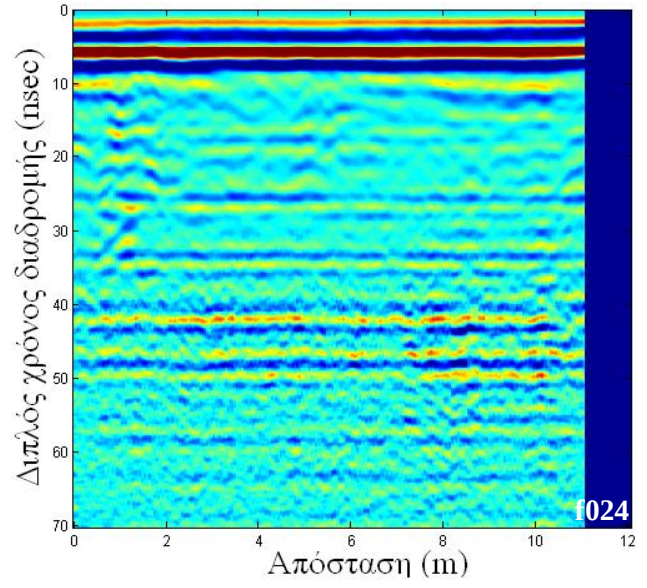
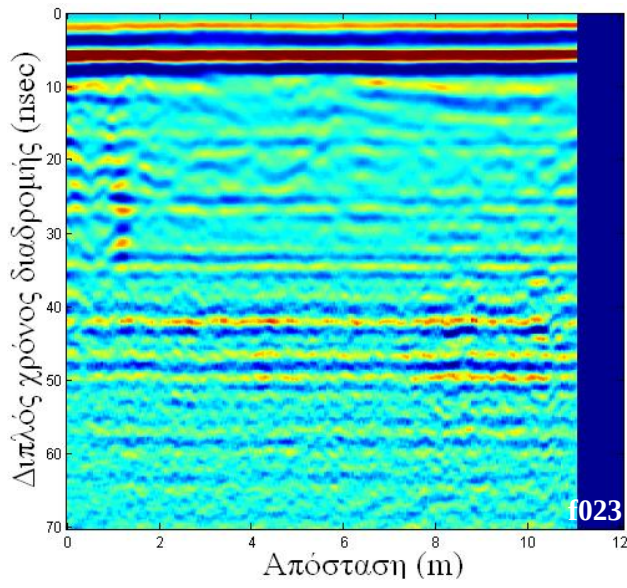


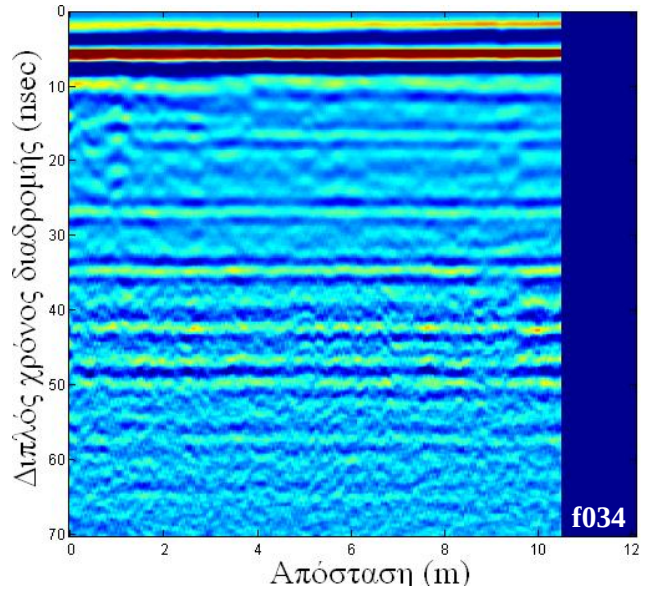
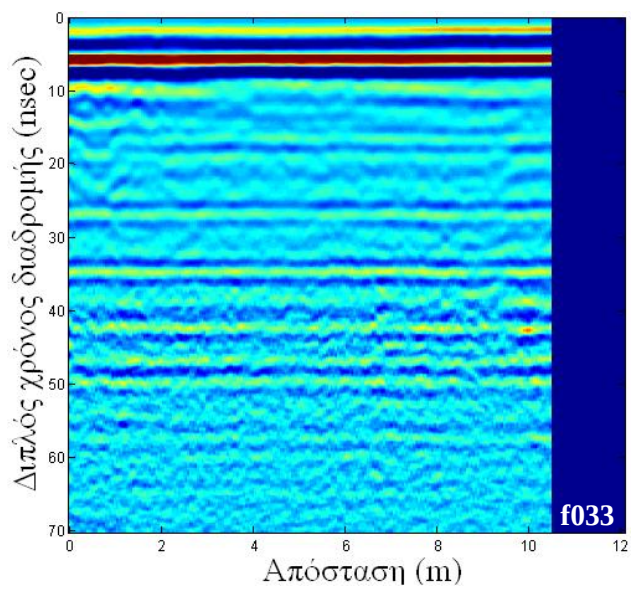
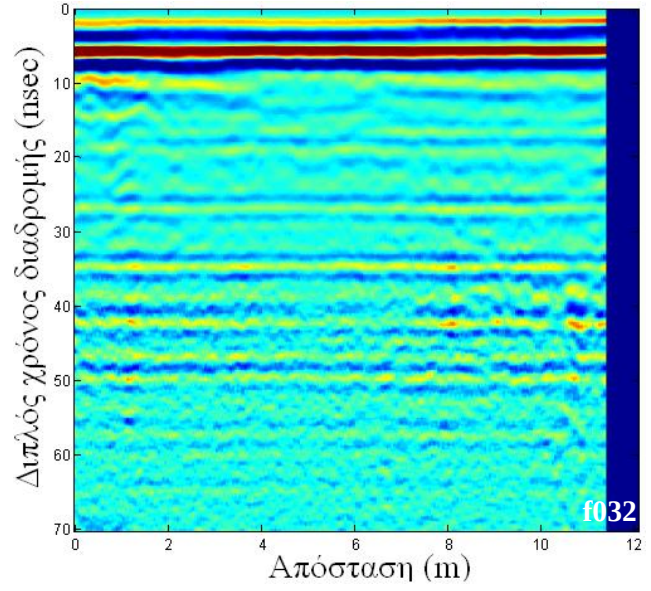
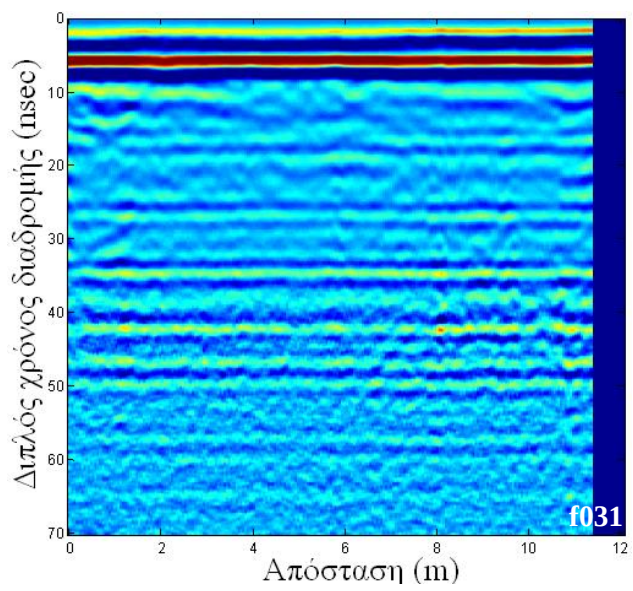
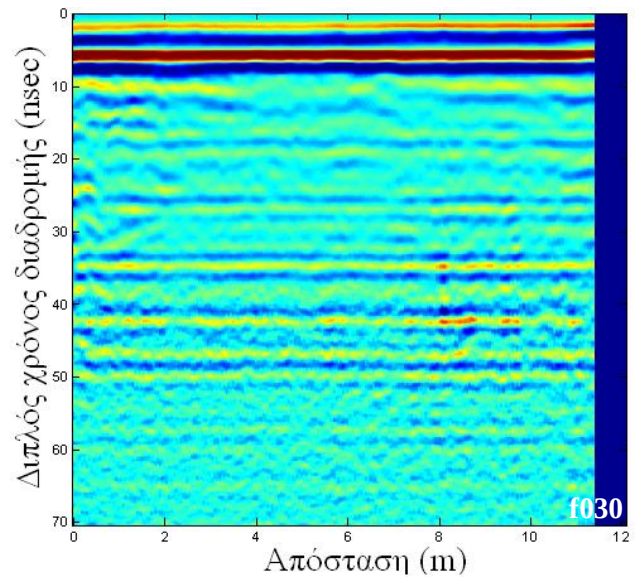
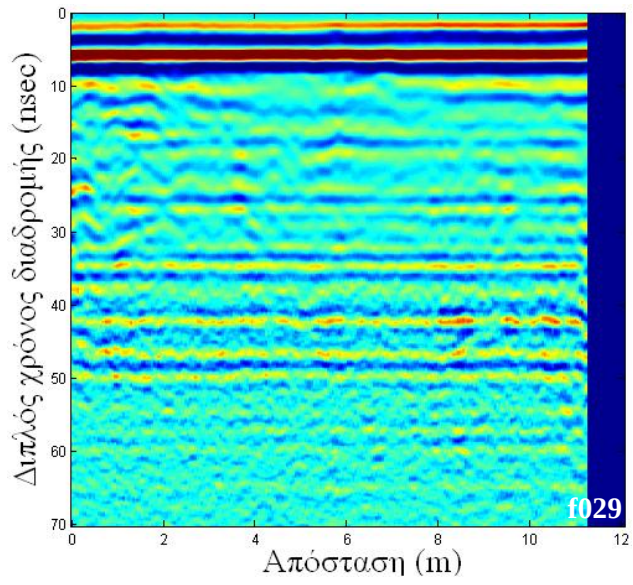
¹ Στις εικόνες του Παραρτήματος Α κάτω δεξιά αναγράφεται ο αριθμός της γραμμής μελέτης.

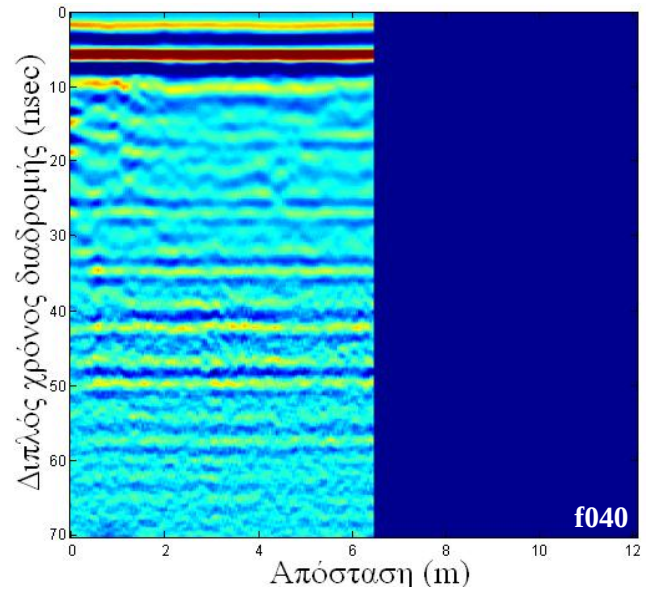
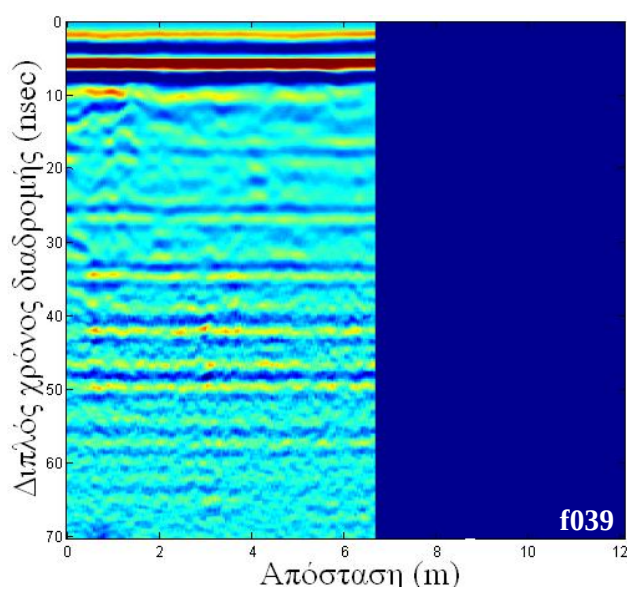
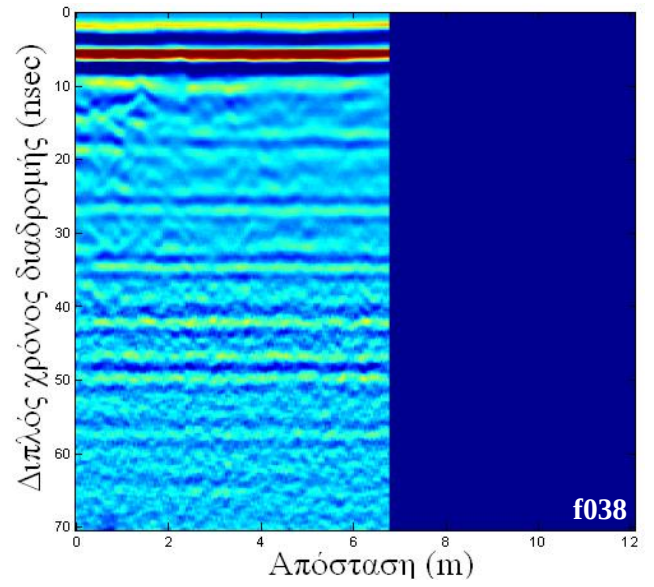
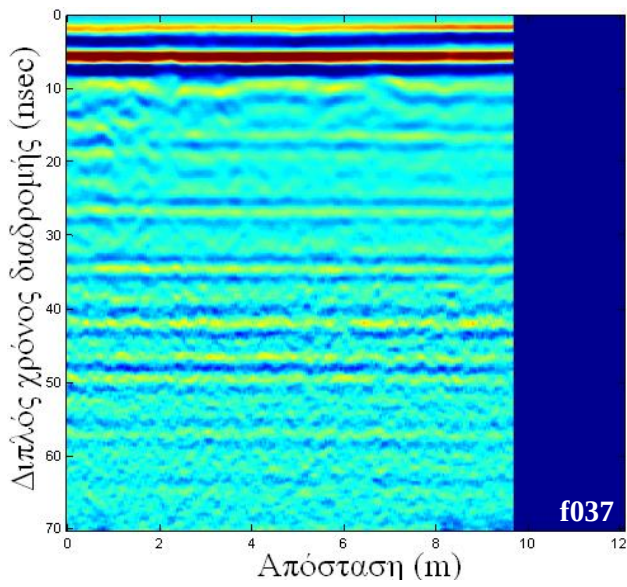
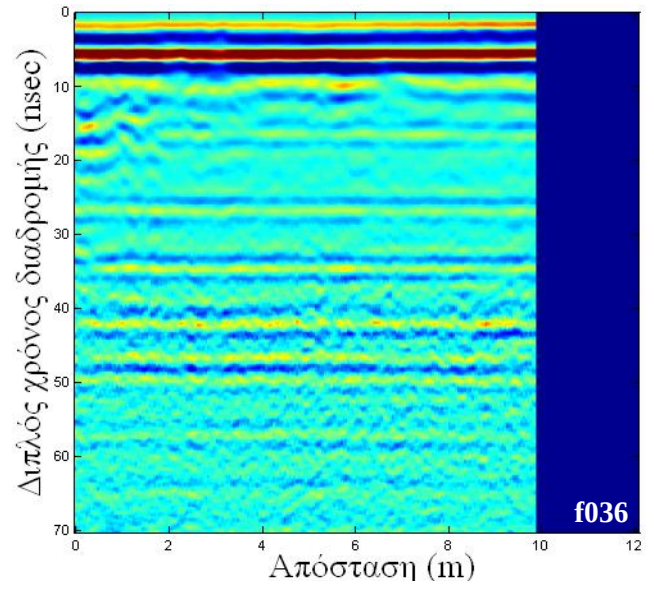
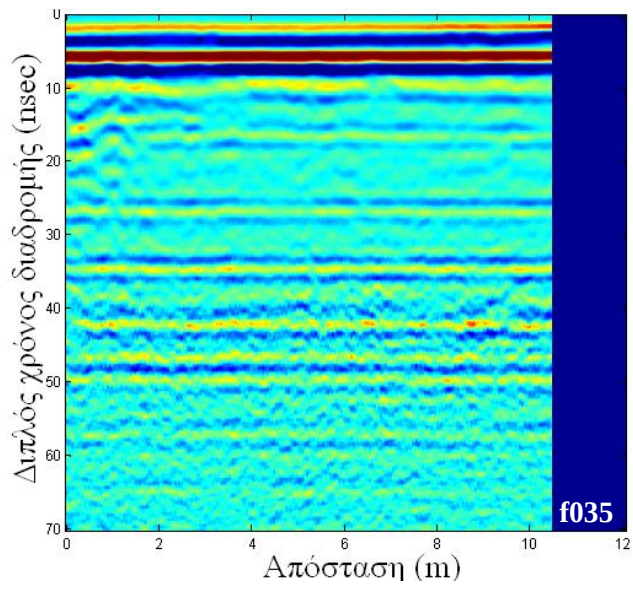


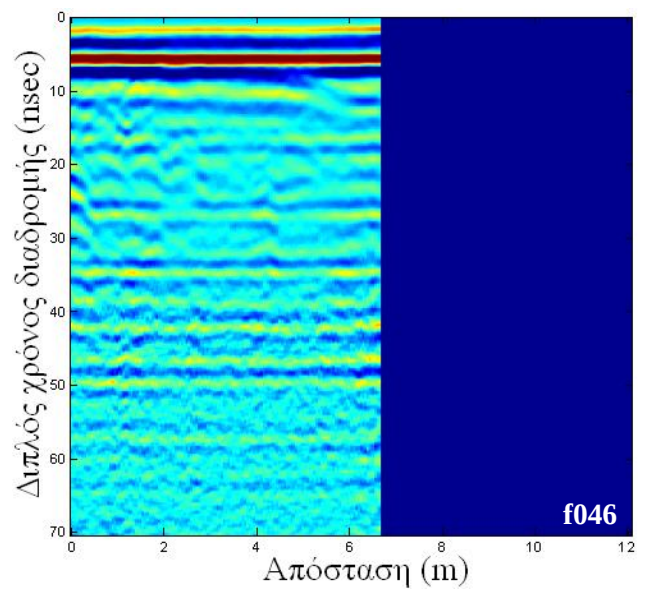
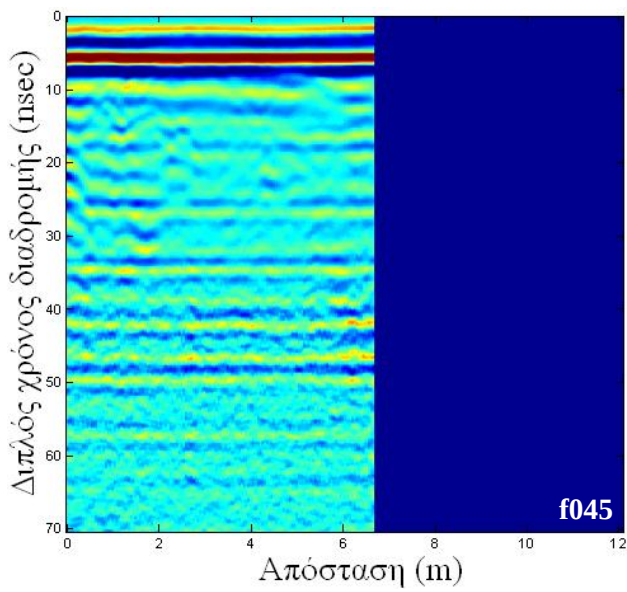
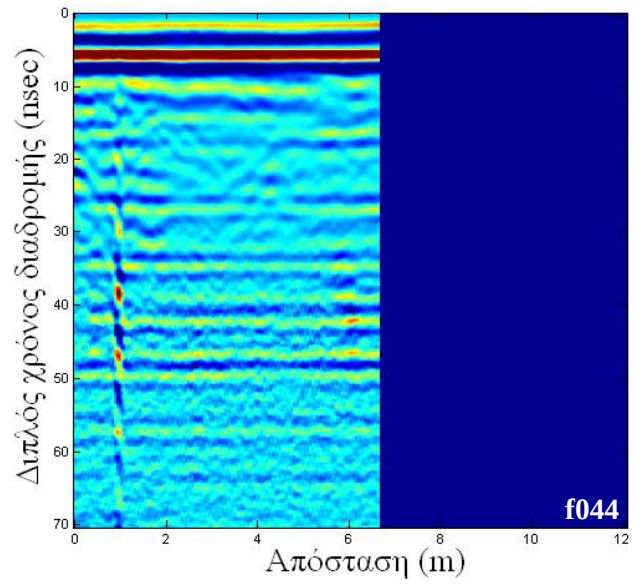
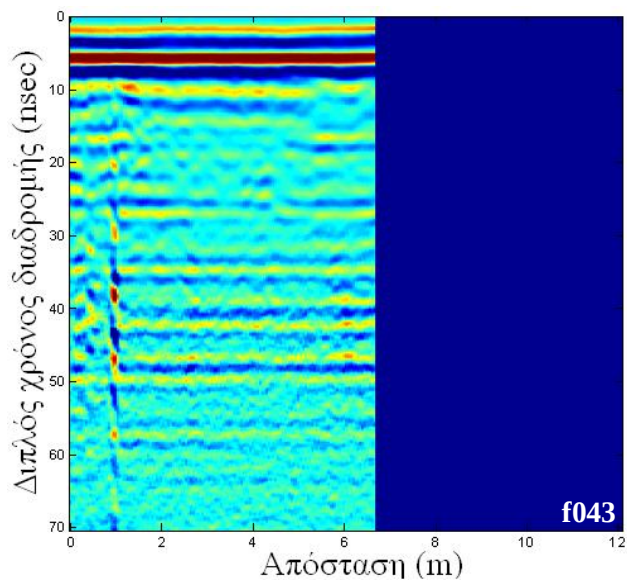
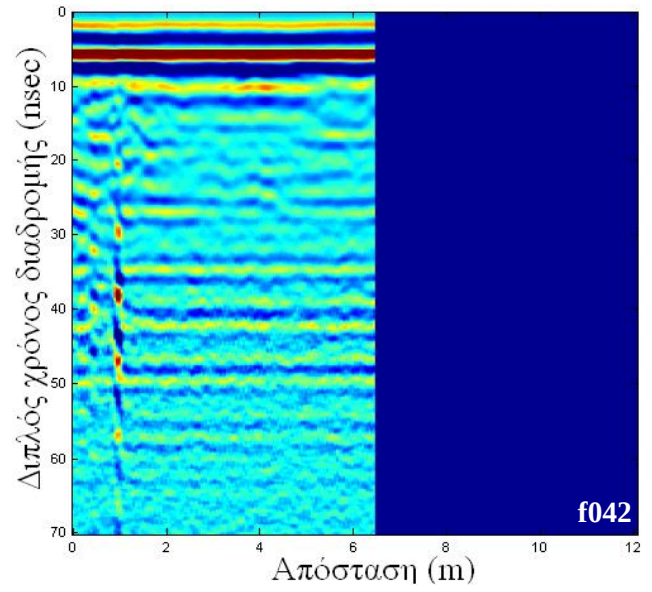
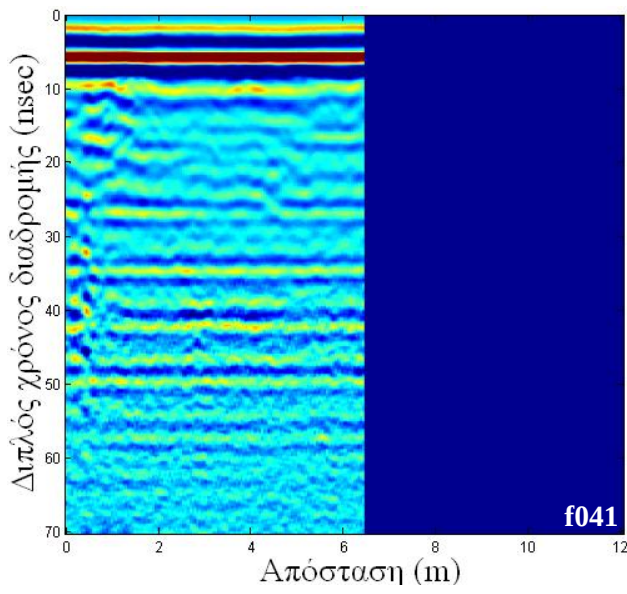


