



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

**«ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ  
ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παπαδημητρίου Δημήτριος**

**Χίλα Έλντι**

**Επιβλέπων καθηγητής: Αποστολόπουλος Γεώργιος**

**ΑΘΗΝΑ**

**Φεβρουάριος 2022**

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

**«ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ  
ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παπαδημητρίου Δημήτριος**

**Χίλα Έλντι**

**Επιβλέπων καθηγητής: Αποστολόπουλος Γεώργιος**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

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

.....  
**Μαρία Μενεγάκη**  
**Καθηγήτρια Ε.Μ.Π**

.....  
**Γεώργιος Αμολοχίτης**  
**ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π**



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι προϊόν εργασίας με συγκεκριμένες απαιτήσεις και δυσκολίες. Θα θέλαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας στους ανθρώπους που μας βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του ιδιαίτερο τρόπο.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε πρωτίστως και κυρίως τον κ. Αποστολόπουλο Γιώργο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, για την ανάθεση της ερευνητικής εργασίας και την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγηση που μας πρόσφερε από την αρχή της συνεργασίας μέχρι και το πέρας αυτής.

Επιπλέον, ευχαριστούμε τους Διδάκτορες γεωφυσικούς κ. Σταύρο Καριζώνη και κ. Δημήτρη Καραΐσκο για την σημαντική συνεισφορά τους στη διαδικασία των γεωφυσικών μετρήσεων στο Πεταλίδι καθώς και για τη βοήθεια στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Κλείνοντας, θέλουμε να εκφράσουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειά μας, που μας στήριξαν με κάθε δυνατό τρόπο στις επιλογές και τις προσπάθειες μας δίνοντας μας δύναμη, αλλά και στους φίλους μας που βρίσκονταν δίπλα μας συνέχεια



## Περίληψη

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

## **Abstract**

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

# Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Πίνακας εικόνων .....	10
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>14</b>
1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας .....	17
1.2 Δομή της Εργασίας .....	17
<b>2. Θεωρητικό Μέρος.....</b>	<b>19</b>
2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος.....	19
2.1.1 Γενικά .....	19
2.1.2 Ηλεκτρικές Μέθοδοι.....	19
2.1.3 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης .....	20
2.1.4 Παράγοντες επηρεασμού της ειδικής αντίστασης .....	21
2.1.5 Ροή ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο .....	23
2.1.6 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο .....	24
2.1.7 Ροή ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου.....	25
2.1.8 Φαινόμενη ειδική Αντίσταση.....	25
2.1.9 Διατάξεις Ηλεκτροδίων.....	26
2.1.10 Επιλογή Κατάλληλης Διάταξης .....	28
2.1.11 Εξοπλισμός Υπαίθρου.....	30
2.1.12 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις .....	31
2.1.13 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας .....	33
2.2 Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος .....	36
2.2.1 Εισαγωγή .....	36
2.2.2 Τύποι ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων – Εφαρμογές της Μεθόδου .....	36
2.2.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	37
2.2.4 Μεθοδολογία Μετρήσεων.....	38
2.2.5 Βάθος και Ανάλυση .....	39
2.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα .....	41
2.2.7 Μαγνητική Επιδεκτικότητα.....	41
2.2.8 Μεθοδολογία μετρήσεων .....	42
2.2.9 Βάθος και ανάλυση.....	42
2.2.10 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	43

