



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**«Γεωφυσική Έρευνα με ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους
στις περιοχές Καστέλι και Λιβάδι της Νήσου
Κεφαλληνίας»**



Μιχαλόπουλος Φώτης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ, 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

«Γεωφυσική Έρευνα με ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους στις περιοχές Καστέλι και Λιβιάδι της Νήσου Κεφαλληνίας»

Μιχαλόπουλος Φώτης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Γεώργιος Αποστολόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σοφία Σταματάκη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Γεώργιος Αμολοχίτης
ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι καρπός δουλειάς με συγκεκριμένες απαιτήσεις και δυσκολίες. Ωστόσο με βοήθησε πολύ στη διεύρυνση των επιστημονικών μου οριζόντων και όχι μόνο. Θα ήθελα να εκφράσω λοιπόν την ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που με βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του ξεχωριστό τρόπο, σε αυτό το κομμάτι της ζωής μου.

Έμπνευση και παράδειγμα προς μίμηση για εμένα, ώστε να ακολουθήσω τον δρόμο της γεωφυσικής ήταν πρωτίστως και κυρίως ο Καθηγητής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, κ. Αποστολόπουλος Γιώργος, τον οποίο θέλω να ευχαριστήσω πρώτο απ' όλους, τόσο για την βοήθειά του καθ' όλη την πορεία της Διπλωματικής μου Εργασίας, όσο για την εμπιστοσύνη, αλλά και την δύναμη που μου έδωσε, σαν σωστός Δάσκαλος, σε καιρούς που το είχα ανάγκη.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον κ. Γεώργιο Αμολοχίτη, γεωφυσικό και μέλος Ε.ΔΙ.Π του τομέα Μεταλλευτικής, για την σημαντική συνεισφορά του στη διαδικασία των γεωφυσικών μετρήσεων στην Κεφαλλονιά καθώς και για τη συνολική του καθοδήγηση στη διαχείριση της εργασίας.

Συμπληρωματικά, ευχαριστώ τους Διδάκτορες γεωφυσικούς κ. Κωνσταντίνο Λεωνταράκη και κ. Χρήστο Ορφανό, αλλά και τον συμφοιτητή μου στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Χρήστο Μπουφίδη για την σημαντική τους βοήθεια στην διαδικασία των γεωφυσικών μετρήσεων αλλά και τις ωραίες στιγμές που περάσαμε στο νησί της Κεφαλλονιάς.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Γεωλόγους κ. Κοσμά Παυλόπουλο καθηγητή του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου, κ. John Underhill Professor of Stratigraphy in the Grant Institute of Geology in the School of Geosciences at The University of Edinburgh και κ. Peter Styles, Professor of Applied and Environmental Geophysics at Keele University για την αξιότιμη προσφορά τους σε γεωλογικά στοιχεία και πληροφορίες που αφορούν την ευρύτερη περιοχή μελέτης της εργασίας μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Odysseus Unbound Foundation και ιδιαιτέρως τον κ. John Crowsaw τόσο για την δυνατότητα πραγματοποίησης της έρευνας όσο και για τη συνεισφορά σε όλα τα στάδια της και τη μοναδική φιλοξενία.

Κλείνοντας, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που με στήριξε με όποιο δυνατό τρόπο σε κάθε μου επιλογή και προσπάθεια και δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω ευχαριστίες σε όλους μου τους φίλους που βρίσκονταν και βρίσκονται δίπλα μου σε οποιαδήποτε βήμα μου, δίνοντας μου δύναμη και χαρίζοντας μου όμορφες στιγμές.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στις περιοχές Λιβάδι και Καστέλι, της νήσου Κεφαλληνίας. Σκοπός της εκπονηθείσας μελέτης είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και η ύπαρξη πιθανών ανθρωπογενών δομών, είτε να εντοπιστεί τέτοια κατανομή ιζημάτων που να έχει επηρεαστεί από αυτές τις πιθανές δομές. Αρχικά έγινε σχεδιασμός της έρευνας με την βοήθεια πληροφοριών από γεωλογική και αρχαιολογική μελέτη που προηγήθηκε. Επιπλέον, για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής έρευνας, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από παρόμοιες δημοσιευμένες περιπτώσεις μελετών γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκαν σε περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Αφού σχεδιάστηκε η γεωφυσική έρευνα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με 3 διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους, την ηλεκτρομαγνητική (EM), το γεωραντάρ (GPR) και την ηλεκτρική μέθοδο (ERT). Η επεξεργασία καθώς και η ερμηνεία των δεδομένων που προέκυψαν από αυτές τις μεθόδους, έγιναν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε η δομή του υπεδάφους, με σημαντικές ανωμαλίες που παρουσιάζουν τη γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής και αρκετές πιθανές ενδείξεις αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Abstract

The subject of this thesis is the geophysical research carried out in Livadi and Kasteli sites of Kefallinia in Greece. The purpose of this study is to investigate both the stratigraphy of the sites and the existence of possible anthropogenic structures, or to identify a sediment distribution that has been affected by these potential structures. The research was initially designed with the help of information from a preceding geological and archaeological study. In addition, data from similar published case studies of geophysical research conducted in sites of archaeological interest were used to design the geophysical research. After the geophysical survey was designed, measurements were made using 3 different geophysical methods, electromagnetic (EM), Ground Penetrating Radar (GPR) and electrical method (ERT). The processing and interpretation of the data obtained from these methods were done at the Applied Geophysics Laboratory of the School of Mining and Metallurgical Engineering of the National Technical University of Athens. From the analysis of the results, the structure of the subsoil was observed, with significant anomalies presenting the geomorphological evolution of the sites and several possible indications of archaeological interest.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract.....	7
Ευρετήριο Εικόνων.....	11
Ευρετήριο Πινάκων.....	16
1. Εισαγωγή.....	17
1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	19
1.2 Δομή της Εργασίας.....	19
2. Θεωρητικό Μέρος.....	20
2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος.....	20
2.1.1 Γενικά.....	20
2.1.2 Ηλεκτρικές Μέθοδοι.....	20
2.1.3 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	21
2.1.4 Παράγοντες επηρεασμού της ειδικής αντίστασης.....	22
2.1.5 Ροή ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο.....	24
2.1.6 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο.....	24
2.1.7 Ροή ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου.....	25
2.1.8 Φαινόμενη ειδική Αντίσταση.....	26
2.1.9 Διατάξεις Ηλεκτροδίων.....	26
2.1.10 Επιλογή Κατάλληλης Διάταξης.....	28
2.1.11 Εξοπλισμός Υπαίθρου.....	30
2.1.12 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις.....	31
2.1.13 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας.....	33
2.2 Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος.....	35
2.2.1 Εισαγωγή.....	35
2.2.2 Τύποι ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων – Εφαρμογές της Μεθόδου.....	36
2.2.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	36
2.2.4 Μεθοδολογία Μετρήσεων.....	37
2.2.5 Βάθος και Ανάλυση.....	38
2.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	40
2.2.7 Μαγνητική Επιδεκτικότητα.....	40
2.2.8 Μεθοδολογία μετρήσεων.....	40
2.2.9 Βάθος και ανάλυση.....	41
2.2.10 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	41
2.2.11 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	42
2.2.12 Βάθος διεύδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.....	43

2.2.13	Συστήματα μέτρησης φάσης.....	43
2.2.14	Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης.....	45
2.3	Γεωραντάρ – GPR (Ground-Penetrating Radar).....	46
2.3.1.	Γενικά.....	46
2.3.2.	Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ.....	48
2.3.3.	Τρόποι μετρήσεων στο ύπαιθρο.....	48
2.3.4.	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου Γεωραντάρ.....	51
3.	Εφαρμογές.....	52
3.1	Εφαρμογή Α: Έρευνα GPR στον αρχαιολογικό χώρο Lara do Santo, στην καρστική περιοχή Lagoa Santa, Minas Gerais, Βραζιλία.....	52
3.1.1	Εισαγωγή.....	52
3.1.2	Τοπική γεωλογία.....	53
3.1.3	Μεθοδολογία.....	54
3.1.4	Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	56
3.1.5	Συμπεράσματα.....	61
3.2	Εφαρμογή Β: Ανασυγκρότηση αρχαιολογικού χώρου της Μεσογείου με την ενσωμάτωση γεωφυσικών και αρχαιολογικών δεδομένων: Ανατολική περιοχή της αρχαίας πόλης Νόρα (Σαρδηνία, Ιταλία).....	62
3.2.1	Εισαγωγή.....	62
3.2.2	Γεωλογικά και γεωμορφολογικά δεδομένα της Nora.....	63
3.2.3	Γεωφυσική αναζήτηση στη Nora.....	65
3.2.4	Ενσωμάτωση γεωφυσικών, γεωμορφολογικών και αρχαιολογικών δεδομένων.....	71
3.2.5	Συμπεράσματα.....	74
3.3	Εφαρμογή Γ: Μια σύγκριση των τεχνικών έρευνας με Γεωραντάρ, με μαγνητόμετρο και με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή στο House in the Horseshoe το ιστορικό σπίτι (Βόρεια Καρολίνα, Η.Π.Α.).....	75
3.3.1	Εισαγωγή.....	75
3.3.2	Γεωλογικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά περιοχής έρευνας.....	76
3.3.3	Ιστορικό περιοχής έρευνας.....	77
3.3.4	Μεθοδολογία.....	78
3.3.5	Αποτελέσματα και συζήτηση.....	80
3.3.6	Συμπεράσματα.....	86
4.	Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στις περιοχές Καστέλι και Λιβιάδι της Νήσου Κεφαλληνίας.....	88
4.1	Γενικά.....	88
4.2	Γεωλογία της περιοχής.....	92
4.2.1	Γεωλογία των Νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης.....	92
4.2.2	Νεοτεκτονική Δομή των νήσων Κεφαλλονιάς -Ιθάκης.....	94

4.2.3	Τεκτονική Επισκόπηση στην Περιοχή Λιβάδι - Χερσόνησος Ληξουρίου - Χερσόνησος Αργοστολίου.....	96
4.3	Ιστορική αναδρομή της περιοχής.....	98
4.3.1	Η θεωρία του Robert Bittlestone.....	98
5.	Γεωφυσική έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα.....	100
5.1	Γενικά.....	100
5.2	Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	100
5.2.1	Γενικά.....	100
5.2.2	Εξοπλισμός.....	102
5.2.3	Αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικής έρευνας και ερμηνεία.....	104
5.3	Γεωραντάρ (GPR).....	124
5.3.1	Γενικά.....	124
5.3.2	Αποτελέσματα 3D-GPR και ερμηνεία.....	125
5.4	Ηλεκτρική Μέθοδος.....	130
5.4.1	Γενικά.....	130
5.4.2	Εξοπλισμός.....	131
5.4.3	Επεξεργασία μετρήσεων.....	132
5.4.4	Αποτελέσματα έρευνας ηλεκτρικής αντίστασης και ερμηνεία.....	132
5.5	Συνολικά Συμπεράσματα και Σχόλια.....	136
6.	Βιβλιογραφία.....	138

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο.....	21
Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003).....	24
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003).....	25
Εικόνα 2.4: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές (Λούης, 2003).....	25
Εικόνα 2.5: Διάταξη Schlumberger.....	26
Εικόνα 2.6: Διάταξη Wenner.....	27
Εικόνα 2.7: Διάταξη Dipole-Dipole.....	27
Εικόνα 2.8: Διάταξη Pole-Pole.....	28
Εικόνα 2.9: Διάταξη Pole-Dipole.....	28
Εικόνα 2.10: Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Vogelsang, 1995).....	31
Εικόνα 2.11: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2003).....	32
Εικόνα 2.12: Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole-Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.....	33
Εικόνα 2.13: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου.....	34
Εικόνα 2.14: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.....	35
Εικόνα 2.15: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002).....	38
Εικόνα 2.16: Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικείμενου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι το (α), ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετρηθεί με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετρείται και μια ανωμαλία μικρότερου μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι ο στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά το έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος Γεώργιος. 2013).....	39
Εικόνα 2.17: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. Το πηνίο αποστολής σημάτων (T) δημιουργεί ένα αρχικό πεδίο της «EMI» που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό αναγκάζει τα ρεύματα να ρέυσουν στα αγωγίμα αντικείμενα όπως το κοίλωμα που παρουσιάζεται εδώ. Τα ρεύματα δημιουργούν στη συνέχεια ένα δευτερεύον πεδίο. Και τα αρχικά και τα δευτερεύοντα πεδία μετριοούνται στο πηνίο του δέκτη (R).....	42
Εικόνα 2.18: Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου.....	44
Εικόνα 2.19: Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης CMD2, CMD4.....	46
Εικόνα 2.20: Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος. 2013).....	48
Εικόνα 2.21: Το πρώτο σχήμα απεικονίζει την λειτουργία Common Offset, ενώ το δεύτερο την λειτουργία Common Mid-point (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002).....	49

Εικόνα 2.22: Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάση της συχνότητας κεραίας του γεωραντάρ.....	50
Εικόνα 2.23: Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων.....	50
Εικόνα 3.1: Χάρτης τοποθεσίας του αρχαιολογικού χώρου Lara do Santo.....	52
Εικόνα 3.2: Σχηματικό πλέγμα του αρχαιολογικού χώρου Lara do Santo που δείχνει τα τρία μπλόκ όπου αποκτήθηκαν τα προφίλ GPR.....	54
Εικόνα 3.3: Εξοπλισμός GPR με κεραία (a) 200 MHz και (b) 400MHz.....	55
Εικόνα 3.4: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 1 για διαφορετικές θέσεις N. a) 3,2 m; b) 3,4 m; c) 3,6 m; d) 3.8 m; e) 4,0 m; f) 4,2 m.....	56
Εικόνα 3.5: GPR φέτες βάθους των 400 MHz στο μπλοκ 1. α) 0,3 m b) 0,4 m c) 0,5 m d) 0,6 m. Το διάστικτο τετράγωνο δείχνει τις ανωμαλίες που προσδιορίζονται στην εικόνα 3.4.....	57
Εικόνα 3.6: Φωτογραφία εκσκαφής που διεξήχθη στο μπλοκ 1. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την παρουσία καμένων υλικών που βρίσκονται σε εστία φωτιάς σε βάθος 0,3 m.....	57
Εικόνα 3.7: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 2 για διαφορετικές θέσεις E. α) 0,2 m, b) 0,4 m, c) 0.6 m, d) 0,8 m.....	58
Εικόνα 3.8: Φωτογραφία εκσκαφής που πραγματοποιήθηκε στο μπλοκ 2 που δείχνει τον ανθρακικό βράχο.....	58
Εικόνα 3.9: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 3 για διαφορετικές θέσεις N. α) 0,0 m, b) 0,2 m, c) 0,4 m.....	59
Εικόνα 3.10: Φωτογραφία εκσκαφής που πραγματοποιήθηκε στο μπλοκ 3. Η διακεκομμένη έλλειψη δείχνει ένα τεχνητό ξύλο που βρέθηκε σε βάθος 0,1 m.....	59
Εικόνα 3.11: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 3 για διαφορετικές θέσεις N. α) 1,8 m, b) 2,0 m, c) 2,2 m.....	60
Εικόνα 3.12: Φωτογραφία εκσκαφής που διεξήχθη στο μπλοκ 3 που δείχνει ρίζα δέντρου που βρίσκεται σε βάθος 0,1 m.....	60
Εικόνα 3.13: Αεροφωτογραφία της χερσονήσου Nora (Σαρδηνία, Ιταλία). Το κόκκινο ορθογώνιο δείχνει την περιοχή γεωφυσικής έρευνας. β: Στοιχεία τοιχοποιίας (που υποδεικνύονται με κόκκινο βέλος) ορατά στην επιφάνεια του εδάφους εντός της γεωφυσικής περιοχής έρευνας.....	62
Εικόνα 3.14: Γεωλογικός χάρτης που δείχνει την επιφανειακή γεωλογία της χερσονήσου Nora (τροποποιημένη από Di Gregorio et al., 2009).....	64
Εικόνα 3.15: Περιοχές έρευνας που διερευνήθηκαν από τις τέσσερις εφαρμοζόμενες γεωφυσικές μεθόδους: MAG, FDEM, ERT και GPR.....	65
Εικόνα 3.16: Χάρτης ανωμαλιών vertical magnetic pseudo-gradient που παρατηρείται στο μπλε ορθογώνιο της Εικόνας 3.15.....	66
Εικόνα 3.17: Χάρτες κανονικοποιημένων τιμών των (a) out of phase και (b) in-phase στοιχείων που παρέχονται από την FDEM έρευνα στο πράσινο ορθογώνιο της Εικόνας 3.15.....	67
Εικόνα 3.18: Αποτέλεσμα μετατροπής σε 3D της 2D τομογραφίας που πραγματοποιήθηκε στο κόκκινο ορθογώνιο της Εικόνας 3.15. Οι επτά φέτες απεικονίζουν την κατανομή της ειδικής αντίστασης σε διαφορετικά βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Ο χάρτης στην κορυφή της ακολουθίας δείχνει τη θέση των προφίλ ERT.....	69

Εικόνα 3.19: Ακολουθία επτά φετών βάθους που λαμβάνονται από την έρευνα GPR στο καφέ ορθογώνιο της Εικόνας 3.15. Οι χάρτες απεικονίζουν τις κατανομές πλάτους ανάκλασης σε διαφορετικά βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Ο χάρτης στην κορυφή της ακολουθίας δείχνει τη θέση των προφίλ GPR.....	70
Εικόνα 3.20: Σχηματική απεικόνιση των αρχαιολογικών δομών που έφερε στο φως η ανασκαφή στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής γεωφυσικής έρευνας.....	72
Εικόνα 3.21: (a) Τοποθέτηση των αρχαιολογικών ευρημάτων στους χάρτες ERT (αριστερά) και GPR (δεξιά) σε βάθος 1m. (b) Χάρτης ERT σε βάθος 1,6 m (αριστερά) και FDEM out of phase (δεξιά). (c) Χάρτης ERT σε βάθος 3.7m (αριστερά) και μαγνητικός χάρτης (δεξιά).....	72
Εικόνα 3.22: Το House in the Horseshoe σήμερα.....	75
Εικόνα 3.23: Φυσιογραφικό και τοπογραφικό πλαίσιο του House in the Horseshoe.....	76
Εικόνα 3.24: Περιοχή έρευνας στο House in the Horseshoe.....	78
Εικόνα 3.25: Αποτελέσματα γεωφυσικών ερευνών (Turner και Lukas, 2016). A. Αγωγιμότητα B. Μαγνητική επιδεκτικότητα C. GPR D. Μαγνητόμετρο.....	80
Εικόνα 3.26: Υπολείμματα θεμελίωσης της Δομής Ένα που ανιχνεύτηκαν από τους χάρτες αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας.....	81
Εικόνα 3.27: Ιστορική αεροφωτογραφία του House in the Horseshoe. Ευγενική παραχώρηση του GIS της Moore County.....	82
Εικόνα 3.28: Γεωφυσικά αποτελέσματα Δομής Δύο με κατακόρυφο προφίλ GPR και τα προφίλ της εκσκαφής.....	83
Εικόνα 3.29: Γεωφυσικά αποτελέσματα Δομής Τρία με κατακόρυφα προφίλ GPR και προφίλ της εκσκαφής.....	84
Εικόνα 3.30: Προφίλ δυτικού τοίχου της δομής Τρία που δείχνει τη ζώνωση του λάκκου.....	85
Εικόνα 3.31: Κεραμικά στη βάση του λάκκου.....	86
Εικόνα 4.1: το κόκκινο βέλος δείχνει τη θέση της χερσονήσου της Παλικής στην Κεφαλονιά.....	88
Εικόνα 4.2: Μεγέθυνση του κόκκινου παραλληλογράμμου της Εικόνας 4.1.....	89
Εικόνα 4.3: α) Στον κόκκινο κύκλο φαίνεται η περιοχή «Καστέλι α'», β) στον πράσινο, η περιοχή «Καστέλι β'», γ) στον κίτρινο η περιοχή «Λιβιάδι α'» και δ) στον μπλε, η περιοχή «Λιβιάδι β'».....	89
Εικόνα 4.4: Συνολική εικόνα των περιοχών έρευνας στη θέση Λιβιάδι.....	90
Εικόνα 4.5: Πανοραμική εικόνα της περιοχής έρευνας «Λιβιάδι α'».....	90
Εικόνα 4.6: Φωτογραφία από την περιοχή «Λιβιάδι β'».....	90
Εικόνα 4.7: Φωτογραφία από τη περιοχή «Καστέλι α'».....	91
Εικόνα 4.8: Πανοραμική εικόνα από την κορυφή στην περιοχή «Καστέλι β'».....	91
Εικόνα 4.9: Η θέα του κόλπου του Λιβαδιού από την περιοχή Καστέλι β'.....	91
Εικόνα 4.10: Νεοτεκτονικός Χάρτης της νήσου Κεφαλλονιάς και Ιθάκης.....	95
Εικόνα 4.11: Απλοποιημένος τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης της νήσου Κεφαλονιάς (Underhill,1989). Thrusts: ανάστροφα ρήγματα, Anticlines: αντίκλινα, Synclines: σύγκλινα, Normal Faults :κανονικά ρήγματα ΚΑΚ: Κόλπος Αγίας Κυριακής, Κ: Καταβόθρες, ΚΛ: Κόλπος Λιβαδιού, Cape Liakka: ακρωτήριο Λιάκκα, Triassic: Τριαδικό, Jurassic: Ιουρασικό, Cretaceous and Paleogene: Κρητιδικό και Παλαιογενές, Miocene: Μειόκαινο, Plio-Pleistocene: Πλειο-Πλειστόκαινο, Late-Quaternary: Άνω-Τεταρτογενές, White Rocks Fault: Επώθηση <<White	

Rocks>>, Argostoli Fault: Επώθηση Αργοστολίου (αποτελείται από δύο κλάδους οι οποίοι συγκλίνουν στα νότια του νησιού).....	97
Εικόνα 4.12: Η προτεινόμενη διαδρομή για το ταξίδι του Οδυσσέα από την άφιξη του στην Ιθάκη στον κόλπο του Αθέρα (Phorcys bay) μέχρι το παλάτι του στο Καστέλι.....	99
Εικόνα 5.1 : Πορεία καταγραφής μετρήσεων στην περιοχή «Καστέλι α΄».....	101
Εικόνα 5.2 : Πορεία καταγραφής μετρήσεων στην περιοχή «Καστέλι β΄».....	101
Εικόνα 5.3 : Πορεία καταγραφής μετρήσεων στην περιοχή «Λιβιάδι α΄».....	102
Εικόνα 5.4: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-2.....	102
Εικόνα 5.5: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.....	104
Εικόνα 5.6: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.....	105
Εικόνα 5.7 : Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.....	106
Εικόνα 5.8: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.....	107
Εικόνα 5.9 : Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.....	108
Εικόνα 5.10: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.....	109
Εικόνα 5.11: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένος από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m και τοποθετημένος στο Google Earth.....	110
Εικόνα 5.12: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.....	111
Εικόνα 5.13: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.....	112
Εικόνα 5.14: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.....	113
Εικόνα 5.15 : Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.....	114
Εικόνα 5.16: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.....	115
Εικόνα 5.17: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.....	116
Εικόνα 5.18: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.....	117
Εικόνα 5.19: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.....	118
Εικόνα 5.20: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m, τοποθετημένος στο Google Earth.....	119
Εικόνα 5.21: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.....	120

Εικόνα 5.22: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.....	121
Εικόνα 5.23: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.....	122
Εικόνα 5.24: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.....	123
Εικόνα 5.25 : Τομές GPR στην περιοχή «Καστέλι α΄».....	124
Εικόνα 5.26 : Τομές GPR στην περιοχή «Λιβιάδι α΄».....	125
Εικόνα 5.27: Μοντέλο 3D-GPR της περιοχής «Καστέλι α΄».....	126
Εικόνα 5.28: Μεγέθυνση μπλε παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.27.....	127
Εικόνα 5.29: Μεγέθυνση πράσινου παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.27.....	127
Εικόνα 5.30: Μοντέλο 3D-GPR της περιοχής «Λιβιάδι α΄».....	128
Εικόνα 5.31: Μεγέθυνση κίτρινου παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.30.....	129
Εικόνα 5.32: Μεγέθυνση πορτοκαλί παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.30.....	129
Εικόνα 5.33: Η γεωηλεκτρική τομή τοποθετημένη σε χάρτη Google Earth.....	130
Εικόνα 5.34 : Όργανο μέτρησης SYSCAL Pro.....	131
Εικόνα 5.35 : Γεωηλεκτρικές τομές διάταξης Dipole – Dipole, με μέθοδο αντιστροφής Robust-Robust (RR) (πάνω) και Robust-Robust – Horizontal (RRH) (κάτω).....	133
Εικόνα 5.36 : Γεωηλεκτρικές τομές διάταξης Schlumberger, με μέθοδο αντιστροφής Robust-Robust (RR) (πάνω) και Robust-Robust – Horizontal (RRH) (κάτω).....	134

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα για κάθε μία.....	18
Πίνακας 2.1: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013).....	23
Πίνακας 2.2: Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στην ειδική αντίσταση των πετρωμάτων (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013).....	23
Πίνακας 2.3: Καταλληλόλητα κάθε διάταξης ανάλογα με την περίπτωση της έρευνας.....	29
Πίνακας 2.4: Εφαρμογές και στόχοι ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	34
Πίνακα 2.5: Τυπικές εφαρμογές οργάνου CMD.....	45
Πίνακας 2.6: Παράθεση ταχυτήτων διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v), τιμών διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) για διάφορους τύπους υλικών....	46

1. Εισαγωγή

Γεωφυσική ονομάζεται η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της Γης, στηριζόμενη στις βασικές αρχές της φυσικής. Αναλύει δηλαδή φυσικά φαινόμενα, όπως η βαρύτητα, ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, η διάδοση των σεισμικών κυμάτων κ.ά., που υπάρχουν ή δημιουργούνται μέσα στη γη και μελετά τις αντίστοιχες φυσικές ιδιότητες, όπως την πυκνότητα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τη μαγνητική επιδεκτικότητα, την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κ.ά..

Με μια πλατιά έννοια, η Γεωφυσική περιλαμβάνει την μελέτη της «στερεάς» Γης, της θάλασσας, της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. Έχει επικρατήσει όμως διεθνώς, η Γεωφυσική να ταυτίζεται σχεδόν με τη Φυσική της «στερεάς» Γης, δηλαδή την Φυσική του εσωτερικού της Γης, ενώ για τις άλλες επιστήμες χρησιμοποιούνται ειδικά ονόματα όπως Ωκεανογραφία, Μετεωρολογία, Φυσική της Ατμόσφαιρας κ.λπ. Από άποψη μεθόδων έρευνας, 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.

Το αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας ήταν αρχικά ο εντοπισμός υπόγειων μεταλλοφόρων κοιτασμάτων. Καθώς τα χρόνια πέρασαν και η τεχνολογική ανάπτυξη ήταν ραγδαία, τα αντικείμενα της γεωφυσικής διευρύνθηκαν. Τώρα η επιστήμη της γεωφυσικής ασχολείται με τον ευρύτερο τομέα των υποδομών, την εύρεση θεμελίωσης κτισμάτων, εγκοίλων, αρχαιολογικών θαμμένων στόχων, βαθιές δομές, στις οποίες πιθανώς να υπάρχουν υδρογονάνθρακες κ.ά. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική έρευνα έχει μεγάλη πρακτική σημασία για το μηχανικό, αφού δίνει τη δυνατότητα μελέτης του φλοιού της γης και των επιφανειακών στρωμάτων, εντοπισμού δομών που σχετίζονται με την εμφάνιση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, μεταλλευμάτων, πηγών γεωθερμικής ενέργειας κλπ. Ακόμα, η εφαρμογή γεωφυσικών μελετών, δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων της γης, γεγονός μεγάλης σημασίας για τον σχεδιασμό της κατασκευής και την παρακολούθηση μεγάλων τεχνικών έργων. Με τα παραπάνω παρατηρούμε ότι η γεωφυσική επιστήμη έχει εισέλθει σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, κάνοντας την απαραίτητη σχεδόν για κάθε είδους έργου που πραγματοποιείται.

Οι γεωφυσικές έρευνες του υπεδάφους της Γης περιλαμβάνουν την χρήση των γεωφυσικών μεθόδων για την συλλογή μετρήσεων από την επιφάνεια της Γης, οι οποίες επηρεάζονται από την εσωτερική κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων μπορεί να αποκαλύψει την εναλλαγή των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Η ορθή επιλογή και εφαρμογή μιας γεωφυσικής μεθόδου, βασίζεται στη διαφοροποίηση κάποιας ιδιότητας των πετρωμάτων, από τη μέτρηση των τιμών της οποίας προσδιορίζεται η δομή του υπεδάφους. Ο εντοπισμός μετρήσιμων διαφοροποιήσεων στις ιδιότητες των πετρωμάτων, η κατάλληλη ερμηνεία τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων, αποτελούν το βασικό σκοπό μιας γεωφυσικής έρευνας. Πρέπει να γίνει γνωστό όμως, ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο «ανωμαλίες», δηλαδή σημεία στα οποία κάποια φυσική ιδιότητα παρουσιάζει επαρκώς διαφορετική τιμή από τα περιβάλλοντα. Αυτό αποτελεί έναν παγκόσμιο περιορισμό, σύμφωνα με τον οποίο δεν μπορούμε να διακρίνουμε οτιδήποτε το ομογενές στη φύση. Μπορούμε μόνο να ξεχωρίσουμε κάτι το οποίο παρουσιάζει κάποιες μορφής χωρική ή και χρονική διαφοροποίηση.

Για κάθε μέθοδο υπάρχει μια «λειτουργική» φυσική ιδιότητα, στην οποία η μέθοδος είναι ευαίσθητη και, ως εκ τούτου, χρησιμεύει για τον προσδιορισμό των υπεδαφικών «ανωμαλιών». Οι σημαντικότερες μέθοδοι, καθώς και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλεύεται η κάθε μία, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΣΤΟΧΟΣ
Βαρυτική Μέθοδος	Ένταση πεδίου βαρύτητας	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων
Μαγνητική Μέθοδος	Ένταση γεωμαγνητικού πεδίου	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της παραμένουσας μαγνήτισης
Σεισμική Μέθοδος	Χρόνοι διαδρομής σεισμικών κυμάτων Περίοδοι σεισμικών κυμάτων Πλάτη σεισμικών κυμάτων	Καθορισμός της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων
Ηλεκτρική Μέθοδος	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση της γης Ηλεκτρικά δυναμικά	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή)
Ραδιομετρική Μέθοδος	Φυσική ραδιενέργεια	Προσδιορισμός της φυσικής ραδιενέργειας των πετρωμάτων
Θερμική Μέθοδος	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων

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

Επίσης, για να έχουμε μεγαλύτερη επιτυχία στην ακρίβεια μπορούμε να εφαρμόσουμε περισσότερες από μία γεωφυσικές μεθόδους και τα αποτελέσματα που προκύπτουν συχνά συγκρίνονται με αυτά ερευνητικών γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή μελέτης. Παρά τους περιορισμούς που προκύπτουν λόγω της φύσης της, η γεωφυσική έρευνα είναι ένα εργαλείο γρήγορης και αξιόπιστης διασκόπησης του υπεδάφους, με σχετικά μικρό οικονομικό κόστος. Για

αυτό και καταλαμβάνει θέση-κλειδί σε ερευνητικά προγράμματα γεωλογικής, γεωτεχνικής και μεταλλευτικής φύσης.

1.1. Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στις περιοχές Λιβάδι και Καστέλι, της νήσου Κεφαλληνίας.

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές (αρχαία κτίσματα ή τοιχία).

Για την πραγματοποίηση του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας, επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση τριών διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, βάσει γεωλογικών και αρχαιολογικών στοιχείων:

- Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM)
- Γεωραντάρ (GPR)
- Ηλεκτρική μέθοδος (ERT).

1.2. Δομή της Εργασίας

Έπειτα από το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο, ακολουθούν άλλα 6 και όλα μαζί συνθέτουν την παρούσα διπλωματική εργασία. Η δομή που ακολουθεί είναι η παρακάτω:

- 2^ο Κεφάλαιο: Γίνεται αναλυτική περιγραφή του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία κάθε μεθόδου που εφαρμόστηκε στην έρευνα.
- 3^ο Κεφάλαιο: Γίνεται αναφορά σε εφαρμογές της γεωφυσικής για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και ανθρωπογενών (αρχαιολογικών) σχηματισμών. Σκοπός της ανάλυσης αυτών είναι να γίνει επεξεργασία των πλάνων άλλων γεωφυσικών ομάδων για την πραγματοποίηση παρόμοιας έρευνας με τη δική μας.
- 4^ο Κεφάλαιο: Γίνεται γενική περιγραφή των περιοχών έρευνας Λιβαδιού και Καστελιού, της νήσου Κεφαλλονιάς (Τοποθεσία, Ιστορικά στοιχεία και Γεωλογία) που καλύφθηκε με τις γεωφυσικές μεθόδους.
- 5^ο Κεφάλαιο: Γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού της γεωφυσικής έρευνας, που περιλαμβάνει τη κατάλληλη επιλογή γεωφυσικών μεθόδων, σειρά εφαρμογής και διατάξεις κάθε μεθόδου. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην ύπαιθρο καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έγινε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Δίνονται τα αποτελέσματα της κάθε γεωφυσικής μεθόδου που εκτελέστηκε και διατυπώνεται η ερμηνεία αυτών. Τέλος, παρουσιάζονται συνολικά συμπεράσματα και σχόλια για την κάθε περιοχή που μελετήθηκε.
- 6^ο Κεφάλαιο: Παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη και επιχειρηματολογία των κεφαλαίων.

2.Θεωρητικό Μέρος

2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος

2.1.1. Γενικά

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Παρουσιάζουν ποικιλία τεχνικών έναντι άλλων μεθόδων όπως η βαρυτική, η μαγνητική, η σεισμική και η ηλεκτρομαγνητική. Χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους μετρούνται διαφορές δυναμικού, ρεύματα καθώς και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν φυσικά ή εισάγονται τεχνητά στη Γη.

2.1.2. Ηλεκτρικές Μέθοδοι

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

Παθητικές Μέθοδοι:

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

Ενεργητικές Μέθοδοι:

- Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method): Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, χαμηλής συχνότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το συγκεκριμένο μετρούμενο δυναμικό και μπορούν επομένως να χαρτογραφηθούν με την χρήση της μεθόδου, περιλαμβάνουν την παρουσία και την ποιότητα, τόσο των ρευστών και των πόρων, όσο και των αργίλων. Χρησιμοποιείται, έτσι, ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, σε μέσα βάθη διασκόπησης.
- Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method): Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται, παύει να διαβιβάζεται, στο έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων αλλά και ηλεκτρικά αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

2.1.3. Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται σε πετρώματα και ορυκτά με τρεις τρόπους:

- Ηλεκτρονικά (Ωμικά), όπου η ροή του ρεύματος στα υλικά περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (μέταλλα),
- Ηλεκτρολυτικά, όπου το ρεύμα μεταφέρεται μέσω ιόντων με σχετικά χαμηλό βαθμό, και τέλος,
- Διηλεκτρικά, λαμβάνει δηλαδή χώρα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές, όπου τα ατομικά ηλεκτρόνια κάτω από την επίδραση εξωτερικού πεδίου, μετακινούνται σχετικά με τον πυρήνα.

Σύμφωνα με τον Νόμο του Ohm, ισχύει πως αν έχουμε ένα κυλινδρικό αγωγό (Εικόνα 2.1), μήκους L και διατομής A , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα I και στα άκρα του μετράται διαφορά δυναμικού ΔV , η ηλεκτρική αντίσταση θα δίνεται από τον τύπο:

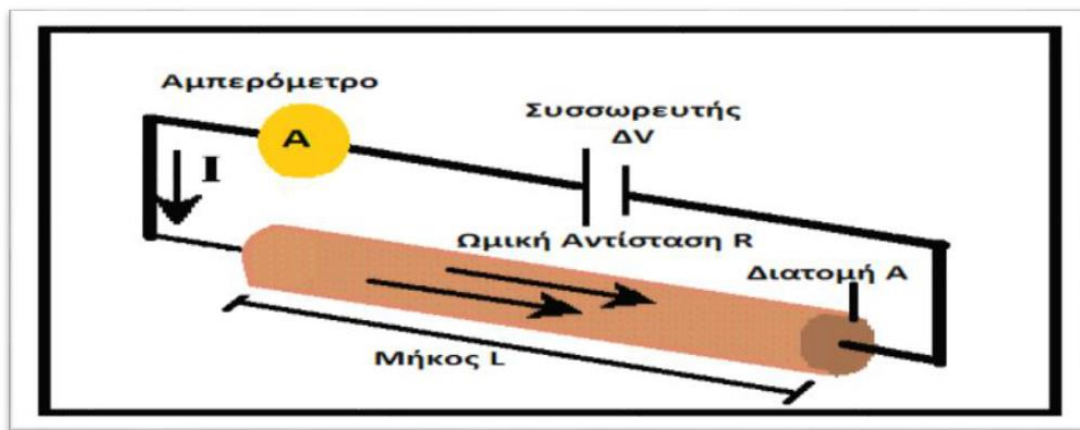
$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

όπου, ΔV η τάση σε Volt και I η ένταση του ρεύματος σε Ampere.

Η Ηλεκτρική ωμική αντίσταση, έχει ως μονάδα μέτρησης το Ohm και εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του αγωγού. Έτσι έχουμε:

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

όπου, A η διατομή του αγωγού σε m^2 , L το μήκος του σε m και τέλος, ρ η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του αγωγού.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση (ρ) του αγωγού είναι ανεξάρτητη των διαστάσεών του. Θεωρείται χαρακτηριστική θεμελιώδης παράμετρος του υλικού που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί ο αγωγός να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί και οι ειδικές αντιστάσεις τους θα ήταν πολύ υψηλές αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. Η αγωγιμότητα του πορώδους πετρώματος μεταβάλλεται με τον όγκο και την κατανομή των πόρων, αλλά πολύ περισσότερο με την αγωγιμότητα και το ποσό του περιεχόμενου νερού. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί, άρα και η αγωγιμότητα είναι περισσότερο ηλεκτρολυτική παρά ωμική. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω ιόντων (μορίων με περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων). Η ειδική αντίσταση διαφέρει από την ευκινησία, την συγκέντρωση και τον βαθμό διαχωρισμού των ιόντων, εξαρτάται από την διηλεκτρική σταθερά του διαλύτη.

2.1.4. Παράγοντες επηρεασμού της ειδικής αντίστασης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης ορυκτών και πετρωμάτων, είναι:

- Το είδος του πετρώματος: Κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα εύρη τιμών ειδικών αντιστάσεων διαφόρων υλικών. Παρατηρούμε πως τις υψηλότερες τιμές παρουσιάζουν τα πυριγενή πετρώματα, ενώ τις χαμηλότερες παρουσιάζουν τα ιζηματογενή. Αυτό συμβαίνει διότι τα τελευταία έχουν συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα, φαίνονται να παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες τις τάσεις αλληλοεπικάλυψης.
- Η δομή και το πορώδες: Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες του πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση.
- Η περιεκτικότητα σε άλατα: Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότερα, του ρευστού πλήρωσης των πόρων, σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.
- Οι επιδράσεις των γεωλογικών διεργασιών: Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση, αλλά επίσης φαίνεται και στον Πίνακα 2.2, υπάρχουν και κάποιες εξαιρέσεις όπως η σκλήρυνση, η ιζηματοποίηση κ.ά..
- Ηλικία πετρώματος: Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών: Η ύπαρξη αργιλικών ορυκτών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία χαμηλών τιμών επαγωγικής ειδικής αντίστασης. Αυτό συμβαίνει λόγω της αυξημένης αγωγιμότητάς της.
- Βαθμός κορεσμού: Όσο ο βαθμός κορεσμού του πετρώματος αυξάνεται, η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση μειώνεται.
- Θερμοκρασία: Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Ωστόσο, ο παράγοντας έχει πολύ μικρή επίδραση, επομένως παίζει ρόλο άξιο αναφοράς μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες.

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

Πίνακας 2.1: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

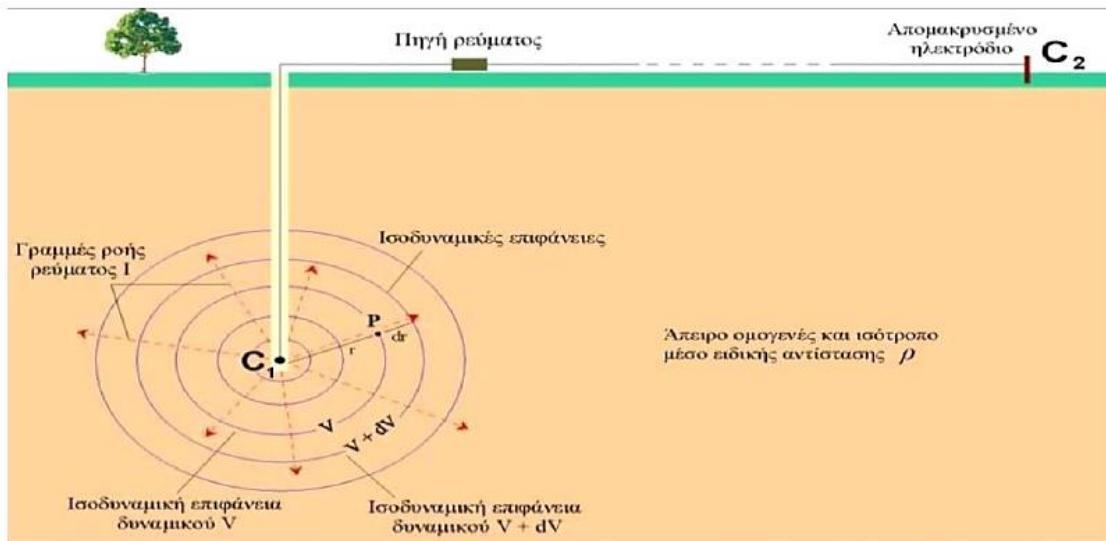
ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αργιλική εξαλλοίωση	Ελάττωση
Διάλυση	Ελάττωση
Ρηγμάτωση	Ελάττωση
Εισροή θαλασσινού νερού	Ελάττωση
Διάτμηση	Ελάττωση
Αποσάθρωση	Ελάττωση
Σκλήρυνση	Αύξηση
Ιζηματοποίηση	Αύξηση
Απολίθωση	Αύξηση
Μεταμόρφωση	Ελάττωση ή Αύξηση

Πίνακας 2.2: Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στην ειδική αντίσταση των πετρωμάτων (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

2.1.5. Ροή ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο

Στην γεωφυσική έρευνα έχουμε διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη και όχι μόνο σε συρμάτινο καλώδιο. Οπότε είναι γεγονός ότι η ροή ρεύματος μέσα σε τρισδιάστατο σώμα παρουσιάζει κάποιες διαφορές σε σχέση με την ροή μέσω γραμμικού αγωγού. Για αυτό τον λόγο αναπτύχθηκε η θεωρία επίσης ροής ρεύματος στον χώρο. Με βάση αυτή τη θεωρία έχουμε σαν χώρο μελέτης το έδαφος της γης, θεωρώντας το επίσης, άπειρο, ομοιογενές και ισότροπο μέσο. Με την παραπάνω λογική η ειδική του αντίσταση είναι ίδια και σταθερή σε ολόκληρη την μάζα του (ηλεκτρικά ομογενής γη).

Για την εφαρμογή στην πράξη αυτού του μοντέλου τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο C_1 μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά στο ομογενές και ισότροπο μέσο. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου C_2 , το οποίο τοποθετείται στη επιφάνεια της γης και σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στην διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι ακτινικές, ξεκινούν από την σημειακή πηγή C_1 και κατευθύνονται επίσης τα έξω. Η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, παραμένει σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών, οι οποίες έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials) και όσον αφορά τις τρεις διαστάσεις, σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες, με κέντρο πάλι το ηλεκτρόδιο (Εικόνα 2.2).

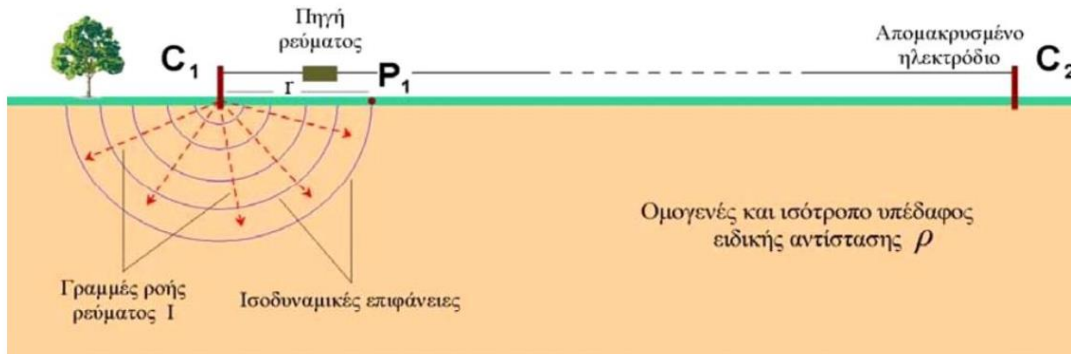


Εικόνα 2.2: Απεικόνιση επίσης ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003)

2.1.6. Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

Το μοντέλο που αναλύθηκε παραπάνω, εφαρμόζεται και σε περίπτωση ημιάπειρου ομογενή χώρου. Η διαδικασία σε αυτήν την περίπτωση έχει ως εξής: Τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο C_1 στην επιφάνεια ηλεκτρικά ομογενούς μέσου. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C_2 , το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια, αλλά σε αρκετά μακρινή

απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στην διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι, και στην περίπτωση του άπειρου ομογενούς μέσου, ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή επίσης τον ημίσφαιρο. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες, από την άλλη, είναι κάθετες στις γραμμές ροής και σχηματίζουν ομόκεντρα ημισφαίρια, με κέντρο το ηλεκτρόδιο C_1 (Εικόνα 2.3).

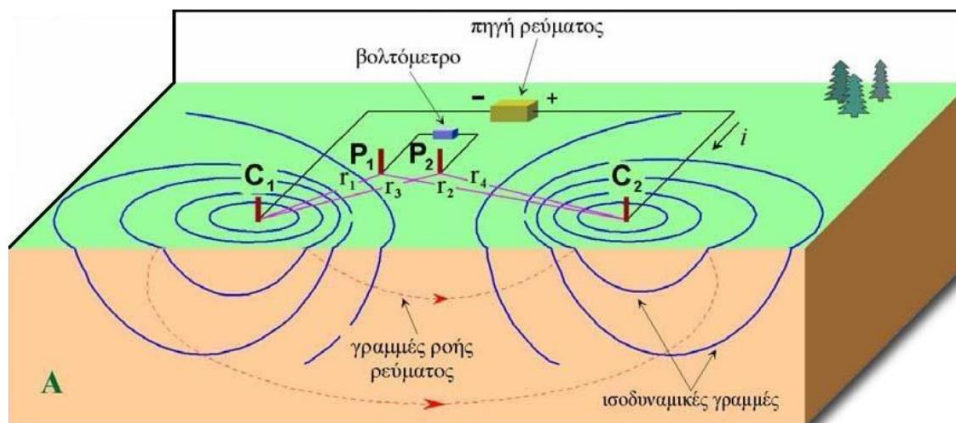


Εικόνα 2.3: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003)

2.1.7. Ροή ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου

Επίσης περιπτώσεις του άπειρου ομογενούς χώρου και ημιάπειρου ομογενούς χώρου, τα δύο ηλεκτρόδια C_1 και C_2 , απείχαν μεταξύ τους μεγάλη απόσταση ώστε η επίδρασή του στη διαμόρφωση του δυναμικού του άλλου να είναι αμελητέα. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος είναι πεπερασμένη, το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας επηρεάζεται και από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος.

Συνεπώς το δυναμικό σε τυχαίο σημείο P_1 θα ισούται με το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V_1 , λόγω της σημειακής πηγής C_1 , και του δυναμικού V_2 , λόγω της πηγής C_2 . Επίσης, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές (Λούης, 2003)

2.1.8. Φαινόμενη ειδική Αντίσταση

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

Στην πραγματικότητα αυτό δεν συμβαίνει, διότι στις περισσότερες περιπτώσεις, το μέσο στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις είναι ανομοιογενές. Αυτό έχει ως επακόλουθο, τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης να διαφοροποιούνται από θέση σε θέση. Έτσι, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση ονομάζεται φαινόμενη ειδική αντίσταση.

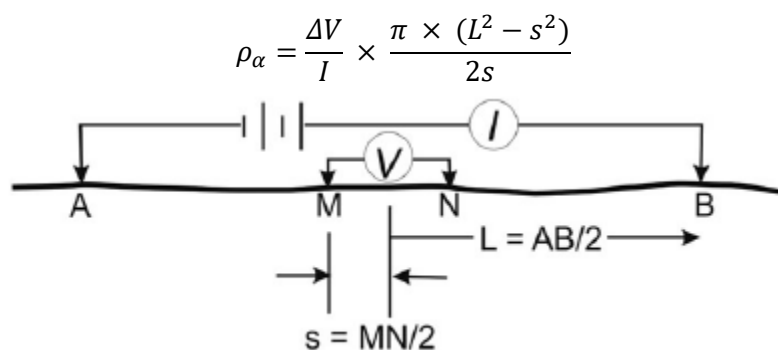
Εδώ είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση ($\rho_\alpha = K * \frac{\Delta V}{I}$) δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μερών του υπεδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση μεταβάλλεται συστηματικά ανάλογα με την γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων και στρωμάτων, που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές, οπότε είναι αντιπροσωπευτική των στρωμάτων του υπεδάφους αλλά και των αγώγιμων ή μη.

2.1.9. Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού επίσης γης. Με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος με τη χρήση δύο ηλεκτροδίων ρεύματος και μετριέται η τάση σε άλλα ηλεκτρόδια δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος, δυναμικού και οι μεταξύ τους αποστάσεις διατάσσονται στο έδαφος με συγκεκριμένο τρόπο ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο της έρευνας. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διατάξεις ηλεκτροδίων και αναλύονται οι αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις.

- Διάταξη Schlumberger:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις L και s αντίστοιχα.

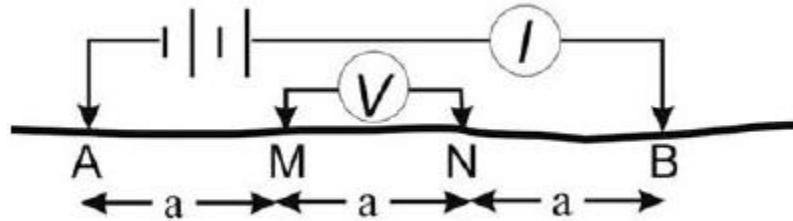


Εικόνα 2.5: Διάταξη Schlumberger

- Διάταξη Wenner:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με a .

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \times 2\pi \times a$$

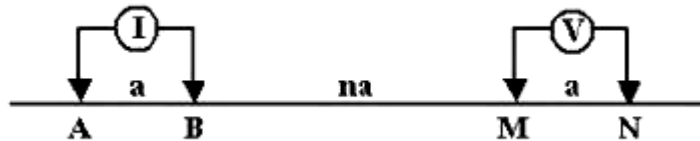


Εικόνα 2.6: Διάταξη Wenner

- Διάταξη Dipole-Dipole:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με a , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού μεταξύ τους. Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των δύο δίπολων, είναι πολλαπλάσια της απόστασης a (na).

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \times \pi \times na (n + 1)(n + 2)$$



Εικόνα 2.7: Διάταξη Dipole-Dipole

- Διάταξη Pole-Pole:

Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια.

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \times 2\pi \times a$$

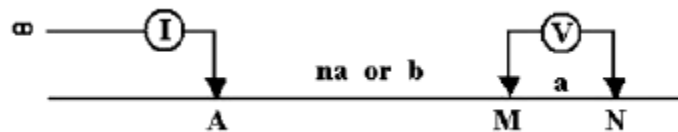


Εικόνα 2.8: Διάταξη Pole-Pole

- Διάταξη Pole-Dipole:

Το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι a , ενώ η απόσταση του κοντινού ηλεκτροδίου ρεύματος από το δίπολο δυναμικού είναι na .

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



Εικόνα 2.9: Διάταξη Pole-Dipole

2.1.10 Επιλογή Κατάλληλης Διάταξης

Στον πίνακα 2.3 φαίνεται η καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με την ιδιαίτερη περίπτωση κάθε έρευνας. Με δύο αστέρια φαίνεται η καταλληλότερη επιλογή διάταξης ενώ με ένα αστέρι είναι η αμέσως επόμενη καταλληλότερη επιλογή διάταξης.

Σαν συμπέρασμα από τα παραπάνω, λαμβάνοντας υπόψη και την ευαισθησία κάθε διάταξης στους διάφορους παράγοντες, προκύπτει ότι τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως διάταξη ηλεκτροδίων για βυθοσκόπηση έχει η διάταξη Schlumberger. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνουν συνεχώς με σταθερή απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία αλλάζει μόνο όταν το μέγεθος επίσης διαφοράς δυναμικού γίνεται τόσο μικρό ώστε να μην είναι δυνατόν να μετρηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια. Όταν πρόκειται να μεταβληθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού, λαμβάνονται διπλομετρήσεις και με τις δύο αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού. Γίνονται έξι μετρήσεις ανά λογαριθμικό κύκλο του μισού της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος. Επίσης, όσον αφορά την διάταξη Dipole-Dipole, παρόλο που έχει μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης λόγω επίσης μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού, υφίσταται το θόρυβο που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες.

