



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑΤΑ Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών και Πολιτικών
Μηχανικών
Δ.Π.Μ.Σ. « Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων »

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για την ανάδειξη αρχαιολογικών ευρημάτων στο Αμφιθέατρο Ωρωπού



Γιαννόπουλος Αλέξανδρος-Παναγιώτης

Επιβλέπων: Γ. Αποστολόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών "Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων" του Ε.Μ.Π., υπό την πολύτιμη καθοδήγηση του Επίκουρου Καθηγητή του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. κ. Αποστολόπουλου Γεωργίου, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την καθοριστική βοήθεια σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και όλους όσους μου παρείχαν οποιαδήποτε βοήθεια ή διευκόλυνση κατά την διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Συγκεκριμένα:

Τον κ. Αμολοχίτη Γεώργιο, Γεωφυσικό, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του τομέα Μεταλλευτικής για την βοήθειά του κατά την διάρκεια των ερευνών υπαίθρου.

Την προϊστάμενη της Β΄ Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων του Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού, Αρχαιολόγο κα. Ανδρίκου Ελένη.

Τους Αρχαιολόγους Ραφτοπούλου Στέλλα και Κυριαζή Άρη για την εποικοδομητική τους συνεργασία κατά την εργασία μας στον χώρο του Αμφιάρειου.

Τους προπτυχιακούς φοιτητές του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ, Κωλέτση Γ., Κυριαζόπουλο Κ., Λοΐζο Φ., Ορφανίδη Τ., Παπαδοπούλου Μ., Σταθοπούλου Σ., Βλασσοπούλου Α για την ουσιαστική τους συνδρομή στην πραγματοποίηση των μετρήσεων υπαίθρου.

Τους φοιτητές και φίλους του μεταπτυχιακού προγράμματος «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» Γιατζίδη Γεώργιο και Ρεγγίνα Κορδή, για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την εργασία μας στον χώρο του Αμφιάρειου.

Την οικογένειά μου για την ανεκτίμητη προσφορά της όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη για ανάδειξη αρχαιολογικών ευρημάτων στο Αμφιάρειο Ωρωπού με την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων. Το Αμφιάρειο είναι αρχαιολογικός χώρος της Αττικής και βρίσκεται νοτιοανατολικά του Ωρωπού. Θεωρείται ως ένας από τους σημαντικότερους αρχαιολογικούς χώρους που διασώζονται μέχρι σήμερα στην Αττική, γεγονός που δίνει μεγάλη αξία στα αποτελέσματα της μελέτης.

Η γεωφυσική μελέτη εκτείνεται στην περιοχή βορειοδυτικά του αρχαίου θεάτρου η οποία είναι καλυμμένη με φερτά αργιλικά υλικά ενώ το υπόβαθρο αποτελείται από μαργαϊκούς σχηματισμούς. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για την αποκάλυψη του υποβάθρου είναι η Μέθοδος Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (EMI), η Μέθοδος του Γεωραντάρ και η Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.

Η εργασία δομείται από 6 μέρη:

Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της επιστήμης της γεωφυσικής όπως επίσης και οι μέθοδοι τις οποίες χρησιμοποιεί ανάλογα με τα φυσικά φαινόμενα που μελετώνται. Επίσης γίνεται συνοπτική αναφορά στην ιστορία της εξέλιξης της γεωφυσικής, ενώ περιγράφονται και κάποιες πρακτικές εφαρμογές που βρίσκει σήμερα η επιστήμη αυτή.

Στο δεύτερο μέρος αναπτύσσονται αναλυτικότερα οι βασικές αρχές των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην πορεία της μελέτης. Παρουσιάζονται κάποια ιστορικά στοιχεία που οδήγησαν στην εξέλιξη τους, οι θεωρητικές αρχές κάθε μεθόδου, η πρακτική χρησιμότητα τους, η διαδικασία λήψης των μετρήσεων στο ύπαιθρο όπως επίσης και η διαδικασία ανάλυσης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται μελέτες γεωφυσικής σε αρχαιολογικές έρευνες με χρήση όλων των διαφορετικών μεθόδων. Παρουσιάζονται παραδείγματα ερευνών στη Νέα Ζηλανδία, την Ιταλία, την Αμερική, την Υεμένη, την Τουρκία και την Ελλάδα, περιοχές όπου επικρατούν πολύ διαφορετικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα όλων των ερευνών συνέκλιναν στο συμπέρασμα πως για κάθε ολοκληρωμένη γεωφυσική μελέτη

είναι απαραίτητος ο συνδυασμός των μεθόδων αφού η καθεμία συμπληρώνει τα αποτελέσματα της άλλης.

Στο τέταρτο μέρος θα γίνει περιγραφή των παραμέτρων που καθορίζουν την καταλληλότητα μίας περιοχής για αρχαιολογική γεωφυσική έρευνα. Συγκεκριμένα, μερικοί βασικοί παράγοντες στην επιλογή μίας περιοχής είναι η φύση του εδάφους (δομή, κλίση, βλάστηση), τα διαθέσιμα ιστορικά-αρχαιολογικά στοιχεία, καθώς επίσης και οι γεωφυσικές ιδιότητες των αντικειμένων που θα επιχειρήσουμε να ανιχνεύσουμε.

Στο πέμπτο μέρος παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της περιοχής όπου έλαβε μέρος η γεωφυσική μελέτη. Αρχικά περιγράφεται η ιστορική χρήση και σημασία του χώρου, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται η πλήρης διάταξη των ήδη ανασκαφέντων μνημείων με σκοπό να γίνει αντιληπτός ο τρόπος λειτουργίας του χώρου. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του Αμφιάρειου και της λιθοστρωματογραφίας του υποβάθρου, ώστε να ερμηνευθούν σωστά τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων.

Στο έκτο μέρος και τελευταίο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία εφαρμογής και η ερμηνεία των γεωφυσικών μεθόδων στην υπό μελέτη περιοχή. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ο τρόπος οργάνωσης/διεξαγωγής των μετρήσεων, η επεξεργασία των δεδομένων, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, αλλά και της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης με την τεχνική των γεωηλεκτρικών τομογραφιών. Εν συνεχεία αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων σε ότι αφορά την ύπαρξη τεχνητών κατασκευών στο χώρο του αρχαίου θεάτρου. Τέλος, εκτιμάται η αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στην παροχή πληροφοριών προς τους αρχαιολόγους, αλλά και στην δημιουργία μίας πληρέστερης εικόνας για τη συνέχεια των ερευνών τους.

ABSTRACT

The thesis is concerned with the application of geophysical methods, in order to detect buried ancient remnants in Amfiareio. The Amfiareio is an archeological site in Attica and is located in the southeast of Oropos. Amfiareio is considered as one of the most important archaeological sites that are preserved today in Attica, therefore giving great value to the results of this study.

The geophysical study extends to the northwest of the ancient theater which is superficially covered with sediment clay materials, while the geological background consists of marly formations. The methods that were applied to uncover the archaeological remnants were the following: Method of Electrical Conductivity (EMI), Method of Ground Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity method.

The project is structured in six chapters:

The first chapter introduces the basics of the science of geophysics, as well as the methods that are used, depending on the physical phenomena being studied. Additionally the chapter makes a brief reference to the history and evolution of geophysics, as well as to some practical applications of this science.

In the second chapter, the basic principles of the geophysical methods used in our research are more analytically developed. Some historical factors that led to their development are presented, in addition to the theoretical principles of each method, their practical uses, the correct application of the techniques, the procedure of the measurements and the analysis of the geophysical data.

The third chapter presents past studies of archaeological geophysical surveys, using and combining different methods in order to discover hidden antiquities. Examples of research in New Zealand, Italy, U.S.A., Yemen, Turkey and Greece are presented. The results of all investigations converged to the conclusion that for a complete geophysical study, it is necessary to use a combination of different geophysical methods, since each method complements the results of the other.

The fourth part will be a description of the different parameters that determine the suitability of an area for archaeological geophysical survey. Specifically, some key

factors in selecting a region is the nature of the soil (structure, slope, existing vegetation), the historical and archaeological evidence available, as well as the geophysical properties of the objects that we will attempt to examine.

The fifth part presents and analyses the key elements of the region, inside which the geophysical study took part. The historical use and significance of the site is described, while the full array of the already excavated monuments is presented in order to comprehend the functional arrangement of Amfiareio. Finally an analysis of the geological conditions in the broad area of the archaeological site is developed, in order to interpret the results of geophysical measurements with precision.

The sixth and last chapter describes the process of implementation and interpretation of the geophysical methods applied in the study area. There is an analytic description about the organization and planning of the measurements, data processing, as well as the final results of the electromagnetic and the electrical resistivity tomography methods. In addition, the final conclusions about the existence of artificial structures located near the ancient theater are presented. Finally, we assess the effectiveness of the geophysical methods in terms of providing more precise information for archaeologists, before continuing their excavations.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1. Βασικά Στοιχεία της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής	8
1.2. Ιστορία της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής	9
1.3. Εφαρμογές της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής	9
1.4. Εφαρμογές της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στην Αρχαιολογική Έρευνα.	11
2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	14
2.1. Μέθοδος Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	15
2.1.1. Αρχές Μεθόδου Ηλεκτρικής Αντίστασης	15
2.1.2. Μεθοδολογία Μετρήσεων της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	17
2.1.3. Μέθοδος Ηλεκτρικής Τομογραφίας.....	22
2.2. Μαγνητική Μέθοδος.....	23
2.2.1. Ιστορία Μαγνητικής Μεθόδου.....	23
2.2.2. Αρχές Μαγνητικής Μεθόδου.....	23
2.2.3. Επιδεκτικότητες Ορυκτών και Πετρωμάτων	25
2.3. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	27
2.3.1. Αρχές Ηλεκτρομαγνητισμού	27
2.3.2. Αρχές Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου	28
2.3.3. Αρχές Λειτουργίας Οργάνων στην Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδο	29
2.4. Μέθοδος Γεωραντάρ.....	33
2.4.1. Αρχές Μεθόδου Γεωραντάρ	33
2.4.2. Αρχές Λειτουργίας του Γεωραντάρ.....	37
2.4.3. Διαμόρφωση Γεωραντάρ	39
2.4.4. Βάθος και Ανάλυση Γεωραντάρ.....	41
3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ	42
3.1. Oaro Urupa, Νέα Ζηλανδία (Ηλεκτρομαγνητική, GPR)	42
3.2. Interamna Lirenas, Lazio (GPR, Μαγνητική)	45
3.3. San Marcos, Νέο Μεξικό (Ηλεκτρικής Αντίστασης, Μαγνητική).....	48
3.4. Mahram Bilqis, Υεμένη (GPR, Μαγνητική)	51
3.5. Αφροδισιάδα, Τουρκία (Ηλεκτρικής Αντίστασης).....	54
3.6. Fort St. Joseph, Michigan (Ηλεκτρομαγνητική, Ηλεκτρικής Αντίστασης, GPR, Μαγνητική) .	57
3.7. Θέατρο Αρχαίας Άσκρης, Βοιωτία (Ηλεκτρικής Αντίστασης).....	61

4. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	68
4.1. Εισαγωγή.....	68
4.1.1. Καταλληλότητα επιφάνειας του εδάφους για τη διέλευση των γεωφυσικών οργάνων .	69
4.1.2. Μελέτη Ιστορικών - Αρχαιολογικών Στοιχείων	72
4.1.3. Μέγεθος και βάθος αρχαιολογικών αντικειμένων	74
4.1.4. Αντίθεση ανάμεσα στον περιβάλλοντα χώρο και το αρχαιολογικό υλικό	76
4.2. Επιλογή της κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου	78
4.2.1. Εισαγωγή	78
4.2.2. Οι Περιβαλλοντολογικές – Γεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας	78
4.2.3. Η Φύση του υπό μελέτη αρχαιολογικού υλικού.....	84
5. ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΑΜΦΙΑΡΕΙΟΝ	88
5.1. Τοποθεσία Αρχαιολογικού Χώρου Αμφιάρειου	88
5.2. Ιστορικά Δεδομένα Περιοχής	89
5.3. Σκοπός Γεωφυσικής Έρευνας.....	90
5.4. Περιοχή Γεωφυσικής Έρευνας.....	91
5.5. Γεωλογία - Τεκτονική Ευρείας Περιοχής.....	92
5.5.1. Εισαγωγή	92
5.5.2. Μελέτη Μεταλλικών Ιζημάτων	93
5.5.3. Μελέτη Αλπικού Συστήματος	96
5.5.4. Συμπέρασμα.....	103
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	104
6.1. Πρόλογος.....	104
6.2. Διεξαγωγή ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου	105
6.3. Γεωηλεκτρικές τομογραφίες.....	113
6.4. Συμπεράσματα.....	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	120

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Βασικά Στοιχεία της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Η Γεωφυσική ανήκει στους εφαρμοσμένους κλάδους της Φυσικής, ενώ από άποψη αντικειμένου αποτελεί κλάδο των Γεωεπιστημών όπου ανήκουν η Γεωδαισία, η Γεωλογία, η Γεωχημεία και η Γεωγραφία. Η επιστήμη της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής βασίζεται στους νόμους της φυσικής με σκοπό να μελετήσει τη Γη. Χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες της Γης και αναλύοντας τα στοιχεία, μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε τη στερεά Γη, τη θάλασσα, την ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα. Παρόλα αυτά ο όρος Γεωφυσική έχει επικρατήσει να ταυτίζεται με τη φυσική της στερεάς Γης, δηλαδή την Φυσική του εσωτερικού της Γης.

Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους ανάλογα με τα φυσικά φαινόμενα που αναλύει. Οι μέθοδοι αυτές είναι:

- Μαγνητική
- Σεισμική
- Βαρυτική
- Ηλεκτρική
- Ηλεκτρομαγνητική
- Θερμική
- Ραδιομετρική

Οι μαγνητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό μαγνητικών ανωμαλιών του υπεδάφους. Οι σεισμικές μέθοδοι διακρίνονται κυρίως στις μεθόδους ανάκλασης και διάθλασης και είναι οι πιο ακριβείς μέθοδοι καθορισμού της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Οι βαρυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων ενώ οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι καθορίζουν την γεωηλεκτρική δομή των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως στις γεωφυσικές έρευνες είναι σημαντικός ο προσδιορισμός κάποιων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Η πυκνότητα, η αντοχή, διαπερατότητα, η αντίσταση κοπώσεως η αποσάθρωση και η κατάτμηση του πετρώματος είναι στοιχεία τα οποία καθορίζουν τις φυσικές ιδιότητες του πετρώματος και κρίνουν ποια μέθοδος είναι κατάλληλη για το κάθε έδαφος και μπορεί να δώσει αποτελέσματα άξια περεταίρω επεξεργασίας.

1.2. Ιστορία της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Παρόλο που η γεωφυσική θεωρείται μία σχετικά νέα επιστήμη καθώς οι σημαντικότερες γνώσεις αποκτήθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες, οι ρίζες των αρχών της βρίσκονται αιώνες πίσω και σε ορισμένες περιπτώσεις στην αρχαιότητα.

Από τον 2ο αιώνα π.Χ. ακόμα, ήταν γνωστή η ιδιότητα μιας μαγνητικής ράβδου να προσανατολίζεται κατά τη διεύθυνση βορρά-νότου, ενώ τον 17ο αιώνα μ.Χ. ο W. Gilbert μέσω του βιβλίου του "DeMagnette" εξέφρασε την άποψη πως η Γη μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας πελώριος μαγνήτης. Το 1672 ο J. Richer απέδειξε πως το πεδίο βαρύτητας στην επιφάνεια της Γης μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο. Οι πρώτες ακριβείς μετρήσεις των στοιχείων του γεωμαγνητικού πεδίου έγιναν από τον Gauss το 1834.

Τα τελευταία χρόνια η συλλογή τεραστίου υλικού γεωφυσικών παρατηρήσεων με σύγχρονα γεωφυσικά όργανα μεγάλης ακρίβειας, η γρήγορη επεξεργασία του υλικού αυτού με ηλεκτρονικούς υπολογιστές μεγάλης ταχύτητας και μνήμης και η ραγδαία αυξημένη θεωρητική έρευνα συνέβαλαν στην αλματώδη ανάπτυξη της Γεωφυσικής επιστήμης.

1.3. Εφαρμογές της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Η γεωφυσική έρευνα βασίζεται κατά κύριο λόγο στη συλλογή, επεξεργασία και ερμηνεία γεωφυσικών παρατηρήσεων που γίνονται απ' ευθείας στη φύση με γεωφυσικά όργανα. Κατά τη διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέτρηση διάφορων φυσικών ποσοτήτων και η ερμηνεία αυτών σε συνάρτηση με άλλες φυσικές ποσότητες που περιγράφουν αμεσότερα τις ιδιότητες της Γης και τις φυσικές διαδικασίες στο εσωτερικό

της. Ο γεωφυσικός πρέπει να γνωρίζει καλά τα πεδία εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων καθώς υπάρχει μεγάλο εύρος στην έρευνα που μας επιτρέπει η χρήση τους.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι εφαρμόζονται με επιτυχία στην ανεύρεση κοιτασμάτων μεταλλευμάτων, ορυκτών ανθράκων, ενταφιασμένων αρχαιοτήτων, παγίδων πετρελαίου ή φυσικού αερίου, στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους σε περιοχές όπου πρόκειται να πραγματοποιηθούν μεγάλα τεχνικά έργα όπως επίσης και στον εντοπισμό υδροφόρων οριζόντων ή γεωθερμικών πεδίων.

Η μέθοδος σεισμικής ανάκλασης βρίσκει μεγάλη χρησιμότητα σε έρευνες κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου καθώς με τη μέθοδο αυτή με έμμεσο τρόπο και χωρίς να είναι δυνατή η μέτρηση κάποιας ιδιότητας του πετρελαίου εντοπίζονται δομές όπου είναι πιθανή η παγίδευση του πετρελαίου. Επίσης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του πάχους των ιζηματογενών λεκανών σαν αναγνωριστικές, η μέθοδος σεισμικής διάθλασης, η βαρυτική μέθοδος και η μαγνητική μέθοδος. Η πιο διαδεδομένη γεωφυσική μέθοδος στην έρευνα για την ανακάλυψη μεταλλευμάτων είναι η μαγνητική μέθοδος η οποία πλέον πραγματοποιείται και με μετρήσεις από αέρος καθώς είναι πιο φθηνές και χρειάζονται λιγότερο χρόνο για την κάλυψη εκτεταμένων περιοχών (αναγνωριστικές διασκοπήσεις). Πολύ διαδεδομένες μέθοδοι επίσης είναι οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι. Με τη μέθοδο ειδικής αντίστασης μας δίνεται η δυνατότητα εντοπισμού υδροφόρων οριζόντων. Η μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης σε συνδυασμό με τη μέθοδο σεισμικής διάθλασης χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση της οροφής του υγιούς πετρώματος, η οποία είναι χρήσιμη στο σχεδιασμό τεχνικών έργων όπως φράγματα, οδοποιία, γέφυρες κ.λ.π. Η χρήση της μεθόδου επαγόμενης πολικότητας είναι η βασικότερη μέθοδος στην έρευνα για θειούχα κοιτάσματα διάσπαρτου τύπου ενώ η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος κινούμενου πομπού-δέκτη είναι η κυριότερη μέθοδος στην έρευνα για μεικτά θειούχα κοιτάσματα. Με τη βοήθεια της βαρυτικής μεθόδου μπορούμε να εκτιμήσουμε τη συνολική μάζα ενός κοιτάσματος.

Η καθιέρωση των γεωφυσικών μεθόδων σε τέτοιας φύσης έρευνες, εκτός από το γεγονός πως μειώνει την αβεβαιότητα πριν την έναρξη των έργων, έχει και μεγάλο οικονομικό όφελος αφού το κόστος τους είναι κατά πολύ μικρότερο από το κόστος για την διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων.

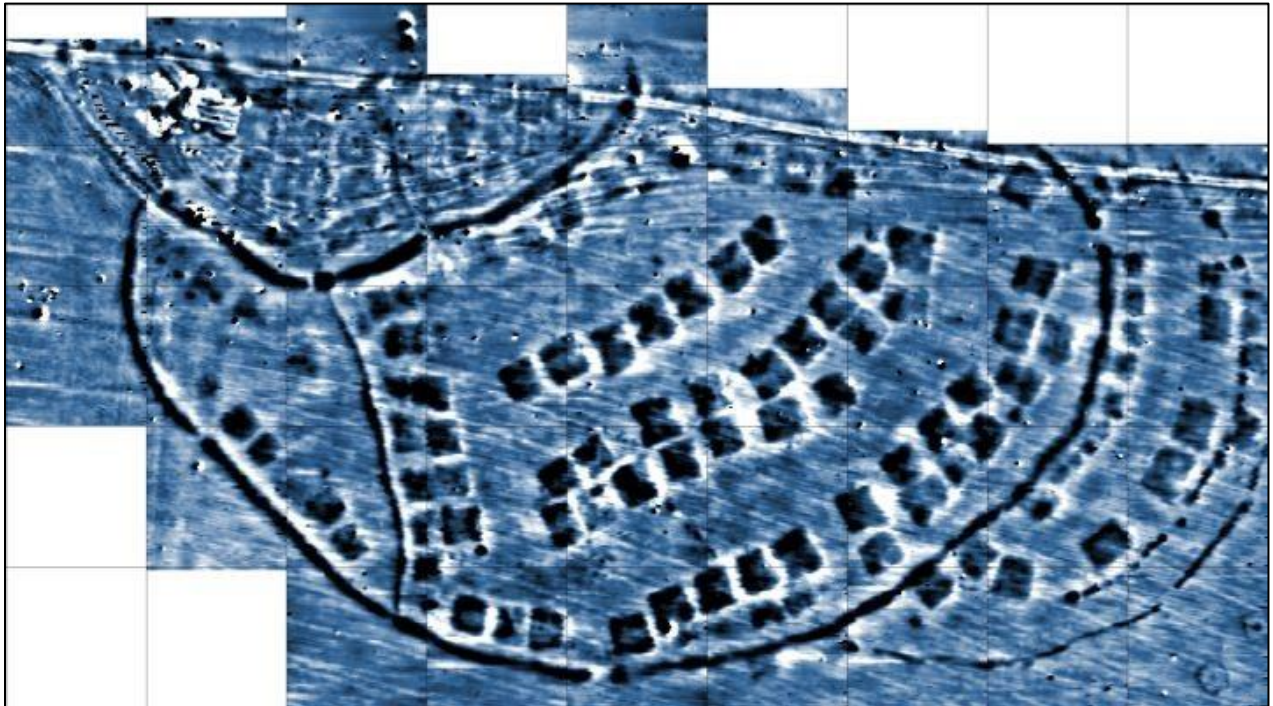
1.4. Εφαρμογές της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής στην Αρχαιολογική Έρευνα.

Η εφαρμογή της γεωφυσικής στην αρχαιολογία καθιερώθηκε αρχικά στην Ευρώπη και ιδιαίτερα στην Μεγάλη Βρετανία η οποία πρωτοπόρησε στην εξέλιξη της, τις δεκαετίες του 1940 και 1950.

Οι περισσότερες γεωφυσικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα στις αρχαιολογικές έρευνες, αναπτύχθηκαν αρχικά για γεωλογικές εφαρμογές . Ενώ οι φυσικές αρχές είναι οι ίδιες, το μικρό βάθος έρευνας και το σχετικά μικρό μέγεθος των αρχαιολογικών αναζητήσεων, δοκίμασαν τα όρια της γεωφυσικής επιστήμης. Η έρευνα με αυτά τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη μιας υποκατηγορίας της γεωφυσικής που σήμερα ονομάζεται «αρχαιολογική γεωφυσική».

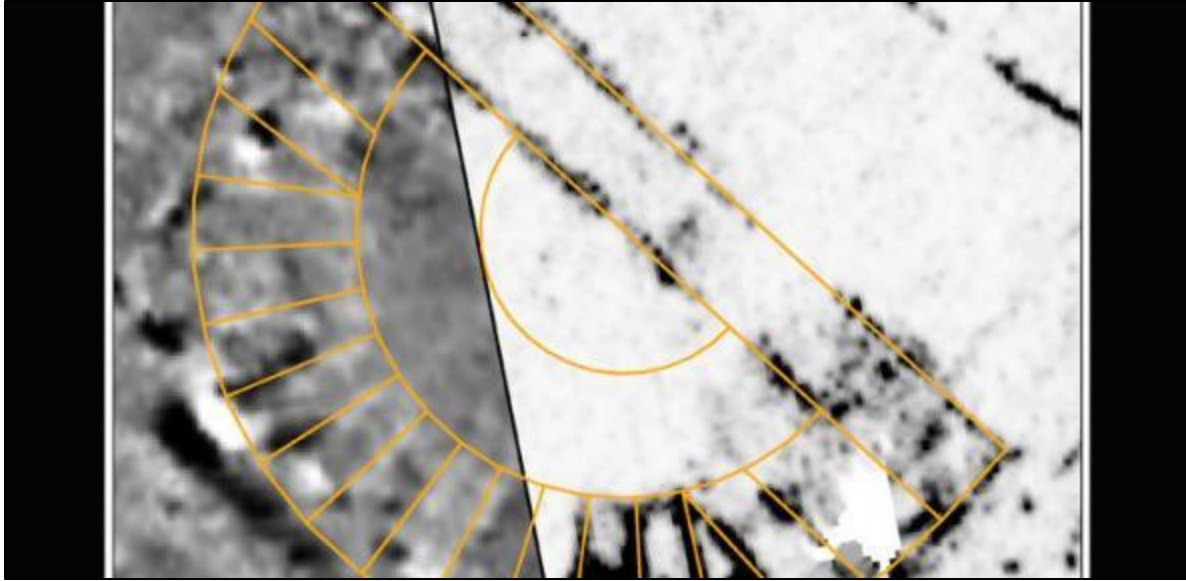
Το 1946 ο Richard Atkinson ξεκίνησε με επιτυχία μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης σε αρχαιολογικό χώρο και η τεχνική του στη συνέχεια ενισχύθηκε με την ανάπτυξη εξοπλισμού από κρυσταλλολυχνίες το 1956 , και τον αυτόματο μετρητή ηλεκτρικής αντίστασης 'Bradphys' στα τέλη του 1960. Η θεωρητική μελέτη και υιοθέτηση νέων ειδών ηλεκτροδίων, κατάλληλων για έρευνες με τα χαρακτηριστικά ενταφιασμένων αρχαιοτήτων, η εξέλιξη στη γρήγορη κάλυψη της περιοχής (Aspinall & Lynam 1968), και η αυτόματη καταγραφή των δεδομένων (Kelly et al . 1984), ενίσχυσαν και πάλι τη χρήση της τεχνικής αυτής. Ενώ οι βελτιώσεις είναι ακόμη και σήμερα σε εξέλιξη, η μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης έχει καθιερωθεί ως μία από τις βασικές μεθόδους της γεωφυσικής στην αρχαιολογία.

Η ανάπτυξη μίας άλλης επιτυχημένης τεχνικής, της μαγνητικής, ξεκίνησε το 1958 από τον Martin Aitken με τη χρήση ενός πρωτονιακού μαγνητόμετρου. Το ενδιαφέρον για την εξέλιξη αυτής της τεχνικής προωθήθηκε μετά από την ανακάλυψη κλιβάνων στο Peterborough του Ηνωμένου Βασιλείου. Ο Aitken αργότερα απέδειξε πως η μέθοδος αυτή ήταν ικανή να δείχνει μαγνητικές ανωμαλίες και σε άλλα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως χαντάκια και υπόγεια κοιλώματα. Ο Irwin Scollar χρησιμοποίησε νέα διαμόρφωση των αισθητήρων με σκοπό τη διεξαγωγή ερευνών μεγάλης κλίμακας το 1963, και το 1966 ξεκίνησε με αυτόματη ψηφιακή καταγραφή των μετρήσεων. Επίσης τη δεκαετία του 1960 τα νέα "fluxgate magnetometers", τα οποία βελτίωσαν κατά πολύ την ταχύτητα μέτρησης, εισήχθησαν από τους John Alldred και Frank Philpot.



Εικόνα 1.1: Μαγνητική χαρτογράφηση στον αρχαίο οικισμό Cica της Σιβηρίας.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται πλέον όλο και περισσότερο στις αρχαιολογικές μελέτες. Συγκεκριμένα, το Γεωραντάρ (GPR) είναι ένα καθιερωμένο εργαλείο το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε για τον εντοπισμό κοιλοτήτων, φρεάτων ορυχείων και σηράγγων και γρήγορα υιοθετήθηκε από τη γεωλογία ή και σε γεωτεχνικά έργα. Μία από τις πρώτες αρχαιολογικές εφαρμογές του GPR ήταν μια προσπάθεια να χαρτογραφηθούν οι θαμμένοι τοίχοι στο φαράγγι Chaco των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.



Εικόνα 1.2: Αποκάλυψη αρχαίου θεάτρου στην Ιταλία σε γεωφυσική έρευνα με GPR.

Πλέον η Γεωφυσική συλλογή δεδομένων είναι πλήρως ψηφιακή, ενώ το αυξανόμενο μέγεθος και η μεγαλύτερη ανάλυση δειγματοληψίας των σύγχρονων ερευνών έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων. Η εξέλιξη στην πληροφορική ήταν αυτή που επέτρεψε την συλλογή, επεξεργασία και χαρτογράφηση χιλιάδων δεδομένων. Ένα παράδειγμα γεωφυσικής έρευνας μεγάλης κλίμακας είναι η μελέτη "Wroxeter Hinderland" στην οποία εμπλέκονται πολλές ομάδες έρευνας, χρησιμοποιώντας ποικιλία γεωφυσικών μεθόδων. Η έρευνα με μαγνητόμετρο και μόνο, έκτασης περίπου 78 στρεμμάτων, κατέγραψε σχεδόν τρία εκατομμύρια σημεία δεδομένων.

2. ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε ενεργητικές και παθητικές. Οι παθητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις συμπεριλαμβάνουν μετρήσεις φυσικών πεδίων ή ιδιοτήτων της γης. Στις παθητικές διασκοπήσεις ανήκουν οι βαρυτομετρικές και οι μαγνητικές με φυσικά πεδία το βαρυτικό και το μαγνητικό αντίστοιχα. Σε αυτά τα πεδία απλά μετρούμε τις χωρικές μεταβολές στην προσπάθειά μας να βγάλουμε συμπεράσματα για την υπεδαφική γεωλογία. Κατά την διεξαγωγή των ενεργητικών γεωφυσικών διασκοπήσεων από την άλλη, ένα σήμα εισάγεται στη γη και εμείς μετρούμε πώς η γη αποκρίνεται στο σήμα αυτό. Τα σήματα αυτά μπορούν να έχουν μια πληθώρα μορφών όπως μετατόπιση ή ηλεκτρικό ρεύμα. Η μέθοδος ειδικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος και η σεισμική ανήκουν στην κατηγορία ενεργών γεωφυσικών μεθόδων.

Στην αρχαιολογική γεωφυσική εφαρμόζονται και οι ενεργητικές αλλά και οι παθητικές γεωφυσικές μέθοδοι. Οι μετρήσεις των μεθόδων στηρίζονται στη διαφοροποίηση μεταξύ του φυσικού υποβάθρου ενός χώρου και ενός αρχαιολογικού στοιχείου. Όπως γίνεται αντιληπτό όταν ο γεωφυσικός χαρτογραφεί μία περιοχή το σημαντικό είναι οι διαφοροποιήσεις των τιμών που εντοπίζονται και όχι το μέγεθος των τιμών των μετρήσεων.

Το είδος, το μέγεθος και το βάθος του στόχου που επιδιώκουμε να ανιχνεύσουμε είναι οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν την πυκνότητα της δειγματοληψίας στο ύπαιθρο. Οι γεωφυσικές μετρήσεις γίνονται συνήθως σε τομές με ορισμένη και σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Η απόσταση μεταξύ των τομών, αλλά και το διάστημα κάθε μέτρησης μέσα σε μία τομή, αποτελούν σημεία μεγάλης προσοχής για μία σωστή μελέτη. Στις περισσότερες αρχαιολογικές γεωφυσικές έρευνες προτείνεται διάστημα μεταξύ των τομών που κυμαίνεται από 0.50m έως 1.00m. Όσο μικρότερη διαφοροποίηση παρουσιάζουν οι τιμές των μετρήσεων τόσο μειώνουμε την απόσταση των τομών μας για μεγαλύτερη ανάλυση. Σε ότι αφορά την πυκνότητα των δειγμάτων μέσα σε κάθε τομή, το μέγεθος του στόχου είναι ο κυριότερος παράγοντας που την καθορίζει. Η πιθανότητα ανίχνευσης μικρών στοιχείων βελτιώνεται με την αύξηση στην πυκνότητα της δειγματοληψίας. Σε γενικές γραμμές όμως, διάστημα από 1.00m έως 0.25m είναι κατάλληλο με αρκετή βελτίωση όσο αυτό μειώνεται.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι που θα εξετασθούν στη συνέχεια είναι η μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η μέθοδος ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EMI), και η μέθοδος του γεωραντάρ καθώς ήταν και οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Τέλος θα επισημανθούν και κάποια βασικά στοιχεία της μαγνητικής μεθόδου στις αρχές της οποίας βασίζεται η μέθοδος ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

2.1. Μέθοδος Ηλεκτρικής Αντίστασης

2.1.1. Αρχές Μεθόδου Ηλεκτρικής Αντίστασης

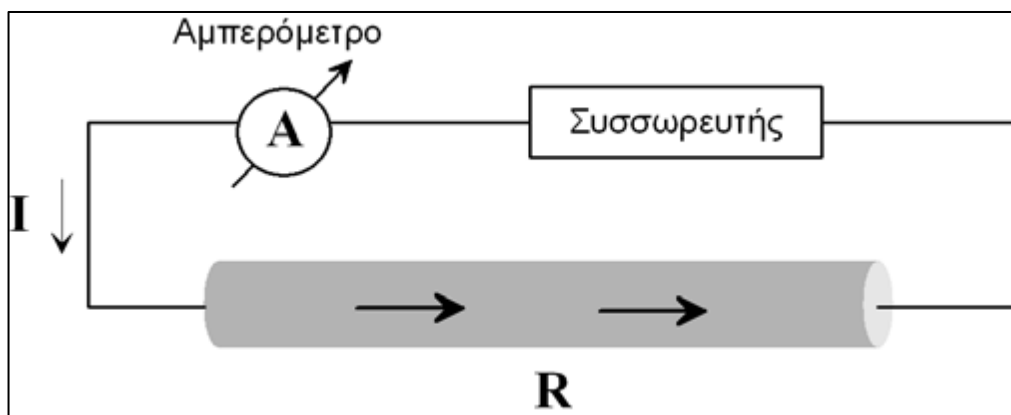
Το 1827 ο Georg Ohm, όρισε μια εμπειρική σχέση μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει ένα συρμάτινο καλώδιο και της διαφοράς δυναμικού που απαιτείται για να δημιουργηθεί το ρεύμα. Συγκεκριμένα συσχέτισε την πυκνότητα ρεύματος εντός ενός αγωγού με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:

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

όπου:

- R είναι η ωμική αντίσταση του υλικού
- V είναι η τάση του ρεύματος
- I είναι η ένταση του ρεύματος

Για να μετρήσουμε την ωμική αντίσταση σε ένα συρμάτινο καλώδιο συνδέουμε μια μπαταρία γνωστής τάσης σε ένα καλώδιο και στη συνέχεια μετρούμε το ρεύμα που διαρρέει το καλώδιο. Η τάση δια το ρεύμα μας δίνει την αντίσταση του καλωδίου.



Εικόνα 2.1: Οι ειδικές αντιστάσεις διαφόρων υλικών.

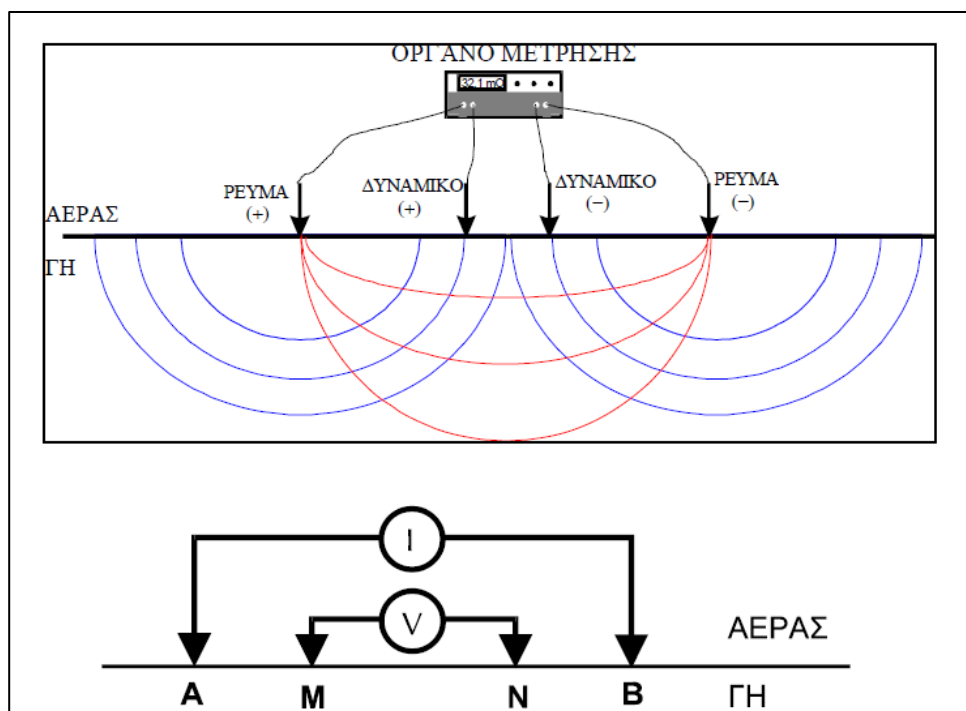
Με τις ηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, η ιδιότητα που κυρίως μας ενδιαφέρει είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Η μέθοδος ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης είναι μία ενεργητική μέθοδος κατά την οποία δημιουργείται υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Σκοπός της μεθόδου είναι να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη. Το μετρούμενο δυναμικό επηρεάζεται κυρίως από την παρουσία ρευστών στους σχηματισμούς, το πορώδες τους και η παρουσία αργιλικών υλικών. Συγκεκριμένα συμπαγείς σχηματισμοί, στραγγισμένα εδάφη και χονδρόκοκκα εδάφη παρουσιάζουν σχετικά υψηλή ειδική αντίσταση, ενώ αργιλικά εδάφη και λεπτόκοκκα εδάφη με υψηλές τιμές υγρασίας παρουσιάζουν μικρότερη ειδική αντίσταση. Η πρακτική εφαρμογή των παραπάνω στοιχείων είναι πολύ χρήσιμη σε αρχαιολογικές μελέτες, καθώς η διαφοροποίηση στις τιμές ειδικής αντίστασης ανάμεσα σε ανθρώπινες κατασκευές από πέτρα και στις αποθέσεις αργιλικών προϊόντων που κάλυψαν τις κατασκευές με το πέρασμα του χρόνου, είναι σημαντική.

Υλικό	Ειδική Αντίσταση (Ωm)
Αέρας	∞
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Γρανίτης	$100 - 1 \times 10^6$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ασβεστόλιθοι	$50 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτες	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθοι	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$100 - 10,000$
Άμμος	$1 - 1,000$
Άργιλος	$1 - 100$
Εδαφικό Νερό	$0.5 - 300$
Θαλασσινό Νερό	0.2

Πίνακας 2.2: Οι ειδικές αντιστάσεις διαφόρων υλικών.

2.1.2. Μεθοδολογία Μετρήσεων της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Κατά τη διαδικασία μέτρησης θα χρειαστεί να τοποθετήσουμε δύο σημειακές πηγές ρεύματος A και B (ηλεκτρόδια ρεύματος). Στη συνέχεια διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I μέσα στη γη με τα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού VMN μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού M, N.



Εικόνα 2.3: Διάταξη ηλεκτροδίων.

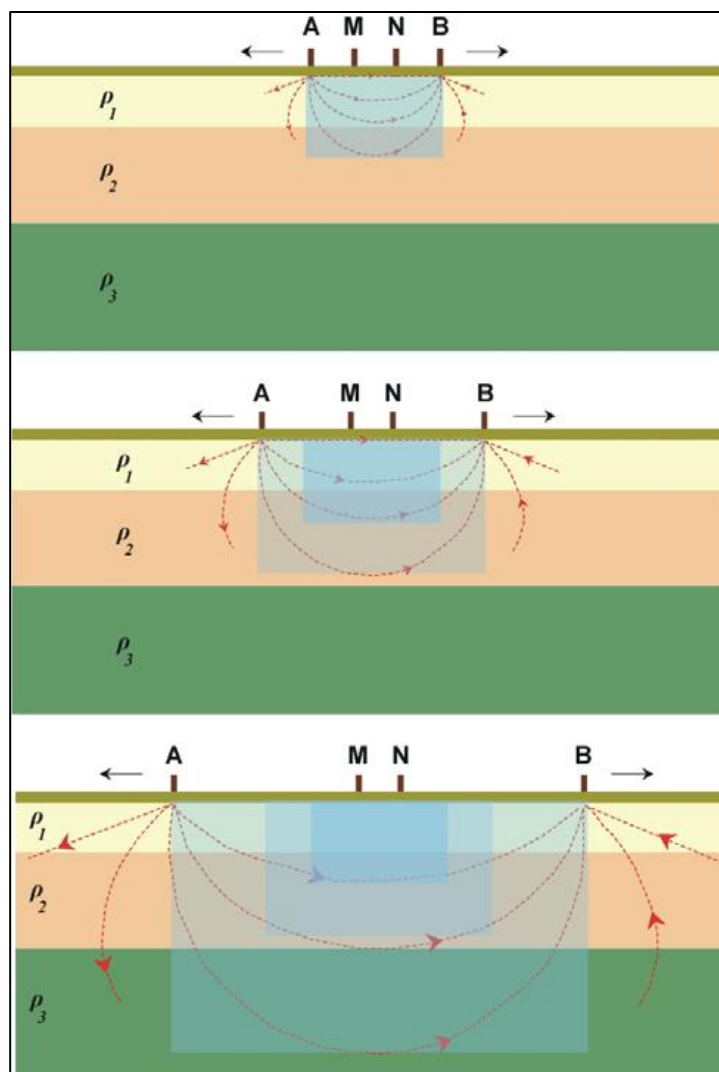
Βρίσκεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση R η οποία προκύπτει από τη σχέση:

$$\bullet \quad R = K \frac{\Delta V}{I}$$

όπου:

- K είναι σταθερά η οποία εξαρτάται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων στο έδαφος
- ΔV είναι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού ανά θέση
- I είναι η ένταση του ρεύματος που διοχετεύουμε στη γη

Αυξομειώνοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων A και B αλλάζει το βάθος διασκόπησης. Αυξάνοντας έτσι, την απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, αυξάνεται και το βάθος διεύθυνσης ενώ μειώνοντας την απόσταση μειώνεται το βάθος της διασκόπησης αντίστοιχα.



Εικόνα 2.4: Βάθος διασκόπησης σε συνάρτηση με την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Ανάλογα με το σκοπό της έρευνας υπάρχουν δύο τεχνικές που μπορούν να εφαρμοσθούν. Οι ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις και οι οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις.

