



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων**

**Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής**



**Φοινίρης Σωτήρης Α.Μ 2015020115**

**Εφαρμογή της μεθόδου γεωραντάρ στα Ενετικά τείχη των Χανίων**

**Εξεταστική Επιτροπή**

**Καθηγητής Αντώνιος Βαφείδης (Επιβλέπων)**

**Καθηγητής Εμμανουήλ Μανούτσογλου**

**Αναπλ. Καθηγητής Εμμανουήλ Στειακάκης**

**Χανιά, 2021**

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διενεργήθηκε προσομοίωση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την διερεύνηση της δυνατότητας απεικόνισης της δομής από τα Ενετικά τείχη στα Χανιά με τη μέθοδο του Γεωραντάρ. Μέσω του προγράμματος ReflexW δημιουργήθηκαν συνθετικές τομές γεωραντάρ για απλό μοντέλο αποτελούμενο από ψαμμιτικούς λίθους και συνδετικό υλικό. Αρχικά προσδιορίστηκαν η γεωμετρία των λίθων και οι φυσικές ιδιότητες των υλικών σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Στην συνέχεια έγινε η ανάλυση των συνθετικών δεδομένων γεωραντάρ. Σε δεύτερο στάδιο, διενεργήθηκε γεωφυσική διασκόπηση στους τοίχους των Νεωρίων με στόχο την απεικόνιση της λιθοδομής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του γεωραντάρ σε συνδυασμό με την ηλεκτρική τομογραφία.

Από την γεωφυσική διασκόπηση σε επιλεγμένες θέσεις στους τοίχους των Νεωρίων προέκυψε ότι το πάχος της λιθοδομής δεν ξεπερνά τα 0.4m. Από την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εκτιμήθηκε η υγρασία στους τοίχους η οποία κυμαίνεται από 20-32% κ.ο. Στις γεωηλεκτρικές τομές, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της λιθοδομής εμφανίζει συνήθως υψηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη στους αργόλιθους των τοίχων.

Πιο συγκεκριμένα στον ανατολικό τοίχο του 7<sup>ου</sup> Νεώριου και στην γεωηλεκτρική τομή της οριζόντιας γραμμής μελέτης, η λιθοδομή απεικονίζεται κατ' εξαίρεση με ζώνες χαμηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαιτίας της πολύ υψηλής υγρασίας 32% κ.ο. Στην ίδια θέση η τομή γεωραντάρ με την κεραία των 900 MHz υπέδειξε ότι η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων κυμαίνεται από 0,05 m/ns έως 0,08 m/ns και αυξάνεται από νότο προς βορρά. Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς στο βόρειο τμήμα της τομής γεωραντάρ υποδεικνύει σύμφωνα με την σχέση Torpp υγρασία ίση με 24% κ.ο., ενώ στο νότιο, 32% κ.ο. Στην ίδια τομή απεικονίζεται ανακλαστήρας στα 7-12 ns ο οποίος αποδίδεται στην λιθοδομή της οποίας το πάχος είναι 0.3 m.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	5
[1.1] Σκοπός.....	5
[1.2] Τα Ενετικά Τείχη.....	5
[1.3] Τα Ενετικά Νεώρια.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ-GPR (GROUND PENETRATING RADAR).....	9
[2.1] Τι είναι το Γεωραντάρ και η αρχή λειτουργίας του .....	9
[2.2] Εξοπλισμός.....	10
[2.3] Διατάξεις πομπού-δέκτη για συλλογή δεδομένων .....	12
[2.4] Χρήσεις Γεωραντάρ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΚΑΙ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	15
[3.1] Η θεωρία των πεπερασμένων διαφορών (FDTD).....	15
[3.2] Το μοντέλο προσομοίωσης σε 2 διαστάσεις.....	18
[3.3] Διεκπεραίωση μοντελοποίησης στο πρόγραμμα .....	19
[3.4] Φυσικές παράμετροι.....	20
[3.5] Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων στο μοντέλο.....	21
[3.6] Δημιουργία συνθετικών δεδομένων για το μοντέλο 2D. ....	21
[3.7] Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων και τομή γεωραντάρ για το παραπάνω μοντέλο.....	23
Κεφάλαιο 4. Εφαρμογή μεθόδου Γεωραντάρ στα Νεώρια .....	29
[4.1] Διεξαγωγή μετρήσεων με τη μέθοδο του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας .....	29
[4.2] Τομές γεωραντάρ.....	31
[4.2.1] Κατακόρυφες γραμμές μελέτης.....	32
[4.2.2] Οριζόντιες γραμμές μελέτης .....	44
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα .....	51
Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία .....	52

## *Ευχαριστίες,*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου κ. Βαφείδη Αντώνιο για τη συνεχή στήριξή και ορθή καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς η απaráμιλλη βοήθειά του ήταν πολύτιμης και κρίσιμης σημασίας, ειδικότερα σε μια περίοδο όπου η εξ' αποστάσεως επικοινωνία λόγω της έξαρσης της πανδημίας του Covid-19 καθιστούσε την διεκπεραίωση της εργασίας ακόμη πιο δύσκολη.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους βοηθούς (Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό) κ. Κρητικάκη Γεώργιο και κ. Οικονόμου Νικόλαο, τον κάθε ένα ξεχωριστά, για τις κατευθυντήριες οδηγίες τους σε όλα τα θέματα που αντιμετώπισα το οποιοδήποτε πρόβλημα.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### [1.1] Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η λεπτομερής εργασία σε πρόγραμμα με δυνατότητα προσομοίωσης συνθετικών δεδομένων γεωραντάρ, η ανάλυση των δυνατοτήτων του γεωραντάρ στο να απεικονίζει οχυρωματικά έργα, όπως τείχη πόλεων και κάτω υπό ποιες συνθήκες. Επίσης στόχος της εργασίας αυτής είναι και η ανάλυση των δεδομένων από την εκπόνηση μιας έρευνας στα Νεώρια Χανίων.

### [1.2] Τα Ενετικά Τείχη

Στα 1252 η πόλη και ο νομός είχε μοιραστεί σε 90 «καβαλαρίες», οι οποίες δόθηκαν στους Ενετούς αποίκους με τη ρητή υποχρέωση να ξαναχτίσουν την πόλη των Χανίων. Αυτοί επισκεύασαν το τείχος του Καστελίου και οργάνωσαν πολεοδομικά την πόλη μέσα στα όριά του. Μέσα στον οχυρωματικό περίβολο που επισκευάστηκε, οικοδομήθηκε μια νέα πόλη με σύγχρονο ρυμοτομικό σχέδιο. Μέσα στη νέα αυτή πόλη χτίστηκαν ή επισκευάστηκαν ναοί, μεγάλα δημόσια και ιδιωτικά κτίρια σύμφωνα με τις τάσεις του Βενετσιάνικου Μανιερισμού.

Τα Χανιά εξελίσσονται σε δεύτερη πόλη του «Βασιλείου της Κρήτης», είναι έδρα Ρέκτορα και Λατίνου Επισκόπου. Η πόλη και το λιμάνι της αποτελούν το κέντρο μιας πλούσιας γεωργικής περιοχής με οικονομικές και πολιτιστικές διασυνδέσεις με την Βενετία. Η εξέλιξη της πολεμικής τέχνης με την ανακάλυψη της πυρίτιδας και η εξάπλωση της Οθωμανικής Αυτοκρατορίας στο χώρο της Ανατολικής Μεσογείου ήταν οι κύριοι λόγοι που ανάγκασαν τους Ενετούς να προχωρήσουν σε νέα οχυρωματικά έργα στην πόλη των Χανίων, αλλά και σε κοντινά στρατηγικά σημεία με αυτήν.

Σταδιακά η πόλη επεκτεινόταν και έξω από το παλιό φρούριο, ώστε θεωρήθηκε αναγκαία η νέα και σύγχρονη οχύρωσή της. Έτσι, στα μέσα του 16<sup>ου</sup> αιώνα η πόλη οχυρώθηκε για μια ακόμη φορά σε σχέδια και επίβλεψη (από το 1538) του διάσημου στα οχυρωματικά έργα Βερονέζου Michele Sanmichielli με σύγχρονα τείχη και τάφρο - που όμως δεν γέμισε ποτέ με νερό. Στο τείχος δόθηκε ορθογώνιο σχήμα, παράλληλο προς τη θάλασσα και κάθε μια από τις τέσσερις γωνίες του ενισχύθηκε

με ένα καρδιόσχημο προμαχώνα. Τα τείχη με την τάφρο περιελάμβαναν και το λιμάνι και ήταν κτισμένα με τις πιο σύγχρονες για την εποχή αντιλήψεις της οχυρωματικής τεχνικής. Οι οχυρώσεις των Χανίων έγιναν κυρίως από τοπικούς πόρους και με υποχρεωτικές αγγαρείες των χωρικών.

Υπήρχαν τρεις πύλες στα τείχη. Μια στα ανατολικά, η πύλη της Άμμου (*Porta Sabbionara*) στο Κουμ-Καπί, που είχε ονομασθεί έτσι από το αμμώδες έδαφος της περιοχής. Το «πορτάκι», μια μικρή πύλη στον προμαχώνα *San Salvatore*, στο τέλος της σημερινής οδού Θεοτοκοπούλου, που εξυπηρετούσε τη στρατιωτική Υπηρεσία, αλλά και τους Εβραίους που έμεναν στη συνοικία της Οθριακής. Η κεντρική πύλη στα νότια του τείχους ήταν η *Porta Retimiota*, (πύλη του φρουρίου), μια που από εκεί άρχιζε ο δρόμος για το Ρέθυμνο. Αργότερα ονομάσθηκε Καλέ-Καπισί και άνοιγε με την ανατολή του ηλίου και κλειδωνόταν με τη δύση του.

Στα μεταγενέστερα χρόνια η πόλη ασφυκτιά μέσα στα τείχη, ενώ μια νέα πολιτεία αρχίζει να σχηματίζεται και να αναπτύσσεται απ' έξω. Στα χρόνια της Κρητικής Πολιτείας η ανάγκη ένωσης των δύο τμημάτων της πόλης φέρνει τις κατεδαφίσεις τμημάτων των τειχών και τη δημιουργία ρηγμάτων στο Κρύο Βρυσάλι, στο Καλέ-Καπισί και στα ανατολικά της *Piatta Forma*, προς το κτίριο του σημερινού 1<sup>ου</sup> Γυμνασίου)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> [http://www.chaniahistory.gr/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=56:%CF%84%CE%B1-%CF%84%CE%B5%CE%AF%CF%87%CE%B7&Itemid=1460&lang=el](http://www.chaniahistory.gr/index.php?option=com_k2&view=item&id=56:%CF%84%CE%B1-%CF%84%CE%B5%CE%AF%CF%87%CE%B7&Itemid=1460&lang=el)



Εικόνα 1. Η δυτική τάφρος των Ενετικών τειχών στα Χανιά.<sup>2</sup>

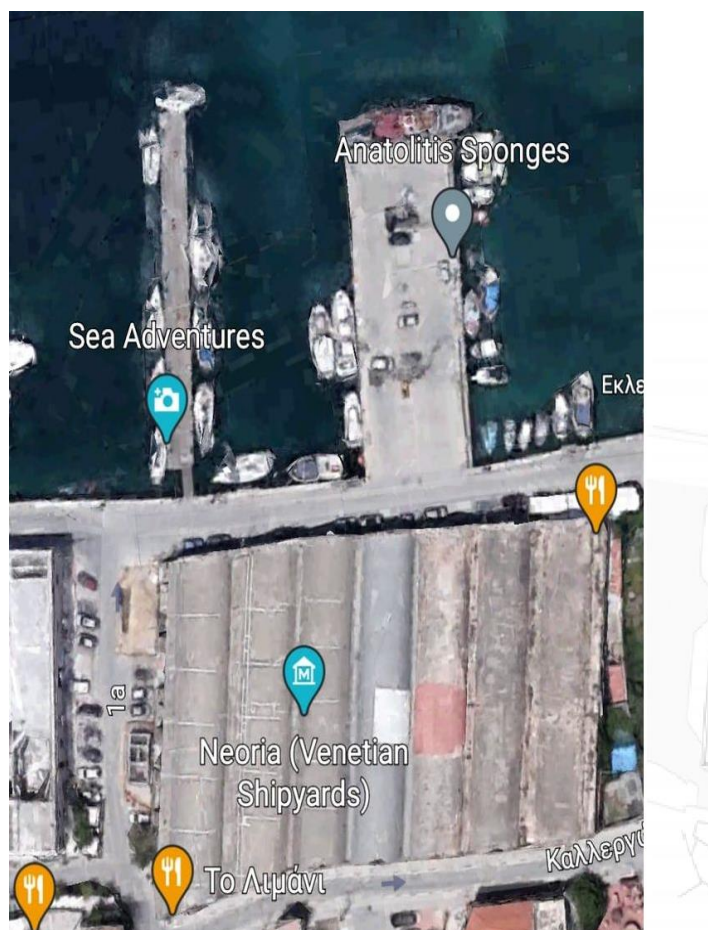
### [1.3] Τα Ενετικά Νεώρια

Τα Ενετικά Νεώρια είναι από τα εντυπωσιακότερα μνημεία στο Παλιό λιμάνι των Χανίων. Κατασκευάστηκαν τον 16ο αιώνα, όταν ο στόλος των Ενετών επικρατούσε στη Μεσόγειο. Την ανάγκη επισκευών του στόλου κάλυψαν τα Ενετικά Νεώρια, που είναι γνωστά και ως Αρσενάλια, από την λατινική λέξη «arsenalli», ή και ως Ταρσανάδες.

---

<sup>2</sup>

<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwj1oCF2f7nAhULyYUKHZc5Dq8QjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.zarpanews.gr%2Fchania-allazei-opsi-i-dytiki-tafros-quot-mesa-quot-sto-ergo-anaplastis-kai-i-apokatastasi-toy-enetikoy-teichoys%2F&psig=AOvVaw0Mw5APvrmQc55fb4jawZMq&ust=1583338318029982>



Εικόνα 2. Τα Νεώρια σήμερα, όπου και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ( Google Earth)

Τα Ενετικά Νεώρια είναι μεγάλες πέτρινες κατασκευές, με αψιδωτή πρόσοψη. «Κοιτάζουν» ανοικτά προς την θάλασσα, έτσι ώστε να μπορούν τα πλοία να φτάνουν μέχρι το εσωτερικό τους ανεμπόδιαστα, θολοσκέπαστα και επικοινωνούν μεταξύ τους με τοξωτά ανοίγματα στους εσωτερικούς τοίχους. Έκλειναν με ξύλινες πόρτες, ενώ η πρόσβαση σε αυτά γινόταν από μια μεγάλη πύλη στο τέλος της σημερινής οδού Δασκαλογιάννη. Έχουν μήκος 50 μέτρων το καθένα, πλάτος 9 μέτρων και ύψος 10 μέτρων. Συνολικά, κατασκευάστηκαν στο παλιό λιμάνι των Χανιών 23 Ενετικά Νεώρια. Από τα Ενετικά Νεώρια σήμερα σώζονται επτά συνεχόμενοι θόλοι και το Μεγάλο Αρσενάλι και δύο νεώρια από το συγκρότημα του Μόρο, στο μυχό του λιμανιού. Η θαλάσσια πρόσβαση σε αυτά δεν υπάρχει πια, λόγω της κατασκευής της προκυμαίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ-GPR (GROUND PENETRATING RADAR)

### [2.1] Τι είναι το Γεωραντάρ και η αρχή λειτουργίας του

Το Γεωραντάρ (GPR) ή ραντάρ υπεδάφους είναι ο γενικός όρος που εφαρμόζεται σε τεχνικές που χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως μία γεωφυσική τεχνική έρευνας του υπεδάφους σε **μικρά βάθη** (συνήθως μέχρι τα 20 μέτρα). Πιο πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε επίσης και για τον έλεγχο μη μεταλλικών δομών. Η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιεί ραδιοκύματα εύρους συχνότητας από 1 έως 1200 MHz. Η λειτουργία του στηρίζεται στην ανάκλαση των ραδιοκυμάτων. Το σύστημα του γεωραντάρ εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό παλμό στο υπό έρευνα υλικό. Ο παλμός, που διαρκεί μερικά νανοδευτερόλεπτα (ns), θα ταξιδεύσει στο έδαφος μέχρι να συναντήσει επιφάνεια με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Την στιγμή αυτή της συνάντησης θα συμβούν κατά κύριο λόγο δύο πράγματα. Ένα μέρος θα διαθλαστεί και θα συνεχίσει την διάδοση του, ενώ ένα μέρος θα υποστεί ανάκλαση και θα επιστρέψει στην κεραία – δέκτη όπου και θα γίνει η καταγραφή με την μορφή χρόνων διαδρομής και πλάτους ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στον δέκτη όμως, δεν καταγράφονται μόνο τα ανακλώμενα κύματα. Γενικά λαμβάνονται και καταγράφονται κύματα τα οποία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες<sup>3</sup>.

- **Απευθείας κύματα:** Πρόκειται για κύματα που όπως λέει και το όνομα τους ταξιδεύουν απευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Λόγω του ότι η ταχύτητα στον αέρα είναι η μέγιστη δυνατή καταγράφονται πρώτα, ενώ επίσης λόγω της μικρής απόστασης που διανύουν έχουν μικρές απώλειες με αποτέλεσμα να δίνουν καταγραφές με μεγάλα πλάτη.

- **Κύματα υπεδάφους:** Είναι τα κύματα που διαδίδονται μέσα στο υπέδαφος, δηλαδή ανακλώμενα κύματα, πολλαπλά ανακλώμενα κύματα λόγω του φαινομένου της αντήχησης, κύματα που δημιουργούνται λόγω περίθλασης και τα κρίσιμα διαθλώμενα κύματα (όταν η απόσταση πομπού δέκτη είναι μεγαλύτερη μιας κρίσιμης τιμής).

