



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ  
ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ ΣΤΟ ΛΙΒΑΔΙ ΝΗΣΟΥ  
ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ “



Ηλιοπούλου Άννα

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2023



...Στην πολυαγαπημένη μου μητέρα ...

## Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει την παρούσα διπλωματική εργασία, μέσα από όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα, από την αρχή μέχρι και το τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους ανθρώπους που με στήριξαν και ήταν δίπλα μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Αποστολόπουλο, που μου έδωσε το κίνητρο να ασχοληθώ με την γεωφυσική και που μου έδωσε την ευκαιρία να πάρω μέρος σε μία γεωφυσική έρευνα τέτοιου βεληνεκούς. Τον ευχαριστώ βαθύτατα για την στήριξη του από το 2019 μέχρι και σήμερα.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον συνάδελφο μου, απόφοιτο και διδακτορικό φοιτητή της σχολής μας, Σταύρο Καριζώνη, για την σημαντική συνεισφορά του στη διαδικασία των γεωφυσικών μετρήσεων, την επεξεργασία τους αλλά και για τις υπέροχες στιγμές που περάσαμε μαζί στο νησί της Κεφαλλονιάς.

Συμπληρωματικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω και το Odysseus Unbound Foundation και ιδιαιτέρως τον κύριο John Crawshaw τόσο για την δυνατότητα πραγματοποίησης της έρευνας όσο και για τη συνεισφορά του, την ξενάγηση στους Μυκηναϊκούς τάφους και την εξαιρετική φιλοξενία στο νησί.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον συνάδελφο και συμφοιτητή μου Παναγιώτη Λιόση που στήριξε αυτή τη γεωφυσική έρευνα και αποτέλεσε σημαντικό κομμάτι αυτής με την συνεισφορά του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πάνω από όλα τους γονείς μου, τον αγαπημένο μου Άρη, αλλά και την αδερφή μου Ευτυχία, για την στήριξη και την αγάπη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, όπου μου έδιναν καθημερινά το θάρρος και την δύναμη να συνεχίσω.



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη περιοχή Λιβιάδι, της νήσου Κεφαλληνίας. Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές που να αποδίδονται στην ύπαρξη ενός αρχαίου λιμανιού ή μώλου, είτε να εντοπιστεί κατανομή ιζημάτων που να έχει επηρεαστεί από τις πιθανές αρχαίες δομές. Αρχικά, έγινε σχεδιασμός της έρευνας βάσει πληροφοριών από γεωλογική μελέτη που προηγήθηκε. Επιπλέον, για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής έρευνας, χρησιμοποιήθηκαν και στοιχεία από παρόμοιες δημοσιευμένες περιπτώσεις μελετών γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκαν σε περιοχή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Έχοντας σχεδιάσει την γεωφυσική έρευνα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με 4 διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους, την ηλεκτρομαγνητική (EM), την μαγνητική μέθοδο, το γεωραντάρ (GPR) και την ηλεκτρική μέθοδο (ERT). Η επεξεργασία και η ερμηνεία των δεδομένων που προέκυψαν από αυτές τις μεθόδους έγιναν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκε η δομή του υπεδάφους στο καθορισμένο βάθος διασκόπησης, με σημαντικές ανωμαλίες που παρουσιάζουν τη γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής λόγω σεισμών και πιθανές ενδιαφέρουσες ενδείξεις τεκτονικής.

## **Abstract**

The subject of the present thesis is the geophysical survey that was carried out in the area of Livadi, on the island of Kefallinia, Greece. The aim of this study is to investigate both the stratigraphy of the area and whether there are anthropogenic structures that can be attributed to the existence of an ancient harbor or pier, or to identify sediment distribution that may have been influenced by these possible ancient structures. Initially, the survey was planned based on information from a previous geological study in the area. In addition, for the design of the geophysical survey, data from similar published cases of geophysical survey studies carried out in an area of archaeological interest, were also used. Having designed from scratch the geophysical survey, measurements were made using 4 different geophysical methods, electromagnetic (EM), the magnetic method, the georadar (ground penetrating radar-GPR) and the electrical method (ERT). The processing and interpretation of the data obtained from these methods, were carried out in the Laboratory of Applied Geophysics in the School of Mining and Metallurgical Engineering at the National Technical University of Athens. The geophysical data interpretation, showed the sub-surface structure to the planned depths, with notable features and abnormalities showing the geomorphological evolution of the area due to the earthquakes and possibly some indications of tectonic interest.

# Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη .....	4
Abstract.....	5
1. Εισαγωγή .....	16
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας .....	19
1.2 Δομή Εργασίας .....	19
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	20
2.1 Η Κλασική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος .....	20
2.1.1 Γενικά.....	20
2.1.2 Αρχές της Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου .....	20
2.1.3. Βάθος διείσδυσης των Ηλεκτρομαγνητικών πεδίων .....	23
2.1.3.1 Συστήματα μέτρησης φάσης.....	24
2.1.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα .....	29
2.1.4.1 Βάθος και Ανάλυση Δεδομένων με την συχνότητα .....	30
2.1.4.2 Μαγνητική Επιδεκτικότητα & Μεθοδολογία Μετρήσεων .....	33
2.1.4.3 Βάθος και Ανάλυση Δεδομένων .....	34
2.1.5 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων & Μέθοδοι Εφαρμογής .....	35
2.1.5.1 Εφαρμογές μεθόδου .....	36
2.1.5.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου .....	36
2.2 Γεωραντάρ-GPR (Ground Penetrating Radar) .....	37
2.2.1 Γενικά.....	37
2.2.2 Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ.....	39
2.2.3 Τρόποι μετρήσεων.....	40
2.2.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της Μεθόδου.....	42
2.3 Μαγνητική Μέθοδος.....	43
2.3.1 Γενικά.....	43
2.3.2 Αρχές της Μαγνητικής Μεθόδου.....	44
2.3.2.1 Μαγνητική Επαγωγή .....	46
2.3.2.2 Μαγνητική Επιδεκτικότητα.....	47
2.3.2.3 Το Μαγνητικό πεδίο της Γης .....	47
2.3.2.4 Παραμένουσα Μαγνήτιση .....	50

2.3.3	Λήψη Μετρήσεων με την Μαγνητική μέθοδο.....	50
2.3.4	Μαγνητικά Όργανα Μέτρησης.....	51
2.4	Ηλεκτρικές Μέθοδοι.....	53
2.4.1	Γενικά.....	53
2.4.1.1	Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης.....	54
2.4.2	Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης .....	55
2.4.2.1	Ηλεκτρική ειδική αντίσταση & Νόμος του Ohm.....	55
2.4.2.2	Επηρεασμός ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.....	57
2.4.2.3	Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο .....	59
2.4.2.4	Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο .....	60
2.4.2.5	Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση.....	61
2.4.5.6	Οι Διατάξεις των ηλεκτροδίων .....	62
2.4.5.7	Κατάλληλη Διάταξη Έρευνας.....	64
2.4.5.8	Βάθος Έρευνας.....	65
2.4.5.9	Εξοπλισμός για την ύπαιθρο .....	66
2.4.3	Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις.....	68
2.4.4	Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας.....	70
3.	ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ .....	72
3.1	Γεωφυσική Έρευνα με GPR (Ground Penetrating Radar) για την εύρεση αρχαίου λιμανιού του Μεσαίωνα και της Εποχής των Βίκινγκ στην περιοχή Sigtuna, Σουηδίας.....	72
3.1.1	Η σημασία του γεωραντάρ στις αρχαιολογικές έρευνες .....	72
3.1.1.1	Περιοχή Έρευνας .....	74
3.1.1.2	Γεωφυσικές έρευνες στην Sigtuna.....	77
3.1.1.4	Χάρτες του GPR για τις περιοχές ενδιαφέροντος.....	78
3.1.1.5	Αποτελέσματα της έρευνας .....	80
3.2	Εφαρμογή Β: Μια προκλητική αρχαιο-γεωφυσική έρευνα μέσω GPR και ERT στο Keber Tepe, City Hill of Doliche,(Gaziantep, NA Τουρκία).....	81
3.2.1	Γενικά.....	81
3.2.2	Ιστορία και Γεωλογία της περιοχής .....	83
3.2.3	Αρχαιολογικές Γεωφυσικές έρευνες.....	85
3.2.4	Έρευνα GPR.....	86
3.2.5	Έρευνα ERT .....	87
3.2.6	Ερμηνεία Αποτελεσμάτων.....	88
3.2.6.1	Site SA-1.....	88

3.2.6.2 Site SA-2.....	94
3.2.6.3 Site SA-3.....	99
3.2.7 Συμπεράσματα της έρευνας .....	103
3.3 :Τρισδιάστατη αναπαράσταση θαμμένων κατασκευών με μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά και γεωηλεκτρικής τομογραφίας δεδομένα με παράδειγμα από την αρχαιολογική θέση της Φαιστού Κρήτης .....	104
(R. Di Maio, M. La Manna and E. Piegari.,2015) .....	104
3.3.1 Γενικά.....	104
3.3.2 Περιγραφή της περιοχής έρευνας .....	105
3.3.3 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος EM .....	106
3.3.4 Ερμηνεία δεδομένων έρευνας.....	109
3.3.5 Συμπεράσματα των ερευνών .....	111
3.4 Η χρήση της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό τάφων και την χαρτογράφηση νεκροταφείων, Ocmulgee National Monument, Georgia USA .....	112
3.4.1 Γενικά.....	112
3.4.2 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος .....	113
3.4.3 Αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	114
3.4.4 Συμπεράσματα έρευνας .....	115
<b>4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΛΙΒΑΔΙ.....</b>	<b>116</b>
4.1 Γενικά.....	116
4.2 Ιστορία και Αρχαιολογία .....	119
4.3 Γεωλογία της περιοχής .....	121
4.3.1 Γεωλογία Ιθάκης και Κεφαλληνίας.....	121
4.3.2 Νεοτεκτονική Δομή Κεφαλληνίας και Ιθάκης.....	124
4.3.2.1 Τεκτονική επισκόπηση στην Περιοχή Λιβάδι- Χερσόνησος Αργοστολίου-Χερσόνησος Ληξουρίου, Κεφαλληνίας .....	126
<b>5. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΛΙΒΑΔΙ,ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>128</b>
5.1 Γενικά για την έρευνα .....	128
5.2 Μαγνητική & Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος.....	131
5.2.1 Γενικά.....	131
5.2.2 Εξοπλισμός.....	133
5.2.3 Ηλεκτρομαγνητικοί και Μαγνητικοί χάρτες .....	136
5.3 Ηλεκτρική Μέθοδος.....	148

5.3.1 Γενικά.....	148
5.3.2 Εξοπλισμός.....	150
5.3.3 Επεξεργασία των μετρήσεων .....	151
5.3.4 Αποτελέσματα της Μεθόδου .....	152
5.3.5 Συμπεράσματα και Σχόλια .....	157
5.3.5.1 Συμπεράσματα.....	157
5.3.5.2 Σχόλια.....	159
6. Βιβλιογραφία .....	160

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1:Γεωφυσικές μέθοδοι και εφαρμογές .....	17
Πίνακας 2: Τυπικές εφαρμογές του CMD .....	28
Πίνακας 3:Ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων( $v$ ) τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς ( $K$ ) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας( $\sigma$ ) για διάφορους τύπους υλικών .....	37
Πίνακας 4:Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος Γεώργιος,2013) .....	57
Πίνακας 5:Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	58
Πίνακας 6:Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με τη περίπτωση της έρευνας .....	64

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Γενική αρχή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου(Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002).....	21
Εικόνα 2: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. Το πηνίο αποστολής σημάτων δημιουργεί ένα αρχικό πεδίο της ‘EMI’ που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό αναγκάζει τα ρεύματα να περάσουν μέσα από τα αγωγίμα αντικείμενα όπως φαίνεται στο σχήμα και στην συνέχεια να δημιουργηθεί από αυτά το δευτερεύον πεδίο. Τα πεδία μετρούνται από το πηνίο-receiver .....	22
Εικόνα 3: α) Ο γωνιακός διαχωρισμός φάσης θ β) διάγραμμα πλάτους των κυματομορφών των P,S,R πεδίων .....	24
Εικόνα 4: Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος-καλώδιο-δέκτης.....	25
Εικόνα 5: Leica GPS system GX1230.....	27
Εικόνα 6:CMD-2 & CMD-4 όργανα μέτρησης.....	28
Εικόνα 7: Χειριστήριο ρυθμίσεων και ελέγχου μετρήσεων του CMD που χρησιμοποιήθηκε στις γεωφυσικές έρευνες στο Λιβιάδι, Κεφαλληνίας .....	28
Εικόνα 8: Geonics EM38 &EM31 Systems.....	30
Εικόνα 9: Προσανατολισμός σπειρών του οργάνου (Σημειώσεις Γεωφυσικής, Αποστολόπουλος,2013) .....	31
Εικόνα 10:Κάθετη διάταξη πηνίων στον ίδιο άξονα στο EM34-XL .....	31
Εικόνα 11:Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικείμενου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (α) ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετριέται με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος Γεώργιος 2013)-το παράδειγμα ‘κουτί με λίρες ‘ .....	32
Εικόνα 12:BartingtonMS2D διάταξη μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας .....	34
Εικόνα 13: Αρχή των συστημάτων FEM&TEM.....	35
Εικόνα 14:Η σχέση συχνότητας και απόστασης ανίχνευσης των υλικών .....	38
Εικόνα 15:Τυπικό διάγραμμα μπλοκ για το σύστημα λειτουργίας του γεωραντάρ/ Εικόνα 16:Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος. 2013) .....	39
Εικόνα 17: Common offset & Common Midpoint(Kearey,Brooks,Hill,2002) .....	40
Εικόνα 18: Διάταξη Transillumination GPR.....	41
Εικόνα 19:Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάση της συχνότητας κεραίας του γεωραντάρ & Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων... ..	42
Εικόνα 20: Μέση επιδεκτικότητα πετρωμάτων .....	45
Εικόνα 21: Τα μαγνητικά δίπολα που δημιουργούνται στην παράλληλη διεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται στο υλικό (Λούης, Φεβρουάριος 2003).....	46
Εικόνα 22:Το γεωμαγνητικό πεδίο της Γης (Λούης,Φεβρουάριος 2003).....	48
Εικόνα 23:Το μαγνητικό πεδίο της Γης (εικόνα (α)) & το όμοιο του, το μαγνητικό πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη( εικόνα (β)).....	48
Εικόνα 24: Χειριστήριο του πρωτονικού μαγνητόμετρου ENVI PRO .....	52

Εικόνα 25: Τα δύο πηνία του πρωτονικού μαγνητόμετρου που μετράνε σε δύο διαφορετικά ύψη το ολικό πεδίο και δείχνουν κατά την μέτρηση συνεχώς προς τον Βορρά.....	52
Εικόνα 26:Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο.....	56
Εικόνα 27: Διαφορετικές περιπτώσεις δομής και πορώδους που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση(Αποστολόπουλος,2013) .....	58
Εικόνα 28: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Ιωάννης Φ.Λούης).....	59
Εικόνα 29:Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2004) .....	60
Εικόνα 30: Διάταξη Schlumberger.....	62
Εικόνα 31: Διάταξη Wenner .....	62
Εικόνα 32: Διάταξη Dipole-Dipole .....	63
Εικόνα 33: Διάταξη Pole-Pole .....	63
Εικόνα 34: Διάταξη Pole-Dipole .....	63
Εικόνα 35: Αναλογία ρεύματος που ρέει κάτω από ένα βάθος z (σε μέτρα)-L η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος (Robinson E.S. And Coruh C. 1988).....	65
Εικόνα 36: Τα καλώδια με καρούλια που συνδέθηκαν με το SYSCAL PRO στις γεωφυσικές έρευνες στο Λιβάδι Κεφαλληνίας & SYSCAL PRO (Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής-Σχολή Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών ΕΜΠ).....	67
Εικόνα 37:Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης(Fabio Taioli) .....	67
Εικόνα 38:Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole – Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.....	69
Εικόνα 39:Ηλεκτρική βυθοσκόπηση σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2003).....	69
Εικόνα 40: Ανεστραμένο μοντέλο μετρήσεων ειδικής αντίστασης (Copyright (1997, 1999) by Dr. M.H.Loke,5, Cangkat Minden Lorong 6, Minden Heights, 11700 Penang, Malaysia .....	71
Εικόνα 41:Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους διςδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγόριθμου .....	71
Εικόνα 42: Ο τοπικός χάρτης δικτύου πόλεως της Sigtuna. Εμφανή στο κάτω μέρος του χάρτη τα σημεία ύπαρξης ναυπηγικών εκτάσεων .....	73
Εικόνα 43: Η τοποθεσία της Sigtuna, Sweden.....	73
Εικόνα 44: Ortophoto of Sigtuna (@Lantmateriet I2014/00691). Georadar survey areas marked purple, land above Viking Age shoreline, 5 meter, white. Alterations done in ArcGIS 10.2.2.....	74
Εικόνα 45: Η περιοχή που έγιναν οι μελέτες και οι ανασκαφές στο Borgmästarängen.....	75
Εικόνα 46: Περιοχή μελέτης και ανασκαφών στο Koppardosan .....	75
Εικόνα 47:Draken, χαρακώματα σημειωμένα με μπλε χρώμα, πέτρινες κατασκευές σημειωμένες με κόκκινο, με πράσινο χρώμα το αργιλικό στρώμα (Savonen 2002 & οι αλλαγές που έγιναν από τον συγγραφέα) .....	76
Εικόνα 48: Περιοχές γεωφυσικών ερευνών .....	77
Εικόνα 49: Χάρτες GRP από το 1982 όπου με καφέ χρώμα είναι οι αγωγοί, με πράσινο χρώμα τα αρχαιολογικά ευρήματα και με μπλε πρόσφατα χαρακτηριστικά της περιοχής.....	78
Εικόνα 50: Συγκέντρωση όλων των αρχαιολογικών χαρακτηριστικών και πρόσφατα χαρακτηριστικά από την περιοχή Urmakaren με ακτογραμμή 5 μέτρα - 3 μέτρα και συντεταγμένες GPS της περιοχής έρευνας με το γεωραντάρ. Χάρτες υποβάθρου του 1862 και ορθοφωτογραφία της σημερινής Sigtuna .....	78
Εικόνα 51: Δεδομένα GPR. Με πράσινο χρώμα τα αρχαιολογικά ευρήματα και με κόκκινο ένας αγωγός που βρέθηκε στην περιοχή.....	79



Εικόνα 52: Συγκέντρωση όλων των αρχαιολογικών χαρακτηριστικών και αγωγός από την περιοχή Korpardosan με ακτογραμμή 5 μέτρα - 3 μέτρα και GPS συντεταγμένες του γεωραντάρ της περιοχής έρευνας και το δέντρο που υπήρχε στην μέση. Χάρτης υποβάθρου του 1862 και ορθοφωτογραφία της σύγχρονης Sigtuna. ....	79
Εικόνα 53: Η περιοχή του Korpardosan, που δείχνει την καλύτερη ερμηνεία της περιοχής έρευνας με πιθανή προβλήτα και περιοχή του λιμανιού. Αριστερά 0,64 m, δεξιά 1,08 μέτρο. ....	80
Εικόνα 54: Χάρτες θέσης της περιοχής μελέτης. Ο χάρτης δημιουργήθηκε με τη χρήση του Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel and Smith, 1995).....	82
Εικόνα 55: Φωτογραφίες από την αρχαία σπηλιά εσωτερικά και εξωτερικά.(λήψη που έγινε κατά την διάρκεια των εσκαφών και του έργου).....	83
Εικόνα 56:(a) Τοπογραφικός χάρτης του Keber Tere, (b-d) SA-1, SA-2, και SA-3 φωτογραφημένες από drone και οι περιοχές γεωφυσικής μελέτης.....	84
Εικόνα 57:(a,b) Όψεις από την αιίδα και τους κεντρικούς κλίτους της χριστιανικής βασιλικής στη νότια πλευρά του λόφου (c,d) Θέα από τα λουτρά στο ανατολικό μέρος της πόλης .....	85
Εικόνα 58: Τομές μελέτης GPR και ERT και οι κατευθύνσεις των προφίλ μετρήσεων .....	86
Εικόνα 59: Έρευνα με GPR στο SA-3 το 2020 .....	87
Εικόνα 60: Χάρτες βάθους GPR στο SA-1 (επικάλυψη εικόνας του drone).....	88
Εικόνα 61: GPR προφίλ του SA-1 .....	89
Εικόνα 62: ERT στο SA-1 .....	90
Εικόνα 63: Ογκομετρικές αναπαραστάσεις σε παράλληλες διατομές της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	91
Εικόνα 64: Σύγκριση χαρτών βάθους ERT & GPR στο SA-1 .....	92
Εικόνα 65: Χάρτες βάθους GPR για το SA-2 που επικαλύπτουν και την εναέρια εικόνα του drone .....	95
Εικόνα 66: Προφίλ GPR στο site SA-2.....	95
Εικόνα 67: Εικόνες ERT προφίλ του SA-2 .....	96
Εικόνα 68: Ογκομετρικές αναπαραστάσεις της κατανομής ηλ.ειδ. αντίστασης στο SA-2.....	97
Εικόνα 69: Σύγκριση χαρτών ERT και GPR στο SA-2 .....	98
Εικόνα 70: Χάρτες βάθους GPR και εικόνα του drone στο site SA-3 .....	99
Εικόνα 71: Εικόνα GPR προφίλ.....	100
Εικόνα 72: Εικόνες ERT SA-3 .....	101
Εικόνα 73: Αεροφωτογραφίες: α) πριν β) κατά τη διάρκεια και γ) μετά την αρχαιολογική εκσκαφή τάφρου στην αυλή του ναού .....	101
Εικόνα 74: Τομογραφίες ERT : Και στις δύο τομογραφίες, το βέλος με την ένδειξη Α στα 19,6 m δείχνει την ακριβή θέση του προηγούμενως αποκαλυφθέντος τοίχου με προσανατολισμό ΝΑ-ΒΑ. Το βέλος Β στα 11,7 μέτρα δείχνει τη γωνία της τετράγωνης αρχαιολογικής τάφρου ενώ το βέλος Γ στα 16,7m .....	102
Εικόνα 75: :(α) Χάρτης της Κρήτης και (β) η θέση των τριών τομέων αρχαιολογικής εξερεύνησης (Α, Β και Γ) στην περιοχή που επιλέχθηκαν ως περιοχές δοκιμής στο πλαίσιο του σχεδίου Φαιστού. Το μπλε με μαύρο τετράγωνο στον τομέα Α υποδεικνύει το χώρο δοκιμών.....	104
Εικόνα 76: Θέση των γεωφυσικών τομών της έρευνας στο χώρο δοκιμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 1b. Τα κόκκινα ορθογώνια δείχνουν τις μαγνητικές και ηλεκτρομαγνητικές τομείς της έρευνας, ενώ τα διακεκομμένα μπλε ορθογώνια δείχνουν τους τομείς που εμπλέκονται με ηλεκτρικές έρευνες, των οποίων ο προσανατολισμός υποδεικνύεται από τις πράσινα βέλη.....	105
Εικόνα 77: Χάρτες της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για κάθε επιλεγμένη συχνότητα (15 kHz, 10 kHz και 5 kHz) .....	107

Εικόνα 78:Χάρτες ανωμαλίας της κάθετης παραγώγου του μαγνητικού πεδίου που παρατηρείται. Οι με μαύρο συνεχείς γραμμές υποδεικνύουν χονδρικά τα όρια πιθανός θαμμένου τοίχου.(c) Συνθετικός χάρτης της κάθετης παραγώγου μαγνητικό πεδίο που παράγεται από δύο πρισματικές πηγές (μαύρα ορθογώνια) χαρακτηρίζεται από μια ασθενές αρνητική μαγνητική αντίθεση. Οι πηγές (2 m πλάτος κατά 18 μέτρα μήκος και 2 m πλάτος με μήκος 2 m) έχουν την κορυφή τους σε 2m κάτω από την επιφάνεια μέτρησης, δηλαδή περίπου 1,5 m από το επίπεδο της επιφάνειας.....	108
Εικόνα 79:Ογκομετρική όψη της τρισδιάστατης (3D) αναστροφής των δισδιάστατων δεδομένων φαινομένης αντίστασης που παρατηρήθηκαν στον τομέα C (α) και D (β). Οι μαύρες γραμμές υποδεικνύουν την περιοχή επικάλυψης μεταξύ των τομέων C και D. Τα στοιχεία για τον όγκο, εκθέτονται επίσης, με αποκόμματα επιπέδων που δίνει την δυνατότητα απεικονίσεις ορθογώνιων τμημάτων προς την κατεύθυνση των προφίλ μετρήσεις σε βάθος 1,4 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (b.g.l.) .....	109
Εικόνα 80: (a) Φωτογραφία του πέτρινου ασβεστολιθικού τοίχου που έφερε στο φως η η αρχαιολογική ανασκαφή στον τομέα A (b) Οριζόντια τομή των στοιχείων αντίστασης που εξάγονται από τα στοιχεία σε βάθος 1,4 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους προεξέχοντας πάνω από την επιφάνεια της περιοχής έρευνας (τομέας D). (c) Φωτογραφία του τοίχου ανακάλυψης επάνω στο οριζόντιο τμήμα που φαίνεται στο (b), η οποία αποδεικνύει σαφώς την τέλεια ταύτιση της γεωμετρίας του τοίχου με τη δομή υψηλής αντίστασης που προσδιορίστηκε από την τομογραφία ηλεκτρικής αντίστασης (ERT). .....	110
Εικόνα 81:A) Αεροφωτογραφία του Οκμούλγκι, B) το ανάχωμα κοιτάζοντας προς τον βορρά.....	112
Εικόνα 82: GEM 300 EM .....	113
Εικόνα 83:Περιοχή έρευνας block 2, με κύκλους φαίνονται πιθανοί τάφοι, με ορθογώνιο τα πιθανά όρια των αρχαίων δομών, με ακανόνιστη γραμμή πιθανή ύπαρξη σιδηροδρομικής γραμμής λόγω επανατοποθέτησης χώματος από τις εκσκαφές .....	114
Εικόνα 84:Περιοχή έρευνας block 1, με κύκλους φαίνονται πιθανοί τάφοι, με ορθογώνιο τα πιθανά όρια των αρχαίων δομών, με ακανόνιστη γραμμή πιθανή ύπαρξη σιδηροδρομικής γραμμής λόγω επανατοποθέτησης χώματος από τις εκσκαφές/ Εικόνα 85:Ψηφιοποιημένος χάρτης της περιοχής με χρήση δεδομένων αγωγιμότητας από το block 1 & block 2 .....	114
Εικόνα 86: Η τοποθεσία της θέσης Λιβάδι, Κεφαλληνίας μέσω Google Earth στην χερσόνησο της Παλικής.....	117
Εικόνα 87: Η περιοχή της Παλικής (περιοχή ενδιαφέροντος για τεκτονική ανάλυση που περιλαμβάνει την θέση ερευνών στο Λιβάδι) και το χωριό Λιβάδι, Κεφαλληνίας.....	117
Εικόνα 88: Συνολικές εικόνες της περιοχής Λιβάδι στην οποία πραγματοποιήθηκαν και οι γεωφυσικές μετρήσεις .....	118
Εικόνα 89: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Λιβάδι, Κεφαλληνίας (ΠΓΜΕ).....	123
Εικόνα 90: Νεοτεκτονικός Χάρτης Νήσων Κεφαλληνίας και Ιθάκης (Λέκκας) .....	125
Εικόνα 91: Τα ρήγματα της Κεφαλληνίας (Διπλωματική Εργασία- Εκτίμηση Σεισμικής Επικινδυνότητας νήσων Κεφαλονίας και Ιθάκης-Μπονάτης Παύλος) .....	126
Εικόνα 92:Απλοποιημένος τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης της Κεφαλληνίας (από Underhill,1989).Thrusts:ανάστροφα ρήγματα Anticlines:αντίκλινα Synclines:σύγκλινα Normal Faults:κανονικά ρήγματα KAK:Κόλπος Αγίας Κυριακής K:Καταβόθρες KL:Κόλπος Λιβαδίου Cape Liakka:ακρωτήριοΛιάκκα Triassic:Τριαδικό Jurassic:Ιουρασικό Cretaceous and Paleogene: Κρητιδικό και Παλαιογενές Miocene:Μειόκαινο Plio-Pleistocene:Πλειο-Πλειστόκαινο Late-Quaternary:Άνω-Τεταρτογενές White Rocks:Επώθηση, Argostoli Fault:Επώθηση Αργοστολίου (αποτελείται από δύο κλάδους οι οποίοι συγκλίνουν στα νότια του νησιού) .....	127

Εικόνα 93: Λιμάνι Κεγχρεών. Απεικόνιση των πλίνθινων τοιχίων για την κατασκευή των αρχαίων λιμανιών του 6ου αιώνα π.Χ.....	130
Εικόνα 94: Μετρήσεις μαγνητικών μέσω Surfer 2016 στο Google Earth (Λιβάδι,Κεφαλληνία)....	131
Εικόνα 95: Μετρήσεις EM παράλληλα και κάθετα στην ακτογραμμή στα 6 μέτρα βάθος διασκόπησης στο Google Earth .....	132
Εικόνα 96: Μετρήσεις EM παράλληλα και κάθετα στην ακτογραμμή στα 3 μέτρα βάθος διασκόπησης στο Google Earth .....	132
Εικόνα 97: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-4 σε βάθος διασκόπησης 6m , στη θέση Λιβάδι .....	133
Εικόνα 98:Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-2 σε βάθος διασκόπησης 3 m , στη θέση Λιβάδι .....	134
Εικόνα 99: Πρωτονικό μαγνητόμετρο την ώρα των μετρήσεων στην θέση Λιβάδι .....	135
Εικόνα 100: Χάρτης total field base magnetic.....	136
Εικόνα 101: Χάρτης ολικού πεδίου διορθωμένος ως προς την βάση (total field corrected) .....	137
Εικόνα 102: Μαγνητικός χάρτης gradient.....	138
Εικόνα 103: Μαγνητικός χάρτης RTP(Reduction to the pole) .....	139
Εικόνα 104: Χάρτης RTP στο Google Earth .....	139
Εικόνα 105: -χάρτης pseudo gravity.....	140
Εικόνα 106: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity για 6m βάθος διασκόπησης και παράλληλα στην ακτογραμμή .....	141
Εικόνα 107: Χάρτης inphase στα 6m βάθος διασκόπησης και παράλληλα στην ακτογραμμή.....	142
Εικόνα 108: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity-6m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή.....	143
Εικόνα 109: Χάρτης inphase στα 6 μέτρα βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή .....	144
Εικόνα 110: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity-3m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις παράλληλα στην ακτογραμμή .....	145
Εικόνα 111: Χάρτης inphase για 3m βάθος διασκόπησης και μετρήσεις παράλληλα στην ακτογραμμή .....	146
Εικόνα 112: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για 3m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετα στην ακτογραμμή .....	146
Εικόνα 113: Χάρτης inphase για 3m βάθος διασκόπησης-μετρήσεις κάθετα στην ακτογραμμή....	147
Εικόνα 114:Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής Λιβάδι που δείχνει την τρισδιάστατη έρευνα γεωηλεκτρικής τομογραφίας: α) Η ρύθμιση «U» (κυανικές γραμμές) για τα ηλεκτρόδια (κόκκινοι σταυροί) επιλέχθηκε για κάθε προφίλ τομογραφίας προκειμένου να καλύψει την περιοχή έρευνας και για όλες τις μετρήσεις που πρέπει να γίνουν ερμηνεύεται σε τρισδιάστατη βάση β)τη ρύθμιση ‘U’ (κυανές γραμμές) για τα ηλεκτρόδια (κόκκινοι σταυροί) που τοποθετούνται σε έναν χάρτη Google Earth ( Γεωγραφικές Συντεταγμένες ΕΓΣΑ) .....	149
Εικόνα 115:Φωτογραφία από το Upper East Part Livadi Παράκτια περιοχή που δείχνει προετοιμασία πεδίου για την απόκτηση δεδομένων τριδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας (Επιστημονική Αναφορά-Αποστολόπουλος,2023).....	149
Εικόνα 116: Όργανο μέτρησης SYSCALPro.....	150
Εικόνα 117: Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής ΛΙΒΑΔΙ με χαρακτηριστικά μεγάλης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια που φαίνονται με βέλη, με βάση τα αποτελέσματα τριδιάστατης ερμηνείας δεδομένων στο γεωηλεκτρικό μοντέλο (Αποστολόπουλος, 2023) .....	152

<b>Εικόνα 118:</b> Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής Λιβαδιού που δείχνει τις οριζόντιες φέτες του τρισδιάστατου μοντέλου ειδικής αντίστασης σε βάθη α) -0,5 m, β) -1 m, γ) -2 m, δ) -3 m, ε) -4 m, στ) -5 m, όπως προκύπτει από την τρισδιάστατη έρευνα της EPT. Η έκταση και το βάθος των χαρακτηριστικών μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι εύκολα ορατές από τις φέτες. .....	153
<b>Εικόνα 119:</b> Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής Λιβάδι, με χαρακτηριστικά αντίστασης κοντά στην επιφάνεια που φαίνονται με βέλη, με βάση τις κάθετες τομές του τρισδιάστατου μοντέλου ειδικής αντίστασης σε αποστάσεις στο τοπικό πλέγμα, αντίστοιχα, (0,13), (0,27), ( 0,42), (0,55), όπως προκύπτει από την τρισδιάστατη ερμηνεία των δεδομένων.(Αποστολόπουλος,2023).....	154
<b>Εικόνα 120:</b> Άνω Ανατολικό τμήμα της παράκτιας περιοχής Λιβάδι που δείχνει τα προηγούμενα προφίλ EPT του 2016 μαζί με τα τρέχοντα (a) και τις παλιές τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας του 2016 που εμφανίζονται με τριδιάστατο τρόπο (b). .....	155
<b>Εικόνα 121a,b:</b> . Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες φαινομενικής αγωγιμότητας για την περιοχή του Εσωτερικού Κόλπου Λιβαδιού έως βάθη 6m και 3m αντίστοιχα, που δείχνουν τις περιοχές «Α», «Β», «Γ» με διαφορετικές κατανομές ιζημάτων. c. Ο «χάρτης κλίσης», που κατασκευάστηκε από διαφορές στις τιμές φαινομενικής αγωγιμότητας από τα προηγούμενα γραφήματα, δείχνει πιο καθαρά διαφορετικές περιοχές ιζήματος, μαζί με ορισμένα γραμμικά χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν κρυμμένα ανθρωπογενή χαρακτηριστικά. d. Χάρτης κλίσης πάνω στον χάρτη Google Earth.(Αποστολόπουλος,2023) .....	156

# 1. Εισαγωγή

<<Η γεωφυσική διασκόπηση είναι η τέχνη της αναζήτησης κρυμμένων αποθέσεων υδρογονανθράκων ή χρήσιμων ορυκτών, με μετρήσεις φυσικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης >> (Dobrin,1960).>>

Γενικά, γεωφυσική ονομάζεται η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της Γης, στηριζόμενη στις βασικές αρχές της φυσικής. Οι γεωφυσικές έρευνες του υπεδάφους της Γης περιλαμβάνουν την συλλογή μετρήσεων κοντά ή στο έδαφος της Γης και επηρεάζονται από την εσωτερική κατανομή των φυσικών της ιδιοτήτων. Αυτές οι φυσικές ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κ.ά. χαρακτηρίζουν τα φυσικά φαινόμενα τα οποία αναλύει και μελετά η γεωφυσική όπως η βαρύτητα, ο ηλεκτρισμός, ο μαγνητισμός, η διάδοση των σεισμικών κυμάτων κ.ά. που δημιουργούνται μέσα στη Γη. Με μια ευρύτερη έννοια, η Γεωφυσική περιλαμβάνει την μελέτη της «στερεάς» Γης, της θάλασσας, της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. Έχει επικρατήσει όμως διεθνώς, η Γεωφυσική να ταυτίζεται σχεδόν με τη Φυσική της «στερεάς» Γης, δηλαδή την Φυσική του εσωτερικού της Γης, ενώ για τις άλλες επιστήμες χρησιμοποιούνται ειδικά ονόματα όπως Ωκεανογραφία, Μετεωρολογία, Φυσική της Ατμόσφαιρας κ.λπ. Από άποψη μεθόδων έρευνας, η Γεωφυσική ανήκει στους εφαρμοσμένους κλάδους της Φυσικής, ενώ από άποψη αντικειμένου αποτελεί κλάδο των Γεωεπιστημών όπου ανήκουν η Γεωδαισία, η Γεωλογία, η Γεωχημεία και η Γεωγραφία.

Αρχικά, στόχος της γεωφυσικής ήταν ο εντοπισμός των υπόγειων μεταλλοφόρων κοιτασμάτων. Με την πάροδο του χρόνου και την ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη, τα αντικείμενα της γεωφυσικής διευρύνθηκαν. Πλέον, η επιστήμη της γεωφυσικής ασχολείται με τον τομέα των υποδομών, την εύρεση θεμελίωσης κτισμάτων, εγκοίλων, αρχαιολογικών θαμμένων δομών, βαθιές δομές, όπως παγίδες με υδρογονάνθρακες κ.ά. Για αυτό και η εφαρμοσμένη γεωφυσική έρευνα έχει πρακτική σημασία για τον μηχανικό, αφού δίνει τη δυνατότητα μελέτης του φλοιού της γης και των επιφανειακών στρωμάτων, εντοπισμού δομών που σχετίζονται με την εμφάνιση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, μεταλλευμάτων, πηγών γεωθερμικής ενέργειας κ.ά. Ακόμα, η εφαρμογή γεωφυσικών μελετών, δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων της γης, γεγονός μεγάλης σημασίας για τον σχεδιασμό της κατασκευής και την παρακολούθηση μεγάλων τεχνικών έργων, εξασφαλίζοντας έτσι και την ασφάλεια και την χρησιμότητά τους για τον άνθρωπο. Με όσα αναφέρονται παραπάνω, παρατηρούμε ότι η γεωφυσική επιστήμη έχει εισέλθει σε πολλούς και ξεχωριστούς τομείς, κάνοντας την απαραίτητη σχεδόν για κάθε είδους έργο που πραγματοποιείται στην σύγχρονη εποχή.

Η γεωφυσική έρευνα, για να πετύχει αυτούς τους στόχους, απαιτεί την ορθή επιλογή και εφαρμογή μιας γεωφυσικής μεθόδου, η οποία βασίζεται στη διαφοροποίηση/εναλλαγή κάποιας ιδιότητας των πετρωμάτων, από τη μέτρηση των τιμών της οποίας προσδιορίζεται τελικά και η δομή του υπεδάφους.

Τέτοιες ιδιότητες, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη φύση και τη δομή των εδαφικών και υπεδαφικών σχηματισμών, είναι η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ελαστικότητα και σπανιότερα η θερμική αγωγιμότητα και η ραδιενέργεια.

Ο εντοπισμός μετρήσιμων διακρίσεων στις παραπάνω ιδιότητες των πετρωμάτων, η κατάλληλη ερμηνεία τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων, αποτελούν το βασικό σκοπό μιας γεωφυσικής έρευνας. Όμως, ως γνωστόν, οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο «ανωμαλίες», δηλαδή σημεία στα οποία κάποια φυσική ιδιότητα παρουσιάζει αρκετά διαφορετική τιμή από τα κοντινότερα. Αυτό αποτελεί έναν παγκόσμιο περιορισμό, σύμφωνα με τον οποίο δεν μπορούμε να διακρίνουμε οτιδήποτε το ομογενές στη φύση αλλά μπορούμε να δούμε μονάχα τις ανομοιογένειες και τις χωρικές/τοπικές διαφοροποιήσεις.

Οπότε, για να έχουμε τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα, πρέπει να κάνουμε κάθε φορά και σωστή επιλογή γεωφυσικής μεθόδου. Η επιλογή αυτή θα εξαρτάται από το μέγεθος της υφιστάμενης αντίθεσης των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων της περιοχής. Για κάθε μέθοδο υπάρχει μια «λειτουργική» φυσική ιδιότητα, στην οποία η μέθοδος θα είναι ευαίσθητη και, ως εκ τούτου, χρησιμεύει για τον προσδιορισμό των υπεδαφικών «ανωμαλιών». Οι σημαντικότερες μέθοδοι, καθώς και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλεύεται η κάθε μία, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1**.

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

**Πίνακας 1: Γεωφυσικές μέθοδοι και εφαρμογές**

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, οι μαγνητικές και βαρυτικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης, είναι από τις αρχαιότερες μεθόδους της εφαρμοσμένης γεωφυσικής (Heiland, 1940) και χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις γεωφυσικές μελέτες.

Παρόλα αυτά, η γεωφυσική έρευνα, αν και δίνει μια πολλή καλή εκτίμηση της εικόνας της περιοχής μελέτης, δεν μπορεί να δώσει μοναδικές και μονοσήμαντες λύσεις για μια δεδομένη κατάσταση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ύπαρξη πολλών και διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών και ο συνδυασμός τους, θα είχαν ως αποτέλεσμα την ίδια τιμή παρατηρούμενης μέτρησης, κάτι που δεν θα διευκόλυνε την έρευνα.

Επίσης, αν λάβουμε υπόψη και την ύπαρξη κάθε φορά του πειραματικού σφάλματος αλλά και του ανθρώπινου λάθους, δηλαδή ότι η λήψη των μετρήσεων είναι επιλεκτική (κατά την κρίση του γεωφυσικού), γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα της έρευνας θα είναι κυρίως προσεγγιστικά και όχι με μεγάλη ακρίβεια/σαφήνεια.

Για αυτό το λόγο, σε μια γεωφυσική έρευνα για να έχουμε μεγαλύτερη επιτυχία στην ακρίβεια των δεδομένων, μπορούμε να εφαρμόσουμε περισσότερες από μια γεωφυσικές μεθόδους, αποκτώντας νέες πληροφορίες αλλά και επιβεβαιώνοντας αποτελέσματα άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Ακόμα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν συχνά συγκρίνονται με αυτά ερευνητικών γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή μελέτης.

Από την άλλη, παρά τους περιορισμούς που προκύπτουν λόγω της φύσης της, η γεωφυσική έρευνα είναι ένα εργαλείο γρήγορης και αξιόπιστης διασκόπησης του υπεδάφους, με σχετικά μικρό οικονομικό κόστος, αν εξαιρέσουμε τις σεισμικές μεθόδους που είναι ιδιαίτερα ακριβές. Για αυτό καταλαμβάνει θέση-κλειδί σε ερευνητικά προγράμματα γεωλογικής, γεωτεχνικής αλλά και μεταλλευτικής φύσης.

## 1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Λιβιάδι της Κεφαλληνίας. Στόχος ήταν η διερεύνηση της στρωματογραφίας της περιοχής αλλά και η πιθανή εύρεση ανθρωπογενών κατασκευών που συνδέονται με την ύπαρξη αρχαίου λιμανιού ή μώλου, είτε τον εντοπισμό ιζηματογενέσεων που προκαλέσαν οι πιθανές αυτές δομές.

Για την συγκεκριμένη έρευνα και με βάση κοινές γεωφυσικές μεθόδους διενεργήθηκαν οι εξής μέθοδοι:

- Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EMR)
- Γεωραντάρ (GPR)
- Ηλεκτρική μέθοδος (ERT)
- Μαγνητική Μέθοδος

## 1.2 Δομή Εργασίας

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

- Στο πρώτο κεφάλαιο περιέχεται η εισαγωγή με σύντομη αναφορά στην επιστήμη της γεωφυσικής και την έρευνα.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία κάθε μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στο ύπαιθρο και στον εξοπλισμό τους.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε εφαρμογές της γεωφυσικής για τον εντοπισμό ανθρωπογενών αρχαιολογικών σχηματισμών. Σκοπός τους η επεξεργασία τους για τον σχεδιασμό της συγκεκριμένης αρχαιολογικής γεωφυσικής έρευνας.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της περιοχής έρευνας στο Λιβιάδι, Κεφαλληνίας (Τοποθεσία, Ιστορικά στοιχεία και Γεωλογία) που καλύφθηκε με τις γεωφυσικές μεθόδους
- Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού της γεωφυσικής έρευνας, που περιλαμβάνει τη κατάλληλη επιλογή γεωφυσικών μεθόδων, σειρά εφαρμογής, διατάξεις κάθε μεθόδου, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έγινε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής όπως και τα συνολικά αποτελέσματα, συμπεράσματα και σχόλια
- Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την εργασία και τα παραρτήματα



## **2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

### **2.1 Η Κλασική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος**

#### **2.1.1 Γενικά**

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι είναι χρήσιμο εργαλείο συλλογής πληροφοριών για την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους. Κατατάσσονται στις μεθόδους φυσικού πεδίου και τις μεθόδους ελεγχόμενης πηγής και χρησιμοποιούνται ήδη από το 1950 ως τα γνωστά μαγνητοτελλουρικά με διακύμανση του μαγνητικού πεδίου της Γης από  $10^{-5}$  δευτερόλεπτα μέχρι και αρκετές ώρες για να μελετήσουν την κατανομή των ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων σε συνάρτηση με το βάθος. (CAGNIARD, 1953).

#### **2.1.2 Αρχές της Ηλεκτρομαγνητικής Μεθόδου**

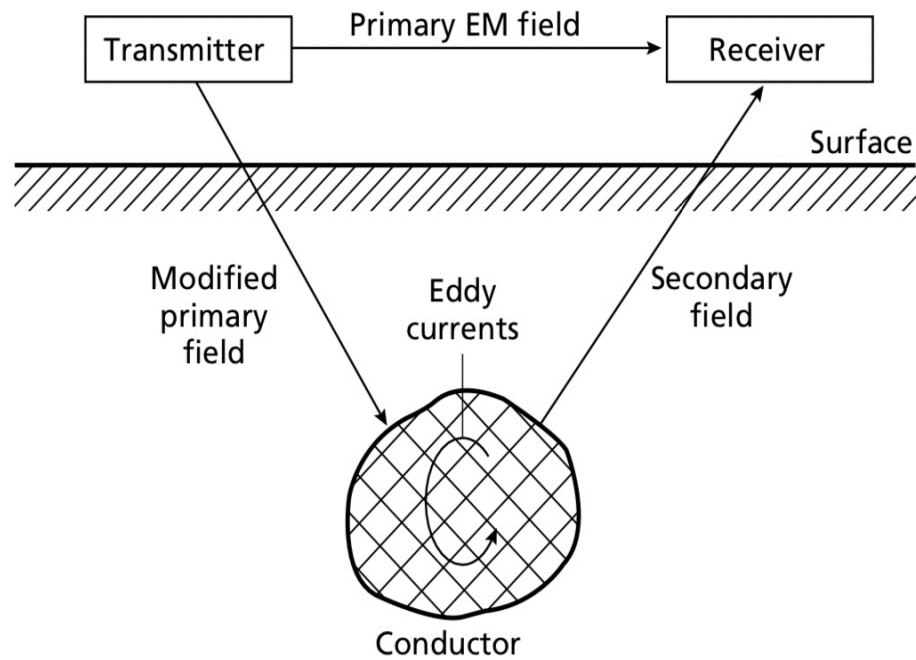
Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι έρευνας χρησιμοποιούν την απόκριση του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα αρχικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να παραχθούν με τη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω μικρού πηνίου φτιαγμένο με περιελίξεις καλωδίου ή μέσω μεγάλου βρόγχου του καλωδίου.

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

Όλοι οι σχηματισμοί με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μερικοί χώροι μεταλλεύματος που περιέχουν τα μεταλλεύματα που είναι μονωτές, μπορούν να παράγουν δευτερογενή πεδία, εάν περιέχουν επαρκείς ποσότητες του βοηθητικού μεταλλεύματος, με μια υψηλή αγωγιμότητα, όπως παραδείγματος χάρι στην περίπτωση των μεταλλευμάτων σουλφιδίου με ύπαρξη πυροτίτη που είναι ένα αγωγίμο ορυκτό

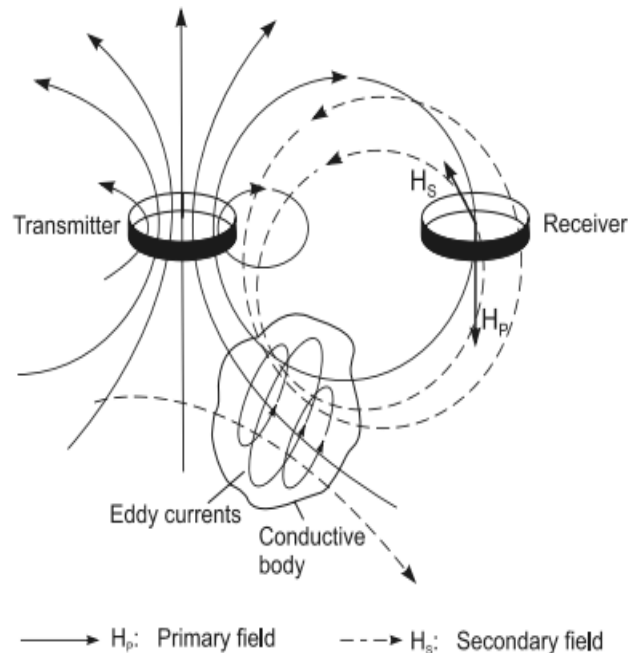
Αν υπάρχει λοιπόν αγωγίμο υλικό στο υπέδαφος, η μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού σήματος επάγει εναλλασσόμενα ρεύματα, τα λεγόμενα Eddy currents, μέσα στον αγωγό.

Τα ρεύματα αυτά παράγουν δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται από το πηνίο-δέκτη. Ο δέκτης επίσης ανιχνεύει και το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι ο συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς, που διαφέρουν ως προς τη φάση και το πλάτος.



*Εικόνα 1: Γενική αρχή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)*

Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από σχετικές σχέσεις και τους προσανατολισμούς των πηνίων), τόσο το μέγεθος όσο και η σχετική φάση του δευτερογενούς πεδίου μπορούν να υπολογιστούν. Η διαφορά στο τελικό πεδίο από το πρωτογενές δίνει την πληροφορία για την γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού του υπεδάφους.



**Εικόνα 2: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. Το πηνίο αποστολής σημάτων δημιουργεί ένα αρχικό πεδίο της “EMI” που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό αναγκάζει τα ρεύματα να περάσουν μέσα από τα αγώγιμα αντικείμενα όπως φαίνεται στο σχήμα και στην συνέχεια να δημιουργηθεί από αυτά το δευτερεύον πεδίο. Τα πεδία μετρούνται από το πηνίο-receiver**

Το δευτερογενές πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε συνιστώσες σε φάση και εκτός φάσης  $90^\circ$  ως προς το πρωτογενές πεδίο. Η εκτός φάσης συνιστώσα χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες υποθέσεις, μπορεί να μετατραπεί σε υπολογιζόμενη φαινόμενη αγωγιμότητα. Η σε φάση συνιστώσα, γενικά μη υπεύθυνη για αλλαγές χωρικής αγωγιμότητας, είναι ειδικά υπεύθυνη για τον εντοπισμό σωμάτων υψηλής αγωγιμότητας, όπως μεταλλικές κατασκευές.

Η μετρούμενη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι η μέση αγωγιμότητα των περισσότερων στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης του οργάνου, σε βάθος έρευνας που σχετίζεται με την απόσταση των πηνίων, την διεύθυνση, τη συχνότητα της λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους.

Συνοψίζοντας, η σε φάση συνιστώσα παρέχει την ένδειξη παρουσίας μεταλλικών αντικειμένων και τεχνικών κατασκευών όπως καλωδίων, αγωγών, πλέγματος στο μπετόν, δεξαμενών κλπ., ενώ η φαινόμενη αγωγιμότητα αποτυπώνει τη γεωλογία και τη στρωματογραφία της περιοχής.

### 2.1.3. Βάθος διείσδυσης των Ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Το βάθος διείσδυσης ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (Spies 1989) εξαρτάται από τη συχνότητά του και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου στο οποίο διαδίδεται.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται κατά την διέλευσή τους μέσω του εδάφους, το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Το βάθος της διείσδυσης  $d$  μπορεί να οριστεί ως το βάθος στο οποίο το πλάτος  $A_d$  μειώνεται κατά ένα παράγοντα  $e^{-1}$  (37%) συγκρινόμενο με το πλάτος στην επιφάνεια  $A_0$ .

$$A_d = A_0 e^{-1}$$
$$d = \frac{503.8}{\sqrt{\sigma f}}$$

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

Το βάθος διείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της αγωγιμότητας του εδάφους. Οπότε, η συχνότητα που χρησιμοποιείται σε μια έρευνα με EM μπορεί να καθορίσει το επιθυμητό βάθος σε οποιοδήποτε μέσο. Παραδείγματος χάριν, σε ξηρές παγετώδεις αργίλους ισχύει:  $5 \times 10^{-4} \text{Sm}^{-1} / d = 225 \text{m} / f = 10 \text{kHz}$

Εμπειρικά, ένα αποτελεσματικό βάθος διείσδυσης  $Z_e$  μπορεί να καθοριστεί ως το μέγιστο βάθος στο οποίο ο αγωγός μπορεί να βρεθεί και να παράγει μια αναγνωρίσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία, όπου:

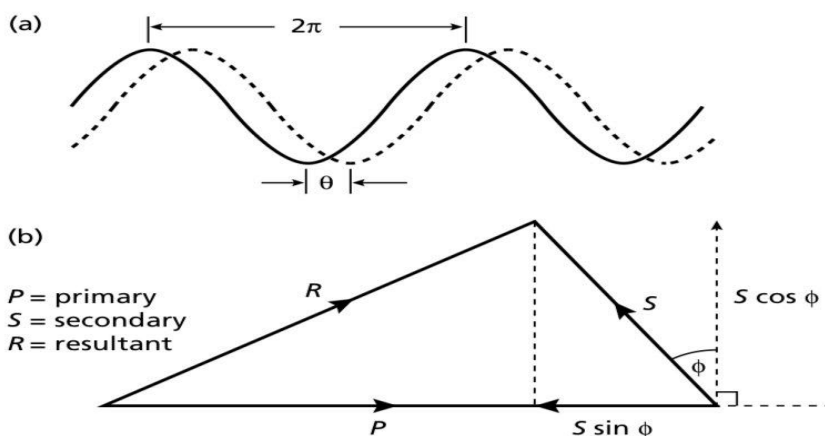
$$Z_e = \frac{100}{\sqrt{\sigma f}}$$

Η σχέση αυτή είναι προσεγγιστική καθώς η διείσδυση εξαρτάται από παράγοντες όπως τη φύση και το μέγεθος των επιδράσεων των διακυμάνσεων της αγωγιμότητας κοντά στην επιφάνεια, τη γεωμετρία του υπόγειου αγωγού και το θόρυβο των οργάνων. Για αυτό, γενικά είναι δύσκολο σε χαμηλές συχνότητες να υπολογίσουμε και έτσι το βάθος διείσδυσης καθορίζεται εξαρχής στα 500m.

### 2.1.3.1 Συστήματα μέτρησης φάσης

Πολλές ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι όπως το VLF και AFMAG (Labson et al. 1985) που αποτελούν επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά συστήματα επίπεδου κύματος παρέχουν ελάχιστες ποσοτικές πληροφορίες στον αγωγό-conductor. Για αυτό και χρησιμοποιούνται πιο σύνθετες ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι που υπολογίζουν την σχέση φάσης και πλάτους μεταξύ του πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που προκύπτουν.

Αρχικά, ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να παρασταθεί ως ένα ημιτονοειδές κύμα μήκους  $\lambda$  ίσο με  $2\pi$  ( $360^\circ$ ). Όταν δύο από αυτά τα κύματα δεν διαδίδονται την ίδια χρονική στιγμή αλλά το ένα βρίσκεται χρονικά πίσω από το άλλο, αναφερόμαστε σε κύματα εκτός φάσης. Αυτή η διαφορά στην φάση των δύο κυμάτων συμβολίζεται με την γωνία  $\theta$  και είναι ο γωνιακός διαχωρισμός των κυματομορφών όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3: α) Ο γωνιακός διαχωρισμός φάσης  $\theta$  β) διάγραμμα πλάτους των κυματομορφών των  $P, S, R$  πεδίων

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

Οι σχέσεις φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως φαίνεται και παραπάνω, αναπαρίστανται σε ειδικά διανυσματικά διαγράμματα, τα διαγράμματα vector, στα οποία το διανυσματικό μήκος είναι ανάλογο προς το πλάτος του πεδίου και η γωνία που μετριέται αντίθετα προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού από το πρωτογενές διάνυσμα στο δευτερογενές διάνυσμα, αντιπροσωπεύει την γωνιακή καθυστέρηση φάσης του δευτερογενούς πεδίου που προηγείται του πρωτογενούς και είναι η γωνία  $\phi$ .