Στις ηλεκτρικές βυθομετρήσεις (VES) μεταβάλλονται οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού διατηρούμενης της συμμετρίας τους ως προς το κέντρο της διάταξης (κέντρο της βυθομέτρησης). Εφ' όσον το βάθος της έρευνας αυξάνει εν γένει με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων οι ηλεκτρικές βυθομετρήσεις χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε να μάθουμε πώς η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται με το βάθος. Όταν πραγματοποιούμε βυθοσκοπήσεις ειδικής αντίστασης, δύο είναι οι τύποι διασκόπησης που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Και για τους δύο

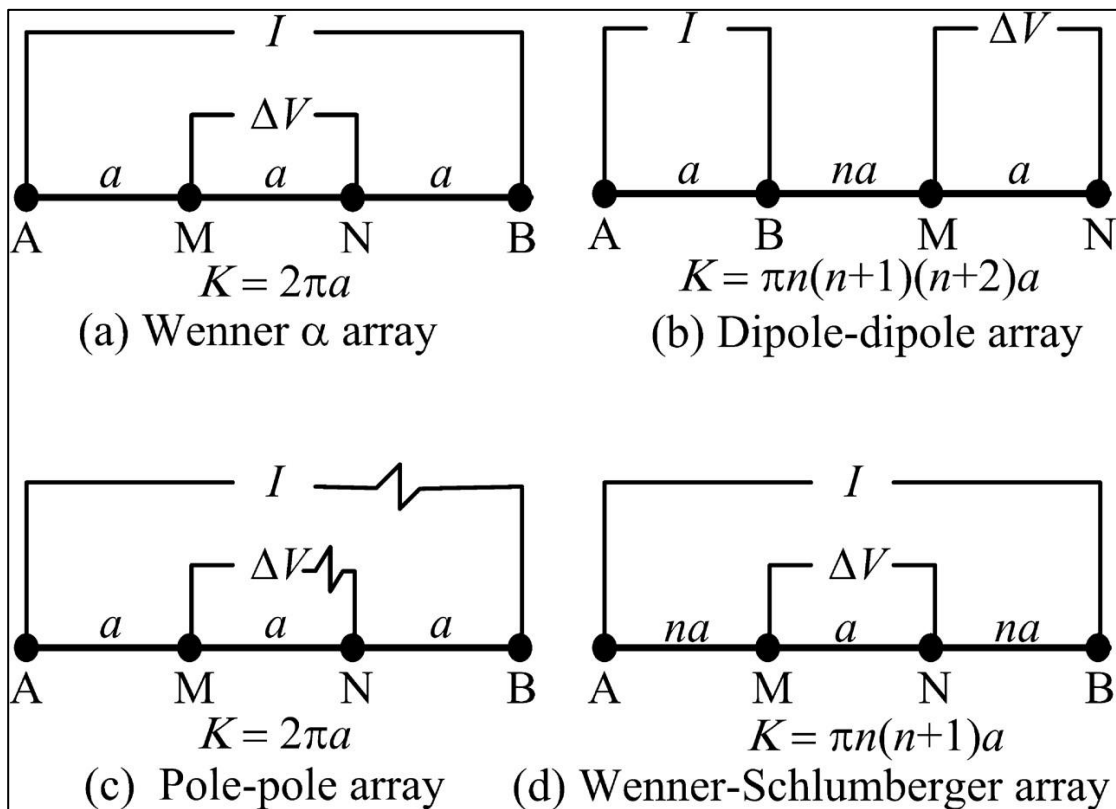
τύπους, τα ηλεκτρόδια κατανέμονται κατά μήκος μια γραμμής, το κέντρο της οποίας αποτελεί τη θέση της βυθοσκόπησης. Η πιο απλή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, από άποψη γεωμετρίας, είναι η μέθοδος Wenner. Η πιο οικονομική σε χρόνο εργασιών υπαίθρου είναι η μέθοδος Schlumberger.

Οι διατάξεις ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού που χρησιμοποιούνται στις έρευνες οριζόντιας μεταβολής της ειδικής αντίστασης διακρίνονται στις γραμμικές διατάξεις ειδικής αντίστασης και στις διατάξεις χωρικής μέτρησης της βαθμίδας του πεδίου με σταθερές πηγές ρεύματος. Οι περισσότερο διαδεδομένες γραμμικές διατάξεις είναι οι διατάξεις Wenner, και Schlumberger καθώς και οι διάφορες παραλλαγές της διάταξης των δίπολων ρεύματος και δυναμικού. Στη διάταξη διπλού δίπολου (dipole-dipole) η απόσταση των ηλεκτροδίων επιλέγεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του στόχου, και στη συνέχεια τα ηλεκτρόδια μετακινούνται διατηρώντας την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος ίση με αυτήν των ηλεκτροδίων δυναμικού. Οι διατάξεις role-role και role-dipole εμφανίζονται κυρίως στον εντοπισμό παράπλευρων ανομοιογενειών σε οριζόντιες χαρτογραφήσεις. Στη διάταξη role-role ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα δυναμικού είναι απομακρυσμένα από τα υπόλοιπα, ενώ στη διάταξη role-dipole το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκεται σε απομακρυσμένη θέση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Η κάθε μία διάταξη έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος για το οποίο προορίζεται. Όλες οι διατάξεις έχουν ως σκοπό την διερεύνηση της οριζόντιας ή πλευρικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης μέσα σε υπεδαφική ζώνη σταθερού περίπου πάχους. Ειδικότερα, με τις τεχνικές αυτές αναζητούνται μέσα σε σταθερού πάχους υπεδαφικές ζώνες, δομές με πεπερασμένες πλευρικές διαστάσεις. Τέτοιες δομές μπορεί να είναι τα φυσικά ή τεχνητά έγκοιλα (σπήλαια, υπόγεια τούνελ ή γαλαρίες ορυχείων) στην τεχνική γεωλογία, οι υδροφόροι ή μη σχηματισμοί άμμων και χαλίκων (φακοί) στην υδρογεωλογία, τα υπεδαφικά υπολείμματα οικισμών ή ταφικών μνημείων στην αρχαιολογική έρευνα, οι ρηγματογόνες ζώνες, οι φλέβες μεταλλοφορίας κλπ.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή της καταλληλότερης διάταξης ηλεκτροδίων παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ευαισθησία διάταξης σε παράπλευρες ανομοιογένειες.

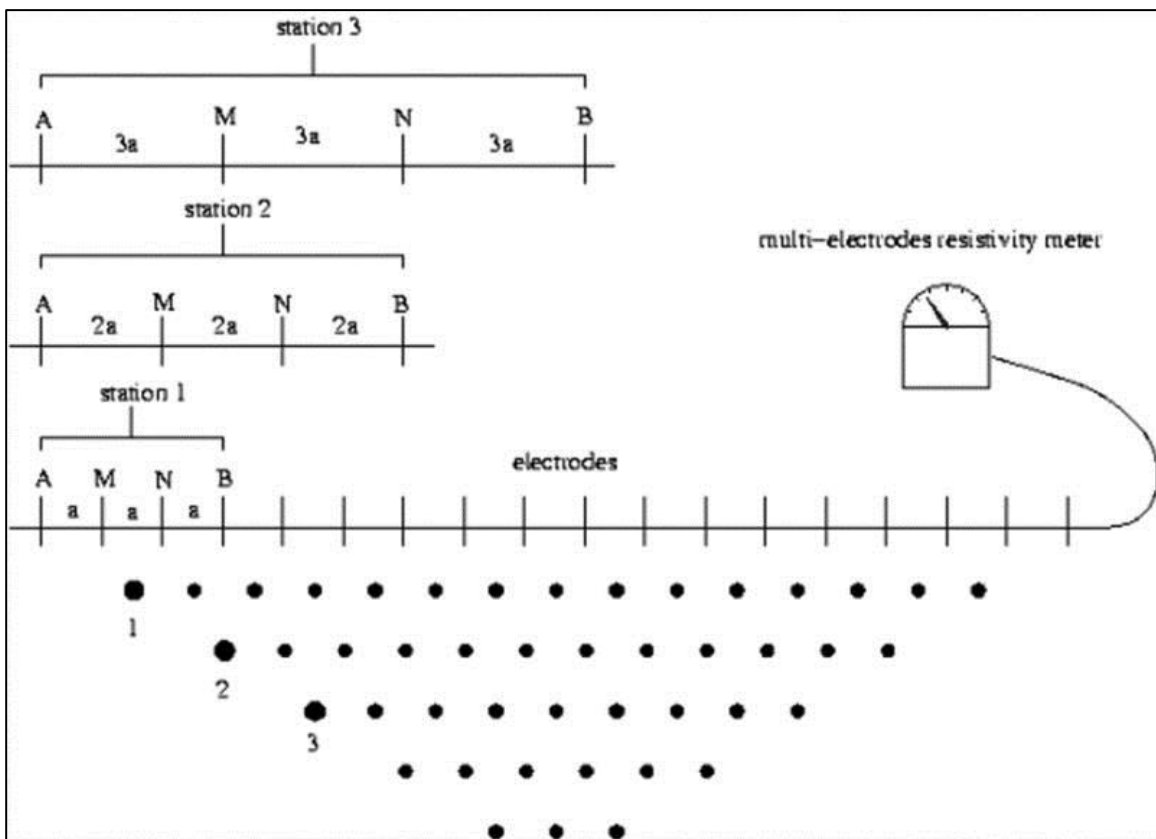
- Ευαισθησία διάταξης σε επιφανειακές ανομοιογένειες.
- Ευαισθησία διάταξης στο διαχωρισμό οριζόντιων στρωμάτων.
- Ευαισθησία διάταξης σε βάθος.
- Διεισδυτικότητα διάταξης μέσω αγωγίμου επιφανειακού στρώματος.
- Βάθος διασκόπησης.
- Λόγος σήματος προς θόρυβο.
- Ευαισθησία διάταξης στην μορφολογία του υποβάθρου.
- Ευαισθησία διάταξης στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας.
- Εύρεση δομών με απότομη κλίση



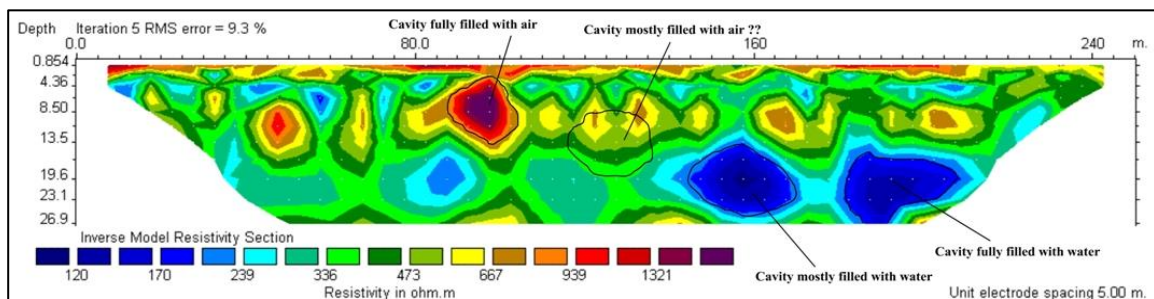
Εικόνα 2.6: Διατάξεις ηλεκτροδίων κατά Wenner, Schlumberger, Dipole-dipole, pole-pole.

2.1.3. Μέθοδος Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Μία μέθοδος ειδικής αντίστασης η οποία εφαρμόζεται ολοένα και περισσότερο είναι η μέθοδος της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας. Στην ουσία πρόκειται για μία μέθοδο που συνδυάζει πολλές βυθοσκοπήσεις σε κοντινή απόσταση. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων και οι διάταξη που θα εφαρμοστεί επιλέγονται από τον γεωφυσικό. Στη μέθοδο της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας γίνεται καταγραφή μετρήσεων με διαφορετικούς συνδυασμούς ηλεκτροδίων κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης.



Εικόνα 2.7: Ακολουθία μετρήσεων για τη δημιουργία δισδιάστατης τομής.



Εικόνα 2.8: Παράδειγμα Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

2.2. Μαγνητική Μέθοδος

2.2.1. Ιστορία Μαγνητικής Μεθόδου

Η γεωφυσική διερεύνηση με τη χρήση παρατηρήσεων του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι η πρώτη γεωφυσική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε. Οι αρχές της που αποτελούν και τη βάση της μεθόδου αυτής έχουν ρίζες σε βάθος πέντε αιώνων όταν ο Sir William Gilbert έκανε συστηματικές παρατηρήσεις του μαγνητικού πεδίου της γης και έδειξε ότι το αίτιο που η μαγνητική βελόνα της πυξίδας κατευθύνεται προς τον βόρειο πόλο της γης είναι διότι η ίδια η γη φαίνεται να συμπεριφέρεται σαν ένας τεράστιος μαγνήτης, ενώ το μαγνητικό πεδίο της γης είναι περίπου ισοδύναμο με αυτό που θα προερχόταν από μια μαγνητική ράβδο τοποθετημένη στο κέντρο της γης με προσανατολισμό κατά μήκος του άξονα περιστροφής της.

Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν κατά τα μέσα του 19ου αιώνα από τον Karl Frederick Gauss ο οποίος έδειξε επίσης πως το μαγνητικό αυτό πεδίο οφείλεται σε πηγές στο εσωτερικό της γης.

Η πρώτη γεωφυσική έρευνα με χρήση του μαγνητικού πεδίου έγινε το 1843 από τον von Werde, για τον εντοπισμό μεταλλευτικών κοιτασμάτων.

Μέχρι σήμερα οι μαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης είναι εξαιρετικά διαδομένες καθώς τα αποτελέσματά τους λαμβάνονται γρήγορα και εύκολα χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες.

2.2.2. Αρχές Μαγνητικής Μεθόδου

Η θεμελιώδης παράμετρος που ελέγχει τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα των πετρωμάτων η οποία δεν μεταβάλλεται μόνο μεταξύ διαφορετικών πετρωμάτων αλλά μεταβολές συμβαίνουν και μέσα στο ίδιο πέτρωμα.

Σύμφωνα με τον νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα η βαρυτική δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο σημειακών μαζών, m_1 και m_2 που βρίσκονται σε απόσταση r μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης που τα χωρίζει και δίνεται από τη σχέση:

- $$F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

Η δύναμη της βαρύτητας είναι πάντα ελκτική καθώς η παγκόσμια σταθερά G η μάζα και η απόσταση έχουν πάντα θετικές τιμές.

Το 1785 Ο Charles Augustin de Coulomb, έδειξε ότι η ελκτική ή απωστική δύναμη μεταξύ ηλεκτρικά φορισμένων σωμάτων και μεταξύ μαγνητικών πόλων επίσης υπακούουν σε έναν νόμο αντίστροφου τετραγώνου, αντίστοιχο του Νεύτωνα παραπάνω. Η μαγνητική δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο μαγνητικών πόλων είναι:

- $$F_m = \frac{1p_1p_2}{\mu r^2}$$

όπου:

- μ είναι μια σταθερά αναλογίας που καλείται μαγνητική διαπερατότητα (magnetic permeability),
- p_1 και p_2 είναι οι εντάσεις των δύο μονόπολων που αναφέρονται και ως ποσότητες μαγνητισμού
- r είναι η απόσταση μεταξύ τους.

Η βασική διαφορά της παραπάνω έκφρασης με αυτήν του Νεύτωνα είναι πως τα p_1 και p_2 αντίθετα με τα m_1 και m_2 μπορούν να είναι θετικά ή αρνητικά δημιουργώντας έτσι δυνάμεις απωστικές ή ελκτικές μεταξύ τους.

Ως H ορίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή η μαγνητική δύναμη ανά ένταση μοναδιαίου πόλου που ασκείται υπό το μονόπολο p_1 .

- $$H = \frac{p_1}{\mu r^2}$$

Η μαγνήτιση που παράγει ένα υλικό όταν τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο καλείται μαγνητική επαγωγή

Η ένταση μαγνήτισης J καθορίζεται απο τη μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου:

- $J = \frac{M}{V}$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα k είναι μια αδιάστατη σταθερά που καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες ενός υλικού και ορίζεται ως:

- $k = \frac{J}{H}$

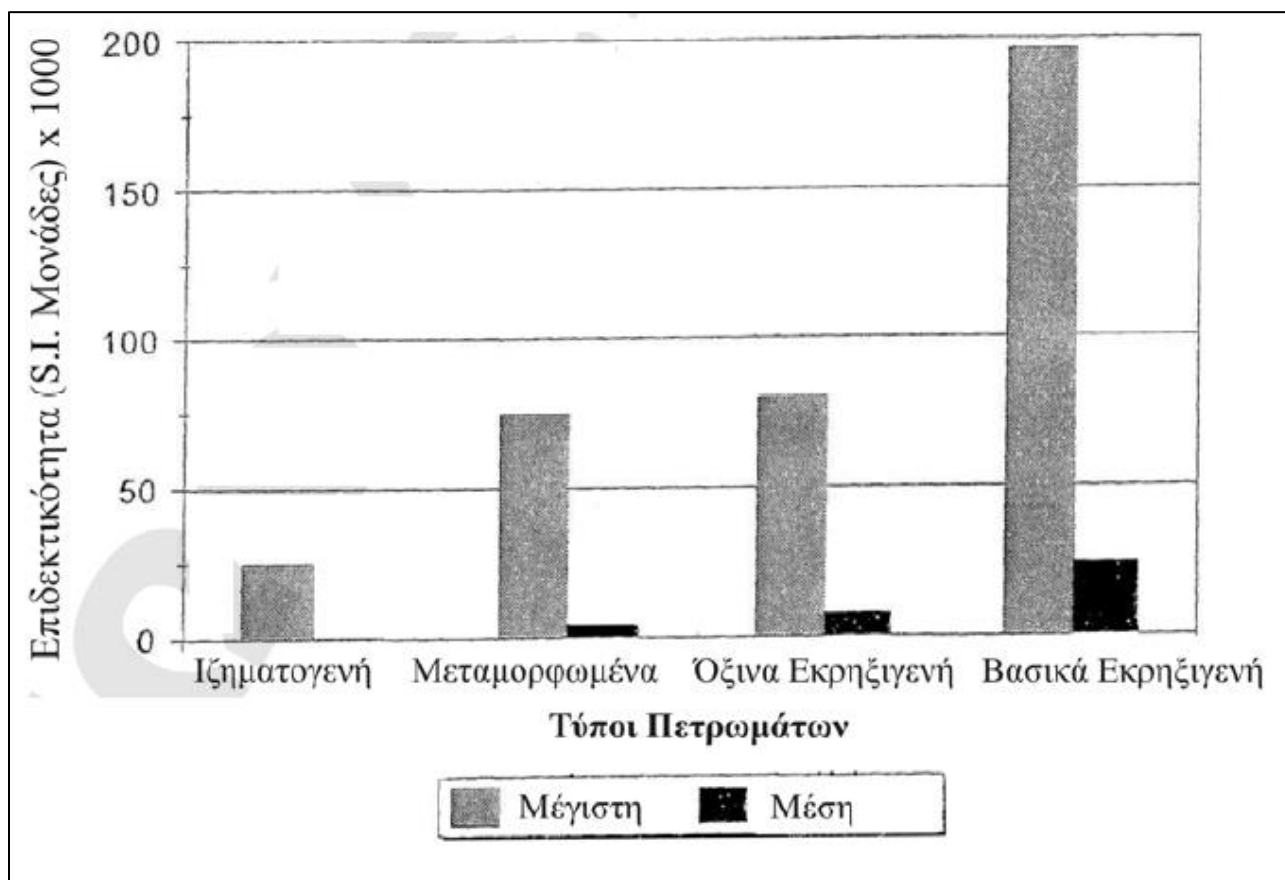
2.2.3. Επιδεκτικότητες Ορυκτών και Πετρωμάτων

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ενδεικτικά οι επιδεκτικότητες κάποιων ορυκτών και πετρωμάτων, όπου παρατηρούμε μεγάλο εύρος τιμών, όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών πετρωμάτων αλλά και σε πετρώματα του ίδιου τύπου. Επίσης παρατηρείται επικάλυψη των τιμών σε διαφορετικά πετρώματα, γεγονός που μας δείχνει πως η γνώση της επιδεκτικότητας και μόνον δεν είναι επαρκής για ασφαλή συμπεράσματα ως προς το είδος του πετρώματος.

Υλικό Επιδεκτικότητα x 10 ³ (SI)	
Αέρας	~0
Χαλαζίας	-0.01
Ορυκτό άλας	-0.01
Ασβεστίτης	-0.001 - 0.01
Σφαλερίτης	0.4
Σιδηροπυρίτης	0.05 - 5
Αιματίτης	0.5 - 35
Ιλμενίτης	300 - 3500
Μαγνητίτης	1200 - 19,200
Ασβεστόλιθος	0 - 3
Ψαμμίτης	0 - 20
Αργιλικός σχιστόλιθος(shale)	0.01 - 15
Σχίστης(schist)	0.3 - 3
Γνεύσιος	0.1 - 25
Σχιστόλιθος (Slate)	0 - 35
Γρανίτης	0 - 50
Γάββρος	1 - 90
Βασάλτης	0.2 - 175
Περιδοτίτης	90 - 200

Πίνακας 2.9: Ενδεικτικές επιδεκτικότητες ορυκτών και πετρωμάτων.

Τα πετρώματα παρουσιάζουν χαμηλή περιεκτικότητα σε μαγνητικά υλικά έχοντας ως αποτέλεσμα χαμηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας. Σε γενικές γραμμές όμως, τα πυριγενή πετρώματα έχουν αυξημένες τιμές επιδεκτικότητας, τα μεταμορφωμένα παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές, ενώ τα ιζηματογενή είναι γενικά χαμηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας.



Εικόνα 2.10: Μαγνητικές επιδεκτικότητες των κυριότερων τύπων πετρωμάτων.

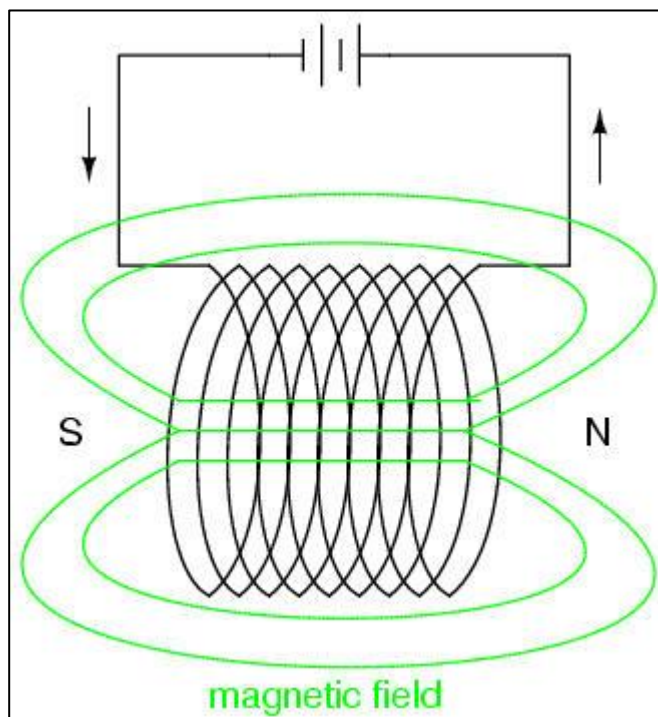
2.3. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

2.3.1. Αρχές Ηλεκτρομαγνητισμού

Στην παραπάνω ενότητα περιγράφηκαν οι βασικές αρχές του μαγνητισμού οι οποίες αποτελούν σημαντική βάση της ηλεκτρομαγνητικής αρχής.

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργείται γύρω του μαγνητικό πεδίο. Η ένταση αυτού του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο γύρω από τον αγωγό εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (I) που διαρρέει τον αγωγό, το μήκος του αγωγού (L) και είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης του σημείου από τον αγωγό. Μαγνητικό πεδίο δημιουργείται και γύρω από ένα πηνίο όταν διαρρέεται από ρεύμα. Το πηνίο είναι καλώδιο τυλιγμένο σε μορφή σπειρών.

Εάν μέσα σε ένα πηνίο τοποθετήσουμε κάποιο μαγνητικό υλικό τότε το πηνίο ονομάζεται ηλεκτρομαγνήτης και το μαγνητικό υλικό που τοποθετήσαμε πυρήνας. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου του ηλεκτρομαγνήτη εξαρτάται από το μαγνητικό πυρήνα, από την ένταση του συνεχούς ρεύματος που το διαρρέει και τον αριθμό των σπειρών του ηλεκτρομαγνήτη.



Εικόνα 2.11: Λειτουργία Ηλεκτρομαγνήτη.

2.3.2. Αρχές Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος είναι μία ενεργητική μέθοδος (δηλαδή δημιουργούμε τεχνητό πεδίο), που χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα για να εντοπίσει μεταβολές στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ροή ρεύματος σε έναν αγωγό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτόν. Εάν κοντά σε αυτό το πεδίο τοποθετήσουμε αντικείμενα που είναι αγώγιμα, τότε το πεδίο θα αναγκάσει τα ηλεκτρικά ρεύματα να ρεύσουν σε αυτά τα αντικείμενα δημιουργώντας ένα νέο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επαγωγή. Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι βασίζονται σε φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι το μέτρο που μας δείχνει κατά πόσο διατρέχεται ένα υλικό από το ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν αναφερόμαστε σε αγωγιμότητα στις γεωφυσικές έρευνες, εννοούμε τις μετρήσεις που λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο επαγωγής (EMI).

Στην παράγραφο της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης εξηγήθηκε η θεωρία της ειδικής αντίστασης βάσει του νόμου του Ωμ η οποία μετράται σε Ωm. Η αντίστροφη ειδική αντίσταση $1/\Omega m$ ονομάζεται ειδική αγωγιμότητα και μετράται σε Siemens/m (S/m). Η ηλεκτρική αγωγιμότητα οφείλεται στην ύπαρξη ελευθέρων ηλεκτρονίων εντός του κρυσταλλικού πλέγματος. Στα μέταλλα και σε περίπτωση εφαρμογής εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια της εξώτατης στοιβάδας μπορούν εύκολα να 'εγκαταλείψουν' το άτομο και να ολισθήσουν μέσα στο πλέγμα, γεγονός που τα καθιστά αγωγούς.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα ανωτέρω δεδομένα, τα περισσότερα ξηρά ορυκτά και πετρώματα είναι πτωχοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και οι ειδικές τους αντιστάσεις θα ήταν εξαιρετικά υψηλές εάν αυτά δεν ήταν πορώδη, και οι πόροι τους δεν ήταν πλήρεις αγώγιμων ρευστών (ύδατος). Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ηλεκτρικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτώνται κυρίως από την δυνατότητά τους να συγκρατούν νερό (υγρασία).

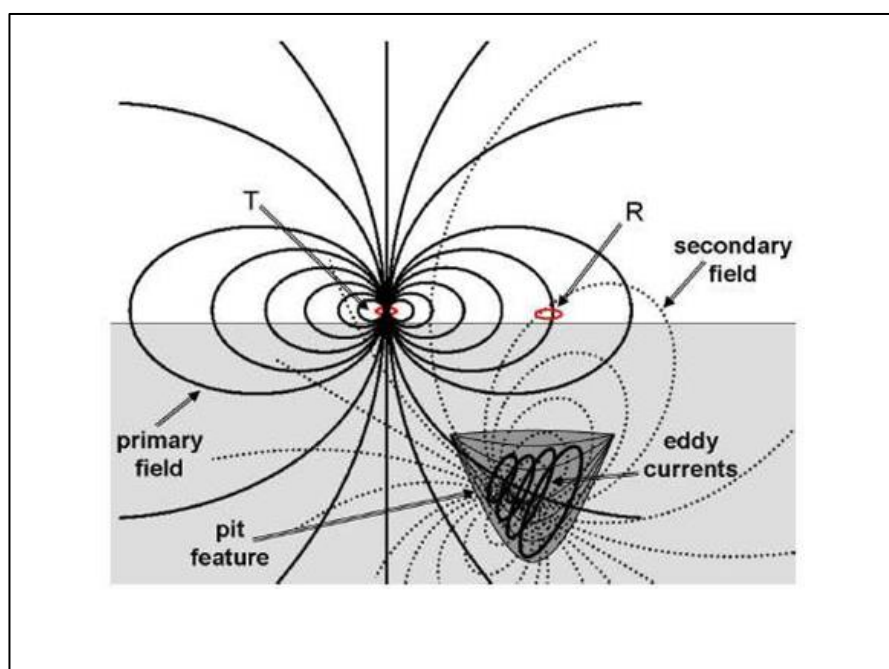
Γενικότερα η παρουσία αργιλικών υλικών στο έδαφος, η υγρασία, το πορώδες, η ύπαρξη υπογείων υδάτων, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, η στρωματογραφία της περιοχής μελέτης και η θερμοκρασία είναι όλοι παράγοντες που επηρεάζουν την

ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους. Έτσι λοιπόν όπως και η μέθοδος ειδικής αντίστασης έτσι και η αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βασισμένες στις αντιθέσεις της υγρασίας και τον τύπο υλικού. Τα μικρά κοιλώματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν με μεγάλη επιτυχία.

2.3.3. Αρχές Λειτουργίας Οργάνων στην Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδο

Στην ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική έρευνα τα δεδομένα συλλέγονται από όργανα με δύο πηνία. Το ένα πηνίο είναι μία συσκευή εκπομπής σημάτων (πομπό) και το άλλο είναι δέκτης σημάτων.

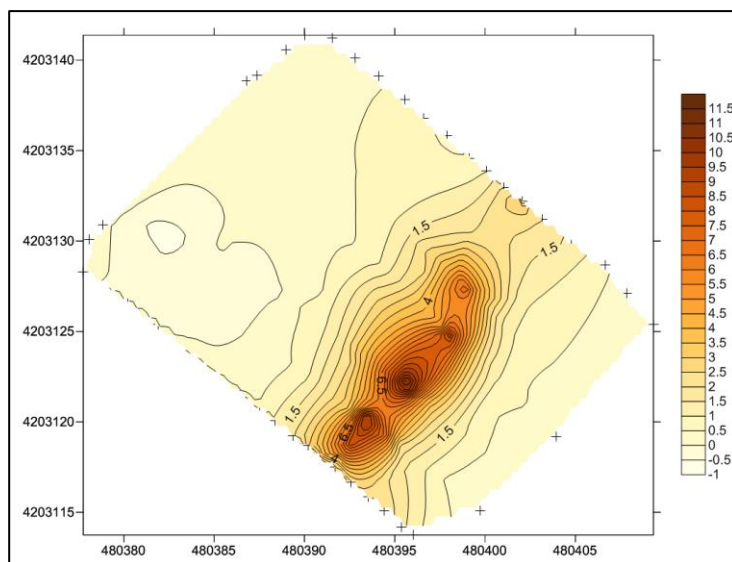
Το αρχικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τον πομπό και διαδίδεται προς κάθε κατεύθυνση και εναλλασσόμενα ρεύματα διεισδύουν στο αγωγίμο υλικό του εδάφους με μορφή στροβίλων και ονομάζονται "eddy currents". Τα εναλλασσόμενα αυτά ρεύματα που διείσδυσαν δημιουργούν δευτερεύοντα ηλεκτρομαγνητικά πεδία τα οποία στη συνέχεια μετρώνται στο πηνίο του δέκτη του οργάνου. Όσο πιο αγωγίμος είναι ένας σχηματισμός τόσο πιο ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία δημιουργούνται.



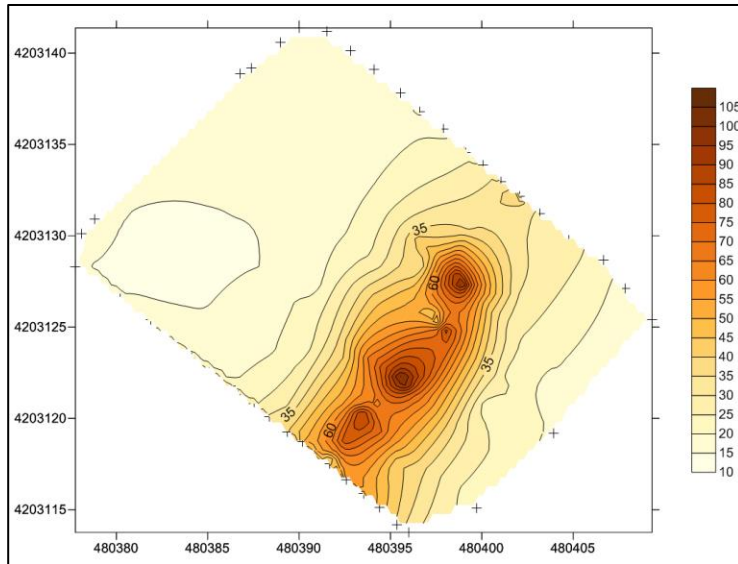
Εικόνα 2.12: Απεικόνιση αρχικού πεδίου, ρευμάτων "eddy", και δευτερεύοντος πεδίου.

Από τη σύγκριση του αρχικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με το δευτερεύον πεδίο ως προς το πλάτος και την καθυστέρηση της φάσης υπολογίζεται η αγωγιμότητα του εδάφους. Η φάση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις σχετικές χρονικές θέσεις δύο σημάτων. Εάν δύο κύματα είναι σε φάση, είναι σύγχρονα. Εάν είναι εκτός φάσης, υπάρχει κάποια καθυστέρηση μεταξύ τους. Επίσης όσο πιο αυξημένη είναι η επίγεια αγωγιμότητα τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση του δευτερεύοντος πεδίου.

Το δευτερογενές πεδίο που λαμβάνεται στον δέκτη ως προς το πρωτογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να αναλυθεί σε δύο φάσεις. Την "in-phase" και την "out-of-phase" με γωνία 90° ως προς το πρωτογενές πεδίο. Η in-phase συνιστώσα εντοπίζει την ύπαρξη σωμάτων υψηλής αγωγιμότητας στο έδαφος ενώ η out-of-phase συνιστώσα υπολογίζει τη φαινόμενη αγωγιμότητα, η οποία είναι η μέση αγωγιμότητα των στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης.

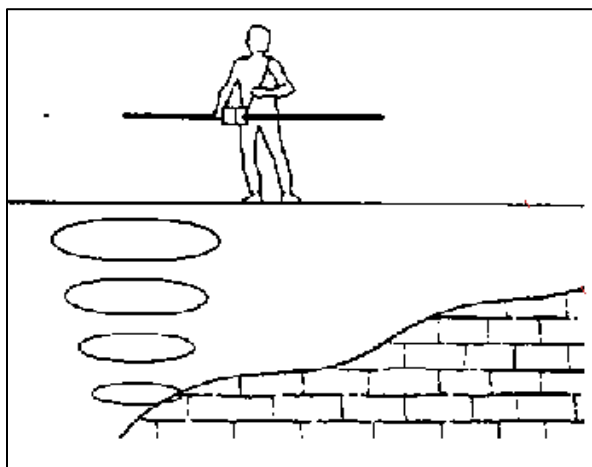


Εικόνα 2.13: Απεικόνιση χάρτη ηλεκτρομαγνητικών in-phase συνιστώσας.



Εικόνα 2.14: Απεικόνιση χάρτη ηλεκτρομαγνητικών out-of-phase συνιστώσας.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι στην διαμόρφωση των οργάνων ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων με παραλλαγές στη συχνότητα, τον αριθμό σπειρών των πηνίων, το διάστημα των σπειρών και τον προσανατολισμό τους. Μια κοινή διαμόρφωση ευρέως χρησιμοποιούμενη στις γεωφυσικές έρευνες είναι η τοποθέτηση μίας σπείρας πομπού και μίας σπείρας δέκτη στα άκρα ενός βραχίονα με την απόσταση πομπού και δέκτη να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η συχνότητα του οργάνου συνήθως μπορεί να καθοριστεί από τον χειριστή του οργάνου, καθώς διαφορετικές συχνότητες έχουν διαφορετική διεισδυτικότητα στο έδαφος. Σύμφωνα όμως με τον McNeil (1996) για κάθε δεδομένο διάστημα σπειρών υπάρχει μία βέλτιστη συχνότητα.



Εικόνα 2.15: Όργανο μέτρησης ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Η ευκολία χρήσης, η ταχύτητα εξαγωγής των δεδομένων, καθώς επίσης και ο μικρός όγκος του εξοπλισμού των οργάνων της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου της δίνουν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι άλλων μεθόδων.

2.4. Μέθοδος Γεωραντάρ

2.4.1. Αρχές Μεθόδου Γεωραντάρ

Η μέθοδος GPR (Ground Probing Radar ή Γεωραντάρ) ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές γεωφυσικές ερευνητικές μεθόδους. Αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι η εκπομπή από μια κεραία υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών ραδιοκυμάτων και η λήψη από ένα δέκτη των ανακλώμενων σημάτων από το υπέδαφος. Η μέθοδος βασίζεται στην ανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, συχνοτήτων από 8 MHz έως 4 GHz, σε ασυνέχειες μέσων, των οποίων η διηλεκτρική σταθερά και αγωγιμότητα μεταβάλλονται.

- Στη γεωλογική χαρτογράφηση και απεικόνιση του υπεδάφους χρησιμοποιούνται συχνότητες <500MHz για να επιτευχθεί βαθύτερη διείσδυση.
- Σε τεχνικά έργα χρησιμοποιούνται συχνότητες >500MHz για να επιτευχθεί καλή ανάλυση.

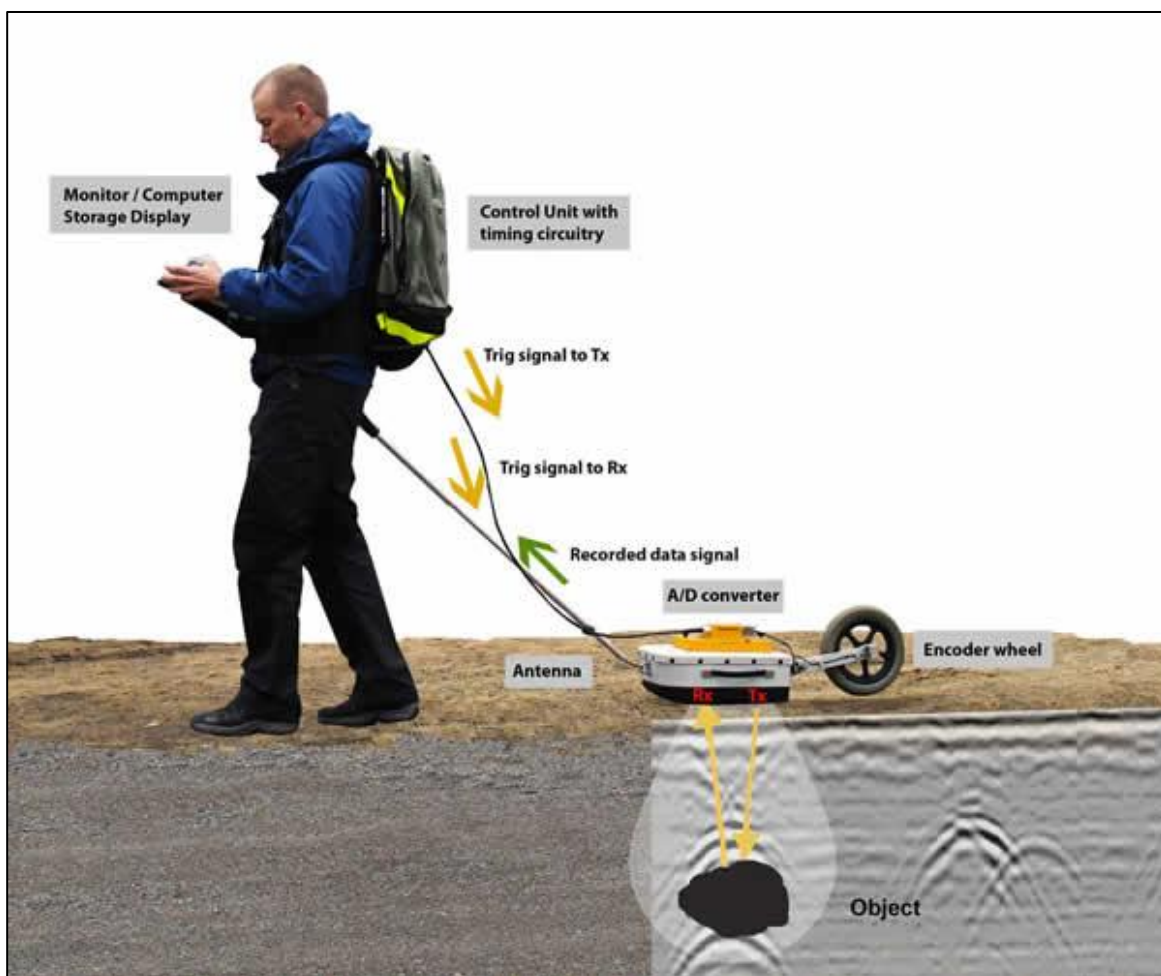
Η διηλεκτρική σταθερά είναι μια ιδιότητα που επηρεάζει τη δυνατότητα ενός υλικού να αποθηκεύει φορτία όταν εφαρμόζεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Η μέθοδος αυτή συνήθως εφαρμόζεται σε περιοχές με σχηματισμούς γενικά υψηλών ειδικών αντιστάσεων.

Ορυκτό	Διηλεκτρική Σταθερά.	Πέτρωμα	Διηλεκτρική Σταθερά
Γαληνίτης	18	Περιδοτίτες	8.6
Σφαλερίτης	7.9 - 69.7	Νορίτες	61
Κορούνδιο	11-13.2	Χαλαζιακοί Πορφύρες	14-49.3
Κασσιτερίτης	23	Διαβάσες	10.5 - 34.5
Αιματίτης	25	Δακίτες	6.8 - 8.2
Ρουτίλιο	31-170	Γρανίτες (ξηροί)	4.8 - 18.9
Φθορίτης	6.2 - 6.8	Γάββροι	8.5 - 40
Απατίτης	7.4 - 11.7	Διορίτες	6
Βαρύτης	7 - 12.2	Σερπεντινίτες	6.6
Οψιδιανός	5.8 - 10.4	Γνεύσιοι	8.5
Θείο (αυτοφυές)	3.6 - 4.7	Ψαμμίτες (υγροί-ξηροί)	4.7 - 12
Ορυκτό άλας	5.6	Συμπαγείς άμμοι (υγρές ως ξηρές)	2.9 - 105
Ανθρακίτης	5.6 - 6.3	Εδάφη (υγρά ως ξηρά)	3.9 - 29.4
Γύψος	5 - 11.5	Βασάλτες	12
Βήρυλος	5.5 - 11.5	Άργιλοι (υγρές ως ξηρές)	7 - 43
Βιοτίτης	4.7 - 9.3	Πετρέλαια	2.07 - .14
Επίδοτο	7.6 - 15.4	Υδωρ (20°C)	80.36
Ορθόκλαστα	3 - 58	Πάγος	3 - 4.3
Πλαγιόκλαστα	5.4 - 7.1		
Χαλαζίας	4.2 - 5		
Ζιρκόνιο	8.6 - 12		

Πίνακας 2.16: Τιμές διηλεκτρικής σταθεράς K σε διάφορα υλικά.

Τα GPR είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες ικανούς να μετρούν το χρόνο του ταξιδιού ενός κύματος σε νανοδευτερόλεπτα (ns) και την ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (ραντάρ) που ανακλάται από τα υπόγεια υλικά. Η ταχύτητα των κυμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη σχετική διηλεκτρική σταθερά, ενώ το βάθος διασκόπησης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του εκπεμπόμενου σήματος και όσο υψηλότερη η συχνότητα τόσο μειώνεται το μέγεθος της ανωμαλίας που είναι δυνατό να εντοπιστεί.