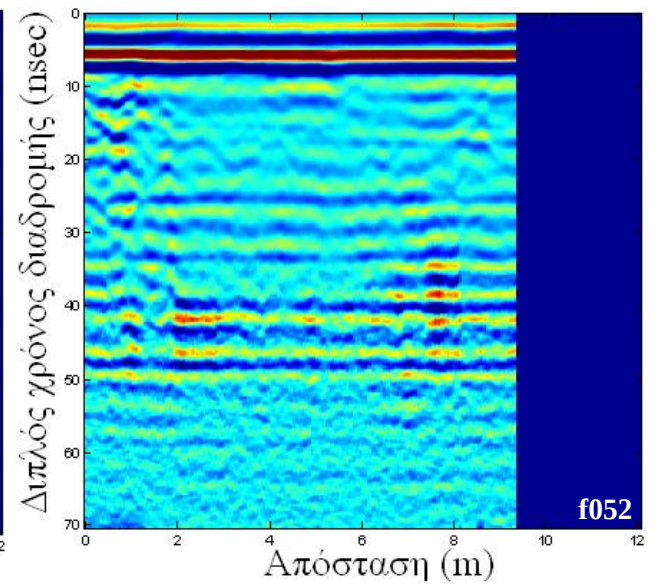
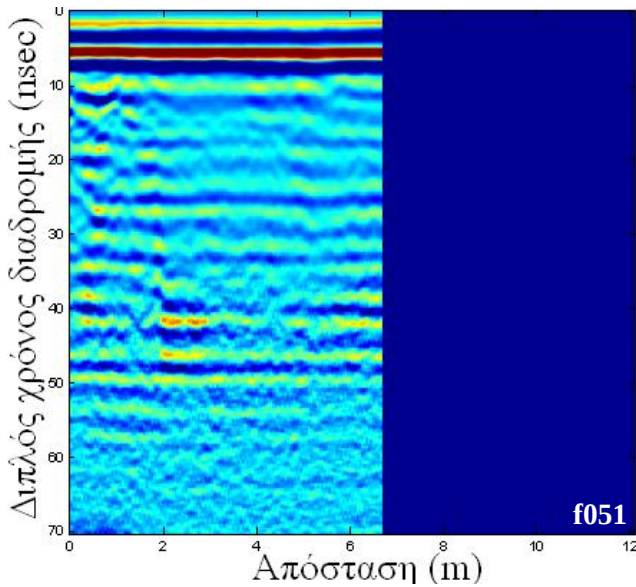
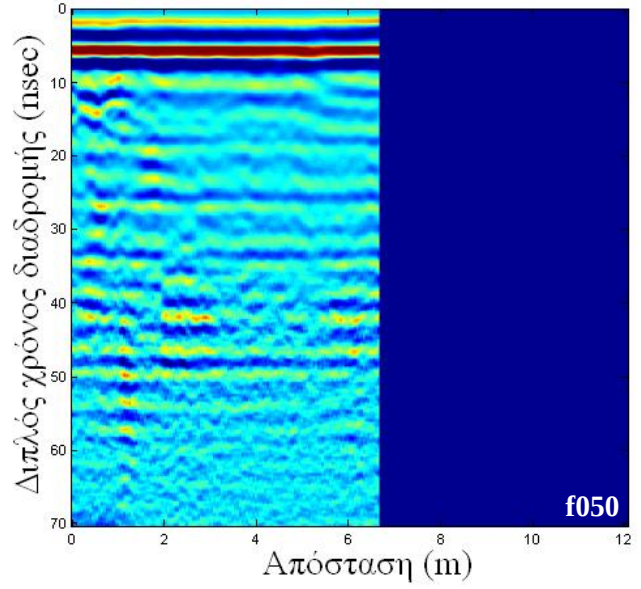
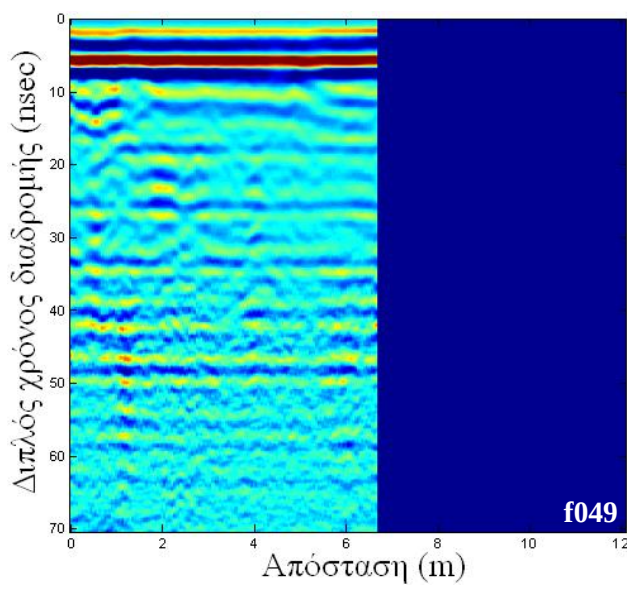
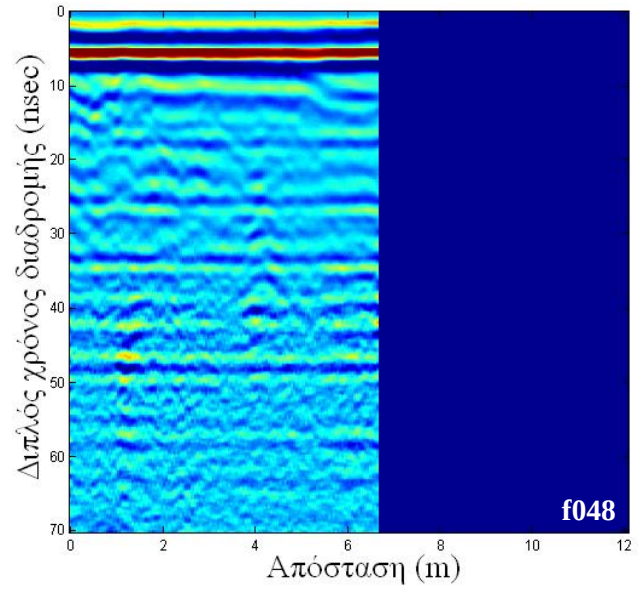
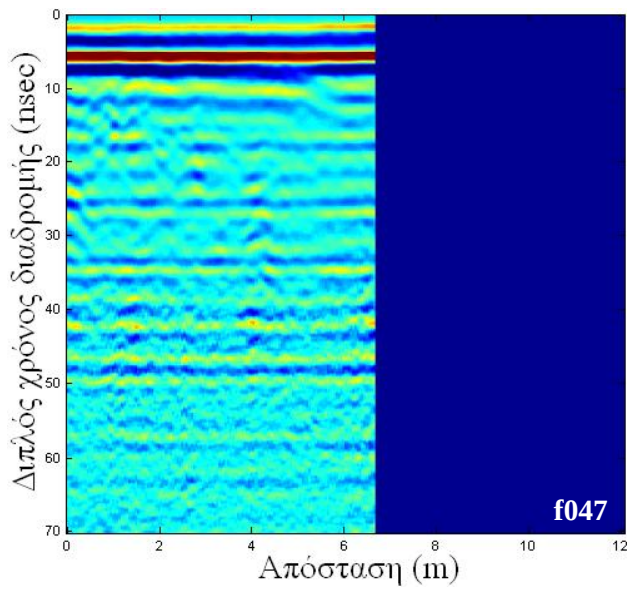


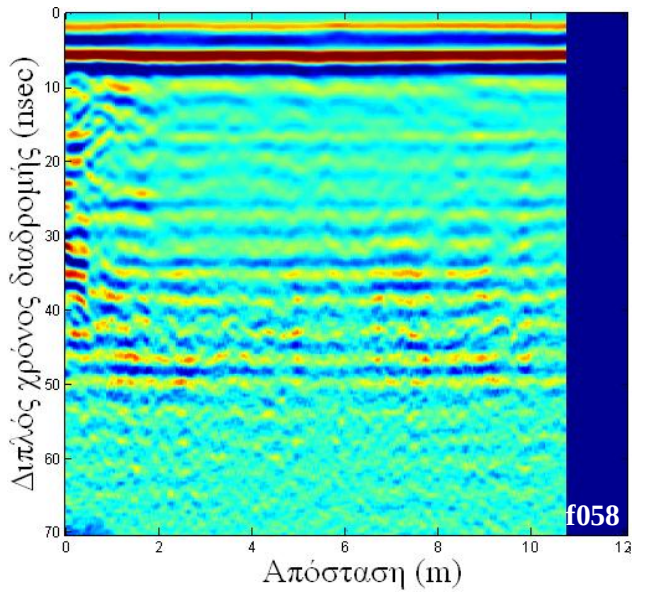
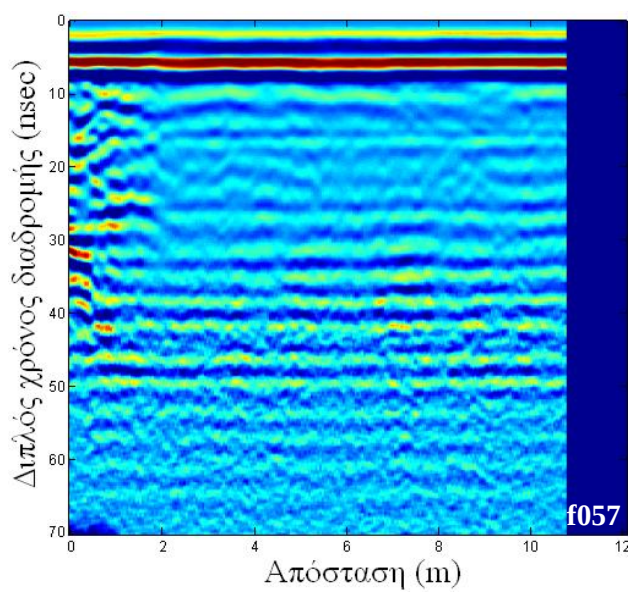
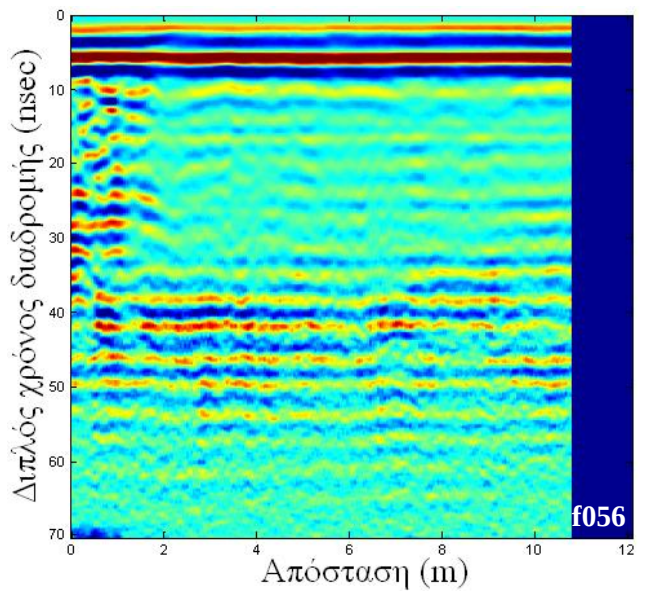
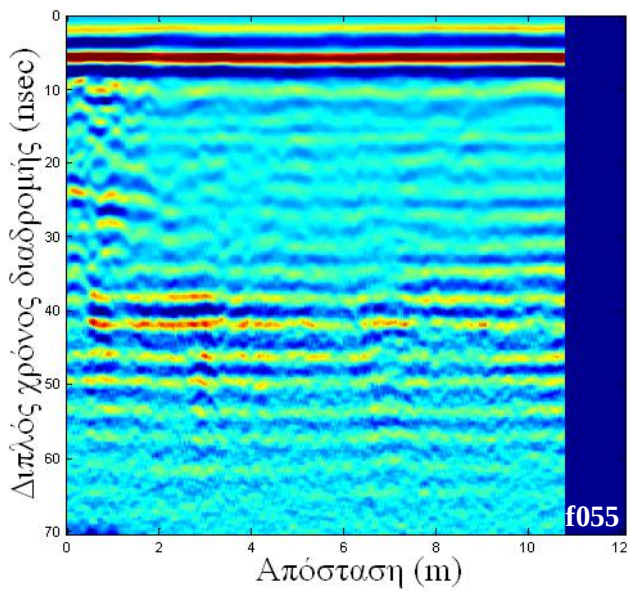
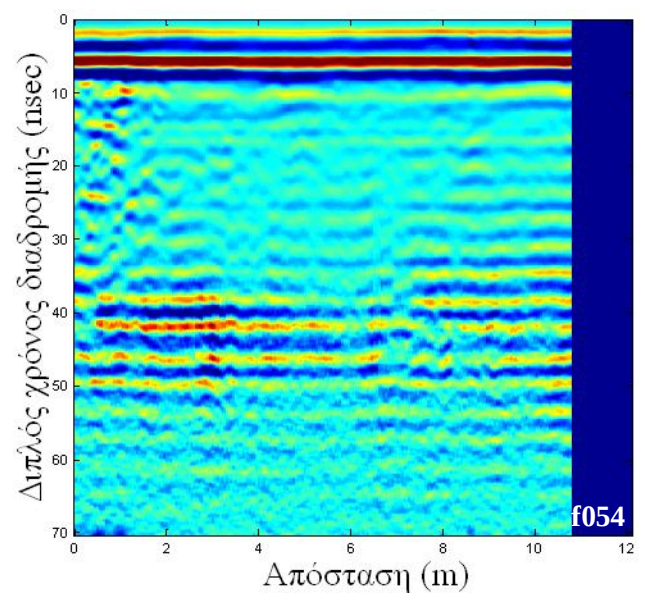
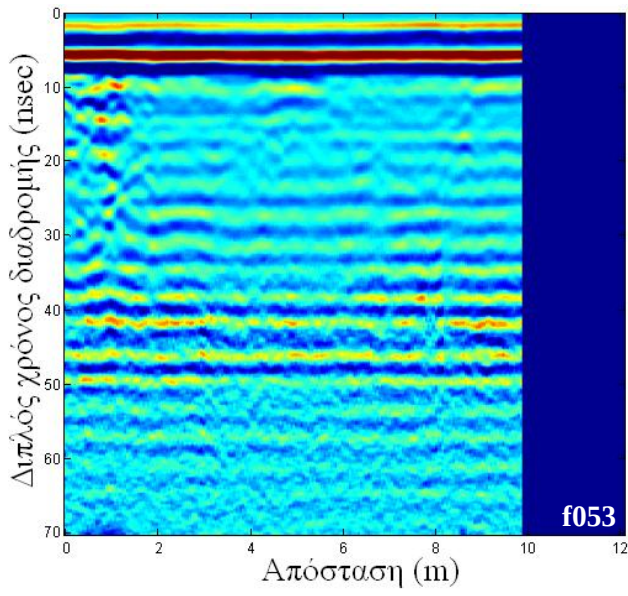