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

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης  $\varphi$ , η οποία είναι η εξής:

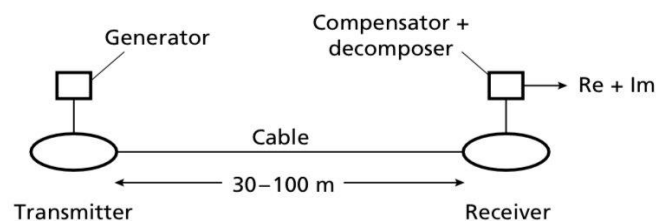
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\pi fL}{r}$$

Με  $f$  την συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κάθε φορά πεδίου,  $L$  η αυτεπαγωγή του αγωγού,  $r$  η αντίσταση του αγωγού.

Αντίστοιχα, για τιμές  $\varphi=\pi/2$  και  $\varphi=0$  μπορούμε να αξιολογήσουμε και το κατά πόσο είναι καλός ή κακός ένας αγωγός. Ένας καλός αγωγός θα προσεγγίσει τα  $\pi/2$  και ένας κακός το  $\varphi=0$ .

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

Τα κλασσικά συστήματα μέτρησης φάσης χρησιμοποιούν κινούμενους πομπούς και δέκτες και αναφέρονται ως δίδυμοι πηνίου (twin-coil) ή slingram συστήματα. Τα πηνία πομπού και δέκτη είναι διαμέτρου 1 m και μεταφέρονται συνήθως οριζόντια και με διαφορετικούς προσανατολισμούς. Τα πηνία αυτά συνδέονται από καλώδιο που φέρνει σήμα αναφοράς και διατηρεί την απόσταση των πηνίων σταθερή, συνήθως στα 30-100 m. Ο πομπός τροφοδοτείται από μία φορητή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Εικόνα 4: Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος-καλώδιο-δέκτης**

Όπως φαίνεται, το σήμα εξόδου που μεταφέρεται από το καλώδιο προς το πηνίο δέκτη περνάει και από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο αυτό μετράει αρχικά στο έδαφος, χωρίς αγωγίμο σώμα και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται στο να παράγει μηδενική έξοδο.

Με αποτέλεσμα, το πρωταρχικό πεδίο αντισταθμίζεται και το σύστημα συνεχίζει να αποκρίνεται μόνο στα δευτερογενή πεδία. Συνεπώς, τέτοιες ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι αποκαλύπτουν την παρουσία σωμάτων ανώμαλης αγωγιμότητας, χωρίς να παρέχουν πληροφορίες για τις απόλυτες τιμές της αγωγιμότητας.

Αντίστοιχα, σε περιοχές που γίνονται έρευνες, ο αναλυτής διαχωρίζει το δευτερογενές πεδίο στις πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες που συνήθως παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, του οποίου το μέγεθος αναμεταδίδεται μέσω του καλωδίου που ενώνει τον πομπό και τον δέκτη. Στην συνέχεια, οι τομές μέτρησης γίνονται γενικώς κάθετα στις γεωλογικές ασυνέχειες και οι μετρήσεις αντιστοιχούν στην θέση του μεσαίου σημείου του συστήματος. Το μέγιστο βάθος ανίχνευσης είναι περίπου το μισό της απόστασης πομπού δέκτη.

Γενικά, οι μετρήσεις υπαίθρου είναι μία απλή διαδικασία και απαιτεί μια ομάδα των δύο ή τριών χειριστών. Η απόσταση και ο προσανατολισμός των πηνίων είναι σημαντικά ,δεδομένου ότι μέχρι και ένα μικρό λάθος στην απόσταση από τον χειριστή, μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση φάσης.

Για αυτό και τα πηνία πρέπει επίσης να κρατιούνται ακριβώς οριζόντια και στο ίδιο ακριβώς επίπεδο, δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Η απαιτούμενη ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε μεγάλες αποστάσεις με ανώμαλη τοπογραφία, ακόμα και αν λαμβάνουμε συνεχείς μετρήσεις με διαφορά δευτερολέπτου.

### 2.1.3.2 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης

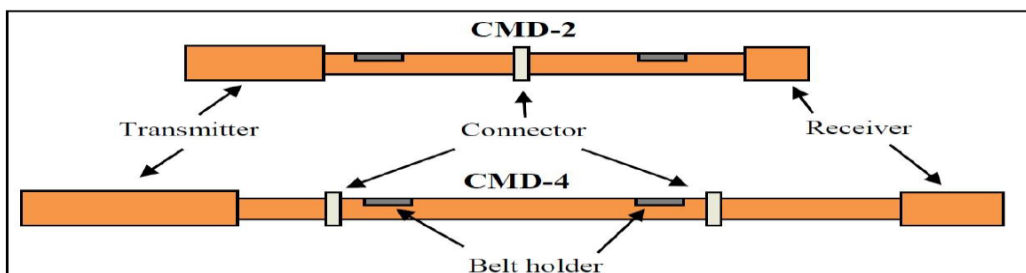
Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in-phase μέτρηση, ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με τη διαμόρφωση του. Το όργανο CMD μπορεί να διαθέτει κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο ώστε για κάθε θέση μέτρησης να καταγράφονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες. Στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε το GPS system της εταιρείας Leica και συγκεκριμένα το Leica 1200 GPS kit GX1230, RX1210T, AX1202 Antenna kit που φαίνεται και παρακάτω.



*Εικόνα 5: Leica GPS system GX1230*

Το ηλεκτρομαγνητόμετρο CMD που χρησιμοποιήθηκε και φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, είναι ένα μηχάνημα με μεγάλη ταχύτητα στην λήψη των μετρήσεων (απόκριση σχεδόν 0,1s), με 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.





Εικόνα 6: CMD-2 & CMD-4 όργανα μέτρησης



Εικόνα 7: Χειριστήριο ρυθμίσεων και ελέγχου μετρήσεων του CMD που χρησιμοποιήθηκε στις γεωφυσικές έρευνες στο Λιβάδι, Κεφαλληνίας

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.

Οι τυπικές χρήσεις του οργάνου σε γεωφυσικές έρευνες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ	ΓΕΩΡΓΙΑ	ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Αποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων	Αναζήτηση κοιτασμάτων	Διαχείριση νερού και λιπασμάτων	Ιστορική έρευνα σπηλαίων	Υδρογεωλογικές μορφές
Αξιολόγηση βραχώδους υποβάθρου	Γεωλογική Έρευνα	Προσδιορισμός ποιότητας εδάφους	Εντοπισμός υπογείων στοών	Σημεία ρύπανσης
	Εντοπισμός σπηλαίων		Εντοπισμός τοιχίων	Διαχείριση νερού λεκανών

Πίνακας 2: Τυπικές εφαρμογές του CMD

## 2.1.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μια “διαγνωστική” φυσική ιδιότητα που ποσοτικοποιεί το πόσο εύκολα μετακινούνται τα ηλεκτρικά φορτία μέσα από ένα δεδομένο υλικό όταν αυτό υποβάλλεται σε εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο. Μετριέται σε Siemens ανά μέτρο (S/m) ή miliSiemens ανά μέτρο (mS/m). Ένα Siemens είναι αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με  $1/\text{Ohm}$ .

Σε αναφορές που περιγράφουν πετρώματα ή ρευστά, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται το αντίστροφό της, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Για τις περισσότερες από τις γεωφυσικές έρευνες που περιγράφονται στις μεθόδους EM, η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι η κύρια διαγνωστική φυσική ιδιότητα.

Οι αρχαιολόγοι, στις διάφορες έρευνες, για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται σε μετρήσεις που συλλέγονται με όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια που βρίσκονται μέσα στο έδαφος όπως συμβαίνει στις ηλεκτρικές μεθόδους. Όταν μιλάμε όμως για αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε σε μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο επαγωγής (EMI), η οποία δεν έρχεται σε επαφή με το έδαφος.

Οι χάρτες της αγωγιμότητας που λαμβάνουμε τείνουν να μοιάσουν με αυτές των δεδομένων ειδικής αντίστασης και μπορούν να ερμηνευτούν χρησιμοποιώντας αυτές τις αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι πολλές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες.

Παρόλο που τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συχνά από ένα μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας πιθανώς τα όρια της ανωμαλίας.

Η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα εντούτοις, είναι μια άριστη μέθοδος, για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βυθισμένες στις αντιθέσεις της επίγειας υγρασίας ή τις αντιθέσεις των τύπων του υλικού.

Τα μικρά κοιλώματα μπορεί να μην ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι και τα υπολείμματα των χωματοουργικών έργων μπορούν να ανιχνευτούν αποτελεσματικά (όπως και διάφορες εκσκαφές που έχουν πληρωθεί ξανά με το εξορυγμένο υλικό).

### 2.1.4.1 Βάθος και Ανάλυση Δεδομένων με την συχνότητα

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετριοούνται με την «EMI» εξαρτώνται από παράγοντες όπως:

- η ειδική συχνότητα
- το ύψος των αισθητήρων επάνω από το έδαφος
- ο προσανατολισμός των σπειρών

Αρχικά, αυτό που μας ενδιαφέρει στην συγκεκριμένη μέθοδο και εξετάζεται είναι η συχνότητα. Όσο χαμηλότερο συχνότητα λαμβάνει η ‘EMI’, τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος του σήματος και άρα το σήμα φτάνει βαθύτερα μέσα στην Γη και μας επιτρέπει να δούμε σε μεγαλύτερα βάθη τους σχηματισμούς.

Γενικά η διείσδυση σε βάθος είναι μεγαλύτερη για τις χαμηλότερες συχνότητες. Βέβαια, το μειονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι ότι ένας μεγαλύτερος όγκος γης μετρείται, επομένως τα μικρά αντικείμενα όπως τα αρχαιολογικά στοιχεία δεν μπορούν να ανιχνευθούν. Είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μια υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα έχει μικρότερο βάθος, έτσι ώστε τα αρχαιολογικά στοιχεία να αποτελούν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου, καθώς έχουμε μικρότερη διακριτική ικανότητα.

Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση και καλύτερη διακριτική ικανότητα, ώστε να ανιχνευθούν τα μικρότερα στοιχεία, αλλά οι χαμηλότερες συχνότητες μπορούν να επιτρέψουν την ανίχνευση των σχετικά μεγάλων ή υψηλών στόχων αντίθεσης που είναι πάρα πολύ βαθιοί και που διαφορετικά δεν μπορούν να ανιχνευθούν.

Αν και τα ρηγά αντικείμενα, ίσως να μπορούν να ανιχνευθούν επαρκώς με χαμηλές συχνότητες, οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες για την ανίχνευση των αρχαιολογικών στόχων. Επομένως, όργανα όπως το «Geonics EM38» χρησιμοποιούνται συχνά και τα όργανα χαμηλότερης συχνότητας όπως EM31 χρησιμοποιούνται για τους βαθύτερους και μεγαλύτερους στόχους.



Εικόνα 8: Geonics EM38 & EM31 Systems

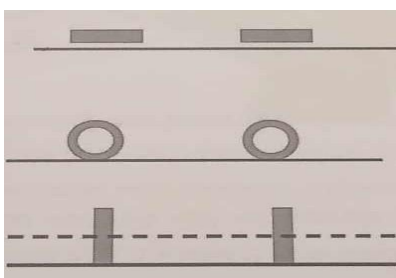
Το ύψος του οργάνου επάνω από το έδαφος αποτελεί επίσης κύριο παράγοντα στην ευαισθησία του βάθους. Δεδομένου ότι η απόσταση μεταξύ του πηνίου δέκτη και των αντικειμένων αυξάνεται, η απόκριση από το αντικείμενο μικραίνει.

Πέρα από το μέγιστο επιφανειακό βάθος, το σήμα επιστροφής από ένα αντικείμενο είναι πάρα πολύ μικρό για να μπορέσει τελικά να ανιχνευθεί. Οπότε και η ευαισθησία βάθους μπορεί να αυξηθεί αν καταφέρουμε και φέρουμε το όργανο όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη χρησιμοποίηση των οργάνων υψηλής συχνότητας όπως το EM38 επειδή το βάθος διείσδυσης είναι κατά τα άλλα ιδιαίτερα περιορισμένο.

Ένας άλλος σοβαρός παράγοντας που έχει επιπτώσεις στο βάθος διείσδυσης είναι και ο προσανατολισμός των πηνίων (σπειρών).

Οι πιο κοινοί προσανατολισμοί, όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους, είναι:

- σπείρες οριζόντιες
- σπείρες κάθετες



*Εικόνα 9: Προσανατολισμός σπειρών του οργάνου (Σημειώσεις Γεωφυσικής, Αποστολόπουλος, 2013)*



*Εικόνα 10: Κάθετη διάταξη πηνίων στον ίδιο άξονα στο EM34-XL*

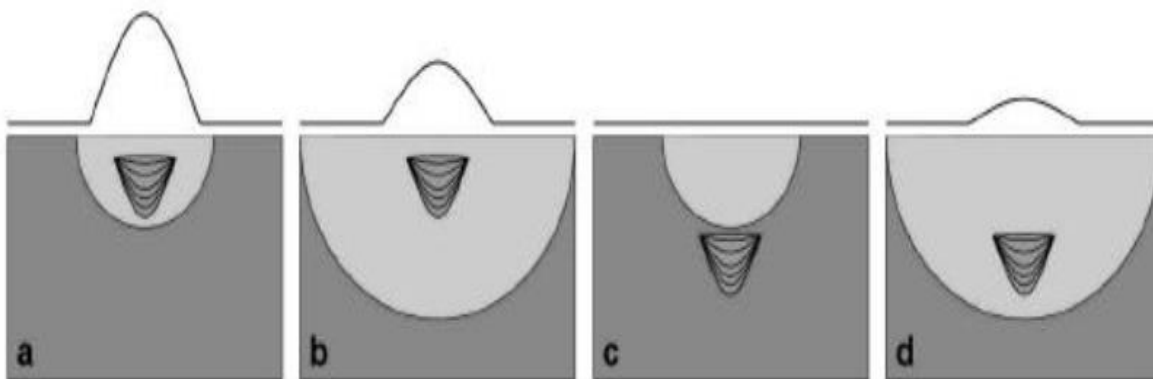
Εάν οι δύο σπείρες τοποθετούνται οριζόντια στην επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός τους καλείται οριζόντιο συνεπίπεδο. Σε αυτήν την θέση ο οριζόντιος πομπός παράγει ένα μαγνητικό πεδίο του οποίου οι γραμμές ροής προέρχονται κάθετα, τον οποίο προσανατολισμό ονομάζουμε κάθετο μαγνητικό δίπολο (ή “ κάθετος τρόπος “).

Σε αυτήν την θέση υπάρχει η μέγιστη ενεργειακή διείσδυση μέσα στο έδαφος και είναι ο πιο κοινός προσανατολισμός για τις αρχαιολογικές έρευνες στην πλειοψηφία τους.

Αντιθέτως, όταν οι σπείρες τοποθετούνται κάθετα όσον αφορά την επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός (βλέπε **Εικόνα 10**) ονομάζεται αντίστοιχα κάθετο συνεπίπεδο και η μαγνητική ροή που προέρχεται από τον πομπό είναι οριζόντια, αποκαλούμενος οριζόντιος μαγνητικός προσανατολισμός δίπολων (ή ‘‘οριζόντιος τρόπος’’).

Σε αυτήν την θέση ένα πολύ μικρότερο μέρος του προκληθέντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαπερνά το έδαφος και έτσι η διείσδυση βάθους μειώνεται. (Witten, A. J. 2006)

Γενικότερα, μπορεί κανείς να αντιληφθεί την συσχέτιση της συχνότητας με το βάθος και στο παρακάτω σχήμα:



*Εικόνα 11: Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικείμενου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι (a) ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετριέται με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετριέται και μια μικρότερη ανωμαλία μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά στο έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος Γεώργιος 2013)-το παράδειγμα ‘‘ κουτί με λίρες ‘‘*

### 2.1.4.2 Μαγνητική Επιδεκτικότητα & Μεθοδολογία Μετρήσεων

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) δείχνει το κατά πόσο ένα υλικό μπορεί να μαγνητιστεί παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου. Μετριέται ανά μονάδα όγκου ( $\kappa$ ) ή ως απλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας ( $\chi$ ), αλλά συνήθως δίνεται ως αναλογία του αρχικού προς το δευτερεύον πεδίο.

Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία προερχόμενα από την εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων τους. Για αυτό το λόγο, οι ουσίες είναι ευαίσθητες και αντιδρούν στα κοντινά μαγνητικά πεδία μέχρι ένα βαθμό. Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει την μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και των υδροξειδίων, σε εντονότερα μαγνητικές μορφές.

Έτσι το χώμα είναι πολύ περισσότερο μαγνητικό από τα στρώματα του υπεδάφους. Ακόμα, οι έντονη δραστηριοποίηση του ανθρώπου μέσω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως οι εκσκαφές, ενισχύουν ακόμα περισσότερο το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα που συναντώνται στους αρχαιολογικούς τόπους να είναι εν μέρη πιο μαγνητικά από εκείνα των μη-πολιτιστικών ενεργά περιοχών. Οι άνθρωποι ενισχύουν με τις παρεμβατικές δραστηριότητές τους τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους των χωμάτων.

Ακόμα, προκαλούν συχνά και την αύξηση της εδαφολογικής θερμοκρασίας μέσω μιας πυρκαγιάς, ενσωματώνοντας καμένα ή υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας υλικά μέσα στο έδαφος. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας στους αρχαιολογικούς τόπους με αποτέλεσμα να αυξάνεται η δυνατότητα και η πιθανότητα να ανιχνευτούν τα τεχνητά αντικείμενα. (Dalan, R. A. 2006)

Για να μετρηθεί η μαγνητική επιδεκτικότητα υπάρχουν πολλοί τρόποι, αλλά όλοι στηρίζονται στην θεμελιώδη αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα δευτεροβάθμιο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (EM) μπορεί να προκληθεί στο έδαφος με τη δημιουργία του αρχικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το δευτεροβάθμιο πεδίο, περιέχει τις πληροφορίες για τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και αποκρίνεται και στις μαγνητικές ιδιότητες.

Έτσι ως γνωστόν, όταν το δευτεροβάθμιο πεδίο μετασχηματίζεται από μαθηματικής άποψης στα «in-phase» και «out-of-phase», το μέγεθος του «out-of-phase» τμήματος είναι ανάλογο προς την αγωγιμότητα και αν δεν υπάρχει κανένας εξαιρετικά αγωγίμος στόχος στο έδαφος (π.χ. μεταλλικά αντικείμενα μεγάλου μεγέθους), το «in-phase» θεωρείται και το μέτρο της μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Τέλος, μερικά όργανα της «EMI» μπορούν να μετρήσουν και την πραγματική αγωγιμότητα και την μαγνητική επιδεκτικότητα ταυτόχρονα. Άλλα όργανα σχεδιάζονται για να μετρήσουν μόνο την μαγνητική επιδεκτικότητα, αλλά εξακολουθούν πάντα να χρησιμοποιούν την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.



### 2.1.4.3 Βάθος και Ανάλυση Δεδομένων

Από τις γεωφυσικές μεθόδους που αναφέρονται στην παρούσα εργασία, η μαγνητική επιδεκτικότητα που συλλέγεται από την επιφάνεια του εδάφους είναι περιορισμένη από την άποψη της διαπερατότητας σε βάθος, εξ 'αιτίας της αδυναμίας των μαγνητικών πεδίων που μετριοούνται. Η εκθετική απώλεια εμφανίζεται καθώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εισάγεται στο έδαφος, και έπειτα καθώς ταξιδεύει από το έδαφος πίσω στον αισθητήρα μέτρησης. Η απώλεια είναι εκθετική στην έκτη δύναμη, με συνέπεια να μην έχει μεγάλη διείσδυση σε βάθος.

Υπάρχουν προφανώς σημαντικές διαφορές στην διαπερατότητα σε βάθος ανάμεσα στα μονής σπείρας και διπλής σπείρας όργανα μέτρησης. Τα μονά όργανα σπειρών πρέπει να έρθουν σε απευθείας επαφή με το έδαφος, και το βάθος της διείσδυσης περιορίζεται από τη διάμετρο του βρόχου αναζήτησης.

Για παράδειγμα, ο <<BartingtonMS2D>> αισθητήρας μονού βρόχου που χρησιμοποιείται στα γεωφυσικά, διαπερνά μόνο περίπου 0.10 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ οι διπλοί αισθητήρες σπειρών, όπως το Geonics EM38, έχουν μια διείσδυση της τάξης του μισού μέτρου ή περισσότερο όπου η ευαισθησία βάθους είναι μεγαλύτερη για την αγωγιμότητα με αυτόν τον αισθητήρα.

Οι πυκνότητες δεδομένων για τις έρευνες περιοχής μαγνητικής επιδεκτικότητας εξαρτώνται από το όργανο. Οι αισθητήρες διπλής σπείρας είναι γρήγοροι και οι χαρακτηριστικές πυκνότητες δεδομένων είναι σχεδόν οι ίδιες όπως και για την αγωγιμότητα, ίσως 0.25m X 0.5m (δηλαδή, 4 αναγνώσεις ανά γραμμικό μέτρο, με περάσματα που χωρίζονται ανά 0.5m).

Οι μονοί αισθητήρες σπειρών, σε αντίθεση με τους διπλής σπείρας, είναι αρκετά πιο αργοί επειδή κάθε ανάγνωση απαιτεί την απευθείας επαφή με το έδαφος και συχνά ο αισθητήρας πρέπει να μηδενιστεί πριν από κάθε μέτρηση. Άρα, η πυκνότητα των μετρήσεων είναι επομένως της τάξης μίας μέτρησης ανά τετραγωνικό μέτρο (ή ακόμα και λιγότερο). Αυτό βάζει όριο στη χωρική ανάλυση. Με τα όργανα διπλών σπειρών η χωρική ανάλυση είναι παρόμοια με την αγωγιμότητα.

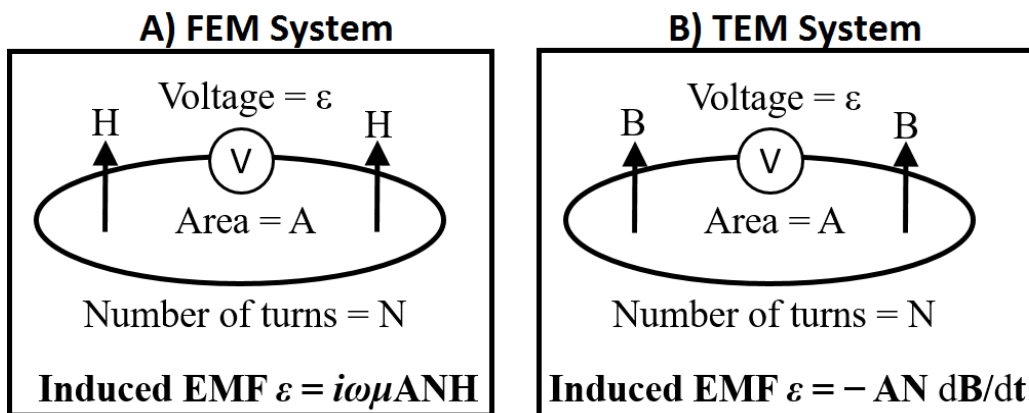


*Εικόνα 12: BartingtonMS2D διάταξη μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας*

## 2.1.5 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων & Μέθοδοι Εφαρμογής

Υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων και είναι τα εξής:

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



Εικόνα 13: Αρχή των συστημάτων FEM&TEM

Ωστόσο, ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα που διαχωρίζονται σε σχέση με την πηγή που χρησιμοποιούν:

- **Παθητικά**- χρησιμοποιούνται φυσικά υπεδιαφικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα (π.χ. Μαγνητοτελλουρικά)
- **Ενεργητικά**- χρησιμοποιείται πομπός ηλεκτρομαγνητικού σήματος που επάγει ρεύμα στο έδαφος)
- **Τοπικού πεδίου**- όργανα μέτρησης αγωγιμότητας
- **Απομακρυσμένου πεδίου**- χρησιμοποιούνται σήματα πολύ χαμηλής συχνότητας που εκπέμπει πομπός για επικοινωνία υποβρυχίων

Ακόμα, τα επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά συστήματα διακρίνονται σε:

- **Μικρού βρόγχου**- τα συστήματα που δουλεύουν περισσότερο στο χώρο των συχνοτήτων EM31, EM34 κλπ και στον χώρο του χρόνου αντίστοιχα. Χρησιμοποιούνται κυρίως για περιβαλλοντικές γεωφυσικές εφαρμογές
- **Μεγάλου βρόγχου**- 5 με 100 μέτρα βρόγχοι-κυρίως συστήματα στον χώρο του χρόνου με χρήση στην μεταλλευτική έρευνα
- **Επίπεδου κύματος**- VLF, Μαγνητοτελλουρικά- χρήση στην μεταλλευτική έρευνα και στον εντοπισμό βαθιών γεωλογικών δομών



### **2.1.5.1 Εφαρμογές μεθόδου**

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος είναι μία μέθοδος γρήγορη με πολλές παραλλαγές συστημάτων μέτρησης και με συγκεκριμένα βάθη διασκόπησης ανάλογα με την αντίστοιχη συχνότητα που εφαρμόζεται ή την απόσταση πομπού και δέκτη που επιλέγεται.

Είναι μία μέθοδος η οποία προσφέρει ποικιλία εφαρμογών οι οποίες είναι οι εξής:

- Μεταλλευτική Έρευνα
- Εντοπισμός ρύπανσης υδάτινων πόρων
- Εντοπισμός μετώπου υφαλμύρινσης
- Γεωλογική χαρτογράφηση, χαρτογράφηση εδαφών, κροκαλών
- Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων (σωληνώσεις, δεξαμενές, τοιχία κλπ)
- Αρχαιολογική Έρευνα
- Εντοπισμός Εγκοίλων (σπήλαια, εγκαταλελειμμένες σήραγγες κλπ)

### **2.1.5.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου**

Είναι γνωστό πως η μέθοδος μέτρησης της αγωγιμότητας έχει πλεονεκτήματα καθώς και μειονεκτήματα. Σε αντίθεση με την ειδική αντίσταση, τα δεδομένα που λαμβάνει η ΕΜΙ» μπορούν να συλλεχθούν γρηγορότερα επειδή δεν υπάρχει καμία ανάγκη να παρεμβληθούν ηλεκτρόδια στο έδαφος όπως στις ηλεκτρικές μεθόδους ή να επαναληφθούν περιστασιακά μακρινοί έλεγχοι.

Ακόμα, τα δεδομένα της «ΕΜΙ» μπορούν να συλλεχθούν και σε περιοχές με πολύ ξηρό ή σκληρό έδαφος, όπου τα ηλεκτρόδια είτε δεν μπορούν να τοποθετηθούν, ή το ρεύμα δεν θα διαρρέυσει στο έδαφος λόγω έλλειψης υγρασίας. Οι πολύ ξερές συνθήκες επιφάνειας δεν είναι απαραίτητως μια ένδειξη ότι το έδαφος κάτω από την επιφάνεια είναι πάρα πολύ ξηρό για να παρέχει μια αρκετή αντίθεση, όμως συχνά επαρκής υγρασία βρίσκεται μόνο μερικά εκατοστόμετρα κάτω από τα ηλεκτρόδια.

Τα όργανα της «ΕΜΙ» μπορούν επίσης να αποθηκευτούν σε ειδικά πακέτα μεταφοράς και να μεταφερθούν ευκολότερα χάρη στο μικρότερο και πιο ευέλικτο μέγεθός τους. Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι η ευαισθησία του ΕΜ38 στην ηλεκτρική παρέμβαση (π.χ., φωτισμός, ηλεκτροφόρα καλώδια) και τα συντρίμια μετάλλων.

## 2.2 Γεωραντάρ-GPR (Ground Penetrating Radar)

### 2.2.1 Γενικά

Το Γεωραντάρ ή αλλιώς το Ground-Penetrating Radar (GPR) είναι μια τεχνική απεικόνισης του υπεδάφους σε υψηλή ανάλυση. Χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προσομοιάζουν σε ήχο αυτά που χρησιμοποιούνται σε υπερηχητικά παλμογράφηματα. Βασίζεται στη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μέσω υλικών με διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές (παρόμοιες με την ακουστική αντίσταση τους στον ήχο). Το GPR λειτουργεί με τη μετάδοση παλμών ραδιοκυμάτων στο έδαφος μέσω μιας κεραίας της οποίας η συχνότητα θα καθορίσει και το βάθος διασκόπησης, αλλά και με τη μέτρηση της ανακλώμενης ενέργειας στην κεραία λήψης.

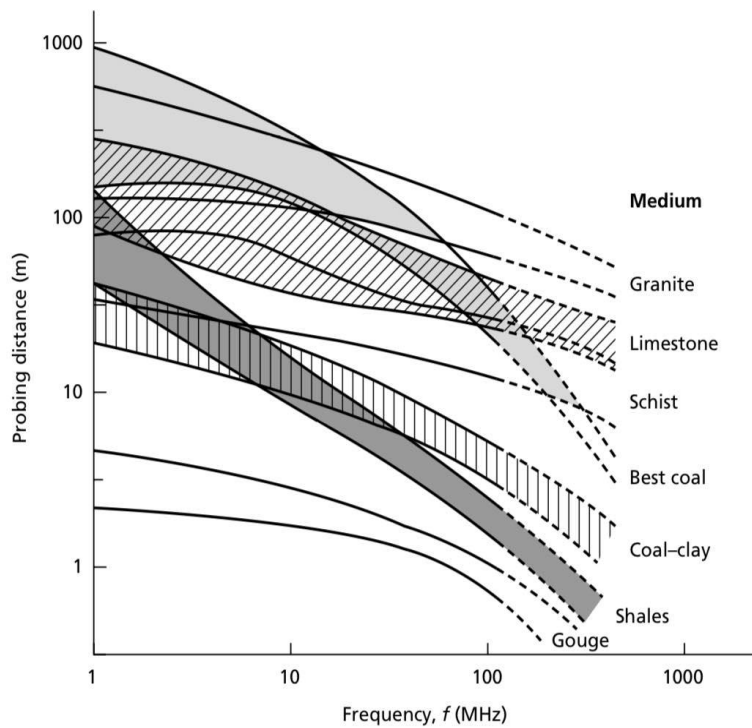
Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετά κοινά σημεία με τη σεισμική μέθοδο, συμπεριλαμβάνεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους καθώς ελέγχει τις ηλεκτρικές ιδιότητες σε υψηλές συχνότητες. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των διηλεκτρικών σταθερών σε μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών που συναντά το κύμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ανακλάται στη διεπιφάνεια αυτή.

Για αυτό, η μέθοδος του Γεωραντάρ εφαρμόζεται σε περιοχές με σχηματισμούς υψηλών σχετικά ειδικών αντιστάσεων και βασίζεται στην ανάκλαση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από 8MHz έως 4GHz, σε ασυνέχειες μέσω των οποίων η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα μεταβάλλονται.

Η διηλεκτρική σταθερά είναι η δυνατότητα ενός υλικού να αποθηκεύει φορτία όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

	K	$\sigma$ (mS/m)	V (m/ns)
Αέρας	1	0	0.30
Αποσταγμένο νερό	80	0.01	0.033
Γλυκό νερό	80	0.5	0.033
Θαλασσινό νερό	80	$3 \cdot 10^3$	0.1
Ξηρή Άμμος	3-5	0.01	0.15
Διαποτισμένη Άμμος	20-30	0.1-1.0	0.06
Ασβεστόλιθος	4-8	0.5-2.0	0.12
Σχιστόλιθος	5-15	1-100	0.09
Ίλύς	5-30	1-100	0.07
Άργιλος	5-40	2-1000	0.06
Γρανίτης	4-6	0.01-1	0.13
Ξηρό Άλας	4-6	0.01-1	0.13
Πάγος	3-4	0.01	0.16

*Πίνακας 3: Ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (v) τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας ( $\sigma$ ) για διάφορους τύπους υλικών*



*Εικόνα 14: Η σχέση συχνότητας και απόστασης ανίχνευσης των υλικών*

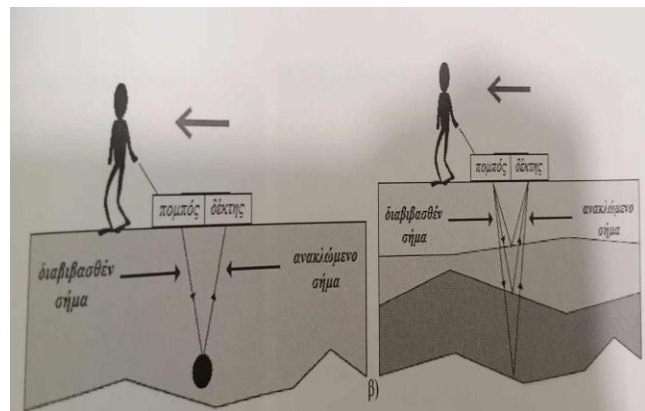
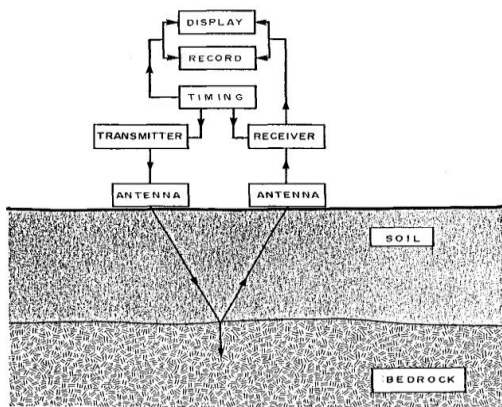
Το GPR αποτελεί μη καταστρεπτική μέθοδο, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αστικές ή γενικότερα ευαίσθητες περιοχές. Έχει επίσης γεωλογικές εφαρμογές, όπως η απεικόνιση δομών σε υψηλή ανάλυση και η χαρτογράφηση του υδροφόρου ορίζοντα. Επίσης έχει και διάφορες μη γεωλογικές εφαρμογές όπως π.χ. στην αρχαιολογία για την εύρεση τοποθεσίας θαμμένων τοίχων ή και κοιλοτήτων. Σε αντίθεση με τις σεισμικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την χαρτογράφηση επιφανειακών στρωμάτων και οι οποίες δεν διαθέτουν την απαιτούμενη ακρίβεια (εντοπισμός υπόγειων κατασκευών με μήκος μικρότερο του 1 m), το γεωραντάρ καθίσταται καταλληλότερη μέθοδος. Συμπεριλαμβάνεται στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους καθώς ελέγχει τις ηλεκτρικές ιδιότητες σε υψηλές συχνότητες.

## 2.2.2 Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε όλα τα συστήματα GPR αποτελείται από τέσσερα κύρια στοιχεία, τη μονάδα εκπομπής, τη μονάδα λήψης, τη μονάδα ελέγχου και τη μονάδα απεικόνισης. Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζεται ένα απλό μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος GPR. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του συστήματος αυτού, οι οποίες καθιστούν το σύστημα πιο πρακτικό για διάφορες εφαρμογές. Ο πομπός παράγει έναν παλμό υψηλής τάσης ελάχιστης διάρκειας. Ο παλμός εφαρμόζεται στην κεραία εκπομπής η οποία ακτινοβολεί τον παλμό στο έδαφος. Αυτό το μεταδιδόμενο σήμα ταξιδεύει στο έδαφος με τα ανακλώμενα σήματα να ταξιδεύουν πίσω στην κεραία λήψης και στη συνέχεια στο δέκτη. Ο δέκτης ενισχύει τα σήματα και στη συνέχεια τα διαμορφώνει για να τα εμφανίσει η μονάδα ελέγχου. (J. L. DAVIS, A. P. ANNAN, 2006).

Πιο συγκεκριμένα τα βασικά στοιχεία του συστήματος είναι:

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

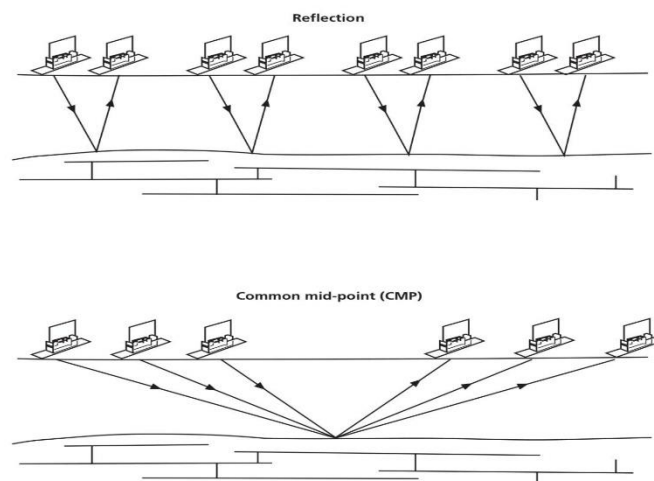


Εικόνα 15:Τυπικό διάγραμμα μπλοκ για το σύστημα λειτουργίας του γεωραντάρ/ Εικόνα 16:Αιάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

### 2.2.3 Τρόποι μετρήσεων

Υπάρχουν δύο μοντέλα διάταξης:

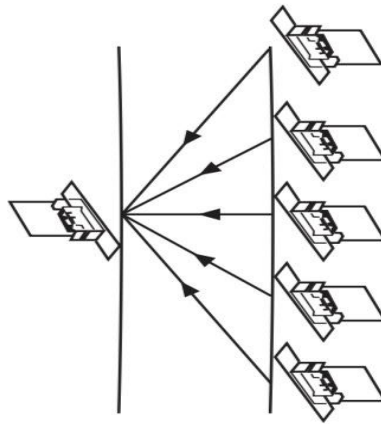
- **Τυπική διάταξη λειτουργίας (common - offset):** Ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση και μετακινούνται κατά την γραμμή διασκόπησης συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα. Συνήθως ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται μέσα σε κουτί θωρακισμένο για μέγιστη κατευθυντικότητα προς τα κάτω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



Εικόνα 17: Common offset & Common Midpoint (Kearey, Brooks, Hill, 2002)

Υπάρχει και ένα τρίτο μοντέλο, το transillumination, δηλαδή την διασκόπηση αντικειμένων με ακτίνα φωτός, στην οποία ο πομπός και η κεραία τοποθετούνται εκατέρωθεν του αντικειμένου ενδιαφέροντος όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.

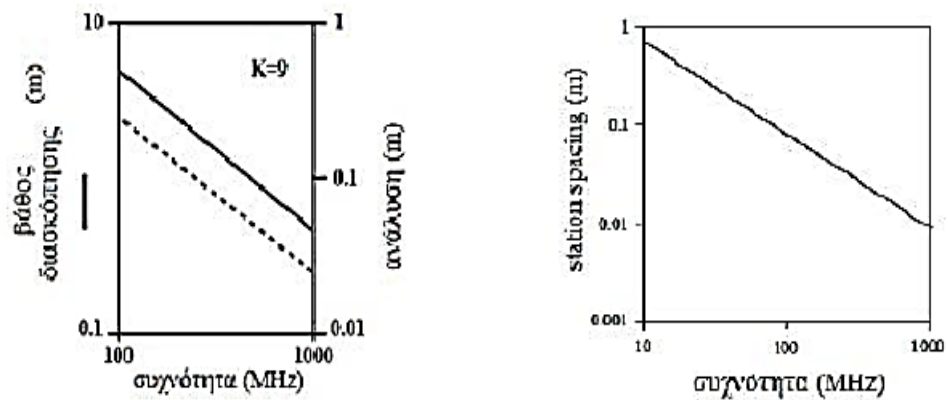
### Transillumination



*Εικόνα 18: Διάταξη Transillumination GPR*

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

- **Η συχνότητα λειτουργίας του πομπού (operating frequency):** Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας των κεραιών του συστήματος γεωραντάρ που χρησιμοποιείται τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση σε βάθος με σαφή όμως μείωση στην ανάλυση που επιτυγχάνεται
- **Η χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval):** Σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist, δεν πρέπει να υπερβαίνει το μισό επίσης περιόδου  $T$  minimum που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη συχνότητα  $f$  maximum του μετρούμενου σήματος.
- **Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (spatial sampling interval ή station spacing):** Η επιλογή του κατάλληλου διαστήματος συνδέεται κυρίως με την κεντρική συχνότητα των κεραιών.
- **Το χρονικό παράθυρο (time window):** Εξαρτάται από το μέγιστο βάθος διείσδυσης και την ελάχιστη ταχύτητα διάδοσης.
- **Θέση των γραμμών διασκόπησης και πυκνότητάς τους (line location and spacing):** Οι γραμμές διασκόπησης καθορίζονται έτσι ώστε να περνούν όσο το δυνατόν κάθετα στην μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται, και με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός των γραμμών που εκτελούνται οι μετρήσεις.



Εικόνα 19: Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάση της συχνότητας κεραίας του γεωραντάρ & Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων

## 2.2.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα της Μεθόδου

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει και πλεονεκτήματα αλλά και λίγα μειονεκτήματα.

Πιο συγκεκριμένα, τα κύρια θετικά της μεθόδου είναι:

- Η ευκολία στην χρήση του μηχανήματος
- Το πόσο γρήγορα λαμβάνει το μηχάνημα τις μετρήσεις

Γεγονός που σχετίζεται με το βάρος του μηχανήματος, τη διαδικασία μετρήσεων, το χρόνο μέτρησης αλλά και το χρόνο απόκρισης των αποτελεσμάτων. Από την άλλη, τα αρνητικά της μεθόδου είναι η δυσκολία ερμηνείας των αποτελεσμάτων, η πραγματοποίηση μετρήσεων σε ανώμαλα εδάφη και το μικρό βάθος ανάλυσης.

## 2.3 Μαγνητική Μέθοδος

### 2.3.1 Γενικά

Η μαγνητική μέθοδος βασίζεται στο μαγνητικό πεδίο της Γης, και στην μεταβολή αυτού ως προς τον χρόνο.

Μέσω αυτής, μπορούμε να εντοπίσουμε υπεδιαφικές δομές υψηλού ενδιαφέροντος, για παράδειγμα κάποια μεταλλοφορία ή κάποιο δόμο άλατος, ή ακόμα και για ανακαλύψεις αρχαίων (π.χ. ταφών), εκμεταλλευόμενοι τις μεταβολές αυτές, αλλά και λόγω των μαγνητικών ιδιοτήτων των γεωλογικών υλικών.

Ακόμα και σήμερα, οι μαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης είναι από τις περισσότερο διαδεδομένες γεωφυσικές τεχνικές. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι οι μαγνητικές παρατηρήσεις αποκτούνται εύκολα και γρήγορα χωρίς να χρειάζονται πολύπλοκες και χρονοβόρες διορθώσεις. Παρά τα προφανή αυτά πλεονεκτήματα τους, όπως και οι βαρυτικές μέθοδοι, οι ερμηνείες των μαγνητικών μετρήσεων υστερούν σε αυτό που λέγεται μοναδικότητα της λύσης. ( Ιωάννης Λούης, Φεβρουάριος 2003)



### 2.3.2 Αρχές της Μαγνητικής Μεθόδου

Όπως γνωρίζουμε από την Φυσική, κάθε μαγνήτης έχει Βόρειο και Νότιο πόλο, οι οποίοι σχηματίζουν ένα μαγνητικό πεδίο. Η Γη συμπεριφέρεται ως ένας μαγνήτης, λόγω της έντονης παρουσίας υγρού σιδήρου στον πυρήνα της. Για να μπορέσουμε να ερμηνεύσουμε την μέθοδο, θα πρέπει να εξηγήσουμε κάποιες έννοιες και να αναφερθούμε σε συγκεκριμένα μεγέθη.

Πιο συγκεκριμένα,

- Η δύναμη  $F$  μεταξύ δύο πόλων, εκφράστηκε μαθηματικά από τον Coulomb, και δίνεται από τον τύπο:

$$F = \frac{\frac{1}{\mu}}{m_1 \cdot m_2} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{Newton})$$

όπου  $\mu$ , η μαγνητική διαπερατότητα, άμεσα εξαρτώμενη από το υλικό που βρίσκεται ανάμεσα στους δύο πόλους, και  $m_1$  και  $m_2$ , ορισμένες μαγνητικές ποσότητες των πόλων.

- Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) που δημιουργείται, ορίζεται ως η δύναμη που ασκήθηκε από τον θετικό πόλο, στο σημείο που θέλουμε να πάρουμε την μέτρηση, το οποίο έχει απόσταση  $r$  από τον πόλο και δίνεται από τον τύπο:

$$H = \frac{\frac{1}{\mu}}{m} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{ampere/meter})$$

- Μεταξύ ενός ζεύγους μαγνητικών πόλων (μαγνητικά δίπολα), αναπτύσσεται μαγνητική ροπή ( $M$ ) και είναι ανυσματικό μέγεθος και δίνεται από τον τύπο:

$$M = m \cdot r \quad (\text{A} \cdot \text{m}_2)$$

- Η μαγνήτιση ενός σώματος που εισέρχεται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, γίνεται εξ επαγωγής και ορίζεται μέσω ενός μεγέθους, που ονομάζεται ένταση μαγνήτισης ( $J$ ) και δίνεται από τον τύπο :

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

όπου  $V$  ο όγκος του σώματος και έχει τις ίδιες μονάδες με την ένταση

Το μεγαλύτερης σημασίας, μέγεθος στην μέθοδο αυτή, η μαγνητική επιδεκτικότητα ( $k$ ). Μαγνητική επιδεκτικότητα είναι ιδιότητα αυτή καθαυτή του υλικού, που καθορίζει την ικανότητα του να μαγνητίζεται από ένα μαγνητικό πεδίο (Και είναι καθαρός αριθμός)

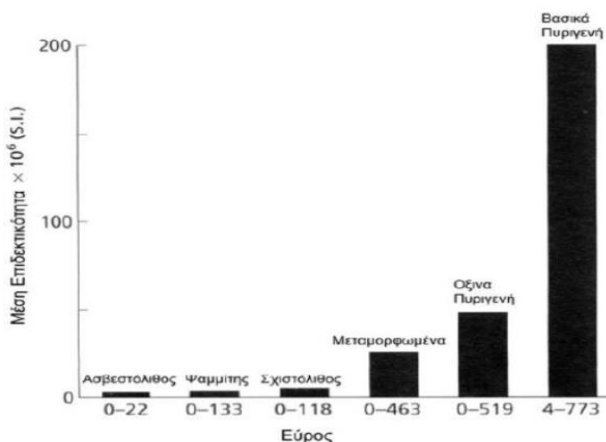
$$k = \frac{J}{H}$$

Αποτελεί την πιο βασική παράμετρο, λόγω της ικανότητάς της να μας παριστάνει αριθμητικά την μαγνήτιση των πετρωμάτων και των ορυκτών μιας περιοχής, η οποία εξαρτάται από την περιεκτικότητά τους σε μαγνητικά υλικά και τα οποία παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές  $k$  από ότι μόνα τους και τα πετρώματα και τα ορυκτά.

Το μέτρο ευκολίας μαγνήτισης ενός υλικού εξαρτάται από τη μαγνητική τους επιδεκτικότητα και αυτά με τη σειρά τους χαρακτηρίζονται ως:

- Παραμαγνητικά υλικά, για  $k > 0$
- Διαμαγνητικά υλικά, για  $k < 0$
- Σιδηρομαγνητικά υλικά, για  $k > 10^{-4}$  emu, δηλαδή για μεγάλες τιμές του  $k$

Ειδικά για τα σιδηρομαγνητικά υλικά ισχύει ότι η δύναμη της μαγνήτισής τους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και εξαφανίζεται στη θερμοκρασία Curie, ενώ πάνω από τη θερμοκρασία αυτή συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά. Επίσης το μαγνητικό πεδίο της περιοχής μπορεί να επηρεάσει την μαγνήτιση ενός υλικού προκαλώντας ακόμα και τη μόνιμη μαγνήτισή του σε περίπτωση πολύ ισχυρού πεδίου. Στα πετρώματα η μαγνητική επιδεκτικότητα, της οποίας η τιμή σε αυτά είναι πολύ χαμηλή, εξαρτάται από την περιεκτικότητά τους σε μαγνητικά υλικά και κυρίως την περιεκτικότητά τους σε μαγνητίτη, αφού είναι το πιο κοινό μαγνητικό υλικό. Τα πετρώματα ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε μαγνητίτη κατηγοριοποιούνται σε σχέση με τη μαγνητική τους επιδεκτικότητα σύμφωνα με το ιστόγραμμα.

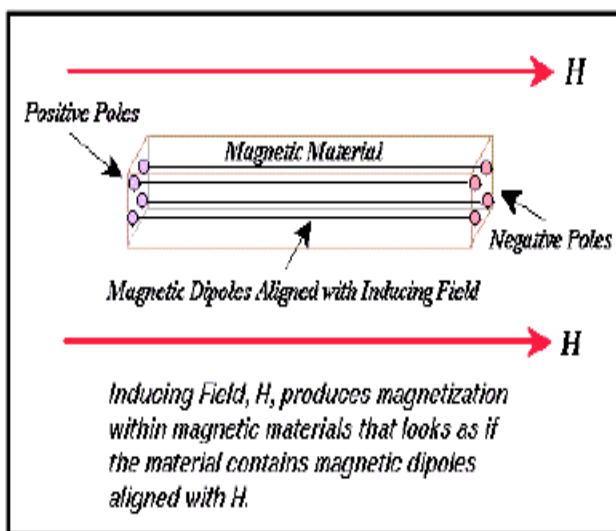


Εικόνα 20: Μέση επιδεκτικότητα πετρωμάτων

### 2.3.2.1 Μαγνητική Επαγωγή

Όταν ένα μαγνητικό υλικό, π.χ.ο σίδηρος, τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο,  $H$ , το μαγνητικό υλικό θα παράγει τη δική του μαγνήτιση. Το φαινόμενο αυτό καλείται μαγνητική επαγωγή (induced magnetization). (Ιωάννης Λούης, Φεβρουάριος 2003)

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο (δηλαδή αυτό που παράγεται από το μαγνητικό υλικό) έχει καταφέρει να δημιουργήσει μια σειρά μαγνητικών δίπολων, τα οποία βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό υλικό και είναι προσανατολισμένα παράλληλα στη διεύθυνση του επαγωγικού πεδίου,  $H$  που αναφέραμε πριν.



Εικόνα 21: Τα μαγνητικά δίπολα που δημιουργούνται στην παράλληλη διεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται στο υλικό (Λούης, Φεβρουάριος 2003)

Η ένταση του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου του μαγνητικού υλικού καλείται ένταση μαγνήτισης (intensity of magnetization),  $I$ .

### 2.3.2.2 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η ένταση της μαγνήτισης,  $I$ , συνδέεται με την ένταση του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου,  $H$ , μέσω μιας σταθεράς αναλογίας,  $k$ , η οποία ονομάζεται μαγνητική επιδεκτικότητα (magnetic susceptibility). Η ένταση της μαγνήτισης ορίζεται ως εξής:

$$I = kH$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μία αδιάστατη σταθερά που καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού και λαμβάνει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές αντίστοιχα. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο,  $I$ , είναι στην ίδια διεύθυνση με το επαγωγικό πεδίο,  $H$ , ενώ οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν ότι επαγόμενο μαγνητικό και επαγωγικό πεδίο βρίσκονται σε αντίθετη διεύθυνση.

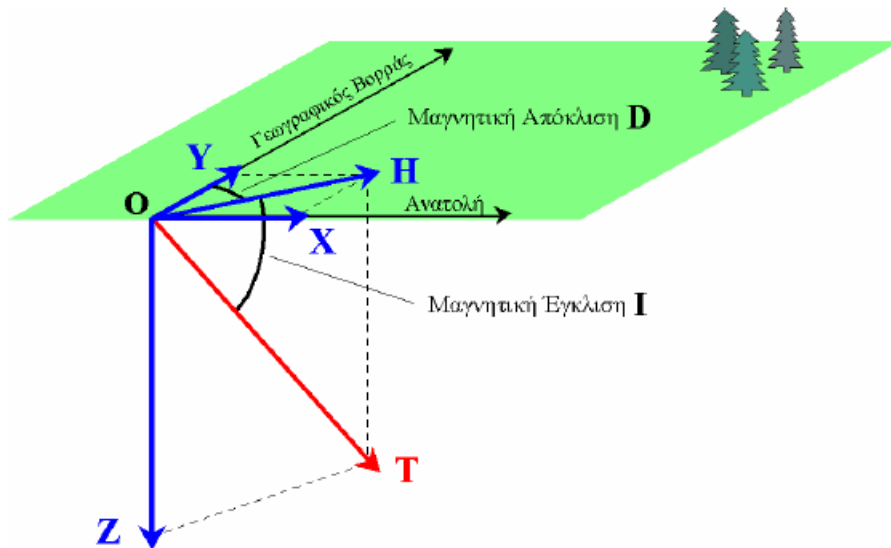
Στις μαγνητικές έρευνες, η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι η θεμελιώδης ιδιότητα των υλικών, των οποίων τη χωρική κατανομή προσπαθούμε να καθορίσουμε.

### 2.3.2.3 Το Μαγνητικό πεδίο της Γης

Το γεωμαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται τόσο σε ένταση όσο και σε διεύθυνση, σε χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από milliseconds μέχρι χιλιετίες (εκτός των περιπτώσεων μικρών ή μεγάλων αλλαγών λόγω ανακατανομών των μαζών, όπως οι παλίρροιες, κίνηση μαγμάτων, ισοστατικές κινήσεις, κ.α.). Για την εφαρμοσμένη γεωφυσική οι πιο σημαντικές χρονικές μεταβολές είναι οι ημερήσιες μεταβολές και οι μαγνητικές καταιγίδες.

Σύμφωνα με την ονοματολογία που έχει επικρατήσει μεταξύ των γεωεπιστημόνων (Parasnis 1986) για την περιγραφή των διανυσματικών ποσοτήτων του γεωμαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται τα εξής:

- Ο γεωγραφικός Βορράς στον άξονα  $Y$
- Η μαγνητική απόκλιση  $D$
- Η μαγνητική έγκλιση  $I$
- Το διάνυσμα του ολικού μαγνητικού πεδίου  $T$

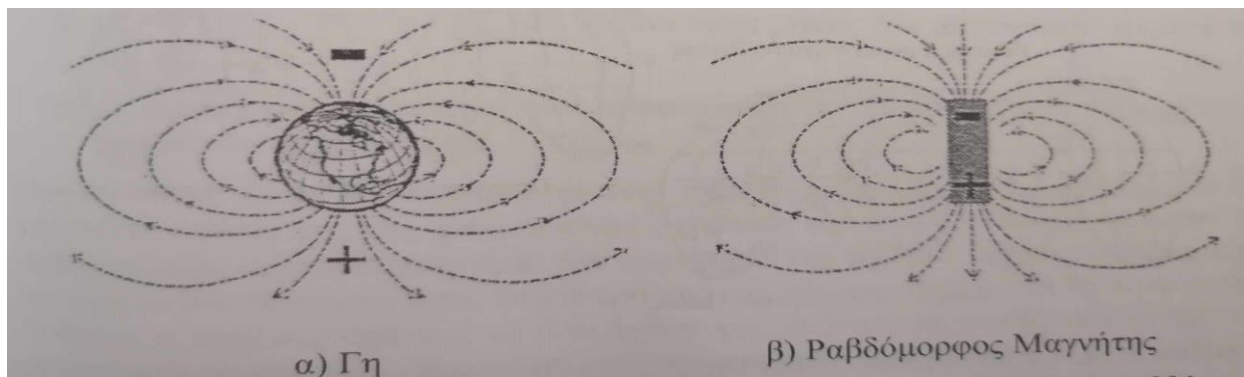


*Εικόνα 22: Το γεωμαγνητικό πεδίο της Γης (Λούης, Φεβρουάριος 2003)*

Σύμφωνα με μελέτες, το γεωμαγνητικό πεδίο της Γης μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη καθώς πιστεύεται ότι ένα μεγάλο μέρος του εσωτερικού πεδίου παράγεται στον πυρήνα της Γης. (Παπαδόπουλος, 2010).

Τα τρία μέρη είναι:

- Το κύριο μαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται στον πυρήνα της Γης και δημιουργεί τις ευρείες μεταβολές της έντασης του πεδίου και της διεύθυνσής του
- Το ανώμαλο μαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται από σιδηρομαγνητικά ορυκτά του φλοιού της Γης
- Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται από ηλεκτρικά ρεύματα της ιονόσφαιρας, αποτελείται από ιονισμένα σωματίδια λόγω της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας και τα οποία τίθενται σε κίνηση από την ηλιακή παλίρροια.



*Εικόνα 23: Το μαγνητικό πεδίο της Γης (εικόνα (α)) & το όμοιο του, το μαγνητικό πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη( εικόνα (β))*

Ακόμα, πέρα από τις χρονικές μεταβολές που υφίσταται το μαγνητικό πεδίο της Γης, οι οποίες και επηρεάζουν τις γεωφυσικές μετρήσεις, το γεωμαγνητικό πεδίο μπορεί και να υποστεί εξωτερικές αλλά και εσωτερικές μεταβολές όπως:

1. Εσωτερικού τύπου

- **Εποχές**, δηλαδή περίοδοι που το μαγνητικό πεδίο είναι κανονικό ή ανεστραμμένο
- **Excursions**, μικρές μεταβολές του πεδίου, όπου επανέρχεται στην αρχική του θέση
- **Παροδικές μεταβολές**, μεταβολές τοπικής κλίμακας, και προκαλούνται από την περιστροφική ταχύτητα της Γης ή από τις αλλαγές στην αλληλεπίδραση πυρήνα-μανδύα.

