



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ -ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ «ΑΡΧΑΙΑΣ
ΑΓΟΡΑΣ» ΣΤΗΝ ΚΟΙΛΑΔΑ ΤΟΥ ΘΟΡΙΚΟΥ ΑΤΤΙΚΗΣ**

ΕΡΡΙΚΟΣ ΜΠΟΛΛΝΕΡΤ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ,
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018

Εξεταστική επιτροπή

Δρ Αποστολόπουλος Γεώργιος

(Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής Τομέα Μεταλλευτικής

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δρ Καλλιώρας Ανδρέας

Επικ. Καθηγητής Τομέα Γεωλογικών Επιστημών

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δρ Μενεγάκη Μαρία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τομέα Μεταλλευτικής

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Πρωτίστως τον κύριο Γεώργιο Αποστολόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τομέα Μεταλλευτικής, που ήταν υπεύθυνος για την Διπλωματική μου εργασία. Τον ευχαριστώ πολύ για την βοήθεια του τόσο για την αρχική ανάθεση του θέματος της εργασίας, όσο και για τη συνολική καθοδήγηση του από την αρχή έως το πέρας αυτής, καθώς και για την βοήθειά του κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων και την επεξεργασία αυτών.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την συμβολή του κυρίου Γεώργιου Αμολοχίτη, γεωφυσικού και μέλους Ε.Ε.ΔΙ.Π. του Τομέα Μεταλλευτικής, ο οποίος μας βοήθησε εξίσου κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Τον ευχαριστώ επίσης για την βοήθειά του στην συγγραφή του κειμένου και για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την διεκπεραίωση της εργασίας, συμπεριλαμβανομένου και της παρουσίασης αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Καπετάνιο, επιβλέπων αρχαιολόγο κατά την διάρκεια των μετρήσεων, για την συνεργασία του στην διάρκεια των μετρήσεων, καθώς και για τις πολύτιμες πληροφορίες που μας παρείχε κατά την διάρκεια της έρευνας και την συγγραφή της διπλωματικής αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου, τους φίλους, τους καθηγητές και συμφοιτητές, που όλα αυτά τα χρόνια, με βοήθησαν να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες που προέκυψαν, και με απέραντη στήριξη με βοήθησαν να πετύχω τους στόχους κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Ερρίκος Μπόλλνερτ

Φεβρουάριος 2018

Περίληψη

«Γεωφυσική Έρευνα στην Περιοχή της «Αρχαίας Αγοράς» στην κοιλάδα του Θορικού Αττικής.»

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το υπέδαφος και η γύρω περιοχή της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού με γεωφυσικές μεθόδους. Ο σκοπός της έρευνας είναι να εντοπιστούν εάν υπάρχουν ή όχι δομές στο υπέδαφος της περιοχής. Σκοπός των αρχαιολόγων που συνεργάστηκαν για αυτήν την έρευνα είναι να δουν αν τα στοιχεία που προκύπτουν από την γεωφυσική έρευνα ενισχύουν την ερμηνεία περί αγοράς. Αρχικά έγινε σχεδιασμός της γεωφυσικής έρευνας με βοήθεια πληροφοριών της περιοχής, όπως γεωλογικά και αρχαιολογικά στοιχεία. Αφού σχεδιάστηκε η γεωφυσική έρευνα έγιναν μετρήσεις μέσα και έξω από την αγορά με 3 διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI), γεωραντάρ (GPR) και την ηλεκτρική μέθοδο (ERT). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις επί τόπου μη καταστρεπτικές μεθόδους μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Εκεί έγινε επεξεργασία και ερμηνεία των μετρήσεων με την δημιουργία γεωφυσικών χαρτών και τομών. Από την εκτενή ανάλυση, επεξεργασία, και ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκαν κάποιες ανωμαλίες του υπεδάφους, οι οποίες πιθανόν να οφείλονται στην ύπαρξη τοιχίων και άλλων δομών που βρίσκονται στο υπέδαφος.

Λέξεις Κλειδιά: γεωφυσικές μέθοδοι, ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EMI), γεωραντάρ (GPR), ηλεκτρική μέθοδος (ERT), Αρχαία Αγορά Θορικού, Λαύριο, αρχαιολογία, εντοπισμός αρχαιοτήτων.

Abstract

“Geophysical Survey of “Ancient Market” in the Thoriko Attica valley region”.

In the present thesis, the subsurface of Thoriko Ancient Market and the area all around is investigated using geophysical methods. The purpose of this survey is to identify whether or not there are structures on the subsurface of Thoriko Ancient Market. The purpose of the archaeologists, who cooperated in this survey, is to determine whether or not the results that come up from the survey support the theory about ancient market. Initially the geophysical investigation was designed and approached with information gathered concerning this area, such as geological and archaeological data. With the establishment and accomplishment of the geophysical survey, measurements were made inside and outside the ancient market with 3 different geophysical methods: electromagnetic induction method (EMI), the ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity method (ERT). The results of the in-situ non-destructive methods were transferred, for further purposes, to the Laboratory of Applied Geophysics of School of Mining and Metallurgical Engineering, of National Technical University of Athens. The processing and the interpretation of the measurements performed in the laboratory resulted in geophysical maps and sections. The interpretation of the geophysical results showed some underground anomalies, which can potentially demonstrate the existence of walls and other structures that are buried in the subsurface.

Key words: geophysical methods, electromagnetic method (EMI), ground – penetrating radar (GPR), electrical method (ERT), Ancient Market of Thoriko, Lavrio, archaeology, detection of antiquities.

Πίνακας Περιεχομένων

Εξεταστική επιτροπή	3
Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	7
Abstract	9
Ευρετήριο Πινάκων	14
Ευρετήριο Εικόνων.....	15
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	21
1.1 Αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας, γενικά.....	21
1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	23
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	24
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Μέρος	25
2.1 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος Μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και Μαγνητικής Επιδεκτικότητας	25
2.1.1 Γενικά.....	25
2.1.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	25
2.1.3 Μαγνητική Επιδεκτικότητα	26
2.1.4 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου- τρόποι μέτρησης ηλεκτραγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας.....	27
2.1.5 Βάθος και Ανάλυση	29
2.1.6 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης	30
2.1.6.1 Παράγοντες επηρεασμού των μετρήσεων	31
2.1.6.2 Όργανο CMD – EM και οι εφαρμογές του	32
2.1.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.....	32
2.1.7.1 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα αγωγιμότητας	32
2.1.7.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα μαγνητικής επιδεκτικότητας.....	33
2.2 Γεωραντάρ – GPR (Ground Penetrating Radar)	34
2.2.1 Γενικά.....	34
2.2.2 Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ	35
2.2.3 Τρόποι μετρήσεων στο ύπαιθρο	36
2.2.4 Παράμετροι μοντέλων - Ανάλυση μετρήσεων.....	38
2.2.5 Απεικόνιση δεδομένων μετρήσεων γεωραντάρ.....	38
2.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των γεωραντάρ.....	39
2.3 Ηλεκτρικές μέθοδοι.....	40

2.3.1 Γενικά.....	40
2.3.2 Διακρίσεις - Κατηγορίες Ηλεκτρικών Μεθόδων	40
2.3.3 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	41
2.3.3.1 Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης	43
2.3.3.2 Ροή ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο	46
2.3.3.3 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο.....	47
2.3.3.4 Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο	48
2.3.3.5 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση	49
2.3.3.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	49
2.3.3.7 Επιλογή κατάλληλης διάταξης	51
2.3.3.8 Εξοπλισμός Υπαίθρου.....	52
2.3.4 Γεωλεκτρικές Διασκοπήσεις.....	54
2.3.4.1 Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης.....	54
2.3.4.2 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση	55
2.3.5 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας.....	57
2.3.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ηλεκτρικής Μεθόδου	58
Κεφάλαιο 3. Εφαρμογές γεωφυσικής έρευνας σε αρχαιολογικούς χώρους στην διεθνή βιβλιογραφία.....	59
3.1 Γεωφυσική Έρευνα στον Ναό του Απόλλωνα, Hierapolis, Turkey.....	59
3.1.1 Εισαγωγή - Πρόβλημα	59
3.1.2 Μέθοδοι και Όργανα.....	59
3.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων.....	60
3.1.3.1 Μετρήσεις ERT	60
3.1.3.2 Μετρήσεις GPR.....	61
3.1.4 Συμπεράσματα	63
3.2 Γεωραντάρ (GPR) ως μέσο για την χαρτογράφηση και για προσχεδιασμένες ανασκαφές, Petra, Jordan	64
3.2.1 Εισαγωγή - Πρόβλημα.....	64
3.2.2 Μέθοδοι - Όργανα	65
3.2.3 Μετρήσεις GPR.....	66
3.2.4 Συμπεράσματα	67
3.3 Η χρήση της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό τάφων και την χαρτογράφηση νεκροταφείων, Ocmulgee National Monument, Georgia USA	69
3.3.1 Εισαγωγή - Πρόβλημα.....	69
3.3.2 Μέθοδοι - Όργανα.....	70

3.3.3 Μετρήσεις EM	70
3.3.4 Συμπεράσματα	72
Κεφάλαιο 4. Πειραματικό Μέρος	73
4.1 Εισαγωγή	73
4.2 Αρχαιολογία της περιοχής.....	74
4.3 Γεωλογία της περιοχής.....	83
4.3.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής – Λαυρεωτικής	83
4.3.2 Γεωλογία Αρχαίας Αγοράς στο Θορικό	86
4.4 Γεωφυσική Έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και Αποτελέσματα	88
4.4.1 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	88
4.4.1.1 Εισαγωγή	88
4.4.1.2 Μετρήσεις Υπαίθρου - Εξοπλισμός.....	89
4.4.1.3 Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες	92
4.4.2 Γεωραντάρ–GPR(Ground-Penetrating-Radar)	103
4.4.2.1 Εισαγωγή	103
4.4.2.2 Επεξεργασία μετρήσεων	104
4.4.2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων	105
4.4.3 Ηλεκτρική Μέθοδος	110
4.4.3.1 Εισαγωγή	110
4.4.3.2 Μετρήσεις υπαίθρου – Εξοπλισμός.....	111
4.4.3.3 Επεξεργασία μετρήσεων	112
4.4.3.4 Αποτελέσματα Ηλεκτρικής μεθόδου (Ηλεκτρικές Τομογραφίες).....	114
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα - Σχόλια	117
5.1 Συμπεράσματα	117
5.2 Σχόλια	119
Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία.....	121

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα για κάθε μία..... σελ 22

Πίνακας 2.1 : Παράθεση ταχυτήτων διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v), τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) για διάφορους τύπους υλικών..... σελ 35

Πίνακας 2.2: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα..... σελ 44

Πίνακας 2.3 : Εύρος τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα, όπως γρανίτης, γάβρος, σχιστόλιθος, χαλαζίας, ψαμμίτης, άργιλος, αλλουβιακές προσχώσεις. σελ 44

Πίνακας 2.4: Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων..... σελ 45

Πίνακας 2.5 : Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα την περίπτωση της έρευνας..... σελ 51

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Ενδεικτικά μηχανήματα Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου. Στο αριστερό μέρος είναι το EM-31, και στο δεξί μέρος είναι το EM-38 (http://geonicsrental.com/).....	σελ 26
Εικόνα 2.2 : Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)	σελ 28
Εικόνα 2.3 : Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων.	σελ 29
Εικόνα 2.4 : Διάταξη και λειτουργία GPR	σελ 36
Εικόνα 2.5: γραμμές διασκόπησης, στις οποίες η μεταξύ τους απόσταση καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες της έρευνας	σελ 37
Εικόνα 2.6 : Η μέθοδος του ανακλαστικού προφίλ (common offset reflection survey).....	σελ 37
Εικόνα 2.7: Μέθοδος CMP(common midpoint).	σελ 37
Εικόνα 2.8 : Σχηματική αναπαράσταση δεδομένων το GPR: Α) Σε 2D , Β) Σε 3D με ενδεικτικό slicemap.....	σελ 39
Εικόνα 2.9: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.	σελ 42
Εικόνα 2.10 : Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο	σελ 47
Εικόνα 2.11 : Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημχώρο	σελ 48
Εικόνα 2.12 : Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημχώρου.....	σελ 48
Εικόνα 2.13: Διατάξεις ηλεκτροδίων.	σελ 50
Εικόνα 2.14 : Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης στο ύπαιθρο και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος.....	σελ 53
Εικόνα 2.15: Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης Dipole–Dipole (α), Wenner (β) και Schlumberger (γ)	σελ 55
Εικόνα 2.16: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης	σελ 56
Εικόνα 2.17: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγόριθμου	σελ 58

Εικόνα 2.18: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων	σελ 58
Εικόνα 3.1 : Τομές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης(P1,P2) έξω από τον Ναό του Απόλλωνα	σελ 60
Εικόνα 3.2 : Διαγράμματα τομών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης,(a) τομή P1 και (b) τομή P2	σελ 61
Εικόνα 3.3: Τομές γεωραντάρ R1, R2, R3, μέσα στον Ναό του Απόλλωνα.....	σελ 62
Εικόνα 3.4: Τομές γεωραντάρ R4, R5, R6, μέσα στον Ναό του Απόλλωνα.....	σελ 62
Εικόνα 3.5: Τοποθεσία της πόλης Πέτρα στην Ιορδανία	σελ 64
Εικόνα 3.6 : Η περιοχή έρευνας του γεωραντάρ της «κάτω Αγοράς». Οι πυλώνες και το χώμα τοποθετήθηκαν εκεί αφού είχαν γίνει οι μετρήσεις και οι ανασκαφές.....	σελ 65
Εικόνα3.7: Slicemaps για τα βάθη 0-25cm, 25-50cm ,50-75cm αντίστοιχα.....	σελ 66
Εικόνα 3.8: slicemap του grid 2, βάθος 25-50 cm με τις τοποθεσίες των πρώτων δοκιμαστικών εκσκαφών (trench 6,trench 8) στις γωνίες του κτίσματος	σελ 66
Εικόνα 3.9 : Ενδεικτική τομή γεωραντάρ όπου φαίνονται οι θέσεις και τα βάθη των τοίχων που έγινε η ανασκαφή τους, καθώς και πιθανών σημείων στα οποία θα γίνει ανασκαφή	σελ 67
Εικόνα 3.10 : Η περιοχή έρευνας του γεωραντάρ της «κάτω Αγοράς», αφότου έχουν γίνει οι δοκιμαστικές ανασκαφές που αναγραφονται ως Tr1,..Tr9 (Trenches).....	σελ 67
Εικόνα 3.11 : A) Αεροφωτογραφία του Οκμούλγκι, B) το ανάχωμα κοιτάζοντας προς τον βορρά	σελ 70
Εικόνα 3.12 : Περιοχή έρευνας block 1	σελ 71
Εικόνα 3.13 : Περιοχή έρευνας block 2	σελ 71
Εικόνα 3.14: Ψηφιοποιημένος χάρτης της περιοχής με χρήση δεδομένων αγωγιμότητας από το block 1 & block 2	σελ 72
Εικόνα 4.1: Περιοχή Αρχαίας Αγοράς και Αρχαίου Θεάτρου του Θορικού στην Λαυρεωτική.....	σελ 73

Εικόνα 4.2: α) Λίθινα εργαλεία από το σπήλαιο του Κίτσου, β) Λίθινο «μεταλλευτικό» σφυρί	σελ 74
Εικόνα 4.3 : Το αρχαίο θέατρο του Θορικού	σελ 78
Εικόνα 4.4: Πανοραμική φωτογραφία της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού.....	σελ 78
Εικόνα 4.5 : Αρχαίο πλυντήριο εμπλουτισμού μεταλλευμάτων στην περιοχή του Θορικού	σελ 79
Εικόνα 4.6: Η αρχαιότερη μεταλλευτική στοά της περιοχής της ΝΑ Αττικής.....	σελ 80
Εικόνα 4.7 : Τοπογραφικό σχέδιο της ανασκαφικής ζώνης του αρχαίου θεάτρου του Θορικού όπως αποτυπώθηκε από την Βέλγικη Αρχαιολογική Αποστολή.....	σελ 81
Εικόνα 4.8: Στρωματογραφική στήλη Ευρύτερης περιοχής της Λαυρεωτικής.....	σελ 85
Εικόνα 4.9: Γεωλογικός χάρτης Αττικής, με κόκκινο φαίνεται η περιοχή της Λαυρεωτικής.....	σελ 86
Εικόνα 4.10: γεωλογικός χάρτης της περιοχή της Λαυρεωτικής (μεγέθυνση).....	σελ 86
Εικόνα 4.11: Γεωφυσικές μετρήσεις στην περιοχή έρευνας με την χρήση του google earth.	σελ 88
Εικόνα 4.12: Μετρήσεις με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο στην Αρχαία Αγορά του Θορικού	σελ 89
Εικόνα 4.13: Το ηλεκτρομαγνητικό όργανο CMD της GF instruments.....	σελ 89
Εικόνα 4.14: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 1, για βάθος 1,5m : (Α) Ηλεκτρικές Αγωγιμότητες , (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικές Επιδεκτικότητες.....	σελ 92
Εικόνα 4.15: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 1, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικές Αγωγιμότητες , (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικές Επιδεκτικότητες	σελ 93
Εικόνα 4.16: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 2, για βάθος 1,5m : (Α) Ηλεκτρικές Αγωγιμότητες , (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικές Επιδεκτικότητες	σελ 94

- Εικόνα 4.17: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 2, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων σελ 95
- Εικόνα 4.18: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 3, για βάθος 1,5 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων σελ 96
- Εικόνα 4.19: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 3, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων σελ 98
- Εικόνα 4.20: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 2, για βάθος 1,5 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων σελ 99
- Εικόνα 4.21: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 4, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων σελ 100
- Εικόνα 4.22: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες της συνολικής περιοχής που πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική έρευνα, για βάθη: (Α) 1,5m και (Β) 3 m σελ 101
- Εικόνα 4.23: Τομές γεωραντάρ με τις ονομασίες τους, περιοχή 1 κόκκινο , περιοχή 2 μπλε, περιοχή 3 μοβ, περιοχή 4 πορτοκαλί σελ 103
- Εικόνα 4.24: Λήψη μετρήσεων γεωραντάρ στην περιοχή της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού από τους κυρίους Αποστολόπουλο και Αμολοχίτη σελ 105
- Εικόνα 4.25 : Τομή T211 της περιοχής 1 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz..... σελ 105
- Εικόνα 4.26: Τομή T222R της περιοχής 2 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz..... σελ 106
- Εικόνα 4.27: α) Τομή T239R της περιοχής 3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz
β) Τομή T2311R της περιοχής 3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz..... σελ 107
- Εικόνα 4.28: Τομή T237R της περιοχής 3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz..... σελ 108
- Εικόνα 4.29: Τομές γεωραντάρ (GPR) με μορφή τρισδιάστατης απεικόνισης..... σελ 109
- Εικόνα 4.30: Γεωηλεκτρικές τομές στην περιοχή της γεωφυσικής έρευνας με την χρήση του google earth σελ 111

Εικόνα 4.31: Όργανο μέτρησης SYSCALPro	σελ 111
Εικόνα 4.32: Γεωηλεκτρική Τομή Thor2-R-1 με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ	σελ 114
Εικόνα 4.33: Γεωηλεκτρική τομή Thor2-R-2 με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ	σελ 115
Εικόνα 4.34: Γεωηλεκτρική τομή Thor2-R-3 με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ	σελ 116

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας, γενικά.

Η Γεωφυσική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της Γης, στηριζόμενη στις βασικές αρχές της Φυσικής. Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική μελετά τις φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών μιας περιοχής, με σκοπό την αποτύπωση τους και τον εντοπισμό υπεδαφικών δομών ενδιαφέροντος.

Με άλλα λόγια, η γεωφυσική εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες του εδάφους και των υλικών, έχοντας όμως ένα μεγάλο περιορισμό. Αυτός είναι ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο ανωμαλίες, δηλαδή σημεία στα οποία κάποια φυσική ιδιότητα παρουσιάζει επαρκώς διαφορετική τιμή από τον περιβάλλοντα χώρο. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες του εδάφους και των υλικών λαμβάνονται από ειδικά όργανα και διατάξεις. Αυτό έχει ένα σοβαρό αποτέλεσμα για το μέλλον της γεωφυσικής. Η γεωφυσική εξαρτάται άμεσα από την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Συνεχώς νέες τεχνολογίες δημιουργούνται, κάνοντας την επιστήμη της Γεωφυσικής ολοένα και πιο αξιόπιστη και αναγκαία.

Επίσης, για να έχουμε μεγαλύτερη επιτυχία στην ακρίβεια μπορούμε να εφαρμόσουμε περισσότερες από μία γεωφυσικές μεθόδους. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ή συνδυασμού μεθόδων, για την αντιμετώπιση του εκάστοτε γεωφυσικού προβλήματος εξαρτάται από δύο παράγοντες. Πρώτα από τη φύση του σχηματισμού, τον οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε, καθώς και του περιβάλλοντός του. Με βάση τη λογική αυτή επιλέγεται η μέθοδος η οποία βασίζεται στη φυσική εκείνη ιδιότητα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαφοροποίηση τιμών, μεταξύ στόχου και περιβαλλόντων πετρωμάτων.

Το αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας ήταν αρχικά ο εντοπισμός υπόγειων μεταλλοφόρων κοιτασμάτων. Καθώς τα χρόνια πέρασαν και η τεχνολογική ανάπτυξη ήταν ραγδαία, τα αντικείμενα της γεωφυσικής διευρύνθηκαν. Τώρα η επιστήμη της γεωφυσικής ασχολείται με τον ευρύτερο τομέα των υποδομών, την εύρεση θεμελίωσης κτισμάτων, έγκοιλων, αρχαιολογικών θαμμένων στόχων, βαθιούς δόμους, στους οποίους πιθανά να υπάρχουν υδρογονάνθρακες κ.ά. Με τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η γεωφυσική επιστήμη έχει εισέλθει σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, κάνοντας την απαραίτητη σχεδόν για κάθε είδους έργου που πραγματοποιείται.

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΣΤΟΧΟΣ
Βαρυτική Μέθοδος	Ένταση πεδίου βαρύτητας	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων
Μαγνητική Μέθοδος	Ένταση γεωμαγνητικού πεδίου	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της παραμένουσας μαγνήτισης
Σεισμική Μέθοδος	<ul style="list-style-type: none"> - Χρόνοι διαδρομής σεισμικών κυμάτων - Περίοδοι σεισμικών κυμάτων - Πλάτη σεισμικών κυμάτων 	Καθορισμός της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων
Ηλεκτρική Μέθοδος	<ul style="list-style-type: none"> - Ειδική ηλεκτρική αντίσταση της γης - Ηλεκτρικά δυναμικά 	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροχωριτικότητα)
Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	Αντίδραση σε ηλεκτρομαγνητική διέγερση	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή)
Ραδιομετρική Μέθοδος	Φυσική ραδιενέργεια	Προσδιορισμός της φυσική ραδιενέργειας των πετρωμάτων
Θερμική Μέθοδος	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα για κάθε μία

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την επίλυση του εκάστοτε γεωφυσικού προβλήματος εξαρτάται, κυρίως από την φύση του σχηματισμού που θέλουμε να προσδιορίσουμε, καθώς και του περιβάλλοντος μέσα στον οποίο βρίσκεται.

Με βάση την λογική αυτή συνήθως επιλέγεται η μέθοδος η οποία βασίζεται στην φυσική εκείνη ιδιότητα που παρουσιάζει την μεγαλύτερη διαφοροποίηση τιμών, μεταξύ «στόχου» και περιβαλλόντων πετρωμάτων πχ. για τον μαγνητίτη ιδανική μέθοδος είναι η μαγνητική μέθοδος, για τον εντοπισμό του υπόγειου υδροφόρου

κατάλληλες είναι οι ηλεκτρικές και οι σεισμικές μέθοδοι διότι ως κορεσμένο πέτρωμα παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σεισμικής ταχύτητας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σχέση με το αντίστοιχο ακόρεστο.

Προκειμένου όμως να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια στα συμπεράσματα της έρευνας συνηθίζεται να εφαρμόζονται περισσότερες από μία γεωφυσικές μέθοδοι, με βάση πάντα την διαφοροποίηση στις φυσικές ιδιότητες των σχηματισμών και του γύρω περιβάλλοντός τους.

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση Γεωφυσικής έρευνας στην Αρχαία Αγορά του Θορικού και την γύρω περιοχή.

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να εντοπίσουμε τυχόν τοπικές δομές, καθώς και την στρωματογραφία της περιοχής, ώστε να δούμε από τι αποτελείται το υπόβαθρο, καθώς και τις θαμμένες αρχαιολογικές δομές (τοιχεία, κομμάτια κολόνων).

Με βάση τη φύση του προβλήματος, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά και αρχαιολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν οι εξής γεωφυσικές μέθοδοι με την ακόλουθη σειρά:

- Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (EMI)
- Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR)
- Ηλεκτρική Μέθοδος (ERT)

Για την κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν τα κατάλληλα όργανα που παρείχε το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του ΕΜΠ. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με την διαμόρφωση του CMD-2, με βάθος συνολικής διασκόπησης το 1,5 m, όπως και τα 3 m, αλλάζοντας μία ρύθμιση στο όργανο. Για τις μετρήσεις της μεθόδου του GPR χρησιμοποιήθηκε θωρακισμένη κεραία της MALA Geoscience, με την διάταξη πηγής και δέκτη η κεραία των 250MHz. Τέλος το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCALPro.

Στην συνέχεια επεξεργάστηκαν τα δεδομένα από τις μετρήσεις της κάθε μεθόδου, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα:

- Surfer Golden Software
- RES2DINV Geotomo Software
- REFLEXW Sandmeier Scientific Software

Με την επεξεργασία βγήκαν ορισμένα συμπεράσματα σε σχέση με την στρωματογραφία του υπεδάφους, καθώς και για τις τοπικές ανωμαλίες που υπήρχαν στο υπέδαφος. Επίσης εντοπίστηκαν πιθανές δομές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, όπου θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από τους αρχαιολόγους.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο και επιπλέον 5 κεφάλαια, συνθέτουν την παρούσα διπλωματική εργασία. Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία κάθε μεθόδου που εφαρμόστηκε στην έρευνά μας (ηλεκτρομαγνητική, γεωραντάρ, ηλεκτρική).

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε εφαρμογές της γεωφυσικής στην αρχαιολογία. Αναλύονται περιληπτικά 3 παρόμοιες υποθέσεις (case study) της γεωφυσικής από την διεθνή βιβλιογραφία (Τουρκία, Ιορδανία, ΗΠΑ). Στόχος της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι να γίνει επεξεργασία του τρόπου αντιμετώπισης που εφάρμοσαν άλλες ομάδες για την επίλυση αντίστοιχων προβλημάτων με το δικό μας.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή της γεωφυσικής έρευνας της συγκεκριμένης εργασίας, που έλαβε τόπο στην Αρχαία Αγορά του Θορικού. Αρχικά παρουσιάζεται η περιοχή έρευνας (τοποθεσία, ιστορικά στοιχεία, γεωλογία). Έπειτα συνεχίζει με την παρουσίαση της κάθε μεθόδου ξεχωριστά. Συγκεκριμένα παρουσιάζει τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε στο ύπαιθρο, την επεξεργασία που έγινε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, και τέλος τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και η ερμηνεία αυτών.

Στο 5^ο κεφάλαιο δίνονται εκτενώς τα συνολικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται σχόλια για περαιτέρω έρευνα και ανασκαφές στην περιοχή.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη και επιχειρηματολογία των κεφαλαίων.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Μέρος

2.1 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος Μέτρησης Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας και Μαγνητικής Επιδεκτικότητας

2.1.1 Γενικά

Η Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EMI) χρησιμοποιείται για την έρευνα του υπεδάφους, κάνοντας χρήση της απόκρισης του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενη ηλεκτρική ένταση και μαγνητική δύναμη. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Η κλασική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος εφαρμόζεται με πολλές παραλλαγές συστημάτων μέτρησης (επίγεια ή από αέρος, χώρος χρόνου ή συχνοτήτων, κλπ.) που έχουν και αντίστοιχες δυνατότητες με πολύ μεγάλη ποικιλία εφαρμογών :

- Μεταλλευτική έρευνα
- Εντοπισμός ρύπανσης υδατικών πόρων
- Εντοπισμός μετώπου υφαλμύρισης
- Γεωλογική χαρτογράφηση, χαρτογράφηση εδαφών, κροκαλών
- Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων (σωληνώσεις, δεξαμενές, τοιχία, κλπ.)
- Αρχαιολογική έρευνα
- Εντοπισμός εγκοίλων (σπήλαια, εγκαταλελειμμένες σήραγγες, κλπ.)

Η μέθοδος είναι γρήγορη στην απόκτηση δεδομένων χωρίς την ανάγκη ηλεκτροδίων στο έδαφος. Το βάθος διασκόπισης είναι συγκεκριμένο για συγκεκριμένη συχνότητα ή απόσταση πομπού-δέκτη.

2.1.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα το ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό, και μετριέται σε Siemens ανά μέτρο (S/m). Ένα Siemens είναι το αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με 1/Ohm. Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, αλλά όπως συζητήθηκε νωρίτερα, τα στοιχεία αγωγιμότητας

δεν είναι συχνά συγκρίσιμα με τις μετρήσεις αντίστασης που λαμβάνονται με τα συστήματα των ηλεκτροδίων.

Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται συνήθως σε μετρήσεις που συλλέγονται με ένα όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε για την αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε στις μετρήσεις που λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) επαγωγής. Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάσουν με τους χάρτες των δεδομένων ειδικής αντίστασης και μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι μερικές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συνήθως από έναν μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας ενδεχομένως τα όρια ανωμαλίας. Όπως στην αντίσταση, η αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βασισμένες στις αντιθέσεις της επίγεια υγρασίας ή τον τύπο υλικού. Τα μικρά κοιλώματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματοургικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν πολύ αποτελεσματικά.



Εικόνα 2.1: Ενδεικτικά μηχανήματα Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου. Στο αριστερό μέρος είναι το EM-31, και στο δεξί μέρος είναι το EM-38 (<http://geonicsrental.com/>)

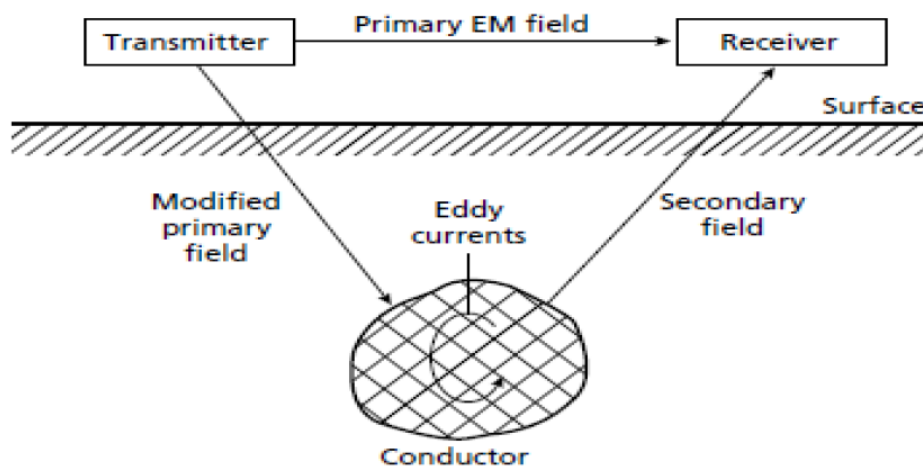
2.1.3 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας ενός υλικού για να μαγνητιστεί παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου. Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου (κ) ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ), αλλά όταν μετρείται με το EM38 ή παρόμοια όργανα δίνεται ως αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο.

Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία προερχόμενα από την εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων, έτσι όλες οι ουσίες αντιδρούν (είναι ευαίσθητες) στα κοντινά μαγνητικά πεδία μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει τη μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και των υδροξειδίων στις εντονότερα μαγνητικές μορφές, έτσι το χώμα είναι πολύ περισσότερο μαγνητικό από τα στρώματα του υπεδάφους. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα επί των αρχαιολογικών τόπων να είναι συνήθως πιο μαγνητικά από εκείνα στις περιβάλλουσες μη-πολιτιστικές περιοχές. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους των χωμάτων, και επίσης με την αύξηση της εδαφολογικής θερμοκρασίας μέσω της πυρκαγιάς. Μπορούν επίσης να ενσωματώσουν καμένα ή υψηλής επιδεκτικότητας υλικά στο έδαφος. Οι πυρκαγιές, είτε φυσικές είτε προκαλούμενες από τον άνθρωπο, επίσης ενισχύουν την μαγνητική επιδεκτικότητα. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας επί των αρχαιολογικών τόπων, με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα να ανιχνευθούν τα τεχνητά αντικείμενα. (Dalan, R. A. 2006)

2.1.4 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου-τρόποι μέτρησης ηλεκτραγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας

Οι ηλεκτρομαγνητικές (EM) μέθοδοι έρευνας χρησιμοποιούν την απόκριση του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα αρχικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να παραχθούν με τη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός μικρού πηνίου φτιαγμένου με πολλές περιελίξεις καλωδίου ή μέσω ενός μεγάλου βρόγχου του καλωδίου. Η απόκριση του εδάφους είναι η παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα τελικά πεδία μπορούν να ανιχνευθούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που ρέουν σε ένα πηνίο δέκτη με τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όλοι οι σχηματισμοί με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μερικοί χώροι μεταλλεύματος που περιέχουν τα μεταλλεύματα που είναι μονωτές, μπορούν να παράγουν δευτερογενή πεδία εάν επαρκείς ποσότητες ενός βοηθητικού μεταλλεύματος με μια υψηλή αγωγιμότητα είναι παρούσες. Παραδείγματος χάριν, ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούνται πάνω από συγκεκριμένου σουλφιδίου μεταλλεύματα, οφείλονται στην παρουσία αγωγίμου ορυκτού πυρροτίτη που είναι διεσπαρμένο σε όλο το χώρο του μεταλλεύματος.



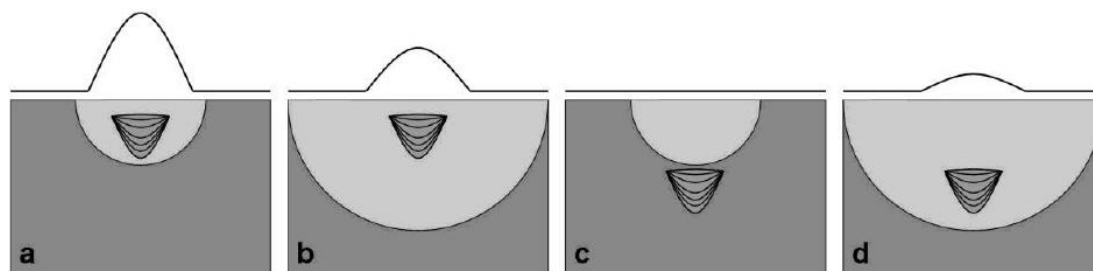
Εικόνα 2.2 :Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Αν υπάρχει λοιπόν αγώγιμο υλικό στο υπέδαφος, με βάση την προηγούμενη συνοπτική θεωρητική ανάλυση, η μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος επάγει εναλλασσόμενα ρεύματα (Eddy Currents) μέσα στον αγωγό. Τα ρεύματα αυτά παράγουν δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται από το πηνίο – δέκτη. Ο δέκτης επίσης ανιχνεύει το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς που διαφέρουν ως προς τη φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από τις σχετικές θέσεις και τους προσανατολισμούς των πηνίων) και το μέγεθος και η σχετική φάση του δευτερογενούς πεδίου μπορούν να υπολογιστούν. Η διαφορά στο τελικό πεδίο από το πρωτογενές δίνει πληροφορία για τη γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού στο υπέδαφος.

Το δευτερογενές πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε συνιστώσες σε φάση και σε εκτός φάσης 90° ως προς το πρωτογενές πεδίο. Η εκτός φάσης συνιστώσα χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες υποθέσεις μπορεί να μετατραπεί σε υπολογιζόμενη φαινόμενη αγωγιμότητα. Η σε φάση συνιστώσα, γενικά μη υπεύθυνη για τις αλλαγές της χωρικής αγωγιμότητας είναι ειδικά υπεύθυνη για τον εντοπισμό υψηλής αγωγιμότητας σωμάτων όπως τα μεταλλικά. Η μετρούμενη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι η μέση αγωγιμότητα ενός ή περισσότερων στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης του οργάνου σε βάθος έρευνας που σχετίζεται με την απόσταση των πηνίων, τη διεύθυνση, τη συχνότητα λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους. (Λούης, 2004)

2.1.5 Βάθος και Ανάλυση

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετριοούνται με την «EMI» εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, η ειδική συχνότητα, το ύψος των αισθητήρων επάνω από το έδαφος, και ο προσανατολισμός των σπειρών. Αρχικά εξετάζεται η συχνότητα. Τα πεδία χαμηλότερης συχνότητας της «EMI» έχουν πιο μεγάλα μήκη κύματος, και είναι επομένως ικανά να διαπεράσουν βαθύτερο στο έδαφος. Γενικά η διείσδυση σε βάθος είναι μεγαλύτερη για τις χαμηλότερες συχνότητες. Βέβαια, το μειονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι ότι ένας μεγαλύτερος όγκος γης μετριέται, επομένως τα μικρά αντικείμενα όπως τα αρχαιολογικά στοιχεία δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μια υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα έχει μικρότερο βάθος, έτσι ώστε τα αρχαιολογικά στοιχεία να αποτελούν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου. Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση ώστε να ανιχνευθούν τα μικρότερα στοιχεία, αλλά οι χαμηλότερες συχνότητες μπορούν να επιτρέψουν την ανίχνευση των σχετικά μεγάλων ή υψηλών στόχων αντίθεσης που είναι πάρα πολύ βαθιοί και ειδήλλως δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Αν και τα ρηχά αντικείμενα, ίσως να μπορούν να ανιχνευθούν επαρκώς με χαμηλές συχνότητες, οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες για την ανίχνευση των αρχαιολογικών στοιχείων (**Εικόνα 2.3**). Επομένως δεν είναι έκπληξη ότι το «Geonics EM38» χρησιμοποιείται τόσο συχνά και τα όργανα χαμηλότερης συχνότητας όπως EM31 χρησιμοποιούνται για τους βαθύτερους και μεγαλύτερους στόχους.