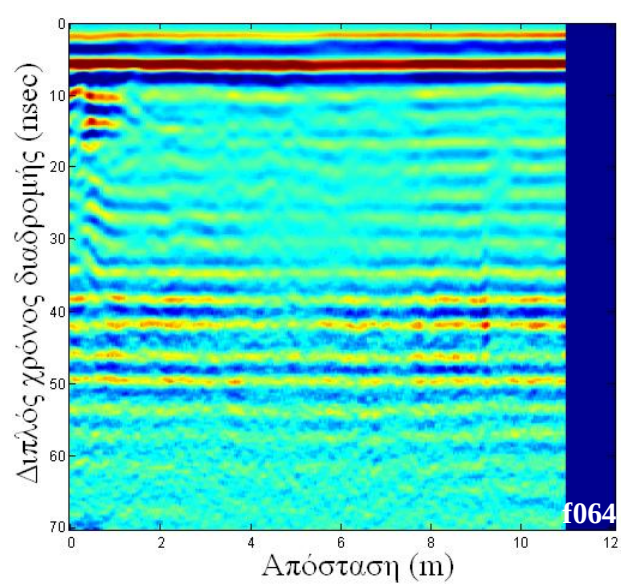
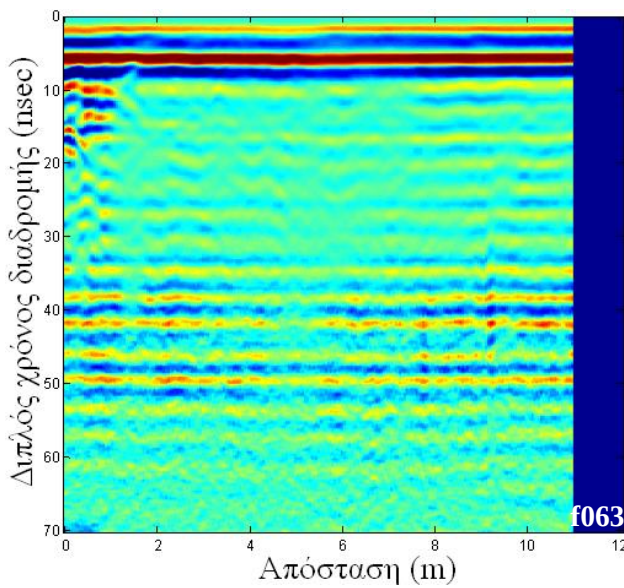
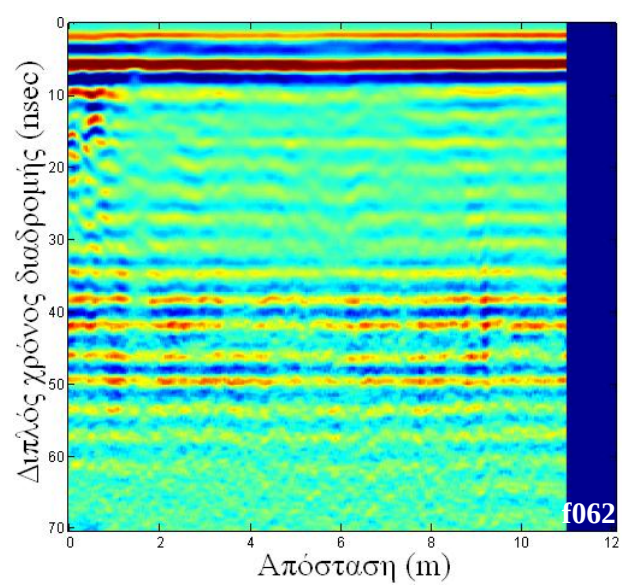
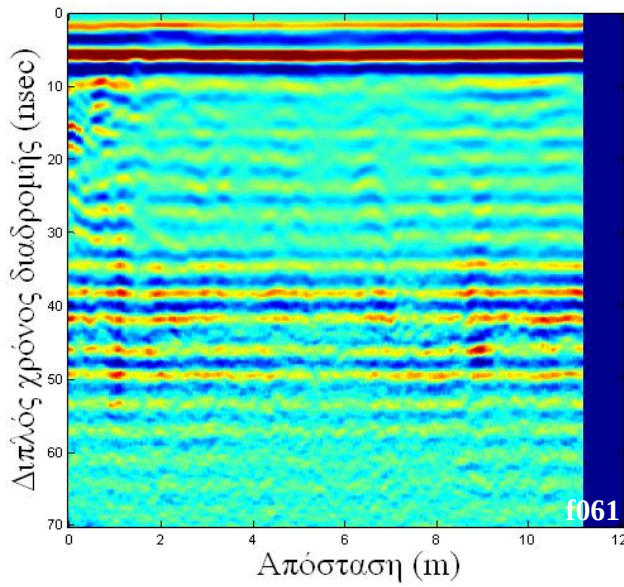
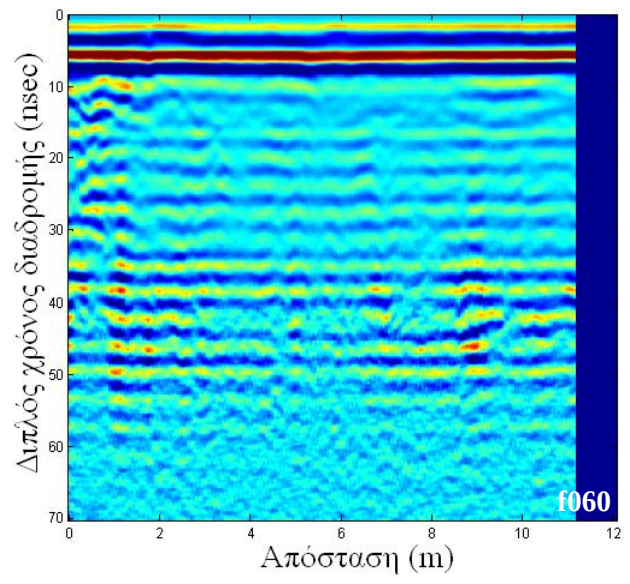
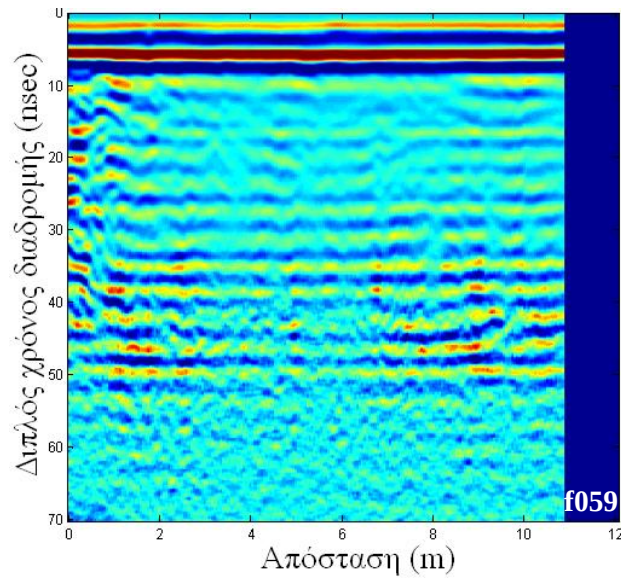


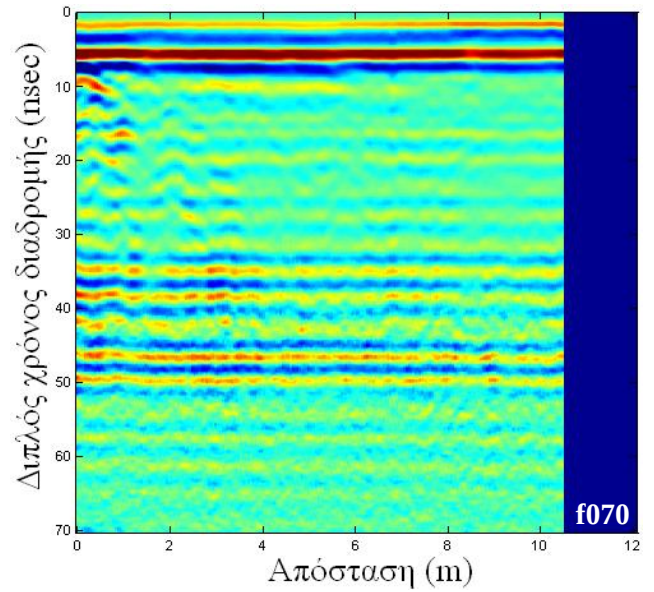
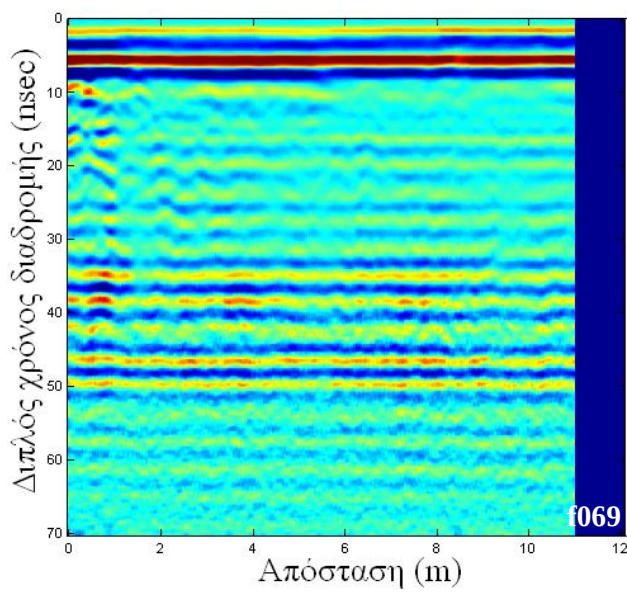
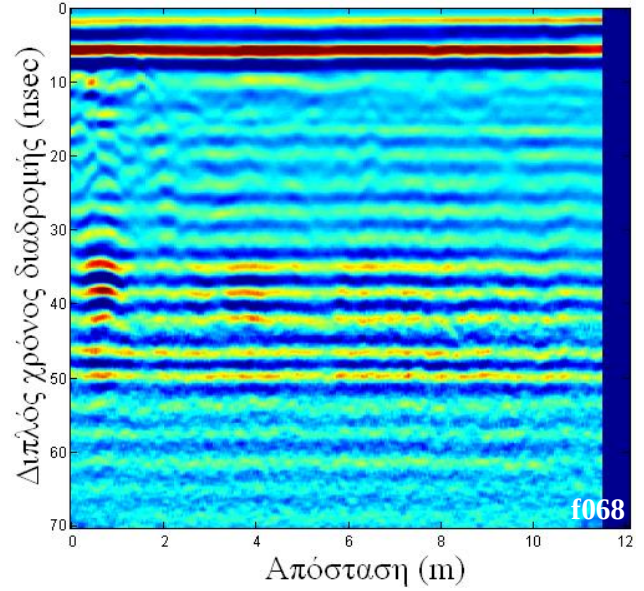
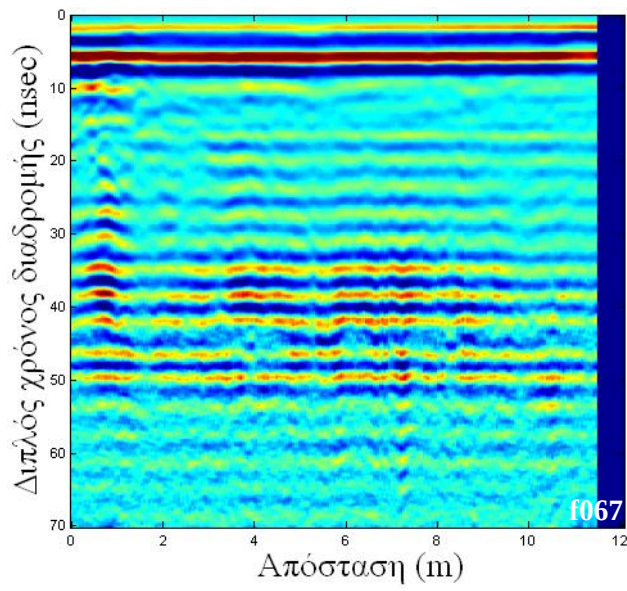
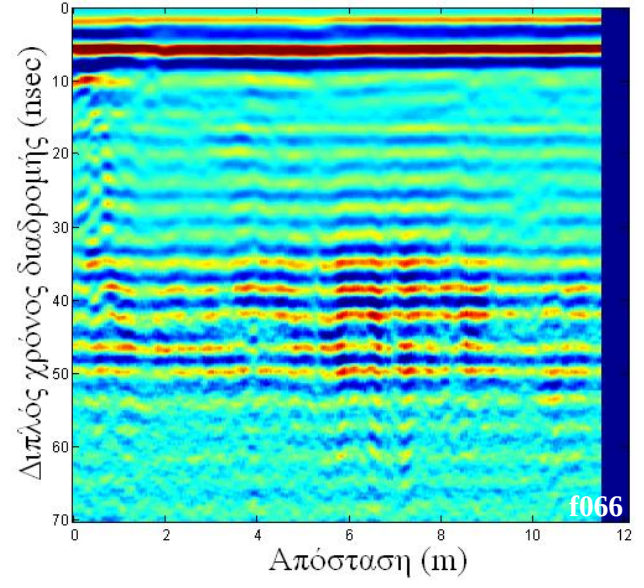
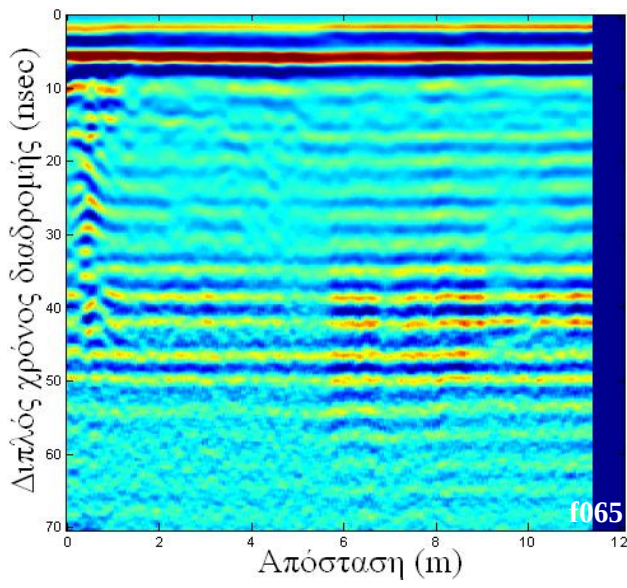


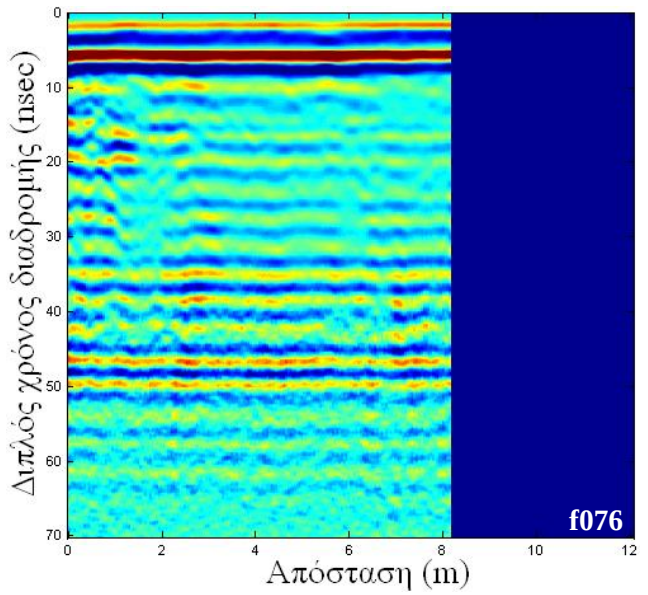
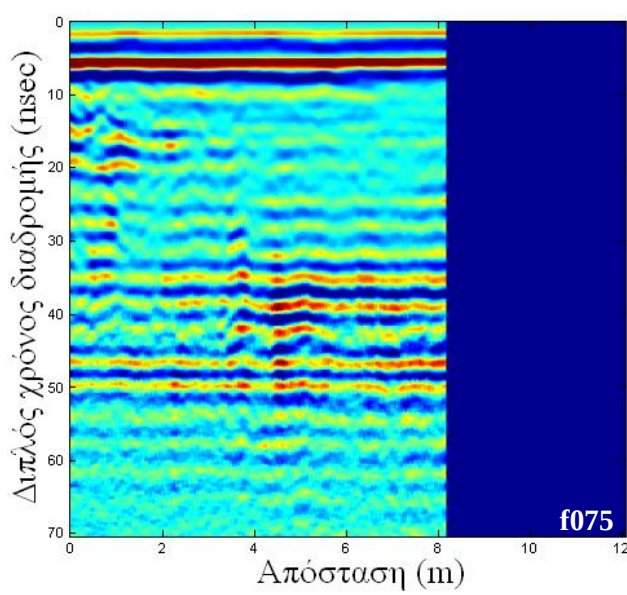
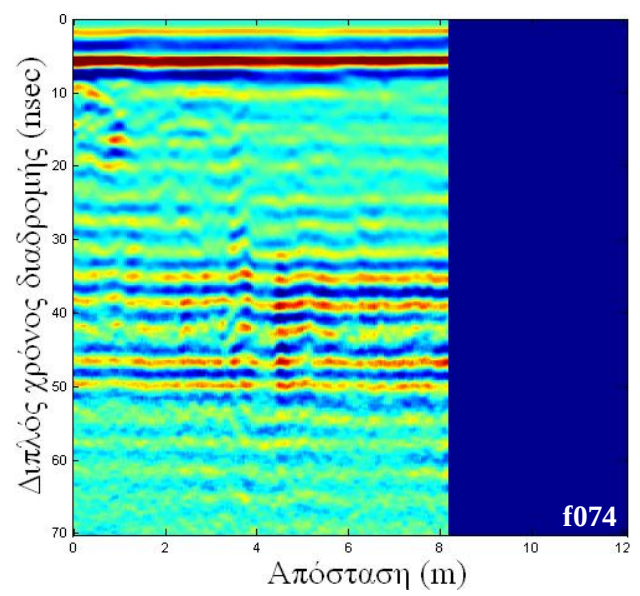
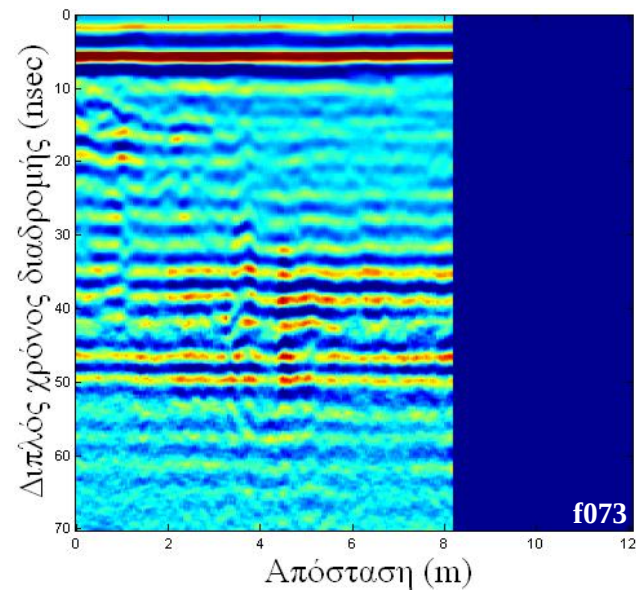
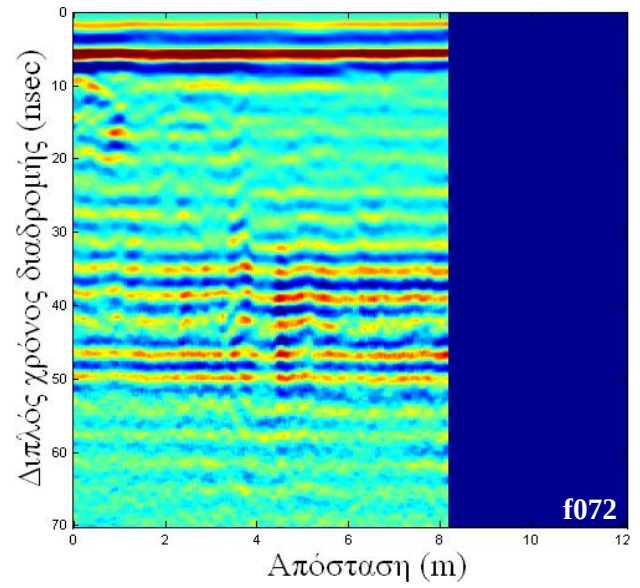
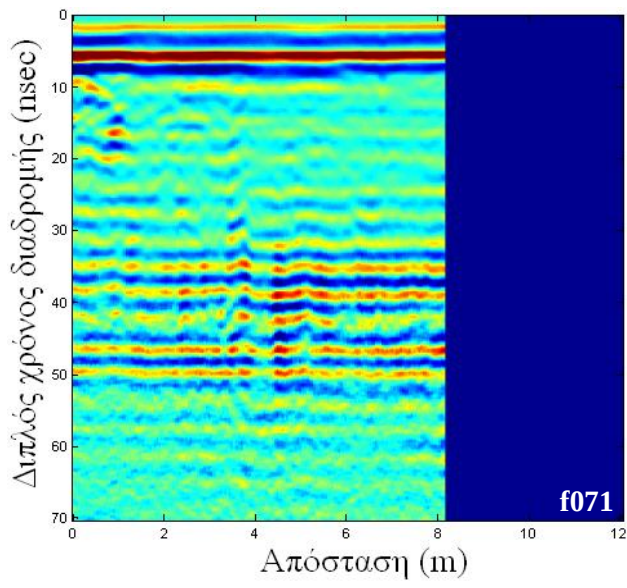