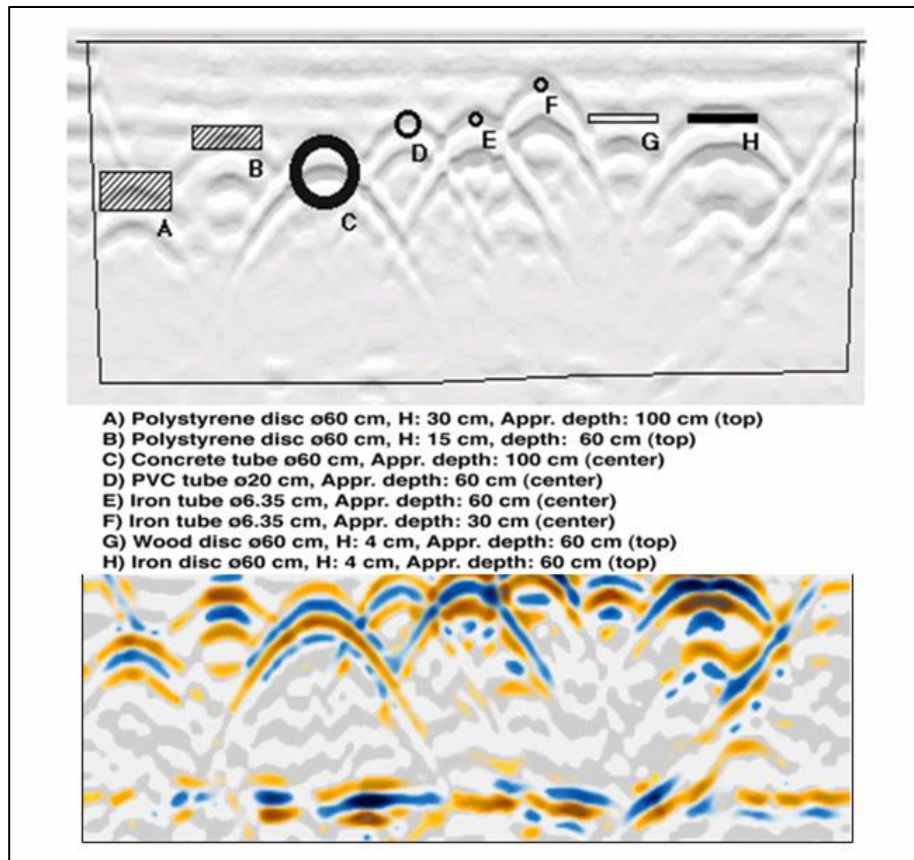
Η μέθοδος επηρεάζεται κυρίως από την αγωγιμότητα των γεωυλικών, η οποία καθορίζει το ρυθμό απόσβεσης του σήματος. Ο κυριότερος παράγοντας που έχει επιπτώσεις στη διηλεκτρική σταθερά είναι η υγρασία (Conyers 2004), καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η παρουσία υγρασίας τόσο αυξάνεται η διηλεκτρική σταθερά. Το αποτέλεσμα, που προκύπτει από την μέτρηση, είναι μια τομή της επιφάνειας μελέτης που ονομάζεται ηχόγραμμα και φανερώνει την δομή των υποστρωμάτων. Με τη μέθοδο του Γεωραντάρ είναι δυνατός ο προσδιορισμός της φύσης και δομής του υπεδάφους και η ανίχνευση ενταφιασμένων αντικειμένων. Το όργανο που χρησιμοποιείται φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.17: Τρόπος λειτουργίας του Γεωραντάρ.

Όταν στο έδαφος υπάρχουν οποιοσδήποτε αλλαγές της διηλεκτρικής σταθεράς, είτε από διεπαφή μεταξύ διαφορετικών υλικών, είτε από παρουσία ασυνεχειών, τα κύματα του γεωραντάρ αλλάζουν ταχύτητα και στο μέρος της ανωμαλίας ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει βαθύτερα. Μερικές φορές τα κύματα του οργάνου δεν ανακλώνται αλλά διαθλώνται ή κάμπτονται ανάλογα με τη φύση του υλικού που διαπερνούν. Το μέγεθος της διαφοράς στη διηλεκτρική σταθερά ανάμεσα σε δύο υλικά καθορίζει την ένταση της ανάκλασης. Ισχυρές ανακλάσεις παράγονται από διεπαφές όπου υπάρχει μεγάλη διαφορά στη διηλεκτρική σταθερά μεταξύ των δύο στρωμάτων, γεγονός όχι και τόσο επιθυμητό στις έρευνες μας, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας ανακλάται με αποτέλεσμα να δυσκολεύει την μετάδοσή σε μεγαλύτερα βάθη. Ιδανικά επιδιώκουμε εδάφη με μέτρια αντίθεση διηλεκτρικής σταθεράς. Τα περισσότερα αρχαιολογικά υλικά είναι χαμηλής έως μέτριας αντίθεσης, και υπάρχει σπάνια πρόβλημα μεγάλης αντίθεσης. Όμως κάποια προβλήματα ίσως

προκύψουν με την παρουσία μεγάλων κομματιών μετάλλου το οποίο ανακλά 100% του σήματος, ή με τον κορεσμό υλικού με νερό, ή εάν υδροφόρος ορίζοντας παρεμβάλλεται στα αρχαιολογικά στρώματα. Το μέταλλο δεν αποτελεί πρόβλημα όταν ο στόχος μας είναι η ανίχνευση αντικειμένων κατασκευασμένων με μεταλλικά κομμάτια.



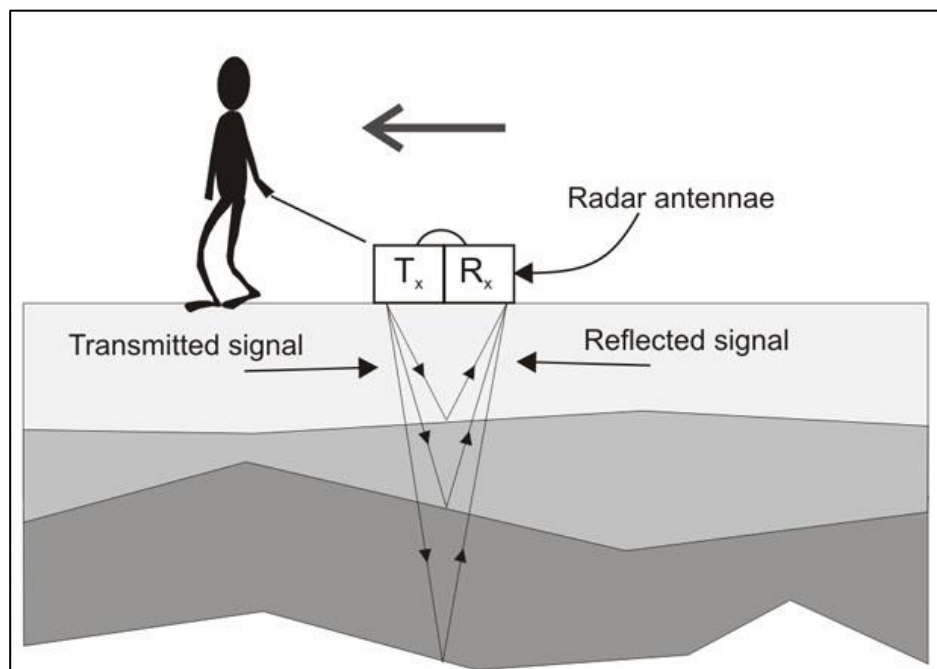
Εικόνα 2.18: Ανακλάσεις από θαμμένους στόχους διαφορετικής γεωμετρίας.

Κύριες εφαρμογές Γεωραντάρ.

- Γεωλογική χαρτογράφηση και απεικόνιση υπεδάφους
- Αρχαιολογική έρευνα
- Μη-παρεμβατικός έλεγχος κατασκευών
- Ανίχνευση διαρροής αποβλήτων
- Ανίχνευση φυσικών κοιλοτήτων και ρωγμών
- Έλεγχος ποιότητας οδοστρωμάτων

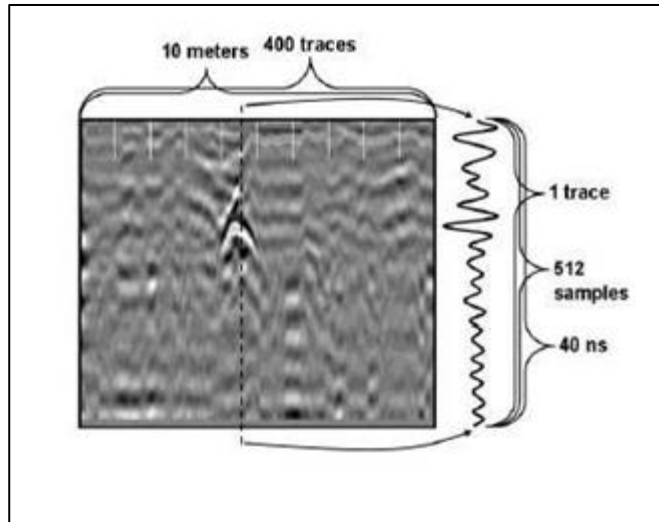
2.4.2. Αρχές Λειτουργίας του Γεωραντάρ

Το GPR αποτελείται από μία γεννήτρια σήματος, έναν πομπό ο οποίος μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα από το κύκλωμα του οργάνου σε ραδιοκύματα που διεισδύουν στο έδαφος, έναν δέκτη και ένα ψηφιακό καταγραφέα με δυνατότητες γραφικής απεικόνισης. Συνήθως ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται μέσα σε θωρακισμένο κουτί ώστε τα κύματα να κατευθύνονται προς το έδαφος. Η κεραία εκπομπής παράγει παλμικά ραδιοκύματα που διαδίδονται στο υπέδαφος. Το σήμα διαδίδεται στο υπέδαφος και όταν συναντά στοιχεία με διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους ανακλάται και επιστρέφει στον δέκτη ο οποίος το καταγράφει.



Εικόνα 2.19: Τρόπος ανίχνευσης του Γεωραντάρ σε σχηματισμούς με διαφορά διηλεκτρικής σταθεράς.

Ο χρόνος που απαιτείται για τα ραδιοκύματα να ξεκινήσουν από τον πομπό, να ανακλαστούν και να επιστρέψουν στο δέκτη καταγράφεται σε nanoseconds, ενώ οι ανακλάσεις καταγράφονται ασταμάτητα, δίνοντας πάρα πολλές μετρήσεις για κάθε οριζόντια θέση στο έδαφος.



Εικόνα 2.20: Σχέση μεταξύ των nanoseconds, των δειγμάτων, και των ιχνών.

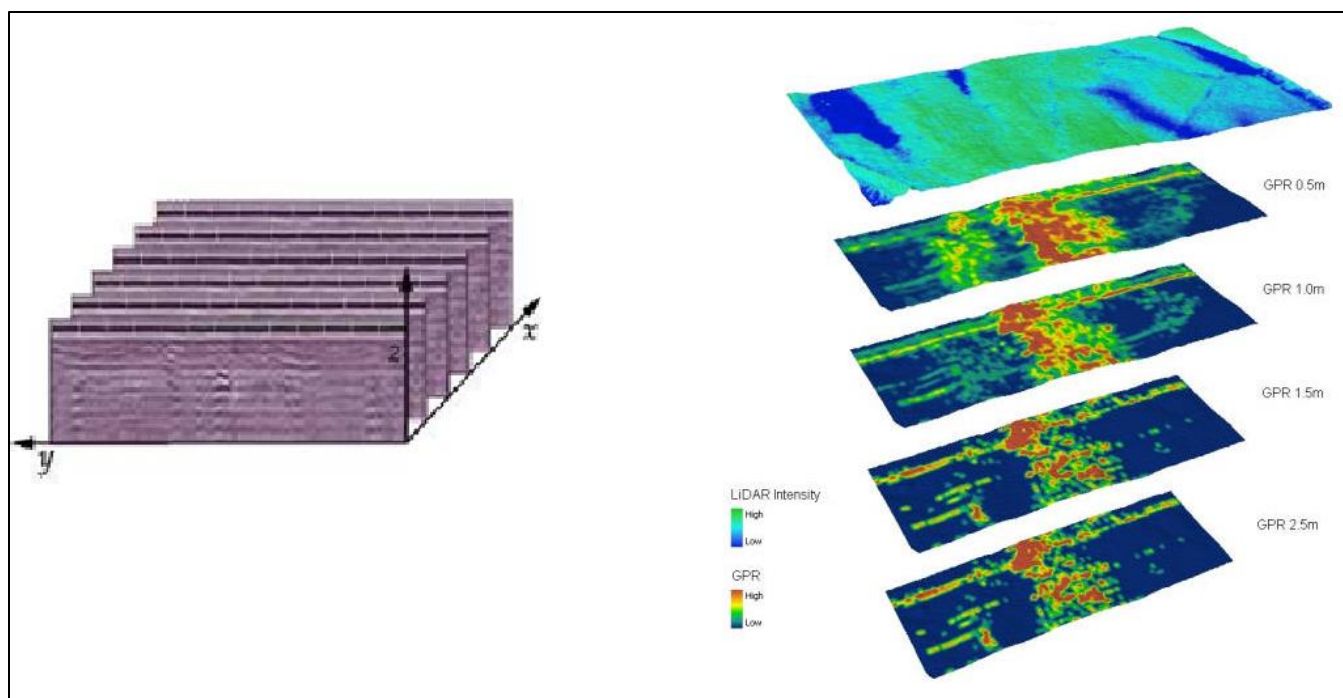
Από την παρακάτω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε το βάθος της μέτρησης.

$$\bullet \quad v = \frac{s}{t}$$

όπου:

- ν είναι η ταχύτητα του σήματος
- s είναι η απόσταση ή στην προκειμένη το βάθος
- t είναι ο χρόνος "ταξιδιού" του σήματος

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι παρουσίασης των δεδομένων από τις μετρήσεις. Αρχικά οι πληροφορίες παρουσιάζονταν σε ραδογράμματα ανάκλασης ή "radagrams". Ραδόγραμμα ανάκλασης είναι αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.15 παραπάνω. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε σειρά από "radagrams" με σκοπό την τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων ή η δημιουργία οριζόντιων χαρτών με αναπτύξη σε βάθος, των "slicemaps".



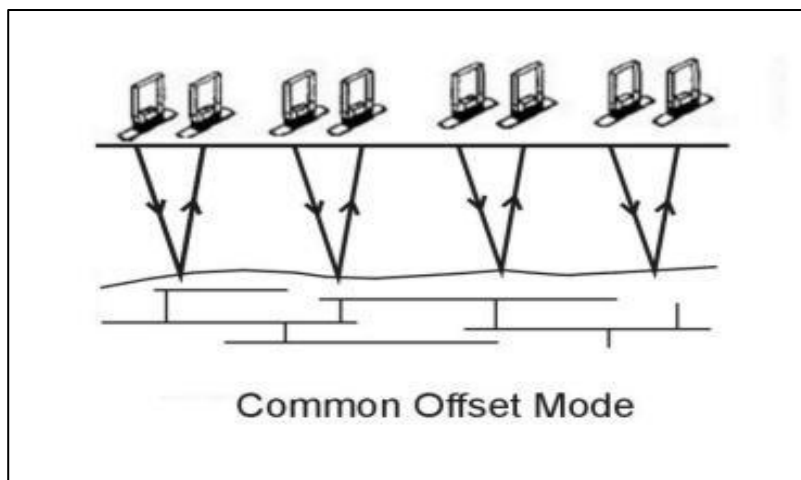
Εικόνα 2.21: Σειρά σχεδιαγραμμάτων αντανάκλασης για τρισδιάστατη χαρτογράφηση.

2.4.3. Διαμόρφωση Γεωραντάρ

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι διαμόρφωσης του ραντάρ. Αντίθετα με τα πρώιμα συστήματα τα πιο σύγχρονα κατασκευάζονται ώστε να μπορούν να κινηθούν μαζί η κεραία, η πηγή ισχύος και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής από το ίδιο άτομο. Επίσης υπάρχουν δύο συστήματα Γεωραντάρ ανάλογα με τη χρήση της κεραίας τους:

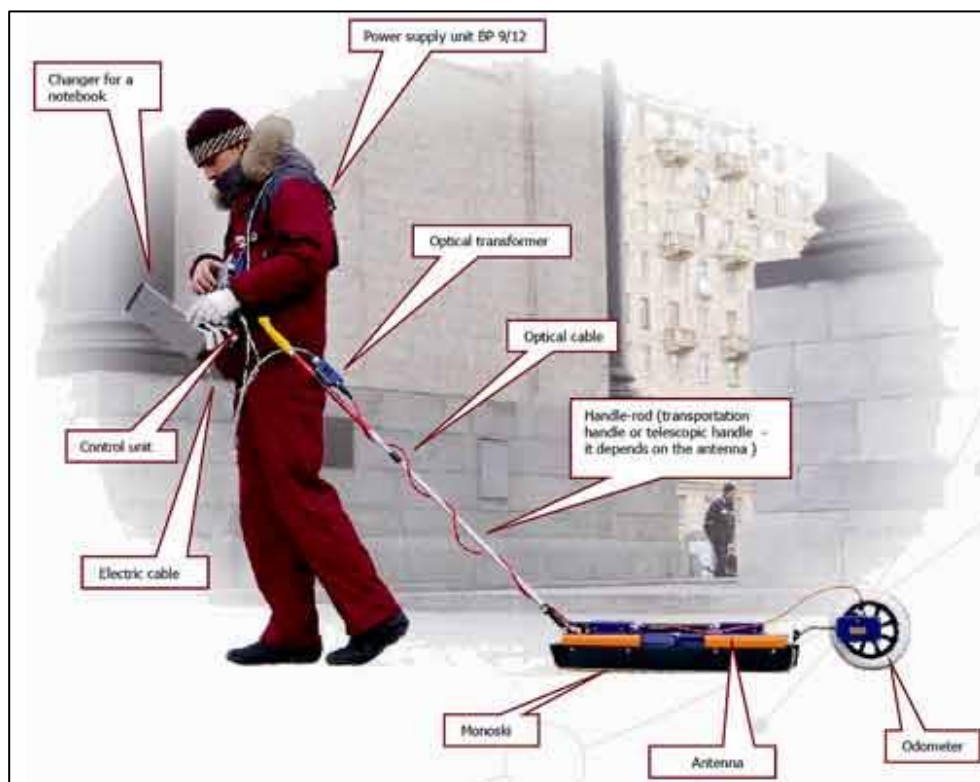
- Τα Μονοστατικά συστήματα που χρησιμοποιούν μία μόνο κεραία ως πομπό και δέκτη ταυτόχρονα
- Τα Διστατικά συστήματα που χρησιμοποιούν ξεχωριστές κεραίες για πομπό και δέκτη

Μία τυπική διάταξη λειτουργίας του οργάνου είναι η common-offset, στην οποία πομπός και δέκτης βρίσκονται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους καθώς κινούνται κατά μήκος μίας γραμμής διασκόπησης.



Εικόνα 2.22: Διάταξη common-offset.

Στα περισσότερα συστήματα εφαρμόζεται στο όργανο και μία ερευνητική ρόδα η οποία καταγράφει την απόσταση που διανύεται κατά τις μετρήσεις στο ύπαιθρο και βοηθάει τον γεωφυσικό να διατηρεί σταθερό ρυθμό. Η χρησιμότητά τους είναι πολύ μεγάλη ειδικά όταν στο έδαφος έρευνας υπάρχουν συχνά εμπόδια που δυσχεραίνουν τη μετακίνηση της κεραίας.



Εικόνα 2.23: Διαμόρφωση του Γεωραντάρ.

2.4.4. Βάθος και Ανάλυση Γεωραντάρ

Το βάθος και η ανάλυση του Γεωραντάρ εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας των κεραιών και από τις συνθήκες του εδάφους. Για βαθύτερη διείσδυση απαιτούνται κεραιές χαμηλότερων συχνοτήτων, οι οποίες όμως, παρέχουν χαμηλότερη ανάλυση αποτελεσμάτων. Η διεισδυτικότητα του σήματος δηλαδή είναι αντιστρόφως ανάλογη της ανάλυσης.

Μία κεραία πολύ χαμηλής συχνότητας μπορεί για παράδειγμα να διαπεράσει αρκετά μέτρα σε βάθος (>50m), αλλά ταυτόχρονα έχει μεγάλη μείωση στη διακριτική ικανότητα ανίχνευσης. Αντιθέτως μία κεραία υψηλής συχνότητας μπορεί να παρέχει μεγάλη ανάλυση στις μετρήσεις, αλλά το βάθος διασκόπησης περιορίζεται σε λίγα μόλις μέτρα. Στην αρχαιολογική έρευνα το σύνηθες εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται ποικίλει από 400-500 MHz για βάθη διασκόπησης από 0.5 έως 5 μέτρα, αν και μεγάλη σημασία έχει το είδος της αρχαιολογικής μελέτης. Αν για παράδειγμα στόχος μας είναι η ανακάλυψη μικρών αντικειμένων θαμμένων σε μικρό βάθος μεγαλύτερη συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ενώ αν ο στόχος μας είναι τοιχία αρχαίων οικισμών σε μεγαλύτερο βάθος, χαμηλότερες συχνότητες ίσως είναι καταλληλότερες.

Η ευαισθησία του οργάνου στο βάθος επίσης σχετίζεται άμεσα με την αγωγιμότητα όπως αναφέρθηκε και στις παραπάνω παραγράφους. Η ενέργεια που στέλνει το όργανο σε αγώγιμο έδαφος χάνει πολύ μεγάλο μέρος της σε αυτό, έχοντας ως αποτέλεσμα να συνεχίζει πολύ λιγότερη ενέργεια σε μεγαλύτερο βάθος. Για το λόγο αυτό αγώγιμα εδάφη με υψηλά ποσοστά υγρασίας σε μικρό βάθος θεωρούνται γενικά ακατάλληλα για τη μέθοδο του Γεωραντάρ.

Οι μετρήσεις γίνονται σε γραμμές διασκόπησης παράλληλες μεταξύ τους. Η απόσταση ανάμεσα στην κάθε γραμμή ανάλογα με το είδος της έρευνα κυμαίνεται από 0.25m για πολύ λεπτομερείς έρευνες, έως 1.00m. Μια βέλτιστη απόσταση που χρησιμοποιείται ευρέως σε αρχαιολογικές έρευνες είναι 0.50m. Η πυκνότητα των δειγμάτων κατά μήκος των γραμμών διασκόπησης εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία κινούμε το όργανο η οποία ελέγχεται από τη ρόδα ερευνών.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ

3.1. Oaro Urupa, Νέα Ζηλανδία (Ηλεκτρομαγνητική, GPR)

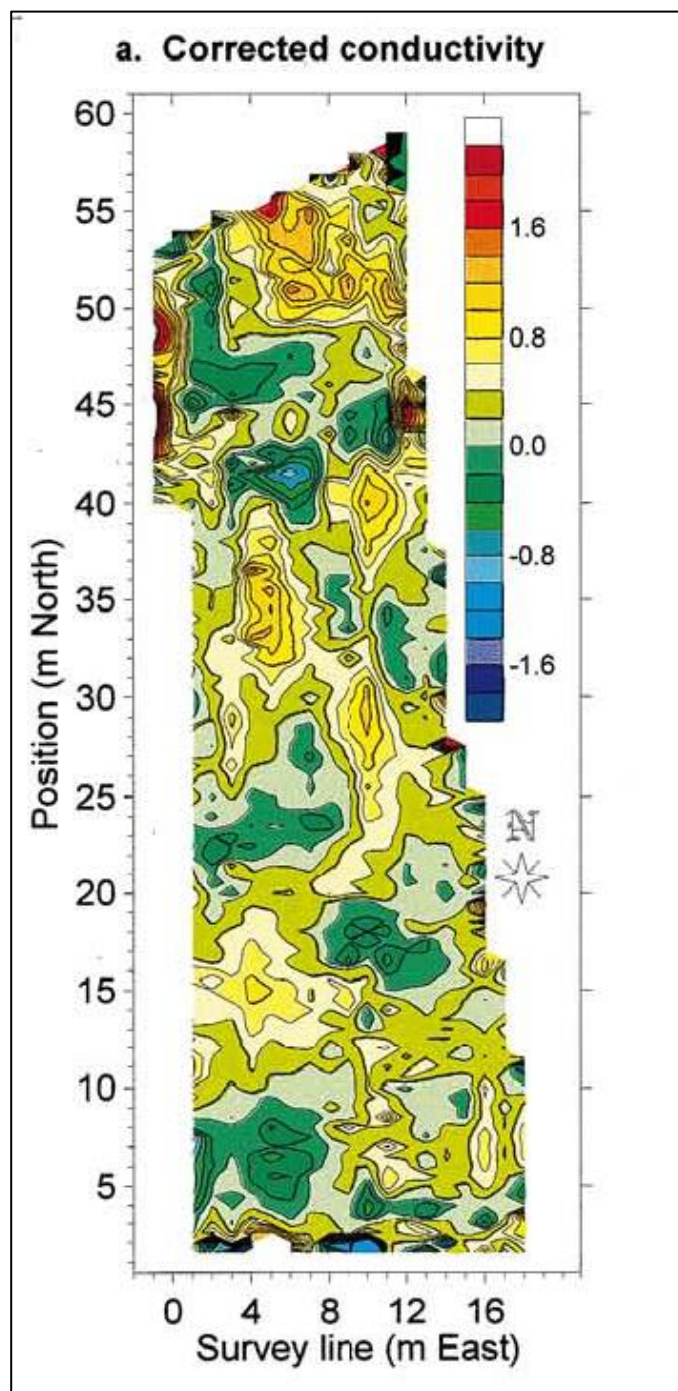
Σήμερα στη Νέα Ζηλανδία υπάρχουν περίπου 150 χώροι ταφής ιθαγενών Maori. Το Oaro Urupa αποτελεί έναν από αυτούς τους χώρους από τον 19ο αιώνα. Η ραγδαία αστική ανάπτυξη είχε ως αποτέλεσμα την εγκατάλειψη των τάφων που με το πέρασμα του χρόνου χάθηκαν και επίσης επέφερε δυσκολίες στην μετέπειτα προσπάθεια ανακάλυψής τους. Οι μη καταστροφικές όμως γεωφυσικές μέθοδοι, χρησιμοποιήθηκαν για τη χαρτογράφηση των νεκροταφείων. Η γεωφυσική απόκριση των τάφων εξαρτήθηκε κυρίως από τη γεωλογία του περιβάλλοντα χώρου, τον βαθμό διαταραχής του και τις φυσικές ιδιότητες των υλικών των τάφων σε σύγκριση με το έδαφος. Παραδοσιακά οι Maori κατασκεύαζαν τους τάφους με προσανατολισμό προς την ανατολή και αντίθετα με τις σημερινές ταφές που γίνονται σε φέρετρα, οι παραδοσιακή ταφή τους γινόταν χωρίς φέρετρο. Ο σχεδιασμός λοιπόν των γεωφυσικών ερευνών στήθηκε με φορά βορρά-νότου ώστε να ευνοείται η εύρεση των τάφων με ανατολικό προσανατολισμό.

Το νεκροταφείο Oaro Urupa είχε διαστάσεις 20mX60m και είναι κατασκευασμένο σε ένα ύψωμα 30m πάνω από τον οικισμό των Oaro. Οι εδαφικές κλίσεις είναι πολύ μικρές και μόνο στο βόρειο κομμάτι του νεκροταφείου αναπτύσσονται κάποιες κλίσεις της τάξεως των 10° - 15°. Επιφανειακά το γεωλογικό υλικό είναι πολύ συνεκτική άργιλος, ενώ σε βάθος μεγαλύτερο των δύο μέτρων το υπόβαθρο αποτελείται από συμπαγή ασβεστόλιθο.

Ο συνδυασμός των μεθόδων κατά τη γεωφυσική διερεύνηση υπέδειξε σωστά τις τοποθεσίες γνωστών τάφων, αλλά και αυτές όπου υπήρχαν χαμένοι τάφοι. Η μελέτη απέδειξε πως σε μία γεωφυσική έρευνα είναι σημαντική η χρήση διαφορετικών μεθόδων, έτσι ώστε διαφοροποιήσεις της μίας να συμπληρώνουν τα κενά της άλλης.

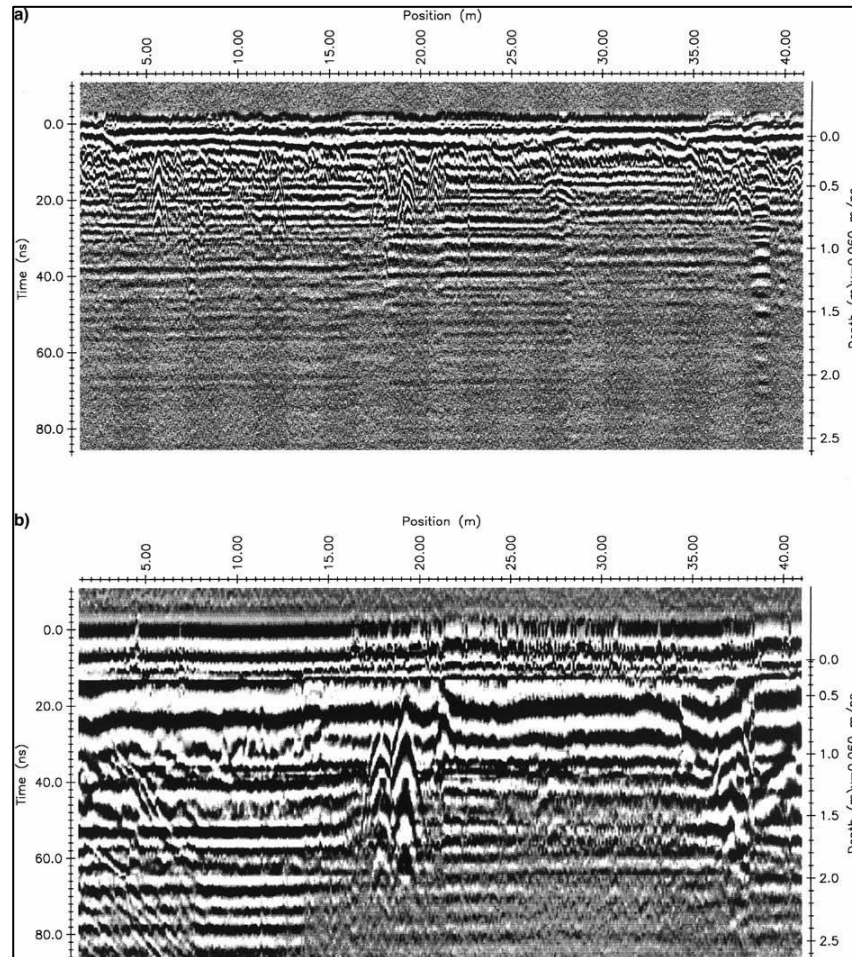
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο σύνολο του χώρου δεν ξεπερνούσε το 1S/M και κατά τις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις ο πομπός βρισκόταν σε σταθερή απόσταση 3.66m από τον δέκτη, ενώ έγινε ανάλυση και στην in-phase και στην out-of-phase

συνιστώσα. Οι μετρήσεις έγιναν ανά 0.50m σε παράλληλες γραμμές με απόσταση 1m μεταξύ τους.



Εικόνα 3.1: Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων στο νεκροταφείο.

Η ανάλυση του γεωραντάρ έγινε σε δύο συχνότητες για διασκόπηση με καλύτερη ανάλυση σε διαφορετικά βάθη. Χρησιμοποιήθηκε έτσι ένα γεωραντάρ με συχνότητα 450MHz και ένα με συχνότητα 200MHz. Η διάταξη λειτουργίας του οργάνου ήταν η common-offset με απόσταση πομπού δέκτη στα 25cm για τις μετρήσεις σε 450MHz, και 60cm για τις μετρήσεις σε 200MHz.



Εικόνα 3.2: α) Προφίλ δειγμάτων γεωραντάρ με συχνότητα 200MHz για μία από τις τομές. β) Προφίλ δειγμάτων γεωραντάρ με συχνότητα 450MHz για την ίδια τομή. Είναι φανερό πως τα αποτελέσματα μεγαλύτερης συχνότητας ενώ έχουν μικρότερη διεισδυτικότητα παρουσιάζουν υψηλότερη ανάλυση σε σχέση με αυτά χαμηλής συχνότητας.

3.2. Interamna Lirenas, Lazio (GPR, Μαγνητική)

Πρόκειται για ρωμαϊκό οικισμό έκτασης 25 εκταρίων, που ιδρύθηκε το 312 π.Χ στην περιοχή Interamna Lirenas, η οποία βρίσκεται στην κοιλάδα Λίρι στο νότιο Λάτσιο, 50km νότια της Ρώμης. Η αρχαία αυτή πόλη εγκαταλείφθηκε πριν από περίπου 1500 χρόνια κατά τον 5ο αιώνα μ.Χ. και σταδιακά καταστράφηκε, ενώ τα κτίρια της αποτέλεσαν πηγή δομικών υλικών των γύρω περιοχών. Με την πάροδο των αιώνων τα ερείπιά της χάθηκαν τελείως και σήμερα η περιοχή αυτή αποτελείται από εκτάσεις γεωργικής γης.



Εικόνα 3.3: Περιοχή Ερευνών στην Interamna Lirenas.

Το 2010 ξεκίνησε μία προσπάθεια χαρτογράφησης της περιοχής από ερευνητές του πανεπιστημίου του Cambridge, με σκοπό την κατανόηση του τι συνέβη στις πόλεις που ιδρύθηκαν από τους Ρωμαίους ως αποικίες στην Ιταλία, μετά την καταστροφή της. Δεδομένου πως μία ανασκαφή ενός τόσο μεγάλου χώρου θα είναι αδύνατη χωρίς πρώτα να αναγνωριστούν κάποια βασικά στοιχεία, η ερευνητική ομάδα αποφάσισε να προβεί σε συστηματική γεωφυσική ανάλυση συνδυάζοντας τις μεθόδους του GPR και της Μαγνητικής.



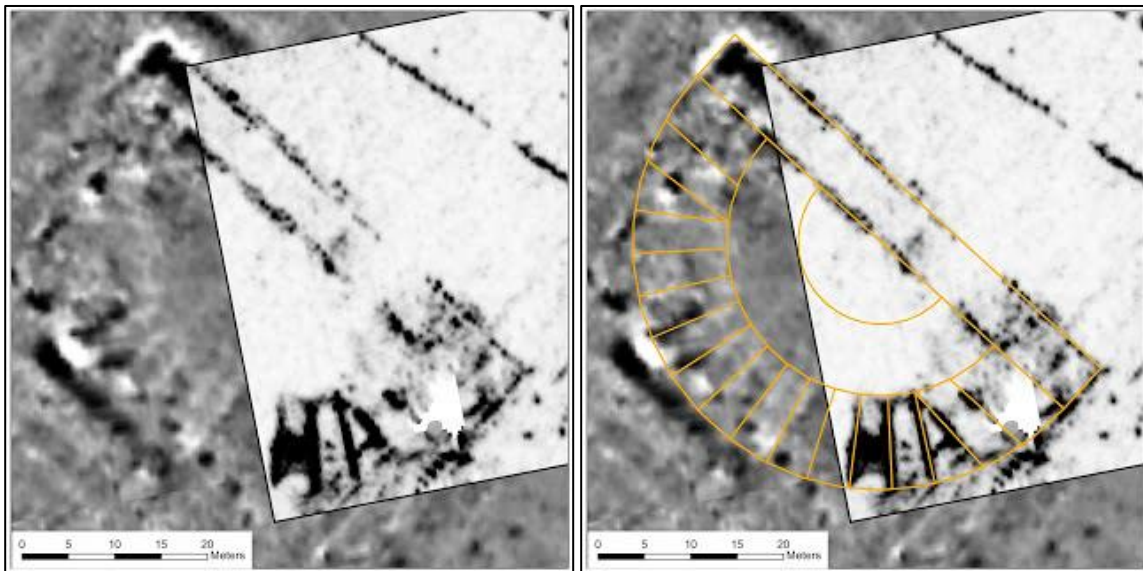
Εικόνα 3.4: Η πλήρης διάταξη της θαμμένης πόλης

Το βάθος των ερευνών ήταν σχετικά μικρό (< 6m), αλλά η έκταση της περιοχής μελέτης δημιούργησε σημαντικές δυσκολίες κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Η γεωφυσική έρευνα επέτρεψε στους ερευνητές να προσδιορίσουν τη συνολική διάταξη της πόλης, πολλά μεμονωμένα κτίρια ένα αρχαίο θέατρο καθώς επίσης και μια μεγάλη ανοικτή περιοχή στο κέντρο του οικισμού που αποτελούσε την αγορά του.



Εικόνα 3.5: Αποκάλυψη των δρόμων και του θεάτρου του οικισμού.

Κατά τις αρχικές μαγνητικές μετρήσεις στην περιοχή του αρχαίου θεάτρου, τα στοιχεία δεν ήταν αρκετά για τον οριστικό χαρακτηρισμό της κατασκευής. Η ανάλυση του γεωραντάρ όμως, αποκάλυψε ότι το κτίριο είχε αρκετά τοιχώματα, διατεταγμένα σε ένα ακτινικό σχεδιάγραμμα, δημιουργώντας μια ημικυκλική καθιστική περιοχή. Αυτό απέδειξε ότι επρόκειτο για τα ερείπια ενός ρωμαϊκού θεάτρου. Κρίνοντας από τα χαρακτηριστικά του, πιστεύεται ότι χρονολογείται στο χρονικό διάστημα κοντά στην αλλαγή της πρώτης χιλιετίας.



Εικόνα 3.6: Μαγνητομετρική εικόνα του θεάτρου με επικάλυψη GPR. Το GPR (λευκό τετράγωνο) δίνει την δυνατότητα στους ερευνητές να ξεχωρίσουν λεπτομερώς το σχήμα της κερκίδας και να χαρακτηρίσουν το κτίσμα ως θέατρο.

3.3. San Marcos, Νέο Μεξικό (Ηλεκτρικής Αντίστασης, Μαγνητική)

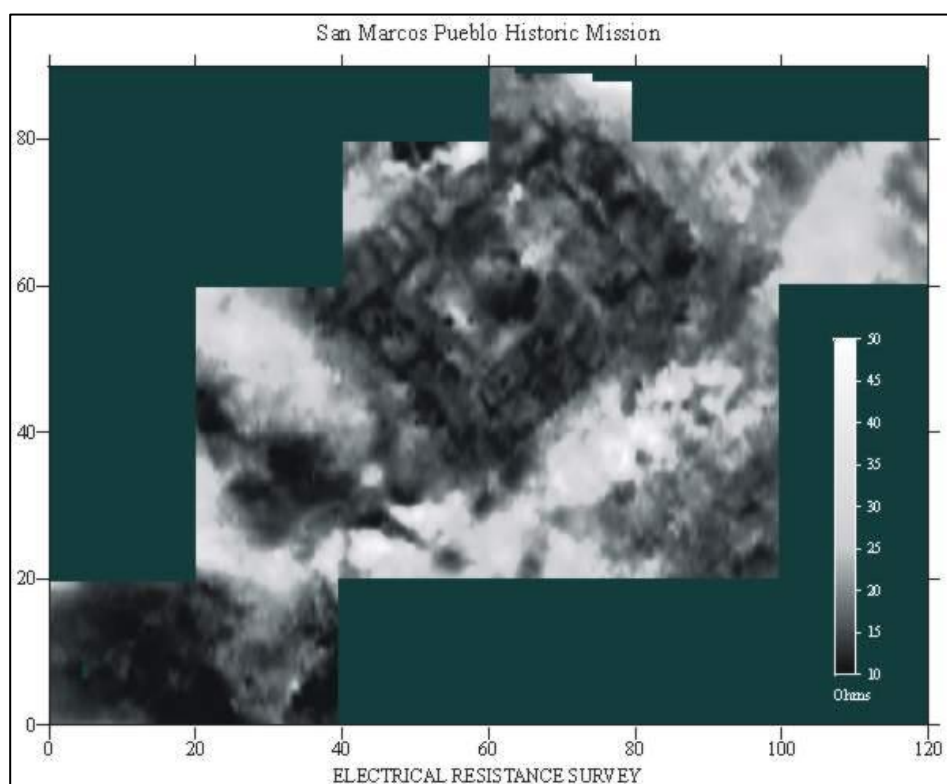
Η Galisteo, στο Νέο Μεξικό είναι περιοχή με χιλιάδες χρόνια ανθρώπινης παρουσίας και τόπος σημαντικής πολιτιστικής επαφής μεταξύ των Αμερικανών ιθαγενών Pueblo και των Ισπανών αποικιοκρατών. Το χωριό San Marcos ήταν ένας από τους μεγαλύτερους οικισμούς κατά τον 15ο και 16ο αιώνα με περίπου 2000 οικήματα. Το 1680 μία επανάσταση των ιθαγενών προκάλεσε το θάνατο των αποικιοκρατών και είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη εγκατάλειψη του οικισμού, αφού ποτέ δεν ανακαταλήφθηκε από τους Ισπανούς.

Το 1999 ξεκίνησαν ανασκαφές στην περιοχή και εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι της γεωφυσικής. Η μέθοδος του γεωραντάρ, της μαγνητικής και της ηλεκτρικής αντίστασης προκειμένου να κατανοήσουν καλύτερα τη διάταξη των οικημάτων.

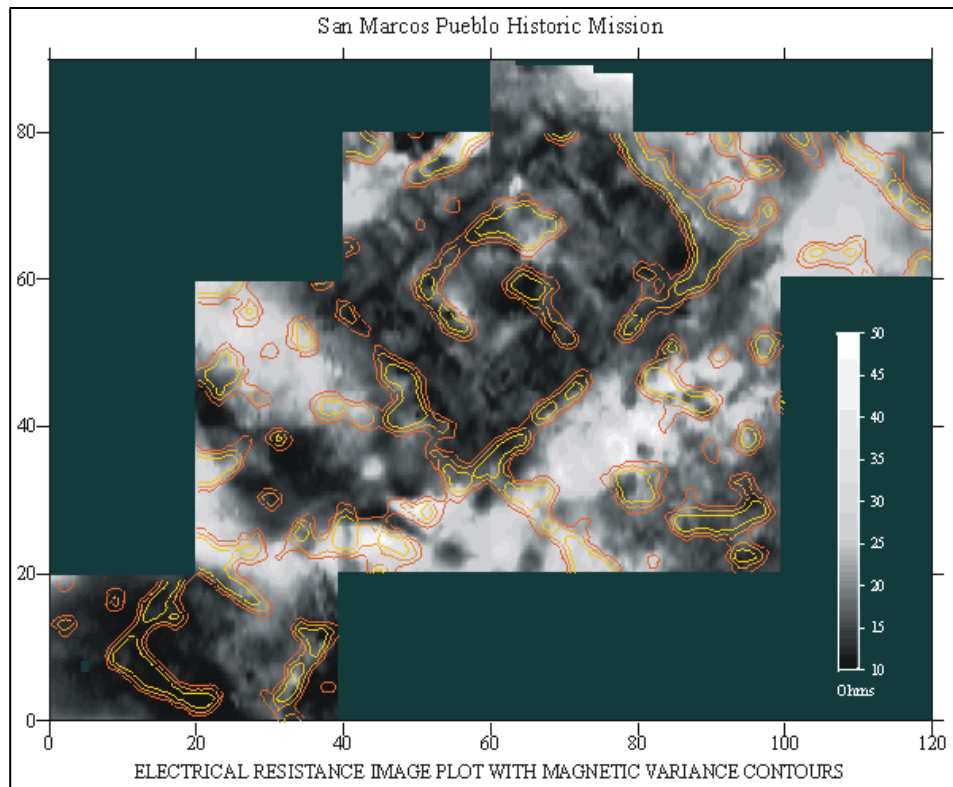


Εικόνα 3.7: Περιοχή Ερευνών στο San Marcos.

Ενώ η μέθοδος του γεωραντάρ δεν αποκάλυψε στοιχεία ικανά για περαιτέρω αξιολόγηση, οι μέθοδοι ηλεκτρικής αντίστασης και των μαγνητικών δεδομένων έδειξαν σαφή χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικής στο υπέδαφος. Ο συνδυασμός δε των δύο μεθόδων λειτούργησε θετικά, στο να ολοκληρωθούν τα στοιχεία της έρευνας, καθώς η κάθε μέθοδος καθόρισε χαρακτηριστικά που δεν ήταν εμφανή στην άλλη. Οι τοίχοι της εποχής οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από πυλό εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερη αντίσταση, ενώ τα θεμέλια από πέτρα εμφάνισαν μαγνητικές ανωμαλίες.



Εικόνα 3.8: Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης.



Εικόνα 3.9: Συνδυασμός μεθόδων ηλεκτρικής αντίστασης και μαγνητομετρίας όπου φαίνονται τα λίθινα θεμέλια των τοιχίων.

3.4. Mahram Bilqis, Υεμένη (GPR, Μαγνητική)

Ο ναός Mahram Bilqis επίσης γνωστός ως Ναός Awam, αποτελεί το μεγαλύτερο προ-ισλαμικό ναό στην Υεμένη, αν όχι στον κόσμο. Κατασκευασμένος από τον αρχαίο αραβικό λαό των Σαβαίων περίπου τον 7ο αιώνα π.Χ., ήταν ένας ιερός τόπος αφιερωμένος στο Θεό της σελήνης Almaqah, όπως αποκαλύφθηκε από τις επιγραφές που κοσμούν το τεράστιο τείχος του.

