



ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΙΧΩΝ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ.

ΑΓΓΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Τμήματος Γεωλογίας
Ειδίκευση: Εφαρμοσμένη Γεωφυσική

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017





ΑΓΓΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΙΧΩΝ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος
Σπουδών “Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία” με κλάδο ειδίκευσης
Εφαρμοσμένη Γεωφυσική
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 3/10/2017

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής Α.Π.Θ. Τσούρλος Παναγιώτης, επιβλέπων

Καθηγητής Α.Π.Θ. Τσόκας Γρηγόριος, μέλος τριμελούς επιτροπής

Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ. Βαργεμέζης Γεώργιος, μέλος τριμελούς επιτροπής



Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Δημήτριος Αγγελής, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΟΙΧΩΝ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση αναφοράς της πηγής και της διατήρησης του παρόντος μηνύματος.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματεύεται την εφαρμογή μη καταστρεπτικών γεωφυσικών μεθόδων στα τείχη του φρουρίου του Επταπυργίου, καθώς και στο έδαφος θεμελίωσης περιφερειακά αυτού. Στόχος της διατριβής είναι η έρευνα της βέλτιστης μεθοδολογικής προσέγγισης στη γεωφυσική διασκόπηση των τειχών και των θεμελιώσεων με τη συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων διαφορετικών γεωφυσικών τεχνικών με τελικό ζητούμενο την εξαγωγή συμπερασμάτων για την εσωτερική δομή τείχους και εδάφους.

Για την επίτευξη του στόχου συνδυάστηκαν και εφαρμόστηκαν σε διάφορα τμήματα των τειχών οι μέθοδοι του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας με την ταυτόχρονη μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ, ενώ επί του εδάφους εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι της ηλεκτρικής τομογραφίας και της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων. Για την βέλτιστη ερμηνεία και επεξεργασία των δεδομένων αναπτύχθηκαν τρία προγράμματα Η/Υ (λογισμικά) σε γλώσσα Matlab τα οποία βοήθησαν στην απεικόνιση τρισδιάστατων δεδομένων γεωραντάρ, στην παραγωγή πολυπλοκότερων συνθετικών μοντέλων, καθώς και στην δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους.

Από την έρευνα στα τείχη χαρτογραφήθηκαν περιοχές με σημαντικά προβλήματα υγρασίας, χαρτογραφήθηκαν και προσδιορίστηκαν διαφορετικές κατασκευαστικές φάσεις, ενώ εντοπίστηκαν και πιθανά δομικά εσωτερικά προβλήματα. Όσον αφορά την έρευνα στο έδαφος αυτή αποκάλυψε το βάθος του υποβάθρου, καθώς και πιθανά ρήγματα.

Η επιλογή αλλά και ο τρόπος εφαρμογής των συγκεκριμένων μεθόδων αποδείχθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητικός, καθώς φαίνεται πως η μία μέθοδος αλληλοσυμπληρώνει την άλλη με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται βελτιωμένη ερμηνεία. Ακόμα πολύ σημαντική για την εξαγωγή συμπερασμάτων αποδείχθηκε και η μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ ως επιβεβαιωτικό εργαλείο στην ερμηνεία των γεωφυσικών εικόνων.



ABSTRACT

This thesis deals with the application of non-destructive geophysical techniques to the walls and to the foundations of the Heptapyrgion fortress, in combination with the modeling of geophysical data. The aim was to investigate and propose optimum methodological approaches regarding the wall and foundation geophysical investigation by means of combined geophysical prospection and finally to draw conclusions about the internal structure of the investigated wall and of the ground of the Heptapyrgion fortress.

In order to achieve the above, the methods of ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) were used at specific locations of the Heptapyrgion walls along with the simultaneous modeling of GPR data, while on the ground the methods of electrical resistivity tomography (ERT) and multi-channel analysis of surface waves (MASW) were used. Furthermore, three Matlab based computer programs have been developed to help visualize three-dimensional GPR data, to boost the production of more complex theoretical synthetic models and to grant the ability of processing to their results.

From the wall survey, it was possible to map areas with significant moisture problems, to map and identify different construction phases as well as to locate possible internal structural problems. Regarding the ground survey, that revealed the true depth of the geological background, as well as possible geological faults.

In conclusion, the choice and the way of applying these methods proved to be successful as methods were complementary to each other and the result helps to obtain improved interpretations. Furthermore, the GPR model simulations proved to be an important tool regarding the interpretation.



Με το πέρας της παρούσας εργασίας αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσούρλο Παναγιώτη καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, για την συνεχή του καθοδήγηση και υποστήριξη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του σε επιστημονικά προγράμματα, που μου στάθηκε και με βοήθησε στο να γίνω καλύτερος.

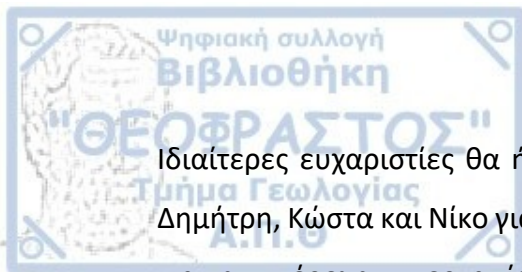
Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βαργεμέζη Γεώργιο αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, για όλες τις πολύτιμες συμβουλές του, για τις ουσιαστικές του παρατηρήσεις και προτάσεις, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του σε επιστημονικά προγράμματα, που μου στάθηκε δίνοντας μου δύναμη να συνεχίσω.

Ευχαριστώ ακόμα τον κ. Τσόκα Γρηγόριο καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ, για την καθοδήγηση του, τις πολύτιμες συμβουλές του, το συνεχές του ενδιαφέρον κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του σε επιστημονικά προγράμματα.

Τις ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω στο προσωπικό της εφορίας αρχαιοτήτων Θεσσαλονίκης και ιδιαίτερα στην κα. Ζαχαροπούλου Γεωργία και στον κ. Γιαννάκη Ιωάννη χάρη τους οποίους δόθηκε το έναυσμα και η δυνατότητα έρευνας στο φρούριο του Επταπυργίου, αλλά και για τις πολύτιμες πληροφορίες και βοήθεια τους καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων.

Επίσης ευχαριστώ τον Δρ. Φίκο Ηλία για τις χρήσιμες συμβουλές του, για την ηθική υποστήριξη που με παρείχε, καθώς και για την δυνατότητα που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του σε επιστημονικά προγράμματα.

Ευχαριστώ τον κ. Γιαννόπουλο Αντώνιο Ανώτερο Λέκτορα του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου για τις πολύτιμες συμβουλές του στα θέματα του γεωραντάρ, αλλά και για το συνεχές του ενδιαφέρον κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.



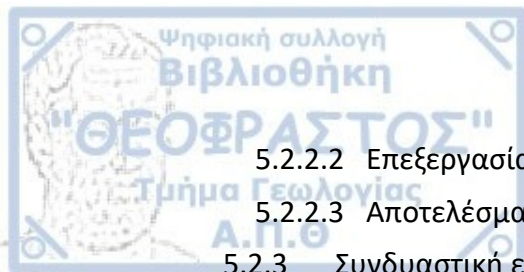
Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στους φίλους και συμφοιτητές Άρη, Δημήτρη, Κώστα και Νίκο για την βοήθεια τους κατά την συλλογή των δεδομένων και για την υπέροχη συνεργασία κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών.

Τέλος θα ήθελα ευχαριστήσω την οικογένεια μου η οποία πάντα στήριζε τις επιλογές μου και στην οποία οφείλω όλη την διαδρομή των σπουδών μου μέχρι σήμερα.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	ii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διατριβής	1
1.2 Μεθοδολογία	2
1.3 Δομή	3
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	4
2.1 Επταπύργιο	4
2.2 Ιστορικά στοιχεία	5
2.3 Γεωλογία της περιοχής	6
2.4 Σύντομη περιγραφή του προβλήματος	7
3. ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	8
3.1 Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar)	8
3.1.1 Εφαρμογές	9
3.1.2 Βασικές αρχές	9
3.1.3 Διατάξεις πομπού - δέκτη	11
3.1.4 Βάθος διείσδυσης και διακριτική ικανότητα	12
3.1.5 Χρήσιμοι όροι	13
3.1.6 Επεξεργασία δεδομένων	13
3.2 Ηλεκτρική τομογραφία (Electrical Resistivity Tomography)	16
3.2.1 Εφαρμογές	16
3.2.2 Βασικές αρχές	16
3.2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων	18
3.2.4 Βάθος διείσδυσης και διακριτική ικανότητα	20
3.2.5 Ευαισθησία διατάξεων και θόρυβος	21
3.2.6 Επεξεργασία δεδομένων	21
3.3 Πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (MASW)	24
3.3.1 Εφαρμογές	24
3.3.2 Βασικές αρχές	24
3.3.3 Βάθος διείσδυσης και ποιότητα μετρήσεων	26
3.3.4 Επεξεργασία δεδομένων	26

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	28
4.1 Αριθμητικές μέθοδοι και μοντελοποίηση	28
4.1.1 Επίλυση ευθέως προβλήματος (GPR Forward Problem)	29
4.1.2 Πεπερασμένες διαφορές στο πεδίο του χρόνου (FDTD)	30
4.2 gprMax	32
4.2.1 Κατασκευή μοντέλου	32
4.2.2 Παράδειγμα και χρήση εντολών (CMD)	36
4.3 Μοντελοποίηση	40
4.3.1 1 ^ο Πείραμα	40
4.3.2 2 ^ο Πείραμα	46
4.3.3 3 ^ο Πείραμα	51
4.4 Ανάπτυξη βοηθητικών λογισμικών	58
4.4.1 Model Designer	58
4.4.2 GprPlus	62
4.5 Συμπεράσματα	67
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΕΠΤΑΠΥΡΓΙΟΥ	68
5.1 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε τοίχους (Πύργος Π3)	68
5.1.1 Εφαρμογή γεωραντάρ	69
5.1.1.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός	69
5.1.1.2 Επεξεργασία δεδομένων	71
5.1.1.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία	74
5.1.1.4 Μοντελοποίηση για την επιβεβαίωση της ερμηνείας	78
5.1.2 Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας	81
5.1.2.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός	81
5.1.2.2 Επεξεργασία δεδομένων	82
5.1.2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία	84
5.1.3 Συνδυαστική ερμηνεία	85
5.2 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε τοίχους (Πύργος Π4)	87
5.2.1 Εφαρμογή γεωραντάρ	87
5.2.1.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός	87
5.2.1.2 Επεξεργασία δεδομένων	89
5.2.1.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία	89
5.2.1.4 Μοντελοποίηση για την επιβεβαίωση της ερμηνείας	92
5.2.2 Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας	94
5.2.2.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός	94



5.2.2.2	Επεξεργασία δεδομένων	94
5.2.2.3	Αποτελέσματα και ερμηνεία	95
5.2.3	Συνδυαστική ερμηνεία και προτάσεις	97
5.3	Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε θεμελιώσεις	99
5.3.1	Εφαρμογή πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων	100
5.3.1.1	Μετρήσεις και εξοπλισμός	100
5.3.1.2	Επεξεργασία δεδομένων	101
5.3.1.3	Αποτελέσματα και ερμηνεία	102
5.3.2	Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας	103
5.3.2.1	Μετρήσεις και εξοπλισμός	103
5.3.2.2	Επεξεργασία δεδομένων	103
5.3.2.3	Αποτελέσματα και ερμηνεία	104
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	109
6.1	Συμπεράσματα της διατριβής	109
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	111
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	112



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό είναι το πρώτο και εισαγωγικό της διατριβής. Εδώ παρουσιάζεται συνοπτικά το αντικείμενο και ο σκοπός της, η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε και τέλος η δομή της.

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διατριβής

Η χρήση γεωφυσικών μεθόδων στην αρχαιολογία αποκτά με τα χρόνια όλο και μεγαλύτερο βάρος και τείνει να γίνει πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της. Με τις γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν με μη καταστρεπτικό τρόπο, ο αρχαιολόγος έχει στα χέρια του ένα πολύτιμο εργαλείο το οποίο μπορεί να τον βοηθήσει να επιτελέσει το έργο του αποτελεσματικότερα.

Παράλληλα η μοντελοποίηση γεωφυσικών δεδομένων η οποία εμφανίζει ραγδαία ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία αποτελεί ένα “όπλο” της γεωφυσικής αφού μπορεί να συνεισφέρει σε μία έρευνα αυξάνοντας δραματικά την αποτελεσματικότητά της.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η εφαρμογή μη καταστρεπτικών γεωφυσικών μεθόδων στο φρούριο του Επταπυργίου και ειδικότερα σε τμήματα των τοίχων του και στο έδαφος περιφερειακά αυτού σε συνδυασμό με την μοντελοποίηση γεωφυσικών δεδομένων. Σκοπός είναι η έρευνα της καλύτερης μεθοδολογικής προσέγγισης, η αντιπαραβολή πραγματικών και μοντελοποιημένων δεδομένων, η συνδυαστική ερμηνεία των τεχνικών και φυσικά η εξαγωγή συμπερασμάτων για την εσωτερική δομή τείχους και εδάφους.



1.2 Μεθοδολογία

Για να επιτευχθεί ο στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

- Συγκέντρωση και μελέτη βιβλιογραφικών δεδομένων που αφορούσαν γεωφυσικές μελέτες σε διάφορα μνημεία ανά τον κόσμο.
- Επιλογή των κατάλληλων γεωφυσικών μεθόδων, μέθοδος γεωραντάρ, ηλεκτρικής τομογραφίας, και πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, καθώς και εφαρμογή τους με μη καταστρεπτικό τρόπο.
- Μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ πριν τις μετρήσεις πεδίου σε συνδυασμό με την ανάπτυξη λογισμικών τα οποία βοήθησαν στην δημιουργία πολυπλοκότερων μοντέλων δίνοντας και ταυτόχρονα την δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων της κάθε μεθόδου τόσο ξεχωριστά όσο και συνδυαστικά, καθώς και μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ για επιβεβαίωση της.

1.3 Δομή

Όσον αφορά την δομή της εργασίας, αυτή αντικατοπτρίζει κατά κύριο λόγο την μεθοδολογική προσέγγιση:

- Το **δεύτερο** κεφάλαιο αφορά την περιοχή έρευνας. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η τοποθεσία του Επταπυργίου, μερικά ιστορικά στοιχεία για το μνημείο, η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής, ενώ τέλος το κεφάλαιο κλείνει με μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος.
- Στο **τρίτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της εργασίας. Συγκεκριμένα γίνεται περιγραφή των βασικών στοιχείων λειτουργίας και θεωρίας της κάθε μεθόδου ξεχωριστά, ενώ πραγματοποιείται και ανάλυση της μεθοδολογίας επεξεργασίας των δεδομένων τους.
- Το **τέταρτο** κεφάλαιο της εργασίας αφορά καθαρά την μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκε πριν από τις μετρήσεις στην περιοχή του Επταπυργίου. Παρουσιάζεται το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των μοντέλων και φυσικά τα ίδια τα μοντέλα με τα αποτελέσματα τους. Επίσης παρουσιάζονται δύο συμπληρωματικά προγράμματα τα οποία κατασκευάστηκαν, μαζί με τους λόγους που οδήγησαν στην δημιουργία τους. Τέλος το κεφάλαιο κλείνει με κάποια συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν.
- Στο **πέμπτο** κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων στην περιοχή του Επταπυργίου. Παρουσιάζονται ξεχωριστά οι διαφορετικές θέσεις έρευνας, ο εξοπλισμός, ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων και φυσικά τα αποτελέσματα μαζί με την ερμηνεία τους.
- Τέλος, στο **έκτο** κεφάλαιο συνοψίζονται και παραθέτονται τα συμπεράσματα της διατριβής μαζί με κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Το κεφάλαιο αυτό αφορά την περιοχή έρευνας. Παρακάτω παρουσιάζεται το Επταπύργιο μαζί με μερικά ιστορικά στοιχεία, παρατίθεται η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής ενώ τέλος πραγματοποιείται μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος.

2.1 Επταπύργιο

Το φρούριο του Επταπύργιου το οποίο είναι επίσης γνωστό και με την οθωμανική του ονομασία "Yedikyle" αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μνημεία της Θεσσαλονίκης και ίσως ένα από τα πρώτα που αντικρίζουν οι επισκέπτες της πόλης είτε αυτοί έρχονται από στεριά, θάλασσα ή αέρα. Το μνημείο τοποθετείται στο βορειοανατολικό άκρο των τειχών της πόλης και εντός της Ακρόπολης (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Τοποθεσία του Επταπυργίου (google earth).

2.2 Ιστορικά στοιχεία

Το Επταπύργιο αποτελείται από δύο ενότητες: το βυζαντινό φρούριο των δέκα πύργων με τα μεταξύ τους μεσοπύργια διαστήματα και τον περίδρομο, καθώς και τα νεότερα κτήρια των φυλακών τα οποία βρίσκονται εντός και εκτός αυτού.

Η ακριβής του χρονολογία παραμένει μέχρι και σήμερα άγνωστη με μόνη επιβεβαιωμένη αυτή του κεντρικού πύργου – πύλης του 1431 μ.Χ. ο οποίος είναι έργο των Τούρκων. Παρουσιάζει διάφορες κατασκευαστικές φάσεις από τη πρώιμη βυζαντινή – παλαιοχριστιανική περίοδο (πύργοι της βόρειας πλευράς) μέχρι και την περίοδο της Τουρκοκρατίας.

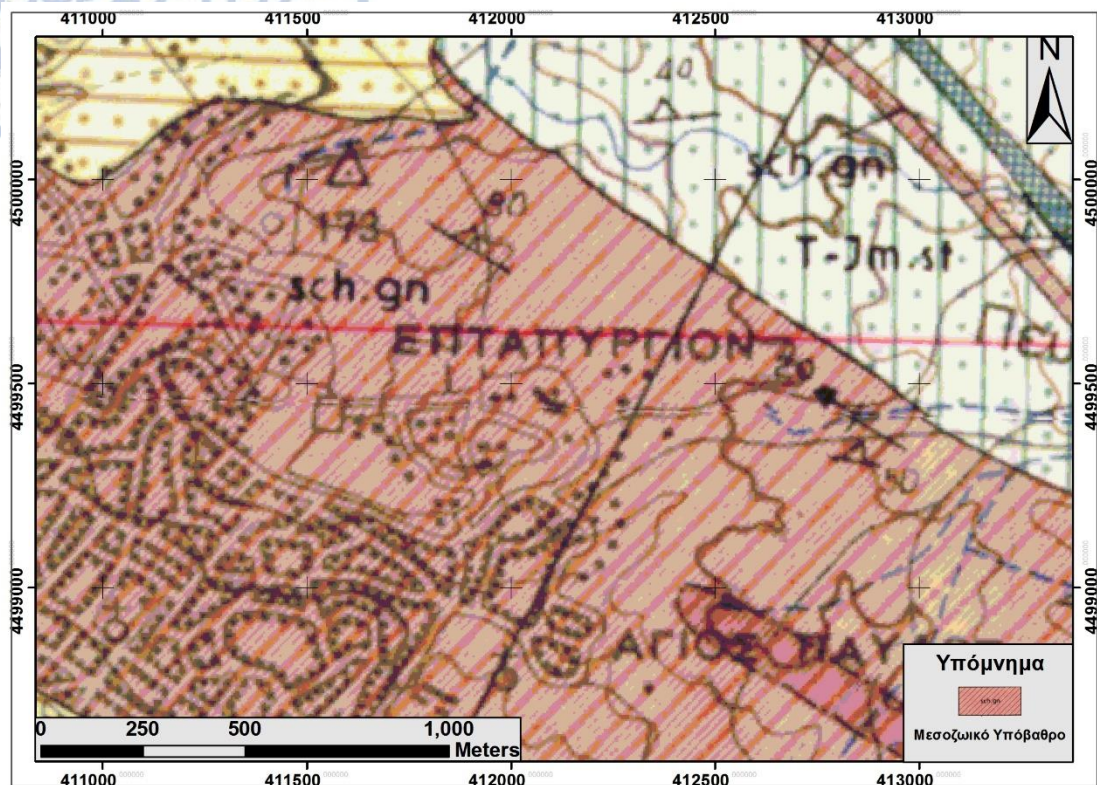
Με την πάροδο των χρόνων η στρατηγική του σημασία μειώθηκε έχοντας σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της χρήσης του. Κατά την δεκαετία του 1890 το φρούριο μετατράπηκε σε φυλακή, ενώ κατά την μετατροπή αυτή πραγματοποιήθηκαν μικροεπισκευές, καθώς και προσθήκες νεότερων κτηρίων για την βελτίωση της λειτουργικότητας του ως σωφρονιστικού ιδρύματος. Υπήρξε δηλαδή πλήρης αντιστροφή της λογικής του φρουρίου, αφού πλέον προστάτευε τον έξω από τον μέσα κόσμο.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 90 το Επταπύργιο βρίσκεται υπό την ευθύνη της Εφορείας Βυζαντινών Αρχαιοτήτων της Θεσσαλονίκης η οποία μάλιστα στεγάζεται και στον χώρο αυτό σε ορισμένα εκ των νεότερων κτηρίων που έχουν ανακαινιστεί. Κλείνοντας την ιστορική αυτή αναδρομή αξίζει να σημειωθεί πως πλέον το μνημείο είναι ανοιχτό και επισκέψιμο καθημερινά, ενώ ενίοτε οι χώροι του ανοικτοί και κλειστοί διατίθενται για πολιτιστικές εκδηλώσεις υπό την αιγίδα της 9^{ης} Εφορείας Βυζαντινών Αρχαιοτήτων.

2.3 Γεωλογία της περιοχής

Γεωλογικά η περιοχή μελέτης ανήκει στην ζώνη Αξιού των εσωτερικών Ελληνίδων και πιο συγκεκριμένα στην ενότητα Άσπρης Βρύσης της υποζώνης Παιονίας. Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε (Ι.Γ.Μ.Ε Φύλλο Θεσσαλονίκης, 1978), απόσπασμα του οποίου βρίσκεται στο σχήμα 2.2 το Επταπύργιο τοποθετείται πάνω στο μεσοζωικό υπόβαθρο το οποίο αποτελείται από τους πρασινοσχιστόλιθους της Περιφοδοπικής ζώνης (Μουντράκης, 1985) και πιο συγκεκριμένα από τους παρακάτω σχηματισμούς:

- Λευκοκρατικό αλβιτικό – σερικιτικό – μικροκλινικό γνεύσιο: (αλβίτης, μικροκλινής, μοσχοβίτης και επουσιώδη ορυκτά), με γνευσιακό ή οφθαλμοειδή ιστό, σε ενστρώσεις μέσα στα μεταϊζήματα.
- Επιγνεύσιοι: ανοιχτοκάστανοι ή πρασινωποί, με καλή στρώση, ομογενείς, με γνευσιακό ή οφθαλμοειδή ιστό και πράσινα, στρεβλωμένα, χλωριτικά στρώματα: ακτινολιθικοί – χλωριτικοί επιγνεύσιοι, σερικιτικοί – χλωριτικοί επιγνεύσιοι, κεροστιλβικοί – βιοτιτικοί - μοσχοβιτικοί επιγνεύσιοι, μοσχοβιτικοί – χλωριτικοί-επιδοτιτικοί επιγνεύσιοι (υπολείμματα πλαγιοκλάστων μετασχηματισμένα σε αλβίτη και νεοσχηματισμένοι χλωρίτης, σερικήτης και ακτινόλιθος).
- Πρασινοσχιστόλιθοι: σκοτεινοπράσινοι και καστανωποί, λεπτόκοκκοι σερικιτικοί - χλωριτικοί σχιστόλιθοι, χλωριτικοί – μοσχοβιτικοί – βιοτιτικοί σχιστόλιθοι, μοσχοβιτικοί – χλωριτικοί – αλμανδικοί σχιστόλιθοι, μοσχοβιτικοί – χλωριτικοί – επιδοτιτικοί – αλμανδικοί σχιστόλιθοι, επιδοτιτικοί και ακτινολιθικοί – χλωριτικοί σχιστόλιθοι και λεπτόκοκκος χλωριτικός – επιδοτιτικός – σερικιτικός – αλβιτικός γνεύσιος.



Σχήμα 2.2 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης.

(Τροποποιημένος χάρτης από Ι.Γ.Μ.Ε. (1978) Φύλλο Θεσσαλονίκης).

2.4 Σύντομη περιγραφή του προβλήματος

Το Επταπύργιο όπως και τα περισσότερα μνημεία σήμερα αντιμετωπίζει δομικά προβλήματα, καθώς και προβλήματα υγρασίας. Τις περισσότερες φορές αυτά δεν είναι ορατά, για αυτόν ακριβώς τον λόγο είναι αναγκαία η διερεύνηση της εσωτερικής δομής σε συνδυασμό με την μελέτη και κατανόηση της έκτασης των ζημιών η οποία θα οδηγήσει τελικώς στην ανάπτυξη του καλύτερου δυνατού σχεδίου αποκατάστασης. Εδώ ακριβώς έρχονται οι γεωφυσικές μέθοδοι οποίες μπορούν να προσδώσουν σχεδόν με ακρίβεια την εσωτερική δομή του μέσου στο οποίο εφαρμόζονται και μάλιστα με μη καταστρεπτικό τρόπο.

Αυτός είναι και ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας εργασίας, να δώσει τις απαραίτητες πληροφορίες όπως ποσοστά υγρασίας, πιθανές ρωγμές σε διάφορα μέρη των τοίχων του μνημείου, αλλά και μία εικόνα του υπεδάφους περιφερειακά αυτού.

ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του βασικού θεωρητικού υποβάθρου των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της διατριβής. Συγκεκριμένα περιγράφονται και αναλύονται η μέθοδος του γεωραντάρ (GPR, *Ground Penetrating Radar*) η οποία ανήκει στην γενικότερη κατηγορία των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων, η ηλεκτρική τομογραφία (ERT, *Electrical Resistivity Tomography*) που ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους και τέλος αυτή της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (MASW, *Multichannel Analysis of Surface Waves*) η οποία υπάγεται στις σεισμικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης. Η περιγραφή πραγματοποιείται με παρουσίαση των βασικών στοιχείων λειτουργίας και θεωρίας της κάθε μεθόδου, καθώς και με ανάλυση της μεθοδολογίας επεξεργασίας των δεδομένων τους.

3.1 Γεωραντάρ (*Ground Penetrating Radar*)

Πρόκειται για μία νέα σχετικά ηλεκτρομαγνητική τεχνική που χαρακτηρίζεται από υψηλή ευκρίνεια και της οποίας η βασική αρχή λειτουργίας είναι ίδια με αυτή της σεισμικής ανάκλασης. Χρησιμοποιείται σε γεωλογικές εφαρμογές από το 1960, ενώ από τα μέσα της δεκαετίας του '80 και με την εξέλιξη της τεχνολογίας παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη με αποτέλεσμα να γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής. Σκοπός της έρευνας με την τεχνική αυτή είναι ο εντοπισμός διεπιφανειών μεταξύ μέσων με διαφορετικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες.

3.1.1 Εφαρμογές

Η ιστορία του γεωραντάρ είναι συνυφασμένη με τις διαφορετικές χρήσεις της τεχνικής. Παρουσιάζει το πιο εκτεταμένο σύνολο εφαρμογών από οποιαδήποτε άλλη γεωφυσική μέθοδο και με ένα εύρος που κυμαίνεται από πλανητικές έρευνες, μέχρι έρευνες για την ανίχνευση ναρκών. Εάν πρέπει να γίνει μία διάκριση σε κατηγορίες τότε αυτή θα γίνει με βάση το πόσο σημαντικό είναι το βάθος διασκόπησης ή το πόσο σημαντική για την έρευνα που πρόκειται να πραγματοποιηθεί είναι η διακριτική ικανότητα (Σπανουδάκης, 2007). Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται κεραίες χαμηλών συχνοτήτων, ενώ στην δεύτερη υψηλών.

Ενδεικτικά μερικοί από τους τομείς στους οποίους χρησιμοποιείται το γεωραντάρ είναι: αρχαιολογικές έρευνες, έρευνες σε τεχνικά έργα (π.χ. εκτίμηση κατάστασης δρόμων), ανίχνευση σωλήνων καλωδίων, έρευνες σε παγετώνες κ.α. Μια πιο λεπτομερής περιγραφή των χρήσεων αλλά και του πλήθους των εφαρμογών του μπορεί να βρεθεί στις ακόλουθες δημοσιεύσεις (Daniels et al, 1988; Peters et al, 1994) καθώς και στο βιβλίο "Ground Penetrating Radar 2ND Edition" (Daniels, 2004).

3.1.2 Βασικές αρχές

Η βασική αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ είναι ίδια με αυτή της σεισμικής ανάκλασης, με μόνη διαφορά ότι αντί για σεισμικά, τα κύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά. Βασίζεται δηλαδή στην ανάκλαση των κυμάτων σε ασυνέχειες μέσω των διαφορετικών ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων.

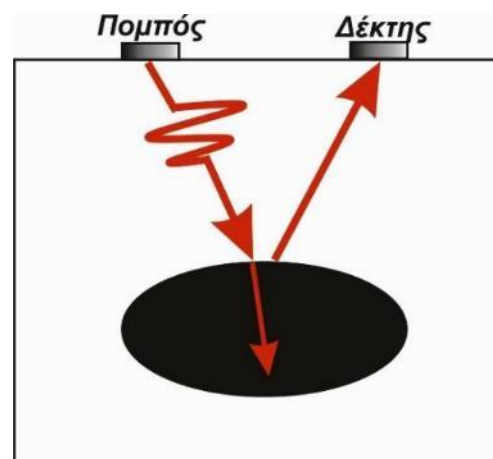
Ουσιαστικά, ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί μικρής διάρκειας, τάξης νανοδευτερολέπτων (10^{-9} sec) οι οποίοι εκπέμπονται από την κεραία – πομπό και σε ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από μία κεντρική συχνότητα, διαδίδονται μέσα στο υπό έρευνα μέσο ωσότου συναντήσουν διαχωριστική επιφάνεια υλικού διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων. Την στιγμή αυτή της συνάντησης θα συμβούν κατά κύριο λόγο δύο πράγματα. Ένα μέρος τους θα διαθλαστεί και θα συνεχίσει την διάδοση του, ενώ ένα μέρος τους θα υποστεί ανάκλαση και θα επιστρέψει στην κεραία – δέκτη όπου και θα γίνει η καταγραφή τους με την μορφή χρόνων διαδρομής και πλάτους ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Σχήμα 3.1).

Στον δέκτη όμως, δεν καταγράφονται μόνο τα ανακλώμενα κύματα. Γενικά λαμβάνονται και καταγράφονται κύματα τα οποία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες (Σπανουδάκης, 2007):

- **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:** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν 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).

Τέλος όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών που ενδιαφέρουν και παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στην μέθοδο, αυτές είναι:

- **Σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r):** που είναι ο λόγος της ηλεκτρικής διαπερατότητας του υλικού προς την ηλεκτρική διαπερατότητα στο κενό, όπου ηλεκτρική διαπερατότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.
- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ):** η οποία εκφράζει την ευκολία διέλευσης ελεύθερων ηλεκτρικών φορτίων σε ένα υλικό. Επίδραση της η απώλεια ενέργειας.

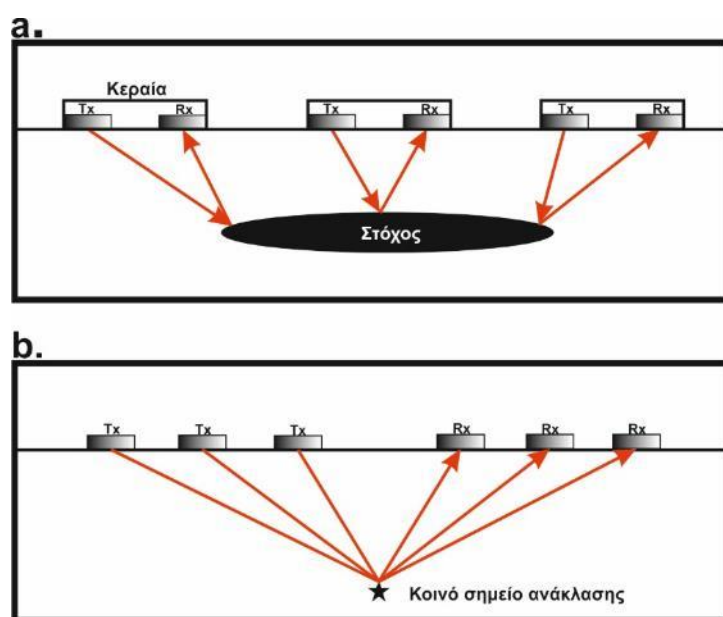


Σχήμα 3.1 Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ.

3.1.3 Διατάξεις πομπού - δέκτη

Οι κύριες διατάξεις λειτουργίας ενός συστήματος γεωραντάρ είναι δύο και η επιλογή τους εξαρτάται από τον σκοπό της έρευνας. Η πρώτη ονομάζεται *σταθερής απόστασης* (Common offset), είναι η τυπική διάταξη και σε αυτήν ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους, ενώ η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη μετακίνηση και των δύο κατά μήκος μίας γραμμής διασκόπησης (Σχήμα 3.2.α). Αξίζει να σημειωθεί πως συνήθως, κατά την διάταξη αυτή ο πομπός και δέκτης βρίσκονται σε κουτί με θωράκιση για την αποφυγή διάδοσης κυμάτων προς κατευθύνσεις εκτός τη ζητούμενης (Αποστολόπουλος, 2013).

Η δεύτερη ονομάζεται *μέθοδος κοινού σημείου* (CMP, Common – midpoint). Σε αυτήν την διάταξη επιλέγεται ένα σταθερό σημείο στο έδαφος, τοποθετείται ο πομπός και ο δέκτης εκατέρωθεν του σημείου αυτού και μεταβάλλεται σταδιακά η απόσταση μεταξύ τους, με πάντα ως κέντρο το κοινό σημείο (Σχήμα 3.2.β). Η διάταξη αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ταχύτητας ως προς το βάθος. Ο υπολογισμός γίνεται με την μέτρηση των μεταβολών του χρόνου από και προς το σημείο ανάκλασης που πραγματοποιούνται κατά τις μετακινήσεις.

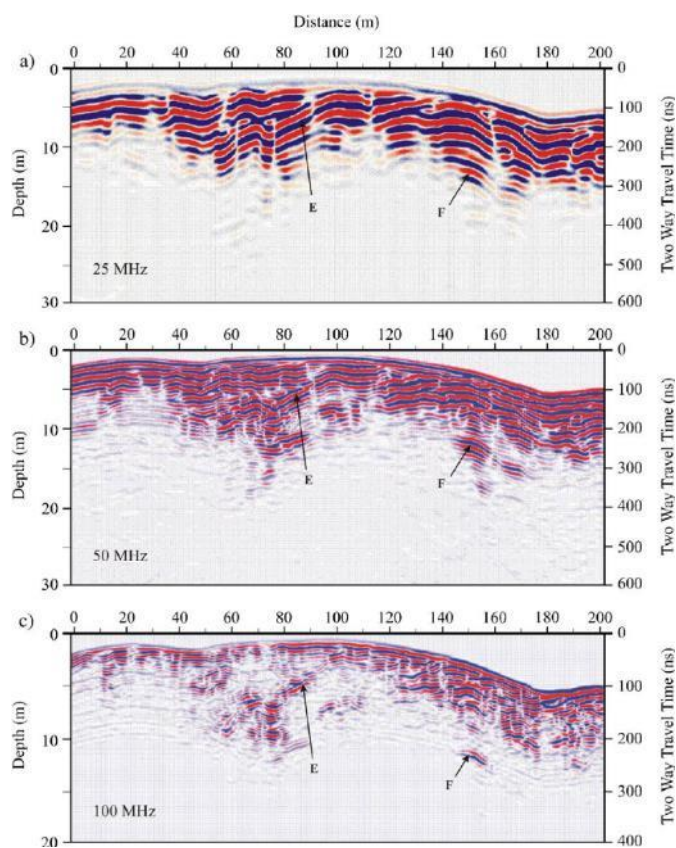


Σχήμα 3.2 Διατάξεις πομπού – δέκτη. α) Διάταξη σταθερής απόστασης και β) διάταξη κοινού σημείου.

3.1.4 Βάθος διείσδυσης και διακριτική ικανότητα

Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται άμεσα από την εξασθένιση που υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά την διάδοσή τους στο μέσο και η οποία αποτελεί συνάρτηση διαφόρων παραγόντων, όπως της σφαιρικής εξάπλωσης των κυμάτων, της σκέδασης και φυσικά της απόσβεσης (attenuation) που είναι και ο σημαντικότερος εκ των τριών. Η ίδια η απόσβεση εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αγωγιμότητα του μέσου.

Σημαντικό ρόλο ως προς το βάθος διασκόπησης αλλά και ως προς την διακριτική ικανότητα αποτελεί η κεντρική συχνότητα εκπομπής του συστήματος. Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση και αντίστοιχα όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μειώνεται το βάθος διασκόπησης, αλλά με κέρδος την διακριτική ικανότητα (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Βάθος διασκόπησης και διακριτική ικανότητα. Έρευνα με GPR στην ίδια περιοχή, με κεραίες 25MHz, 50MHz και 100MHz (Porsani et al, 2006).

3.1.5 Χρήσιμοι όροι

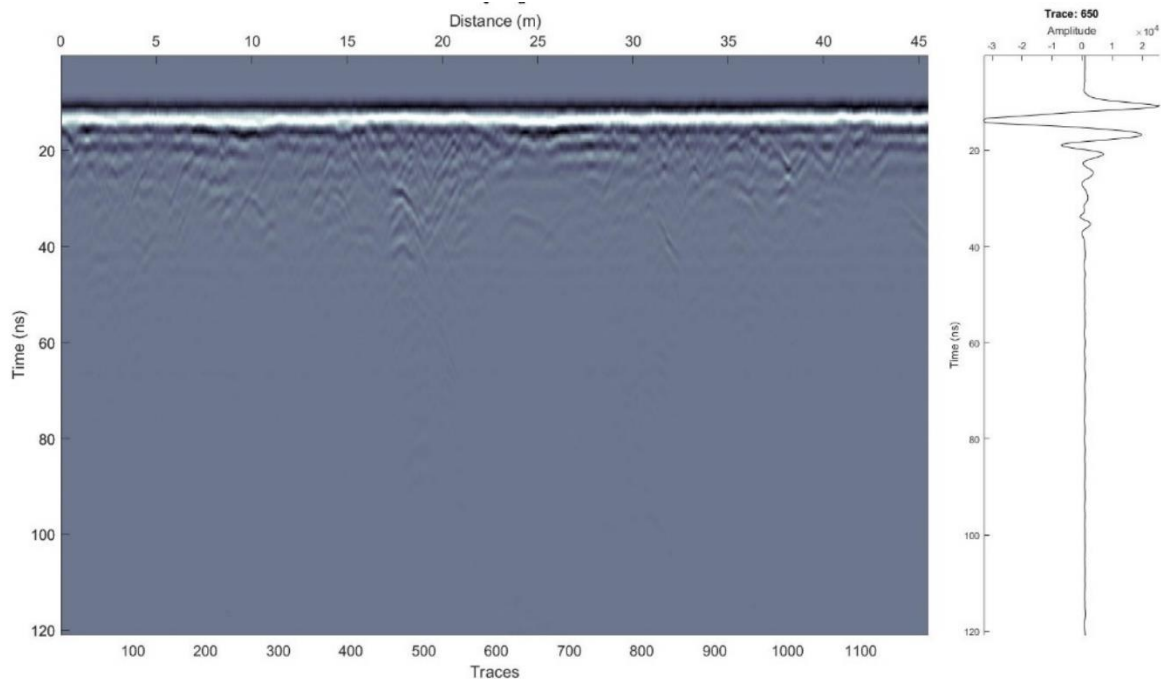
Για να γίνει ευκολότερα η κατανόηση των παρακάτω κεφαλαίων θα πρέπει να διευκρινιστούν πρώτα κάποιοι όροι, πολλοί από τους οποίους αποτελούν ταυτόχρονα και παραμέτρους κατά την διασκόπηση με την μέθοδο του γεωραντάρ.

- **Συχνότητα λειτουργίας (Operating frequency):** Είναι η συχνότητα μετάδοσης της κεραίας. Στην πραγματικότητα πρόκειται για την κεντρική συχνότητα καθώς η κεραία μεταδίδει ένα εύρος συχνοτήτων το οποίο κυμαίνεται από 0.5 – 2 φορές της κεντρικής.
- **Ίχνος (Trace, Ascan):** Ο δέκτης ενός συστήματος γεωραντάρ καταγράφει τον χρόνο και το πλάτος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το σύνολο των καταγραφών σε μια θέση, πλατών ως προς τους χρόνους ονομάζεται ίχνος.
- **Βήμα διασκόπησης (Trace step):** Είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μέτρησης, δηλαδή δύο διαδοχικών ιχνών.
- **Δείγμα (Sample):** Ονομάζεται η κάθε μέτρηση – καταγραφή πλάτους ως προς τον χρόνο (αντιστοιχεί στο ίχνος).
- **Συχνότητα δειγματοληψίας (Sampling frequency):** Πρόκειται για την συχνότητα με την οποία το σύστημα γεωραντάρ πραγματοποιεί καταγραφές.
- **Διάστημα δειγματοληψίας (Sampling interval):** Σχετίζεται με την συχνότητα δειγματοληψίας και είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο καταγραφών.
- **Χρονικό παράθυρο (Time window):** Είναι ο ολικός χρόνος καταγραφής και μετράται σε νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec).

3.1.6 Επεξεργασία δεδομένων

Όπως γίνεται κατανοητό η απεικόνιση ενός και μοναδικού ίχνους κάθε φορά κάνει την διαδικασία της επεξεργασίας και ερμηνείας δύσκολη. Για τον λόγο αυτό πολλά ίχνη μαζί τα οποία έχουν προέλθει από την συνεχή καταγραφή κατά την μετακίνηση της κεραίας και με σταθερό βήμα, τοποθετούνται στην σειρά και δημιουργούν μια τομή ραντάρ (GPR section, Bscan), με τον οριζόντιο άξονα να αντιπροσωπεύει την απόσταση και τον κατακόρυφο τον χρόνο διαδρομής (Two way travel time). Οι μονάδες είναι συνήθως σε μέτρα και νανοδευτερόλεπτα (10^{-9} sec) αντίστοιχα, ενώ

τα πλάτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κωδικοποιούνται με την μορφή χρωμάτων (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Μη επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ (Bscan) στα αριστερά, ίχνος (Ascan) δεξιά.

Όσον αφορά την επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ, αυτή γενικά έχει ως στόχο την ανάδειξη των πληροφοριών που αφορούν τον σκοπό της έρευνας. Κατά κύριο λόγο πραγματοποιούνται τεχνικές για την αφαίρεση του θορύβου, την αφαίρεση των πολλαπλών ανακλάσεων, αλλά και φυσικά για την ενίσχυση του σήματος των δεδομένων.

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται στα δεδομένα ένα είδος προ - επεξεργασίας (Preprocessing – editing), το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει συνένωση ή απομάκρυνση δεδομένων, αντιστροφή του άξονα των αποστάσεων, διόρθωση ή ακόμα και ολική αφαίρεση προβληματικών ιχνών, καθώς και αναδειγματοληψία (Resampling) τόσο στον άξονα των αποστάσεων όσο και στον άξονα των χρόνων. Στην συνέχεια ακολουθεί η βασική επεξεργασία (Basic processing).

Πρώτος στόχος κατά την βασική επεξεργασία είναι η απομάκρυνση των πολύ χαμηλών συχνοτήτων οι οποίες σχετίζονται με επαγωγικά φαινόμενα ή με το πιθανό

περιορισμένο δυναμικό εύρος του οργάνου (Annan, 2003), το βήμα αυτό είναι γνωστό ως **"dewowing"**.

Στην συνέχεια και επειδή πολλές φορές το γεωραντάρ δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσει με ακρίβεια τον χρόνο της πρώτης άφιξης (time zero point), με αποτέλεσμα την εσφαλμένη ευθυγράμμιση των ανακλάσεων, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί διόρθωση (**Zero time adjustment**).