---

<sup>3</sup> Σπανουδάκης Νικόλαος, ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007

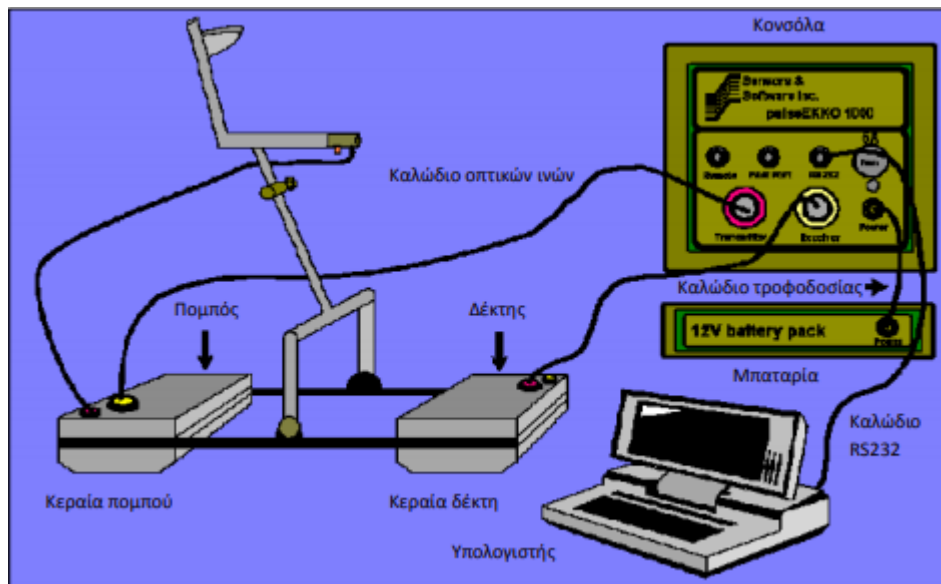
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα προσδιορίζει το βάθος διείσδυσης, το οποίο σχετίζεται επίσης άμεσα με τη φύση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Το βάθος διασκόπησης (δ) είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας που χρησιμοποιεί ο πομπός του οργάνου. Δηλαδή όσο πιο μεγάλη συχνότητα χρησιμοποιεί το όργανο τόσο πιο μικρό είναι το βάθος διασκόπησης αλλά στην ανάλυση είναι πιο «καθαρά» τα δεδομένα, ενώ με τη χρήση μικρότερης συχνότητας επιτυγχάνεται μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης αλλά με πιο «θολά» τα δεδομένα κατά την ανάλυση.

## **[2.2] Εξοπλισμός**

Ένα τυπικό σύστημα αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη: την κονσόλα ή μονάδα ελέγχου, τον υπολογιστή, τις κεραίες διαφόρων συχνοτήτων (50 MHz-1 GHz), την μπαταρία, τον πομπό και τον δέκτη. Ο πομπός και ο δέκτης προσαρμόζονται στο επάνω μέρος των κεραιών, ώστε η μία κεραία να χρησιμοποιείται για την εκπομπή και η άλλη για την λήψη της ακτινοβολίας. Οι κεραίες συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικό πλαίσιο, ώστε η απόσταση τους να παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Η μονάδα ελέγχου συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω σειριακού καλωδίου και με τις κεραίες με καλώδιο οπτικών ινών. Το σήμα που λαμβάνει η κεραία του δέκτη προωθείται στην μονάδα ελέγχου, όπου μετρείται ο χρόνος διαδρομής και το πλάτος του κύματος. Οι μετρήσεις καταγράφονται στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή και ταυτόχρονα εμφανίζεται το ίχνος του σήματος στην οθόνη.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Βαφείδης Α. «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II». Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά 2001.



Εικόνα 3. Τυπικός εξοπλισμός Γεωραντάρ.<sup>5</sup>

Πιο σύγχρονες συσκευές Γεωραντάρ χρησιμοποιούν τροχούς για τη μετακίνησή τους. Δίνεται ενδεικτική εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 4. Συσκευή Γεωραντάρ της εταιρείας JCG. Η συσκευή είναι η UtilityScan με ενσωματωμένο σύστημα LineTrac. Διαθέτει κεραία 350 MHz και ανιχνεύει στόχους σε βάθος έως 10 m.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Βαφείδης Α. «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II». Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά 2001.

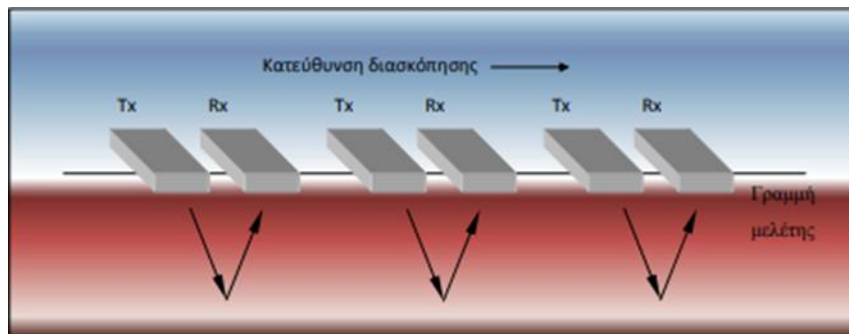
<sup>6</sup> <https://www.jgc.gr/index.php/el/products/geophysical-equipment/gpr/gssi-utilityscan>

### [2.3] Διατάξεις πομπού-δέκτη για συλλογή δεδομένων

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι διάταξης για την συλλογή δεδομένων από τη μέθοδο του Γεωραντάρ. (α) Η μέθοδος ανάκλασης, (β) η μέθοδος διάταξης κοινού ενδιάμεσου σημείου πομπού-δέκτη και (γ) η μέθοδος της τομογραφίας. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος συλλογής δεδομένων Γεωραντάρ χρησιμοποιεί τη διάταξη **«κοινού ενδιάμεσου σημείου πομπού-δέκτη»**. Δηλαδή ο πομπός και ο δέκτης μετακινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης διατηρώντας σταθερή τη μεταξύ τους απόσταση. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει ένα κοινό ενδιάμεσο σημείο μεταξύ πομπού-δέκτη το οποίο διευκολύνει τον υπολογισμό της ταχύτητας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η βέλτιστη διάταξη των κεραιών θέλει τα ηλεκτρικά πεδία τους παράλληλα, ενώ κινούνται κατά μήκος της γραμμής μελέτης η οποία είναι κάθετη στο επίπεδο πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου. Η διαδικασία μίας διασκόπησης κοινού ενδιάμεσου σημείου είναι απλή. Αρχικά προσδιορίζεται ένας ανακλαστήρας με την βοήθεια της μεθόδου της ανάκλασης. Στη συνέχεια επιλέγεται ένα σημείο της επιφάνειας του εδάφους ακριβώς επάνω από τον ανακλαστήρα, το οποίο θα είναι το κοινό ενδιάμεσο σημείο. Κατά την διάρκεια της διασκόπησης η κάθε κεραία απομακρύνεται από το κοινό ενδιάμεσο σημείο κατά  $n_x/2$  και η απόσταση πομπού - δέκτη αυξάνει σε ακέραια πολλαπλάσια του  $n_x$ . Το μετρούμενο μέγεθος είναι το πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος συναρτήσει του χρόνου διαδρομής.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Βαφείδης Α. «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II». Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά 2001.



Εικόνα 5. Σχηματική παρουσίαση της διάταξης σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη.<sup>8</sup>

Για να υπολογιστεί ο χρόνος που χρειάζεται το προσπίπτον κύμα να φτάσει σε ένα σημειακό ανακλαστήρα και πίσω στο δέκτη ξανά, χρησιμοποιείται η εξής εξίσωση.

$$\rightarrow t = [2 \cdot \sqrt{x^2 + z^2}] / v$$

όπου  $v$  = ταχύτητα διάδοσης ΗΜ κύματος,  $x$  = απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη,  $z$  = βάθος ανακλαστήρα και  $t$  = χρόνος προσπίπτοντος κύματος για να φτάσει στον ανακλαστήρα και πίσω στον δέκτη.

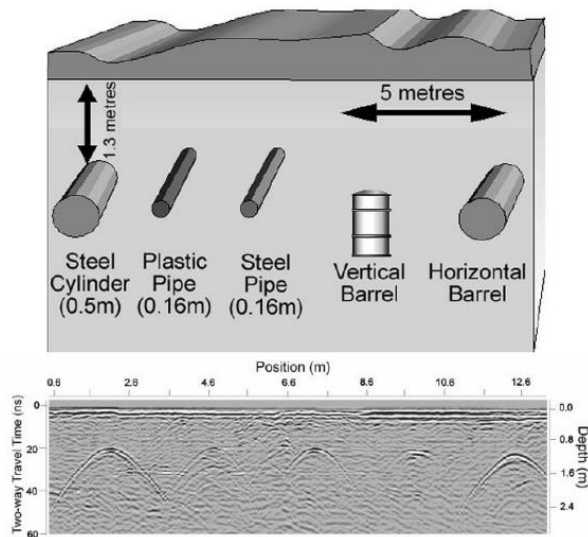
#### [2.4] Χρήσεις Γεωραντάρ

Η υψηλή ακρίβεια που παρέχει η μέθοδος του Γεωραντάρ στο να ανιχνεύει ασυνέχειες στην κατανομή των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, δίνει λύσεις σε πολλά πρακτικά προβλήματα όπως ο καθορισμός του πάχους των γεωλογικών στρωμάτων και του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα, ο προσδιορισμός υπόγειων εγκοίλων και στοών, ο εντοπισμός θαμμένων αρχαιοτήτων, η χαρτογράφηση των πάγων και ο διαχωρισμός στρωμάτων πάγου διαφορετικών εποχών, ο υπολογισμός της έκτασης της ρύπανσης των υπογείων υδάτων, ο έλεγχος της κατάστασης του

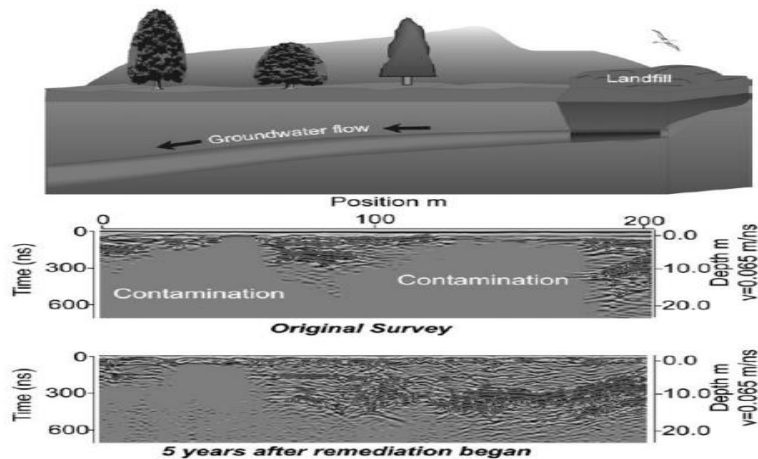
<sup>8</sup> Βαφειδής Α. «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II». Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά 2001.

πυρήνα των φραγμάτων, της ασφάλτου των δρόμων, ο εντοπισμός θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, η ανεύρεση μεταλλικών και μη μεταλλικών αντικειμένων κ.α.

Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος του Γεωραντάρ χρησιμοποιείται και για μετρήσεις μέσα σε γεωτρήσεις.



Εικόνα 6. Σχηματική απεικόνιση τομής του υπεδάφους με διάφορα στερεά και απεικόνιση τους σε τομογραφία με τη χρήση της μεθόδου Γεωραντάρ.<sup>9</sup>



Εικόνα 7. Χρησιμοποίηση Γεωραντάρ για την εύρεση μολυσματικού νερού σε υπόγειο υδροφόρο. Απεικόνιση των δεδομένων της τομογραφίας.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> [http://www.geo.auth.gr/762/PDF/LEC10\\_NEW.pdf](http://www.geo.auth.gr/762/PDF/LEC10_NEW.pdf)

<sup>10</sup> [http://www.geo.auth.gr/762/PDF/LEC10\\_NEW.pdf](http://www.geo.auth.gr/762/PDF/LEC10_NEW.pdf)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΚΑΙ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

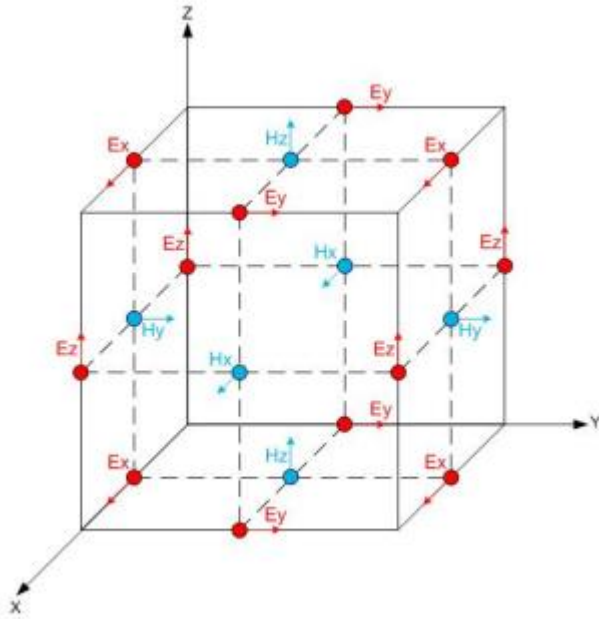
Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό REFLEXW. Το συγκεκριμένο λογισμικό, για να προσομοιώνει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων διαφορών η οποία βρίσκει χρήση στην επίλυση των εξισώσεων του Maxwell. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και ερμηνεία σεισμικών και ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων. Μπορεί να προσομοιώνει δεδομένα σε 2 διαστάσεις (2D) καθώς έχει και τη δυνατότητα προσομοίωσης σε 3 διαστάσεις (3D).

### [3.1] Η θεωρία των πεπερασμένων διαφορών (FDTD)

Η θεωρία αυτή παρουσιάστηκε αρχικά από τον Yee το 1966 και λόγω της απλότητάς της αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους. Αποτελεί τη βάση των πλέον σύγχρονων υπολογιστικών πακέτων, καθώς είναι σε θέση να προσομοιώνει με επάρκεια και ακρίβεια πληθώρα προβλημάτων που εμπλέκουν φαινόμενα ακτινοβολίας, σκέδασης, κυματοδήγησης κ.α σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Η μέθοδος FDTD στηρίζεται στο κελί του Yee (Σχήμα 3.1), το οποίο αποτελεί και τη βάση της διακριτοποίησης του συνεχούς χώρου. Συγκεκριμένα οι συνιστώσες του πεδίου ορίζονται στα μέσα των εδρών και των ακμών του κύβου, έτσι ώστε κάθε ηλεκτρική (μαγνητική) πεδιακή συνιστώσα να περικλείεται από τις αντίστοιχες μαγνητικές (ηλεκτρικές) συνιστώσες. Η τοποθέτηση τους αυτή καθιστά δυνατό τον υπολογισμό των πεδιακών συνιστωσών, καθώς είναι εφικτή η διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων του Maxwell<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Κοκοτάκης Βασίλειος, ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015



Σχήμα 3.1: Το κελί διακριτοποίησης του Yee.<sup>12</sup>

Η μέθοδος αυτή, όπως προαναφέρθηκε, βασίζεται στις εξισώσεις του Maxwell. Βασίζεται δηλαδή στην επίλυση των εξισώσεων στο πεδίο του χρόνου με την βοήθεια των πεπερασμένων διαφορών αλλά και την χωρική και χρονική διακριτοποίηση των  $E$  (ηλεκτρικό πεδίο) και  $H$  (μαγνητικό πεδίο). Σε αυτήν τη περίπτωση μόνο οι κοντινές επιδράσεις λαμβάνονται υπόψη καθώς υπολογίζονται όλα τα σημεία του χώρου.

Σε ένα ισοτροπικό και ομογενές μέσο, οι εξισώσεις του Maxwell σε σχέση με την χρονική παράγωγο των  $E$  και  $H$  εκφράζονται ως εξής:

$$1. \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \times (\nabla \times H - \sigma E)$$

$$2. \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} (\nabla \times E)$$

<sup>12</sup> Κοκοτάκης Βασίλειος, ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015

Με τη χρήση των δύο παραπάνω εξισώσεων και των προβολών στους άξονες  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  υπολογίζονται και οι εξής εξισώσεις:

$$3. \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{e} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right)$$

$$4. \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{e} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right)$$

$$5. \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{e} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right)$$

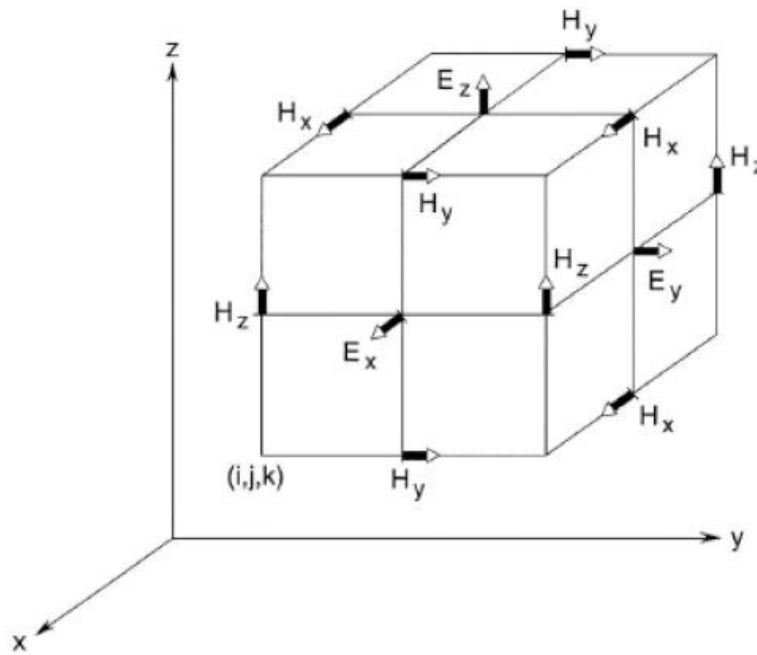
$$6. \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right)$$

$$7. \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right)$$

$$8. \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$

Έχοντας προσδιορίσει τις παραπάνω βαθμωτές διαφορικές εξισώσεις εφαρμόζεται ο αλγόριθμος του Yee. Για τον υπολογισμό των παραπάνω ως προς τον χρόνο τοποθετούνται τα  $E$  και  $H$  με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται παρεμβολή του ενός πεδίου με το άλλο. Η υπόθεση αυτού του υπολογιστικού μοντέλου είναι ότι το ηλεκτρικό πεδίο προσδιορίζεται σε χρονικές στιγμές  $\Delta t$ ,  $2 \Delta t$ ,  $3 \Delta t$  κτλ. ενώ το μαγνητικό πεδίο προσδιορίζεται σε χρονικές στιγμές  $0.5 \Delta t$ ,  $1.5 \Delta t$  κτλ. Η διαδικασία που ακολουθείται στον υπολογισμό των  $E$  και  $H$  είναι σχετικά απλή. Αρχικά οι τιμές της έντασης  $E$  σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό σημείο, υπολογίζονται από τις ήδη αποθηκευμένες τιμές της έντασης  $H$ . Στην συνέχεια αυτές οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των τιμών της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται συνεχώς έως ότου να καλυφθούν όλα τα πιθανά χρονικά βήματα.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Κοκοτάκης Βασίλειος, ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015