Εικόνα 2.3 : Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικειμένου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (a) ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετριέται με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι ο στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος, 2008)

Εμπειρικά, ένα βάθος διείσδυσης z_e , το οποίο αντιπροσωπεύει το μέγιστο βάθος στο οποίο ένα αντικείμενο μπορεί να βρεθεί δίνεται από τον παρακάτω τύπο. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

$$z_e = 100/\sqrt{\sigma f}$$

Το ύψος του οργάνου επάνω από το έδαφος είναι επίσης ένας κύριος παράγοντας που έχει επιπτώσεις στην ευαισθησία του βάθους. Δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ του πηνίου δέκτη και των αντικειμένων αυξάνεται, η απόκριση από το αντικείμενο μικραίνει. Πέρα από το μέγιστο επιφανειακό βάθος, το σήμα επιστροφής από ένα αντικείμενο είναι πάρα πολύ μικρό για να ανιχνευθεί. Η ευαισθησία βάθους μπορεί επομένως να αυξηθεί με το να φέρουμε το όργανο όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη χρησιμοποίηση των οργάνων υψηλής συχνότητας όπως το EM38 επειδή το βάθος διείσδυσης είναι περιορισμένο.

Ένας άλλος σοβαρός παράγοντας που έχει επιπτώσεις στο βάθος διείσδυσης είναι ο προσανατολισμός των πηνίων (σπειρών). Οι δύο πιο κοινοί προσανατολισμοί είναι να κρατηθούν οι σπείρες είτε οριζόντιες είτε κάθετες όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους. Εάν οι δύο σπείρες τοποθετούνται οριζόντια στην επιφάνεια του εδάφους (φανταστείτε δύο ρόδες που βρίσκονται στο έδαφος) ο προσανατολισμός τους καλείται οριζόντιο συνεπίπεδο. Σε αυτήν την θέση ο οριζόντιος πομπός παράγει ένα μαγνητικό πεδίο του οποίου οι γραμμές ροής προέρχονται κάθετα, τον οποίο προσανατολισμό ονομάζουμε κάθετο μαγνητικό δίπολο (ή απλά «κάθετος τρόπος»). Σε αυτήν την θέση υπάρχει μέγιστη ενεργειακή διείσδυση στο έδαφος. Αυτός είναι ο πιο κοινός προσανατολισμός για τις περισσότερες αρχαιολογικές έρευνες. Όταν οι σπείρες κρατιούνται κάθετα όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός ονομάζεται κάθετο συνεπίπεδο και η μαγνητική ροή που προέρχεται από το πομπό είναι οριζόντια, αποκαλούμενος οριζόντιος μαγνητικός προσανατολισμός δίπολων («οριζόντιος τρόπος»). Σε αυτήν την θέση ένα πολύ μικρότερο μέρος του προκληθέντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαπερνά το έδαφος και έτσι η διείσδυση βάθους μειώνεται. (Witten, A. J. 2006)

2.1.6 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης

Είναι δυνατό με ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις να βρούμε την αγωγιμότητα του υπεδάφους. Το δευτερογενές EM πεδίο μετράται με ένα κινητό σύστημα πομπού – δέκτη μέσω μιας σύνθετης συνάρτησης της απόστασης μεταξύ των πηνίων s , της συχνότητας λειτουργίας f και της αγωγιμότητας του υπεδάφους σ . Ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν το πηλίκο του s δια του βάθους διείσδυσης d , γνωστό ως «αριθμός επαγωγής», είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα, τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i\omega s^2}{4}$$

Όπου, H_s και H_p είναι τα πλάτη του δευτερογενούς και πρωτογενούς EM ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αντίστοιχα, $\omega=2\pi f$, μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, και η παρουσία του $i = (-1)^{1/2}$, δείχνει ότι μετράται η εκτός φάσης (φανταστική) συνιστώσα

Έτσι, η αναλογία H_s/H_p είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του εδάφους. Δεδομένου ότι το d εξαρτάται από το γινόμενο sf , εκτίμηση της μέγιστης πιθανής τιμής του σ , μας επιτρέπει την επιλογή του f , έτσι ώστε η ανωτέρω προϋπόθεση για χαμηλό «αριθμό επαγωγής» ικανοποιείται. Το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από το s και είναι ανεξάρτητο από την κατανομή της αγωγιμότητας του υπεδάφους. Μετρήσεις που λαμβάνονται με χαμηλό «αριθμό επαγωγής», δίνουν την φαινόμενη αγωγιμότητα σ_a :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} * \frac{H_s}{H_p}$$

Η παραπάνω σχέση επιτρέπει την κατασκευή των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων που παρέχουν άμεση ανάγνωση της αγωγιμότητας εδάφους σε ένα προκαθορισμένο βάθος. Μια τέτοια εφαρμογή του πομπού – δέκτη τοποθετημένων σε έναν βραχίονα 3,7m μεταξύ τους, παρέχοντας ένα σταθερό βάθος διείσδυσης περίπου 6m, είναι το όργανο CMD4. Το όργανο αυτό επιτρέπει την γρήγορη εκτέλεση έρευνας κατά μήκος γραμμών σε βάθος χρήσιμο για τους μηχανικούς και για αρχαιολογικές έρευνες. Όταν ένα μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης απαιτείται, ένα άλλο σύστημα μέτρησης χρησιμοποιείται με τα πηνία πομπού και δέκτη σε μεταβαλλόμενη απόσταση ανάλογα με το βάθος. Μεταβάλλοντας την απόσταση, άρα και το βάθος, διενεργούμε ηλεκτρομαγνητική βυθοσκόπηση.

2.1.6.1 Παράγοντες επηρεασμού των μετρήσεων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι :

- Πετρολογία περιοχής
- Παρουσία αργίλων που είναι πολύ αγωγίμοι
- Υγρασία
- Πορώδες
- Αγωγιμότητα του υπεδαφικού ύδατος
- Στρωματογραφία

- Πρόσκαιρες αλλαγές στην αγωγιμότητα του υπεδάφους, λόγω αλλαγής της υγρασίας, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της θερμοκρασίας
- Πρόσθεση ή αφαίρεση διαλελυμένων ρυπαντών

Η σε φάση συνιστώσα είναι η άλλη μέτρηση του οργάνου. Ορίζεται σαν σχετική ποσότητα σε ppt (part per thousand), μέρος ως προς χίλια, του πρωτογενούς μαγνητικού πεδίου και είναι άμεσα συσχετιζόμενο με την μαγνητική επιδεκτικότητα του μετρούμενου υλικού. Η σε φάση συνιστώσα παρέχει την ένδειξη παρουσίας μεταλλικών αντικειμένων, όπως καλωδίων, αγωγών, πλέγματος από μπετόν, δεξαμενών, κλπ. Έτσι μπορεί κανείς με τη σε φάση συνιστώσα να διακρίνει μεταξύ των τεχνητών κατασκευών από την γεωλογία της περιοχής που αποτυπώνεται από τον χάρτη φαινόμενης αγωγιμότητας.

2.1.6.2 Όργανο CMD – ΕΜ και οι εφαρμογές του

Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in – phase μέτρηση, ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με τη διαμόρφωση. Οι τυπικές εφαρμογές του οργάνου είναι :

Στη γεωτεχνική έρευνα (αξιολόγηση βραχώδους υποβάθρου, αποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων, κλπ)

Στη γεωλογική χαρτογράφηση περιοχών (αναζήτηση κοιτασμάτων, γεωλογική έρευνα, εντοπισμός σπηλαιωμάτων, κλπ)

Στη γεωργία (προσδιορισμός ποιότητας εδάφους, διαχείριση νερού και λιπασμάτων)

Στην αρχαιολογία (εντοπισμός τοιχίων, ιστορική έρευνα σπηλαιωμάτων, εντοπισμός υπόγειων στοών, κλπ)

Για περιβαλλοντικούς σκοπούς (σε υδρογεωλογικές εφαρμογές, σε σημεία ρύπανσης, για διαχείριση νερού λεκανών)

Το όργανο CMD μπορεί με την κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.

2.1.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

2.1.7.1 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα αγωγιμότητας

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς επίσης και μειονεκτήματα στην έρευνα αγωγιμότητας. Έναντι της ειδικής αντίστασης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν γρηγορότερα επειδή δεν υπάρχει καμία ανάγκη να παρεμβληθούν ηλεκτρόδια στο έδαφος ή να ξαναγίνουν περιστασιακά οι μακρινοί έλεγχοι. Επίσης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν στις περιοχές με πολύ ξηρό ή

σκληρό έδαφος, όπου τα ηλεκτρόδια είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν, ή το ρεύμα δεν θα ρεύσει λόγω της έλλειψης υγρασίας. Οι πολύ ξερές συνθήκες επιφάνειας δεν είναι απαραίτητως μια ένδειξη ότι το έδαφος κάτω από την επιφάνεια είναι πάρα πολύ ξηρό για να παρέχει μια αρκετή αντίθεση, συχνά επαρκής υγρασία βρίσκεται μόνο μερικά εκατοστόμετρα κάτω από τα ηλεκτρόδια. Τα όργανα της «EMI» μπορούν επίσης να «πακεταριστούν» και να μεταφερθούν ευκολότερα εξ αιτίας του μικρότερου μεγέθους τους. Τα μειονεκτήματα των ερευνών αγωγιμότητας περιλαμβάνουν την ευαισθησία του EM38 στην ηλεκτρική παρέμβαση (π.χ., φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια) και τα συντρίμια μετάλλων (Bevan 1998, Clark 1996, Clay 2006). Σε ορισμένες περιπτώσεις, εντούτοις, η ευαισθησία του EM38 στο μέταλλο είναι ένα πλεονέκτημα, όπως μες στα πεδία μάχης ή άλλες περιοχές όπου τα χειροποίητα αντικείμενα μετάλλων είναι μεταξύ των στόχων που θέλουμε να βρεθούν (Bevan 1998 Heckman 2005).

2.1.7.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα μαγνητικής επιδεκτικότητας

Οι μαγνητικές έρευνες, μαγνητικής επιδεκτικότητας δεν χρησιμοποιούνται πολύ στην αρχαιολογία, τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ένας λόγος είναι η πολυπλοκότητα της οργάνωσης των μηχανισμών, και τα όρια της διείσδυσης σε βάθος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η τρέχουσα έλλειψη σταθερών και βελτιωμένων οργάνων. Το EM38 είναι ευρέως διαθέσιμο, αλλά είναι επιρρεπές στην κλίση και τα στοιχεία μερικές φορές είναι δύσκολο και χρονοβόρο να επεξεργαστούν. Βέβαια, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στην μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Το γεγονός ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα που μετριέται με την «EMI» είναι μια ενεργή μέθοδος σημαίνει ότι δεν περιορίζεται στην κατεύθυνση και τη δύναμη του γήινου μαγνητικού πεδίου (σε αντιδιαστολή με τη μαγνητομετρία), έτσι μπορεί να εντοπίσει τα στοιχεία ανεξάρτητα από τη γεωμετρία. Μερικές έρευνες έχουν δείξει ότι με τη μαγνητική επιδεκτικότητα μπορούν να ανιχνευτούν κάτω από την επιφάνεια πολιτιστικά στοιχεία που δεν ανιχνεύονται με τη μαγνητομετρία. Το Geonics EM38 είναι πιθανώς το καλύτερο για τη γρήγορη κάλυψη περιοχής και την καλή διείσδυση βάθους για τις αρχαιολογικές εφαρμογές. (Ernenwein E. G., 2009)

2.2 Γεωραντάρ – GPR (Ground Penetrating Radar)

2.2.1 Γενικά

Η μέθοδος του γεωραντάρ (GPR) είναι μια πολύ αποδεκτή γεωφυσική τεχνική απεικόνισης του υπεδάφους σε υψηλή ανάλυση. Παρόλο που το GPR χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα για να διεισδύσει στο υπέδαφος, ελέγχοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών με την χρήση υψηλών συχνοτήτων. Το GPR είναι μη καταστρεπτική μέθοδος. Παλαιότερα χρησιμοποιούταν αποκλειστικά σχεδόν για γεωλογικούς σκοπούς όπως χαρτογράφηση υδροφόρων οριζόντων, απεικόνιση γεωλογικών σχηματισμών. Αλλά την σημερινή εποχή έχει διάφορες άλλες εφαρμογές όπως στον μη καταστρεπτικό έλεγχο τσιμεντένιων κατασκευών, για την ακριβή τοποθεσία θαμμένων τοίχων ή κτισμάτων για την αρχαιολογία. (Harry M.Jol 2009)

Η μέθοδος των γεωραντάρ εφαρμόζεται σε περιοχές με σχηματισμούς υψηλών σχετικά ειδικών αντιστάσεων. Βασίζεται στην ανάκλαση υψηλών συχνοτήτων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από 8MHz έως 4GHz, σε ασυνέχειες μέσων, των οποίων η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα μεταβάλλονται. Η διηλεκτρική σταθερά είναι η δυνατότητα ενός υλικού να αποθηκεύει φορτία όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στον **Πίνακα 2.1** παρατίθενται οι ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v), οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) για διάφορους τύπους υλικών.

Ακολουθώντας διάφορες παραμέτρους διαδικασίας μέτρησης και επεξεργασίας εξασφαλίζουμε την δυνατότητα να έχουμε ανακλώμενο σήμα επιστροφής λόγω της παρουσίας κάποιου αντικειμένου. Το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά αυτού του σήματος, εξαρτώνται από τη γεωμετρία και την αντίθεση στις ιδιότητες του αντικειμένου με τον περιβάλλοντα χώρο.

	K	σ (mS/m)	v (m/ns)
Αέρας	1	0	0,30
Αποσταγμένο νερό	80	0,01	0,033
Γλυκό νερό	80	0,5	0,033
Θαλασσινό νερό	80	$3 \cdot 10^3$	0,01
Ξηρά άμμος	3-5	0,01	0,15
Διαποτισμένη άμμος	20-30	0,1-1,0	0,06
Ασβεστόλιθος	4-8	0,5-2	0,12
Σχιστόλιθος	5-15	1-100	0,09
ΐλύς	5-30	-100	0,07
Άργιλος	5-40	2-1000	0,06
Γρανίτης	4-6	0,01-1	0,13
Ξηρό άλας	5-6	0,01-1	0,13
Πάγος	3-4	0,01	0,16

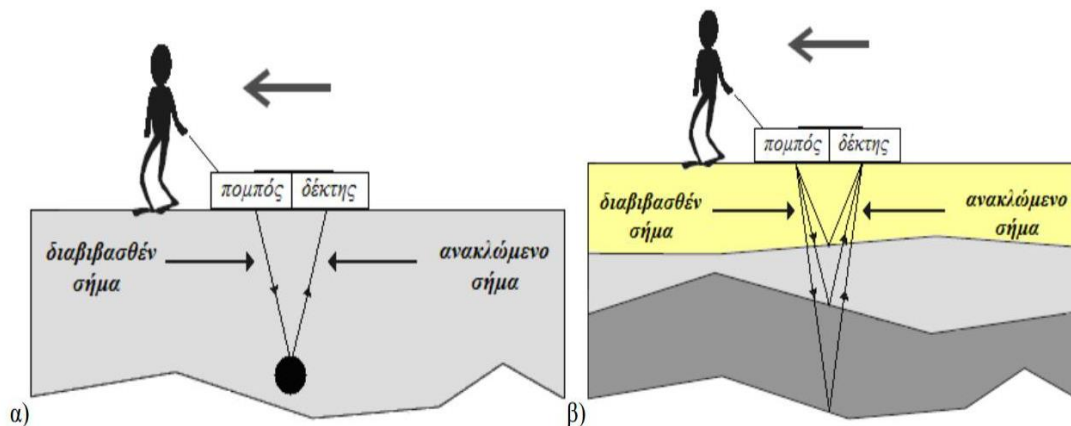
Πίνακας 2.1 : Παράθεση ταχυτήτων διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v), τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) για διάφορους τύπους υλικών

2.2.2 Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ

Τα μέρη και οι λειτουργίες που περιλαμβάνονται σε μια διαδικασία μέτρησης γεωραντάρ είναι τα ακόλουθα (**Εικόνα 2.4**):

- Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (πηγή) που μπορεί να παραγάγει χρονικά κυμαινόμενες τάσεις (εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο) στο εκάστοτε απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων με ελεγχόμενο και καταγράψιμο τρόπο.
- Μια κεραία πομπός που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ραδιοκύμα), το οποίο μπορεί να διεισδύσει δια του υπεδάφους στο στόχο. Η κεραία πομπός, μετασχηματίζει τα ηλεκτρικής τάσης σήματα σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Ένα σύστημα ανίχνευσης (δέκτης), που αποτελείται συνήθως από μια κεραία και ηλεκτρικά στοιχεία κυκλώματος, που μπορούν να ανιχνεύσουν τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να τα μετασχηματίσουν σε μια ηλεκτρική τάση που μπορεί να καταγραφεί και να επεξεργαστεί. (Αποστολόπουλος Γ. 2008)



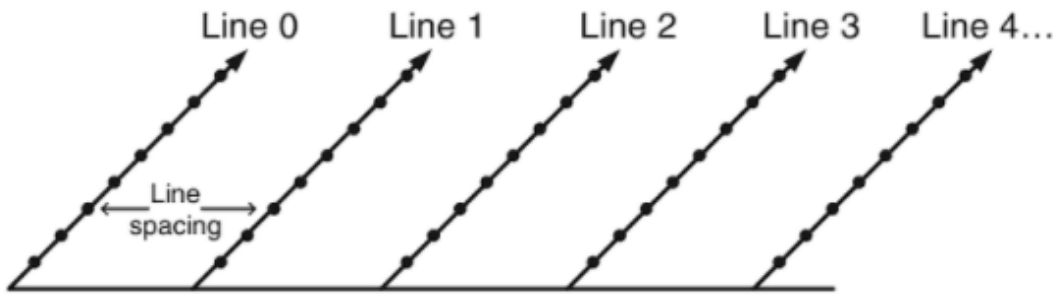
Εικόνα 2.4 : Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος 2008)

2.2.3 Τρόποι μετρήσεων στο ύπαιθρο

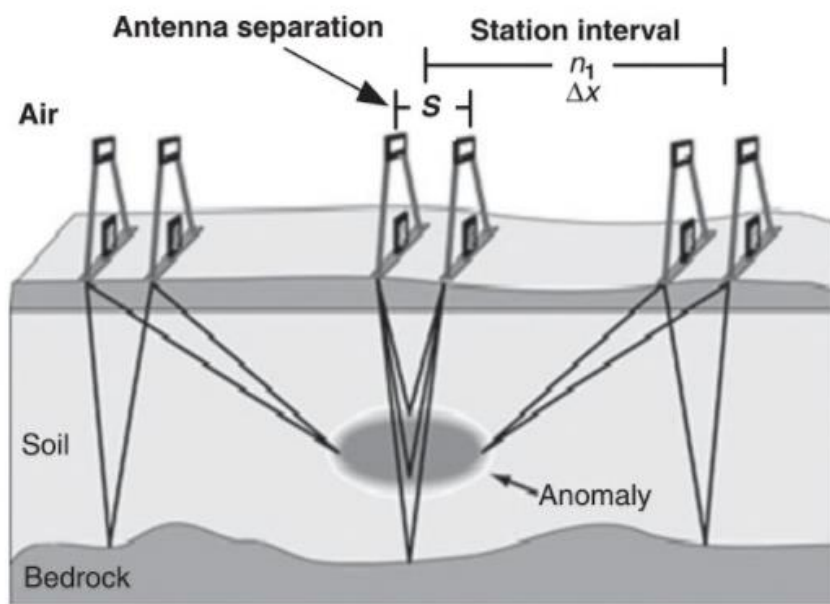
Ο τρόπος των μετρήσεων στο ύπαιθρο γίνεται συνήθως σε ευθείες γραμμές (γραμμές διασκόπισης) οι οποίες είναι παράλληλες και σχηματίζουν ορθογώνιο. Η διεύθυνσή τους καθορίζεται έτσι ώστε να περνούν όσο το δυνατόν γίνεται κάθετα στην μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται. **(Εικόνα 2.5)**

Για τις μετρήσεις στο ύπαιθρο υπάρχουν 2 μοντέλα λειτουργίας:

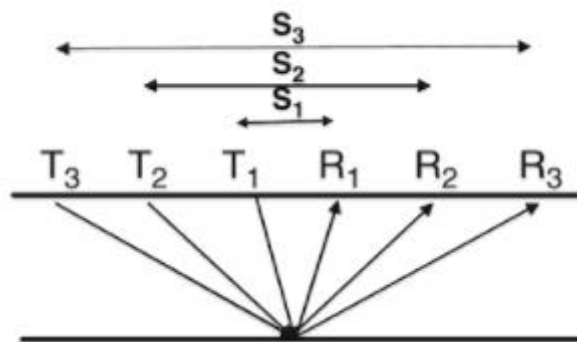
- Η μέθοδος του ανακλαστικού προφίλ (common offset reflection survey): Σε αυτήν την μέθοδο ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους, και μετακινούνται μαζί κατά μήκος μιας γραμμής διασκόπισης-έρευνας, συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα. Υπάρχει η πιθανότητα να χρησιμοποιούνται αντένες διαφορετικών συχνοτήτων έτσι ώστε πιθανόν να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα. **(Εικόνα 2.6)**
- Η μέθοδος του κοινού μεσαίου σημείου CMP (Common-Midpoint) όπου ο πομπός και ο δέκτης απομακρύνονται από ένα συγκεκριμένο κεντρικό σημείο, ή το ένα στέκεται σταθερό και το άλλο απομακρύνεται από το πρώτο. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος. **(Εικόνα 2.7)**



Εικόνα 2.5: Γραμμές διασκόπησης, στις οποίες η μεταξύ τους απόσταση καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες της έρευνας



Εικόνα 2.6 : Η μέθοδος του ανακλαστικού προφίλ (common offset reflection survey)



Εικόνα 2.7: Μέθοδος CMP (common midpoint). (M.Jol 2009)

2.2.4 Παράμετροι μοντέλων - Ανάλυση μετρήσεων

Η μέθοδος του κοινού **μεσαίου σημείου CMP** χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος μεταβάλλοντας την απόσταση των κεραιών, κρατώντας σταθερό το κέντρο της διάταξης και την συχνότητά τους (**βλ Εικόνα 2.7**).

Στην **common-offset** όμως υπάρχει μια σειρά παραμέτρων που πρέπει να καθοριστεί για να φτάσουμε στο επιθυμητό βάθος και την επιθυμητή ανάλυση, καθώς εξαρτώνται από τις συνθήκες του εδάφους (υγρασία, είδος ιζημάτων) καθώς και από την συχνότητα των κεραιών. Κάποιοι ακόμα παράγοντες είναι το χρονικό παράθυρο (TW) που εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης και την ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης, η χρονική διαφορά Δt μεταξύ δυο διαδοχικών μετρήσεων.

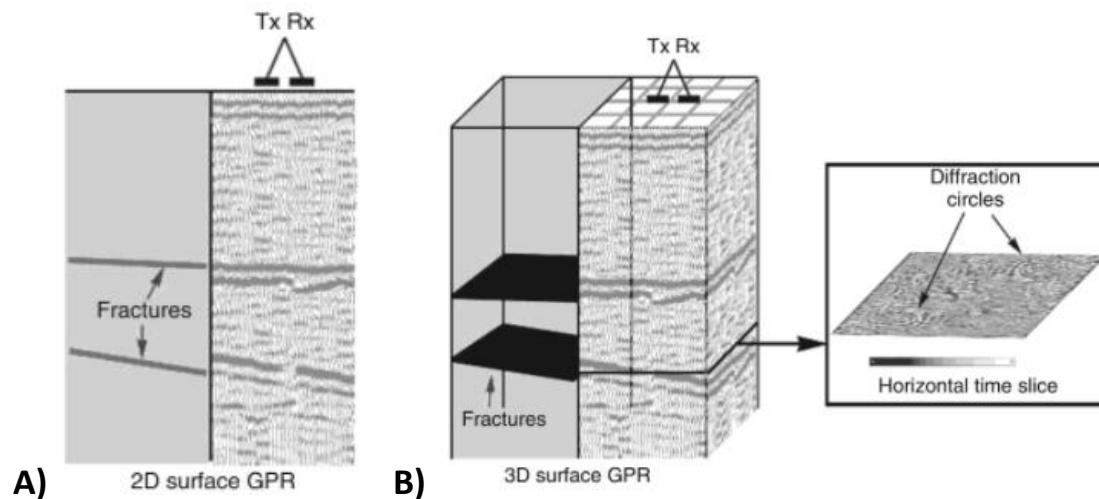
Συγκεκριμένα η συχνότητα των κεραιών και κατά συνάρτηση το βάθος επιδρούν αντιστρόφως ανάλογα στην ανάλυση των μετρήσεων. Για παράδειγμα μια κεραία χαμηλής συχνότητας της τάξεως των 50-80MHz, παρόλο που μπορεί να φτάσει σε βάθος περίπου στα 40-50m θα μας προσφέρει χαμηλή ανάλυση. Αντίθετα μια κεραία της τάξεως των 900MHz θα φτάσει το πολύ μέχρι το βάθος των 1-1,5m αλλά θα έχει μια πολύ μεγάλη ανάλυση της τάξεως των εκατοστών.

Το βάθος διείσδυσης του GPR σχετίζεται άμεσα με το έδαφος και συγκεκριμένα με την υγρασία και την αγωγιμότητά του. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι ένα μέρος του σήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα και διασκορπίζεται πριν επιστρέψει στον δέκτη. Όσο πηγαίνουμε βαθύτερα τόσο λιγότερο ανακλώμενο σήμα φτάνει στον δέκτη. Κάποιοι λόγοι που συνδέονται με αυτήν την απώλεια μπορεί να είναι και οριζόντες υλικών που έχουν αποθηκεύσει νερό πχ αργιλικοί.

2.2.5 Απεικόνιση δεδομένων μετρήσεων γεωραντάρ

Η απεικόνιση των δεδομένων του γεωραντάρ είναι αυτή του πλάτους των σημάτων ως προς τον χρόνο. Η ανίχνευση προϋποθέτει ότι το σήμα επιστροφής από τον στόχο είναι μεγαλύτερου πλάτους από άλλα σήματα θορύβου.

Τα ραδογράμματα που αποκτώνται στο ύπαιθρο χρειάζονται ενίσχυση με τον χρόνο, φιλτράρισμα ανάλογα με την συχνότητα έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση των πιθανά βαθύτερων οριζόντων ή σωμάτων, τα οποία λόγω θορύβων δεν φαίνονται πριν το φιλτράρισμα. (Αποστολόπουλος 2008)



Εικόνα 2.8 : Σχηματική αναπαράσταση δεδομένων το GPR: A) Σε 2D , B) Σε 3D με ενδεικτικό slicemap (M. Jol 2009)

2.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των γεωραντάρ

Κάποια πλεονεκτήματα της μεθόδου των γεωραντάρ είναι ότι είναι εύκολη και γρήγορη μέθοδος κατά την διάρκεια των μετρήσεων, καθώς το μηχάνημα είναι σχετικά ελαφρύ και απλά το τραβάει κάποιος κατά μήκος της γραμμής διασκόπισης και αυτό παίρνει κατά την διάρκεια συνεχείς και γρήγορες μετρήσεις. Ένα θετικό ακόμα της μεθόδου είναι ότι έχει πολλές δυνατότητες και επιλογές για τις παραμέτρους του (συχνότητα, βάθος διείσδυσης...) με αποτέλεσμα να έχει πολλές εφαρμογές και διάφορες χρήσεις καθώς δίνει την επιλογή στον χρήστη να βρει τον τρόπο να έχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Αποτελεί επίσης μια μη καταστρεπτική μέθοδο που τις δίνει πολλές δυνατότητες και διάφορες εκτός γεωλογικών εφαρμογές πχ σε τσιμεντοκατασκευές. Έχει υψηλή ανάλυση σε μικρά βάθη και δίνει και την δυνατότητα δισδιάστατης και τρισδιάστατης απεικόνισης στον χρήστη.

Αντιθέτως η συγκεκριμένη μέθοδος έχει και κάποια αρνητικά στοιχεία. Ένα εκ των οποίων είναι η δυσκολία να παρθούν μετρήσεις σε ανώμαλα εδάφη, διότι υπάρχει πιθανότητα να μην εκπέμπεται το σήμα με τον κάθετο προσανατολισμό, αλλά να εκπεμφθεί πλαγίως. Επίσης το γεωραντάρ δεν μπορεί να έχει υψηλές αποδόσεις σε μεγάλα βάθη λόγω απωλειών ενεργείας από το έδαφος. Και το κυριότερο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές στις οποίες υπάρχουν πολλές βροχές και πολύ υγρασία, ή σε περιοχές στις οποίες υπάρχουν μεταδότες ραδιοκυμάτων.

Τέλος το γεωραντάρ ή GPR είναι μια μέθοδος η οποία συνεχώς έχει και καινούργιες εφαρμογές και επίσης συνεχώς βελτιώνεται και εξελίσσεται με αποτέλεσμα το όριο της να μην είναι σαφές.

2.3 Ηλεκτρικές μέθοδοι

2.3.1 Γενικά

Η εμφάνιση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής χρονολογείται από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Με την χρήση των μεθόδων αυτών επιτεύχθηκε ο εντοπισμός φυσικού αερίου στην Ρουμανία το 1923 και αλατούχων δομών στην Γαλλία το 1926. Η συστηματική εφαρμογή τους ξεκίνησε την δεκαετία του '70 και αυτό, λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γεγονός που βοήθησε τόσο στην συλλογή των δεδομένων όσο και στην επεξεργασία τους.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής του ηλεκτρικού ρεύματος. Παρουσιάζουν ποικιλία τεχνικών έναντι άλλων μεθόδων, όπως η βαρυτική, η μαγνητική, η σεισμική και η ηλεκτρομαγνητική. Μετριοούνται συνήθως δυναμικά, ρεύματα (εντάσεις και πυκνότητες) και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται είτε από φυσικές είτε από τεχνικές πηγές. Η κύρια παράμετρος που μετρείται εδώ είναι η ηλεκτρική ειδική αντίσταση ρ , ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ . (Παπαδόπουλος, 2008)

2.3.2 Διακρίσεις - Κατηγορίες Ηλεκτρικών Μεθόδων

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διακρίνονται σε παθητικές και ενεργητικές μεθόδους ανάλογα με την χρησιμοποίηση φυσικών ή τεχνητών πεδίων.

Παθητικές Μέθοδοι:

- Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self Potential Method). Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία, είτε σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, είτε είναι ηλεκτροκινητικής ή γεωθερμικής προέλευσης. Εφαρμόζεται σε υδρογεωλογικές ή γεωθερμικές έρευνες.
- Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric Method). Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη –μέχρι και τον μανδύα– μέσα στη γη.

Ενεργητικές Μέθοδοι:

- Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method). Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου

ρεύματος. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, με μέσα βάθης διασκόπησης.

- Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method) Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν, το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται, παύει να διαβιβάζεται, στο έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών. (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2008)
- Μέθοδος Ηλεκτρομαγνητισμού (Electromagnetic Method). Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που παράγεται από επαγωγή λόγω της ροής ρεύματος μέσα στη γη. Ο ηλεκτρομαγνητισμός χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό αγώγιμων μεταλλικών δομών και κοιτασμάτων μετάλλων, για τον εντοπισμό θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, για την ανίχνευση πυρομαχικών που δεν έχουν εκραγεί και για τη γεωφυσική χαρτογράφηση κοντά στην επιφάνεια.

2.3.3 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί στα πετρώματα με τρεις τρόπους:

- τον ηλεκτρικό (Ωμικό)
- τον ηλεκτρολυτικό και
- τη διηλεκτρική μετάδοση .

Ο πρώτος τρόπος είναι ο κανονικός και γίνεται με τη ροή ρεύματος σε υλικά που έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι τα μέταλλα. Στον ηλεκτρολυτικό τρόπο το ρεύμα δημιουργείται από τα ιόντα που μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό. Η διηλεκτρική μετάδοση λαμβάνει χώρα σε μικρής αγωγιμότητας υλικά και μονωτές, οι οποίοι έχουν πολύ λίγους ελεύθερους μεταφορείς ή κανέναν. Κάτω από την επίδραση ενός εξωτερικού μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια μετατοπίζονται ελαφρώς σχετικά με τον πυρήνα τους. Αυτός ο ελαφρά σχετικός διαχωρισμός αρνητικών και θετικών φορτίων είναι γνωστός ως διηλεκτρική πόλωση του υλικού. Ιοντική και μοριακή πόλωση μπορεί να εμφανισθεί σε υλικά με ιοντικούς και μοριακούς δεσμούς. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η διηλεκτρική μετάδοση είναι το αποτέλεσμα της αλλαγής της ηλεκτρονικής, ιοντικής ή μοριακής πόλωσης που προκαλείται από το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , είναι η ηλεκτρική ιδιότητα των πετρωμάτων που χρησιμοποιείται στις μεθόδους ηλεκτρικής διασκόπησης.

Ο υπολογισμός της στηρίζεται στο νόμο του Ohm:

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

όπου V: η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα κυλινδρικής αντίστασης (Volt),

όπου I: η ένταση του ρεύματος που την διαρρέει (Ampere) και

όπου R: η ηλεκτρική της αντίσταση (Ohm).

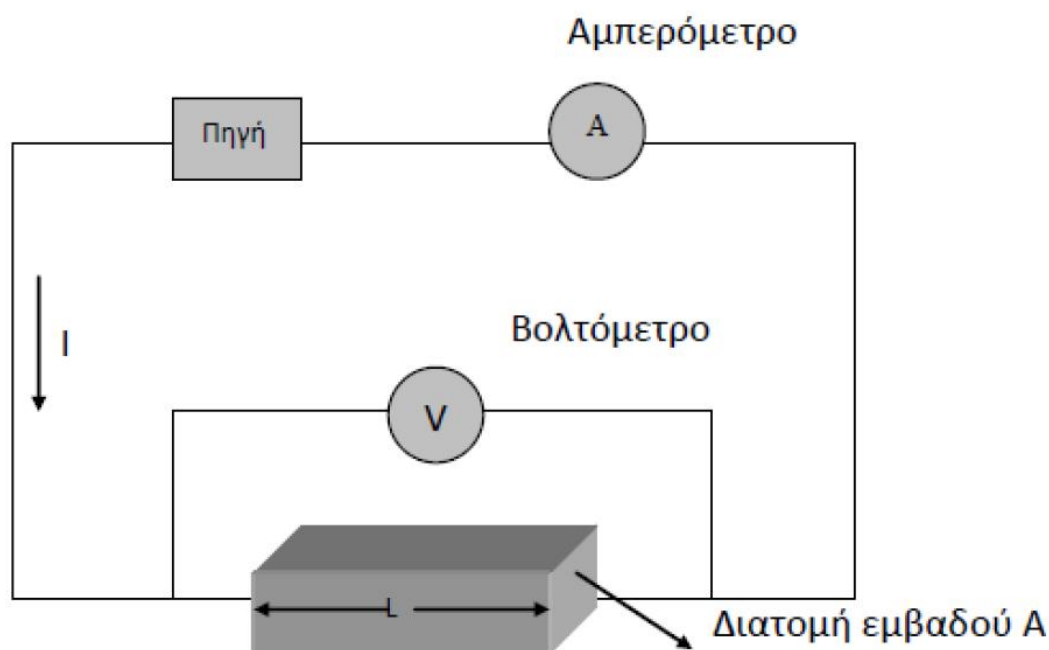
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ υπολογίζεται από την σχέση:

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

όπου R: η ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)

όπου A: το εμβαδό της διατομής του κυλίνδρου (m^2), και

όπου L: το μήκος του κυλίνδρου (m)



Εικόνα 2.9: Ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελούμενο από πηγή και αγωγό σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (Λούης, 2004)

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) είναι το Ohm.m. Το αντίστροφο μέγεθος:

$$\sigma=1/\rho$$

της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετρώματος, με μονάδα μέτρησης στο διεθνές σύστημα S.I., το siemens / m.

2.3.3.1 Παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης

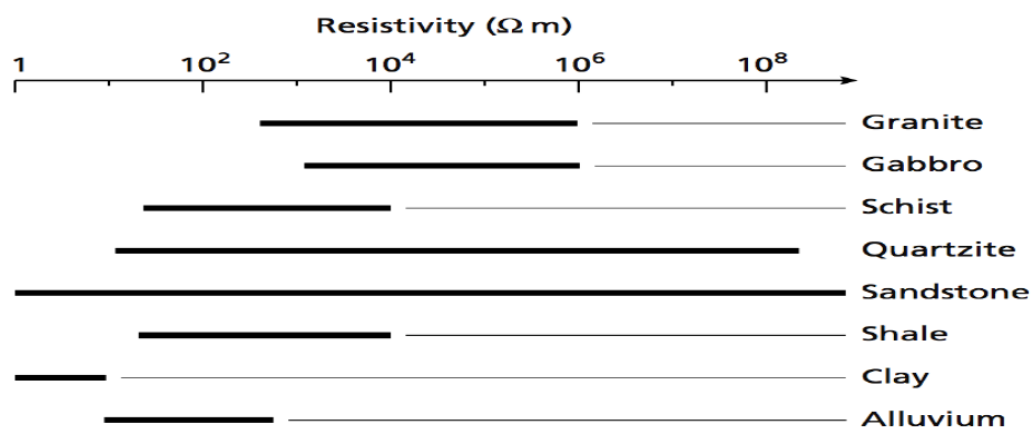
Οι σημαντικότεροι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων και των ορυκτών είναι:

- Είδος του πετρώματος

Όπως φαίνεται και από τους **Πίνακες 2.2 και 2.3** που ακολουθούν, κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Σε γενικές γραμμές, πάντως, τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή, τις χαμηλότερες, λόγω του – συνήθως – υψηλού περιεχομένου τους σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες, όμως, τάσεις αλληλεπικάλυψης.