2.2.11 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου .....	43
2.2.12 Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων .....	45
2.2.13 Συστήματα μέτρησης φάσης .....	46
2.2.14 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης .....	48
2.3 Γεωραντάρ – GPR (Ground-Penetrating Radar) .....	49
2.3.1 Γενικά .....	49
2.3.2 Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ .....	50
2.3.3 Τρόποι μετρήσεων στο ύπαιθρο .....	52
2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου Γεωραντάρ .....	54
<b>3. Εφαρμογές .....</b>	<b>55</b>
3.1 Εφαρμογή Α: Διερευνητική γεωφυσική έρευνα με GPR και ERT του Μεσαιωνικού Χωριού του Κάστρου Pancorbo (Burgos, Ισπανία) .....	55
3.1.1 Εισαγωγή .....	56
3.1.2 Τοποθεσία .....	56
3.1.3 Μεθοδολογία .....	57
3.1.4 Αποτελέσματα .....	60
3.1.5 Συμπεράσματα .....	64
3.2 Εφαρμογή Β: Μια προκλητική αρχαιο-γεωφυσική έρευνα μέσω GPR και ERT στο Keber Tere, City Hill of Doliche,(Gaziantep, NA Τουρκία) .....	65
3.2.1 Εισαγωγή .....	65
3.2.2 Ιστορία και γεωλογία .....	66
3.2.3 Γεωφυσική έρευνα .....	67
3.2.4 Έρευνα γεωραντάρ .....	69
3.2.5 Έρευνα ERT .....	70
3.2.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων .....	71
3.2.7 Συμπεράσματα .....	87
3.3 Γεωφυσική έρευνα στο Khirbat Faynan, μια τοποθεσία αρχαίου αναχώματος στη Νότια Ιορδανία .....	89
3.3.1 Εισαγωγή .....	89
3.3.2 Μεθοδολογία .....	92
3.3.3 Αποτελέσματα και συζήτηση .....	97
3.3.4 Συμπεράσματα .....	98
<b>4. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στη περιοχή Πεταλίδι του Νομού Μεσσηνίας .....</b>	<b>100</b>
4.1 Γενικά και γεωλογία .....	100
4.2 Ιστορική αναδρομή της περιοχής .....	101

<b>5. Γεωφυσική έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα .....</b>	<b>104</b>
5.1 Γενικά .....	104
5.2 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	107
5.2.1 Γενικά .....	107
5.2.2 Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες .....	109
5.3 Μέθοδος γεωηλεκτρικής τομογραφίας.....	115
5.3.1 Γενικά .....	115
5.3.2 Γεωηλεκτρικές τομές .....	118
5.4 Μέθοδος Γεωραντάρ.....	123
5.4.1 Εισαγωγή .....	123
5.4.2 Οριζόντιες τομές γεωραντάρ μετά από τρισδιάστατη επεξεργασία .....	124
<b>6. Συζήτηση – Συμπεράσματα.....</b>	<b>129</b>
<b>7. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>131</b>