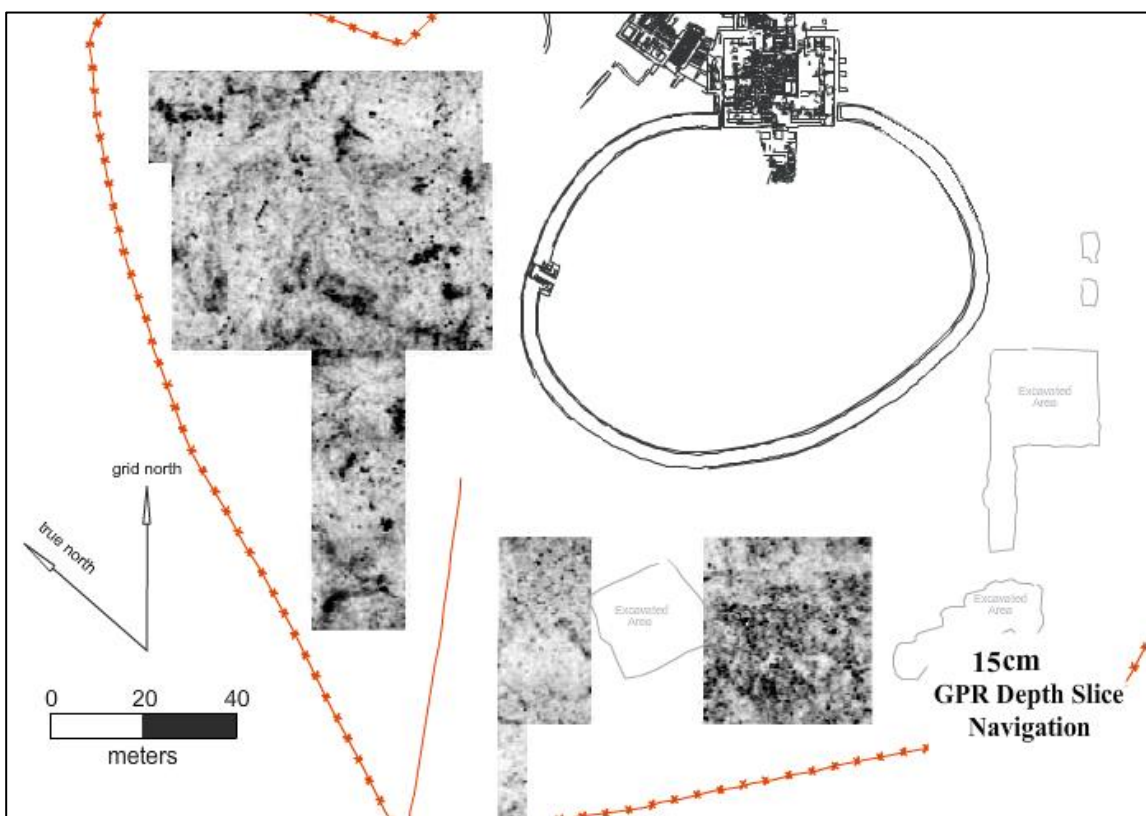


Εικόνα 3.10: Ο ναός του Mahram Bilqis στην Υεμένη.

Η γεωφυσική έρευνα που ξεκίνησε το 2006 γύρω από το χώρο του ναού, αποτελείται από μετρήσεις με γεωραντάρ και με μαγνητόμετρο. Τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα ελήφθησαν στη δυτική και νότια πλευρά του ναού, όπου απεικονίζεται ένα σύμπλεγμα δρόμων και κτιριακών δομών με προσανατολισμό παρόμοιο με αυτόν

της δυτικής πύλης του ναού. Παρά τις δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή της έρευνας και οι δύο μέθοδοι υπήρξαν απόλυτα επιτυχείς στον στόχο τους.

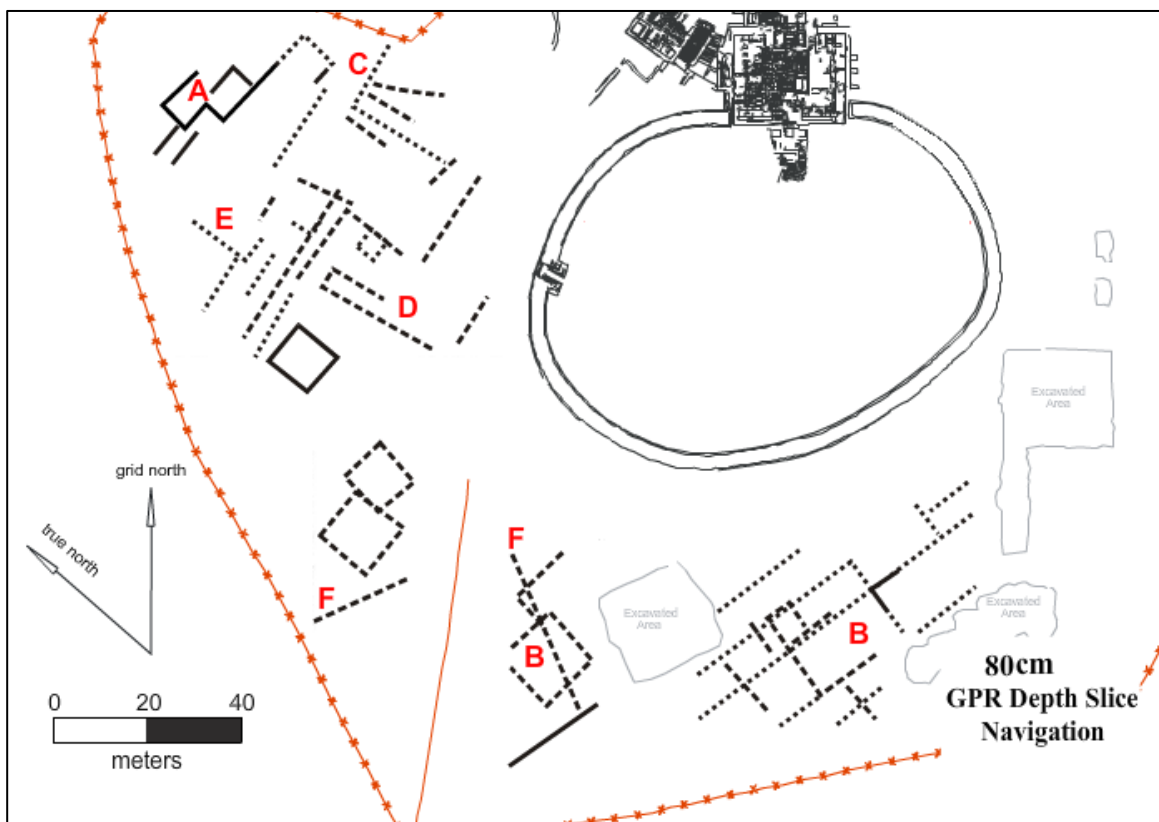
Η διαφοροποίηση του σήματος GPR στην περιοχή της μελέτης ήταν πολύ μικρή, υποδεικνύοντας πως τα θαμμένα αρχαιολογικά υλικά έχουν περιορισμένη αντίθεση με τα γύρω εδάφη. Τούβλα λάσπης και ασβεστολιθικές δομές είναι οι πιθανές πηγές αυτού του σήματος. Μετά από σειρά μετρήσεων δημιουργήθηκαν οριζόντιοι χάρτες (slicemaps) από βάθος 10cm έως 100cm ανά 5cm. Στους χάρτες σε βάθος μεγαλύτερο από 50cm ο θόρυβος του σήματος γίνεται όλο και πιο εμφανής μειώνοντας την ανάλυση των μετρήσεων.



Εικόνα 3.11: Οριζόντιος χάρτης GPR σε βάθος 15cm.

Μετά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τη συμπλήρωση τους από τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων, συντάχθηκε χάρτης με την ερμηνεία των δεδομένων από τη περιοχή της μελέτης, στην οποία διακρίνονται ευθύγραμμα στοιχεία που αποτελούν απομεινάρια αρχαίων δρόμων, οικημάτων, τοιχίων, και τάφων. Η

επιτυχία της γεωφυσικής έρευνας του Mahram Bilqis μπορεί να αποδοθεί στην σωστή εξέλιξη της μεθοδολογίας η οποία εφαρμόζεται τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Λόγω των δυσχερών χαρακτηριστικών του υποβάθρου, κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί υψηλής ανάλυσης μελέτη με πολύ υψηλή πυκνότητα του δειγματοληψίας.



Εικόνα 3.12: Ερμηνεία αποτελεσμάτων της γεωφυσικής μελέτης.

3.5. Αφροδισιάδα, Τουρκία (Ηλεκτρικής Αντίστασης)

Η Αφροδισιάδα βρίσκεται ανατολικά της Κω και ήταν μικρή πόλη στην Καρία της Μικράς Ασίας. Η τοποθεσία ήταν αφιερωμένη στην θεά Αφροδίτη και χτίστηκε από τους Έλληνες τον 3ο π.Χ. αιώνα. Ήταν γνωστή για τα μάρμαρά της και τη Σχολή γλυπτικής ενώ ο ναός της Αφροδίτης ο οποίος ονομάστηκε "Τετράπυλον" υπολογίζεται ότι χτίστηκε τον 1ο μ.Χ αιώνα. Το μάρμαρο που χρησιμοποιούσαν τα διάφορα τοπικά εργαστήρια της Αφροδισιάδας προέρχεται από μια περιοχή μόλις 2km βορειοανατολικά της πόλης, γεγονός που πρόσφερε σε αυτά μεγάλες ποσότητες πρώτης ύλης σε πολύ χαμηλό κόστος. Κατά τους πρώτους αιώνες μ.Χ. η πόλη γνώρισε σημαντική ανάπτυξη, ενώ τον 5ο μ.Χ. αιώνα ο ναός της Αφροδίτης σε χριστιανικό ναό. Στα τέλη του 6ου μ.Χ. αιώνα και μετά από συνεχείς επιδρομές η πόλη παρήκμασε. Επέζησε με δυσκολία έως τον 14ο μ.Χ. αιώνα, όταν και εγκαταλείφθηκε οριστικά.



Εικόνα 3.13: Αρχαιολογικά ευρήματα Αφροδισιάδας μετά τις πρώτες συστηματικές ανασκαφές τη δεκαετία του 1960.

Τις αρχές της δεκαετίας του 1940 η επιστημονική κοινότητα άρχισε να διακρίνει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τη σημασία των έργων της Αφροδισιάδας. Συστηματικές ανασκαφές όμως ξεκίνησαν στη δεκαετία του 1960. Το 1991 ξεκίνησε ένα νέο πρόγραμμα μελετών με στόχο την ανακάλυψη νέων μνημείων, γλυπτών και άλλων ευρημάτων. Γεωφυσική έρευνα με χρήση της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης ξεκίνησε το 1995 και ολοκληρώθηκε το 1998. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε σε έκταση 200.000m².

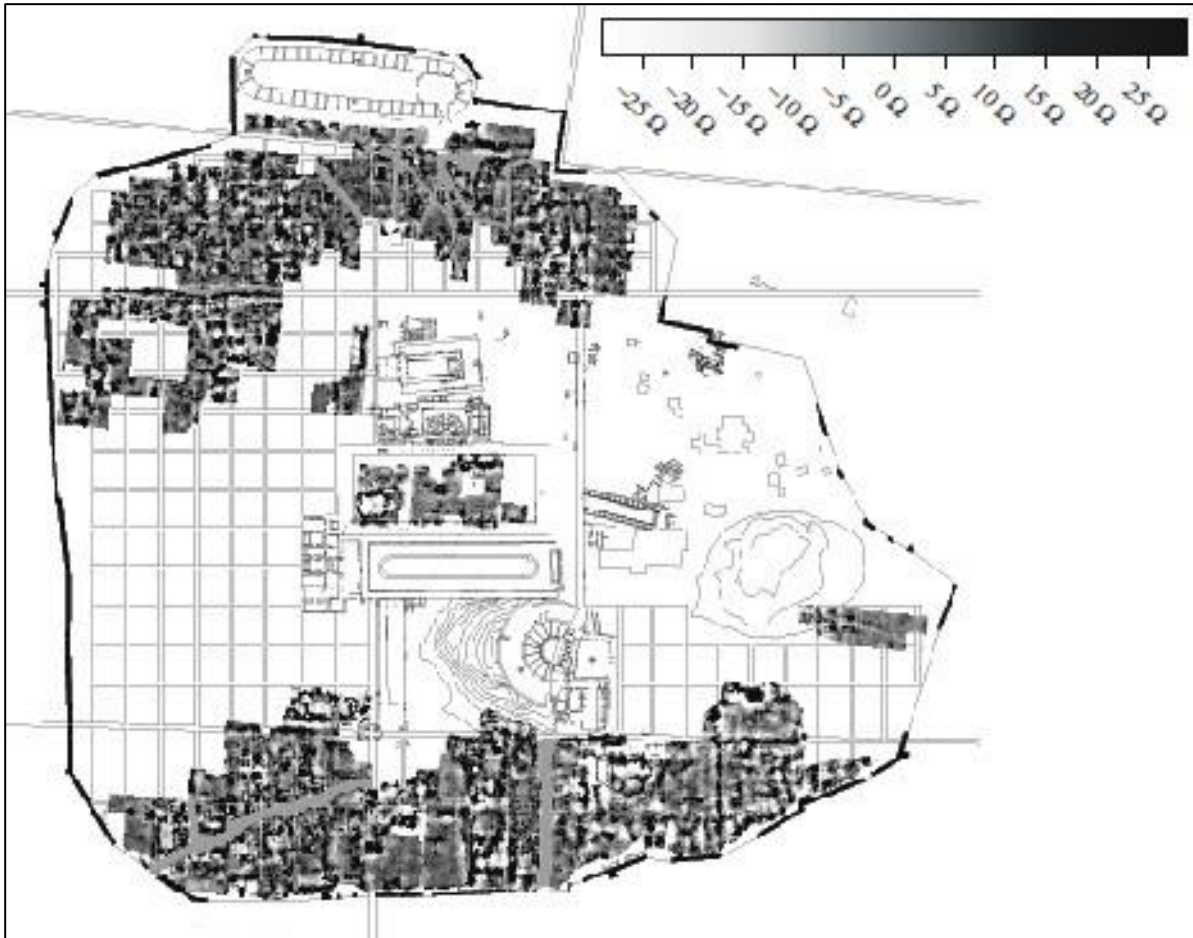


Εικόνα 3.14: Γεωφυσικές έρευνες στην Αφροδισιάδα το 1995.

Τα αποτελέσματα της έρευνας σε ηλεκτρική αντίσταση έχουν ήδη αλλάξει την πρότερη αντίληψη για την αρχαία Αφροδισιάδα, αποδεικνύοντας πως ρυμοτομικά η πόλη απλώνεται σε ένα σχέδιο με μορφή πλέγματος. Στις κατοικημένες περιοχές, το κάθε οικοδομικό τετράγωνο έχει διαστάσεις 35,5m πλάτος, και 39,0m μήκος.

Οι δημόσιες πλατείες και τα δημόσια κτίρια του κέντρου της πόλης χτίστηκαν σύμφωνα με τον ίδιο σχεδιασμό και τον ίδιο προσανατολισμό. Μόνο ο Ναός της Αφροδίτης και το θέατρο έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς, καθώς ενδέχεται να

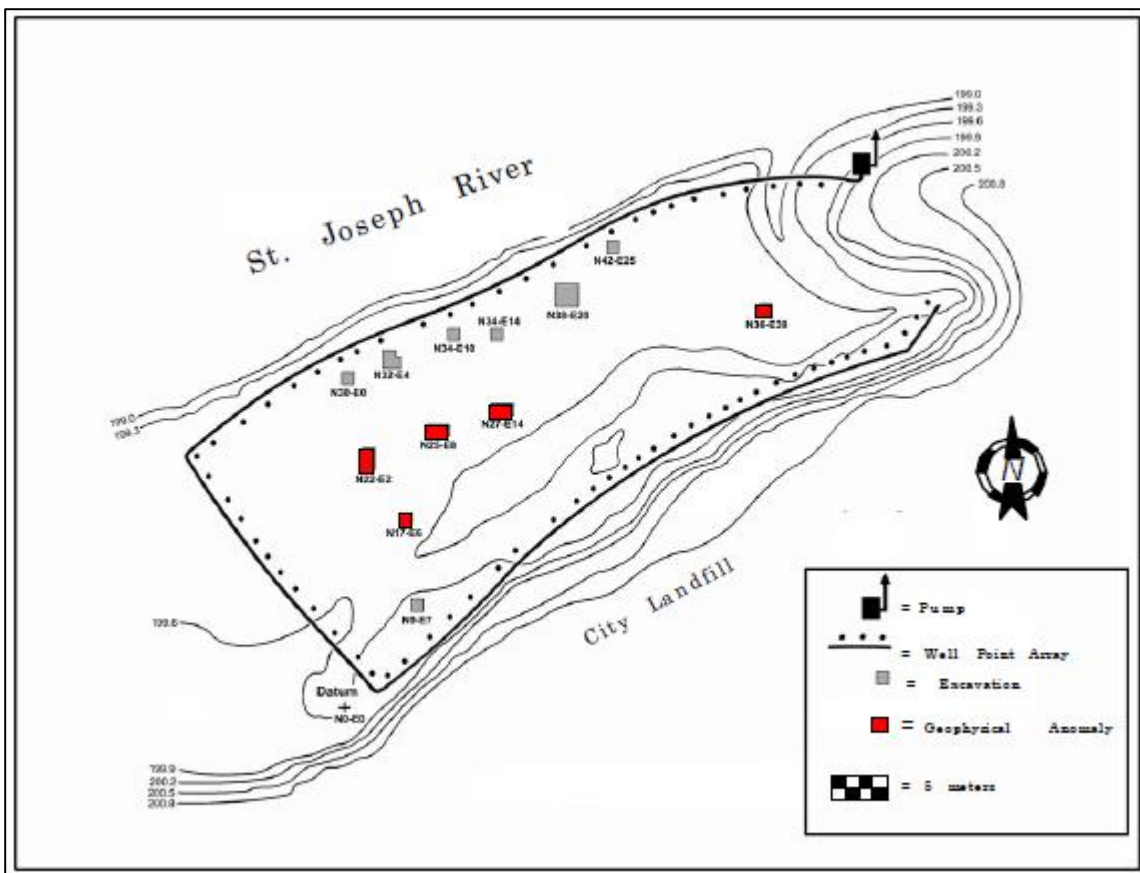
προηγούνται του δικτύου της πόλης. Η ακριβής ημερομηνία του νέου ρυμοτομικού σχεδίου είναι αβέβαιη, αλλά μάλλον πραγματοποιήθηκε κατά τον δεύτερο ή πρώτο αιώνα π.Χ..



Εικόνα 3.15: Αποτέλεσμα μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης σε περιοχή 200.000m^2 . Φαίνεται ξεκάθαρα ο ομοιόμορφος ρυμοτομικός σχεδιασμός της πόλης.

3.6. Fort St. Joseph, Michigan (Ηλεκτρομαγνητική, Ηλεκτρικής Αντίστασης, GPR, Μαγνητική)

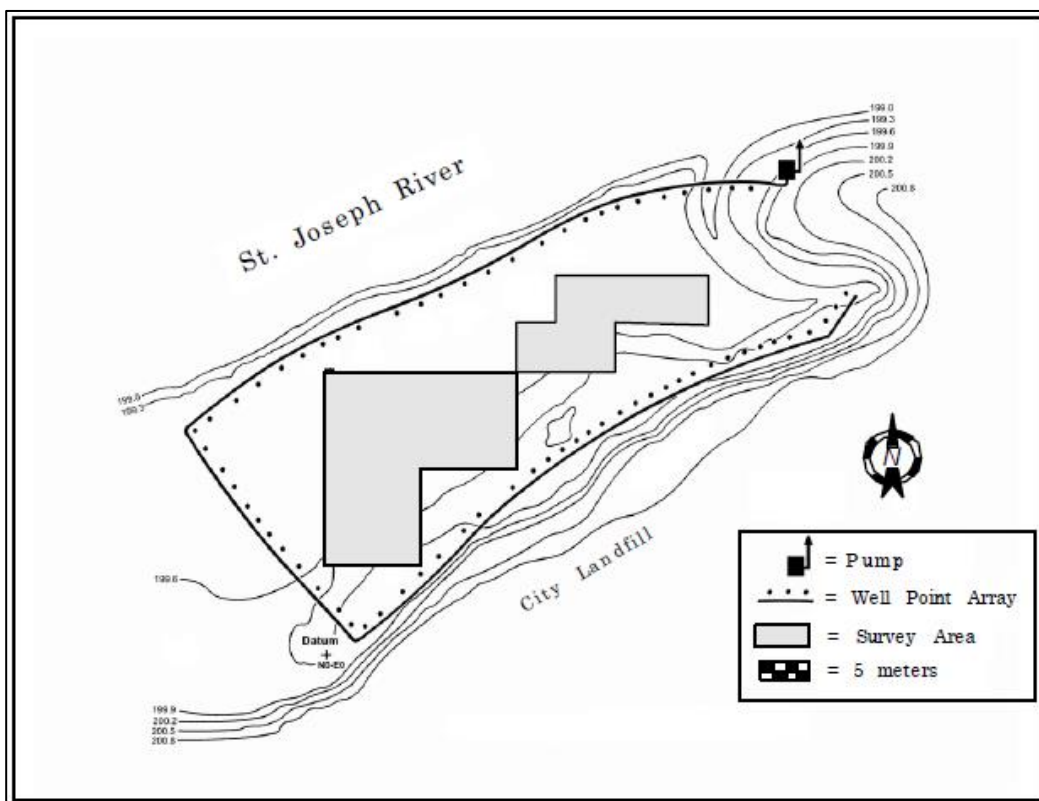
Το Φρούριο St. Joseph στο νοτιοδυτικό Μίσιγκαν, κατασκευάστηκε κατά τον 17ο αιώνα (1691) από τους Γάλλους. Το φρούριο εκτός από στρατόπεδο αποτελούσε και χώρο θρησκευτικών και εμπορικών δραστηριοτήτων. Το 18ο αιώνα το φρούριο βρισκόταν ανάμεσα στα 5 μεγαλύτερα κέντρα εμπορικών συναλλαγών των Γάλλων αποικιοκρατών και αποτελούσε σύνορο της Γαλλικής κυριαρχίας στην περιοχή. Το 1761 ο Βρετανικός στρατός κατέλαβε το φρούριο και το 1763 ομάδες Αμερικανών ιθαγενών επιτέθηκαν στο St. Joseph, απομακρύνοντας και τον στρατό των Βρετανών. Εκτός από κάποιες οικογένειες εμπόρων που έμειναν για λίγα χρόνια, το φρούριο ουσιαστικά εγκαταλείφθηκε οριστικά.



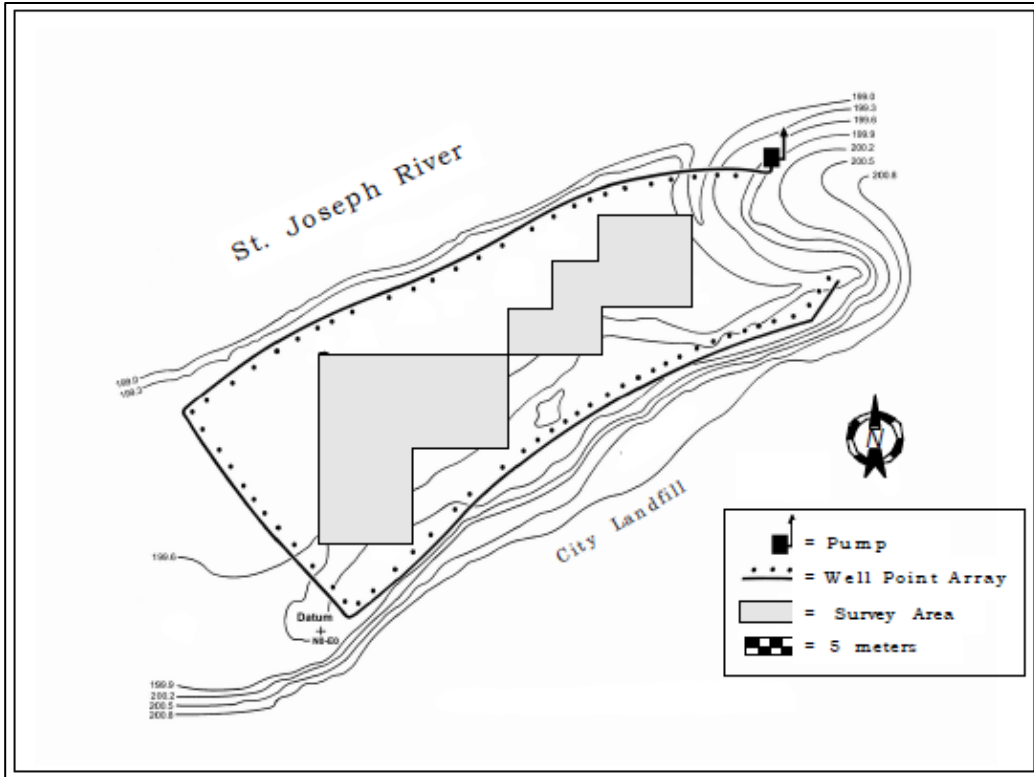
Εικόνα 3.16: Διάταξη του ξύλινου φράχτη που οχύρωνε το φρούριο.

Σύμφωνα με ιστορικά δεδομένα το φρούριο περιείχε ξύλινα σπίτια, μία λίθινη φυλακή, στρατώνες, όπως επίσης και ένα ξύλινο φράχτη από πασσάλους. Από άποψη γεωλογίας, η περιοχή της έρευνας καλύπτεται επιφανειακά από στρώμα (πάχους 25-30cm) αργιλικών επιχώσεων ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας έχει υψηλή στάθμη κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου, με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονη παρουσία ύδατος στις μετρήσεις. Το υπόβαθρο μέχρι βάθος 8m αποτελείται από άμμο.

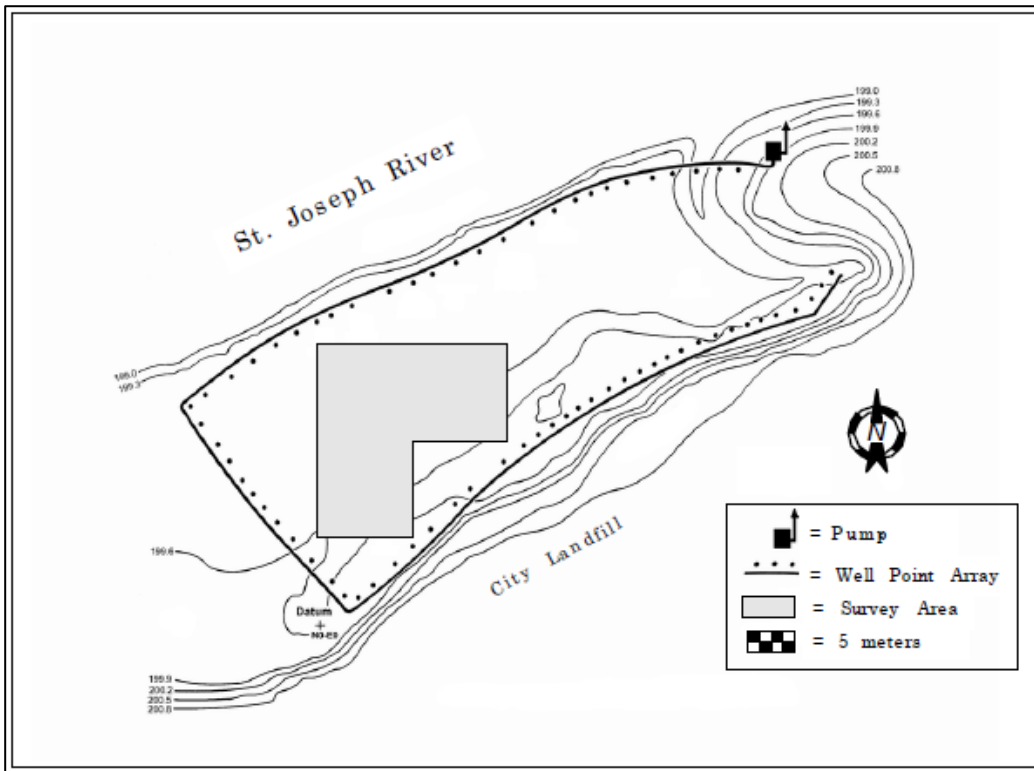
Τέσσερις τύποι γεωφυσικών μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν. Γεωραντάρ, ηλεκτρομαγνητικές, ηλεκτρικής αντίστασης και μαγνητικής επιδεκτικότητας. Οι μετρήσεις του GPS έγιναν σε έκταση 430m² σε συχνότητα 500MHz. Οι μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου έγιναν σε έκταση 475m² με βήμα 0.5m, κατά μήκος τομών που είχαν απόσταση 0.5m. Η μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης εφαρμόσθηκε σε περιοχή έκτασης 300m² σε γραμμές με απόσταση 0.5m μεταξύ τους.



Εικόνα 3.17: Περιοχή μετρήσεων με το Γεωραντάρ.

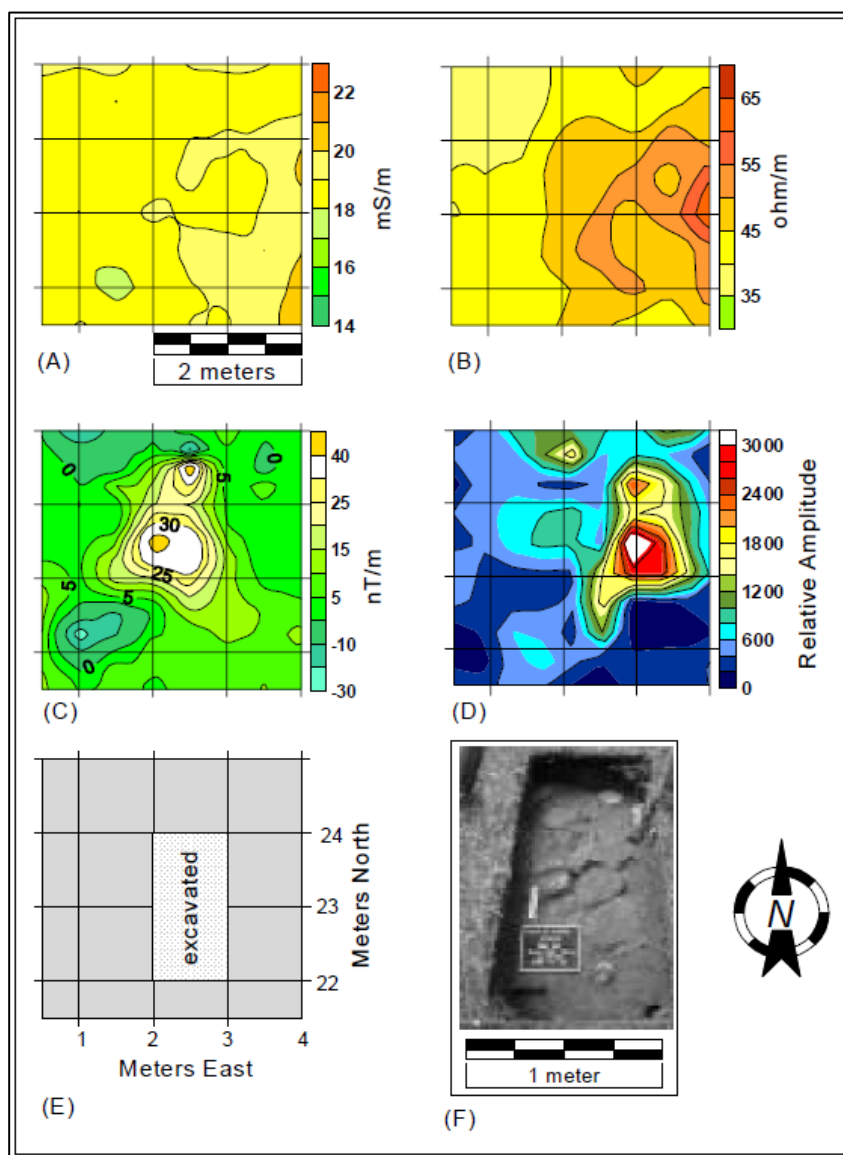


Εικόνα 3.18: Περιοχή μετρήσεων με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο.



Εικόνα 3.19: Περιοχή μετρήσεων με τη μέθοδο ηλεκτρικής αντίστασης.

Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων έδειξαν περιοχές με ανωμαλίες οι οποίες καταγράφηκαν από όλες σχεδόν τις μεθόδους. Δυσκολίες γενικά συναντήθηκαν στη διεξαγωγή συμπερασμάτων από την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και τη μέθοδο ηλεκτρικής αντίστασης, λόγω της έντονης παρουσίας νερού. Στη συνέχεια έγιναν 5 μικρής κλίμακας ανασκαφές στα σημεία των ανωμαλιών, σύμφωνα με τις οποίες αποδείχθηκε αδιαμφισβήτητα η ύπαρξη αρχαιολογικού υλικού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μεθόδων σε μία από τις ανωμαλίες που ανιχνεύθηκαν, όπως επίσης και η δοκιμαστική ανασκαφή που έγινε.



Εικόνα 3.20: Α) Χάρτης αποτελεσμάτων ηλεκτρομαγνητικών, Β) Χάρτης αποτελεσμάτων ηλεκτρικής αντίστασης, C) Αποτελέσματα μαγνητικών, D) Οριζόντιος χάρτης γεωραντάρ, E) Σημείο δοκιμαστικής ανασκαφής, F) Φωτογραφία της δοκιμαστικής ανασκαφής.

3.7. Θέατρο Αρχαίας Άσκλης, Βοιωτία (Ηλεκτρικής Αντίστασης)

Η Άσκλης ήταν αρχαία πόλη της Βοιωτίας χτισμένη στις νότιες πλαγιές του Ελικώνα, στην κοιλάδα των μουσών. Στους ιστορικούς χρόνους η πόλη ανήκε στο κράτος των Θεσπιών. Η Άσκλης ήταν η πατρίδα του μεγάλου επικού ποιητή της αρχαιότητας Ησίοδου.

Μέρος του θεάτρου της αρχαίας Άσκλης είχε αποκαλυφθεί κατά τις ανασκαφές που έγιναν το 1890. Ωστόσο το αρχαίο θέατρο δεν έχει ακόμη ερευνηθεί συστηματικά. Από το κοίλον του το μόνο σημείο που έχει ερευνηθεί είναι το σκηνικό οικοδόμημα. Οι αρχαιολόγοι που έκαναν τις ανασκαφές ισχυρίζονται ότι δεν υπήρχαν εδώλια και οι θεατές κάθονταν στο χώμα. Η Σκηνή είχε διαστάσεις 22 X 7 μέτρα και το Προσκήνιο 22 X 3 μέτρα. Στο κάτω μέρος του Προσκήνιου υπήρχαν 12 δωρικοί ημικίονες, καθένας ενωμένος με ορθογώνιο στύλο. Η σκηνική αυτή κατασκευή χρονολογείται από το τέλος του 3ου π.Χ. αιώνα ή την αρχή του 2ου π.Χ.



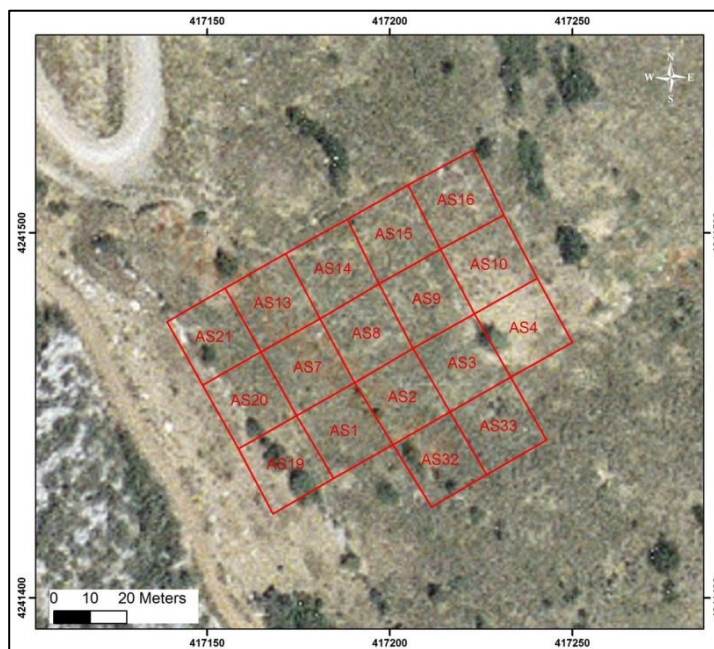
Εικόνα 3.21: Αρχαιολογικά ευρήματα στο θέατρο της αρχαίας Άσκλης μετά τις πρώτες συστηματικές ανασκαφές το 1890.

Το Νοέμβριο του 2012 πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες στο θέατρο της αρχαίας Άσκλης. Ο στόχος της γεωφυσικής έρευνας ήταν η ανίχνευση θαμμένων

αρχαιοτήτων και η κατά το δυνατόν χαρτογράφησή τους. Επίσης, η έρευνα στόχευε στη απεικόνιση της δομής του υπεδάφους, μέχρι βάθους περίπου 5 m.

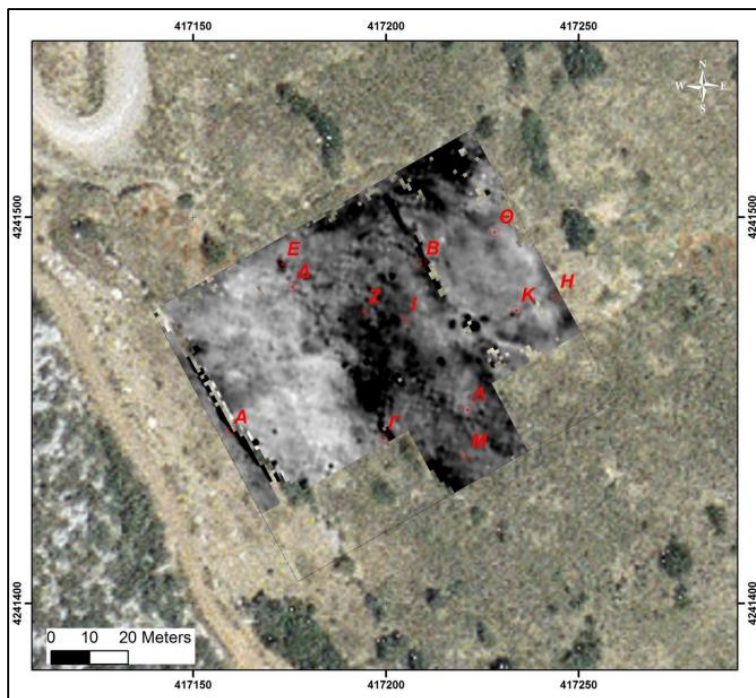
Για την πραγματοποίηση της έρευνας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής χαρτογράφησης και η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η έρευνα κατέγραψε αρκετές διαταραχές των γεωφυσικών πεδίων που προφανώς αντανακλούν την ύπαρξη υπεδάφιων δομών, οι οποίες πιθανά είναι θαμμένα αρχαία αρχιτεκτονικά λείψανα. Η περιοχή που πραγματοποιήθηκε η έρευνα βρίσκεται στο δυτικό άκρο της κοιλάδας των Μουσών, στις παρυφές του Ελικώνα. Η ακρόπολη της αρχαίας Άσκρης βρίσκεται στο ύψωμα βορειοανατολικά της περιοχής των ερευνών.

Κατά τη διεξαγωγή της ηλεκτρικής χαρτογράφησης ο χώρος καταμήθηκε σε μικρά κελιά διαστάσεων 20m x 20m και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κάρναβο με ισοδιάσταση 1m, ο οποίος υλοποιήθηκε στο έδαφος για κάθε κελί χωριστά. Η διαδικασία αυτή διευκόλυνε τη λήψη των μετρήσεων βοηθώντας να αντιμετωπιστούν οι τοπογραφικές ανωμαλίες. Να αποφευχθούν δηλαδή χώροι με πυκνή βλάστηση ή άλλου είδους εμπόδια και να υπάρξει σχετική ευελιξία στην κάλυψη του χώρου. Η απόσταση μεταξύ των κινουμένων ηλεκτροδίων ήταν σταθερή και ίση με 0.5m, ενώ τα σταθερά ηλεκτρόδια ήταν τοποθετημένα σε απόσταση μεγαλύτερη των 15 m από τον εκάστοτε κάρναβο μετρήσεων. Τα σταθερά ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν σε απόσταση περίπου 0.5 m μεταξύ τους.



Εικόνα 3.22: Τα κελιά διαστάσεων 20mX20m στα οποία έγιναν οι μετρήσεις.

Ο χάρτης των αντιστάσεων παρουσίασε πολλές ανωμαλίες υψηλών τιμών πράγμα που έδειξε πως στις αντίστοιχες θέσεις υπάρχουν δομές στο υπέδαφος, οι οποίες έχουν υψηλότερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση από το περιβάλλον στο οποίο φιλοξενούνται. Με δεδομένο ότι τα εδάφη στο χώρο που ερευνήθηκε είναι αργιλικά και παρουσιάζουν γενικά χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση, οι δομές που προκαλούν τις υψηλές ανωμαλίες είναι πιθανά λείψανα της παρελθούσης χρήσης του χώρου.



Εικόνα 3.23: Κατανομή των αντιστάσεων με σημειωμένες τις ανωμαλίες.

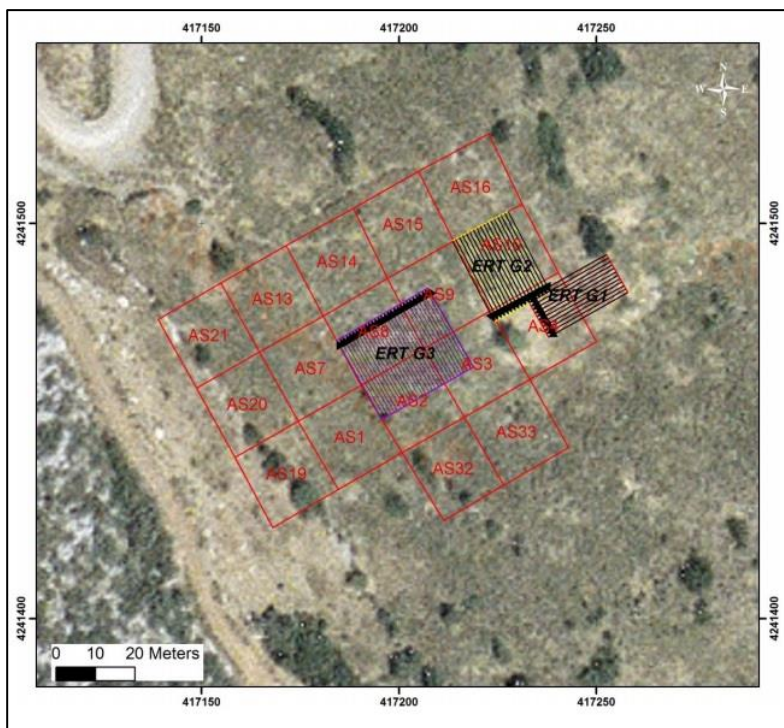
Παρουσιάζονται γενικά, σχετικά μεγάλου μήκους γραμμικές θετικές ανωμαλίες με διεύθυνση B-N, οι οποίες σημειώνονται με τα γράμματα A, B και Γ. Οι ανωμαλίες αυτές στην κατανομή της υπεδάφιας ηλεκτρικής αντίστασης συνοδεύονται από ορατούς λιθωρούς. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και οι υπεδάφιας αντιστατικές δομές που προκαλούν τις θετικές αυτές ανωμαλίες είναι αντίστοιχης φύσης. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και για τις ευθυγραμμίσεις των υψηλών τιμών αντίστασης που χαρακτηρίζονται από τα γράμματα Δ, Ε, Ζ, Η και Θ, όμως, στις θέσεις που αυτές παρατηρούνται δεν υπάρχουν επιφανειακές λιθωστοιβάξεις.