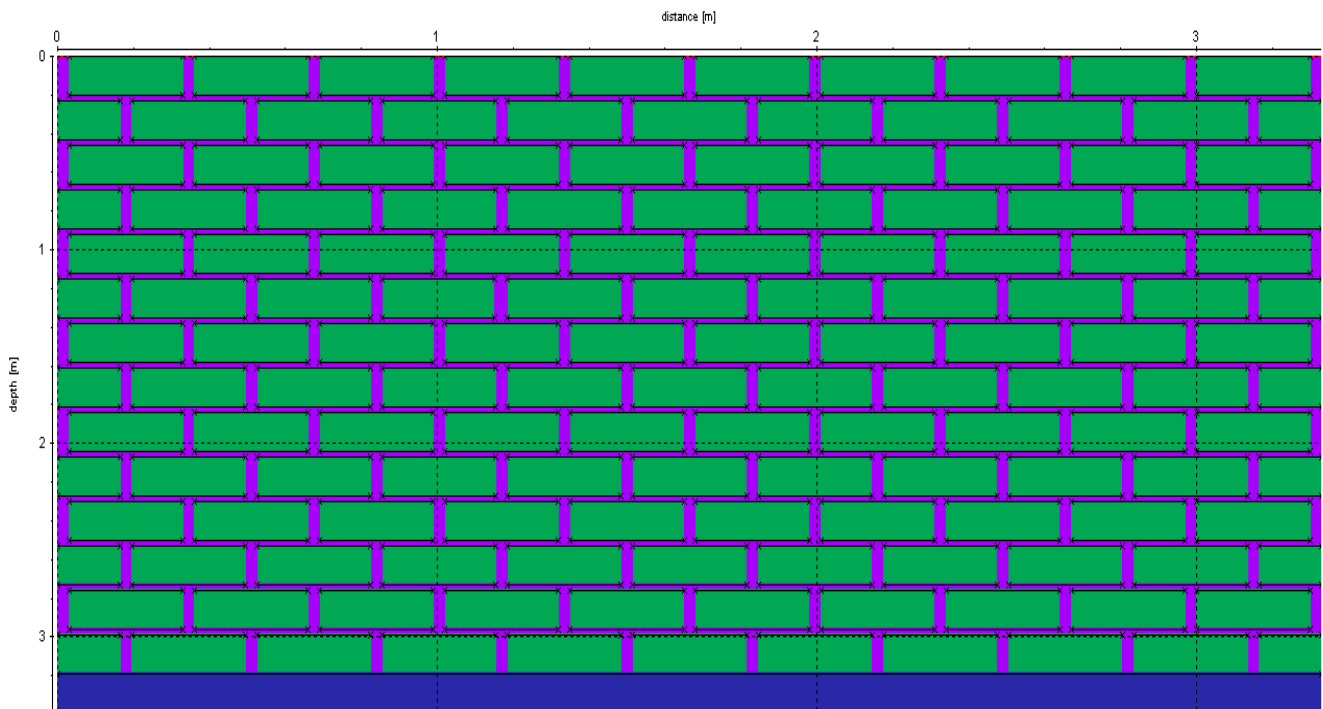
Σχήμα 3.2: Τοποθέτηση των συνιστωσών των εντάσεων  $E$  και  $H$  στο κελί του Yee.<sup>14</sup>

Για να λειτουργήσει σωστά ο αλγόριθμος του Yee λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι. Κάποιες, χαρακτηριστικές από αυτές, είναι το μέγεθος των κελίων Yee, το χρονικό βήμα, ο καθορισμός της διέγερσης και οι απορροφητικές συνθήκες.

### [3.2] Το μοντέλο προσομοίωσης σε 2 διαστάσεις

Το μοντέλο απαρτίζεται από δύο διαστάσεις,  $x$  και  $z$ . Το μήκος ( $x$ ) του μοντέλου ορίστηκε σε 3.33 m ενώ το πλάτος του ( $z$ ) σε 3.4 m. Μέσα, περιέχει ένα σύνολο ψαμμιτικών λίθων οι οποίοι είναι «ενωμένοι» μεταξύ τους με στρώσεις από συνδετικό υλικό (κονίαμα) και ένα στρώμα αέρα (κενό) το οποίο οριοθετείται από τα 3.2 m μέχρι τα 3.4 m. Η κάθε επίστρωση κονιάματος έχει πάχος 3 mm (0.03m). Ο κάθε ψαμμιτικός λίθος ορίστηκε να έχει πάχος 0,2 m και μήκος 0.3 m. Παρακάτω τοποθετείται χαρακτηριστική εικόνα του εν λόγω μοντέλου.

<sup>14</sup> Δουλγέρογλου Σ. Ελένη, Παπαευαγγέλου Α. Αποστολία. «ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ FDTD ΚΑΙ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΩΤΟΣ», 2006

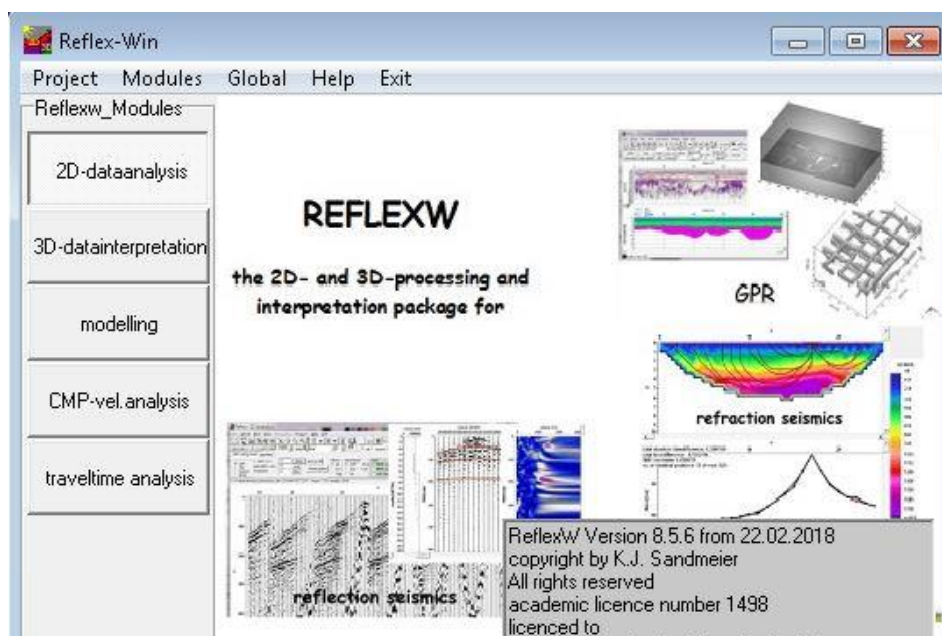


Εικόνα 8. Το μοντέλο προσομοίωσης σε 2 διαστάσεις (2D).

### [3.3] Διεκπεραίωση μοντελοποίησης στο πρόγραμμα

Για την σωστή και ορθή υλοποίηση του μοντέλου έπρεπε να γίνουν τα παρακάτω βήματα.

1. Κατανόηση της γεωμετρίας του μοντέλου.
2. Ορθή εκτίμηση των φυσικών παραμέτρων του κάθε υλικού στο μοντέλο.
3. Σωστή τοποθέτηση του κάθε υλικού στο πρόγραμμα.
4. Σωστή ενσωμάτωση των φυσικών παραμέτρων στο κάθε υλικό.



Εικόνα 9. Αρχική οθόνη του προγράμματος ReflexW

Αρχικά για την δημιουργία του μοντέλου επιλέχθηκε η εντολή «modelling». Έπειτα στο περιβάλλον του προγράμματος οριοθετείται το μοντέλο σε δύο διαστάσεις. Την  $x$  και  $z$ , όπου στο εν λόγω μοντέλο οι διαστάσεις αυτές, όπως προαναφέρθηκε είναι ορισμένες σε 3.33 m και 3.4 m, αντίστοιχα. Στη συνέχεια ορίζονται σταδιακά το κάθε στρώμα υλοποιώντας σιγά-σιγά το μοντέλο. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι για κάθε στρώμα που δημιουργείται, πρέπει να δίνονται και οι ανάλογες τιμές των φυσικών παραμέτρων του (Epsilon  $x$ , sigma, mue).

### [3.4] Φυσικές παράμετροι

Το κάθε υλικό έχει τις δικές του ξεχωριστές φυσικές παραμέτρους. Μέσα στο ευρύ σύνολο των φυσικών παραμέτρων των υλικών εμπεριέχονται και οι τρεις συγκεκριμένες παράμετροι.

#### 1. Epsilon $x$

Ως Epsilon  $x$  στο πρόγραμμα, ορίζεται η **διηλεκτρική σταθερά του υλικού ή σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα**, συμβολίζεται με  $\epsilon_r$  και είναι ίση με το λόγο της ηλεκτρικής διαπερατότητας του υλικού  $\epsilon$  προς την ηλεκτρική διαπερατότητα στο κενό  $\epsilon_0$ . Η ηλεκτρική διαπερατότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο και μετράται σε Farads/m. Η διηλεκτρική σταθερά σχετίζεται με την ικανότητα του μέσου διάδοσης να πολώνει ηλεκτρικά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα και να ελέγχει την ταχύτητά του. Το  $\epsilon_r$  είναι καθαρός αριθμός και εξαρτάται από την συχνότητα του κύματος (είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας).

#### 2. Sigma

Ως Sigma στο πρόγραμμα ορίζεται η **ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού**. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μέτρο της ευκολίας ή

δυσκολίας με την οποία άγεται ηλεκτρικό ρεύμα δια μέσω κάποιου υλικού ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του. Συμβολίζεται συνήθως με  $\sigma$ . Η μονάδα μέτρησής της είναι το Siemens ανά μέτρο (S/m).

### 3. Mue

Ως Mue στο πρόγραμμα ορίζεται η **σχετική μαγνητική διαπερατότητα**. Η μαγνητική διαπερατότητα για μη μαγνητικά υλικά όπως οι περισσότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί θεωρείται περίπου ίση με την μαγνητική διαπερατότητα του κενού και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα, ίση με ένα. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  ενός μέσου είναι το ποσοστό κατά το οποίο αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο όταν εισάγεται ένα υλικό μέσο σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο στο κενό.<sup>15</sup>

#### [3.5] Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων στο μοντέλο.

	Ψαμμίτης	Συνδετικό υλικό (Κονίαμα)	Αέρας (Κενό)
Epsilon $\epsilon$ (Διηλεκτρική σταθερά)	2,7	7,6	1
Mue ( Σχετική Μαγνητική διαπερατότητα)	0,0001	1	1
Sigma ( Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα), (S/m)	0,002	0,005	0,0001

Πίνακας 3.1- Τιμές των φυσικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης

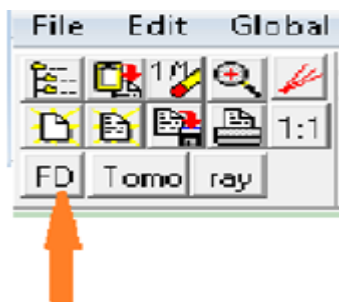
#### [3.6] Δημιουργία συνθετικών δεδομένων για το μοντέλο 2D.

Με την υλοποίηση του μοντέλου και τον καθορισμό των φυσικών παραμέτρων του, γίνεται η δημιουργία των συνθετικών δεδομένων. Όπως και στην μοντελοποίηση, έτσι και στη δημιουργία των συνθετικών δεδομένων

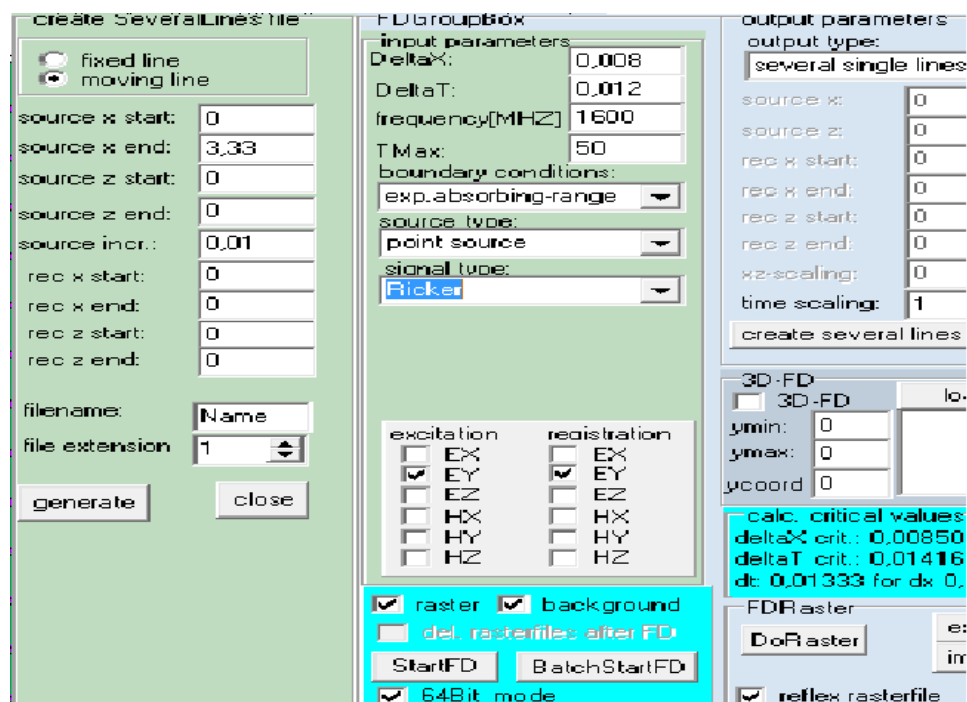
<sup>15</sup> Γιαννίκας Κωνσταντίνος, Καλεσιάκης Κωνσταντίνος, Ψωμιάδης Γεώργιος, Διατάξεις χαρακτηρισμού μαλακών φεριτών σε συχνότητες από 0.3 έως 5 MHz, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας), 2011

ακολουθήθηκαν κάποια βήματα. Τα βήματα θα αποδυθούν και σε μορφή εικόνων παρακάτω.

1. Επιλογή καρτέλας FD.
2. Εισαγωγή των δεδομένων στις ανάλογες καρτέλες(DeltaX, DeltaT, συχνότητα, μέγιστος χρόνος διάδοσης κύματος, είδος πηγής, βήμα διασκόπησης).
3. Επιλογή καρτέλας StartFD.



Εικόνα 10. Επιλογή καρτέλας FD.

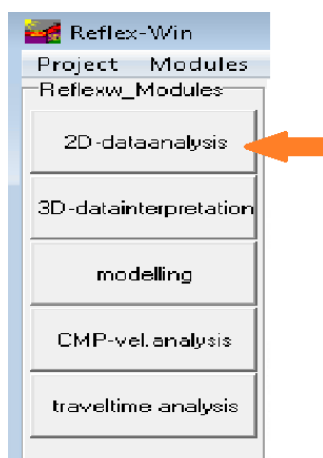


Εικόνα 11. Εισαγωγή παραμέτρων για την δημιουργία συνθετικών δεδομένων.

Αρχικά έγινε εισαγωγή της συχνότητας στην οποία θα λειτουργούσε η προσομοίωση. Η τιμή της εισήχθη στα 1600 MHz. Έπειτα το πρόγραμμα αυτομάτως προτείνει τις τιμές για το βήμα χωρικής διακριτοποίησης DeltaX και το βήμα χρονικής διακριτοποίησης DeltaT. Οι τιμές αυτές τροποποιήθηκαν ελαφρώς για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Εισήχθησαν ελαφρώς μικρότερες τιμές από τις προτεινόμενες. Επίσης, ο μέγιστος χρόνος διάδοσης των κυμάτων εισήχθη στα 50 ns για να μπορέσει να γίνει καταγραφή και ανακλώμενων ή περιθλώμενων κυμάτων και όχι μόνο των απευθείας. Η πηγή ορίσθηκε σε τύπου Ricker και το βήμα διασκόπησης στα 0.01 m. Τέλος, μετά από τις ενέργειες αυτές και τη συμπλήρωση των απαιτούμενων παραμέτρων, επιλέχθηκε η καρτέλα “StartFD” για να αρχίσουν οι υπολογισμοί από το πρόγραμμα και να δημιουργηθούν τα συνθετικά δεδομένα.