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ($\Omega \cdot m$)
Αέρας	∞
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Συμπαγής Γρανίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^6$
Αποσαθρωμένος Γρανίτης	$1 - 1 \times 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \times 10^3$
Δομολίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \times 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \times 10^2$
Εδαφικό Νερό	0,5 - 300
Θαλασσινό Νερό	0,2

Πίνακας 2.2 : Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος, 2008)



Πίνακας 2.3 : Εύρος τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα, όπως γρανίτης, γάββρος, σχιστόλιθος, χαλαζίας, ψαμμίτης, άργιλος, αλλουβιακές προσχώσεις. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

- Δομή και Πορώδες: όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.
- Περιεκτικότητα σε άλατα: όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.
- Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών: κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση, αλλά υπάρχουν και εξαιρέσεις όπως η σκλήρυνση, η ιζηματοποίηση, η απολίθωση πετρωμάτων κ.ά. **(Πίνακας 2.4)**

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αργιλική εξαλλοίωση	Ελάττωση
Διάλυση	Ελάττωση
Ρηγματώση	Ελάττωση
Εισροή θαλασσινού νερού	Ελάττωση
Διάτμηση	Ελάττωση
Αποσάθρωση	Ελάττωση
Σκλήρυνση	Αύξηση
Ιζηματοποίηση	Αύξηση
Απολίθωση	Αύξηση
Μεταμόρφωση	Αύξηση ή Ελάττωση

Πίνακας 2.4: Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων.

- Ηλικία πετρώματος: τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών: λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών, η ύπαρξή τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλών τιμών επιφανειακής ειδικής αντίστασης.
- Βαθμός κορεσμού: Όσο ο βαθμός κορεσμού ενός πετρώματος αυξάνεται, η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση μειώνεται.
- Θερμοκρασία: Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Αυτός ο παράγοντας, ωστόσο, έχει τόσο μικρή επίδραση, ώστε διαδραματίζει αξι�σημείωτο ρόλο μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες

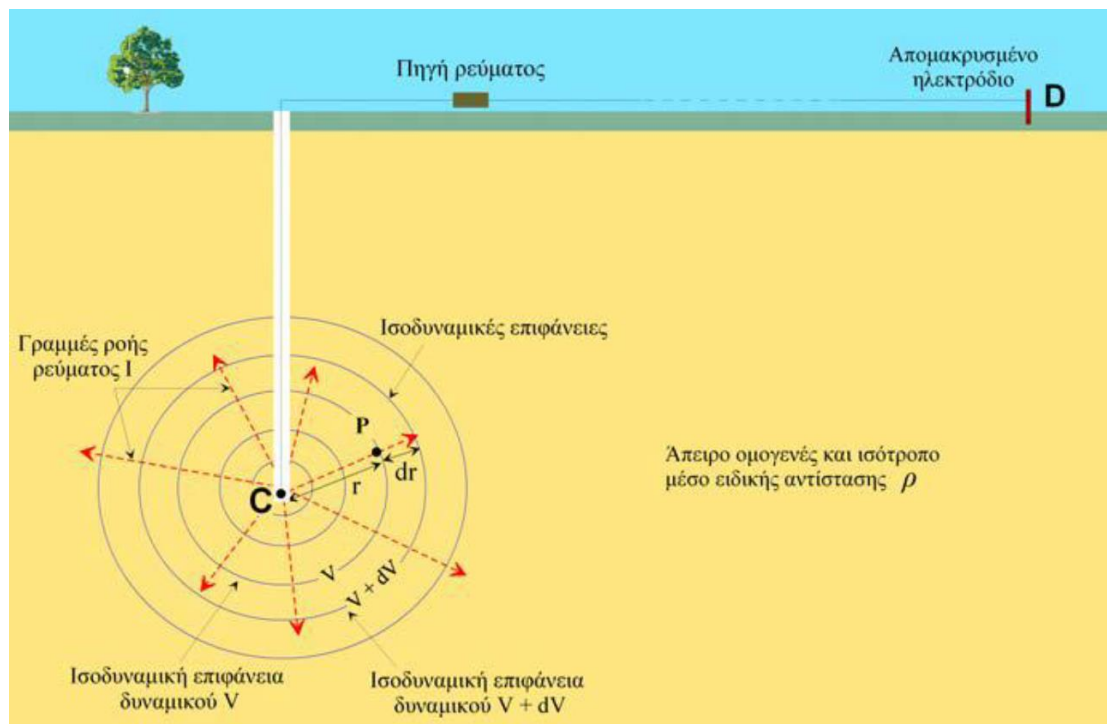
2.3.3.2 Ροή ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο

Για να περιγράψουμε τη φύση του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα μέσο που καταλαμβάνει κάποιο όγκο, πρέπει να κινηθούμε πέρα από τις απλές έννοιες του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού από την εμπειρία μας με τα καλώδια, τις αντιστάσεις και τις μπαταρίες. Μέσα στη γη, ή σε οποιοδήποτε τρισδιάστατο σώμα, το ηλεκτρικό ρεύμα δεν περιορίζεται σε μια ροή κατά μήκος μιας μοναδικής διαδρομής όπως συμβαίνει με το καλώδιο. Προσωρινά σε αυτό το στάδιο, θα δεχτούμε ότι η ειδική αντίσταση της γης είναι ενιαία σε όλη τη μάζα της (ομογενής ηλεκτρικά γη).

Συνθήκες άπειρου ομογενούς χώρου δημιουργούμε στην πράξη με την τοποθέτηση ηλεκτροδίου μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά μέσα σε ομογενές και ισότροπο έδαφος (**Εικόνα 2.10**). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος (συσσωρευτής) και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου D, το οποίο τοποθετείται συνήθως στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I, σημειακής πηγής C, που βρίσκεται μέσα σε άπειρο ομογενές και ισότροπο μέσο είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τα έξω

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το ρεύμα (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές) ρέει από το ηλεκτρόδιο C ακτινικά κατά μήκος ευθειών γραμμών. Αν μπορούσαμε με ένα βολτόμετρο να υπολογίσουμε την διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) που προκαλεί η ειδική αντίσταση του μέσου σε μια απόσταση πολύ μακριά από το ηλεκτρόδιο ρεύματος σε διάφορες θέσεις του μέσου, θα βρίσκαμε ότι η πτώση τάσης είναι σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών οι οποίες έχουν κέντρο το ηλεκτρόδιο.

Οι γραμμές αυτές καλούνται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials). Στις τρεις διαστάσεις, οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το ηλεκτρόδιο. Μερικές ισοδυναμικές γραμμές δείχνονται με μπλε κύκλους.



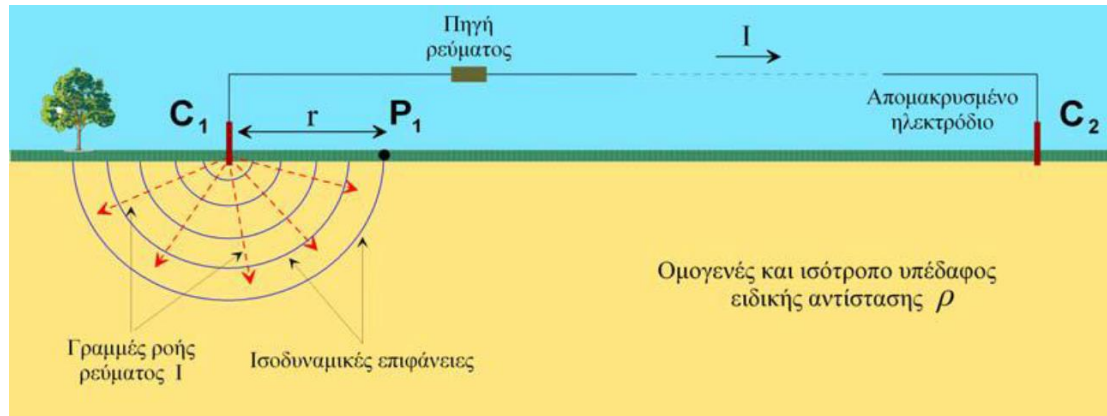
Εικόνα 2.10 : Το δυναμικό σημειακής πηγής σε άπειρο ομογενή χώρο

Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων του μέσου μπορούν να υπολογιστούν απλά αφαιρώντας τα δυναμικά των δύο ισοδυναμικών γραμμών που διέρχονται αντίστοιχα από τα δύο σημεία. Επομένως, αν τα σημεία βρίσκονται πάνω σε ένα μπλε κύκλο με κέντρο το ηλεκτρόδιο ρεύματος, δεν θα καταγραφεί διαφορά δυναμικού, διότι οι δύο αυτές θέσεις βρίσκονται πάνω στην ίδια ισοδυναμική γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι, αν παίρναμε το βολτόμετρο και ενώναμε τους δύο ακροδέκτες του με τα δύο αυτά σημεία της γης, θα καταγράφαμε διαφορά δυναμικού ίση με μηδέν. Σε σχέση με το δυναμικό κοντά στο ηλεκτρόδιο, οι διαφορές δυναμικού αυξάνουν καθώς απομακρυνόμαστε από το ηλεκτρόδιο. Αυτό είναι λογικό, εφόσον η μέτρηση που κάνουμε με το βολτόμετρο είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το μέσο επί την ειδική αντίσταση του μέσου, σύμφωνα με το νόμο του Ohm. Καθώς απομακρυνόμαστε από τα ηλεκτρόδια, το ρεύμα ταξιδεύει μέσα από μεγαλύτερη ποσότητα μέσου. Η ειδική αντίσταση αυξάνει με την αύξηση της διαδρομής, επομένως αυξάνει και η τάση. (Λούης, 2004)

2.3.3.3 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

Συνθήκες ομογενούς ημιχώρου δημιουργούμε στη πράξη με την τοποθέτηση μικρών διαστάσεων ηλεκτροδίου, C1, (σημειακή πηγή ρεύματος) στην επιφάνεια ομογενούς γης (**Εικόνα 2.11**). Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C2, το οποίο τοποθετείται συνήθως

στην επιφάνεια της γης αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος, I , της σημειακής πηγής, C_1 , είναι ακτινικές που ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο.

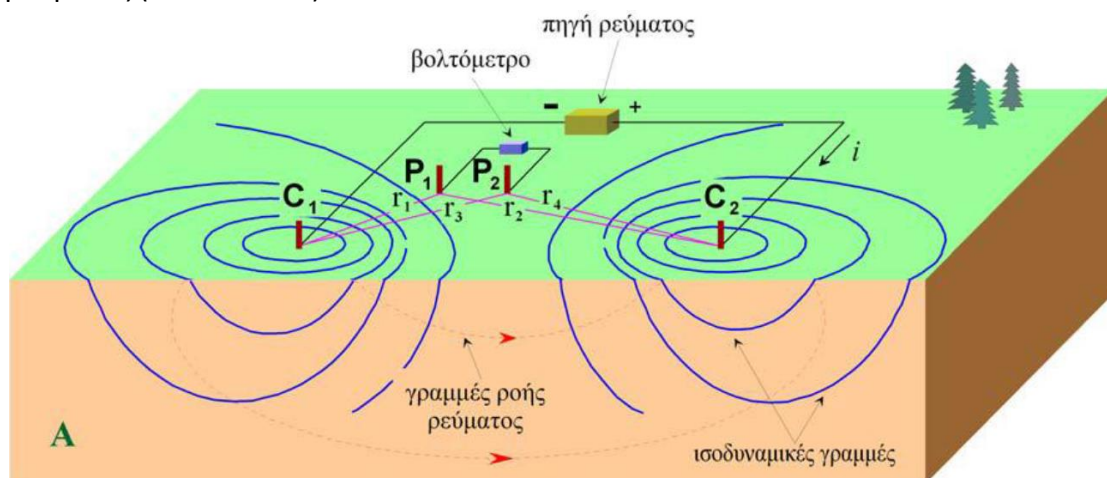


Εικόνα 2.11 : Το δυναμικό σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες ως κάθετες στις γραμμές ροής (ακτίνες) θα είναι ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες. (Λούης, 2004)

2.3.3.4 Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρο

Στις περιπτώσεις του άπειρου ομογενή χώρου και του ημιάπειρου ομογενή χώρου, τα δυο ηλεκτρόδια C_1 και C_2 , απέχουν μεταξύ τους μεγάλη απόσταση ώστε η επίδραση του ενός στη διαμόρφωση του δυναμικού του άλλου να είναι αμελητέα. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος είναι πεπερασμένη, το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας επηρεάζεται από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (**Εικόνα 2.12**)



Εικόνα 2.12 : Το δυναμικό δύο σημειακών πηγών σε ομογενή ημιχώρου (Λούης, 2004)

Άρα το δυναμικό σε τυχαίο σημείο P1 θα ισούται με το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V1, λόγω της σημειακής πηγής C1, και του δυναμικού V2, λόγω της πηγής C2. Ακόμα, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια (οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές του σχήματος.)

2.3.3.5 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Σε ομογενές και ισότροπο μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση θα είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

Όταν όμως το μέσο είναι ανομοιογενές, η υπολογιζόμενη ειδική ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται *φαινόμενη ειδική αντίσταση*.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε { $\rho_{\alpha} = K * (\Delta V / I)$ } για κάθε θέση ή/και διεύθυνση της διάταξης ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική, ούτε της πραγματικής ειδικής αντίστασης, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διάφορων μερών του υπεδάφους. Μεταβάλλεται, όμως, συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγωγίμων ή μη ανομοιογενών. (Αποστολόπουλος, 2008)

2.3.3.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Σε κάθε γεωφυσική μέτρηση, τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού και οι μεταξύ τους αποστάσεις διατάσσονται στο έδαφος με συγκεκριμένο τρόπο, ανάλογα με τις αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις.

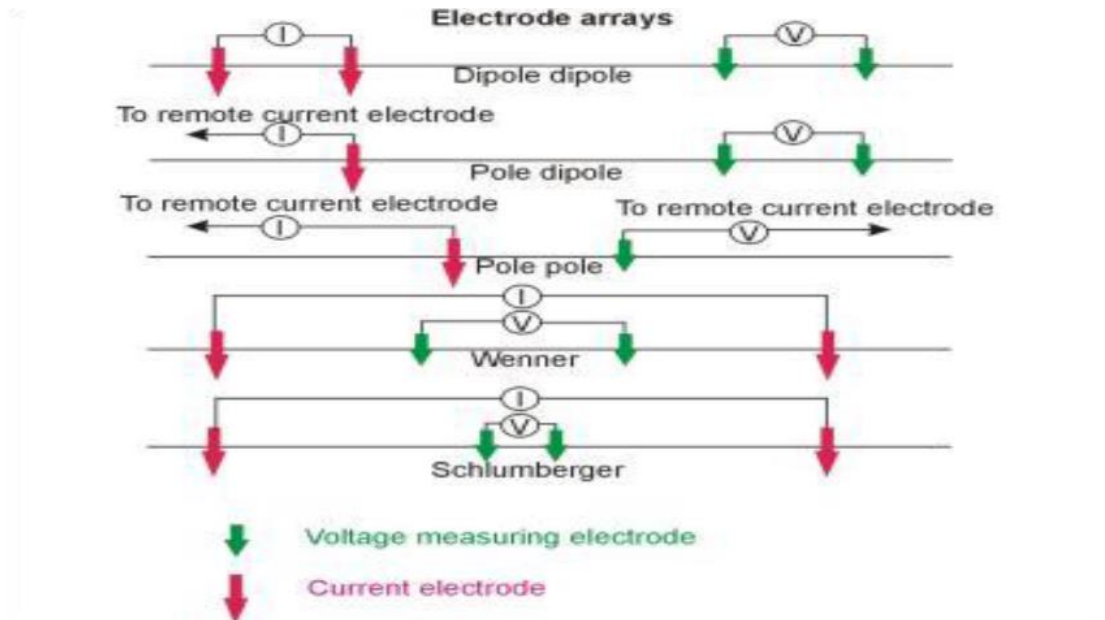
Οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων είναι οι εξής:

Διάταξη Schlumberger: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις L και l αντίστοιχα. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} * \frac{\pi * (L^2 - l^2)}{2l}$$

Διάταξη Wenner: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a και η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi * a$$



Εικόνα 2.13: Διατάξεις ηλεκτροδίων.

Διάταξη Dipole-Dipole: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση a , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης a (na). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} * \pi * n * (n + 1)(n + 2)a$$

Διάταξη Pole - Pole: Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} * 2\pi * a$$

(Αποστολόπουλος, 2008)

2.3.3.7 Επιλογή κατάλληλης διάταξης

Στον **πίνακα 2.5** φαίνεται η καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με τη ιδιαίτερη περίπτωση κάθε έρευνας. Με δύο αστέρια φαίνεται η καταλληλότερη επιλογή διάταξης ενώ με ένα αστέρι είναι η αμέσως επόμενη καταλληλότερη επιλογή διάταξης.

	Wenner	Schlumberger	Pole - Dipole	Dipole - Dipole
Λόγος σήματος προς θόρυβο	**	*		
Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες			*	**
Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση	*	**		
Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων	**	**		
Ευαισθησία στη μορφολογία του υποβάθρου			*	**
Βάθος διασκόπησης				**
Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος	**	**	*	*
Ευαισθησία στην κλίση	*	**		

Πίνακας 2.5 : Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα την περίπτωση της έρευνας

Σαν συμπέρασμα με τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία κάθε διάταξης στους διάφορους παράγοντες, προκύπτει ότι τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως διάταξη ηλεκτροδίων για βυθοσκόπηση έχει η διάταξη Schlumberger. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνουν συνεχώς με σταθερή απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία αλλάζει μόνο όταν το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού γίνεται τόσο μικρό ώστε να μην είναι δυνατόν να μετρηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια. Όταν πρόκειται να μεταβληθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού, λαμβάνονται διπλομετρήσεις και με τις δυο αποστάσεις

των ηλεκτροδίων δυναμικού. Γίνονται έξι μετρήσεις ανά λογαριθμικό κύκλο του ημίσεως της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος.

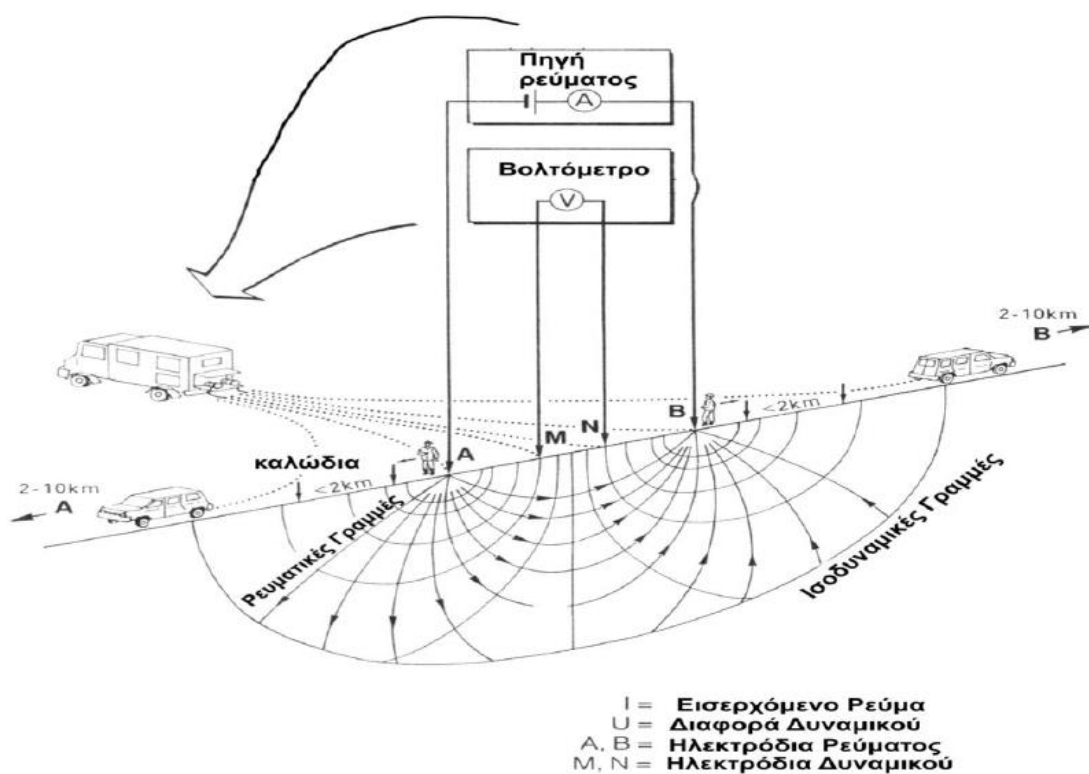
Η διάταξη Dipole–Dipole, παρόλο που έχει μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης λόγω της μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού υφίσταται το θόρυβο που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες.

2.3.3.8 Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να μετρήσουμε τη φαινόμενη ειδική αντίσταση στο ύπαιθρο, δηλαδή τα ΔV και I , χρειαζόμαστε:

- **Πηγή Ηλεκτρικού Ρεύματος:** Ποικίλλει, ανάλογα με το είδος του υπό διερεύνηση προβλήματος. Για συνήθη αναπτύγματα ηλεκτροδίων ρεύματος χρησιμοποιούνται συσσωρευτές, ενώ για μεγαλύτερα ανοίγματα, προτιμώνται πηγές μεγάλης ισχύος, όπως βενζινοκίνητες γεννήτριες ρεύματος.
- **Βολτόμετρο:** Τα σύγχρονα, υψηλής ακρίβειας, βολτόμετρα έχουν αντιστάσεις εισόδου της τάξης των $10M\Omega$ ή και μεγαλύτερες, με αποτέλεσμα να είναι ικανά να μετρούν δυναμικά από $10\mu V$ έως μερικά V . Αυτά τα υψηλής εμπέδησης βολτόμετρα είναι συζευγμένα με ένα καταγραφικό σύστημα, για την περίπτωση που το μετρούμενο δυναμικό είναι πολύ μικρό.
- **Αμπερόμετρο:** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα απλό αμπερόμετρο, το οποίο όμως, υπόκειται στον περιορισμό να μπορεί να μετρήσει ποσότητα ρεύματος από λίγα milliamps έως και $0.5amps$, με μεγάλη ακρίβεια και με σφάλμα που να μην υπερβαίνει το 2% στην πλήρη κλίμακα. Πολλά από τα σύγχρονα όργανα ρυθμίζονται έτσι ώστε ο χειριστής να καθορίζει την ποσότητα του ρεύματος που διοχετεύεται στο έδαφος και το όργανο να επιχειρεί να την αποδώσει.
- **Καλώδια σε καρούλια:** Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των ηλεκτροδίων με τα διάφορα ηλεκτρικά εξαρτήματα. Η αντίσταση τους θεωρείται κατά κανόνα αμελητέα.
- **Ηλεκτρόδια:** Πρόκειται για ράβδους από αλουμίνιο, χαλκό ή χάλυβα, μήκους 60-70 cm. Οι ράβδοι πακτώνονται γερά στο έδαφος και συνδέονται με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά εξαρτήματα των κυκλωμάτων ρεύματος και δυναμικού, μέσω των καλωδίων

- **Όργανο Επιλογής της Χρησιμοποιούμενης Διάταξης.** Πρόκειται για ένα όργανο, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του γεωφυσικού οργάνου και των καλωδίων ρεύματος και δυναμικού, έχοντας ως αποστολή τη διανομή του σήματος εξόδου (ρεύματος) στα κατάλληλα, κάθε φορά, ηλεκτρόδια ρεύματος και τον καθορισμό των ηλεκτροδίων δυναμικού από τα οποία λαμβάνεται η κάθε μέτρηση. Με τον τρόπο αυτό, το όργανο ελέγχει, κάθε φορά, εάν η πραγματοποιούμενη μέθοδος είναι Schlumberger ή Dipole – Dipole.
- **Όργανο Ρύθμισης της Απόστασης των Ηλεκτροδίων Δυναμικού.** Μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης παρεμβάλλεται ένας ακόμα διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικών για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.



Εικόνα 2.14 : Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης στο ύπαιθρο και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος

2.3.4 Γεωλεκτρικές Διασκοπίσεις

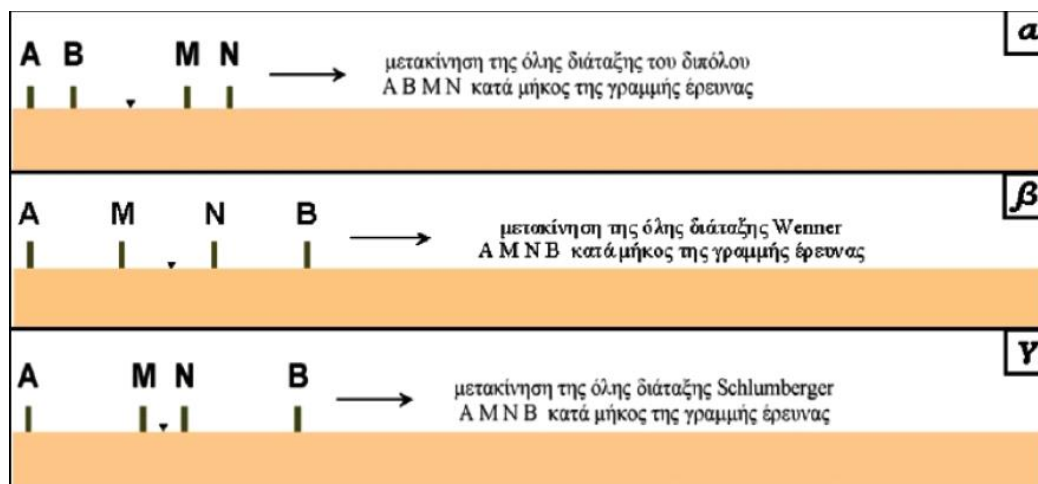
Ο στόχος των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων είναι η περιγραφή της δομής του υπεδάφους. Έτσι, με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια και μελετώντας την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος, επιτυγχάνεται η περιγραφή της δομής του υπεδάφους. Ανάλογα με τον τρόπο που προσεγγίζεται ο προσδιορισμός της γεωλογικής δομής του υπεδάφους, οι γεωηλεκτρικές διασκοπίσεις χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την ηλεκτρική χαρτογράφηση και την ηλεκτρική βυθοσκόπηση.

2.3.4.1 Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης

Στη Γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως π.χ. μεταπτώσεις. Η ιδιότητα αυτή της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης την κάνει ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση αναζήτησης μεταλλευμάτων ή αρχαιοτήτων.

Αν κρατήσουμε τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού σταθερές μεταξύ τους και μετακινούμε όλη τη διάταξη κατά μήκος μιας γραμμής ή χωρικά σε μια ευρύτερη περιοχή, τότε διασκοπούμε παράπλευρα το χώρο σε ένα περίπου σταθερό μέσο βάθος μέσω της κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που μετρούμε. Η κατανομή αυτή ποιοτικά δίνει τη χωρική κατανομή στο συγκεκριμένο βάθος γεωηλεκτρικών σχηματισμών. Επομένως, χρησιμοποιώντας οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις μας δίνεται η δυνατότητα να σαρώσουμε πλευρικά μια ζώνη συγκεκριμένου πάχους και να μελετήσουμε την πλευρική διαφοροποίηση του υλικού της ζώνης από τη μελέτη της οριζόντιας (πλευρικής) μεταβολής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Τα πειράματα αυτά παρέχουν μετρήσεις της χωρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης για καθορισμένη απόσταση ηλεκτροδίων, τα αποτελέσματα πολλών σειρών μετρήσεων ηλεκτρικής χαρτογράφησης (η οποία ονομάζεται προφίλ ειδικής αντίστασης), χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση χαρτών που παρουσιάζουν καμπύλες ίσων τιμών ειδικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα της έρευνας των οριζόντιων μεταβολών της ειδικής αντίστασης επιδέχονται μόνο ποιοτική ερμηνεία. Και αυτή η ποιοτική ερμηνεία αποκτά μεγαλύτερη αξία αν συνδυαστεί με πληροφορίες που προέρχονται από τις γεωτρήσεις που υπάρχουν στην περιοχή.



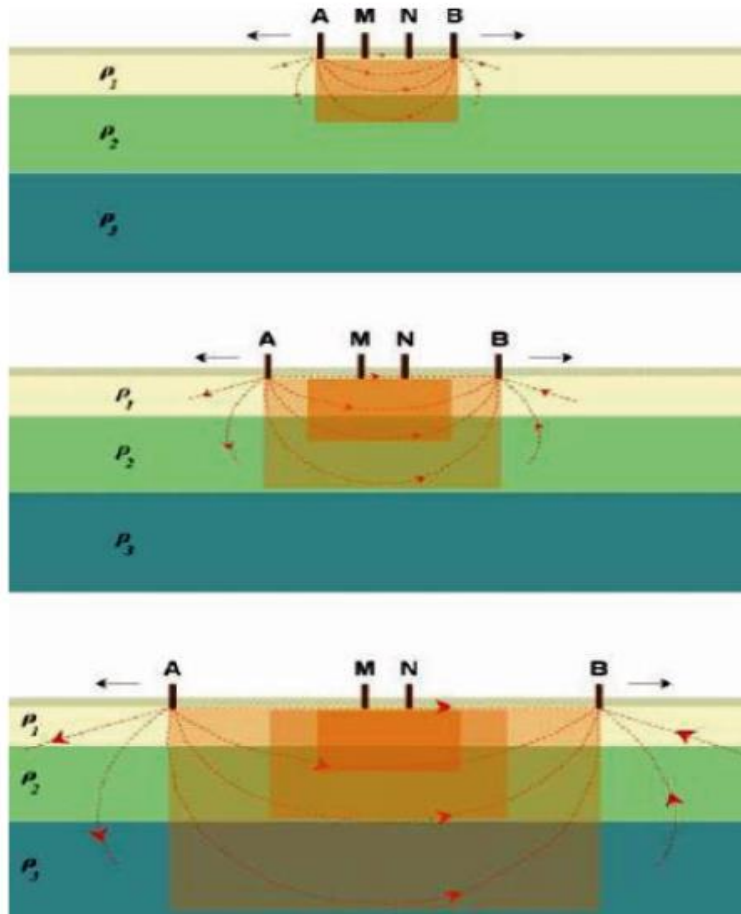
Εικόνα 2.15: Προφίλ ειδικής αντίστασης με μετακίνηση ολόκληρης της διάταξης Dipole–Dipole (α), Wenner (β) και Schlumberger (γ) (Μαυρομάτης, 2007)

2.3.4.2 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση

Στην ηλεκτρική βυθοσκόπηση (Vertical Electrical Sounding - VES), μπορούμε να βρούμε την εναλλαγή των στρωμάτων με το βάθος, κάτω από ένα σημείο το οποίο είναι το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων, "ανοίγοντας" τα ηλεκτρόδια ρεύματος συμμετρικά ως προς το κέντρο σε μεγαλύτερες διαδοχικά αποστάσεις. (Εικόνα 2.16)

Η μεταβολή των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δίνει μια πρώτη εικόνα των μεταβολών των ειδικών αντιστάσεων των διάφορων στρωμάτων ρις βάθος. Αντικείμενο της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης είναι η δημιουργία του γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους (υπολογισμός πάχους και ειδικής αντίστασης του κάθε στρώματος) από τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στις διάφορες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος.

Συνήθως όταν θέλουμε να διασκοπίσουμε εις βάθος με την ηλεκτρική βυθοσκόπηση χρησιμοποιούμε την διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Μετακινούμε συμμετρικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις τα ηλεκτρόδια ρεύματος κρατώντας σταθερά τα ηλεκτρόδια δυναμικού, έως ότου οι τιμές διαφοράς δυναμικού γίνουν πολύ μικρές, οπότε μεταφέρουμε και τα ηλεκτρόδια δυναμικού συμμετρικά ως προς το κέντρο σε μεγαλύτερη απόσταση και συνεχίζουμε να αυξάνουμε τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος.



Εικόνα 2.16: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2004)

2.3.5 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Η μέθοδος της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να έχουμε σε συγκεκριμένες θέσεις, μεγάλης ακρίβειας διασκοπήσεις, τόσο παράπλευρα, όσο και σε βάθος. Η ηλεκτρική τομογραφία συνίσταται σε πολλές βυθοσκοπήσεις πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται από την επιλογή των διατάξεων που θέλουμε. Όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μια δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, δηλαδή μια γεωηλεκτρική τομογραφία.

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην κατεύθυνση αυτοματοποίησης της λήψης γεωφυσικών δεδομένων και της αντιστροφής τους αύξησε δραστικά την εφαρμοσιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι κύριες εφαρμογές της μεθόδου είναι γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές σε πολλές χώρες. Η δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μια αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους.

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων, οι οποίες παράγονται από τα συστήματα αυτά, με τη σειρά τους, αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία των δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντιστροφής δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτή την ανάγκη. Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος. **(Εικόνα 2.17)**

Οι ειδικές ηλεκτρικές τους αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και την απόκριση του μοντέλου. **(Εικόνα 2.18)**

Κεφάλαιο 3. Εφαρμογές γεωφυσικής έρευνας σε αρχαιολογικούς χώρους στην διεθνή βιβλιογραφία

3.1 Γεωφυσική Έρευνα στον Ναό του Απόλλωνα, Hierapolis, Turkey

(Negri, Leucci, 2006)

3.1.1 Εισαγωγή - Πρόβλημα

Τα ερείπια της Ιεράπολης βρίσκονται μερικά χιλιόμετρα βόρεια της Λαοδικείας στην Δυτική Τουρκία. Αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλα γεωθερμικά πεδία, τα οποία έχουν ιαματικές πηγές κατά μήκους ρηγμάτων. Μέσα στην πόλη της Ιεράπολης υπάρχει ο Ναός του Απόλλωνα, που είναι η κύρια θεότητα της πόλης. Δίπλα στον Ναό υπάρχει το Πλουτώνιο, ένας υπόγειος θάλαμος αρκετά μεγάλος για να χωρέσει ένα άτομο και ο οποίος θάλαμος φαρδαίνει όσο κάποιος κατεβαίνει, και μία τρύπα διαμέτρου 9 μέτρων που περιβάλλεται από φράχτη. Λέγεται ότι τα παλιά χρόνια χρησιμοποιούσαν το πλουτώνιο από τους ιερείς του ναού του Απόλλωνα για να πραγματοποιούνται θυσίες. Συγκεκριμένα λόγω των δηλητηριώδη αερίων που αναδύονταν από το Πλουτώνιο ο θάλαμος αυτός καλυπτόταν από ένα στρώμα πυκνής ομίχλης και οποιοδήποτε ζωντανό πλάσμα έμπαινε μέσα σε αυτήν την τρύπα – θάλαμο πέθαινε.

Στην συγκεκριμένη περιοχή πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα, προκειμένου να εξεταστούν και να απαντηθούν τα ακόλουθα ερωτήματα που είχαν δημιουργηθεί από τους αρχαιολόγους :

- Αρχικά αν υπάρχουν κοιλότητες ή δομές χτισμένες από τους ανθρώπους κάτω από τον Ναό του Απόλλωνα
- Αν υπάρχει είσοδος που συνδέει το Πλουτώνιο και το εσωτερικό του Ναού του Απόλλωνα , προκειμένου να γίνονται οι θυσίες
- Τέλος να γίνει αξιολόγηση του γεωραντάρ (GPR) και της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) , ως μέσα για την έρευνα θαμμένων σχετικά κοντά στην επιφάνεια αρχαιολογικών δομών όπως κενών, τοίχων κτλ.

3.1.2 Μέθοδοι και Όργανα

Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι το γεωραντάρ (GPR) και η ηλεκτρική τομογραφία (ERT). Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν αυτές οι

μέθοδοι είναι ότι θέλουμε να ανιχνεύσουν μεταβολές στις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υπεδάφους προκειμένου να εντοπίσουν αντικείμενα, τοίχους και την στρωματογραφία του υπεδάφους.

Μέσα στον Ναό του Απόλλωνα εφαρμόστηκε μόνο η μέθοδος των γεωραντάρ με συχνότητες κεραιών 200MHz και 500MHz, διότι το κύριο υλικό κατασκευής του Ναού είναι ο τραβερτίνης, ο οποίος έχει υψηλή ηλεκτρική ειδική αντίσταση. Στην περιφέρεια του Ναού του Απόλλωνα εφαρμόστηκαν και οι δύο μέθοδοι.