Επιμήκεις ανωμαλίες, κάθετες σε αυτές που σχολιάστηκαν παραπάνω, παρατηρούνται στις θέσεις που σημειώνονται με τα γράμματα Ι και Κ. Όσον αφορά μάλιστα την ανωμαλία Κ στο νότιο ανατολικό άκρο της περιοχής που μελετήθηκε, αυτή

φαίνεται να συναρθρώνεται με την Η στο σχηματισμό ορθογώνιου γεωμετρικού σχήματος που θυμίζει κάτοψη θεμελιώσεων. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ανωμαλίες αυτές οφείλονται πιθανά σε υπεδάφια λείψανα αρχαίας κατασκευής. Παρουσιάζονται επίσης πολλές ανωμαλίες υψηλών αντιστάσεων αλλά ακαθόριστου σχήματος, πράγμα που δυσκολεύει την ερμηνεία τους.

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες πραγματοποιήθηκαν στις θέσεις που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, όπου προηγούμενα είχαν ερευνηθεί με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Πρωταρχικός σκοπός της διεξαγωγής αυτού του τμήματος της έρευνας ήταν η διαλεύκανση της φύσης συγκεκριμένων στόχων, που είχαν ήδη εντοπιστεί με την εφαρμογή της ηλεκτρικής χαρτογράφησης. Επίσης, οι τομογραφίες στόχευαν στη μελέτη της γεωλογικής δομής σε βάθη μεγαλύτερα αυτών που αναμένεται να βρίσκονται θαμμένες οι αρχαιότητες.

Για να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ποιότητα στις μετρήσεις επιλέχθηκε η διάταξη μέτρησης διπόλου-διπόλου, η οποία χαρακτηρίζεται από καλή σχέση σήματος προς θόρυβο και επαρκή διακριτική ικανότητα τόσο στις πλευρικές όσο και στις κατακόρυφες μεταβολές της υπεδάφιας αντίστασης.

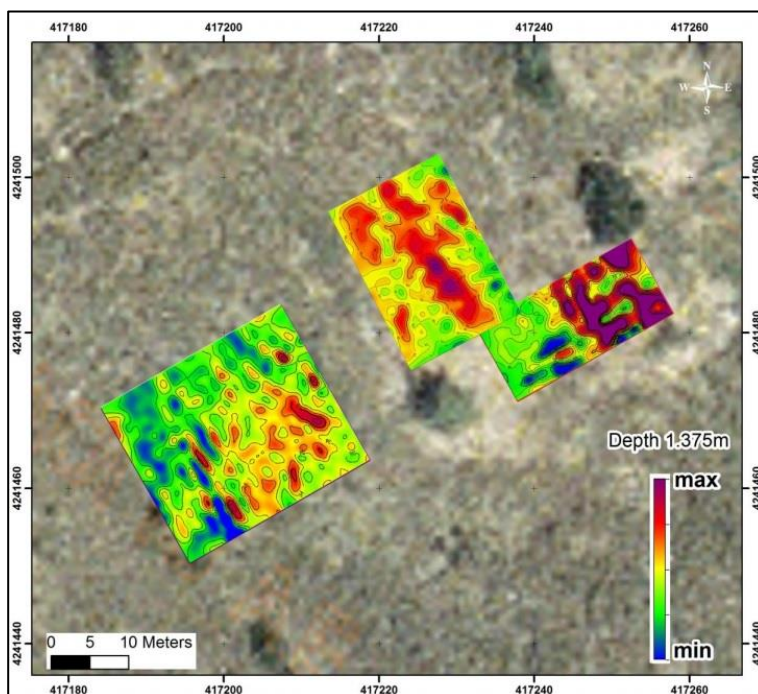


Εικόνα 3.24: Οι γεωηλεκτρικές τομές σε συσχέτιση με τα κελιά της ηλεκτρικής έρευνας.

Βάσει του αρχικού σχεδιασμού επιλέχθηκε απόσταση ηλεκτροδίων ίση με 1.0m, απόσταση ηλεκτροδίου ρεύματος – δίπολου μέτρησης δυναμικού (nxa) με μέγιστο n ίσο με 10 που αντιστοιχεί σε μέγιστο βάθος έρευνας περίπου 4 με 5m και διπλασιασμός και τριπλασιασμός του δίπολου δυναμικού (nx2a, , nx3a). Με βάση τον εξοπλισμό ηλεκτρικής τομογραφίας που χρησιμοποιήθηκε, υπήρχε η δυνατότητα πολυπλεξίας μεταξύ 48 ανεξάρτητων καναλιών κατά την υλοποίηση μιας σταθερής γραμμής μέτρησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 24 κανάλια με απόσταση μεταξύ τους ίση με 1.0 m. Το μήκος των τομογραφιών ήταν 23.0m.

Από τις κατανομές που παρουσιάζονται, αυτές που αναφέρονται στα επιφανειακότερα στρώματα μέχρι του βάθους του 1m, παρουσιάζουν πολλές μικρού μήκους κύματος θετικές ανωμαλίες. Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω της ισχυρή ανομοιογένειας του εδαφικού καλύμματος το οποίο περιέχει κυλιόλιθους διαφόρων μεγεθών.

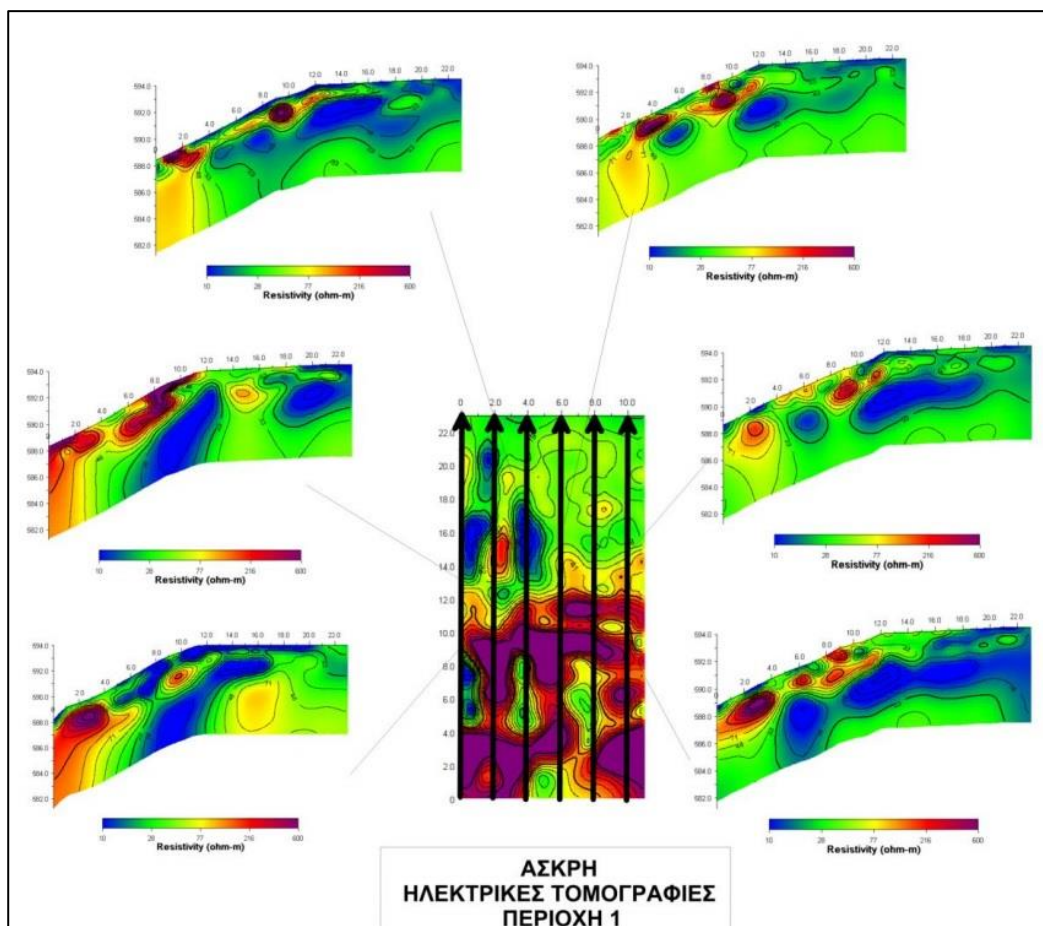
Όμως από το βάθος του 1 m και κάτω εμφανίζονται γραμμικές ανωμαλίες υψηλών, οι οποίες συνδυάζονται και σχηματίζουν καλά ορισμένα ορθογώνια γεωμετρικά σχήματα. Η μορφή των σχημάτων αυτών παραπέμπει σε κάτοψη αρχιτεκτονικών στοιχείων και ακριβώς αυτό το γεγονός μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ανωμαλίες αντανακλούν την ύπαρξη τέτοιων στο υπέδαφος.



Εικόνα 3.25: Κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης και στις τρεις θέσεις που ερευνήθηκαν για βάθος 1.13m.

Επίσης επειδή ο κάρναβος των τομογραφιών εκτείνεται κατά το ήμισυ σε σχετικά επίπεδο τμήμα και κατά το ήμισυ σε κεκλιμένο έδαφος, πιστεύουμε ότι από τις υπεδάφειες αντιστατικές δομές που απεικονίζονται στα σχήματα, μερικές σχετίζονται πιθανά με την αρχαία σκηνή και άλλες με αναλληματοικά στοιχεία.

Μία από τις ανωμαλίες αυτές καλύπτει όλο σχεδόν το πλάτος του το βορειοανατολικό άκρο καννάβου των τομογραφιών. Προεξάρχει δε όλων των άλλων ανωμαλιών για βάθη μεγαλύτερα των 2.5. Η όποια δομή προκαλεί ανάλογη ανωμαλία δεν παρουσιάζει καμιά ένδειξη στην επιφάνεια του εδάφους. Οι κύριες επιμήκειες ανωμαλίες ευθυγραμμίζονται ΒΒΔ-ΝΝΑ και προφανώς κατά την κάθετο στη διεύθυνση αυτή εφ' όσον σχηματίζονται ορθές γωνίες και οι κατευθύνσεις αυτές συμφωνούν με την εικαζόμενη χωροταξία του αρχαίου θεάτρου.



Εικόνα 3.26: Κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης σε κατακόρυφες τομές που ταυτίζονται με τις γραμμές κατά μήκος των οποίων μετρήθηκαν οι τομογραφίες.

Συμπερασματικά εντοπίστηκαν ανωμαλίες στην κατανομή της αντίστασης στο υπέδαφος, πολλές από τις οποίες έχουν γραμμική μορφή. Μερικές από αυτές μάλιστα σχηματίζουν ορθογώνια γεωμετρικά σχήματα. Η διεύθυνση των υπεδάφιων δομών που προκαλούν τις εν λόγω ανωμαλίες συμφωνεί με τη διεύθυνση των ορατών δομικών καταλοίπων. Το γεγονός αυτό οδήγησε τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για πιθανά θαμμένα αρχαία λείψανα και εκτιμήθηκε ότι οι περισσότερες και καλά διαμορφωμένες ανωμαλίες παρατηρούνται στο χώρο που πιθανά κάποτε ορθωνόταν το σκηνικό οικοδόμημα.

4. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

4.1. Εισαγωγή

Ο σκοπός της ενότητας που ακολουθεί είναι η παροχή χρήσιμων πληροφοριών προς τους αρχαιολόγους και τους γεωφυσικούς οι οποίες καθορίζουν εάν απαιτείται ή όχι η διεξαγωγή γεωφυσικής έρευνας σε μια συγκεκριμένη περίπτωση, όπως επίσης ποιες τεχνικές και μεθοδολογίες θα μας παρέχουν τα μέγιστα δυνατά αποτελέσματα. Σήμερα δεν υπάρχει τυποποιημένο πρότυπο για τη διεξαγωγή γεωφυσικών διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους, καθώς η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου στην αρχαιολογική γεωφυσική έρευνα ποικίλει ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες στη συγκεκριμένη περιοχή. Σε γενικές γραμμές δεν είναι εφικτό να προβλέψει ο γεωφυσικός αν μία περιοχή είναι κατάλληλη για γεωφυσική έρευνα πριν αυτή ερευνηθεί. Είναι όμως δυνατόν να αξιολογηθούν οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται αν η γεωφυσική έρευνα θα είναι επιτυχής.

Κάποιοι παράγοντες που θα συμβάλλουν καθοριστικά στην αναγνώριση της καταλληλότητας μίας περιοχής για γεωφυσική έρευνα είναι οι παρακάτω:

- Καταλληλότητα επιφάνειας του εδάφους για τη διέλευση των γεωφυσικών οργάνων
- Μελέτη Ιστορικών - Αρχαιολογικών Στοιχείων
- Μέγεθος και βάθος αρχαιολογικών αντικειμένων
- Αντίθεση ανάμεσα στον περιβάλλοντα χώρο και το αρχαιολογικό υλικό

4.1.1. Καταλληλότητα επιφάνειας του εδάφους για τη διέλευση των γεωφυσικών οργάνων

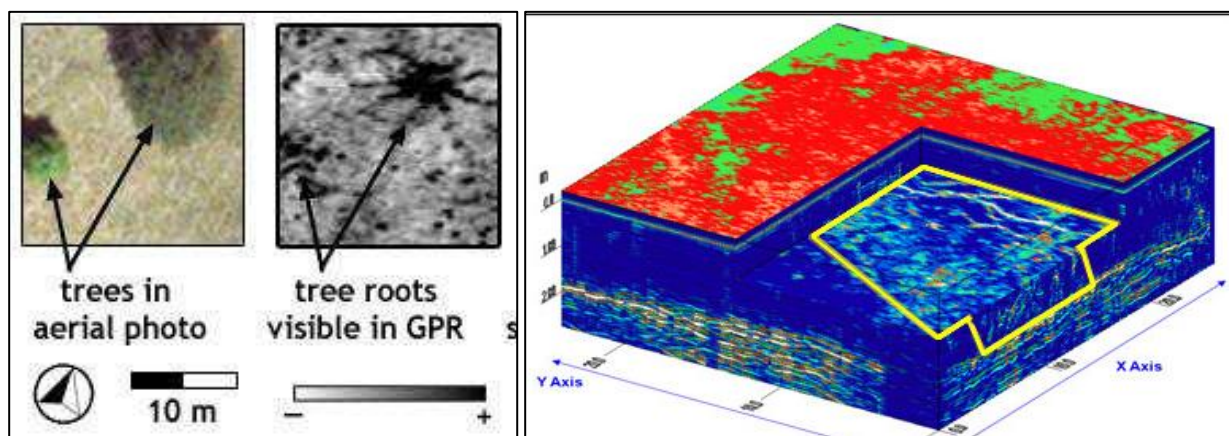
Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο οι υπόγειες όσο και οι επιφανειακές συνθήκες του εδάφους έχουν μεγάλη σημασία. Μία έρευνα μπορεί να παρεμποδίζεται και να δυσχεραίνεται εξαιτίας περιφράξεων ή εδαφικών ανωμαλιών ή έντονης βλάστησης. Η βλάστηση συχνά αποτελεί σημαντικό εμπόδιο σε τέτοιου είδους έρευνες, καθώς πολλοί αρχαιολογικοί χώροι βρίσκονται σε πλούσιες σε βλάστηση περιοχές. Οι περισσότερες γεωφυσικές έρευνες διεξάγονται με όργανα τα οποία συλλέγουν αυτόματα δεδομένα ή χειροκίνητα (απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερος χρόνος σε αυτήν την περίπτωση).



Εικόνα 4.1: Επίδραση βλάστησης σε έρευνα με χρήση GPR.

Η ύπαρξη δένδρων ή άλλων εμποδίων, πολλές φορές καθιστά την διέλευση του χειριστή σε ευθεία γραμμή για την ομαλή συλλογή δεδομένων αδύνατη. Έτσι, πολλές μετρήσεις ίσως να χρειαστεί να παρεκκλίνουν σημαντικά από την ευθεία των μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι κατά την επεξεργασία των δεδομένων, το λογισμικό λαμβάνει τις τιμές σύμφωνα ακριβώς με τη συλλογή τους κατά μήκος της διαδρομής. Η αποφυγή των εμποδίων έχει ως αποτέλεσμα την πιθανή εισαγωγή θορύβου στα δεδομένα. Όσοι χάρτες δημιουργούνται από αυτά τα δεδομένα πιθανώς να μην είναι ακριβείς στην τοποθεσία ή την μορφή των ανωμαλιών, και η διόρθωσή τους μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα, όταν είναι δυνατή.

Πρόσθετα προβλήματα στην γεωφυσική έρευνα συχνά δημιουργούν και οι ρίζες των δέντρων. Για παράδειγμα, στην μαγνητική έρευνα, οι μεγάλες ρίζες σε έδαφος το οποίο είναι πλούσιο σε σίδηρο, εντοπίζονται σαν αδύναμες αρνητικές ανωμαλίες. Στις περισσότερες πάντως μαγνητικές έρευνες, οι ρίζες των δέντρων δε φαίνονται καθόλου. Στις έρευνες αντίστασης και αγωγιμότητας, οι ρίζες είναι δυνατό να απορροφήσουν την τοπική υγρασία με αποτέλεσμα να προκαλέσουν μεγάλη αντίσταση ή ανωμαλίες χαμηλής αγωγιμότητας, ενώ εξαιτίας της διαφορετικής ανάκλασης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, οι ρίζες ανιχνεύονται αμέσως με το GPR.

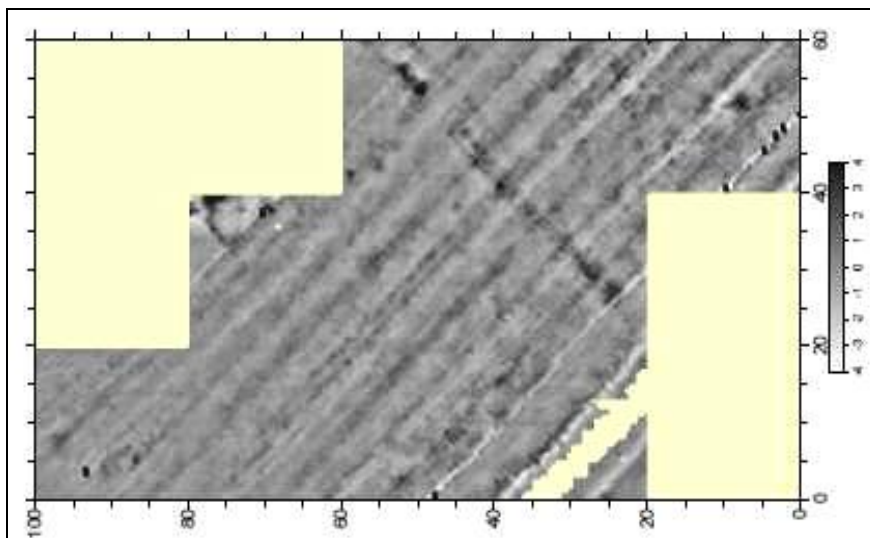


Εικόνα 4.2: Απεικόνιση συμπλέγματος ριζών στο GPR.

Εν συνεχεία σε χέρσες περιοχές, το ψηλό χορτάρι, οι θάμνοι και τα σπαρτά μπορεί επίσης να προκαλέσουν προβλήματα. Οι ιδανικές περιοχές είναι αυτές που έχουν μόνο κοντό χορτάρι, ειδικά για τις μεθόδους GPR, κατά τις οποίες τα όργανα πρέπει να είναι πολύ κοντά στο έδαφος, ενώ αυτά της EMI μπορεί να μεταφέρονται και πιο ψηλά. Υπάρχουν μερικές περιπτώσεις στις οποίες ίσως πρέπει κάποια εμπόδια όπως οι θάμνοι ή οι μικροί βράχοι να μετακινηθούν, ώστε να γίνει σωστά η έρευνα.

Ενοχλήσεις μπορούν να προκληθούν και από τεχνητές κατασκευές, όπως για παράδειγμα από φράκτες, δρόμους, πεζοδρόμια και θαμμένες εγκαταστάσεις. Συχνά δεν μπορεί να γίνει τίποτα για να αφαιρεθούν τα εν λόγω εμπόδια με σημαντικό αντίκτυπο στην εκάστοτε έρευνα. Οι φράκτες ειδικά, είναι ένα πολύ σύνηθες πρόβλημα για την μαγνητομετρία και συχνά φέρουν εμπόδια στον εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων μέσα σε ακτίνα αρκετών μέτρων. Από κει και πέρα η μαγνητομετρία σπάνια χρησιμοποιείται κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Τα όργανα της EMI, αν και παρουσιάζουν μικρότερη ευαισθησία στο μέταλλο, αντιμετωπίζουν παρόμοια προβλήματα. Σε κατοικημένες περιοχές συνήθως χρησιμοποιείται το GPR, αφού δεν επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους.

Επίσης, η διαταραχή της επιφάνειας του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα προς εξέταση πριν την διεξαγωγή μίας γεωφυσικής έρευνας. Για παράδειγμα, περιοχές που έχουν εξομαλυνθεί από μηχανήματα βαρέως τύπου είναι εξαιρετικά δύσκολο να υποβληθούν σε έρευνα, καθώς η ποικιλία των ιδιοτήτων του εδάφους που δημιουργείται μπορεί να κάνει αδύνατη την ανίχνευση των στοιχείων προς αναζήτηση. Σε περιπτώσεις που η έρευνα στοχεύει σε πολύ μικρά βάθη, ακόμα και οι γεωργικές δραστηριότητες όπως το όργωμα μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα στην ανίχνευση αντίθεσης των στοιχείων.



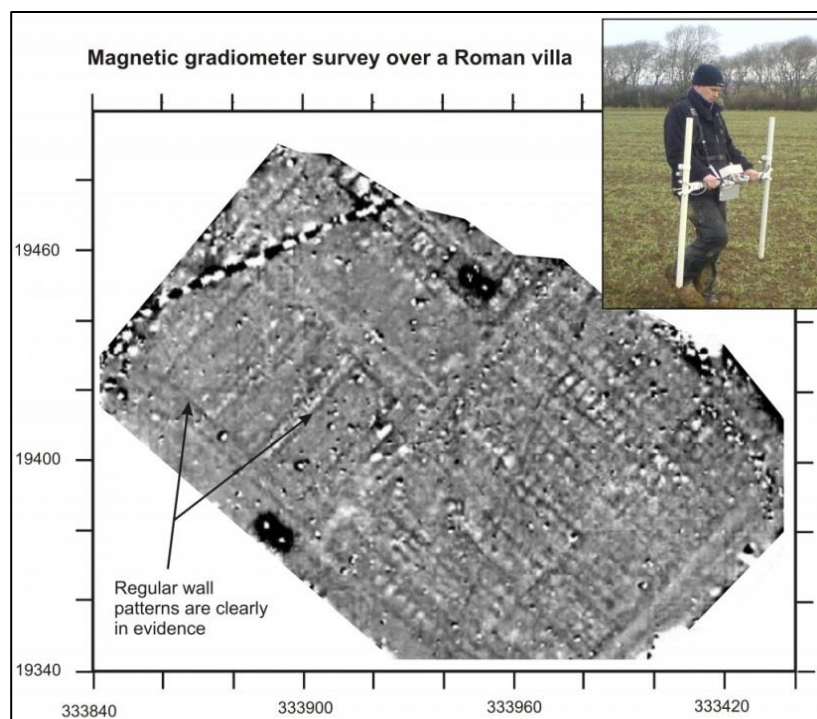
Εικόνα 4.3: Παράδειγμα «ενόχλησης» επιφάνειας από το όργωμα. Τα αυλάκια από το όργωμα κυριαρχούν σε αυτά τα δεδομένα αντίστασης από την NewPhiladelphia, Illinois, κάνοντάς το δύσκολο να δούμε τις ανωμαλίες των στοιχείων που ψάχνουμε. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν με ένα GeoscanRM15. (Hargrave 2007).

Σε γενικές γραμμές το ερώτημα της καταλληλότητας της επιφάνειας του εδάφους αποτελεί ένα πολύπλοκο ζήτημα στη γεωφυσική. Εάν η συλλογή δεδομένων είναι εφικτή χωρίς πλήθος εμποδίων ή παρεκκλίσεων τότε η έρευνα είναι επίσης εφικτή. Ωστόσο, ακόμα και σε περιπτώσεις εδαφών με πολλά εμπόδια, φυσικά και μη, αν και χρονοβόρα ή λιγότερο ακριβής, η γεωφυσική έρευνα μπορεί να πραγματοποιηθεί.

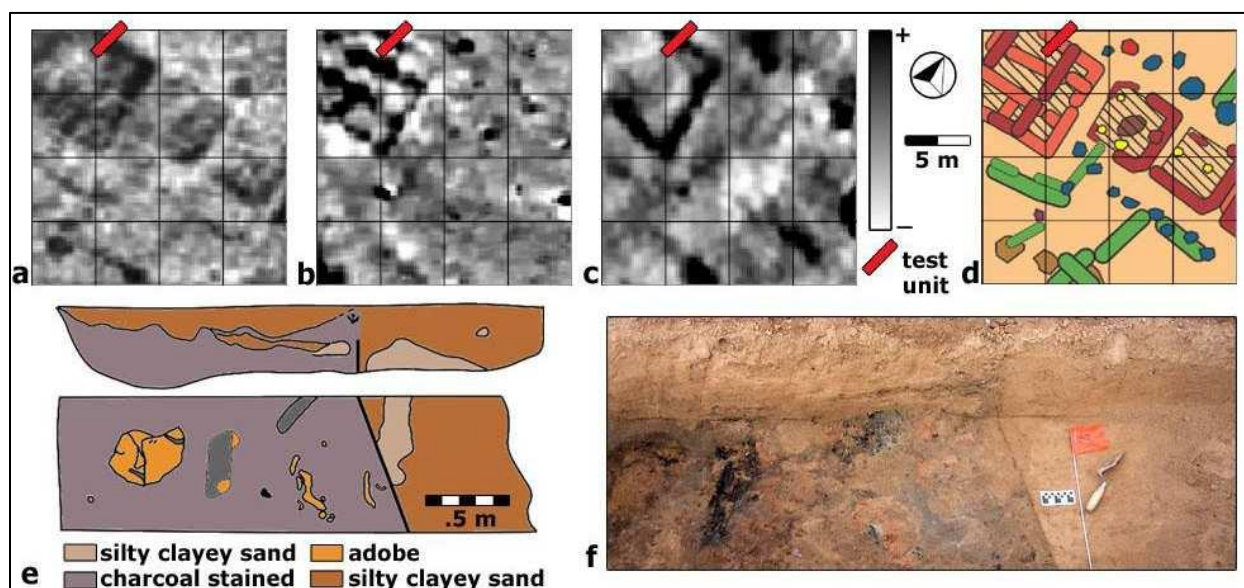
4.1.2. Μελέτη Ιστορικών - Αρχαιολογικών Στοιχείων

Πριν προχωρήσουμε σε μία αρχαιολογική γεωφυσική έρευνα θα πρέπει να έχουμε τουλάχιστον κάποιες ενδείξεις, ότι στην υπό μελέτη περιοχή υπήρξε αρχαιολογική δραστηριότητα. Τέτοιες ενδείξεις μπορεί να είναι επιφανειακά αρχαία ερείπια ή και ιστορικά κείμενα τα οποία υποδεικνύουν έναν τόπο.

Τα αρχαιολογικά αντικείμενα είναι πολύ πιθανόν να έχουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, όπως πυκνότητα, περιέχουσα υγρασία, πορώδες, περιεκτικότητα σε μεταλλικά συστατικά κ.α. Διαφορές σε αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να μετρηθούν με μεγάλη ακρίβεια αφού συσχετίζονται τις γεωφυσικές ιδιότητες όπως τον μαγνητισμό, την ηλεκτρική αντίσταση κ.α. Ως εκ τούτου τα αρχαιολογικά στοιχεία που αναζητούνται επιβάλλεται να έχουν φυσικές ιδιότητες διαφορετικές σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο.



Εικόνα 4.4: Δημιουργία μαγνητικού χάρτη κατά την αναζήτηση αρχαίων ερειπίων Ρωμαϊκής κατοικίας.



Εικόνα 4.5: Η δοκιμή μιας ορθογώνιας ανωμαλίας στο Pueblo Escondido, ολοσχερώς καμένη δομή. Γεωφυσικά δεδομένα και οι χάρτες για τη γύρο περιοχή παρουσιάζονται. α) Χάρτης γεωραντάρ από 0,47-0,63m, β) μαγνητικός χάρτης γ) χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας δ) η ερμηνεία που δίνεται πριν από την ανασκαφή ε) Προφίλ της δοκιμαστικής μονάδας του δυτικού τοίχου και χάρτης του πατώματος της τάφρου. φ) Φωτογραφία του κεντρικού τμήματος της δοκιμαστικής μονάδας και του πατώματος της τάφρου.

Κατά τη σύγκριση των γεωφυσικών δεδομένων τα αποτελέσματα των ανασκαφών, τα αποκαλυφθέντα στοιχεία είτε θα συμφωνούν με τα γεωφυσικά δεδομένα είτε όχι. Στις ιδανικές περιπτώσεις οι τα στοιχεία που αποκαλύπτουν ανασκαφές επιβεβαιώνουν τις προβλέψεις των γεωφυσικών ερευνών. Αυτή όμως δεν είναι πάντοτε και η πραγματικότητα. Μερικές φορές διάφοροι παράγοντες διαστρεβλώνουν την έρευνα με συνέπεια είτε να ανακαλύπτονται στοιχεία που τα γεωφυσικά δεδομένα απέτυχαν να αναδείξουν, είτε σε άλλες περιπτώσεις ανωμαλίες που έδειξε η γεωφυσική έρευνα να μην εξηγούνται κατά την ανασκαφή. Περιπτώσεις σαν αυτές είναι πολλές φορές αποτέλεσμα διάφορων φυσικών παραγόντων όπως η ύπαρξη ριζών δέντρων, εγκοίλων, ανθρώπινων παρεμβάσεων κ.α.

4.1.3. Μέγεθος και βάθος αρχαιολογικών αντικειμένων

Η ικανότητα ανίχνευσης ενός αντικειμένου σε γενικές γραμμές μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος του αντικειμένου κάτω από την επιφάνεια, αλλά και όσο μειώνεται το μέγεθός του.

Ανάλογα την μέθοδο που χρησιμοποιούμε με διαφοροποίηση των ρυθμίσεων μπορούμε να επιτύχουμε διαφορετική διεισδυτικότητα σε βάθος (όσο αυξάνεται η διεισδυτικότητα τόσο μειώνεται η ανάλυση των δεδομένων).

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το εκτιμώμενο βάθος διείσδυσης ανάλογα με τη γεωφυσική μέθοδο που χρησιμοποιείται.

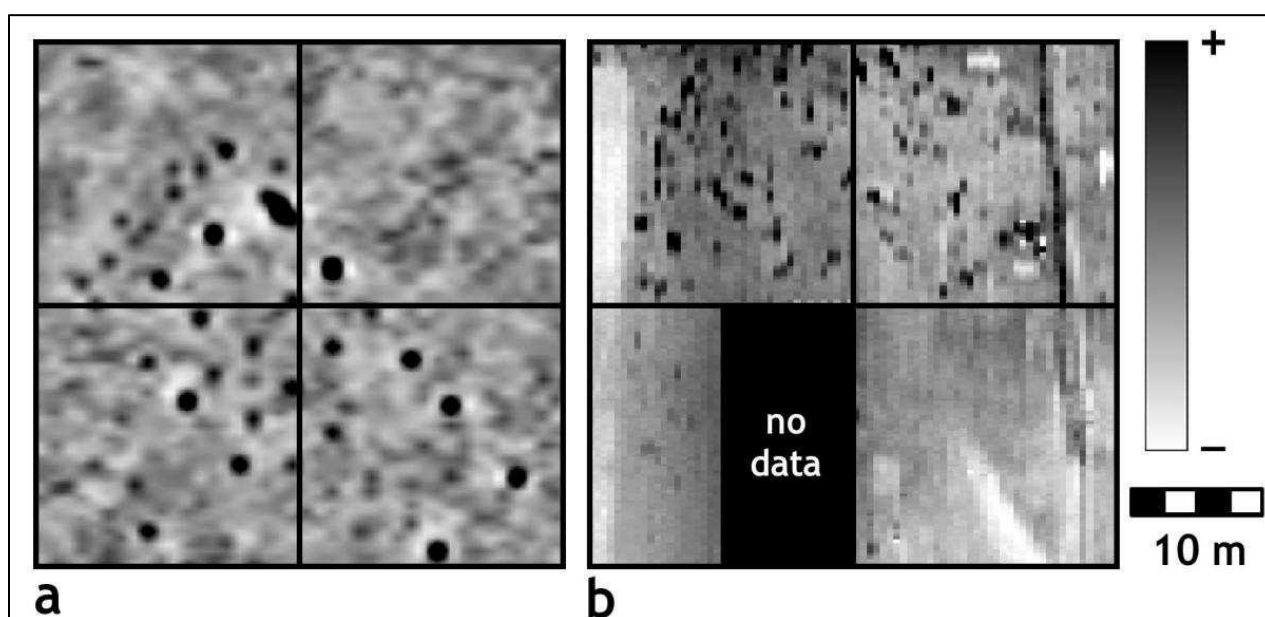
Method	Instrument	Depth (m)
Resistivity	RM15 or similar, twin probe array, .5 m separation	0.5
Resistivity	RM15 or similar, twin probe array, 1 m separation	1
EMI	EM38, conductivity, vertical mode	1.5
EMI	EM38, conductivity, horizontal mode	0.75
EMI	EM38, magnetic susceptibility, vertical mode	0.5
EMI	EM38, magnetic susceptibility, horizontal mode	0.25
EMI	EM31, conductivity, vertical mode	6
EMI	EM31, conductivity, horizontal mode	3
EMI	EM31, magnetic susceptibility, vertical mode	2
EMI	EM31, magnetic susceptibility, horizontal mode	1
Magnetometry	Fluxgate (Bartington, Geoscan, or similar)	1 – 1.5
GPR	GSSI system with 200 MHz antenna	3 – 7
GPR	S&S system with 250 MHz antenna	2.5 – 6.5
GPR	GSSI system with 270 MHz antenna	2 – 6
GPR	GSSI system with 400 MHz antenna	0.5 – 4
GPR	S&S system with 450 MHz antenna	0.5 – 3.5
GPR	S&S system with 500 MHz antenna	0.5 – 3
GPR	GSSI system with 900 MHz antenna	0.2 – 1

Σε ότι αφορά το μέγεθος του στόχου, εμπειρικά εκτιμάται ότι αντικείμενα μικρότερα από 0,25m είναι πρακτικά αδύνατο να ανιχνευθούν από τις γεωφυσικές μεθόδους, εκτός από τις περιπτώσεις που πρόκειται για έντονα μαγνητικά υλικά (σίδηρος, νικέλιο, μαγνητίτης κ.α.). Τα αντικείμενα με έντονες μαγνητικές ιδιότητες μπορούν να ανιχνευθούν με χρήση μαγνητόμετρου ακόμα και σε μεγέθη λίγων εκατοστών. Επειδή οι σχετικές ανωμαλίες συνήθως δεν παρουσιάζουν μια διακριτή μορφή, τα μικρά αντικείμενα αποτελούν πρόκληση στη γεωφυσική, καθώς δεν αρκεί μόνο η εντόπισή τους αλλά και η αναγνώριση τους ως στοιχεία τεχνητά, στα γεωφυσικά δεδομένα.

Ακόμα ένας γενικός κανόνας που αφορά στα αντικείμενα διαμέτρου μεταξύ 0,30-0,50m είναι ότι αυτά είναι δυνατό να ανιχνευτούν εφόσον δεν είναι πολύ βαθιά θαμμένα και εφόσον η πυκνότητα των δεδομένων είναι μεγάλη. Πολύ μικρά αντικείμενα για παράδειγμα είναι δυνατό να ανιχνευτούν με GPR με κεραία συχνότητας από 400 έως 500 MHz εάν η πυκνότητα της δειγματοληψίας είναι μεγάλη. Γενικότερα, όταν η

πυκνότητα της δειγματοληψίας είναι μεγάλη, μπορούμε να εντοπίσουμε μικρά αντικείμενα ανεξαρτήτως μεθόδου.

Τέλος, πολύ σημαντικό στοιχείο στην ερμηνεία των δεδομένων αποτελεί το σχήμα των εξεταζόμενων αντικείμενων. Για παράδειγμα ευθείες γραμμές ή καμπύλες ταξινομημένες με συνοχή ή συμμετρία είναι πιθανόν να υποδεικνύουν τεχνητά στοιχεία-κατασκευές, ενώ άμορφες και ασύμμετρες χωρίς συνοχή ανωμαλίες ίσως σχετίζονται με εδαφικές ανωμαλίες (ρίζες δέντρων, πέτρες, έγκοιλα κ.α.) ή λάθη στη συλλογή δεδομένων.



Εικόνα 4.6: Ταξινομημένες ανωμαλίες έναντι τυχαίων. (a) Η τσιμεντένια βάση ενός ιστορικού κτιρίου στην ArmyCity, δημιουργεί ένα ορθογώνιο μοτίβο σε δεδομένα ηλεκτρικής αντίστασης, (b) ενώ οι τυχαίες μικρές ανωμαλίες σε δεδομένα μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι πολύ πιο δύσκολο να ερμηνευτούν. Πιθανόν να σχετίζονται με μικρούς βράχους και διάφορες τρύπες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

4.1.4. Αντίθεση ανάμεσα στον περιβάλλοντα χώρο και το αρχαιολογικό υλικό

Ακόμα και σε περιπτώσεις όπου τα αντικείμενα διαθέτουν μεγάλο μέγεθος, είναι αρκετά ρηχά και έχουν αρκετή αντίθεση για να ανιχνευτούν, είναι πιθανή η δυσκολία της αναγνώρισής τους εάν κρύβονται από τον 'σωρό', ενώ ίσως να μην αναγνωριστούν και καθόλου. Ο σωρός αναφέρεται στις ανωμαλίες στα γεωφυσικά δεδομένα που δεν

συσχετίζονται με τα φαινόμενα ενδιαφέροντος (δηλαδή τις αρχαιολογικές καταθέσεις). Παράδειγμα αποτελούν τα κοιλώματα υποορόφων τα οποία μπορεί να έχουν γεωφυσικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές από τα λαγύμια τρωκτικών ή τις ρίζες δέντρων.

Τα πρόσφατα μεταλλικά απορρίμματα αποτελούν μια από τις πιο συχνές και ενοχλητικές πηγές σωρού που μπορούν να επιδράσουν αρνητικά σε μια γεωφυσική έρευνα. Το μέταλλο είναι ιδιαίτερα κοινό στις στρατιωτικές εγκαταστάσεις και τις περιοχές κοντά στις σύγχρονες ή ιστορικές κατοικίες. Τα σιδηρούχα μέταλλα αποτελούν κι αυτά πηγή σωρού και είναι πιο ενοχλητικά για τις μαγνητικές έρευνες, ενώ μπορούν να έχουν επιπτώσεις στα δεδομένα αγωγιμότητας. Οι ενδείξεις ανίχνευσης προϊστορικών στοιχείων είναι αδύνατο να ανιχνευτούν όταν εμφανίζονται με ισχυρές και συχνά διπολικές ανωμαλίες μικρά κομμάτια μετάλλου κοντά στην επιφάνεια ή μεγαλύτερα κομμάτια σε μεγαλύτερο βάθος. Οι σημαίες σήμανσης που χρησιμοποιούνται συχνά από τους αρχαιολόγους στις μετρήσεις, είναι ιδιαίτερα ενοχλητικές και δε θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται όπου γίνονται γεωφυσικές έρευνες.

Μια άλλη πηγή σωρού που εμφανίζεται στη γεωφυσική έρευνα με αρνητικές επιπτώσεις είναι οι βράχοι. Σε ορισμένες περιοχές, οι ηφαιστειακοί και πλούσιοι σε σίδηρο βράχοι προκαλούν προβλήματα παρόμοια με εκείνα που αφορούν τα μεταλλικά απορρίμματα. Η μεγάλη ποσότητα βράχων και το κοντινό στην επιφάνεια βραχώδες υπόβαθρο επίσης αντιπροσωπεύουν μια κύρια πηγή σωρού στις μεθόδους αντίστασης και GPR.

4.2. Επιλογή της κατάλληλης γεωφυσικής μεθόδου

4.2.1. Εισαγωγή

Είναι πρακτικά αδύνατο να καθορισθεί με βεβαιότητα η αποτελεσματικότητα ή η ακρίβεια μίας γεωφυσικής μεθόδου εάν προηγουμένως δεν δοκιμαστεί σε τμήμα της υπό εξέταση περιοχής. Εάν για παράδειγμα είναι δυνατόν να εξετασθούν όλες οι διαθέσιμες μέθοδοι σε ένα τμήμα στο οποίο έχουν επιβεβαιωθεί κάποια ευρήματα, τότε εκ του αποτελέσματος θα είμαστε ικανοί να κρίνουμε την εγκυρότερη μέθοδο.

Ωστόσο, ορισμένοι παράγοντες αποτελούν σημαντικά στοιχεία στην ορθότερη εκτίμηση για την εφαρμογή μίας γεωφυσικής μεθόδου. Οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την συμβατότητα της γεωφυσικής μεθόδου είναι:

- Οι Περιβαλλοντολογικές – Γεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας
- Η Φύση του υπό μελέτη αρχαιολογικού υλικού

4.2.2. Οι Περιβαλλοντολογικές – Γεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας

Μερικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες μπορεί να είναι πολύ ευνοϊκές για μερικές μεθόδους αλλά μπορεί να είναι καταστροφικές για άλλες. Οι σημαντικότεροι περιβαλλοντολογικοί παράγοντες που μπορεί να παίξουν ρόλο στην επιτυχία ή αποτυχία μιας έρευνας μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες ομάδες, στις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες του εδάφους. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες, που γενικά καθορίζονται από την υγρασία και την σύσταση του εδάφους, επηρεάζουν δραματικά την αντίσταση, την αγωγιμότητα και το γεωραντάρ. Η μαγνητομετρία και η μαγνητική επιδεκτικότητα επηρεάζονται έντονα από τις μαγνητικές ιδιότητες του εδάφους, τους βράχους και τα πολιτιστικά στοιχεία. Η παρουσία απορριμμάτων μετάλλων στην επιφάνεια, μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα, όπως πινακίδες ή φράκτες, και ηφαιστειακά πετρώματα στο έδαφος επηρεάζουν την μαγνητική επιδεκτικότητα και την μαγνητομετρία. Ο παρακάτω πίνακας έχει μια λίστα με αυτές τις ιδιότητες και την επίδραση τους πάνω σε κάθε μια από τις 5 γεωφυσικές μεθόδους.

Condition ¹	RES	COND	GPR	MS	MAG
extremely dry	P	P	C	N	N
dry	C	N	B	N	N
moderate moisture	B	B	B	N	N
Moist ²	B	N	C	N	N
saturated	P	C	C	N	N
high % clay minerals	N	N	P	N	N
moderate to high salinity	N	N	P	N	N
abundant non-magnetic rocks	C	N	C	N	N
abundant magnetic rocks	C	N	C	N	P
magnetic bedrock near surface	N	N	N	N	P
metal (ferrous) debris on surface	N	C	N	N	P
large metal objects (fences, etc.)	N	N	N	N	C
poorly developed soils	N	N	N	C	C
well developed soils	N	N	N	B	B

Πίνακας 4.7: Επίδραση περιβαλλοντολογικών συνθηκών σε κοινές γεωφυσικές μεθόδους.

1. Υποθέτοντας ότι το χώμα έχει αρκετή μαγνητική αντίθεση με το υπόβαθρο.

2. Το έδαφος παραμένει αρκετά σταθερό ώστε να περπατηθεί

Όπου RES= ηλεκτρική αντίσταση, COND= αγωγιμότητα, MS= μαγνητική επιδεκτικότητα, MAG= μαγνητογραφία, GPR= γεωραντάρ και B= επωφελής C= προβληματίζει N= καμία επίδραση P= προβληματική.

