



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία
«Γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό της
στρωματογραφίας και της τεκτονικής στην
περιοχή Λιβιάδι Νήσου Κεφαλληνίας»



Καριζώνης Σταύρος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ, 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

«Γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας και της τεκτονικής στην περιοχή Λιβάδι Νήσου Κεφαλληνίας»

Καριζώνης Σταύρος

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ
ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

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

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

.....
Μαρία Μενεγάκη
Επικ.Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που με βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του ξεχωριστό τρόπο σε αυτήν μου την προσπάθεια.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αποστολόπουλο Γεώργιο, αναπληρωτή καθηγητή του Τομέα Μεταλλευτική και υπεύθυνο για την παρούσα διπλωματική εργασία, τόσο για την αρχική ανάθεση του θέματος της εργασίας αλλά και τη συνολική στήριξη και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Είμαι ευγνώμων γιατί η συνολική του παρουσία αποτέλεσε κίνητρο για την ενασχόληση μου με τη Γεωφυσική επιστήμη καθώς για τις ευκαιρίες συμμετοχής μου σε πολλές δραστηριότητες του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής το οποίο διατηρεί σε υψηλό επίπεδο.

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 την κα Αγγελική Βλασσοπούλου και κ. Γεώργιο Γιαννάτο απόφοιτους της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών 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 και κ. John Underhill Professor of Stratigraphy in the Grant Institute of Geology in the School of Geosciences at The University of Edinburgh 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 Crawshaw τόσο για την δυνατότητα πραγματοποίησης της έρευνας όσο και για τη συνεισφορά σε όλα τα στάδια της και τη μοναδική φιλοξενία.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Γιάννη και Αντωνία για απέραντη στήριξη τους σε κάθε μου επιλογή αλλά και την βοήθεια τους στο να πετύχω τους στόχους μου

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Μιχάλη καθώς με βοήθησε να αντιμετωπίσω οποιαδήποτε δυσκολία και αποτελεί πρότυπο καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω ευχαριστίες σε όλους μου τους φίλους που βρίσκονται δίπλα μου σε οποιαδήποτε βήμα μου, δίνοντας μου δύναμη και χαρίζοντας μου ωραίες στιγμές

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη περιοχή Λιβάδι, της νήσου Κεφαλληνίας. Σκοπός της εκπονηθείσας μελέτης είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές ενός πιθανού αρχαίου λιμανιού, 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 μελέτη που προηγήθηκε. Επιπλέον, για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής έρευνας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από παρόμοιες δημοσιευμένες περιπτώσεις μελετών γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκαν σε περιοχή 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 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 στο σχεδιασμένο βάθος διασκόπησης, με σημαντικές ανωμαλίες που παρουσιάζουν τη γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής και πιθανές ενδιαφέρουσες ενδείξεις τεκτονικής.

Abstract

The subject of the present thesis is the geophysical survey that was carried out in Livadi site of Kefallinia, Greece. The purpose of this study is the detection of possible anthropogenic structures of an ancient port or the detection of the sedimentation that has been influenced by these possible structures. Initially, the geophysical investigation designed and approached with information gathered from previous geological survey. In addition, before the design of the geophysical survey, we traced back to similar case studies of geophysical surveys which took place in areas with archaeological importance. The investigation conducted by using 3 different geophysical methods the electromagnetic (EM), the ground penetrating radar (GPR) and electrical method (ERT). The geophysical data were processed in the Laboratory of Applied Geophysics in the School of Mining and Metallurgical Engineering at the National Technical University of Athens. The interpretation of the geophysical data showed the sub-surface structure to the planned depths, with notable features for the geomorphological evolution of the area and possibly some indications of tectonic interest.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη	7
Abstract	8
Ευρετήριο Εικόνων	12
Ευρετήριο Πινάκων.....	18
1. Εισαγωγή	20
1.1. Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας	22
1.2. Δομή της Εργασίας	23
2. Θεωρητικό Μέρος	25
2.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι	25
2.1.1. Γενικά	25
2.1.2. Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης.....	26
2.1.3 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις.....	37
2.1.4 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας.....	40
2.2. Η Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	42
2.2.1. Γενικά	42
2.2.2. Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων – Εφαρμογές της Μεθόδου	42
2.2.3. Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	43
2.2.4. Μαγνητική Επιδεκτικότητα.....	46
2.2.5. Αρχές της Γεωφυσικής Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου	47
2.3 Γεωραντάρ-GPR (Ground Penetrating Radar)	54
2.3.1. Γενικά	54
2.3.2. Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ	55
2.3.3. Μετρήσεις στο ύπαιθρο	56
3. Εφαρμογές της Γεωφυσικής για τον Εντοπισμό Ανθρωπογενών (Αρχαιολογικών) Σχηματισμών	59

3.1. Εφαρμογή Α: Ολοκληρωμένη γεωφυσική έρευνα στο φρούριο San Lorenzo, Παναμάς, κεντρική Αμερική).	59
3.1.1. Γενικά	59
3.1.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων	60
3.1.3. Αποτελέσματα δεδομένων Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου	61
3.1.4. Αποτελέσματα δεδομένων Μαγνητικής Μεθόδου	62
3.1.5. Συμπεράσματα.....	62
3.2. Εφαρμογή Β: Απόδειξη της συμβολής της διηλεκτρικής διαπερατότητας στην σε φάση ηλεκτρομαγνητική μέθοδο απόκρισης των εδαφών: Παράδειγμα αρχαιολογικού χώρου στο Μπαχρέιν	63
3.2.1. Γενικά	63
3.2.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων	63
3.2.3. Αποτελέσματα δεδομένων Μαγνητικής Μεθόδου	65
3.2.4. Αποτελέσματα δεδομένων Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου	65
3.2.5. Συμπεράσματα.....	70
3.3. Εφαρμογή Γ: Γεωφυσική έρευνα στην αρχαιολογική περιοχή του Cade του Vernon Country, Wisconsin.	71
3.3.1. Γενικά	71
3.3.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων	71
3.3.3. Αποτελέσματα δεδομένων 1ης έρευνας Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου	73
3.3.4. Αποτελέσματα δεδομένων 2ης έρευνας Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου.	75
3.4. Εφαρμογή Δ: Γεωφυσική έρευνα στο φρούριο St. Joseph (20BE23), Niles, Michigan	77
3.4.1. Γενικά	77
3.4.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων	78
3.4.3. Αποτελέσματα δεδομένων συνδυασμένων μεθόδων.	81
4. Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας και της τεκτονικής στη θέση Λιβιάδι.	90
4.1. Γενικά	90
4.2. Ιστορία και αρχαιολογία της περιοχής Λιβιάδι	92

4.2. Γεωλογία της Περιοχής	94
4.2.1. Γεωλογία των Νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης.....	94
4.2.2. Νεοτεκτονική Δομή των νήσων Κεφαλλονιάς – Ιθάκης	98
5. Γεωφυσική έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και Αποτελέσματα.	104
5.1. Γενικά	104
5.2. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος	106
5.2.1. Γενικά	106
5.2.2. Εξοπλισμός.....	107
5.2.3. Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες.....	110
5.3. Γεωραντάρ – GPR (Ground – Penetrating Radar)	116
5.3.1. Γενικά	116
5.3.2 Επεξεργασία μετρήσεων	117
5.3.3. Τομές Γεωραντάρ	118
5.3.4 Συνολικά αποτελέσματα – συμπεράσματα τομών γεωραντάρ.....	127
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 Ηλεκτρικής Μεθόδου	134
5.4.5. Συνδυαστικά Σχόλια για την Ηλεκτρική Μέθοδο	146
5.5. Συμπεράσματα και Σχόλια	148
5.5.1. Συμπεράσματα.....	148
5.5.2 Σχόλια.....	151
6. Βιβλιογραφία	152

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο	26
Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο	30
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο.	31
Εικόνα 2.4: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές.	32
Εικόνα 2.5: Διάταξη Schlumberger	33
Εικόνα 2.6: Διάταξη Wenner.....	33
Εικόνα 2.7: Διάταξη Dipole-Dipole	34
Εικόνα 2.8: Διάταξη Pole - Pole.....	34
Εικόνα 2.9: Διάταξη Pole – Dipole.....	35
Εικόνα 2.10: Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	37
Εικόνα 2.11: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης.	39
Εικόνα 2.12: Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole – Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.....	40
Εικόνα 2.13: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διςδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγόριθμου.	41
Εικόνα 2.14: Μοντέλο Απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων	41
Εικόνα 2.15: 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 διεξόδου βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (a) ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετριέται με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος Γεώργιος 2013).....	44
Εικόνα 2.16: 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 ρεύσουν στα αγώγιμα 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).	48
Εικόνα 2.17: Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου	51
Εικόνα 2.18: Leica GX 1230 GG RTK Reciever with L2C	53
Εικόνα 2.19: Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης CMD2, CMD4.	53
Εικόνα 2.20: Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013).....	55
Εικόνα 2.21: (a) Τυπική διάταξη λειτουργίας (common – offset) (b) Μέθοδος κοινού μεσαίου σημείου (Common – Midpoint).....	56
Εικόνα 2.22: Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάση της συχνότητας κεραίας του γεωραντάρ.....	57
Εικόνα 2.23: Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων...57	57
Εικόνα 3.1: (Αριστερά) Τοποθεσία του στρατηγικού Ισθμιακού Τριγώνου με το Φρούριο San Lorenzo στο χάρτη. (Δεξιά) Ο ποταμός Charges και οι κύριες πόλεις : A- San Lorenzo, B – Portobelo, C – Nombre de Vios, D – Venta de Cruces, E – Παλιά πόλη Παναμά, F – Πόλη Παναμά και τα 2 κύρια μονοπάτια.....	59
Εικόνα 3.2: Οι Ζώνες έρευνας και τα ερείπια του Φρουρίου.	60
Εικόνα 3.3: Χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε διαφορετικά βάθη διασκόπησης (0.3,0.7 και 1m) για τις Ζώνες 1 (α) και 2 (β)για το Φρούριο San Lorenzo.	61
Εικόνα 3.4: Κάθετη μαγνητική ψευδό – κλίση μετά από διορθώσεις στην Ζώνη 1.....	62
Εικόνα 3.5: Qal'at al-Bahrain, γενική όψη και τοποθεσία του πορτογαλικού φρουρίου, του ελληνιστικού φρουρίου, του μαγνητικού χάρτη και του περιγράμματος της έκτασης 40 m x 40 m πραγματοποίησης έρυνα με EM.	64
Εικόνα 3.6: Λεπτομέρειες χάρτη της κατακόρυφης κλίσης του συνολικού πεδίου με την προτεινόμενη ερμηνείας σε σχέση με την περίοδο Dilmun.....	65
Εικόνα 3.7: Φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετρήθηκε με όργανο CMD σε συχνότητα 30 kHz σε οριζόντια και κάθετη διάταξη με απόσταση εσωτερικών πηνίων 0,71 m και 1,18 m.	66
Εικόνα 3.8: Σε φάση συνιστώσα μετά την απομάκρυνση του μέρους της σε φάση αγωγιμότητας (CMD στα 30kHz οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη απόσταση εσωτερικών πηνίων 0,71 m και 1,18 m) και αντίστοιχη κλίμακα μαγνητικής επιδεκτικότητας.	67
Εικόνα 3.9: Σε φάση αποκρίσεις σε σχέση με σχετική διαπερατότητα και μαγνητικής επιδεκτικότητας.....	68
Εικόνα 3.10: Χάρτες φαινόμενης μαγνητική επιδεκτικότητας και σχετικής επιδεκτικότητας σε φάση δεδομένων που προέκυψαν από οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη οργάνου.....	69
Εικόνα 3.11: Τοποθεσία εκσκαφής το έτος 1994	72
Εικόνα 3.12: Χάρτης αγωγιμότητας σε κατακόρυφη λειτουργία οργάνου.	73

Εικόνα 3.13: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας σε κατακόρυφη λειτουργία οργάνου.....	74
Εικόνα 3.14: Χάρτης αγωγιμότητας σε οριζόντια λειτουργία οργάνου	75
Εικόνα 3.15: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας σε οριζόντια λειτουργία οργάνου.....	76
Εικόνα 3.16: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας σε οριζόντια λειτουργία οργάνου.....	78
Εικόνα 3.17: Περιοχή έρευνας με ηλεκτρομαγνητική μέθοδο. Η επιφάνεια 475 m ² που καλύφθηκε με EM.....	79
Εικόνα 3.18: Περιοχή έρευνας με μέθοδο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Η επιφάνεια 300 m ² που καλύφθηκε με ER σε διάταξη Wenner.	79
Εικόνα 3.19: Περιοχή έρευνας με μέθοδο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Η επιφάνεια 300 m ² που καλύφθηκε με ER σε διάταξη Wenner.	80
Εικόνα 3.20: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #1 Α) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) GPR πλάτος σε χρονικό διάστημα, E) Τοποθεσία εκσκαφής, F) Φωτογραφία της δομής.	82
Εικόνα 3.21: Κομμάτια κεραμικών creamware .Αυτά τα αντικείμενα χρονολογούνται από την τελευταία κατάληψη του οχυρού St. Joseph.....	83
Εικόνα 3.22: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #2 Α) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) GPR πλάτος σε χρονικό διάστημα 21.75 – 29 ns, E) Τοποθεσία εκσκαφής, F) Φωτογραφία της δομής.	84
Εικόνα 3.23: GPR τομή της Ανωμαλίας #2. Το αρχείο αυτό δείχνει ξεκάθαρα τη δομή.....	85
Εικόνα 3.24: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #3 Α) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) GPR πλάτος σε χρονικό διάστημα, E) Τοποθεσία εκσκαφής.	86
Εικόνα 3.25: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #4 Α) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) Τοποθεσία εκσκαφής.....	88
Εικόνα 3.26: Πανοραμική εικόνα της περιοχής έρευνας στη θέση Λιβάδι.	89
Εικόνα 4.1: Με κόκκινο βέλος η τοποθεσία Λιβάδι στο χάρτη της νήσου Κεφαλλονιάς.	90
Εικόνα 4.2: Συνολική εικόνα της περιοχής έρευνας στη θέση Λιβάδι.....	91
Εικόνα 4.3: Πανοραμική εικόνα της περιοχής έρευνας στη θέση Λιβάδι.....	91
Εικόνα 4.4 Γεωλογικός Χάρτης της ευρύτερης περιοχής της θέσης Λιβάδι (τμήμα του Γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ).....	99
Εικόνα 4.5: Νεοτεκτονικός Χάρτης της νήσου Κεφαλλονιάς και Ιθάκης.....	100
Εικόνα 4.6: Απλοποιημένος τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης της νήσου Κεφαλονιάς (από 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).....	102
Εικόνα 5.1: Χάρτης Google Earth όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι Γωηλεκτρικές τομές και με μωβ χρώμα η περιοχή που καλύφθηκε με Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις.	105
Εικόνα 5.2: Χάρτης Google Earth όπου με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται τα προφίλ του Γεωραντάρ	105
Εικόνα 5.3: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις θέσεις των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων σε βάθος διασκόπησης 3 m.	106
Εικόνα 5.4: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις θέσεις των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων σε βάθος διασκόπησης 6 m	107
Εικόνα 5.5: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-2 σε βάθος διασκόπησης 3 m , στη θέση Λιβάδι.....	108
Εικόνα 5.6: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m (επάνω). Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m τοποθετημένος σε χάρτη Google Earth (κάτω).....	110
Εικόνα 5.7: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (α), Χάρτης μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με φωτοσκίαση (β) και Χάρτης κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) (γ) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.....	112
Εικόνα 5.8: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 m (επάνω). Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 m τοποθετημένος σε χάρτη Google Earth (κάτω).....	113
Εικόνα 5.9: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (α), Χάρτης μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με φωτοσκίαση (β) και Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας (γ) για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 m.....	115
Εικόνα 5.10: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις τομές γεωρανταρ	116
Εικόνα 5.11: Αποτύπωση των τομών γεωραντάρ σε εξάρτηση από το σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87'.	1176
Εικόνα 5.12 : Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-1» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού	118
Εικόνα 5.13: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-2» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού	119

Εικόνα 5.14: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-3» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.....	120
Εικόνα 5.15: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-4» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.....	121
Εικόνα 5.16: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-5» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.....	122
Εικόνα 5.17: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-6» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.....	123
Εικόνα 5.18: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-7» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.....	124
Εικόνα 5.19: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-8» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.....	125
Εικόνα 5.20: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-9» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.....	126
Εικόνα 5.21: Τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση των εννέα τομών Γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκαν	129
Εικόνα 5.22: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις γεωηλεκτρικές τομές.....	130
Εικόνα 5.23: Η γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-6	131
Εικόνα 5.24: Όργανο μέτρησης SYSCALPro	132
Εικόνα 5.25: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-1, διεύθυνση Νοτιοδυτικά προς Βορειοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal.....	134
Εικόνα 5.26: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-2, διεύθυνση Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal	136
Εικόνα 5.27: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-3 διεύθυνση Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal	138

Εικόνα 5.28: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-4 με διεύθυνση Νοτιοδυτικά προς Βορειοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal	140
Εικόνα 5.29: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-6 διεύθυνση Βοράς προς Νότο. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal ..	142
Εικόνα 5.30: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-5 διεύθυνση Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal	144
Εικόνα 5.31: Τρισδιάστατη απεικόνιση των Γεωηλεκτρικών τομών «KEF-RES».....	146

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές μέθοδοι και μετρούμενη φυσική ιδιότητα για κάθε μία.	21
Πίνακας 2.1: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος Γεώργιος,2013)	
Πίνακας 2.2: Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	29
Πίνακας 2.3: Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με την περίπτωση έρευνας.	36
Πίνακας 2.4: Τυπικές εφαρμογές οργάνου CMD.....	52
Πίνακας 2.5: Ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων(ν) τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας(σ) για διάφορους τύπους υλικών	54
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστική τιμή αγωγιμότητας για κάθε τύπο εδάφους	73
Πίνακας 3.2: Λίστα τοποθεσιών και ευρημάτων σε σχέση με τις ανωμαλίες που εντοπίστηκαν	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Εισαγωγή

Η γεωφυσική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της Γης, στηριζόμενη στις βασικές αρχές της φυσικής. Οι γεωφυσικές έρευνες του υπεδάφους της Γης περιλαμβάνουν την συλλογή μετρήσεων κοντά ή στο έδαφος 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 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 μια πλατιά έννοια όμως, 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.

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. Τέτοιες ιδιότητες, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη φύση και τη δομή των υπεδάφικών σχηματισμών, είναι η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ελαστικότητα και σε μικρότερο βαθμό η θερμική αγωγιμότητα και η ραδιενέργεια. Ο εντοπισμός μετρήσιμων διαφοροποιήσεων στις παραπάνω ιδιότητες των πετρωμάτων, η κατάλληλη ερμηνεία τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων, αποτελούν το βασικό σκοπό μιας γεωφυσικής έρευνας. Όμως πρέπει να γίνει γνωστό 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 κάποιας μορφής χωρική ή και χρονική διαφοροποίηση.

Για να έχουμε τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα πρέπει να κάνουμε σωστή επιλογή γεωφυσικής μεθόδου. Η επιλογή αυτή θα εξαρτάται από το μέγεθος της υφιστάμενης αντίθεσης των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων της περιοχής έρευνας. 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.

Η γεωφυσική έρευνα, αν και δίνει μια πολλή καλή εκτίμηση της εικόνας της περιοχής μελέτης, εντούτοις δεν μπορεί να δώσει μοναδικές και μονοσήμαντες λύσεις για μια δεδομένη κατάσταση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί γεωλογικών σχηματισμών θα είχαν ως αποτέλεσμα την ίδια τιμή παρατηρούμενης μέτρησης. Επίσης, αν συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι κάθε έρευνα πεδίου εμπεριέχει ένα ποσοστό πειραματικού σφάλματος και ότι η λήψη των μετρήσεων είναι επιλεκτική (κατά την κρίση του ερευνητή), γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα της έρευνας θα είναι προσεγγιστικά και όχι με μεγάλη ακρίβεια.

Για αυτό το λόγο σε μια γεωφυσική έρευνα για να έχουμε μεγαλύτερη επιτυχία στην ακρίβεια μπορούμε να εφαρμόσουμε περισσότερες από μια γεωφυσικές μεθόδους. Ακόμα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν συχνά συγκρίνονται με αυτά ερευνητικών γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή μελέτης.

Από την άλλη, 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 καταλαμβάνει θέση-κλειδί σε ερευνητικά προγράμματα γεωλογικής, γεωτεχνικής και μεταλλευτικής φύσης.

1.1. Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στη περιοχή Λιβάδι, της νήσου Κεφαλληνίας.

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές ενός αρχαίου λιμανιού, είτε τον εντοπισμό ίζηματογενέσεων που προκλήθηκαν από αυτές τις πιθανές δομές.

Για την πραγματοποίηση του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν 3 διαφορετικές γεωφυσικές μέθοδοι, με βάση γεωλογικών και αρχαιολογικών στοιχείων, με τη συγκεκριμένη σειρά:

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

1.2. Δομή της Εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από 5 κεφάλαια τα οποία περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Στο πρώτο κεφάλαιο περιέχεται η εισαγωγή με στόχο την μικρή αναφορά στο αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.
2. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία κάθε μεθόδου που εφαρμόστηκε στην έρευνα.
3. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε εφαρμογές της γεωφυσικής για τον εντοπισμό 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. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της περιοχής έρευνας Λιβιάδι, ης νήσου Κεφαλλονιάς (Τοποθεσία, Ιστορικά στοιχεία και Γεωλογία) που καλύφθηκε με τις γεωφυσικές μεθόδους.
5. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού της γεωφυσικής έρευνας, που περιλαμβάνει τη κατάλληλη επιλογή γεωφυσικών μεθόδων, σειρά εφαρμογής, διατάξεις κάθε μεθόδου. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην ύπαιθρο καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έγινε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Τέλος, δίνονται εκτενώς τα συνολικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται σχόλια για την έρευνα που πραγματοποιήθηκε.
6. Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη και επιχειρηματολογία των κεφαλαίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι

2.1.1. Γενικά

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους μετρούνται διαφορές δυναμικού, ρεύματα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν φυσικά ή εισάγονται τεχνητά στην Γη

2.1.1.1. Ηλεκτρικές Μέθοδοι

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

Παθητικές μέθοδοι:

- **Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (Self-Potential Method):**

Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία, είτε σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, είτε είναι ηλεκτροκινητικής ή γεωθερμικής προέλευσης. Εφαρμόζεται σε υδρογεωλογικές ή γεωθερμικές έρευνες.

- **Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric Method)**

Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη –μέχρι και τον μανδύα– μέσα στη γη.

Ενεργητικές μέθοδοι:

- **Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method):**

Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μετρούμενο δυναμικό, και μπορούν επομένως να χαρτογραφηθούν με τη χρήση της μεθόδου, περιλαμβάνουν την παρουσία και ποιότητα των ρευστών, των πόρων και των αργίλων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, με μέσα βάθη διασκόπησης.

- **Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induce Polarization Method):** Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν, το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται , παύει να διαβιβάζεται, έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

2.1.2. Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

2.1.2.1. Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση – Νόμος του Ohm.

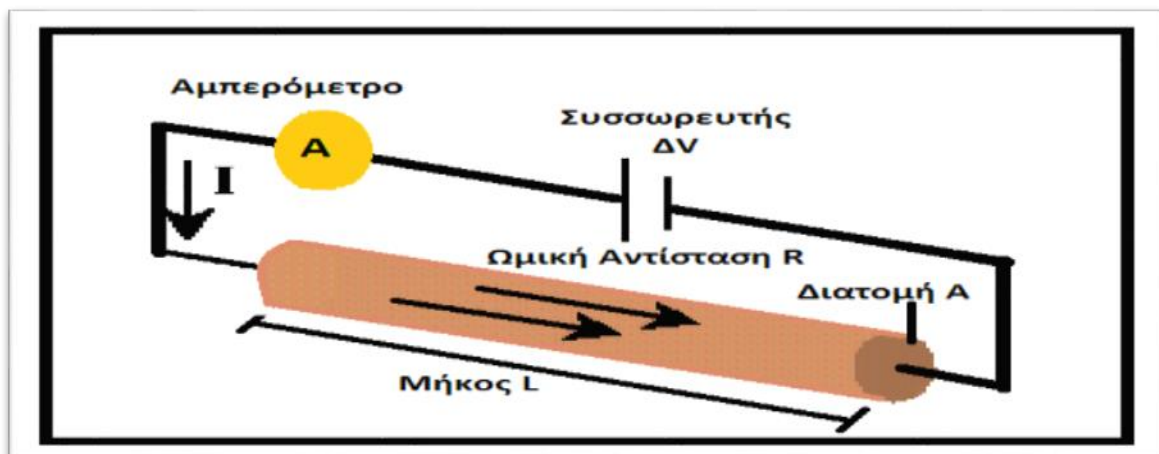
Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσα στα πετρώματα και τα ορυκτά με τρεις τρόπους:

- **Ηλεκτρονικά (Ωμικά):** Η ροή του ρεύματος στα υλικά περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια.
- **Ηλεκτρολυτικά:** Το ρεύμα μεταφέρεται μέσω ιόντων με σχετικά χαμηλό βαθμό.
- **Διηλεκτρικά:** Λαμβάνει 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, σε ένα κυλινδρικό αγωγό (**Εικόνα 2.1**) μήκους L και διατομής A , που διαρρέεται από ρεύμα I και στα άκρα του μετράται διαφορά δυναμικού ΔV , η ηλεκτρική αντίσταση R 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 R έχει ως μονάδα μέτρησης το Ohm.



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

Η ηλεκτρική ωμική αντίσταση, συμβολίζεται με το γράμμα **R**, εξαρτάται από τις γεωμετρικές διαστάσεις του αγωγού:

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

όπου **ρ** η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του αγωγού, ανεξάρτητη των διαστάσεών του, που 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 ενός πορώδους πετρώματος μεταβάλλεται με τον όγκο και την κατανομή των πόρων, αλλά πολύ περισσότερο με την αγωγιμότητα και το ποσό του περιεχομένου νερού. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί και η αγωγιμότητα είναι περισσότερο ηλεκτρολυτική παρά ωμική. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω ιόντων (μορίων με περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων). Η ειδική αντίσταση διαφέρει με την ευκινησία, την συγκέντρωση και τον βαθμό διαχωρισμού των ιόντων (εξαρτάται από την διηλεκτρική σταθερά του διαλύτη).

2.1.2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αντίσταση

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

- Είδος πετρώματος: Κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν, γενικά, τις υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή τις χαμηλότερες, λόγω – συνήθως – υψηλού περιεχομένου τους σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, παράλληλα με έντονες τάσεις αλληλεπικάλυψης. Ενδεικτικές είναι οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στον **Πίνακα 2.1** που ακολουθεί.
- Δομή και Πορώδες: Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

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)

Δομή και Πορώδες: Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

- Περιεκτικότητα σε άλατα: Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.
- Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών: Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση, αλλά υπάρχουν και εξαιρέσεις όπως η σκλήρυνση, η ιζηματοποίηση, η απολίθωση πετρωμάτων κ.ά. Στον **Πίνακα 2.2** που ακολουθεί, δίνονται οι επιδράσεις διαφόρων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων.

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	Αύξηση ή Ελάττωση

Πίνακας 2.2: Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση

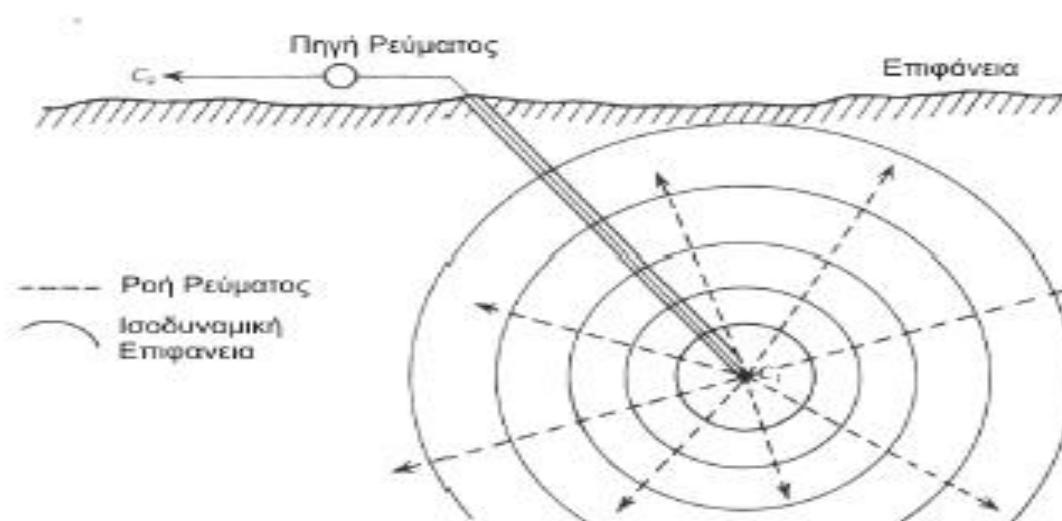
(Αποστολόπουλος 2008)

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

2.1.2.3. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο

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

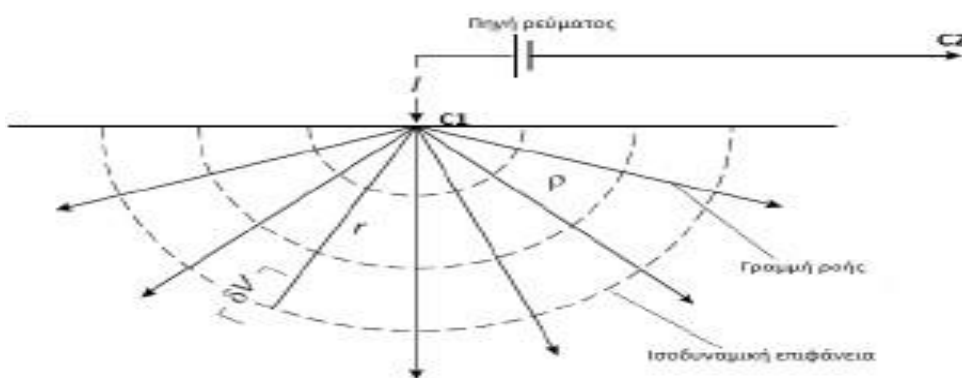
Το μοντέλο αυτό στην πράξη εφαρμόζεται τοποθετώντας ένα ηλεκτρόδιο C1 μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά σε ομογενές και ισότροπο μέσο. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C2, που τοποθετείται στην επιφάνεια της γης και σε αρκετά μακρινή απόσταση ούτως ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή C1, κατευθυνόμενες προς τα έξω. Η 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 στις τρεις διαστάσεις σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες, με κέντρο το ηλεκτρόδιο.



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο

2.1.2.4. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

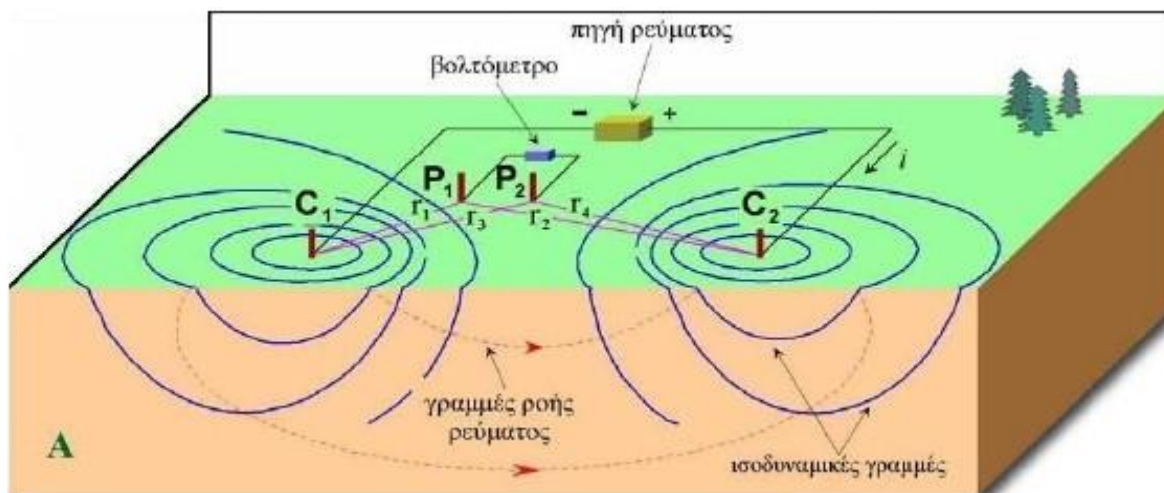
Στην περίπτωση του ημιάπειρου ομογενή χώρου ομοίως, η διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά την τοποθέτηση ενός ηλεκτροδίου C1 στην επιφάνεια ηλεκτρικά ομογενούς μέσου. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C2, το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια, αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, ούτως ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι, όπως και στην περίπτωση του άπειρου ομογενούς μέσου, ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο. Ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι κάθετες στις γραμμές ροής και σχηματίζουν ομόκεντρα ημισφαίρια, με κέντρο το ηλεκτρόδιο C1.



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο.

2.1.2.5. Ηλεκτρόδιο Ρεύματος και Δυναμικού στην Επιφάνεια Ομογενή Χώρου

Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους στην επιφάνεια της γης. Το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας επηρεάζεται και από τα δύο ηλεκτρόδια. Επομένως, το δυναμικό σε ένα τυχαίο σημείο P1 θα ισούται με το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V1, λόγω της σημειακής πηγής C1 και του δυναμικού V2, λόγω της πηγής C2. Τέλος, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, όπως φαίνεται στο **Εικόνα 2.4**.



Εικόνα 2.4: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημιάπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές.

2.1.2.6. Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

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

Σε ένα ανομοιογενές μέσο, η ειδική αντίσταση ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μερών του υπεδάφους. Μεταβάλλεται συστηματικά ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγώγιμων ή μη αγώγιμων.

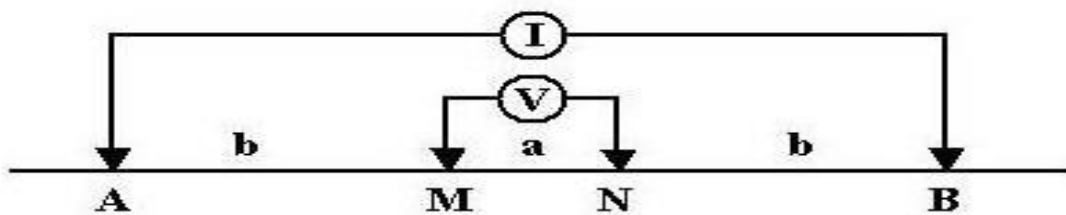
2.1.2.7. Διάταξεις Ηλεκτροδίων

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Με τη μέθοδο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος με τη χρήση δυο ηλεκτροδίων ρεύματος και μετριέται η τάση σε άλλα ηλεκτρόδια δυναμικού.

Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και τις μεταξύ τους αποστάσεις, έχουμε τις ακόλουθες διατάξεις ηλεκτροδίων:

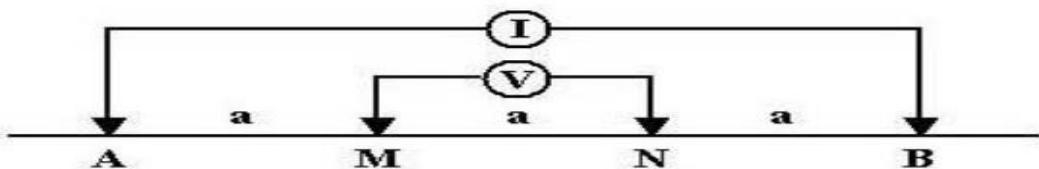
- Διάταξη Schlumberger: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις **b** και **a** αντίστοιχα. (Εικόνα 2.5)

$$\rho_A = \frac{V}{I} \pi \frac{b(b+a)}{a} \approx \frac{V}{I} \pi \frac{b^2}{a} \quad \text{if } a \ll b$$



Εικόνα 2.5: Διάταξη Schlumberger

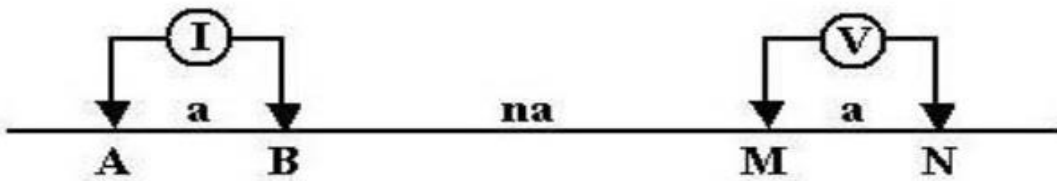
Διάταξη Wenner: Τέσσερα ηλεκτρόδια διατάσσονται επί μιας νοητής ευθείας σε ισαπέχουσες αποστάσεις. Τα δύο εξωτερικά είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και διακρίνονται σε πρωτεύον και δευτερεύον. Τα δύο εσωτερικά αντιπροσωπεύουν τα ηλεκτρόδια δυναμικού τα οποία αντίστοιχα διαχωρίζονται σε πρωτεύον και δευτερεύον. Από το πρωτεύον ηλεκτρόδιο ρεύματος, διοχετεύεται ηλεκτρικό πεδίο γνωστών χαρακτηριστικών και μετράτε η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού. Το κάθε σημείο οριοθετείται στο μέσον της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού.



$$\rho_A = 2\pi a \frac{V}{I}$$

Εικόνα 2.6: Διάταξη Wenner

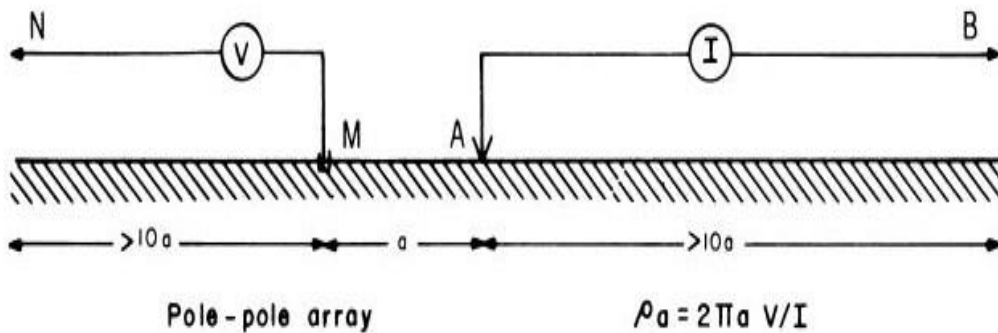
- Διάταξη Dipole – Dipole: Χρησιμοποιούνται δύο ζεύγη ηλεκτροδίων, το πρώτο αποτελείται από ηλεκτρόδια ρεύματος και το δεύτερο από ηλεκτρόδια δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ του κάθε ζεύγους ηλεκτροδίων παραμένει σταθερή και ίση με το μοναδιαίο άνοιγμα αυτών, ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο ζευγών αλλάζει κατά μια τιμή που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μοναδιαίου ανοίγματος. Το σημείο μέτρησης είναι το μέσον της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού.



$$\rho_A = \frac{V}{I} \pi a n(n+1)(n+2).$$

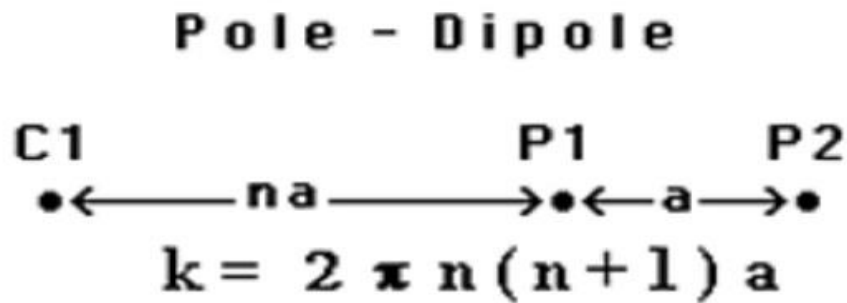
Εικόνα 2.7: Διάταξη Dipole-Dipole

- Διάταξη Pole – Pole: Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού απέχουν πολύ μεγάλη απόσταση από τα δύο κοντινά ηλεκτρόδια.



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 ηλεκτροδίου ρεύματος από το ηλεκτρόδιο δυναμικού είναι na . Χρησιμοποιείται κυρίως για Τομογραφία και Βυθοσκόπηση.



Εικόνα 2.9: Διάταξη Pole – Dipole.

2.1.2.8. Επιλογή Κατάλληλης Διάταξης.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται με σειρά καταλληλότητας η αντιστοιχία κάθε διάταξης σε σχέση με την ιδιαίτερη περίπτωση έρευνας που αντιμετωπίζεται κάθε φορά. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως διάταξη ηλεκτροδίων για βυθοσκόπηση έχει η διάταξη Schlumberger. Οι υποθέσεις γίνονται λαμβάνοντας υπόψιν την ευαισθησία κάθε διάταξης και διάφορους παράγοντες σε κάθε περίπτωση έρευνας. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνουν συνεχώς με σταθερή απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία αλλάζει μόνο όταν το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού γίνεται τόσο μικρό ώστε να μην είναι δυνατόν να μετρηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια. . Όταν πρόκειται να μεταβληθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού, λαμβάνονται διπλομετρήσεις και με τις δύο αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού. Γίνονται έξι μετρήσεις ανά λογαριθμικό κύκλο του μισού της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος.

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

	Wenner	Schlunberger	Pole – Dipole	Dipole - Dipole
Λόγος σήματος προς θόρυβο	1	2		
Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες			2	1
Διαχωρισμός δομώ σε απότομη κλίση	2	1		
Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων	2	1		
Ευαισθησία στη μορφολογία του υποβάθρου			2	1
Βάθος διασκόπησης				1
Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος	2	1	4	3
Ευαισθησία στην κλίση	2	1		

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

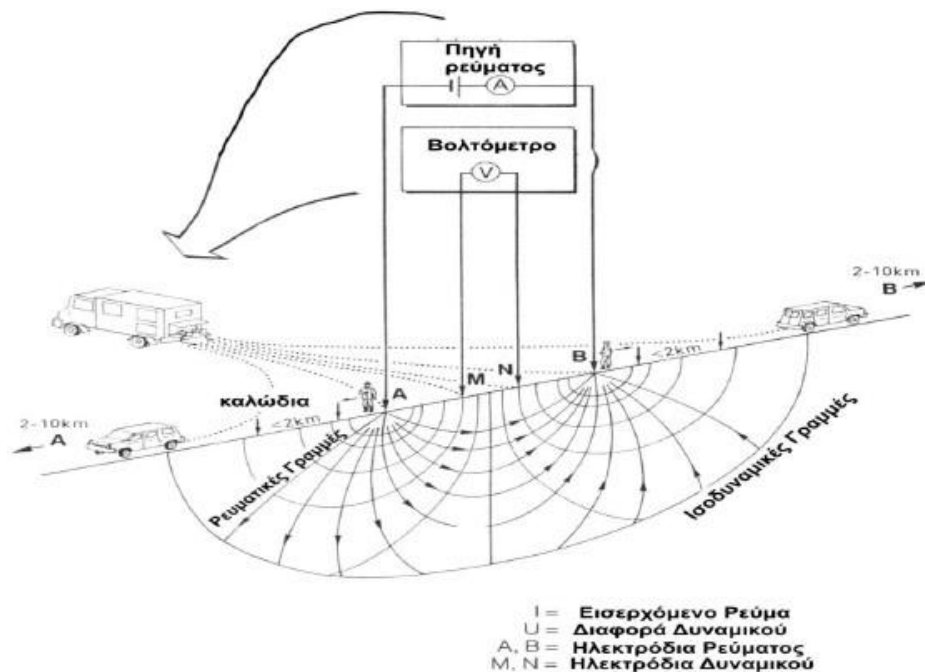
2.1.2.9. Εξοπλισμός Υπαίθρου

Ο απαραίτητος εξοπλισμός που χρειαζόμαστε για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, δηλαδή των ΔV στο πεδίο έρευνας είναι ο ακόλουθος:

- Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο: Μέχρι 1 Ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές, ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες.
- Βολτόμετρο: Υψηλής αντίστασης εισόδου ($>10 \text{ M}\Omega$) για ακρίβειες από μV έως V.
- Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης: Το όργανο αυτό 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.
- Όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού: Μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης παρεμβάλλεται ένας ακόμα διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικών για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.

- Καλώδια σε καρούλια
- Ηλεκτρόδια

Στην παρούσα Γεωφυσική Έρευνα, το εργαστήριο εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, παρέχει το όργανο μέτρησης SYSCAL PRO. Το συγκεκριμένο όργανο μετράει υψηλές τιμές Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και Επαγόμενης Πολικότητας. Δίνει τη δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης 10 καναλιών καθώς και της εναλλαγής της διάταξης ηλεκτροδίων, 1000V – 250W – 2,5A.



Εικόνα 2.10: Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

2.1.3 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις.