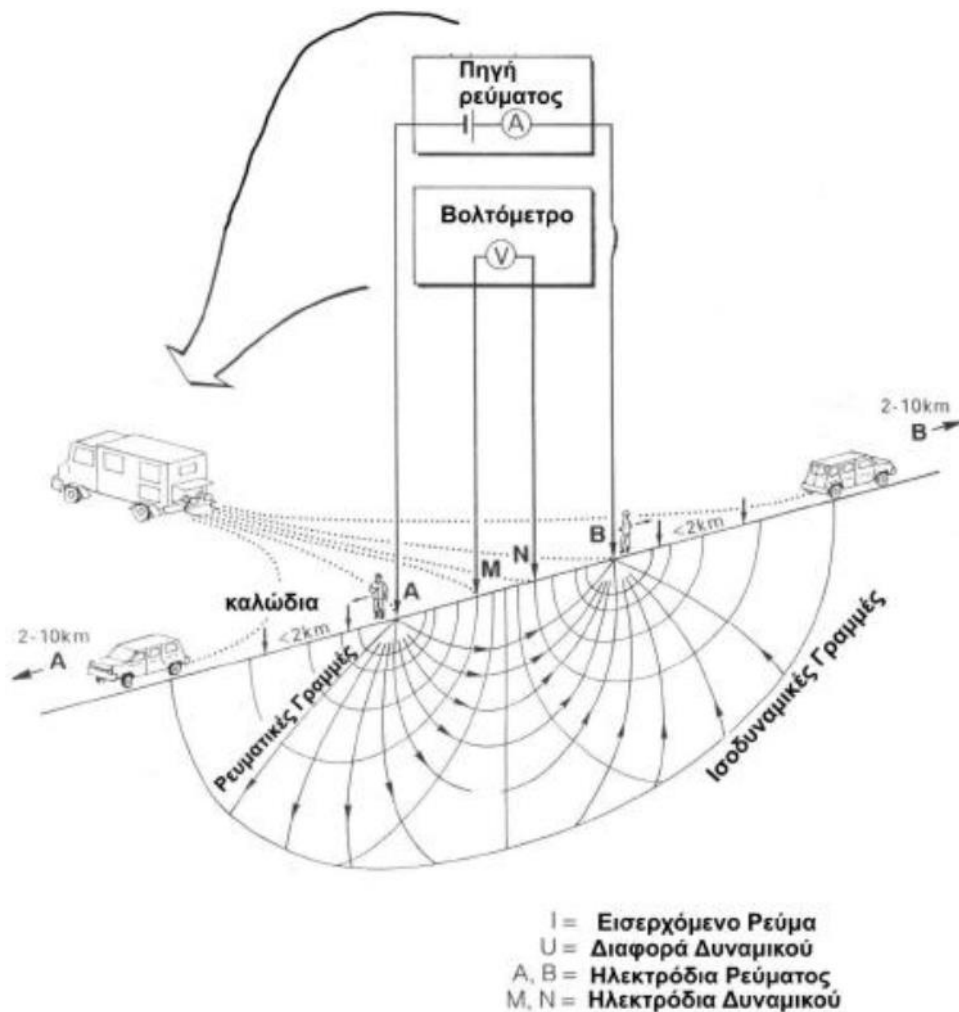
	<u>Wenner</u>	<u>Schlumberger</u>	<u>Pole-Dipole</u>	<u>Dipole-Dipole</u>
Λόγος σήματος προς θόρυβο	**	*		
Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες			*	**
Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση	*	**		
Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων	**	**		
Ευαισθησία στην μορφολογία του υποβάθρου			*	**
Βάθος διασκόπησης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

Πίνακας 2.3: Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με την περίπτωση της έρευνας

2.1.11. Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να μετρήσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση, δηλαδή τα ΔV και I , χρειαζόμαστε:

- **Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο.** Μέχρι 1 Ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές, ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες.
- **Βολτόμετρο υψηλής αντίστασης** εισόδου ($>10\text{ M}\Omega$) ώστε να έχουμε ακριβείς μετρήσεις από μV έως V . Τα παραπάνω βρίσκονται συνήθως σε ένα όργανο μέτρησης, το οποίο επιπροσθέτως περιέχει ένα σύστημα αντιστάθμισης ώστε το βολτόμετρο να συνδέεται μαζί του να αφαιρεί φυσικά δυναμικά.
- **Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης.** Πρόκειται για ένα όργανο το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του γεωφυσικού οργάνου και των καλωδίων ρεύματος και δυναμικού, έχοντας ως αποστολή τη διανομή του σήματος εξόδου στα κατάλληλα, κάθε φορά, ηλεκτρόδια ρεύματος και τον καθορισμό των ηλεκτροδίων δυναμικού από τα οποία λαμβάνεται η κάθε μέτρηση. Με τον τρόπο αυτό, το όργανο, ελέγχει κάθε φορά την πραγματοποιούμενη μέθοδο (Schlumberger, Dipole-Dipole, Pole-Dipole).
- **Όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού.** Μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης παρεμβάλλεται ένας ακόμα διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.
- **Καλώδια σε καρούλια**
- **Ηλεκτρόδια**



Εικόνα 2.10: Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Vogelsang, 1995)

2.1.12 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις

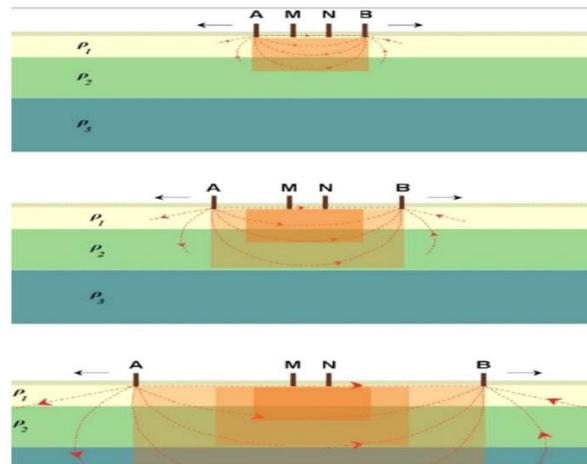
Ο στόχος των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων είναι η περιγραφή της δομής του υπεδάφους. Έτσι, με τις μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια και μελετώντας την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος, επιτυγχάνεται η περιγραφή της δομής του υπεδάφους.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

- **Ηλεκτρική βυθοσκόπηση**

Η περιγραφή επίσης γεωλογικής δομής του υπεδάφους κατά την εφαρμογή της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης, βασίζεται στις κατακόρυφες μεταβολές, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του πάχους ή/και του βάθους των γεωλογικών στρωμάτων.

Με τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση προσδιορίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a) σε σταθερό σημείο της επιφάνειας για διαδοχικά αυξανόμενες τιμές του γεωμετρικού συντελεστή K . Αυτό πραγματοποιείται αυξάνοντας συνεχώς την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Καθώς η διάταξη των ηλεκτροδίων απλώνεται, η ίδια ποσότητα ρεύματος διανέμεται μέσω παχύτερης ζώνης. Επομένως, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις των βαθύτερων γεωλογικών στρωμάτων έχουν μια αναλογική επίδραση στη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Εναλλασσόμενα στρώματα, υψηλής και χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης, μπορούν να εμφανισθούν σε γράφημα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος (Εικόνα 2.11).

Ανάμεσα στις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων, η διάταξη Wenner είναι η λιγότερο κατάλληλη για τις γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις (παρόλο που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά) και αυτό λόγω της μετακίνησης και των τεσσάρων ηλεκτροδίων σε κάθε πρόσθετη μέτρηση. Αντιθέτως, στη διάταξη Schlumberger τα ηλεκτρόδια παραμένουν στην ίδια θέση, και μόνο τα ηλεκτρόδια του ρεύματος μετακινούνται για κάθε επιπλέον μέτρηση. Τέλος, η διάταξη Dipole-Dipole, όπου τα ηλεκτρόδια ρεύματος παραμένουν και μετακινούνται τα ηλεκτρόδια δυναμικού, είναι η πιο κατάλληλη για βαθιές βυθοσκοπήσεις.



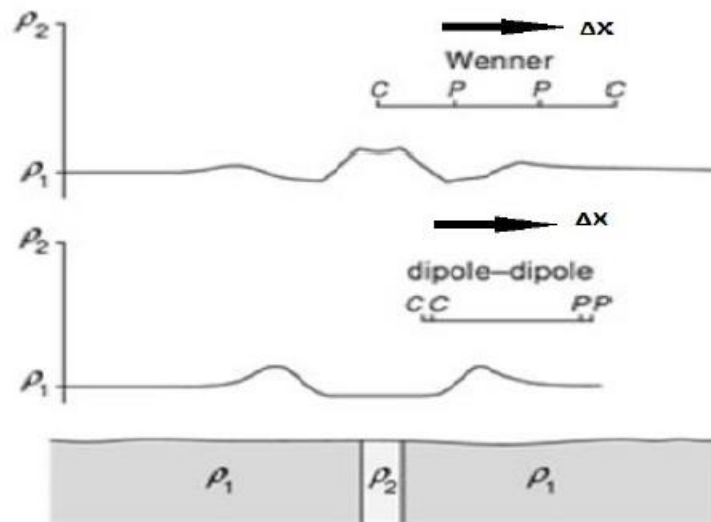
Εικόνα 2.11: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2003)

- **Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης**

Στη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, η περιγραφή επίσης γεωλογικής δομής βασίζεται στη μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια διεύθυνση. Με τη μέθοδο αυτή εντοπίζονται ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών (π.χ. μεταπτώσεις). Χάρη σε αυτήν την ιδιότητα η γεωηλεκτρική χαρτογράφηση είναι κατάλληλη για περιπτώσεις αναζήτησης μεταλλευμάτων ή αρχαιοτήτων.

Κατά την γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_a προσδιορίζεται, για σταθερή τιμή του γεωμετρικού συντελεστή K , σε σημεία που ανήκουν σε τομές κατά το δυνατό κάθετες στην παράταξη των σχηματισμών. Πολύ σημαντικός είναι ο καθορισμός της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος προτού ξεκινήσει η χαρτογράφηση, καθώς από αυτήν την απόσταση εξαρτάται το βάθος μέχρι το οποίο οι σχηματισμοί στο υπέδαφος επιδρούν στη διαμόρφωση της τιμής της ρ_a .

Μια σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας την διάταξη των ηλεκτροδίων από θέση σε θέση κατά μήκος της γραμμής μελέτης. Οι τιμές αυτές, κατά μήκος αρκετών παράλληλων γραμμών τοποθετούνται σε χάρτη φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων. Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, χρησιμοποιώντας κάποια υπολογιστικά προγράμματα, για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμών πραγματικής ειδικής αντίστασης.



Εικόνα 2.12: Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole-Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.

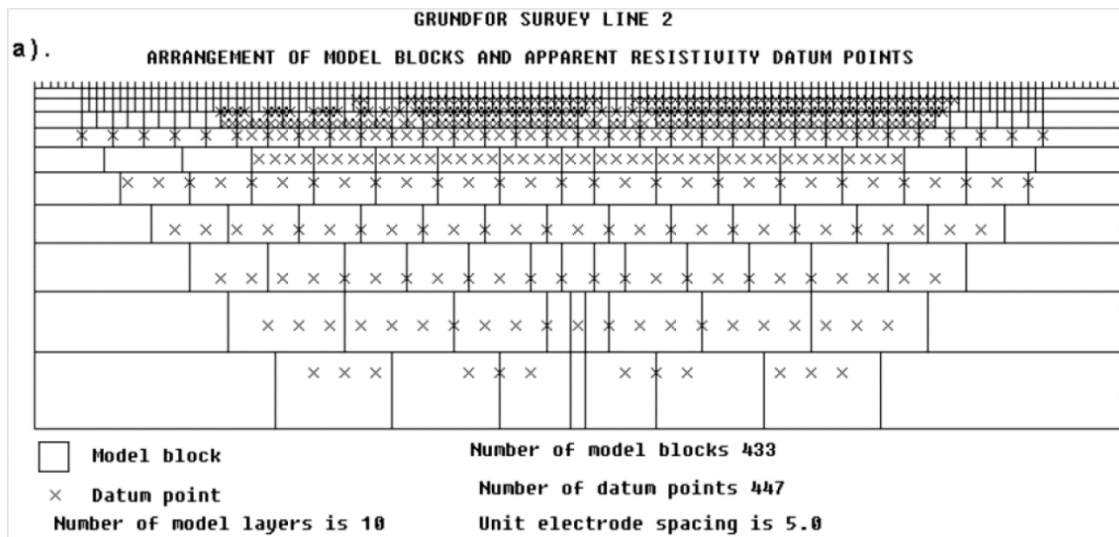
2.1.13. Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Η ηλεκτρική τομογραφία εφαρμόζεται στην περίπτωση που χρειάζεται να έχουμε συγκεκριμένες θέσεις, μεγάλης ακρίβειας, τόσο παράπλευρα όσο και σε βάθος, καθώς αποτελείται από τις βυθοσκοπήσεις, πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται από την επιλογή των διατάξεων που θέλουμε. Επίσης οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μια δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, δηλαδή μια γεωηλεκτρική τομογραφία.

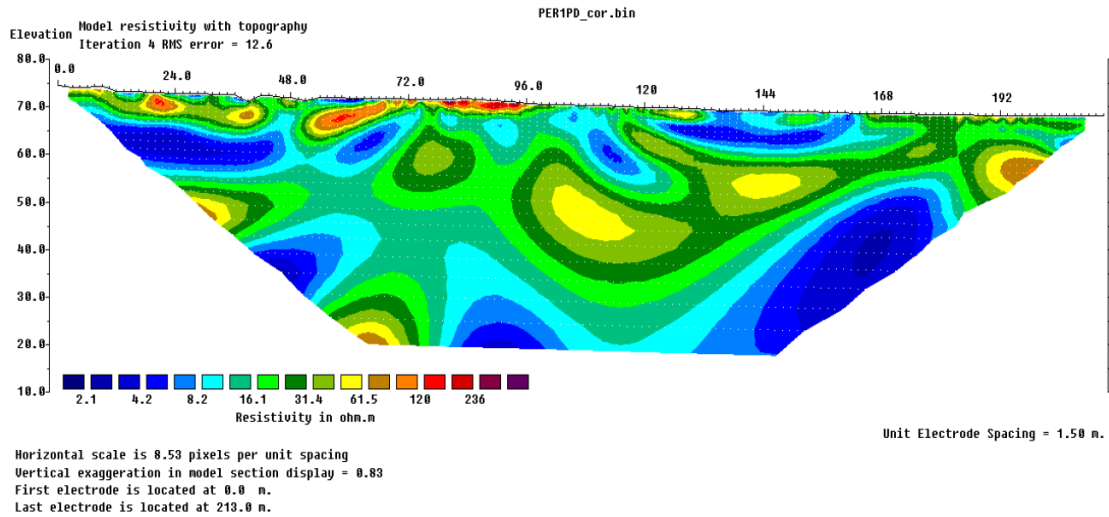
Η μέθοδος αυτή απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους.

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί, τα τελευταία χρόνια, στην κατεύθυνση αυτοματοποίησης της λήψης γεωφυσικών δεδομένων, αύξησε δραστικά την εφαρμοσιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, στην αρχαιολογία καθώς και στην υδρογεωλογία.

Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων που παράγονται από τα συστήματα αυτά, απαιτούν αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία δεδομένων. Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντιστροφής δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτή την ανάγκη. Με τις τεχνικές αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος. Οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα και την απόκριση του μοντέλου (Εικόνα 2.13, Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.13: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου.



Εικόνα 2.14: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

2.2. Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

2.2.1. Εισαγωγή

Κατά την Ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EM) χρησιμοποιούμε την απόκριση του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενη ηλεκτρική ένταση και μαγνητική δύναμη (Kaerey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Το προφίλ της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υπεδάφους και οι μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου έχουν επίσης ερμηνείες. Ουσιαστικά, οι μετρήσεις των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων έχουν μεγάλη ευαισθησία στον τύπο του υγρού, το ποσοστό της αργίλου και το πορώδες.

Στόχοι μικρής αγωγιμότητας	Στόχοι μέσης αγωγιμότητας	Στόχοι μεγάλης αγωγιμότητας
Παγετώδεις εκτάσεις	Ρηγματομένες ζώνες	Ζώνες υφαλμίρινσης
Κρυσταλλωμένοι βράχοι	Αρχαιολογικές κατασκευές	Χαλύβδινοι αγωγοί
Αδρανείς αποθέσεις	Υδροφόροι γλυκού νερού	Αργιλικόι φακοί
Έγκοιλα		

Πίνακας 2.4: Εφαρμογές και στόχοι ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

2.2.2. Τύποι ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων – Εφαρμογές της Μεθόδου

Έχουμε συστήματα δύο ειδών:

- TEM (Time-domain Electromagnetic Measurements): μετρήσεις συναρτήσεων του χρόνου.
- FEM (Frequency-domain Electromagnetic Measurements): μετρήσεις συναρτήσεων της συχνότητας.

Επιπροσθέτως, τα συστήματα διαφέρουν με βάση την πηγή:

- Παθητικά: Χρησιμοποιούνται φυσικά υπεδafικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα π.χ. Μαγνητοτελλουρικά.
- Ενεργητικά: Χρησιμοποιείται πομπός ηλεκτρομαγνητικού σήματος που επάγει ρεύμα στο έδαφος.
- Τοπικού πεδίου: Χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης αγωγιμότητας.
- Απομακρυσμένου πεδίου: Χρησιμοποιούνται σήματα πολύ χαμηλής συχνότητας που εκπέμπει πομπός για επικοινωνία υποβρυχίων.

Τέλος, τα επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά συστήματα διακρίνονται σε:

- Μικρού βρόγχου: Είναι τα περισσότερα συστήματα που λειτουργούν στο χώρο των συχνοτήτων (EM31, EM34, κλπ.) και κάποια που λειτουργούν στον χώρο του χρόνου. Χρησιμοποιούνται κυρίως για περιβαλλοντικές εφαρμογές.
- Μεγάλου βρόγχου: (Βρόγχοι 5-100m) Είναι κυρίως συστήματα στο χώρο του χρόνου που χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα.
- Επίπεδου κύματος (VLF, Μαγνητοτελλουρικά): Χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα και στον εντοπισμό γεωλογικών δομών μεγάλου βάθους.

Ανάλογα με την παραλλαγή του συστήματος μέτρησης που εφαρμόζεται, παρέχονται και οι αντίστοιχες δυνατότητες, με αποτέλεσμα την μεγάλη ποικιλία σε εφαρμογές της:

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

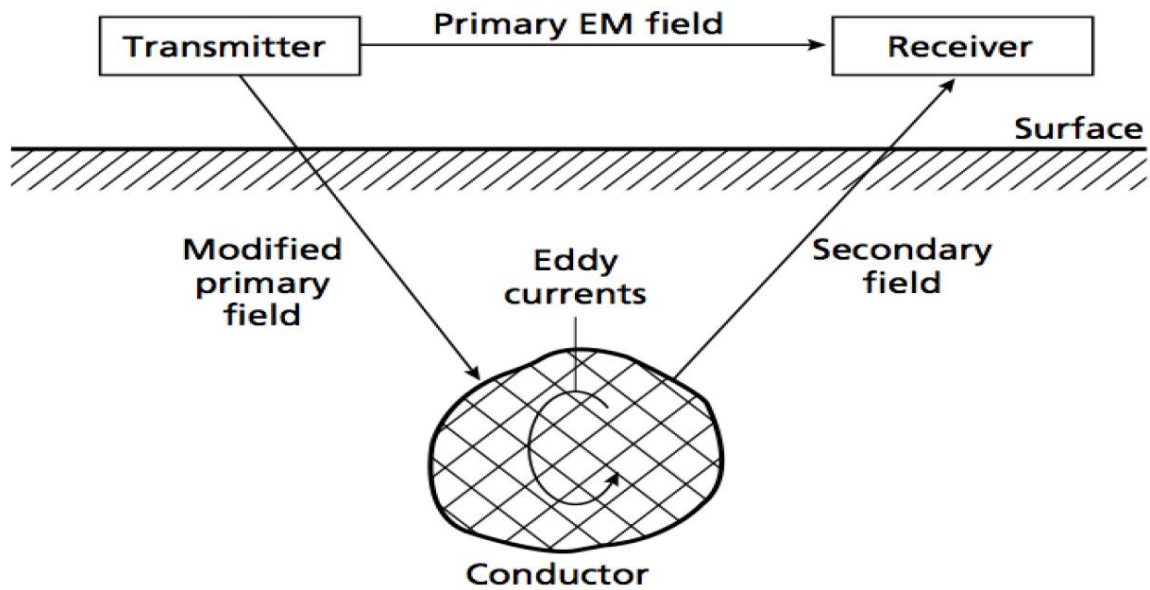
2.2.3. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα το ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό και μετριέται σε Siemens ανά μέτρο (S/m). Ένα Siemens είναι αντίστροφο του Ohm ($S=1/Ohm$). Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι τα στοιχεία αγωγιμότητας είναι συχνά συγκρίσιμα με αυτά της αντίστασης που λαμβάνεται με τα σήματα των ηλεκτροδίων, στην Ηλεκτρική μέθοδο. Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή

την αντίσταση, αναφέρονται σε μετρήσεις που συλλέγονται με όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε όμως για αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε σε μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο επαγωγής (EMI). Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάσουν με αυτές των δεδομένων ειδικής αντίστασης και μπορούν να ερμηνευτούν χρησιμοποιώντας τις αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι πολλές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συνήθως από ένα μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας έτσι ενδεχομένως τα όρια της ανωμαλίας. Η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος, για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βυθισμένες στις αντιθέσεις της επίγεια υγρασίας ή τις αντιθέσεις των τύπων του υλικού. Τα μικρά κοιλώματα μπορεί να μην ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι και τα υπολείμματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευτούν αποτελεσματικά.

2.2.4. Μεθοδολογία Μετρήσεων

Η μέθοδος επίσης «EMI» που μετράει την αγωγιμότητα είναι αρκετά πιο σύνθετη από την αντίσταση, έτσι μόνο οι θεμελιώδεις αρχές εξηγούνται εδώ. Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσω μιας σπείρας ή του βρόχου, δημιουργείται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Εάν αυτό το πεδίο είναι κοντά σε αντικείμενα που είναι κάπως αγωγίμα, τότε το πεδίο θα αναγκάσει τα ρεύματα να ρέουν σε αυτά. Ακριβώς επίσης το ηλεκτρικό ρεύμα στη σπείρα δημιούργησε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, έτσι και τα ρεύματα στα αντικείμενα, θα δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτή η διαδικασία καλείται επαγωγή. Στις αρχαιολογικές έρευνες, τα δεδομένα αγωγιμότητας της «EMI» συλλέγονται συνήθως με δύο πηνία, τον πομπό (transmitter), που λειτουργεί ως συσκευή εκπομπής σημάτων, και τον δέκτη (receiver) σημάτων. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν επίσης εναλλακτικές διαμορφώσεις, συμπεριλαμβανομένης της «Slingram», του οριζοντίου βρόχου, της κινούμενης συσκευής πομπού-δέκτη, του διπλού πηνίου κινούμενης πηγής, και του μετρητή εδάφους-αγωγιμότητας. Γενικά, ο πομπός δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποκαλούμενο αρχικό πεδίο (primary field) που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις και κυρίως προς το έδαφος. Εάν το έδαφος είναι αγωγίμο, ή περιέχει δομές που είναι αγωγίμες, τα ρεύματα θα ρέουν σε αυτό. Αυτά τα δημιουργούμενα ρεύματα, αποκαλούμενα «eddy currents» (επειδή διαμορφώνονται όπως οι στρόβιλοι στην κοίτη ενός ποταμού), θα δημιουργήσουν στην συνέχεια ένα δευτερεύον πεδίο (secondary field). Τα δευτερεύοντα, όπως και τα αρχικά πεδία, μετρούνται από το πηνίο του δέκτη (Εικόνα 2.15).



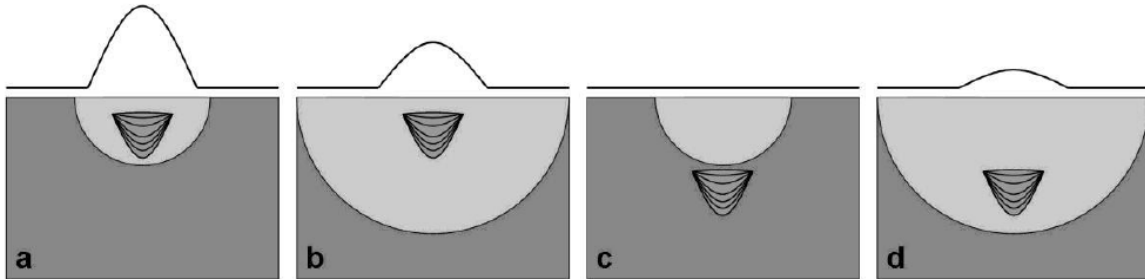
Εικόνα 2.15: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Η αγωγιμότητα προσεγγίζεται με την σύγκριση του δευτερεύοντος με το αρχικό πεδίο, και την μέτρηση της καθυστέρησης φάσης. Η φάση είναι επίσης 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. Υπάρχει ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα που παίρνει για τη διαδικασία επαγωγής να εμφανιστεί και το δεύτερο πεδίο να ληφθεί. Όσο υψηλότερη είναι η επίγεια αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση του δευτερεύοντος πεδίου. Αυτή η καθυστέρηση μετριέται με μαθηματική σχέση που αναλύει το λαμβανόμενο σήμα σε δύο μέρη: in-phase και out-of-phase. Το «in-phase» πρέπει να είναι σε φάση με τον πομπό (Αρχικό πεδίο), ενώ το «out-of-phase» καθυστερεί με γωνία 90 μοιρών.

2.2.5. Βάθος και Ανάλυση

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετρούνται με την «EMI», εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες είναι η ειδική συχνότητα, το ύψος των αισθητήρων πάνω από το έδαφος και ο προσανατολισμός των σπειρών. Αρχικά, εξετάζεται η συχνότητα. Τα πεδία χαμηλότερης συχνότητας της «EMI» έχουν πιο μεγάλα μήκη κύματος και επομένως, είναι ικανά να διαπεράσουν βαθύτερα στο έδαφος. Γενικότερα, η διείσδυση σε βάθος είναι μεγαλύτερη σε χαμηλότερες συχνότητες. Από την άλλη, το μειονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι ότι μετριέται μεγαλύτερος όγκος γης, οπότε τα μικρά αντικείμενα, όπως π.χ. αρχαιολογικά στοιχεία, δεν μπορούν να ανιχνευτούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μια υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα έχει μικρότερο βάθος, και επομένως τα αρχαιολογικά στοιχεία θα αποτελούν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου. Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση ώστε να ανιχνευτούν τα μικρότερα στοιχεία, αλλά οι χαμηλότερες συχνότητες μπορούν να επιτρέψουν την ανίχνευση σχετικά μεγάλων ή υψηλών στόχων αντίθεσης, που βρίσκονται

σε μεγάλα βάθη και ειδάλλως δεν θα μπορούσαν να ανιχνευτούν (Εικόνα 2.16). Συνοψίζοντας, αν και τα ρηχά αντικείμενα, ίσως να μπορούσαν να ανιχνευθούν επαρκώς με χαμηλότερες συχνότητες, οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες και προτιμούνται για την ανίχνευση αρχαιολογικών στοιχείων.



Εικόνα 2.16: Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικείμενου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι το (α), ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετρηθεί με μια χαμηλότερη συχνότητα (β), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια ανωμαλία μικρότερου μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι ο στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (γ) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά το έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (δ). (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

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

Επίσης ένας σοβαρός παράγοντας ο οποίος έχει επιπτώσεις στο βάθος διείσδυσης είναι ο προσανατολισμός των πηνίων (σπειρών). Οι δύο πιο κοινί προσανατολισμοί είναι να κρατηθούν οι σπείρες είτε οριζόντιες είτε κάθετες ως προς την επιφάνεια του εδάφους. Εάν οι δύο σπείρες τοποθετούνται οριζόντια στην επιφάνεια του εδάφους (φανταστείτε δύο ρόδες που βρίσκονται στο έδαφος) ο προσανατολισμός της καλείται οριζόντιο συνεπίπεδο. Σε αυτήν την θέση ο οριζόντιος πομπός παράγει ένα μαγνητικό πεδίο του οποίου οι γραμμές ροής προέρχονται κάθετα. Αυτόν τον προσανατολισμό των γραμμών ροής τον ονομάζουμε κάθετο μαγνητικό δίπολο (Η απλούστερα «κάθετος τρόπος»). Σε αυτή τη θέση υπάρχει μέγιστη ενεργειακή διείσδυση στο έδαφος. Επίσης είναι ο πιο κοινός προσανατολισμός για τις περισσότερες αρχαιολογικές έρευνες. Από την άλλη, όταν οι σπείρες κρατιούνται κάθετα ως προς την επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός ονομάζεται κάθετο συνεπίπεδο και η μαγνητική ροή που προέρχεται από τον πομπό είναι οριζόντια, αποκαλούμενη ως οριζόντιο μαγνητικό δίπολο («οριζόντιος τρόπος»). Σε αυτήν την θέση ένα πολύ μικρότερο μέρος του προκληθέντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαπερνά το έδαφος και έτσι η διείσδυση βάθους μειώνεται. (Witten, A. J. 2006)

2.2.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς επίσης και μειονεκτήματα στην έρευνα αγωγιμότητας. Έναντι της ειδικής αντίστασης, τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν γρηγορότερα επειδή δεν υπάρχει καμία ανάγκη να παρεμβληθούν ηλεκτρόδια στο έδαφος ή να ξαναγίνουν περιστασιακά οι μακρινοί έλεγχοι. Επίσης τα δεδομένα της «EMI» μπορούν να συλλεχθούν σε περιοχές με πολύ σκληρό ή ξηρό έδαφος, όπου τα ηλεκτρόδια είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν, είτε ρεύμα δεν θα ρέει λόγω έλλειψης υγρασίας. Οι πολύ ξερές συνθήκες επιφανείας δεν είναι απαραίτητως μια ένδειξη ότι το έδαφος, κάτω από την επιφάνεια, είναι πάρα πολύ ξηρό για να περιέχει μια αρκετή αντίθεση, συχνά επαρκής υγρασία βρίσκεται μόνο μερικά εκατοστά κάτω από τα ηλεκτρόδια. Τα όργανα της «EMI» μπορούν επίσης να πακεταριστούν και να μεταφερθούν εύκολα εξ αιτίας του μικρότερου μεγέθους επίσης. Τα μειονεκτήματα των ερευνών αγωγιμότητας περιλαμβάνουν σίγουρα την ευαισθησία του οργάνου στη ηλεκτρική παρέμβαση (π.χ. φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια) και τα συντρίμια μετάλλων.

2.2.7. Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας του υλικού να μαγνητιστεί παρουσία του μαγνητικού πεδίου. Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου (κ) ή ως απλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ), αλλά συνήθως δίνεται ως αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο.

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

2.2.8. Μεθοδολογία μετρήσεων

Υπάρχουν διάφοροι να μετρηθεί η μαγνητική επιδεκτικότητα, αλλά όλοι στηρίζονται στην θεμελιώδη αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα δευτεροβάθμιο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (EM) μπορεί να προκληθεί στο έδαφος με τη δημιουργία του αρχικού πεδίου. Το δευτεροβάθμιο πεδίο, όχι μόνο περιέχει τις πληροφορίες για τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους, αλλά αποκρίνεται και στις μαγνητικές ιδιότητες. Επίσης υπενθυμίζεται, ότι όταν το δευτεροβάθμιο πεδίο μετασχηματίζεται από μαθηματικής άποψης στα «in-phase» και «out-of-phase», το μέγεθος του «out-of-phase» τμήματος είναι ανάλογο προς την αγωγιμότητα. Ευ' όσον δεν υπάρχει κανένας εξαιρετικά αγωγίμος στόχος στο έδαφος (επίσης μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα), το «in-phase» θεωρείται μέτρο της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Τέλος, μερικά όργανα της «EMI» μπορούν να μετρήσουν και την πραγματική αγωγιμότητα και την μαγνητική επιδεκτικότητα ταυτόχρονα. Άλλα

όργανα σχεδιάζονται για να μετρήσουν μόνο την μαγνητική επιδεκτικότητα, αλλά εξακολουθούν πάντα να χρησιμοποιούν την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.

2.2.9. Βάθος και ανάλυση

Από τις γεωφυσικές μεθόδους που περιγράφονται εδώ, η μαγνητική επιδεκτικότητα που συλλέγεται από την επιφάνεια του εδάφους, είναι η πιο περιορισμένη, από την άποψη της διαπερατότητας σε βάθος εξ αιτίας της αδυναμίας των μαγνητικών πεδίων να μετρούνται. Η εκθετική απώλεια εμφανίζεται καθώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εισάγεται στο έδαφος, και έπειτα πάλι καθώς ταξιδεύει από το έδαφος στον αισθητήρα μέτρησης. Η απώλεια είναι εκθετική στη έκτη δύναμη, με συνέπεια την πολύ μικρή διείσδυση σε βάθος.

Υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στην διαπερατότητα σε βάθος, ανάμεσα στα μονά και διπλής σπείρας όργανα. Τα μονά όργανα σπειρών πρέπει να έχουν απευθείας επαφή με το έδαφος και το βάθος της διείσδυσης περιορίζεται από τη διάμετρο του βρόχου αναζήτησης. Για παράδειγμα, ο «BartingtonMS2D» αισθητήρας μονού βρόχου, διαπερνά 0,1 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι διπλοί αισθητήρες σπειρών όπως το «Geonics EM38» έχουν μια διείσδυση της τάξης του μισού μέτρου ή και περισσότερο (εντούτοις η ευαισθησία του βάθους είναι μεγαλύτερη για την αγωγιμότητα με αυτόν τον αισθητήρα).

Οι πυκνότητες δεδομένων για τις έρευνες περιοχής μαγνητικής επιδεκτικότητας εξαρτώνται από το όργανο. Οι αισθητήρες διπλής σπείρας είναι γρήγοροι και οι χαρακτηριστικές πυκνότητες δεδομένων είναι σχεδόν οι ίδιες με αυτές της αγωγιμότητας, ίσως 0,25m × 0,5m (δηλ. 4 αναγνώσεις ανά γραμμικό μέτρο, με περάσματα που χωρίζονται αν 0,5m). Οι μονοί αισθητήρες σπειρών, λοιπόν, είναι αρκετά πιο αργοί επειδή κάθε ανάγνωση απαιτεί την απευθείας επαφή με το έδαφος και συχνά ο αισθητήρας πρέπει να μηδενιστεί πριν από κάθε μέτρηση. Επομένως, η πυκνότητα των μετρήσεων είναι της τάξης μιας μέτρησης ανά τετραγωνικό μέτρο (ή και λιγότερο). Αυτό βάζει ένα προφανές όριο στη χωρική ανάλυση. Με τα όργανα διπλών σπειρών η χωρική ανάλυση είναι παρόμοια με την αγωγιμότητα.

2.2.10. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

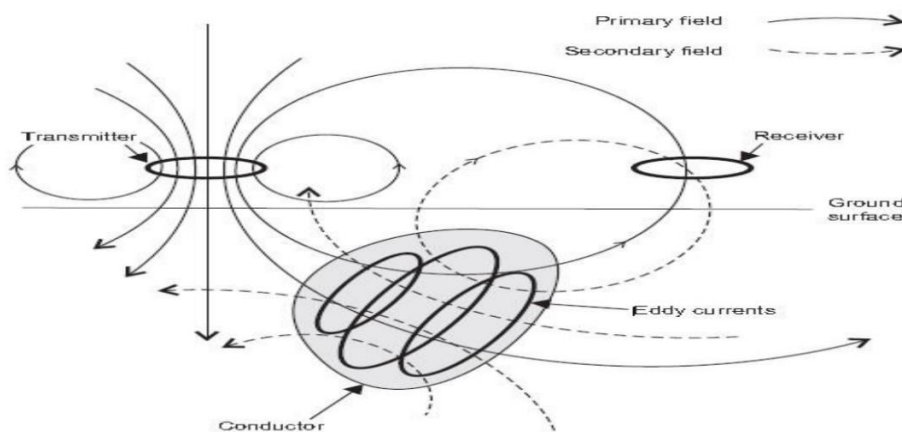
Οι μαγνητικές έρευνες επιδεκτικότητας δεν χρησιμοποιούνται πολύ στη αρχαιολογία, τόσο στην Ευρώπη όσο και επίσης Η.Π.Α.. Επίσης λόγος είναι η πολυπλοκότητα επίσης οργάνωσης των μηχανισμών και τα όρια της διείσδυσης σε βάθος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η τρέχουσα έλλειψη σταθερών και βελτιωμένων οργάνων.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

2.2.11. Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι έρευνας (EMI) χρησιμοποιούν την απόκριση του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα αρχικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να παραχθούν με τη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω μικρού πηνίου φτιαγμένο με περιελίξεις καλωδίου ή μέσω μεγάλου βρόγχου του καλωδίου. Η απόκριση του εδάφους είναι η παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα τελικά πεδία μπορούν να ανιχνευτούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που ρέουν σε ένα πηνίο δέκτη με τη διαδικασία επίσης ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Όλοι οι σχηματισμοί με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μερικοί χώροι μεταλλεύματος που περιέχουν τα μεταλλεύματα που είναι μονωτές, μπορούν να παράγουν δευτερογενή πεδία, εάν περιέχουν επαρκείς ποσότητες του βοηθητικού μεταλλεύματος, με μια υψηλή αγωγιμότητα. Για παράδειγμα, ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούνται πάνω από μέταλλευμα συγκεκριμένου σουλφιδίου, οφείλονται στην παρουσία αγωγίμου ορυκτού πυρροτίτη που είναι διασπασμένο σε όλο το χώρο του μεταλλεύματος.

Αν υπάρχει λοιπόν αγωγίμο υλικό στο υπέδαφος, η μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού σήματος επάγει εναλλασσόμενα ρεύματα (Eddy Currents) μέσα στον αγωγό. Τα ρεύματα αυτά παράγουν δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται από το πηνίο-δέκτη. Ο δέκτης επίσης ανιχνεύει και το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι ο συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς, που διαφέρουν ως επίσης τη φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από επίσης σχετικές σχέσεις και προσανατολισμούς των πηνίων), τόσο το μέγεθος όσο και η σχετική φάση του δευτερογενούς πεδίου μπορούν να υπολογιστούν. Η διαφορά στο τελικό πεδίο από το πρωτογενές δίνει την πληροφορία για την γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού του υπεδάφους.



Εικόνα 2.17: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. Το πηνίο αποστολής σημάτων (T) δημιουργεί ένα αρχικό πεδίο της «EMI» που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό αναγκάζει τα ρεύματα να ρέουν στα αγωγίμα αντικείμενα όπως το κοίλωμα που παρουσιάζεται εδώ. Τα ρεύματα δημιουργούν στη συνέχεια ένα δευτερεύοντα πεδίο. Και τα αρχικά και τα δευτερεύοντα πεδία μετριοούνται στο πηνίο του δέκτη (R)

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

2.2.12. Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Το βάθος διείσδυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εξαρτάται από τη συχνότητά του και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου, μέσω του οποίου διαδίδεται. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται κατά τη διέλευση μέσα από το έδαφος και το πλάτος μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Το βάθος της διείσδυσης d μπορεί αν οριστεί ως το βάθος στο οποίο το πλάτος A_d μειώνεται κατά ένα παράγοντα e^{-1} (37%) συγκρινόμενο με το πλάτος στην επιφάνεια A_0 .

$$A_d = A_0 \times e^{-1}$$

$$d = \frac{503,8}{\sqrt{\sigma f}}$$

Όπου το d είναι σε μέτρα, η αγωγιμότητα σ σε $S m^{-1}$ και η συχνότητα f του πεδίου είναι σε Hz.

Το βάθος διείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της αγωγιμότητας του εδάφους. Συνεπώς, η συχνότητα που χρησιμοποιείται σε μια έρευνα EM μπορεί να καθορίσει το επιθυμητό βάθος σε οποιοδήποτε μέσο. Εμπειρικά, ένα αποτελεσματικό βάθος διείσδυσης z_e μπορεί να καθοριστεί ως το μέγιστο βάθος στο οποίο ο αγωγός μπορεί να βρεθεί και να παράγει μια αναγνωρίσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία.

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

Η εξάρτηση του βάθους διείσδυσης από την συχνότητα, τοποθετεί επίσης περιορισμούς στην μέθοδο EM, με μέγιστη επιτεύξιμη διείσδυση της τάξης των 500m.

2.2.13. Συστήματα μέτρησης φάσης

Ένα ηλεκτρομαγνητικό σύστημα έρευνας μπορεί να μετρά τις σχέσεις φάσης και πλάτους μεταξύ των πρωτογενών, δευτερογενών και τελικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να παρασταθεί από ένα ημιτονοειδές κύμα μήκους 2π (360°). Όταν κατά την διάδοση δύο κυμάτων, τα κύματα αρχίζουν να διαδίδονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τότε θεωρούνται ότι είναι εκτός φάσης. Η διαφορά φάσης μπορεί να αντιπροσωπευτεί με γωνία φάσης θ στον γωνιακό διαχωρισμό των κυματομορφών. Οι σχέσεις φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορούν να αναπαρασταθούν σε ειδικά διανυσματικά διαγράμματα, στα οποία το διανυσματικό μήκος είναι ανάλογο με το πλάτος του πεδίου και η γωνία που μετριέται, αντίθετα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, από το πρωτογενές διάνυσμα στο δευτερογενές διάνυσμα, αντιπροσωπεύει την γωνιακή καθυστέρηση φάσης του δευτερογενούς πεδίου που προηγείται του πρωτογενούς.

Το πρωτογενές πεδίο P , οδεύει άμεσα από τον πομπό στον δέκτη επάνω από το έδαφος και δεν υφίσταται καμία τροποποίηση, εκτός από μια μικρή μείωση του πλάτους που προκαλείται με τη γεωμετρική διάδοση. Επίσης, το πρωτογενές πεδίο εισχωρεί στο έδαφος, μειώνεται κατά πολύ το πάτος του, αλλά παραμένει σε φάση με το επιφανειακό πρωτογενές. Το πρωτογενές πεδίο προκαλεί επίσης μια εναλλασσόμενη τάση σε ένα υπεδαφικό αγωγό, με την ίδια συχνότητα, αλλά με καθυστέρηση φάσης $\pi/2$, σύμφωνα με τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

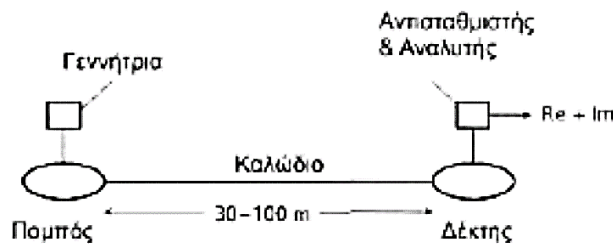
Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης ϕ .

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi fL}{r}\right)$$

Όπου f η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, L η αυτεπαγωγή του αγωγού και r η αντίσταση του αγωγού. Σε έναν καλό αγωγό το ϕ θα πλησιάσει το $\pi/2$ ενώ σε έναν κακό αγωγό, το μηδέν.

Η προβολή του S στον οριζόντιο άξονα (πρωτογενές πεδίο) είναι $S \times \sin\phi$ και είναι, σε γωνία π , εκτός φάσης ως το P . Είναι γνωστή ως σε φάση συνιστώσα ή in-phase ή πραγματική συνιστώσα του S . Η κάθετη προβολή είναι $S \times \cos\phi$, $\pi/2$ εκτός φάσης ως το P , και είναι γνωστή ως εκτός φάσης ή φανταστική συνιστώσα.

Τα σύγχρονα όργανα είναι σε θέση να διαχωρίσουν το δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε πραγματική (RC) και φανταστική (Im) συνιστώσα. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία RC/Im τόσο καλύτερος είναι ο αγωγός. Μερικά συστήματα, κυρίως αερομεταφερόμενα, μετρούν απλώς τη γωνία φάσης ϕ .



Εικόνα 2.18: Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου

Τα κλασικά συστήματα μέτρησης φάσης χρησιμοποιούν κινούμενους πομπούς και δέκτες και αναφέρονται ως δίδυμο πηνίου (twin-coil) ή slingram συστήματα. Τα πηνία πομπού και δέκτη είναι διαμέτρου 1m και μεταφέρονται συνήθως οριζόντια, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικοί προσανατολισμοί. Τα πηνία συνδέονται με ένα καλώδιο το οποίο φέρνει ένα σήμα αναφοράς, καθώς επίσης επιτρέπει την απόσταση των πηνίων να διατηρηθεί σταθερή, συνήθως 30-100m. Ο πομπός τροφοδοτείται από μια φορητή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το σήμα εξόδου από το πηνίο-δέκτη περνάει από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο μετράει αρχικά στο έδαφος χωρίς αγωγίμο σώμα και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται ώστε να παράγει μηδενική έξοδο. Με τον τρόπο αυτό, το πρωταρχικό πεδίο αντισταθμίζεται, έτσι ώστε το σύστημα να αποκρίνεται στη συνέχεια μόνο στα δευτερογενή πεδία. Συνεπώς, τέτοιες ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

αποκαλύπτουν την παρουσία σωμάτων ανώμαλης αγωγιμότητας, χωρίς παροχή πληροφορίας για τις απόλυτες τιμές αγωγιμότητας. Στην περιοχή έρευνας, ο αναλυτής χωρίζει το δευτερογενές πεδίο από πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες, που συνήθως παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, του οποίου το μέγεθος αναμεταδίδεται μέσω του διασυνδεδεθέντος καλωδίου. Τομές μέτρησης γίνονται γενικά κάθετα στις γεωλογικές ασυνέχειες και οι μετρήσεις αντιστοιχούν στη θέση του μεσαίου σημείου του συστήματος. Το μέγιστο βάθος ανίχνευσης είναι περίπου το μισό της απόστασης πομπού-δέκτη.

Οι μετρήσεις υπαίθρου είναι απλή διαδικασία και απαιτεί μια ομάδα των δύο ή τριών χειριστών. Η απόσταση και ο προσανατολισμός των πηνίων είναι κρίσιμα στοιχεία, δεδομένου ότι ένα μικρό λάθος στην απόσταση μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση φάσης. Τα πηνία πρέπει να κρατηθούν ακριβώς οριζόντια και συνεπίπεδα δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Είναι λογικό, η απαιτούμενη ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού, να είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε μεγάλες αποστάσεις με ανώμαλη τοπογραφία.

2.2.14. Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης

Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in-phase μέτρηση, ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με την διαμόρφωσή του. Το όργανο CMD μπορεί να διαθέτει κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο ώστε για κάθε θέση μέτρησης να καταγράφονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες. Οι τυπικές εφαρμογές του οργάνου παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 2.5):

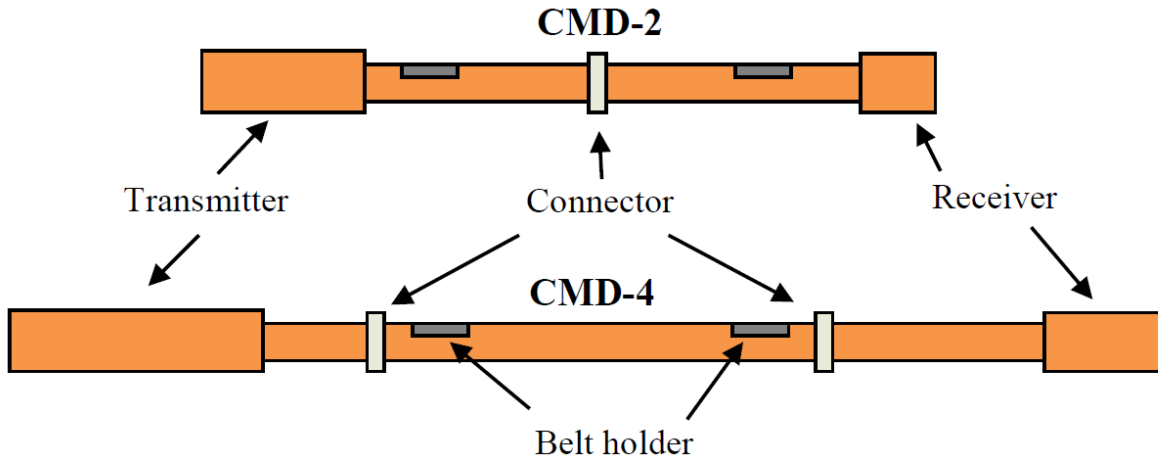
Γεωτεχνική έρευνα	Γεωλογική χαρτογράφηση περιοχών	Γεωργία	Αρχαιολογία	Περιβαλλοντικοί σκοποί
<ul style="list-style-type: none"> Αξιολόγηση βραχώδους Αποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων 	<ul style="list-style-type: none"> Αναζήτηση κοιτασμάτων Γεωλογική έρευνα Εντοπισμός σπηλαιωμάτων 	<ul style="list-style-type: none"> Προσδιορισμός ποιότητας εδάφους Διαχείριση νερού και λιπασμάτων 	<ul style="list-style-type: none"> Εντοπισμός τοιχίων Ιστορική έρευνα σπηλαιωμάτων Εντοπισμός υπόγειων στοών 	<ul style="list-style-type: none"> Υδρογεωλογικές εφαρμογές Σημεία ρύπανσης Διαχείριση νερού λεκανών

Πίνακα 2.5: Τυπικές εφαρμογές οργάνου CMD

Τα πλεονεκτήματα του μηχανήματος είναι η ταχύτητά του (απόκριση σχεδόν 0,1s), η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε δύο βάθη διασκόπισης αλλά και η άμεση σύνδεση με GPS για γρήγορο προσδιορισμό, καθώς και αποθήκευση πληροφοριών υψομέτρου, γεωγραφικού πλάτους και μήκους στα σημεία μετρήσεων.

Σε συνεχείς μετρήσεις, όταν το όργανο μετακινείται διαρκώς σε μια περιοχή έρευνας, η μετρούμενη αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα υπολογίζονται ως μέσοι όροι των τιμών που μετρήθηκαν σε κάθε θέση και σε κάθε στιγμή μέτρησης. Το λάθος κατά τη μέτρηση υπολογίζεται ως τυπική απόκλιση. Το CMD επιτρέπει, ωστόσο, τον αυτόματο έλεγχο σφάλματος. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει

το μέγιστο αποδεκτό όριο σφάλματος (<1%,<2%,<5%,<10%) και σε τέτοιες περιπτώσεις, η μέτρηση επιμηκύνεται στο διπλάσιο.



Εικόνα 2.19: Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης CMD2, CMD4.

2.3. Γεωραντάρ – GPR (Ground-Penetrating Radar)

2.3.1. Γενικά

Το Γεωραντάρ ή αλλιώς Ground-Penetrating Radar (GPR) είναι μια τεχνική απεικόνισης του υπεδάφους σε υψηλή ανάλυση. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετά κοινά σημεία με τη σεισμική μέθοδο, συμπεριλαμβάνεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους καθώς ελέγχει τις ηλεκτρικές ιδιότητες σε υψηλές συχνότητες. Το GPR αποτελεί μη καταστρεπτική μέθοδο, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αστικές ή γενικότερα ευαίσθητες περιοχές. Έχει επίσης γεωλογικές εφαρμογές, όπως η απεικόνιση δομών σε υψηλή ανάλυση και η χαρτογράφηση του υδροφόρου ορίζοντα. Επίσης έχει και διάφορες μη γεωλογικές εφαρμογές όπως π.χ. στην αρχαιολογία για την εύρεση τοποθεσίας θαμμένων τοίχων ή και κοιλοτήτων.

Η μέθοδος με γεωραντάρ εφαρμόζεται σε περιοχές με σχηματισμούς υψηλών σχετικά ειδικών αντιστάσεων. Το γεωραντάρ αποτελείται από μια κεραία που λειτουργεί ως πομπός, ο οποίος εκπέμπει έναν μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Ο παλμός της ανακλάται από αντικείμενα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και κατόπιν λαμβάνεται από άλλη κεραία που λειτουργεί ως δέκτης. Βασίζεται στην ανάκλαση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, από 8MHz έως 4GHz, σε ασυνέχειες μέσων που η αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά μεταβάλλονται. Η διηλεκτρική σταθερά είναι η δυνατότητα του υλικού να αποθηκεύει φορτία όταν εφαρμόζεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στον πίνακα

2.4 παρατίθενται οι ταχύτητες διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v), οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) για διάφορους τύπους υλικών.

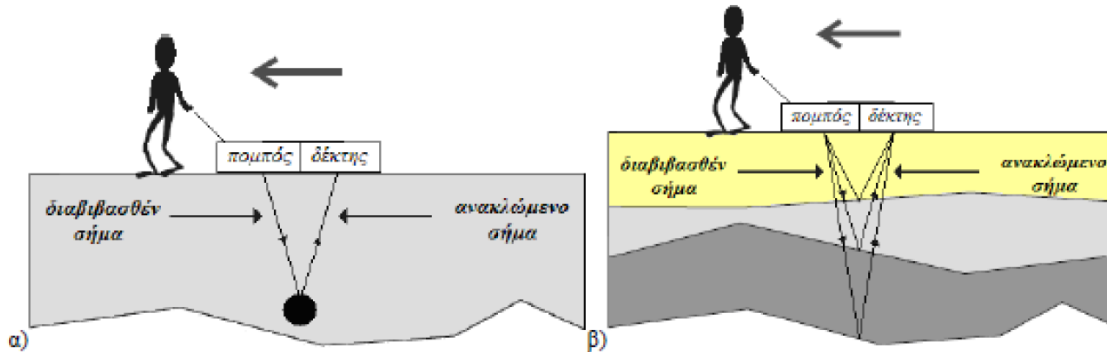
	K	σ (mS/m)	v (m/ns)
Αέρας	1	0	0,3
Αποσταγμένο νερό	80	0,01	0,033
Θαλασσινό νερό	80	3000	0,01
Ξηρή άμμος	3-5	0,01	0,15
Διαποτισμένη άμμος	20-30	0,1-1	0,06
Ασβεστόλιθος	4-8	0,5-2	0,12
Σχιστόλιθος	5-15	1-1000	0,09
Άργιλος	5-40	2-1000	0,06
Γρανίτης	4-6	0,01-1	0,13
Ξηρό άλας	5-6	0,01-1	0,13
Πάγος	4-6	0,01	0,16

Πίνακας 2.6: Παράθεση ταχυτήτων διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v), τιμών διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σ) για διάφορους τύπους υλικών.

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

2.3.2. Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ

Τα μέρη και οι λειτουργίες που περιλαμβάνονται σε μια διαδικασία μέτρησης με γεωραντάρ είναι τα ακόλουθα (Εικόνα 2.20):

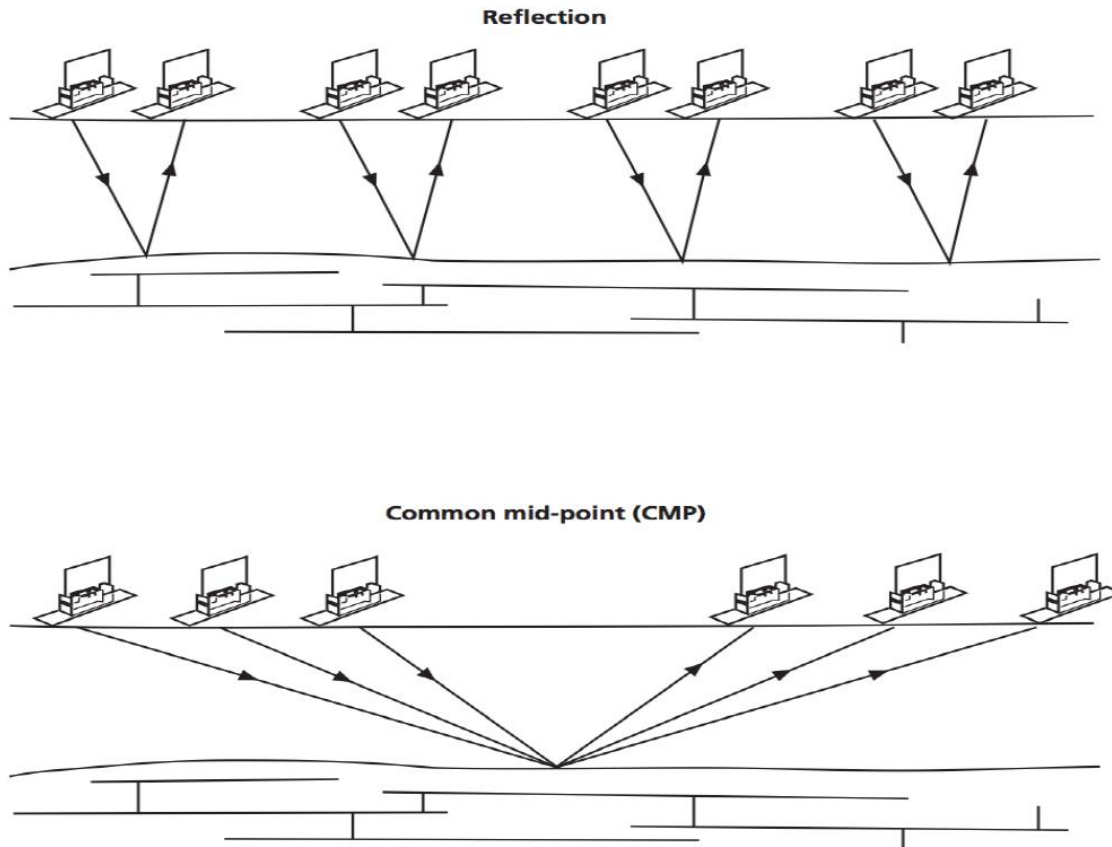


Εικόνα 2.20: Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

- Ηλεκτρικό κύκλωμα (πηγή): Παράγει χρονικά κυμαινόμενες τάσεις (εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο) στο εκάστοτε απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων με ελεγχόμενο και καταγράψιμο τρόπο.
- Κεραία – πομπός: Μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ραδιοκύμα), το οποίο μπορεί να διεισδύσει δια του υπεδάφους στο στόχο. Η Κεραία-πομπός, μετασχηματίζει τα ηλεκτρικής τάσης σήματα σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Σύστημα ανίχνευσης – δέκτης: Αποτελείται συνήθως από μια κεραία και ηλεκτρικά στοιχεία κυκλώματος, που μπορούν να ανιχνεύσουν τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να τα μετασχηματίσουν σε μια ηλεκτρική τάση που μπορεί να καταγραφεί και να επεξεργαστεί.