Υγρασία:

Η επιτυχία ή αποτυχία των μεθόδων που στηρίζονται στις ηλεκτρικές ιδιότητες εξαρτώνται κυρίως από το ποσοστό υγρασίας στο έδαφος, το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται με την εδαφολογική σύσταση, μέγεθος των κόκκων, ξηρότητα και το κλίμα. Ευτυχώς, στα περισσότερα πεδία μια τουλάχιστον μέθοδος ευνοείται από τις επικρατούσες συνθήκες. Η μεγαλύτερη ανησυχία προκύπτει όταν το έδαφος είναι τελείως στεγνό ή τελείως υγρό (βάλτος), γιατί και στις δύο περιπτώσεις δεν θα έχουμε αρκετή αντίθεση. Η αντίθεση όπως έχει αναφερθεί είναι σημαντικός παράγοντας για κάθε μέθοδο. Τα αρχαιολογικά στοιχεία μπορούν να εντοπιστούν με ηλεκτρικές μεθόδους γιατί είτε κρατούν την υγρασία καλύτερα από τα γύρω υλικά, είτε «στεγνώνουν» πιο γρήγορα και καλύτερα. Εάν όλη η τοποθεσία προς έρευνα είναι εξαιρετικά ξηρή και έχουν αποξηρανθεί και όλα τα στοιχεία τότε η αντίθεση εξαλείφεται και τα στοιχεία δεν μπορούν να εντοπιστούν με ηλεκτρικές μεθόδους. Το ίδιο ισχύει και σε αντίθετη περίπτωση εάν η τοποθεσία είναι εξαιρετικά υγρή.

Η αντίσταση και η αγωγιμότητα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά στην υγρασία, αν και οι έρευνες αντίστασης χρειάζονται ένα επαρκές ποσοστό υγρασίας στο έδαφος, καθώς υπάρχει η ανάγκη τοποθέτησης ηλεκτροδίων στο έδαφος, ώστε να μπορεί το ρεύμα να διαχέεται. Σε πολύ ξηρές συνθήκες υπάρχει μεγάλη αντίσταση επαφής και έτσι το ρεύμα δεν μπορεί να περάσει από τα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι της EMI.

Η επίδραση της υγρασίας είναι πιο έντονη όσον αφορά το γεωραντάρ. Η ικανότητα να εντοπίζει στοιχεία επηρεάζεται έντονα από το ποσοστό αντίθεσης ανάμεσα στα στοιχεία και του περιβάλλοντος χώρου. Έλλειψη αντίθεσης λόγω έλλειψης υγρασίας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα πολύ αμυδρές ανακλάσεις από τα θαμμένα στοιχεία. Βέβαια, είναι σπάνιο να μην υπάρχει η απαραίτητη υγρασία και έτσι το GPR είναι πολύ πετυχημένο σε πολύ ξηρές περιοχές. Αυτό συμβαίνει διότι το GPR δεν ανταποκρίνεται μόνο στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, αλλά και σε άλλους παράγοντες που συμβάλλουν στη σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα των υλικών (Conyers, 2004), συμπεριλαμβανομένης και της συμπιεστότητας του εδάφους.

Καθώς η αντίθεση υγρασίας μεταξύ των στοιχείων και του υπόβαθρου μεγαλώνει, η ικανότητα να εντοπιστούν με GPR επίσης μεγαλώνει, αλλά υπάρχει ένας ακόμα περιοριστικός παράγοντας. Καθώς η υγρασία αυξάνεται, η ενέργεια του γεωραντάρ διαχέεται και έτσι μειώνεται το βάθος διείσδυσης. Έτσι σε πολύ ξηρές συνθήκες το βάθος διείσδυσης μπορεί να είναι το μέγιστο αλλά δεν ισχύει το ίδιο και για την αντίθεση. Για μέτρια υγρασία η αντίθεση είναι έντονη ενώ δεν επηρεάζεται πολύ το μέγιστο βάθος. Όμως για μεγάλο ποσοστό υγρασίας, η ενέργεια του ραντάρ που εισέρχεται στο έδαφος μπορεί να αποσβεστεί τόσο ώστε να μην φτάσει ποτέ στην κεραία λήψης.

Η διαπερατότητα του GPR σε βάθος εξαρτάται και από το μέγεθος αργίλου και αλάτων στο έδαφος. Και τα δύο είναι εξαιρετικά αγωγιμα, και μπορεί να αποσβέσουν την ενέργεια και να μειώσουν το βάθος διείσδυσης.

Βράχοι:

Η παρουσία βράχων δημιουργεί προβλήματα στις γεωφυσικές μεθόδους. Στην ηλεκτρική αντίσταση, οι βράχοι μπορεί να εμποδίζουν τα ηλεκτρόδια και να δημιουργούν εσφαλμένες αναγνώσεις ή να δημιουργούν το φαινόμενο του σωρού όπως αυτό έχει αναφερθεί. Οι βράχοι όχι μόνο αντιπροσωπεύουν το σωρό στα δεδομένα GPR, αλλά «κρύβουν» τα βαθύτερα στοιχεία με την απόσβεση ενός μεγάλου μέρους της ενέργειας πριν φτάσει σε αυτά τα στοιχεία. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα χειρότερο όταν υπάρχουν μεγαλύτεροι βράχοι μεγάλης πυκνότητας. Εάν μερικοί βράχοι έχουν εναπομείναντα μαγνητικά πεδία (ηφαιστειογενή πετρώματα) μπορεί να είναι μια σημαντική πηγή σωρού στα δεδομένα της μαγνητογραφίας. Ο Ανδεσίτης για παράδειγμα, είναι πολύ μαγνητικός και κάθε μικρό κομμάτι του θα προκαλέσει διπολική μαγνητική ανωμαλία. Φυσικά, είναι μικρότερο πρόβλημα εάν οι βράχοι είναι λίγο μαγνητικοί ή εάν είναι αρκετά βαθιά θαμμένοι. Για να αξιολογηθεί πόσο σοβαρά προβλήματα μπορεί να μας δημιουργήσουν τέτοιοι βράχοι είναι καλό να γίνει μια δοκιμαστική έρευνα.

Εδάφη:

Τα περισσότερα εδάφη είναι έστω και λίγο μαγνητικά. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν την εδαφική μαγνητική επιδεκτικότητα, επομένως ο τύπος τους εδάφους, το πάχος του και η αντίθεση του με το υπόβαθρο επηρεάζουν την επιτυχία της έρευνας μαγνητογραφίας και μαγνητικής επιδεκτικότητας (Clark, 1996, Dalan, 2006, Gaffney&Gater, 2003, Kvamme, 2006b). Τα αρχαιολογικά στοιχεία όπως τα κοιλώματα, οι τάφροι και οι λεκάνες σπιτιών γεμίζονταν συχνά με έδαφος που ξεπλενόταν από την γύρω περιοχή. Η συγκέντρωση του μαγνητικά ενισχυμένου εδάφους σε αυτά τα αρχαιολογικά στοιχεία τα κάνει να έχουν αντίθεση με τα περιχώρα τους (περίπτωση με την οποία ανιχνεύσαμε δεξαμενές στην τρέχουσα έρευνα μας στο Λαύριο). Η μαγνητομετρία και η μαγνητική επιδεκτικότητα μπορούν να έχουν επιτυχία στην έρημο και άλλες περιοχές με αδύναμα μαγνητικά χώματα. Η μαγνητομετρία θα ανιχνεύσει καμένα στοιχεία όπως τα δάπεδα τζακιού και τα καμένα σπίτια (στην έρευνα μας στο Λαύριο θα μπορεί να ανιχνεύσει τις καμίνους), και η μαγνητική επιδεκτικότητα

που μετριέται με EMI μπορεί να είναι πιο ευαίσθητη στις λεπτές παραλλαγές από την μαγνητική επιδεκτικότητα που μετριέται με ένα μαγνητόμετρο.

Τα δεδομένα μαγνητομετρίας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας που συλλέχθηκαν στο Pueblo Escondido, που βρίσκεται στο ζεστό και ξηρό νότιο New Mexico είναι ένα αρχικό παράδειγμα. Η μαγνητομετρία με FM36 fluxgate Geoscan gradiometer αποκάλυψε καμένες οικίες, αλλά δεν ανίχνευσε κανένα σημάδι των πολλών άλλων κατοικιών που παρουσιάζονται στον χάρτη GPR (εικόνα 4.5). Πολλά από τα σπίτια, και τα δύο κήκον, ανιχνεύτηκαν από την έρευνα μαγνητικής επιδεκτικότητας χρησιμοποιώντας EM38. Οι χάρτες μαγνητικής επιδεκτικότητας παρουσιάζουν επίσης γραμμικά μοτίβα που περιβάλλουν τα σπίτια, τα οποία ερμηνεύονται σαν κάποιο είδος «βεράντας».(Ernenwein 2008).

Μεταλλικά αντικείμενα και απορρίμματα μετάλλων:

Τα αντικείμενα μετάλλων όλων των μεγεθών και των μορφών αντιπροσωπεύουν ένα πρόβλημα για μερικούς τύπους γεωφυσικών ερευνών και ειδικότερα στην μαγνητομετρία και την αγωγιμότητα. Οι έρευνες σε πολλές περιοχές περιπλέκονται από τα μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων τύπων όπως, φράκτες, σωληνώσεις, οχετοί, πινακίδες κτλ. Βέβαια, αν δεν καλύπτουν μεγάλο μέρος της περιοχής και είναι εντοπισμένα δεν μας προκαλούν μεγάλη ανησυχία. Ένα πιο σοβαρό πρόβλημα είναι τα συντρίμια και τα απορρίμματα μετάλλων τα οποία μπορεί να είναι διασκορπισμένα σε ολόκληρη την περιοχή των ερευνών. Το κάθε μικρό κομμάτι σιδηρούχου μετάλλου μπορεί να δημιουργήσει μια δυσανάλογα μεγάλη ανωμαλία στα δεδομένα μαγνητομετρίας, «κρύβοντας» κοντινά αρχαιολογικά στοιχεία.

Στην έρευνα αγωγιμότητας της EMI τα μεταλλικά αντικείμενα δημιουργούν μια σειρά αναγνώσεων που συνάδουν με αναγνώσεις ιστορικών αντικειμένων ή άλλων μεταλλικών αντικειμένων εκτός ενδιαφέροντος, οπότε η ερμηνεία των δεδομένων γίνεται πολύ δύσκολη. Εάν μια περιοχή είναι ρυπασμένη με συντρίμια μετάλλων πρέπει να καθαριστεί πριν από την μαγνητογραφία ή την EMI, το οποίο απαιτεί μια συστηματική έρευνα με ανιχνευτές μετάλλων, το οποίο αυξάνει τον χρόνο και το κόστος της έρευνας.

Συμπεράσματα:

Για να επιλεγθεί ποιες γεωφυσικές μέθοδοι θα χρησιμοποιηθούν, οι περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις είναι πιθανότατα ο πιο σοβαρός παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί. Η υγρασία του εδάφους μαζί με το μέγεθος των κόκκων, την αποξήρανση και την περιεκτικότητα σε άργιλο μπορούν να καθορίσουν την επιτυχία ή αποτυχία της αντίστασης, της αγωγιμότητας και του GPR. Ο πίνακας 4.7 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί ποια μέθοδος είναι η καταλληλότερη λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν μια ιδιαίτερη περιοχή. Αν οι συνθήκες είναι ξηρές σαν την έρημο, η καλύτερη μέθοδος είναι πιθανότατα το GPR ακολουθούμενο από την EMI. Δεδομένου ότι η υγρασία αυξάνεται το GPR παραμένει μια καλή επιλογή, αλλά θα μπορούσε να περιοριστεί η διείσδυση σε βάθος. Η αντίσταση και η αγωγιμότητα είναι άριστες επιλογές σε μέτρια υγρασία. Καθώς το έδαφος γίνεται όλο και πιο βαλτώδες, το GPR έχει μικρή διείσδυση σε βάθος και οι άλλες τρεις μέθοδοι πάσχουν από έλλειψη αντίθεσης. Επίσης με την αύξηση παρουσίας αργίλου αυξάνεται η αγωγιμότητα και μειώνεται το βάθος του GPR. Όμως οι έρευνες αγωγιμότητας και αντίστασης επηρεάζονται αμυδρά και μπορεί να δώσουν πολύ καλά αποτελέσματα, αρκεί να μην εμποδίζονται τα ηλεκτρόδια να τοποθετηθούν στο έδαφος. Η παρουσία θαλασσινού νερού ή άλλων ηλεκτρολυτών περιορίζουν την εφαρμογή του GPR.

Στην περίπτωση μαγνητικών μεθόδων οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι λιγότερο σημαντικές. Η υγρασία, το μέγεθος των κόκκων δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Είναι το πάχος και η αντίθεση μεταξύ του χώματος του εδάφους και του υπεδάφους καθώς και οι μαγνητικές ιδιότητες των βράχων που υπαγορεύουν την επιτυχία των μαγνητικών μεθόδων. Εάν το χώμα είναι μαγνητικά «εμπλουτισμένο» συγκριτικά με το υπέδαφος, οι μαγνητικές μέθοδοι είναι πιο πιθανό να είναι επιτυχείς (Clark 1996). Βέβαια, η MS είναι πολύ ευαίσθητη και δουλεύει πολύ καλά ακόμα και σε ερημικές συνθήκες. Η μαγνητομετρία είναι πολύ χρήσιμη σε περιβάλλοντα με πολύ ασθενή μαγνητικά χώματα επειδή μετράει εναπομείναντα μαγνητικά πεδία, τα οποία συχνά δημιουργούνται από καμένα αρχαιολογικά στοιχεία και στοιχεία τα οποία περιέχουν μαγνητικά πετρώματα. Γενικά η μαγνητομετρία φαίνεται να δουλεύει καλά στα περισσότερα περιβάλλοντα.

4.2.3. Η Φύση του υπό μελέτη αρχαιολογικού υλικού

Ακόμα και εάν οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι πολύ ευνοϊκές για ορισμένες μεθόδους, τα στοιχεία που υπάρχουν στην περιοχή μπορεί να μην παρουσιάζουν ικανοποιητική αντίθεση με τον περιβάλλοντα χώρο. Ο πίνακας 4.8 απαριθμεί διαφορετικούς τύπους αρχαιολογικών στοιχείων, τη δυνατότητα να ανιχνευτούν με διάφορες μεθόδους και μια συνοπτική εξήγηση. Σε όλες τις περιπτώσεις οι τύποι των στοιχείων είναι πολύ γενικευμένοι και γίνονται πολλές υποθέσεις. Εστιάζουμε στα πιο κοινά αρχαιολογικά στοιχεία. Φυσικά στοιχεία τα οποία είναι σε ένα γραμμικό μοτίβο ή σε άλλα μοτίβα που έχουν συνοχή, είναι πολύ πιο εύκολο να αναγνωριστούν σαν πολιτιστικά. Στον παρακάτω πίνακα επίσης υποθέτουμε ότι όλα τα αντικείμενα δεν είναι πολύ βαθιά θαμμένα και ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για κάθε μέθοδο.

Feature	RES	COND	GPR	MS	MAG	Explanation/Notes
Pits/Excavations:						
Post hole	P	P	M	P	P	Generally too small, often no patterns
Grave (no void space)	M	P	M	M	M	Small, low contrast, may lack pattern
Excavation (archaeological)	M	M	M	M	M	COND often blurs boundaries
Processing/storage pit	P	P	M	M	E	Often small, low contrast
Borrow pit	M	M	M	E	E	Usually a soil (magnetic) low/void
House basin	M	M	E	E	E	Favorable compaction, fill, size & shape
Wall trench	M	M	E	M	M	Favorable shape/pattern
Pathway	M	M	E	M	E	Favorable compaction & incision
Ditch	M	M	M	M	E	Often good contrast & patterned
Void space (graves, tunnels)	P	M	E	M	M	VOIDS are very good GPR reflectors
Walls:						
Adobe/mud wall	M	M	E	M	M	Depends heavily on contrast
Stone wall, non-magnetic	E	E	E	M	M	Magnetic contrast questionable
Stone wall, magnetic	E	E	E	E	E	Electrical & magnetic contrast
Brick wall	E	E	E	E	E	Electrical & magnetic contrast
Monoliths						
Non-magnetic stone	M	M	M	M	M	Lack of pattern
Magnetic stone	M	M	M	M	E	Assuming remanent magnetism
Floors/pavements/surfaces:						
Compact earthen surface	P	M	E	P	P	Favorable compaction & contrast
Prepared mud/adobe surface	M	M	E	P	P	Favorable compaction & contrast
Stone floor, non-magnetic	E	E	E	P-M	P-M	Magnetic contrast still possible
Stone floor, magnetic	E	E	E	M	E	Nature of magnetic contrast varies
Artifacts:						
Ferrous metal	P	M	P	P	E	Must be very shallow for COND
Igneous rock (small)	P	M	P	P	E	Must be very shallow for COND
Fired/Burned Features						
Hearth, small/unprepared	P	P	M	P	M	Lacks size, robustness, & pattern
Hearth, prepared	P	P	M	P	E	Favorable compaction, burning, size
Kiln	M	M	E	M	E	Favorable size, burning
Very large clay pot	P	P	M	P	M	Remanant magnetic field from firing
Burned house/architecture	M	M	M	M	E	Favorable size, pattern & burning
Accumulations:						
Midden	E	E	M	M	M	Favorable moisture contrast
Earthen mound	E	E	M	E	M	Moisture and magnetic contrast

Πίνακας 4.8: Ανίχνευση κοινών αρχαιολογικών στοιχείων με χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Όπου RES= ηλεκτρική αντίσταση, COND= αγωγιμότητα, MS= μαγνητική επιδεκτικότητα, MAG= μαγνητογραφία, GPR= γεωραντάρ και (P= δύσκολη ανίχνευση, M= μέτριας δυσκολίας, E= τέλεια ανίχνευση).

Κοιλώματα:

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τα στοιχεία που δημιουργήθηκαν από την αφαίρεση της γης και μετά ξαναγέμισμα κατά την πάροδο του χρόνου με ποιο χαλαρό υλικό, με αποτέλεσμα τα στοιχεία να αντιπαραβάλλουν με τον περιβάλλοντα χώρο. Αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνουν τάφους, αποθήκες, κοιλώματα σπιτιών, δεξαμενές και διαφόρων άλλων τάφρων. Οι μαγνητικές μέθοδοι λειτουργούν καλά για την ανίχνευση των κοιλωμάτων όταν το χώμα έχει αφαιρεθεί και είτε δεν έχει αναπληρωθεί είτε έχει αντικατασταθεί με διαφορετικό από της υπόλοιπης περιοχής. Και οι δύο περιπτώσεις οδηγούν σε αρνητικές ανωμαλίες. Αυτά τα στοιχεία θα παρουσιάζονταν σαν θετικές ανωμαλίες εάν τελικά γεμίζονταν με χώμα ποιο μαγνητικό από το υπόβαθρο. Τα κοιλώματα μπορούν επίσης να ανιχνευτούν με την ηλεκτρική αντίσταση, αγωγιμότητα, και γεωραντάρ όταν οι συνθήκες το ευνοούν. Συχνά το κοίλωμα που γεμίζει είναι λιγότερο συμπαγές από τα περιβάλλοντα υλικά, επιτρέποντας την διατήρηση υγρασίας και έτσι την καλύτερη αντίθεσή του. Τα κύματα του ραντάρ μπορεί να απεικονίσουν τα όρια των στοιχείων όπως τους τοίχους και τα «πατώματα» εάν δεν είναι πολύ βαθιά. Στα καλά στρωματοποιημένα εδάφη ένα κοίλωμα αντιπροσωπεύεται από ένα «σπάσιμο» στις οριζόντιες ανακλάσεις και μερικές φορές στους χάρτες.

Τοίχοι:

Οι τοίχοι είναι κοινά αρχαιολογικά στοιχεία και είναι ευνοϊκά για τη γεωφυσική γιατί εκθέτουν μια διακριτή γεωμετρική μορφή. Οι μακροσκελείς ευθείες ανωμαλίες που φαίνονται κάθετα η μία στην άλλη, ή κυκλικά μοτίβα αναγνωρίζονται εύκολα ως στοιχεία τοίχων. Επίσης μερικές φορές το επίχρισμα των τοίχων είναι έντονα μαγνητικό και έτσι οι τοίχοι ξεχωρίζουν ακόμα πιο εύκολα. Οι τοίχοι φτιαγμένοι από λάσπη ή πλίθα ανιχνεύονται καλύτερα με γεωραντάρ, αλλά μπορεί επίσης να ανιχνευτούν με οποιαδήποτε γεωφυσική μέθοδο εάν τα δεδομένα είναι αρκετά πυκνά και τα περιβάλλοντα υλικά παρέχουν αρκετή αντίθεση. Η κατάσταση είναι αρκετά ευνοϊκή όταν οι τοίχοι είναι φτιαγμένοι εξολοκλήρου από πέτρα καθώς η πέτρα παρέχει αρκετή αντίθεση με το περιβάλλον χώμα και ηλεκτρικά και μαγνητικά. Σε μερικές περιπτώσεις οι πέτρινοι τοίχοι δημιουργούν αρνητικές ανωμαλίες εάν το περιβάλλον υπόβαθρο είναι

σημαντικά πιο μαγνητικό από τις πέτρες. Όταν οι τοίχοι περιλαμβάνουν ηφαιστειογενή πέτρες ή οποιοδήποτε άλλο πέτρωμα που έχει παραμένον μαγνητισμό, τότε ο τοίχος θα παρουσιάσει ισχυρή ανωμαλία στα δεδομένα μαγνητομετρίας. Τέτοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι τοίχοι που είναι φτιαγμένοι από τούβλο.

Πατώματα, διάδρομοι και επιφάνειες:

Μια συμπαγής επιφάνεια είναι ορατή με το γεωραντάρ καθώς η απότομη αλλαγή μεταξύ δύο επιφανειών θα προκαλέσει ανάκλαση υψηλού εύρους. Η ανίχνευση μιας τέτοιας επιφάνειας με αντίσταση ή αγωγιμότητα θα εξαρτηθεί από τα υλικά επάνω και κάτω από την επιφάνεια, ή της ίδιας της επιφάνειας εάν αυτή είναι αρκετά παχιά. Μερικές φορές μια επιφάνεια κάνει το έδαφος από κάτω της να συγκρατεί περισσότερη υγρασία σε σχέση με το έδαφος που δεν βρίσκεται κάτω από αυτήν. Οι πέτρινες επιφάνειες είναι πιο εύκολο να ανιχνευτούν από όλες τις μεθόδους για τους ίδιους λόγους που ισχύουν και στους πέτρινους τοίχους.

Χειροποίητα αντικείμενα:

Τα χειροποίητα αντικείμενα δεν είναι συνήθως ένας εύκολος στόχος για τις γεωφυσικές έρευνες εκτός εάν είναι αρκετά μεγάλα. Εξαίρεση παρουσιάζουν αυτά τα οποία είναι φτιαγμένα από δομικά υλικά, εργαλεία, μηχανήματα, μαγειρικά σκεύη, πολεμικά είδη και άλλα. Αυτά μπορούν να ανιχνευτούν με μεθόδους EMI αλλά μόνο όταν είναι κοντά στην επιφάνεια. Πολύ καλύτερα αποτελέσματα παίρνουμε με ένα μαγνητόμετρο το οποίο ανιχνεύει τα παραμένοντα μαγνητικά πεδία για κάθε αντικείμενο. Αυτό μπορεί να είναι επωφελές στις αρχαιολογικές περιοχές, όμως εάν υπάρχουν πολλά τέτοια αντικείμενα τότε τείνουν να «κρύψουν» άλλα μη σιδηρούχα στοιχεία.

5. ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΑΜΦΙΑΡΕΙΟΝ

5.1. Τοποθεσία Αρχαιολογικού Χώρου Αμφιάρειου

Το Αμφιάρειο είναι αρχαιολογικός χώρος της Αττικής και βρίσκεται 50km βόρεια της Αθήνας και 10km νοτιοανατολικά της σημερινής σκάλας Ωρωπού όπου βρισκόταν ο αρχαίος Ωρωπός. Είναι χτισμένο σε μια μικρή κοιλάδα το Μαυροδήλεσι, την οποία διασχίζει ένα ξερό ποτάμι το οποίο οι αρχαίοι ονόμαζαν Χαράδρα.

Κατά την αρχαιότητα ήταν λιμάνι με ιδιαίτερη σημασία, στα σύνορα Αττικής-Βοιωτίας και απέναντι από την Ερέτρια. Η θέση της πόλης είχε ως συνέπεια τη διεκδίκηση της κυριαρχίας της από τους Ερετριείς, τους Βοιωτούς, τους Αθηναίους και τελικά τη μακρόχρονη υποταγή της στους τελευταίους. Ο τόπος ήταν κατοικημένος από την προϊστορική εποχή. Ο Όμηρος αναφέρει τον Ωρωπό με την ονομασία Γαία, έναν εκτεταμένο οικισμό απέναντι από την Ερέτρια.



Εικόνα 5.1: Περιοχή ερευνών στον αρχαίο χώρο του Αμφιαρείου.

5.2. Ιστορικά Δεδομένα Περιοχής

Το Αμφιάρειο είναι αρχαιολογικός χώρος της Αττικής και βρίσκεται νοτιοανατολικά του Ωρωπού. Ιδρύθηκε κατά το δεύτερο μισό του 5ου αιώνα π.Χ. από τους Αθηναίους, σαν ιερός ναός, μαντείο και ιεροθεραπευτήριο αφιερωμένο στον χθόνιο θεό και ήρωα του Άργους Αμφιάραο. Ήταν το κύριο ιερό του Ωρωπού και στον χώρο του κάθε πέντε χρόνια λάμβαναν μέρος τα "Μεγάλα Αμφιαράεια" προς τιμή του Αμφιάραου. Η γιορτή αυτή ήταν ιδιαίτερα δημοφιλής και περιελάμβανε μουσικούς και αθλητικούς αγώνες στο θέατρο και το στάδιο μπροστά από την στοά αντίστοιχα. Κατά τους αιώνες της Ρωμαϊκής κυριαρχίας το Αμφιάρειο συνέχισε να αποτελεί χώρο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος αλλά εγκαταλείφθηκε κατά την υστερορωμαϊκή περίοδο περί τα τέλη 3ου αιώνα μ.Χ.

Το ιερό εκτεινόταν σε ένα φαράγγι κατά μήκος των όχθων ενός χειμάρρου πλησίον μίας ιερής πηγής. Κατά τα αρχικά ίχνη χρήσης του ναού (5ο αι. π.Χ.), αυτός αποτελούνταν από δύο βωμούς και έναν θεατρικά διαμορφωμένο χώρο για καθήμενους που εστιάζει στους βωμούς μπροστά του.

Ο μικρός ναός του Αμφιάραου είναι οικοδομήθηκε στις αρχές του 4ου αιώνα. Πίσω από τον μικρό ναό υπήρχε αναλημματικός τοίχος στον οποίο στηριζόταν μια στοά που χρησίμευε ως "εγκοιμητήριο" το οποίο ήταν χώρος διαμονής των ικετών έως την ίασή τους.

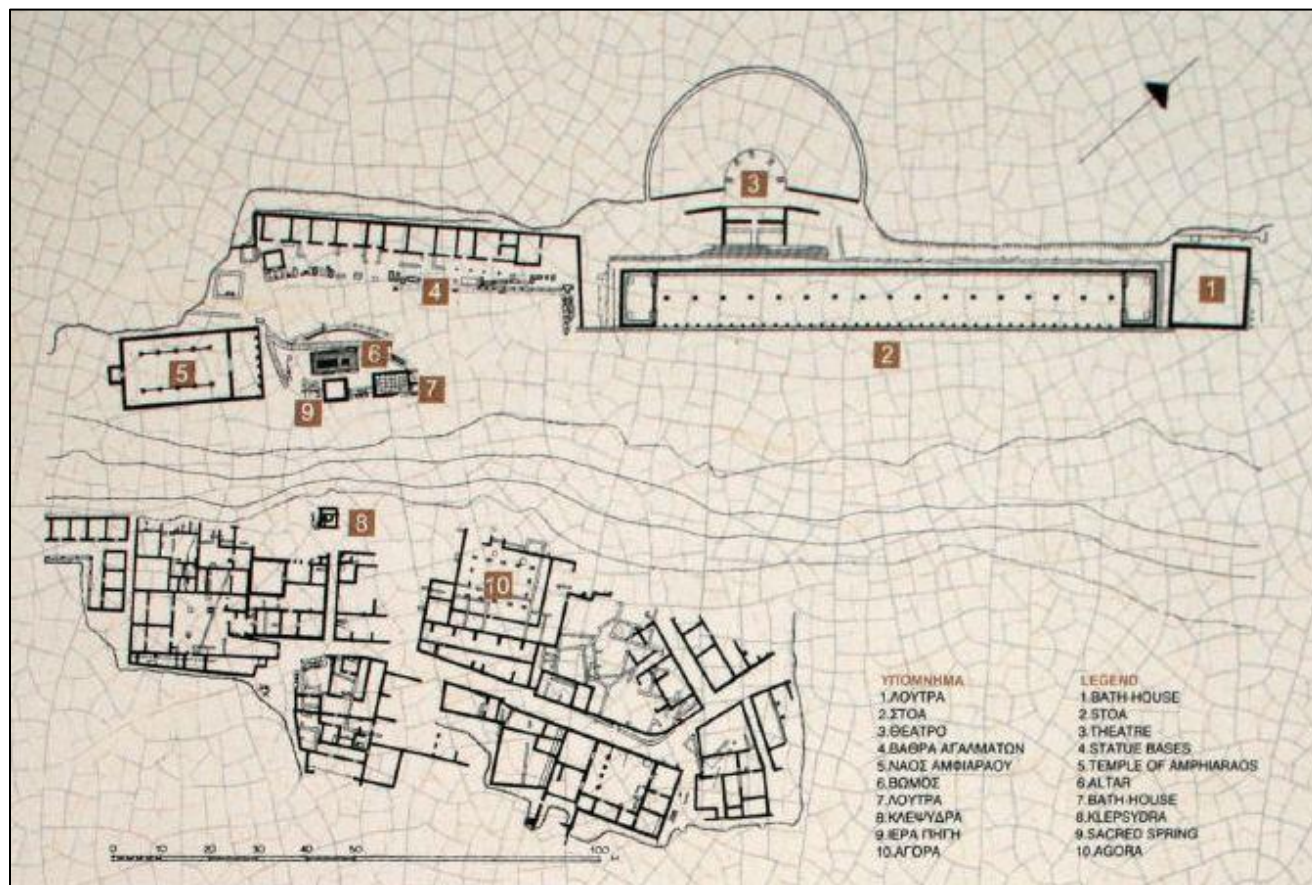
Ο μεγάλος δωρικού ρυθμού ναός του Αμφιάραου ανεγέρθη στα μέσα του 4ου αιώνα π.Χ. νοτιοανατολικά του μικρού ναού και νοτιοδυτικά του βωμού. Ταυτόχρονα έγινε και η προσθήκη μιας επιμήκους στοάς δωρικού ρυθμού, εξοπλισμένης με θρανία-πάγκους για την φιλοξενία των επισκεπτών, και ανδρικών και γυναικείων λουτρών.

Αργότερα κατασκευάσθηκαν μία κρήνη και κατά πλάτος του φαραγγιού ένα μνημειακό υδραυλικό ρολόι, όμοιο με αυτό της αθηναϊκής Αγοράς.

Κατά τον 2ο αιώνα π.Χ. χτίστηκε στα βόρεια της στοάς ένα μικρό θέατρο, του οποίου η σκηνή σώζεται μέχρι σήμερα σε καλή κατάσταση.

Σύμφωνα με κείμενα των αρχαίων συγγραφέων τα οποία μιλούν για νικητές των γυμνικών και ιππικών αγώνων, θεωρείται ότι υπήρχε στάδιο και ιππόδρομος, των οποίων τα ίχνη μέχρι σήμερα δεν έχουν βρεθεί. Το πιθανότερο σημείο του σταδίου είναι

ο χώρος που παρεμβάλλεται μεταξύ της μεγάλης στοάς και της χαράδρας, η οποία χωρίζει την αριστερή πλευρά του ιερού χώρου από την δεξιά πλευρά του κοσμικού χώρου.



Εικόνα 5.2: Διάταξη Αρχαιολογικού χώρου.

5.3. Σκοπός Γεωφυσικής Έρευνας

Σκοπός της γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήσαμε, ήταν η πλήρης αποκάλυψη της διάταξης του αρχαίου θεάτρου το οποίο χτίστηκε κατά τον 2ο αιώνα π.Χ. στα βόρεια της στοάς, του οποίου μόνον η σκηνή σώζεται μέχρι σήμερα.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με ιστορικές αναφορές το αρχαίο αυτό θέατρο εκτός της σκηνής αποτελείται και από αμφιθεατρικές ξύλινες κερκίδες χωρητικότητας περίπου 300 θεατών οι οποίες εδράζονταν επί πέτρινων βάσεων. Μέρος των κερκίδων έχει ήδη

αποκαλυφθεί, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του καλύπτεται προς τα βορειοδυτικά από φερτά υλικά.

Η πλήρης αποκάλυψη των αμφιθεατρικών κερκίδων, η πιθανή ανίχνευση τεχνητού διαδρόμου για την πρόσβαση σε αυτές από τα βορειοανατολικά, καθώς επίσης και η ανίχνευση οποιασδήποτε άλλης αρχαίας κατασκευής στον περιβάλλοντα χώρο του θεάτρου, ήταν οι κυριότεροι στόχοι προς επίτευξη για την παρούσα μελέτη.

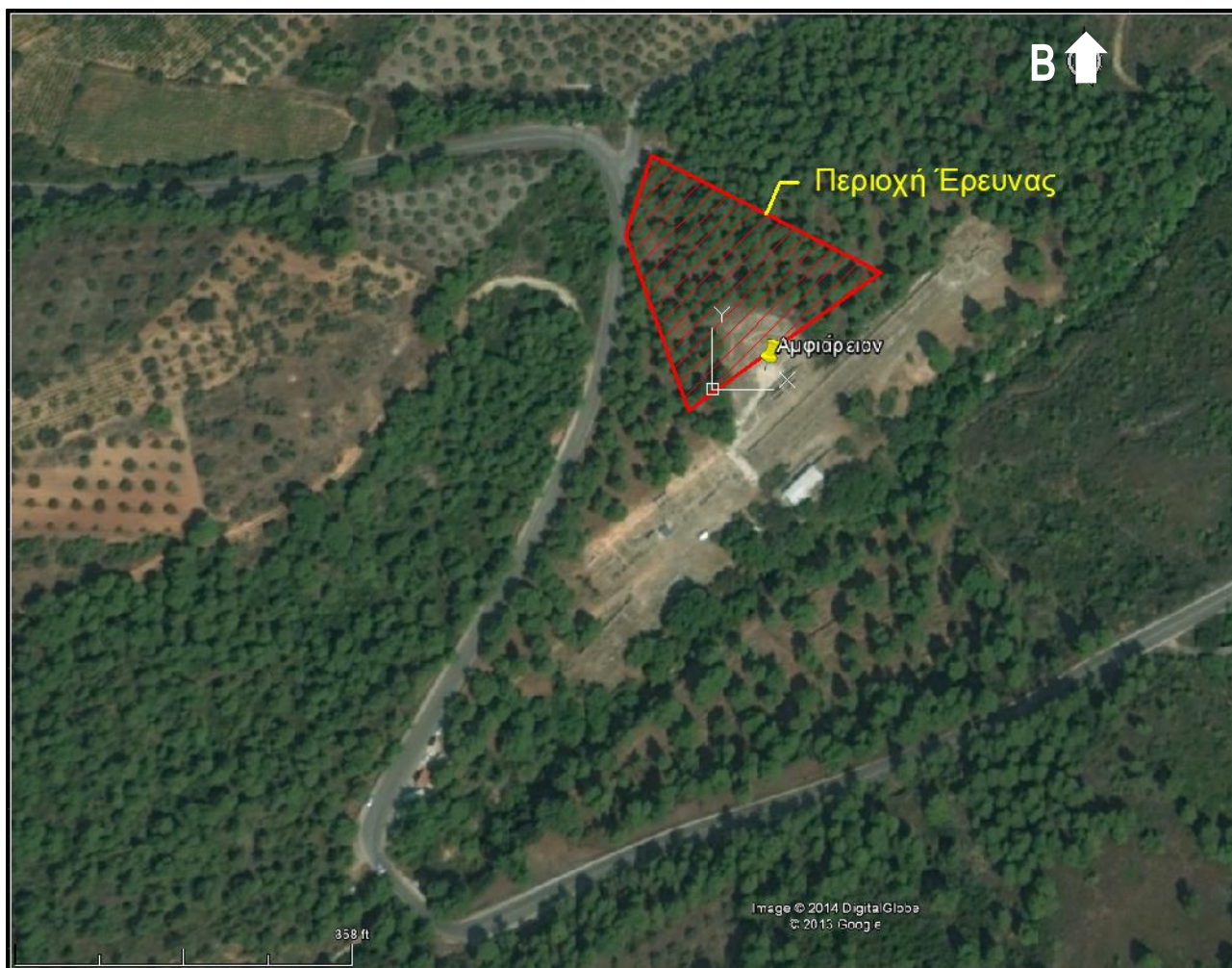


Εικόνα 5.3: Περιοχή της έρευνας όπου έγιναν οι γεωφυσικές μελέτες.

5.4. Περιοχή Γεωφυσικής Έρευνας

Οι γεωφυσικές μετρήσεις έγιναν στη βόρεια πλευρά του αρχαιολογικού χώρου του Αμφιάρειου βορειοδυτικά του θεάτρου (πίσω από τις κερκίδες οι οποίες δεν είναι πλήρως αποκαλυμμένες και χάνονται βορειοδυτικά της αρχαίας στοάς) και στα ανατολικά παράλληλα με την αρχαία στοά.

Η περιοχή στην οποία έλαβε μέρος η γεωφυσική έρευνα είναι δασώδης και επιφανειακά καλύπτεται από φερτά αργιλικά υλικά με μορφή Αλλουβιακών σχηματισμών, οι οποίοι περιλαμβάνουν επιφανειακά χαλαρά γεωυλικά εδαφικής υφής, μεταφερμένα από χείμαρρους και ποτάμια. Πρόκειται για ποτάμιας αποθέσεις, αναβαθμίδες και αποθέσεις κοιλάδας που δομούνται από καστανές αμμοϊλίες με χάλικες γνευσίων και μαρμάρων, άμμους, ιλύες και αργίλους με έντονη την παρουσία της αργιλικής κύριας μάζας η οποία αποτελεί το συνδετικό υλικό. Παρουσιάζουν γενικά συνεκτική και κατά τόπους χαλαρή δομή. Χαρακτηρίζονται από περιορισμένη αντοχή, σχετικά μεγάλη παραμορφωσιμότητα και μέτρια περατότητα.



Εικόνα 5.4: Περιοχή ερευνών στον αρχαίο χώρο του Αμφιάρειου.

Στη συνέχεια ακολουθεί πλήρης ανάλυση των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του Αμφιάρειου και της λιθοστρωματογραφίας του υποβάθρου, ώστε να ερμηνευθούν σωστά τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων και να εξαχθούν τα συμπεράσματα της έρευνας.

5.5. Γεωλογία - Τεκτονική Ευρείας Περιοχής

5.5.1. Εισαγωγή

Η περιοχή Μαρκόπουλου-Ωρωπού βρίσκεται στον γεωλογικό χάρτη Ερέτρια με κλίμακα 1:50.000 του ΙΓΜΕ (Γ. Κατσικάτσος 1977). Η ευρύτερη περιοχή Μαρκόπουλου-Ωρωπού γεωτεκτονικά ανήκει στην Υποπελαγονική ενότητα. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί

που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή από τους νεότερους προς τους παλαιότερους, είναι:

- Τεταρτογενείς σχηματισμοί
- Νεογενείς σχηματισμοί
- Σχηματισμοί Υποπελαγονικής Ενότητας

Οι Τεταρτογενείς και Νεογενείς σχηματισμοί ανήκουν στην κατηγορία των μεταλπικών ιζημάτων, ενώ η Υποπελαγονική Ενότητα ανήκει στο αλπικό σύστημα ορογένεσης. Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική μελέτη των σχηματισμών που αναπτύσσονται στην περιοχή.

5.5.2. Μελέτη Μεταλπικών Ιζημάτων

Με το τέλος της κύριας φάσης του αλπικού κύκλου ορογένεσης ακολούθησε η απόθεση των μεταλπικών ιζημάτων, ηπειρωτικών και θαλάσσιων σε προϋπάρχουσες ή νεοδημιουργηθείσες λεκάνες.

Ο Ελληνικός χώρος συνίσταται από δύο κατηγορίες μεταλπικών ιζημάτων:

- Τα ιζήματα της μεσοελληνικής αύλακας (μολασσικά ιζήματα) τα οποία είναι και τα παλαιότερα, ολιγοκαινικής - μειοκαινικής ηλικίας (Brunn 1956, Ori & Roveri 1987) και σχετίζονται άμεσα με τις προϋπάρχουσες αλπικές δομές. Η σχέση τους οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά αποτίθενται σε μεγάλες αύλακες που δημιουργούνται στο χώρο πίσω από το μέτωπο της ορογένεσης και παράλληλα σ' αυτό (Ori & Friend 1984).
- Τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα τα οποία αποτίθενται σε τάφρους, που αναπτύσσονται πολύ πίσω από το μέτωπο της ορογένεσης και δεν συνδέονται με την διαδικασία της ορογένεσης.

Τεταρτογενείς

Τα τεταρτογενή ιζήματα (al) δεν συνδέονται με την διαδικασία ορογένεσης αλλά πρόκειται για σχηματισμούς της Ολοκαίνου υποπεριόδου που συνίστανται από:

- Προχωματικές αποθέσεις σε μικρές εσωτερικές λεκάνες ή ποταμοκοιλιάδες που αποτελούνται κυρίως από χαλαρά καστανόχρωμα αργιλοαμμώδη υλικά με παρουσία από κροκαλολατύπες κατά θέσεις και παρεμβολές από χαλαρά κροκαλολατυποπαγή.
- Ασύνδετα υλικά από άμμους στις κοίτες χειμάρρων.
- Ερυθρογή με διάσπαρτες κροκαλολατύπες.
- Υλικά χειμάρριων αναβαθμίδων μικρού ύψους.
- Παράκτιους σχηματισμούς από άμμο, κροκάλες και συνεκτικούς ψαμμίτες.

Στην περιοχή του Ωρωπού συναντώνται κυρίως κατά μήκος της κοίτης των χειμάρρων και κατά μήκος των ακτών της περιοχής. Στην περιοχή πλησίον του Αμφιάρειου, μία έκταση τέτοιων τεταρτογενών σχηματισμών αναπτύσσεται κατά μήκος του όρμου Αγίων Αποστόλων σε απόσταση περίπου 1500m βορειοανατολικά του αρχαιολογικού χώρου.

Νεογενείς

Οι παρατεταμένες πλευρικές πιέσεις και ο κατακερματισμός των πετρωμάτων ξεκίνησαν διεργασίες διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης κλαστικών ιζημάτων στις λεκάνες. Τα μεγαλύτερα πεδία με κλαστικά ιζήματα παρατηρούνται σήμερα στις νότιες και ανατολικές παρυφές της Πεντέλης και στην περιοχή μεταξύ μεταμορφωμένων και μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Τα κλαστικά ιζήματα συνίστανται από ολισθόλιθους, ογκόλιθους, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και ερυθρούς πηλούς.

Ποταμολιμναία ιζήματα, Ανωτέρου Μειόκαινου Κατωτέρου Πλειόκαινου, που συνίστανται από μάργες, τραβερτίνες μαργαϊκούς ασβεστολίθους και αργίλους σε εναλλαγή με κροκαλοπαγή, υπερκείμενα των παραπάνω κλαστικών ιζημάτων, έχουν διαπιστωθεί στις νότιες παρυφές της Πάρνηθας και της Πεντέλης, στο Πικέρμι, στη Ραφήνα, στη Καλογρέζα, στο Μαρούσι και στη περιοχή Περιστερίου - Λιοσίων. Επίσης αναφέρονται στο Κάλαμο το Μαρκόπουλο και τον Ωρωπό.

