

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

*Γεωφυσική έρευνα με την μέθοδο του γεωραντάρ στο Φρούριο Κούλε στο
Ηράκλειο Κρήτης*



Διπλωματική εργασία
Γαραντζιώτη Παρασκευή

Εξεταστική Επιτροπή

Βαφείδης Αντώνιος, Καθηγητής (επιβλέπων)

Σουπιός Παντελής, Καθηγητής (ΤΕΙ Κρήτης)

Σπανουδάκης Νικόλαος, Εργαστηριακός Διδάσκων

Χανιά

Φεβρουάριος 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα με τη μέθοδο γεωραντάρ στο χώρο του φρουρίου Κούλε στο Ηρακλείο Κρήτης. Συγκεκριμένα η έρευνα στηρίχτηκε στο φαινόμενο της περίθλασης και την λειτουργία της μεθόδου του γεωραντάρ με χρήση του προγράμματος `matgpr`.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων της παραπάνω διαδικασίας και την εκτίμηση της διάβρωσης του μνημείου.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την οικονομική και ηθική υποστήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια καθώς επίσης και στους εργαστηριακούς διδάσκοντες κ. Σπανουδάκη Νικόλαο και Οικονόμου Νικόλαο, για τη βοήθειά τους στην επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ.

Επίσης θα ήθελα εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Βαφείδη για την καθοδήγηση και τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της πραγματοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της επιτροπής που δέχτηκαν να εξετάσουν την παρούσα εργασία.

Στη μνήμη
του αγαπημένου μου
παππού Κωνσταντίνου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αναφέρεται στη γεωφυσική έρευνα με την μέθοδο του γεωραντάρ στο φρούριο Κούλε, στο Ηράκλειο Κρήτης.

Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην οροφή, στους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους του κτιρίου με το γεωραντάρ με κεραίες των 400MHz και επεξεργασία των δεδομένων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Η επεξεργασία των μετρήσεων, στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα `matgpr` το οποίο δουλεύει σαν εργαλειοθήκη του MATLAB. Η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων περιλαμβάνει εφαρμογή φίλτρων, ενίσχυσης και εξομάλυνσης των δεδομένων με στόχο την καλύτερη ερμηνεία τους.

Για την καλύτερη ερμηνεία των δεδομένων και την ανάλυση ταχυτήτων δημιουργήθηκαν συνθετικά δεδομένα για την γραμμή F006, που διασκοπήθηκε στο πάτωμα του κτιρίου. Κατά την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο με καμάρες.

Από την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ και τη μελέτη των συνθετικών δεδομένων που δημιουργήθηκαν και παρουσιάζονται, συμπεραίνεται η ύπαρξη θολωτών δομών κάτω από το δάπεδο στο ισόγειο του μνημείου, ενώ στους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους, καθώς και την ταράτσα του μνημείου, παρατηρούνται εξασθετισμένες καταγραφές οι οποίες αποδίδονται στην αυξημένη υγρασία.

Διαπιστώνεται επίσης οι θολωτές δομές κάτω από το κτίριο, σε αντιστοιχία με τις θολωτές δομές που εμφανίζονται στον εσωτερικό του χώρο, λειτουργούσαν και ως στοές υπόγειας επικοινωνίας της θάλασσας από τα βόρεια προς το εσωτερικό του λιμανιού.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	1
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	1
Εισαγωγή.....	1
Σκοπός	1
1.1 Ιστορία του αρχαιολογικού φρουρίου Κούλε.....	1
1.2 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ	5
1.3 Ταχύτητα διάδοσης.....	5
1.4 Υπολογισμός βάθους ανακλαστικής επιφάνειας.....	5
1.5 Βιβλιογραφική έρευνα για εφαρμογή του γεωραντάρ στην αρχαιομετρία	6
1.6 Γενικές χρήσεις γεωραντάρ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	11
ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	11
Εισαγωγή.....	11
2.1 Σχεδιασμός διασκόπησης	11
2.2 Επεξεργασία δεδομένων	14
Διόρθωση των χρόνων πρώτων αφίξεων	14
Φίλτρο αποκοπής σήματος υποβάθρου (background removing filter).....	16
Ενίσχυση σήματος.....	17
2.3 Παράθυρα ή μάσκες.....	18
2.4 Περίθλαση.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	22
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	22
Εισαγωγή.....	22
3.1 Πραγματικά δεδομένα γεωραντάρ	22
3.2 Βήματα επεξεργασίας.....	23
3.3 Τομές	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	35
ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ	
ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	35
Εισαγωγή.....	35
4.1 Συνθετικά δεδομένα.....	35

4.2 Μοντέλο	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	39
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	39
5.1 Συμπεράσματα	39
5.2 Προτάσεις	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:	41
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:	45

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα	Τίτλος	Σελίδες
1.1.	Φτερωτός λέων της Βενετίας	2
1.2.	Φρούριο Κούλε	3
1.3.	Φρούριο Κούλε	3
1.4.	Φρούριο Κούλε-Ταράτσα	4
1.5.	Φρούριο Κούλε	4
2.1.	Δυνατοί προσανατολισμοί κεραίων	14
2.2.	Τομή F006 χωρίς φίλτρο.	15
2.3.	Τομή F006 με εφαρμογή της διόρθωσης πρώτων αφίξεων time-zero	15
2.4.	Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου dewow.	16
2.5.	Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου Removal Global Background	16
2.6.	Ενίσχυση SEC	17
2.7.	Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου SEC	17
2.8.	Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου mean filter	18
2.9.	Περίθλαση από τετραγωνικό άνοιγμα	20
2.10.	Περίθλαση από δύο παράλληλες σχισμές	20
2.11.	Περίθλαση από μία λεπτή σχισμή	20
3.1.α.	Κάτοψη του ισογείου του μνημείου Κούλε. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης	22
3.1.β	Κάτοψη της ταράτσας του μνημείου Κούλε. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης	23
3.2.	Η τομή γεωραντάρ F002	24
3.3.	Η τομή γεωραντάρ F019	25
3.4.	Η τομή γεωραντάρ F006	26
3.5.	Η τομή γεωραντάρ F009	26
3.6.	Η τομή γεωραντάρ F010	27
3.7.	Η τομή γεωραντάρ F055	27
3.8.	Η τομή γεωραντάρ F011	28
3.9.	Η τομή γεωραντάρ F005	29
3.10.	Η τομή γεωραντάρ F044	29
3.11.	Η τομή γεωραντάρ F045	30
3.12.	Η τομή γεωραντάρ F048	30
3.13.	Η τομή γεωραντάρ F032	31
3.14.	Η τομή γεωραντάρ F035	32
3.15.	Η τομή γεωραντάρ F029	33
3.16.	Η τομή γεωραντάρ F049	34
4.1.	Η τομή γεωραντάρ F006	36
4.2.	Ομοίωμα καμάρας στο πρόγραμμα matgpr	37
4.3.	Συνθετική τομή γεωραντάρ με εφαρμογή του Split-Step 2D Modelling	38
4.4.	Συνθετική τομή γεωραντάρ με εφαρμογή του FDTD 2D Modelling	38
4.5.	Η τομή γεωραντάρ F011	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Εισαγωγή

Η εφαρμογή των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην απεικόνιση του υπεδάφους, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει σημαντική τεχνολογική άνθιση. Το χαμηλό κόστος που τις χαρακτηρίζει και ταυτόχρονα το μεγάλο ενδιαφέρον των εταιρειών για μελέτη των υπεδάφειων γεωλογικών δομών, κατέστησαν τις γεωφυσικές έρευνες διασκόπησης αναπόσπαστο τμήμα μεγάλων ερευνητικών προγραμμάτων.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι εφαρμόζονται σε ποικίλα περιβάλλοντα και ανάλογα με το στόχο της έρευνας επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος ή ο καλύτερος συνδυασμός μεθόδων. Με το συνδυασμό διασκοπήσεων επιτυγχάνεται η λήψη περισσότερων πληροφοριών για το υπό μελέτη γεωλογικό υπέδαφος.

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση ανωμαλιών που σχετίζονται με συγκέντρωση υγρασίας, την λιθοδομή και καταγραφές οι οποίες σχετίζονται με δομές στη βάση του φρουρίου Κούλε στο Ηράκλειο με γεωφυσικές μεθόδους. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στην επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ.

1.1 Ιστορία του αρχαιολογικού φρουρίου Κούλε

Κούλες, Καστέλλο ντελ Μόλο (Castello del Molo), Ρόκκα α Μάρε (Rocca a Mare), Κάστρο της θάλασσας (Castello a Mare), Κάστρο της Κάντια ή πρώην Χάνδακα (Castel di Candia) λέγεται το θαλάσσιο φρούριο που κτίστηκε από τους Ενετούς στο Ηράκλειο. Βρίσκεται στην είσοδο του ενετικού λιμανιού, ώστε να προστατεύει το λιμάνι του Ηρακλείου και μαζί με το Κάστρο του Παλαιοκάστρου τον κόλπο της Αμμουδάρας από τις εισβολές και τις αποβάσεις άλλων κατακτητών.

Αρχικά οι Ενετοί κατασκεύασαν ένα πύργο, αλλά κρίθηκε ανεπαρκής, ενώ οι ζημιές από το σεισμό του 1303 δεν επισκευάστηκαν επαρκώς, με αποτέλεσμα να κατεδαφιστεί το 1523 και στην θέση του σχεδιάστηκε ένας μεγαλύτερος πύργος. Το καινούργιο οικοδόμημα αποκτά τη τελική του μορφή ανάμεσα στο 1523-1540. Οι εργασίες

διακόπτονταν το χειμώνα λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών. Στη συνέχεια δέχθηκε αλλεπάλληλες επισκευές λόγω φθοράς από τη δράση των κυμάτων.

Οι συνεχείς επισκευές συνέχισαν και μετά την κατάληψη του Χάνδακα από τους Τούρκους το 1669. Το 1719 τμήμα της βορειοδυτικής πλευράς του Κούλε κατέρρευσε, αλλά ξαναεπισκευάστηκε.

Παράλληλα λειτουργούσε ως φυλακή. Το 2000 έγιναν μέτρα υποστήριξης της νότιας πλευράς επειδή είχε σπηλαιωθεί από τη θάλασσα.



Σχήμα 1.1. Φτερωτός λέων της Βενετίας.
(<https://el.wikipedia.org/wiki/Κούλες>)

Το φρούριο κατασκευάστηκε με ογκώδεις δόμους που μεταφέρθηκαν από τα Φρασκιά και τη Ντία. Είναι διώροφο και κάλυπτε περίπου 3.600 τ.μ. Στο ισόγειο χωρίζεται σε 26 διαμερίσματα που χρησίμευαν κυρίως ως αποθήκες τροφίμων και πολεμοφοδίων, αλλά και ως κελιά φυλακής. Στον όροφο υπήρχαν δωμάτια για τους αξιωματικούς μαζί και φούρνος, μύλος και μια μικρή εκκλησία.

Στις τρεις πλευρές προς τη θάλασσα άνοιγαν θυρίδες για τα κανόνια που προστάτευαν το λιμάνι. Το 1630 υπήρχαν 18 κανόνια στο ισόγειο και 25 στον όροφο. Στη ΒΑ, Δ και Ν πλευρά εξωτερικά ήταν εντοιχισμένες μαρμαρίνες ανάγλυφες παραστάσεις του φτερωτού λέοντα της Βενετίας που σήμερα σώζονται ακρωτηριασμένες.

Κατά την περίοδο της αιγυπτιακής κυριαρχίας στην Κρήτη (1830-1840), κατασκευάστηκε πάνω στη βορειοανατολική γωνία του Κούλε ένας φάρος. Το 1930 προστίθενται στο φάρο τσιμεντένια υποστηλώματα. Ο φάρος καταστράφηκε στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, αλλά επανακατασκευάστηκε και συνέχισε να λειτουργεί μέχρι το 1960, όταν ανακαινίστηκε και αφαιρέθηκαν τα τσιμεντένια υποστηλώματα.

Σήμερα ο Κούλες είναι επισκέψιμος, ενώ χρησιμοποιείται και για πολιτιστικές εκδηλώσεις. Ανά περιόδους εκτελούνται εργασίες αναστήλωσης και το φρούριο μένει ανοιχτό για το κοινό.



Σχήμα 1.2. Φρούριο Κούλε. (www.kastra.eu/castlegr.php?kastro=koules)



Σχήμα 1.3. Φρούριο Κούλε. (<https://www.heraklion.gr/ourplace/koule/koule.html>)



Σχήμα 1.4. Φρούριο Κούλε – Ταράτσα.
(https://iraklioblog.blogspot.gr/2016/08/blog-post_193.html)



Σχήμα 1.5. Φρούριο Κούλε.
(<http://www.kastra.eu/castlegr.php?kastro=koules>)

1.2 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Το γεωραντάρ χρησιμοποιεί υψηλής συχνότητας (10 - 10000 MHz), μικρής διάρκειας, ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς για αποκάλυψη πληροφοριών στο υπέδαφος. Το ηλεκτρομαγνητικό σήμα (παλμός) παράγεται από έναν πομπό και διοχετεύεται στο υπέδαφος με ταχύτητα που εξαρτάται κυρίως από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού. Κατά την διάδοση και όταν ο παλμός συναντήσει διεπιφάνεια υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, μέρος της ενέργειας του παλμού ανακλάται ή διαχέεται πίσω στην επιφάνεια (όπου και ανιχνεύεται και καταγράφεται από έναν δέκτη στην επιφάνεια του εδάφους) ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διοχετεύεται σε βαθύτερα επίπεδα .

1.3 Ταχύτητα διάδοσης

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν σε ένα υλικό με καθορισμένη ταχύτητα που εξαρτάται από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού. Έτσι ένας παλμός που διαδίδεται μέσα από δύο διαφορετικά υλικά θα φτάσει στον ανιχνευτή σε διαφορετικούς χρόνους. Η ταχύτητα διάδοσης του παλμού είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού:

$$v = c / (\sqrt{\epsilon_r})$$

όπου v , η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, c , η ταχύτητα του φωτός και ϵ_r , η σχετική διαπερατότητα (σχετική διηλεκτρική σταθερά) του υλικού.

1.4 Υπολογισμός βάθους ανακλαστικής επιφάνειας

Στα περισσότερα γεωλογικά υλικά η αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά (σχετική διαπερατότητα) είναι οι ιδιότητες που κυρίως επηρεάζουν τον παλμό και τη διάδοσή του. Οι μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας είναι συνήθως απειροελάχιστες και ως εκ τούτου αμελητέες. Έτσι το βάθος στο οποίο βρίσκεται η ανακλαστική επιφάνεια (ανακλαστήρας) υπολογίζεται με βάση τον χρόνο διπλής διαδρομής.

$$d = v \cdot t / 2$$

όπου d , το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο ανακλαστήρας σε σχέση με την επιφάνεια όπου και βρίσκεται ο πομπός του παλμού, v , η ταχύτητα διάδοσης του παλμού στο υλικό και t , ο χρόνος διπλής διαδρομής του παλμού (πομπός \rightarrow ανακλαστήρας \rightarrow δέκτης).

1.5 Βιβλιογραφική έρευνα για εφαρμογή του γεωραντάρ στην αρχαιομετρία

Διεθνής έρευνα

Πολλοί επιστήμονες έχουν ασχοληθεί με την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό θαμμένων ερειπίων ,όπως για παράδειγμα τοίχους τάφων και λοιπά, τον έλεγχο επικυνδυνότητας ιστορικών κτηρίων,αστοχίες και ρωγμές.

Πιο συγκεκριμένα , οι Gracia et al (2000), πραγματοποίησαν έρευνα για την επιβεβαίωση της θέσης αρχαίων δομών κάτω από καθεδρικό ναό στην Ισπανία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνάς τους, βρέθηκαν κρύπτες ,οστεοφυλάκια ,τάφοι και η θέση αρχαίων τοιχών που προυπήρχαν της τελικής επέκτασης του καθεδρικού ναού. Επίσης εντοπίστηκαν τρία διαφορετικά πολιτιστικά επίπεδα δόμησης της Ρωμαϊκής, Αραβικής και Μεσαιωνικής εποχής.

Οι Orlando και Slob (2008) , χρησιμοποίησαν γεωραντάρ με διπολικές κεραίες των 2 GHz για τον εντοπισμό και παρακολούθηση ρωγμών σε ιστορικό κτίριο, λόγω παρακείμενης κατολίσθησης. Ανιχνεύθηκαν δύο είδη ανωμαλιών στα δεδομένα που οφείλονται σε στοιχεία της δόμησης , μεταλλικά πλέγματα καθώς και υπάρχουσες ρωγμές. Οι ρωγμές στα δεδομένα του γεωραντάρ συμφωνούν με τις επιτόπιες παρατηρήσεις των ρωγμών στους τοίχους του κτιρίου. Παρόλα αυτά, η παρακολούθηση των ρωγμών δεν κατέστη δυνατή λόγω της σύζευξης κεραίων.

Ο Bevan (1991) πραγματοποίησε έρευνα με χρήση γεωραντάρ σε παλαιούς τάφους, σε εννέα διαφορετικές περιοχές της Αμερικής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι τάφοι δεν είναι παλαιότεροι του 17^{ου} αιώνα. Παρόλα αυτά οι μαγνητικές και ηλεκτρικές διασκοπίσεις που έγιναν, δίνουν επιτυχή και μή αποτελέσματα .

Ο Conyers (2004), διεξήγαγε έρευνα μεταξύ δύο περιοχών αρχαιολογικών δομών στο Ιλινόις και την Ουάσιγκτον, σε σχέση με τους τύπους εδάφους και την περιεκτικότητά

τους σε υγρασία. Οι χάρτες του πλάτους των HM κυμάτων που παράγονται από τα δεδομένα που συλλέγονται τόσο σε αμμώδες όσο και σε αργιλώδες έδαφος κατά τη διάρκεια υγρών και ξηρών συνθηκών εδάφους, υποδεικνύουν ότι ορισμένοι τύποι θαμμένων υπολειμμάτων σε αυτά τα εδάφη είναι ορατοί, αλλά όχι πάντα. Επίσης οι εργαστηριακές μετρήσεις των δειγμάτων εδάφους από αυτές τις θέσεις δείχνουν πόσο ευαίσθητοι είναι πολλοί τύποι υλικών σε μικρές αλλαγές υγρασίας. Αυτά τα ευρήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οδηγοί για την αποτελεσματικότητα του GPR σε διαφορετικά εδάφη και συνθήκες υγρασίας.

Οι Goodman et al (2006), έκαναν μια ανάλυση δεδομένων γεωραντάρ με οριζόντιες τομές. Για την ερμηνεία των δεδομένων σε κάθε τομή επέλεξαν την ισχυρότερη ανάκλαση σε σχέση με τις ρηχότερες τομές. Διαπίστωσαν ότι τα αποτελέσματα ήταν καλύτερα σε σχέση με τον κλασσικό τρόπο εξαγωγής οριζόντιων τομών.

Οι Gracia et al (2008), πραγματοποίησαν έρευνα γεωραντάρ για την μελέτη αποκατάστασης του ρωμαϊκού θεάτρου Sagunto της Βαλένθια στην Ισπανία. Η έρευνα αναφέρεται στις πιθανές επιπτώσεις των πολλών αναδιαμορφώσεων που υπέστη το μνημείο παλαιότερα. Έγιναν επιτόπιες μετρήσεις ταχύτητας των HM κυμάτων, στα τοιχώματα στα οποία υπήρχαν μεταλλικές προσθήκες, ώστε να προσδιοριστεί το ακριβές βάθος αντικειμένων και να γίνει σύγκριση με παλαιότερες μετρήσεις. Από τα αποτελέσματα προκύπτουν σημαντικές διακυμάνσεις στην επιφάνεια των ρωμαϊκών κερκίδων λόγω διάβρωσης από το νερό.

Οι Leucci και Nergi (2006), χρησιμοποίησαν την τεχνική (GPR) για τη διερεύνηση της υπεδάφους σε αστική περιοχή στη Mesagne της Ιταλίας, με σκοπό την χαρτογράφηση των αρχαιολογικών δομών του εδάφους. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δυο επιλεγμένες περιοχές. Η επιτόπια απεικόνιση της χωρικής κατανομής των ισχυρών ανακλάσεων, όπως η ανωμαλία που ερμηνεύεται ως ένα παλαιό υπόγειο, καθιστά τις τεχνικές 3D απεικόνισης πολύ ελκυστικές στις αρχαιολογικές εφαρμογές με GPR.

Οι Corcoran et al (1998), πραγματοποίησαν γεωφυσική έρευνα στο Hammond Street House στην πανεπιστημιούπολη του Boston College στο Chestnut Hill της Μασαχουσέτης. Η διεξαγωγή της έρευνας έγινε για την υποστήριξη του

χρονοδιαγράμματος αρχαιολογικής έρευνας, πριν την κατασκευή ενός νέου κτιρίου. Από την εμφάνιση μικρών κοιλοτήτων, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά τον 19^ο αιώνα στην περιοχή υπήρχαν δομές, όπως οικία, αχυρώνας, σιδηρουργείο καθώς και σωληνώσεις, δεξαμενές και τείχη.

Έρευνα στην Ελλάδα

Οι Τσόκας et al (2012), πραγματοποίησαν γεωφυσική διασκόπηση στα Ακοβιτικά του δήμου Καλαμάτας, πλησίον των αποκαλυμμένων ερειπίων του πρωτογεωμετρικού ναού του Ποσειδώνα. Ο στόχος της γεωφυσικής έρευνας ήταν η ανίχνευση θαμμένων αρχαιοτήτων και η κατά το δυνατόν χαρτογράφησή τους. Για την πραγματοποίηση της έρευνας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής χαρτογράφησης και η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας. Κατεγράφησαν αρκετές διαταραχές των γεωφυσικών πεδίων που προφανώς αντανακλούν την ύπαρξη υπεδάφινων δομών, σε κάποιες από τις οποίες πιθανώς να είναι θαμμένα αρχαία αρχιτεκτονικά λείψανα. Η παρέμβαση έγινε χωρίς να επηρεαστεί το παραμικρό στον χώρο, δηλαδή με πλήρως μη καταστροφικό τρόπο.

Οι Τσουρούλα και Μάρκος (2006), πραγματοποίησαν γεωφυσική μελέτη στον αρχαιολογικό χώρο του ιερού του Ποσειδώνα στην ευρύτερη περιοχή της νήσου Πόρος, στην Καλαύρεια. Χρησιμοποιήθηκαν η μαγνητική, ηλεκτρομαγνητική και ηλεκτρική μέθοδος. Από τα αποτελέσματα εντοπίζονται οι κύριες πηγές θορύβου για την χαρτογράφηση στην συγκεκριμένη περιοχή, όπως το επιφανειακό διαταραγμένο στρώμα λόγω άρωσης και καλλιέργειας, τα επιφανειακά διεσπαρμένα μεταλλικά αντικείμενα αλλά και τα θαμμένα, η παρουσία μεταλλικών περιφράξεων και απομακρυσμένων πυλώνων της ΔΕΗ και η παρουσία σωρών απορριμμάτων. Από τη μελέτη των χαρτών στο σύνολό τους προκύπτει παρουσία αρχαιολογικών ευρημάτων σε βάθος μεγαλύτερο του μισού μέτρου.

Έρευνα στην Κρήτη

Το πλεονέκτημα της μεθόδου GPR είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αστικά περιβάλλοντα, όπου άλλες μέθοδοι (για παράδειγμα μαγνητικές και ηλεκτρικές) δεν προτείνονται εξαιτίας του θορύβου που προκαλούν μεταλλικά αντικείμενα και/ή δομές. Ένα παράδειγμα είναι η χαρτογράφηση ενός τούρκικου σχολείου στην παλιά πόλη του

Ρεθύμνου, στην Κρήτη (Papadopoulos et al, 2012). Τα αρχιτεκτονικά απομεινάρια εντοπίστηκαν στις τομές βάθους 30cm κάτω από την επιφάνεια και επεκτάθηκαν μέχρι τα 2,0m.

Εκτεταμένες έρευνες διεξάχθηκαν στην παλιά πόλη των Χανίων, με σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων υπολειμμάτων του Βενετσιάνικου τείχους (Spanoudakis et al.2008). Τα τείχη αυτά καταστράφηκαν μετά από την ίδρυση της ημιαυτόνομης κρητικής πολιτείας με πρωτεύουσα τα Χανιά. Τα τείχη ήταν ανεπαρκή και θεωρήθηκαν από τον κυρίαρχο χριστιανικό πληθυσμό ως σύμβολο τυραννίας. Οι τομές GPR απεικονίζουν τα θαμμένα λείψανα ενός προμαχώνα και μπροστά από την Δημοτική Αγορά, αλλά και ίχνη της πρόσοψης και ένα τμήμα του τοίχου που διασχίζει την αυλή του αθλητικού γυμνασίου, του οποίου η κατεύθυνση συναντά διατηρημένα τμήματα των τοίχων.

Επίσης, μέθοδος GPR εφαρμόστηκε για την χαρτογράφηση αρχαίων θεάτρων. Αρχικά, το GPR χρησιμοποιήθηκε μαζί με την Ηλεκτρική Τομογραφία για να ανακαλύψει εκ νέου το μικρό θέατρο και το Αμφιθέατρο στην αρχαία πόλη Ιεράπυτνα (Ιεράπετρα) στην Κρήτη (Papadopoulos et al., 2012b). Στην περίπτωση του μικρού θεάτρου ισχυρές ανακλάσεις παρουσιάζονται στα δεδομένα GPR, οι οποίες σχετίζονται με ερείπια του θεάτρου. Τα αποτελέσματα που προέρχονται από το Αμφιθέατρο συγκρίθηκαν με ένα παλαιότερο σχέδιο από τον 16ο αιώνα. Οι ισχυρές ανακλάσεις που είναι ορατές στα δεδομένα GPR περιγράφουν μια ημικυκλική περιοχή που συσχετίζεται με την πλατεία του Αμφιθέατρου στη δυτική πλευρά, ενώ στην ανατολική πλευρά μια άλλη ομάδα ισχυρών ανακλαστών φαίνεται να ακολουθεί την ανατολική πλευρά της πλατείας με απόκλιση στον προσανατολισμό.

Μία άλλη εκτεταμένη έρευνα πραγματοποιήθηκε από το 2005 στα αρχαία Άπτερα, στα Χανιά. Τα Άπτερα βρέθηκαν στην γεωμετρική περίοδο τον 8^ο αιώνα (π.Χ), καταλήφθηκαν από τους Ρωμαίους κατά το 1ο και 2ο αι. (μ.Χ.) και εγκαταλείφθηκαν το 365 (μ.Χ.) λόγω καταστροφικού σεισμού. Τα ευρήματα περιλαμβάνουν δεξαμενές, πηγάδια, τάφους (νεκροπόλεως), δημόσια λουτρά, αγάλματα και λοιπά. Η έρευνα GPR περιμετρικά από το μοναστήρι του 12ου μ.Χ. αιώνα, όπου υπήρχε η αρχαία αγορά, απεικονίζει καλά πηγάδια και αγωγούς (Spanoudakis et al 2011).