2.3.3. Τρόποι μετρήσεων στο ύπαιθρο

Τα βασικά μοντέλα διάταξης είναι 2 (Εικόνα 2.21):

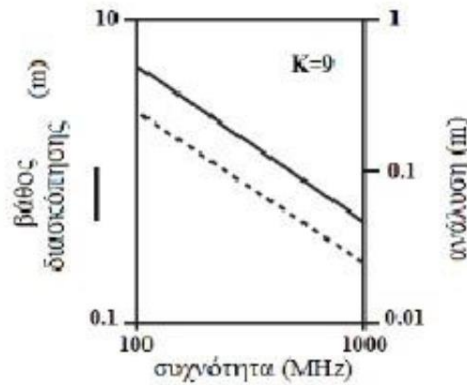


Εικόνα 2.21: Το πρώτο σχήμα απεικονίζει την λειτουργία *Common Offset*, ενώ το δεύτερο την λειτουργία *Common Mid-point* (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

1. Τυπική διάταξη λειτουργίας (Common Offset): Ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή και μικρή απόσταση μεταξύ τους, καθώς μετακινούνται κατά μήκος μιας συγκεκριμένης γραμμής διασκόπησης συλλέγοντας διαρκώς δεδομένα. Υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν κεραιές ίδιας ή και διαφορετικής συχνότητας (με αυτόν τρόπο είναι πιθανό να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα). Συνηθίζεται ο πομπός και ο δέκτης να βρίσκονται μέσα σε θωρακισμένο κουτί για μέγιστη κατευθυντικότητα προς τα κάτω αλλά και προς αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων.
2. Μέθοδος κοινού μεσαίου σημείου (Common Mid-point): Ο πομπός και ο δέκτης απομακρύνονται από ένα συγκεκριμένο κεντρικό σημείο, ή το ένα στέκεται σταθερό και το άλλο απομακρύνεται από το πρώτο. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος.

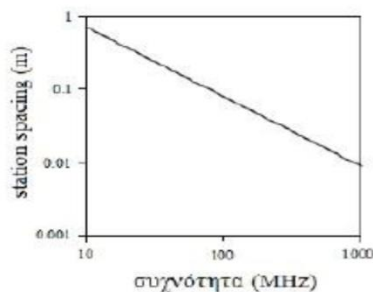
Σε μια τυπική διάταξη λειτουργίας ή αλλιώς σε μία *Common Offset*, κατά την έναρξη των μετρήσεων, καθορίζουμε μια σειρά από παραμέτρους:

- Συχνότητα λειτουργίας πομπού (operating frequency): Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας των κεραιών του συστήματος γεωραντάρ που χρησιμοποιείται τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διείσδυση σε βάθος, με σαφή όμως μείωση στην ανάλυση που επιτυγχάνεται. (Εικόνα 2.22)



Εικόνα 2.22: Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάση της συχνότητας κεραιάς του γεωραντάρ.

- Χρονικό παράθυρο (time window): Εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης και την ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης.
- Χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval): Σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist, δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό επίσης περιόδου T_{minimum} που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη συχνότητα f_{maximum} του μετρούμενου σήματος.
- Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (spatial sampling interval ή station spacing): Η επιλογή του κατάλληλου διαστήματος συνδέεται κυρίως με την κεντρική συχνότητα των κεραιών. (Εικόνα 2.23)



Εικόνα 2.23: Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων

- Θέση και πυκνότητα των γραμμών διασκόπησης (line location and spacing): Οι γραμμές διασκόπησης καθορίζονται έτσι ώστε να περνούν όσο το δυνατόν κάθετα στην μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός των γραμμών που εκτελούνται οι μετρήσεις.

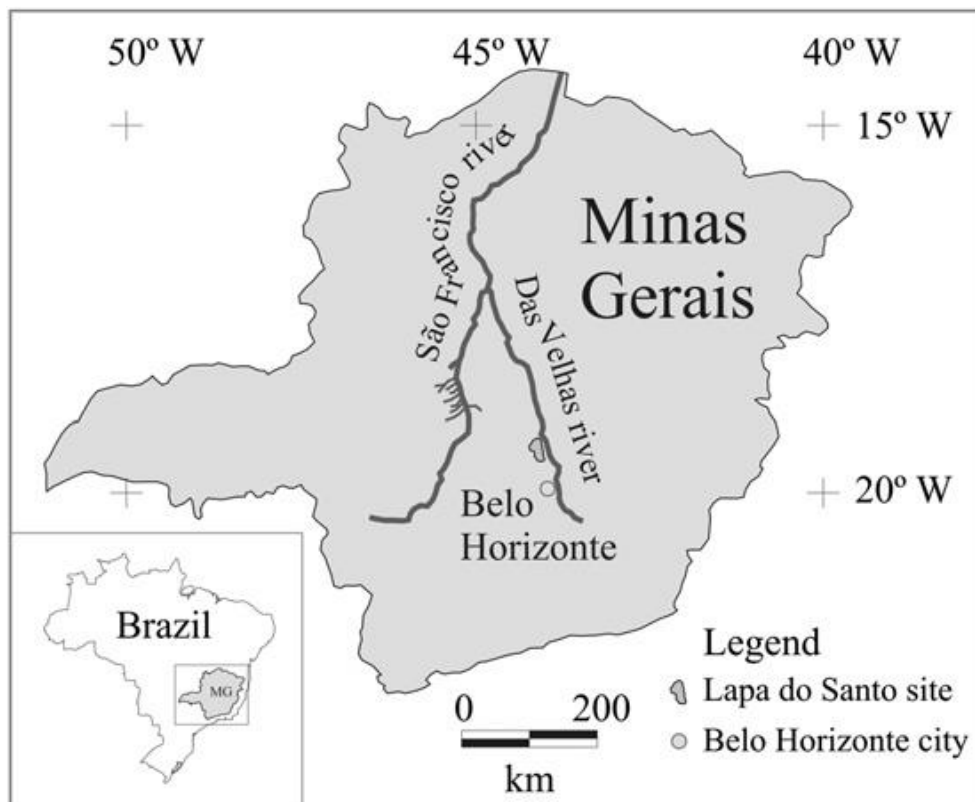
2.3.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου Γεωραντάρ

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα αλλά και λίγα μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, τα κύρια θετικά επίσης μεθόδου είναι η ευκολία και το πόσο γρήγορο είναι το μηχάνημα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, γεγονός που σχετίζεται με το βάρος του μηχανήματος, τη διαδικασία μετρήσεων, το χρόνο μέτρησης αλλά και το χρόνο απόκρισης των αποτελεσμάτων. Από την άλλη, τα αρνητικά της μεθόδου είναι η δυσκολία ερμηνείας των αποτελεσμάτων, η πραγματοποίηση μετρήσεων σε ανώμαλα εδάφη και το μικρό βάθος ανάλυσης. Τέλος το γεωραντάρ ή GPR είναι μια μέθοδος που συνεχώς εξελίσσεται, κάτι το οποίο καθορίζει τα όριά της, άγνωστα.

3. Εφαρμογές

3.1. Εφαρμογή Α: Έρευνα GPR στον αρχαιολογικό χώρο Lapa do Santo, στην καρστική περιοχή Lagoa Santa, Minas Gerais, Βραζιλία

(Jorge Luis Porsani, Guilherme de Matos Jangelme, Renato Kipnis)



Εικόνα 3.1: Χάρτης τοποθεσίας του αρχαιολογικού χώρου Lapa do Santo.

3.1.1. Εισαγωγή

Σε αυτή την εφαρμογή παρουσιάζεται και συζητούνται τα αποτελέσματα μιας έρευνας GPR-2D και GPR-3D σε ένα αρχαιολογικό καταφύγιο, το Lapa do Santo, που βρίσκεται στην καρστική περιοχή της Santa Lagoa, στην κεντρική Βραζιλία. (Εικόνα 3.1). Η περιοχή έχει αρκετούς αρχαιολογικούς χώρους με πολύ καλή διατήρηση της υλικής κουλτούρας και των ανθρωπίνων ερειπίων, του όψιμου Πλειστόκαινου και πρώιμου Ολόκαινου και είναι επίσης μια πολύ σημαντική περιοχή για παλαιοντολογικές μελέτες. Οι ανασκαφές στην περιοχή έγιναν για πρώτη φορά από τον Δανό φυσιοδίφη Peter Lund, ο οποίος το 1842 ανέφερε μια στρωματογραφική συσχέτιση μεταξύ ανθρωπίνων και μεγα-φαναίων στο σπήλαιο Sumidouro. Οι Wesley Hurt και Oldemar Blasi πραγματοποίησαν επίσης πρώτες επαγγελματικές αρχαιολογικές ανασκαφές στο Lagoa Santa το 1956. Ο πρωταρχικός στόχος ήταν να διερευνηθεί η συνύπαρξη των ανθρώπων και των μεγα-φαναίων.

Η ανασκαφή στις τοποθεσίες του σπηλαίου Cerca Grande αποκάλυψε την ανθρώπινη κατοχή πρώιμου Ολόκαινου, αλλά τίποτα δεν έδειξε τη συνύπαρξη ανθρώπων και εξαφανισμένων ζώων που διεκδικούσε ο Peter Lund. Από το 1971 έως το 1976 μια γαλλο-βραζιλιάνικη ομάδα με επικεφαλής την Anette Laming-Emperaire πραγματοποίησε εντατικές αρχαιολογικές έρευνες στο Lagoa Santa. Στο Lapa Vermelha IV, βρέθηκαν κόκαλα και κοπριά από ένα εξαφανισμένο είδος βραδύπους (*Catonyx cuijieri*) σε μια στρώση που χρονολογείται στα 9580±200 BP (GIF 3208), ενώ στα στρώματα κάτω από τον βραδύπους, βρέθηκαν οστά επίσης ανθρώπινου σκελετού που ονομάστηκε Luzia.

Ο Neves πραγματοποίησε κρανιακές μετρήσεις σε περίπου 100 σκελετούς, συμπεριλαμβανομένης της Luzia, και βρήκε ότι ήταν μορφολογικά διακριτές από παλιούς και σύγχρονους ιθαγενείς Αμερικανούς και από βορειοανατολικούς Ασιάτες επίσης. Αντ' αυτού, βρήκε τα κρανία παρόμοια με αυτόχθονες Αυστραλούς ακόμη και Αφρικανούς. Σε μια σειρά εκδόσεων, έθεσε μια υπόθεση πρώιμης μετανάστευσης στην Αμερική πριν από αυτή που ήταν προγονική επίσης σύγχρονους ιθαγενείς Αμερικανούς.

Το 2000, ξεκίνησε ένα μακροχρόνιο παλαιoανθρωπολογικό έργο στην περιοχή που συντονίστηκε από τον Walter Neves. Αυτό το πολυεπιστημονικό ερευνητικό πρόγραμμα στοχεύει στην καλύτερη κατανόηση των πρώτων κατοίκων της πεδιάδας της Νότιας Αμερικής. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα μελέτη παρουσιάζει τα αποτελέσματα της 2D και 3D GPR έρευνας που αποσκοπούν στην αναγνώριση του σπηλαίου, των θαμμένων ογκόλιθων, των αρχαιολογικών χαρακτηριστικών, των αρχαιολογικών αντικειμένων, των ανθρώπινων ταφών και των στρωματογραφικών οριζόντων.

3.1.2 Τοπική γεωλογία

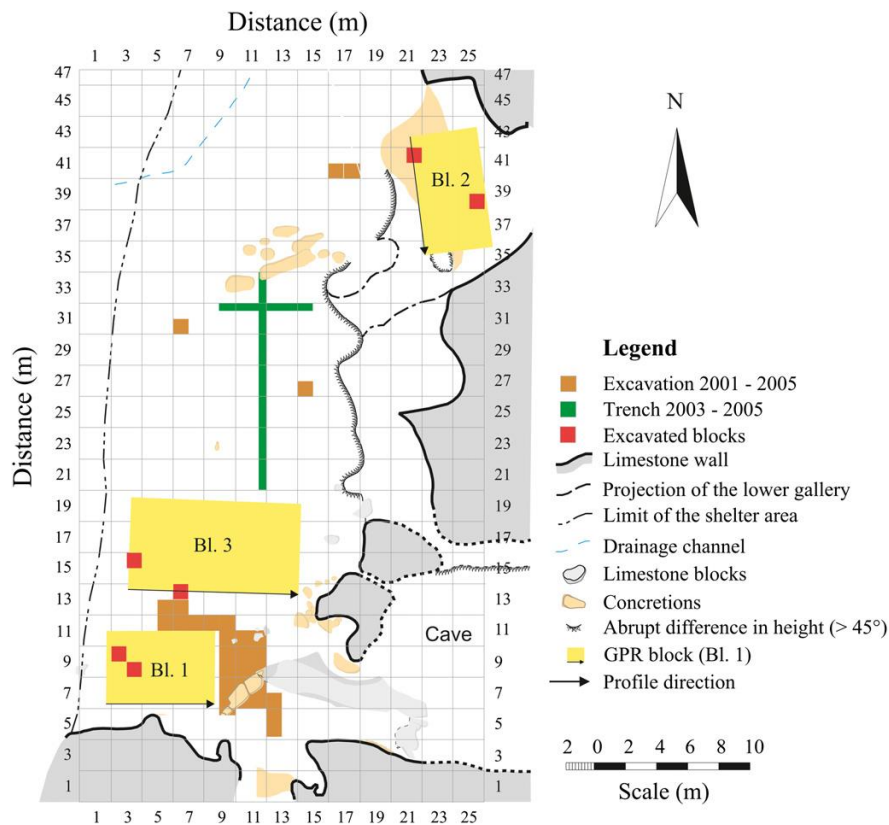
Ο αρχαιολογικός χώρος Lapa do Santo βρίσκεται στην περιοχή Lagoa Santa, η οποία βρίσκεται ακριβώς βόρεια του Belo Horizonte, του κράτους Minas Gerais (Εικ. 1). Το Lagoa Santa χαρακτηρίζεται από το καρστικό του ανάγλυφο που σχηματίζεται στον ασβεστολιθικό σχηματισμό, γνωστό ως Sete Lagoas με άφθονες ασβεστολιθικές επιφανειακές εμφανίσεις, ημιμόνιμες λίμνες και βράχως καταφύγια που περιέχουν πλούσιο αρχαιολογικό και παλαιοντολογικό αρχείο.

Η τοπική γεωλογία περιλαμβάνει αλληλουχίες του ανώτερου προτεροζωικού ασβεστόλιθου του σχηματισμού Sete Lagoas, Bambuí Group, που τοποθετείται πάνω από γνεύσιο και μιγματίτη. Ο σχηματισμός Sete Lagoas περιλαμβάνει δύο συχνώς εμπλεκόμενες διαδοχές ανθρακικού άλατος. Η πρώτη ακολουθία βρίσκεται ακριβώς πάνω από το παλαιοπροτεροζωικό κρυσταλλικό υπόγειο. Τα πρώτα μέτρα καθίζησης ανθρακικών αλάτων εμφανίστηκαν σε μια πειραματική πλατφόρμα, με περιορισμένη σύνδεση με τον ωκεανό.

Μέχρι σήμερα βρέθηκαν περισσότεροι από 50 αρχαιολογικοί χώροι στην περιοχή Lagoa Santa. Η μεγάλη πλειοψηφία αυτών (80%) συναντάται σε ανθρακούχα καταφύγια και σπήλαια. Ο ανθρακούχος σχηματισμός παρουσιάζει πάχος περίπου 200 m, κυμαινόμενο από 650 έως 850 m.a.s.s. Ο σχηματισμός παρουσιάζει χημική καθαρότητα, με τιμές CaCO₃ μεγαλύτερες από 90%. Η υψηλή συχνότητα του CaCO₃ στο σχηματισμό διευκολύνει τη διάλυση του ασβεστόλιθου και την ανάπτυξη καταφυγίων και σπηλαίων. Επίσης συχνές στο γεωλογικό υπόβαθρο είναι οι χαλαρές δομές λόγω διαδικασιών κατακερματισμού και αντίστροφων ρηγμάτων που είναι η αφορμή για το σχηματισμό των σπηλαίων και την ανάπτυξη τοπικού καρστικού ανάγλυφου.

3.1.3. Μεθοδολογία

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε Γεωραντάρ (GPR). Τα δεδομένα του Γεωραντάρ αποκτήθηκαν σε τρία μπλοκ αρχαιολογικών στρωμάτων που ονομάστηκαν μπλοκ 1, μπλοκ 2 και μπλοκ 3, τα οποία επιλέχθηκαν με βάση το αρχαιολογικό τους δυναμικό (Εικόνα 3.2). Τα τρία μπλοκ παρουσιάζουν διάφορες διαστάσεις: το μπλοκ 1 έχει 7 m κατά μήκος του δυτικού-ανατολικού άξονα (κατεύθυνση απόκτησης δεδομένων GPR) και 4,6 m κατά μήκος του άξονα Νότου-Βορρά. Το μπλοκ 2 έχει 4,5 μέτρα κατά μήκος του δυτικού-ανατολικού άξονα και 8 μέτρα κατά μήκος του άξονα νότου-βορρά (κατεύθυνση απόκτησης δεδομένων GPR). Και το μπλοκ 3 έχει 10 μέτρα κατά μήκος του δυτικού-ανατολικού άξονα (κατεύθυνση απόκτησης δεδομένων GPR) και 6 m κατά μήκος του άξονα Νότου-Βορρά.



Εικόνα 3.2: Σχηματικό πλέγμα του αρχαιολογικού χώρου Lara do Santo που δείχνει τα τρία μπλόκς όπου αποκτήθηκαν τα προφίλ GPR.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε με εξοπλισμό SIR-3000 (GSSI). Τα GPR προφίλ ελήφθησαν κατά μήκος παράλληλων τομών. Τα δεδομένα GPR επεξεργάστηκαν με την τεχνική 3D, η οποία βασίζεται στη χρησιμοποίηση όλων των 2D παράλληλων προφίλ για να αποκτηθεί μια 3D υπόγεια εικόνα.

113 προφίλ γεωραντάρ ελήφθησαν με κεραίες των 200 MHz και 400 MHz (Εικόνα 3.3). Τα προφίλ που αποκτήθηκαν με τις 200 MHz κεραίες είχαν απόσταση μεταξύ τους 0,5 m, με συνολικά 34 προφίλ και τα προφίλ που ελήφθησαν με τις κεραίες 400 MHz είχαν απόσταση μεταξύ τους 0,2 m, με συνολικά 79

προφίλ. Και με τις δύο κεραίες η συχνότητα μετρήσεων ήταν ανά 0,01 m (1 cm) με αποτέλεσμα την υψηλή χωρική ανάλυση των προφίλ GPR, επίσης απαιτείται για τις αρχαιολογικές έρευνες. Με βάση αυτά τα προφίλ, δημιουργήθηκε ο τρισδιάστατος χώρος ο οποίος παρουσιάζεται ως φέτες βάθους. Παρόλο που αποκτήθηκαν προφίλ με τις κεραίες 200 MHz και 400 MHz, στην τρέχουσα μελέτη παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα που ελήφθησαν με την κεραία 400 MHz, λόγω της υψηλότερης οριζόντιας και κατακόρυφης ανάλυσης.



Εικόνα 3.3: Εξοπλισμός GPR με κεραία (a) 200 MHz και (b) 400MHz

Το λογισμικό για την έπειτα επεξεργασία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση δεδομένων και τις ερμηνείες ήταν το Radan (GSSI). Τα κύρια στάδια που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία δεδομένων ήταν: διόρθωση μεγέθους προφίλ, διόρθωση μηδενικού χρόνου, φιλτράρισμα ζώνης διέλευσης, αφαίρεση υποβάθρου, χρονικά μεταβαλλόμενες μετρήσεις και μετατροπή χρόνου-βάθους. Η διόρθωση μεγέθους προφίλ ήταν απαραίτητη για την τυποποίηση του μεγέθους των προφίλ. Στη διόρθωση μηδενικού χρόνου η θέση ίχνους διορθώνεται από την άφιξη του αέρα. Το φιλτράρισμα ζώνης διέλευσης ήταν απαραίτητο για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών στόχων με την εξάλειψη των θορύβων χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων. Οι παράμετροι του φίλτρου επιλέχθηκαν με βάση την ανάλυση των συχνοτήτων φάσματος. Η αφαίρεση υποβάθρου ήταν απαραίτητη για την ενίσχυση μικρών τοπικών ανωμαλιών που θα μπορούσαν να σχετίζονται με αρχαιολογικούς στόχους, εξαλείφοντας τις συνεχείς αντανάκλασεις κατά μήκος των προφίλ. Οι μετρήσεις που διαφέρουν χρονικά εφαρμόστηκαν στα δεδομένα για την αντιστάθμιση των ενεργειακών απωλειών λόγω της απορρόφησης και της γεωμετρικής σκέδασης.

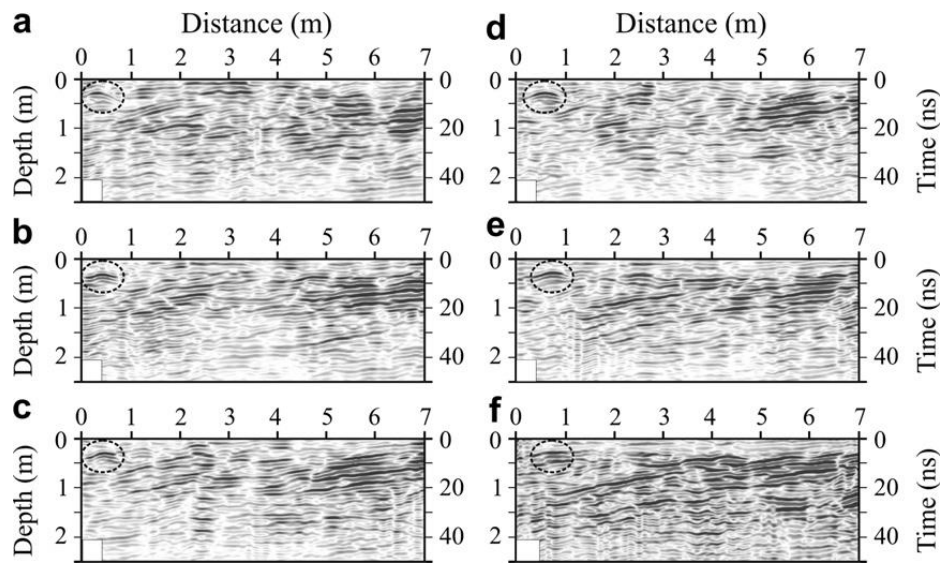
Τέλος, για τη μετατροπή των χρονικών προφίλ σε προφίλ βάθους χρησιμοποιήθηκε ταχύτητα 0,1 m /ns. Αυτή η ταχύτητα υπολογίστηκε με βάση ένα προφίλ ανάκλασης σε έναν γνωστό στόχο (π.χ. ένα μεταλλικό σωλήνα με διάμετρο 0,1 m) που θάφτηκε σε γνωστό βάθος. Από το προφίλ GPR (προφίλ αντανάκλασης GPR) αποκτήσαμε τον αμφίδρομο χρόνο ταξιδιού (t) του ανακλώμενου κύματος πάνω από τον θαμμένο σωλήνα. Καταγράφηκε το ακριβές βάθος (h) της επάνω επιφάνειας του θαμμένου σωλήνα, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αντανάκλαση του σήματος GPR και ανταλλάσσοντας τις τιμές των (h) και (t) στην εξίσωση ($v=2h / t$) αποκτήθηκε την ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος διάδοσης (Daniels, 1996, Porsani, 1999).

3.1.4. Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Όλα τα προφίλ GPR που αποκτήθηκαν με την κεραία των 400 MHz αναλύθηκαν μεμονωμένα και η θέση των πιο σημαντικών γεωφυσικών ανωμαλιών παρουσιάζεται απευθείας στα σχήματα. Αυτοί είναι δυνητικοί αρχαιολογικοί στόχοι που ανασκάφθηκαν για επιβεβαίωση. Παρακάτω παραθέτονται τα πιο σημαντικά αποτελέσματα για κάθε αρχαιολογικό μπλοκ που ερευνήθηκε ως 2D προφίλ, και ως φέτες βάθους.

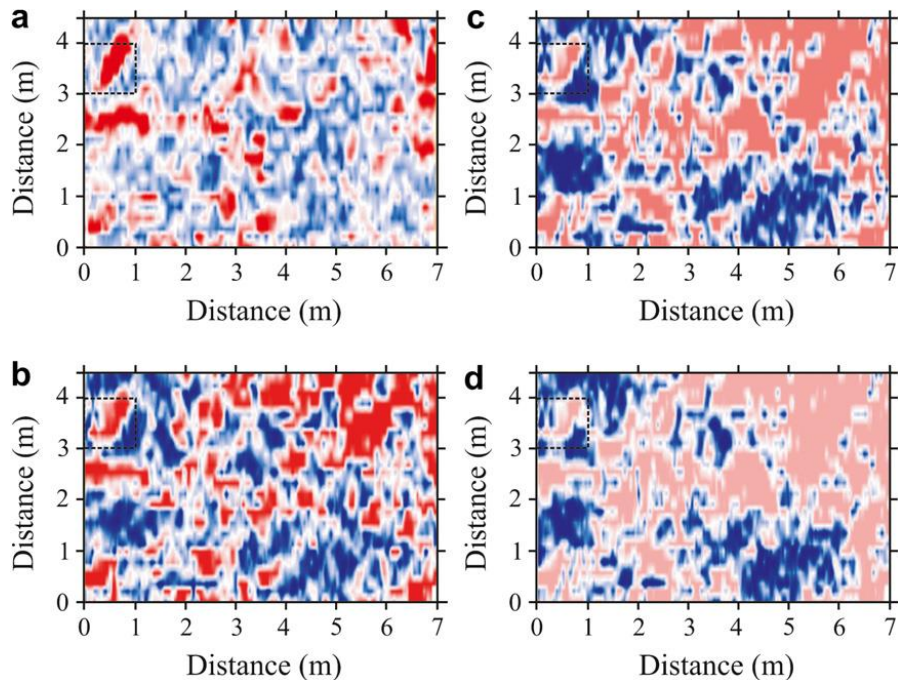
Μπλοκ 1:

Η Εικόνα 3.4 δείχνει τα αποτελέσματα για θέσεις 3,2 m, 3,4 m, 3,6 m, 3,8 m, 4,0 m και 4,2 m N στο μπλοκ 1 (Εικόνα 3.2). Τα προφίλ παρουσιάζουν πολύπλοκες μορφές ανάκλασης, παρουσιάζοντας ισχυρές υπο-οριζόντιες και κεκλιμένες ανακλάσεις, πιθανώς σχετιζόμενες με επίσης δομές του στρώματος πυθμένα ή με την παρουσία ρηγμάτων. Επισημαίνεται η παρουσία μιας διαυγούς ανωμαλίας που χαρακτηρίζεται από έναν υπερβολικό ανακλαστήρα (διάστικτο κύκλο) με μια κορυφή στη θέση 0,5 και σε 0,3 m βάθος (Εικόνα 3.4). Οι υπερβολικές ανακλάσεις σε προφίλ GPR προέρχονται από τοπικές πηγές και μπορούν να αντιστοιχούν σε αρχαιολογικούς στόχους (Daniels, 1996, Conyers, 2004) ως εκ τούτου, αξίζει να ανασκαφεί.



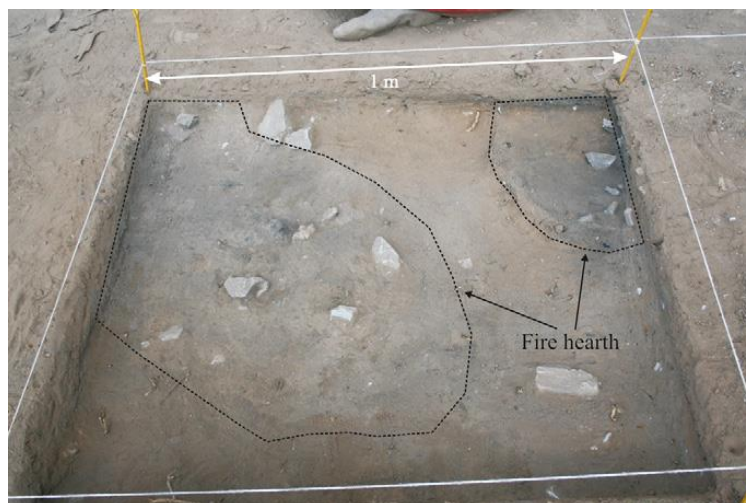
Εικόνα 3.4: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 1 για διαφορετικές θέσεις N. a) 3,2 m; b) 3,4 m; c) 3,6 m; d) 3,8 m; e) 4,0 m; f) 4,2 m.

Η Εικόνα 3.5 δείχνει τις φέτες σε βάθος 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m και 0,6 m. Οι υπερβολικές ανακλάσεις υψηλού πλάτους (διακεκομμένος κύκλος) που παρατηρούνται στα προφίλ (Εικόνα 3.4) φαίνονται στην Εικόνα 3.5. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υψηλά πλάτη παρουσιάζουν τη διάσταση του δυνητικού αρχαιολογικού στόχου. Ένα τετραγωνικό εμβαδόν 1 m x 1 m (διάστικτο τετράγωνο στην Εικόνα 3.5) ανασκάφθηκε για να επαληθεύσει τον θαμμένο στόχο. Η Εικόνα 3.2 δείχνει τον εντοπισμό των εκσκαφθέντων περιοχών (κόκκινο τετράγωνο) για το μπλοκ 1.



Εικόνα 3.5: GPR φέτες βάθους των 400 MHz στο μπλοκ 1. α) 0,3 m β) 0,4 m γ) 0,5 m δ) 0,6 m. Το διάστικτο τετράγωνο δείχνει τις ανωμαλίες που προσδιορίζονται στην εικόνα 3.4.

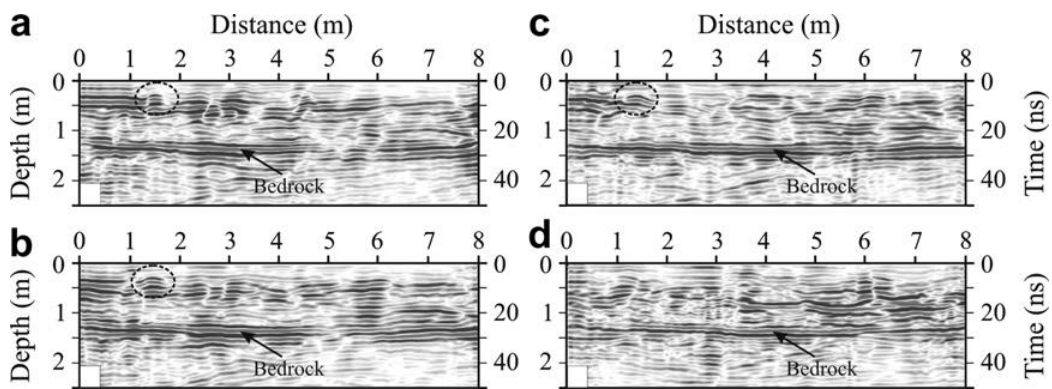
Η Εικόνα 3.6 δείχνει την εκσκαφή που πραγματοποιήθηκε με βάση το αποτέλεσμα των προφίλ GPR (Εικόνα 3.4) και των φετών σε βάθος (Εικόνα 3.5). Η ανασκαφή της περιοχής αποκάλυψε μια εστία φωτιάς σε βάθος 0,3 μ., που χαρακτηρίζεται από την παρουσία ογκόλιθων, λιθόστρωτων και άφθονο ξυλάνθρακα. Αν και η εστία δεν έχει άμεση ημερομηνία, το στρωματογραφικό επίπεδο που σχετίζεται με την εστία χρονολογείται στο 7940 ± 50 BP.



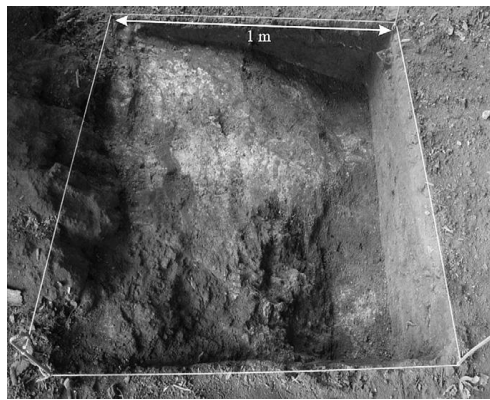
Εικόνα 3.6: Φωτογραφία εκσκαφής που διεξήχθη στο μπλοκ 1. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την παρουσία καμένων υλικών που βρίσκονται σε εστία φωτιάς σε βάθος 0,3 m.

Μπλοκ 2:

Η Εικόνα 3.7 δείχνει τα αποτελέσματα για τις θέσεις, 0,2 m, 0,4 m, 0,6 m και 0,8 m Ε στο μπλοκ 2 (Εικόνα 3.2). Τα προφίλ παρουσιάζουν πολύπλοκες ανακλάσεις με υψηλά πλάτη σε βάθος 1 m και ισχυρό υπο-οριζόντιο ανακλαστήρα σε βάθος 1,4 m. Ο πυθμένας του προφίλ χαρακτηρίζεται από την παρουσία ανθρακούχων πετρωμάτων με λίγες παρεμβολές. Ο ισχυρός υπο-οριζόντιος ανακλαστήρας μπορεί να σχετίζεται με το άνω τμήμα του υπόβαθρου ή με ένα υπο-οριζόντιο ρήγμα του. Επίσης, πολύ ευδιάκριτη στα προφίλ είναι μια γεωφυσική ανωμαλία που χαρακτηρίζεται από έναν υπερβολικό ανακλαστήρα με υψηλό πλάτος και κορυφή στην περιοχή βάθους 1,5 m και 0,2 m. Σύμφωνα με τον Conyers (2004) οι ανακλάσεις GPR με μεγαλύτερα πλάτη έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συσχετιστούν με αρχαιολογικούς στόχους, αλλά μπορούν επίσης να συνδεθούν με φυσικούς θαμμένους ογκόλιθους. Προκειμένου να επαληθευτεί η ανωμαλία GPR που χαρακτηρίζεται από έναν υπερβολικό ανακλαστήρα (διακεκομμένος κύκλος στην Εικόνα 3.7) πραγματοποιήθηκε μια εκσκαφή ενός τετραγωνικού μέτρου (κόκκινο τετράγωνο στην Εικόνα 3.2). Η Εικόνα 3.8 δείχνει το αποτέλεσμα της μονάδας εκσκαφής. Κατά τη διάρκεια της ανασκαφής παρατηρήθηκε η ύπαρξη ενός υπόγειου ανθρακικού σχηματισμού, ένας θαμμένος σταλαγμίτης που κάποτε ήταν μέρος μιας στήλης.



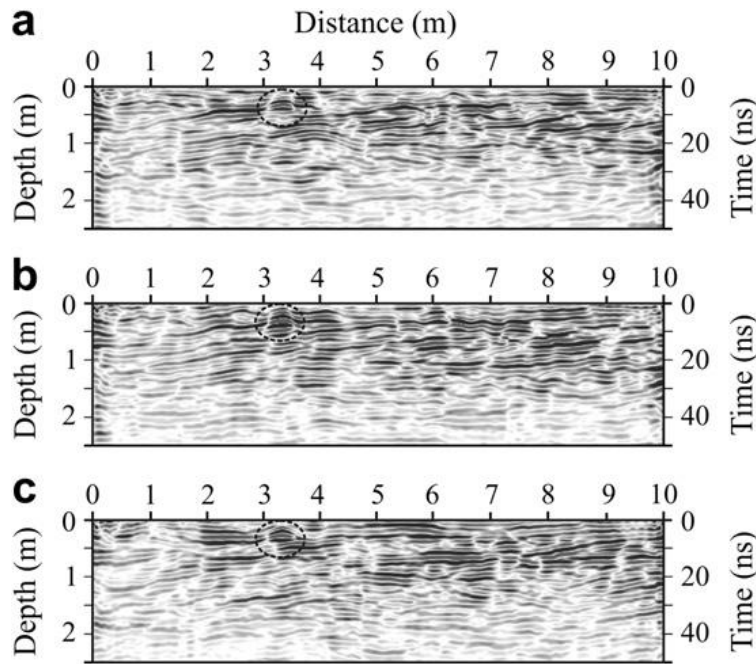
Εικόνα 3.7: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 2 για διαφορετικές θέσεις Ε. α) 0,2 m, b) 0,4 m, c) 0,6 m, d) 0,8 m.



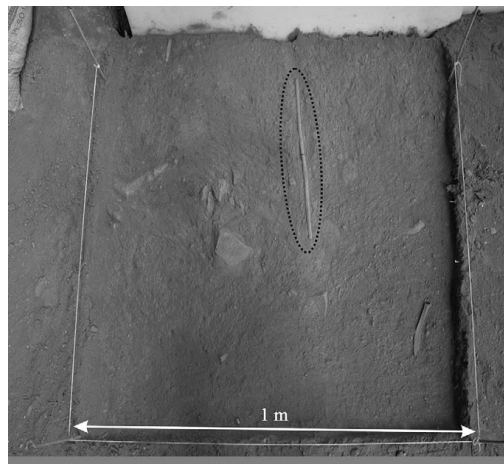
Εικόνα 3.8: Φωτογραφία εκσκαφής που πραγματοποιήθηκε στο μπλοκ 2 που δείχνει τον ανθρακικό θράξο.

Μπλοκ 3:

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των προφίλ GPR που αποκτήθηκαν στο μπλοκ 3 για τις θέσεις N, 0,0 m, 0,2 m και 0,4 m (Εικόνα 3.2) παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.9. Τα προφίλ παρουσιάζουν σύνθετα σχέδια ανάκλασης με ισχυρές υπο-οριζόντιες και κεκλιμένες ανακλάσεις. Μια ανιχνεύσιμη γεωφυσική ανωμαλία που χαρακτηρίζεται από έναν υπερβολικό ανακλαστήρα με θέση κορυφής σε βάθος 3,3 m και βάθους 0,1 m (διακεκομμένος κύκλος), απεικονίζεται στο Σχήμα 10. Αυτή η ανωμαλία ερευνήθηκε με ανασκαφή τετραγωνικής επιφάνειας 1×1 m (κόκκινο τετράγωνο στην Εικόνα 3.2) που παρήγαγε ένα χειροποίητο ξύλινο αντικείμενο (Εικόνα 3.10) που σχετίζεται με ιστορικές κατοχές βραχωδών καταφυγίων.

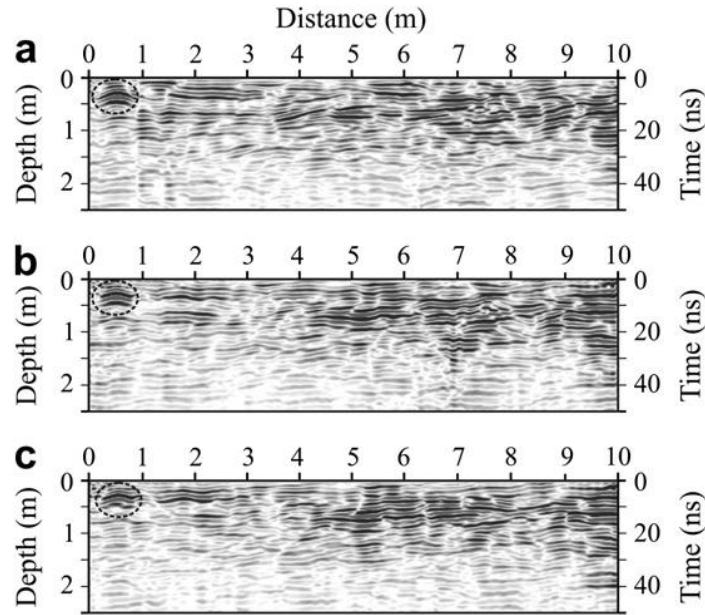


Εικόνα 3.9: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 3 για διαφορετικές θέσεις N. α) 0,0 m, b) 0,2 m, c) 0,4 m.

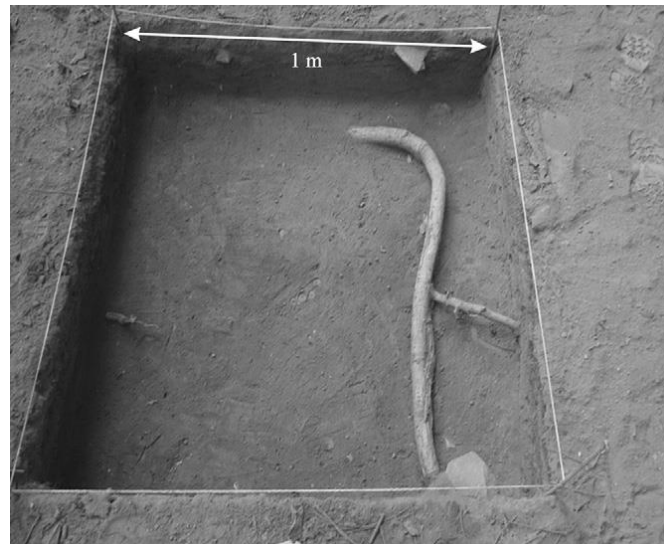


Εικόνα 3.10: Φωτογραφία εκσκαφής που πραγματοποιήθηκε στο μπλοκ 3. Η διακεκομμένη έλλειψη δείχνει ένα χειροποίητο ξύλινο αντικείμενο που βρέθηκε σε βάθος 0,1 m.

Επίσης ένας ξεχωριστός υπερβολικός ανακλαστήρας στο μπλοκ 3 για θέσεις 1,8 m, 2,0 m και 2,2 m N, με κορυφή στα 0,5 m και 0,1 m το βάθος (διακεκομμένος κύκλος στην Εικόνα 3.11), ενδεχομένως συνδεδεμένος με αρχαιολογικούς στόχους, επιθεωρήθηκε. Έγινε ανασκαφή μιας τετραγωνικής επιφάνειας 1×1 m (κόκκινο τετράγωνο στην Εικόνα 3.2) (Εικόνα 3.12) και αποκάλυψε την παρουσία ρίζας δέντρου μέσα στα αρχαιολογικά στρώματα, που χαρακτηρίζεται ως ένας αρχαιολογικός καταρράκτης για την ερμηνεία των GPR. Από την άλλη πλευρά, το αποτέλεσμα αυτό χρησιμεύει ως καλό παράδειγμα ασάφειας στην ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων σε αρχαιολογικές εφαρμογές.



Εικόνα 3.11: Προφίλ GPR των 400 MHz στο μπλοκ 3 για διαφορετικές θέσεις N. α) 1,8 m, b) 2,0 m, c) 2,2 m.



Εικόνα 3.12: Φωτογραφία εκσκαφής που διεξήχθη στο μπλοκ 3 που δείχνει ρίζα δέντρου που βρίσκεται σε βάθος 0,1 m.

3.1.5 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των 400 MHz GPR έδειξαν γεωφυσικές ανωμαλίες καλά καθορισμένες με τη μορφή υπερβολικών ανακλαστήρων και περιοχών με υψηλά πλάτη. Αυτές οι ανακλάσεις προέρχονται από συγκεκριμένους θαμμένους στόχους και υποδεικνύουν αρχαιολογικό δυναμικό. Ορισμένες από τις ανωμαλίες που παρατηρήθηκαν επιλέχθηκαν για να διερευνηθούν με αρχαιολογικές ανασκαφές. Οι ανασκαφές έφεραν θετικά αποτελέσματα με την παρουσία αρχαιολογικού υλικού, όπως εστίες φωτιάς και αρχαιολογικά αντικείμενα.

Τα αποτελέσματα GPR-3D, με τη μορφή φέτας-βάθους, ήταν σημαντικά για να οριοθετήσουν τις διαστάσεις των γεωφυσικών ανωμαλιών και είναι ένα ουσιαστικό εργαλείο για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της αρχαιολογικής μελέτης.

Οι αρχαιολογικές ανασκαφές των ανωμαλιών που εντοπίστηκαν με τη μέθοδο GPR επιβεβαίωσαν την παρουσία θαμμένου υλικού. Ωστόσο, λόγω της αμφισημίας της ερμηνείας των δεδομένων, δεν είναι δυνατόν να γίνει διάκριση μιας ανωμαλίας που σχετίζεται με έναν αρχαιολογικό στόχο (π.χ. τεχνητό αντικείμενο) από μια ανωμαλία που σχετίζεται με το φυσικό χαρακτηριστικό (π.χ. ρίζα δέντρου).

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου GPR στην ταυτοποίηση πιθανών θαμμένων αρχαιολογικών στόχων μέσα σε μια καρστική περιοχή. Η μελέτη αυτή δείχνει επίσης το δυναμικό της έρευνας GPR στην παροχή βοήθειας στους αρχαιολόγους σε ένα πρόγραμμα ανασκαφής μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας την πιθανότητα εύρεσης αρχαιολογικών στόχων στα αρχικά στάδια του έργου.

3.2 Εφαρμογή Β: Ανασυγκρότηση αρχαιολογικού χώρου της Μεσογείου με την ενσωμάτωση γεωφυσικών και αρχαιολογικών δεδομένων: Ανατολική περιοχή της αρχαίας πόλης Νόρα (Σαρδηνία, Ιταλία)

(Rosa Di Maioa, Mauro La Manna, Ester Piegaria, Arturo Zarab, Jacopo Bonetto)



Εικόνα 3.13: Αεροφωτογραφία της χερσονήσου Nora (Σαρδηνία, Ιταλία). Το κόκκινο ορθογώνιο δείχνει την περιοχή γεωφυσικής έρευνας. β: Στοιχεία τοιχοποιίας (που υποδεικνύονται με κόκκινο βέλος) ορατά στην επιφάνεια του εδάφους εντός της γεωφυσικής περιοχής έρευνας.

3.2.1. Εισαγωγή

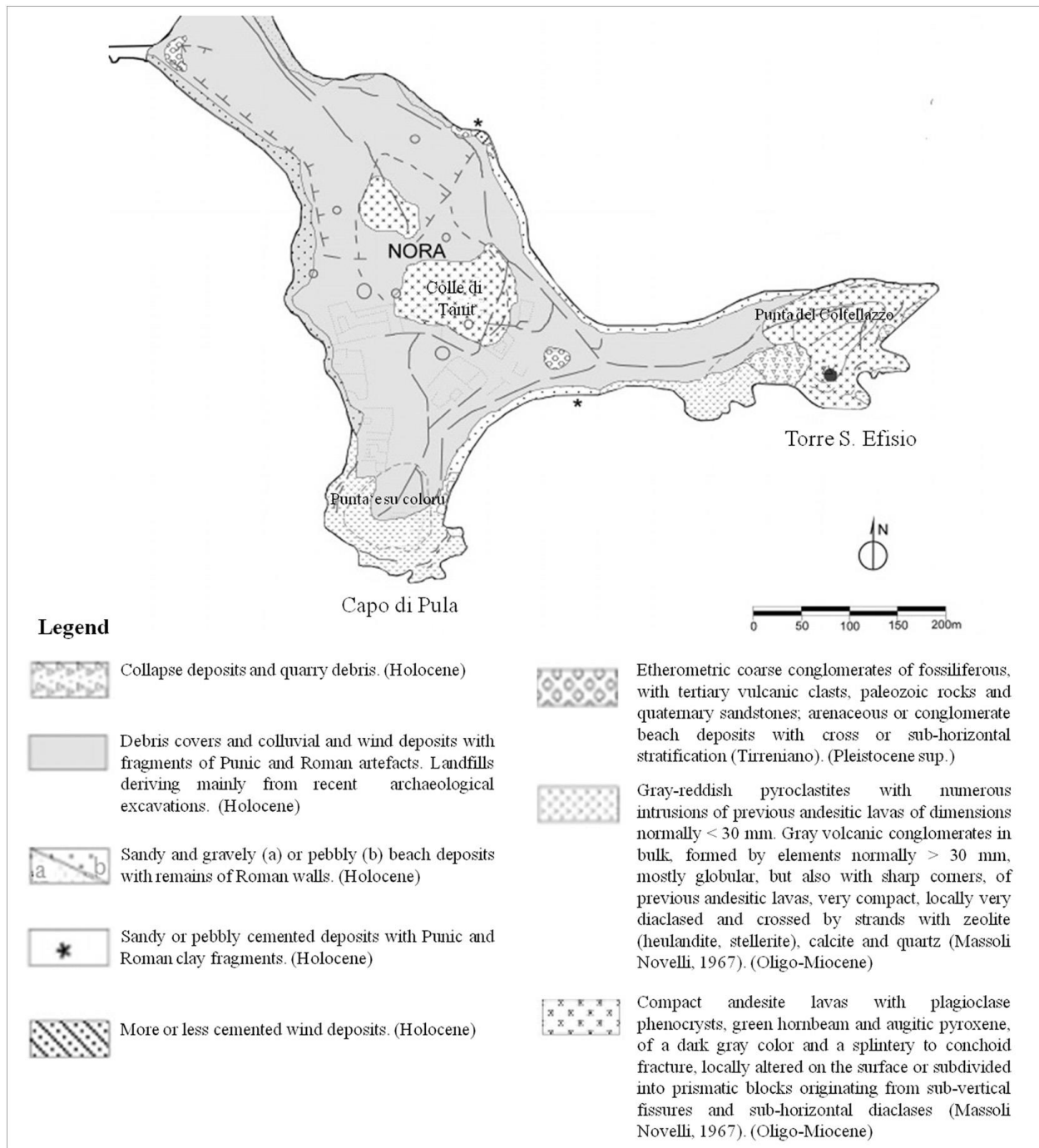
Ο αρχαιολογικός χώρος της Νόρα είναι χτισμένος σε μια μεγάλη χερσόνησο που σηματοδοτεί τον κόλπο του Κάλιاري (Σαρδηνία, Ιταλία) στο νοτιότερο τμήμα της. Οι πρώιμες φοινικικές φάσεις της δυτικής Μεσογειακής αρχαίας πόλης χρονολογούνται στα μέσα του 8^{ου} αι. Π.Χ., αλλά η ανάπτυξη ως αστικό κέντρο πραγματοποιήθηκε κατά τις περιόδους της Πουνής και της Ρωμαϊκής Δημοκρατίας (τέλη 6^{ου}-2^{ου} αι. Π.Χ.). Ωστόσο η κορύφωση της μνημειώδους εξέλιξής της οφείλεται στην δυναστεία των Σεβήρων (195-235 μ.Χ.)

Όπως στις περισσότερες από τις αρχαίες παράκτιες πόλεις, η μελέτη στη Νόρα είναι μάλλον περίπλοκη εξαιτίας της μερικής (ή πλήρους) ταφής ή βύθισης των αρχαιολογικών καταλοίπων και της υποβάθμισης της από την προοδευτική είσοδο του θαλασσινού νερού. Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει ένα εκτεταμένο διεπιστημονικό ερευνητικό πρόγραμμα, το οποίο περιλαμβάνει επιστημονικούς κλάδους που ποικίλουν από την αρχαιολογία έως τις επιστήμες της γης. Συγκεκριμένα, στην παρούσα εφαρμογή, τα αποτελέσματα μιας εκτενούς γεωφυσικής αναζήτησης με υψηλή ανάλυση που επικεντρώνεται στην παράκτια περιοχή μεταξύ ξηράς και θάλασσας, η οποία και δεν έχει ληφθεί υπόψη σε προηγούμενες αστικές και θαλάσσιες αρχαιολογικές έρευνες, αναφέρονται και ενσωματώνονται με νέα αρχαιολογικά δεδομένα.

3.2.2 Γεωλογικά και γεωμορφολογικά δεδομένα της Nora

Η αρχαία ρωμαϊκή πόλη Nora βρίσκεται στη νοτιοδυτική ακτή της Σαρδηνίας (Ιταλία), η οποία χαρακτηρίζεται από μια εναλλαγή ακρωτηρίων και παραλιών με ανάδρομες λιμνοθάλασσες. Η πόλη εμφανίζεται στο ακρωτήριο Capo di Pula, το οποίο έχει σχεδόν τριγωνικό σχήμα περιορισμένο στα ανατολικά και νότια από τα Punta del Coltellazzo και Punta «e su Coloru», αντίστοιχα (Εικόνα 3.14). Επιπλέον, δύο μορφολογικά ανώτατα όρια, Capo della Torre di Sant'Efisio και Colle di Tanit, εμφανίζονται στην περιοχή Coltellazzo και το κεντρικό τμήμα της χερσονήσου, αντίστοιχα (Βλέπε Εικόνα 3.14). Συγκεκριμένα, το Colle di Tanit προέρχεται από ένα ηφαιστειακό νησί συνδεδεμένο με την ηπειρωτική χώρα μέσω ενός μαξιλαριού άμμου, πλάτους περίπου 80 μέτρων, που περιβάλλει πράγματι μια λιμνοθάλασσα που οριοθετείται προς τα νότια από μια τεταρτογενή ακτογραμμή. Η πεδιάδα γύρω από την αρχαία πόλη σχηματίστηκε στο ανώτερο τριτογενές και διασχίζεται από μερικά ποτάμια, τα κυριότερα από τα οποία είναι το Rio Pula και το Rio S. Margherita.

Η γεωλογική κατάσταση της περιοχής χαρακτηρίζεται γενικά από ηφαιστειακά πετρώματα που σχηματίζονται στο Ολιγόκαινο και Μειόκαινο και ιδιαίτερα από λάβα ανδεσίτη, χρώματος ανοιχτού γκρι έως καφέ, που περιγράφεται στη βιβλιογραφία ως ανδεσιτικά και ηφαιστειακά συγκροτήματα, αντίστοιχα. Το ηφαιστειακό υπόστρωμα ξεπροβάλλει σε τρία σημεία της χερσονήσου της Nora: στο ακρωτήριο του Sant'Efisio (ανατολική πλευρά), κοντά στο Punta «e su Coloru» (νότια πλευρά) και στο κέντρο της χερσονήσου σε αντιστοιχία με το Colle of Tanit. Όσον αφορά τις ιζηματογενείς εναποθέσεις που επικαλύπτουν το ηφαιστειακό υπόστρωμα, σε διάφορα σημεία της χερσονήσου εντοπίζονται διάφορα κρούσματα Τυρρηνικών κοιτασμάτων με πάχος που δεν υπερβαίνει τα 3 μέτρα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Οι εναποθέσεις αυτές αποτελούνται κυρίως από συσσωματώματα και άμμο με μερικά απολιθώματα, όπως το *Strombus bubonius*, *Conus testudinarius*, *Patella Ferruginea*. Συγκεκριμένα, η γεωφυσική περιοχή έρευνας βρίσκεται κοντά στο ακρωτήριο του Sant'Efisio, όπου έχει αναγνωριστεί μια ξεχωριστή ιζηματογενής Τυρρηνική ακολουθία αποτελούμενη από επίπεδα γρανίτη με διαφορετική κοκκομετρία, που σχηματίστηκαν κατά κύριο λόγο από ένα οργανογενές συστατικό (περίπου 60%) συμπεριλαμβανομένων των βιοκλαστών και των κελυφών οστρακοειδών.

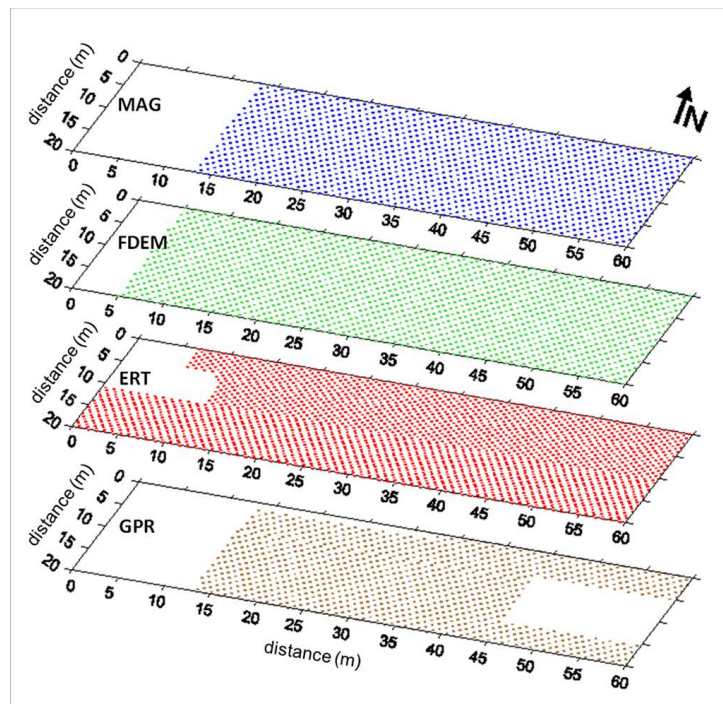


Εικόνα 3.14: Γεωλογικός χάρτης που δείχνει την επιφανειακή γεωλογία της χερσονήσου Nora (τροποποιημένη από Di Gregorio et al., 2009).