Επόμενο βήμα συνήθως αποτελεί η ενίσχυση των δεδομένων με τον χρόνο (**Time gain**). Η εξασθένιση του σήματος κατά την διάδοση του στο υπέδαφος έχει σαν αποτέλεσμα οι ανακλάσεις σε μεγαλύτερα βάθη – χρόνους να μην διακρίνονται καθαρά και για τον λόγο αυτό πρέπει να ενισχυθούν. Το βήμα αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό και πρέπει να πραγματοποιείται με προσοχή, καθώς ταυτόχρονα με τα ζητούμενα ενισχύεται και ο θόρυβος. Οι σημαντικότεροι τρόποι ενίσχυσης είναι (Jol, 2008):

- Αυτόματος έλεγχος ενίσχυσης (Automatic gain control, AGC).
- Φθίνουσας ενέργειας (Energy decay, SEC).
- Σταθερή, γραμμική εκθετική ή και ενίσχυση ορισμένη από τον χρήστη (Custom Gain).

Αφού πραγματοποιηθούν τα παραπάνω ακολουθεί το στάδιο που αναφέρεται πολλές φορές ως ειδική επεξεργασία (Special or advanced processing) και το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει: φιλτράρισμα στο πεδίο των συχνοτήτων (**Frequency domain filtering**), στο πεδίο των κυματαρίθμων (**Wavenumber domain filtering**), φιλτράρισμα στον χώρο συχνότητας – κυματαρίθμων (**FK filtering**), απομάκρυνση του θορύβου υποβάθρου και των οριζόντιων πολλαπλών ανακλάσεων λόγω του φαινομένου αντήχησης των κεραιών (**Background noise removal**), αποσυνέλιξη (**Deconvolution**) για την βελτίωση της χρονικής ανάλυσης των δεδομένων αλλά και την απόσβεση πολλαπλών ανακλάσεων, μετασχηματισμός Hilbert (**Hilbert transformation**) για την εύρεση του στιγμιαίου πλάτους (**Instantaneous amplitude**). Τέλος, βασικό βήμα αποτελεί η εύρεση της ταχύτητας ή καλύτερα η εύρεση μίας μέσης ταχύτητας του μέσου που πραγματοποιείται η διασκόπηση. Η ταχύτητα χρησιμοποιείται για την μετατροπή του άξονα των χρόνων σε βάθος αλλά και για την χωροθέτηση των δεδομένων (**Migration**) η οποία θα αφαιρέσει τις περιθλάσεις και ταυτόχρονα θα διορθώσει τις κλίσεις των στρωμάτων.

3.2 Ηλεκτρική τομογραφία (Electrical Resistivity Tomography)

Η τεχνική αυτή εντάσσεται στην γενικότερη κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων, αλλά πιο συγκεκριμένα στην μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και ως στόχο έχει την ανίχνευση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους ή του μέσου στο οποίο εφαρμόζεται. Για τον λόγο αυτό, και λόγω του ότι διαφορετικοί σχηματισμοί – μέσα παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες είναι δυνατή η εύρεση δομών ενδιαφέροντος. Κύριο χαρακτηριστικό της τεχνικής είναι η λήψη δεδομένων τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ χαρακτηρίζεται επίσης από τον μεγάλο αριθμό μετρήσεων με αυτοματοποιημένα όργανα και τεχνικές ερμηνείας.

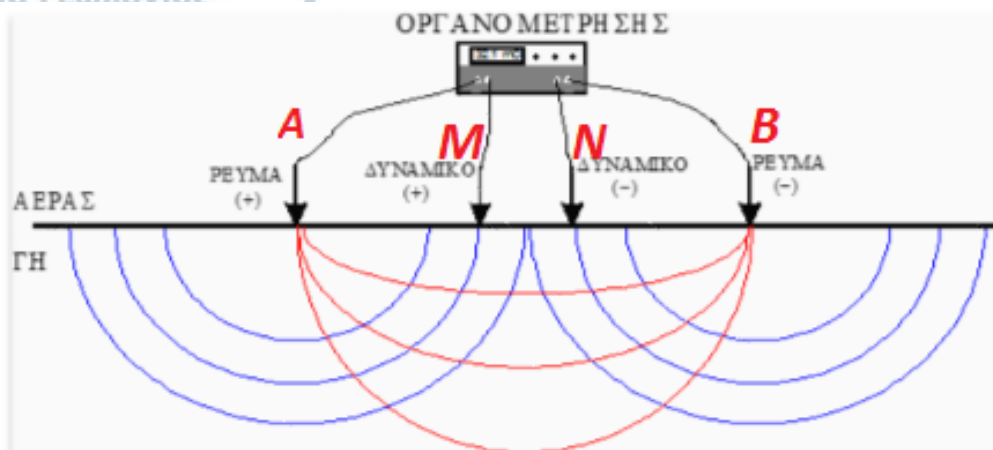
3.2.1 Εφαρμογές

Σήμερα η ηλεκτρική τομογραφία και γενικότερα οι ηλεκτρικές μέθοδοι αποτελούν μια από τις βασικότερες και πιο χρήσιμες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και χρησιμοποιούνται ευρέως για την διερεύνηση διάφορων γεωλογικών, περιβαλλοντικών, υδρογεωλογικών, γεωτεχνικών προβλημάτων, καθώς και στην αρχαιολογική έρευνα.

3.2.2 Βασικές αρχές

Με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, μετράται η διαφορά δυναμικού η οποία προκαλείται από την εισαγωγή χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στο μέσο που εφαρμόζεται. Η διαφορά που μετράται είναι και αυτή που αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ρεύμα διαδίδεται στο μέσο, δίνοντας έτσι ενδείξεις για την ηλεκτρική του αντίσταση. Αποτέλεσμα των παραπάνω η έμμεση εύρεση δομών ενδιαφέροντος λόγω των διαφορετικών αντιστάσεων που παρουσιάζονται.

Η κάθε μέτρηση πραγματοποιείται με τέσσερα ηλεκτρόδια, δύο ηλεκτρόδια A, B τα οποία χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος έντασης I και δύο M, N για την μέτρηση της διαφοράς δυναμικού V_{MN} (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού.
(http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf)

Όταν όμως το μέσο στο οποίο πραγματοποιείται η διασκόπηση δεν είναι ομογενές τότε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται και είναι συνάρτηση της γεω-ηλεκτρικής δομής του, καθώς και της γεωμετρίας των μετρήσεων (θέσεις ηλεκτροδίων). Συνεπώς η μετρούμενη αντίσταση σε ένα ανομοιογενές μέσο δεν παριστάνει την πραγματική ειδική αντίσταση, αλλά την φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a).

Έχοντας λοιπόν λάβει υπόψη τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι, η τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιεί αυτοματοποιημένα μια σειρά μετρήσεων φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, μετακινώντας την διάταξη των ηλεκτροδίων κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης. Έτσι με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται μετρήσεις σε δύο διαστάσεις (κατακόρυφα και οριζόντια).

3.2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Όπως προαναφέρθηκε, η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των μετρήσεων. Έτσι, ανάλογα με τον τρόπο που τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια στο μέσο, αλλά και των μεταξύ τους αποστάσεων οι τιμές της μεταβάλλονται. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων μαζί με τις αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις (Σχήμα 3.6) (Milsom, 2003).

- **Wenner:** Στην διάταξη αυτή ισχύει $AM = MN = NB = \alpha$, δηλαδή τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν μεταξύ τους ίση απόσταση α . Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση (3.1).

$$\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{I} \quad (3.1)$$

- **Schlumberger:** Κατά την διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού να είναι αρκετά μικρότερη αυτής των ηλεκτροδίων του ρεύματος, δηλαδή $MN = 2l$, $AB = 2L$ και $L \gg l$. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται από την σχέση (3.2).

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (3.2)$$

- **Διπόλου – διπόλου (dipole – dipole):** Εδώ τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους, $AB = 2l$, όπως επίσης και τα ηλεκτρόδια δυναμικού $MN = 2l$, ενώ τα ταυτόχρονα τα δίπολα μεταξύ τους σε πολλαπλάσια απόσταση, $BM = n2l$. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση (3.3).

$$\rho_{\alpha} = 2\pi n(n+1)(n+2)l \frac{\Delta V}{I} \quad (3.3)$$

- **Πόλου – διπόλου (pole – dipole):** Η διάταξη αυτή ξεχωρίζει σε σχέση με τις προηγούμενες καθώς το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε τεράστια απόσταση από το άλλο, στο "άπειρο", $AB > 15 \cdot \max(n) \cdot l$, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού έχουν μεταξύ τους απόσταση $MN = l$. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την σχέση (3.4).

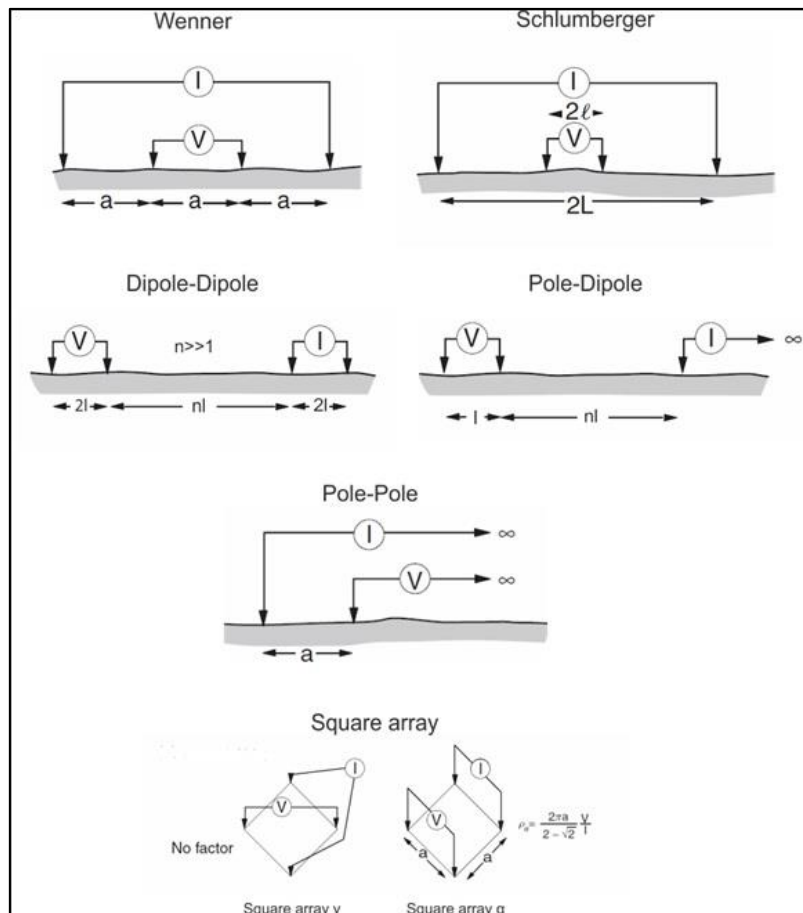
$$\rho_a = 2\pi n(n+1)l \frac{V_{MN}}{I} \quad (3.4)$$

- **Πόλου – πόλου (pole – pole):** Στην διάταξη αυτή ένα ζεύγος ηλεκτροδίων (ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα δυναμικού) τοποθετούνται σε μεταξύ τους απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, AB και $MN > 30a$. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση (3.5).

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I} \quad (3.5)$$

- **Τετραγωνική διάταξη (square array):** Κατά την διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις γωνίες ενός τετραγώνου, ενώ διακρίνονται δύο τύποι της διάταξης αυτής, τύπος α και τύπος γ . Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του τύπου α δίνεται από την σχέση (3.6).

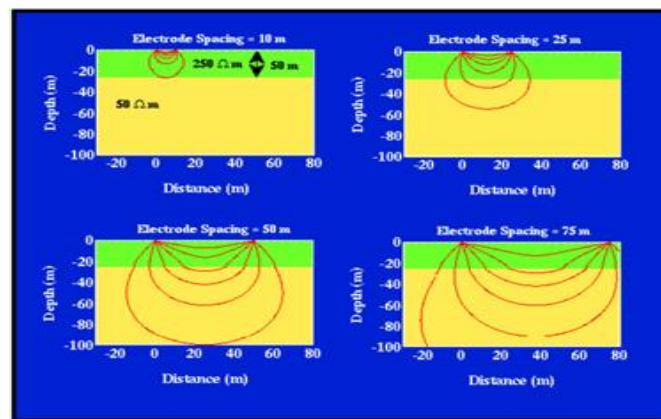
$$\rho_a = \frac{2\pi a}{2-\sqrt{2}} \frac{V}{I} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.6 Βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων (Milson, 2003)

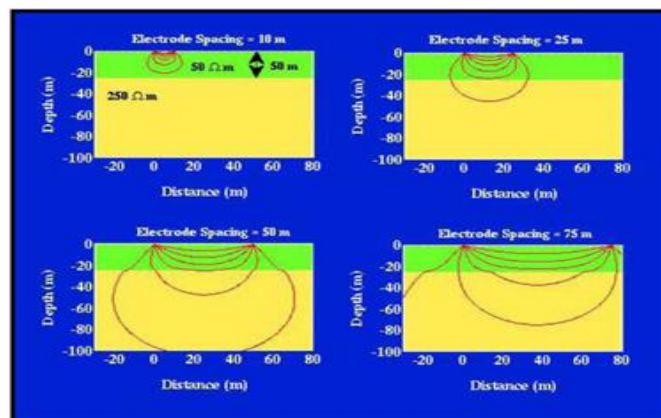
3.2.4 Βάθος διείσδυσης και διακριτική ικανότητα

Γενικά ισχύει ότι το βάθος διείσδυσης είναι άμεσα εξαρτώμενο και ανάλογο των αποστάσεων των ηλεκτροδίων ρεύματος. Ταυτόχρονα όμως όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διείσδυσης – διασκόπησης τόσο μειώνεται η διακριτική ικανότητα και αυτό για το ηλεκτρικό ρεύμα κατά την διάδοσή του στο μέσο και σε μεγαλύτερο βάθος διαχέεται περισσότερο (γεωμετρική διασπορά) και συναντά όλο και μεγαλύτερη αντίσταση. Γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητό πως διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων ανταποκρίνονται διαφορετικά ως προς το βάθος διείσδυσης και την διακριτική ικανότητα. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3.7 και 3.8) παρουσιάζεται η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος σε σχέση με τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.7 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος και απόσταση ηλεκτροδίων, όταν ο ανώτερος ορίζοντας έχει μεγαλύτερη αντίσταση του κατώτερου.

(https://faculty.unlv.edu/pburnley/GEOL442_642/RES/NOTES/ResistivityNotes015Layered_02.html)



Σχήμα 3.8 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος και απόσταση ηλεκτροδίων, όταν ο ανώτερος ορίζοντας έχει μικρότερη αντίσταση του κατώτερου.

(https://faculty.unlv.edu/pburnley/GEOL442_642/RES/NOTES/ResistivityNotes015Layered_02.html)

3.2.5 Ευαισθησία διατάξεων και θόρυβος

Η επιλογή της διάταξης των ηλεκτροδίων σε μία γεωφυσική έρευνα σχετίζεται άμεσα με την ευαισθησία της ως προς τις κατακόρυφες και οριζόντιες μεταβολές της αντίστασης, καθώς και με τον λόγο σήματος προς θόρυβο ο οποίος καθορίζει και το μέγιστο βάθος διασκόπησης. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1) παρουσιάζεται η αξιολόγηση των διατάξεων σχετικά με την ευαισθησία και τον θόρυβο.

Πίνακας 3.1 Πίνακας αξιολόγησης διατάξεων (Ward, 1989)

Διατάξεις	Λόγος S/N	Πλευρικές μεταβολές	Κατακόρυφες μεταβολές
Wenner	5	2	5
Schlumberger	4	2	5
Διπόλου – διπόλου	1	5	2
Πόλου – διπόλου	3	4	2
Πόλου – πόλου	5	4	2
5: Καλύτερη			

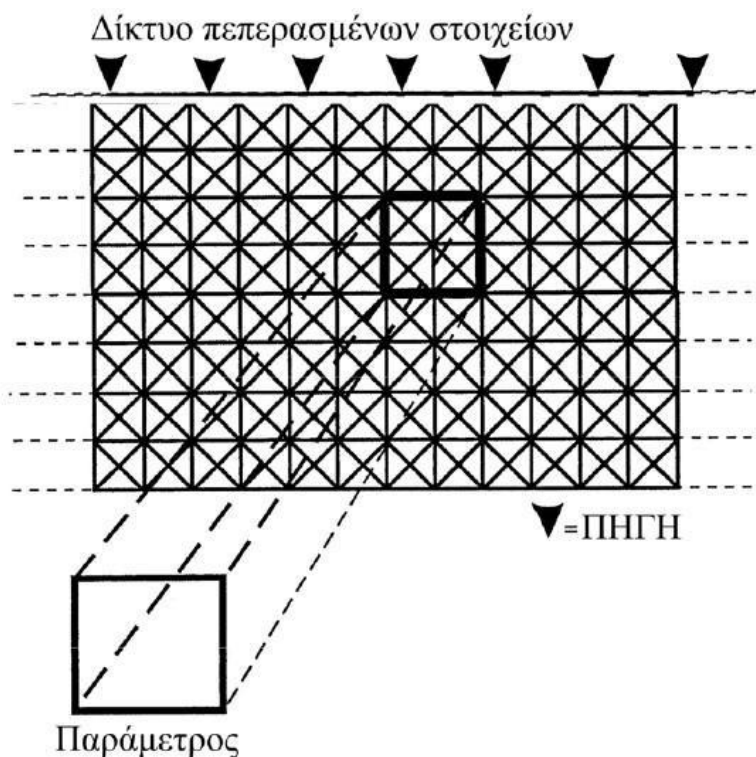
3.2.6 Επεξεργασία δεδομένων

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται κατά τις μετρήσεις δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση, αλλά την φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση. Για να αποσπαστεί η πραγματική εικόνα μέσω των φαινόμενων αντιστάσεων, εφαρμόζεται μία πολύπλοκη μαθηματικά και υπολογιστικά διαδικασία η οποία ονομάζεται αντιστροφή (**Inversion**). Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η εύρεση ενός μοντέλου αντιστάσεων που να “παράγει” μετρήσεις οποίες να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές, ενώ απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι η επίλυση του ευθέως προβλήματος (Electrical resistivity forward problem).

Το ευθύ πρόβλημα αφορά τον υπολογισμό των φαινόμενων ηλεκτρικών αντιστάσεων για την περίπτωση που θα διεξάγονταν μία έρευνα και θα ήταν γνωστή η διάταξη των ηλεκτροδίων αλλά και η κατανομή των πραγματικών αντιστάσεων του μέσου. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται συνήθως με αριθμητικές μεθόδους (Numerical methods) από τις οποίες οι δημοφιλέστερες είναι: η μέθοδος των

πεπερασμένων διαφορών (Finite difference method) (Park and Van, 1991; Ellis and Oldenburg, 1994) και των πεπερασμένων στοιχείων (Finite element method) (Pridmore et al, 1981; Sasaki, 1994; LaBrecque et al, 1996; Tsourlos and Ogilvy, 1999; Yi et al, 2001; Pain et al, 2002) η οποία εφαρμόζεται και στην παρούσα διατριβή.

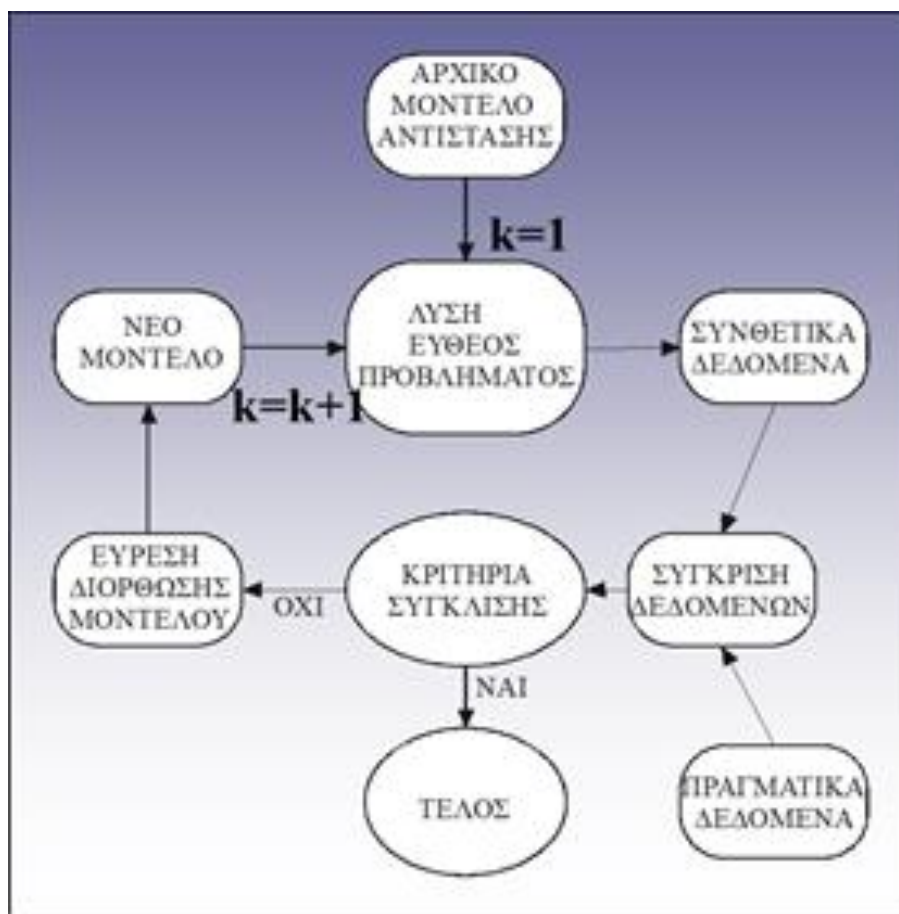
Σύμφωνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το μέσο διακριτοποιείται σε ομογενή τριγωνικά στοιχεία (Elements) διαφορετικών ηλεκτρικών αντιστάσεων, με αποτέλεσμα την δυνατότητα επίλυσης οποιασδήποτε και ανεξαρτήτου πολυπλοκότητας, κατανομής των ηλεκτρικών αντιστάσεων (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 Παράμετρος και δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (Tsourlos, 1995)

Η επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος, όπως ορίζει και το όνομα της αποτελεί την αντίστροφη διαδικασία κατά την οποία πλέον προσπαθεί να προσδιοριστεί το μοντέλο αντιστάσεων το οποίο θα “παράγει” τις μετρήσεις που θα πλησιάζουν στις πραγματικές. Όμως λόγω μη γραμμικότητας του γεωηλεκτρικού προβλήματος η διαδικασία ανάγεται σε επαναληπτική και πραγματοποιείται έτσι επίλυση επιμέρους μικρότερων γραμμικών προβλημάτων, έως ότου τα συνθετικά δεδομένα και με

διαδοχικές βελτιώσεις σφαλμάτων (RMS μεταξύ πραγματικών – συνθετικών δεδομένων), να προσεγγίζουν τις μετρήσεις (Σχήμα 3.10). Συνήθεις μέθοδοι για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος είναι: η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Least square) (Lines and Treitel, 1984), η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης (Damped least – square) (Levenberg, 1944; Marquadt, 1963; Franklin, 1970), η μέθοδος ιδιαζουσών τιμών (Eigenvalues) (Lanczos, 1960; Golub and Reinsh, 1970), και η μέθοδος της εξομαλυμένης αντιστροφής (Smoothness constrained) (Tikhonov, 1963; Constable et al, 1987).



Σχήμα 3.10 Διαδικασία της αντιστροφής (www.geo.auth.gr).

3.3 Πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (MASW)

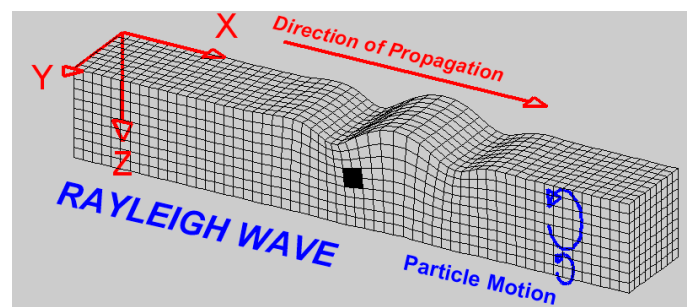
Η τεχνική αυτή ανήκει στην κατηγορία των σεισμικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης και εισήχθη για πρώτη φορά στην γεωφυσική κατά τα τέλη της δεκαετίας του '90 (Park et al, 1999). Αποτελεί στην ουσία μια εξαιρετικά νέα τεχνική, η οποία ως στόχο έχει την εκτίμηση των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων (V_s) βασιζόμενη στην μελέτη των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

3.3.1 Εφαρμογές

Η πιο σημαντική εφαρμογή της μεθόδου είναι η ανάλυση σεισμικού κινδύνου σε μία περιοχή η οποία επιτυγχάνεται με την εύρεση των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων για τα πρώτα 30 μέτρα, ενώ χρησιμοποιείται επίσης για την ανίχνευση ανωμαλιών, για την χαρτογράφηση εδάφους αλλά και για την αξιολόγηση συμπύκνωσης στην οδοποιία (masw.com).

3.3.2 Βασικές αρχές

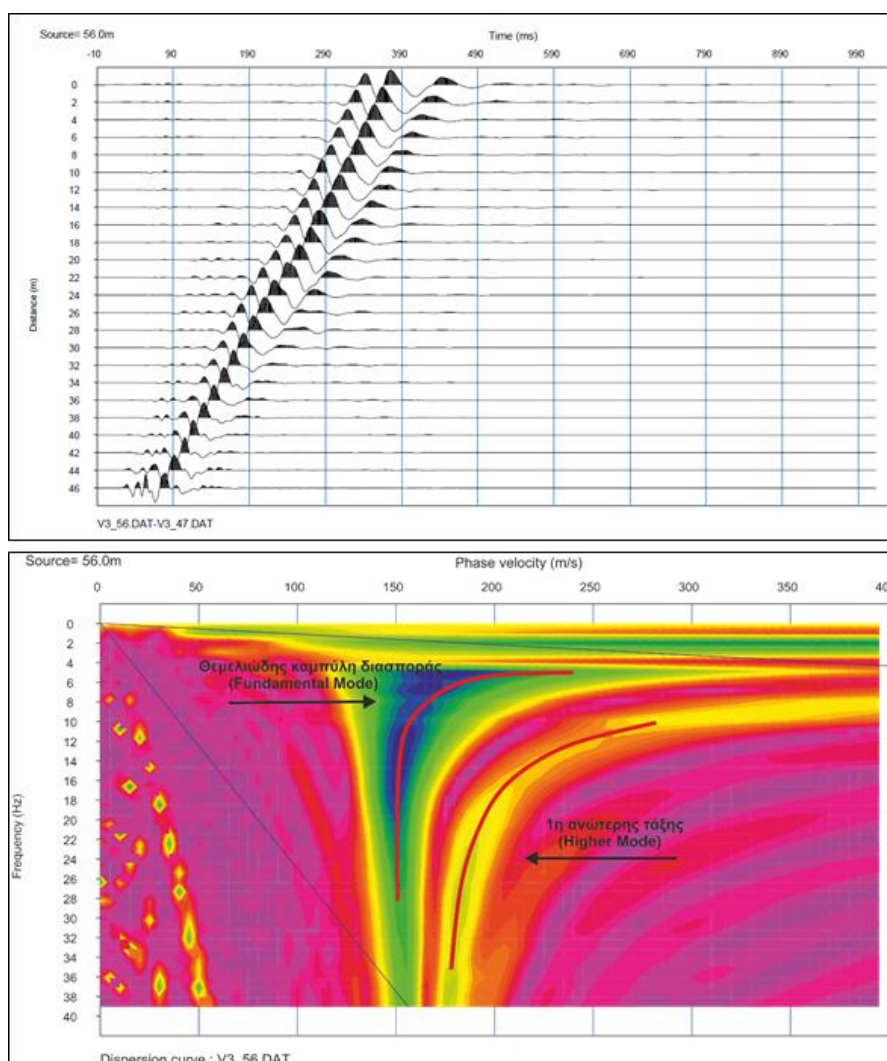
Όπως προειπώθηκε, η τεχνική βασίζεται στην μελέτη των κυμάτων Rayleigh. Τα κύματα αυτά προκύπτουν από την συμβολή διαμηκών (P) και εγκαρσίων (S) κυμάτων και διαδίδονται παράλληλα με την επιφάνεια (Lay and Wallace, 1995). Συγκεκριμένα, κατά την διάδοση τους τα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης διαγράφουν ελλείψεις στο κατακόρυφο επίπεδο, ενώ ταυτόχρονα κινούνται παράλληλα προς την κατεύθυνση διάδοσης (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11 Διάδοση επιφανειακών κυμάτων Rayleigh
(<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/Rwave.htm>)

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των κυμάτων Rayleigh αποτελεί το φαινόμενο της διασποράς κατά το οποίο η ταχύτητα τους μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την συχνότητα. Ειδικότερα όταν πρόκειται για ανομοιογενές μέσο, κύματα με διαφορετικά μήκη κύματος διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα (Socco and Strobbia, 2004), γεγονός το οποίο οφείλεται κατά κύριο λόγο σε γεωμετρικές μεταβολές των γεωλογικών σχηματισμών.

Το παραπάνω φαινόμενο είναι και αυτό που “εκμεταλλευόμαστε” για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων μελετώντας τις καμπύλες διασποράς (dispersion curves)(Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12 Καταγραφή επιφανειακών κυμάτων επάνω, καμπύλες διασποράς της αντίστοιχης καταγραφής κάτω (Αβραμίδου, 2016).

3.3.3 Βάθος διείσδυσης και ποιότητα μετρήσεων

Το βάθος διασκόπησης έχει άμεση σχέση και εξάρτηση από την κατανομή της σεισμικής ενέργειας στα διαφορετικά μήκη κύματος και ουσιαστικά καθορίζεται από την ακόλουθη σχέση (masw.com):

$$Z_{\max} = 0.5 * L_{\max}$$

όπου, $Z_{\max}$ = μέγιστο βάθος διασκόπησης

$L_{\max}$ = μεγαλύτερο μήκος κύματος

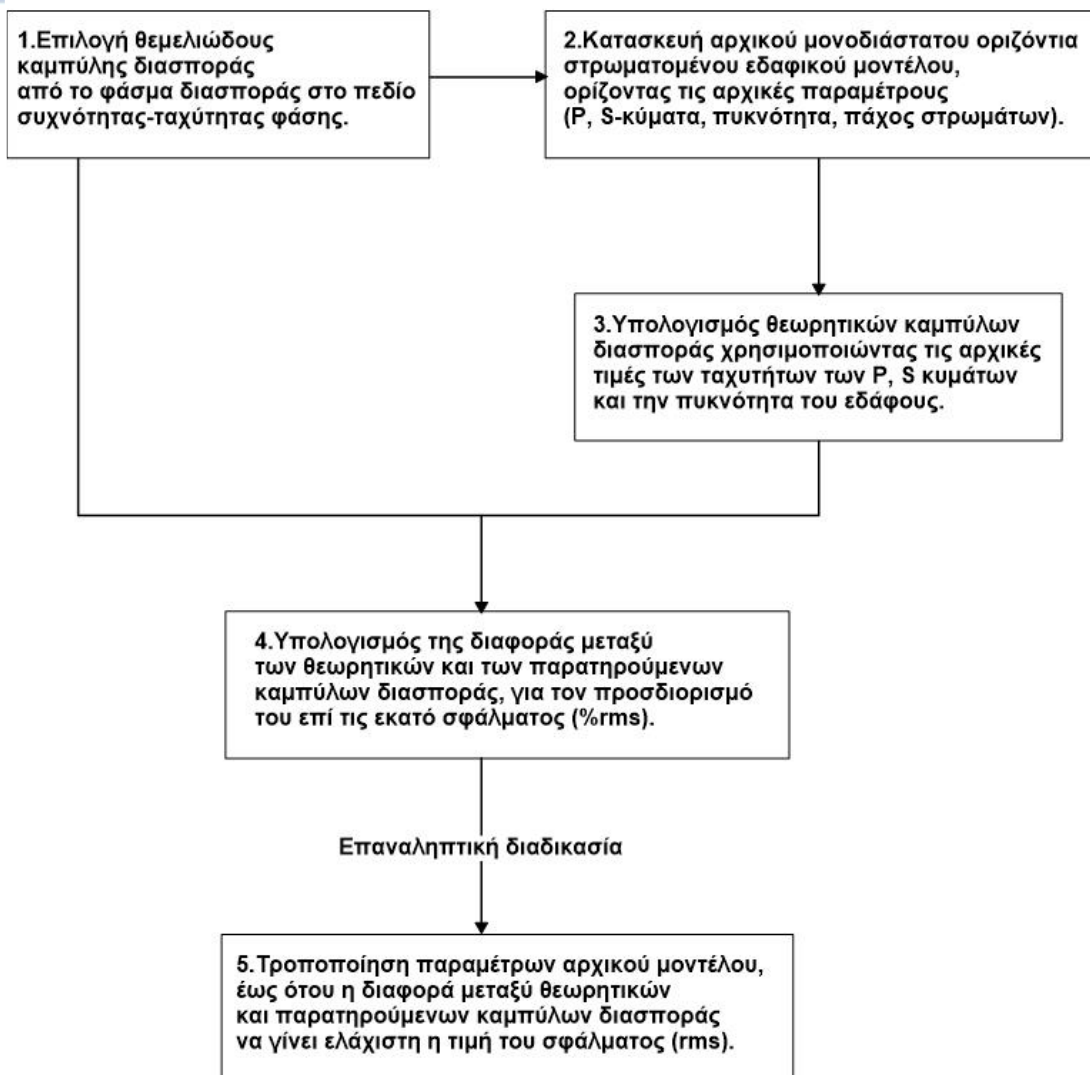
Όσον αφορά τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων αυτοί επιγραμματικά είναι (Κρητικάκης, 2010):

- Το ανάγλυφο
- Η σεισμική πηγή
- Οι δέκτες γεώφωνα
- Η γεωμετρία της διάταξης
- Οι παράμετροι καταγραφής

3.3.4 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων εφαρμόζεται η διαδικασία της αντιστροφής. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται προσδιορισμός του μοντέλου κατανομής των ταχυτήτων των εγκαρσίων κυμάτων μέσω επαναληπτικής εφαρμογής της αντιστροφής των χαρακτηριστικών των καμπυλών διασποράς. Τα στάδια τα οποία ακολουθούνται κατά την διαδικασία αυτή παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.13).

Αντιστροφή επιφανειακών κυμάτων Rayleigh



Σχήμα 3.13 Διαδικασία αντιστροφής (Αβραμίδου, 2016).

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Το κεφάλαιο αυτό αφορά την μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ (GPR Forward Modeling) που πραγματοποιήθηκε πριν από την λήψη των πραγματικών δεδομένων στην περιοχή του Επταπυργίου. Παρακάτω γίνεται μια περιγραφή του ευθέως προβλήματος στην μέθοδο του γεωραντάρ, αλλά και μίας εκ των μεθόδων που εφαρμόζονται για την λύση του. Παρουσιάζεται το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δισδιάστατων μοντέλων και φυσικά τα ίδια τα μοντέλα μαζί με τα αποτελέσματά τους. Επίσης παρουσιάζονται δύο συμπληρωματικά προγράμματα τα οποία κατασκευάστηκαν σε γλώσσα Matlab, μαζί με τους λόγους που οδήγησαν στην δημιουργία τους, ενώ τέλος το κεφάλαιο κλείνει με τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την μοντελοποίηση.

4.1 Αριθμητικές μέθοδοι και μοντελοποίηση

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας και ειδικότερα της υπολογιστικής ισχύος είχε και έχει σαν αποτέλεσμα την ραγδαία εξέλιξη της μοντελοποίησης και αριθμητικής προσομοίωσης καθιστώντας τις χρήσιμα εργαλεία, τόσο ως προς την κατανόηση, όσο και την ανάλυση σχεδόν οποιουδήποτε επιστημονικού προβλήματος (Inan and Marshall, 2011).

Η εφαρμογή της αριθμητικής προσομοίωσης δεν θα μπορούσε να λείπει φυσικά από τον τομέα της γεωφυσικής αλλά και από την μέθοδο του γεωραντάρ. Έτσι σήμερα αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς, να συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών διάδοσης και κατά συνέπεια να αυξήσει την αποτελεσματικότητα μίας έρευνας, αλλά και να χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή παραμέτρων μιας πραγματικής διασκόπησης (Giannakis et al, 2016).

4.1.1 Επίλυση ευθέος προβλήματος (GPR Forward Problem)

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο υπέδαφος, αλλά και γενικά όλα τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell (Balanis, 1989) οι οποίες είναι 1^{ης} τάξεως διαφορικές εξισώσεις και εκφράζουν την συμπεριφορά των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, αλλά και τις αλληλεπιδράσεις τους με την ύλη.

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \vec{D} = q \quad (4.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (4.4)$$

όπου, $\vec{E}$ = ένταση ηλεκτρικού πεδίου (Volt/m),

$\vec{H}$ = ένταση μαγνητικού πεδίου (Ampere/m),

$\vec{D}$ = διηλεκτρική μετατόπιση (Coulomb/m²),

$\vec{B}$ = μαγνητική επαγωγή (Weber/m²),

$\vec{J}$ = πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (Ampere/m²),

q = πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου (Coulomb/m³),

t = χρόνος (sec).

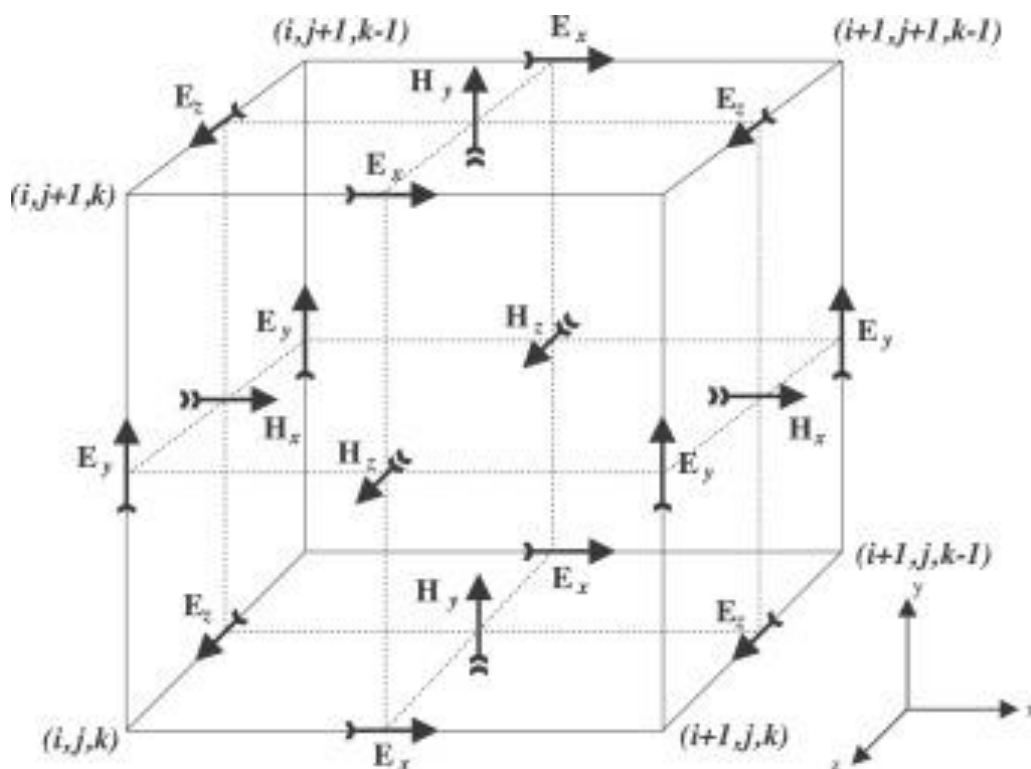
Η επίλυση του ευθέος προβλήματος στην μέθοδο του γεωραντάρ πραγματοποιείται με την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων χρησιμοποιώντας κατάλληλες αρχικές και οριακές συνθήκες και αυτό γιατί η φύση του το κατατάσσει σαν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών, χωρίς όρια.

Ένας τρόπος για την επίτευξη του παραπάνω στόχου είναι η χρήση αριθμητικών μεθόδων (Numerical methods), εκ των οποίων ξεχωρίζει για διάφορους λόγους (Sadiku, 2001; Inan and Marshall, 2011) η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD, Finite Difference Time Domain).

4.1.2 Πεπερασμένες διαφορές στο πεδίο του χρόνου (FDTD)

Με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD, Finite Difference Time Domain Method) ο χώρος και ο χρόνος χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μοντέλο να αναπαριστά μια διακριτοποιημένη προσομοίωση του πραγματικού προβλήματος, αλλά ταυτόχρονα περιορισμένου μεγέθους. Το πλέγμα που δημιουργείται με αυτόν τον διαχωρισμό ονομάζεται πλέγμα FDTD και το δομικό του στοιχείο είναι το κελί (Yee cell) (Yee, 1966) που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1).

Η διακριτοποίηση αυτή του χώρου σε βήματα $\Delta x \Delta y \Delta z$ και των χρονικών βημάτων Δt είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς, όσο πιο μικρά είναι τα διαστήματα, τόσο πιο σωστό και ακριβές είναι το μοντέλο, όμως ταυτόχρονα με την ακρίβεια αυξάνεται και το υπολογιστικό κόστος. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο, οι τιμές των βημάτων θα πρέπει να είναι πάντοτε πεπερασμένες αφού οι υπολογιστές διαθέτουν συγκεκριμένη μνήμη και ταχύτητα επεξεργασίας (Warren et al, 2016).



Σχήμα 4.1 Yee cell, το βασικό δομικό στοιχείο του πλέγματος FDTD. Πήρε την ονομασία του από τον Kane Yee που επινόησε την μέθοδο (Warren et al, 2016).

Η αριθμητική επίλυση πραγματοποιείται με την εφαρμογή των εξισώσεων του Maxwell σε κάθε κελί (Yee cell) ξεχωριστά, ενώ η προσομοίωση του χρόνου γίνεται επιλύοντας το πρόβλημα επαναληπτικά κάθε φορά και για χρόνο που αυξάνεται με βήμα Δt , έτσι η κάθε επανάληψη αντιστοιχεί σε μία χρονική στιγμή t . Όμως το γεγονός αυτό, ότι δηλαδή επιθυμούμε την λύση απευθείας στον χρόνο έχει σαν αποτέλεσμα οι τιμές των διαστημάτων (Δx Δy Δz και Δt) να μην μπορούν να οριστούν ανεξάρτητα και να σχετίζονται μεταξύ τους με την παρακάτω συνθήκη η οποία είναι γνωστή ως CLF condition:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (4.5)$$

όπου, c = ταχύτητα του φωτός (m/sec)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η φύση του ευθέως προβλήματος στην μέθοδο του γεωραντάρ το κατατάσσει σαν ένα πρόβλημα χωρίς όρια, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η επίλυση του απαιτεί την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέχρι τον μηδενισμό της ενέργειας τους, δηλαδή μέχρι το άπειρο. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι αυτό δεν μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για τον λόγο αυτό επινοήθηκε η "Οριακή Συνθήκη Απορρόφησης" (ABC, Absorbing Boundary Condition) και συγκεκριμένα το "Όριο Απορρόφησης" που αποτελεί μια περιοχή στην οποία η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μηδενίζεται (το κύμα απορροφάται).

4.2 *gprMax*

Το *gprMax* (Warren et al., 2016) είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που προσομοιώνει την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επιλύοντας τις εξισώσεις του Maxwell στον τρισδιάστατο χώρο με την αριθμητική μέθοδο και συγκεκριμένα με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD, Finite Difference Time Domain Method).

Αναπτύχθηκε σε πρώτη φάση το 1996 (Giannopoulos, 2005) όταν η μοντελοποίηση με την χρήση αριθμητικών μεθόδων ήταν ακόμα σε αρχικά στάδια. Πλέον, με την τρέχουσα υπολογιστική ισχύ δίνεται η ευκαιρία για την κατασκευή λεπτομερών και σύνθετων μοντέλων σε βαθμό που προηγουμένως δεν ήταν δυνατόν.