Μία άλλη πειραματική μελέτη όπου το GPR χρησιμοποιήθηκε μαζί με τεχνικές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, για να χαρτογραφηθεί η περιοχή κοντά στην ανασκαφή

που έφερε στο φως τα απολιθώματα ενός ελέφαντα ο οποίος έφτανε τα 4,5 μέτρα ύψος, στην Σητεία στην Κρήτη. (Papadopoulos et al., 2005)

1.6 Γενικές χρήσεις γεωραντάρ

- Μη καταστρεπτική εξέταση οπλισμένου σκυροδέματος: Ποιοτικός έλεγχος τσιμέντου, ανίχνευση φθοράς και ανομοιογενειών, εξέταση πάχους τσιμέντου κ.α.
- Ιστορικά κτήρια - Αρχαιολογία: Αποκάλυψη εσωτερικής δομής τοιχοποιιών, ανίχνευση ρηγματώσεων , αποκάλυψη θεμελιώσεων ιστορικών κτισμάτων και υπολείμματα διαφόρων κατασκευών στο υπέδαφος.
- Χαρτογράφηση υπόγειων σωληνώσεων (ύδρευσης, φυσικού αερίου κ.α.) .
- Εξέταση οδοστρωμάτων: Χαρτογράφηση ατελειών, πάχους ασφάλτου.
- Γεωλογική χαρτογράφηση: Αποκάλυψη της τοπογραφίας των πετρωμάτων, χαρτογράφηση βυθού ποταμών και λιμνών, αποκάλυψη υπόγειων νερών και υπόγειων κοιλοτήτων.
- Ορυχεία: Ανίχνευση πετρωμάτων, κοιλοτήτων και άλλων ανομοιογενειών.

ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή

Η τομή του γεωραντάρ προκύπτει από την καταγραφή του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο υπέδαφος. Προκειμένου να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα για την κατανόηση της απαιτείται η ψηφιακή ανάλυση της.

Σκοπός της ψηφιακής ανάλυσης εικόνας είναι να τονίσει κάποια χαρακτηριστικά που δε γίνονται άμεσα αντιληπτά.

Το πρώτο στάδιο στην ψηφιακή ανάλυση εικόνας περιλαμβάνει αρχικά την εφαρμογή φίλτρων με τα οποία επιτυγχάνεται ο τονισμός των οριζόντιων και των κεκλιμένων ανακλαστήρων, η απομάκρυνση των κυμάτων περίθλασης και του θορύβου και γενικότερα η βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.

2.1 Σχεδιασμός διασκόπησης

Πριν ξεκινήσει η πραγματοποίηση της έρευνας θεωρείται σκόπιμο να μελετηθούν όλες εκείνες οι παράμετροι που θα καθορίσουν την επιτυχία της έκβαση. Το στάδιο αυτό είναι κρίσιμο και πρέπει να γίνει προσεκτικά, ώστε οι μετρήσεις να είναι ακριβείς και να αποφευχθούν σφάλματα τα οποία θα δώσουν λανθασμένες πληροφορίες. Ο σχεδιασμός αποτελείται από τρία βασικά στάδια:

1. Αξιολόγηση του πεδίου της έρευνας
2. Επιλογή της μεθόδου διασκόπησης:
 - i. Βάθος και μέγεθος του στόχου
 - ii. Ηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου και του μέσου διάδοσης
 - iii. Περιβάλλον της διασκόπησης

3. Προσδιορισμός των παραμέτρων της διασκόπησης όπου περιλαμβάνονται, η συχνότητα εκπομπής ο ολικός χρόνος καταγραφής, το διάστημα δειγματοληψίας, το βήμα διασκόπησης, η απόσταση των κεραιών, ο προσανατολισμός των κεραιών.

I. Συχνότητα εκπομπής

Η συχνότητα εκπομπής (operating frequency) συνδέεται άμεσα με την διακριτική ικανότητα και το βάθος διείσδυσης του παλμού του γεωραντάρ. Στις υψηλές συχνότητες εκπομπής το βάθος διείσδυσης είναι μικρό, ενώ η διακριτική ικανότητα μεγάλη. Στις χαμηλές συχνότητες συμβαίνει το αντίστροφο. Για την βέλτιστη επιλογή της συχνότητας δύο παράγοντες πρέπει να σταθμιστούν ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε διασκόπησης.

Μία διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος αποτελεί ο υπολογισμός της συχνότητας (σε MHz) από την εξίσωση:

$$f = \frac{150}{x\sqrt{\epsilon_r}}$$

όπου το x συμβολίζει την χωρική διακριτική ικανότητα σε μέτρα.

II. Ολικός χρόνος καταγραφής

Ο ολικός χρόνος καταγραφής σχετίζεται άμεσα με το βάθος διείσδυσης. Ο υπολογισμός του στηρίζεται στην εξίσωση:

$$W = 2.6d_{\max}/v$$

όπου W είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής, d_{\max} το μέγιστο βάθος και v η ταχύτητα του παλμού στο μέσο διάδοσης.

III. Διάστημα δειγματοληψίας

Η καταγραφή των δεδομένων δεν είναι συνεχής διαδικασία. Έτσι ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο καταγραφών. Ο υπολογισμός του διαστήματος δειγματοληψίας γίνεται βάση της συχνότητας Nyquist f_N ,

η οποία ορίζεται ως η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψείας για να είναι το δείγμα αντιπροσωπευτικό. Αν ληφθεί υπ' όψη ένας συντελεστής ασφάλειας ίσος με 2, τότε προκύπτουν οι σχέσεις:

$$f_N = 1/2\Delta t \rightarrow 1.5f = 1/2\Delta t \rightarrow \text{συντ. Ασφάλειας} = 2 \rightarrow f = 1/6\Delta t$$

όπου Δt το διάστημα δειγματοληψείας και f η κεντρική συχνότητα σε Hz.

IV. Βήμα διασκόπησης

Το βήμα δειγματοληψείας ορίζει την απόσταση δυο διαδοχικών σταθμών πάνω στη γραμμή μελέτης όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις. Προτείνεται το βήμα δειγματοληψείας Nyquist n_x το οποίο ισούται με:

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

V. Απόσταση των κεραιών

Τα συστήματα γεωραντάρ δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να μεταβάλει κατά το δοκούν την απόσταση των κεραιών ώστε να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Αύξηση της απόστασης των κεραιών συνεπάγεται αύξηση στη γωνία ανάκλασης και του συντελεστή ανάκλασης. Συνεπάγεται όμως και αύξηση της εξασθένισης του κύματος. Δίδεται από τη σχέση:

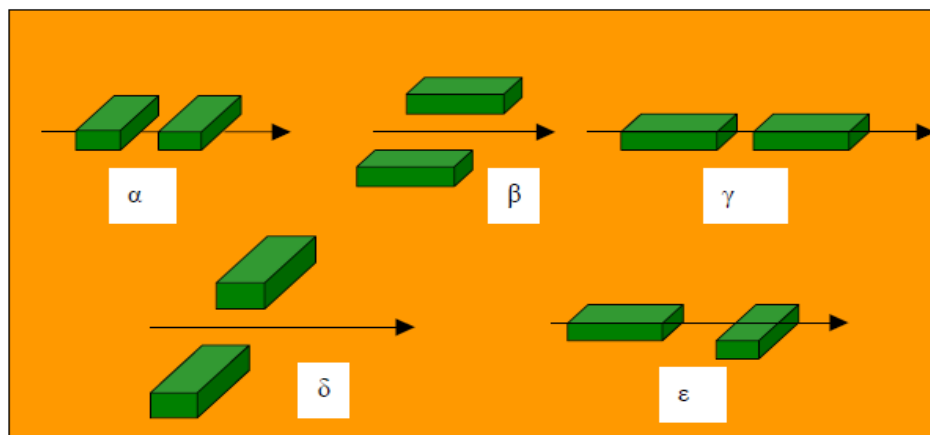
$$S = 2d_{\text{στόχου}} / (\epsilon_r - 1)^{1/2}$$

VI. Υπέρθωση

Η υπέρθεση είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η βελτίωση των μετρήσεων αφού τα πλάτη ενισχύονται, ενώ ο θόρυβος εξαλείφεται.

VII. Προσανατολισμός των κεραιών

Η παράμετρος που μελετάται τελευταία είναι ο προσανατολισμός των κεραιών, σε σχέση με τη γραμμή μελέτης. Οι πιο συνηθισμένοι προσανατολισμοί είναι όταν το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται κάθετα στο επίπεδο διάδοσης του κύματος και βρίσκουν εφαρμογή στη γεωλογική χαρτογράφηση.



Σχήμα 2.1. Δυνατοί προσανατολισμοί κεραιών.

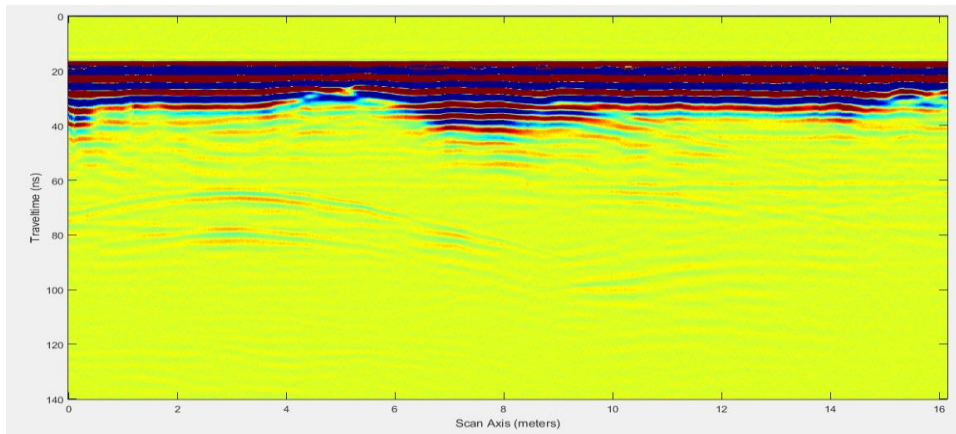
2.2 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από την μέθοδο του γεωραντάρ, χρησιμοποιήθηκαν τα φίλτρα διόρθωσης των πρώτων αφίξεων (σχήμα 2.3), αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (σχήμα 2.4), αποκοπής σήματος υποβάθρου (σχήμα 2.5), ενίσχυσης σήματος των ανακλώμενων κυμάτων (σχήμα 2.8) και το φίλτρο μέσης τιμής (σχήμα 2.9). Η εφαρμογή των φίλτρων παρουσιάζεται στην συνέχεια, για την γραμμή μελέτης F006.

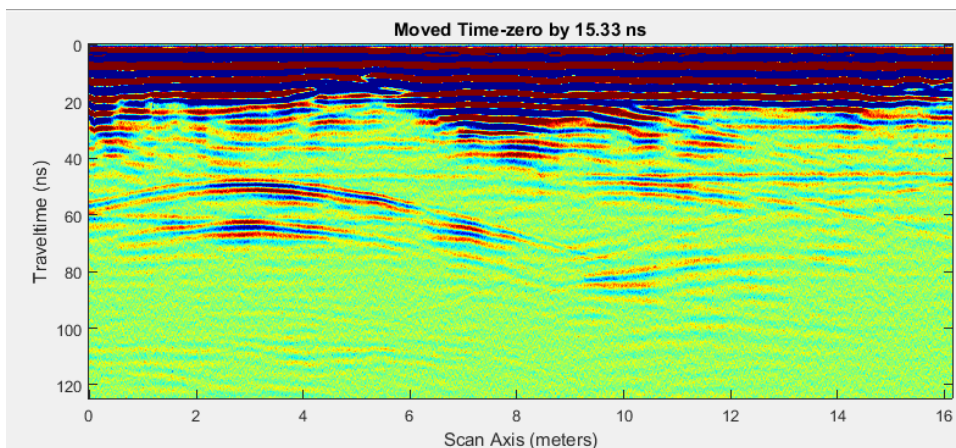
Διόρθωση των χρόνων πρώτων αφίξεων

Ορισμένες φορές ο χρόνος άφιξης των απευθείας κυμάτων (timezero) δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται (συνήθως αυξάνει). Αυτό οφείλεται αφενός στην μη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος πριν την έναρξη της διασκόπησης και αφετέρου στα κατεστραμμένα καλώδια σύνδεσης των κεραιών με τη μονάδα ελέγχου και την βίαιη μετακίνησή τους κατά την διάρκεια της διασκόπησης.

Η διόρθωση του χρόνου άφιξης των απευθείας κυμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν από τις καταγραφές πρόκειται να δημιουργηθούν οριζόντιες τομές. Η διόρθωση συνίσταται στην μετατόπιση κάθε ίχνους χωριστά έτσι ώστε τα απευθείας κύματα να τοποθετηθούν στην σωστή τους θέση στην τομή F006.



Σχήμα 2.2.: Τομή F006 χωρίς φίλτρο.

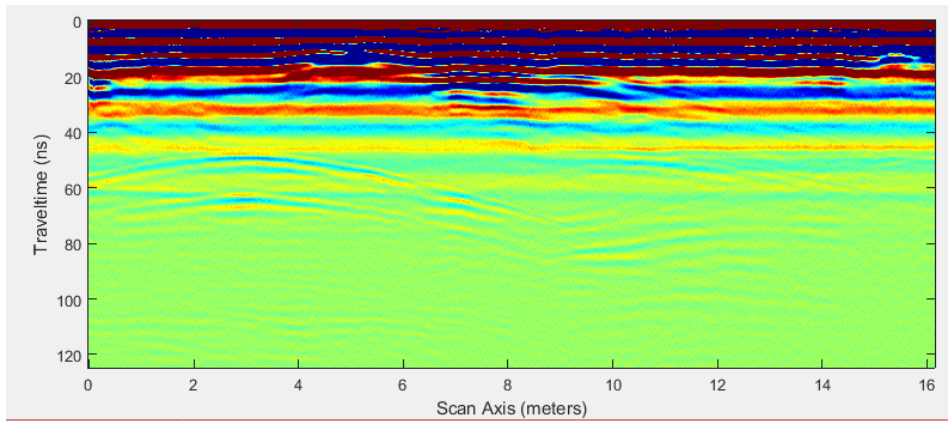


Σχήμα 2.3. Τομή F006 με εφαρμογή της διόρθωσης πρώτων αφίξεων time-zero.

Φίλτρα διόρθωσης

Η εκπομπή του παλμού από την κεραία του γεωραντάρ μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία σημάτων χαμηλών συχνοτήτων που διαχέονται στο έδαφος και υπερτίθενται στα σήματα ανάκλασης υψηλών συχνοτήτων. Το πλήθος των σημάτων χαμηλών συχνοτήτων και ο τρόπος που εμφανίζονται στα δεδομένα εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και την απόσταση των κεραιών. Τα φίλτρα διόρθωσης συμβάλλουν στην μείωση των σημάτων χαμηλής συχνότητας όπως είναι το φίλτρο διόρθωσης dewow.

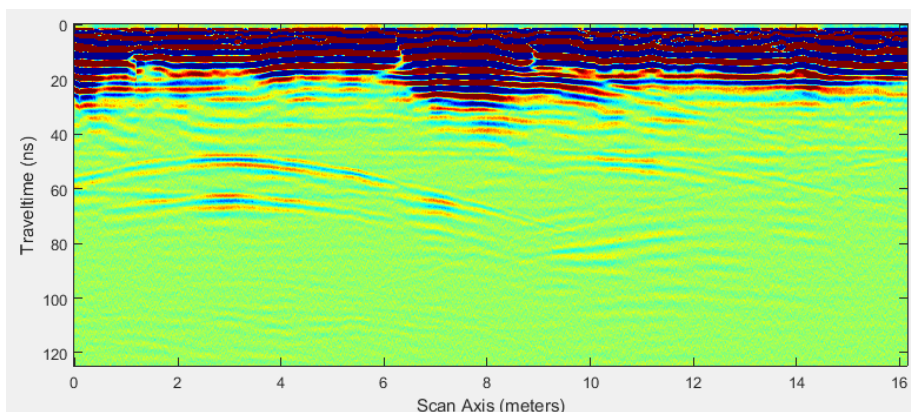
Το φίλτρο διόρθωσης dewow χρησιμοποιείται για την αποκοπή χαμηλών συχνοτήτων, επιτρέποντας την διέλευση του φάσματος ακτινοβολίας συγκεκριμένης κεντρικής συχνότητας εκπομπής με μεγάλη πιστότητα, ενώ αντίθετα απαγορεύει την διέλευση σημάτων χαμηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 2.4. Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου dewow.

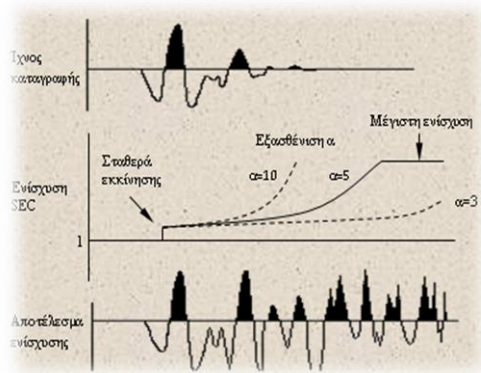
Φίλτρο αποκοπής σήματος υποβάθρου (background removing filter)

Μερικές φορές εμφανίζονται σήματα στις τομές που μοιάζουν με οριζόντιους ανακλαστήρες και οφείλονται στις κεραίες. Το φαινόμενο αυτό, που ονομάζεται antenna ringing, επισκιάζει τα ανακλώμενα κύματα με αποτέλεσμα την δύσκολη ερμηνεία της τομής. Οριζόντιοι ανακλαστήρες μπορούν να οφείλονται και σε αντικείμενα στην επιφάνεια της γης. Όλα αυτά τα σήματα μπορούν να εξαλειφθούν από μία τομή γεωραντάρ χρησιμοποιώντας το φίλτρο αποκοπής του σήματος του υποβάθρου.



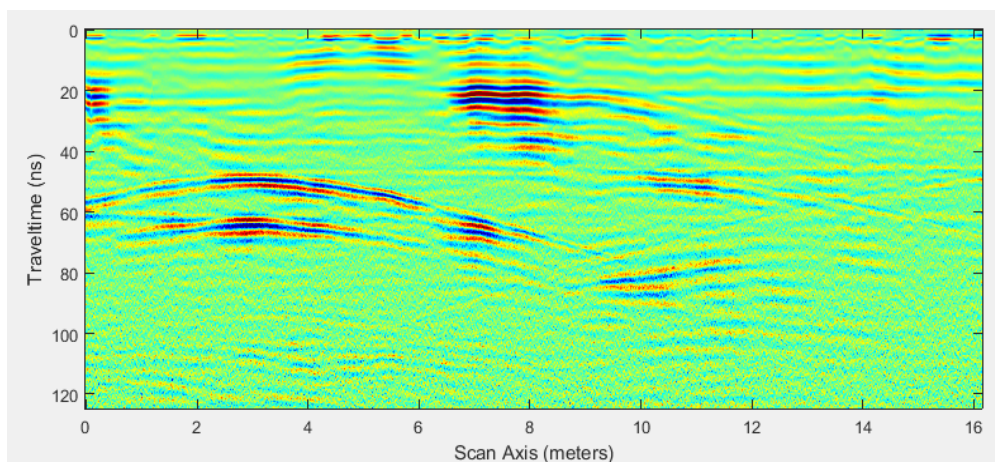
Σχήμα 2.5. Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου Removal Global Background.

Ενίσχυση σήματος



Σχήμα 2.6. Ενίσχυση SEC.

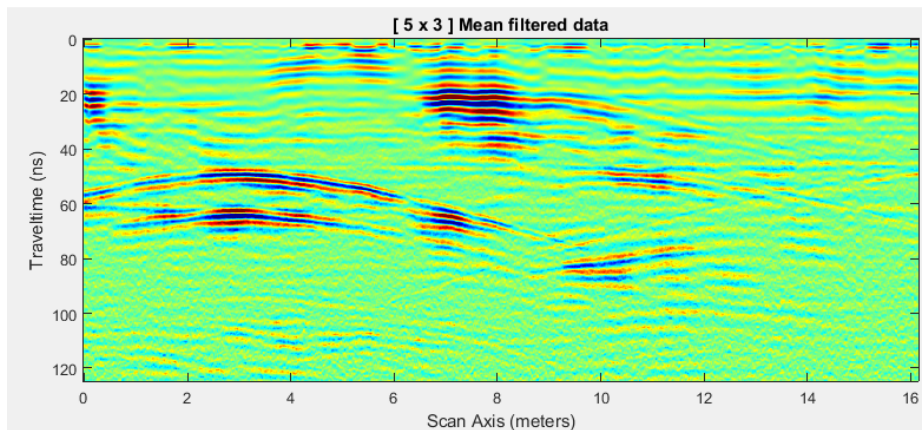
Καθώς ο χρόνος της καταγραφής αυξάνει, τα ανακλώμενα κύματα είναι εξασθενημένα, δηλαδή το πλάτος τους μειώνεται. Για την απεικόνιση των αδύνατων σημάτων και τον εντοπισμό ανακλάσεων που προέρχονται από μεγαλύτερα βάθη το σήμα καταγραφής πρέπει να ενισχυθεί. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ενίσχυσης, όπως η ενίσχυση SEC.



Σχήμα 2.7. Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου SEC.

Φίλτρο μέσης τιμής

Το φίλτρο αυτό υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων και αντικαθιστά το κεντρικό εικονοστοιχείο με τη μέση τιμή. Χρησιμοποιείται σα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των τιμών των εικονοστοιχείων που δεν αντιπροσωπεύουν το περιβάλλον τους. Συχνά χρησιμοποιείται ένας τετραγωνικός πυρήνας 3×3 , αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτεροι πυρήνες (π.χ. 5×5 τετράγωνα) για πιο ομαλή εξομάλυνση.



Σχήμα 2.8. Τομή F006 με εφαρμογή του φίλτρου *mean filter*.

2.3 Παράθυρα ή μάσκες

Τα φίλτρα (μάσκες) διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιείται για ελάττωση του θορύβου.
- Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων. Η ταχέως μεταβαλλόμενη λεπτομέρεια της εικόνας αντιστοιχεί σε υψηλή συχνότητα. Η πληροφορία υψηλής συχνότητας επιτρέπει την απομόνωση και την ενίσχυση της τοπικής λεπτομέρειας.

2.3.1 Μονοδιάστατα φίλτρα

Τα μονοδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε να ενεργούν είτε σε χρονοσειρές, λαμβάνοντας υπόψη εικονοστοιχεία που ανήκουν στο ίδιο ίχνος, είτε σε στιγμιότυπα κύματος λαμβάνοντας υπόψη εικονοστοιχεία τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά ίχνη, αλλά αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο. Παρακάτω αναφέρονται μερικά από τα πιο συχνά σε χρήση μονοδιάστατα φίλτρα εκτός των όσων έχουν προαφερθεί:

- Φίλτρο διόρθωσης Dcshift
- Φίλτρο διόρθωσης Dewow
- Φίλτρο κινητού μέσου όρου
- Φίλτρο μέσου ίχνους:
- Φίλτρο διαφοράς ίχνων:

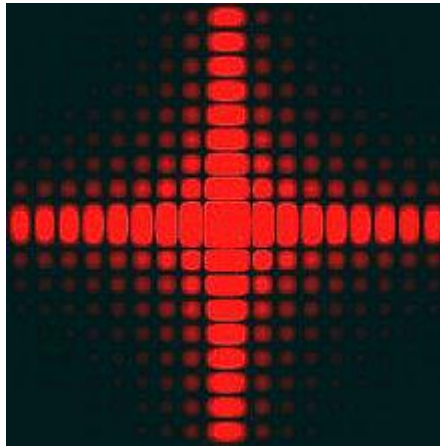
- στ) Φίλτρο ισοστάθμισης ιχνών:
- ζ) Φίλτρο αποκοπής σημάτων υποβάθρου:
- η) Φίλτρο σταθμισμένου μέσου ίχνους:
- θ) Φίλτρο ενδιάμεσου όρου:

2.3.2 Δυσδιάστατα φίλτρα

Τα δυσδιάστατα φίλτρα είναι σχεδιασμένα ώστε κατά την εφαρμογή τους να λαμβάνουν υπόψη μια ομάδα εικονοστοιχείων που ανήκουν σε γειτονικά ίχνη και γειτονικούς χρόνους. Τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο σε τομές γεωραντάρ όσο και σε οριζόντιες τομές (χάρτες). Παρακάτω αναφέρονται μερικά γνωστά δισδιάστατα φίλτρα.

- α) Φίλτρο μέσης τιμής:
- β) Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

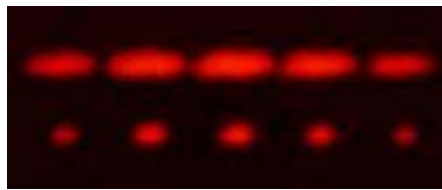
2.4 Περίθλαση



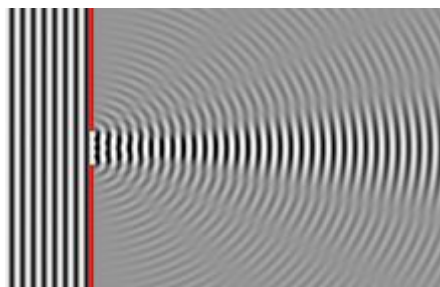
Σχήμα 2.9. Περίθλαση από τετραγωνικό άνοιγμα.

(<https://el.wikipedia.org/wiki/Περίθλαση>)

Η περίθλαση είναι φαινόμενο της διάδοσης των κυμάτων. Είναι μία από τις περιπτώσεις στις οποίες το φως εκτρέπεται από την ευθεία πορεία του. Όταν το φως διέρχεται μέσα από μία λεπτή σχισμή ή οπή δεν εμφανίζεται ένα απλό φωτεινό αποτύπωμα σε μία οθόνη τοποθετημένη πίσω από την σχισμή που αντιστοιχεί στην εικόνα της οπής ή της σχισμής αλλά μία εικόνα που περιλαμβάνει φωτεινές και σκοτεινές περιοχές σε μία μεγάλη περιοχή γύρω από την θέση που θα έπρεπε να εμφανίζεται το φωτεινό αποτύπωμα. Το αντίστοιχο φαινόμενο εκτροπής του φωτός συμβαίνει όταν φως πέσει πάνω σε ιδιαίτερα λεπτό αντικείμενο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της περίθλασης.



Σχήμα 2.10. Περίθλαση από δύο παράλληλες σχισμές. (<https://el.wikipedia.org/wiki/Περίθλαση>)



Σχήμα 2.11. Περίθλαση από μία λεπτή σχισμή. (<https://el.wikipedia.org/wiki/Περίθλαση>)

Όταν φωτεινή δέσμη προσπίπτει πάνω σε λεπτή σχισμή τότε σύμφωνα με την αρχή του Huygens κάθε μέρος της σχισμής γίνεται με την σειρά του πηγή εκπομπής φωτεινών ακτίνων. Οι φωτεινές αυτές ακτίνες συμβάλλουν είτε καταστρεπτικά είτε ενισχυτικά ακολουθώντας τους κανόνες της ενισχυτικής και καταστρεπτικής συμβολής. Αν έχουμε μία σχισμή πλάτους a τότε για δύο δέσμες που εξέρχονται από την σχισμή με διεύθυνση θ και απέχουν $a/2$ η διαφορά των δρόμων τους είναι ίση με:

$$\Delta S = \frac{a}{2} \eta \mu \theta$$

Και επομένως η συνθήκη καταστρεπτικής συμβολής μεταξύ τους είναι:

$$\frac{a}{2} \eta \mu \theta = n \frac{\lambda}{2}$$

Από την οποία προκύπτει η σχέση που μας δίνει τις διευθύνσεις στις οποίες παρατηρείται καταστρεπτική συμβολή.