## Πίνακας εικόνων

Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημίπειρο ομογενή χώρο .....	21
Εικόνα 2.2: Απεικόνιση επίσης ροής ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003).....	24
Εικόνα 2.3: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημίπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003).....	24
Εικόνα 2.4: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές επιφάνειες σε ημίπειρο ομογενή χώρο με δύο σημειακές πηγές (Λούης, 2003).....	25
Εικόνα 2.5: Διάταξη Schlumberger .....	26
Εικόνα 2.6: Διάταξη Wenner .....	26
Εικόνα 2.7: Διάταξη Dipole-Dipole.....	27
Εικόνα 2.8: Διάταξη Pole-Pole .....	27
Εικόνα 2.9: Διάταξη Pole-Dipole .....	28
Εικόνα 2.10: Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Vogelsang, 1995).....	31
Εικόνα 2.11: Ηλεκτρική βυθοσκόπηση σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης (Λούης, 2003).....	32
Εικόνα 2.12: Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole-Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.....	33
Εικόνα 2.13: Διάρθρωση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα, με τη βοήθεια προεπιλεγμένου αλγορίθμου. ....	34
Εικόνα 2.14: Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων .....	35
Εικόνα 2.15: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002).....	39
Εικόνα 2.16: Επίδραση της συχνότητας της «EMI» και του βάθους στόχων. Οι γραμμικές απεικονίσεις αντιπροσωπεύουν το σχετικό μέγεθος των μετρήσεων αγωγιμότητας και τα σχέδια αντιπροσωπεύουν τις κατωτέρω διατομές ενός αντικείμενου που θάβεται στα διαφορετικά βάθη. Τα ημικύκλια παρουσιάζουν τα όρια της διείσδυσης βάθους λόγω της συχνότητας. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι το (α), ένα ρηχό αντικείμενο μετρημένο με μια σχετικά υψηλή συχνότητα. Εάν το ίδιο αντικείμενο μετρηθεί με μια χαμηλότερη συχνότητα (b), μια μεγαλύτερη περιοχή μετρείται και μια ανωμαλία μικρότερου μεγέθους καταγράφεται. Εντούτοις, όταν τα βαθύτερα αντικείμενα είναι ο στόχος, μια υψηλότερη συχνότητα (c) μπορεί να μην διαπεράσει αρκετά βαθιά το έδαφος, έτσι το αντικείμενο δεν θα ανιχνευόταν. Η καλύτερη προσέγγιση για τα αντικείμενα που είναι γνωστό ότι είναι βαθιά, είναι να χρησιμοποιηθεί μια χαμηλότερη συχνότητα (d). (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013).....	40
Εικόνα 2.17: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. Το πηνίο αποστολής σημάτων (T) δημιουργεί ένα αρχικό πεδίο της «EMI» που διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις. Αυτό αναγκάζει τα ρεύματα να ρέυσουν στα αγωγίμα αντικείμενα όπως το κοίλωμα που παρουσιάζεται εδώ. Τα ρεύματα δημιουργούν στη συνέχεια ένα δευτερεύον πεδίο. Και τα αρχικά και τα δευτερεύοντα πεδία μετριοούνται στο πηνίο του δέκτη (R).....	44
Εικόνα 2.18: Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου.....	47
Εικόνα 2.19: Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης CMD2, CMD4.....	49
Εικόνα 2.20: Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013).....	51
Εικόνα 2.21: Το πρώτο σχήμα απεικονίζει την λειτουργία Common Offset, ενώ το δεύτερο την λειτουργία Common Mid-point (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002) .....	52
Εικόνα 2.22: Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάση της συχνότητας κεραίας του γεωραντάρ. ....	53