Το λογισμικό περιλαμβάνει προχωρημένες συνθήκες απορρόφησης (Advanced absorbing boundary conditions), δυνατότητα μοντελοποίησης υλικών με μεγάλη ποικιλία ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, δυνατότητα μοντελοποίησης ανισότροπων υλικών, τραχείες επιφάνειες κ.α.

Τέλος, όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας του, πρέπει να αναφερθεί ότι κυρίως για λόγους ταχύτητας, αλλά και ευκολίας κατασκευής πολύπλοκων μοντέλων το *gprMax* δεν περιλαμβάνει γραφικό περιβάλλον. Η χρήση του γίνεται μέσω της γραμμής εντολών (DOS, Command line) με διάφορες εντολές και φυσικά με ένα αρχείο το οποίο περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την μοντελοποίηση. Το πως κατασκευάζεται το αρχείο, πως και ποιες εντολές μπορούν να χρησιμοποιηθούν, παρουσιάζεται στην συνέχεια.

4.2.1 Κατασκευή μοντέλου

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μοντελοποίηση αποτελεί το αρχείο εισαγωγής (Input file) μέσα στο οποίο βρίσκονται όλα τα στοιχεία που αφορούν την γεωμετρία αλλά και τις παραμέτρους του μοντέλου. Όλες οι πληροφορίες δίνονται με εντολές οι οποίες πρέπει πάντα να ξεκινάνε με "#", οτιδήποτε άλλο λαμβάνεται σαν σχόλιο, ενώ οι θέσεις ορίζονται πάντοτε σε σύστημα συντεταγμένων xyz σε μέτρα. Επίσης η σειρά με την οποία δίνονται οι διάφορες εντολές δεν επηρεάζει καθόλου το τελικό αποτέλεσμα.



- **Μέγεθος χώρου (domain size)**

#domain: f1 f2 f3

οπού, f1, f2, f3: Συντεταγμένες xyz σε μέτρα.

- **Διακριτοποίηση του χώρου (Discretization of space)**

#dx_dy_dz: f1 f2 f3

οπού, f1, f2, f3: Οι τιμές των διαστημάτων Δx , Δy , Δz . Το Δt υπολογίζεται αυτόματα από την σχέση 3.5 και ουσιαστικά αποτελεί το διάστημα δειγματοληψίας.

Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί πως αν το Δy έχει ίδια τιμή με το γ του μεγέθους του χώρου, τότε το μοντέλο θα είναι 2D, ενώ στην περίπτωση που ισχύει $\gamma > \Delta y$ το μοντέλο θα είναι 3D.

- **Κυματομορφή πηγής (Waveform)**

#waveform: str1 f1 f2 str2

οπού, str1, f1, f2, str2: Τύπος κυματομορφής, μέγιστο πλάτος κυματομορφής, συχνότητα κυματομορφής (Hertz), μία ονομασία για να χρησιμοποιηθεί ως id.

- **Πηγή (Source)**

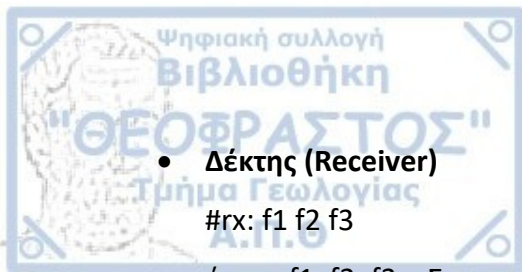
#hertzian_dipole: c1 f1 f2 f3 str1

οπού, c1, f1, f2, f3, str1: Πόλωση πηγής x, y ή z, συντεταγμένες xyz πηγής, το id της κυματομορφής.

Για να πραγματοποιηθεί όδευση τότε πρέπει να δοθούν στοιχεία για την κίνηση της πηγής και του δέκτη.

#src_steps: f1 f2 f3

όπου, f1, f2, f3: Τα βήματα της πηγής στους άξονες xyz (πχ #src_steps: 0.04 0 0 κίνηση κατά τον άξονα x 4cm ανά ίχνος).



- **Δέκτης (Receiver)**

#rx: f1 f2 f3

όπου f1, f2, f3, : Συντεταγμένες xyz δέκτη

#rx_steps: f1 f2 f3

όπου, f1, f2, f3: Τα βήματα του δέκτη στους άξονες xyz.

- **Χρονικό παράθυρο (Time window)**

#time_window: f1

όπου, f1: το χρονικό παράθυρο σε δευτερόλεπτα

- **Υλικά μοντέλου (Materials)**

#material: f1 f2 f3 f4 str1

όπου, f1, f2, f3, f4, str1:

Σχετική διηλεκτρική επιδεκτικότητα (ϵ_r , relative permittivity)

Αγωγιμότητα (σ , conductivity Siemens/meter)

Μαγνητική διαπερατότητα (μ_r , relative permeability)

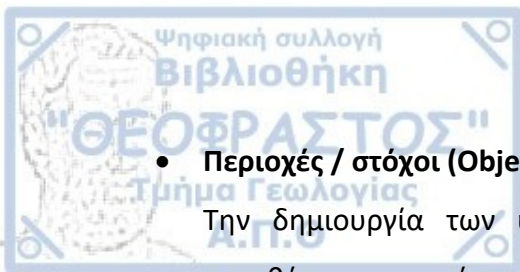
Μαγνητική απώλεια (σ^* , magnetic loss Ohms/meter)

Ονομασία υλικού (id)

Όσον αφορά τα υλικά πρέπει να σημειωθεί ότι:

1^{ον} στην περίπτωση που απουσίας μαγνητικών υλικών οι παράμετροι μ_r και σ^* παίρνουν τιμές 1 και 0 αντίστοιχα.

2^{ον} το grpMax περιλαμβάνει και 3 υλικά ενσωματωμένα (build-in materials) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας με την ονομασία τους και χωρίς να χρειάζεται να δηλωθούν οι παράμετροι ϵ_r , σ , μ_r και σ^* . Τα υλικά αυτά είναι: free_space, pec (perfect electric conductor) και water.



- **Περιοχές / στόχοι (Object construction commands)**

Την δημιουργία των υλικών του μοντέλου ακολουθεί η δημιουργία και τοποθέτηση στον χώρο των περιοχών ή στόχων.

Υπάρχει ένα σύνολο εντολών για την δημιουργία διάφορων σχημάτων όπως πχ

#box: f1 f2 f3 f4 f5 f6 str1

οπού, f1, f2, f3: Συντεταγμένες xyz κάτω αριστερά κορυφής

f3, f4, f5: Συντεταγμένες xyz πάνω και πίσω δεξιά κορυφής

str1: Το id ενός υλικού από αυτά που έχουν δημιουργηθεί.

#sphere, #cylinder, #triangle, #plate και διάφορες άλλες με τρόπο τοποθέτησης που μπορεί να βρεθεί στο εγχειρίδιο του λογισμικού.

- **Προβολή Γεωμετρίας (Geometry view)**

#geometry_view: f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 file1 c1

οπού, f1, f2, f3: Συντεταγμένες xyz κάτω αριστερά κορυφής όλου του χώρου (συνήθως 0 0 0 η αρχή των αξόνων).

f3, f4, f5: Συντεταγμένες xyz πάνω και πίσω δεξιά κορυφής όλου του χώρου. Ουσιαστικά είναι οι τιμές του #domain

f6, f7, f8: Οι τιμές των διαστημάτων Δx, Δy, Δz.

file1: το όνομα του αρχείου vti.

c1: μπορεί να είναι είτε η γεωμετρία ανά κελί, είτε f γεωμετρία ανά άκρη κελιού.

Με την εντολή αυτή στο αρχείο εισαγωγής το πρόγραμμα θα κατασκευάσει ένα αρχείο (.vti) το οποίο περιλαμβάνει την γεωμετρία του μοντέλου. Έτσι πχ με ένα πρόγραμμα όπως το Paraview (<http://www.paraview.org>) είναι δυνατή η οπτικοποίηση της.

4.2.2 Παράδειγμα και χρήση εντολών (CMD)

Μοντελοποίηση σωλήνα σε ημιχώρο.

- **Βήμα 1^ο: Κατασκευή αρχείου εισαγωγής (test_model.in) και τοποθέτηση του σε ένα φάκελο μέσα στον γενικό φάκελο του προγράμματος.**

```
#domain: 3 0.005 1.1
#dx_dy_dz: 0.005 0.005 0.005
#waveform: ricker 1 1e9 rick
#hertzian_dipole: γ 0.45 0 1 rick
#src_steps: 0.02 0 0
#rx: 0.55 0 1
#rx_steps: 0.02 0 0
#time_window: 20e-9
#material: 5.0 0.001 1.0 0.0 half_space
#box: 0 0 0 3 0.005 1 half_space
#cylinder: 1.5 0 0.5 1.5 0.005 0.5 0.1 pec
#geometry_view: 0 0 0 3 0.005 1.1 0.005 0.005 0.005 test_model n
```

Αφού κατασκευαστεί το αρχείο εισαγωγής, πρώτος στόχος θα πρέπει να είναι ο έλεγχος της γεωμετρίας. Είναι πολύ βασικό καθώς σε πολύπλοκα μοντέλα η πιθανότητα λάθους είναι ιδιαίτερα αυξημένη.

- **Βήμα 2^ο: Ενεργοποίηση προγράμματος και έλεγχος γεωμετρίας μοντέλου.**

Από την γραμμή εντολών (CMD) ο χρήστης πρέπει να οδηγηθεί στον φάκελο που έχει τοποθετηθεί το αρχείο εισαγωγής. Η ενεργοποίηση του προγράμματος πραγματοποιείται με την εντολή **“activate gprMax”** και με την χρήση της ακόλουθης εντολής **“python -m gprMax test_model.in --geometry-only”** κατασκευάζεται το αρχείο που περιέχει την γεωμετρία του μοντέλου (Σχήμα 4.2 και 4.3).

```

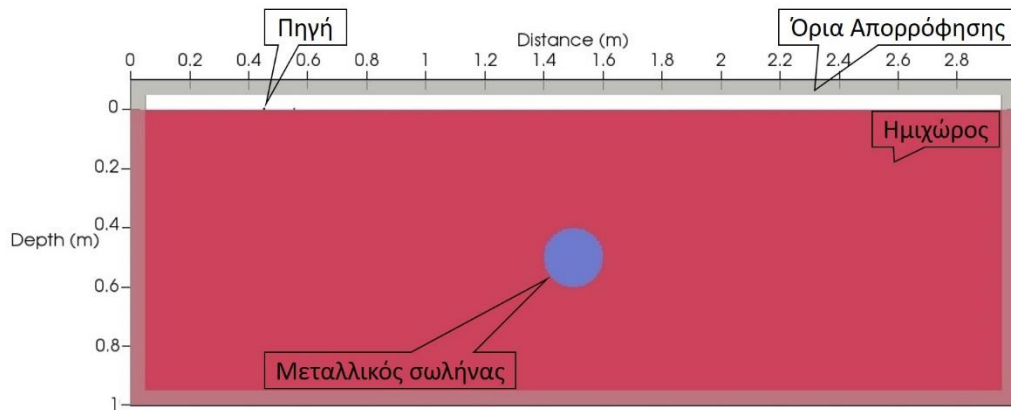
C:\ Γραμμή εντολών
Microsoft Windows [Version 10.0.14393]
(c) 2016 Microsoft Corporation. Με επιφύλαξη κάθε νόμιμου δικαιώματος.

C:\Users\Dimítris>cd gprMax\models\test

C:\Users\Dimítris\gprMax\models\test>activate gprMax

(gprMax) C:\Users\Dimítris\gprMax\models\test>python -m gprMax test_model.in --geometry-only
  
```

Σχήμα 4.2 Ενεργοποίηση λογισμικού και έλεγχος γεωμετρίας.



Σχήμα 4.3 Γεωμετρία μοντέλου.

- **Βήμα 3^ο: Εκτέλεση προγράμματος για όδευση 2 μέτρων**

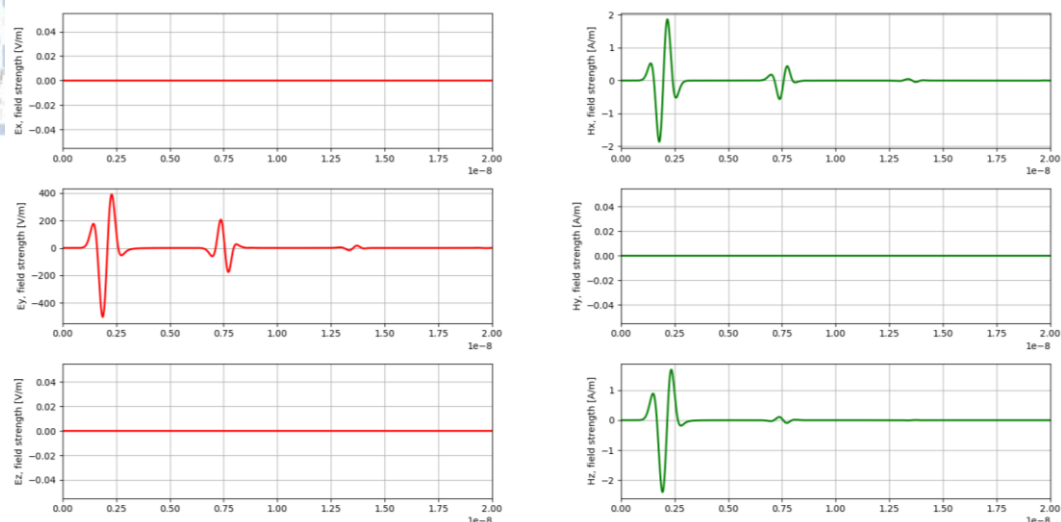
Ουσιαστικά αυτό που κάνει το gprMax είναι η δημιουργία ιχνών (traces), συνεπώς εφόσον έχει οριστεί στο αρχείο εισαγωγής βήμα πηγής και δέκτη 0.02m, για όδευση 2 μέτρων η διαδικασία θα πρέπει να επαναληφθεί 100 φορές.

python -m gprMax test_model.in -n 100

- **Βήμα 4^ο: Αρχεία εξαγωγής και απεικόνιση αποτελεσμάτων**

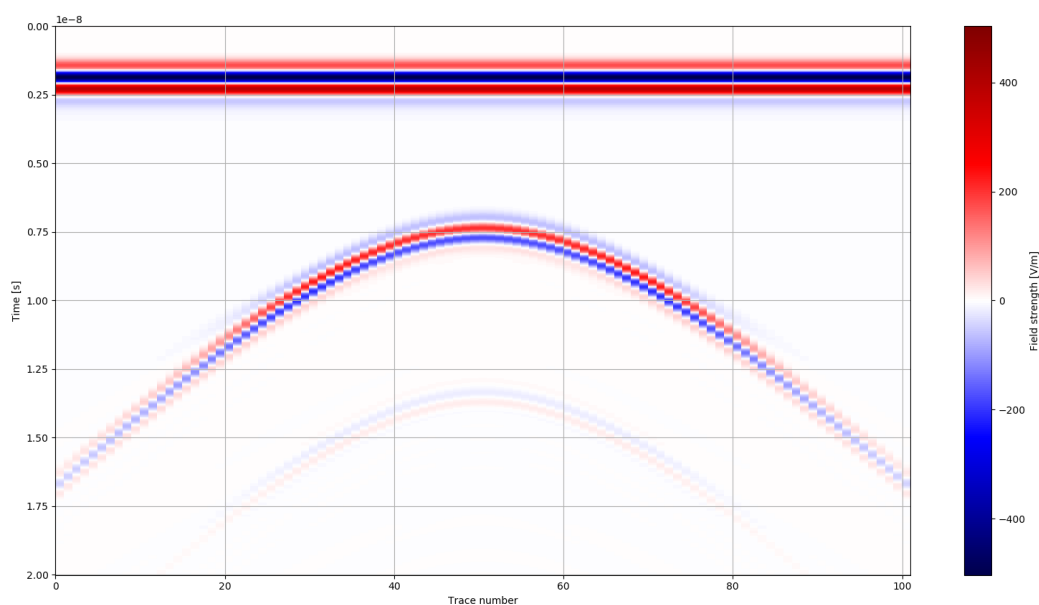
Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας θα έχουν δημιουργηθεί 100 διαφορετικά αρχεία με επέκταση .out (πχ test_model50.out). Τα αρχεία αυτά είναι της μορφής HDF5 περιλαμβάνουν πληροφορίες για το κάθε ένα από τα 100 ίχνη.

Με την εντολή **“python -m tools.plot_Ascan test_model50.out”** μπορεί να σχεδιαστεί ένα συγκεκριμένο ίχνος (Σχήμα 4.4).

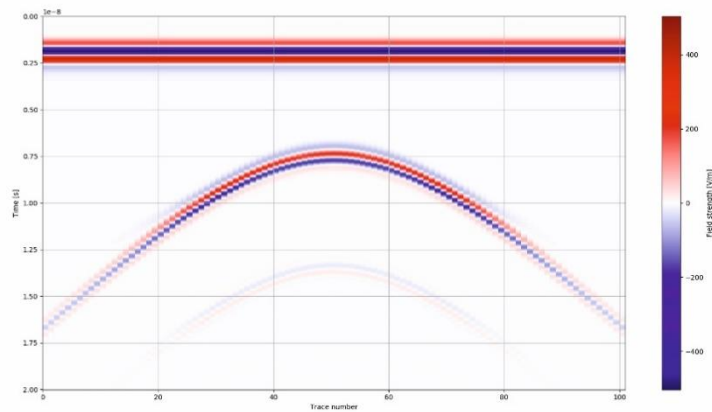
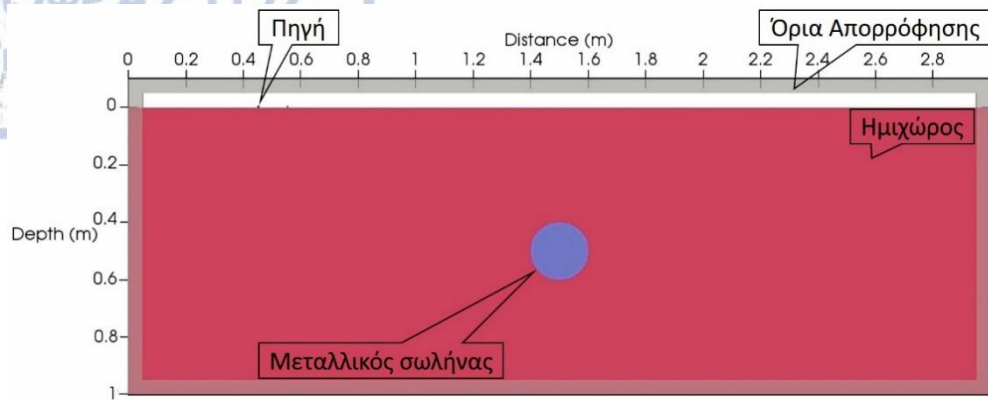


Σχήμα 4.4 Απεικόνιση 50^{ου} ίχνους μοντέλου.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον σχεδιασμό της τομής γεωραντάρ (Bscan) αποτελεί η συνένωση των 100 αυτών αρχείων. Η συνένωση πραγματοποιείται με την εντολή **“python -m tools.outputfiles_merge test_model”**, ενώ για να σχεδιαστεί η τομή χρησιμοποιείται η εντολή **“python -m tools.plot_Bscan test_model_merged.out Ey”**. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.5 και 4.6).



Σχήμα 4.5 Τομή γεωραντάρ (Bscan) μοντέλου.



Σχήμα 4.6 Μοντέλο και αποτέλεσμα.

4.3 Μοντελοποίηση

Σκοπός της μοντελοποίησης στην παρούσα διατριβή, η οποία όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκε πριν από την λήψη των πραγματικών δεδομένων, ήταν σε πρώτη φάση η εξοικείωση με τα δεδομένα του γεωραντάρ, μέσω της δημιουργίας και λήψης αποτελεσμάτων από πολύ απλά μοντέλα. Εν συνεχεία έγιναν διάφορα πειράματα με σκοπό την σύγκριση των αποκρίσεων από στόχο ίδιας γεωμετρίας αλλά διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων (ϵ_r , σ), την σύγκριση των αποκρίσεων στόχων διαφορετικών μεγεθών και βάθους από διαφορετικής κεντρικής συχνότητας πηγές, ενώ τελικός σκοπός ήταν η μοντελοποίηση, λήψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων από πολυσύνθετα μοντέλα τοίχων που προσομοίαζαν περιοχές υγρασίας και ρωγμές.

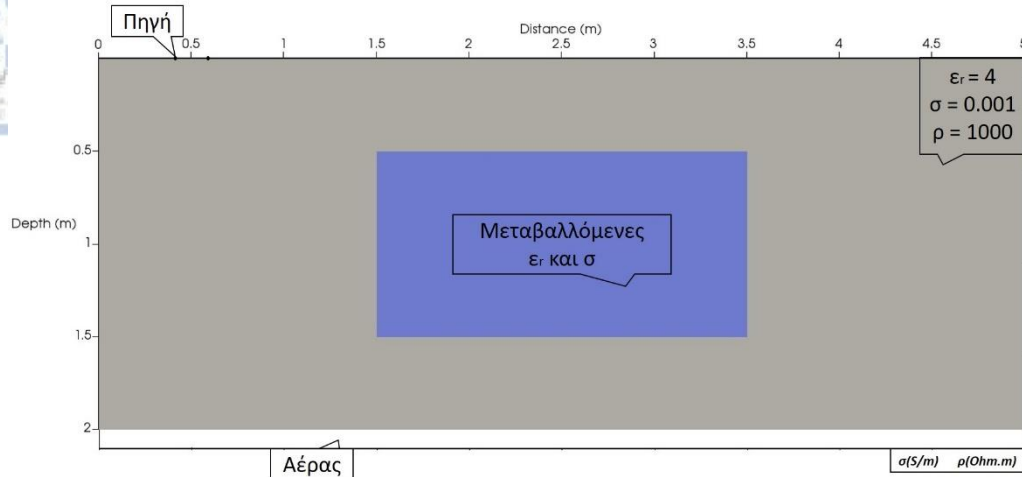
4.3.1 1^ο Πείραμα

Σκοπός του 1^{ου} πειράματος ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός στόχου ίδιας γεωμετρίας αλλά μεταβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων. Για την επίτευξη του κατασκευάστηκε ένα απλό μοντέλο τοίχου (Σχήμα 4.7), με ένα ορθογώνιο στόχο του οποίου οι ιδιότητες (ϵ_r , σ) μεταβλήθηκαν 11 φορές (11 δοκιμές).

Πιο συγκεκριμένα στις πρώτες 6 δοκιμές πραγματοποιήθηκε σταδιακή αύξηση της σχετικής διηλεκτρικής επιδεκτικότητας, ενώ στις υπόλοιπες μόνο της αγωγιμότητας. Οι πληροφορίες του μοντέλου, καθώς και των μεταβολών των ιδιοτήτων του στόχου ανά δοκιμή παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (πίνακας 4.1 και 4.2), ενώ τα αποτελέσματα στα σχήματα 4.8 και 4.10.

Πίνακας 4.1 Πληροφορίες μοντέλου 1^{ου} πειράματος.

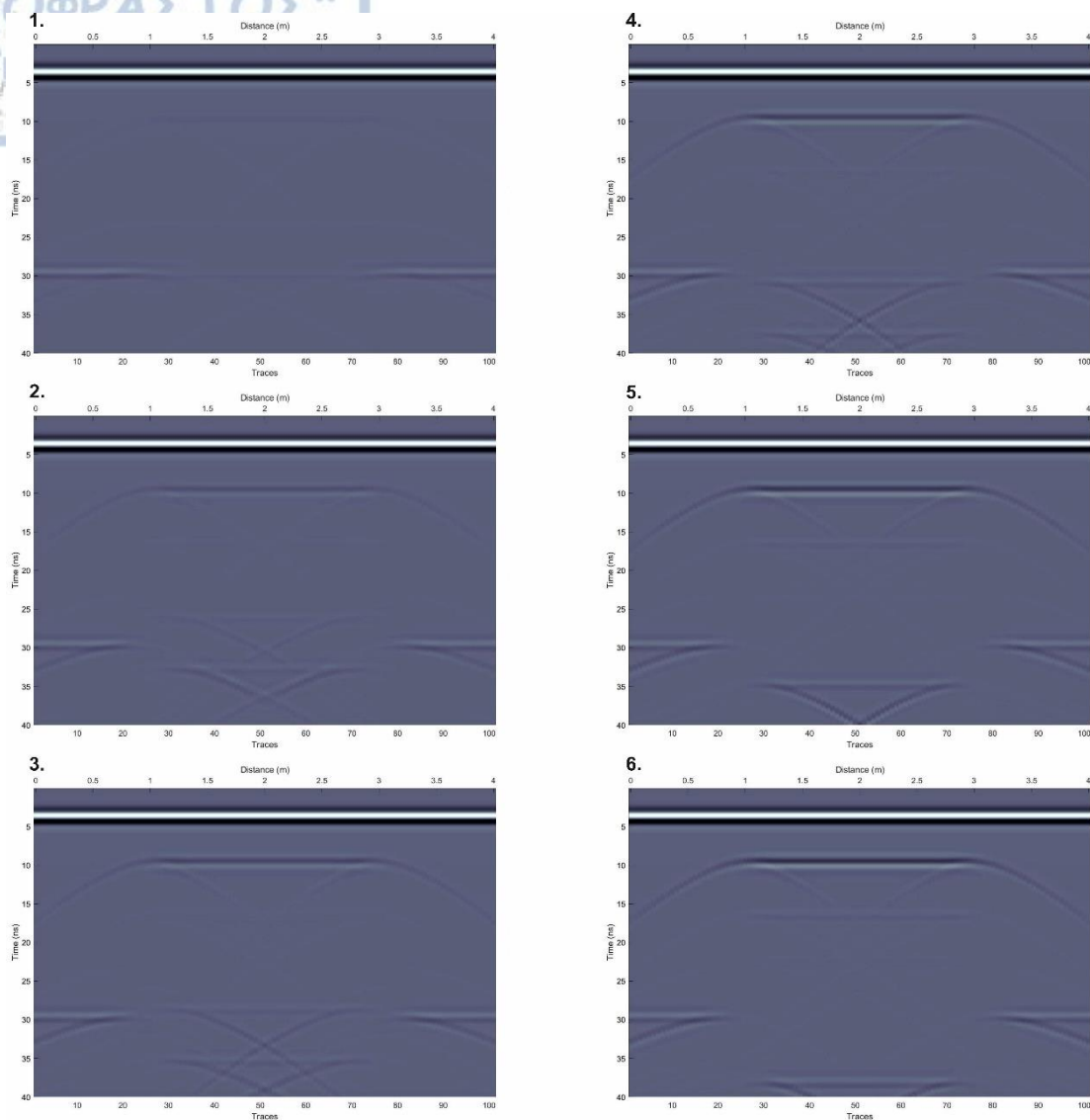
Πηγή (MHz)	500
Απόσταση πηγής – δέκτη (m)	0.18
Χώρος xyz (m)	5 – 0.004 – 2.2
Διάστημα δειγματοληψίας (m)	0.04
Συνολικά ίχνη	100
Χρονικό παράθυρο (ns)	40



Σχήμα 4.7 Μοντέλο τοίχου με ορθογώνιο στόχο του οποίου οι ιδιότητες (ϵ_r και σ) μεταβάλλονται ανά δοκιμή.

Πίνακας 4.2 Πληροφορίες υλικών μοντέλου ανά δοκιμή.

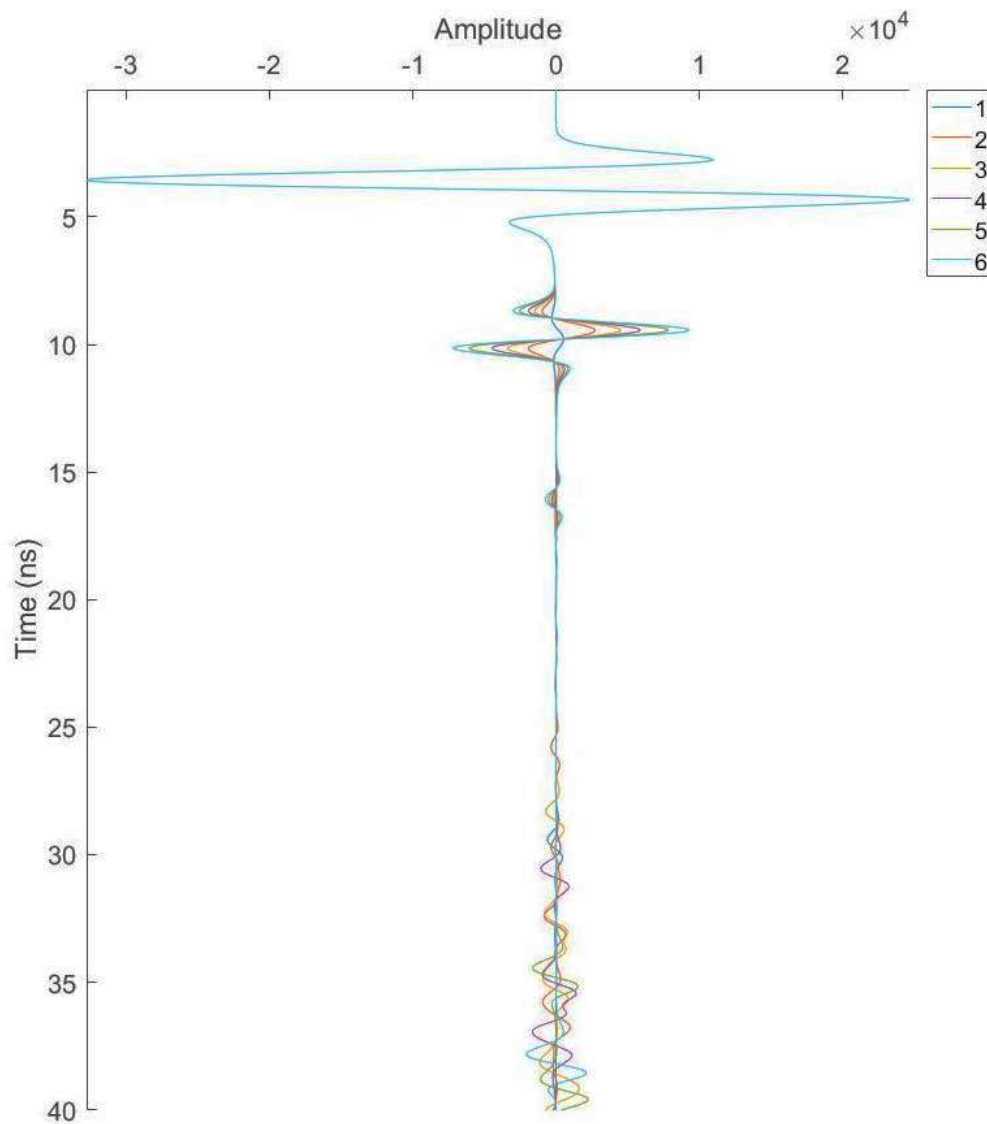
Δοκιμή	ϵ_r	$\sigma(\text{S/m})$	$\rho(\text{Ohm.m})$	Χρώμα
1	4	0.001	1000	
	4	0.010	100	
2	4	0.001	1000	
	6	0.010	100	
3	4	0.001	1000	
	8	0.010	100	
4	4	0.001	1000	
	10	0.010	100	
5	4	0.001	1000	
	14	0.010	100	
6	4	0.001	1000	
	18	0.010	100	
7	4	0.001	1000	
	18	0.005	200	
8	4	0.001	1000	
	18	0.0025	400	
9	4	0.001	1000	
	18	0.001666	600	
10	4	0.001	1000	
	18	0.00125	800	
11	4	0.001	1000	
	18	0.001	1000	



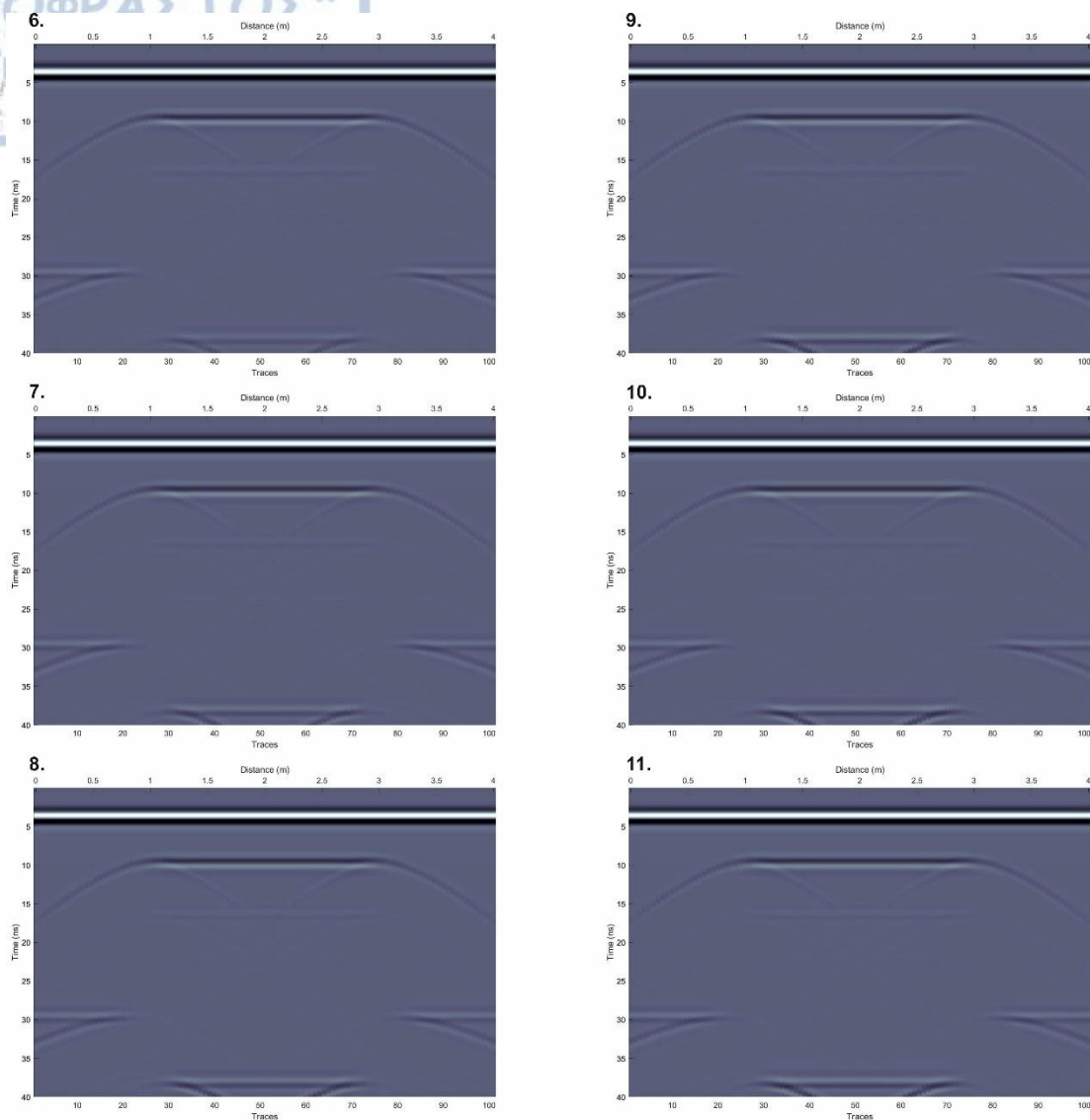
Σχήμα 4.8 Δοκιμές 1 – 6, ϵ_r στόχου: 4, 6, 8, 10, 14 και 18 αντίστοιχα.

Από τις πρώτες 6 δοκιμές είναι εμφανής η σταδιακή ισχυροποίηση των ανακλάσεων του στόχου η οποία οφείλεται στην διαφορά των σχετικών διηλεκτρικών σταθερών μεταξύ μέσου και στόχου, ενώ εμφανής είναι επίσης και η μετατόπιση των ανακλάσεων στον χρόνο εξαιτίας της αλλαγής της ταχύτητας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα στον στόχο ($v = c/\sqrt{\epsilon_r}$, c = ταχύτητα φωτός). Μάλιστα όσον αφορά την ταχύτητα παρατηρείται πως η μείωση της είναι τόσο μεγάλη ανά δοκιμή, σε σημείο που η ανάκλαση από την απέναντι πλευρά (αέρας) να βγαίνει εκτός χρονικού παραθύρου.

Για να γίνουν ακόμα πιο εμφανή τα παραπάνω επιλέχθηκε το ίχνος 50 από κάθε δοκιμή και σχεδιάστηκε το ένα πάνω στο άλλο. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9.

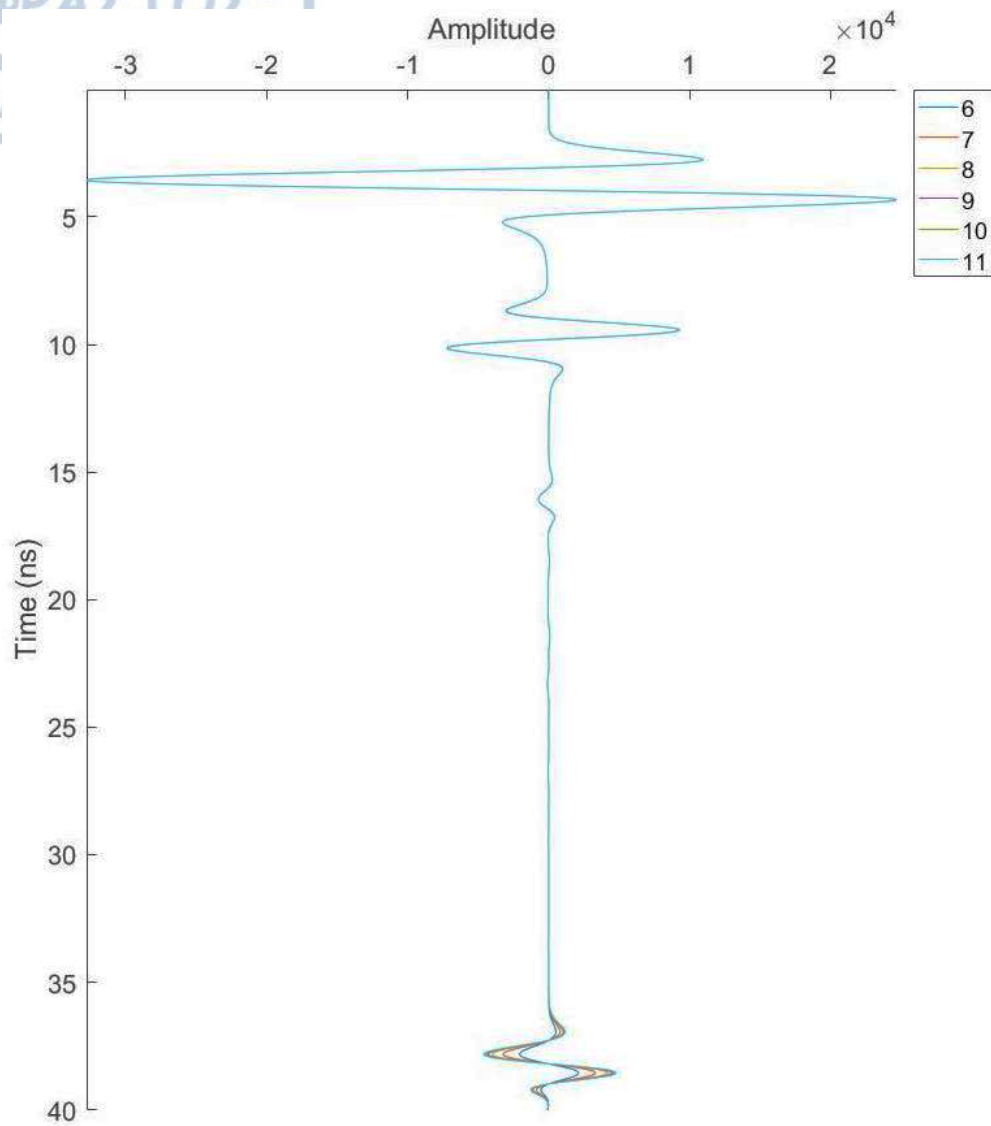


Σχήμα 4.9 Ίχνος 50 για τις πρώτες 6 δοκιμές.



Σχήμα 4.10 Δοκιμές 6 – 11, σ στόχου: 0.01, 0.005, 0.0025, 0.001666, 0.00125 και 0.001 (S/m) αντίστοιχα.

Στις υπόλοιπες δοκιμές (6 – 11) η διαφορά των σχετικών διηλεκτρικών σταθερών παρέμεινε η ίδια, ενώ ανά δοκιμή πραγματοποιούνταν μείωση της αγωγιμότητας του στόχου και μέχρι την εξισορρόπηση της με του μέσου. Εκ πρώτης όψης δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές, με λίγη προσοχή όμως είναι εμφανής η μείωση της εξασθένισης η οποία και εμφανίζεται μόνο στην ανάκλαση κατά την έξοδο από τον στόχο. Όπως και στις πρώτες 6 δοκιμές, έτσι και εδώ και για τον ίδιο λόγο, επιλέχθηκε το ίχνος 50 για σχεδιασμό και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 Ίχνος 50 δοκιμή 6 – 11.

4.3.2 2^ο Πείραμα

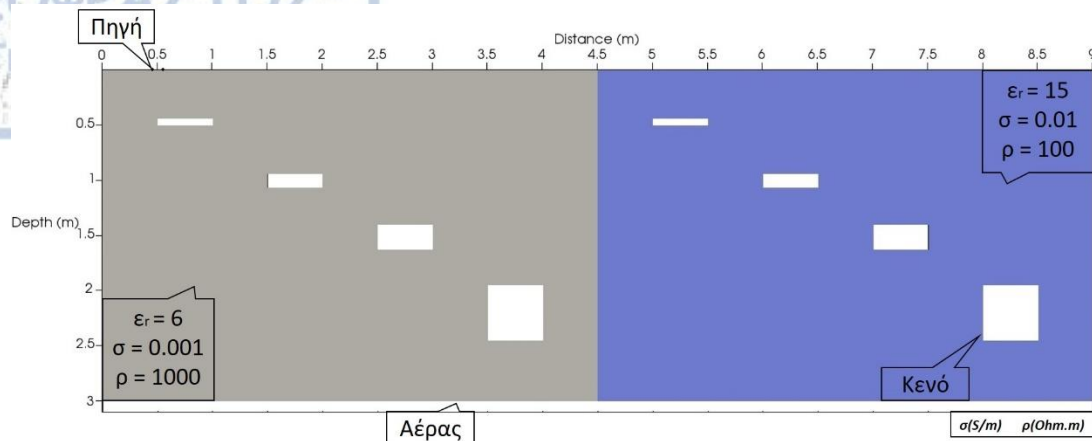
Σκοπός του 2^{ου} πειράματος ήταν η οπτικοποίηση και σύγκριση της απόκρισης στόχων διαφορετικών μεγεθών και βάθους σε πηγές διαφορετικών κεντρικών συχνοτήτων. Πρόκειται δηλαδή για ένα πείραμα ελέγχου βάθους διασκόπησης και διακριτικής ικανότητας. Για την επίτευξή του κατασκευάστηκε μοντέλο τοίχου το οποίο χωρίστηκε στην μέση με την χρήση διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων προσομοιάζοντας έτσι στεγνή και υγρή φάση (Σχήμα 4.12). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 4 δοκιμές και τα στοιχεία του μοντέλου παρουσιάζονται στους πίνακες 4.3 και 4.4.

Πίνακας 4.3 Πληροφορίες μοντέλου 2^{ου} πειράματος.

Χώρος xyz (m)		9 – 0.005 – 3.2	
Διάστημα δειγματοληψίας (m)		0.04	
Συνολικά ίχνη		200	
Χρονικό παράθυρο (ns)		100	
Ιδιότητες υλικών			
ε _r	σ(S/m)	ρ(Ohm.m)	Χρώμα
6	0.001	1000	ΣΤΕΓΝΗ ΦΑΣΗ
15	0.01	100	ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ

Πίνακας 4.4 Μεταβολές της κεντρικής συχνότητας της πηγής ανά δοκιμή.