2. Εξωτερικού τύπου:

- **Μαγνητικές καταιγίδες και ηλιακές κηλίδες (>100nT)**. Η ηλιακή δραστηριότητα συχνά συνοδεύεται από μεγάλα ποσά ενέργειας στο πλάσμα. Μια έντονη μαγνητική καταιγίδα μπορεί να εμφανιστεί απότομα και οφείλεται στις ηλιακές κηλίδες. Δεν συνιστάται η λήψη μετρήσεων, παρουσία τέτοιων φαινομένων, λόγω της δυσκολίας που εμφανίζουν στην διόρθωση.
- **Ημερήσια μεταβολή**, λόγω της απόκλισης από τον 23ο άξονα περιστροφής.
- **Ημερήσια μεταβολή, που συνδέεται με την δραστηριότητα του ήλιου, της σελήνης και του electrojet φαινομένου στον μαγνητικό ισημερινό (100-200 nT)**.
- **Magnetic Bays**, ομαλές αλλαγές μικρής διάρκειας
- **Micropulsations**, που οφείλονται σε μικρές ηλεκτρικές φορτίσεις.
- **Ατμοσφαιρική επίδραση**

Αν εξαιρέσουμε τις μαγνητικές καταιγίδες και τις ηλιακές κηλίδες, οι υπόλοιπες μεταβολές είναι πολύ μικρού πάχους.

#### 2.3.2.4 Παραμένουσα Μαγνήτιση

Αν το μαγνητικό υλικό έχει σχετικά μεγάλη επιδεκτικότητα, ή αν το επαγωγικό πεδίο είναι ισχυρό, το μαγνητικό υλικό θα διατηρήσει ένα μέρος της επαγωγικής μαγνήτισης ακόμα και μετά την εξαφάνιση του επαγόμενου πεδίου. Η μαγνήτιση που παραμένει καλείται Παραμένουσα Μαγνήτιση (Remanent Magnetization). Η παραμένουσα μαγνήτιση είναι η συνιστώσα της μαγνήτισης του υλικού που οι γεωφυσικοί χρησιμοποιούν για να αποτυπώσουν την κίνηση των ηπείρων και των ωκεάνιων λεκανών που είναι αποτέλεσμα της τεκτονικής των λιθοσφαιρικών πλακών. Ο μόνος τρόπος να μετρήσουμε την συνιστώσα της παραμένουσας μαγνήτισης ενός πετρώματος είναι να πάρουμε ένα δείγμα του πετρώματος στο εργαστήριο για ανάλυση. Αυτό είναι χρονοβόρο και δαπανηρό. Έτσι, στη γεωφυσική έρευνα, δεχόμαστε ότι δεν υπάρχει η συνιστώσα της παραμένουσας μαγνήτισης στο παρατηρούμενο πεδίο. Είναι σαφές, ότι η παραδοχή αυτή είναι λανθασμένη και μπορεί πιθανώς να επηρεάσει τις ερμηνείες μας.

#### 2.3.3 Λήψη Μετρήσεων με την Μαγνητική μέθοδο

Η γεωφυσική έρευνα με μαγνητική μέθοδο μπορεί να διεξαχθεί στη στεριά, στη θάλασσα και στον αέρα.

**Εναέρια έρευνα:** Πρόκειται για μία μέθοδο λήψης μετρήσεων με τη χρήση ελικοπτέρου ή αεροσκάφους, επανδρωμένου ή μη, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κάλυψη μεγάλων περιοχών έρευνας για μεταλλοφορία ή για πετρέλαιο. Είναι μία γρήγορη μέθοδος και προσφέρει πολύ καλή σχέση κάλυψης – κόστους, ενώ ταυτόχρονα έχει το πλεονέκτημα να καλύψει δύσβατες περιοχές, στις οποίες η τοπογραφία ή η παρουσία ενός υδάτινου σώματος θα αποτελούσε μία πιθανή δυσκολία για τη λήψη μετρήσεων. Επιπλέον σε μεγάλα υψόμετρα λαμβάνονται μεγάλου μήκους κύματος και μικρού πλάτους ανωμαλίες, οι οποίες αποτυπώνουν καλύτερα τις βαθιές ευρείες γεωλογικές μεταβολές από σχηματισμούς διαφορετικής μαγνητικής επιδεκτικότητας. Αντίστοιχα σε μικρά υψόμετρα λαμβάνουμε μικρού μήκους κύματος και μεγάλου πλάτους ανωμαλίες, οι οποίες αποτυπώνουν καλύτερα τις μικρές γεωλογικές μεταβολές από τους σχηματισμούς που βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια. Τα πλεονεκτήματα αυτά σημαίνουν ότι τα δεδομένα προς επεξεργασία είναι καλύτερα και επομένως η επεξεργασία και η ερμηνεία τους θα είναι ευκολότερη και ακριβέστερη.

**Θαλάσσια έρευνα:** Η βασική εφαρμογή της μεθόδου είναι η ωκεανογραφική έρευνα μεγάλης κλίμακας για πετρέλαιο ή για γεωφυσικά φαινόμενα. Η έρευνα διεξάγεται με την προσάρτηση του μαγνητόμετρου (ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής/πρωτονικό) περίπου 15 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Λόγω του σχετικά υψηλού κόστους της προτείνεται η εφαρμογή της μαζί με σεισμικά ή βαρυτικά.

**Επίγεια έρευνα:** Η βασική εφαρμογή είναι η λεπτομερής έρευνα για μεταλλοφορία, αλλά χρησιμοποιείται μετά από τη γεωχημική αναγνώριση για έρευνα ευτελών μετάλλων και για αργαιολογικές έρευνες. Τα μαγνητικά όργανα που χρησιμοποιούνται είναι μαγνητόμετρα στρέψης, πρωτονικά μαγνητόμετρα, μαγνητόμετρα ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροπής.

### 2.3.4 Μαγνητικά Όργανα Μέτρησης

Τα μαγνητικά όργανα μέτρησης συνήθως μετρούν το γεωμαγνητικό πεδίο ή την οριζόντια ή την κάθετη συνιστώσα του και διαθέτουν ακρίβεια  $\pm 0.1$  nT. Το μαγνητόμετρο στρέψης μετράει την κάθετη συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου και το πρωτονικό και το μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής μετράνε την ολική ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου.

Το πρωτονικό μαγνητόμετρο είναι το πιο διαδεδομένο όργανο για διασκοπήσεις υπαίθρου και για συνεχείς παρατηρήσεις. Η αισθητήρια συσκευή είναι ένα δοχείο με υγρό, πλούσιο σε άτομα υδρογόνου, που αποτελούν τα δίπολα, που με την παρουσία του γεωμαγνητικού πεδίου  $B_e$  ευθυγραμμίζονται με αυτό. Γύρω από το δοχείο υπάρχει ένα πηνίο, στο οποίο ρέει ρεύμα που δημιουργεί μαγνητικό πεδίο  $B_p$  διαφορετικής διεύθυνσης και μεγαλύτερο κατά 50-100 φορές. Στη συνέχεια, το ρεύμα διακόπτεται και το πεδίο που δημιουργήθηκε φεύγει. Τα πρωτόνια γυρίζουν στην αρχική κατάσταση ευθυγράμμισης με το πεδίο  $B_e$ , με σπειροειδή τρόπο, σε φάση γύρω από αυτή τη διεύθυνση, με περίοδο 0.5 msec και χρειάζονται περίπου 1-3 sec για να φτάσουν στην αρχική τους διεύθυνση.

Η μέτρηση της συχνότητας της σπειροειδούς κίνησης των πρωτονίων δίνει την ένταση του ολικού μαγνητικού πεδίου με μεγάλη ακρίβεια. Η συχνότητα βρίσκεται από τη μέτρηση της εναλλασσόμενης τάσης που επάγεται στο πηνίο λόγω της σπειροειδούς κίνησης των πρωτονίων.

Το όργανο είναι εξοπλισμένο με δυο αισθητήρες, οι οποίοι μετράνε ταυτόχρονα το ολικό πεδίο σε δύο διαφορετικά ύψη και στη συνέχεια βρίσκουμε τη διαφορά των τιμών ως προς την απόσταση μεταξύ τους, που ορίζεται ως κατακόρυφη βαθμίδα (μέτρηση gradient).

Το μαγνητόμετρο ακόμα, διαθέτει ένα βέλος πάνω στον αισθητήρα, το οποίο και πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με το γεωγραφικό Βορρά, κατά τη λήψη των μετρήσεων.

Παρακάτω βλέπουμε ένα παρόμοιο πρωτονικό μαγνητόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στην γεωφυσική έρευνα στο Λιβάδι, Κεφαλληνίας.





*Εικόνα 24: Χειριστήριο του πρωτονικού μαγνητόμετρου ENVI PRO*



*Εικόνα 25: Τα δύο πηνία του πρωτονικού μαγνητόμετρου που μετράνε σε δύο διαφορετικά ύψη το ολικό πεδίο και δείχνουν κατά την μέτρηση συνεχώς προς τον Βορρά*

## 2.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

### 2.4.1 Γενικά

Σκοπός των ηλεκτρικών γεωφυσικών ερευνών είναι να προσδιοριστεί η κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπεδάφος κάνοντας μετρήσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους, βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους μετρούνται διαφορές δυναμικού, ρεύματα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν φυσικά ή εισάγονται τεχνητά στην Γη.

Από τις μετρήσεις αυτές, η πραγματική ειδική αντίσταση,  $\rho$ , του υπεδάφους μπορεί να εκτιμηθεί αλλά και/ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα,  $\sigma$ . Η ειδική αντίσταση του εδάφους σχετίζεται με διάφορες γεωλογικές παραμέτρους, όπως η περιεκτικότητα του υπεδάφους σε ορυκτά και ρευστά, το πορώδες και ο βαθμός κορεσμού σε νερό των πετρωμάτων.

Οι έρευνες ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται εδώ και πολλές δεκαετίες σε υδρογεωλογικές, μεταλλευτικές και γεωτεχνικές έρευνες. Πιο πρόσφατα, έχουν χρησιμοποιηθεί και για περιβαλλοντικές έρευνες.

### 2.4.1.1 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι συνήθως ταξινομούνται ανάλογα με την ενέργεια που χρησιμοποιούν σε τεχνητές ή φυσικές. Ακόμα, κατηγοριοποιούνται και με βάση την χρήση τεχνητών ή φυσικών πεδίων στις εξής κατηγορίες:

#### Παθητικές:

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

#### Ενεργητικές:

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

## 2.4.2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

### 2.4.2.1 Ηλεκτρική ειδική αντίσταση & Νόμος του Ohm

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

- Τον ηλεκτρονικό (Ωμικά)
- Τον ηλεκτρολυτικό
- Την διηλεκτρική μετάδοση

Ο πρώτος τρόπος είναι ο κανονικός και γίνεται με τη ροή ρεύματος στα υλικά που έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια όπως τα μέταλλα. Στον ηλεκτρολυτικό, το ρεύμα δημιουργείται από τα ιόντα που μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό ενώ η διηλεκτρική μετάδοση λαμβάνει χώρα σε μικρής αγωγιμότητας υλικά και μονωτές, οι οποίοι έχουν πολύ λίγους ελεύθερους μεταφορείς ή και κανέναν. Σε όλες τις περιπτώσεις μετάδοσης (επίδρασης εξωτερικού μεταβαλλόμενου πεδίου με μετατόπιση ηλεκτρονίων σε σχέση με τον πυρήνα, ελαφρύς διαχωρισμός αρνητικών και θετικών φορτίων ή αλλιώς το φαινόμενο της διηλεκτρικής πόλωσης) , η διηλεκτρική μετάδοση είναι το αποτέλεσμα της αλλαγής της ηλεκτρονικής, ιοντικής ή μοριακής πόλωσης που προκαλείται από το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

#### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ-ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση ενός κυλινδρικού στερεού μήκους  $L$  και διατομής  $A$ , με αντίσταση  $R$  μεταξύ των δύο ακραίων επιφανειών-διατομών, δίνεται από την σχέση:

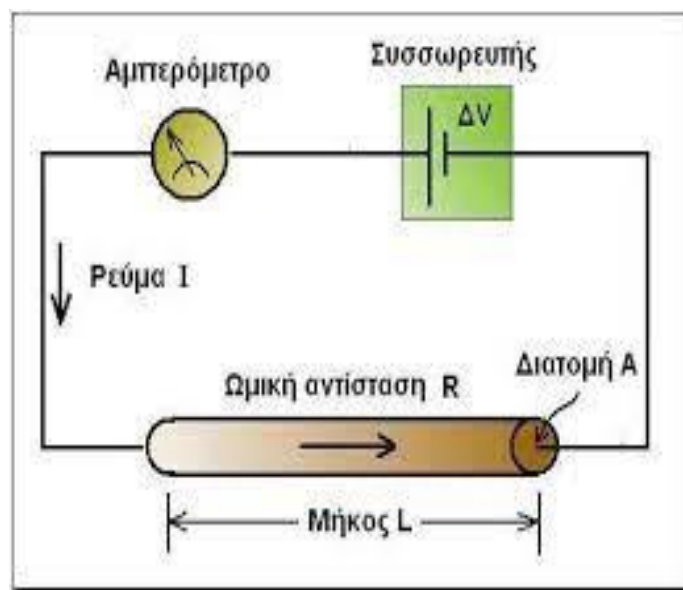
$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Εάν  $A$  είναι σε  $m^2$ ,  $L$  σε  $m$  και  $R$  σε  $\Omega m$  –μονάδα ειδικής αντίστασης θα είναι το  $\Omega m.m$

Σύμφωνα με τον Νόμο του Ohm, σε ένα κυλινδρικό αγωγό μήκους  $L$  και διατομής  $A$ , που διαρρέεται από ρεύμα  $I$  και στα άκρα του μετράται διαφορά δυναμικού  $\Delta V$ , η ηλεκτρική αντίσταση  $R$  δίνεται από τον τύπο:

$$R = V/I$$

όπου,  $\Delta V$  η τάση σε (Volt) και  $I$  η ένταση του ρεύματος σε (Ampere). Η ηλεκτρική ωμική αντίσταση  $R$  έχει ως μονάδα μέτρησης το Ohm.



*Εικόνα 26: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημίπειρο ομογενή χώρο*

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

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

όπου  $\rho$  η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του αγωγού, ανεξάρτητη των διαστάσεών του, που θεωρείται χαρακτηριστική θεμελιώδης παράμετρος του υλικού που είναι κατασκευασμένος ο αγωγός και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί ο αγωγός να διαβιβάσει ηλεκτρικό ρεύμα.

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

## 2.4.2.2 Επηρεασμός ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης

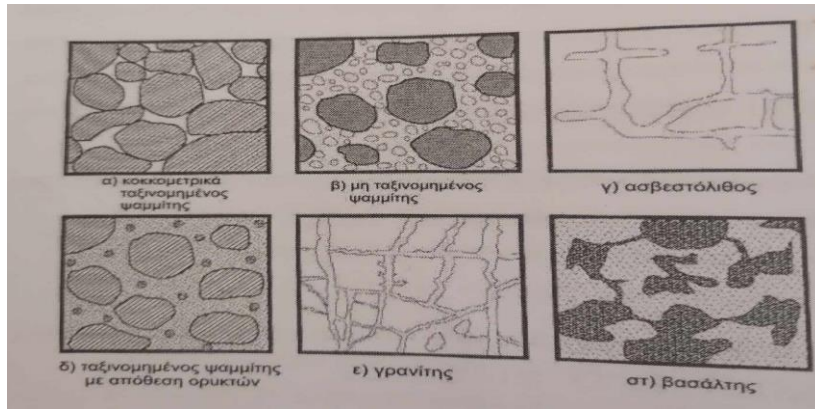
Οι σημαντικότεροι παράγοντες επηρεασμού της ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων και ορυκτών είναι οι εξής:

- **Το είδος του πετρώματος:** Κάθε είδος ορυκτού, πετρώματος ή εδάφους χαρακτηρίζεται και από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Πιο συγκεκριμένα, τα πυριγενή πετρώματα είναι αυτά που παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή τις χαμηλότερες λόγω υψηλού τους περιεχομένου σε ρευστά. Τέλος, τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές με τάση επικαλύψεων,

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)
Αέρας	$\infty$
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	$3 \times 10^{-1}$
Γαληνίτης	$2 \times 10^{-3}$
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

*Πίνακας 4: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)*

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



Εικόνα 27: Διαφορετικές περιπτώσεις δομής και πορώδους που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση (Αποστολόπουλος, 2013)

- **Περιεκτικότητα σε άλατα:** Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος
- **Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών:** Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση (με εξαιρέσεις)

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

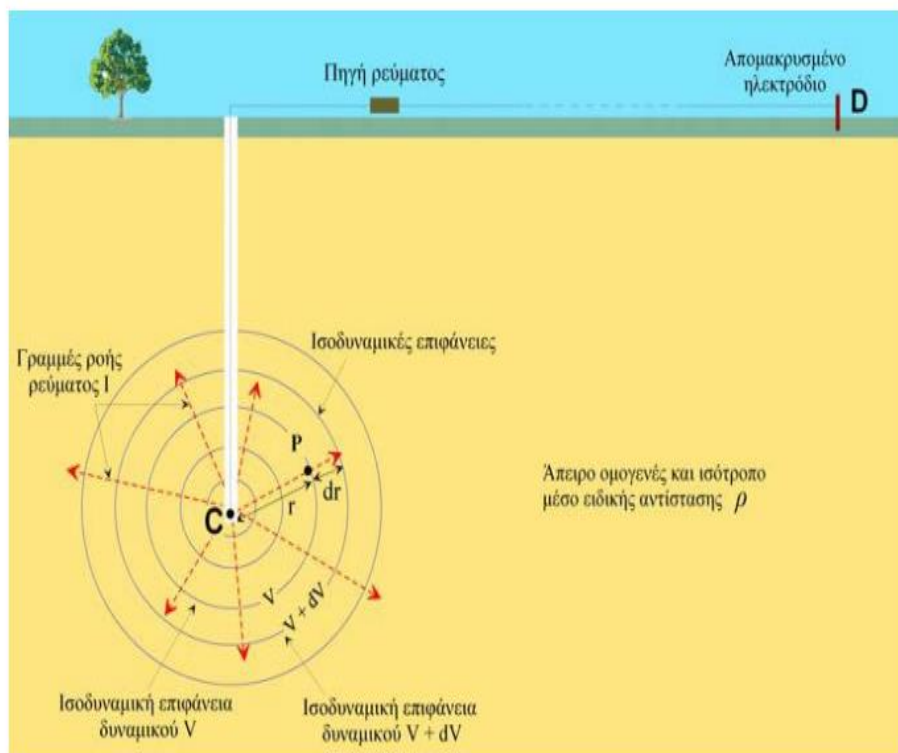
Πίνακας 5: Επίδραση γεωλογικών διεργασιών στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση

- **Ηλικία πετρώματος:** Τα παλαιότερα πετρώματα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης
- **Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών:** Λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών έχουμε ως αποτέλεσμα την δημιουργία χαμηλών τιμών επιφανειακής ειδικής αντίστασης
- **Βαθμός κορεσμού:** Όσο ο βαθμός κορεσμού ενός πετρώματος αυξάνεται, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται
- **Θερμοκρασία:** Όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος

### 2.4.2.3 Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο

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

Το μοντέλο αυτό, εφαρμόζεται τοποθετώντας ένα ηλεκτρόδιο C1 μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά σε ομογενές και ισότροπο μέσο. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C2, που τοποθετείται στην επιφάνεια της γης και σε αρκετά μακρινή απόσταση ούτως ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος  $I$  είναι ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή C1, κατευθυνόμενες προς τα έξω. Η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, παραμένει σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών, οι οποίες έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials) και στις τρεις διαστάσεις σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες, με κέντρο το ηλεκτρόδιο.



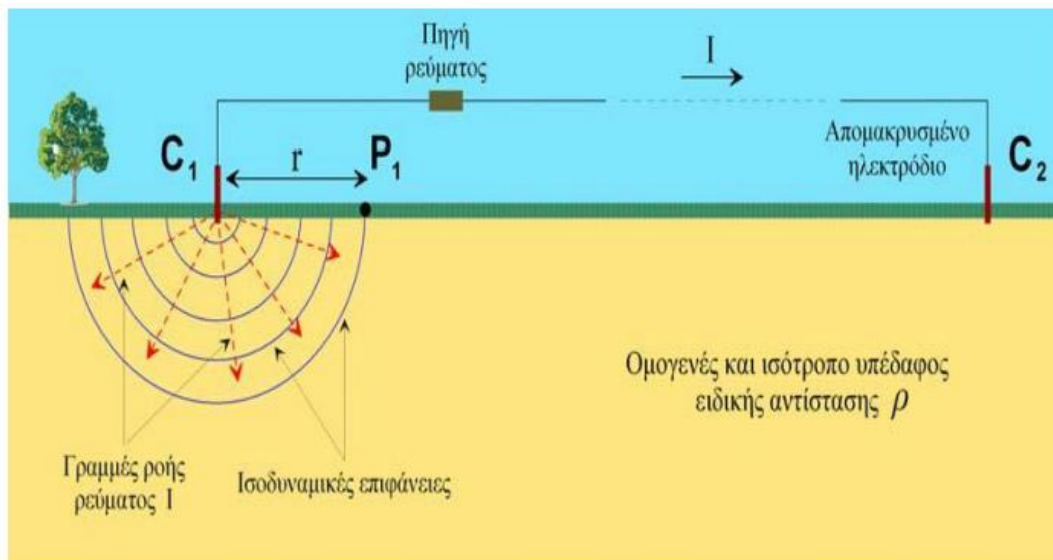
Εικόνα 28: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Ιωάννης Φ.Λούης)



#### 2.4.2.4 Ηλεκτρόδιο Ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

Στην περίπτωση του ημιάπειρου ομογενή χώρου εφαρμόζεται ομοίως το μοντέλο του άπειρου ομογενή χώρου. Η διαδικασία αυτή τη φορά περιλαμβάνει αρχικά:

1. Την τοποθέτηση ενός ηλεκτροδίου  $C_1$  στην επιφάνεια ηλεκτρικά ομογενούς μέσου. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου,  $C_2$ , το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια, αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, ούτως ώστε η επίδραση του στη διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα.
2. Οι γραμμές ροής του ρεύματος  $I$  είναι, όπως και στην περίπτωση του άπειρου ομογενούς μέσου, ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή προς τον ημιχώρο. Ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι κάθετες στις γραμμές ροής και σχηματίζουν ομόκεντρα ημισφαίρια, με κέντρο το ηλεκτρόδιο  $C_1$ .



Εικόνα 29: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2004)

### 2.4.2.5 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Η ειδική αντίσταση θα είναι:

1. Σε ένα ομογενές και ισότροπο μέσο και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την αντίσταση του μέσου.
2. Σε ένα ανομοιογενές μέσο, θα ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, ούτε μιας μέσης τιμής των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων μερών του υπεδάφους. Η μεταβολή της ανάλογα με τη γεωλογική τομή και κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγώγιμων ή μη αγώγιμων.

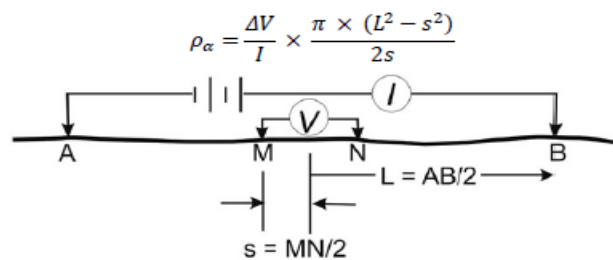
### 2.4.5.6 Οι Διατάξεις των ηλεκτροδίων

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

Οι διατάξεις των ηλεκτροδίων είναι 5 και χωρίζονται σε αυτές τις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και τις μεταξύ τους αποστάσεις.

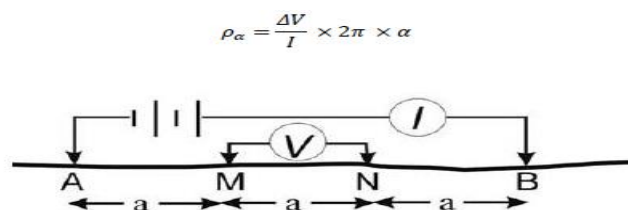
Οι κατηγορίες είναι οι εξής:

- **Διάταξη Schlumberger:** Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις  $L$  και  $s$  αντίστοιχα.



Εικόνα 30: Διάταξη Schlumberger

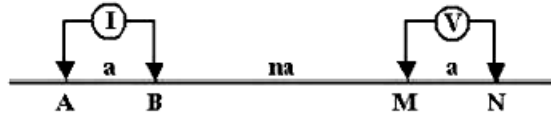
- **Διάταξη Wenner:** Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με  $a$ .



Εικόνα 31: Διάταξη Wenner

- **Διάταξη Dipole-Dipole:** Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με  $a$  και τόσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού μεταξύ τους. Όσον αφορά την απόσταση μεταξύ των δύο δίπολων, είναι πολλαπλάσια της απόστασης  $a$  ( $na$ ).

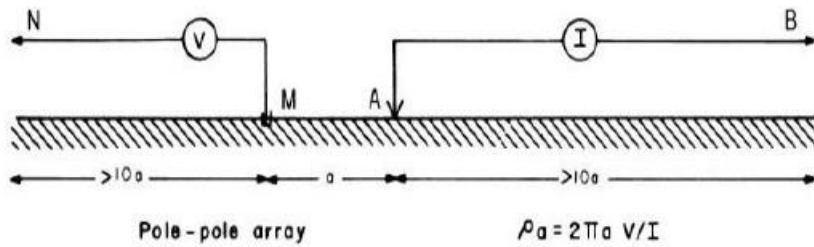
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \times \pi \times na(n+1)(n+2)$$



Εικόνα 32: Διάταξη Dipole-Dipole

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

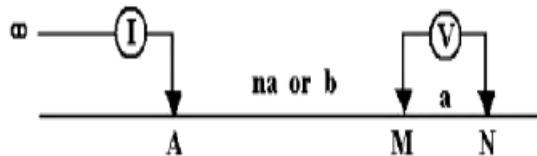
$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \times 2\pi \times \alpha$$



Εικόνα 33: Διάταξη Pole-Pole

- **Διάταξη Pole - Dipole:** Το ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι  $a$ , ενώ η απόσταση του ηλεκτροδίου ρεύματος από το ηλεκτρόδιο δυναμικού είναι  $na$ . Χρησιμοποιείται κυρίως για Τομογραφία και Βυθοσκόπηση.

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



Εικόνα 34: Διάταξη Pole-Dipole

### 2.4.5.7 Κατάλληλη Διάταξη Έρευνας

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνεται η καταλληλότητα κάθε διάταξης σε κάθε γεωφυσική έρευνα. Με άνω παύλα φαίνεται η καταλληλότερη επιλογή διάταξης, ενώ με ένα + είναι η αμέσως επόμενη καταλληλότερη επιλογή διάταξης.

Λαμβάνοντας υπόψη και την ευαισθησία κάθε διάταξης στους διάφορους παράγοντες, προκύπτει ότι τα περισσότερα πλεονεκτήματα ως διάταξη ηλεκτροδίων για βυθοσκόπηση έχει η **διάταξη Schlumberger**.

Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνουν συνεχώς με σταθερή απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία αλλάζει όταν το μέγεθος διαφοράς δυναμικού γίνεται τόσο μικρό ώστε δεν μπορεί να μετρηθεί με μεγάλη ακρίβεια.

Αν μεταβληθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού, λαμβάνονται διπλομετρήσεις και με τις δύο αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού. Γίνονται έξι μετρήσεις ανά λογαριθμικό κύκλο του μισού της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Ακόμα, στην διάταξη Dipole-Dipole, που έχει μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης λόγω μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού, υπάρχει θόρυβος που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες.

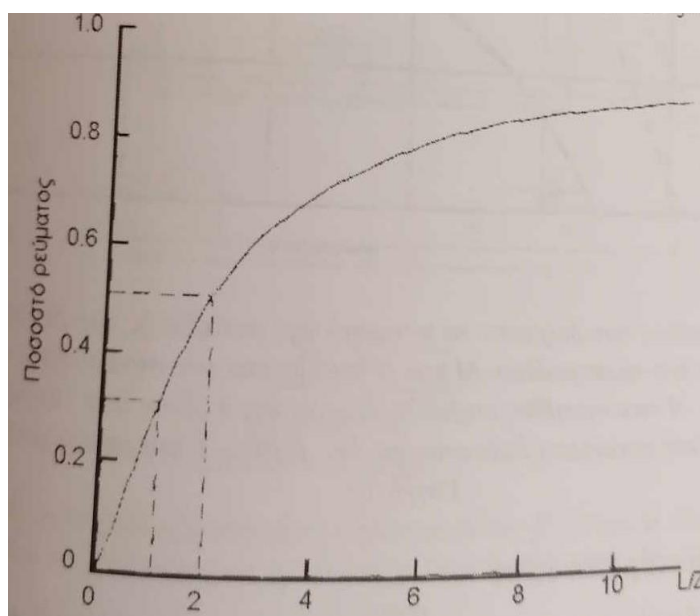
	Wenner	Schlumberger	Pole-Dipole	Dipole-Dipole
Λόγος σήματος προς θόρυβο	-	+		
Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες			+	-
Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση	+	-		
Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων	-	-		
Ευαισθησία στην μορφολογία του υποβάθρου			+	-
Βάθος διασκόπησης				-
Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα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

*Πίνακας 6:Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με τη περίπτωση της έρευνας*

### 2.4.5.8 Βάθος Έρευνας

Σε ομογενές έδαφος, καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, τόσο αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται πως η αναλογία του ρεύματος που διαρρέει κάτω από ένα ορισμένο βάθος έστω  $z$ , αυξάνεται καθώς ο λόγος διαχωρισμού των ηλεκτροδίων  $L$  ως προς το βάθος αυτό  $z$  επίσης αυξάνεται.



*Εικόνα 35: Αναλογία ρεύματος που ρέει κάτω από ένα βάθος  $z$  (σε μέτρα)- $L$  η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος (Robinson E.S. And Coruh C. 1988)*

Κάθε φορά, η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε το έδαφος να ενεργοποιείται στο επιθυμητό βάθος και να είναι τουλάχιστον ίση με αυτό. Με βάση αυτό, δημιουργείται και το πρόβλημα ότι δεν είναι πλέον τόσο πρακτικά εύκολο να επιτευχθεί το βάθος διείσδυσης με απλές γεωηλεκτρικές μεθόδους καθώς χρειάζονται μεγάλες αποστάσεις για την ανάπτυξη των καλωδίων και την χρήση οργάνων με μεγάλη ισχύ. (βάθος της τάξης του ενός χιλιομέτρου μπορεί να επιτευχθεί με κανονικό εξοπλισμό)

### 2.4.5.9 Εξοπλισμός για την ύπαιθρο

Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση χρειαζόμαστε τον κατάλληλο εξοπλισμό, δηλαδή:

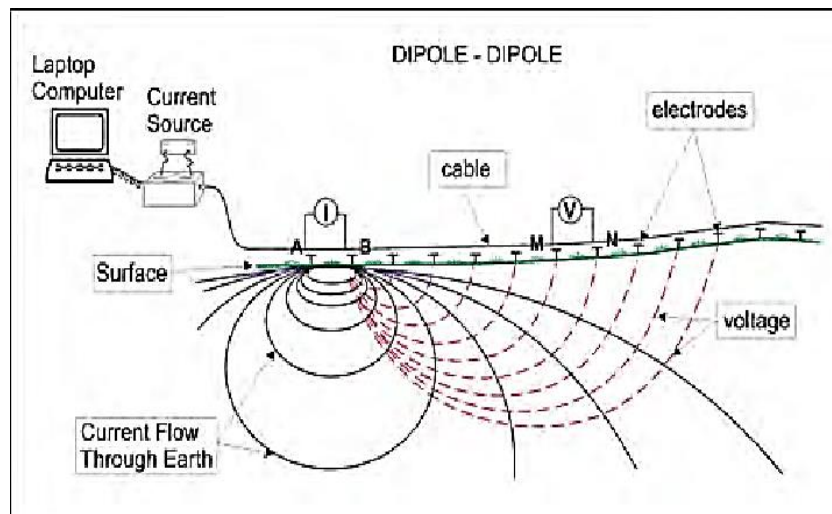
- **Πηγή ηλεκτρικού ρεύματος και Αμπερόμετρο:** Μέχρι 1 Ampere χρησιμοποιούμε συσσωρευτές, ενώ για ρεύμα μεγαλύτερης έντασης γεννήτριες
- **Βολτόμετρο υψηλής αντίστασης εισόδου (>10 MΩ):** [ για ακριβείς μετρήσεις από  $\mu\text{V}$  έως V]. Τα παραπάνω βρίσκονται συνήθως σε ένα όργανο μέτρησης, το οποίο περιέχει ένα σύστημα αντιστάθμισης ώστε το βολτόμετρο να συνδέεται μαζί του να αφαιρεί φυσικά δυναμικά
- **Όργανο επιλογής της χρησιμοποιούμενης διάταξης:** Το όργανο παρεμβάλλεται μεταξύ του γεωφυσικού οργάνου και των καλωδίων ρεύματος και δυναμικού, με στόχο τη διανομή του σήματος εξόδου στα κατάλληλα ηλεκτρόδια ρεύματος και τον καθορισμό των ηλεκτροδίων δυναμικού από τα οποία λαμβάνεται η κάθε μέτρηση.
- **Όργανο ρύθμισης της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού:** Μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού και του οργάνου επιλογής της κατάλληλης διάταξης παρεμβάλλεται ένας διακόπτης, ο οποίος ρυθμίζει την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικών για την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση.
- **Ηλεκτρόδια και καρούλια με τα καλώδια**



**Εικόνα 36: Τα καλώδια με καρούλια που συνδέθηκαν με το SYSCAL PRO στις γεωφυσικές έρευνες στο Λιβάδι Κεφαλληνίας & SYSCAL PRO (Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής-Σχολή Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών ΕΜΠ)**

Στην έρευνα στο Λιβάδι Κεφαλληνίας, το εργαστήριο εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, παρέιχε το όργανο μέτρησης SYSCAL PRO. Το συγκεκριμένο όργανο μετράει υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και επαγόμενης πολικότητας.

Δίνει τη δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης 10 καναλιών καθώς και της εναλλαγής της διάταξης ηλεκτροδίων, 1000V – 250W – 2,5A.



**Εικόνα 37: Διάταξη εξοπλισμού μέτρησης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Fabio Taioli)**



### 2.4.3 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις

Γεωηλεκτρική διασκόπηση είναι η περιγραφή της δομής του υπεδάφους της Γης. Πραγματοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνεια και μελετώντας την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων αλλά και τον τρόπο διάδοσης των ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος, γίνεται δυνατή η περιγραφή της δομής του υπεδάφους.

Ανάλογα με τον τρόπο που γίνεται (προσεγγιστικά) ο προσδιορισμός της γεωλογικής δομής του υπεδάφους, οι γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, **την ηλεκτρική χαρτογράφηση και την ηλεκτρική βυθοσκόπηση.**

#### ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ

Στη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση, η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στην μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια διεύθυνση.

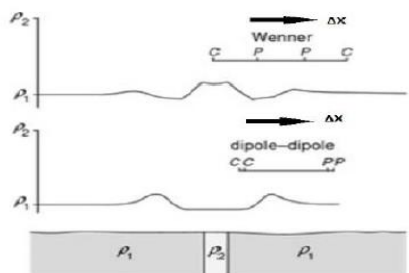
Στην οριζόντια χαρτογράφηση, χρησιμοποιείται σταθερό διάστημα ηλεκτροδίων με βάση τα αποτελέσματα των βυθοσκοπήσεων που προηγούνται. Όλη η διάταξη μετέπειτα κινείται κατά μήκος μίας καθορισμένης γραμμής μετά από κάθε μέτρηση που πραγματοποιείται.

Οι τιμές που λαμβάνονται καθώς μετακινείται η διάταξη, κατά μήκος αρκετών παράλληλων γραμμών, τοποθετούνται σε χάρτη φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων. Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει επεξεργασία των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιώντας κάποια υπολογιστικά προγράμματα για τον υπολογισμό προσεγγιστικών τιμών πραγματικής ειδικής αντίστασης.

Με την μέθοδο αυτή εντοπίζονται ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών (π.χ. μεταπτώσεις). Η ιδιότητα αυτή της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης την καθιστά κατάλληλη για περιπτώσεις αναζήτηση μεταλλευμάτων ή αρχαιοτήτων

Η οριζόντια χαρτογράφηση διεξάγεται με δύο διαφορετικά διαστήματα ηλεκτροδίων, με στόχο τον διαχωρισμό των επιφανειακών γεωλογικών επιδράσεων, από τις επιδράσεις των βαθύτερων οριζόντων.

Η ερμηνεία των δεδομένων της οριζόντιας ηλεκτρικής χαρτογράφησης είναι συνήθως ποιοτική και ιδιαίτερης σημασίας είναι ο προσδιορισμός των θέσεων των γεωλογικών δομών (π.χ. θαμμένες κοίτες ποταμών κ.ά), ενώ τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα λαμβάνονται με τον συνδυασμό της οριζόντιας χαρτογράφησης με την ηλεκτρική βυθοσκόπηση.



Εικόνα 38:Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole – Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ

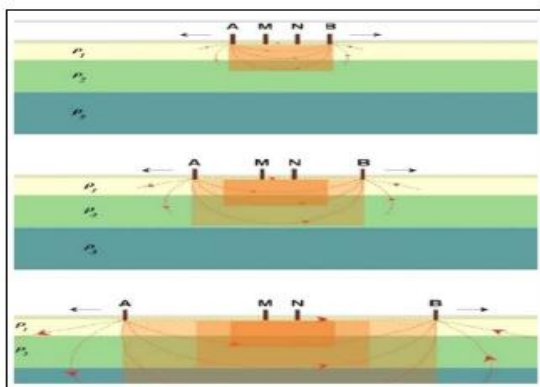
Η ηλεκτρική βυθοσκόπηση βασίζεται σε κατακόρυφες μεταβολές για να περιγράψει τη γεωλογική δομή του υπεδάφους.

Με την μέθοδο αυτή:

1. Λαμβάνουμε τον υπολογισμό των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του πάχους ή/και του βάθους των γεωλογικών στρωμάτων.
2. Λαμβάνουμε τον προσδιορισμό της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό σημείο της επιφάνειας για διαδοχικά αυξανόμενες τιμές του γεωμετρικού συντελεστή  $K$  (αυξάνοντας συνεχώς την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος).

Όσο απλώνεται η διάταξη των ηλεκτροδίων, η ίδια ποσότητα ρεύματος διανέμεται μέσα από τις παχύτερες ζώνες. Ως γνωστόν, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις των βαθύτερων γεωλογικών στρωμάτων έχουν μία αναλογική επίδραση στη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Εναλλασσόμενα, υψηλής και χαμηλής ηλεκτρικής αντίστασης, στρώματα μπορούν να εμφανισθούν σε γράφημα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της απόστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος. Είναι αποδεδειγμένο ότι η διάταξη Schlumberger είναι η καταλληλότερη για τις γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις γιατί τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν στην ίδια θέση και μόνο τα ηλεκτρόδια ρεύματος μετακινούνται για κάθε περαιτέρω μέτρηση που λαμβάνεται. Απεναντίας, η διάταξη Wenner λογίζεται ως η λιγότερο κατάλληλη διάταξη από όλες, λόγω της μετακίνησης των τεσσάρων ηλεκτροδίων σε κάθε πρόσθετη μέτρηση (παρόλο που χρησιμοποιείται αρκετά συχνά). Τέλος, η διάταξη Dipole – Dipole (την οποία και πραγματοποιήσαμε και στο Λιβάδι, Κεφαλληνίας) όπου τα ηλεκτρόδια ρεύματος παραμένουν σταθερά και μετακινούνται τα ηλεκτρόδια δυναμικού, είναι η πιο κατάλληλη διάταξη για τις βαθιές βυθοσκοπήσεις.



Εικόνα 39:Ηλεκτρική βυθοσκόπηση σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2003)

## 2.4.4 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Η ηλεκτρική τομογραφία εφαρμόζεται όταν χρειάζεται να έχουμε συγκεκριμένες θέσεις, μεγάλης ακρίβειας, τόσο παράπλευρα όσο και σε βάθος. Αυτό, διότι η ηλεκτρική τομογραφία απαρτίζεται από τις βυθοσκοπήσεις που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.

Ανάλογα με την διάταξη που επιλέγουμε καθορίζονται και:

- Ο τρόπος μέτρησης
- οι αποστάσεις
- οι θέσεις των ηλεκτροδίων

Στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται οι τιμές που τελικά δίνει μια δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακρίβειας, δηλαδή μια γεωηλεκτρική τομογραφία.

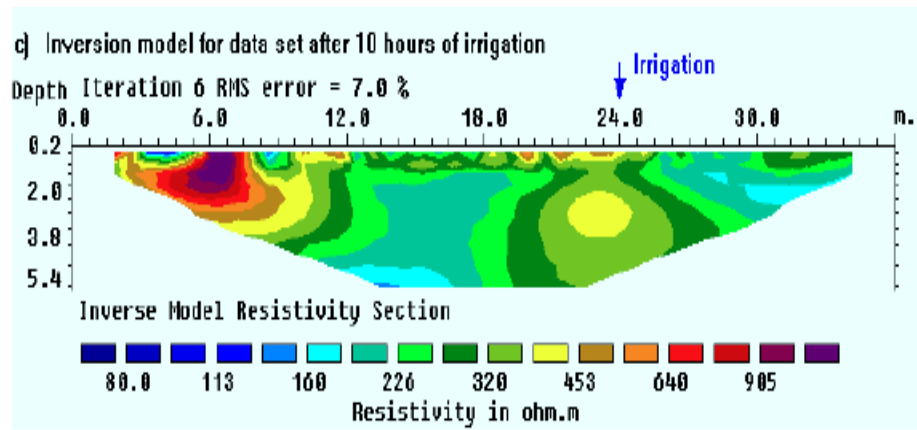
Η μέθοδος αυτή απαιτεί την καταγραφή δεδομένων με διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να καταστεί εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους.

Χάρη στην τεχνολογική ανάπτυξη και πρόοδο των γεωφυσικών μεθόδων και συγκεκριμένα αυτής της ηλεκτρικής τομογραφίας, η μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, στην αρχαιολογία καθώς και στην υδρογεωλογία.

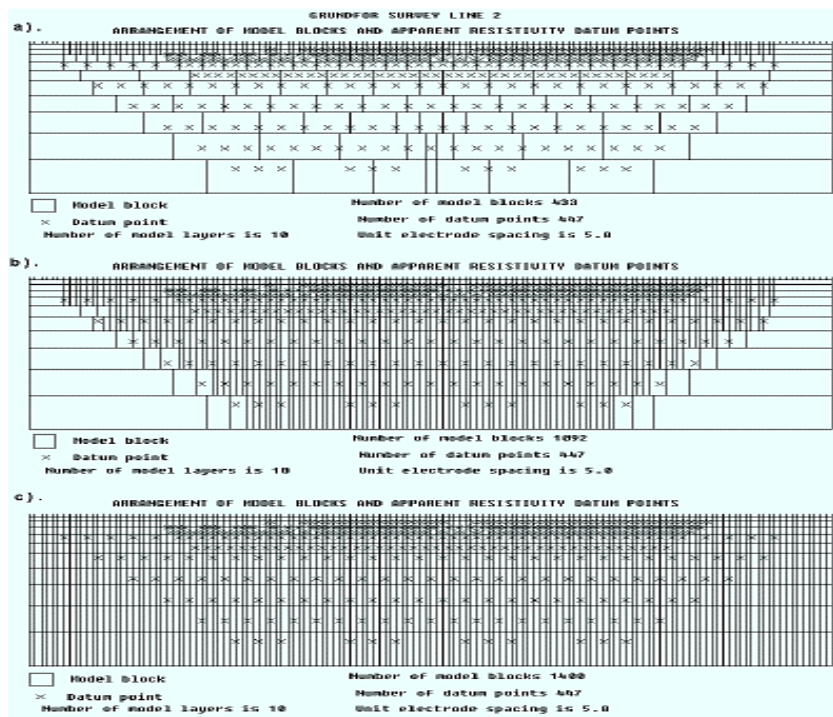
Οι μεγάλες ποσότητες δεδομένων που παράγονται από τα συστήματα αυτά, απαιτούν αυτοματοποιημένο χειρισμό και επεξεργασία δεδομένων.

Αυτόματες αριθμητικές τεχνικές αντιστροφής και δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν αυτή την ανάγκη.

Με βάση αυτές, το υπέδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως, αυξάνει με το βάθος. Οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα και την απόκριση του μοντέλου.



Εικόνα 40: Ανεστραμμένο μοντέλο μετρήσεων ειδικής αντίστασης (Copyright (1997, 1999) by Dr. M.H.Loke,5, Cangkat Minden Lorong 6, Minden Heights, 11700 Penang, Malaysia



Εικόνα 41: Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγόριθμου

### **3. ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ**

#### **3.1 Γεωφυσική Έρευνα με GPR (Ground Penetrating Radar) για την εύρεση αρχαίου λιμανιού του Μεσαίωνα και της Εποχής των Βίκινγκ στην περιοχή Sigtuna, Σουηδίας**

(Master's Thesis Archaeological Science Anne Homeister, Supervisors: Andreas Viberg & Lena Holmquist & Sven Kalmring, Stockholm University VT 2015 Archaeological Research Laboratory)

##### **3.1.1 Η σημασία του γεωραντάρ στις αρχαιολογικές έρευνες**

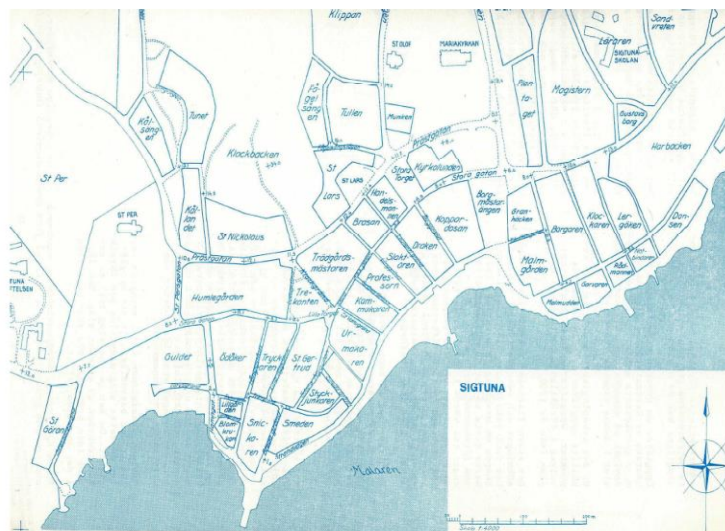
Η επιλογή της συγκεκριμένης γεωφυσικής έρευνας έγινε λόγω του ότι όπως και στο Λιβάδι Κεφαλληνίας, το ερώτημα ήταν αν τελικά υπήρξε εκεί λιμάνι ή μόλος και αν όντως θα μπορούσαν να ανευρεθούν αντικείμενα που να μαρτυρούν την ύπαρξη ναυπηγικής δραστηριότητας. Ακόμα υπάρχουν και ομοιότητες από τεκτονικής πλευράς στην περιοχή. Όπως και στο Λιβάδι, Κεφαλληνίας έτσι και εδώ έγινε εκτενής χρήση του γεωραντάρ

Η συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα έγινε σε συνέχεια ανθρωπογενών ευρημάτων όπως καρφιά και άλλες μεταλλικές κατασκευές ναυπηγικής και για να απαντηθεί τελικά το ερώτημα αν υπήρξε λιμάνι κάποτε στην Sigtuna (ως κεντρικό λιμάνι με τον δικό του μόλο που βρήκαν οι αρχαιολόγοι). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε 4 διαφορετικές περιοχές στα Borgmästarängen, Draken, Urmakaren and Koppardosan στην Sigtuna.

Αρχικά, γνωρίζοντας ότι η εποχή των Βίκινγκ ήταν μία εποχή που στηριζόταν στο ναυτικό εμπόριο και την ναυσιπλοΐα και έχοντας βρει τα πρώτα λιμάνια των Βίκινγκς σε Γερμανία, Δανία και Γροιλανδία, το ενδιαφέρον των αρχαιολόγων στράφηκε και στην Σουηδία που ήταν και το σημείο αναδιανομής (Haywood 1995:38).

Το ενδιαφέρον στράφηκε προς στην Sigtuna για τους εξής λόγους:

- Η Sigtuna είναι μία πόλη στα Νοτιοανατολικά της Σουηδίας, στο χαμηλότερο τμήμα της χώρας, με το παραδοσιακό όνομα stad. Ήδη από το 980 μ.Χ. καθιερώθηκε ως λιμάνι με έκταση περίπου 4χλμ κατά μήκος της παλαιάς πόλης της Sigtuna και θεωρήθηκε από την σκανδιναβική μυθολογία ως το σπίτι του πατέρα των Θεών Όντιν.
- Το ενδιαφέρον με την Sigtuna, όπως και με το Λιβάδι, είναι ότι από την εποχή των Βίκινγκς έχει σημειώσει ανύψωση 5 μέτρων από Νότο προς Βορρά και όλα τα ευρήματα βρίσκονται συνήθως σε παράκτιες περιοχές και όχι μέσα στην θάλασσα όπως θα περιμέναμεν.
- Ακόμα, παρόλο που η Sigtuna είναι όντως από την αρχαιότητα ένα λιμάνι, τα αρχαιολογικά ευρήματα εκτείνονται σε πολλές μικρότερες περιοχές της Sigtuna οπότε δεν είναι γνωστό το που ακριβώς βρισκόταν ο μόλος και το αρχαίο λιμάνι



**Εικόνα 42: Ο τοπικός χάρτης δικτύου πόλεως της Sigtuna. Εμφανή στο κάτω μέρος του χάρτη τα σημεία ύπαρξης ναυπηγικών εκτάσεων**



**Εικόνα 43: Η τοποθεσία της Sigtuna, Sweden**

Αυτή, όπως και οι 360 αρχαιολογικές έρευνες που έχουν γίνει στην Sigtuna, μαρτυρούσαν πως μόνο εκεί θα ήταν πιθανό να βρεθεί το αρχαίο λιμάνι, αλλά αποδείχθηκαν εν μέρη άκαρπες. Παρόλο που τα ευρήματα που βρέθηκαν σε όλη την περιοχή του παραπάνω χάρτη συνδέονται με το εμπόριο από πλοία (άγκυρες, καρφιά σφικτήρων), στην περιοχή αυτή και γύρω από αυτήν, οι προσδοκίες ήταν υψηλές για να βρεθούν υπολείμματα λιμανιών της εποχής των Βίκινγκς ή των πρώιμων μεσαιωνικών χρόνων και οι τάφροι είχαν ανοιχτεί κοντά στην ακτογραμμή και μέσα στο νερό για να διευκολύνουν τις έρευνες. Βέβαια, βρέθηκε σύγχρονο υλικό, όπως ξυλεία που προέρχεται από το 1800 και το 1900 μ.Χ. αλλά τίποτα αρχαιολογικού ενδιαφέροντος δε βρέθηκε σε αυτές τις τάφρους και δεν ήταν εύκολο μόνο από τις ξύλινες κατασκευές να χαρακτηριστεί το αρχαίο λιμάνι (Edberg 2012- Wikström & Androsjtjuk 2012).

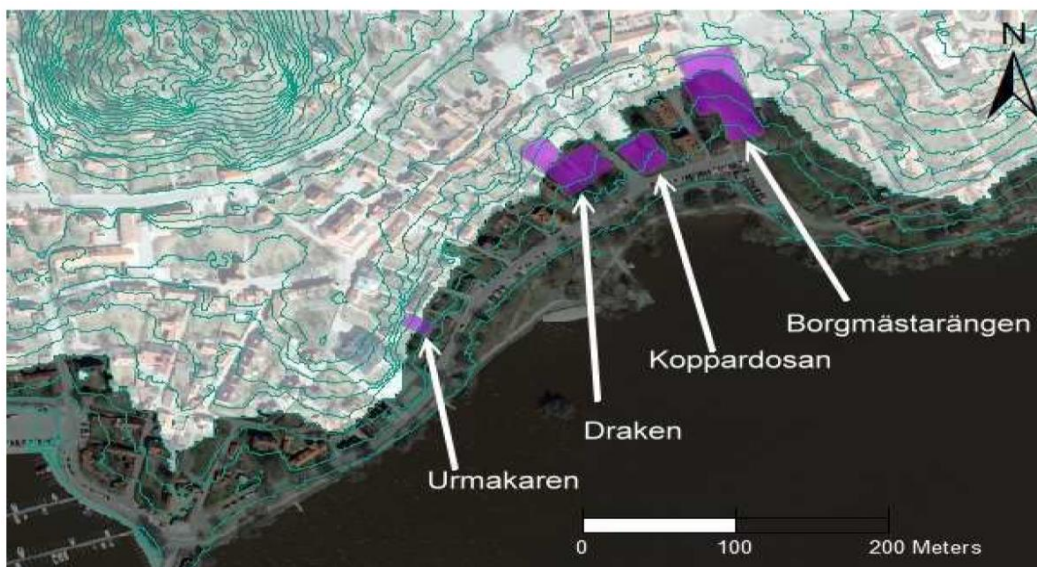


### 3.1.1.1 Περιοχή Έρευνας

Η έρευνα χωρίστηκε και πραγματοποιήθηκε σε 4 περιοχές (με μωβ):

- Borgmästarängen
- Draken,
- Urmakaren
- Koppardosan

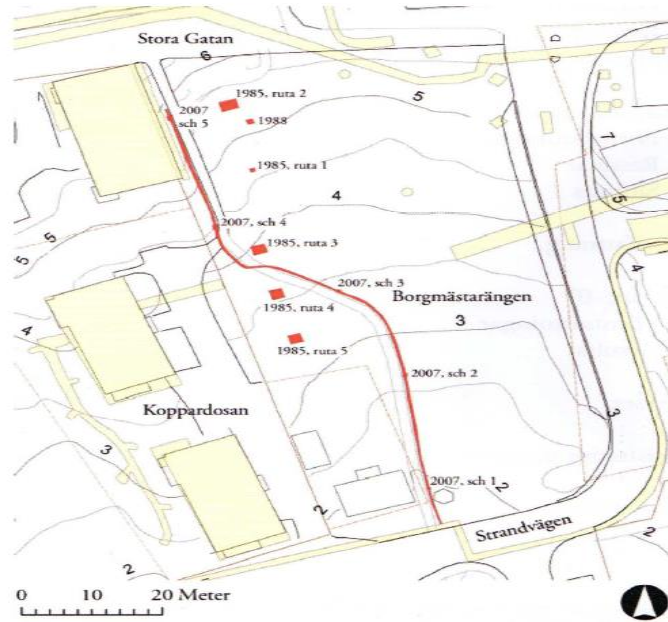
Στην περιοχή της Sigtuna:



*Εικόνα 44: Ortophoto of Sigtuna (@Lantmäteriet I2014/00691). Georadar survey areas marked purple, land above Viking Age shoreline, 5 meter, white. Alterations done in ArcGIS 10.2.2.*

#### **Borgmästarängen**

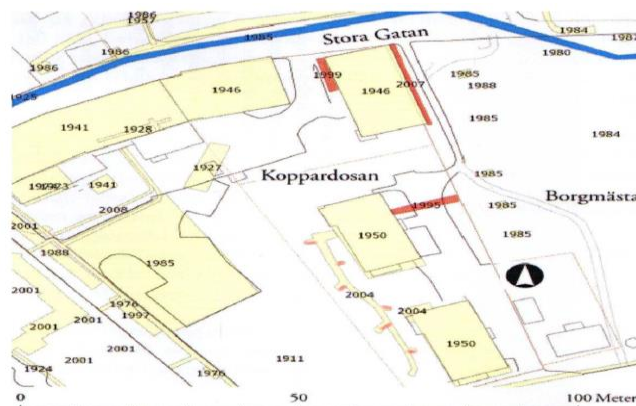
Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο ανατολικό κομμάτι της Sigtuna, Black Earth κοντά στην μεσαιωνική ακτογραμμή.



*Εικόνα 45: Η περιοχή που έγιναν οι μελέτες και οι ανασκαφές στο Borgmästarängen*

### Koppardosan

Η έκταση του Koppardosan καλύπτει περίπου 6.700 τ.μ. και τα πολιτιστικά του στρώματα είναι παχύτερα προς τα Stora Gatan και ανύπαρκτα προς το Strandvägen, με αποτέλεσμα η κάλυψη των πολιτιστικών στρωμάτων να ανέρχεται σε 5.400 m<sup>2</sup>. Πάνω από το 40% της περιοχής έχει ερευνηθεί αρχαιολογικά, αν και όχι πάντα καταγεγραμμένα και δημοσιευμένα.