3.2.3 Γεωφυσική αναζήτηση στη Nora

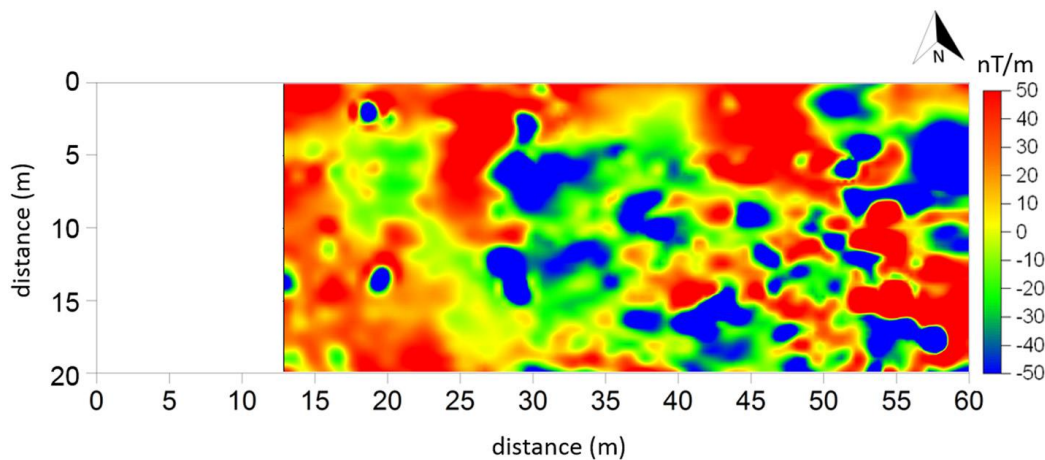
Η γεωφυσική έρευνα στη Nora πραγματοποιήθηκε μέσω μιας προσέγγισης που αποτελείτο από την εφαρμογή και την ενσωμάτωση των ακόλουθων μεθόδων αναζήτησης: μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά, ραντάρ διείσδυσης εδάφους και ηλεκτρικά συνεχούς ρεύματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιώντας τεχνικές λήψης δεδομένων υψηλής ανάλυσης, οι οποίες επέτρεψαν την τρισδιάστατη ανασυγκρότηση του εξεταζόμενου υπεδάφους, κυρίως όσον αφορά τις παραμέτρους ηλεκτρικής αντίστασης και μαγνητικής επιδεκτικότητας. Επίσης είναι γνωστό, στην αρχαιολογική έρευνα, η αναγνώριση τιμών υψηλής αντίστασης (δηλαδή επίσης χαμηλής αγωγιμότητας) δείχνει την ύπαρξη δομών, ανθεκτικών στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ. κοιλότητες, πέτρινους τοίχους ή θεμέλια), τα οποία γενικά, φιλοξενούνται σε ένα περισσότερο αγώγιμο περιβάλλον λόγω της κυκλοφορίας ρευστού, κυρίως σε ιζηματογενή εδάφη. Η παρουσία μαγνητικών ανωμαλιών είναι, αντιθέτως, συνέπεια της αντίθεσης μεταξύ μαγνητικών ιδιοτήτων των ανθρωπολογικών δομικών υλικών και εκείνων του φιλοξενούμενου χώματος ή βράχου. Δεδομένου ότι αυτές οι ανωμαλίες συνδέονται στενά με την ευθυγράμμιση των πηγών που τις προκαλούν, η διανομή τους στο χώρο δίνει πληροφορίες για τη γεωμετρία των θαμμένων μαγνητικών σωμάτων.

Αρχικά, μαγνητικές (MAG) και ηλεκτρομαγνητικές (FrequencyDomainEM) τεχνικές επαγωγής εφαρμόστηκαν για μια προκαταρκτική διερεύνηση της επιλεγμένης περιοχής. Διαδοχικά, πραγματοποιήθηκαν έρευνες υψηλής ανάλυσης για την τομογραφία ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (ERT) και το προφίλ Γεωραντάρ (GPR) για τον καλύτερο προσδιορισμό των παρατηρούμενων ανωμαλιών MAG και FDEM. Η Εικόνα 3.15 δείχνει τις περιοχές έρευνας για κάθε χρησιμοποιούμενη γεωφυσική μέθοδο.



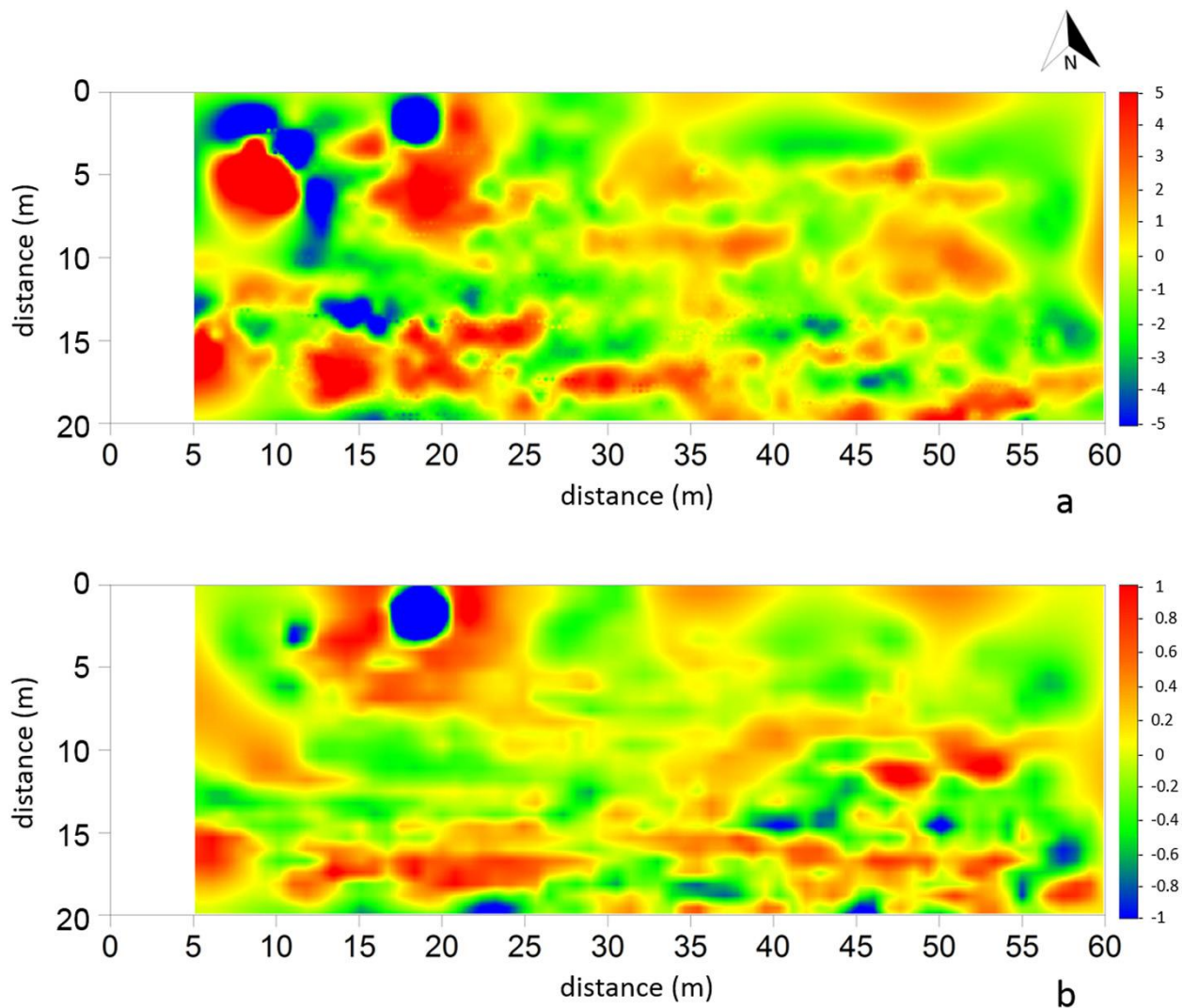
Εικόνα 3.15: Περιοχές έρευνας που διερευνήθηκαν από τις τέσσερις εφαρμοζόμενες γεωφυσικές μεθόδους: MAG, FDEM, ERT και GPR.

Η Εικόνα 3.16 δείχνει τον μαγνητικό χάρτη (vertical pseudo-gradient) που λαμβάνεται από την επεξεργασία των μαγνητικών δεδομένων που αποκτήθηκαν στην μπλε περιοχή της Εικόνας 3.15 κατά μήκος παράλληλων προφίλ με προσανατολισμό Α-Δ μήκους 47m και απόστασης μεταξύ τους 1m. Ένα Μαγνητόμετρο (GSMP-40 by GEM Systems) χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των συνιστωσών υψηλής συχνότητας του σήματος που παράγεται από ρηχές μαγνητικές πηγές, πιθανώς σχετιζόμενες με ανθρωπογενείς δομές. Η διάταξη μαγνητομέτρου, στην πραγματικότητα, περιλαμβάνει την ταυτόχρονη μέτρηση του γεωμαγνητικού πεδίου σε δύο διαφορετικά ύψη από το επίπεδο της γης με δύο αισθητήρες διατεταγμένους κάθετα κατά μήκος μιας ράβδου στήριξης. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών (vertical magnetic pseudo-gradient) είναι επομένως ανεξάρτητη από σχετικά ανεπιθύμητα σώματα έξω από την περιοχή έρευνας. Συγκεκριμένα, για την παρούσα μαγνητική αναζήτηση, η θέση των δύο μαγνητικών αισθητήρων στα 20 cm και 120 cm από την επιφάνεια, αντίστοιχα, επέτρεψαν την απόκτηση δεδομένων που χαρακτηρίζονται από υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο.



Εικόνα 3.16: Χάρτης ανωμαλιών vertical magnetic pseudo-gradient που παρατηρείται στο μπλε ορθογώνιο της Εικόνας 3.15.

Τα χαρακτηριστικά που επισημαίνονται στον χάρτη της Εικόνας 3.16 θα μπορούσαν να αποδοθούν σε εξαιρετικά μαγνητισμένα υλικά που χαρακτηρίζονται από αξιοσημείωτη μαγνητική επιδεικτικότητα. Λαμβάνοντας υπόψη την αβαθή γεωλογική-στρωματογραφική κατάσταση της περιοχής μελέτης (βλέπε Εικόνα 3.14), οι παρατηρούμενες διπολικές μαγνητικές ανωμαλίες μπορεί να σχετίζονται τόσο με τοπικές στρωματογραφικές επιδράσεις όσο και με την παρουσία θαμμένων αρχαιολογικών δομών. Η τελευταία υπόθεση υποστηρίζεται ικανοποιητικά από την ανακάλυψη κλασμάτων ή οικοδομικών υλικών σαφούς ηφαιστειακής προέλευσης (ανδρειακές πέτρες) στο ρηχό τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής. Όπως θα φανεί αργότερα, η σύγκριση του χάρτη ανωμαλιών της Εικόνας 3.16 με τα αποτελέσματα που προέρχονται από τις χρησιμοποιούμενες γεωφυσικές μεθόδους έδωσε χρήσιμες ενδείξεις για τον διαχωρισμό των σημάτων των παρατηρούμενων ανωμαλιών.



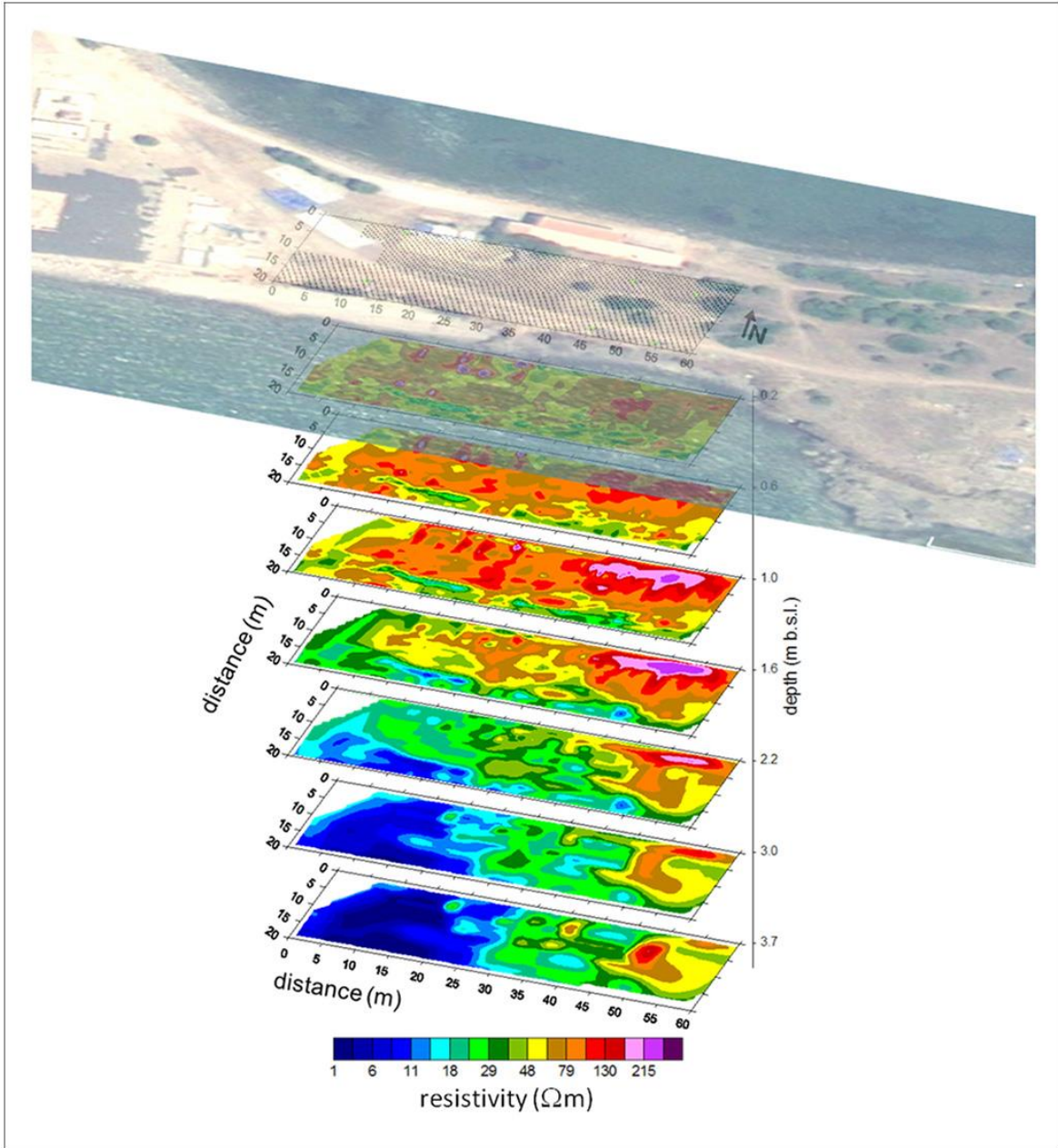
Εικόνα 3.17: Χάρτες κανονικοποιημένων τιμών των (a) out of phase και (b) in-phase στοιχείων που παρέχονται από την FDEM έρευνα στο πράσινο ορθογώνιο της Εικόνας 3.15.

Η Εικόνα 3.17 απεικονίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων FDEM (ηλεκτρομαγνητικά) που εκτελούνται στο πράσινο ορθογώνιο της Εικόνας 3.15 κατά μήκος παράλληλων προφίλ (απόσταση 1 m) ελαφρώς μεγαλύτερα (55 m) από τα μαγνητικά. Χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρομαγνητόμετρο EM31 (GEONICS system), το οποίο αποτελείται από πηνία πομπού και δέκτη για τη μέτρηση των ηλεκτρικών ρευμάτων που παράγονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, με επαγωγή χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων, στην επιφάνεια του εδάφους. Συγκεκριμένα, το λαμβανόμενο σήμα δίδεται με όρους δύο συνιστωσών που είναι αντιστοίχως σε φάση (in-phase) και εκτός φάσης (out of phase) (τετραγωνική συνιστώσα) με το μεταδιδόμενο σήμα. Δεδομένου ότι το σύστημα EM31 λειτουργεί με ηλεκτρομαγνητικά σήματα σε αριθμό χαμηλής επαγωγής (LowInductionNumber), το τετραγωνικό κομμάτι (out of face) υποδηλώνει τη φαινόμενη αγωγιμότητα του όγκου του εδάφους που ερευνάται, ενώ το κομμάτι σε φάση σχετίζεται με την φαινόμενη μαγνητική επιδεκτικότητα. Οι Εικόνες 3.17a και b δείχνουν, αντιστοίχως, στους χάρτες out of phase και in-phase που παρέχονται από την έρευνα FDEM

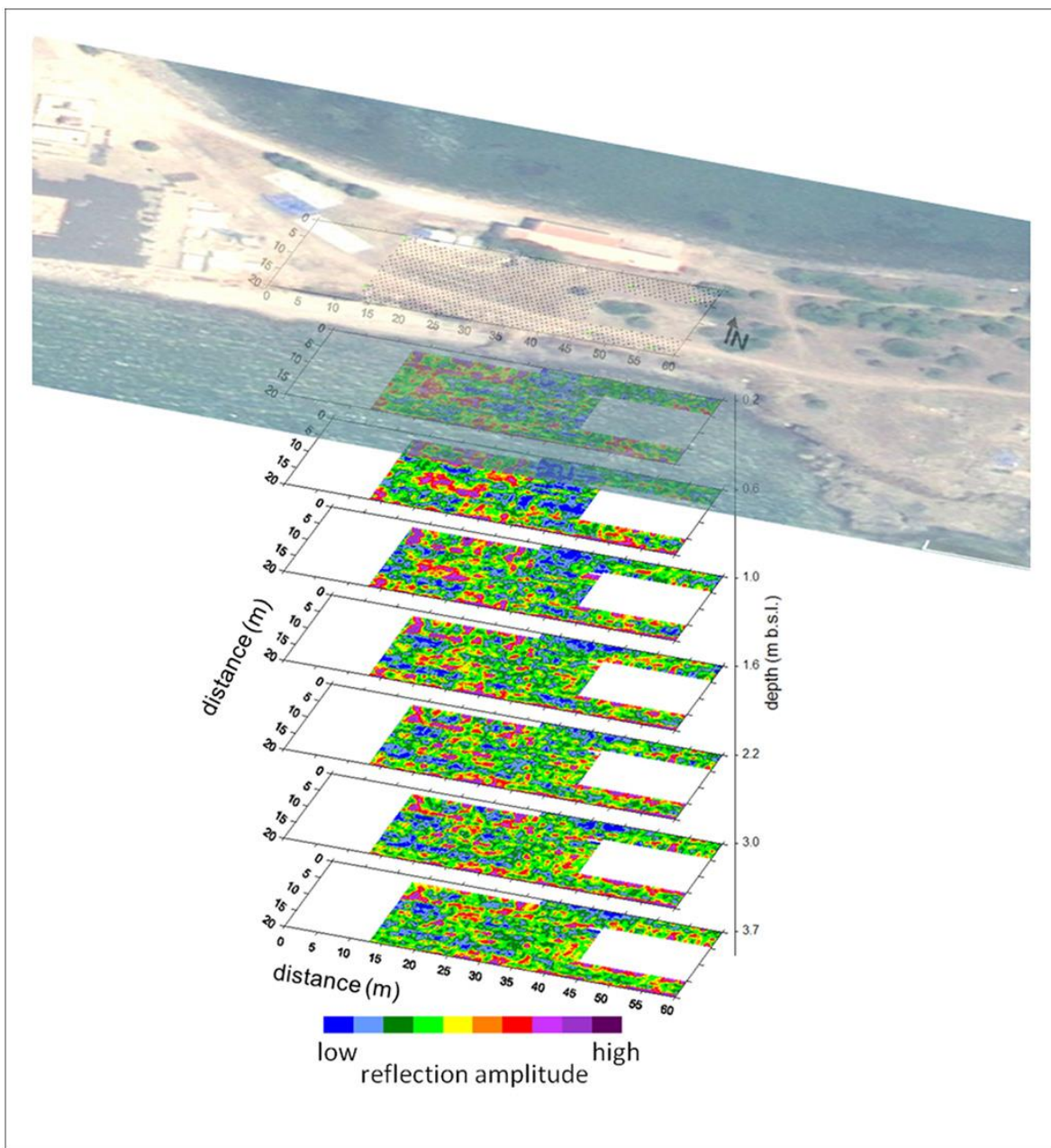
μετά την αφαίρεση των ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων μεγάλης περιόδου. Οι ανακτημένοι χάρτες αποτυπώνονται με όρους κανονικοποιημένων τιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με την παραδοχή του LIN, το βάθος της έρευνας συνδέεται κυρίως με την απόσταση μεταξύ των άκρων και τον προσανατολισμό (οριζόντιο ή κάθετο) των σπειρών σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους. Καθώς η απόσταση μεταξύ των άκρων της συσκευής EM31 είναι 3,7m και έχει χρησιμοποιηθεί ως κατακόρυφος προσανατολισμός ομοεπίπεδου βρόχου για την απόκτηση δεδομένων, οι χάρτες της Εικόνας 3.17 αναφέρονται σε βάθος εξερεύνησης περίπου 3m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Και οι δύο χάρτες παρουσιάζουν μάλλον σύνθετη κατανομή της υψηλής και χαμηλής αγωγιμότητας και των μαγνητικών ανωμαλιών, αν και οι μεγαλύτερες αντιθέσεις είναι ορατές στους δυτικούς και νοτιότερους τομείς της περιοχής έρευνας. Αναφορικά με τη γεωλογική αξιολόγηση του εξεταζόμενου υπεδάφους, η θετική αγωγιμότητα και οι μαγνητικές αντιθέσεις θα μπορούσαν να αποδοθούν σε υψηλά ποσοστά υγρασίας των ρηχών κλαστικών εδαφών και σε σημαντική ποσότητα ηφαιστειακών υλικών, αντίστοιχα.

Οι Εικόνες 3.18 και 3.19 δείχνουν τα αποτελέσματα της έρευνας υψηλής ανάλυσης που διεξήχθη με μελέτες ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και γεωραντάρ, αντίστοιχα.

Όσον αφορά την ηλεκτρική έρευνα, η διδιάστατη (2D) τομογραφία ειδικής αντίστασης (ERT) που διεξήχθη στη Νογα αποτελείτο από ένα πυκνό δίκτυο 20 προφίλ ERT (απόστασης 1m) μέσα στην κόκκινη περιοχή της Εικόνας 3.15. Για προφανείς λόγους (παρουσία εμποδίων, άσφαλτος κλπ.), το μήκος των προφίλ μεταβάλλεται από 35,25 μ. έως 58,50 μ. Οι φαινομενικές τιμές αντίστασης συλλέχθηκαν από τον μετρητή ειδικής αντίστασης Syscal Pro-48 (IRIS Instruments, Orléans, France) σε διάταξη πολλαπλών ηλεκτροδίων. Με βάση τη γεωμετρία και τη διάσταση των ορατών στην επιφάνεια δομών (βλ. Εικόνα 3.13b), επιλέχθηκε μια συστοιχία Wenner-Schlumberger, με απόσταση ηλεκτροδίων 0,75 μ., προκειμένου να εμφανιστούν τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κάθετες δομές. Επιπλέον, χάρη στην υψηλή χωρική ανάλυση επίσης 2D ERT έρευνας, ένα λογισμικό αντιστροφής δεδομένων pseudo-3D (Res3Dinv by Loke, 2013) χρησιμοποιήθηκε για την ανάκτηση της κατανομής της αντίστασης του εξεταζόμενου υπόγειου όγκου. Για το ανεστραμμένο μοντέλο που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.18, προέκυψε σφάλμα μικρότερο από 10%, το οποίο αντιπροσωπεύεται από επτά φέτες σε διαφορετικά βάθη κάτω από το επίπεδο επίσης επιφάνειας. Μία γενική μείωση των τιμών ειδικής αντίστασης με αυξανόμενο βάθος φαίνεται να χαρακτηρίζει ολόκληρο τον όγκο που ερευνήθηκε. Σχετικά υψηλές και καλά διαμορφωμένες ανωμαλίες της αντίστασης παρατηρούνται πράγματι στο ρηχότερο τμήμα του υπεδάφους, με εξαίρεση τη δομή αντίστασης που βρίσκεται στον βορειοανατολικό τομέα της περιοχής έρευνας, η οποία παρατηρείται μέχρι το μέγιστο βάθος εξερεύνησης. Η συνήθης διάταξη (rpattern) τέτοιων ρηχών ανωμαλιών αντίστασης συσχετίζεται καλά με δομές ανθρωπογενούς φύσης. Συγκεκριμένα, οι κατακόρυφες γραμμές που παρατηρούνται στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας σε βάθος 1m από το επίπεδο επιφάνειας, ταιριάζουν με τις υψηλές αντιθέσεις της φαινόμενης αγωγιμότητας που εμφανίζονται στην FDEM έρευνα στον ίδιο τομέα (Εικόνα 3.17), καθώς και με τις ανθρωπογενείς δομές που είναι ορατές στην επιφάνεια (Εικόνα 3.13b). Επιπλέον, η σειρά των ανωμαλιών χαμηλής ειδικής αντίστασης, που παρατηρείται στον νοτιότερο τομέα της περιοχής μέχρι το βάθος των 1,6m (Εικόνα 3.18), συμφωνεί με τη διάταξη θετικής αγωγιμότητας και μαγνητικών ανωμαλιών που παρουσιάζονται στους χάρτες των Εικόνων 3.17a και b, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.18: Αποτέλεσμα μετατροπής σε 3D επίσης 2D τομογραφίας που πραγματοποιήθηκε στο κόκκινο ορθογώνιο της Εικόνας 3.15. Οι επτά φέτες απεικονίζουν την κατανομή της ειδικής αντίστασης σε διαφορετικά βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Ο χάρτης στην κορυφή της ακολουθίας δείχνει τη θέση των προφίλ ERT.



Εικόνα 3.19: Ακολουθία επτά φετών βάθους που λαμβάνονται από την έρευνα GPR στο καφέ ορθογώνιο της Εικόνας 3.15. Οι χάρτες απεικονίζουν τις κατανομές πλάτους ανάκλασης σε διαφορετικά βάθη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Ο χάρτης στην κορυφή της ακολουθίας δείχνει τη θέση των προφίλ GPR.

Η Εικόνα 3.19 δείχνει τα αποτελέσματα της έρευνας GPR που διεξήχθη κατά μήκος 40 παράλληλων προφίλ, απόστασης μεταξύ τους 0,5 m, στο καφέ ορθογώνιο της Εικόνας 3.15, το οποίο είναι ελαφρώς μικρότερο από την περιοχή έρευνας ERT, δεδομένου ότι οι ανθρωπογενείς δομές και η βλάστηση εμπόδιζαν την πρόσβαση στο γεωραντάρ. Αυτό σήμαινε ότι το μήκος των προφίλ κυμαινόταν από 27 έως 47 μέτρα. Τα δεδομένα GPR αποκτήθηκαν από ένα σύστημα ραντάρ SIR-3000 (GSSI, Nashua, USA) με μία μονοστατική κεραία 400 MHz χρησιμοποιώντας επίσης ακόλουθες παραμέτρους: time window 36

ns, stacking 1, μέγεθος βήματος 0,01 m. Τα δεδομένα στη συνέχεια επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Reflexw 7.0, από την Sandmaier (Karlsruhe, Germany), για να ανακτηθούν χάρτες, σε διαφορετικά βάθη, της κατανομής πλάτους ανάκλασης μέσα στον εξεταζόμενο όγκο, πιθανώς σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Συγκεκριμένα, η Εικόνα 3.19 απεικονίζει επτά χάρτες τοποθετημένους στα ίδια βάθη που εξετάστηκαν από την έρευνα ERT (βλέπε Εικόνα 3.18). Εξετάζοντας ολόκληρη τη σειρά χαρτών, είναι σαφώς εμφανής μια μάλλον πολύπλοκη εικόνα των ανωμαλιών GPR, που έχουν επίσης ταξινομηθεί σύμφωνα με καλά καθορισμένες γεωμετρίες. Συγκεκριμένα, στον βορειοδυτικό τομέα της εξεταζόμενης περιοχής, οι ανωμαλίες με μεγάλα πλάτη ανάκλασης οριοθετούν αισθητά ορθογώνια σχήματα, ορατά σε βάθος περίπου 1m . Τέτοιου είδους χαρακτηριστικά συμφωνούν και με τις ευθυγραμμισμένες τιμές αντιστάσεων που παρατηρούνται στο ίδιο τμήμα του υπεδάφους (Εικόνα 3.18) και με τα αρχαιολογικά ευρήματα που παρατηρούνται στη σημερινή επιφάνεια (Εικόνα 3.13β) και αποδίδονται σε περιμετρικούς τοίχους του κτιρίου. Επιπλέον, η σημαντική αδυναμία του πλάτους αντανάκλασης, κατανεμημένου σύμφωνα με μια ευθυγράμμιση που καλύπτει ολόκληρο το νότιο τμήμα της εξεταζόμενης περιοχής, παρέχει μια περαιτέρω επιβεβαίωση της ερμηνευτικής υπόθεσης που προτείνεται από τα αποτελέσματα της έρευνας FDEM και ERT. Την πιθανή παρουσία δηλαδή, επιμήκους δομής που σχηματίζεται από μαγνητικά υλικά και διαποτίζεται από μια μη αμελητέα κυκλοφορία του νερού.

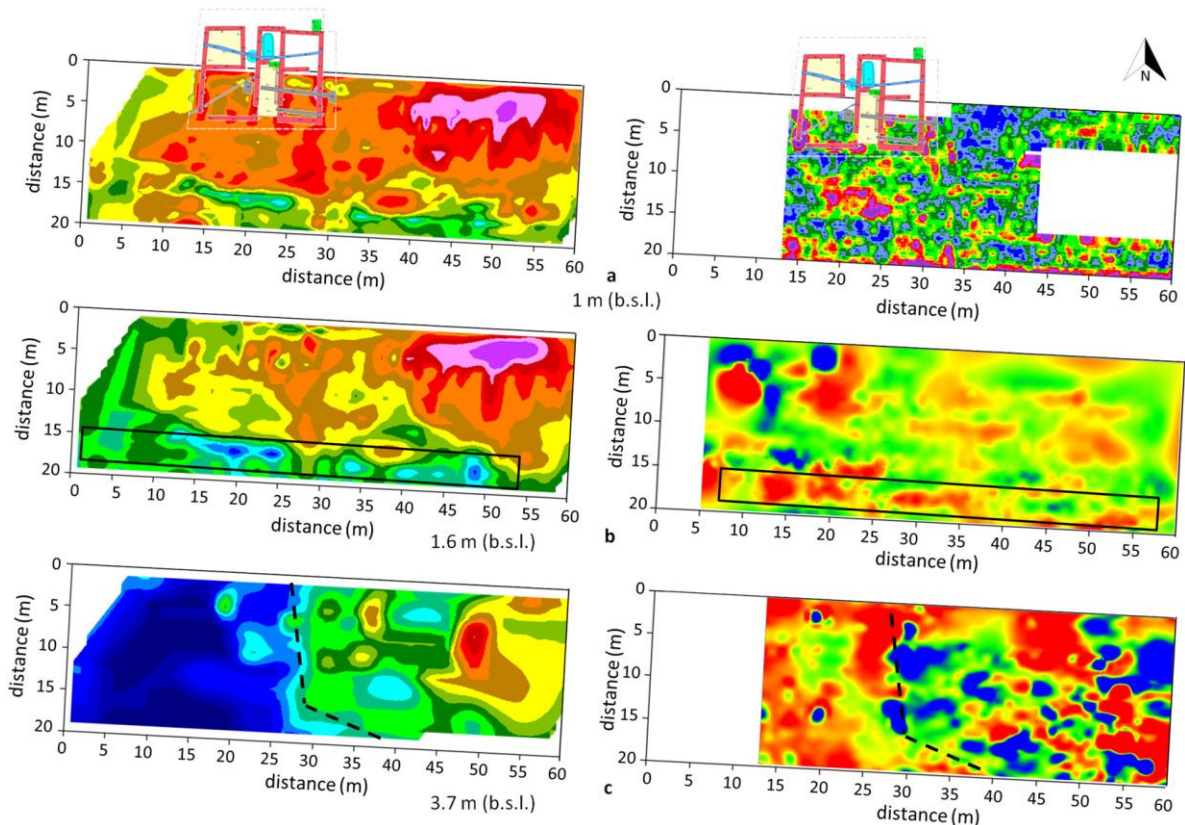
3.2.4 Ενσωμάτωση γεωφυσικών, γεωμορφολογικών και αρχαιολογικών δεδομένων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας και της προκαταρκτικής στρωματογραφικής έρευνας των Falezza και Previato (2010), άρχισε συστηματική ανασκαφή μεταξύ του ανατολικού ορίου της ρωμαϊκής αγοράς και των δυτικών πλαγιών του λόφου Coltellazzo. Ειδικότερα, η αρχαιολογική έρευνα επικεντρώθηκε στην περιοχή που βρίσκεται νότια της αποκαλούμενης «Casa Sarda», μιας σύγχρονης αποθήκης που χτίστηκε τον περασμένο αιώνα, όπου εμφανή γεωφυσικά μοτίβα ανωμαλιών, που αποδίδονται σε πηγές ανθρωπογενούς φύσης, έχουν εντοπιστεί. Η Εικόνα 3.20 δείχνει μια σχηματική εικόνα των δομών που φάνηκαν στο φως από την εκσκαφή. Χτίστηκαν τόσο με ρωμαϊκό σκυρόδεμα όσο και με τοπικά πέτρινα τεμάχια (ανδεσίτη και ψαμμίτη) και είναι πιθανότατα μέρος μιας ευρείας κατοικίας, αποτελούμενης από ένα ή περισσότερα οικοδομικά τετράγωνα.

Τοποθετώντας την Εικόνα 3.20 στους γεωφυσικούς χάρτες, η συσχέτιση μεταξύ των ανασκαφέντων δομών και των γεωφυσικών αποτελεσμάτων είναι εμφανής όσον αφορά τη γεωμετρία, τη φύση και το βάθος των παρατηρούμενων ανωμαλιών.



Εικόνα 3.20: Σχηματική απεικόνιση των αρχαιολογικών δομών που έφερε στο φως η ανασκαφή στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής γεωφυσικής έρευνας.



Εικόνα 3.21: (a) Τοποθέτηση των αρχαιολογικών ευρημάτων στους χάρτες ERT (αριστερά) και GPR (δεξιά) σε βάθος 1m. (b) Χάρτης ERT σε βάθος 1,6 m (αριστερά) και FDEM out of phase (δεξιά). (c) Χάρτης ERT σε α βάθος 3.7m (αριστερά) και μαγνητικός χάρτης (δεξιά)

Η επικύρωση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων από την ανασκαφή υποδηλώνει ότι το μοτίβο αντιστάσεων και οι αντίστοιχες ανωμαλίες μεγάλου πλάτους παρατηρήθηκαν λίγα μέτρα νότια των ανασκαμμένων δομών (Εικόνα 3.21^α) θα μπορούσαν να υποδεικνύουν υπολείμματα κτίσματος. Από την άλλη πλευρά, η έλλειψη γεωφυσικών ανωμαλιών που βρίσκεται αμέσως ανατολικά του κτιρίου που έφερε στο φως η αρχαιολογική ανασκαφή, υποδηλώνει την ύπαρξη επίσης ανοιχτού χώρου. Αυτή η υπόθεση υποστηρίζεται από την ανασκαφή η οποία σε επιφανειακό επίπεδο έχει επισημάνει ένα είδος πλακόστρωτου που κάλυπτε συχνά ανοιχτούς χώρους στους ρωμαϊκούς χρόνους, όπως και σε ένα από τα δωμάτια του κτιρίου. Μέχρι σήμερα, το δάπεδο από τούβλα είναι μόνο μερικώς ορατό αμέσως βόρεια της περιοχής έρευνας, αλλά θα μπορούσε να επεκταθεί περαιτέρω νότια και ανατολικά και να καλύψει την περιοχή σε μια μικρή αυλή. Ως εκ τούτου, οι αξιοσημείωτες ανωμαλίες στον βορειοανατολικό τομέα της περιοχής έρευνας θα μπορούσαν να ερμηνευτούν ως περιμετρικά τοιχώματα του δεύτερου κτιρίου, παρόμοιο με το ανασκαφθέν, αλλά ακόμα θαμμένο. Εάν η ερμηνεία αυτή ήταν σωστή, χάρη στη γεωφυσική έρευνα, η αστική δομή του ανατολικού τμήματος της πόλης θα έχει μερικώς ανακατασκευαστεί, με τα συγκροτήματα κατοικιών να συνδέονται με πλακόστρωτους ανοιχτούς χώρους. Το ίδιο αστικό στοιχείο έχει παρατηρηθεί στη Nora με αρχαιολογικές ανασκαφές στον δυτικό τομέα της πόλης και στο οικοδομικό μπλοκ κατά μήκος της νοτιοανατολικής ακτής της χερσονήσου.

Όσον αφορά την ισχυρή αγώγιμη λωρίδα που εκτείνεται κατά μήκος σχεδόν όλου του νότιου ορίου της περιοχής έρευνας (βλέπε μαύρο ορθογώνιο στην Εικόνα 3.21b), η γεωμετρία και το μέγεθος της ανωμαλίας, θα μπορούσαν να σχετίζονται με θαμμένα ανθρωπογενή υπολείμματα που αποτελούνται από μαγνητικά υλικά, όπως φαίνεται και στον χάρτη FDEM σε φάση (βλ. Εικόνα 3.17β). Η αρχαιολογική ανάλυση της διάταξης του ανατολικού αστικού τομέα εγγυάται την παρουσία του δρόμου που πηγαιίνει από την αγορά της πόλης ως την κορυφή του Coltellazzo και η μελέτη του αστικού οδικού δικτύου στη ρωμαϊκή εποχή εξηγεί ότι οι κύριοι δρόμοι της Nora ήταν στρωμένοι με πετρώματα ανδεσίτη. Έτσι, υποτίθεται ότι αυτή η ευθεία ανωμαλία μπορεί να αποδοθεί σε έναν πλακόστρωτο ρωμαϊκό δρόμο ή αλλιώς σε ένα πατημένο μονοπάτι, πλούσιο σε ανδεσιτικά πετρώματα.

Εξετάζοντας το μέγιστο βάθος εξερεύνησης της αναζήτησης ERT, η καθαρή ασυνέχεια της αντίστασης που είναι ορατή περίπου στη μέση ολόκληρης της περιοχής έρευνας (διακεκομμένη μαύρη γραμμή στο αριστερό πλαίσιο της Εικόνας 3.21c) μπορεί να ερμηνευτεί ως γεωλογική ασυνέχεια λόγω της καλής συσχέτισης με το μοτίβο μαγνητικής ανωμαλίας χαμηλής συχνότητας (διακεκομμένη μαύρη γραμμή στο δεξιό πλαίσιο της Εικόνας 3.21c) που πιθανόν προέρχεται από το ηφαιστειακό υπόστρωμα.

Η γεωφυσική έρευνα προσφέρει επίσης μερικά άλλα θεμελιώδη στοιχεία για την αναδημιουργία του παλαιοπεριβαλλοντικού τοπίου και την αρχαιολογική διαμόρφωση ενός σημαντικού τμήματος του αρχαίου οικισμού. Πιο συγκεκριμένα, ο πιο βαθύς χάρτης ERT (Εικόνα 3.21c) δείχνει μια προοδευτική αλλά απότομη πτώση του ανδεσιτικού υποστρώματος από τους πρόποδες του λόφου Coltellazzo προς τα δυτικά. Οι ανδεσιτικοί βράχοι βαθαινούν και βαθμιαία αντικαθίστανται στο αρχαιολογικό βάθος (από περίπου 2m έως 4m) από ιζηματογενείς αποθέσεις και αλλοιωμένα ανδεσιτικά εδάφη που συνδέουν το λόφο Coltellazzo με τις δυτικές αποθέσεις της χερσονήσου. Έτσι, αυτά τα στοιχεία μπορεί να υποδηλώνουν ότι ακριβώς στη μέση της περιοχής που αναζητήθηκε, οι ακανόνιστες πλαγιές του λόφου Coltellazzo, αφήνουν χώρο σε μια πιο επίπεδη και ομοιογενή περιοχή που εκτείνεται προς τα δυτικά. Αυτή η πιθανή παραδοχή, που υποδηλώνεται από τη γεωφυσική έρευνα, ταιριάζει εν τέλει και με τα αποτελέσματα των ανασκαφών που πραγματοποιήθηκαν από το 1994 σε ολόκληρη την ανατολική περιοχή της πόλης.

3.2.5. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας όχι μόνο προσέφεραν νέες σημαντικές ενδείξεις για να εκτιμήσουν την ολοένα πιο πιθανή παρουσία αυτού του παρελθοντικά μεγάλου και επίπεδου χώρου δυτικά του λόφου Coltellazzo, αλλά και να δώσουν ένα πολύ πιθανό μεγαλύτερο όριο της περιοχής του αρχαιότερου οικισμού, που επεκτείνεται ανατολικά. Έτσι, αυτή η προγνωστική ανάλυση, βασισμένη στην ενσωμάτωση των αρχαιολογικών και γεωφυσικών δεδομένων, θα αξιοποιηθεί πλήρως για το σχεδιασμό της μελλοντικής επέκτασης των αρχαιολογικών τάφρων (προγραμματισμένων για τις καλοκαιρινές εκστρατείες του 2018), που θα μπορούσαν να δώσουν καλύτερη γνώση της αρχαιότερης πόλης της Nora βασισμένη σταθερά στην ολοένα ισχυρότερη ενοποίηση των ιστορικών και φυσικών επιστημών.

3.3 Εφαρμογή Γ: Μια σύγκριση των τεχνικών έρευνας με Γεωραντάρ, με μαγνητόμετρο και με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή στο House in the Horseshoe το ιστορικό σπίτι (Βόρεια Καρολίνα, Η.Π.Α.)

(Jacob R. Turner, Roy S. Stine, Linda F. Stine)



Εικόνα 3.22: Το House in the Horseshoe σήμερα

3.3.1 Εισαγωγή

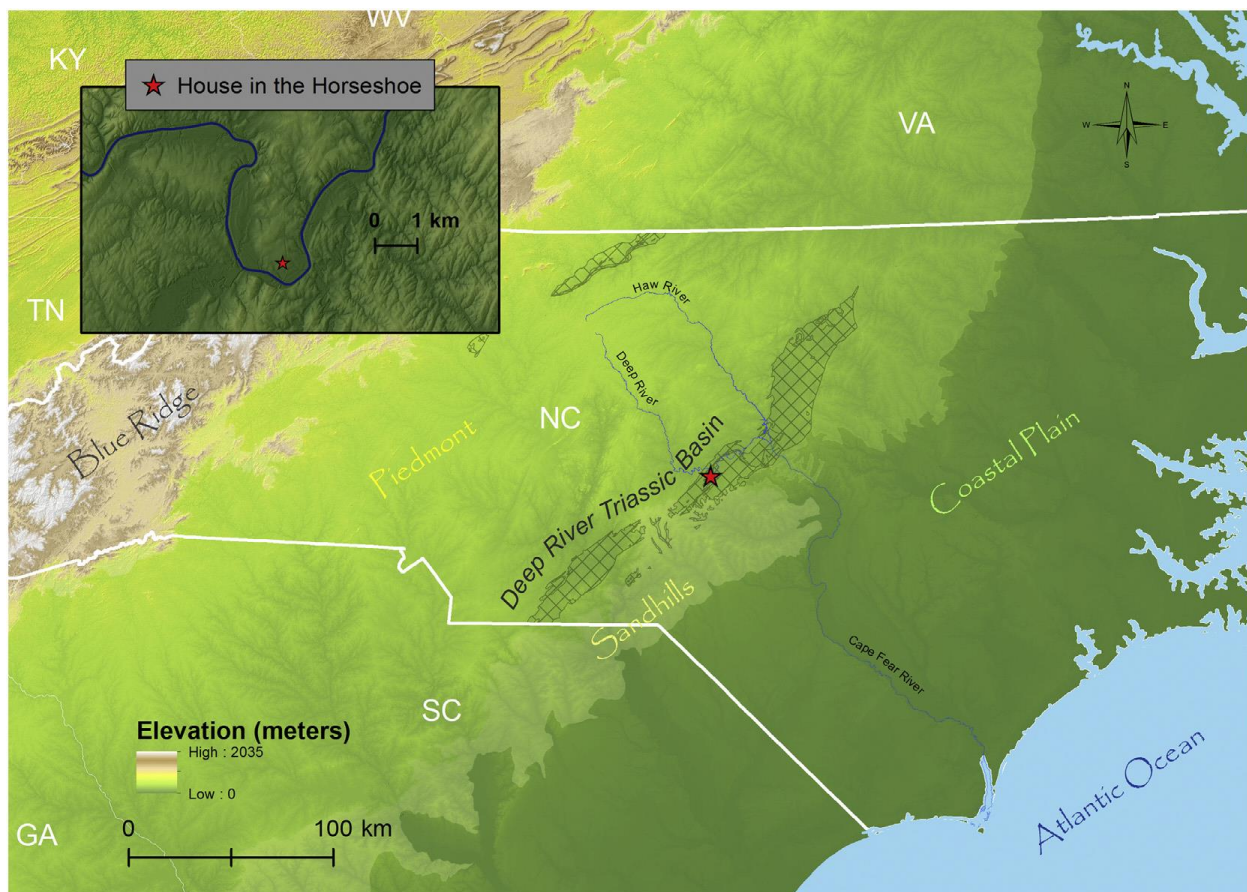
Το 2013 και το 2014, πανεπιστημιακοί φοιτητές και καθηγητές συνεργάστηκαν με το North Carolina Office of State Archaeology and Historic Sites για να επεκτείνουν την προηγούμενη αρχαιολογική εργασία στο House in the Horseshoe χρησιμοποιώντας γεωφυσικές μεθόδους. 2.840 τετραγωνικά μέτρα της περιοχής ερευνήθηκαν με τη χρήση γεωραντάρ (GPR), μαγνητόμετρου και μετρητή ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI) με στόχο να προσδιοριστεί ποια μέθοδος αποδίδει καλύτερα όταν ερευνώνται χαρακτηριστικά ιστορικών περιοχών σε λεπτή αμμώδη άργιλο και με ποιους συνδυασμούς.

Οι έρευνες παρέιχαν την ευκαιρία να εκτιμηθεί ο τρόπος με τον οποίο κάθε όργανο αναλύει τα δομικά υπολείμματα και θα επιτρέψουν έτσι τον προσδιορισμό του αριθμού των οργάνων που είναι απαραίτητα για την αποτελεσματική ανίχνευση των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών. Ενώ κάθε μέθοδος που συζητήθηκε έχει αποδεδειγμένο ιστορικό επιτυχίας όταν χρησιμοποιείται από μόνη της, για τον προσδιορισμό των αρχαιολογικών χαρακτηριστικών, τα πλεονεκτήματα της χρήσης πολλαπλών μεθόδων έχουν όμως εδραιωθεί και είναι η προτιμώμενη προσέγγιση πολλών ερευνητών. Τα διαφορετικά όργανα

αλληλοσυμπληρώνονται επειδή μετρούν διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά ή ιδιότητες του υπεδάφους. Ο Johnson (2006: 12) εξηγεί ότι «... όχι μόνο τα διάφορα όργανα ανιχνεύουν διαφορετικά πράγματα, αλλά συχνά βλέπουν τα ίδια πράγματα διαφορετικά».

3.3.2. Γεωλογικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά περιοχής έρευνας.

Το House in the Horseshoe είναι μια ιστορική περιοχή της αποικιακής περιόδου που βρίσκεται στο νότιο άκρο του Piedmont, στην κομητεία Moore της Βόρειας Καρολίνας (Εικόνα 3.23). Το σπίτι κάθεται στην άκρη του λόφου στο κέντρο μιας μεγάλης στρογγυλής καμπύλης (πέταλο) του Deep River. Απέχει υψομετρικά περίπου 26,5 μ. από το κανάλι του ποταμού στα δυτικά (97,5 μ. Πάνω από τη μέση στάθμη του υδροφόρου), βλέποντας από ψηλά μεγάλες πλημμυρικές εκτάσεις που χρησιμοποιούνταν ιστορικά αλλά και σήμερα για γεωργικούς σκοπούς. Τα εδάφη εντός της επίπεδης, ανοικτής γεωφυσικής περιοχής έρευνας στο οροπέδιο ταξινομούνται γενικά ως ψιλή αμμώδης άργιλος Masada, με 2 έως 8% πρηνή. Τα εδάφη της σειράς Masada εμφανίζουν τυπικά 0,23 μ. ψιλή αμμώδη άργιλο στην επιφάνεια, αμέσως από κάτω έναν πυκνό οριζοντα αργίλου μέχρι τα 1,14 μ., ακολουθούμενο από αμμοχάλικο με άργιλο μέχρι τα 2,03 μ.. Μεγάλο βάθος μέχρι τον υδροφόρο οριζοντα και περιοριστικά φυσικά χαρακτηριστικά αναφέρονται από την έρευνα βαθύτερα από τα 2.03m (USDA NRCS, 2017).



Εικόνα 3.23: Φυσιογραφικό και τοπογραφικό πλαίσιο του House in the Horseshoe

3.3.3. Ιστορικό περιοχής έρευνας.

Το House in the Horseshoe, επίσης γνωστό ως Alston House, είναι ίσως το πιο αξιοσημείωτο ως ιστορικό ορόσημο που φέρει τα σημάδια της Αμερικανικής Επανάστασης. Το σπίτι χτίστηκε το 1772 ή 1773 για τον συνταγματάρχη της πατριωτικής πολιτοφυλακής Philip Alston (Whig movement). Μετά από επίθεση στο εσωτερικό του σπιτιού, όπου βρισκόταν ο ίδιος με τη σύζυγό του, τα παιδιά και μια μικρή ομάδα από στρατιώτες του, την Κυριακή 29 Ιουλίου 1781 από μια μικρή αντίπαλη ομάδα Loyalists, ενώ η οικογένεια Alston επέζησε της αντιπαράθεσης χωρίς αλλοιώσεις, η προφορική ιστορία δηλώνει ότι οκτώ άτομα θάφτηκαν την επόμενη μέρα «... στο φρύδι του λόφου, μερικά μέτρα από το σπίτι». Σήμερα υπάρχουν ενδείξεις της αντιπαράθεσης, αλλά η τοποθεσία των θαμμένων στρατιωτών δεν είναι γνωστή.

Ενώ η συσχέτισή του με την Αμερικανική Επανάσταση μπορεί να έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τον τόπο, η ιστορική έρευνα του Willcox (1999) εξηγεί ότι το Alston House χρησίμευσε επίσης ως κέντρο μιας γεωργικής φυτείας διαχειριζόμενης από σκλάβους μέσω της κατοχής πολλών πρώιμων ιδιοκτητών. Ο Alston ήταν ένας μεγάλος γαιοκτήμονας στην περιοχή Deep River το 1780 (2500 στρέμματα) και λειτουργούσε από το σπίτι με μια ομάδα είκοσι σκλάβων όπως και ο διάδοχός του, Thomas Perkins. Ο πολυετής κυβερνήτης της Βόρειας Καρολίνας, Benjamin Williams, αγόρασε το σπίτι και τα εδάφη από το Perkins το 1798, σημειώνοντας στην αλληλογραφία του ότι ο Perkins είχε επιτυχημένη φυτεία εδώ και πολλά χρόνια με ογδόντα χέρια σκλάβων. Η κυριαρχία του Williams ως ιδιοκτήτης του House in the Horseshoe ήταν το αποκορύφωμα της ύπαρξης του σπιτιού, επεκτείνοντας την αρχική δομή με πρόσθετες πτέρυγες και κτίσματα, πιέζοντας την παραγωγικότητα των γύρω περιοχών στο βέλτιστο γεωργικό της δυναμικό. Αυτή η παραγωγικότητα ήταν δυνατή μόνο μέσω της χρήσης υπόδουλων εργατών, που σύμφωνα με την Ομοσπονδιακή Απογραφή των Ηνωμένων Πολιτειών ήταν 103 σε αριθμό στη φυτεία το 1810.

Η Emily Burke σημείωσε ότι οι νοτιότερες φυτείες έχουν «... τόσες στέγες όσα και δωμάτια» (Burke, 1850, Vlach, 1993: 77). Η πιο λεπτομερής καταγραφή τέτοιων δομών που να έχουν κατασκευαστεί στο House in the Horseshoe είναι γραμμένη στην αλληλογραφία του Κυβερνήτη Williams, που περιγράφει τη μερική κατασκευή και τις διαστάσεις μιας σιταποθήκης, στάβλου, κτηρίων ύφανσης, επεξεργασίας καπνού και κατασκευής βαγονιών, καθώς και την πρόθεση να χτιστούν άλλα δύο σπίτια, δύο κήποι, ένα κτήριο επεξεργασίας για βαμβάκι και μια πλατφόρμα φόρτωσης βαγονιών. Ωστόσο, δεν βρεθεί χάρτης των κατασκευών του ή εκείνων του Alston. Και άλλες οικογένειες έχουν επίσης ζήσει στην περιοχή όλα αυτά τα χρόνια, αλλάζοντας, χτίζοντας ή αποσυναρμολογώντας τα κτίσματα γύρω από το σπίτι, αλλάζοντας το σπίτι ανάλογα με τις ανάγκες τους.

Ο Baroody (1978) διεξήγαγε μια αρχαιολογική έρευνα για να αυξήσει τη γνώση του ιστορικού αρχιτεκτονικού τοπίου στο House in the Horseshoe. Η εργασία περιλάμβανε τη χρήση λοξής υπέρυθρης αεροφωτογράφισης του χώρου, σε συνδυασμό με δοκιμές γεώτρησης. Η έρευνα πεδίου και οι χάρτες υποδεικνύουν δυο πιθανές τοποθεσίες σιταποθηκών στο βόρειο άκρο της περιοχής έρευνας, καθώς και έναν θαμμένο διάδρομο με χαλίκια που εν μέρει δείχνει την προηγούμενη θέση κάποιου κτιρίου, ενδεχομένως ενός ξενώνα. Μια πιθανή τοποθεσία κουζίνας ανακαλύφθηκε δυτικά του σπιτιού, χαρακτηριζόμενη από επίστρωση υπόγειου ξυλάνθρακα και την παρουσία τούβλων. Η αναφορά δηλώνει ότι ένα κτίσμα κουζίνας κάηκε το 1804, αλλά χωρίς ιστορικές πηγές να υποστηρίξει τον ισχυρισμό ή οποιαδήποτε άλλη συζήτηση λεπτομερειών. Η αναφορά δηλώνει επίσης ότι τα περισσότερα κτίρια υπήρχαν πιθανώς έξω από τα εδάφη της πολιτείας και είναι πολύ πιθανό να έχουν διαταραχθεί από τον εξοπλισμό βιομηχανικής γεωργίας.

3.3.4 Μεθοδολογία

Κατά τη διάρκεια της αρχικής συζήτησης, ο υπεύθυνος της περιοχής έρευνας John Hairr (2013) πρότεινε ότι η ερευνητική ομάδα να διερευνήσει την ανοιχτή περιοχή βορειοανατολικά του σπιτιού για να αναζητήσει τα οκτώ άτομα που μπορεί να είχαν ταφεί εκεί και ταυτόχρονα να συγκεντρώσει πληροφορίες για τυχόν θαμμένα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με φυτεία. Επιπλέον, ο Hairr πρότεινε ότι η κουζίνα του Alston House πιθανόν να υπήρχε στην πλευρά του σπιτιού που βλέπει ανατολικά, μακριά από τον ποταμό και όχι στην περιοχή που πρότεινε ο Baroody το 1978.