Εικόνα 2.23: Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων .....	53
Εικόνα 3.1 : Χάρτης τοποθεσίας του Pancorbo καθώς και της περιοχής έρευνας.....	55
Εικόνα 3.2 : Εικόνα του οχρωματικού τειχίου στη περιοχή της Santa Marta.....	57
Εικόνα 3.3 : Η περιοχή έρευνας με συντεταγμένες UTM. Οι κόκκινες γραμμές αφορούν ,τα προφίλ GPR W-E (P1 έως P26) και Νότος-Βορράς (T1 έως T5). Εμφανίζονται επίσης τα προφίλ ERT (τα ηλεκτρόδια είναι οι γκρι κουκκίδες). .....	58
Εικόνα 3.4 : Προφίλ ERT P1 έως P4 WEST-EAST και προφίλ T1-T2 SOUTH-NORTH (κίτρινο τελείες). Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα προφίλ GPR. ....	59
Εικόνα 3.5 : Τρισδιάστατη τοποθέτηση προφίλ ERT ειδικής αντίστασης Wenner-Schlumberger. Η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνεται με το βάθος. Τα δύο πρώτα μέτρα επιτρέπουν πιο λεπτομερή ερμηνεία. ....	60
Εικόνα 3.6 : a) Μοντέλο BERT διαφορετικών διατάξεων τοιχίων, b) Αναμενόμενο προφίλ ειδικής αντίστασης (συνθετικό). c) Προφίλ πραγματικής ειδικής αντίστασης (ERT P1 έως 4,4 m σε βάθος) με παρόμοια χαρακτηριστικά. d) Προφίλ GPR (GPR P1). Ορατές ζώνες ανωμαλιών σημειώνονται με κόκκινο χρώμα. e) Ενέργεια υπολογισμένη για τη διάταξη GPR P1.....	62
Εικόνα 3.7: Χάρτης, GPR, του ίχνους ενέργειας των ανωμαλιών. Τα μαύρα σχέδια είναι οι κατασκευές που βρέθηκαν μετά τις ανασκαφές. ....	63
Εικόνα 3.8: Χάρτες θέσης της περιοχής μελέτης. ....	67
Εικόνα 3.9: Μερικές φωτογραφίες του προϊστορικού σπηλαίου από έξω και μέσα.....	68
Εικόνα 3.10: (a, b) Όψεις από την αψίδα και τους κεντρικούς κλίτους της χριστιανικής βασιλικής στη νότια πλαγιά του λόφου της πόλης (c, d) Θέα από ένα μεγάλο κτίριο αστικών λουτρών της ρωμαϊκής περιόδου που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της πόλης. ....	68
Εικόνα 3.11: (a) Τοπογραφικός χάρτης του Keber Tepe, (b-d) SA-1, SA-2, και SA-3 φωτογραφημένες από drone και οι περιοχές γεωφυσικής μελέτης.....	69
Εικόνα 3.12: Τομείς μελέτης GPR και EPT και οι προσανατολισμοί ορισμένων προφίλ.....	70
Εικόνα 3.13: Εικόνες από τις έρευνες GPR και ERT του 2020 που έγιναν στο SA-3.....	71
Εικόνα 3.14: Οι χάρτες βάθους GPR που ελήφθησαν από το SA-1 επικαλύπτονταν στην εικόνα του drone.....	71
Εικόνα 3.15: Εικόνες GPR ορισμένων προφίλ στο SA-1.....	72
Εικόνα 3.16: Εικόνες ERT ορισμένων προφίλ στο SA-1.....	73
Εικόνα 3.17: Μερικές ογκομετρικές αναπαραστάσεις της κατανομής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στο SA-1.....	74
Εικόνα 3.18: Σύγκριση ορισμένων χαρτών βάθους GPR και ERT που ελήφθησαν από το SA-1.....	76
Εικόνα 3.19: Οι χάρτες βάθους GPR που ελήφθησαν από το SA-2 επικαλύπτονταν στην εικόνα του drone.....	78
Εικόνα 3.20: Εικόνες GPR ορισμένων προφίλ στο SA-2.....	79
Εικόνα 3.21: Εικόνες ERT ορισμένων προφίλ στο SA-2.....	80
Εικόνα 3.22: Μερικές ογκομετρικές αναπαραστάσεις της κατανομής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στο SA-2.....	81
Εικόνα 3.23: Σύγκριση ορισμένων χαρτών βάθους GPR και ERT που ελήφθησαν από το SA-2.....	82
Εικόνα 3.24: Οι χάρτες βάθους GPR που ελήφθησαν από το SA-3 επικαλύπτονται στην εικόνα του drone.....	83
Εικόνα 3.25: Εικόνες GPR ορισμένων προφίλ στο SA-3.....	84
Εικόνα 3.26: Εικόνες ERT ορισμένων προφίλ στο SA-3.....	84
Εικόνα 3.27: Αεροφωτογραφίες με το drone τραβηγμένες (α) πριν (β) κατά τη διάρκεια και (γ) μετά την αρχαιολογική τάφρο στην αυλή της εκκλησίας. ....	85