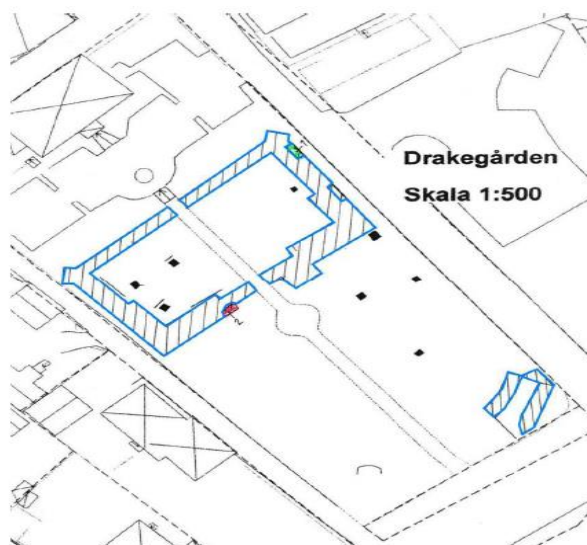
*Εικόνα 46: Περιοχή μελέτης και ανασκαφών στο Koppardosan*



## Draken

Η περιοχή Draken βρίσκεται σε μια πλαγιά νότια του Stora Gatan προς το Strandvägen. Αυτή η περιοχή έχει αποτελέσει αντικείμενο μικρότερων αρχαιολογικών ερευνών, ωστόσο δεν υπάρχουν δεδομένα δημοσιευμένα και διαθέσιμα.

Μια δημοσιευμένη έκθεση του 2000 αναφέρει ωστόσο πολιτιστικά στρώματα που χρονολογούνται από τον Μεσαίωνα στο βορειοανατολικό τμήμα του Draken, τα οποία ανακαλύφθηκαν κατά τη διάρκεια εγκατάστασης γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας-βλέπε εικόνα 7 (Savonen 2002).



*Εικόνα 47:Draken, χαρακώματα σημειωμένα με μπλε χρώμα, πέτρινες κατασκευές σημειωμένες με κόκκινο, με πράσινο χρώμα το αργιλικό στρώμα (Savonen 2002 & οι αλλαγές που έγιναν από τον συγγραφέα)*

## Urmakaren

Η περιοχή του Urmakaren βρίσκεται στο κέντρο του μεσαιωνικού κέντρου της πόλης νοτιοανατολικά του Μουσείου της Sigtuna. Αρχαιολογικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν το 1927, το 1962 και το 1970, 1990-91 και το 2007.

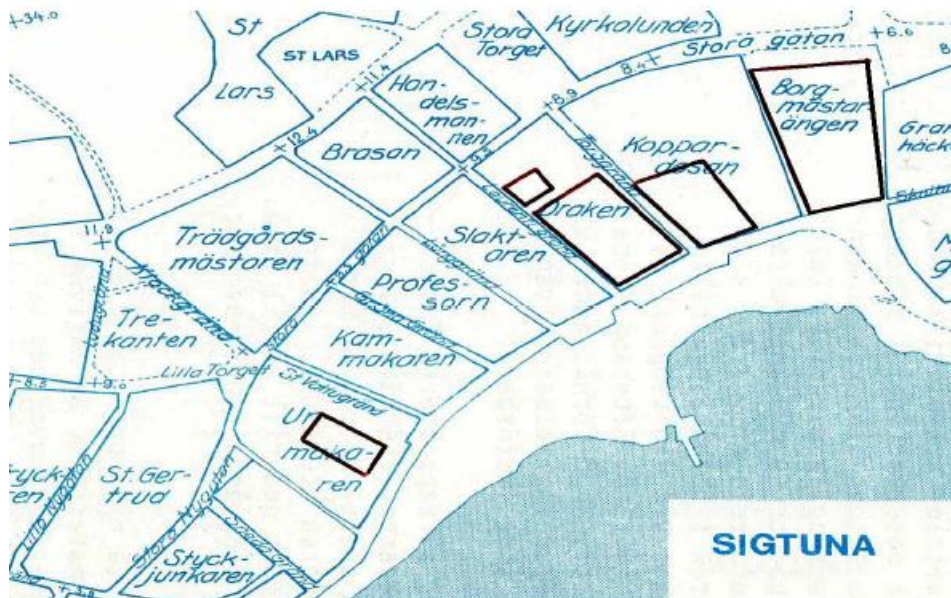
Η τεκμηρίωση των ανασκαφών κατά τη διάρκεια των ετών 1927, 1962 και 1970 σε αυτό το οικόπεδο είναι σχεδόν μη κατατοπιστικές, αλλά δίνουν μια ένδειξη για το πάχος του πολιτιστικού στρώματος (1,5-1,6 μέτρα). Πιστεύεται ότι έχει αφαιρεθεί μεγάλη ποσότητα πολιτιστικών στρωμάτων, τουλάχιστον περίπου 5x1 μέτρο, στο κέντρο του Urmakaren, γεγονός που δημιούργησε μια περισσότερο από ορατή άκρη.

Η γεωφυσική περιοχή έρευνας βρίσκεται κάτω από αυτή την άκρη σε μια πλαγιά προς το Strandvägen.

### 3.1.1.2 Γεωφυσικές έρευνες στην Sigtuna

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την απάντηση των παραπάνω ερευνητικών ερωτημάτων είναι η μέθοδος ProEx ground penetrating radar που κατασκευάζεται από την Malå GeoScience και συνδέεται με κεραία 500 MHz, τοποθετημένο σε καρότσι ανώμαλου εδάφους.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις περιοχές όπως αναφέρεται και παραπάνω, στο Borgmästarängen, Koppardösan, Urmakaren και Draken, οι οποίες βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή της εποχής των Βίκινγκς, περίπου 5 μέτρα πάνω από το σημερινό επίπεδο της θάλασσας.



Εικόνα 48: Περιοχές γεωφυσικών ερευνών

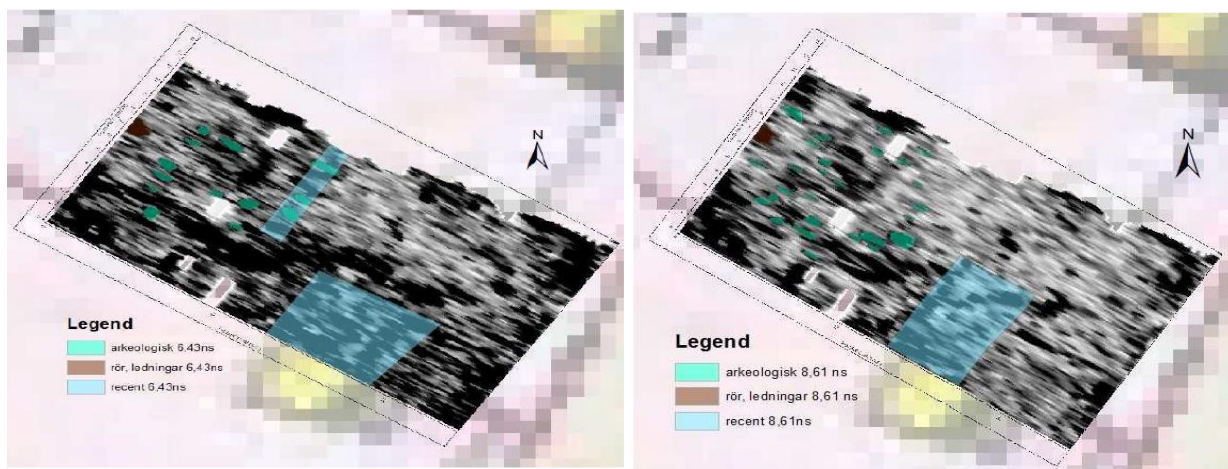
Έχουν καθοριστεί συνολικά πέντε περιοχές έρευνας, όπου η περιοχή Draken αντιπροσωπεύεται με δύο, λόγω των περίπλοκων και πυκνοφυτεμένων χαρακτηριστικών της περιοχής. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν με απόσταση προφίλ 25 εκατοστών και απόσταση δειγματοληψίας 3 εκατοστών, προκειμένου να ανακαλυφθούν χαρακτηριστικά που μπορούν να συσχετιστούν με χαρακτηριστικά λιμανιών από την εποχή των Βίκινγκς ή του Μεσαίωνα, π.χ. πασσαλότρυπες ή πέτρινες κατασκευές.

### 3.1.1.4 Χάρτες του GPR για τις περιοχές ενδιαφέροντος

#### Urmakaren

Η τοπογραφία και η βλάστηση σε αυτή την τοποθεσία διέφερε από τις άλλες τοποθεσίες έρευνας. Η περιοχή είναι τοποθετείται σε μια πλαγιά με αύξηση του υψομέτρου από το νότο προς το βορρά με πολυάριθμα αναχώματα που προέρχονται από τη βλάστηση στην επιφάνειά της.

Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια πιο πρόχειρη και σχεδόν αδύνατη ερμηνεία του συνόλου δεδομένων. Η γραμμή βάσης καθορίστηκε στη δυτική πλευρά της περιοχής από βορρά προς νότο με 25 μέτρα και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τη βορειοδυτική γωνία με κατεύθυνση δυτικά-ανατολικά μήκους 11 μέτρων.



*Εικόνα 49: Χάρτες GRP από το 1982 όπου με καφέ χρώμα είναι οι αγωγοί, με πράσινο χρώμα τα αρχαιολογικά ευρήματα και με μπλε πρόσφατα χαρακτηριστικά της περιοχής*



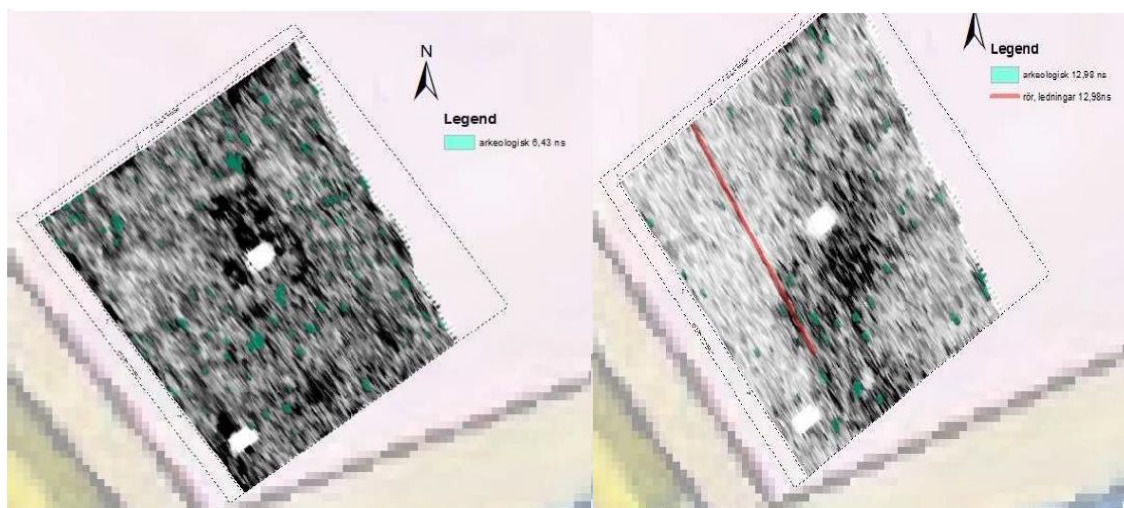
*Εικόνα 50: Συγκέντρωση όλων των αρχαιολογικών χαρακτηριστικών και πρόσφατα χαρακτηριστικά από την περιοχή Urmakaren με ακτογραμμή 5 μέτρα - 3 μέτρα και συντεταγμένες GPS της περιοχής έρευνας με το γεωραντάρ. Χάρτες υποβάθρου του 1862 και ορθοφωτογραφία της σημερινής Sigtuna*



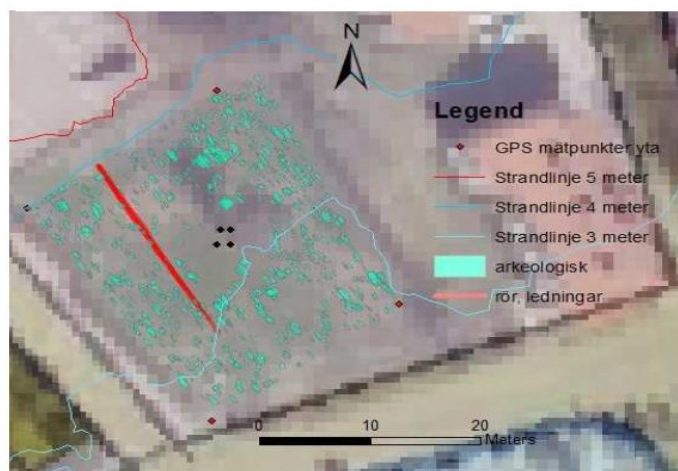
Όπως και στην περιοχή του Urmakaren, έτσι και στα site Draken I & II βρέθηκαν παρόμοια δεδομένα που είχαν παρθεί από ήδη από το 1982 ή είχαν βρεθεί από διάφορες ανασκαφές από παλαιότερα έτη.

Σημασία έχει να δοθεί έμφαση στο site **Koppardosan** όπου και είναι και το πιο πιθανό σημείο εύρεσης του αρχαίου λιμανιού.

Η περιοχή έρευνας Koppardosan είχε τα λιγότερα εμπόδια από όλες τις τοποθεσίες, εκτός από ένα δέντρο στη μέση του της περιοχής έρευνας. Μια γραμμή βάσης 28 μέτρων δημιουργήθηκε και τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τη βορειοδυτική γωνία σε 21μέτρων με κατεύθυνση δυτικά-ανατολικά.



*Εικόνα 51: Δεδομένα GPR. Με πράσινο χρώμα τα αρχαιολογικά ευρήματα και με κόκκινο ένας αγωγός που βρέθηκε στην περιοχή*



*Εικόνα 52: Συγκέντρωση όλων των αρχαιολογικών χαρακτηριστικών και αγωγός από την περιοχή Koppardosan με ακτογραμμή 5 μέτρα - 3 μέτρα και GPS συντεταγμένες του γεωραντάρ της περιοχή έρευνας και το δέντρο που υπήρχε στην μέση. Χάρτης υποβάθρου του 1862 και ορθοφωτογραφία της σύγχρονης Sigtuna.*

### 3.1.1.5 Αποτελέσματα της έρευνας

Όσον αφορά το Koppardosan, τα αποτελέσματα της έρευνας με το γεωραντάρ παρουσίασαν πιθανά χαρακτηριστικά του λιμανιού και ένα μοτίβο από πέτρες ή οπές. Το μοτίβο αυτό αρχίζει αρκετά νωρίς στα 0,10 μέτρα, συνεχίζει με κάποιες αλλαγές μέχρι το 1,08 μέτρο και βρίσκεται μεταξύ των εκτιμώμενων 4 και 3 μέτρων ακτογραμμής. Σε αυτή την περιοχή παρατηρείται συσσώρευση λίθων και δεν πρέπει να αποκλείεται η ύπαρξη προβλήτας.

Το καλύτερο προφίλ ραντάρ αυτού του σχεδίου μπορεί να παρατηρηθεί στα 0,64 - 1,08 μέτρα (που βλέπουμε παραπάνω) δίνοντας μια ακμή περίπου 24 μέτρων από τα βορειοδυτικά προς τα βορειοανατολικά και 23 μέτρων από τα ανατολικά προς τα βόρεια. Τα ακριβή περιγράμματα είναι ωστόσο δύσκολο να προσδιοριστούν, δεδομένου ότι δεν εμφανίζονται όλες οι ανωμαλίες σε κάθε χρονική τομή. Πρέπει επίσης κανείς να έχει υπόψη του ότι οι ερμηνείες των ανωμαλιών κοντά στο δέντρο δεν λήφθηκαν υπόψη λόγω της ρίζας του συστήματος. Περαιτέρω έρευνες στο Torggränd, το οποίο βρίσκεται στην αριστερή πλευρά της περιοχής έρευνας, θα ήταν ενδιαφέρουσα για να βρεθεί μία πιθανή σύνδεση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που βρέθηκαν με το GPR.

Τα πολιτιστικά στρώματα της Sigtuna, που χρονολογούνται από τον 10ο έως τον 13ο αιώνα, έχουν μελετηθεί μέσω ανασκαφών. Η υποβάθμιση του αρχαιολογικού υλικού λόγω των γραμμών ηλεκτροδότησης VA και της ανόδου της στάθμης των υπόγειων υδάτων καθιστά δύσκολη την ανεύρεση κατασκευών που σχετίζονται με το λιμάνι, όπως ξύλινοι στύλοι από την εποχή των Βίκινγκς και τους πρώιμους μεσαιωνικούς χρόνους. (παρόλο που ανασκαφές βρήκαν ελάχιστα δείγματα του 1800-1900 μ.Χ χωρίς ακριβή προέλευση)

Παρά το γεγονός ότι δεν εγκαταλείφθηκε ποτέ σαν λιμάνι, αλλά επεκτείνεται και βρίσκεται υπό ανακατασκευή, οι πιθανότητες να έχει καταστραφεί η αρχική περιοχή του λιμανιού είναι μεγάλες. Ωστόσο, στη Sigtuna έχουν βρεθεί ευρήματα που σχετίζονται με το λιμάνι, όπως καρφιά σφιγκτήρες, καρφιά βάρκας και δύο άγκυρες, τα οποία μπορούν να συσχετιστούν με τις δραστηριότητες του λιμανιού. Ακόμα, η διάταξη των ευρημάτων δείχνει πως το πιθανότερο σημείο ύπαρξης του αρχαίου μεγάλου λιμανιού βρίσκεται στην περιοχή του Koppardosan και είναι και αυτό που ξεχώρισε στα δεδομένα.

Τέλος, παρόλο που η μέθοδος του GPR έδειξε σαν πιθανότερο σημείο μία περιοχή από τις 4 βασικές της γεωφυσικής αυτής έρευνας, επιδεικνύοντας ανθρωπογενείς κατασκευές όπως πλίνθους, καρφιά, άγκυρες και αγωγούς, δεν μπορεί σαν μέθοδος να δείξει από μόνη της με σιγουριά το ακριβές σημείο. Για αυτό, έχοντας ως παράδειγμα τέτοιες έρευνες, η έρευνα στο Λιβιάδι συγκαταλέγει στις μεθόδους το GPR και το στηρίζει με τις υπόλοιπες που αναφέραμε παραπάνω.



Εικόνα 53: Η περιοχή του Koppardosan, που δείχνει την καλύτερη ερμηνεία της περιοχής έρευνας με πιθανή προβλήτα και περιοχή του λιμανιού. Αριστερά 0,64 m, δεξιά 1,08 μέτρο.

## **3.2 Εφαρμογή Β: Μια προκλητική αρχαιο-γεωφυσική έρευνα μέσω GPR και ERT στο Keber Tepe, City Hill of Doliche,(Gaziantep, NA Τουρκία)**

**(Çağlayan B, Yunus L.E, Olcay Ç, Michael B, Julia A, Mehmet Ali K.)**

### **3.2.1 Γενικά**

Οι αρχαιολογικές έρευνες έγιναν στην αρχαία πόλη Doliche της Τουρκίας το 2015 σε μία συνεργασία μεταξύ του Τουρκικού Υπουργείου Πολιτισμού και Τουρισμού και του Κέντρου Μικρασιατικών Ερευνών στο Πανεπιστήμιο του Münster της Γερμανίας και χρηματοδοτούνται από το Γερμανικό Ερευνητικό Συμβούλιο.

Στο συγκεκριμένο έργο, το οποίο είναι ένα από τα 32 ανασκαφικά έργα που πραγματοποιήθηκαν από ξένους επιστήμονες το 2019, οι αρχαιολογικές γεωφυσικές έρευνες έχουν καθοριστικό ρόλο για τη διερεύνηση της έκτασης και της διάταξης της αρχαίας Doliche.

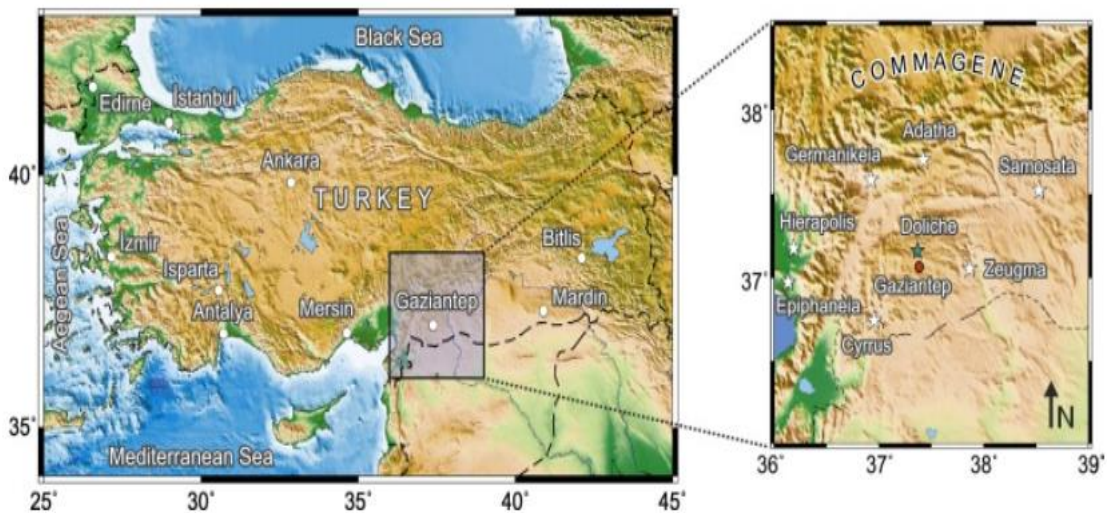
Αυτή η μελέτη παρουσιάζει τα αποτελέσματα των ερευνών με δύο μεθόδους:

- Με GPR
- Με ERT

Οι έρευνες αυτές διενεργήθηκαν στον λόφο της πόλης Doliche (Keber Tepe) κατά τη διάρκεια των αρχαιολογικών εκστρατειών 2019 και 2020.

Η συνδυασμένη χρήση GPR και ERT είναι πολύ συνηθισμένη και διευκολύνει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων στις αρχαιολογικές εξερευνήσεις. (Negri et al., 2008; Fernández-Álvarez et al., 2017; Angelis et al., 2018; Balkaya et al., 2018; Deiana et al., 2018; Akca et al., 2019; Yilmaz et al., 2019; Ortega-Ramírez et al., 2020)

Οι γεωφυσικές έρευνες μέχρι και το 2019 έγιναν σε δύο διαφορετικά site, μία σημαντική για την περιοχή χριστιανική εκκλησία και ένα κτήριο-ρωμαϊκό λουτρό, ενώ το 2020 έγιναν και οι έρευνες στην αυλή της εκκλησίας.



Εικόνα 54: Χάρτες θέσης της περιοχής μελέτης. Ο χάρτης δημιουργήθηκε με τη χρήση του *Generic Mapping Tools (GMT)* (Wessel and Smith, 1995).

Το Keber Tere αποτελείται κυρίως από **αργιλώδη ασβεστόλιθο** και το ίδιο υλικό είχε χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή του έργου, οπότε και οι περιοχές μελέτης περιλαμβάνουν θαμμένες κατασκευές χτισμένες από πέτρα του ίδιου υλικού.

Σε ένα έδαφος λοιπόν το οποίο είναι πλούσιο σε άργιλο, η εύρεση αργιλώδους ασβεστόλιθων λίθων είναι δύσκολη με την μέθοδο του GPR. Αυτό συμβαίνει καθώς οδηγούμαστε σε χαμηλή αντίθεση μεταξύ των φυσικών ιδιοτήτων μεταξύ αρχαιολογικών στόχων και εδάφους και δεν λαμβάνουμε ισχυρές ανωμαλίες αλλά αδύναμες ανακλάσεις που δεν δίνουν ακριβή αποτελέσματα.

Αντίθετα, η έρευνα ERT όρισε καλά την αντίθεση ειδικής αντίστασης για τις δομές στο υπέδαφος ως ζώνη όγκου. Η αρχαιολογική ανασκαφή στην αυλή, η οποία αποκάλυψε διάφορες σημαντικές κατασκευές που σχετίζονται με την εκκλησία, έδωσε την ευκαιρία να συσχετιστούν τα γεωφυσικά αποτελέσματα.

Έτσι, ένας συνδυασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και από τις δύο εφαρμογές κατέδειξε κάποιες ανωμαλίες που υποδεικνύουν την παρουσία (με κανονικά σαφή ίχνη) των αρχαιολογικών δομών που υπάρχουν στο υπέδαφος.

Ακόμα, οι πληροφορίες που συλλέγονται από τις έρευνες είναι ζωτικής σημασίας για τη λήψη αποφάσεων σχετικά:

- με τη μελλοντική κατεύθυνση του έργου και
- την πιθανή απαλλοτρίωση ιδιόκτητης γης (ακριβή)



### 3.2.2 Ιστορία και Γεωλογία της περιοχής

Η Doliche, αρχαία πόλη στη ΝΑ Τουρκία, ιδρύθηκε τον 3ο αιώνα π.Χ. και αργότερα προσαρτήθηκε στη ρωμαϊκή επαρχία της Συρίας. Άκμασε κατά τη διάρκεια της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορικής περιόδου, αλλά καταστράφηκε από τον Πέρση Μεγάλο Βασιλιά Sāpūr I το 253 μ.Χ.

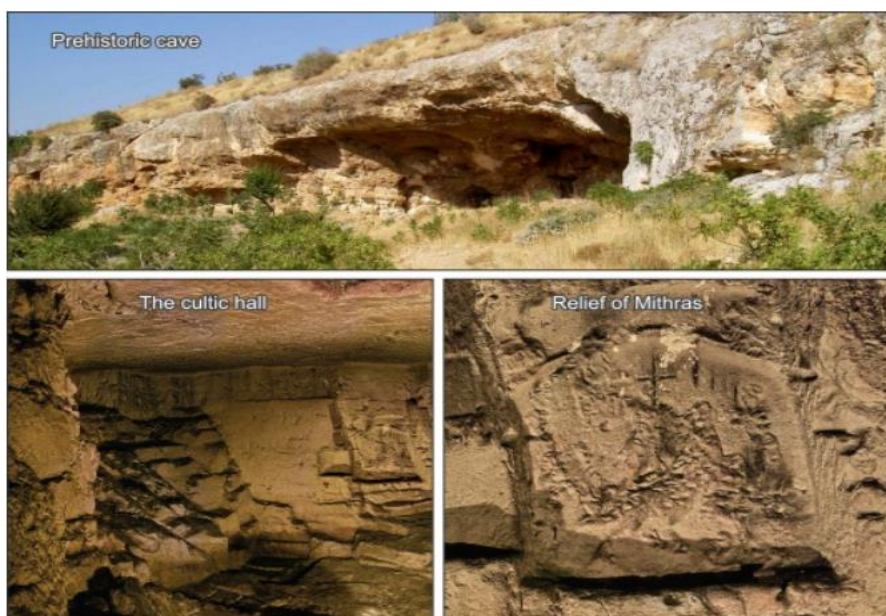
Μετά τη βυζαντινή ανακατάληψη το 962 μ.Χ., έγινε πρωτεύουσα μιας βυζαντινής συνοριακής επαρχίας και φρούριο της σταυροφορικής κομητείας της Έδεσσας. Η Doliche είναι κυρίως γνωστή για τη θεότητά της, τον Δία Doliche, ο οποίος ήταν δημοφιλής στη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία.

Το νέο έργο έχει ως στόχο να βελτιώσει τις γνώσεις που υπάρχουν ως προς την αστικοποίηση στην αρχαία ΝΑ Ανατολία, χρησιμοποιώντας αρχαιολογικές και αρχαιογεωφυσικές έρευνες.

Πρώτον, διερευνώνται αρχαιολογικές και αρχαιογεωφυσικές έρευνες σε ολόκληρη την περιοχή της πόλης.

Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί δεν υπάρχουν υπολείμματα αρχιτεκτονικής που να έχουν επιβιώσει στην επιφάνεια του εδάφους. Λόγω της απουσίας αστικών χαρακτηριστικών ορατών στο έδαφος (λόγω της καταστροφής και μετά αναδημιουργίας της Doliche), οι αρχαιογεωφυσικές έρευνες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην έρευνα της πόλης.

Ωστόσο, η επιφάνεια του Keber Tere είναι γεμάτη με διάσπαρτα θραύσματα αγγείων, κεραμίδια και άλλα αρχαιολογικά υλικά, αλλά ίχνη κτιρίων στο έδαφος είναι εξαιρετικά σπάνια. Τα μόνα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι ένα προϊστορικό σπήλαιο και ένα ιερό του Μίθρα σε υπόγειο λατομείο.



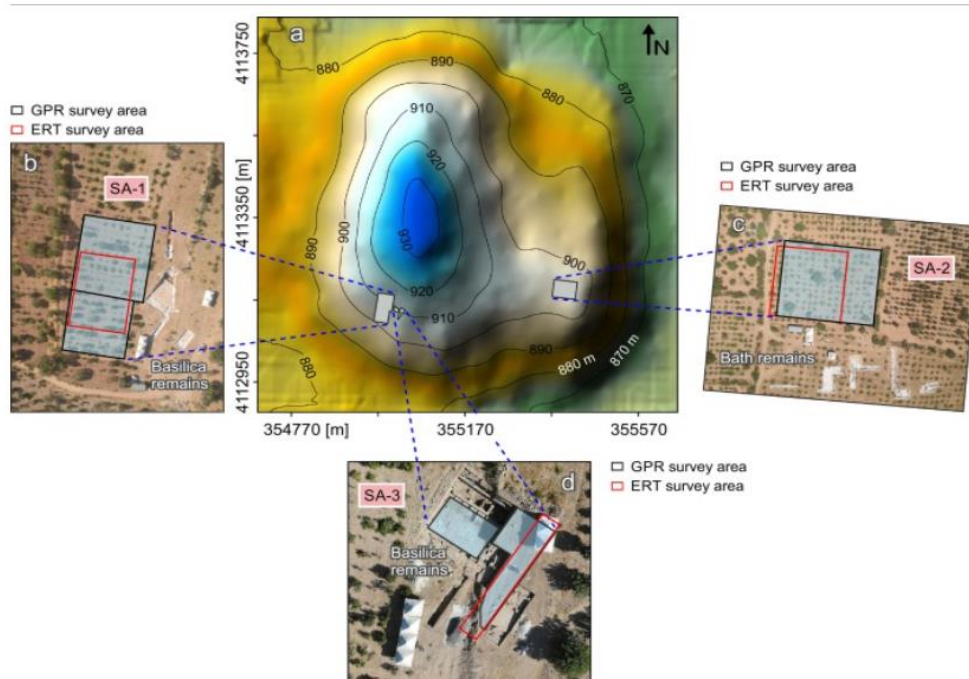
*Εικόνα 55: Φωτογραφίες από την αρχαία σπηλιά εσωτερικά και εξωτερικά. (λήψη που έγινε κατά την διάρκεια των εσκαφών και του έργου)*



Δεύτερον, το έργο εστιάζει στην ανάπτυξη της πόλης στην ύστερη αρχαιότητα (4ος-7ος αι. μ.Χ.). Δοκιμαστικά ορύγματα, που είχαν σκαφτεί στη νοτιοδυτική πλαγιά του Keber Tere το 2015, έδειξαν ότι σε αυτό το τμήμα η πόλη ήταν πυκνοκατοικημένη στην πρώιμη βυζαντινή περίοδο.

Αυτό επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των μεταγενέστερων ανασκαφών. Το πιο σημαντικό εύρημα μέχρι στιγμής ήταν η ανακάλυψη ενός μεγάλου τρίκλιτου Χριστιανικής βασιλικής του τέλους του 4ου αιώνα.

Τέλος, το έργο επεκτάθηκε σε μια μεγάλη περιοχή στο ανατολικό τμήμα της πόλης, η οποία είχε προηγουμένως αναγνωριστεί ως μέρος διοίκησης της Doliche. Οι δοκιμαστικές τάφροι απέδωσαν εξαιρετικά αποτελέσματα δίνοντας στοιχεία για την ανακάλυψη ενός μεγάλου λουτρού της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορικής περιόδου που αποδεικνύει και την ύπαρξη της πολύς περιφερειακά.



**Εικόνα 56:(a) Τοπογραφικός χάρτης του Keber Tere, (b-d) SA-1, SA-2, και SA-3 φωτογραφημένες από drone και οι περιοχές γεωφυσικής μελέτης**

Όπως φαίνεται και από τον τοπογραφικό χάρτη ο σχηματισμός που αποτελείται το όρος Gaziantep είναι κυρίως από αργιλώδη ασβεστόλιθο, ασβεστόλιθο, και ανθρακικό ασβέστιο. Σε ορισμένα σημεία παχύ στρώμα ασβεστόλιθου υπάρχει αντί αυτού του αργιλώδους και ανθρακικού ασβεστόλιθου. Στο Keber Tere ο αργιλώδης ασβεστόλιθος είναι κυρίαρχος σχηματισμός και γεωργικό έδαφος το υπερκαλύπτει.

### 3.2.3 Αρχαιολογικές Γεωφυσικές έρευνες

Το 2019 πραγματοποιήθηκαν αρχαιολογικές ανασκαφές σε δύο περιοχές της πόλης:

- σε μια χριστιανική βασιλική στην νότια πλευρά της πόλης
- σε ένα ρωμαϊκό κτίριο αστικών λουτρών στο ανατολικό τμήμα της πόλης

Επιλέχθηκαν δύο περιοχές μελέτης, SA-1 και SA-2, για γεωφυσική διερεύνηση.

Το GPR επιλέχθηκε για τα γρήγορα, υψηλής ανάλυσης και χαμηλής χρονικής και εργασιακής επιβάρυνσης χαρακτηριστικά του. Η ERT εφαρμόστηκε για τη χαμηλότερη ανάλυση και τις αποτελεσματικότερες διαδικασίες πεδίου. Επιχειρήθηκε και μαγνητική απεικόνιση, αλλά ανεπιθύμητα μαγνητικά σήματα την εμπόδισαν. Το 2020, μια επιπλέον περιοχή μελέτης, η SA-3, χρησιμοποιήθηκε για αρχαιογεωφυσικές έρευνες.



*Εικόνα 57:(a,b) Όψεις από την αψίδα και τους κεντρικούς κλίτους της χριστιανικής βασιλικής στη νότια πλευρά του λόφου (c,d) Θέα από τα λουτρά στο ανατολικό μέρος της πόλης*

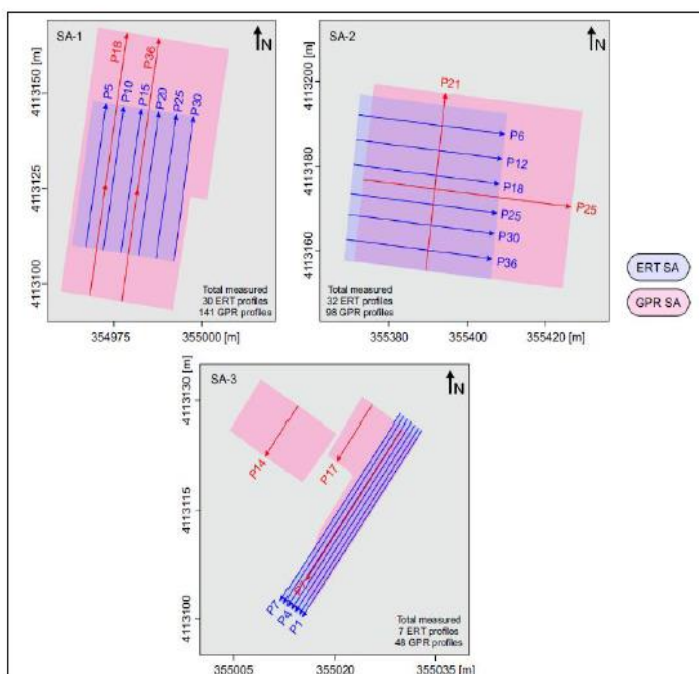
### 3.2.4 Έρευνα GPR

Στην συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα το GPR που χρησιμοποιήθηκε είχε κεραία συχνότητας 500 MHz και τα δεδομένα λήφθηκαν σε προφίλ 0.5m.

Το site SA-1 χωρίστηκε σε 2 περιοχές λόγω τοπογραφίας. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε κατευθύνσεις N-B κατά την έρευνα.

Η πρώτη περιοχή με διαστάσεις 32m x 30m, που βρίσκεται στο ΝΑ τμήμα της περιοχής αποτελείται από 65 προφίλ GPR ενώ η δεύτερη με διαστάσεις 37.5m x 37m περιλαμβάνει 76 προφίλ.

Στο site SA-2 (45m x 51m), η έρευνα με το GPR πραγματοποιήθηκε με διευθύνσεις Α-Δ (46 προφίλ) και Ν-Β (52 προφίλ) λόγω της πυκνότερης βλάστησης. Τέλος, μετρήθηκαν 48 προφίλ GPR στο SA-3, το οποίο καλύπτει έκταση περίπου 280m<sup>2</sup>.



Εικόνα 58: Τομές μελέτης GPR και ERT και οι κατευθύνσεις των προφίλ μετρήσεων

### 3.2.5 Έρευνα ERT

Η μέθοδος ERT περιλαμβάνει δυσκολότερη διαδικασία λήψης μετρήσεων στο ύπαιθρο σε σχέση με το GPR και στην συγκεκριμένη έρευνα οι περιοχές επιλέχθηκαν με βάση τα υποσχόμενα αποτελέσματα του GPR.

Έτσι επιλέχθηκαν οι παρακάτω περιοχές:

- SA-1
- SA-2
- SA-3

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν Dipole-Dipole με 48 ηλεκτρόδια και 62 διατομές συνολικά.

Το SA-1 περιλαμβάνει 30 προφίλ σε κατεύθυνση N-B όπως στο GPR, ενώ το SA-2 αποτελείται από 32 προφίλ με διεύθυνση Α-Δ. ( 9 προφίλ παραλείφθηκαν λόγω πυκνής βλάστησης)

Το μήκος του προφίλ είναι 37.6m λαμβάνοντας υπόψη την επιλεγμένη απόσταση των ηλεκτροδίων στα 0.8m και το βάθος έρευνας στα περίπου 5m. Συνολικά μετρήθηκαν 629 σημεία σε κάθε προφίλ.

Ακόμα, με τις ίδιες παραμέτρους με πριν (αριθμός ηλεκτροδίων και αποστάσεις), λήφθηκαν και δεδομένα με την διάταξη Wenner-Schlumberger δύο προφίλ, για να αποκτηθεί μία εικόνα για τις γεωλογικές ιδιότητες των βαθύτερων στρωμάτων των περιοχών που ερευνήθηκαν.

Στο site SA-3, η φαινόμενη ειδική αντίσταση μετρήθηκε κατά μήκος 7 προφίλ με διάταξη Dipole-Dipole με απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων στα 0.7m.

Τα δεδομένα ερμηνεύτηκαν και επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography) το οποίο έδωσε και 2D και 3D διαγράμματα.



*Εικόνα 59: Έρευνα με GPR στο SA-3 το 2020*



## 3.2.6 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

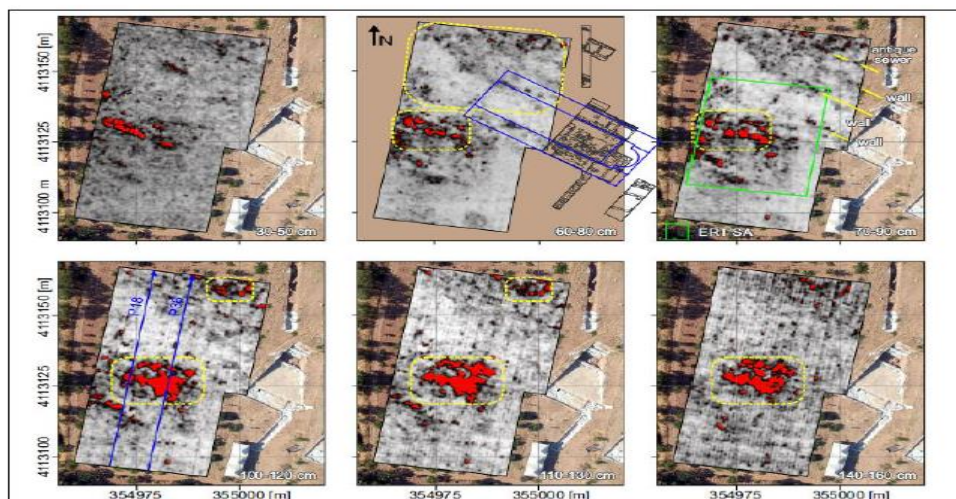
### 3.2.6.1 Site SA-1

Στο συγκεκριμένο site, οι περιοχές έρευνας με το GPR αποτελούνται από δύο μέρη λόγω των συνθηκών που επικρατούσαν στο πεδίο (όπως φαίνεται και από την εναέρια εικόνα του drone παρακάτω).

Πιο συγκεκριμένα:

- Οι περιοχές με τις μαύρες γραμμές ανήκουν στην χριστιανική βασιλική

Παρουσιάζονται λοιπόν τομές που έγιναν στην περιοχή με επίπεδα βάθους μεταξύ 30 και 160cm



Εικόνα 60: Χάρτες βάθους GPR στο SA-1 (επικάλυψη εικόνας του drone)

Από τους συγκεκριμένους χάρτες παρατηρούμε τα εξής:

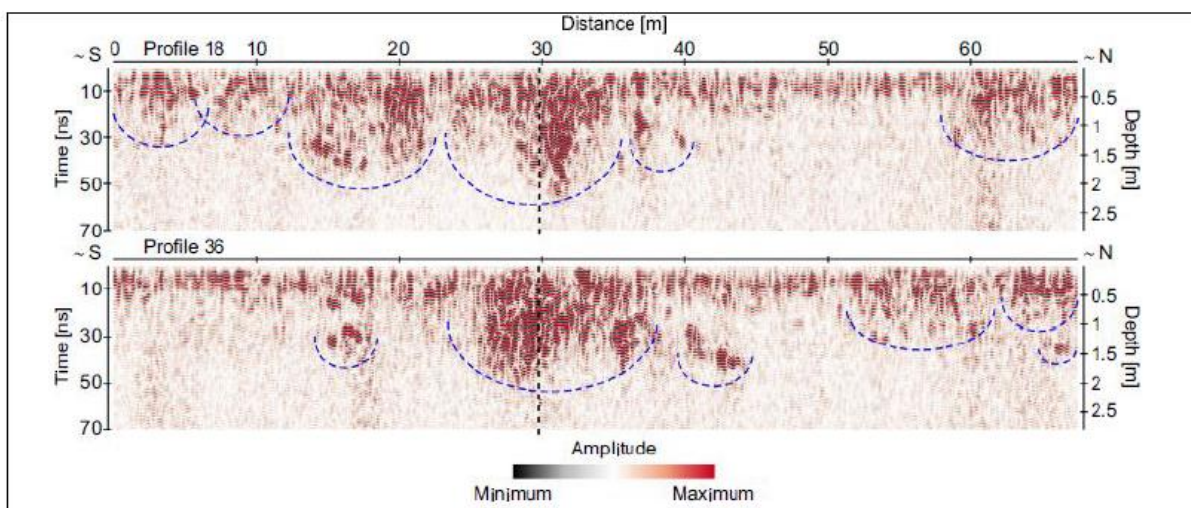
- Τις χαρακτηριστικές κίτρινες διακεκομμένες περιοχές
- Μία λεπτομερή κάτοψη της θαμμένης εκκλησίας (στον χάρτη των 60-80cm)
- Παρακείμενες αρχαιολογικές κατασκευές (στον χάρτη των 60-80cm)
- Ίχνη του κλίτου της εκκλησίας να προχωράνε προς τα δυτικά (λαμβάνοντας υπόψη τα κίτρινα βέλη στον χάρτη των 70-90cm)
- Το τρίτο βέλος από τα νότια που μπορεί να υποδεικνύει το βόρειο κομμάτι της εκκλησίας
- Τα γκρι και μαύρα χρώματα των χαρτών (πιθανές ανωμαλίες σχετικά χαμηλού πλάτους)

Τα τελευταία μπορούν να ερμηνευθούν ως πιθανά ευρήματα του GPR με βάση τον κανονικό προσανατολισμό τους.

Τα βόρεια τμήματα της περιοχής έρευνας GPR χαρακτηρίζονται κυρίως από ανωμαλίες πυκνής ανάκλασης που μπορούν να φανούν μέχρι και τα 130cm βάθος. Στο συγκεκριμένο βάθος εντοπίζεται και η συνέχεια ενός υστεροπαλαιικού υπονόμου.

Επιπλέον, στους παραπάνω χάρτες, τα χαρακτηριστικά κόκκινα ίχνη είναι αυτά τα σημεία που εμφανίζουν υψηλότερες τιμές πλάτους και βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Το πλάτος αυτού του μοτίβου ανάκλασης με κανονικά σχήμα που μπορεί να ακολουθηθεί στο βαθύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας, είναι σχεδόν 15m λαμβάνοντας υπόψη τον χάρτη τομής βάθους 100-120cm.

Τα προφίλ 18 (στα 7.5m) και προφίλ 36 (στα 17.5m) που φαίνονται οι προσανατολισμοί τους στην εικόνα 58 επιλέχθηκαν για να παρουσιάσουν τον χαρακτηρισμό ανάκλασης αυτού του σχεδίου. Έτσι η εικόνα 61 αντιπροσωπεύει τα δεδομένα 2D επεξεργασμένα σε ραδιογράμματα με χρονική περικοπή παραθύρου των 30ns.



*Εικόνα 61: GPR προφίλ του SA-1*

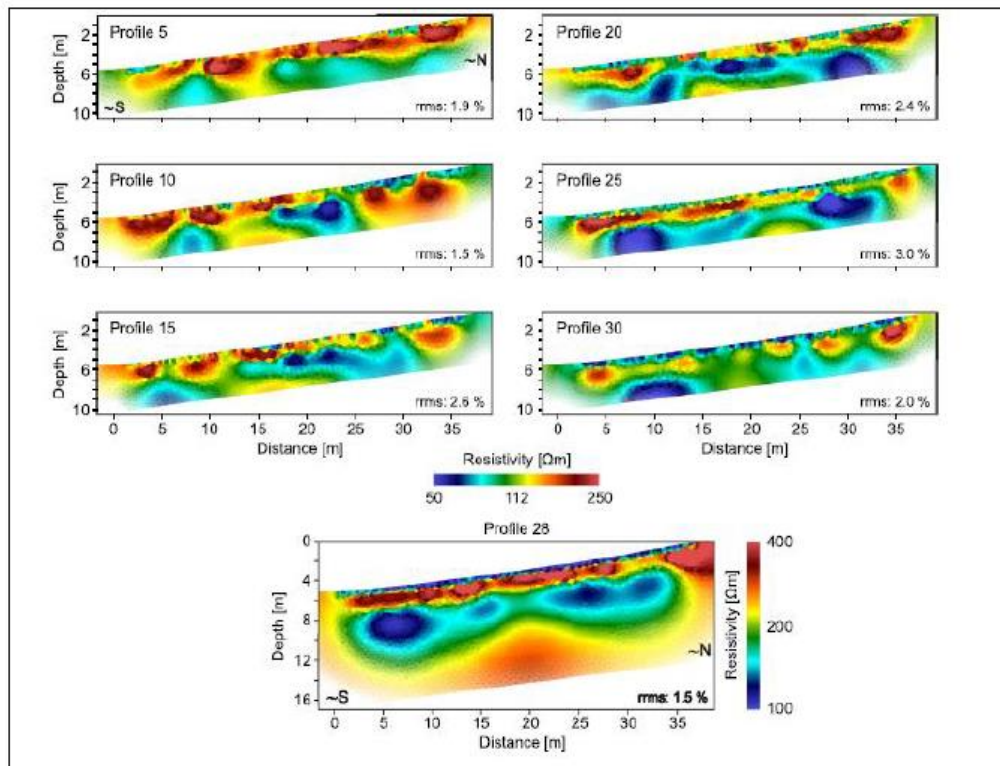
Αυτό που βλέπουμε στο εξής προφίλ είναι:

- Τις κάθετες διακεκομμένες γραμμές στα 30m που υποδεικνύουν το όριο μεταξύ των δύο υποπεριοχών του SA-1
- Τις μπλε διακεκομμένες γραμμές που υποδεικνύουν υποσχόμενες ανωμαλίες

Τα δύο αυτά ραδιογράμματα, παρουσιάζουν αντανάκλασεις υψηλού πλάτους, ειδικά στη ζώνη μετάβασης μεταξύ των δύο υποπεριοχών μέχρι και το βάθος των 2m. Επίσης, η απουσία ανακλάσεων και η ρηχή αντίστοιχα διεύθυνση σήματος σε ορισμένα σημεία όπως φαίνεται στο παραπάνω ραδιόγραμμα, υποδηλώνουν την υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, επιλέχθηκε και η περιοχή έρευνας με ERT. Τα όρια της περιοχής μελέτης φαίνονται καθαρά στον χάρτη του βάθους 70-90cm με τις συμπαγείς πράσινες γραμμές. (Εικόνα 60)

Στην εικόνα 62 παρουσιάζονται 7 παραδείγματα μοντέλων ειδικής αντίστασης ως 2D κάθετες τομές, με τις τομές που λαμβάνονται στο τέλος της 3<sup>ης</sup> με 4<sup>ης</sup> επανάληψης να εμφανίζουν κατανομές ειδικής αντίστασης εύρους περίπου 50 με 250Ωm.



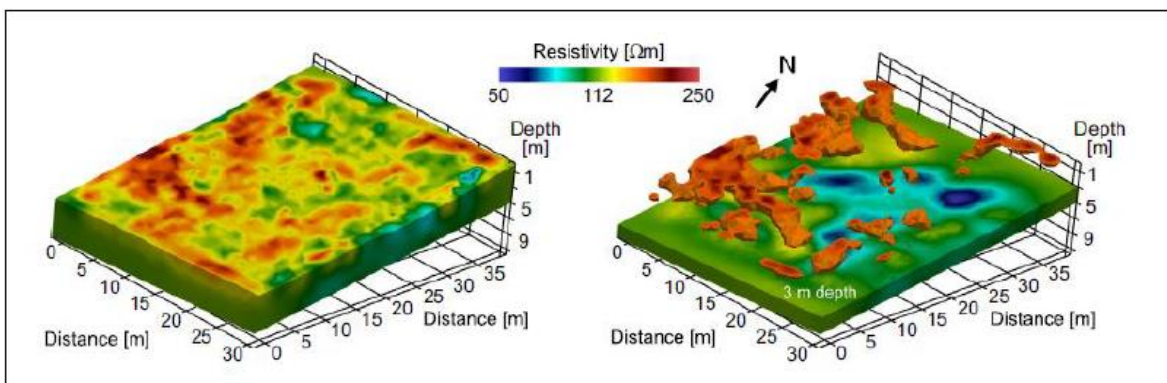
*Εικόνα 62: ERT στο SA-1*

Σύμφωνα με τα δεδομένα του ERT έχουμε στο SA-1:

- Μετρήσεις σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης που υπερβαίνουν την τιμή των 150Ωm (πορτοκαλί μέχρι κόκκινο)
- Πιθανή ύπαρξη αρχαιολογικών κατασκευών σε βάθος περίπου 3m που φαίνονται με βάση τον προσανατολισμό και τα σχήματα στο μέσο που χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ 50 και 75Ωm (μπλε μέχρι τρκουάζ).
- Το τελευταίο τμήμα στο κάτω πλαίσιο της εικόνας 62 που παρουσιάζει το μοντέλο της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που λαμβάνεται με την μέθοδο Wenner-Schlumberger

Τα βαθύτερα τμήματα δείχνουν μία τάση μέτριας μέχρι υψηλής ειδικής αντίστασης που πιθανότατα οφείλεται σε μετάβαση στα κορυφαία επίπεδα του βράχου. Παρόλο που οι τιμές φαίνεται να είναι αρκετά χαμηλές για τον ασβεστόλιθο, η περιεκτικότητα του βράχου σε άργιλο συμβάλλει στην μείωση της ειδικής αντίστασης.

Έτσι, οι ζώνες υψηλής ειδικής αντίστασης στο ανώτερο τμήμα του ERT πιθανότατα να είναι αποκρίσεις θαμμένων αρχαιολογικών κατασκευών από αργιλοασβεστόλιθο και επιβεβαιώνεται και από το υλικό που έχει βρεθεί από τις εκσκαφές. Στην εικόνα 63 με χρήση του ParaView παρουσιάζεται το 3D γεωηλεκτρικό μοντέλο που λήφθηκε από την αξιολόγηση των δεδομένων του ERT στο site SA-1, σε παράλληλες διατομές.



*Εικόνα 63: Ογκομετρικές αναπαραστάσεις σε παράλληλες διατομές της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης*

Στο αριστερό πλαίσιο του σχήματος φαίνεται μία κατανομή μεγαλύτερη από την τιμή ειδικής αντίστασης των  $100\Omega m$ , ενώ στο δεξί πλαίσιο της εικόνας 63 φαίνεται ένας όγκος ισοεπιφανειακών τιμών υψηλότερος από  $150\Omega m$  με επιφάνεια κοπής ως 3m βάθος. Σύμφωνα με αυτά τα δύο δεδομένα που προκύπτουν, υποδεικνύεται ότι η περιοχή έρευνας χαρακτηρίζεται κατά μέσο όρο από τιμές ειδικής αντίστασης  $100\Omega m$  και είναι προφανές ότι η καθορισμένη περιοχή όγκου ( $>150\Omega m$ ) προσελκύει την προσοχή. Αυτό, διότι τόσο με κανονικά σχήματα αλλά και προεκτάσεις τους, δείχνει κάτι που μπορεί να είναι ανθρωπογενείς δομές κρυμμένες κάτω από την επιφάνεια. Τα αποτελέσματα απεικόνισης των GPR και ERT γενικά υποστηρίζουν το ένα το άλλο στις αρχαιολογικές γεωφυσικές έρευνες.

Αυτό που συμβαίνει είναι ότι το GPR υποδεικνύει την ύπαρξη χαμηλής διηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ του εδάφους και του αρχιτεκτονικού υλικού της κατασκευής με χαμηλές και ασθενείς συνήθως ανακλάσεις σε ορισμένες περιοχές της μελέτης, ενώ η ERT υποδεικνύει ανωμαλίες σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης. Συγκεκριμένα, στην περιοχή μελέτης ο βράχος που αναφέρθηκε ότι υπάρχει είναι πολύ μαλακός αργιλώδης ασβεστόλιθος που χρησιμοποιείται σε αρχαιολογικές κατασκευές όπως φαίνεται στην εικόνα 57. Στην εικόνα φαίνεται η εκκλησία με ψηφιδωτό δάπεδο σε χοντρή στρώση από κονίαμα, όψιμους τοίχους από μάζα και μεγάλους τοπικά λατομημένους ασβεστολιθικούς λίθους που είχαν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του ναού. Αυτό αποδεικνύει και την πολυπλοκότητα της περιοχής μελέτης SA-1.

Ακόμα, η άργιλος ως ένα υλικό με υψηλή αγωγιμότητα είναι πιθανό να απορροφά τα σήματα του GPR και να μειώνει δραστικά το βάθος διείσδυσης του σήματος. Αν και μπορεί να συμβαίνει αυτό, τα λεπτά στρώματα αρχαιολογικού υλικού που υπάρχουν κάτω από την άργιλο της επιφάνειας, θα μπορούσαν να ενισχύσουν την ανακλαστικότητα του σήματος και να βοηθήσουν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

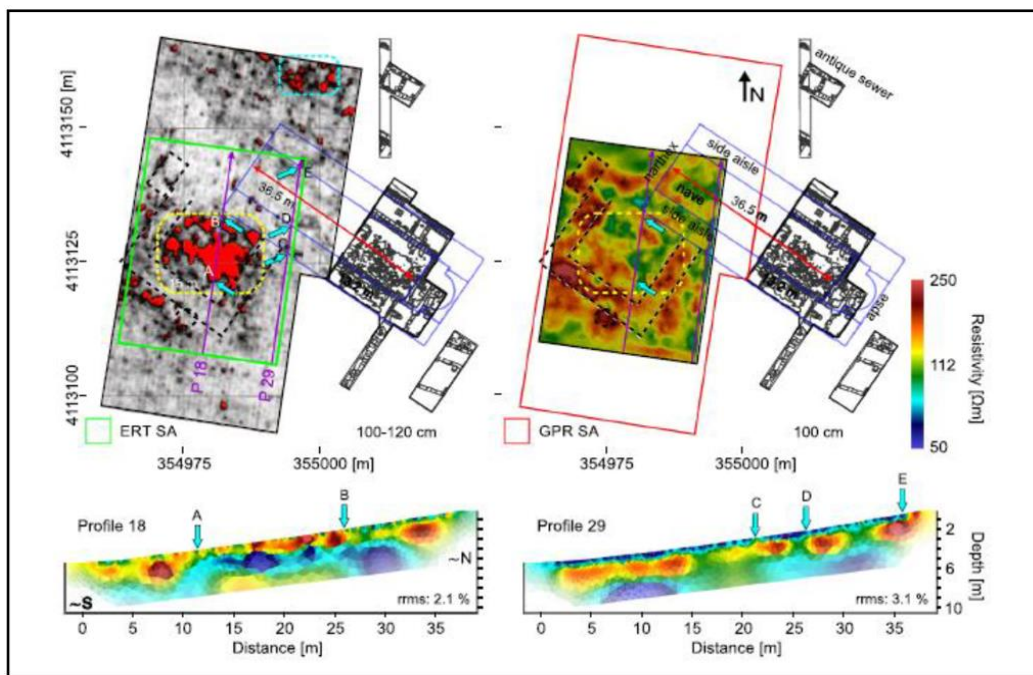


Στην περίπτωση του ERT, ο αργιλώδης ασβεστόλιθος έχει υψηλότερο εύρος ειδικής αντίστασης από το έδαφος που καλύφθηκε στην έρευνα. Συνεπώς, οι δύο γεωφυσικές τεχνικές να μπορούν να παρέχουν σχετικά διαφορετικής προέλευσης ανωμαλίες που σχετίζονται με αρχαιολογικές κατασκευές που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια (λόγω και της γεωλογικής κατάστασης που επικρατεί στην περιοχή έρευνας).