Στην περιοχή του Ωρωπού οι νεογενείς σχηματισμοί του Ανώτερου Μειοκαίνου, αποτελούν τμήμα της νεογενούς λεκάνης Θηβών-Τανάγρας-Ωρωπού. Οι νεογενείς αυτοί σχηματισμοί αποτελούνται από δύο ενότητες:

- Την Ανώτερη που αποτελείται εξ' ολοκλήρου από ποταμοχερσαίες αποθέσεις και περιλαμβάνει ένα μόνο λιθοστρωματογραφικό ορίζοντα, τα κροκαλοπαγή Μαρκόπουλου-Ωρωπού (M₅.ft,c).
- Την Κατώτερη που αποτελείται κυρίως από λιμναίες αποθέσεις μαργών, μαργαϊκών ασβεστολίθων και τραβερτινών.

Τα κροκαλοπαγή Μαρκόπουλου-Ωρωπού (M₅.ft,c) της Ανώτερης ενότητας καταλαμβάνουν σχεδόν εξ ολοκλήρου τη περιοχή του Ωρωπού και συνεχίζονται προς τα δυτικά στην περιοχή Χαλκουτσίου-Δήλεσι. Κατά κύριο λόγο αποτελούνται από κροκαλοπαγή με ψαμμικό συνδετικό υλικό και κροκάλες προχωρημένης αποστρωγγύλωσης ποικίλης λιθολογικής σύστασης και μεγέθους, το οποίο κυμαίνεται από λίγα εκατοστά έως 1m σε κάποιες περιπτώσεις. Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρούνται κροκάλες και λατύπες μαργαϊκών ασβεστολίθων που προέρχονται από τους σχηματισμούς της κατώτερης ενότητας. Συνδέονται από ψαμμίτες, αργίλους και καστανέρυθρους πυλούς με μορφή ενστρώσεων. Η ηλικία τους είναι Ανωμειοκαινική όπως προκύπτει από την ανεύρεση Πικερμικής πανίδας στην περιοχή. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται ανάμεσα σε 400-500m.

Στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου του Αμφιάρειου και προς τα νοτιοανατολικά αναπτύσσονται, λιμνοποτάμιες αδρομερείς αποθέσεις (M₅.c,st) οι οποίες ανήκουν στην Κατώτερη ενότητα και συνίστανται από εναλλασσόμενες αποθέσεις κροκαλοπαγών, κροκαλολατυπτοπαγών, ψαμμιτών, αργιλοαμμωδών υλικών, πηλών, μαργών και μικρών ενστρώσεων μαργαϊκών ασβεστολίθων. Οι μεγάλοι πάχους στρώσεις μαργαϊκού ασβεστολίθου διαχωρίζονται κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση και θα περιγραφούν παρακάτω. Οι λιμνοποτάμιες αυτές αδρομερείς αποθέσεις απατώνται με μορφή οριζόντιων ενστρώσεων ποικίλου πάχους έως και 100m ή με μορφή εναλλαγών και πλευρικών μεταβάσεων προς τους αμιγείς λιμναίους σχηματισμούς.

Οι μάργες (M₅.m) και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (M₅.mk,tv) της Κατώτερης ενότητας, συναντώνται διάσπαρτα μέσα στις στρώσεις των λιμνοποτάμιων αδρομερών αποθέσεων αλλά συμμετέχουν σε σημαντικό ποσοστό στη γεωλογία της περιοχής. Οι μάργες είναι χρώματος λευκού έως υποκίτρινου από εύθρυπτες έως πολύ σκληρές

αμιγείς με καλή στρώση, εκτός από περιορισμένες περιπτώσεις παρεμβολών αμμούχων ή αργιλούχων μαργών και διάσπαρτων κροκάλων. Το μέγιστο πάχος των μαργαϊκών στρώσεων φτάνει τα 250m. Οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι έχουν συνήθως μορφή φακοειδών ενστρώσεων πάχους από λίγα μέτρα έως και περισσότερα από 100m όπως για παράδειγμα στην Μονή Σωτήρος δυτικά του Αμφιάρειου. Πρόκειται για σκληρούς μαργαϊκούς ασβεστολίθους και τραβερτινοειδείς ασβεστολίθους που κυμαίνονται από μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις κατά θέσεις άστρωτοι ενώ κατά κανόνα συνοδεύονται από τεφρόλευκες μάργες.

5.5.3. Μελέτη Αλπικού Συστήματος

Μελέτη Υποπελαγονικής Ζώνης

Η Υποπελαγονική ζώνη βρίσκεται δυτικά της Πελαγονικής και εκτείνεται από την Αλβανία κατά μήκος του κορμού της Ελλάδας προς την Ανατολική Στερεά Ελλάδα και την ανατολική Πελοπόννησο.

Αρχικά η ζώνη χαρακτηρίστηκε από τους Renz (1955) και Μαρίνο (1957) με την ονομασία Ζώνη ανατολικής Ελλάδας. Ο Aubouin το 1959 την ονόμασε Υποπελαγονική, θέλοντας να υπογραμμίσει τη σύνδεση της με την Πελαγονική και καθόρισε την παλαιογεωγραφική της θέση, ως την δυτική παρυφή της Πελαγονικής ζώνης προς την βαθιά αύλακα της Πίνδου, αποδίδοντάς της χαρακτήρα ιζηματογένεσης ενδιάμεσης μεταξύ νηριτικής και πελαγικής φάσης.

Η Υποπελαγονική ζώνη χαρακτηρίζεται από μεγάλες οφιολιθικές μάζες ενώ έχει μεγάλη εξάπλωση η σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Η Υποπελαγονική ζώνη θεωρείται ως κατωφέρεια της Πελαγονικής εξαιτίας της τοποθέτησης των οφιολίθων της πανώ σε νηριτικά ή πελαγικά ιζήματα γεγονός που οδήγησε ερευνητές στην προσπάθεια να καταργήσουν τη ζώνη και να την ενσωματώσουν στην Πελαγονική. Μετά όμως από λεπτομερείς παλαιοντολογικές και ιζηματολογικές μελέτες υπήρξε σαφής διαχωρισμός στις ζώνες της Υποπελαγονικής και της Πελαγονικής.

Οι αλπικοί σχηματισμοί της Υποπελαγονικής ζώνης στην ευρύτερη περιοχή βρίσκονται επωθημένοι πάνω στους μεταμορφωμένους σχηματισμούς του Νεοελληνικού Τεκτονικού Καλύμματος και εμφανίζονται υπό την μορφή τεκτονικού παραθύρου.

Οι σχηματισμοί της Υποπελαγονικής ζώνης που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης συνίστανται από Ανωκρητιδικούς επικλυσιογενείς ασβεστόλιθους (Κ₁.κ) οι οποίοι διακρίνονται σε Ανώτερο τμήμα και Κατώτερο τμήμα.

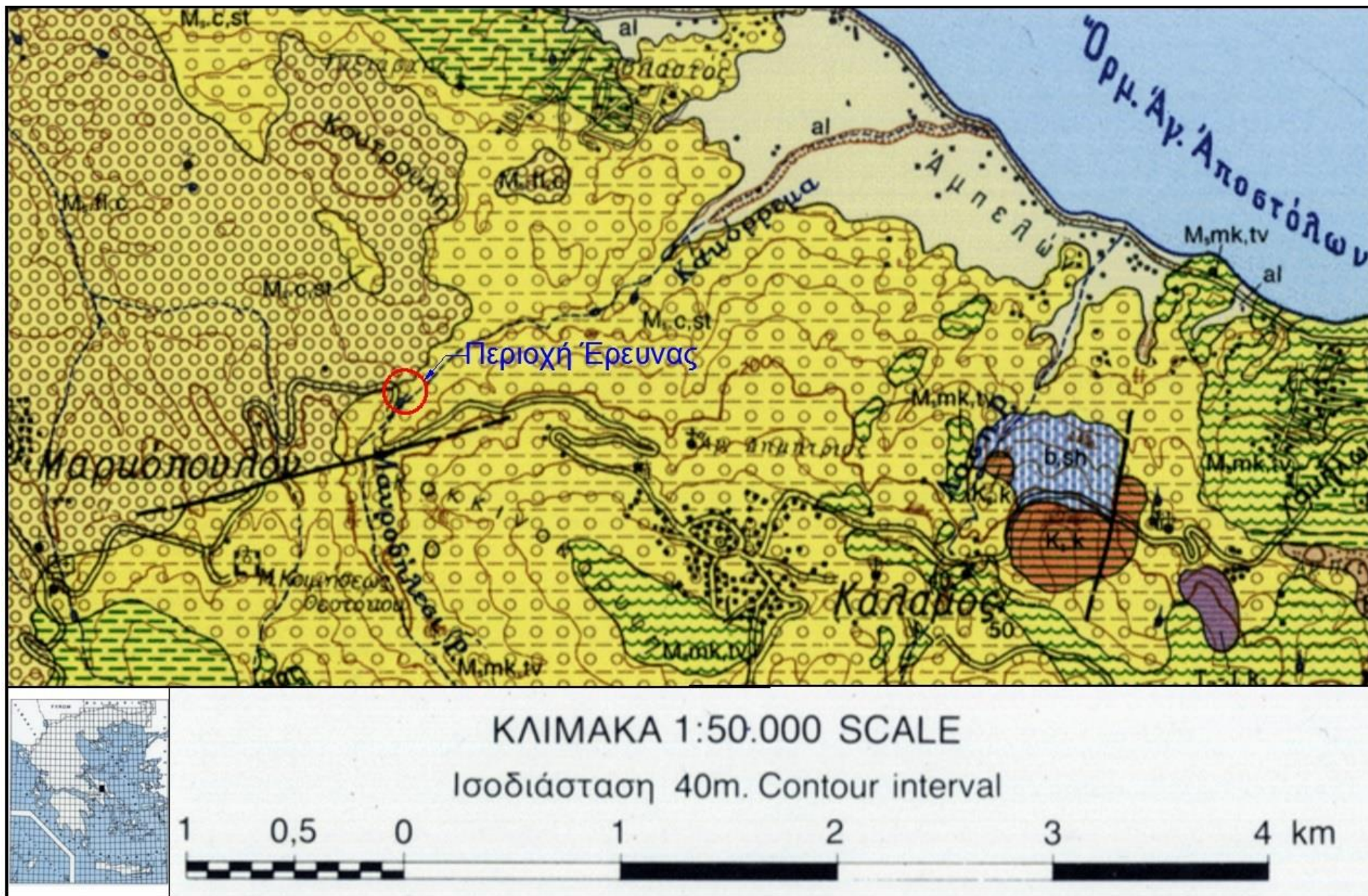
Το Ανώτερο αποτελείται από λεπτούς έως μεσοστρωματώδεις και μερικές φορές φυλλώδεις ασβεστολίθους χρώματος τεφρόφαιου, τεφρού και σε περιπτώσεις υποπράσινου ή κόκκινου, με κονδύλους και διαστρώσεις πυριτολίθων. Σε ορισμένες θέσεις παρατηρούνται παρεμβολές ασβεστολιθικών κροκαλοπαγών. Το πάχος τους φτάνει μέχρι και τα 150m.

Το Κατώτερο τμήμα αποτελείται από μεσοστρωματώδεις και κατά θέσεις παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους, χρώματος λευκότεφρου ή τεφρού και κατά θέσεις σκουρότεφρου ή υποκίτρινου. Κατά κύριο λόγο είναι κρυσταλλικοί, νηριτικοί, καρστικοί και με απολιθώματα ρουδιστών και γαστεροπόδων, ενώ τοπικά είναι βιοκλαστικοί ή λατυποπαγείς με λατύπες έως και 5cm. Το πάχος τους κυμαίνεται από 200m έως 400m.

Στη συνέχεια παρατίθεται ο γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος, όπως επίσης και γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης, ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Αμφιάρειου σε μεγαλύτερη ανάλυση και η στρωματογραφική στήλη στην περιοχή του Ωρωπού.



Εικόνα 5.5: Γεωτεκτονικό σχήμα Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιοδοτική μάζα, Pe: Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου, Al: Υποζώνη Αλμωπίας, Pl: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικοκυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού-Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών, Au: Ενότητα "Πλακώδεις ασβεστόλιθοι-Ταλέα όρη". (Κατά Mountrakis et al 2010).



Εικόνα 5.6: Τμήμα Γεωλογικού χάρτη Ερέτριας 1:50.000, στο οποίο διακρίνεται η περιοχή μελέτης (Γ. Κασικάτσος 1977).

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

ΟΛΟΚΑΙΝΟ

Προσχωματικές αποθέσεις: σε ποταμοκοιλιάδες ανοικτές προς τη θάλασσα ή σε μικρές εσωτερικές λεκάνες, κυρίως από χαλαρά καστονάχρωμα αργιλοαμμόδη υλικά με διάσπαρτες κροκαλολάτιπες και κατά θέσεις, με παρεμβολές χαλαρών κροκαλολατυποπαγών, **αούδετα υλικά**, από άμμιους και κροκαλολάτιπες στις κοίτες των χειμάρρων, **ερυθρογμή** με διάσπαρτες κροκαλολάτιπες, **υλικά χειμάρρων αναθεθμίδων:** μικρού ύψους και **παράκτιοι σχηματισμοί:** από άμμιους, κροκάλες και συνεκτικούς ψαμμίτες (beach rocks)

al

ΝΕΟΓΕΝΕΣ

ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

Περιοχή Μαλακάσας - Ωρωπού

Οι νεογενείς σχηματισμοί της περιοχής Μαλακάσας-Ωρωπού αποτελούν τμήμα της μεγάλης νεογενούς λεκάνης Θηβών-Τανάγρας-Ωρωπού. Αποτελούνται από δύο Ενότητες σχηματισμών: μία Ανώτερη εξ ολοκλήρου από ποταμοχερσαίες αποθέσεις, και μία Κατώτερη κυρίως από λιμναίες και λιγότερο από ποταμολιμναίες αποθέσεις (βλ. Στρατογραφική στήλη τμήματος Αττικής).

Ανώτερη Ενότητα: περιλαμβάνει ένα μόνο λιθostrωματογραφικό οριζόντιο. Τα κροκαλοπαγή Μαρκοπούλου-Ωρωπού που περιγράφονται στη συνέχεια:

Κροκαλοπαγή Μαρκοπούλου-Ωρωπού: καταλαμβάνουν, σχεδόν εξ ολοκλήρου, τη μεταξύ Μαρκοπούλου-Σκάλας Ωρωπού και Ωρωπού περιοχή και συνεχίζονται προς τα δυτικά, στην περιοχή Χαλκουλταίου-Δήλεσι. Αποτελούνται κατά κανόνα από κροκαλοπαγή με συνδετικό υλικό ψαμμιτικό και κροκάλες ποικίλης λιθολογικής σύστασης και ποικίλου μεγέθους, που κυμαίνεται από λίγα έως και 50cm και σε μερικές περιπτώσεις έως και 1m, γενικά προχωρημένης αποστογγύλωσης. Κατά κανόνα είναι μέτριας συνεκτικότητας. Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρούνται και κροκάλες-λατύπες μαργαϊκών ασβεστολίθων-τραβερτινών που προέρχονται απ' τους σχηματισμούς της Κατώτερης Ενότητας. Συνοδεύονται πάντοτε από ψαμμίτες, αργίλους και καοτανέρυθρους πηλούς, με μορφή ενστρώσεων. Σ' αυτά είναι συχνή η παρουσία διασταυρούμενης στρώσης, συνιζηματογενών κατολισθήσεων και συνιζηματογενών ρηγμάτων. Η ηλικία τους είναι ανωμειοκαινική, όπως αυτή προκύπτει από την ανεύρεση στην περιοχή πικερμικής πανίδας με *Hipparion mediterraneum* και *Hipparion koenigswaldi* (I. ΚΟΥΜΑΝΤΑΚΗΣ, 1971). Ανωμειοκαινική ηλικία δίνεται στους σχηματισμούς αυτούς και από τον Α. ΜΕΤΤΟ (1992). Πάχος: 400-500m.



Κατώτερη Ενότητα: αποτελείται κυρίως από λιμναίες αποθέσεις μαργών, μαργαϊκών ασβεστολίθων και κατά θέσεις τραβερτινών, στις οποίες παίρνουν μέρος και κλαστικά ιζήματα, τα οποία επικρατούν στα κατώτερα μέρη του ανατολικού τμήματος της Ενότητας αυτής. Στην περιοχή Μαυροσουβάλας-Μπάφι, στην οποία απαντώνται σχηματισμοί της θάσης της εν λόγω Ενότητας έχουμε απόθεση και λιγνιτικών κοιτασμάτων. Ηλικία: Ανώτερο Μειόκαινο (Βαλλέσιο) (Α. ΜΕΤΤΟΣ, 1992).

Συνολικό πάχος σχηματισμών: μεγαλύτερο από 600m, που διακρίθηκαν ως παρακάτω:

Μαργαϊκοί ασβεστολίθοι και τραβερτίνες: σε μορφή συνήθως φακοειδών ενστρώσεων αλλά και εκτεταμένων οριζώντων, πάχους από λίγα έως και περισσότερα από 100m (περιοχή Μήλεσι και Μονής Σωτήρος), που παρεμβάλλονται σε ολόκληρο το στρωματογραφικό πάχος των σχηματισμών της Κατώτερης Ενότητας. Είναι σκληροί μαργαϊκοί ασβεστολίθοι και τραβερτίνες ή τραβερτινοειδείς ασβεστολίθοι, μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις άστρωτοι, που συνοδεύονται, κατά κανόνα, από σκληρές τεφρόλευκες μάργες, προς τις οποίες συνήθως μεταπίπτουν ταχύτατα ή εναλλάσσονται με αυτές. Είναι χρώματος τεφρόλευκου, φαιοκίτρινου ή κιτρινέρυθρου, συχνά με πολυάριθμες σπέες και τμήματα υδροχαρών φυτών (τραβερτίνες), ψευδοωλιθικοί και εν μέρει καρστικοποιημένοι. Οι αμιγείς τραβερτίνες της ευρείας περιοχής έχουν τύχει εκτεταμένης εκμετάλλευσης.



Μάργες: συμπεριέχουν σε σημαντικό ποσοστό. Είναι συνήθως λευκές έως τεφρόλευκες, υποκίτρινες ή κιτρινόλευκες, εύθρυπτες έως πολύ σκληρές, με καλή στρώση, αμιγείς ή με παρεμβολές αμμοίχων ή και αργιλοίχων μαργών και μερικές φορές με διάσπαρτες κροκάλες. Κατά θέσεις με παρεμβολές πηλών, αργιλοαμμοιωδών υλικών, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών, καθώς και ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων. Σε μερικές περιπτώσεις παρατηρήθηκαν σ' αυτές διαστρώσεις και κόνδυλοι οπαλιού.



Μέγιστο συνολικό πάχος: 250m περίπου

Λιμνοπατάμιες αδρομερείς αποθέσεις: συνίστανται από εναλλασσόμενες αποθέσεις κροκαλοπαγών, κροκαλολατυποπαγών, ψαμμιτών, αργιλοαμμοιωδών υλικών, πηλών, μαργών και μικρών ενστρώσεων μαργαϊκών ασβεστολίθων (αι μεγάλες έχουν διαχωριστεί κατά τη γεωλογική χαρτογράφηση). Απαντώνται σ' ολόκληρο το στρωματογραφικό πάχος των σχηματισμών της Κατώτερης Ενότητας με μορφή οριζώντων και ενστρώσεων ποικίλου πάχους (έως και 100m) ή με μορφή εναλλαγών και πλεωρικών μεταβάσεων προς τους αμιγείς λιμναίους σχηματισμούς. Βαθμιαία τα κατώτερα μέρη των αδρομερών αυτών αποθέσεων μεταβαίνουν προς τις ανατολικές και νοτιοανατολικές παρυφές της νεογενούς λεκάνης σε κροκαλολατυποπαγείς σχηματισμούς με ογκόλιθους (M₅c).



Μένιστο συνολικό πάχος: 300m περίπου.

ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

Οι αλπικοί σχηματισμοί της Πελαγονικής ζώνης στην ευρεία περιοχή του φύλλου μαζί με τους σχηματισμούς του νεοπαλαιζωικού υποβάθρου τους βρίσκονται επωθημένοι πάνω στους μεταμορφωμένους σχηματισμούς του Νεοελληνικού Τεκτονικού Καλύμματος ή πάνω στη σχετικά Αυτόθνη Ενότητα Αλμυροσταπίου-Αττικής, που ανήκει στη ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης και ερμηνεύεται στην περιοχή αυτή με μορφή τεκτονικού παραθύρου. Στην περιοχή του φύλλου εμφανίζονται οι παρακάτω σχηματισμοί της εν λόγω ζώνης.

ΚΕΝΟΜΑΝΙΟ - ΜΑΙΣΤΡΙΧΤΙΟ

Ανωκρητιδικό επικλυσιγενές ασβεστόλιθοι: διακρίνονται σε δύο τμήματα, ένα Ανώτερο και ένα Κατώτερο. - Ανώτερο τμήμα: αποτελείται από λεπτο- έως μεσοστρωματώδεις και μερικές φορές φυλλώδεις μικρικούς ασβεστολίθους, χρώματος τεφρόφαιου, τεφρού και κατά θέσεις υποπράσινου ή κοκκινωπού, με κόνδυλους και διαστρώσεις πυριτολίθων. Κατά θέσεις με παρεμβολές ασβεστολιθικών κροκαλολατυποπαγών. Συχνά βρίσκονται ασύμφωνα πάνω στους υποκείμενους ασβεστόλιθους του Κατώτερου τμήματος. Σε πολλές θέσεις οι άμεσως υποκείμενοι του φύλλου ασβεστόλιθοι είναι μικρικοί και εναλλάσσονται με κλαστικούς-ψαμμίχους ασβεστολίθους. Βρέθηκαν τα παρακάτω μικροπολιώματα που δίνουν σ' αυτούς ανωσενονία-μιαστρίχτια ηλικία:



ΜΕΛΗ ΤΟΥ ΗΩΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ

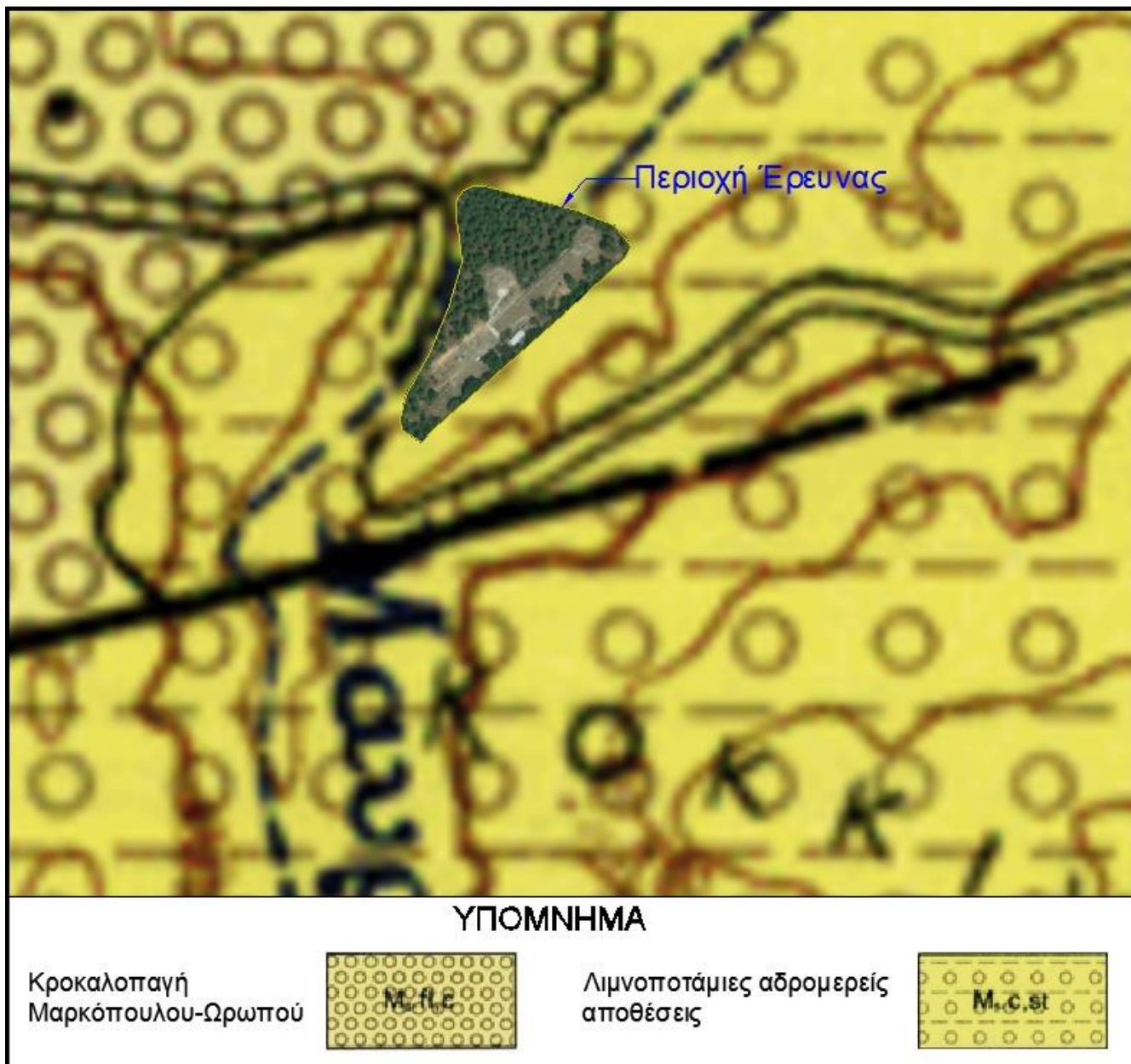
Ηφαιστειοίζηματογενείς σχηματισμοί: είναι μέλη του Ηωελληνικού Τεκτονικού Καλύμματος που αποτελούνται από:

- ιζήματα ωκέανων περιοχών, όπως ραδιολαρίτες, κεραμόχρωμοι πηλίτες, αργίλιοι σχιστόλιθοι, και μικρικοί ασβεστολίθοι με διαστρώσεις πυριτολίθων, οι οποίοι συνήθως εγκλείουν Filaments. Τα ιζήματα αυτά μερικές φορές συνοδεύονται από οργανογενείς ασβεστόλιθους στους οποίους βρέθηκε μικροπανίδα πιθανής λιάσις ηλικίας:



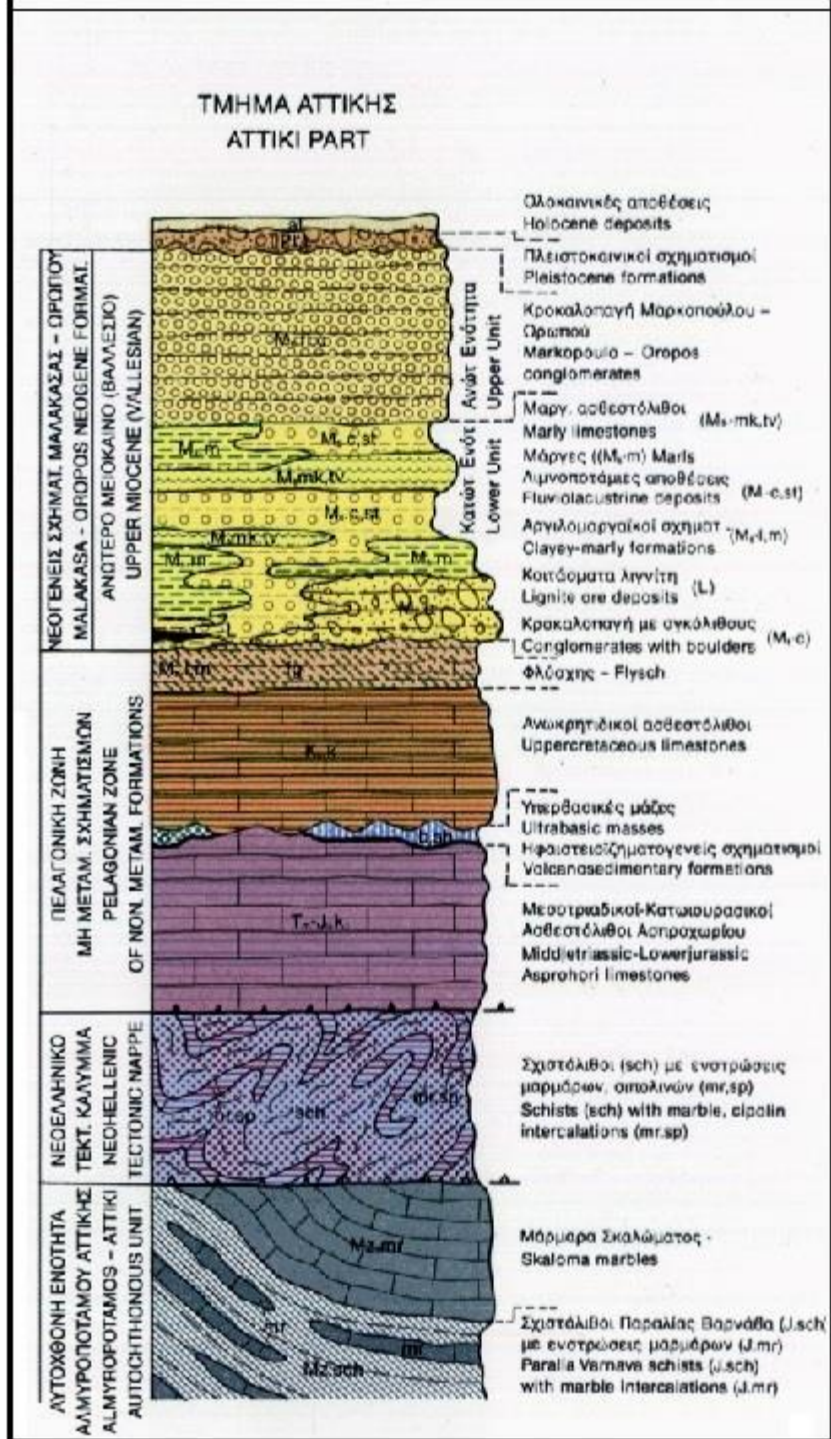
Γεωλογικό όριο		Geological boundary
Γεωλογικό όριο πιθανό ή καλυμμένο		Geological boundary probable or covered
Ρήγμα ορατό και πιθανή προέκτασή του		Fault visible and its probable extension
Ρήγμα κανονικό με ένδειξη του κατεβθέντος τμήματος και πιθανή προέκτασή του		Fault normal with indication of descended block and its probable extension
Επίτευση		Thrust
Επίωθηση, καλυμμένη, μη μεταμορφωμένων σχηματισμών της Πελαγονικής Ζώνης		Overthrust, covered of non metamorphic formations of the Pelagonian zone.
Επίωθηση του Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος.		Overthrust of the Neohellenic tectonic nappe
Τεκτονική επαφή		Tectonic contact
Άξονας αντικλίνας		Anticlinal axis
Άξονας συγκλίνας		Synclinal axis
Διεύθυνση και κλίση στρωμάτων και σχιστότητας		Strike and dip of beds and schistosity
Οριζόντια ή κατακόρυφα στρώματα και σχιστότητα, αντιστοιχα		Horizontal and vertical beds and schistosity, corresponding
Ανεστραμμένα στρώματα και σχιστότητα		Reversed beds and schistosity
Μικροπτυχωμένα στρώματα (σταλιδωμένα)		Microfolded beds
Εμφάνιση μεταλλεύματος: σιδήρου και μαγγανίου, αντιστοιχα		Ore occurrence iron and manganese, corresponding
Αιγνιτικό κοιτάσμα εξορυγμένο		Excavated lignite ore
Λατομείο ενεργό ή αργού «Μαρμάρων Ερέτριας»		Quarry active or idle of «Eretria Marbles»

Εικόνα 5.7: Υπόμνημα γεωλογικού χάρτη (Γ. Κατσικάτος 1977).



Εικόνα 5.8: Γεωλογία εδάφους στην ακριβή τοποθεσία του αρχαιολογικού χώρου του Αμφιάρειου.

ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΤΗΛΕΣ
 STRATIGRAPHIC COLUMNS
 ΚΛΙΜΑΚΑ 1:25.000 SCALE



Εικόνα 5.9: Στρωματογραφική στήλη στην περιοχή του Ωρωπού.

5.5.4. Συμπέρασμα

Ανακεφαλαιώνοντας, βάσει της γεωλογικής μελέτης της περιοχής του αρχαίου θεάτρου, αυτό επικάθεται σε λιμνοποτάμιες αδρομερείς αποθέσεις (M₅.c,st) οι οποίες ανήκουν στην Κατώτερη ενότητα των νεογενών σχηματισμών και συνίστανται από εναλλασσόμενες αποθέσεις κροκαλοπαγών, κροκαλολατυποπαγών, ψαμμιτών, αργιλοαμμωδών υλικών, πηλών, μαργών και μικρών ενστρώσεων μαργαϊκών ασβεστολίθων. Οι λιμνοποτάμιες αυτές αδρομερείς αποθέσεις απατώνται με μορφή οριζόντιων ενστρώσεων ποικίλου πάχους έως και 100m ή με μορφή εναλλαγών και πλευρικών μεταβάσεων προς τους αμιγείς λιμναίους σχηματισμούς.

Επίσης, μάργες (M₅.m) αλλά και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (M₅.mk,tv) της Κατώτερης ενότητας, συναντώνται διάσπαρτα μέσα στις στρώσεις των λιμνοποτάμιων αδρομερών αποθέσεων αλλά συμμετέχουν σε σημαντικό ποσοστό στη γεωλογία της περιοχής. Οι μάργες είναι χρώματος λευκού έως υποκίτρινου από εύθρυπτες έως πολύ σκληρές αμιγείς με καλή στρώση, εκτός από περιορισμένες περιπτώσεις παρεμβολών αμμούχων ή αργιλούχων μαργών και διάσπαρτων κροκάλων. Το μέγιστο πάχος των μαργαϊκών στρώσεων φτάνει τα 250m. Οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι έχουν συνήθως μορφή φακοειδών ενστρώσεων πάχους από λίγα μέτρα έως και περισσότερα από 100m όπως για παράδειγμα στην Μονή Σωτήρος δυτικά του Αμφιάρειου. Πρόκειται για σκληρούς μαργαϊκούς ασβεστολίθους και τραβερτινοειδείς ασβεστολίθους που κυμαίνονται από μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις κατά θέσεις άστρωτοι ενώ κατά κανόνα συνοδεύονται από σκληρές τεφρόλευκες μάργες, προς τις οποίες συνήθως μεταπίπτουν ταχύτατα ή εναλλάσσονται με αυτές.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

6.1. Πρόλογος

Στην υπό μελέτη περιοχή εφαρμόστηκαν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος εντοπισμού της φαινόμενης αγωγιμότητας, και γεωηλεκτρικές τομογραφίες για τον εντοπισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Για την διεξαγωγή των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν 11 τομές μετρήσεων, έτσι ώστε η περιοχή να καλυφθεί κατά τον πληρέστερο δυνατό τρόπο και να εντοπιστεί η κατανομή της φαινόμενης αγωγιμότητας σε δύο βάθη 3m και 6m αντίστοιχα.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν 4 γεωηλεκτρικές τομές με προσανατολισμό Βορρά-Νότου αλλά και Δύσης-Ανατολής, με στόχο να αποκαλυφθούν οι κερκίδες του θεάτρου, αλλά και να ανιχνευθούν τυχόν κατασκευές/δομές πλησίον αυτού.



Εικόνα 6.1: Αεροφωτογραφία (Πηγή Google Maps), όπου σημειώνεται η θέση της περιοχής μελέτης, καθώς επίσης και η θέση των ηλεκτρομαγνητικών τομών (Γαλάζιες) και των γεωηλεκτρικών τομών (κόκκινες).

6.2. Διεξαγωγή ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Αφού σχεδιάστηκαν οι 11 τομές των μετρήσεων στην περιοχή της μελέτης με μεταξύ τους απόσταση 5m, πραγματοποιήθηκαν οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με βήμα 1m, χρησιμοποιώντας το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2 (απόσταση πηνίων 3m) και CMD-4 (απόσταση πηνίων 6m) αντίστοιχο του Geonics EM-31.

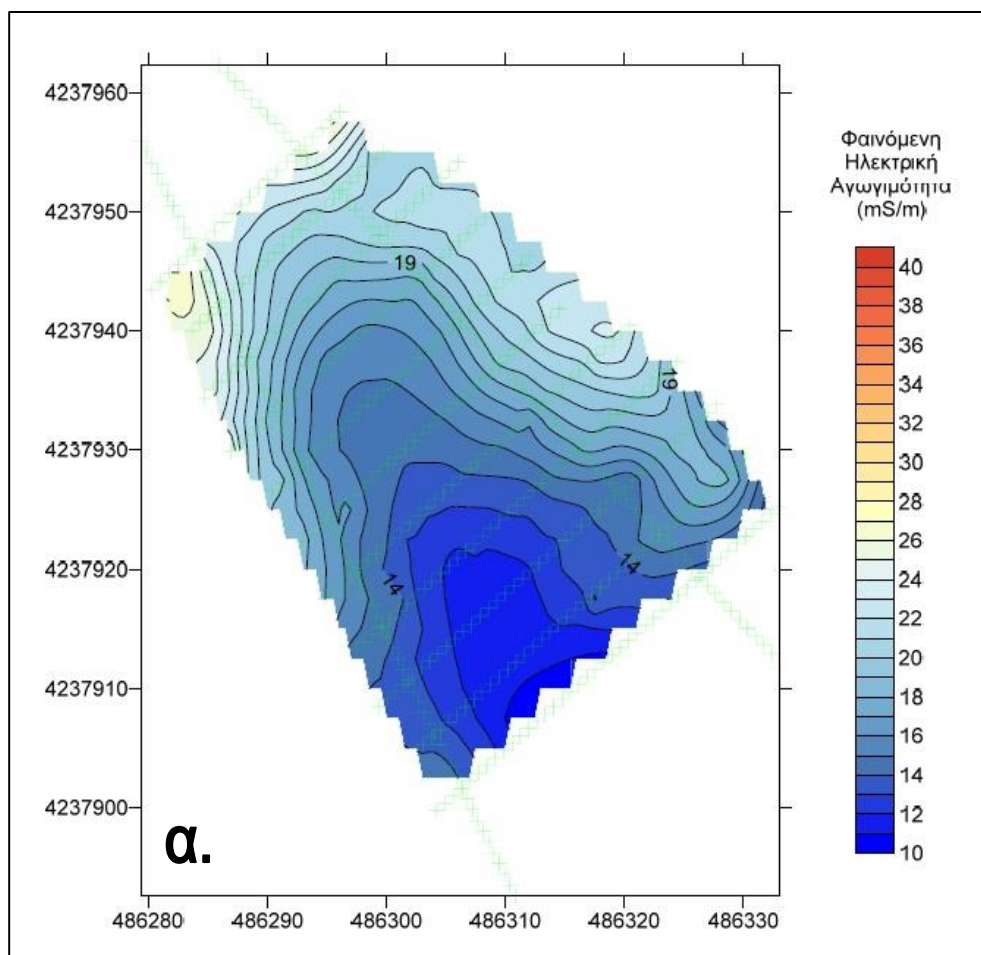
Αρχικά με το CMD-2 πραγματοποιήσαμε μετρήσεις στη ρύθμιση «high» με βάθος διασκόπησης τα 3m. Εν συνεχεία με το CMD-4 στη ρύθμιση «high», πραγματοποιήσαμε μετρήσεις με βάθος διασκόπησης τα 6m.

Ακολούθως, με χρήση του προγράμματος «Surfer» δημιουργήσαμε τους χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τις δύο διαμορφώσεις (δύο βάθη διασκόπησης) που παρατίθενται στις εικόνες 6.2 και 6.3 αντίστοιχα.

Αναλυτικότερα, στην εικόνα 6.2 της διαμόρφωσης CMD-2 (βάθος διασκόπησης 3m) παρατηρούμε τα εξής:

Μέχρι το βάθος των 3m έχουμε σχετικά χαμηλές φαινόμενες ηλεκτρικές αγωγιμότητες, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το έδαφος αποτελείται από ένα σχετικά χαλαρό υλικό με αδρομερή υλικά. Στο νότιο τμήμα του χάρτη, οι τιμές της αγωγιμότητας είναι στα χαμηλότερα επίπεδα τους σχηματίζοντας ένα κοίλο το οποίο πιθανότατα περιγράφει την αμφιθεατρική διαμόρφωση των κερκίδων του αρχαίου θεάτρου.

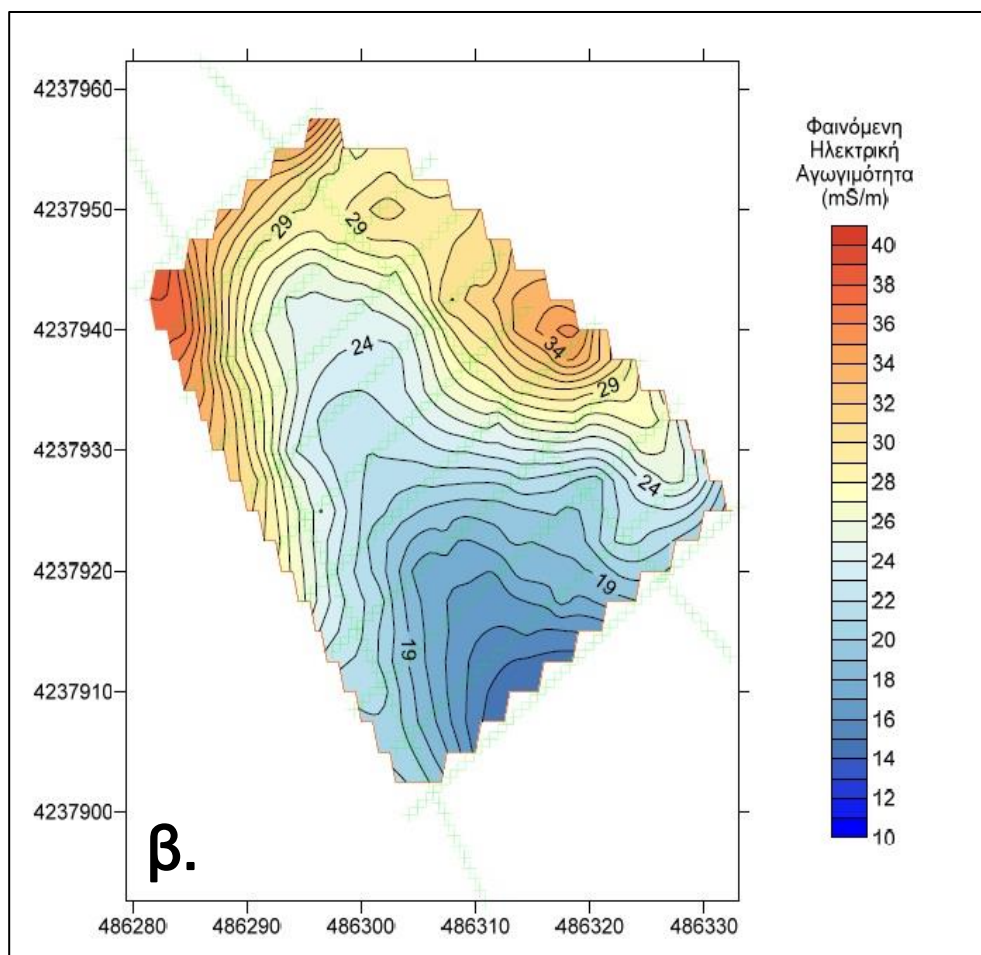
Παρατηρούμε δηλαδή ένα είδος «ομαλής κοιλάδας», η οποία στενεύει προς τα βορειοδυτικά και ανοίγει προς τα νοτιοανατολικά καταλήγοντας τελικά στην έως σήμερα αποκαλυμμένη εκσκαφή του θεάτρου. Πλευρικά της κοιλάδας πιθανότατα εντοπίζεται το αυτόχθονο μαργαϊκό υπόβαθρο.



Εικόνα 6.2: Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε βάθος 3m (Διαμόρφωση CMD-2).