Εικόνα 3.28: Σύγκριση ορισμένων τομογραφιών βάθους GPR και ορισμένων τομογραφιών ERT με τα αρχαιολογικά ευρήματα που εκτέθηκαν στο SA-3.....	87
Εικόνα 3.29: Χάρτης της περιοχής που δείχνει την τοποθεσία του Khirbet Faynan .....	89
Εικόνα 3.30: Το Khirbat Faynan, στη κοιλάδα Faynan.....	90
Εικόνα 3.31: Ανασκαφές στην πύλη φρουρίου της Εποχής του Σιδήρου στο Khirbat en-Nahas. ....	91
Εικόνα 3.32: Στοιχεία EMI που αποκτήθηκαν στο Khirbat Faynan. Οι ελλείψεις με μπλε χρώμα δείχνουν ενδιαφέρουσες περιοχές χαμηλής αγωγιμότητας. Οι μωβ ελλείψεις υποδεικνύουν περιοχές υψηλής αγωγιμότητας που μπορεί να σχετίζονται με προηγούμενη ανθρώπινη δραστηριότητα. ....	94
Εικόνα 3.33 : Δισδιάστατη γραμμή ERT στη δυτική πλευρά του λόφου. ....	96
Εικόνα 3.34 : Ημιδιάφανη οριζόντια φέτα ERT σε βάθος 1 m, τοποθετημένη πάνω από αεροφωτογραφία της ανασκαφής.....	96
Εικόνα 3.35: Οι τοίχοι που βρέθηκαν κατά την ανασκαφή, επάλληλοι στην ERT σε βάθος 1 m. ....	98
Εικόνα 4.1: Η εικόνα της περιοχής που έγινε η έρευνα, όπως φαίνεται από το Google Earth. ....	100
Εικόνα 5.1: Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι τρεις τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας. ....	105
Εικόνα 5.2: Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής (με πράσινο, κόκκινο, μπλε για συνολικό βάθος 6μ, με μωβ για συνολικό βάθος 3μ). ..	105
Εικόνα 5.3: Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι μετρήσεις γεωραντάρ (με κόκκινο, έως βάθος 6μ, με μωβ έως βάθος 3μ) .....	106
Εικόνα 5.4: Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής με CMD-2 για συνολικό βάθος 3μ. ....	107
Εικόνα 5.5 : Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής με CMD-4 για συνολικό βάθος 6μ. ....	108
Εικόνα 5.6: Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας μέχρι βάθους 6μ. Στη άνω αριστερά περιοχή (μωβ περίγραμμα) του χάρτη έχει τοπικά πολύ χαμηλές αγωγιμότητες που μπορεί να συνδέονται με αρχαίες κατασκευές. Το καφέ περίγραμμα συμβολίζει τα όρια του επιχώματος και των αποθέσεων του, βλέπουμε ότι και εκεί υπάρχουν περιοχές με χαμηλές αγωγιμότητες. ....	109
Εικόνα 5.7: Ο χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.6 όπως φαίνεται στο Google Earth.....	110
Εικόνα 5.8: Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.6. ....	111
Εικόνα 5.9: Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.6 όπως φαίνεται στο Google Earth. ....	111
Εικόνα 5.10: Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της σε φάση συνιστώσας μέχρι βάθους 6μ. ....	112
Εικόνα 5.11: Ο χάρτης της σε φάσης συνιστώσας όπως φαίνεται στο Google Earth.....	112
Εικόνα 5.12: Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας έως βάθους 3μ. ....	113
Εικόνα 5.13: Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας έως βάθους 3μ όπως φαίνεται στο Google Earth. ....	113
Εικόνα 5.14: Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.12. ....	114
Εικόνα 5.15: Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της 5.12 όπως φαίνεται στο Google Earth. ....	114



