



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

Γεωφυσική Έρευνα στην παράκτια
ζώνη στην περιοχή της Αρτέμιδος,
Αττικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευσταθία Γαρμπή
Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Αποστολόπουλος

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2019



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

Γεωφυσική Έρευνα στην παράκτια ζώνη στην
περιοχή της Αρτέμιδος, Αττικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής : Γεώργιος Αποστολόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις __/__/2019

.....
Αποστολόπουλος Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής,
ΕΜΠ

.....
Μενεγάκη Μαρία

Αναπληρώτρια
Καθηγήτρια,
ΕΜΠ

.....
Αθανασάς Κωνσταντίνος

Επίκουρος Καθηγητής,
ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Καθώς η διπλωματική εργασία που μου ανατέθηκε από τον κ. Γεώργιο Αποστολόπουλο, αναπληρωτή καθηγητή του ΕΜΠ, ολοκληρώθηκε θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ μαζί του σε ένα από τα έργα που ανατέθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της σχολής Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Ο κ. Αποστολόπουλος είναι ένας άνθρωπος που σε κερδίζει από την πρώτη στιγμή με το έργο του και το μεράκι του να σε κάνει να ανακαλύψεις τις ικανότητές σου και να προχωρήσεις τόσο στην επιστήμη σου όσο και στην ζωή σου. Η βοήθειά του και η παρουσία του τόσο στο πεδίο, όσο και στο εργαστήριο καθόλη την διάρκεια συγγραφής της εργασίας ήταν πολύτιμη. Δίπλα μου σε αυτήν την προσπάθεια ήταν και ο κ. Γεώργιο Αμολοχίτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, τον οποίο ευχαριστώ θερμά. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στους Υπ. Διδάκτορες Δημήτρη Καραϊσκό και Σταύρο Καριζώνη για τις συμβουλές τους κατά τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής (τον Δημήτρη και για την προσφορά του στο πεδίο), καθώς και τους συμφοιτητές μου Αλεξάνδρα Σακαλίδη και Κωνσταντίνο Κορμπή για τη βοήθεια τους στο ύπαιθρο. Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω την Εφορία Αρχαιοτήτων Ανατολικής Αττικής και ιδιαιτέρως την Έφορο κα Ανδρικού για την άδεια που χορήγησε στο Εργαστήριο Γεωφυσικής για να διεξαχθούν οι μετρήσεις στο ναό της Αρτέμιδος καθώς και την αρχαιολόγο Ειρήνη Συριανού για τις χρήσιμες πληροφορίες και αρχαιολογικά στοιχεία που μας παρείχε για τον χώρο. Τέλος, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και στους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένεια μου και τους φίλους μου, που χωρίς την βοήθεια και στην στήριξή τους δεν θα τα είχα καταφέρει.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη γεωφυσική έρευνα στην παράκτια περιοχή πλησίον του Ναού της Αρτέμιδος Ταυροπόλου και του μικρότερου ναού νοτιότερα του πρώτου, που εντοπίζεται στο Δήμο Σπάτων – Αρτέμιδος με σκοπό την επιπρόσθετη αναζήτηση ανθρωπογενών στοιχείων που χρονολογούνται από τον 7^ο αι. Π.Χ. έως τον 1^ο αι. Μ.Χ., καθώς και της στρωματογραφίας της περιοχής. Το επίκεντρο της αναζήτησης προσδιορίστηκε στο βάθος του αναγλύφου της οροφής του βραχώδους υποβάθρου και στις τοπικές δομές της περιοχής έρευνας. Ο ναός της Αρτέμιδος Ταυροπόλου χαρακτηρίζεται ως ένα μνημείο πολιτισμικής κληρονομιάς και η επιπλέον μελέτη της περιοχής κρίθηκε απαραίτητη από την Εφορεία Αρχαιοτήτων Ανατολικής Αττικής. Για το λόγο αυτό η Εφορεία Αρχαιοτήτων έκρινε απαραίτητη τη μελέτη της περιοχής μέσω της γεωφυσικής έρευνας με σκοπό την εύρεση και προστασία δομών ανθρωπογενούς προελεύσεως, καθώς παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής ικανοποιητικών συμπερασμάτων με μη καταστροφικές μεθόδους. Αρχικά, εξετάστηκε η γεωλογία της περιοχής έρευνας και η υγρασία και καταλληλότητα του εδάφους για διέλευση των γεωφυσικών οργάνων. Επίσης πολύ σημαντικό ερώτημα αποτέλεσε το σημείο αναζήτησης και ο στόχος που μελετάται. Σύμφωνα με τη φύση του προβλήματος αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τα γεωλογικά χαρακτηριστικά και την τοποθεσία κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν οι εξής μέθοδοι:

- Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (EM)
- Ηλεκτρική Τομογραφία (ERT)
- Γεωραντάρ (GPR)

Ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις κάθε μεθόδου χρησιμοποιώντας κατάλληλα λογισμικά που διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Μετά την εκτενή επεξεργασία και ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων παρατηρήθηκαν κάποιες ανωμαλίες του υπεδάφους που πιθανόν να οφείλονται στην ύπαρξη τοιχείων και άλλων δομών και εκτιμώνται να έχουν προκληθεί από ανθρωπογενείς αιτίες.

Abstract

The conducted survey aimed to the geophysical investigation of the coastal region next to the temple of Artemida Tavropolou located in the region of Artemida in Attica, Greece in order to detect further archeological structures dated back to a specific period from the 7th century B.C. to the 1st century A.D. The research focused on identifying the stratigraphy and the location of any local archaeological underground man-made structures. As the temple of Artemida is a monument of cultural heritage, the Ephorate of Antiquities of East Attica found it crucial to conduct further research. Therefore, the Ephorate decided that the research conducted with any geophysical methods would be the most beneficial as it is a non-destructive method and will not harm any additional remains. The geology of the region was examined thoroughly along with the moisture in the subsurface, the capability of conducting the geophysical survey and the structures that are investigated. The research was designed after taking into account the geological and historical data, as well as information from foreign bibliography from similar case studies. The methods that were performed were the following:

- Electromagnetic Method (EM)
- Electrical Resistivity Tomography (ERT)
- Ground Penetrating Radar (GPR)

Then the processing of the data was processed using suitable software, provided by the Laboratory of Applied Geophysics in the School of Mining Engineering at National Technical University of Athens. The interpretation of the geophysical results showed some underground anomalies, which can potentially demonstrate the existence of walls and other structures that likely could have been caused by anthropogenic factors.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ	13
1.2	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	15
1.3	ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	19
2.1	ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	19
2.1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
2.1.2	ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	19
2.1.3	ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ.....	20
2.1.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	24
2.1.5	ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	27
2.1.6	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΕΝΤΟΣ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ	29
2.1.7	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ.....	29
2.1.8	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ	32
2.1.9	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	34
2.1.10	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΣΤΗΝ ΞΗΡΑ	35
2.2	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	37
2.2.1	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	37
2.2.2	ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	37
2.2.3	ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ	40
2.2.4	ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ	42
2.2.5	ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	43
2.2.6	ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ	45
2.2.7	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΗΣ	46
2.2.8	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΟΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	48
2.3	ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ (GROUND PENETRATING RADAR – GPR)	49
2.3.1	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΜΕΡΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ.....	50
2.3.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ	52
2.3.3	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΡΑΔΙΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ	53
	54
2.3.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	54
2.3.5	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	55

3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΝΑ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

56

3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ GPR ΚΑΙ ΕΜ ΓΙΑ ΤΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΤΟΥ ΝΗΣΙΟΥ PADRE (ΤΕΞΑΣ) ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΗΣ ΤΟΥ	56
3.1.1 ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	57
3.1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ	60
3.1.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	62
3.2 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΑ ΑΞΙΟΘΕΑΤΑ ΣΤΟ ΙΣΡΑΗΛ.....	63
3.2.1 ΥΑΒΝΕ	63
3.2.2 ΥΑΒΝΕ ΥΑΜ	65
3.2.3 ΒΕΤΗΣΑΙΔΑ.....	66
3.3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΣΤΟ ΠΟΤΑΜΙΟ ΛΙΜΑΝΙ ΤΗΣ ΎΣΤΙΑΣ	69
3.3.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	70
3.3.2 ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	70
3.3.3 ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΒΑΘΟΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΛΙΜΑΝΙΟΥ	71
3.3.4 Η ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΛΙΜΑΝΙΟΥ.....	72
3.3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
<u>4 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΗΣ ΑΡΤΕΜΙΔΟΣ.....</u>	<u>78</u>
4.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	78
4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΝΑΟ ΤΗΣ ΑΡΤΕΜΙΔΟΣ	80
4.1.1 ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΩΡΟΣ.....	80
4.1.2 Ο ΜΥΘΟΣ ΤΗΣ ΘΕΑΣ ΑΡΤΕΜΙΣ.....	82
4.2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	83
4.2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	83
4.2.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	83
4.2.3 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	85
.....	85
4.3 ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	89
4.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	89
4.3.2 ΚΛΑΣΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (ΕΜ)	90
4.3.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ (ΕΡΤ).....	100
4.3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ	113
<u>5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ</u>	<u>116</u>
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	116

5.2 ΣΧΟΛΙΑ.....	120
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σημασία της εφαρμοσμένης γεωφυσικής

Η γεωφυσική αποτελεί μία επιστήμη κατά την οποία αξιοποιούνται φυσικά φαινόμενα, όπως η βαρύτητα, ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, η διάδοση σεισμικών κυμάτων κλπ. Μια γεωφυσική μελέτη επικεντρώνεται στις αντίστοιχες φυσικές ιδιότητες (της πυκνότητας, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων) με σκοπό να εξεταστεί το υπέδαφος της γης. Βασίζεται στο ότι τα γεωφυσικά πεδία που μετρούνται στην επιφάνεια της Γης, επηρεάζονται από ιδιότητες δομών που βρίσκονται πιο βαθιά μέσα στο έδαφος και που οι κλασικές γεωλογικές μέθοδοι δεν μπορούν να ερευνήσουν.

Η διερεύνηση του υπεδάφους αποτελεί μια απαιτητική διαδικασία, καθώς βασίζεται σε δεδομένα από ποικίλες και διαφορετικές μεθόδους. Για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων σε μια περιοχή ενδιαφέροντος απαιτείται ο συσχετισμός δεδομένων και πληροφοριών από τον τομέα της αρχαιολογίας, της γεωλογίας, της υδρογεωλογίας, της γεωμορφολογίας, της πολεοδομίας κλπ.. Στο επάγγελμα του μηχανικού η εφαρμοσμένη γεωφυσική είναι επιστήμη ιδιαίτερης σημασίας, αφού παρέχει τη δυνατότητα μελέτης των επιφανειακών στρωμάτων και του φλοιού της γης, καθώς και τον εντοπισμό δομών που συνδέονται με την εμφάνιση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, εντοπισμό μεταλλοφορίας, πηγών γεωθερμικής ενέργειας, προϋπάρχοντων δομών ανθρωπογενούς δραστηριότητας, στρωματογραφίας, διακύμανσης του υδροφόρου ορίζοντα κ.α.. Η **γεωφυσική διασκόπηση** περιλαμβάνει τη λήψη μετρήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, οι οποίες επηρεάζονται από την εσωτερική κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων της γης. Συνεπώς, ο εντοπισμός κάποιας τοπικής δομής στο υπέδαφος εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες, που διαφοροποιούνται σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο (ανωμαλίες). Σε έναν γεωλογικό σχηματισμό όμως υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αλληλοεπικάλυψης των φυσικών ιδιοτήτων, με αποτέλεσμα η εφαρμογή μιας μόνο γεωφυσικής μεθόδου να μην είναι αρκετή για την επίλυση του προβλήματος. Για την διεξαγωγή ολοκληρωμένων και ακριβέστερων συμπερασμάτων είναι απαραίτητος ο συνδυασμός τουλάχιστον δύο διαφορετικών μεθόδων. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για να επιλυθεί ένα πρόβλημα γεωφυσικού ενδιαφέροντος εξαρτάται από:

- Τη γεωλογία της περιοχής

- Το βάθος του στόχου
- Το είδος του στόχου
- Το κατά πόσον οι γεωφυσικές ιδιότητες του στόχου διαφοροποιούνται σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο του στόχου (Αποστολόπουλος, 2013)

Οι γεωφυσικές μέθοδοι διαχωρίζονται ανάλογα με την φυσική ιδιότητα που της διέπει στις παρακάτω κατηγορίες:

Πίνακας 1.1: Γεωφυσικές Μέθοδοι

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ	ΦΥΣΙΚΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΣΤΟΧΟΣ
Βαρυτική	Μεταβολές της επιτάχυνσης της βαρύτητας	Πυκνότητα	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας των υπεδαφικών σχηματισμών
Μαγνητική	Μεταβολές της έντασης του μαγνητικού πεδίου	Μαγνητική επιδεκτικότητα	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της παραμένουσας μαγνήτισης
Ηλεκτρική			
Ειδικής αντίστασης	Ηλεκτρική Αντίσταση της Γης	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης
Φυσικού Δυναμικού	Ηλεκτροκινητικό δυναμικό	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	
Επαγόμενης Πολικότητας	Διαφορά δυναμικού	Ηλεκτρική χωρητικότητα	
Μαγνητοτελλουρική			
Σεισμική	Χρόνος διάδοσης των διαθλώμενων ή ανακλώμενων κυμάτων	Πυκνότητα, ελαστικότητα	Καθορισμός της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων
Ραδιομετρική	Φυσική ραδιενέργεια	Ακτινοβολία	Προσδιορισμός της φυσικής ραδιενέργειας των πετρωμάτων

Θερμική	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης	Θερμοκρασία	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων
Ηλεκτρομαγνητική	Απόκριση σε ηλεκτρομαγνητική διέγερση	Ηλεκτρική αγωγιμότητα, μαγνητική επιδεκτικότητα	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης
Γεωραντάρ	Χρόνος διάδοσης των ανακλώμενων παλμών του Γεωραντάρ σε ασυνέχειες	Διηλεκτρική σταθερά, ηλεκτρική αγωγιμότητα	Εντοπισμός ασυνεχειών

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση της γεωφυσικής έρευνας στην παράκτια ζώνη πλησίον του ναού της Αρτέμιδος, που εντοπίζεται στο Δήμο Σπάτων – Αρτέμιδος, συγκεκριμένα στην παραλία της Αρτέμιδος.

Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης αποτελεί η δυνατότητα εντοπισμού δομών και του τρόπου με τον οποίον ήταν διαμορφωμένη η ακτογραμμή την περίοδο λειτουργίας του ναού, αλλά και η περαιτέρω αναζήτηση ανθρωπογενών στοιχείων που χρονολογούνται από τον 7^ο αι. Π.Χ. έως τον 1^ο αι. Μ.Χ.. Το επίκεντρο της αναζήτησης προσδιορίστηκε στο βάθος του αναγλύφου της οροφής του βραχώδους υποβάθρου και στις τοπικές δομές της περιοχής έρευνας. Ο ναός της Αρτέμιδος Ταυροπόλου χαρακτηρίζεται ως ένα μνημείο πολιτισμικής κληρονομιάς και η επιπλέον μελέτη της περιοχής κρίθηκε απαραίτητη από την Εφορεία Αρχαιοτήτων Ανατολικής Αττικής, η οποία απευθύνθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, καθώς παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής ικανοποιητικών συμπερασμάτων με μη καταστροφικές μεθόδους.

Η ομάδα πραγματοποίησης της παρούσας έρευνας αποτελούνταν από μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Υπεύθυνος της έρευνας ήταν ο Δρ. Γεώργιος Αποστολόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τομέα Μεταλλευτικής και τα υπόλοιπα μέλη ήταν ο Δρ. Γεώργιος Αμολοχίτης μέλος

Ε.Ε.ΔΙ.Π. του τομέα μεταλλευτικής, ο υποψήφιος Διδάκτορας Δημήτριος Καραΐσκος και τις τελειόφοιτες σπουδάστριες της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. Αλεξάνδρα Σακαλίδη και Ευσταθία Γαρμπή.

Ύστερα από μελέτη γεωλογικών και αρχαιολογικών στοιχείων αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν τρεις διαφορετικές γεωφυσικές μέθοδοι:

- Ηλεκτρική μέθοδος
- Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM)
- Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR)

Κάθε μέθοδος χρειάστηκε ένα ειδικό όργανο για τη διεξαγωγή της έρευνας. Όσον αφορά την ηλεκτρική μέθοδο χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYLCAL Pro για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ύστερα, για τη διεξαγωγή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, το όργανο μέτρησης της GE Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2 με βάθος συνολικής διασκόπησης 1,5m και 3m. Τέλος για τις μετρήσεις με τη μέθοδο Γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε μία θωρακισμένη κεραία της MALA Geoscience με συχνότητα 250 MHz.

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τα εξής υπολογιστικά προγράμματα:

- Ηλεκτρική μέθοδος: RES2DINV της Geotomo Software
- Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM): Surfer της Golden Software
- Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR): REFLEXW της Sandmeier Scientific Software

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα των μετρήσεων οδηγούν σε ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία αφορούν την ύπαρξη ή όχι τοπικών δομών καθώς και την έκταση του βραχώδους υποβάθρου.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και με δεδομένο της γειτνίασης της παράκτιας περιοχής που ερευνήθηκε υπήρξε συνεργασία με τη φοιτήτρια Σακαλίδη Αλεξάνδρα στο πλαίσιο του θεωρητικού υποβάθρου της εργασίας καθώς και στην ανάλυση των ιστορικών, γεωλογικών και γεωγραφικών δεδομένων.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία δομείται από τα εξής έξι κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο 1:** εισαγωγή στο αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής και στο εξεταζόμενο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής
- **Κεφάλαιο 2:** ανάπτυξη του θεωρητικού υποβάθρου για τις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσίαση των οργάνων μέτρησης για τη λήψη δεδομένων της συγκεκριμένης έρευνας
- **Κεφάλαιο 3:** παραδείγματα γεωφυσικής έρευνας από διεθνή βιβλιογραφία με παρεμφερές αντικείμενο μελέτης
- **Κεφάλαιο 4:** παρουσίαση πληροφοριών για την εξεταζόμενη περιοχή
- **Κεφάλαιο 5:** καταγραφή και επεξεργασία δεδομένων μετρήσεων
- **Κεφάλαιο 6:** σχόλια και συμπεράσματα από τη διεξαγωγή της έρευνας και της έκβασης των αποτελεσμάτων
- **Κεφάλαιο 7:** βιβλιογραφία και πηγές για τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας



Εικόνα 1.1: Μετρήσεις γεωραντάρ στην περιοχή έρευνας



Εικόνα 1.2: Ηλεκτρική τομογραφία στην περιοχή έρευνας

2 Θεωρητικό Μέρος

2.1 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

2.1.1 Εισαγωγή

Κατά την ηλεκτρική μέθοδο πραγματοποιείται μέτρηση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Εφαρμόστηκε πρώτη φορά από τον Conrad Schlumberger το 1912, ο οποίος αξιοποίησε τους νόμους του γεωηλεκτρισμού. Κάνοντας χρήση της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος από τους υπεδάφικους σχηματισμούς υλοποιούνται έρευνες και εντοπισμός υδροφόρων οριζόντων, επίλυση γεωτεχνικών και μεταλλευτικών προβλημάτων, μετρώνται διαφορές δυναμικού, ρεύματα και φυσικά ή τεχνητά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. (Άκης Τσελέντης)

Με τη χρήση συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας εντοπίζονται οριζόντιες και κατακόρυφες διαφοροποιήσεις ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

2.1.2 Τύποι ηλεκτρικών μεθόδων

Πίνακας 1.2: Διάκριση Ηλεκτρικών Μεθόδων

Παθητικές Μέθοδοι	Μέθοδος του φυσικού δυναμικού	Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών συσχετιζόμενα με την αποσαρθωση κοιτασμάτων σουφλιδίων γεωθερμικής ή ηλεκτροκινητικής προέλευσης Εφαρμογές σε υδρογεωλογικές, γεωθερμικές έρευνες
	Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος	Χρησιμοποιεί μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων παραγόμενων από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα Εφαρμογές στον καθορισμό ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη (έως μανδύα)
Ενεργητικές Μέθοδοι	Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης	Χρησιμοποιεί ηλεκτρικό δυναμικό συσχετιζόμενο με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος Εφαρμογές σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες με μέσα βάθη διασκόπησης
	Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (συνδιασμός με ειδική ηλεκτρική αντίσταση)	Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών, χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν γίνεται παύση της διαβίβασης του ρεύματος στο έδαφος Εφαρμογή στον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλου και ηλεκτρικά αγώγιμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών

Ανάλογα με την ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, οι ηλεκτρικές μέθοδοι διακρίνονται σε ενεργητικές και παθητικές.

2.1.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες της ύλης

2.1.3.1 Ηλεκτρικά Δυναμικά

Τα φυσικά δυναμικά του υπεδάφους δημιουργούνται λόγω ηλεκτροχημικής ή μηχανικής δραστηριότητας και σχετίζονται κατά κύριο λόγο με το υπόγειο νερό. Διακρίνονται σε:

- Ηλεκτροκινητικό Δυναμικό (μηχανικής προέλευσης)
- Δυναμικό Διάχυσης (χημικής προέλευσης)
- Δυναμικό Nerst (χημικής προέλευσης)
- Δυναμικό Ορυκτογένεσης (χημικής προέλευσης)
- Φυσικό Δυναμικό σχετιζόμενο με την παρουσία γεωθερμικών πεδίων

2.1.3.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα και ειδική ηλεκτρική αντίσταση

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

- Ηλεκτρονικά (ωμικά): η ροή του ρεύματος περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (μέταλλα).
- Ηλεκτρολυτικά: το ρεύμα μεταφέρεται μέσω ιόντων με σχετικά χαμηλό ρυθμό.
- Διηλεκτρικά: λαμβάνει χώρα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές όπου τα ατομικά ηλεκτρόνια κάτω από την επίδραση εξωτερικού πεδίου μετακινούνται σχετικά με τον πυρήνα.

Ιδιαίτερα σημαντική ιδιότητα της ύλης αποτελεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία χαρακτηρίζει αν ένα γεωλογικό υλικό είναι καλός ή κακός αγωγός. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα συμβολίζεται με σ και μετράται σε Siemens/m και δείχνει πόσο εύκολα διαδίδεται το ηλεκτρικό φορτίο μέσα στο πέτρωμα.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.1)$$

ρ : ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Έστω κυλινδρικός αγωγός μήκους L και διατομής A που διαρρέεται από ρεύμα I και στα άκρα του υπάρχει διαφορά δυναμικού ΔV . Σύμφωνα με το νόμο του Ohm η ηλεκτρική αντίσταση R δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.2)$$

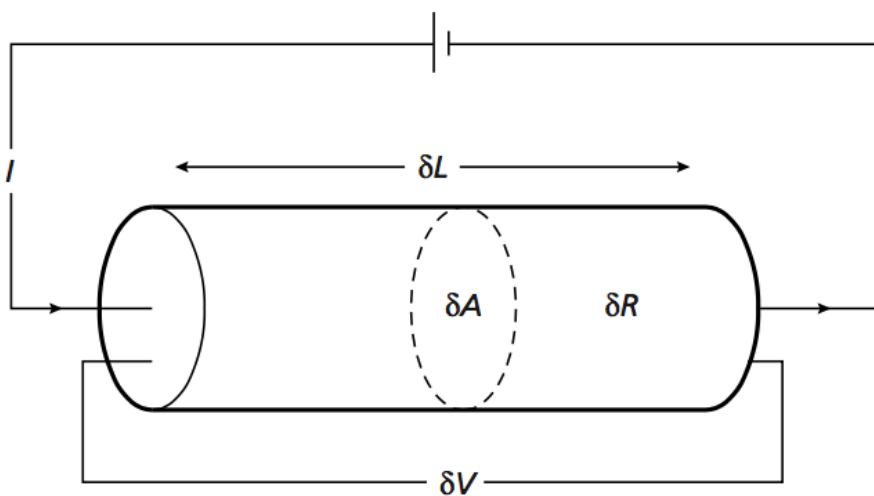
Όμως η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται και από τις διαστάσεις του αγωγού σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (2.3)$$

Το αντίθετο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ** που περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί να διαβιβαστεί το ρεύμα σε ένα υλικό και ισούται με :

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.4)$$

R: ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)



Εικόνα 1.1: Κύκλωμα Αντίστασης Πηγή: (Philip Kearey, 2002)

Η ειδική αντίσταση ενός μέσου σύμφωνα με τον τύπο του Archie είναι:

$$\rho_e = a \times \varphi^{-m} \times s^{-n} \times \rho_w \quad (2.5)$$

φ : ποσοστό όγκου των πόρων (πορώδες)

s : ποσοστό πόρων που περιέχουν νερό

a : σταθερά $0,5 \leq a \leq 2,5$

m : σταθερά $1,3 \leq m \leq 2,5$

ρ_w : ειδική αντίσταση του νερού

Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί (υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση), όμως εξαιτίας του πορώδους (κυκλοφορία ρευστών στους πόρους) οι ειδικές αντιστάσεις δεν έχουν πολύ υψηλές τιμές.

Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από:

- Το είδος του πετρώματος

Πίνακας 1.3: Είδος Πετρώματος Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm*m)
Αέρας	∞
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζία	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
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	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \times 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \times 10^2$
Εδαφικό νερό	$0,5 - 300$
Θαλασσινό νερό	$0,2$

Έχει παρατηρηθεί πως τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σε αντίθεση με τα ιζηματογενή, τα οποία εξαιτίας του αυξημένου

περιεχομένου σε ρευστά εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές. Όσον αφορά τα μεταμορφωμένα πετρώματα έχουν ενδιάμεσες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με έντονες τάσεις αλληλεπικάλυψης.

- **Την δομή και το πορώδες του πετρώματος**

Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες ενός πετρώματος τόσο μικρότερη είναι και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

- **Την περιεκτικότητα σε άλατα**

Όσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης σε άλατα τόσο μικρότερη η ειδική αντίσταση

- **Τις επιδράσεις των γεωλογικών διεργασιών**

Οι γεωλογικές διεργασίες γενικά μειώνουν την ειδική αντίσταση όπως ή αργλική εξαλλοίωση, διάλυση, ρηγμάτωση, εισροή θαλασσινού νερού, διάτμηση και αποσάθρωση. Υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις όπως η σκλήρυνση, ιζηματοποίηση και απολίθωση που αυξάνουν την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενώ η γεωλογική διεργασία της μεταμόρφωσης μπορεί να αυξήσει ή να ελαττώσει την τιμή της.

- **Την ηλικία του πετρώματος**

Όσο μεγαλύτερη είναι η ηλικία του πετρώματος τόσο μεγαλύτερες τείνουν να είναι οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

- **Τον βαθμό κορεσμού του πετρώματος**

Όσο αυξάνεται ο βαθμός κορεσμού ενός πετρώματος τόσο μειώνεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

- **Τις επιδράσεις των αργλικών ορυκτών**

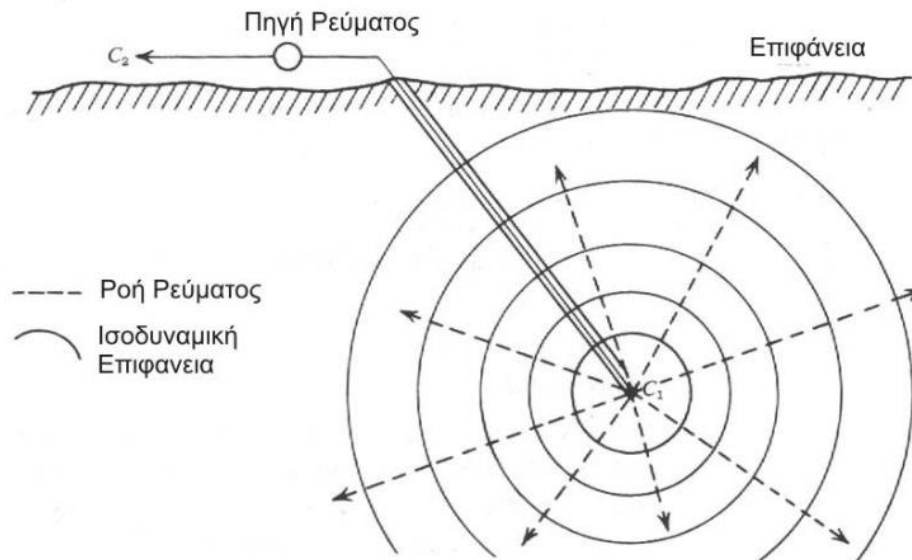
Λόγω αυξημένης αγωγιμότητας των αργλικών ορυκτών παρουσιάζονται χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

- **Την θερμοκρασία**

Όσο αυξάνει η θερμοκρασία του πετρώματος τόσο παρατηρείται μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. (αξιοσημειώτες μεταβολές της θερμοκρασίας παρατηρούνται σε γεωθερμικά συστήματα)

2.1.4 Μέθοδος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης

2.1.4.1 Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο



Εικόνα1.2: Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Ηλεκτρόδιο μικρών διαστάσεων C1 (σημειακή πηγή ρεύματος) τοποθετείται σε μεγάλο βάθος σε ισότροπο και ομογενές μέσο και ηλεκτρόδιο C2 στην επιφάνεια της Γης σε μεγάλη απόσταση από το C1 (αμελητέα επίδραση στην διαμόρφωση του δυναμικού). Τα ηλεκτρόδια συνδέονται με πηγή ρεύματος δημιουργώντας κύκλωμα με ακτινικές γραμμές ροής ρεύματος που ξεκινούν από την σημειακή πηγή και κατευθύνονται προς τα έξω. Κατά μήκος ομόκεντρων κυκλικών γραμμών που έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο C1 και βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις από αυτό (**ισοδυναμικές γραμμές**) η διαφορά δυναμικού λόγω ηλεκτρικής αντίστασης του μέσου παραμένει σταθερή. Στις τρεις διαστάσεις οι ισοδυναμικές γραμμές σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες που έχουν ως κέντρο και πάλι το ηλεκτρόδιο C1.

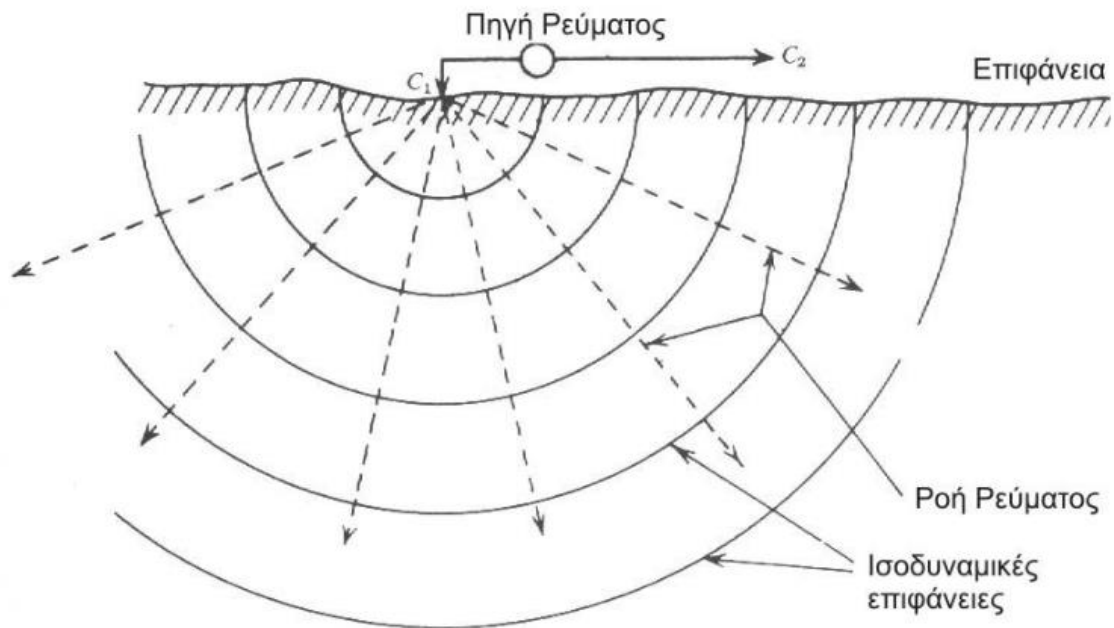
Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times r \times V}{I} \quad (2.6)$$

V: το δυναμικό που δημιουργείται σε σημείο του χώρου λόγω του C1

r: η απόσταση του σημείου από το C1

2.1.4.2 Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο



Εικόνα 1.3: Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

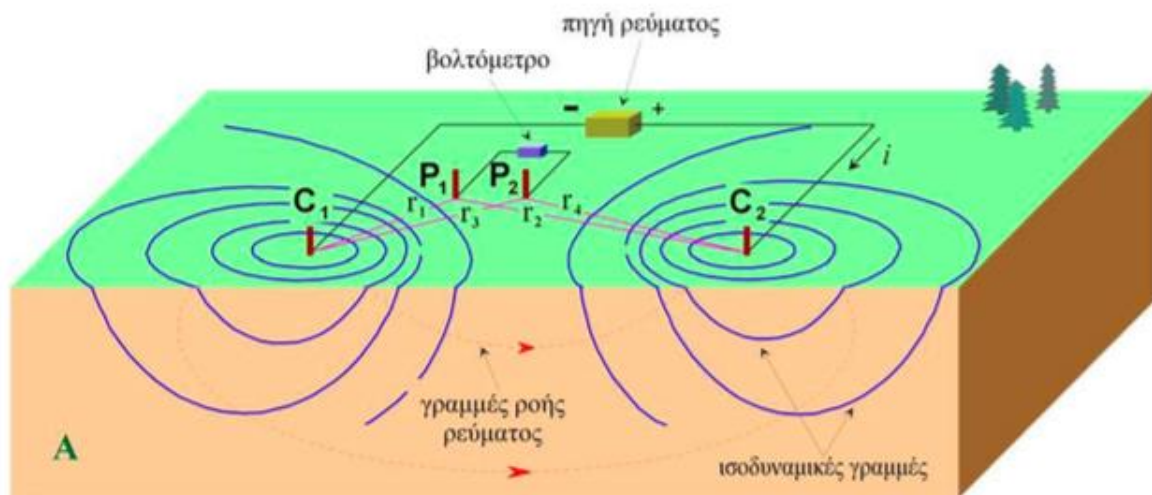
Στην επιφάνεια ηλεκτρικού ομογενούς μέσου τοποθετούνται δύο ηλεκτρόδια (C1 και C2) με μεγάλη απόσταση μεταξύ του (αμελητέα επίδραση του C2 στην διαμόρφωση του δυναμικού), τα οποία συνδέονται με πηγή ρεύματος. Το ρεύμα I δημιουργεί ακτινικές γραμμές ροής από το C1 με κατεύθυνση προς το έδαφος και ισοδύναμες επιφάνειες – ομόκεντρα ημισφαίρια.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{2 \times \pi \times r \times V}{I} \quad (2.7)$$

2.1.4.3 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου χώρου

Τα ηλεκτρόδια C1 και C2 είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια σε πεπερασμένη απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε και τα δύο να επηρεάζουν το δυναμικό σε κοντινό σημείο της επιφάνειας.



Εικόνα 1.4: Ηλεκτρώδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου

Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{k \times \Delta V}{I} \quad (2.8)$$

k: ορίζεται ως ο γεωμετρικός παράγοντας που εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων C1 και C2

$$k = \frac{2 \times \pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \quad (2.9)$$

2.1.4.4 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

Στην περίπτωση ομογενούς και ισότροπου μέσου η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ υπολογίζεται από τον τύπο $\rho = \frac{k \times \Delta V}{I}$. Παραμένει σταθερή, χωρίς να επηρεάζεται από την θέση των ηλεκτροδίων και ισούται με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου.

Στην περίπτωση ανομοιογενούς μέσου, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση διαφέρει ανάλογα με τις θέσεις των ηλεκτροδίων και ονομάζεται **φαινόμενη ειδική αντίσταση**.

Υπολογίζεται για κάθε θέση και διάταξη των ηλεκτροδίων από τον τύπο:

$$\rho_\alpha = \frac{K \times \Delta V}{I} \quad (2.10)$$

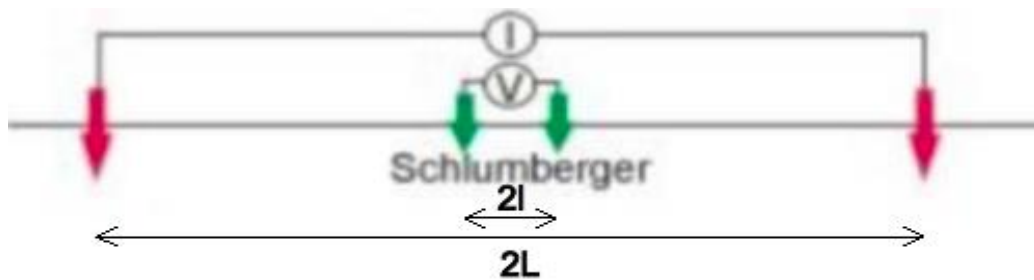
Η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δεν είναι αντιπροσωπευτική όλου του στρώματος που εξετάζεται αφού διαφέρει ανά σημείο σύμφωνα με τη γεωλογική τομή και τον τρόπο

που κατανέμονται οι ειδικές αντιστάσεις των στρωμάτων που διαρρέονται από τις ρευματικές γραμμές.

2.1.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θέση των ηλεκτροδίων του δυναμικού και ρεύματος, των αποστάσεων μεταξύ τους και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

2.1.5.1 Διάταξη Schlumberger

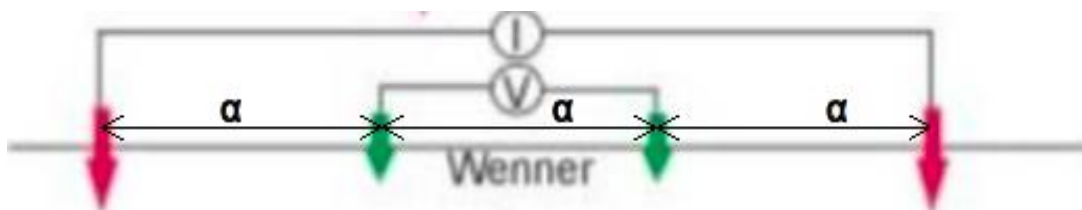


Εικόνα 1.5: Διάταξη Schlumberger Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Τα ηλεκτρόδια της διάταξης είναι συμμετρικά ως προς το κέντρο της απέχοντας απόσταση L (ηλεκτρόδια ρεύματος) και l (ηλεκτρόδια δυναμικού). Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi (L^2 - l^2)}{I \times 2 \times l} \quad (2.11)$$

2.1.5.2 Διάταξη Wenner



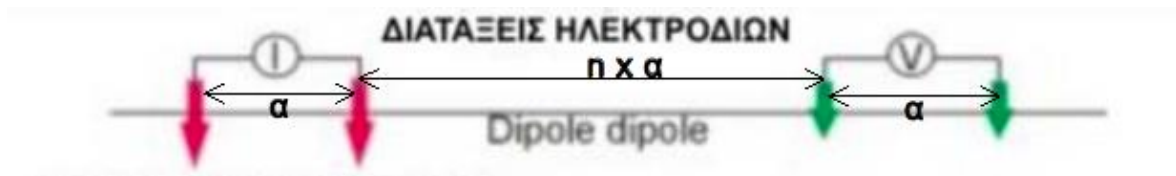
Εικόνα 1.6: Διάταξη Wenner Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Η απόσταση όλων των ηλεκτροδίων είναι σταθερή μεταξύ τους και ισούται με α.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi \times 2 \times a}{I} \quad (2.12)$$

2.1.5.3 Διάταξη Dipole-Dipole



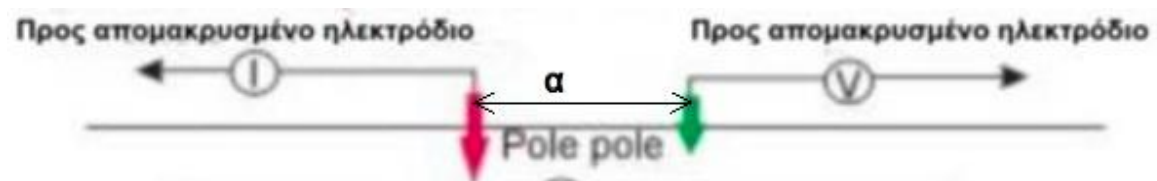
Εικόνα 1.7: Διάταξη Dipole-Dipole Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Στη συγκεκριμένη διάταξη τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση a , όση απέχουν και τα ηλεκτρόδια ρεύματος. Όσον αφορά τα δίπολα, αυτά απέχουν μεταξύ πολλαπλάσια απόσταση a .