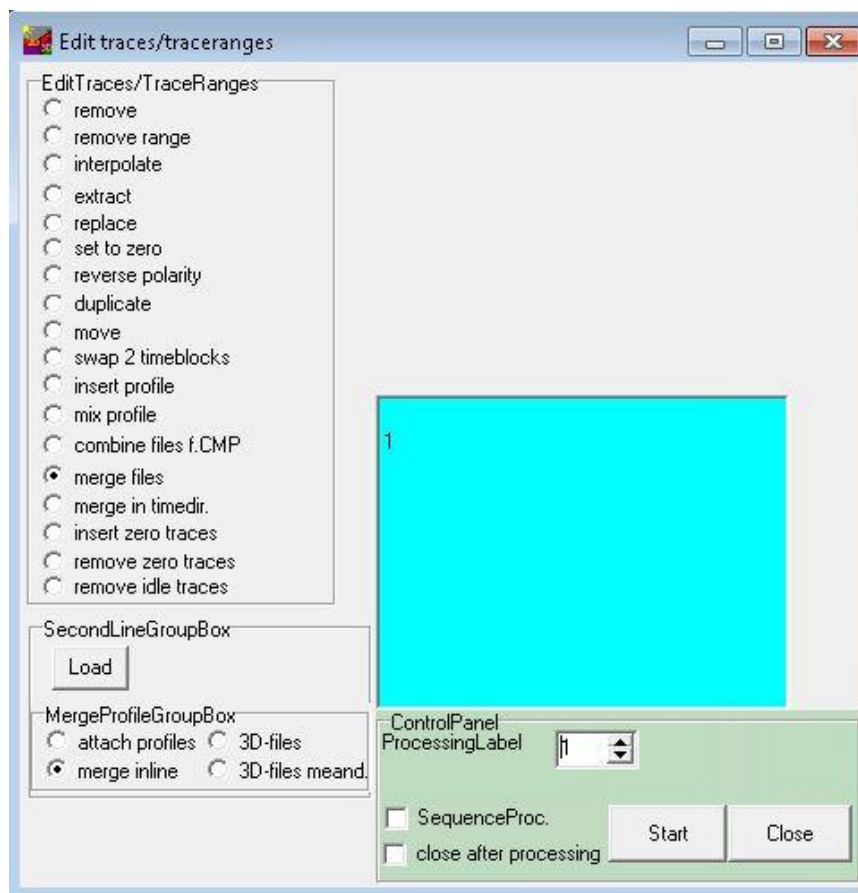
### [3.7] Επεξεργασία συνθετικών δεδομένων και τομή γεωραντάρ για το παραπάνω μοντέλο.

4. Για την ανάκτηση και δημιουργία της τομής Γεωραντάρ που θα δειχθεί και ερμηνευθεί πιο κάτω, έπρεπε να γίνουν κάποιες διαδικασίες οι οποίες αναφέρονται κάτωθι.
1. Αρχικά, επιλέγεται η καρτέλα 2D-data analysis στο αρχικό μενού του προγράμματος ReflexW όπως φαίνεται πιο κάτω.



Εικόνα 12. Επιλογή καρτέλας 2D-dataanalysis.

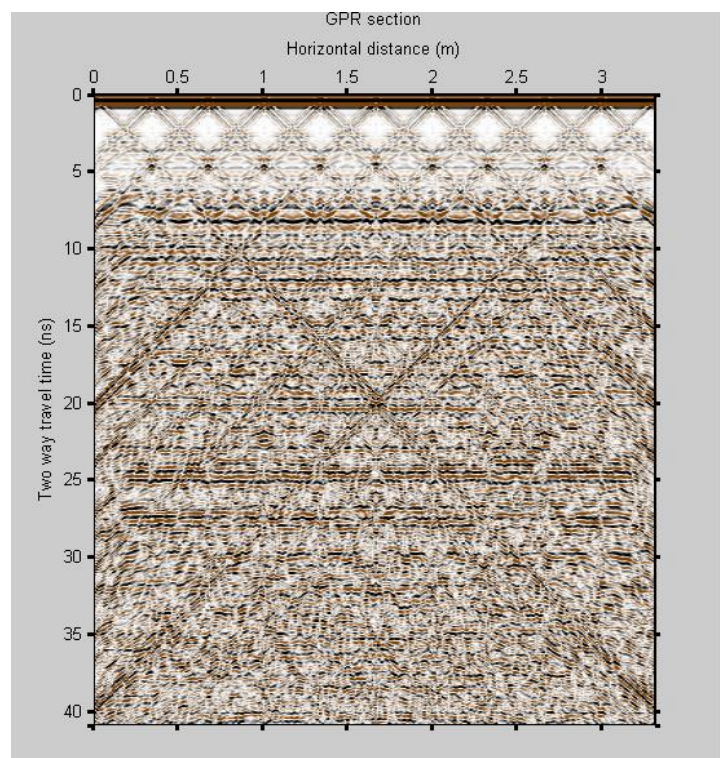
2. Επιλογή “File”-“Open” για την εισαγωγή του «ROHDATA» αρχείου.
3. Έπειτα, επιλέγεται το “Processing”- “Edit Traces/Traceranges”. Επιλέγονται τα «merge files»-«merge inline», «load» και όλα τα υπόλοιπα αρχεία **ΕΚΤΟΣ** του πρώτου το οποίο επιλέχθηκε στο προηγούμενο βήμα.



Εικόνα 13. Editing Traces/Traceranges

4. Τέλος, απεικονίζεται η τομή γεωραντάρ με την επιλογή του κουμπιού «2→1» για μόνο ένα «παράθυρο» μπροστά στην οθόνη μας το οποίο περιέχει μέσα την τομή από τα συνθετικά δεδομένα.

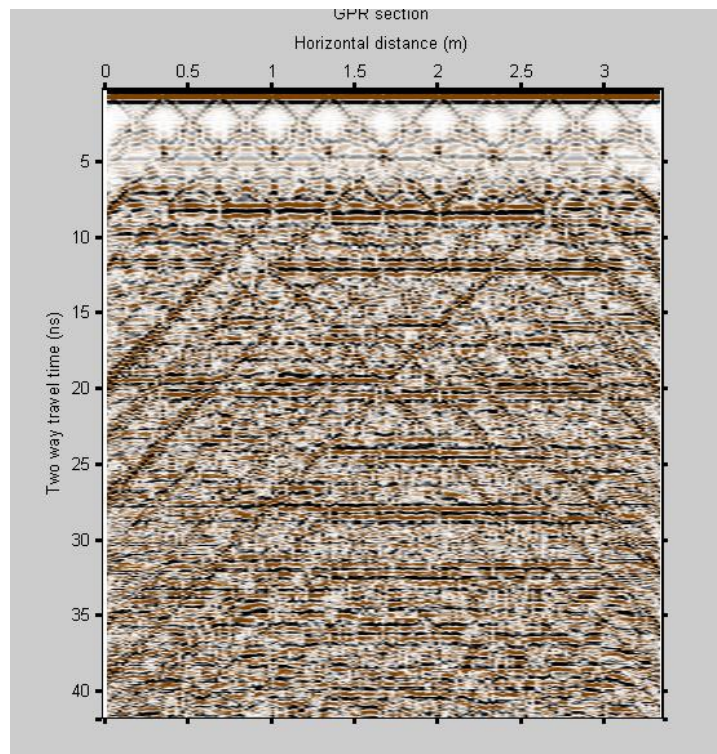
Από το παραπάνω μοντέλο προέκυψε η τομή γεωραντάρ η οποία μετά την ενίσχυσή της σε περιβάλλον MatLab είναι πιο ευδιάκριτη. Χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης στο προαναφερθέν πρόγραμμα (MatLab). (Για περαιτέρω πληροφορίες περί διαδικασίας εφαρμογής και επεξεργασίας με το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης στη MatLab, βλέπε διπλωματική εργασία Κοκοτάκη Βασίλειου, 2015)



Εικόνα 14. Τομή γεωραντάρ (συνθετικά δεδομένα) από το μοντέλο. Χρήση κεραίας 1.6 GHz.

Επιπλέον, εισηγήθηκε και η δημιουργία συνθετικών δεδομένων του ιδίου μοντέλου αλλά με την χρήση της κεραίας των 1.2 GHz. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε επακριβώς με την προηγούμενη και για αυτή τη τομή.

Παρακάτω δίνεται η τομή μετά από την επιτυχή ενίσχυσή τους με το φίλτρο αυτόματης ενίσχυσης.



**Εικόνα 15.** Τομή γεωραντάρ με τη χρήση της κεραίας των 1.2 GHz, έπειτα από εφαρμογή του φίλτρου αυτόματης ενίσχυσης.

Όπως παρατηρείται υπάρχουν πολλές και έντονες ανακλάσεις καθώς και περιθλάσεις μέσα στις τομές (Εικόνες 14 και 15). Στη τομή με την κεραία 1.2 GHz φαίνονται ακόμη καλύτερα και ελαφρώς πιο πολλά σήματα.

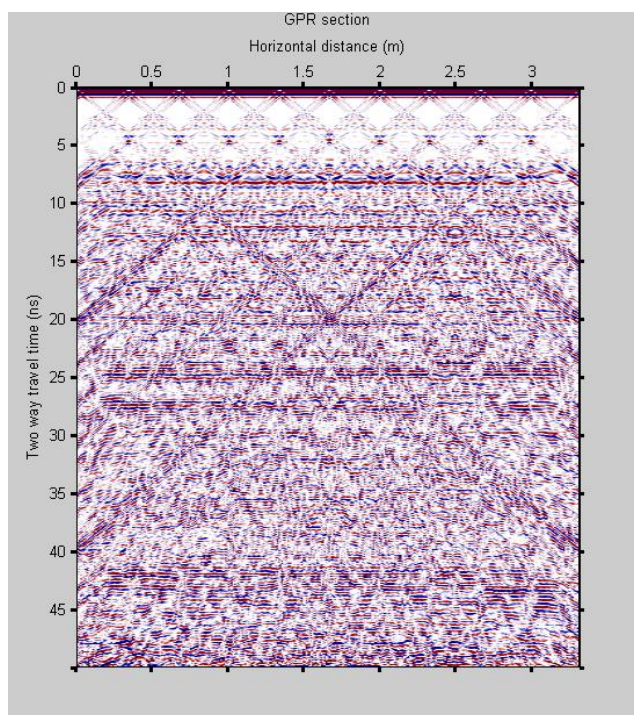
Αρχικά, τόσες ανακλάσεις προέρχονται από τα κομμάτια των λίθων ανά στρώμα. Στην συνέχεια δημιουργήθηκε αρχείο Excel για να υπολογισθούν οι διπλοί χρόνοι που χρειάζεται το κύμα για να φτάσει και να επιστρέψει πίσω από τον κάθε λίθο. Δίνεται ενδεικτικός πίνακας παρακάτω (Πίνακας 3.2).

Όπως φαίνεται (Πίνακας 3.2), στις πλείστες των περιπτώσεων, οι υπολογισμένοι διπλοί χρόνοι αντιστοιχούν στις ανακλάσεις που εμφανίζονται στις τομές.

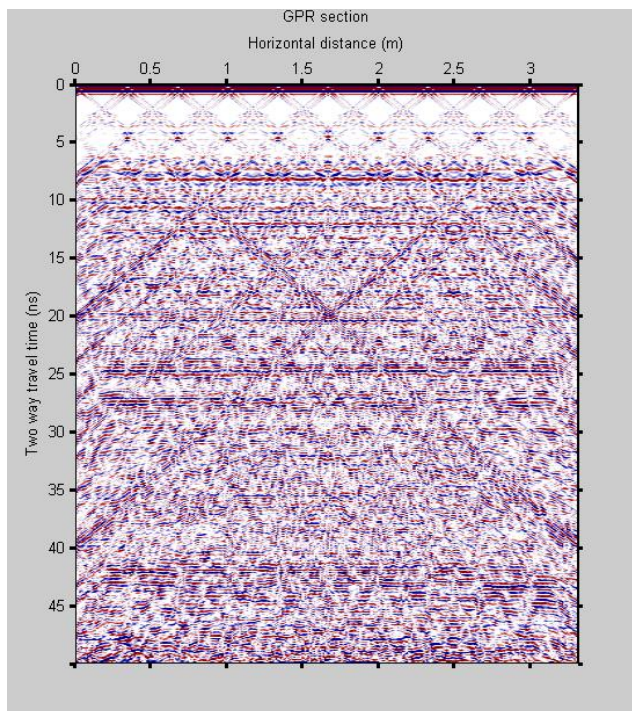
Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι παραπάνω υπολογισμοί αφορούν μόνο τις κύριες ανακλάσεις.

	Λίθος	Κονίαμα	Μέση		Διπλός χρόνος(ns)
Ταχύτητα(m/ns)	0,18	0,11	0,17	1ος Λίθος κάτω	2,19
Πάχος (m)	0,20	0,03		2ος Λίθος πάνω	2,74
Απλός χρόνος(ns)	1,10	0,28		2ος Λίθος κάτω	4,93
				3ος Λίθος πάνω	5,48
				3ος Λίθος κάτω	7,68
				4ος Λίθος πάνω	8,23
	Ανακλάσεις που βλέπω και ταυτίζεται με το excel			4ος Λίθος κάτω	10,42
				5ος Λίθος πάνω	10,97
				5ος Λίθος κάτω	13,16
				6ος Λίθος πάνω	13,71
				6ος Λίθος Κάτω	15,90
				7ος Λίθος Πάνω	16,45
				7ος Λίθος κάτω	18,64
				8ος Λίθος πάνω	19,20
				8ος Λίθος κάτω	21,39
				9ος Λίθος Πάνω	21,94
				9ος Λίθος Κάτω	24,13
				10ος Λίθος Πάνω	24,68
				10ος Λίθος Κάτω	26,87
				11ος Λίθος πάνω	27,42
				11ος Λίθος κάτω	29,61
				12ος Λίθος Πάνω	30,16
				12ος Λίθος κάτω	32,36
				13ος Λίθος Πάνω	32,91
				13ος Λίθος κάτω	35,10
				14ος Λίθος πάνω	35,65
				οριο τοίχου (14ος Λίθος κάτω)	37,84
				οριο μοντελου	39,17

Πίνακας 3.2. Διπλοί χρόνοι για τον κάθε λίθο πάνω και κάτω.



Εικόνα 16. Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ για τις κεραίες των 1.6 GHz.



**Εικόνα 17. Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ για τις κεραίες των 1.2 GHz.**

Η ανάκλαση από το όριο του μοντέλου φαίνεται στις εικόνες 16 και 17 όπου παρουσιάζονται τις ίδιες τομές αλλά με πιο μεγάλο εύρος στον χρόνο καταγραφής. Το όριο διαφαίνεται στα 42ns περίπου. Σύμφωνα με τον πίνακα 3.2 το όριο του μοντέλου αναμενόταν κοντά στα 39 ns περίπου. Άρα στα 42 ns η ανάκλαση που φαίνεται είναι το όριο του μοντέλου.

## Κεφάλαιο 4. Εφαρμογή μεθόδου Γεωραντάρ στα Νεώρια

### [4.1] Διεξαγωγή μετρήσεων με τη μέθοδο του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε σε επιλεγμένες θέσεις σε τοίχους στα Νεώρια Χανίων. Διασκοπήθηκαν συνολικά επτά (7) γραμμές μελέτης με την μέθοδο του γεωραντάρ και δύο (2) γραμμές μελέτης με την μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας (Εικόνα 18).

Η μέθοδος του γεωραντάρ ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους, με τις οποίες επιδιώκεται τόσο η απεικόνιση των διηλεκτρικών ανομοιογενειών, όσο και η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος. Αυτό επιτυγχάνεται με την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος τα οποία όταν συναντήσουν γεωλογικό σχηματισμό με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, μέρος της ενέργειάς τους ανακλάται προς την επιφάνεια, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια διαδίδεται προς βαθύτερους σχηματισμούς. Όλες οι γραμμές μελέτης διασκοπήθηκαν με τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Μέθοδος διασκόπησης:** Σταθερή απόσταση πομπού-δέκτη
- **Κυρίαρχη συχνότητα κεραίας:** 400 MHz και 900 MHz
- **Ολικός χρόνος καταγραφής:** 150 ns
- **Διάστημα χρονικής δειγματοληψίας:** 0.0244 ns
- **Διάστημα δειγματοληψίας διαδοχικών ιχνών:** 2 cm
- **Μήκος γραμμών (συνολικό):** 4 m

- **Μέγιστο βάθος διασκόπησης:**  $1\text{ m}$
- **Πρόγραμμα επεξεργασίας:** *Mat Lab*

Η επεξεργασία των δεδομένων σε όλες τις γραμμές μελέτης πραγματοποιήθηκε με την χρήση αλγορίθμων σε περιβάλλον Mat lab.

Επιγραμματικά, η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ για την απεικόνιση των τομών περιλάμβανε τα εξής βήματα:

- 1) Διόρθωση για τον μηδενικό χρόνο (time-zero correction) και αποκοπή μεταγενέστερων χρόνων καταγραφής
- 2) Αποκοπή αρμονικών πολύ χαμηλής συχνότητας (Dewow)
- 3) Χρονικά μεταβαλλόμενη ενίσχυση

Η επεξεργασία των δεδομένων γεωραντάρ για την εισαγωγή τους σε αλγόριθμο ανάλυσης ταχυτήτων βάσει των περιθλάσεων περιλάμβανε τα εξής βήματα:

- 1) Διόρθωση για τον μηδενικό χρόνο (time-zero correction) και αποκοπή μεταγενέστερων χρόνων καταγραφής
- 2) Αποκοπή αρμονικών πολύ χαμηλής συχνότητας (Dewow)
- 3) Αφαίρεση μέσου ίχνους (Background noise removal)
- 4) Χρονικά μεταβαλλόμενη ενίσχυση (Inverse amplitude decay gain)

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους, με τις οποίες επιδιώκεται ο καθορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της κατανομής των τιμών της στο υπέδαφος. Αυτό επιτυγχάνεται με την δημιουργία τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων. Το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από τη δομή του υπεδάφους, και επομένως από τις μετρήσεις του δυναμικού είναι δυνατός ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής.

Οι παράμετροι της ηλεκτρικής τομογραφίας οι εξής:

- **Διάταξη:** Διπόλου-διπόλου και *Gradient*
- **Αριθμός ηλεκτροδίων:** 40
- **Απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων:** 0.1 m
- **Αριθμός επιπέδων βάθους:** 14 επίπεδα
- **Πρόγραμμα επεξεργασίας:** *Res2Dinv*
- **Μέθοδος αντιστροφής:** *Smoothness constraint inversion*
- **Μέγιστο βάθος διασκόπησης στο κέντρο της τομής:** 0.8 m

## [4.2] Τομές γεωραντάρ

Οι μετρήσεις με το γεωραντάρ έγιναν στον δυτικό και ανατολικό τοίχο του Νεωρίου 1 (N1), στον δυτικό τοίχο του Νεωρίου 2 (N2), στον ανατολικό τοίχο του Νεωρίου 6 (N6) και στο δυτικό τοίχο του Νεωρίου 7 (N7) με κατακόρυφες διασκοπήσεις, καθώς και στον ανατολικό τοίχο του Νεωρίου 7 (N7) όπου πραγματοποιήθηκαν οριζόντια αλλά και κατακόρυφη διασκόπηση.



Εικόνα 18. Κάτοψη Νεωρίων με κόκκινα βέλη οι θέσεις σε τοίχους στα Νεώρια Χανίων στις οποίες πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική διασκόπηση

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε πομπός συχνότητας 400 MHz κατά κόρον, αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις πομπός συχνότητας 900 MHz.