Εικόνα 5.16: Με τις κίτρινες κουκκίδες φαίνεται η PET-RES-1, με τις μπλε η PET-RES-2 και με τις κόκκινες πάνω στο επίχωμα η PET-RES-3.....	116
Εικόνα 5.17: Φωτογραφία από την θέση της PET-RES-1 .....	116
Εικόνα 5.18: Φωτογραφία από την θέση της PET-RES-2. ....	117
Εικόνα 5.19: Φωτογραφία από την θέση της PET-RES-3. ....	117
Εικόνα 5.20: Η τομογραφία με τη διάταξη Schlumberger. ....	118
Εικόνα 5.21: Η τομογραφία με τη διάταξη dipole-dipole. ....	118
Εικόνα 5.22: Η τομογραφία με τη διάταξη Schlumberger. ....	119
Εικόνα 5.23: Η τομογραφία με τη διάταξη dipole-dipole. ....	120
Εικόνα 5.24: Η τομογραφία με τη διάταξη Schlumberger. ....	121
Εικόνα 5.25: Η τομογραφία με τη διάταξη dipole-dipole. ....	121
Εικόνα 5.26: Η θωρακισμένη αντένα 100MHz.....	123
Εικόνα 5.27: Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι μετρήσεις γεωραντάρ (με κόκκινο για βάθος διασκόπησης 8μ, με μωβ για βάθος 4μ).....	124
Εικόνα 5.28: Οριζόντιες τομές γεωραντάρ, παρουσιαζόμενες με τρισδιάστατο τρόπο, αποτύπωσης μεγέθους του πλάτους των ανακλάσεων του σήματος γεωραντάρ που δημιουργούνται από ασυνέχειες δομών διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς και αγωγιμότητας για βάθη 2.5m, 3.0m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 5.0m. ....	126
Εικόνα 5.29: Φωτογραφία από την απόκτηση μετρήσεων στον δρόμο με την θωρακισμένη αντένα 100MHz όπου φαίνονται και ήδη αποκαλυμμένα αρχαία τοιχεία. ....	127
Εικόνα 5.30: Οριζόντια τομή γεωραντάρ αποτύπωσης μεγέθους πλάτους ανάκλασης με διαφορετικό λογισμικό απ' ότι προηγούμενα για βάθος 3μ όπου οι κόκκινες αποχρώσεις μας δείχνουν θέσεις δομών που δημιουργούν τοπικές ισχυρές ανακλάσεις και μπορεί να σχετίζονται με θέσεις αρχαίων τοιχείων. Η τομή γεωραντάρ έχει αποθεθεί επάνω στο Google Earth χάρτη. ....	127
Εικόνα 5.31: Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι μετρήσεις γεωραντάρ με μωβ για βάθος 4μ. ....	128
Εικόνα 5.32: Οριζόντιες τομές γεωραντάρ, παρουσιαζόμενες με τρισδιάστατο τρόπο, αποτύπωσης μεγέθους του πλάτους των ανακλάσεων του σήματος γεωραντάρ που δημιουργούνται από ασυνέχειες δομών διηλεκτρικής σταθεράς και αγωγιμότητας για βάθη 0.4m, 0.5m, 0.6m, 0.7m, 0.8m.....	128

# 1. Εισαγωγή

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

Με μια πλατιά έννοια, η Γεωφυσική περιλαμβάνει την μελέτη της «στερεάς» Γης, της θάλασσας, της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας. Έχει επικρατήσει όμως διεθνώς, η Γεωφυσική να ταυτίζεται σχεδόν με τη Φυσική της «στερεάς» Γης, δηλαδή την Φυσική του εσωτερικού της Γης, ενώ για τις άλλες επιστήμες χρησιμοποιούνται ειδικά ονόματα όπως Ωκεανογραφία, Μετεωρολογία, Φυσική της Ατμόσφαιρας κ.λπ. Από άποψη μεθόδων έρευνας, η Γεωφυσική ανήκει στους εφαρμοσμένους κλάδους της Φυσικής, ενώ από άποψη αντικείμενου αποτελεί κλάδο των Γεωεπιστημών όπου ανήκουν η Γεωδαισία, η Γεωλογία, η Γεωχημεία και η Γεωγραφία.

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

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

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

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

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

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

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

## **1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας**

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στη περιοχή Πεταλίδι του Νομού Μεσσηνίας. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς δομές (αρχαία κτίσματα ή τοιχεία). Για την πραγματοποίηση του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας, επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση τριών διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, βάσει γεωλογικών και αρχαιολογικών στοιχείων:

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

## **1.2 Δομή της Εργασίας**

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

- 2ο Κεφάλαιο: Γίνεται αναλυτική περιγραφή του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία κάθε μεθόδου που εφαρμόστηκε στην έρευνα.
- 3ο Κεφάλαιο: Γίνεται αναφορά σε εφαρμογές της γεωφυσικής για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και ανθρωπογενών (αρχαιολογικών)

σχηματισμών. Σκοπός της ανάλυσης αυτών είναι να γίνει επεξεργασία των σχεδίων άλλων γεωφυσικών ομάδων για την πραγματοποίηση παρόμοιων ερευνών με τη δική μας.