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi \times n \times a \times (n + 1) \times (n + 2)}{I} \quad (2.13)$$

2.1.5.4 Διάταξη Pole-Pole



Εικόνα 1.8: Διάταξη Pole-Pole Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος απέχει από το ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απόσταση a , ενώ τα υπόλοιπα δύο βρίσκονται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V \times \pi \times 2 \times a}{I} \quad (2.14)$$

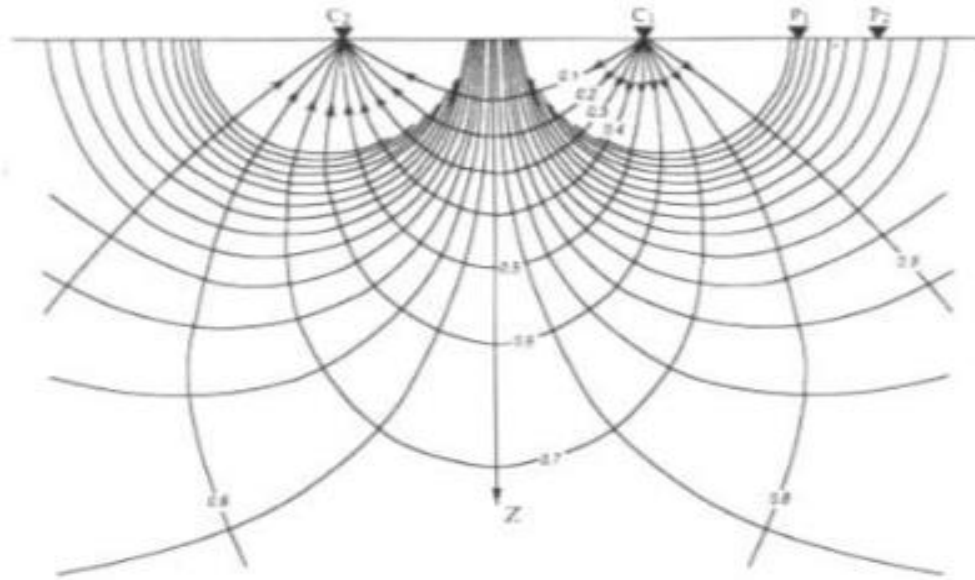
2.1.5.1 Διάταξη Pole-Dipole



Εικόνα 1.9: Διάταξη Pole-Dipole Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση a , ενώ το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος βρίσκεται σε απόσταση πολλαπλάσια του a και το άλλο βρίσκεται σε πολύ πιο απομακρυσμένο σημείο.

2.1.6 Κατανομή ρεύματος και δυναμικού εντός ομογενούς υπεδάφους



Εικόνα 1.10: Κατανομή ρευματικών και δυναμικών γραμμών Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Παραπάνω παρουσιάζεται η κατανομή των ρευματικών και δυναμικών γραμμών για δύο ηλεκτρόδια ρεύματος στην επιφάνεια ομογενούς υπεδάφους.

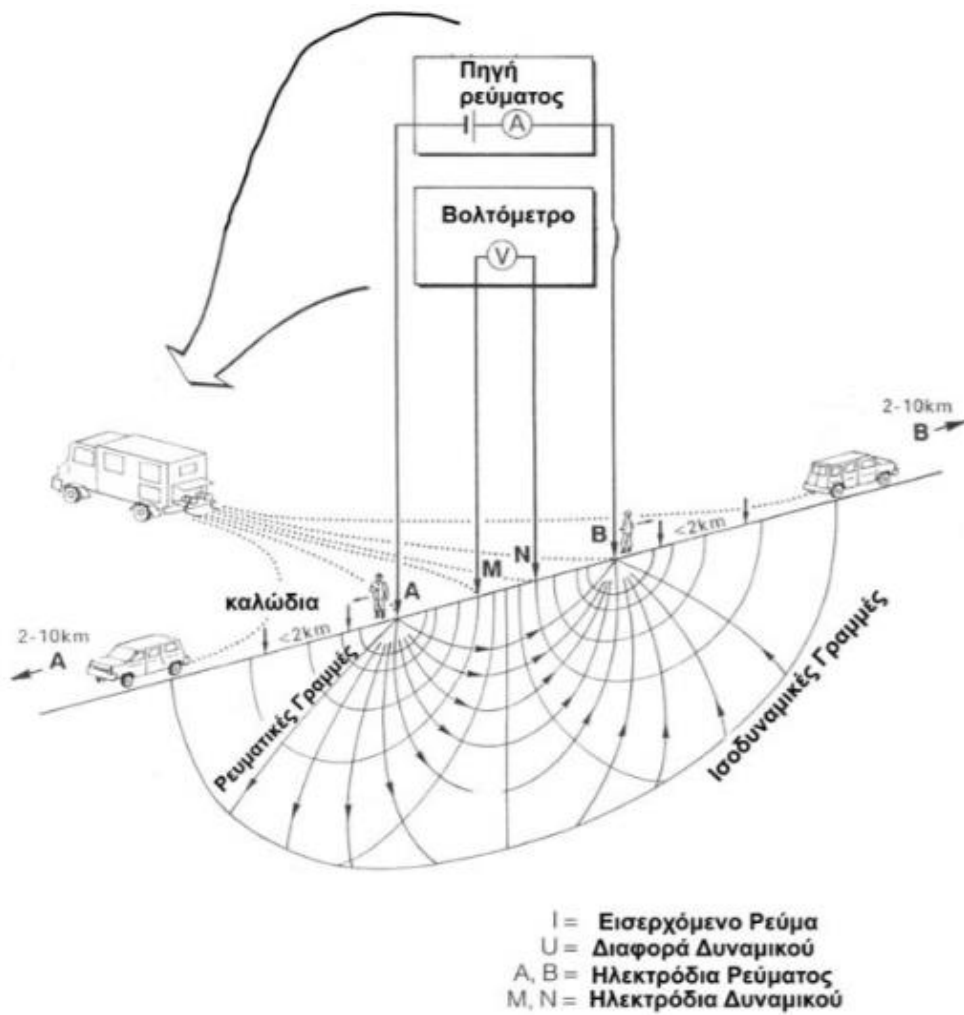
Το κλάσμα του ολικού ρεύματος που περνάει από βάθος z_1 δίνεται παρακάτω:

$$\frac{I_x}{I} = 1 - \frac{2}{\pi} \times \tan^{-1} \frac{2 \times z_1}{c_1 \times c_2} \quad (2.15)$$

2.1.7 Εξοπλισμός Υπαιθρου

Ο απαραίτητος εξοπλισμός για την διεξαγωγή ηλεκτρικών μετρήσεων στην ύπαιθρο απαρτίζεται από:

- Την πηγή του ηλεκτρικού ρεύματος, το αμπερόμετρο και το βολτόμετρο, τα οποία βρίσκονται σε ένα όργανο μέτρησης που περιέχει επιπλέον σύστημα αντιστάθμισης έτσι ώστε το βολτόμετρο να αφαιρεί φυσικά δυναμικά.
- Το όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού
- Καλώδια σε καρούλια
- Ηλεκτρόδια



Εικόνα 1.11: Εξοπλισμός Υπαίθρου Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

- Το όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης το οποίο βρίσκεται μεταξύ του γεωφυσικού οργάνου και των καλωδίων (ρεύματος και δυναμικού) και έχει ως στόχο να διαδώσει το ρεύμα στα κατάλληλα ηλεκτρόδια ρεύματος και να καθορίσει τα ηλεκτρόδια δυναμικού που χρησιμοποιούνται στην λήψη των μετρήσεων. Έτσι διεκπεραιώνεται έλεγχος εντοπισμού της διάταξης που πραγματοποιείται.



Εικόνα 1.12: Ηλεκτρόδιο και καλώδιο Πηγή: προσωπικό αρχείο



Εικόνα 1.13: Καρούλι και όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης Πηγή: προσωπικό αρχείο

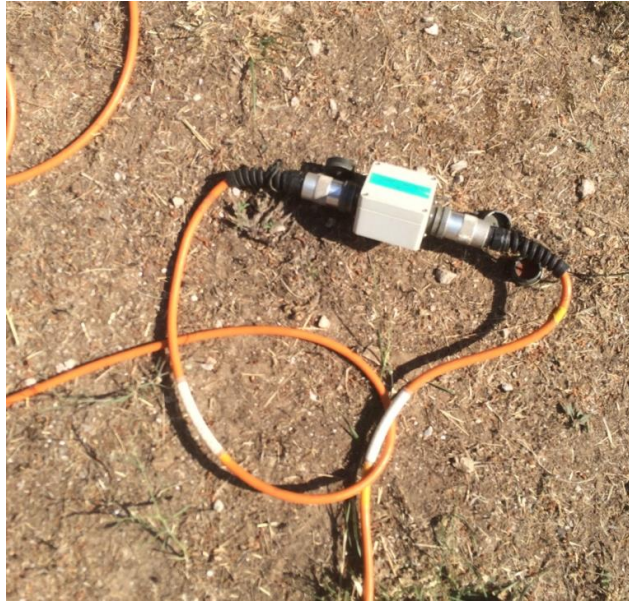


α)



β)

Εικόνα 1.14: α) Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης β) Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης και πηγή ηλεκτρικού ρεύματος Πηγή: Προσωπικό αρχείο

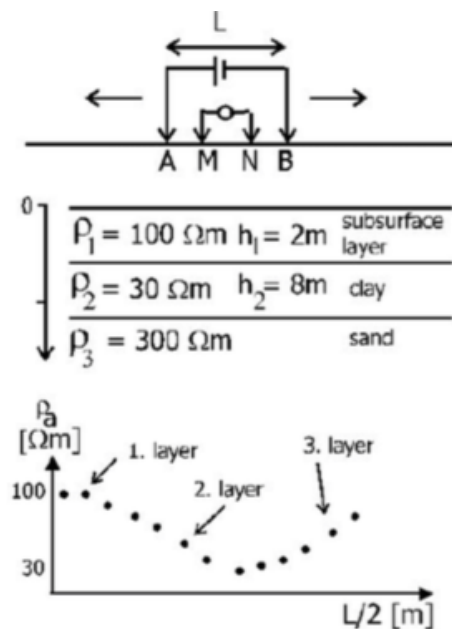


Εικόνα 1.15: Όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού Πηγή: προσωπικό αρχείο

2.1.8 Μετρήσεις και τεχνικές υπαίθρου

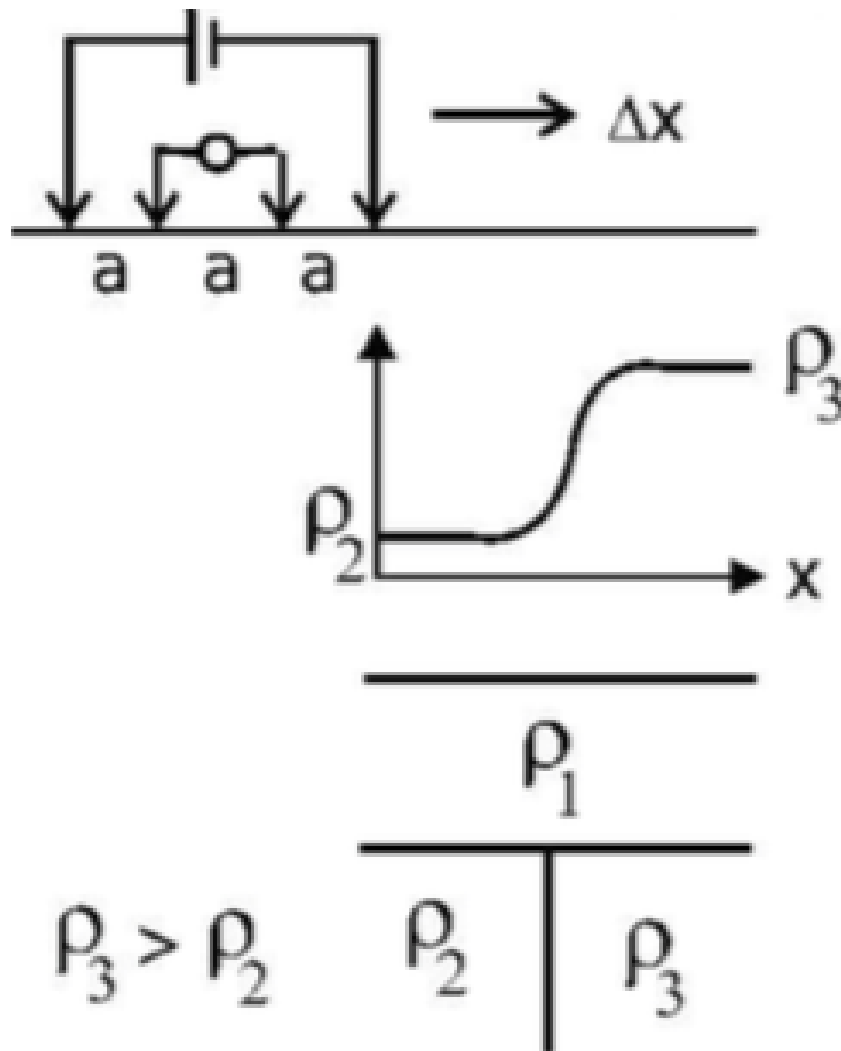
Το βάθος διασκόπησης είναι ανάλογο με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Όσο αυξάνεται η μεταξύ τους απόσταση τόσο πιο βαθιά διαδίδεται το ρεύμα.

Σύμφωνα με τον σκοπό της έρευνας η μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εφαρμόζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους:



Εικόνα 1.16: Ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

- **Ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις**, κατά τις οποίες χρησιμοποιείται κυρίως η διάταξη Schlumberger και βοηθούν στον εντοπισμό της εναλλαγής των στρωμάτων με το βάθος. Η διαφοροποίηση του βάθους διασκόπησης γίνεται με την συμμετρική αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος όπως παρουσιάζεται στη διπλανή σχηματική απεικόνιση.
- **Οριζόντιες ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις** κατά την οποία σαρώνεται πλευρικά, κρατώντας σταθερή τη διάταξη των ηλεκτροδίων, μια ζώνη συγκεκριμένου πάχους και στη συνέχεια διεξάγεται μελέτη της πλευρικής διαφοροποίησης του υλικού της ζώνης από τη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Οι ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις συνηθέστερα γίνονται με τη χρήση της διάταξης Wenner.



Εικόνα 1.17: Ηλεκτρικές χαρτογραφήσεις Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

2.1.9 Καταλληλότητα διάταξης ηλεκτροδίων

Πίνακας 1.4: Επιλογή διάταξης ηλεκτροδίων

	Διάταξη Schlumberger	Διάταξη Wenner	Διάταξη Pole-Dipole	Διάταξη Dipole-Dipole
Λόγος σήματος προς θόρυβο	II	I	III	IV
Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες	III	IV	II	I
Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση	I	II	IV	III
Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων	I	I	II	II
Ευαισθησία στην μορφολογία του υποβάθρου	III	III	II	I
Βάθος διασκόπησης	II	-	-	I
Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος	I	I	III	II
Ευαισθησία στην κλίση	I	I	III	II
Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση βυθοσκοπήσεων	I	-	-	-
Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων	III	III	I	II
Διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγώγιμου στρώματος	I	-	-	-
Ευαισθησία στο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής έρευνας	-	-	-	I

I: Καταλληλότερη επιλογή

II: Κατάλληλη επιλογή

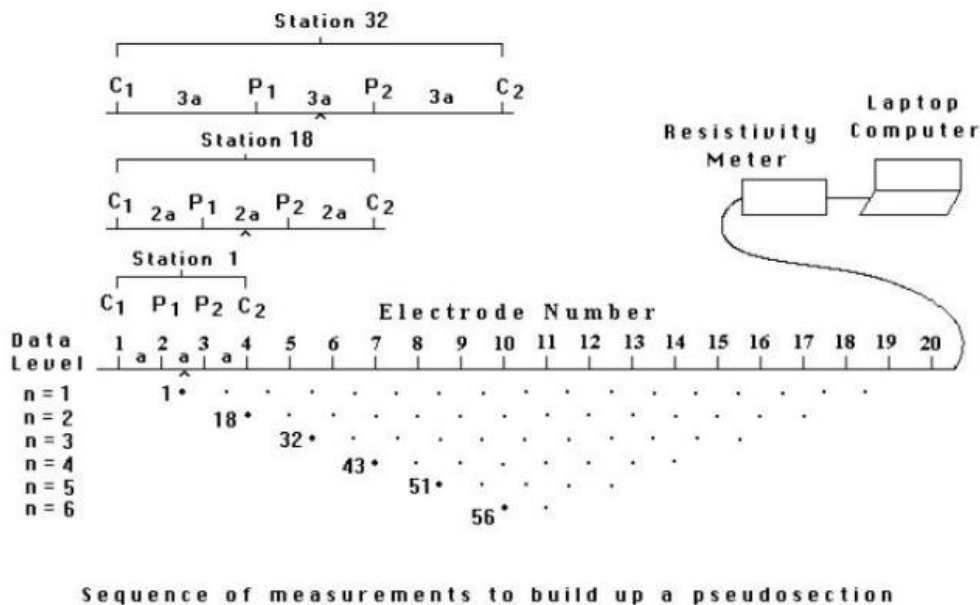
III: Λιγότερο κατάλληλη επιλογή

IV: σχεδόν ακατάλληλη

(-) : Δεν δίνονται πληροφορίες για την καταλληλότητα της μεθόδου

2.1.10 Ηλεκτρική Τομογραφία στην Ξηρά

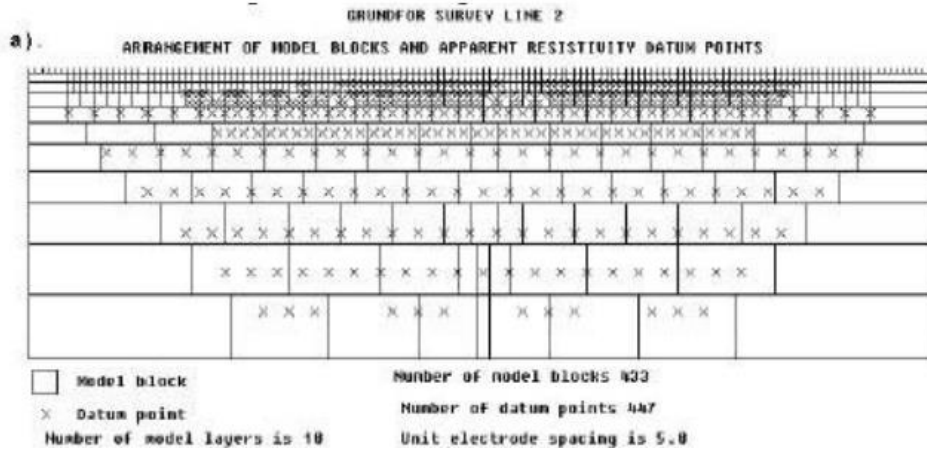
Η ηλεκτρική τομογραφία επιλέγεται για διασκοπήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις μεγάλης ακρίβειας, τόσο παράπλευρα όσο και σε βάθος. Η επιλογή διάταξης καθορίζει το τρόπο μέτρησης, τις αποστάσεις και τις θέσεις των ηλεκτροδίων. Οι τιμές που λαμβάνονται ερμηνεύονται σε μία δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, τη γεωηλεκτρική τομογραφία. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Για την επιτυχία της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας είναι απαραίτητη η λήψη δεδομένων από ηλεκτρόδια πολλών διαφορετικών αποστάσεων κατά μήκος μίας γραμμής και πυκνή πλευρική κάλυψη της περιοχής, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους. Εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένα πολυηλεκτροδιακά συστήματα, λήψης δεδομένων και επεξεργασίας.



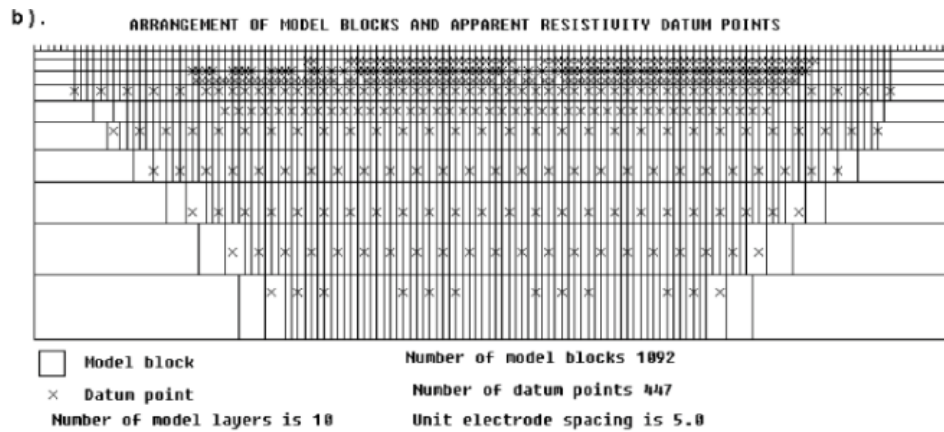
Εικόνα 1.18: Αλληλουχία μετρήσεων για την δημιουργία ψευδοτομημάτων Πηγή: (Loke, 1999)

Σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς έχουν δημιουργηθεί αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντίστροφης δημιουργίας μοντέλων. Σύμφωνα με αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων και μεγέθους που αυξάνει με το βάθος. Μέχρι να ολοκληρωθεί αποδεκτή συμφωνία μεταξύ δεδομένων εισόδου και απόκρισης του μοντέλου, οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις των κελιών προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Για την

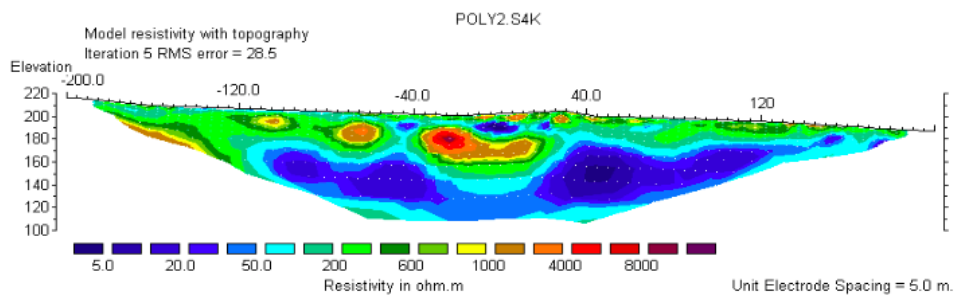
αντιμετώπιση της τοπογραφίας απαιτούνται διορθώσεις (μετατροπή των δεδομένων πριν και μετά την αντιστροφή) ή απευθείας εισαγωγή της στο πλέγμα. (Αποστολόπουλος, 2013)



Εικόνα 1.19: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου Πηγή: (Loke, 1999)



Εικόνα 1.20: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με περισσότερα κελιά από τα δεδομένα. Πηγή: (Loke, 1999)



Horizontal scale is 9.13 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.56
First electrode is located at -200.0 m.
Last electrode is located at 200.0 m.

Εικόνα 1.21: Μοντέλο Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

2.2 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

Κατά την Ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (EM) η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων επιτευγχάνεται μέσω της απόκρισης του εδάφους. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αποτελούνται από εναλλασσόμενη ηλεκτρική ένταση και μαγνητική δύναμη. (Philip Kearey, 2002) Κύριος στόχος της μεθόδου αποτελεί ο προσδιορισμός της κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υπεδάφους.

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

2.2.1 Εφαρμογές της μεθόδου

Στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους γεωφυσικής έρευνας συμπεριλαμβάνονται πολλές παραλλαγές τεχνικών και συστημάτων μέτρησης (επίγεια ή από αέρος, χώρος χρόνου ή συχνοτήτων, κλπ.) που έχουν και αντίστοιχες δυνατότητες με πολύ μεγάλη κλίμακα εφαρμογών:

- Μεταλλευτική έρευνα [SEP]
- Εντοπισμός ρύπανσης υδατικών πόρων [SEP]
- Εντοπισμός μετώπου υφαλμύρισης [SEP]
- Γεωλογική χαρτογράφηση, χαρτογράφηση εδαφών, κροκαλών [SEP]
- Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων (σωληνώσεις, δεξαμενές, τοιχία, κλπ.). [SEP]
- Αρχαιολογική έρευνα [SEP]
- Εντοπισμός εγκοίλων (σπήλαια, εγκαταλελειμμένες σήραγγες, κλπ.) [SEP]
(Αποστολόπουλος, 2013)

2.2.2 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι χωρίζονται κατά κύριο λόγο σε καταγραφή δεδομένων συναρτήσεως του χρόνου και συναρτήσεως της συχνότητας.

- **TEM:** Time-domain Electromagnetic Measurements – Μετρήσεις συναρτήσεως του χρόνου, κατά την οποία η εκπομπή του πρωτεύοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πραγματοποιείται ως ασυνεχείς ακολουθίες παλμών. Η καταγραφή των δευτερευόντων κυμάτων γίνεται κατά τη παύση των δύο διαδοχικών παλμών. Η

μέθοδος TEM διερευνά την απόκριση της Γης κατά τη διάρκεια του κενού χρόνου μεταξύ των πρωτεύοντων παλμών,

- **FEM:** Frequency-domain Electromagnetic Measurements – Μετρήσεις συναρτήσεως της συχνότητας. Στη συγκεκριμένη μέθοδο διερευνάται η απόκριση της Γης από μία ακολουθία ξεχωριστών συχνοτήτων. Σε αντίθεση με τις μεθόδους TEM, τα πρωτεύοντα κύματα εκπέμπονται σε μία ή περισσότερες συχνότητες και καταγράφονται την ίδια χρονική περίοδο με τα δευτερεύοντα. (π.χ. Μέθοδος οριζόντιων ομοεπίδεδων βρόχων (Slingshot), συστήματα χαμηλών αριθμών επαγωγής – γεωαγωγιμόμετρα, μαγνητοτελλουρική μέθοδος ακουστικής συχνότητας ελεγχόμενης πηγής (CSAMT), μέθοδος αντιστάθμισης, μέθοδος Turam, VLF) (Άκης Τσελέντης)

Επιπροσθέτως, γίνεται ταξινόμηση ανάλογα με τον τύπο μετρήσεων που εκτελεί ο δέκτης:

- Συστήματα μέτρησης γωνίας (angle)
- Συστήματα μέτρησης φάσης (phase)
- Συστήματα μέτρησης έντασης (intensity)

Στη συνέχεια, γίνεται διαχωρισμός σύμφωνα με την πηγή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και διαχωρίζονται σε:

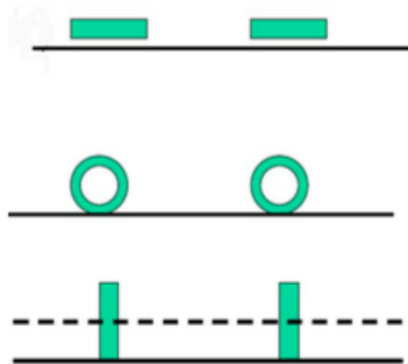
- **Παθητικά:** χρησιμοποιούνται φυσικά υπεδafικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα (π.χ. Μαγνητοτελλουρικά (MT), Μαγνητοτελλουρικά ακουστικής συχνότητας (AMT), Γεωμαγνητική βυθοσκόπηση, Μαγνητικά πεδία ακουστικής συχνότητας (AFMAG)) (Άκης Τσελέντης)
- **Ενεργητικά:** γίνεται χρήση πομπού ηλεκτρομαγνητικού σήματος που επάγει ρεύμα στο έδαφος
- **Τοπικού πεδίου:** όργανα μέτρησης αγωγιμότητας
- **Απομακρυσμένου πεδίου:** χρησιμοποιούνται σήματα πολύ χαμηλής συχνότητας που εκπέμπει πομπός για επικοινωνία υποβρυχίων

Τέλος γίνεται ταξινόμηση με βάση τα επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά συστήματα:

- **Μικρού βρόχου:** Είναι τα περισσότερα συστήματα που δουλεύουν στον χώρο των συχνοτήτων και κάποια στον χώρο του χρόνου. Γίνεται κύρια χρήση σε περιβαλλοντικές εφαρμογές. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν τα EM31 και CMD4 με δύο μικρά πηνία, ένα πομπό και ένα δέκτη, που απέχουν σταθερή απόσταση και είναι τοποθετημένα κάθετα του προφίλ των μετρήσεων. Το EM34

κάνει χρήση δύο πηνίων, ενός πομπού και ενός δέκτη, μεταβλητής απόστασης και διατάξεων. Τα πηνία λοιπόν μπορούν να είναι διατεταγμένα οριζόντια και στο ίδιο επίπεδο, κάθετα και στο ίδιο επίπεδο και κάθετα και στον ίδιο άξονα.

- **Μεγάλου βρόγχου:** (5μ με 100μ βρόγχοι). Κυρίως συστήματα στο χώρο του χρόνου που χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα. [L]
[SEP]
- **Επίπεδον κύματος:** (VLF, Μαγνητοτελλουρικά) Χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα και στον εντοπισμό βαθέων γεωλογικών δομών. (Αποστολόπουλος, 2013)



Εικόνα 1.22: Διατάξεις πηνίων Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)



Εικόνα 1.23: α) CMD4 β) EM-34 Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

2.2.3 Καταστατικές Εξισώσεις του Ηλεκτρομαγνητισμού

Βασική προϋπόθεση αποτελεί η κατανόηση της βασικής θεωρίας και αρχής του ηλεκτρομαγνητισμού σε ανομοιογενή ή τμηματικά ομογενή μέσα. Ο όρος ηλεκτρομαγνητισμός αναφέρεται στη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου από ρεύμα που ρέει μέσα σε έναν αγωγό. (Αποστολόπουλος, 2013)

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι που εφαρμόζονται σήμερα στηρίζονται στα φαινόμενα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Για να γίνουν κατανοητά τέτοια φαινόμενα και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιούνται τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία γίνεται χρήση των εξισώσεων του Maxwell (Σχέσεις 2.18, 2.19). Σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις γίνεται περιγραφή της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιούνται κατά διάρκεια των γεωφυσικών εφαρμογών στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.17)$$

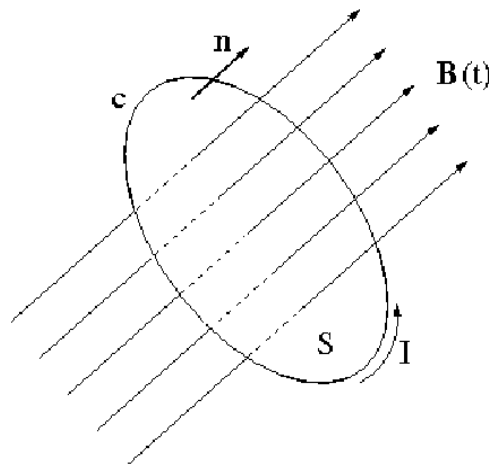
όπου E: ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

B: μαγνητική επαγωγή (T)

H: ένταση μαγνητικού πεδίου (A/m)

J: πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (A/m²)

D: η διηλεκτρική μετατόπιση (C/m²)



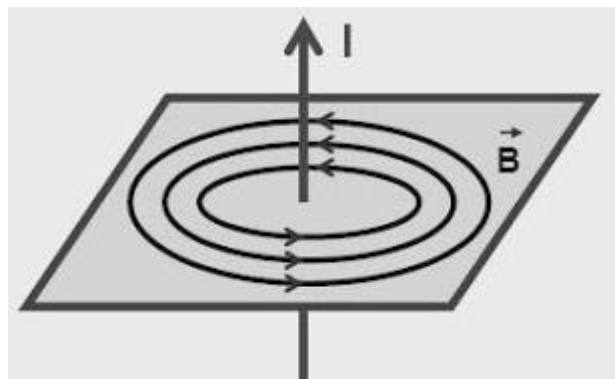
Εικόνα 1.24: Νόμος του Faraday Πηγή: (Demkowicz)

Η εξίσωση 2.16 αποτελεί το νόμο του Faraday και δηλώνει ότι η χρονική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, τέτοιο ώστε η παραγόμενη ηλεκτρική τάση να είναι ανάλογη αλλά προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής. (Εικόνα 2.24) (Άκης Τσελέντης)

Η εξίσωση 2.17 αναφέρεται στο νόμο του Ampere. Ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει σε αγωγό είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ενός μαγνητικού πεδίου, η ένταση του οποίου είναι ανάλογη του ολικού ρεύματος που διαρρέει το χώρο και με διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση ροής του ρεύματος (Τζάνης, 2016). Σύμφωνα με τους νόμους του Gauss σε διαφορική μορφή προκύπτει ότι η συνολική ηλεκτρική ροή που διαρρέει κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν (2.18) καθώς και η ολική ροή μαγνητικού πεδίου δια μέσου κλειστής επιφάνειας είναι μηδέν. (2.19)

$$\nabla \times H = 0 \quad (2.18)$$

$$\nabla \times E = 0 \quad (2.19)$$



Εικόνα 1.25: Ο νόμος του Ampere Πηγή: (Self Study Point)

Αν γίνει θεώρηση ομογενούς και ισότροπου μέσου ισχύει η σχέση:

$$D = \epsilon \times H \quad (2.20)$$

ϵ : διηλεκτρική σταθερά του μέσου

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα το μαγνητικό πεδίο παράγει μαγνητικές γραμμές κάθετες στη διεύθυνση του αγωγού και ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$B = \mu \times H \quad (2.21)$$

$$J = \sigma \times E \quad (2.22)$$

μ : μαγνητική διαπερατότητα

σ : ηλεκτρική αγωγιμότητα

(Άκης Τσελέντης)

2.2.4 Ηλεκτρικές και Μαγνητικές Ιδιότητες της ύλης

2.2.4.1 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ιδιαίτερα σημαντική ιδιότητα της ύλης αποτελεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία χαρακτηρίζει αν ένα γεωλογικό υλικό είναι καλός ή κακός αγωγός. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα συμβολίζεται με σ και μετράται σε Siemens/m και δείχνει πόσο εύκολα διαδίδεται το ηλεκτρικό φορτίο μέσα στο πέτρωμα.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.23)$$

ρ : ειδική ηλεκτρική αντίσταση

2.2.4.2 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Με τον όρο μαγνητική επιδεκτικότητα (k) ορίζεται ως που ένα σώμα έχει τη δυνατότητα να μαγνητίζεται και πρόκειται για αδιάστατο μέγεθος. Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι το πηλίκο της έντασης της μαγνήτισης ενός σώματος προς τη μαγνητική ροπή.

$$k = \frac{J}{H} \quad (2.24)$$

J: ένταση της μαγνήτισης (Amp/m)

H: ένταση του μαγνητικού πεδίου (Amp/m)

M: μαγνητική ροπή (Amp*m²)

Ως ένταση του μαγνητικού πεδίου H ορίζεται η δύναμη που ασκήθηκε σε μοναδιαίο θετικό σε ένα σημείο που απέχει απόσταση r από ένα πόλο μαγνητικής ποσότητας m .

$$H = \frac{m}{\mu \times r^2} \quad (2.25)$$

Μαγνητική ροπή ορίζεται $M = m \times l$ και πρόκειται για ένα ανυσματικό μέγεθος με διεύθυνση από τον αρνητικό προς το θετικό πόλο, αφού οι πόλοι υπάρχουν πάντα σε ζεύγη και η βασική μαγνητική οντότητα είναι το μαγνητικό δίπολο με δύο πόλους μαγνητικών ποσοτήτων $+m$, $-m$ που απέχουν απόσταση l .

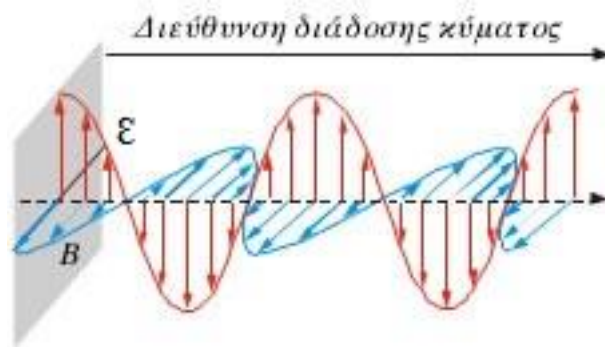
Τέλος, ως **ένταση της μαγνήτισης J** ορίζεται η ένταση με την οποία ένα μαγνητικό σώμα σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο γίνεται εξ επαφής μαγνητισμένο. (Αποστολόπουλος, 2013)

$$J = \frac{M}{V} \quad (2.26)$$

2.2.5 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM) εκμεταλλεύεται την απόκριση του εδάφους με σκοπό τη διάδοση των προσπιπτουσών εναλλασσόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τα οποία αποτελούνται από δύο κάθετους άξονες, την ηλεκτρική ένταση (E) και μαγνητική δύναμη (H). (Philip Kearey, 2002)

Στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους που εξετάζονται υπάρχει το πρωτογενές (Primary) και το δευτερογενές (Secondary) ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα πρωτογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορεί να δημιουργούνται με τη διέλευση εναλλασσόμενου ρεύματος (σχετικά χαμηλής συχνότητας) μέσω ενός μικρού πηνίου αποτελούμενου από πολλές σπείρες σύρματος ή μέσω ενός μεγάλου βρόχου σύρματος. Το πεδίο αυτό ακολουθεί τις εξής τρεις διαδρομές:

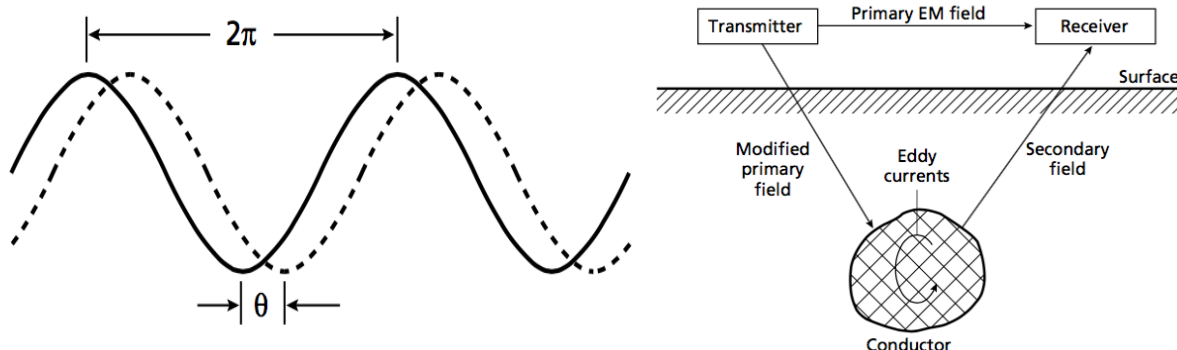


Εικόνα 1.26: Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος Πηγή: (Φυσική (Γενικής Παιδείας) - Βιβλίο Μαθητή)

- Πάνω από το έδαφος από τον πομπό στο δέκτη με τη μόνη διαφοροποίηση να παρατηρείται στη μείωση του πλάτους εξαιτίας της γεωμετρικής διάδοσης
- Εισχώρηση στο έδαφος με αποτέλεσμα τη μείωση του πλάτους αλλά διατήρηση της σε φάσης συνιστώσας με το επιφανειακό
- Εισχώρηση σε υπεδafικό αγωγό με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας εναλλασσόμενης τάσης με ίδια συχνότητα αλλά με καθυστέρηση φάσης κατά $\pi/2$

Η απόκριση του εδάφους είναι η δημιουργία δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα προκύπτοντα πεδία είναι εφικτό να ανιχνευθούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που προκαλούν τη ροή σε ένα πηνίο δέκτη μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Πρόκειται ουσιαστικά για μία ενεργητική μέθοδο που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που παράγεται από επαγωγή λόγω της ροής ρεύματος μέσα στη γη. Στην τεχνική αυτή, ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό

πεδίο παράγεται στην επιφάνεια της γης το οποίο δημιουργεί ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στη γη μέσω επαγωγής. (Philip Kearey, 2002)

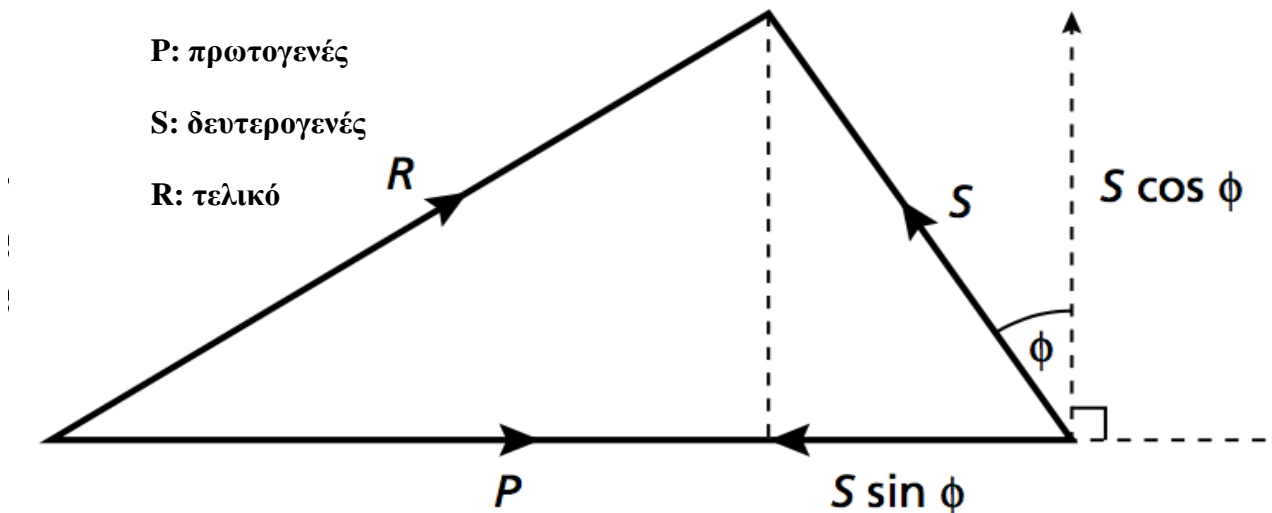


Εικόνα 1.27: α) Διαφορά φάσης θ μεταξύ δύο κυμάτων β) Γενική αρχή ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης
Πηγή: (Philip Kearey, 2002)

Όσον αφορά τα δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία παράγονται κυρίως από σχηματισμούς με μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και ανιχνεύονται από πηνίο-δέκτη. Σε περίπτωση αγώγιμου υπεδάφικου υλικού επάγονται εναλλασσόμενα ρεύματα (Eddy Currents) μέσα στον αγωγό από τη μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Ο συνδυασμός του δευτερογενούς πεδίου που δημιουργείται σε αλληλεπίδραση με το πρωτογενές έχει ως αποτέλεσμα το συνιστάμενο, με διαφορά φάσης θ στο γωνιακό διαχωρισμό των κυματομορφών και διαφορετικό πλάτος (Εικόνα 2.28). Το τελικό πεδίο παρέχει πληροφορίες που αφορούν τη γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού του υπεδάφους.