Επομένως, η εικόνα 64 παρακάτω δείχνει μία σύγκριση των αποτελεσμάτων από το GPR και την ERT που πραγματοποιήθηκαν στο site SA-1 λαμβάνοντας υπόψη τον χάρτη τομών βάθους 100-120cm (αριστερό πλαίσιο) και 100cm (δεξιό πλαίσιο) αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης παρουσιάζει κάποιες γεωφυσικές ανωμαλίες που πιθανότατα σχετίζονται με αρχαιολογικές δομές και βλέπουμε τα εξής:

- Το πλάτος ανωμαλιών μεταξύ κίτρινων διακεκομμένων γραμμών στον χάρτη τομής βάθους GPR είναι περίπου στα 15m
- Η απόσταση μεταξύ των κεντρικών κλίτων της βασιλικής περίπου στα 10m
- Τα μήκη των αποκαλυφθέντων τοίχων της βασιλικής περίπου 13.2m και 7m
- Οι κύριες κατευθύνσεις των ανωμαλιών φαίνεται να είναι σύμφωνες με τον βόρειο τοίχο της βασιλικής και τον υπόγειο υπόνομο που βρέθηκε
- Οι μαύρες διακεκομμένες γραμμές είναι οι ανωμαλίες υψηλής ειδικής αντίστασης, με κανονικά σχήματα και εμφανίζονται στον χάρτη τομής βάθους της ERT-οι ανωμαλίες αυτές μπορεί να οφείλονται σε κατασκευές κοντά στην εκκλησία, προσαρτημένες ή εγγενείς



Εικόνα 64: Σύγκριση χαρτών βάθους ERT & GPR στο SA-1

Οι ανωμαλίες όλων των χαρτών υπερτίθενται για χάρη σύγκρισης. Δισδιάστατες τομές για τα προφίλ 18 και 29 δίνονται στο κάτω μέρος της παραπάνω εικόνας.

Με βάση την σύγκριση και των δύο χαρτών, μπορεί να ειπωθεί πως οι ανωμαλίες που εμφανίζονται αφορούν διαφορετικές τοποθεσίες στην περιοχή μελέτης. Οι αντανakλάσεις υψηλού πλάτους μέσα στις κίτρινες διακεκομμένες γραμμές σχετίζονται καλά με την ζώνη μέτριας ειδικής αντίστασης. Παρόλα αυτά, οι ανωμαλίες υψηλής αντίστασης μεταξύ των μαύρων διακεκομμένων γραμμών, όπου και οι ανακλάσεις έχουν χαμηλά πλάτη, πιθανότατα υποδεικνύουν κάποιους συμπαγείς τοίχους.

Μεταξύ αυτών, το προφίλ 18 αφορά ζώνη υψηλού πλάτους τομής GPR ενώ το 29 κόβει πιθανές επεκτάσεις των τοίχων του κλίτου της βασιλικής. Ακόμα, οι ακριβείς τοποθεσίες σημειώνονται στην εικόνα με τα γράμματα Α έως και D.

Λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή της ειδικής αντίστασης στο προφίλ 18, μπορούμε να πούμε πως υπάρχει καλή αντιστοιχία μεταξύ των ίδιων επιπέδων βάθους και στο GPR και στα αποτελέσματα της ERT. Ακόμα, στο προφίλ 29, εμφανίζονται ανωμαλίες χαρακτηριστικές για την σχετικά υψηλή ειδική αντίστασή τους, σε βάθος μικρότερο από 1m κάτω από την επιφάνεια και κοντά στα τοιχώματα του κλίτου που επισημαίνονται με τα γράμματα C,D & E.

Επί πρόσθετα, η συνέχεια του ναού μπορεί να βρεθεί με το GPR με τις κατακερματισμένες ανωμαλίες, αλλά τα λεπτά τοιχώματα του κλίτου εμφανίζονται με την ERT σε χαμηλότερη ανάλυση λόγω της απόστασης των ηλεκτροδίων στα 0.8m.

Τα αποτελέσματα της ERT είναι όμως αυτά που δίνουν περισσότερες πληροφορίες για κατασκευές στα νότια και νοτιοδυτικά του ναού. Ωστόσο, είναι δύσκολο να εξακριβωθεί η φύση αυτών των δομών και φαίνεται να έχουν ίδιο προσανατολισμό με τον ναό σαν όλον άρα να αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της αρχικής κατασκευής του.

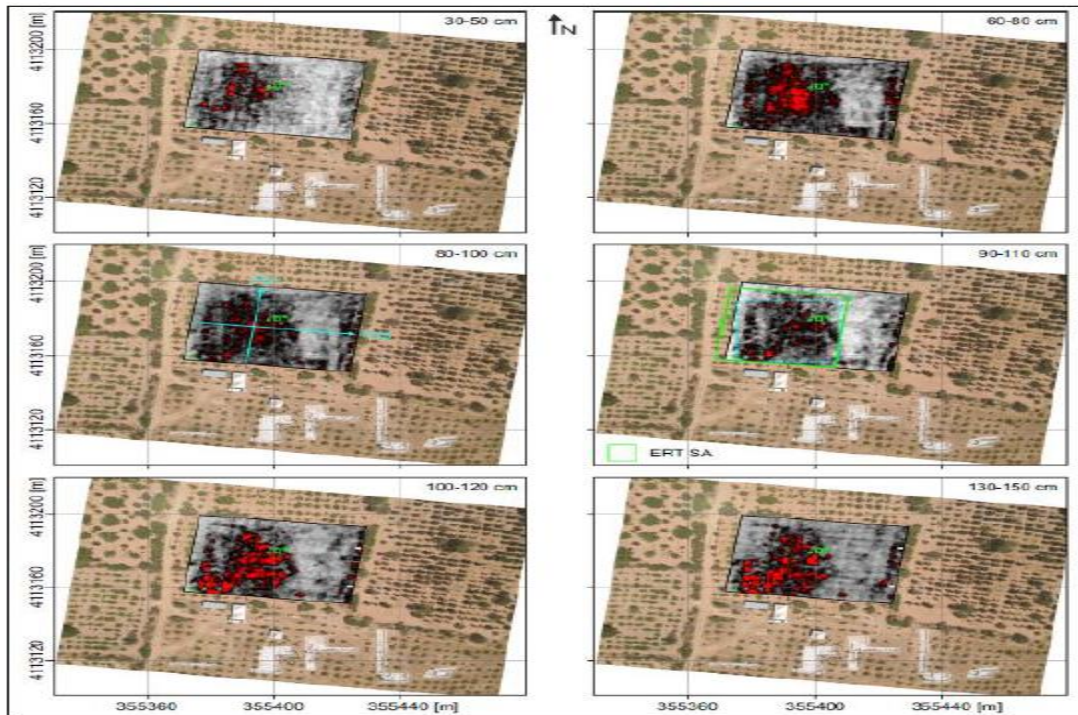
### 3.2.6.2 Site SA-2

Στην εικόνα 65 φαίνεται η περιοχή του site SA-2 στην οποία έγιναν μελέτες με GPR και ERT κοντά στο λουτρό που φαίνεται στην διπλανή εικόνα. Συγκριτικά με το site SA-1, η περιοχή έχει επίπεδη επιφάνεια και το βάθος των αρχαιολογικών δομών λογίζεται πολύ μικρό. Γενικά, η βλάστηση στην περιοχή προκαλεί διάφορες δυσκολίες στην εφαρμογή των μεθόδων, ιδιαιτέρως στην εφαρμογή του GPR που συναντά ανώμαλες επιφάνειες ανά διαστήματα.

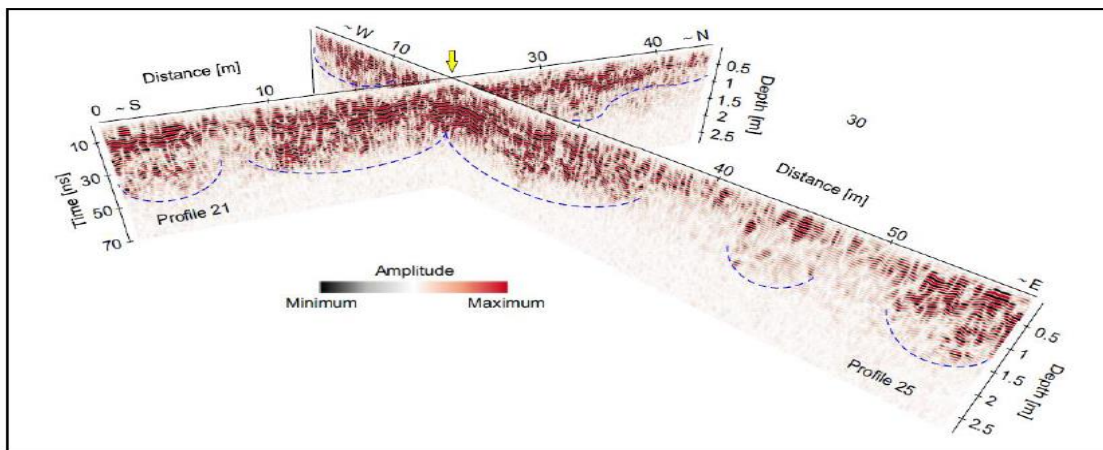
Για αυτό το λόγο παρθήκαν οι εξής αποφάσεις και είχαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Η μελέτη του GPR έγινε σε κατευθύνσεις σχεδόν A-Δ και N-B, κόβοντας η μία την άλλη σχεδόν κάθετα για να μειωθεί ο κίνδυνος απώλειας δεδομένων
- Η περιοχή έρευνας παρουσιάζει υποσχόμενες ανωμαλίες περίπου από τα κεντρικά και προς το δυτικό κομμάτι του SA-2
- Οι ανωμαλίες αυτές είναι με μπλε διακεκομμένες γραμμές σε χάρτη βάθους 90-110cm
- Έχοντας ελάχιστη έως καθόλου αντανάκλαση, στο μεσαίο τμήμα της περιοχής προς τα ανατολικά, πιστεύεται ότι τα αρχαιολογικά υλικά που υπάρχουν μετακινήθηκαν για χρήση άλλου
- Σχεδόν όλες οι τομές παρουσιάζουν κανονικό προσανατολισμό και είναι από το νοτιοδυτικό τμήμα προς το βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής
- Ίχνη ανάκλασης μεγάλου πλάτους εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα του ανατολικού τμήματος της δομής και είναι πολύ αισθητά

Όλα αυτά φαίνονται καθαρά και στους παρακάτω χάρτες:



Εικόνα 65: Χάρτες βάθους GPR για το SA-2 που επικαλύπτουν και την εναέρια εικόνα του drone

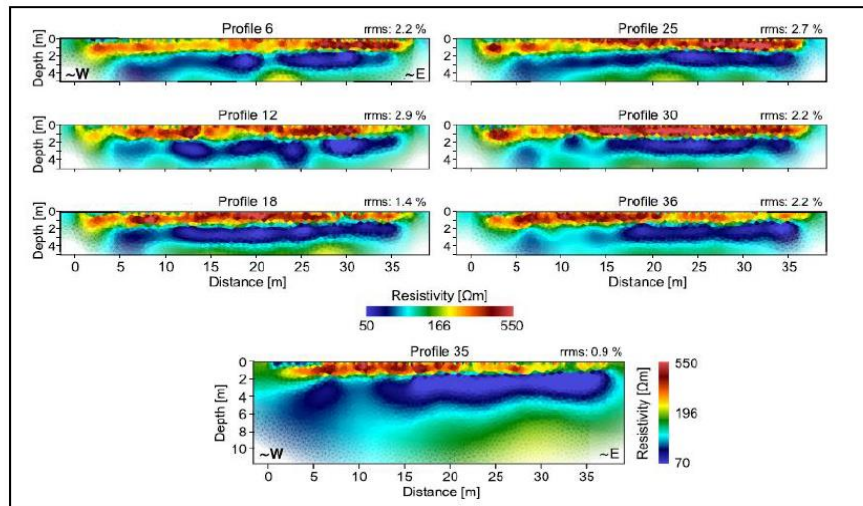


Εικόνα 66: Προφίλ GPR στο site SA-2

Στην εικόνα 66, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα δύο επεξεργασμένων ραδιογραμμμάτων που αποτελούνται αντίστοιχα από τα προφίλ 21 και 25 και οι προσανατολισμοί τους φαίνονται και στην εικόνα 65.

Πιο συγκεκριμένα:

- Τα σημεία τομής τους σημειώνονται με κίτρινο βέλος και είναι στα 17m και 22.5 m μαζί με τις κατευθύνσεις μέτρησης
- Οι μπλε διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν υποσχόμενες ανωμαλίες
- Τα ισχυρά μοτίβα ανακλάσεων υποστηρίζουν το ένα το άλλο στην περιοχή αυτού του σημείου
- Η έρευνα με την ERT συνεπώς έγινε σε περιορισμένη περιοχή που φαίνεται και από τις πράσινες γραμμές που καλύπτουν αυτές οι ανωμαλίες στην εικόνα 65 και προέκυψαν από το GPR



**Εικόνα 67: Εικόνες ERT προφίλ του SA-2**

Στην εικόνα 67, εμφανίζονται έξι διατομές Dipole-Dipole ERT που ελήφθησαν στο τέλος της 3<sup>ης</sup> με 8<sup>ης</sup> επανάληψης.

Η περιοχή αυτή παρουσιάζει σχετικά υψηλότερη τιμή μέγιστης ειδικής αντίστασης συγκριτικά με το SA-1. Σύμφωνα με αυτά, το SA-2 παρουσιάζει μία ζώνη υψηλής αντίστασης >300Ωm που φαίνεται ότι εκτείνεται πλευρικά στην κατεύθυνση Α-Δ. Η ζώνη αυτή, που βρίσκεται και πάνω από το μέσο χαμηλής ειδικής αντίστασης (<100Ωm) εμφανίζεται μεταξύ 20-30cm και 1.5-2m βάθος.

Τέτοιες ανωμαλίες ιδιαίτερα υψηλής αντίστασης είναι σύμφωνες με το βάθος των υπολειμμάτων του λουτρού αλλά δεν μπορούν να εξηγηθούν από λιθολογικής άποψης στην ύπαρξη ενός αγωγίμου μέσου. Οπότε, τα ευρήματα αυτά πιθανότατα να σχετίζονται με αρχαιολογικά κατάλοιπα.

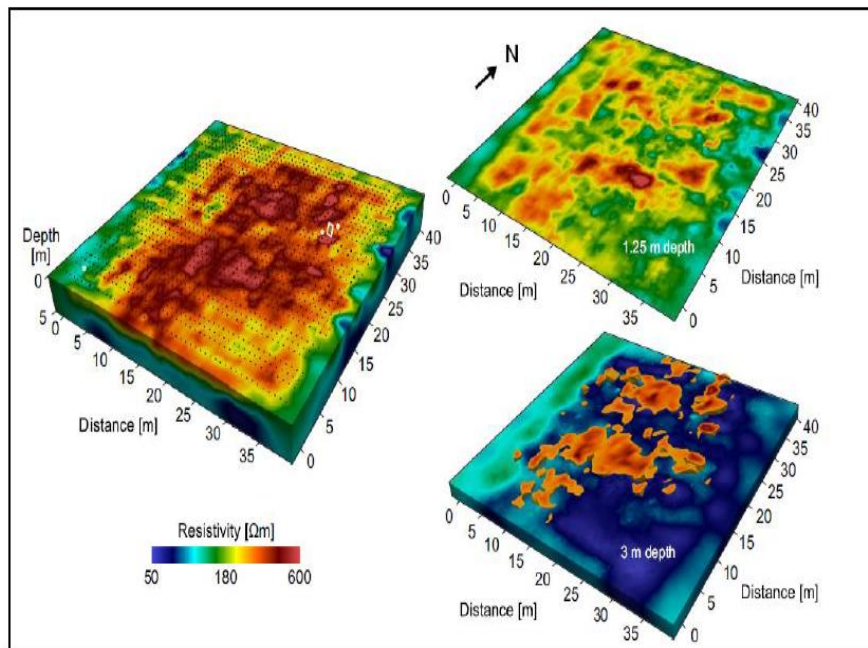


Στο κάτω μέρος της εικόνας 67 φαίνεται και το προφίλ δεδομένων που λήφθηκαν με την διάταξη Wenner-Schlumberger και έχουμε τα εξής:

- Παρόμοια με αυτή του SA-1 , εκτός από το ανώτερο στρώμα, οι τιμές της ειδικής αντίστασης αυξάνονται με το βάθος
- Η ζώνη μετάβασης μεταξύ του στρώματος χαμηλής ειδικής αντίστασης και του βράχου φαίνεται προς τα ανατολικά σε βάθος περίπου 7m
- Τα τομογράμματα της WS υποδηλώνουν ήπια κυματοειδή τοπογραφία
- Τα δεδομένα είναι συναφή με δεδομένα που λήφθηκαν στο Keber Tere από ανασκαφές

Στην εικόνα 68 παρακάτω δίνεται και το τρισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο μετά από αναστροφή των 2D ERT.

Στην τρισδιάστατη απεικόνιση του SA-2 που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά της εικόνας, εντοπίζεται επιφάνεια της περιοχής έρευνας με ως επί το πλείστον τιμές υψηλής ειδικής αντίστασης (>300Ωm) παρόμοιες με τα αποτελέσματα των 2D. Τα ηλεκτρόδια φαίνονται ως μαύρες κουκίδες στην επιφάνεια των προφίλ, ενώ παρατηρούνται και 3 δέντρα (οι λευκοί κύκλοι) και ένας λάκκος (λευκό ορθογώνιο) που δεν παράγουν ψευδείς ανωμαλίες για παρερμηνευση των δεδομένων. Το δεξί πλαίσιο της εικόνας παρουσιάζει δύο χάρτες βάθους που δείχνουν κανονικές ανωμαλίες και στις δύο κατευθύνσεις. Με βάση την ευθυγράμμιση τους στην περιοχή, θεωρείται ότι υπάρχει αρχαιολογική κατασκευή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια. Σε αυτά τα επίπεδα βάθους, η μέση τιμή ειδικής αντίστασης υπολογίζεται μικρότερη των 100Ωm, ενώ και τα ίχνη των δομών εμφανίζουν αντίσταση (πράσινο έως κόκκινο χρώμα) κυμαίνονται μεταξύ 150 και 550Ωm.

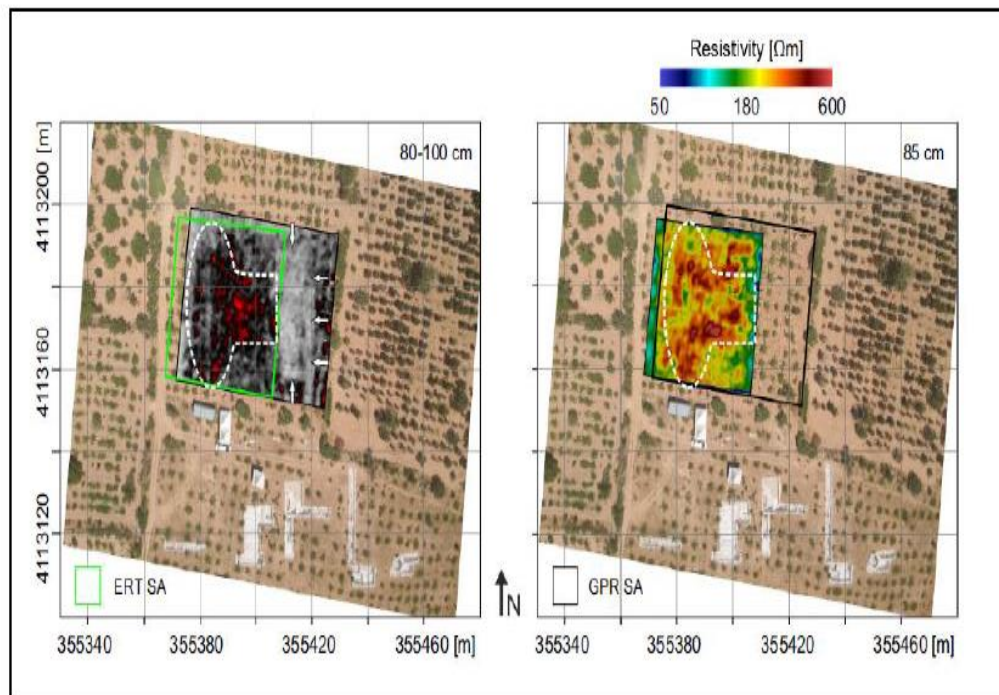


*Εικόνα 68: Ογκομετρικές αναπαραστάσεις της κατανομής ηλ.ειδ. αντίστασης στο SA-2*

Στην εικόνα 69, γίνεται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και από τις δύο μεθόδους, λαμβάνοντας υπόψη τους χάρτες βάθους 80-100cm (αριστερό πλαίσιο) και 85cm (δεξί πλαίσιο). Τα αποτελέσματα που φαίνονται μεταξύ των λευκών διακεκομμένων δείχνουν να συμφωνούν μεταξύ τους.

Οι πιο σημαντικές ανωμαλίες εκτείνονται N-B και συμπίπτουν με τις προεκτάσεις των υπολειμμάτων του λουτρού. Αυτά τα ευρήματα, πιθανότατα υποδηλώνουν την ύπαρξη αρχαιολογικών δομών στο site SA-2 ακριβώς κάτω από την επιφάνεια.

Ωστόσο, δεν είναι εύκολο να απαντήσουμε με ασφάλεια, γιατί δεν προκύπτει κάποιο σαφές μοτίβο που να βοηθάει στην αναγνώριση μεμονωμένων κτιρίων ή μονάδων. Οι εικόνες και των δύο μεθόδων επιβεβαιώνουν την θέση μίας πολύ μεγάλης τεχνητής κατασκευής στο κέντρο της περιοχής και η δομή διευρύνεται αρκετά προς τα δυτικά. Ακόμα, ο προσανατολισμός και οι ευθυγραμμίσεις των ανωμαλιών ταυτίζονται με τον προσανατολισμό των κτιρίων της ρωμαϊκής περιόδου που ανασκάφθηκαν χρόνια πριν. Πιθανότατα, να μιλάμε για μνημειώδες κτίριο της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας και γενικότερα η ζώνη αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ζώνη μεγάλων αστικών κτιρίων.



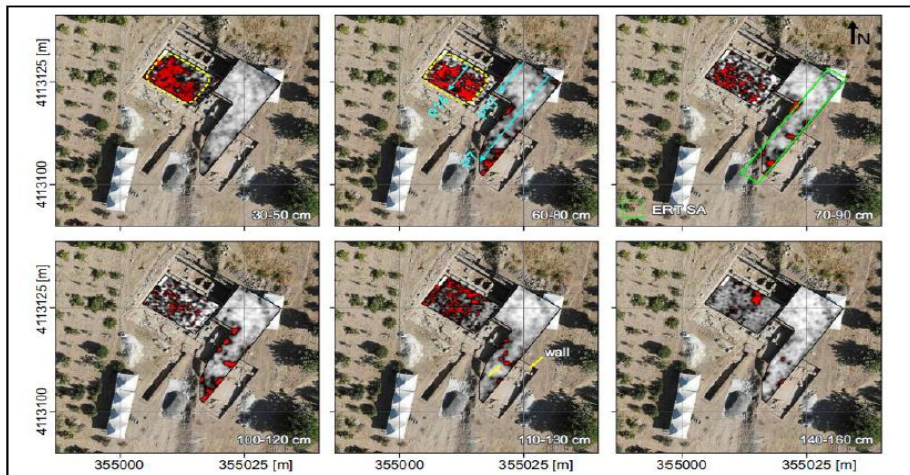
**Εικόνα 69: Σύγκριση χαρτών ERT και GPR στο SA-2**

### 3.2.6.3 Site SA-3

Η γεωφυσική έρευνα για το SA-3 χωρίστηκε σε δύο μέρη, στο ανατολικό τμήμα του SA-1. Το πρώτο μέρος ήταν το γνωστό ψηφιδωτό δάπεδο που καλύπτει το κεντρικό κλίτο του ναού και το δεύτερο έναν χώρο σε σχήμα I. Οι όψεις για το SA-3 παρουσιάζονται και στις παραπάνω εικόνες...

Το πρώτο μέρος, ερευνήθηκε μόνο με την μέθοδο του GPR καθώς είναι καλυμμένο με μωσαϊκό στο δάπεδο και δεν ήταν δυνατό να διενεργηθεί ηλεκτρική μέθοδος με ηλεκτρόδια. Η εικόνα 70, παρουσιάζει τους χάρτες βάθους 30-160cm.

Με βάση τους πρώτους από αυτούς(βάθος 30-50cm & 60-80cm) της περιοχής του ψηφιδωτού, παρατηρείται ότι το δάπεδο περιέχει κονίαμα με ελάχιστα κομμάτια μωσαϊκού και εμφανίζει ανωμαλίες υψηλότερου πλάτους από τις περιοχές με πυκνό μωσαϊκό.



*Εικόνα 70: Χάρτες βάθους GPR και εικόνα του drone στο site SA-3*

Στην δεύτερη περιοχή μελέτης κυριαρχούν όπως φαίνεται οι κόκκινες ανωμαλίες μεγάλου πλάτους και οι γκρι μαύρες ανωμαλίες χαμηλού πλάτους που μπορούν να ερμηνευθούν ως πιθανά υποσχόμενα ευρήματα του GPR. (εικόνα 70)

Αυτά που συμπεραίνουμε είναι:

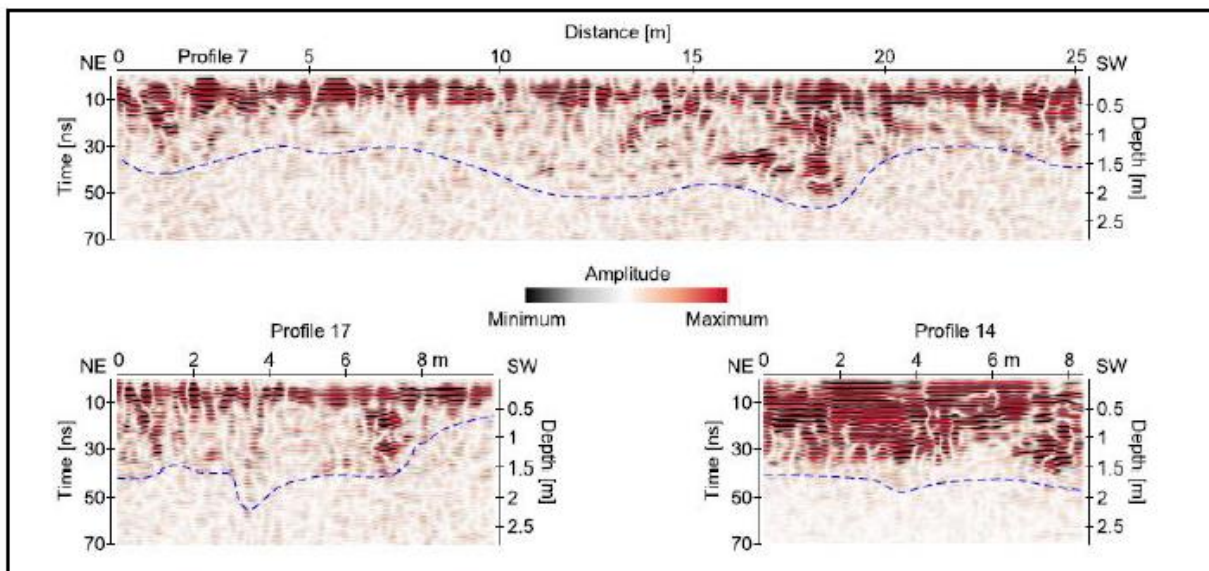
- Οι εναέριας απεικονίσεις δείχνουν μια τοιχοποιία σε αρχαιολογική τάφρο και ένα δάπεδο στα νότια της που απεικονίζεται με ανωμαλία του τοίχου και επεκτείνεται στα 1.5m προς την ασπίδα του ναού και στην συνέχεια προς τα βορειοανατολικά παράλληλα με την ασπίδα από το μέσο της περιοχής μελέτης
- Η ανωμαλία που εμφανίζεται λόγω του δαπέδου είναι επίσης ορατή
- Μία άλλη ζώνη ανωμαλίας γειτνιάζει με την αναμενόμενη προέκταση του τοίχου του ναού
- Στον χάρτη των 60-80cm παρατηρείται και μία συνέχεια των τοίχων που βρίσκονται στο βορειότερο μέρος του πρώτου τμήματος της έρευνας



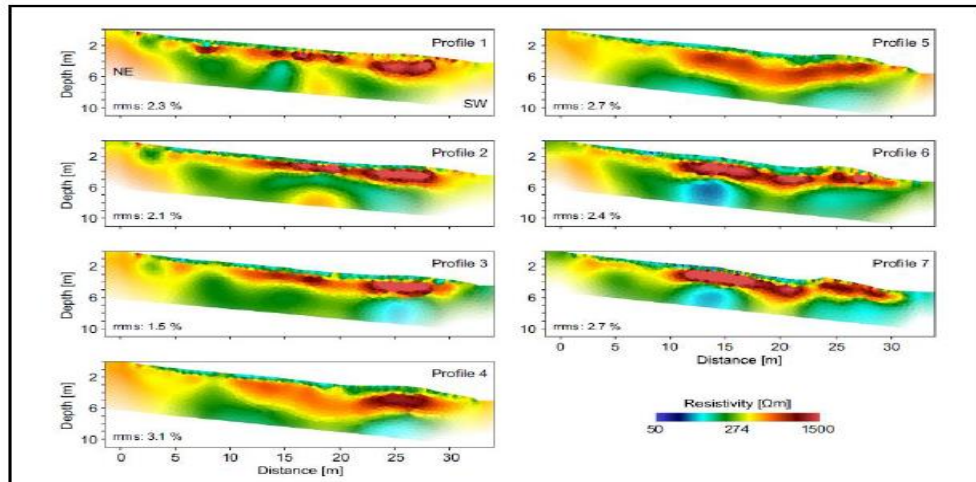
Η εικόνα 71 παρουσιάζει τα δισδιάστατα ραδιογράμματα του προφίλ 14 από το ψηφιδωτό δάπεδο και τα προφίλ 7 και 17 που μετρήθηκαν στην αυλή έξω από την εκκλησία. Οι αντανάκλασεις που παρουσιάζονται με μπλε διακεκομμένες γραμμές είναι πολλά υποσχόμενες ανωμαλίες σε κάθε τμήμα βάθους.

Τέλος, στην εικόνα 72, φαίνονται τα τομογραφήματα της ειδικής αντίστασης για τα 7 προφίλ με κατεύθυνση ΒΑ προς ΝΔ.

Το πρώτο προφίλ είναι κοντά στον τοίχο και το τελευταίο κοντά στην αψίδα του ναού. Τις υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης παρουσίασε το συμπαγές έδαφος που υπάρχει στην περιοχή σε σύγκριση με το SA-1 που έχει γεωργικό έδαφος στην επιφάνειά του. Αυτές οι ανωμαλίες υψηλής ειδικής αντίστασης μεγαλύτερης των 500Ωm στο μέσο υποδοχής με μικρότερη ειδική αντίσταση αυτή των 200Ωm, παρατηρούνται μέχρι και τα 50cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και ξεκινούν από το 10<sup>ο</sup> μέτρο κάθε τομογραφίας.

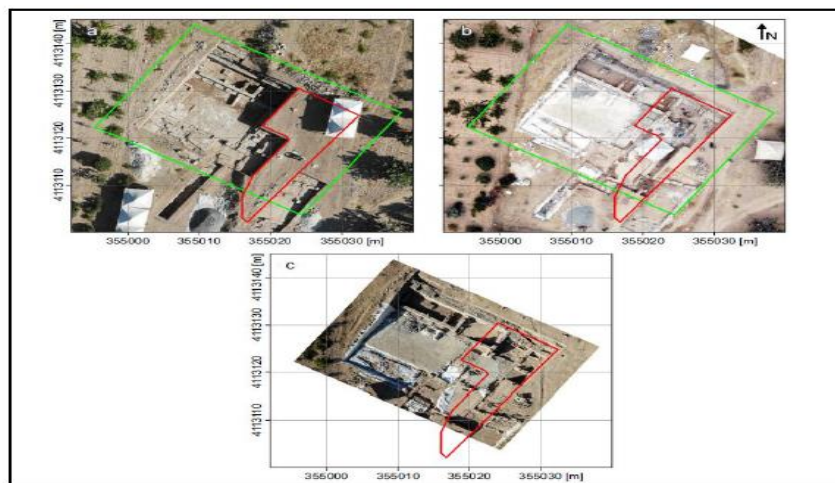


*Εικόνα 71: Εικόνα GPR προφίλ.*



**Εικόνα 72:Εικόνες ERT SA-3**

Η εικόνα 73, δείχνει τις αεροφωτογραφίες που λήφθηκαν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της αρχαιολογικής ανασκαφής στην αυλή της εκκλησίας. Στην τρίτη εικόνα, φαίνεται η αυλή της εκκλησίας και τα δύο δωμάτια που γειτνιάζουν με την αιψίδα όπως και η ίδια η αιψίδα. Με βάση την τάφρο που διανοίχθηκε με διαστάσεις 10x10m , παρατηρούνται κανάλια νερού και λεκάνες που πιθανότατα σχετίζονται με την χρήση του ναού.



**Εικόνα 73:Αεροφωτογραφίες: α) πριν β) κατά τη διάρκεια και γ) μετά την αρχαιολογική εκσκαφή τάφρου στην αυλή του ναού**

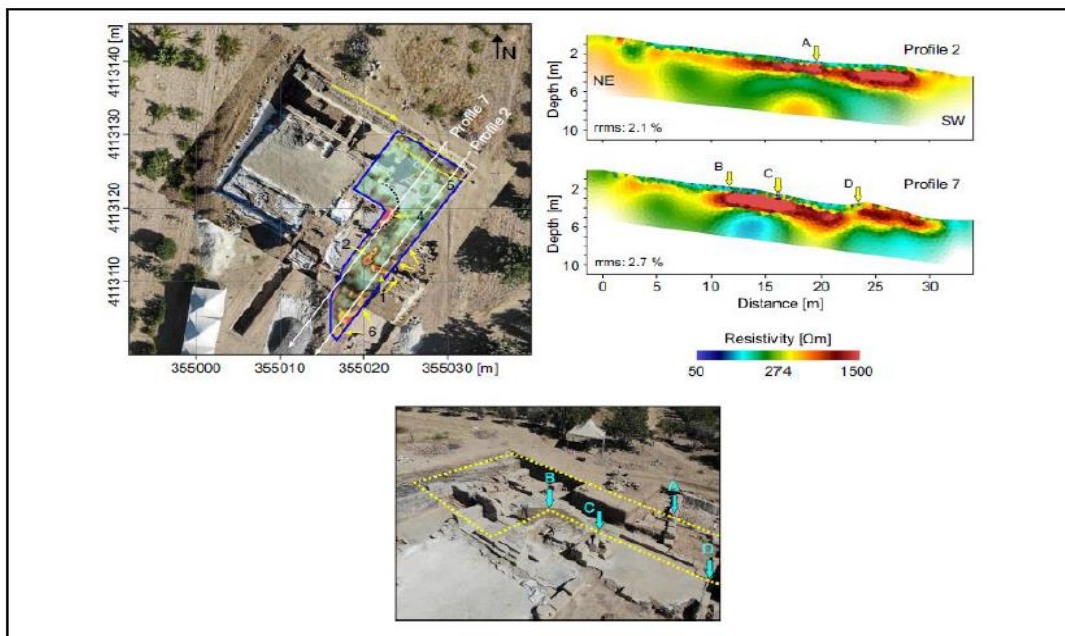
Η εξερεύνηση GPR παρείχε καλή αλλά περιορισμένη εικόνα λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή της ανασκαφής. Ο διαφανής χάρτης τομής βάθους που προέκυψε από τη σύνθεση τριών επιπέδων που περιέχουν 80–100 cm, 100–130 cm και 120–150 cm εμφανίζει τις έξι διακριτές ανωμαλίες GPR. Η ανωμαλία που υποδεικνύεται από τον αριθμό 1 δείχνει μια προέκταση του προηγουμένως εκτεθειμένου τοίχου που ενώνεται με τον ανατολικό τοίχο του ναού.

Στην εικόνα 74, ο τοίχος με αριθμό 2 μπορεί να εντοπιστεί περίπου 2 m στην κατεύθυνση ΝΔ-ΒΑ όμως η ορατότητά του είναι καθαρή μέχρι το τέλος του βόρειου τμήματος της τάφρου. Η τρίτη ανωμαλία που βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του γνωστού τοίχου παρουσιάζει καλή ταύτιση με την ανασκαφή. Στην τέταρτη ανωμαλία, ένα τμήμα της αψίδας του ναού παρουσιάζει αντανakλάσεις μεγάλου πλάτους, ενώ ορισμένα τμήματα που βρίσκονται στο όριο της τετράγωνης τάφρου εμφανίζουν αντανakλάσεις σχετικά μέτριου πλάτους. Αυτό ισχύει σχεδόν και για το πέμπτο που σχετίζεται με τη δομή του τοίχου όπως φαίνεται και από το κίτρινο βέλος στην εικόνα.

Τέλος, οι υψηλότερες αντανakλάσεις εμφανίζονται στην έκτη ζώνη ανωμαλίας που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, κοντά στο μωσαϊκό δάπεδο. Συνεπώς, οι ανωμαλίες υψηλού πλάτους που έδειξε το GPR (αναφέρονται παραπάνω) είναι ουσιαστικά συνεπείς με τις αρχαιολογικές δομές που ανακαλύφθηκαν.

Συγκεκριμένα ισχύουν τα εξής:

- Το όριο του δαπέδου της αψίδας μπορεί να εντοπιστεί, αλλά όχι και με τόσο υψηλή ανάλυση
- Το GPR δεν μπόρεσε να προσδιορίσει όλες τις δομές που εκτέθηκαν, ειδικά στο μεσαίο και βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης
- Με σκούρο γκρι εμφανίζονται τα σχετικά χαμηλού πλάτους ίχνη
- τέτοιες ανωμαλίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ως δείκτης αρχαιολογικών δομών στην αρχαία Doliche λόγω της ασθενούς φυσικής αντίθεσης μεταξύ της δομής και του εδάφους
- η ετερογενής κατανομή της περιεκτικότητας σε άργιλο στο δομικό υλικό μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση μικρών ανωμαλιών στο GPR



*Εικόνα 74: Τομογραφίες ERT : Και στις δύο τομογραφίες, το βέλος με την ένδειξη A στα 19,6 m δείχνει την ακριβή θέση του προηγουμένου αποκρυφθέντος τοίχου με προσανατολισμό ΝΑ-ΒΑ. Το βέλος B στα 11,7 μέτρα δείχνει τη γωνία της τετράγωνης αρχαιολογικής τάφρου ενώ το βέλος Γ στα 16,7m*

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, συμπεράνουμε ότι η έρευνα του ERT απέδωσε ανωμαλίες σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης, παρέχοντας καλή συμφωνία με τις εκτεθειμένες αρχαιολογικές δομές. Σε σύγκριση με το GPR, τα τμήματα 2D του ERT κατάφεραν να απεικονίσουν τις βόρειες αρχαιολογικές κατασκευές εντός της τάφρου, που παράγουν χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης

### **3.2.7 Συμπεράσματα της έρευνας**

Λαμβάνοντας υπόψη τις αρχαιολογικές τάφρους που διανοίχθηκαν στον περίβολο της εκκλησίας, φαίνεται ότι η μέθοδος GPR μπορεί να καθορίσει εν μέρει τις αρχαιολογικές κατασκευές, παρόμοια με την περίπτωση του SA-1. Στο SA-1, οι προκύπτουσες εικόνες διατομής και ογκομετρικής ανωμαλίας που λαμβάνονται από έρευνες GPR και ERT δείχνουν μερικά αξιοσημείωτα γεωφυσικά ίχνη, τα οποία μπορούν να ερμηνευθούν ως αρχαιολογικές κατασκευές. Από την άλλη πλευρά, η έρευνα της EPT έδωσε ικανοποιητικές υποεπιφανειακές εικόνες της ειδικής αντίστασης, σύμφωνες με τις εκκλησιαστικές κατασκευές που βρέθηκαν από τις αρχαιολογικές ανασκαφές.

Αυτά τα ευρήματα παρείχαν μερικές χρήσιμες πληροφορίες πριν ξεκινήσουν τις μακροχρόνιες διαδικασίες των αρχαιολογικών ανασκαφών. Αυτή η μελέτη δείχνει επίσης ότι η εφαρμογή και των δύο μεθόδων βοηθά στην αντιμετώπιση προβλημάτων που δημιουργούνται από τα πλούσια σε άργιλο εδάφη, τη χρήση αργιλώδους ασβεστόλιθου για οικοδομικούς σκοπούς και την σκληρή επιφάνεια. Σε τέτοιες περιοχές που προκαλούν ένα δύσκολο έργο για μια αρχαιογεωφυσική έρευνα, μια συνδυασμένη ερμηνεία των εικόνων GPR και ERT μπορεί να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

### 3.3 :Τρισδιάστατη αναπαράσταση θαμμένων κατασκευών με μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά και γεωηλεκτρικής τομογραφίας δεδομένα με παράδειγμα από την αρχαιολογική θέση της Φαιστού Κρήτης

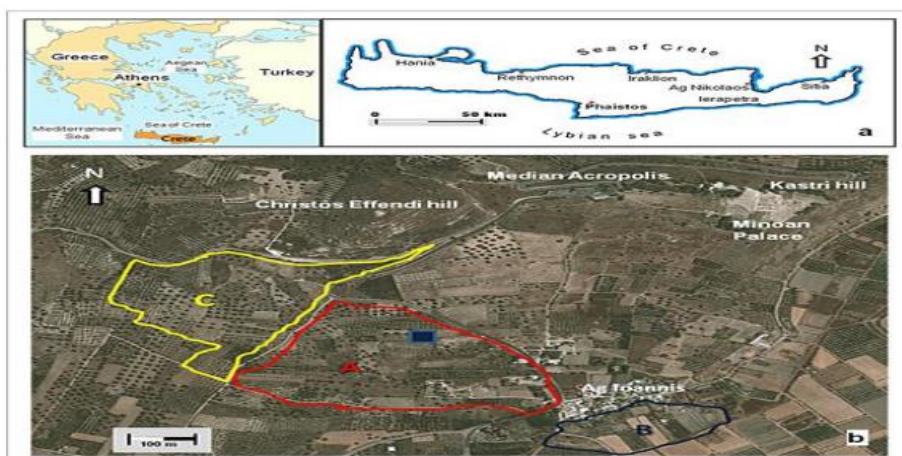
(R. Di Maio, M. La Manna and E. Piegari.,2015)

#### 3.3.1 Γενικά

Η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει στα αποτελέσματα υψηλής ανάλυσης με μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά (EM) και με ηλεκτρικές γεωφυσικές μεθόδους. Σκοπός ήταν η αξιολόγηση της ανάλυσης των τεχνικών μη καταστροφικό ελέγχου των θαμμένων αρχαίων δομών στην αρχαία Φαιστό.

Τα μαγνητικά και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος επέτρεψαν την ταχεία απόκτηση δεδομένων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την προκαταρκτική διερεύνηση του επιλεγμένου χώρου δοκιμών, προκειμένου να εντοπιστούν οι τομείς που χαρακτηρίζονται από σημαντικές αντιθέσεις σε ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της έρευνας που διεξήχθη εντός του κομματιού Α (μπλε με μαύρο τετράγωνο). Συγκεκριμένα, θα επικεντρωθούμε στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό τοιχίου της περιοχής.



Εικόνα 75: : (α) Χάρτης της Κρήτης και (β) η θέση των τριών τομέων αρχαιολογικής εξερεύνησης (Α, Β και Γ) στην περιοχή που επιλέχθηκαν ως περιοχές δοκιμής στο πλαίσιο του σχεδίου Φαιστού. Το μπλε με μαύρο τετράγωνο στον τομέα Α υποδεικνύει το χώρο δοκιμών



### 3.3.2 Περιγραφή της περιοχής έρευνας

Η Φαιστός είναι ένα μινωικό κέντρο στο δυτικό τμήμα της πεδιάδας της Μεσαράς. Η πεδιάδα συνορεύει στα βόρεια από το όρος Ίδη, από τα βουνά Αστερούσια στο νότο, και απλώνεται στο Λιβυκό Πέλαγος στα δυτικά (Watrous et al., 2005). Είναι μια λεκάνη από νεογενή και τεταρτογενούς περιόδους, που περικλείεται από βορρά προς νότο μεταξύ του ορεινού όγκου Ψηλορείτη και από την κορυφογραμμή των Αστερουσίων. Στο ανώτερο του τμήμα, ο Ψηλορείτης, περιλαμβάνει χαώδης σχηματισμούς και εδάφη με οφιόλιθους, ενώ το χαμηλότερο περιλαμβάνει μεσοζωικά ανθρακικά στρώματα. Γενικότερα, τα κύρια ανάγλυφα του νησιού της Κρήτης προήλθαν κατά τη διάρκεια της Νεογενούς περιόδου, ενώ έχει αναπτυχθεί και μια σειρά από τεκτονικές λεκάνες πληρωμένες από χονδρόκοκκες ηπειρωτικές καταθέσεις.

Κατά τη διάρκεια της Πλειο-Τεταρτογενούς περιόδου, τεκτονικά φαινόμενα δημιούργησαν συστήματα κανονικών ρηγμάτων (Angelier, 1979; Stewart and Hancock, 1991; Fassoulas, 2001), τα οποία δεσμεύουν τις κύριες κοιλάδες του νησιού, όπως την πεδιάδα της Μεσαράς, η οποία φιλοξενεί το μινωικό ανάκτορο της Φαιστού. Το ανάκτορο βρίσκεται στο λόφο Καστρί, ο οποίος έχει σχηματιστεί από ιζήματα, ενώ το κάτω μέρος του λόφου χαρακτηρίζεται από μια παχιά ακολουθία από υπόλευκη μάργα και λασπώδεις λεπτόκοκκους αργίλους.

Ακόμα εμφανίζονται λεπτά επίπεδα-στρώματα μαργαϊκού ασβεστόλιθου με εμφανίσεις πολλών στρωμάτων από κιτρινωπούς ασβεστολιθικούς-ψαμμίτες, ενώ στην κορυφή, καλά εδραιωμένοι ασβεστολιθικοί ψαμμίτες υπάρχουν και αποτελούν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο χτίστηκε το παλάτι της Φαιστού.

Τέλος, πολλές είναι και οι κατολισθήσεις που έχουν επηρεάσει τις βουνοπλαγιές από τους ιστορικούς χρόνους, λόγω της αργιλώδους φύση των ιζημάτων, και η υποκείμενη κοιλάδα χαρακτηρίζεται από ιζήματα που μεταφέρθηκαν από κατολισθήσεις. Κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς (Ολόκαινο), πολλές προσχωσιγενείς, κολλουβιακές και αιολικές εκδηλώσεις συνέβησαν στο δυτικό τμήμα της κοιλάδας της Μεσαράς, δημιουργώντας αποθέσεις που αποτελούνται κυρίως από μαργαϊκά ιζήματα με παρουσία αργιλικών ορυκτών. Αυτό το γεωλογικό περιβάλλον χαρακτηρίζει το ανώτερο στρώμα της περιοχής όπου πραγματοποιήθηκε η έρευνα.



Εικόνα 76: Θέση των γεωφυσικών τομών της έρευνας στο χώρο δοκιμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 1b. Τα κόκκινα ορθογώνια δείχνουν τις μαγνητικές και ηλεκτρομαγνητικές τομές της έρευνας, ενώ τα διακεκομμένα μπλε ορθογώνια δείχνουν τους τομείς που εμπλέκονται με ηλεκτρικές έρευνες, των οποίων ο προσανατολισμός υποδεικνύεται από τις πράσινα βέλη

### 3.3.3 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος EM

Η ηλεκτρομαγνητική έρευνα πραγματοποιήθηκε με μετρήσεις στο πεδίο της συχνότητας (FDEM), μέσω πηνίων πομπού και δέκτη. Πιο συγκεκριμένα δημιουργούνται ηλεκτρικά ρεύματα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους που προκύπτουν από την επαγωγή των χρονικών μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων στην επιφάνεια του εδάφους.

Ως μαγνητική μέθοδος, FDEM, είναι μια πολύ γρήγορη τεχνική η οποία είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την εμφάνιση θαμμένων ανθρωπογενών δομών από την άποψη της γεωφυσικής αντίθεσής τους με το πέτρωμα που τις περικλείει.

Στην αρχαιολογική έρευνα, η μέθοδος FDEM (Thiesson et al., 2009; Saey et al., 2012; Simon et al., 2012; De Smedt et al., 2014), γενικά προτιμάται αντί της μαγνητικής μεθόδου για τη διερεύνηση τοποθεσιών όπου οι διαφορές της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι πολύ χαμηλές για να ανιχνευθούν, ενώ παράλληλα υπάρχουν διαφορές υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης.

Αυτό ισχύει και πιο συγκεκριμένα στην παρουσία κατάλοιπων τοιχώματος, κατασκευασμένα από υψηλής αντίστασης ασβεστόλιθο που περικλείονται από ένα εξαιρετικά αγωγίμο περιβάλλον, π.χ. έδαφος ή αργιλώδη ιζήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη ικανότητα παρακράτησης νερού.

Οι μετρήσεις FDEM στη Φαιστό καταγράφηκαν με τη χρήση του Profiler EMP-400 πολλαπλών συχνοτήτων, από την GSSI (Nashua, NH, USA). Το Profiler είναι ένας νέας γενιάς επαγωγικός αισθητήρας EM με σταθερή απόσταση (1,21 m) μεταξύ του πομπού και του πηνίου του δέκτη, τα οποία απέχουν περίπου 69 20cm από την επιφάνεια του εδάφους.

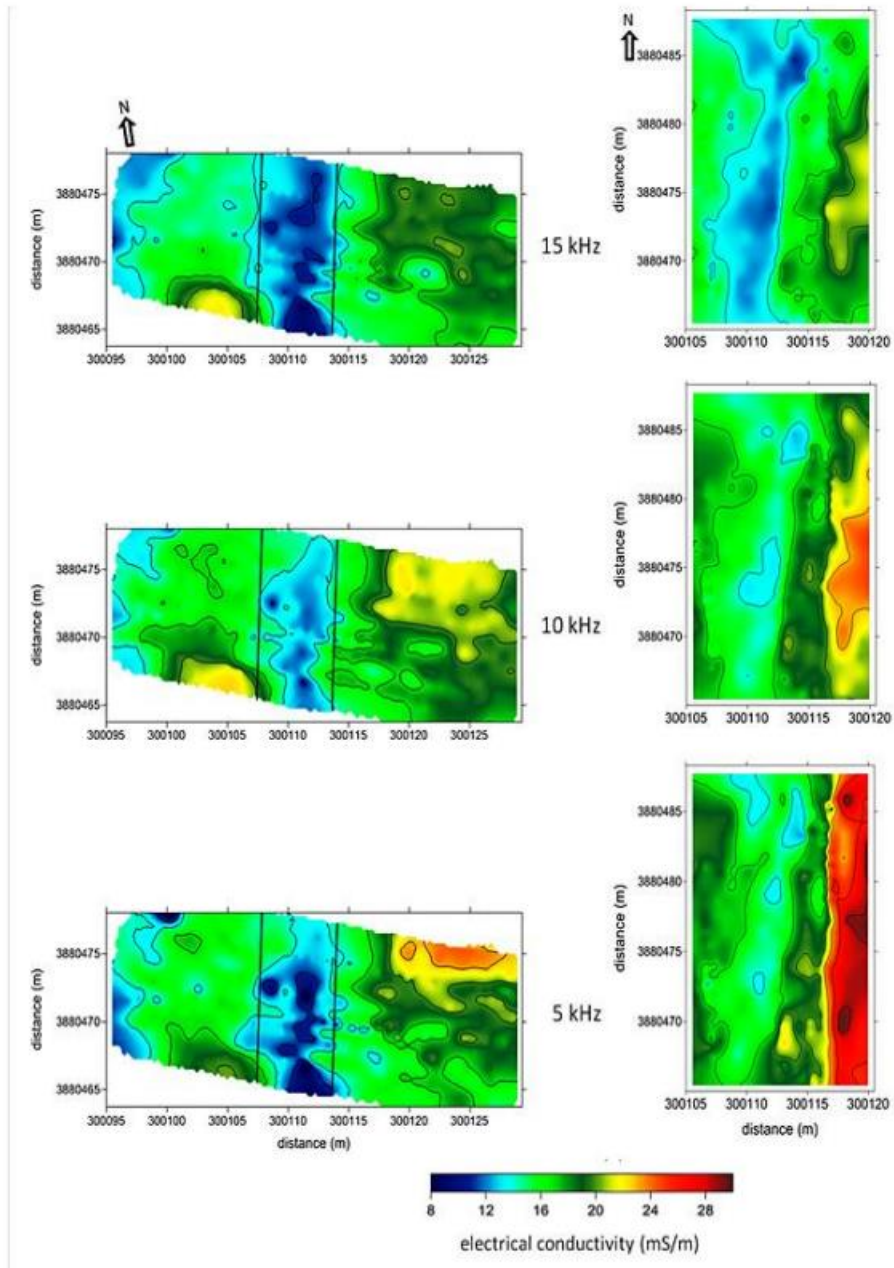
Η συσκευή λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (1-16 kHz), παρέχοντας εκτιμήσεις τόσο της εμφανούς αγωγιμότητας όσο και της ευαισθησίας του υλικού κάτω από την επιφάνεια του εδάφους καθώς και μεταξύ των πηνίων πομπού και δέκτη. Με το συγκεκριμένο μηχάνημα είναι ικανή η ταυτόχρονη διερεύνηση μέχρι και τριών διαφορετικών συχνοτήτων μεταξύ 1 kHz και 16 kHz, οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Οι συχνότητες 5, 10 και 15 kHz επιλέχθηκαν και στην συγκεκριμένη έρευνα. Όπως όλες οι συσκευές ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (EMI), το Profiler μετρά για κάθε συχνότητα τόσο τη σε φάση (πραγματική) συνιστώσα όσο και τη συνιστώσα τετραγωνισμού (φανταστική) του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από το πρωτογενή EM πεδίο. Η σε φάση συνιστώσα είναι γενικά πολύ ευαίσθητη σε αντικείμενα ή υλικά με μεγάλη μαγνητική επιδεκτικότητα, ενώ η συνιστώσα τετραγωνισμού είναι πολύ ευαίσθητη σε ηλεκτρικά αγωγίμα υλικά.

Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση σημάτων EM σε χαμηλή τιμή επαγωγής (της τάξεως των 104 Hz), η συνιστώσα σε φάση, εκφράζεται σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm), και σχετίζεται με την προφανή μαγνητική επιδεκτικότητα ενώ η συνιστώσα τετραγωνισμού, που εκφράζεται σε milliSiemens ανά μέτρο (mS / m), σχετίζεται με την φαινόμενη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Καθώς οι μετρήσεις σε φάση δεν προσφέρουν επαρκή ανάλυση για να πάρουμε ακριβείς και αξιόπιστες πληροφορίες, θα επικεντρωθούμε μόνο στη συνιστώσα-τετραγωνισμού.

Ο αριθμός και το μήκος των τομών EM είναι ίσες με αυτές των μαγνητικών, καθώς και η μεταξύ τους απόσταση, δηλαδή 11 τομές με κατεύθυνση A-Δ και μήκος 30 m πραγματοποιήθηκαν στον τομέα A και 15 τομές με προσανατολισμένο B-N και μήκους 20 m έγιναν στον τομέα B, με απόσταση 1m μεταξύ γειτονικών τομών. Οι αισθητήρες EM χρησιμοποιήθηκαν σε κατακόρυφη διάταξη για να επιτευχθεί μεγαλύτερο βάθος έρευνας.