Με γνώμονα όλους τους στόχους, η ομάδα γεωφυσικής έρευνας του Πανεπιστημίου δημιούργησε ένα πλέγμα έρευνας με μονάδες συλλογής δεδομένων 100 m² στο βορειοανατολικό τμήμα της αυλής του σπιτιού, καθώς και μια μικρότερη απομονωμένη περιοχή έρευνας που δημιουργήθηκε για να ερευνηθεί η περιοχή κουζίνας που πρότεινε ο Hairr, με συνολικό εμβαδό 2840 m² (Εικόνα 3.24). Έτσι με μια κεραία GPS Topcon GR3 σε συνδυασμό με την υπηρεσία OPUS (National Geodetic Survey Online Position User Service) αποκτήθηκαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 3.24: Περιοχή έρευνας στο House in the Horseshoe

Τα όργανα γεωφυσικής έρευνας περιελάμβαναν ένα GSSI SIR 3000 GPR με κεραία 400 MHz και κωδικοποιητή για τη μέτρηση απόστασης, ένα μαγνητόμετρο διπλού αισθητήρα Bartington 601 και έναν μετρητή ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής Geonics EM38 MK 2. Το EM38 μεταφέρθηκε σε απόσταση 0,10 μέτρων από το έδαφος σε μια προσπάθεια να μειώσει την ένταση και να επισκιάσει τις ανωμαλίες που δημιουργούνται από τα πρόσφατα μέταλλα ή τα ιστορικά μεταλλικά σκουπίδια στη ζώνη κάτω από την επιφάνεια, όπως πρότεινε ο Clay (2006) και ο Bevan (1998). Γραμμές μεταφοράς τοποθετήθηκαν ανά 0,5 m για όλα τα όργανα, με πυκνότητα 8 μετρήσεις/m για το μαγνητόμετρο και το EM38 και 50 μετρήσεις/m για συλλογή δεδομένων GPR.

Μετά τις έρευνες, τα ακατέργαστα δεδομένα από κάθε όργανο υποβλήθηκαν σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας λογισμικό, διαφορετικό για κάθε μέθοδο. Τα δεδομένα του μαγνητόμετρου υποβλήθηκαν σε επεξεργασία στο TerraSurveyor v3.0.29.1 (DW Consulting, Barneveld, Ολλανδία) και το επεξεργασμένο προϊόν εξήχθη σε μορφή ASCII raster για εισαγωγή και γεωγραφική αντιστοιχία στο ArcGIS v 10.3.1 (Environmental Systems Research Institute, Redlands California).

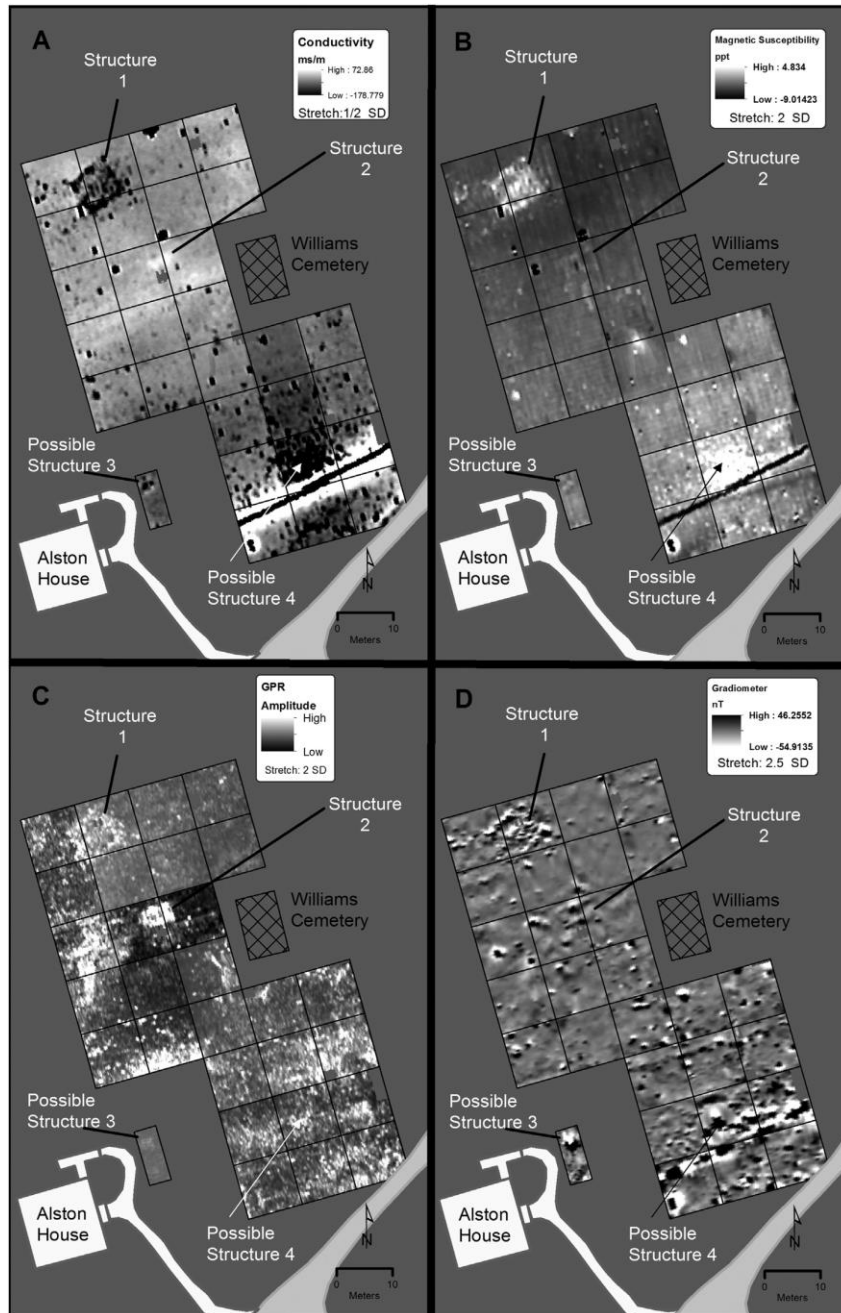
Όλα τα προφίλ GPR υποβλήθηκαν σε επεξεργασία και ερμηνεύτηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό RADAN v7.3.13.1227 (Geophysical Survey Systems Inc. Nashua, New Hampshire) το οποίο μετατρέπει τα δεδομένα κατακόρυφου προφίλ του υπεδάφους σε μια οριζόντια τομή, σχηματίζοντας επίσης έναν κύβο δεδομένων 3D για διαδραστική επεξεργασία και ερμηνεία δεδομένων στην οθόνη.

Τα ακατέργαστα δεδομένα EMI υποβλήθηκαν σε μια πρώτη επεξεργασία χρησιμοποιώντας το DAT38MK2 v1.12 (Geonics Limited, Mississauga, Οντάριο, Καναδάς), το οποίο επέτρεψε την μετατροπή των αρχείων σε αρχείο κειμένου, τη διόρθωσή της και τον χωρισμό της σε ξεχωριστά πλέγματα ASCII raster μαγνητικής επιδεκτικότητας και αγωγιμότητας. Αμφότερα τα σύνολα δεδομένων υποβλήθηκαν σε επεξεργασία στο Surfer v 10.7.972 (Golden Software Inc. Golden, Colorado), με μια ανάλυση 0.125m/pixel ρυθμισμένη ώστε να ταιριάζει με τις ρυθμίσεις πυκνότητας δεδομένων των 8 μετρήσεων/m, του οργάνου, ταιριάζοντας και με την ανάλυση των υπόλοιπων εικόνων. Και οι δύο εικόνες εξήχθησαν στη συνέχεια σε ASCII raster και έπειτα εισήχθησαν και αντιστοιχίστηκαν γεωγραφικά στο ArcGIS.

Όλα τα επίπεδα δεδομένων ερμηνεύτηκαν μαζί στο ArcGIS, όπου εξετάστηκαν για αποδεικτικά επίσης κουζίνας του Alston House, άλλων κτισμάτων και για πιθανές τοποθεσίες ταφής. Διάφορες πηγές δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν για να βοηθήσουν στην ερμηνεία των γεωφυσικών εικόνων, συμπεριλαμβανομένης της ιστορικής αεροφωτογραφίας από το δικτυακό τόπο του Moore County North Carolina GIS (2017), σαρωμένα και γεωγραφικώς αντιστοιχισμένα έγγραφα χαρτών του αρχείου του North Carolina Historic Sites Division of Archives, που δημιουργήθηκε από τον Baroody (1978), πλάγια υπέρυθρη αεροφωτογραφία που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας του Baroody, αλλά και μιας που τραβήχτηκε το 1987, καθώς και οι γραπτές εκθέσεις των εργασιών πεδίου του Baroody και του ιστορικού της περιοχής γραμμένο από τον Willcox (1999).

3.3.5 Αποτελέσματα και συζήτηση

Έγινε αμέσως σαφές ότι η προσέγγιση πολλαπλών οργάνων έχει σημαντικό πλεονέκτημα στο House in the Horseshoe. Οι έρευνες αποκάλυψαν τέσσερις περιοχές όπου κάποτε βρισκόνταν κτίσματα στο τοπίο του House in the Horseshoe (Εικόνα 3.25).



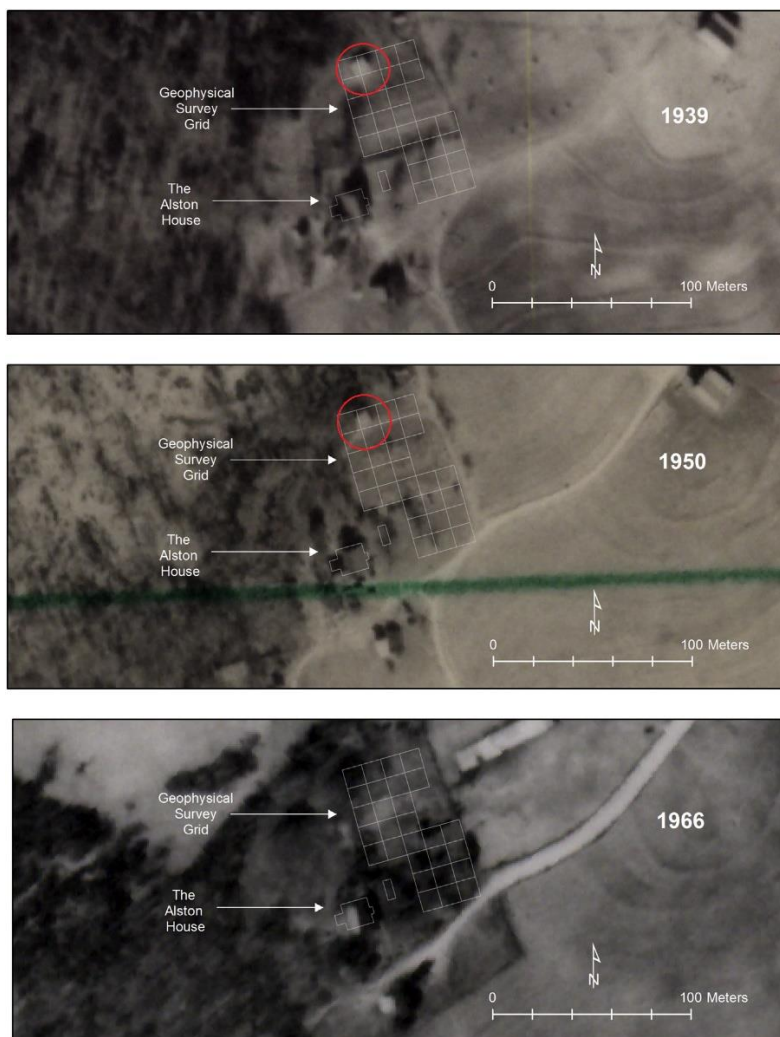
Εικόνα 3.25: Αποτελέσματα γεωφυσικών ερευνών (Turner και Lukas, 2016). Α. Αγωγιμότητα Β. Μαγνητική επιδεκτικότητα C. GPR D. Μαγνητόμετρο.

Από τις τέσσερις δομές, η έρευνα πεδίου με ανιχνευτή και γεωτρύπανο επιβεβαίωσε ότι τα υπολείμματα των Κατασκευών Ένα και Τέσσερα βρίσκονταν, τουλάχιστον εν μέρει, κοντά στην επιφάνεια. Αυτό ανακαλύφθηκε πριν από την απομάκρυνση του εδάφους, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας δεδομένων και έπαιξε ρόλο στην επιλογή φέτας βάθους για τον χάρτη GPR. Η ανασκαφή της Δομής Δύο και η εξερεύνηση της Τρίτης αποκάλυψε άθικτες αρχαιολογικές αποθέσεις, με την Τρίτη Δομή να βρίσκεται στην περιοχή που υποδεικνύεται από τον Hairr ως πιθανή θέση κουζίνας (2013). Στοιχεία ανασκαφής μιας μαζικής ταφής ή μεμονωμένων αξόνων δεν ήταν εμφανή σε καμία από επίσης τέσσερις εικόνες της συνολικής περιοχής έρευνας αλλά ούτε και στα κάθετα δεδομένα GPR .

Η Δομή Ένα ήταν ορατή σε όλους τους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ως τετράγωνο υπόστεγο 7,16 μέτρων ή μικρό θεμέλιο σπιτιού. Η ανίχνευση αποκάλυψε θραύσματα θεμελίων από τούβλα και πέτρα στην επιφάνεια ακριβώς κάτω από το γρασίδι (Εικόνα 3.26). Ένα κτίριο ήταν ορατό στις αεροφωτογραφίες του 1939 και 1950 και απουσίαζε το 1966 (Εικόνα 3.27). Αυτό υποδηλώνει ότι αφαιρέθηκε κατά την αποκατάσταση του σπιτιού που άρχισε το 1954 (Willcox, 1999).

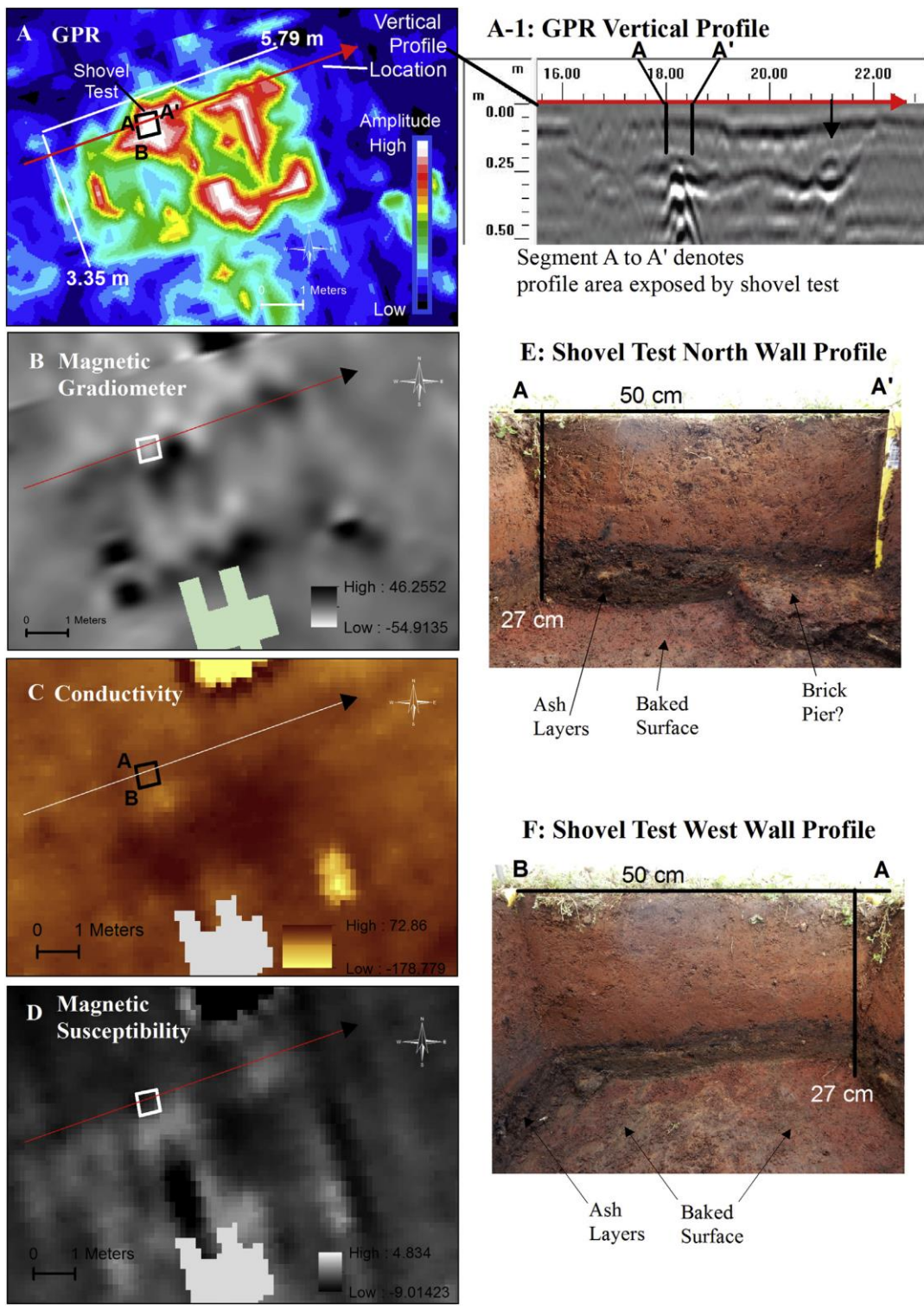


Εικόνα 3.26: Υπολείμματα θεμελίωσης της Δομής Ένα που ανιχνεύτηκαν από τους χάρτες αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας.



Εικόνα 3.27: Ιστορική αεροφωτογραφία του House in the Horseshoe. Ευγενική παραχώρηση του GIS της Moore County.

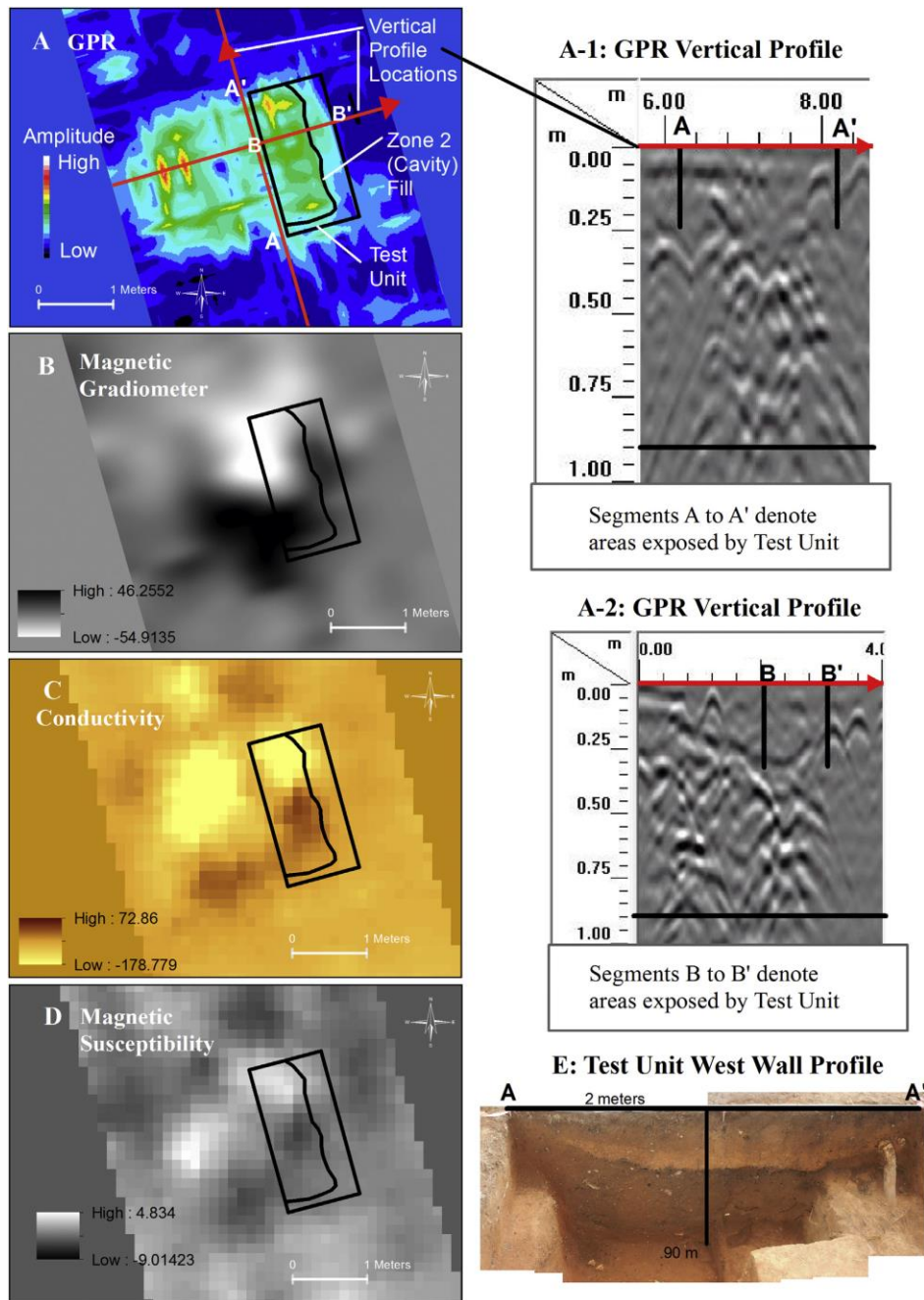
Η Δομή Δύο ανακαλύφθηκε κυρίως λόγω της εμφάνισής της στον χάρτη GPR ως σχήμα ορθογωνίου μεγάλου εύρους, περίπου 5,8 επί 3,4 μ. Το διακριτό σχήμα είναι ορατό στον χάρτη βάθους 0.3 m των αποτελεσμάτων της έρευνας GPR (Εικόνα 3.25C) και παρουσιάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην Εικόνα 3.28^A (μεγέθυνση φέτας βάθους GPR με χρώμα) και στην Εικόνα 3.28^A-1 (κατακόρυφο προφίλ GPR). Η δοκιμή ανασκαφής με φτυάρι αποκάλυψε άθικτες αρχαιολογικές αποθέσεις που αρχίζουν στα 0,17 μ. Κάτω από ένα κάλυμμα πυκνής κόκκινης αργίλου. Κάτω από το στρώμα αυτό, υπήρχαν διακριτά στρώματα ξυλάνθρακα και τέφρας, όπως και καρφιά που βρέθηκαν ενδιάμεσα. Επίσης, βρέθηκε και ένα μοναδικό τούβλο στον βορεινό τοίχο, που πιθανόν να ήταν η άκρη μιας κολόνας από τούβλα (Εικόνα 3.28^E). Η βάση της δοκιμής ανασκαφής παρουσίασε μια κόκκινη και σκληρυμένη στρώση ψημένης αργίλου στα 0.27m κάτω από την επιφάνεια η οποία, μαζί με τις επάλληλες στρώσεις άνθρακα και τέφρας, δείχνουν μια παρατεταμένη και πιθανώς επανειλημμένη έκθεση σε φωτιά.



Εικόνα 3.28: Γεωφυσικά αποτελέσματα Δομής Δύο με κατακόρυφο προφίλ GPR και τα προφίλ της εκσκαφής

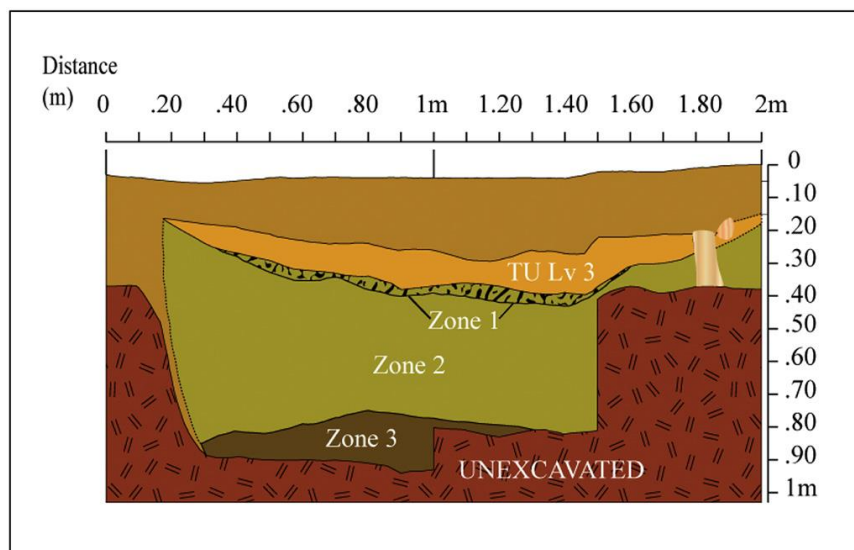
Μετά την αναγνώριση και χρονολόγηση των καρφιών που βρέθηκαν, υποτέθηκε ότι η Δομή Δύο λειτουργούσε ως καπνιστήριο τροφίμων, που χρονολογείται από την εποχή του Philip Alston (1772/73 έως 1790/91), του Thomas Perkins (1790/91 έως 1798), ή πιθανόν του κυβερνήτη Williams (1798-1814).

Η Δομή Τρία αποκαλύφθηκε πιο καθαρά από τα δεδομένα GPR, τα οποία εμφάνιζαν ένα μεγάλο χαρακτηριστικό γνώρισμα κελαριού, περίπου 2,5 επί 1,5m, στη φέτα βάρους (Εικόνα 3.29^Α), με εκτιμώμενο βάθος 0,9m επίσης φαίνεται στα κατακόρυφα προφίλ GPR (Εικόνα 3.29^Α -1 και Α-2). Τα κατακόρυφα προφίλ υποδεικνύουν μια ασθενή μεταβατική ζώνη 0,10 έως 0,30 μ., κάτω από την επιφάνεια, με επίσης πολύπλοκες αλληλοκαλυμμένες αντανάκλασεις από κάτω, οι οποίες υποδηλώνουν την ύπαρξη πολλών μικρών αντανάκλαστικών αντικειμένων (Εικόνα 3.29^Α- 2).



Εικόνα 3.29: Γεωφυσικά αποτελέσματα Δομής Τρία με κατακόρυφα προφίλ GPR και προφίλ της εκσκαφής

Οι ανασκαφές της δομής επιβεβαίωσαν το χαρακτηριστικό γνώρισμα ως ένα μεγάλο ιστορικό λάκκο, που ταιριάζει πολύ με τις διαστάσεις που υπολογίζονται από τα δεδομένα GPR που φαίνονται στην Εικόνα 3.29. Η δοκιμαστική μονάδα ανασκαφής 1 επί 2m απεικονίζεται από μια συμπαγή μαύρη γραμμή που σχηματίζει ένα ορθογώνιο στο ανατολικό άκρο της ανωμαλίας όμως φαίνεται επίσης Εικόνες 3.29^A, B, C και D, με την εσωτερική γραμμή να αντιπροσωπεύει το οριζόντιο όριο της γεμάτης κοιλότητας. Η ιστορική κοιλότητα εμφάνισε οριζόντια ζώνωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.29^E και όπως επισημαίνεται στο σχέδιο προφίλ της Εικόνας 3.30.



Εικόνα 3.30: Προφίλ δυτικού τοίχου επίσης δομής Τρία που δείχνει τη ζώνωση του λάκκου.

Το στρώμα δαπέδου, Ζώνη 3, ήταν μια ξεχωριστή, σκοτεινή κόκκινη-καφέ αμμώδης άργιλος, πάχους 0,17 μ., που έληγε στα 0,9 μ. κάτω από την επιφάνεια. Η ζώνη 3 εμφάνισε στην επιφάνειά της μια λεπτή κατανομή ιστορικών αντικειμένων, περιλαμβανομένων τούβλων, θραυσμάτων τούβλων, κεραμικών (Εικόνα 3.31) πορσελάνη, αδιαφανές λευκό γυαλί και διαφανή γυαλιά. Η ζώνη 3 επικαλύφθηκε από τη Ζώνη 2, η οποία ήταν ένα σκούρο καφέ στρώμα από αμμώδη άργιλο, πάχους 0,38 m, το οποίο αποτέθηκε όλο μαζί στην κοιλότητα, πάνω από το στρώμα δαπέδου. Ακριβώς πάνω από τη Ζώνη 2 ήταν η Ζώνη 1: ένα στρώμα ξυλάνθρακα πάχους 2 cm, αναμεμιγμένο με εδάφη της Ζώνης 2, που ήταν η πηγή της επιφάνειας χαμηλού πλάτους ορατής στο κατακόρυφο προφίλ GPR που φαίνεται στην Εικόνα 3.29^{A-2} και το μεγάλο μαγνητικό δίπολο στην Εικόνα 3.29B. Πάνω από το φακό του άνθρακα, η μονάδα δοκιμής εκσκαφής επιπέδου 3 παρουσίασε ένα υπερκείμενο στρώμα από κιτρινωπή-κόκκινη, συμπαγή αμμώδη άργιλο πάχους 0,11m.

Τα κεραμικά αντικείμενα που βρίσκονταν πάνω ή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια της Ζώνης 3 χρονολογήθηκαν και έδειξαν ότι αυτό το υπόγειο έγινε περίπου 100 χρόνια μετά την κατασκευή του σπιτιού το 1772 ή 1773, αποκλείοντας το ενδεχόμενο ο λάκκος να χρησίμευε ως κελάρι κουζίνας του 18^{ου} αιώνα. Πιθανότατα χρησιμοποιήθηκε ως υπόγειο, κελάρι ή αποχωρητήριο, και χρησιμοποιήθηκε τελευταία κατά τα έτη αμέσως μετά τον αμερικανικό εμφύλιο πόλεμο.



Εικόνα 3.31: Κεραμικά στη βάση του λάκκου

3.3.6 Συμπεράσματα

Στη Δομή Ένα, όλα τα όργανα ανταποκρίθηκαν καλά στην παρουσία τούβλου και πέτρας που αποτελούσαν το θεμέλιο. Η θεμελίωση εμφανίζεται ως μια ισχυρή ανωμαλία στο σύνολο δεδομένων αγωγιμότητας επειδή η μάζα τούβλου είναι λιγότερο ηλεκτρικά αγωγίμη από το μητρικό έδαφος, κοντά στην επιφάνεια (Εικόνα 3.26). Ενώ η αγωγιμότητα φαίνεται να αποδίδει καλύτερα τα ρηχά στοιχεία θεμελίωσης επίσης Δομής Ένα, το GPR αρθρώνει επίσης τα ίδια χαρακτηριστικά πολύ καλά και έχει το πλεονέκτημα να απεικονίζει και τα πιο βαθιά στρώματα με σχετική ακρίβεια που τα άλλα όργανα δεν μπορούν.

Ενώ η Δομή Δύο είναι ορατή μέσα σε όλα τα σύνολα δεδομένων, ο πυροσυσσωματωμένος, συντηγμένος υποόροφος του καπνιστηρίου και οι κολώνες από τούβλα γίνονται καλύτερα αντιληπτά από το συνδυασμό GPR και μαγνητόμετρου, ενώ και τα δύο σύνολα δεδομένων που βασίζονται στο EMI προσφέρουν λιγότερες πληροφορίες (Εικόνα 3.28). Τα προφίλ GPR υποδεικνύουν με ακρίβεια το βάθος

μέχρι το σκληρυμένο πάτωμα, μέσω ενός πυκνού υπερκείμενου πηλού αργιλίου (Εικόνα 3.28^A-1). Επειδή τα τούβλα ξαναπυρώθηκαν μαζί με το πάτωμα από άργιλο, καθίστανται κάπως λιγότερο ορατά από το GPR στους χάρτες φετών βάθους, παρόλο που είναι παρόντα στα κατακόρυφα προφίλ ως πηγές αντανάκλασεων (Εικόνα 3.28^A-1).

Η Δομή Τέσσερα παρουσιάζει την πιο αμφιλεγόμενη περίπτωση. Οι χάρτες φέτας βάθους του GPR δεν δείχνουν ότι υπάρχουν ακέραια θεμέλια ή κολώνες στη θέση αυτή, ή οποιαδήποτε άλλη προφανή θεμελίωση (Εικόνα 3.25C). Το μαγνητόμετρο ανιχνεύει τουλάχιστον ένα μεγάλο σιδηρό αντικείμενο κοντά στην επιφάνεια του οποίου το δίπολο εξουδετερώνει μετρήσεις από μεγάλο μέρος του περιβάλλοντος εδάφους (Εικόνα 3.25D). Ωστόσο, τα στοιχεία της αγωγιμότητας (Εικόνα 3.25^A) και της μαγνητικής επιδεκτικότητας (Εικόνα 3.25B) για την περιοχή, προσφέρουν πληροφορίες που καλύπτονται από το μεταλλικό αντικείμενο που παραμορφώνει τις μετρήσεις του οργάνου και δεν είναι ορατό στο ραντάρ. Οι πιο ακραία ανώμαλες θετικές τιμές ολόκληρης της έρευνας μαγνητικής επιδεκτικότητας και οι πιο ακανόνιστα χαμηλές τιμές της μελέτης αγωγιμότητας συγκεντρώνονται στην περιοχή αυτή, συμπίπτοντας με μια θέση τη αυλής όπου ο Baroody (1978) αναφέρει πως υπήρχαν πολλά καρφιά.

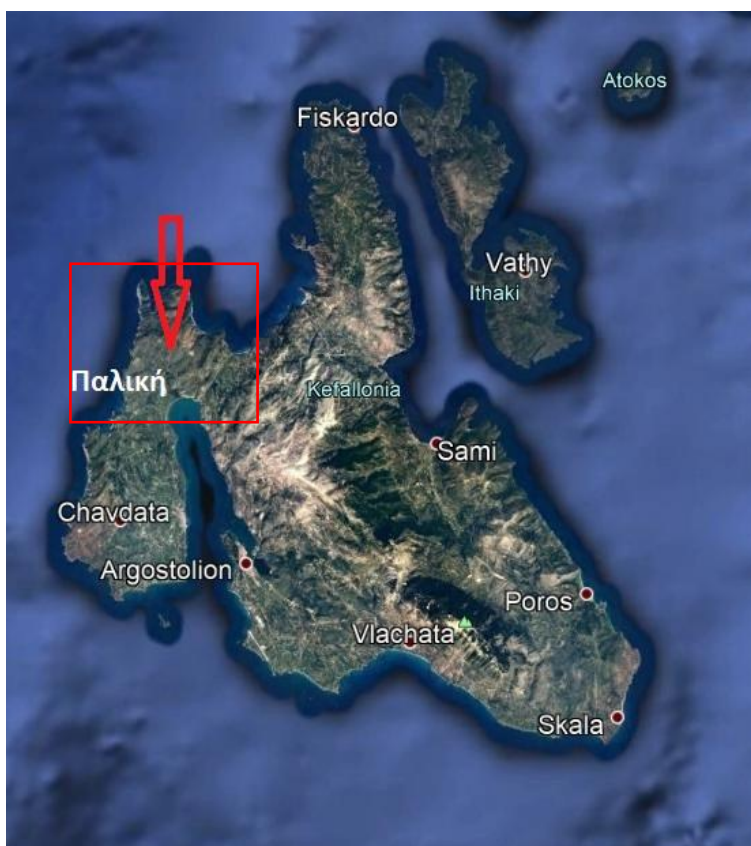
Το καλύτερο ενιαίο εργαλείο για την αναζήτηση ιστορικών δομών στο House in the Horseshoe ήταν το GPR. Ένα Ραντάρ που εντόπισε επακριβώς τις άθικτες αρχαιολογικές καταθέσεις, αποδεικνύοντας ότι είναι επίσης εξαιρετικός εκτιμητής της θέσης και του βάθους για τα θαμμένα χαρακτηριστικά. Τα ιστορικά χαρακτηριστικά του House in the Horseshoe, όπως τα υποστηρίγματα από τούβλα και τα βαθιά υπόγεια όπως το κελάρι, είναι χαρακτηριστικά ιστορικών χώρων, καθιστώντας αυτόν τον αισθητήρα ιδιαίτερα εφαρμόσιμο σε πολλά ιστορικά πλαίσια. Η αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα αποδείχτηκαν επίσης χρήσιμες στο House in the Horseshoe για τον προσδιορισμό ιστορικών χαρακτηριστικών, καθώς και μεταλλικών αντικειμένων που έχουν κατατεθεί στο ανώτατο στρώμα του εδάφους.

Οι γεωφυσικές έρευνες του House in the Horseshoe παρέχουν εξαιρετικά παραδείγματα ιστορικών χαρακτηριστικών του τόπου όπως απεικονίζονται από τρεις συνήθως χρησιμοποιούμενους αισθητήρες. Οι δομικές ανωμαλίες μέσα στις εικόνες εκτέθηκαν, παρέχοντας ερμηνευτικές λεπτομέρειες που αποκαλύπτουν πως μπορεί να μοιάζουν τα δομικά χαρακτηριστικά με τη χρήση εργαλείων GPR, EMI και μαγνητόμετρου σε εδάφη Masada και σε παρόμοια περιβάλλοντα. Οι ερμηνείες και οι εικόνες των θαμμένων δομικών χαρακτηριστικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κρατικούς αξιωματούχους στο House in the Horseshoe για να αποφύγουν αυτές τις τοποθεσίες σύμφωνα με τα καθήκοντα διαχείρισης πολιτιστικών πόρων και να προσφέρουν νέες πληροφορίες για το ιστορικό τοπίο της περιοχής. Άλλοι διαχειριστές ιστορικών τόπων επωφελούνται και αυτοί από αυτά τα αποτελέσματα ακολουθώντας αυτά τα λεπτομερή παραδείγματα για να εντοπίσουν πως μοιάζουν τα χαρακτηριστικά των θαμμένων ιστορικών χώρων στις γεωφυσικές εικόνες, αλλά και να εκτιμήσουν τις δυνατότητες που προσφέρουν οι μη καταστρεπτικές γεωφυσικές μέθοδοι για την αύξηση της γνώσης που σχετίζεται με την ιστορία του τόπου.

4. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στις περιοχές Καστέλι και Λιβάδι της Νήσου Κεφαλληνίας

4.1 Γενικά

Η γεωφυσική έρευνα έλαβε χώρα στο νησί της Κεφαλονιάς και πιο συγκεκριμένα στην χερσόνησο Παλικής. Η Χερσόνησος της Παλικής βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της Κεφαλονιάς όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: το κόκκινο βέλος δείχνει τη θέση της χερσονήσου της Παλικής στην Κεφαλονιά.

Προκειμένου να επιλεχθούν οι περιοχές έρευνας και να πραγματοποιηθεί η γεωφυσική έρευνα εξετάστηκε η γεωλογία αλλά και η ιστορία της περιοχής, (όπως παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 4.2 και 4.3 αντίστοιχα) ώστε να συσχετιστούν τα αποτελέσματα της έρευνας με συγκεκριμένους σχηματισμούς.

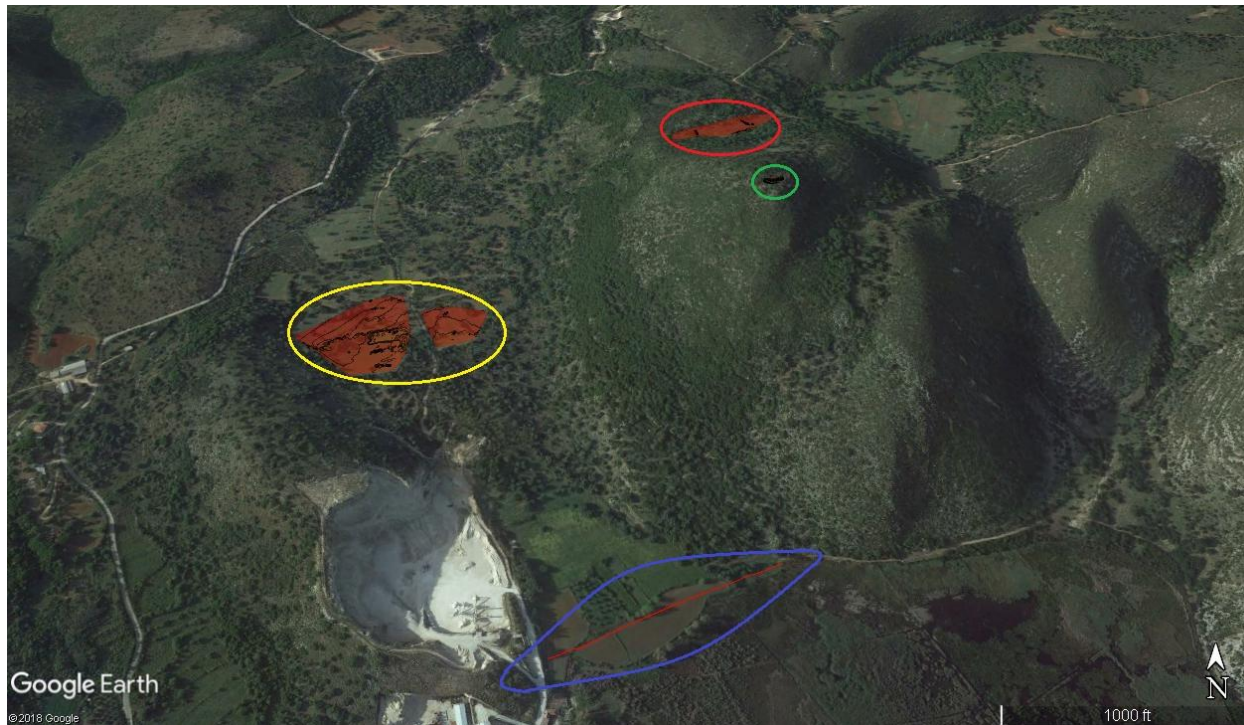
Επιλέχτηκαν τελικά τέσσερις περιοχές ενδιαφέροντος, δύο στην τοποθεσία Λιβάδι και δύο στο Όρος Καστέλι (Εικόνα 4.2). Το χωριό Λιβάδι της Κεφαλονιάς βρίσκεται στη χερσόνησο της Παλικής, κοντά στα χωριά Κουβαλάτα και Βλυχάτα, στο σημείο όπου βρίσκεται ο ομώνυμος υδροβιότοπος. Ο υδροβιότοπος Λιβάδι είναι από τα σημαντικότερα οικοσυστήματα της Κεφαλονιάς. Υπολογίζεται πως εδώ εκβάλλουν περισσότερα από εκατό ρυάκια και χείμαρροι της περιοχής, ενώ αποτελεί καταφύγιο για πλήθος σπάνιων πτηνών. Το Καστέλι βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της χερσονήσου Παλικής της Κεφαλονιάς, στο βόρειο άκρο του κόλπου του Λιβαδιού. Η τοποθεσία έχει χαρακτηριστεί Καταφύγιο Άγριας Ζωής «όρους

Καστέλι-Μπλωστή» και η κορυφή του υψώματος Λαχιές προσφέρει πανοραμική θέα προς τη θάλασσα, τη χερσόνησο Παλικής και επίσης την υπόλοιπη Κεφαλονιά.



Εικόνα 4.2: Μεγέθυνση του κόκκινου παραλληλογράμμου της Εικόνας 4.1

Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται πως οι περιοχές έρευνας βρίσκονται σχετικά κοντά μεταξύ τους, και έπειτα παρουσιάζονται διάφορες φωτογραφίες προς κατανόηση της γενικής εικόνας των περιοχών.



Εικόνα 4.3: α) Στον κόκκινο κύκλο φαίνεται η περιοχή «Καστέλι α'», β) στον πράσινο, η περιοχή «Καστέλι β'», γ) στον κίτρινο η περιοχή «Λιβάδι α'» και δ) στον μπλε, η περιοχή «Λιβάδι β'»



Εικόνα 4.4: Συνολική εικόνα των περιοχών έρευνας στη θέση Λιβάδι



Εικόνα 4.5: Πανοραμική εικόνα της περιοχής έρευνας «Λιβάδι α'»



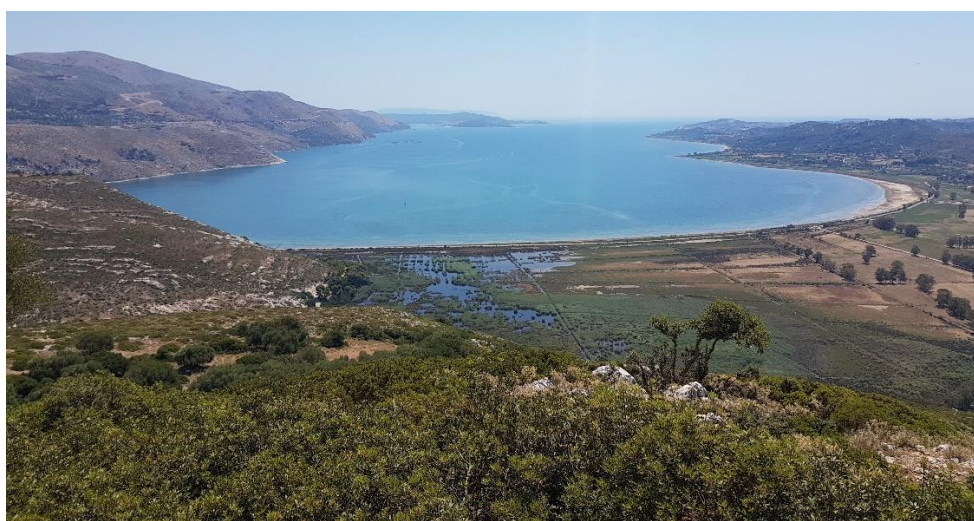
Εικόνα 4.6: Φωτογραφία από την περιοχή «Λιβάδι β'»



Εικόνα 4.7: Φωτογραφία από τη περιοχή «Καστέλι α'»



Εικόνα 4.8: Πανοραμική εικόνα από την κορυφή στην περιοχή «Καστέλι β'»



Εικόνα 4.9: Η θέα του κόλπου του Λιβαδιού από την περιοχή Καστέλι β'

4.2 Γεωλογία επίσης περιοχής

4.2.1. Γεωλογία των Νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης

Στη γεωλογική δομή των νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης λαμβάνουν μέρος αλπικοί σχηματισμοί, καθώς και νεότεροι πλειοτεταρτογενείς (μεταλπικοί) σχηματισμοί, οι οποίοι επικάθονται ασύμφωνα στους πρώτους.

Αλπικοί σχηματισμοί

Οι αλπικοί σχηματισμοί ανήκουν στις δυο πιο εξωτερικές ενότητες των Ελληνίδων, την ενότητα Παξών, η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της Κεφαλλονιάς και είναι η σχετικά αυτόχθονη και την Ιόνια ενότητα, η οποία δομεί το νοτιοανατολικό τμήμα της νήσου και ολόκληρη την νήσο Ιθάκη, είναι δε επωθημένη πάνω στην προηγούμενη.

Ενότητα Παξών

Στην Κεφαλλονιά εμφανίζονται τα ανώτερα μέλη της ανθρακικής σειράς που αντιστοιχούν στην περίοδο Ανώτερο Ιουρασικό – Κατώτερο Μειόκαινο, καθώς και η αργιλοκλαστική φλυσική σειρά που αποτελεί κανονική συνέχεια της προηγούμενης και αντιστοιχεί στο διάστημα Μέσο Μειόκαινο – Κατώτερο Πλειόκαινο (BP Co., 1971).

Ανθρακική σειρά

Η ανθρακική σειρά παρουσιάζει μια έντονη διαφοροποίηση στις ιζηματογενείς χαρακτήρες κατά τη διάρκεια του Κρητιδικού, η οποία υποχωρεί κατά το Τριτογενές. Ειδικότερα παρατηρούνται:

- Στη χερσόνησο της Παληκής και στη χερσόνησο του Αργοστολίου χαρακτηριστικές φάσεις μιας ιδιαίτερα ρηχής νηριτικής παραμένουσας πλατφόρμας. Το πάχος των ιζημάτων ξεπερνά τα 1000 m για το Άνω Κρητιδικό – Παλαιόκαινο αντιστοιχούν δε σε λευκούς εστρωμένους ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, δολομίτες αποσαθρωμένους με όψη κιμωλίας και ίχνη ανάδυσης και βιογενείς-βιοκλαστικούς περιυφαλώδεις ασβεστόλιθους.
- Στο κεντρικό τμήμα της νήσου, φάσεις επίσης ρηχές, αλλά και βαθύτερες που χαρακτηρίζουν το περιθώριο μιας βραχύβιας κρητιδικής πλατφόρμας με πάχος ιζημάτων πάνω από 1000m μόνο για το Άνω Κρητιδικό. Νηριτικοί ασβεστόλιθοι, βιοκλαστικοί και μικριτικοί ακολουθούμενοι από λευκούς μικριτικούς και δολομιτικούς ασβεστόλιθους μεσο-ανωπαλιρροιακής πλατφόρμας με ίχνη ανάδυσης και με ενδιαστρώσεις βιοκλαστικών οριζόντων με ρουδιστές και οριζόντων με γαστερόποδα (BP Co., 1971).
- Στην περιοχή της χερσονήσου της Ερισσού και του όρους Καλού, της βορειοδυτικούς πρόποδες της Αγίας Δυνατής και στις δυτικές προσβάσεις του Αίνου φάσεις κυρίως του περιθωρίου, ενός κλιτύος και του πυθμένα μιας λεκάνης, δηλαδή στο μεγαλύτερο της μέρος πελαγικές με συνολικό πάχος που ξεπερνά τα 1000 m για το Ανώτερο Ιουρασικό – Άλβιο. Αντιπροσωπεύονται από εστρωμένους δολομίτες, ασβεστόλιθους και πυριτιολίθους. Οι τελευταίοι μεταπίπτουν κατά τη διάρκεια του Αλβίου σε βιοκλαστικούς – λατυποπαγείς ασβεστόλιθους κλιτύος, ενώ πλευρικά αναπτύσσονται βιοκλαστικοί περιυφαλώδεις και μικριτικοί ασβεστόλιθοι ρηχής πλατφόρμας. Από το Τουρυνίο μέχρι το Ηώκαινο αναπτύσσονται έως και 600 m πελαγικοί λατυποπαγείς και τουρβιδιτικοί ασβεστόλιθοι κλιτύος. Ο πελαγικός χαρακτήρας των ιζημάτων ενισχύεται κατά το Ανώτερο Ηώκαινο – Ολιγόκαινο (BP Co., 1971).

Αργιλο-κλαστική φλυσχική σειρά

Αποτελεί την κανονική εξέλιξη της κυρίως ανθρακικής σειράς με πάχος που ανέρχεται σε επίσης εκατοντάδες μέτρα. Συμμετέχουν κυρίως μάργες με ενδιαστρώσεις ψαμμιτών, αργίλων, ολιγόμεικτων λατυποπαγών και κροκαλοπαγών. Η σειρά εμφανίζεται στη χερσόνησο Παληκής, στην περιοχή κόλπου Αργοστολίου και όρμου Κατελειού. Ηλικία Λάγγιο – Μεσσήνιο.

Ιόνιος Ενότητα

Από το σύνολο των στρωματογραφικών οριζόντων της σειράς στη δομή των δύο νήσων συμμετέχουν μόνο οι ορίζοντες της μεσοζωικής ανθρακικής σειράς. Οι παλαιότεροι σχηματισμοί της ενότητας είναι τριαδικοί εβαπορίτες, υπολειμματικά άστρωτα λατυποπαγή ασβεστόλιθων και δολομιτών και άργιλοι διάλυσης. Πάνω από αυτές αναπτύσσεται μια ανθρακική σειρά που περιλαμβάνει δολομίτες, φυκώδεις ασβεστόλιθους και ασβεστόλιθους με πυριτόλιθους στην κορυφή αντίστοιχους των νηριτικών «ασβεστόλιθων Παντοκράτορα». Ηλικία Αν. Τριαδικό – Μέσο Λιάσιο (BP Co., 1971). Ακολουθούν φάσεις «Ammonitico rosso» από ασβεστοσχίστες και ερυθρούς ασβεστόλιθους με αμμωνίτες του Τοαρσίου, ασβεστόλιθοι με πυριτόλιθους και σχιστόλιθοι με Ποσειδώνιες του Δογγερίου και τέλος ασβεστόλιθοι με ή χωρίς πυριτιόλιθους, πελαγικοί οι οποίοι γίνονται λατυποπαγείς στην κορυφή της σειράς, ηλικίας Κρητιδικού (BP Co. 1971, RENZ 1955). Σχηματισμοί νεότεροι του Μεσοζωϊκού ίσως να υπάρχουν με τη μορφή τεκτονικών ρακών (ΝΙΚΟΛΑΟΥ, 1983). Στη νήσο Ιθάκη αναπτύσσεται κυρίως η ανθρακική σειρά της Ιονίου ενότητας ηλικίας Ιουρασικού – Κρητιδικού.

Μεταλλικοί σχηματισμοί

Η ασύμφωνη τοποθέτηση τους πάνω από αλπικούς αποτελεί και το μόνο κριτήριο προκειμένου να χαρακτηρισθούν ως «μεταλλικοί σχηματισμοί». Διακρίνεται μια κατώτερη σειρά θαλάσσιων ιζημάτων ηλικίας Κατώτερου Πλειόκαινου – Κατώτερου Πλειστοκαινού (ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ-ΔΙΚΑΙΟΥΛΙΑ, 1965) και μια ανώτερη σειρά αποθέσεων ηπειρωτικού κυρίως χαρακτήρα, οι οποίες είναι ασύμφωνα τοποθετημένες πάνω στις προηγούμενες (Μέσο, Ανώτερο Πλειστόκαινο – Ολόκαινο) (BP Co. 1971, SOREL 1976, UNDERHILL 1985, 1989, κ.ά.). Πλειο-Καλάβρια σειρά. Πρόκειται για μια θαλάσσια σειρά που αναπτύσσεται επικλυσιαγενώς επί των σχηματισμών επίσης ενότητας Παξών. Το πλάτος εμφάνισης κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 km περίπου, ενώ το πάχος τους είναι μεταξύ 200 και 500 m. Η σειρά αυτή περιλαμβάνει στη βάση της (Κατ. Πλειόκαινο) ορίζοντες ολιγόμεικτων κροκαλοπαγών και λατυποπαγών, συμφυρματοπαγών ασβεστόλιθων και συμπαγών ασβεστοαρενιτών, στο ενδιαμέσο τμήμα της, ηλικίας Μέσου – Ανώτερου Πλειόκαινου, κυανές και κίτρινες μάργες με λυολίθους, ενδιαστρώσεις ψαμμιτών, ασβεστολιθικών άμμων, κροκαλοπαγών και στο ανώτερο τμήμα της, ηλικίας Κατ. Πλειστοκαινού – Καλαβρίου, επίσης μάργες μέσα στις οποίες παρεμβάλλονται ενδιαστρώσεις ασβεστολιθικών άμμων και στη συνέχεια χονδρόκοκκοι ασβεστοαρενίτες απόσυρσης (BP Co., 1971).