Οι παραπάνω σχέσεις φάσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μπορούν να ερμηνευτούν και σε διανυσματικά διαγράμματα, όπου παρατηρούνται οι πραγματικές (εντός φάσης) συνιστώσες και οι φανταστικές (εκτός φάσης) συνιστώσες (Εικόνα 2.28). Η γωνία ϕ που μετράται παρουσιάζει τη γωνιακή καθυστέρηση φάσης του δευτερογενούς ύστερα από το πρωτογενές. Για αγώγιμο υλικό το ϕ φτάνει τη τιμή $\pi/2$ ενώ για μη αγώγιμο υλικό είναι σχεδόν 0. Συνεπώς, το δευτερογενές πεδίο που παράγεται έχει μια καθυστέρηση από το πρωτογενές $\pi/2 + \phi$. Το δευτερογενές πεδίο (S) μπορεί να ερμηνευτεί σε δύο συνιστώσες με τη μία συνιστώσα να βρίσκεται εντός φάσης ή πραγματική (R) ενώ η δεύτερη να είναι εκτός φάσης 90° ως προς το πρωτογενές πεδίο ή φανταστική (I). Μεγαλύτερη αναλογία R/I υποδηλώνει και μεγαλύτερο ϕ , δηλαδή πιο αγώγιμο υλικό. Η εκτός φάσης συνιστώσα του δευτερογενούς πεδίου συνδέεται με τη φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα ενώ η σε φάση είναι ευαίσθητη σε μεταβολές της αγωγιμότητας που προκαλούνται από αγώγιμα υλικά όπως μεταλλικά αντικείμενα. Με τον όρο **φαινόμενη αγωγιμότητα** ορίζεται ως η μέση

αγωγιμότητα ενός ή περισσοτέρων στρωμάτων του υπεδάφους με το βάθος διερεύνησης να εξαρτάται από την απόσταση και διάσταση των πηνίων καθώς και την συχνότητα που εκπέμπεται για το πρωτογενές πεδίο και την αγωγιμότητα κάθε στρώματος. (Άκης Τσελέντης) (Αποστολόπουλος, 2013) (Parasnis, 1997)



Εικόνα 1.28: Διανυσματικό διάγραμμα που απεικονίζει τις σχέσεις φάσης και πλάτους μεταξύ πρωτογενούς, δευτερογενούς και τελικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου Πηγή: (Philip Kearey, 2002)

2.2.6 Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο έχει και το βάθος διείσδυσης d (σε m) στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους το οποίο εξαρτάται από:

1. την συχνότητα του πεδίου f (σε Hz) και
2. την ηλεκτρική αγωγιμότητα σ (σε $S \cdot m^{-1}$) του μέσου διάδοσης

Το βάθος διείσδυσης της μεθόδου επαγωγής EM περιορίζεται από την αποτελεσματικότητα της μετατροπής της μεταδιδόμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια των κινητοποιημένων υπεδαφικών φορτίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ και η συχνότητα f , τόσο μεγαλύτερη είναι η αποδοτικότητα και κατά συνέπεια τόσο μικρότερο είναι το βάθος διείσδυσης. Ως βάθος διείσδυσης ή βάθος επιδερμίδας (d) ορίζεται το βάθος στο οποίο το πλάτος του πεδίου A_d μειώνεται κατά παράγοντα e^{-1} (37%) συγκεκριμένο με το πλάτος στην επιφάνεια A_0

$$A_d = A_0 e^{-1} \quad (2.27)$$

$$d = \sqrt{\frac{\omega}{2\sigma\mu}} = 503,8 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} \quad (2.28)$$

όπου $\omega = 2\pi f$: η γωνιακή συχνότητα

μ : η μαγνητική επιδεκτικότητα

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν είναι εφικτό, εφαρμόζοντας μια συγκεκριμένη συχνότητα να καθοριστεί το βάθος διεξαγωγής της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου. (Everett, 2013) Ωστόσο υπάρχουν περιορισμοί στο βάθος διασκόπησης αφού οι πολύ χαμηλές συχνότητες είναι δύσκολο να παραχθούν και στη συνέχεια να μετρηθούν και έτσι το μέγιστο βάθος φθάνει συνήθως τα 500 m. (Αποστολόπουλος, 2013)

Εμπειρικά για να προσεγγιστεί το βάθος z του αγώγιμου σώματος που αναζητείται και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μπορεί να αποδώσει αποτελέσματα είναι:

$$z \approx \frac{d}{5} \approx 100 \sqrt{\frac{1}{\sigma f}} \quad (2.29)$$

(Άκης Τσελέντης)

2.2.7 Συστήματα μέτρησης φάσης

Με την χρήση ενός ηλεκτρομαγνητικού συστήματος έρευνας δύναται να μετρήσει τις σχέσεις φάσης και πλάτους μεταξύ των πρωτογενών, δευτερογενών και τελικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Το εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να παρασταθεί από ένα ημιτονοειδές κύμα μήκους 2π (360ο). Όταν ένα τέτοιο κύμα ακολουθείται από άλλο ημιτονοειδές κύμα, αλλά 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 αναπαριστώνται σε ειδικά διανυσματικά διαγράμματα. Σε αυτά τα διαγράμματα το διανυσματικό μήκος είναι ανάλογο του πλάτους του πεδίου και η γωνία που μετριέται αντίθετα προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού από το πρωτογενές διάνυσμα στο δευτερογενές διάνυσμα, αποτελεί την γωνιακή καθυστέρηση φάσης του δευτερογενούς πεδίου που ακολουθεί το πρωτογενές. Το πρωτογενές πεδίο P οδηγείται άμεσα από τον πομπό στο δέκτη επάνω από το έδαφος και χωρίς τροποποίηση, πέραν 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. Σύμφωνα με τους νόμους της **ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής**, το πρωτογενές πεδίο προκαλεί εναλλασσόμενη τάση ίδιας συχνότητας σε υπεδαφικό αγωγό με καθυστέρηση φάσης $\pi/2$. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης που ισούται με

$$\varphi = \tan^{-1} (2\pi f L r)$$

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

Η προβολή του S στον οριζόντιο (πρωτογενές πεδίο) άξονα είναι $S \sin \varphi$ και είναι σε γωνία π , εκτός φάσης ως προς το P και ονομάζεται **σε φάση συνιστώσα** ή **in-phase** ή **πραγματική συνιστώσα του S** . Η κάθετη προβολή είναι $S \cos \varphi$, $\pi/2$ 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. Η ποιότητα του αγωγού αυξάνει όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία RC/Im . Μερικά συστήματα, κυρίως αερομεταφερόμενα, μετρούν απλά τη γωνία φάσης φ . Στα κλασσικά συστήματα μέτρησης φάσης χρησιμοποιούνται κινούμενοι πομποί και δέκτες και ονομάζονται συστήματα μέτρησης δίδυμου πηνίου (twin-coil) ή slingram συστήματα. Τα πηνία πομπού και δέκτη έχουν διάμετρο 1 m και μεταφέρονται τις περισσότερες φορές οριζόντια, αλλά μπορούν να εφαρμοστούν και διαφορετικοί προσανατολισμοί. Τα πηνία συνδέονται με καλώδιο το οποίο φέρνει ένα σήμα αναφοράς και εξασφαλίζει ότι η απόσταση των πηνίων διατηρείται σταθερή, συνήθως 30-100 m. Η τροφοδοσία του πομπού διενεργείται από μία φορητή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το σήμα εξόδου από το πηνίο δέκτης περνάει από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο μετράει στην αρχή το έδαφος (αγώγιμο σώμα) και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται στο να παράγει μηδενική έξοδο. Έτσι, το πρωταρχικό πεδίο αντισταθμίζεται με σκοπό το σύστημα να αποκρίνεται στη συνέχεια μόνο στα δευτερογενή πεδία. Επομένως, αυτές οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι πραγματοποιούνται για την αποκάλυψη σωμάτων ανώμαλης αγωγιμότητας, χωρίς παροχή πληροφορίας για τις απόλυτες τιμές αγωγιμότητας. Στην περιοχή έρευνας, το δευτερογενές πεδίο χωρίζεται στις πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες που τις περισσότερες φορές παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, το μέγεθος του οποίου αναμεταδίδεται μέσω του διασυνδεδεμένου καλωδίου. Οι τομές μέτρησης εκτελούνται κυρίως κάθετα στις γεωλογικές ασυνεχείς και οι μετρήσεις αντιστοιχούν στην θέση του μεσαίου σημείου του συστήματος. Το μέγιστο βάθος ανίχνευσης ισούται περίπου με 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 παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς ακόμα και ένα μικρό λάθος στην απόσταση μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση της φάσης. Απαιτείται επίσης, τα πηνία να κρατηθούν ακριβώς οριζόντια και στο ίδιο επίπεδο δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Σε μεγάλες αποστάσεις με ανώμαλη τοπογραφία η ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού είναι δύσκολο να διατηρηθεί. (Αποστολόπουλος, 2013)

2.2.8 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μετράται με ενός κινητού συστήματος πομπού – δέκτη, το οποίο λαμβάνει υπόψη την απόσταση μεταξύ των πηνίων s , την συχνότητα λειτουργίας f και την αγωγιμότητα του υπεδάφους σ . Το βάθος διείσδυσης του οργάνου εξαρτάται από την απόσταση των πηνίων, αλλά είναι ανεξάρτητο της κατανομής της αγωγιμότητας του υπεδάφους.

Τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα παρέχουν άμεση ανάγνωση της αγωγιμότητας σε ένα καθορισμένο βάθος στο έδαφος.

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 συνδέεται με GPS ώστε για κάθε θέση μέτρησης να καταγράφονται και οι γεωγραφικές συντεταγμένες. Στην περιοχή έρευνας έγινε χρήση διαφορικού GPS Leica GX 1230 GG RTK Receiver 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 επιμηκώνεται στο διπλάσιο.

2.3 Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR)

Το γεωραντάρ αποτελεί μία μη καταστρεπτική γεωφυσική μέθοδο που πραγματοποιείται σε σχηματισμούς με υψηλή ειδική αντίσταση και είναι βασισμένη στην κατακόρυφη ανάκλαση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (8MHz-4GHz) σε ασυνέχειες μέσω των οποίων η διηλεκτρική σταθερά K (ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει φορτίο όταν βρεθεί σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ δεν παραμένουν σταθερά, αλλά μεταβάλλονται. Παρατίθεται πίνακας τύπων υλικών με τις αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων v , την διηλεκτρική σταθερά K και την ηλεκτρική αγωγιμότητα σ .

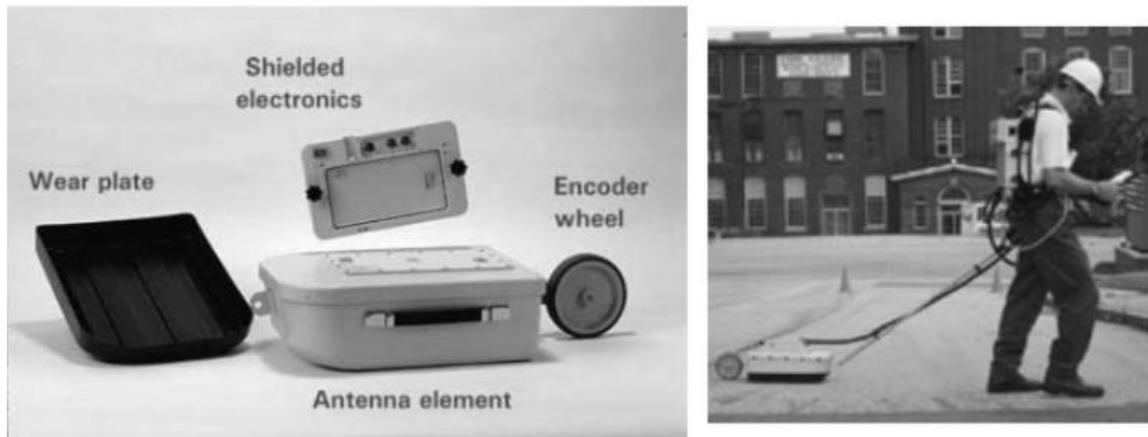
Πίνακας 1.5: Διηλεκτρική σταθερά K , ηλεκτρική αγωγιμότητα σ και ταχύτητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων V για διάφορους τύπους υλικών Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

	K	Σ (mS/m)	V (m/ns)
Αέρας	1	0	0,3
Αποσταγμένο νερό	80	0,01	0,033
Γλυκό νερό	80	0,5	0,033
Θαλασσινό νερό	80	3000	0,01
Ξηρά άμμος	3-5	0,01	0,15
Διαποτισμένη Άμμος	20-30	0,1-1	0,06
Ασβεστόλιθος	4-8	0,5-2	0,12
Σχιστόλιθος	5-15	1-100	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	5-6	0,01-1	0,13
Πάγος	3-4	0,01	0,16

Η μέθοδος του GPR εφαρμόστηκε αρχικά το 1960 και από την δεκαετία του 1980 μέχρι σήμερα εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό σε τεχνικά έργα, διερεύνηση δομών του υπεδάφους σε μικρό βάθος, αρχαιολογικές έρευνες κ.α., με σκοπό την απεικόνιση ανώτερων γεωλογικών στρωμάτων και την εκτίμηση της συνέχειας αυτών στον χώρο ή τον εντοπισμό θαμμένων αντικειμένων (ανακλώμενο σήμα επιστροφής στην περίπτωση κάποιας ασυνέχειας ή λόγω παρουσίας κάποια αντικειμένου). Η ανομοιογένεια του υλικού στο οποίο διαδίδεται η ενέργεια είναι ο κύριος παράγοντας που ελέγχει τον αριθμό των ανακλάσεων που θα ληφθούν.

2.3.1 Βασικά στοιχεία – μέρη συστήματος γεωραντάρ

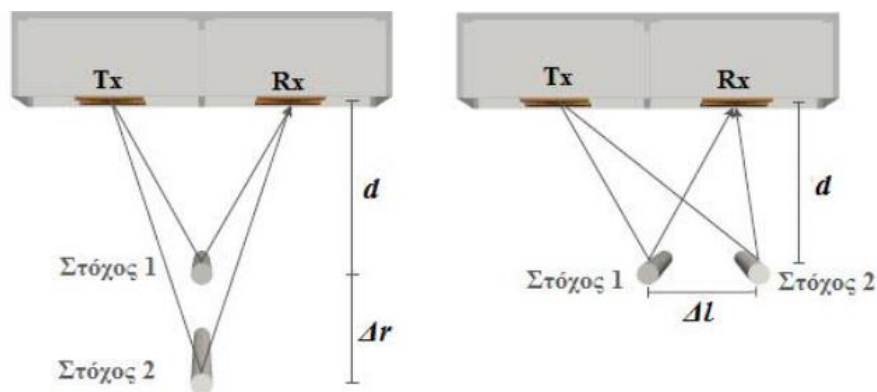
- Πηγή: Ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο έχει την δυνατότητα να καταγράφει και με ελεγχόμενη τρόπο να παράγει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων που απαιτείται για την κάθε διαδικασία μέτρησης.
- Κεραία: Η ανακλώμενη προς την επιφάνεια ενέργεια λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη, η οποία μπορεί να είναι μονοστατική, δηλαδή να χρησιμεύει και ως πομπός και ως δέκτης (σύστημα ανίχνευσης ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και μετασχηματισμός αυτών σε ηλεκτρική τάση η οποία μπορεί να καταγραφεί και να επεξεργαστεί) , ή να υπάρχουν περισσότερες από μια από τις οποίες η μια χρησιμοποιείται σαν πομπός και οι υπόλοιπες σαν δέκτες (διστατικές κεραίες). Η κεραία πομπός (Tx) μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα της πηγής σε ραδιοκύμα το οποίο διεισδύει στο υπέδαφος μέχρι τον στόχο. Το ανακλώμενο σήμα στη συνέχεια ενισχύεται και καταγράφεται από ψηφιακή μονάδα ελέγχου με βάση τον χρόνο διπλής διαδρομής (χρόνος διαδρομής από εκπομπή σήματος μέχρι τον ανακλαστήρα και τον χρόνο επιστροφής στην κεραία λήψης (Rx)). Ο τύπος της κεραίας που επιλέγεται επηρεάζει το βάθος διείσδυσης και την διακριτική ικανότητα. Για μεγαλύτερο βάθος στόχου χρησιμοποιούνται κεραίες χαμηλής συχνότητας (25-200MHz), που όμως προσφέρουν μικρή διακριτική ικανότητα (εντοπισμός γεωλογικών στρωμάτων, μεγάλων καρστικών χαρακτηριστικών, ρηγμάτων, βαθιά θαμμένων αντικειμένων κ.α.). Το αντίθετο συμβαίνει με κεραίες υψηλότερης συχνότητας (300-1000 MHz), οι οποίες επιτρέπουν καλύτερη διακριτική ικανότητα, αλλά λαμβάνουν ανακλάσεις από μικρότερα βάθη (εντοπισμός επιφανειακά θαμμένων αντικειμένων, ατσάλινων δοκών, σωλήνων και καλωδίων στο σκυρόδεμα κ.α.).



Εικόνα 1.29: Εξοπλισμός υπαίθρου Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)

Το σήμα που εκπέμπεται κατά την διαδικασία μιας μέτρησης με γεωραντάρ μπορεί να φτάσει μέχρι 30m βάθος σε εδάφη που έχουν χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως είναι η ξερή άμμος ή ο γρανίτης, ενώ σε περιπτώσεις υπεδάφους με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (π.χ. αργιλικό έδαφος) το βάθος διασκόπησης μπορεί να φτάσει μέχρι και 1m (ή και λιγότερο). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αγώγιμα υλικά απορροφούν και στην συνέχεια εξασθενούν την ενέργεια του κύματος.

Το γεωραντάρ μετακινείται από την μία θέση μέτρησης στην επόμενη χειροκίνητα με την βοήθεια ράβδου μεταφοράς ή με την χρήση οχήματος το οποίο κινείται με σταθερή ταχύτητα καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων. Οι γραμμές διασκόπησης πρέπει να διαπερνούν όσο το δυνατόν κάθετα προς την πλευρά μεγαλύτερης διάστασης του εκάστοτε ερευνοούμενου στόχου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των γραμμών που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η μέτρηση. (Ακης Τσελέντης)



Εικόνα 1.30: Κατακόρυφη (αριστερά) και οριζόντια (δεξιά) ανάλυση συστημάτων γεωραντάρ Πηγή: (Μαρία Κουή, 2015)

2.3.2 Μετρήσεις υπαίθρου

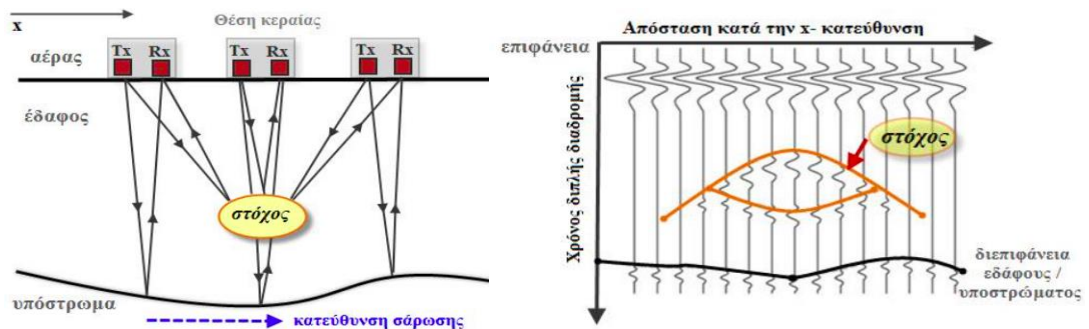
Διάταξη Common – offset

Τυπική διάταξη συστήματος γεωραντάρ κατά την οποία ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται μέσα σε θωρακισμένο κουτί, σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους και συλλέγουν δεδομένα συνεχώς, καθώς μετακινούνται κατά μήκος μιας γραμμής διασκόπησης με σταθερή (κατά το δυνατόρο σε περίπτωση χειροκίνητης μεταφοράς) ταχύτητα. Η ύπαρξη του θωρακισμένου κουτιού έχει σαν αποτέλεσμα την μέγιστη κατευθυντικότητα του σήματος προς το έδαφος και την αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων.

Για την ολοκλήρωση μιας Common – offset διάταξης πρέπει να καθοριστούν οι εξής παράμετροι:

- Συχνότητα λειτουργίας κεραίας (operating frequency), όπου επηρεάζει το βάθος διασκόπησης και τη διακριτική ικανότητα
- Χρονικό παράθυρο (time window), δηλαδή τα χρονικά όρια καταγραφής ενός σήματος. Εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης του κύματος στο υπέδαφος και την ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης
- Χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval), η οποία σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist, δεν είναι δυνατό να ξεπερνάει το μισό της περιόδου T_{\min} που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη συχνότητα f_{\max} του μετρούμενου σήματος.
- Απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (spatial sampling interval) και της πυκνότητας σαρώσεων που είναι συνδεδεμένος με την συχνότητα λειτουργίας της κεραίας
- Θέση και πυκνότητα γραμμών διασκόπησης – line location and spacing

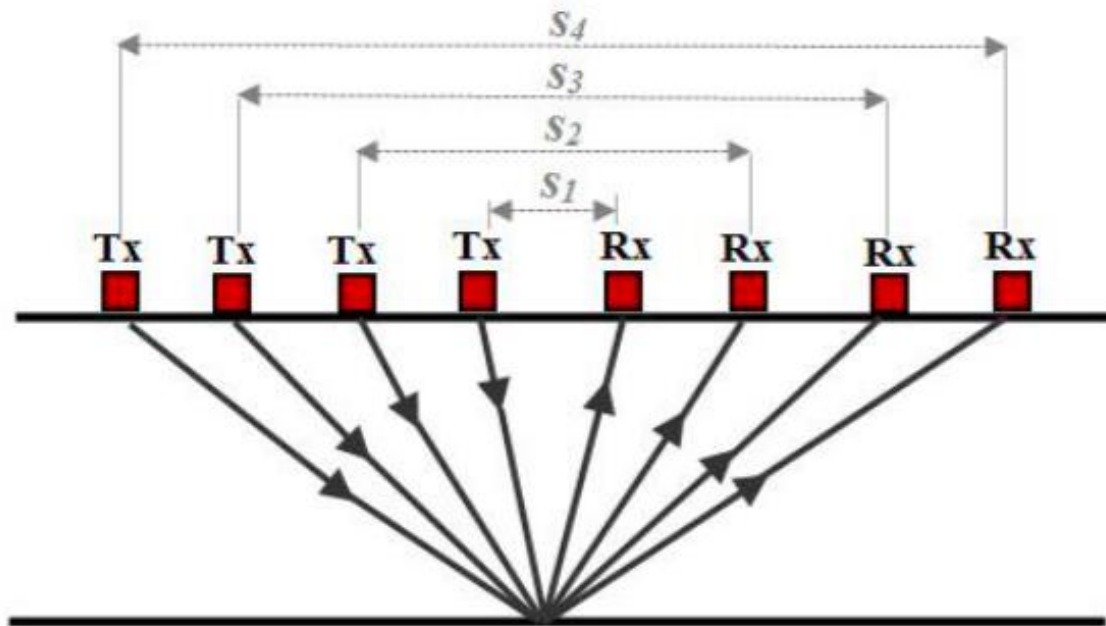
(Μαρία Κουή, 2015)



Εικόνα 1.31: α) Σχηματική αναπαράσταση της Common Offset διάταξης λειτουργίας β) διάγραμμα καταγραφής ανακλώμενου σήματος σε δισδιάστατη μορφή Πηγή: (Μαρία Κουή, 2015)

Μέθοδος κοινού μεσαίου σημείου *Common – Midpoint*

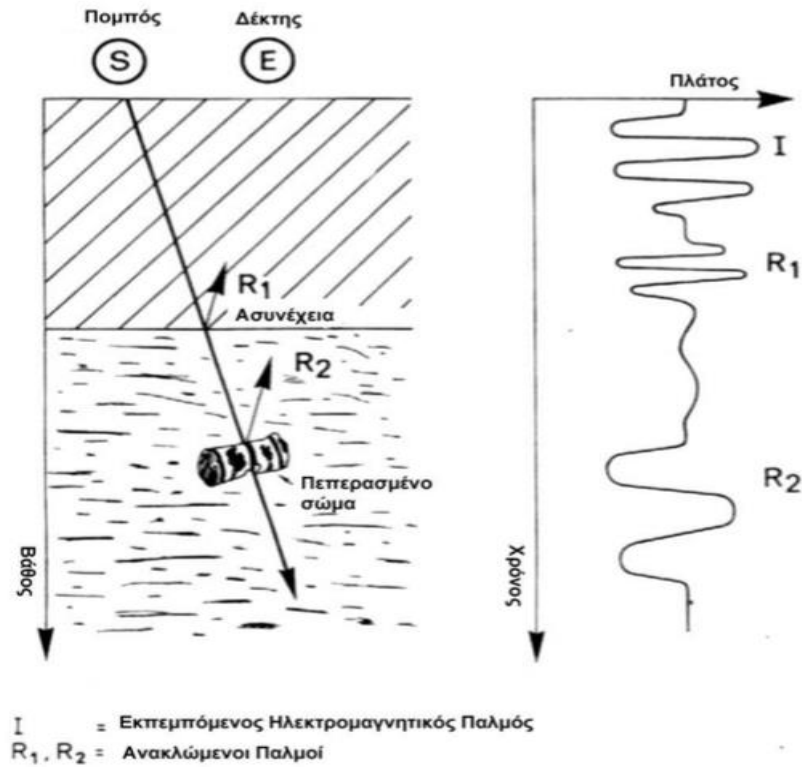
Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης του σήματος του γεωραντάρ ως προς το βάθος με την μέτρηση των μεταβολών του χρόνου από και προς το σημείο ανάκλασης. Κατά την διαδικασία αυτή η απόσταση των κεραιών μεταβάλλεται κατά καθορισμένη απόσταση, ενώ το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό. (Αποστολόπουλος, 2013)



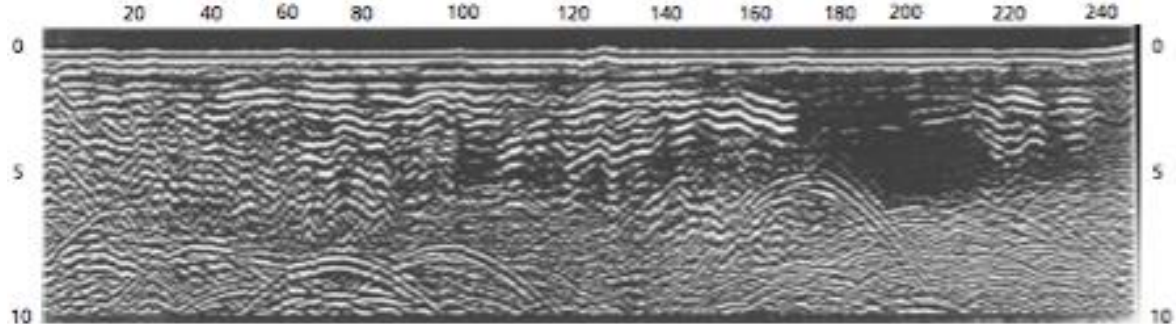
Εικόνα 1.32: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του κοινού μεσαίου σημείου CMP (Common-Midpoint)
Πηγή: (Μαρία Κουή, 2015)

2.3.3 Απεικόνιση ραδιογραμμμάτων και επεξεργασία τους

Η οπτική απεικόνιση των δεδομένων που λαμβάνονται κατά την διάρκεια μιας μέτρησης γεωραντάρ είναι η απεικόνιση του πλάτους των σημάτων που στέλνονται και ανακλώνται ως προς τον χρόνο. Για να είναι δυνατή η ανίχνευση του σήματος που ανακλάται στον στόχο και επιστρέφει στον δέκτη, πρέπει το πλάτος του σήματος αυτού να είναι μεγαλύτερο από τα πλάτη των σημάτων του θορύβου. Τα ραδιογράμματα που αποκτώνται στην ύπαιθρο χρειάζονται ενίσχυση με τον χρόνο και φιλτράρισμα ανάλογα με την συχνότητα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση βαθύτερων οριζόντων ή σωμάτων. (Αποστολόπουλος, 2013)



Εικόνα 1.33: Πλάτος σήματος ως προς το χρόνο Πηγή: (Αποστολόπουλος, 2013)



Εικόνα 1.34: Ραδόγραμμα από ύπαιθρο Πηγή: (Philip Kearey, 2002)

2.3.4 Πλεονεκτήματα της μεθόδου

Ο βέλτιστος τρόπος επίλυσης επιφανειακών γεωτεχνικών ζητημάτων προκύπτει μέσα από την εφαρμογή της μεθόδου του Γεωραντάρ. Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή έναντι των άλλων μεθόδων είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλή ανάλυση
- Άμεση και συνεχής συλλογή δεδομένων
- Μη καταστροφική μέθοδος
- Απεικόνιση σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο επίπεδο

Πριν την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μεθόδου προηγείται ψηφιακή επεξεργασία του σήματος.

2.3.5 Μειονεκτήματα της μεθόδου

Η εφαρμογή της μεθόδου έχει ορισμένους περιορισμούς. Η χρήση του γεωραντάρ δεν ενδείκνυται σε περιοχές όπου υπάρχουν εγκατεστημένοι μεταδότες ραδιοκυμάτων, σε περιοχές με εκτεταμένες μεταλλικές κατασκευές στο υπέδαφος ή στην επιφάνεια και σε περιοχές με υψηλή υγρασία και βρόχινες συνθήκες. Επιπλέον, για να μπορεί να υπάρξει μετρήσιμη ανάκλαση, πρέπει οι διαφορές στις ηλεκτρικές ιδιότητες ανάμεσα στο στόχο και στο μέσο διάδοσης να είναι σημαντικές. (ΑΓΑΜΕΜΝΟΝΟΣ, 2017)

3 Εφαρμογές γεωφυσικών μεθόδων σε παράκτιες περιοχές ανά τον κόσμο

3.1 Εφαρμογή GPR και EM για τον χαρακτηρισμό της στρωματογραφίας του νησιού Padre (Τέξας) κατά μήκος της ακτής του

(Bradley A.Weymer, 2013)

Στο νησί Padre (Padre Island National Seashore – barrier island), απέναντι από την ακτογραμμή της πολιτείας των ΗΠΑ, Τέξας, πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 2010-2011 και 2013 γεωφυσικές έρευνες με σκοπό να προσδιοριστεί χωρικά και χρονικά η στρωματογραφία του νησιού. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του γεωραντάρ (GPR) για να ερευνηθεί η εσωτερική δομή διαφόρων μεγεθών (μικρή, μεσαία, μεγάλη) αμμοθίνων. Στην συνέχεια, έγιναν ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις (EM) για να διερευνηθεί η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην αμμοθίνα μεσαίου μεγέθους, τα δεδομένα των οποίων εξετάστηκαν σε συνδυασμό με τα δεδομένα από τις αρχικές μετρήσεις του GPR αλλά και από τις νέες που πάρθηκαν στο σημείο διεξαγωγής των EM.

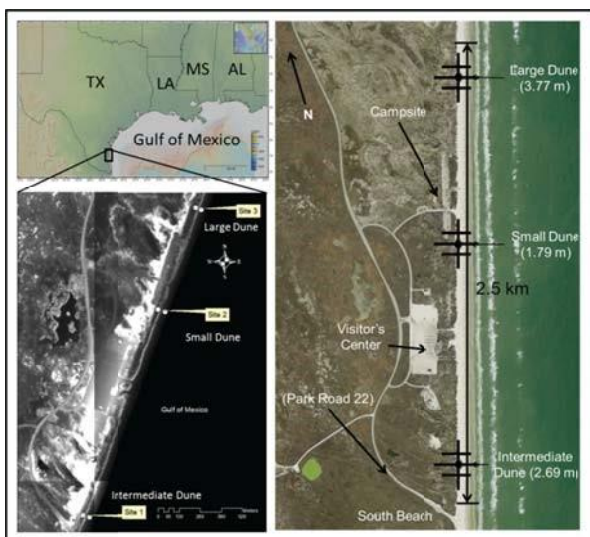
Σήμερα η επέκταση του νησιωτικού φραγμού πραγματοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια ακραίων καταιγίδων οι οποίες μπορούν να διαρρήξουν τους αμμόλοφους και να εναποθέσουν ιζήματα στο οπίσθιο φράγμα. Η πιθανότητα διάρρηξης ή υπερύψωσής τους, μειώνεται καθώς αυξάνεται η στάθμη της θάλασσας. Στις περιοχές με χαμηλού ύψους αμμοθίνες παρατηρείται ότι η ρηγμάτωση και η υπερπλήρωση είναι συνηθέστερες δημιουργώντας το δυναμικό για ταχεία επέκταση ακόμη και υπέρβαση της στάθμης της θάλασσας. Σε μικρά τμήματα της ίδιας παραλίας μπορεί να υπάρξουν σημαντικές διαφορές στο ύψος των αμμοθίνων που οδηγούν σε διαφορετικό ιστορικό στρωματογραφίας κατά μήκος της θάλασσας. Σε περιοχές όπου το ύψος του αμμόλοφου είναι χαμηλό η επέκτασης των αποχετευτικών αγωγών μπορεί να οδηγήσει σε πλευρική διάβρωση της αμμοθίνας, ενώ σε περιοχές όπου οι αμμόλοφοι είναι ψηλοί, μόνο η βάση του αμμόλοφου διαβρώνεται και τα ιζήματα μεταφέρονται προς τη θάλασσα.

Το ποσοστό επέκτασης του νησιού εξαρτάται από το χρόνο ανάκαμψης μεταξύ δύο ακραίων καταιγίδων, καθώς και του ύψους και της έκτασης των αμμοθίνων. Η ανάκτηση του χαμένου – λόγω διάβρωσης – ύψους των αμμόλοφων εξαρτάται από την ικανότητα των ιζημάτων να μεταφερθούν από την παραλία στην αμμοθίνα. Οι διατηρημένες ιζηματογενείς δομές της

παραλίας και του αμμόλοφου μπορεί να προσφέρουν μια παρόμοια χρονολόγηση του τρόπου με τον οποίο οι αμμόλοφοι ανταποκρίνονται και επανέρχονται στην μορφή που είχαν πριν, από ακραίες καταιγίδες και τις συνέπειες για την ανταπόκριση του νησιού σε σχετική αύξηση της στάθμης της θάλασσας.

3.1.1 Γεωραντάρ

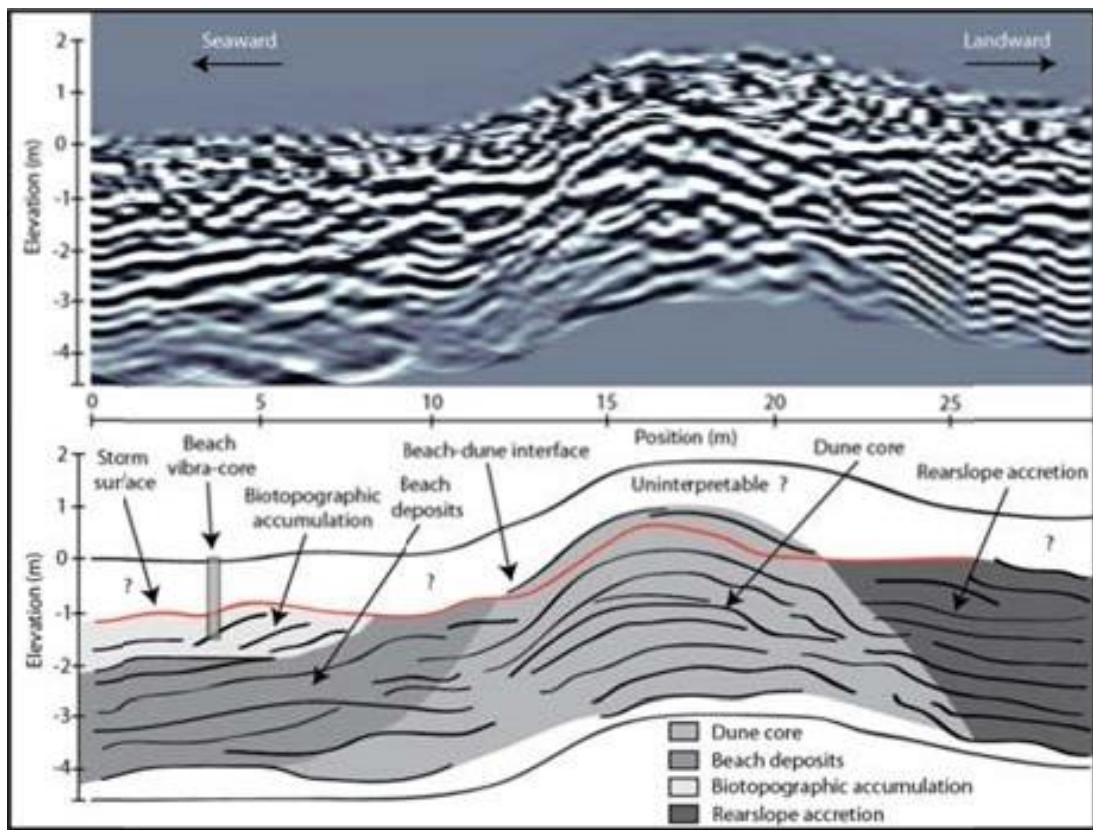
Σειρά από έρευνες GPR διεξήχθησαν για να μελετήσουν διαφορετικές εσωτερικές δομές τριών μορφοδυναμικά διακριτών αμμοθίνων. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από σύστημα αισθητήρων και λογισμικού με κεραία 200 MHz ρυθμισμένη σε standard ευρείας ανάκλασης. Σε κάθε θέση διεξήχθησαν τέσσερις διαδρομές. Μια κύρια και δύο γειτονικές (μια βόρεια και μία προς νότο) που προσανατολίζονται κάθετα στον αμμόλοφο, καθώς και μια παράλληλη κατά μήκος της διεπαφής παραλίας-αμμόλοφου.