Ξεκινώντας από τις μετρήσεις που έγιναν στο N7 επισημαίνεται ότι στην συγκεκριμένη τοποθεσία διενεργήθηκε και ηλεκτρική τομογραφία. Η ηλεκτρική τομογραφία στην ουσία τεκμηριώνει την ερμηνεία των δεδομένων του γεωραντάρ.

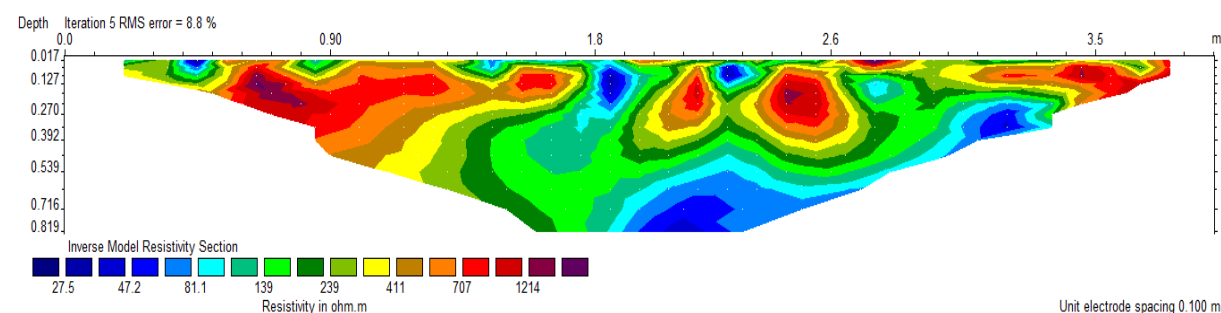
#### [4.2.1] Κατακόρυφες γραμμές μελέτης

##### A. Νεώριο 7 (N7) Ανατολικός τοίχος 400 MHz

Ξεκινώντας από τις μετρήσεις που έγιναν στο N7 επισημαίνεται ότι η συγκεκριμένη κατακόρυφη γραμμή μελέτης διασκοπήθηκε και με την μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας. Η γεωηλεκτρική τομή χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση της ερμηνείας των δεδομένων του γεωραντάρ.

Η γραμμή μελέτης ξεκινά από το πάνω μέρος του τοίχου και καταλήγει στο δάπεδο. Στην γεωηλεκτρική τομή (Εικόνα 19) εμφανίζονται ζώνες με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μικρότερες των 80 Ωm (μπλε χρώμα) οι οποίες αποδίδονται σε αυξημένη υγρασία/αργιλότητα. Η μεγαλύτερη από αυτές εμφανίζεται στο χαμηλότερο τμήμα του τμήμα του τοίχου (2m – 3.4m στην γεωηλεκτρική τομή) σε απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια του τοίχου περίπου 0.5m. Ζώνες με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεγαλύτερες των 400 Ωm (καφέ-κόκκινο χρώμα) αποδίδονται στην λιθοδομή της οποίας το μέσο πάχος είναι 0.4m.

#### ■ Ηλεκτρική τομογραφία



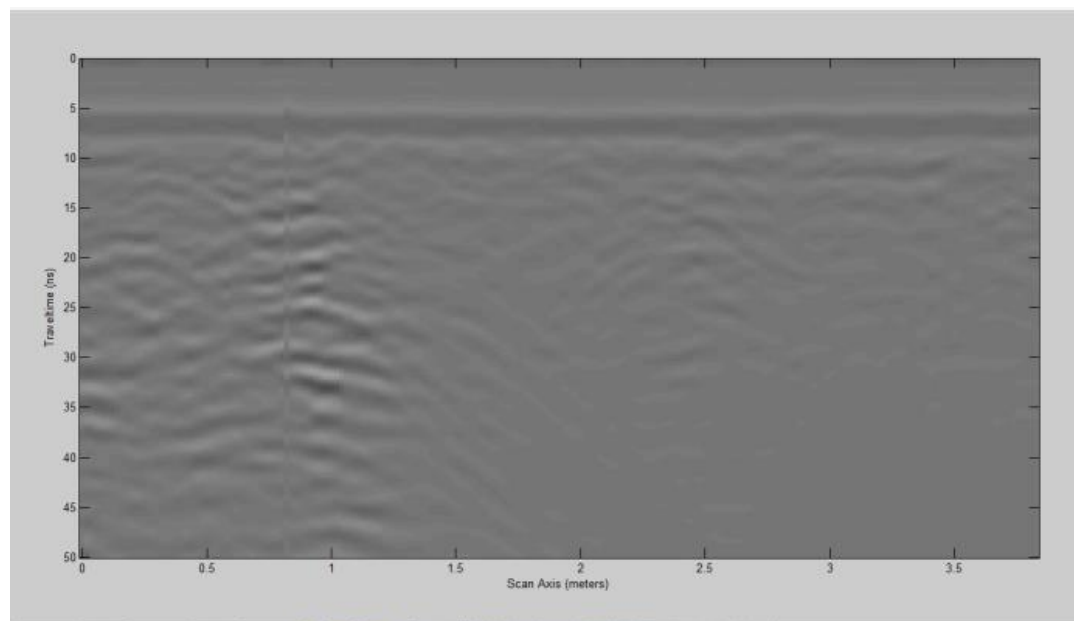
Εικόνα 19. Γεωηλεκτρική τομή στον ανατολικό τοίχο του 7<sup>ου</sup> Νεωρίου από πάνω προς τα κάτω.

Με βάση τις τομές γεωραντάρ που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων (Εικόνα 20) προσδιορίστηκαν δύο ζώνες υψηλότερης σχετικά

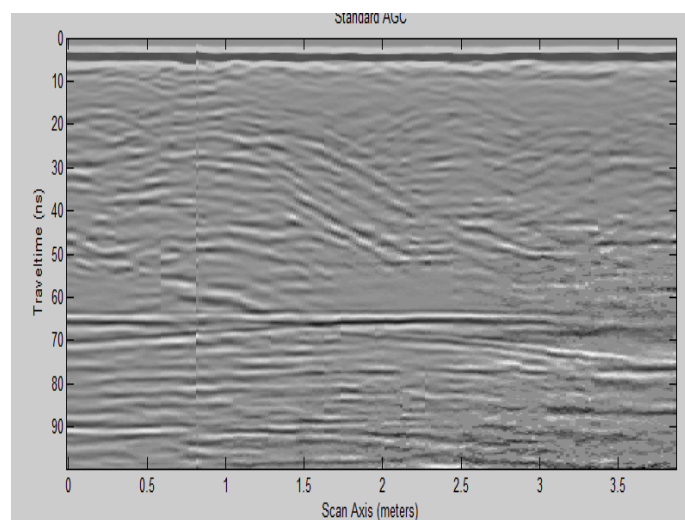
εξασθένησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η πρώτη από τα 1.5 m μέχρι περίπου τα 2 m από την αρχή της γραμμής μελέτης και η δεύτερη από 3 m μέχρι το τέλος. Η υψηλότερη εξασθένηση αποδίδεται σε αυξημένη περιεκτικότητα της σε υγρασία ή/και σε αυξημένη αργιότητα.

Παρουσιάζονται δηλαδή ζώνες αυξημένης εξασθένησης και μειωμένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης λόγω της ύπαρξης υγρασίας στις δομές.

#### ■ Γεωραντάρ

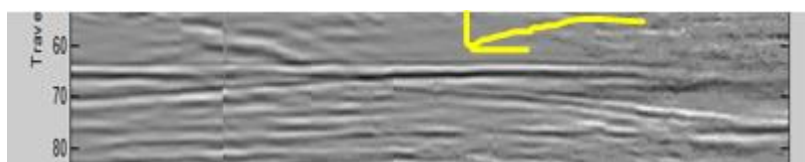


**Εικόνα 20.** Ανεπεξέργαστη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον ανατολικό τοίχο του 7<sup>ου</sup> Νεώριου από πάνω προς τα κάτω.



**Εικόνα 21.** Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον ανατολικό τοίχο του 7<sup>ου</sup> Νεώριου από πάνω προς τα κάτω.

Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται η ίδια τομή γεωραντάρ με την εικόνα 20 αλλά με τη διαφορά ότι αυτή έχει εφαρμοστεί αυτόματη ενίσχυση. Στην τομή αυτή ο χρόνος καταγραφής των κυμάτων είναι μεγαλύτερος και φτάνει μέχρι τα 100 ns. Παρατηρούνται ανακλώμενα κύματα που προέρχονται από τον απέναντι τοίχο, το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου 7, όπως φαίνονται στην εικόνα 20.



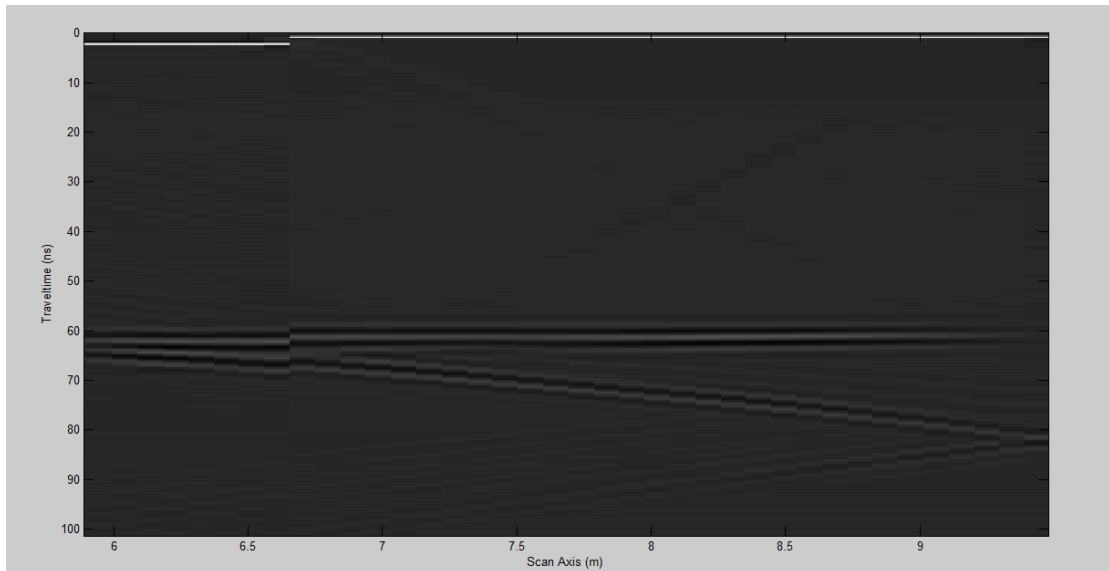
Εικόνα 22. Ανακλώμενα κύματα από τον απέναντι τοίχο το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου στην τομή γεωραντάρ

Τα κύματα αυτά εμφανίζονται σε όλες τις κατακόρυφες τομές (N1,N2,N7) σε χρόνο καταγραφής από 60ns μέχρι 70ns. Για την αναγνώρισή τους χρησιμοποιήθηκε και ένα μοντέλο προσομοίωσης για τη δημιουργία συνθετικών δεδομένων. Βάση των συνθετικών αυτών δεδομένων κα τη σύγκριση των επεξεργασμένων τομών και των συνθετικών και επιβεβαιώθηκε ότι η ύπαρξη καταγραφής κυμάτων στα 65-70 nsπερίπου οφείλεται σε αυτά τα κύματα.

Αναμένεται στις τομές γεωραντάρ η καταγραφή ανακλώμενων κυμάτων που προέρχονται από την άλλη ελεύθερη επιφάνεια του τοίχου αλλά δεν διακρίνονται σε αυτή την τομή. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους. Ο ένας είναι αυτός που προαναφέρθηκε, δηλαδή στην ύπαρξη υγρασίας κυρίως στα κατώτερα τμήματα της δομής και έτσι τα κύματα να παρουσιάζουν υψηλή εξασθένιση, και ο δεύτερος, στο ότι αυτά τα ανακλώμενα κύματα καταγράφονται σε παρόμοιους χρόνους με τα κύματα από τον απέναντι τοίχο τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερα πλάτη. Πιο πιθανόν όμως να συμβαίνει λόγω της ύπαρξης υγρασίας καθώς η εφαρμογή της

μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας υποδεικνύει έντονη παρουσία υγρασία στο κάτω τμήμα της δομής.

■ Συνθετικά δεδομένα



Εικόνα 23. Συνθετικά δεδομένα για την απεικόνιση των κυμάτων αέρος

Από τις τομές γεωραντάρ προσδιορίστηκε και το πάχος του τοίχου όπου υπήρξε καταγραφή κύματος.

Αρχικά η ταχύτητα διάδοσης του κύματος εκτιμήθηκε στα 0,072 m/ns από την μελέτη περιθλώμενων κυμάτων. Γνωρίζοντας τη ταχύτητα και το τύπο που συνδέει τη ταχύτητα με την διηλεκτρική σταθερά εκτιμάται η τελευταία.

$$v=c/\epsilon^{0.5} \text{ άρα } \epsilon=(c/v)^2 =17.4$$

Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς αντιστοιχεί στο πάνω τμήμα του τοίχου (στα 0.4 m της τομής γεωραντάρ) και υποδεικνύει ζώνη υγρασίας ίσης με 30% κ.ο.

$$\epsilon_r = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3 \quad (\text{σχέση Torpp})$$

Έπειτα, υπολογίστηκε ότι το πάχος της λιθοδομής του τοίχου στα 0.4 m τομής γεωραντάρ είναι ίσο με 0.36 m.

$$@0.4\text{m}: 10\text{ns}/2 \times 0,072\text{m}/\text{ns}=0.36\text{m}$$

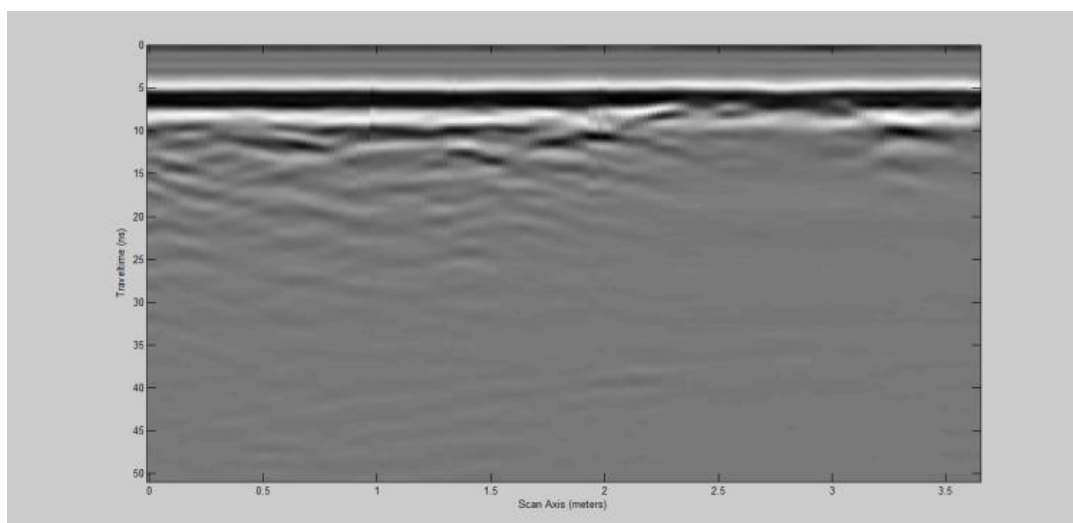
Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τα 3-3.5 m, όπου το πάχος της λιθοδομής του τοίχου υπολογίστηκε στα 0,28m με τη ταχύτητα των κυμάτων να υπολογίζεται στα 0.056 m/ns, την διηλεκτρική σταθερά στα 28,7 και την υγρασία 44% κ.ο.

$$v=c/\epsilon^{0.5} \text{ άρα } \epsilon=(c/v)^2 =28,7$$

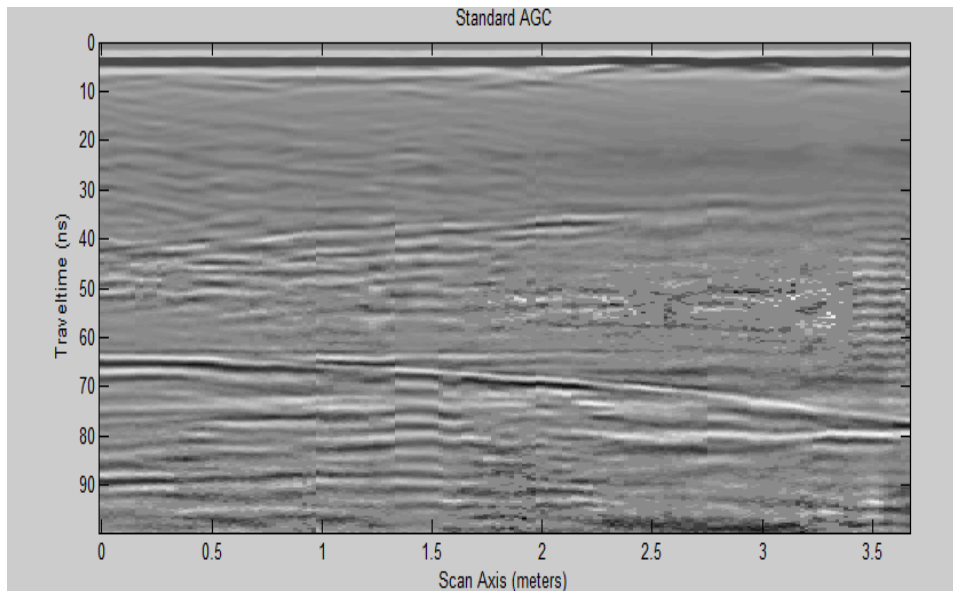
$$@3-3.5\text{m}: 10\text{ns}/2 \times 0,056\text{m}/\text{ns}=0.28\text{m}$$

#### B. Νεώριο 1 (N1) Ανατολικός τοίχος 400 MHz

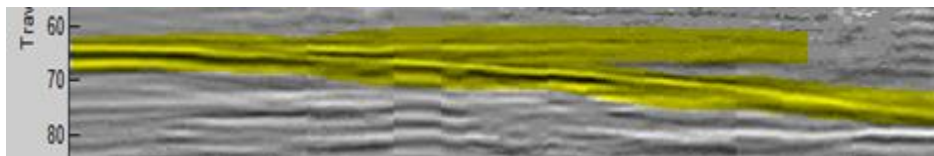
Παρατηρείται και σε αυτή τη τομή (Εικόνα 24) ότι υπάρχει εξασθένιση των κυμάτων από τα 2.4 m μέχρι το τέλος της γραμμής μελέτης. Επίσης αναμένεται ανάκλαση που προέρχονται από την ελεύθερη επιφάνεια του τοίχου αλλά δεν εμφανίζεται στην τομή (Εικόνα 25). Αυτό συμβαίνει πιθανόν για τους προαναφερθέντες λόγους στη διασκόπηση της θέσης N7 (ανατολικός τοίχος). Παρατηρείται και εδώ η ύπαρξη ανακλώμενων κυμάτων από τον απέναντι τοίχο, το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου 1 στην τομή γεωραντάρ στα 65-70 ns περίπου.