Σχηματισμοί Μέσου-Ανώτερου Πλειστόκαινου – Ολόκαινου. Εμφανίζονται κυρίως στη χερσόνησο του Αργοστολίου – αεροδρομίου. Πρόκειται για σχηματισμούς ηπειρωτικού, σπάνια θαλάσσιου χαρακτήρα. Διακρίνονται:

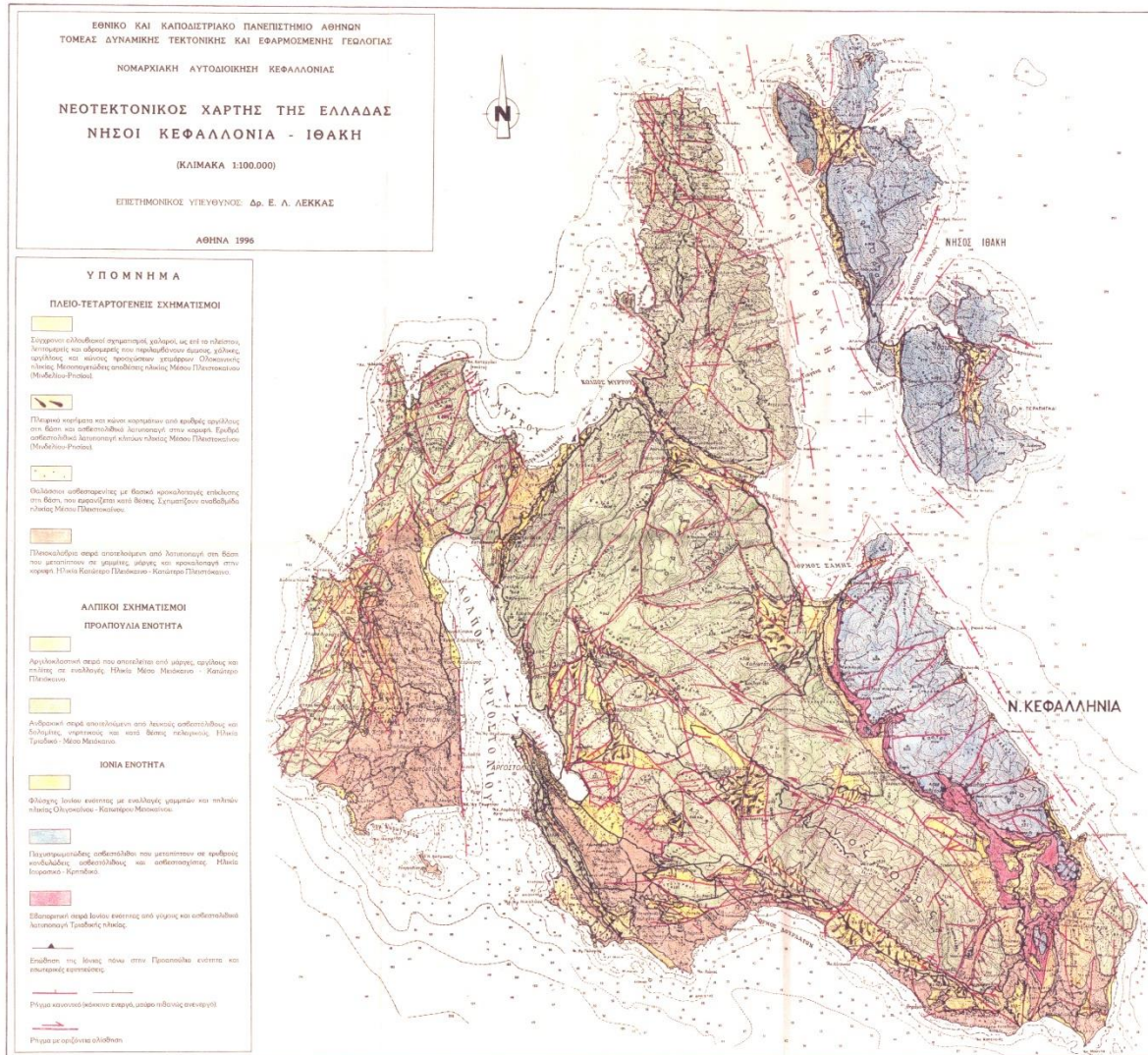
- Λατυποπαγή πλαγιάς. Στις πλαγιές του βυθίσματος μεταξύ των χωριών Αγκώνα-Κοντογουράτα και Ζόλα καθώς και στον όρμο της Αγίας Κυριακής αναπτύσσονται, ασύμφωνα πάνω στις μειοκαινικές μάργες, λατυποπαγή του Μινδέλιου, που τα κατώτερα της μέλη περικλείουν ασβεστολιθικά τεμάχια μέσα σε ένα κόκκινο ασβεστολιθικό ή ασβεστιτικό τσιμέντο.
- Θαλάσσιοι ασβεστοαρενίτες. Εμφανίζονται σε επίσης παράκτιες κυρίως περιοχές του νησιού με τη μορφή μικρού πάχους θαλάσσιων ασβεστοαρενιτών επίκλυσης με διασταυρωμένες στρώσεις και κατά τύπους βασικό κροκαλοπαγές. Η ηλικία της είναι Παλαιο-Μιλάτσια (Μέσο Πλειστόκαινο) (UNDERHILL, 1989).

- Μεσοπαγετώδεις αποθέσεις Μινδέλιου-Ρήσιου. Πρόκειται για προϊόντα καρστικοποίησης και εξαλλοίωσης ασβεστόλιθων που εμφανίζονται με τη μορφή αργίλων απασβέστωσης μέσα σε ολίνες (UNDERHILL, 1989).
- Κώννοι προσχώσεων Ρήσιου. Τυπικές αποθέσεις παγετώδους περιόδου, περιόδου ρηξιστασίας, που αποτίθενται λόγω διάβρωσης στους πρόποδες των πλαγιών. Η βάση αυτών των κώννων αποτελείται από κόκκινες αργίλους με πυρίτιο και τεμάχια των υποκείμενων εξαλλοιωμένων θαλάσσιων ασβεστοαρενιτών (UNDERHILL, 1989).
- Σύγχρονοι σχηματισμοί. Βρίσκονται διάσπαρτοι σε πολλά σημεία του νησιού. Στην περιοχή του αεροδρομίου και ΔΝΔ της Σκάλας απαντούν μικρού πάχους κόκκινοι αργιλικοί άμμοι ηπειρωτικής προέλευσης καθώς και παράκτια κροκαλοπαγή και κόκκινες ασβεστολιθικές κρούστες, που είναι πιθανώς Βούρμιας ηλικίας. Στους δυτικούς πρόποδες του Αίνου εμφανίζονται με τη μορφή πλευρικών κορημάτων και κώννων προσχώσεων χειμάρρων.

4.2.2. Νεοτεκτονική Δομή των νήσων Κεφαλλονιάς -Ιθάκης

Η δομή των νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης είναι αποτέλεσμα επίσης επίδρασης μιας σειράς διαδοχικών τεκτονικών παραμορφωτικών επεισοδίων κυρίως συμπιεστικού χαρακτήρα, τα οποία επίσης έχουν διακοπεί από περιόδους κατά τις οποίες παρατηρείται μια αποσυμπίεση των πετρωμάτων και επίδραση της βαρύτητας, φαινόμενα που αντιστοιχούν σε ένα καθεστώς εφελκυσμού.

Οι κύριες τεκτονικές μορφές που δημιουργήθηκαν κατά τη φάση επίσης αλπικής παραμόρφωσης των νήσων, συνδέονται γενετικά με την τοποθέτηση του καλύμματος της Ιόνιας ενότητας πάνω στην ενότητα Παξών κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο και είναι: (i) ανάστροφα ρήγματα με διεύθυνση είτε ΒΔ-ΝΑ, είτε ΝΔ-ΒΑ και ανοικτές πτυχές με άξονες που παρουσιάζουν ίδιο προσανατολισμό μέσα στην ενότητα Παξών, τα οποία θεωρούνται ως παλαιότερες συνιζηματογενείς τεκτονικές δομές που κατά την περίοδο της ιζηματογένεσης καθόριζαν τις διάφορες παλαιογεωγραφικές περιοχές της Προαπούλιας πλατφόρμας. Σε ορισμένα από αυτά τα ρήγματα (ρήγμα Αγίας Ευφημίας ΝΔ του όρους Καλό, ρήγμα Αίνου) παρατηρείται και μια οριζόντια συνιστώσα κίνησης εκτός από την αμιγώς εφίππευτική, (ii) εφίππευσεις, αντίκλινα εφίππευσης και αντικλινικά δίδυμα εφίππευσης με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και (iii) ρήγματα βαρύτητας με διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ μέσα στην Ιόνια ενότητα. Αξονικά επίπεδα πτυχών και εφίππευσεις είναι παράλληλα με την κύρια τεκτονική επιφάνεια επώθησης της Ιόνιας ενότητας πάνω στην ενότητα Παξών. Στις προηγούμενες τεκτονικές μορφές του Κατ. Πλειόκαινου προστίθενται στη συνέχεια οι νεότερες μορφές (δομές) που συνδέονται με τα παραμορφωτικά επεισόδια του Πλειο-Πλειστοκαινού (νεοτεκτονικές μορφές).



Εικόνα 4.10: Νεοτεκτονικός Χάρτης της νήσου Κεφαλλονιάς και Ιθάκης

Οι νεοτεκτονικές μορφές αντιπροσωπεύονται κυρίως από τα ρήγματα, τα οποία τέμνουν ή οριοθετούν όλους ανεξαιρέτως τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τα ρηξιτεμάχη της νήσου. Πρόκειται για μια μεγάλη ποικιλία ρηγμάτων με άλμα από μερικά μέτρα έως κάποιες δεκάδες μέτρα και με ολίσθηση τόσο με κατακόρυφη συνιστώσα όσο και με οριζόντια. Τα ρήγματα που αναγνωρίστηκαν και τα οποία αποδεικνύεται πως έχουν επαναδραστηριοποιηθεί ή δημιουργηθεί κατά την Πλειο-Τεταρτογενή περίοδο κατατάσσονται κατά σειρά σπουδαιότητας σε επιπτώσεις και ανάστροφα, οριζόντιας ολίσθησης και τέλος κανονικά. Συγκεκριμένα παρατηρούνται:

- Αναζωπυρώσεις παλαιότερων σημαντικών τεκτονικών δομών, κυρίως επιπτώσεων και ανάστροφων ρηγμάτων (Αίνου, Αργοστολίου, Κοντογουράτων Αγκώνα, Αγίας Ευφημίας, Ασπρογέρακα-Παλαιάς Σκάλας, Παλαιόκαστρου, περιθωρίου Ζακύνθου-Κεφαλλονιάς), αλλά και δημιουργία νεότερων, πολύ χαρακτηριστικών στη περιοχή κυρίως επίσης χερσονήσου Αργοστολίου (Ακρωτήριο Λαρδηγός, Ξενοδοχείο Mediterranee, Ξενοδοχείο White Rocks, απόκρημνες παραλίες ΝΔ από το χωριό Μηνιές, περιοχή αεροδρομίου). Πολλά από τα

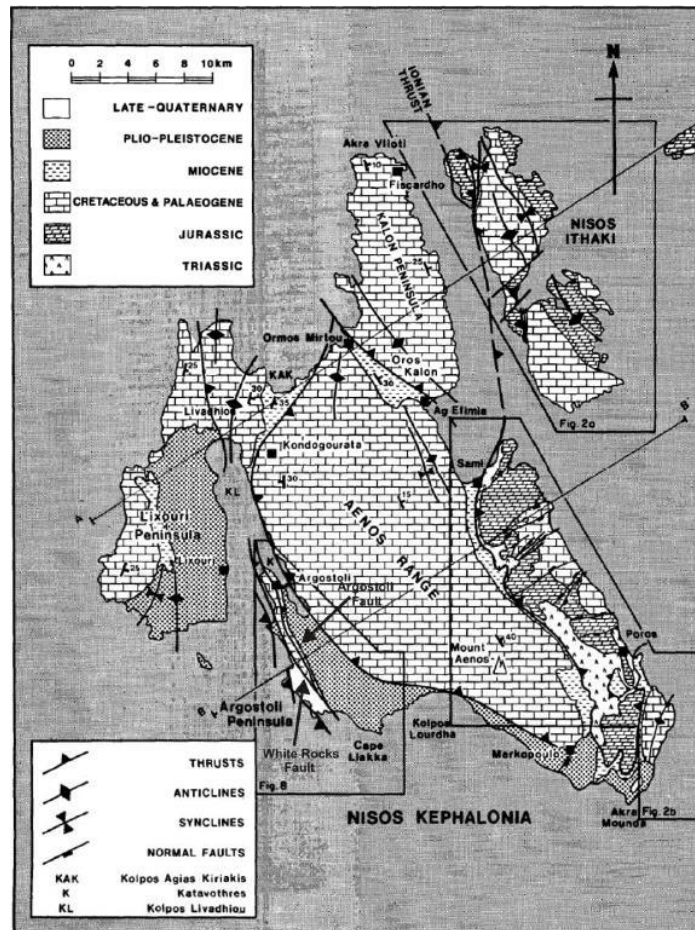
παραπάνω ρήγματα, παλαιότερα και νεότερα, παρουσιάζουν και μία οριζόντια συνιστώσα κίνησης γεγονός που τα κατατάσσει στα πλαγιοανάστροφα και στις πλαγιοεπιπτώσεις (Αίνου, Αγίας Ευφημίας, Ζακύνθου-Κεφαλλονιάς). Ρήγματα με καθαρή οριζόντια ολίσθηση (strike slip) δρουν αυτή τη περίοδο (Μηνιές, Φραγκάτα, Καμπούλια, Παλαιόκαστρο, χερσόνησος Παληκής) αλλά είναι μικρότερης σημασίας. Τέλος ρήγματα κανονικά, διαπιστώθηκε με βεβαιότητα ότι έδρασαν εκ νέου στη ΝΑ απόληξη του Αίνου (τεκτονικό βύθισμα στο χωριό Αργίνια) (UNDERHILL, 1989).

- Επαναδραστηριοποιήσεις και ανορθώσεις παλαιότερων κατωπλειοκαινικών πτυχώσεων (αντίκλινο Αίνου, Αργοστολίου-Μηνιών, Μεγάλης Ράχης, Κοντογουράτων, Καλού, χερσονήσου Παληκής) αλλά και δημιουργία νεότερων με κάποια απόκλιση από τις παλαιότερες διευθύνσεις (σύγκλινο κόλπου Αργοστολίου, Αηλιά-Κουστουμπάρδι, αεροδρομίου) (UNDERHILL, 1989).
- Ανυψώσεις γραμμών ακτών που τοπικά μπορούν να φθάνουν ως και 100m ύψος όπως παρατηρείται για την παλαιοακτή του Κατώτερου Πλειστοκαινίου στην χερσόνησο Αργοστολίου (Μηνιές).
- Έντονη κατά βάθος διάβρωση των δομών που δημιούργησαν οι τεκτονικές παραμορφωτικές φάσεις του Κατώτερου Πλειόκαινου και Πλειστοκαινού. Τα φαινόμενα επίσης εντοπίζονται κυρίως στις Δ και ΝΔ πλευρές των μορφολογικών εξάρσεων (όρος Αίνος, όρος Καλό, Χερσόνησος Παληκής) εκεί όπου διέρχονται οι σημαντικές τεκτονικές δομές και εκτελείται η μεγαλύτερη κίνηση, παραμόρφωση και κατακερματισμός των πετρωμάτων.
- Μετατοπίσεις του υδρογραφικού δικτύου, από τον νότο (περιοχή Πάστρα και Παλαιάς Σκάλας, βύθισμα Κατελειού) προς τα Α και ΒΑ (Πόρος), λόγω των σημαντικών κινήσεων που έλαβαν χώρα αυτή την περίοδο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα επίσης την πλήρη διάβρωση των πλειοπλειστοκαινικών ιζημάτων προς τα βόρεια του νησιού έτσι ώστε να μην απαντώνται σήμερα βορειότερα του Ασπρογέρακα (ΝΑ Κεφαλλονιά).

4.2.3. Τεκτονική Επισκόπηση στην Περιοχή Λιβάδι – Χερσόνησος Ληξουρίου – Χερσόνησος Αργοστολίου

Εκτός από την περιοχή του Αίνου καθεστώς συμπιεστικής τεκτονικής συναντάμε επίσης και στην δυτική Κεφαλονιά. Στην περιοχή Λιβαδίου, η οποία βρίσκεται μεταξύ του Κόλπου Αγίας Κυριακής και της περιοχής Ληξουρίου, απαντώνται πτυχές με άξονες σε διεύθυνση Β-Ν και τουλάχιστον ένα μεγάλης έκτασης ανάστροφο ρήγμα (Εικόνα 4.6). Πάραυτα, όσο απομακρύνεται κανείς από το ρήγμα της περιοχής Αίνου προς τα δυτικά ο αριθμός των μεσοσκοπικών πτυχών καθώς και η πυκνότητα του σχισμού των πετρωμάτων μειώνονται δείχνοντας εξασθένηση του προαναφερθέντος καθεστώτος. Στην περιοχή Αργοστολίου οι κυριότερες τεκτονικές δομές είναι δύο μεγάλης έκτασης ρήγματα, το ρήγμα του Αργοστολίου και το ρήγμα <<White Rocks>> (επονομαζόμενο από το ξενοδοχείο πλησίον του οποίου εντοπίζεται τμήμα του ρήγματος, Underhill 1989). Το ρήγμα του Αργοστολίου ξεκινά από το βόρειο τμήμα της περιοχής Αργοστολίου και ενώνεται με το ρήγμα <<White Rocks>> στα νότια της Κεφαλονιάς, κοντά στο ακρωτήριο Λιάκκα. Είναι πιθανό το ρήγμα αυτό να ενώνεται με το προαναφερθέν ανάστροφο ρήγμα της περιοχής Λιβαδίου δια μέσου του κόλπου Λιβαδίου (Εικόνα 4.6). Στρωματογραφικές και ιζηματολογικές μελέτες δείχνουν ότι το ρήγμα Αργοστολίου έδρασε ως ένα ανατολικά βυθιζόμενο κανονικό ρήγμα, αρχικά κατά το Μεσοζωικό και έπειτα κατά το Άνω Μειόκαινο. Μια γωνιώδης ασυμφωνία του Κατώτερου Πλειοκαινίου διαχωρίζει τις Άνω-Μειοκαινικές ακολουθίες της χερσονήσου του Αργοστολίου από τις Μεσο – Πλειοκαινικές ριπιδιακές ακολουθίες οι οποίες βρίσκονται στο άνω τέμαχος του ρήγματος. Η ασυμφωνία αυτή πιθανότατα δείχνει τεκτονική ανύψωση και στροφή των σχηματισμών ως αποτέλεσμα του καθεστώτος τεκτονικής αστάθειας της περιοχής, το οποίο με την σειρά

του οφείλεται στην επώθηση της Ιόνιας ζώνης επάνω στην Προ-Απούλια. Συνεπώς η παρουσία της ασυμφωνίας της αποτελεί απόδειξη ότι το καθεστώς συμπιεστικής τεκτονικής είναι ευρύτερο του ανατολικού κομματιού της Κεφαλονιάς και φτάνει μέχρι το δυτικό τμήμα της. Άρα το ρήγμα αυτό ξεκίνησε την λειτουργία του ως κανονικό ρήγμα και έπειτα επαναενεργοποιήθηκε κατά το Κατώτερο Μειόκαινο ως επώθηση λόγω του προαναφερθέντος καθεστώτος συμπιεστικής τεκτονικής. Το ρήγμα <<White Rocks>> αποτελεί μια επώθηση μικρής γωνίας κλίσεως, της οποίας το επίπεδο κλίνει ανατολικά. Στην οροφή της επώθησης βρίσκονται ασβεστόλιθοι Κρητιδικής και Παλαιογενούς ηλικίας, ενώ η βάση αποτελείται από Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα. Το γεγονός ότι το επίπεδο της επώθησης <<White Rocks>> είναι σχεδόν παράλληλο σε σχέση με το επίπεδο της επώθησης του Αργοστολίου – η γωνία βύθισης του ρήγματος Αργοστολίου είναι μεγαλύτερη – καθώς και η προφανής απουσία συνιζηματογενούς κίνησης στην επώθηση <<White Rocks>> δείχνουν ότι αυτή η επώθηση αναπτύχθηκε ως αποτέλεσμα της δημιουργίας λοξοτμήσεων στη βάση του επαναδραστηριοποιημένου ρήγματος Αργοστολίου (Underhill 1989).



Εικόνα 4.11: Απλοποιημένος τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης της νήσου Κεφαλονιάς (Underhill, 1989). Thrusts: ανάστροφα ρήγματα, Anticlines: αντίκλινα, Synclines: σύγκλινα, Normal Faults :κανονικά ρήγματα ΚΑΚ: Κόλπος Αγίας Κυριακής, Κ: Καταβόθρες, ΚΛ: Κόλπος Λιβαδίου, Cape Liakka: ακρωτήριο Λιάκκα, Triassic: Τριαδικό, Jurassic: Ιουρασικό, Cretaceous and Paleogene: Κρητιδικό και Παλαιογενές, Miocene: Μειόκαινο, Plio-Pleistocene: Πλειο-Πλειστόκαινο, Late-Quaternary: Άνω-Τεταρτογενές, White Rocks Fault: Επώθηση <<White Rocks>>, Argostoli Fault: Επώθηση Αργοστολίου (αποτελείται από δύο κλάδους οι οποίοι συγκλίνουν στα νότια του νησιού)

4.3 Ιστορική αναδρομή επίσης περιοχής

Κέντρο της κατοίκησης στην αρχαιότητα αποτελούσε η πόλη της Πάλης, χτισμένη στην υψηλότερη κορυφή μιας σειράς μέτριων ασβεστολιθικών υψωμάτων που υψώνονται κατά μήκος της ακτής, ενάμιση χιλιόμετρο βόρεια από την πόλη του Ληξουρίου. Η εύφορη φύση του εδάφους, που εκφράζεται συμβολικά και στα στάχια που κοσμούσαν τα νομίσματα της πόλης προσέφερε τις προϋποθέσεις για την πρώιμη οικιστική εγκατάσταση Πράγματι στη θέση Καραβοστάσι, που παρά της επιχώσεις αποτελεί ακόμη και σήμερα φυσικό λιμένα της Πάλης, σύντομο πρόγραμμα συνεργασίας της Εφορείας με την Ιταλική Αρχαιολογική Σχολή Αθηνών έφερε στο φως θραύσμα κρατήρα του τελευταίου τετάρτου του 8^{ου} αι. π.Χ. που υποδεικνύει την πρώιμη για τα δεδομένα της Κεφαλλονιάς εγκατάσταση στην Πάλη. Η πόλις των Παλέων ήταν μία από τις τέσσερις πόλεις της Κεφαλληνίας (τετράπολις). Η Πάλη, όπως και οι άλλες πόλεις του νησιού, ήταν αυτόνομη, είχε δικό της νόμισμα, χάρασσε τη δική της εξωτερική πολιτική. Σύμφωνα με τον Πολύβιο η Πάλη διέθετε φυσική οχύρωση, περικλειόμενη από θάλασσα και γκρεμούς, αλλά και τείχος. Επίσης ο Πολύβιος αναφέρει ότι η χώρα της Πάλης είχε άφθονο σιτάρι. Ήδη από τα μέσα του 5^{ου} αιώνα η Κεφαλλονιά, εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης που τις προσέδιδε μια ιδιαίτερως σημαντική στρατηγική σημασία, θα βρεθεί αναμειγμένη στις συγκρούσεις των ηγεμονίδων πόλεων.

Στην περιοχή Λιβιάδι εντοπίζονται τα ερείπια της Μονής της Κυράς των Αγγέλων, μια αγροτική έπαυλη του 17^{ου} αιώνα που έχει χαρακτηριστεί διατηρητέο μνημείο και τις πρώην αγροτικές φυλακές, που χρησιμοποιήθηκαν έως τις αρχές του 20ού αιώνα.

4.3.1 Η θεωρία του Robert Bittlestone

Για αιώνες, η περιγραφή του Ομήρου για την Ιθάκη στην Οδύσσεια απασχολεί τους επιστήμονες, διότι δεν ταιριάζει με τη γεωγραφία της σύγχρονης νήσου της Ιθάκης.

Ο Άγγλος μελετητής Robert Bittlestone στο βιβλίο του “Odysseus Unbound” (Cambridge, 2005) υποστηρίζει ότι η Ομηρική Ιθάκη ήταν η Χερσόνησος της Παλικής που την εποχή του Χαλκού ήταν (σύμφωνα με τον ίδιο) ξεχωριστό νησί. Παρατήρησε ότι ένα κανάλι θα μπορούσε να διαχωρίζει την Παλική από το κύριο μέρος του νησιού στην ύστερη μυκηναϊκή εποχή (γύρω στο 12^ο αιώνα π.Χ.) και θα μπορούσε να είχε πληρωθεί αργότερα από υλικά κατολισθήσεων ως αποτέλεσμα σεισμών και άλλων μεγάλων τεκτονικών μετακινήσεων, μετατρέποντας το νησί στη χερσόνησο που βλέπουμε σήμερα.

Μετά από εκτενή έρευνα σε συνεργασία με κορυφαίους επιστήμονες και επίσης εμπειρογνώμονες, ο Robert Bittlestone μπόρεσε να ταιριάζει μια σειρά τοποθεσιών στην Παλική με την περιγραφή του Ομήρου για την επιστροφή του Οδυσσέα στην Ιθάκη, συμπεριλαμβανομένου του παλατιού και του λιμανιού. Η προτεινόμενη διαδρομή για το ταξίδι του Οδυσσέα από την άφιξη του στην Ιθάκη στον κόλπο του Αθέρα (Phorcys bay) μέχρι το παλάτι του στο Καστέλι, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.12. Η θεωρία αυτή θεωρείται αρκετά σοβαρή αν και δεν έχει αποδειχτεί ακόμη.



Εικόνα 4.12: Η προτεινόμενη διαδρομή για το ταξίδι του Οδυσσέα από την άφιξη του στην Ιθάκη στον κόλπο του Αθέρα (Phorcys bay) μέχρι το παλάτι του στο Καστέλι

5. Γεωφυσική έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα

5.1 Γενικά

Ξεκινώντας, για να επιλέξουμε τις κατάλληλες γεωφυσικές μεθόδους, για την εκάστοτε περιοχή έρευνας θα πρέπει να εξετάσουμε μια ακολουθία συνθηκών, οι οποίες είναι:

- Ο σκοπός της έρευνας
- Ποιο είναι το σημείο αναζήτησης και ποια η γεωλογία της περιοχής (υγρασία, καταλληλότητα εδάφους για διέλευση των γεωφυσικών οργάνων).
- Το αντικείμενο που ψάχνουμε (υλικό κατασκευής των αρχαίων στόχων που αναζητούμε, το μέγεθος και το βάθος της).

Απαντώντας τα παραπάνω ερωτήματα με μεγάλη ακρίβεια εκτίμησης, είμαστε σε θέση να δούμε αν στην περιοχή μελέτης είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί γεωφυσική έρευνα, και ποιες γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά.

Όσον αφορά τις περιοχές «Καστέλι α'», «Καστέλι β'» και «Λιβάδι α'», η πρώτη γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ηλεκτρομαγνητική. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο βάθη διασκόπησης, 1,5 m και 3 m. Προτεραιότητα ήταν να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια της περιοχής έρευνας, δεδομένων των συνθηκών και της γεωμορφολογίας της θέσης. Στόχος ήταν η αποτύπωση της στρωματογραφίας της περιοχής και ο εντοπισμός πιθανών ανθρωπογενών δομών. Σε κάθε περίπτωση η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος δίνει πολύτιμα αποτελέσματα για το χώρο αναζήτησης.

Συμπληρωματικά, ακολούθησαν μετρήσεις γεωραντάρ, για τις περιοχές «Καστέλι α'» και «Λιβάδι α'», με σκοπό την καταγραφή περιθλάσεων από τοπικούς στόχους στην περίπτωση τοιχίων ή συνεχών ανακλάσεων σε περιπτώσεις ανθρωπογενών αποθέσεων, ενώ ανακλάσεις που είναι διακριτές ανά χρονικά διαστήματα υποδηλώνουν στρωματογραφικές ασυνέχειες.

Τέλος, για την περιοχή «Λιβάδι β'», πραγματοποιήθηκε μια γεωηλεκτρική τομογραφία, η οποία είχε σκοπό την απεικόνιση του υπεδάφους με δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή. Αυτή η γεωηλεκτρική τομή επίσης βοηθάει να αποτυπωθεί με μεγάλη λεπτομέρεια το υπέδαφος και μέσω αυτής μπορούν να εντοπιστούν στρωματογραφικές ασυνέχειες και τοπικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης.

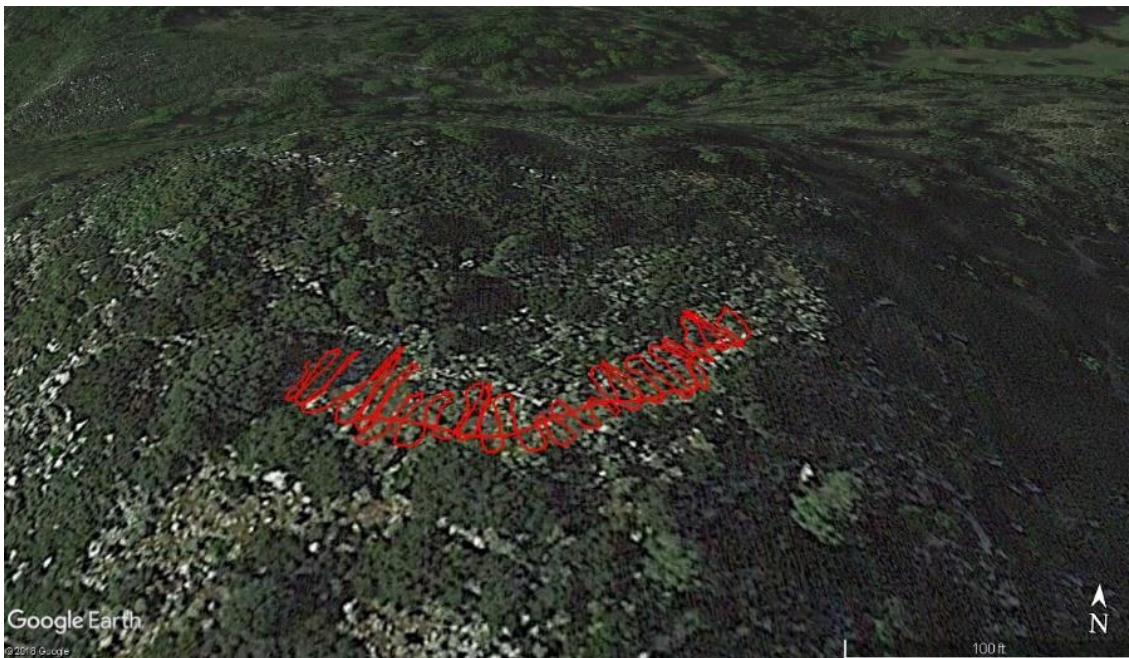
5.2 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

5.2.1 Γενικά

Επίσης προαναφέρθηκε, η πρώτη μέθοδος που πραγματοποιήθηκε ήταν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος. Στόχος ήταν να καλυφθεί όσο το δυνατόν ευρύτερη επιφάνεια, δεδομένων των γεωμορφολογικών συνθηκών, με βάθος διασκόπησης το 1,5 m και τα 3 m. Η πορεία καταγραφής των μετρήσεων που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες, για κάθε μία από τις τρεις περιοχές που επιλέχτηκαν για αυτή τη μέθοδο.



Εικόνα 5.1 : Πορεία καταγραφής μετρήσεων στην περιοχή «Καστέλι α'»



Εικόνα 5.2 : Πορεία καταγραφής μετρήσεων στην περιοχή «Καστέλι β'»



Εικόνα 5.3 : Πορεία καταγραφής μετρήσεων στην περιοχή «Λιβάδι α΄»

5.2.2 Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας επίσης GF Instruments “CMD” με τη διαμόρφωση CMD-2 (Εικόνα 5.4), η οποία προσφέρει επιλογή βάθους διασκόπησης ανάμεσα σε 1,5 και 3 m. Το όργανο παρέχει τη λειτουργία σύνδεσης με όργανο GPS ώστε να παρέχει στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων επίσης κάθε θέσης μέτρησης. Στην παρούσα γεωφυσική έρευνα χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία συνεχούς μέτρησης με GPS.



Εικόνα 5.4: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-2

Το όργανο αποτελείται από την μονάδα ελέγχου και το σύστημα πομπού δέκτη.

Μονάδα ελέγχου:

- Η Μονάδα ελέγχου Attachable CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη.
- Πέντε τρόποι μέτρησης:
 - Χειροκίνητη μέτρηση – ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πιέζοντας το πλήκτρο. Η θέση του σημείου ενημερώνεται αυτόματα στο προκαθορισμένο δίκτυο ή μπορεί να εισαχθεί απευθείας. Κάθε σημείο μπορεί να μετρηθεί και πάλι ή να παραλειφθεί και να ολοκληρωθεί με ένα σχόλιο.
 - Συνεχής μέτρηση – Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Οι θέσεις για το προφίλ καθορίζεται από τα σήματα μήκους με συνεχή συνυπολογισμό των θέσεων των μεμονωμένων μετρήσεων.
 - GPS χειροκίνητη μέτρηση – ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πατώντας το πλήκτρο. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
 - Λειτουργία αναζήτησης – τα δεδομένα μετρώνται συνεχώς, αλλά δεν αποθηκεύονται.
- Άμεση υποστήριξη του δέκτη GPS. Γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το υψόμετρο εμφανίζονται και αποθηκεύονται αυτόματα.
- Εύκολη εξαγωγή δεδομένων σε αποθηκευτική μονάδα USB.
- Χρόνος μέτρησης 1 s.
- 128 MB μνήμη δεδομένων:
 - Max: 64 αρχεία
 - Max: 4,8 εκατομμύρια σημεία μετρήσεων.
- Οθόνη LCD 320 x 240, με λευκό φωτισμό.
- Θερμοκρασία λειτουργίας: : -10 °C έως +50 °C.
- Βάρος: 0,7 kg

Σύστημα πομπού δέκτη:

- Μεγέθη που μετρώνται:
 - Ηλεκτρική αγωγιμότητα.
 - Μαγνητική επιδεκτικότητα.
- Ακρίβεια μέτρησης: $\pm 4\%$ σε 50 mS/m
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 10 Hz.

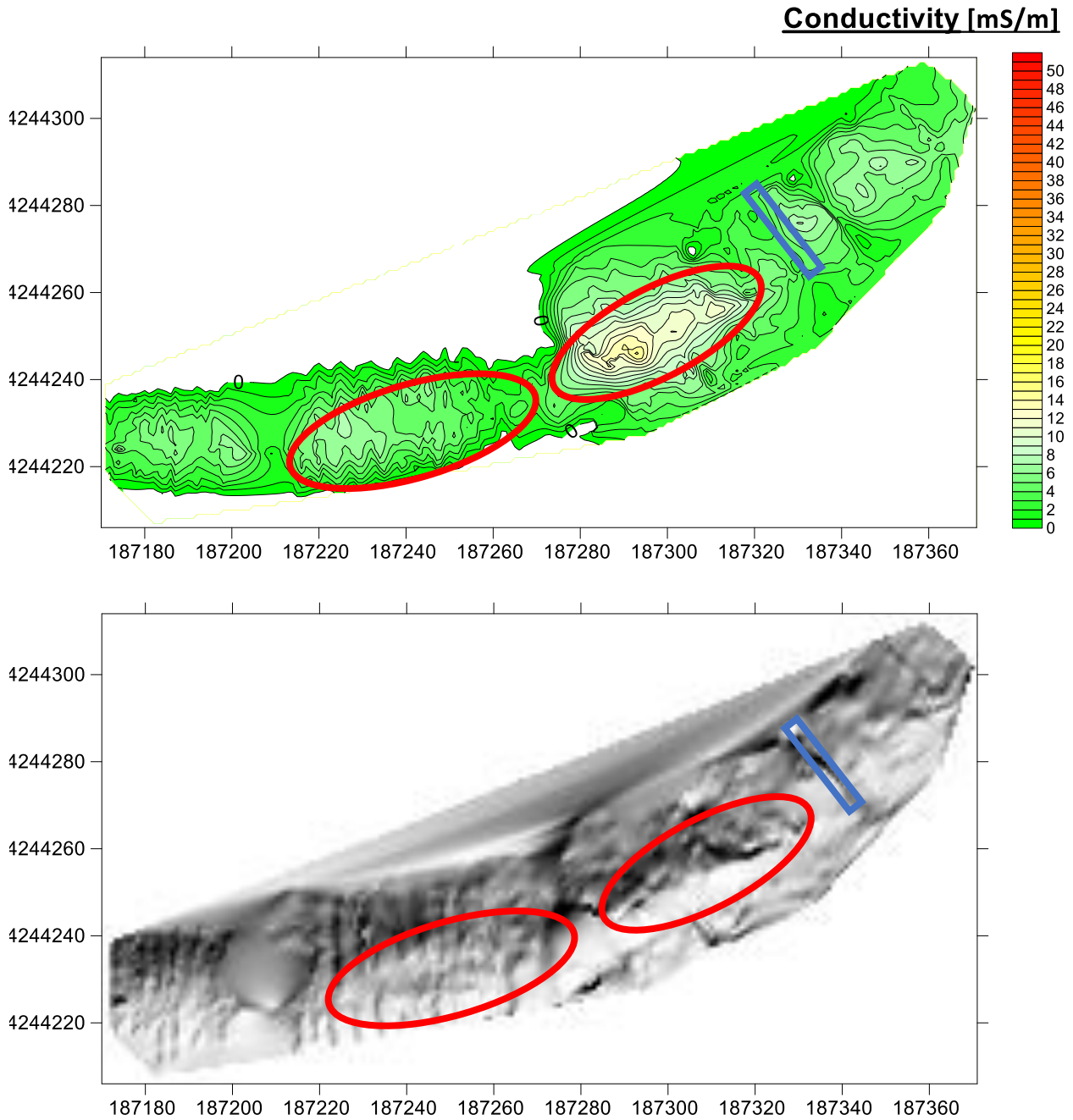
Με τη βοήθεια των οργάνων που αναφέρθηκαν παραπάνω πάρθηκαν μετρήσεις με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 1,5 m και 3 m. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ονομάζονται low και medium αντίστοιχα.

Τέλος, τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Surfer της Golden software και παρουσιάζονται στη συνέχεια. Για κάθε χάρτη που παρήχθη, είτε conductivity είτε in-phase, παρήχθη επίσης άλλος ένας, μόνο με διαφορετική φωτοσκίαση, ώστε να μην επηρεάζεται η εικόνα που λαμβάνουμε από την επιλεγμένη πορεία μετρήσεων. Επίσης, όσον αφορά το βάθος των τριών μέτρων, δημιουργήσαμε επιπρόσθετους χάρτες από τους οποίους αφαιρέσαμε τις ανωμαλίες του πρώτου 1,5 m, ενισχύοντας έτσι τις βαθύτερες ανωμαλίες. Οι συγκεκριμένοι χάρτες θα ονομάζονται medium-low.

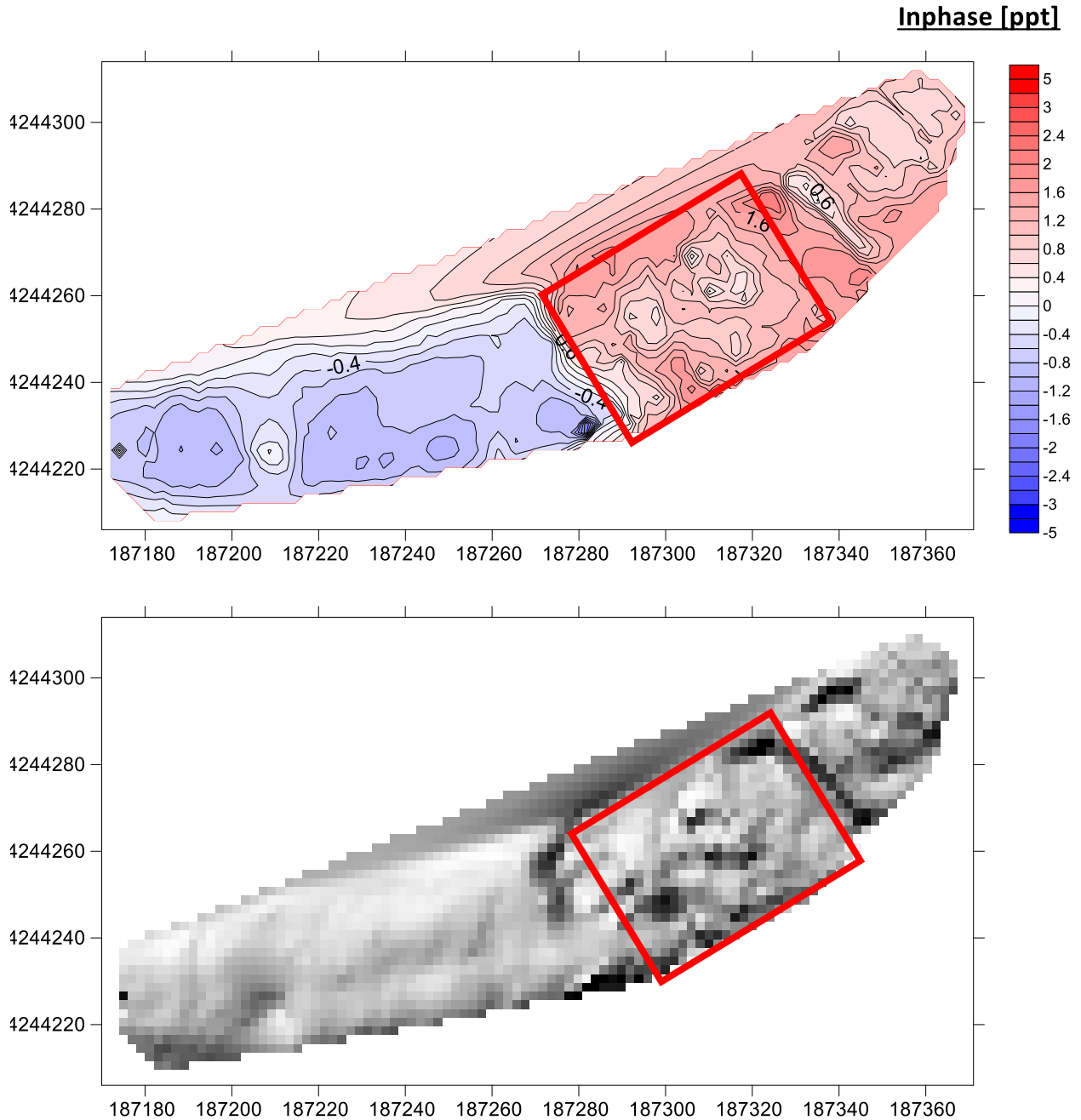
5.2.3 Αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικής έρευνας και ερμηνεία

Περιοχή «Καστέλι α΄»

Βάθος 1,5 m (low):



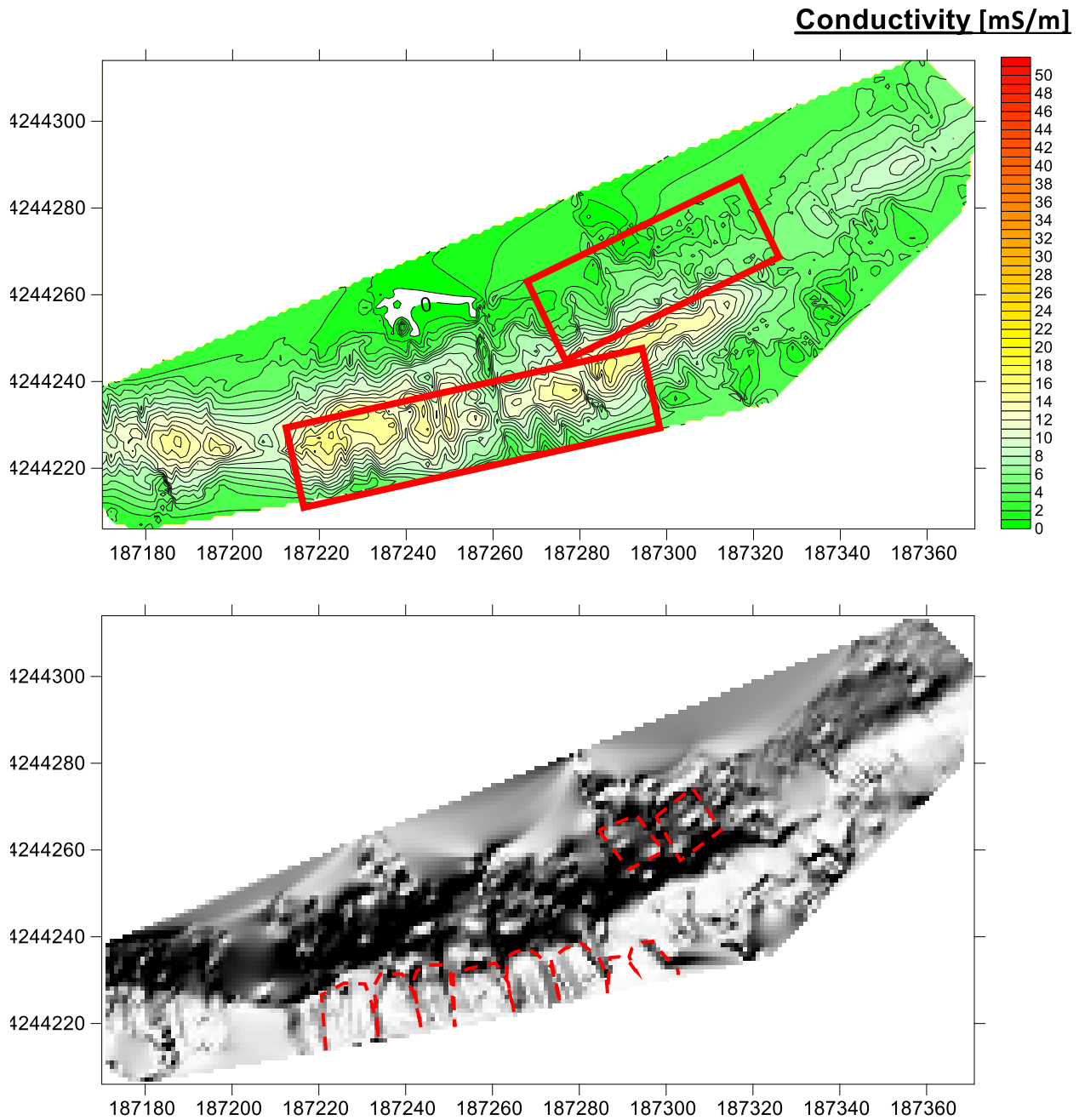
Εικόνα 5.5: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.



Εικόνα 5.6: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας μέχρι το 1,5 m, φαίνεται να υπάρχει κατά κύριο λόγο αδρομερές ασβεστολιθικό υλικό σε συνδυασμό με χαλαρές αποθέσεις, με δύο περιοχές ενδιαφέροντος που επισημαίνονται με τους κόκκινους κύκλους στην Εικόνα 5.5. Επίσης είναι διακριτό και ένα μεγάλο τοιχίο (μπλε παραλληλόγραμμα Εικόνα 5.5), το οποίο είναι ορατό και από την επιφάνεια του εδάφους. Στη σε φάση συνιστώσα του ίδιου βάθους μπορούμε να διακρίνουμε κάποιες σημαντικές ανωμαλίες στο βορειότερο κομμάτι της περιοχής (κόκκινο παραλληλόγραμμα στην Εικόνα 5.6), ωστόσο όχι τόσο έντονες ώστε να έχουν ξεκάθαρη ερμηνεία.

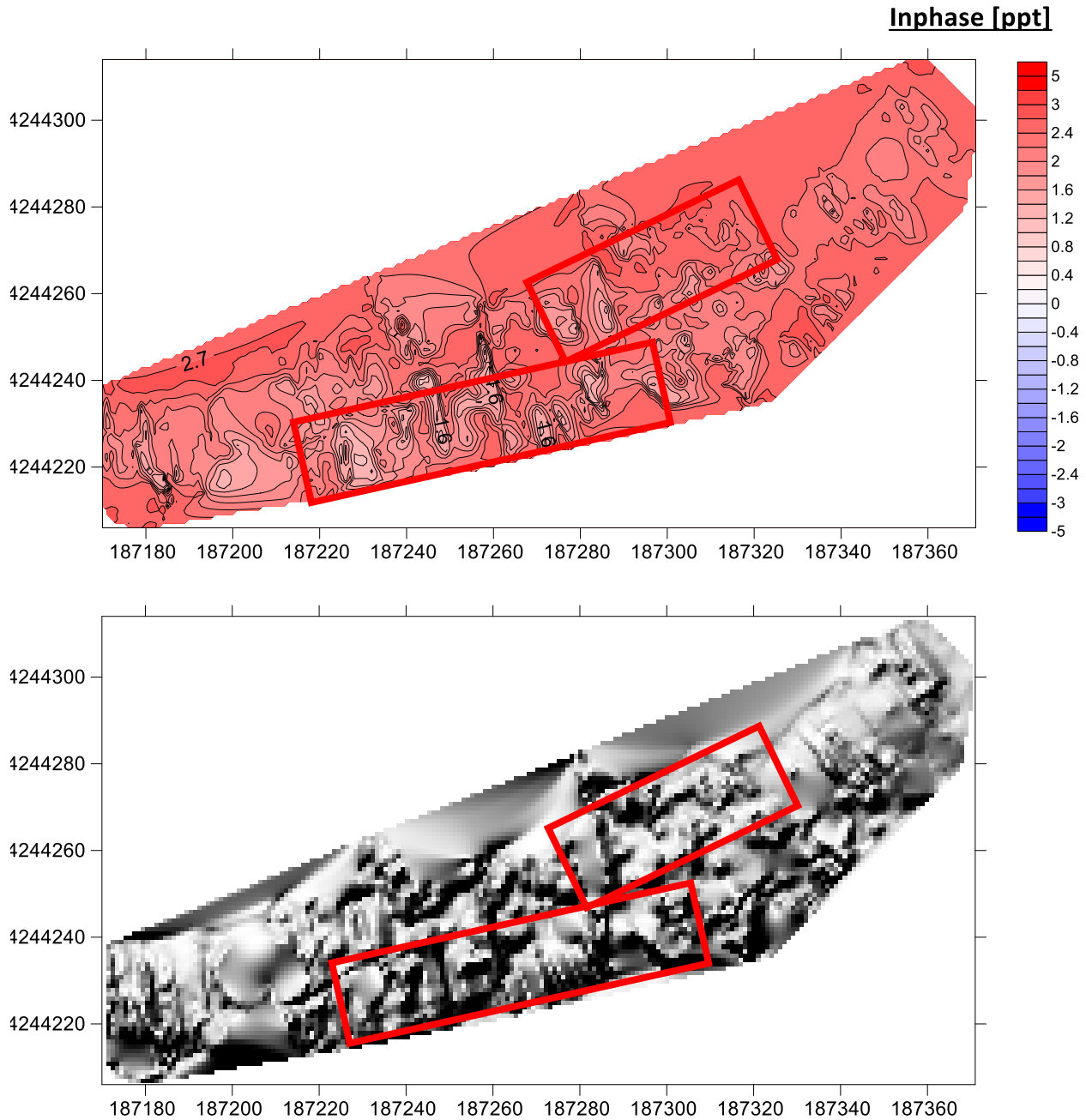
Βάθος 3 m (medium):



Εικόνα 5.7 : Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.

Καθώς περνάμε στο βάθος των τριών μέτρων συναντάμε, με τιμές μεγαλύτερες του μηδενός, λεπτόκοκκο, χαλαρό υλικό στις προαναφερθείσες περιοχές ενδιαφέροντος. Σε περίπτωση που υπάρχουν ασβεστολιθικές ανθρωπογενείς δομές, πληρωμένες με χαλαρά υλικά, θα φαίνονται ως δομές μηδενικής μαγνητικής αγωγιμότητας, εικόνα που μοιάζει με τις προαναφερθείσες περιοχές ενδιαφέροντος (κόκκινα παραλληλόγραμμο στην Εικόνα 5.7).

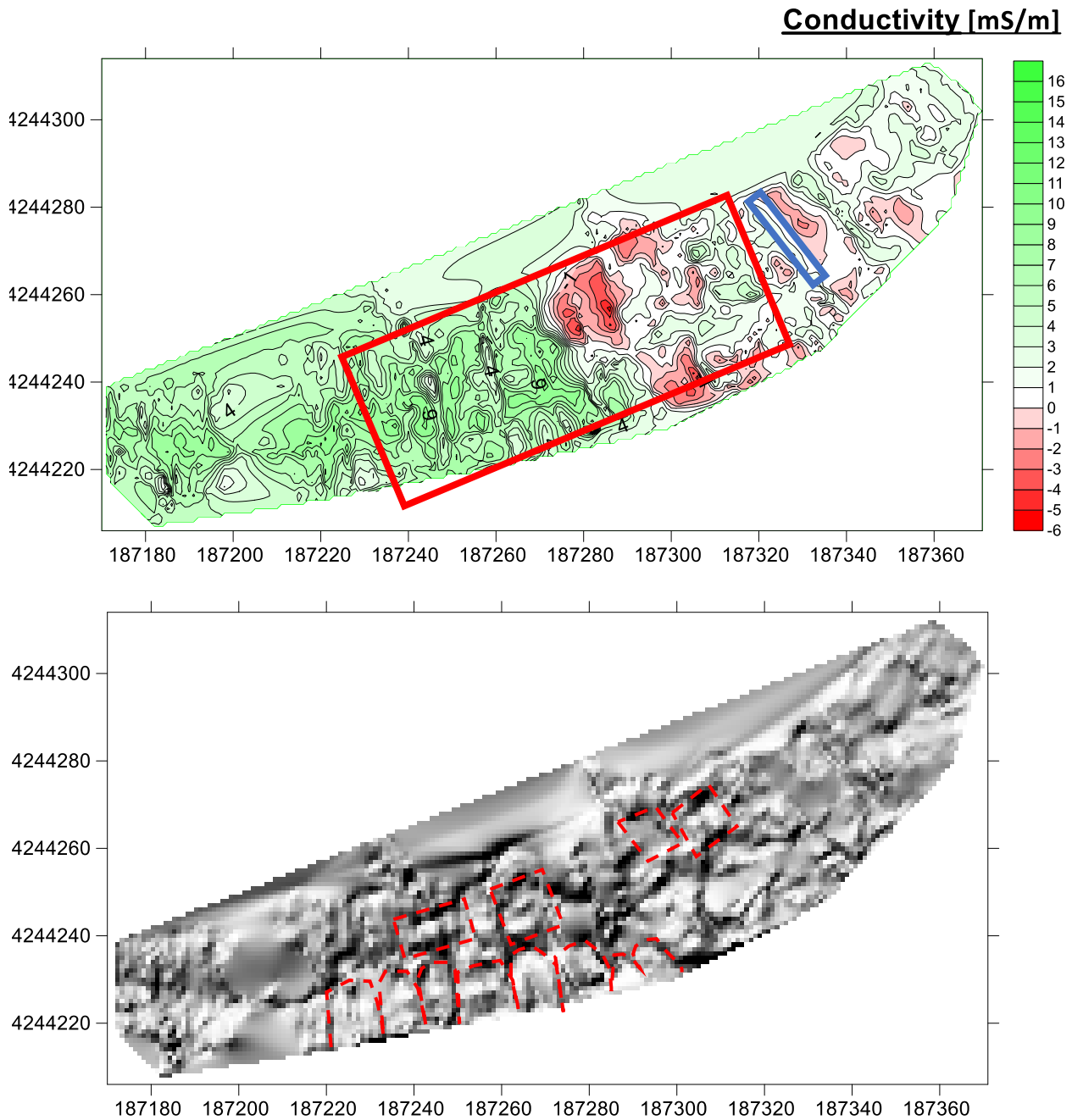
Έτσι, με την βοήθεια της φωτοσκίασης παρατηρούμε μικρές μεμονωμένες περιοχές, σαν καμάρες, αλλά και τετραγωνισμένες, που θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν μικρά κτίσματα (κόκκινα διακεκομμένα σχήματα στην Εικόνα 5.7). Το τοίχιο ωστόσο, που είναι ορατό από την επιφάνεια, δεν είναι ορατό στα 3 m, γεγονός που μας κάνει να πιστεύουμε πως δεν φτάνει στο συγκεκριμένο βάθος.



Εικόνα 5.8: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.

Στις μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας των 3 m, φαίνονται πάλι οι επίσης διάσπαρτες τετραγωνισμένες περιοχές (κόκκινα παραλληλόγραμμα στην Εικόνα 5.8), όχι όμως με τόσο ξεκάθαρα όρια και διαστάσεις, κάτι που είναι λογικό για την συγκεκριμένη μέθοδο.