Εικόνα 3.1: Περιοχή έρευνας όπου φαίνονται οι αμμοθίνες και οι διαδρομές GPR – Πηγή: (Bradley A.Weymer, 2013)

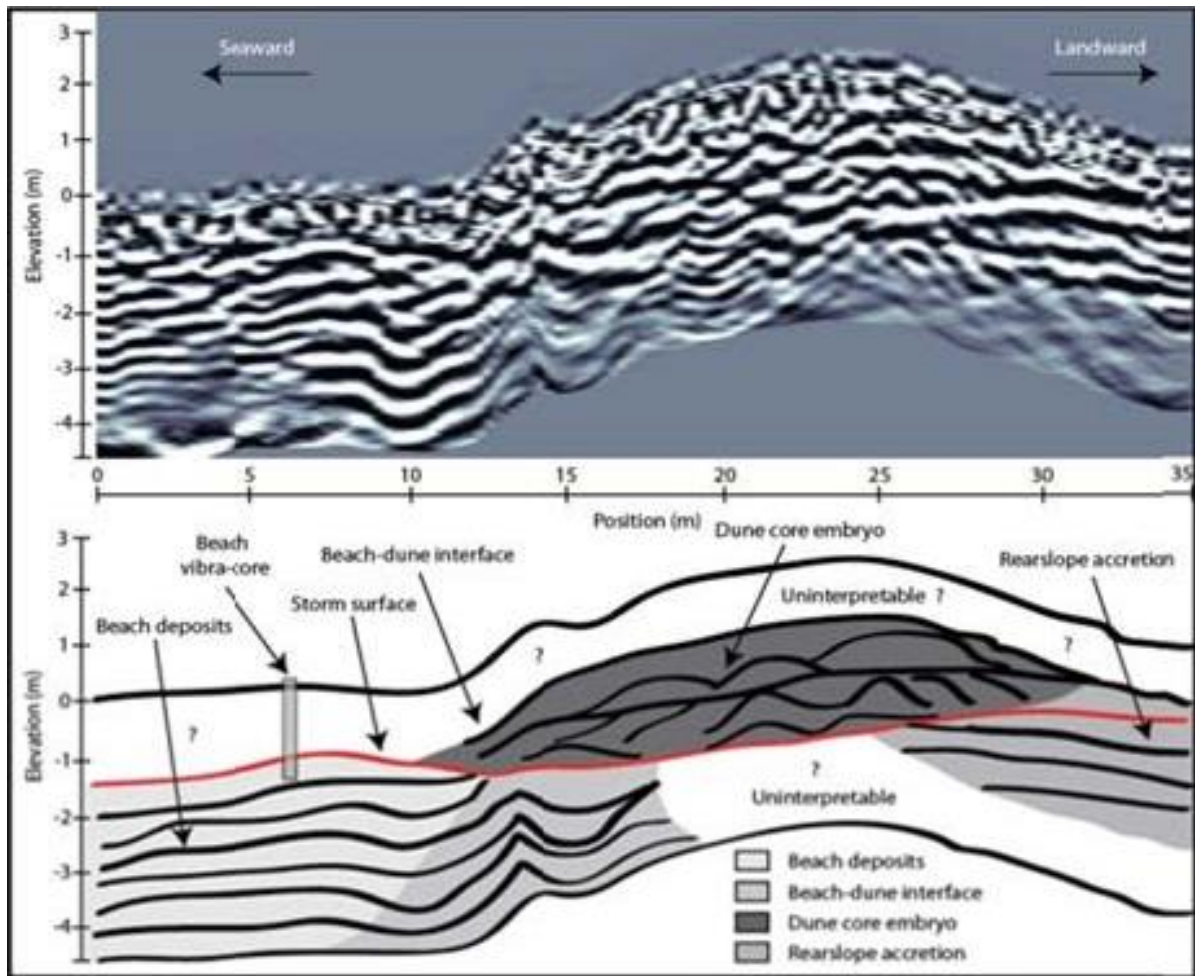
Τα αποτελέσματα από τις έρευνες GPR που πραγματοποιήθηκαν το 2010-2011 υποδηλώνουν ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην εσωτερική δομή κάθε αμμοθίνας. Το κύριο (κεντρικό) GPR προφίλ του μικρού αμμόλοφου αποκάλυψε χαμηλής γωνίας ανακλάσεις βυθιζόμενες προς την μεριά της θάλασσας, οι οποίες εντοπίζονται σε μέγιστο βάθος 3,5 m. Υπάρχει μια μετάβαση από αυτές τις ανακλάσεις στη διεπαφή παραλίας-αμμόλοφου σε ανακλάσεις πιο σταδιακά βυθιζόμενες στο έδαφος, που βρίσκονται στο πίσω μέρος του αμμόλοφου και είναι χαμηλής γωνίας, ελαφρώς βυθισμένες στο έδαφος και στοιβαγμένες. Μέσα στον πυρήνα του αμμόλοφου, οι κοίλες ανακλάσεις περιορίζονται σε πλάτος 10 m, με παρόμοια γεωμετρία να επαναλαμβάνεται στα γειτονικά προφίλ. Φαίνεται

ότι υπάρχει μια γενική έλλειψη δομής πιο κοντά στην επιφάνεια, αν και μικρές ανακλάσεις είναι εμφανείς σε όλο το μήκος του προφίλ που δίνει το γεωραντάρ. Με την κόκκινη γραμμή (Εικόνα 3,2) παρουσιάζεται η επιφάνεια της αμμοθίνας μετά την καταιγίδα και παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν έμβρυα νέων πυρήνων αμμοθίνων, αλλά μόνο ο αρχικός πυρήνας.



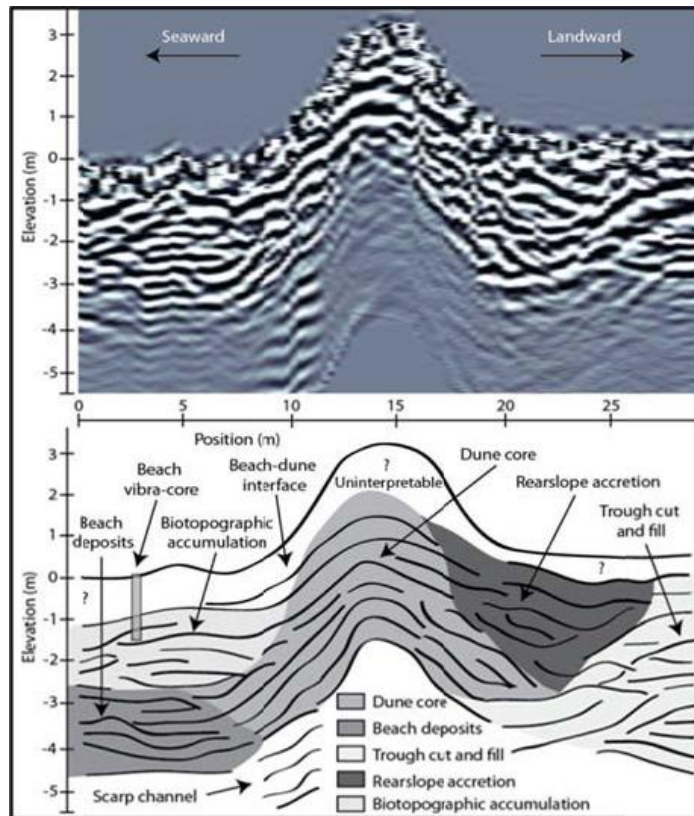
Εικόνα 3.2: GPR προφίλ μικρής αμμοθίνας – Πηγή: (Bradley A.Weymer, 2013)

Το προφίλ GPR για του ενδιάμεσου ύψους αμμόλοφο αποκαλύπτει υπο-οριζόντιες κρυμμένες, απαλά βυθιζόμενες προς την θάλασσα ανακλάσεις, που παραμένουν σε μέγιστο βάθος 4 m. Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό που εκτείνεται σε ολόκληρο το προφίλ είναι η φωτεινή, σχεδόν οριζόντια ανάκλαση σε βάθος 1,2 m που οριοθετείται από άλλες μικρές, χαμηλού πλάτους, ασυνεχείς κυρτές κυματοειδείς ανακλάσεις. Η ανάκλαση αυτή αποτελεί την επιφάνεια μετά την καταιγίδα (κόκκινη γραμμή). Η διεπαφή παραλία-αμμόλοφου βρίσκεται στα 11 m και φαίνεται σαν μια αιχμή στη βάση της αμμοθίνας. Στην πλευρά προς τη θάλασσα, υπάρχουν ασυνεχείς σχεδόν οριζόντιες ανακλάσεις που συνεχίζουν μέσα στον αμμόλοφο. Κατά μήκος της χερσαίας πλευράς της κορυφογραμμής υπάρχουν σχεδόν οριζόντιες ανακλάσεις προς την ξηρά που συνεχίζουν μέχρι το τέλος της διαδρομής. Πάνω από την κόκκινη γραμμή εντοπίζονται έμβρυα νέων πυρήνων αμμοθίνων (15 – 30 m).



Εικόνα 3.3: GPR προφίλ μεσαίας αμμοθίνας – Πηγή: (Bradley A.Weymer, 2013)

Τα πιο σημαντικά στοιχεία που προκύπτουν από τα προφίλ GPR στην μεγάλη αμμοθίνα είναι πακέτα συνεχών ανακλάσεων που εκτείνονται σε 7-12 m κατά μήκος του κύριου προφίλ. Αυτές οι ανακλάσεις εκτείνονται σε βάθος περίπου 7 m κάτω από την επιφάνεια και εντοπίζονται στη διεπαφή παραλίας-αμμοθίνας. Το κύριο προφίλ GPR απαρτίζεται από σχεδόν οριζόντιες ανακλάσεις βυθιζόμενες προς την θάλασσα, που εκτείνονται από βάθος 1,5 έως 5 m και καλύπτονται από αντανακλάσεις μεγαλύτερης γωνίας μεταξύ βάθους 0,5-1,5 m. Στη βάση του αμμόλοφου, υπάρχουν ασυνεχείς, κυρτές ανακλάσεις χαμηλότερου πλάτους, οι οποίες μεταβαίνουν σε μεγάλης γωνίας (9-12 m) πηγαίνοντας από τη βάση του αμμόλοφου προς την κορυφή του. Στην κορυφή της αμμοθίνας οι ανακλάσεις είναι σχεδόν οριζόντιες (12-16 m) και αρχίζουν να βυθίζονται προς το έδαφος στο πίσω μέρος (16-20 m).



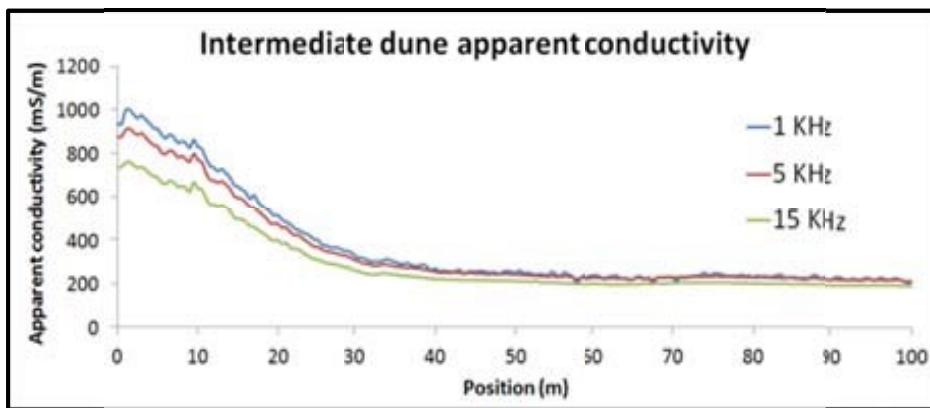
Εικόνα 3.4: GPR προφίλ μεγάλης αμμοθίνας – Πηγή: (Bradley A.Weymer, 2013)

3.1.2 Ηλεκτρομαγνητικά

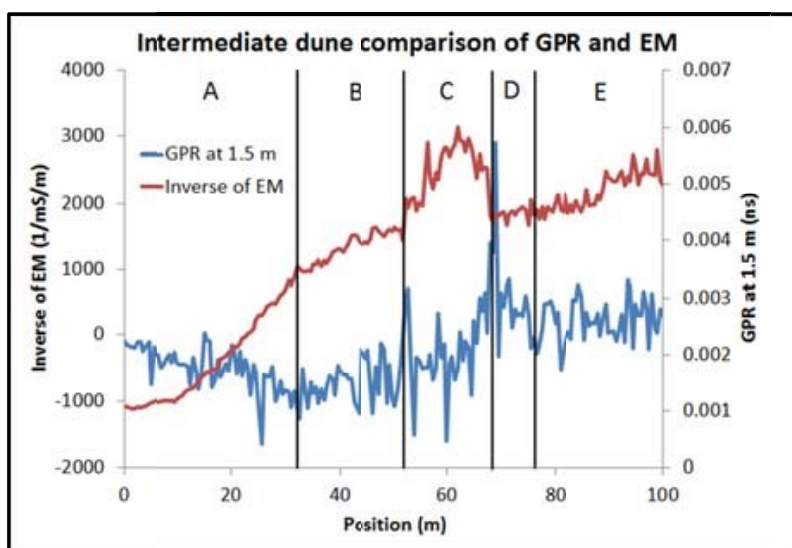
Τον Μάιο του 2013 συλλέχθηκαν δύο προφίλ EM σε ολόκληρο τον αμμόλοφο μεσαίου μεγέθους για σύγκριση με τα προφίλ GPR που συλλέχθηκαν το 2010-2011 και το 2013. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το GSSI EMP-400 EM Profiler με βήμα 0,5 m. Η διαδρομή που ακολουθήθηκε ήταν κάθετη προς την αμμοθίνα. Για κάθε έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις συχνότητες: 1 kHz, 5 kHz και 15 kHz. Τα δεδομένα αποθηκεύονται με χρονική ένδειξη, καθώς καταγράφονται επίσης και δεδομένα GPS για κάθε μέτρηση.

Τα αποτελέσματα από το EM προφίλ δείχνουν ότι το περιβάλλον κοντά στην θάλασσα είναι πολύ αγώγιμο με φαινόμενη αγωγιμότητα που κυμαίνεται μεταξύ 700-1000 mS / m ενώ προς τον αμμόλοφο, η φαινομενική αγωγιμότητα μειώνεται στα 200 mS / m. Τα βάθη διασκόπησης για κάθε συχνότητα είναι 16 m, 8 m και 5 m για 1 kHz, 5 kHz και 15 kHz, αντίστοιχα. Η σύγκριση των προφίλ αγωγιμότητας σε κάθε συχνότητα δείχνει ότι η φαινόμενη αγωγιμότητα αυξάνεται με το βάθος διεύθυνσης, αφού οι υψηλότερες τιμές μετρούνται στη χαμηλότερη συχνότητα, 1 kHz.

Μια σύγκριση μεταξύ των GPR και του αντίστροφου των δεδομένων EM παρουσιάζεται στην εικόνα 3.6. Λαμβάνοντας το αντίστροφο των δεδομένων EM, μπορούν να φανούν σημεία καμπής που επιτρέπουν τον εντοπισμό των κύριων χαρακτηριστικών του συστήματος παραλίας-αμμόλοφων. Με βάση τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από τα προφίλ του γεωραντάρ, οι γνωστές μεταβάσεις ανάμεσα στο περιβάλλον παραλίας-αμμόλοφους ταυτίζονται με τα μέγιστα και τα ελάχιστα σημεία στην αντίστροφη καμπύλη EM. Για παράδειγμα, το πρώτο σημείο κλίσης αντιστοιχεί στο παραθαλάσσιο περιβάλλον (A), ενώ το δεύτερο αντιστοιχεί στην υπεράκτια (B) κ.ο.κ. Εάν οι γνωστές μεταβάσεις είναι ορατές μέσα από τα δεδομένα του EM, τότε αποδεικνύεται ότι θα μπορεί να χρησιμοποιηθούν EM στο μέλλον για τη διεξαγωγή ευρείας κλίμακας ερευνών για παρόμοιες περιπτώσεις εντοπισμού δομών.



Εικόνα 3.5: EM προφίλ της μεσαίας αμμοθίνης που δείχνει την φαινόμενη αγωγιμότητα για κάθε μια χρησιμοποιούμενη συχνότητα – Πηγή: (Bradley A.Weymer, 2013)



Εικόνα 3.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων EM και GPR – Πηγή: (Bradley A.Weymer, 2013)

3.1.3 Συμπεράσματα

Ένας συνδυασμός δεδομένων GPR και EM χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη για να χαρακτηρίσει τις διαφορές στην υπο-επιφανειακή στρωματογραφία σε τρεις διαφορετικές αμμοθίνες. Τα στοιχεία δείχνουν ότι ακόμη και κατά μήκος μιας μικρής έκτασης της παραλίας, οι λεπτές διακυμάνσεις στο ύψος και την έκταση των αμμόλοφων θα επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο οι μηχανισμοί απόκρισης και ανάκτησης των παραλιών και των αμμοθίνων αντιδρούν στις ακραίες καταιγίδες και την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Έτσι, το ιστορικό της στρωματογραφίας σε κάθε τοποθεσία είναι θεμελιωδώς διαφορετικό. Ο μικρότερος αμμόλοφος, κατά τη μετάβαση των καθεστώτων υπερπλήρωσης και πλημμυρών, παρουσίασε ελάχιστη καθαρή διάβρωση κατά τη διάρκεια της καταιγίδας, αλλά παρουσίασε και την ελάχιστη ανάκαμψη. Ο ενδιάμεσος αμμόλοφος φαίνεται να έχει διαβρωθεί εντελώς από τη θύελλα, αλλά έχει επίσης επιδείξει τη μεγαλύτερη ανάκαμψη λόγω της μετανάστευσης των συσσωρευμένων αναχωμάτων από τη μεταφορά με τον αέρα, οδηγώντας στην ανάπτυξη νέων αμμόλοφων για τον σχηματισμό του σύγχρονου πυρήνα του πυθμένα. Ο μεγαλύτερος αμμόλοφος παρουσιάζει μόνο έκπλυση στη βάση του και μικρή ανάκαμψη μετά την καταιγίδα, με εξαίρεση την αποκατάσταση της παραλίας. Οι μηχανισμοί ανάκτησης στο προ-καταιγίδας ύψος της αμμοθίνας εξαρτώνται από την κλίμακα επιπτώσεων της καταιγίδας, καθώς και από το ύψος του αμμόλοφου.

3.2 Γεωφυσικές έρευνες σε παράκτια αρχαιολογικά αξιοθέατα στο Ισραήλ

(Christeen Nahas)

Οι ακτές του Ισραήλ (Μεσόγειος, Θάλασσα της Γαλιλαίας, Νεκρά Θάλασσα και Ερυθρά Θάλασσα) είναι μεγάλου αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, με ευρήματα που χρονολογούνται από την πρώιμη εποχή του Χαλκού, δηλαδή περίπου 4.000 χρόνια πριν από σήμερα. Οι περιοχές όμως που εντοπίζονται αυτά τα ευρήματα, απειλούνται από διάβρωση, η οποία εξελίσσεται περαιτέρω κατά μήκος των ήδη πυκνοκατοικημένων ακτών, από ζημιές λόγω στρατιωτικών ασκήσεων, από βανδαλισμούς κ.α. ανθρώπινες δραστηριότητες. Ο εντοπισμός των αρχαιολογικών θέσεων και η τεκμηρίωσή τους είναι προϋπόθεση για την διατήρησή τους, γι' αυτό και μόλις εντοπισθούν, οι αρχαιολόγοι περιορίζουν την περιοχή και μετά το πέρας της ανασκαφής συχνά οι τοποθεσίες αυτές ξαναθάπτονται.

Τον Ιούλιο του 2005 πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες σε 4 αρχαιολογικές θέσεις ιστορικά συνδεδεμένες με τις ακτές, στην Υαννε, το Υαννε Yam, το Tel Nami (δεν υπάρχουν επεξεργασμένα στοιχεία από την έρευνα) και στην Bethsaida.

3.2.1 Υαννε

Το Tel Υαννε είναι ένα μεγάλο αρχαίο ανάχωμα που βρίσκεται 20 km νότια του Τελ Αβίβ, έχει έκταση 4 εκτάρια (0.04 km²) και υψώνεται περίπου 30 m πάνω από την πλημμυρική πεδιάδα του ποταμού Soreq. Στην περιοχή αυτή έχουν εντοπιστεί κομμάτια από πήλινα αγγεία από το 1200 π.Χ. Το Tel Υαννε βρίσκεται πάνω στο «δρόμο της θάλασσας» (Via Maris), μια αρχαία οδό που συνέδεε την Αίγυπτο και την Ανατολία μέσω της Παλαιστίνης και της Εύφορης Ημισελήνου.

Η μεγάλη έκταση της αρχαιολογικής περιοχής, καθώς και η μεγάλη ιστορική της σημασία οδήγησε στην ανάγκη για περεταίρω διερεύνησής της και έτσι τον Ιούλιο του 2003 πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT), καθώς και φωτογράφιση σε μια προσπάθεια να περιγραφεί η κάτοψη και η κάθετη έκταση των συσσωρευμένων πολιτιστικών υπολειμμάτων και να εντοπιστούν αρχικές διαγνωστικές αρχαιολογικές ανασκαφές. Τον Ιούλιο του 2005, διεξήχθησαν συμπληρωματικές έρευνες ERT καθώς και εναέρια φωτογράφιση μεγάλου μεγέθους.

Το ανάχωμα βρίσκεται κάτω από λιθογραφικά ιζήματα της ομάδας των Kurkar, η οποία περιγράφει παράκτια ιζήματα από το Πλειόκαινο μέχρι την σύγχρονη περίοδο και περιέχει

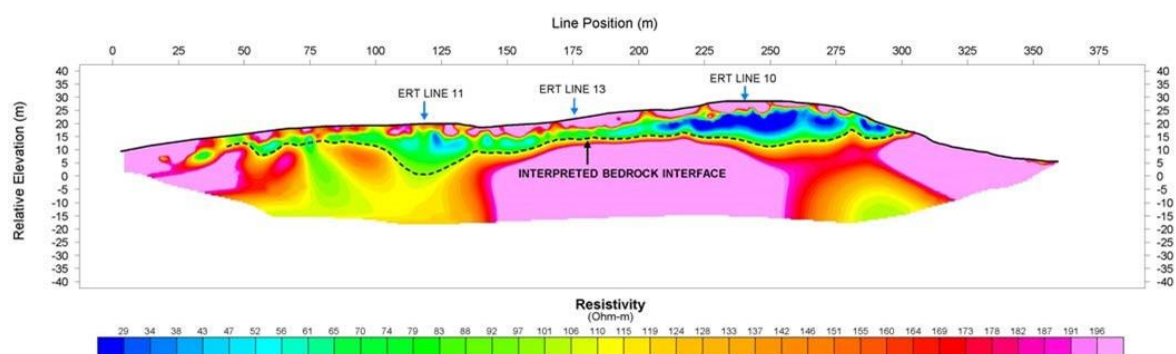
σημαντικές ποσότητες χαλαζιακής άμμου που έχει εναποτεθεί εκεί μεταφερόμενη μέσω αέρα από το δέλτα του Νείλου.

Το 2003 πραγματοποιήθηκαν 8 γραμμές ERT με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε απόσταση τουλάχιστον 1 m και διάταξη 2-D με μέγιστο βάθος διασκόπησης τα 12 m. Η ηλεκτρική απεικόνιση ήταν εν μέρει πετυχημένη στο Υανπε όσον αφορά

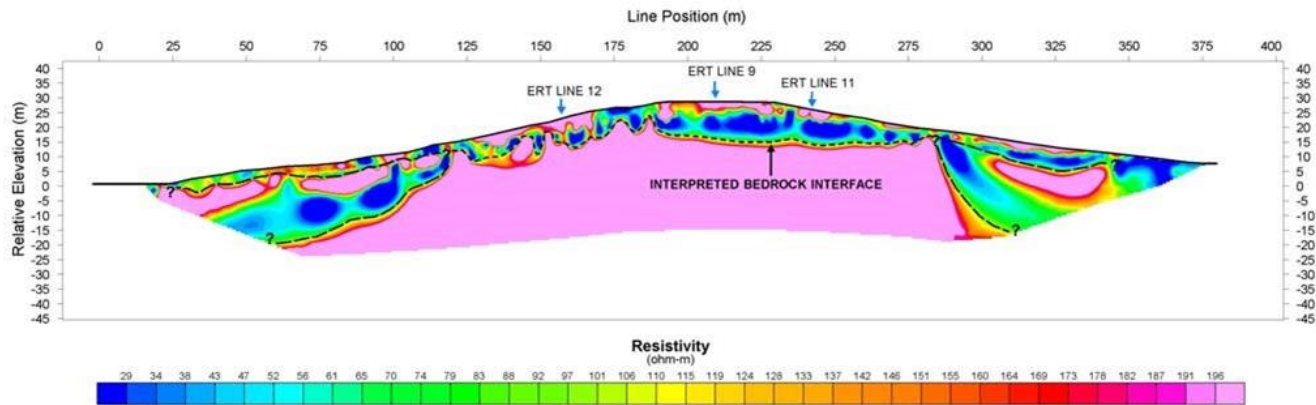
- την προσδιορισμό του πάχους των αρχαιολογικών συντριμμιών
- το μέγεθος
- την έκτασή τους και
- το υποκείμενο υπόβαθρο.

Ωστόσο, το βάθος διασκόπησης ήταν ανεπαρκές για να μπορέσει να δώσει εικόνα για το υπόβαθρο στο υψηλότερο σημείο του λόφου, αλλά και σε ορισμένες θέσεις κατά μήκος της πλαγιάς.

Το 2005 πραγματοποιήθηκαν 5 γραμμές ERT. Η ηλεκτρική τομογραφία της γραμμής 9 επιβεβαίωσε ότι η συσσώρευση των αρχαιολογικών συντριμμάτων υπερβαίνει τα 10 m πάνω από τα ανώτερα τμήματα του αναχώματος, ενώ της γραμμής 10 επιβεβαιώνει το έντονο ανάγλυφο στην τοπογραφία του βραχώδους υποβάθρου. Αποκολλήσεις, όπως αυτές που παρατηρήθηκαν στα 280 m, παρατηρούνται συνήθως σε υπάρχοντα απομεινάρια του ψαμμίτη Kurkar. Δειγματοληψία σε βάθος περίπου 4 m κοντά στην κορυφή του αναχώματος έδειξε όχι καλά καθορισμένη στρωματογραφία. Σε αυτό το βάθος όμως, βρέθηκαν αρχαιολογικά ευρήματα που μαρτυρούν την εποχή κατοίκησης και άνθισης της περιοχής.



Εικόνα 3.7: ERT γραμμής 9 - Πηγή: (Christeen Nahas)



Εικόνα 3.8: ERT γραμμής 10 - Πηγή: (Christeen Nahas)

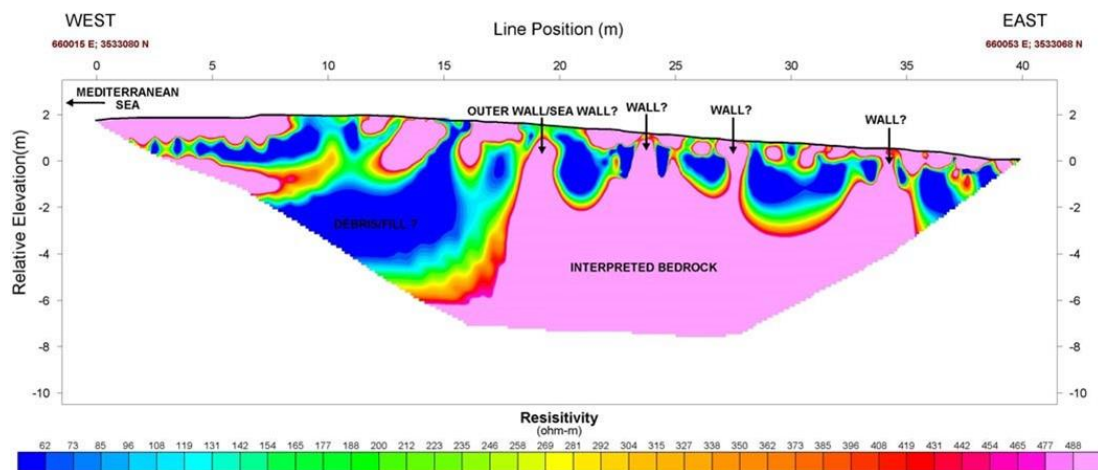
3.2.2 Yavne Yam

Το Yavne Yam βρίσκεται στη Μεσόγειο Θάλασσα, περίπου 14 km από το Yavne και υπάρχουν ενδείξεις πως κατοικείται από την Μέση εποχή του Χαλκού μέχρι και τον μεσαίωνα. Οι ύφαλοι που σχηματίζονται από ψαμμίτες της ομάδας Kurkar δημιουργούν ένα φυσικό λιμάνι, αρκετά προστατευμένο, που έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ιστορία της περιοχής.

Μία γραμμή ERT μήκους 40 m, με ελάχιστη απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων τα 0.5 m και με μέγιστο βάθος διασκόπησης τα 6 m συλλέχθηκε κατά μήκος μιας χερσονήσου από άμμο, όπως φαίνεται στην αεροφωτογραφία. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σειρά από κάθετα στοιχεία, τα οποία υποδηλώνουν τοίχους. Για την λεπτομερή περιγραφή αυτών των τειχών πραγματοποιήθηκε έρευνα με γεωραντάρ GPR.



Εικόνα 3.9: Αεροφωτογραφία που φαίνονται οι μετρήσεις ERT - Πηγή: (Christeen Nahas)



Εικόνα 3.10: Προφίλ ERT- Πηγή: (Christeen Nahas)

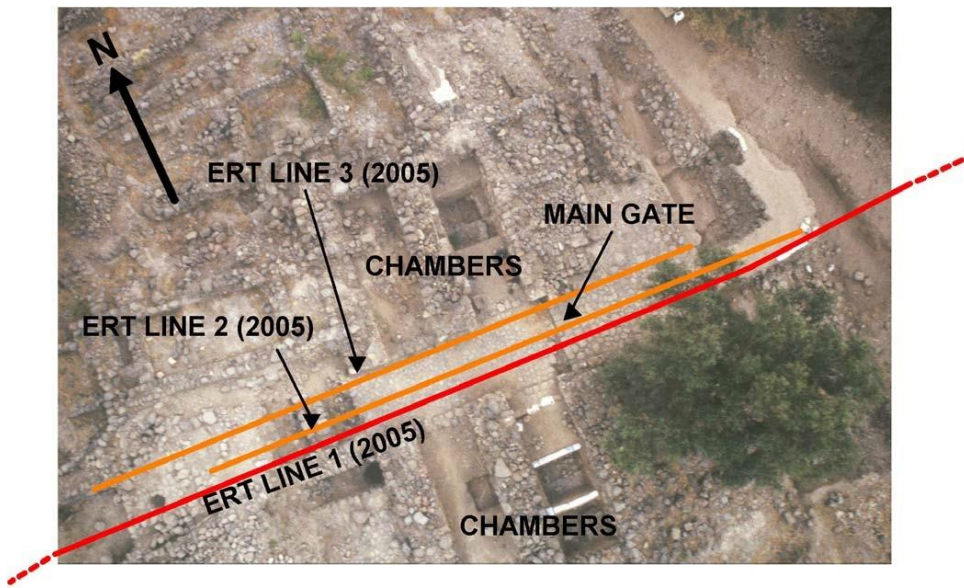
3.2.3 Bethsaida

Η Bethsaida βρίσκεται στον Ιορδάνη ποταμό περίπου 3 km από την συμβολή του Ιορδάνη και της θάλασσας της Γαλιλαίας. Όλα τα αρχαιολογικά – αρχιτεκτονικά ευρήματα (9^ο ίσως και 10^ο αι. π.Χ.) έχουν κατασκευαστεί από βασάλτη διαφόρων μεγεθών. Ο λόφος είναι χτισμένος πάνω σε λάβα από το βουνό Γκολάν.

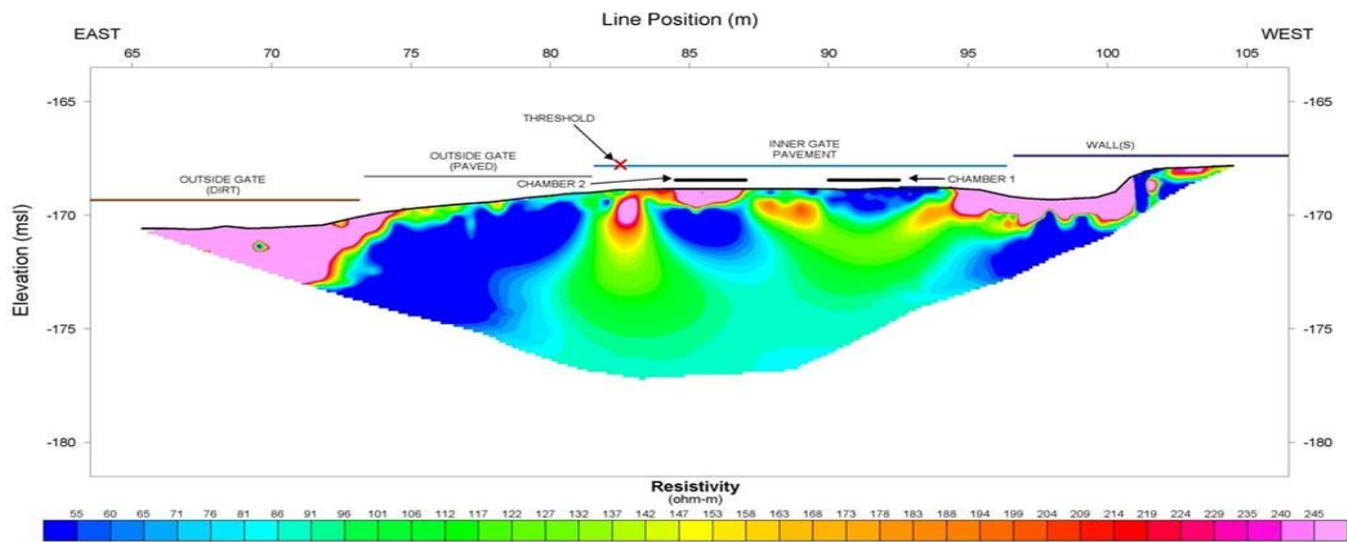
Ανασκαφές έφεραν στο φως μια τετράκλινη εντυπωσιακή πύλη στην είσοδο της πόλης, με 8 πύργους των 10 m και ένα τείχος πλάτους 6 m από βασάλτη, που υποδηλώνει το μεγαλείο της πόλης κατά τον 9^ο – 10^ο αι π.Χ. και την ιστορική της σημασία. Θεμελιώδες ερώτημα για τους αρχαιολόγους είναι αν υπάρχει ή όχι ένα άλλο σύστημα εισόδου κάτω από αυτό του 9^{ου} αι π.Χ. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες (ERT) που απλώθηκαν στο μέσο της τετράκλινης πύλης. Σε κάθε μια από τις γραμμές ERT παρατηρούνται δομές με μεγάλες τιμές ηλεκτρική αντίστασης γύρω από τους θαλάμους, που μπορεί να είναι οι τοίχοι από βασάλτη οι οποίοι ορίζουν μια πύλη με 4 θαλάμους του 10^{ου} αι π.Χ. που βρίσκονται κάτω από την πύλη του 9^{ου} αι. π.Χ.



Εικόνα 3.11: Αεροφωτογραφία της περιοχής - Πηγή: (Christeen Nahas)



Εικόνα 3.12: Αεροφωτογραφία που φαίνονται οι μετρήσεις ERT - Πηγή: (Christeen Nahas)



Εικόνα 3.13: ERT γραμμή 2 - Πηγή: (Christeen Nahas)

3.3 Γεωφυσικές έρευνες στο ποτάμιο λιμάνι της Όστιας

(Tina Wunderlich, 2017)

Η αρχαία πόλη της Όστιας βρίσκεται στην εκβολή του ποταμού Τίβερη και τον 2^ο αι μ.Χ. αποτελούσε το μεγαλύτερο κέντρο διανομής και εμπορίου στην Μεσόγειο. Η κεντρική αστική περιοχή της αρχαίας Όστιας έχει ερευνηθεί εκτενώς και έχουν ανασκαφεί μεγάλα τμήματα, ενώ η υποτιθέμενη περιοχή του λιμανιού στα δυτικά του αρχαιολογικού χώρου έχει μελετηθεί σε μικρότερο βαθμό. Στο λιμάνι της αρχαίας Όστιας της Ιταλίας πραγματοποιήθηκε μια συνδυασμένη γεωφυσική και γεωαρχαιολογική μελέτη με σκοπό:

- τον προσδιορισμό της έκτασης της λεκάνης του λιμανιού
- τον προσδιορισμό της στρωματογραφίας της ιζηματογενούς πλήρωσης του λιμανιού
- του βάθους της λεκάνης και
- την αναζήτηση ανθρωπογενούς δραστηριότητας (υπολειμμάτων λιμενικών κατασκευών) γύρω από τη λεκάνη αυτή.

Οι εφαρμοζόμενες γεωφυσικές μέθοδοι ήταν η ηλεκτρική τομογραφία (ERT), το γεωραντάρ (GPR) και η σεισμική με κύματα S και P. Η έκταση και το σχήμα της λεκάνης του λιμανιού προσδιορίστηκαν από τις μετρήσεις ERT, οι οποίες σε 3D απεικόνιση έδειξαν ότι η πρόιμη λεκάνη της λιμνοθάλασσας του λιμανιού είχε διαστάσεις τουλάχιστον 100 m x 50 m. Τα νότια σύνορά της επιβεβαιώθηκαν με μετρήσεις GPR που απεικονίζουν με σαφήνεια την πρώην μετάβαση εδάφους – νερού και την αρχή της αρχαίας χερσαίας οικοδομικής κατασκευής. Στα ανατολικά της σύνορα εντοπίστηκε ομαδοποιημένος ορίζοντας σε βάθος 2-3 m από ανάλυση των σεισμικών κυμάτων P, ο οποίος πιθανότατα αντιπροσωπεύει μια τσιμεντοειδή ράμπα, ένα μικρό μέρος του οποίου είχε ανακαλυφθεί σε προηγούμενη μελέτη. Η ιζηματογενής πλήρωση της πρόιμης λεκάνης διερευνήθηκε με ένα συνδυασμό vibrocoring (γεωτρήσεων), ERT και σεισμικών.

Τα προφίλ της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση της στρωματογραφίας, καθώς έδωσαν εικόνα του υπεδάφους μεταξύ των θέσεων που υπήρχαν δείγματα από γεωτρήσεις (vibrocore) τα οποία δίνουν με ακρίβεια τη στρωματογραφία. Αποδείχθηκε ότι μια ιζηματογενής στρώση, η οποία είναι σημαντική για την ανάπτυξη του λιμανιού, δεν θα μπορούσε να εντοπιστεί από τα ERT αλλά ανιχνεύεται ξεκάθαρα στα προφίλ σεισμικής ταχύτητας σε συνάρτηση με το βάθος. Πρόκειται για ένα λεπτό χονδρόκοκκο στρώμα υψηλής ενέργειας σε βάθος 1-2 m, το οποίο προκλήθηκε από τσουνάμι σύμφωνα με προηγούμενη μελέτη. Αυτό το στρώμα διαχωρίζει δύο φάσεις του

λιμανιού: από κάτω μια παλαιότερη λιμνοθάλασσα λιμενική φάση και μια νεότερη φάση ποτάμιου λιμανιού από πάνω.