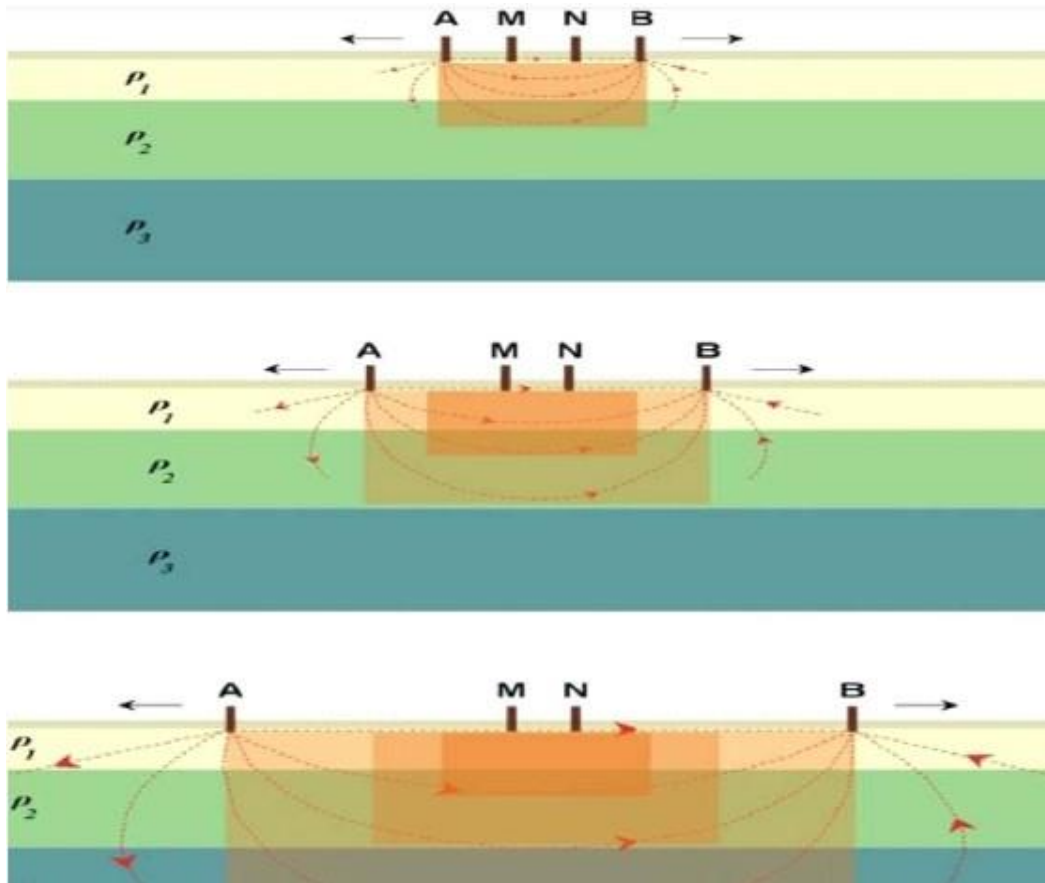
Ο στόχος των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων είναι η περιγραφή της δομής του υπεδάφους. Έτσι, με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια και μελετώντας την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων και τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος, επιτυγχάνεται η περιγραφή της δομής του υπεδάφους.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

2.1.3.1 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση

Η ηλεκτρική βυθοσκόπηση, μια εφαρμογή που βασίζεται σε κατακόρυφες μεταβολές, περιγράφει τη γεωλογική δομή του υπεδάφους. Ως αποτέλεσμα έχουμε τον υπολογισμό των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του πάχους ή/και του βάθους των γεωλογικών στρωμάτων.

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

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

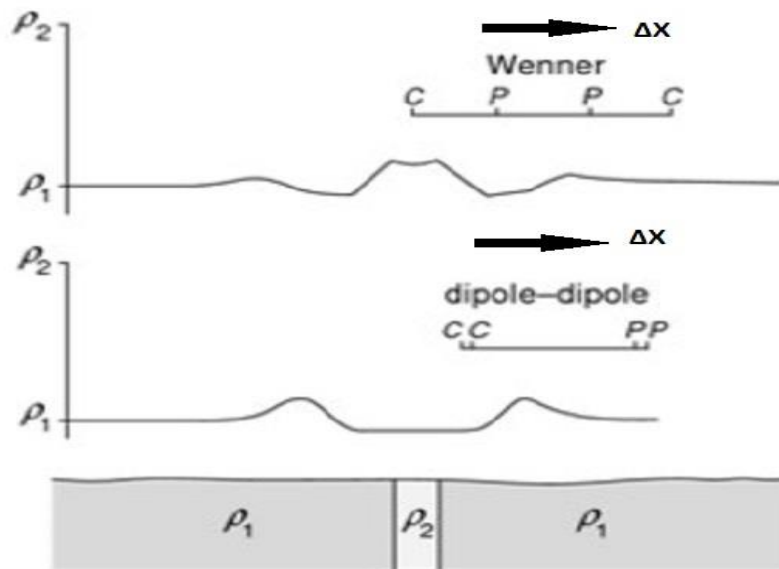


Εικόνα 2.11: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης.

2.1.3.2 . Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης

Στη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στην μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια διεύθυνση. Με την μέθοδο αυτή εντοπίζονται ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών (π.χ. μεταπτώσεις). Η ιδιότητα αυτή της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης την καθιστά κατάλληλη για περιπτώσεις αναζήτηση μεταλλευμάτων ή αρχαιοτήτων.

Μια σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη 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.



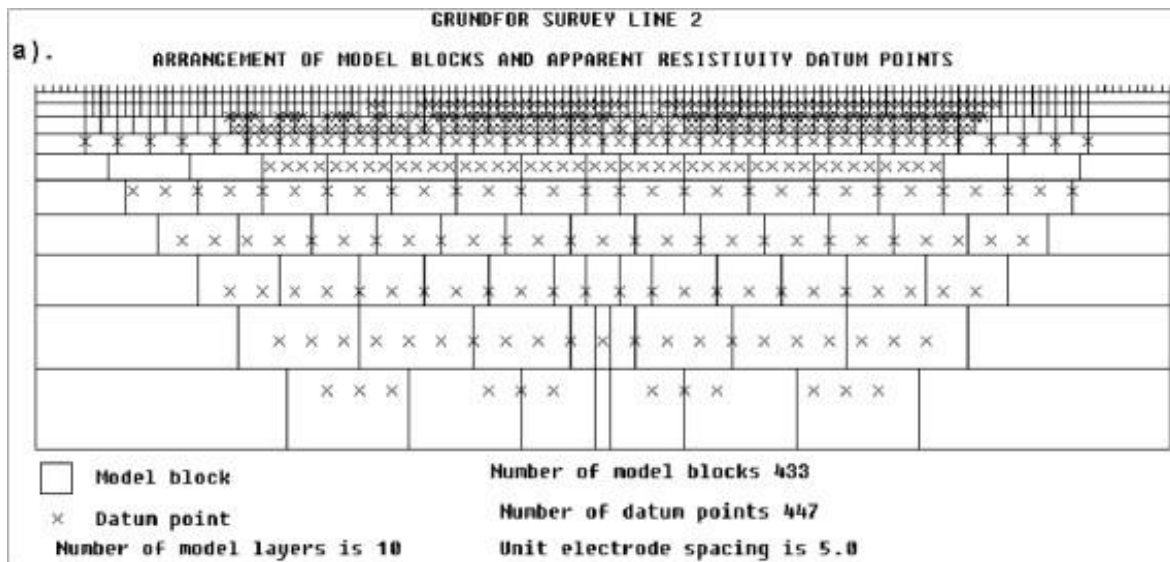
Εικόνα 2.12: Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole – Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.

2.1.4 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

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

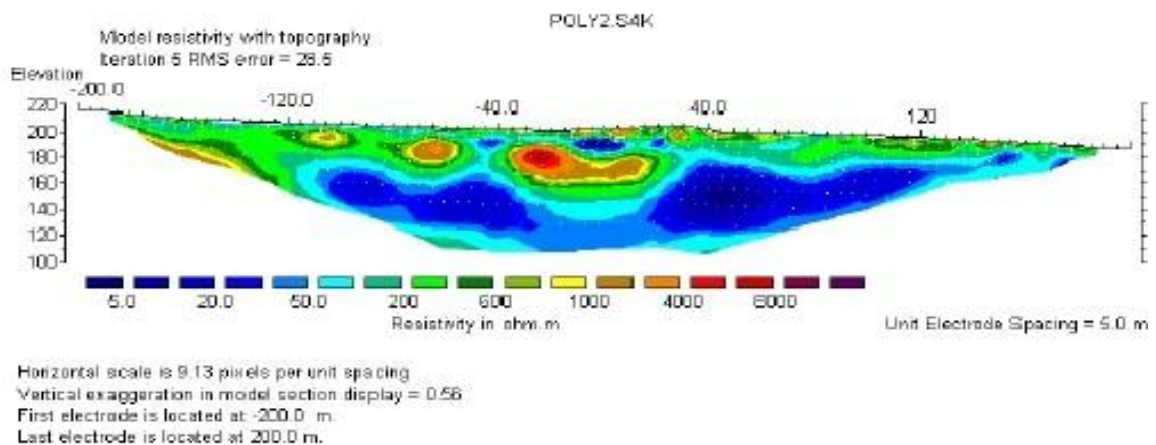
Η μέθοδος αυτή απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους.

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



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

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



Εικόνα 2.14: Μοντέλο Απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

2.2. Η Κλασική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

2.2.1. Γενικά

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

2.2.2. Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων – Εφαρμογές της Μεθόδου

Έχουμε δύο ειδών συστήματα:

- **TEM (Time domain Electromagnetic Measurements):** Μετρήσεις σε συνάρτηση του χρόνου.
- **FEM (Frequency-domain Electromagnetic Measurements):** Μετρήσεις σε συνάρτηση συχνότητας.

Επιπλέον, έχουμε διαφόρων ειδών συστήματα σε σχέση με την πηγή:

- **Παθητικά:** Χρησιμοποιούνται φυσικά υπεδαφικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα πχ. Μαγνητοτελλουρικά
- **Ενεργητικά:** Χρησιμοποιείται πομπός ηλεκτρομαγνητικού σήματος που επάγει ρεύμα στο έδαφος
- **Τοπικού πεδίου:** Όργανα μέτρησης αγωγιμότητας
- **Απομακρυσμένου πεδίου:** Χρησιμοποιούνται σήματα πολύ χαμηλής συχνότητας που εκπέμπει πομπός για επικοινωνία υποβρυχίων.

Τέλος, τα επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα διακρίνονται σε:

- **Μικρού βρόγχου:** Είναι τα περισσότερα συστήματα που δουλεύουν στο των συχνοτήτων (EM31, EM34, κλπ.) και κάποια στον χώρο του χρόνου. Κυρίως χρησιμοποιούνται για περιβαλλοντικές εφαρμογές.
- **Μεγάλου βρόγχου (5m με 100m βρόγχοι):** Κυρίως συστήματα στον χώρο του χρόνου που χρησιμοποιούνται στη μεταλλευτική έρευνα.
- **Επιπέδου κύματος (VLF, Μαγνητοτελλουρικά):** Χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα και στον εντοπισμό βαθέων γεωλογικών δομών.

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

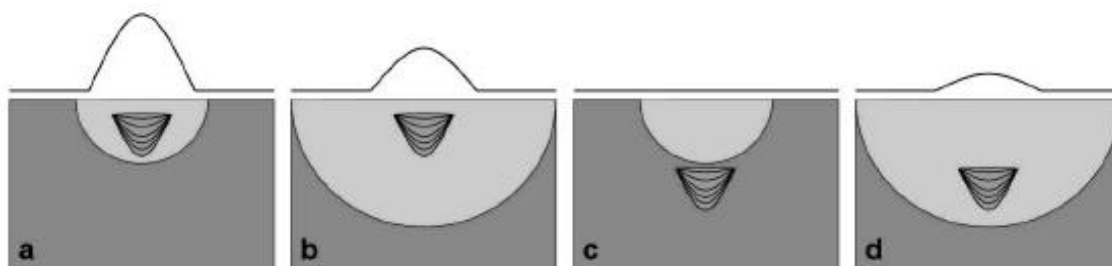
- Μεταλλευτική έρευνα
- Εντοπισμός ρύπανσης υδατικών πόρων
- Εντοπισμός μετώπου υφαλμύρισης
- Γεωλογική χαρτογράφηση, χαρτογράφηση εδαφών, κροκαλών
- Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων(σωληνώσεις, δεξαμενές, τοιχία, κλπ.)
- Αρχαιολογική έρευνα
- Εντοπισμός εγκοίλων (σπήλαια, εγκαταλελειμμένες σήραγγες,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

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) ή miliSiemens ανά μέτρο (mS/m). Ένα Siemens είναι αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με 1/Ohm. Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης και τα στοιχεία αγωγιμότητας δεν είναι συχνά συγκρίσιμα με τις μετρήσεις αντίστασης που λαμβάνονται με τα συστήματα των ηλεκτροδίων. Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται συνήθως σε μετρήσεις που συλλέγονται με ένα όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε για την αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε σε μετρήσεις που λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EMI) επαγωγής. Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάζουν με τους χάρτες των δεδομένων ειδικής αντίστασης και μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι μερικές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συνήθως από έναν μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας ενδεχομένως τα όρια της ανωμαλίας. Όπως στην αντίσταση, η αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βυθισμένες στις αντιθέσεις της επίγειας υγρασίας ή τον τύπο υλικού. Τα μικρά κοιλώματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι και τα υπολείματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν αποτελεσματικά.

2.2.3.1. Βάθος και ανάλυση

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετριοούνται με την «EMI» εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, η ειδική συχνότητα, το ύψος των αισθητήρων επάνω από το έδαφος, και ο προσανατολισμός των σπειρών. Αρχικά εξετάζεται η συχνότητα. Τα πεδία χαμηλότερης συχνότητας της «EMI» έχουν πιο μεγάλα μήκη κύματος, και είναι επομένως ικανά να διαπεράσουν βαθύτερο στο έδαφος. Γενικά η διείσδυση σε βάθος είναι μεγαλύτερη για τις χαμηλότερες συχνότητες. Βέβαια, το μειονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι ότι ένας μεγαλύτερος όγκος γης μετριέται, επομένως τα μικρά αντικείμενα όπως τα αρχαιολογικά στοιχεία δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μια υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα έχει μικρότερο βάθος, έτσι ώστε τα αρχαιολογικά στοιχεία να αποτελούν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου. Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση ώστε να ανιχνευθούν τα μικρότερα στοιχεία, αλλά οι χαμηλότερες συχνότητες μπορούν να επιτρέψουν την ανίχνευση των σχετικά μεγάλων ή υψηλών στόχων αντίθεσης που είναι πάρα πολύ βαθιοί και ειδάλως δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Αν και τα ρηγά αντικείμενα, ίσως να μπορούν να ανιχνευθούν επαρκώς με χαμηλές συχνότητες, οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες για την ανίχνευση των αρχαιολογικών στοιχείων (**Εικόνα 2.15**). Επομένως, δεν είναι έκπληξη ότι το «Geonics EM38» χρησιμοποιείται τόσο συχνά και τα όργανα χαμηλότερης συχνότητας όπως EM31 χρησιμοποιούνται για τους βαθύτερους και μεγαλύτερους στόχους.



Εικόνα 2.15: Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικειμένου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (a) ένα ρηγά αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετριέται με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος Γεώργιος 2013)

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

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

2.2.3.2. 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 στις περιοχές με πολύ ξηρό ή σκληρό έδαφος, όπου τα ηλεκτρόδια είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν, ή το ρεύμα δεν θα ρεύσει λόγω της έλλειψης υγρασίας. Οι πολύ ξερές συνθήκες επιφάνειας δεν είναι απαραίτητως μια ένδειξη ότι το έδαφος κάτω από την επιφάνεια είναι πάρα πολύ ξηρό για να παρέχει μια αρκετή αντίθεση, συχνά επαρκής υγρασία βρίσκεται μόνο μερικά εκατοστόμετρα κάτω από τα ηλεκτρόδια. Τα όργανα της «EMI» μπορούν επίσης να «πακεταριστούν» και να μεταφερθούν ευκολότερα εξ' αιτίας του μικρότερου μεγέθους τους. Τα μειονεκτήματα ερευνών αγωγιμότητας περιλαμβάνουν την ευαισθησία του EM38 στην ηλεκτρική παρέμβαση (π.χ., φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια) και τα συντρίμια μετάλλων.

2.2.4. Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι το μέτρο της δυνατότητας ενός υλικού να ,μαγνητιστεί παρουσία μαγνητικού πεδίου. Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου (κ) ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ), αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις δίνεται σαν αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο. Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία, προερχόμενα από την εξωτερική στιβάδα των ηλεκτρονίων, έτσι ώστε όλες οι ουσίες αντιδρούν στα κοινά μαγνητικά πεδία, μέχρι ενός σημείου. Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει τη μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και υδροξειδίων στις εντονότερες μαγνητικές μορφές, έτσι το χώμα είναι πολύ πιο μαγνητικό και από τα στρώματα του υπεδάφους. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα επί των αρχαιολογικών τόπων να είναι συνήθως πιο μαγνητικά από εκείνα στις περιβάλλουσες μη πολιτιστικές περιοχές. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της εδαφολογικής θερμοκρασίας μέσω της πυρκαγιάς. Οι πυρκαγιές, είτε φυσικές είτε προκαλούμενες από τον άνθρωπο, επίσης ενισχύουν την μαγνητική επιδεκτικότητα. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας επί των αρχαιολογικών τόπων, με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα να ανιχνευθούν τα τεχνητά αντικείμενα. (Dalan. R. A. 2006)

2.2.4.1. Βάθος και ανάλυση

Από όλες τις γεωφυσικές μεθόδους που περιγράφονται εδώ, η μαγνητική επιδεκτικότητα που συλλέγεται από την επιφάνεια του εδάφους είναι περιορισμένη από την άποψη της διαπερατότητας σε βάθος εξ 'αιτίας της αδυναμίας των μαγνητικών πεδίων που μετριούνται. 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 στην 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 ευθείας επαφή με το έδαφος, και το βάθος της διείσδυσης περιορίζεται από τη διάμετρο του βρόχου αναζήτησης. Για παράδειγμα, ο <<BartingtonMS2D>> αισθητήρας μονού βρόχου, διαπερνά μόνο περίπου 0.10 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι διπλοί αισθητήρες σπειρών, όπως το Geonics EM38 έχουν μια διείσδυση της τάξης του μισού μέτρου ή περισσότερο (εντούτοις, η ευαισθησία 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 όπως για την αγωγιμότητα, ίσως 0.25m X 0.5m (δηλ., 4 αναγνώσεις ανά γραμμικό μέτρο, με περάσματα που χωρίζονται ανά 0.5m). Οι μονοί αισθητήρες σπειρών, εντούτοις, 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. Άρα, η πυκνότητα των μετρήσεων είναι επομένως της τάξης μίας μέτρησης ανά τετραγωνικό μέτρο (ή λιγότερο). Αυτό βάζει ένα προφανές όριο στη χωρική ανάλυση. Με τα όργανα διπλών σπειρών η χωρική ανάλυση είναι παρόμοια με την αγωγιμότητα.

2.2.5. Αρχές της Γεωφυσικής Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου

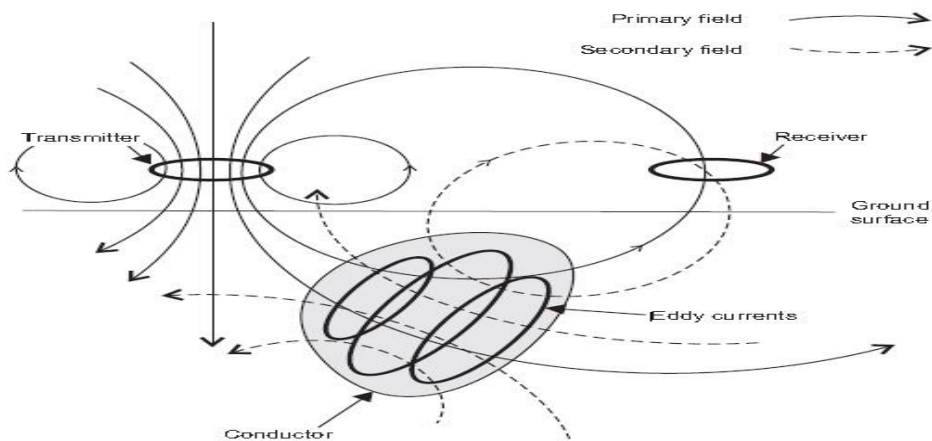
Οι ηλεκτρομαγνητικές (EMI) μέθοδοι έρευνας χρησιμοποιούν την απόκριση του εδάφους στη διαδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Τα αρχικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να παραχθούν με τη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός μικρού πηνίου φτιαγμένο με πολλές περιελίξεις καλωδίου ή μέσω ενός μεγάλου βρόχου του καλωδίου.

Η απόκριση του εδάφους είναι η παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα τελικά πεδία μπορούν να ανιχνευθούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που ρέουν σε ένα πηνίο δέκτη με τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

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

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 προς την φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από τις σχετικές θέσεις 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 2.16: 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 ρεύσουν στα αγώγιμα 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).

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 τις αλλαγές της χωρικής αγωγιμότητας, είναι ειδικά υπεύθυνη για τον εντοπισμό υψηλής αγωγιμότητας σωμάτων όπως μεταλλικά. Η μετρούμενη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι η μέση αγωγιμότητα ενός ή περισσοτέρων στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης του οργάνου, σε βάθος έρευνας που σχετίζεται με την απόσταση των πηνίων, την διεύθυνση, τη συχνότητα λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους.

2.2.5.1. Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Το βάθος διείσδυσης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εξαρτάται από τη συχνότητα του και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου μέσω του οποίου διαδίδεται. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται κατά την διέλευσή τους μέσω του εδάφους, το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Το βάθος της διείσδυσης \mathbf{d} μπορεί να οριστεί ως το βάθος στο οποίο το πλάτος \mathbf{A}_d μειώνεται κατά ένα παράγοντα e^{-1} (37%) συγκρινόμενο με το πλάτος στην επιφάνεια \mathbf{A}_0 .

$$\mathbf{A}_d = \mathbf{A}_0 \times e^{-1}$$

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

Όπου το \mathbf{d} είναι σε μέτρα, η αγωγιμότητα σ σε Sm^{-1} και η συχνότητα \mathbf{f} του πεδίου είναι σε Hz.

Το βάθος διείσδυσης είναι αντίστροφος 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 \mathbf{z}_e μπορεί να καθοριστεί ως το μέγιστο βάθος στο οποίο ο αγωγός μπορεί να βρεθεί και να παράγει μια αναγνωρίσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία .

$$\mathbf{z}_e = \frac{100}{\sqrt{\sigma f}}$$

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

2.2.5.2. 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 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, τα οποία το διανυσματικό μήκος είναι ανάλογο προς το πλάτος του πεδίου και η γωνία που μετρείται αντίθετα προς 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 \mathbf{P} οδεύει άμεσα από τον πομπό στο 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 πολύ το πλάτος του, αλλά παραμένει σε φάση με το επιφανειακό πρωτογενές. Το πρωτογενές πεδίο προκαλεί μια εναλλασσόμενη τάση σε ένα υπεδαφικό αγωγό με την ίδια συχνότητα με πρωτογενές αλλά με καθυστέρηση φάσης $\pi/2$ σύμφωνα με τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

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

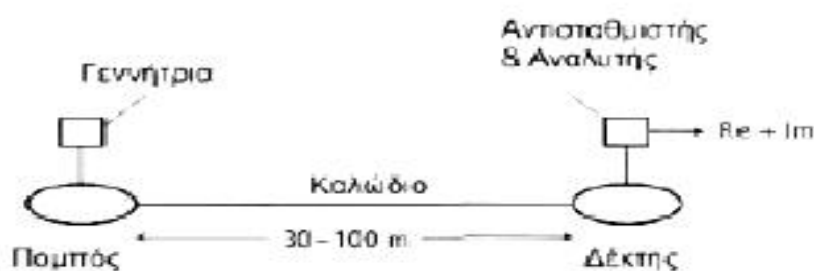
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi fL}{r}\right)$$

Όπου f η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, L η αυτεπαγωγή του αγωγού, r η αντίσταση του αγωγού. Ένας καλός αγωγός θα πλησιάζει το ϕ τα $\pi/2$ ενώ ένας για έναν κακό αγωγό το μηδέν.

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

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



Εικόνα 2.17: Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου

Το σήμα εξόδου από το πηνίο δέκτης περνάει από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο μετράει αρχικά στο έδαφος χωρίς αγωγίμο σώμα και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται στο 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 στις πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες που συνήθως παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, του οποίου το μέγεθος αναμεταδίδεται μέσω του διασυνδεδεμένου καλωδίου. Τομές μέτρησης γίνονται γενικά κάθετα στις γεωλογικές ασυνεχείς και οι μετρήσεις αντιστοιχούν στην 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 ,δεδομένου

ότι ένα μικρό λάθος στην απόσταση μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση φάσης. Τα πηνία πρέπει επίσης να κρατηθούν ακριβώς οριζόντια και συνεπίπεδα δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Η απαιτούμενη ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε μεγάλες αποστάσεις με ανώμαλη τοπογραφία.

2.2.3.2. 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 τη διαμόρφωση του. Το όργανο CMD μπορεί να διαθέτει κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο ώστε για κάθε θέση μέτρησης να καταγράφονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες. Στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε διαφορικό GPS Leica GX 1230 GG RTK Receiver with L2C (Εικόνα 2.18). Οι τυπικές εφαρμογές του οργάνου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.4):

Γεωτεχνική έρευνα	Γεωλογική Χαρτογράφηση Περιοχών	Γεωργία
<ul style="list-style-type: none"> Αξιολόγηση βραχώδους υποβάθρου 	<ul style="list-style-type: none"> Αναζήτηση κοιτασμάτων 	<ul style="list-style-type: none"> Προσδιορισμός ποιότητας εδάφους
<ul style="list-style-type: none"> Αποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων 	<ul style="list-style-type: none"> Γεωλογική έρευνα 	<ul style="list-style-type: none"> Διαχείριση νερού και λιπασμάτων
	<ul style="list-style-type: none"> Εντοπισμός σπηλαίων 	

Αρχαιολογία	Περιβαλλοντικούς σκοπούς
<ul style="list-style-type: none"> Εντοπισμός τοιχίων 	<ul style="list-style-type: none"> Υδρογεωλογικές μορφές
<ul style="list-style-type: none"> Ιστορική έρευνα σπηλαίων 	<ul style="list-style-type: none"> Σημεία ρύπανσης
<ul style="list-style-type: none"> Εντοπισμός υπογείων στοών 	<ul style="list-style-type: none"> Διαχείριση νερού λεκανών

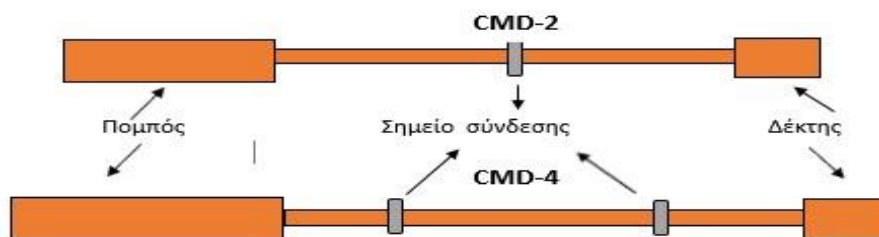
Πίνακας 2.4: Τυπικές εφαρμογές οργάνου CMD



Εικόνα 2.18: Leica GX 1230 GG RTK Reciever with L2C

Τα πλεονεκτήματα του μηχανήματος είναι η ταχύτητα του (απόκριση σχεδόν 0,1s), η δυνατότητα για δύο βάθη διασκόπησης αλλά και η άμεση σύνδεση του GPS για γρήγορο προσδιορισμό αλλά και αποθήκευση δεδομένων υψομέτρου και γεωγραφικού πλάτους και μήκους σε κάθε σημείο μέτρησης.

Σε συνεχείς μετρήσεις, όταν το όργανο μετακινείται συνεχώς στη περιοχή έρευνας, η μετρούμενη αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα υπολογίζονται ως μέσος όρος των τιμών που μετρήθηκαν σε κάθε θέση, σε κάθε στιγμή μέτρησης. Λάθος κατά τη μέτρηση υπολογίζεται ως τυπική απόκλιση. Το CMD επιτρέπει τον αυτόματο έλεγχο σφάλματος. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει το μέγιστο αποδεκτό όριο σφάλματος (<1%, <2%, <5%, <10%,) και σε αυτή την περίπτωση 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 το Ground-Penetrating Radar (GPR) είναι μια τεχνική απεικόνισης του υπεδάφους σε υψηλή ανάλυση. Σε αντίθεση με τις σεισμικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την χαρτογράφηση επιφανειακών στρωμάτων και οι οποίες δεν διαθέτουν την απαιτούμενη ακρίβεια (εντοπισμός υπόγειων κατασκευών με μήκος μικρότερο του 1 m) , το γεωραντάρ καθίσταται καταλληλότερη μέθοδος. Συμπεριλαμβάνεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους καθώς ελέγχει τις ηλεκτρικές ιδιότητες σε υψηλές συχνότητες. Το GPR είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος, και επομένως μπορεί να εφαρμοστεί στις αστικές και ευαίσθητες περιοχές.

Η μέθοδος γεωραντάρ εφαρμόζεται σε περιοχές με σχηματισμούς υψηλών σχετικά ειδικών αντιστάσεων. Βασίζεται στην ανάκλαση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από 8MHz έως 4GHz, σε ασυνέχειες μέσων που η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα μεταβάλλονται. Η διηλεκτρική σταθερά είναι η δυνατότητα ενός υλικού να αποθηκεύει φορτία όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στον παρατίθενται οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (K), της ηλεκτρικής **Πίνακα 2.5** αγωγιμότητας σ και οι ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v).

	K	σ (mS/m)	V (m/ns)
Αέρας	1	0	0.30
Αποσταγμένο νερό	80	0.01	0.033
Γλυκό νερό	80	0.5	0.033
Θαλασσινό νερό	80	3×10^3	0.01
Ξηρά άμμος	3-5	0.01	0.15
Διαποτισμένη άμμος	20-30	0.1-1.0	0.06
Ασβεστόλιθος	4-8	0.5-2	0.12
Σχιστόλιθος	5-15	1-100	0.09
Ίλος	5-30	1-100	0.07
Άργιλος	5-40	2-1000	0.06
Γρανίτης	4-6	0.01-1	0.13
Ξηρό άλας	4-6	0.01-1	0.13
Πάγος	3-4	0.01	0.16

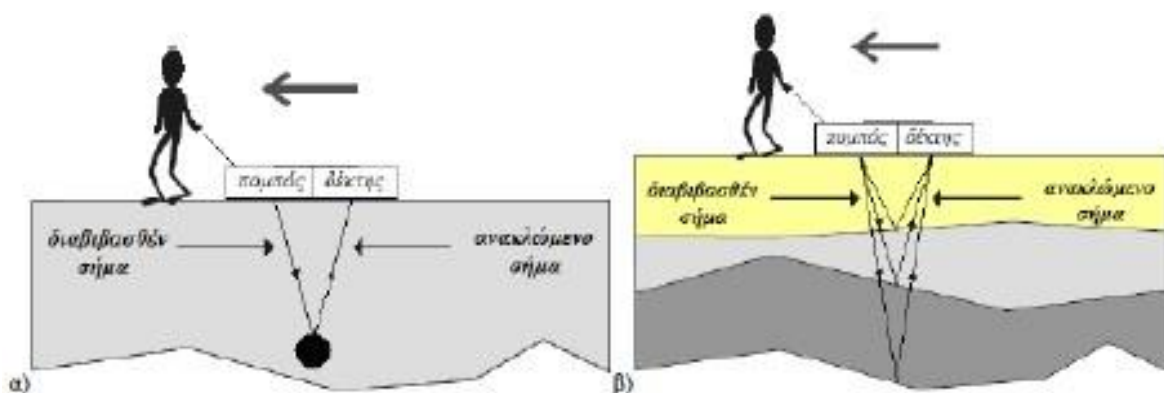
Πίνακας 2.5: Ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων(v) τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας(σ) για διάφορους τύπους υλικών

Ακολουθώντας διάφορες παραμέτρους διαδικασίας μέτρησης και επεξεργασίας εξασφαλίζουμε την δυνατότητα να έχουμε ανακλώμενο σήμα επιστροφής λόγω παρουσίας κάποιου αντικειμένου. Το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά αυτό του σήματος, εξαρτώνται από τη 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 γεωραντάρ είναι τα ακόλουθα:

- Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα: Παραγάγει 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.

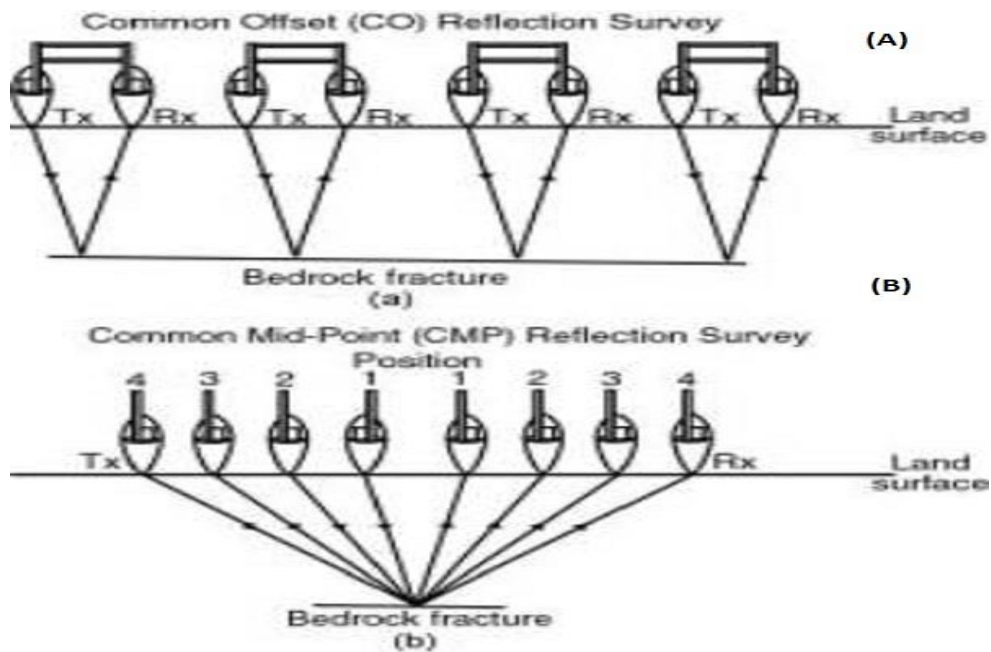


Εικόνα 2.20: Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

2.3.3. Μετρήσεις στο ύπαιθρο

Υπάρχουν δύο μοντέλα διάταξης:

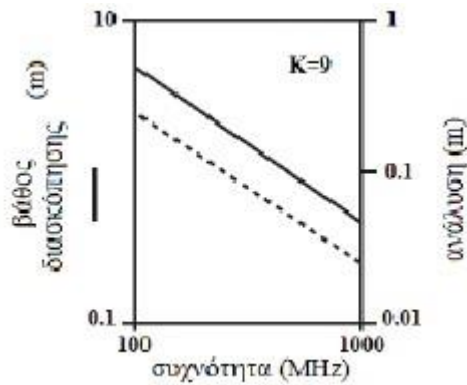
- Τυπική διάταξη λειτουργίας (common - offset): Ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση και μετακινούνται κατά την γραμμή διασκόπησης συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα. Συνήθως ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται μέσα σε κουτί θωρακισμένο για μέγιστη κατευθυντικότητα προς τα κάτω και για αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων(
- Μέθοδος κοινού μεσαίου σημείου (Common – Midpoint):Ο πομπός και ο δέκτης απομακρύνονται από ένα συγκεκριμένο κεντρικό σημείο, ή το ένα στέκεται σταθερό και το άλλο απομακρύνεται από το πρώτο. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος.



Εικόνα 2.21: (a) Τυπική διάταξη λειτουργίας (common – offset) (b) Μέθοδος κοινού μεσαίου σημείου (Common – Midpoint)

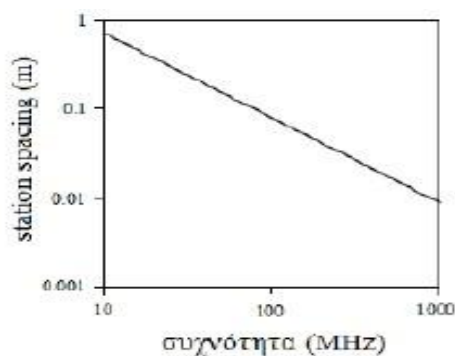
Σε μια τυπική διάταξη λειτουργίας common – offset καθορίζονται μια σειρά από παραμέτρους:

- Συχνότητα λειτουργίας πομπού (operating frequency): Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας των κεραιών του συστήματος γεωραντάρ που χρησιμοποιείται τόσο μεγαλύτερη 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 κεραίας 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 της περιόδου T_{\min} που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη συχνότητα f_{\max} 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 των γραμμών διασκόπησης και πυκνότητάς τους (line location and spacing): Οι γραμμές διασκόπησης καθορίζονται έτσι ώστε να περνούν όσο το δυνατόν κάθετα στην μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται, και με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός των γραμμών που εκτελούνται οι μετρήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ (ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ) ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

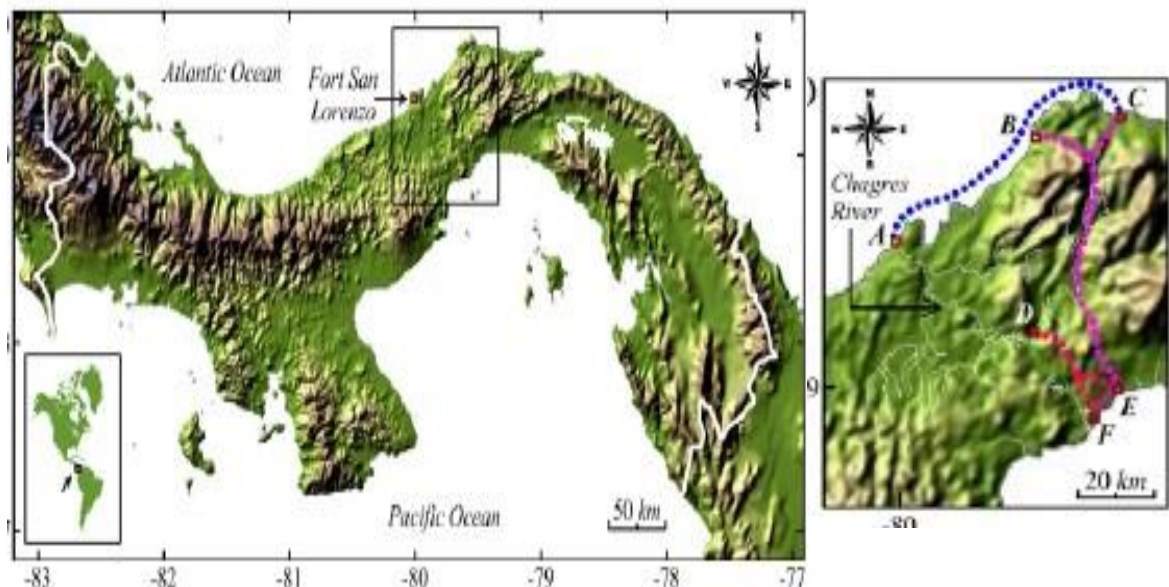
3. Εφαρμογές της Γεωφυσικής για τον Εντοπισμό Ανθρωπογενών (Αρχαιολογικών) Σχηματισμών

3.1. Εφαρμογή Α: Ολοκληρωμένη γεωφυσική έρευνα στο φρούριο San Lorenzo, Παναμάς, κεντρική Αμερική

(A. Mojica, L. Pastor, M. Lezcano, R. Gonzalez, b. Rangel, R. Buenaño, M. Gómez, M. Llubes, J. Thiesson, C. Camerlynck & R. Vanhoeserlande, 2016).

3.1.1. Γενικά

Ο αρχαιολογικός χώρος του Φρούριου San Lorenzo βρίσκεται στην εκβολή του ποταμού Charges, στο βόρειο τμήμα του Παναμά (κεντρική Αμερική) και είναι ένας από τους πιο σημαντικούς Ισπανικούς αρχαιολογικούς χώρους του Ισθμού (17ος και 18ος αιώνας) γιατί χρησίμευε στην προστασία του ποταμού Charges – Las Cruces Trail (με τους θησαυρούς από την νότια Αμερική) από τους Άγγλους πειρατές. Το φρούριο βρίσκεται στην εκβολή του ποταμού Charges, στην ακτή της Καραϊβικής και χαρακτηρίζεται σαν θαυμάσιο παράδειγμα στρατιωτικής αρχιτεκτονικής, (πυροβολαρχία, φρέατα και σήραγγες) που είναι ένα με το επίπεδο της θάλασσας ; του 17ου και 18ου αιώνα. Το 1670, ο πειρατής Henry Morgan επιτέθηκε και άφησε στο Φρούριο του San Lorenzo μόνο ερείπια και το 1680 οι Ισπανοί ανακατασκεύασαν ένα καινούριο φρούριο, 24 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας με μια τάφρο καθώς και νέες πολεμίστρες και κτήρια (**Εικόνα 3.1**).



Εικόνα 3.1: (Αριστερά) Τοποθεσία του στρατηγικού Ισθμιακού Τριγώνου με το Φρούριο San Lorenzo στο χάρτη. (Δεξιά) Ο ποταμός Charges και οι κύριες πόλεις : A- San Lorenzo, B – Portobelo, C – Nombre de Vios, D – Venta de Cruces, E – Παλιά πόλη Παναμά, F – Πόλη Παναμά και τα 2 κύρια μονοπάτια.

3.1.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων

Ο καλύτερος τρόπος για να εξερευνηθούν θαμμένα αρχαιολογικά ευρήματα είναι να χρησιμοποιηθούν γεωφυσικές μέθοδοι όπως ηλεκτρομαγνητική, μαγνητική και ηλεκτρική χωρίς να επηρεάζουν τις περιοχές έρευνας. Ο σκοπός αυτής της έρευνας ήταν να ανιχνεύσει θαμμένα ερείπια που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά στοιχεία οχύρωσης του παλαιού φρουρίου μέσω έρευνας με χρήση ηλεκτρομαγνητικής και μαγνητικής μεθόδου.

Δύο ζώνες ερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας χαμηλής συχνότητας, πολλαπλών πηνίων, ηλεκτρομαγνητικών και μαγνητικών οργάνων (σε ρύθμιση για κάθετη λειτουργία) Οι χάρτες της Ζώνης 1 (βορειοανατολικός τομέας, δείχνουν μια ευθυγράμμιση κατά μήκος της περιοχής έρευνας, η οποία μπορεί να συνδέεται με μία τάφρο που χρησιμοποιούνταν σαν στρατιωτική διαδρομή και ένα όριο μεταξύ της τάφρου της κύριας δομής με την εξωτερική πολεμίστρα. Οι χάρτες της Ζώνης 2 (κεντρικός τομέας) δείχνουν ένα τμήμα ενός θαμμένου τοίχου, πιθανώς να συνδέεται με μια σημαντική δομή του φρουρίου. (Εικόνα 3.2)

Με βάση τις ιστορικές πληροφορίες για την περιοχή και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, έγινε ηλεκτρομαγνητική χαρτογράφηση σε 2 σημαντικές περιοχές του φρουρίου. Η Ζώνη 1 (που βρίσκεται ανάμεσα στην εξωτερική πολεμίστρα στο βορειοανατολικό τμήμα και της τάφρου του κύριου κτίσματος με επιφάνεια 66 m x 25 m και τη Ζώνη 2 που βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του φρουρίου με έκταση 12 m x 16 m.

Και οι 2 ζώνες διερευνήθηκαν με το όργανο CMD –Mini Explorer για την χαρτογράφηση σε πολλαπλά βάθη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με ανάλυση 0,1 mS/m , ενώ η Ζώνη 1 διερευνήθηκε με μαγνητόμετρο G-858 σε λειτουργία “gradient” με κάθετη απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων τα 0.60 m.