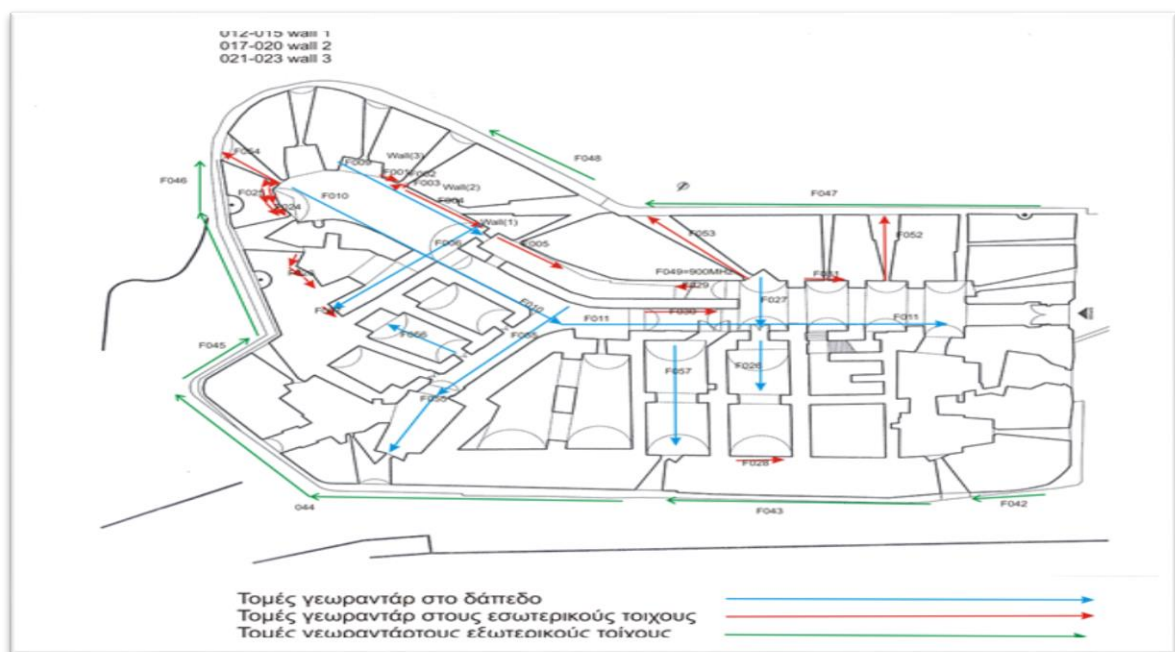
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Εισαγωγή

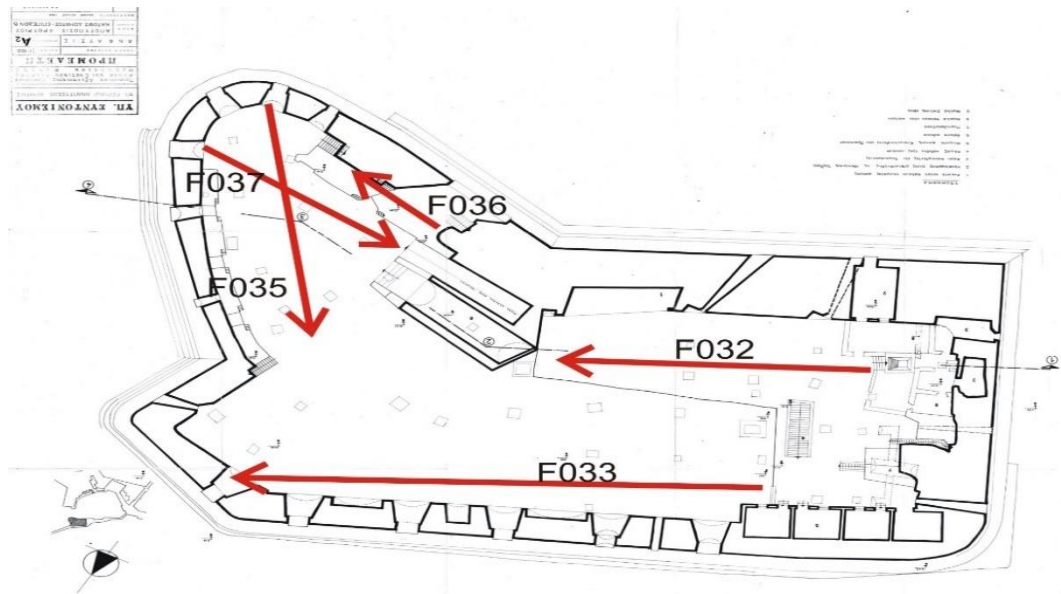
Πραγματοποιήθηκε διασκόπηση με γεωραντάρ στο Φρούριο Κούλε, με συχνότητα 400Hz, βήμα διειγματοληψείας 0.5m και διάστημα διειγματοληψείας 0.1465ns, στο δάπεδο του ισογείου, στην ταράτσα καθώς και στους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους του.

3.1 Πραγματικά δεδομένα γεωραντάρ

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε γραμμές μελέτης που καλύπτουν όλη την έκταση του μνημείου, σύμφωνα με τα παρακάτω σκαριφήματα :



Σχήμα 3.1α. Κάτοψη του ισογείου του μνημείου Κούλε. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης.



Σχήμα 3.1β. Κάτοψη της ταράτσας του μνημείου Κούλε. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης.

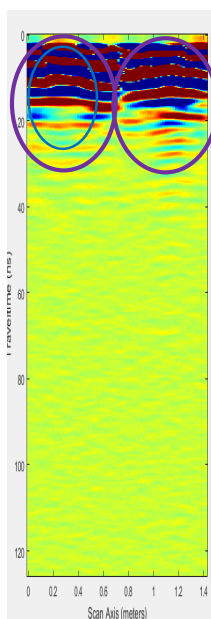
3.2 Βήματα επεξεργασίας

- Για να γίνει η επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATGPR ώστε να προκύψουν οι τομές ανά γραμμή μελέτης και εφαρμόστηκαν φίλτρα διόρθωσης όπως το Dewow, το φίλτρο Global Background, η ενίσχυση σήματος SEC, και τα φίλτρα time zero και μέσης τιμής, που αναφέρονται αναλυτικά στην ενότητα 2.2.
- Μετά ακολούθησε ανάλυση ταχυτήτων, αυτό που έγινε δηλαδή ήταν να προσαρμοσθεί μια υπερβολικού τύπου καμπύλη στην επιλεγμένη περίθλαση ώστε να υπολογισθεί η ταχύτητα.

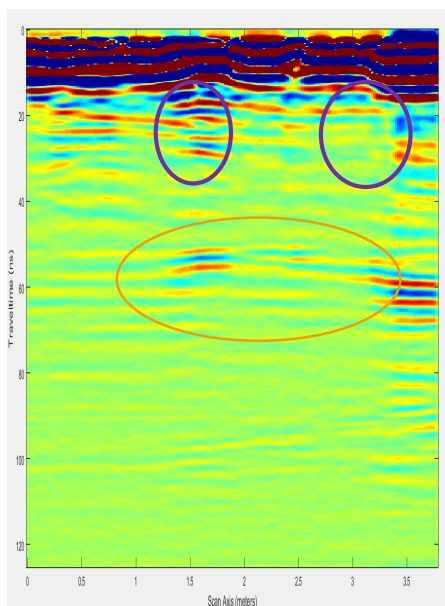
3.3 Τομές

Παρακάτω παρατίθενται τομές για κάποιες από τις πιο αντιπροσωπευτικές γραμμές μελέτης από διάφορα σημεία του μνημείου. Οι τομές για κάθε γραμμή μελέτης παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο παράρτημα.

Οι ανωμαλίες στις εικόνες του γεωραντάρ διακρίνονται και σημειώνονται σε κύκλους ανάλογα με την αιτία που τις προκαλεί. Σε μπλε κύκλο σημειώνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με συγκέντρωση υγρασίας η οποία προκαλεί εξασθένιση στα ΗΜ κύματα. Σε κόκκινο κύκλο σημειώνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με λιθοδομή οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων. Σε κίτρινο κύκλο σημειώνονται καταγραφές οι οποίες σχετίζονται με δομές στη βάση του κτιρίου, με πράσινες γραμμές διακρίνονται τα σημεία τομής τους με άλλες τομές και με μοβ κύκλο τα σημεία περιθλάσεων που οφείλονται στην ύπαρξη γωνιών και σε πλάγιους τοίχους.



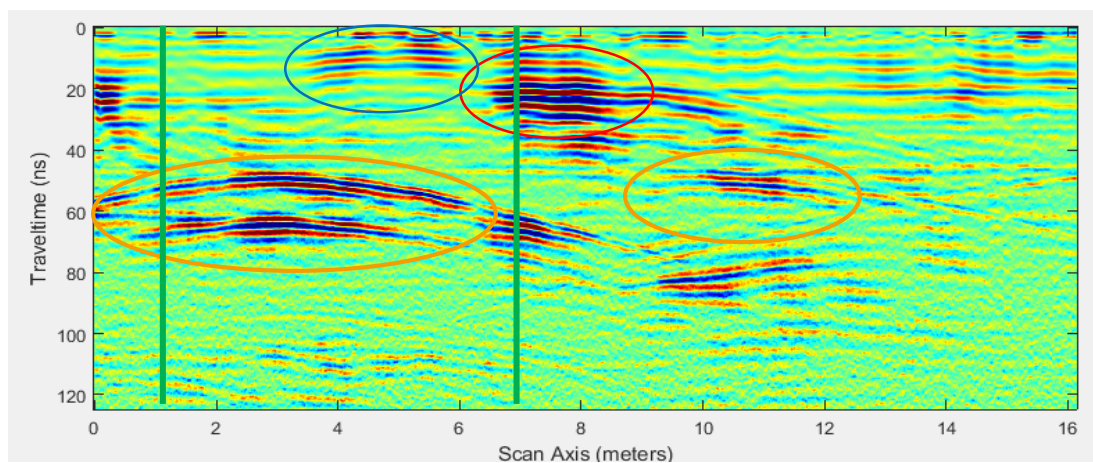
Σχήμα 3.2. Η τομή γεωραντάρ F002.



Σχήμα 3.3. Η τομή γεωραντάρ F019.

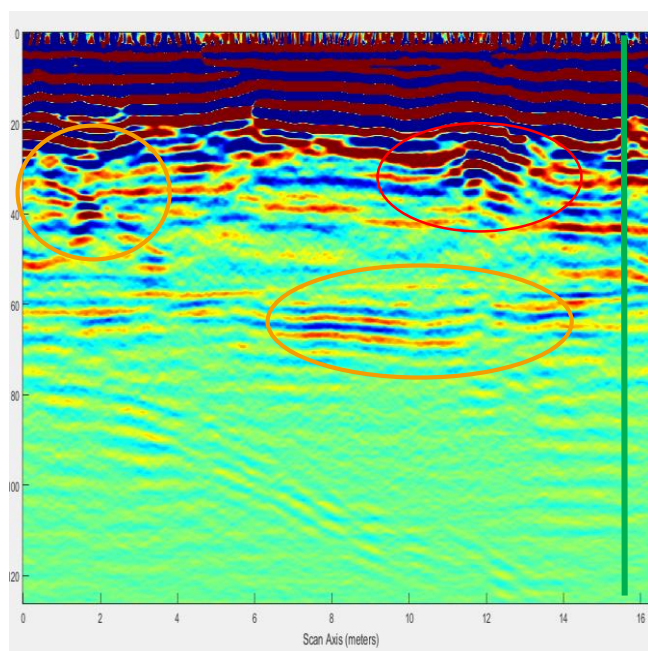
Η τομή γεωραντάρ F002 (σχήμα 3.2) προέρχεται από τοίχο του μνημείου και παρουσιάζει ανωμαλία η οποία οφείλεται στην αυξημένη συγκέντρωση υγρασίας στα 10ns (βάθος 0.5m) σε απόσταση 0-0.5m από την αρχή της γραμμής μελέτης (μπλε κύκλος). Παρουσιάζονται 2 περιθλάσεις στα σημεία γωνιών του τοίχου μήκους περίπου 0.4m (μοβ κύκλοι).

Η τομή γεωραντάρ F019 (σχήμα 3.3.) προέρχεται από εσωτερικό τοίχο του μνημείου (wall 2). Στα 60ns καταγράφονται ανακλάσεις από θολωτές δομές (κίτρινοι κύκλοι). Παρουσιάζονται 2 περιθλάσεις στα σημεία γωνιών του τοίχου στα 1.5 και 3.5m από την αρχή της γραμμής μελέτης στα 15ns περίπου (μοβ κύκλοι).



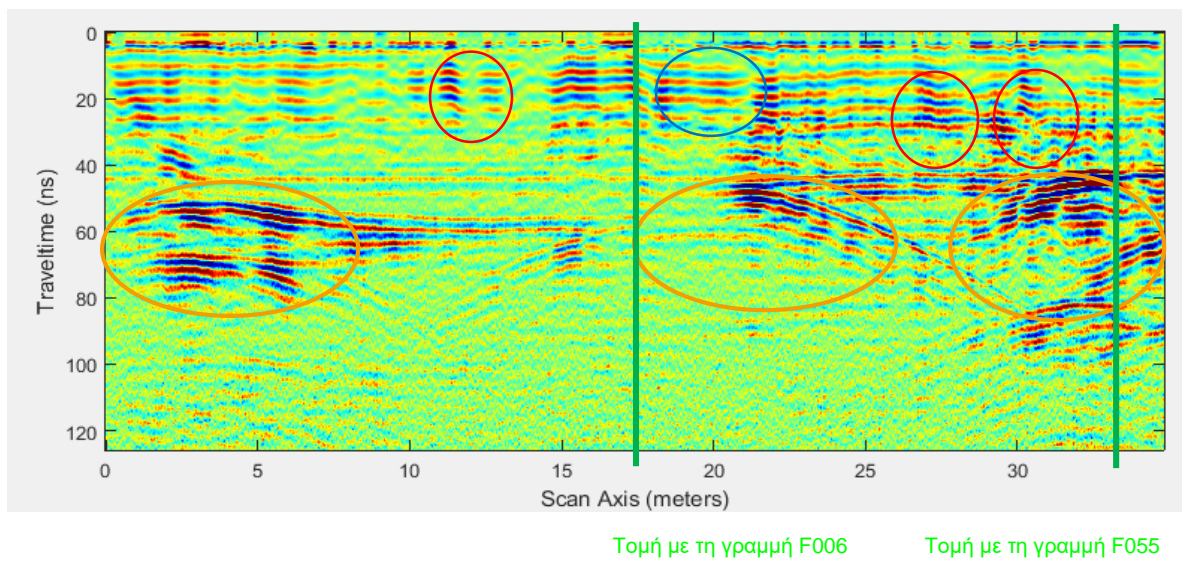
Τομή με τη γραμμή F009 Τομή με τη γραμμή F010

Σχήμα 3.4. Η τομή γεωαραντάρ F006.

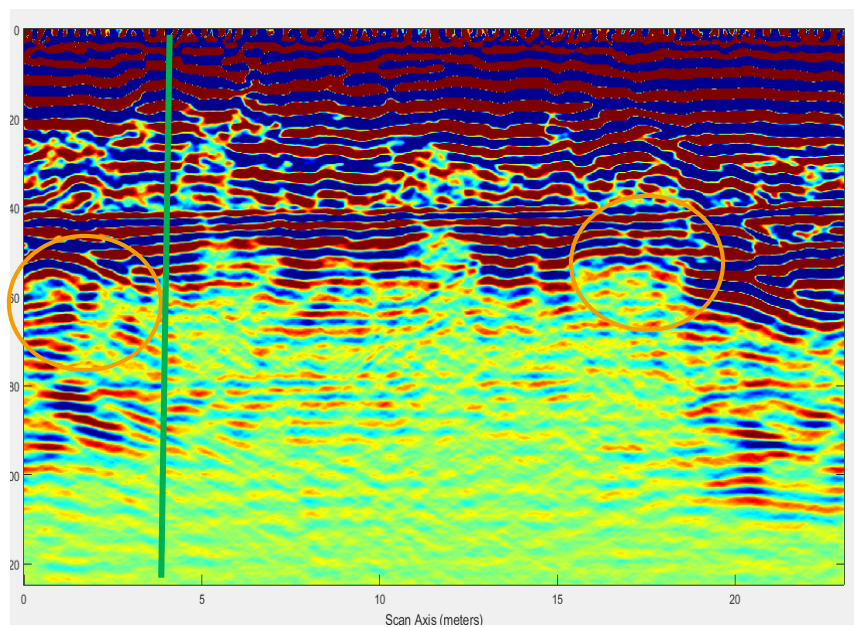


Τομή με τη γραμμή F006

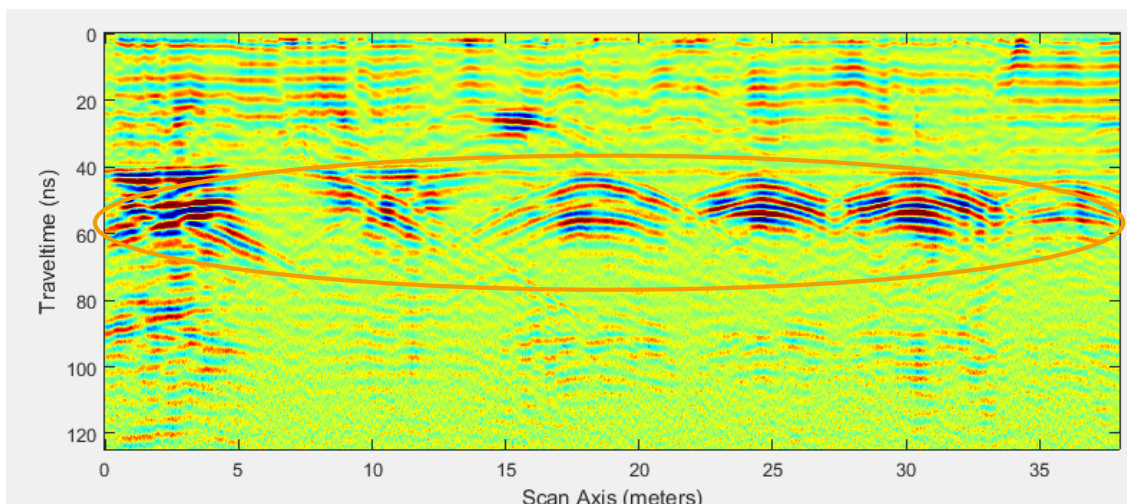
Σχήμα 3.5. Η τομή γεωαραντάρ F009.



Σχήμα 3.6. Τομή γεωραντάρ F010.



Σχήμα 3.7. Η τομή γεωραντάρ F055.



Σχήμα 3.8. Η τομή γεωραντάρ F011.

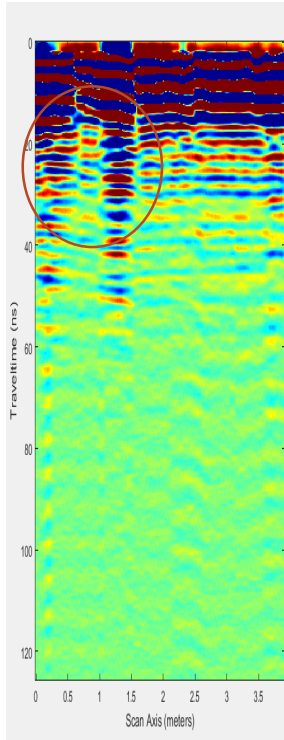
Η τομή γεωραντάρ F006 (σχήμα 3.4), προέρχεται από το δάπεδο του μνημείου. Στα 10 ns της καταγραφής (βάθος 0.5m) και σε απόσταση 4-6m (μπλε κύκλος) εμφανίζεται έντονη εξασθένιση στα πλάτη των H/M κυμάτων από την αρχή της γραμμής μελέτης που πιθανόν να οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση υγρασίας. Στα 10 ns (βάθος 0.5m) και στα 6-9m από την αρχή της γραμμής μελέτης (κόκκινο κύκλος), εμφανίζονται πολλαπλές ανακλάσεις των H/M κυμάτων λόγω της λιθοδομής στο δάπεδο του μνημείου. Στα 45ns (βάθος περίπου 2m) καταγράφονται ανακλάσεις από θολωτές δομές (κίτρινοι κύκλοι). Οι δομές αυτές είναι δυο στον αριθμό και οι κορυφές τους απέχουν 8m. Η πρώτη έχει κορυφή στα 3m ενώ η δεύτερη στα 11m.

Στην τομή γεωραντάρ F009 (σχήμα 3.5) εμφανίζεται οριζόντιος ανακλαστήρας στα 60 ns (βάθος περίπου 3m) σε οριζόντια απόσταση 6-15m. Ο ίδιος ανακλαστήρας διακρίνεται και στη γραμμή F006 σε οριζόντια απόσταση 0-1m.

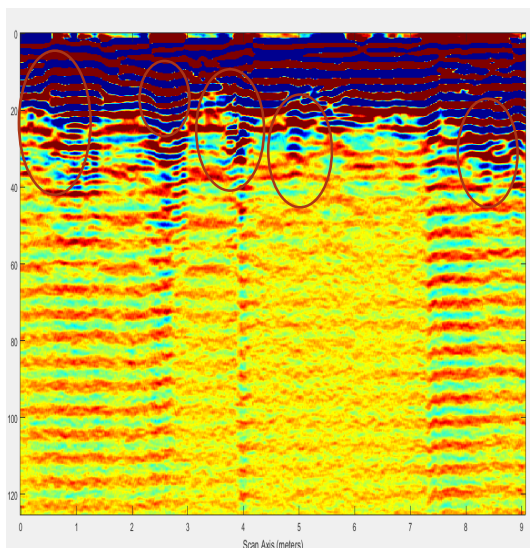
Στην τομή γεωραντάρ F010 (σχήμα 3.6), πέρα από τη ζώνη εξασθένισης (μπλε κύκλος) και τις πολλαπλές ανακλάσεις (κόκκινος κύκλος), εμφανίζονται ανακλάσεις από θολωτές δομές (κίτρινοι κύκλοι). Μια πρώτη ανάκλαση εμφανίζεται στα 50 ns (2.5m βάθος) και σε οριζόντια απόσταση 0-7 m. Άλλες δύο ανακλάσεις βρίσκονται στα 40 ns (βάθος 2m) και σε οριζόντια απόσταση 31 και 32m αντίστοιχα από την αρχή της γραμμής. Επίσης εμφανίζεται οριζόντιος ανακλαστήρας πάνω από τις θολωτές δομές, όπου στα ΝΑ καταγράφεται σε μεγαλύτερο βάθος (περίπου κατά 0,5m) απ' ό τι στα ΒΔ.

Στην τομή γεωραντάρ F055 (σχήμα 3.7) διακρίνονται θολωτές δομές (κίτρινος κύκλος) στα 40 ns (βάθος 2m). Στην τομή με τη γραμμή F010 διακρίνεται ο ίδιος ανακλαστήρας και η ίδια θολωτή δομή.

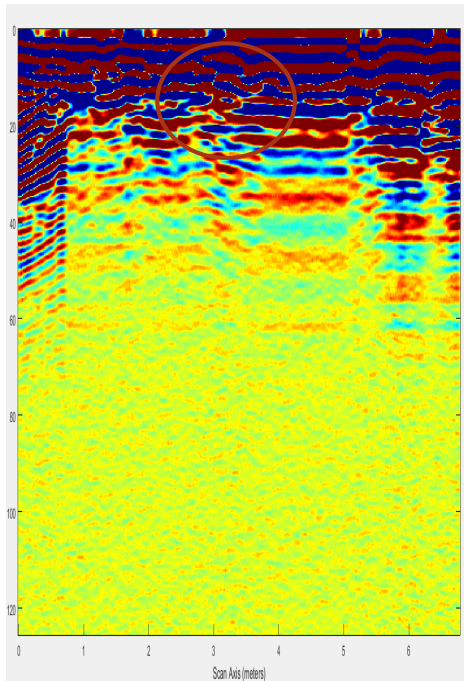
Στην τομή γεωραντάρ F011 (σχήμα 3.8) διακρίνονται 5 θολωτές δομές (κίτρινος κύκλος) στα 40ns (βάθος 2m) και κέντρο στα 6, 19, 25, 31 και 36m αντίστοιχα από την αρχή της γραμμής μελέτης.



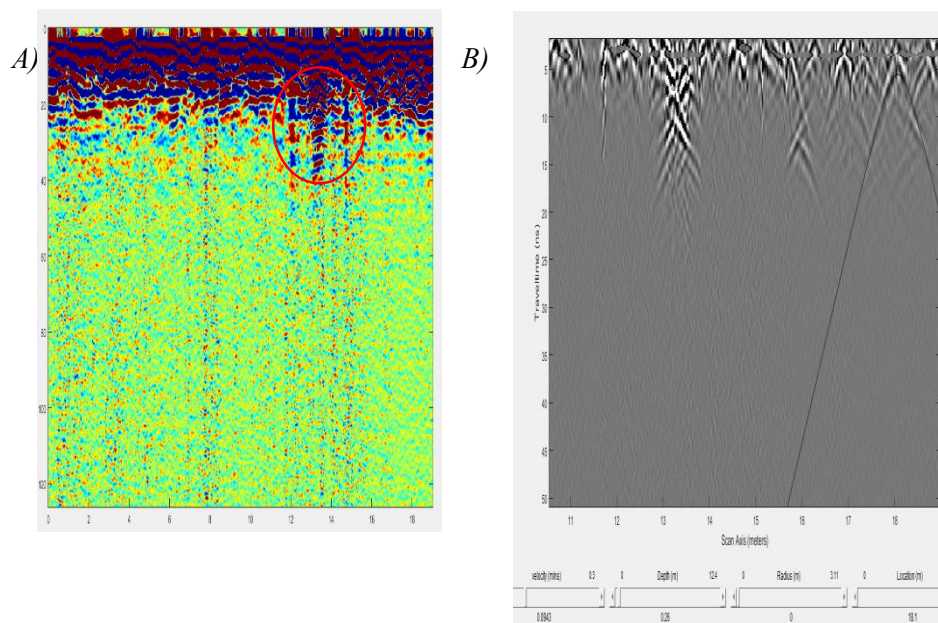
Σχήμα 3.9. Η τομή γεωραντάρ F005.



Σχήμα 3.10. Η τομή γεωραντάρ F044.



Σχήμα 3.11. Η τομή γεωραντάρ F045.