Δοκιμή	Πηγή (MHz)	Απόσταση πηγής – δέκτη (m)
1	1000	0.1
2	800	0.14
3	500	0.18
4	250	0.36



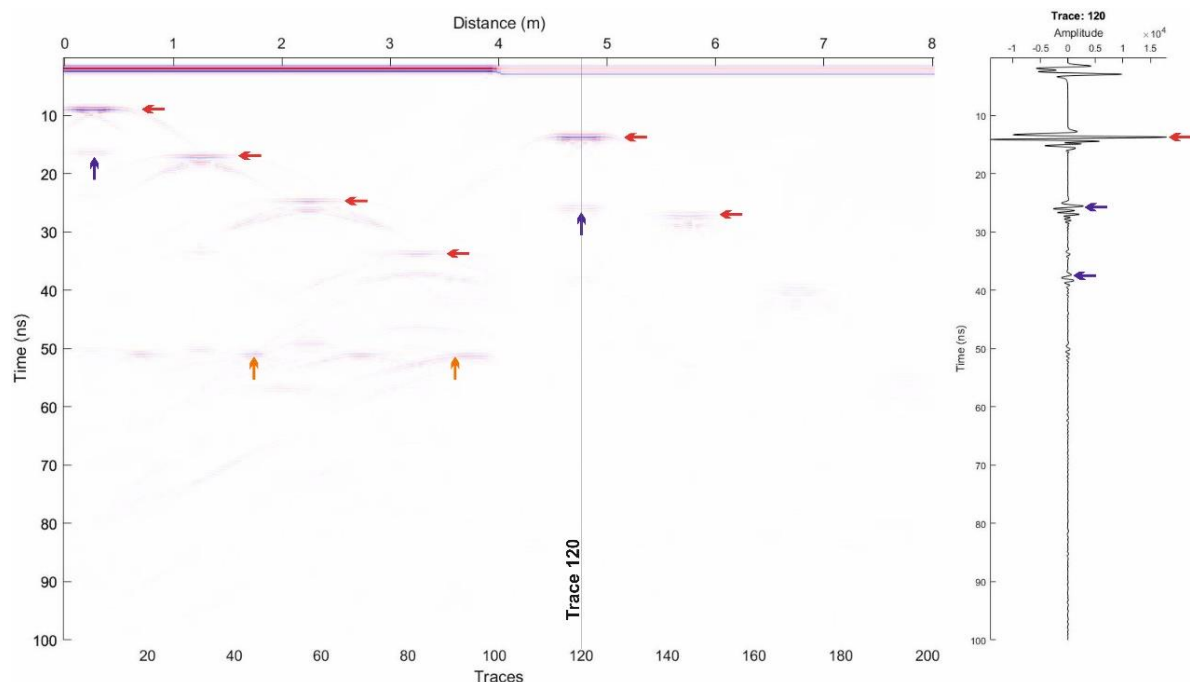
Σχήμα 4.12 Μοντέλο τοίχου με στεγνή - υγρή φάση και κενά διαφορετικών μεγεθών. Η κεντρική συχνότητα της πηγής μεταβάλλεται ανά δοκιμή.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών (Σχήματα 4.13 – 4.16) αυτό που παρατηρείται σχεδόν αμέσως είναι η διαφορετικότητα της πρώτης ανάκλασης, αλλά και η χρονική διαφορά μεταξύ των ανακλάσεων της στεγνής και υγρής φάσης. Επισημαίνεται πως οι ανακλάσεις των στόχων σε όλα τα σχήματα έχουν μαρκαριστεί με κόκκινα βέλη. Όπως και στο 1^ο πείραμα η διαφορά αυτή οφείλεται στην αλλαγή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς και κατά συνέπεια στην αλλαγή των ταχυτήτων. Ακόμα, όσον αφορά την πρώτη ανάκλαση παρατηρείται συνολικά μια μετατόπιση της στον χρόνο και ανά δοκιμή, γεγονός το οποίο οφείλεται στην μεγαλύτερη απόσταση που έχει να διανύσει το απευθείας κύμα (απόσταση πηγής – δέκτη μεγαλύτερη ανά δοκιμή). Εμφανής είναι επίσης και η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων η οποία είναι μεγαλύτερη στην δεξιά και υγρή μεριά και οφείλεται καθαρά στην αγωγιμότητα.

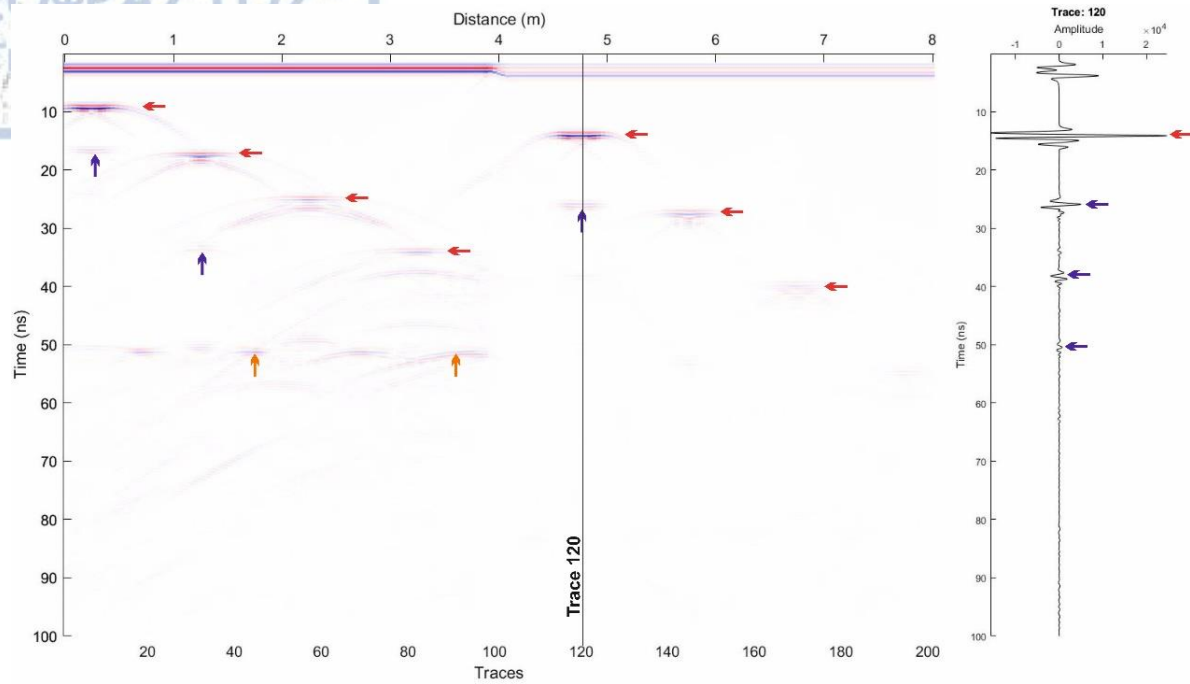
Σε δεύτερη φάση αυτό που παρατηρείται είναι η σχέση πηγής (κεντρικής συχνότητας), βάθους διασκόπησης και διακριτικής ικανότητας. Είναι φανερό ότι όσο μειώνεται η κεντρική συχνότητα της πηγής οι βαθύτεροι στόχοι παρουσιάζονται όλο και πιο έντονα, ενώ αντίστοιχα η ακρίβεια με την οποία αποτυπώνονται μειώνεται. Μάλιστα στα σχήματα 4.15 και 4.16, πηγές 500MHz και 250MHz αντίστοιχα, η μείωση είναι τόσο δραματική για τους πρώτους και μικρότερους στόχους, σε σημείο που οι 2 ανακλάσεις (εισόδου - εξόδου) να αποτυπώνονται σαν μία.

Ακόμα, στα σχήματα με μπλε βέλη έχουν μαρκιαστεί οι πολλαπλές ανακλάσεις που οφείλονται στο φαινόμενο της αντήχησης, την παγίδευση δηλαδή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και την έλευση ανακλάσεων από τον ίδιο στόχο σε μετέπειτα χρόνους.

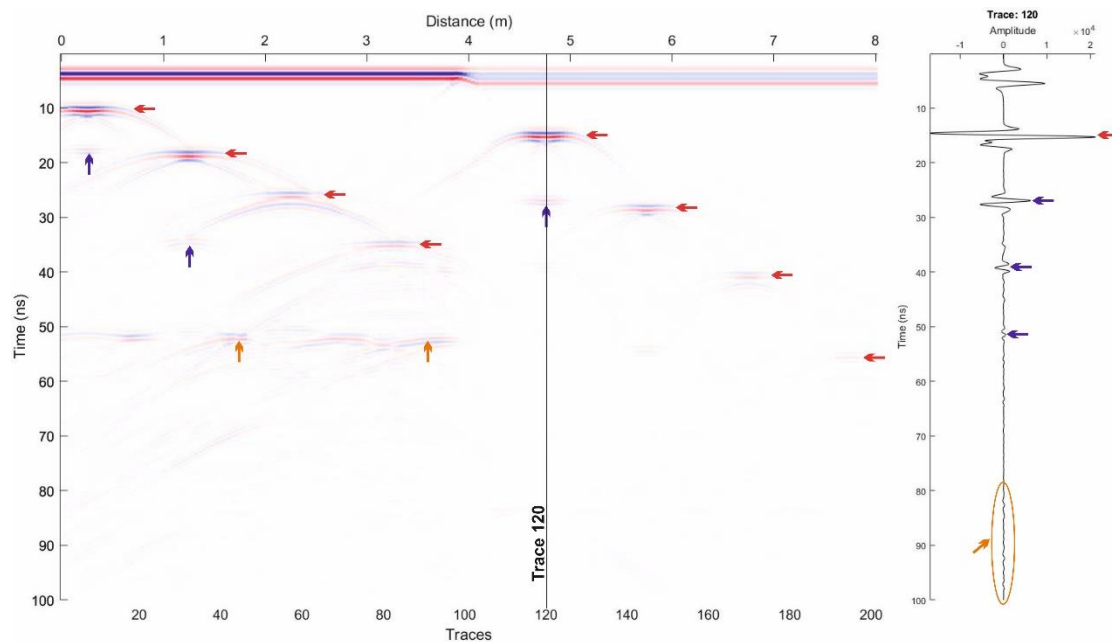
Επίσης, με πορτοκαλί βέλη έχει σημειωθεί η ανάκλαση του αέρα από την απέναντι πλευρά του τοίχου, η οποία, όπως είναι φανερό στην τομή γεωραντάρ, κάνει αισθητή την παρουσία της μόνο στην αριστερή και στεγνή πλευρά. Παρ' όλα αυτά η πληροφορία της και για την υγρή φάση του τοίχου υπάρχει και διακρίνεται καθαρά στο ίχνος που επιλέχθηκε να σχεδιαστεί σε συνδυασμό με την τομή (Σχήμα 4.15 και 4.16). Αυτό πρακτικά σημαίνει πως με την εφαρμογή χρονικής ενίσχυσης θα μπορέσει να αποτυπωθεί και στην τομή. Το ίδιο φυσικά ισχύει και για τις πολλαπλές ανακλάσεις που έχουν σημειωθεί στο ίχνος αλλά δεν φαίνονται στην τομή γεωραντάρ.



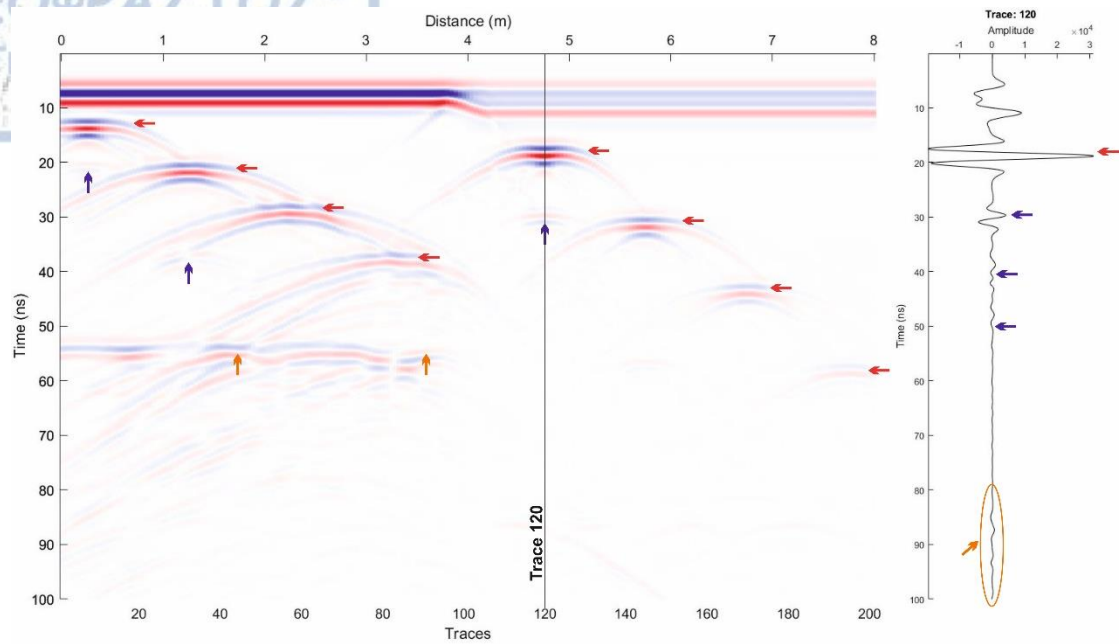
Σχήμα 4.13 1^η Δοκιμή, κεντρική συχνότητα πηγής 1GHz, με κόκκινα βέλη σημειώνονται οι στόχοι, με μπλε οι πολλαπλές και πορτοκαλί η ανάκλαση του αέρα.



Σχήμα 4.14 2^η Δοκιμή, κεντρική συχνότητα πηγής 800MHz, με κόκκινα βέλη σημειώνονται οι στόχοι, με μπλε οι πολλαπλές και πορτοκαλί η ανάκλαση του αέρα.



Σχήμα 4.15 3^η Δοκιμή, κεντρική συχνότητα πηγής 500MHz, με κόκκινα βέλη σημειώνονται οι στόχοι, με μπλε οι πολλαπλές και πορτοκαλί η ανάκλαση του αέρα.



Σχήμα 4.16 4^η Δοκιμή, κεντρική συχνότητα πηγής 250MHz, με κόκκινα βέλη σημειώνονται οι στόχοι, με μπλε οι πολλαπλές και πορτοκαλί η ανάκλαση του αέρα.

4.3.3 3^ο Πείραμα

Βασικός και τελικός σκοπός ήταν η δημιουργία, λήψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων από σύνθετα μοντέλα τοίχων που προσομοιάζαν περιοχές υγρασίας και ρωγμές, μοντέλα τα οποία αργότερα θα βοηθούσαν στην διαδικασία της επεξεργασίας, αλλά και πιθανότατα στην ερμηνεία των πραγματικών δεδομένων.

Για να γίνει όμως εφικτή η δημιουργία όσο τον δυνατόν πιο σύνθετων μοντέλων, καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, ήταν απαραίτητη και η ανάπτυξη δύο βοηθητικών προγραμμάτων. Τα προγράμματα αυτά μαζί με τους λόγους που οδήγησαν στην δημιουργία τους παρουσιάζονται στο [κεφάλαιο 4.4](#).

Για το 3^ο πείραμα λοιπόν, κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα τοίχων με περιοχές διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων καθώς και κενές περιοχές προσομοιάζοντας έτσι διαφορετικές φάσεις, στεγνή – υγρή, αλλά και ρωγμές – έγκοιλα αντίστοιχα. Στα μοντέλα τοποθετήθηκαν επίσης τούβλα, ενώ έγινε και μια προσπάθεια δημιουργίας ανομοιογενούς συνδετικού υλικού το οποίο ως σκοπό είχε να προσδώσει στα αποτελέσματα μια αληθοφάνεια και ένα είδος θορύβου. Ταυτόχρονα, για να ενισχυθεί ο θόρυβος και η αληθοφάνεια, στα καθαρά αποτελέσματα των μοντέλων και πριν τη εισαγωγή τους για επεξεργασία προστέθηκε με την χρήση κώδικα στην Matlab κανονικός λευκός θόρυβος (white Gaussian noise). Οι πληροφορίες των δύο μοντέλων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.

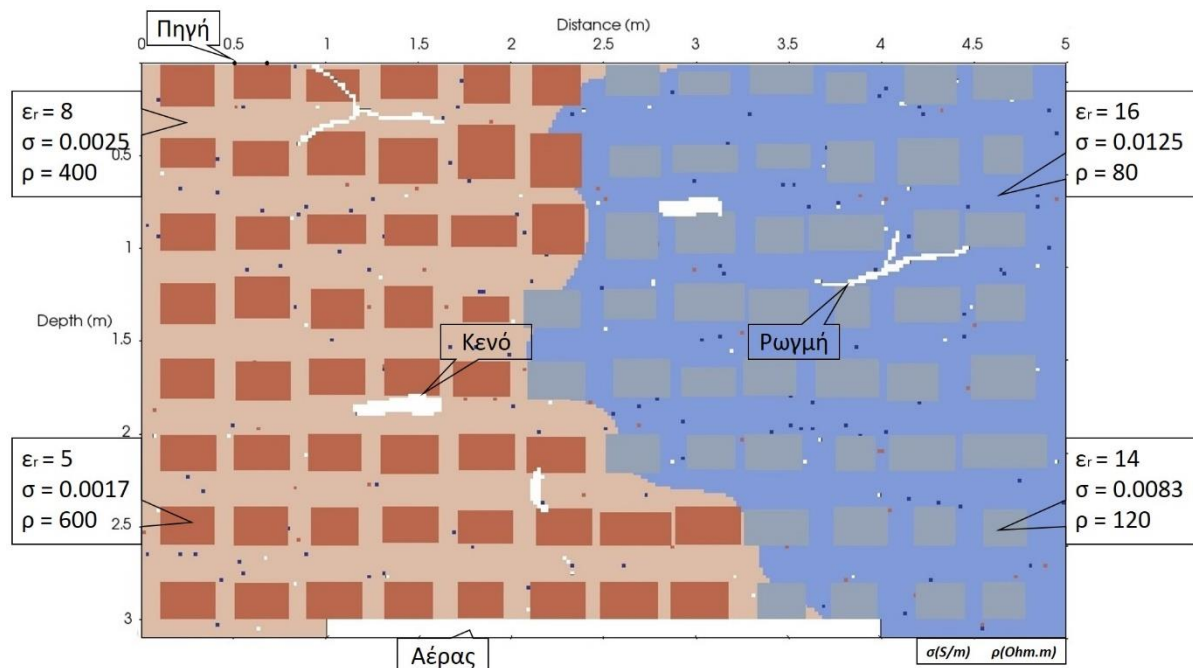
Πίνακας 4.5 Πληροφορίες μοντέλων 3^{ου} πειράματος.

Πηγή (MHz)			500	
Χώρος xyz (m)			5 – 0.004 – 3.2	
Διάστημα δειγματοληψίας (m)			0.02	
Συνολικά ίχνη			200	
Χρονικό παράθυρο (ns)			80	
Υλικά	Ιδιότητες υλικών			
	ε _r	σ(S/m)	ρ(Ohm.m)	Χρώμα
Αέρας - Κενό	1	0	∞	
Στεγνό τούβλο	5	0.0017	600	
Στεγνό συνδετικό	8	0.0025	400	
Υγρό τούβλο	14	0.0083	120	
Υγρό συνδετικό	16	0.0125	80	
Χαλίκι	4.5	0.001	1000	

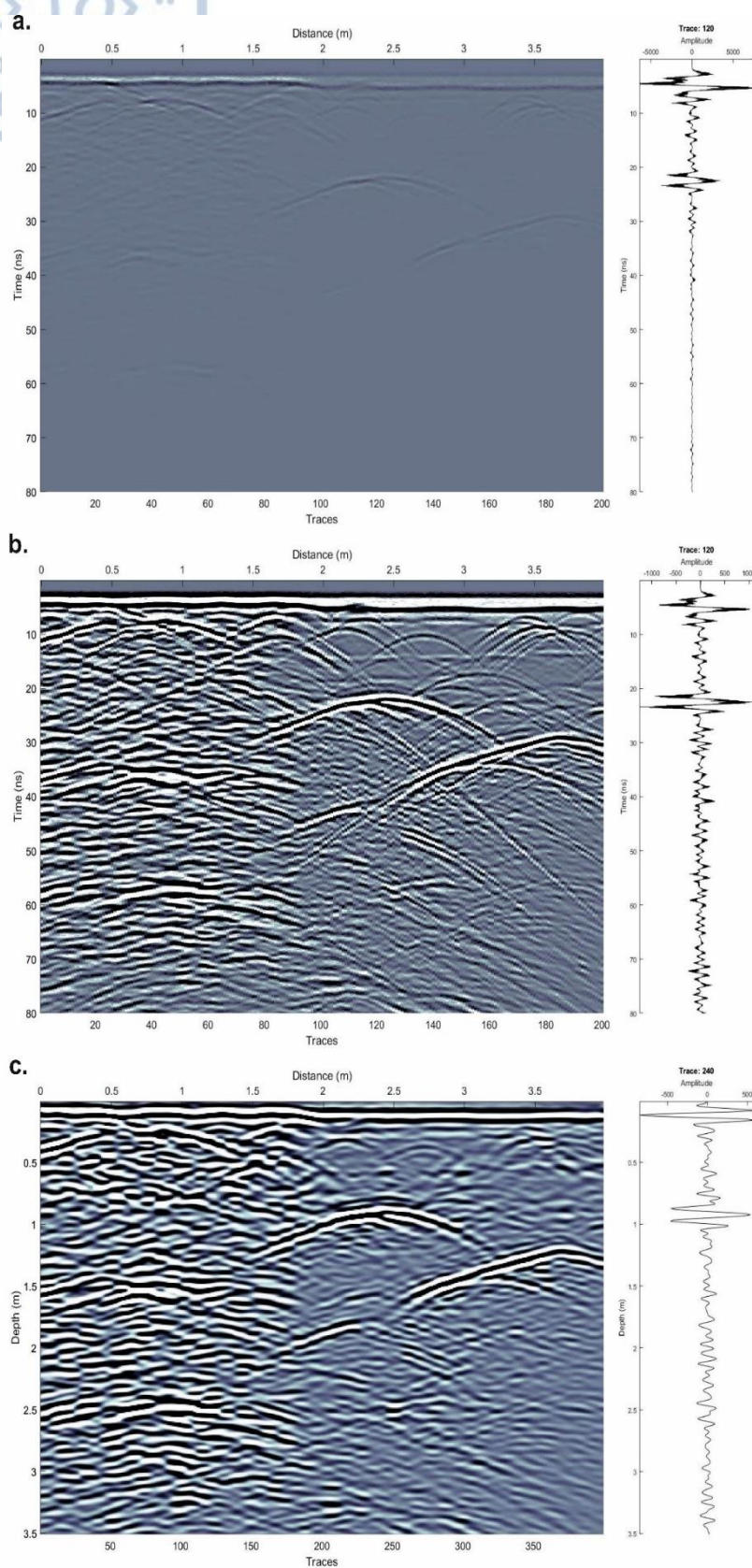
1^ο Μοντέλο

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται κατά σειρά, το πρώτο συνθετικό μοντέλο (Σχήμα 4.17), το αποτέλεσμα, δηλαδή η τομή γεωραντάρ με την εισαγωγή λευκού θορύβου 30% (Σχήμα 4.18a), η τομή με την εφαρμογή μόνο χρωματικής και χρονικής ενίσχυσης (Σχήμα 4.18b), η επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ (Σχήμα 4.18c) και ένα συνδυαστικό σχήμα της τελευταίας με του μοντέλου (Σχήμα 4.19).

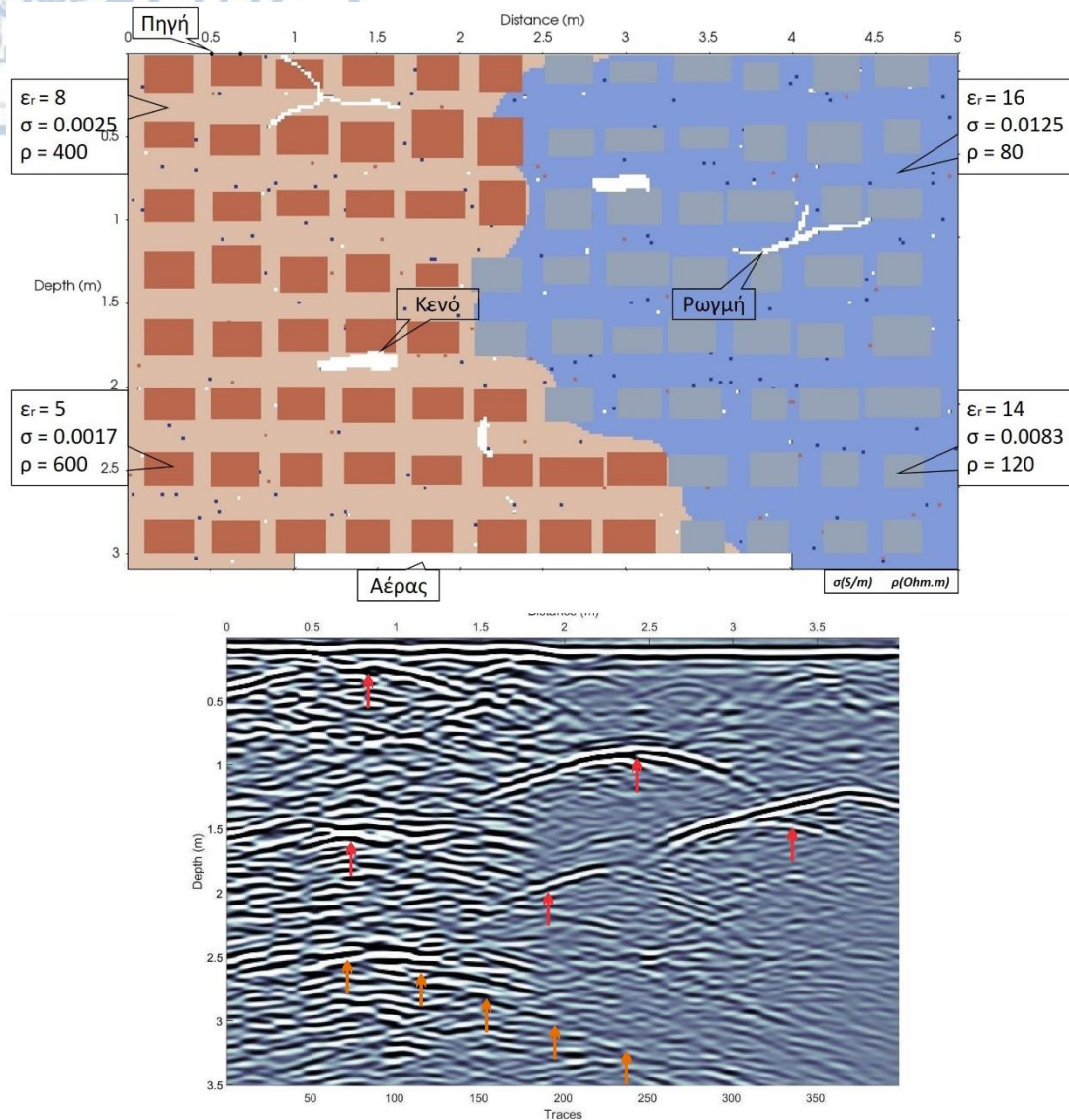
Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε: διόρθωση του χρόνου της πρώτης άφιξης (Zero time adjustment), χρονική ενίσχυση (Time gain), φιλτράρισμα στο πεδίο των συχνοτήτων και κυματαρίθμων (Frequency and wavenumber filtering), αποσυνέλιξη (Deconvolution) και τέλος παρεμβολή μεταξύ των ιχνών (Trace interpolation). Όσον αφορά την μετατροπή της κλίμακας από χρόνο σε βάθος, αυτή έγινε με την χρήση των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών και με την θεώρηση μιας σταθερής ταχύτητας για όλο το μοντέλο 0.09m/ns.



Σχήμα 4.17 Γεωμετρία 1^{ου} μοντέλου.



Σχήμα 4.18 α. Τομή γεωραντάρ με την προσθήκη θορύβου, β. τομή με ενίσχυση, γ. επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ.



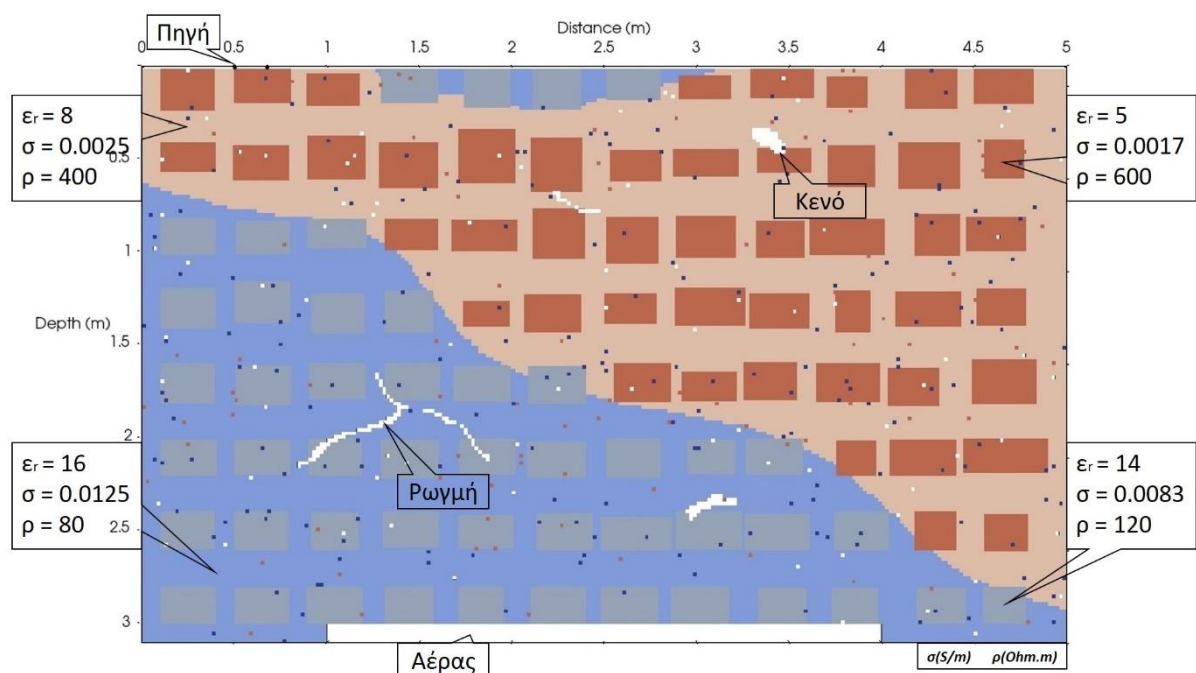
Σχήμα 4.19 Επεξεργασμένα δεδομένα σε συνδυασμό με το μοντέλο. Με κόκκινα βέλη σημειώνονται οι ανακλάσεις των ρωγμών – εγκοίλων, ενώ με πορτοκαλί η ανάκλαση του αέρα.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4.19) είναι φανερό ότι το σήμα που σχετίζεται με την περιοχή υγρασίας είναι ασθενές λόγω της εξασθένησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Επίσης τα έγκοιλα – ρωγμές (κόκκινα βέλη) φαίνεται να δημιουργούν σημαντικά έντονες ανακλάσεις οι οποίες ξεχωρίζουν ανεξάρτητα από την φάση, στεγνή ή υγρή, που βρίσκονται. Εμφανής είναι επίσης και η μετατόπιση της ανάκλασης του αέρα (πορτοκαλί βέλη) που οφείλεται φυσικά στις διαφορετικές ταχύτητες. Τέλος, κάτι που αξίζει να σημειωθεί είναι, ότι, λόγω της εφαρμογής μίας και μέσης ταχύτητας το βάθος όλων των στόχων αποκλίνει από το πραγματικό.

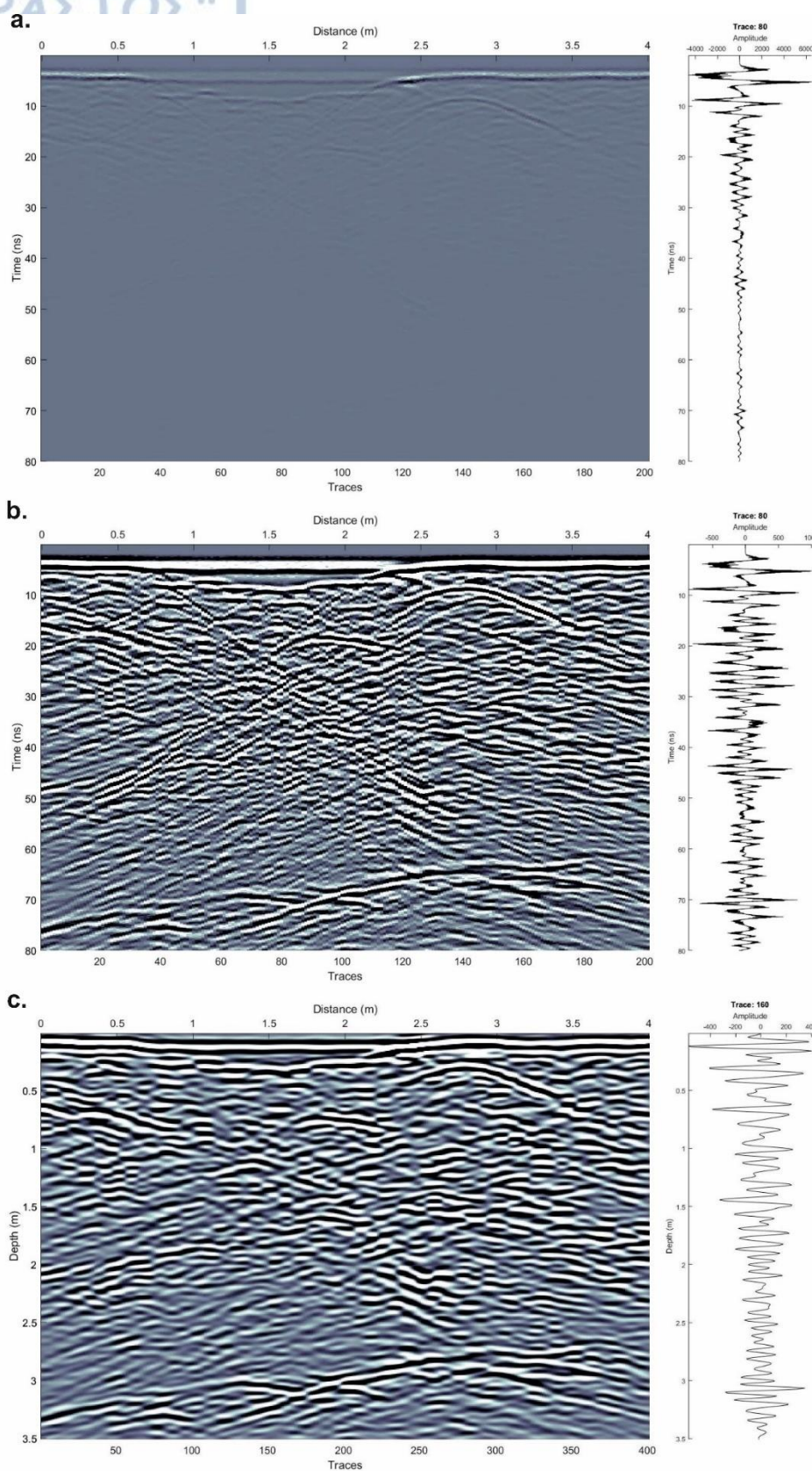
2^ο Μοντέλο

Στα σχήματα 4.20 – 4.22 παρουσιάζονται κατά σειρά το δεύτερο συνθετικό μοντέλο, η τομή γεωραντάρ με την εισαγωγή θορύβου (Σχήμα 4.21a), η τομή με την εφαρμογή χρωματικής και χρονικής ενίσχυσης (Σχήμα 4.21b), η επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ (Σχήμα 4.21c) και το συνδυαστικό σχήμα της τελευταίας με του μοντέλου.

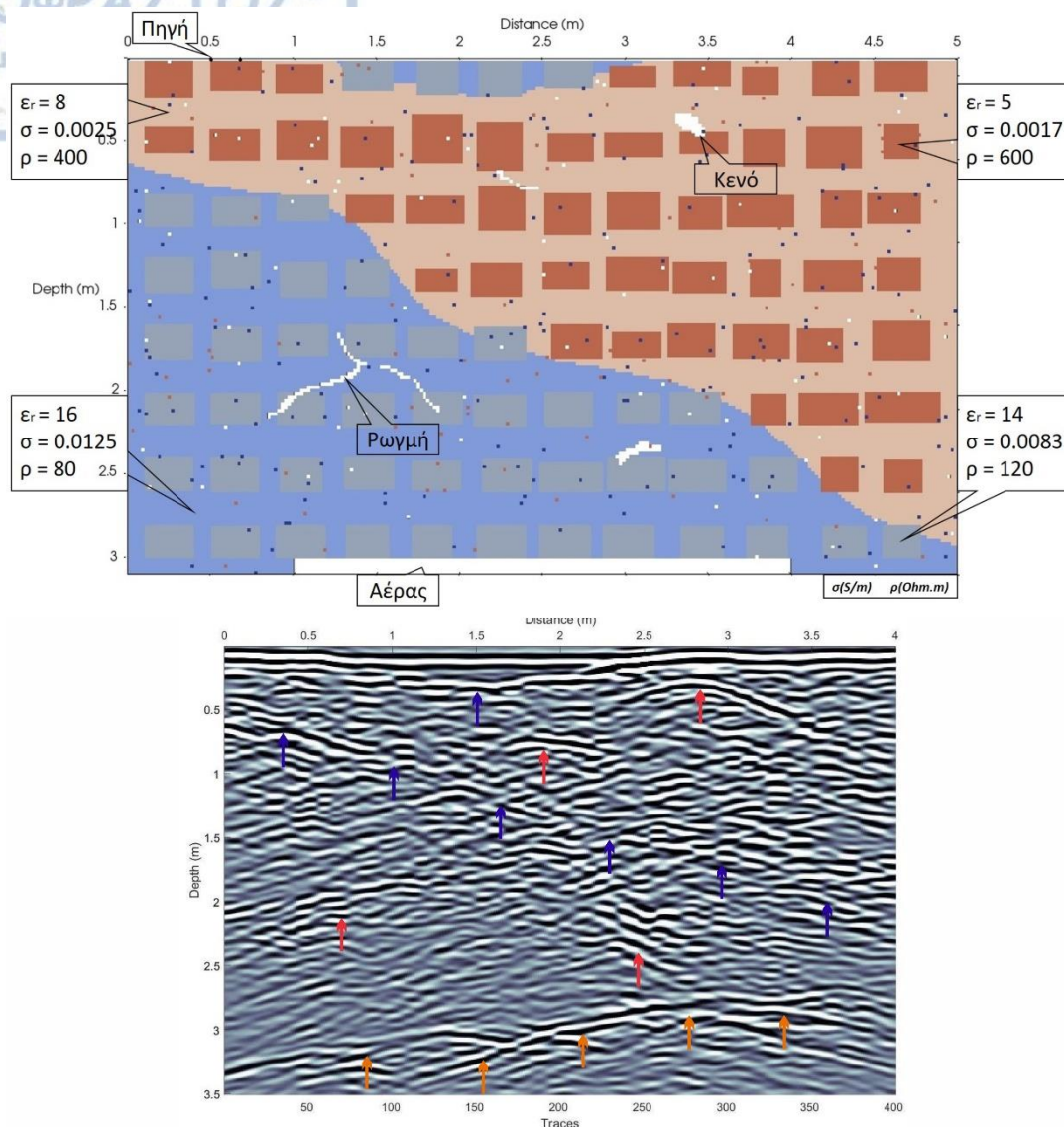
Για την επεξεργασία των δεδομένων ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και εφαρμογή φίλτρων με αυτή του 1^{ου} μοντέλου αλλά φυσικά χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους. Τέλος, η ταχύτητα που χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό της κλίμακας ήταν ίδια (0.09m/ns), δεδομένου του ότι το μοντέλο περιέχει τα ίδια υλικά με το πρώτο αλλά και παρόμοιες εκτάσεις φάσεων (στεγνή – υγρή).



Σχήμα 4.20 Γεωμετρία 2^{ου} μοντέλου.



Σχήμα 4.21 α. Τομή γεωραντάρ με την προσθήκη θορύβου, β. τομή με ενίσχυση, γ. επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ.



Σχήμα 4.22 Επεξεργασμένα δεδομένα σε συνδυασμό με το μοντέλο. Με κόκκινα βέλη σημειώνονται οι ανακλάσεις των ρωγμών – εγκοίλων, με πορτοκαλί η ανάκλαση του αέρα, ενώ με μπλε βέλη οι ανακλάσεις προερχόμενες από την υγρασία.

Παρατηρώντας το σχήμα 4.22 διακρίνεται καθαρά όπως και στην περίπτωση του 1^{ου} μοντέλου η χαρακτηριστική εξασθένηση του σήματος στις περιοχές υγρασίας, ταυτόχρονα όμως με την εμφάνιση ασθενών αλλά ορατών ανακλάσεων στα όρια τους (μπλε βέλη). Τα έγκοιλα – ρωγμές εμφανίζονται για μια ακόμη φορά με έντονες ανακλάσεις ανεξαρτήτου φάσης (στεγνής – υγρής) και σημειώνονται με κόκκινα βέλη. Τέλος όλες οι ανακλάσεις συμπεριλαμβανομένης και αυτής του αέρα (πορτοκαλί βέλη) εμφανίζουν απόκλιση λόγω της μέσης ταχύτητας που επιλέχθηκε για τον μετασχηματισμό των αξόνων από χρόνο σε βάθος.

4.4 Ανάπτυξη βοηθητικών λογισμικών

Η ανάγκη για την δημιουργία όσο το δυνατόν πιο σύνθετων μοντέλων, καθώς και η ανάγκη επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους οδήγησε στην ανάπτυξη δύο προγραμμάτων σε γλώσσα Matlab.

Το 1^ο πρόγραμμα Model Designer είναι σχεδιαστικό και έχει να κάνει με την δημιουργία πολύπλοκων σχημάτων – στόχων μέσα σε ένα μοντέλο, ενώ το 2^ο πρόγραμμα GprPlus είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ.