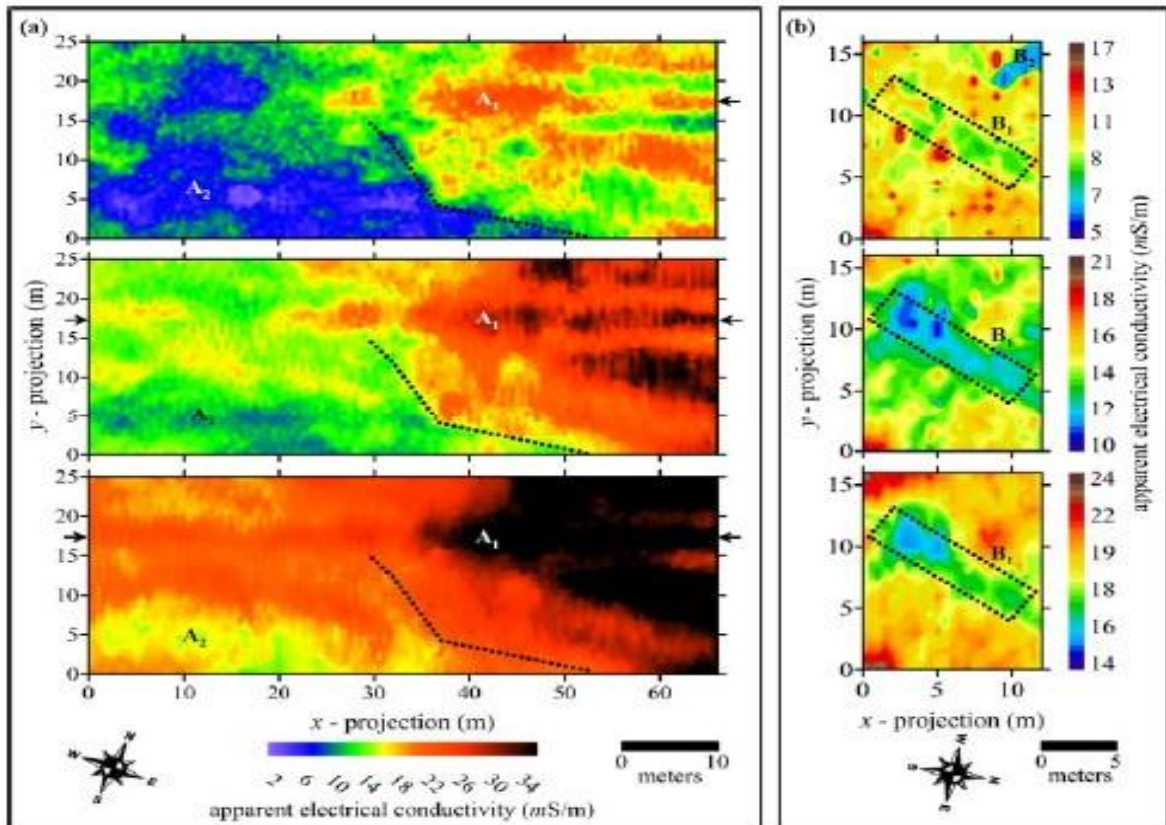


Εικόνα 3.2: Οι Ζώνες έρευνας και τα ερείπια του Φρουρίου.

3.1.3. Αποτελέσματα δεδομένων Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου

Η **Εικόνα 3.3 Α** δείχνει μια ηλεκτρική ανωμαλία A1 (κόκκινο και μαύρο χρώμα) με ψηλές τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας και με κατεύθυνση Νοτιοδυτικά – Βορειοανατολικά κατά μήκος της Ζώνης 1. Αυτή η ανωμαλία συνδέεται με ανθρωπογενείς κατασκευές, όπου σύμφωνα με τις ιστορικές πληροφορίες η ανωμαλία συνδέεται με ένα αρχαίο χαράκωμα που συνδέει την τάφρο του φρουρίου με την εξωτερική πολεμίστρα. Η ανωμαλία A2 (με χαμηλές τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας) συνδέεται με ένα συμπαγή χώρο υγειονομικής ταφής η οποία χρησίμευε ως τείχος.

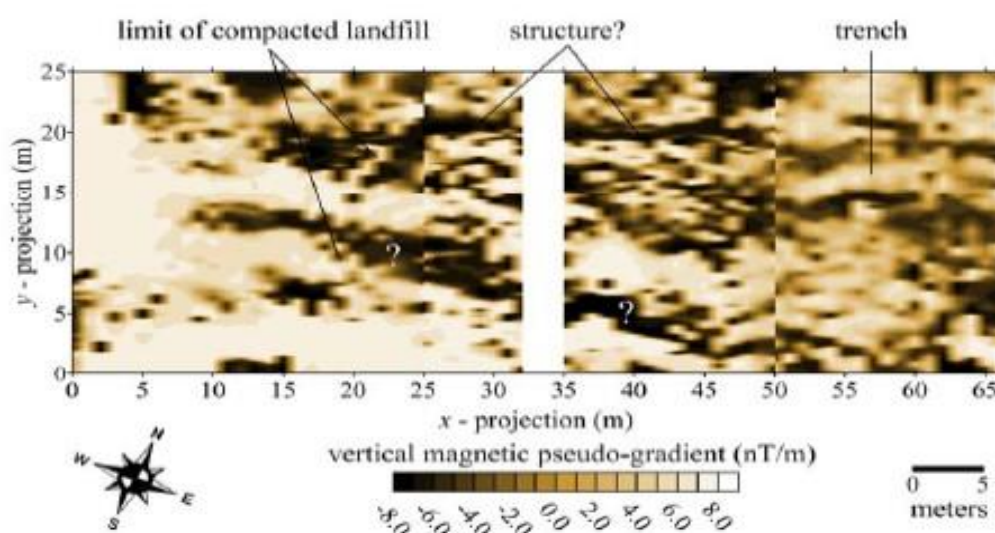
Στην **Εικόνα 3.3 Β** παρουσιάζεται μια σημαντική ανωμαλία με κατεύθυνση Νοτιοδυτικά – Βορειοανατολικά και χαμηλές τιμές φαινόμενης αγωγιμότητας. (η ανωμαλία B1 σε χρώμα ανοιχτό μπλε) όπου σύμφωνα με τους αρχαιολόγους αυτή η ανωμαλία μπορεί να συνδέεται με ένα τμήμα των θεμελίων του αρχαίου κτηρίου που καταστράφηκε από του Άγγλους πειρατές κατά την κατοχή τους. Επιπλέον, η ανωμαλία B2 συνδέεται με μια σειρά βράχων που βρίσκονται επιφανειακά.



Εικόνα 3.3: Χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε διαφορετικά βάθη διασκόπησης (0.3, 0.7 και 1 m) για τις Ζώνες 1 (α) και 2 (β) για το Φρούριο San Lorenzo.

3.1.4. Αποτελέσματα δεδομένων Μαγνητικής Μεθόδου

Στην **Εικόνα 3.4** παρουσιάζονται δύο κάθετες γραμμικές μαγνητικές ανωμαλίες που μπορεί να συνδέονται με το όριο ανάμεσα στον πληρωμένο χώρο ταφής και την εξωτερική πολεμίστρα. Στον βόρειο τομέα μια γραμμική μαγνητική ανωμαλία θα μπορούσε να συνδέεται με μια δομή και η μαγνητική ανωμαλία που βρίσκεται στο βορειοανατολικό τομέα μπορεί να συνδέεται με την τάφρο που περιγράφεται παραπάνω. (ανωμαλία Α στο **Εικόνα 3.3**)



Εικόνα 3.4: Κάθετη μαγνητική ψευδό – κλίση μετά από διορθώσεις στην Ζώνη 1.

3.1.5. Συμπεράσματα

Η ενσωμάτωση όλων των γεωφυσικών δεδομένων μας επιτρέπει να προτείνουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με την σύνδεση ανάμεσα σε δύο από τις κύριες δομές του φρουρίου: την τάφρο και την εξωτερική πολεμίστρα. Οι χάρτες που λήφθηκαν, παρουσιάζουν μια ευθυγράμμιση κατά μήκος της περιοχής έρευνας, η οποία μπορεί να συνδέεται με ένα χαράκωμα που χρησιμοποιείται σαν στρατιωτική οδός. (Ζώνη 1) Το όριο μεταξύ της τάφρου και της εξωτερικής πολεμίστρας έχει εντοπιστεί πράγμα που μας επιτρέπει να καταλάβουμε καλύτερα την αλληλουχία των δομών που ήταν μέρος αυτής σημαντικής αρχαιολογικής περιοχής. Τέλος στη Ζώνη 2 είναι πιθανό να εντοπίστηκε ένα τμήμα ενός θαμμένου τοίχου που πιθανά να συνδέονταν με μια σημαντική δομή του φρουρίου.

3.2. Εφαρμογή Β: Απόδειξη της συμβολής της διηλεκτρικής διαπερατότητας στην σε φάση ηλεκτρομαγνητική μέθοδο απόκρισης των εδαφών: Παράδειγμα αρχαιολογικού χώρου στο Μπαχρέιν.

(Christophe Benech¹, Pierre Lombard¹, Fayçal Rejiba² and Alain Tabbagh², 2016).

3.2.1. Γενικά

Το νησί Μπαχρέιν , βρίσκεται στο Αραβικό/Περσικό Κόλπο στον τροπικό του καρκίνου, έχει καταληφθεί από τους ανθρώπους εδώ και πολύ καιρό. Είναι πολύ γνωστό για τα σημαντικά νεκροταφεία που χρονολογούνται από την εποχή του χαλκού έως την Ελληνιστική περίοδο. Οι τύμβοι είναι τόσοι πολλοί ώστε, μέχρι τον 20ο αιώνα , το Μπαχρέιν συχνά αναφέρονταν ως «Νησί Νεκροταφείο» χωρίς μόνιμη εγκατάσταση. Οι αρχαιολόγοι τελικά απέδειξαν ότι ένας λαμπρός και πρωτότυπος πολιτισμός άκμαζε σε αυτό το νησί , συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια την περίοδο Dilmun. Αυτός ο πολιτισμός έπαιξε σημαντικό ρόλο καθώς αποτέλεσε σταυροδρόμι για την εμπορική κίνηση στον κόλπο, διευκολύνοντας το εμπόδιο μετάλλων μεταξύ Ομάν και Μεσοποταμίας. Η συνεχής στρωματογραφία είναι ένα θεμελιώδες σημείο αναφοράς για την ιστορία του νησιού, του οποίου το Qal'at al-Bahrain είναι ένας σημαντικός οικισμός και ίσως η πρωτεύουσα.

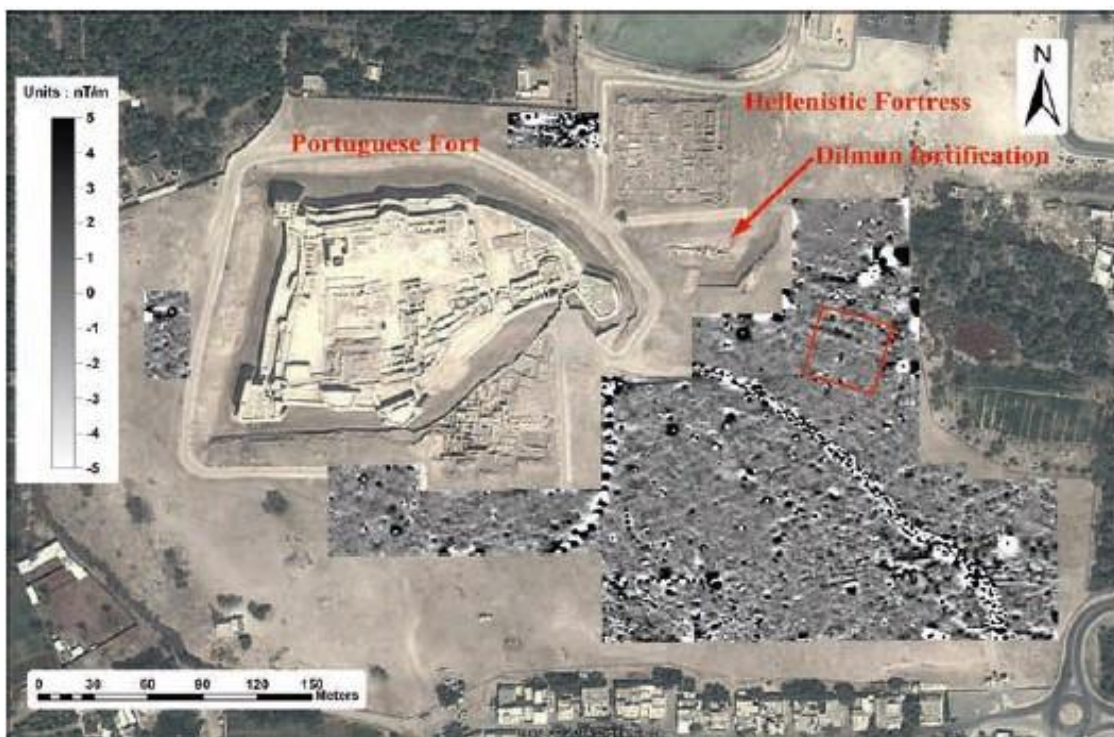
3.2.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να αναπτύξει μια εξήγηση για τα αποτελέσματα της σε φάση συνιστώσας τα οποία καταγράφηκαν στην περιοχή έρευνας. Η έρευνα επικεντρώθηκε σε μια περιορισμένη περιοχή επιφάνειας 40 x 40 m², όπου χαρτογραφήθηκε ο οικισμός Qal'at al-Bahrain. (Εικόνα 3.5)

Το έδαφος είναι πολύ αργιλώδες και έχει αναπτυχθεί πάνω από ένα διαβρωμένο υπόστρωμα μάργας, με το ξηρό κλίμα να επικρατεί και τη θάλασσας όπου προωθεί την συσσώρευση αλάτων. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άργιλο και άλας, η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του εδάφους είναι συχνά χαμηλότερη από 10 Ωm, το οποίο αποκλείει την χρήση GPR. Παρόλο που υψηλές αποκρίσεις της αγωγιμότητας μπορεί να αναμένονται, δεν υπάρχει λόγος να περιμένουμε ιδιαίτερα ισχυρές μαγνητικές ιδιότητες. Ωστόσο, στο μεγαλύτερο μέρος των περιοχών έρευνας, έδωσαν εκπληκτικά υψηλές τιμές για την σε φάση συνιστώσα από το όργανο.

Η επιφάνεια που εξετάζουμε, με τη μαγνητική μέθοδο, είναι μέρος της περιοχής που ερευνηθηκε και το 2011 με χρήση οργάνου G-858 (Geometrics, Ltd), μαγνητόμετρο ολικού πεδίου, καισίου, με δύο αισθητήρες, στο οποίο άνω αισθητήρας είναι τοποθετημένες σε ύψος 1,03 μέτρων και ο κάτω σε 0,4. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την μέτρηση σε κατακόρυφη κλίση είτε της έντασης του μαγνητικού πεδίου είτε απλά την ένταση σε κάθε υψόμετρο.

Κατά τη διάρκεια της ηλεκτρομαγνητικής έρευνας πεδίου στο Μπαχρέιν, η συχνότητα λειτουργίας του οργάνου ήταν 30 kHz, κατέγραφε συνεχώς δεδομένα καθώς ήταν στη λειτουργία συνεχούς καταγραφής χρησιμοποιώντας ένα κοινό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Η λειτουργία αυτή χαρακτηρίζεται από διάστημα καταγραφής 0,1 δευτερολέπτου και τα κέντρα των πηνίων απέχουν 0,12 m καθ' ύψος από το έδαφος. Στα ακόλουθα αποτελέσματα οι λειτουργίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τόσο η κατακόρυφη και κάθετη διάταξη οργάνου καθώς και οι αποστάσεις των 0,71 m και 1,18 m μεταξύ των δυο εσωτερικών πηνίων.



Εικόνα 3.5: *Qal'at al-Bahrain*, γενική όψη και τοποθεσία του πορτογαλικού φρούριου, του ελληνιστικού φρούριου, του μαγνητικού χάρτη και του περιγράμματος της έκτασης 40 m x 40 m πραγματοποίησης έρυνα με EM.

3.2.3. Αποτελέσματα δεδομένων Μαγνητικής Μεθόδου

Τα περισσότερα αρχαιολογικά ευρήματα που αποκαλύφθηκαν από το μαγνητικό χάρτη φαίνεται να ανήκουν στην καθυστερημένη κατάληψη του χώρου, πιθανότατα στην μεσαιωνική περίοδο (Εικόνα 3.6). Στην Βορειοανατολική γωνία του χάρτη, η κλίση δείχνει ξεκάθαρα τι μπορεί να ερμηνευθεί ως συνέχιση της οχύρωσης. Κατά μήκος της Νότιας πλευράς της οχύρωσης και παράλληλα με αυτό, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ένα ορθογώνιο κτίριο επιφάνειας 20 m x 35 m. Ένα 5 μέτρων πλάτους μονοπάτι είναι επίσης ορατό, μεταξύ του κτιρίου και της οχύρωσης. Αν και είναι δύσκολο να προκύψει μια πιο ακριβή περιγραφή της εσωτερικής οργάνωσης του κτιρίου, η θέση και ο προσανατολισμός δείχνουν ότι μπορεί επίσης να ανήκουν στην περίοδο Dilmun.

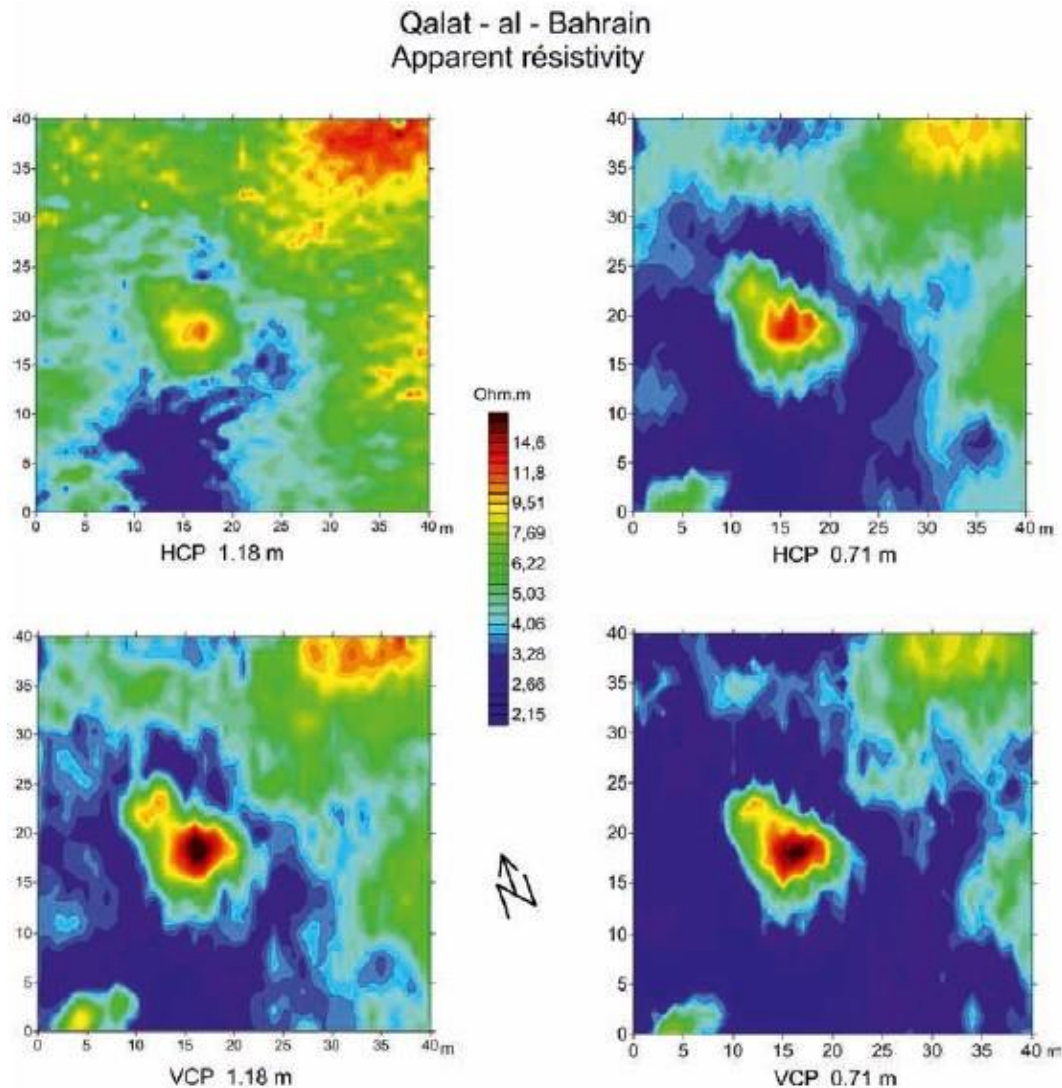


Εικόνα 3.6: Λεπτομέρειες χάρτη της κατακόρυφης κλίσης του συνολικού πεδίου με την προτεινόμενη ερμηνείας σε σχέση με την περίοδο Dilmun

3.2.4. Αποτελέσματα δεδομένων Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου

Οι τέσσερις χάρτες φαινόμενης ειδικής αντίστασης (αντίστροφο της αγωγιμότητας) στην Εικόνα 3.7 λήφθηκαν σε κατακόρυφη και οριζόντια διάταξη καθώς με απόσταση εσωτερικών πηνίων 0,71 m και 1,18 m. Υπάρχει συνέπεια στα αποτελέσματα των χαρτών, πέρα από τη μικρή αύξηση της διηλεκτρικής διαπερατότητας τόσο μεταξύ κατακόρυφης και οριζόντιας διάταξης όσο και αποτελεσμάτων μεταξύ απόστασης 0,71 m και 1,18 εσωτερικών πηνίων του οργάνου, όπου μπορεί να ερμηνευθεί απλώς με μια μείωση της

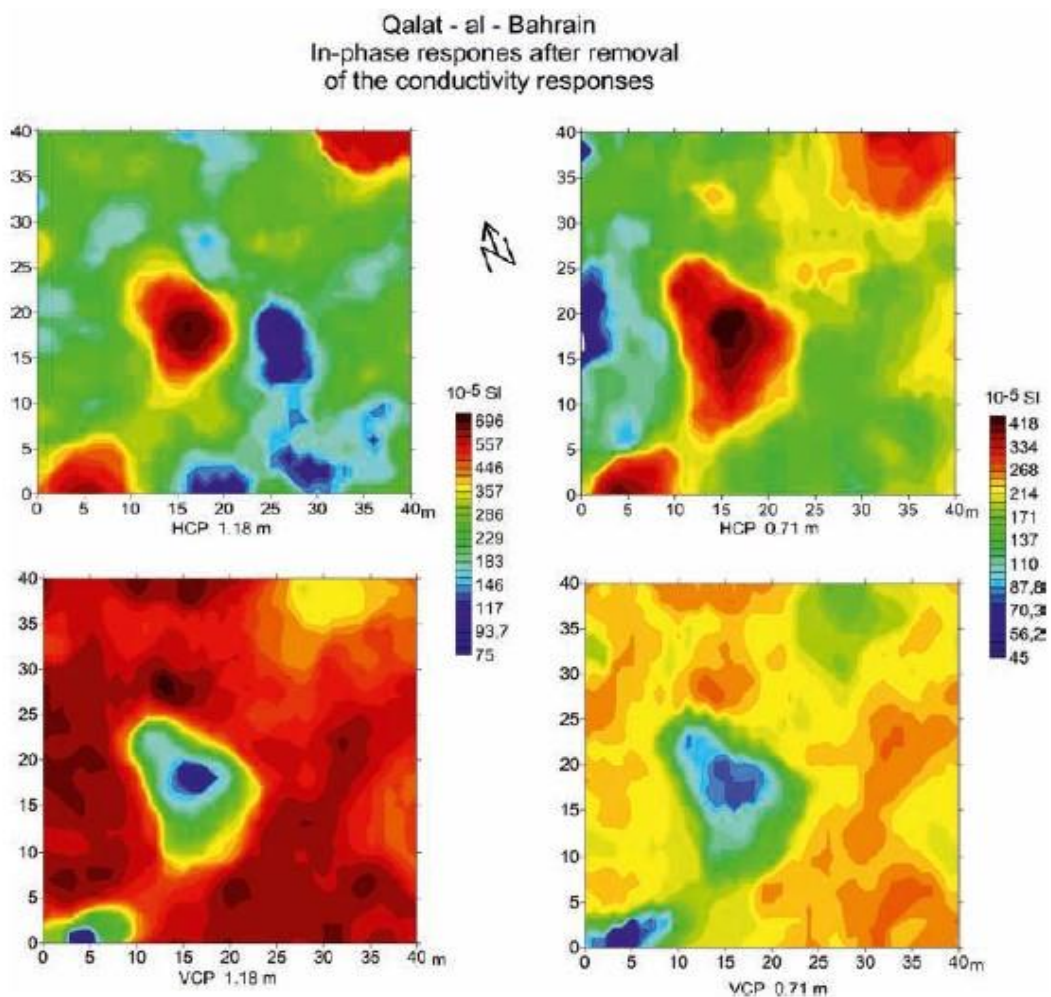
αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το βάθος διασκόπησης. Οι διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης διαφέρουν από εκείνες της μαγνητικής ιδιότητας που λήφθηκαν από το μαγνητικό χάρτη.



Εικόνα 3.7: Φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετρήθηκε με όργανο CMD σε συχνότητα 30 kHz σε οριζόντια και κάθετη διάταξη με απόσταση εσωτερικών πηνίων 0,71 m και 1,18 m.

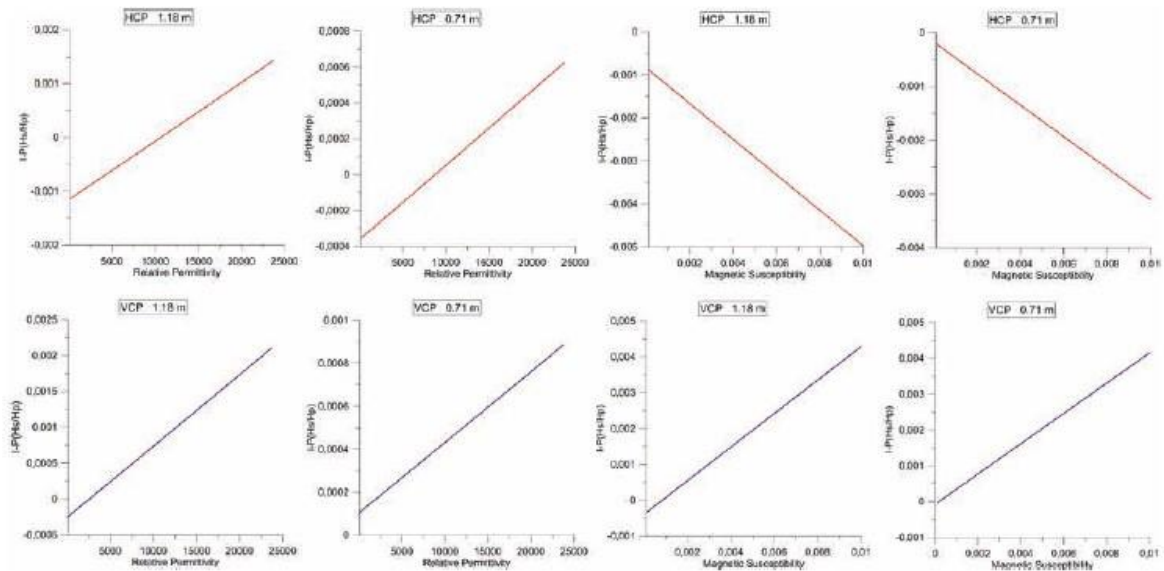
Στην υψηλή αγωγιμότητα του εδάφους, ένα μέρος της σε φάση απόκρισης δημιουργείται από την αγωγιμότητα. Για να διορθωθεί αυτό το φαινόμενο, αφού υπολογιστεί, σε κάθε σημείο της η «σε φάση συνιστώσας» της έρευνας, η φαινόμενη αγωγιμότητα προσδιορίστηκε από την απόκριση τετραγωνισμού. Μετά την αφαίρεση αυτού του τμήματος, το υπομένον σε φάση σήμα συνήθως θεωρείται ότι έχει δημιουργηθεί από τη μαγνητική επιδεκτικότητα του εδάφους.

Στην **Εικόνα 3.8** παρουσιάζονται οι τέσσερις χάρτες των «σε φάση συνιστωσών» διορθωμένες από τις αποκρίσεις αγωγιμότητας με τις αντίστοιχες κλίμακες μαγνητικής επιδεκτικότητας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση των σε «φάση συνιστωσών» που προκύπτουν από μηχανικές παραμορφώσεις (κυρίως θερμικής μετατόπισης) της δομής του οργάνου, η αβεβαιότητα στις μετρήσεις παραμένει κοντά στο μηδέν ακόμα και μετά από τακτικούς ελέγχους που πραγματοποιούνται μετά από ανύψωση του οργάνου. Ένα εντελώς απροσδόκητο αποτέλεσμα, σε αντίθεση με όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν προηγουμένως με το ίδιο όργανο και διαφορετικούς ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες αποκαλύπτεται σε αυτή την εικόνα. Οι διακυμάνσεις στην μαγνητική επιδεκτικότητα τόσο σε κατακόρυφη όσο και σε οριζόντια διάταξη είναι σε πλήρη αντίθεση, δηλαδή οι ελάχιστες τιμές της κάθετης διάταξης αντιστοιχούν στις μέγιστες της οριζόντιας διάταξης, και το αντίστροφο.



Εικόνα 3.8: Σε φάση συνιστώσα μετά την απομάκρυνση του μέρους της σε φάση αγωγιμότητας (CMD στα 30kHz οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη απόσταση εσωτερικών πηνίων 0,71 m και 1,18 m) και αντίστοιχη κλίμακα μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Χρησιμοποιώντας τον πλήρη υπολογισμό EM (Thiesson et al. 2014), η **Εικόνα 3.9** παρουσιάζει τις γραφικές παραστάσεις των σε φάση αποκρίσεων ως συνάρτηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας και διηλεκτρικής διαπερατότητας για κάθετη και οριζόντια διάταξη οργάνου καθώς και διαφορετικές τιμές της απόστασης μεταξύ των πηνίων του.

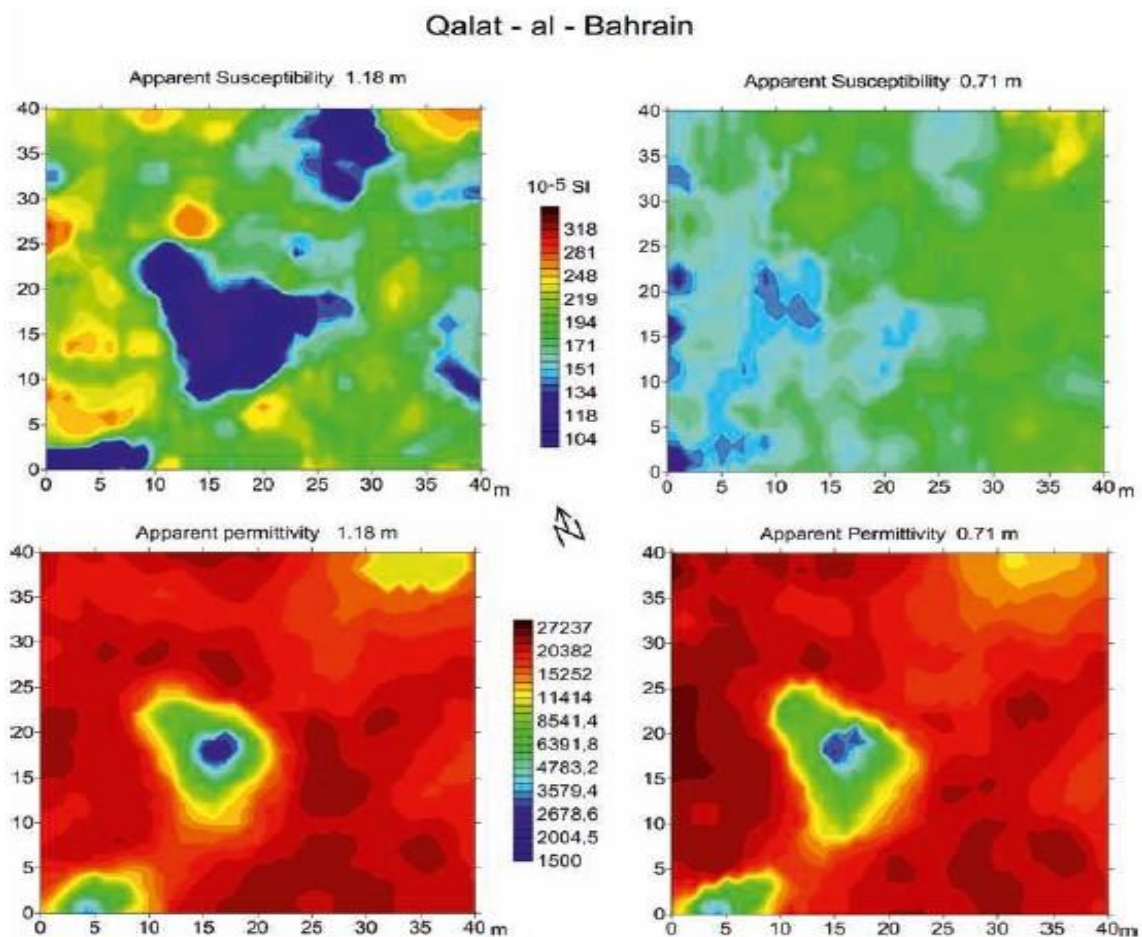


Εικόνα 3.9: Σε φάση αποκρίσεις σε σχέση με σχετική διαπερατότητα και μαγνητικής επιδεκτικότητας

Όλες οι αποκρίσεις είναι γραμμικές, τόσο οι αποκρίσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας όσο και της σχετικής διηλεκτρικής διαπερατότητας είναι αυξανόμενες. Οι κλίσεις των αποκρίσεων, αυξάνονται όταν η απόσταση μεταξύ εσωτερικών πηνίων αυξηθεί από τα 0,71 m στα 1.18 m. Το κύριο αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης είναι ότι ενώ σε όλες τις κλίσεις έχουν το ίδιο πρόσημο σε κάθετη διάταξη οργάνου, οι κλίσεις των συνιστωσών μεταξύ μαγνητικής επιδεκτικότητας και διηλεκτρικής διαπερατότητας στην οριζόντια διάταξη οργάνου έχουν διαφορετικά πρόσημα. Οπότε, αν η σε φάση συνιστώσα θεωρείται (λανθασμένα) ότι δημιουργείται από επιδεκτικότητα, ενώ πραγματικά η διηλεκτρική διαπερατότητα επικρατεί αυτής, αλλάζει το σήμα της υπολογιζόμενης επιδεκτικότητας στην οριζόντια διάταξη οργάνου. Αυτό δίνει μια τέλεια εξήγηση για τις προφανείς αντιφάσεις που παρατηρήθηκαν στην περιοχή έρευνας του νησιού Μπαχρέν και αποτελεί απόδειξη για την κυρίαρχη επιρροή της διηλεκτρικής διαπερατότητας του εδάφους σε σχέση με την επιδεκτικότητά του.

Ο διαχωρισμός των συνιστωσών μεταξύ των δύο ιδιοτήτων επιτυγχάνεται με κάλυψη της περιοχής έρευνας με το όργανο να βρίσκεται τόσο σε οριζόντια όσο και κατακόρυφη διάταξη. Η ελαφρά μηχανική αστάθεια της δομής του οργάνου, δυσκολεύει τον καθορισμό της σε φάση με μηδενική μετατόπιση. Για το λόγο αυτό υποθέτουμε, ότι ο μηδενισμός είναι ίδιος και για τις δύο διατάξεις πηνίων και έχει τιμή που ελαχιστοποιεί το μέσο αποτέλεσμα μεταξύ των οριζόντιων και κάθετων σε φάση μετρήσεων.

Οι φαινόμενες επιδεκτικότητες και φαινόμενης διαπερατότητες παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.10**. Οι χάρτες φαίνονται να είναι πολύ όμοιοι και έχουν καλό συσχετισμό με τους χάρτες ειδικής αντίστασης. Οι διακυμάνσεις στην επιδεκτικότητα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σημαντικά ασθενέστερη στην περίπτωση της μικρότερης απόστασης μεταξύ των εσωτερικών πηνίων του οργάνου. Καθώς η απόκριση του οργάνου κυριαρχείται από τις διακυμάνσεις της διαπερατότητας του εδάφους, δεν αποτελεί έκπληξη ότι οι δύο χάρτες επιδεκτικότητας φαίνεται να έχουν λιγότερη συνεκτικότητα.



Εικόνα 3.10: Χάρτες φαινόμενης μαγνητική επιδεκτικότητας και σχετικής επιδεκτικότητας σε φάση δεδομένων που προέκυψαν από οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη οργάνου.

3.2.5. Συμπεράσματα

Οι μετρήσεις EMI που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το CMD “Mini Explorer” στο νησί Μπαχρέιν πρέπει να ερμηνευτούν στο συγκεκριμένο πλαίσιο τους: Ένα αργιλώδες έδαφος κοντά στην θάλασσα, σε ένα ξηρό κλίμα. Κατά την ερμηνεία αυτών των δεδομένων, είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι οι ιδιότητες του εδάφους, τόσο μαγνητικά όσο και ηλεκτρικά, μπορούν να επηρεάσουν τις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις. Ωστόσο, καθώς η υψηλή διηλεκτρική σταθερά ενός γεμάτο με άλας αργιλώδους εδάφους συνδέεται με πολύ υψηλές τιμές αγωγιμότητας, οι ερευνητές θα πρέπει να γνωρίζουν τον κίνδυνο ότι η απόκριση της σε φάση αγωγιμότητα προκύπτει από την υψηλή διαπερατότητα του εδάφους παρά από τη μαγνητική επιδεκτικότητα. Η κατάσταση αυτή γίνεται εντονότερη όταν χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες ή διαφορετικά πηνία.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος όπως και άλλες γεωφυσικές μέθοδοι είναι πάντα δυνατό άμεσα να αντιστραφούν τα ανεπεξέργαστα δεδομένα με τη χρήση μιας πλήρους διαδικασίας αντιστροφής, χωρίς να προηγηθεί μετατροπή δεδομένων σε χάρτες. Αυτό βήμα είναι πολύ σημαντικό διότι μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην όλη διαδικασία ερμηνείας. Στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου έρευνας, χωρικές μεταβολές στην διαπερατότητα του εδάφους αντιστοιχούν σε μεταβολές στα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η περιεκτικότητα σε άργιλο, τύπος άργιλου, ιοντική δύναμη και μέγεθος πόρων ενώ οι διακυμάνσεις στην μαγνητική επιδεκτικότητα είναι ενδεικτικά των μεταβολών στις συνθήκες οξείδωσης– αναγωγής που συμβαίνουν λόγω ανθρώπινης παρεμβολής.

3.3. Εφαρμογή Γ: Γεωφυσική έρευνα στην αρχαιολογική περιοχή του Cade του Vernon Country, Wisconsin

(Stephanie M. Sullivan, 2007).

3.3.1. Γενικά

Το North Fork είναι μια περιοχή του ποταμού Bad Axe , στο Wisconsin των ΗΠΑ, που εμφανίζει προοπτικές να φέρει θαμμένες δομές. Ανάμεσα στις πολλές θέσεις έρευνας που έχουν εμφανιστεί στην περιοχή, η παρούσα μελέτη περίπτωσης ασχολείται με δεκαέξι από αυτές που βρίσκονται στο Αρχαιολογικό τομέα Cade. Η κύρια αρχαιολογική έρευνα που έχει διεξαχθεί στην περιοχή αφορά στην παράδοση κατάληψης, κατά την ύστερη εποχή του σιδήρου περιοχής της κοιλάδας. Παρόλο που η περιοχή του ποταμού Bad Axe, έχει πλούσια αρχαιολογική ιστορία , ο προσδιορισμός του κατάλληλου μέρους για να ξεκινήσει η ανασκαφή είναι δύσκολος, δεδομένου ότι πολλές περιοχές έρευνας βρίσκονται κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις.

3.3.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων

Ο σκοπός αυτής της εργασίας πεδίου ήταν να οριοθετήσει πιθανά πολιτισμικά χαρακτηριστικά (δομές) που βρίσκονται κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις. Στην περίπτωση εντοπισμού χαρακτηριστικών δομών, θα βοηθούσε τον υπεύθυνο καθηγητή πεδίου στον καθορισμό της καλύτερης περιοχής για ανασκαφή. Με τη σειρά τους οι ανασκαφές θα συμβάλουν στην κατανόηση των προτύπων οικισμού, στην ύστερη εποχή του σιδήρου περιοχή. Η συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα συνέβαλε τόσο στον τομέα Γεωγραφίας/Γεωεπιστημών όσο και στον τομέα Αρχαιολογίας/Κοινωνιολογίας του Πανεπιστημίου του Wisconsin με την εκπλήρωση των παρακάτω στόχων:

- Να καταγραφούν γεωφυσικές ανωμαλίες που μπορεί να υποδεικνύουν πιθανά αρχαιολογικά χαρακτηριστικά (δομές).
- Να χρησιμοποιηθεί νέα μέθοδος έρευνας στην αρχαιολογική περιοχή Cade που μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση της χωρικής κατανομής και της επέκτασης κατά την ύστερη εποχή του σιδήρου.

Στην τοποθεσία Cade 5, σε παλαιότερη έρευνα έγινε εκσκαφή εστίας οβάλ διατομής μήκους 2,3 μέτρων στην διεύθυνση Βοράς – Νότος και 1,7 μέτρων στην διεύθυνση Ανατολής – Δύσης. Εμφανίστηκε στην αρχή της plowzone η οποία βρίσκεται 25 εκατοστά κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις. Η περιοχή εκσκαφής παρήγαγε 139,9 κιλά καμένου δολομίτη. **(Εικόνα 3.11)**



Εικόνα 3.11: Τοποθεσία εκσκαφής το έτος 1994

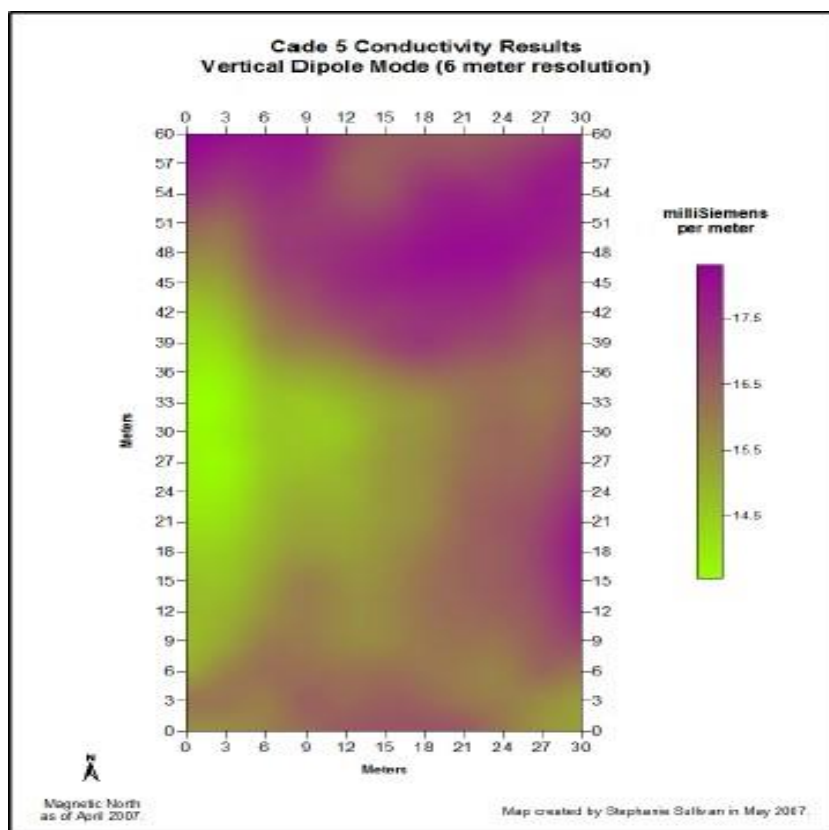
Παρόλο που η περιοχή εκσκαφής επιτρέπει την ερμηνεία για την αλληλουχία της απόθεσης που είναι υπεύθυνη για το σχηματισμό, παρατηρήθηκαν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά. Η αλληλουχία στρωμάτων του εδάφους κάτω από την εστία είναι πολύπλοκη και εμφανίζει ποικιλία. Κάθε προφίλ ήταν διαφορετικό. Ένα τμήμα του προφίλ φάνηκε να έχει πληρωθεί από ανθρωπογενείς κατασκευές. Τα επιπλέον ερωτήματα που έπρεπε να απαντηθούν για αυτήν τη περιοχή ήταν τα εξής:

- Ποια είναι η χρονολογική περίοδος και η χωρική κατανομή του Woodland στο North Fork της κοιλάδας του ποταμού Bad Axe.
- Υπάρχουν αποδείξεις που υποδεικνύουν ότι η αποστράγγιση του ποταμού Bad Axe λάμβανε χώρα σε εποχιακή βάση ή καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Ο στόχος αναμενόταν να είναι θαμμένος στα 3 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία αποτελεί σημείο αναφοράς. Υπήρχε υγρασία λόγω του ότι την προηγούμενη μέρα των μετρήσεων έβρεξε οπότε οι τιμές αγωγιμότητας πρόκειται να είναι αυξημένες από ότι αναμενόταν. Χρησιμοποιήθηκε το όργανο CM-31 της εταιρίας GF Instruments. Κατά τη διάρκεια της πρώτης σειράς μετρήσεων το όργανο ήταν ρυθμισμένο στην κατακόρυφη διπολική λειτουργία. Πρόκειται για το πρότυπο τρόπο λειτουργίας του οργάνου καθώς δίνει μέγιστη ανάλυση των μετρήσεων έως έξι μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Μια επιπλέον πρότυπη μέθοδος έρευνας που εφαρμόστηκε ήταν ο καθορισμός πλέγματος που θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις στην περιοχή έρευνας. Το πλέγμα είχε διαστάσεις 30 μέτρων στον άξονα ανατολής δύσης και 60 μέτρων στον άξονα βορά-νότου. Το βήμα προχώρησης για καταγραφή δεδομένων ήταν στα 3 μέτρα για κάθε άξονα.