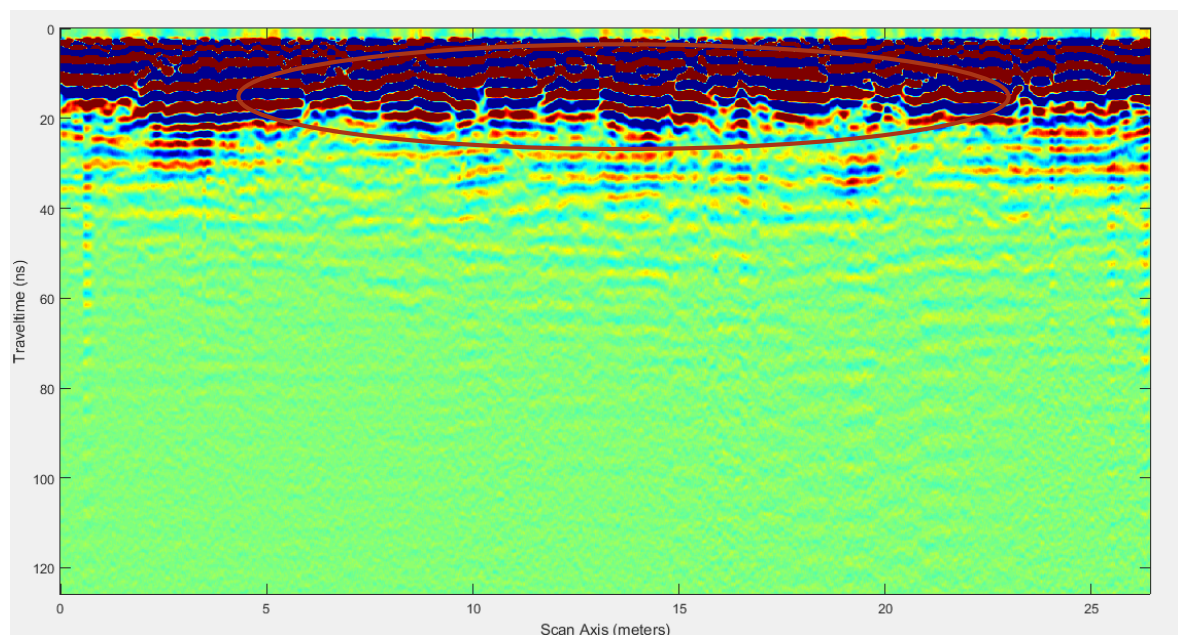
Σχήμα 3.12. *A)* Η τομή γεωραντάρ F048. *B)* Εικόνα με περιθλώμενα κύματα στα 18.1m και 7ns περίπου, η οποία αναδεικνύει τα όρια των λίθων διαστάσεων 50-75cm με ταχύτητα $u=0.0924m/ns$ για δομή σε βάθος 0.26m.

Η τομή γεωραντάρ F005 (σχήμα 3.9) προέρχεται από εσωτερικό τοίχο του μνημείου. Διακρίνονται ανωμαλίες που σχετίζονται τη λιθοδομή (κόκκινος κύκλος) οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων στα 10-40ns στα 0-2m από την αρχή της γραμμής μελέτης.

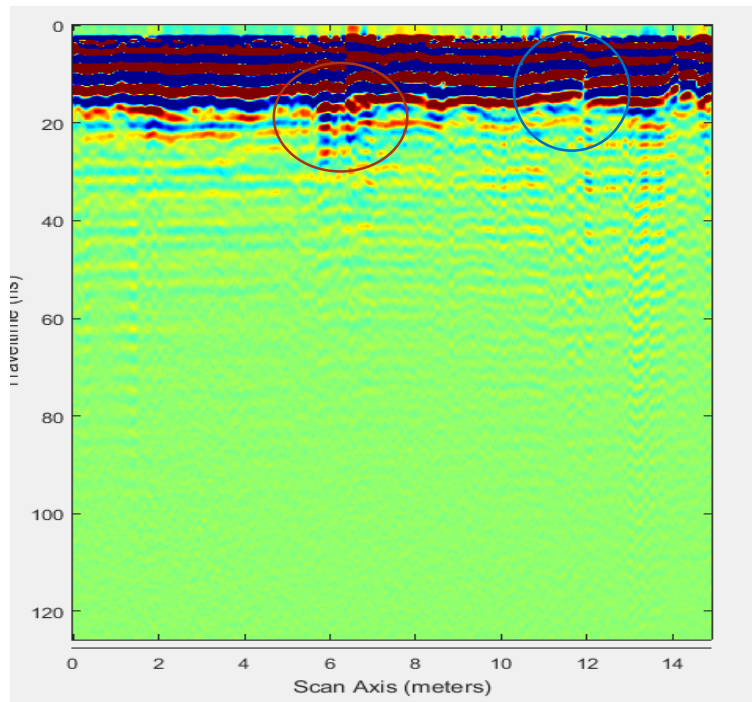
Η τομή γεωραντάρ F044 (σχήμα 3.10) προέρχεται από εξωτερικό τοίχο του μνημείου. Διακρίνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με τη λιθοδομή οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων (κόκκινοι κύκλοι) στα 10-20ns, 15ns, 15-30ns, 20-30ns και 25-30ns, στα 0.5, 2.5, 4, 5 και 8,5m από την αρχή της γραμμής μελέτης.

Η τομή γεωραντάρ F045 (σχήμα 3.11) προέρχεται από εξωτερικό τοίχο του μνημείου. Διακρίνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με τη λιθοδομή (κόκκινος κύκλος) οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων στα 10-20ns, στα 3-4m από την αρχή της γραμμής μελέτης.

Η τομή γεωραντάρ F048 (σχήμα 3.12.A) προέρχεται από εξωτερικό τοίχο του μνημείου. Διακρίνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με τη λιθοδομή (κόκκινος κύκλος) οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων στα 20-30ns, στα 12-16m από την αρχή της γραμμής μελέτης. Η εικόνα με hyperbola (σχήμα 3.12.B) παρουσιάζει περίθλαση στα 18.1m και 7ns περίπου, αναδεικνύει τα όρια των λίθων διαστάσεων 50-75cm με ταχύτητα $u=0.0924\text{m/ns}$ για δομή σε βάθος 0.26m.



Σχήμα 3.13. Η τομή γεωραντάρ F032.

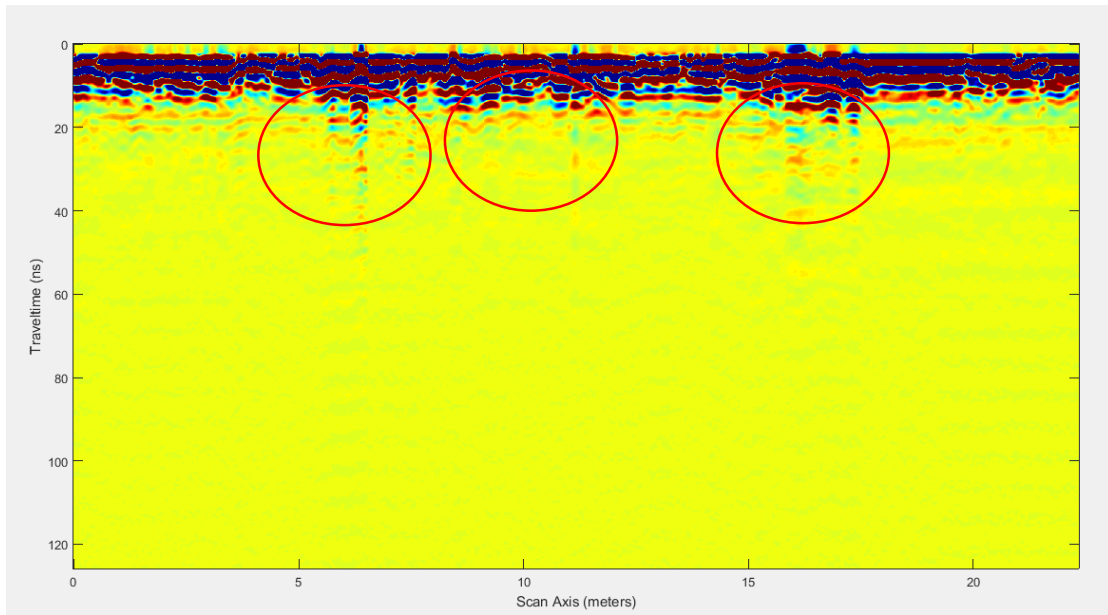


Σχήμα 3.14. Η τομή γεωραντάρ F035.

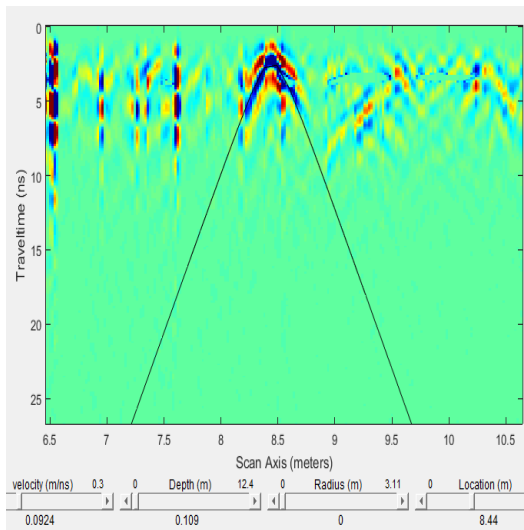
Η τομή γεωραντάρ F032 (σχήμα 3.13) προέρχεται από την ταράτσα του μνημείου. Διακρίνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με τη λιθοδομή (κόκκινος κύκλος) οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων στα 10-20ns, στα 6-22m από την αρχή της γραμμής μελέτης.

Η τομή γεωραντάρ F035 (σχήμα 3.14) προέρχεται από την ταράτσα του μνημείου. Διακρίνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με τη λιθοδομή (κόκκινος κύκλος) οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων στα 15-28ns, στα 6m από την αρχή της γραμμής μελέτης. Επίσης εμφανίζεται ζώνη εξασθένησης (μπλέ κύκλος) στα 5-15ns, στα 11m από την αρχή της γραμμής μελέτης.

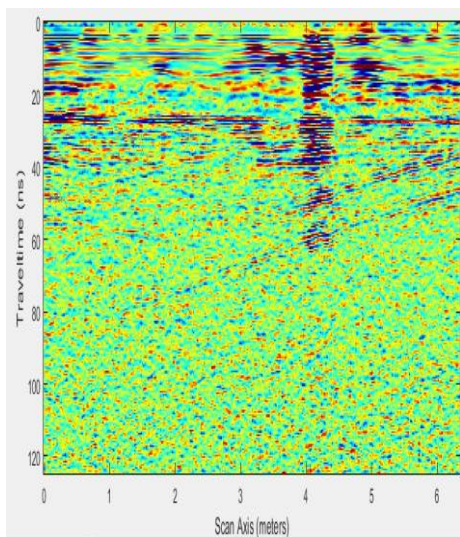
A)



B)



Σχήμα 3.15. A) Η τομή γεωραντάρ F029. B) Εικόνα με περιθλώμενα κύματα στα 8.44m και 2.5ns περίπου, με ταχύτητα $u=0.0924\text{m/ns}$ για δομή σε βάθος 0.109m.



Σχήμα 3.16. Η τομή γεωραντάρ F049.

Η τομή γεωραντάρ F029 (σχήμα 3.15.A) προέρχεται από εσωτερικό τοίχο του μνημείου στο σημείο της ράμπας με συχνότητα εκπομπής 400Hz. Διακρίνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με τη λιθοδομή οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων στα 15-30ns, στα 6m 10m και 16m από την αρχή της γραμμής μελέτης. Το σχήμα 3.15.B παρουσιάζει περίθλαση στα 8.44m και 2.5ns περίπου, με ταχύτητα $u=0.0924\text{m/ns}$ για δομή σε βάθος 0.109m.

Η τομή γεωραντάρ F049 (σχήμα 3.16) προέρχεται από εσωτερικό τοίχο του μνημείου στο σημείο της ράμπας με συχνότητα εκπομπής 900Hz. Έχει διασκοπηθεί κατά μήκος της ίδιας γραμμής με την τομή F029, αλλά με μέτρηση συχνότητας 900Hz και επομένως καλύτερη ακρίβεια αλλά μικρότερο βάθος.

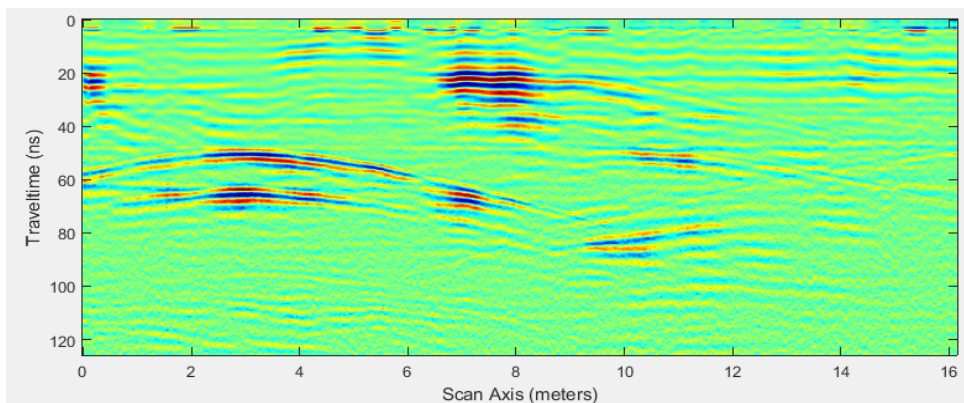
Από τη μελέτη των τομών του γεωραντάρ που έγιναν στο μνημείο προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- Στις τομές του γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκαν στο δάπεδο του μνημείου καταγράφονται ανακλάσεις από θολωτές δομές (σημειώνονται σε κίτρινους κύκλους).
- Στις τομές του γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκαν στους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους του μνημείου παρατηρούνται εξασθετισμένες καταγραφές οι οποίες αποδίδονται στην αυξημένη υγρασία καθώς και πολλαπλές ανακλάσεις οι οποίες αποδίδονται στη λιθοδομή.

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή

Για την ερμηνεία των δεδομένων και την ανάλυση ταχυτήτων δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με συνθετικά δεδομένα προσομοιώντας την γραμμή F006.



Σχήμα 4.1. Τομή γεωραντάρ F006

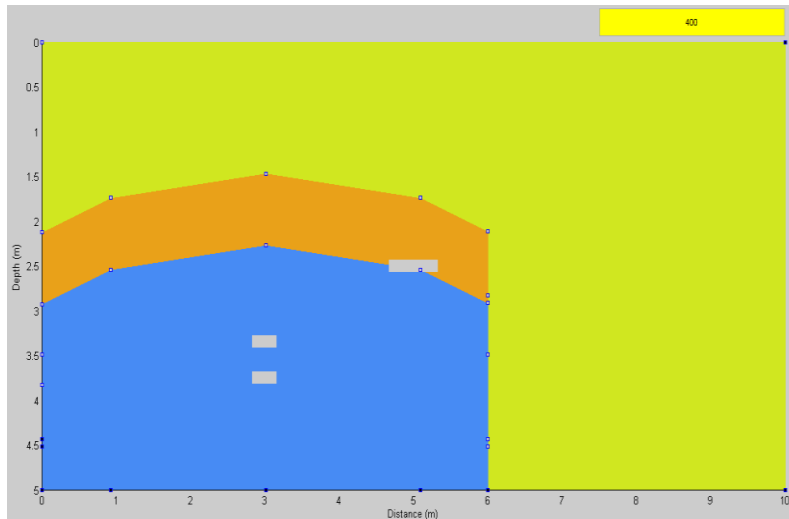
4.1 Συνθετικά δεδομένα

Κατά την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης καμάρας. Η δομή αυτή περιείχε νερό ή αέρα. Στόχος ήταν να γίνει ανάλυση των ανακλάσεων ώστε να προκύψει αν αυτές μετά την χωροθέτηση απεικονίζουν παρόμοια δομή με αυτή των πραγματικών δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα για να δημιουργηθεί η κάθε συνθετική τομή γεωραντάρ το πρόγραμμα ζητούσε 3 παραμέτρους: αντίσταση, διηλεκτρική σταθερά και μαγνητική διαπερατότητα. Αυτές οι παράμετροι εισήχθησαν για το μοντέλο υπεδάφους. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι οι συνθετικές τομές έγιναν για συχνότητα 400 MHz και για να γίνει η χωροθέτηση των συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι ταχύτητες μεταξύ 0,03m/ns - 0,06 m/ns για την δημιουργία του υπερκείμενου στρώματος της καμάρας και 0,3 m/ns για το υποκείμενο στρώμα της καμάρας.

4.2 Μοντέλο

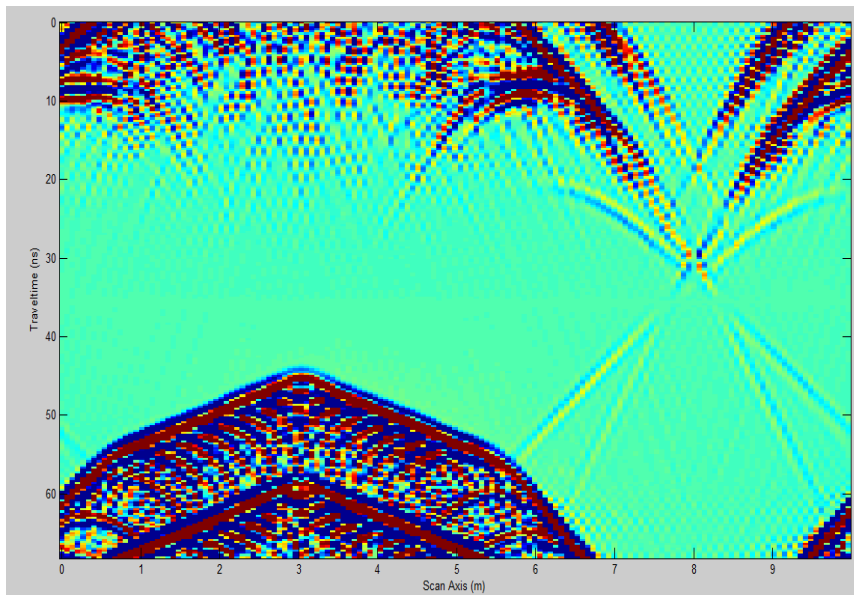
Για την ερμηνεία των δεδομένων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το πρόγραμμα *matgpr*, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία του παρακάτω μοντέλου, με σκοπό την σύγκριση των συνθετικών δεδομένων που αντιστοιχούν σε αυτό το μοντέλο με τα πραγματικά δεδομένα της έρευνας.



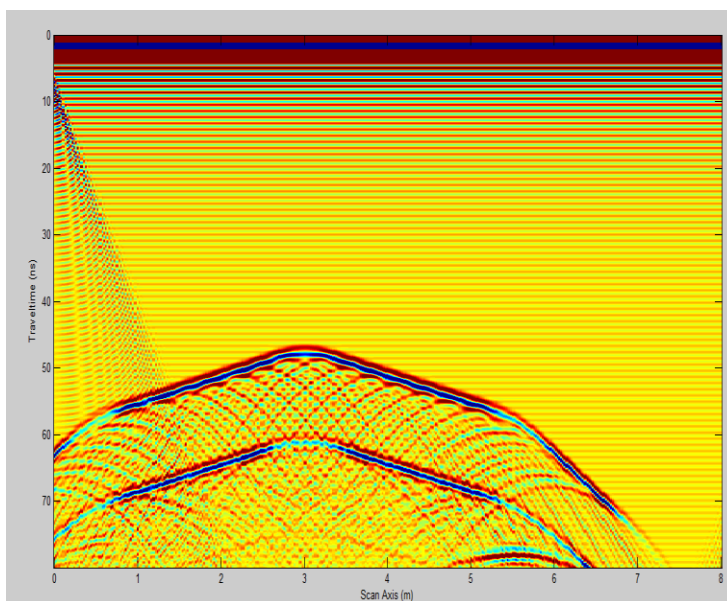
Σχήμα 4.2. Ομοίωμα καμάρας στο πρόγραμμα *matgpr*.

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε (σχήμα 4.2.) προσομοιώνει την γραμμή F006 (σχήμα 4.1.). Το άνω τμήμα (πορτοκαλί σχηματισμός) αποτελεί την κορυφή της καμάρας και το κάτω τμήμα (μπλε σχηματισμός) τον κενό χώρο όπου διέρχεται το νερό.

Για την δημιουργία των συνθετικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν το μοντέλο του σχήμα 4.2 δύο μέθοδοι, η μία επιλύει την κυματική εξίσωση με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στον χώρο x - z - t (FDTD 2D Modelling) και η άλλη στο χώρο συχνότητας κυματαριθμού (Split-Step 2D Modelling). Οι συνθετικές τομές γεωραντάρ (σχήματα 4.3. και 4.4.) αφορούν τη γραμμή F006 (σχήμα 4.1.). Τα συνθετικά δεδομένα είναι συγκρίσιμα με τα πραγματικά και επαληθεύουν την ερμηνεία που δόθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την ύπαρξη θολωτών δομών στην μεγάλη αίθουσα στο ΝΑ τμήμα του φρουρίου.



Σχήμα 4.3. Συνθετική τομή γεωραντάρ με εφαρμογή του *Split-Step 2D Modelling*.



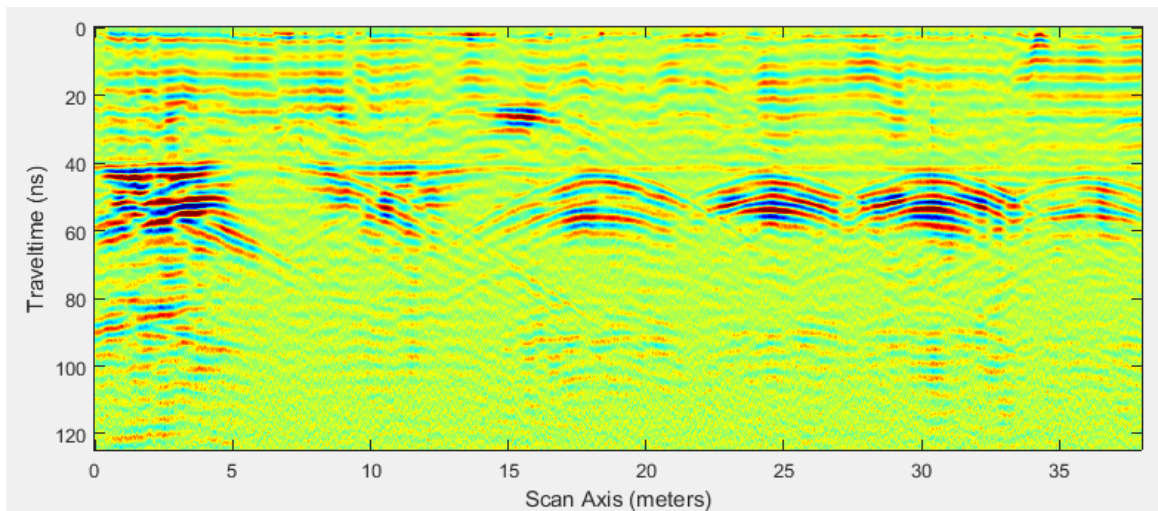
Σχήμα 4.4. Συνθετική τομή γεωραντάρ με εφαρμογή του *FDTD 2D Modelling*.

Η δημιουργία του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με κεντρική συχνότητα εκπομπής 400MHz και για ταχύτητες μεταξύ 0,03m/ns - 0,06 m/ns στο υπερκείμενο στρώμα και στο υποκείμενο στρώμα της καμάρας είναι 0,3 m/ns. Το πάχος του υπερκείμενου υλικού υπολογίζεται μεταξύ 0,75m - 1,5m και το πάχος του στρώματος της καμάρας είναι 75cm. Επιπλέον, οι χρόνοι εμφάνισης των δομών των πραγματικών δεδομένων της γραμμής F006 συμπίπτουν με το χρόνο εμφάνισης της δομής του μοντέλου, ώστε να επιτυγχάνεται ορθώς η σύγκριση μεταξύ τους.

Από την σύγκριση και την μελέτη των συνθετικών και των πραγματικών δεδομένων προκύπτει ότι η κατασκευή του μνημείου, του οποίου τα θεμέλια βρίσκονται εντός του θαλάσσιου χώρου, περιλαμβάνει την δημιουργία θολωτών καμάρων. Οι καμάρες αυτές αποτέλεσαν την βάση στήριξης του υπερκείμενου επιπέδου (δάπεδο κτιρίου), καθώς επίσης η ύπαρξή τους διευκολύνει την διέλευση της θάλασσας.

Παρατηρείται επίσης ότι στα σημεία που βρίσκονται οι καμάρες αυτές, βρίσκονται αντίστοιχες στην οροφή εντός του χώρου στο ισογείο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αντίστοιχη προσομοίωση είναι δυνατό να γίνει και με άλλες γραμμές μελέτης των πραγματικών δεδομένων όπως με την γραμμή F011 (σχήμα 4.5.).



Σχήμα 4.5. Τομή γεωραντάρ F011

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

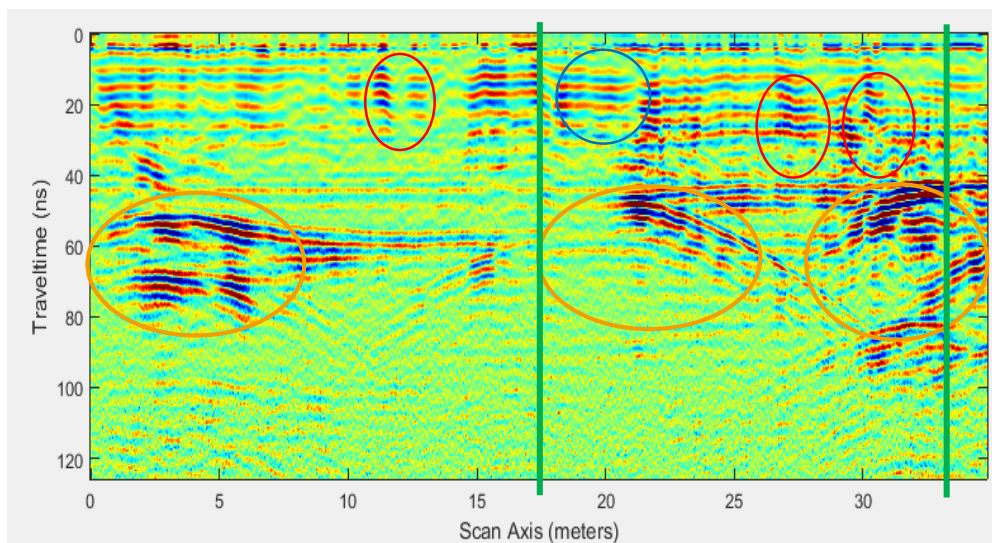
Η εφαρμογή της γεωφυσικής μεθόδου του γεωραντάρ στην αρχαιολογία παρέχει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Από την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ και μελετώντας τα συνθετικά δεδομένα που δημιουργήθηκαν και παρουσιάζονται παραπάνω, συμπεραίνεται η ύπαρξη ανωμαλιών σε πολλά σημεία του μνημείου.

Συγκεκριμένα, εντοπίζονται ανωμαλίες στις τομές του γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκαν στο δάπεδο του μνημείου, όπου καταγράφονται ανακλάσεις από θολωτές δομές. Επίσης, στις τομές του γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκαν στους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους καθώς και την ταράτσα του μνημείου, παρατηρούνται εξασθετισμένες καταγραφές οι οποίες αποδίδονται στην αυξημένη υγρασία καθώς και πολλαπλές ανακλάσεις οι οποίες αποδίδονται στη λιθοδομή.

Οι ανωμαλίες στις εικόνες του γεωραντάρ διακρίνονται και σημειώνονται σε κύκλους ανάλογα με την αιτία που τις προκαλεί. Σε μπλε κύκλο σημειώνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με συγκέντρωση υγρασίας η οποία προκαλεί εξασθένηση στα ΗΜ κύματα. Σε κόκκινο κύκλο σημειώνονται ανωμαλίες που σχετίζονται με τη λιθοδομή οι οποίες προκαλούν το φαινόμενο των πολλαπλών ανακλάσεων. Σε κίτρινο κύκλο σημειώνονται καταγραφές οι οποίες σχετίζονται με δομές στη βάση του κτιρίου, με πράσινες γραμμές διακρίνονται τα σημεία τομής τους με άλλες τομές και με μοβ κύκλο τα σημεία περιθλάσεων που οφείλονται στην ύπαρξη γωνιών και σε πλάγιους τοίχους.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τομή F010, όπως φαίνεται παρακάτω.