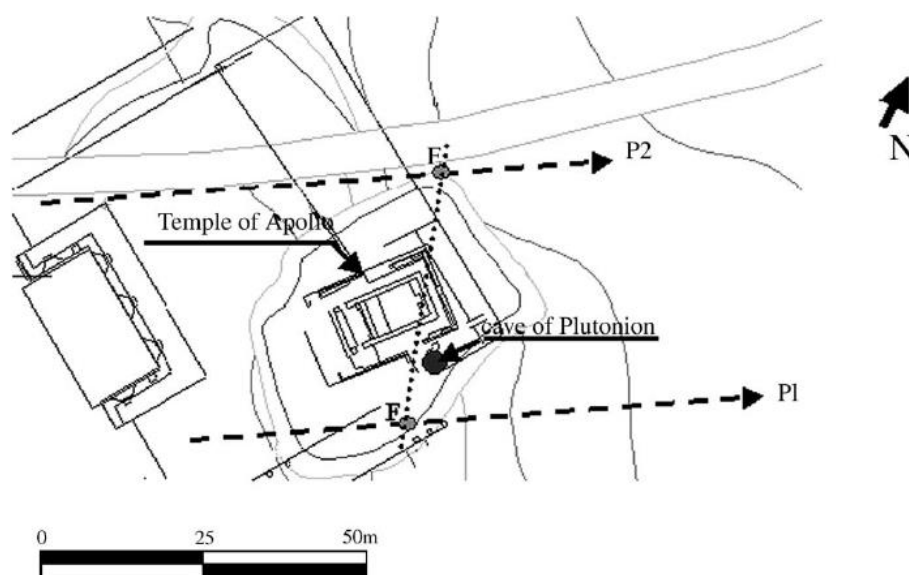
Τα όργανα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι :

- ERT: Syscal R1 georesistivity meter
- GPR: Sir2 της GSSI

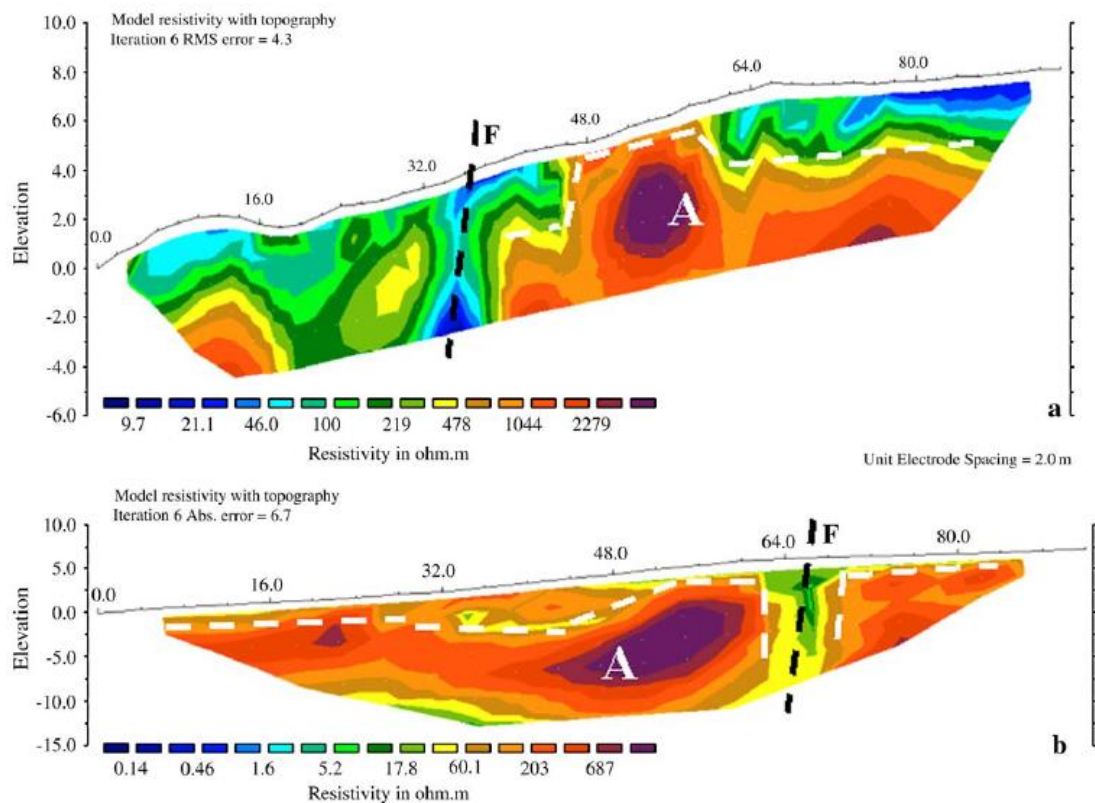
3.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

3.1.3.1 Μετρήσεις ERT

Πραγματοποιήθηκαν 2 τομές ηλεκτρικής τομογραφίας από τα βορειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά, με την χρήση 48 ηλεκτροδίων, το βήμα ανάμεσα τους ίσο με 2 m και με την διάταξη Wenner- Schlumberger. **(Εικόνα 3.1)**



Εικόνα 3.1 : Τομές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης(P1,P2) έξω από τον Ναό του Απόλλωνα (Negri S, Leucci G. 2006)



Εικόνα 3.2 : Διαγράμματα τομών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, (α) τομή P1 και (β) τομή P2 (Negri S, Leucci G. 2006)

Στην τομή P1 (**Εικόνα 3.2α**) φαίνεται μια περιοχή υψηλών ειδικών αντιστάσεων που συμβολίζεται με το γράμμα A, η οποία πιθανότατα να οφείλεται στην περιοχή του τραβερτίνη. Με το γράμμα F συμβολίζεται μια περιοχή χαμηλών ειδικών αντιστάσεων που οφείλεται στην παρουσία κάποιου ρήγματος.

Στην τομή P2 (**Εικόνα 3.2β**) η περιοχή υψηλών ειδικών αντιστάσεων (γράμμα A) οφείλεται στον τραβερτίνη και η περιοχή χαμηλών ειδικών αντιστάσεων (γράμμα F) οφείλεται στο ρήγμα.

Συμπερασματικά αν λάβουμε υπόψη και την τοποθεσία του Ναού του Απόλλωνα, οι τομογραφίες μας δείχνουν ότι το ρήγμα περνά ακριβώς κάτω από τον Ναό και το πλουτώνιο βρίσκεται επίσης πάνω στον δρόμο του.

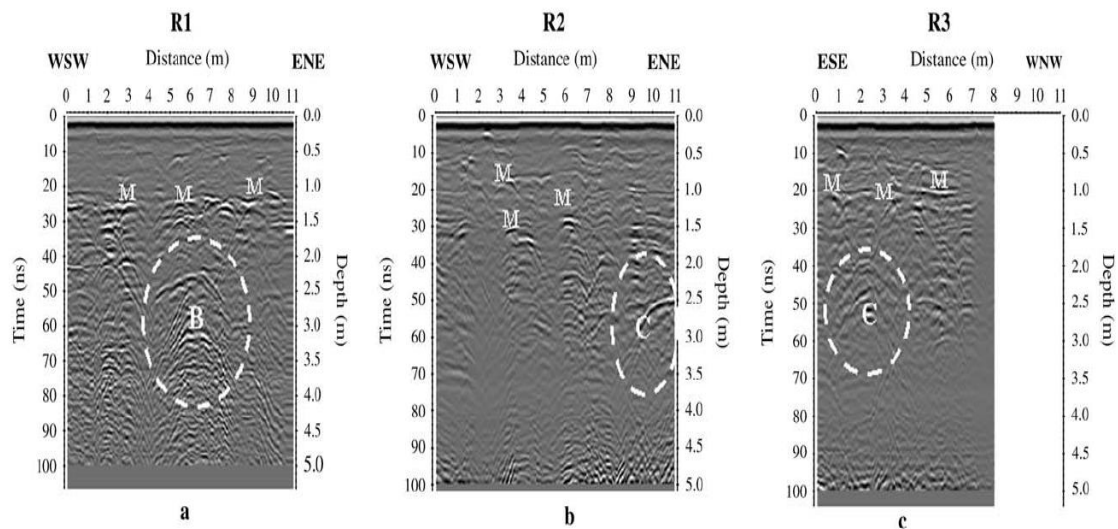
3.1.3.2 Μετρήσεις GPR

Πραγματοποιήθηκαν 3 οριζόντιες και 3 κάθετες τομές γεωραντάρ μέσα στον ναό και ονομάστηκαν R1,R2,R3 και R4,R5,R6 αντίστοιχα. (**Εικόνα 3.3, Εικόνα 3.4**) και εξάγονται μια σειρά από παρατηρήσεις - συμπεράσματα.

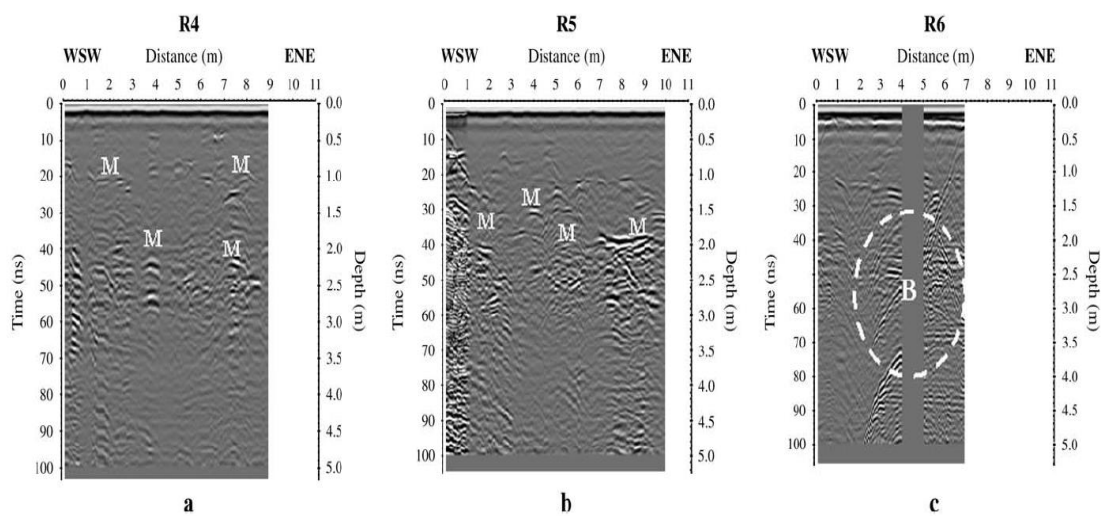
- ο συσχετισμός μεταξύ των ανωμαλιών που φαίνονται στις τομές με το γράμμα C στις τομές R2 και R3 μπορεί να ερμηνευθούν ως μια δομή που χρησιμοποιείται για την πρόσβαση στο Πλουτώνιο, μάλλον η είσοδός του.

- ο συσχετισμός μεταξύ των ανωμαλιών που φαίνονται στα σχήματα με το γράμμα Β στις τομές R1 και R6 μπορεί να ερμηνευθούν ως ένας διάδρομος που οδηγεί στην παραπάνω είσοδο.
- ο συσχετισμός μεταξύ των ανωμαλιών που φαίνονται στα σχήματα με το γράμμα Μ σε όλες τις τομές δείχνει την παρουσία των θεμελίων.

Από τις δύο γεωφυσικές μεθόδους που πραγματοποιήθηκαν και τα συμπεράσματα που προαναφέρθηκαν, προσφέρουν υποστήριξη στην υπόθεση των αρχαιολόγων ότι πιθανώς να υπάρχει ένας διάδρομος και μία είσοδος που να ενώνει τον Ναό του Απόλλωνα με το Πλουτώνιο. (Negri S, Leucci G. 2006)



Εικόνα 3.3: Τομές γεωραντάρ R1, R2, R3, μέσα στον Ναό του Απόλλωνα (Negri S, Leucci G. 2006)



Εικόνα 3.4: Τομές γεωραντάρ R4, R5, R6, μέσα στον Ναό του Απόλλωνα, (Negri S, Leucci G. 2006)

3.1.4 Συμπεράσματα

Μετά την έρευνα και την ανάλυση των αποτελεσμάτων και συνδυασμό των αποτελεσμάτων των δύο γεωφυσικών μεθόδων, καταλήξανε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ο Ναός του Απόλλωνα έχει από κάτω του σίγουρα κάποια ανθρώπινη κατασκευή , η οποία πιθανολογείται ότι είναι η είσοδος του Πλουτωνίου. Συνεπώς η υπόθεση των αρχαιολόγων ότι το Πλουτώνιο και ο Ναός συνδέονται είναι κατά πάσα πιθανότητα σωστή.
- υπάρχει ένα, άγνωστο μέχρι να γίνει η έρευνα , ρήγμα κάτω από τον ναό του Απόλλωνα , το οποίο περνά και κάτω από το Πλουτώνιο με διεύθυνση βόρειο, βορειοδυτική - νότιο, νοτιοανατολική.
- Η στρωματογραφία της περιοχής είναι κυρίως άργιλοι και τραβερτίνες. Το επάνω στρώμα είναι οι άργιλοι και στο αμέσως επόμενο στρώμα βρίσκονται οι τραβερτίνες
- Η ηλεκτρική τομογραφία (ERT) αποδείχθηκε πολύ καλή μέθοδος για τον εντοπισμό αρχαιολογικών δομών και τοίχων σε αργλικές αποθέσεις .Το γεωραντάρ (GPR) είναι πολύ αξιόπιστο σε έρευνες μέσα σε ναούς από μόνο του. Τέλος και οι δύο μέθοδοι δώσανε αξιόπιστα αποτελέσματα και είναι ικανές και κατάλληλες για να χρησιμοποιηθούν σε αρχαιολογικές έρευνες.

(Negri S, Leucci G. 2006)

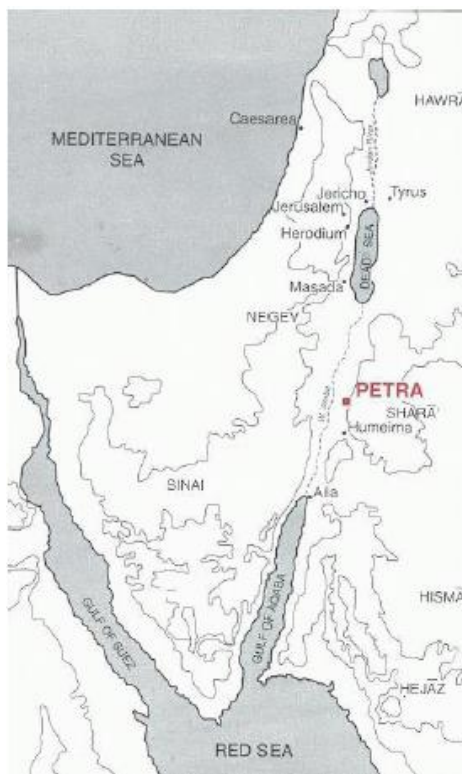
3.2 Γεωραντάρ (GPR) ως μέσο για την χαρτογράφηση και για προσχεδιασμένες ανασκαφές, Petra, Jordan

(CONYERS, ERNENWEIN, BEDAL,2002)

3.2.1 Εισαγωγή - Πρόβλημα

Η πόλη Πέτρα βρίσκεται στην Ιορδανία περίπου στο ενδιάμεσο της απόστασης ανάμεσα στην Νεκρά θάλασσα και το λιμάνι της Άγκαμπα στην ερυθρά θάλασσα. Η περιοχή έχει ιδιαίτερη αρχαιολογική σημασία καθώς στην Πέτρα υπήρχε η αρχαία αγορά της τότε εποχής.(Εικόνα 3.5)

Το πρόβλημα που υπάρχει στην συγκεκριμένη περιοχή είναι ότι οι αρχαιολόγοι εδώ και χρόνια έχουν μπερδευτεί και δεν ξέρουν πώς να εντοπίσουν τις τοποθεσίες και να χαρτογραφήσουν τις αρχαίες δομές που είναι θαμμένες μέσα στο έδαφος, ή αν κάποιες ξεπροβάλουν και στην επιφάνεια. Παλαιότερα όταν είχαν αυτό το πρόβλημα δοκίμαζαν να κάνουν τυχαίες ανασκαφές αντιπροσωπευτικές για την περιοχή με φτυάρια εκεί που είχαν τις περισσότερες πιθανότητες να βρουν τα αρχαία. Την σημερινή εποχή όμως, κάποιες γεωφυσικές μέθοδοι έχουν κερδίσει την εκτίμηση και τον σεβασμό της αρχαιολογικής κοινότητας για τις αποδόσεις που έχουν στο να βρίσκουν θαμμένες αρχαίες δομές.



Εικόνα 3.5: Τοποθεσία της πόλης Πέτρα στην Ιορδανία

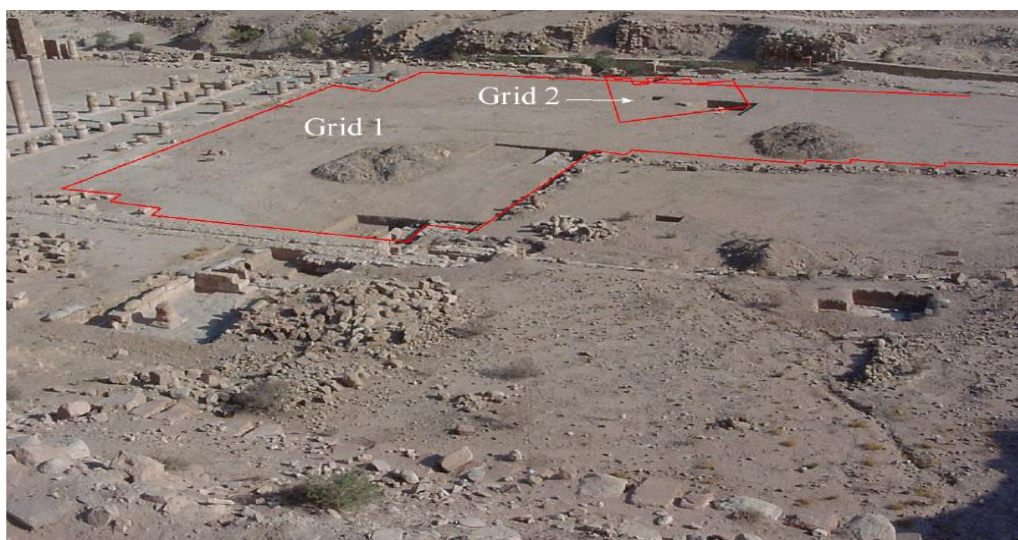
3.2.2 Μέθοδοι - Όργανα

Στην συγκεκριμένη περιοχή πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα με στόχο να βρεθούν οι ακριβείς τοποθεσίες των αρχαίων μνημείων έτσι ώστε να χαρτογραφηθεί το υπέδαφος της περιοχής και οι αρχαιολόγοι να κάνουν εκσκαφές χωρίς να καταστρέψουν τα μνημεία ή το οτιδήποτε της πολιτισμικής κληρονομιάς τους. Επίσης πρέπει να χαρτογραφηθεί το υπέδαφος για άλλες θαμμένες δομές, που δεν θα γίνουν εκσκαφές, καθώς και να βρεθεί η στρωματογραφία της περιοχής. Παρόλο που προτάθηκαν διάφορες γεωφυσικές μέθοδοι, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής αντίστασης και των μαγνητικών ερευνών, η μέθοδος των γεωραντάρ ήταν αυτή που εφαρμόστηκε αποκλειστικά. Ο λόγος είναι ότι το γεωραντάρ έχει την ικανότητα να συλλέγει τις μετρήσεις πολύ γρήγορα, αλλά το πιο σημαντικό ήταν η ικανότητά του να χαρτογραφεί και να δείχνει το ακριβές βάθος και τοποθεσία των αρχαίων. Αντιθέτως οι άλλες γεωφυσικές μέθοδοι παρόλο που βρίσκουν την τοποθεσία το αποτέλεσμα είναι ένα συνδυασμός των θαμμένων στοιχείων χωρίς να ξέρουμε το ακριβές βάθος.

Το όργανο και ο εξοπλισμός που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ο εξής :

- Γεωραντάρ της GSSI , μοντέλο SIR 2000
- Κεραία των 400 MHz
- Αποθηκευτικός χώρος ο σκληρός δίσκος και μετά CD ROM

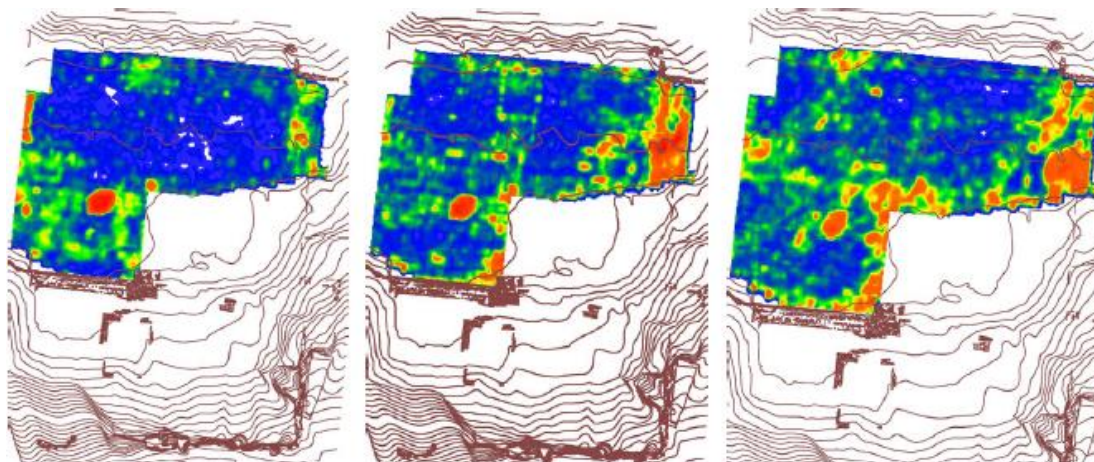
Η περιοχή που εξετάστηκε φαίνεται στην **Εικόνα 3.6**. Η απόσταση των γραμμών του γεωραντάρ είναι στα 50cm , και όταν βρισκόταν κάποια περιοχή ιδιαίτερης σημασίας εφαρμόζοταν ακόμη πιο πυκνός κάναβος με αποστάσεις των 20-25 cm.



Εικόνα 3.6 : Η περιοχή έρευνας του γεωραντάρ της «κάτω Αγοράς». Οι πυλώνες και το χώμα τοποθετήθηκαν εκεί αφού είχαν γίνει οι μετρήσεις και οι ανασκαφές.

3.2.3 Μετρήσεις GPR

Οι μετρήσεις πάρθηκαν στην περιοχή η οποία προαναφέρθηκε και η επεξεργασία τους έγινε με τα λεγόμενα slicemaps.

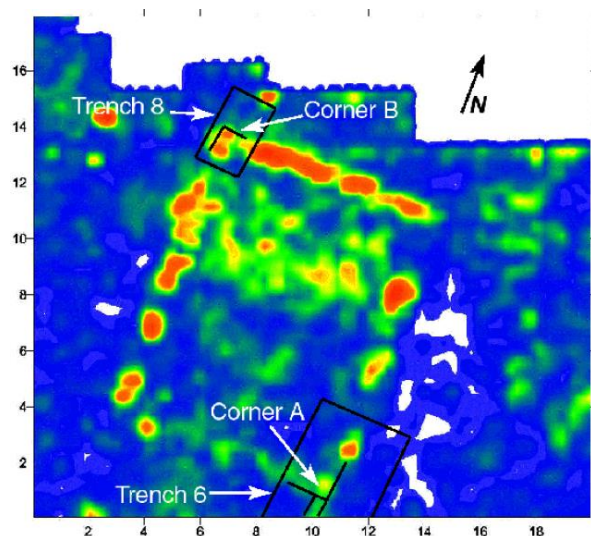


Εικόνα3.7: Slicemaps για τα βάθη 0-25cm, 25-50cm, 50-75cm αντίστοιχα

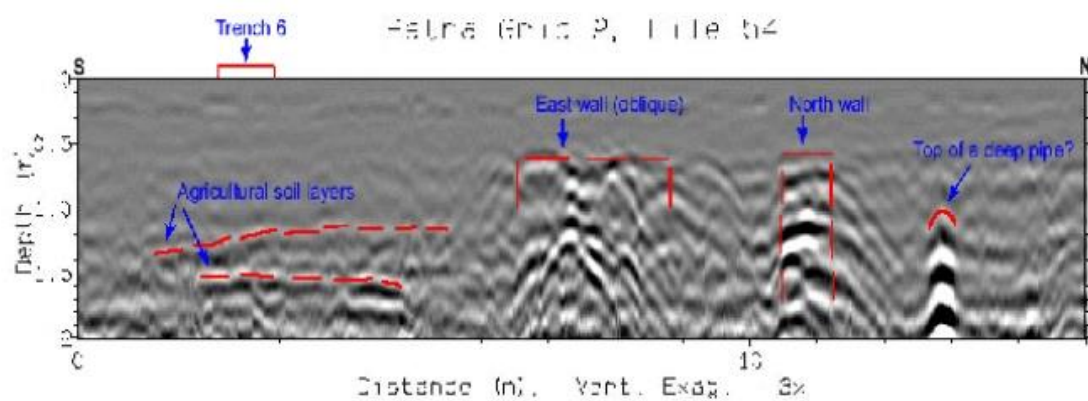
Στο 1^ο slicemap οι ανακλάσεις οφείλονται κυρίως σε βραχώδους σχηματισμούς κοντά στην επιφάνεια, συγκεκριμένα η κόκκινη στρογγυλή περιοχή στην κάτω πλευρά του χάρτη είναι ένας βράχος ο οποίος δεν μπορούσε να απομακρυνθεί πριν την έρευνα.

Στο 2^ο slicemap φαίνονται ορθογώνιες δομές πολύ πιο συγκεκριμένες στο βόρειο μέρος του χάρτη οι οποίες ονομάστηκαν grid 2, καθώς και πολλοί άλλοι πιθανοί τοίχοι και κατασκευές.

Στο 3^ο slicemap εμφανίζονται επίσης πολλές ορθογώνιες πιθανές περιοχές κτισμάτων και τοίχων στις οποίες θα γίνουν αρχικά δοκιμαστικές ανασκαφές.



Εικόνα 3.8: Slicemap του grid 2, βάθος 25-50 cm με τις τοποθεσίες των πρώτων δοκιμαστικών εκσκαφών (trench 6, trench 8) στις γωνίες του κτίσματος



Εικόνα 3.9 : Ενδεικτική τομή γεωραντάρ όπου φαίνονται οι θέσεις και τα βάθη των τοίχων που έγινε η ανασκαφή τους, καθώς και πιθανών σημείων στα οποία θα γίνει ανασκαφή

3.2.4 Συμπεράσματα

Το γεωραντάρ είναι το μοναδικό γεωφυσικό εργαλείο για κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που μπορεί να φτιάξει τρισδιάστατους χάρτες και εικόνες των αρχαιολογικών χώρων οι οποίοι βρίσκονται ακόμα κάτω από την επιφάνεια της Γης. Συγκεκριμένα από την παραπάνω γεωφυσική έρευνα στην αρχαίο αγορά της πόλης Πέτρα της Ιορδανίας το γεωραντάρ ανταποκρίθηκε με εξαιρετη ακρίβεια στις μετρήσεις του και τις τοποθεσίες των θαμμένων τοίχων και δομών. Προτού αρχίσουν τις ανασκαφές δοκιμάστηκε η ακρίβεια του γεωραντάρ με δοκιμαστικές μικρές ανασκαφές, οι οποίες στέφθηκαν με απόλυτη επιτυχία. **(Εικόνα 3.10)**



Εικόνα 3.10 : Η περιοχή έρευνας του γεωραντάρ της «κάτω Αγοράς», αφού έχουν γίνει οι δοκιμαστικές ανασκαφές που αναγραφονται ως Tr1,..Tr9 (Trenches)

Σαν συνέχεια το αποτέλεσμα ήταν να καθοδηγούνται οι ανασκαφές της περιοχής με στρατηγικό τρόπο και τεράστια ακρίβεια από τους χάρτες των γεωραντάρ οι οποίοι όχι μόνο οδήγησαν τις εκσκαφές , αλλά και έφτιαξαν λεπτομερέστατους χάρτες για τα αρχαία τα οποία θα παραμείνουν θαμμένα στον αρχαιολογικό χώρο. Τέλος βρέθηκε η στρωματογραφία του εδάφους για την οποία αποδείχθηκε σε μεταγενέστερα χρόνια ότι υπήρχε ένας ορίζοντας εδάφους, στον οποίο υπήρχαν οι αρχαίοι κήποι και οι αντίστοιχες δομές για την ύδρευση αυτών.

(CONYERS, ERNENWEIN, BEDAL,2002)

3.3 Η χρήση της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό τάφων και την χαρτογράφηση νεκροταφείων, Ocmulgee National Monument, Georgia USA (DANIEL P. BIGMAN, 2010)

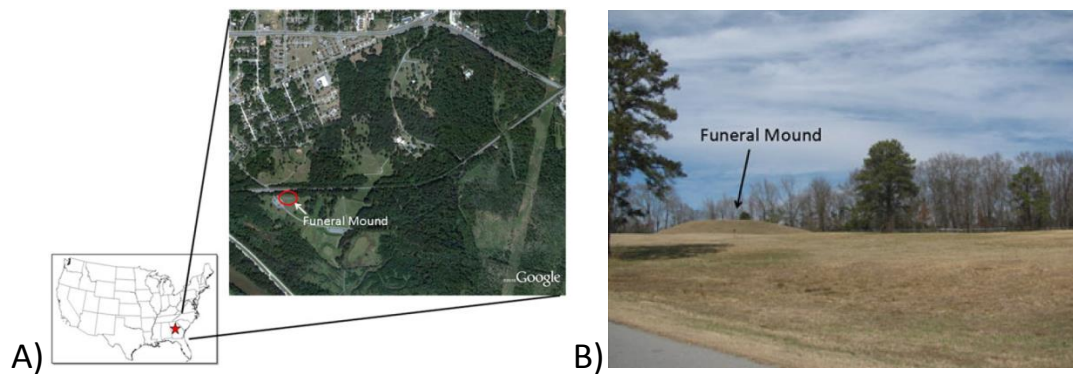
3.3.1 Εισαγωγή - Πρόβλημα

Το Οκμούλγκι είναι το 4^ο μεγαλύτερο ανάχωμα στις Ανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες και υπάρχουν αποδείξεις συνεχούς ανθρώπινης κατοίκησης για πάνω από 12.000 χρόνια, από την παλεοινδιάνικη περίοδο μέχρι και τον Αμερικανικό εμφύλιο. Την περίοδο που άρχισαν οι αποικίες των ευρωπαίων να έρχονται στις ΗΠΑ δημιουργήθηκε το λεγόμενο έθνος των ινδιάνων, του οποίου η παράδοση λέει ότι στο Οκμούλγκι υπήρχαν 2 καταυλισμοί ινδιάνων που είχαν αναγκαστεί να μεταναστεύσουν λόγω της εξάπλωσης των ευρωπαίων κατά τον 17ο και 18ο αι.

Συγκεκριμένα αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία δεν είναι τα αμυντικά χαρακώματα που υπάρχουν, αλλά το νεκροταφείο που βρίσκεται στην νοτιοδυτική γωνία του. Το νεκροταφείο (funeral mound) έχει επίπεδη κορυφή και κυλινδρική δομή και χτίστηκε σε επτά διαφορετικές φάσεις. Σε όλο το Οκμούλγκι η μεγαλύτερη πυκνότητα τάφων ανακαλύφθηκε και βρίσκεται σε αυτήν την κατασκευή, καθώς και την περιοχή γύρω από αυτήν.

Μία από τις πιο δημοφιλείς εφαρμογές των γεωφυσικών μεθόδων είναι να λύνουν αρχαιολογικά ζητήματα, όπως το να χαρτογραφούν νεκροταφεία και να εντοπίζουν τάφους αυτών. Παλαιότερα χρησιμοποιούταν κατά κύριο λόγο σε αρχαιολογικές εφαρμογές η μέθοδος των ηλεκτρομαγνητικών. Αλλά τα τελευταία χρόνια οι ηλεκτρικές τομογραφίες και τα γεωραντάρ έχουν γίνει τα βασικά εργαλεία προκειμένου να ερευνηθούν και να χαρτογραφηθούν ιστορικά και προϊστορικά νεκροταφεία.

Στην συγκεκριμένη περιοχή του νεκροταφείου πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα ο σκοπός της οποίας είναι να χαρτογραφηθεί το νεκροταφείο του Οκμούλγκι, να βρεθούν τάφοι και αρχαία πολιτισμικής αξίας, καθώς και να παρουσιαστούν τα θετικά της γεωφυσικής μεθόδου των ηλεκτρομαγνητικών ως βασικής μεθόδου για την χαρτογράφηση νεκροταφείων.



Εικόνα 3.11 : A) Αεροφωτογραφία του Οκμούλγκι, B) το ανάχωμα κοιτάζοντας προς τον βορρά

3.3.2 Μέθοδοι – Όργανα

Στην συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM survey) αποκλειστικά. Ο λόγος ήταν διότι ήθελαν να έχουν μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων, καθώς τα υλικά που βρίσκονται μέσα στους τάφους (οστά ,κεραμικά δοχεία, κρυστάλλους από γυάλινες χάντρες ...) δεν είναι αγώγιμα . Αντίθετα το έδαφος στην περιοχή το οποίο αποτελείται από άργιλο είναι αγώγιμο. Η άργιλος στο Οκμούλγκι έχει βάθος μέχρι 3 μέτρα και από κάτω βρίσκεται η κόκκινη άργιλος της πολιτείας της Γεωργίας. Η άργιλος έχει μικρό πορώδες και μεγάλο ποσοστό κράτησης νερού, οι τάφοι θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερο πορώδες, το οποίο θα είναι γεμάτο με αέρα ο οποίος έχει υψηλή αντίσταση

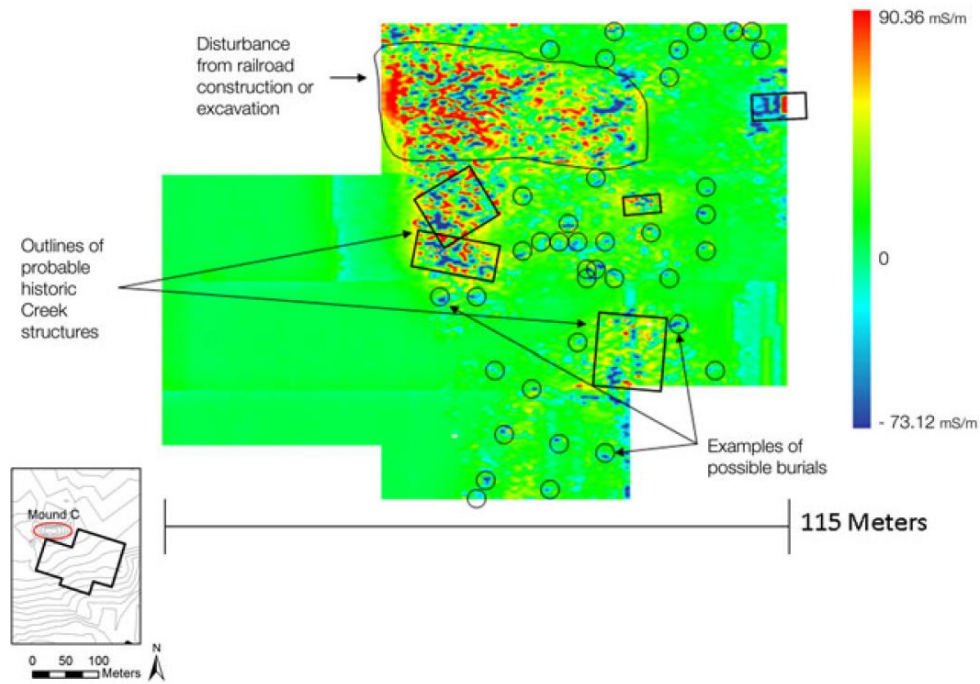
Το όργανο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι το **GEM-300 της GSSI, Inc**

Με χαρακτηριστικά και ρυθμίσεις ως εξής:

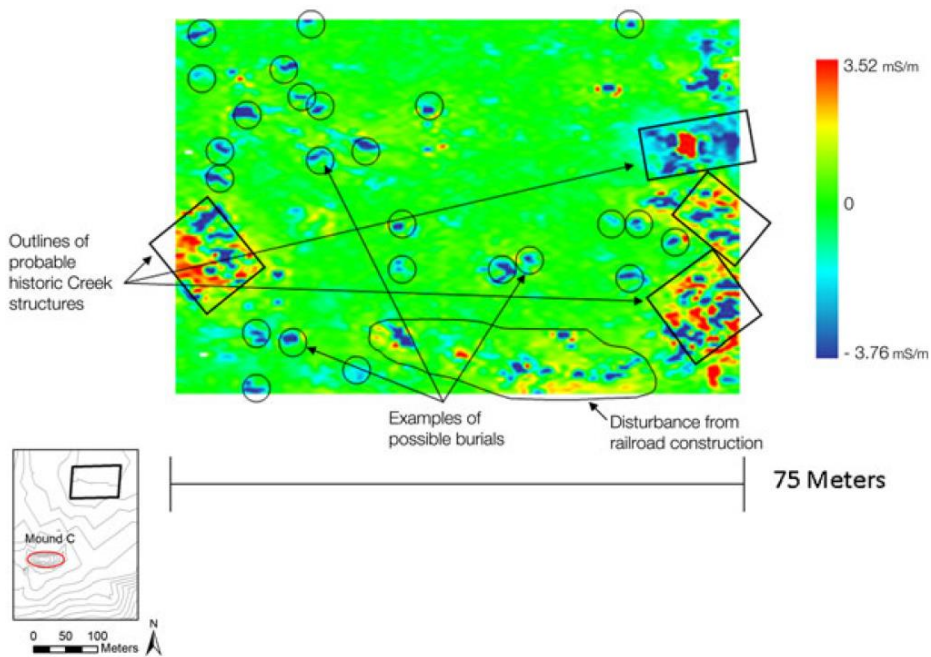
- coil spacing 1,67 m ,
- συχνότητα 150 Hz,
- βάθος έρευνας 2 μέτρα.
- Χρόνος διαδοχικών μετρήσεων 1/8 s
- Ταχύτητα ατόμου περίπου 1m/s
- Ο προσανατολισμός που παίρνονται οι μετρήσεις κρίθηκε με βάση το τοπίο, καθώς ο προσανατολισμός των τάφων είναι άγνωστος

3.3.3 Μετρήσεις EM

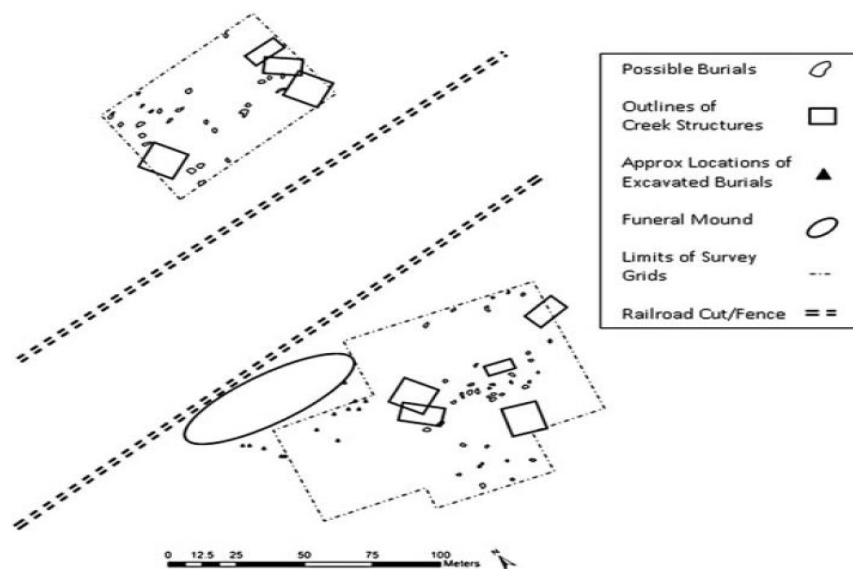
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 2 περιοχές. Η περιοχή έρευνας block 1 είχε έκταση 8750 m² και βρίσκεται στην νοτιοανατολική γωνία του αναχώματος (**Εικόνα 3.12**), ενώ η περιοχή έρευνας block 2 είχε έκταση 3750 m² και βρίσκεται βορειοανατολικά του αναχώματος σε απόσταση περίπου 100 m (**Εικόνα 3.13**)



Εικόνα 3.12 : Περιοχή έρευνας block 1, με κύκλους φαίνονται πιθανοί τάφοι, με ορθογώνιο τα πιθανά όρια των αρχαίων δομών, με ακανόνιστη γραμμή πιθανή ύπαρξη σιδηροδρομικής γραμμής λόγω επανατοποθέτησης χώματος από τις εκσκαφές



Εικόνα 3.13 : Περιοχή έρευνας block 2, με κύκλους φαίνονται πιθανοί τάφοι, με ορθογώνιο τα πιθανά όρια των αρχαίων δομών, με ακανόνιστη γραμμή πιθανή ύπαρξη σιδηροδρομικής γραμμής λόγω επανατοποθέτησης χώματος από τις εκσκαφές



Εικόνα 3.14: Ψηφιοποιημένος χάρτης της περιοχής με χρήση δεδομένων αγωγιμότητας από το block 1 & block 2

3.3.4 Συμπεράσματα

Μετά την διεκπεραίωση της έρευνας και αφού είχε χαρτογραφηθεί το νεκροταφείο (**Εικόνα 3.14**) και είχαν τοποθετηθεί τα όριά του, έγιναν ανασκαφές στα πιθανά σημεία που πιθανόν να υπήρχαν οι τάφοι και βρέθηκαν συνολικά 60 τάφοι και σε μερικές περιπτώσεις κρανία ή σε μια περίπτωση μόνο δόντια. Σαν συμπέρασμα το όργανο δεν είναι ευαίσθητο αρκετά για να διακρίνει την διαφορά σε αυτά και του soil matrix. Παρόλο αυτού του μειονεκτήματος η αναλογία τάφοι, ευρήματα – μη τάφοι είναι 10 προς 1, γεγονός που αποδεικνύει ότι το όργανο είναι πολύ αξιόπιστο για την χαρτογράφηση και έρευνα αρχαιολογικών χώρων ή δομών. Σε κάποιες περιπτώσεις που δεν υπήρχαν τάφοι πιθανότατα να οφείλονται σε κατασκευές της ινδιάνικης εποχής, οι οποίες αφού ήταν ξύλινες έχουν διαλυθεί στο περιβάλλον έδαφος ή οφείλονται στα όρια της σιδηροδρομικής γραμμής που κατασκευάστηκε στην περιοχή και στην επανατοποθέτηση του χώματος που είχαν σκάψει για να την κατασκευάσουν.