3.3.1 Ηλεκτρική τομογραφία

Για την λήψη δεδομένων και την κάλυψη ολόκληρης της περιοχής του λιμανιού πραγματοποιήθηκαν 13 γραμμές ERT με αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων 0.75 m, 1 m και 2 m και διατάξεις ηλεκτροδίων Dipole – Dipole, Wenner και Schlumberger. Η θέση και το ύψος των ηλεκτροδίων μετρήθηκαν από 2 διαφορετικά όργανα. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας οι διαφορετικές διατάξεις των ηλεκτροδίων συνδυάστηκαν και τα ύψη τους (αφού πρώτα συγκρίθηκαν οι μετρήσεις από το κάθε όργανο) εισήχθησαν στα δεδομένα.

Η ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρική αντίσταση του υγρού των πόρων και συνεπώς την αλατότητα του και από τον κορεσμό των πόρων. Για ιζήματα ίσου πορώδους και κορεσμού, εκείνο με υψηλότερη αλατότητα του υγρού των πόρων θα δείξει χαμηλότερη ειδική αντίσταση σε σύγκριση με την χαμηλή αλατότητα. Ένας επιπλέον παράγοντας είναι η περιεκτικότητα σε άργιλο, η οποία έχει επιπρόσθετη επιφανειακή αγωγιμότητα, οδηγώντας σε χαμηλότερη ειδική αντίσταση των ιζημάτων του πηλού.

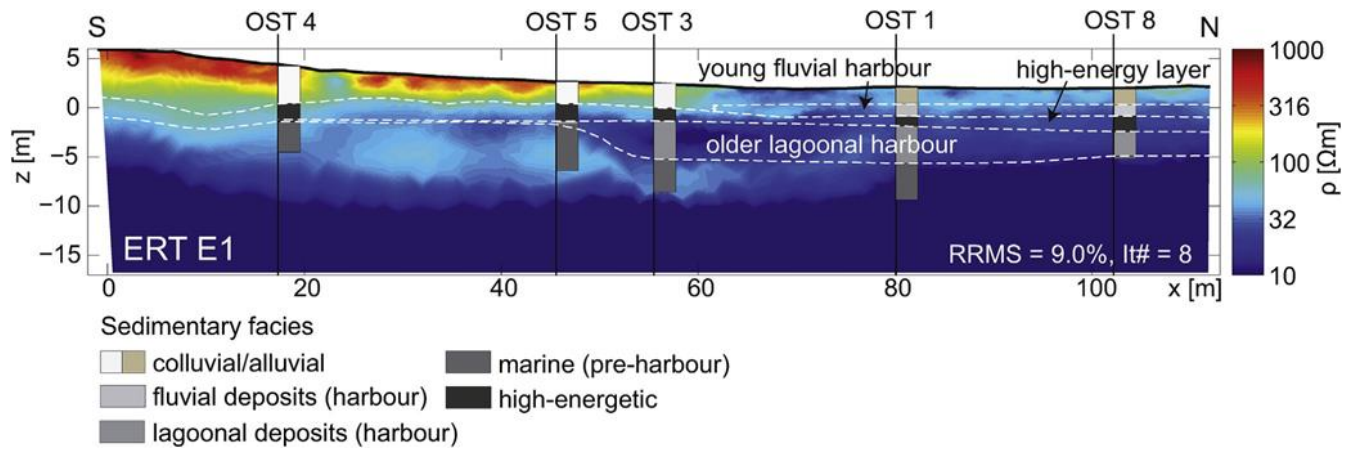
3.3.2 Γεωραντάρ

Οι μετρήσεις GPR εφαρμόστηκαν στην περιοχή γύρω από το λιμάνι για αποτυπώσουν πιθανά απομεινάρια ανθρωπογενούς δραστηριότητας και να εντοπίσουν τα σύνορα της φραγμένης με λάσπη λεκάνης του λιμανιού. Χρησιμοποιήθηκε μια κεραία 200 MHz και μια μονάδα GSSI SIR-3000. Τα προφίλ αποκτήθηκαν κάθε 0,3 m με 100 σαρώσεις / s. Η θέση της κάθε μέτρησης εντοπίστηκε με την τοποθέτηση ενός δείκτη κάθε 1 m κατά μήκος μιας μετρητικής ταινίας και αργότερα με τη μέτρηση DGPS. Τα παράλληλα προφίλ εισήχθησαν σε έναν κύβο δεδομένων 3D και κόπηκαν οριζόντια σε χρονικά φύλλα. Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προσδιορίστηκε με μέτρηση CMP (Κοινή μέση τιμή) και βρέθηκε να είναι 10 cm / ns.

3.3.3 Στρωματογραφία και βάθος της λεκάνης του λιμανιού

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ERT που διασχίζει τη λεκάνη από το νότο προς το βορρά και των γεωτρήσεων μικρού βάθους προκύπτει το συμπέρασμα ότι η υψηλή αντίσταση στην κορυφή του στρώματος ανερχόμενης επιφάνειας αντιστοιχεί σε κολλουβιακά ιζήματα τα οποία μετατρέπονται σε αλλουβιακά ιζήματα χαμηλότερης αντίστασης μεταξύ των γεωτρήσεων OST 3 και OST 1. Οι γεωτρήσεις OST 1 και 8 μαρτυρούν ένα στρώμα εναποθέσεων άμμου σε βάθος 1,7-2,7 m (κάτω από την επιφάνεια), το οποίο είναι πάχους 1 m και αντιστοιχεί σε εναποθέσεις ποταμών. Κάτω από αυτό το στρώμα, το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται σημαντικά και ακολουθούν φάσεις υψηλής ενέργειας σε ολόκληρο το προφίλ περίπου 1 m πάχος (δημιουργήθηκε από τσουνάμι). Στο βόρειο μισό του προφίλ ακολουθεί ένα στρώμα ιζηματογενών (lagoonal sediments follows) αποθέσεων, περίπου 3 m πάχους, το οποίο ερμηνεύεται ως μια παλαιότερης φάση λεκάνης λιμνοθάλασσας με τη βάση της να βρίσκεται σε περίπου 7,6 m βάθος από την επιφάνεια. Η λεκάνη απορροής της λιμνοθάλασσας ήταν μεγαλύτερη από του νεότερου ποτάμιου λιμανιού και εκτείνεται προς τα νότια περίπου μέχρι την OST 5.

Στο νότιο τμήμα του προφίλ, η διασύνδεση μεταξύ κολλουβιακού στρώματος και ζώνης υψηλής ενέργειας μπορεί να εντοπιστεί στην ERT με μια ισχυρή μείωση της αντίστασης (από > 300 Ωm έως <100 Ωm). Η αλλουβιακή κάλυψη στην κορυφή των ιζημάτων του ποτάμιου λιμανιού χαρακτηρίζεται από ελαφρώς υψηλότερη ειδική αντίσταση, αλλά δεν μπορεί να διακριθεί μια σαφής διεπαφή. Τα όρια από το λιμάνι – λιμνοθάλασσα έως τα υποκείμενα θαλάσσια ιζήματα μπορούν να ανιχνευθούν από μια ισχυρή μείωση των τιμών ειδικής αντίστασης (<10 Ωm) μεταξύ των γεωτρήσεων OST 1 και 8. Στις θέσεις OST 4, 5 και 3 τα θαλάσσια ιζήματα παρουσιάζουν αντιστάσεις γύρω στα 50 Ωm, αλλά στα 9 m (κάτω από το επίπεδο της θάλασσας) οι αντιστάσεις μειώνονται σε <10 Ωm. Οι χαμηλότερες αντιστάσεις σε αυτό το στρώμα προς τα βόρεια μπορεί πιθανώς να εξηγηθούν από τα υπόγεια νερά αυξημένης αλατότητας που προέρχονται από τον κοντινό ποταμό και τη σύνδεσή του με τη Μεσόγειο Θάλασσα. Περίπου στα 10 m από το επίπεδο της θάλασσας παρατηρείται μια διεπαφή η οποία διαχωρίζει την περιοχή από μια περιοχή με πολύ χαμηλή ειδική αντίσταση (<5 Ωm). Καθώς όμως δεν υπάρχουν δεδομένα από vibrocoring δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια η σύσταση του στρώματος.



Εικόνα 3.14: Προφίλ ERT E1 - Πηγή: (Tina Wunderlich, 2017)

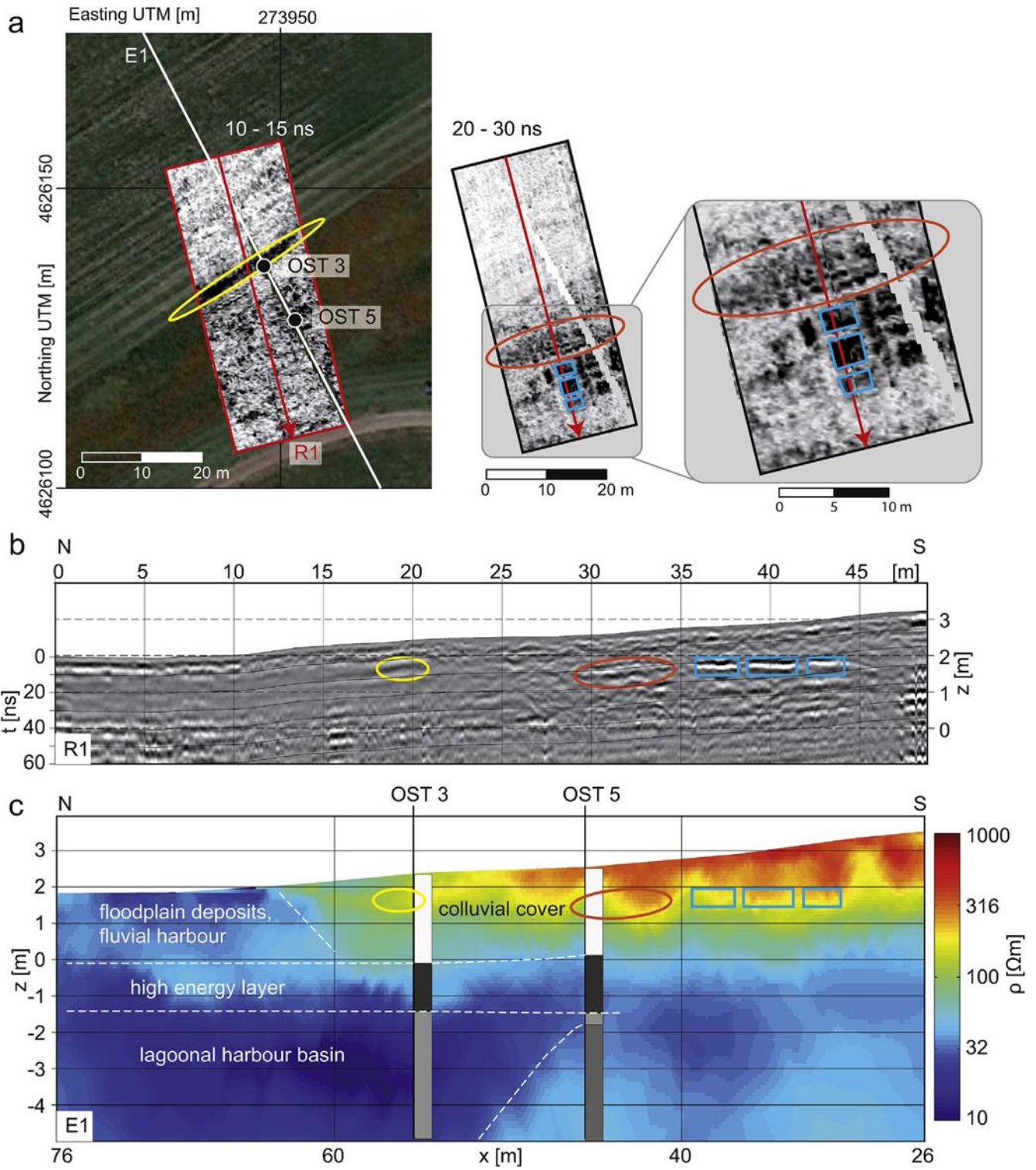
3.3.4 Η επέκταση της λεκάνης του λιμανιού

Η συνοριακή περιοχή της λιμενικής λεκάνης διερευνήθηκε λεπτομερέστερα από το GPR. Η ελεγχόμενη περιοχή βρίσκεται στα νότια της πρώιμης λιμενικής λεκάνης. Πραγματοποιήθηκαν 2 τομές GPR, εκ των οποίων η πρώτη έδειξε τη δομή του υπεδάφους σε βάθος 0,5 – 0,75 m και μια στενή ζώνη υψηλής ενέργειας ανάκλασης που διασχίζει την περιοχή από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά κοντά στην OST 3. Μια σύγκριση με το κατακόρυφο τμήμα του ραδιογράμματος R1 δείχνει μια ελαφρώς βυθισμένη ευρεία ανάκλαση πλάτους περίπου 3 m, το εύρος της οποίας μειώνεται έντονα προς τα βόρεια. Η δεύτερη τομή έδωσε την δομή του υπεδάφους σε βάθος 1-1,5 m. Στο προφίλ αυτό εντοπίζονται και διάφορα ορθογώνια αντικείμενα υψηλού πλάτους ανακλάσεως (μπλε κουτάκια), καθώς και μια ζώνη αυξημένης ανακλαστικότητας σε σύγκριση με το βόρειο τμήμα της περιοχής (πορτοκαλί κύκλος). Οι ορθογώνιες δομές αντιστοιχούν σε ισχυρές ανακλάσεις στο ραντάρ κάθετης τομής R1, οι οποίες διαχωρίζονται σαφώς από χαμηλά ανακλαστικά κενά πλάτους 0,5 m. Λόγω του ορθογωνίου σχήματος και των διακριτών ορίων, μπορεί να υποθεθεί ότι η προέλευση είναι ανθρωπογενής, δηλ. οικοδομικές κατασκευές / απομεινάρια. Η περιοχή που σημειώνεται με πορτοκαλί χρώμα μια σχεδόν οριζόντια ανάκλαση, η οποία όμως δεν είναι τόσο ισχυρή και επίπεδη όσο τα μπλε κουτιά.

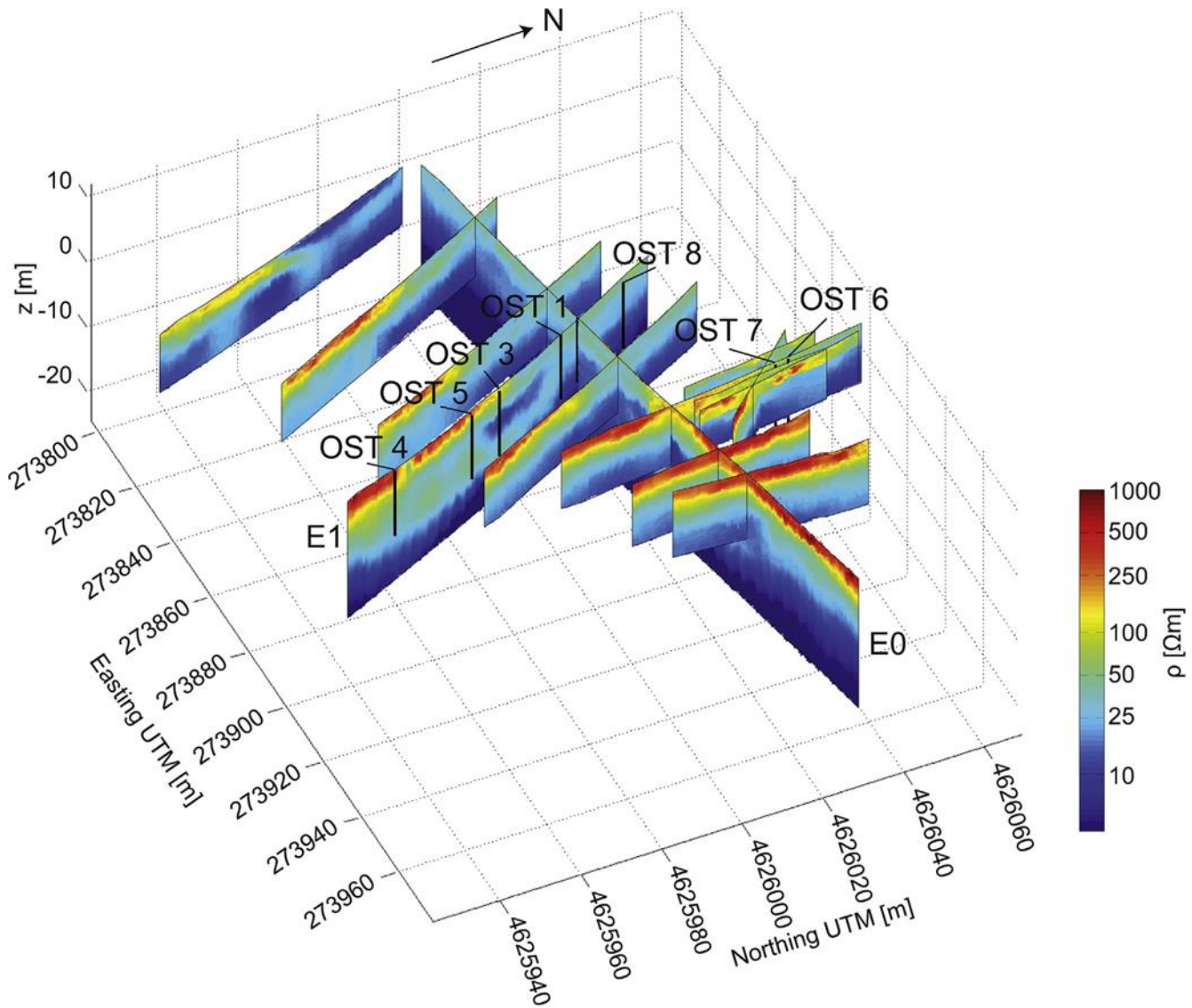
Θεωρείται ότι όλες αυτές οι δομές είναι υπολείμματα κτιρίων ή υποδομών, καθώς βρίσκονται στο ίδιο βάθος 1 m που αντιστοιχεί στο αρχαίο επίπεδο κατασκευής. Η λεκάνη του λιμανιού είναι εμφανής στα αποτελέσματα του GPR σαν περιοχή χαμηλής ανακλαστικότητας και μειωμένης αναλογίας σήματος / θορύβου (S / N) κάτω από 40 ns. Η μείωση του λόγου S / N προκαλείται από χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης που οδηγούν σε αυξημένη εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Το προφίλ E1 συγκρινόμενο με το ραδιογράφημα R1 έδειξε ότι η θέση της ισχυρής γραμμής GPR (σημειωμένη με κίτρινο χρώμα) συμπίπτει στην γραμμή ERT με τη (σταδιακή) μετάβαση από τα κολλουβιακά ιζήματα σε ποτάμιες αποθέσεις. Επομένως, υποθέτουμε ότι η γραμμή GPR δείχνει την πρόμη ακτογραμμή.

Για να προσδιοριστούν οι διαφορετικές πλευρικές εκτάσεις τόσο της λιμνοθάλασσας όσο και του ποταμού, όλα τα προφίλ ERT αντισταθμίστηκαν με τις ίδιες ρυθμίσεις των παραμέτρων επεξεργασίας και απεικονίστηκαν σε 3D. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής έδειξαν ότι το κολλουβιακό στρώμα στο νότιο και ανατολικό τμήμα παρουσιάζεται ως ζώνη ηλεκτρικά υψηλής αντοχής (κόκκινο και κίτρινο) που επικαλύπτει την παλιά λεκάνη λιμνοθάλασσας (σκούρο μπλε) πλευρικά κατά περίπου 10 m, προτού αναβαθμιστεί σε αλλουβιακές αποθέσεις (πράσινο). Η έκταση της νεότερης φάσης του ποταμίου λιμανιού δεν μπορεί να ανιχνευθεί με σαφήνεια, αλλά ως προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μετάβαση μεταξύ κολλουβιακού και αλλουβιακού στρώματος.



Εικόνα 3.15: Σύγκριση των δεδομένων GPR με ERT - Πηγή: (Tina Wunderlich, 2017)



Εικόνα 3.16: 3D απεικόνιση προφίλ ERT - Πηγή: (Tina Wunderlich, 2017)

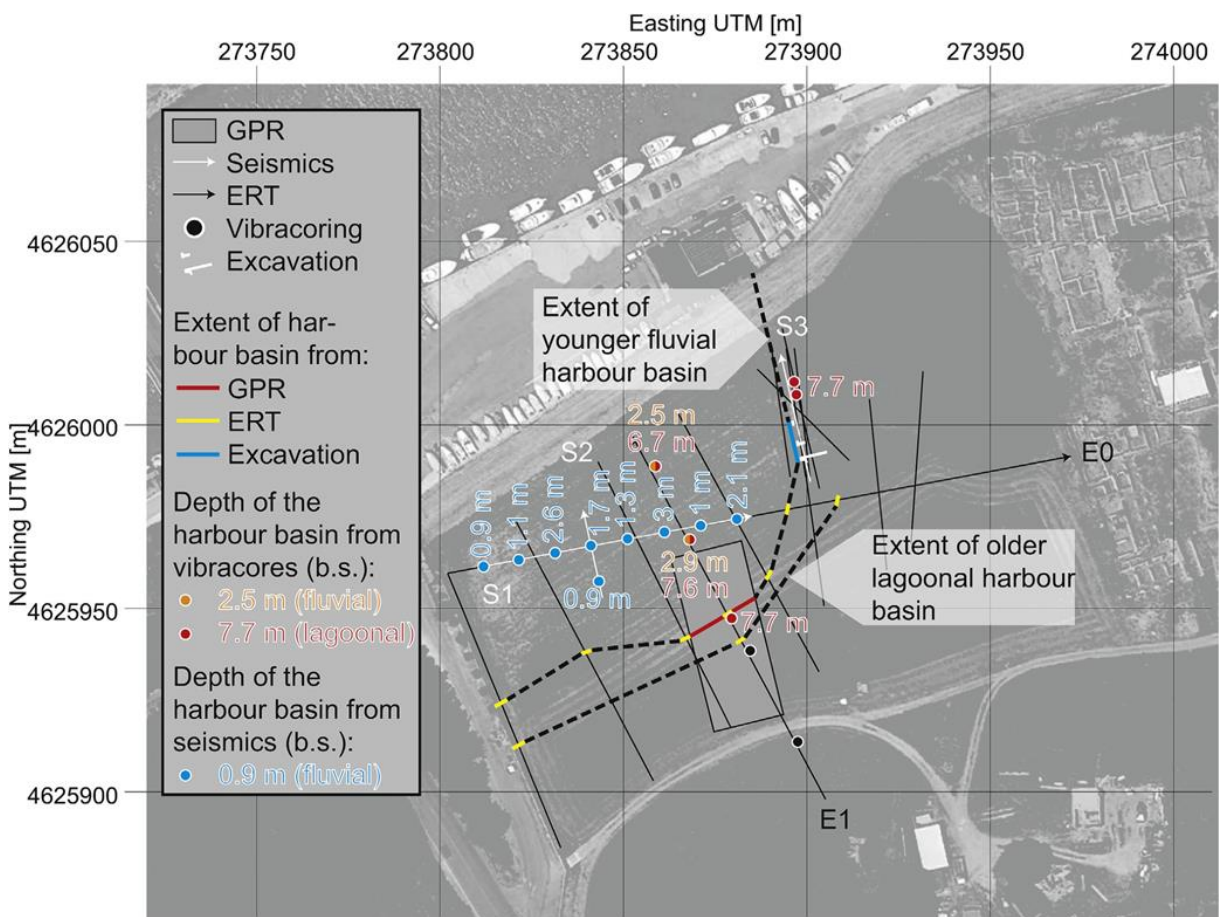
3.3.5 Συμπεράσματα

Με βάση την ERT και λαμβάνοντας υπόψη πληροφορίες από σεισμικές μετρήσεις, ανασκαφές και αναγνωριστικές γεωτρήσεις, μπορεί να κατασκευαστεί ένας χάρτης της έκτασης και του βάθους των δύο λεκανών, οποίος δείχνει τη μικρότερη έκταση του νεότερου ποτάμιου λιμανιού, το οποίο έχει ελάχιστες διαστάσεις 50 m. (Βορρά-νότο) και 100 m (ανατολικά-δυτικά). Το παλαιότερο λιμναίο λιμάνι έφτασε στα 8 με 15 m προς τα νότια και πιθανόν ανατολικά. Για την έκταση και το βάθος της νεότερης λεκάνης απορροής ποταμού

υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες. Αυτό οφείλεται στο μικρότερο βάθος του όπου η ανάλυση των εικόνων ERT είναι υψηλότερη.

Τα σεισμικά δεδομένα παρείχαν το βάθος του ποτάμιου λιμανιού που αντιστοιχούσε στην κορυφή του ενσωματωμένου στρώματος υψηλής ταχύτητας. Το βάθος του λιμανιού δεν μπορούσε να προσδιοριστεί από τα σεισμικά.

Η ανάλυση ERT μειώνεται από την επιφάνεια προς το βάθος και προς τις πλευρές των προφίλ, ανάλογα επίσης με τις χρησιμοποιούμενες διαμορφώσεις ηλεκτροδίων. Ενώ οι συστοιχίες dipole dipole παρέχουν καλύτερη πλευρική ανάλυση, οι συστοιχίες Wenner και Schlumberger έχουν καλύτερη κατακόρυφη ανάλυση. Έτσι, ένας συνδυασμός αυτών των διαμορφώσεων, όπως έγινε σε αυτή τη μελέτη, παρέχει την καλύτερη δυνατή ανάλυση σε όλες τις κατευθύνσεις.



Εικόνα 3.17: Έκταση και βάθος των δύο λεκανών απορροής όπως προκύπτουν από τις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης – Πηγή: (Tina Wunderlich, 2017)

Ανακεφαλαιώνοντας, από την έρευνα στην περιοχή της Οστίας προέκυψαν τα εξής:

1. Στρωματογραφία και βάθος της πλήρωσης της λεκάνης: Το λιμάνι αποτελείται από δύο φάσεις: α) μια παλαιότερη φάση λιμνοθάλασσας με τη βάση της σε περίπου 7.6 m βάθος και β) μια νεότερη φάση χαρακτηριζόμενη από ποτάμια ιζήματα με βάση σε περίπου 2,7 m. Οι δύο φάσεις διαχωρίζονται από ένα χονδρόκοκκο λεπτό στρώμα υψηλής ενέργειας, το οποίο αποδόθηκε σε ένα τσουνάμι και το οποίο εντοπίζεται στα σεισμικά προφίλ. Οι δύο φάσεις του λιμένα θα μπορούσαν να αναγνωριστούν στα προφίλ ERT, αλλά η ERT δεν αναγνωρίζει τη στιβάδα υψηλής ενέργειας λόγω του χαμηλού πάχους της και της χαμηλής αντίθεσης αντίστασης.

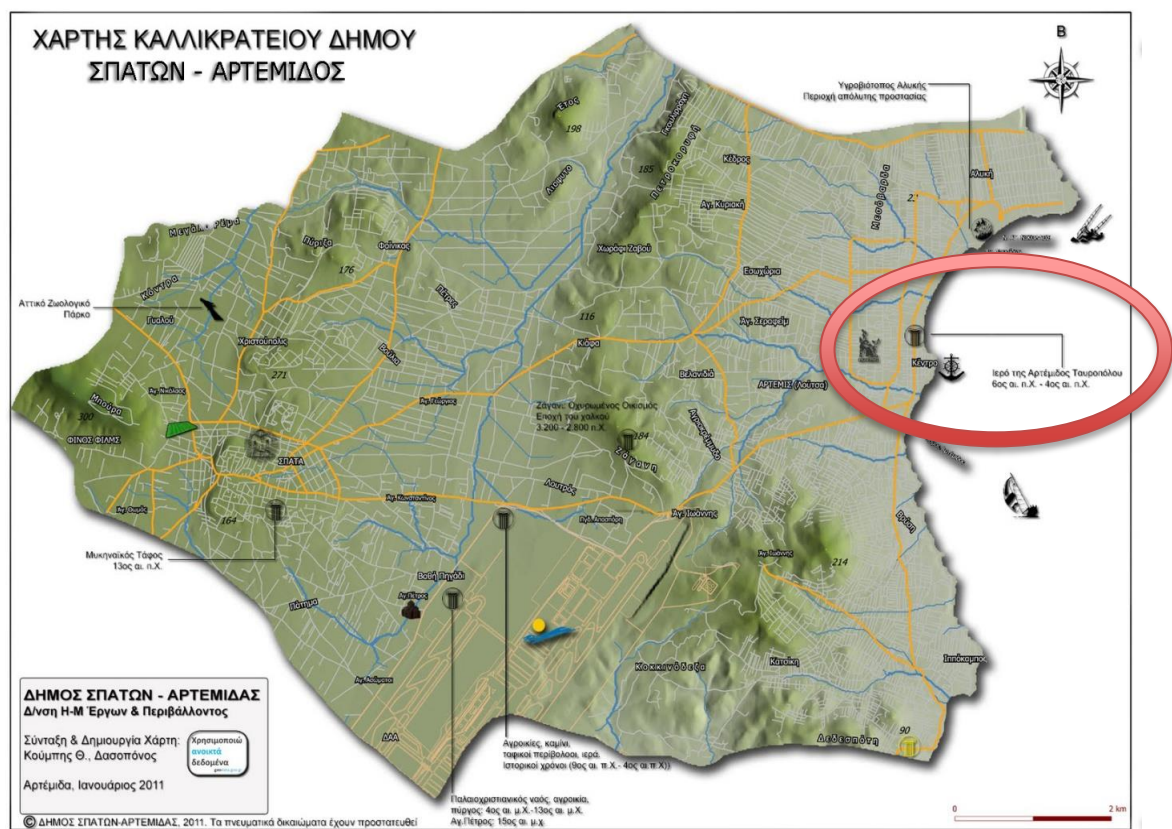
2. Πλευρική έκταση της λεκάνης απορροής: Με βάση το βαθμονομημένο με γεωτρήσεις ERT, μπορεί να κατασκευαστεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο της λιμενικής λεκάνης, το οποίο παρουσιάζει μικρές διαφορές στις πλευρικές εκτάσεις των δύο φάσεων. Τα όρια είναι καλά καθορισμένα στα ανατολικά και τα νότια. Η ελάχιστη έκταση της λεκάνης του άνω ποτάμιου λιμανιού είναι περίπου 100 m 50 m, ενώ το παλαιότερο λιμνοθάλασσιο λιμάνι έφτασε τα 8-15 m επιπλέον προς στα νότια και στα ανατολικά. Στο νότο εμφανίζεται μια καλά καθορισμένη απότομη γραμμή στις μετρήσεις GPR που πιθανότατα υποδεικνύουν τα όρια της λεκάνης νεότερων σταδίων καθώς συμφωνεί με τα αντίστοιχα ERT προφίλ.

3. Τα υπολείμματα της χερσαίας υποδομής θα μπορούσαν να χαρτογραφηθούν από το GPR νότια της γραμμής που καθορίζει τα νότια σύνορα της λεκάνης απορροής. Στα ανατολικά του σύνορα θα μπορούσε να χαρτογραφηθεί ένας ενοποιημένος ορίζοντας σε βάθος 2-3 m, ο οποίος κατά πάσα πιθανότητα αντιπροσωπεύει υπολείμματα ενός λιμενικού συγκροτήματος.

4 Γεωφυσική Έρευνα πλησίον του ναού της Αρτέμιδος

4.1 Περιοχή διεξαγωγής γεωφυσικής έρευνας

Η περιοχή γεωφυσικής έρευνας που εξετάζεται εντοπίζεται στην παραλία της Αρτέμιδος, η οποία ανήκει στο Δήμο Σπάτων – Αρτέμιδος που συστάθηκε με το πρόγραμμα Καλλικράτης από τη συνένωση των προϋπαρχόντων δήμων Σπάτων – Λούτσας και Αρτέμιδος. (Εικόνα 4.1) Ανήκει στην περιφέρεια Αττικής, στο περιφερειακό διαμέρισμα Ανατολικής Αττικής.



Εικόνα 4.1: Χάρτης Καλλικρατειού Δήμου Σπάτων - Αρτέμιδος

Πηγή: http://www.spata-artemis.gr/userdata/images/map_big.png

Ο Δήμος Σπάτων – Αρτέμιδος εκτείνεται από την πεδιάδα Μεσογείων, στην κεντρική Αττική και έως τα παράλια του Ν. Ευβοϊκού. Η περιοχή, που ορίζει την κεντρική ανατολική Αττική, διαχωρίζεται από άλλες ευρύτερες χωρικές περιοχές (βορειοανατολική Αττική – Λεκανοπέδιο – νότια και νοτιοανατολική Αττική), σε ανάπτυγμα ημικυκλίου από τα φυσικά «φράγματα» του Πεντελικού όρους, του Υμηττού και της Μερέντας. Η διοικητική δομή του Δήμου Σπάτων-Αρτέμιδος αποτελείται από τις Δημοτικές Κοινότητες Σπάτων – Λούτσας και Αρτέμιδος.

Η Δημοτική Κοινότητα Αρτέμιδος έχει συνολική έκταση 21,226 τετραγωνικά χιλιόμετρα όταν η συνολική έκταση του Δήμου είναι 73695 τετραγωνικά χιλιόμετρα και περιλαμβάνει τους οικισμούς Λούτσα, Βραυρώνα, Βελανιδέζα, Πράσινο Λόφο και Βρύση. Η Δημοτική Κοινότητα Αρτέμιδος, έως το 1962 αποτελούσε συνοικισμό του Δήμου Σπάτων και ονομαζόταν “Λούτσα”, η οποία στην αρβανίτικη γλώσσα προσδιορίζει ένα μέρος με πολύ νερό. Η περιοχή και ο αρχικός οικισμός της Λούτσας παραμένει στα διοικητικά όρια των Σπάτων μέχρι το 1974 όπου μετά αναγνωρίζεται ως Κοινότητα της Ανατολικής Αττικής με το όνομα Αρτέμιδα, ονομασία που προέρχεται από την αρχαία θεά Αρτέμιδα, αφού στην Βραυρώνα, παρακείμενη περιοχή, υπάρχουν τα ερείπια του ιερού της Βραυρωνίας Αρτέμιδος. Ο πληθυσμός του Δήμου σύμφωνα με τον Πίνακα Προσωρινών αποτελεσμάτων του Μόνιμου Πληθυσμού της Ελλάδος, απογραφή 2011 ανέρχεται σε 33.843 κατοίκους. (Δήμος Σπάτων - Αρτέμιδος, 2011)



Εικόνα 4.2: Χάρτης Αττικής - παραλία Αρτέμιδος Πηγή: Google Earth

4.1 Ιστορικά και αρχαιολογικά στοιχεία για το ναό της Αρτέμιδος

4.1.1 Αρχαιολογικός Χώρος

Ο Αρχαιολογικός χώρος στον οποίο διεξάχθηκε μεγάλο μέρος της έρευνας εντοπίζεται στην παραλία της Αρτέμιδος στην Νοτιοανατολική Αττική και είναι ναός αφιερωμένος στην θεά Άρτεμις Ταυροπόλου. Η πρώτη ανασκαφή διεκπεραιώθηκε το 1925 όπου και βρέθηκαν τα πρώτα ευρήματα του ναού από τον Έφορο Αρχαιοτήτων Αττικής Νικόλαο Κυπαρίσση. Κατά την περίοδο 1956-1957 η Αρχαιολογική Εταιρεία προχώρησε σε δεύτερη σειρά ερευνών υπό τη διεύθυνση του τότε Διευθυντή Αρχαιοτήτων Ιωάννη Παπαδημητρίου και με τη συνεργασία των τότε Επιμελητών Αρχαιοτήτων Βασιλείου Χ. Πετράκου και Όλγας Αλεξανδρή. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 έγιναν περαιτέρω ανασκαφές στο νότιο τμήμα του ναού όπου βρέθηκαν παραλιακά κτηριακά συγκροτήματα λατρευτικού χαρακτήρα. Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί ένας μικρός ναός από τους γεωμετρικούς μέχρι και τους κλασικούς χρόνους. Τέλος, στον ευρύτερο χώρο του ιερού έχουν εντοπισθεί δύο πρότυλα (ανατολικό και δυτικό), χαλικόστρωτος δρόμος και βάθρα αναθημάτων.

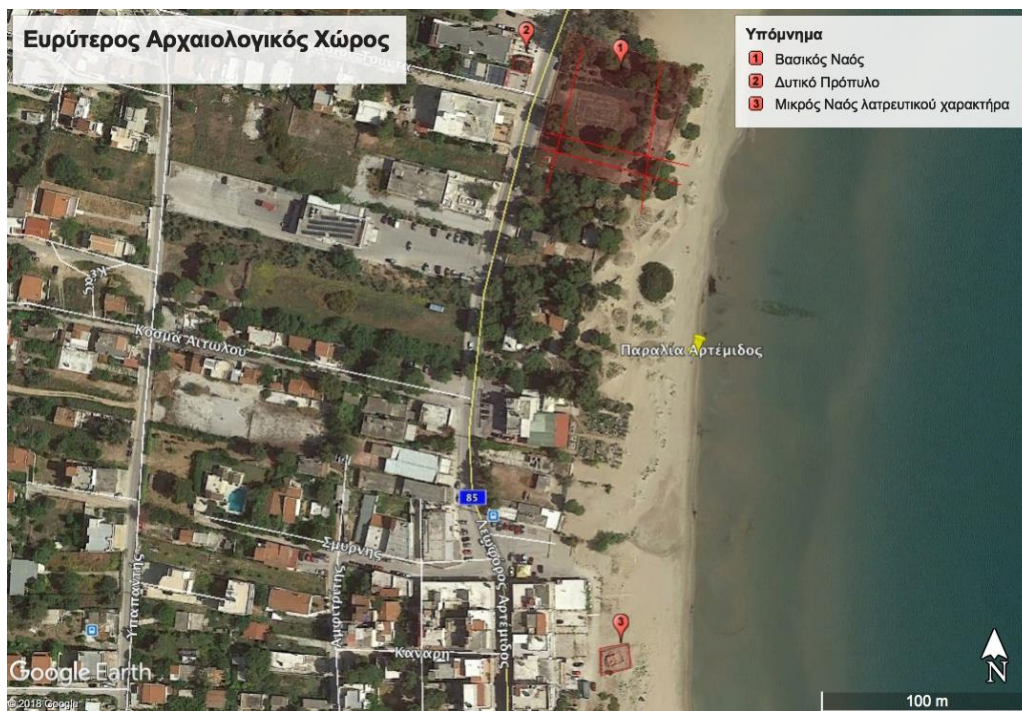
Από το κεντρικό ναό σώζεται μόνο το θεμέλιο ενός δωρικού περιπτέρου φτιαγμένο από πωρόλιθο με διαστάσεις ευθυντηρίας 21,16 X 14,11 m. και διαστάσεις κυρίως ναού 7 X 13 m. Ο πωρόλιθος αποτελεί υλικό που χρησιμοποιούνταν για τις περισσότερες ανθρωπογενείς κατασκευές της εποχής. Ο κύριος ναός χωρίζεται σε ένα μεγάλο ανατολικό τμήμα 7 x 5 m καθώς και σε ένα μικρότερο 5 x 3,2 m το οποίο χαρακτηρίστηκε ως άδυτο από τον Ι. Τραυλό. Ο ναός χρονολογείται μεταξύ τέλους του 6^{ου} αι. Π.Χ. και τα δύο τρίτα του 4^{ου} αι. Π.Χ. λόγω κατασκευαστικών λεπτομερειών (υπολείμματα από δύο βαθμίδες της κρηπίδας πάνω από την ευθυντήρια του ναού). Επιπλέον, βρέθηκαν κατά τις ανασκαφές του 1956-1957 λείψανα από τον κεραμοπλαστικό διάκοσμο του ναού καθώς και μεγάλη ποσότητα κεραμικής και μικροευρυμάτων. (Μουσείο Βραυρώνας)

Ο ναός της Αρτέμιδος Ταυροπόλου είναι γνωστός από αναφορές σε αρχαία κείμενα όπως η τραγωδία του Ευριπίδη «Ιφιγένεια εν Ταύροις» (στίχ. 1446-1457) καθώς και η κωμωδία του Μενάνδρου «Επιτρέποντες» (στίχ. 451-454). Στην αρχαιότητα αποτελούσε ιδιαίτερης σημασίας λατρευτικό χώρο, καθώς και το κέντρο του αρχαίου αττικού δήμου των Αλών Αραφηνίδων. Ιδρυτής του ναού σύμφωνα με τον Ευριπίδη είναι ο Ορέστης, ο οποίος καθώς μετέφερε το ξόανο της θεάς αποβιβάστηκε στην περιοχή και έχτισε το ναό. Οι δύο αρχαίοι συγγραφείς δίνουν πληροφορίες για το ύφος και τις τελετές που περιλάμβανε η εορτή των

«Ταυροπολίων» που πραγματοποιούνταν προς τιμήν της θεάς όπως νυχτερινές πομπές, τελετές διονυσιακού χαρακτήρα και δρώμενα με συμβολική μίμηση ανθρωποθυσιών.