Τομή με τη γραμμή F006

Τομή με τη γραμμή F055

Η τομή γεωραντάρ F010

5.2 Προτάσεις

Με σκοπό την βέλτιστη εκτίμηση και αξιολόγηση των δομών του μνημείου και της διάβρωσής του, προτείνεται μια εκ νέου πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας με την μέθοδο του γεωραντάρ, πιο πυκνής διάταξης γραμμών στο δάπεδο, την ταράτσα και τους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους του μνημείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξίου Γ., Αρχές Ασύρματης Επικοινωνίας Δεδομένων ΜΔΕ "ΕΤΥ" Ή Ασύρματα Ηλεκτρονικά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα ΜΔΕ "ΣΕΣΕ", κεφάλαιο 7^ο Διάδοση Η/Μ Κυμάτων & 8^ο, Κεραίες
(<https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/kef08.pdf>)
- Βασιλάκης Κ. (Οκτώβριος 2008), Γεωτεχνική Έρευνα Με Την Χρήση Σύγχρονων Γεωφυσικών Μεθόδων, Ηράκλειο
- Βαφείδης Α. (2001), Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Έρευνας, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών πόρων.
- Πουλιούδης Γ. (2001), Μέθοδοι Επεξεργασίας Καταγραφών Γεωραντάρ, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πουλιούδης Γ. (2000), Γεωφυσική διασκόπηση Με Τη Μέθοδο Του Υπεδάφιου Ραντάρ Στον Αρχαιολογικό Χώρο Της Ιτάνου Λασιθίου, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Ρεμπελάκης Ε. (2009), Το φως Κυματικός Και Σωματιδιακός Χαρακτήρας, Διπλωματική εργασία, ΕΑΠ, , Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής ΙΙ, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
(<http://eclass.teipat.gr/eclass/modules/document/file.php/742158/Course10PhysicsIIdpdf>)
- Σπανουδάκης Ν. (Νοέμβριος 2002), Ανάπτυξη Μεθόδων Επεξεργασίας Δεδομένων Γεωραντάρ Και Εφαρμογή Σε Περιβαλλοντικά Προβλήματα, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: "Περιβαλλοντική Γεωτεχνολογία", Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Χανιά.
- Σταμούλη Π., Συμβολή της προσομοίωσης δεδομένων γεωραντάρ στην απεικόνιση υπόγειων δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- Τζάνης Α. (Μάιος 2010), Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Γεωφυσικής, Αθήνα.
- Τσόκας Γ. et al (Δεκέμβριος 2012), Γεωφυσική Διασκόπηση στα Ακοιτικά Καλαμάτας.

- Τσουρούλα Ι. και Μάρκος Α. (2008), Επεξεργασία και Έρμηνεία των Γεωφυσικών Δεδομένων από την Έρευνα στον Αρχαιολογικό χώρο του Ιερού του Ποσειδώνα στη Καλαύρεια.
- Φινν Α., Θεμελιώδης πανεπιστημιακή φυσική τόμος ΙΙ
- Χατζηγεωργίου Μ. (Νοέμβριος 2010), Εφαρμογή Μεθόδων Επεξεργασίας Δεδομένων Γεωραντάρ Για Τον Εντοπισμό Θαμμένων Ανθρωπογενών Δομών, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Χορευτάκη Γ. (2006), Ανάπτυξη Μεθόδου Επεξεργασίας Δεδομένων Γεωραντάρ Για Τον Εντοπισμό Διάκενων Και Εγκοίλων Σε Ασβεστολιθικούς Σχηματισμούς. Εφαρμογή Σε Δεδομένα Από Το Λατομείο Ζωφόρων, Ν. Ηρακλείου, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Χρηστάκης Χ. (Φεβρουάριος 2016), Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων Υπεράνω Επιπέδου Εδάφους Με Απώλειες, Για Εφαρμογές Στις Ασύρματες Τηλεπικοινωνίες, Ακριβής Διατύπωση Και Επίλυση Του Προβλήματος Στον Φασματικό Χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, Αθήνα.

ΛΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bevan B. (September 1991), The search for graves, Geophysics. Vol. 56. No. 9, p.p. 1310-1319.
- Boyle R. and Thomas R. (1988), Computer Vision: A First Course, Blackwell Scientific Publications, p.p. 32-34.
- Conyers L. (June, 2004), Moisture and Soil Differences as Related to the Spatial Accuracy of GPR Amplitude Maps at Two Archaeological Test Sites, Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, p.p. 21-24, Delft, The Netherlands
- Corcoran K. et al (1998), Geophysical Investigation of a 19th Century Archeological Site, Boston College, Hager GeoScience, Inc., Waltham, MA.
- Goodman D et al (2006), GPR Overlay Analysis for Archaeological Prospection, , 11th International Conference On Ground Renetrating Radar, p.p. 19-22, Columbus Ohio, Usa.
- Davies E. (1990), Machine Vision: Theory, Algorithms and Practicalities, Academic Press, Chap. 3.
- Gracia V. (2008), GPR survey to study the restoration of a Roman monument, Journal of Cultural Heritage 9, p.p. 89-96.

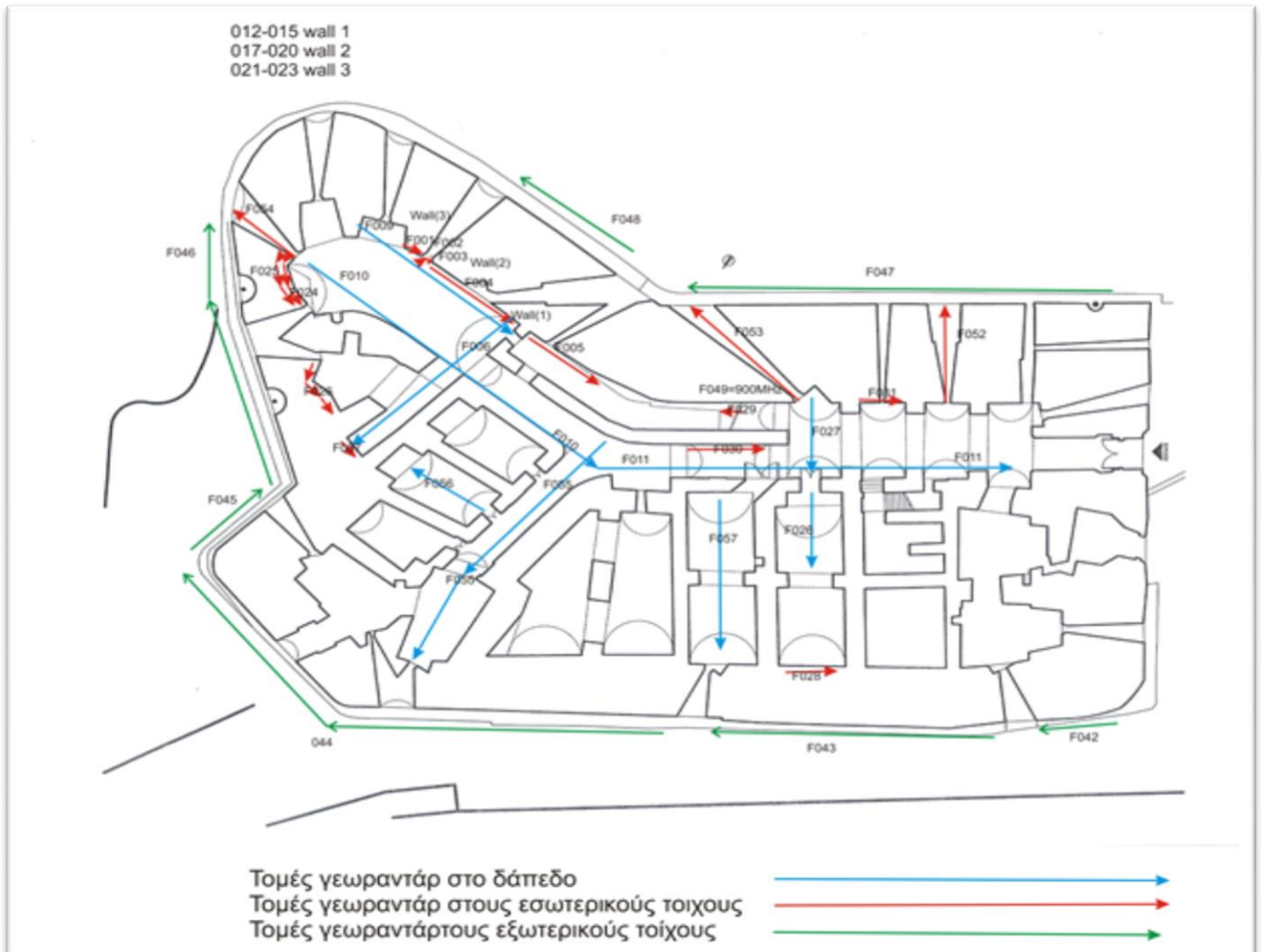
- Gracia V. et al, (2000), GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral, Spain, *Journal Of Applied Geophysics* 43, p.p. 167-174.
- Labropoulos K., Moropoulou A. (2013), “Ground penetrating radar investigation of the bell tower of the church of the Holy Sepulchre”, *Construction and Building Materials* , p.p. 689-700
- Leucci G. and Negri S. (2006), Use of ground penetrating radar to map subsurface archaeological features in an urban area, *Journal of Archaeological Science* 33, p.p. 502-512.
- Orlando L. and Slob E. (2008), Using multicomponent GPR to monitor cracks in a historical building, *Journal Of Applied Geophysics*, Volume 67, 4, p.p. 327-334
- Papadopoulos, N.G., Sarris, A., and Giapitsoglou, C. (2012a). Mapping the buried archaeological remains in the area of the old Turkish School of Rethymno (Crete, Greece) through the application of surface ERT and GPR techniques. In *Πρακτικά 5ού Σύμposiumού Ελληνικής Αρχαιομετρικής Εταιρείας, Επιστ. Επιμέλεια Ν. Ζαχαρίας, Μ. Γεώργακοπούλου, Κ. Πολύκρετη, Γ. Φακορελλής, Θ. Βακούλης, (Αθήνα: Εκδόσεις Παπαζήση)*, pp. pp. 101–116.
- Papadopoulos, N.G., Sarris, A., Salvi, M.C., Dederix, S., Souplos, P., and Dikmen, U. (2012b). Rediscovering the small theatre and amphitheatre of ancient Ierapytna (SE Crete) by integrated geophysical methods. *J. Archaeol. Sci.* 39, 1960–1973.
- Papadopoulos, N.G., Sarris, A., Fassoulas, C., Illiopoulos, G., and Hamdan, H. (2005). Contribution of Geophysical Investigations in the Paleontological Research for the recovery of *Deinotherium giganteum* from Siteia, Crete. In *6th European Geoparks Meeting, University of Aegean, Mytiline*.
- Spanoudakis N., M. Manataki, V. Niniou Kindeli, A.P. Vafidis (2011). GPR imaging at Aptaera archaeological site. 6th congress of Balkan Geophysical Society. 3-6 October 2011, Budapest
- Spanoudakis N., Antonios Vafidis, Chrissi Bourbou, Ilias Maras, Nikolaos Alevras, Mihalis Andrianakis (2008). Georadar Survey In The Venetian And Byzantine Fortification Walls Of Chania. 5o Symposium fo the Greek Archaeometry Company. 8 - 10 October 2008, Athens.
- Vernon D. (1991), *Machine Vision*, Prentice-Hall, Chap. 4.

ΧΡΗΣΙΜΑ LINK

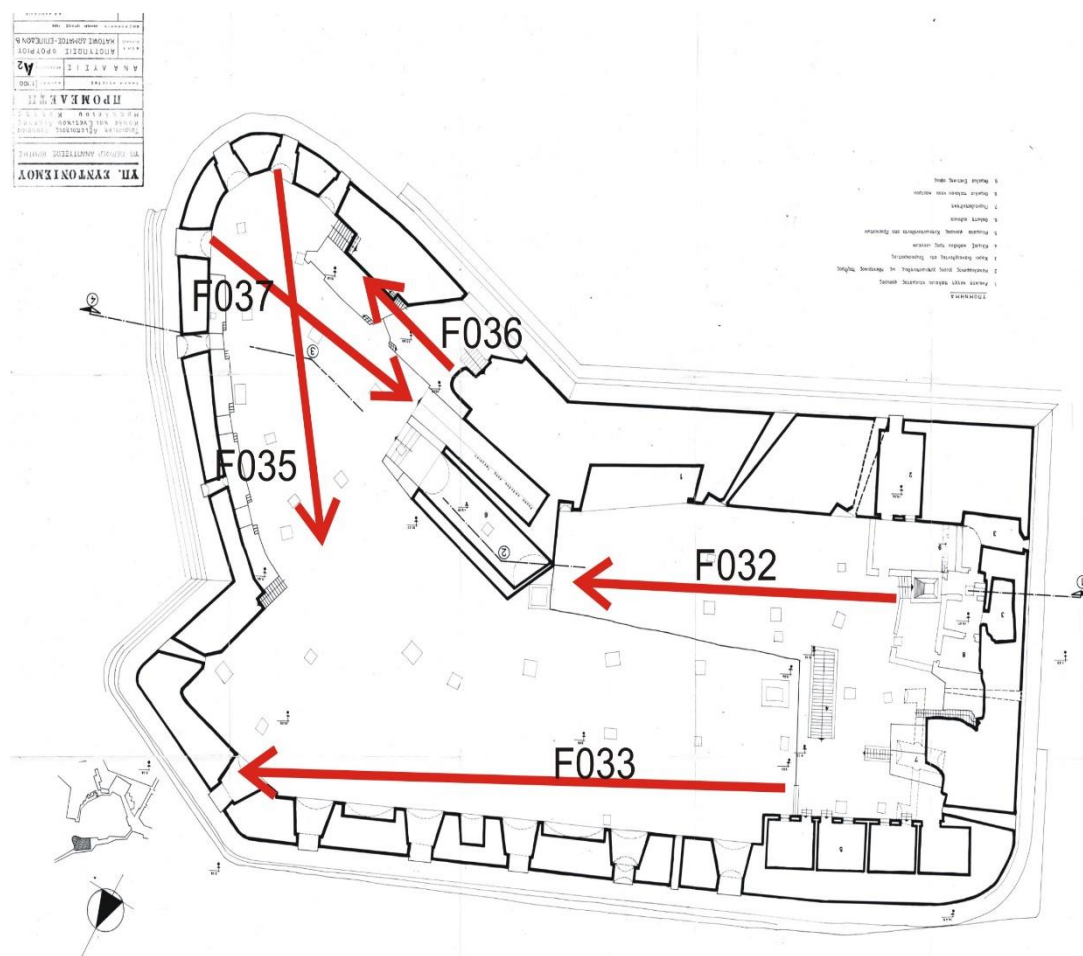
- Βικιπαίδεια
- Γεωφυσική Έρευνα και Γεωφυσικές Μέθοδοι», Κυπριακή Δημοκρατία, Υπουργείο Γεωργίας Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης (<http://goo.gl/DBFajy>)
- Εφαρμογές Γεωραντάρ», Terra Mentor (<http://goo.gl/u6UTyd>)
- Η μέθοδος GPR (γεωραντάρ)», Geo Analysis

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:

ΤΟΜΕΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΟ ΜΝΗΜΕΙΟ ΚΟΥΛΕ

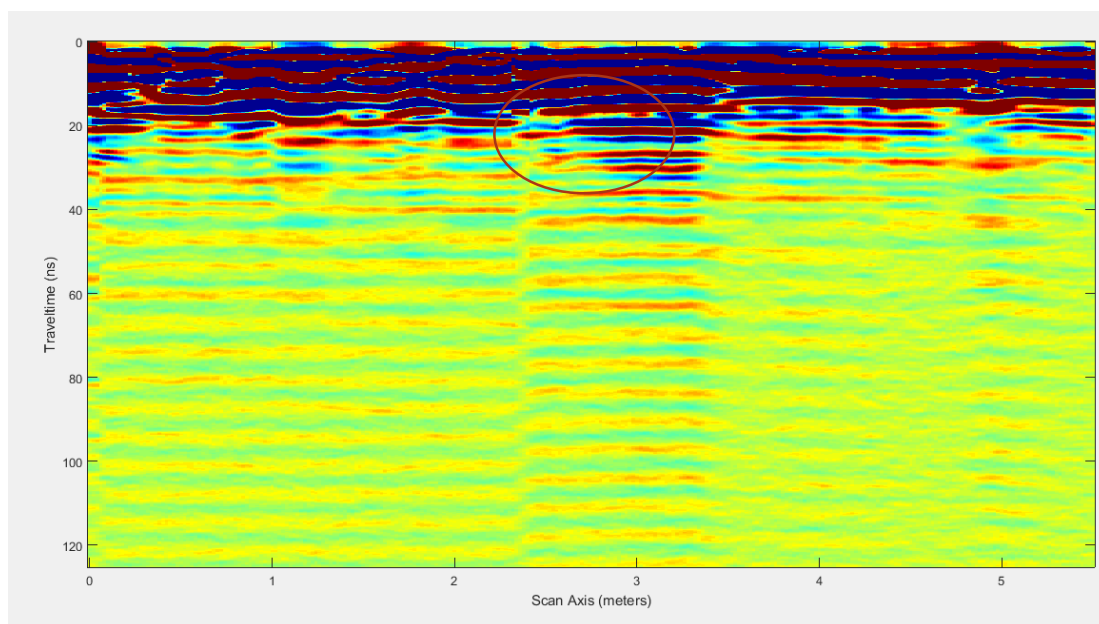


Κάτοψη Φρουρίου Κούλε. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης.

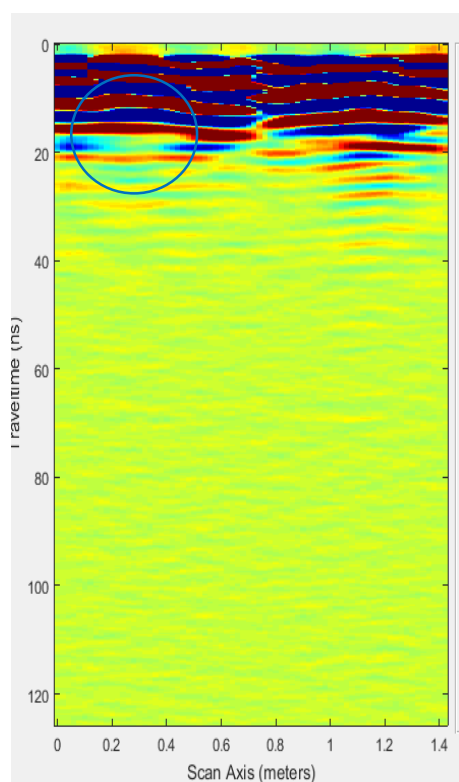


Κάτοψη της ταράτσας του μνημείου Κούλε. Διακρίνονται οι γραμμές μελέτης.

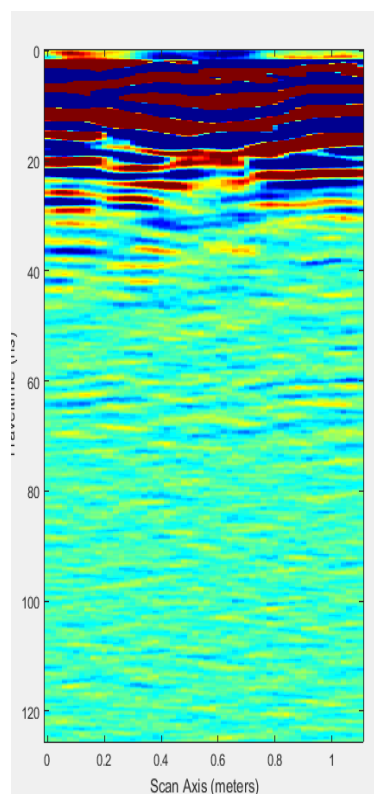
1. Τομές Γεωραντάρ στους εσωτερικούς τοίχους του κτιρίου.