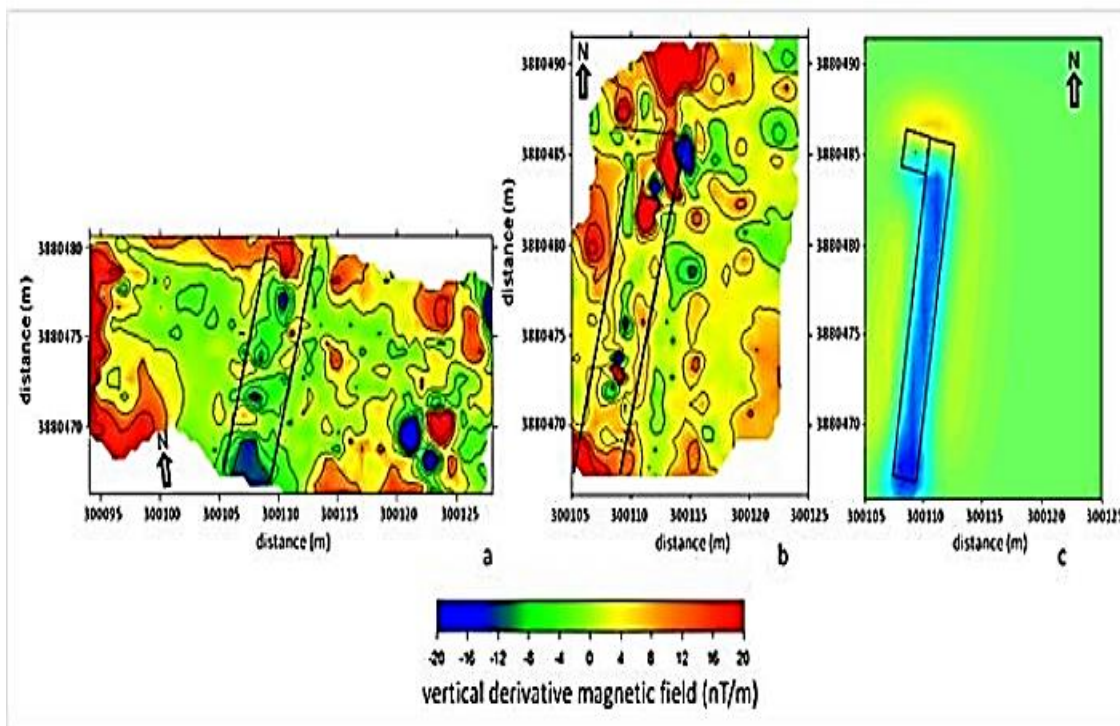
*Εικόνα 77:Χάρτες της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για κάθε επιλεγμένη συχνότητα (15 kHz, 10 kHz και 5 kHz)*



Στην εικόνα 77 (αριστερή πλευρά) διακρίνεται μια ανωμαλία χαμηλής αγωγιμότητας (με τις μαύρες γραμμές) η οποία χαρακτηρίζει το κεντρικό τμήμα του τομέα Α σε όλες τις συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν.

Αυτή η περιοχή, χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές αντίστασης και αντιστοιχεί στην περιοχή όπου υπάρχει ευθυγράμμιση ασθενών μαγνητικών διαφορών (βλέπε παρακάτω σχήμα τέρμα αριστερά), υποδηλώνοντας την παρουσία θαμμένου ασβεστολιθικού τοίχου, κατασκευασμένου από ελαφρώς μαγνητικά υλικά, μέσα σε ένα λασπο-αργιλώδες περιβάλλον.

Τέλος, η φαινόμενη αγωγιμότητα του τομέα Β (δεξιά πλευρά), επιβεβαιώνει την αρχική υπόθεση. Πράγματι, παρατηρείται μια εμφανής μείωση των τιμών αγωγιμότητας στο μεσαίο τμήμα του συνόλου του τομέα, κάτι που υποδηλώνει τη δομή τοιχώματος που εκτείνεται κατά τη διεύθυνση Β-Ν. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι το πως για το μαγνητικό χάρτη του τομέα Β (μεσαίο σχέδιο), ο προσανατολισμός μιας τέτοιας ανωμαλίας, η οποία στρέφεται προς τα δυτικά στο βορειότερο τμήμα του τομέα Β, και είναι 72 ολοφάνερη στο χάρτη αγωγιμότητας, λαμβάνεται τελικώς στην υψηλότερη συχνότητα (15 kHz) και όχι στην μικρότερη.



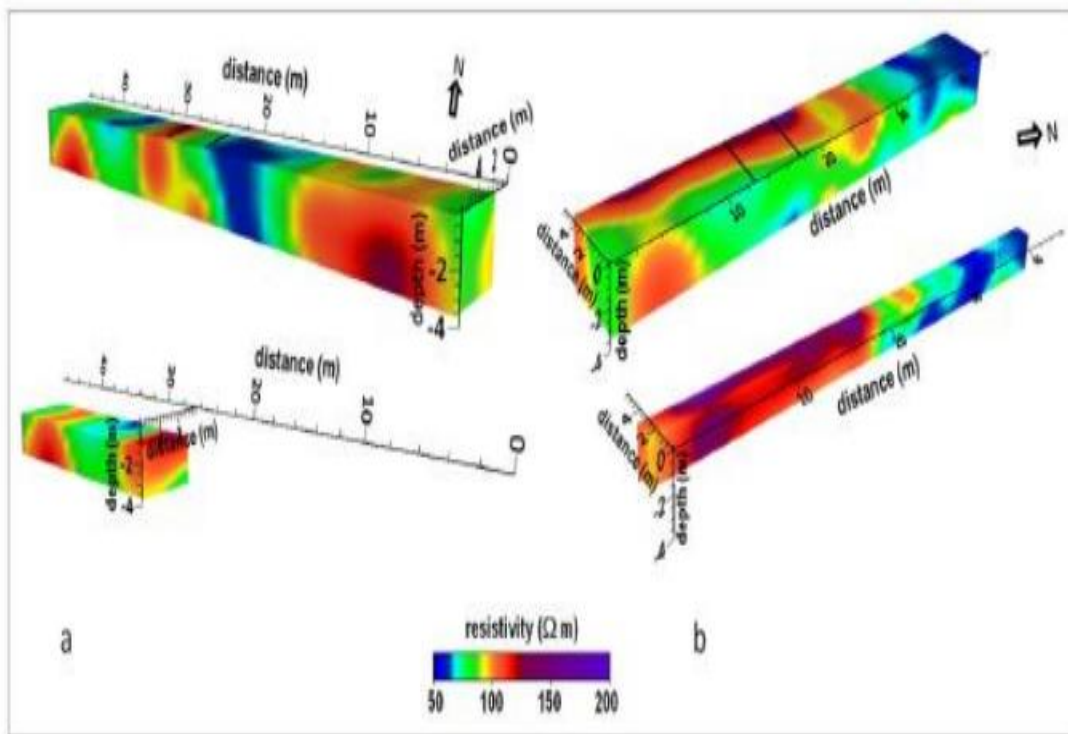
*Εικόνα 78:Χάρτες ανωμαλίας της κάθετης παραγώγου του μαγνητικού πεδίου που παρατηρείται. Οι με μαύρο συνεχείς γραμμές υποδεικνύουν χονδρικά τα όρια πιθανός θαμμένου τοίχου.(c) Συνθετικός χάρτης της κάθετης παραγώγου μαγνητικό πεδίο που παράγεται από δύο πρισματικές πηγές (μαύρα ορθογώνια) χαρακτηρίζεται από μια ασθενές αρνητική μαγνητική αντίθεση. Οι πηγές (2 m πλάτος κατά 18 μέτρα μήκος και 2 m πλάτος με μήκος 2 m) έχουν την κορυφή τους σε 2m κάτω από την επιφάνεια μέτρησης, δηλαδή περίπου 1,5 m από το επίπεδο της επιφάνειας.*

### 3.3.4 Ερμηνεία δεδομένων έρευνας

Η προκαταρκτική έρευνα με τα EM περιέγραψε σε βάθος, μια πολύ εμφανής ανώμαλη κατανομή των τιμών αγωγιμότητας στο κεντρικό τμήμα των δύο κλάδων A και B (εικόνα 77). Αυτή η ανώμαλη συμπεριφορά συσχετίζεται καλά με τα αποτελέσματα της υψηλής ανάλυσης EPT έρευνας, το οποίο σχεδιάστηκε με βάση των μαγνητικών και των EM αποτελεσμάτων, στα οποία φαίνεται επιμήκης δομή υψηλής ειδικής αντίστασης, πλάτους περίπου 2 m, από την επιφάνεια μέχρι το βάθος των 1,4m (Σχήμα εικόνα 79 το b).

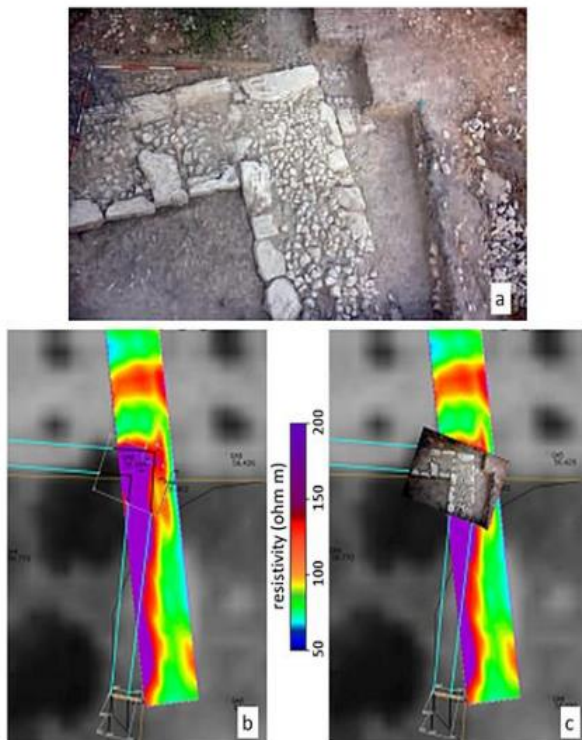
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που έδωσαν τα EPT με αυτά των EM χαρτών αγωγιμότητας, αποδεικνύεται ότι το βάθος έρευνα είναι περίπου 0-2 m για κάθε (Εικόνα 79 το b).

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της EPT περικλείουν όντως τη δομική οριοθέτηση της ανιχνευόμενης αντίστασης στη βόρεια κατεύθυνση, η θέση της οποίας καταγράφει με άριστο τρόπο τη μαγνητική ανωμαλία που αποδεικνύεται στα αποτελέσματα της μαγνητικής έρευνας (Α-Δ μαύρη γραμμή στην Εικόνα 78 το b).



*Εικόνα 79: Ογκομετρική όψη της τρισδιάστατης (3D) αναστροφής των δισδιάστατων δεδομένων φαινομένης αντίστασης που παρατηρήθηκαν στον τομέα C (α) και D (β). Οι μαύρες γραμμές υποδεικνύουν την περιοχή επικάλυψης μεταξύ των τομέων C και D. Τα στοιχεία για τον όγκο, εκθέτονται επίσης, με αποκόμματα επιπέδων που δίνει την δυνατότητα απεικονίσεις ορθογώνιων τμημάτων προς την κατεύθυνση των προφίλ μετρήσεις σε βάθος 1,4 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (b.g.l.)*

Η αρχική υπόθεση επιβεβαιώνεται με την παρουσία ενός θαμμένου τοίχου από ασβεστόλιθο, όπου προέκυψε από τα αποτελέσματα μιας δοκιμαστικής ανασκαφής (Εικόνα 80), η οποία αποκάλυψε ότι σε βάθος 1,4 m, μεγάλα τμήματα ενός τοίχου, περίπου 2m σε πάχος, ο οποίος χτίστηκε από μπλοκ ασβεστόλιθου (Bredaki et al., 2011).



*Εικόνα 80: (a) Φωτογραφία του πέτρινου ασβεστολιθικού τοίχου που έφερε στο φως η αρχαιολογική ανασκαφή στον τομέα A (b) Οριζόντια τομή των στοιχείων αντίστασης που εξάγονται από τα στοιχεία σε βάθος 1,4 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους προεξέχοντας πάνω από την επιφάνεια της περιοχής έρευνας (τομέας D). (c) Φωτογραφία του τοίχου ανακάλυψης επάνω στο οριζόντιο τμήμα που φαίνεται στο (b), η οποία αποδεικνύει σαφώς την τέλεια ταύτιση της γεωμετρίας του τοίχου με τη δομή υψηλής αντίστασης που προσδιορίστηκε από την τομογραφία ηλεκτρικής αντίστασης (ERT).*

Πλήρωση με επιτόπου μικρές πέτρες και από χώμα, θα μπορούσε να εξηγήσει την παρατηρούμενη σε βάθος μείωση της αντίστασης, λόγω της κατακράτησης του νερού στο διάστημα ανάμεσα των πετρών. Το εύρημα της ανασκαφής, επιτρέπουν να καθοριστεί με ακρίβεια τμήμα της δυτικής οχύρωσης και ταυτόχρονα προσφέρει πληροφορίες για το που στρίβει ο τοίχος της δυτικής πλευράς της πόλης. Ειδικότερα, κάποια αντικείμενα που έχουν ανακτηθεί (π.χ. ένα μικρό φλιτζάνι και αμφορέας ή υδρία), που αποτελούνται από μαγνητισμένο υλικό, ίσως μπορούν να εξηγήσουν τις μαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούνται κατά μήκος της διατομής που οριοθετεί τη από ασβεστόλιθο (τοίχος).

### 3.3.5 Συμπεράσματα των ερευνών

Όπως τα μαγνητικά έτσι και τα ηλεκτρομαγνητικά EM σαν μέθοδοι, δεν απαιτούν άμεση επαφή με το έδαφος, επιτρέποντας ταυτόχρονη γρήγορη εξερεύνηση δύο τομέων, στους οποίους εντοπίστηκαν οι ενδιαφέρουσες ανωμαλίες.

Ειδικότερα, η χρήση των πολλαπλών συχνοτήτων των EM επέτρεψε να εντοπιστούν ανώμαλες τάσεις των ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων των θαμμένων όγκων. Συνοπτικά, η έρευνα έδωσε σαφή ένδειξη της γωνίας μιας επιμήκουσ δομής με κατεύθυνση N-B που χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές αντίστασης και χαμηλής μαγνήτισης.

Οι βαθιές παραλλαγές των παρατηρούμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών παραμέτρων συσχετίζονται με μια δομή τοίχου κατασκευασμένη από ασβεστολιθικό υλικό διαστρωματωμένο με χονδροειδείς πέτρες και υγρά εδάφη. Οι επακόλουθες αρχαιολογικές ανασκαφές, των οποίων η θέση και η γεωμετρία σχεδιάστηκαν με βάση τις λεπτομερείς ενδείξεις της έρευνας, αποκάλυψαν μεγάλους τομείς (πλάτους περίπου 2 m) μιας οχύρωσης που περιτριγυρίζεται με τοίχο, η οποία είναι χρονολογικά σύμφωνη με τις ιστορικές πηγές για την καταστροφή της Φαιστού το 150 π.Χ.

### 3.4 Η χρήση της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό τάφων και την χαρτογράφηση νεκροταφείων, Ocmulgee National Monument, Georgia USA

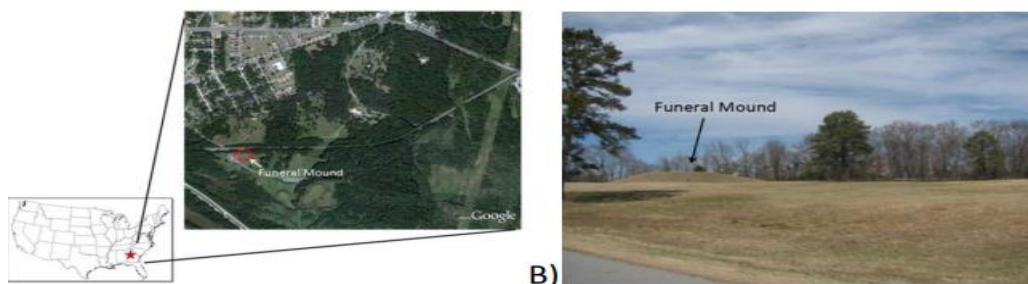
(DANIEL P. BIGMAN, 2010)

#### 3.4.1 Γενικά

Το Οκμούλγκι είναι το τέταρτο σε μέγεθος μεγαλύτερο ανάχωμα των Ανατολικών ΗΠΑ. Υπάρχουν αποδείξεις ανθρώπινης κατοίκησης για πάνω από 12.000 χρόνια, από την παλεοινδιάνικη περίοδο μέχρι και τον Αμερικανικό εμφύλιο. Την περίοδο που οι αποικίες των ευρωπαίων άρχισαν να εμφανίζονται στις Ηνωμένες Πολιτείες, δημιουργήθηκε το έθνος των ινδιάνων, του οποίου η παράδοση αναφέρει ότι:

- ο “στο Οκμούλγκι υπήρχαν 2 καταυλισμοί ινδιάνων, αναγκασμένοι να μεταναστεύσουν λόγω της εξάπλωσης των ευρωπαίων κατά τον 17<sup>ο</sup> και 18<sup>ο</sup> αιώνα.”

Γενικότερα, ιδιαίτερης σημασίας δεν ήταν τα αναχώματα αλλά το νεκροταφείο που βρίσκεται στην νοτιοδυτική γωνία του καταυλισμού. Το νεκροταφείο (λεγόμενο και funeral mound) έχει επίπεδη κορυφή και κυλινδρική δομή και χτίστηκε σε επτά διαφορετικές φάσεις. Στην περιοχή του Οκμούλγκι η μεγαλύτερη πυκνότητα τάφων ανακαλύφθηκε και βρίσκεται σε αυτήν την κατασκευή, καθώς και την περιοχή γύρω από αυτήν. Σε ότι αφορά τις γεωφυσικές μεθόδους που μπορούν να ανακαλύπτουν και να χαρακτηρίζουν νεκροταφεία και τάφους, παλαιότερα ειδικά σε αρχαιολογικές εφαρμογές, πολύ δημοφιλής ήταν και είναι η μέθοδος των ηλεκτρομαγνητικών EM. Τα τελευταία χρόνια, οι ηλεκτρικές τομογραφίες και τα γεωραντάρ έχουν γίνει τα βασικά εργαλεία έρευνας και χαρτογράφησης προϊστορικών και ιστορικά ενδιαφερόντων κοιμητηρίων. Στην περιοχή του νεκροταφείου του Οκμούλγκι, έγινε χαρτογράφηση του έτσι ώστε να βρεθούν τάφοι και αρχαία πολιτισμικής αξίας και να παρουσιαστούν τα θετικά της γεωφυσικής μεθόδου των ηλεκτρομαγνητικών ως βασικής μεθόδου για την χαρτογράφηση νεκροταφείων.



Εικόνα 81:Α) Αεροφωτογραφία του Οκμούλγκι, Β) το ανάχωμα κοιτάζοντας προς τον βορρά



### 3.4.2 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος EM αποκλειστικά, διότι χρειαζόταν μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων, καθώς τα υλικά που βρίσκονται μέσα στους τάφους (οστά, κεραμικά δοχεία κ.ά.) δεν είναι αγωγίμα.

Αντιθέτως, το έδαφος στην περιοχή αποτελείται από άργιλο και αυτομάτως όπως γνωρίζουμε είναι αγωγίμο. Η άργιλος στο Οκμούλγκι έχει βάθος μέχρι 3μέτρα και από κάτω βρίσκεται η κόκκινη άργιλος της πολιτείας της Georgia. Η άργιλος έχει μικρό πορώδες και μεγάλο ποσοστό κατακράτησης νερού, οπότε και οι τάφοι θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερο πορώδες, το οποίο θα είναι γεμάτο με αέρα ο οποίος έχει και υψηλή ηλεκτρική αντίσταση.

Το όργανο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι το GEM-300 της GSSI, Inc με χαρακτηριστικά και ρυθμίσεις ως εξής:

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

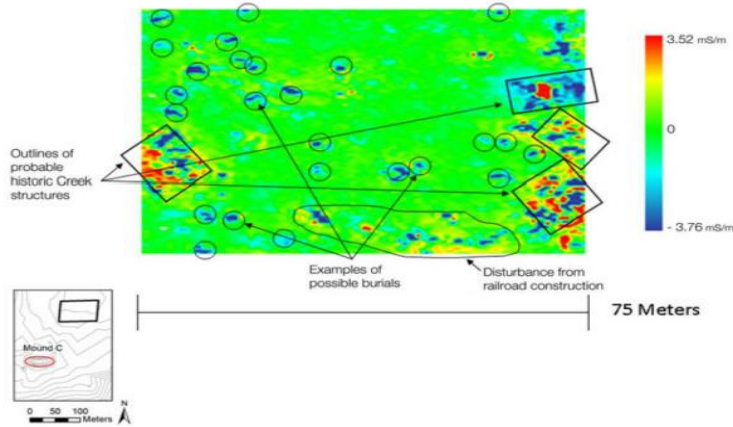


*Εικόνα 82: GEM 300 EM*

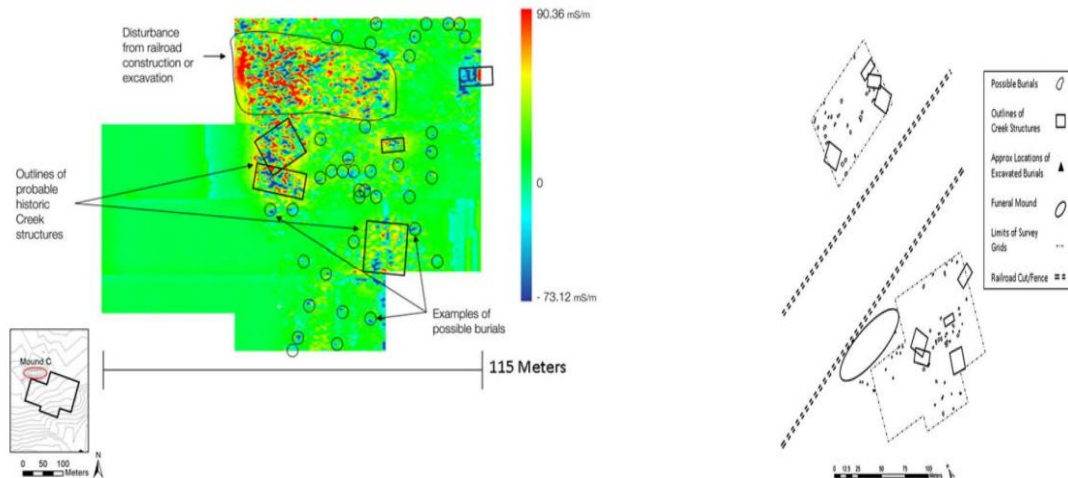
### 3.4.3 Αποτελέσματα ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Οι μετρήσεις έγιναν σε 2 περιοχές:

- περιοχή έρευνας block 1 με έκταση 8750 m<sup>2</sup> που βρίσκεται στην νοτιοανατολική γωνία του αναχώματος
- περιοχή έρευνας block 2 με έκταση 3750 m<sup>2</sup> που βρίσκεται βορειοανατολικά του αναχώματος σε απόσταση περίπου 100 m



**Εικόνα 83:** Περιοχή έρευνας block 2, με κύκλους φαίνονται πιθανοί τάφοι, με ορθογώνιο τα πιθανά όρια των αρχαίων δομών, με ακανόνιστη γραμμή πιθανή ύπαρξη σιδηροδρομικής γραμμής λόγω επανατοποθέτησης χώματος από τις εκσκαφές



**Εικόνα 84:** Περιοχή έρευνας block 1, με κύκλους φαίνονται πιθανοί τάφοι, με ορθογώνιο τα πιθανά όρια των αρχαίων δομών, με ακανόνιστη γραμμή πιθανή ύπαρξη σιδηροδρομικής γραμμής λόγω επανατοποθέτησης χώματος από τις εκσκαφές/

**Εικόνα 85:** Ψηφιοποιημένος χάρτης της περιοχής με χρήση δεδομένων αγωγιμότητας από το block 1 & block 2

### 3.4.4 Συμπεράσματα έρευνας

Μετά το πέρας της έρευνας και αφού είχε χαρτογραφηθεί το νεκροταφείο (Εικόνα 85) και είχαν τοποθετηθεί τα όριά του, έγιναν και κάποιες ανασκαφές στα σημεία που θεωρούσαν πιθανόν να υπάρχουν αρχαίοι τάφοι και τελικά βρέθηκαν συνολικά 60 από αυτούς ενώ και σε μερικές περιπτώσεις βρέθηκαν μαζί και κρανία ή μόνο ανθρώπινα δόντια.

Συμπερασματικά, το όργανο GEM-300 δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο για να διακρίνει την διαφορά σε αυτά π.χ. δόντια και κρανία και του soil matrix. Πέρα από αυτό το μειονέκτημα που έχει ως όργανο, η αναλογία τάφοι, ευρήματα – μη τάφοι είναι 10 προς 1, γεγονός που αποδεικνύει ότι είναι πολύ αξιόπιστο για την χαρτογράφηση και έρευνα αρχαιολογικών χώρων ή δομών.

Σε ορισμένες περιπτώσεις που δεν βρέθηκαν τάφοι, πιθανότατα αυτό να οφείλεται σε κατασκευές της ινδιάνικης εποχής, οι οποίες αφού ήταν κατεξοχήν ξύλινες έχουν διαλυθεί στο περιβάλλον έδαφος ή οφείλονται στα όρια της σιδηροδρομικής γραμμής που κατασκευάστηκε στην περιοχή και στην επανατοποθέτηση του χώματος που είχαν σκάψει για να την κατασκευάσουν (αδρόκοκκο υλικό πλήρωσης εκσκαφής που καταστρέφει τις μετρήσεις και δεν γίνεται εύκολα διαφοροποίηση).

Τέλος, είναι γνωστό και αποδείχθηκε, ότι με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο παίρνονται ταχύτερες μετρήσεις και πολύ αξιόπιστες, οι οποίες είναι ικανές να χρησιμοποιηθούν στις αρχαιολογικές μελέτες. (Bigman,2010)

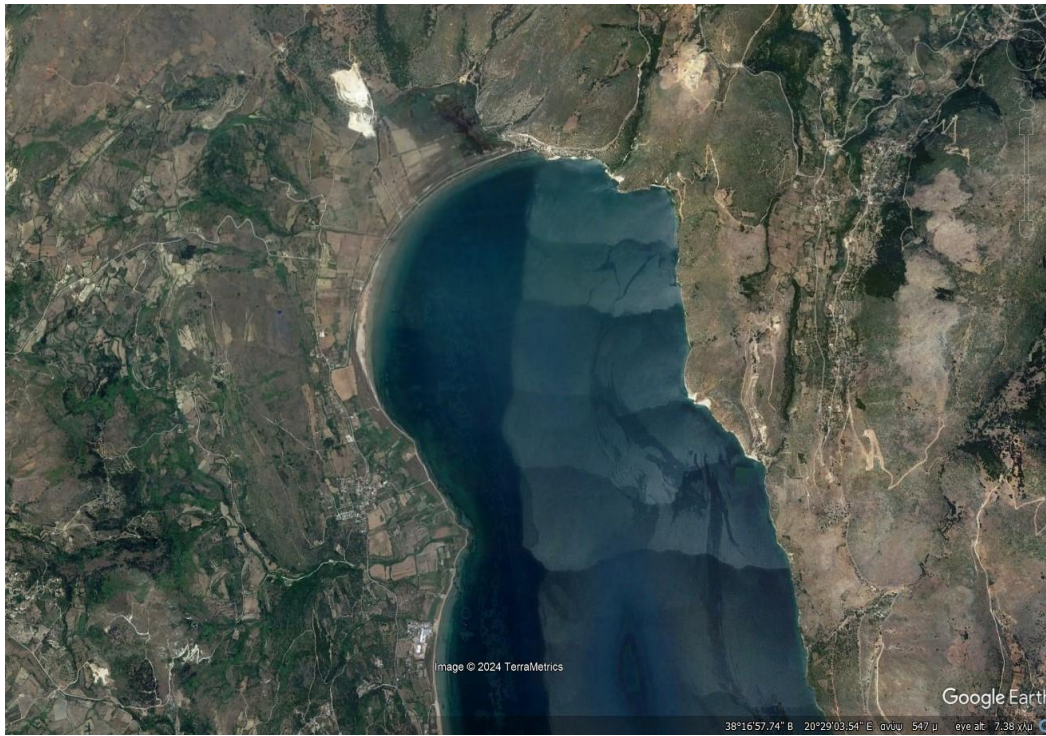


## **4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ** **ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΤΗΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ** **ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΛΙΒΑΔΙ**

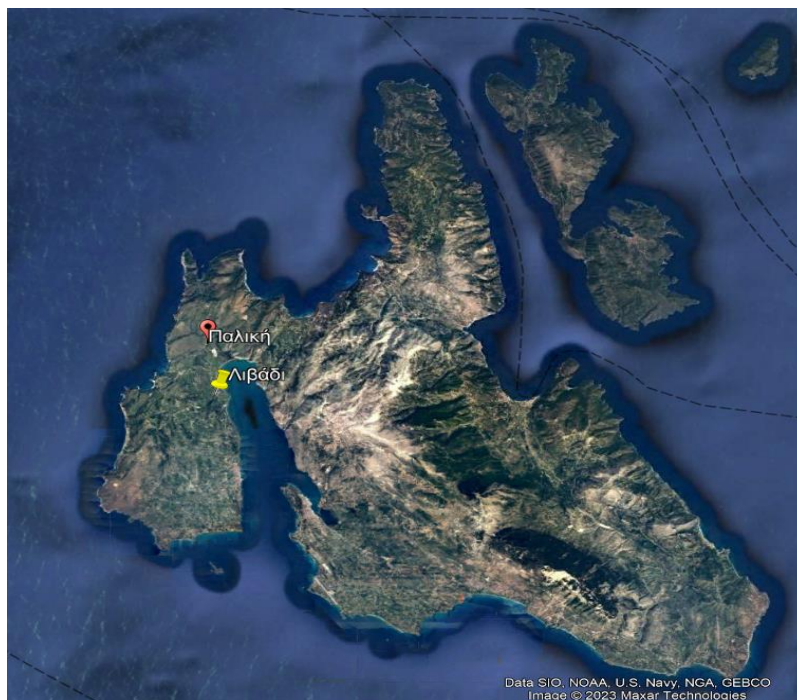
### **4.1 Γενικά**

Η τοποθεσία της περιοχής έρευνας βρίσκεται στη νήσο της Κεφαλληνίας και συγκεκριμένα στην θέση Λιβάδι στην μεριά του Ληξουρίου. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας της περιοχής όσο και για την πιθανή εύρεση ανθρωπογενών δομών που να συνάδουν με την ύπαρξη αρχαίου λιμανιού ή μώλου, είτε τέτοια κατανομή ιζημάτων που να έχουν επηρεαστεί από αυτές τις πιθανές ανθρωπογενείς δομές.

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



**Εικόνα 86: Η τοποθεσία της θέσης Λιβάδι, Κεφαλληνίας μέσω Google Earth στην χερσόνησο της Παλικής**



**Εικόνα 87: Η περιοχή της Παλικής (περιοχή ενδιαφέροντος για τεκτονική ανάλυση που περιλαμβάνει την θέση ερευνών στο Λιβάδι) και το χωριό Λιβάδι, Κεφαλληνίας**



*Εικόνα 88: Συνολικές εικόνες της περιοχής Λιβάδι στην οποία πραγματοποιήθηκαν και οι γεωφυσικές μετρήσεις*

## 4.2 Ιστορία και Αρχαιολογία

Το χωριό Λιβιάδι, Κεφαλληνίας βρίσκεται στην χερσόνησο της Παλικής, στο σημείο που βρίσκεται και ο υδροβιότοπος Λιβιάδι. Ο υδροβιότοπος αυτός είναι ένα από τα σημαντικότερα οικοσυστήματα που υπάρχουν στο νησί. Υποστηρίζεται πως σε αυτόν, εκβάλλουν πάνω από εκατό ρυάκια και χείμαρροι ενώ ταυτόχρονα αποτελεί και καταφύγιο για πολλά είδη σπάνιων πτηνών και πανίδας.

Κοντά στο χωριό Λιβιάδι όπως και στον υδροβιότοπο, βρίσκονται και δύο άλλα χωριά τα Βλυχάτα και τα Κουβαλάτα. Στην συγκεκριμένη περιοχή, εντοπίζονται τα ερείπια της Μονής Κυράς των Αγγέλων, μία αγροτική έπαυλη του 17<sup>ου</sup> αιώνα που έχει αναγνωριστεί και ως διατηρητέο μνημείο, ενώ εκεί βρίσκονται και οι πρώην αγροτικές φυλακές που βρίσκονταν σε χρήση μέχρι και τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα.

Παλαιότερα, η πόλη κέντρο που κατοικούνταν ήταν η Πάλη, χτισμένη στην υψηλότερη κορφή μιας σειράς μέτριων ασβεστολιθικών υψωμάτων που υψώνονταν κατά μήκος της ακτής, περίπου ενάμιση χιλιόμετρο βόρεια από το Ληξούρι. Η ευφορία του εδάφους της περιοχής και τα άπλετα στρέμματα στάχια που υπήρχαν και αποτελούσαν νόμισμα της εποχής, προσέφεραν τις προϋποθέσεις για πρώιμη οικιστική εγκατάσταση στην περιοχή.

Η πρώιμη αυτή εγκατάσταση ήρθε να επαληθευτεί από την εύρεση θραύσματος κρατήρα του τελευταίου τετάρτου του 8<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ., σε ένα σύντομο πρόγραμμα συνεργασίας της Ιταλικής Αρχαιολογικής Σχολής Αθηνών με την Εφορεία Αρχαιοτήτων, στη θέση Καραβοστάσι, που παρά τις επιχώσεις αποτελεί μέχρι και σήμερα φυσικό λιμένα της Πάλης.

Η πόλη των Πάλεων, ήταν μία από τις τέσσερις πόλεις της τότε Κεφαλληνίας (η λεγόμενη τετράπολις). Η Πάλη, όπως και άλλες πόλεις του νησιού, ήταν αυτόνομη, με δικό της νόμισμα και δική της εξωτερική πολιτική. Σύμφωνα με τον Πολύβιο, η Πάλη διέθετε φυσική οχύρωση, περικλειόταν από γκρεμούς αλλά και θάλασσα, όπως και από τείχη. Αναφέρεται ακόμα πως η χώρα της Πάλης είχε και άφθονο σιτάρι. Ήδη από τα μέσα του 5<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ., η Κεφαλληνία, εξαιτίας της γεωγραφικής θέσης της, ήταν νήσος με στρατηγική σημασία, για αυτό και βρέθηκε στο επίκεντρο συγκρούσεων των ηγεμονίδων πόλεων.

Γύρω στο 456 π.Χ. οι Αθηναίοι στρέφονται δυτικά και επιχειρούν να πάρουν στον έλεγχο τους τα νησιά του Ιονίου και το ίδιο το πέλαγος. Η Πάλη, έχοντας μία φιλο-ειρηνική στάση απέναντι στην Κόρινθο τουλάχιστον μέχρι και το 431 π.Χ., συνέχισε την πολιτική αυτή ακόμα και όταν οι Αθηναίοι έθεσαν ολόκληρο το νησί στην κυριαρχία τους. Οι Αθηναίοι επιδίωκαν να αποσπάσουν από την Κόρινθο τις βάσεις που είχε στο Ιόνιο και να δημιουργήσουν κλοιό γύρω από την Πελοπόννησο. Η Κεφαλληνία θα λειτουργούσε ως ορμητήριο επιδρομών στις ακτές της Πελοποννήσου.

Ακόμα, η Κεφαλληνία θα μπορούσε να εξασφαλίσει στους Αθηναίους καλά λιμάνια, πλοία αλλά και οπλίτες για τις επιχειρήσεις απόβασης εναντίων των Σπαρτιατών και των συμμάχων τους. Μετά το τέλος του Πελοποννησιακού πολέμου, η Κεφαλληνία θα περάσει στον έλεγχο της Σπάρτης για ένα χρονικό διάστημα.



Όμως, με την δημιουργία της Β' Αθηναϊκής Συμμαχίας, η Κεφαλληνία θα βρεθεί και πάλι στην σφαίρα επιρροής της Αθήνας. Παραμένει ωστόσο ασαφές αν εκτός από την πόλη των Πρόννων, που είναι και η μόνη που αναφέρεται στο Ψήφισμα του Αριστοτέλους, αν και οι υπόλοιπες πόλεις αποτελούσαν μέλη της Συμμαχίας.

Αυτή η "ασάφεια" επιβεβαιώνει για μία ακόμη φορά την ανεξαρτησία των πόλεων της Κεφαλληνίας και την διαφοροποίησή τους ως προς την εξωτερική τους πολιτική.

Περί τις αρχές του 2<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ. τα Ιόνια νησιά, όντας πύλες εισόδου προς την Ανατολή, θα βρεθούν στο στόχαστρο της επεκτατικής πολιτικής των Ρωμαίων. Η συνεργασία των Κεφαλλήνων με τους Αιτωλούς, όσο και η δράση κεφαλληνιακών πειρατικών ομάδων στο Ιόνιο, δημιουργούσαν προβλήματα στους Ρωμαίους. Επιπλέον, η στρατηγική θέση που κατείχε το νησί, το καθιστούσε το καταλληλότερο νησί για την κύρια βάση του ρωμαϊκού στόλου στην περιοχή της Δυτικής Ελλάδας.

Η ευκαιρία για κατάκτηση της Κεφαλληνίας δόθηκε με τον Αιτωλικό πόλεμο (190π.Χ.-189π.Χ.), όπου ο Ρωμαίος ύπατος Μάρκος Φούλβιος Νομίλιωρ εκστρατεύει το 189π.Χ. στην Ελλάδα και όπως αναφέρεται από τον Λίβιο, η κατάληψη της Κεφαλληνίας ήταν και ο κύριος στόχος της εκστρατείας.

Το τέλος του πολέμου βρήκε τους Αιτωλούς στην θέση του ηττημένου και την σύναψη συνθήκης ειρήνης μεταξύ των εμπόλεμων δυνάμεων, από την οποία και σκόπιμα εξαιρέθηκε η Κεφαλληνία. Οι Ρωμαίοι αποβιβάστηκαν στο νησί, απαίτησαν την παράδοση των πόλεων την οποία και τελικά πέτυχαν. Ολόκληρη η νήσος της Κεφαλληνίας βρισκόταν οριστικά επί ρωμαϊκής κυριαρχίας παραμένοντας μια σημαντικότερη ναυτική βάση για τους Ρωμαίους.

Όσο αφορά το καθεστώς που ίσχυε στην Κεφαλληνία επί της κατοχής της, οι μαρτυρίες είναι λιγιστές και συχνά αντιφατικές. Ο Πλίνιος αναφέρει ότι η Κεφαλληνία ήταν *libera civitas*, ενώ σύμφωνα με τον Στράβωνα το νησί έγινε κτήμα του Γάιου Αντώνιου, που έμεινε εξόριστος στο νησί και ήθελε να ιδρύσει νέα πόλη. Στους αυτοκρατορικούς χρόνους, ο Αδριανός φέρεται να δωρίζει το νησί στην Αθήνα. Ωστόσο, περί το 131 με 132 π.Χ. η Πάλη αναφέρεται και πάλι ως <<"ελευθέρα και αυτόνομος">>.

## 4.3 Γεωλογία της περιοχής

### 4.3.1 Γεωλογία Ιθάκης και Κεφαλληνίας

Στη γεωλογική δομή των νήσων Κεφαλληνίας και Ιθάκης λαμβάνουν μέρος αλπικοί σχηματισμοί, καθώς και νεότεροι πλειοτεταρτογενείς (μεταλπικοί) σχηματισμοί, οι οποίοι επικάθονται ασύμφωνα στους πρώτους (ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ-ΔΙΚΑΙΟΥΛΙΑ 1965, BP Co. 1971, BP Co et al 1985, ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ 1991).

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

**Αλπικοί σχηματισμοί** :Οι αλπικοί σχηματισμοί ανήκουν στις δύο πιο εξωτερικές ενότητες των Ελληνίδων, την ενότητα Παξών, η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της νήσου και είναι σχετικά αυτόχθον και την Ιόνια ενότητα, η οποία δομεί το νότιο-ανατολικό τμήμα της νήσου και ολόκληρη την νήσο Ιθάκη, ενώ είναι ακριβώς πάνω στην προηγούμενη.

**Αργιλο-κλαστική φλυσγική σειρά** :Αποτελεί την κανονική εξέλιξη της κύριας ανθρακικής σειράς με πάχος που ανέρχεται σε μερικές εκατοντάδες μέτρα. Συμμετέχουν κυρίως μάργες με ενδιαστρώσεις ψαμμιτών, αργίλων, ολιγόμεικτων λατυποπαγών και κροκαλοπαγών. Η σειρά εμφανίζεται στη χερσόνησο Παλικής, στην περιοχή του κόλπου του Αργοστολίου και όρμου Κατελειού, Ηλικία Λάγγιο - Μεσσήνιο (BP Co., 1971).

**Ανθρακική σειρά**:Η ανθρακική σειρά παρουσιάζει έντονη διαφοροποίηση στους ιζηματογενείς χαρακτήρες κατά τη διάρκεια του Κρητιδικού, η οποία υποχωρεί κατά το Τριτογενές.

Ειδικότερα έχουμε:

- Στο κεντρικό τμήμα της νήσου, υπάρχουν ρηχές φάσεις, όπως και βαθύτερες που χαρακτηρίζουν το περιθώριο μιας βραχύβιας κρητιδικής πλατφόρμας με πάχος ιζημάτων πάνω από 1000 m μόνο για το Άνω Κρητιδικό. Νηριτικοί ασβεστόλιθοι, βιοκλαστικοί και μικριτικοί ακολουθούμενοι από λευκούς μικριτικούς και δολομιτικούς ασβεστόλιθους μέσονωπαλιρροιακής πλατφόρμας με ίχνη ανάδυσης και με ενδιαστρώσεις βιοκλαστικών οριζόντων με ρουδιστές και οριζόντων με γαστερόποδα (BP Co., 1971)
- Στη χερσόνησο της Παλικής και στη χερσόνησο του Αργοστολίου υπάρχουν χαρακτηριστικές φάσεις ιδιαίτερα ρηχής νηριτικής παραμένουσας πλατφόρμας. Το πάχος των ιζημάτων ξεπερνά τα 1000 m για το Άνω Κρητιδικό - Παλαιόκαινο και αντιστοιχούν σε λευκούς εστρωμένους ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, δολομίτες αποσαθρωμένους με όψη κιμωλίας και ίχνη ανάδυσης και βιογενείς - βιοκλαστικούς περιωφαλώδεις ασβεστόλιθους.
- Στην περιοχή της χερσονήσου της Ερισσού και του όρους Καλού, στους βορειοδυτικούς πρόποδες της Αγίας Δυνατής και στις δυτικές προσβάσεις του Αίνου υπάρχουν φάσεις κυρίως του περιθωρίου, της κλιτύς και του πυθμένα μιας λεκάνης, ενώ στο μεγαλύτερο τους μέρος πελαγικές με συνολικό πάχος που ξεπερνά τα 1000 m για το Ανώτερο

Ιουρασικό - Αλβιο. Αντιπροσωπεύονται από εστρωμένους δολομίτες, ασβεστόλιθους και πυριτιόλιθους. Οι τελευταίοι μεταπίπτουν κατά τη διάρκεια του Αλβίου σε βιοκλαστικούς - λατυποπαγείς ασβεστόλιθους κλιτύς, ενώ πλευρικά αναπτύσσονται βιοκλαστικοί περιωφαλώδεις και μικριτικοί ασβεστόλιθοι ρηχής πλατφόρμας. Από το Τουρώνιο μέχρι το Ηώκαινο αναπτύσσονται έως και 600 m πελαγικοί λατυποπαγείς και τουρβιδιτικοί ασβεστόλιθοι κλιτύς. Ο πελαγικός χαρακτήρας των ιζημάτων ενισχύεται κατά το Ανώτερο Ηώκαινο - Ολιγόκαινο (BP Co., 1971).

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

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

**Πλειο-Καλάβρια σειρά :** Πρόκειται για θαλάσσια σειρά που αναπτύσσεται επικλυσιογενώς επί των σχηματισμών της ενότητας Παξών. Το πλάτος εμφάνισης κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 km περίπου, ενώ το πάχος μεταξύ 200 και 500 m. Η σειρά περιλαμβάνει στη βάση της (Κατ. Πλειόκαινο), ορίζοντες ολιγόμεικτων κροκαλοπαγών και λατυποπαγών, συμφυρματοπαγών ασβεστολιθών και συμπαγών ασβεσταρενίτων, στο ενδιάμεσο τμήμα της, ηλικίας Μέσου - Ανώτερου Πλειόκαινου, κυανές και κίτρινες μάργες με ιλυόλιθους, ενδιαστρώσεις ψαμμιτών, ασβεστολιθικών άμμων, κροκαλοπαγών και στο ανώτερο τμήμα της, ηλικίας Κατ. Πλειστοκαίνου - Καλαβρίου, αλλά και μάργες μέσα στις οποίες παρεμβάλλονται ενδιαστρώσεις ασβεστολιθικών άμμων και στη συνέχεια χονδρόκοκοι ασβεσταρενίτες απόσυρσης (BP Co., 1971).

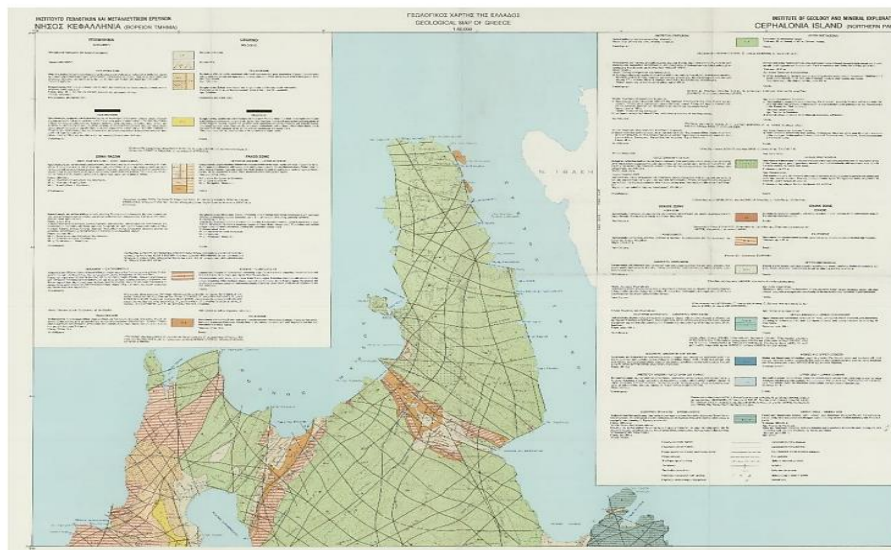
### **Σχηματισμοί Μέσου-Ανώτερου Πλειστόκαινου – Ολόκαινου**

Εμφανίζονται κυρίως στη χερσόνησο του Αργοστολίου- αεροδρομίου. Πρόκειται για σχηματισμούς ηπειρωτικού, σπάνια θαλάσσιου χαρακτήρα.



Διακρίνονται ως εξής σε:

- **Θαλάσσιοι ασβεστοαρενίτες:** Εμφανίζονται σε πολλές παράκτιες κυρίως περιοχές του νησιού με τη μορφή μικρού πάχους θαλάσσιων ασβεστοαρενιτών επίκλυσης με διασταυρωμένες στρώσεις και κατά τόπους βασικό κροκαλοπαγές. Η ηλικία τους είναι Παλαιο - Μιλάτσια (Μέσο Πλειστόκαινο) (UNDERHILL, 1989).
- **Μεσοπαγετώδεις αποθέσεις Μινδέλιου-Ρήσιου:** Πρόκειται για προϊόντα καρστικοποίησης και εξαλλοίωσης ασβεστόλιθων που εμφανίζονται με τη μορφή αργίλων απασβέστωσης μέσα σε ολίνες (UNDERHILL, 1989).
- **Λατυποπαγή πλαγιάς:** Στις πλαγιές του βυθίσματος μεταξύ των χωριών ΑγκώναΚοντογουράτα και Ζόλα καθώς και στον όρμο της Αγίας Κυριακής αναπτύσσονται, ασύμφωνα πάνω στις μειοκαινικές μάργες, λατυποπαγή του Μινδέλιου, που τα κατώτερα τους μέλη περικλείουν ασβεστολιθικά τεμάχια μέσα σε ένα κόκκινο ασβεστολιθικό ή ασβεστιτικό τσιμέντο.
- **Κώνιοι προσχώσεων Ρήσιου:** Τυπικές αποθέσεις παγετώδους περιόδου, περιόδου 97 Εικόνα 4.4: Γεωλογικός Χάρτης της ευρύτερης περιοχής της θέσης Λιβιάδι (τμήμα του Γεωλογικού χάρτη του ΙΓΜΕ) ρηξιστασίας, που αποτίθενται λόγω διάβρωσης στους πρόποδες των πλαγιών. Η βάση αυτών των κώνων αποτελείται από κόκκινες αργίλους με πυρίτιο και τεμάχια των υποκείμενων εξαλλοιωμένων θαλάσσιων ασβεστοαρενετών (UNDERHILL, 1989).
- **Σύγχρονοι σχηματισμοί:** Βρίσκονται διάσπαρτοι σε πολλά σημεία του νησιού. Στην περιοχή του αεροδρομίου και ΔΝΔ της Σκάλας απαντούν μικρού πάχους κόκκινοι αργίλοι άμμοι ηπειρωτικής προέλευσης καθώς και παράκτια κροκαλοπαγή και κόκκινες ασβεστολιθικές κρούστες, που είναι πιθανώς Βούρμιας ηλικίας. Στους δυτικούς πρόποδες του Αίνου εμφανίζονται με τη μορφή πλευρικών κορημάτων και κώνων προσχώσεων χειμάρρων.



Εικόνα 89: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Λιβιάδι, Κεφαλληνίας (ΙΓΜΕ)

### 4.3.2 Νεοτεκτονική Δομή Κεφαλληνίας και Ιθάκης

Η δομή των νήσων Κεφαλληνίας και Ιθάκης είναι το αποτέλεσμα επίδρασης πολλών διαδοχικών τεκτονικών παραμορφωτικών επεισοδίων συχνότερα συμπίεστικού χαρακτήρα, τα οποία έχουν διακοπεί από περιόδους αποσυμπίεσης των πετρωμάτων και λόγω επίδραση της βαρύτητας, φαινόμενα που συνδέονται με καθεστώτα εφελκυσμού.

Οι κύριες τεκτονικές μορφές που δημιουργήθηκαν κατά τη φάση της αλπικής παραμόρφωσης των νήσων, είναι γενετικώς συνδεδεμένες με την τοποθέτηση του καλύμματος της Ιόνιας ενότητας πάνω στην ενότητα Παξών κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο.

Συγκεκριμένα είναι:

- Εφιππεύσεις, αντίκλινα εφιππευσης και αντικλινικά δίδυμα εφιππευσης με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.
- Ανάστροφα ρήγματα με διεύθυνση είτε ΒΔ-ΝΑ, είτε ΝΔ-ΒΑ, ανοικτές πτυχές με άξονες με ίδιο προσανατολισμό μέσα στην ενότητα Παξών, που θεωρούνται παλαιότερες συνιζηματογενείς τεκτονικές δομές που κατά την περίοδο της ιζηματογένεσης καθόριζαν τις διάφορες παλαιογεωγραφικές περιοχές της Προαπούλιας πλατφόρμας. Σε ορισμένα ρήγματα (ρήγμα Αγίας Ευφημίας ΝΔ του όρους Καλό, ρήγμα Αίνου) παρατηρείται και μια οριζόντια συνιστώσα κίνησης εκτός από την αμιγώς εφιππευτική
- Κανονικά ρήγματα με διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ στην Ιόνια ενότητα. Αξονικά επίπεδα πτυχών και εφιππεύσεις παράλληλα με την κύρια τεκτονική επιφάνεια επώθησης της Ιόνιας ενότητας πάνω στην ενότητα Παξών. Στις προηγούμενες τεκτονικές μορφές του Κατ. Πλειόκαινου προστίθενται οι νεότερες μορφές (δομές) που συνδέονται με τα παραμορφωτικά επεισόδια του Πλειο-Πλειστοκαίνου (νεοτεκτονικές μορφές).

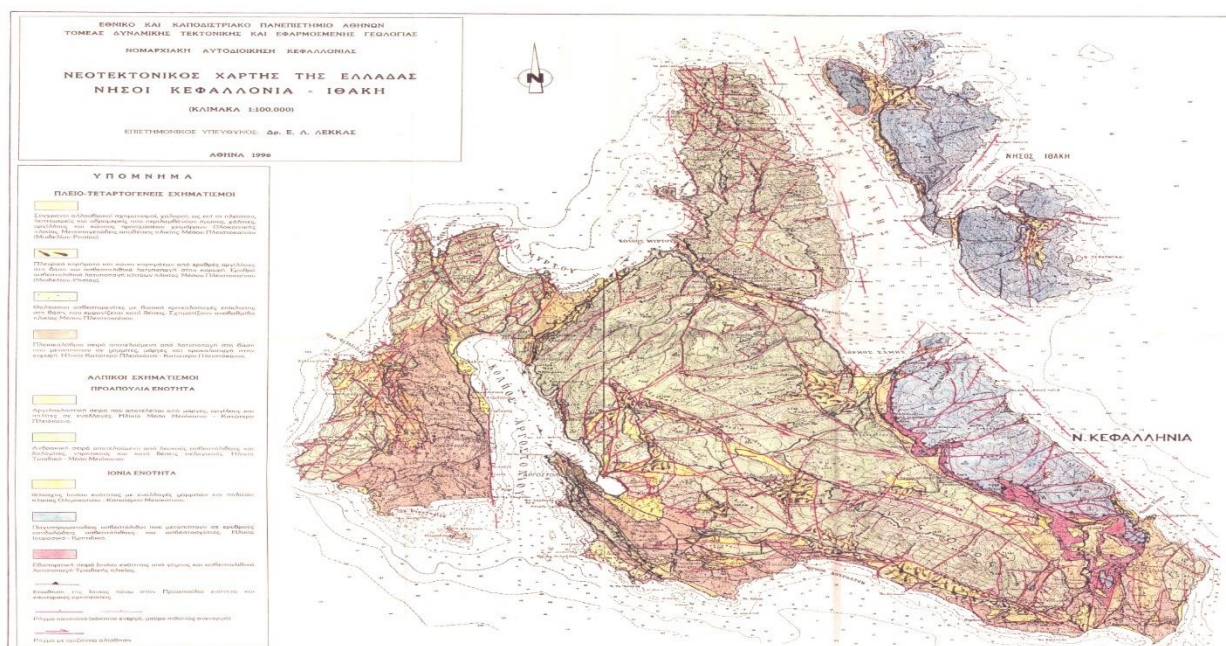
Οι νεοτεκτονικές μορφές διαμορφώνονται κυρίως από τα ρήγματα, τα οποία τέμνουν ή οριοθετούν τους γεωλογικούς σχηματισμούς (εξ' ολοκλήρου και ανεξαιρέτως) και τα ρηξιτεμάχη της νήσου. Πρόκειται για μεγάλη ποικιλία ρηγμάτων με άλμα από μερικά μέτρα έως μερικές δεκάδες μέτρα και με ολίσθηση τόσο με κατακόρυφη συνιστώσα όσο και με οριζόντια.

Τα ρήγματα που βρέθηκαν και αναγνωρίστηκαν και τα οποία αποδεικνύεται πως έχουν επαναδραστηριοποιηθεί ή δημιουργηθεί κατά την Πλειο-Τεταρτογενή περίοδο κατατάσσονται κατά σειρά σπουδαιότητας σε εφιππεύσεις και ανάστροφα, οριζόντιας ολίσθησης και τέλος σε κανονικά ρήγματα.

Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Έντονη κατά βάθος διάβρωση δομών που δημιουργήθηκαν από τις τεκτονικές παραμορφωτικές φάσεις του Κατώτερου Πλειόκαινου και Πλειστοκαίνου. Τα φαινόμενα αυτά εντοπίζονται κυρίως στις Δ και ΝΔ πλευρές των μορφολογικών εξάρσεων (όρος Αίνος, όρος Καλό, Χερσόνησος Παλικής) εκεί όπου διέρχονται οι σημαντικές τεκτονικές δομές και εκτελείται η μεγαλύτερη κίνηση, παραμόρφωση και κατακερματισμός των πετρωμάτων.