Τέλος αποδεικνύεται ότι με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο παίρνονται ταχύτατες μετρήσεις και πολύ αξιόπιστες, οι οποίες είναι ικανές να χρησιμοποιηθούν στις αρχαιολογικές μελέτες.

(Bigman,2010)

Κεφάλαιο 4. Πειραματικό Μέρος

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός της συγκεκριμένης γεωφυσικής έρευνας είναι να εξεταστεί η περιοχή της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού ως προς την στρωματογραφία του υπεδάφους, καθώς και να εντοπιστούν οι αρχαιολογικές δομές και το πώς εκτείνονται γύρω από την περιοχή της Αρχαίας Αγοράς. **(Εικόνα 4.1)**

Προκειμένου να επιτύχουμε τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε τις εξής μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης:

- Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος
- Γεωραντάρ (GPR)
- Ηλεκτρική μέθοδος, με την τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT)



Εικόνα 4.1: Περιοχή Αρχαίας Αγοράς και Αρχαίου Θεάτρου του Θορικού στην Λαυρεωτική. Με κίτρινο κύκλο συμβολίζεται η περιοχή της γεωφυσικής έρευνας στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής.

4.2 Αρχαιολογία της περιοχής

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της Λαυρεωτικής, που καθόρισε την φυσιογνωμία και την ιστορία της, είναι το μεταλλοφόρο υπέδαφός της.

Ο Θορικός βρίσκεται στη βορειοανατολική ακτή της Λαυρεωτικής και απέχει περίπου 50 χιλ. από την Αθήνα. Ήταν αρχαία σημαντική παράλια πόλη της ΝΑ Αττικής, της λεγόμενης Λαυρεωτικής, η οποία έλεγχε τα γειτονικά μεταλλεία του Λαυρίου από τα οποία γινόταν κατά την αρχαιότητα εξόρυξη μολύβδου και αργύρου. Ο Θορικός σύμφωνα με τις ανασκαφικές έρευνες που διενήργησε στη περιοχή η Βελγική αρχαιολογική αποστολή, κατά την περίοδο 1963-1976, ήταν ένας από τους αρχαιότερους οικισμούς της Αττικής και ένα από τα αρχαιότερα ναυτικά φρούριά της. Φαίνεται να κατοικείται από την τέταρτη χιλιετία π.Χ. Η κατοίκηση στο λόφο Βελατούρι υπήρξε μακράιωνη και πυκνή. Στην κορυφή του σώζονται τα ερείπια της ακρόπολης με ίχνη εγκατάστασης από το τέλος της νεολιθικής εποχής, σπίτια της πρωτοελλαδικής και μεσοελλαδικής περιόδου (2900 - 1600 π.Χ.) και πέντε θολωτοί και θαλαμωτοί τάφοι της υστεροελλαδικής (μυκηναϊκής) περιόδου (1600-1100 π.Χ.).

Στην προϊστορική εποχή έγινε εκμετάλλευση του υπεδάφους και μάλιστα προηγήθηκε, και των χαλκούχων (του μαλαχίτη και του αζουρίτη) εκμεταλλεύσεων. Η εκμετάλλευση της εποχής έγινε σε περιοχές, όπου υπήρχαν εμφανή, ή εύκολα προσβάσιμα για την τεχνολογία της εποχής, κοιτάσματα της 1ης Επαφής, δηλαδή στα υψώματα (π.χ. στα Ριμπάρια, το Σουβλερό). Στο Οβρυόκαστρο, υπάρχουν μικρές μεταλλευτικές στοές, που φαίνεται ότι ανοίχτηκαν από τους προϊστορικούς μεταλλευτές στα τέλη της Νεολιθικής εποχής. Δεν έχουν όμως εντοπιστεί λείψανα από τις εγκαταστάσεις μεταλλουργικών εργασιών (όπου προετοιμάζαν και όπου έλιωναν το μέταλλο), ούτε σχετικά υποπροϊόντα (σκωρίες) παρά μόνον μερικά λίθινα εργαλεία, με τα οποία έκαναν την εξόρυξη. **(Εικόνα 4.2)**



Εικόνα 4.2: α) Λίθινα εργαλεία από το σπήλαιο του Κίτσου, β) Λίθινο «μεταλλευτικό» σφυρί

Σε άλλες θέσεις όμως του ελλαδικού χώρου έχουν βρεθεί νεολιθικά μετάλλια αντικείμενα, που έχουν γίνει από μέταλλο (χαλκό) που προέρχεται από το Λαύριο. Η πρώτη σαφής μαρτυρία για εκτεταμένη εξόρυξη μεταλλεύματος προέρχεται από την επόμενη φάση, την *Πρώιμη Εποχή του Χαλκού ή Πρωτοελλαδική* (3^η χιλιετία π.Χ.). Χαρακτηριστικό της είναι η μεταλλευτική στοά στους νοτιοδυτικούς πρόποδες του μεγάλου Βελατουριού στο Θορικό, αμέσως δυτικά από το Θέατρο, η οποία χρονολογείται στην 3η χιλιετία. Η στοά ανοίχθηκε με λίθινα εργαλεία για την εκμετάλλευση φλέβας μεταλλεύματος που ήταν ορατή στην πλαγιά. Σημάδια από τα αποτυπώματα των εργαλείων εντοπίστηκαν στα τοιχώματά της και στις επιχώσεις αυτής βρέθηκαν και θραύσματά τους.

Ο Θορικός εξελίσσεται στο μεγάλο μεταλλευτικό κέντρο της ηπειρωτικής Ελλάδας, γεγονός που του προσδίδει πλούτο και δύναμη. Ο λόφος κατοικείται από τις αρχές τουλάχιστον της 4ης χιλιετίας π.Χ. Διαθέτει δύο ασφαλή λιμάνια που ανοίγονται στις Κυκλάδες και το Ανατολικό Αιγαίο και είναι η βάση για τις εμπορικές σχέσεις και η πύλη για τις πολιτιστικές ανταλλαγές, όπως αυτές τεκμηριώνονται από την ομοιότητα της κεραμικής. Κατά την τελευταία περίοδο της Προϊστορικής Εποχής, δηλαδή την *Μυκηναϊκή* (1.600-1.100 π.Χ.), ο Θορικός είναι το σημαντικότερο Μυκηναϊκό κέντρο της Αττικής. Ο οικισμός έχει αναπτυχθεί στην κορυφή του λόφου Βελατούρι. Από αυτόν τον λόφο δεν ερευνήθηκε αλλά μόνο ένα μικρό τμήμα του στα τέλη του 19ου αιώνα. Οι οικίες του οικισμού έχουν κτισθεί ανάμεσα σε διαδοχικούς αναλημματικούς περιβόλους, έχουν δε λιθόκτιστα θεμέλια και μερικές φορές λιθόστρωτα δάπεδα.

Τα διαπρεπέστερα μνημεία του Θορικού είναι τα ταφικά, κυρίως οι δύο θολωτοί τάφοι που χρονολογούνται στις αρχές της Μυκηναϊκής εποχής. Στους μυκηναϊκούς τάφους βρέθηκαν αγγεία και ειδώλια από τον 7ο και έως το τέλος του 5ου αιώνα π.Χ., που υποδεικνύουν την παρουσία μιας ηρωικής λατρείας που συνεχίστηκε για πολλούς αιώνες. Η κορυφή του λόφου εξακολούθησε να κατοικείται στη γεωμετρική εποχή, στην οποία ανήκει ένα μεγάλο δωμάτιο με κτιστούς πάγκους που ήταν πιθανώς χώρος συγκέντρωσης των κατοίκων της περιοχής. Λιθάργυροι που βρέθηκαν σε δωμάτιο σπιτιού της ίδιας περιόδου δείχνουν ότι και κατά την εποχή αυτή υπήρχε παραγωγή μολύβδου και αργύρου. Χαμηλότερα στις πλαγιές εκτείνονταν τα νεκροταφεία με πλούσια κτερίσματα από τη γεωμετρική (1100 π.Χ) έως την ύστερη κλασική περίοδο (350 π.Χ.) που φανερώνουν τη συνεχή κατοίκηση του χώρου. Το 412 π.Χ. κατά τη διάρκεια του Πελοποννησιακού πολέμου οι Αθηναίοι οχύρωσαν τη χερσόνησο του Αγίου Νικολάου για να προστατεύσουν τα μεταλλεία. Κατά τους κλασικούς χρόνους αποτελούσε την πρωτεύουσα του δήμου Θορικών που βρισκόταν στον σημερινό λόφο Βελατούρι προς την βόρεια και νότια σχηματιζόμενες μικρές πεδιάδες. Ο δε λιμένας του Θορικού, στον ομώνυμο σήμερα

όρμο, εμφάνιζε μεγάλη κίνηση διαμετακομιστικού εμπορίου, ιδίως ξυλείας και μετάλλων. (Κακαβογιάννη 2008)

Στο τέλος του 6^{ου} αιώνα π.Χ. εγκαθιδρύεται στην Αθήνα το δημοκρατικό πολίτευμα, ένα γεγονός που θεωρείται από τα σημαντικότερα στην παγκόσμια ιστορία. Βασικός συντελεστής της εγκαθίδρυσης των νέων θεσμών υπήρξε ο Κλεισθένης, ο οποίος με τις επιλογές του έκανε τον αθηναϊκό δήμο τη μεγάλη πολιτική δύναμη των κλασικών χρόνων.

Μια βασική δημοκρατική επιλογή ήταν η αναδιάταξη του χώρου, που εκφράστηκε με τη διαίρεση της Αττικής σε δήμους. Οι κάτοικοι κατανεμήθηκαν σε δήμους σύμφωνα με τον τόπο κατοικίας τους και όχι την καταγωγή τους από τις αρχαίες φυλές. Με τον τρόπο αυτό κλονίστηκαν οι κοινωνικές βάσεις της παλιάς αριστοκρατίας, καθιερώθηκε η ισονομία των πολιτών και καθένας δηλώνεται με το όνομα του δήμου της καταγωγής του. Η εδαφική αναδιοργάνωση, που στηρίχτηκε στη δημιουργία των δήμων και των δέκα φυλών, ένωσε μεταξύ τους τα διάφορα μέρη της Αττικής και δημιούργησε την πόλη-κράτος των Αθηνών, που κατόρθωσε να αντιμετωπίσει την περσική εισβολή και είχε τόσο σημαντική προσφορά στην παγκόσμια σκέψη.

Με τη διοικητική διαίρεση του Κλεισθένη, δημιουργήθηκαν στη Λαυρεωτική πέντε βασικοί δήμοι: του Σουνίου, του Θορικού, της Αναφλύστου, της Βήσας και της Αμφιτροπής. Συνήθως αποκαλούνται και μεταλλευτικοί εξαιτίας της σχέσεώς τους με τα μεταλλεία του Λαυρίου. Ανάλογα με την εδαφική έκταση, τον αριθμό των δημοτών και άλλους ιστορικούς παράγοντες, έστειλαν έναν αριθμό αντιπροσώπων τους στην Αθήνα, στη Βουλή των Πεντακοσίων.

Η αναλογική αυτή εκπροσώπηση της κάθε περιοχής στα όργανα της Πολιτείας αποτελούσε έναν βασικό θεσμό της δημοκρατικής λειτουργίας. Κάθε δήμος μέσα στα όρια της περιφέρειάς του είχε ένα κέντρο, πολιτικό-διοικητικό-θρησκευτικό, μικρότερους οικισμούς, ιερά, καλλιεργήσιμες εκτάσεις, αγροκτήματα και αγροτικές εγκαταστάσεις και στην περίπτωση της Λαυρεωτικής μεταλλευτικές εγκαταστάσεις (στοές, εργαστήρια, καμίλους τήξεως μεταλλεύματος(αλλά και τα λατομεία στο Σούνιο (Αγριλέζα) και τον Θορικό (Στεφάνι).

Παράλληλα με τα μεγάλα επίσημα ιερά του Σουνίου και του Θορικού, ένα πλήθος μικρότερων ιερών και τόπων λατρείας διασκορπισμένων σε όλη τη Λαυρεωτική βγαίνει μέσα από τις επιγραφές, σε έναν τόπο όπου η εύνοια της θεότητας ήταν απαραίτητη και για τους επιχειρηματίες αλλά και για τους εργαζόμενους στα μεταλλεία. Ελεύθεροι πολίτες και δούλοι ξενικής καταγωγής – όπως φαίνεται από τα ονόματά τους – κάνουν αφιερώματα σε θεότητες και ιερά. Μαρτυρείται λατρεία της Δήμητρας, της Κυβέλης, της Άρτεμης, της Αφροδίτης, του Απόλλωνα αλλά και θεοτήτων ανατολικής προέλευσης όπως του Μηνός και της Βενδίδος.

Το κέντρο του αρχαίου δήμου του Θορικού βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του λόφου Βελατούρι κάτω από τη μυκηναϊκή ακρόπολη και τους θολωτούς τάφους. Πρόκειται για έναν πυκνά χτισμένο οικισμό με ιερά, θέατρα, νεκροταφεία και εργαστήρια, ένα εμπορικό κέντρο που θα φιλοξενούσε έμπορους και ναυτικούς καθώς χτίστηκε κοντά στη θάλασσα και είχε ένα λιμάνι που προστατευόταν από το οχυρό που σώζεται στη χερσόνησο του Αγίου Νικολάου.

Ανεξάρτητα από την συνεκτικότητα που παρουσιάζουν οι οικισμοί, εμφανίζονται κέντρα συλλογικής κοινωνικοοικονομικής δραστηριότητας που συνήθως αποτελούν και κέντρα του αντίστοιχου Δήμου. Τέτοια είναι τα ιερά και οι αγορές. Γνωστές αγορές είναι η των Σαλαμινίων (Λιμάνι Πασά), του Λευκίου κάπου στο άνω Σούνιο, κοντά στην Αγγιλέζα, και οι δύο στον αρχαίο Δήμο Σουνίου. Πιθανώς και το στωϊκό οικοδόμημα στην κοιλάδα του Ποταμού στο Θορικό (αναφέρεται και ως πιθανό ιερό της Δήμητρας) να εντάσσεται σε κάποιο τέτοιο κέντρο. Οι επιγραφές των Σαλαμινίων παραθέτουν μια πολύ ζωντανή περιγραφή της οργάνωσης στον χώρο των παραγωγικών οικιστικών μονάδων και του συλλογικού κέντρου. (ΚΑΠΕΤΑΝΙΟΣ 2009)

Ένα από τα συλλογικά αυτά κέντρα ήταν η Αρχαία Αγορά του Θορικού κοντά στην οποία υπάρχει και το αρχαίο θέατρο του Θορικού, το οποίο είναι το αρχαιότερο θέατρο στην Ευρώπη, σίγουρα ένα από τα αρχαιότερα στον κόσμο, κατασκευάστηκε τον 6^ο αιώνα π.χ. και η ιδιαιτερότητα του βρίσκεται στο ιδιόμορφο ελλειψοειδές σχήμα του σε αντίθεση με την ημικυκλική κατασκευή των νεότερων σε χρονολογία θεάτρων. Ήταν το επίκεντρο του αρχαίου Δήμου του Θορικού, που ανήκε στην πόλη-κράτος των Αθηνών και χρησιμοποιείτο όχι μόνο για παραστάσεις αλλά και για τις συνεδριάσεις των πολιτών του Δήμου. Η χωρητικότητα του ανέρχεται στους 4.000 θεατές. Στον χώρο του θεάτρου υπήρχε μικρός ναός του θεού Διονύσου και δωμάτια για την διαμονή των ηθοποιών. Στην ανατολική πλευρά υπάρχει μία μεγάλη αίθουσα με κερκίδες διπλού επιπέδου λαξευμένες στο βράχο, που ήταν πιθανώς τόπος συγκέντρωσης και προετοιμασίας των θεμάτων που επρόκειτο να συζητηθούν στις συνελεύσεις του Δήμου. **(Εικόνα 4.3, Εικόνα 4.4)**



Εικόνα 4.3 : Το αρχαίο θέατρο του Θορικού



Εικόνα 4.4: Πανοραμική φωτογραφία της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού

Δίπλα στο δυτικό διάζωμα του θεάτρου υπάρχουν ευρήματα από ένα σπίτι με πεντάκλινο δωμάτιο, πιθανότατα δωμάτιο συμποσίων, και εξωτερική αυλή. Εντύπωση προκαλεί το γεγονός, ότι ακριβώς νότια της σκηνής του θεάτρου και σε παράλληλη εποχή με την λειτουργία του, υπήρχε νεκροταφείο που χρησιμοποιήθηκε από τον 6ο αι. π.Χ. έως τα μέσα του 4ου αι. π.Χ. Βόρεια του θεάτρου υπάρχει ο λόφος Βελατούρι που στην κορυφή του φιλοξενεί θολωτούς τάφους της μυκηναϊκής περιόδου (1.600-1.100 π.χ.). Μέχρι στιγμής έχουν ανακαλυφθεί πέντε τάφοι, δύο από αυτούς μεγάλοι θολωτοί, με πλήθος από κτερίσματα στο εσωτερικό τους, ενώ όλη η γύρω περιοχή είναι γεμάτη από αρχαιολογικά ευρήματα που μαρτυρούν τον έντονο εποικισμό ενός μεγάλου λατρευτικού κέντρου της ευρύτερης περιοχής στην εποχή εκείνη.

Δίπλα ακριβώς από το αρχαίο θέατρο, στέκει ίσως ένα από τα αρχαιότερα «πλυντήρια» μεταλλεύματος του 6ου αιώνα π.χ. Τα «πλυντήρια» είναι ειδικές κατασκευές των αρχαίων μεταλλευτών, στις οποίες μεταφέρονταν τα μεταλλεύματα μετά την εξόρυξη, το θρυμματισμό και το κοσκίνισμά τους, για τον εμπλουτισμό τους, δηλαδή για να καθαριστούν ακόμη καλύτερα. **(Εικόνα 4.5)**



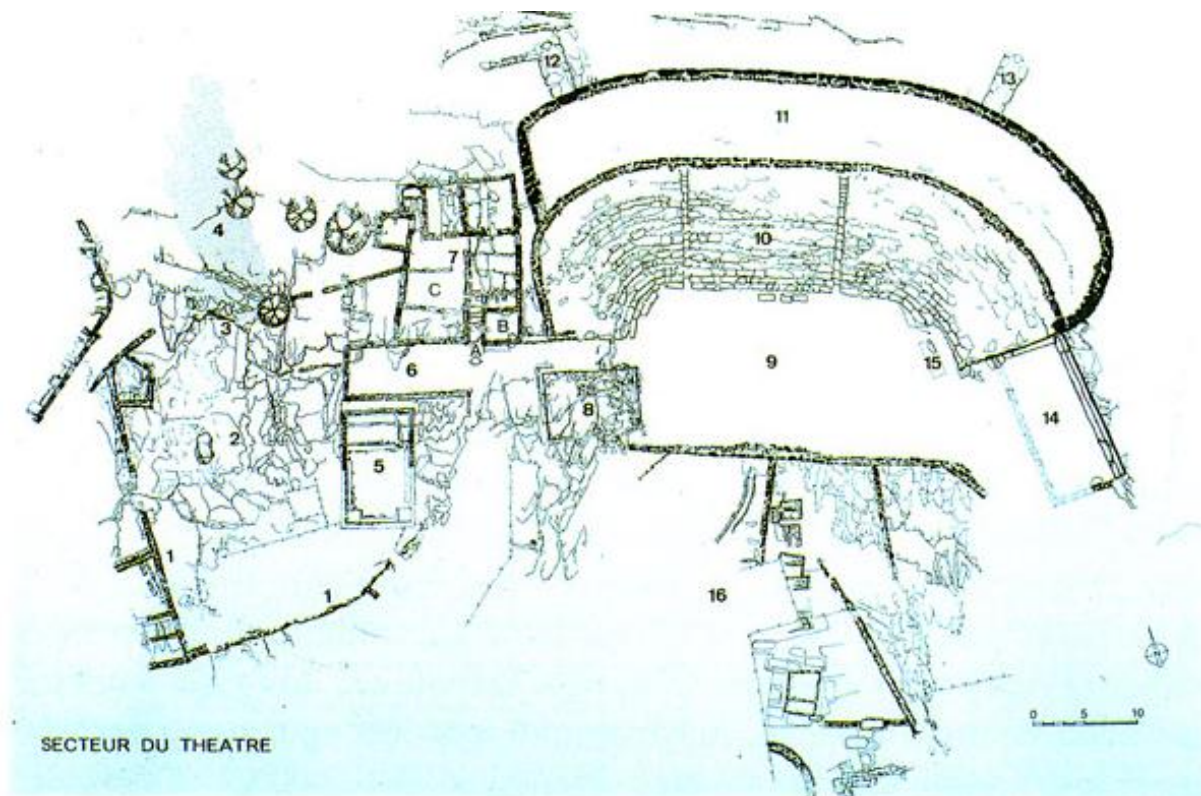
Εικόνα 4.5 : Αρχαίο πλυντήριο εμπλουτισμού μεταλλευμάτων στην περιοχή του Θορικού

Το μετάλλευμα έβγαινε από μια παρακείμενη σπηλιά **(Εικόνα 4.6)**, ακριβώς δίπλα από το πλυντήριο, στην οποία υπήρχε μεγάλη ποσότητα από ασήμι και μόλυβδο. Να σημειωθεί ότι από το συγκεκριμένο ασήμι, κατασκευάστηκαν τα πρώτα αττικά τετράδραχμα, το Αθηναϊκό νόμισμα που κυριάρχησε για σχεδόν 5 αιώνες και είχε στην μία όψη την Αθηνά και στην άλλη την γλαύκα (κουκουβάγια). Ο χώρος αυτός αποτέλεσε την κύρια πηγή χρηματοδότησης των σχεδίων της Αθήνας κατά τον «χρυσό αιώνα» της πόλης. Το συγκεκριμένο μεταλλείο, μαζί με τα υπόλοιπα μεταλλεία της περιοχής έδιναν στην πόλη της Αθήνας 750 τάλαντα τον χρόνο με τα οποία ο Θεμιστοκλής κατασκεύασε τον περίφημο στόλο της πόλης.



***Εικόνα 4.6:** Η αρχαιότερη μεταλλευτική στοά της περιοχής της ΝΑ Αττικής. Η στοά αυτή βρίσκεται στο λόφο Βελατούρι στην περιοχή του Θορικού και χρονολογείται στο 3000 π.Χ.*

Μετά την εξάντληση των μεταλλείων του Λαυρίου και την καταστροφή του Θορικού από το Ρωμαίο αυτοκράτορα Σύλλα το 86 π.Χ. η περιοχή εγκαταλείφτηκε. Κατοικήθηκε και πάλι, κατά τη περίοδο που συνήθως ονομάζουμε «Πρωτοβυζαντινή», από τον 4^ο αι έως τον 7^ο αι. μ.Χ., μέχρι την εποχή που ξεκινά η κάθοδος των σλαβικών φύλων προς τον ηπειρωτικό ελλαδικό χώρο και που ερημώνουν την ύπαιθρο της Αττικής. Από τότε, ελάχιστο ασήμι βγήκε, περιστασιακά, από το Λαύριο.



Εικόνα 4.7 : Τοπογραφικό σχέδιο της ανασκαφικής ζώνης του αρχαίου θεάτρου του Θορικού όπως αποτυπώθηκε από την Βέλγικη Αρχαιολογική Αποστολή. (1.) Αρχαίος τοίχος της παραχώρησης της μεταλλευτικής στοάς Νο:3. (2.) Ο υπαίθριος χώρος του πλυντηρίου. (3.) Η είσοδος στην μεταλλευτική στοά Νο:3. (4.) Η γκρίζα διαγράμμιση δείχνει το ανεσκαμμένο τμήμα στο εσωτερικό της στοάς. (5.) Πλυντήριο Νο:4. (6.) Η σκηνοθήκη. (7.) Σπίτι Νο:2. Α. Η είσοδος Β. Ο ανδρώννας C. Η αυλή. (8.) Τα θεμέλια του Ναού του Διονύσου. (9.) Η ορχήστρα. (10.) Το κοίλον του 5^{ου} π.Χ. αιώνα. (11.) Το κοίλον του 4^{ου} π.Χ. αιώνα. (12.) Η δυτική δίοδος. (13.) Η ανατολική δίοδος. (14.) Η αίθουσα με τους πάγκους. (15.) Ο Βωμός. (16.) Ο χώρος της νεκρόπολης.

Τον 19ο αιώνα, η Λαυρεωτική γνωρίζει μια δεύτερη περίοδο ακμής.

Το τεράστιο δίκτυο των μεταλλευτικών φρεάτων, δημιουργημένο στην αρχαιότητα, απετέλεσε τη βάση επάνω στην οποία στηρίχθηκε το νεότερο δίκτυο, που άρχισε να κατασκευάζεται από το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1870 και διατηρήθηκε ενεργό έως τις πρώτες μεταπολεμικές δεκαετίες. Το 1875, ιδρύθηκε από τον Serpieri η «Compagnie Francaise des Mines du Laurium», που διαδέχθηκε τα «Μεταλλεία Καμάριζας».

Τα Μεταλλεία Λαυρίου λειτούργησαν από το 1875 έως το 1989. Στο διάστημα 1875-1904 η εταιρεία κατασκευάζει το βασικό πυρήνα των εγκαταστάσεων της που περιλαμβάνει κτίρια διοίκησης, εγκαταστάσεις μηχανικής επεξεργασίας και υδρομηχανικού εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων και αναγωγής του μολύβδου. Το

1905 ξεκινά μια μεγάλη επιχείρηση τεχνολογικού εκσυγχρονισμού της μεταλλουργίας του μολύβδου. Επίσης, από το 1905 αλλάζει και η κινητήρια δύναμη του συγκροτήματος με την εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων. Στο τέλος της δεκαετίας του 1920 η εταιρεία βρίσκεται αντιμέτωπη με τη συνεχιζόμενη πτώση των τιμών του μολύβδου και με τη σταδιακή εξάντληση των κοιτασμάτων. Επιχειρεί να αντιμετωπίσει την κρίση με τον εκσυγχρονισμό της μεθόδου εμπλουτισμού και με την παραγωγή καθαρού μολύβδου για την εσωτερική αγορά. Οι τελευταίες σημαντικές παρεμβάσεις στο συγκρότημα είναι οι εγκαταστάσεις των φίλτρων καπνού που δημιουργήθηκαν μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Ορισμένα από τα κτίρια που σώζονται μέχρι και σήμερα κατασκευάστηκαν το 1875-76 και εξακολούθησαν μέχρι το 1988 να στεγάζουν τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Το συγκρότημα διέκοψε οριστικά τη λειτουργία του το 1989. (Ζαβερδίνος Α.Μ. 2011)

4.3 Γεωλογία της περιοχής

4.3.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής – Λαυρεωτικής

Η Λαυρεωτική βρίσκεται στη ΝΑ πλευρά της Αττικής. Απέχει 55 χλμ. από την Αθήνα και καταλαμβάνει έκταση 200 χλμ.² περίπου. Η μορφολογία της είναι λοφώδης ως ημιορεινή, με μεγαλύτερο υψόμετρο στη θέση Μεγάλο Ριμπάρι (372 m.). Η περιοχή είναι άνυδρη, εν μέρει πευκόφυτη και διασχίζεται από κοιλάδες.

Η Λαυρεωτική αποτελεί τμήμα του Αττικοκυκλαδικού Μεταμορφωμένου Συμπλέγματος και ανήκει στην Ενδιάμεση Μεταμορφική Ζώνη των Ελληνίδων (Πελαγονική Ζώνη). Δομείται από τρεις κύριες τεκτονικές ενότητες αλπικής ηλικίας:

- την Κατώτερη (Παρααυτόχθονη Σειρά ή Σειρά Καμάριζας),
- την Ενδιάμεση (Κυανοσχιστολιθική Ενότητα που αντιστοιχεί με τη Σειρά Πλάκας της Λαυρεωτικής) και
- την Ανώτερη (μη μεταμορφωμένη σειρά, ασβεστολιθικά ράκη

Α. Κατώτερη Τεκτονική Ενότητα (Σειρά Καμάριζας): Θεωρείται αυτόχθονη. Χαρακτηρίζεται από μεταμορφικές διαδικασίες πρασινο-σχιστολιθικής και αμφιβολιτικής φάσης. Ηλικία τριαδική-κάτω ιουρασική. Αποτελείται από τους εξής σχηματισμούς:

1. Κατώτερο Μάρμαρο Καμάριζας: Λευκό-τεφροκύανο μάρμαρο, άστρωτο ως παχυπλακώδες, αδροκρυσταλλικό, το οποίο στην οροφή του γίνεται λεπτοστρωματώδες και μικροκρυσταλλικό, με ανάπτυξη λατυποπαγοειδούς δομής κατά θέσεις. Πάχος 300-500 m. και ηλικία τριαδική.
2. Σχιστόλιθος Καμάριζας: Επικρατούν μαύροι ως καστανόχρωμοι μαρμαρυγικοί, χαλαζιακοί και χλωριτικοί σχιστόλιθοι με μεταμόρφωση κατώτερης-μέσης πρασινο-σχιστολιθικής φάσης. Στην περιοχή Πλάκα, λόγω γειννίασης με γρανοδιοριτική διείσδυση, έχει μετατραπεί σε κερατίτη. Συμμετέχουν επίσης ηφαιστειακά πετρώματα και βασικά-υπερβασικά σώματα. Η επαφή με το Κατώτερο Μάρμαρο Καμάριζας είναι κανονική και υπάρχει χαρακτηριστική μεταβατική ζώνη από εναλλαγές ασβεστιτικών σχιστόλιθων και λεπτοστρωσιγενών ασβεστιτικών μαρμάρων. Πάχος 20-300 m. Πιθανή ηλικία ιουρασική
3. Ανώτερο Μάρμαρο Καμάριζας: Λευκό-λευκότεφρο μάρμαρο μεσολεπτοπλακώδες, πλούσιο σε κονδυλοειδείς δομές μεταπυριτολίθων και δολομιτών. Πάχος 0-150 m. Ηλικία ιουρασική
4. Επικλυσιγενής Ασβεστόλιθος (ή Κατώτερος Ασβεστόλιθος Πλάκας): Συνήθως άστρωτος, χαοτικής μορφής, έντονα καρστικοποιημένος και οξειδωμένος.

Αναπτύσσεται επικλυσιογενώς επί του Ανώτερου Μαρμάρου Καμάριζας και απευθείας επί του Σχιστόλιθου Καμάριζας, διά μέσου κροκαλοπαγούς βάσης. Πάχος 0-80 m. Ηλικία άνω ιουρασική-κάτω κρητιδική

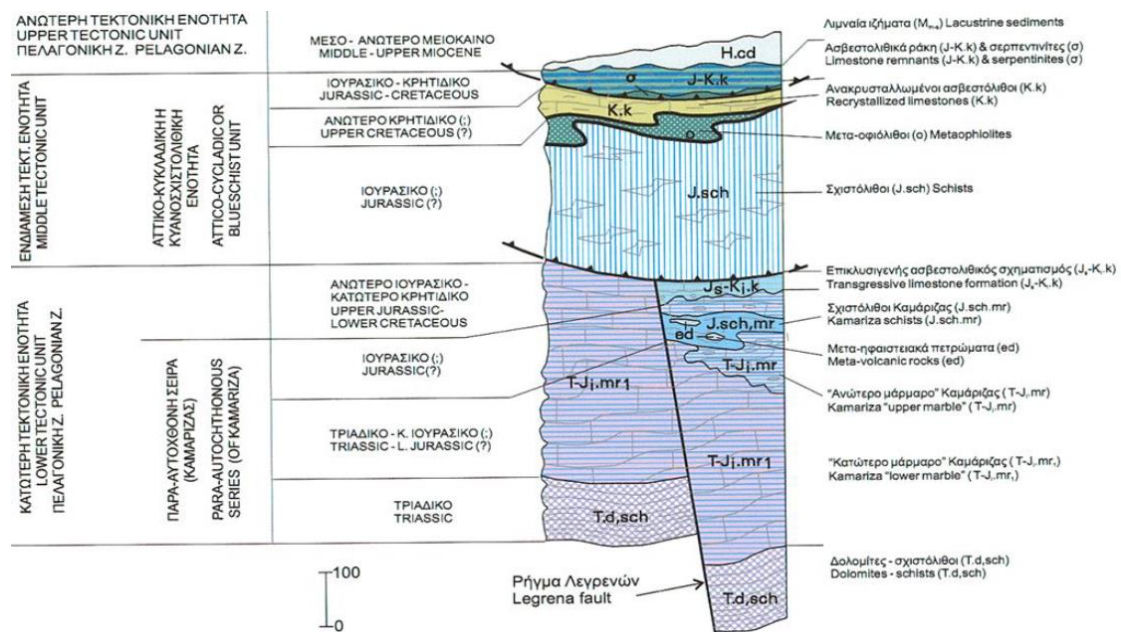
Β. Ενδιάμεση Τεκτονική Ενότητα (Σειρά Πλάκας): Είναι αλλόχθονη και βρίσκεται επωθημένη στους σχηματισμούς της αυτόχθονης Ενότητας Καμάριζας. Αποτελεί το Φυλλιτικό ή Νεοελληνικό κάλυμμα στην περιοχή της Λαυρεωτικής. Χαρακτηρίζεται από μεταμορφικές συνθήκες υψηλών πιέσεων χαμηλών θερμοκρασιών (γλαυκοφανιτική φάση) ηωκαινικής ηλικίας και από ανάδρομη μεταμόρφωση πρασινοσχιστολιθικής φάσης μειοκαινικής ηλικίας. Διαχωρίζεται σε σχιστόλιθους, πρασινίτες (μεταφιολιθικά εκρηξιγενή πετρώματα) και ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους.