- 4ο Κεφάλαιο: Γίνεται γενική περιγραφή της περιοχής έρευνας Πεταλίδι του νομού Μεσσηνίας (Τοποθεσία, Ιστορικά στοιχεία και Γεωλογία) που καλύφθηκε με τις γεωφυσικές μεθόδους.
- 5ο Κεφάλαιο: Γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού της γεωφυσικής έρευνας, που περιλαμβάνει τη κατάλληλη επιλογή γεωφυσικών μεθόδων, σειρά εφαρμογής και διατάξεις κάθε μεθόδου. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην ύπαιθρο καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έγινε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Δίνονται τα αποτελέσματα της κάθε γεωφυσικής μεθόδου που εκτελέστηκε και διατυπώνεται η ερμηνεία αυτών. Τέλος, παρουσιάζονται συνολικά συμπεράσματα και σχόλια για την κάθε περιοχή που μελετήθηκε.
- 6ο Κεφάλαιο: Παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη και επιχειρηματολογία των κεφαλαίων.

## 2. Θεωρητικό Μέρος

### 2.1 Ηλεκτρική Μέθοδος

#### 2.1.1 Γενικά

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

#### 2.1.2 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

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

##### Παθητικές Μέθοδοι:

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

##### Ενεργητικές Μέθοδοι:

- Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method): Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο παράγεται από πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, χαμηλής συχνότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το συγκεκριμένο μετρούμενο δυναμικό και μπορούν επομένως να χαρτογραφηθούν με την χρήση της μεθόδου, περιλαμβάνουν την παρουσία και την ποιότητα, τόσο των ρευστών και των πόρων, όσο και των αργίλων. Χρησιμοποιείται, έτσι, ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, σε μέσα βάθη διασκόπησης.

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

### 2.1.3 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

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

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

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

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

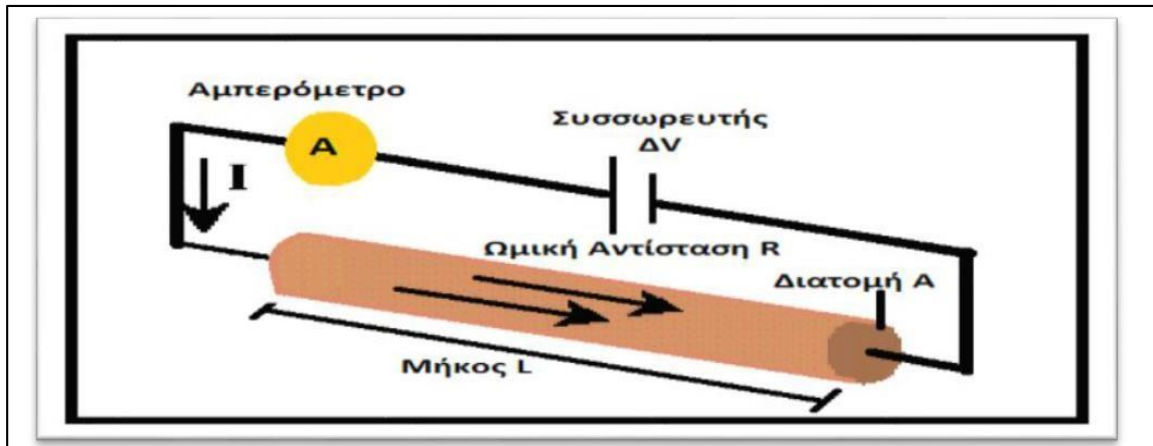
όπου, ΔV η τάση σε Volt και I η ένταση του ρεύματος σε Ampere.

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

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

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





Εικόνα 2.1: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

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

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

### 2.1.4 Παράγοντες επηρεασμού της ειδικής αντίστασης

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

- Το είδος του πετρώματος: Κάθε είδος ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα εύρη τιμών ειδικών αντιστάσεων διαφόρων υλικών. Παρατηρούμε πως τις υψηλότερες τιμές παρουσιάζουν τα πυριγενή πετρώματα, ενώ τις χαμηλότερες παρουσιάζουν τα ιζηματογενή. Αυτό συμβαίνει διότι τα τελευταία έχουν συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα, φαίνονται να παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες τις τάσεις αλληλοεπικάλυψης.
- Η δομή και το πορώδες: Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες του πετρώματος, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση.