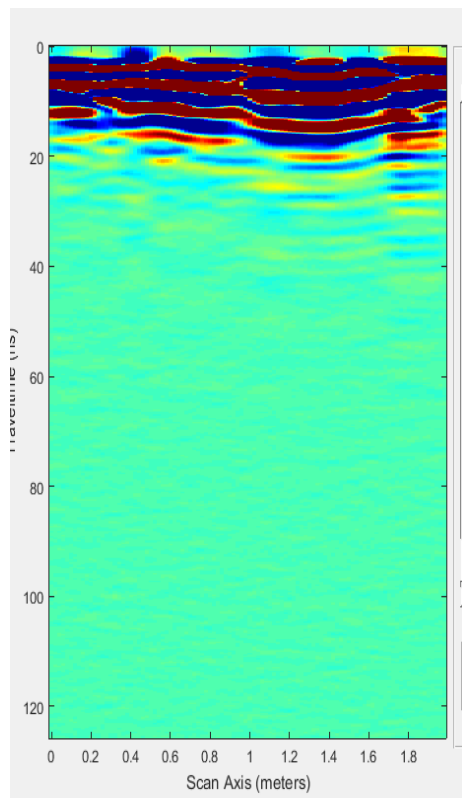
Τομή γεωραντάρ F001



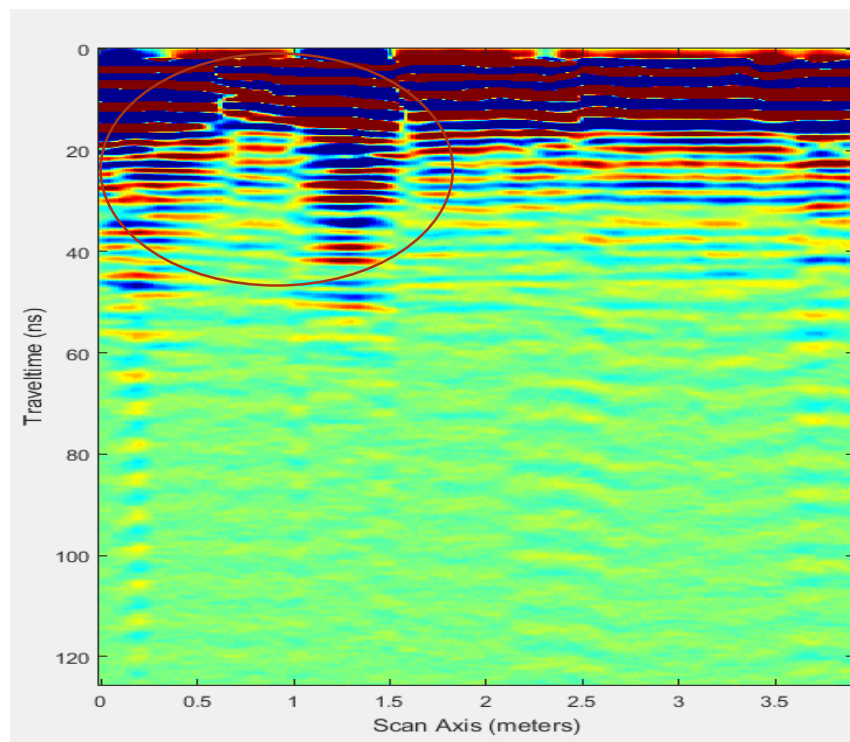
Τομή γεωραντάρ F002



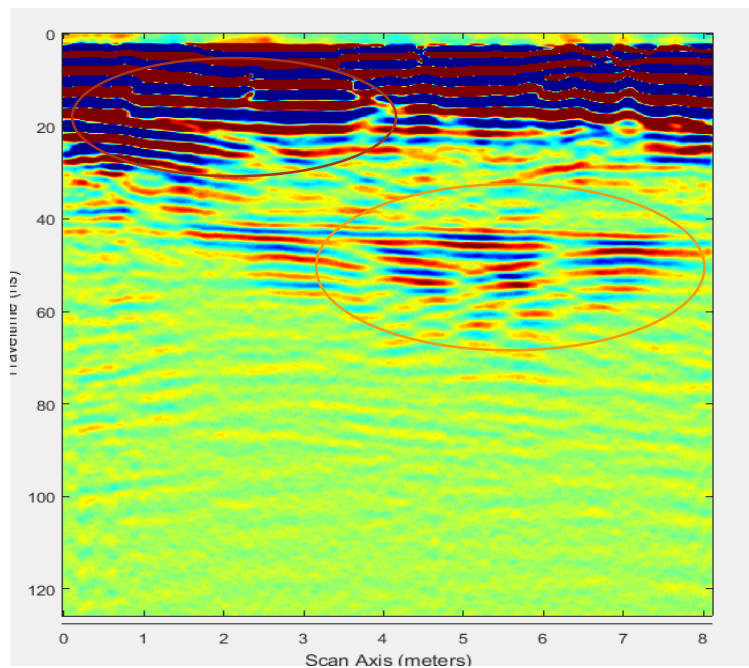
Τομή γεωραντάρ F003



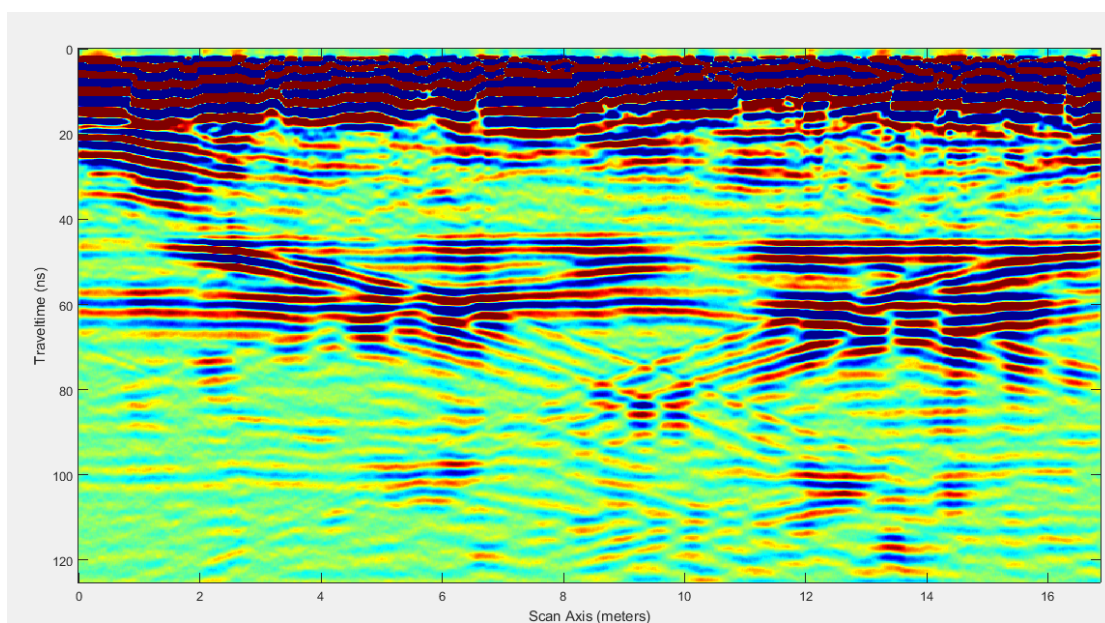
Τομή γεωραντάρ F004



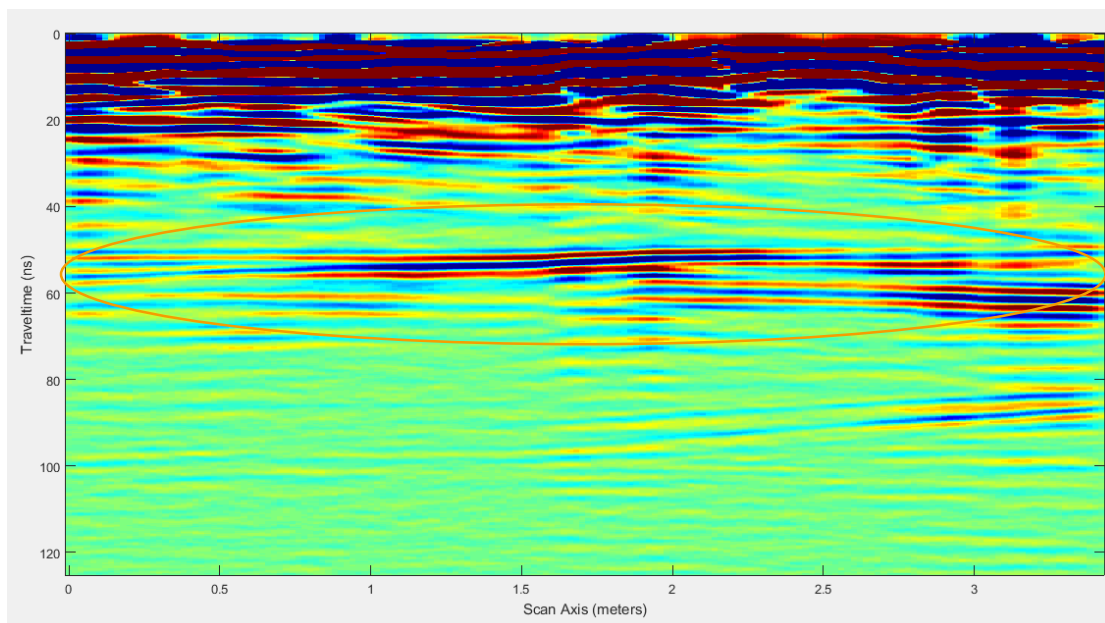
Τομή γεωραντάρ F005



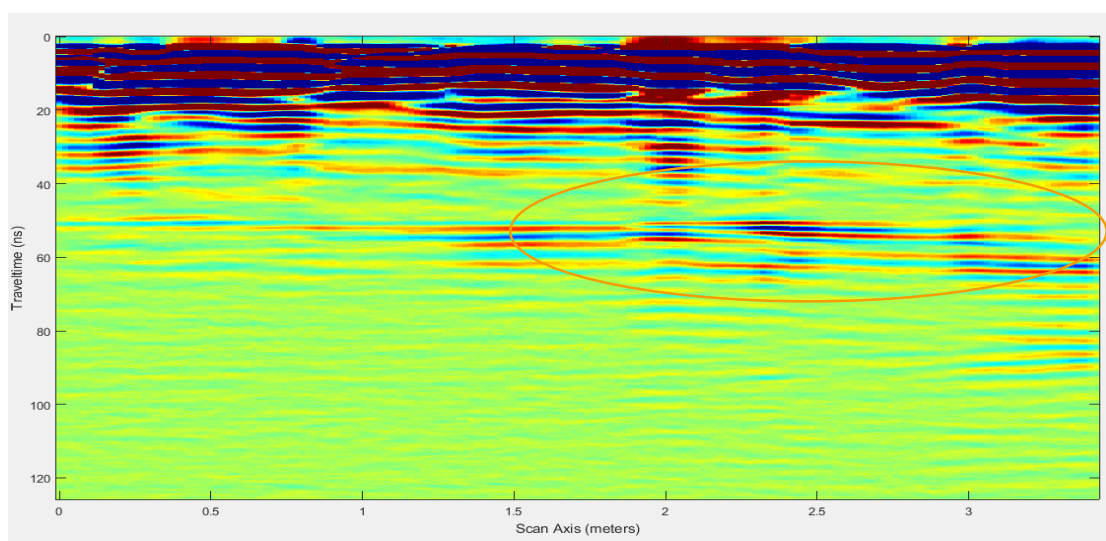
Τομή γεωραντάρ F007



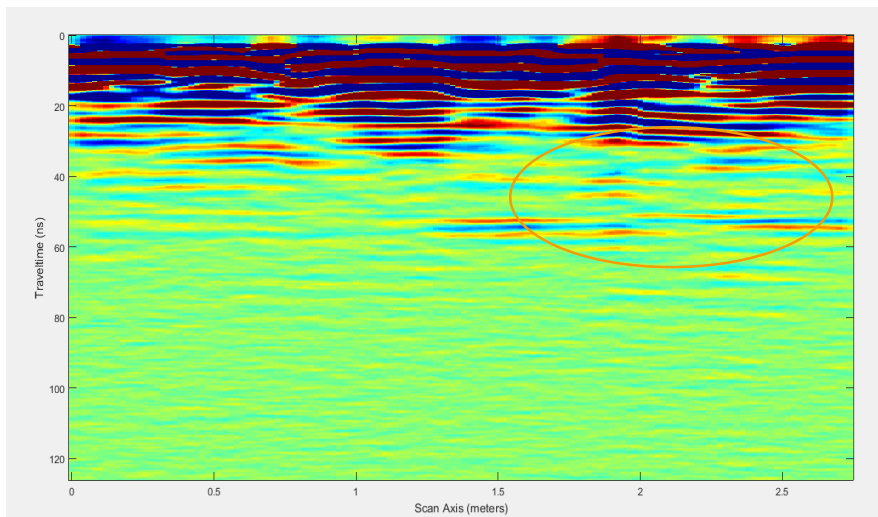
Τομή γεωραντάρ F008



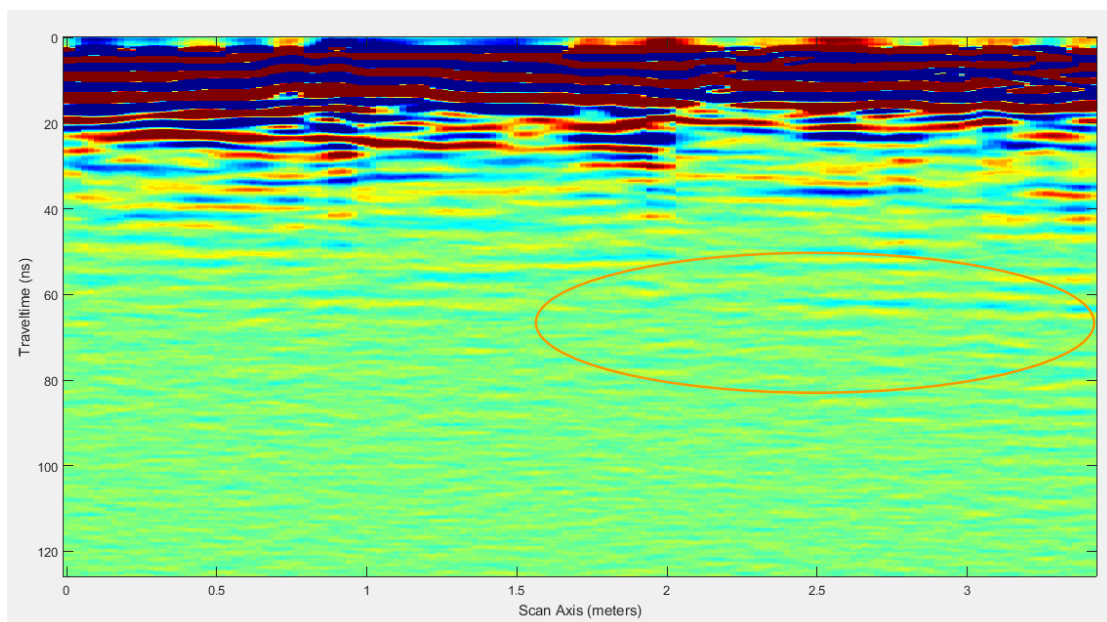
Τομή γεωραντάρ F012



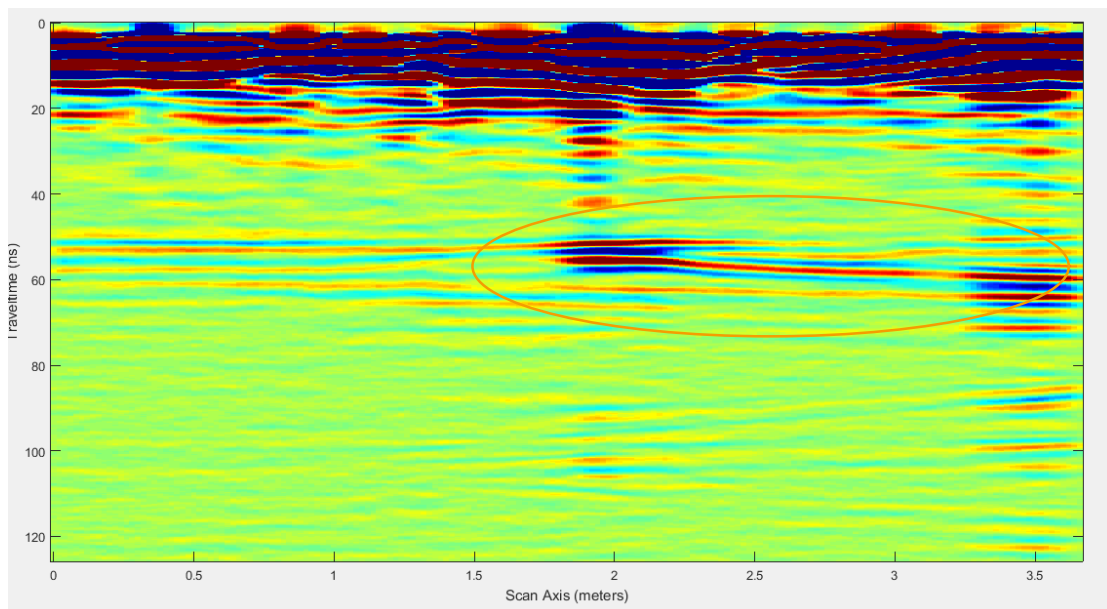
Τομή γεωραντάρ F013



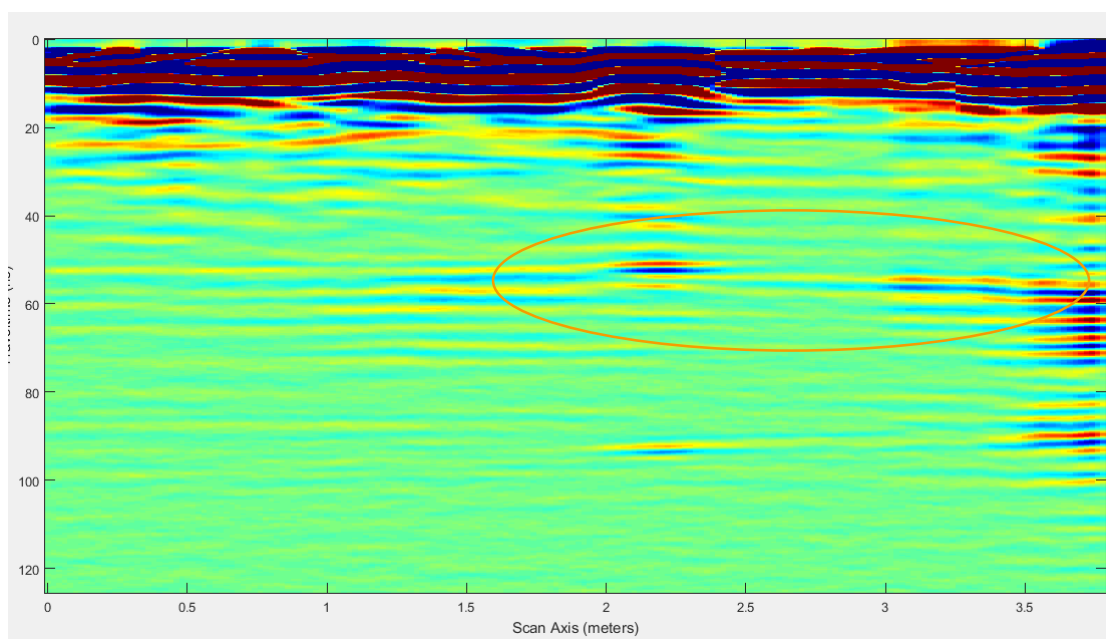
Τομή γεωραντάρ F014



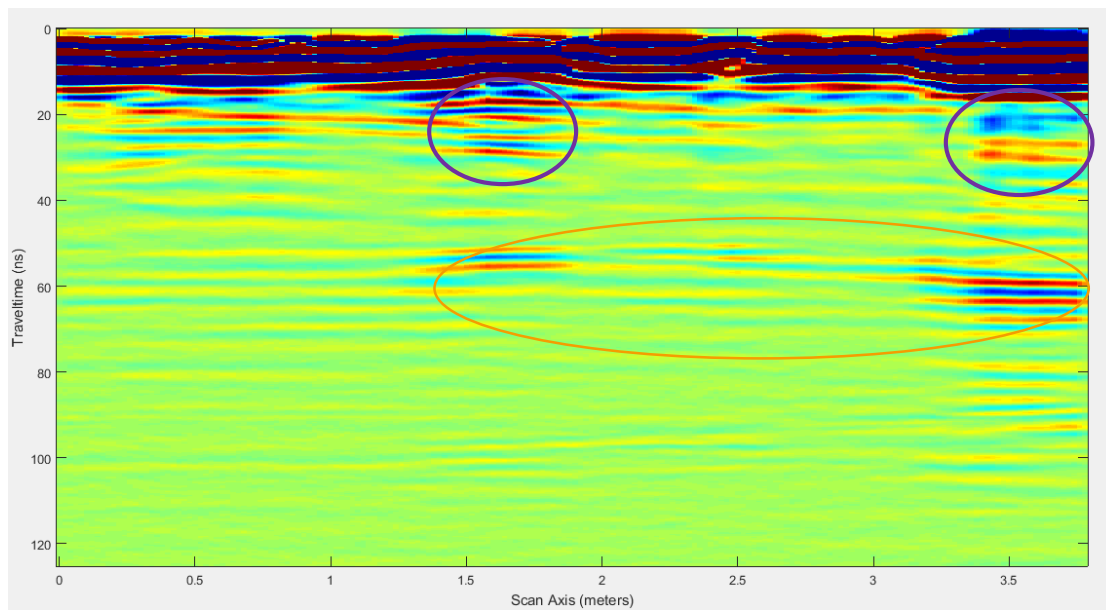
Τομή γεωραντάρ F015



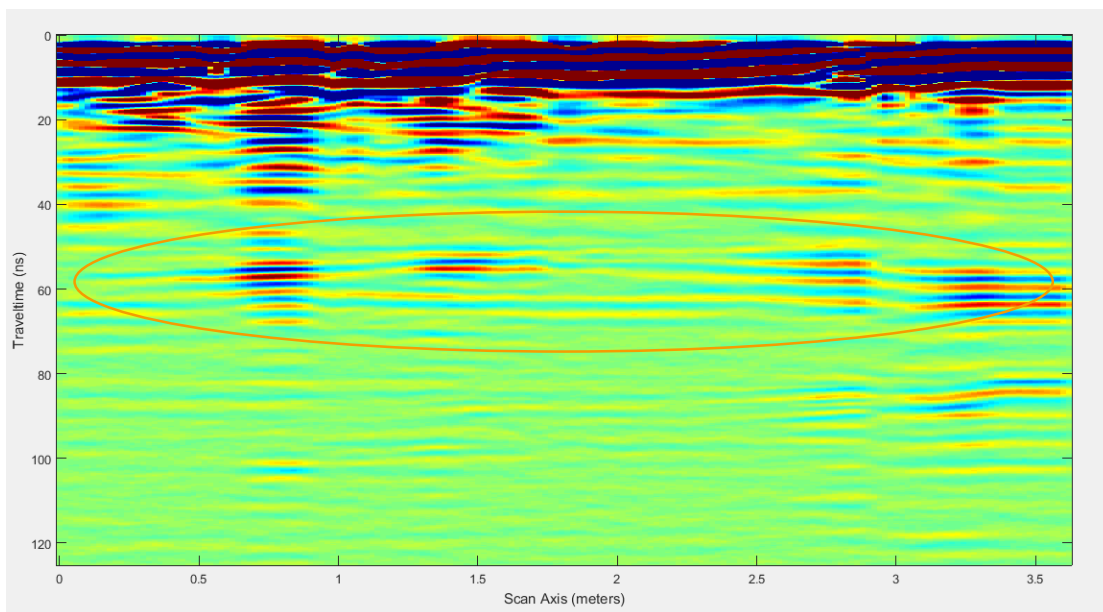
Τομή γεωραντάρ F017



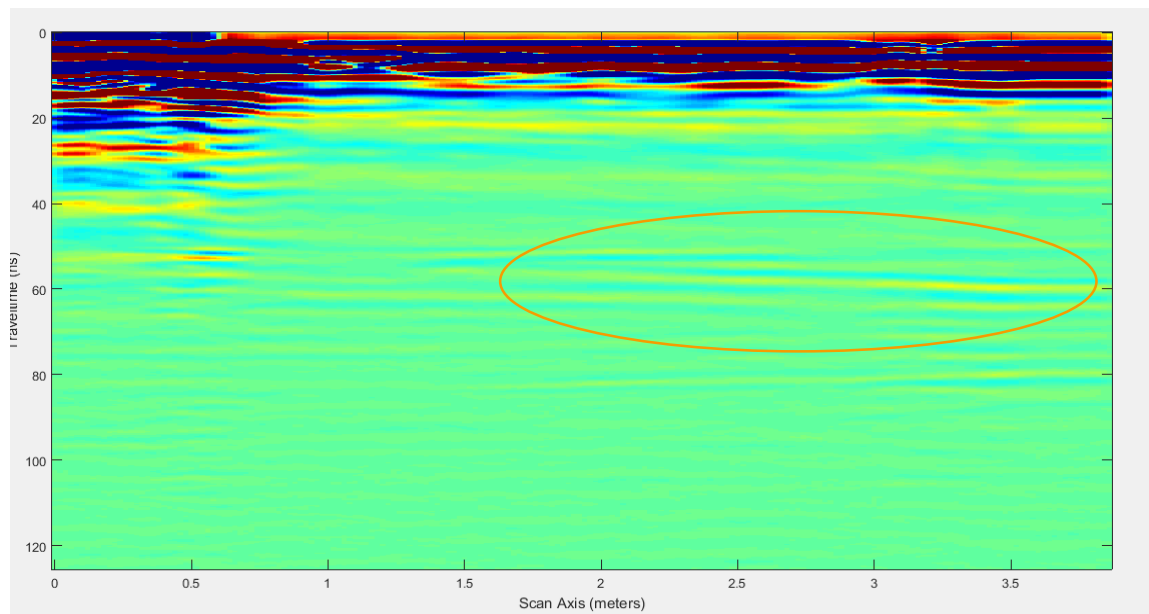
Τομή γεωραντάρ F018



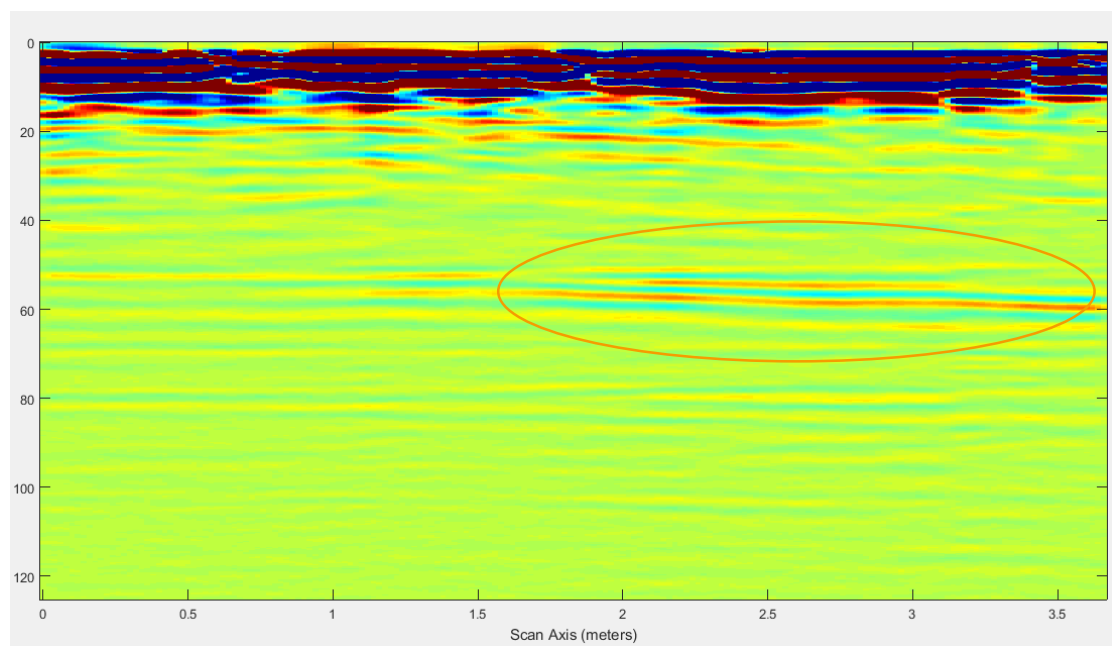
Τομή γεωραντάρ F019



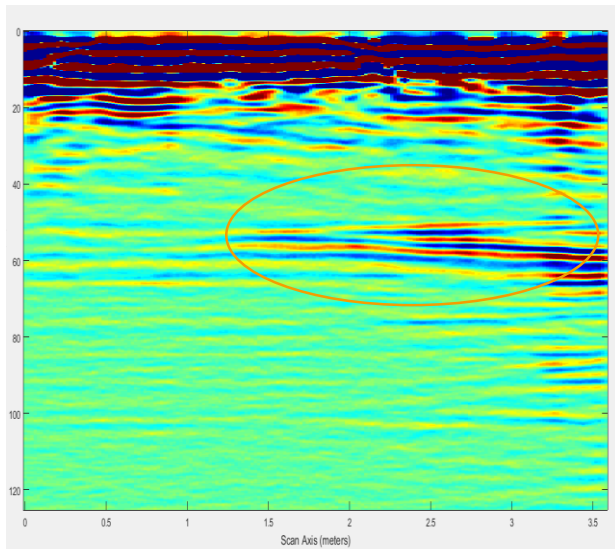
Τομή γεωραντάρ F020



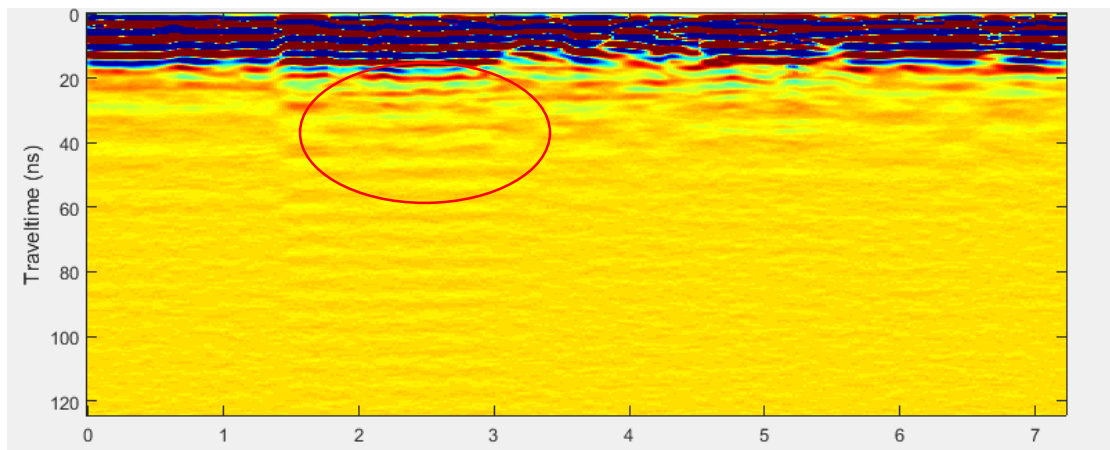