Από τα ευρήματα που έχουν βρεθεί κατά καιρούς στις ανασκαφές υποδηλώνεται ότι ο ιερός χώρος λειτουργούσε από τον 7^ο αι. Π.Χ. έως και τον 1^ο αι. Μ.Χ.. Υπάρχουν διασωθέντα αντικείμενα που μαρτυρούν την χρήση του ιερού και μέχρι τον 4^ο αι Μ.Χ. , που όμως δεν επαρκούν για να γίνει συσχέτιση με τελετές λατρευτικού χαρακτήρα.

(Καλογερόπουλος) (Συριανού)



Εικόνα 4.3: Ευρύτερος Αρχαιολογικός Χώρος Πηγή: Google Earth



Εικόνα 4.4: Αρχαιολογικός Χώρος αφιερωμένος στη θεά Αρτέμιδα Ταυροπόλου Πηγή: Προσωπικό Αρχείο

4.1.2 Ο μύθος της θεάς Άρτεμις

Κατά την προετοιμασία του Τρωικού Πολέμου η θεά Άρτεμις προκειμένου να εκδικηθεί τον βασιλιά Αγαμέμνων που σκότωσε το Ιερό Ελάφι της, προκάλεσε την παύση των ανέμων με αποτέλεσμα ο αχαιικός στόλος να μην μπορεί να αποπλεύσει εναντίον της Τροίας. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο ο μάντης Κάλχας προφήτευσε ότι θα έπρεπε να θυσιαστεί στην θεά η κόρη του Αγαμέμνων, Ιφιγένεια η οποία έφτασε με δόλο στην Αυλίδα μαζί με την μητέρα της Κλυταιμνήστρα. Λίγο πριν την θυσία, η Άρτεμις λυπήθηκε την κοπέλα, με ένα σύννεφο την άρπαξε, άφησε στην θέση της ένα ελάφι και την μετέφερε στην Ταυρίδα, όπου την έκανε ιέρεια στο ναό της, στον οποίο τελούταν ανθρωποθυσίες.

Μετά το τέλος του πολέμου, η Κλυταιμνήστρα οργανώνει τον θάνατο του Αγαμέμνων για να τον εκδικηθεί και στην συνέχεια ακολουθεί η εκδίκηση του γιού τους Ορέστη για την δολοφονία του πατέρα του. Ο Ορέστης κυνηγημένος από τύψεις και Ερινύες που σκότωσε την μητέρα του καταφεύγει στο Μαντείο των Δελφών από όπου παίρνει χρησμό να μεταβεί στην Ταυρίδα να αρπάξει το ξόανο της Άρτεμις από τον ναό, στο οποίο είναι ιέρεια η αδελφή του Ιφιγένεια, και να το μεταφέρει στην Αττική.

Ο Ορέστης υπακούει και μεταβαίνει πράγματι στην Ταυρίδα. Εκεί συλλαμβάνεται και οδηγείται στο ναό για θυσία. Όμως, ο Ορέστης αναγνωρίζει στο πρόσωπο της ιέρειας την αδελφή του, η οποία κατορθώνει να εξαπατήσει το βασιλιά Θόαντα και να αποδράσουν συναποκομίζοντας και το ξόανο της θεάς. Στο σημείο της Αττικής που έφτασαν ο Ορέστης ίδρυσε τον ναό της Αρτέμιδος Ταυροπόλου. (Μήττα) (ΑΡΓΟΛΙΚΗ ΑΡΧΕΙΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ) (Jelena, 2007)



Εικόνα 4.5: Η θυσία της Ιφιγένειας Πηγή: (ΑΡΓΟΛΙΚΗ ΑΡΧΕΙΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ)

4.2 Γεωλογία της περιοχής

4.2.1 Γεωλογία ευρύτερης περιοχής

Το πεδίο εφαρμογής της μελέτης εντοπίζεται στο τμήμα της Αττικοκυκλαδικής μάζας που εντάσσεται στις κεντρικές Ελληνίδες. Στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής εμφανίζονται αλπικοί και μεταλπικοί σχηματισμοί, με τους μεταλπικούς να υπέρκειται των αλπικών. Τα αλπικά πετρώματα εμφανίζονται κυρίως στους ορεινούς όγκους και τους λόφους και ανήκουν στην Πελαγονική Ζώνη. Πρόκειται για ασβεστόλιθους, μάρμαρα, σχιστόλιθους, φυλλίτες, δολομίτες και οφιόλιθους. Οι μεταλπικοί σχηματισμοί είναι αποθέσεις του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς, ενώ υπάρχει περιορισμένη εμφάνιση μαγματικής διείσδυσης.

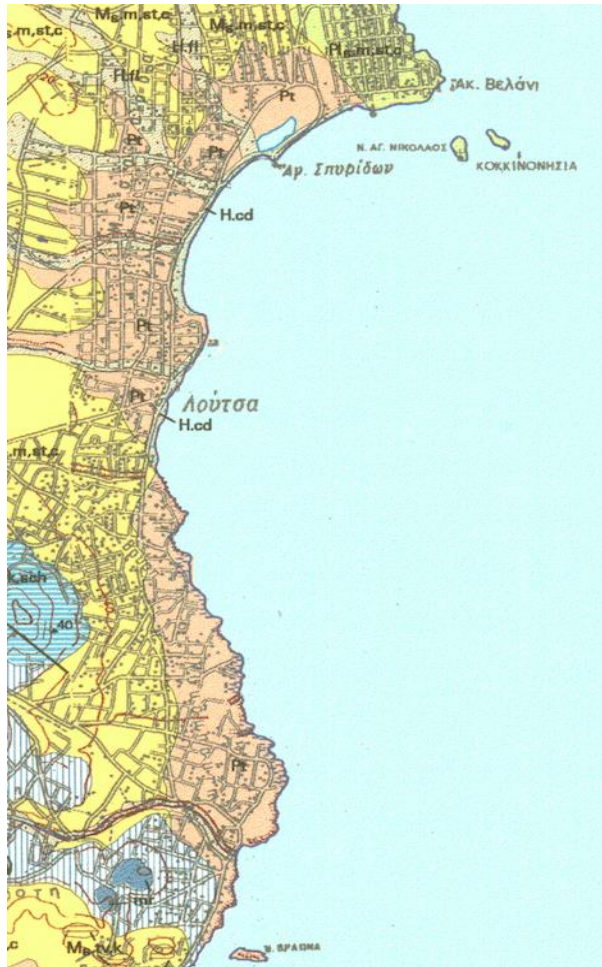
Η περιοχή που εξετάζεται αφορά την παραλία της Αρτέμιδος η οποία εντοπίζεται στην παράκτια ζώνη της Ανατολικής Αττικής. Η παλαιοντολογική έρευνα της περιοχής έδειξε ότι κυριαρχούν οι μεταλπικοί σχηματισμοί που είναι αποθέσεις του Τεταρτογενούς. Πιο συγκεκριμένα η παραλία αποτελείται από σύγχρονους παράκτιους σχηματισμούς του Ολόκαινου με εμφανίσεις αποθέσεων στην κοίτη του χείμαρου που εντοπίζεται βόρεια της περιοχής ενδιαφέροντος. Η περιοχή δυτικά συνίσταται από καστανόχρωμες χερσαίες και ποταμοχερσαίες απόθεσεις του Πλειστόκενου με συνεκτικούς αργιλοπηλούς, ποικίλης λιθολογικής σύστασης με διάφορες κροκάλες και λατύπες που προέρχονται από την αποσάρθρωση των νεογενών σχηματισμών και συνεκτικά κροκαλολατυποπαγή από αλπικά πετρώματα. Ολοκαινικής προέλευσης είναι επίσης οι άμμοι ακτών και οι μικρές θίνες που εντοπίζονται κατά κύριο λόγο στην περιοχή που διεξήχθη η έρευνα. (Εικόνα 4.6, 4.7)

(Λατσούδας, 2003) (Σπανού, 2010) (Καρκάνη, 2012)

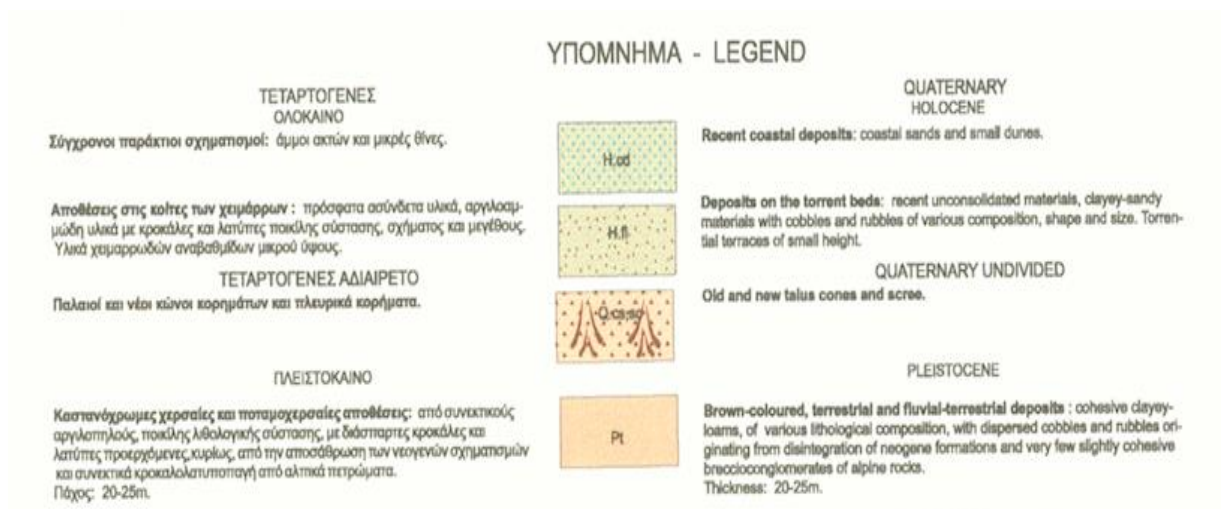
4.2.2 Τεκτονική περιοχής έρευνας

Από τον μεγάλο αριθμό των ρηγμάτων που εντοπίζονται στην περιοχή της Αττικής συμπεραίνεται πως έχει υποστεί έντονο τεκτονισμό, που διαφοροποιείται από το ένα τμήμα της περιοχής στο άλλο. Τα ρήγματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση των πτυχώσεων του αναγλύφου αναδεικνύοντας τους ορεινούς όγκους και οριοθετώντας τις πεδινές λεκάνες, με κύρια τη λεκάνη των Μεσογείων. Στη διαμόρφωση του αναγλύφου συνέβαλαν επίσης, οι εφελκυστικές τάσεις που εμφανίστηκαν στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής κατά το Μειόκαινο κυρίως λόγω του εφελκυσμού του κεντρικού Αιγαίου. Αυτό

είχα σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία και ενεργοποίηση ρηγμάτων τα οποία επηρεάζουν έκτοτε την γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής.

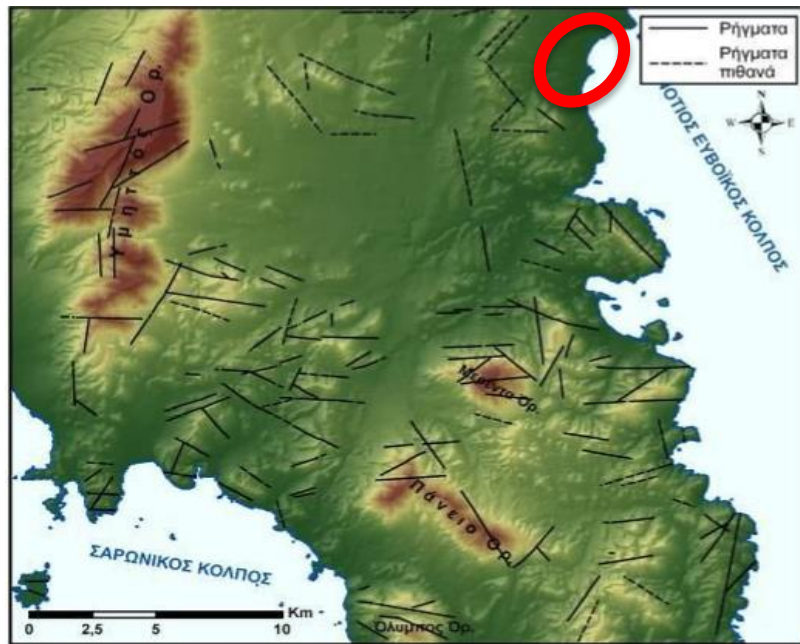


Εικόνα 4.6: Απεικόνιση της περιοχής ενδιαφέροντος, Φύλλο Κορωπί – Πλάκα ΓΓΜΕ Πηγή: (Λατσούδας, 2003)



Εικόνα 4.7: Γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή ενδιαφέροντος Φύλλο Κορωπί – Πλάκα ΓΓΜΕ

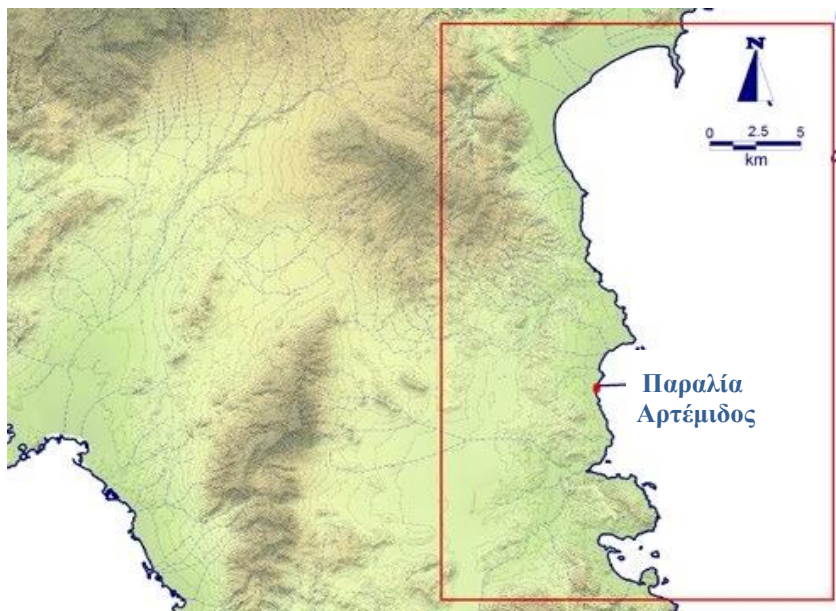
Πηγή: (Λατσούδας, 2003)



Εικόνα 4.8: Ψηφιοποιημένος χάρτης με τα ρήγματα της Αττικής Φύλλο Κοροπή – Πλάκα ΙΓΜΕ
 Πηγή: (Λατσούδας, 2003)

Από τον παραπάνω χάρτη (Εικόνα 4.8) είναι εμφανές ότι η περιοχή της Αρτέμιδος – περιοχή έρευνας (κύκλος), δεν έχει έντονη τεκτονική, καθώς δεν υπάρχουν ρήγματα.

4.2.3 Γεωμορφολογία περιοχής έρευνας

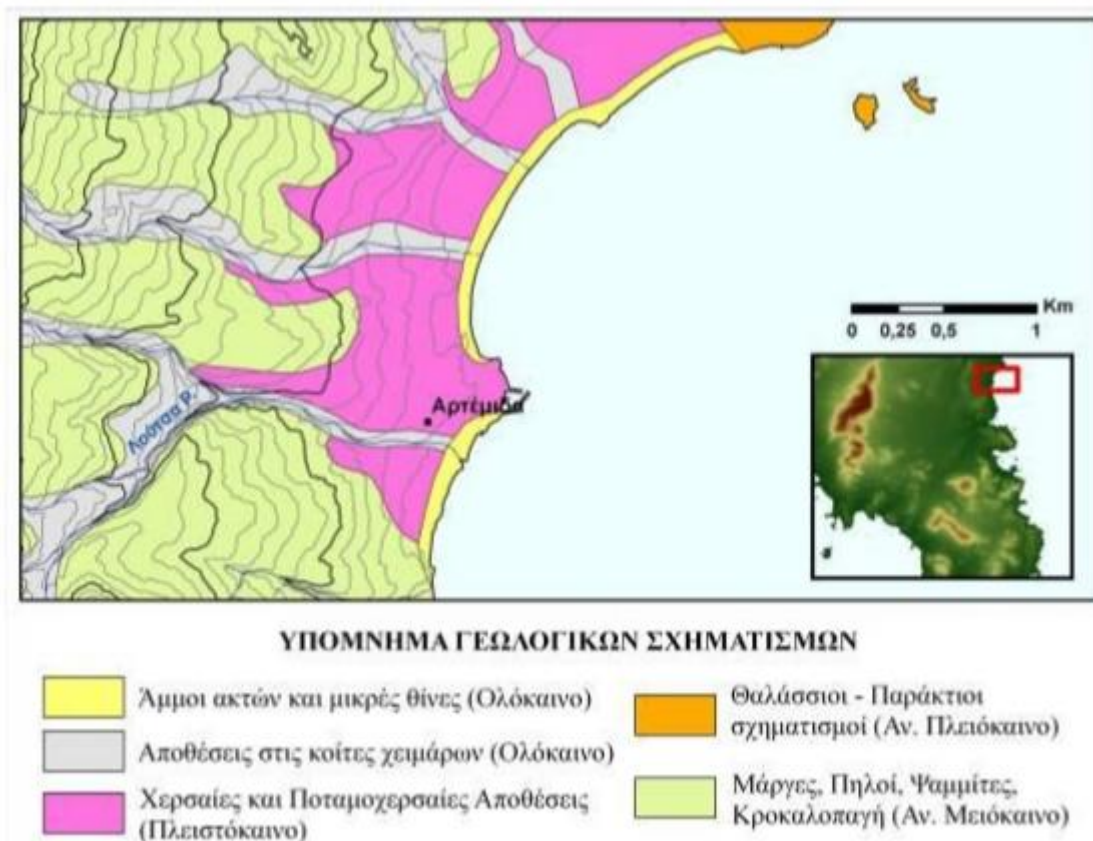


Εικόνα 4.9: Χάρτης της παραλίας Αρτέμιδος Πηγή: (Καρκάνη, 2012)

Η σχετική κατηγορία του υπομνήματος του γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ παρέχει, με ελάχιστο ποσοστό σφάλματος, πληροφορίες για την γεωμορφολογία της περιοχής κατατάσσοντάς την στην κατηγορία των παράκτιων περιοχών ήπιων κλίσεων ($0^{\circ} - 5^{\circ}$) σε Τεταρτογενείς σχηματισμούς.

Οι ακτές μικρής κλίσης αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος από Ολοκαινικούς και Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς μεγάλης ποικιλομορφίας, οι οποίοι μπορεί να είναι αιολικές αποθέσεις άμμων και μικρών θινών, θαλάσσιες αποθέσεις με κροκάλες ή ακτές με κροκάλες και άμμο.

Η περιοχή της Αρτέμιδος παρουσιάζει ήπιο ανάγλυφο, αφού οι λόφοι που τη διαχωρίζουν από τη λεκάνη των Μεσογείων εμφανίζουν ηπιότερες κλίσεις προς τις ακτές. Οι ακτές της αποτελούνται από αιολικές αποθέσεις άμμων και μικρών θινών. Νοτιότερα παρατηρείται μικρή σταδιακή αύξηση των κλίσεων των ακτών, στις οποίες υπάρχουν κατά θέσεις ιζήματα, ενώ στις εκβολές των ρεμάτων οι παραλίες αποτελούνται από κροκάλες και άμμο. (Λιώσης, 2013)



Εικόνα 4.10: Γεωλογικός χάρτης περιοχής (ΙΓΜΕ) Πηγή: (Λιώσης, 2013)

Όσον αφορά την παραλία της Αρτέμιδος εντοπίζονται ακτόλιθοι (beachrocks), οι οποίοι ορίζονται ως σκληροί ιζηματογενείς σχηματισμοί (Εικόνα 4.11). Συντελούνται από παράλια

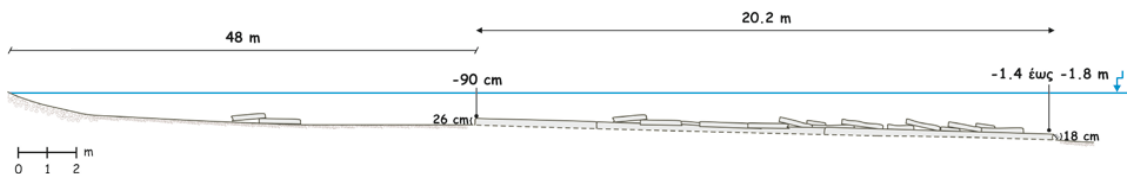
ιζήματα και έχουν συνήθως ως συγκολλητικό υλικό ασβεστίτη υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο ή αραγωνίτη. Η διαδικασία της συγκόλλησης εκτελείται ταχέως εξαιτίας της απόθεσης και καθίζησης ανθρακικών υλικών. Στην περιοχή ενδιαφέροντος οι ακτόλιθοι καταλαμβάνουν μία έκταση κατά μήκος της παραλίας ίση με περίπου 350m, οι οποίοι ανά σημεία είναι υπολειμματικοί αφού είτε έχουν μετατοπιστεί βαθύτερα είτε έχουν αφαιρεθεί προγενέστερα.



Εικόνα 4.11: Ακτόλιθοι στο παράκτιο τμήμα της παραλίας της Αρτέμιδος Πηγή: (Καρκάνη, 2012)



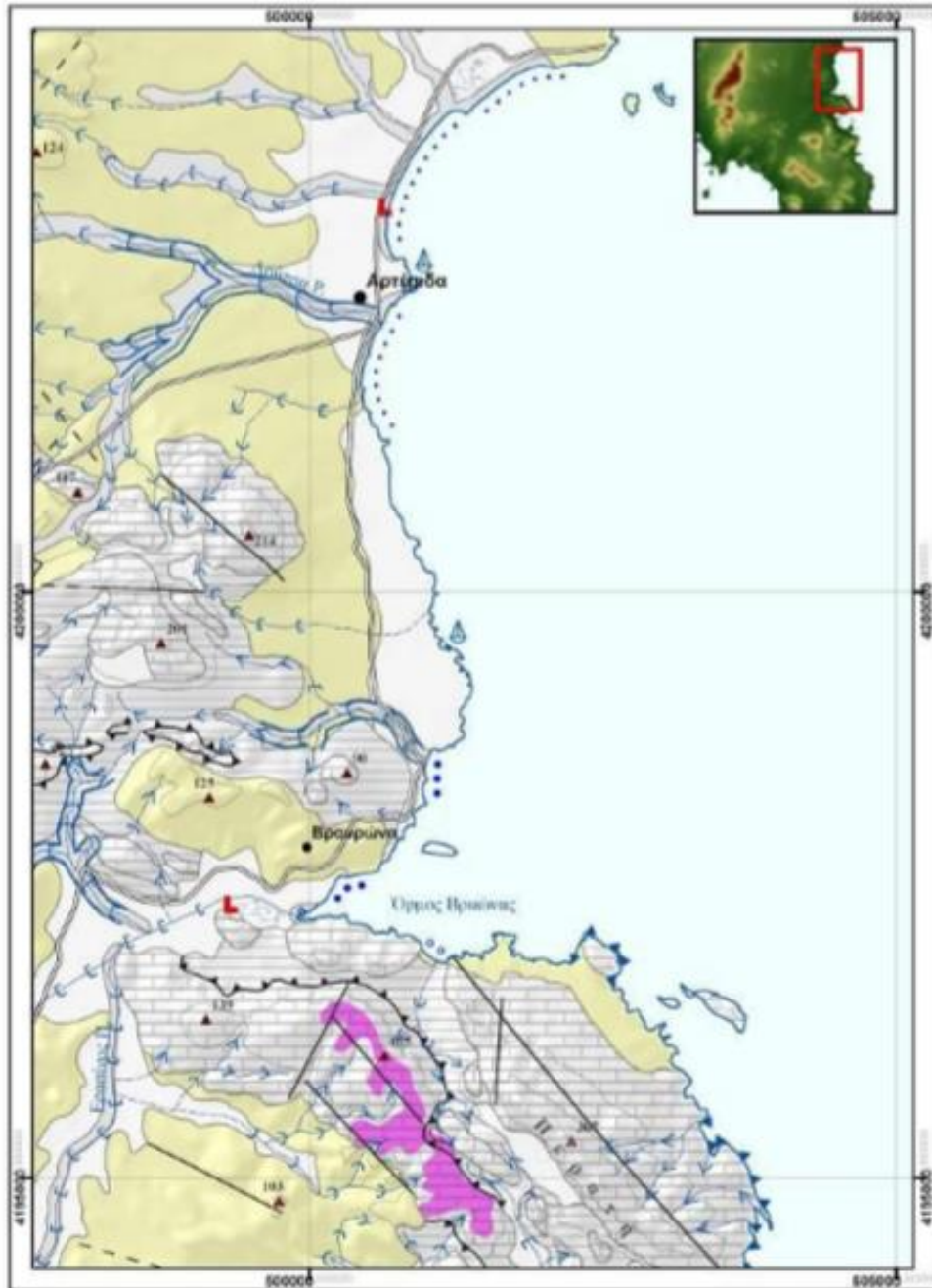
Εικόνα 4.12: Σπασμένες και μεταφερόμενες πλάκες από ακτόλιθους σε βάθος περίπου 1,5m Πηγή: (Καρκάνη, 2012)



Εικόνα 4.13: Σχηματική διάταξη των υποθαλάσσιων, εντοπιζόμενων ακτολίθων Πηγή: (Καρκάνη, 2012)

Εντός της θάλασσας παρατηρούνται κατακερματισμένα τμήματα ακτολίθων (Εικόνα 4.12), αρκετά από τα οποία δεν βρίσκονταν εκεί παλαιότερα. Από έρευνα που διεξήχθη από τη

γεωλόγο Άννα Καρκάνη το 2012 προέκυψε ότι συγκεκριμένα στην περιοχή διεξαγωγής της γεωφυσικής έρευνας πλησίον του ναού της Αρτέμιδος εντοπίστηκαν υποθαλάσσιοι ακτόλιθοι, 48 m από την ακτογραμμή και εκτείνονται για 20,2 m. Παρατηρούνται σε βάθος 0,9 m έως 1,4 - 1,8 m και μέσου πάχους 0,26 m. Στο βαθύτερο σημείο εντοπισμού τους φτάνουν σε πάχος τα 0,18 m και είναι υποσκαμμένοι. (Εικόνα 4.13) (Καρκάνη, 2012)



Εικόνα 4.14: Απόσπασμα γεωμορφολογικού χάρτη (ΒΑ ακτές Αττικής) Πηγή: (Λιώσης, 2013)

4.3 Γεωφυσική έρευνα: μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα

4.3.1 Επιλογή γεωφυσικών μεθόδων

Μετά από μελέτη του αντικειμένου της έρευνας που ανατέθηκε από την Εφορία Αρχαιοτήτων, σε συνδυασμό με διεθνή βιβλιογραφία για μελέτες παρόμοιων θεμάτων, πραγματοποιήθηκε η επιλογή των γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην περιοχή. Πρωτεύοντα ρόλο στην επιλογή έπαιξε η γεωλογία, αλλά και η υγρασία και καταλληλότητα του εδάφους για διέλευση των γεωφυσικών οργάνων, αφού η έρευνα διεξήχθη σε παράκτια περιοχή, καθώς επίσης, και ο στόχος που ανατέθηκε προς μελέτη (τοποθεσία και βάθος που αναμένεται να εντοπιστεί). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν οι εξής μέθοδοι:

- Κλασική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM)
- Ηλεκτρική τομογραφία (ERT)
- Γεωραντάρ (GPR)

Αρχικά επιλέχθηκε η κλασική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, στόχος της οποίας (όσον αφορά την ηλεκτρική αγωγιμότητα) ήταν η αποτύπωση της στρωματογραφίας, η διερεύνηση για τυχόν εισροή θαλασσινού νερού στο υπέδαφος, καθώς και ο εντοπισμός τοπικών δομών που μαρτυρούν την ύπαρξη ανθρώπινης δραστηριότητας (π.χ. τοιχία) στην περιοχή των αμμοθίνων γύρω από τον ήδη ανακαλυφθέντα αρχαίο ναό αλλά και στην περιοχή κοντά στον προγενέστερο ναό νοτιότερα του ναού της Αρτέμιδος. Οι χάρτες μαγνητικής επιδεκτικότητας που λαμβάνονται επίσης από την μέθοδο αυτή παρείχαν την δυνατότητα εντοπισμού μεταλλικών στοιχείων όπως και την δυνατότητα εντοπισμού δομών κοντά στο επίπεδο του θαλασσινού νερού, αφού το σήμα δεν απορροφάται λόγω αλατότητας και υγρασίας του υπεδάφους. Η διάταξη των πηνίων του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου ήταν τέτοια ώστε το βάθος διασκόπησης να φτάσει τα 3 m. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος της παραλίας από το ύψος του ναού της Αρτέμιδος μέχρι το ύψος του προγενέστερου ναού νοτιότερα αυτού. Ο αριθμός των μετρήσεων ήταν τέτοιος ώστε να δημιουργηθεί ένας πυκνός κάνναβος για πιο σαφή αποτελέσματα.

Στην συνέχεια, σε περιοχές που οι μετρήσεις EM έδειξαν ενδιαφέρον και σε περιοχές που χρειαζόταν επιπλέον διερεύνηση εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας έτσι ώστε να αποκτηθούν δισδιάστατες γεωηλεκτρικές τομές που απεικονίζουν το υπέδαφος (στο

συγκεκριμένο χώρο που τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια) και τους υπάρχοντες σχηματισμούς.

Σαν τελευταία μέθοδος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των γεωραντάρ. Η μέθοδος αυτή έχει στόχο τον εντοπισμό συνεκτικών σχηματισμών μέσα στο γενικότερο περιβάλλον χαλαρών ιζημάτων των επιφανειακών στρωμάτων. Τέτοιοι συνεκτικοί σχηματισμοί μπορούν να αποδοθούν σε τοιχία ναών, πρότυλα, πλακόστρωτα κλπ.

4.3.2 Κλασική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM)

4.3.2.1 Εισαγωγή

Η γεωφυσική έρευνα της περιοχής ξεκίνησε με την χρήση της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου. Οι μετρήσεις πάρθηκαν κατά μήκος της παραλίας από το ύψος του μεγάλου ναού της Αρτέμιδος μέχρι τον μικρότερο ναό που βρίσκεται νοτιότερα. Οι τομές είχαν απόσταση μεταξύ τους περίπου 2 m και διεύθυνση Ανατολής – Δύσης, ενώ πραγματοποιήθηκαν και δύο τομές με διεύθυνση Νότου – Βορρά και κάλυψαν έκταση περίπου 13.600 m². Το βήμα της μέτρησης ήταν 1 m.

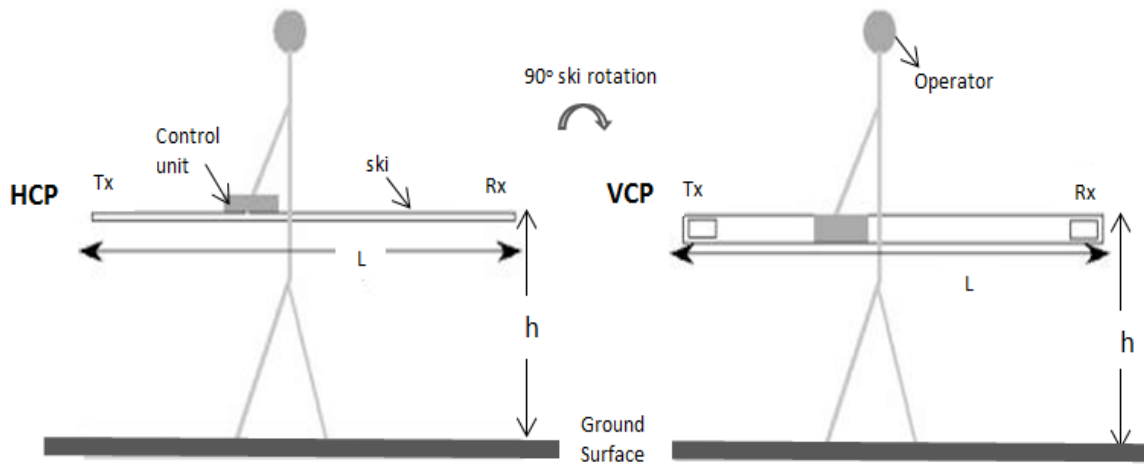
4.3.2.2 Εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου έγινε χρήση του οργάνου μέτρησης CMD-2, της GE Instruments “CMD” με την οριζόντια διαμόρφωση των πηνίων (HCP – Horizontal Coplanar) με συνολικό βάθος διασκόπησης 3 m. Ο τρόπος μέτρησης του οργάνου ήταν συνεχής και τα δεδομένα αποθηκεύονταν σε αυτό κατά την επιλεγμένη χρονική περίοδο. Οι μετρήσεις σε αυτό το βάθος χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη σταθερότητα, αφού ανιχνεύουν μεγαλύτερο όγκο εδαφικού υλικού. (Vince Gaffney, 2013; Vince Gaffney, 2013)

Για την καταγραφή πληροφοριών που αφορούν στοιχεία για τις ακριβείς θέσεις των μετρήσεων (γεωγραφικές συντεταγμένες) χρησιμοποιήθηκε ειδικό όργανο GPS, το οποίο προσδιόριζε συνεχώς την θέση των μετρήσεων.

Το όργανο μέτρησης αποτελείται από την μονάδα ελέγχου και το σύστημα πομπού δέκτη. Η μονάδα ελέγχου CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη,

ενώ ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε όπως προαναφέρθηκε για τη συγκεκριμένη έρευνα ήταν συνεχής μέτρηση με GPS.



Εικόνα 4.1: Δύο διαμορφώσεις πηρών του CMD-2 (VCP και HCP - κάθετα και οριζόντια αντίστοιχα) Πηγή : (ResearchGate, n.d.)



Εικόνα 4.2: Ειδικό όργανο GPS



Εικόνα 4.3: Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μετρήσεων CMD-2



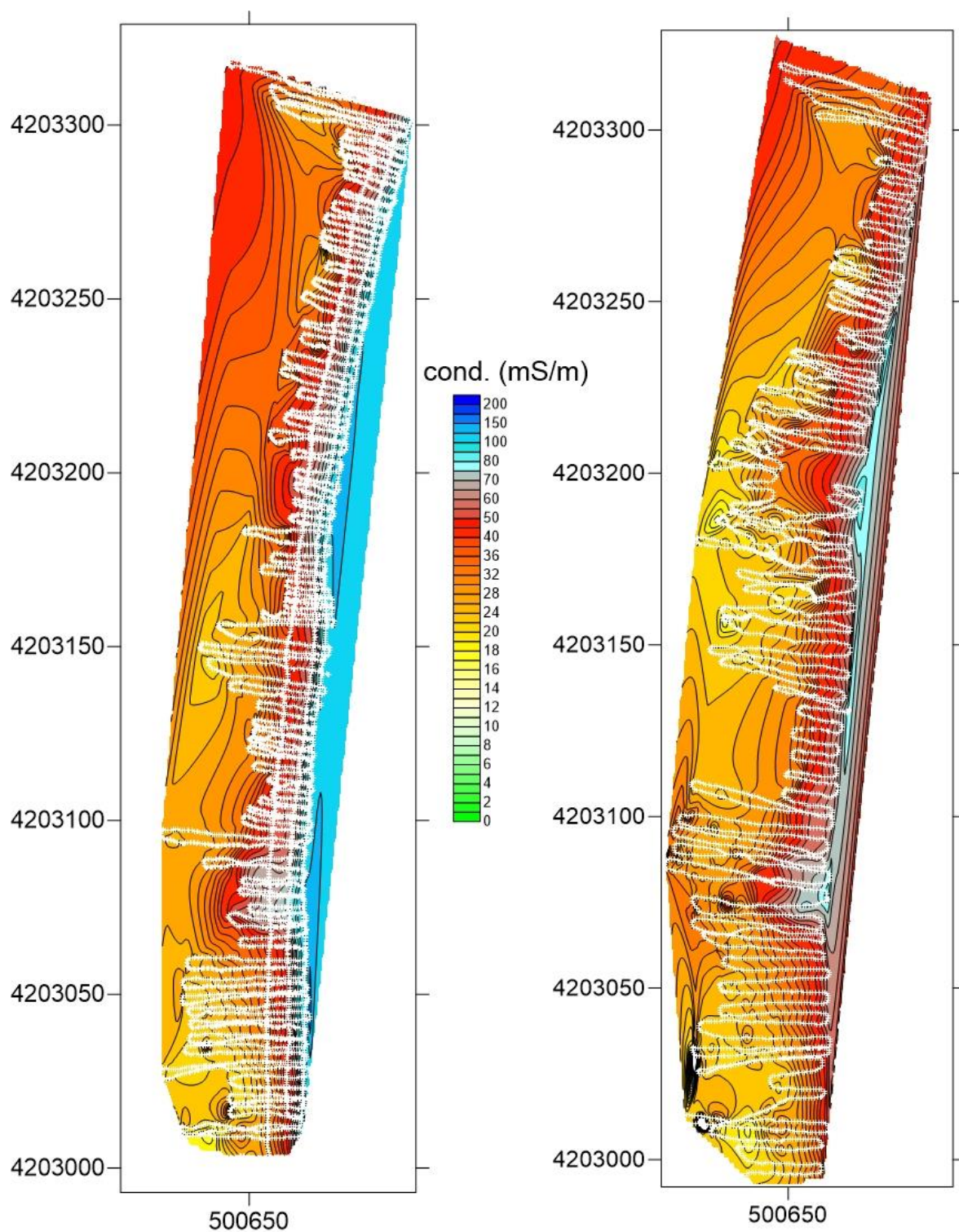
Εικόνα 4.4: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις στον χώρο της παραλίας

4.3.2.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

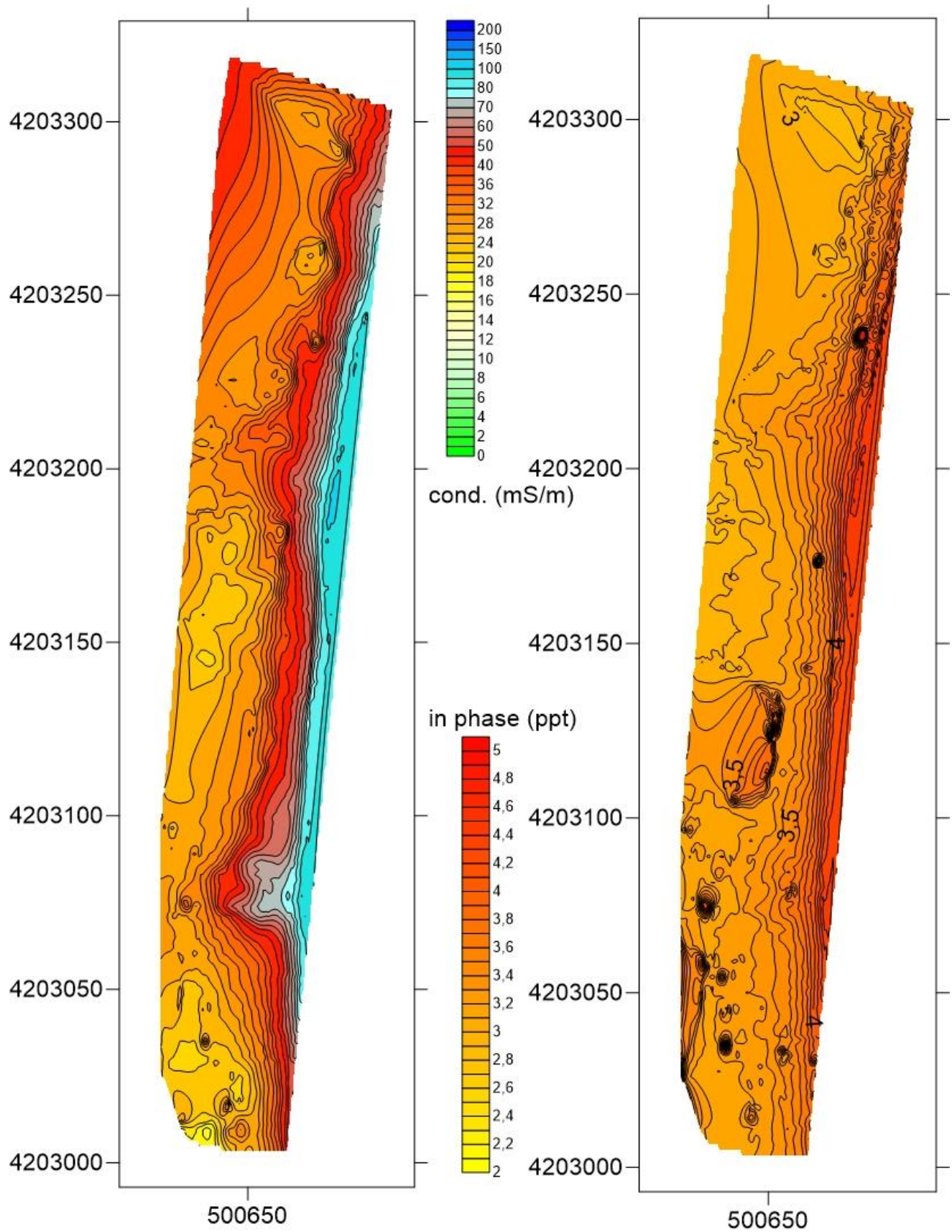
Τα δεδομένα των μετρήσεων εισήχθησαν και επεξεργάστηκαν από τον πρόγραμμα Surfer, της Golden Software. Με την χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος πραγματοποιήθηκε η δημιουργία χαρτών ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος διασκόπησης 3 m.