3.3.3. Αποτελέσματα δεδομένων 1ης έρευνας Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου

Στην παρακάτω **Εικόνα 3.12** και τον **Πίνακα 3.1** φαίνονται οι μετρήσεις της αγωγιμότητας που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της πρώτης έρευνας. Οι μετρήσεις στην περιοχή Cade 5 έχουν εύρος μεταξύ 13 έως 20 milliSiemens ανά μέτρο. Όλες οι μετρήσεις εμπίπτουν μεταξύ τις τιμές του χώματος και της ίλυσ. Δεν υπάρχουν αντιθέσεις που να σηματοδοτούν παρουσία ανωμαλίας.

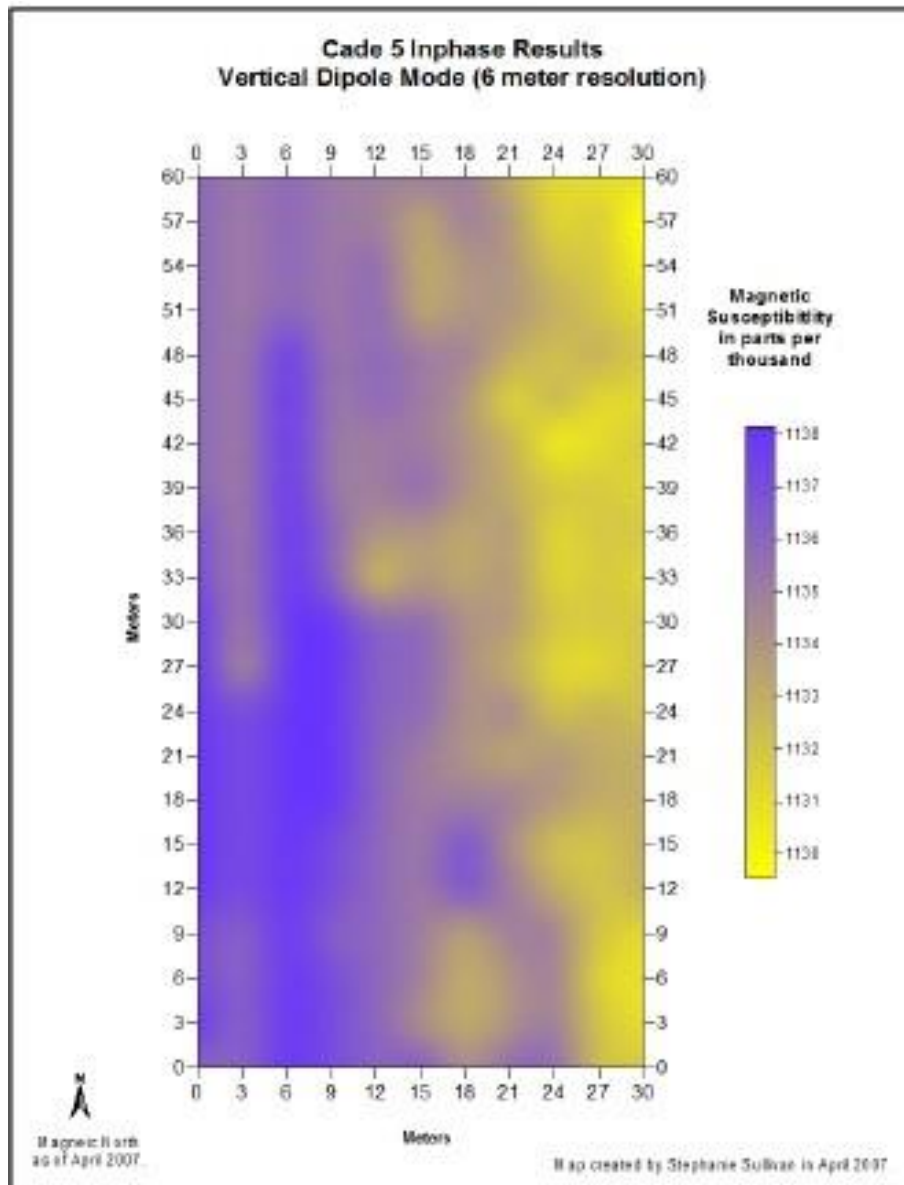


Εικόνα 3.12: Χάρτης αγωγιμότητας σε κατακόρυφη λειτουργία οργάνου.

Έδαφος	Αγωγιμότητα (MS/m)
Άμμος με χαλίκι	0,1 – 1
Αργιλώδης άμμος	1 – 5
Μάργα	5 - 25
Ίλυσ	12.5 - 25
Άργιλος	25 – 100
Άλας	100 - 200

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστική τιμή αγωγιμότητας για κάθε τύπο εδάφους

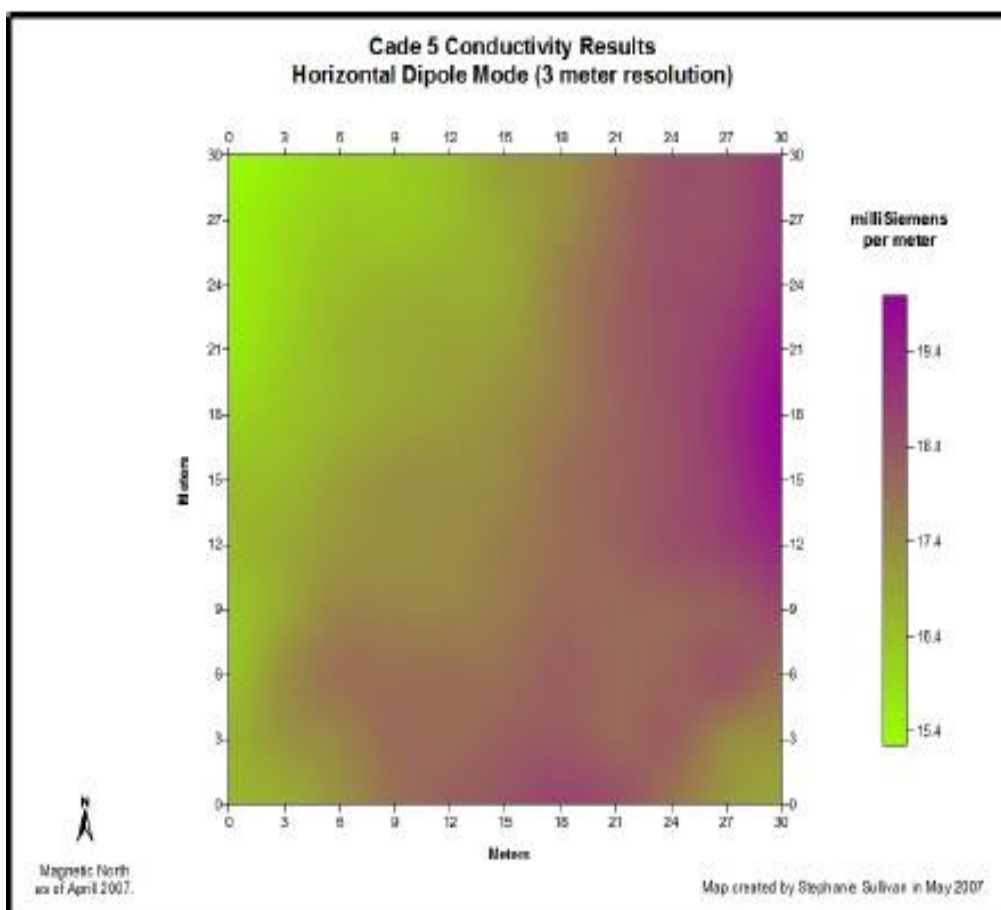
Ο μετρητής αγωγιμότητας δίνει επίσης μετρήσεις για την σε φάση συνιστώσα του, την μαγνητική επιδεκτικότητα. Η **Εικόνα 3.13** δίνει τα αποτελέσματα μετρήσεων για την σε φάση συνιστώσα (μαγνητική επιδεκτικότητα). Μεταξύ της χαμηλότερη και της μεγαλύτερης τιμής, στο χώρο της έρευνας, οι μετρήσεις διαφέρουν μόνο κατά 10 τιμές στις 1000. Αυτό μας δείχνει ότι στην περιοχή έρευνας δεν υπάρχουν θαμμένα μεταλλικά αντικείμενα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις της αγωγιμότητας



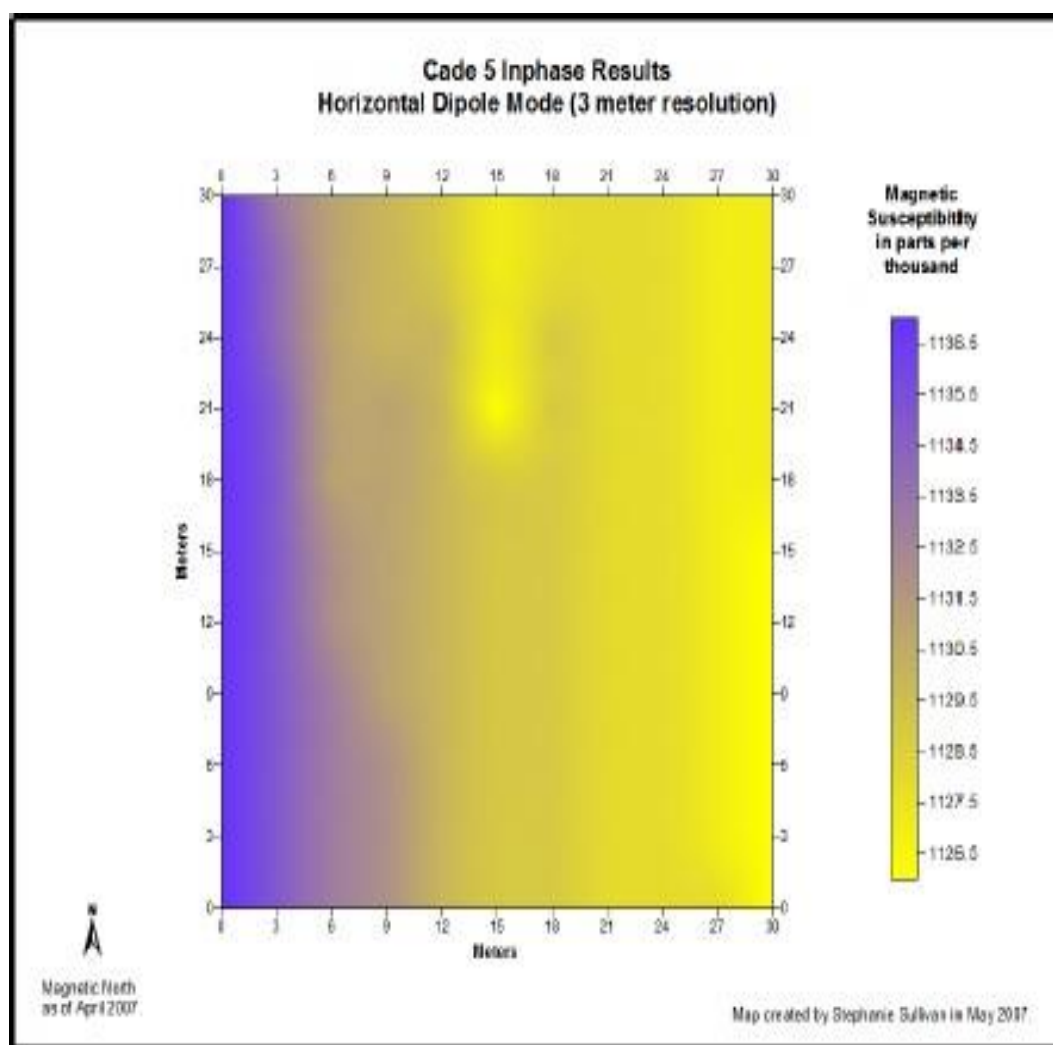
Εικόνα 3.13: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας σε κατακόρυφη λειτουργία οργάνου.

3.3.4. Αποτελέσματα δεδομένων 2ης έρευνας Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου.

Οι μετρήσεις της δεύτερης ηλεκτρομαγνητικής έρευνας στην ίδια περιοχή πραγματοποιήθηκαν μια βδομάδα αργότερα. Ο στόχος της έρευνας ήταν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με την λειτουργία του οργάνου σε οριζόντια λειτουργία δίπολου, μια λειτουργία που επιτρέπει να παίρνουμε μετρήσεις πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Με τη λειτουργία αυτή παράγουμε αποτελέσματα που προέρχονται από μέγιστη ανάλυση τριών μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πλέγμα μόνο που αυτή τη φορά έγιναν μετρήσεις στα μισά 30 από τα 60 μέτρα στο νότιο τμήμα του αντίστοιχου άξονα. Το αποτέλεσμα και αυτής της έρευνας για άλλη μια φορά δεν έδωσε ανωμαλίες. Οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 15 και 21 milliSiemens για τις συνθήκες αγωγιμότητας (Εικόνα 3.14) αντανακλώντας την κανονική τιμή για το έδαφος της περιοχής. Οι τιμές της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) δεν περιέχουν κορυφές διατηρούνται μεταξύ 1126 και 1138, ακριβώς όπως και στην πρώτη περίπτωση έρευνας. (Εικόνα 3.15)



Εικόνα 3.14: Χάρτης αγωγιμότητας σε οριζόντια λειτουργία οργάνου



Εικόνα 3.15: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας σε οριζόντια λειτουργία οργάνου.

3.3.5. Συμπεράσματα.

Τρία διαφορετικά χαρακτηριστικά υπεδάφους αναμενόταν να βρεθούν κατά τη διάρκεια αυτών των ερευνών. Τα χαρακτηριστικά θα ήταν τα εξής:

1. Το κανονικό προφίλ του εδάφους (χαρακτηριστικό χρώμα για ιλύ)
2. Το διαταραγμένο έδαφος που έγινε η ανασκαφή.
3. Το υπόλοιπο της εστίας που εξακολουθεί να είναι άθικτο (που παρουσιάζεται από την χαρακτηριστική ανωμαλία)

Προκειμένου να επιτευχθεί ο πρώτος στόχος, ήταν επίσης η ελπίδα να εμφανιστούν ανωμαλίες και στην υπόλοιπη περιοχή έρευνας. Ωστόσο, αυτές οι προσδοκίες δεν υπήρξαν.

Ο δεύτερος στόχος ήταν να χρησιμοποιηθεί μια νέα μέθοδος έρευνας στην αρχαιολογική περιοχή Cade που θα συνέβαλε στην κατανόηση της χωρικής κατανομής και της επέκτασης των κατοίκων στην περιοχή. Είχε διαπιστωθεί ότι το όργανο CM-31 έχει μεγάλο μέγεθος για να χρησιμοποιηθεί στην ανίχνευση προϊστορικών χαρακτηριστικών που τείνουν να βρίσκονται εντός των πρώτων δύο μέτρων κάτω από το έδαφος. Παρόλο, που ήταν δυνατόν το όργανο να χρησιμοποιηθεί για αρχαιολογικό σκοπό, οι παράμετροι του δεν είναι κατάλληλες για χρήση στον συγκεκριμένο αρχαιολογικό χώρο Cade 5.

Ο τρίτος στόχος του συγκεκριμένου έργου επιτεύχθηκε. Μια καλύτερη κατανόηση για τη χρήση του γεωφυσικού εξοπλισμού σε αρχαιολογικές εφαρμογές αποκτήθηκε με το τέλος των εργασιών.

3.4. Εφαρμογή Δ: Γεωφυσική έρευνα στο φούριο St. Joseph (20BE23), Niles, Michigan

(Daniel P. Lynch, 2008)

3.4.1. Γενικά

Το φρούριο St. Joseph είναι ένα Γαλλικό και αργότερα Αγγλικό συγκρότημα περιφρούρησης - οικονομικών συναλλαγών, 17-18ου αιώνα, που βρίσκεται στο νοτιοδυτικό Michigan. Μια γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε και τα αποτελέσματα αυτής εξακριβώθηκαν μέσω αρχαιολογικής ανασκαφής.

Το 1679, ο Γάλλος εξερευνητής René-Robert Cavalier de La Salle εξερεύνησε το ποτάμι St. Joseph κατά τη διάρκεια των ταξιδιών του δυτικά των Great Lakes. Η στρατηγική σημασία της περιοχής αναγνωρίστηκε από τους Γάλλους και από το 1680 και σε μια ομάδα Ιησουϊτών παραχωρήθηκε μια έκταση κοντά στο Niles, Michigan. Το 1961, ιδρύθηκε το φρούριο St. Joseph που αποτέλεσε κέντρο φρούρησης και συναλλαγών. Η τοποθεσία του φρουρίου επιλέχθηκε επειδή είναι κοντά ένα σημαντικό πέρασμα που συνδέει τον ποταμό St. Joseph και τη λεκάνη των λιμνών Great Lakes στην αποστράγγιση του ποταμού Μισισσιπή. Αυτή η στρατηγική θέση ήταν ένα σημείο κατά μήκος του δικτύου του εμπορίου και επικοινωνίας που συνέδεε τα γαλλικά εδάφη στα δυτικά εδάφη της λεκάνης των λιμνών Great Lakes και τις γαλλικές αποικίες κατά μήκος του ποταμού Μισισσιπή. Η δημιουργία κέντρου φρούρησης και εμπορίου στη θέση αυτή χρησίμευε για να εντείνει το εμπόριο γούνας, να σταθεροποιήσει τις σχέσεις των δυτικών φυλών και εξυπηρέτησε στον έλεγχο της επέκτασης της Συμπολιτείας των Πέντε Εθνών.

3.4.2. Γεωφυσικές Μέθοδοι – Απόκτηση Δεδομένων.

Μια γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε και τα αποτελέσματα αυτής εξακριβώθηκαν μέσω αρχαιολογικής ανασκαφής. Οι γεωφυσικές μέθοδοι περιλάμβαναν γεωραντάρ, ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, ηλεκτρικής αντίστασης και μαγνητική μέθοδο.

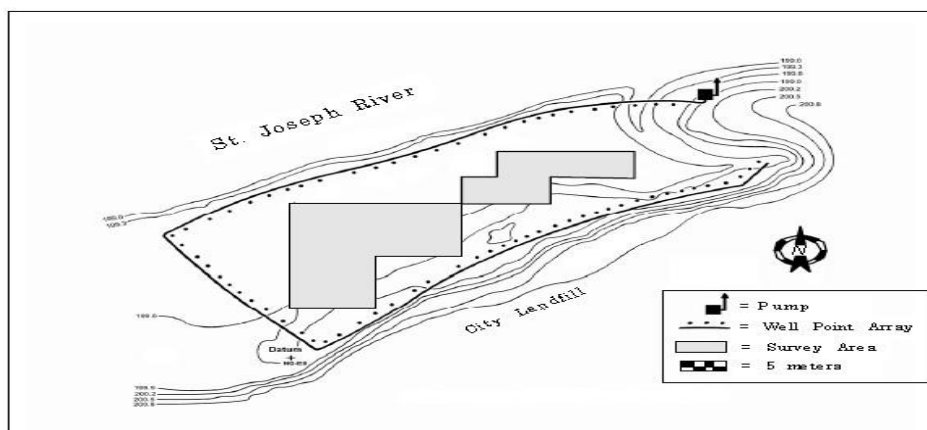
Σκοπός της έρευνας αυτής είναι να μέσω των γεωφυσικών μεθόδων να γίνει αξιολόγηση των παρακάτω στόχων, που αποτελούν κομμάτι μιας παλαιότερης έρευνας στην ίδια τοποθεσία. Οι στόχοι είναι οι εξής:

1. Καθορισμός των κατακόρυφων στρωματογραφικών σχέσεων μεταξύ των πολιτισμικών αποθέσεων (δομών).
2. Ανάκτηση ενός μεγαλύτερου δείγματος αδιατάρακτου ευρήματος και βιολογικών υπολειμμάτων.
3. Προσδιορισμός *in situ* χαρακτηριστικών δομών κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων αρχιτεκτονικών ερειπίων που θα καθορίσουν την ακεραιότητα της περιοχής και θα βοηθήσουν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Χαρακτηριστικά έρευνας με μέθοδο GPR

Η έρευνα GPR περιλάμβανε μια έκταση 430 m² που πραγματοποιήθηκαν 64 τομές που αποτελούνταν από 780 γραμμικά μέτρα. Τα δεδομένα GPR αποκτήθηκαν με ψηφιακή μονάδα ελέγχου ραντάρ Geophysical Servey Systems Inc. SIR-10A+ με διστατική κεραία 500 MHz (μοντέλο 3102A). **(Εικόνα 3.16)**

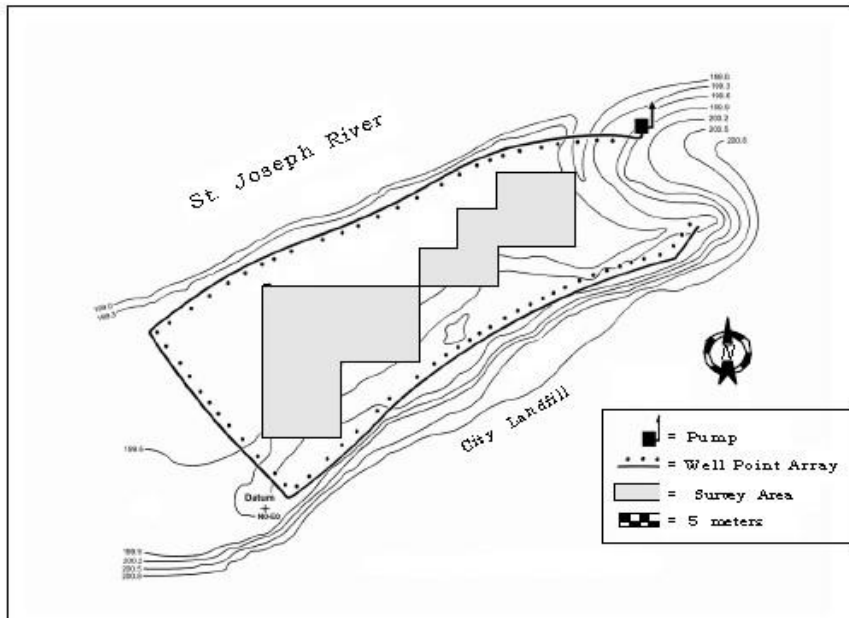
Όλα τα αρχεία δεδομένων συλλέχτηκαν ως 16 bit αρχεία με χρονικό παράθυρο 60ns. Τα παράλληλα προφίλ του GPR απείχαν μεταξύ τους κατά 0,5 m και χαρακτηριστικά σήματα μήκους 2 m υπήρχαν κατά μήκος όλων των τομών.



Εικόνα 3.16: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας σε οριζόντια λειτουργία οργάνου

Χαρακτηριστικά έρευνας με Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδο

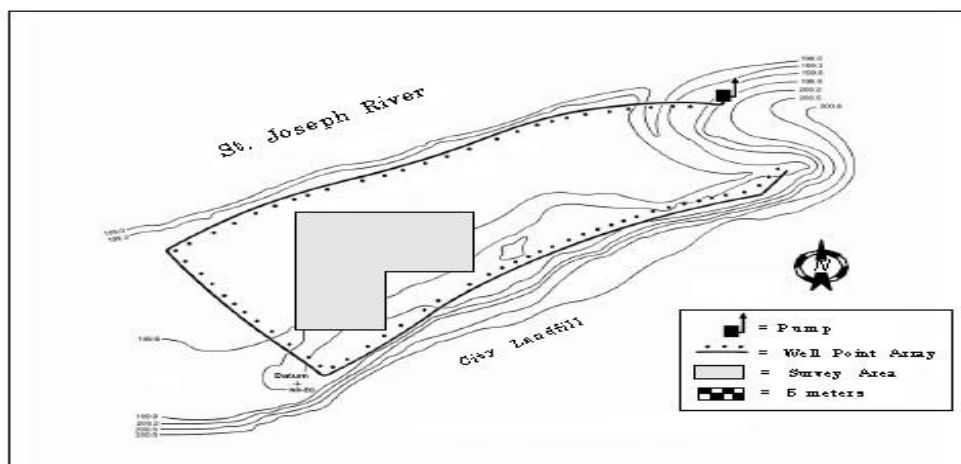
Η έρευνα της ηλεκτρικής αγωγιμότητας περιλάμβανε μια έκταση 475 m² (**Εικόνα 3.17**) Τα δεδομένα της έρευνας λήφθηκαν με την χρήση οργάνου EM38 DLM-H της εταιρίας Geonics Limited. Με συχνότητα λειτουργίας 40.3 KHz .



Εικόνα 3.17: Περιοχή έρευνας με ηλεκτρομαγνητική μέθοδο. Η επιφάνεια 475 m² που καλύφθηκε με EM.

Χαρακτηριστικά έρευνας με Ηλεκτρική Αντίσταση (ER)

Η έρευνα με χρήση της ηλεκτρικής αντίστασης περιλάμβανε μια έκταση 300 m². Τα δεδομένα λήφθηκαν με τη χρήση οργάνου Syscal R-2 και η διάταξη των ηλεκτροδίων που επιλέχθηκε ήταν η διάταξη Wenner με απόσταση $a=0,5$ m². (**Εικόνα 3.18**)

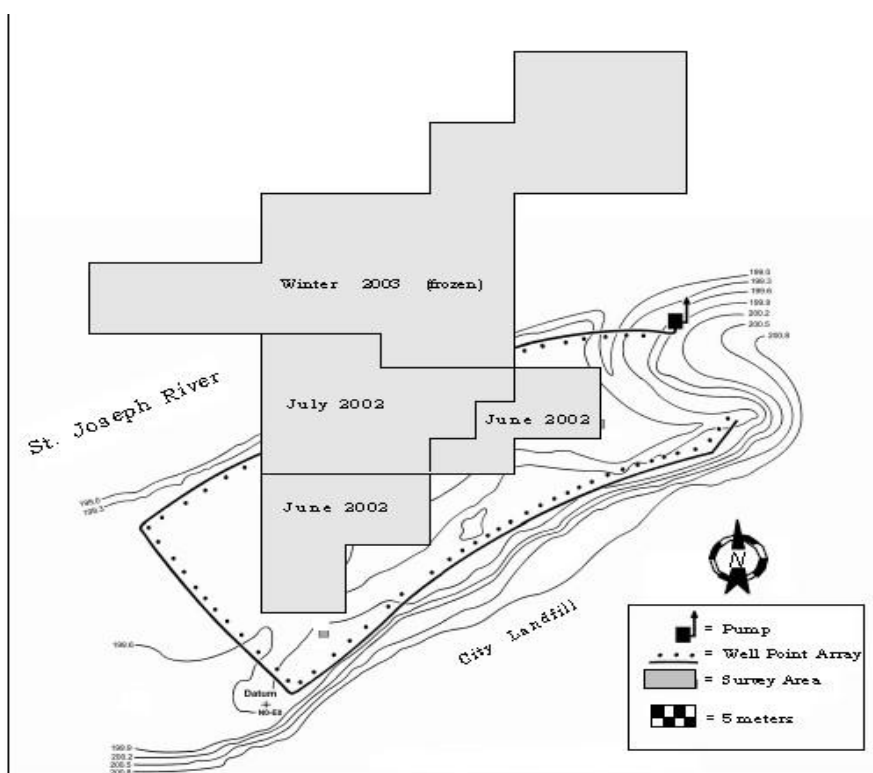


Εικόνα 3.18: Περιοχή έρευνας με μέθοδο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Η επιφάνεια 300 m² που καλύφθηκε με ER σε διάταξη Wenner.

Χαρακτηριστικά έρευνας με Μαγνητική μέθοδο

Η πρώτη έρευνα με μαγνητόμετρο, η οποία διεξήχθη τον Ιούνιο του 2002, περιελάμβανε μια έκταση 475 τετραγωνικών μέτρων. Η πρώτη έρευνα χρησιμοποιήθηκε για να ληφθούν αποφάσεις στο τομέα σχετικά με την τοποθεσία των αρχαιολογικών ανασκαφών. Η δεύτερη έρευνα, πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2002, επεκτάθηκε έξω από τον ποταμό του St. Joseph σε μια προσπάθεια να αποκτηθούν δεδομένα για πιθανά βυθισμένα τμήματα. Η έρευνα αυτή αύξησε την περιοχή κάλυψης σε 1050 m². Μια τρίτη έρευνα, με χρήση μαγνητόμετρου επεκτάθηκε επίσης πέρα από τον ποταμό και κάλυψε μια έκταση των 2300 m². (Εικόνα 3.19)

Τα δεδομένα της έρευνας με τη μαγνητική μέθοδο λήφθηκαν με χρήση μαγνητόμετρου της εταιρίας Geometrics και μοντέλο 858 Mag Mapper με κλισίμετρο καισίου-ατμού και αισθητήρες που απείχαν μεταξύ τους κατά 0,8 cm. Ο κάτω αισθητήρας διατηρήθηκε σε ύψος 0,3 m από το έδαφος καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας. Παράλληλες τομές με χρήση μαγνητόμετρου πραγματοποιήθηκαν κάθε 0,5 m και καθοδηγητικό στοιχείο μήκους 2 m υπήρχε κατά μήκος κάθε γραμμής.



Εικόνα 3.19: Περιοχή έρευνας με μέθοδο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Η επιφάνεια 300 m² που καλύφθηκε με ER σε διάταξη Wenner.

3.4.3. Αποτελέσματα δεδομένων συνδυασμένων μεθόδων.

Τέσσερις από τις πέντε γεωφυσικές έρευνες καθοδήγησαν τις ανασκαφές να ανακτήσουν στοιχεία για την αδιαμφισβήτητη απόδειξη της κατοχής του φρουρίου του St. Joseph. Αποφεύχθηκαν οι υψηλής συχνότητας μαγνητικές ανωμαλίες δίπολου χαρακτηριστικό των αντικειμένων με μεταλλική επιφάνεια και επιλέχθηκε να δοκιμαστούν οι θέσεις που είχαν μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι αρχιτεκτονικά ερείπια και τα χαρακτηριστικά τους αντιπροσωπεύονται από μονοπολικές ανωμαλίες χαμηλής συχνότητας δίπολου.

Τρεις ανασκαφές στηρίχθηκαν αποκλειστικά σε δεδομένα με μαγνητόμετρο (Ανωμαλίες #1, #3 και #4). Μια ανασκαφή βασίστηκε στο συνδυασμό μαγνητικής μεθόδου, GPR και ηλεκτρικής αντίστασης (Ανωμαλία #2). Η μόνη αποτυχημένη ανασκαφή στηριζόταν αποκλειστικά σε δεδομένα GPR (Ανωμαλία #5). **(Πίνακας 3.2)**

Μονάδα	Μέθοδος	Περιγραφή	Αποτελέσματα Εκσκαφής
N27 E14	Μαγνητική	Ανωμαλία #1 Μεγάλη +75 nT/m κυκλική, μονοπολική μαγνητική ανωμαλία	Σχήμα 3.20 Πιθανώς καλά
N22 E02	Μαγνητική GPR Ηλεκτρικής Αντίστασης	Ανωμαλία #2 Μαγνητικό δίπολο, υψηλής έντασης ανακλάσεις GPR, υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης	Σχήμα 3.22 Πέτρινη εστία
N25 E08	Μαγνητική	Ανωμαλία #3 +30 nT/m μονοπολική μαγνητική ανωμαλία	Σχήμα 324 Καμμένη ίλυς
N36 E39	Μαγνητική	Ανωμαλία #4 +75 nT/m μονοπολική μαγνητική ανωμαλία	Σχήμα 3,25 Πολιτισμικό σιχείο, τοποθετημένη πέτρα
N17 E06	GPR	Ανωμαλία #5 Ανακλάσεις GPR	Λαγούμι τρωκτικών

Πίνακας 3.2: Λίστα τοποθεσιών και ευρημάτων σε σχέση με τις ανωμαλίες που εντοπίστηκαν

Για την Ανωμαλία #1:

Μέθοδος EM και ER:

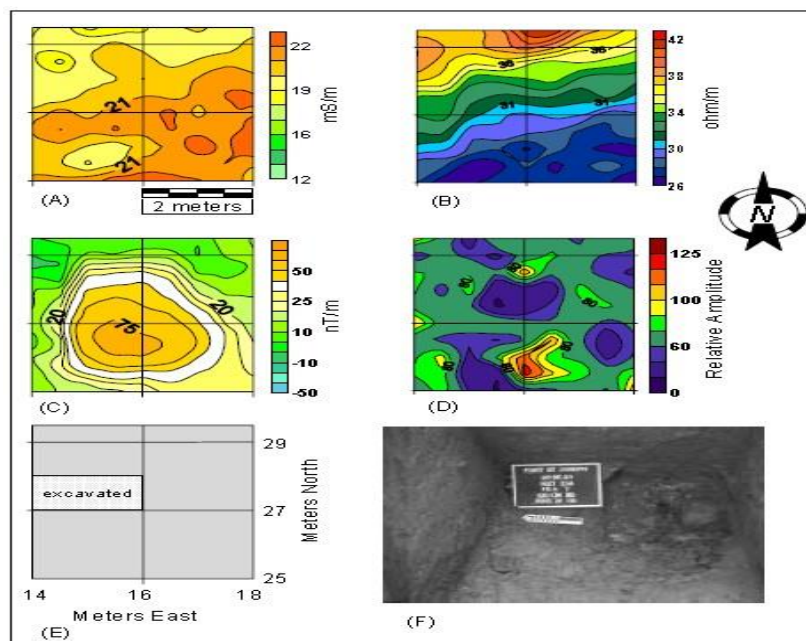
Ούτε η EM ούτε η ER έρευνα θα μπορούσε να ανιχνεύσει την Ανωμαλία #1. Στη θέση αυτή υπήρχε χαμηλή αντίσταση / υψηλή αγωγιμότητα και μια ένδειξη με κατεύθυνση νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά. Η ένδειξη αυτή προκύπτει από το έλος όπου στο χαμηλότερο τμήμα του βρίσκεται οργανικό χώμα. Η υγρή, οργανική επιφάνεια του στρώματος κάλυψε την ανωμαλία #1 από την ανίχνευσή της με τα μέσα EM και ER. **(Εικόνα 3.20 A, B)**

Μαγνητική μέθοδος:

Η Ανωμαλία # 1 προσδιορίστηκε πιο εύκολα ως > 3 m διαμέτρου, 75 nT/m μονοπολική ανωμαλία. **(Σχήμα 3.20 C)**. Αυτή η ανωμαλία που εντοπίστηκε αμέσως λόγω του μεγάλου μεγέθους της, στρογγυλού σχήματος, της υψηλής έντασης και χαμηλής συχνότητας ομαλού περιγράμματος. Βάσει των στοιχείων αυτής της μεθόδου στηρίχτηκε η ανασκαφή η αυτή την ανωμαλία.

Μέθοδος GPR:

Η Ανωμαλία #1 εμφανίστηκε στα προφίλ του GPR. Οι αρχικές παρατηρήσεις του πεδίου σχετικά με τα μη επεξεργασμένα δεδομένα 2D έδειξαν ότι ήταν μια περιοχή ενδιαφέροντος. Παρατηρείται ένα δαχτυλίδι μεγάλου εύρους τιμών (80 – 120 σχετικού πλάτους) στο χάρτη πλάτους σε σχέση με το χρόνο. **(Σχήμα 3.20 D)**



Εικόνα 3.20: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #1 A) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) GPR πλάτος σε χρονικό διάστημα, E) Τοποθεσία εκσκαφής, F) Φωτογραφία της δομής.

Αποτελέσματα εκσκαφής:

Στην **Εικόνα 3.20 F**, φαίνονται δύο διακριτές στρωματογραφικές ζώνες πολιτισμικών αποθέσεων. Η ανώτερη Ζώνη 1 (0,70 m-1,15 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους) αποτελούνταν από μια σκουρόχρωμη οργανική στρώση που περιέχει υπολείμματα καλοδιατηρημένης πανίδας καθώς και κέρατα ελαφιών και οστά. Αυτή η ζώνη περιέχει επίσης διαγνωστικά κεραμικά, που περιλάμβαναν Αγγλικά χαρακτηριστικά κεραμικά (creamware) σε βάθος 80-90 εκατοστών (**Εικόνα 3.21**). Τα αντικείμενα που βρέθηκαν ήταν σύμφωνα με τον προσδιορισμό αυτής της ζώνης ένας σωρός σκουπιδιών που σχετίζεται χρονικά με μεταγενέστερη κατάληψη του οχυρού.



Εικόνα 3.21: Κομμάτια κεραμικών creamware. Αυτά τα αντικείμενα χρονολογούνται από την τελευταία κατάληψη του οχυρού St. Joseph.

Η δεύτερη ζώνη (1,15 m – 1,40 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους) έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την πρώτη. Η Ζώνη 2 είναι εμφανώς προσδιορισμένη σε απότομα κυλινδρικά τοιχώματα. Αποτελείται από μικρά ή μεγαλύτερα κομμάτια καμένου μπαγδατιού, υπολείμματα κάρβουνου και ζωικών λειψάνων. Μερικά από τα μεγαλύτερα κομμάτια καμένου μπαγδατιού, καθώς και οι ασβεστομένες επιφάνειες αποδεικνύουν ότι τα αρχιτεκτονικά αυτά στοιχεία προέρχονται σχεδόν σίγουρα από την γαλλική αποικιακή αρχιτεκτονική.

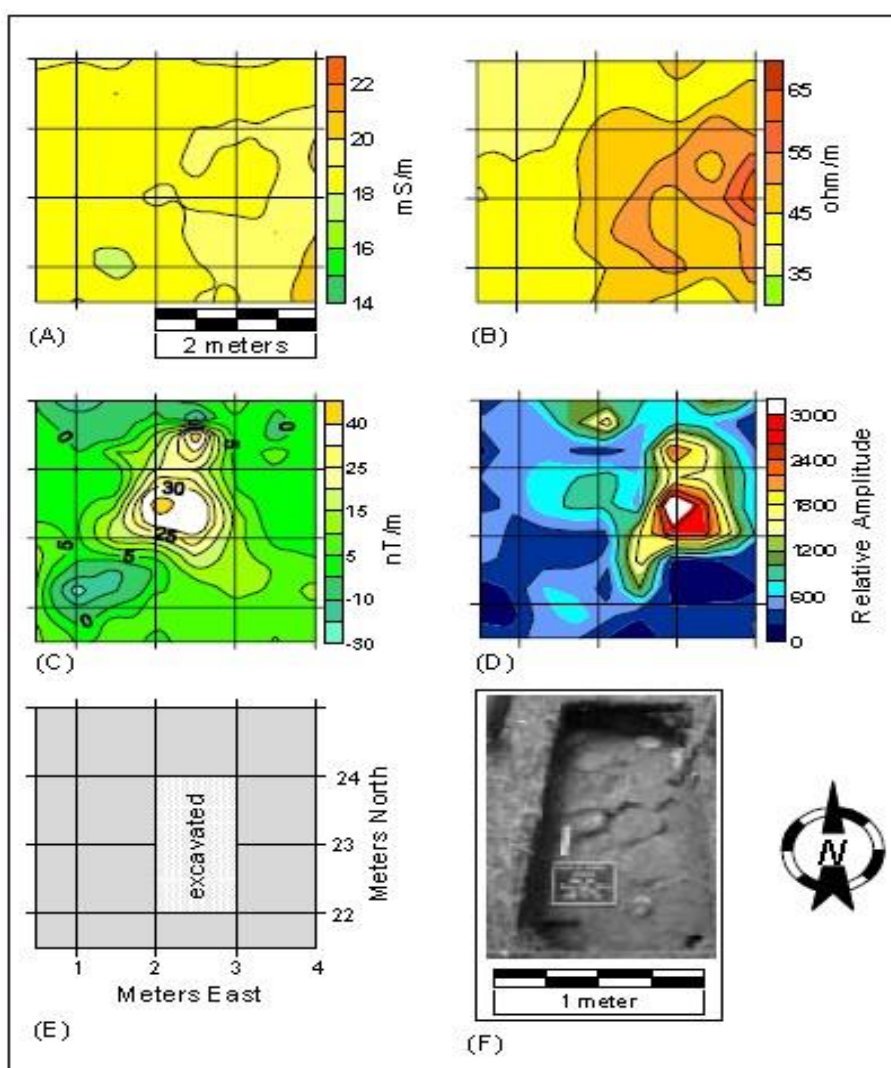
Για την Ανωμαλία #2:

Μέθοδος EM και ER:

Αν και οι μέθοδοι EM και ER υποτίθεται ότι έπρεπε να δώσουν παρόμοια αποτελέσματα, μόνο η μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης ανίχνευσε την Ανωμαλία #2. Όπως και με την Ανωμαλία #1 τα οργανικό επιφανειακό στρώμα «καλύπτει» την υποκείμενη ανωμαλία από τον εντοπισμό της με το EM-38. (**Εικόνα 3.22 A**) Ωστόσο, τα αποτελέσματα της διάταξης Wenner δείχνουν μια ένδειξη με κατεύθυνση νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά σχήματος «L» να διασχίζει κατά μήκος την εκσκαφή. (**Εικόνα 3.22 B**).

Μαγνητική μέθοδος:

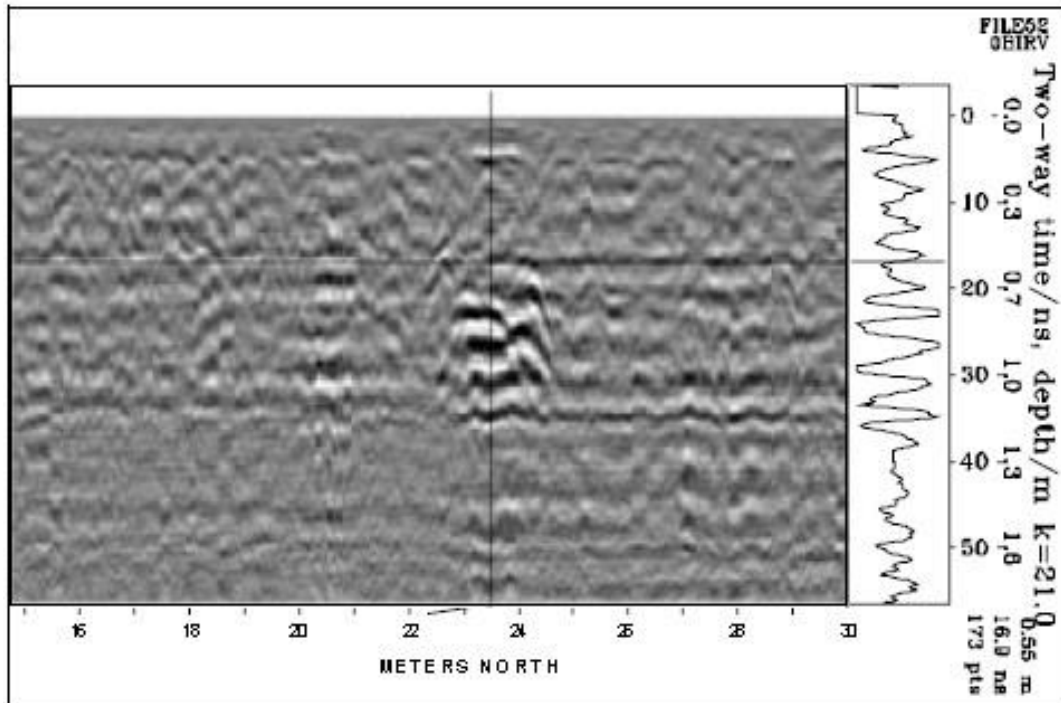
Τα αποτελέσματα με το μαγνητόμετρο ήταν καθοριστικά για την Ανωμαλία #2. Τα δίπολα που προκύπτουν ήταν αρκετά κοντά και πιθανότατα προκύπτουν από δύο διακριτές πηγές. (**Εικόνα 3.22 C**). Η βορινή ανωμαλία δίπολου ήταν ευθυγραμμισμένη με χαμηλές τιμές μαγνητότητας προς το βορά και υψηλές προς το νότο. Αυτό το είδος της ευθυγράμμισης είναι χαρακτηριστικό ενός in situ μαγνητικού αντικειμένου., πιθανώς κάτι που κάηκε σε αυτό το χώρο. Η δεύτερη ανωμαλία δίπολου, στα νότια, είχε αντίθετο προσανατολισμό από τον πρώτο με τις χαμηλές τιμές προς τα νοτιοδυτικά. Αυτού του είδους η ανωμαλία είναι τυπική ενός αντικειμένου που αποτελεί μαγνητισμένο υπόλειμμα ,όπως πέτρα, η οποία περιστράφηκε και μετατοπίστηκε από την αρχική της θέση.



Εικόνα 3.22: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #2 A) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) GPR πλάτος σε χρονικό διάστημα 21.75 – 29 ns, E) Τοποθεσία εκσκαφής, F) Φωτογραφία της δομής.

Μέθοδος GPR:

Η ανωμαλία ήταν εμφανής σε τρεις τομές της μεθόδου GPR. Η ανωμαλία αυτή αποτελούνταν από μια σειρά στενών διαστημάτων, ημι-παραβολικών και επιπέδων ανακλάσεων που ξεκινούσαν 17 nanoseconds κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Επιπλέον, στο χάρτη με τα πλάστη σε σχέση με το χρόνο που δημιουργήθηκε από συνδυαζόμενες τιμές GPR έμοιαζε σε μεγάλο βαθμό με το σχήμα και το μέγεθος των αποτελεσμάτων του μαγνητόμετρου και της ER. (Εικόνα 3.23)



Εικόνα 3.23: GPR τομή της Ανωμαλίας #2. Το αρχείο αυτό δείχνει ξεκάθαρα τη δομή

Αποτελέσματα εκσκαφής :

Κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σε αυτήν την τοποθεσία αποκαλύφθηκε το επάνω μέρος πολύ μεγάλων επίπεδων πετρών, οι οποίες ήταν μέρος μια στεγνής απόθεσης μιας πέτρινης εστίας. (Εικόνα 3.23 F) Επιπλέον, στα ευρήματα συγκαταλέγονται κεραμικά αντικείμενα, κάποια από αυτά ζωγραφισμένα αγγλικά creamware σε βάθος εκσκαφής 28 – 44 cm.