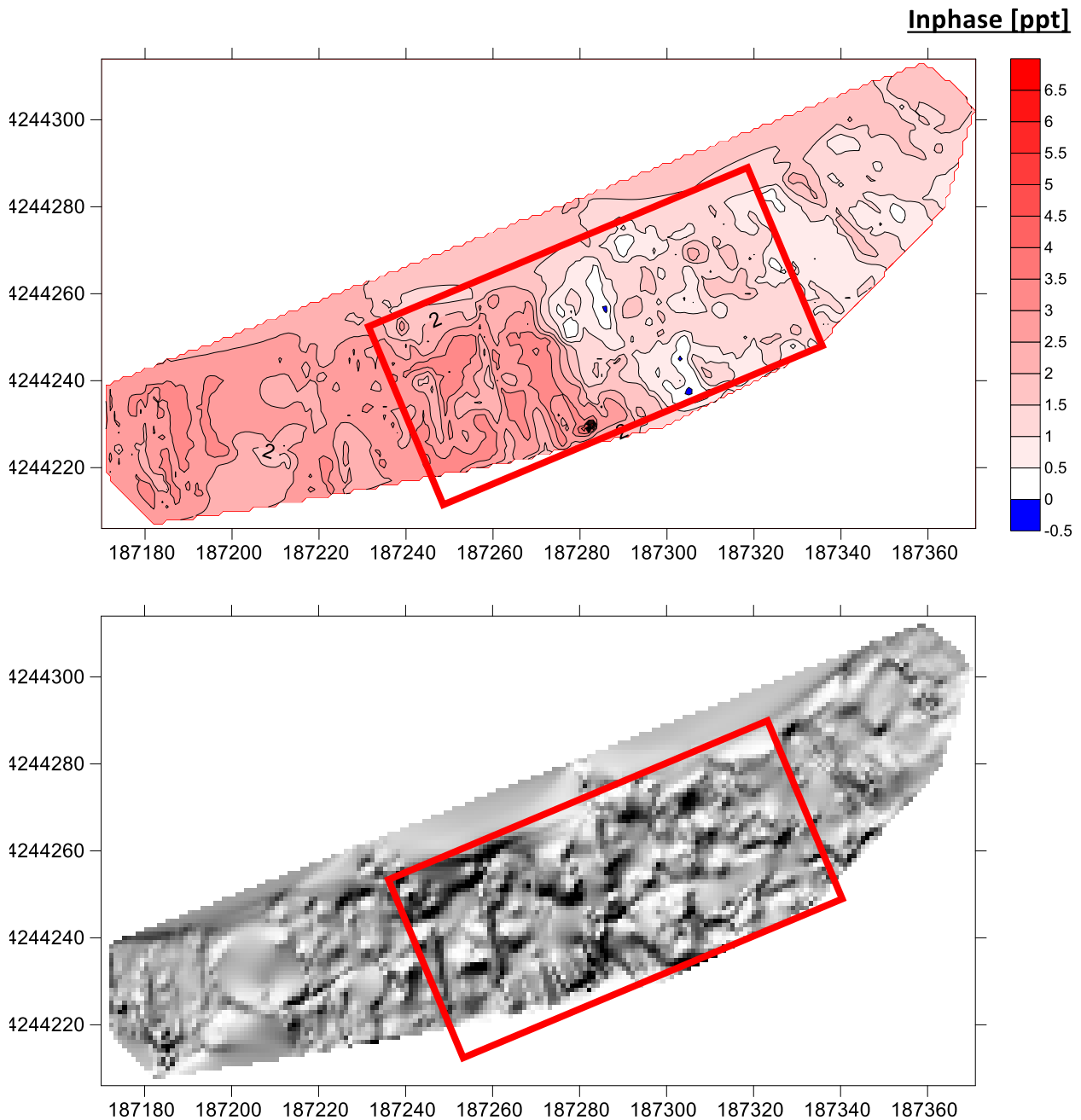
Βάθος 3 m (medium-low):



Εικόνα 5.9 : Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.

Αφαιρώντας τις ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m, επίσης ενδιαφέρουσες ανωμαλίες φαίνονται και στην Εικόνα 5.9 (κόκκινο παραλληλόγραμμο και κόκκινος διακεκομμένος σχηματισμός) και με την φωτοσκίαση ακόμα πιο ξεκάθαρα (κόκκινα διακεκομμένα σχήματα στην Εικόνα 5.9), κάτι που ενισχύει το ενδεχόμενο ύπαρξης κτισμάτων στο συγκεκριμένο σημείο. Επιπροσθέτως, το τοιχίο που δεν ήταν ορατό

προηγούμενος στο ίδιο βάθος, εμφανίζεται στην Εικόνα 5.9, πράμα που δηλώνει πως επεκτείνεται βαθύτερα τουλάχιστον μέχρι τα 3 m και στην Εικόνα 5.7 αλλά η επιρρέασή του από τις ρηχότερες ανωμαλίες δεν το καθιστά ορατό.



Εικόνα 5.10: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.

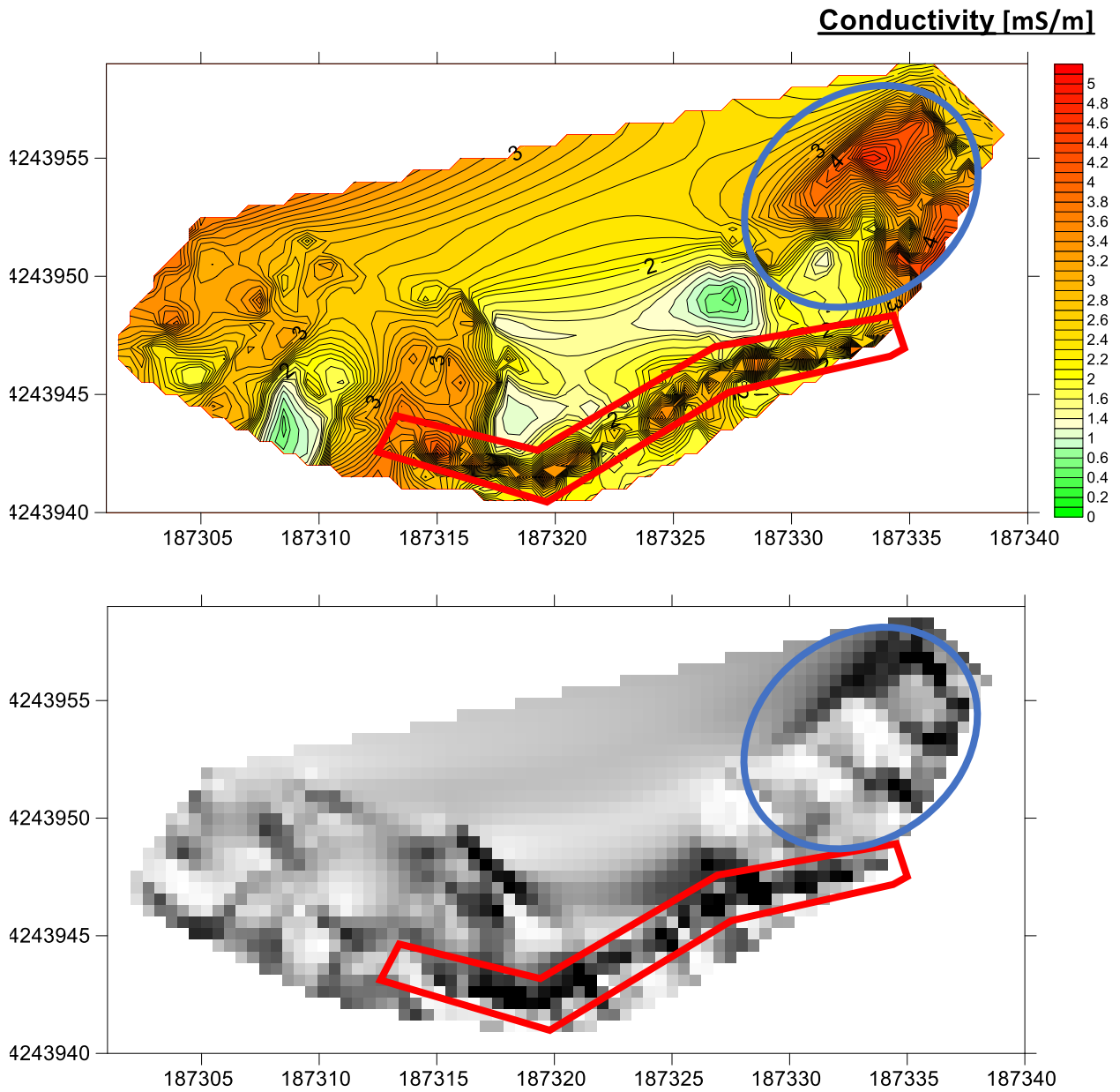
Στην σε φάση συνιστώσα των 3 m, απαλλαγμένη από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m, για άλλη μια φορά φαίνονται αρκετές ανωμαλίες απροσδιόριστων διαστάσεων και ορίων, ωστόσο η εμφάνιση επίσης δεν είναι καθόλου ασήμαντη, καθώς σε συνδυασμό με τις προηγούμενες ενδείξεις κάνει την ύπαρξη αρχαίων κτισμάτων στο σημείο ακόμη πιο ελπιδοφόρα.



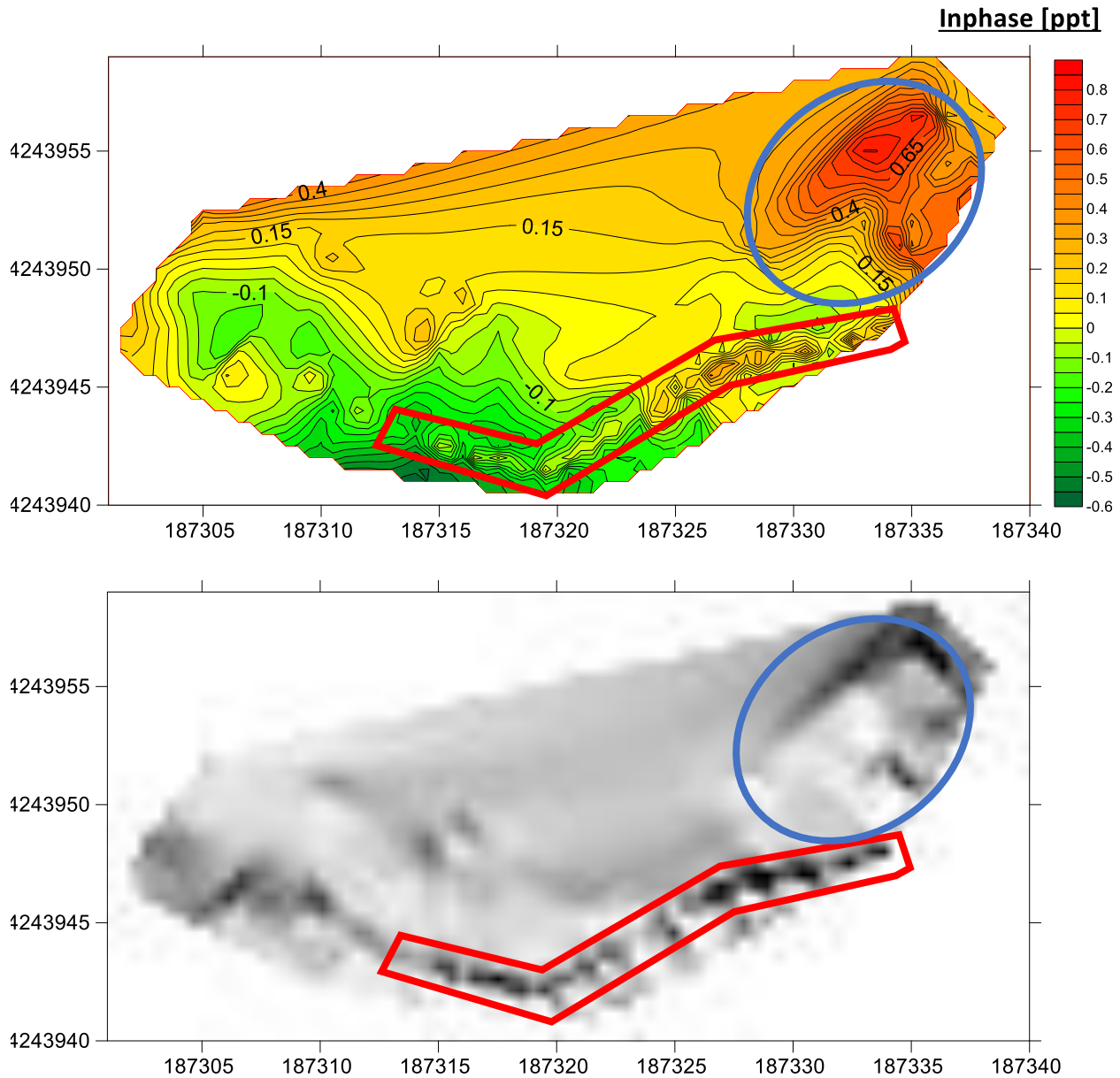
Εικόνα 5.11: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένος από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m και τοποθετημένος στο Google Earth.

Περιοχή «Καστέλι Β΄»

Βάθος 1,5 m (low):



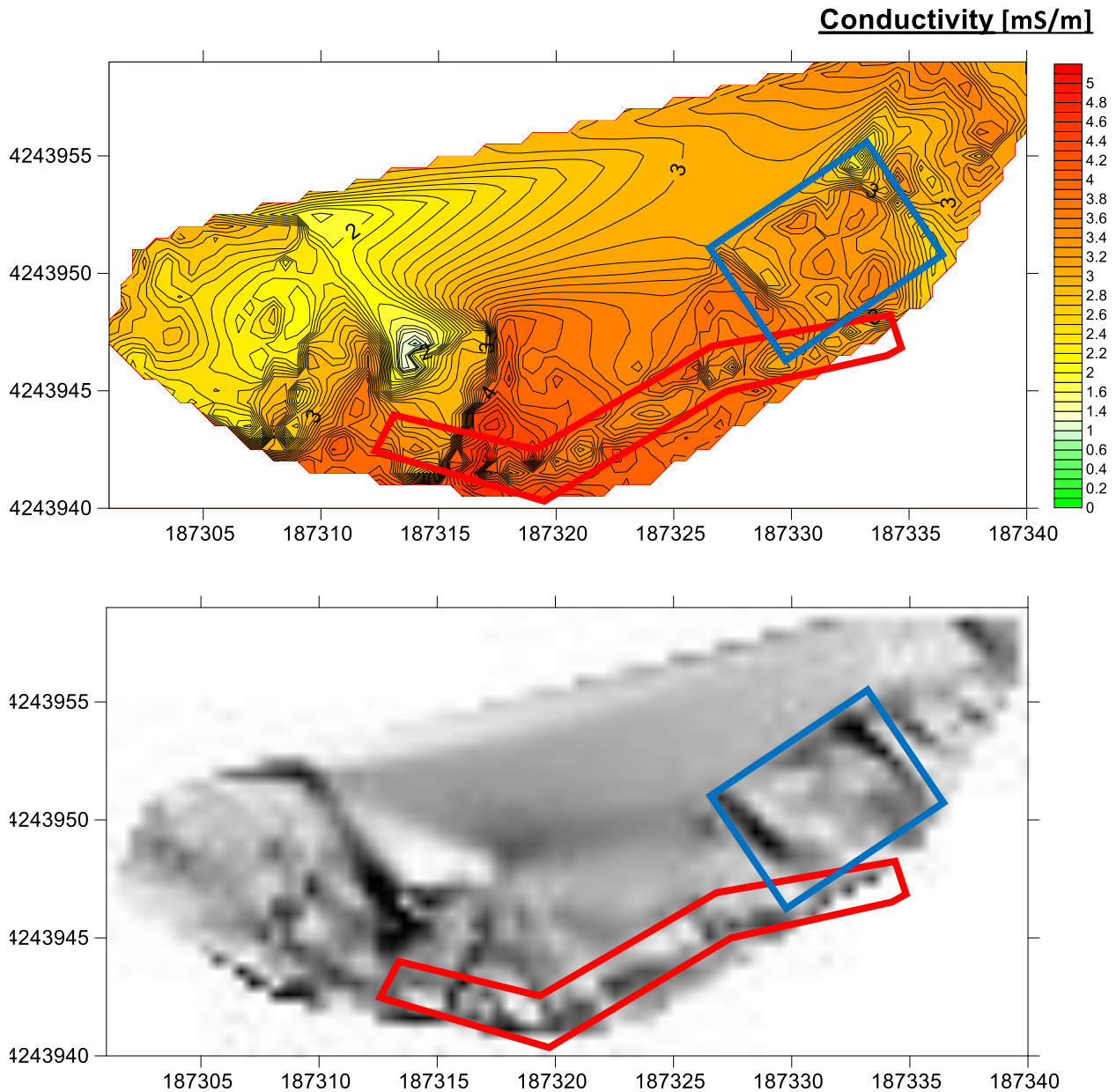
Εικόνα 5.12: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.



Εικόνα 5.13: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.

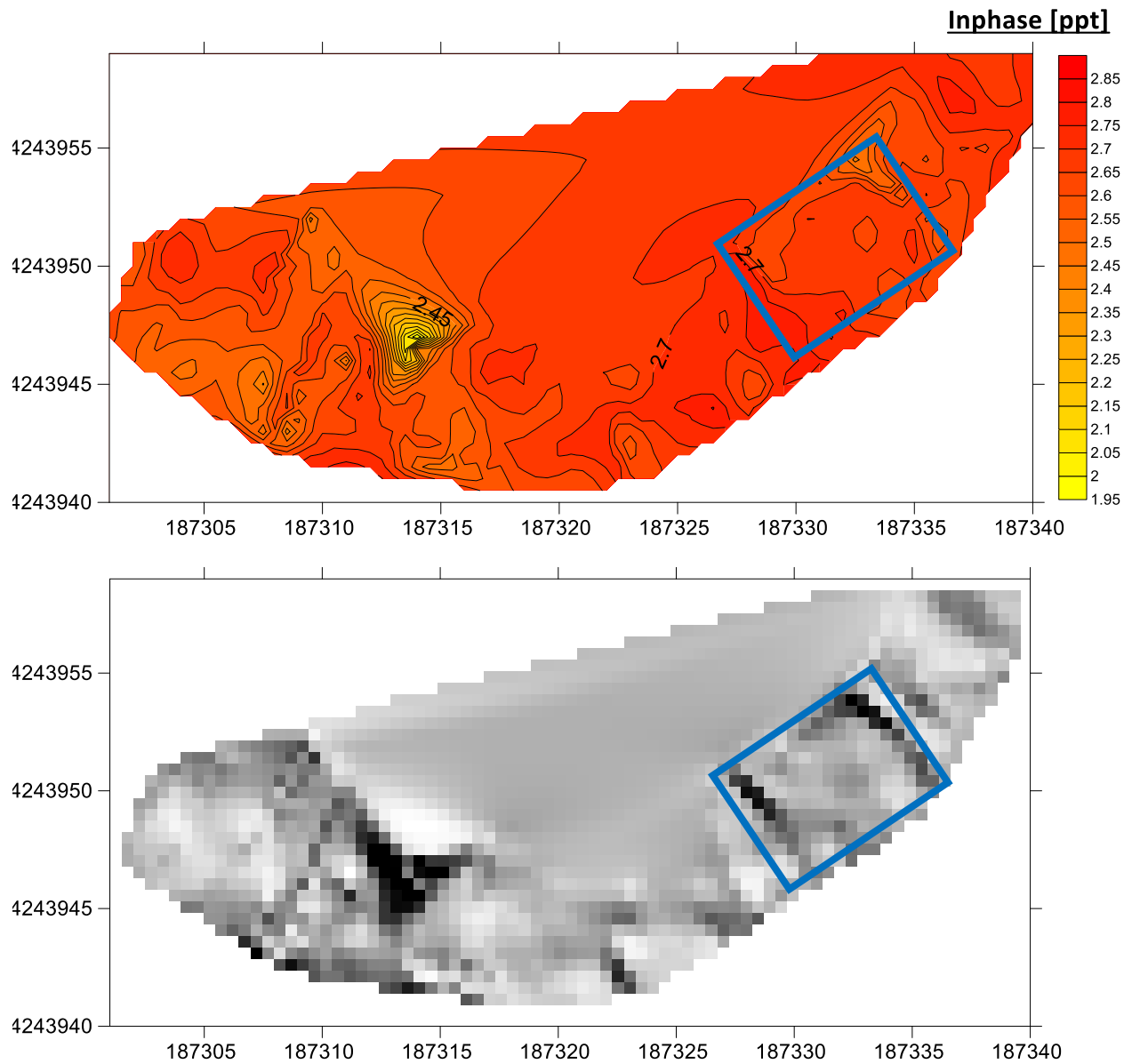
Η περιοχή «Καστέλι β'», μέχρι το 1,5 m, παρουσιάζει σε γενικές γραμμές παρόμοια εικόνα με την περιοχή «Καστέλι α'», δηλαδή κατά κύριο λόγο επικρατεί αδρομερές ή ασβεστολιθικό υλικό. Παρατηρούνται κυρίως δύο ενδιαφέρουσες ανωμαλίες, η πρώτη διασχίζει το νοτιότερο μέρος της περιοχής (κόκκινο περίγραμμα επίσης εικόνες 5.12 και 5.13) και θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε ένα μεγάλο τείχος. Η δεύτερη βρίσκεται στο ανατολικότερο τμήμα της (μπλε κύκλος επίσης Εικόνες 5.12 και 5.13), ωστόσο εκεί δεν βλέπουμε ξεκάθαρα κάποια συγκεκριμένη δομή.

Βάθος 3 m (medium):



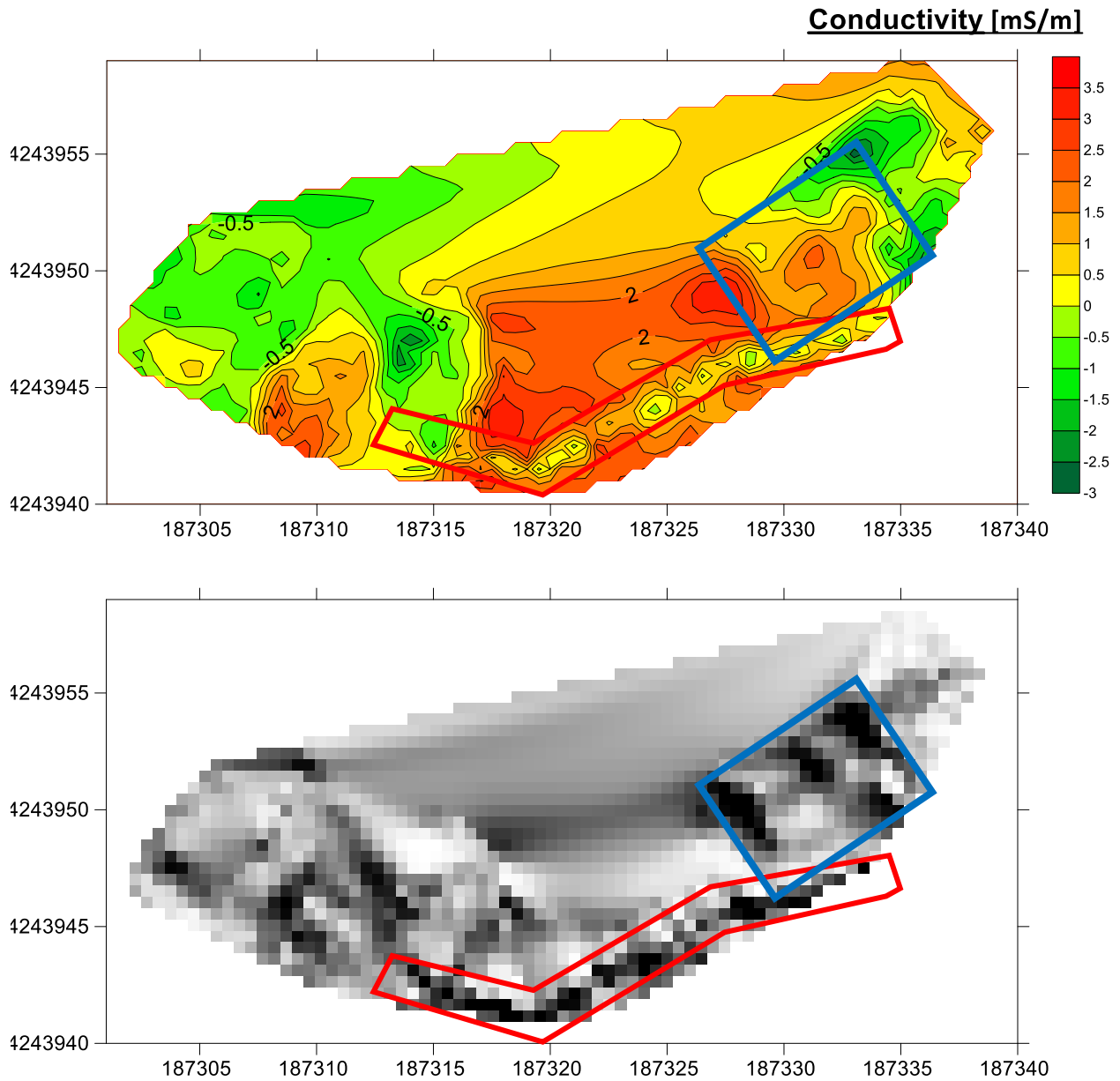
Εικόνα 5.14: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.

Εμβαθύνοντας στα 3 m, στις μετρήσεις μαγνητικής αγωγιμότητάς, εξακολουθούμε να βλέπουμε την νοτιότερη ανωμαλία (περιγεγραμμένη με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 5.14), πίσω όμως από την δεύτερη και ανατολικότερη ανωμαλία, εμφανίζεται μια άλλη παραλληλόγραμμη (μπλε παραλληλόγραμμο στην Εικόνα 5.14), η οποία μοιάζει πολύ περισσότερο με κτίσμα. Η ίδια ανωμαλία φαίνεται και στις μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας (μπλε παραλληλόγραμμο στην Εικόνα 5.15).



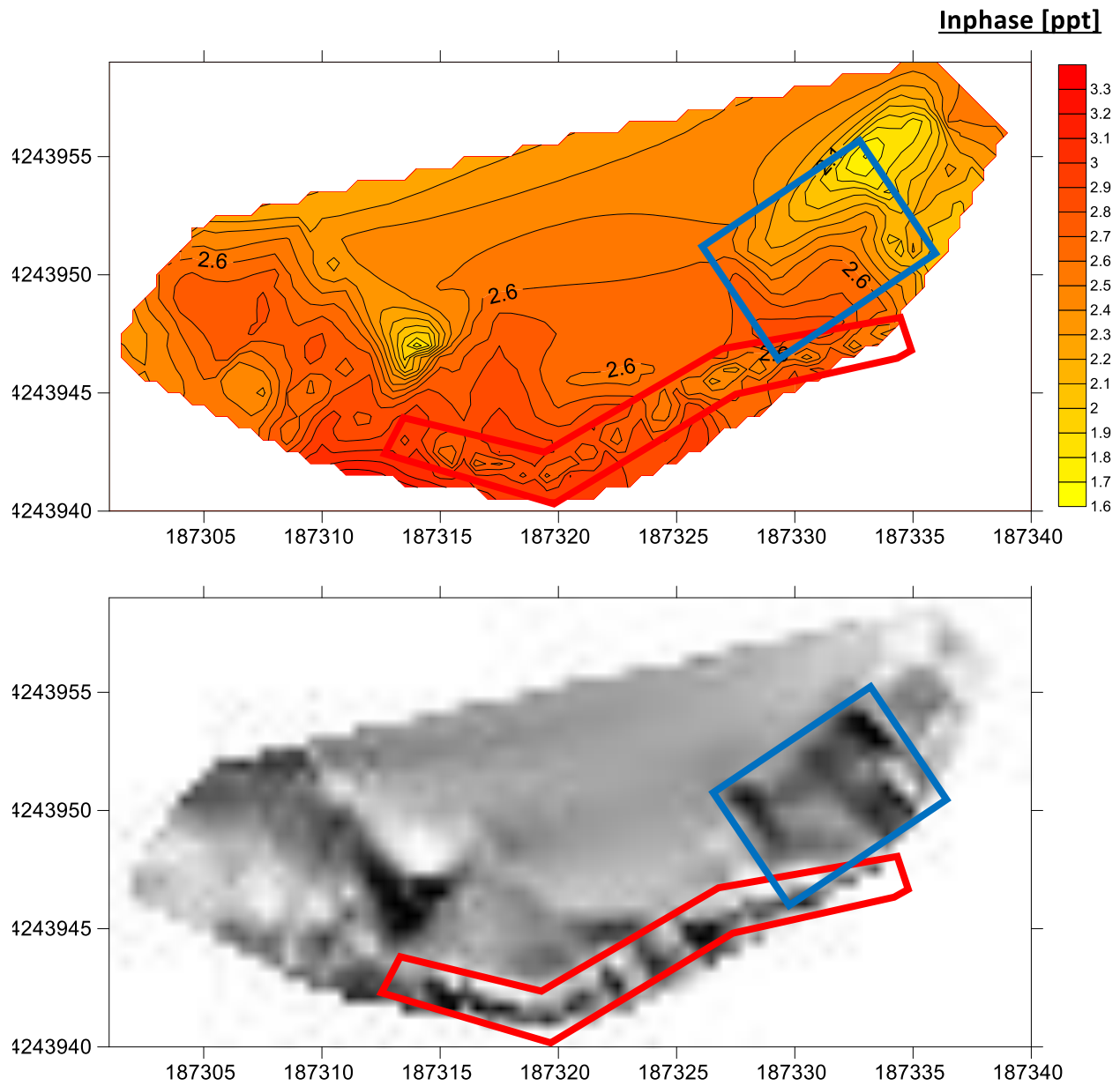
Εικόνα 5.15 : Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.

Βάθος 3 m (medium-low):



Εικόνα 5.16: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.

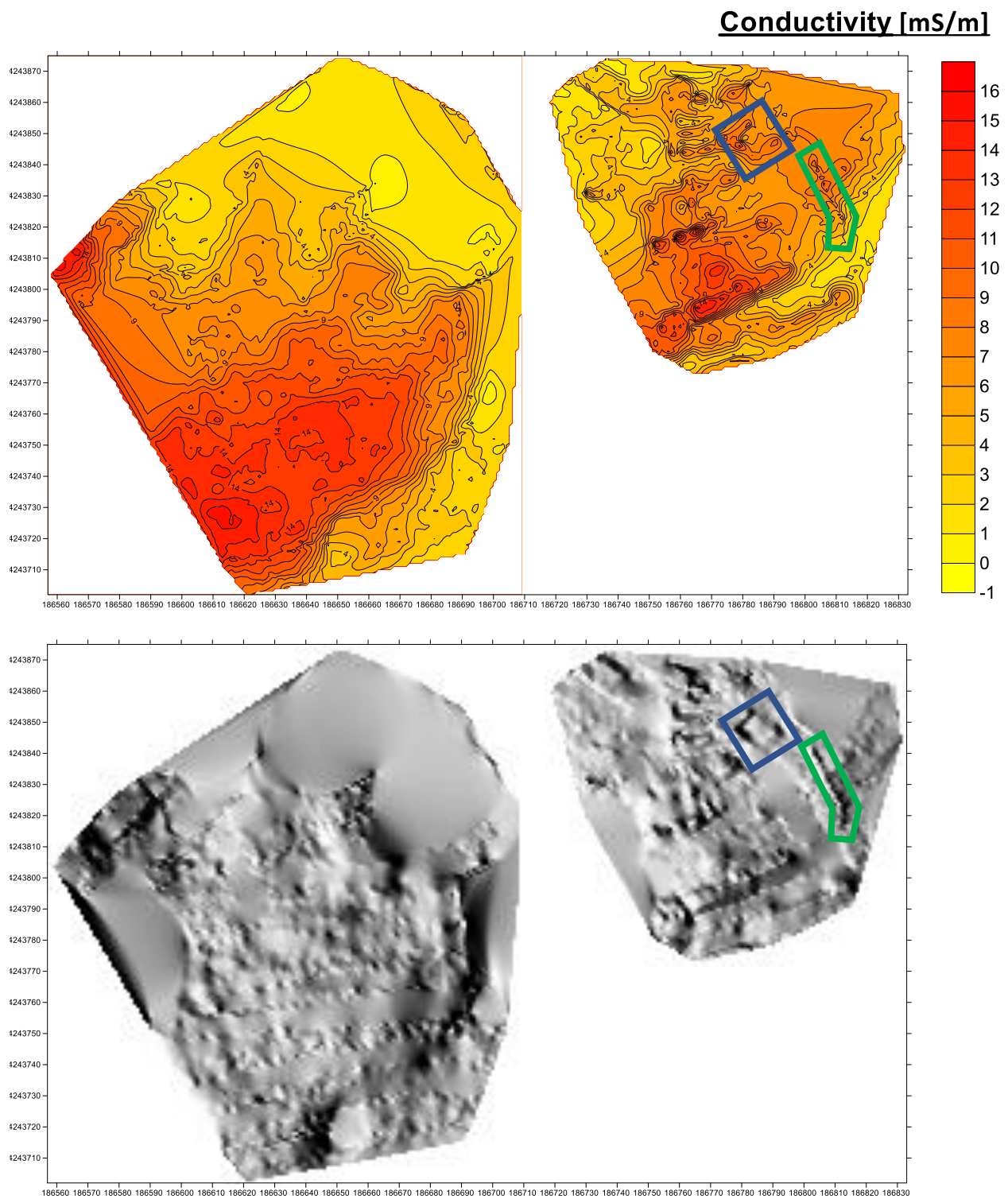
Τέλος, αφαιρώντας το θόρυβο από τις ρηχότερες ανωμαλίες, επίσης Εικόνες 5.16 και 5.17 φαίνονται πλέον πιο καθαρά οι δύο ανωμαλίες, και στα δύο είδη μετρήσεων, κάτι που σημαίνει ότι οι δύο δομές απλώνονται τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 3 m. Οι δομές αυτές θα μπορούσαν κάλλιστα να αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο τοιχίο με ένα κτίσμα στο τέλος του.



Εικόνα 5.17: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.

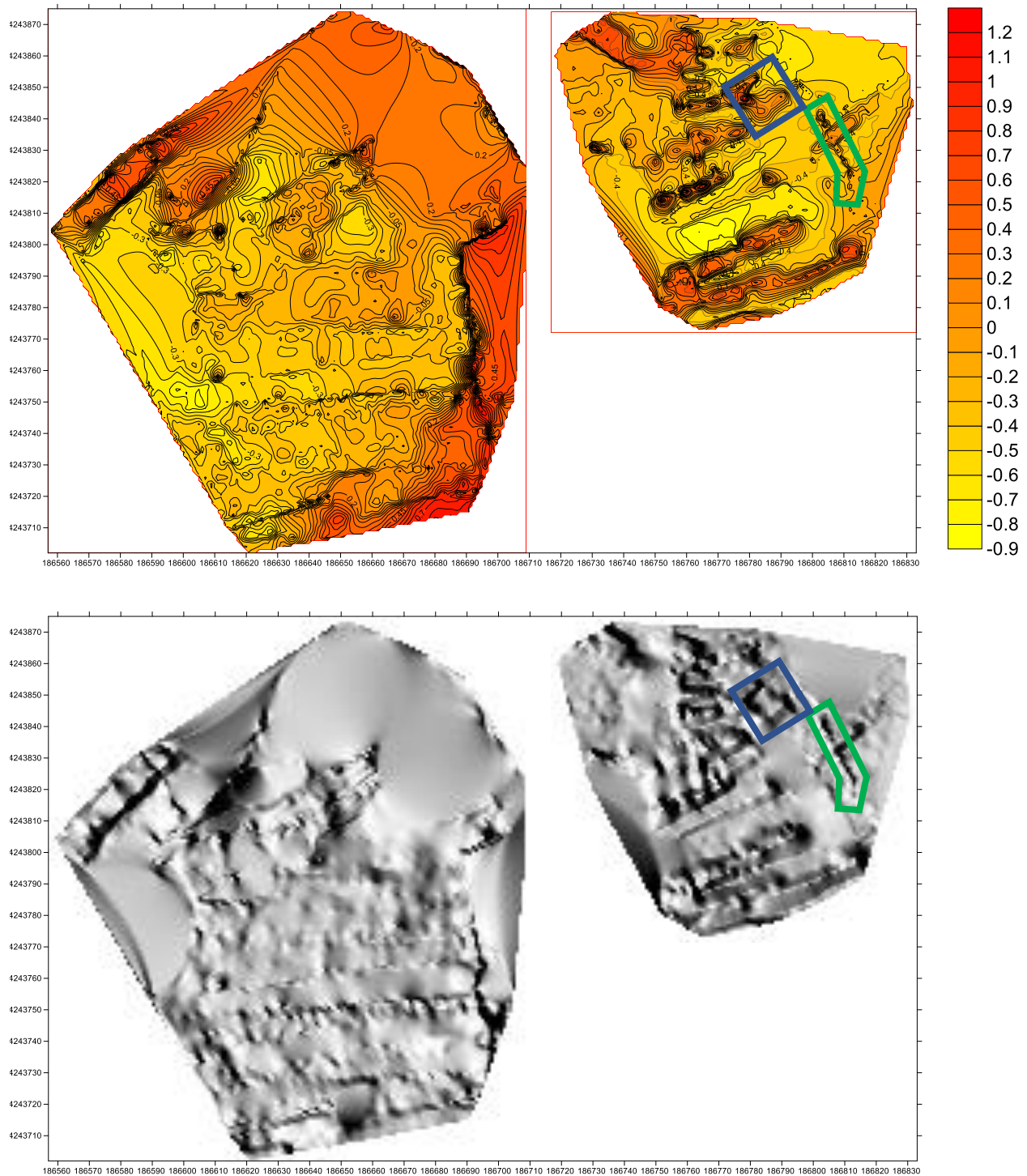
Περιοχή «Λιβάδι α΄»

Βάθος 1,5 m (low):

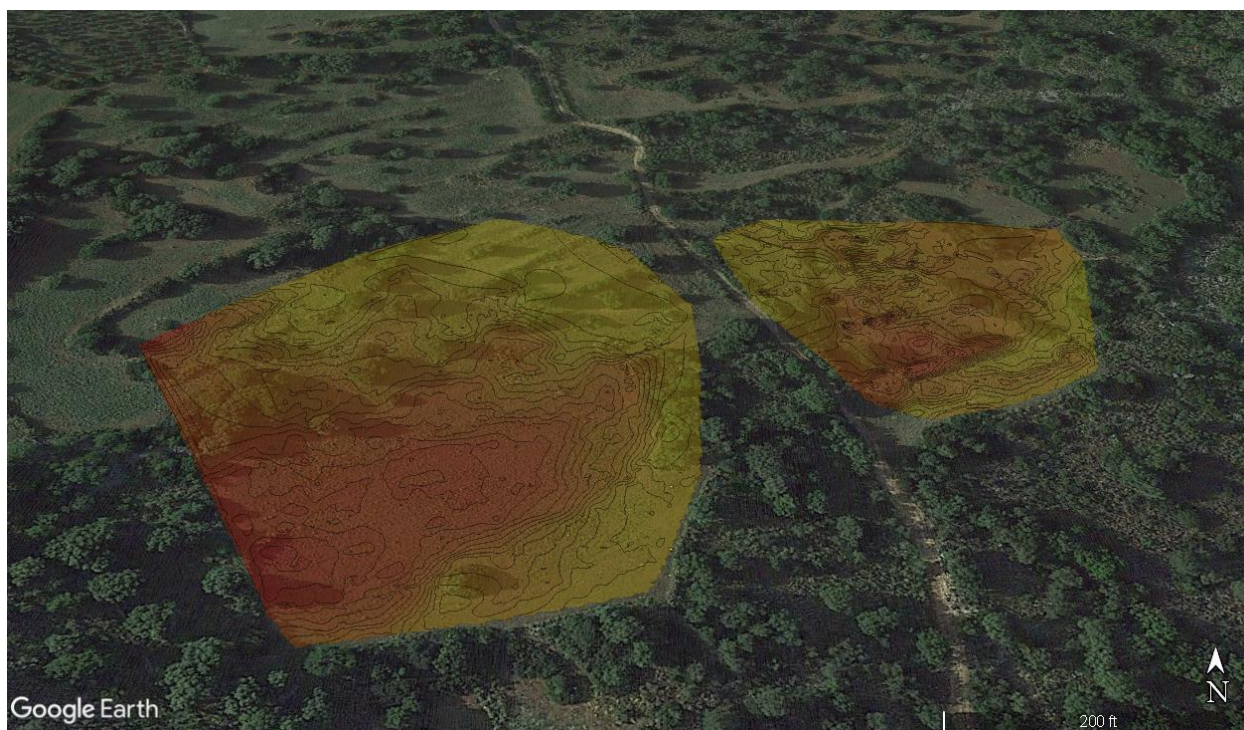


Εικόνα 5.18: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.

Inphase [ppt]



Εικόνα 5.19: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m.



Εικόνα 5.20: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 1,5 m, τοποθετημένος στο Google Earth.

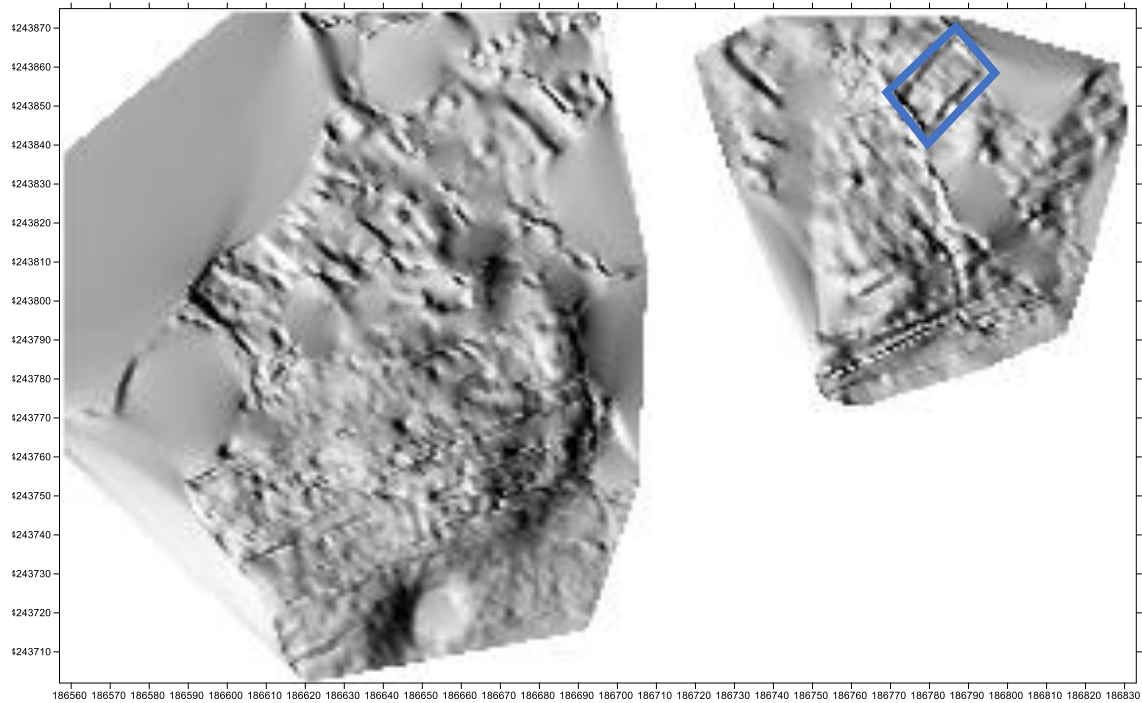
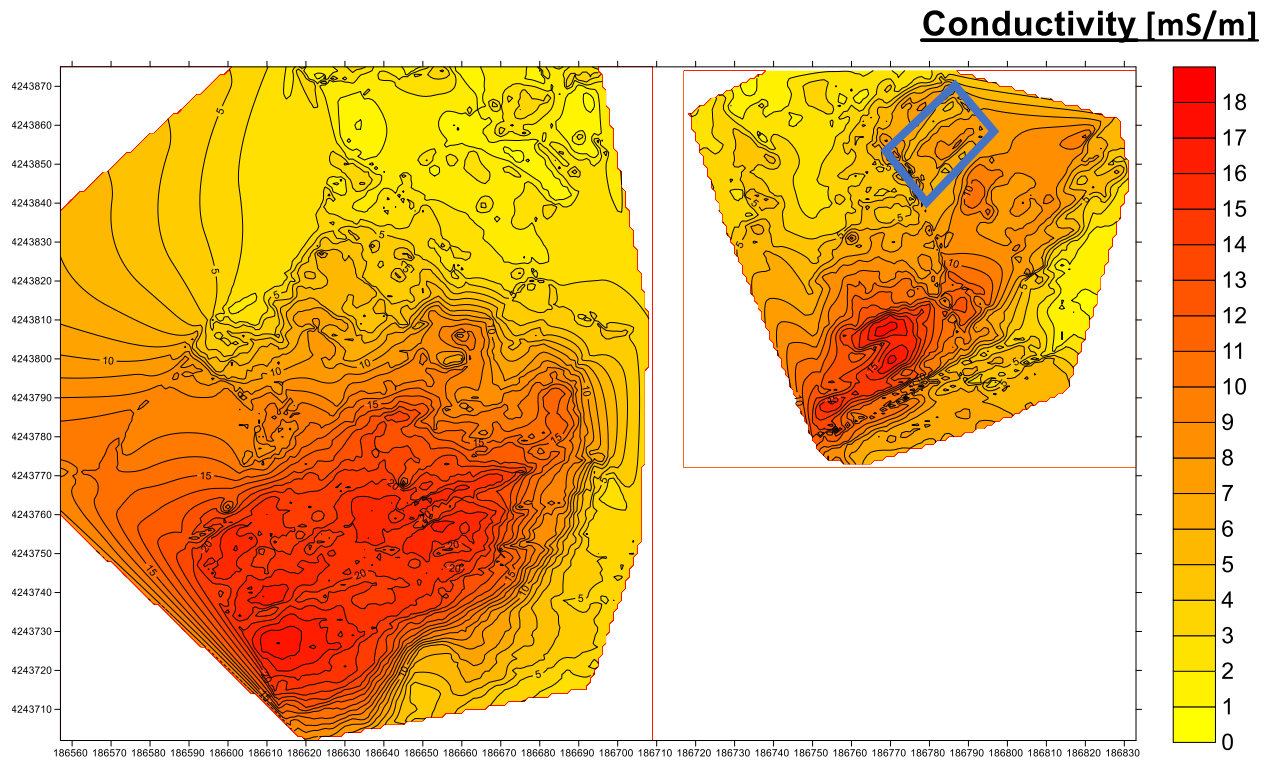
Στην Περιοχή «Λιβάδι α΄» εξετάστηκε μια αρκετά μεγάλη έκταση, ωστόσο μόνο δύο ενδιαφέρουσες ανωμαλίες εμφανίστηκαν στον βορειοανατολικό τμήμα της. Σε γενικές γραμμές η περιοχή δεν διαφέρει πολύ από τις προηγούμενες, με την διαφορά ότι κυριαρχούν χαλαρές αποθέσεις, ενώ η ύπαρξη αδρομερούς ασβεστολιθικού υλικού, στην συγκεκριμένη περιοχή είναι λίγο πιο σπάνια.

Μέχρι το βάθος διασκόπησης 1,5 m, οι δύο ενδιαφέρουσες ανωμαλίες, είναι κοινές και εμφανίζονται τόσο στους χάρτες μαγνητικής αγωγιμότητας, όσο και σε αυτούς της σε φάση συνιστώσας. Η πρώτη, (μπλε παραλληλόγραμμο της Εικόνες 5.18 και 5.19) φαίνεται να είναι μια σχεδόν τετραγωνισμένη δομή που θυμίζει μικρό κτίσμα πληρωμένο με χαλαρές αποθέσεις. Η δεύτερη (πράσινο περίγραμμα στις Εικόνες 5.18 και 5.19), φαίνεται σαν μικρό τοιχίο, οι μετρήσεις αυτές όμως δεν είναι αρκετές για να βγει κάποιο συγκεκριμένο πόρισμα.

Περνώντας στα βαθύτερα στρώματα, στη μέτρηση με βάθος διασκόπησης τα 3 m, παρατηρούμε ότι η πρώτη ανωμαλία βρίσκεται πιο βαθιά, ως όμως ένα μεγαλύτερο παραλληλόγραμμο κτίσμα (μπλε παραλληλόγραμμο στις Εικόνες 5.21 και 5.22), ενώ η δεύτερη ανωμαλία απουσιάζει από τις μετρήσεις.

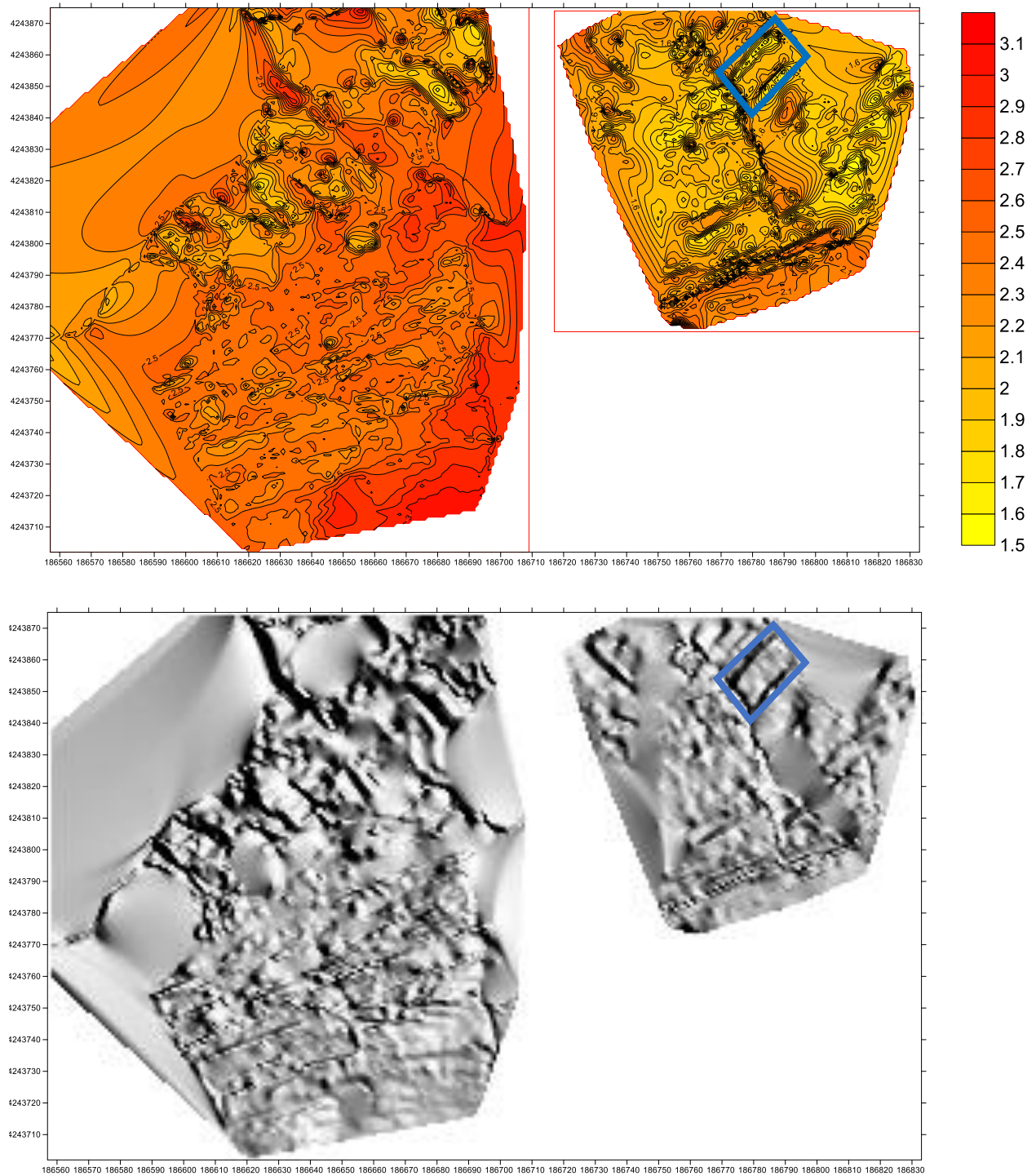
Στο τελευταίο στάδιο, όπως και στις υπόλοιπες περιοχές, αφαιρέσαμε τις μετρήσεις που έγιναν μέχρι το βάθος του 1,5 m από τις μετρήσεις με βάθος διασκόπησης τα 3 m. Το αποτέλεσμα ήταν να επαληθευτεί η μεγαλύτερη μορφή της πρώτης ανωμαλίας (μπλε παραλληλόγραμμο στις Εικόνες 5.23 και 5.24) στα 3 m, αλλά και η επανεμφάνιση της δεύτερης ανωμαλίας (πράσινο περίγραμμα στις Εικόνες 5.23 και 5.24). Αυτό συνέβη προφανώς διότι στις Εικόνες 5.21 και 5.22, ο θόρυβος από τα ρηγά στρώματα δεν καθιστούσε την ανωμαλία ορατή. Αυτό σημαίνει ότι η δεύτερη ανωμαλία, ή αλλιώς πιθανό τοιχίο, απλώνεται τελικά και αυτό τουλάχιστον μέχρι τα 3 m.

Βάθος 3 m (medium):



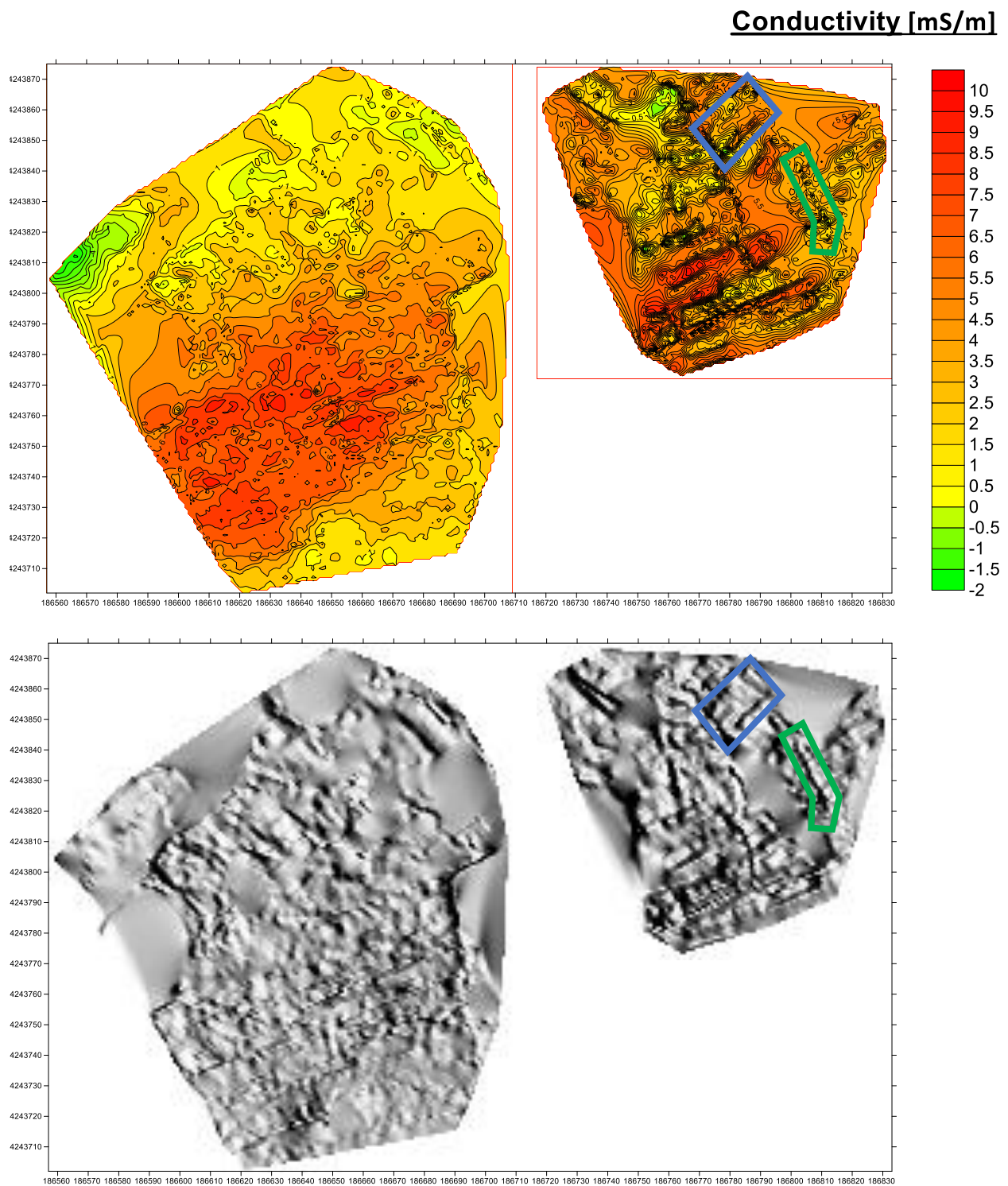
Εικόνα 5.21: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.