1. Σχιστόλιθοι Πλάκας: Καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στη Λαυρεωτική. Πρόκειται για φυλλίτες με χαλαζία, σερικήτη ως μοσχοβίτη, ασβεσίτη και χλωρίτη. Κατά θέσεις, παρεμβάλλονται πρασινοσχιστόλιθοι (πρασινίτες, μεταφιολίθοι) με γλαυκοφανή καθώς και ανθρακικοί σχηματισμοί. Πάχος 50-180 m. Πιθανή ηλικία ιουρασική.
2. Ασβεστόλιθοι Πλάκας: Διακριτός, υπολειμματικός ορίζοντας. Καταλαμβάνουν τα ανώτερα στρωματογραφικά μέλη του καλύμματος. Πρόκειται για ανακρυσταλλωμένους, κατά κανόνα, λεπτοπλακώδεις, λεπτοστρωσιγενείς ασβεστολίθους, συνήθως λευκού ως τεφρόλευκου χρώματος. Τοπικά έχουν λατυποπαγοειδή υφή, διασχίζονται από πυκνό δίκτυο ασβεστιτικών φλεβών και κατά θέσεις είναι πλούσιοι σε κονδύλους πυριτόλιθων. Πάχος 5-70 m. Ηλικία μεσοκρητιδική.

Γ. Ανώτερη Τεκτονική Ενότητα (ασβεστολιθικά ράκη): Σε περιορισμένη έκταση της Κεντρικής Λαυρεωτικής αναπτύσσεται ένας ανθρακικός μη μεταμορφωμένος σχηματισμός. Πρόκειται για ασβεστολίθους μικριτικού τύπου, λεπτοπαχυπλακώδεις, οι οποίοι κατά κανόνα είναι αγκεριτωμένοι και συνοδεύονται συχνά από τεκτονικό πέγμα σερπεντινιτών ή και ερυθρών ραδιολαριτών. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί χαρακτηρίζονται ασβεστολιθικά ράκη και, σύμφωνα με νεότερες έρευνες, θεωρείται ότι αποτελούν μέρος της μη μεταμορφωμένης Ανώτερης Τεκτονικής Ενότητας του Αττικοκυκλαδικού Συμπλέγματος. Πάχος 0-80 μ. και ηλικία μέση-ανώτερη κρητιδική

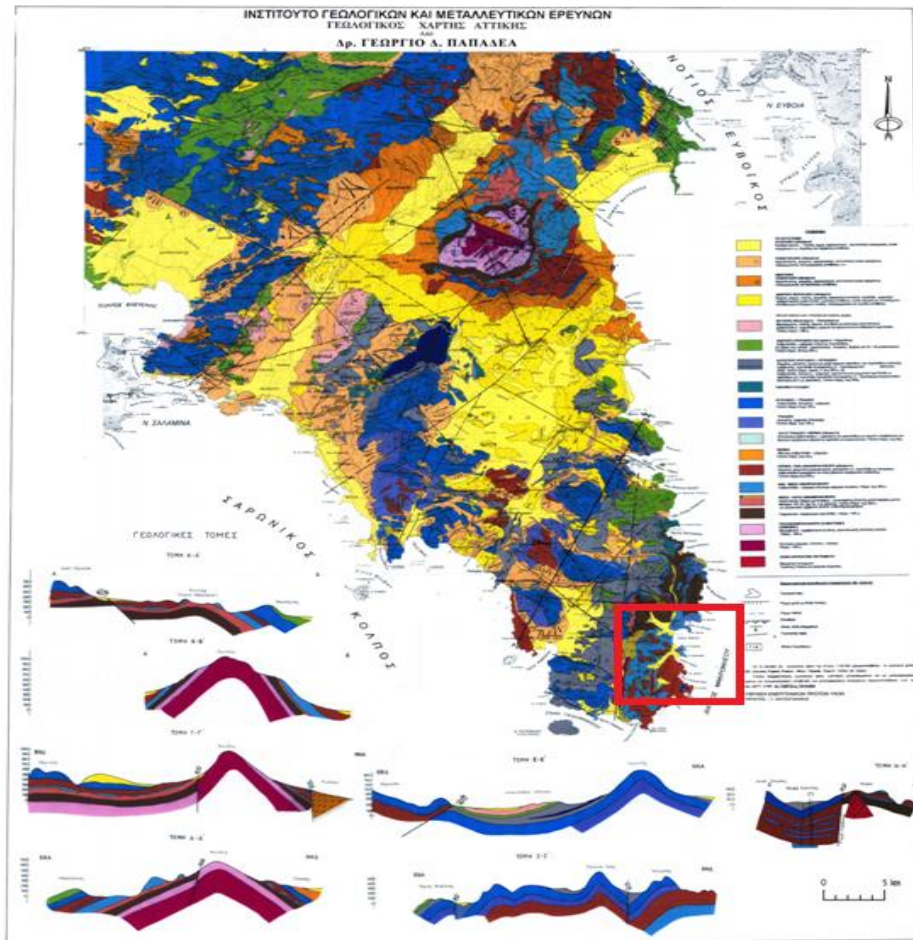
1. Γρανοδιορίτης Πλάκας: Εκτός των προαναφερθέντων, σε ολόκληρη την ανατολική κυρίως Λαυρεωτική εντοπίζονται κατά θέσεις και εμφανίσεις εκρηξιγενών πετρωμάτων όξινου χημισμού, φλεβικής μορφής ή μορφής σωρού. Πρόκειται για τυπικούς μετατεκτονικούς γρανοδιορίτες Ι- τύπου, μειοκαινικής ηλικίας, με πλέον χαρακτηριστικό εκείνο της Πλάκας. Ο

γρानοδιοριτής της Πλάκας είναι μορφής σωρού, περιορισμένης επιφανειακής έκτασης (περίπου 0,5 χλμ²) και θεωρείται ότι αποτελεί τη Δ-ΒΔ απόληξη μεγάλου λακκολίθου που εντοπίζεται στον ευρύτερο χώρο του Αττικοκυκλαδικού Συμπλέγματος. Συναντάται κυρίως εντός των σχιστολιθικών πετρωμάτων της Σειράς Καμάριζας, στα περιθώρια των οποίων έχει δημιουργήσει τόσο άλω μεταμόρφωσης (κερατίτη, τοπική ονομασία πλακίτης), όσο και μετασωματικά φαινόμενα τύπου skarn (κοίτασμα μαγνητίτη). Σύμφωνα με την επικρατούσα άποψη, η μεταλλοφορία της Λαυρεωτικής συνδέεται με τη διακίνηση υδροθερμικών διαλυμάτων, τα οποία έχουν άμεση σχέση με τη διείδυση του γρानοδιοριτή της περιοχής Πλάκας. **(Εικόνα 4.8)**

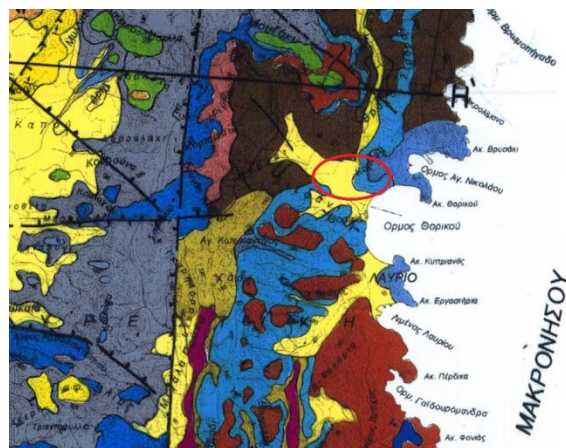


Εικόνα 4.8: Στρωματογραφική στήλη Ευρύτερης περιοχής της Λαυρεωτικής (Γεωλογικός χάρτης Ι.Γ.Μ.Ε., Φύλλο Λαύριο 1997-2000)

4.3.2 Γεωλογία Αρχαίας Αγοράς στο Θορικό



Εικόνα 4.9: Γεωλογικός χάρτης Αττικής, με κόκκινο φαίνεται η περιοχή της Λαυρεωτικής (Παπαδέας, 2001)



Εικόνα 4.10: γεωλογικός χάρτης της περιοχή της Λαυρεωτικής (μεγέθυνση) , με κόκκινο οβάλ τονίζεται η περιοχή μελέτης της Αρχαίας αγοράς στο Θορικό Λαυρίου.

Στην περιοχή της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού που έχει τονιστεί στον χάρτη με κόκκινο οβάλ (**Εικόνα 4.10**) πιθανότατα θα συναντήσουμε γεωλογικά τους εξής σχηματισμούς με βάση το υπόμνημα του χάρτη (**Εικόνας 4.9**) :

- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα (ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου), με πάχος έως και 300 μέτρα, πρασινόχρωμοι, σκουρόφαιοι, τεφροί, λεπτο- μέχρι παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Σε αρκετές θέσεις είναι βαθυκαστανόχρωμοι έως καστανέρυθροι, λόγω αγκεριτίωσης, σχηματίζοντας αγκεριτωμένους ασβεστόλιθους πλούσιους σε πυριτικούς κονδύλους. Τοπικά είναι λατυποπαγείς και διασχίζονται από πυκνό δίκτυο ασβεστιτικών φλεβιδίων. Αποτελούν ένα διακριτό υπολειμματικό ορίζοντα και καταλαμβάνουν τις ανώτερες στρωματογραφικές περιοχές.

Στη μεταμορφωμένη Αττική το ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου εμφανίζεται και στη βόρεια Αττική και έχει αποτεθεί πάνω στην ανομοιόμορφη και διαβρωμένη βαρίσκια μορφολογία με ασυμφωνία. Τόσο στη βόρεια Αττική (Μαραθώνα, Πεντέλη) όσο και στη νότια Αττική (Α. Λαυρεωτική) το ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου λόγω της ανομοιογενούς μορφολογίας του υποβάθρου, παρουσιάζει από περιοχή σε περιοχή διαφορετικά πάχη.

Στη ΝΑ Λαυρεωτική, στην περιοχή Σουνίου - Λεγραινών περίπου 100μ.Χαρακτηριστικό γνώρισμα της βάσης του ανωτέρου μαρμάρου Λαυρίου σε όλες τις περιοχές που εμφανίζεται είναι η επιγενετική και in situ μεταλλοφορία, ενώ στα κατώτερα στρώματά του εμφανίζονται κλαστικής προέλευσης υλικά, συμπεριλαμβανομένων και μικρών τεμαχίων γραφίτη και με την παρουσία μεταλλικών και μη μεταλλικών ορυκτών. Η παρουσία των μεταλλικών ορυκτών στο ανώτερο μάρμαρο δίνει πολλές φορές στην αποκεκαλυμμένη και διαβρωμένη επιφάνεια του μαρμάρου ερυθρά απόχρωση.

- Το ανώτερο μειόκαινο (αδιαίρετο), το οποίο αποτελείται από άργιλους, μάργες, πηλίτες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ογκόλιθους, μαργαϊκούς και τραβερτινοειδείς ασβεστολίθους, λιγνιτικές αποθέσεις, κώνους κορημάτων, απολιθώματα σπονδυλωτών (Πικερμική Πανίδα) , ποταμοχερσαίες και λιμναίες αποθέσεις.
- Τεφρόμαυροι και τεφροκύανοιοι Σχιστόλιθοι: Η παραπάνω γνευσιακή σειρά περνά με σαφή διαχωριστικά όρια σε τεφρόμαυρους και τεφροκύανους σχιστόλιθους, των οποίων το χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι η παρουσία γραφίτη. Στα ανώτερα στρώματα των σχηματισμών αυτών, παρεμβάλλονται μικρού πάχους ενστρώσεις μαρμάρων και σιπολινών. Οι σχιστόλιθοι αυτοί έχουν διαπιστωθεί και στην περιοχή της λίμνης του Μαραθώνα, στην ανατολική περιοχή της Πάρνηθας, και στην ανατολική περιοχή της Λαυρεωτικής. Το πάχος τους είναι έως και 350 μέτρα. . (Γ. Παπαδέας 2001)

4.4 Γεωφυσική Έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και Αποτελέσματα

4.4.1 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

4.4.1.1 Εισαγωγή

Η 1^η μέθοδος που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή ήταν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος. Η περιοχή χωρίστηκε σε 4 υποπεριοχές, στις οποίες εφαρμόστηκε η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος: Α) Περιοχή 1 (οργωμένο χωράφι) Β) Περιοχή 2 (χωράφι με παντζάρια) Γ) Περιοχή 3 (γύρω από την αρχαία αγορά), Δ) Περιοχή 4 (εντός της αρχαίας αγοράς). Δεν δημιουργήθηκε συγκεκριμένος κάναβος λόγω της μεγάλης έκτασης που έπρεπε να μελετηθεί. Αντίθετα πάρθηκαν μετρήσεις περίπου ανά 1 μέτρο σε πλάτος και από άκρη σε άκρη του οικοπέδου(περιοχή 1). Στις περιοχές 2,3,4 που είχαν μεγαλύτερο ενδιαφέρον πάρθηκαν πιο πυκνές μετρήσεις. Οι μετρήσεις φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11: Γεωφυσικές μετρήσεις στην περιοχή έρευνας με την χρήση του google earth. Οι κίτρινες γραμμές δείχνουν τις διαδρομές που πάρθηκαν οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις, οι πράσινες γραμμές δείχνουν την θέση των ηλεκτρικών τομών, οι μπλε, κόκκινες, καφέ και μοβ δείχνουν την θέση των προφίλ του γεωραντάρ



Εικόνα 4.12: Μετρήσεις με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο στην Αρχαία Αγορά του Θορικού

4.4.1.2 Μετρήσεις Υπαίθρου - Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2, με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m, και CMD-4 (**Εικόνα 4.13**), με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m, αντίστοιχο του Geonics EM-31. Το όργανο με κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο μπορεί να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.



Εικόνα 4.13: Το ηλεκτρομαγνητικό όργανο CMD της GF instruments (CMD , Electromagnetic Conductivity Meter User Manual)

Το όργανο αποτελείται από μια μονάδα ελέγχου και το σύστημα πομπού δέκτη. Κάποια από τα χαρακτηριστικά του οργάνου με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή είναι τα εξής:

Μονάδα Ελέγχου:

- Η Μονάδα ελέγχου Attachable CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη
- Υπάρχουν και χρησιμοποιούνται 5 τρόποι μέτρησης:
 - ✓ Χειροκίνητη μέτρηση - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πιέζοντας το πλήκτρο. Η θέση του σημείου ενημερώνεται αυτόματα στο προκαθορισμένο δίκτυο ή μπορεί να εισαχθεί απευθείας. Κάθε σημείο μπορεί να μετρηθεί και πάλι ή να παραλειφθεί και να ολοκληρωθεί με ένα σχόλιο.
 - ✓ Συνεχής μέτρηση - Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Οι θέσεις για το προφίλ καθορίζεται από τα σήματα μήκους με συνεχή συνυπολογισμό των θέσεων των μεμονωμένων μετρήσεων.
 - ✓ GPS χειροκίνητη μέτρηση - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πατώντας το πλήκτρο. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
 - ✓ Συνεχής μέτρηση GPS - Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
 - ✓ Λειτουργία αναζήτησης - τα δεδομένα μετρώνται συνεχώς, αλλά δεν σώζονται.

Εμείς συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε τον τρόπο συνεχών μετρήσεων GPS και αυτόματης αποθήκευσής τους.

- Άμεση υποστήριξη του δέκτη GPS. Γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το υψόμετρο εμφανίζονται και αποθηκεύονται αυτόματα.
- Εύκολη μεταφορά δεδομένων σε USB.
- Χρόνος μέτρησης: 0,1 - 20 s.
- 128 MB μνήμη δεδομένων:
 - max. 64 αρχεία.
 - max. 4,8 εκατομμύρια σημεία μετρήσεων.
- Οθόνη LCD 320 x 240, με λευκό φωτισμό.
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -10 ° C έως +50 ° C.
- Διαστάσεις: 270 x 90 (145) x 60 mm.

- Βάρος: 0,7 kg (με μπαταρία Li-Ion μπαταρία).

Σύστημα πομπού δέκτη :

- Μεγέθη που μετρώνται:
 - Ηλεκτρική Αγωγιμότητα
 - Μαγνητική Επιδεκτικότητα
- Ακρίβεια μέτρησης: $\pm 4\%$ σε 50 mS / m
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 10 Hz.
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -10°C έως $+50^{\circ}\text{C}$.

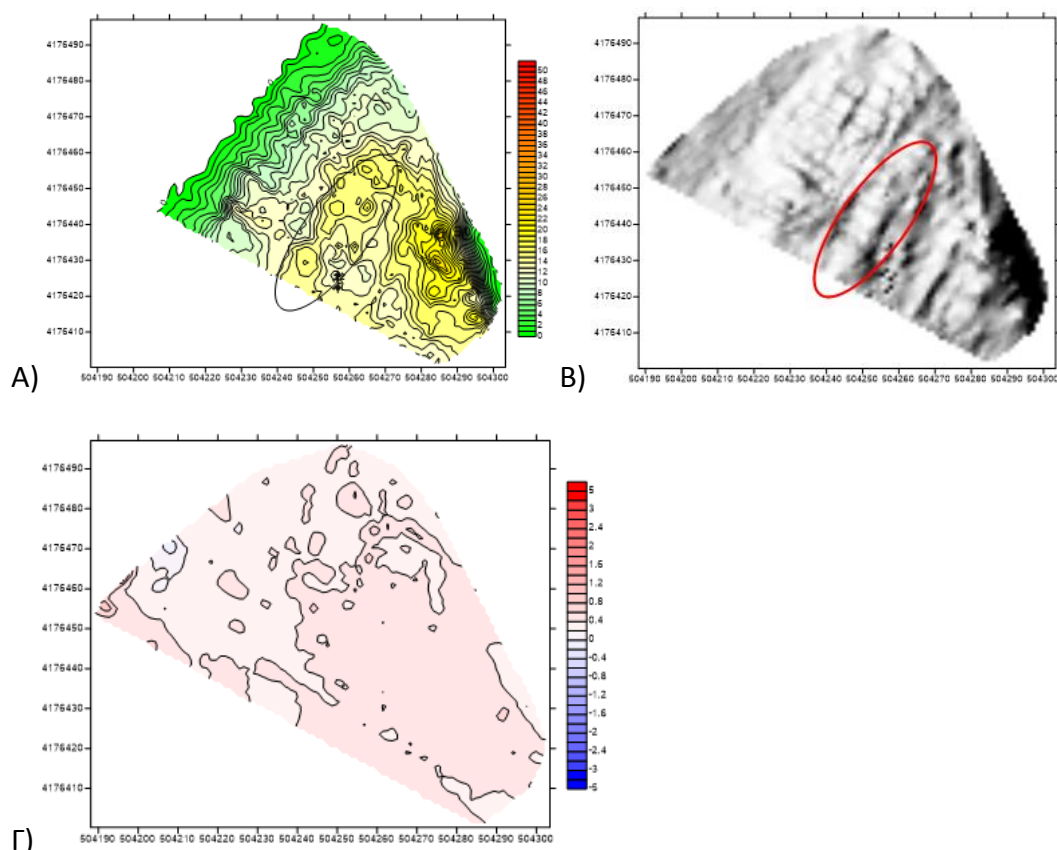
Με τη βοήθεια των οργάνων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα οποία είχαμε μαζί μας για τις μετρήσεις, πάρθηκαν μετρήσεις με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 1,5 και 3 m. Για τα 6 m δεν πήραμε μετρήσεις, γιατί κρίθηκε ότι δεν ήταν αναγκαίες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα ονομάζονται low, και medium αντίστοιχα. Τέλος, τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Surfer της Golden Software δημιουργώντας τους χάρτες που ακολουθούν.

4.4.1.3 Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες

Περιοχή 1 βάθος 1,5 m

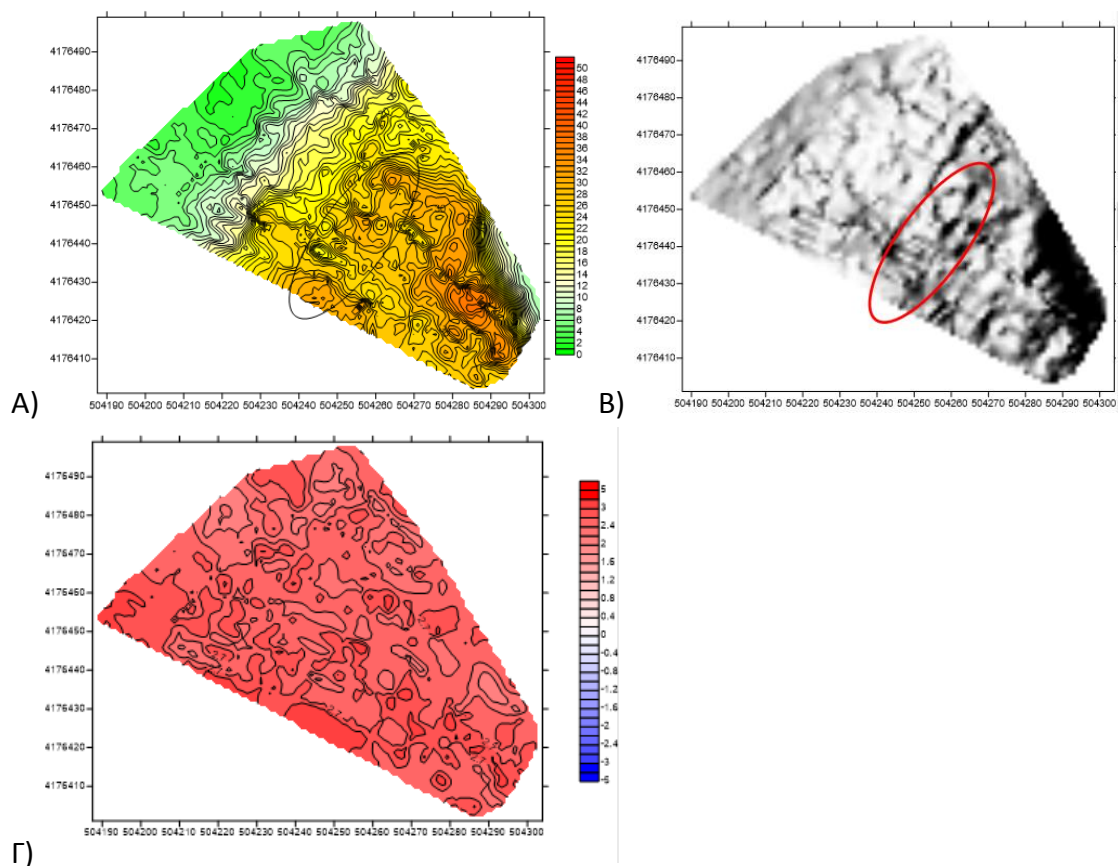
Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.14** παρατηρώντας για συνολικό βάθος 1,5 m βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Δεξιά και αριστερά στον χάρτη υπάρχουν χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, έχουμε συνεκτικό ασβεστόλιθο ο οποίος είναι με μορφή βράχου που βυθίζεται στο υπόβαθρο και είναι ορατός και στην επιφάνεια
- Στο κέντρο του χάρτη υπάρχουν πιο υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας πράγμα που δείχνει ότι υπάρχουν πιο χαλαρά υλικά.
- Στην σημειωμένη περιοχή με το μαύρο οβάλ παρατηρούμε πολλές τοπικές ανωμαλίες πράγμα που δείχνει ότι κάτι πιθανόν να υπάρχει θαμμένο.
- Με την χρήση του shaded map φαίνεται ότι στην περιοχή του οβάλ υπάρχουν 2 δομές, οι οποίες είναι σχετικά ευθύγραμμες. Αυτές οι δομές πιθανότατα να είναι τοιχία της αρχαίας εποχής.
- Στον χάρτη των μαγνητικών επιδεκτικότητων δεν παρατηρείται κάποια μεγάλη διαφοροποίηση στις τιμές καθώς δεν υπάρχουν μεταλλικά υλικά στο υπόβαθρο για να υπάρξει διαφοροποίηση.



Εικόνα 4.14: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 1, για βάθος 1,5m : (A) Ηλεκτρικές Αγωγιμότητες , (B) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικές Επιδεκτικότητες

Περιοχή 1 βάθος 3 m



Εικόνα 4.15: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 1, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικές Αγωγιμότητες, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικές Επιδεικτικότητες

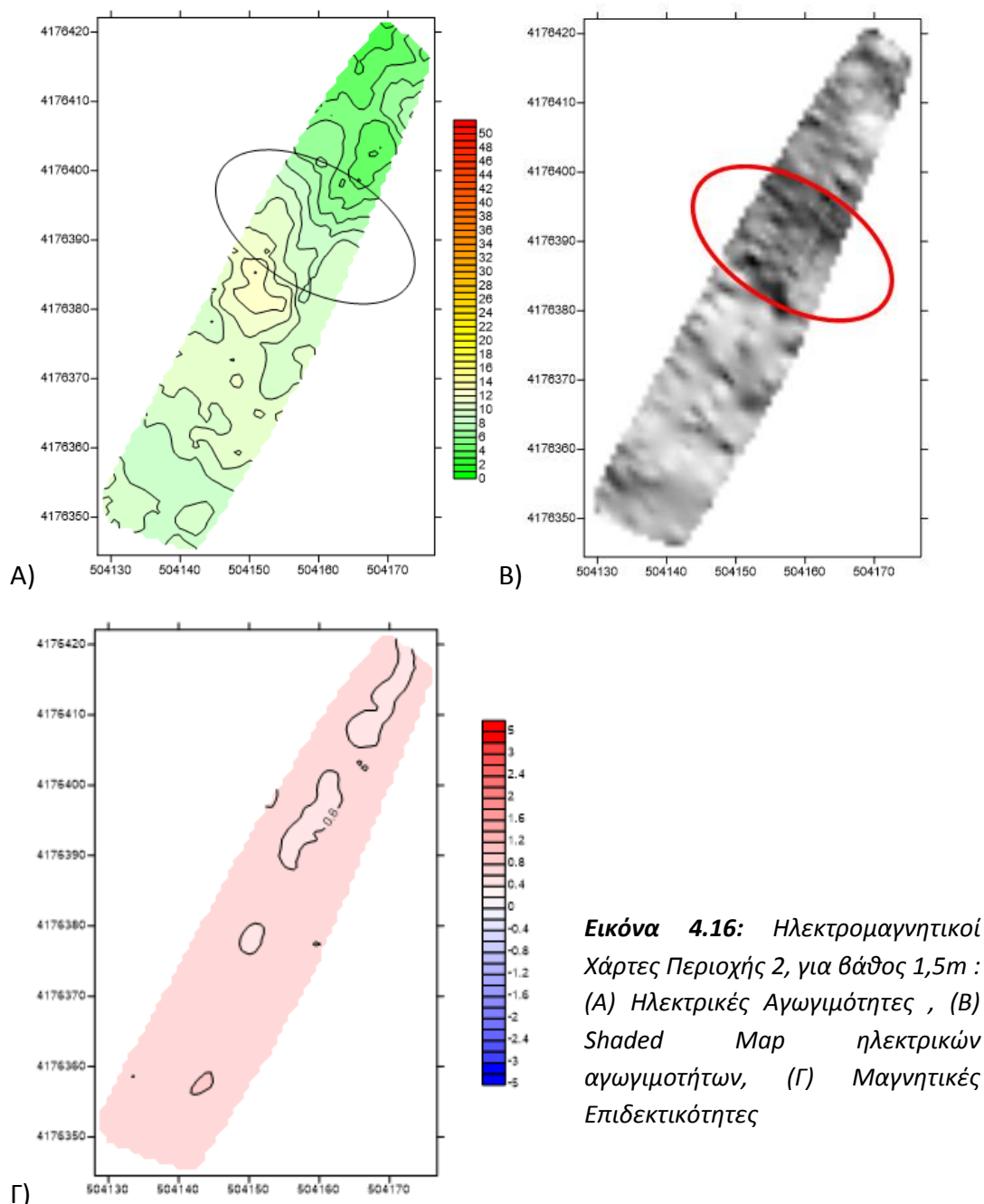
Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.15** παρατηρείται ότι για το βάθος 3 m συμπεραίνονται τα εξής:

- Οι χαμηλές τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνεχίζουν να υφίστανται στα άκρα του χάρτη (πράσινο χρώμα) άρα ο ασβεστόλιθος(βράχος) βυθίζεται σίγουρα.
- Η περιοχή του ενδιαφέροντος με το οβάλ συνεχίζει να έχει ενδιαφέρον, με πολλά τοπικά και ποικίλες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, κυρίως υψηλές.
- Με την χρήση του shaded map συνεχίζεται να παρατηρούνται οι ευθείες δομές, αλλά δεν φαίνονται όσο στο 1,5 m. Άρα αν υπάρχει κάτι, βρίσκεται σε σχετικά μικρά βάθη το πολύ 3 m.
- Στον χάρτη των μαγνητικών επιδεικτικότητων παρατηρείται ότι οι τιμές αυξήθηκαν. Ο λόγος είναι ότι μελετάται στο βάθος των 3 m, αλλά ούτε πάλι φαίνεται κάποια μεγάλη διαφοροποίηση ή περιοχή ενδιαφέροντος.

Περιοχή 2 βάθος 1,5 m

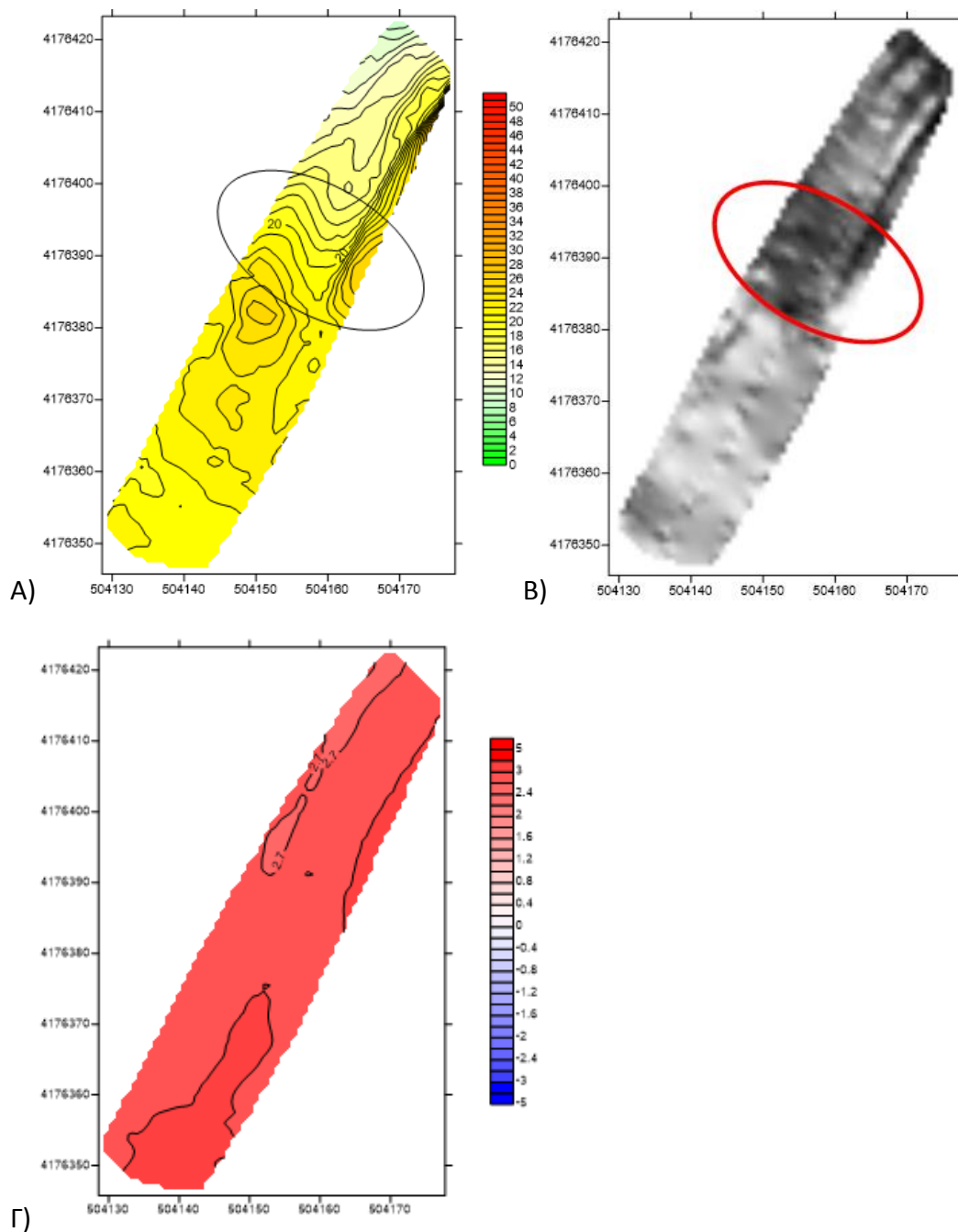
Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.16** για το βάθος του 1,5 m συμπεραίνονται τα εξής:

- Στο κεντρικό μέρος του χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας φαίνεται ότι υπάρχουν πιο πολλές μεταβολές και τοπικές ανωμαλίες, γεγονός το οποίο δείχνει ότι πιθανόν κάτι να υπάρχει που διατάραξε τις μετρήσεις. Η περιοχή ενδιαφέροντος περιγράφεται με μαύρη γραμμή.
- Από το shaded map (low) φαίνεται ότι εκεί που έχουμε περιγράψει την περιοχή ενδιαφέροντος μάλλον να υπάρχει όντως κάποια δομή, αλλά δεν φαίνεται και πολύ καθαρά.



Εικόνα 4.16: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 2, για βάθος 1,5m : (Α) Ηλεκτρικές Αγωγιμότητες , (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικές Επιδεκτικότητες

Περιοχή 2 βάθος 3 m

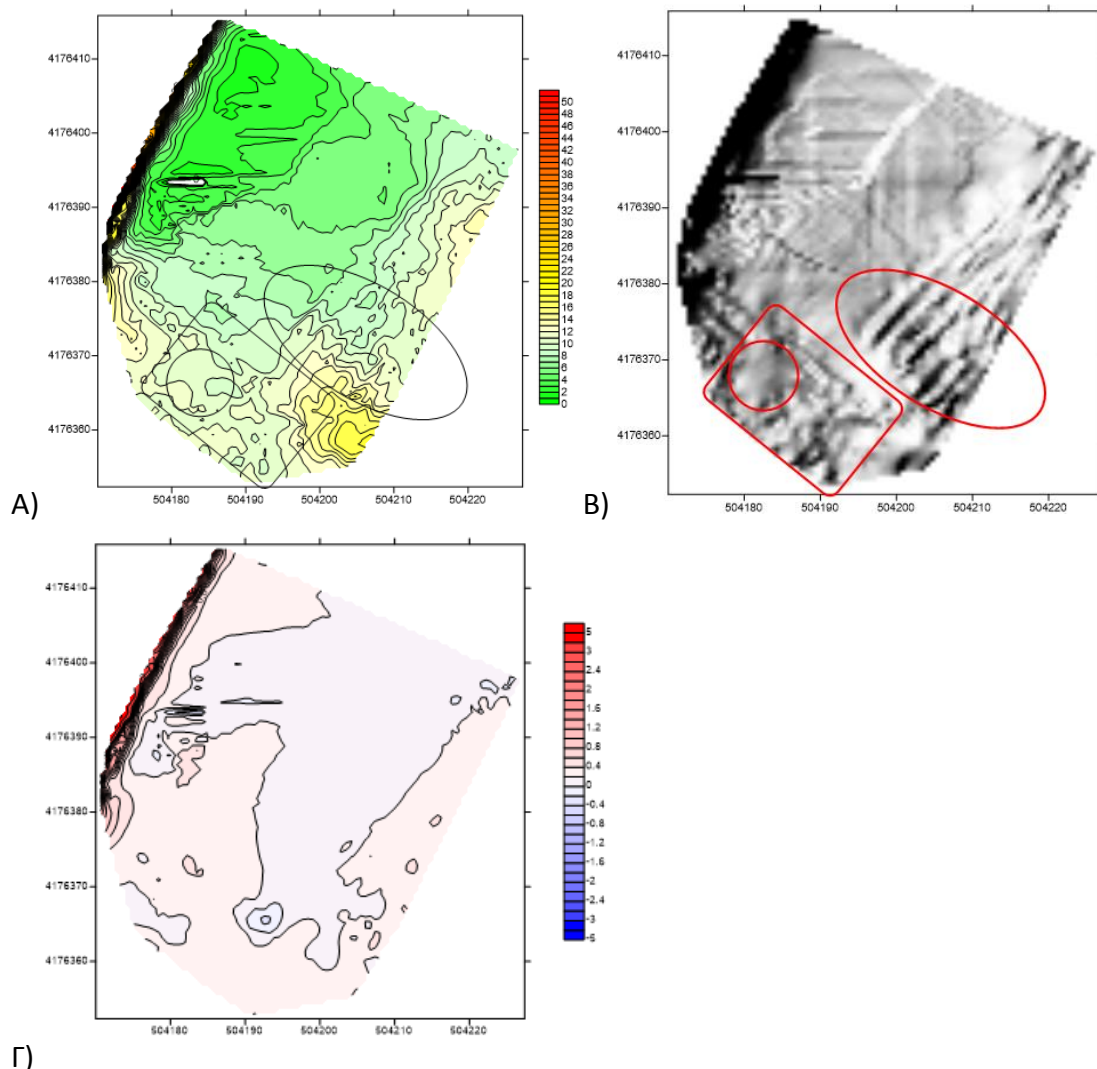


Εικόνα 4.17: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 2, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων

Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.17** για το βάθος των 3 m συμπεραίνονται τα εξής:

- Η ίδια περιοχή ενδιαφέροντος που αποτυπώθηκε στην Εικόνα 4.16 φαίνεται να παρουσιάζει ανωμαλίες, οπότε σίγουρα κάτι βρίσκεται σε αυτό το σημείο, λογικά κάποια εμφάνιση αρχαίου δομής.
- Στην άκρη του χάρτη αγωγιμοτήτων (πάνω δεξιά γωνία) φαίνονται επίσης πολύ απότομες μεταβολές, αλλά οφείλονται σε ένα σύγχρονο μεταλλικό φράχτη που έχει χτιστεί εκεί για να περιβάλλει τον αρχαιολογικό χώρο. Άρα δεν αποτελούν περιοχή ενδιαφέροντος.
- Στο shaded map (medium) παρατηρείται στην σημειωμένη περιοχή πιο έντονα οι σκιές από τον αντίστοιχο χάρτη του 1,5 m, ότι όντως υπάρχουν κάποιες δομές.