**Εικόνα 24. Ανεπεξέργαστη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον ανατολικό τοίχο του 1ου Νεωρίου από πάνω προς τα κάτω.**



Εικόνα 25. Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον ανατολικό τοίχο του 1ου Νεωρίου από πάνω προς τα κάτω.



Εικόνα 26. Ανακλώμενα κύματα από τον απέναντι τοίχο το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου στην τομή γεωραντάρ

Από τις τομές γεωραντάρ προσδιορίστηκε και το πάχος της λιθοδομής του τοίχου όπου υπήρξε καταγραφή κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων σε αυτή τη τομή υπολογίστηκε στα 0,08 m/ns από την μελέτη περιθλώμενων κυμάτων. Με το ίδιο ακριβώς σκεπτικό όπως και στην προηγούμενη τομή, υπολογίστηκε η διηλεκτρική σταθερά και έπειτα το πάχος της λιθοδομής του τοίχου στα 0.4 m.

$$\rightarrow v=0,08\text{m/ns}$$

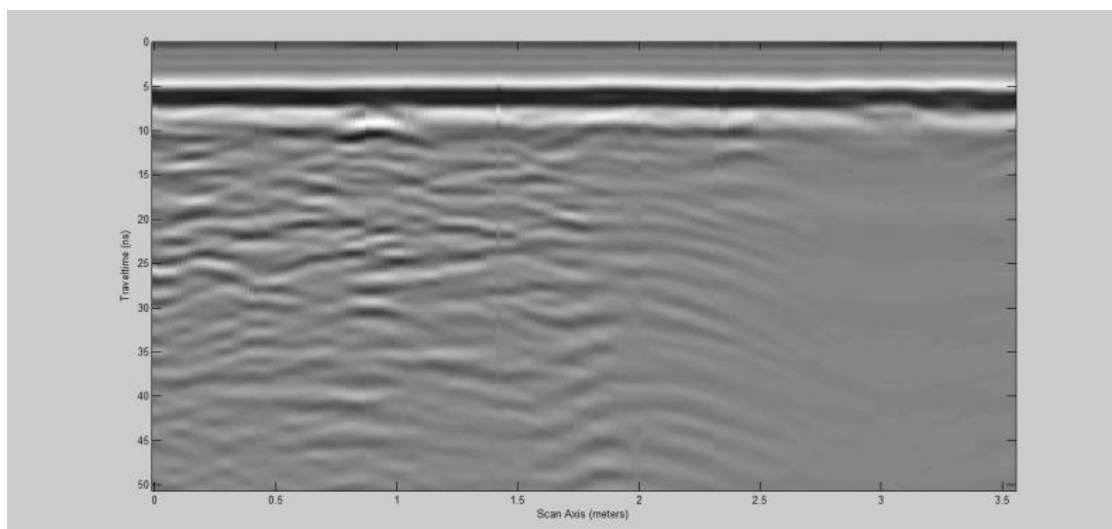
$$\rightarrow v=c/\epsilon^{0.5} \text{ άρα } \epsilon=(c/v)^2 =13,4$$

$$\rightarrow @0.4 \text{ m: } 10\text{ns}/2 \times 0.08 \text{ m/ns} = \mathbf{0.4 \text{ m}}$$

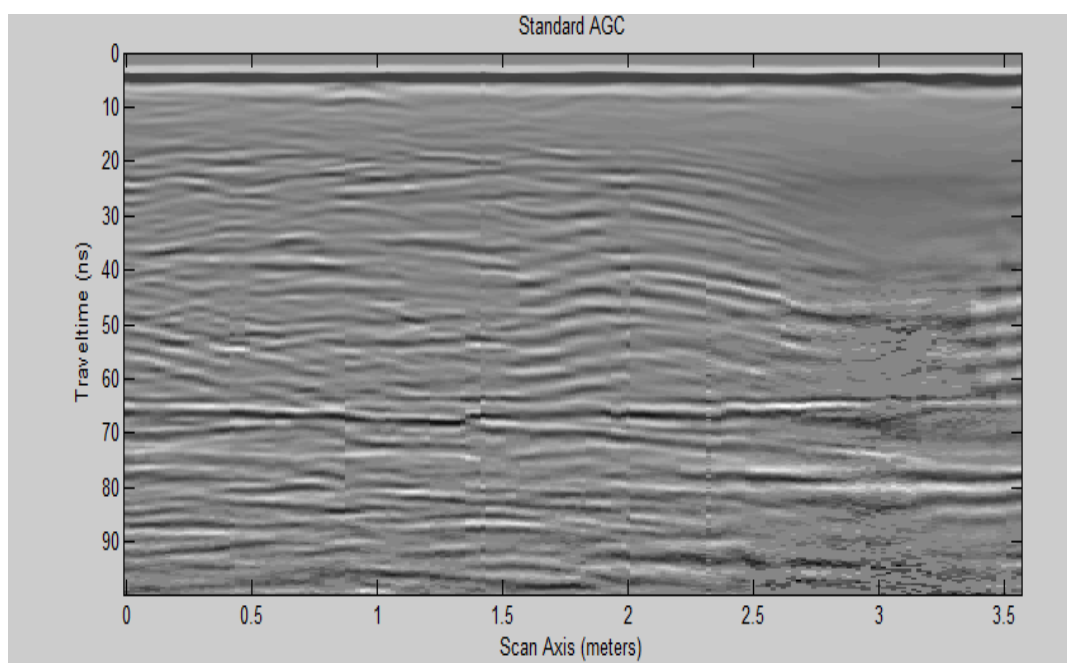
Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς αντιστοιχεί στο πάνω τμήμα του τοίχου (στα 0.4 m της τομής γεωραντάρ) και υποδεικνύει υγρασία ίση με 25% κ.ο.

$$\epsilon_r = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3 \text{ (σχέση Torpp)}$$

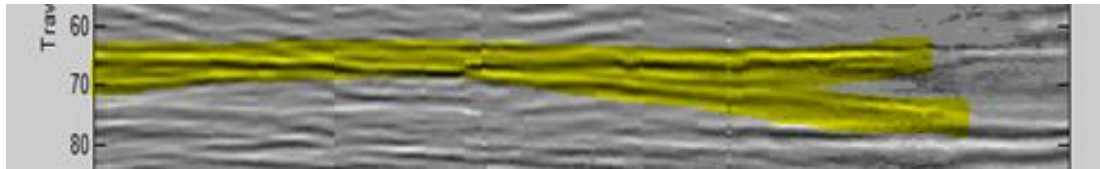
Κ. Νεώριο 1 Δυτικός τοίχος 400 MHz



Εικόνα 27. Ανεπεξέργαστη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον δυτικό τοίχο του 1ου Νεώριου από πάνω προς τα κάτω.



Εικόνα 28. Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον δυτικό τοίχο του 1ου Νεώριου από πάνω προς τα κάτω.



Εικόνα 29. Ανακλώμενα κύματα από τον απέναντι τοίχο το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου στην τομή γεωραντάρ

Από τις τομές γεωραντάρ προσδιορίστηκε το πάχος της λιθοδομής του τοίχου όπου υπήρξε καταγραφή κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων σε αυτή τη τομή υπολογίστηκε στα 0,08 m/ns από την μελέτη περιθλώμενων κυμάτων. Με το ίδιο ακριβώς σκεπτικό όπως και στην προηγούμενες θέσεις, υπολογίστηκε η διηλεκτρική σταθερά και έπειτα το πάχος της λιθοδομής του τοίχου στα 0.4 m.

$$\rightarrow v=0,08\text{m/ns}$$

$$\rightarrow v=c/\epsilon^{0.5} \text{ άρα } \epsilon=(c/v)^2 =13,4$$

$$\rightarrow @0,3\text{m} : 10 \text{ ns}/2 \times 0.08\text{m/ns} = \mathbf{0.4 \text{ m}}$$

$$\rightarrow @2.5 \text{ m} : 10 \text{ ns}/2 \times 0.06 \text{ m/ns} = \mathbf{0.3 \text{ m}}$$

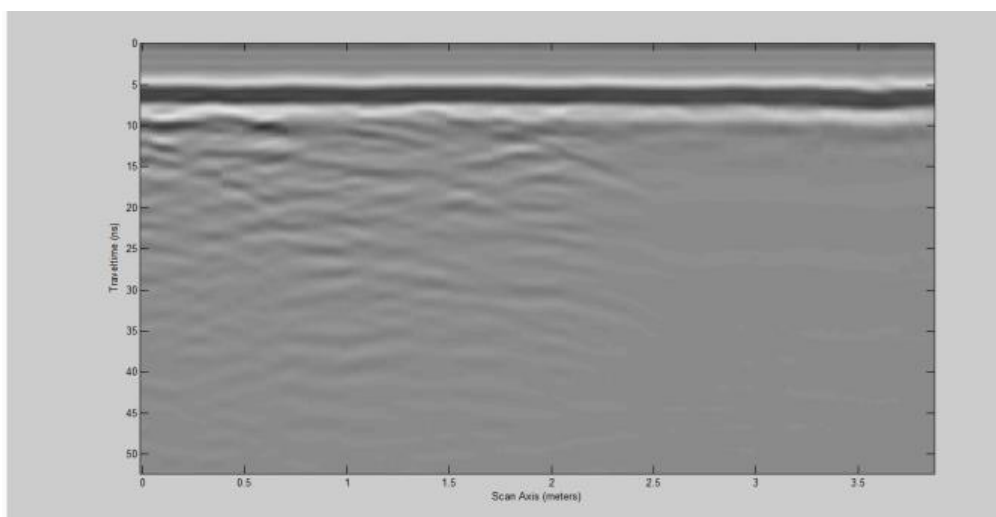
Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς αντιστοιχεί στο πάνω τμήμα του τοίχου (στα 0.4 m της τομής γεωραντάρ) και υποδεικνύει υγρασία ίση με 25% κ.ο.

$$\epsilon_r = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3 \text{ (σχέση Torpp)}$$

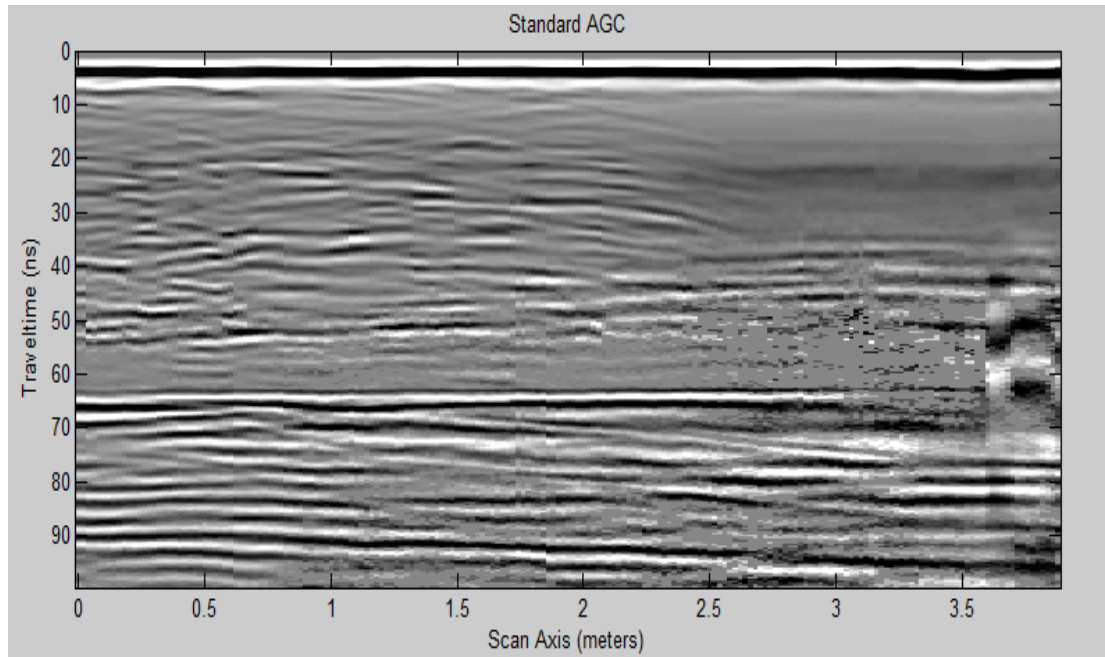
Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τα 2.5 m, όπου το πάχος της λιθοδομής του τοίχου υπολογίστηκε στα 0,3m με τη ταχύτητα των κυμάτων να υπολογίζεται στα 0.06 m/ns, την διηλεκτρική σταθερά στα 28,7 και την υγρασία 44% κ.ο.

#### D. Νεώριο 2 (N2) Δυτικός τοίχος 400 MHz

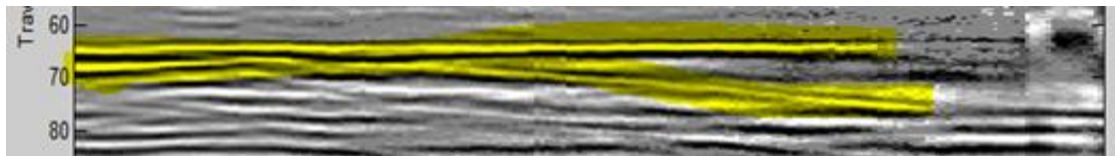
Όπως και στις προηγούμενες τομές ούτε και εδώ διακρίνεται ανάκλαση που προέρχεται από την άλλη ελεύθερη επιφάνεια του τοίχου. Αυτό οφείλεται και πάλι στην ύπαρξη υγρασίας (εξασθένιση κύματος από τα 2.4m περίπου μέχρι το τέλος της γραμμής μελέτης) είτε στην επικάλυψη των προαναφερθέντων ανακλώμενων κυμάτων από αντίστοιχα ανακλώμενα κύματα προερχόμενα από τον απέναντι τοίχο, το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου 2.



**Εικόνα 30. Ανεπεξέργαστη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον δυτικό τοίχο του 2ου Νεωρίου από πάνω προς τα κάτω.**



Εικόνα 31. Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον δυτικό τοίχο του 2ου Νεώριου από πάνω προς τα κάτω.



Εικόνα 32. Ανακλώμενα κύματα από τον απέναντι τοίχο το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου

Από τις τομές γεωραντάρ προσδιορίστηκε το πάχος της λιθοδομής του τοίχου όπου υπήρξε καταγραφή κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων σε αυτή τη τομή υπολογίστηκε στα 0,08 m/ns από την μελέτη περιθλώμενων κυμάτων. Με το ίδιο ακριβώς σκεπτικό όπως και στην προηγούμενη τομή, υπολογίστηκε η διηλεκτρική σταθερά και έπειτα το πάχος της λιθοδομής του τοίχου στα 0.4 m.

$$\rightarrow v=0,08\text{m/ns}$$

$$\rightarrow v=c/\epsilon^{0.5} \text{ άρα } \epsilon=(c/v)^2 =13,4$$

$$\rightarrow @0,4 \text{ m: } 10\text{ns}/2 \times 0.08 \text{ m/ns} = \mathbf{0.4\text{m}}$$

$$\rightarrow v=0,06\text{m/ns}$$

$$\rightarrow v=c/\epsilon^{0.5} \text{ άρα } \epsilon=(c/v)^2 =25$$

$$\rightarrow @2 \text{ m: } 10\text{ns}/2 \times 0.06 \text{ m/ns} = \mathbf{0.3\text{m}}$$

Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς αντιστοιχεί στο πάνω τμήμα του τοίχου (στα 0.4 m της τομής γεωραντάρ) και υποδεικνύει υγρασία ίση με 25% κ.ο. Αντίστοιχα στο κάτω τμήμα του τοίχου (στα 2 m της τομής γεωραντάρ) η υγρασία είναι ίση με 40% κ.ο

$$\varepsilon_r = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3 \text{ (σχέση Torpp)}$$

#### Ε. Νεώριο 2 (N2) Δυτικός τοίχος 900 MHz

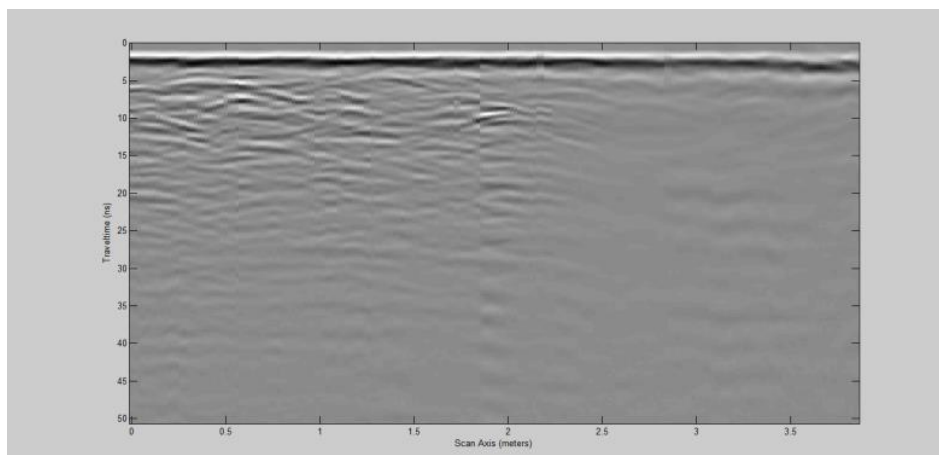
Στην ίδια θέση με την προηγούμενη, η γραμμή μελέτης σαρώθηκε αλλά αυτή τη φορά με κεραίες συχνότητας 900 MHz. Αυτό έγινε για να συλλεχθούν δεδομένα με μεγαλύτερη ανάλυση.