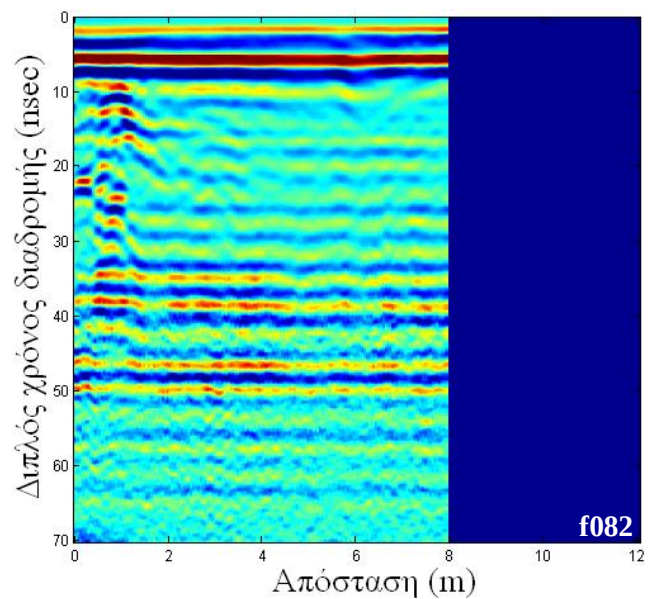
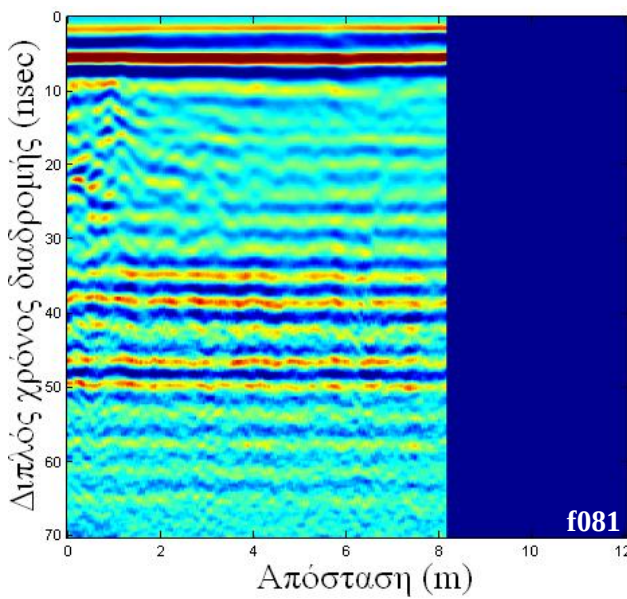
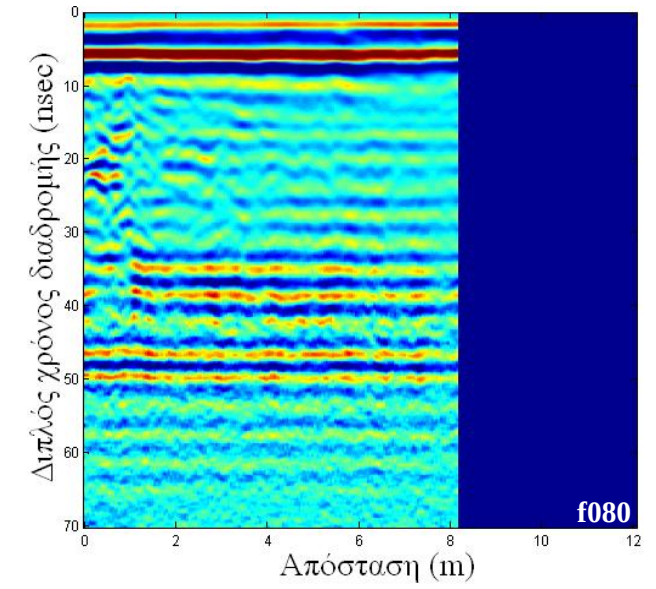
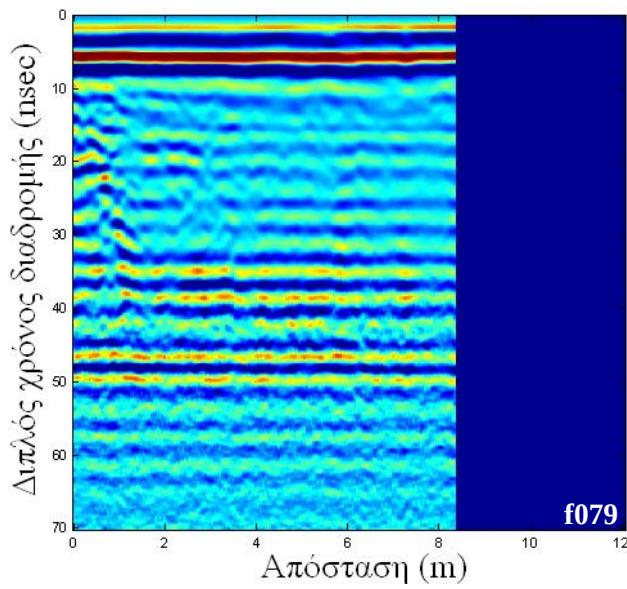
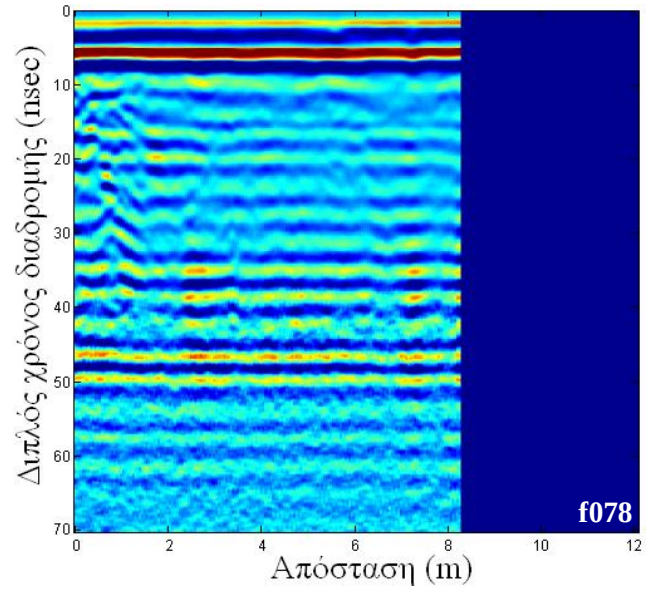
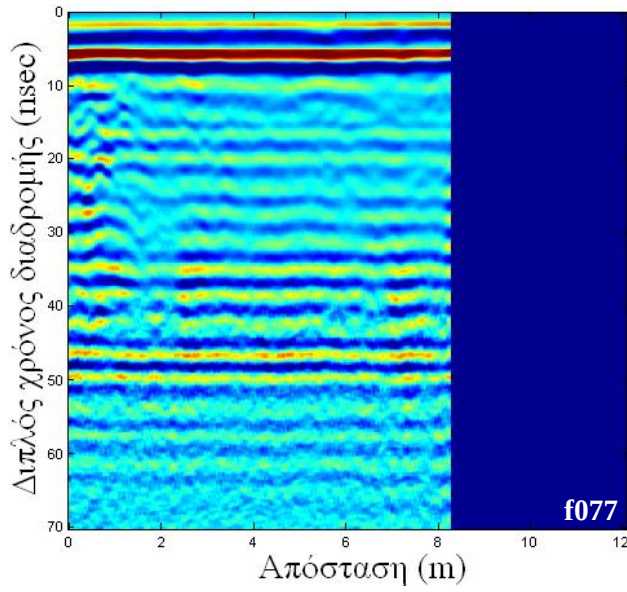


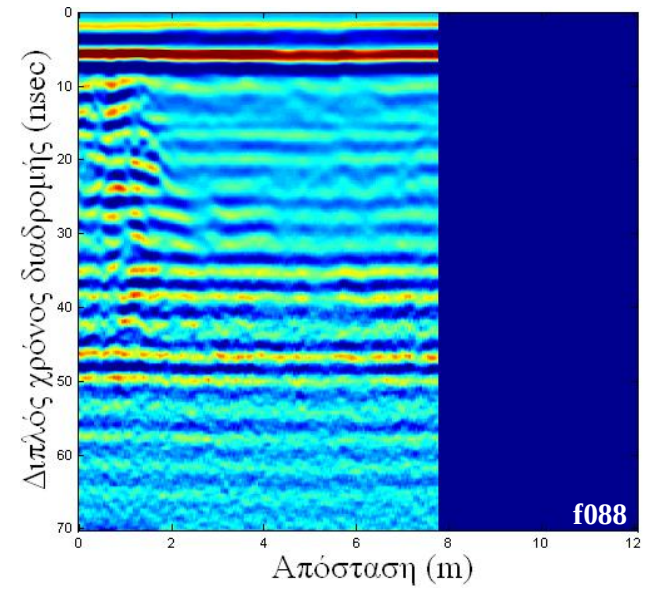
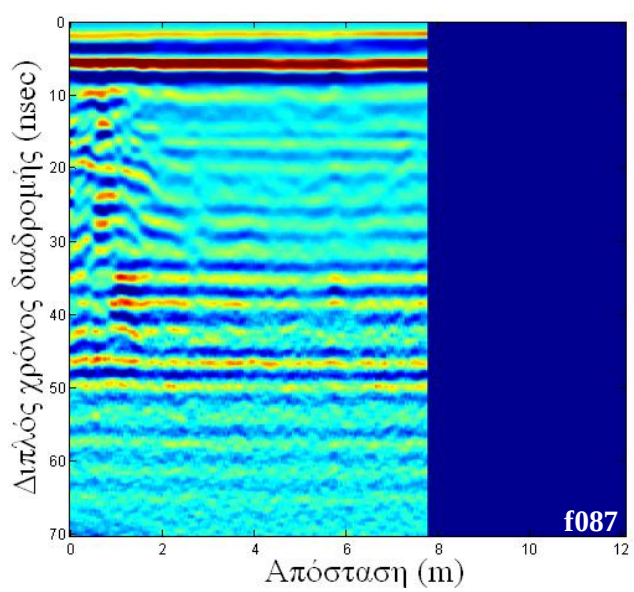
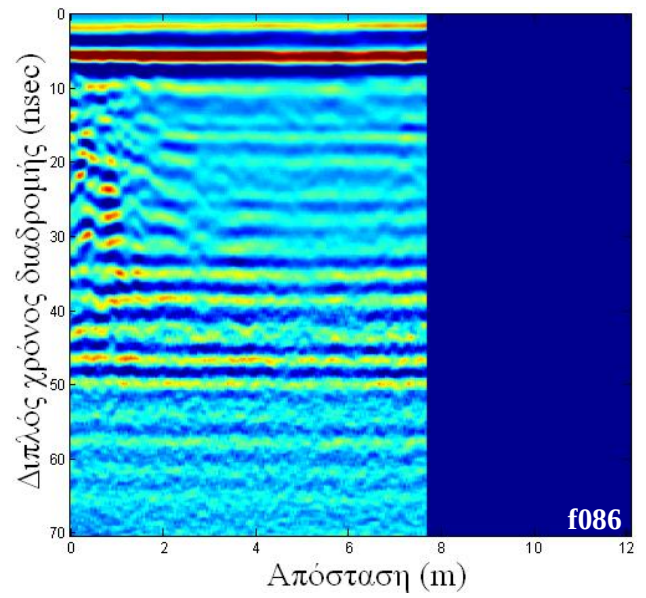
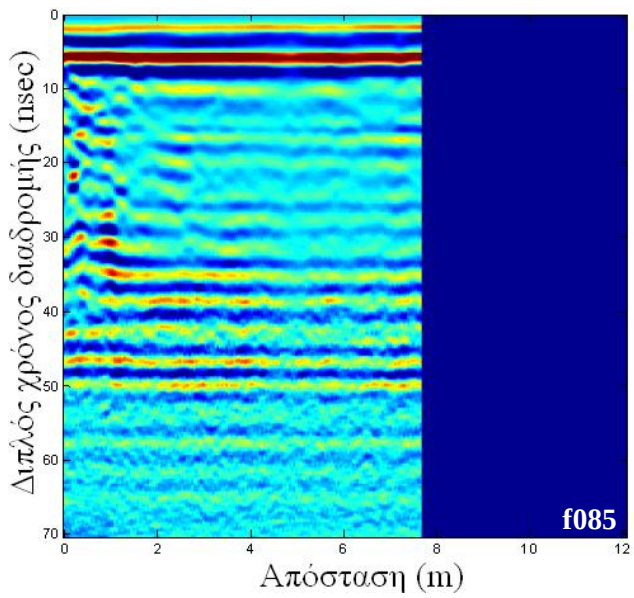
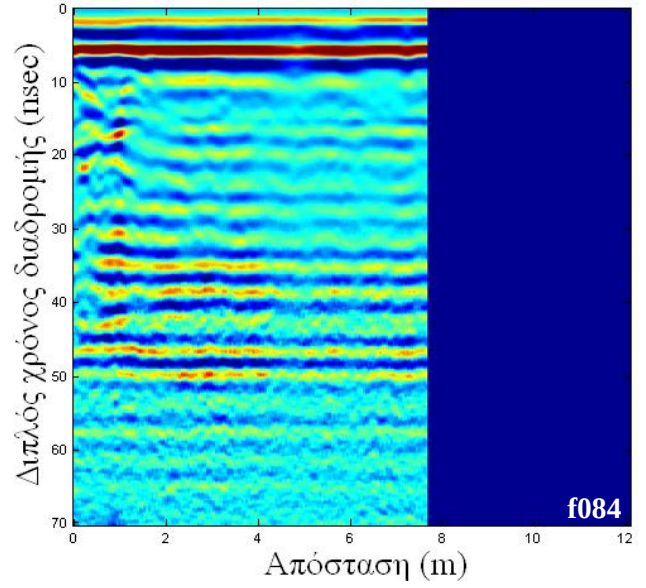
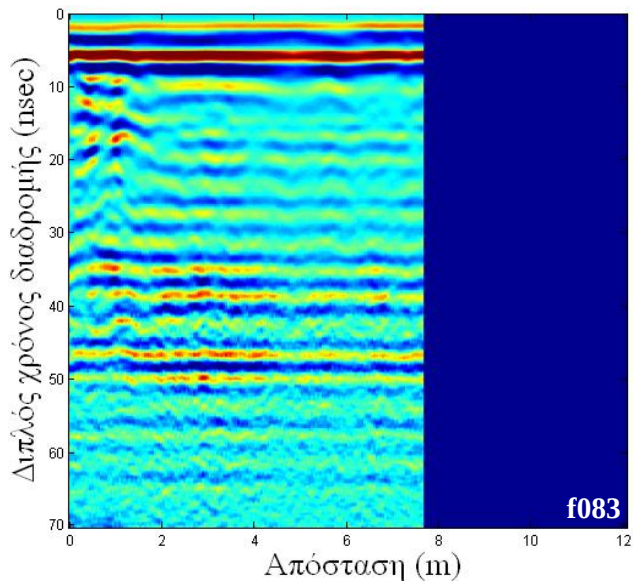


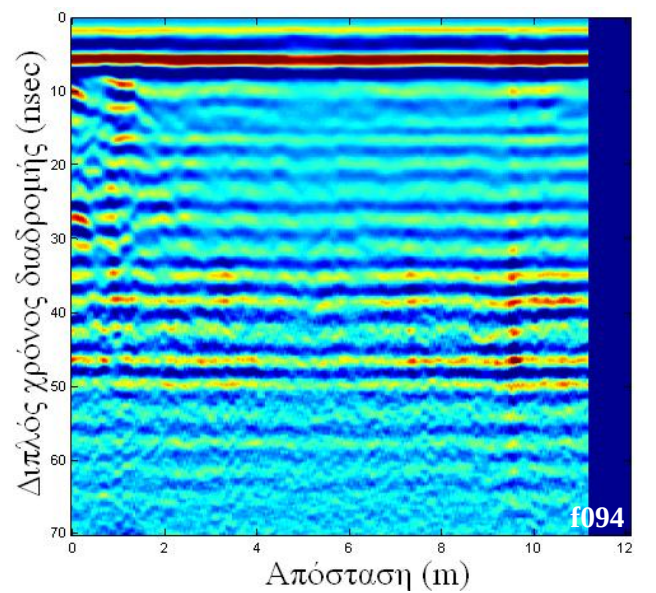
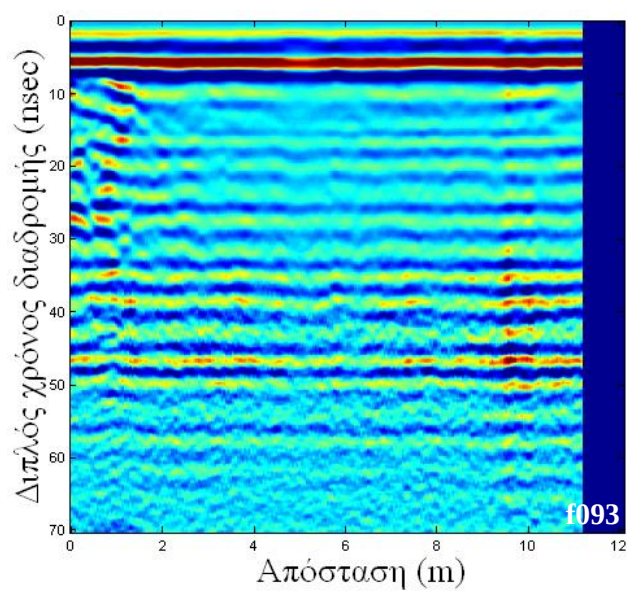
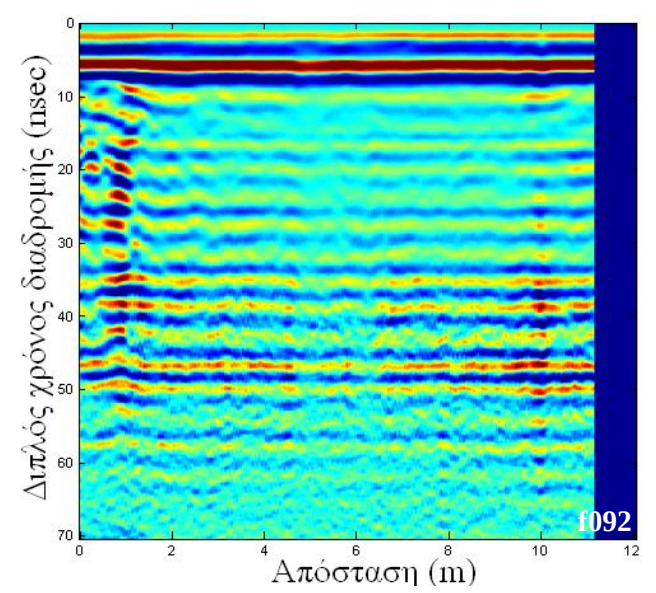
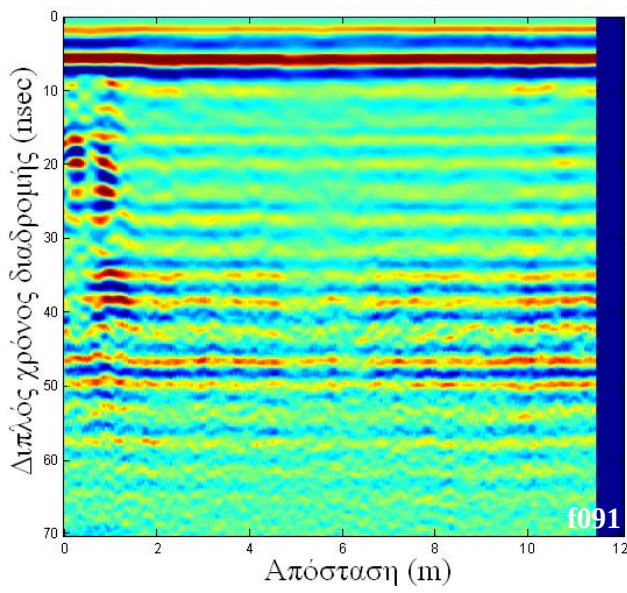
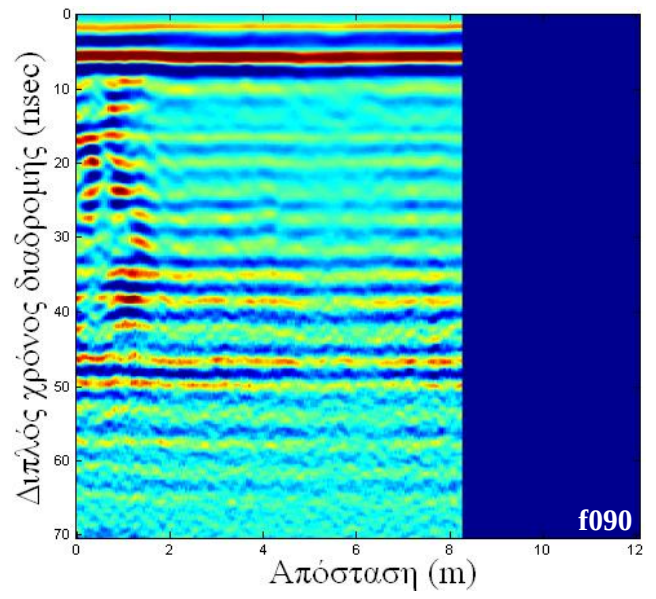
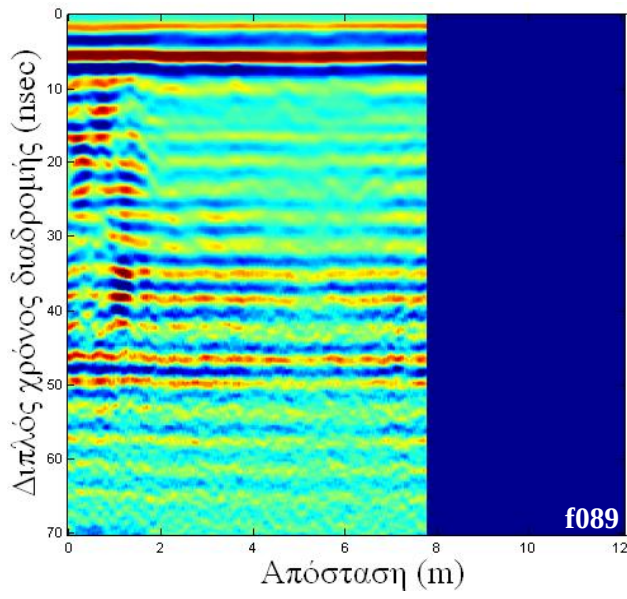