Περιοχή 3 βάθος 1,5 m

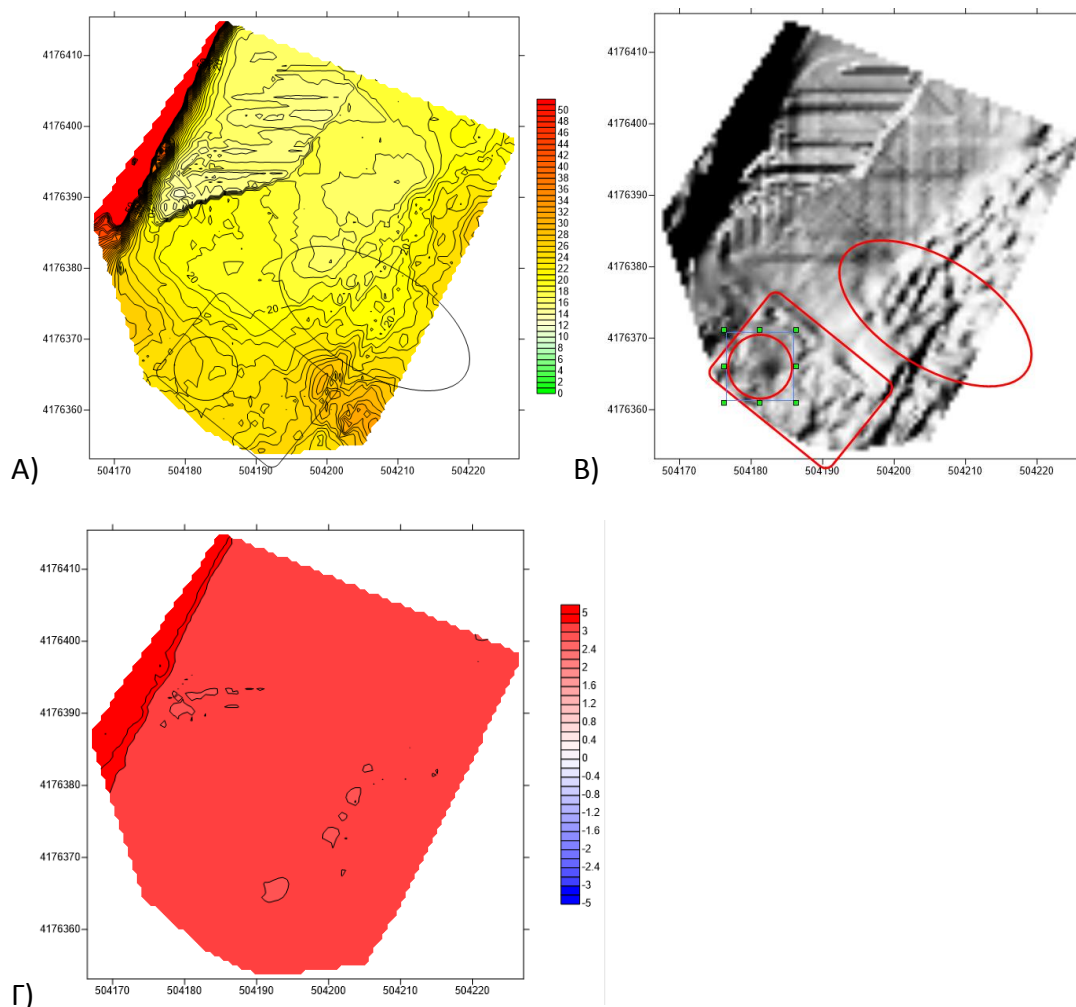


Εικόνα 4.18: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 3, για βάθος 1,5 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων

Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.18** για το βάθος του 1,5 m μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Προς τα πάνω αριστερά του χάρτη έχει σημειωθεί μια περιοχή η οποία έχει πολύ υψηλές τιμές. Αυτό οφείλεται στον σύγχρονο φράχτη που υπάρχει, προκειμένου να περιβάλλει τον αρχαιολογικό χώρο και ο οποίος μας επηρέασε τις μετρήσεις. Άρα η συγκεκριμένη περιοχή δεν είναι περιοχή ενδιαφέροντος.
- Στο δεξιό κομμάτι και προς τα κάτω παρατηρούνται κάποια τοπικά ακρότατα και κάμπουσες ανωμαλίες συγκεντρωμένες στην περιοχή που έχει σημειωθεί (οβάλ, ορθογώνιο, κύκλος). Από τον χάρτη των ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων μπορεί να χαρακτηριστεί αυτή η περιοχή σαν περιοχή ενδιαφέροντος. Προκειμένου να φανεί αν όντως υπάρχει κάτι θα το ελεγχθεί με την χρήση του shaded map.
- Με την χρήση του shaded map φαίνεται ότι:
 - Στο οβάλ υπάρχουν τοιχία
 - Στον κύκλο υπάρχει τοπικό όπου υπάρχει θαμμένο κομμάτι κολώνας
 - Στο ορθογώνιο υπάρχουν τοιχία
- Το κεντρικό κομμάτι του χάρτη δεν σχολιάζεται διότι είναι η αρχαία αγορά . Αυτή έχει μελετηθεί και σχολιαστεί σε άλλον χάρτη ξεχωριστά παρακάτω.

Περιοχή 3 βάθος 3 m

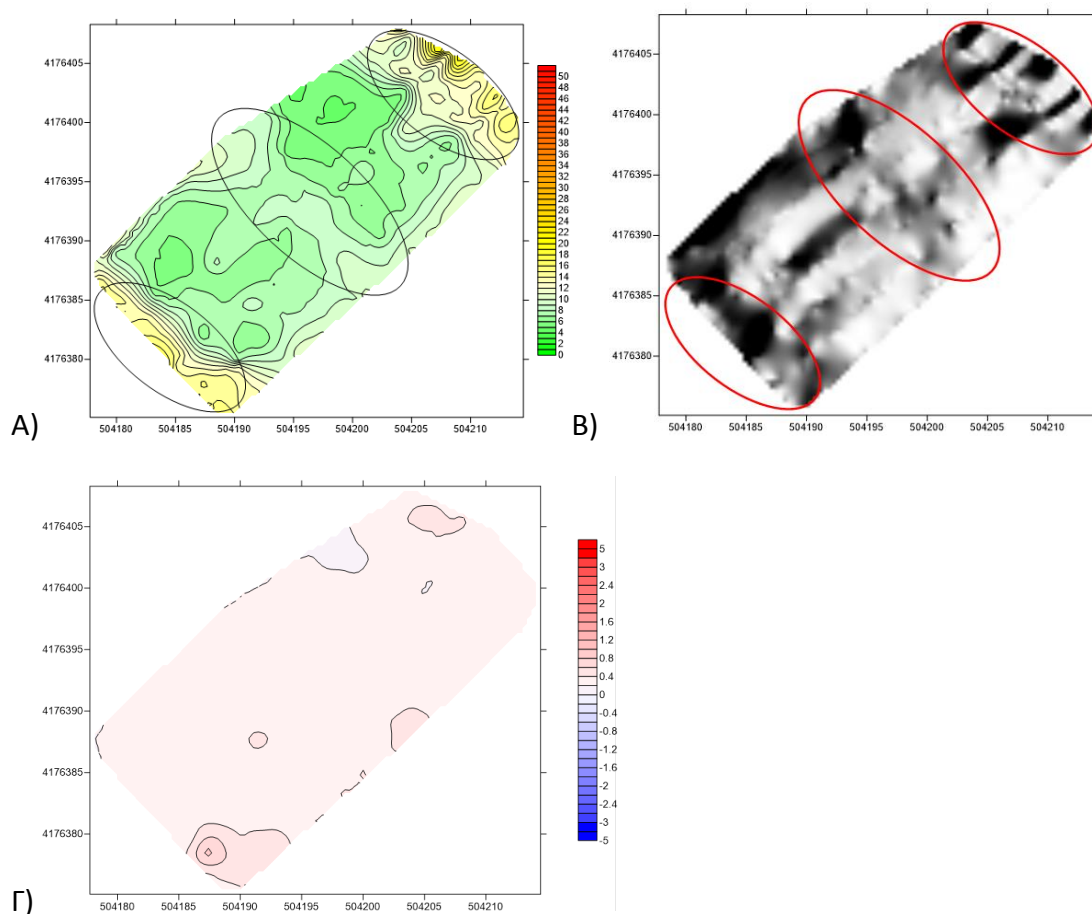


Εικόνα 4.19: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 3, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων

Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.19** για το βάθος των 3 m μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις συγκριτικά με το βάθος του 1,5m:

- Στην πάνω αριστερά πλευρά του χάρτη με χρώμα κόκκινο υπάρχει ο μεταλλικός φράχτης που έχει επηρεάσει τις μετρήσεις
- Με την χρήση του shaded map φαίνεται ότι:
 - Στον κύκλο πιθανόν να υπάρχει ένα κομμάτι κολώνας
 - Στο ορθογώνιο παράλληλα με τις δυο πλευρές του (προς τα δεξιά) υπάρχουν δυο τοιχία τα οποία σχηματίζουν γωνία
 - Τα οβάλ αποτελεί περιοχή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος λόγω πιθανών δομών που βρίσκονται στην περιοχή εκεί
- Στον ηλεκτρομαγνητικό χάρτη στις περιοχές που υπάρχει ενδιαφέρον παρατηρείται ότι υπάρχουν πολλές ανωμαλίες και τοπικά.
- Το κεντρικό κομμάτι του χάρτη αποτελεί την περιοχή 4 (αρχαία αγορά), την οποία θα σχολιάσουμε παρακάτω.

Περιοχή 4 βάθος 1,5 m



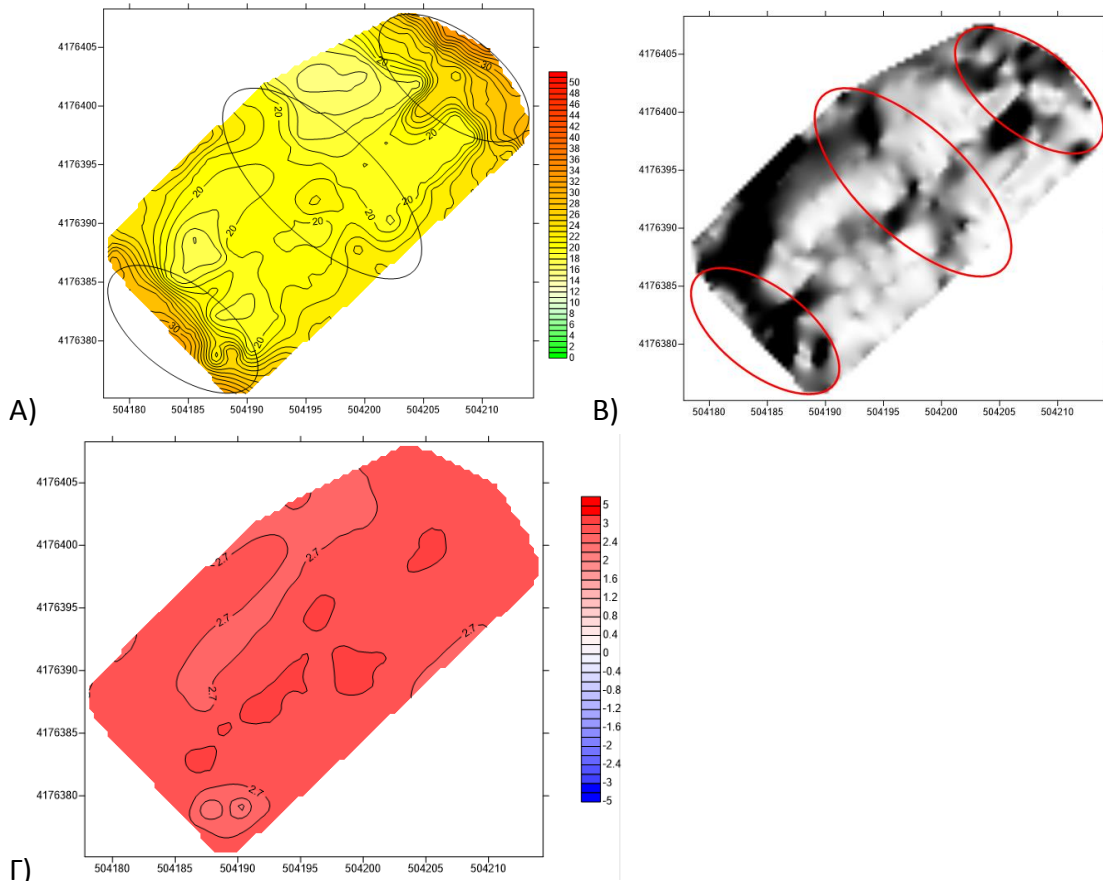
Εικόνα 4.20: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 2, για βάθος 1,5 m : (A) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (B) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων

Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.20** για το βάθος του 1,5 m μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις για την περιοχή της αρχαίας αγοράς:

- Όλη η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλο αρχαιολογικό ενδιαφέρον, καθώς υπάρχουν ήδη πολλά αρχαία που έχουν βρεθεί με ανασκαφές (πράσινη περιοχή), καθώς και πολλά τα οποία φαίνονται ότι συνεχίζουν και μέσα στο έδαφος (κίτρινη περιοχή).
- Συγκεκριμένα στο χάρτη των ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων τα τοπικά που φαίνονται στην πράσινη περιοχή με τις χαμηλές ηλεκτρικές αγωγιμότητες είναι κυρίως αρχαία τα οποία έχουν ήδη βρεθεί (κεντρικό οβάλ). Αποτελούνται από συμπαγή κομμάτια μαρμάρων κυρίως και για αυτό έχουν χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- Στις άκρες του χάρτη (shaded map) υπάρχει αρχαιολογικό ενδιαφέρον:

- Στο πάνω οβάλ φαίνονται θαμμένα τοιχία σε μικρό βάθος, διότι διακρίνονται εύκολα. Κάποια από αυτά τα τοιχία φαίνονται να εκτείνονται και εκτός του χάρτη σε μέρη όπου δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις
- Στο κάτω οβάλ φαίνονται χαρακτηριστικά οι τοπικές ανωμαλίες που δείχνουν την ύπαρξη των κολώνων, κάποιες βρίσκονται ήδη στην επιφάνεια
- Το κεντρικό οβάλ είναι περιοχή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Φαίνεται να υπάρχουν πιθανές δομές και τοπικά ακρότατα, κάποια από το οποία είναι ορατά και στην επιφάνεια.

Περιοχή 4 βάθος 3 m

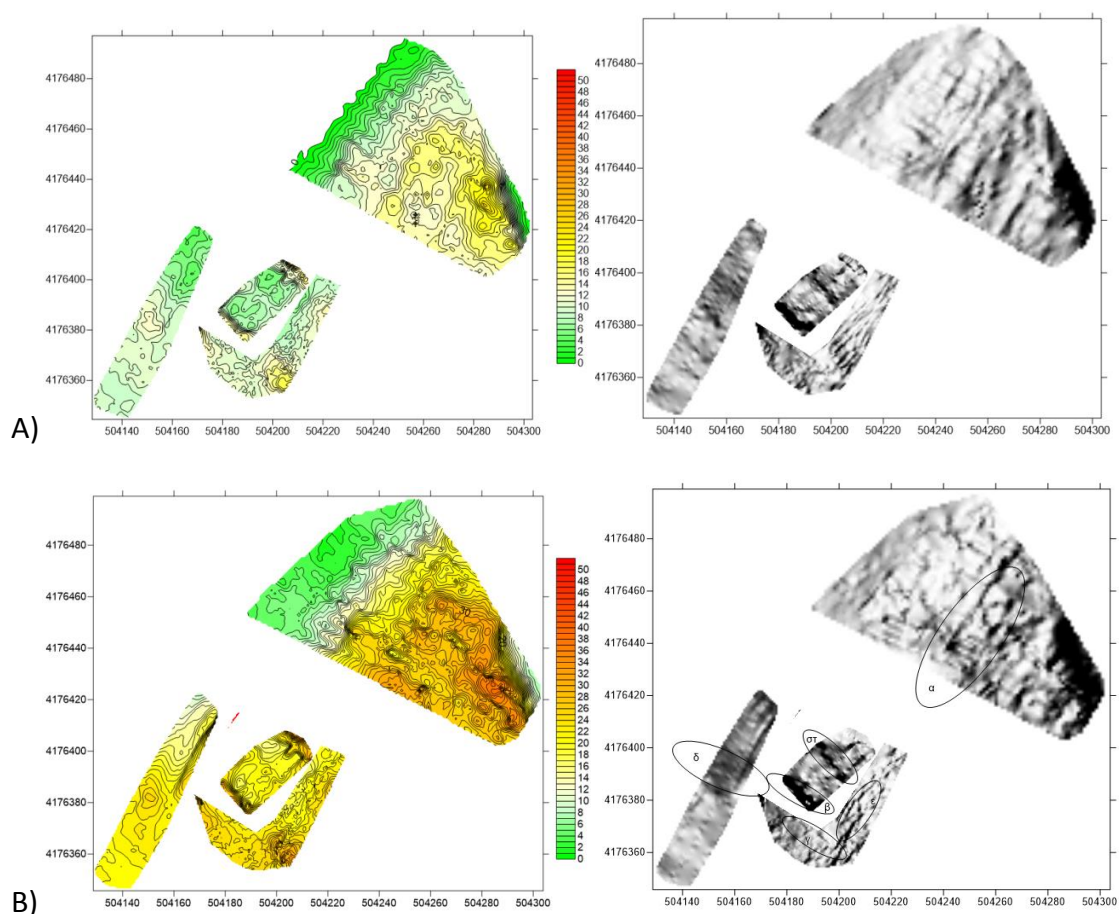


Εικόνα 4.21: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες Περιοχής 4, για βάθος 3 m : (Α) Ηλεκτρικών Αγωγιμοτήτων, (Β) Shaded Map ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, (Γ) Μαγνητικών Επιδεκτικότητων

Με βάση τους χάρτες της **Εικόνας 4.21** για το βάθος του 3 m μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις :

- Η γενική δομή του χάρτη και οι ανωμαλίες είναι παρόμοιες με τον χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας του βάθους του 1,5 m .
- Οι περιοχές ενδιαφέροντος συνεχίζουν να είναι ενδιαφέρουσες, και υπάρχουν πιθανά τοιχία θαμμένα (οβάλ).
- Στο shaded map παρατηρούνται εκτός των συμπερασμάτων που προαναφέρθηκαν, ότι:
 - Στο κάτω οβάλ δεν υπάρχουν μόνο κολώνες , αλλά και πιθανό τοιχίο
- Επίσης τα τοπικά που σε αυτήν την περιοχή είναι πάρα πολλά αποτελούν κολώνες οι περισσότερες από τις οποίες έχουν βρεθεί(κεντρικό οβάλ), βρίσκονται στην επιφάνεια που πήραμε μετρήσεις.

Συνολικά συμπεράσματα ΗΜ



Εικόνα 4.22: Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες της συνολικής περιοχής που πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική έρευνα, για βάθη: (Α) 1,5m και (Β) 3 m

Αφού τέλειωσε η επεξεργασία των χαρτών των 4 περιοχών, ξεχωριστά για τον καθένα, τους τοποθετήθηκαν όλοι σε κανονική κλίμακα σε κοινό χάρτη, με μία ιδιότητα του προγράμματος Surfer που το επιτρέπει αυτό.

Το κομμάτι του μεταλλικού φράχτη που επηρέαζε έντονα τις μετρήσεις στην περιοχή 3 έχει αφαιρεθεί. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες για 1,5 m και 3 m αντίστοιχα. Συνολικός χάρτης για τις in phase μαγνητικές επιδεικτικότητες δεν έγινε, καθώς οι ηλεκτρικές αγωγιμότητες είναι αυτές που έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Επειδή και στις 2 περιπτώσεις (1,5 m και 3m) φαίνονται παρόμοια τα αποτελέσματα, θα σχολιαστούν μόνο για τους χάρτες βάθους 3 m στους οποίους φαίνονται πιο καθαρά και έχουν μεγαλύτερο βάθος έρευνας. (Θεωρείται ότι ο βορράς βρίσκεται προς το πάνω μέρος του χάρτη). Υπάρχουν 5 περιοχές συνολικού ενδιαφέροντος, ονομαζόμενες α, β, γ, δ, ε αντίστοιχα όπως φαίνονται στην **Εικόνα 4.22:**

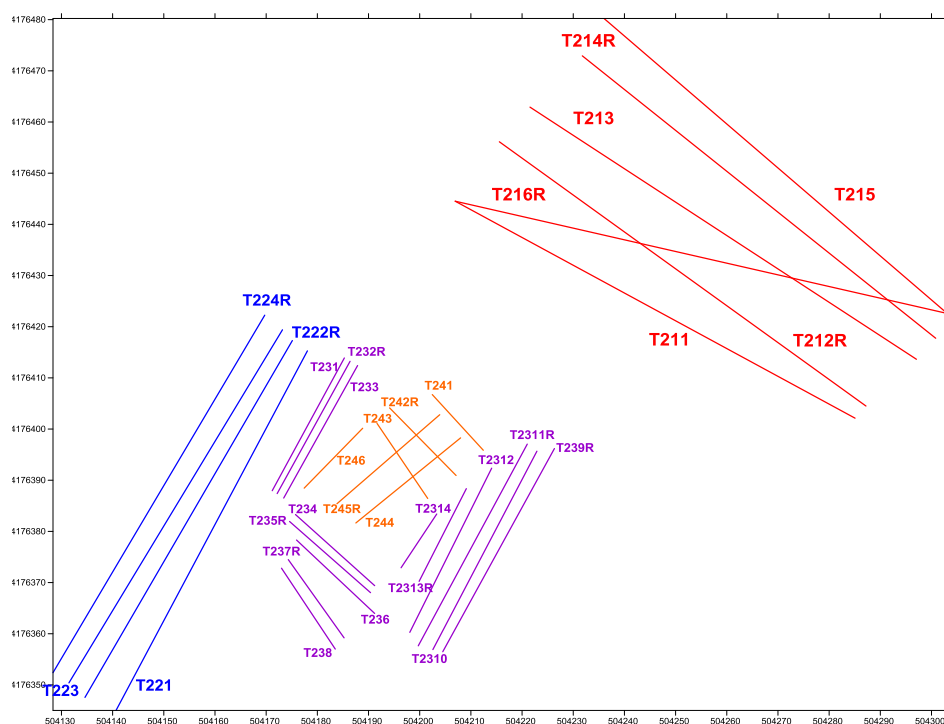
- Στην περιοχή α υπάρχουν 2 τοιχία με διεύθυνση βορειοανατολική – νοτιοδυτική.
- Στην περιοχή δ υπάρχουν και 2 τοιχία με διεύθυνση προς τις περιοχές β και γ αντίστοιχα.
- Στην περιοχή β φαίνεται ότι υπάρχει ένα τοιχίο, που συνεχίζει και περνά προς την περιοχή δ, πιθανότατα να είναι το ίδιο τοιχίο.
- Το δεύτερο τοιχίο της περιοχής δ πηγαίνει και πιθανόν να είναι αυτό που υπάρχει στην περιοχή γ.
- Στην περιοχή γ υπάρχουν τοιχία που σχηματίζουν γωνία και μια θαμμένη κολώνα (**Εικόνα 4.22**)
- Στην περιοχή ε φαίνονται τοιχία με διεύθυνση βορειοανατολική – νοτιοδυτική
- Στην περιοχή ενδιαφέροντος στ υπάρχουν τοιχία και κομμάτια από κολώνες κάποια από τα οποία είναι φαίνονται και βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους.

4.4.2 Γεωραντάρ-GPR(Ground-Penetrating-Radar)

4.4.2.1 Εισαγωγή

Η 2^η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή είναι η μέθοδος των γεωραντάρ GPR.

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι γρήγορη και αρκετά αξιόπιστη. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται επί τόπου, αλλά χρειάζονται και μια περαιτέρω επεξεργασία στο εργαστήριο ώστε να ενισχυθούν τα σήματα για να είναι πιο ευδιάκριτα. Συνολικά έγιναν 30 τομές γεωραντάρ με τις διευθύνσεις τους όπως φαίνονται στην **Εικόνα 4.23** . Η επιλογή των διευθύνσεων έγινε ανάλογα με το πώς βόλευε η περιοχή να γίνουν οι μετρήσεις σε αυτήν. Χρησιμοποιήσαμε την θωρακισμένη κεραία της MALA Geoscience, και είχαμε την διάταξη : Πηγή και δέκτης η κεραία με 250 MHz. Για τις συντεταγμένες των σημείων εκκίνησης και λήξης των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε όργανο καταγραφής συντεταγμένων GPS.



Εικόνα 4.23: Τομές γεωραντάρ με τις ονομασίες τους, περιοχή 1 κόκκινο , περιοχή 2 μπλε, περιοχή 3 μοβ, περιοχή 4 πορτοκαλί

4.4.2.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων ήταν το REFLEXW τους Sandmeier Scientific Software. Έγινε η εξής επεξεργασία κατά βήμα:

- subtract-mean (dewow)
- move start-time
- manual gain (γ)
- background removal
- band-pass frequency

Μετά το πέρας της επεξεργασίας, οι εικόνες των μοντέλων επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer ώστε να εντοπιστούν ενδεχόμενες ανωμαλίες ή στρωματογραφία (αν φτάσει η αντένα 250 MHz).

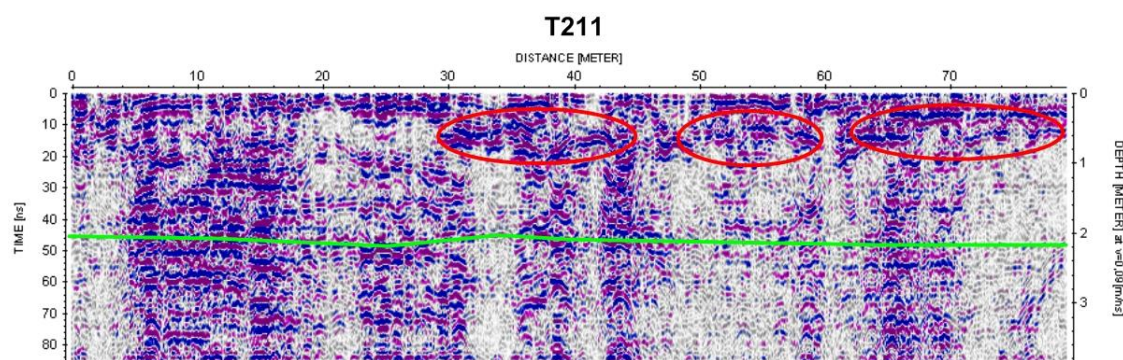
Η λήψη των μετρήσεων του γεωραντάρ έγινε από τον κύριο Αποστολόπουλο και τον κύριο Αμολοχίτη (**Εικόνα 4.24**). Η επεξεργασία αυτών των μετρήσεων και των τομών του γεωραντάρ έγινε από τον κύριο Αποστολόπουλο με στόχο την εύρεση ανωμαλιών, δομών και της στρωματογραφίας. Τα αποτελέσματα κάποιων ενδεικτικών τομών παραθέτονται στην επόμενη παράγραφο. Επιπλέον δημιουργήθηκαν από τον κ. Αποστολόπουλο οι τρισδιάστατες δομές (3D) στις οποίες φαίνονται όλες οι τομές με τα αποτελέσματά τους.



Εικόνα 4.24: Λήψη μετρήσεων γεωραντάρ στην περιοχή της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού από τους κυρίους Αποστολόπουλο και Αμολοχίτη

4.4.2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

- Τομή T211 , με τοποθεσία στην περιοχή 1

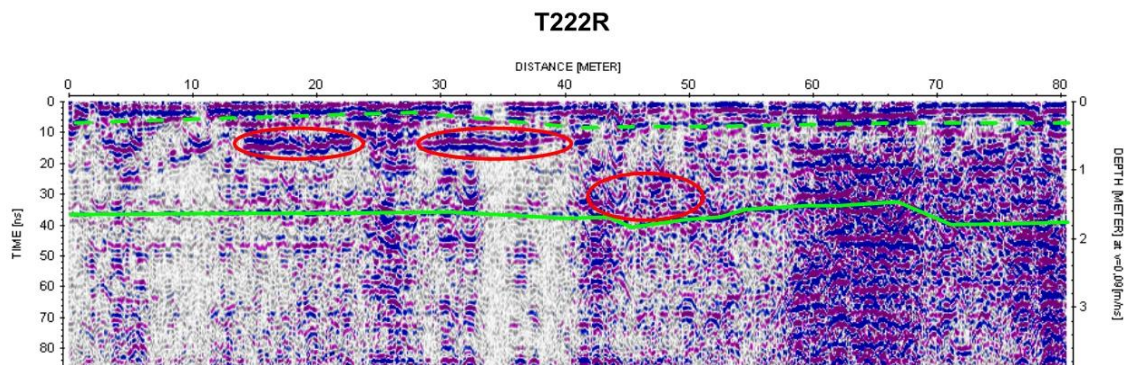


Εικόνα 4.25 : Τομή T211 της περιοχής 1 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz

Στην τομή γεωραντάρ T211 (**Εικόνα 4.25**) παρατηρούνται κάποιες ανωμαλίες στις σημειωμένες περιοχές με το κόκκινο χρώμα. Αυτά είναι πιθανά τα τοιχεία που βρέθηκαν με την μέθοδο των ηλεκτρομαγνητικών στις αντίστοιχες θέσεις και την χρήση του shaded map.

Στο βάθος των 2 μέτρων περίπου παρατηρείται ένας οριζοντας στο υπόβαθρου της περιοχής.

- Τομή T222R, με τοποθεσία στην περιοχή 2



Εικόνα 4.26: Τομή T222R της περιοχής 2 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz

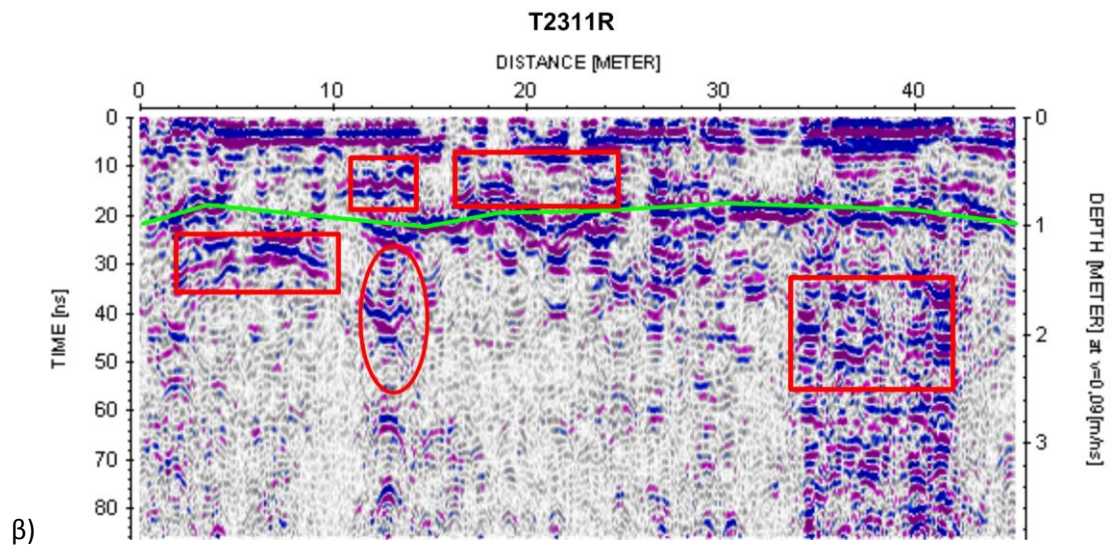
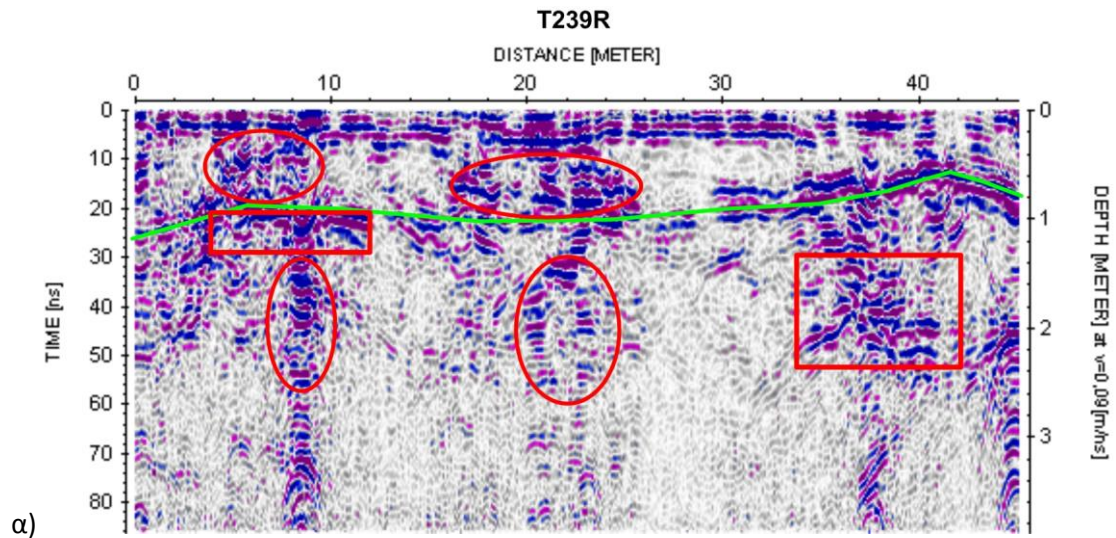
Στην τομή γεωραντάρ T222R (**Εικόνα 4.26**) αυτής της τομής παρατηρούνται κάποιες ενδιαφέρουσες ανωμαλίες οι οποίες έχουν σημειωθεί με το κόκκινο χρώμα. Σε αυτά τα σημεία υπάρχουν πιθανά τα τοιχία τα οποία φαίνονται ξεκάθαρα με την ηλεκτρική τομογραφία και τα οποία βρίσκονται στην περιοχή ενδιαφέροντος (περιοχή 2) των ηλεκτρομαγνητικών.

Με πράσινη συνεχής γραμμή συμβολίζονται τα όρια του ορίζοντα του υποβάθρου σε βάθος σχεδόν 2m . Με διακεκομμένη πράσινη γραμμή σε βάθος του 0,5m συμβολίζεται το ανώτερο στρώμα στο οποίο βρίσκονται οι καλλιέργειες.

- Τομή T239R και Τομή T2311R, με τοποθεσία στην περιοχή 3

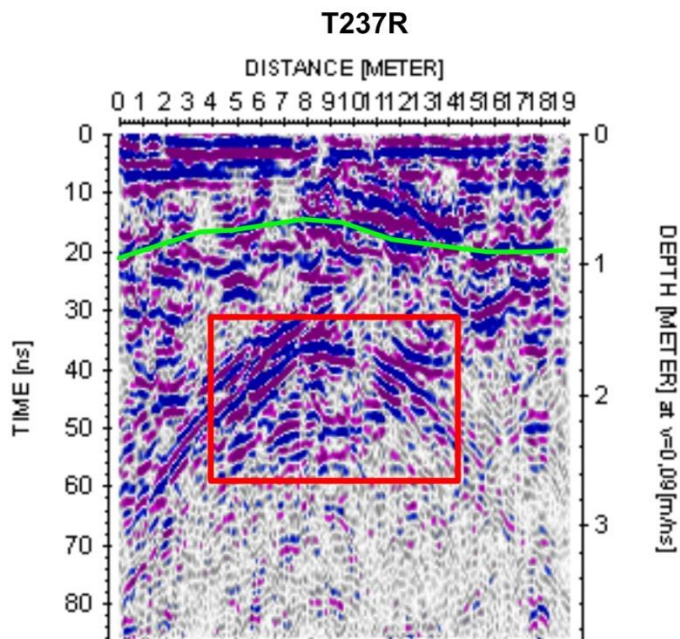
Οι δύο τομές που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 4.27** αποτελούν παράλληλες τομές που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή 3 ανατολικά της αγοράς. Συγκεκριμένα και στις δυο εικόνες φαίνεται ότι ο ορίζοντας του υποβάθρου βρίσκεται στο βάθος τους 1 m περίπου.

Με τα κόκκινα οβάλ και ορθογώνια έχουν σημειωθεί περιοχές οι οποίες έχουν αρχαιολογικό ενδιαφέρον και υπάρχουν πιθανότατα θαμμένα τοιχία και κολόνες. Τα ορθογώνια της **Εικόνας 4.27α** εμφανίζονται και στην **Εικόνα 4.27β**, άρα αποτελούν τοιχία. Το κεντρικό οβάλ στην Τομή T239R πιθανότατα να είναι κολόνα, διότι δεν εμφανίζεται και στην τομή T2311R.