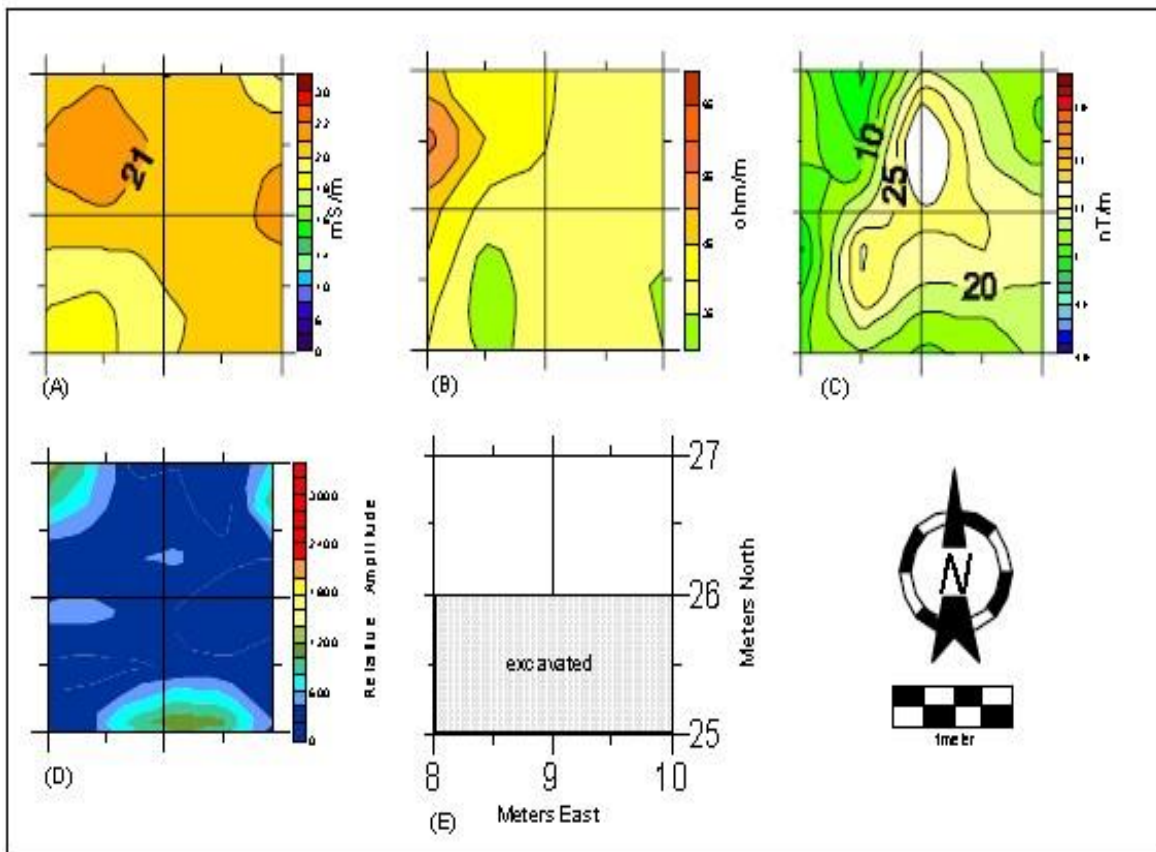
Για την Ανωμαλία #3:

Μέθοδος EM και ER:

Ούτε με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο ούτε με τη μέθοδο ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης ανιχνεύτηκε η Ανωμαλία #3 (**Εικόνα 3.24 A, 24 B**). Το εξαιρετικά αγώγιμο στρώμα της επιφάνειας είναι πιθανό να επικαλύπτει την αρχαιολογική απόθεση σε αυτή την περιοχή.

Μαγνητική μέθοδος:

Η Ανωμαλία #3 ήταν πιο εύκολο να προσδιοριστεί σαν μονοπολική μαγνητική ανωμαλία εύρους +30 nT/m. Πρόκειται για την μικρότερη σε τιμή μαγνητική ανωμαλίας που προέκυψε από όλες τις περιοχές έρευνας. Η ανωμαλία είχε σχήμα και η υψηλότερη τιμή των μετρήσεων εμφανίστηκε στο βορειότερο τμήμα της. Θεωρείται ότι η ανωμαλία αυτή θα μπορούσε να απεικονίζει το νότιο άκρο μια δομής που συνδεόταν με την πέτρινη εστία που αποτελεί την Ανωμαλία #2. (**Εικόνα 3.24 C**)



Εικόνα 3.24: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #3 A) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) GPR πλάτος σε χρονικό διάστημα, E) Τοποθεσία εκσκαφής.

Μέθοδος GPR:

Η μέθοδος GPR δεν ήταν σε θέση να ανιχνεύσει την Ανωμαλία #3 (**Εικόνα 3.24D**). Είναι πιθανό η υψηλή αγωγιμότητα και η μεγάλη σύσταση σε νερό στα υπερκείμενα στρώματα να εξασθένησαν το σήμα του GPR σε αυτή την περιοχή έρευνας.

Αποτελέσματα εκσκαφής :

Τα αποτελέσματα της έρευνας σε αυτή την περιοχή θα μπορούσε να είναι μέρος μιας ευρύτερης δομής που στέγαζε το πέτρινο τζάκι που προέκυψε από την εκσκαφή στην περιοχή της Ανωμαλίας #2. Κάτω από το βάθος των 60 cm εκσκαφής βρέθηκαν κάποια καλοδιατηρημένα πολιτισμικά στοιχεία καθώς και κάποια ζωικά υπολείμματα.

Για την Ανωμαλία #4:

Μέθοδος EM και ER:

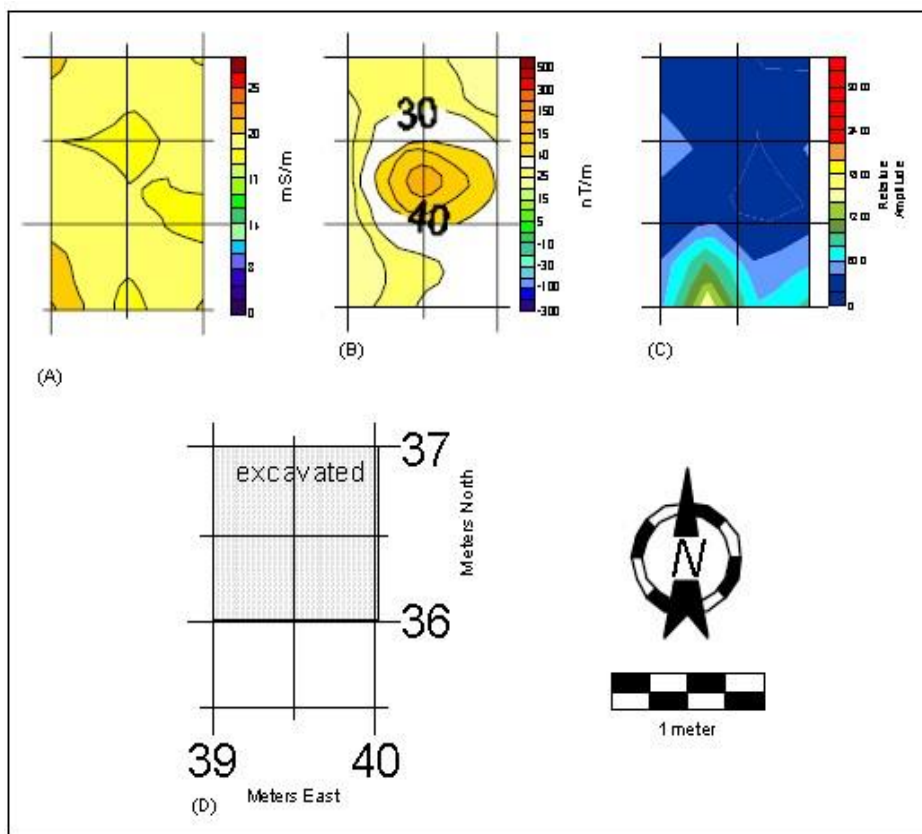
Η μέθοδος EM δεν ήταν σε θέση να ανιχνεύσει την Ανωμαλία #4 (**Εικόνα 3.25 A**). Όπως και σε άλλες περιοχές έρευνας όπου δοκιμάστηκε κατά τη διάρκεια αυτού του έργου, η υψηλή αγωγιμότητα και η οργανική επιφανειακή στρώση υπερκαλύπτει πιθανές υποκείμενες αρχαιολογικές αποθέσεις. Η έρευνα με ER, σε διάταξη Wenner, δεν κάλυψε αυτό το τμήμα της περιοχής γι' αυτό δεν έδειξε αποτελέσματα.

Μαγνητική μέθοδος:

Η Ανωμαλία #4 αναγνωρίστηκε ως μια οβάλ μονοπολική μαγνητικής έντασης +75 nT/m (**Εικόνα 3.25 B**). Οι διαστάσεις της ανωμαλίας ήταν περίπου 0,75 m με διεύθυνση ανατολικά – δυτικά και 0,5 m στην διεύθυνση βοράς – νότος. Αυτή η ανωμαλία είναι εξίσου παρόμοια με την Ανωμαλία #1 και την Ανωμαλία #3 καθώς είναι μονοπολική. Αυτός ο τύπος μαγνητικής ανωμαλίας θα μπορούσε να είναι το τυπικό σχήμα μιας λεκάνης απορροής σε λάκκο ή αρχαιολογικές δομές σε σχήμα κυλίνδρου.

Μέθοδος GPR:

Η μέθοδος GPR δεν ήταν κατάλληλη για να ανιχνεύσει την Ανωμαλία #4 (**Εικόνα 3.25 C**). Είναι πιθανόν ότι η υψηλή αγωγιμότητα καθώς και η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό των επιφανειακών στρωμάτων να εξασθένησε το σήμα GPR. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αυτή η τοποθεσία διεξαγωγής των μετρήσεων ήταν κοντά σε ένα μικρό ρέμα αποστράγγισης με αποτέλεσμα την κακή διεύθυνση του σήματος.



Εικόνα 3.25: Γεωφυσικά Αποτελέσματα για την Ανωμαλία #4 A) Ηλεκτρομαγνητική αγωγιμότητα, β) Ηλεκτρική ειδική αντίσταση, C) Μαγνητικός χάρτης, D) Τοποθεσία εκσκαφής.

Αποτελέσματα εκσκαφής :

Κατά την εκσκαφή τα αρχαιολογικά χαρακτηριστικά που εντοπίστηκαν ήταν άμορφα και δεν μπορούσαν να καθοριστούν. Παρόλα αυτά στο έδαφος εμπεριέχονταν αποικιακά αντικείμενα καθώς και δυο στοιβαγμένες πέτρες που βρέθηκαν, είναι απίθανο να θεωρηθούν φυσικό φαινόμενο σαν απόθεση πλημμυρών. Αν και δεν χαρακτηρίστηκε σαν περιοχή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος είναι πιθανό οι πέτρες να αποτελούν πολιτισμικό στοιχείο και να τοποθετήθηκαν στην τοποθεσία. Τα κοντινά εδάφη, έδειχναν να έχουν υποστεί τροποποιήσεις πολιτισμικού στοιχείου καθώς και ζωικά υπολείμματα. (Εικόνα 3.25 D)

Για την Ανωμαλία #5 δεν γίνεται εκτενέστερη αναφορά καθώς καμία από τις γεωφυσικές μεθόδους δεν κατάφερε να την ανιχνεύσει καθώς και τα αποτελέσματα της εκσκαφής δεν έδωσαν κάποιο αποτέλεσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ
ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΤΜΟ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΛΙΒΑΔΙ

4. Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας και της τεκτονικής στη θέση Λιβάδι.

4.1. Γενικά

Η τοποθεσία της περιοχής έρευνας βρίσκεται στο νησί της Κεφαλονιάς και συγκεκριμένα στην θέση Λιβάδι (**Εικόνα 4.1**). Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε για τον εντοπισμό της στρωματογραφία της περιοχής όσο και το αν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές ενός αρχαίου λιμανιού είτε τέτοια κατανομή ιζημάτων που να έχουν επηρεαστεί από αυτές τις πιθανές δομές

Προτού πραγματοποιηθεί η γεωφυσική έρευνα εξετάστηκε η γεωλογία της περιοχής ώστε να συσχετιστούν τα αποτελέσματα της έρευνας με συγκεκριμένους σχηματισμούς. Η περιοχή έρευνας προσδιορίζεται στους χάρτες που ακολουθούν προκειμένου να είναι ξεκάθαρη η επιφάνεια που καλύφθηκε. Η πρόθεση ήταν να καλυφθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια της περιοχής, αλλά είτε λόγω δυσκολιών που προκύπτουν στο πεδίο, είτε δυσκολίας πρόσβασης δεν κατέστη δυνατή η πλήρης κάλυψης



Εικόνα 4.1: Με κόκκινο βέλος η τοποθεσία Λιβάδι στο χάρτη της νήσου Κεφαλονιάς.



Εικόνα 4.2: Συνολική εικόνα της περιοχής έρευνας στη θέση Λιβάδι.



Εικόνα 4.3: Πανοραμική εικόνα της περιοχής έρευνας στη θέση Λιβάδι.

4.2. Ιστορία και αρχαιολογία της περιοχής Λιβάδι

Το χωριό Λιβάδι της Κεφαλονιάς βρίσκεται στη χερσόνησο της Παλικής, 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

Κοντά στο Λιβάδι βρίσκεται το χωριό Κουβαλάτα και τα Βλυχάτα. Στην περιοχή εντοπίζονται τα ερείπια της Μονής της Κυράς των Αγγέλων, μια αγροτική έπαυλη του 17ου αιώνα που έχει χαρακτηριστεί διατηρητέο μνημείο και τις πρώην αγροτικές φυλακές, που χρησιμοποιήθηκαν έως τις αρχές του 20ού αιώνα.

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 στάχυα που κοσμούσαν τα νομίσματα της πόλης προσέφερε τις προϋποθέσεις για την πρώιμη οικιστική εγκατάσταση. Πράγματι στη θέση Καραβοστάσι, που παρά τις 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 8ου αι. π.Χ. που υποδεικνύει την πρώιμη για τα δεδομένα της Κεφαλονιάς 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 5ου αιώνα η Κεφαλλονιά, εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης που της προσέδιδε μια ιδιαίτερος σημαντική στρατηγική σημασία, θα βρεθεί αναμειγμένη στις συγκρούσεις των ηγεμονίδων πόλεων.

Περί το 456 π.Χ. οι Αθηναίοι θα στραφούν δυτικά και θα επιχειρήσουν να ελέγξουν και το Ιόνιο πέλαγος. Η Πάλη ωστόσο φαίνεται να ακολουθεί μια φιλο-Κορινθιακή πολιτική τουλάχιστον μέχρι το 431 π.Χ. όταν η Αθήνα έθεσε ολόκληρο το νησί υπό τον έλεγχό της. Οι Αθηναίοι επεδίωκαν να αποσπάσουν από την Κόρινθο τις βάσεις της στο Ιόνιο και να δημιουργήσουν ένα κλοιό γύρω από την Πελοπόννησο, χρησιμοποιώντας και το νησί της Κεφαλλονιάς ως ορμητήριο επιδρομών στις ακτές της Πελοποννήσου. Η Κεφαλλονιά θα

εξασφάλιζε επίσης στους Αθηναίους καλά λιμάνια, πλοία και οπλίτες για τις επιχειρήσεις τους εναντίον των Σπαρτιατών και των συμμάχων τους. Μετά το τέλος του Πελοποννησιακού πολέμου η Κεφαλλονιά θα περάσει για ένα χρονικό διάστημα στο έλεγχο της Σπάρτης. Με τη δημιουργία όμως της Β΄ Αθηναϊκής Συμμαχίας η ισορροπία δυνάμεων αλλάζει και η Κεφαλλονιά θα βρεθεί και πάλι στη σφαίρα επιρροής των Αθηναίων. Παραμένει ωστόσο ασαφές εάν, εκτός από την πόλη των Πρόννων που είναι η μόνη που αναφέρεται στο Ψήφισμα του Αριστοτέλους, και οι υπόλοιπες πόλεις του νησιού αποτέλεσαν μέλη της Συμμαχίας. Αυτή η «ασάφεια» υπογραμμίζει για άλλη μια φορά την αυτονομία των πόλεων της Κεφαλλονιάς και τη διαφοροποίηση μεταξύ τους στη χάραξη εξωτερικής πολιτικής.

Στις αρχές του 2ου αι. π.Χ. τα Ιόνια νησιά, ως πύλες εισόδου προς την Ανατολή, θα βρεθούν στο στόχαστρο της επεκτατικής πολιτικής των Ρωμαίων. Η συνεργασία των Κεφαλλήνων με τους Αιτωλούς, αλλά και η δράση κεφαλληνιακών πειρατικών ομάδων στο Ιόνιο, δημιουργούσαν αρκετά προβλήματα στους Ρωμαίους. Επιπλέον η στρατηγική θέση του νησιού το καθιστούσε το πλέον κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί ακόμα και ως η κύρια βάση του ρωμαϊκού στόλου στη δυτική Ελλάδα. Η ευκαιρία για την κατάκτηση της Κεφαλλονιάς δόθηκε κατά τον Αιτωλικό πόλεμο (190 π.Χ. - 189 π.Χ.). Ο Ρωμαίος ύπατος Μάρκος Φούλβιος Νομίλιωρ εκστρατεύει το 189 π.Χ. στην Ελλάδα και, όπως ξεκάθαρα αναφέρει ο Λίβιος, η κατάληψη της Κεφαλλονιάς αποτελούσε έναν από τους κύριους στόχους της όλης εκστρατείας. Το τέλος του πολέμου και τη συντριβή των Αιτωλών ακολούθησε συνθήκη ειρήνης μεταξύ των εμπόλεμων δυνάμεων από την οποία σκοπίμως εξαιρέθηκε η Κεφαλλονιά. Οι Ρωμαίοι αποβιβάστηκαν στο νησί και ζήτησαν την παράδοση των πόλεων οι οποίες και υπάκουσαν. Ολόκληρη πλέον η Κεφαλλονιά πέρασε οριστικά στη ρωμαϊκή κυριαρχία παραμένον-τας μια σημαντικότετη ναυτική βάση για το ρωμαϊκό στόλο. Σχετικά με το ισχύον καθεστώς των Κεφαλλήνων κατά την περίοδο αυτή οι μαρτυρίες είναι λιγοστές και συχνά αντιφατικές. Ο Πλίνιος αναφέρει ότι η Κεφαλλονιά ήταν *libera civitas*, ενώ σύμφωνα με τον Στράβωνα ολόκληρο το νησί έγινε κτήμα του Γαΐου Αντώνιου, ο οποίος ως εξόριστος διέμενε στην Κεφαλλονιά και μάλιστα σχεδίαζε την ίδρυση νέας πόλης. Στους αυτοκρατορικούς χρόνους, ο Αδριανός φέρεται να δωρίζει ολόκληρο το νησί στους Αθηναίους. Ωστόσο περί το 131/132 η Πάλη αναφέρεται ως «ελευθέρα και αυτόνομος».

4.2. Γεωλογία της 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 (ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ-ΔΙΚΑΙΟΥΛΙΑ 1965, BP Co. 1971, BP Co et al 1985, ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ 1991).

Αλπικοί σχηματισμοί

Οι αλπικοί σχηματισμοί ανήκουν στις δύο 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 νότιο-ανατολικό 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 στους ιζηματογενείς της 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 περιωφλώδεις 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 1000 m μόνο για το Άνω Κρητιδικό. Νηριτικοί ασβεστόλιθοι, βιοκλαστικοί και μικριτικοί ακολουθούμενοι από λευκούς μικριτικούς και δολομιτικούς ασβεστόλιθους μέσονωπαλιρροιακής 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, στους βορειοδυτικούς πρόποδες της Αγίας Δυνατής και στις δυτικές προσβάσεις του Αίνου φάσεις κυρίως του περιθωρίου, της κλιτύς και του πυθμένα μιας λεκάνης, δηλαδή στο μεγαλύτερο τους μέρος πελαγικές με συνολικό πάχος που ξεπερνά τα 1000 m για το Ανώτερο Ιουρασικό - Αλβιο. Αντιπροσωπεύονται από εστρωμένους δολομίτες, ασβεστόλιθους και πυριτιόλιθους. Οι τελευταίοι μεταπίπτουν κατά τη διάρκεια του Αλβίου σε βιοκλαστικούς - λατυποπαγείς ασβεστόλιθους κλιτύς, ενώ πλευρικά αναπτύσσονται βιοκλαστικοί περιωφάλοι και μικριτικοί ασβεστόλιθοι ρηχής πλατφόρμας. Από το Τουρώνιο μέχρι το Ηώκαινο αναπτύσσονται έως και 600 m πελαγικοί λατυποπαγείς και τουρβιδιτικοί ασβεστόλιθοι κλιτύς. Ο πελαγικός χαρακτήρας των ιζημάτων ενισχύεται κατά το Ανώτερο Ηώκαινο - Ολιγόκαινο (BP Co., 1971).

Αργίλο-κλαστική φλυσγική σειρά. Αποτελεί την κανονική εξέλιξη της κυρίως ανθρακικής σειράς με πάχος που ανέρχεται σε μερικές 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 (BP Co., 1971)

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 τριαδικό εβαπορίτες, υπολειμματικά άστρωτα λατυποπαγή ασβεστόλιθων και δολομιτών και άργιλοι διάλυσης. Πάνω από αυτούς 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 πυριτιόλιθους και σχιστόλιθοι με Ποσειδώνιες του Δογγερίου και τέλος ασβεστόλιθοι με ή χωρίς πυριτιόλιθους, πελαγικοί οι οποίοι γίνονται λατυποπαγείς προς την κορυφή της σειράς, ηλικίας Κρητιδικού (BP Co., 1971, KENZ 1955). Σχηματισμοί νεότεροι του Μεσοζωϊκού ίσως να υπάρχουν με τη μορφή τεκτονικών ρακών (ΝΙΚΟΛΑΟΥ. 1983)

Μεταλλικοί σχηματισμοί

Η ασύμφωνη τοποθέτηση τους πάνω στους αλπικούς αποτελεί και το μόνο κριτήριο προκειμένου να χαρακτηριστούν ως «μεταλλικοί σχηματισμοί». Διακρίνεται μια κατώτερη σειρά θαλάσσιων ιζημάτων ηλικίας Κατώτερου Πλειόκαινου - Κατώτερου Πλειστοκαίνου (ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ-ΔΙΚΑΙΟΥΛΙΑ, 1965) και μια ανώτερη σειρά αποθέσεων ηπειρωτικού κυρίως χαρακτήρα, οι οποίες είναι ασύμφωνα τοποθετημένες πάνω στις προηγούμενο (Μέσο, Ανώτερο Πλειστόκαινο - Ολόκαινο) (BP Co. 1971, UNDERHILL 1985, 1989. κ.ά.).

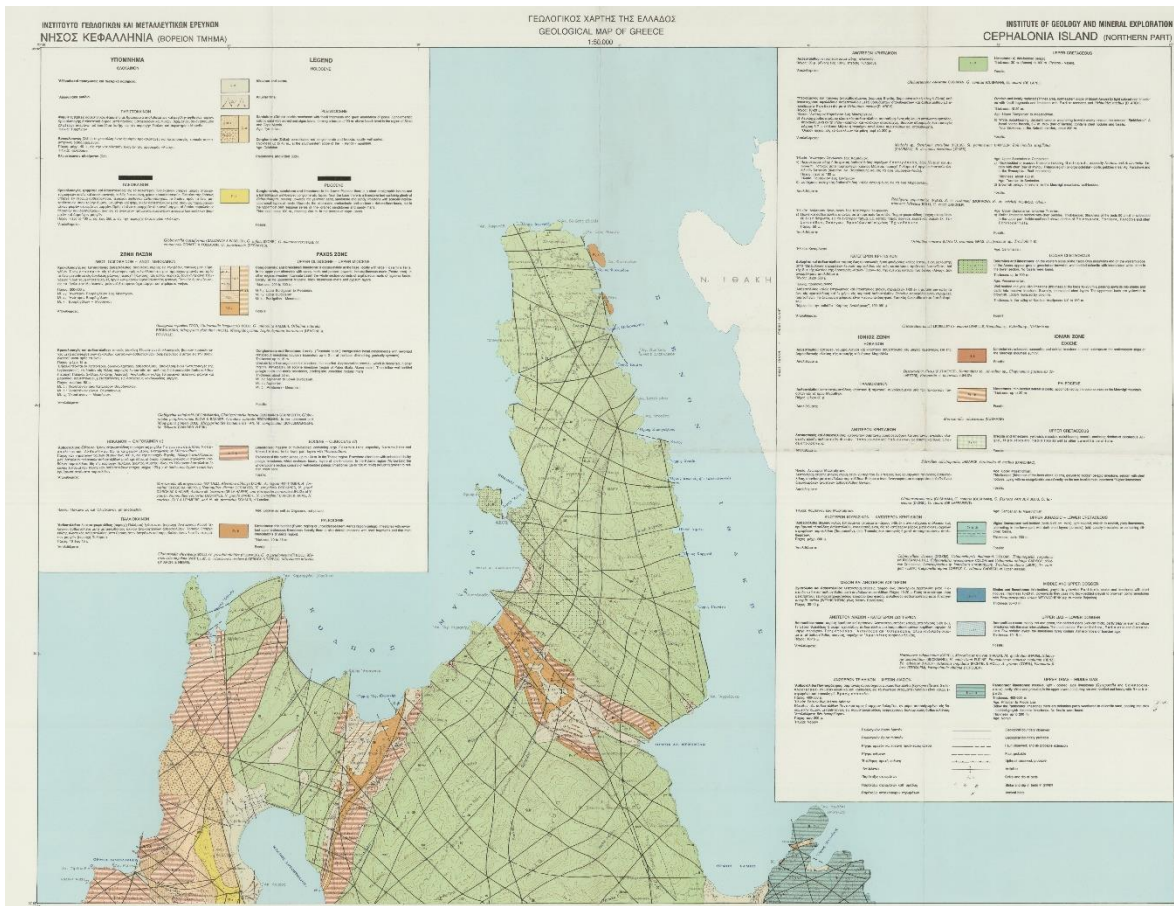
Πλειο-Καλάβρια σειρά: Πρόκειται για μια θαλάσσια σειρά που αναπτύσσεται επικλυσιαστικά επί των σχηματισμών της ενότητας Παξών. Το πλάτος εμφάνισης κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 km περίπου, ενώ το πάχος της μεταξύ 200 και 500 m. Η σειρά αυτή περιλαμβάνει στη βάση της (Κατ. Πλειόκαινο) οριζόντες ολιγόμεικτων κροκαλοπαγών και λατυποπαγών, συμφυρματοπαγών ασβεστολίθων και συμπαγών ασβεσταρενίτων, στο ενδιαμέσο τμήμα της, ηλικίας Μέσου - Ανώτερου Πλειόκαινου, κυανές και κίτρινες μάργες με ιλύλιθους, ενδιστρώσεις ψαμμιτών, ασβεστολιθικών άμμων, κροκαλοπαγών και στο ανώτερο τμήμα της, ηλικίας Κατ. Πλειστοκαίνου - Καλαβρίου, επίσης μάργες μέσα στις οποίες παρεμβάλλονται ενδιστρώσεις ασβεστολιθικών άμμων και στη συνέχεια χονδρόκοκκοι ασβεσταρενίτες απόσυρσης (BP Co., 1971).

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

- 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 τους μέλη περικλείουν ασβεστολιθικά τεμάχια μέσα σε ένα κόκκινο ασβεστολιθικό ή ασβεστιτικό τσιμέντο.
- Θαλάσσιοι ασβεστοαρενίτες. Εμφανίζονται σε πολλές παράκτιες κυρίως περιοχές του νησιού με τη μορφή μικρού πάχους θαλάσσιων ασβεστοαρενιτών επίκλυσης με διασταυρωμένες στρώσεις και κατά τόπους βασικό κροκαλοπαγές. Η ηλικία τους 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).
- Κώνοι προσχώσεων Ρήσιου. Τυπικές αποθέσεις παγετώδους περιόδου, περιόδου

ρηξιστασίας, που αποτίθενται λόγω διάβρωσης στους πρόποδες των πλαγιών. Η βάση αυτών των κώνων αποτελείται από κόκκινες αργίλους με πυρίτιο και τεμάχια των υποκείμενων εξαλλοιωμένων θαλάσσιων ασβεστοαρενετών (UNDERHILL, 1989)

- Σύγχρονοι σχηματισμοί. Βρίσκονται διάσπαρτοι σε πολλά σημεία του νησιού. Στην περιοχή του αεροδρομίου και ΔΝΔ της Σκάλας απαντούν μικρού πάχους κόκκινοι αργιλοκοί 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 κώνων προσχώσεων χειμάρρων.



Εικόνα 4.4: Γεωλογικός Χάρτης της ευρύτερης περιοχής της θέσης Λιβάδι (τμήμα του Γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ)

4.2.2. Νεοτεκτονική Δομή των νήσων Κεφαλλονιάς – Ιθάκης

Η δομή των νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης είναι αποτέλεσμα της επίδρασης μιας σειράς διαδοχικών τεκτονικών παραμορφωτικών επεισοδίων κυρίως συμπιεστικού χαρακτήρα, τα οποία όμως 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 της αλπικής παραμόρφωσης των νήσων, συνδέονται γενετικά με την τοποθέτηση του καλύμματος της Ιόνιας ενότητας πάνω στην ενότητα Παξών κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο και είναι:

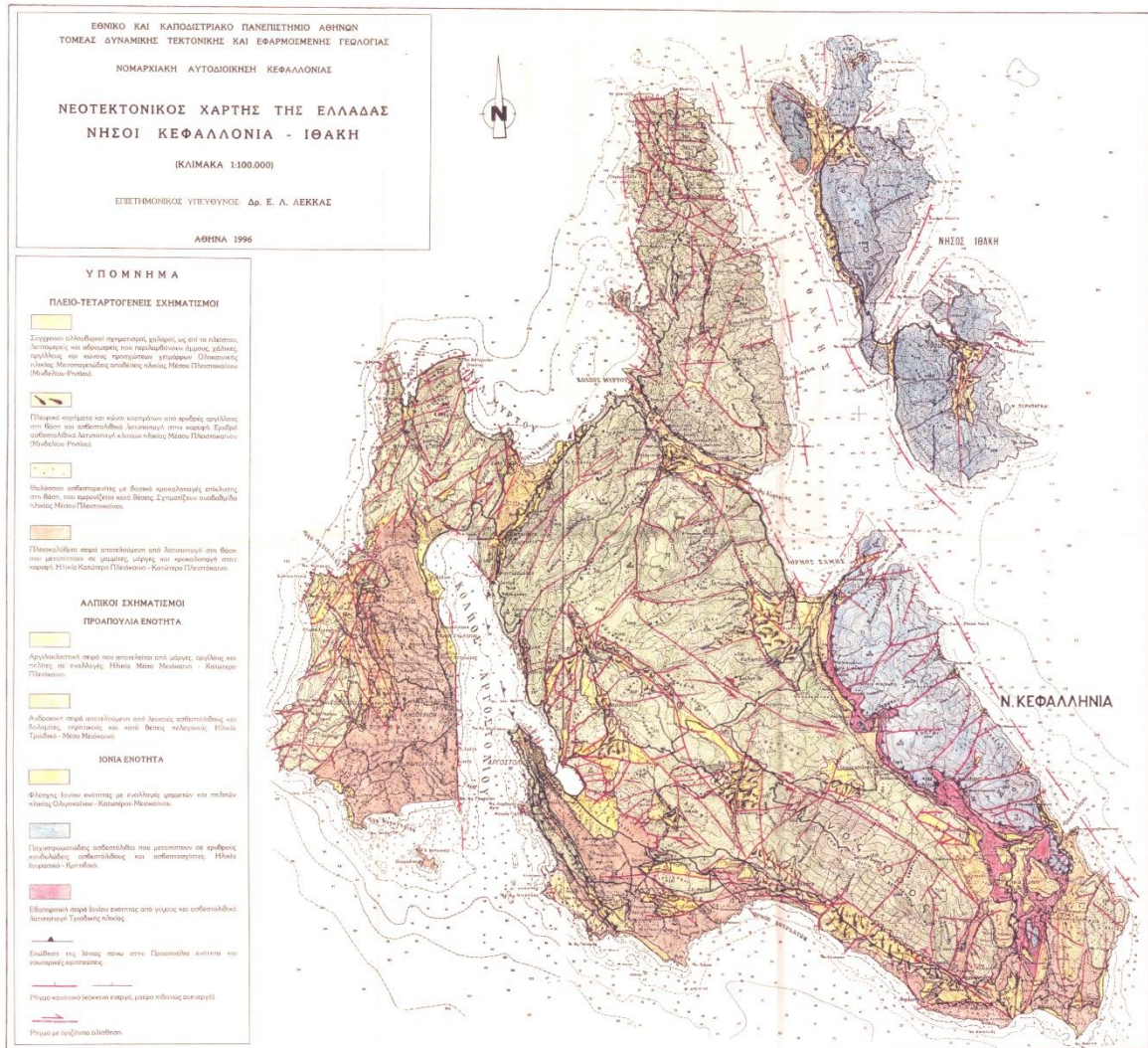
- i. Ανάστροφα ρήγματα με διεύθυνση είτε ΒΔ-ΝΑ, είτε ΝΔ-ΒΑ και ανοικτές πτυχές με άξονες που παρουσιάζουν ίδιο προσανατολισμό μέσα στην ενότητα Παξών, τα οποία θεωρούνται ως παλαιότερες συνιζηματογενείς τεκτονικές δομές που κατά την περίοδο της ιζηματογένεσης καθόριζαν τις διάφορες παλαιογεωγραφικές 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 εφιππευτική.
- ii. Εφιππεύσεις, αντίκλινα εφιππευσης και αντικλινικά δίδυμα εφιππευσης με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.
- iii. Ρήγματα βαρύτητας με διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ μέσα στην Ιόνια ενότητα. Αξονικά επίπεδα πτυχών και εφιππεύσεις 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-Πλειστοκαίνου (νεοτεκτονικές μορφές).

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 μερικές 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 επιπεύσεις και ανάστροφα, οριζόντιας ολίσθησης και τέλος κανονικά. Συγκεκριμένα παρατηρούνται:

- ❖ Αναζωπυρώσεις παλαιότερων σημαντικών τεκτονικών δομών, κυρίως επιπεύσεων και αναστροφών ρηγμάτων (Αίνου, Αργοστολίου, Κοντογουράτων Αγκώνα, Αγίας Ευφημίας, Ασπρογέρακα-Παλαιάς Σκάλας, Παλαιόκαστρο, περιθώριου Ζακύνθου-Κεφαλλονιάς), αλλά και δημιουργία νεότερων, πολύ χαρακτηριστικών στη περιοχή κυρίως της χερσονήσου Αργοστολίου (Ακρωτήριο Λαρδηγός, Ξενοδοχείο Meditteranee, 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 πλαγιοεπιπεύσεις (Αίνου, Αγίας Ευφημίας, Ζακύνθου-Κεφαλλονιάς). Ρήγματα με καθαρή οριζόντια ολίσθηση (strike slip) δρύνε 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 - Κουοτουμπάρδι, αεροδρομίου) (Underhill 1989).
- ❖ Ανυψώσεις γραμμών ακτών που τοπικά μπορούν να φθάνουν ως και 100 m ύψος όπως παρατηρείται για την παλαιοακτή του Κατώτερου Πλειστοκαίνου στην χερσόνησο Αργοστολίου (Μηνιές).
- ❖ Έντονη κατά βάθος διάβρωση των δομών που δημιούργησαν οι τεκτονικές παραμορφωτικές φάσεις του Κατώτερου Πλειόκαινου και Πλειστοκαίνου. Τα φαινόμενά της 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).

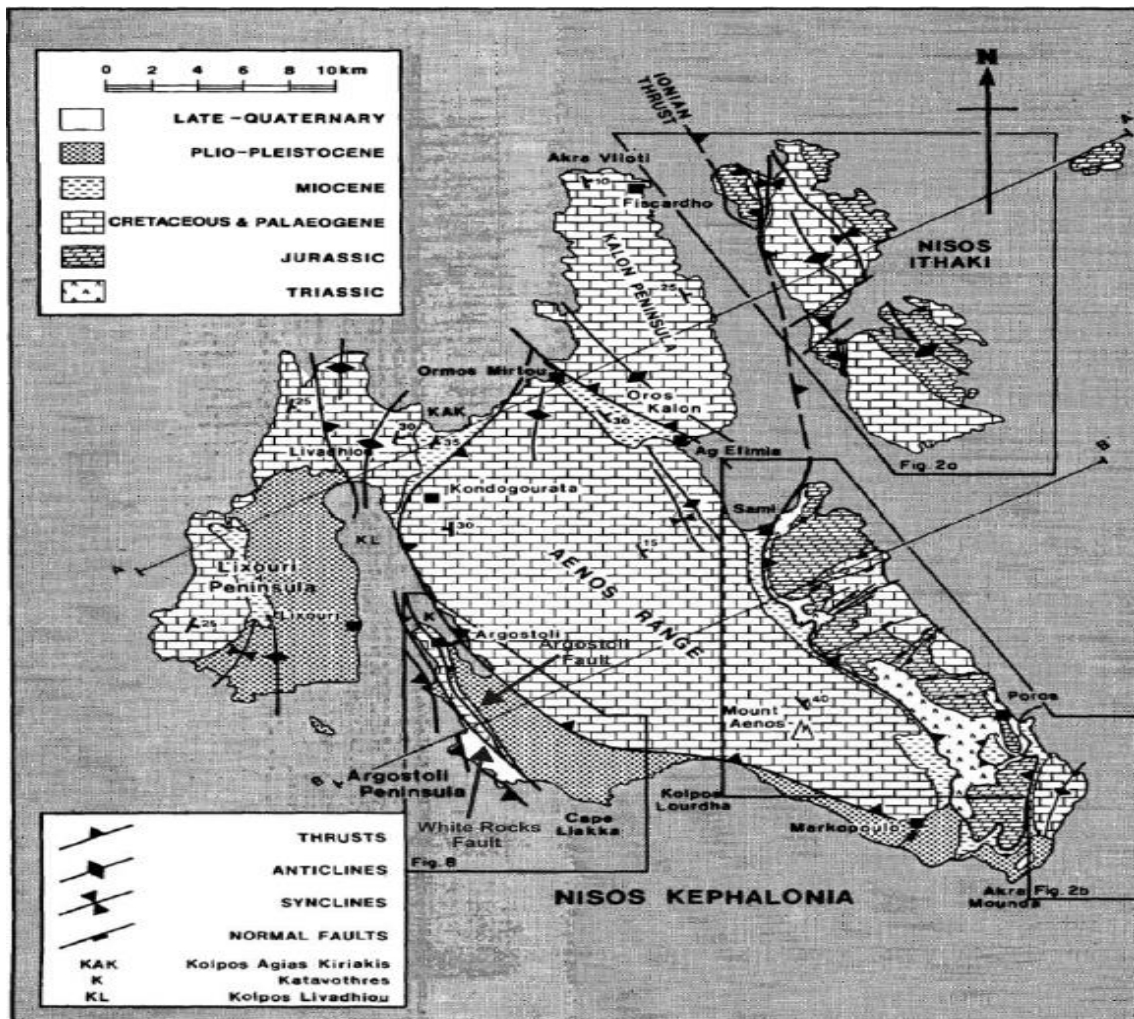


Εικόνα 4.5: Νεοτεκτονικός Χάρτης της νήσου Κεφαλονιάς και Ιθάκης

4.2.2.1. Τεκτονική Επισκόπηση στην Περιοχή Λιβαδίου - Χερσόνησος Ληξουρίου - Χερσόνησος Αργοστολίου.

Εκτός από την περιοχή του Αίνου καθεστώς συμπίεστικής 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. Μιαγωνιώδης ασυμφωνία του Κατώτερου Πλειοκαίνου 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 αυτής αποτελεί απόδειξη ότι το καθεστώς συμπίεστικής 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 συμπίεστικής 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 λοξοτήσεων στη βάση του επαναδραστηριοποιημένου ρήγματος Αργοστολίου (Underhill 1989).



Εικόνα 4.6: Απλοποιημένος τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης της νήσου Κεφαλονιάς (από 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)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΘΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5. Γεωφυσική έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και Αποτελέσματα.

5.1. Γενικά

Η επιλογή κατάλληλων γεωφυσικών μεθόδων για την εκάστοτε περιοχή έρευνας γίνεται με γνώμονα μιας σειράς συνθηκών, οι οποίες είναι:

- 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 τους).

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

Η πρώτη γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ηλεκτρομαγνητική. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο βάθη διασκόπησης, 3 m και 6 m. Προτεραιότητα ήταν να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια της περιοχής έρευνας, δεδομένων των συνθηκών και της γεωμορφολογίας της θέσης. Επιπλέον, για να αποφευχθεί η επίδραση της κατεύθυνσης των μετρήσεων στα αποτελέσματα, σε συγκεκριμένες θέσεις, έγιναν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις με διαφορετική κατεύθυνση για να έχουμε επικάλυψη. 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.

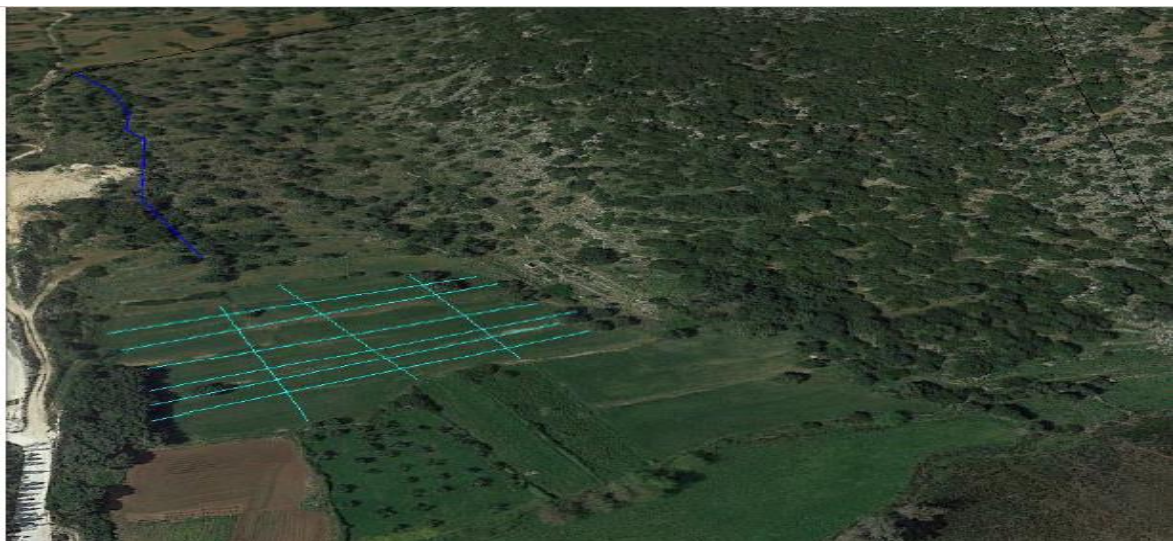
Ακολούθησαν μετρήσεις γεωραντάρ, με σκοπό την καταγραφή περιθλάσεων από τοπικούς στόχους στην περίπτωση τοιχίων ή συνεχών ανακλάσεων σε περιπτώσεις ανθρωπογενών αποθέσεων, ενώ ανακλάσεις που είναι διακριτές ανά χρονικά διαστήματα υποδηλώνουν στρωματογραφικές ασυνέχειες.

Τέλος πραγματοποιήθηκε γεωηλεκτρική τομογραφία. Είχε σκοπό την απεικόνιση του υπεδάφους με δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή. Αυτή η γεωηλεκτρική τομή μας βοηθάει να αποτυπωθεί με μεγάλη λεπτομέρεια το υπέδαφος και μέσω αυτής μπορούν να εντοπιστούν στρωματογραφικές ασυνέχειες και τοπικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης.

Οι μετρήσεις των μεθόδων αποτυπώνονται στις ακόλουθες εικόνες, με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η ηλεκτρική τομογραφία, με μωβ η περιοχή που καλύφθηκε με ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις (Εικόνα 5.1) και με μπλε χρώμα οι τομές γεωραντάρ (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.1: Χάρτης Google Earth όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι Γεωηλεκτρικές τομές και με μωβ χρώμα η περιοχή που καλύφθηκε με Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις.