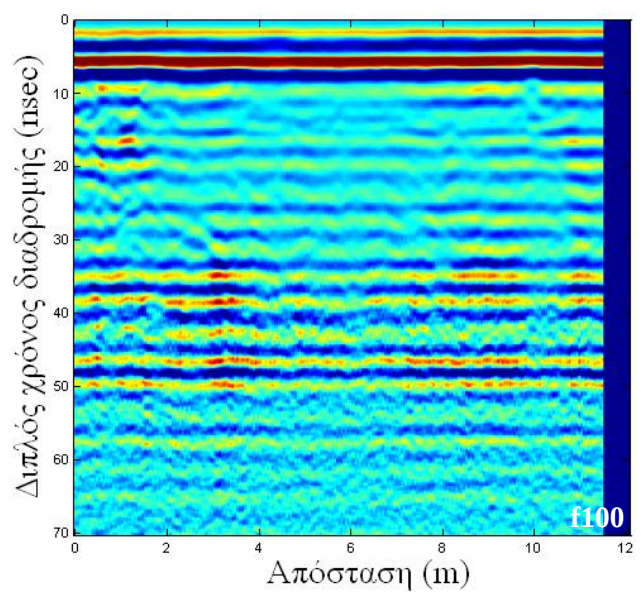
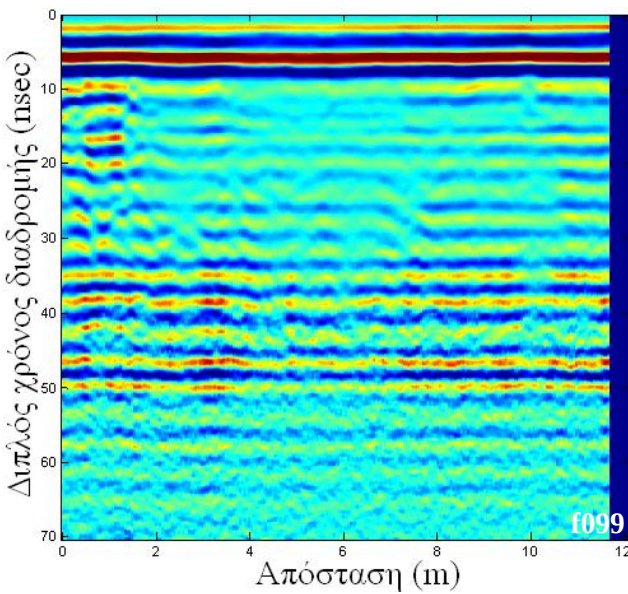
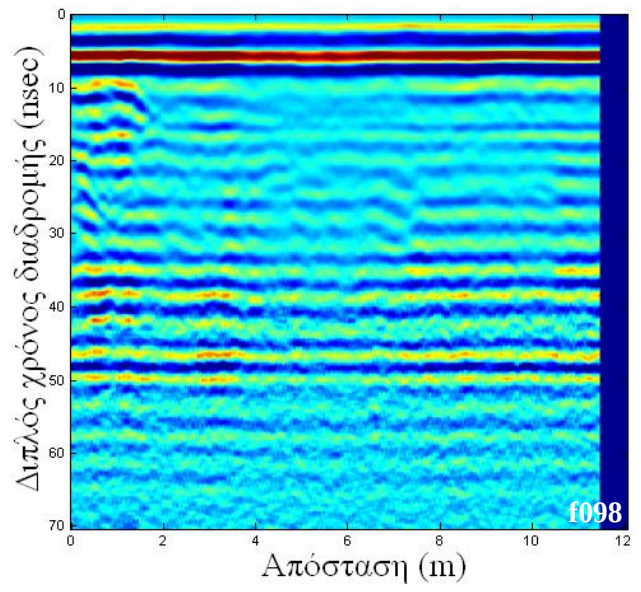
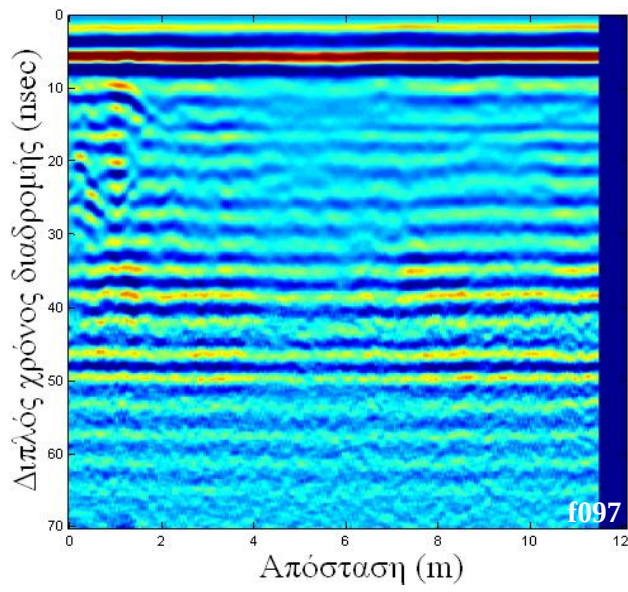
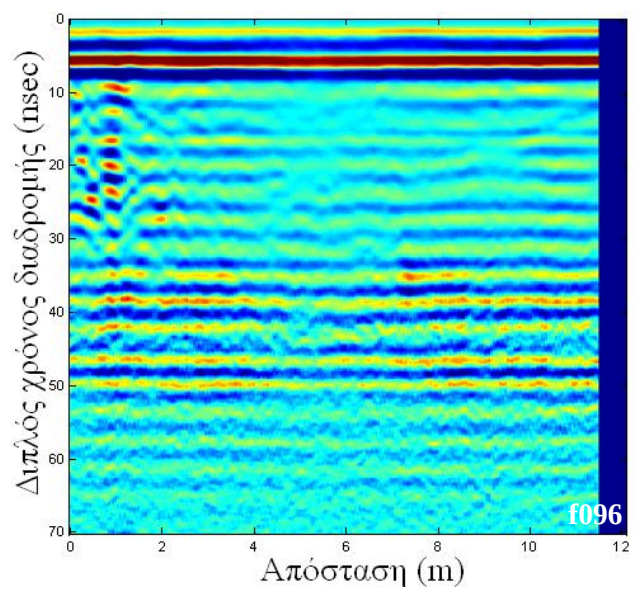
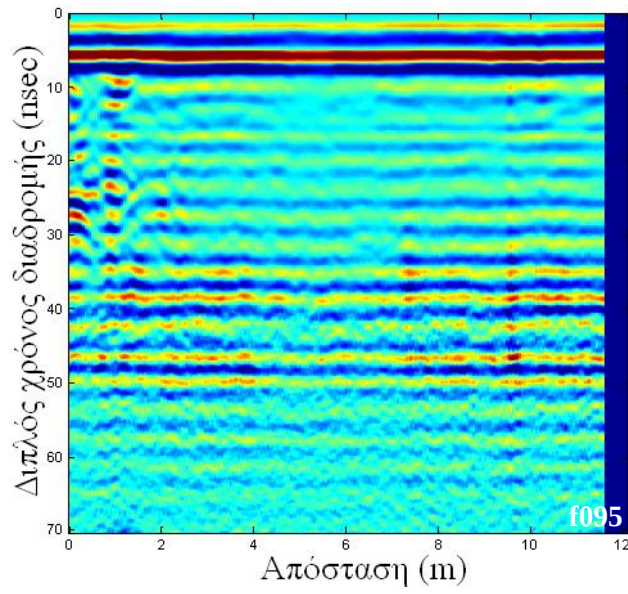


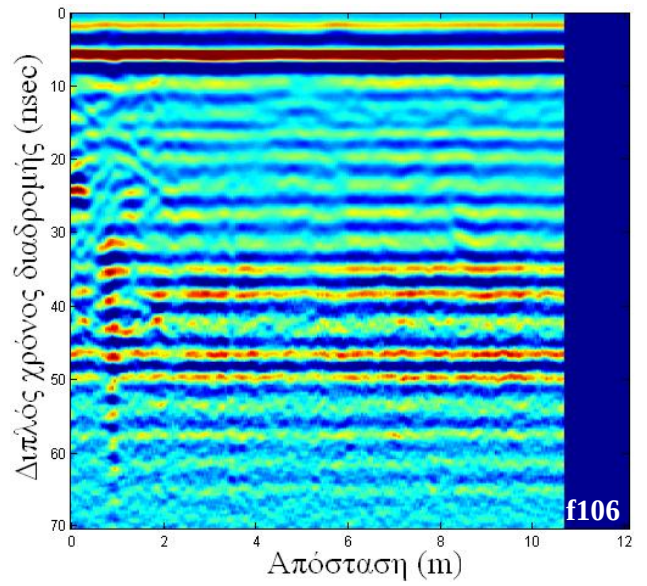
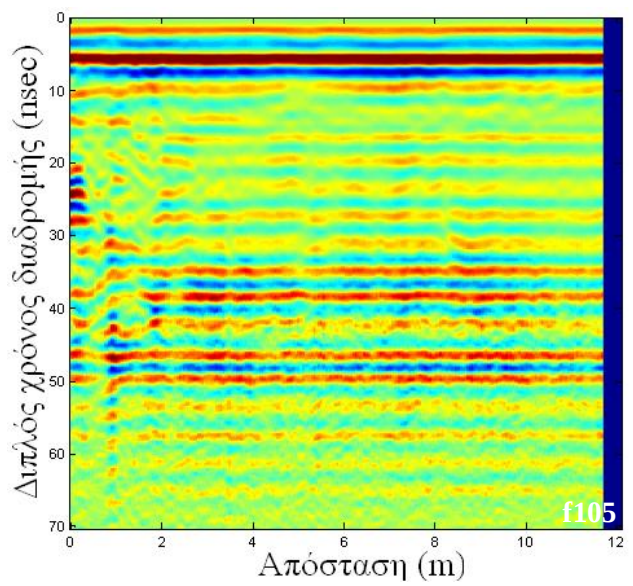
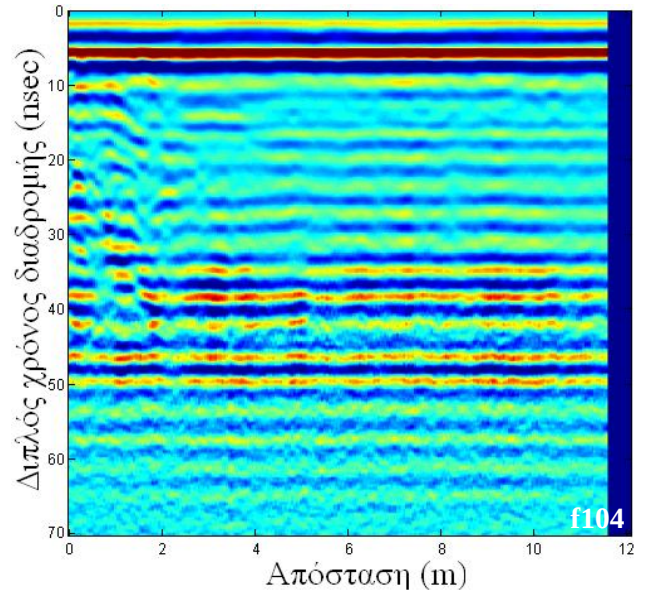
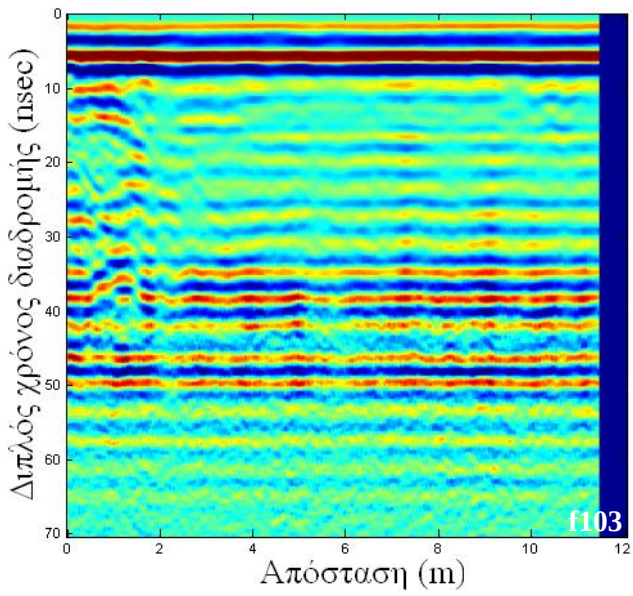
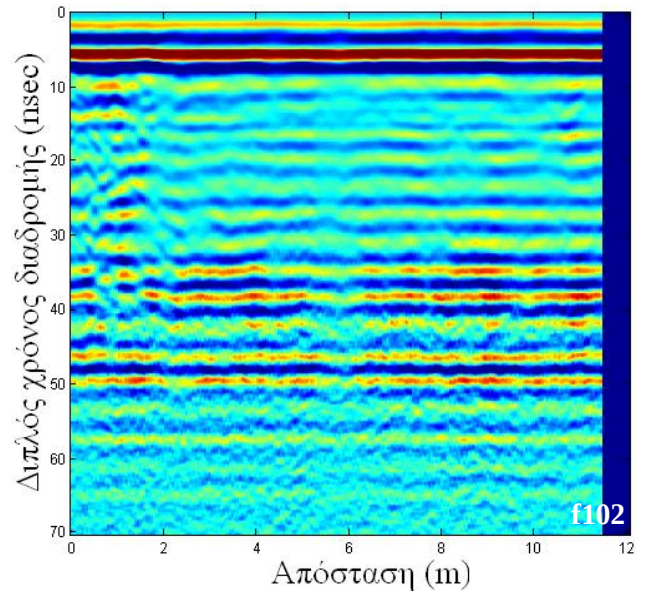
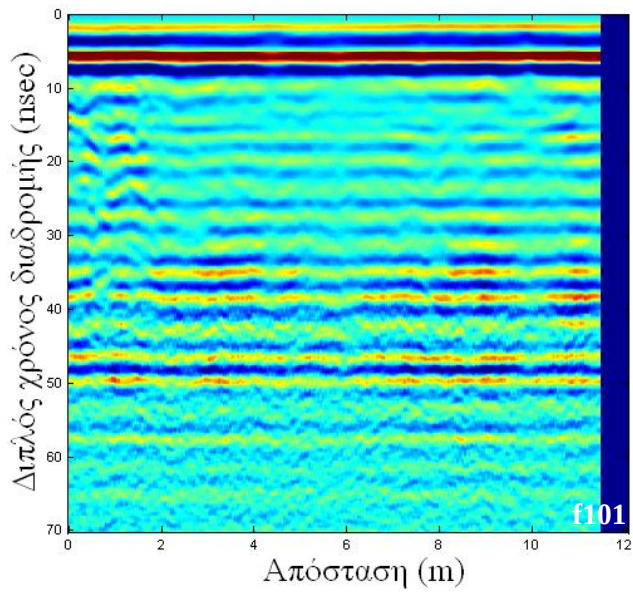


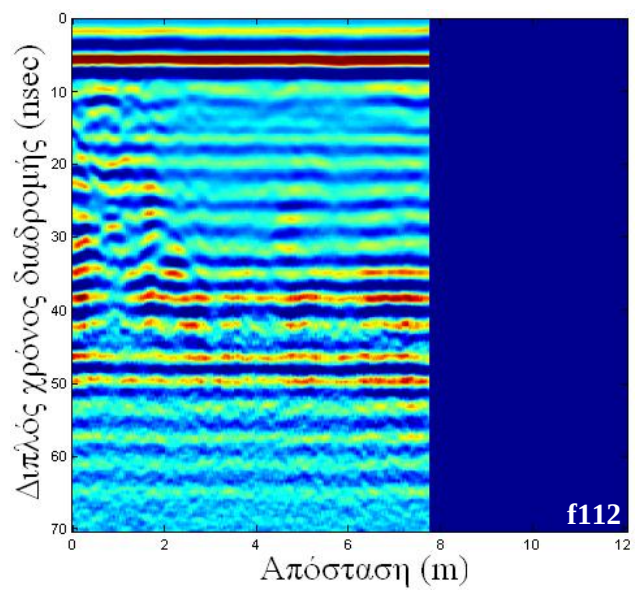
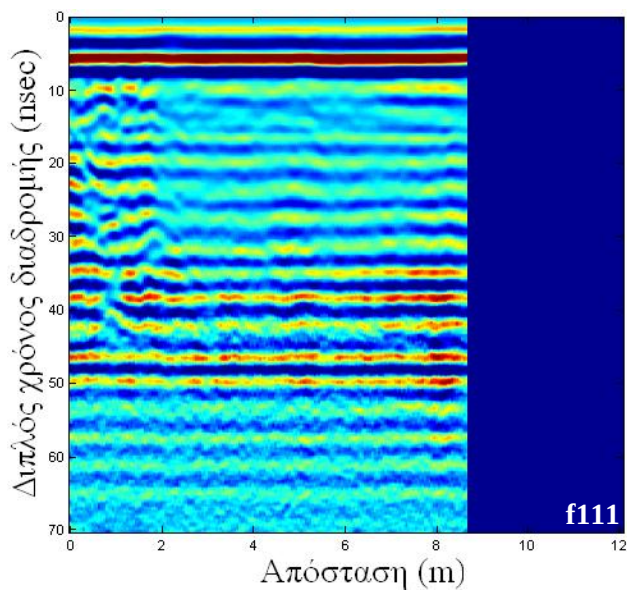
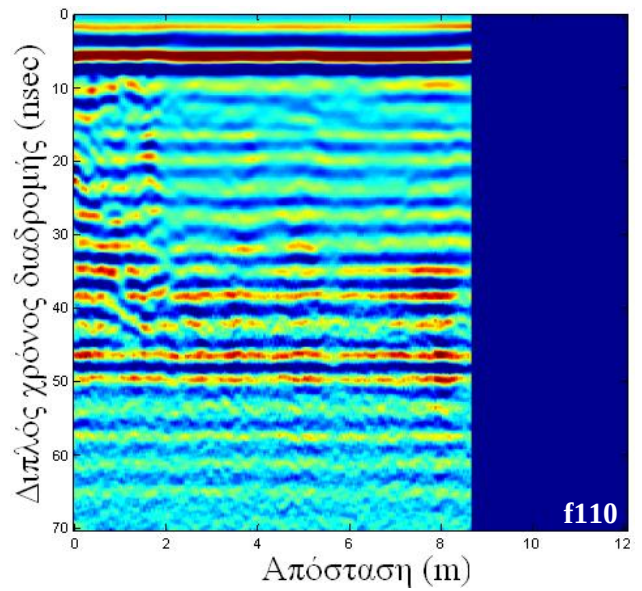
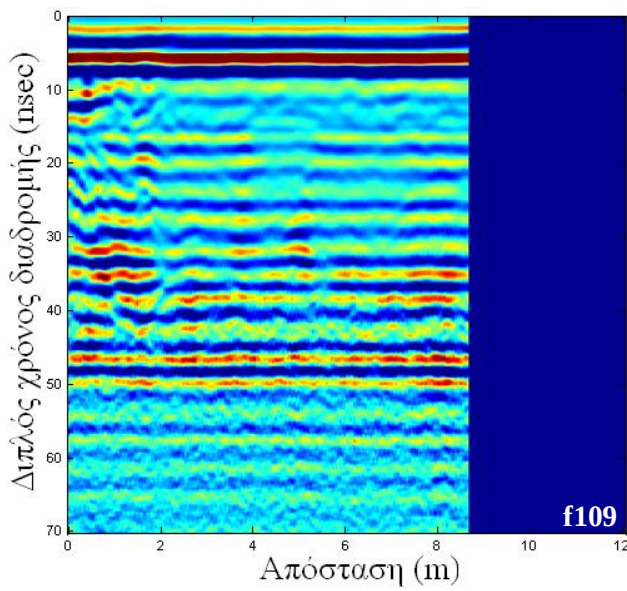
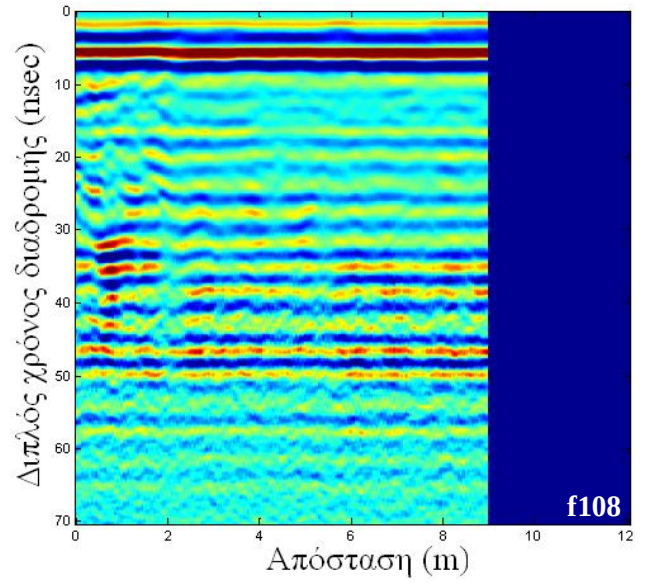
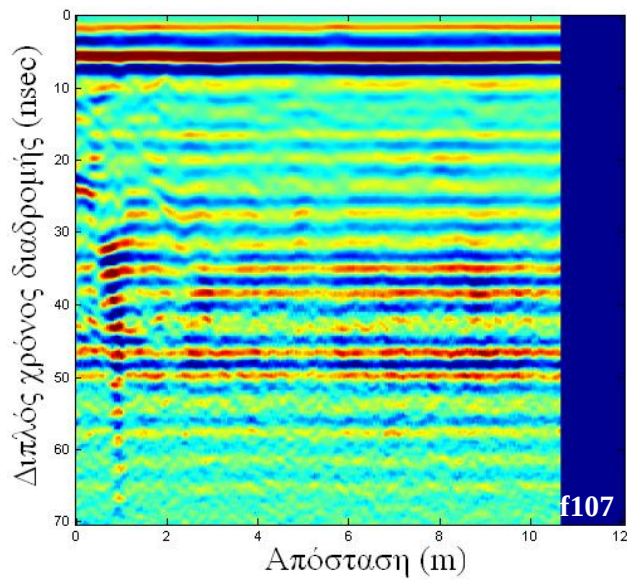