- Αναψώσεις γραμμών των ακτών που τοπικά φθάνουν ως και 100 m ύψος όπως παρατηρήθηκε στην παλαιοακτή του Κατώτερου Πλειστοκαίνου στην χερσόνησο Αργοστολίου (Μηνιές).
- Επαναδραστηριοποιήσεις και ανορθώσεις παλαιότερων κατωπλειοκαινικών πτυχώσεων (αντίκλινο Αίνου, Αργοστολίου-Μηνιών, Μεγάλης Ράχης, Κοντογουράτων, Καλού, χερσονήσου Παληκής) και δημιουργία νεότερων με απόκλιση από τις παλαιότερες διευθύνσεις (σύγκλινο κόλπου Αργοστολίου, Αηλιά - Κουοτουμπάρδι, αεροδρομίου) (Underhill 1989).
- Αναζωπυρώσεις παλαιότερων σημαντικών τεκτονικών δομών, κυρίως επιπεύσεων και αναστροφών ρηγμάτων (Αίνου, Αργοστολίου, Κοντογουράτων Αγκώνα, Αγίας Ευφημίας, Ασπρογέρακα-Παλαιάς Σκάλας, Παλαιόκαστρο, περιθώριου Ζακύνθου-Κεφαλλονιάς), δημιουργία νεότερων, χαρακτηριστικών στη περιοχή της χερσονήσου Αργοστολίου (Ακρωτήριο Λαρδηγός, Ξενοδοχείο Mediterranee, Ξενοδοχείο White Rocks, απόκρημνες παραλίες ΝΔ από το χωριό Μηνιές, περιοχή αεροδρομίου). Πολλά από τα παραπάνω ρήγματα, παλαιότερα και νεότερα, παρουσιάζουν και μία οριζόντια συνιστώσα κίνησης γεγονός που τα κατατάσσει στα πλαγιοαναστροφα και στις πλαγιοεπιπεύσεις (Αίνου, Αγίας Ευφημίας, Ζακύνθου-Κεφαλλονιάς). Ρήγματα με καθαρή οριζόντια ολίσθηση (strike slip) δρουνε αυτή τη περίοδο (Μηνιές, Φραγκάτα, Καμπούλια, Παλαιόκαστρο, χερσονήσος Παληκής) αλλά δεν φέρουν άκρας σημασίας.
- Ρήγματα κανονικά, διαπιστώθηκε με βεβαιότητα ότι έδρασαν εκ νέου στη ΝΑ απόληξη του Αίνου (τεκτονικό βύθισμα στο χωριό Αργίνια) (Underhill 1989)
- Μετατοπίσεις του υδρογραφικού δικτύου, από τον νότο (περιοχή Πάστρα και Παλαιάς Σκάλας, βύθισμα Κατελειού) προς τα Α και ΒΑ (Πόρος), λόγω σημαντικών κινήσεων που έδρασαν αυτή την περίοδο. Ως αποτέλεσμα ήταν η πλήρης διάβρωση των πλειοπλειστοκαινικών ιζημάτων προς τα βόρεια του νησιού ώστε να μην απαντώνται σήμερα βορειότερα του Ασπρογέρακα (ΝΑ Κεφαλονιά).



Εικόνα 90: Νεοτεκτονικός Χάρτης Νήσων Κεφαλληνίας και Ιθάκης (Λέκκας)

#### 4.3.2.1 Τεκτονική επισκόπηση στην Περιοχή Λιβιάδι- Χερσόνησος Αργοστολίου-Χερσόνησος Ληξουρίου, Κεφαλληνίας

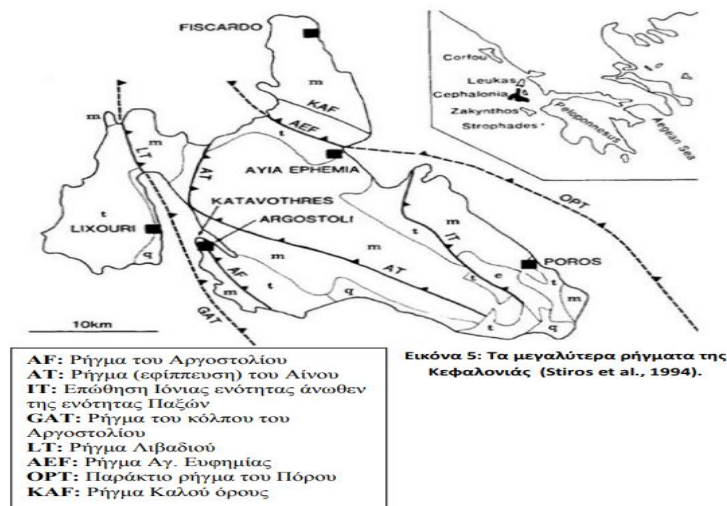
Πέρα από την περιοχή του Αίνου, συναντάμε καθεστώς συμπίεστικής τεκτονικής ακόμα και στην δυτική Κεφαλονιά. Στην περιοχή Λιβιάδι, που βρίσκεται μεταξύ του Κόλπου Αγίας Κυριακής και της περιοχής Ληξουρίου, συναντώνται πτυχές με άξονες σε διεύθυνση Β-Ν και τουλάχιστον ένα μεγάλης έκτασης ανάστροφο ρήγμα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 90).

Παρόλα αυτά, όσο πιο μακριά βρίσκεται κανείς από το ρήγμα της περιοχής Αίνου προς τα δυτικά, ο αριθμός των μεσοσκοπικών πτυχών όπως και η πυκνότητα του σχισμού των πετρωμάτων, μειώνονται δείχνοντας εξασθένηση του καθεστώτος συμπίεστικής τεκτονικής.

Στην περιοχή του Αργοστολίου, οι κυριότερες τεκτονικές δομές είναι δύο μεγάλης έκτασης ρήγματα:

- ο το ρήγμα του Αργοστολίου
- ο το ρήγμα <<White Rocks>> (επονομαζόμενο από το ξενοδοχείο πλησίον του οποίου εντοπίζεται τμήμα του ρήματος, Underhill 1989)

Πιο συγκεκριμένα, το ρήγμα του Αργοστολίου ξεκινά από το βόρειο τμήμα της περιοχής Αργοστολίου και ενώνεται με το ρήγμα <<White Rocks>> στα νότια της Κεφαλονιάς, κοντά στο ακρωτήριο Λιάκκα. Πιθανότατα το ρήγμα αυτό να ενώνεται και με το προαναφερθέν ανάστροφο ρήγμα της περιοχής Λιβιάδι μέσω του κόλπου Λιβαδιού.



Εικόνα 91: Τα ρήγματα της Κεφαλληνίας (Διπλωματική Εργασία- Εκτίμηση Σεισμικής Επικινδυνότητας νήσων Κεφαλλονιάς και Ιθάκης-Μπονάτης Παύλος)



Ακόμα, στρωματογραφικές και ιζηματολογικές μελέτες έδειξαν ότι το ρήγμα του Αργοστολίου έδρασε ως ανατολικά βυθιζόμενο κανονικό ρήγμα, αρχικά κατά το Μεσοζωικό και έπειτα κατά το Άνω Μειόκαινο.

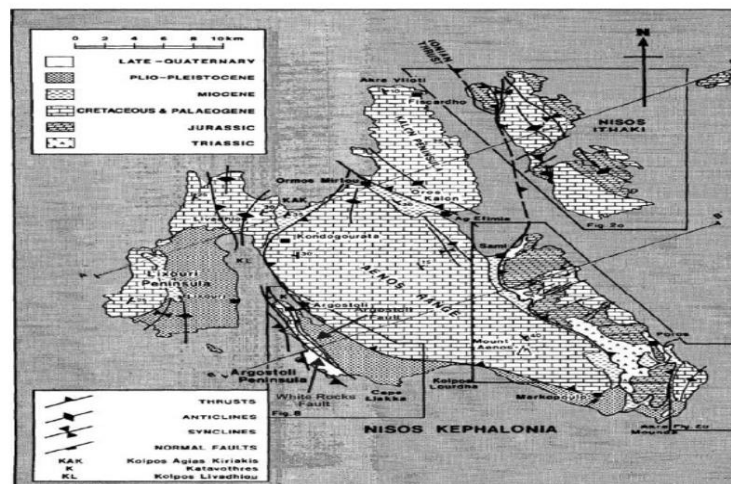
Μια γωνιώδης ασυμφωνία του Κατώτερου Πλειοκαίνου διαχωρίζει τις Άνω-Μειοκαινικές ακολουθίες της χερσονήσου του Αργοστολίου από τις Μεσο - Πλειοκαινικές ριπιδιακές ακολουθίες που βρίσκονται στο άνω τέμαχος του ρήγματος.

Η ασυμφωνία αυτή που προκύπτει, είναι πιθανό να δείχνει την τεκτονική ανύψωση και την στροφή των σχηματισμών ως επερχόμενο αποτέλεσμα του καθεστώτος τεκτονικής αστάθειας που επικρατεί στην περιοχή και το οποίο με την σειρά του οφείλεται στην επώθηση της Ιόνιας ζώνης επάνω στην Προ-Απούλεια.

Συνεπώς, η παρουσία της ασυμφωνίας αποδεικνύει ότι το καθεστώς συμπίεστικής τεκτονικής είναι ευρύτερο του ανατολικού κομματιού της Κεφαλονιάς και φτάνει μέχρι το δυτικό τμήμα της. Οπότε και το ρήγμα αυτό ξεκίνησε την λειτουργία του ως κανονικό ρήγμα και έπειτα ενεργοποιήθηκε ξανά κατά το Κατώτερο Μειόκαινο ως επώθηση λόγω τουκαθεστώτος συμπίεστικής τεκτονικής.

Το ρήγμα ‘‘White Rocks’’ αποτελεί μια επώθηση μικρής γωνίας κλίσεως και το επίπεδο της κλίνει ανατολικά. Στην οροφή της επώθησης βρίσκονται ασβεστόλιθοι Κρητιδικής και Παλαιογενούς ηλικίας και στην βάση βρίσκονται Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα.

Το ότι το επίπεδο της επώθησης ‘‘White Rocks’’ είναι σχεδόν παράλληλο σε σχέση με το επίπεδο της επώθησης του Αργοστολίου με τη γωνία βύθισης του ρήγματος Αργοστολίου να είναι μεγαλύτερη, καθώς και η προφανής απουσία κάποιας συνιζηματογενούς κίνησης στην επώθηση αυτή, φανερώνουν ότι η επώθηση αυτή αναπτύχθηκε ως επακόλουθο της δημιουργίας λοξοτμήσεων στη βάση του επαναδραστηριοποιημένου ρήγματος Αργοστολίου (Underhill 1989).



**Εικόνα 92:** Απλοποιημένος τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης της Κεφαλληνίας (από Underhill, 1989). Thrusts: ανάστροφα ρήγματα Anticlines: αντίκλινα Synclines: σύγκλινα Normal Faults: κανονικά ρήγματα ΚΑΚ: Κόλπος Αγίας Κοριακής Κ: Καταβόθρες ΚΛ: Κόλπος Λιβαδίου Cape Liakka: ακρωτήριο Λιάκκα Triassic: Τριαδικό Jurassic: Ιουρασικό Cretaceous and Paleogene: Κρητιδικό και Παλαιογενές Miocene: Μειόκαινο Plio-Pleistocene: Πλειο-Πλειστόκαινο Late-Quaternary: Άνω-Τεταρτογενές White Rocks: Επώθηση, Argostoli Fault: Επώθηση Αργοστολίου (αποτελείται από δύο κλάδους οι οποίοι συγκλίνουν στα νότια του νησιού)

## 5. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΛΙΒΑΔΙ, ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Γενικά για την έρευνα

Κάθε γεωφυσική έρευνα στην ύπαιθρο διαμορφώνεται με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και τον στόχο.

Τα κριτήρια επιλογής των μεθόδων είναι τα εξής:

- Σκοπός της έρευνας (δηλαδή αν ψάχνουμε μεταλλικό στόχο, ανθρωπογενή κατασκευή κτλ)
- Ποιο είναι το σημείο αναζήτησης και ποια η γεωλογία της περιοχής (υγρασία, καταλληλότητα εδάφους για διέλευση των γεωφυσικών οργάνων).
- Το μέγεθος αλλά και το βάθος στο οποίο βρίσκονται οι στόχοι που ψάχνουμε

Έχοντας απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα, μπορούμε με ασφάλεια να καθορίσουμε τις γεωφυσικές μεθόδους που θα χρησιμοποιήσουμε, τον συνδυασμό αυτών αλλά και τις δυσκολίες που θα συναντήσουμε όπως την ανακρίβεια του οργάνου, τα σφάλματα κάθε μεθόδου, την κακή προσβασιμότητα κτλ.

Συγκεκριμένα για την γεωφυσική έρευνα στο Λιβάδι:

- **Στόχος:** Η εύρεση της στρωματογραφίας της περιοχής και η ύπαρξη τυχόν ανθρωπογενών δομών που παραπέμπουν σε κατασκευές αρχαίου λιμανιού ή μώλου όπου τοποθετούσαν φορτία αλλά και βάρκες κ.ά.
- Η περιοχή μελέτης βρισκόταν κοντά στην ακτογραμμή οπότε και οι μετρήσεις έχουν προσανατολισμό σε σχέση με αυτήν. Οι κατευθύνσεις ήταν παράλληλα στην ακτογραμμή αλλά και κάθετα σε αυτήν για να πετύχουμε μεγαλύτερο εύρος της περιοχής και να φανεί καλύτερα ο στόχος
- Η περιοχή έρευνας ήταν ένα χωράφι, με περιφέρεια ορθογωνίου, το οποίο είχε μία ανομοιογένεια στην κλίση N-B με μεγαλύτερη ένταση NA
- Η περιοχή βρίσκεται ακριβώς μπροστά από έναν χείμαρρο που έχει φέρει πλημμυρικό υλικό, ένα λατομείο που λειτουργεί χρόνια και ένα ρήγμα που ξεκινάει από τον βράχο στα δυτικά του λατομείου και βυθίζεται στην περιοχή μελέτης και συνεχίζει προς τα ΒΑ του σημείου (για αυτό το λόγο και η περιοχή αυτή της χερσονήσου της Παλικής είναι ιδιαίτερα σεισμογενής)
- Η περιοχή μελέτης βρισκόταν κοντά σε δέντρα τα οποία έχουμε εξαιρέσει και από τις μετρήσεις ιδιαίτερα τον ηλεκτρομαγνητικών καθώς χανόταν το σήμα του GPS κάτω από αυτά

Οι μέθοδοι που αξιοποιήθηκαν με την σειρά που έγιναν ήταν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος με βάθος διασκόπησης 6 μέτρων και 3 μέτρων αντίστοιχα, η μαγνητική μέθοδος, το γεωραντάρ για το οποίο δεν θα αναφερθούμε ενδελεχώς στην συγκεκριμένη αναφορά αλλά και η ηλεκτρική μέθοδος με την οποία και συνοψίζεται η γεωφυσική έρευνα.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε έχοντας προτεραιότητα την κάλυψη όσο γίνεται μεγαλύτερης επιφάνειας της περιοχής έρευνας, δεδομένων των συνθηκών και της γεωμορφολογίας της θέσης της. Επιπλέον, για να αποφευχθεί η επίδραση της κατεύθυνσης των μετρήσεων στα αποτελέσματα, σε συγκεκριμένες θέσεις, έγιναν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις με διαφορετική κατεύθυνση για να έχουμε επικάλυψη (παράλληλα και κάθετα στην ακτογραμμή). Στόχος ήταν όπως αναφέραμε η αποτύπωση της στρωματογραφίας της περιοχής και ο εντοπισμός πιθανών ανθρωπογενών δομών.

Σε κάθε περίπτωση η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος δίνει σημαντικά στοιχεία για την περιοχή ενώ τα μαγνητικά έρχονται να συμπληρώσουν τα όσα είδαμε. Το γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε για την δυνατότητα του να καταγράφει περιθλάσεις από τοπικούς στόχους στην περίπτωση τοιχίων ή συνεχών ανακλάσεων σε περιπτώσεις ανθρωπογενών αποθέσεων αλλά και ανακλάσεις που είναι διακριτές ανά χρονικά διαστήματα και υποδηλώνουν στρωματογραφικές ασυνέχειες. Η ηλεκτρική μέθοδος από την άλλη χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση του υπεδάφους με δισδιάστατη και τρισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή. Αυτή η γεωηλεκτρική τομή αποτυπώνει με μεγάλη λεπτομέρεια το υπέδαφος και μέσω αυτής μπορούν να εντοπιστούν στρωματογραφικές ασυνέχειες και τοπικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης που ήταν και το σημείο ενδιαφέροντος στην συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε για να διευρύνει τα αποτελέσματα αλλά και να βοηθήσει στην λήψη αποφάσεων για την διαχείριση της περιοχής μετά την έρευνα.

Τέλος, για να υποστηρίξουμε τα αποτελέσματα αλλά και την ερμηνεία τους, παραθέτουμε και λίγα ιστορικά και πολιτιστικά στοιχεία για τα αρχαία λιμάνια και τους μώλους της Ελλάδας εκείνης της εποχής.

Για αρχή, η γεωφυσική αυτή έρευνα έγινε με πρωτοβουλία του Odysseus Foundation και οι αρχαιολογικές έρευνες έχουν ως στόχο την εποχή που καταγράφει ο Όμηρος τις περιπέτειες του Οδυσσέα, οπότε και αναφερόμαστε στον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., την εποχή του τυράννου Πεισίστρατου περί το 560-510 π.Χ. σύμφωνα με αναφορές.

Μέχρι και τον 7<sup>ο</sup>-8<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. η κατασκευή των λιμανιών παρέμενε απaráλλακτη. Πιο συγκεκριμένα, προτού εφευρεθεί το υδραυλικό κονίαμα, που άλλαξε ριζικά την κατασκευή των λιμανιών από τα ελληνιστικά χρόνια, η κατασκευή των μερών του λιμανιού όπως ο μώλος γινόταν από ξύλο, λίθους ή θα λαξεύονταν πάνω σε βράχια (συμπαγείς κατασκευές).

Κατά κανόνα δημιουργούνταν από ξύλο, ενώ από λίθο δημιουργούνταν τα τοιχία του μώλου, χώροι αποθήκευσης εμπορευμάτων αλλά και φάροι και όλα βρίσκονταν κοντά στην ακτή, με τις προκυμαίες να βρίσκονται κατά κανόνα εφαιπτόμενες με αυτήν με 1 μέτρο περίπου σε ύψος. Γενικότερα όλες οι κατασκευές δεν απείχαν πολύ από το υπεδαφικό υψόμετρο εκτός από τους φάρους.



Αυτό που χρειάζεται ωστόσο να επισημανθεί είναι ότι οι μόλοι δεν ήταν ιδιαίτερα ανθεκτικοί πριν τα ελληνιστικά χρόνια καθώς δεν δημιουργούνταν από κάποιο συνδετικό υλικό. (Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή επιστημών του Ανθρώπου, Τμήμα Ιστορίας, Αρχαιολογίας και Κοινωνικής Ανθρωπολογίας, Διπλωματική Εργασία-“ Τα αρχαία λιμάνια των Κυκλάδων στους ιστορικούς χρόνους”-Χαραλαμπίδου Εύα, Βόλος 2003)

Έχοντας όλα αυτά κατά νου, μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Οι γεωφυσικές μέθοδοι δεν μπορούν αν ανιχνεύσουν το ξύλο το οποίο θα έχει προ πολλού καταστραφεί από τα πλημμυρικά φαινόμενα του χειμάρρου
- Οι τυχόν ανθρωπογενείς κατασκευές θα περιλαμβάνουν συμπαγές υλικό, πλίνθους ή λίθους που παραπέμπουν σε κατασκευές μόλων και λιμενικών τμημάτων της εποχής
- Δεν υπάρχει πιθανότητα εύρεσης μεταλλικής κατασκευής καθώς τις αλυσίδες τις χρησιμοποιούσαν στα λιμάνια του 8<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ.

Παρακάτω φαίνεται το παλαιό λιμάνι Κεγχρεών Κορινθίας όπου φαίνονται οι πλίνθινες κατασκευές των μόλων των λιμανιών της εποχής που αναφερόμαστε.



*Εικόνα 93: Λιμάνι Κεγχρεών. Απεικόνιση των πλίνθινων τοιχίων για την κατασκευή των αρχαίων λιμανιών του 6ου αιώνα π.Χ.*

## 5.2 Μαγνητική & Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

### 5.2.1 Γενικά

Οι δύο πρώτες μέθοδοι που εφαρμόστηκαν στην αρχή της έρευνας ήταν η ηλεκτρομαγνητική με βάθος 6 και με βάθος διασκόπησης 3 μέτρα και στην συνέχεια η μαγνητική μέθοδος για να συμπληρώσει τα υπάρχοντα δεδομένα των EM.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για να καλύψει όλο το εύρος της περιοχής μελέτης και για να υπάρξει όσο γίνεται μεγαλύτερη κάλυψη οι μετρήσεις έγιναν παράλληλα αλλά και κάθετα στην ακτογραμμή. Η μαγνητική μέθοδος ακολούθησε τις ίδιες κατευθύνσεις για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Παρακάτω φαίνονται οι μετρήσεις που λάβαμε μέσω surfer 2016 και στο google earth:



*Εικόνα 94: Μετρήσεις μαγνητικών μέσω Surfer 2016 στο Google Earth (Λιβάδι,Κεφαλληνία)*





*Εικόνα 95: Μετρήσεις EM παράλληλα και κάθετα στην ακτογραμμή στα 6 μέτρα βάθος διασκόπησης στο Google Earth*



*Εικόνα 96: Μετρήσεις EM παράλληλα και κάθετα στην ακτογραμμή στα 3 μέτρα βάθος διασκόπησης στο Google Earth*

Τέλος, να αναφερθεί ότι η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος είναι από τις πιο χρήσιμες μεθόδους σε αρχαιολογικές έρευνες καθώς δείχνει την ευρύτερη μαγνητική εικόνα της περιοχής και βοηθάει στο να ξεχωρίσουν μαγνητικές και μη μαγνητικές (π.χ. αρχαιολογικές) κατασκευές σε μεγάλη έκταση. Τα μαγνητικά έγιναν για να συμπληρώσουν και να επιβεβαιώσουν τους στόχους μαζί με έναν βαρυτικό χάρτη.

## 5.2.2 Εξοπλισμός

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2 με συνολικό βάθος διασκόπησης τα 3m και CMD-4 , με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m, αντίστοιχο του Geonics EM-31.

Το όργανο αυτό παρέχει τη λειτουργία σύνδεσης με όργανο GPS ώστε να παρέχει στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.

Στην παρούσα γεωφυσική έρευνα χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία συνεχούς μέτρησης με GPS



*Εικόνα 97: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-4 σε βάθος διασκόπησης 6m , στη θέση Λιβάδι*





*Εικόνα 98: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις με τη χρήση οργάνου CMD-2 σε βάθος διασκόπησης 3 m , στη θέση Λιβάδι*

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο αποτελείται από την μονάδα ελέγχου και το σύστημα πομπού δέκτη.

Πιο συγκεκριμένα:

- Η Μονάδα ελέγχου Attachable CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη.

Ακόμα υπάρχει δυνατότητα 5 μετρήσεων οι οποίες είναι οι εξής:

- **Άμεση υποστήριξη του δέκτη GPS.** Γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το υψόμετρο εμφανίζονται και αποθηκεύονται αυτόματα.
- **Χειροκίνητη μέτρηση** - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πιέζοντας το πλήκτρο. Η θέση του σημείου ενημερώνεται αυτόματα στο προκαθορισμένο δίκτυο ή μπορεί να εισαχθεί απευθείας. Κάθε σημείο μπορεί να μετρηθεί και πάλι ή να παραλειφθεί και να ολοκληρωθεί με ένα σχόλιο.
- **Συνεχής μέτρηση** - Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Οι θέσεις για το προφίλ καθορίζεται από τα σήματα μήκους με συνεχή συνυπολογισμό των θέσεων των μεμονωμένων μετρήσεων.
- **GPS χειροκίνητη μέτρηση** - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πατώντας το πλήκτρο. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
- **Λειτουργία αναζήτησης** - τα δεδομένα λαμβάνονται συνεχώς, αλλά δεν αποθηκεύονται.

Σε αυτό το σύστημα πομπού δέκτη λαμβάνονται μετρήσεις της **ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας** αντίστοιχα με ακρίβεια μέτρησης:  $\pm 4\%$  σε  $50\text{ m S/m}$  και μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας τα  $10\text{ Hz}$ .

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

Στην μαγνητική μέθοδο χρησιμοποιήθηκε το πρωτονικό μαγνητόμετρο που είναι το πιο διαδεδομένο όργανο για διασκοπήσεις υπαίθρου και για συνεχείς παρατηρήσεις. Το όργανο είναι εξοπλισμένο με δυο αισθητήρες, οι οποίοι μετράνε ταυτόχρονα το ολικό πεδίο σε δύο διαφορετικά ύψη και στη συνέχεια βρίσκουμε τη διαφορά των τιμών ως προς την απόσταση μεταξύ τους, που ορίζεται ως κατακόρυφη βαθμίδα (μέτρηση gradient). Το μαγνητόμετρο ακόμα, διαθέτει ένα βέλος πάνω στον αισθητήρα, το οποίο και πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με το γεωγραφικό Βορρά, κατά τη λήψη των μετρήσεων.

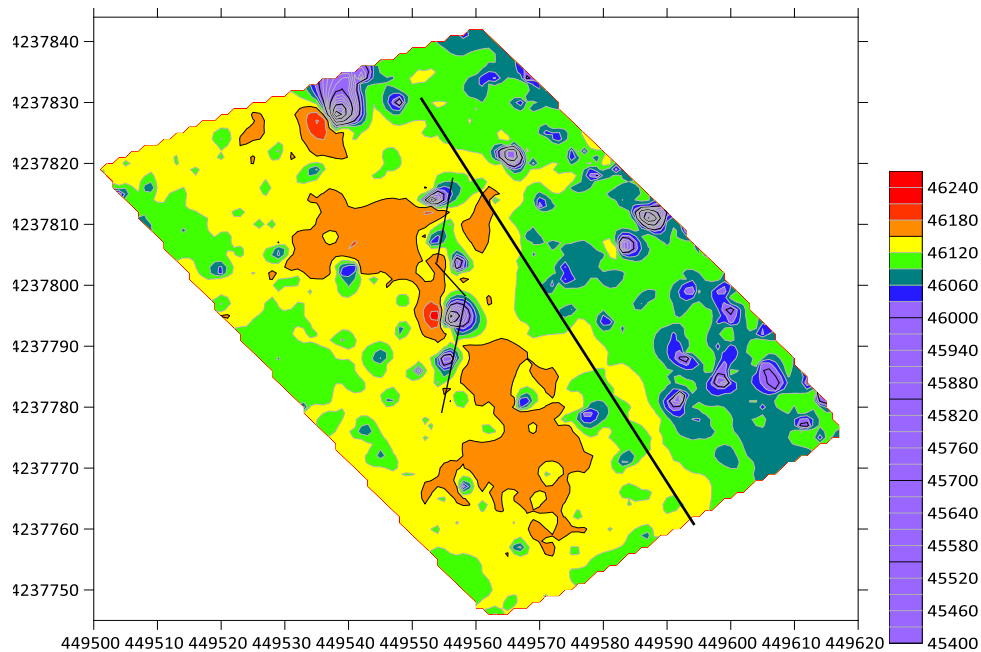
Τα μαγνητικά όργανα μέτρησης συνήθως μετρούν το γεωμαγνητικό πεδίο ή την οριζόντια ή την κάθετη συνιστώσα του και διαθέτουν ακρίβεια  $\pm 0.1\text{ nT}$ .



*Εικόνα 99: Πρωτονικό μαγνητόμετρο την ώρα των μετρήσεων στην θέση Λιβιάδι*

### 5.2.3 Ηλεκτρομαγνητικοί και Μαγνητικοί χάρτες

Από τις μετρήσεις των μαγνητικών λάβουμε τους παρακάτω χάρτες:

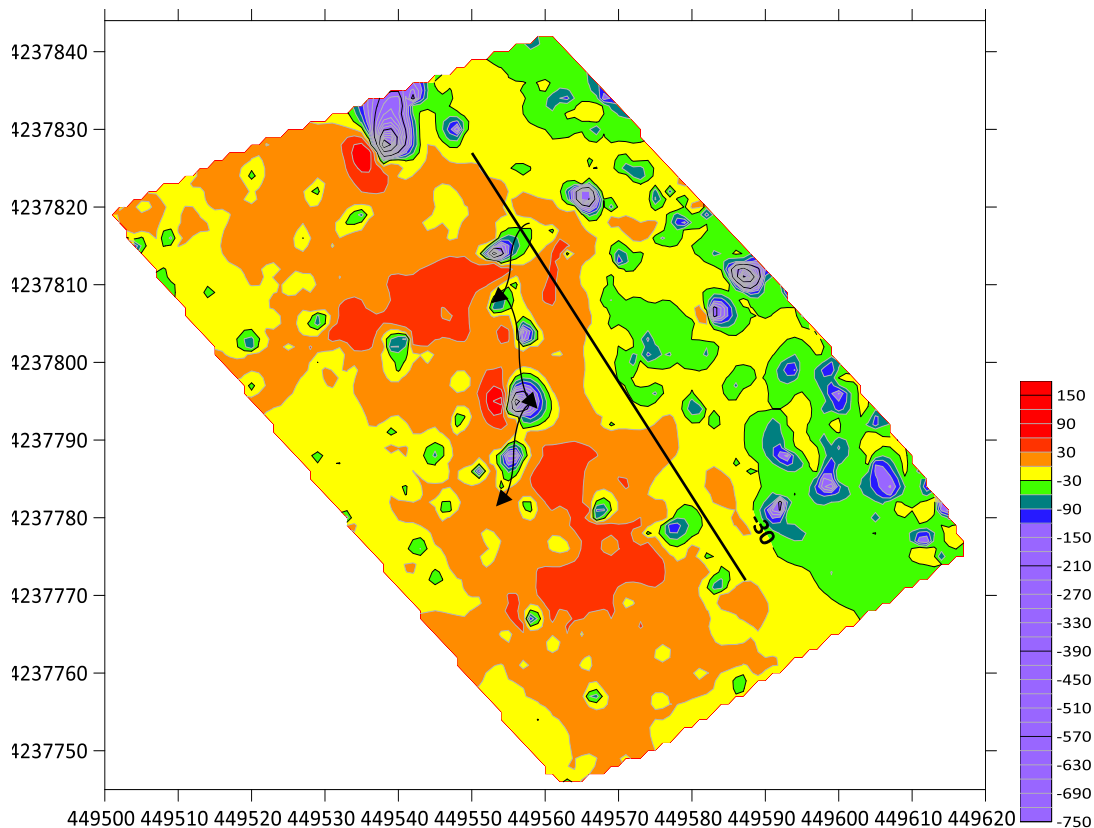


Εικόνα 100: Χάρτης total field base magnetic

Στον συγκεκριμένο χάρτη της ολικής μαγνήτισης της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται τα εξής:

- Η **τεθλασμένη μαύρη γραμμή** στο κεντροδεξιό κομμάτι του χάρτη καθορίζει μία περιοχή χαμηλών τιμών μαγνήτισης που βρίσκεται ανάμεσα και μέσα στην περιοχή των υψηλών και υψηλότερων τιμών μαγνήτισης και πιθανότατα αντιστοιχεί σε **διάταξη συμπαγούς υλικού που παραπέμπει σε τοιγίο**. Η συγκεκριμένη τοπική γραμμή χαμηλών τιμών επηρεάζει την κατανομή των χαλαρών και τα χωρίζει στις δύο πορτοκαλί περιοχές
- Η **παχιά μαύρη γραμμή** που διασχίζει το δεξιό μέρος του μαγνητικού χάρτη διαχωρίζει την πλευρά στην οποία βρίσκονται και οι χαμηλότερες τιμές μαγνήτισης και σύμφωνα με την γεωλογία της περιοχής αντιστοιχούν στο στρώμα ενός τύπου ασβεστόλιθου.
- Η **κεντρική περιοχή με πορτοκαλί-κόκκινο χρώμα** που αντιστοιχεί σε υψηλές τιμές μαγνήτισης και αντικατοπτρίζει την επέκταση(γραμμική έκταση βυθίσματος) μεγαλύτερων συγκεντρώσεων λεπτόκοκκου υλικού που έχει έρθει μέσω του χειμάρρου στα Βόρεια της περιοχής μελέτης. Ακόμα, χαρακτηρίζει και τις περιοχές με διεύθυνση όχι γραμμική, με κατεύθυνση ΒΑ-ΝΔ που αντιστοιχούν σε πιθανές ανθρώπινες γεωργικές εργασίες.

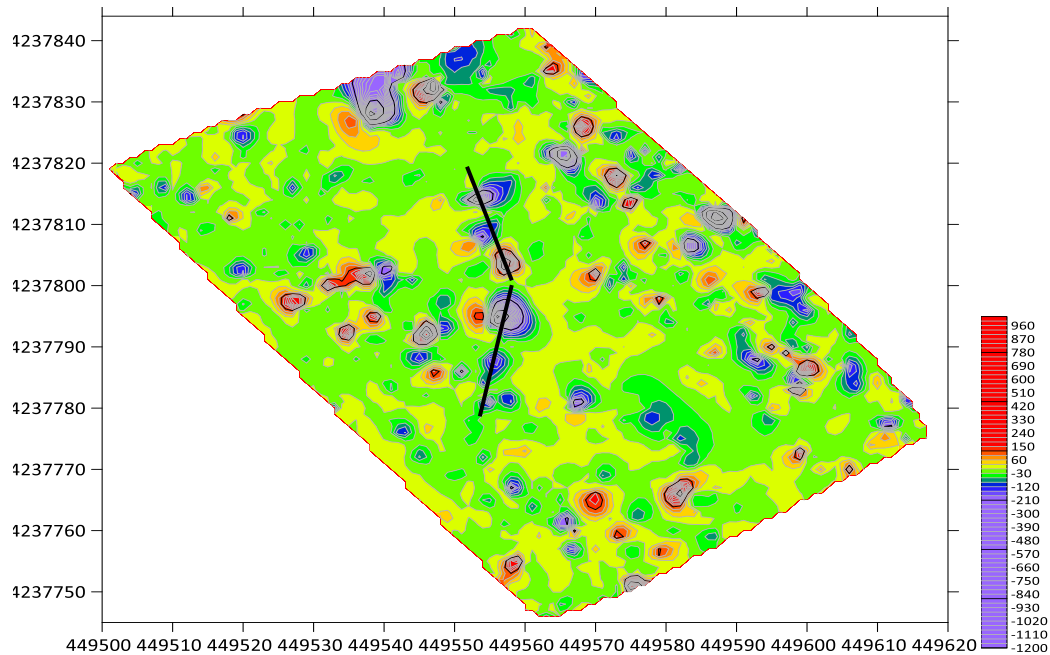




Εικόνα 101: Χάρτης ολικού πεδίου διορθωμένος ως προς την βάση (total field corrected)

Στον μαγνητικό χάρτη ολικού πεδίου διορθωμένος ως προς την βάση- (residual magnetic map)- Εικόνα 101, παρουσιάζονται τα εξής:

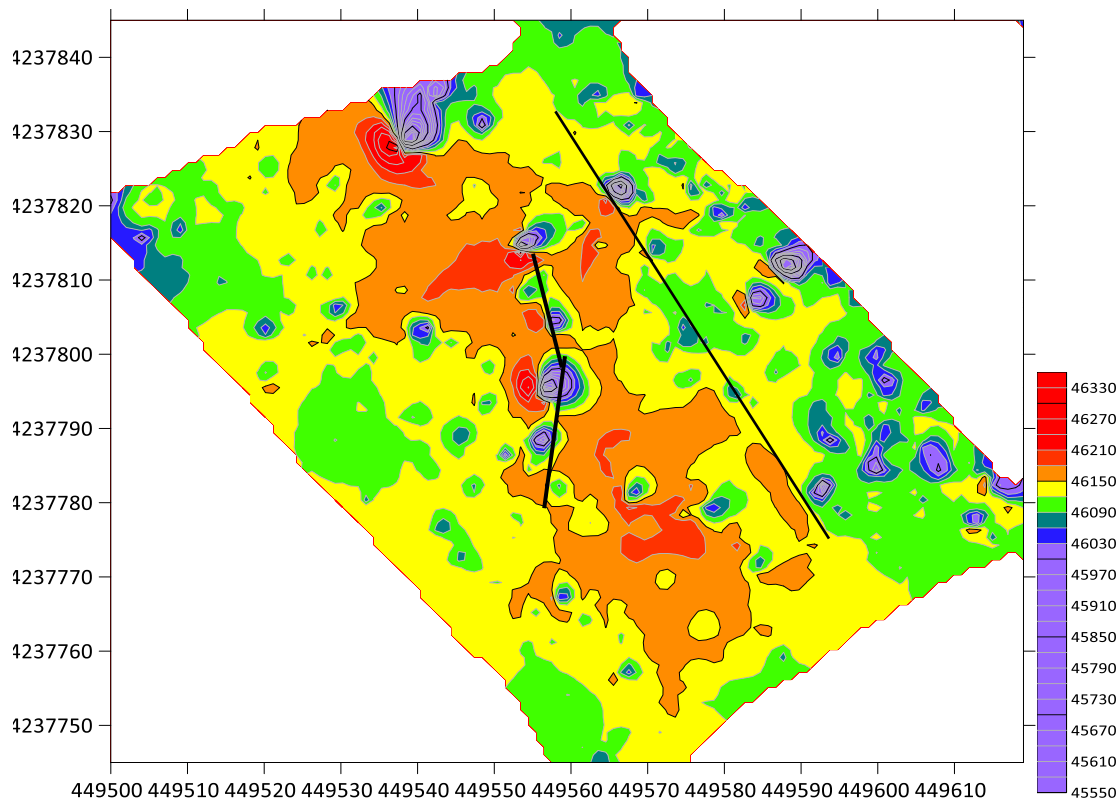
- Η **με βέλη μαύρη γραμμή** αντιστοιχεί και πάλι σε μία περιοχή χαμηλότερων τιμών μαγνήτισης ανάμεσα στην περιοχή με τις υψηλές τιμές μαγνήτισης και πιθανότατα αντιστοιχεί σε **διάταξη συμπαγούς υλικού που παραπέμπει σε τοιγίο**.
- Η **παχιά μαύρη γραμμή** που χωρίζει τον χάρτη και παρουσιάζει και πάλι το κομμάτι από το οποίο ξεκινά ο ασβεστόλιθος και βυθίζεται
- Η **κεντρική περιοχή με πορτοκαλί-κόκκινο** χρώμα που αντιστοιχεί σε υψηλές τιμές μαγνήτισης και αντικατοπτρίζει την επέκταση(γραμμική έκταση βυθίσματος) μεγαλύτερων συγκεντρώσεων λεπτόκοκκου υλικού που έχει έρθει μέσω του χειμάρρου στα Βόρεια της περιοχής μελέτης. Ακόμα, χαρακτηρίζει και τις περιοχές με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (όχι γραμμικές) που αντιστοιχούν σε πιθανές ανθρώπινες γεωργικές εργασίες.



*Εικόνα 102: Μαγνητικός χάρτης gradient*

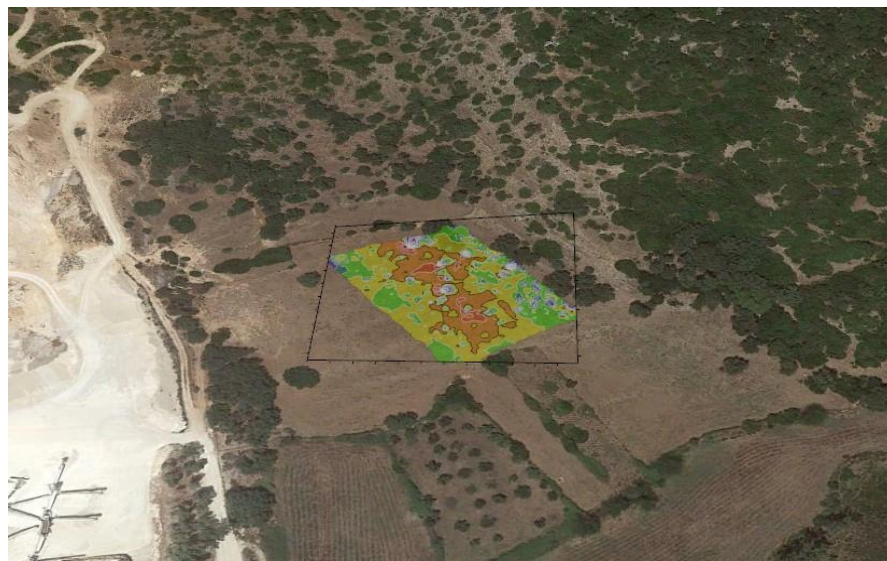
Ο μαγνητικός χάρτης gradient μπορεί να χαρακτηρίσει **στόχους** και όχι την ευρύτερη μαγνήτιση της περιοχής για αυτό και διακρίνονται:

- Η **μαύρη τεθλασμένη γραμμή** που επιβεβαιώνει και πάλι την περιοχή χαμηλών τιμών μαγνήτισης, που φαίνεται ξεκάθαρα και στους δύο προηγούμενους χάρτες και αντιστοιχεί όπως αναφέρθηκε λόγω των τιμών, σε συμπαγές υλικό που παραπέμπει σε μέγεθος και διάταξη **σε τοιγίο**
- Διάσπαρτες πολύ μικρότερες περιοχές με υψηλότερες και αντίστοιχα χαμηλότερες τιμές μαγνήτισης, που οφείλονται στην αναμόχλευση του υλικού που έχει παρασύρει και εναποθέσει η δραστηριότητα του χειμάρρου κοντά στην περιοχή (λεπτόκοκκο και αδρόκοκκο υλικό)



*Εικόνα 103: Μαγνητικός χάρτης RTP (Reduction to the pole)*

Ο χάρτης της εικόνας 103 έγινε στο πρόγραμμα Magpick με την μέθοδο Reduction to the pole (το ολικό διπολικό μαγνητικό πεδίο μετατράπηκε σε μονοπολικό). Ο χάρτης Reduction to the Pole επιβεβαιώνει την δομή που έχει παρουσιαστεί και στους υπόλοιπους μαγνητικούς χάρτες κάνοντας φανερή την διάχυση των λεπτόκοκκων υλικών στις ίδιες περιοχές με το πορτοκαλί και κόκκινο χρώμα, λόγω εκσκαφής της περιοχής, δομές που παρατηρούνται καθαρά και στον χάρτη του Google Maps παραπάνω.

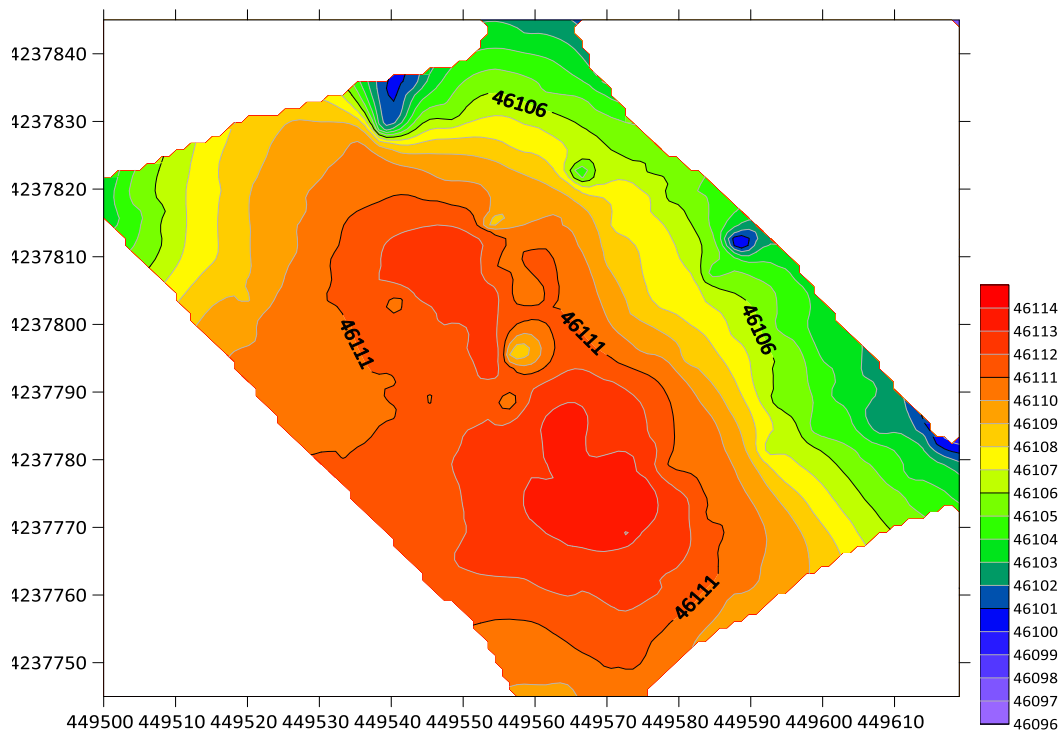


*Εικόνα 104: Χάρτης RTP στο Google Earth*

Ο συγκεκριμένος χάρτης μας παρουσιάζει τα εξής:

- Η **παχιά μαύρη γραμμή** στα δεξιά του χάρτη με τις χαμηλές και χαμηλότερες τιμές μαγνήτισης που αντιστοιχεί στο στρώμα του ασβεστόλιθου της περιοχής
- Η **διακεκομμένη τεθλασμένη γραμμή** που χαρακτηρίζει για πολλοστή φορά την συνεχή περιοχή χαμηλών τιμών ανάμεσα στην περιοχή των υψηλών και υψηλότερων τιμών μαγνήτισης του χάρτη και που αντιστοιχεί με βάση τις αριθμητικές τιμές σε κάποιο **συμπαγές/ αδρό υλικό** που από διάταξη και μέγεθος παραπέμπει **σε τοιχίο**.
- Η **κεντρική περιοχή με πορτοκαλί-κόκκινο** χρώμα που αντιστοιχεί σε υψηλές τιμές μαγνήτισης και αντικατοπτρίζει την επέκταση(γραμμική έκταση βυθίσματος) μεγαλύτερων συγκεντρώσεων λεπτόκοκκου υλικού που έχει έρθει μέσω του χειμάρρου στα Βόρεια της περιοχής μελέτης. Ακόμα, χαρακτηρίζει και τις περιοχές με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (όχι γραμμικές) που αντιστοιχούν σε πιθανές ανθρώπινες γεωργικές εργασίες.

Τέλος, παρουσιάζεται και ο pseudo gravity χάρτης που έγινε στο πρόγραμμα Magpick και δείχνει ξεκάθαρα τις **δύο μεγάλες περιοχές** με υψηλές τιμές (**κόκκινο-κίτρινο-πορτοκαλί χρώμα**) που αντιστοιχούν στο λεπτόκοκκο/ σπασμένο υλικό και στην περιοχή στα δεξιά του χάρτη(**μπλε και πράσινο χρώμα**), με τις χαμηλότερες τιμές, που αντιστοιχεί στον ασβεστόλιθο. Τέλος, φαίνεται και η διαφοροποίηση των τιμών **στο μέσο του χάρτη** όπου βρίσκεται και η περιοχή ενδιαφέροντος με την πιθανή ύπαρξη τοιχίου.

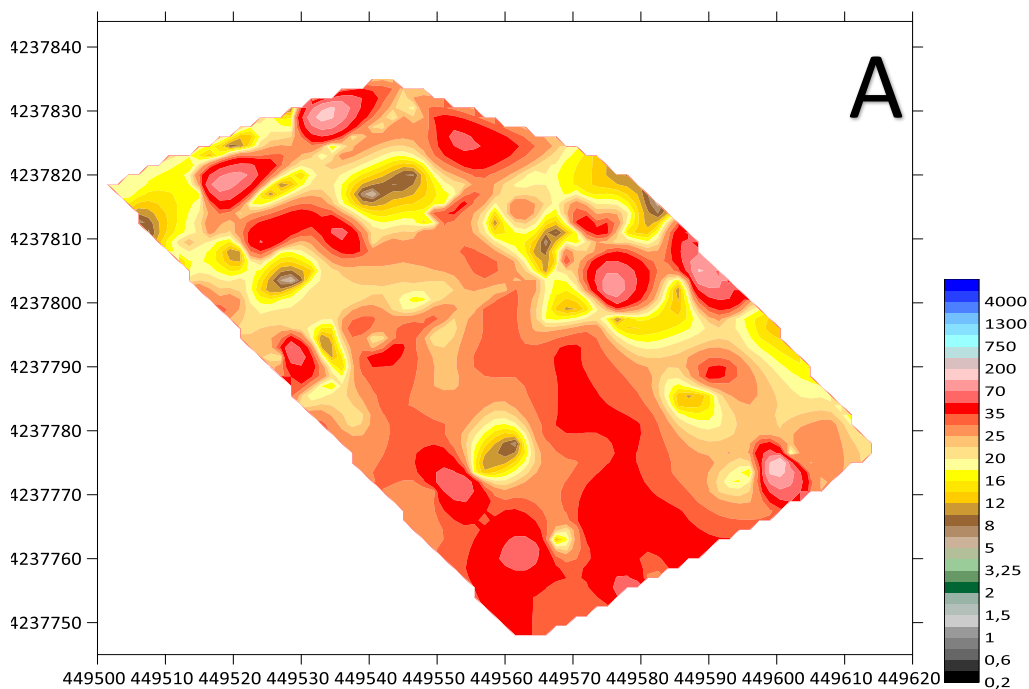


Εικόνα 105: -χάρτης pseudo gravity

Πέρα από τους μαγνητικούς χάρτες, επεξεργασία έγινε και στα δεδομένα της μεθόδου EM και μας έδωσαν τους παρακάτω χάρτες:

- Για τα **6 μέτρα** βάθος διασκόπησης :
  - A) Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity για μετρήσεις παράλληλες στην ακτογραμμή
  - B) Χάρτης inphase για μετρήσεις παράλληλες στην ακτογραμμή
  - Γ) Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή
  - Δ) Χάρτης inphase για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή
- Για τα **3 μέτρα** βάθος διασκόπησης:
  - E) Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity για μετρήσεις παράλληλες στην ακτογραμμή
  - ΣΤ) Χάρτης inphase για μετρήσεις παράλληλες στην ακτογραμμή
  - Z) Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή
  - H) Χάρτης inphase για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή

Στους χάρτες χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Natural Neighbor με διάστημα  $dx \ dy \ 1.5$ . Οι χάρτες θα παρουσιαστούν με το γράμμα και την σειρά που τους αντιστοιχεί από την ανωτέρω κατάταξη.

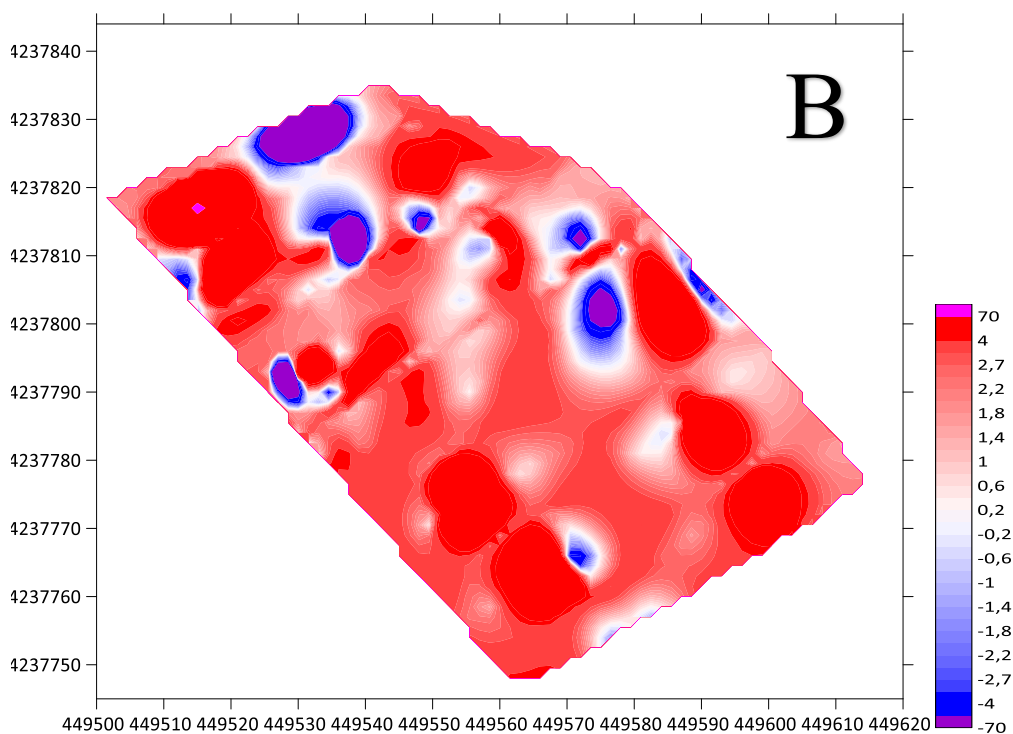


Εικόνα 106: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity για 6m βάθος διασκόπησης και παράλληλα στην ακτογραμμή

Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζονται τα εξής:

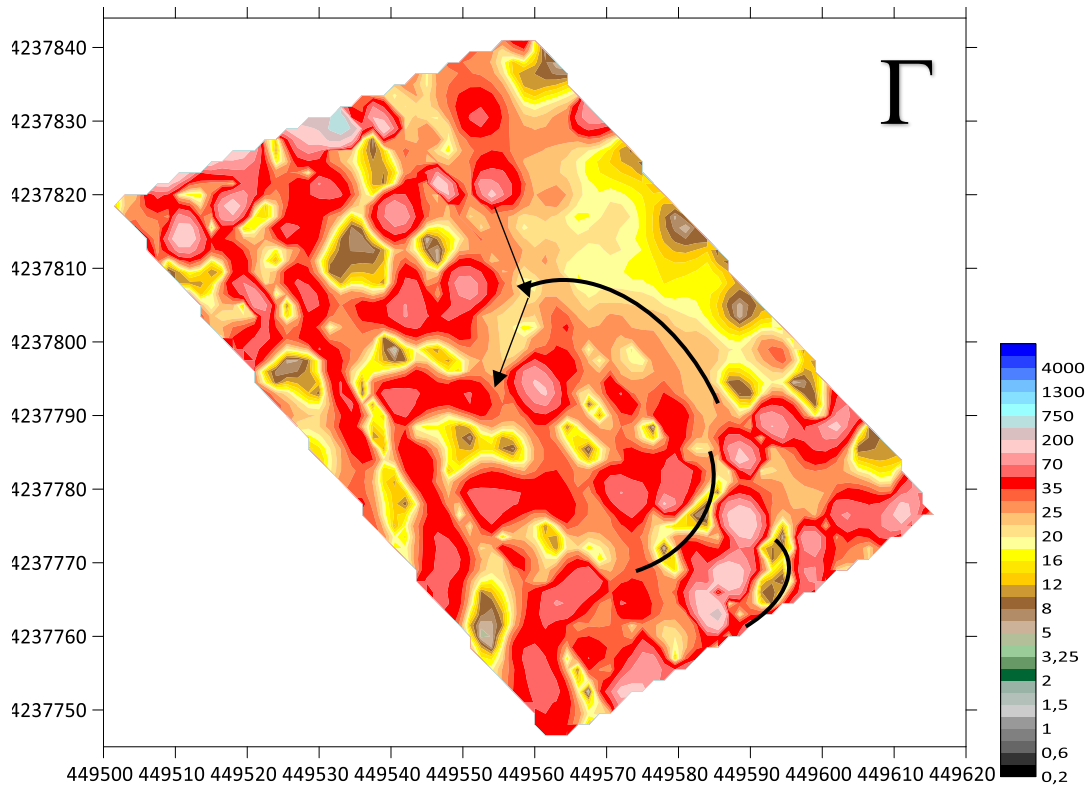
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στην ευρύτερη περιοχή που διαχωρίζει τα λεπτόκοκκα από τα αδρόκοκκα υλικά χωρίς σαφή όμως διαχωρισμούς
- Διακρίνεται στο πάνω κομμάτι στα ΒΑ ένα μέρος από την περιοχή με τις χαμηλές μετρήσεις μαγνήτισης και εξίσου εδώ ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που φάνηκαν και στον χάρτη της ολικής μαγνήτισης και αντιστοιχούν μάλλον σε συμπαγές υλικό σε διάταξη
- Την **περιοχή δεξιά του χάρτη** που δείχνει σε μικρό βαθμό το στρώμα του ασβεστόλιθου που αντιστοιχεί σε μικρές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ταυτίζεται η θέση του και στους μαγνητικούς χάρτες παραπάνω
- Δεν λαμβάνεται ωστόσο σαφής εικόνα από στόχο που να αντιστοιχεί πιθανότατα σε ανθρωπογενή κατασκευή.

Οι χάρτες inphase, όπως και ο χάρτης που παρουσιάζεται παρακάτω, παρουσιάζονται με σκοπό την ολοκληρωμένη εικόνα των δεδομένων και όχι για να προσθέσουν δεδομένα καθώς οι χάρτες inphase αποβλέπουν στον εντοπισμό στόχων-που στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχει κάτι ξεκάθαρο όπως στους μαγνητικούς χάρτες.