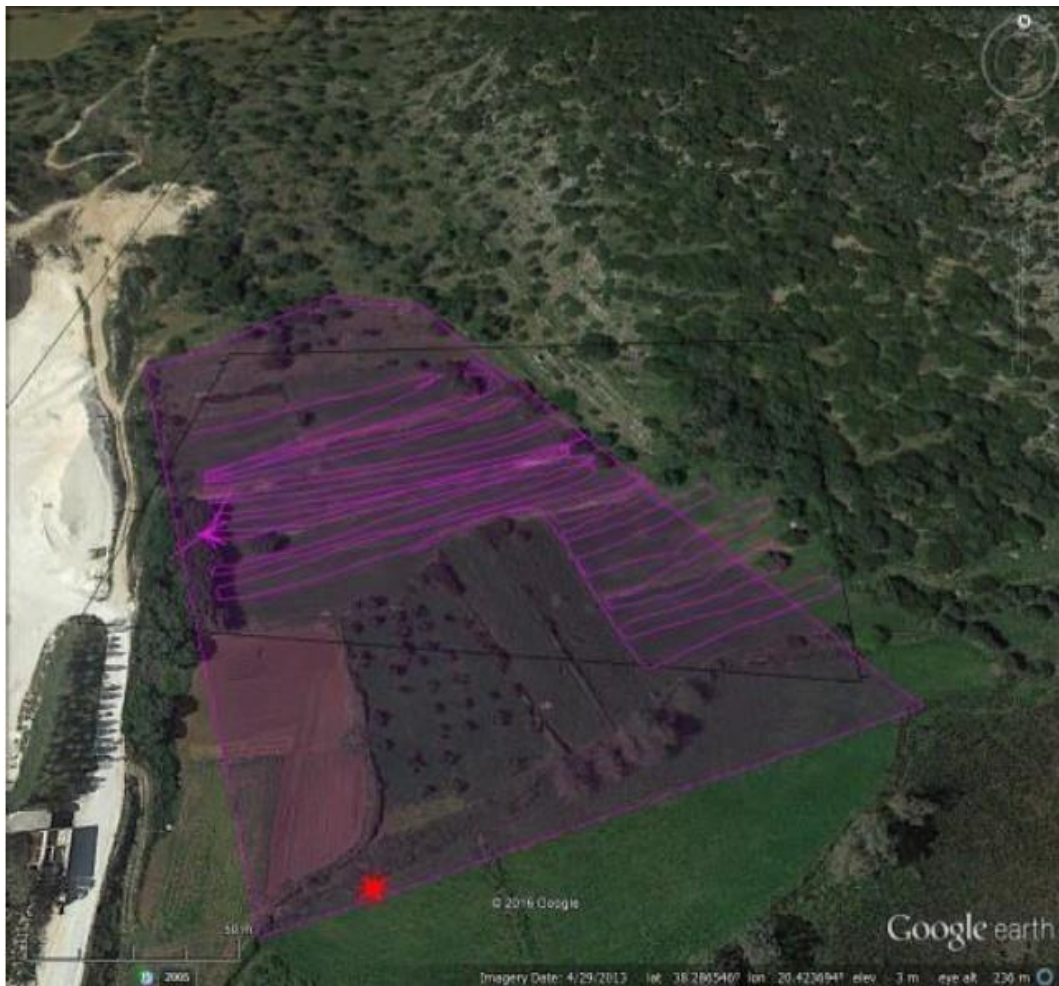


Εικόνα 5.2: Χάρτης Google Earth όπου με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται τα προφίλ του Γεωραντάρ

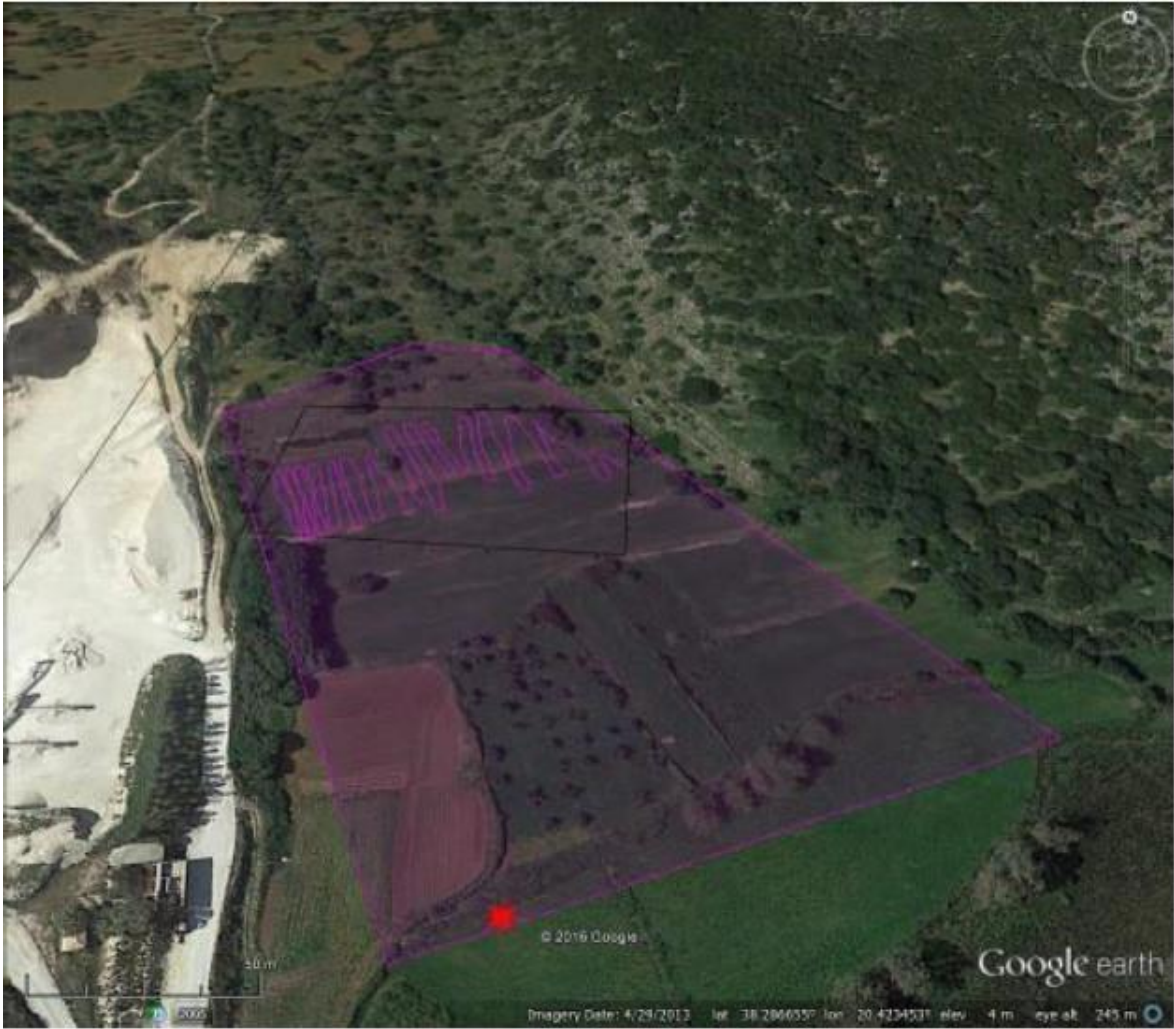
5.2. Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

5.2.1. Γενικά

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 τα 3 m και τα 6 m (**Εικόνα 5.3**, **Εικόνα 5.4**). Τέλος, για να αποφευχθεί η επίδραση, της κατεύθυνσης που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, στα αποτελέσματα έγιναν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις με διαφορετική κατεύθυνση για να έχουμε επικάλυψη.



Εικόνα 5.3: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις θέσεις των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων σε βάθος διασκόπησης 3 m.



Εικόνα 5.4: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις θέσεις των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων σε βάθος διασκόπησης 6 m

5.2.2. Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2 (**Εικόνα 5.5**) με συνολικό βάθος διασκόπησης τα 3m και CMD-4 , με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m, αντίστοιχο του Geonics EM-31. Το όργανο παρέχει τη λειτουργία σύνδεσης με όργανο GPS ώστε να παρέχει στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης. Στην παρούσα γεωφυσική έρευνα χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία συνεχούς μέτρησης με GPS:



Εικόνα 5.5: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-2 σε βάθος διασκόπησης 3 m , στη θέση Λιβάδι

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

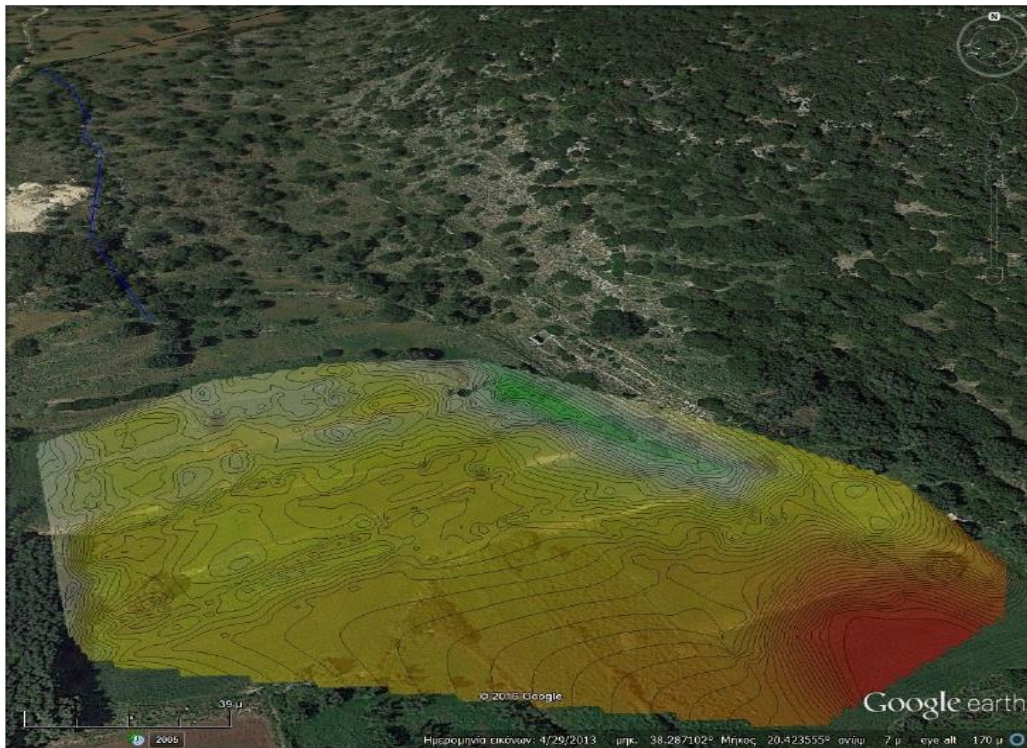
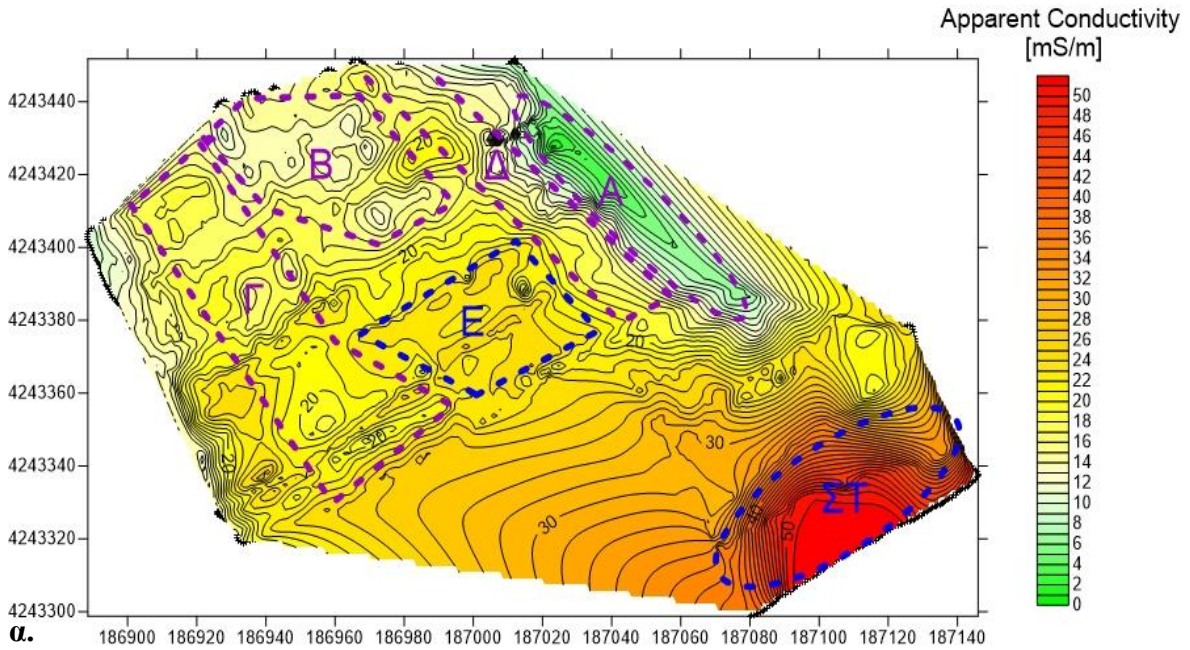
- Μεγέθη που μετρώνται:
 - Ηλεκτρική αγωγιμότητα.
 - Μαγνητική επιδεκτικότητα.
- Ακρίβεια μέτρησης: $\pm 4\%$ σε 50 m S/m
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 10 Hz.

Με τη βοήθεια των οργάνων που αναφέρθηκαν παραπάνω πάρθηκαν μετρήσεις με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m και 6 m. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα ονομάζονται medium και high αντίστοιχα.

Τέλος, τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Surfer της Golden software και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.2.3. Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες

Διαμόρφωση CMD-2 και βάθος διασκόπησης 3 m



Εικόνα 5.6: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m (επάνω). Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m τοποθετημένος σε χάρτη Google Earth (κάτω).

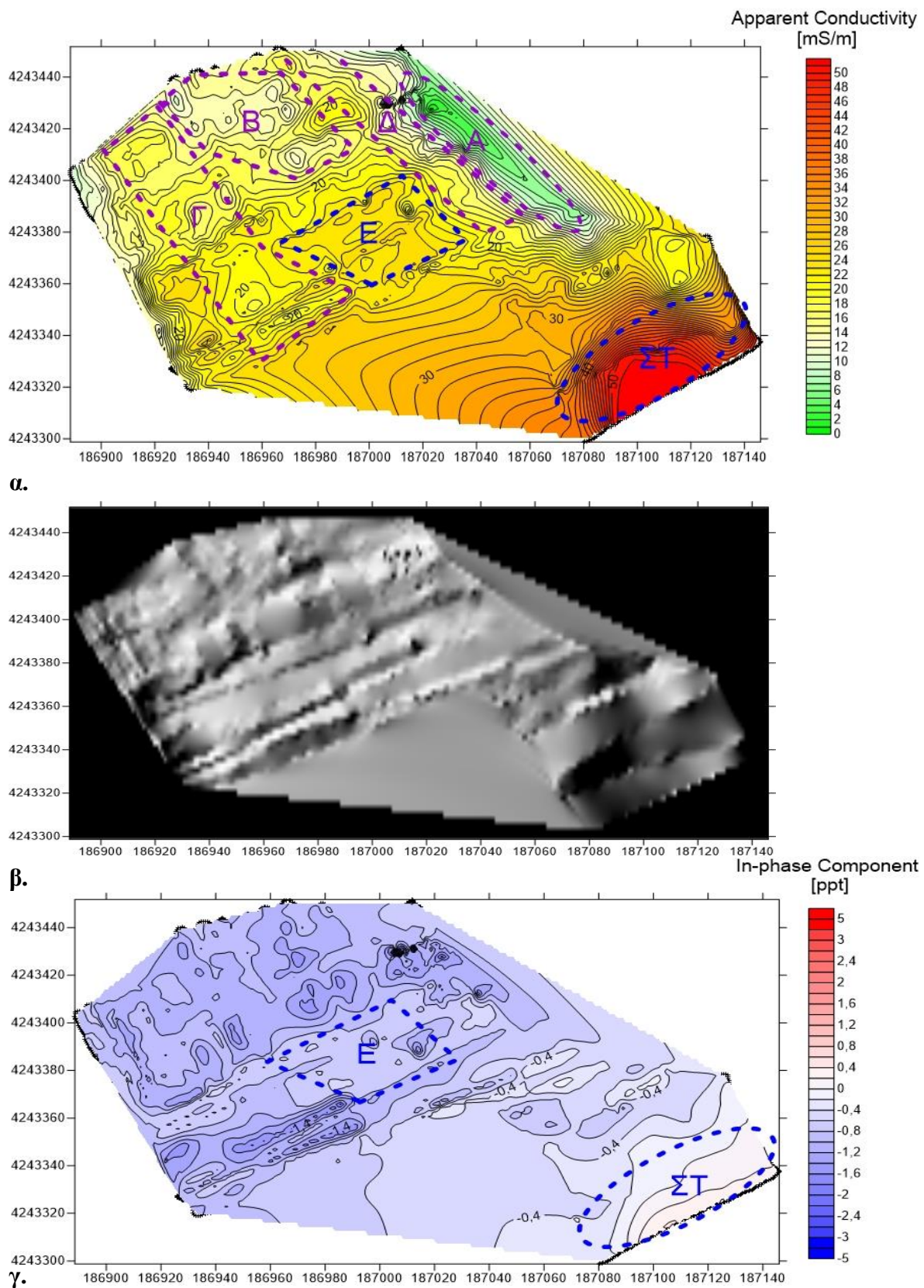
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στην **Εικόνα 5.6 α**, παρουσιάζεται ο χάρτης της φαινόμενης αγωγιμότητας χωρισμένος σε μεμονωμένες περιοχές. Η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m, εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στην **περιοχή «Α»** εμφανίζονται πολύ χαμηλές τιμές αγωγιμότητας που πιθανώς συνδέονται με το βραχώδες υπόστρωμα.
- Στην **περιοχή «Β»** οι σχετικά χαμηλές τιμές αγωγιμότητας συνδέονται με αδρομερές υλικό που μεταφέρεται μέσω του χειμάρρου. (ο χειμάρρος φαίνεται στην **Εικόνα 5.6 β**, με μπλε χρώμα).
- Στην **περιοχή «Γ» και «Δ»** παρουσιάζονται μεσαίες τιμές αγωγιμότητας και πιθανότερα συνδέονται με λεπτόκοκκο υλικό αναμιγμένο με αδρομερές. Η ανάμιξη των δύο αυτών είναι αποτέλεσμα βαρυντικών κινήσεων εξαιτίας των επικλήσεων του εδάφους.
- Στην **περιοχή «Ε»** οι μεσαίες προς υψηλές τιμές αγωγιμότητας πιθανώς υποδεικνύουν λεπτόκοκκο υλικό, πιθανώς η άμμος που προκύπτει από το αδρομερές υλικό, σαν απόθεση του χειμάρρου.
- Τέλος, στην **περιοχή «ΣΤ»** εμφανίζονται πολύ υψηλές τιμές αγωγιμότητας που πιθανόν προκύπτουν από την ύπαρξη πολύ χαλαρού υλικού και από την επίδραση υφάλμυρου νερού. Αυτό το πολύ λεπτόκοκκο υλικό είναι άμμος και αργιλοπηλώδεις αποθέσεις από την λιμνοθάλασσα.

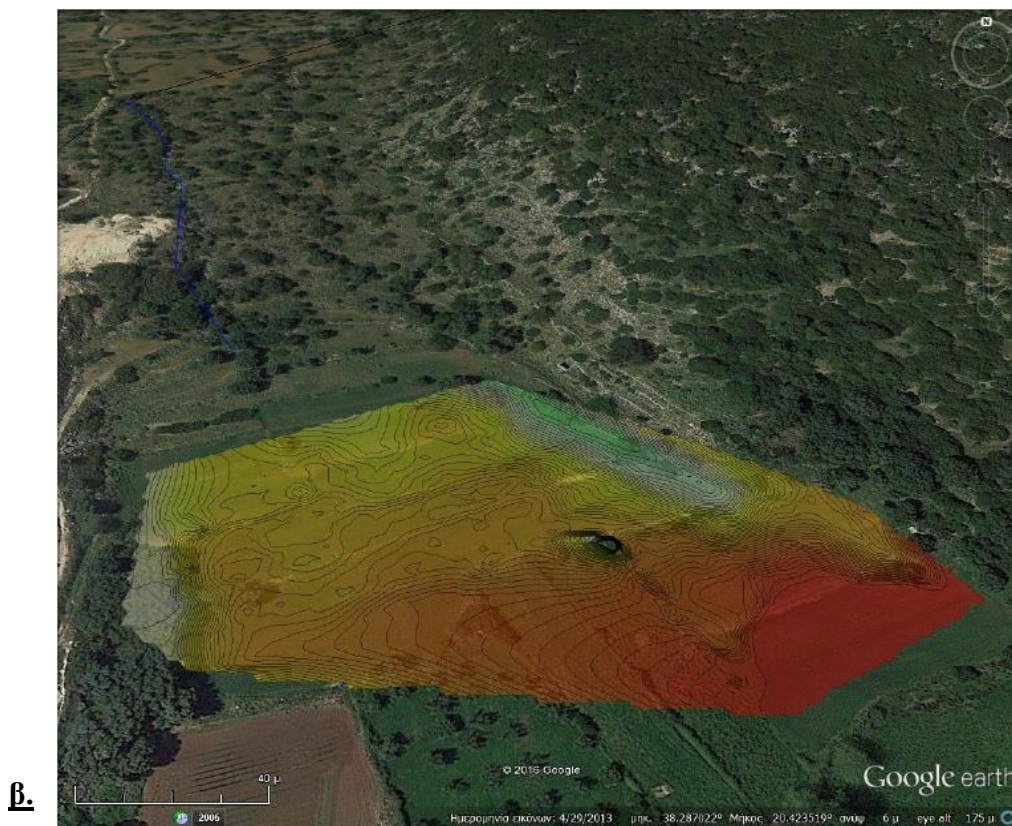
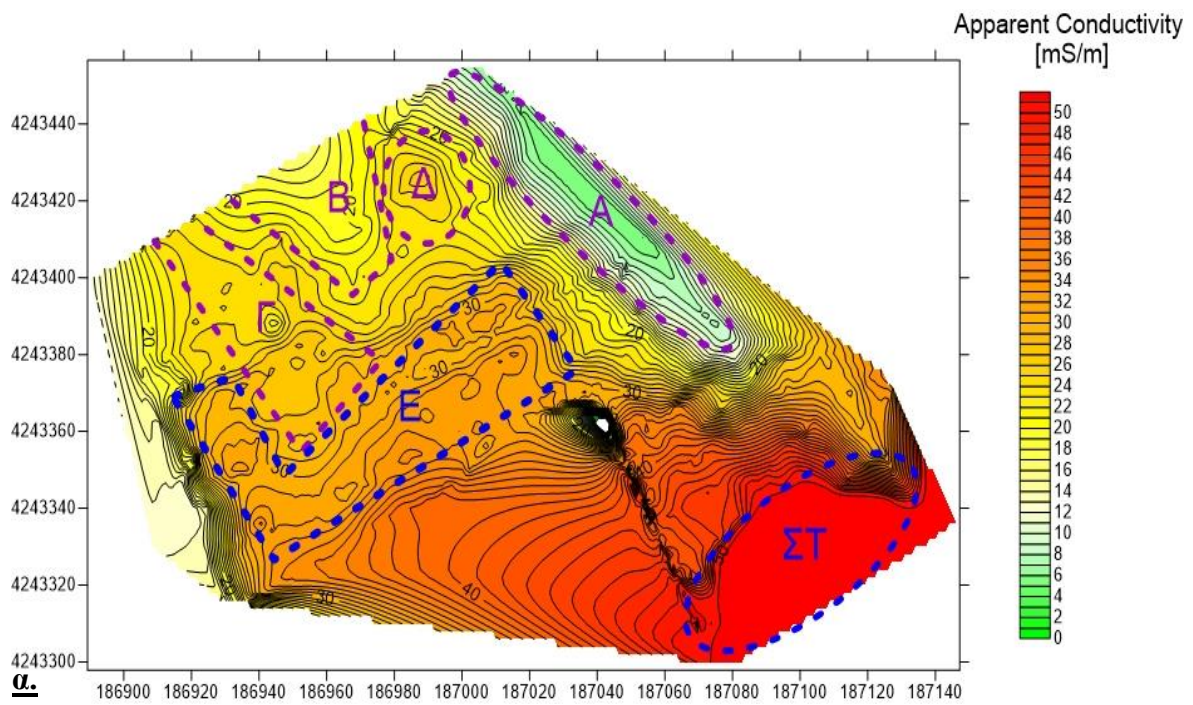
Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 5.7**, χωρίζοντας τον χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε μεμονωμένες περιοχές και εξετάζοντας τον σε συνδυασμό με τον φωτοσκιασμένο χάρτη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της σε φάση συνιστώσας (χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας) παρατηρούμε τα ακόλουθα:

- Ο χάρτης φωτοσκίασης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν εμφανίζει κάποιες τοπικές ανωμαλίες που θα μπορούσαν να υποδεικνύουν ανθρωπογενείς δομές (τοίχοι, δρόμοι κλπ.) εκτός από μια ανωμαλία με κατεύθυνση ίδια με αυτή των μετρήσεων. Στο βόρειο τμήμα παρατηρείται μια διαφοροποίηση μεταξύ των **περιοχών «Β», «Γ», «Δ»**. Ξεκαθαρίζει και η εικόνα για τις **περιοχές «Α» και «ΣΤ»**.
- Στο χάρτη της σε φάσης συνιστώσας, που παρουσιάζεται η μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας, οι **περιοχές «Ε» και «ΣΤ»** εμφανίζουν καθαρά την ύπαρξη λεπτομερούς αγώγιμου υλικού.



Εικόνα 5.7: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (α), Χάρτης μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με φωτοσκίαση (β) και Χάρτης κατανομής της σε φάση συνιστώσας (μαγνητικής επιδεκτικότητας) (γ) για συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m.

Διαμόρφωση CMD-4 και βάθος διασκόπησης 6 m



Εικόνα 5.8: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 m (επάνω). Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 m τοποθετημένος σε χάρτη Google Earth (κάτω).

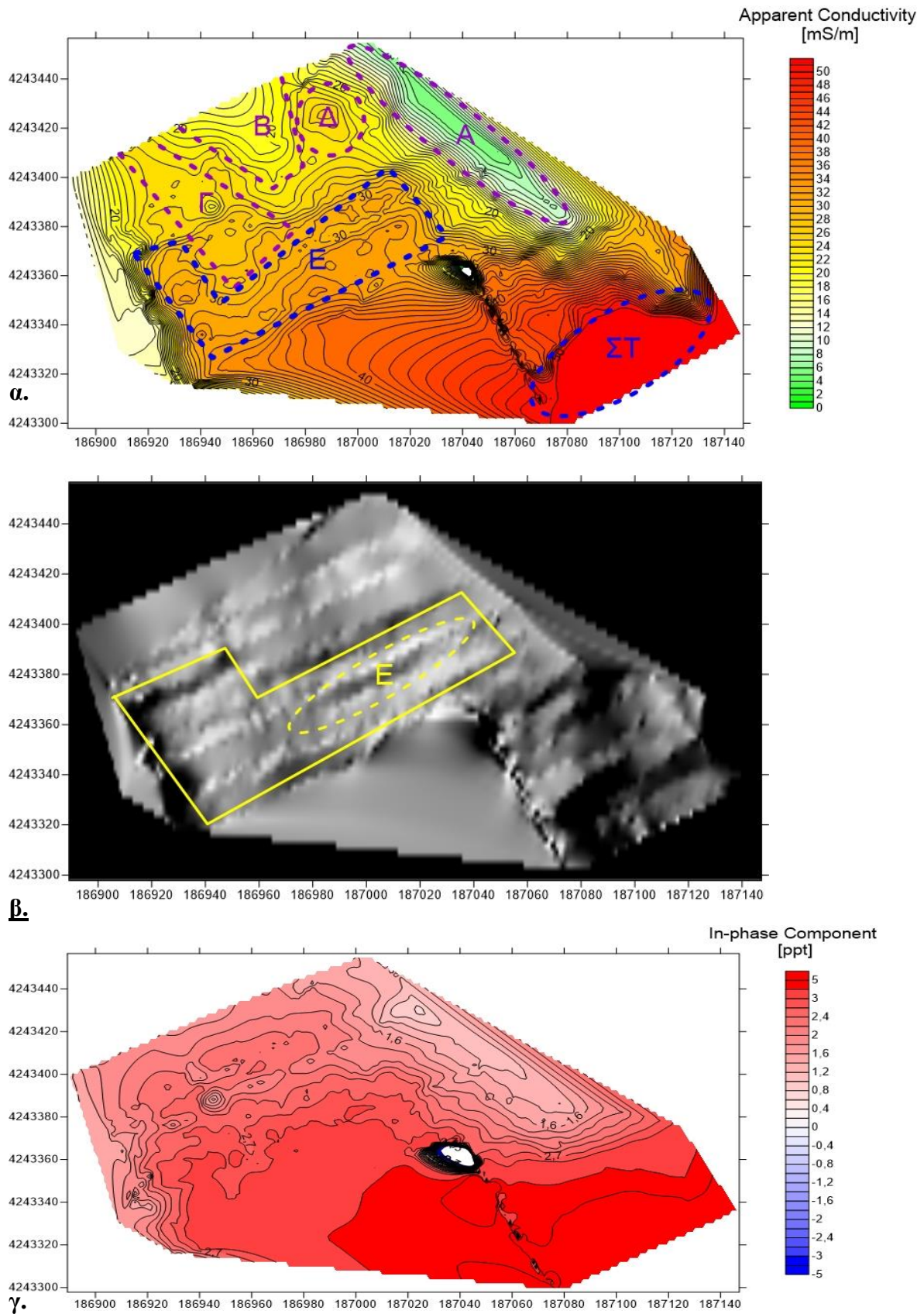
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στην **Εικόνα 5.8**, παρουσιάζεται ο χάρτης της φαινόμενης αγωγιμότητας χωρισμένος σε μεμονωμένες περιοχές. Η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m, εξάγει τα εξής σχόλια:

- Στην **περιοχή «Α»** εμφανίζονται πολύ χαμηλές τιμές αγωγιμότητας που πιθανώς συνδέονται με το βραχώδες υπόστρωμα.
- Στην **περιοχή «Β»** οι σχετικά χαμηλές τιμές αγωγιμότητας συνδέονται με αδρομερές υλικό που μεταφέρεται μέσω του χειμάρρου, ο οποίος παρουσιάζεται με μπλε χρώμα στην **Εικόνα 5.8 β**.
- Στην **περιοχή «Γ» και «Δ»** παρουσιάζονται μεσαίες τιμές αγωγιμότητας και πιθανότερα συνδέονται με λεπτόκοκκο υλικό αναμιγμένο με αδρομερές.
- Στην **περιοχή «Ε»** οι μεσαίες προς υψηλές τιμές αγωγιμότητας πιθανώς υποδεικνύει λεπτόκοκκο υλικό.
- Τέλος, στην **περιοχή «ΣΤ»** εμφανίζονται πολύ υψηλές τιμές αγωγιμότητας που πιθανόν προκύπτουν από την ύπαρξη πολύ χαλαρού υλικού και από την επίδραση θαλασσινού νερού.

Επιπλέον, χωρίζοντας τον χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε μεμονωμένες περιοχές και εξετάζοντας τον σε συνδυασμό με τον φωτοσκιασμένο χάρτη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (**Εικόνα 5.9**) και τη σε φάση συνιστώσα (χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας), σε βάθος διασκόπησης τα 6 m, παρατηρούμε τα ακόλουθα:

- Ο χάρτης φωτοσκίασης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας εμφανίζει στη **περιοχής «Ε»**, που εντοπίστηκε από το χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας, μια χαρακτηριστική γραμμικότητα. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στην κατεύθυνση που πάρθηκαν οι μετρήσεις. Επιπλέον, μέσα στην ίδια **περιοχή «Ε»** εμφανίζεται μια κάποια διαφοροποίηση καθώς παρατηρείται ένα βύθισμα στο σημείο όπου έχει περιγραφεί με διακεκομμένη γραμμή, απ' ότι στο βορειότερο τμήμα της.
- Στο χάρτη της σε φάσης συνιστώσας, που παρουσιάζεται η μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας, δεν εμφανίζεται κάποιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό.



Εικόνα 5.9: Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (α), Χάρτης μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με φωτοσκίαση (β) και Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεικτικότητας (γ) για συνολικό βάθος διασκόπησης 6 m.

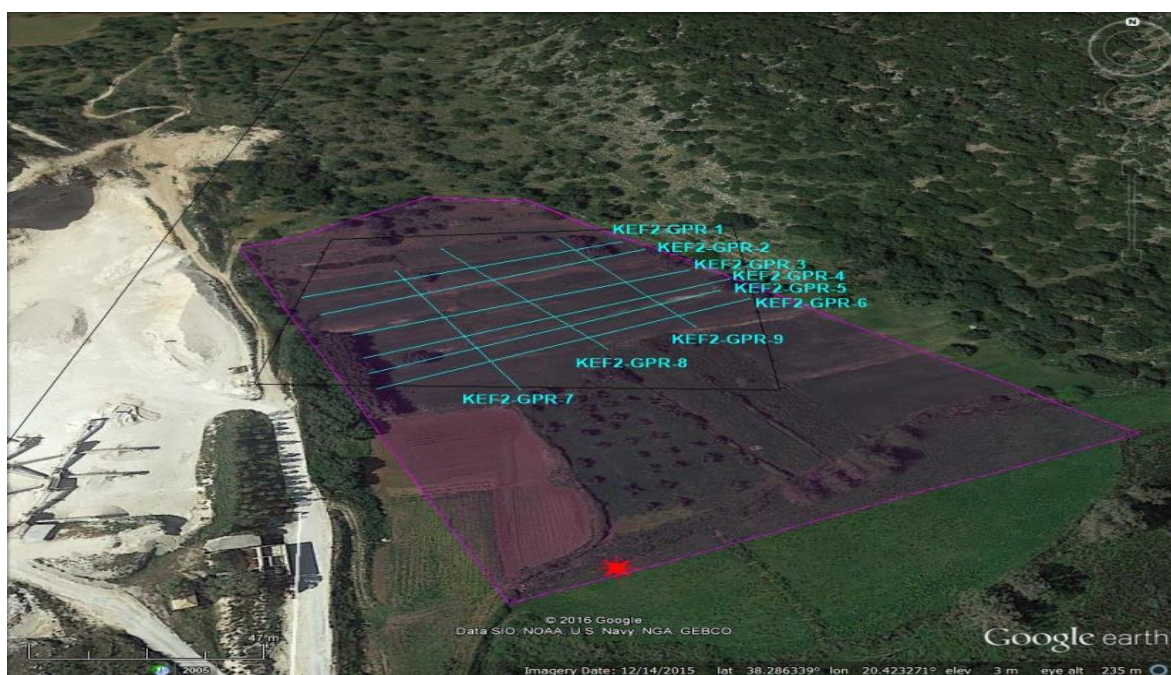
5.3. Γεωραντάρ – GPR (Ground – Penetrating Radar)

5.3.1. Γενικά

Η δεύτερη κατά σειρά μέθοδος που εφαρμόστηκε στη περιοχή Λιβιάδι ήταν αυτή του γεωραντάρ ή GPR. Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η γρήγορη λήψη των αποτελεσμάτων καθώς και η αξιοπιστία της. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό πιθανών δομών, που υποδηλώνουν ανθρωπογενή παρέμβαση, ενός αρχαίου λιμανιού 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.

Χρησιμοποιήθηκε μια κεραία των 100 MHz της MALA Geoscience καθώς μας ενδιέφερε να επιτύχουμε μεγάλος βάθος διασκόπησης. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 9 τομές, εκ των οποίων οι 6 (KEF2-GPR-1,2,3,4,5,6) έχουν διεύθυνση Ανατολή – Δύση και οι υπόλοιπες 3 (KEF2-GPR-7,8,9) έχουν διεύθυνση Βορράς - Νότος (**Εικόνα 5.10**).

Σε όλα τα ραδογράμματα παρουσιάζονται κάποιες ασυνέχειες που διαχωρίζουν χώρους διαφορετικής σύστασης του υπεδάφους. Αυτοί οι χώροι χώροι αποτυπώνονται από την επιφάνεια με τα εξής χρώματα: γαλάζιο, κίτρινο, πράσινο, ανοιχτό πράσινο. Περιοχές πολλαπλών ανακλάσεων οι οποίες έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον και υποδηλώνουν πολλαπλές στρώσεις αδρομερούς υλικού περιγράφονται με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές.



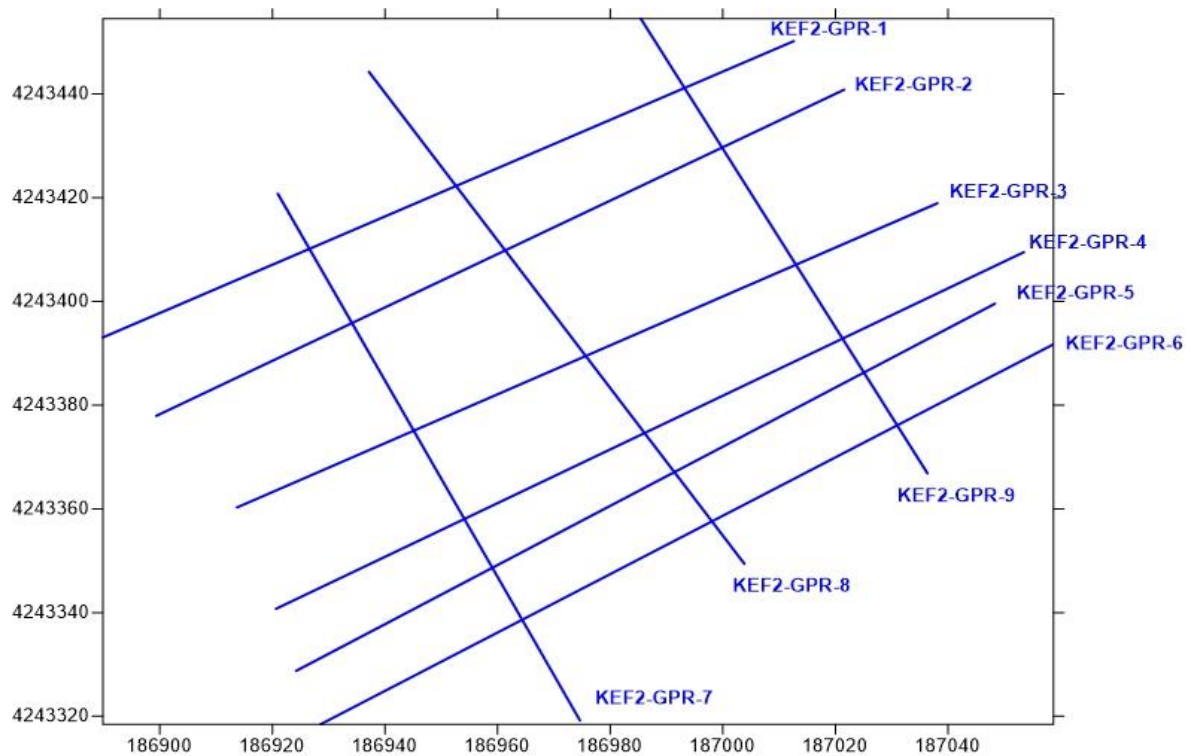
Εικόνα 5.10: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις τομές γεωρανταρ

5.3.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Μετά την λήψη των δεδομένων, έγινε επεξεργασία τους από τον επιβλέποντα καθηγητή, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα REFLEXW της Sandmeier Scientific Software. Τα στάδια της επεξεργασίας ήταν τα εξής:

1. Subtract-mean(dewow)
2. Move start- time
3. Manual gain(y)
4. Background removal
5. Band-pass frequency

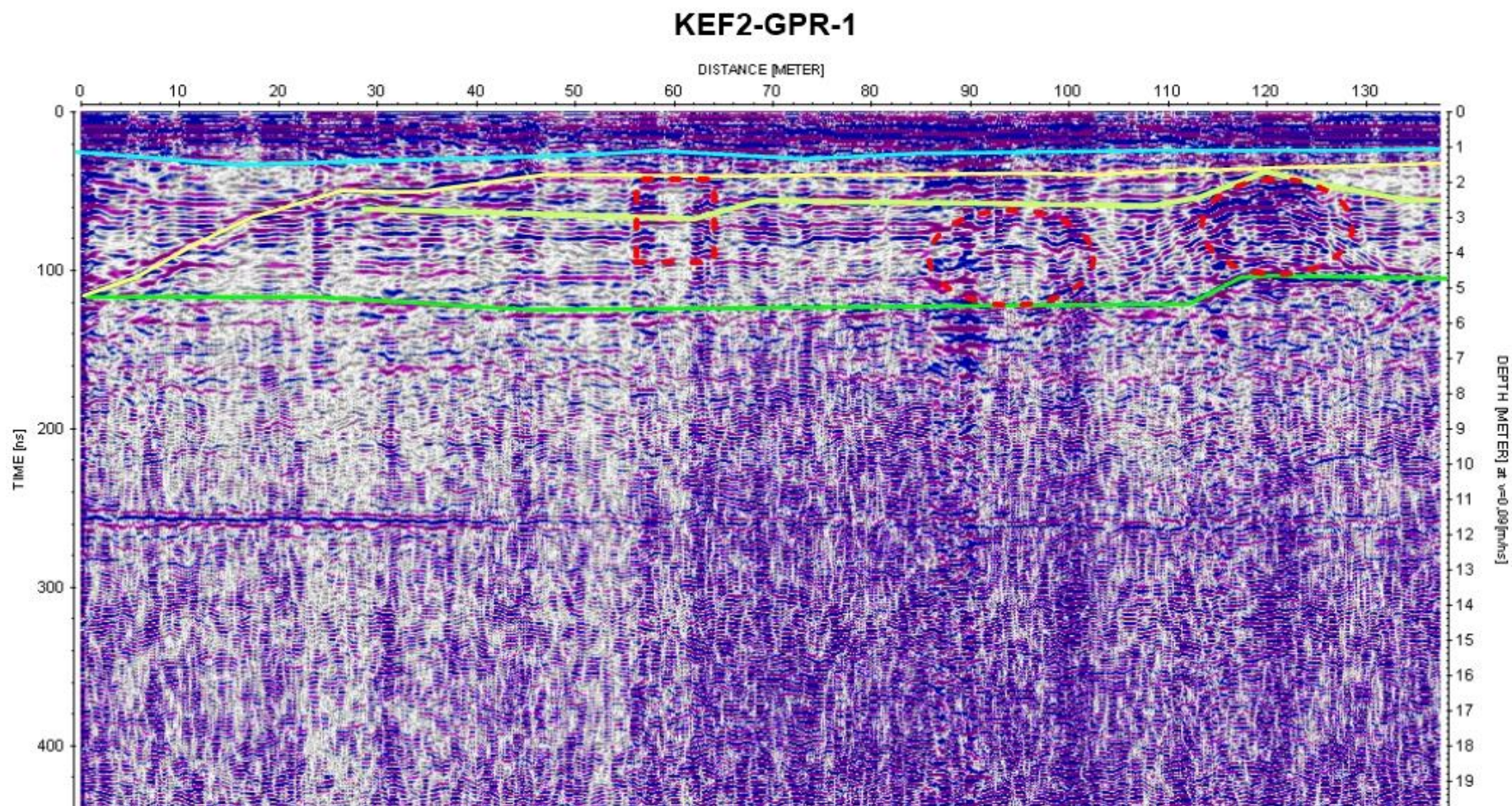
Μετά το πέρας της επεξεργασίας, οι εικόνες των μοντέλων επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer ώστε να εντοπιστούν ανωμαλίες ή στρωματογραφία.



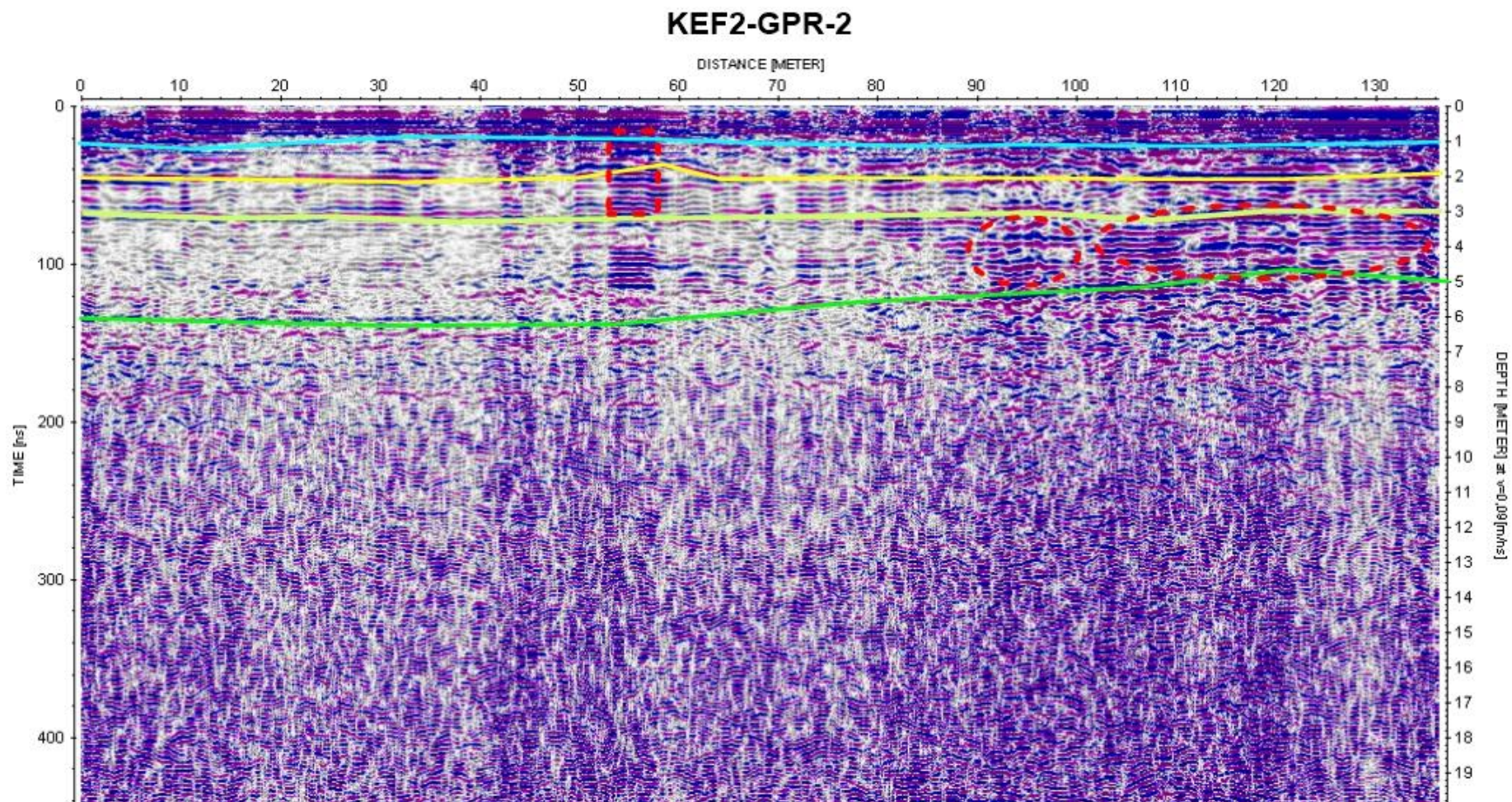
Εικόνα 5.11: Αποτύπωση των τομών γεωραντάρ σε εξάρτηση από το σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87'.