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο αποτελεί η επιλογή της συχνότητας λειτουργίας του γεωραντάρ, η οποία πρέπει να προεπιλεχθεί των μετρήσεων. Όσο μεγαλύτερη συχνότητα εκπομπής έχουμε τόσο υψηλή διακριτικότητα προκύπτει, με το μειονέκτημα όμως του μικρού βάθους διείσδυσης. Αντίθετα η σχετικά μικρή συχνότητα εκπομπής έχει το πλεονέκτημα του μεγάλου βάθους διείσδυσης και το μειονέκτημα της διακριτικής ικανότητας.<sup>16</sup>

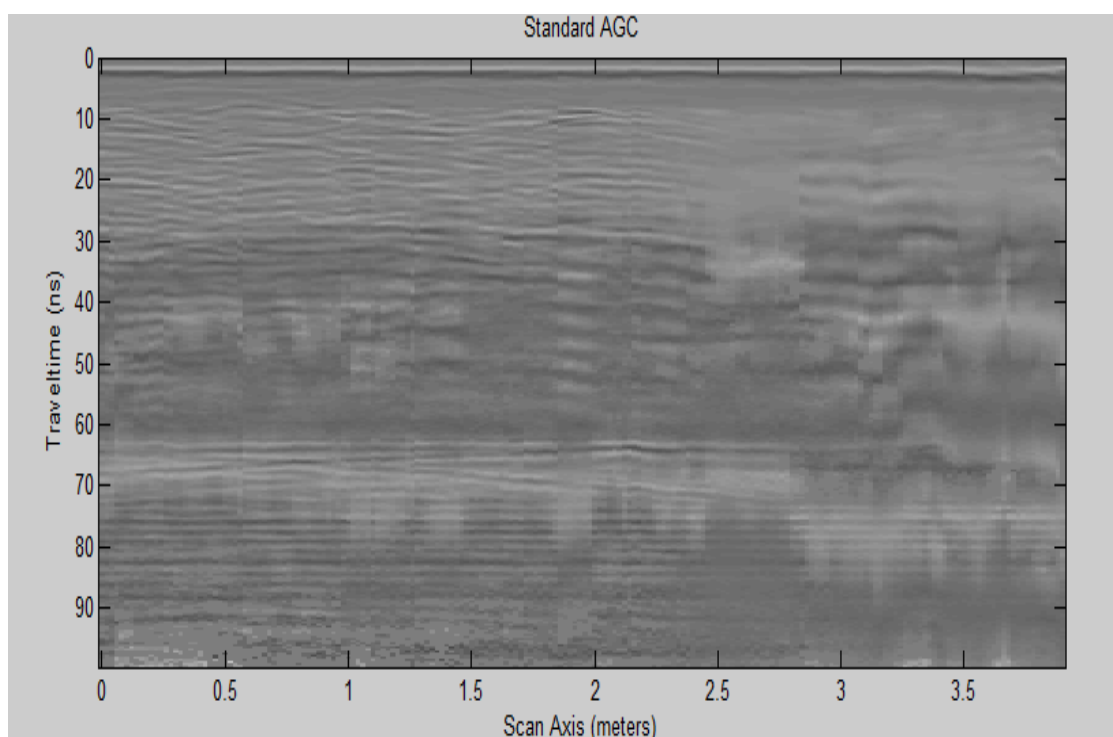
Και σε αυτή τη περίπτωση, ακόμη και με τη χρήση κεραιών υψηλότερης συχνότητας, παρατηρείται πάλι στο δεξί τμήμα της τομής γεωραντάρ εξασθένιση των κυμάτων λόγω της υγρασίας (Εικόνα 33).

---

<sup>16</sup> Ευθυμίου Κ. Μαρία, ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΑΠΤΕΡΩΝ ΤΟΥ Ν.ΧΑΝΙΩΝ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ιούλιος 2012



**Εικόνα 33.** Ανεπεξέργαστη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 900 MHz στον δυτικό τοίχο του 2ου Νεώριου από πάνω προς τα κάτω.



**Εικόνα 34.** Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 900 MHz στον δυτικό τοίχο του 2ου Νεώριου από πάνω προς τα κάτω.



**Εικόνα 35.** Ανακλώμενα κύματα από τον απέναντι τοίχο το δάπεδο και την οροφή του Νεωρίου

Από τις τομές γεωραντάρ προσδιορίστηκε το πάχος της λιθοδομής του τοίχου όπου υπήρξε καταγραφή κύματος. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων σε αυτή τη τομή υπολογίστηκε στα 0,1 m/ns από την μελέτη περιθλώμενων κυμάτων. Με το ίδιο ακριβώς σκεπτικό όπως και στην προηγούμενη τομή, υπολογίστηκε η διηλεκτρική σταθερά και έπειτα το πάχος της λιθοδομής του τοίχου στα 0.4 m.

$$\rightarrow v=0,1\text{m/ns}$$

$$\rightarrow v=c/\epsilon^{0.5} \text{ άρα } \epsilon=(c/v)^2 =9$$

$$\rightarrow @ 0\text{-}1\text{m}: 5\text{ns}/2 \times 0,1\text{m/ns} = \mathbf{0.25\text{m}}$$

$$\rightarrow @ 2.2\text{m}: 6,5\text{ns}/2 \times 0,1\text{m/ns} = \mathbf{0.32\text{m}}$$

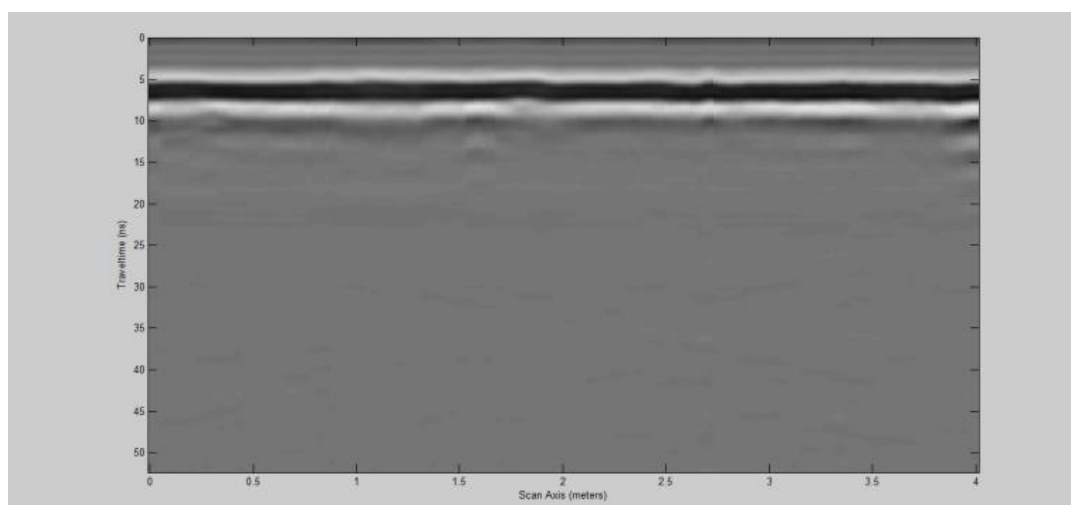
Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς αντιστοιχεί στο πάνω τμήμα του τοίχου (στα 0.4 m της τομής γεωραντάρ) και υποδεικνύει ζώνη υγρασίας ίσης με 18% κοκ.

$$\epsilon_r = 3,03 + 9,3\theta + 146\theta^2 - 76,7\theta^3 \text{ (σχέση Torpp)}$$

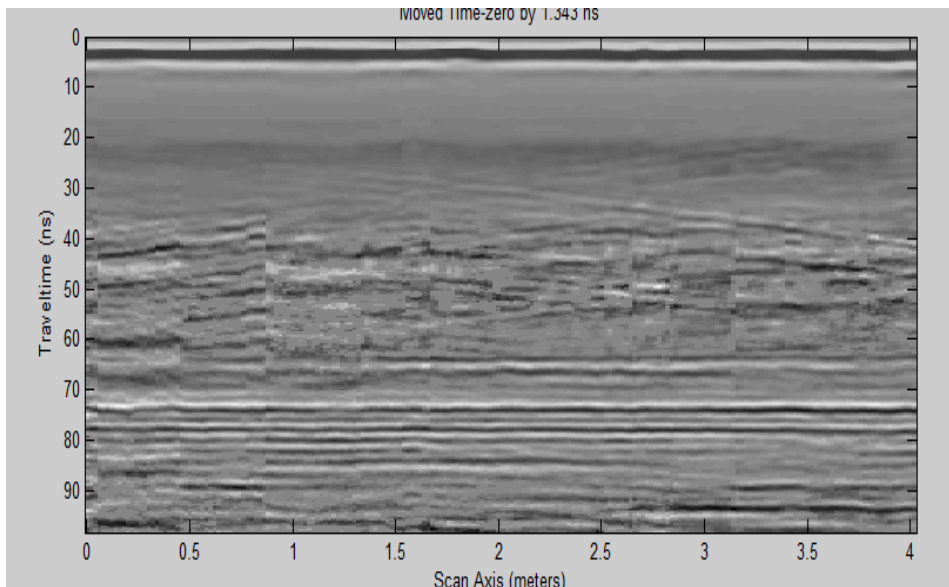
#### [4.2.2] Οριζόντιες γραμμές μελέτης

A. Νεώριο 7 (N7) ανατολικός τοίχος 400 MHz

Στην ίδια τοποθεσία στο N7 όπου πραγματοποιήθηκε η κατακόρυφη διασκόπηση έγινε και μια οριζόντια.



Εικόνα 36. Ανεπεξέργαστη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον ανατολικό τοίχο του 7ου Νεώριου από δεξιά προς τα αριστερά.



Εικόνα 37. Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 400 MHz στον ανατολικό τοίχο του 7ου Νεώριου από δεξιά προς τα αριστερά.

Στην επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ (Εικόνα 37) παρατηρούνται 3 ανακλάσεις (ευθείες γραμμές) στα τέλη της τομής. Στα 65 ns, 71 ns και 78 ns. Έπειτα, βρέθηκε αντίστοιχα για την κάθε ανάκλαση η απόσταση του «εμποδίου» που δημιουργεί την ανάκλαση των κυμάτων από τη γραμμή μελέτης με τον παρακάτω τύπο:

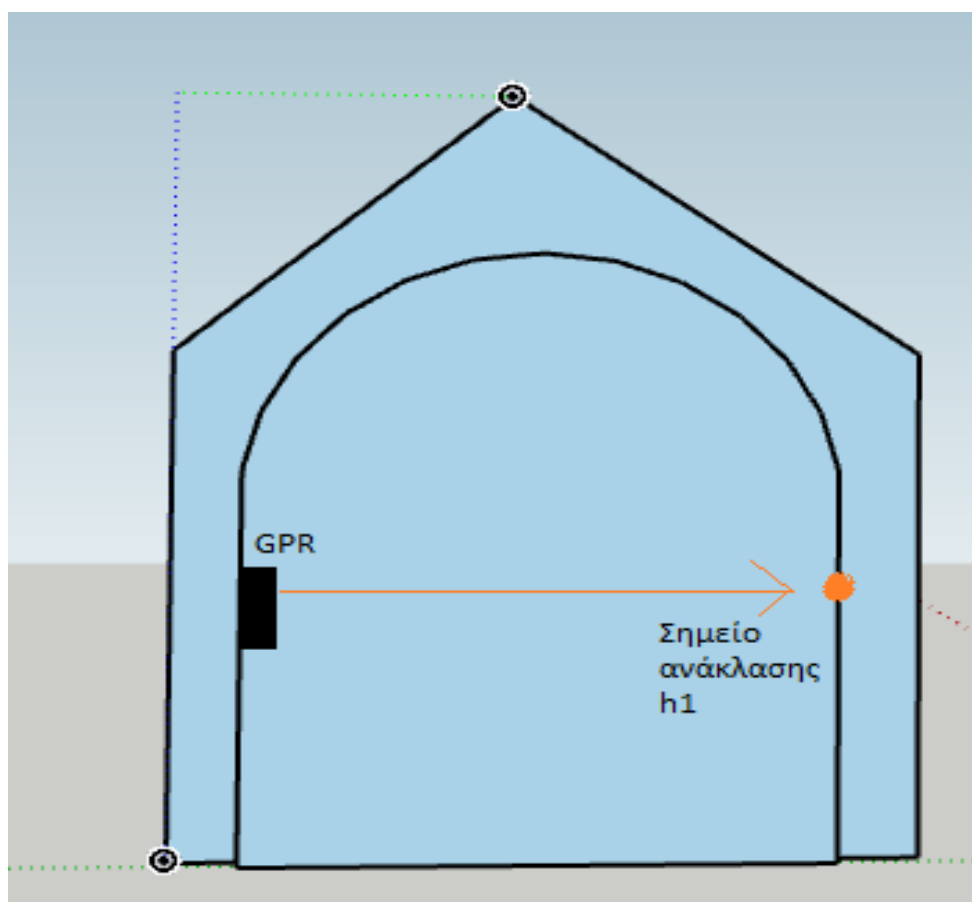
$$5. \quad H = \frac{1}{2} * t(\text{ns}) * 0.3 \text{ m/ns}$$

Άρα, αντίστοιχα για τις ανακλάσεις στα 65 ns, 71 ns, 78 ns πήραμε τις αποστάσεις των σημείων που δημιουργούν την ανάκλαση .

- 65 ns  $\rightarrow h_1 = \frac{1}{2} * 65 \text{ ns} * 0.3 \text{ m/ns} \rightarrow \mathbf{h_1=9.45 \text{ m}}$
- 73 ns  $\rightarrow h_2 = \frac{1}{2} * 73 \text{ ns} * 0.3 \text{ m/ns} \rightarrow \mathbf{h_2=10.95 \text{ m}}$
- 78 ns  $\rightarrow h_3 = \frac{1}{2} * 78 \text{ ns} * 0.3 \text{ m/ns} \rightarrow \mathbf{h_3=11.85 \text{ m}}$

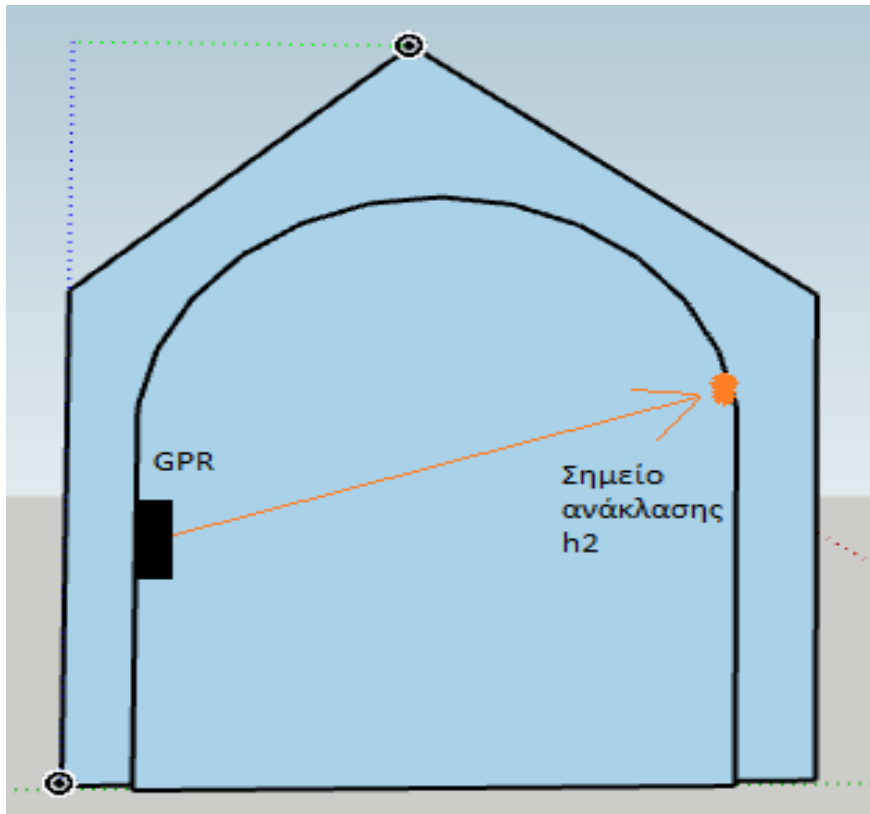
Η ερμηνεία που αποδόθηκε για τις πιο πάνω ανακλάσεις είναι η εξής:

1.  $h_1=9.45 \text{ m} \rightarrow$  Ο στόχος από τον οποίο προέρχεται η ανάκλαση αυτή, είναι ο απέναντι τοίχος από τον τοίχο που έγινε η μέτρηση. Δηλαδή η ανάκλαση αυτή προέρχεται από τον τοίχο απέναντι της γραμμής μελέτης. Δίνεται πιο κάτω σχήμα για την καλύτερη κατανόηση του.



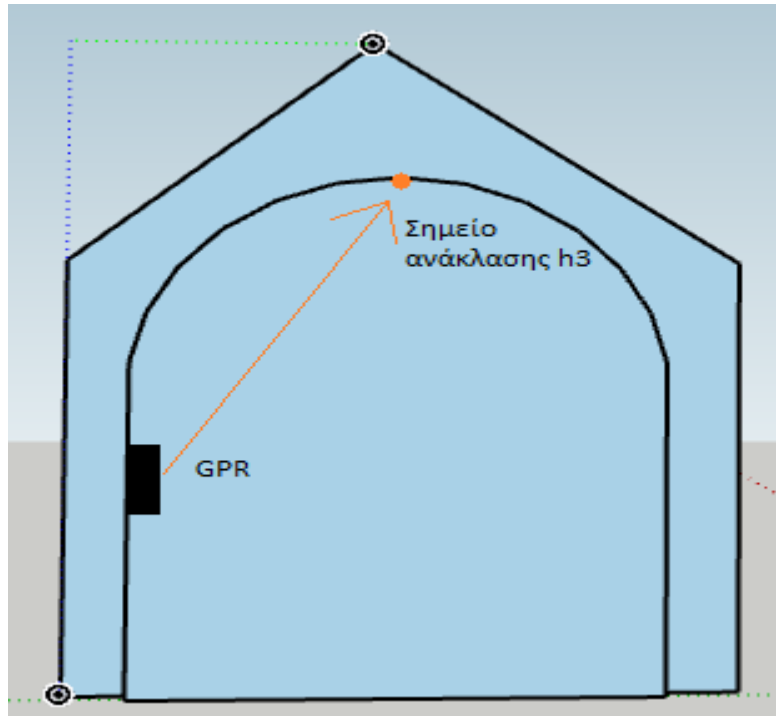
Εικόνα 38. Σχήμα Νεωρίου με την υπόδειξη του στόχου που δημιουργεί την ανάκλαση στα 65 ns.