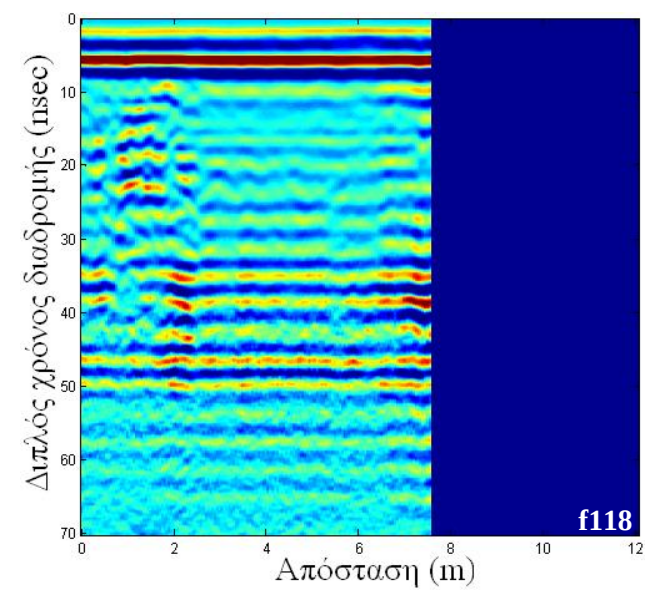
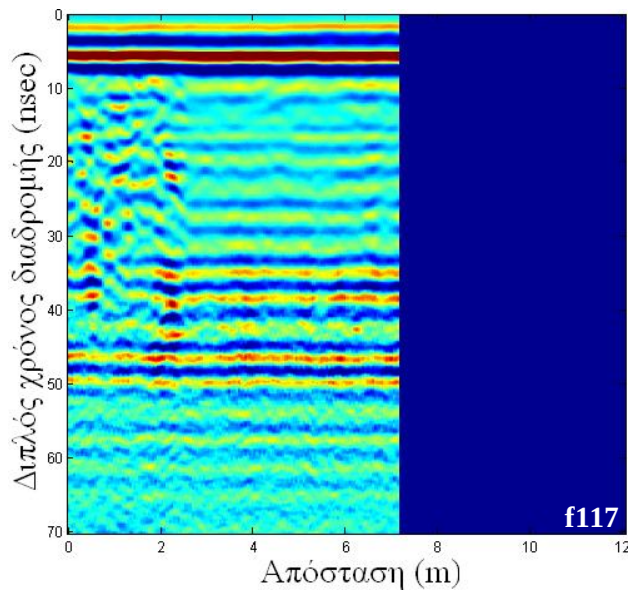
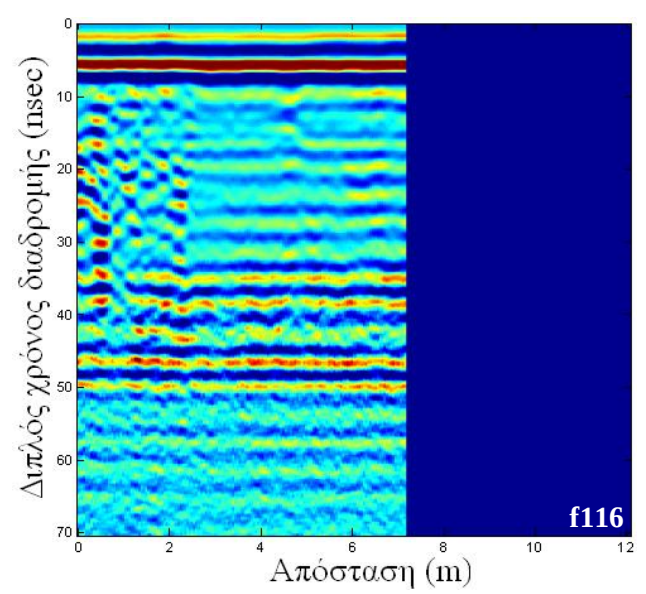
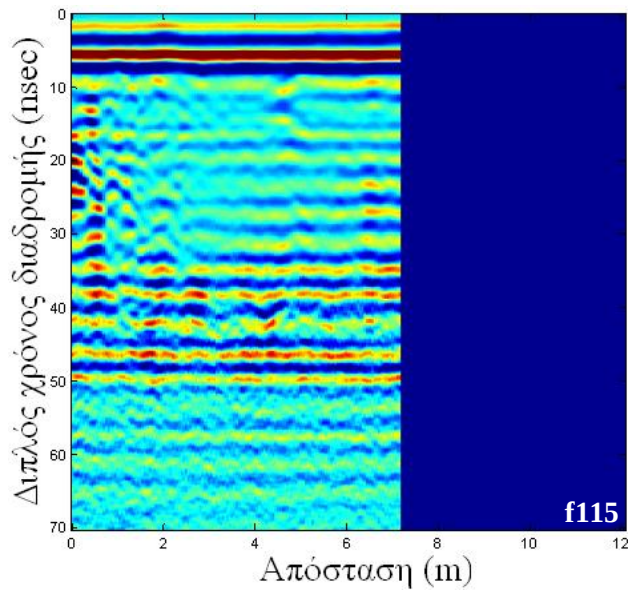
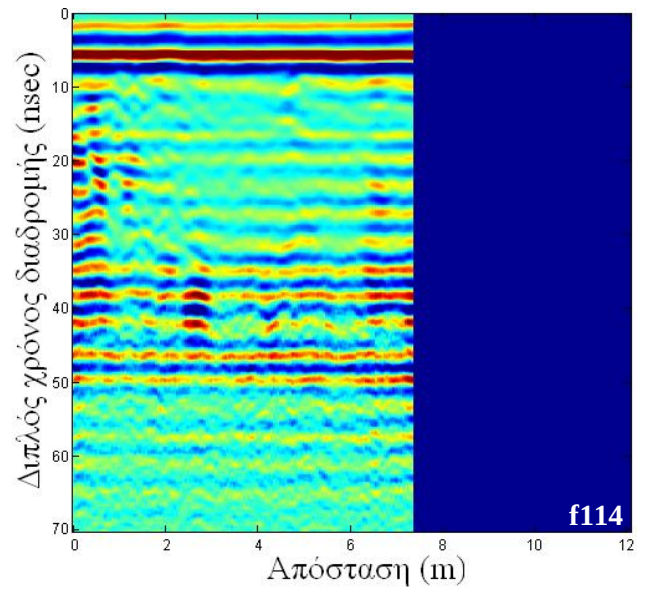
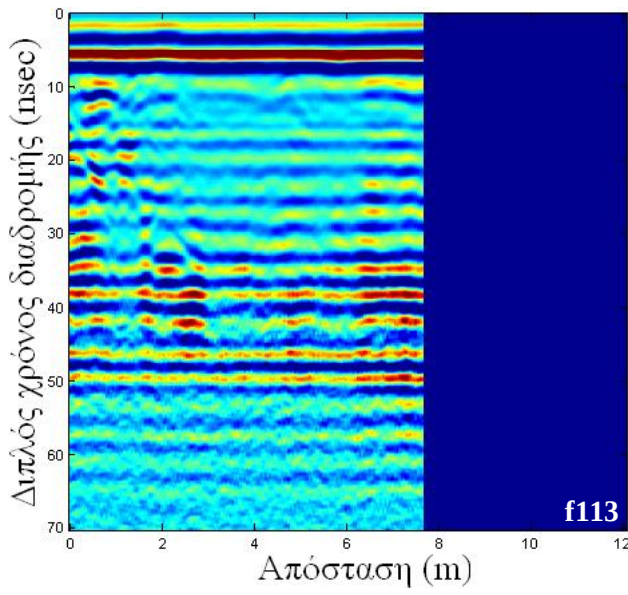


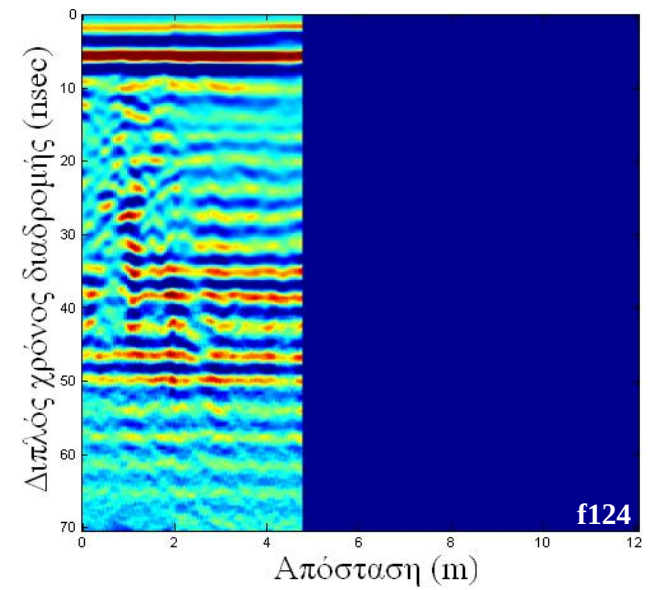
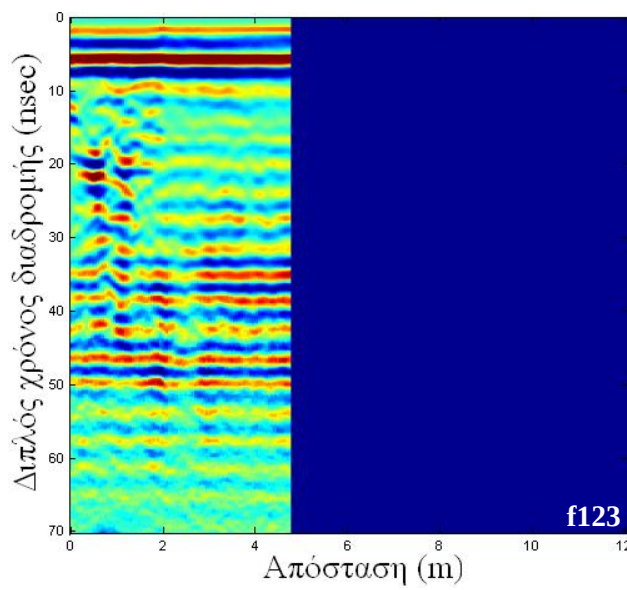
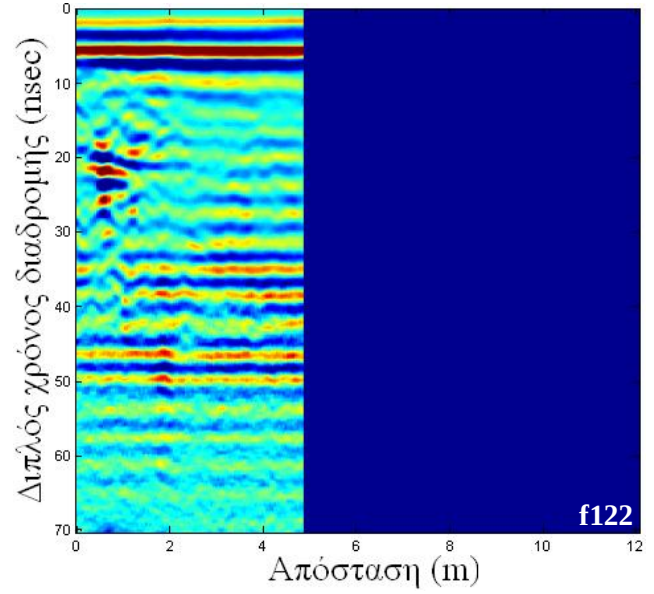
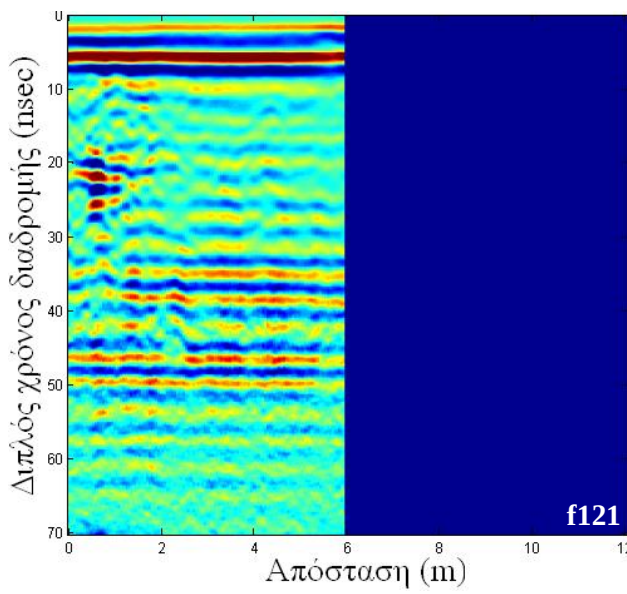
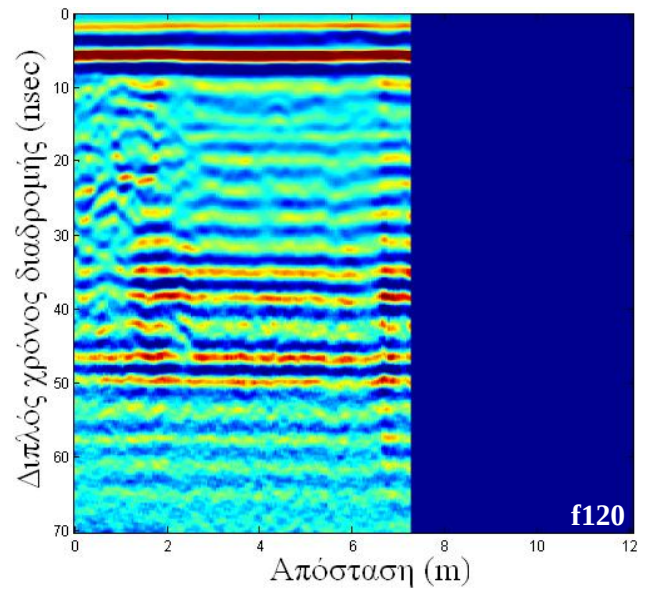
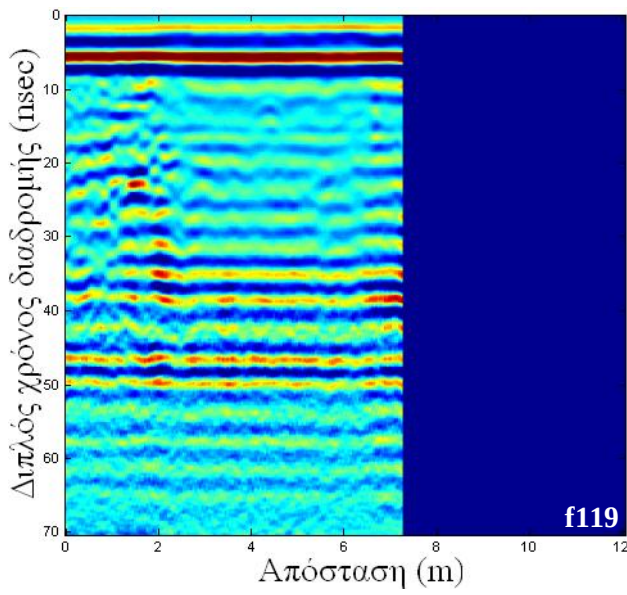


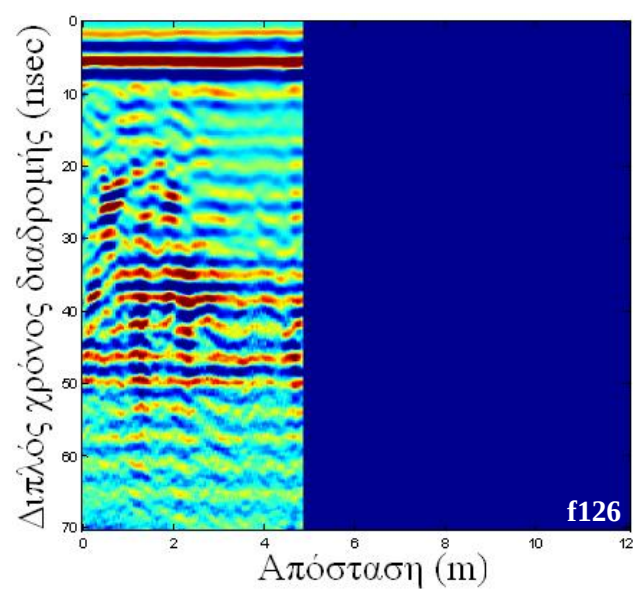
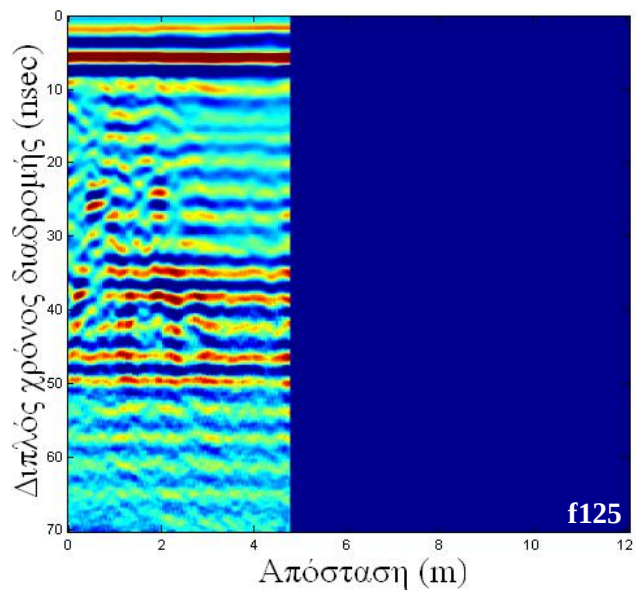






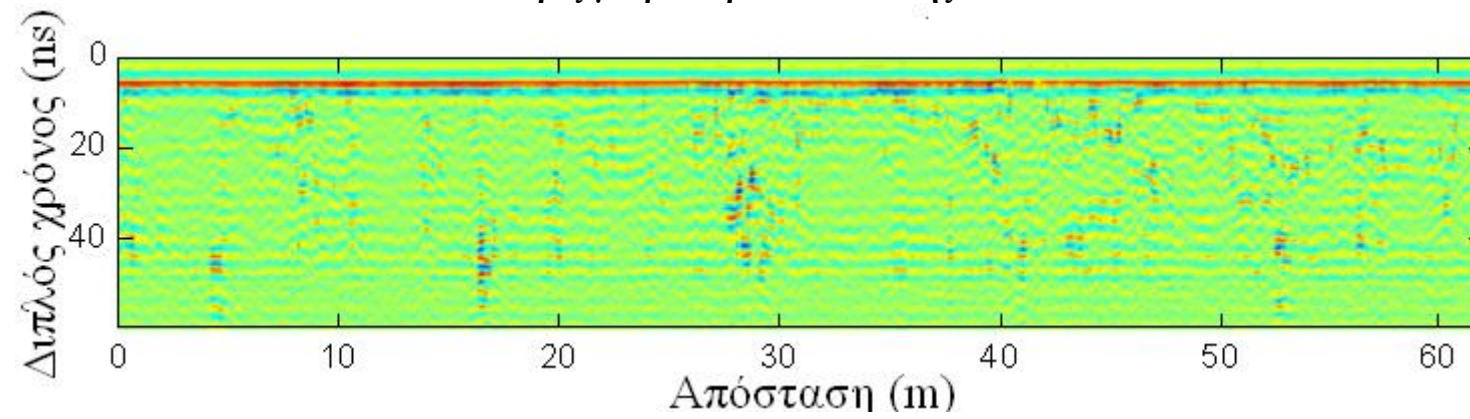




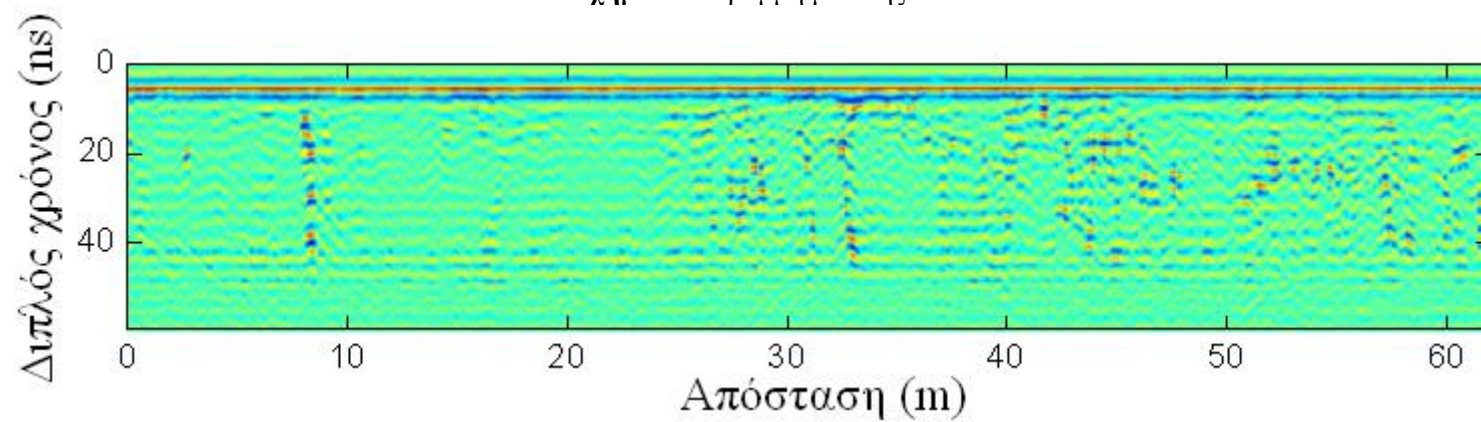


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

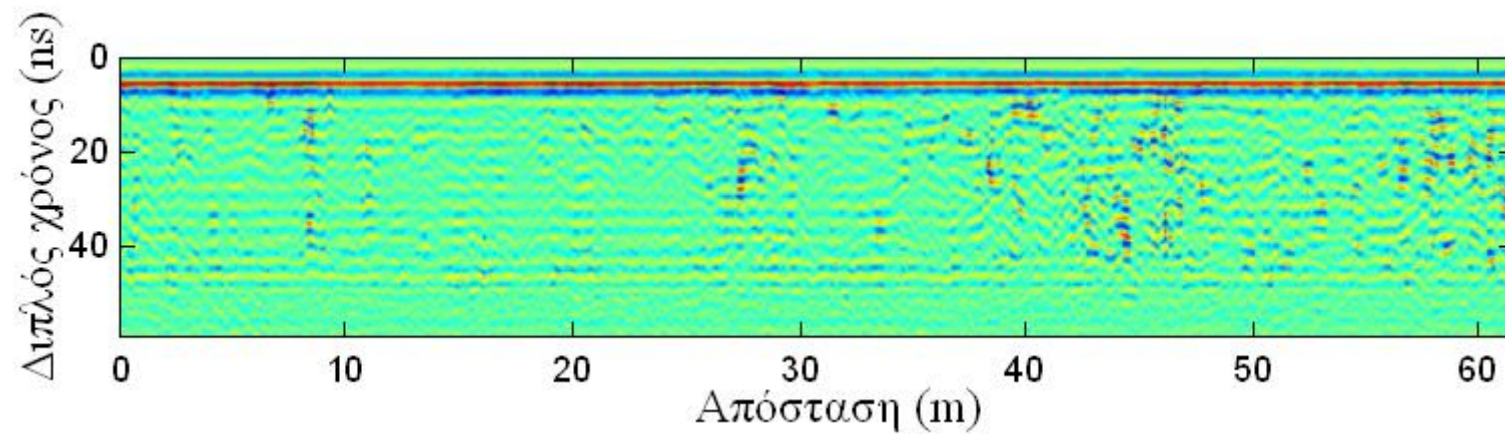
Κάνναβος γεωραντάρ Κ2 διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ



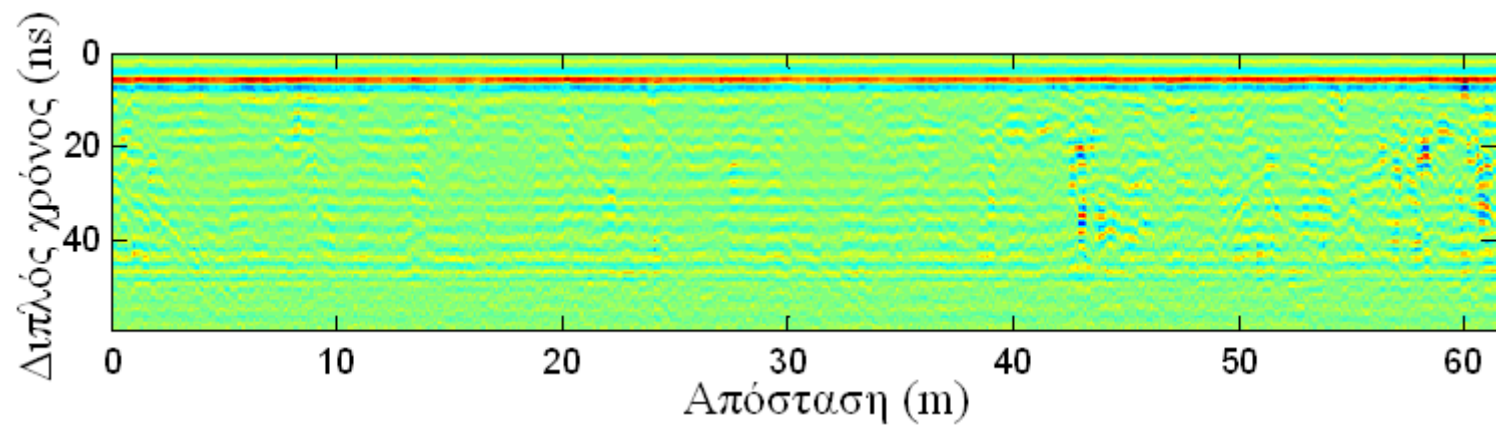
Σχήμα Β1: Γραμμή μελέτης f01.