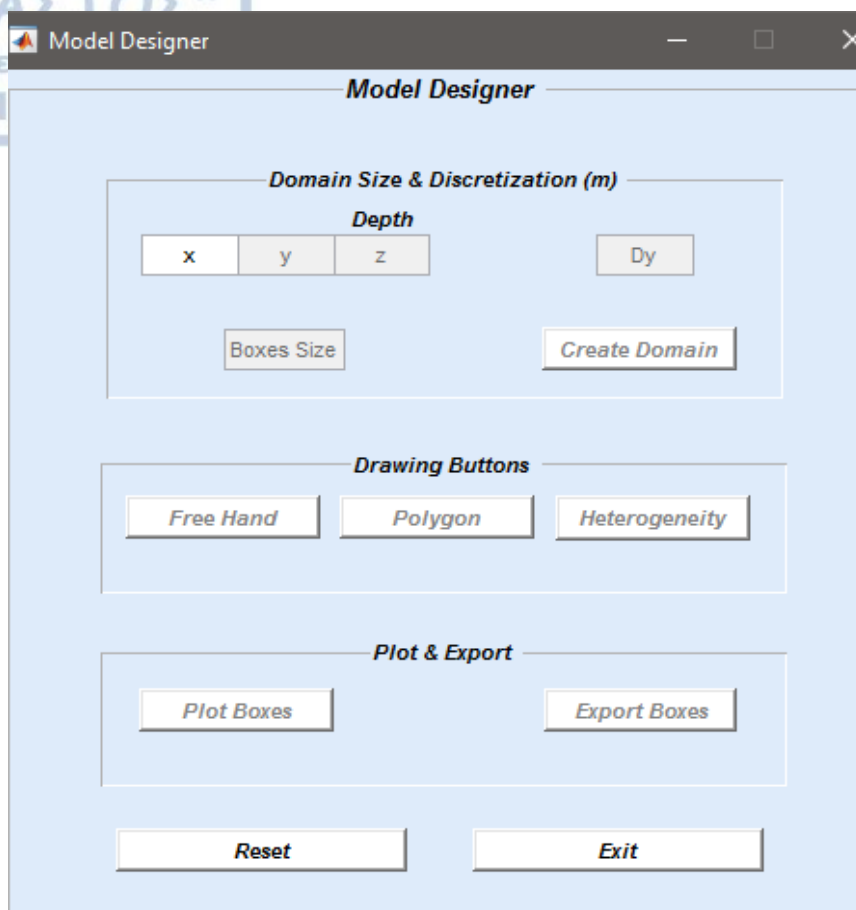
4.4.1 Model Designer

Όπως προειπώθηκε, ο σχεδιασμός μιας δομής – στόχου στο gprMax πραγματοποιείται με την χρήση συντεταγμένων και εντολών (#box, #triangle, #circle κλπ) στο αρχείο εισαγωγής. Ο χρήστης δηλαδή, δημιουργεί ένα αντικείμενο και με συντεταγμένες το τοποθετεί στον χώρο. Τι γίνεται όμως όταν ο στόχος ο οποίος πρέπει να κατασκευαστεί είναι πολύπλοκος σχεδιαστικά;

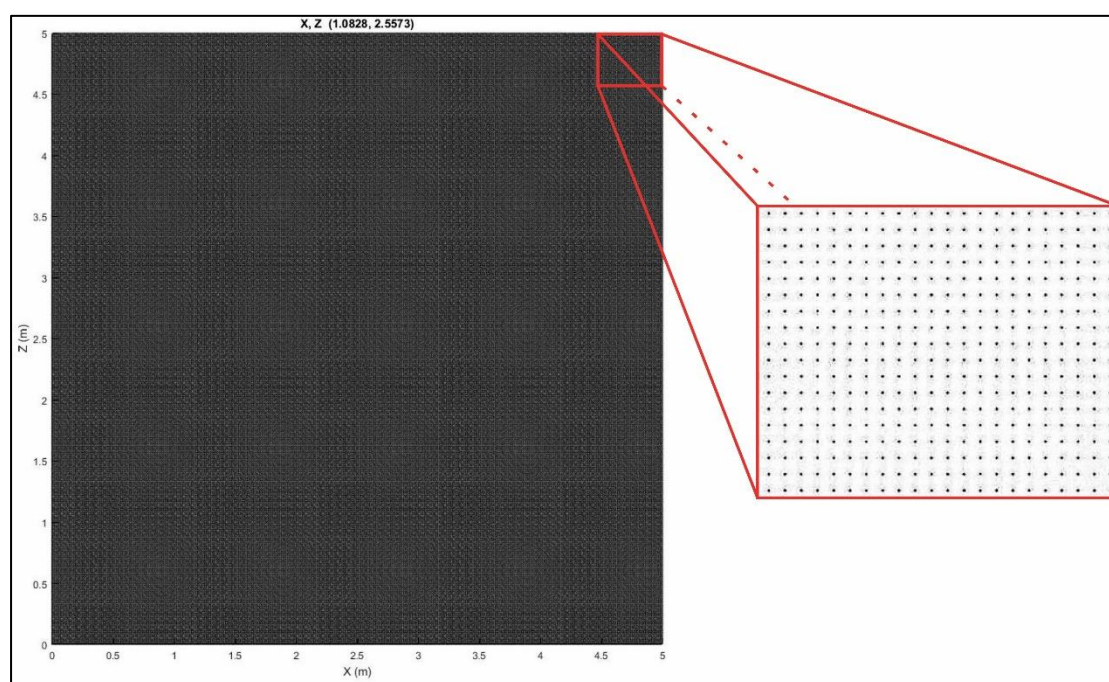
Ένας τρόπος είναι ο συνδυασμός εντολών, ο συνδυασμός πολλών συντεταγμένων και η τοποθέτηση των αντικειμένων (πχ boxes) με την μορφή σκαλοπατιών. Γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητό πως όσο πιο σχεδιαστικά πολύπλοκη είναι η δομή, τόσοσ περισσότερος χρόνος απαιτείται για τον υπολογισμό των συντεταγμένων και την σωστή τοποθέτηση των αντικειμένων. Επίσης με τον τρόπο αυτό η πιθανότητα λάθους είναι ιδιαίτερα αυξημένη και απαιτείται διαρκώς ο έλεγχος της κατασκευής μέσω της εντολής geometry_view αλλά και ξεχωριστού προγράμματος (Paraview).

Για να αποφευχθεί ακριβώς όλη αυτή η χρονοβόρα διαδικασία αλλά και για να επιτευχθεί η δημιουργία οποιουδήποτε σχήματος και σε μια εξομαλυμένη μορφή (smooth), κατασκευάστηκε το πρόγραμμα του σχήματος 4.23.

Ουσιαστικά αυτό που κάνει, είναι, να διακριτοποιεί όλο τον χώρο που χρησιμοποιείται σαν domain στο μοντέλο σε χιλιάδες μικρά κουτιά (Σχήμα 4.24) καθένα εκ των οποίων θα λάβει την επιθυμητή ταυτότητα του υλικού (material id) που έχει δοθεί στο αρχείο εισαγωγής.



Σχήμα 4.23 Επιφάνεια εργασίας λογισμικού Model Designer



Σχήμα 4.24 Διακριτοποίηση του χώρου σε κουτιά.

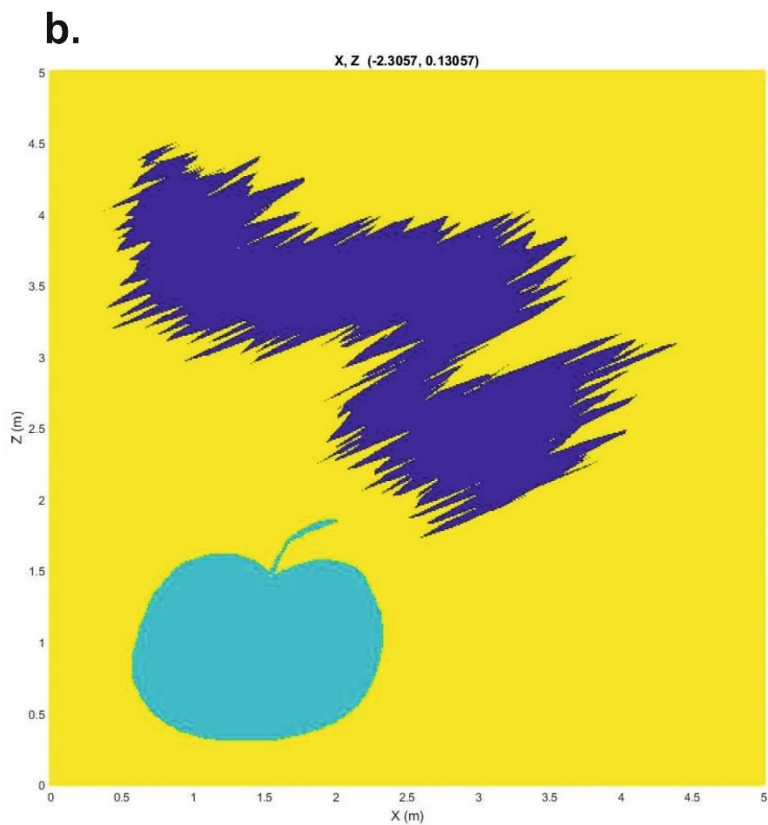
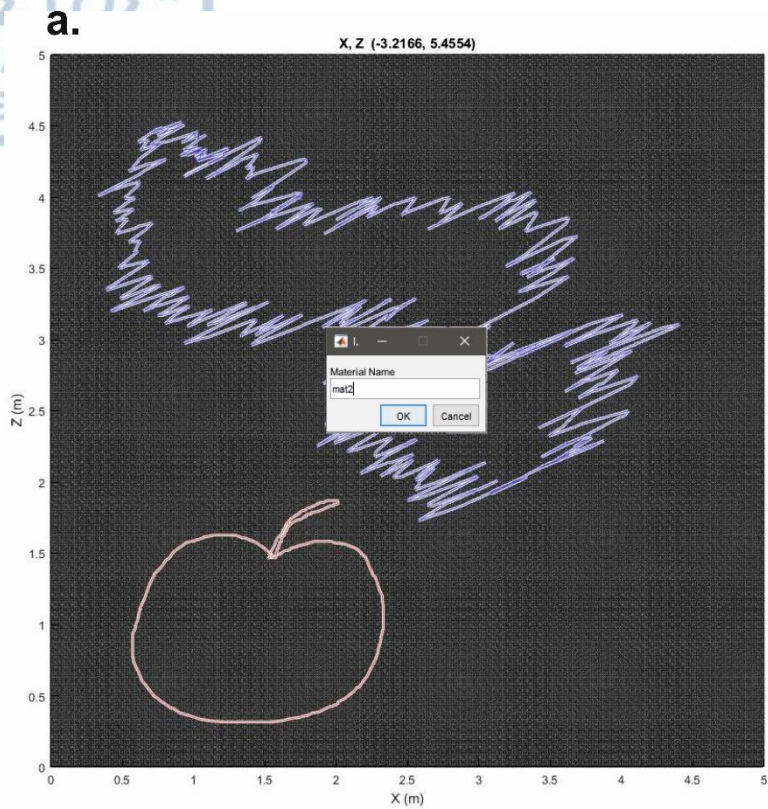
Παράδειγμα κατασκευής σύνθετου μοντέλου

Αφού έχει δημιουργηθεί το αρχείο εισαγωγής του gprMax με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, τοποθετούνται στα πλαίσια του Model Designer οι πληροφορίες x , y , z και Dy . Αυτομάτως από το πρόγραμμα θα υπολογιστεί και το μέγεθος των κουτιών (Boxes Size) το οποίο θα είναι 10 φορές το διάστημα Dy . Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί πιο εξομαλυσμένες δομές (smooth) ή μια πιο αραιή διακριτοποίηση έχει την δυνατότητα να επέμβει και να αλλάξει τον αριθμό αυτό.

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας το κουμπί Create Domain θα δημιουργηθεί ο χώρος της μοντελοποίησης ο οποίος και θα πρέπει να ονομαστεί, να του δοθεί δηλαδή μία ταυτότητα (material id). Πάνω στον χώρο αυτό ο χρήστης, είτε με το κουμπί Free Hand είτε με το Polygon θα μπορέσει να σχεδιάσει και να ταυτοποιήσει στόχους – δομές (Σχήμα 4.25a), ενώ επίσης χρησιμοποιώντας το κουμπί heterogeneity το πρόγραμμα θα ταυτοποιήσει τυχαία κουτιά ζητώντας απλά ένα ποσοστό που σχετίζεται με τον συνολικό αριθμό τους.

Με το κουμπί Plot Boxes δίνεται η δυνατότητα οπτικοποίησης του αποτελέσματος με χρώματα (Σχήμα 4.25b), ενώ τέλος χρησιμοποιώντας το Export Boxes το πρόγραμμα θα δημιουργήσει το αρχείο που θα περιέχει τις συντεταγμένες και την ταυτότητα (Material id) του κάθε κουτιού. Οι πληροφορίες αυτές τοποθετούνται στο αρχείο εισαγωγής του gprMax.

Κλείνοντας, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα έχει και την δυνατότητα κατασκευής τρισδιάστατων δομών την οποία και θα την ανιχνεύσει μόνο του σε περίπτωση που $y > Dy$.



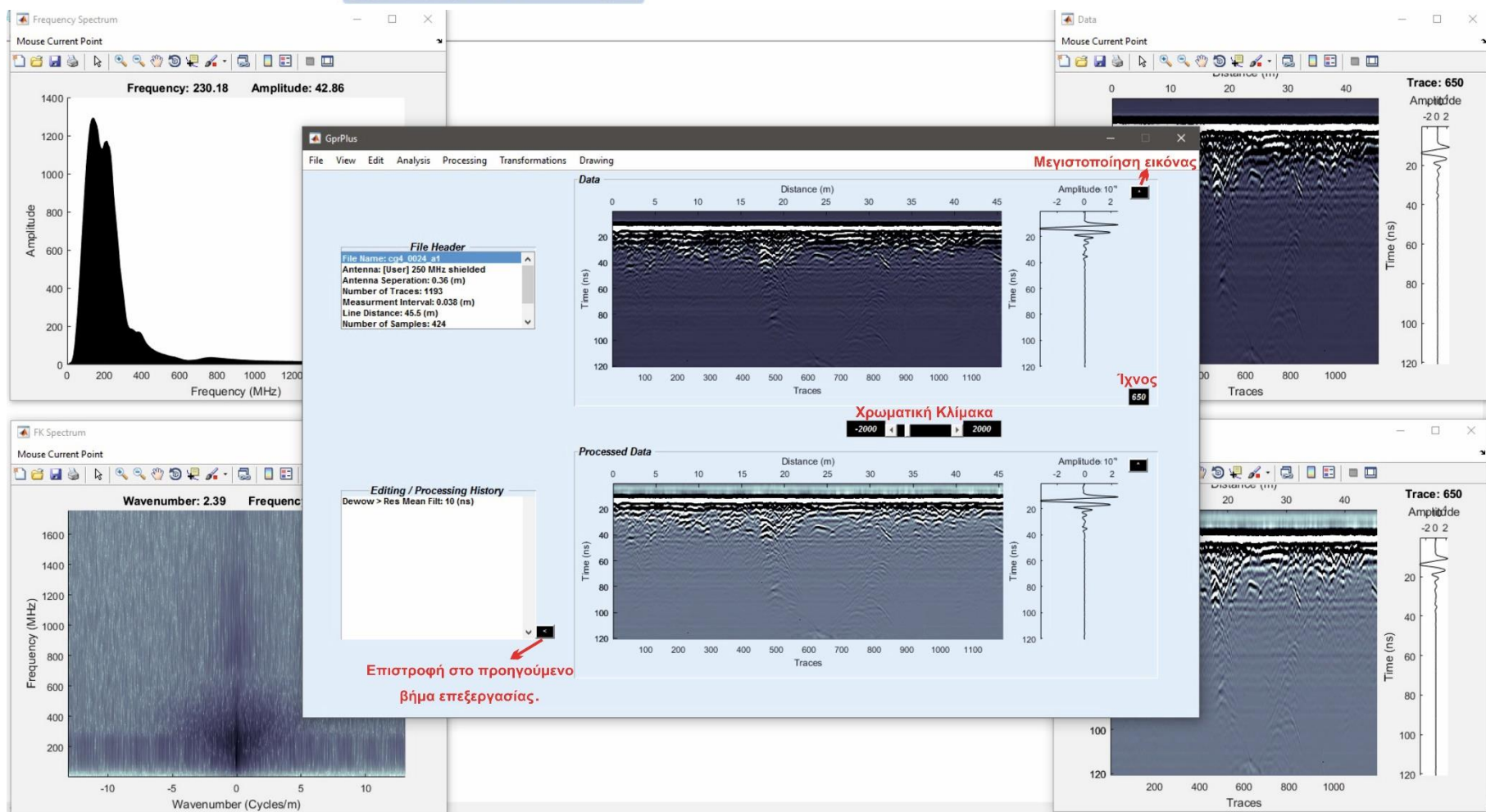
Σχήμα 4.25 *a.* Δημιουργία δομών – στόχων και ταυτοποίηση, *b.* Τελικό αποτέλεσμα με την χρήση του κουμπιού Plot Boxes.

4.4.2 GprPlus

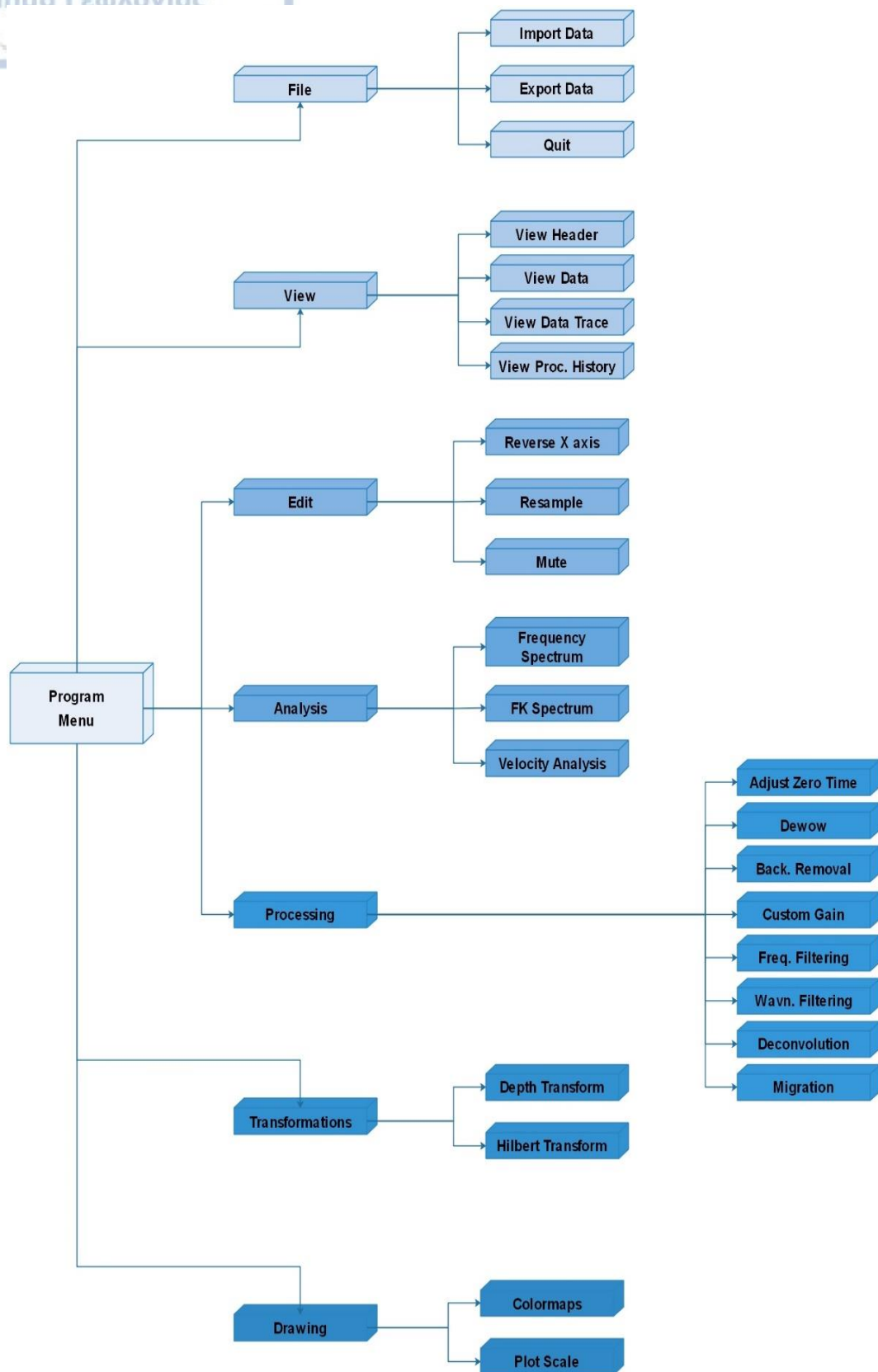
Παραπάνω αναφέρθηκε ότι αποτέλεσμα το οποίο λαμβάνεται μέσω της μοντελοποίησης με το gprMax βρίσκεται μέσα σε αρχεία της μορφής HDF5. Αυτή είναι μία μορφή η οποία δεν είναι συμβατή με τα προγράμματα επεξεργασίας. Επίσης η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με την χρήση εντολών και ο χρήστης δεν έχει την δυνατότητα να επέμβει στον τρόπο με τον οποίο αυτή γίνεται (χρώματα, χρωματική κλίμακα, συνδυαστική απεικόνιση A και Bscan, κλπ).

Έτσι η ανάγκη για επεξεργασία των αποτελεσμάτων αλλά και για επέμβαση στον τρόπο με τον οποίο απεικονίζονται, οδήγησε αρχικά στην δημιουργία ενός προγράμματος οπτικοποίησης τους αλλά και μετατροπής της μορφής του αρχείου σε μία μορφή συμβατή με τα προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ (Rd3 / Rad). Εν συνεχεία διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν προοπτικές για την ανάπτυξη πολύπλοκων αλγορίθμων και έτσι γεννήθηκε η ιδέα της δημιουργίας ενός προγράμματος, μέσα από το οποίο ο καθένας θα μπορούσε να επεξεργαστεί τα δεδομένα του γεωραντάρ, είτε αυτά προέρχονταν από το gprMax, είτε από πραγματικές μετρήσεις. Το GprPlus λοιπόν, είναι ένα πρόγραμμα κατασκευασμένο σε γλώσσα Matlab, με γραφικό περιβάλλον (Σχήμα 4.26), το οποίο διαβάζει, οπτικοποιεί και επεξεργάζεται δεδομένα τα οποία προέρχονται, τόσο από την επίλυση του ευθέος προβλήματος, όσο και από δεδομένα μετρήσεων υπαίθρου. Περιλαμβάνει διάφορους αλγορίθμους που αφορούν την ανάλυση, προ επεξεργασία – διόρθωση αλλά και επεξεργασία των δεδομένων (Σχήμα 4.27), ενώ η μορφή και ο τρόπος κατασκευής του επιτρέπει την συνεχή βελτίωση του.

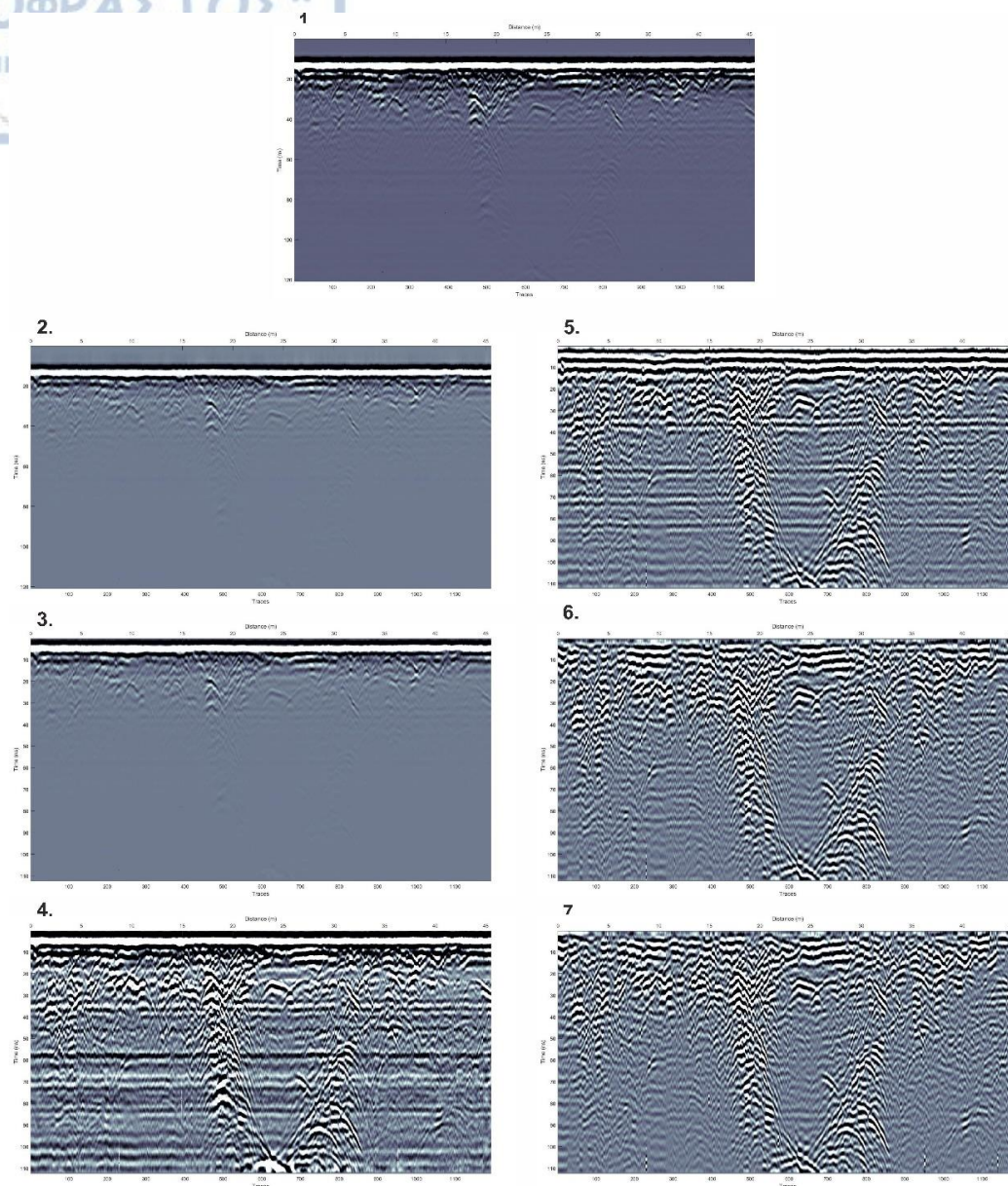
Στην συνέχεια και συγκεκριμένα στα σχήματα 4.28 και 4.29 παρουσιάζονται και δύο παραδείγματα από την επεξεργασία με το πρόγραμμα. Το πρώτο αφορά την επεξεργασία δεδομένων υπαίθρου, ενώ το δεύτερο την επεξεργασία δεδομένων προερχόμενων από μοντελοποίηση.



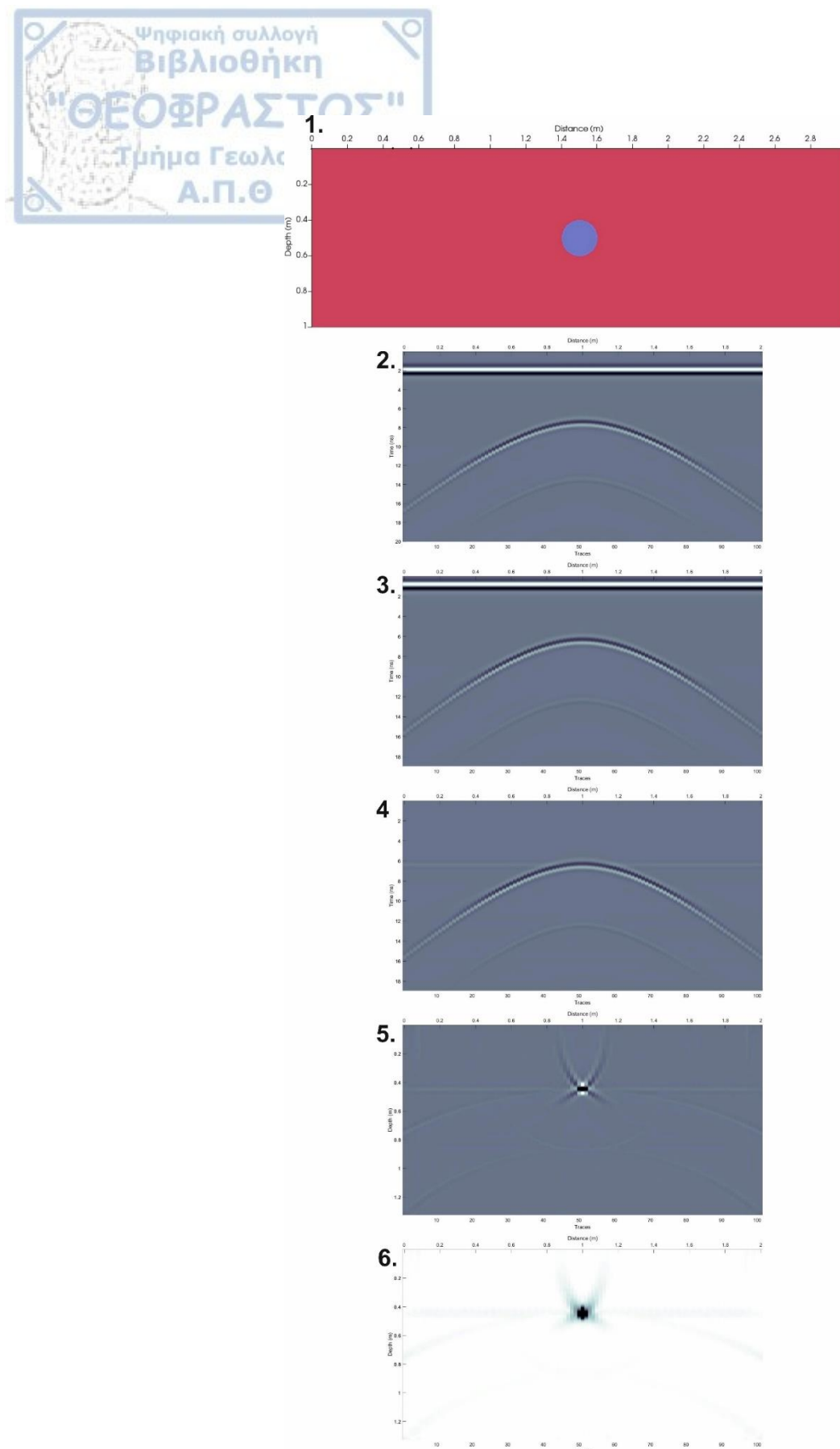
Σχήμα 4.26 Επιφάνεια εργασίας του προγράμματος. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι λειτουργίες διάφορων κουμπιών.



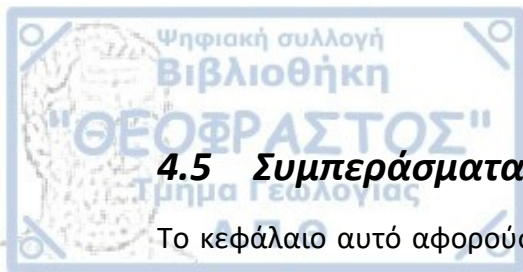
Σχήμα 4.27 Menu του προγράμματος.



Σχήμα 4.28 Επεξεργασία δεδομένων υπαίθρου. 1. Ανεπεξέργαστα δεδομένα, 2. απομάκρυνση επαγωγικής συνιστώσας, 3. διόρθωση του χρόνου πρώτης άφιξης, 4. χρονική ενίσχυση, 5. φιλτράρισμα στο πεδίο των συχνοτήτων, 6 απομάκρυνση θορύβου υποβάθρου, 6 φιλτράρισμα στο πεδίο των κυματαρίθμων.



Σχήμα 4.29 Επεξεργασία δεδομένων grtMax. 1. Μοντέλο σωλήνα σε ημιχώρο, 2. Αποτέλεσμα, 3. διόρθωση του χρόνου άφιξης, 4. απομάκρυνση θορύβου υποβάθρου, 5. χωροθέτηση, 6. μετασχηματισμός Hilbert (στιγμιαίο πλάτος).



4.5 Συμπεράσματα

Το κεφάλαιο αυτό αφορούσε στην μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ η οποία και πραγματοποιήθηκε πριν από την λήψη των πραγματικών μετρήσεων στην περιοχή του Επταπυργίου.

Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό grgMax μέσα από το οποίο δημιουργήθηκαν εκτός από τα παραπάνω μοντέλα αρκετά περισσότερα τα οποία βοήθησαν στην εξοικείωση με τα δεδομένα του γεωραντάρ έχοντας έτσι έναν εκπαιδευτικό σκοπό.

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν παραπάνω, τα αποτελέσματα τους χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των μετρήσεων υπαίθρου, ενώ ταυτόχρονα αποτέλεσαν και έναν χρήσιμο βοηθό για την καλύτερη ερμηνεία των δεδομένων, όπως θα γίνει εμφανές και στο επόμενο κεφάλαιο.

Τα δύο προγράμματα τα οποία κατασκευάστηκαν, βοήθησαν στο η παραπάνω διεργασία να προχωρήσει ένα βήμα παρακάτω με την δημιουργία πολυπλοκότερων μοντέλων, καθώς και με την δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους.

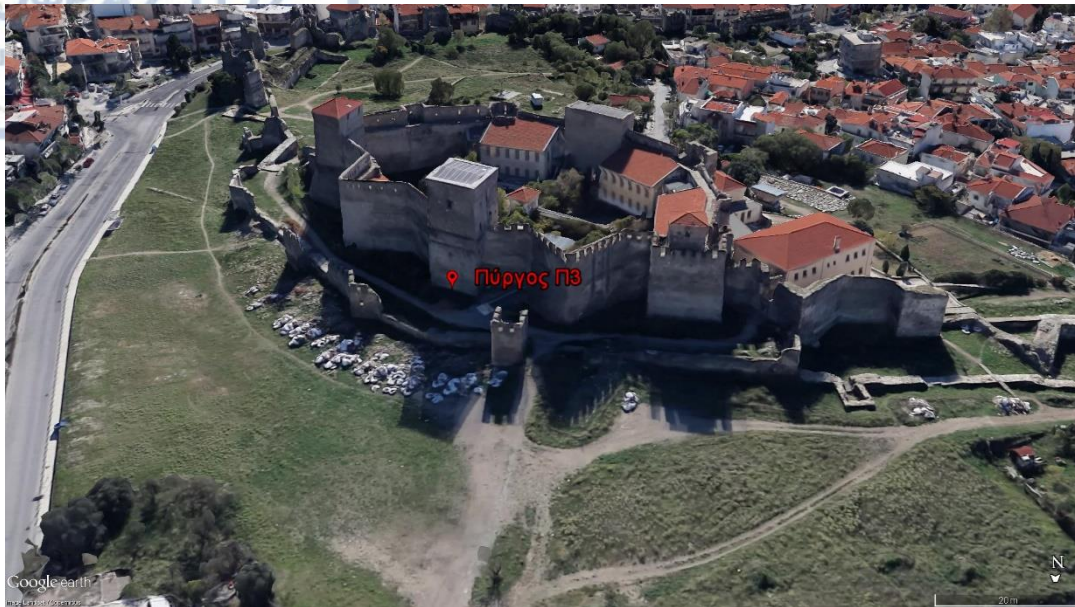


ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΕΠΤΑΠΥΡΓΙΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η εφαρμογή των μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή του Επταπυργίου. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι ξεχωριστά οι θέσεις έρευνας, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων, ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων και φυσικά τα αποτελέσματα μαζί με την ερμηνεία τους.

5.1 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε τοίχους (Πύργος Π3)

Την πρώτη θέση έρευνας αποτέλεσε ένα τμήμα του εξωτερικού τείχους του πύργου Π3 (Σχήμα 5.1). Σκοπός ήταν ο έλεγχος αυτού για υγρασία, για εσωτερικά δομικά προβλήματα αλλά και η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας προηγούμενων εργασιών αποκατάστασης. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στις 25 Νοεμβρίου 2016 και οι μέθοδοι – τεχνικές οι οποίες εφαρμόστηκαν ήταν αυτή του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας.



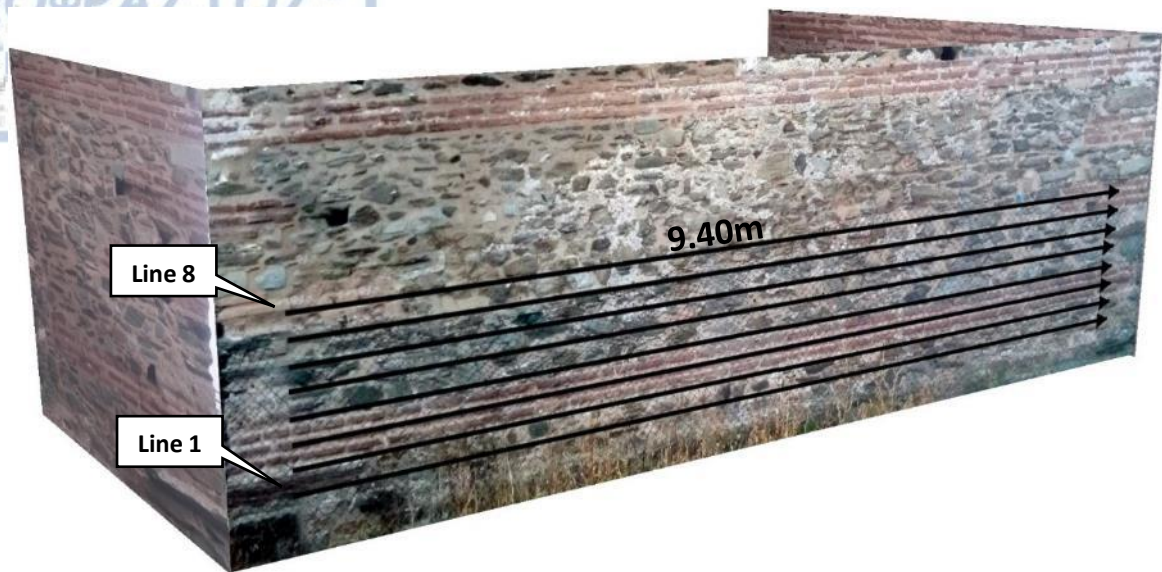
Σχήμα 5.1 Περιοχή έρευνας, εξωτερικός τοίχος πύργου Π3 (google earth).

5.1.1 Εφαρμογή γεωραντάρ

5.1.1.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Για την λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν 8 παράλληλα προφίλ με το πρώτο να ξεκινά στα 0.5μ από το έδαφος και τα μεταξύ τους διαστήματα να κυμαίνονται στα 0.2μ. Όλες οι αποστάσεις κατά μήκος των γραμμών καταγράφηκαν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας μετροταινίες, ενώ για την διευκόλυνση των μετρήσεων, αλλά και την αποφυγή λαθών κατασκευάστηκε ένα πλέγμα με σχοινιά. Τέλος κάθε γραμμή προφίλ ξεκινούσε και τελείωνε στα 0.4μ περίπου από τις άκρες τοίχου (Σχήμα 5.2).

Όσον αφορά τον εξοπλισμό, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα γεωραντάρ της MALA με την θωρακισμένη κεραία κεντρικής συχνότητας 500MHz, καθώς θεωρήθηκε μια καλή και μέση λύση μεταξύ διεισδυτικής και διακριτικής ικανότητας. Παρ' όλα αυτά, σε δύο προφίλ και συγκεκριμένα στην γραμμή 4 και 6 χρησιμοποιήθηκε και κεραία των 250MHz για σύγκριση των δεδομένων αλλά και την επίτευξη μεγαλύτερου βάθους διασκόπησης (Σχήμα 5.3). Το βήμα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 0.04μ και για τις δύο κεραίες, ενώ το χρονικό παράθυρο στα 70 και 95 νανοδευτερόλεπτα αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση του τοίχου. Με μαύρα βέλη σημειώνονται από κάτω προς τα επάνω τα προφίλ 1 – 8.



Σχήμα 5.3 Αριστερά συλλογή δεδομένων με την κεραία 500MHz της MALA, δεξιά κεραία των 250 MHz.

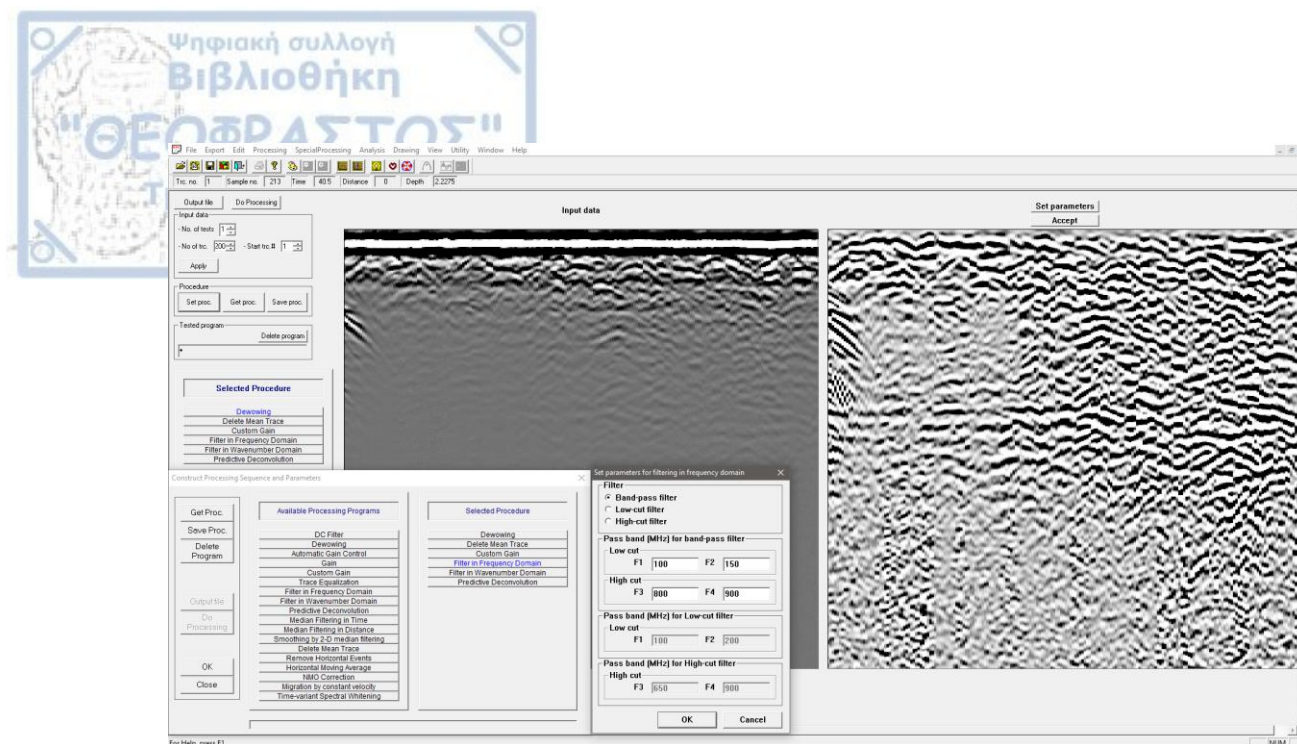
5.1.1.2 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RADPROfWin (Kim, 2004) το οποίο παρέχει διάφορες τεχνικές για την απεικόνιση, ανάλυση, αλλά και επεξεργασία των δεδομένων. Μεγάλο του πλεονέκτημα και το οποίο αξίζει να αναφερθεί, είναι ότι εκτός από το πλήθος των τεχνικών και φίλτρων που περιλαμβάνει, παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον το οποίο είναι άκρως φιλικό προς τον χρήστη (Σχήμα 5.4).

Αρχικά και σε όλα τα προφίλ εφαρμόστηκε διόρθωση του χρόνου πρώτης άφιξης (**Zero time adjustment**), απομάκρυνση της επαγωγικής συνιστώσας (**dewow**), καθώς και αφαίρεση του θορύβου υποβάθρου (**Background removal**). Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε χρονική ενίσχυση των δεδομένων (**Custom time gain**), φιλτράρισμα στο πεδίο το συχνοτήτων (**Frequency filtering**), στο πεδίο των κυματαριθμών (**Wavenumber filtering**), καθώς και αποσυνέλιξη (**Deconvolution**), ενώ τελικό στάδιο της επεξεργασίας αποτέλεσε η παρεμβολή μεταξύ των ιχνών (**Trace interpolation**), μαζί με την αποκοπή (**Data editing**) των δεδομένων στα 60 (500MHz) και 80 (250MHz) νανοδευτερόλεπτα.

Επίσης, για την καλύτερη απεικόνιση των περιοχών υγρασίας εφαρμόστηκε στα επεξεργασμένα δεδομένα και ο μετασχηματισμός Hilbert (**Hilbert Transform**) για την εύρεση του στιγμιαίου πλάτους. Ο μετασχηματισμός αυτός παράγει τομές γεωραντάρ χωρίς αρνητικές τιμές και για αυτό τον λόγο θεωρήθηκε κατάλληλος για την παρουσίαση περιοχών με διαφορετική ισχύ ανακλάσεων (πχ στεγνή – υγρή φάση τοίχου).

Εξαιτίας της απουσίας υπερβολών, καθώς και στόχων γνωστού βάθους (πχ ανάκλαση αέρα από την απέναντι πλευρά), η ανάλυση των ταχυτήτων ήταν εξαιρετικά δύσκολη. Για τον λόγο αυτό και για την μετατροπή του άξονα των χρόνων σε βάθος πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή σε ένα κοντινό τοίχο, μικρού πάχους και ίδιας κατασκευής υλικών. Για την δοκιμή τοποθετήθηκε μεταλλική πλάκα πίσω από τον τοίχο του οποίου το πάχος ήταν εύκολο να προσδιοριστεί και έτσι υπολογίστηκε η ταχύτητα στα 0.11m/ns.