Τομή γεωραντάρ F021



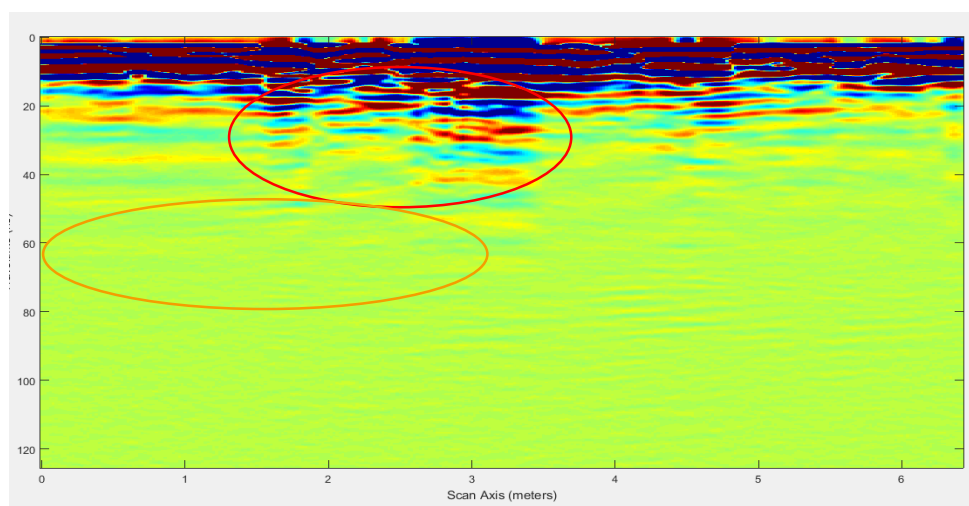
Τομή γεωραντάρ F022



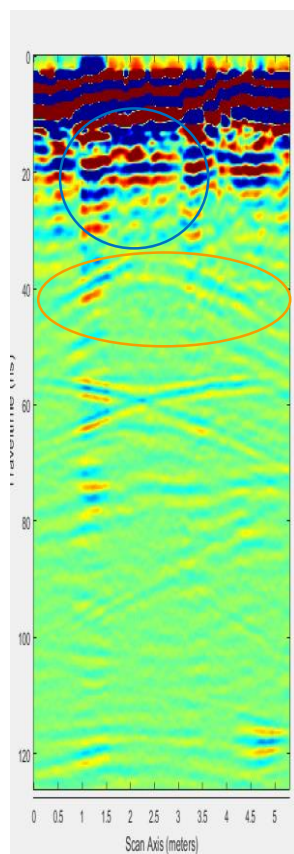
Τομή γεωραντάρ F023



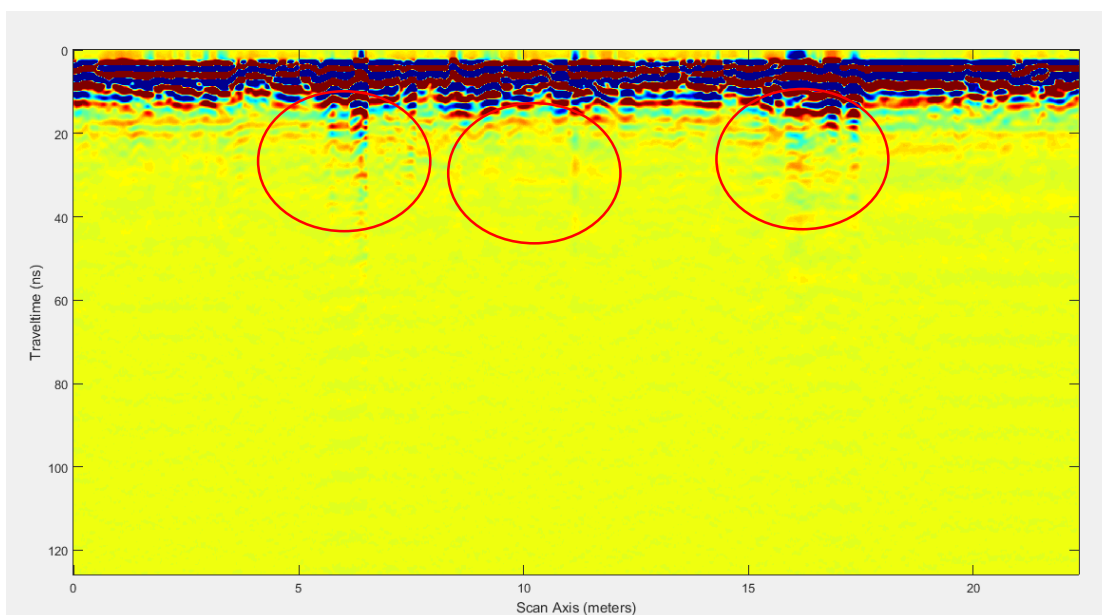
Τομή γεωραντάρ F024



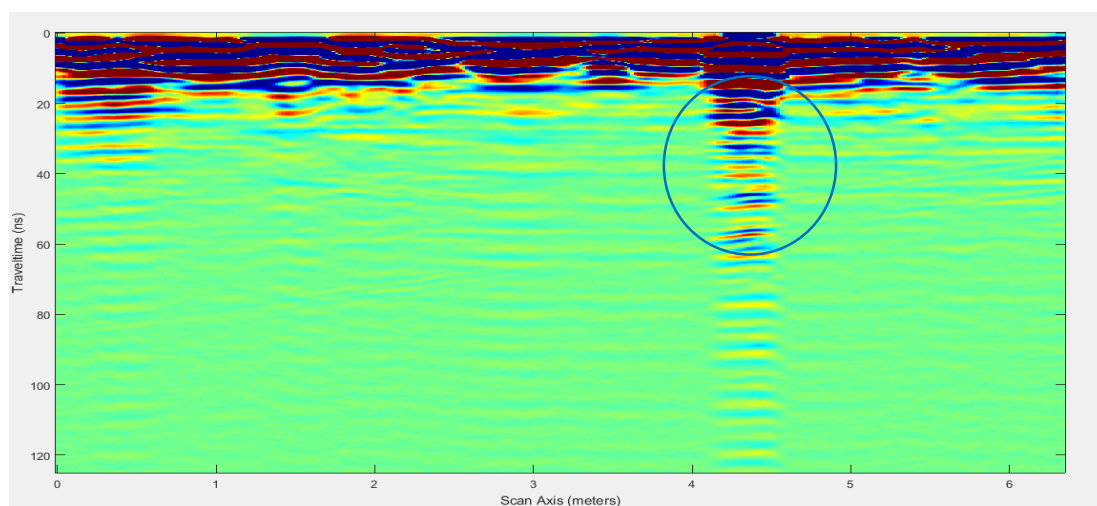
Τομή γεωραντάρ F025



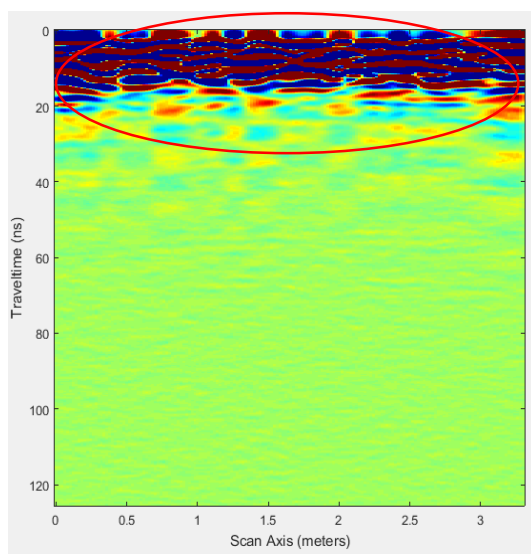
Τομή γεωραντάρ F028



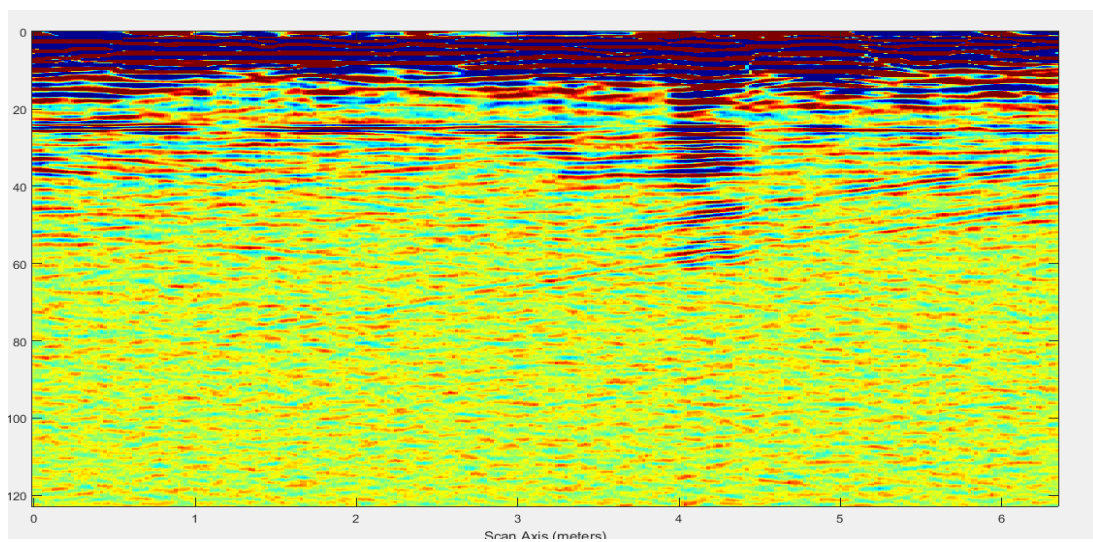
Τομή γεωραντάρ F029



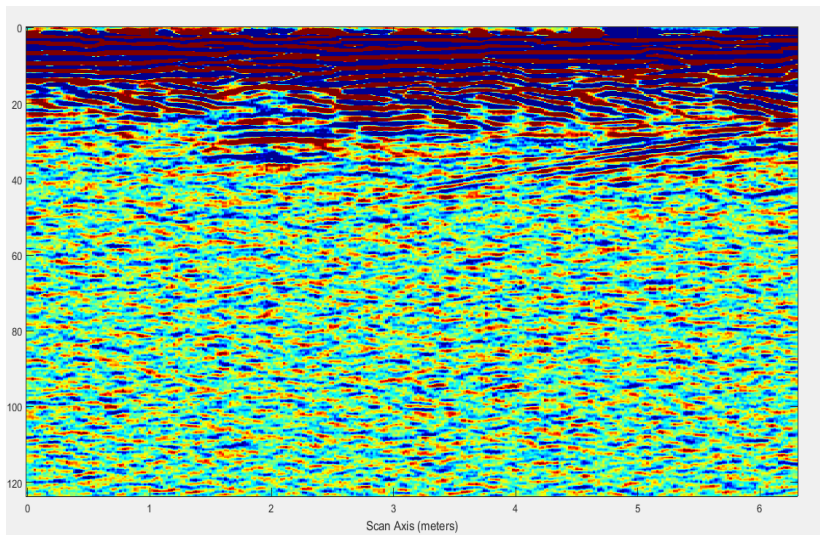
Τομή γεωραντάρ F030



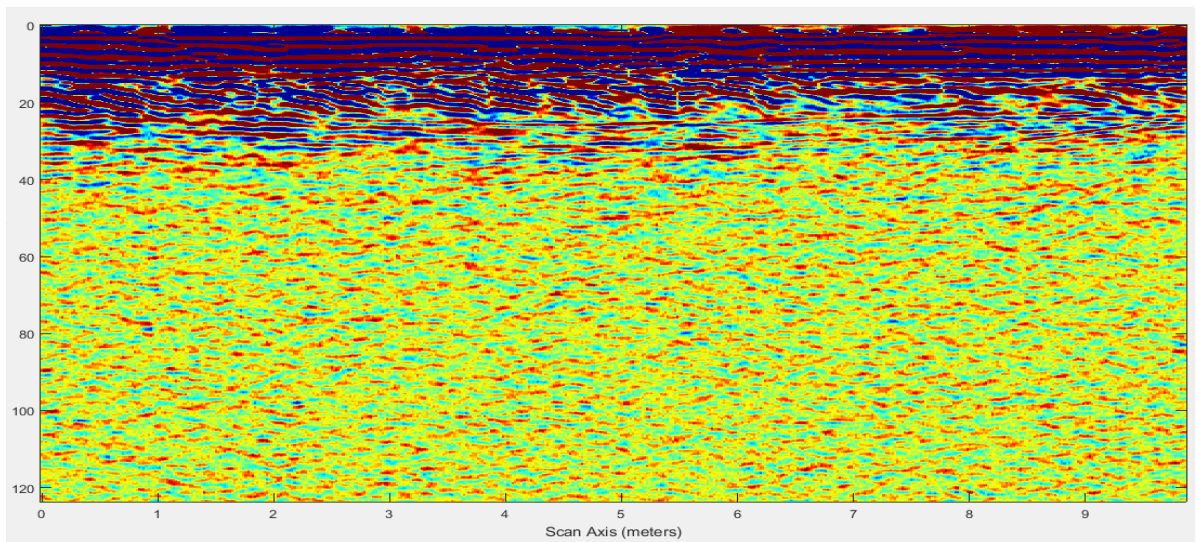
Τομή γεωραντάρ F031



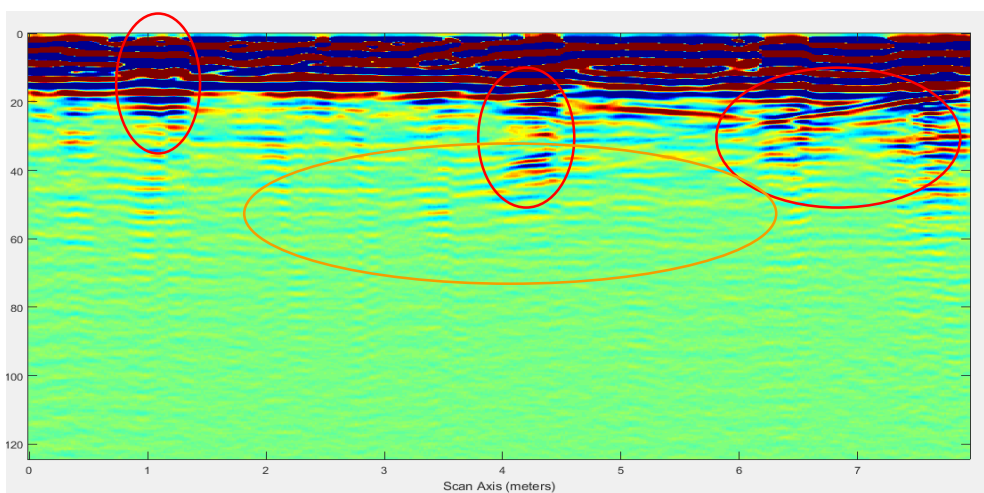
Τομή γεωραντάρ F049



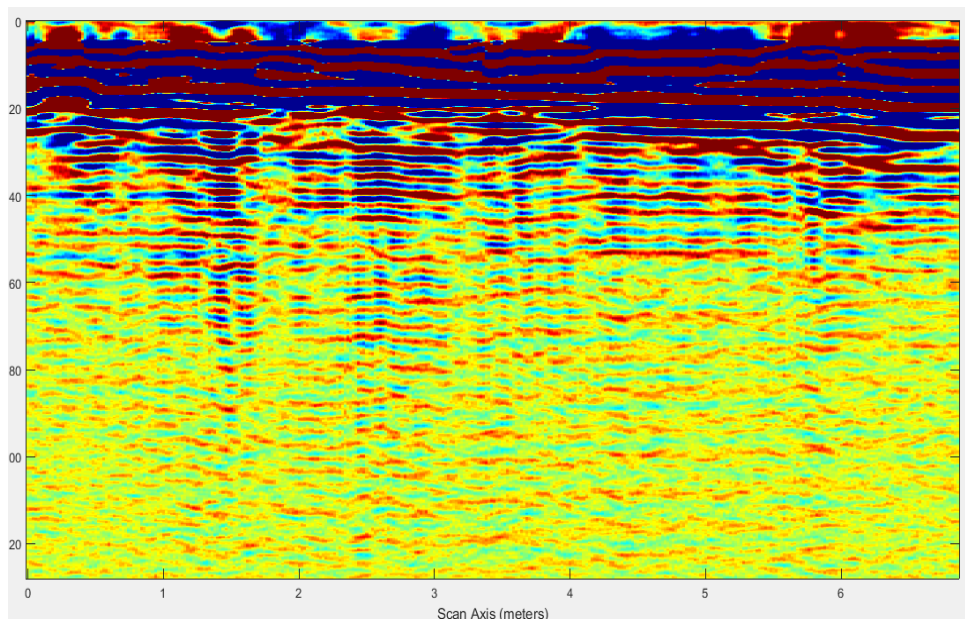
Τομή γεωραντάρ F050



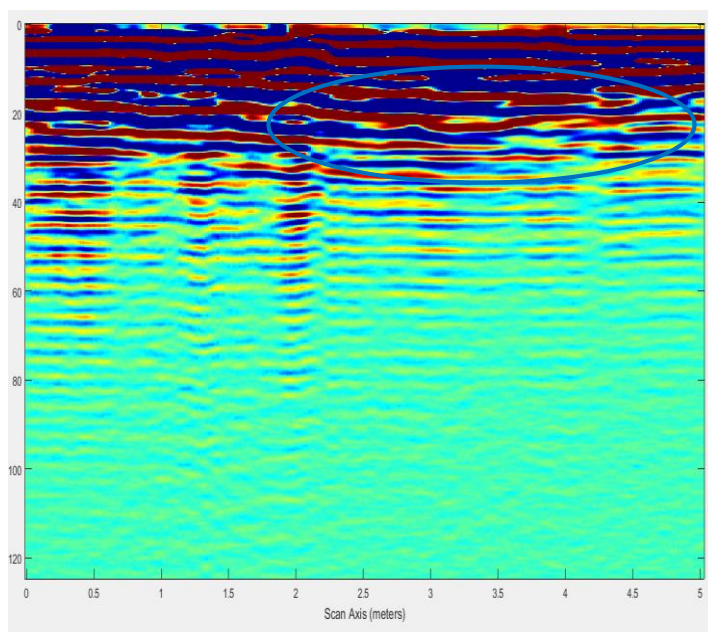
Τομή γεωραντάρ F051



Τομή γεωραντάρ F052

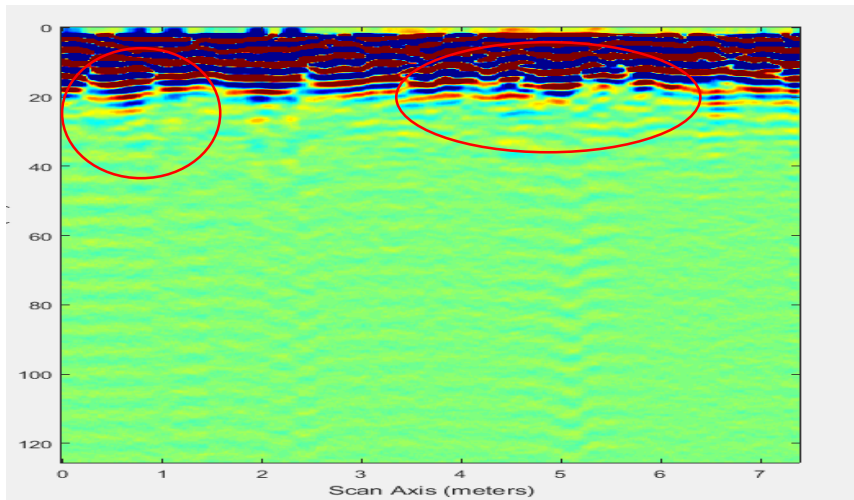


Τομή γεωραντάρ F053

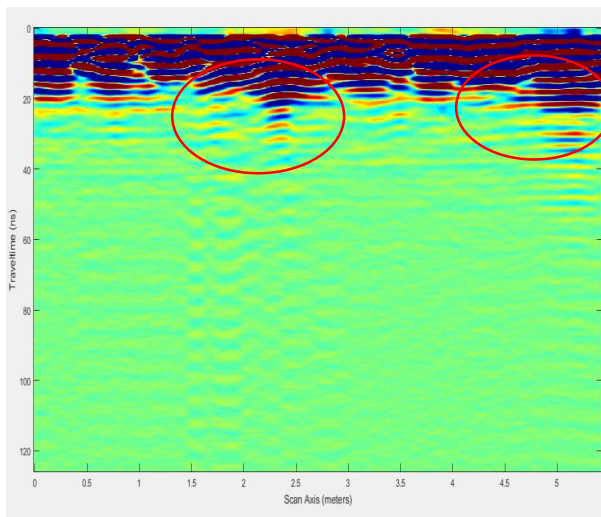


Τομή γεωραντάρ F054

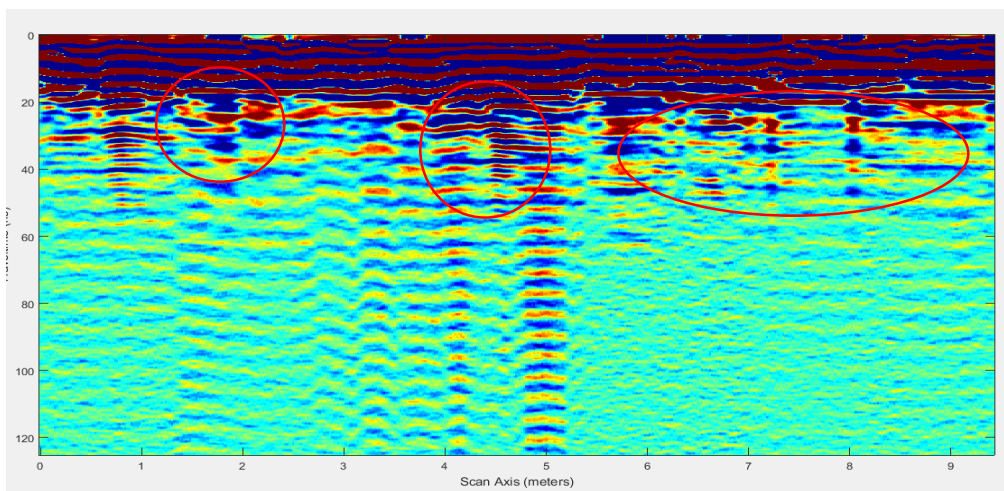
2. Τομές Γεωραντάρ στους εξωτερικούς τοίχους του κτιρίου.