5.3.3. Τομές Γεωραντάρ

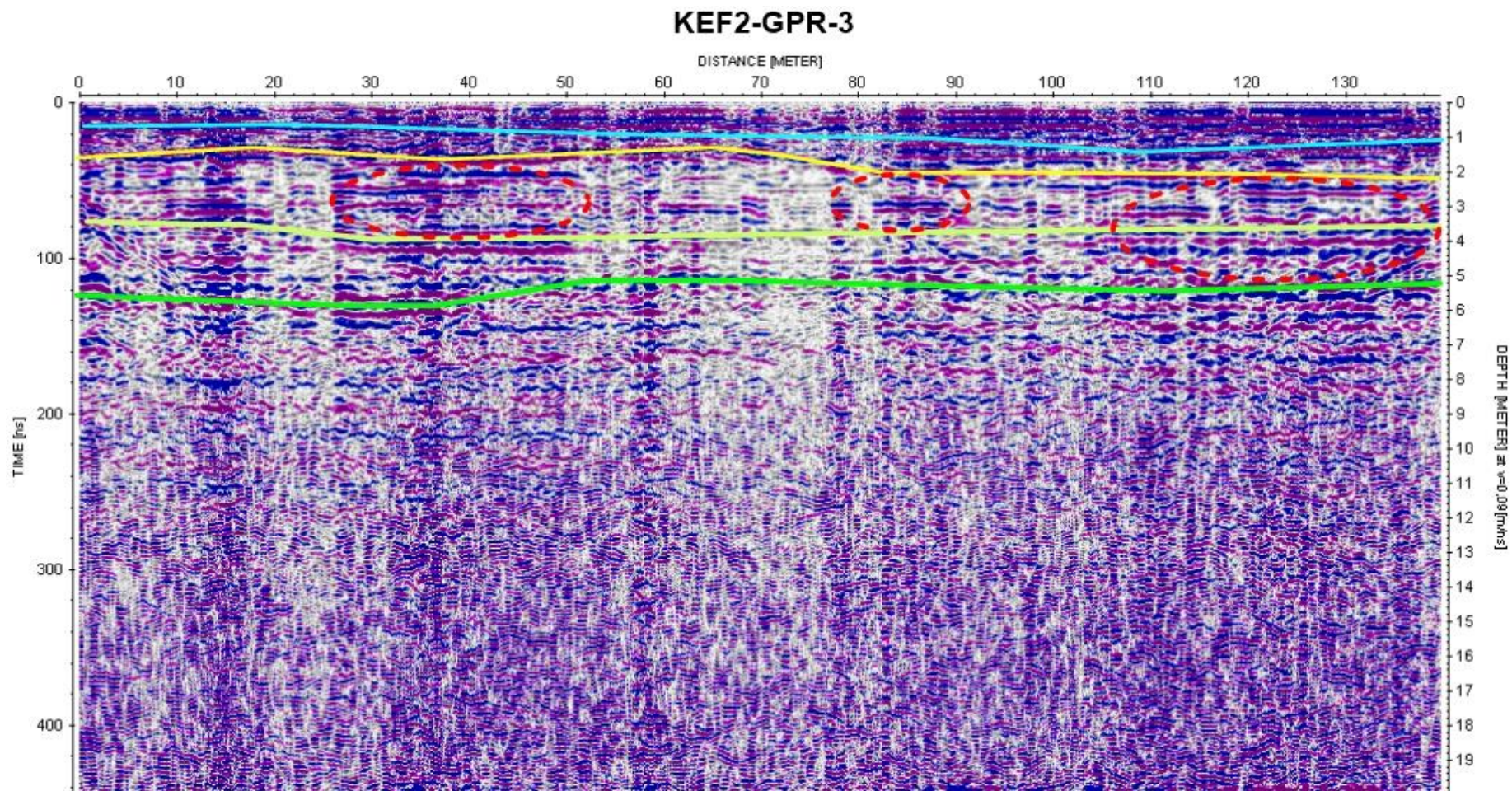
Τομές με διεύθυνση από Ανατολή προς Δύση:



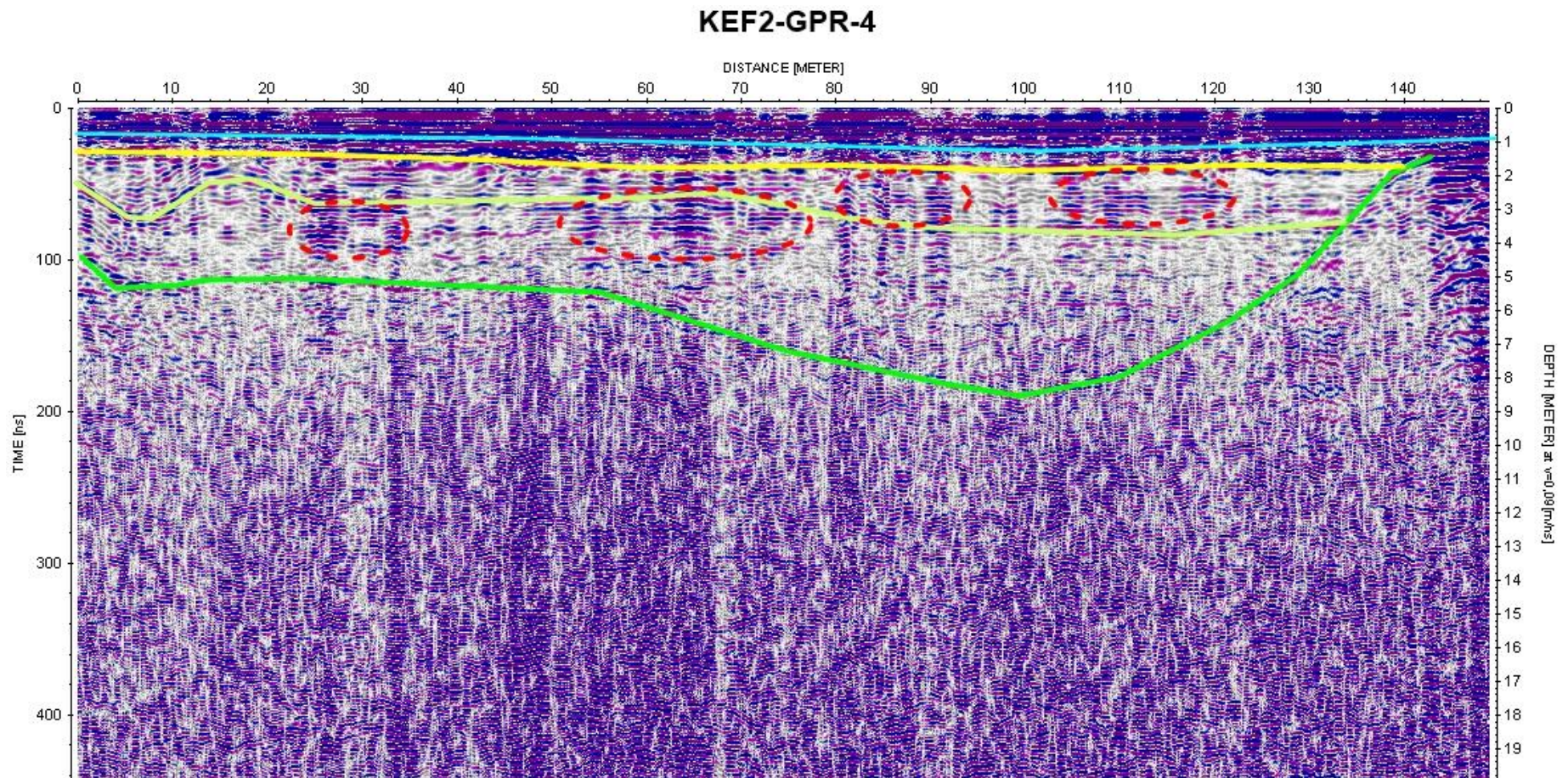
Εικόνα 5.12 : Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-1» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού



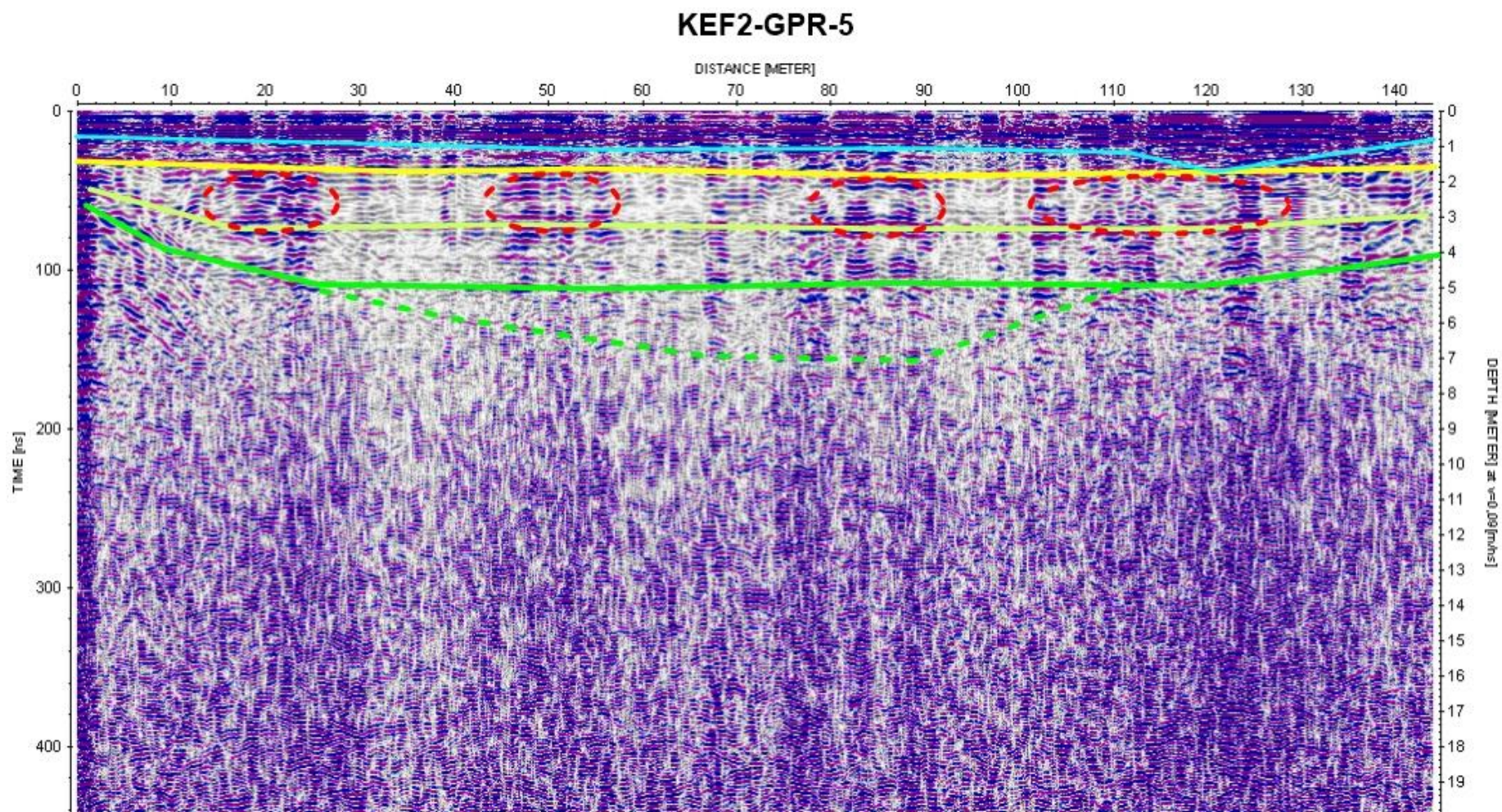
Εικόνα 5.13: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-2» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού



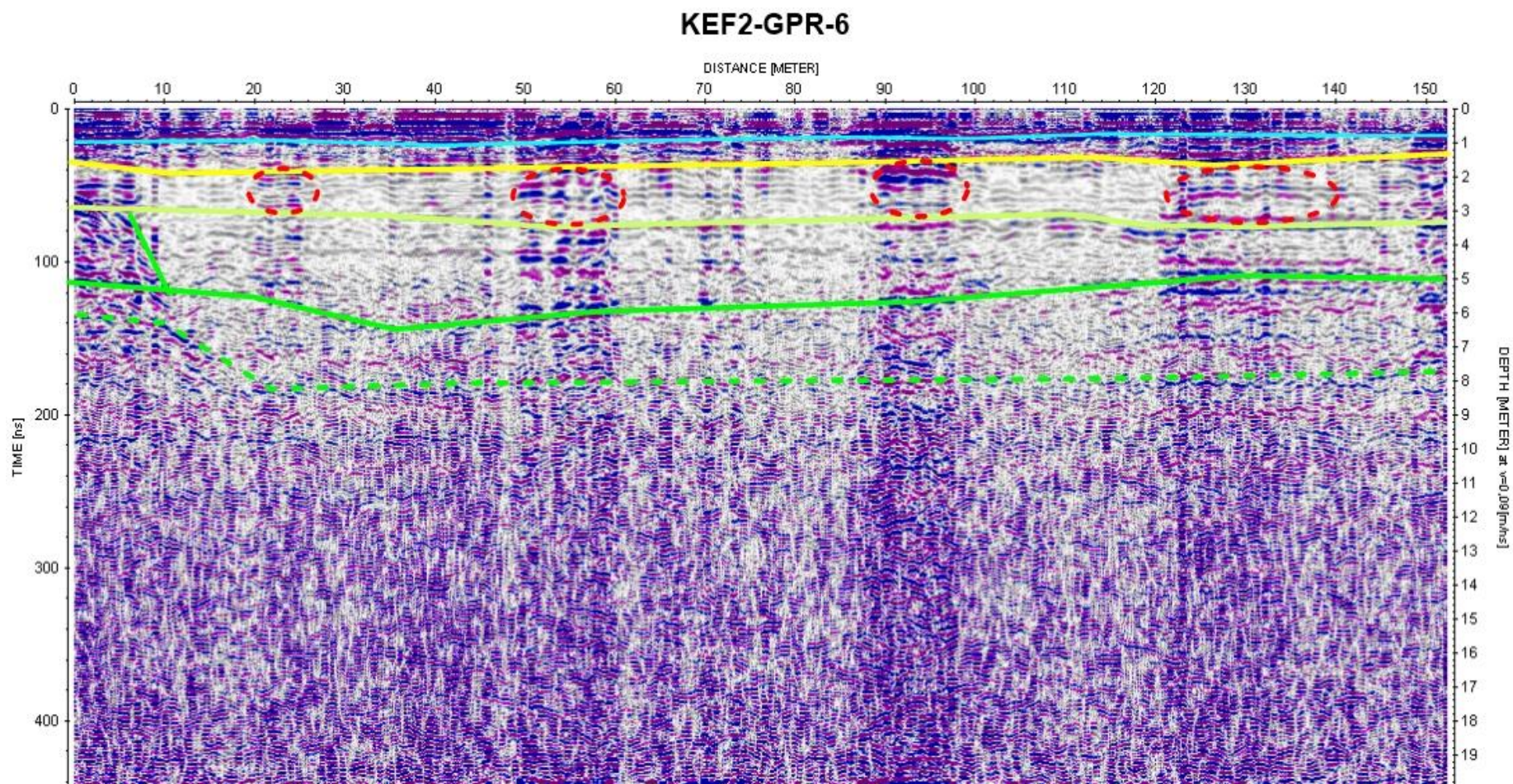
Εικόνα 5.14: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-3» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού



Εικόνα 5.15: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-4» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.

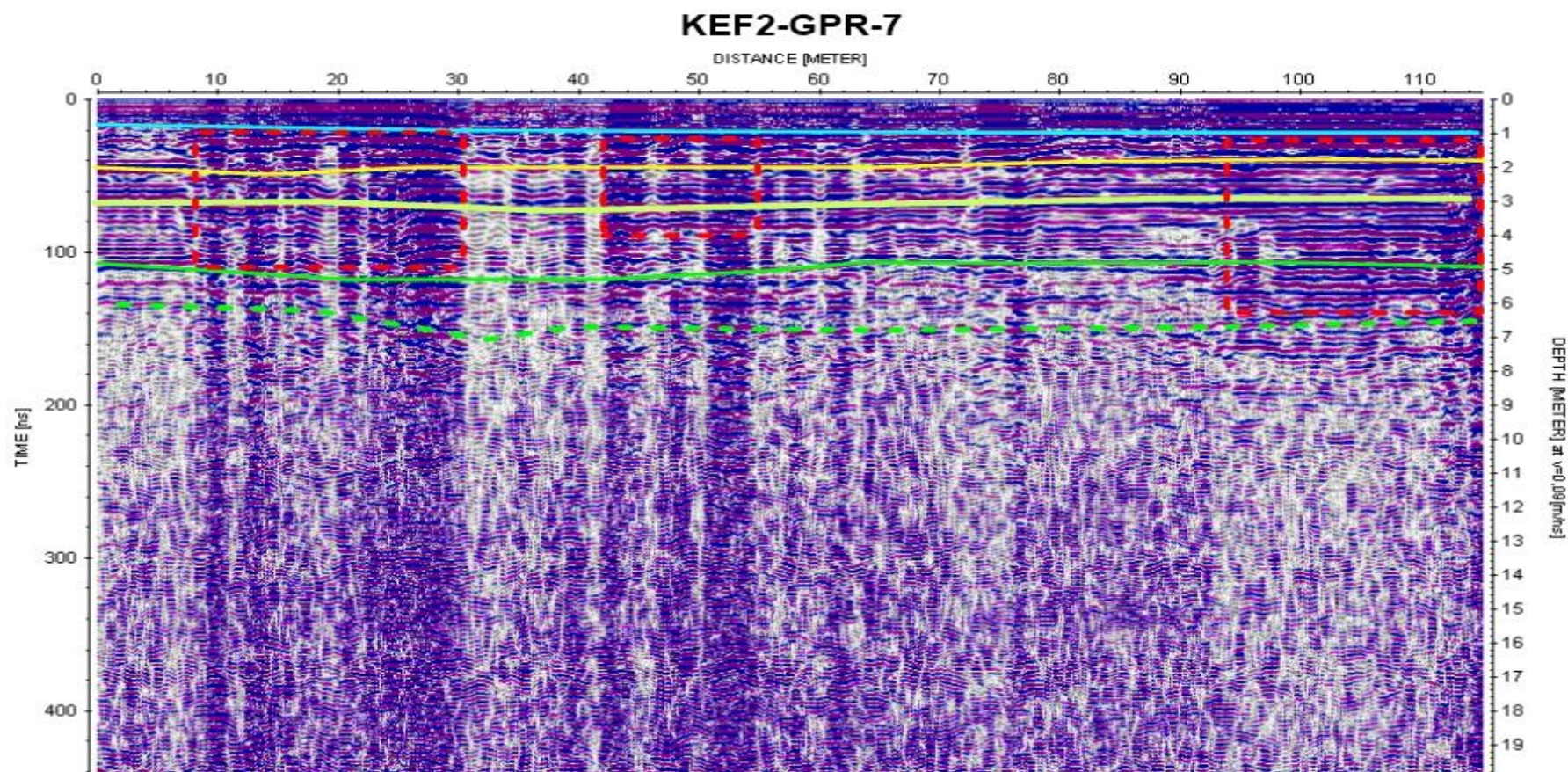


Εικόνα 5.16: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-5» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.

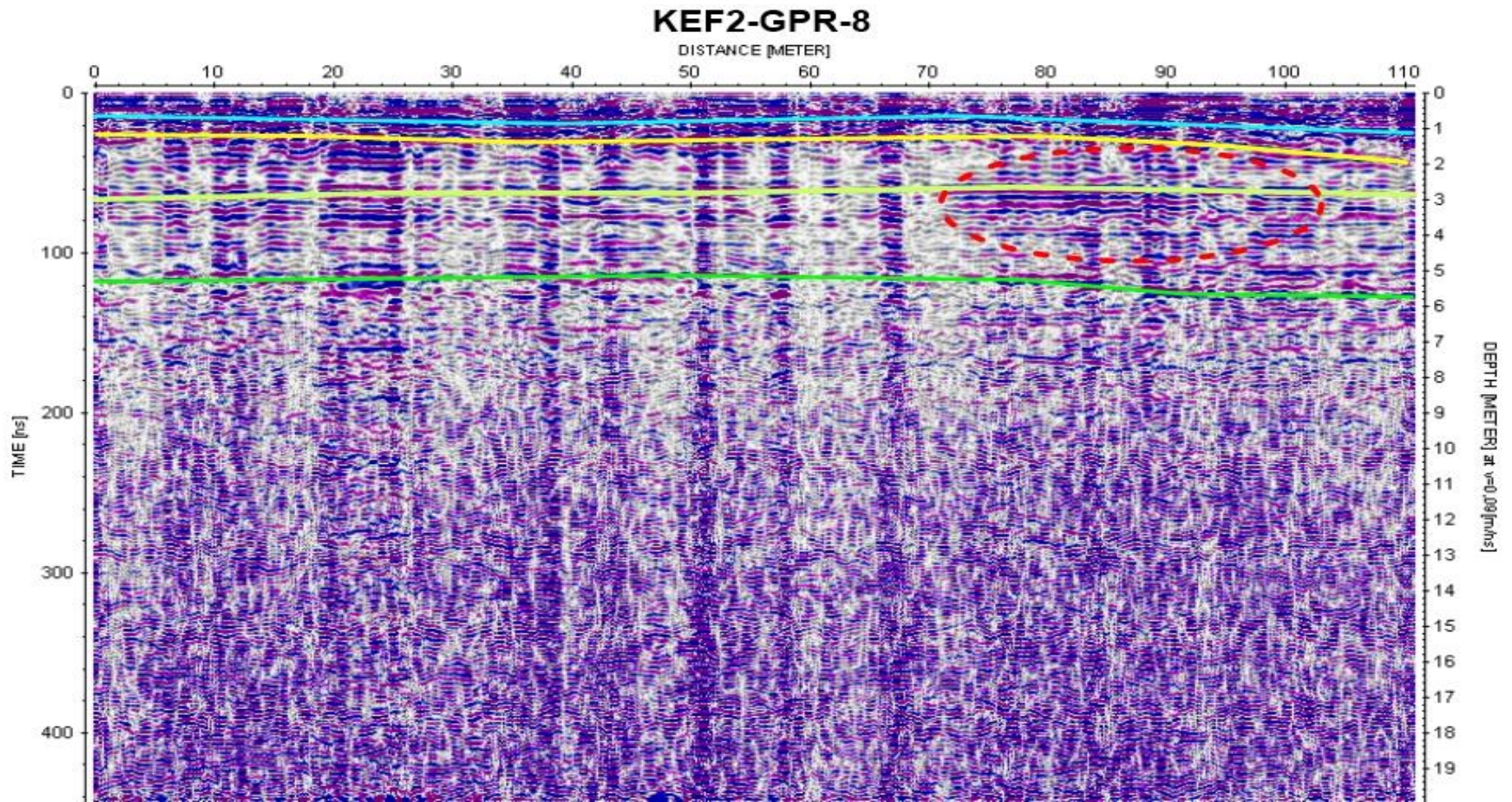


Εικόνα 5.17: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-6» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.

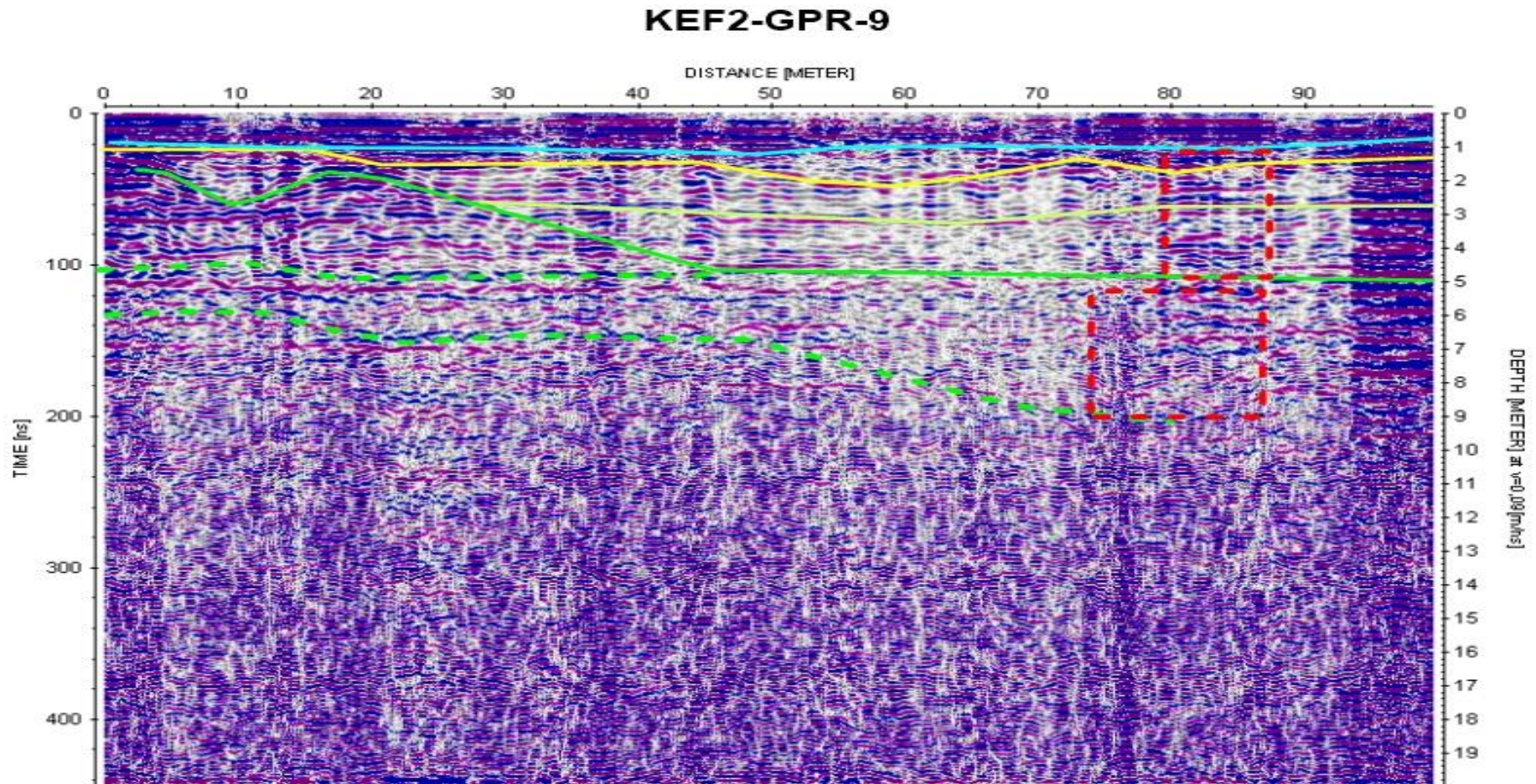
Τομές με διεύθυνση από Βορρά προς Νότο:



Εικόνα 5.18: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-7» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.



Εικόνα 5.19: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-8» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.



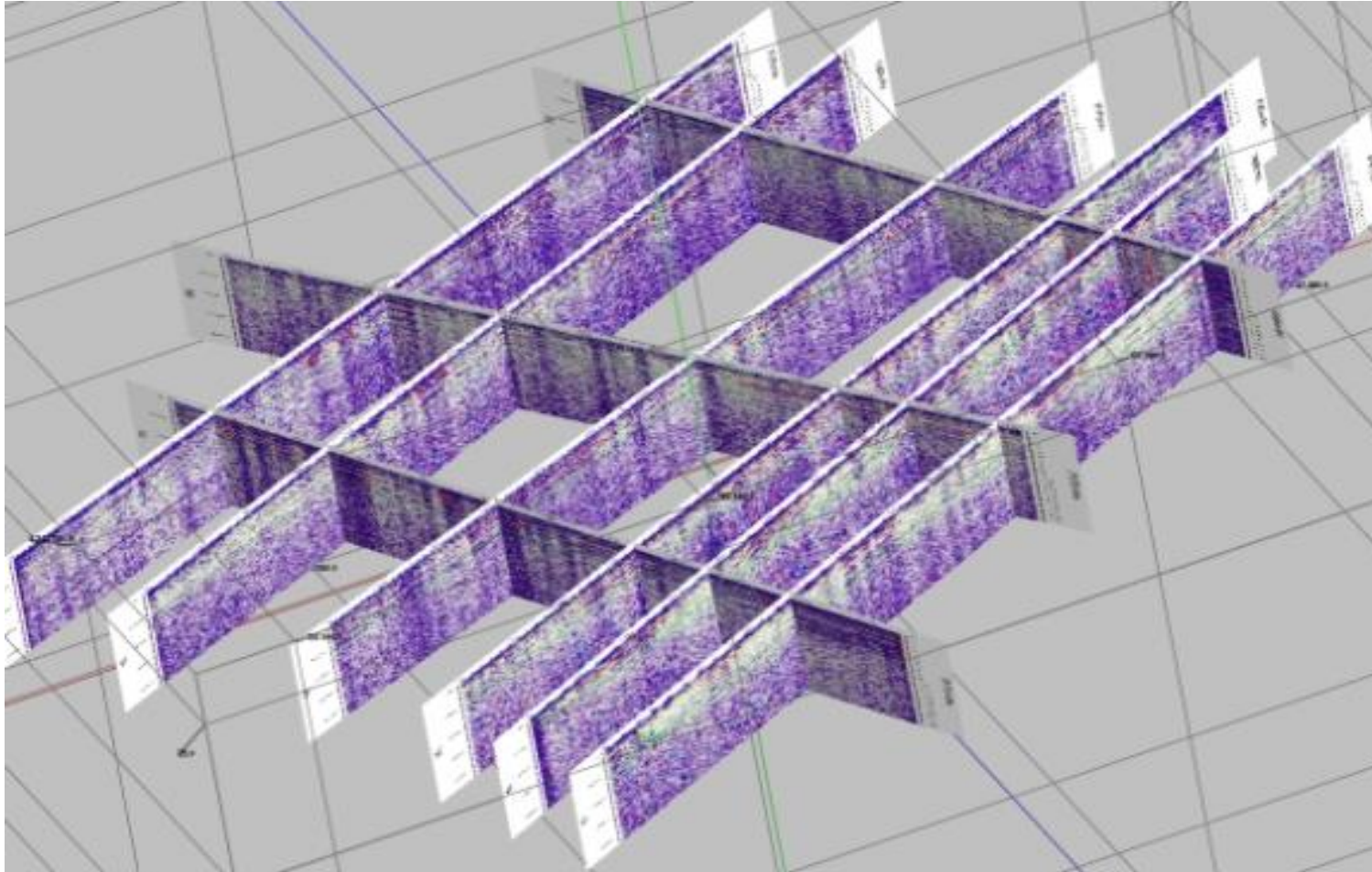
Εικόνα 5.20: Τομή Γεωραντάρ «KEF2-GPR-9» με διαφορετικά χρώματα αποτυπώνονται οι στρωματογραφίες, με κόκκινο χρώμα περιγράφονται οι περιοχές που εμφανίζουν πολλαπλές ανακλάσεις, που πιθανόν είναι ομαδοποιήσεις αδρομερούς υλικού.

5.3.4 Συνολικά αποτελέσματα – συμπεράσματα τομών γεωραντάρ.

Παραπάνω παρουσιάζονται οι χάρτες με τις τομές του Γεωραντάρ, 6 τομές (KEF2-GPR-1,2,3,4,5,6) παράλληλες με διεύθυνση Ανατολή προς Δύση και 3 τομές (KEF2-GPR-7,8,9) κάθετες στις πρώτες με διεύθυνση Βορά προς Νότο. Από τους παραπάνω χάρτες προκύπτουν μια σειρά συμπερασμάτων και είναι τα εξής:

- Εμφανίζονται 4 ασυνέχειες μεταξύ των στρώσεων, οι οποίες αποτυπώνονται με γραμμές διαφορετικού χρώματος. Σε μερικές τομές εντοπίζονται ασυνέχειες βαθύτερες από την πράσινη γραμμή και ανήκουν στις τομές με διεύθυνση Δύση – Ανατολή. Όλες οι ασυνέχειες υποδεικνύουν χαλαρό υλικό και πιθανά το βραχώδες υπόστρωμα είναι βαθύτερα και δεν εντοπίστηκε.
- Παρατηρείται ένα βύθισμα κάτω από την βαθύτερη πράσινη ασυνέχεια στις τομές «KEF2-GPR4,5»
- Περιοχές με πολλαπλές ανακλάσεις, οι οποίες περιγράφονται με διακεκομμένες κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν χώρους με μαζεμένο αδρομερές υλικό.
- Το επάνω στρώμα χαρακτηρίζεται με έντονες ανακλάσεις καθώς είναι αποτέλεσμα ύπαρξης αδρομερούς υλικού ενώ στις κατώτερες στρώσεις γίνεται είτε λεπτόκοκκο είτε περισσότερο ομογενοποιημένο υλικό.
- Η τομή «KEF-2 GPR-7» εμφανίζει μεγαλύτερη παρουσία ανακλάσεων σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τομές, πιθανά λόγω αυξημένης παρουσίας και έκτασης αδρομερούς υλικού, το οποίο είναι αποτέλεσμα απόθεσης του χειμάρρου.
- Σε έκταση 80 – 100 m των τομών «KEF2-GPR-1,2,3,4,5,6) υπάρχει μια συνεχής γραμμικότητα, μια περιοχή πάχους 10 m αποτελούμενη από αδρομερές υλικό, όπως φαίνεται στην τρισδιάστατη παρουσίαση των τομών GPR.(Σχήμα 5.10)
- Στο Ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας(προς το τέλος των τομών KEF2-GPR-1,2,3,4,5,6) επικρατούν πολλαπλές ανακλάσεις υποδεικνύοντας την ύπαρξη ομαδοποιημένου αδρομερούς υλικού.
- Στο Βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας (προς το τέλος των τομών (KEF2-GPR-7,8,9) επικρατούν πολλαπλές ανακλάσεις που υποδεικνύουν την ύπαρξη αδρομερούς υλικού.
- Πολύ καθαρές περιθλάσεις είτε χαρακτηριστικά γραμμικότητας που θα μπορούσαν να προκληθούν από μεγάλες πέτρινες δομές, από τα οποία συνεπάγεται κατασκευή λιμανιού δεν είναι εμφανή με την μέθοδο γεωραντάρ. Στην περίπτωση που υπάρχουν ανθρωπογενείς κατασκευές, ενδεχομένως να

βρίσκονται στην περιοχή που εντοπίζεται μια χαρακτηριστική γραμμικότητα, είτε σε άλλες πιθανές περιοχές. Σε κάθε περίπτωση είναι αρκετά δύσκολο να εντοπιστούν καθώς στην περιοχή έρευνας καταλήγει εκβολή χειμάρρου και υπάρχει παρουσία αδρομερούς υλικού.



Εικόνα 5.21: Τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση των εννέα τομών Γεωραντάρ που πραγματοποιήθηκαν

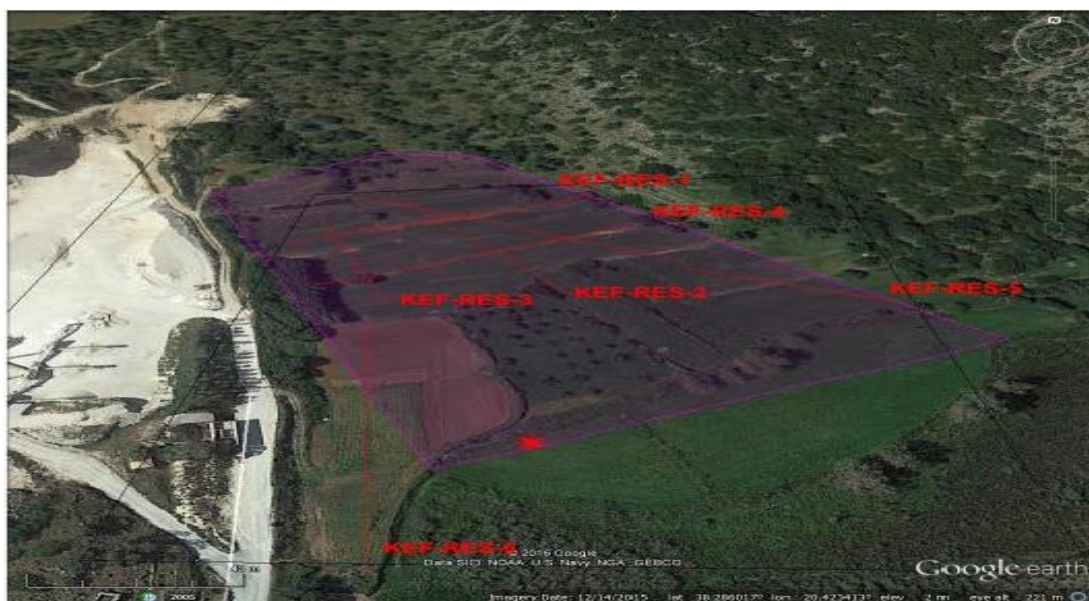
5.4. Ηλεκτρική Μέθοδος

5.4.1. Γενικά

Η ηλεκτρική μέθοδος ήταν η 3η κατά σειρά γεωφυσική μέθοδος που εφαρμόστηκε. Πρόκειται για την πιο αργή μέθοδος αλλά με περισσότερα 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.

Στις μετρήσεις με την μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη dipole – dipole. Με τη συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται ο εντοπισμός τόσο οριζόντιων όσο πλευρικών ανομοιογενειών επιτυγχάνοντας το μέγιστο βάθος διασκόπησης. Πραγματοποιήθηκαν 6 τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας με τις οποίες καλύφθηκε το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας. Από αυτές οι 5 τομές είχαν συνολικό μήκος 142 m και μια που είχε συνολικό μήκος 355 m και χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια.

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



Εικόνα 5.22: Χάρτης Google Earth με αποτυπωμένες τις γεωηλεκτρικές τομές.



Εικόνα 5.23: Η γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-6

5.4.2. Εξοπλισμός

Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCALPro. 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 νέο σύστημα σχεδιασμένο για υψηλή ανάλυση στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης και IP. Περιλαμβάνει αρκετές επιλογές δίνοντας τη δυνατότητα εργασίας σε κάθε είδους συνθήκες και πεδία. Δηλαδή έχει την προοπτική για εξερεύνηση υπογείων νερών, για γεωτεχνικές μελέτες των πολιτικών μηχανικών ή για διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές.

Γενικά Χαρακτηριστικά του μηχανήματος:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως 4000 ηλεκτρόδια
- Μνήμη flash Δεδομένων: πάνω από 21 000 αναγνώσεις
- Τροφοδοσία: δύο εσωτερικές επαναφορτιζόμενες 12 V, 7.2 A μπαταρίες, προαιρετική εξωτερική μπαταρία 12V του αυτοκινήτου μπορεί να συνδέεται με το τμήμα πομπού



Εικόνα 5.24: Όργανο μέτρησης SYSCALPro

5.4.3 Επεξεργασία μετρήσεων

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

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

Τα βήματα επεξεργασίας είναι τα παρακάτω:

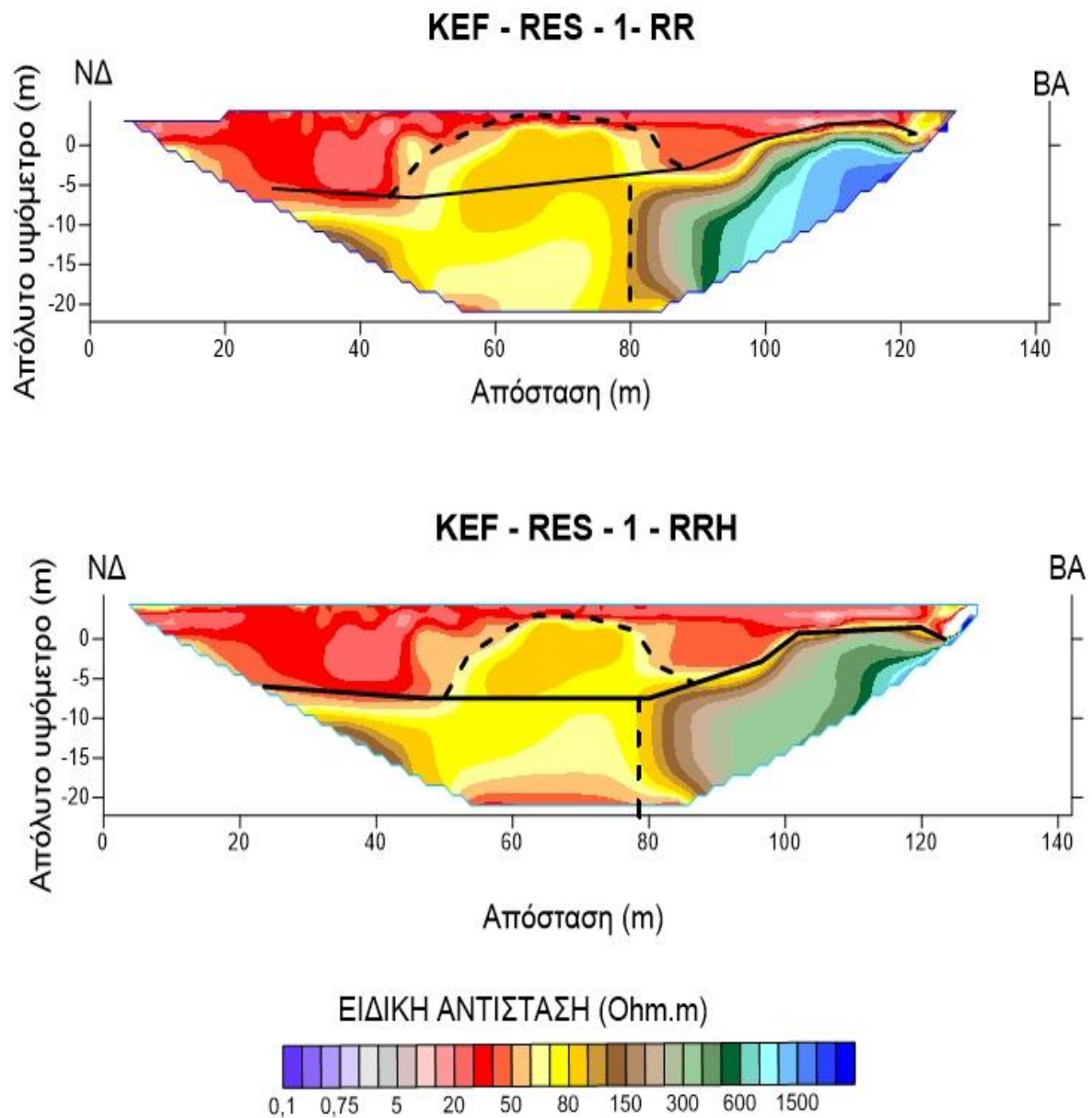
1. . Επιλέχθηκε η ρύθμιση «use model refinement» ώστε να δημιουργηθούν μετρήσεις περισσότερες από αυτές που εισάγονται. Πιο συγκεκριμένα έχει την δυνατότητα να δημιουργεί μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων. Έτσι το τελικό μοντέλο πραγματοποιείται στις παράλληλες τομές 0,5m και κατά συνέπεια διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος

2. Επιλέχθηκε για την δημιουργία του μοντέλου κατά την αντιστροφή των μετρήσεων (inversion) η εξής διαδικασία 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)**: Μετά από τις παραπάνω ερμηνείες 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 Ηλεκτρικής Μεθόδου

Γεωηλεκτρική τομή «ΚΕF-RES-1»

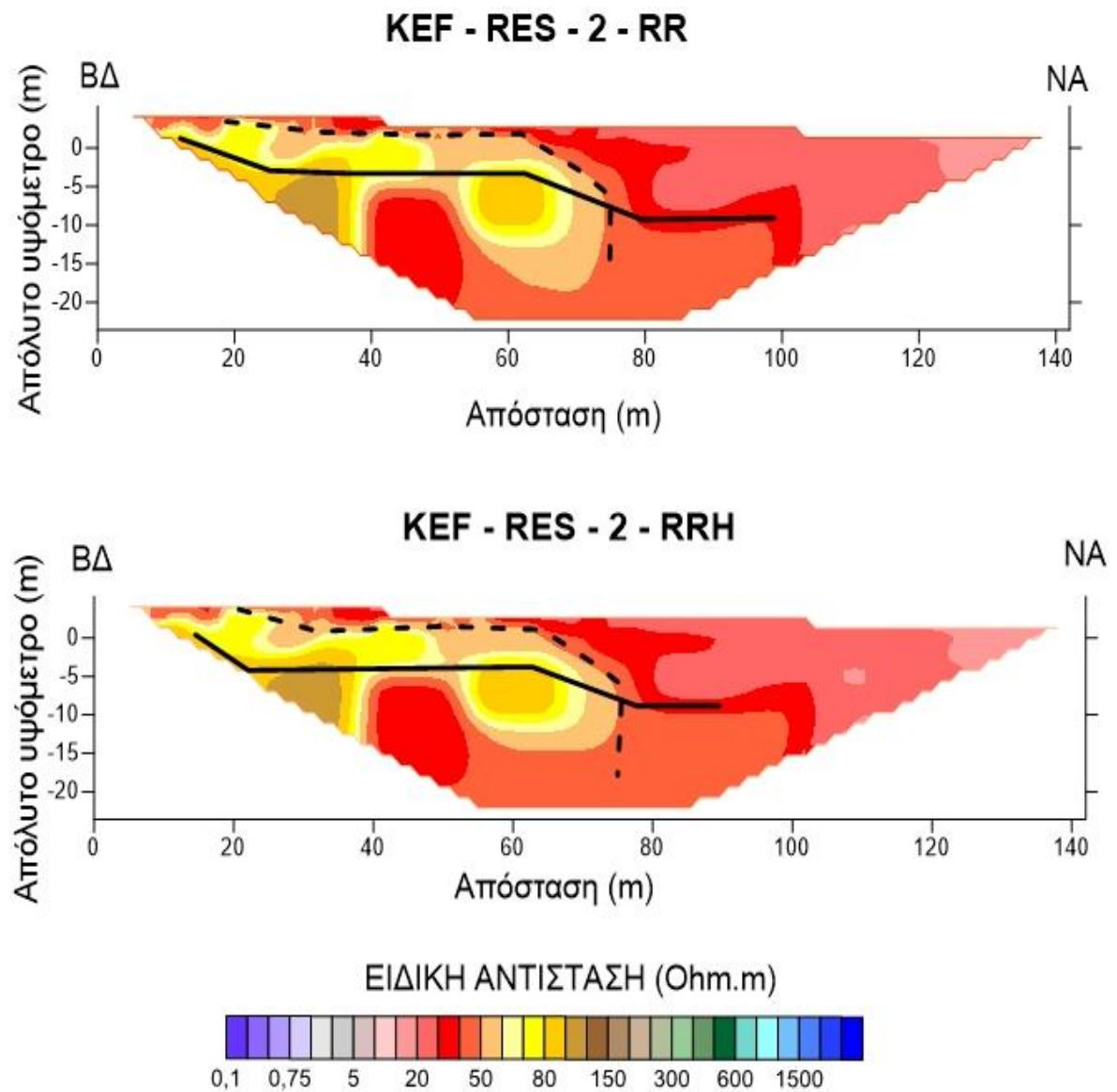


Εικόνα 5.25: Γεωηλεκτρική τομή ΚΕF-RES-1, διεύθυνση Νοτιοδυτικά προς Βορειοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal.