Inphase [ppt]



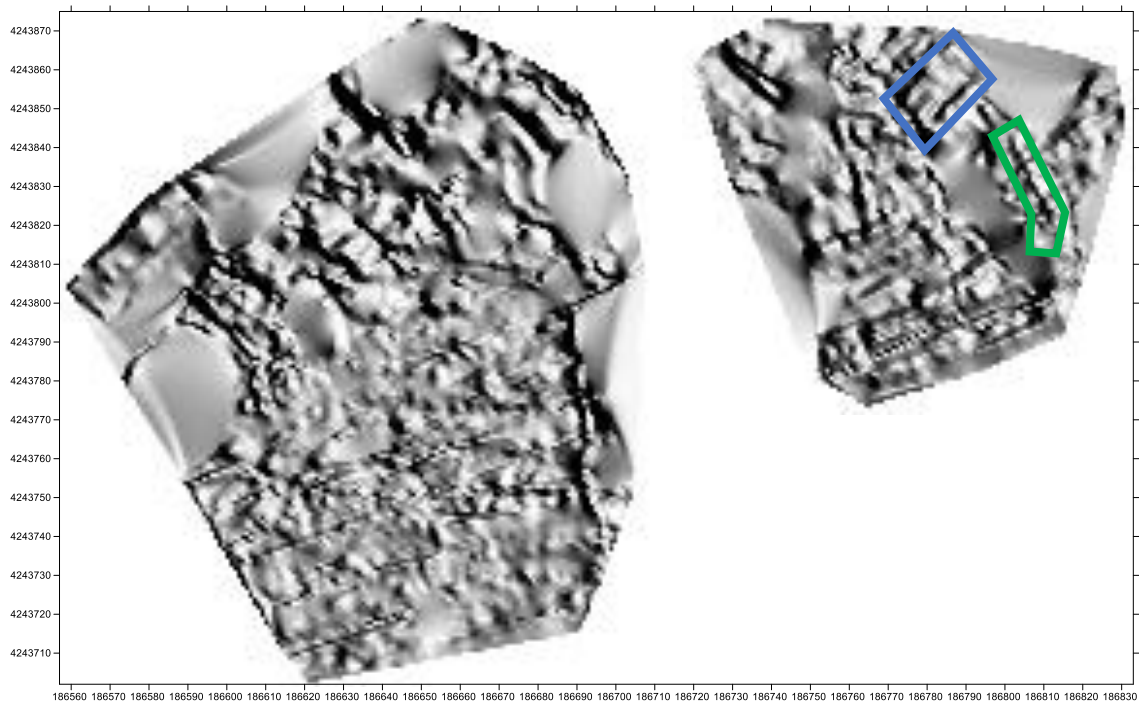
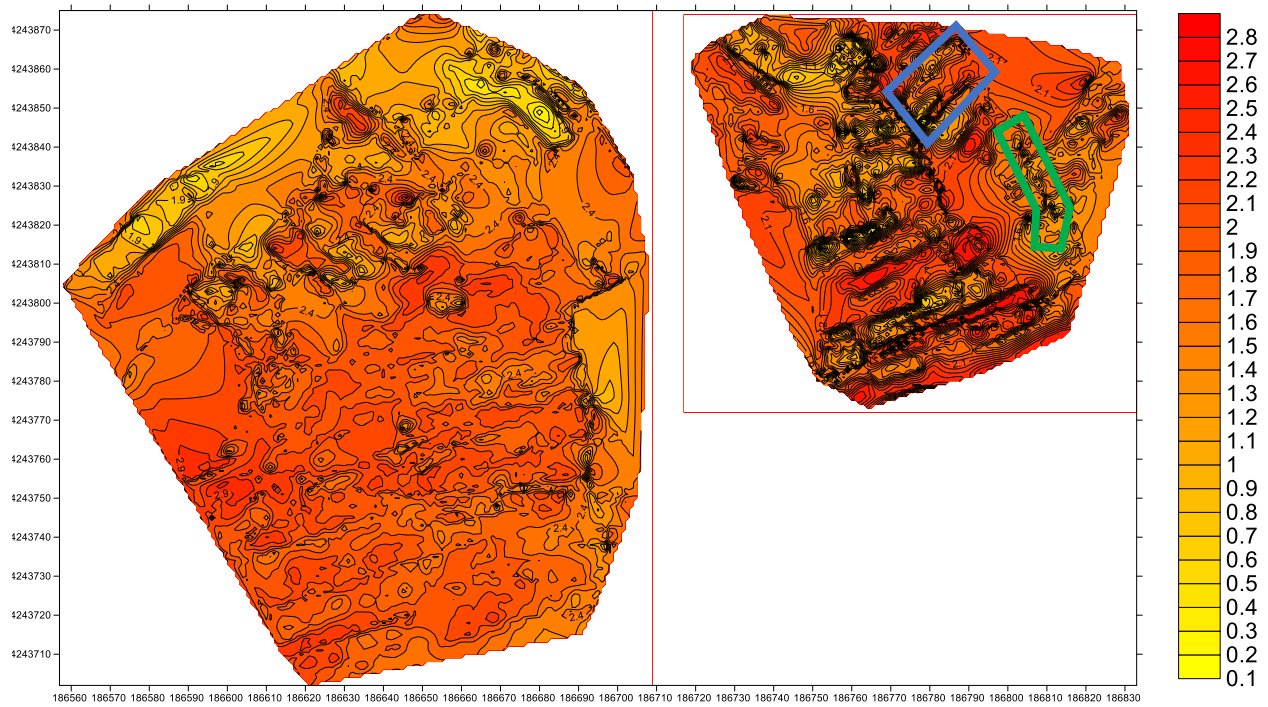
Εικόνα 5.22: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.

Βάθος 3 m (medium-low):



Εικόνα 5.23: Χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.

Inphase [ppt]



Εικόνα 5.24: Χάρτες κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m, απαλλαγμένοι από ανωμαλίες μέχρι το 1,5 m.

5.3 Γεωραντάρ (GPR)

5.3.1 Γενικά

Η δεύτερη κατά σειρά μέθοδος που εφαρμόστηκε στις περιοχές «Καστέλι α΄» και «Λιβιάδι α΄» ήταν αυτή του γεωραντάρ ή GPR (Ground Penetrating Radar). Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η γρήγορη λήψη των αποτελεσμάτων καθώς και η αξιοπιστία της. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό πιθανών ανωμαλιών, που υποδηλώνουν ανθρωπογενή παρέμβαση, αρχαίων δομών καθώς και ιζηματογενέσεις που θα είναι αποτελέσματα αυτών των δομών. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται κυρίως για μια πρώτη εκτίμηση και στη συνέχεια γίνεται περαιτέρω ανάλυση στο εργαστήριο έτσι ώστε να ενισχυθούν τα σήματα και να παραλάβουμε πιο ευδιάκριτα αποτελέσματα.

Στην περιοχή «Καστέλι α΄» χρησιμοποιήθηκε μία κεραία των 250 MHz επίσης MALA Geoscience, ενώ στη περιοχή «Λιβιάδι α΄» χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός, με μία των 500 MHz, της ίδιας εταιρίας.

Στην περιοχή «Καστέλι α΄» πραγματοποιήθηκαν συνολικά 20 τομές. Η τοποθέτησή της φαίνεται στην Εικόνα 5.25, ενώ στην Εικόνα 5.26, φαίνεται ο τρόπος που τοποθετήθηκαν οι 13 τομές στην περιοχή «Λιβιάδι α΄».

Με την κεραία των 250MHz, η οποία έχει μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης, μπορούμε να παρατηρήσουμε κυρίως την στρωματογραφία της περιοχής ενώ οι τομές συνδυασμού των δύο κεραίων έχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα και διευκολύνουν στον εντοπισμό τοπικών δομών.



Εικόνα 5.25 : Τομές GPR στην περιοχή «Καστέλι α΄»



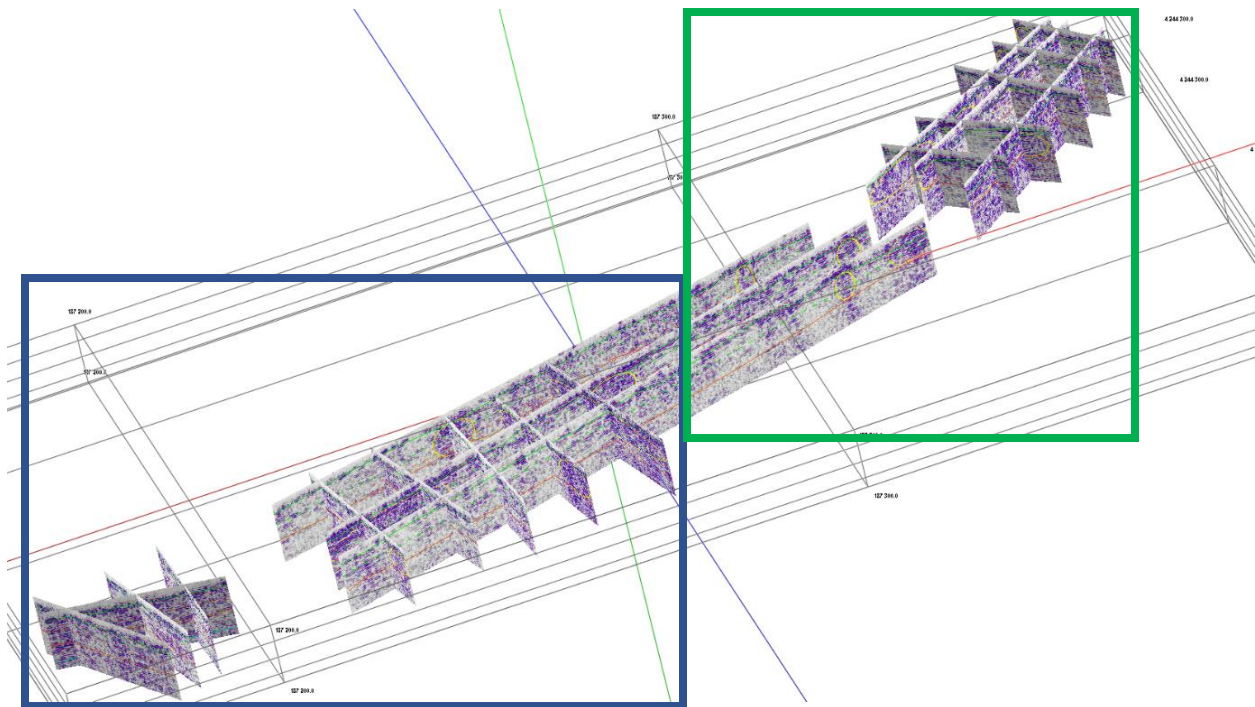
Εικόνα 5.26 : Τομές GPR στην περιοχή «Λιβάδι α΄»

Μετά την λήψη των δεδομένων, έγινε επεξεργασία τους από τον επιβλέποντα καθηγητή, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα REFLEXW της Sandmeier Scientific Software. Έπειτα, οι εικόνες των μοντέλων επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer ώστε να εντοπιστούν ανωμαλίες και στρωματογραφία. Τέλος, για κάθε περιοχή, δημιουργήθηκε ένα ενιαίο μοντέλο 3D-GPR, το οποίο περιέχει όλες τις τομές της εκάστοτε περιοχής. Στο κεφάλαιο 5.3.2, παρουσιάζονται εικόνες από τα 3D-GPR, αλλά και ερμηνεία στρωματογραφίας και πιθανών αρχαιολογικών στόχων.

5.3.2 Αποτελέσματα 3D-GPR και ερμηνεία

Λόγω μεγάλου μεγέθους των εικόνων του 3D-GPR, παρουσιάζονται παρακάτω και μεγεθύνσεις αυτών, με σκοπό την ευκολότερη παρατήρηση των ανωμαλιών.

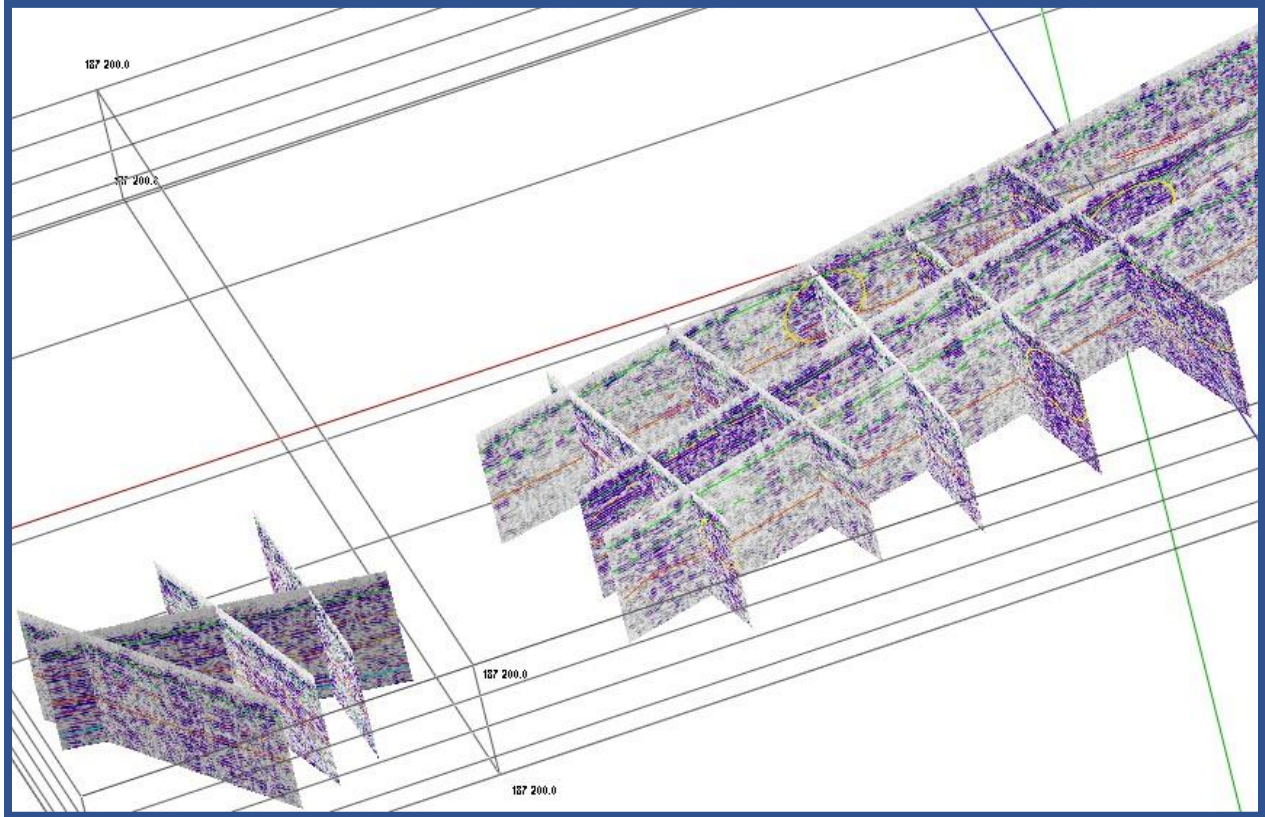
Περιοχή: «Καστέλι α΄»



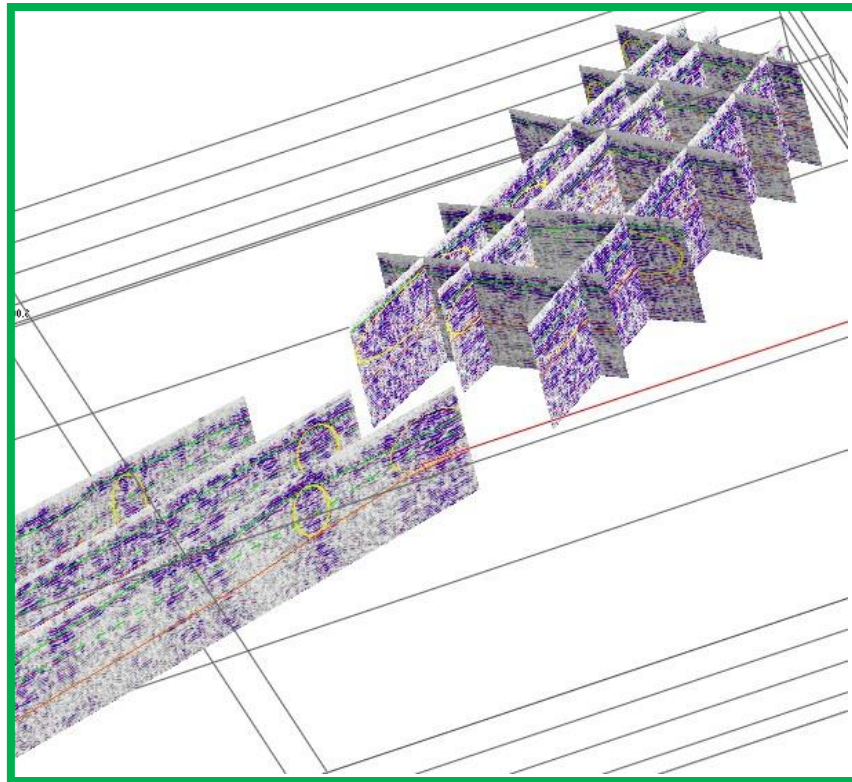
Εικόνα 5.27: Μοντέλο 3D-GPR της περιοχής «Καστέλι α΄»

Όσον αφορά την στρωματογραφία της περιοχής, ξεκινώντας από την επιφάνεια, μέχρι την πρώτη ασυνέχεια που εμφανίζεται σε βάθος μισού μέτρου (πρώτη πράσινη γραμμή στις Εικόνες 5.27-5.29), φαίνεται να υπάρχει κυρίως αδρομερές υλικό. Περνώντας στην δεύτερη ασυνέχεια (δεύτερη πράσινη γραμμή στις Εικόνες 5.27-5.29) και μέχρι την Τρίτη (κόκκινη γραμμή στις Εικόνες 5.27-5.29), το αδρομερές υλικό λιγοστεύει και δίνει τη θέση του σε χαλαρές αποθέσεις, ωστόσο δεν παύει να επικρατεί. Κάτω από την Τρίτη ασυνέχεια (κόκκινη γραμμή στις Εικόνες 5.27-5.29), δεν φαίνεται να υπάρχει αδρομερές υλικό και η περιοχή είναι πληρωμένη με χαλαρές αποθέσεις. Το βραχώδες υπόστρωμα είναι λογικά βαθύτερα γι' αυτό και δεν εντοπίστηκε.

Άλλη μία παρατήρηση που έγινε στις εικόνες, είναι πως υπάρχουν αρκετές περιοχές με πολλαπλές ανακλάσεις (κυκλωμένες με κίτρινο χρώμα στις Εικόνες 5.27-5.29), οι οποίες υποδεικνύουν χώρους με μαζεμένο αδρομερές υλικό. Το ενδιαφέρον είναι ότι σε πολλά σημεία οι περιοχές αυτές φαίνεται να ενώνονται και να έχουν μια συνέχεια. Στην περίπτωση που αυτό συμβαίνει, οι ανωμαλίες αυτές είναι ακόμη πιο πιθανό να αντιπροσωπεύουν υπόγεια τοιχία. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες δομές εμφανίζονται στα κομμάτια της περιοχής όπου και η ηλεκτρομαγνητική έρευνα εμφάνισε αντίστοιχες δομές πιθανού αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

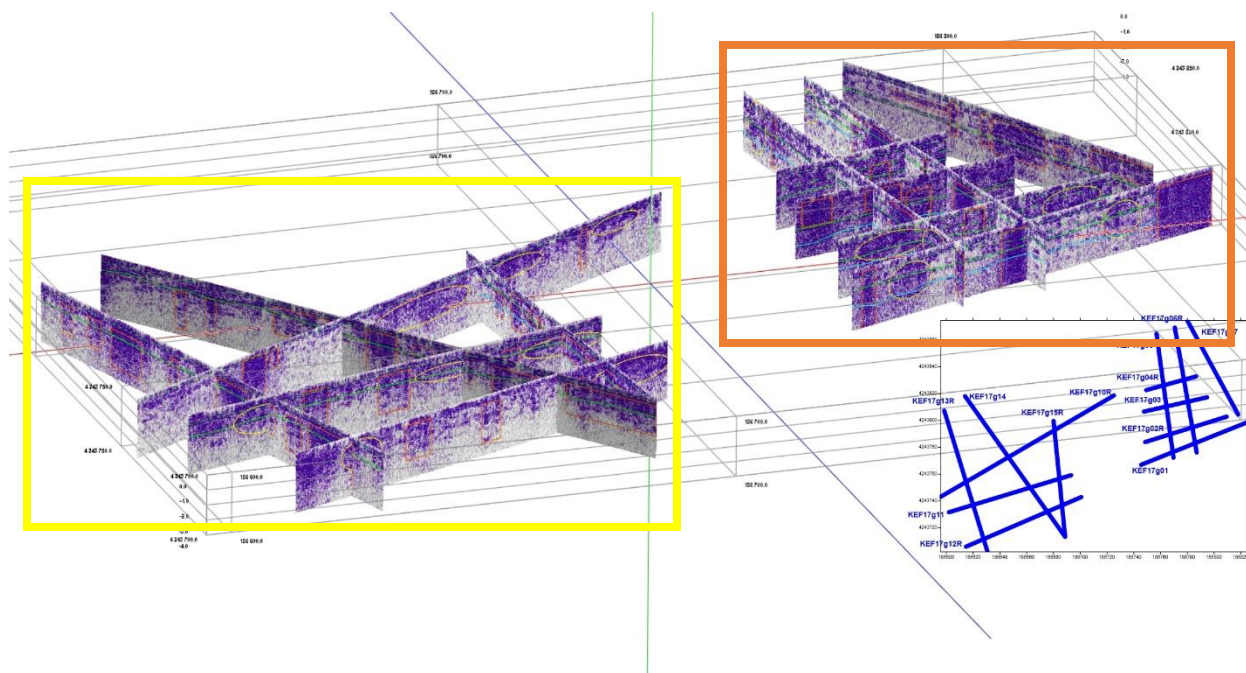


Εικόνα 5.28: Μεγέθυνση μπλε παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.27



Εικόνα 5.29: Μεγέθυνση πράσινου παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.27

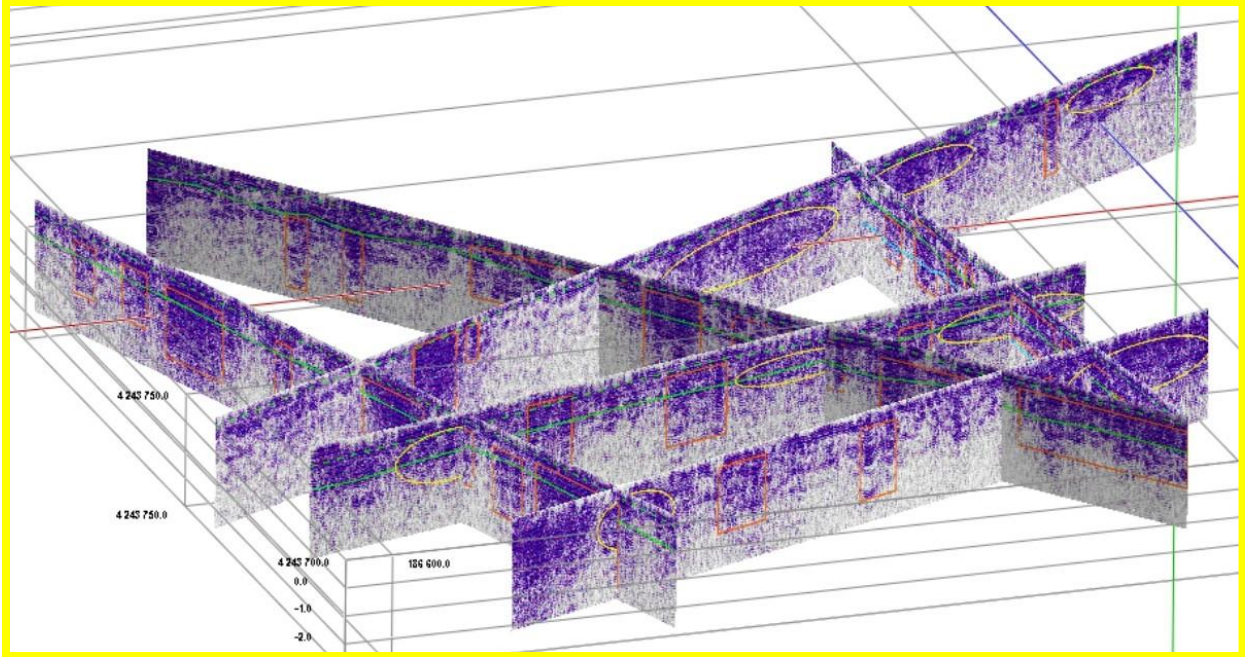
Περιοχή: «Λιβάδι α΄»



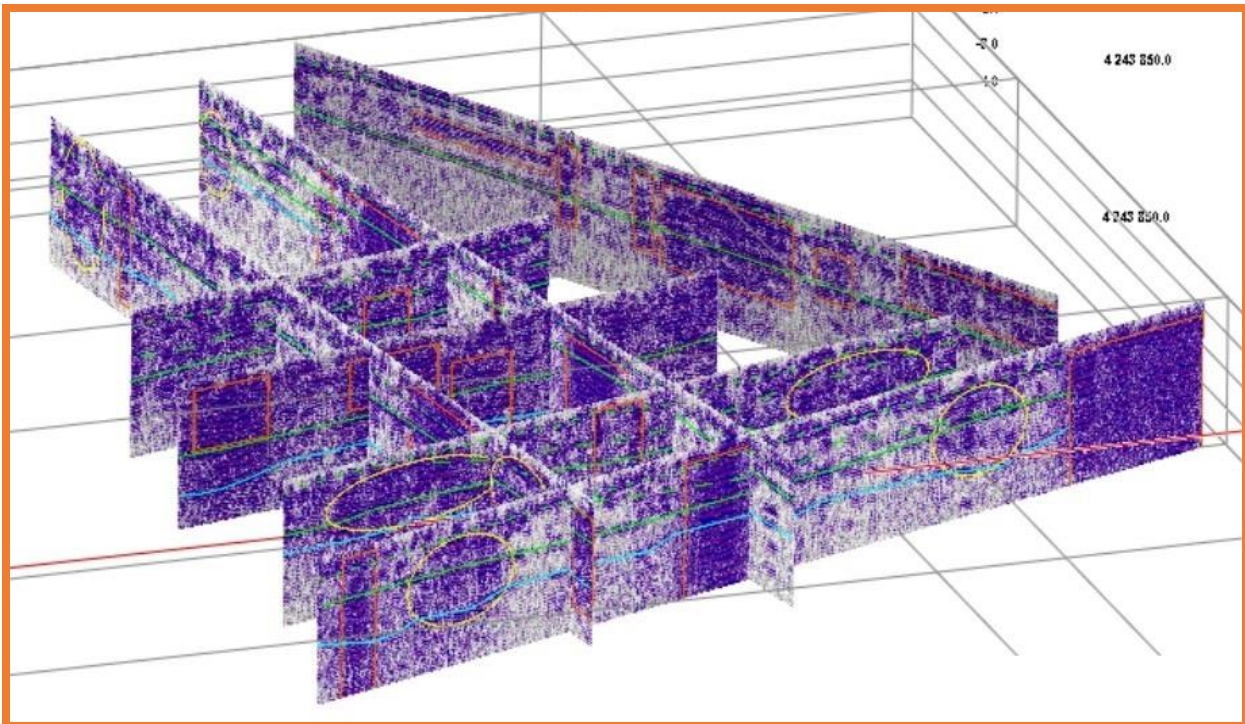
Εικόνα 5.30: Μοντέλο 3D-GPR της περιοχής «Λιβάδι α΄»

Τα δεδομένα GPR της περιοχής «Λιβάδι α΄» έδειξαν παρόμοια στρωματογραφία με αυτή της περιοχής «Καστέλι α΄». Στις Εικόνες 5.30-5.32 φαίνεται μέχρι το 1-1,5 μέτρο βάθους (πράσινη γραμμή στις Εικόνες 5.30-5.32) να επικρατεί αδρομερές υλικό μέσα σε χαλαρές αποθέσεις. Στη συνέχεια, κατεβαίνοντας μέχρι τα 2-2,5 μέτρα βάθους (γαλάζια γραμμή στις Εικόνες 5.30-5.32), συναντάμε και πάλι αδρομερές υλικό, πιο λεπτόκοκκο όμως αυτή τη φορά. Βαθύτερα από τα 2-2,5 μέτρα, το έδαφος πλέον αποτελείται κυρίως από χαλαρό υλικό, με κάποιες εξαιρέσεις. Τέλος, όπως και στην προηγούμενη περιοχή, βραχώδες υπόστρωμα δεν εντοπίστηκε.

Οι προαναφερθείσες εξαιρέσεις αφορούν περιοχές πολλαπλών ανακλάσεων που σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζονται και μέχρι τα 4 μέτρα. Οι Εικόνες 5.30-5.32 παρουσιάζουν αρκετές τέτοιες περιοχές. Πολλές από αυτές (κυκλωμένες με κίτρινο χρώμα επίσης Εικόνες 5.30-5.32) βρίσκονται μόνο στα ρητά στρώματα όπου επικρατούν τα αδρομερή, οπότε και δεν μπορούν να έχουν ξεκάθαρη ερμηνεία. Αντιθέτως, άλλες δομές (κόκκινα παραλληλόγραμμα στις Εικόνες 5.30-5.32) δημιουργούν πιο ξεκάθαρες ανωμαλίες και είναι διακριτές και στα βαθύτερα στρώματα. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι ανωμαλίες αυτές φαίνεται να έχουν συνέχεια μεταξύ τους, κάτι που τις καθιστά ακόμη πιο ενδιαφέρουσες, όσον αφορά την πιθανή αρχαιολογική τους σημασία.



Εικόνα 5.31: Μεγέθυνση κίτρινου παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.30



Εικόνα 5.32: Μεγέθυνση πορτοκαλί παραλληλογράμμου της Εικόνας 5.30

5.4 Ηλεκτρική Μέθοδος

5.4.1 Γενικά

Η ηλεκτρική μέθοδος ήταν η 3^η κατά σειρά γεωφυσική μέθοδος που εφαρμόστηκε, μόνο όμως στην περιοχή «Λιβάδι β'». Πρόκειται για την πιο αργή μέθοδο αλλά με περισσότερο ποιοτικά αποτελέσματα. Με την γεωηλεκτρική τομογραφία μπορούμε με ακρίβεια να αποτυπώσουμε την στρωματογραφία, να προσδιορίσουμε την τεκτονική και οποιαδήποτε χαρακτηριστικά από ανθρωπογενή ή φυσικά αίτια, ωστόσο κύριος σκοπός της ήταν η αποτύπωση του ασβεστολιθικού υποβάθρου.

Στις μετρήσεις με την μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Schlumberger αλλά και η dipole – dipole. Με αυτόν τον συνδυασμό διατάξεων ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται ο εντοπισμός τόσο κάθετων όσο και πλευρικών ανομοιογενειών αλλά και το μέγιστο βάθος διασκόπησης. Πραγματοποιήθηκε μία τομή, με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ, συνολικού μήκους 350 m, αποτελούμενη από 72 ηλεκτρόδια με 5 m μεταξύ τους απόσταση.

Τέλος, όλα τα ηλεκτρόδια και κατ' επέκταση η τομή αποτυπώθηκαν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας διαφορικό σύστημα GPS Leica. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα διαμόρφωσης δισδιάστατων γεωηλεκτρικών τομογραφιών με το υψόμετρο να είναι η κατακόρυφη συνιστώσα, αντί για το βάθος, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα μέτρησης των στρωμάτων σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας.



Εικόνα 5.33: Η γεωηλεκτρική τομή τοποθετημένη σε χάρτη Google Earth.

5.4.2 Εξοπλισμός

Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCAL Pro. Πρόκειται για διάταξη με ένα διαβιβαστή ρεύματος, ο οποίος στέλνει ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και στη συνέχεια μετράει την τάση που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Ο μετρητής SYSCAL Pro αποτελείται από 10 ταυτόχρονα κανάλια λήψης δεδομένων, είναι 1000 V – 250 W – 2.5 A. Έχει τη δυνατότητα αυτόματου injection ranging και έχει την επιλογή αλλαγής των ηλεκτροδίων. Είναι ένα σύστημα σχεδιασμένο για υψηλή ανάλυση στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης και IP. Περιλαμβάνει αρκετές επιλογές δίνοντας τη δυνατότητα εργασίας σε κάθε είδους συνθηκών και πεδίων.

Γενικά Χαρακτηριστικά του μηχανήματος:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως 4000 ηλεκτρόδια
- Μνήμη flash Δεδομένων: πάνω από 21 000 αναγνώσεις
- Τροφοδοσία: δύο εσωτερικές επαναφορτιζόμενες 12 V, 7.2 A μπαταρίες, προαιρετική εξωτερική μπαταρία 12V του αυτοκινήτου μπορεί να συνδέεται με το τμήμα πομπού
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 έως +70 ° C
- Βάρος (SYSCAL Pro Switch-48): 13 kg (IRIS INSTRUMENTS: SYSCAL Pro. Manual Guide)



Εικόνα 5.34 : Όργανο μέτρησης SYSCAL Pro

5.4.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία λήψης των μετρήσεων στο ύπαιθρο, έγινε ανάλυση και επεξεργασία αυτών, δηλαδή της Γεωηλεκτρικής Τομής. Για την ερμηνεία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2dinv (Loke and Barker, 1996). Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας.

Αρχικά επιλέχθηκε η ρύθμιση «use model refinement» ώστε να δημιουργηθούν μετρήσεις περισσότερες από αυτές που εισάγονται. Πιο συγκεκριμένα έχει την δυνατότητα να δημιουργεί μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων. Έτσι το τελικό μοντέλο πραγματοποιείται σαν να είχαμε ηλεκτρόδια παρατεταγμένα ανά 2,5 m αντί για 5 m και κατά συνέπεια διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν για την δημιουργία του μοντέλου κατά την αντιστροφή των μετρήσεων (Inversion) οι εξής διαδικασίες ερμηνείας:

- ***Robust-Robust (RR)***: Με αυτή την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία θορύβου στις μετρήσεις.
- ***Robust-Robust – Horizontal (RRH)***: Με αυτή την επιλογή μπορούμε να ρυθμίσουμε την αντιστροφή ώστε να απορρίπτει μετρήσεις οι οποίες είναι αντίθετες με αυτό που αναμένουμε βάσει της γεωλογίας της περιοχής. Δηλαδή μπορούμε να κάνουμε σίγαση (Damping) του θορύβου στις μετρήσεις. Στην RRH θεωρούμε ότι τα στρώματα είναι σχετικά οριζόντια και δίνεται έμφαση στη κάθετη μεταβολή της ειδικής αντίστασης (όταν ενδιαφερόμαστε περισσότερο για τη στρωματογραφία και λιγότερο τον εντοπισμό πεπερασμένων δομών)

5.4.4 Αποτελέσματα έρευνας ηλεκτρικής αντίστασης και ερμηνεία

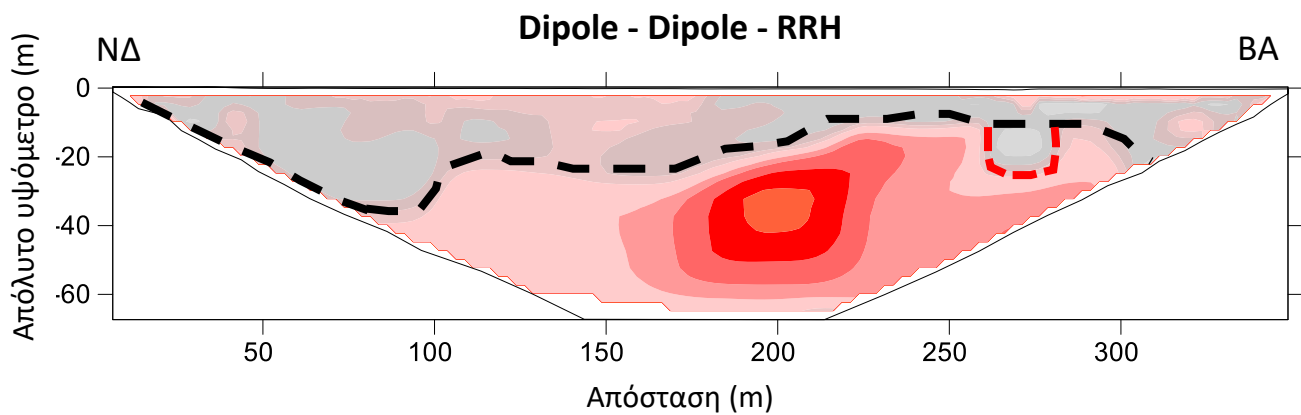
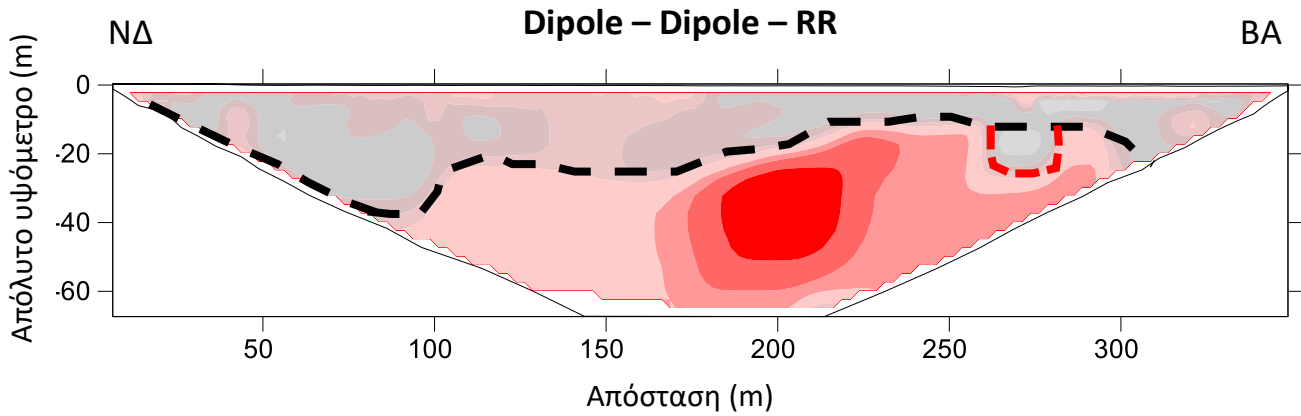
Τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής έρευνας έδειξαν ότι υπάρχουν μεγάλες μεταβολές ειδικής αντίστασης καθώς και αρκετός θόρυβος. Επίσης η ύπαρξη αρκετής υγρασίας στο έδαφος δυσκόλεψε ακόμη περισσότερο την μέθοδο.

Τόσο για την μέθοδο Dipole – Dipole όσο και για την Schlumberger, οι διαδικασίες ερμηνείας που επιλέξαμε κατά την αντιστροφή των μετρήσεων φαίνεται να δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Ωστόσο οι δύο μέθοδοι μεταξύ τους, παρουσιάζουν επίσης διαφορές.

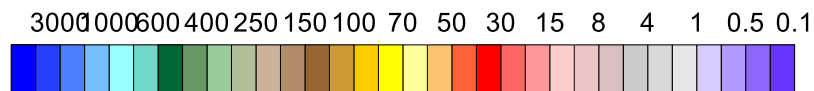
Όσον αφορά το κομμάτι της τομής, από το κέντρο της, μέχρι το Βορειοανατολικό άκρο, οι δύο μέθοδοι έχουν δώσει παρόμοια αποτελέσματα ως προς τον ασβεστολιθικό ορίζοντα (μαύρη διακεκομμένη γραμμή επίσης εικόνες 5.35 Και 5.36). Φαίνεται δηλαδή ο βράχος, στα 175 m, όπου συναντάται σε βάθος 20 m να έχει μια μικρή ανοδική πορεία, μέχρι περίπου τα 225 m όπου φτάνει στα 10 m βάθος και αρχίζει να βυθίζεται ελάχιστα, μέχρι που τελικά στα 300 m παρατηρείται μια απότομη βύθιση.

Εξάιρεση αποτελεί μία ανωμαλία όπου μόνο η μέθοδος Dipole – Dipole κατάφερε να ξεχωρίσει λόγω της ευαισθησίας της σε παράπλευρες ανομοιογένειες και φαίνεται με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στην εικόνα 5.35. Συναντάται σε βάθος περίπου 10 m, στην επιφάνεια του ασβεστολιθικού υποβάθρου, έχει

βάθος άλλα 15 m και μήκος γύρω στα 20 m και φαίνεται να είναι πληρωμένη με χαλαρά υλικά, χαμηλής ειδικής αντίστασης. Η ανωμαλία αυτή φαίνεται αρκετά ενδιαφέρουσα, δεν μπορούμε όμως να αντλήσουμε περεταίρω στοιχεία για αυτήν από την γεωηλεκτρική τομή.



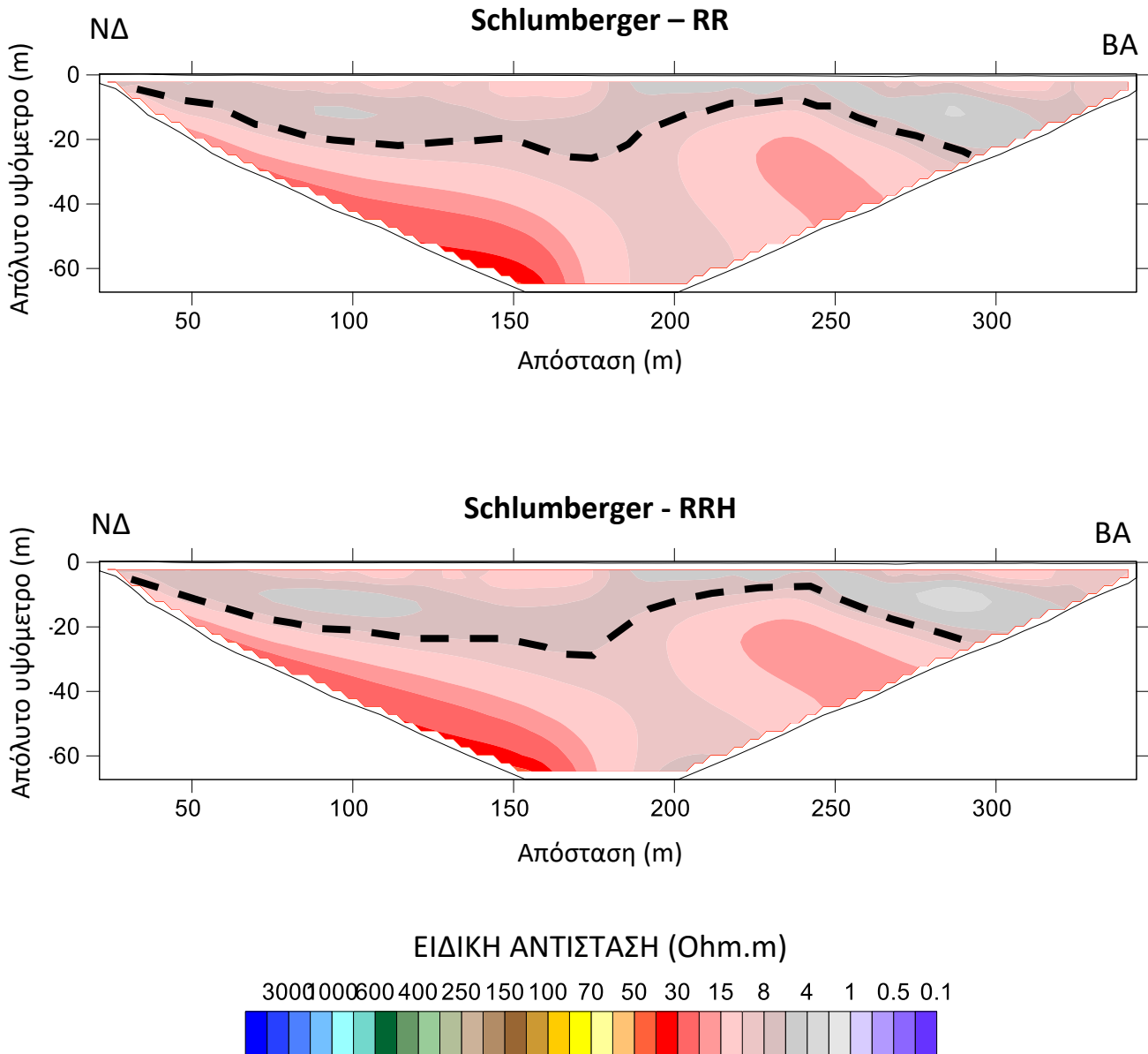
ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)



Εικόνα 5.35 : Γεωηλεκτρικές τομές διάταξης Dipole - Dipole, με μέθοδο αντιστροφής Robust-Robust (RR) (πάνω) και Robust-Robust - Horizontal (RRH) (κάτω).

Από την άλλη πλευρά, στο κομμάτι της τομής που απλώνεται από το νοτιοδυτικό της άκρο μέχρι το κέντρο της, δεν έδωσε παρόμοια αποτελέσματα στις δύο μεθόδους. Από την απόσταση περίπου των 100 m μέχρι αυτή των 175, το ασβεστολιθικό υπόβαθρο κείται περίπου οριζόντια σε βάθος 20 m και για

τις δύο διατάξεις. Επίσης, στο σημείο 0 ο βράχος βρίσκεται σε βάθος 2-3 m και στις δύο διατάξεις. Παρά το γεγονός ότι βρίσκεται σε χαμηλό σχετικά βάθος, είναι λογικό, διότι παρατηρώντας την εικόνα 5. Βλέπουμε τον ασβεστόλιθο που μελετάμε να εμφανίζεται στην επιφάνεια, στο λατομείο αδρανών ακριβώς δίπλα στην τομή. Το διαφορούμενο σκέλος, είναι το σκέλος από το 0 μέχρι την απόσταση των 100 m.



Εικόνα 5.36 : Γεωηλεκτρικές τομές διάταξης Schlumberger, με μέθοδο αντιστροφής Robust-Robust (RR) (πάνω) και Robust-Robust – Horizontal (RRH) (κάτω).

Στη διάταξη Schlumberger παρατηρούμε μια σταθερή ανοδική πορεία του βράχου προς τα νοτιοδυτικά, με μικρή κλίση, από τα 100 m μέχρι το σημείο 0. Αντιθέτως στις μετρήσεις της διάταξης Dipole – Dipole, κοντά στην απόσταση των 100 m ο βράχος φαίνεται να βυθίζεται απότομα προς τα νοτιοδυτικά μέχρι το βάθος των 40 m και από εκεί να ξεκινάει την ανοδική του πορεία της το σημείο 0 με πολύ μεγαλύτερη πλέον κλίση.

Τελικά, πιο πιθανή, φαίνεται να είναι η εικόνα που μας δίνει η διάταξη Schlumberger, καθώς σε γενικές γραμμές η μέθοδος ενδείκνυται στον διαχωρισμό οριζόντιων στρωμάτων. Επίσης είναι γεγονός ότι η περιοχή έχει μια επιφανειακή στρώση χαλαρών υλικών μεγάλου πάχους (5-20 m), αλλά και μεγάλη διείσδυση από θαλασσινό νερό. Αυτοί οι παράγοντες δίνουν χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις στο έδαφος, άρα και χαμηλό σήμα μέτρησης, κάτι που επηρεάζει πολύ την διάταξη Dipole – Dipole.

5.5 Συνολικά Συμπεράσματα και Σχόλια

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το υπέδαφος στις περιοχές Καστέλι και Λιβάδι, στο νησί της Κεφαλλονιάς, με γεωφυσικές μεθόδους. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές, πιθανού αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, στο υπέδαφος. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε η επιστήμη της γεωφυσικής να λύσει αυτό το πρόβλημα.

Για τον σχεδιασμό της έρευνας, αναζητήθηκαν στην παγκόσμια βιβλιογραφία παρόμοιες εφαρμογές γεωφυσικών μεθόδων και οι τρεις εφαρμογές που βρέθηκαν βοήθησαν σημαντικά την έρευνά μας. Η πρώτη εφαρμογή έλαβε χώρα στην Βραζιλία και τα αποτελέσματά της έδειξαν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου GPR στην ταυτοποίηση πιθανών θαμμένων αρχαιολογικών στόχων μέσα σε μια περιοχή. Η δεύτερη και η τρίτη εφαρμογή από την άλλη, δίνουν έμφαση στον συνδυασμό μεθόδων ώστε τα αποτελέσματα της μίας να μπορούν να επαληθεύουν ή και να συμπληρώνουν τα αποτελέσματα της άλλης. Από την μελέτη των τριών αυτών εφαρμογών συμπεράναμε πως η μέθοδος που ενδείκνυται για την αναγνώριση της στρωματογραφίας μιας περιοχής είναι η ηλεκτρική μέθοδος, ενώ για την αναζήτηση αρχαιολογικών στόχων, πιο αποδοτικές, είναι ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, η μέθοδος του γεωραντάρ, και η μαγνητική μέθοδος, κυρίως όμως ο συνδυασμός τους.

Έτσι, στην δική μας εφαρμογή στο Νησί της Κεφαλλονιάς, όπου ερευνηθήκαν τέσσερις περιοχές, με βάση την γεωλογία αλλά και την αρχαιολογία της περιοχής επιλέχθηκε συνδυασμός από τρεις διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί και η ενδεδειγμένη σειρά πραγματοποίησής τους στη συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα ήταν η έναρξη με ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, συνέχεια με γεωραντάρ και λήξη μετρήσεων με ηλεκτρική μέθοδο.

Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα σε τρεις από τις τέσσερις περιοχές. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο οι χάρτες με βάθος συνολικής διασκόπησης 1,5 m. Έφεραν στο φως κάποιες ενδιαφέρουσες ανωμαλίες αλλά και μια γενική εικόνα για την στρωματογραφία μέχρι αυτό το βάθος. Επίσης με τους χάρτες για βάθος συνολικής διασκόπησης 3 m εντόπισαν πιθανά τοιχία και δομές στο υπέδαφος, τα οποία είχαν μικρότερες τιμές αγωγιμότητας από το περιβάλλοντα χώρο. Συμπληρωματικά, με τους χάρτες αφαίρεσης των ρηχών ανωμαλιών εντοπίστηκαν με καλύτερο τρόπο οι περιοχές διαφορετικής αγωγιμότητας μέχρι τα 3 m. καθώς επίσης με τον χάρτη φωτοσκίασης μπορέσαμε να διακρίνουμε πιο ξεκάθαρα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τα τοιχία και τις δομές που είχαν βρεθεί στους αρχικούς χάρτες.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η μέθοδος του γεωραντάρ συμπληρωματικά σε δύο από τις προηγούμενες τρεις περιοχές. Με τη μέθοδο του γεωραντάρ που στηρίζεται στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο έδαφος, τη μέτρηση του ποσού ενέργειας που ανακλάται πίσω και του χρόνου που παίρνει για να φθάσει στην επιφάνεια, ανιχνεύθηκαν ανακλάσεις που πιθανά να αντιστοιχούν σε τοιχία και δομές, οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου λήφθηκαν γρήγορα, και επιβεβαίωσαν σε πολλές περιπτώσεις τις τοπικές ανωμαλίες που είχαν βρεθεί με την πρώτη μέθοδο αλλά έδωσαν και μια πιο εμπειριστατωμένη άποψη για την στρωματογραφία των περιοχών έρευνας.

Τέλος, εφαρμόστηκε η Ηλεκτρική μέθοδος στην τέταρτη περιοχή όπου κύριος σκοπός ήταν η αναγνώριση της θέσης του βραχώδους υποβάθρου. Επιστρατεύσαμε την ηλεκτρική μέθοδο καθώς είναι η

ενδεικτική για την αναγνώριση στρωματογραφίας αλλά και για να πετύχουμε μεγάλο βάθος διασκόπησης και εφαρμόσαμε τις διατάξεις Schlumberger και Dipole – Dipole. Τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής έρευνας έδειξαν ότι υπάρχουν μεγάλες μεταβολές ειδικής αντίστασης καθώς και αρκετός θόρυβος. Επίσης η ύπαρξη θαλασσινού νερού στους υπόγειους σχηματισμούς της περιοχής, όντας παραθαλάσσια, δυσκόλεψε λίγο την μέθοδο. Παρ' όλα αυτά ο συνδυασμός δύο διατάξεων βοήθησε αρκετά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το βάθος και η ανάπτυξη του βραχώδους υποβάθρου βρέθηκε καθώς και μία ενδιαφέρουσα δομή που ανακαλύφθηκε μόνο με μια από τις δύο διατάξεις.

Κλείνοντας, η γεωφυσική έρευνα έδωσε αρκετά ενδιαφέροντα δεδομένα για τις περιοχές, τόσο για την στρωματογραφία τους όσο και για τις πιθανές ανθρωπογενείς δομές, με αποτέλεσμα και την σημαντική βοήθεια στην θεωρία του R. Bittlestone. Η μελέτη των τριών εφαρμογών που αναζητήθηκαν στην παγκόσμια βιβλιογραφία κρίθηκε αρκετά αποδοτική, καθώς με την ηλεκτρική μέθοδο που πρότειναν οι εφαρμογές για την αναζήτηση στρωματογραφίας βρέθηκε το βραχώδες υπόστρωμα στην τέταρτη περιοχή αλλά και στις υπόλοιπες περιοχές η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος και ο συνδυασμός της με την μέθοδο GPR απέδωσαν σε μεγάλο βαθμό. Η χρήση συνδυασμών μεθόδων αποδείχθηκε για άλλη μια φορά πολύ χρήσιμη, καθώς η μια μέθοδος επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της επόμενης και συνεπώς παρέχει παραπάνω ασφάλεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

6. Βιβλιογραφία

Αποστολόπουλος, Γ. (2013). *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Αποστολόπουλος, Γ. (2008). *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καραλής, Π. (2011). *Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Ενταφιασμένων Αρχαιοτήτων στην Περιοχή Κερατέας Αττικής*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Καριζώνης, Σταύρος (2017). *Γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας και της τεκτονικής στην περιοχή Λιβάδι Νήσου Κεφαλληνίας*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Λοϊζος, Φοκίων (2014). *Γεωφυσική έρευνα στο ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο*. Διπλωματική εργασία Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λούης, Ι. Φ. (2003). *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική*. Αθήνα: Ε.Κ.Π.Α.

Παπαδοπούλου, Μυρτώ (2015). *Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σμυρνιού, Ελένη (2016). *Γεωφυσική έρευνα στον Πειραιά για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και πιθανών ανθρωπογενών δομών*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Bittlestone R., Diggle J. & Underhill J. (2005). *Odysseus Unbound: The Search for Homer's Ithaca*.

CMD. 2013. Electromagnetic Conductivity User Manual. 2013.

Dalan, R. A. (2006). *Magnetic Susceptibility in Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*, edited by J. K. Johnson, pp. 161-203. University of Alabama Press, Tuscaloosa.

Daniels D. J. (1996). *Ground Penetrating Radar: The Institution of Electrical Engineers*. London, United Kingdom

Ernenwein E. G., Hargrave M. L. (2009). *Archaeological Geophysics for DoD Field Use: a Guide for New and Novice Users*. Project 200611: Streamlined Archaeo-geophysical Data Processing and Integration for DoD Field Use.

IRIS INSTRUMENTS, 2003: SYSCAL Pro. Manual Guide

Kearey P., Brooks M., Hill I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd Editorial Offices.

Loke M.H. and Barker R.D. (1996). *Rapid Least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting 44, pp. 131 – 152

Maio R., Manna M., Piegari E., Zara A., Bonetto J. *Reconstruction of a Mediterranean coast archaeological site by integration of geophysical and archaeological data: The eastern district of the ancient city of Nora (Sardinia, Italy)*. Journal of Archaeological Science: Reports (2018). Editors: Andy Howard, Chris O. Hunt

Porsani J. L., Jangelme M. G., Kipnis R. *GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil*. Journal of Archaeological Science (2010) Editors-in-Chief: Marcos Martín-Torres, Robin Torrence

Turner Jacob R., Stine S. Roy, Stine F. Linda. *A comparison of ground-penetrating radar, magnetic gradiometer and electromagnetic induction survey techniques at House in the Horseshoe State Historic Site*. Journal of Archaeological Science: Reports (2018). Editors: Andy Howard, Chris O. Hunt

Underhill, J. R. (1985). *Neogene and Quaternary tectonics and sedimentation in Western Greece*. Wales: University of Wales.

Witten, A. J. (2006). *Handbook of Geophysics and Archaeology*. Equinox Publishing, London.