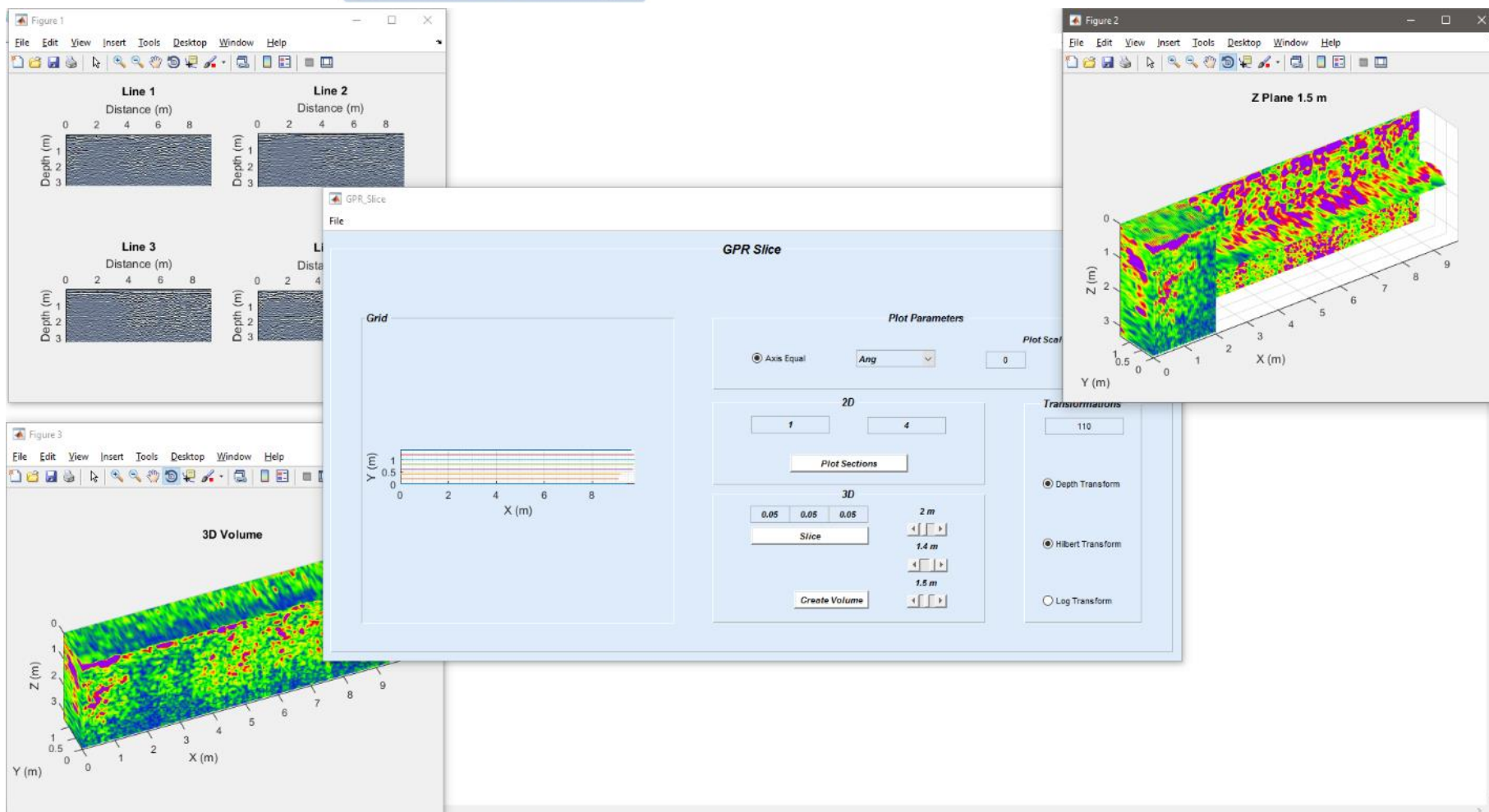


Σχήμα 5.4 Επεξεργασία δεδομένων με το RADPROfWin.

Η δημιουργία αλλά και απεικόνιση των τρισδιάστατων δεδομένων επιτεύχθηκε με την κατασκευή ενός προγράμματος σε γλώσσα Matlab, του GPR Slice (Σχήμα 5.5). Το πρόγραμμα πραγματοποιεί συνένωση των τομών γεωραντάρ, δημιουργώντας έτσι με παρεμβολή τρισδιάστατα δεδομένα της μορφής xyz. Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία του είναι εκτός φυσικά από τα δισδιάστατα δεδομένα και ένα αρχείο το οποίο θα περιέχει τις πληροφορίες – συντεταγμένες της κάθε τομής ξεχωριστά στον χώρο.

Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται με την ανάγνωση του αρχείου πληροφοριών και όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, ο χρήστης έχει την δυνατότητα απεικόνισης των τομών γεωραντάρ, τομών σε όλα τα επίπεδα (x, y, z plane), αλλά και όλου του όγκου των δεδομένων (Volume). Επίσης δίνεται και η δυνατότητα εξαγωγής τους σε μορφή xyz για την οπτικοποίηση τους σε άλλα προγράμματα.

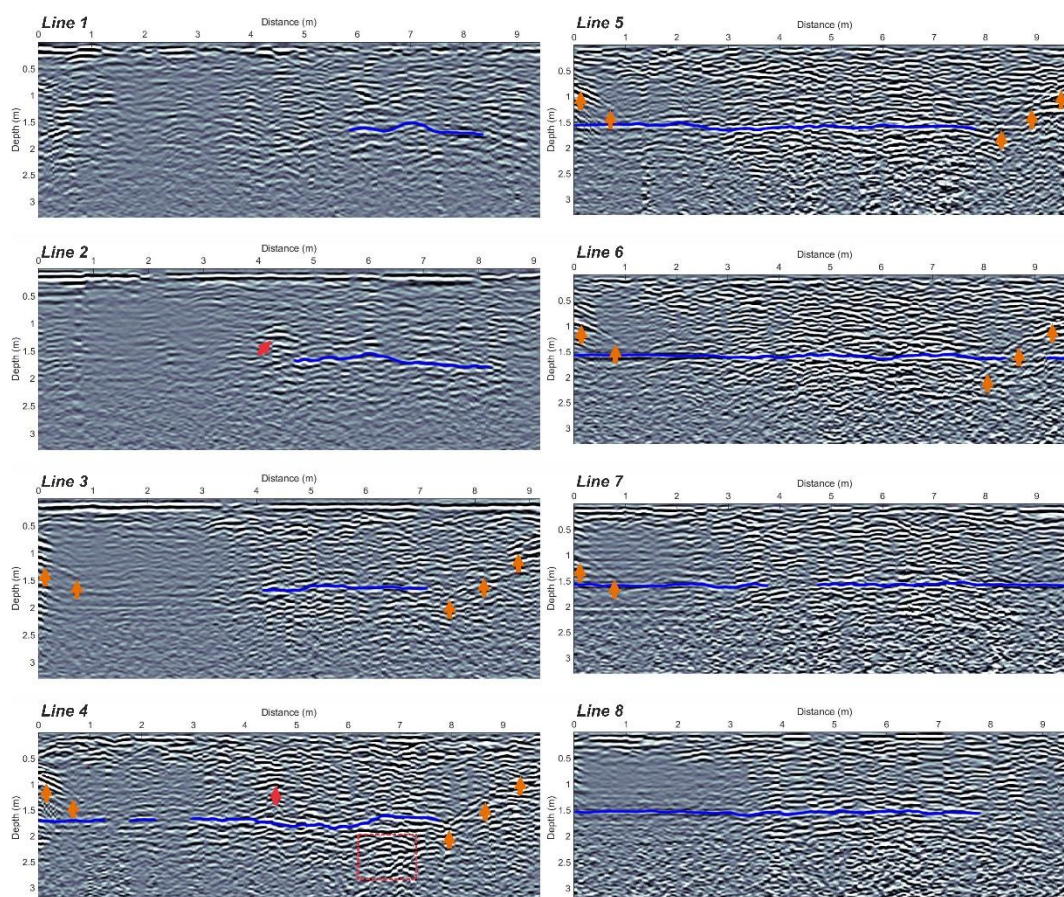
Στο GPR Slice εισήχθησαν οι επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ και αποφασίστηκε να εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός Hilbert, θεωρώντας ότι είναι ο κατάλληλος για να δώσει σε τρισδιάστατη μορφή τις διαφορετικές φάσεις του τοίχου.



Σχήμα 5.5 Επιφάνεια εργασίας του προγράμματος.

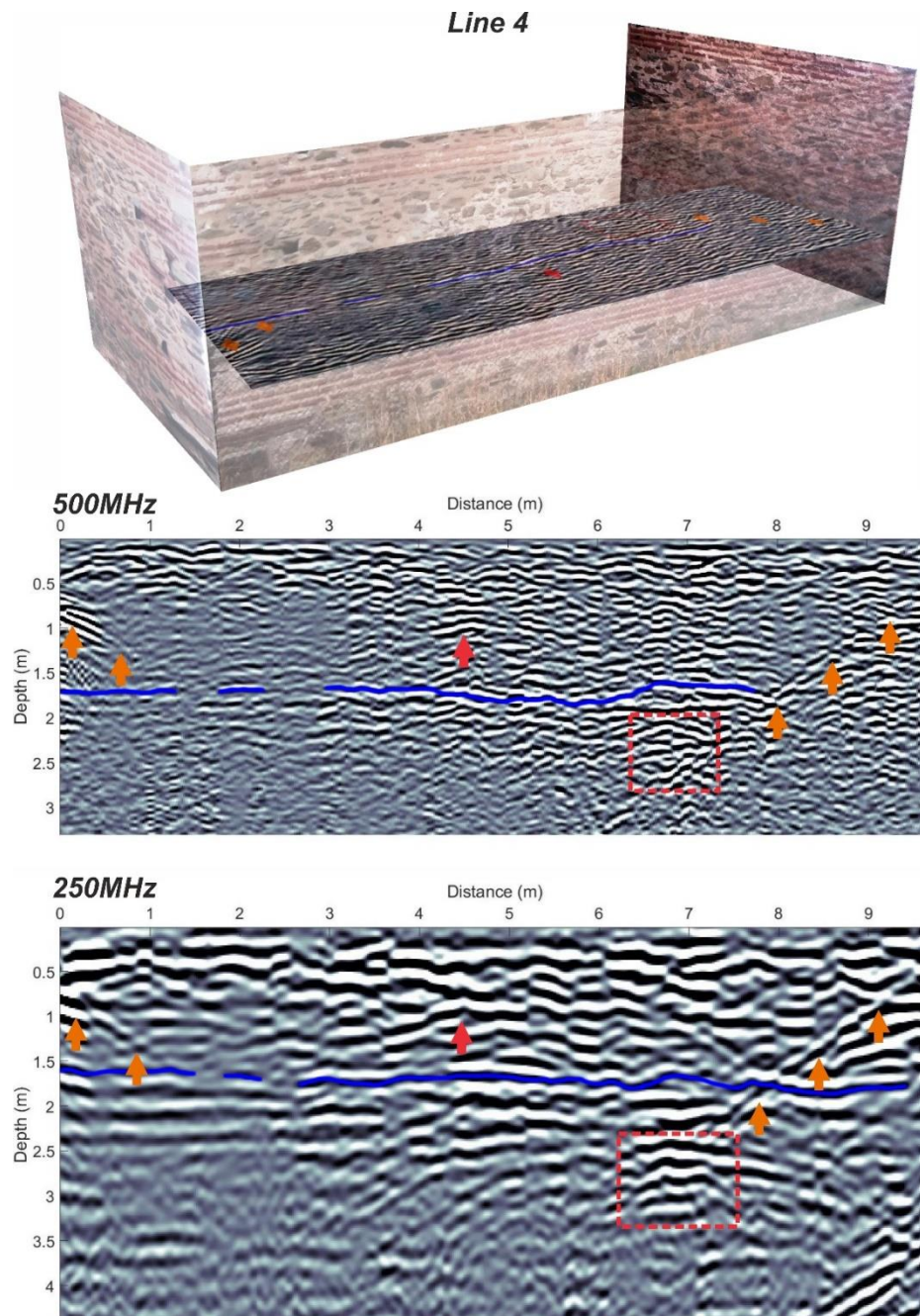
5.1.1.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.6) παρουσιάζονται οι επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ από τον πύργο Π3 του Επταπυργίου. Όπως παρατηρείται σε όλες τις τομές και στο βάθος των 1.5 – 1.8μ εμφανίζεται μία ισχυρή ανάκλαση η οποία έχει σημειωθεί με μπλε χρώμα. Η ανάκλαση αυτή φαίνεται να αποτελεί μία επιφάνεια και πιθανότατα σχετίζεται με μία διαφορετική φάση κατασκευής του πύργου όπως συνάγεται και από ιστορικά στοιχεία. Με κόκκινα βέλη έχουν σημειωθεί οι πιθανές ρωγμές στο εσωτερικό του τοίχου των οποίων οι ανακλάσεις ήταν αρκετά ισχυρές και εμφανείς από τα αρχικά στάδια της επεξεργασίας. Ακόμα στην 4^η κατά σειρά τομή και μέσα σε ένα κόκκινο τετράγωνο επισημαίνεται μία περιοχή έντονων ανακλάσεων και πιθανά διαταραγμένη. Τέλος μαρκαρισμένες με πορτοκαλί βέλη και παρούσες στις περισσότερες τομές είναι οι πλευρικές ανακλάσεις του αέρα.



Σχήμα 5.6 Επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ πύργου Π3 οι οποίες δείχνουν την δεύτερη φάση του τοίχου (μπλε), τις πιθανές ρωγμές (κόκκινο), καθώς και τις πλευρικές ανακλάσεις του αέρα (πορτοκαλί).

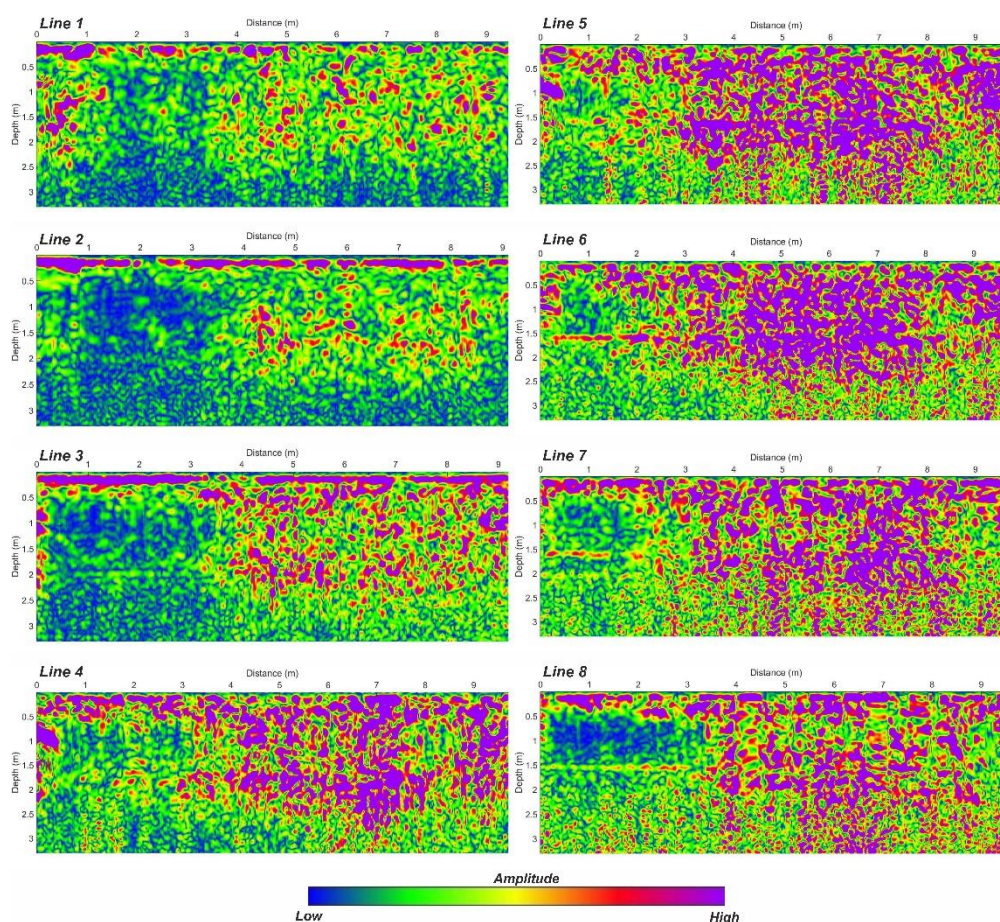
Στο σχήμα 5.7 απεικονίζεται το αποτέλεσμα της 4 γραμμής που όπως έχει προαναφερθεί σαρώθηκε τόσο με την κεραία των 500 όσο και με τον 250MHz. Φαίνεται να υπάρχει μία καλή συμφωνία μεταξύ των δύο τομών παρά την αναμενόμενη διαφορά στην διακριτική ικανότητα.



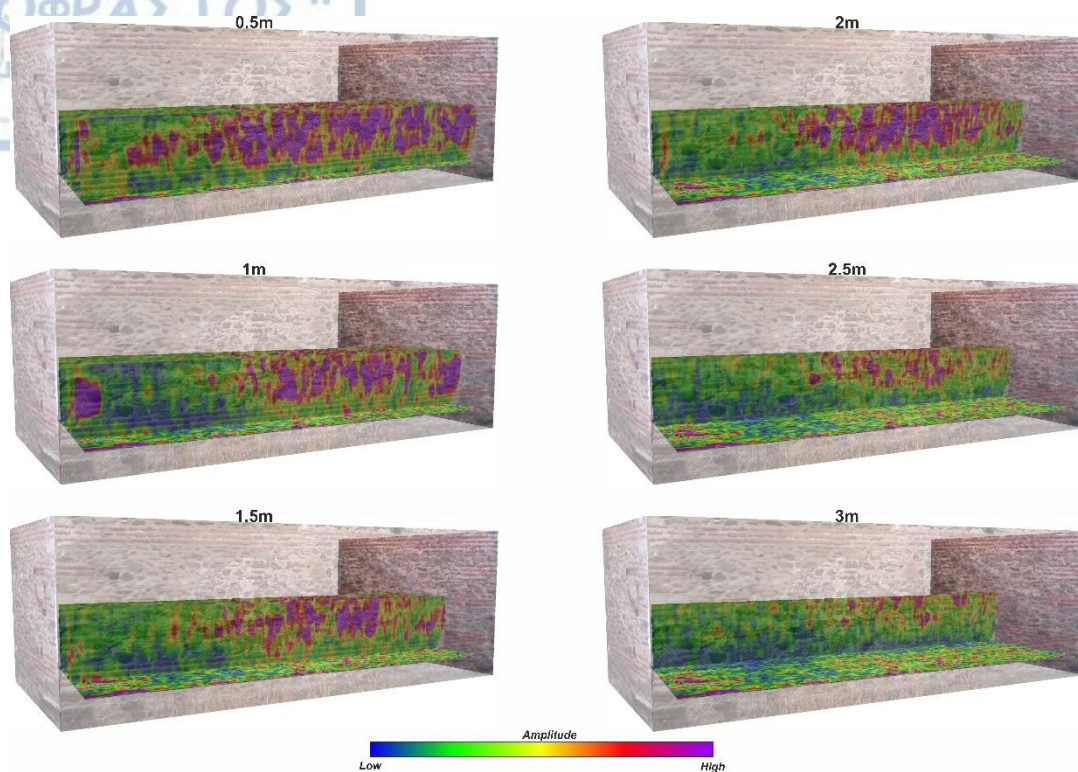
Σχήμα 5.7 Από πάνω προς τα κάτω: Τρισδιάστατη απεικόνιση του τοίχου με την 4^η τομή γεωραντάρ, επεξεργασμένη τομή των 500MHz και των 250MHz.

Στην ενότητα της επεξεργασίας αναφέρθηκε ότι εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός Hilbert με στόχο την εύρεση και απεικόνιση του στιγμιαίου πλάτους, καθώς έτσι θα μπορούσαν να αποτυπωθούν καλύτερα περιοχές με ισχυρές ή μη ισχυρές ανακλάσεις, ουσιαστικά οι περιοχές υγρασίας. Έτσι στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι μετασχηματισμένες τομές γεωραντάρ (Σχήμα 5.8), οι οριζόντιες τομές (Depth slices) στα 0.5 – 3μ και με βήμα 0.5μ (Σχήμα 5.9) και τέλος μια τρισδιάστατη απεικόνιση των περιοχών με υψηλή ηλεκτρομαγνητική εξασθένιση - χαμηλό σήμα (Σχήμα 5.10).

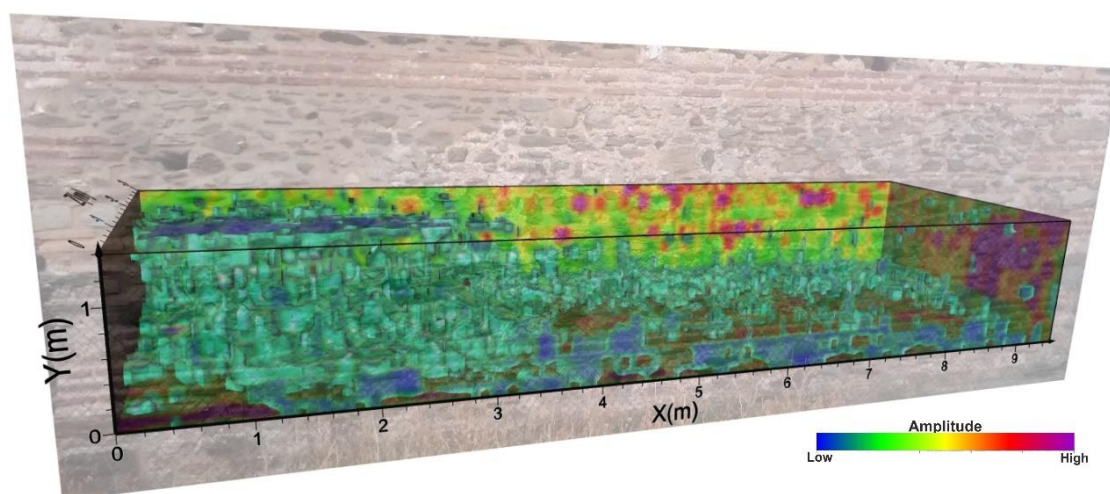
Όλα τα σχήματα δείχνουν πολύ καθαρά τις περιοχές υγρασίας οι οποίες παρουσιάζονται με ψυχρά χρώματα (μπλε – πράσινο) και κυριαρχούν στο αριστερό και ανατολικό τμήμα του τοίχου, ενώ φαίνεται το μεγαλύτερο ποσοστό τους να συσσωρεύεται στο κάτω μέρος, δηλαδή κοντά στο επίπεδο του εδάφους.



Σχήμα 5.8 Μετασχηματισμένες τομές γεωραντάρ. Με μπλε – πράσινο χρώμα οι περιοχές υγρασίας.



Σχήμα 5.9 Οριζόντιες μετασχηματισμένες τομές (Depth slices) από 0.5μ – 3μ και με βήμα 0.5μ. Με μπλε – πράσινο χρώμα οι περιοχές υγρασίας.



Σχήμα 5.10 Απεικόνιση της υγρασίας με την μορφή ισοεπιφάνειας (πράσινο χρώμα).

5.1.1.4 Μοντελοποίηση για την επιβεβαίωση της ερμηνείας

Στο 3^ο κεφάλαιο δημιουργήθηκαν και παρουσιάστηκαν μοντέλα τοίχων με υγρασία και ρωγμές τα αποτελέσματα των οποίων βοήθησαν σημαντικά στην επεξεργασία, αλλά και την ερμηνεία των δεδομένων υπαίθρου. Παρ' όλα αυτά παρατηρήθηκαν και κάποιες διαφορές πέρα από τις αναμενόμενες, καθώς και νέα στοιχεία τα οποία δημιούργησαν ερωτήματα που έπρεπε να απαντηθούν.

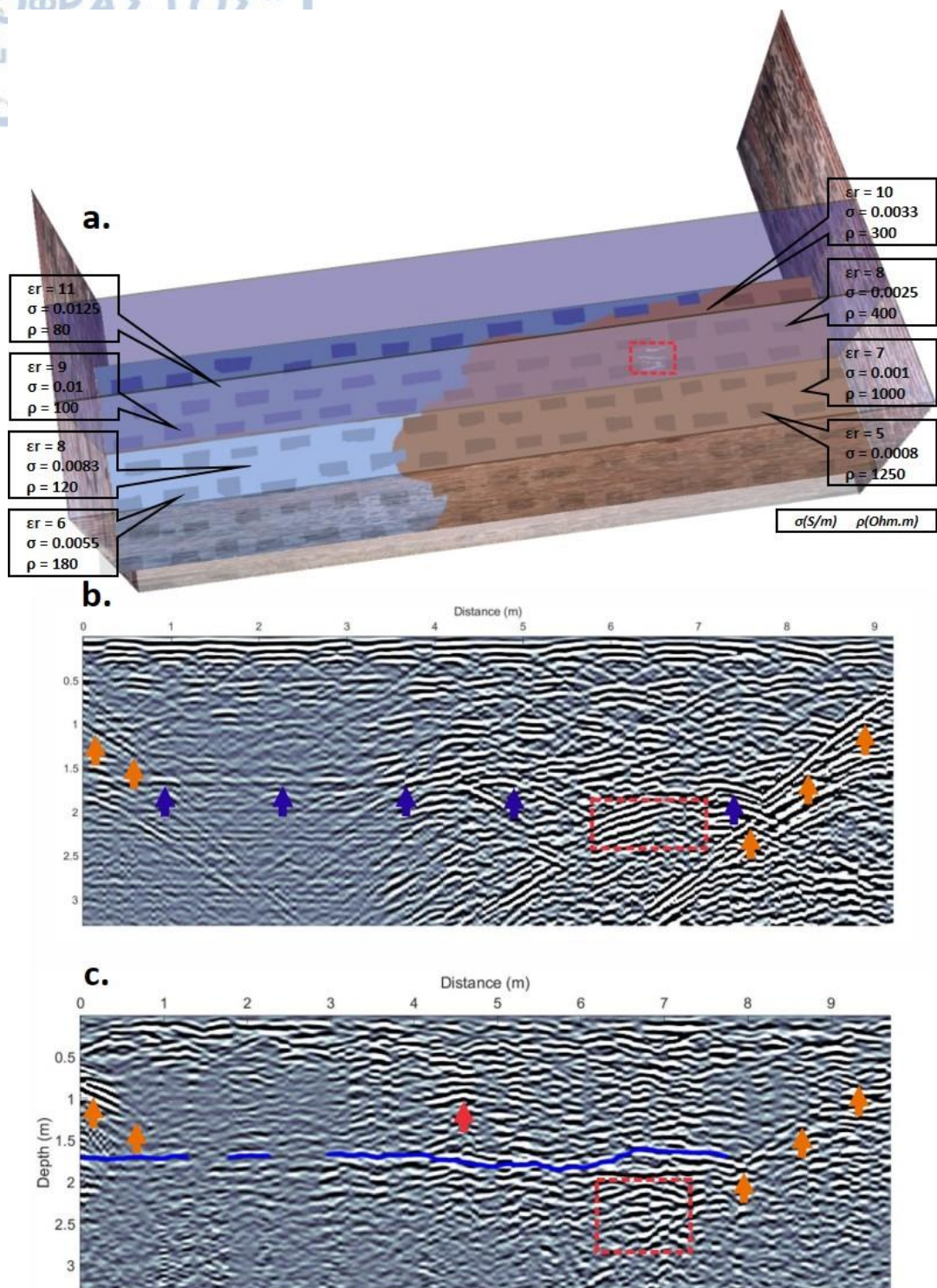
Από την σύγκριση συνθετικών – πραγματικών δεδομένων είναι εμφανείς οι ομοιότητες όσον αφορά τον τρόπο που παρουσιάζεται η υγρασία αλλά και οι ρωγμές. Δημιουργείται όμως ένα βασικό ερώτημα για το αν θα έπρεπε η ισχυρή οριζόντια ανάκλαση που ερμηνεύεται στον τοίχο του Επταπυργίου ως μια διαφορετική φάση, να παρουσιάζει ένα είδος καμπυλότητας ή έστω μια μικρή κλίση στην περιοχή υγρασίας. Υπενθυμίζεται ότι αντίστοιχη περίπτωση στα συνθετικά δεδομένα αποτελούσε η ανάκλαση του αέρα.

Η συμπεριφορά που παρατηρήθηκε ερμηνεύεται με την παραδοχή ότι στον τοίχο του Επταπυργίου και στην υγρή φάση ο παράγοντας που παίζει τον σημαντικότερο ρόλο είναι η αγωγιμότητα και όχι τόσο η διηλεκτρική σταθερά. Για την αποδοχή όμως της παραδοχής αυτής, αλλά και ταυτόχρονα για την επιβεβαίωση πως οι ανακλάσεις οι οποίες παρουσιάζονταν πλευρικά οφειλόταν στον αέρα, ήταν αναγκαία η δημιουργία ενός νέου μοντέλου. Το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε με τις ακριβείς διαστάσεις και σχήμα του υπό έρευνα τοίχου, ενώ σαν οδηγοί χρησιμοποιήθηκαν τόσο τα αποτελέσματα της έρευνας με το γεωραντάρ, όσο και αυτά των ηλεκτρικών τομογραφιών. Οι πληροφορίες του παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πηγή (MHz)	500			
Χώρος xyz (m)	11 – 0.004 – 3.2			
Διάστημα δειγματοληψίας (m)	0.04			
Συνολικά ίχνη	231			
Χρονικό παράθυρο (ns)	80			
Υλικά	Ιδιότητες υλικών			
	ϵ_r	$\sigma(S/m)$	$\rho(Ohm.m)$	Χρώμα
Αέρας - Κενό	1	0	∞	
Πάνω δεξιά συνδετικό	7	0.001	1000	
Πάνω δεξιά τούβλο	5	0.0008	1250	
Κάτω δεξιά συνδετικό	10	0.0033	300	
Κάτω δεξιά τούβλο	8	0.0025	400	
Πάνω αριστερά συνδετικό	8	0.0083	120	
Πάνω αριστερά τούβλο	6	0.0055	180	
Κάτω αριστερά συνδετικό	11	0.0125	300	
Κάτω αριστερά τούβλο	9	0.01	100	

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το συνθετικό μοντέλο (Σχήμα 5.12a), το επεξεργασμένο του αποτέλεσμα (Σχήμα 5.12b), καθώς και η 4^η επεξεργασμένη τομή του Επταπυργίου (Σχήμα 5.12c). Στα συνθετικά δεδομένα εφαρμόστηκε το ίδιο φιλτράρισμα με τα δεδομένα υπαίθρου, με διαφορετικές φυσικά παραμέτρους, ενώ επίσης έγινε και αποκοπή τους στα 60 νανοδευτερόλεπτα. Όσον αφορά την κλίμακα των χρόνων αυτή μετασχηματίστηκε σε κλίμακα βάθους με την εφαρμογή ταχύτητας 0.11m/ns.

Εξετάζοντας τα συνθετικά δεδομένα είναι εμφανές ότι στην περιοχή υγρασίας το σήμα εμφανίζεται ασθενικό λόγω της υψηλής αγωγιμότητας, ενώ η διαφορετική δομική φάση παρουσιάζεται με την μορφή μιας οριζόντιας ισχυρής ανάκλασης κατά μήκος της τομής (μπλε βέλη). Επίσης διακρίνονται καθαρά οι πλευρικές ανακλάσεις του αέρα (πορτοκαλί βέλη) αλλά και η διαταραγμένη περιοχή (κόκκινο ορθογώνιο). Τέλος συγκρίνοντας τα συνθετικά με τα πραγματικά δεδομένα η ερμηνεία η οποία δόθηκε φαίνεται να επιβεβαιώνεται, αποδεικνύοντας έτσι και την χρησιμότητα της μοντελοποίησης, τόσο πριν από την λήψη των δεδομένων όσο και μετά.



Σχήμα 5.12 α. Συνθετικό μοντέλο, β. Επεξεργασμένα συνθετικά δεδομένα, γ. 4^η επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ Επταπυργίου.

5.1.2 Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας

5.1.2.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Η λήψη των ηλεκτρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε στα ίδια 8 παράλληλα προφίλ με αυτά του γεωραντάρ για την σύγκριση και την δυνατότητα συνδυαστικής ερμηνείας. Υπενθυμίζεται πως το πρώτο προφίλ βρισκόταν στα 0.5μ από το έδαφος, ενώ οι μεταξύ τους αποστάσεις κυμαίνονταν στα 0.2μ.

Για την κάθε τομογραφία χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια των οποίων η επαφή με τον τοίχο επιτεύχθηκε με την χρήση μπεντονίτη (Σχήμα 5.11), αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο φθορές στο μνημείο. Οι αποστάσεις τους ορίστηκαν στα 0.4μ, ενώ η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η διπόλου – διπόλου η οποία χαρακτηρίζεται από την εξαιρετική διακριτική ικανότητα κυρίως σε πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

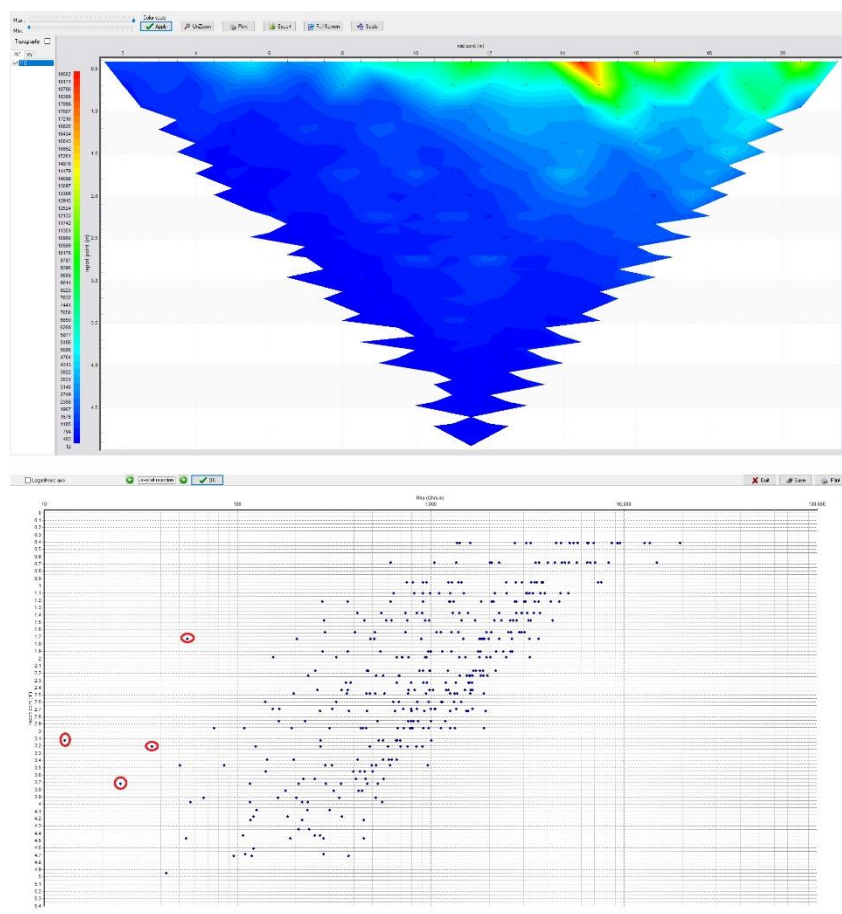
Ο εξοπλισμός περιλάμβανε, πολύκλινα καλώδια κατασκευασμένα από χαλκό, αυτόματο πολυπλέκτη 48 θέσεων και φυσικά το όργανο των γεωφυσικών μετρήσεων Syscal Pro της εταιρίας Iris Instruments το οποίο είναι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο, μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 Αριστερά συλλογή δεδομένων (επαφή με μπεντονίτη), δεξιά όργανο μέτρησης Syscal Pro.

5.1.2.2 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σε πρώτη φάση το λογισμικό Prosys II της εταιρίας IRIS Instruments το οποίο επιτρέπει την μεταφορά, φιλτράρισμα και εξαγωγή των δεδομένων σε διάφορες μορφές αρχείων για την εισαγωγή τους σε άλλα λογισμικά αντιστροφής. Με την χρήση του Prosys II έγινε χαρτογράφηση των δεδομένων με την μορφή ψευδοτομών, καθώς και αφαίρεση των αρνητικών και ακραίων τιμών (Σχήμα 5.12).

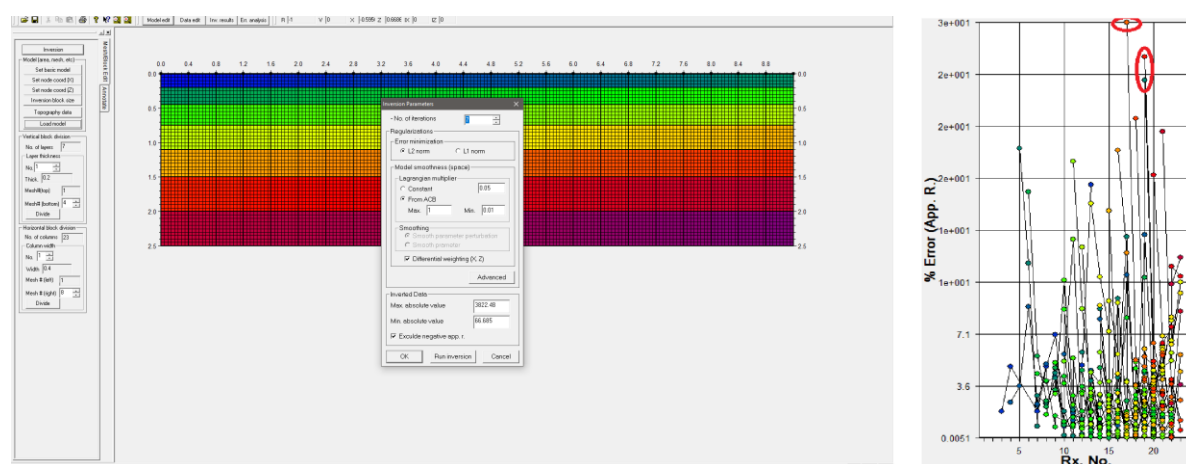


Σχήμα 5.12 Ψευδοτομή δεδομένων, και αφαίρεση ακραίων τιμών στο Prosys II (Κόκκινοι κύκλοι).

Εν συνεχεία τα φιλτραρισμένα δεδομένα εισήχθησαν στο DC_2DPro (Kim, 2010) το οποίο είναι ένα λογισμικό που εκτελεί μη γραμμική δισδιάστατη αντιστροφή με την μέθοδο του Occam (Constable, 1987), ενώ χρησιμοποιεί για την επίλυση του ευθέος προβλήματος, επαναληπτικά, την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πρόγραμμα ορίστηκε αρχικά η δομή των παραμέτρων και σχηματίστηκε έτσι το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 5.13). Στην συνέχεια εφαρμόστηκε η διαδικασία της αντιστροφής με στόχο την αποτύπωση των πραγματικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η διαδικασία επαναλήφθηκε αρκετές φορές και κάθε φορά απομακρυνόταν ένα μικρό πλήθος μετρήσεων με βάση το % σφάλμα μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δεδομένων (Σχήμα 5.13).

Τα τελικά αποτελέσματα χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα αξιόπιστα καθώς το % σφάλμα κυμάνθηκε μεταξύ 2 – 7% ενδεικτικό φυσικά και της καλής ποιότητας των πρωτογενών δεδομένων.



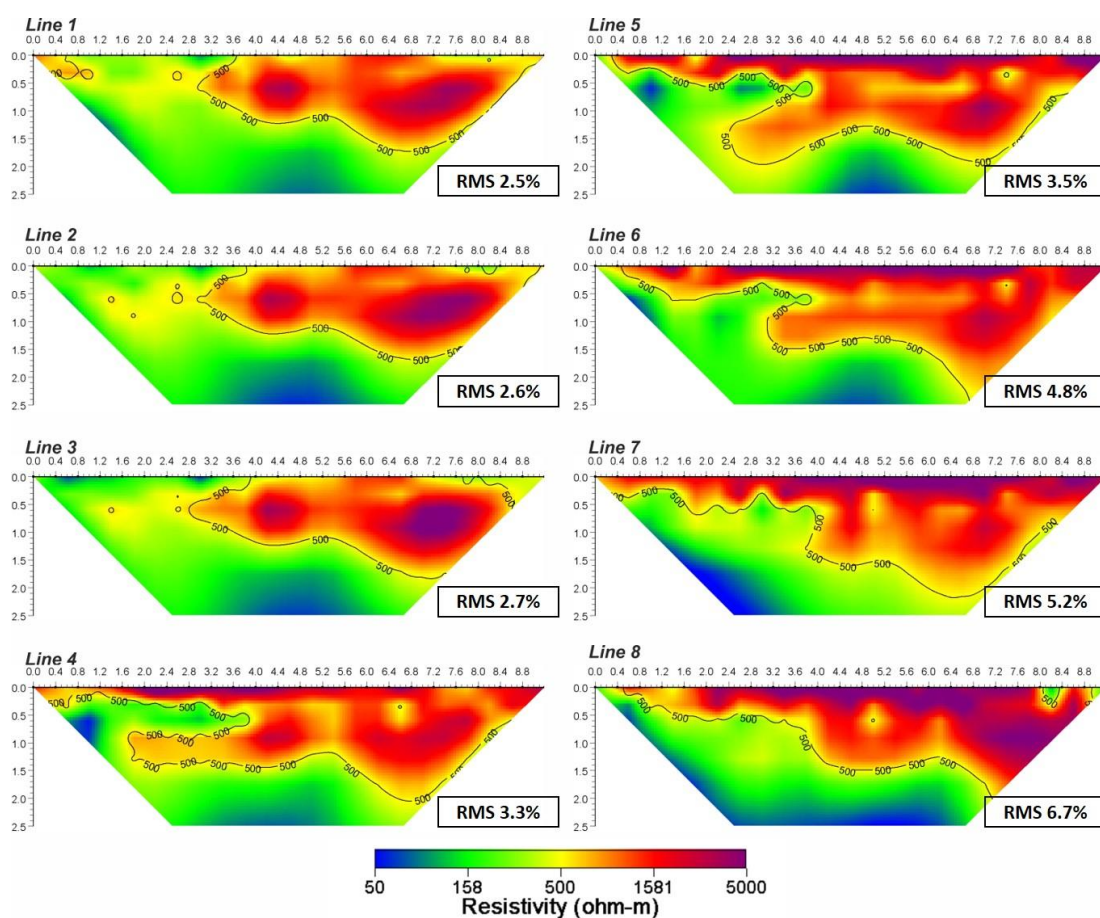
Σχήμα 5.13 DC2Pro, αριστερά ορισμός των παραμέτρων και διαλογικό παράθυρο αντίστροφής, δεξιά αφαίρεση μετρήσεων κατά την διαδικασία με βάση το % σφάλμα.

Για την δημιουργία των τρισδιάστατων δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DC_3DPro (Kim, 2010) το οποίο πραγματοποιεί τρισδιάστατη αντιστροφή χρησιμοποιώντας για την επίλυση του ευθέος προβλήματος, επαναληπτικά την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

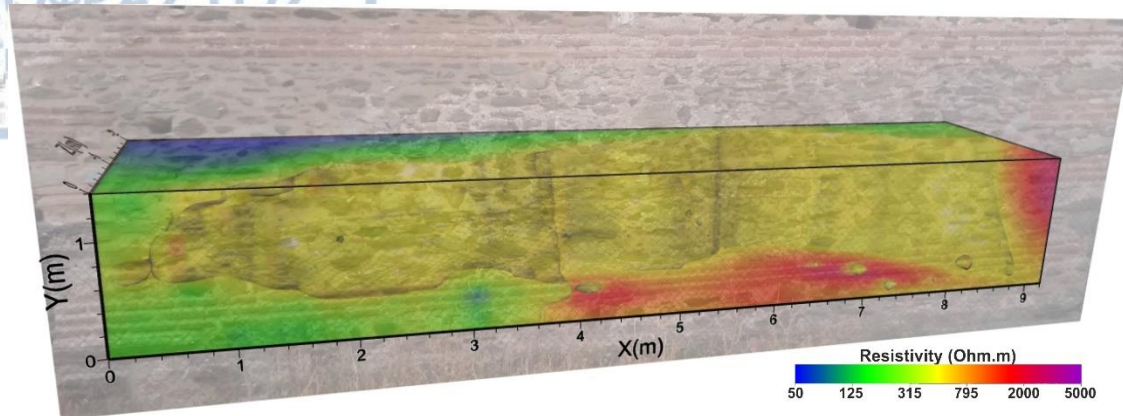
5.1.2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των ηλεκτρικών μεθόδων στον πύργο Π3 του Επταπυργίου. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι ηλεκτρικές τομογραφίες των προφίλ 1 – 8 (Σχήμα 5.14), καθώς και μια τρισδιάστατη απεικόνιση των χαμηλών αντιστάσεων (Σχήμα 5.15). Στα σχήματα αποτυπώνονται τα πραγματικά βάθη και οι πραγματικές ηλεκτρικές αντιστάσεις με την χρήση κλίμακας ουράνιου τόξου.