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Το βραχώδες υπόστρωμα θεωρείται ότι είναι υποκείμενο της μαύρης γραμμής και παρατηρείται πλευρική αλλαγή της αντίστασης η οποία επισημαίνεται με διακεκομμένη γραμμή. Παρατηρείται ότι βυθίζεται προς τα δυτικά. Οι υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης στο βορειανατολικό τμήμα της γεωηλεκτρικής τομής, σε βάθος περίπου 5 m, συναντάμε ασβεστόλιθο. Προς το κέντρο της γεωηλεκτρικής τομής υπάρχει εναλλαγή των στρωμάτων, κροκαλοπαγές, ψαμμίτες και ίσως πάλι ασβεστόλιθος
- Επάνω από το βραχώδες υπόστρωμα και στο κέντρο της γεωηλεκτρικής τομής, υπάρχει αδρομερές υλικό το οποίο περιγράφεται με διακεκομμένη μαύρη γραμμή.
- Επιπλέον, στο επάνω μέρος των επιφανειακών σχηματισμών υπάρχει χαλαρό υλικό, άργιλος αναμιγμένο με κάποια αδρομερή.
- Τέλος, παρατηρείται ότι το μοντέλο Robust – Robust Horizontal που δημιουργήσαμε δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αυτή την τομή, καθώς μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την στρωματογραφία αλλά και τις όποιες ξεκάθαρες ισχυρές τοπικές δομές.

Γεωηλεκτρική τομή «ΚΕΦ-RES-2»

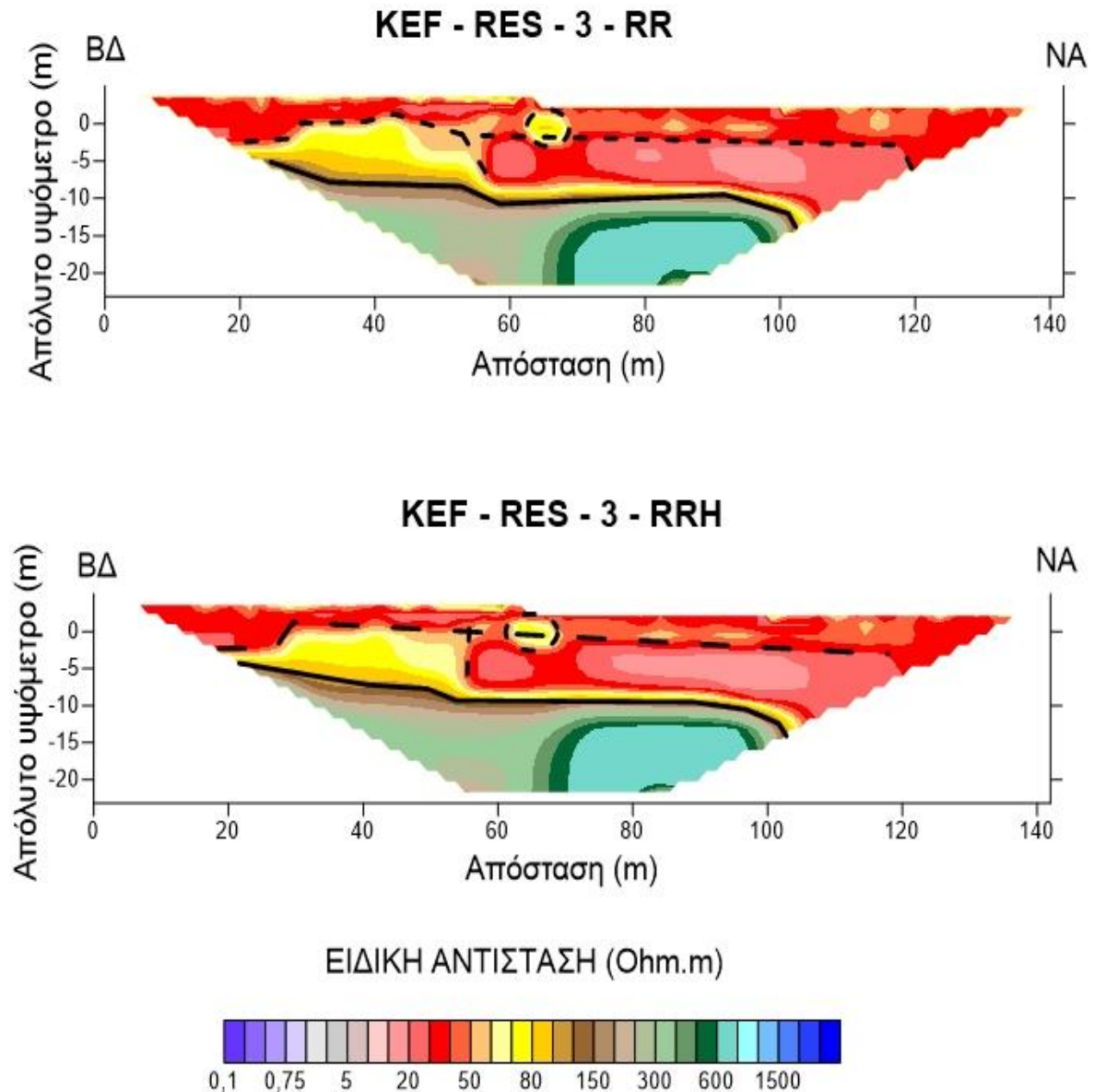


Εικόνα 5.26: Γεωηλεκτρική τομή ΚΕΦ-RES-2, διεύθυνση Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Το βραχώδες υπόστρωμα θεωρούμε ότι βρίσκεται κάτω από τη μαύρη γραμμή και παρατηρείται πλευρική αλλαγή στις τιμές της ειδικής αντίστασης που περιγράφονται με διακεκομμένη γραμμή. Παρατηρείται πως βυθίζεται προς τα νοτιοδυτικά. Οι υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης στο βορειοδυτικό τμήμα υποδηλώνουν εναλλαγή των στρωμάτων, κροκαλοπαγές, ψαμμίτες και πιθανώς διαφορετικό τύπου ασβεστόλιθο. Οι χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης στην βραχομάζα, στο νοτιοανατολικό τμήμα της γεωηλεκτρικής τομής υποδηλώνει ότι έχει επηρεαστεί από διείσδυση θαλασσινού νερού.
- Μπορεί να γίνει η υπόθεση, ότι η πλευρική ανομοιογένεια στο βραχώδες υπόστρωμα και το τμήμα που περιγράφεται με διακεκομμένη γραμμή είναι πιθανό ρήγμα, εξ' αιτίας της ύπαρξης χαλαρού σχηματισμού στο νοτιοανατολικό τμήμα.
- Επάνω από το βραχώδες υπόστρωμα, από το βορειοδυτικό άκρο της γεωηλεκτρικής τομής μέχρι και το κέντρο της, υπάρχει αδρομερές υλικό, το οποίο εκτείνεται μέχρι την διακεκομμένη γραμμή.
- Στους αμέσως παραπάνω σχηματισμούς υπάρχει χαλαρό υλικό, άργιλος, μαζί με κάποια αδρομερή και καθώς προχωράμε προς το νοτιοανατολικό άκρο οι τιμές της ειδικής αντίστασης μειώνονται με πιθανότερη αιτία την διείσδυση υφάλμυρου νερού.
- Τέλος, παρατηρείται ότι το μοντέλο Robust – Robust Horizontal που δημιουργήσαμε δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αυτή την τομή, καθώς μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την στρωματογραφία αλλά και τις όποιες ξεκάθαρες ισχυρές τοπικές δομές.

Γεωηλεκτρική τομή «KEF-RES-3»

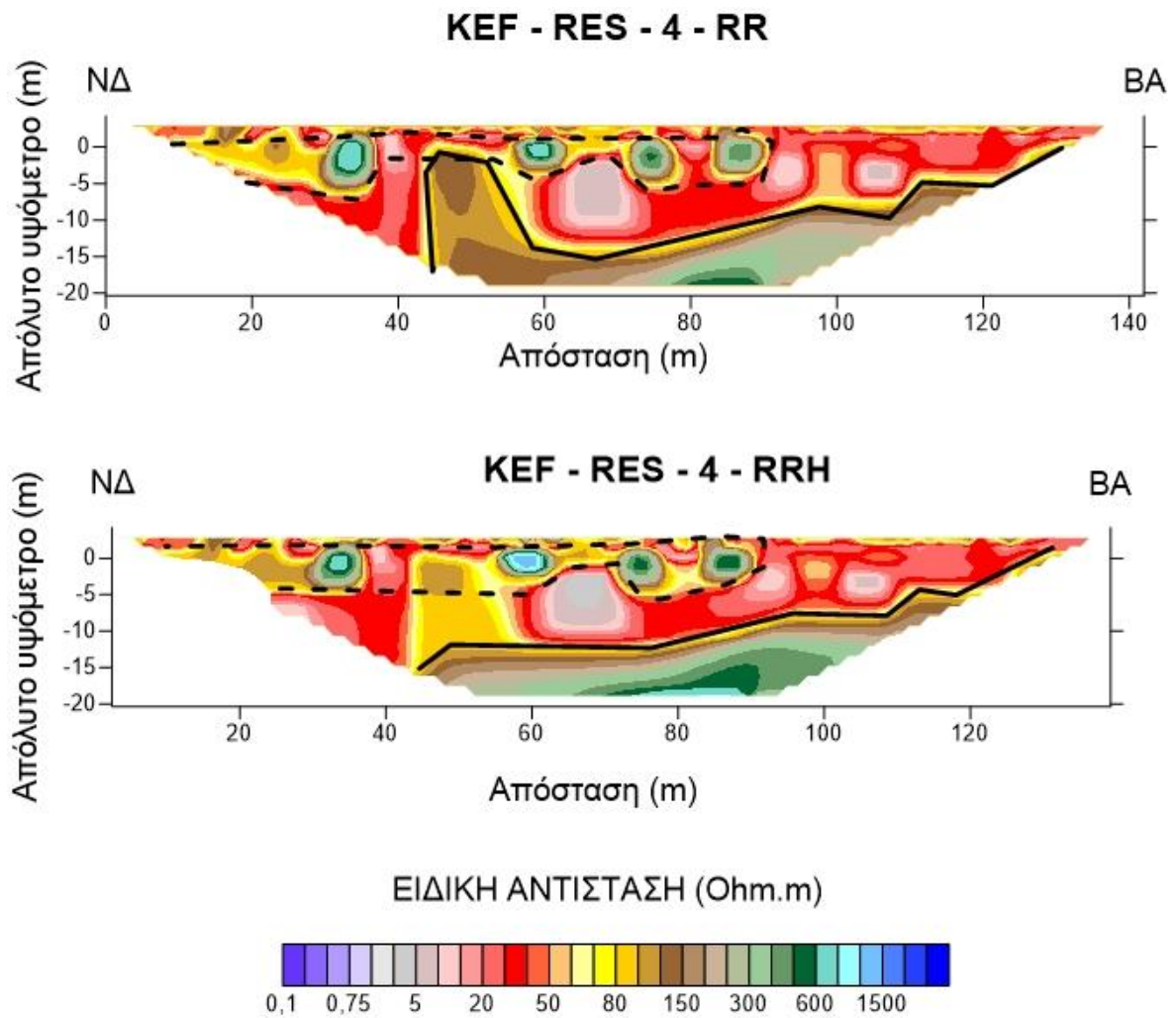


Εικόνα 5.27: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-3 διεύθυνση Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Αρχικά, το βραχώδες υπόστρωμα θεωρείται ότι βρίσκεται κάτω από τη μαύρη γραμμή. Οι υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης υποδηλώνουν την ύπαρξη ασβεστόλιθου. Επίσης, φαίνεται η βραχομάζα να βυθίζεται ελαφρώς προς τα νοτιοδυτικά.
- Επάνω από το βραχώδες υπόστρωμα, στο βορειοδυτικό τμήμα της γεωηλεκτρικής τομής, εντοπίζεται αδρομερές υλικό το οποίο εκτείνεται μέχρι το όριο της διακεκομμένης γραμμής.
- Επάνω και από τους 2 σχηματισμούς που αναφέρθηκαν, εντοπίζεται χαλαρό υλικό, το οποίο πιθανότερα είναι αργιλικό. Η διακεκομμένη γραμμή διαχωρίζει αυτό το σχηματισμό με το κατώτερο τμήμα του να εμφανίζει χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης το οποίο υποδηλώνει την διείσδυση υφάλμυρου νερού.
- Επιπλέον, εντοπίζεται μια τοπική περιοχή, στην επάνω στρώση, με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και περιγράφεται με κυκλική διακεκομμένη γραμμή.
- Τέλος, παρατηρείται ότι το μοντέλο Robust – Robust Horizontal που δημιουργήσαμε δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αυτή την τομή, καθώς μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την στρωματογραφία αλλά και τις όποιες ξεκάθαρες ισχυρές τοπικές δομές.

Γεωηλεκτρική τομή «KEF-RES-4»

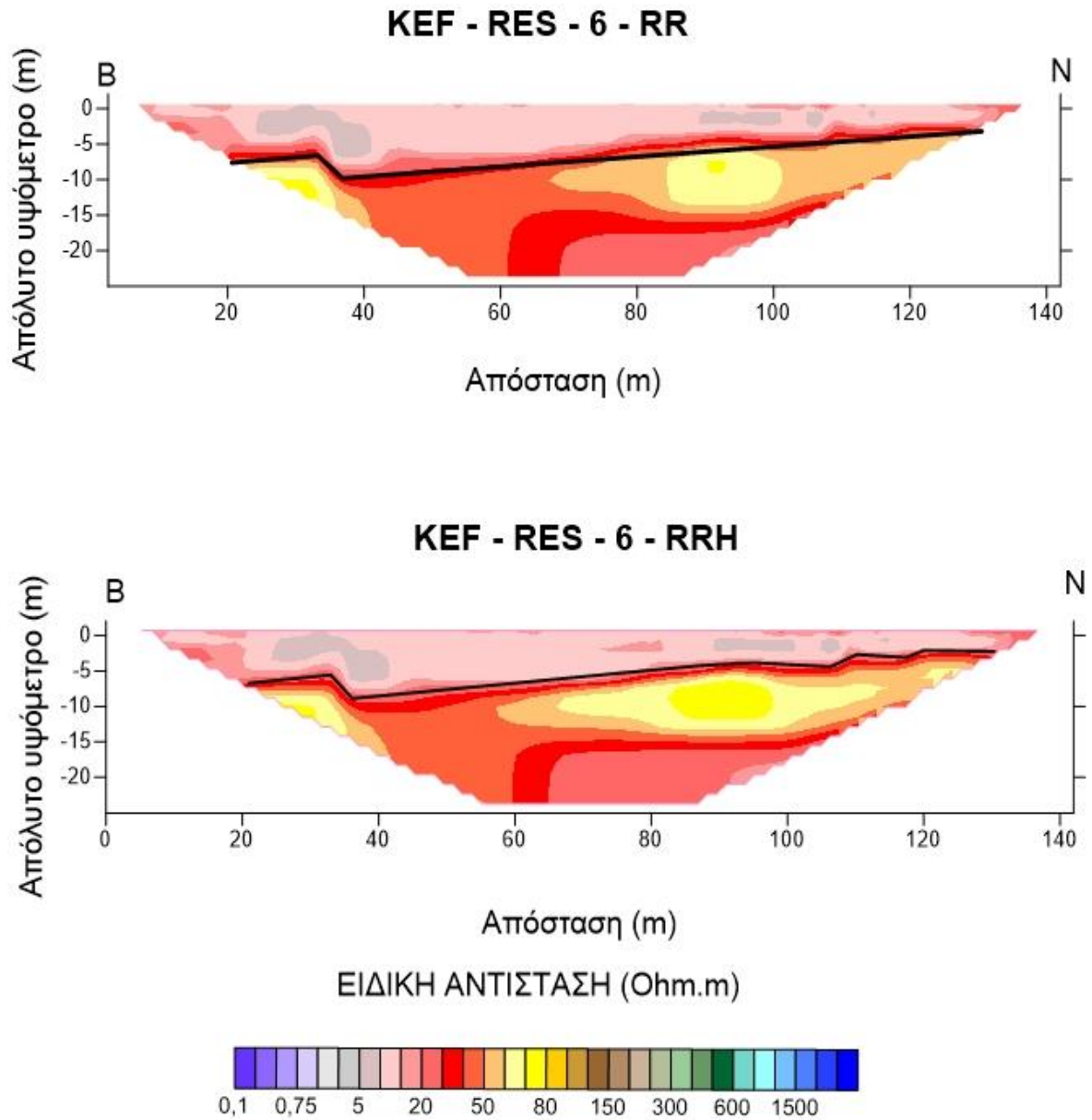


Εικόνα 5.28: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-4 με διεύθυνση Νοτιοδυτικά προς Βορειοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Τα δεδομένα για τις τιμές της ειδικής αντίστασης στην τομή «KEF-RES-4» είχαν πολύ θόρυβο γι' αυτό και κάποιες ανωμαλίες που εντοπίστηκαν επιφανειακά δεν μπορούν να αξιολογηθούν αξιόπιστες. Για το λόγο αυτό θα θεωρηθεί ολόκληρο σαν ένα στρώμα αδρομερούς υλικού.
- Το βραχώδες υπόστρωμα θεωρείται ότι βρίσκεται κάτω από τη μαύρη γραμμή. Οι υψηλές τιμές, της ειδικής αντίστασης υποδηλώνουν την ύπαρξη ασβεστόλιθου. Επίσης παρατηρείται η βραχομάζα να βυθίζεται ελαφρώς προς τα νοτιοδυτικά.
- Επάνω από το βραχώδες υπόστρωμα, υπάρχει χαλαρό υλικό με χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που φαίνεται να έχουν επηρεαστεί από τη διείσδυση υφάλμυρου νερού. Στην αμέσως επάνω στρώση, από το νοτιοδυτικό άκρο της τομής μέχρι και το κέντρο της, εντοπίζεται μια στρώση αδρομερούς υλικού του οποίου η σύσταση ποικίλει.
- Τέλος, παρατηρείται ότι το μοντέλο Robust – Robust Horizontal που δημιουργήσαμε δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αυτή την τομή, καθώς μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την στρωματογραφία αλλά και τις όποιες ξεκάθαρες ισχυρές τοπικές δομές.

Γεωηλεκτρική τομή «ΚΕF-RES-6»

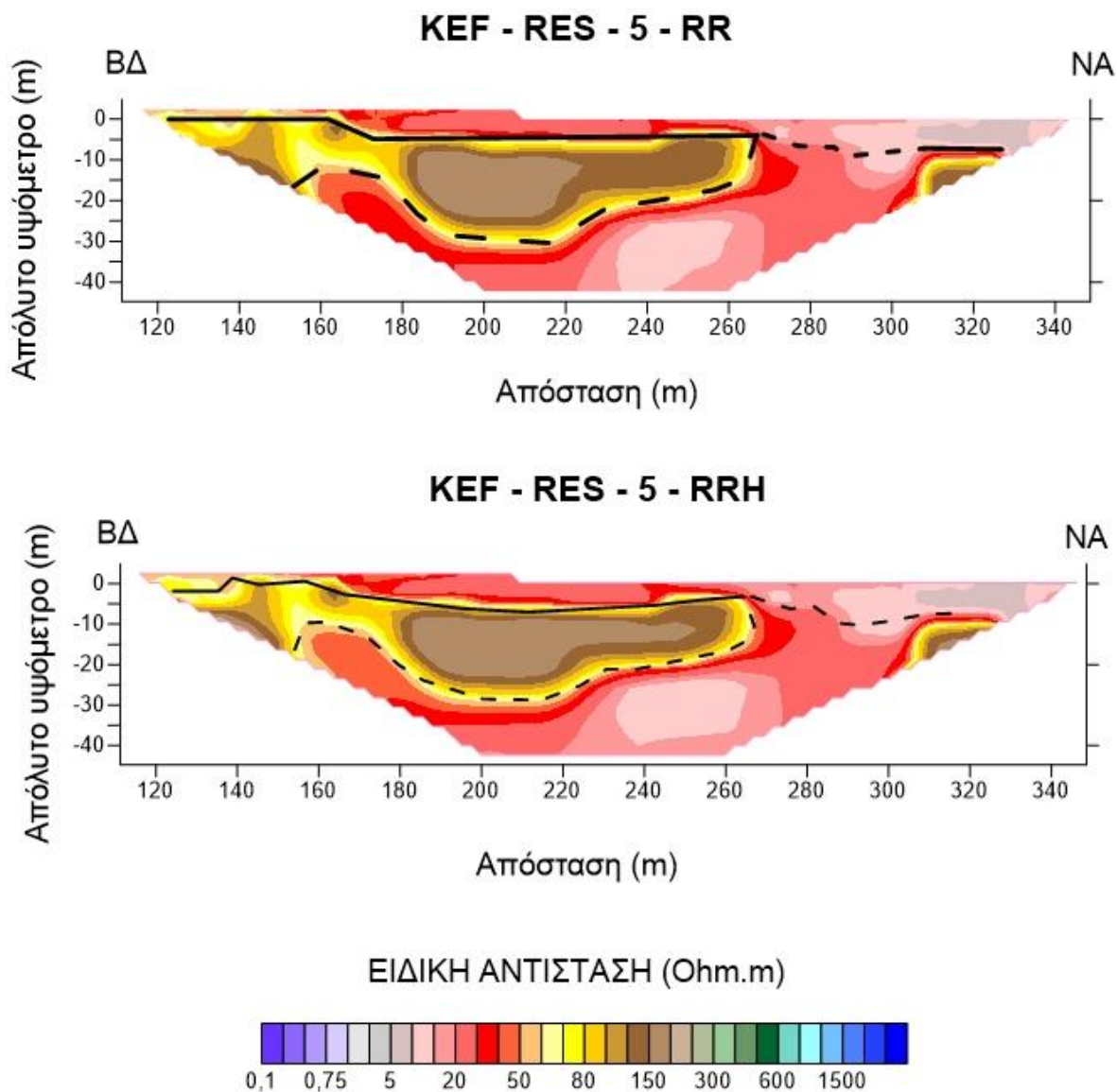


Εικόνα 5.29: Γεωηλεκτρική τομή ΚΕF-RES-6 διεύθυνση Βοράς προς Νότο. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal

Σχόλια – Αποτελέσματα:

- Μια σχετικά ομοιόμορφη στρώση αργιλικής φύσεως θεωρείται ότι βρίσκεται κάτω από τη μαύρη γραμμή. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης ποικίλουν, εξ 'αιτίας των εναλλαγών σε αδρομερές υλικό είτε στην διείσδυση υφάλμυρου νερού. Το στρώμα αυτό βυθίζεται ελαφρώς προς τα βόρεια.
- Επιπλέον, επάνω από την αργιλική στρώση υπάρχει χαλαρό υλικό με χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης που έχουν επηρεαστεί λόγω της διείσδυσης υφάλμυρου νερού, καθώς πρόκειται για αδρομερές υλικό με μεγάλη διαπερατότητα..
- Τέλος, παρατηρείται ότι το μοντέλο Robust – Robust Horizontal που δημιουργήσαμε δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αυτή την τομή, καθώς μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την στρωματογραφία αλλά και τις όποιες ξεκάθαρες ισχυρές τοπικές δομές.

Γεωηλεκτρική τομή «KEF-RES-5»



Εικόνα 5.30: Γεωηλεκτρική τομή KEF-RES-5 διεύθυνση Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά. Επάνω είναι η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust, κάτω η γεωηλεκτρική τομή Robust – Robust Horizontal

Σχόλια – Αποτελέσματα:

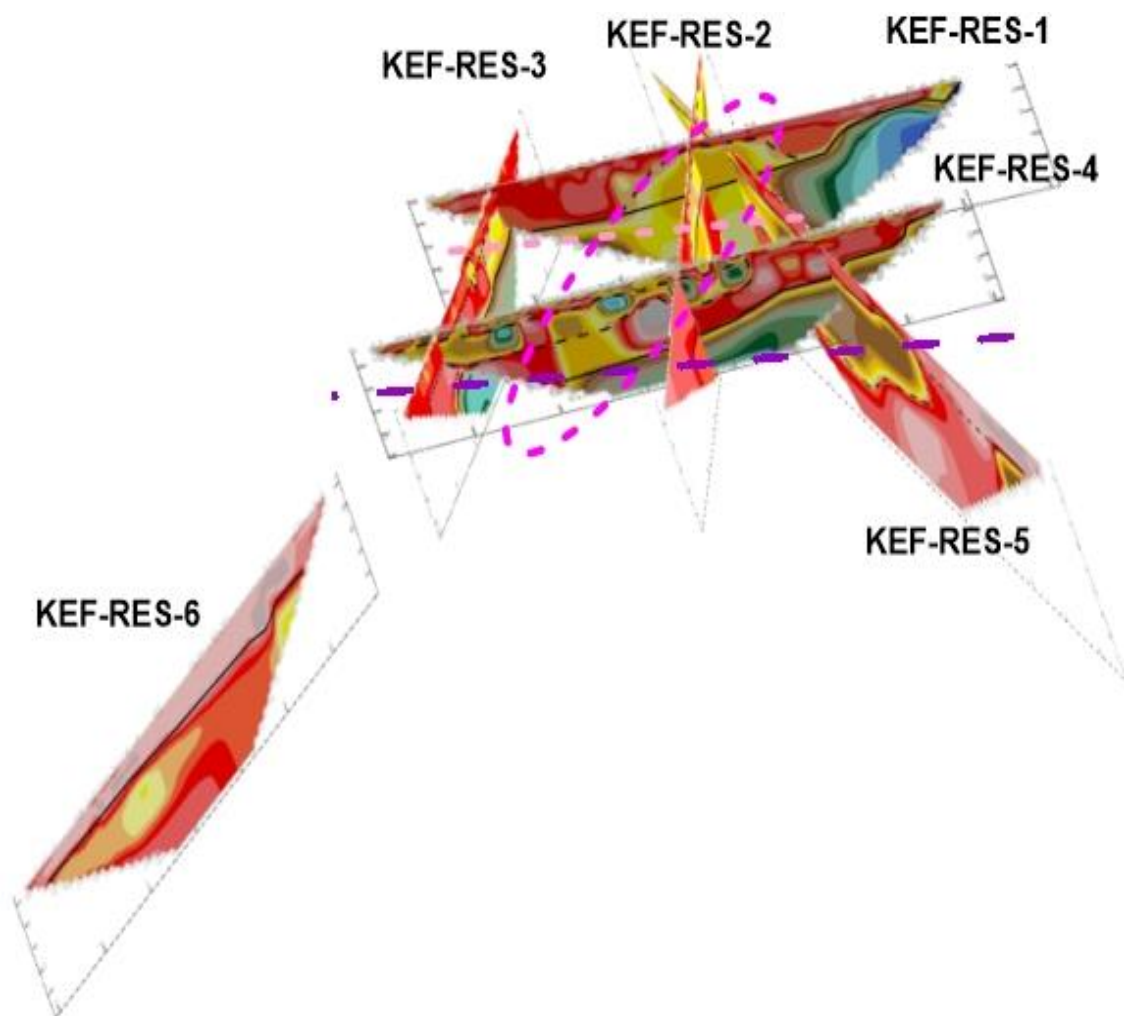
- Το βραχώδες υπόστρωμα θεωρούμε ότι βρίσκεται κάτω από τη μαύρη γραμμή, με τις υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης να υποδηλώνουν την ύπαρξη ασβεστόλιθου. Παρατηρείται ένα βύθισμα της βραχομάζας προς τα νοτιοανατολικά. Σε απόσταση 270 m κατακερματισμός της του βραχώδους υποστρώματος και στη συνέχεια εμφανίζεται σε απόσταση 310 m. Στο ενδιάμεσο τμήμα υπάρχει είτε χαλαρό υλικό είτε διείσδυση υφάλμυρου νερού, το οποίο μικραίνει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Επιπλέον κάτω από το βραχώδες υπόστρωμα υπάρχει μια περιγεγραμμένη, με διακεκομμένη γραμμή, περιοχή στην οποία οι τιμές ειδικής αντίστασης έχουν ελαχιστοποιηθεί λόγω της ύπαρξης υφάλμυρου νερού.
- Στο επάνω μέρος, υπάρχει χαλαρό υλικό το οποίο στο νοτιοανατολικό του τμήμα έχει διεισδύσει νερό. Πρόκειται για την περιοχή με τις υψηλές τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρατηρήθηκαν στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες.
- Τέλος, παρατηρείται ότι το μοντέλο Robust – Robust Horizontal που δημιουργήσαμε δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αυτή την τομή, καθώς μας δίνει καλύτερα αποτελέσματα για την στρωματογραφία αλλά και τις όποιες ξεκάθαρες ισχυρές τοπικές δομές.

5.4.5. Συνδυαστικά Σχόλια για την Ηλεκτρική Μέθοδο

Παρουσιάζοντας όλες τις γεωηλεκτρικές τομές «KEF-RES» σε τρισδιάστατη απεικόνιση (Εικόνα 5.31) μπορούμε να εντοπίσουμε τα στρώματα και τις ανωμαλίες του υπεδάφους καθώς και το πώς αυτά εκτείνονται στο χώρο.

Στην τρισδιάστατη απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών παρατηρείται ότι οι ανωμαλίες της κάθε μιας ταιριάζει με τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα, οι ανωμαλίες τόσο για το αδρομερές υλικό κοντά στην επιφανειακή στρώση, στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας, όσο και του βραχώδους υποστρώματος ταιριάζουν μεταξύ όλων των τομών.

- Προκύπτει από την τρισδιάστατη απεικόνιση των γεωηλεκτρικών τομών ότι επεκτείνοντας τις ανωμαλίες καθώς και τα στρώματα, το αδρομερές υλικό στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας έχει διεύθυνση προς το νότο και περιγράφεται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή.
- Επιπλέον, με ροζ διακεκομμένη γραμμή χωρίζεται η περιοχή που αφορά την επάνω στρώση αδρομερούς υλικού με το βόρειο τμήμα της να είναι πιο ρηχό από το νοτιότερο που βυθίζεται.
- Τέλος, πιο σημαντική είναι η μωβ διακεκομμένη γραμμή καθώς το βραχώδες υπόστρωμα παύει να υπάρχει πέρα από αυτή. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε κάποιο ρήγμα, το οποίο επιβεβαιώνεται αν παρατηρηθεί επιφανειακά που σταματάει να υπάρχει ο λόφος, το οποίο είναι νότια της μωβ διακεκομμένης γραμμής. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τους χάρτες που παρουσιάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς οι υψηλές τιμές αγωγιμότητας υποδηλώνουν ότι δεν υπάρχει βράχος.



Εικόνα 5.31: Τρισδιάστατη απεικόνιση των Γεωηλεκτρικών τομών «KEF-RES»

5.5. Συμπεράσματα και Σχόλια

5.5.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική διερευνάται το υπέδαφος στην περιοχή Λιβάδι, της νήσου Κεφαλλονιάς, με γεωφυσικές μεθόδους. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές ενός αρχαίου λιμανιού ή να εντοπιστεί τέτοια κατανομή ιζημάτων που να έχει επηρεαστεί από αυτές τις πιθανές δομές. Η περιοχή έρευνας αποτελεί περιοχή πιθανού αρχαιολογικού ενδιαφέροντος για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν γρήγορες μη καταστρεπτικές μέθοδοι. Η επιλογή της Γεωφυσικής κρίνεται αναγκαία γιατί μπορεί να ανταποκριθεί στις παραπάνω απαιτήσεις.

Με την εφαρμογή τριών γεωφυσικών μεθόδων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτουν μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται στην συνέχεια:

- Διαπιστώθηκε η δομή του υπεδάφους στο σχεδιασμένο βάθος διασκόπησης, με σημαντικές ανωμαλίες που παρουσιάζουν τη γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής και πιθανές ενδιαφέρουσες ενδείξεις τεκτονικής.
- Οι μελέτες περιπτώσεων (case studies), οι οποίες αναζητήθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία βοήθησαν σημαντικά στην δική μας έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, οι 4 εφαρμογές που μελετήθηκαν είχαν παρόμοια αντικείμενα με την γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήσαμε στην περιοχή Λιβάδι. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές ακολούθησαν σχεδόν όμοιο σχεδιασμό γεωφυσικής έρευνας και κατάφεραν να φέρουν εις πέρας δύσκολα γεωφυσικά προβλήματα. Για το λόγο αυτό έγινε εκτενής μελέτη του σχεδιασμού των τεσσάρων αυτών εφαρμογών, δηλαδή με βάση το βάθος και με την ευκρίνεια την οποία θέλαμε να επιτύχουμε. Η συχνότητα της κεραίας του γεωρανταρ επιλέχθηκε με βάση των αποτελεσμάτων αυτών των εφαρμογών. κριτήριο ήταν τόσο το βάθος διασκόπησης όσο και η ευκρίνεια στα αποτελέσματα. Η κάλυψη της περιοχής έρευνας με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο, στηρίχθηκε στην γεωφυσική έρευνα στο φρούριο του San Lorenzo, στην κεντρική Αμερική, καθώς πρόκειται για μια εξίσου ευρεία περιοχή έρευνας.
- Κάθε μια από τις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην προσπάθεια να γίνει εντοπισμός της στρωματογραφίας.

- Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα. Καλύφθηκε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια δεδομένων των δυσκολιών της γεωμορφολογίας της περιοχής.
- Στους χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, οι τιμές εμφανίζουν διακυμάνσεις που οφείλονται στις διαδοχικές ποσότητες αποθέσεων αδρομερούς υλικού, που προέρχονται από τον κοντινό χειμάρρο. Επιπλέον, στους χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με συνολικό βάθος διασκόπησης τα 6 m εμφανίζονται δυο περιοχές στα βόρεια και νότια με υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- Οι τιμές της σε φάση συνιστώσας, η οποία δηλώνει την μαγνητική επιδεκτικότητα, εντόπισαν καθαρά την ύπαρξη λεπτομερούς υλικού στις δύο περιοχές.
- Στην περίπτωση της μεθόδου γεωραντάρ, εντοπίστηκαν κάποιες περιοχές που εμφανίζουν γραμμικότητα. Σε αυτές δημιουργούνται πολλαπλές ανακλάσεις που προκύπτουν από ομαδοποιημένο αδρομερές υλικό, το πιο πιθανό είναι από παλαιότερη απόθεση του χειμάρρου.
- Δύο τομές γεωραντάρ (KEF2-GPR-4,5) επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για τις δύο περιοχές (περιοχή «Ε» και «ΣΤ»)(**Εικόνα 5.8, Εικόνα 5.14, Εικόνα 5.15**)
- Από την γεωηλεκτρική τομογραφία εντοπίστηκε η περιοχή όπου υπάρχει αδρομερές υλικό , η οποία εμφανίστηκε και στις υπόλοιπες δύο μεθόδους. Επιπλέον, εντοπίστηκε ασβεστόλιθος ο οποίος βυθίζεται με διεύθυνση από τα ανατολικά στα νοτιοδυτικά και στην συνέχεια παύει να εμφανίζεται εξαιτίας του ρήγματος. Στο νοτιότερο τμήμα της περιοχής έρευνας, σε συμφωνία με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και το γεωραντάρ, από τις γεωηλεκτρικές τομές εντοπίστηκε η περιοχή με λεπτόκοκκο υλικό όπου έχει διεισδύσει υφάλμυρο νερό. Τέλος, για τις γεωηλεκτρικές τομές το συνολικό τους μήκος ήταν κατάλληλο για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας.
- Οι διατάξεις των οργάνων των τριών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η βέλτιστη. Για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο με τις διαμορφώσεις του CMD-2, με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m και με το CMD-4 βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m. Με τη κεραία των 100 Mhz για τις μετρήσεις γεωραντάρ επιτεύχθηκε επιθυμητό βάθος με αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέλος για τις γεωηλεκτρικές τομές επιλέχθηκε η διάταξη ηλεκτροδίων Dipole–Dipole που ήταν

η ενδεδειγμένη, για τον εντοπισμό των ανωμαλιών και του επιθυμητού βάθους

- Στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο η καταγραφή των μετρήσεων ήταν συνεχής και με ταυτόχρονο εντοπισμό θέσης, καθώς κληθήκαμε να καλύψουμε όλη την περιοχή.
- Η επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις της κάθε μεθόδου, έγινε χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα: το Surfer της Golden Software, το RES2DINV της Geotomo Software, SeisImager και το PlotRefa της EG & G GEOMETRICSC και το REFLEXW της Sandmeier Scientific Software. Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής μεθόδου με το πρόγραμμα RES2DINV, η διαδικασία ερμηνείας Robust-Robust Horizontal έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Με αυτή τη ρύθμιση οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης κατά την κατακόρυφο και στην παρουσία «θορύβου» στις μετρήσεις.

5.5.2 Σχόλια

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας και σχετίζοντάς τα με τους στόχους που θέλαμε να επιτύχουμε, τις μεθόδους που ακολουθήσαμε και τη διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων, προκύπτουν τα εξής σχόλια:

- Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης γεωφυσικής έρευνας είναι ορθός και προτείνεται σε περιπτώσεις με παρόμοιο αντικείμενο έρευνας με την συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα. Αναλυτικότερα η επιλογή των συγκεκριμένων γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης του υπεδάφους, η σειρά εφαρμογής τους, οι διατάξεις τους και η επεξεργασία των δεδομένων, συνιστάται σε ανάλογες μελέτες. Για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική είναι απαραίτητη καθώς παρέχει χρήσιμη πληροφορία με εφαρμογή μη καταστρεπτικών μεθόδων.
- Σημαντική είναι επίσης η παράλληλη εφαρμογή όσο τον δυνατόν περισσότερων γεωφυσικών μεθόδων καθώς η μια μέθοδος επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της επόμενης και συνεπώς παρέχει παραπάνω ασφάλεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο επιτυγχάνεται εξαγωγή γρήγορων και οικονομικών αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό προηγείται σαν μέθοδος για να ληφθούν μια γενική αλλά ουσιαστική εικόνα του για τη φύση του εδαφικού υλικού και την έκταση του στο χώρο.
- Η μέθοδος του γεωραντάρ μας εξασφαλίζει αποτελέσματα τόσο για την στρωματογραφία όσο και για πιθανές ανθρωπογενείς δομές παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή λόγω της ύπαρξης αδρομερών υλικών σε μικρό βάθος και αργιλικών υλικών σε μεγαλύτερο βάθος δυσχεραίνει τον εντοπισμό ανθρωπογενών δομών και κατά συνέπεια δεν θα έδινε αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα εάν εφαρμόζονταν μόνη της.
- Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας είναι πιο χρονοβόρα, επίπονη και ακριβή μέθοδος, όμως έχει ασύγκριτα πλεονεκτήματα από άποψη λεπτομέρειας. Επίσης, μας δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης των εντοπιζόμενων γεωλογικών σχηματισμών σε μεγάλα βάθη.
- Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν στη θέση Λιβιάδι ήρθαν σε συμφωνία μεταξύ τους, καθώς και με την γεωλογική μελέτη που είχε προηγηθεί.

6. Βιβλιογραφία

- Αποστολόπουλος, Γ. (2008). *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Αποστολόπουλος, Γ. (2013). *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Βαφείδης, Α. (2007). *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II*. (Τ. Μ. Πόρων, Επιμ.) Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καπατσώρης, Α. (2012). *Τεκτονική Ανάλυση των δύο μεγάλων επωθήσεων στις περιοχές Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών*.
- Καραλής, Π. (2011). *Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Ενταφιασμένων Αρχαιοτήτων στην Περιοχή Κερατέας Αττικής*, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΛΕΚΚΑΣ, Ε., ΔΑΝΑΜΟΣ, Γ., & ΜΑΥΡΙΚΑΣ, Γ. (2001, Σεπτέμβριος 11-17). Γεωλογική Δομή και Εξέλιξη των Νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης. *Δελτίο της Ελληνικής και Γεωλογικής Εταιρίας*.
- Λοΐζος, Φοκίων. 2014. *Γεωφυσική έρευνα στο ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο*. Διπλωματική εργασία Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λούης, Ι. Φ. (2004). *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική*. Αθήνα: Ε.Κ.Π.Α.
- Παπαδόπουλος Κ. Αλέξανδρος. (2015). *Εφαρμογή Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Ρευστοποιήσεων στη Βασιλική του Λεχαιίου Κορινθίας*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος, Τ. (2008). *Εισαγωγή στη Γεωδυσική*. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- Παπαδοπούλου, Μυρτώ. 2015. *Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων*. Πολυτεχνείο, Διπλωματική Εργασία. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο.
- Σμπόνιας, Κ., & Ματαράγκα, Κ. (n.d.). *Η αρχαιολογική έρευνα επιφάνειας του Ιονίου Πανεπιστημίου στην Παλική Κεφαλλονιάς*.
- Σμυρνιού, Ε. 2016. *Γεωφυσική έρευνα στον Πειραιά για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και πιθανών ανθρωπογενών δομών*. Διπλωματική εργασία Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

- Benech, C., Lombard, P., Rejiba, F., & Tabbagh, A. (2016). *Demonstrating the contribution of dielectric permittivity to the in-phase EMI response of soils: example of an archaeological site in Bahrain*. European Association of Geoscientists & Engineers.
- 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.
- 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, D. M., 1999. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. *Cangkat Minden Lorong*, 6574525, 63.
- 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
- Lynch, D. P. (2006). *A geophysical Survey of fort St. Joseph (20BE23)*. Michigan: Western Michigan University.
- Mojica, A. L. P. (2016). *Integrated Geophysical Surveys of the Fort San Lorenzo, Panama, Central America*. Vienna: Near Surface Geoscience.
- Sullivan, S. M. (2007). *Geophysical Prospection in the Cade Archaeological District of Vernon County*. Wisconsin.
- Underhill, J. R. (1985). *Neogene and Quaternary tectonics and sedimentation in Western Greece*. Wales: University of Wales.