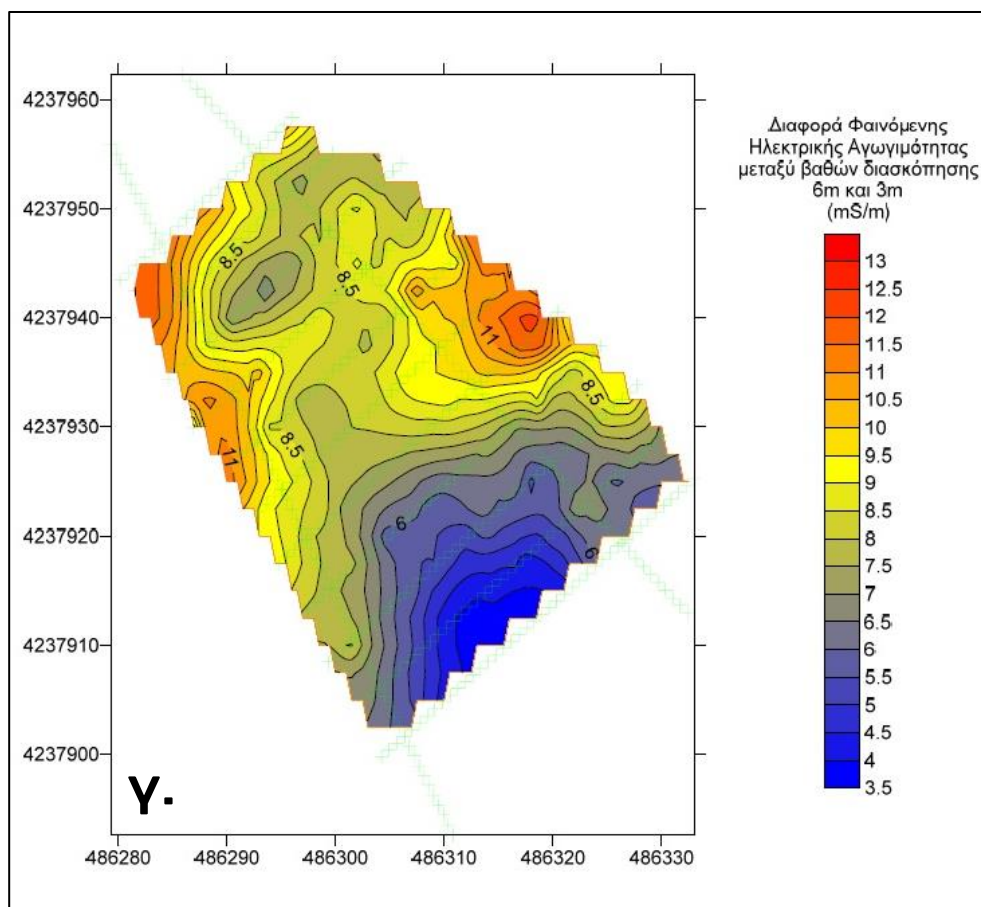
Στην εικόνα 6.3 της διαμόρφωσης CMD-4 (βάθος διασκόπησης 6m) παρατηρούμε τα εξής:

Σε αυτό το βάθος διασκόπησης εντοπίζεται και πάλι ένα αντίστοιχο είδος «κοιλιάδας», η οποία όμως σε αντίθεση με αυτήν των μετρήσεων σε βάθος διασκόπησης 3m δεν είναι ομαλή ως προς την βύθισή της. Συγκεκριμένα στο νότιο τμήμα της η κοιλιάδα παρουσιάζει απότομες μεταβολές στην αγωγιμότητα (μεγάλες κλίσεις), η οποίες ομαλοποιούνται στο βόρειο τμήμα της. Στο μέρος το οποίο υφίσταται το κοίλο του θεάτρου παρατηρείται ένα έντονα αδρομερές υλικό με πολύ χαμηλές αγωγιμότητες όμοιο με αυτό της διαμόρφωσης CMD-2.



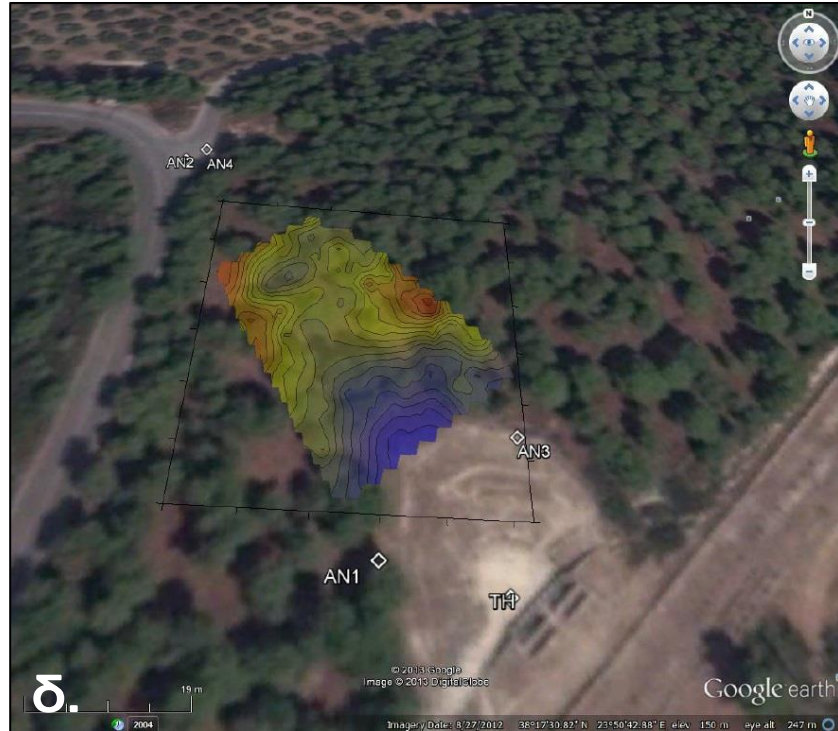
Εικόνα 6.3: Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε βάθος 6m (Διαμόρφωση CMD-4).

Σε μία προσπάθεια να αναδείξουμε τις μεταβολές της αγωγιμότητας ανάμεσα στις μετρήσεις για τα βάθη 3m και 6m, δημιουργήσαμε έναν χάρτη κατανομής φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας αφαιρώντας τις τιμές για βάθος διασκόπησης 3m από τις αντίστοιχες για βάθος διασκόπησης 6m. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου παρατίθεται γραφικά στην εικόνα 6.4.



Εικόνα 6.4: Χάρτης κατανομής της διαφοράς φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 6m – 3m.

Εν συνεχεία, με στόχο να συσχετίσουμε τα αποτελέσματα της κατανομής της διαφοράς φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 6m-3m με το ήδη αποκαλυμμένο θέατρο, τοποθετήσαμε την κατανομή αυτή πάνω στην αεροφωτογραφία της περιοχής (πηγή Google Earth) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.5. Στην εικόνα 6.6, διαχωρίσαμε την υπάρχουσα κατανομή σε χώρους ανάλογα με τις μεταβολές της αγωγιμότητας, προσπαθώντας να ερμηνεύσουμε την κατάσταση του υπεδάφους της περιοχής ερευνών.

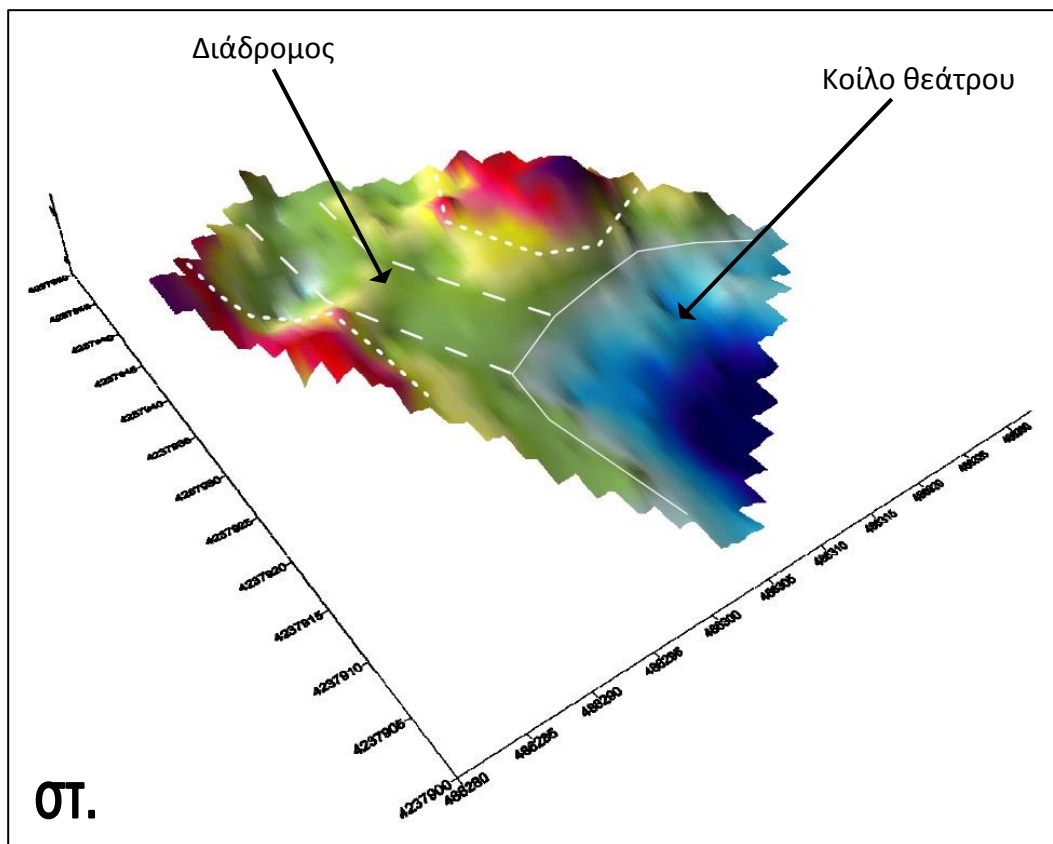


Εικόνα 6.5: Χάρτης κατανομής της διαφοράς φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 6m – 3m πάνω σε αεροφωτογραφία του Google Earth.



Εικόνα 6.6: Χάρτης κατανομής της διαφοράς φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 6m – 3m πάνω σε αεροφωτογραφία του Google Earth. Οι διάφοροι χώροι που ανιχνεύθηκαν οριοθετούνται από τις άσπρες διαγραμμίσεις.

Για την πληρέστερη απεικόνιση της αποτύπωσης του υπεδάφους, παρακάτω παρουσιάζεται και η τρισδιάστατη αποτύπωση της κατανομής των διαφορών φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 6m-3m στην περιοχή των ερευνών (εικόνα 6.7).



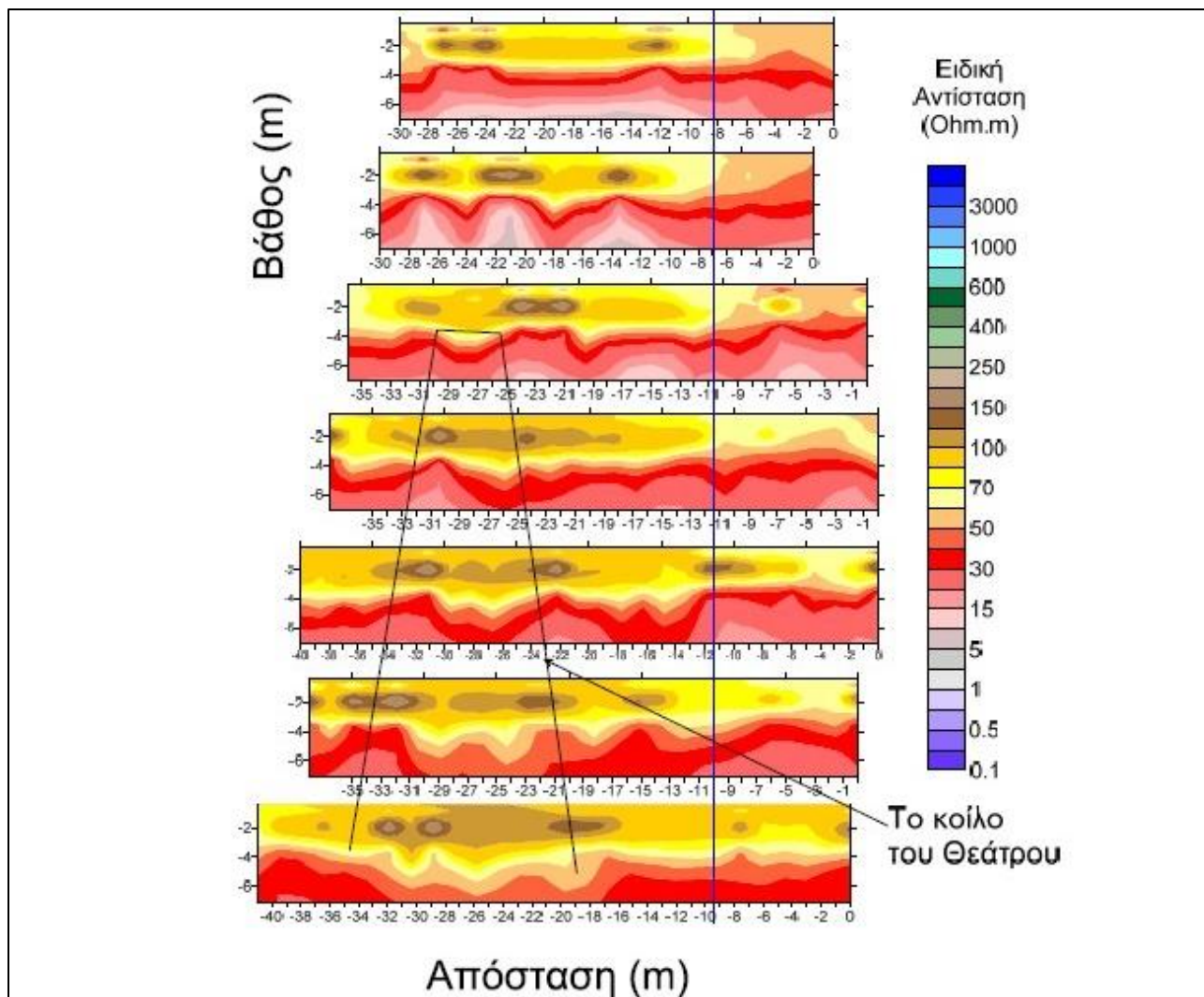
Εικόνα 6.7: Τρισδιάστατη αποτύπωση της κατανομής της διαφοράς φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 6m – 3m. Οι διάφοροι χώροι που ανιχνεύθηκαν οριοθετούνται από τις άσπρες διαγραμμίσεις.

Μελετώντας τις παραπάνω απεικονίσεις της κατανομής των διαφορών φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα βάθη 6m-3m, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

1. Στην νότια – νοτιοανατολική περιοχή (μπλε χρώμα) των χαμηλών διαφορών ηλεκτρικής αγωγιμότητας που περικλείεται από τη συνεχόμενη λευκή γραμμή, πιθανότατα περιγράφεται το κοίλο του θεάτρου με τις κερκίδες, όπως αυτό διαμορφώνεται κάτω από τα αδρομερή/χαλαρά υλικά που το καλύπτουν.

2. Στα δυτικά και ανατολικά της λεπτής διακεκομμένης γραμμής (περιοχές με κόκκινες αποχρώσεις) αρχίζει το αυτόχθονο μαργαϊκό υπόβαθρο.
3. Εσωτερικά των ορίων της λεπτής διακεκομμένης γραμμής και βόρεια του κοίλου, ο διάδρομος (περιοχή με πράσινες αποχρώσεις) που ορίζεται από την χονδρή διακεκομμένη γραμμή, είναι πληρωμένος με διαφορετικής ποσόστωσης αδρομερή υλικά και ίσως υποδηλώνει την ύπαρξη μιας τεχνητής διόδου από και προς το θέατρο από τα βόρεια. Η δίοδος αυτή αρχικά δείχνει να ακολουθεί πορεία προς βορρά, ενώ στη συνέχεια αλλάζει κατεύθυνση προς ανατολάς.

Παρακάτω παρουσιάζεται και μία νέα τεχνική που αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ουσιαστικά πρόκειται για την μετατροπή των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων της κάθε τομής (με διαφορετικά βάθη διασκόπησης) σε τιμές ηλεκτρικής τομογραφίας. Η τεχνική αυτή έχει σημαντικά μικρότερη ακρίβεια από την πραγματική γεωηλεκτρική τομογραφία αλλά είναι ικανή να μας δώσει μια γενικότερη εικόνα της κατανομής της ειδικής αντίστασης σε βάθος. Στην εικόνα 6.8 απεικονίζονται οι 11 γεωηλεκτρικές τομές, στις οποίες μπορούμε να εντοπίσουμε την παρουσία του κοίλου του θεάτρου (τομές 1-5).



Εικόνα 6.8: Αποτύπωση της μετατροπής των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων σε προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας.

6.3. Γεωηλεκτρικές τομογραφίες

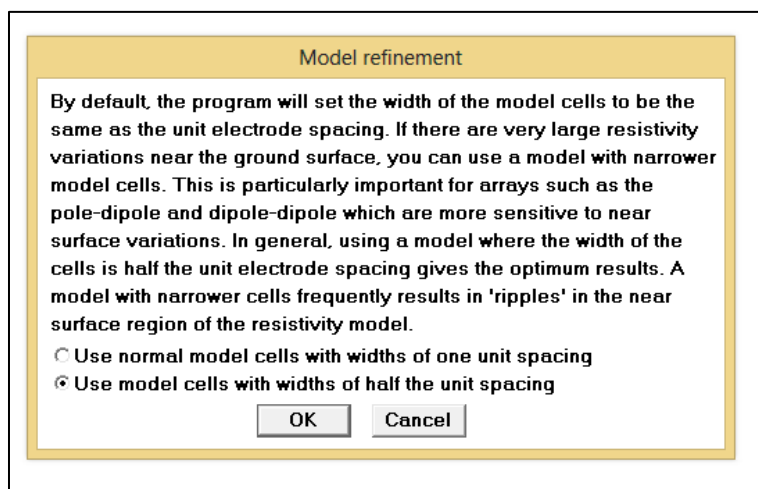
Οι 4 γεωηλεκτρικές τομές των οποίων η ακριβής θέση και προσανατολισμός απεικονίζονται στην εικόνα 6.1, είχαν ως βασικό στόχο να αποκαλύψουν τις κερκίδες του θεάτρου σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων, αλλά και να ανιχνεύσουν τυχόν κατασκευές/δομές στην περιοχή πλησίον αυτού προς ανατολάς.

Οι τομογραφίες έγιναν με χρήση της διάταξης pole-dipole με απόσταση ηλεκτροδίων 1,5m, η οποία δύναται να αποκαλύψει τυχόν δομές και την έκταση τους σε βάθος και παράπλευρα, με μεγάλη ακρίβεια (3000 μετρήσεις).

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των ηλεκτρικών τομογραφιών, αλλά και την εξαγωγή του τελικού προφίλ της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα RES2DINV (Loke and Barker, 1996). Το πρόγραμμα αυτό, μας δίνει τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας.

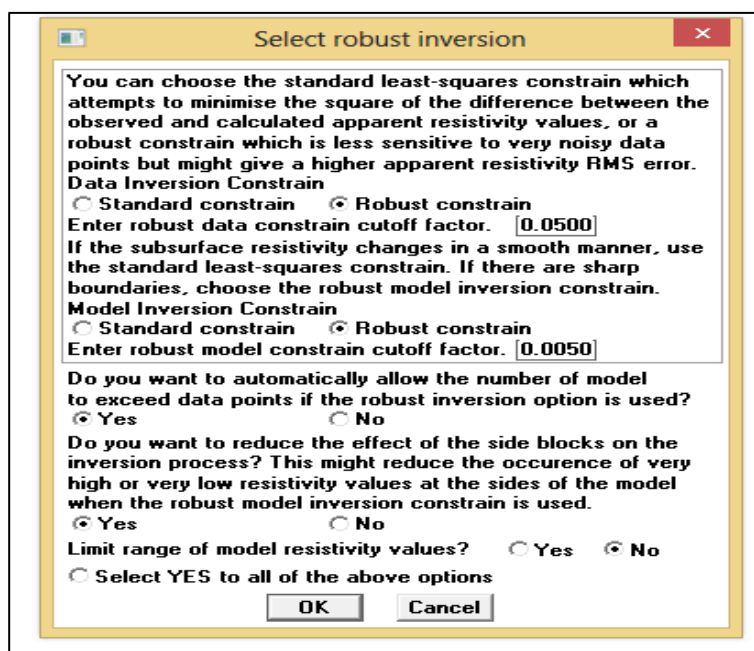
Συγκεκριμένα:

1. Επιλέξαμε τη ρύθμιση «Model Refinement», η οποία δίνει στο πρόγραμμα τη δυνατότητα να δημιουργήσει περισσότερες μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων, μέσω της επεξεργασίας των ήδη υπαρχόντων μετρήσεων. Ως αποτέλεσμα, το τελικό μοντέλο μπορεί να διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.9 : Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της παραμέτρου Model Refinement.

2. Τέλος, επιλέξαμε την παράμετρο «Robust–Robust» προκειμένου να αφαιρέσουμε τον «θόρυβο» και να μπορέσουμε να έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται απότομα. Η επιλογή «Robust – Robust» παρέχει την καλύτερη ερμηνεία των μετρήσεων, δεδομένου ότι τα επιφανειακά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια και ως εκ τούτου ο παραγόμενος «θόρυβος» εξαλείφεται.



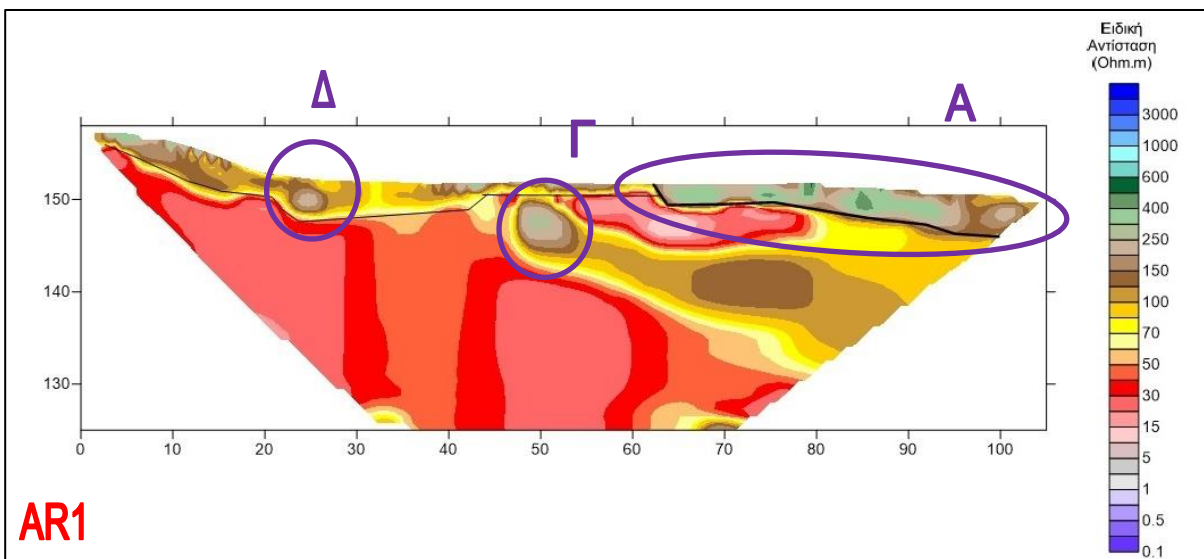
Εικόνα 6.10: Εικόνα από το πρόγραμμα επεξεργασίας RES2DINV για την επιλογή της παραμέτρου «Robust – Robust».

Ακολούθως, στις εικόνες 6.11, 6.12, 6.13 και 6.14 παραθέτουμε τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης (τομές AR1, AR2, AR3, AR4) στο πρόγραμμα RES2DINV.

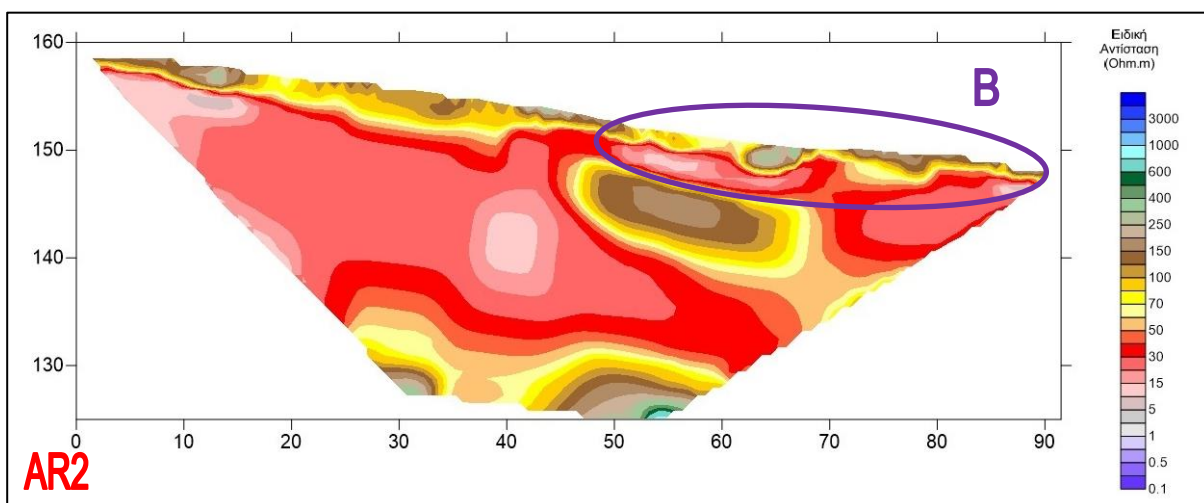
Επίσης, με σκοπό την πληρέστερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων στο χώρο μελέτης, δημιουργήσαμε μία τρισδιάστατη παρουσίαση και των τεσσάρων γεωηλεκτρικών τομογραφιών. Με τον τρόπο αυτό έχουμε τη δυνατότητα συνδυαστικά οριοθετήσουμε τυχόν ανωμαλίες, γεγονός που θα δώσει μεγαλύτερη αξιοπιστία στα τελικά μας συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, μελετώντας τις παρακάτω απεικονίσεις της κατανομής των γεωηλεκτρικών προφίλ για τις τομές AR1, AR2, AR3, AR4, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

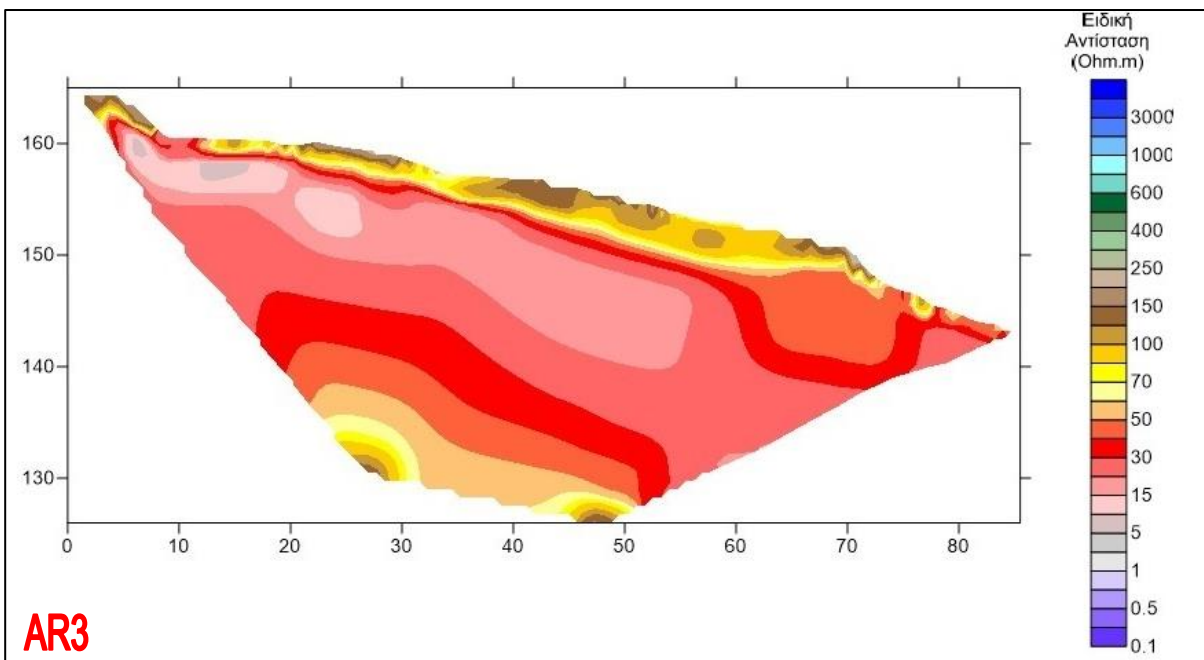
1. Ανατολικά του θεάτρου στις σημειωμένες περιοχές Α και Β, παρατηρούμε μία έκταση μεγάλου μήκους που παρουσιάζει σημαντικά αυξημένες αντιστάσεις, οι οποίες πιθανότατα υποδεικνύουν την ύπαρξη αρχαίων κατασκευών.
2. Η τιμές της ειδικής αντίστασης στις περιοχές Γ και Δ βόρεια και περιμετρικά των αποκαλυμμένων κερκίδων, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι σε βάθος 1-3m της εν λόγω περιοχής υπάρχουν κατασκευές από πέτρα, που πιθανότατα αποτελούν τη συνέχεια των πέτρινων βάσεων των κερκίδων που έχουν ήδη εκσκαφεί μέχρι σήμερα.
3. Η ευρύτερη περιοχή (ΣΤ) μέτριων προς υψηλών αντιστάσεων που σημειώνεται στην τριδιάστατη απεικόνιση με διακεκομμένη διαγράμμιση, επαληθεύει την αρχική μας εκτίμηση (βάσει των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων) ότι βόρεια των κερκίδων υπήρχε διάδρομος πρόσβασης στο αρχαίο θέατρο.
4. Όπως φαίνεται από την περιοχή Ε (παρόμοιων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με αυτές της περιοχής ΣΤ), ο προαναφερθείς διάδρομος που αρχικά έχει κατεύθυνση προς βορρά, στρέφεται ανατολικά. Η παρατήρηση αυτή, επίσης συμπίπτει με τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.



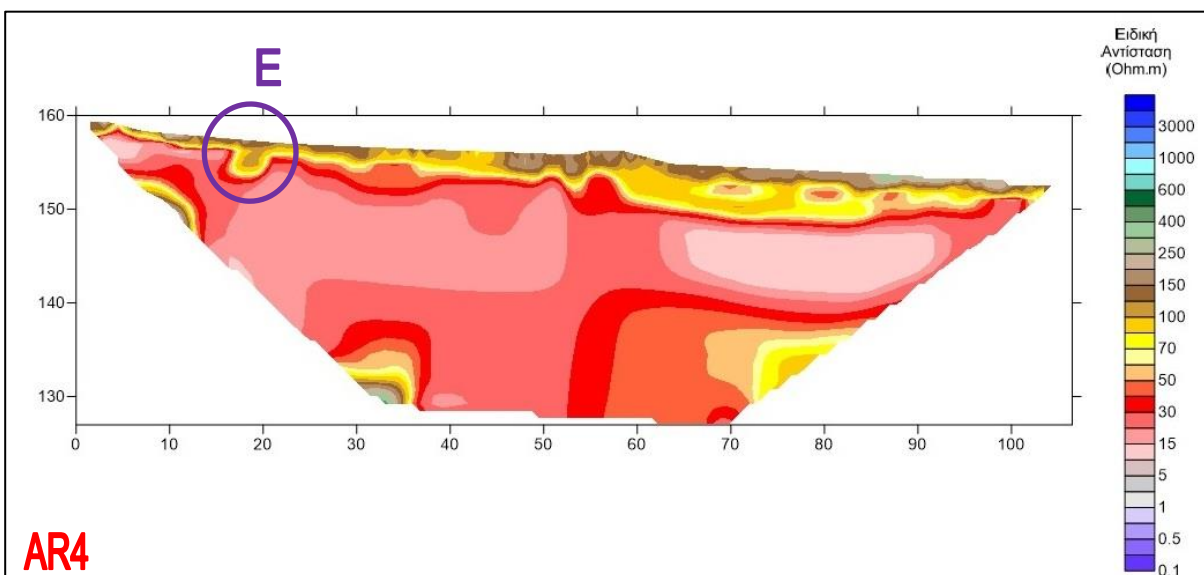
Εικόνα 6.11: Διδιάστατη απεικόνιση της τομής AR1 ηλεκτρικής τομογραφίας.



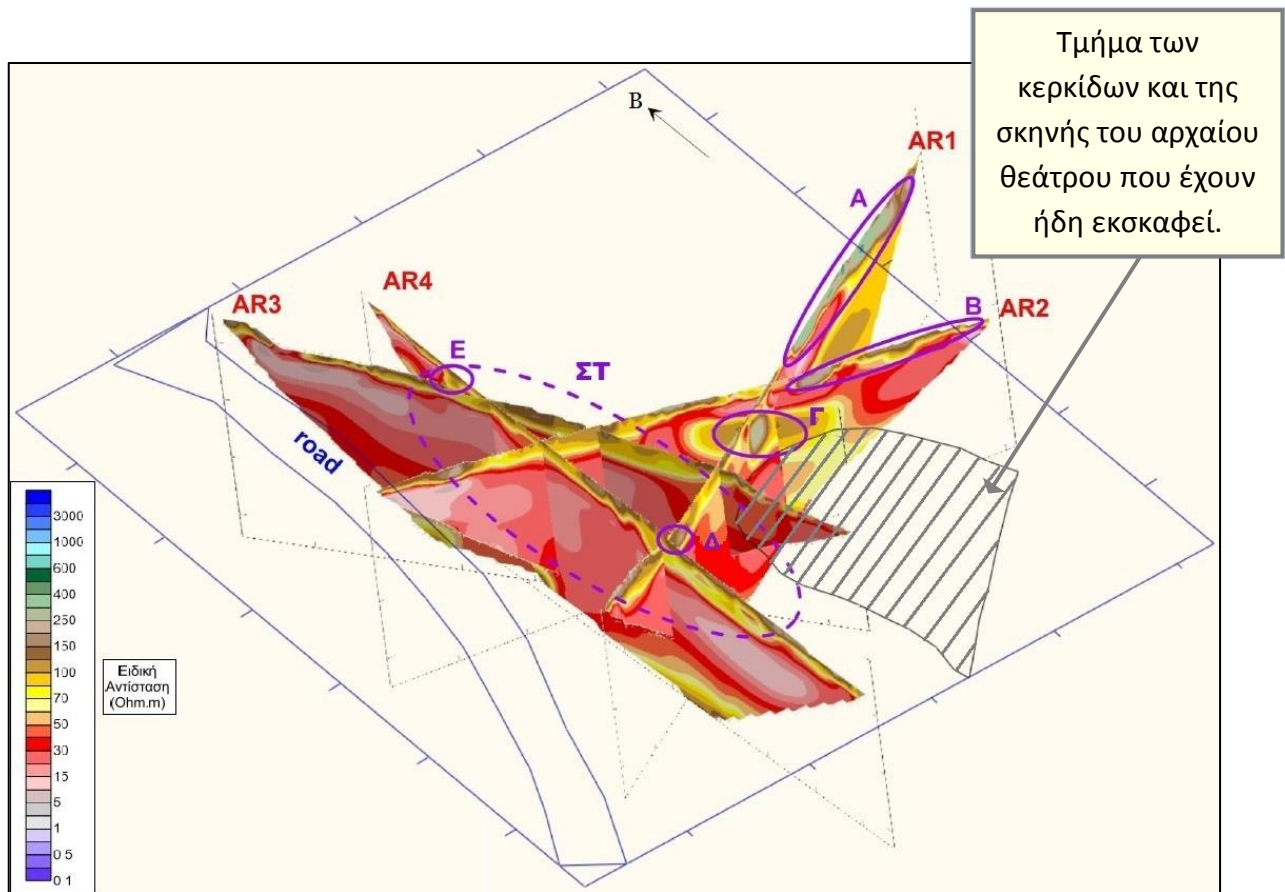
Εικόνα 6.12: Διδιάστατη απεικόνιση της τομής AR2 ηλεκτρικής τομογραφίας.



Εικόνα 6.13: Διδιάστατη απεικόνιση της τομής AR3 ηλεκτρικής τομογραφίας.



Εικόνα 6.14: Διδιάστατη απεικόνιση της τομής AR4 ηλεκτρικής τομογραφίας.



Εικόνα 6.15: Τριδιάστατη απεικόνιση των τομών AR1, AR2, AR3, AR4 ηλεκτρικής τομογραφίας.

6.4. Συμπεράσματα

Από την εφαρμογή των δύο προαναφερθεισών γεωφυσικών μεθόδων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, προκύπτουν ανακεφαλαιωτικά τα εξής συμπεράσματα:

- Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μέτρησης της φαινόμενης αγωγιμότητας σε 2 βάθη διασκόπησης, μας έδωσε αρκετά χρήσιμες πληροφορίες για την εξέλιξη των ερευνών. Συγκεκριμένα, οι αρχικοί χάρτες μας έδωσαν σημαντικές πληροφορίες για την σύσταση του υπεδάφους στο σημείο των ερευνών και επέτρεψαν τον σαφή διαχωρισμό τους από το αυτόχθονο υπόβαθρο.

- Επιπλέον, με την τεχνική δημιουργίας χάρτη κατανομής φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας αφαιρώντας τις τιμές για βάθος διασκόπησης 3m από τις αντίστοιχες για βάθος διασκόπησης 6m, καταφέραμε να αναδείξουμε τις μεταβολές της αγωγιμότητας στα δύο αυτά βάθη. Η συγκεκριμένη τεχνική μας επέτρεψε να αποτυπώσουμε το κοίλο (κερκίδες) του αρχαίου θεάτρου, αλλά και τον πιθανό διάδρομο στα βόρεια αυτού, διευκολύνοντας και επιταχύνοντας έτσι το έργο των αρχαιολογικών ανασκαφών.
- Η καινοτόμος τεχνική που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του ΕΜΠ, στην οποία οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με διαφορετικά βάθη διασκόπησης μετατρέπονται σε τιμές ηλεκτρικής αντίστασης, παρότι αποδίδει αποτελέσματα μειωμένης ακρίβειας, επιβεβαίωσε τα ανωτέρω αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, εντοπίζοντας παρόμοιες διατάξεις στην περιοχή μελέτης.
- Τέλος, οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες ανέδειξαν σημαντικές τοπικές αντιθέσεις στην ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους, σκιαγραφώντας την διάταξη του υποβάθρου στον χώρο μελέτης του Αμφιθέατρου με σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Το βασικό στοιχείο που καθιστά την παρούσα μελέτη επιτυχή στην επίτευξη των αρχικών της στόχων, είναι η σαφής συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των ανωτέρω μεθόδων κατά τη σύγκρισή τους, καθώς τα ευρήματά τους συνηγορούν στην ύπαρξη σημαντικής αρχαιολογικής δραστηριότητας στην υπό μελέτη περιοχή, ενώ η σαφής και ακριβής τοποθέτησή τους στο χώρο σαφώς διευκολύνει το έργο της μελλοντικής αρχαιολογικής ανασκαφής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aitken, M. J. 1958 Magnetic Prospecting. The Water Newton Survey. *Archaeometry* 1(1):24-29.
2. American Society for Testing and Materials (1999), "Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods", Designation D-6429, Philadelphia, PA.
3. Annan, A.P. (1997), "Ground Penetrating Radar Workshop Notes", Sensors & Software, Mississauga Ontario.
4. Anuskiewicz, R. J. 1998 Technology, Theory, and Analysis: Using Remote Sensing as a Tool for Middle-Range Theory Building in Maritime and Nautical Archaeology. In *Maritime Archaeology: A Reader in Substantive and Theoretical Contributions*, edited by L. E. Babits, and Hans Van Tilburg, pp. 223-231. Plenum Press, New York.
5. Ballard, R. 1973 Introduction to the 1973 Hardscrabble Edition. In *Old Fort Saint Joseph*. Hardscrabble Books, Berrien Springs, Michigan.
6. Beck, A.E. (1981). *Physical Principles of Exploration Methods*. John Wiley & Sons, New York.
7. Becker, R., and T. J. Martin 2002 A Preliminary Report on Animal Exploitation Patterns at Fort St. Joseph (20BE23). Paper presented at the 48th annual meeting of the Midwest Archaeological Conference, Columbus, OH.
8. Bevan, B. (1983). Electromagnetics for Mapping Buried Earth Features. *Journal of Field Archaeology* 10:47-54.
9. Bevan, B. (1994). A \$50 Resistivity Meter. Submitted to the National Park Service, IAS, Denver, Colorado.
10. Carpenter, P. J., W. E. Doll, and R. D. Kaufmann, 1998, Geophysical character of buried sinkholes on the Oak Ridge Reservation, Tennessee, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v.3.
11. Carpenter, P. J., W. E. Doll, and R. D. Kaufmann, 1995, Geophysical surveys over karst features near the Oak Ridge Y-12 Plant, Oak Ridge, TN, report Y/ER-200, Martin Marietta Energy Systems, Inc., 88 pages.
12. Clark, A. 1996 "Seeing Beneath the Soil: Prospection Methods in Archaeology, Routledge, London".
13. Clay, R. B. 2006 "Conductivity survey: a survival manual. In *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*, edited by J. K. Johnson. University of Alabama Press, Tuscaloosa."
14. Conyers, L. B. and D. Goodman 1997 "Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. AltaMira Press, Walnut Creek, California".

15. Dunbar, J., 2011, Electrical resistivity investigation of gas hydrate distribution in the Mississippi Canyon Block 118, Gulf of Mexico: Quarterly Report for United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.
16. English Heritage, "Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation", Swindon, 2008.
17. Jackson, J. 1994. Active tectonics of the Aegean region. *Ann. Rev. Earth Planet.*
18. Le Pichon, X. & Angelier, J. 1979. The hellenic Arc and Trench System: a key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean. *Tectonophysics*.
19. Makris, J. 1977. Geophysical investigations of the Hellenides. *Hamb. Geophys. Einzelschr.*
20. McKenzie, D.P. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth Planet. Sci.*
21. McNeill, J.D. (1980), "Electrical Conductivity of Soils and rocks", Technical Note TN-5, Geonics Limited, Mississauga, Ontario.
22. Molnar, P. & Tapponier, P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*.
23. Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P.I., Tsokas, G.N. and Sarris, A. Efficient ERT Measuring and Inversion Strategies for 3D Imaging of Buried Near Surface Geophysics.
24. Papazachos, B.C. & Comninakis, P.E. 1978. Deep structure and tectonics of the Eastern Mediterranean. *Tectonophysics*.
25. Parasnis, D.S. Principles of Applied Geophysics. Third Edition, Chapman and Hall, London, 1997.
26. Tsokas, G.N., Giannopoulos, A., Tsourlos, P., Vargemezis, G., Tealby, J.M., Sarris, A., Papazachos, C.B. and Savopoulou, T. A large scale geophysical survey in the archaeological site of Europos (N. Greece) *Journal of Exploration Geophysic.*
27. Vargemezis Gewrgios (2006), "Geophysical Survey over the eastern Anthemounta basin", European Research Program LIFE, 04ENV/GR/000099.
28. Witten, A. J. 2006 "Handbook of Geophysics and Archaeology. Equinox Publishing, London".
29. Καραλής Πέτρος, "Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Ενταφιασμένων Αρχαιοτήτων στην Περιοχή Κερατέας Αττικής", Διπλωμαστική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π, 2011.

30. Τσόκας, Γ.Ν. Εισαγωγή στις μεθόδους ανάλυσης και ερμηνείας γεωλογικών παρατηρήσεων, Παν. Θεσ/νίκης, 1990.
31. Τσαΐμου Κ.Γ. Αθήνα 1991 “Αρχαιογνωσία των μετάλλων: Τεχνολογία των μετάλλων κατά την αρχαιότητα.”