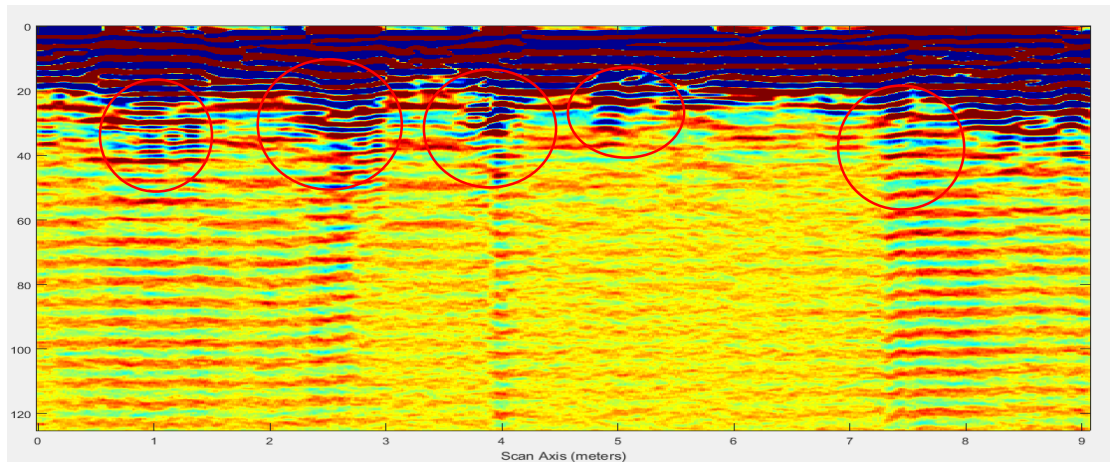
Τομή γεωραντάρ F041



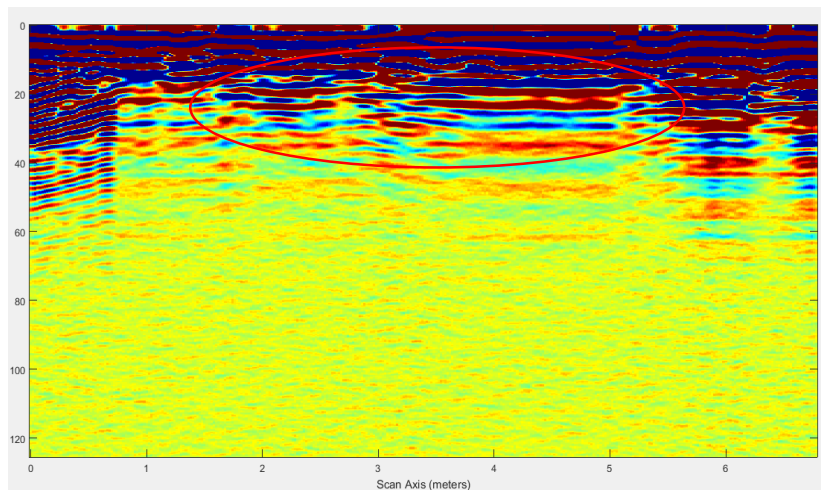
Τομή γεωραντάρ F042



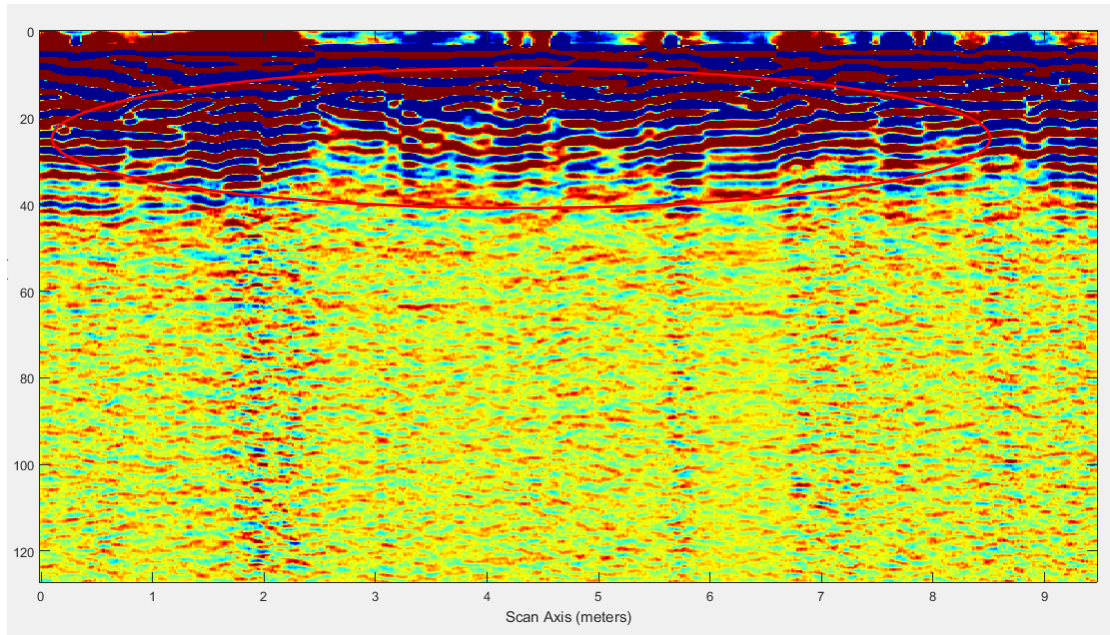
Τομή γεωραντάρ F043



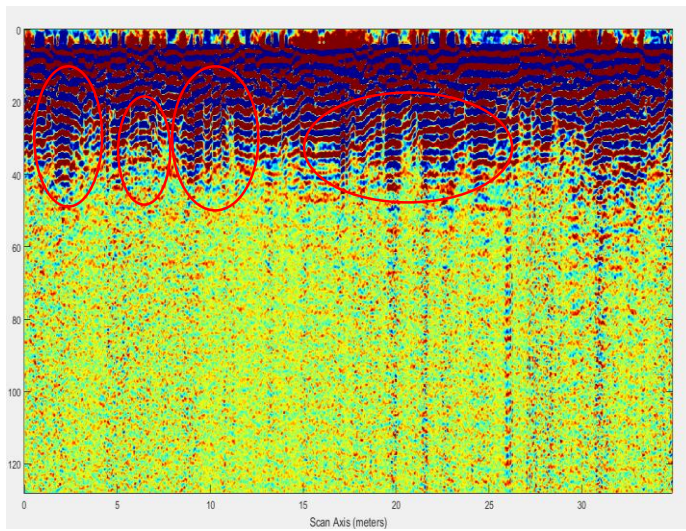
Τομή γεωραντάρ F044



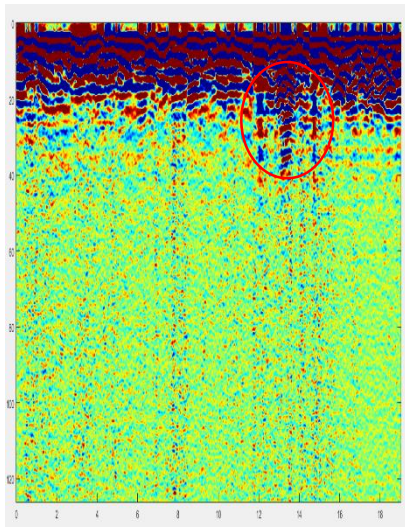
Τομή γεωραντάρ F045



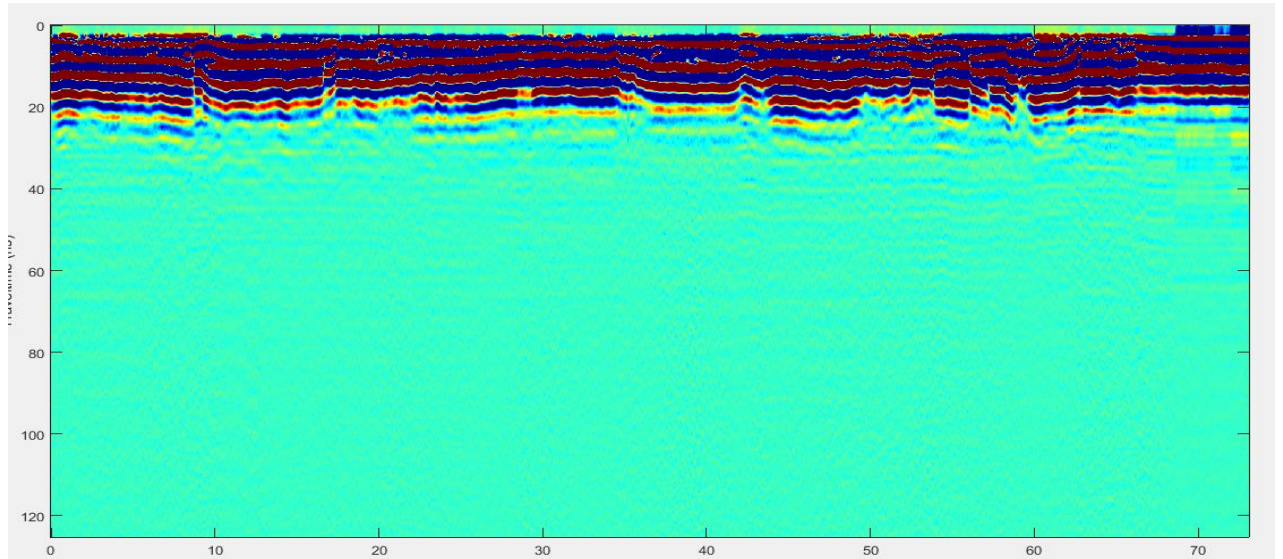
Τομή γεωραντάρ F046



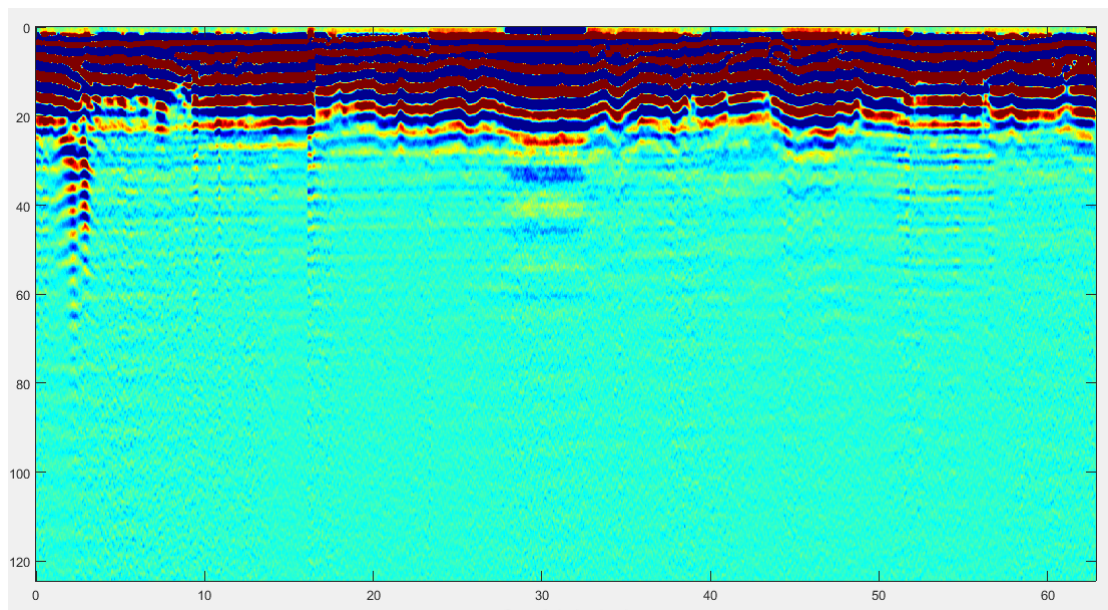
Τομή γεωραντάρ F047



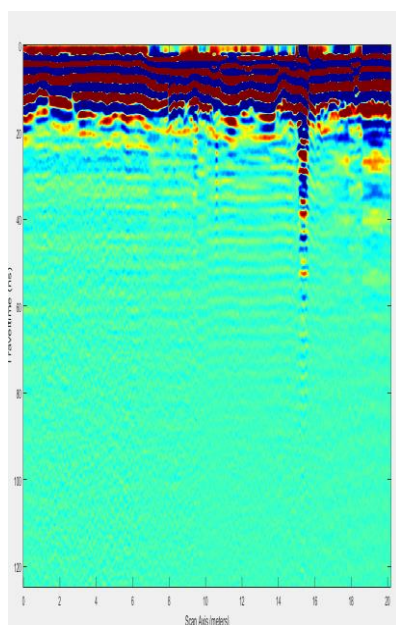
Τομή γεωραντάρ F048



Τομή γεωραντάρ F060

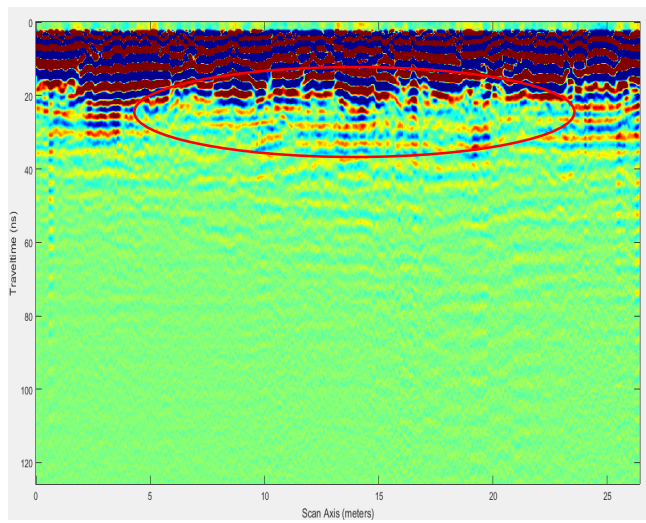


Τομή γεωραντάρ F061

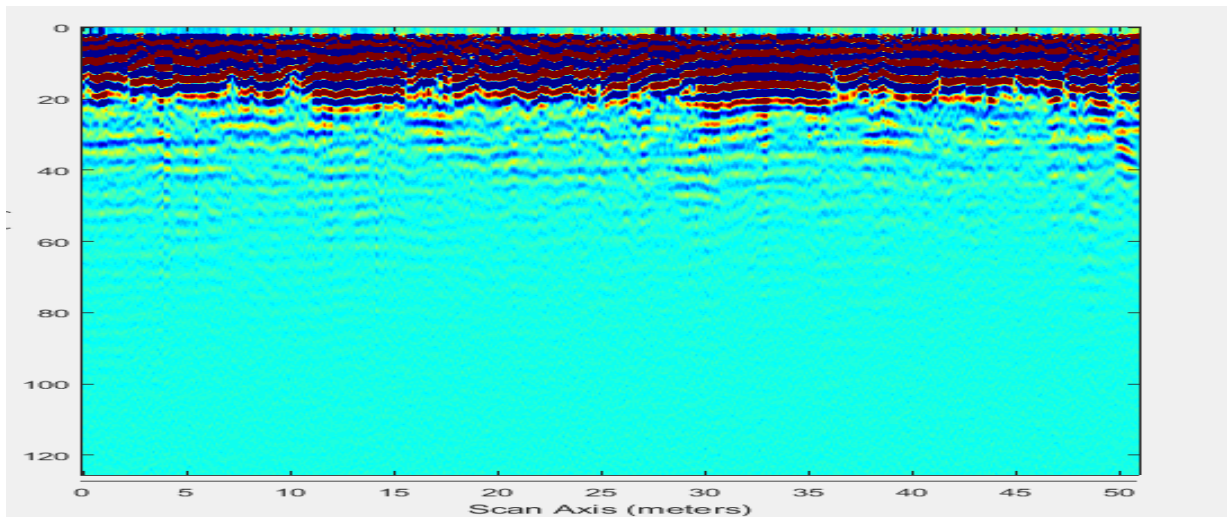


Τομή γεωραντάρ F062

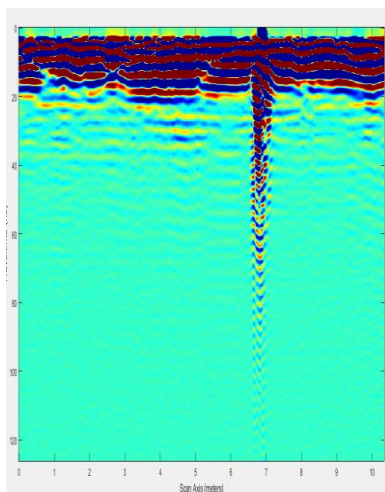
3. Τομές Γεωραντάρ στην ταράτσα του κτιρίου.



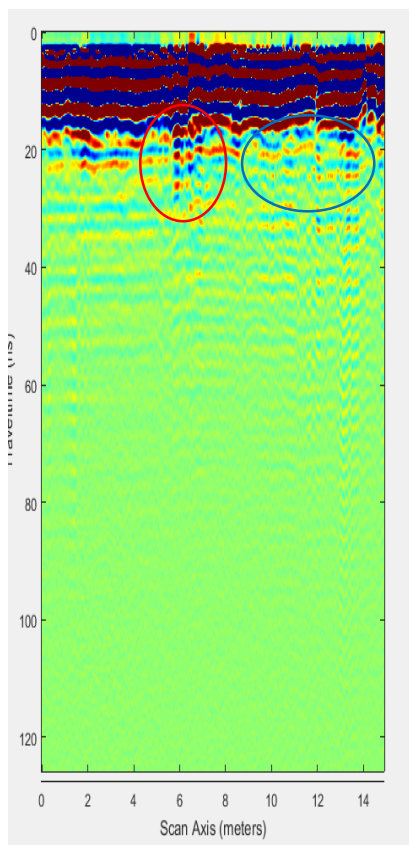
Τομή γεωραντάρ F032



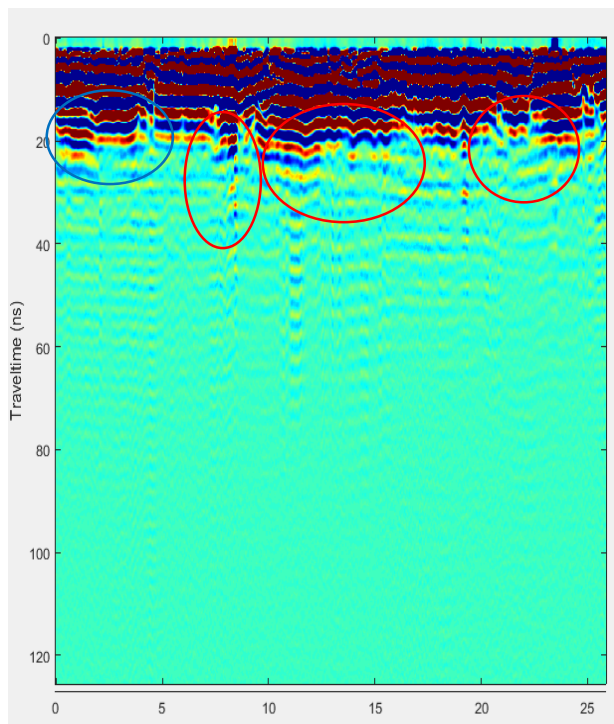
Τομή γεωραντάρ F033



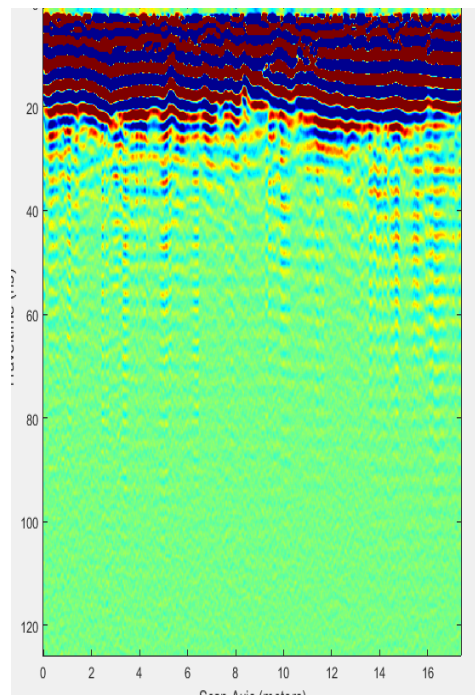
Τομή γεωραντάρ F034



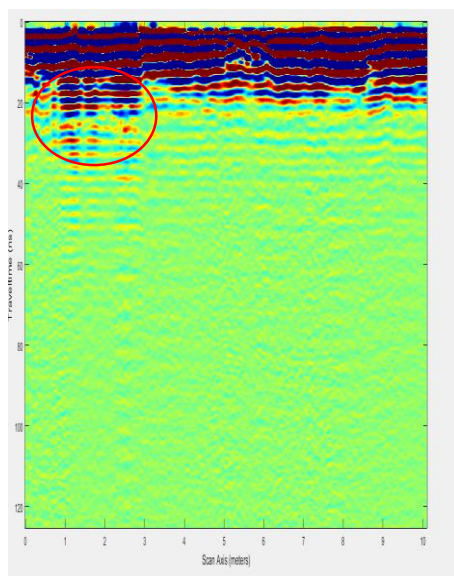
Τομή γεωραντάρ F035



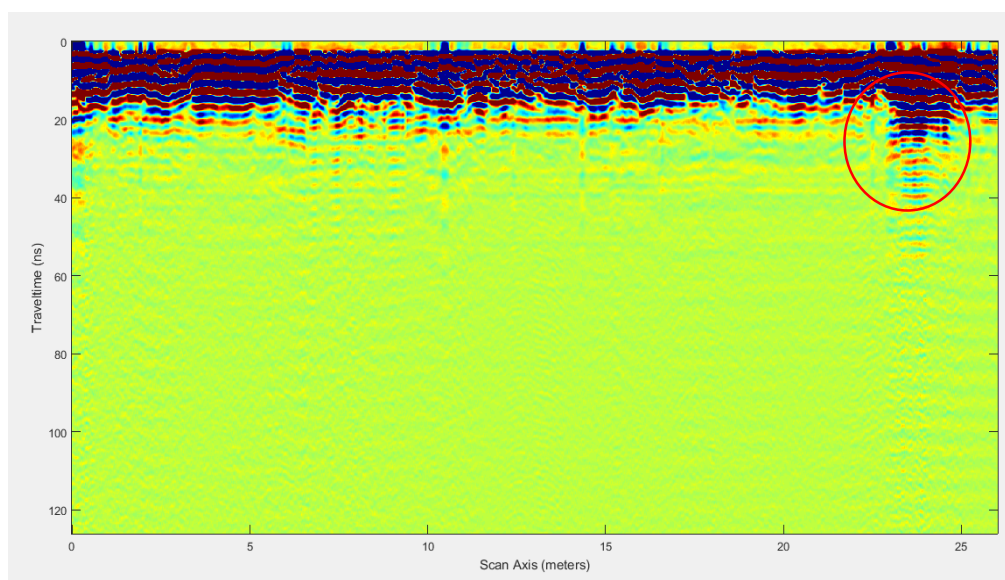
Τομή γεωραντάρ F036



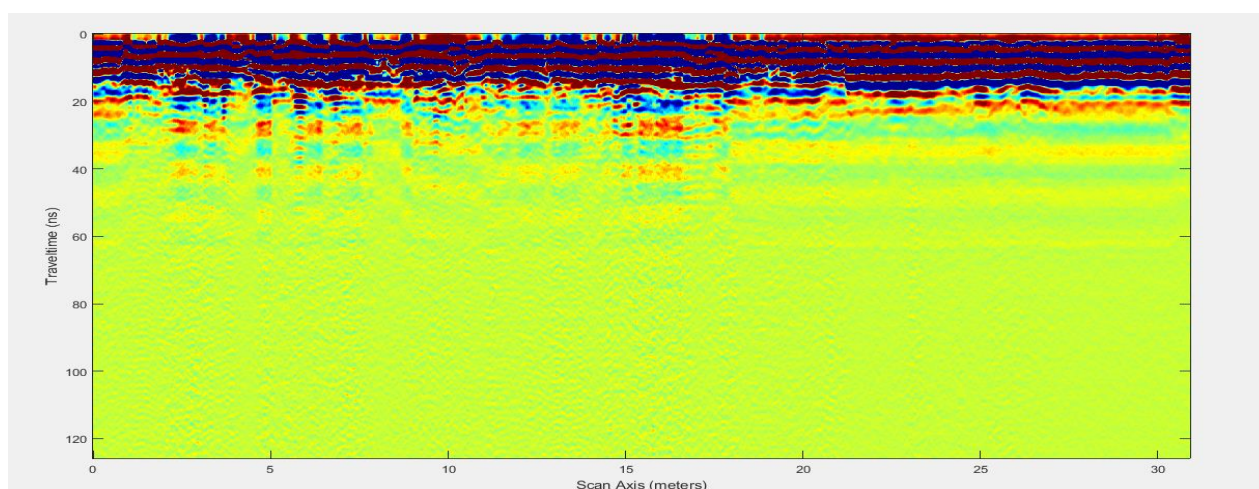
Τομή γεωραντάρ F037



Τομή γεωραντάρ F038

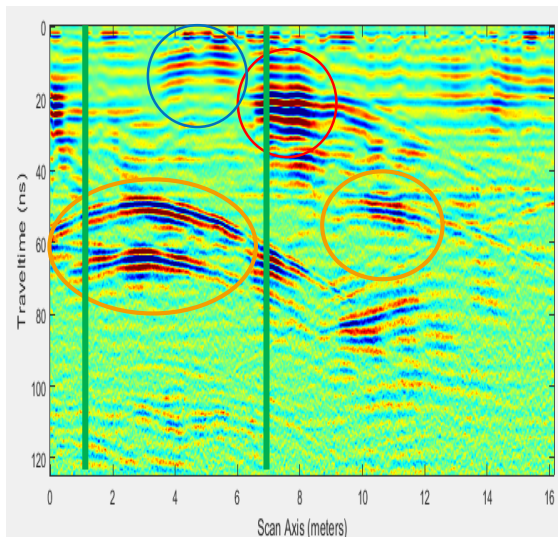


Τομή γεωραντάρ F039

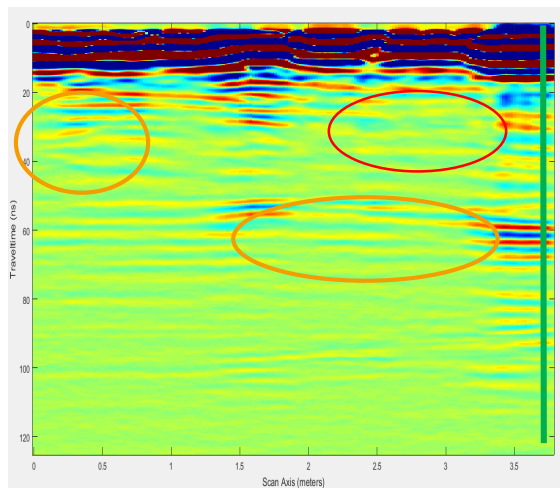


Τομή γεωραντάρ F040

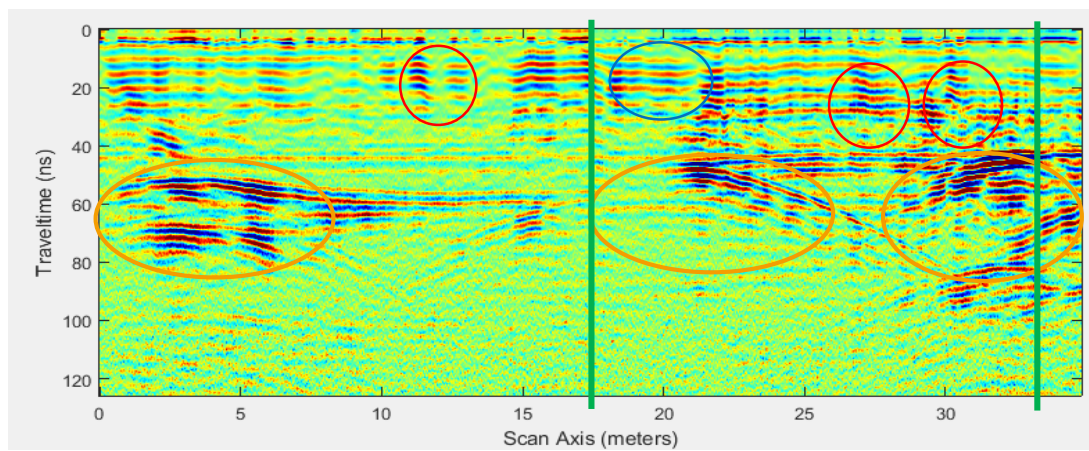
4. Τομές Γεωραντάρ στο δάπεδο του κτιρίου.



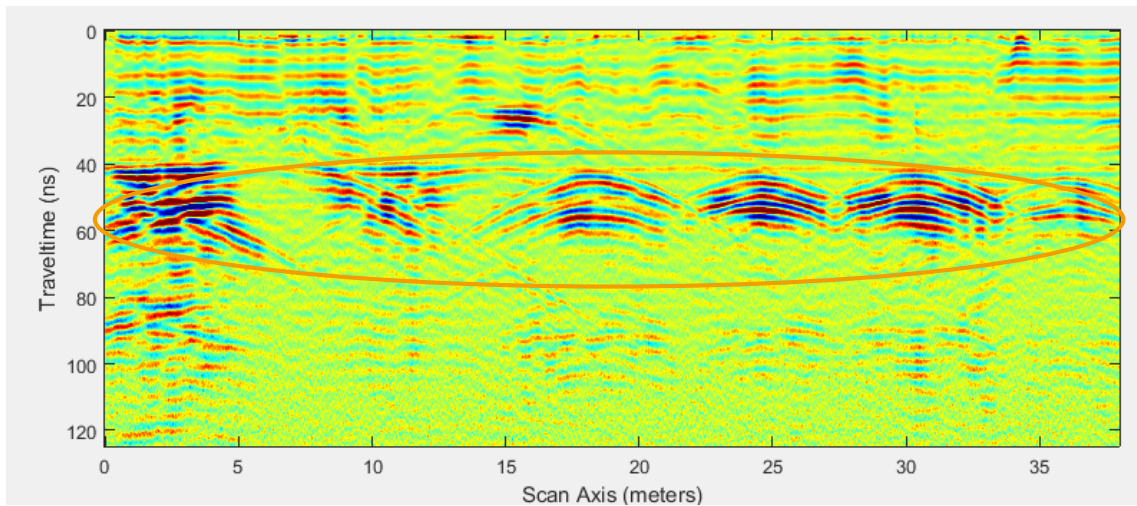
Τομή γεωραντάρ F006



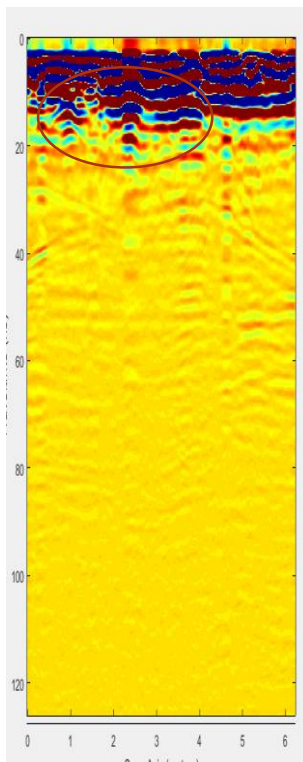
Τομή γεωραντάρ F009



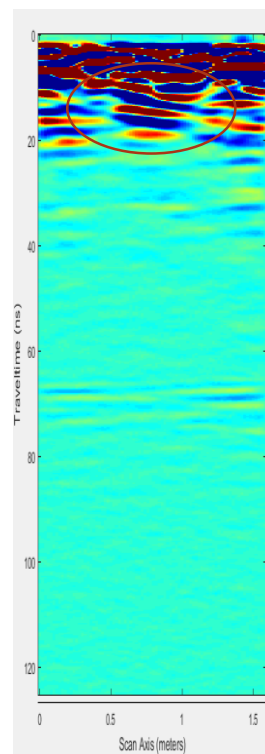
Τομή γεωραντάρ F010



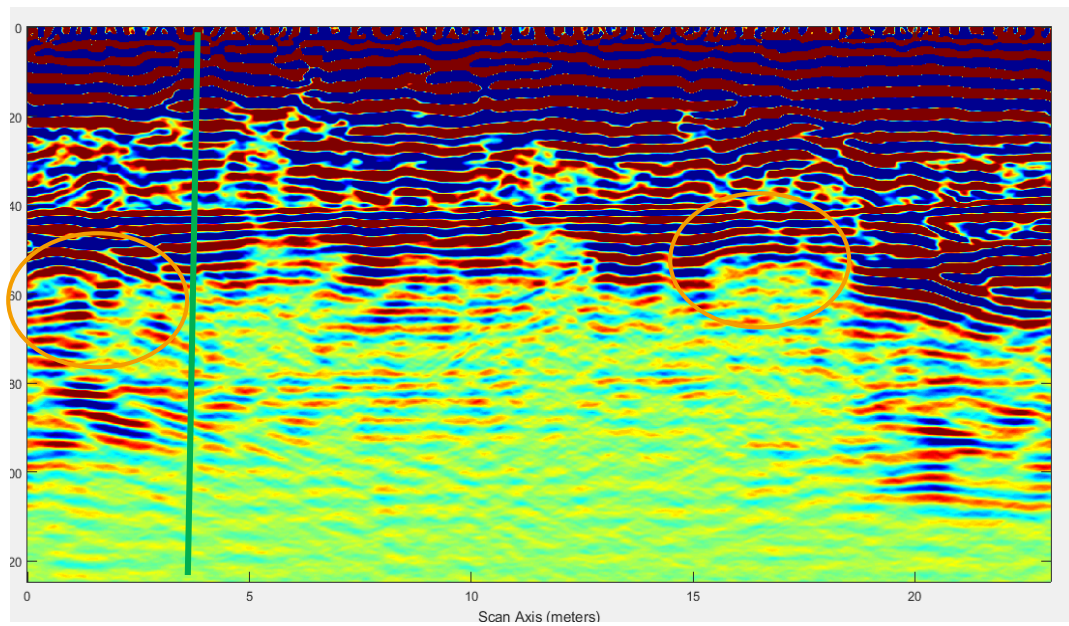
Τομή γεωραντάρ F011



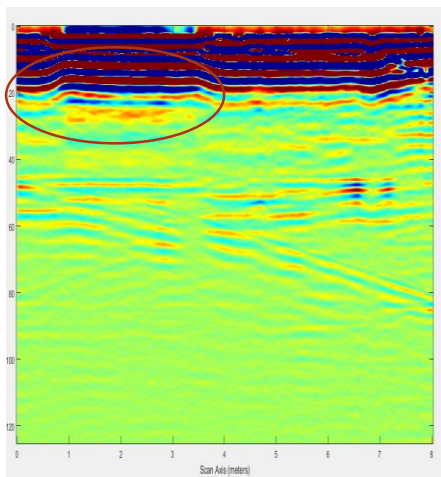
Τομή γεωραντάρ F026



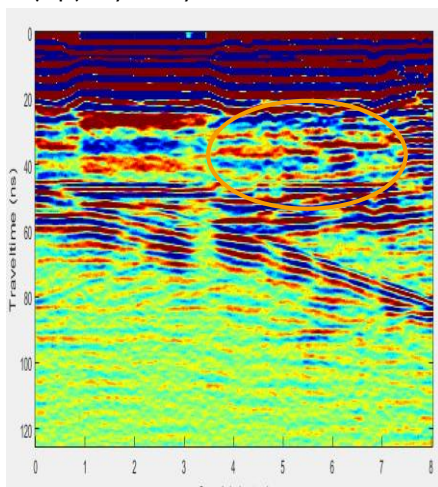
Τομή γεωραντάρ F027



Τομή γεωραντάρ F055



Τομή γεωραντάρ F056



Τομή γεωραντάρ F057