Εικόνα 4.27: α) Τομή T239R της περιοχής 3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz β) Τομή T2311R της περιοχής 3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz

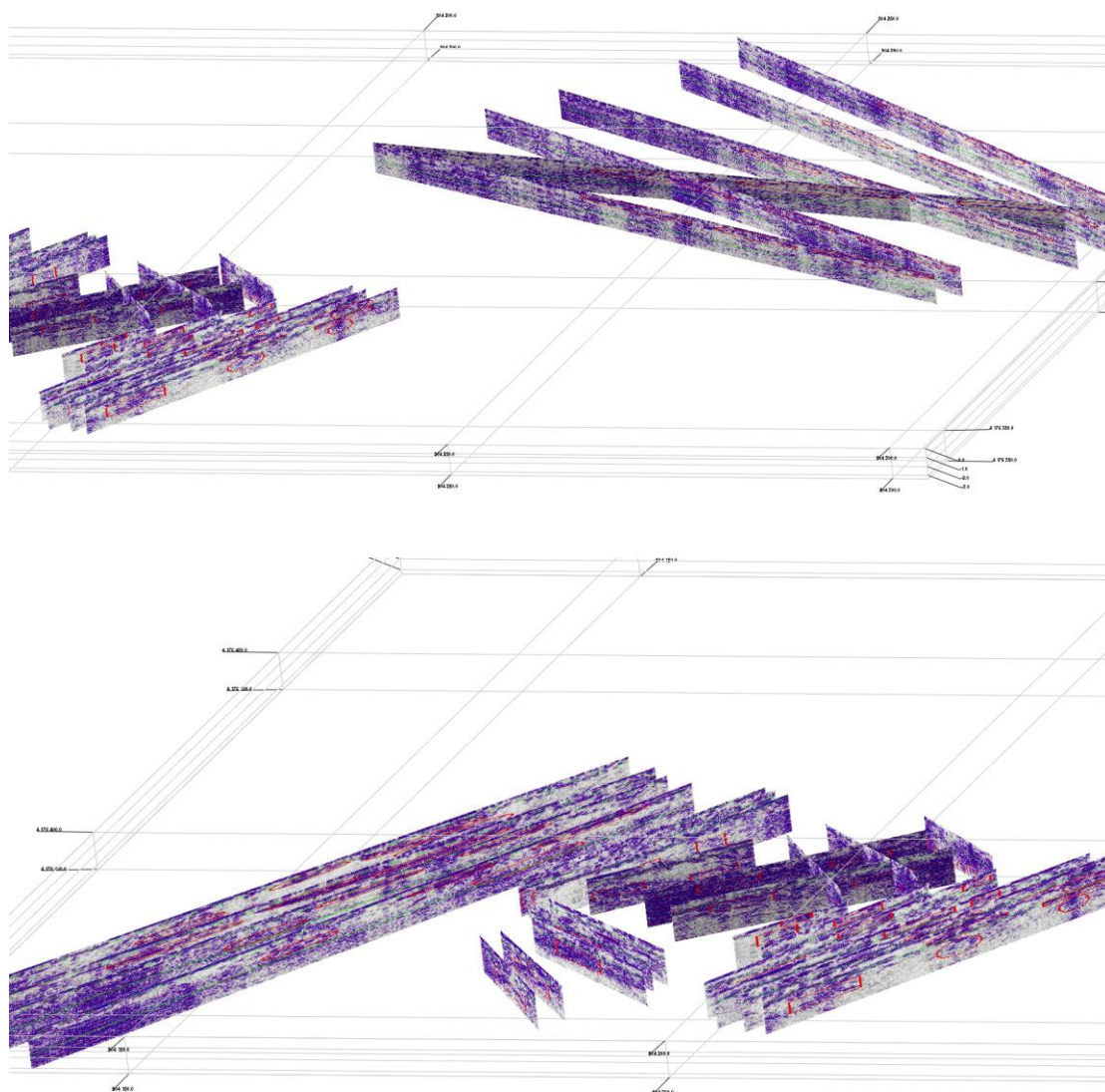
- Τομή T237R, με τοποθεσία στην περιοχή 3



Εικόνα 4.28: Τομή T237R της περιοχής 3 με χρήση πομπού και δέκτη 250MHz

Στην **Εικόνα 4.28** αυτής της τομής παρατηρούμε ότι ο ορίζοντας του υπόβαθρου βρίσκεται περίπου στο 1 m βάθος και συμβολίζεται με την πράσινη συνεχή γραμμή.

Με το κόκκινο παραλληλόγραμμο βλέπουμε ότι υπάρχει κάποια δομή η οποία εμφανίζεται αντίστοιχα και στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο σαν τοπικό . Αυτή η ανωμαλία επιβεβαιώνει την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και ότι υπάρχει μία κολόνα σε βάθος περίπου 1,5 -2 m.



Εικόνα 4.29: Τομές γεωραντάρ (GPR) με μορφή τρισδιάστατης απεικόνισης. Στην επάνω εικόνα φαίνεται η κεντρική και το βορειοανατολική περιοχή της έρευνας (περιοχές 1,3,4). Στην κάτω εικόνα φαίνεται η κεντρική και το δυτική περιοχή της έρευνας (περιοχές 2,3,4)

Από την **Εικόνα 4.29** της τρισδιάστατης απεικόνισης (3D) όλων των τομών γεωραντάρ μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι οι πιθανές τοπικές δομές οι οποίες αναφέρονται στις τομές του γεωραντάρ παραπάνω εμφανίζονται να έχουν μια συνέχεια. Συνεπώς πιθανόν να είναι θαμμένα τοιχεία.

4.4.3 Ηλεκτρική Μέθοδος

4.4.3.1 Εισαγωγή

Η 3^η γεωφυσική μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η ηλεκτρική μέθοδος. Είναι η πιο αργή μέθοδος και η πιο επίπονη, όμως είναι αυτή που δίνει τα καλύτερα και τα πιο ποιοτικά αποτελέσματα. Μας δείχνει ακριβώς την στρωματογραφία και τις θαμμένες δομές.

Οι διατάξεις έχουν να κάνουν ως προς τον τρόπο που στήσαμε τα ηλεκτρόδια δυναμικού και το ηλεκτρόδιο ρεύματος. Στις μετρήσεις μας για την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήσαμε διάταξη dipole-dipole, καθώς θέλουμε να δούμε τις παράπλευρες επιφάνειες και ανωμαλίες που υπάρχουν (τομές Thor2-R-1, Thor2-R-2). Η τομή Thor2-R-3 έχει χρησιμοποιήσει την διάταξη pole-dipole προκειμένου να εντοπίσει την στρωματογραφία της περιοχής και τις παράπλευρες επιφάνειες. Οι διευθύνσεις των τομών φαίνονται στην **Εικόνα 4.23**.

- Για την τομή Thor2-R-1 χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια τοποθετημένα ανά 1,5 m, επομένως η συνολική απόσταση της τομής είναι 108 m.
- Για την τομή Thor2-R-2 χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια τοποθετημένα ανά 1,5 m, επομένως η συνολική απόσταση της τομής είναι 108 m .
- Για την τομή Thor2-R-3 χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια τοποθετημένα ανά 2,5 m, επομένως η συνολική απόσταση της τομής είναι 180 m .

Το απόλυτο υψόμετρο κάθε θέσης ηλεκτροδίου βρέθηκε με την χρήση του GPS.



Εικόνα 4.30: Γεωηλεκτρικές τομές στην περιοχή της γεωφυσικής έρευνας με την χρήση του google earth.

4.4.3.2 Μετρήσεις υπαίθρου – Εξοπλισμός

Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCALPro. (**Εικόνα 4.31**).



Εικόνα 4.31: Όργανο μέτρησης SYSCALPro

Πρόκειται για έναν διαβιβαστή ρεύματος, ο οποίος στέλνει ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και μετράει στη συνέχεια την τάση που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Ο μετρητής SYSCAL Pro αποτελείται από 10 ταυτόχρονα κανάλια λήψης δεδομένων, είναι 1000 V – 250 W – 2.5 A. Έχει τη δυνατότητα αυτόματου injection ranging και έχει την επιλογή αλλαγής των ηλεκτροδίων. Είναι ένα νέο σύστημα σχεδιασμένο για υψηλή ανάλυση στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης και IP. Περιλαμβάνει αρκετές επιλογές δίνοντας τη δυνατότητα εργασίας σε κάθε είδους συνθήκες και πεδία. Δηλαδή έχει την προοπτική για εξερεύνηση υπογείων νερών, για γεωτεχνικές μελέτες των πολιτικών μηχανικών ή για διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές.

Γενικά Χαρακτηριστικά του μηχανήματος:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως 4000 ηλεκτρόδια
- Μνήμη flash Δεδομένων: πάνω από 21 000 αναγνώσεις
- Τροφοδοσία: δύο εσωτερικές επαναφορτιζόμενες 12V, 7,2 A μπαταρίες, προαιρετική εξωτερική μπαταρία 12V του αυτοκινήτου μπορεί να συνδέεται με το τμήμα πομπού
- Παντός καιρού
- Θήκη που δεν καταστρέφεται, δεν φθείρεται
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 έως +70 ° C
- Διαστάσεις (SYSCAL Pro Switch-48): 31 x 23 x 36 cm.
- Βάρος (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg (IRIS INSTRUMENTS: SYSCAL Pro. Manual Guide)

4.4.3.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία λήψης των μετρήσεων στην ύπαιθρο, τότε έγινε η ανάλυση και η επεξεργασία των μετρήσεων, δηλαδή των Γεωηλεκτρικών Τομών.

Για την ερμηνεία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2dinv (Loke and Barker, 1996). Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας. Τα βήματα επεξεργασίας είναι τα παρακάτω:

- Επιλέξαμε την ρύθμιση «use model refinement» διότι το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μετρήσεις περισσότερες από αυτές που του εισάγονται. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να δημιουργηθούν μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων. Τέλος, το μοντέλο μας να διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος, διότι σε σημεία που δεν έχει πληροφορία αρχικά αποκτά με αυτήν την εντολή.

- Επιλέξαμε τη ρύθμιση «Inversion methods» , και ελέχθησαν 2 εναλλακτικές διαδικασίες ερμηνείας:

1. Επιλογή Robust – Robust

Με αυτή την επιλογή στο Res2dinv έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία θορύβου.

2. Επιλογή Standard – Standard :

Με αυτήν την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται ελεύθερα.

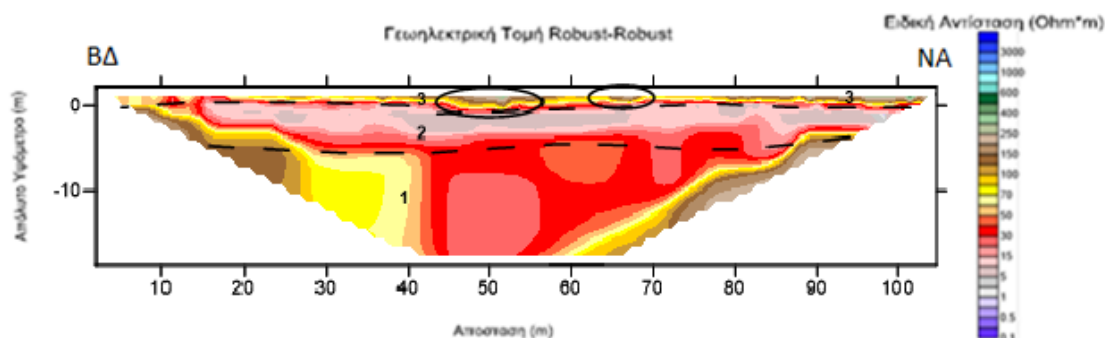
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των 2 παραπάνω επιλογών παρατηρήθηκε ότι στην επιλογή Standard-Standard δεν φαινότουσαν όσο καθαρά φαίνονται στην επιλογή Robust-Robust οι περιοχές ενδιαφέροντος, οπότε παρουσιάζονται μόνο οι τομές Robust-Robust.

Τέλος, τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Res2dinv και μετατράπηκαν σε δεδομένα για να μπορούν να επεξεργαστούν από το πρόγραμμα Surfer της Goldensoftware, προκειμένου να τοποθετήσουμε την χρωματική διαβάθμιση που θέλουμε , καθώς και να σημειώσουμε τις περιοχές που έχουν ενδιαφέρον.

Συνολικά έχουμε 3 γεωηλεκτρικές τομές.

4.4.3.4 Αποτελέσματα Ηλεκτρικής μεθόδου (Ηλεκτρικές Τομογραφίες)

Γεωηλεκτρική Τομή Thor2-R-1

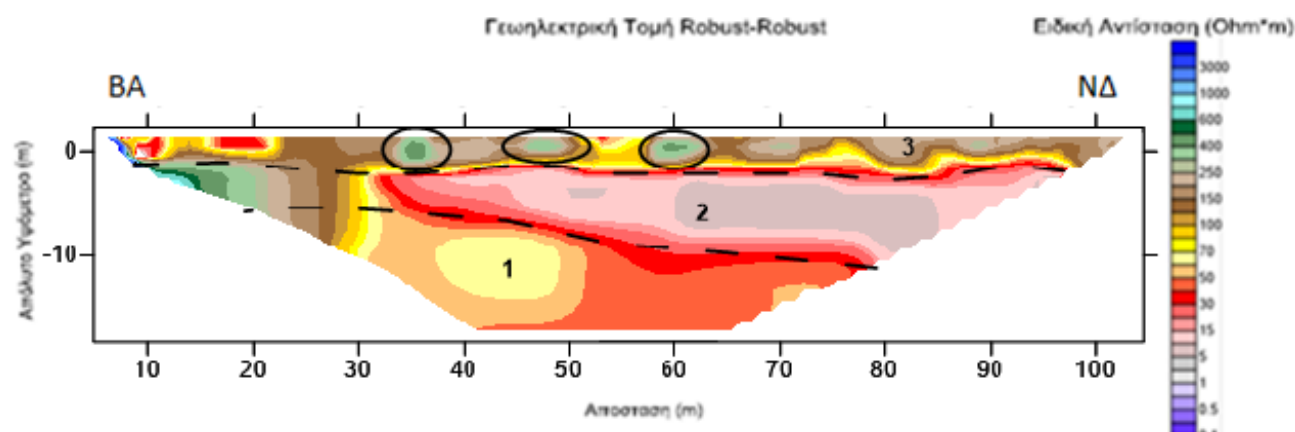


Εικόνα 4.32: Γεωηλεκτρική Τομή Thor2-R-1 με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Η περιοχή 1 με τιμές ειδικής αντίστασης 30 - 150 $\Omega \cdot m$ χαρακτηρίζεται ως σχιστόλιθος
- Η περιοχή 2 με τιμές ειδικής αντίστασης 5 - 150 $\Omega \cdot m$ χαρακτηρίζεται ως ασβεστόλιθος στον οποίο διακρίνονται οι εξής φάσεις:
 - Στην ΒΔ πλευρά της τομής, περιοχή χρωμάτων κιτρινοκαφέ (τιμές ειδικής αντίστασης 40 - 150 $\Omega \cdot m$, χαρακτηρίζεται ως υγιής ασβεστόλιθος χωρίς την παρουσία αλμυρού νερού
 - Η περιοχή χρωμάτων γκρι κόκκινο με τιμές ειδικών αντιστάσεων 5-40 $\Omega \cdot m$, χαρακτηρίζεται ως ασβεστόλιθος ο οποίος έχει υποστεί υφαλμύριση. Για αυτό τον λόγο παρουσιάζονται και τόσο χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης
- Η περιοχή 3 χαρακτηρίζεται ως επιφανειακό στρώμα υψηλών ειδικών αντιστάσεων και πιθανόν να αποτελείται από χαλαρά υλικά και μέσα στο οποίο βρίσκονται οι περιοχές ενδιαφέροντος και πιθανές αρχαιολογικές δομές (τοιχία, κολόνες).
- Στις περιοχές που έχουν σημειωθεί με οβάλ μέσα στην περιοχή 3 της γεωηλεκτρικής τομής χαρακτηρίζονται ως περιοχές στις οποίες υπάρχει αρχαιολογικό ενδιαφέρον. Ο λόγος είναι επειδή παρατηρείται απότομη τοπική αύξηση στις ειδικές αντιστάσεις με αποτέλεσμα να υπάρχουν πιθανές ανθρωπογενείς κατασκευές (πιθανά τοιχία).

Γεωηλεκτρική Τομή Thor2-R-2

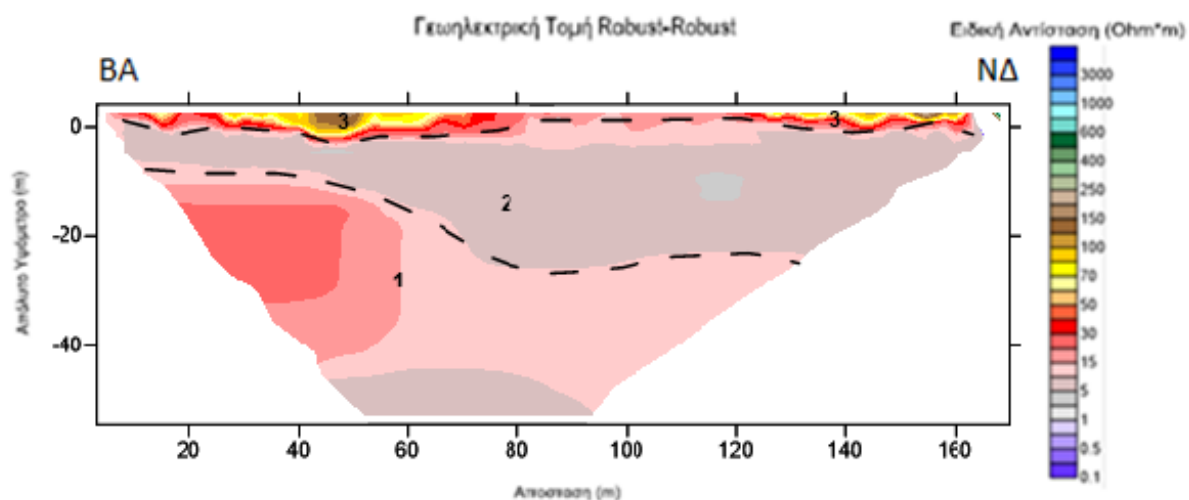


Εικόνα 4.33: Γεωηλεκτρική τομή Thor2-R-2 με διεύθυνση BA-NΔ

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Η περιοχή 1 με τιμές ειδικής αντίστασης 30 - 250 $\Omega \cdot m$ χαρακτηρίζεται ως σχιστόλιθος, καθώς εμφανίζεται και στην ευρύτερη περιοχή σε πολύ μικρά βάθη, ακόμα και στην επιφάνεια του εδάφους.
- Η περιοχή 2 με τιμές ειδικής αντίστασης 5 - 600 $\Omega \cdot m$ χαρακτηρίζεται ως ασβεστόλιθος στον οποίο διακρίνονται οι εξής φάσεις:
 - Στην BA πλευρά της τομής, περιοχή χρωμάτων κίτρινο, καφέ, πράσινο (τιμές ειδικής αντίστασης 50 - 600 $\Omega \cdot m$, χαρακτηρίζεται ως υγιής ασβεστόλιθος χωρίς την παρουσία αλμυρού νερού. Αποτελεί πιθανόν κάποιο υγιές βραχώδες υπόβαθρο.
 - Η περιοχή NΔ, χρωμάτων γκρι, ροζ, κόκκινο με τιμές ειδικών αντιστάσεων 5-40 $\Omega \cdot m$, χαρακτηρίζεται ως ασβεστόλιθος ο οποίος έχει υποστεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Έχει εισέλθει δηλαδή θαλασσινό νερό μέσα στην μάζα του και για αυτό τον λόγο παρουσιάζονται και τόσο χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης.
- Η περιοχή 3 χαρακτηρίζεται ως το ανώτερο στρώμα υψηλών ειδικών αντιστάσεων και πιθανόν να αποτελείται από χαλαρά υλικά και μέσα στο οποίο βρίσκονται οι περιοχές ενδιαφέροντος και πιθανές αρχαιολογικές δομές (τοιχία, κολόνες).
- Οι περιοχές, οι οποίες είναι σημειωμένες με οβάλ, αποτελούν περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος και συγκεκριμένα αποτελούν πιθανά τοιχία, τα οποία είναι θαμμένα το πολύ σε βάθος 4 m. Έχουν ειδικές αντιστάσεις γύρω στα 300-500 $\Omega \cdot m$ χρώματος πράσινου και βρίσκονται μέσα στο ανώτερο - επιφανειακό στρώμα (περιοχή 3).

Γεωηλεκτρική Τομή Thor2-R-3



Εικόνα 4.34: Γεωηλεκτρική τομή Thor2-R-3 με διεύθυνση BA-ND

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Στην περιοχή 2 ,εντός διακεκομμένων, με το γκρι-μπλε χρώμα ειδικής αντίστασης 0-10 $\Omega \cdot m$ είναι ο ασβεστόλιθος μέσα στον οποίο έχει εισέλθει θαλασσινό νερό (υφαλμύριση) και για αυτό τον λόγο έχει χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης.
- Στην περιοχή 1 χρώματος ροζ-κόκκινου με τιμές ειδικής αντίστασης από 10-30 $\Omega \cdot m$ περίπου πιθανότατα να έχουμε σχιστόλιθο. Τα όρια του οποίου με τον ασβεστόλιθο είναι δύσκολο να τα διακρίνουμε.
- Κοντά στο έδαφος ως και βάθος 5 m (περιοχή 3) παρατηρούμε υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης της τάξεως 40-200 Ω . Σε αυτήν την περιοχή υπάρχουν αδρομερείς χαλαροί σχηματισμοί και άργιλοι. Πιθανότατα στην περιοχή των μεγάλων ειδικών αντιστάσεων να υπάρχει και αρχαιολογικό ενδιαφέρον.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα - Σχόλια

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το υπέδαφος στον αρχαιολογικό χώρο της «Αρχαίας Αγοράς» του Θορικού με γεωφυσικές μεθόδους. Ο σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να εντοπιστούν, εάν υπάρχουν ή όχι, δομές στο υπέδαφος. Αν υπάρχουν, πού βρίσκονται και αν είναι δυνατόν προς τα που εκτείνονται. Επειδή στην περιοχή έρευνας υπάρχουν αρχαιολογικές δομές, επιβάλλεται η έρευνα να γίνει με μη καταστρεπτικές μεθόδους. Για αυτόν τον λόγο και επιλέχθηκε η επιστήμη της γεωφυσικής, για να λύσει αυτό το πρόβλημα.

Οι εφαρμογές (case studies) που αναζητήθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία βοήθησαν σημαντικά στην έρευνα αυτή. Αρχικά το αντικείμενο αυτών των 3 ερευνών που παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν ήταν παρόμοιο με την γεωφυσική έρευνα της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού. Αυτές οι 3 έρευνες, παρόλο που δεν χρησιμοποίησαν τον συνδυασμό και των τριών μεθόδων, όπως έγινε στην Αρχαία Αγορά, κατάφεραν να λύσουν προβλήματα αντίστοιχης δυσκολίας με μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στο δικό μας πρόβλημα. Γι αυτόν τον λόγο έγινε μια περιληπτική ανάλυση αυτών των ερευνών, καθώς μας βοήθησαν σε ένα αρχικό πλάνο σχεδιασμού της έρευνας στην Αρχαία Αγορά και την επιλογή των μεθόδων προς χρήση για την έρευνα.

Από την εφαρμογή των 3 γεωφυσικών μεθόδων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, προκύπτουν μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται παρακάτω:

- ✓ Κάθε μία από τις 3 γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την έρευνα (ηλεκτρομαγνητική, γεωραντάρ, ηλεκτρική τομογραφία) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην προσπάθεια εντοπισμού αρχαιοτήτων και συμπληρώνει τις άλλες δύο.
- ✓ Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα. Με την συγκεκριμένη μέθοδο, οι χάρτες της μαγνητικής επιδεκτικότητας δεν έδειξαν μεγάλες διαφοροποιήσεις ούτε εντόπισαν κάποια δομή, για τον απλούστατο λόγο ότι δεν είχαμε στο υπέδαφος μεταλλικά υλικά ή μαγνητικά πετρώματα.
 - Οι χάρτες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με συνολικό βάθος διασκόπησης το 1,5m και οι αντίστοιχοι φωτοσκιασμένοι χάρτες αυτών δείχνουν κάποια πιθανά σημεία στα οποία υπάρχουν περιοχές ενδιαφέροντος αλλά επειδή δεν είναι εντελώς σίγουρα τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται και με τους αντίστοιχους χάρτες των 3m.

- Οι χάρτες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με συνολικό βάθος διασκόπησης τα 3 με τους αντίστοιχους φωτοσκιασμένους, παρουσιάζουν ευκρινέστερα τις περιοχές ενδιαφέροντος, τα τοπικά και τις ανωμαλίες στις ηλεκτροαγωγιμότητες. Εντόπισαν δηλαδή τα τοιχεία και κάποια κομμάτια κολώνων με σχετικά καλή ακρίβεια.
- Οι συνολικοί χάρτες των ηλεκτραγωγιμοτήτων με τους αντίστοιχους φωτοσκιασμένους χάρτες «ένωσαν» τις πληροφορίες για τις αρχαιολογικές δομές και το πώς πιθανά να εκτείνονται τα τοιχεία.
- ✓ Με την μέθοδο του γεωραντάρ που στηρίζεται στην μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο έδαφος και την μέτρηση του ποσού της ενέργειας που ανακλάται πίσω και το χρόνο που παίρνει για να φτάσει στην επιφάνεια, ανιχνεύτηκαν ανακλάσεις που πιθανά να αντιστοιχούν σε τοιχεία ή κομμάτια κολώνων. Με τη 3-D επεξεργασία τους επαληθεύτηκαν τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου και «ξεχωρίστηκαν» κάποια τοιχεία από τις κολώνες και τις απλές περιοχές ενδιαφέροντος.
- ✓ Η γεωηλεκτρική τομογραφία απέδειξε την χρησιμότητά της στις αρχαιολογικές έρευνες επειδή τα στοιχεία προς μελέτη παρουσιάζουν τοπικές διαφορές με την φυσική στρώση του εδάφους. Αυτές οι διαμορφώσεις ως προς το έδαφος σχετίζονται με μια τοπική αντίθεση στην ηλεκτρική αντίσταση. Έτσι μετρώντας τις ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις του εδάφους λήφθηκαν αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια και λεπτομέρεια όσον αφορά τα τοιχεία. Στις περισσότερες περιπτώσεις βέβαια είχαν επιβεβαιωθεί και από τις προηγούμενες 2 μεθόδους. Επιπλέον εντοπίστηκαν τα όρια των σχηματισμών και η στρωματογραφία του υπεδάφους, καθώς και οι πιθανές περιοχές με υφαλμύριση του ασβεστόλιθου.

Τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων είναι σε σημαντική συμφωνία μεταξύ τους όσον αφορά την ύπαρξη και την θέση των τοιχείων και των κολώνων. Συνολικά με συνδυασμό των αποτελεσμάτων βρέθηκαν σύνολο 6 τοιχεία, 1 κομμάτι κολώνας και κάποιες περιοχές περαιτέρω ενδιαφέροντος για μελλοντική έρευνα και ανασκαφές. Τα τοιχεία είναι δύο με διεύθυνση βορρά –νότου (περιοχή 1) , δύο με διεύθυνση ανατολής – δύσης (περιοχή 2) δύο που σχηματίζουν γωνία (περιοχή 3). Το κομμάτι κολώνας βρίσκεται και αυτό στην περιοχή 3. Κάποια άλλα τοιχεία και τοπικές ανωμαλίες που φαίνονται , βρίσκονται μέσα στην Αρχαία Αγορά και είναι ήδη ανεσκαμμένα στην επιφάνεια του εδάφους. Οι περιοχές ενδιαφέροντος βρίσκονται στις άκρες της περιοχής 3 και 4 και είναι πιθανά τοιχεία ή κολώνες αλλά δεν φαίνονται και πολύ καθαρά μετά την επεξεργασία των μετρήσεων. Τα βάθη των τοιχείων που εντοπίστηκαν είναι το πολύ 3 m.

Η σειρά πραγματοποίησης των μετρήσεων αποδείχθηκε ορθή (πρώτα ηλεκτρομαγνητικά και γεωραντάρ και τέλος τομογραφίες), καθώς οι πιθανές δομές που εντόπισαν τα ηλεκτρομαγνητικά και τα γεωραντάρ , βοήθησαν στον σχεδιασμό

και προσανατολισμό των τομογραφιών, έτσι ώστε να έχουν την σωστή κάθετη διεύθυνση με τα τοιχεία που εντοπίστηκαν.

Οι διατάξεις των οργάνων θεωρούνται ότι ήταν οι βέλτιστες δυνατές για την έρευνα αυτή. Το CMD-2 της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για τα βάθη 1,5 m και 3m έδωσε αξιοπρεπέστατα αποτελέσματα. Με βήμα προχώρησης περίπου το 1 m και συνεχή αυτόματη λήψη μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο. Αντίστοιχα και το γεωραντάρ με διάταξη πηγή και δέκτη την κεραία των 250MHZ. Για την ηλεκτρική μέθοδο εφαρμόστηκε διάταξη Dipole – Dipole με απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων 1,5 m.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της κάθε μεθόδου θεωρείται ότι ήταν η καλύτερη δυνατή. Έγινε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με τα προγράμματα Surfer της Golden Software για τα ηλεκτρομαγνητικά, RES2DINV της Geotomo Software για την ηλεκτρική μέθοδο και REFLEXW της Sandmeier Scientific Software για το γεωραντάρ.

5.2 Σχόλια

Με βάση τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας σε σχέση με τους στόχους που θέλαμε να επιτύχουμε, αλλά και την εφαρμογή των μεθόδων και τη διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων προκύπτουν κάποια σχόλια, τα οποία αναγράφονται παρακάτω:

Στην συγκεκριμένη έρευνα η ουσιαστική ταυτοποίηση των σχηματισμών της ηλεκτρικής τομογραφίας με βάση τις ειδικές αντιστάσεις τους είναι πολύ δύσκολη δεδομένου ότι οι τιμές που εμφανίζονται δεν είναι οι ενδεικτικές - συνηθισμένες τιμές του κάθε πετρώματος. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι λόγω του φαινομένου της υφαλμύρισης του υπεδάφους της περιοχής, η οποία οφείλεται σε πλημμυρισμένες αρχαίες μεταλλευτικές στοές, καθώς και στο ότι ο ασβεστόλιθος και ο σχιστόλιθος είναι καταπονημένοι λόγω της μακράς εκμετάλλευσης της περιοχής.

Προκειμένου να έχουμε μια εικόνα για τον τρόπο που εναλλάσσονται τα στρώματα στο υπόβαθρο και να ταυτοποιήσουμε τους σχηματισμούς, θα προτεινόταν να γίνει μια βαθιά γεώτρηση στην περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο θα "απελευθερωθούν" οι πληροφορίες και θα γίνει μια καλύτερη ταυτοποίηση των σχηματισμών και στην ευρύτερη περιοχή.

Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης γεωφυσικής έρευνας είναι ορθός και προτείνεται σε περιπτώσεις με παρόμοιο αντικείμενο έρευνας με της Αρχαίας Αγοράς του Θορικού. Πιο αναλυτικά, η επιλογή των συγκεκριμένων γεωφυσικών μεθόδων, η

σειρά εφαρμογής τους, οι διατάξεις τους και η επεξεργασία των μετρήσεων είναι ενδεδειγμένη για γεωφυσικές έρευνες με παρόμοια γεωλογικά και αρχαιολογικά στοιχεία. Άλλωστε στις πιο πολλές περιπτώσεις έρευνας σε αρχαιολογικούς χώρους η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική είναι απαραίτητη καθώς παρέχει χρήσιμες πληροφορίες με εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή έρευνας είναι μια σύντομη και ταυτόχρονα οικονομική μέθοδος με την οποία μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα σε σχέση με την φύση του υλικού των σχηματισμών του υπεδάφους και τον τρόπο που αυτά κατανέμονται στον χώρο. Πολύ σημαντική είναι και η συμβολή της στον εντοπισμό των τοπικών μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας, οι οποίες εντοπίζουν την ύπαρξη και την διάκριση ανθρωπογενών κατασκευών π.χ. (πηγάδια, τοίχους, έγκοιλα, κολώνες, σωληνώσεις).

Το γεωραντάρ, παρόλο που μπορεί να δώσει πληροφορίες για τους υπόγειους ορίζοντες, η ορατότητά του είναι περιορισμένη όσον αφορά το βάθος διασκόπισης, π.χ. στα αργιλικά εδάφη.

Η ηλεκτρική μέθοδος είναι μια δύσκολη, επίπονη και χρονοβόρα μέθοδος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Αυτό έχει σαν συνεπακόλουθο, η συγκεκριμένη μέθοδος να είναι πιο ακριβή, αλλά παράλληλα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προσφέρει να έχουν πολύ μικρό σφάλμα, να είναι μεγάλης ακρίβειας και να μπορούν να φτάσουν σε μεγάλα βάθη εάν είναι επιθυμητό.

Φάνηκε με μεγάλη σαφήνεια ότι για την εξαγωγή συγκεκριμένων συμπερασμάτων για την περιοχή έρευνας είναι απαραίτητη η εφαρμογή παραπάνω της μιας μεθόδου. Στην περίπτωση μας αποδείχτηκε ότι η μια μέθοδος επιβεβαιώνει και συμπληρώνει την άλλη. Συγκεκριμένα εντοπίστηκαν οι ανωμαλίες και τα τοπικά από την ηλεκτρομαγνητική και επαληθεύθηκαν από τα γεωραντάρ και τις ηλεκτρικές τομογραφίες.

Τέλος προτείνουμε την διεξαγωγή επιπλέον εκσκαφών στην περιοχή, καθώς η περιοχή της Αρχαίας Αγοράς έχει τεράστιο αρχαιολογικό ενδιαφέρον και πολλές θαμμένες δομές, που πιθανόν να βοηθήσουν τους αρχαιολόγους να κατανοήσουν την ιστορία της περιοχής αυτής.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

1. Bigman D.P., 2012. The Use of Electromagnetic Induction in Locating Graves and Mapping Cemeteries: an Example from Native North America. *Archaeological Prospection* 19, 31-39
2. Conyers L. B., Ernenwein E. G., Bedal BEDAL L-A, 2002. Ground Penetrating Radar (GPR) Mapping as a Method for Planning Excavation Strategies (Petra, Jordan). *Society for American Archaeology, e-tiquity* 2002 Number 1, ISSN 1541-5465
3. Dalan R.A. 2006. Susceptibility in Remote Sensing in Archaeology. An Explicit North American Perspective, edited by J.K. Johnson, pp. 161-203. University of Alabama Press, Tuscaloosa
4. Dinsmoor, W.R. Jr., 1982. Anchoring Two Floating Temples, *Hesperia* 51 (), 410-451, tables 95-96
5. Erneiswein E.G., Hargrave M.L. 2009. Archaeological Geophysics for DoD Field Use: A Guide for New and Novice Users. Project 200611: Streamlined Archaeo-geophysical Data Processing and Integration for DoD Field Use.
6. Jol H.M. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier BV.
7. Kapetanios A., 2013: "Thorikos' Theater: retaining walls – retaining chronologies?", σε: *Thorikos 1963-2013 : 50 years of Belgian Excavations, evaluation and perspective*, Proceedings of the conference held in Athens 7-8 October (υπό έκδοση)
8. Keary P., Brooks M., Hill I., 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd Editorial Offices
9. Loke M.H. and Barker R.D. 1996 . Rapid least- squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131 - 152
10. Negri S., Leucci G. 2006. Geophysical Investigation of the Temple of Apollo (Hierapolis, Turkey). *Journal of Archaeological Science* 33 (2006), 1505 - 1513.
11. Witten, A.J. 2006. *Handbook of Geophysics and Archaeology*. Equinox Publishing, London.
12. Αποστολόπουλος Γ. 2008, *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
13. Αποστολοπούλου - Κακαβογιάννη Ο. 2008: «Βίος και πολιτισμός στην Λαυρεωτική κατά τους προϊστορικούς χρόνους», στο *Πρακτικά Θ' Επιστημονικής Συνάντησης ΝΑ Αττικής*, (Λαύριο Αττικής, 13-16 Απριλίου 2000)

14. Βερβερέλης Ε., 2011. Εφαρμογή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στον Αστικό Ιστό, για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και Πεπερασμένων Δομών Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
15. Βλασσοπούλου Α. - Σταθοπούλου Κ. , 2014 Γεωφυσική Έρευνα στην Κοιλιάδα του Θορικού για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας και του μετώπου της υφαλμύρινσης. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
16. Ζαβερδίνος Α.Μ., 2011. Εξέταση των Δυνατοτήτων επέκτασης του υπόγειου χώρου διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων στο χώρο του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου
17. Καπετάνιος Α. 2009 : «Ο ΧΩΡΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΘΡΩΠΟΙ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ», σε Δόγκα-Τόλη Μ. και Οικονόμου, Στ (επιμ) *Αρχαιολογικές Συμβολές* , τόμος Α, Μουσείο Κυκλαδικής Τέχνης 183-198.
18. Λοΐζος,Φ., 2014.Γεωφυσική Έρευνα στο Ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο,. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
19. Λούης Ι. , 2004 Εισαγωγικά Μαθήματα στην Διερευνητική Γεωφυσική. Ε.Κ.Π.Α.
20. Λούης, Ι. 2004. Εισαγωγή στην Γεωφυσική Έρευνα - Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης, Σημειώσεις Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα.
21. Μακρής Γ. , 2015Γεωφυσική Έρευνα στο Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου για τον εντοπισμό θέσης εγκατάστασης περιβαλλοντικής διαχείρισης υδάτων καθώς και μεταλλευτικής στοάς. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
22. Μιχαλόπουλος Κ., ,2015 Γεωφυσική Έρευνα στο Ναό του Ηφαίστου στο Θησείο. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
23. Παπαδέας Δ.Γ. , 2001 Δρ. Γεωλόγος Ι.Γ.Μ.Ε., επεξηγηματική μελέτη του γεωλογικού χάρτη της Αττικής.
24. Παπαδόπουλος Τ.,. 2008. Εισαγωγή στη Γεωφυσική, εκδόσεις Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.
25. Παπαδοπούλου Μ. , 2015 Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση Γεωτεχνικών Προβλημάτων. Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.
26. Παυλοπούλου Π.Γ. , 2015 Γεωφυσική Έρευνα στο Βυζαντινό Ναό Αγίου Νικολάου στο Πλατάκι Αχαΐας. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.