4.3.2.4 Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες

Οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν δύο φορές σε διάστημα δύο ημερών. Από την παρατήρηση και ερμηνεία των EM χαρτών της πρώτης και της δεύτερης ημέρας, κρίθηκε απαραίτητη η σύμπτυξη των δεδομένων φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας και των δύο ημερών σε έναν χάρτη φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και σε έναν χάρτη μαγνητικής επιδεκτικότητας αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή είχε σαν αποτέλεσμα την πρόσθεση περισσότερων πληροφοριών απ' ότι θόρυβο και συνεπώς, την διεξαγωγή πιο έγκυρων συμπερασμάτων.



Εικόνα 4.5: Αριστερά ο χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας την 1η ημέρα και δεξιά την 2η ημέρα. Με άσπρο φαίνονται τα σημεία που πάρθηκαν μετρήσεις



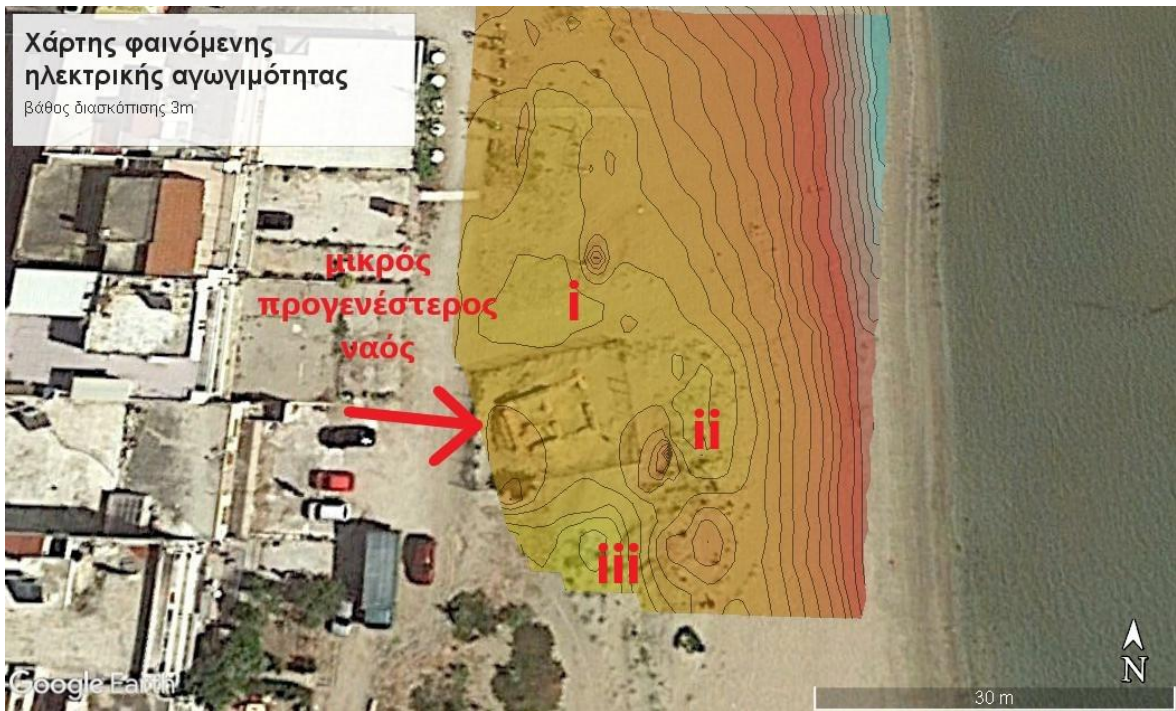
Εικόνα 4.6: Χάρτης φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αριστερά) και μαγνητικής επιδεκτικότητας (δεξιά) – σύμπτυξη δεδομένων και των δύο ημερών)

Από τον χάρτη της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας μπορούν να εντοπιστούν τα εξής:

- Κατά μήκος της ακτογραμμής οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι πολύ μεγάλες (80-100 mS/m) πράγμα που οφείλεται στο θαλασσινό νερό. (Εικόνα 4.6)
- Επίσης σε όλο το μήκος της παραλίας που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις υπάρχει μια έκταση πιο δυτικά της περιοχής με τις πολύ υψηλές τιμές, με τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας περίπου 40-50 mS/m, ενώ ακόμα πιο δυτικά οι τιμές πέφτουν κάτω από τα 30 mS/m. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στο συμπέρασμα πως υπάρχει κάποια δομή που εμποδίζει το θαλασσινό νερό να διεισδύσει προς την ακτή. (Εικόνα 4.7)
- Περιμετρικά του μικρού ναού, στον χώρο που λήφθηκαν δεδομένα, παρατηρούνται αρκετά χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (τοπικές ανωμαλίες) – κάτω από 20 mS/m (σημεία i, ii και iii). (Εικόνα 4.8)
- Στο σημείο 1, στην περιοχή δηλαδή που εκβάλλει το ρέμα που έρχεται από τον οικισμό, υπάρχει μεγαλύτερη διείσδυση της θάλασσας. Αυτό οφείλεται σε κατά βάθος διάβρωση του υπεδάφους από το ρέμα που έχει σαν αποτέλεσμα η περιοχή σε εκείνο το σημείο να γεμίζει νερό. (Εικόνα 4.9)
- Στο ίδιο ύψος, βορειότερα προς τον κεντρικό ναό, οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι εξ' ίσου χαμηλές σε αρκετά μεγάλο μέρος της παραλίας δημιουργώντας κάτι σαν διάδρομο (παραλληλόγραμμο στο σημείο 2) που οδηγεί στην αμμοθίνα σε περιοχές όπου εντοπίζονται τοπικές ανωμαλίες (σημεία 3,4,5,6). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα σημεία που εντοπίζονται οι τοπικές ανωμαλίες συμπίπτουν με το ανάγλυφο της περιοχής. (Εικόνα 4.10)
- Παρατηρείται μια σχετική διαφοροποίηση της αγωγίμης ζώνης κατά μήκος της ακτής, η οποία γίνεται πιο έντονη στην περιοχή των τοπικών ανωμαλιών (αμμοθίνα), όπου οι υψηλές τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνεχίζονται και πιο δυτικά από τις τοπικές ανωμαλίες.



Εικόνα 4.7: Προβολή του χάρτη φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο Google Earth



Εικόνα 4.8: Ο μικρός και προγενέστερος του ναού της Αρτέμιδος ναός στο νότιο τμήμα της παραλίας - γύρω από το ναό φαίνονται οι χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας



Εικόνα 4.9: Η περιοχή που παρατηρείται μεγαλύτερη διείσδυση της θάλασσας



Εικόνα 4.10: Περιοχή σχηματισμού διαδρόμου και τοπικών ανωμαλιών

Οι τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας δίνουν πληροφορίες για το βαθμό υφαλμύρινσης της περιοχής. Τα χαλαρά ιζήματα του υπεδάφους, καθώς και το γεγονός ότι η τοποθεσία είναι δίπλα στην θάλασσα, έχουν σαν αποτέλεσμα την μεγάλη διαπερατότητα του υπεδάφους και επομένως αναμένονται υψηλές τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αντί αυτού όμως, οι EM μετρήσεις έδειξαν σημεία με χαμηλές τιμές που οφείλονται σε μικρής διαπερατότητας δομές. Οι δομές αυτές μπορεί να είναι είτε αδρομερή υλικά που έχει αποθέσει στην περιοχή η θάλασσα είτε συνεκτικές δομές, ανθρωπογενούς ίσως προελεύσεως, όπως τοιχία, δρόμοι κλπ. Πιθανότατα γύρω από τον ήδη ανακαλυφθέντα ναΐσκο να υπάρχουν και άλλα αρχαία κτίσματα της ίδιας, προγενέστερης ή μεταγενέστερης περιόδου τα οποία να ενώνονται με κάποιον διάδρομο, ή τείχη και να οδηγούν σε άλλα κτίσματα στις περιοχές των τοπικών ανωμαλιών (3,4,5 και 6). Συνολικότερα παρατηρείται μια δομή με αυτά τα χαρακτηριστικά η οποία ακολουθεί σχεδόν παράλληλα την θάλασσα σε όλο το μήκος που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις EM.

Ο χάρτης της μαγνητικής επιδεκτικότητας δεν δίνει κάποια επιπλέον στοιχεία και έρχεται σε συμφωνία με τον χάρτη της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των παρατηρήσεων και συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτόν, καθώς δεν περιμένουμε δομές, όπως π.χ. τείχη, να έχουν υψηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Οι τοπικές ανωμαλίες που παρατηρούνται πιθανόν οφείλονται σε κάποιο θαμμένο μεταλλικό αντικείμενο, όμως περισσότερο αποδίδονται σε σφάλμα, αφού κατά την διάρκεια των μετρήσεων υπήρχαν αρκετοί λουόμενοι στην περιοχή, καθώς και διάφορα μεταλλικά αντικείμενα (μεταλλικές κολόνες, ομπρέλες, μεταλλική περίφραξη κλπ).



Εικόνα 4.11: Προβολή του χάρτη μαγνητικής επιδεκτικότητας στο Google Earth - με κίτρινο φαίνονται μερικές τοπικές ανωμαλίες που οφείλονται σε σφάλμα

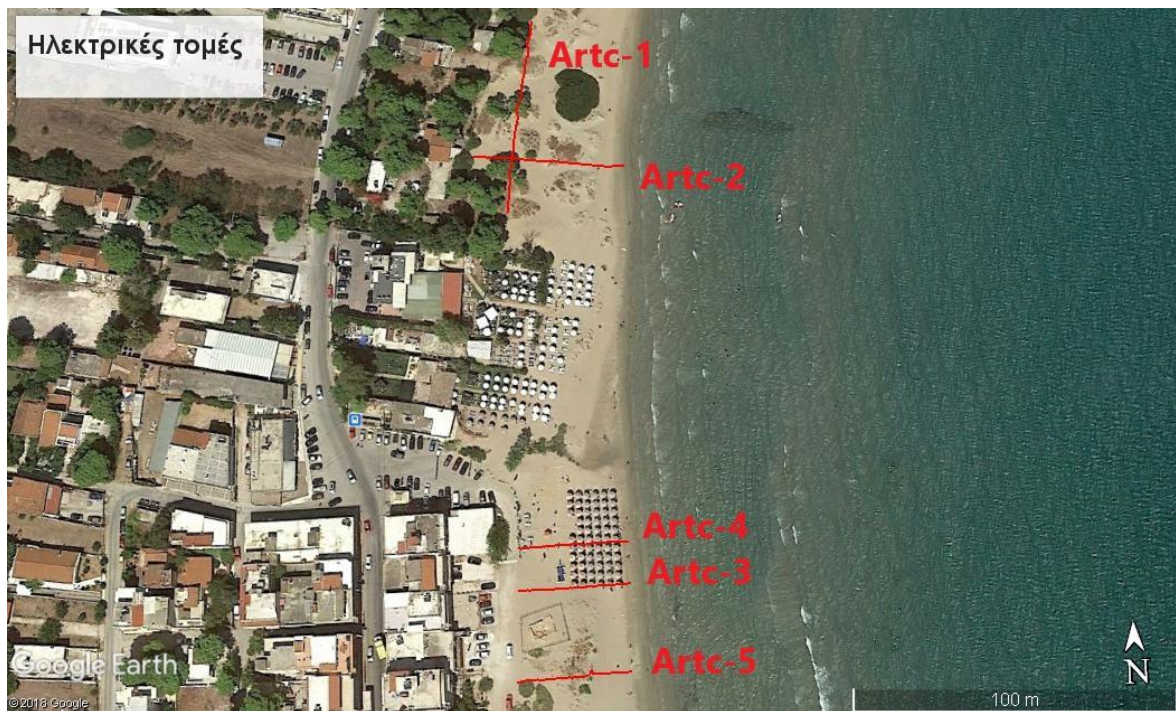
Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή υπάρχουν συνεκτικές δομές που έχουν ενδιαφέρον και χρήζουν περισσότερης έρευνας και μελέτης.

4.3.3 Ηλεκτρική τομογραφία (ERT)

4.3.3.1 Εισαγωγή

Για να διερευνηθούν περισσότερο οι περιοχές ενδιαφέροντος που φάνηκαν από τις EM μετρήσεις επιλέχθηκε σε συνέχεια αυτών η ηλεκτρική τομογραφία (ERT). Πραγματοποιήθηκαν 5 τομές (Artc-1, Artc-2, Artc-3, Artc-4 και Artc-5) στα σημεία όπου εντοπίζονταν χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας, με διεύθυνση δύσης – ανατολής (Artc-2, Artc-3, Artc-4 και Artc-5) και βορρά – νότου (Artc-1).

Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η Pole – Dipole για τις πρώτες 4 τομές και η Wenner – Schlumberger για την πέμπτη τομή.

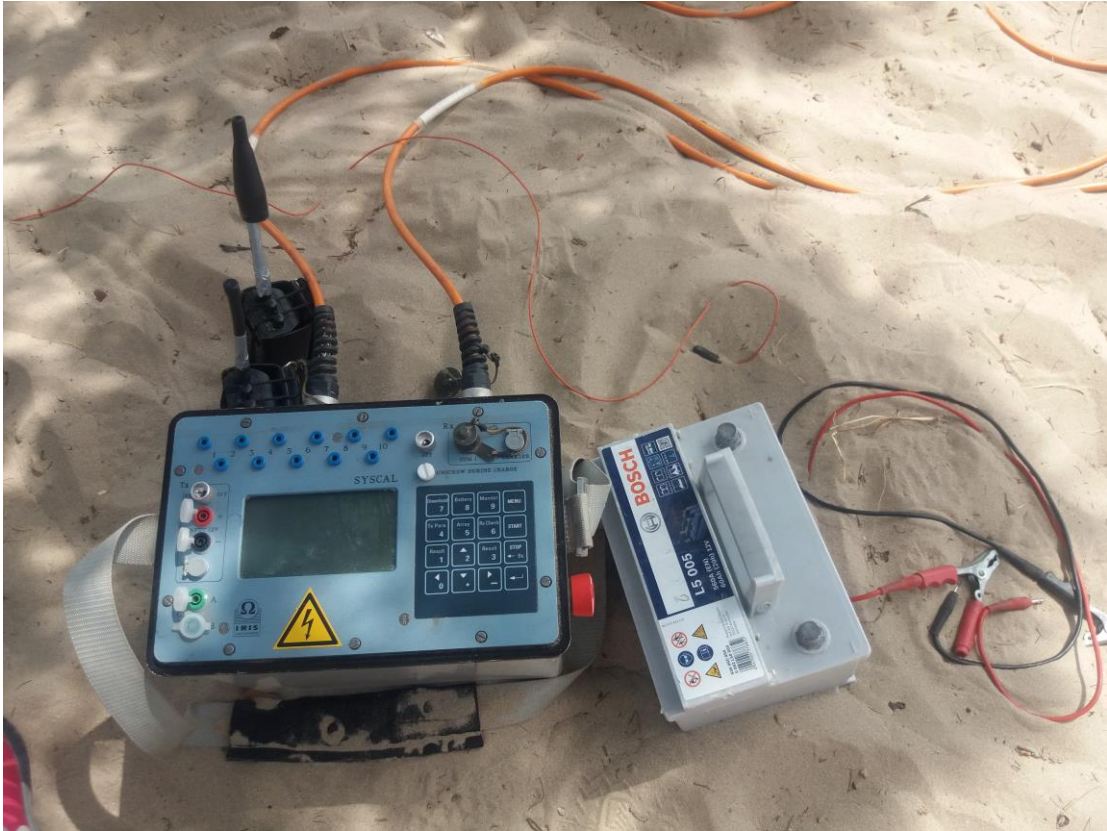


Εικόνα 4.12: Προβολή ακριβούς τοποθεσίας τομών στο Google Earth

4.3.3.2 Εξοπλισμός

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL Pro, της IRIS Instruments. Το όργανο αυτό αποτελεί έναν διαβιβαστή ρεύματος ο οποίος στέλνει ρεύμα εντός του υπεδάφους, μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και στη συνέχεια μετράει την τάση που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Επιπλέον, συγκεντρώνει δεδομένα από 10 κανάλια με δέκτες και έναν εσωτερικό πομπό 250 W. (IRIS Instruments, n.d.).

Στα σημεία που τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια πάρθηκαν και δεδομένα των γεωγραφικών συντεταγμένων με το ειδικό όργανο GPS.



Εικόνα 4.13: Όργανο SYSICAL Pro και εξωτερική μπαταρία



Εικόνα 4.14: Ηλεκτρική τομογραφία (Artec-2) κάθετα στην αμμοθίνα



Εικόνα 4.15: Ηλεκτρική τομογραφία (Artec-1) παράλληλα στην αμμοθίνα

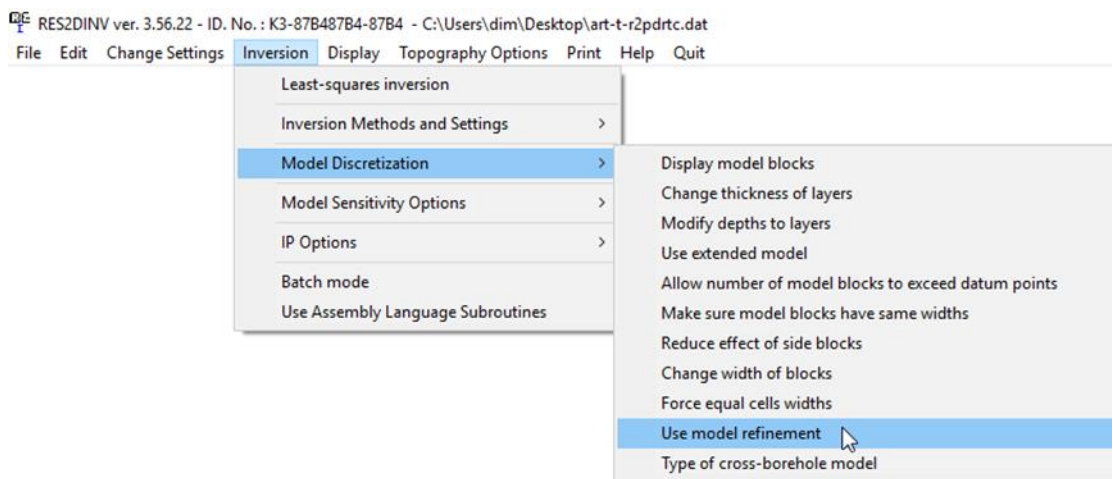


Εικόνα 4.16: Ηλεκτρική τομογραφία (Artec-3) στην περιοχή πλησίον του μικρού ναού

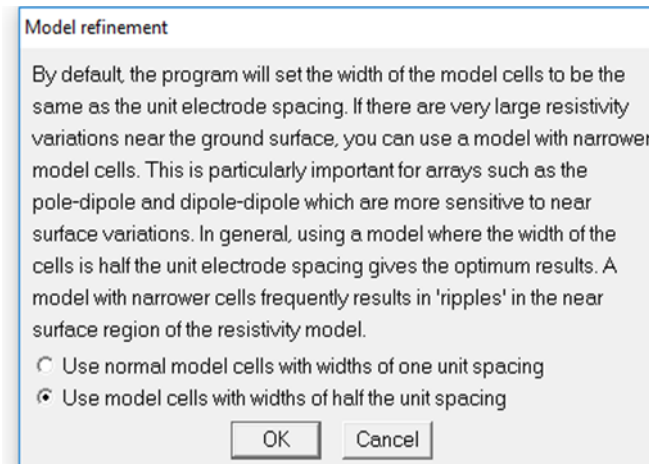
4.3.3.3 Επεξεργασία μετρήσεων

Για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τις ERT στην ύπαιθρο, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2DIVN, της Geotomo Software, το οποίο δίνει το γεωηλεκτρικό μοντέλο σύμφωνα με τη διακύμανση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε τομή με τη μέθοδο της αντιστροφής (inversion). Δηλαδή, ξεκινώντας από τις γεωφυσικές μετρήσεις καταλήγει στη γεωλογική απεικόνιση (γεωηλεκτρικό μοντέλο) με πολλαπλές επαναλήψεις.

Απαραίτητο για την δημιουργία των ηλεκτρικών τομογραφιών είναι η ρύθμιση κάποιων παραμέτρων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα τους. Έτσι, αρχικά επιλέχθηκε η Διακριτοποίηση Μοντέλου (Model Discretization) και στη συνέχεια η τελειοποίηση του μοντέλου (use model refinement), προβλέποντας με αυτόν τον τρόπο μετρήσεις σε σημεία που δεν υπάρχει επαρκής πληροφορία. Για την τελειοποίηση του μοντέλου επιλέχθηκε η δημιουργία κελιών με την μισή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (δηλ. 0,5 m), έτσι ώστε τα τελικά μοντέλα να περιέχουν περισσότερες λεπτομέρειες. Ακολούθησε η επιλογή περιορισμού Robust – Robust, κατά την οποία οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε δεδομένα που περιέχουν θόρυβο και έχουν τη δυνατότητα να εντοπίσουν τα όρια των δομών που χαρακτηρίζονται από απότομες μεταβολές της ειδικής αντίστασης.



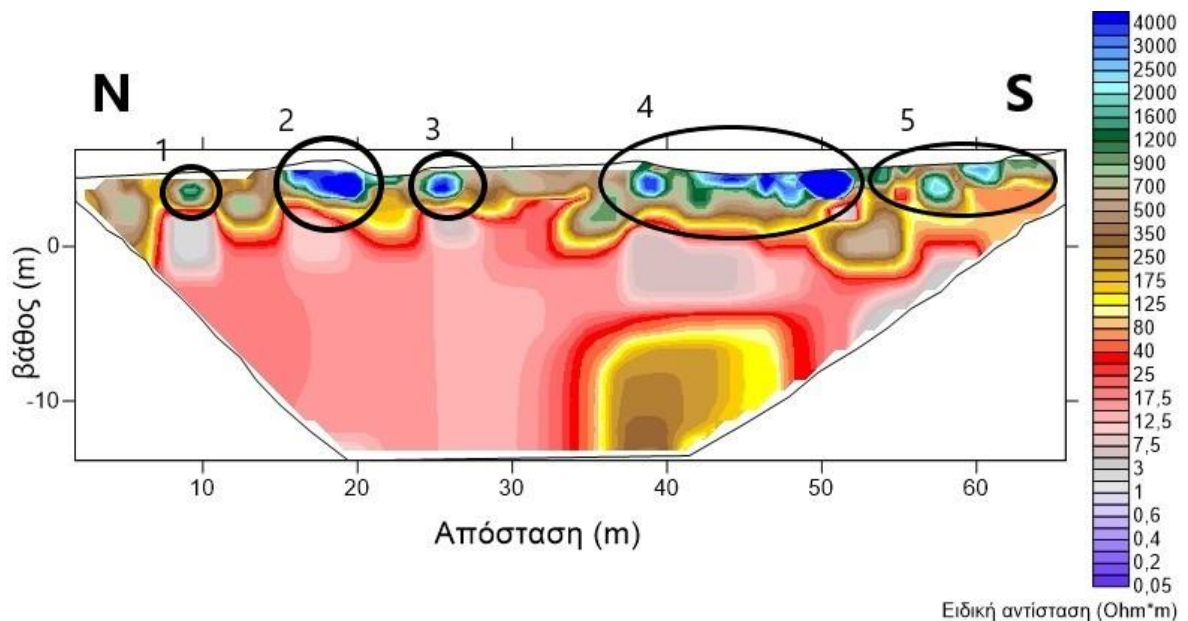
Εικόνα 4.17: Επεξεργασία δεδομένων ERT



Εικόνα 4.18: Επεξεργασία δεδομένων ERT

4.3.3.4 Ηλεκτρικές τομογραφίες

4.3.3.4.1 Ηλεκτρική τομογραφία Artc-1



Εικόνα 4.19: Ηλεκτρική τομογραφία Artc-1

Η τομή Artc-1 είχε μήκος 72 m και χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια (ανά 1 m) με διάταξη Pole – Dipole.

Στην ηλεκτρική τομογραφία που προέκυψε μετά από επεξεργασία των δεδομένων που λήφθηκαν στο πεδίο, είναι εμφανή σημεία αρκετά υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (1600-4000 Ohm*m) μέσα στις συνολικά χαμηλές τιμές (125-600 Ohm*m), οι οποίες αφορούν τα χαλαρά ιζήματα που υπάρχουν στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα:

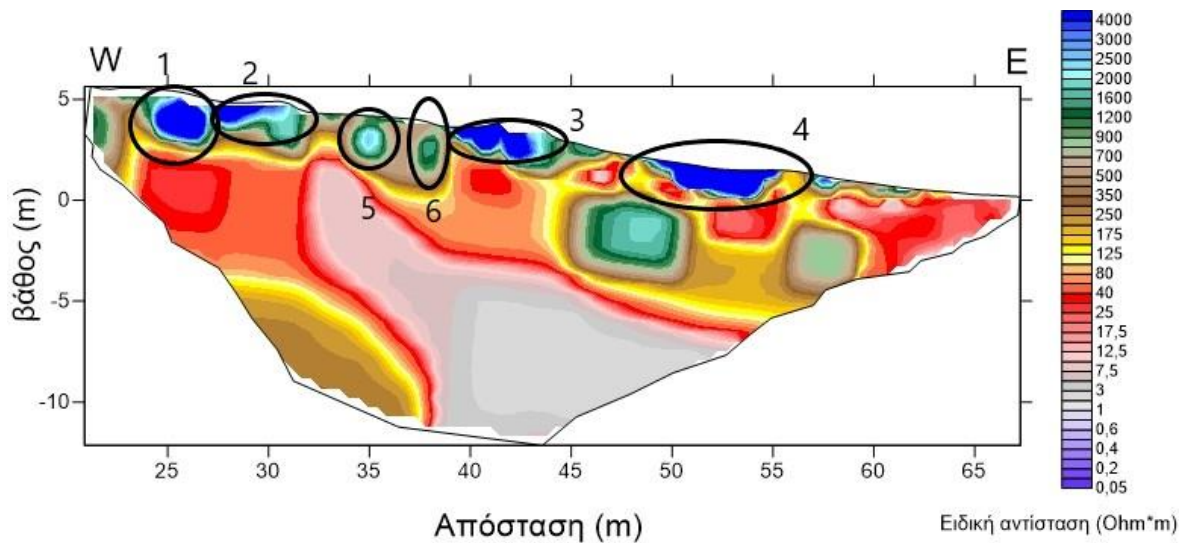
- Σημείο 1: Σε απόσταση 10 m υπάρχει μια δομή η οποία παρουσιάζει ειδική ηλεκτρική αντίσταση γύρω στα 1600 Ohm*m.
- Σημείο 2: Στα 15-20 m απόσταση παρατηρείται δομή ακόμη μεγαλύτερης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που φτάνει τα 4000 Ohm*m.
- Σημείο 3: Παρόμοια δομή συναντάται στα 26 m περίπου απόστασης.
- Σημείο 4: Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εμφανίζονται στα 38-50 m απόσταση, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 1600-4000 Ohm*m.
- Σημείο 5: Πηγαίνοντας προς τα νότια, από τα 55 m περίπου της απόστασης μέχρι το τέλος της τομής εντοπίζεται δομή με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 1200-2000 Ohm*m.

Από την προβολή της τομής στο χάρτη της περιοχής, είναι εμφανές ότι τα σημεία που αναφέρθηκαν παραπάνω συμπίπτουν με τις περιοχές όπου υπάρχουν αμμοθίνες.

Το κομμάτι της ηλεκτρικής τομογραφίας με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 1-40 Ohm*m αφορά την διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος. Η μεγάλη αντίθεση στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι οποίες φτάνουν τα 4000 Ohm*m κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ κάτω από το επίπεδο της θάλασσας είναι σχεδόν μηδενικές, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κοντά στην επιφάνεια υπάρχουν συνεκτικές και αδιαπέρατες δομές.

Ενδιαφέρον επίσης, παρουσιάζει το γεγονός ότι οι δομές αυτές βρίσκονται σε ίδιο βάθος (περίπου 4 m) και έχουν περίπου ίδιο πάχος 1,5 m.

4.3.3.4.2 Ηλεκτρική τομογραφία Artc-2



Εικόνα 4.20: Ηλεκτρική τομογραφία Artc-2

Σε αντίστοιχο περιβάλλον (με χαλαρά ιζήματα και τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 125-600 Ohm*m) με την τομή Artc-1 πραγματοποιήθηκε και η δεύτερη τομή Artc-2, κάθετα στην πρώτη. Η Artc-2 έχει μήκος 70 m και χρησιμοποιήθηκαν 70 ηλεκτρόδια (ανά 1 m) και διάταξη ηλεκτροδίων Pole – Dipole.

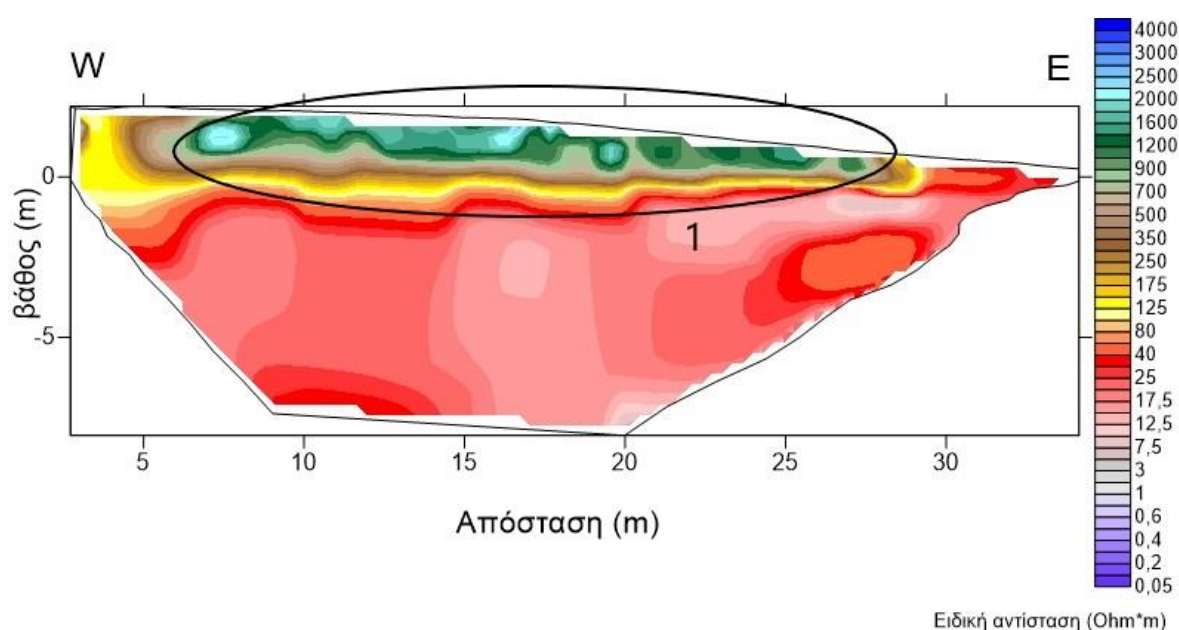
Στις γενικά χαμηλές τιμές, 125-600 Ohm*m της επιφάνειας και 1-40 Ohm*m που αφορούν την διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος, εντοπίστηκαν τα εξής σημεία στα οποία οι τιμές διαφοροποιούνται προς τα πάνω:

- Σημείο 1: Σε απόσταση 25-27 m παρατηρείται κάποια δομή σε βάθος 5 m με πάχος 2 m και ειδική ηλεκτρική αντίσταση 4000 Ohm*m.
- Σημείο 2: Αντίστοιχη δομή παρατηρείται και στα 27-32 m σε βάθος 4,5 m με πάχος 0,5 m.
- Σημείο 3: Σε απόσταση 37-44 m και σε βάθος 4 m (με πάχος 2 m) συναντάται πάλι ειδική ηλεκτρική αντίσταση 4000 Ohm*m.
- Σημείο 4: Παρόμοια δομή σε μεγαλύτερο βάθος 3 m (με πάχος 2 m) εντοπίζεται και στα 47-55 m.
- Σημείο 5: Σε απόσταση 35 m και σε βάθος 4 m (με πάχος 1 m) παρατηρείται δομή με ειδική ηλεκτρική αντίσταση 1200-2000 Ohm*m.
- Σημείο 6: Αντίστοιχη δομή παρατηρείται και στα 37 m με ειδική ηλεκτρική αντίσταση 1600 Ohm*m.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διείσδυση της θάλασσας στο κομμάτι 62 m μέχρι το τέλος της τομής όπου η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι $40 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, πράγμα αναμενόμενο αφού τα τελευταία ηλεκτρόδια ήταν πολύ κοντά στην άκρη της ακτής.

Όπως και στην Artc-1, οι δομές με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση που εντοπίζονται, ταυτίζονται με την τοποθεσία των αμμοθινών, βρίσκονται περίπου στο ίδιο βάθος και έχουν ίδιο πάχος (περίπου 2 m), τόσο μεταξύ τους όσο και με αυτές της Artc-1, που έχουν περίπου 1,5 m πάχος.

4.3.3.4.3 Ηλεκτρική τομογραφία Artc-3



Εικόνα 4.21: Ηλεκτρική τομογραφία Artc-3

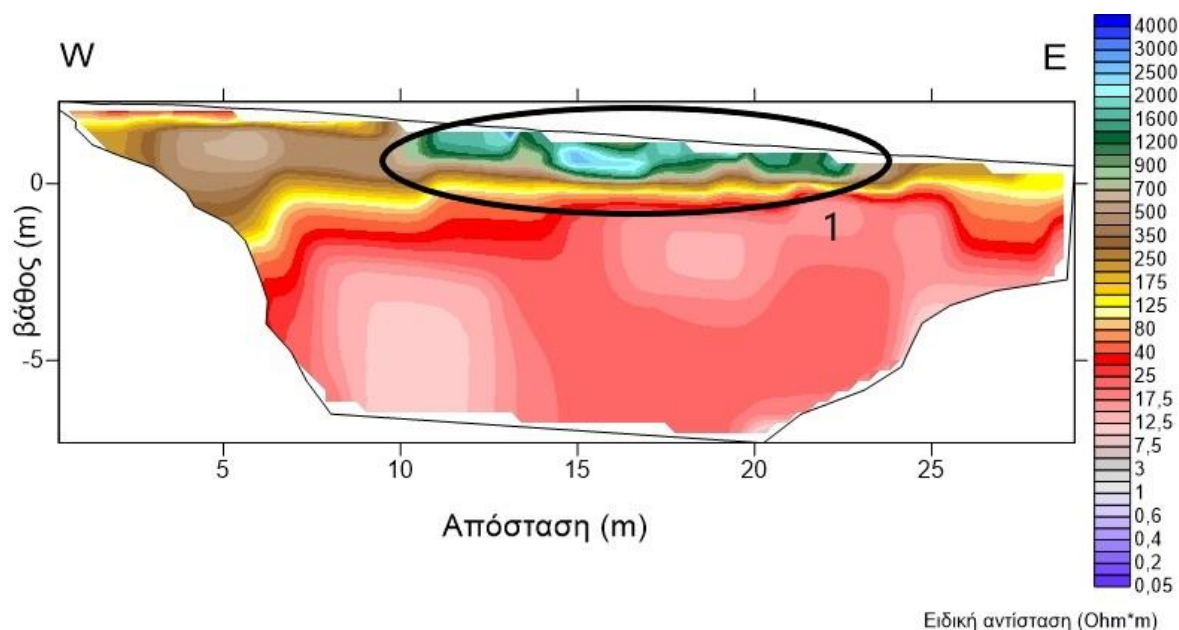
Η ηλεκτρική τομογραφία Artc-3 πραγματοποιήθηκε βόρεια του μικρού ναού κάθετα προς την θάλασσα. Έχει μήκος 35 m, χρησιμοποιήθηκαν 35 ηλεκτρόδια (ανά 1 m) και διάταξη ηλεκτροδίων Pole – Dipole.

Στην ηλεκτρική τομογραφία της τρίτης τομής είναι πολύ εμφανής η διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος. Γίνεται αντιληπτό με τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ($10\text{-}40 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) που στο μεγαλύτερο μέρος εντοπίζονται σε βάθος 1 m από το επίπεδο της θάλασσα και κάτω. Από τα 27 m μέχρι το τέλος της τομής, τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $40 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ παρατηρούνται και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Δομή με υψηλότερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (1200-2000 Ohm*m) σε σχέση με τις τιμές 125-600 Ohm*m των χαλαρών ιζημάτων του υπεδάφους εντοπίζεται στα 7-27 m και σε βάθος 2 m, με πάχος 1 m. (σημείο 1 – Εικόνα 4.21)

Και σε αυτή την ηλεκτρική τομογραφία εντοπίζεται η αντίθεση χαμηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε μεγαλύτερο βάθος και υψηλότερων τιμών κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως και εδώ οι δομές με υψηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση βρίσκονται στο ίδιο βάθος και έχουν ίδιο πάχος με αυτές των υπόλοιπων τομών.

4.3.3.4.4 Ηλεκτρική τομογραφία Artc-4



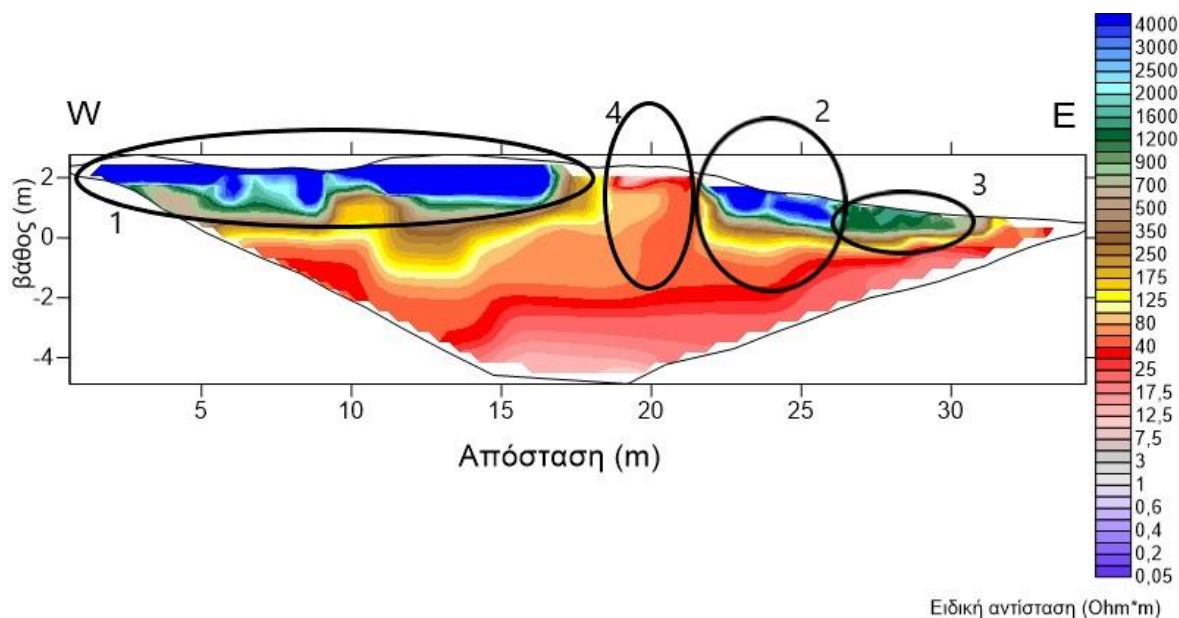
Εικόνα 4.22: Ηλεκτρική τομογραφία Artc-4

Η ηλεκτρική τομογραφία Artc-4 πραγματοποιήθηκε βορειότερα και παράλληλα με την Artc-3. Έχει μήκος 35 m, χρησιμοποιήθηκαν 35 ηλεκτρόδια (ανά 1 m) και διάταξη ηλεκτροδίων Pole – Dipole.