*Εικόνα 107: Χάρτης inphase στα 6m βάθος διασκόπησης και παράλληλα στην ακτογραμμή*





*Εικόνα 108: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity-6m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή*

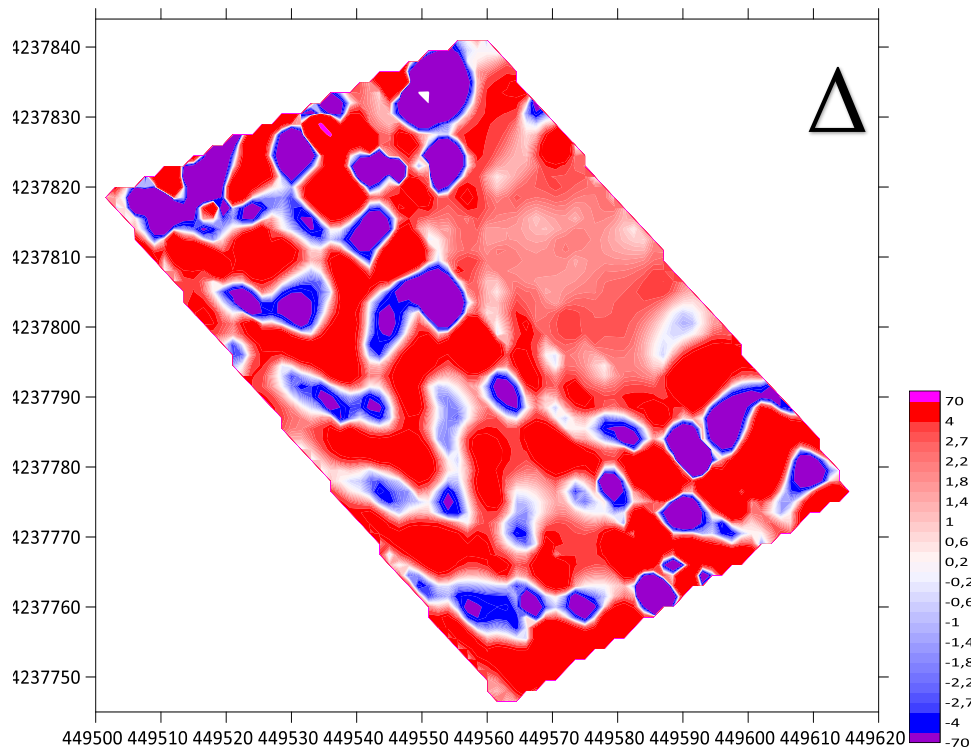


*Figure 1: Ηλεκτρομαγνητικός χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας με 6 μέτρα βάθος διασκόπησης στο Google Earth*

Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζονται ενδιαφέροντα ευρήματα όπως:

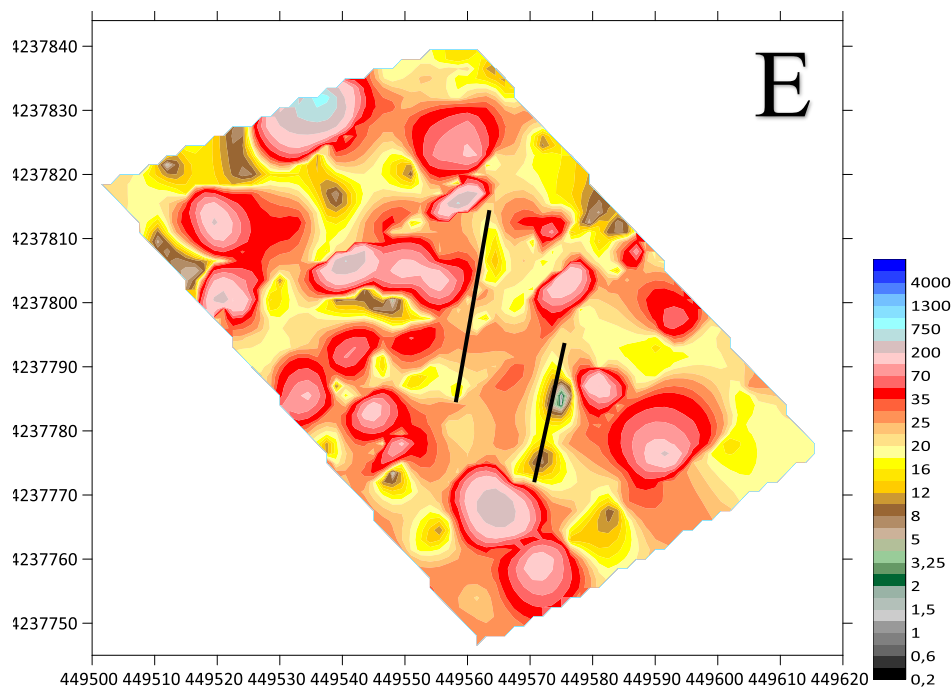
- Η περιοχή των χαμηλών τιμών τόσο μαγνήτισης (μαγνητικός χάρτης ολικής μαγνήτισης) όσο και χαμηλών ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων που παραπέμπει σε συμπαγές υλικό με συγκεκριμένη διάταξη όπως φαίνεται από τα **δύο ενωμένα βέλη** στον χάρτη
- Η **περιοχή που χωρίζεται από την καμπύλη** στα δεξιά του χάρτη, που αντιστοιχεί σε ένα κομμάτι του στρώματος του ασβεστόλιθου που ξέρουμε ότι βρίσκεται γεωλογικά εκεί και στην συνέχεια βυθίζεται προς τα ΝΔ
- Οι **παράλληλες καμπύλες περιοχές** που αντιστοιχούν σε σχετικά χαμηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και πιθανότατα περιλαμβάνουν, εν συνεχεία με την πιο ξεκάθαρη περιοχή τυχόν συμπαγούς υλικού, **'πέταλα' συμπαγούς ή αδρόκοκκου υλικού που παραπέμπουν σε σχήμα και διάταξη μικρότερων τοιγίων π.χ. τοιγίο μόλου**

Παρακάτω παρουσιάζεται και ο αντίστοιχος χάρτης inphase που δεν δίνει σαφή εικόνα για στόχο.



*Εικόνα 109: Χάρτης inphase στα 6 μέτρα βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή*

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες E(Εικ.110), ΣΤ(Εικ.111), Ζ(Εικ.112) & Η(Εικ.113) για τα 3 μέτρα βάθος διασκόπηση τόσο για παράλληλες όσο και για κάθετες στην ακτογραμμή μετρήσεις.

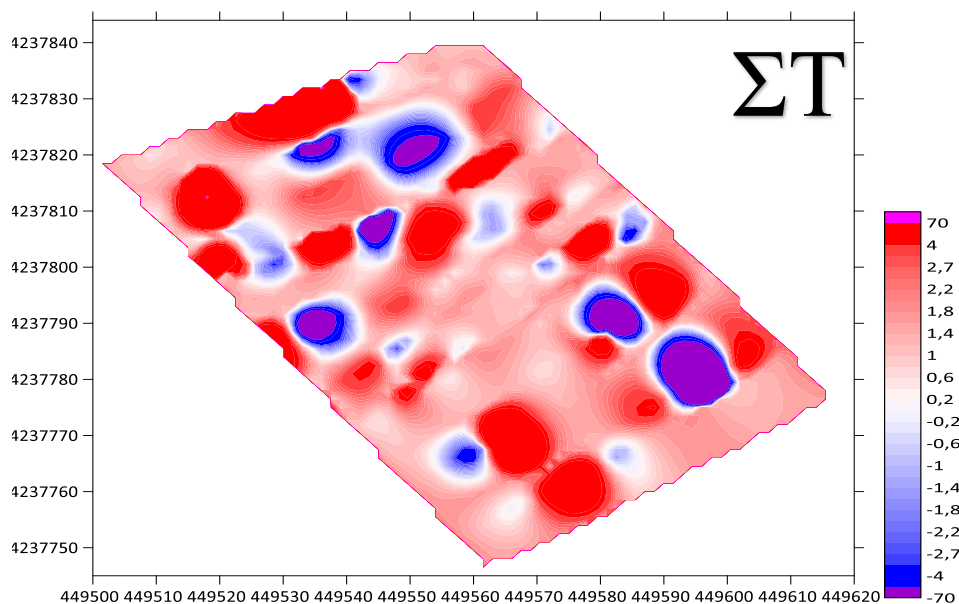


Εικόνα 110: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity-3m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις παράλληλα στην ακτογραμμή

Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζονται τα εξής:

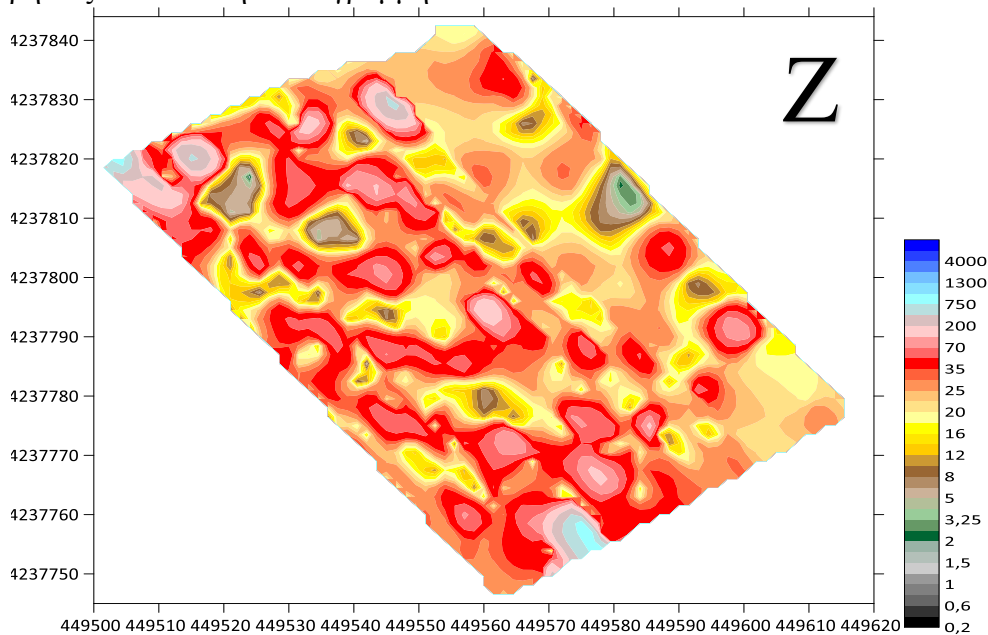
- Η περιοχή στα δεξιά του χάρτη που αντιστοιχεί στο στρώμα του ασβεστόλιθου όπως φαίνεται καθαρά και στους μαγνητικούς χάρτες αλλά χωρίς σαφή όρια έναρξης και πέρατος
- Οι δύο παράλληλες μαύρες γραμμές που αντιστοιχούν σε δομές χαμηλών μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μπορεί να σχετίζονται με το πιθανό τοίχιο/συμπαγή δομή που εμφανίζεται τόσο στους μαγνητικούς χάρτες όσο και στον χάρτη Γ (Εικ.108) (Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity-6m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή)
- Η περιοχή που αντιστοιχεί σε τιμές χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μπορεί να αποτελεί κομμάτι του “πετάλου” που εμφανίζεται σχηματικά και στον χάρτη Γ (Εικ.108) (Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας-conductivity-6m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετες στην ακτογραμμή) και ίσως είναι συνέχεια του τοιχίου από τυχόν μόλο της εποχής.

Παρακάτω δίνεται και ο χάρτης inphase για τυπικούς λόγους χωρίς να συμπληρώνει δεδομένα για τυχόν στόχους που μπορεί να αντιστοιχούν σε αρχαία ανθρώπινη ναυτιλιακή δραστηριότητα.



*Εικόνα 111: Χάρτης inphase για 3m βάθος διασκόπησης και μετρήσεις παράλληλα στην ακτογραμμή*

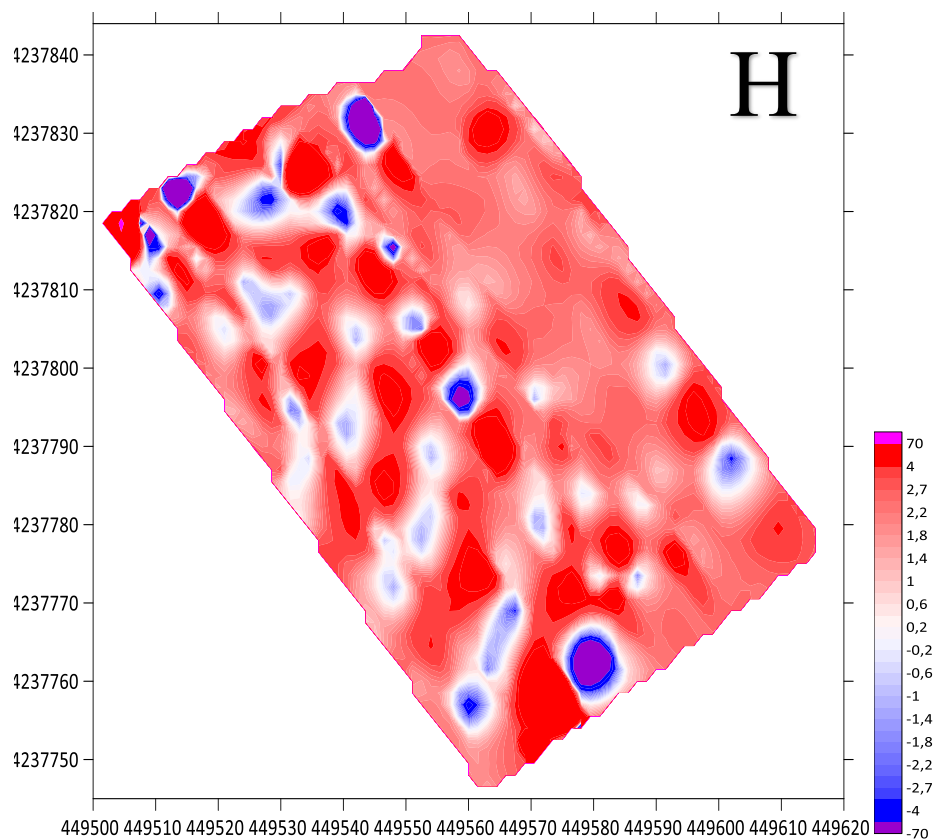
Στην συνέχεια παρουσιάζονται και οι δύο χάρτες για την ηλεκτρική αγωγιμότητα και το inphase για τις μετρήσεις κάθετα στην ακτογραμμή



*Εικόνα 112: Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για 3m βάθος διασκόπησης για μετρήσεις κάθετα στην ακτογραμμή*

Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζονται τα εξής:

- Η **περιοχή στα δεξιά** που για μία ακόμη φορά δίνει την περιοχή που πιστεύεται ότι αρχίζει το στρώμα του ασβεστόλιθου και στην συνέχεια βυθίζεται προς τα ΝΔ προς την κατεύθυνση δηλαδή της ακτής
- Την **περιοχή χαμηλών** τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο μέσο-πέρας του χάρτη που μπορεί να έχει σχέση με την μικρότερη πεταλοειδή μορφή συμπαγούς πιθανότατα υλικού που εμφανίζεται και στον **χάρτη Γ** (Εικ.108)



*Εικόνα 113: Χάρτης inphase για 3m βάθος διασκόπησης-μετρήσεις κάθετα στην ακτογραμμή*



## 5.3 Ηλεκτρική Μέθοδος

### 5.3.1 Γενικά

Η ηλεκτρική μέθοδος ήταν η τελευταία κατά σειρά γεωφυσική μέθοδος που εφαρμόστηκε καθώς και η πιο αργή μέθοδος αλλά με ποιοτικά αποτελέσματα, ειδικά σε σύγκριση με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο.

Με την γεωηλεκτρική τομογραφία μπορούμε με ακρίβεια να αποτυπώσουμε την στρωματογραφία, να προσδιορίσουμε την τεκτονική και τυχόν χαρακτηριστικά από ανθρωπογενή ή φυσικά/γεωλογικά αίτια.

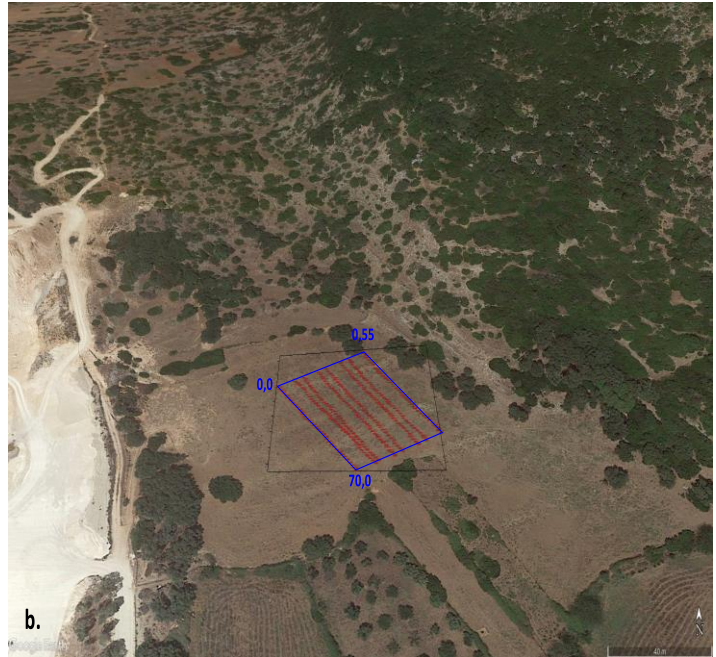
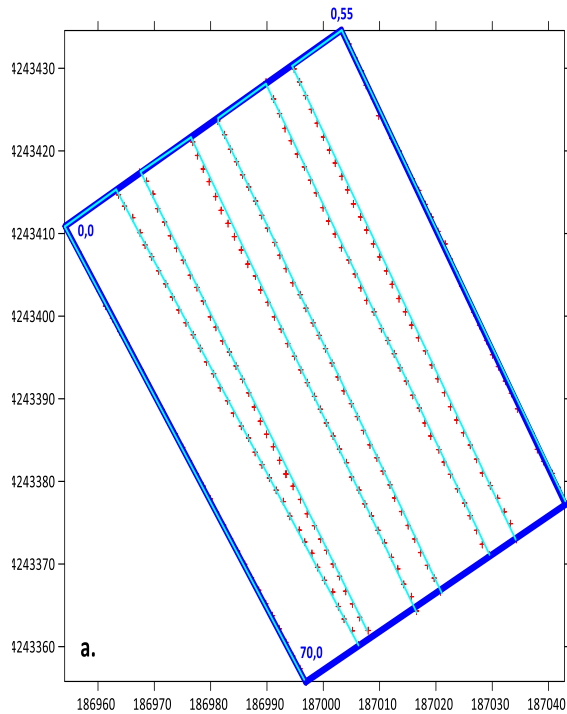
Στις μετρήσεις της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιήθηκε η **διάταξη dipole – dipole**. Με τη συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται ο εντοπισμός τόσο οριζόντιων όσο και πλευρικών ανομοιογενειών επιτυγχάνοντας το μέγιστο βάθος διασκόπησης.

Πραγματοποιήθηκαν 6 τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας, δηλαδή 3 σετ ‘πέταλα’ μετρήσεων σε σχήμα Π με τις οποίες καλύφθηκε το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής έρευνας. Χρησιμοποιήθηκαν 72 ηλεκτρόδια και οι διαστάσεις του κάθε πετάλου ήταν  $D=70m$  και  $10m$  πλάτος ξεκινώντας από τα δεξιά της περιοχής και κοιτώντας προς τον Νότο. Το βήμα για τις μετρήσεις ήταν  $5m$  και επανατοποθέτηση στα  $10m$  πλάτος όπως αναφέρθηκε.

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

Στον παρακάτω χάρτη από το google earth φαίνονται οι μετρήσεις που έγιναν στο πεδίο από την Τεχνική Έκθεση προς το ΟΥΦ του καθηγητή Γεώργιου Αποστολόπουλου (2023, Λιβάδι Κεφαλληνίας).





**Εικόνα 114:** Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής Λιβάδι που δείχνει την τριδιάστατη έρευνα γεωηλεκτρικής τομογραφίας: **α)** Η ρύθμιση «U» (κυανικές γραμμές) για τα ηλεκτρόδια (κόκκινοι σταυροί) επιλέχθηκε για κάθε προφίλ τομογραφίας προκειμένου να καλύψει την περιοχή έρευνας και για όλες τις μετρήσεις που πρέπει να γίνουν ερμηνεύεται σε τριδιάστατη βάση **β)**τη ρύθμιση ‘U’ (κυανές γραμμές) για τα ηλεκτρόδια (κόκκινοι σταυροί) που τοποθετούνται σε έναν χάρτη Google Earth ( Γεωγραφικές Συντεταγμένες ΕΓΣΑ)



**Εικόνα 115:** Φωτογραφία από το Upper East Part Livadi Παράκτια περιοχή που δείχνει προετοιμασία πεδίου για την απόκτηση δεδομένων τριδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας (Επιστημονική Αναφορά-Αποστολόπουλος,2023)

### 5.3.2 Εξοπλισμός

Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCALPro.

Πρόκειται για διάταξη με ένα διαβιβαστή ρεύματος, ο οποίος στέλνει ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και στη συνέχεια μετράει την τάση που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού.

Ο μετρητής SYSCAL Pro αποτελείται από 10 ταυτόχρονα κανάλια λήψης δεδομένων, είναι 1000 V – 250 W – 2.5 A. Έχει τη δυνατότητα αυτόματου injection ranging και έχει την επιλογή αλλαγής των ηλεκτροδίων. Είναι ένα νέο σύστημα σχεδιασμένο για υψηλή ανάλυση στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης και IP. Περιλαμβάνει αρκετές επιλογές δίνοντας τη δυνατότητα εργασίας σε κάθε είδους συνθήκες και πεδία. (εξερεύνηση υπογείων νερών, γεωτεχνικές μελέτες πολιτικών μηχανικών, περιβαλλοντικές εφαρμογές)



*Εικόνα 116: Όργανο μέτρησης SYSCALPro*

### 5.3.3 Επεξεργασία των μετρήσεων

Ολοκληρώνοντας την διαδικασία λήψης μετρήσεων στο πεδίο, έγινε η ανάλυση και η επεξεργασία των εν λόγω μετρήσεων, δηλαδή των Γεωηλεκτρικών Τομών.

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

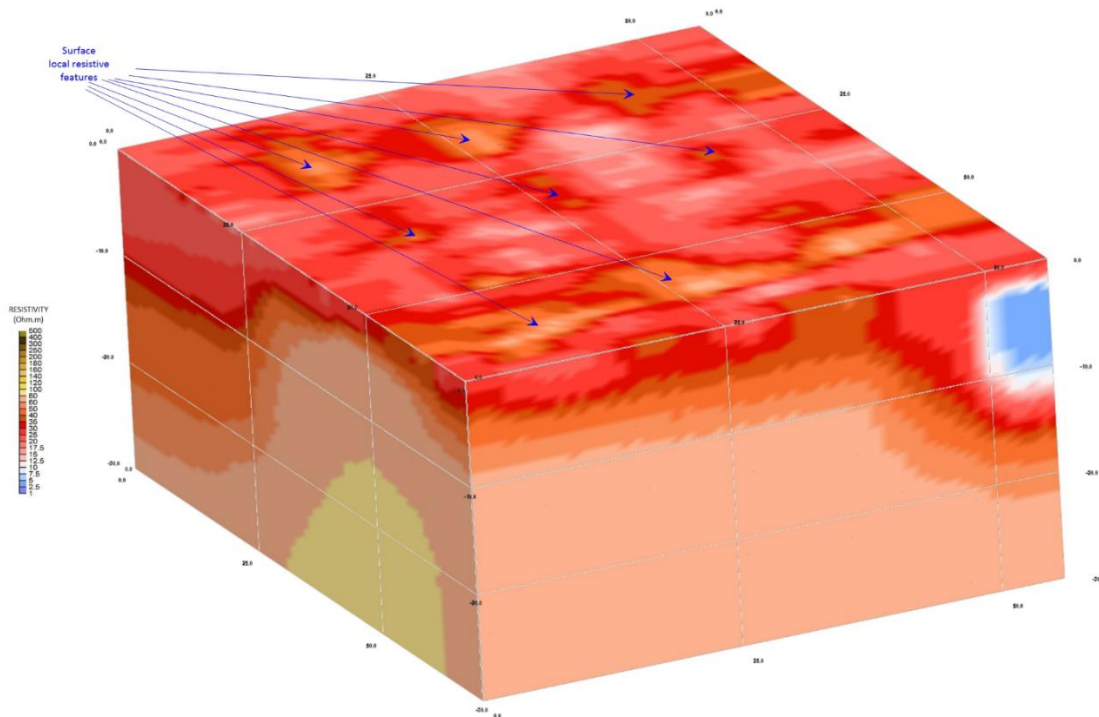
Τα βήματα επεξεργασίας είναι τα παρακάτω:

- Επιλέχθηκε η ρύθμιση «use model refinement» για την δημιουργία περισσότερων μετρήσεων από αυτές που εισάγονται, δηλαδή έχει την δυνατότητα να δημιουργεί μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα το τελικό μοντέλο να πραγματοποιείται στις παράλληλες τομές 0,5m και κατά συνέπεια να διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος.
- Επιλέχθηκε για την δημιουργία του μοντέλου κατά την αντιστροφή των μετρήσεων (inversion) η εξής διαδικασία ερμηνείας:
  - **Robust-Robust(RR)**: Με αυτή την επιλογή γίνεται ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία θορύβου στις μετρήσεις.
  - **Robust – Robust – Horizontal (RRH)**: μπορούμε να ρυθμίσουμε την αντιστροφή ώστε να απορρίπτει μετρήσεις οι οποίες είναι αντίθετες με βάση την γεωλογία της περιοχής (μπορούμε να κάνουμε σίγαση (Damping) του θορύβου στις μετρήσεις). Στην RRH θεωρούμε ότι τα στρώματα είναι σχετικά οριζόντια και δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη κάθετη μεταβολή της ειδικής αντίστασης (μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την στρωματογραφία και όχι τόσο για τις πεπερασμένες δομές που μπορεί να βρεθούν)

### 5.3.4 Αποτελέσματα της Μεθόδου

Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση του καθηγητή μου Γεώργιου Αποστολόπουλου και του Εργαστηρίου Γεωφυσικής της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών μηχανικών λάβαμε τις παρακάτω γεωηλεκτρικές τομογραφίες:

- 3D γεωηλεκτρική τομογραφία της περιοχής μελέτης
- ‘‘Φέτες’’ γεωηλεκτρικής τομογραφίας σε διαφορετικά βάθη
- Τις παλιές γεωηλεκτρικές τομογραφίες της μελέτης του 2016 του εργαστηρίου Γεωφυσικής ΕΜΠ
- Τους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες της περιοχής μελέτης αλλά και της γύρω περιοχής του βάλλου για σύγκριση δεδομένων και ανάκτηση ολοκληρωμένης εικόνας της περιοχής ως προς την τεκτονική



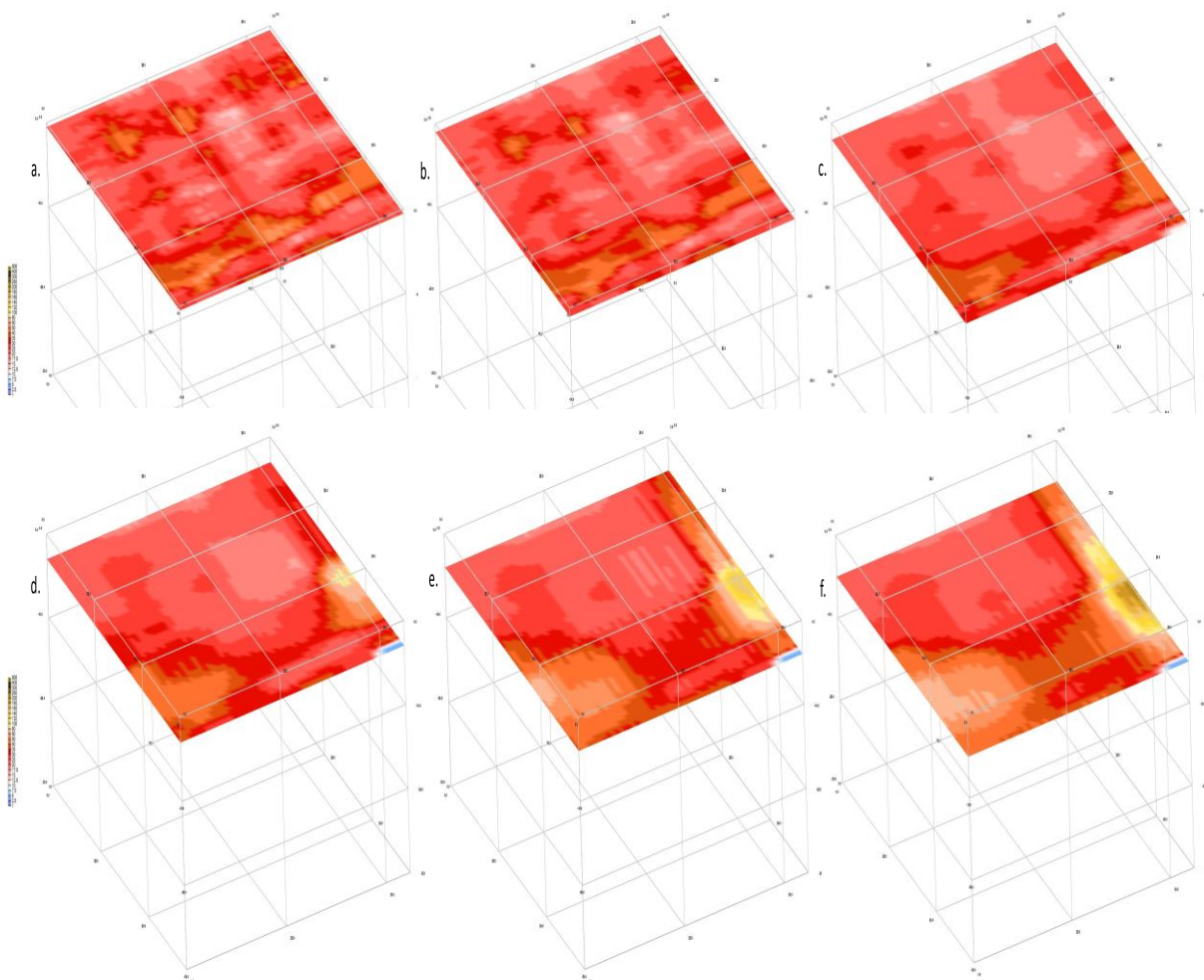
*Εικόνα 117: Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής ΛΙΒΑΔΙ με χαρακτηριστικά μεγάλης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια που φαίνονται με βέλη, με βάση τα αποτελέσματα τριδιάστατης ερμηνείας δεδομένων στο γεωηλεκτρικό μοντέλο (Αποστολόπουλος, 2023)*



Στην 3D γεωηλεκτρική τομογραφία της Εικόνας 117 παρουσιάζονται τα εξής:

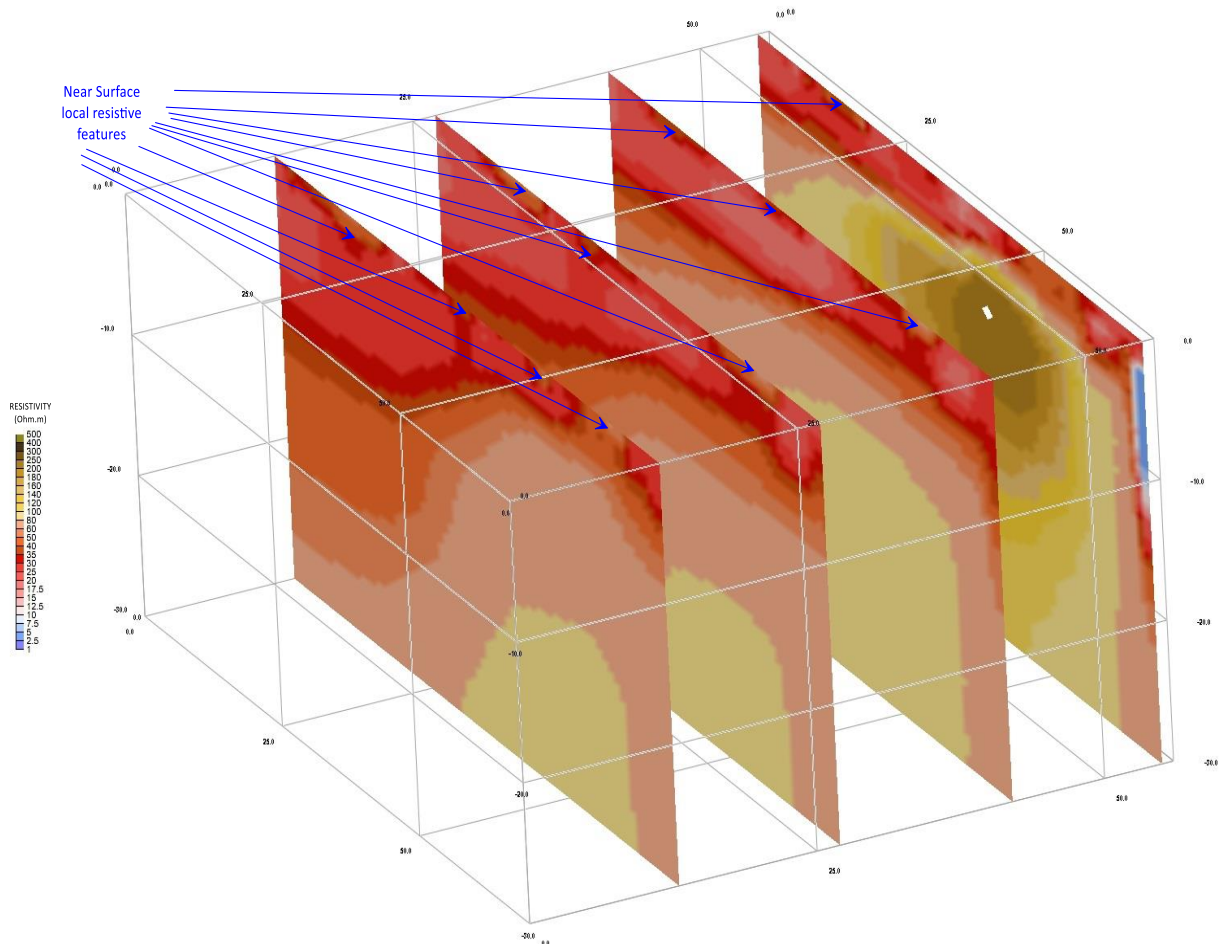
- Τοπικές υψηλότερης ειδικής αντίστασης επιφανειακές δομές που φαίνεται ότι δεν συνεχίζουν σε μεγαλύτερα βάθη και συμβολίζονται με τα **μπλε βέλη**
- Επιφανειακές συστάδες λίθων που ίσως να αντιστοιχούν στις δομές με τα μπλε βέλη και να οφείλονται σε αγροτικές εργασίες που έχουν γίνει στην περιοχή

Τα ίδια παρατηρούμε και στις “οριζόντιες τομές” γεωηλεκτρικής τομογραφίας σε διάφορα βάθη που φαίνονται στην Εικόνα 118 :



*Εικόνα 118.: Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής Λιβαδιού που δείχνει τις οριζόντιες φέτες του τρισδιάστατου μοντέλου ειδικής αντίστασης σε βάθη α) -0,5 m, β) -1 m, γ) -2 m, δ) -3 m, ε) -4 m, στ) -5 m, όπως προκύπτει από την τρισδιάστατη έρευνα της EPT. Η έκταση και το βάθος των χαρακτηριστικών μεγάλης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι εύκολα ορατές από τις φέτες.*

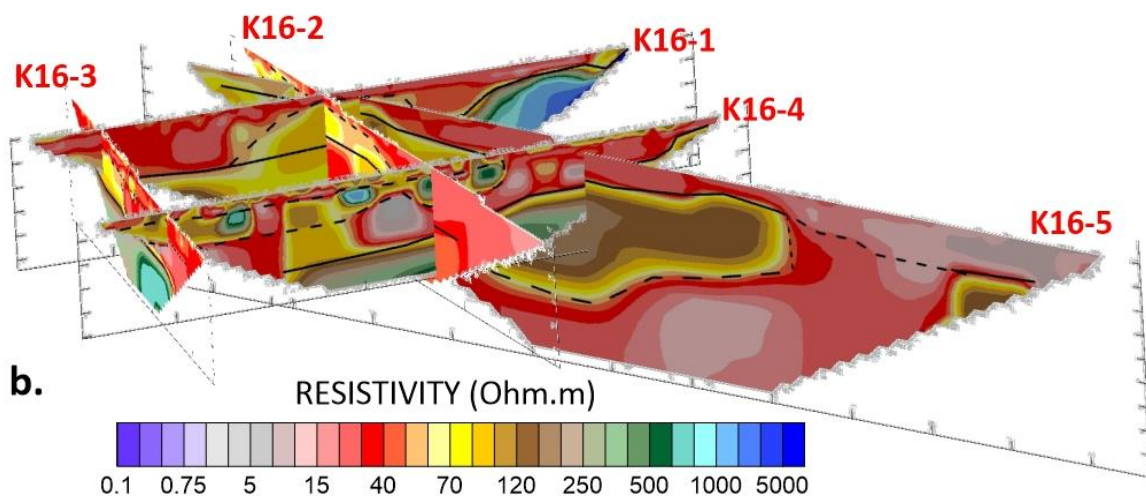
Αυτό που αξίζει να σημειωθεί στις τομές της Εικόνας 118 είναι ότι οι τοπικές δομές που εμφανίζονται και στο τρισδιάστατο μοντέλο φαίνονται μέχρι και το 1.5 μέτρο ενώ μετά εξαφανίζονται και δεν συνεχίζουν.



*Εικόνα 119:.* Άνω Ανατολικό τμήμα της Παράκτιας περιοχής Λιβάδι, με χαρακτηριστικά αντίστασης κοντά στην επιφάνεια που φαίνονται με βέλη, με βάση τις κάθετες τομές του τρισδιάστατου μοντέλου ειδικής αντίστασης σε αποστάσεις στο τοπικό πλέγμα, αντίστοιχα, (0,13), (0,27), (0,42), (0,55), όπως προκύπτει από την τρισδιάστατη ερμηνεία των δεδομένων. (Αποστολόπουλος, 2023)

Στα παλιά EM που πραγματοποιήθηκαν το 2016 (από την τεχνική έκθεση του εργαστηρίου Γεωφυσικής ΕΜΠ) λαμβάνουμε και τους χάρτες της Εικόνας 121 προκειμένου να συσχετιστούν με τα αποτελέσματα της τομογραφίας από την **Εικ. 118** και τα παλιά αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών τομών που λήφθηκαν το 2016 (**Εικ. 119a**). Αρχικά, αναγνωρίζουμε ότι βρισκόμαστε σε μια περιοχή όπου ο ασβεστόλιθος/το υπόβαθρο βυθίζεται προς τα δυτικά (καφέ έως κίτρινο χρώμα στην **Εικ. 118**), ενώ η μαύρη γραμμή στην **Εικ. 119b** δείχνει το ανάγλυφο της κορυφής του βράχου, με χοντρό έως λεπτό υλικό κοντά στην επιφάνεια.

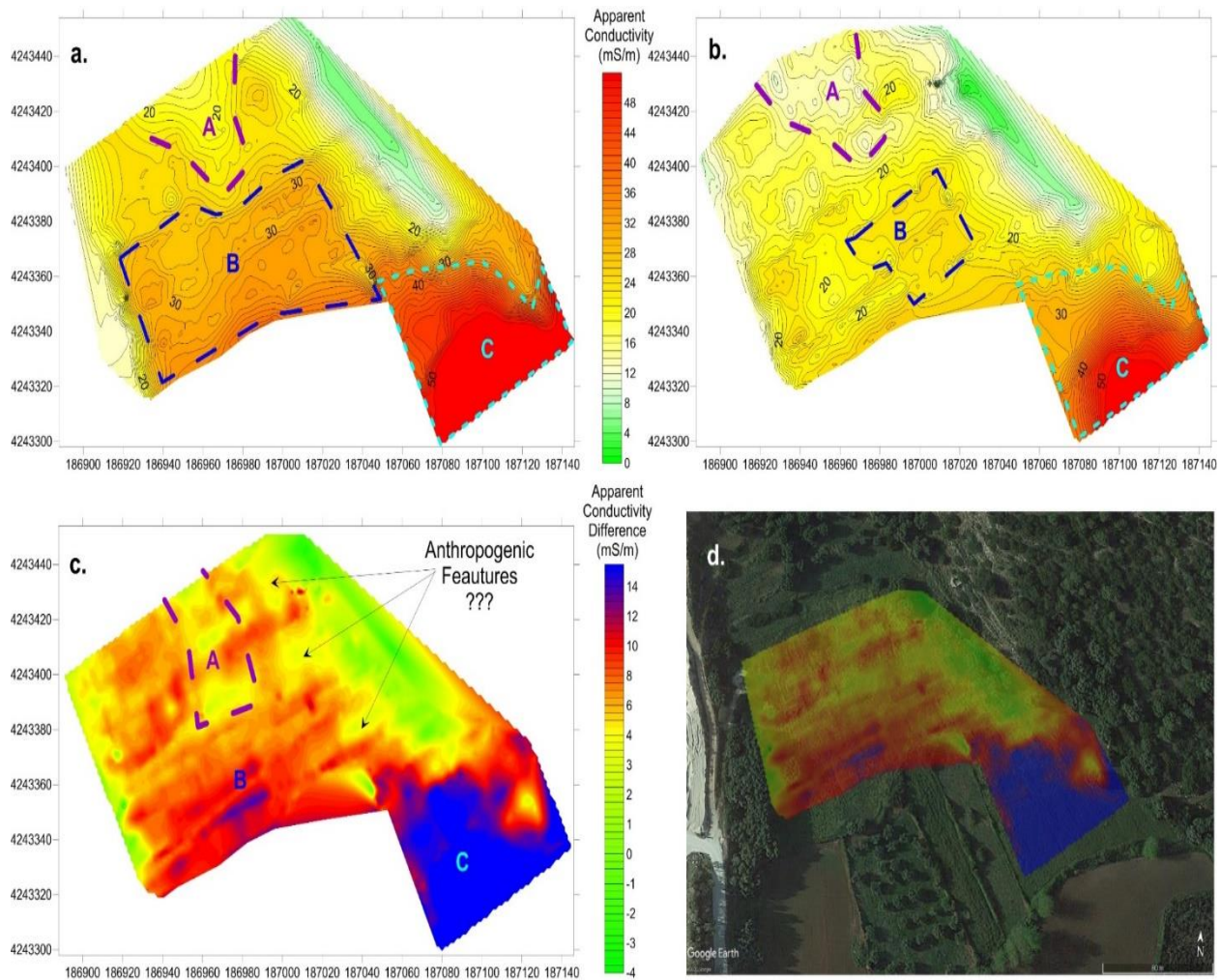




*Εικόνα 120: Άνω Ανατολικό τμήμα της παράκτιας περιοχής Λιβιάδι που δείχνει τα προηγούμενα προφίλ EPT του 2016 μαζί με τα τρέχοντα (a) και τις παλιές τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας του 2016 που εμφανίζονται με τριδιάστατο τρόπο (b).*

Στην γεωηλεκτρική τομή της **Εικόνας 119b** βλέπουμε τα εξής:

- Οι κίτρινες περιοχές είναι το ρέον αδρομερές υλικό που έχει γεμίσει την περιοχή
- Το **μπλε** είναι ο ασβεστόλιθος που όπως αναφέρει και η γεωλογία της περιοχής βυθίζεται μετά από ένα σημείο και τον καλύπτουν τα αδρομερή



**Εικόνα 121a,b:** Ηλεκτρομαγνητικοί Χάρτες φαινομενικής αγωγιμότητας για την περιοχή του Εσωτερικού Κόλπου Λιβαδιού έως βάθος 6m και 3m αντίστοιχα, που δείχνουν τις περιοχές «Α», «Β», «Γ» με διαφορετικές κατανομές ιζημάτων. **c.** Ο «χάρτης κλίσης», που κατασκευάστηκε από διαφορές στις τιμές φαινομενικής αγωγιμότητας από τα προηγούμενα γραφήματα, δείχνει πιο καθαρά διαφορετικές περιοχές ιζήματος, μαζί με ορισμένα γραμμικά χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν κρυμμένα ανθρωπογενή χαρακτηριστικά. **d.** Χάρτης κλίσης πάνω στον χάρτη Google Earth. (Αποστολόπουλος, 2023)

Στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες στην **Εικόνα 121**, η περιοχή μελέτης μας καλύπτει το βόρειο-ανατολικό μέρος τους και παρατηρούμε και πάλι το στρώμα του ασβεστόλιθου (πράσινο χρώμα) αλλά και τις τοπικές γραμμικές περιοχές χαμηλών τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας ή διαφοράς της που αναφέραμε στους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες της μελέτης του 2023, αλλά και στην γεωηλεκτρική τομογραφία.

Με λίγα λόγια, τα αποτελέσματα του 2023 μαζί με τα αποτελέσματα του 2016 και το γεωηλεκτρικό μοντέλο συσχετίζονται και δίνει την συνολική εικόνα της περιοχής για την δυνατότητα εφαρμογής διαφόρων μεθόδων π.χ. εκσκαφή τάφρου με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ για τον εντοπισμό τυχόν ανθρωπογενών δομών (ή συμπαγούς δομής-τοιχίου).

## 5.3.5 Συμπεράσματα και Σχόλια

### 5.3.5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται διερεύνηση της περιοχής του βάλτου στο χωριό Λιβάδι, Κεφαλληνίας με γεωφυσικές μεθόδους. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας από το εργαστήριο γεωφυσικής της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών, είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές ενός αρχαίου λιμανιού ή μόλου ή/και να εντοπιστεί τέτοια κατανομή ιζημάτων που να έχει επηρεαστεί από αυτές τις πιθανές δομές

Η περιοχή έρευνας αποτελεί περιοχή πιθανού αρχαιολογικού ενδιαφέροντος για αυτό χρησιμοποιήθηκαν γρήγορες μη καταστρεπτικές μέθοδοι και η μελέτη διήρκεσε περίπου μία εβδομάδα. Ακόμα, καθώς η περιοχή ήταν ιδιωτική δεν υπήρχε δυνατότητα χρήσης άλλων καταστρεπτικών μεθόδων. Η επιλογή της γεωφυσικής σε τέτοιες περιπτώσεις κρίνεται αναγκαία γιατί μπορεί να ανταποκριθεί στις παραπάνω απαιτήσεις.

Με την εφαρμογή τεσσάρων γεωφυσικών μεθόδων(μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά, ηλεκτρικά και γεωραντάρ) και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτουν μια σειρά από τα εξής συμπεράσματα:

- Διαπιστώθηκε η δομή του υπεδάφους στο σχεδιασμένο βάθος διασκόπησης, με σημαντικές ανωμαλίες που παρουσιάζουν τη γεωμορφολογική εξέλιξη της περιοχής και πιθανές ενδιαφέρουσες ενδείξεις τεκτονικής.
- Οι μελέτες περιπτώσεων (case studies), οι οποίες αναζητήθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία βοήθησαν σημαντικά στην έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, οι τέσσερις παραπάνω εφαρμογές που είχαν παρόμοια αντικείμενα με την γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήσαμε στην περιοχή Λιβάδι. Η χρήση των ηλεκτρομαγνητικών θεωρήθηκε ως μία μέθοδος που δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα στην εύρεση αρχαιοτήτων όπως και το γεωραντάρ (που δεν αναλύθηκε εκτενώς στην παρούσα εργασία) που έδωσε μεγαλύτερη ευκρίνεια σε βάθος και σε ποιότητα των δεδομένων. Η γεωηλεκτρική τομή ήταν αυτή που έδωσε και την δυνατότητα εφαρμογής και άλλων καταστροφικών μεθόδων σε μετέπειτα στάδιο της έρευνας.



- Κάθε μια από τις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην προσπάθεια να γίνει εντοπισμός της στρωματογραφίας αλλά και των πεπερασμένων δομών που εντοπίστηκαν (περιοχής με διάταξη στους μαγνητικούς και ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες)
- Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα και με την σε φάση συνιστώσα, η μαγνητική επιδεκτικότητα. Καλύφθηκε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια δεδομένων των δυσκολιών της γεωμορφολογίας της περιοχής, όπως το ότι ήταν δύσβατη η περιοχή σε σημεία, η ύπαρξη δέντρων που έκοβαν το σήμα του GPS και η ανομοιογένεια στο υψόμετρο.
- Στους χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, οι τιμές εμφανίζουν διακυμάνσεις που οφείλονται στις διαδοχικές ποσότητες αποθέσεων αδρομερούς και λεπτομερούς υλικού, που προέρχονται από τον κοντινό χείμαρρο
- Επιπλέον, στον μαγνητικό χάρτη Reduction to the Pole, εμφανίζονται δυο περιοχές στα βόρεια και νότια με υψηλές τιμές μαγνήτισης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μία γραμμικότητα ενώ στα δεξιά εντοπίζεται και το στρώμα του ασβεστόλιθου που βυθίζεται από τα ανατολικά στα ΝΔ και στην συνέχεια παύει να εμφανίζεται εξαιτίας του ρήγματος.
- Οι τιμές της σε φάση συνιστώσας, η οποία δηλώνει την μαγνητική επιδεκτικότητα, εντόπισαν καθαρά την ύπαρξη λεπτομερούς υλικού στις δύο περιοχές.
- Από την γεωηλεκτρική τομογραφία εντοπίστηκε η περιοχή όπου υπάρχει αδρομερές υλικό, η οποία εμφανίστηκε και στις υπόλοιπες δύο μεθόδους, εντοπίστηκε και το στρώμα του ασβεστόλιθου. Στο νοτιότερο τμήμα της περιοχής έρευνας, σε συμφωνία με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο και το γεωραντάρ, από τις γεωηλεκτρικές τομές εντοπίστηκε η περιοχή με λεπτόκοκκο υλικό όπου έχει διεισδύσει υφάλμυρο νερό.
- Το συνολικό μήκος των γεωηλεκτρικών τομών ήταν κατάλληλο για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας και της διάταξης των υλικών από τον χείμαρρο.
- Οι διατάξεις των οργάνων των τριών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η βέλτιστη. Για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο με τις διαμορφώσεις του CMD-2, με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m και με το CMD-4 βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m.
- Στην ηλεκτρομαγνητική μέθοδο η καταγραφή των μετρήσεων ήταν συνεχής και με ταυτόχρονο εντοπισμό θέσης μέσω GPS
- Η επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις της κάθε μεθόδου, έγινε χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα: το RES2DINV της Geotomo Software, Magpick κ.ά.

### 5.3.5.2 Σχόλια

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

- Ο σχεδιασμός της έρευνας είναι ορθός και προτείνεται σε περιπτώσεις με παρόμοιο αντικείμενο έρευνας με την συγκεκριμένη έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή των γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης, η σειρά εφαρμογής τους, οι διατάξεις και η επεξεργασία των δεδομένων, συνιστάται σε ανάλογες έρευνες.
- Σημαντική ήταν και η παράλληλη εφαρμογή μίας σειράς γεωφυσικών μεθόδων καθώς η μια μέθοδος επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της επόμενης και συνεπώς παρέχει παραπάνω ασφάλεια και ακρίβεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Με την ηλεκτρομαγνητική και την μαγνητική μέθοδο επιτυγχάνεται εξαγωγή γρήγορων και οικονομικών αποτελεσμάτων. Για αυτό και διενεργούνται πρώτες, για να λάβουμε μια γενική και ουσιαστική εικόνα για τη φύση του εδαφικού υλικού και την έκταση του στο χώρο μελέτης
- Η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας είναι πιο χρονοβόρα, επίπονη και ακριβή μέθοδος, όμως έχει ασύγκριτα πλεονεκτήματα από άποψη λεπτομέρειας. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης των εντοπιζόμενων γεωλογικών σχηματισμών σε μεγάλα βάθη.
- Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν στη θέση Λιβιάδι ήρθαν σε συμφωνία μεταξύ τους, καθώς και με την γεωλογική μελέτη που είχε προηγηθεί.
- Εντοπίστηκαν όπως φάνηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια από την μαγνητική μέθοδο, δομές με συμμετρία και διάταξη που θα μπορούσε να αποδοθεί σε **συμπαγή τοιχία** που δημιουργούν **πέταλο** που παρομοιάζει **σε μόλο** της αρχαίας αυτής περιόδου. Αυτό το συμπέρασμα λαμβάνεται και από την ύπαρξη λεπτόκοκκου υλικού αμφότερα του συμπαγούς τοιχίου που του προσδίδει και την κατεύθυνση στον χώρο.
- Δεν υπήρξαν άλλα δεδομένα που να μπορούν να χαρακτηρίσουν την σίγουρη ύπαρξη ενός αρχαίου λιμανιού και μόλο παρά οι πιθανές συμπαγές δομές των τοιχίων με κυριότερη την κεντρική ανάμεσα στην περιοχή του λεπτόκοκκου υλικού. Το μόνο που συμπληρώνει την ιδέα αυτή είναι ότι η ακτή βρισκόταν πολύ κοντά στην περιοχή μελέτης και ίσως οι βάρκες να τοποθετούνταν στον μόλο με κατεύθυνση προς το πέταλα δηλαδή προς τα Ανατολικά της περιοχής μελέτης
- Για την εξακρίβωση των παραπάνω στοιχείων, από την τεχνική αναφορά του καθηγητή Γεώργιου Αποστολόπουλου, επικεφαλής της έρευνας του Εργαστηρίου Γεωφυσικής ΕΜΠ, προτείνει την **εκσκαφή** δύο γραμμών κάθετα στην ακτογραμμή, ανάμεσα στις γεωηλεκτρικές τομές, **με μέγιστο βάθος τα 2 με 2.5 μέτρα** , μήπως και εντοπιστούν αυτά **τα πιθανά τοιχία** και γίνει περαιτέρω ανάλυση αρχαιολογικά.

## 6. Βιβλιογραφία

- Αποστολόπουλος, Γ. (2008, *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)
- Αποστολόπουλος, Γ. (2013, *Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)
- Βαφειδής, Α. (2007, *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική II*. (Τ. Μ. Πόρων, Επιμ.) Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.)
- Ηλιοπούλου Α.(2020, Άσκηση υπαίθρου ηλεκτρομαγνητικών και μαγνητικών μετρήσεων-μελέτη υπόγειου αγωγού-Μεταλλευτική έρευνα)
- Καπατσώρης , Α. (2012, *Τεκτονική Ανάλυση των δύο μεγάλων επωθήσεων στις περιοχές*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών)
- Καριζώνης, Σταύρος (2017, *Γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό της στρωματογραφίας και της τεκτονικής στην περιοχή Λιβιάδι Νήσου Κεφαλληνίας*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)
- ΛΕΚΚΑΣ, Ε., ΔΑΝΑΜΟΣ, Γ., & ΜΑΥΡΙΚΑΣ, Γ. (2001, Σεπτέμβριος 11-17, Γεωλογική Δομή και Εξέλιξη των Νήσων Κεφαλονιάς και Ιθάκης. *Δελτίο της Ελληνικής και Γεωλογικής Εταιρείας*)
- Λούης, Ι. Φ. (2004, *Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική*. Αθήνα: Ε.Κ.Π.Α
- Μιχαλόπουλος, Φώτης (2020, *Γεωφυσική Έρευνα με ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους στις περιοχές Καστέλι και Λιβιάδι της Νήσου Κεφαλληνίας*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)
- Παπαδόπουλος, Τ. (2008, *Εισαγωγή στη Γεωφυσική*. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών)
- Σμπόνιας, Κ., & Ματαράγκα, Κ. (n.d.). *Η αρχαιολογική έρευνα επιφάνειας του Ιονίου Πανεπιστημίου στην Παλική Κεφαλλονιάς*
- Χαραλαμπίδου Εύα,(2003, Βόλος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή επιστημών του Ανθρώπου, Τμήμα Ιστορίας, Αρχαιολογίας και Κοινωνικής Ανθρωπολογίας, Διπλωματική Εργασία-“ Τα αρχαία λιμάνια των Κυκλάδων στους ιστορικούς χρόνους”-)
- Anne Homeister,( 2015, Ground-penetrating radar surveys for the detection of Viking Age and early medieval harbor remains in Sigtuna, Sweden- Master’s Thesis Archaeological Science-Stockholm University VT - Archaeological Research Laboratory)
- Bittlestone, R., Diggle , J., & Underhill, J. (2005, *Odysseus Unbound: The Search for Homer's Ithaca.*)
- Çağlayan Balkaya, Yunus Levent Ekinci, Olcay Çakmak , Michael Blömer ,Julia Arnkens , Mehmet Ali Kaya (A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene (Gaziantep,SE Turkey)-
- DANIEL P. BIGMAN (2010, Η χρήση της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό τάφων και την χαρτογράφηση νεκροταφείων, Ocmulgee National Monument, Georgia USA)
- R. Di Maio, M. La Manna and E. Piegari.(2015, Τρισδιάστατη αναπαράσταση θαμμένων κατασκευών με μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά και γεωηλεκτρικής τομογραφίας δεδομένα με παράδειγμα από την αρχαιολογική θέση της Φαιστού Κρήτης)
- CMD. 2013. Electromagnetic Conductivity User Manual