2.  $h_2 = 10.95 \text{ m} \rightarrow$  Ο στόχος ο οποίος προκαλεί την ανάκλαση στα 73 ns είναι στην απέναντι μεριά πάλι από τη γραμμή μελέτης αλλά είναι ένα σημείο εκεί που αρχίζει να δημιουργείται το κεκλιμένο σημείου του θόλου.



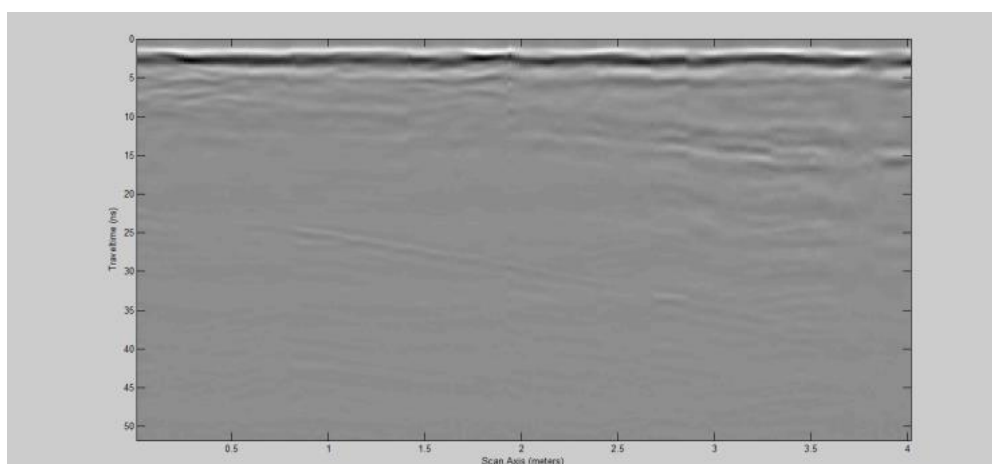
Εικόνα 39. Σχήμα Νεωρίου με την υπόδειξη του στόχου που δημιουργεί την ανάκλαση στα 73 ns.

3.  $h_3=11.85\text{ m}$  → Η ανάκλαση που παρατηρήθηκε στα 78 ns δημιουργήθηκε από ένα σημείο στο θόλο του Νεωρίου. Συγκεκριμένα το σημείο αυτό είναι το ψηλότερο πάνω στο θόλο.

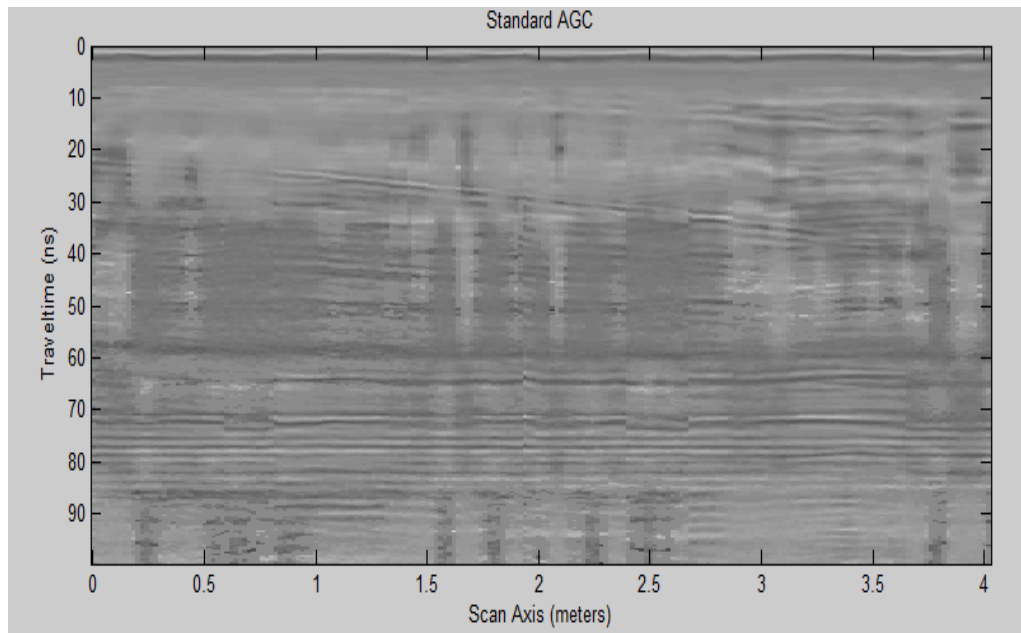


Εικόνα 40. Σχήμα Νεωρίου με την υπόδειξη του στόχου που δημιουργεί την ανάκλαση στα 78 ns.

#### B. Νεώριο 7 (N7) ανατολικός τοίχος 900 MHz



Εικόνα 41. Ανεπεξέργαστη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 900 MHz στον ανατολικό τοίχο του 7ου Νεωρίου από δεξιά προς τα αριστερά.



Εικόνα 42. Επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ με τις κεραίες των 900 MHz στον ανατολικό τοίχο του 7ου Νεώριου από δεξιά προς τα αριστερά.

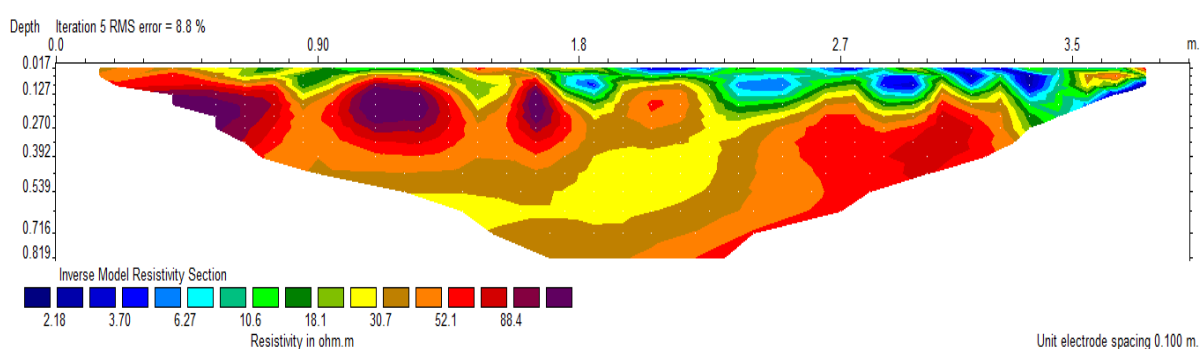
Με τη χρήση της κεραίας των 900 MHz η διασκόπηση που έγινε, έδωσε αποτελέσματα με μεγαλύτερη διακριτικότητα σε σύγκριση με την προηγούμενη διασκόπηση με τη χρήση των κεραιών των 400 MHz. Η μεγαλύτερη διακριτικότητα φαίνεται και στην αρχική ανεπεξέργαστη τομή ( Εικόνα 40) όπου διακρίνονται και πιο «αργές» καταγραφές. Είναι η μόνη τομή στην οποία παρατηρούμαι πιο «αργές» καταγραφές. Ουσιαστικά σε αυτή τη τομή βλέπουμε για πρώτη φορά την πίσω μεριά της λιθοδομής του τοίχου λόγω της επιλογής της κεραίας των 900 MHz και λόγω της ύπαρξης υγρασίας η οποία μειώνει τη ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και έτσι παίρνουμε πιο αργές καταγραφές οι οποίες δεν επιστρέφουν στο δέκτη μαζί με τα απευθείας κύματα.

Αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι στα 5 ns στην ανεπεξέργαστη τομή πιθανόν μέσα στις καταγραφές των απευθείας κυμάτων να υπάρχουν και ανακλάσεις από το δάπεδο που διακρίνονται με αρκετή προσοχή και μεγέθυνση. Η απόσταση του δαπέδου από τα βάση των κυμάτων ανάκλασης στα 5 ns περίπου, υπολογίστηκε στα 0.75 m ( $h = 1/2 * 5 \text{ ns} * 0.3 \text{ m/ns} = \mathbf{0.75 \text{ m}}$ ). Δηλαδή κοντά στο 1 m όπως και ήταν στην πραγματικότητα περίπου η γραμμή μελέτης μας. Αυτό υποδεικνύει ότι η παρατήρησή αυτή, πιο πιθανόν είναι σωστή. Μεταξύ των 7 ns -12 ns παρατηρείται

μια ανάκλαση με κεκλιμένη γραμμή. Αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη ενός «εμποδίου» μέσα στο τοίχο. Συγκεκριμένα, το εμπόδιο αυτό μετρήθηκε ότι βρίσκεται στα 0,3 m μέσα στο τοίχο όπου ήταν η γραμμή μελέτης.

Η ταχύτητα των κυμάτων στα 5 ns υπολογίστηκε στα 0,085 m/ns ενώ στα 10 ns- 15 ns υπολογίστηκε ίση με 0,05 m/ns. Η μεγάλη διαφορά στις τιμές της ταχύτητας των κυμάτων υπάρχει λόγω ύπαρξης μεγάλης ποσότητας υγρασίας. Ο ανακλαστήρας είναι κεκλιμένος επειδή οι αρχικές καταγραφές φτάνουν πιο νωρίς εφόσον δίνονται από κύματα τα οποία κινούνται σε σημεία που δεν υπάρχει υγρασία ενώ όσο αυξάνεται το μήκος της διασκόπησης αρχίζουν τα κύματα να κινούνται μέσα από υγρασία και έτσι ο χρόνος διάδοσης αυξάνεται, άρα και ο χρόνος καταγραφής του σήματος αυξάνεται συνάμα.

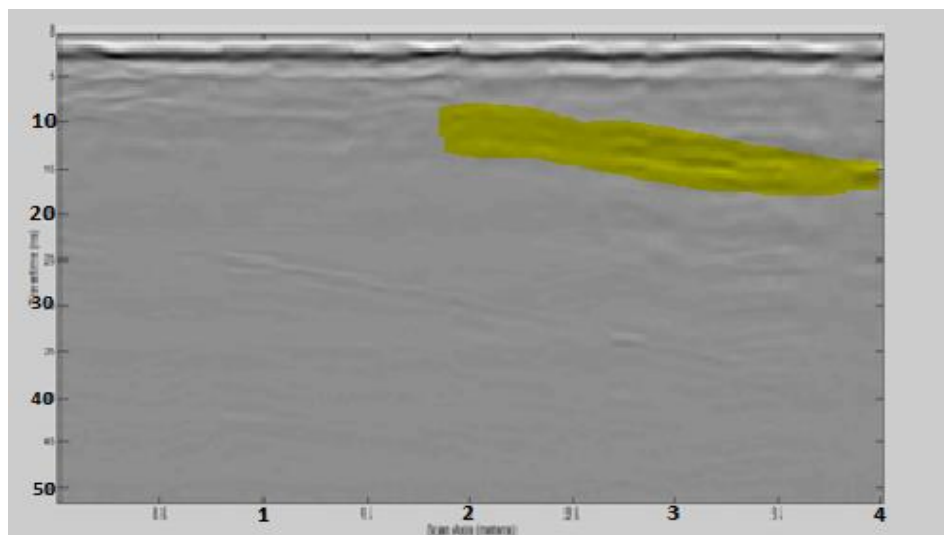
Με τη διασκόπηση που έγινε με τη χρήση των κεραιών των 900 MHz, πραγματοποιήθηκε εκ νέου και μελέτη με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου - διπόλου (DD). Η ερμηνεία που έγινε από τις τομές γεωραντάρ επαληθεύεται και από την ηλεκτρική τομογραφία.



**Εικόνα 43. Γεωηλεκτρική τομή στον ανατολικό τοίχο του 7<sup>ου</sup> Νεωρίου από δεξιά προς τα αριστερά.**

Στην παραπάνω γεωηλεκτρική τομή (Εικόνα 43) μπορούμε να παρατηρήσουμε την ύπαρξη ζωνών υγρασίας. Οι ζώνες αυτές αρχίζουν από τα 1.8 m περίπου και συνεχίζουν μέχρι το τέλος της γραμμής μελέτης, όπου βλέπουμε να υπάρχουν μπλε και γαλάζιες ζώνες. Αυτό σημαίνει ότι οι ζώνες αυτές έχουν πολύ χαμηλή τιμή

ηλεκτρικής αντίστασης, πράγμα που φαίνεται στο υπόμνημα με τα χρώματα κάτω αριστερά. Αυτό λοιπόν επαληθεύει τις προηγούμενες μας ερμηνείες για ύπαρξη υγρασίας εφόσον στην ανεπεξέργαστη τομή μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι οι ανακλάσεις αρχίζουν να δημιουργούν μια κεκλιμένη πορεία (κεκλιμένος ανακλαστήρας) στα 1.8 m περίπου (Εικόνα 44).



Εικόνα 44. Υπόδειξη σημείου στο οποίο αρχίζει η αλλαγή κλίσης του ανακλαστήρα με κεκλιμένη πορεία.

## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας και μελετώντας διεξοδικά τα ζητήματα που πραγματεύτηκε, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Πρώτον, η μέθοδος του γεωραντάρ είναι κατάλληλη για έρευνα και μελέτη σε τείχη και οχυρωματικά έργα καθώς αυτό διαφαίνεται όχι μόνο από τις αναλύσεις των τομών γεωραντάρ που ελήφθησαν από την προσομοίωση και από την έρευνα στα Νεώρια, αλλά και από την επαλήθευση των δεδομένων των τομών αυτών από τις ηλεκτρικές τομογραφίες που εξήγαγαν τα ίδια συμπεράσματα. Δεύτερον, η προσομοίωση ενός μοντέλου στο πρόγραμμα ReflexW είναι μία καλή αρχική προσέγγιση της πραγματικότητας για έναν μελετητή που έχει βλέψεις να ερευνήσει το

συγκεκριμένο χώρο που προσομοιάζει, με τη μέθοδο του γεωραντάρ, καθώς με τη χρήση του προγράμματος αυτού μπορεί να πάρει σημαντικές πληροφορίες όπως που αναμένονται ανακλάσεις και από ποιά στόχο προέρχονται.

Από την γεωφυσική διασκόπηση στους τοίχους των Νεωρίων με στόχο την απεικόνιση της λιθοδομής σε επιλεγμένες θέσεις στους τοίχους των Νεωρίων προέκυψε ότι το πάχος της λιθοδομής δεν ξεπερνά τα 0.4m. Από την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εκτιμήθηκε η υγρασία στους τοίχους η οποία κυμαίνεται από 20-32% κ.ο. Στις γεωηλεκτρικές τομές, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της λιθοδομής εμφανίζει συνήθως υψηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη στους αργόλιθους των τοίχων.

Πιο συγκεκριμένα στον ανατολικό τοίχο του 7<sup>ου</sup> Νεώριου και στην γεωηλεκτρική τομή της οριζόντιας γραμμής μελέτης, η λιθοδομή απεικονίζεται κατ' εξαίρεση με ζώνες χαμηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαιτίας της πολύ υψηλής υγρασίας 32% κ.ο. Στην ίδια θέση η τομή γεωραντάρ με την κεραία των 900 MHz υπέδειξε ότι η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων κυμαίνεται από 0,05 m/ns έως 0,08 m/ns και μειώνεται από νότο προς βορρά. Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς στο βόρειο τμήμα της τομής γεωραντάρ υποδεικνύει σύμφωνα με την σχέση Torp υγρασία ίση με 24% κ.ο., ενώ στο νότιο, 32% κ.ο. Στην ίδια τομή απεικονίζεται ανακλαστήρας στα 7-12 ns ο οποίος αποδίδεται στην λιθοδομή της οποίας το πάχος είναι 0.3 m.

## Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- [http://www.chaniahistory.gr/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=56:%CF%84%CE%B1-%CF%84%CE%B5%CE%AF%CF%87%CE%B7&Itemid=1460&lang=el](http://www.chaniahistory.gr/index.php?option=com_k2&view=item&id=56:%CF%84%CE%B1-%CF%84%CE%B5%CE%AF%CF%87%CE%B7&Itemid=1460&lang=el)
- <https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwj1oCF2f7nAhULyYUKHZc5Dq8QjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.zarpan>

[ews.gr%2Fchania-allazei-opsi-i-dytiki-tafros-quot-mesa-quot-sto-ergo-anaplastis-kai-i-apokatastasi-toy-enetikoy-teichoys%2F&psig=AOvVaw0Mw5APvrmQc55fb4jawZMq&ust=1583338318029982](http://ews.gr%2Fchania-allazei-opsi-i-dytiki-tafros-quot-mesa-quot-sto-ergo-anaplastis-kai-i-apokatastasi-toy-enetikoy-teichoys%2F&psig=AOvVaw0Mw5APvrmQc55fb4jawZMq&ust=1583338318029982)

- Σπανουδάκης Νικόλαος, ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007
- Βαφειδης Α. «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II». Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά 2001.
- <https://www.jgc.gr/index.php/el/products/geophysical-equipment/gpr/gssi-utilityscan>
- [http://www.geo.auth.gr/762/PDF/LEC10\\_NEW.pdf](http://www.geo.auth.gr/762/PDF/LEC10_NEW.pdf)
- Κοκοτάκης Βασίλειος, ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015
- Δουλγέρογλου Σ. Ελένη, Παπαευαγγέλου Α. Αποστολία. «ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ FDTD ΚΑΙ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΩΤΟΣ», 2006
- Γιαννίκας Κωνσταντίνος, Καλεσιάκης Κωνσταντίνος, Ψωμιάδης Γεώργιος, Διατάξεις χαρακτηρισμού μαλακών φεριτών σε συχνότητες από 0.3 έως 5 MHz, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας), 2011
- Ευθυμίου Κ. Μαρία, ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΑΠΤΕΡΩΝ ΤΟΥ Ν.ΧΑΝΙΩΝ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ιούλιος 2012