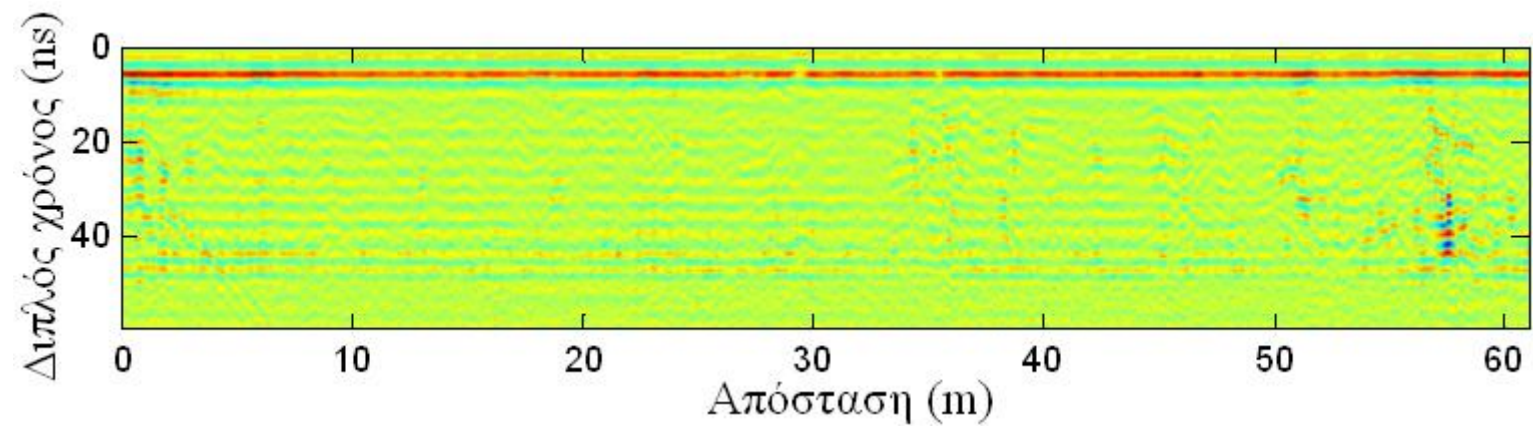
Σχήμα Β2: Γραμμή μελέτης f02.



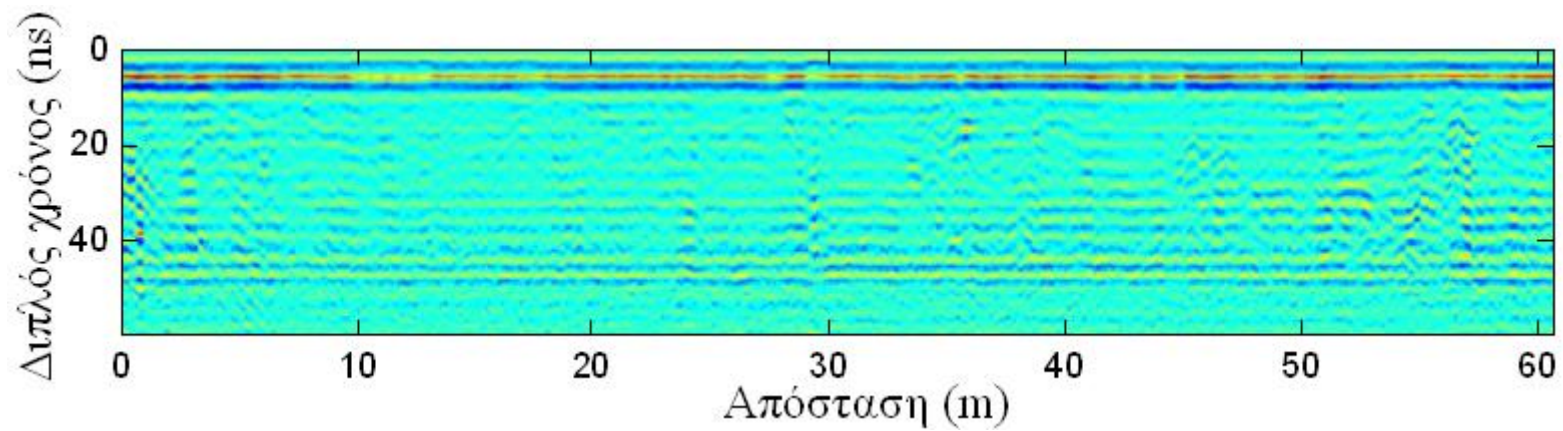
Σχήμα Β3: Γραμμή μελέτης f03.



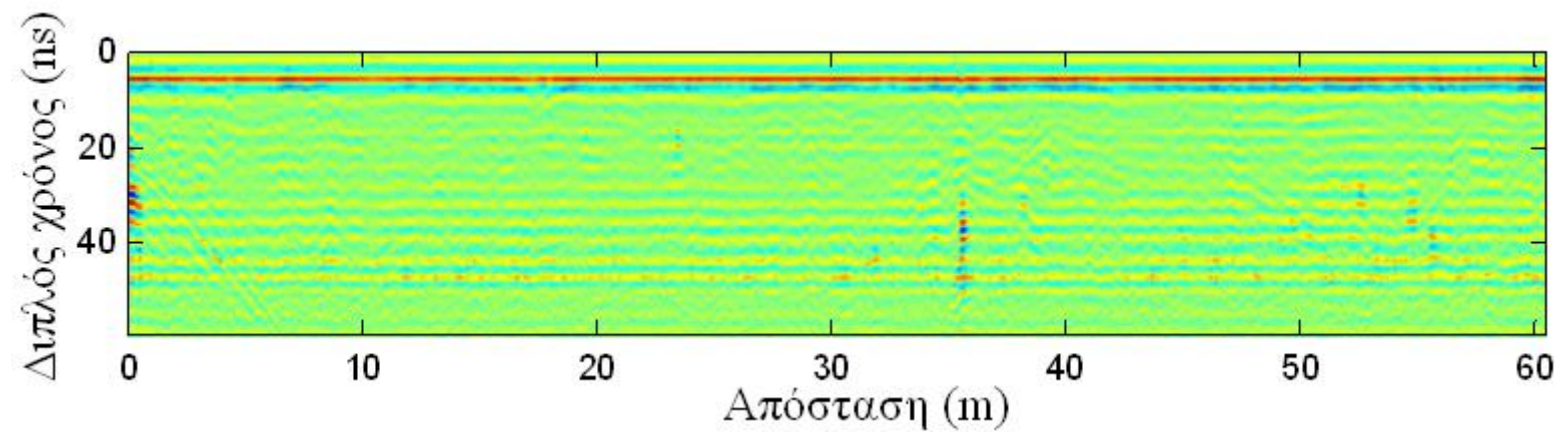
Σχήμα Β4: Γραμμή μελέτης f04.



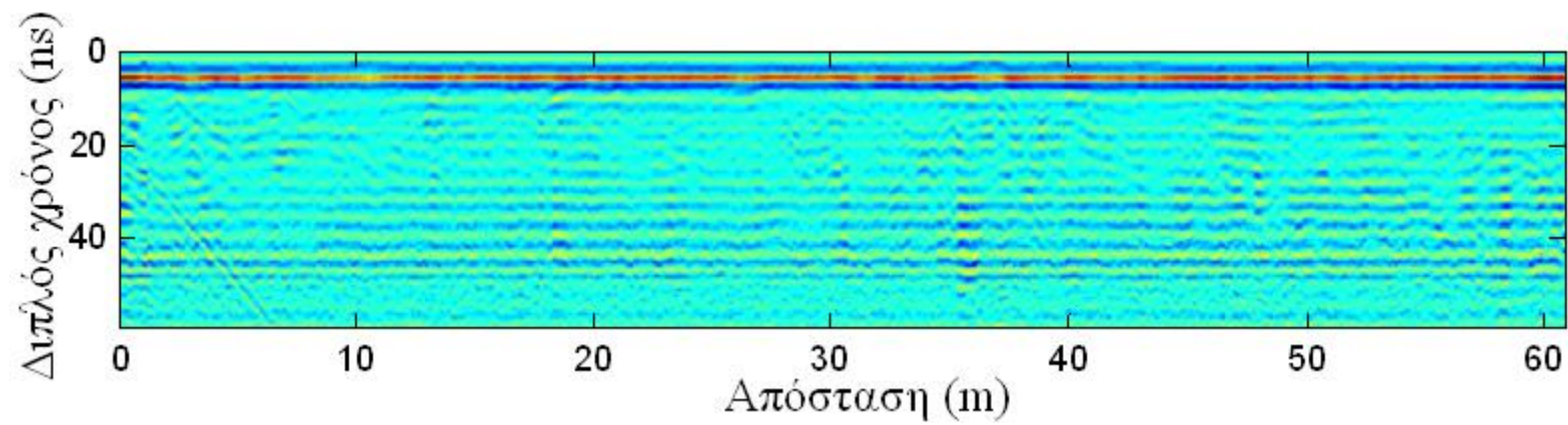
Σχήμα B5: Γραμμή μελέτης f05.



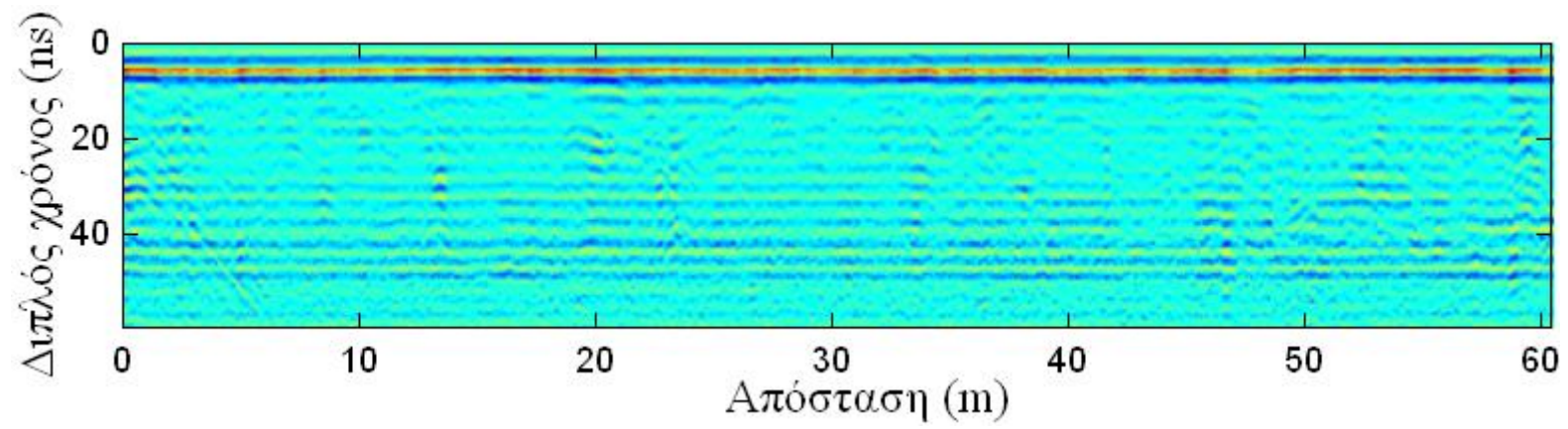
Σχήμα B6: Γραμμή μελέτης f06.



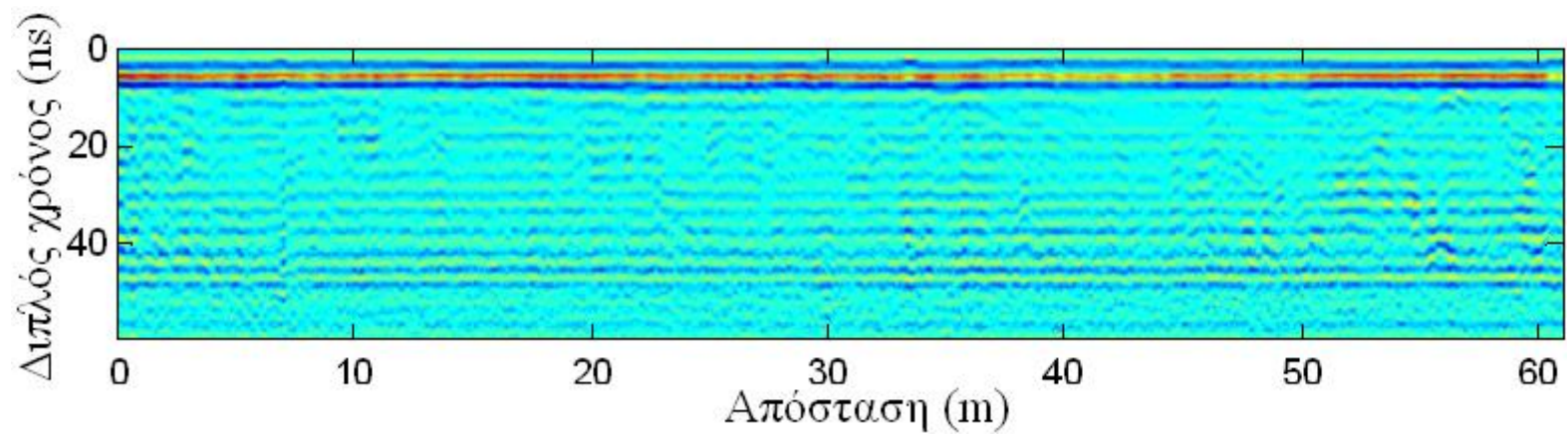
Σχήμα Β7: Γραμμή μελέτης f07.



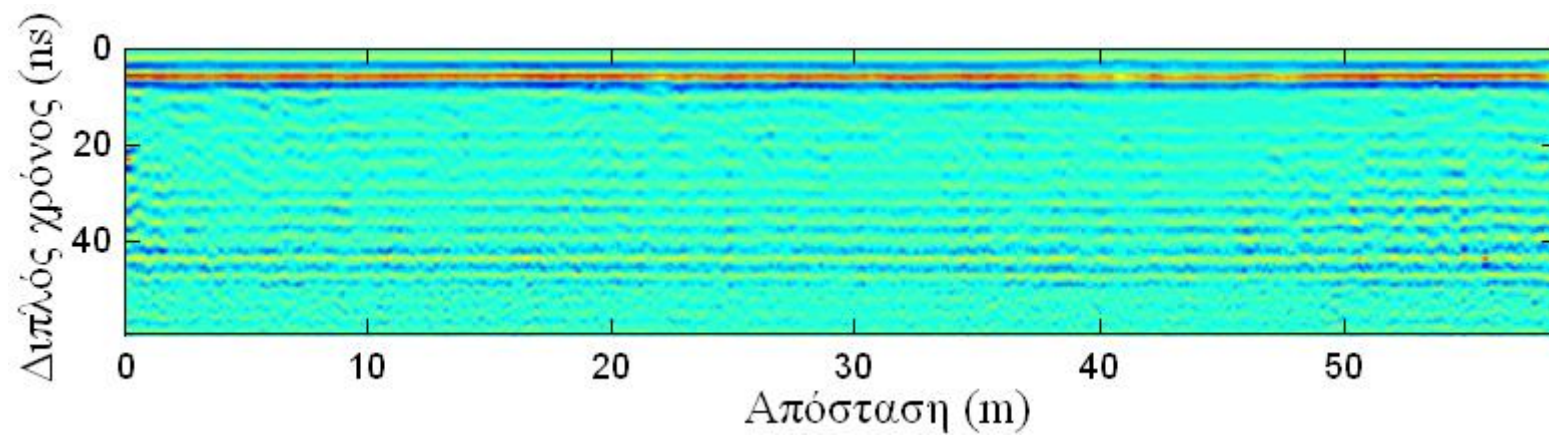
Σχήμα Β8: Γραμμή μελέτης f08.



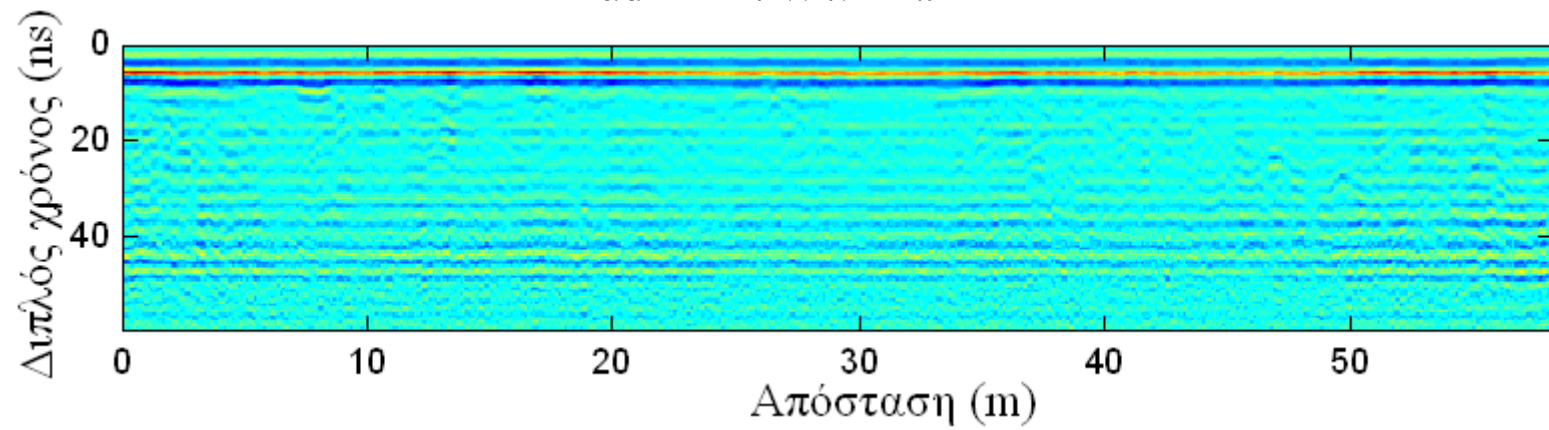
Σχήμα B9: Γραμμή μελέτης f09.