Όπως παρατηρείται η περιοχή υγρασίας η οποία φυσικά παρουσιάζει χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις εντοπίζεται κυρίως στο αριστερό κομμάτι του τείχους και αποτυπώνεται στα σχήματα με ψυχρά χρώματα (μπλε – πράσινο). Επίσης φαίνεται γενικά το μεγαλύτερο ποσοστό της να συσσωρεύεται στο τμήμα του τείχους που βρίσκεται πιο κοντά στο έδαφος.



Σχήμα 5.14 Ηλεκτρικές τομογραφίες στον πύργο Π3 του Επταπυργίου. Με ψυχρά χρώματα αποτυπώνεται η υγρασία.



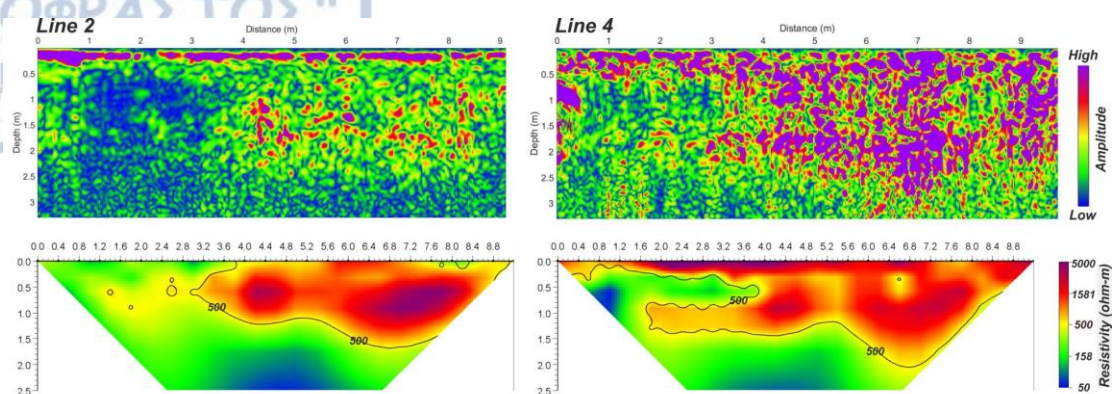
Σχήμα 5.15 Τρισδιάστατη απεικόνιση των χαμηλών αντιστάσεων κάτω των 500 Ohm.m.

5.1.3 Συνδυαστική ερμηνεία

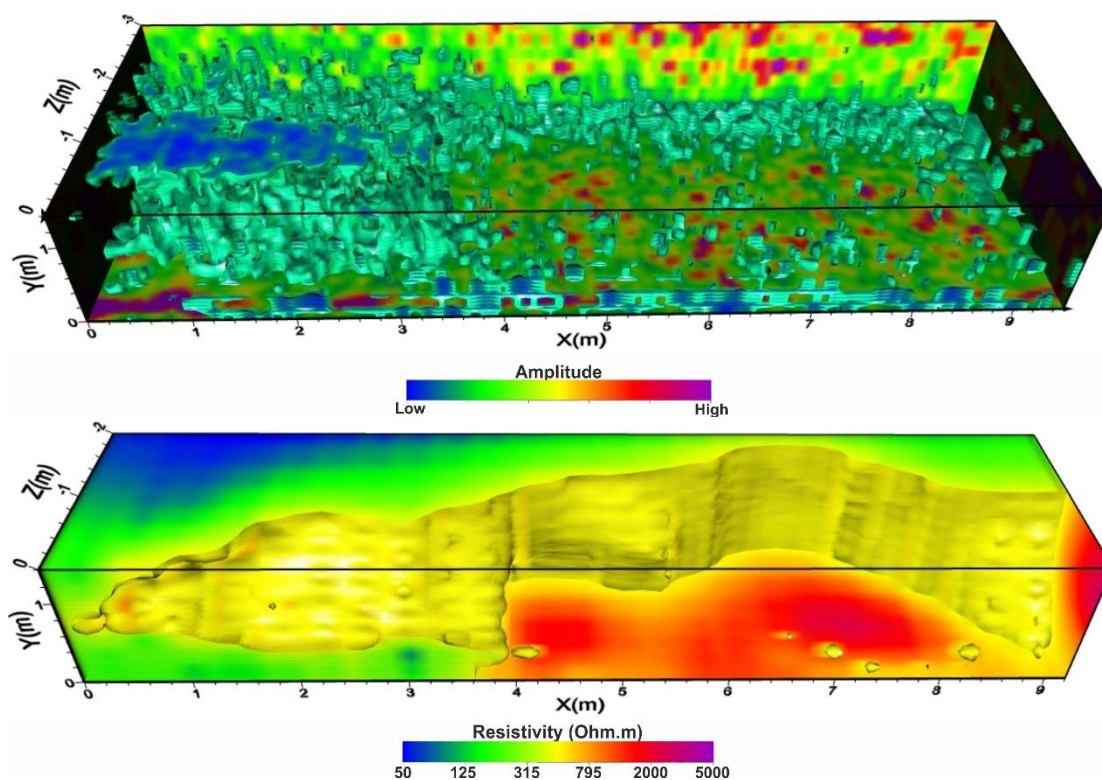
Για να επιτραπεί μία συνδυαστική ερμηνεία, αλλά και να δειχθεί η πολύ καλή συμφωνία των δύο μεθόδων που εφαρμόστηκαν, δημιουργήθηκαν τα δύο παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5.16 και 5.17).

Στο πρώτο (Σχήμα 5.16) παρουσιάζονται οι επεξεργασμένες και μετασχηματισμένες τομές γεωραντάρ των προφίλ 2 και 4 με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους τομογραφίες, ενώ το δεύτερο (Σχήμα 5.17) αποτελεί μια τρισδιάστατη απεικόνιση της υγρασίας με τις δύο μεθόδους.

Με μία πρώτη ματιά είναι εμφανής η πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μεθόδων καθώς οι περιοχές με ισχυρό σήμα (γεωραντάρ) αποτυπώνονται ως περιοχές υψηλών ηλεκτρικών αντιστάσεων (κόκκινο – μωβ χρώμα), ενώ αντίστοιχα αυτές με το ασθενές σήμα (γεωραντάρ) αποτυπώνονται ως αγώγιμες περιοχές (μπλε – πράσινο χρώμα). Επίσης η μετάβαση μεταξύ των τμημάτων χαμηλής και υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης φαίνεται να συμπίπτει με την μεταβολή της ισχύος του σήματος του γεωραντάρ (άξονας X 3.6m).



Σχήμα 5.16 Μετασχηματισμένες (Hilbert Transform) τομές γεωραντάρ των προφίλ 2 και 4 με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές τομογραφίες.



Σχήμα 5.17 Τρισδιάστατη απεικόνιση της υγρασίας με τις δύο μεθόδους.

5.2 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε τοίχους (Πύργος Π4)

Την δεύτερη θέση έρευνας αποτέλεσε ένα τμήμα του εξωτερικού τείχους του πύργου Π4 (Σχήμα 5.18). Σκοπός όπως και στην προηγούμενη θέση ήταν ο έλεγχος αυτού για υγρασία, εσωτερικά δομικά προβλήματα αλλά και η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας προηγούμενων εργασιών αποκατάστασης. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στις 28 Φεβρουαρίου 2017 και οι μέθοδοι – τεχνικές οι οποίες εφαρμόστηκαν ήταν αυτή του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής τομογραφίας.



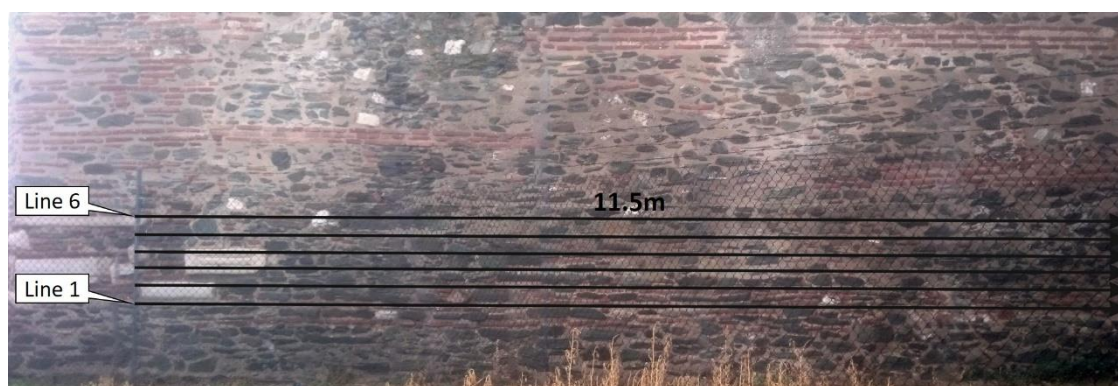
Σχήμα 5.18 Περιοχή έρευνας, εξωτερικός τοίχος πύργου Π4 (google earth).

5.2.1 Εφαρμογή γεωραντάρ

5.2.1.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Για την λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν 6 παράλληλα προφίλ με το πρώτο να ξεκινά από τα 0.8μ από το έδαφος και τα μεταξύ τους διαστήματα να κυμαίνονται στα 0.2μ. Όλες οι αποστάσεις κατά μήκος των γραμμών καταγράφηκαν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας μετροταινίες, ενώ για την διευκόλυνση των μετρήσεων, αλλά και την αποφυγή λαθών κατασκευάστηκε ένα πλέγμα με σχοινιά. Τέλος η κάθε γραμμή ξεκινούσε από τα 3μ περίπου της αριστερής άκρης του τοίχου έως και το τέλος της δεξιάς άκρης (Σχήμα 5.19). Όσον αφορά τον εξοπλισμό αρχικά χρησιμοποιήθηκε το σύστημα γεωραντάρ της MALA με την θωρακισμένη κεραία κεντρικής συχνότητας 500MHz αλλά λόγω της γενικότερης απουσίας σήματος, καθώς και της παρουσίας

μόνο μίας ισχυρής ανάκλασης σε σχετικά μεγάλους χρόνους, επιλέχθηκε τελικώς η χρήση κεραίας κεντρικής συχνότητας 250MHz (Σχήμα 5.20). Η επιλογή αυτή αποσκοπούσε κυρίως στην εύρεση της απέναντι πλευράς του τοίχου (3.4μ πάχος) η οποία θα επέτρεπε τον υπολογισμό της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς και κατά συνέπεια της ταχύτητας, καθώς και στην ανάδειξη της ισχυρής ανάκλασης που προαναφέρθηκε. Το βήμα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 0.04μ, ενώ το χρονικό παράθυρο στα 95 νανοδευτερόλεπτα.



Σχήμα 5.19 Απεικόνιση του τοίχου. Με μαύρα βέλη σημειώνονται από κάτω προς τα επάνω τα προφίλ 1 – 6.



Σχήμα 5.20 Συλλογή δεδομένων με την κεραία 250MHz της MALA.

5.2.1.2 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RADPROfWin (Kim, 2004) και αρχικά στα δεδομένα εφαρμόστηκε διόρθωση του χρόνου πρώτης άφιξης (**Zero time adjustment**), απομάκρυνση της επαγωγικής συνιστώσας (**dewow**), καθώς και αφαίρεση του θορύβου υποβάθρου (**Background removal**). Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε χρονική ενίσχυση των δεδομένων (**Custom time gain**), φιλτράρισμα στο πεδίο το συχνοτήτων (**Frequency filtering**), στο πεδίο των κυματαρίθμων (**Wavenumber filtering**), καθώς και αποσυνέλιξη (**Deconvolution**), ενώ τελικό στάδιο της επεξεργασίας αποτέλεσε η παρεμβολή μεταξύ των ιχνών (**Trace interpolation**), μαζί με την αποκοπή (**Data editing**) των δεδομένων στα 80 νανοδευτερόλεπτα.

Όσον αφορά την μετατροπή των αξόνων από χρόνο σε βάθος αυτή τελικώς δεν πραγματοποιήθηκε κυρίως για λόγους που θα αναφερθούν παρακάτω.

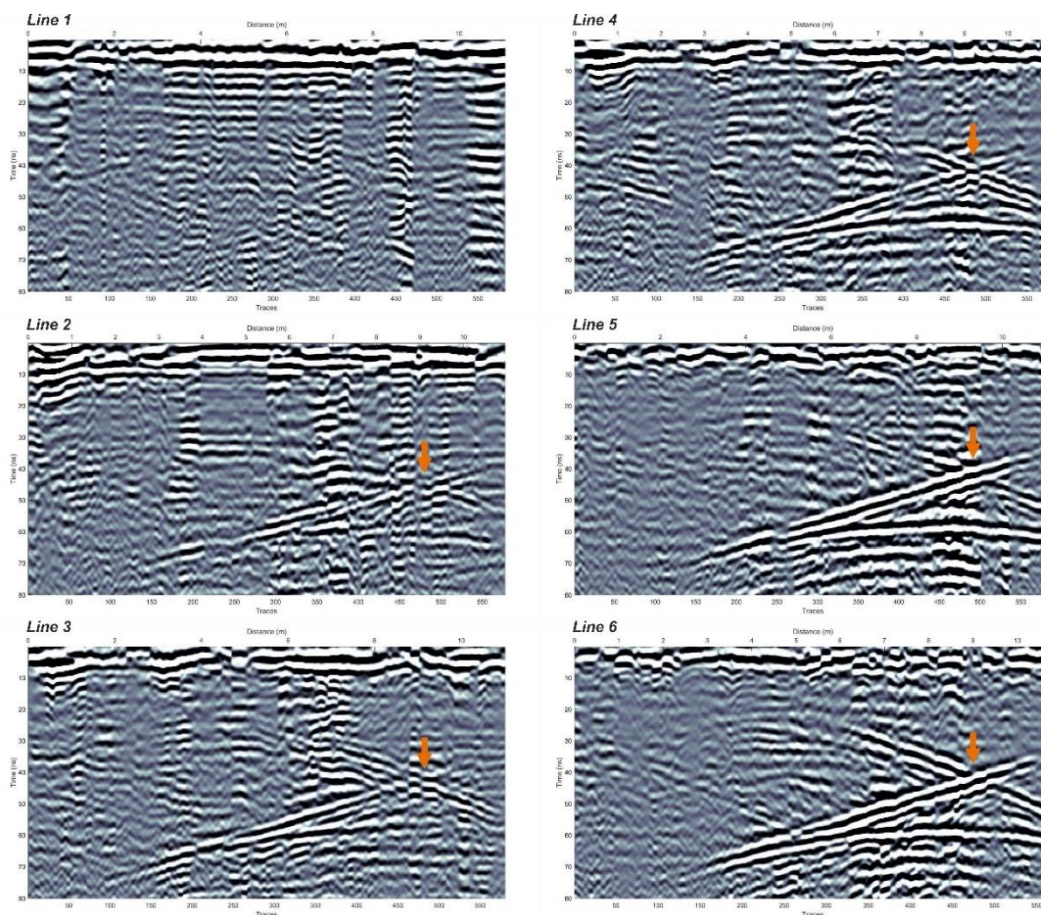
5.2.1.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.21) παρουσιάζονται οι επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ από τον πύργο Π4 του Επταπυργίου. Με μία πρώτη ματιά, αυτό που παρατηρείται είναι η ύπαρξη θορύβου και η γενικότερη απουσία ανακλάσεων στο αριστερό τμήμα του τείχους η οποία προδιαθέτει την παρουσία έντονης υγρασίας. Ακόμα εμφανής είναι και η απουσία της ανάκλασης της απέναντι πλευράς η οποία θα έπρεπε να παρουσιάζεται σαν μία σχεδόν οριζόντια γραμμή σε μεγάλους χρόνους. Η απουσία της μέχρι και τον χρόνο των 95 νανοδευτερολέπτων (πριν την αποκοπή στα 80ns) υποδηλώνει υψηλές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς και αγωγιμότητας, δηλαδή παρουσία υγρασίας.

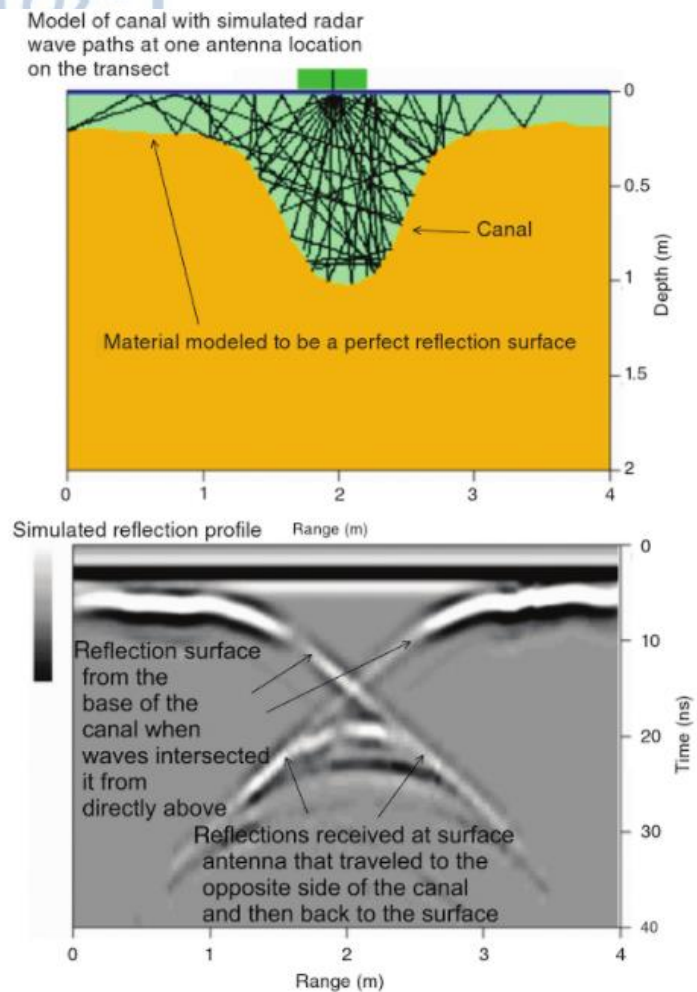
Ακόμα σε όλες τις τομές με εξαίρεση την πρώτη, παρατηρείται στο δεξιό τμήμα μία ισχυρή ανάκλαση η οποία έχει σημειωθεί με πορτοκαλί βέλη. Για την ανάκλαση αυτή μπορούν να δοθούν δύο πιθανές ερμηνείες.

- Παρουσιάζει χαρακτηριστικό σχήμα το οποίο από την βιβλιογραφία είναι γνωστό ως “bow tie” και οφείλεται σε κοιλότητα (Canal) όπως αυτή του σχήματος 5.22, η οποία αρχίζει και διαμορφώνεται 1μ από το έδαφος (Γραμμή 2).

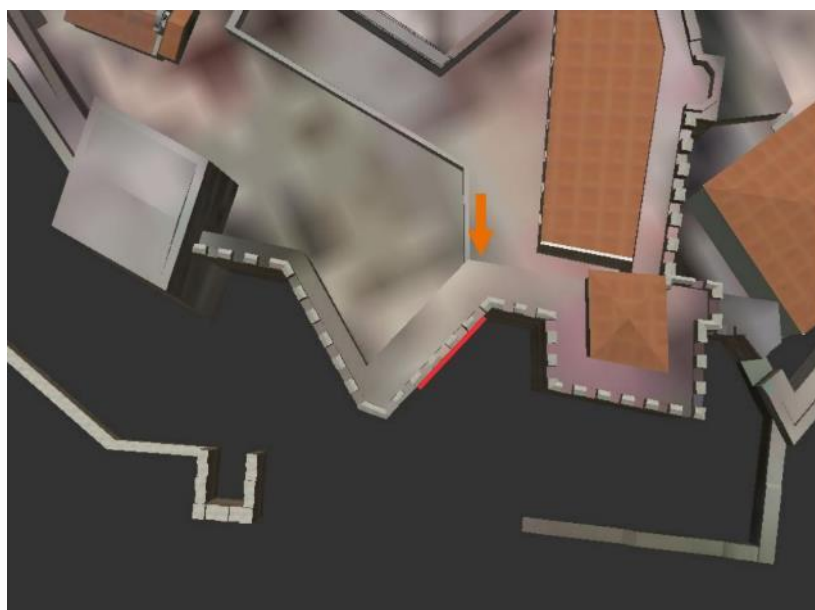
- Πρόκειται για ανακλάσεις αέρα οι οποίες προέρχονται από την γωνία και την απέναντι πλευρά του δίπλα τοίχου (Σχήμα 5.23 πορτοκαλί βέλος). Το γεγονός ότι δεν παρουσιάζονται στην τομή 1 οφείλεται στο ότι το έδαφος εσωτερικά του Επταπυργίου βρίσκεται λίγο ψηλότερα από τα 0.8 μέτρα (1 προφίλ εξωτερικά).



Σχήμα 5.21 Επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ πύργου Π4 με πορτοκαλί χρώμα σημειώνεται η ανάκλαση της κοιλότητας ή του αέρα.



Σχήμα 5.22 Συνθετικό μοντέλο κοιλάτητας και αποτέλεσμα με το χαρακτηριστικό "bow tie" (Conyers, 2016).



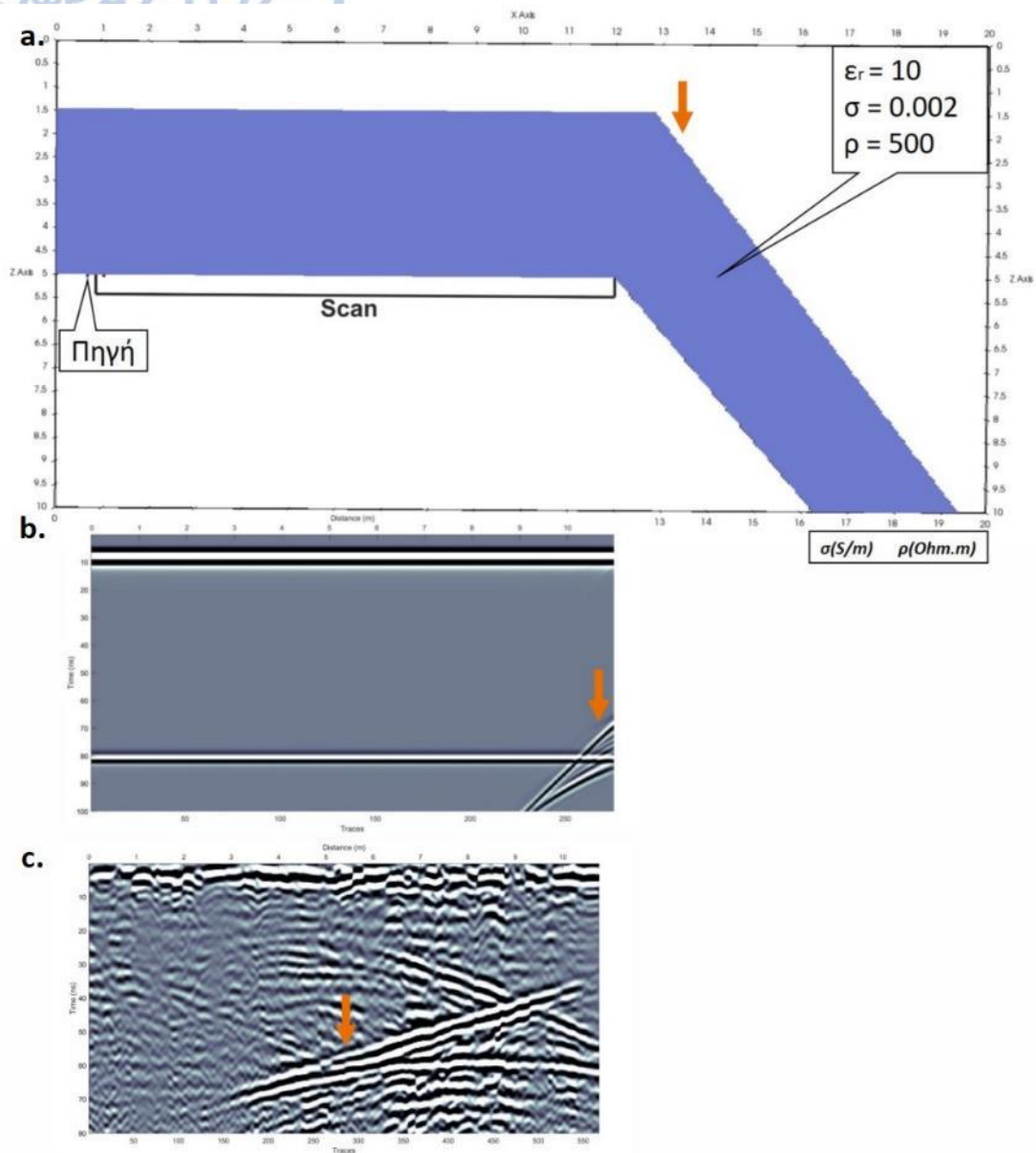
Σχήμα 5.23 Περιοχή έρευνας, με πορτοκαλί βέλος σημειώνεται η πιθανή προέλευση των ανακλάσεων.

5.2.1.4 Μοντελοποίηση για την επιβεβαίωση της ερμηνείας

Για τον έλεγχο της δεύτερης πιθανής ερμηνείας, ότι δηλαδή οι ανακλάσεις που εμφανίζονται στις τομές προέρχονται από τον αέρα, ήταν αναγκαία η κατασκευή μοντέλων τα οποία θα προσομοίαζαν το υπό έρευνα τείχος τόσο σε μέγεθος όσο και σχήμα. Εξαιτίας της αδυναμίας προσδιορισμού της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, αλλά και γενικότερα για πειραματισμό, κατασκευάστηκαν διάφορα μοντέλα με υλικά διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, καθώς και τείχη με ίδια αλλά και με διαφορετική γωνία από ότι η πραγματική.

Στο σχήμα 5.24 παρουσιάζεται το συνθετικό μοντέλο το οποίο αποτελείται από ένα ενιαίο υλικό (Σχήμα 5.24a), το αποτέλεσμα του μοντέλου χωρίς κάποια επεξεργασία (Σχήμα 5.24b), καθώς και η 6^η επεξεργασμένη τομή του Επταπυργίου (Σχήμα 5.24c). Παρατηρώντας τα συνθετικά με τα πραγματικά δεδομένα, διαπιστώνεται πως υπάρχει μια σχετική ομοιότητα και πως ένα τμήμα των ανακλάσεων που υπάρχουν στις τομές του Επταπυργίου μπορεί να παραχθεί από τον αέρα που βρίσκεται στην πίσω γωνία των τειχών (πορτοκαλί βέλη).

Κλείνοντας πρέπει να σημειωθεί ότι το αποτέλεσμα αυτό δεν αποτελεί επιβεβαίωση της δεύτερης ερμηνείας αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη δεδομένου ότι οι ανακλάσεις των πραγματικών δεδομένων τοποθετούνται κοντά στην γωνία του τοίχου.



Σχήμα 5.24 α. Συνθετικό μοντέλο, β. συνθετική τομή, γ. 6^η επεξεργασμένη τομή γεωραντάρ Επταπυργίου.

5.2.2 Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας

5.2.2.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Η λήψη των ηλεκτρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε στα ίδια 6 παράλληλα προφίλ με αυτά του γεωραντάρ για την σύγκριση και την δυνατότητα συνδυαστικής ερμηνείας. Υπενθυμίζεται πως το πρώτο προφίλ βρισκόταν στα 0.8μ από το έδαφος, ενώ οι μεταξύ τους αποστάσεις κυμαίνονταν στα 0.2μ.

Κάθε ηλεκτρική τομογραφία πραγματοποιήθηκε με την χρήση 24 ηλεκτροδίων των οποίων η επαφή επιτεύχθηκε με την χρήση μπεντονίτη για την αποφυγή φθορών (Σχήμα 5.25). Οι αποστάσεις τους ορίστηκαν στα 0.5μ, ενώ η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η διπόλου – διπόλου. Όσον αφορά τον εξοπλισμό, αυτός ήταν ο ίδιος με την περίπτωση του πύργου Π3 ([Κεφ. 5.1.2.1](#)).



Σχήμα 4.25 Συλλογή δεδομένων (επαφή με μπεντονίτη)

5.2.2.2 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Prosys II, DC_2DPro (Kim, 2010), DC_3DPro (Kim, 2010) και εφαρμόστηκε η διαδικασία της δισδιάστατης αλλά και τρισδιάστατης αντιστροφής ([Κεφ. 5.1.2.2](#)). Το σφάλμα των τελικών αποτελεσμάτων κυμάνθηκε μεταξύ 3.5 – 6.5 %, ποσοστό το οποίο δείχνει την καλή ποιότητα των μετρήσεων.

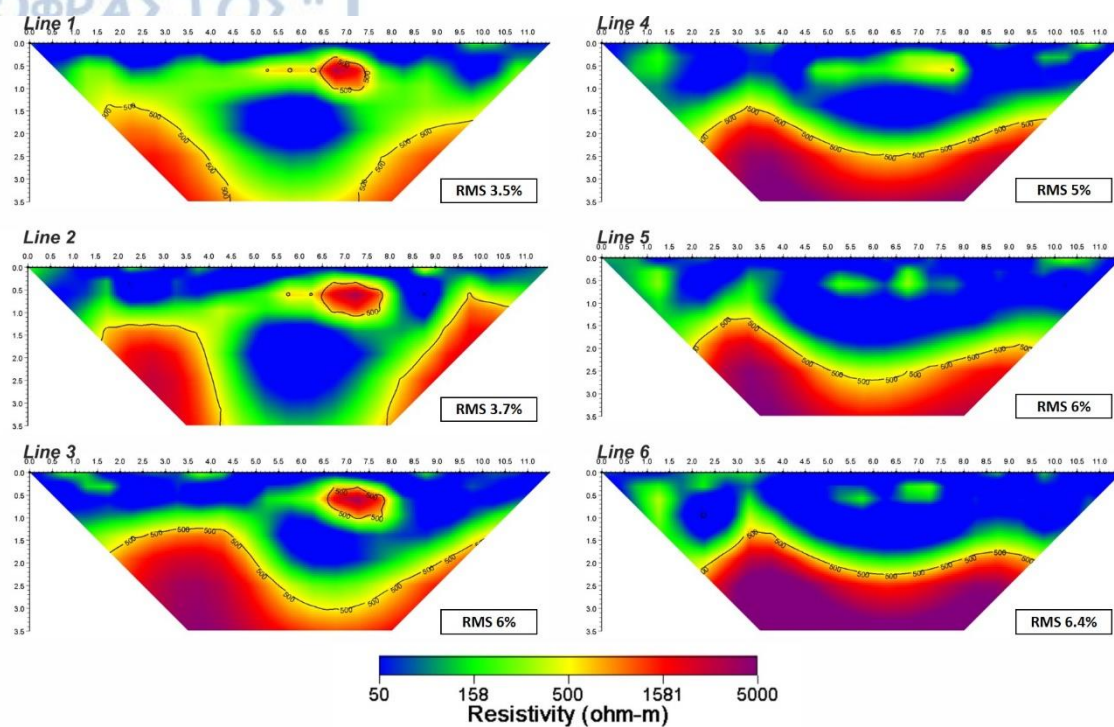
5.2.2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Στα σχήματα 5.26 και 5.27 παρουσιάζονται οι ηλεκτρικές τομογραφίες των προφίλ 1 – 6 και η τρισδιάστατη απεικόνιση όλου του όγκου των δεδομένων (Volume) με την χρήση κλίμακας ουράνιου τόξου.

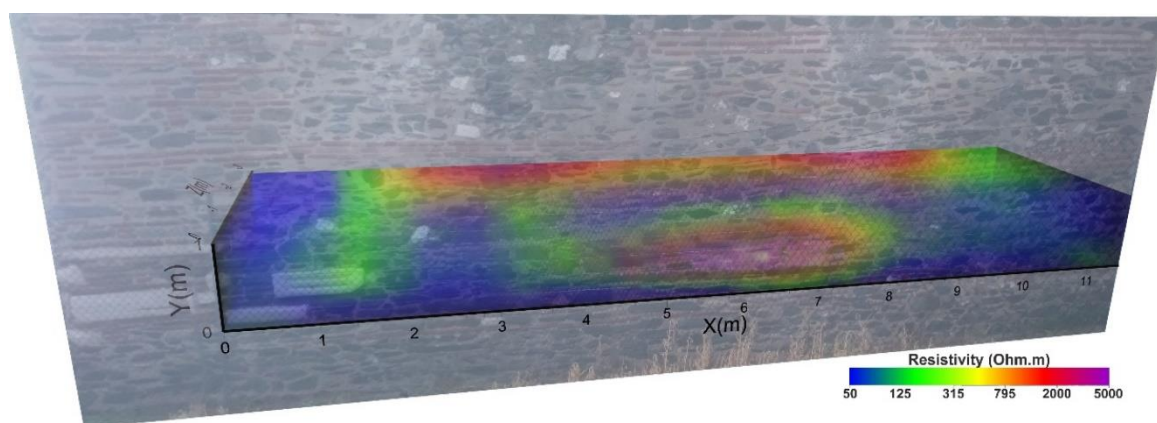
Όπως παρατηρείται και όσον αφορά την υγρασία, το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής μεθόδου έρχεται να επιβεβαιώσει αυτό του γεωραντάρ. Οι αντιστάσεις που εμφανίζονται γενικά, είναι ιδιαίτερα χαμηλές και καταλαμβάνουν σχεδόν όλο ή τουλάχιστον το μεγαλύτερο ποσοστό του τοίχου (μπλε – πράσινο χρώμα).

Ακόμα παρατηρείται μία δομή υψηλών αντιστάσεων (~ 4000 Ohm.m, 3D) στα 5 - 8μ του άξονα x και στα 0.8 – 1.2 μ από την επιφάνεια του εδάφους η οποία θα μπορούσε να οφείλεται σε κάποιο κενό.

Τέλος οι σχετικά υψηλές αντιστάσεις οι οποίες αρχίζουν και παρουσιάζονται σε μεγάλο βάθος πιθανότατα σχετίζονται με την απέναντι πλευρά του τοίχου (αέρας). Η πιθανότητα αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι δεν παρουσιάζονται σε τέτοιο μεγάλο βαθμό στην πρώτη τομογραφία (Σχήμα 5.26, Line 1). Υπενθυμίζεται ότι το έδαφος εσωτερικά του Επταπυργίου βρίσκεται ψηλότερα από τα 0.8 μέτρα του 1^{ου} προφίλ.



Σχήμα 5.26 Ηλεκτρικές τομογραφίες στον πύργο Π4 του Επταπυργίου. Με ψυχρά χρώματα αποτυπώνεται η υγρασία.



Σχήμα 5.27 Τρισδιάστατη απεικόνιση όλου του όγκου των ηλεκτρικών δεδομένων του πύργου Π4.

5.2.3 Συνδυαστική ερμηνεία και προτάσεις

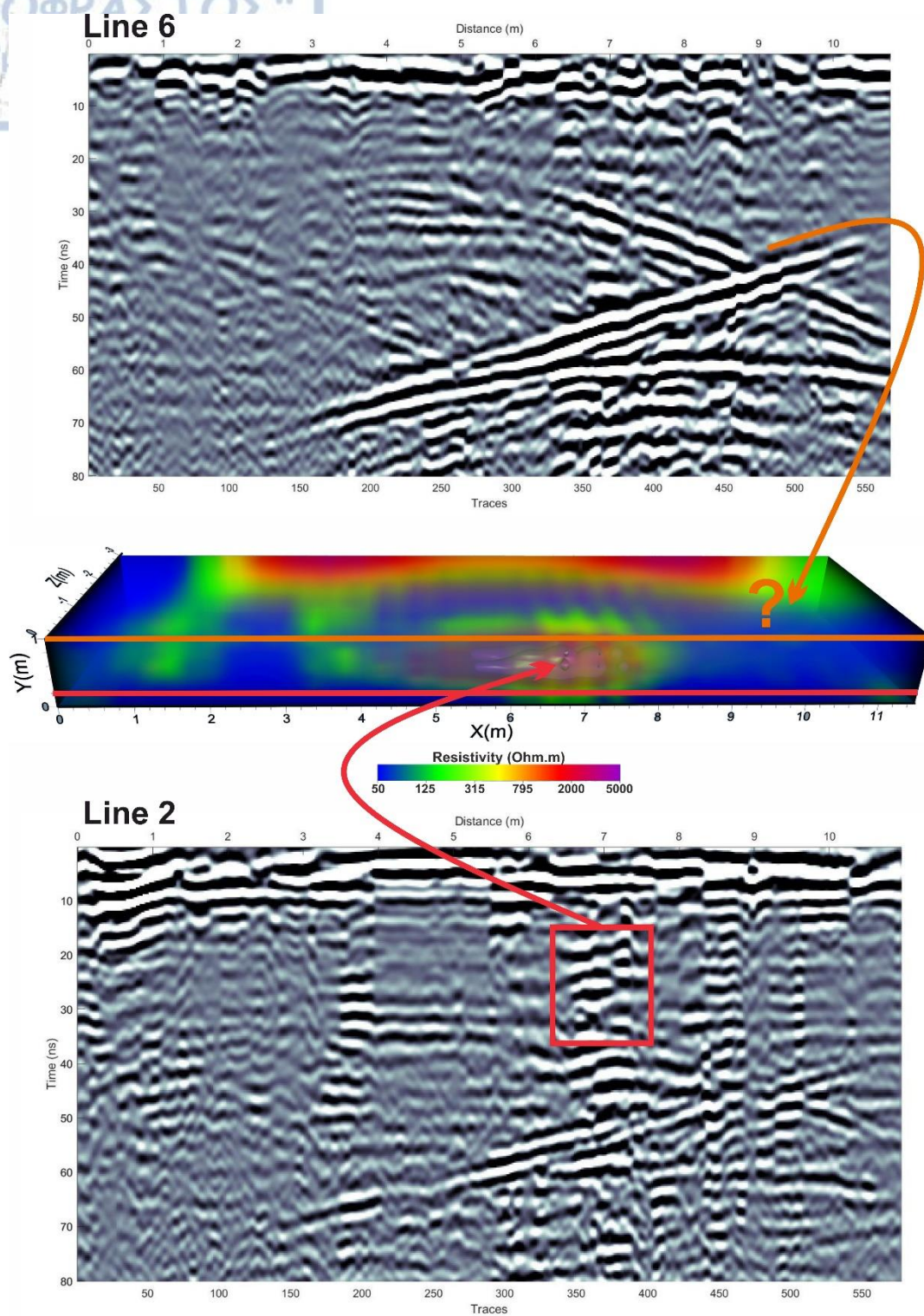
Για την συνδυαστική ερμηνεία κατασκευάστηκε το ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.28) το οποίο περιλαμβάνει τις επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ των γραμμών 2 και 6 μαζί με όλο τον όγκο των ηλεκτρικών δεδομένων.

Παρατηρώντας το σχήμα σε πρώτη φάση διακρίνεται η συμφωνία που υπάρχει στις δύο μεθόδους όσον αφορά την υγρασία. Η απουσία σήματος στο μεγαλύτερο μέρος των δύο τομών γεωραντάρ φαίνεται να οφείλεται στις ιδιαίτερα χαμηλές αντιστάσεις οι οποίες κυριαρχούν σε όλο το κομμάτι που ερευνήθηκε (μπλε – πράσινο χρώμα).

Συμφωνία φαίνεται να υπάρχει επίσης και ως προς την δομή υψηλών αντιστάσεων η οποία δημιουργεί τις ανακλάσεις που σημειώνονται με κόκκινο ορθογώνιο στην γραμμή 2. Οι ανακλάσεις αυτές αρχικά είχαν ερμηνευτεί ως θόρυβος ή “artifacts” απόρροια της επεξεργασίας. Το γεγονός ότι παρουσιάζονται και με τις δύο μεθόδους δείχνει την σημαντικότητα εφαρμογής περισσότερων από μία γεωφυσικών μεθόδων. Ακόμα, ασυμφωνία φαίνεται να υπάρχει ως προς τις ισχυρές ανακλάσεις που βρίσκονται στο δεξί μέρος του τείχους και σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα. Το γεγονός αυτό, ότι δηλαδή δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στις αντιστάσεις του δεξιού τμήματος, ενισχύει σημαντικά την πιθανότητα να προέρχονται από τον αέρα όπως ειπώθηκε παραπάνω.

Κλείνοντας και όσον αφορά το τμήμα του πύργου Π4 που ερευνήθηκε προτείνεται:

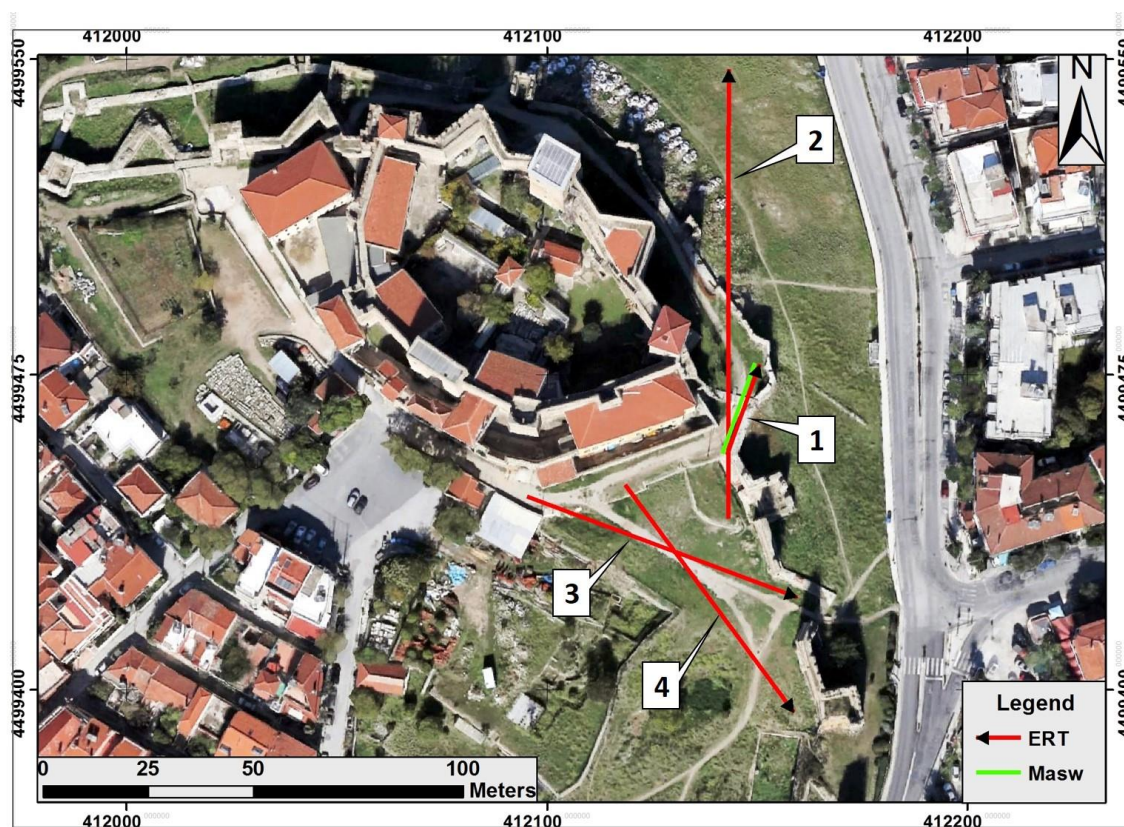
- Επανάληψη των μετρήσεων με τη μέθοδο του γεωραντάρ με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα του μέσου (μεγαλύτερο χρονικό παράθυρο, διάταξη CMP, μετρήσεις κατά τους καλοκαιρινούς μήνες). Ο προσδιορισμός της ταχύτητας αλλά και τα νέα δεδομένα θα επιτρέψουν την σύνδεση και την καλύτερη ερμηνεία της αντιστατικής δομής.
- Επανάληψη των μετρήσεων και των δύο μεθόδων με προφίλ που θα συνεχίζονται στο παραπλήσιο γωνιακό τείχος. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι περισσότερο δυνατός ο προσδιορισμός της προέλευσης των γωνιακών ανακλάσεων.