Οι παρατηρήσεις από την ηλεκτρική τομογραφία της τέταρτης τομής είναι παρόμοιες με αυτές της Artc-3. Βρίσκεται σε σχεδόν ίδιο περιβάλλον με τη διεύθυνση του θαλασσινού νερού σε βάθος 2 m και κάτω από το επίπεδο της θάλασσας και με τα χαλαρά ιζήματα της περιοχής κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Δομή με ειδική ηλεκτρική αντίσταση 1200-

2000 Ohm*m εντοπίζεται στα 10-22 m (σημείο 1 – Εικόνα 4.22), σε βάθος 2 m και με πάχος, επίσης όπως και στην Artc-3, 1 m.

4.3.3.4.5 Ηλεκτρική τομογραφία Artc-5



Εικόνα 4.23: Ηλεκτρική τομογραφία Artc-5

Η ηλεκτρική τομογραφία Artc-5 έγινε νότια του μικρού ναού, παράλληλα στην Artc-3 και στην Artc-4. Έχει μήκος 35 m, χρησιμοποιήθηκαν 35 ηλεκτρόδια (ανά 1 m) και διάταξη ηλεκτροδίων Wenner – Schlumberger.

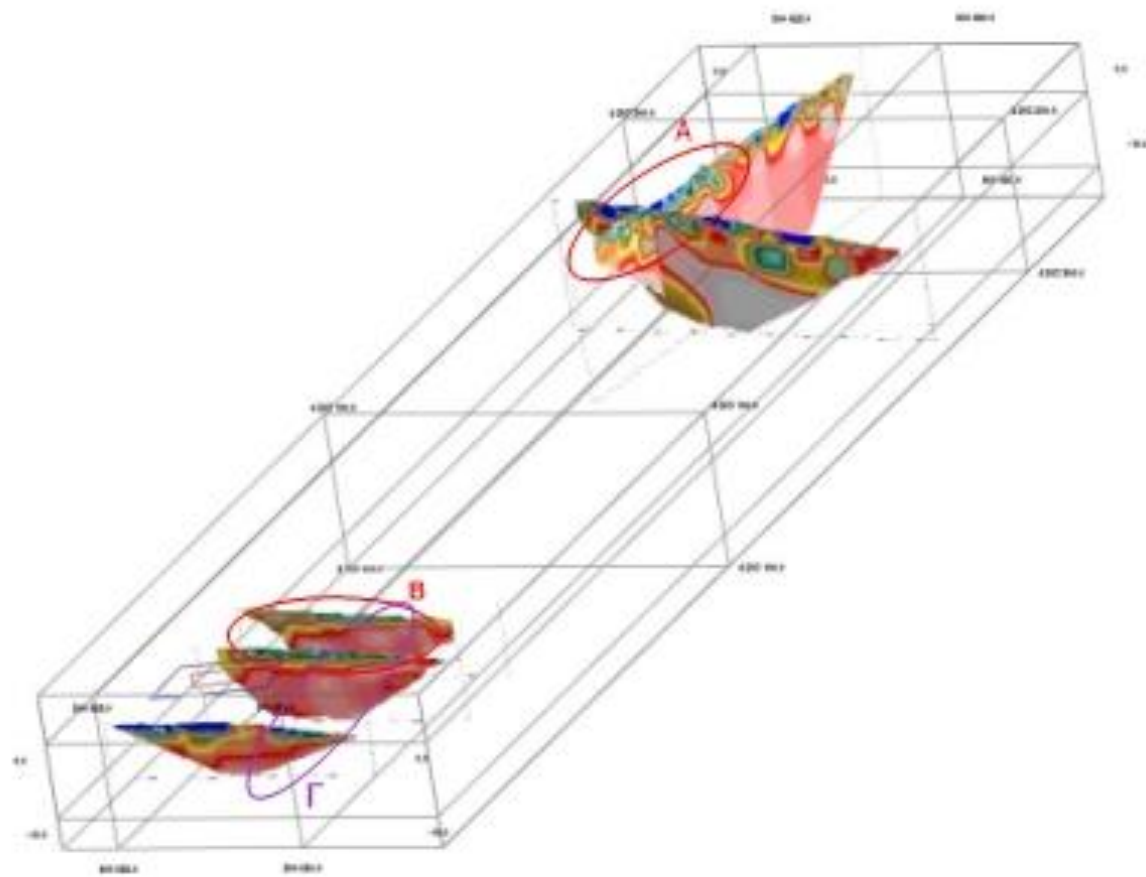
Ερμηνεύοντας στην ηλεκτρική τομογραφία Artc-5 με αντίστοιχο τρόπο με τις προηγούμενες τομογραφίες εντοπίζονται τα εξής:

- Σημείο 1: Στα 0-17 m παρατηρούνται πολύ υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (4000 Ohm*m) σε βάθος 2 m (1 m πάχος).
- Σημείο 2: Ίδιας ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δομή εντοπίζεται στα 22-26 m σε βάθος 1,5 m (1,5 m πάχος).
- Σημείο 3: Σε βάθος 1 m (1 m πάχος) και σε απόσταση 26-30 m υπάρχει δομή με ειδική ηλεκτρική αντίσταση 900-1000 Ohm*m.
- Σημείο 4: Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διείσδυση του θαλασσινού νερού στο σημείο αυτό και η μεγάλη αντίθεση στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εντοπίζονται δεξιά και αριστερά αυτού.

4.3.3.5 Συμπεράσματα

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες στο σύνολό τους έδειξαν μεγάλη αντίθεση μεταξύ των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους όσο και στις τιμές που αφορούν την διείσδυση του θαλασσινού νερού. Η γεωλογία της περιοχής που μαρτυρά την ύπαρξη χαλαρών ιζημάτων (άρα και διαπερατών) έχει σαν αποτέλεσμα να αναμένονται χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το γεγονός ότι υπάρχουν σημεία με πολύ υψηλές τιμές ($4000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα σημεία αυτά αποτελούν κάποιες συνεκτικές και αδιαπέρατες δομές που οφείλονται είτε σε εναποθέσεις αδρομερών υλικών, είτε σε ανθρωπογενούς προέλευσης δομές (π.χ. τοιχία, δρόμοι, κτίσματα κτλ). Το ίδιο βάθος που εντοπίζονται αυτές οι δομές, καθώς και το παρόμοιο πάχος τους, ενισχύουν ακόμα περισσότερο το παραπάνω συμπέρασμα.

Το τρισδιάστατο μοντέλο στο οποίο απεικονίζονται όλες οι ηλεκτρικές τομογραφίες ενισχύει και αποδεικνύει τα παραπάνω συμπεράσματα. Είναι εμφανές ότι οι παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την κάθε ηλεκτρική τομογραφία ξεχωριστά, βρίσκεται σε συμφωνία με τις υπόλοιπες. Παρατηρούνται δομές που χαρακτηρίζονται από συνέχεια, καθώς εντοπίζονται σε γειτονικές ηλεκτρικές τομογραφίες (σημεία Α, Β και Γ στην εικόνα 4.24). Επιπλέον, από τις ηλεκτρικές τομογραφίες Artc-3 και Artc-4 διακρίνεται εμφανέστατα και η διείσδυση του θαλασσινού νερού.



Εικόνα 4.24: 3D απεικόνιση ηλεκτρικών τομογραφιών

4.3.4 Μέθοδος Γεωραντάρ

Η τελευταία μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή ήταν η μέθοδος του γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR) αποτελεί μία γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδο, κατά τη διάρκεια της οποίας λαμβάνονται επιτόπου αποτελέσματα που επεξεργάζονται περισσότερο στο εργαστήριο. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 10 τομές, 6 τομές περιμετρικά του μικρού ναού και άλλες 4 στην περιοχή της αμμοθίνας, όπου πραγματοποιήθηκαν και οι ERT.

4.3.4.1 Εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων γεωραντάρ στο ύπαιθρο, χρησιμοποιήθηκε μία θωρακισμένη κεραία της εταιρείας MALA Geoscience. Το συγκεκριμένο όργανο φέρει μια κεραία συχνότητας 250 MHz που λειτουργεί ταυτόχρονα ως πηγή και δέκτης.



Εικόνα 4.25: Όργανο μετρήσεων GPR

4.3.4.2 Επεξεργασία Μετρήσεων

Τα δεδομένα που λήφθηκαν από τις μετρήσεις στην ύπαιθρο επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν περαιτέρω μέσω του προγράμματος REFLEXW της Sandmeier Scientific Software. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των δεδομένων ήταν τα εξής:

- Subtract - mean (dewow),

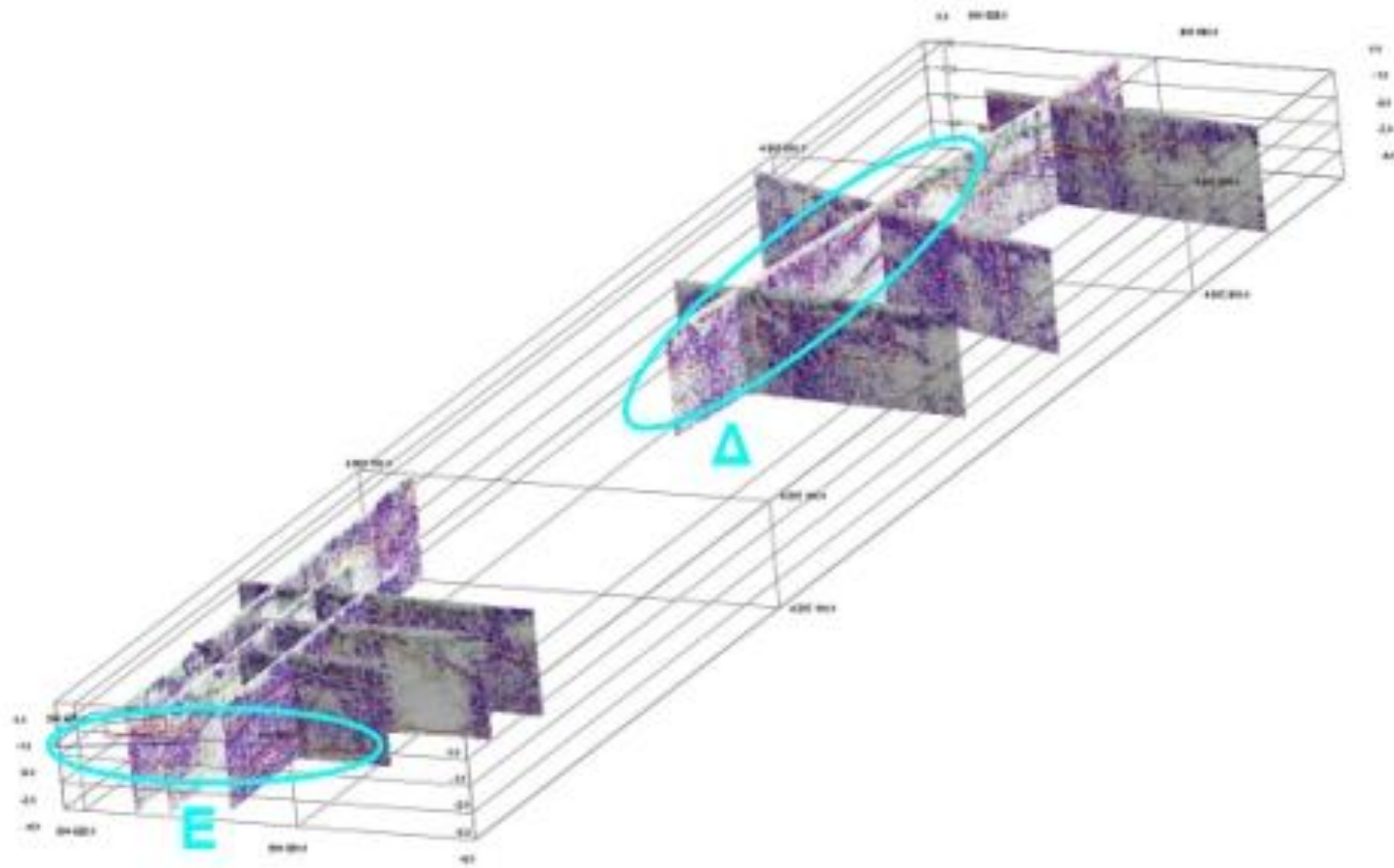
- Correct max phase,
- Move start-time,
- Energy Decay
- Band pass frequency
- Background removal,
- Spectral whitening
- Migration

Τα αποτελέσματα των τομών GPR που προέκυψαν από το πρόγραμμα REFLEXW επεξεργάστηκαν περισσότερο στο πρόγραμμα Surfer έτσι ώστε να εντοπιστούν τοπικές ανωμαλίες και να γίνει διάκριση της στρωματογραφίας.

4.3.4.3 Τομές Γεωραντάρ

Για την βέλτιστη διεξαγωγή συμπερασμάτων τα ραδογράμματα παρουσιάστηκαν σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Από την απεικόνιση αυτή είναι δυνατός ο εντοπισμός των διαφορετικών οριζόντων του υπεδάφους της περιοχής. Η κίτρινη γραμμή στην εικόνα 4.26 (σε κάθε ένα ραδογράμμο) ορίζει την στρωματογραφία και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μέχρι τα 3 m βάθος (περίπου μέχρι αυτό το βάθος φτάνει η κίτρινη γραμμή) το υπέδαφος αποτελείται επιφανειακά από πολύ λεπτομερή υλικά (άμμος) τα οποία όσο μεγαλώνει το βάθος γίνονται πιο αδρομερή. Τα περιγεγραμμένα με την διακεκομμένη κόκκινη γραμμή σημεία (περιοχή Δ και Ε – περιοχές που ταυτίζονται και με την περιοχή Α των ERT, αλλά και με τις δομές υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης που εντοπίζονται στις ηλεκτρικές τομογραφίες Artc-3, Artc-4, και Artc-5 εικόνα 4.24), αφορούν πολλαπλές ανακλάσεις του ηλεκτρομαγνητικού σήματος, οι οποίες παρουσιάζουν συνέχεια και γραμμικότητα. Τα σημεία αυτά αποτελούν στόχους αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, καθώς τα χαρακτηριστικά τους (συνέχεια και γραμμικότητα), μαρτυρούν την ανθρωπογενή τους προέλευση. Ενισχυτικά στο παραπάνω συμπέρασμα δρα το γεγονός ότι η περιοχή έρευνας χρήζει αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, αφού υπάρχουν ήδη δύο αρχαίοι ναοί.

Οι γκριζες περιοχές πιθανόν να αφορούν την διείσδυση του θαλασσινού νερού, η οποία οδηγεί σε απορρόφηση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος και καθιστά μη δυνατή την διεξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων.



Εικόνα 4.26: 3D απεικόνιση ραδογραμμάτων GPR

5 Συμπεράσματα και σχόλια

5.1 Συμπεράσματα

Κατά τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη γεωφυσική έρευνα πλησίον του ναού της Αρτέμιδος Ταυροπόλου και του μικρότερου ναού νοτιότερα του πρώτου, στην παράκτια περιοχή της Αρτέμιδος της Ανατολικής Αττικής με σκοπό τον εντοπισμό δομών που οφείλονται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα, δηλαδή περαιτέρω αρχαιολογικών ευρημάτων και την διερεύνηση της στρωματογραφίας της περιοχής.

Για την διεκπεραίωση της γεωφυσικής έρευνας προηγήθηκε η γεωλογική μελέτη της περιοχής δίνοντας ιδιαίτερη βάση στο γεγονός ότι πρόκειται για μια παράκτια περιοχή (στην παραλία της Λούτσας) και συνεπώς αναμένεται η επίδραση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος στις μετρήσεις. Καθώς λοιπόν, λόγω της υφαλμύρινσης προβλέπεται ένα αρκετά ηλεκτρικά αγώγιμο περιβάλλον, όποια σημεία παρουσιάσουν αντίθετα αποτελέσματα αποτελούν πιθανά αρχαιολογικά ευρήματα. Αυτό συμβαίνει διότι τα σημεία αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλό βαθμό διαπερατότητας, άρα αποτελούν συνεκτικές δομές. Τέτοιες δομές μπορούν να εντοπιστούν με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εκτενής έρευνα των ιστορικών στοιχείων του ναού της Αρτέμιδος και συνολικότερα της περιοχής, καθώς μπορούσαν να δώσουν στοιχεία για το τι αναμένεται να εντοπιστεί. Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης γεωφυσικής μελέτης και επιλογή των καταλληλότερων γεωφυσικών μεθόδων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το στόχο που αναζητείται, τα γεωμορφολογικά στοιχεία της περιοχής και ύστερα από αναδρομή στην παγκόσμια βιβλιογραφία για να εντοπιστούν παρόμοιες περιπτώσεις γεωφυσικής έρευνας. Επιλέχθηκαν να αναπτυχθούν και να μελετηθούν επιπλέον οι εξής τρεις περιπτώσεις:

- Εφαρμογή GPR και EM για τον χαρακτηρισμό της στρωματογραφίας του νησιού Padre (Τέξας) κατά μήκος της ακτής του
- Γεωφυσικές έρευνες σε παράκτια αξιοθέατα στο Ισραήλ
- Γεωφυσικές έρευνες στο ποτάμιο λιμάνι της Όστιας

Στο νησί Padre (Τέξας), πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες με σκοπό να προσδιοριστεί χωρικά και χρονικά η στρωματογραφία του νησιού. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του γεωραντάρ (GPR με μία κεραία 200 MHz) για να ερευνηθεί η εσωτερική δομή διαφόρων μεγεθών (μικρή, μεσαία, μεγάλη) αμμοθίνων. Στην συνέχεια, έγιναν ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις (EM) για να διερευνηθεί η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην αμμοθίνα μεσαίου μεγέθους. Ο συνδυασμός των δεδομένων GPR και EM χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη για να χαρακτηρίσει τις διαφορές στην υποεπιφανειακή στρωματογραφία στις τρεις διαφορετικές αμμοθίνες. Τα στοιχεία δείχνουν ότι διαφοροποιήσεις στο ύψος και την έκταση των αμμόλοφων επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο οι μηχανισμοί απόκρισης και ανάκτησης των παραλιών και των αμμοθίνων λειτουργούν στα καιρικά φαινόμενα και στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Ο μικρότερος αμμόλοφος, κατά τη μετάβαση των καθεστώτων υπερπλήρωσης και πλημμυρών, παρουσίασε ελάχιστη καθαρή διάβρωση κατά τη διάρκεια της καταιγίδας, αλλά παρουσίασε και την ελάχιστη ανάκαμψη. Ο ενδιάμεσος αμμόλοφος φαίνεται να έχει διαβρωθεί εντελώς από τη θύελλα, αλλά έχει επίσης επιδείξει τη μεγαλύτερη ανάκαμψη λόγω της μετανάστευσης των συσσωρευμένων αναχωμάτων από τη μεταφορά με τον αέρα, οδηγώντας στην ανάπτυξη νέων αμμόλοφων για τον σχηματισμό του σύγχρονου πυρήνα του πυθμένα. Ο μεγαλύτερος αμμόλοφος παρουσιάζει μόνο έκπλυση στη βάση του και μικρή ανάκαμψη μετά την καταιγίδα, με εξαίρεση την αποκατάσταση της παραλίας. Οι μηχανισμοί ανάκτησης στο προ-καταιγίδας ύψος της αμμοθίνας εξαρτώνται από την κλίμακα επιπτώσεων της καταιγίδας, καθώς και από το ύψος του αμμόλοφου.

Στις ακτές του Ισραήλ πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες (σε 4 αρχαιολογικές θέσεις ιστορικά συνδεδεμένες με τις ακτές, στην Yavne, το Yavne Yam, το Tel Nami και στην Bethsaida), που στόχο είχαν τον εντοπισμό των αρχαιολογικών θέσεων και την τεκμηρίωσή τους, ούτως ώστε να μπορέσουν να προστατευτούν και να διατηρηθούν ως πολιτισμικά μνημεία. Στο Yavne χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας με μέγιστο βάθος διασκόπησης τα 12 m, δίνοντας πληροφορίες για τον προσδιορισμό του πάχους, του μεγέθους και της έκτασης των αρχαιολογικών συντριμμιών, αλλά και του υποκείμενου υποβάθρου. Από τις ηλεκτρικές τομογραφίες επιβεβαιώθηκε ότι η συσσώρευση των αρχαιολογικών συντριμμάτων υπερβαίνει τα 10 m πάνω από τα ανώτερα τμήματα του αναχώματος και το έντονο ανάγλυφο στην τοπογραφία του βραχώδους υποβάθρου. Στο Yavne Yam πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις ERT, αλλά και μετρήσεις με γεωραντάρ.

Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σειρά από κάθετα στοιχεία, τα οποία υποδηλώνουν τοίχους. Όσον αναφορά την Bethsaida, πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες (ERT) που απλώθηκαν στο μέσο της τετράκλινης πύλης που είχε ανακαλυφθεί από ανασκαφές στην περιοχή. Σε κάθε μια από τις γραμμές ERT παρατηρούνται δομές με μεγάλες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης γύρω από τους θαλάμους, που μπορεί να είναι οι τοίχοι από βασάλτη οι οποίοι ορίζουν μια πύλη με 4 θαλάμους του 10^{ου} αι. π.Χ. που βρίσκονται κάτω από την πύλη του 9^{ου} αι. π.Χ.

Στην Όστια, της Ιταλίας πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες που αφορούν τη διερεύνηση του αρχαίου λιμανιού της Όστια, στην όχθη του Τίβερη και είχαν στόχο τον προσδιορισμό της έκτασης της λεκάνης του λιμανιού, τα χαρακτηριστικά της ιζηματογενούς πλήρωσης του και την εύρεση τυχών ανθρωπογενών δομών - κτισμάτων στην περιοχή. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ηλεκτρική τομογραφία (ERT), το γεωραντάρ (GPR) και η σεισμική μέθοδος. Η έκταση και το σχήμα της λεκάνης του λιμανιού προσδιορίστηκαν από τα προφίλ που προέκυψαν από την ηλεκτρική τομογραφία (ERT), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και για την απεικόνιση της στρωματογραφίας. Οι μετρήσεις GPR, που έγιναν με την χρήση κεραίας 200 MHz και του GSSI SIR-3000, εφαρμόστηκαν στην περιοχή γύρω από το λιμάνι για τη χαρτογράφηση πιθανών αρχαίων ανθρωπογενών δομών και τον εντοπισμό των συνόρων της λεκάνης του λιμανιού. Τα αποτελέσματα της έρευνας ήταν πολύ αξιόπιστα ταυτίζονται με τα διατρητικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, καθιστώντας τις μεθόδους της μελέτης τις καταλληλότερες για το συγκεκριμένο περιβάλλον.

Για την δεδομένη γεωφυσική μελέτη στην περιοχή της Αρτέμιδος, αφού λήφθηκαν υπόψη όλα τα παραπάνω (διεθνής βιβλιογραφία, στόχος αναζήτησης, βάθος, τοποθεσία και γεωλογία περιοχής) αποφασίστηκε η χρήση των μεθόδων της ηλεκτρικής τομογραφίας, του γεωραντάρ και της κλασσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, έτσι ώστε να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Το τελικό συμπέρασμα προέκυψε από την συνολική εκτίμηση των αποτελεσμάτων αυτών, καθώς η κάθε μέθοδος ολοκλήρωνε και επιβεβαίωνε την προηγούμενη.

Η κλασσική ηλεκτρομαγνητική μέθοδος έδωσε πληροφορίες για τον βαθμό υφαλμύρισης της περιοχής έρευνας. Τα χαλαρά ιζήματα του υπεδάφους, καθώς και το γεγονός ότι η τοποθεσία είναι δίπλα στην θάλασσα, έχουν σαν αποτέλεσμα την μεγάλη διαπερατότητα του υπεδάφους και επομένως αναμένονται υψηλές τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Αντί αυτού όμως, οι EM μετρήσεις έδειξαν σημεία (τοπικές ανωμαλίες γύρω

από τον μικρότερο ναό και στην περιοχή της αμμοθίνας) με χαμηλές τιμές που οφείλονται σε μικρές διαπερατότητας δομές. Οι δομές αυτές αρχικά χαρακτηρίστηκαν ως αδρομερή υλικά που έχει αποθέσει στην περιοχή η θάλασσα, ή συνεκτικές δομές, ανθρωπογενούς ίσως προελεύσεως, όπως τοιχία, δρόμοι κλπ. Συνολικότερα παρατηρήθηκε μια δομή με αυτά τα χαρακτηριστικά η οποία ακολουθεί σχεδόν παράλληλα την θάλασσα σε όλο το μήκος που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις EM.

Οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας ERT) παρουσίασαν μεγάλη αντίθεση μεταξύ των τιμών της επιφάνειας του εδάφους και των τιμών σε μεγαλύτερο βάθος που αφορούν την διείσδυση του θαλασσινού νερού. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από τη γεωλογία της περιοχής αναμένονται χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το γεγονός ότι υπάρχουν σημεία με πολύ υψηλές τιμές ($4000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) οδηγεί στο συμπέρασμα που προέκυψε και από τις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις, ότι δηλαδή τα σημεία αυτά αποτελούν κάποιες συνεκτικές και αδιαπέρατες δομές. Το ίδιο βάθος που εντοπίζονται αυτές οι δομές, καθώς και το παρόμοιο πάχος τους, ενισχύουν ακόμα περισσότερο το παραπάνω συμπέρασμα.

Το τρισδιάστατο μοντέλο στο οποίο απεικονίζονται όλες οι ηλεκτρικές τομογραφίες ενισχύει και αποδεικνύει τα παραπάνω. Παρατηρούνται δομές που χαρακτηρίζονται από συνέχεια, καθώς εντοπίζονται σε γειτονικές ηλεκτρικές τομογραφίες (σημεία Α, Β και Γ). Επιπλέον, από τις ηλεκτρικές τομογραφίες Artc-3 και Artc-4 διακρίνεται εμφανέστατα και η διείσδυση του θαλασσινού νερού.

Τα παραπάνω συμπεράσματα έρχονται σε συμφωνία και με τα δεδομένα που προέκυψαν από την μελέτη των ραδιογραμμάτων, καθώς στα σημεία που εντοπίστηκαν οι τοπικές ανωμαλίες στα EM και οι δομές πολύ υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης στα ERT ταυτίζονται με τα σημεία των πολλαπλών ανακλάσεων που εμφανίζονται στα GPR. Οι ανακλάσεις αυτές χαρακτηρίζονται επίσης από συνέχεια και γραμμικότητα, στοιχεία που δεν απαντώνται σε φυσικούς σχηματισμούς. Συνεπώς, οι δομές που εντοπίστηκαν από την πρώτη στιγμή με την χρήση της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, αποτελούν συνεκτικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης. Είναι δηλαδή πιθανοί αρχαιολογικοί στόχοι.

5.2 Σχόλια

Από την ανάλυση και την μελέτη των περιπτώσεων της διεθνούς βιβλιογραφίας, καθώς και από την εφαρμογή των συγκεκριμένων γεωφυσικών μεθόδων στην περιοχή έρευνας και τα αποτελέσματα αυτών, αποδεικνύεται η καταλληλότητα των μεθόδων που επιλέχθηκαν για την υλοποίηση της έρευνας, τον εντοπισμό τοπικών δομών και την ανάλυση της στρωματογραφίας στην περιοχή. Ο συνδυασμός μεθόδων γεωφυσικής μελέτης που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη έρευνα κρίνεται σωστός και προτείνεται σε παρόμοιες περιπτώσεις με ομοειδές πρόβλημα. Αναλυτικότερα, η επιλογή αυτών των γεωφυσικών μεθόδων, η σειρά εφαρμογής τους, οι διατάξεις τους και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων ενδείκνυται για έρευνες με παρεμφερή γεωλογικά, γεωμορφολογικά, ιστορικά και αρχαιολογικά στοιχεία.

Ενθαρρυντικό στοιχείο στην επιλογή του συνδυασμού κλασσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, ηλεκτρικής τομογραφίας και γεωραντάρ, αποτελούν τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου ξεχωριστά. Πλεονεκτήματα που αφορούν:

- την ευκολία και την μη κοστοβόρα σαφή εικόνα για τη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υπεδάφους την οποία παρέχει η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος
- την απλή, γρήγορη, εύχρηστη και οικονομική μέθοδο με ταυτόχρονη παραγωγή αποτελεσμάτων τόσο για την στρωματογραφία, αλλά και τον εντοπισμό ανθρωπογενών δομών του γεωραντάρ, καθώς και
- τα ακριβή και λεπτομερή αποτελέσματα, με μεγάλο βάθος διασκόπησης, που προσφέρει η ηλεκτρική τομογραφία, παρ' ότι αποτελεί μια δύσκολη και χρονοβόρα μέθοδο.

Σημαντική παράμετρος αποτέλεσε το γεγονός ότι πρόκειται για μια παράκτια περιοχή έρευνας, πράγμα που να μην δημιουργεί προβλήματα λόγω διείσδυσης του θαλασσινού νερού (απορρόφηση σήματος, αδυναμία στην διερεύνηση του υπεδάφους σε μεγάλο βάθος κ.α.), έχει όμως το πλεονέκτημα ότι εμφανίζει διαφορετική περατότητα και είναι εύκολο να εντοπιστούν συνεκτικές δομές μέσα στα χαλαρά ιζήματα της ευρύτερης περιοχής. Ύστερα από το πέρας της έρευνας προτείνεται στην Εφορεία Αρχαιοτήτων να εστιάσει το ενδιαφέρον της στην περιοχή γύρω από τον μικρότερο ναό, βόρεια αυτού (σημείο 2 εικόνα 4.10) καθώς και στην περιοχή της αμμοθίνας στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής των μετρήσεων (περιοχή Α εικόνα 4.24).

6 Βιβλιογραφία

- al., S. R. (2009, January). GPR and inductive electromagnetic surveys applied in three coastal sambaqui (shell mounds) archaeological sites in Santa Catarina state, South Brazil. *Journal of Archaeological Science*, 36, 2081-2088.
- Benjamin W. Stanley, B. L. (n.d.). Urban Open Spaces in Historical Perspective: A Transdisciplinary Typology and Analysis. *Urban Geography*, 33(8).
- Bradley A. Weymer, P. B. (2013). Using GPR and EM to characterize barrier island transgression along the Texas Coast. *SEG Houston 2013 Annual Meeting*.
- Christeen Nahas, P. B. (n.d.). Geophysical investigations at coastal archaeological sites in Israel. *SEG*.
- Conyers, L. (2004). *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. Altamira Press.
- DeBlasis, P. K.-Y. (2007). *Sam- baqui e Paisagem: Dinâmica natural e arqueologia regional no litoral do sul do Brasil*.
- Demkowicz, L. (n.d.). *Research Gate*. Ανάκτηση από Research Gate: https://www.researchgate.net/figure/Faradays-Law_fig9_255590884
- Everett, M. E. (2013). *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Federica Sulas, M. M. (2012, June). Archaeology at the micro-scale: micromorphology and phytoliths at a Swahili stonetown. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 4(2), 145–159.
- Fish, S. D. (2000). *Eventos incrementais na construção de sambaquis, litoral sul do Estado de Santa Catarina*.
- Fleisher, J. (2014, September). The complexity of public space at the Swahili town of Songo Mnara, Tanzania. *Journal of Anthropological Archaeology*, 35, 1-22.
- Goodman D, P. S. (2013). *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Berlin: Springer.
- Horton, M. (1996). *Shanga: The Archaeology of a Muslim Trading Community on the Coast of East Africa*. Nairobi: British Institute in Eastern Africa.
- Hutson, S. S. (2007, September). Beyond the buildings: formation processes of ancient Maya houselots and methods for the study of non-architectural space. *Journal of Anthropological Archaeology*, 26(3), 444-473.

- IRIS Instruments*. (n.d.). Ανάκτηση από Syscal Pro: <http://www.iris-instruments.com/syscal-pro.html>
- J.B. Fleisher, F. S. (n.d.). *Deciphering public spaces from open space in urban contexts: Geophysical survey, multi-element soil analysis, and artifact distributions at the 15th-16th-century AD Swahili settlement of Songo Mnara, Tanzania*. Rice University.
- J.B. Fleisher, S. W.-J. (2010). Kilwa-type coins from Songo Mnara, Tanzania: New Finds and Chronological Implications. *Numismatic Chronicle*, 170, 51-59, 494–506.
- Jelena, J. (2007). *Ο μύθος της Ιφιγένειας στον Ζ. Ρακίνα, στον Γ. Ρίτσο και στη σύγχρονη ποίηση*. Διπλωματική Εργασία, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, Τμήμα Θεατρικών Σπουδών, Πάτρα.
- Kneip, A. (2004). *O Povo da Lagoa: Uso do SIG para o Modelamento e Simulação na Area Arqueolo'gica do Camacho*. D.Sc. Thesis.
- Loke, D. M. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.
- McNeil, J. (1980, October). Electromagnetic Terrain Conductivity Measurements at Low Induction Numbers. Ontario, Canada: GEONICS LIMITED. Ανάκτηση από GEONICS LIMITED: <http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn6.pdf>
- Negri S, L. G. (2008). High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface. *Journal of Applied Geophysics* , 65, 111-120.
- Orlando, L. (2007). Georadar data collection, anomaly shape and archaeological interpretation - a case study from central Italy. . *Archaeological Prospection* , 14, 213-225.
- P.C.F. Giannini, P. D. (2005). Processos e materiais geolóγicos e a construção de sambaquis no litoral sul de Santa Catarina . *Proceedings of 10th Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário* .
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of Applied Geophysics* (Fifth Edition εκδ.). Sweden: Chapman & Hall.
- Philip Kearey, M. B. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (Third Edition εκδ.). Blackwell Science.

- Piro S, G. D. (2003). The study and characterisation of Emperor Traiano's Villa (Altopiani di Arcinazzo – Roma) using high-resolution integrated geophysical surveys. . *Archaeological Prospection* , 20, 1-25.
- ResearchGate*. (n.d.). Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/figure/a-GEM-2-in-HCP-coils-configurations-b-GEM-2-in-VCP-coils-configurations-Won-1980_fig3_323497024
- Self Study Point*. (n.d.). Ανάκτηση από Ampere's Law: <https://selfstudypoint.in/ampere-law/>
- Selma I. Rodrigues a, J. L. (2009, January). GPR and inductive electromagnetic surveys applied in three coastal sambaqui (shell mounds) archaeological sites in Santa Catarina state, South Brazil . *Journal of Archaeological Science*, 36, 2081-2088.
- Smith, M. L. (2003). *The Social Construction of Ancient Cities*. (M. L. Smith, Επιμ.) Washington: Smithsonian Institution Press.
- Tina Wunderlich, D. W. (2017). The river harbour of Ostia Antica - stratigraphy, extent and harbour infrastructure from combined geophysical measurements and drillings. *Elsevier Ltd and INQUA*.
- Valeria Testone, V. L. (2015). Use of Integrated Geophysical Methods to Investigate a Coastal Archaeological Site: the Sant'Imbenia Roman Villa (Northern Sardinia, Italy). *Archaeological Prospection*, 22, 63-74.
- Vince Gaffney, J. B. (2013). Assessment of the CMD Mini-Explorer, a New Low-frequency Multi-coil Electromagnetic Device, for Archaeological Investigations. *Archaeological Prospection*.
- Welham, K. F.-J. (2014). *Geophysical survey in Sub-Saharan Africa: magnetic and electromagnetic investigation of the UNESCO world heritage site of Songo Mnara, Tanzania* . *Archaeological Prospection*.
- Wells, E. C. (2017, September). Sampling Design and Inferential Bias in Archaeological Soil Chemistry. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 17(3), 209-230.
- ΑΓΑΜΕΜΝΟΝΑΣ, Α. (2017). *Γεωφυσική Έρευνα σε αρχαιολογικούς χώρους του Νομού Κορινθίας*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών - Τομέας Μεταλλευτικής - Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Αθήνα.

- ΑΓΑΜΕΜΝΟΝΟΣ, Α. (2017). *Γεωφυσική Έρευνα σε αρχαιολογικούς χώρους του Νομού Κορινθίας*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών - Τομέας Μεταλλευτικής - Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Αθήνα.
- Άκης Τσελέντης, Π. Π. (n.d.). *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική*. Αθήνα: Liberal Books.
- Αποστολόπουλος, Γ. (2013). *ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΑΡΓΟΛΙΚΗ ΑΡΧΕΙΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ*. (n.d.). Ανάκτηση από Ιφιγένεια:
<https://argolikivivliothiki.gr/tag/%CE%B9%CF%86%CE%B9%CE%B3%CE%AD%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%B7-%CE%B5%CE%BD-%CF%84%CE%B1%CF%8D%CF%81%CE%BF%CE%B9%CF%82/>
- Δήμος Σπάτων - Αρτέμιδος*. (2011). Ανάκτηση από Ιστορία: <http://www.spata-artemis.gr/index.php?module=news&type=user&func=display&id=183>
- K.A. Sudduth, S. D. (2001). Accuracy issues in electro- magnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture . *Computers and Electronics in Agriculture* , 31, 239-264.
- Καλογερόπουλος, Κ. (n.d.). *η εν Αθήναις Αρχαιολογική Εταιρεία*. Ανάκτηση από Λούτσα: <http://www.archetai.gr/site/content.php?artid=124>
- Καρκάνη, Ά. (2012). *Μελέτη των ακτόλιθων της Ανατολικής Αττικής*. ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ , ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ . ΑΘΗΝΑ: ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ .
- Λατσούδας, Χ. (2003). Γεωλογικός Χάρτης Ελλάδας σε κλίμακα 1:50.000. *Φύλλο Κορωπί-Πλάκα*.
- Λιώσης, Ν. (2013). *ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ: ΦΥΛΛΑ ΧΑΡΤΗ Γ.Υ.Σ. ΚΟΡΩΠΙ ΚΑΙ ΠΛΑΚΑ (ΚΛΙΜΑΚΑ 1:50.000)*. Πτυχιακή Εργασία, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα.
- Μαρία Κουή, Ν. Α. (2015). *Έλεγχος για γεωραντάρ*. Ανάκτηση από Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα: <http://hdl.handle.net/11419/6172>

- Μήττα, Δ. (n.d.). *Ψηφίδες για την ελληνική γλώσσα & την ελληνική εκπαίδευση*. Ανάκτηση από Μορφές και Θέματα της Αρχαίας Ελληνικής Μυθολογίας, Ιφινένεια: http://www.greek-language.gr/digitalResources/ancient_greek/mythology/lexicon/atreides/page_010.html
- Σπανού, Σ. (2010). *ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΒΙΟΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΑΕΡΟΛΙΜΕΝΑ ΑΘΗΝΩΝ*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Βιολογίας, Τομέας Βιολογίας Φυτών, Πάτρα.
- Συριανού, Ρ. (n.d.). *ΟΔΥΣΣΕΥΣ Υποργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού*. Ανάκτηση από Ιερό Ταυροπόλου Αρτέμιδος στην Αρτέμιδα: http://odysseus.culture.gr/h/2/gh251.jsp?obj_id=21044
- Τζάνης, Α. (2016). *Στοιχεία από τον γεωηλεκτρομαγνητισμό* (4η Αναθεώρηση εκδ.). Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Φυσική (Γενικής Παιδείας) - Βιβλίο Μαθητή*. (n.d.). Ανάκτηση από ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ: <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C107/483/3168,12795/>