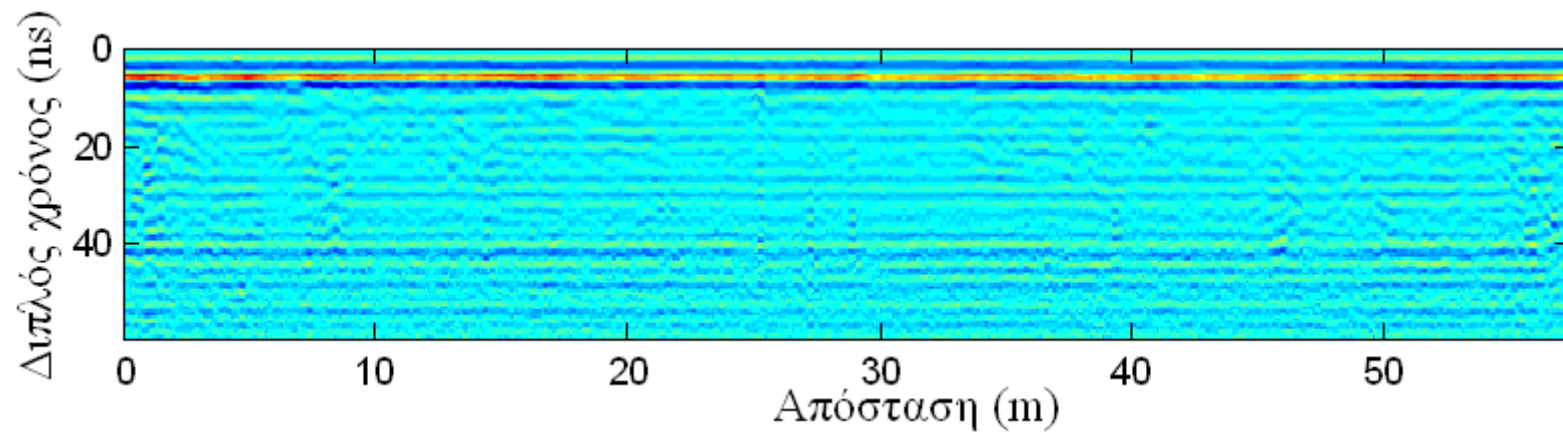
Σχήμα B10: Γραμμή μελέτης f10.



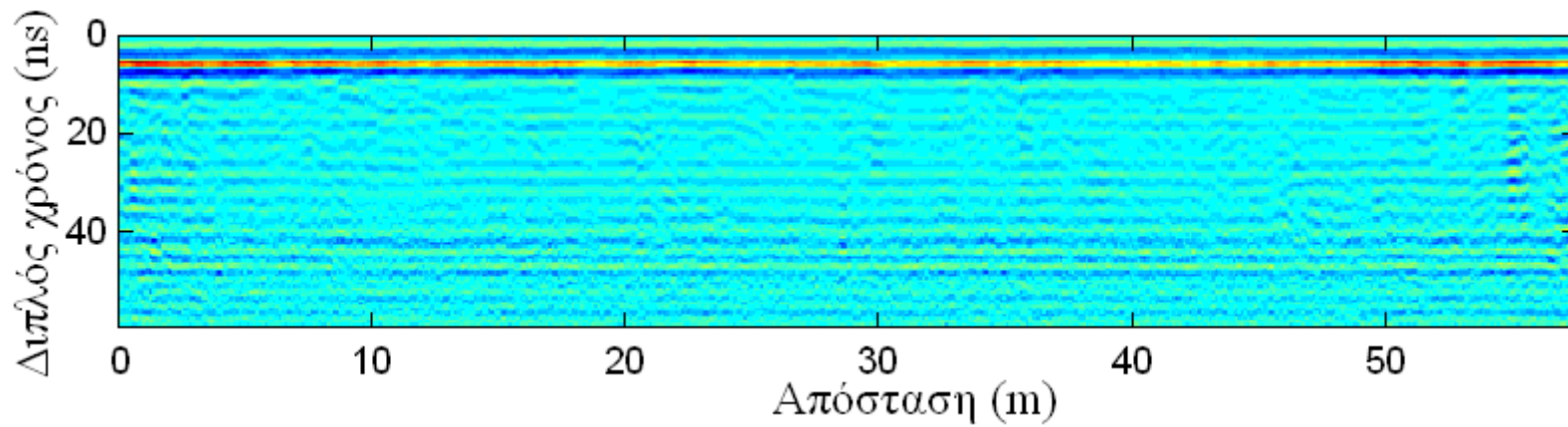
Σχήμα B11: Γραμμή μελέτης f11.



Σχήμα B12: Γραμμή μελέτης f12.



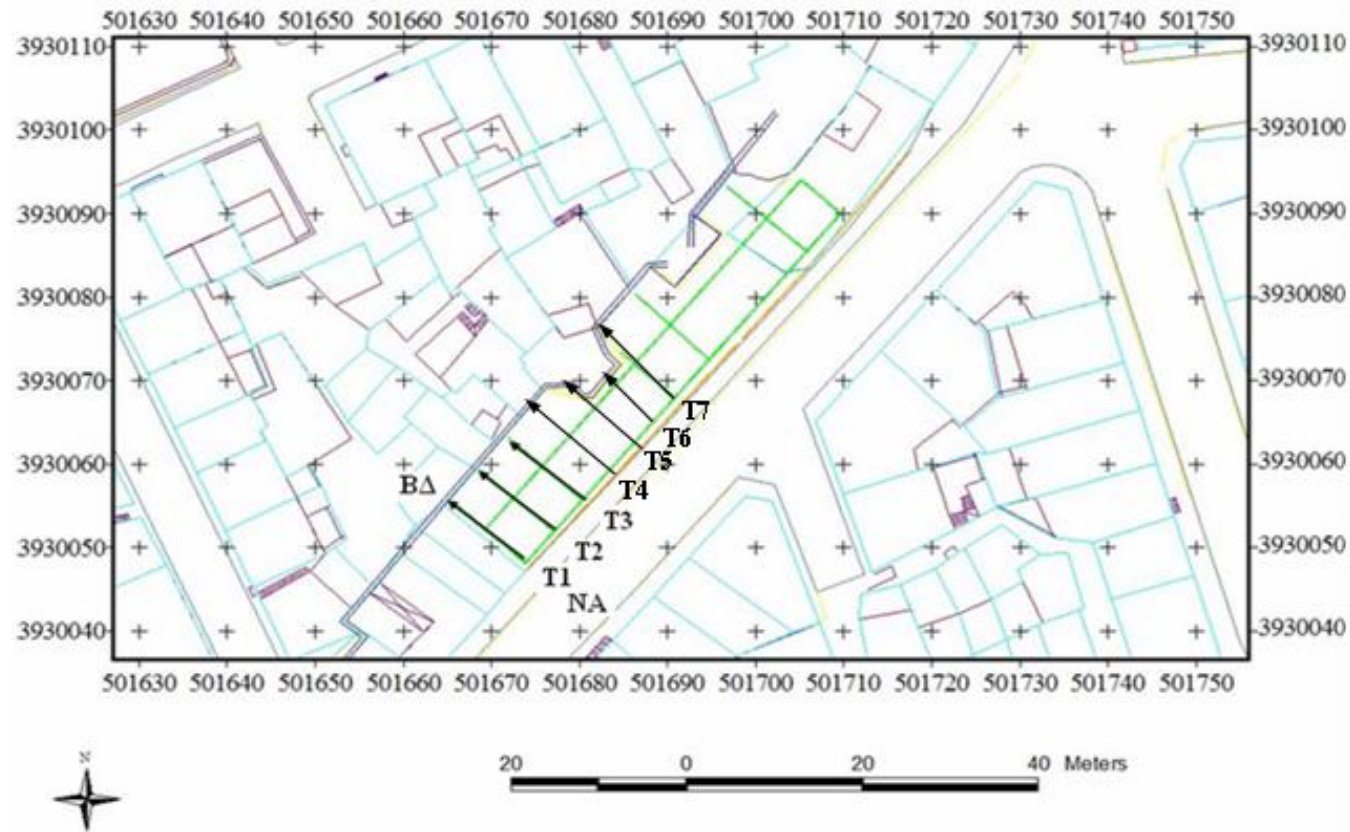
Σχήμα B13: Γραμμή μελέτης f13.

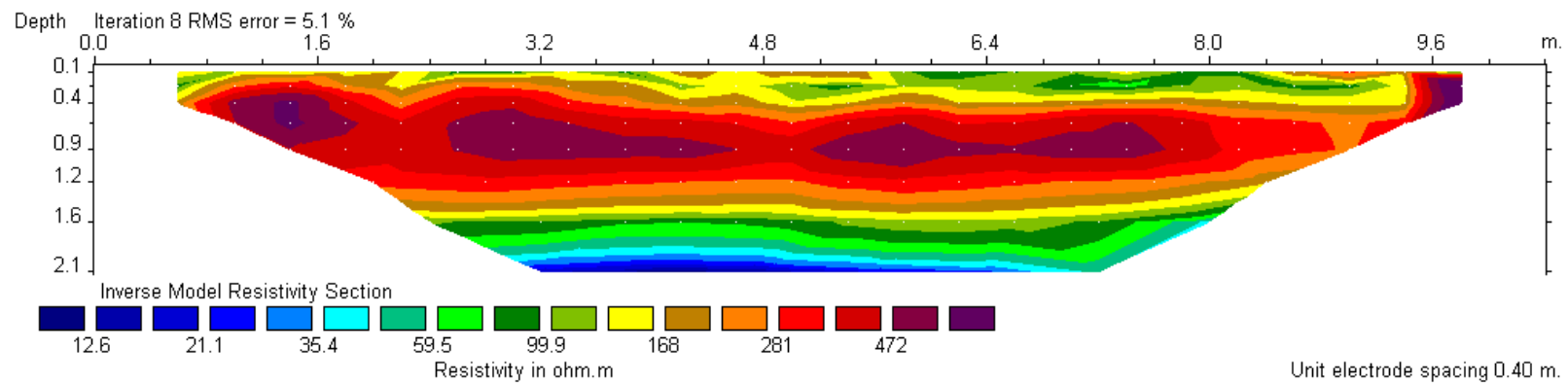


Σχήμα B14: Γραμμή μελέτης f14.

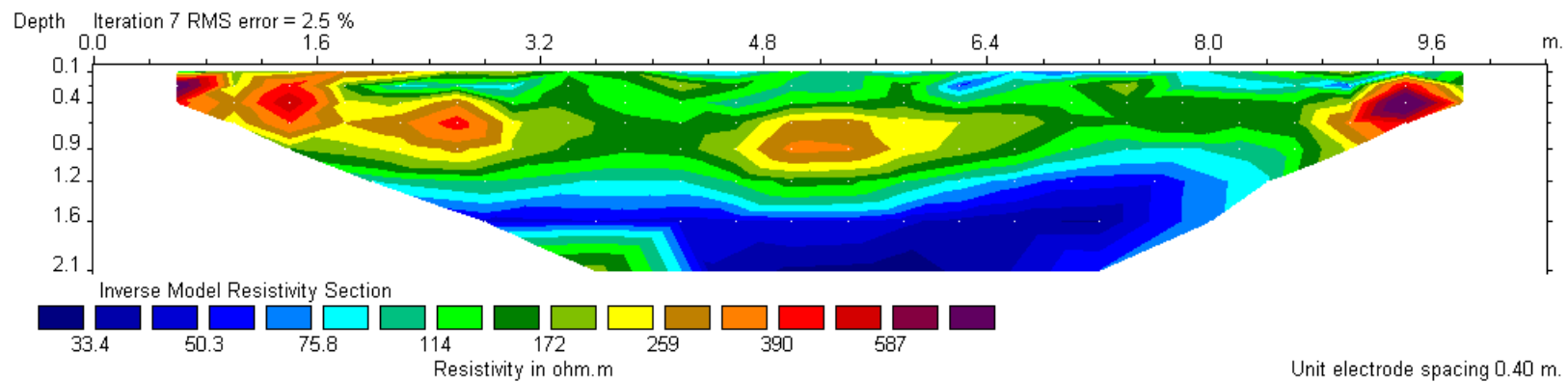
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Κάνναβος ηλεκτρικής τομογραφίας διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ

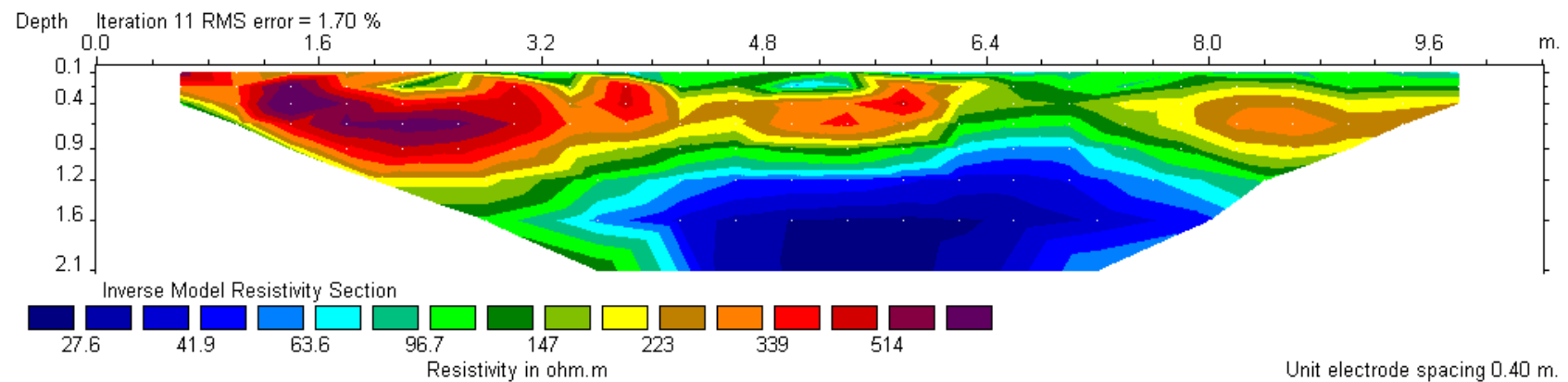




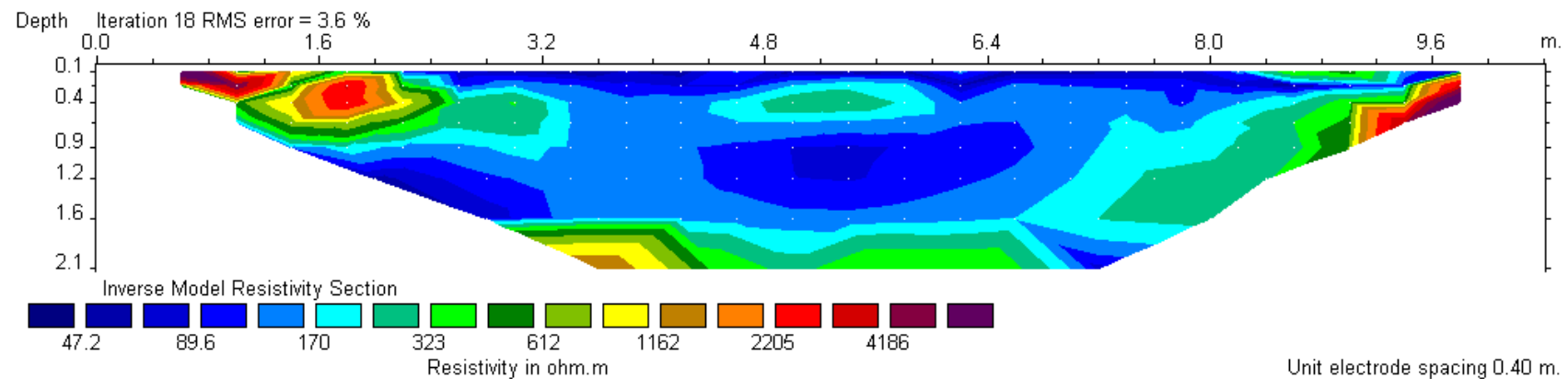
Σχήμα Γ1: Γραμμή μελέτης T1 (0 m).



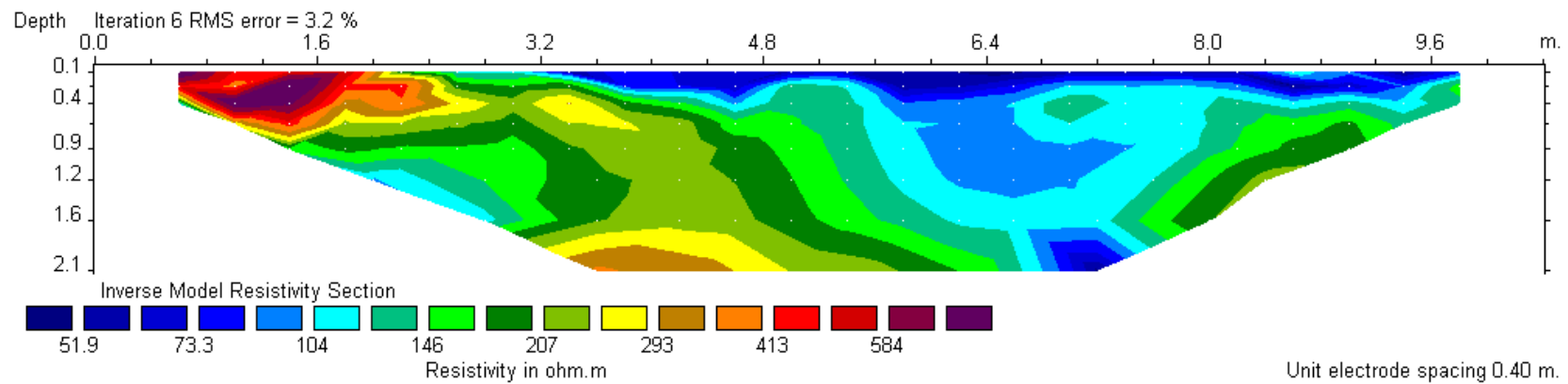
Σχήμα Γ2: Γραμμή μελέτης T2 (5 m).



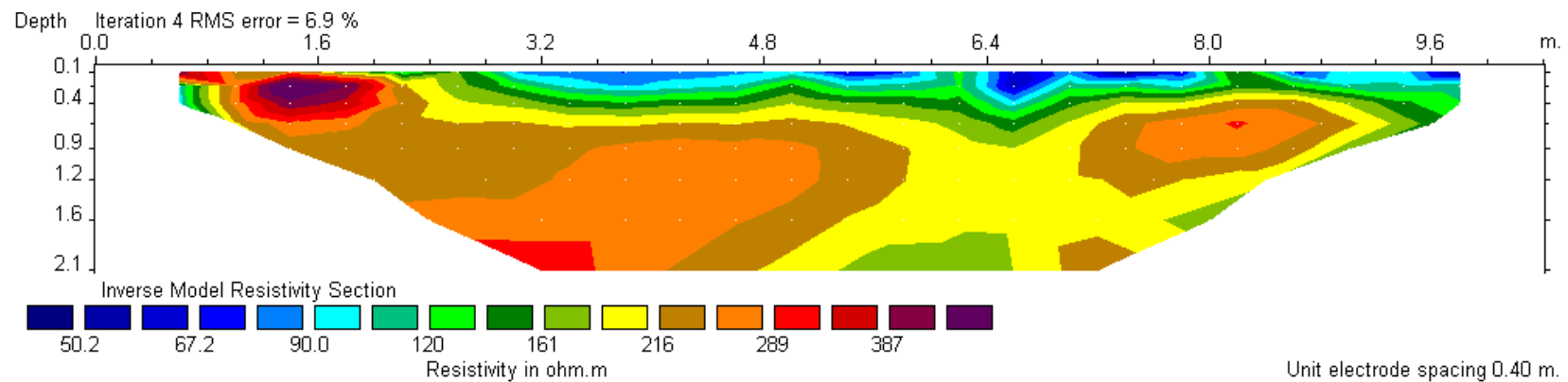
Σχήμα Γ3: Γραμμή μελέτης T3 (10 m).



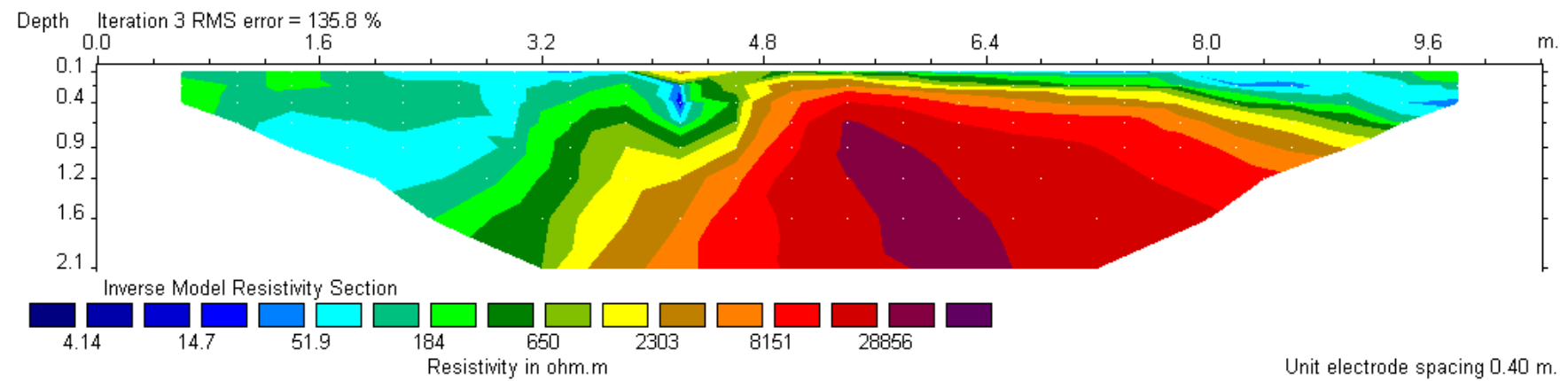
Σχήμα Γ4: Γραμμή μελέτης T4 (15 m).



Σχήμα Γ5: Γραμμή μελέτης T5 (20 m).



Σχήμα Γ6: Γραμμή μελέτης T6 (25 m).



Σχήμα Γ7: Γραμμή μελέτης T7 (30 m).