Σχήμα 5.28 Επεξεργασμένες τομές γεωραντάρ των γραμμών 2 και 4 σε συνδυασμό με το αποτέλεσμα των ηλεκτρικών μεθόδων.

5.3 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε θεμελιώσεις

Εκτός από την έρευνα στα τείχη του Επταπυργίου ερευνήθηκε και το υπέδαφος περιφερειακά του μνημείου. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτή της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων, καθώς και της ηλεκτρικής τομογραφίας με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό των ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) αλλά και της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 1 τομή σεισμικών δεδομένων και 4 τομές ηλεκτρικής τομογραφίας, οι θέσεις των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 5.29.



Σχήμα 5.29 Περιοχή μελέτης και θέσεις των τομών.

5.3.1 Εφαρμογή πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων

5.3.1.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Για τη λήψη των σεισμικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σταθερή διάταξη γεωφώνων με ισοαποστάσεις του 1μ. και κινούμενη πηγή. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 3 χτυπήματα και η θέση της πηγής βρισκόταν στο 1μ από το 1^ο γεώφωνο, στο κέντρο της διάταξης και στο 1μ από το τελευταίο γεώφωνο αντίστοιχα. Ο εξοπλισμός των μετρήσεων περιλάμβανε τον σειсмоγράφο Strataview 48 καναλιών της εταιρίας Geometrics, 24 γεώφωνα κατακόρυφης συνιστώσας και ιδιοσυχνότητας 4.5Hz και την πηγή, ένα σφυρί βάρους 5kg (Σχήμα 5.30). Οι παράμετροι των μετρήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2 Παράμετροι μετρήσεων

Αριθμός τομών	1
Αριθμός γεωφώνων	24
Απόσταση γεωφώνων	1μ
Τύπος γεωφώνων	4.5Hz, κατακόρυφης συνιστώσας
Μήκος αναπτύγματος	23μ
Πηγή	Σφυρί 5kg
Αριθμός χτυπημάτων / θέση πηγής	3 / -1μ, 11.5μ 24μ
Διάστημα καταγραφής	1024ms



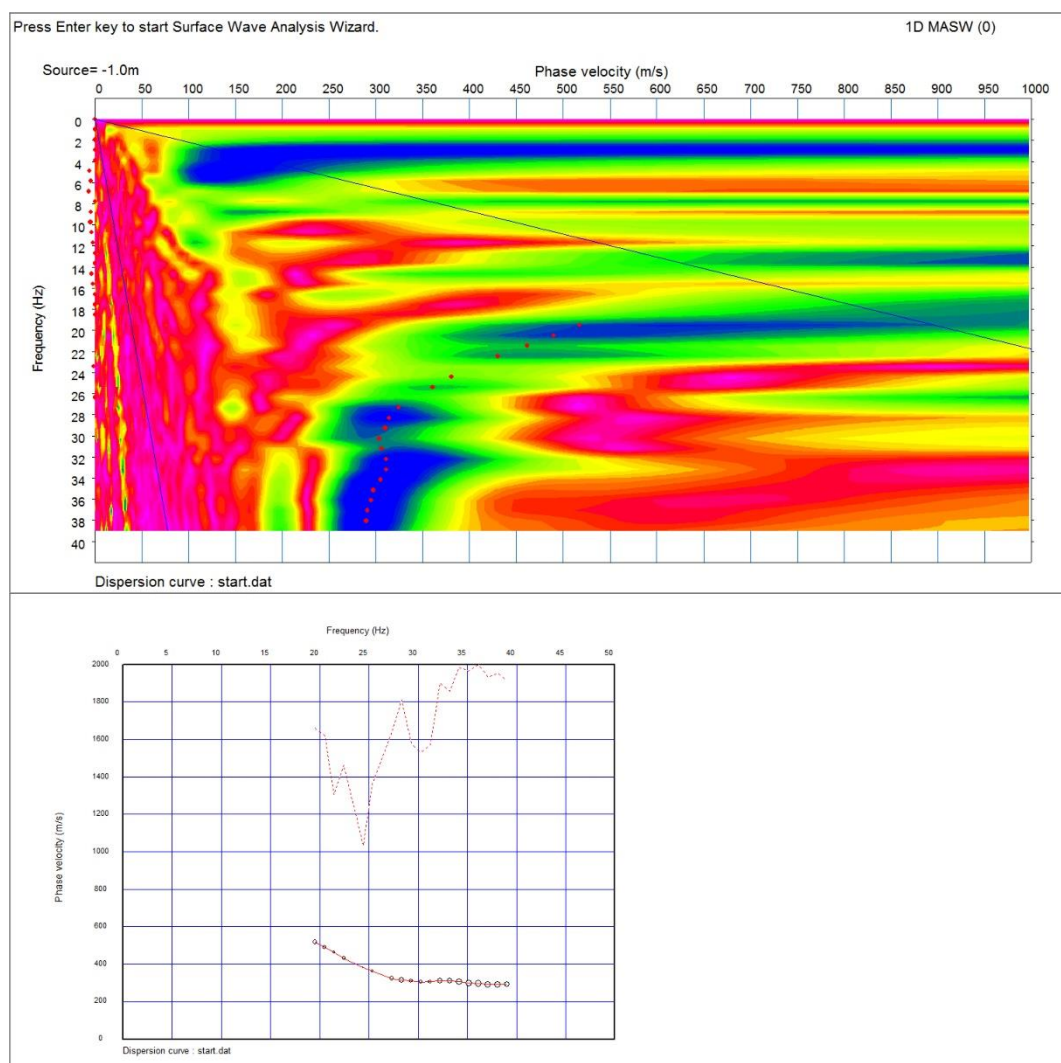
Σχήμα 5.30 Αριστερά συλλογή δεδομένων, δεξιά όργανο μετρήσεων Strataview.

5.3.1.2 Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το λογισμικό SeisImager της εταιρίας Geometrics και συγκεκριμένα με την χρήση των υπό – προγραμμάτων του Pickwin και WaveEq.

Αρχικά έγινε εισαγωγή των δεδομένων στο Pickwin μέσα από το οποίο ορίστηκε η γεωμετρία της διάταξης, μετασχηματίστηκε το πεδίο απόστασης – χρόνου σε πεδίο συχνότητας – ταχύτητας φάσης και επιλέχθηκαν οι καμπύλες διασποράς.

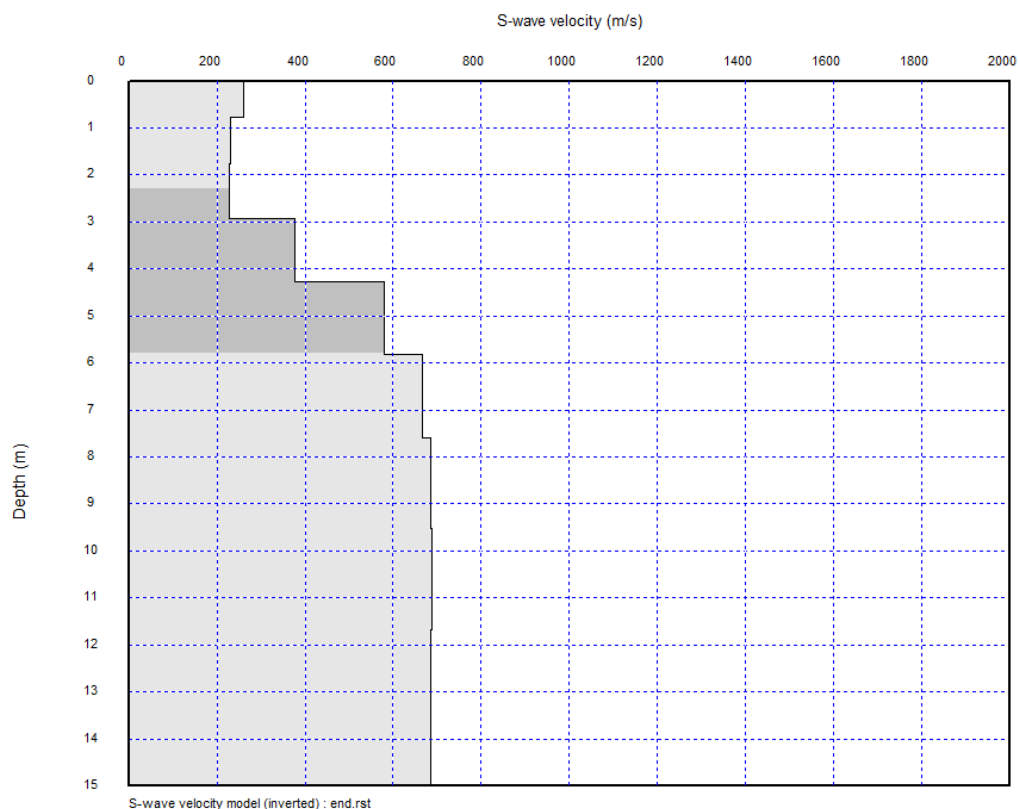
Στην συνέχεια οι καμπύλες διασποράς προβλήθηκαν μέσα στο WaveEq, ορίστηκε το αρχικό μοντέλο και πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της αντιστροφής (Σχήμα 5.31).



Σχήμα 5.31 Επεξεργασία δεδομένων στο SeisImager. Επάνω επιλογή καμπύλης διασποράς (Pickwin), κάτω προβολή της στο WaveEq πριν την αντιστροφή.

5.3.1.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Το σχήμα 5.32 απεικονίζει το μοντέλο κατανομής των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s) μέχρι το βάθος των 6μ. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απότομη αύξηση των σεισμικών κυμάτων στα ~ 5μ η οποία προσεγγίζει τα 600m/s. Η έντονη αυτή αύξηση πιθανόν να σχετίζεται με την είσοδο σε ένα πιο συμπαγή σχηματισμό, σχηματισμό ο οποίος να σχετίζεται με το υπόβαθρο της περιοχής (αποσαθρωμένο υπόβαθρο).



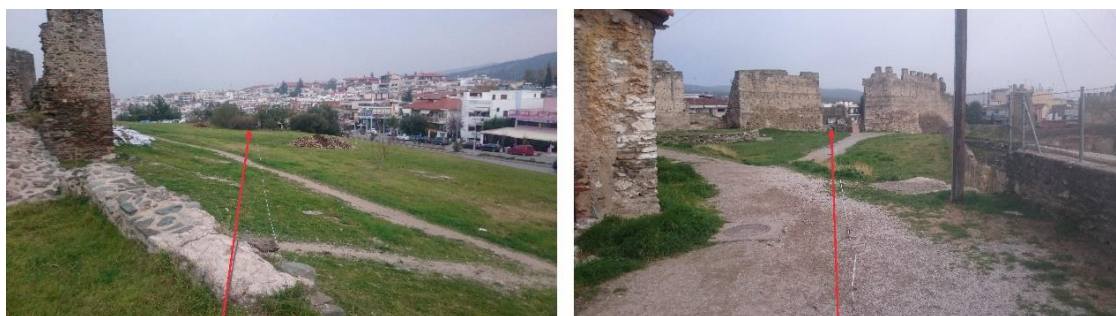
Σχήμα 5.32 Μοντέλο κατανομής εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (V_s).

5.3.2 Εφαρμογή ηλεκτρικής τομογραφίας

5.3.2.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Όπως προειπώθηκε για την έρευνα περιφερειακά του μνημείου πραγματοποιήθηκαν σε συνδυασμό με την μία τομή σεισμικών δεδομένων και 4 τομογραφίες υψηλής ανάλυσης με συνολικό μήκος 276μ (Σχήμα 5.33). Για την κάθε τομογραφία χρησιμοποιήθηκαν 24 χάλκινα ηλεκτρόδια υψηλής αγωγιμότητας, ενώ ως διάταξη επιλέχθηκε η διπόλου – διπόλου.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ίδιος με αυτόν που έχει περιγραφεί στο [Κεφ. 5.1.2.1](#), ενώ επιπρόσθετα έγινε και χρήση τοπογραφικού εξοπλισμού και συγκεκριμένα του GPS Trimble R6 της εταιρίας Optron για να επιτραπεί με αυτόν τον τρόπο η τοπογραφική τοποθέτηση των ηλεκτρικών τομογραφιών.



Σχήμα 5.33 Φωτογραφίες κατά την λήψη των δεδομένων της 2^{ης} και 3^{ης} τομογραφίας.

5.3.2.2 Επεξεργασία δεδομένων

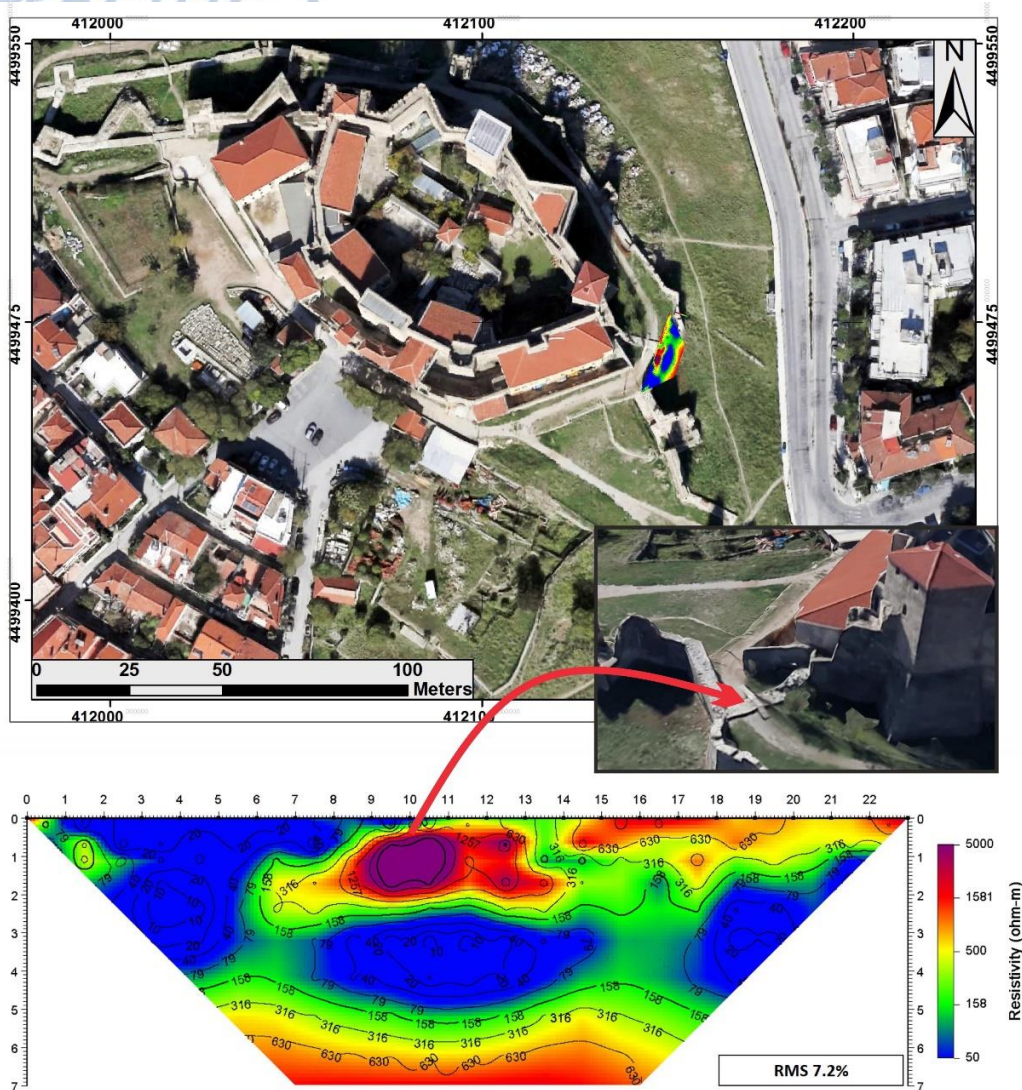
Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τα λογισμικά Prosys II και DC_2DPro με την διαδικασία που έχει περιγραφεί στο [Κεφ. 5.1.2.2](#). Η μόνη διαφορά κατά τα βήματα της επεξεργασίας η οποία και πρέπει να αναφερθεί είναι ότι πριν από την διαδικασία της αντιστροφής εισήχθη στο πρόγραμμα η τοπογραφία της εκάστοτε τομογραφίας.

Κλείνοντας, για μια ακόμα φορά τα τελικά αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλά σφάλματα της τάξεως του 6 – 9% ενδεικτικά της καλής ποιότητας των μετρήσεων.

5.3.2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία

Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζεται η 1^η κατά σειρά τομογραφία η οποία πραγματοποιήθηκε στην ίδια θέση με την τομή MASW για να μπορέσει να γίνει και μία σύγκριση των σεισμικών – ηλεκτρικών δεδομένων. Το άνοιγμα των ηλεκτροδίων ορίστηκε στο 1μ, ενώ το συνολικό μήκος της τομογραφίας έφτασε τα 23μ.

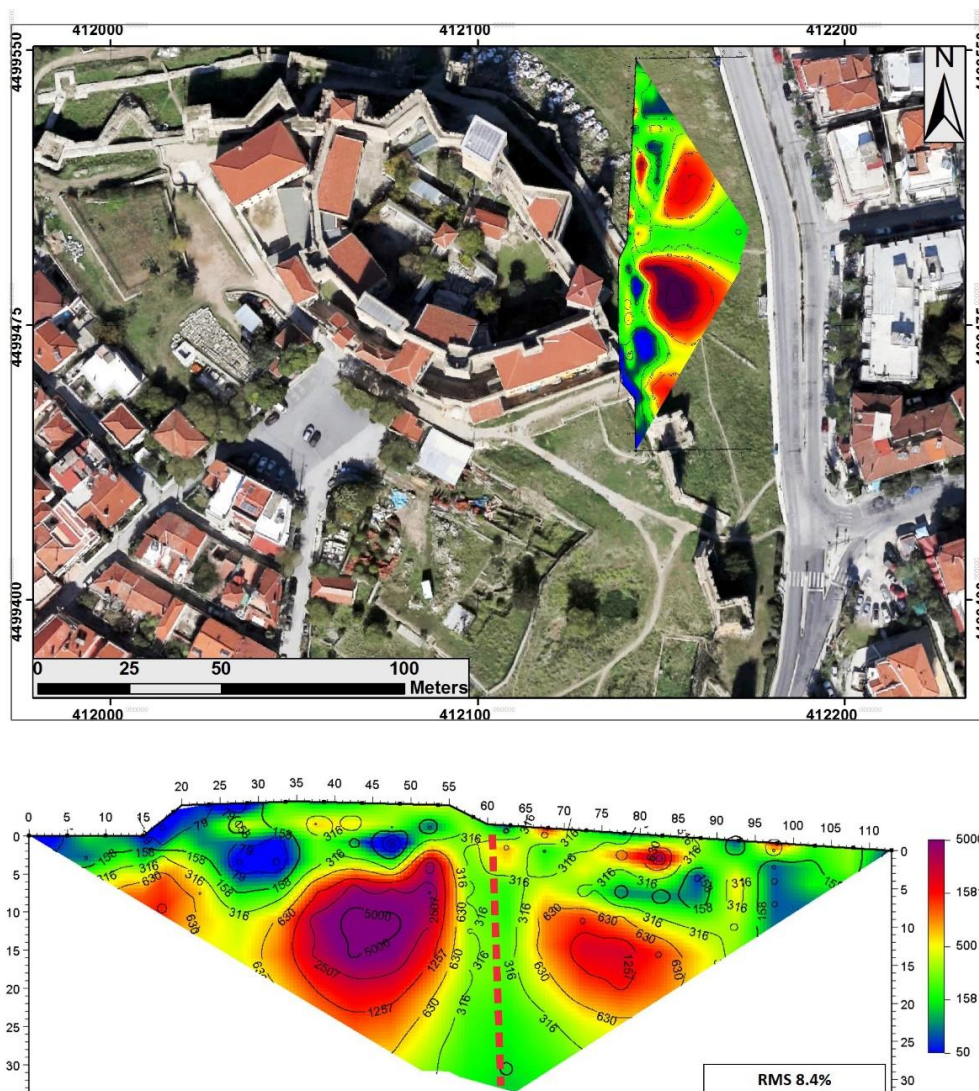
Όπως παρατηρείται στην τομογραφία του σχήματος, στα 10μ του άξονα x και μέχρι το βάθος των ~2μ εντοπίζεται μια ιδιαίτερα αντιστατική δομή με τιμές > 3000 Ohm.m (κόκκινο – μωβ) η οποία πιθανότατα σχετίζεται με τα θεμέλια του γκρεμισμένου τοίχου που εντοπίζεται και επιφανειακά στο σημείο εκείνο. Βαθύτερα 2.5 – 5μ, καθώς και στο αριστερό τμήμα κυριαρχούν ιδιαίτερα χαμηλές αντιστάσεις οι οποίες λόγω των τιμών τους που προσεγγίζουν τα 10 – 20 Ohm.m υποδηλώνουν αργιλικά υλικά (μπλε). Τέλος στα 6 – 7μ εμφανίζεται αντιστατικό στρώμα με τιμές 600 Ohm.m που όπως αποδεικνύεται και παρακάτω (2^η τομογραφία) φαίνεται να σχετίζεται με την αρχή του υποβάθρου της περιοχής (αποσαθρωμένο υπόβαθρο). Η ερμηνεία αυτή φαίνεται να συμφωνεί και με τις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων οι οποίες όπως προειπώθηκε παρουσιάζουν απότομη αύξηση στο βάθος αυτό.



Σχήμα 5.34 1^η τομογραφία θέσης και αποτέλεσμα. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται η πιθανή προέλευση της αντιστατικής δομής.

Το σχήμα 5.35 απεικονίζει την 2^η κατά σειρά τομογραφία που πραγματοποιήθηκε περιφερειακά του μνημείου. Η τομογραφία αυτή έγινε στην ίδια θέση με 1^η με στόχο την έρευνα σε μεγαλύτερο βάθος για τον εντοπισμό του υποβάθρου. Ακριβώς για αυτόν τον λόγο το άνοιγμα των ηλεκτροδίων ορίστηκε στα 5μ, ενώ το συνολικό της μήκος έφτασε τα 115μ.

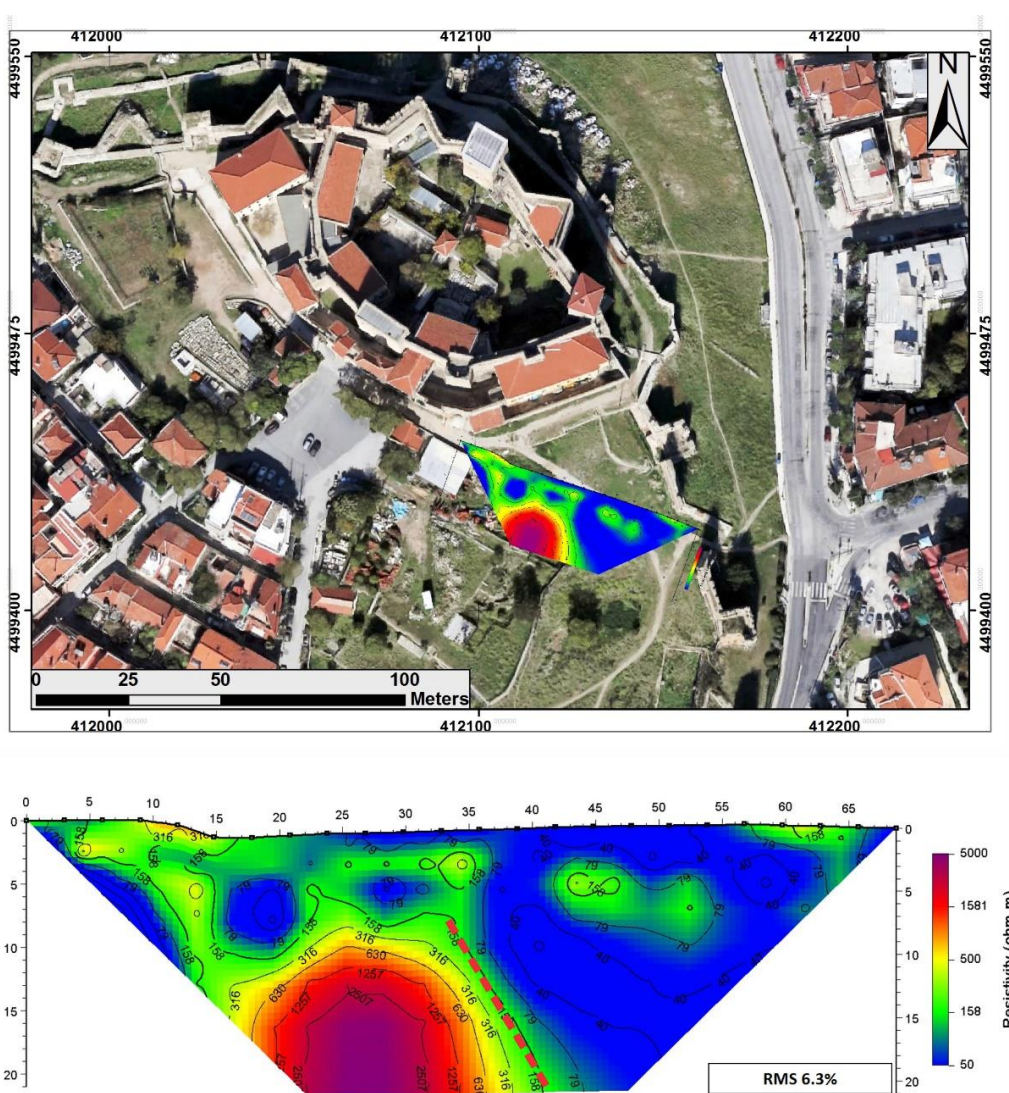
Παρατηρώντας το σχήμα διακρίνεται καθαρά πλέον το υπόβαθρο της περιοχής το οποίο εμφανίζεται από τα ~6μ στο αριστερό τμήμα (κόκκινο – μωβ) και φαίνεται να επιβεβαιώνει την ερμηνεία της 1^{ης} τομογραφίας όσον αφορά αυτό το κομμάτι. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η διακοπή της συνέχειας του υποβάθρου που εντοπίζεται στα 60μ του άξονα x και μέχρι το βάθος των 35μ, διακοπή η οποία πιθανότατα σχετίζεται με ρήγμα.



Σχήμα 5.35 2^η τομογραφία θέση και αποτέλεσμα. Με κόκκινη γραμμή σημειώνεται το πιθανό ρήγμα.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.36) παρουσιάζεται η 3^η τομογραφία η οποία πραγματοποιήθηκε στο νότιο τμήμα της περιοχής. Το άνοιγμα των ηλεκτροδίων ορίστηκε στα 3μ ενώ το συνολικό μήκος της έφτασε τα 69μ.

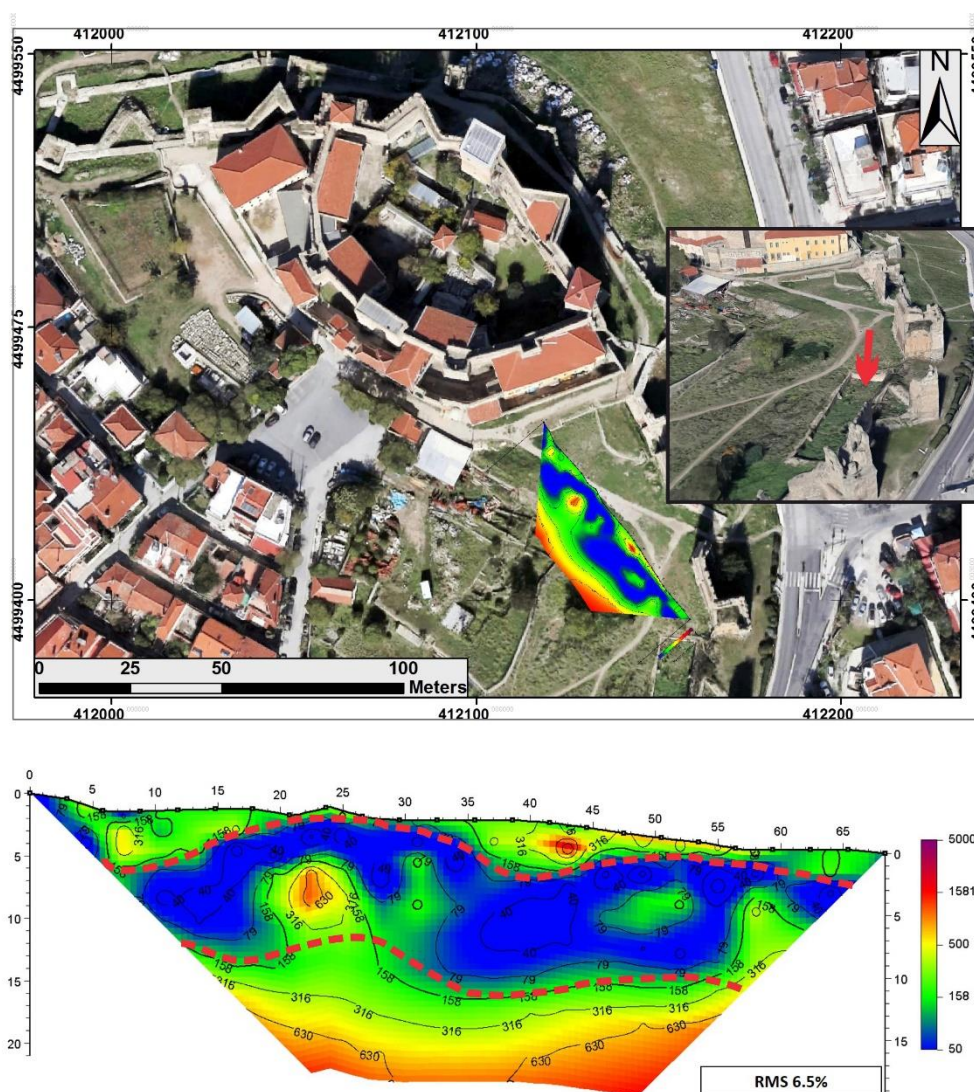
Στην τομογραφία διακρίνεται μία έντονη πλευρική διαφοροποίηση των ηλεκτρικών αντιστάσεων και ιδιαίτερα από τα ~ 10μ βάθος. Το αριστερό τμήμα της διακατέχεται από αντιστάσεις > 1000 Ohm.m (κόκκινο – μωβ), ενώ το δεξί από αντιστάσεις ~ 50 Ohm.m (μπλε). Η έντονη αυτή πλευρική διαφοροποίηση δηλώνει την παρουσία ενός ρήγματος.



Σχήμα 5.36 3^η τομογραφία θέση και αποτέλεσμα. Με κόκκινη γραμμή σημειώνεται το πιθανό ρήγμα

Στο τελευταίο σχήμα (Σχήμα 5.37) βρίσκεται το αποτέλεσμα της 4^{ης} τομογραφίας η οποία επίσης πραγματοποιήθηκε στο νότιο τμήμα της περιοχής. Το άνοιγμα των ηλεκτροδίων ορίστηκε στα 3μ και το συνολικό της μήκος έφτασε τα 69μ.

Από την τομογραφία παρατηρείται σχεδόν αμέσως ένα στρώμα χαμηλών αντιστάσεων 50 – 80 Ohm.m (μπλε) σε βάθος 5 – 15μ. Το στρώμα αυτό παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον καθώς φαίνεται να ακολουθεί την πορεία προς την βυζαντινή κινστέρνα (στέρνα συγκέντρωσης νερού του φρουρίου) και να σχετίζεται άμεσα με αυτήν. Πιθανότατα πρόκειται για την παλαιοκοίτη που την τροφοδοτούσε με νερό.



Σχήμα 5.37 4^η τομογραφία θέση και αποτέλεσμα. Με κόκκινες γραμμές σημειώνεται το στρώμα χαμηλών αντιστάσεων, ενώ με κόκκινο βέλος στον χάρτη η βυζαντινή κινστέρνα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό το οποίο είναι και το τελευταίο της εργασίας συνοψίζονται και παραθέτονται τα συμπεράσματα σε συνδυασμό με κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα στην περιοχή του Επταπυργίου.

6.1 Συμπεράσματα της διατριβής

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η εφαρμογή διαφορετικών και μη καταστρεπτικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης στο φρούριο του Επταπυργίου και συγκεκριμένα σε διάφορα τμήματα των τειχών του αλλά και στο έδαφος περιφερειακά αυτού σε συνδυασμό με την μοντελοποίηση γεωφυσικών δεδομένων. Στόχος ήταν η έρευνα της καλύτερης δυνατής μεθοδολογικής προσέγγισης, η σύγκριση πραγματικών και μοντελοποιημένων δεδομένων, η συνδυαστική ερμηνεία των τεχνικών και φυσικά η εξαγωγή συμπερασμάτων που σχετίζονται με την εσωτερική δομή τοιχίων και εδάφους.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου μελετήθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα που σχετίζονταν με γεωφυσικές μελέτες σε μνημεία ανά τον κόσμο, εφαρμόστηκαν μη καταστροφικές γεωφυσικές μέθοδοι σε συνδυασμό με μοντελοποίηση γεωφυσικών δεδομένων πριν αλλά και μετά την εφαρμογή στο πεδίο, αναπτύχθηκαν λογισμικά τα οποία ενίσχυσαν την μοντελοποίηση αλλά και την απεικόνιση των δεδομένων, ενώ τέλος πραγματοποιήθηκε ερμηνεία των αποτελεσμάτων της κάθε μεθόδου τόσο ξεχωριστά όσο και συνδυαστικά.

Όσον αφορά τα συμπεράσματα της εργασίας, αυτά συνοψίζονται ως εξής:

- Η μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ και συγκεκριμένα τα πειράματα που προηγήθηκαν των μετρήσεων στην περιοχή του Επταπυργίου αποδείχθηκαν

εξαιρετικά χρήσιμα καθώς όχι μόνο λειτούργησαν εκπαιδευτικά, αλλά χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία για την αξιολόγηση των μετρήσεων υπαίθρου, ενώ βοήθησαν και σημαντικά στην ερμηνεία των πραγματικών δεδομένων.

- Τα τρία προγράμματα τα οποία αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής βοήθησαν στην δημιουργία και απεικόνιση τρισδιάστατων δεδομένων γεωραντάρ, αλλά και στην ώθηση της διαδικασίας παραγωγής πολυπλοκότερων θεωρητικών συνθετικών μοντέλων, καθώς και την δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων τους.
- Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον πύργο Π3 έγινε δυνατή η χαρτογράφηση της υγρασίας, καθώς και η χαρτογράφηση και προσδιορισμός διαφορετικών δομικών – κατασκευαστικών φάσεων. Ακόμα έγινε δυνατός ο εντοπισμός πιθανών εσωτερικών δομικών προβλημάτων όπως ρωγμών και διαταραγμένων περιοχών.
- Η έρευνα στον πύργο Π4 αποκάλυψε και χαρτογράφησε σημαντικά ποσοστά υγρασίας, καθώς και μία πιθανή δομή η οποία μπορεί να σχετίζεται με κάποιο κενό, ενώ ταυτόχρονα δεν μπόρεσε να αποδώσει ερμηνεία όσον αφορά την πιθανή δομή στο δεξιό τμήμα η οποία και χρίζει περεταίρω έρευνας.
- Εξαιρετική επιλογή αποδείχθηκε η χρήση των μεθόδων γεωραντάρ και ηλεκτρικής τομογραφίας για την έρευνα στα τείχη του Επταπυργίου, καθώς φαίνεται πως η μία μέθοδος αλληλοσυμπληρώνει την άλλη με αποτέλεσμα την βέλτιστη ερμηνεία. Ταυτόχρονα πολύ σημαντική αποδείχθηκε και η μοντελοποίηση δεδομένων γεωραντάρ ως επιβεβαιωτικό εργαλείο στην ερμηνεία.
- Τέλος από την έρευνα περιφερειακά του μνημείου αποκαλύφθηκε το βάθος του υποβάθρου της περιοχής, ενώ ταυτόχρονα εντοπίστηκαν και πιθανά ρήγματα τα οποία φυσικά χρίζουν και περεταίρω έρευνας.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή μελετήθηκε η εφαρμογή διαφορετικών και μη καταστρεπτικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης σε τμήματα των τειχών του Επταπυργίου αλλά και στο έδαφος περιφερειακά αυτού. Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα τα οποία είναι πολύ υποσχόμενα και μπορούν βοηθήσουν λήψη μελλοντικών αποφάσεων όσον αφορά την συντήρηση του μνημείου. Παρ' όλα αυτά όμως η έρευνα ήταν σχετικά μικρής κλίμακας και αφορούσε περιορισμένα τμήματα του. Έτσι έχοντας πλέον αποδεδειγμένα μια μεθοδολογία η οποία αποδίδει προτείνονται τα παρακάτω:

Τείχη

- Επέκταση της έρευνας σε μεγαλύτερα τμήματα των τειχών η οποία μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με την χρήση ικριώματος.
- Διαχρονική παρακολούθηση μεταβολών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι οποίες θα μπορέσουν να αποδώσουν με ακρίβεια πλέον όχι μόνο την παρουσία αλλά και την εποχική και χωρική μεταβολή της υγρασίας.

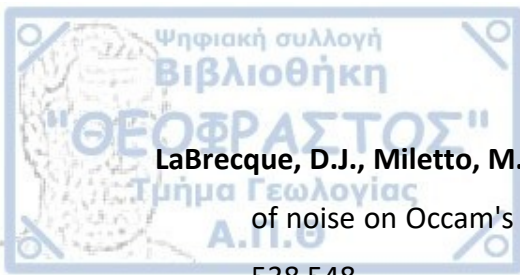
Έδαφος

- Επέκταση της έρευνας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έκταση εντός του Επταπυργίου αλλά και στην ευρύτερη περιοχή για την δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων γεωλογικών μοντέλων και την ακριβή χαρτογράφηση των τεκτονικών δομών που εντοπίστηκαν.

- Αβραμίδου Ε. (2016).** Εφαρμογή γεωηλεκτρικών και σεισμικών μεθόδων ως εργαλείο στην γεωτεχνική προσομοίωση ρωγματώσεων στο Δ.Δ. Βαλτόνερων (Δ. Αμύνταιου, Φλώρινας), Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Αποστολόπουλος Γ. (2013).** Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τομέας Μεταλλευτικής, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ι.Γ.Μ.Ε. (1978).** Γεωλογικός Χάρτης 1:50000 Φύλλο Θεσσαλονίκης, Χαρτογράφηση: Dr. Fockel F., Αντωνιάδης Π., Ιωαννίδης Κ.
- Κρητικάκης Γ. (2010).** Επιφανειακά κύματα: Εφαρμογές σε περιβαλλοντικά και γεωτεχνικά προβλήματα. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Μουντράκης Δ. (1985).** Γεωλογία της Ελλάδας, University Studio, Θεσσαλονίκη.
- Σπανουδάκης Ν. (2007).** Συμβολή των μεθόδων ταξινόμησης δεδομένων γεωραντάρ στην επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Annan A. P. (2003).** Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Incorporated.
- Balanis, C. (1989).** Advanced engineering electromagnetics. 1st ed. Hoboken: Wiley.
- Constable, S. Parker. R., and Constable C. (1987).** Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 52, 289-300.
- Conyers, L. (2016).** Ground-penetrating radar for geoarchaeology. Oxford: Wiley.
- Daniels, D. J. (2004).** Ground penetrating radar. 2nd ed. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- Daniels, D. J., Gynton, D. J., Scott H. F. (1988).** Introduction to subsurface radar, IEE Proceedings, Vol. 135, pt. F, pp. 278-320
- Ellis, R. G., and Oldenburg D.W. (1994).** Applied geophysical inversion. Geophysics, 42. 1020-1036.
- Franklin J.N. (1970).** Well-posed stochastic extensions of illposed linear problems. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 31, 682-716.
- Giannakis, I., Giannopoulos, A. and Warren, C. (2016).** A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(1), pp.37-51.
- Giannopoulos, A. (2005).** Modelling ground penetrating radar by GprMax. Construction and Building Materials (2005), 19, pp. 755-762.
- Golub, G. H. and Reinsch, C. (1970).** Singular Value Decomposition and Least Square Solutions. Numer. Math 14. 403-420.
- Inan, U. and Marshall, R. (2011).** Numerical electromagnetics. 1st ed. Cambridge University Press.
- Jol, H. (2008).** Ground Penetrating Radar Theory and Applications. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Science.
- Kim J.H. (2010).** DC2DPro – User's Manual, KIGAM, KOREA
- Kim J.H., Yi M.J. (2010).** DC3DPro 3D Geoelectrical Modelling and Inversion, User's Manual. KIGAM, Korea.
- Kim, J.H. (2004).** RADPRO/GPR. User's guide, KIGAM, S. Korea.



LaBrecque, D.J., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A. and Owen, E. (1996). The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data, *Geophysics*, 61, 538-548.

Lanczos, C. (1960). Linear differential operators. D. Van Nostrand Company Ltd.

Lay T. and Wallance C. T. (1995). Modern Global Seismology, International Geophysics Series, Vol. 58, Academic Press, pp. 521

Levenberg, K. (1944). A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *The Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.

Lines, L.R., and Treitel S. (1984). Tutorial: a review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.

Marquardt D. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11, 431-441.

Milsom, J. (2003). Field geophysics. 3rd ed. Chichester: Wiley

Pain, C.C., Herwanger, J.V., Worthington, M.H. and de Oliveira, C.R.E. (2002). Effective Multidimensional Resistivity Inversion using Finite Element Techniques. *Geophys. J. Int.*, 151, 710-728.

Park C.B., Miller R. and Xia J. 1999. Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, Vol. 64

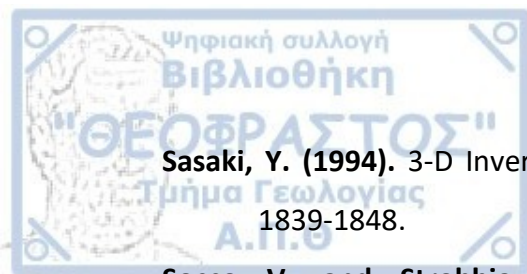
Park, S.K., and Van, G.P. (1991). Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, 56, 951-960.

Peters, L. Jr., Daniels, J. J., Young, J. D. (1994). Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, pp. 1802-1822.

Porsani, J. L., Sauck, W. A., & Júnior, A. O. S. (2006). GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 58(3), 177-187.

Pridmore, D., Hohmann, G., Ward, S., and Sill, W. (1981). An investigation of finite element modelling for electrical and electromagnetic data in three dimensions. *Geophysics*, 46, 1009-1024.

Sadiku, M. (2001). Numerical techniques in electromagnetics. 1st ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press.



Sasaki, Y. (1994). 3-D Inversion using the Finite Element Method. *Geophysics*, 59, 1839-1848.

Socco V. and Strobbia C. (2004). Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial, *Near Surface Geophysics*, p. 165-185

Tikhonov, A.N. (1963). Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. *Soviet Mathematics*. 4. 1035-1038.

Tsourlos, P. (1995). Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data: D. Phil. Thesis, University of York.

Tsourlos, P. and Ogilvy, R. (1999). An algorithm for the 3-D Inversion of Tomographic Resistivity and Induced Polarization data: Preliminary Results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2, 2, 30-45.

Ward, S. (1989). Resistivity and induced polarization methods: in *Investigations in Geophysics no 5, Geotechnical and Environmental Geophysics vol I*, ed. S.Ward SEG, Tulsa, 147-189.

Warren, C., Giannopoulos, A. and Giannakis, I. (2016). gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, pp.163-170.

Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(3), pp.302-307.

Yi. M.J., Kim, J.H., Song, Y., Cho, S.J., Chung, S.H. and Suh, J.H. (2001). Three-Dimensional Imaging of Subsurface Structures using Resistivity Data. *Geophysical Prospecting*, 49, 483-497.



ΆΛΛΕΣ ΠΗΓΕΣ

www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/PDF/LEC3_NEW.pdf

<http://www.paraview.org>

<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/Rwave.htm>

https://faculty.unlv.edu/pburnley/GEOL442_642/RES/NOTES/ResistivityNotes015Layered_02.html