- Η περιεκτικότητα σε άλατα: Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότερα, του ρευστού πλήρωσης των πόρων, σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος.
- Οι επιδράσεις των γεωλογικών διεργασιών: Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση, αλλά επίσης φαίνεται και στον Πίνακα 2.2, υπάρχουν και κάποιες εξαιρέσεις όπως η σκλήρυνση, η ιζηματοποίηση κ.ά..
- Ηλικία πετρώματος: Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών: Η ύπαρξη αργιλικών ορυκτών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία χαμηλών τιμών επαγωγικής ειδικής αντίστασης. Αυτό συμβαίνει λόγω της αυξημένης αγωγιμότητάς της.
- Βαθμός κορεσμού: Όσο ο βαθμός κορεσμού του πετρώματος αυξάνεται, η ειδική ηλεκτρική του αντίσταση μειώνεται.
- Θερμοκρασία: Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Ωστόσο, ο παράγοντας έχει πολύ μικρή επίδραση, επομένως παίζει ρόλο άξιο αναφοράς μόνο σε γεωθερμικά συστήματα και όχι σε γεωτεχνικές ή περιβαλλοντικές μελέτες.

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ( $\Omega \cdot m$ )
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	$1 - 1 \times 10^2$
Λσβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \times 10^3$
Δομολίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1 \times 10^3$
Άργιλος	$1 - 1 \times 10^2$
Εδαφικό Νερό	0,5 - 300
Θαλασσινό Νερό	0,2

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

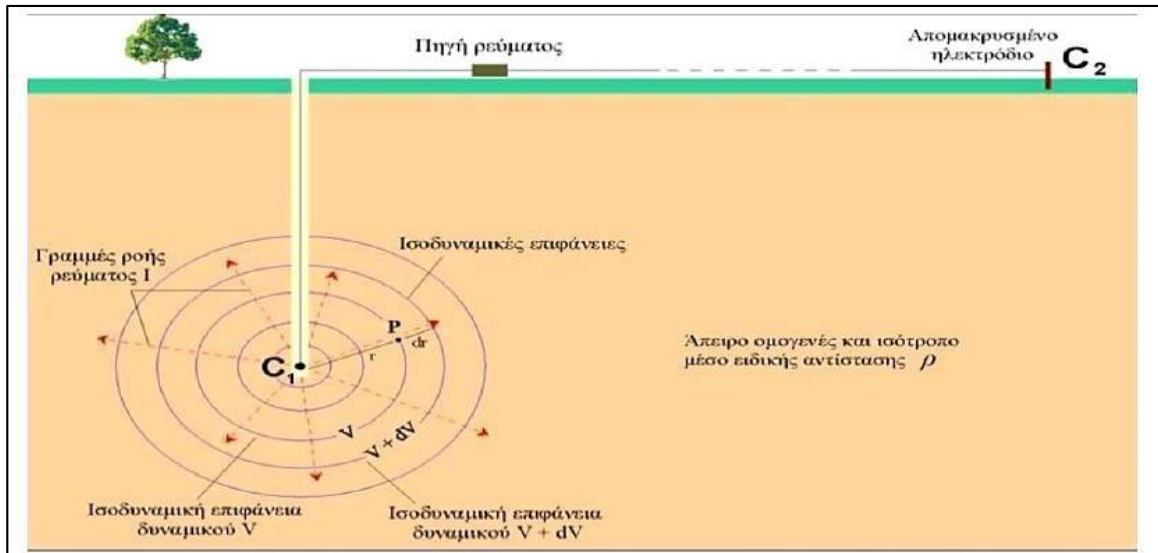
ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αργίλική εξαλλοίωση	Ελάττωση
Διάλυση	Ελάττωση
Ρηγμάτωση	Ελάττωση
Εισροή θαλασσινού νερού	Ελάττωση
Διάτμηση	Ελάττωση
Αποσάθρωση	Ελάττωση
Σκλήρυνση	Αύξηση
Ιζηματοποίηση	Αύξηση
Απολίθωση	Αύξηση
Μεταμόρφωση	Ελάττωση ή Αύξηση

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

### 2.1.5 Ροή ρεύματος σε Άπειρο Ομογενή Χώρο

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

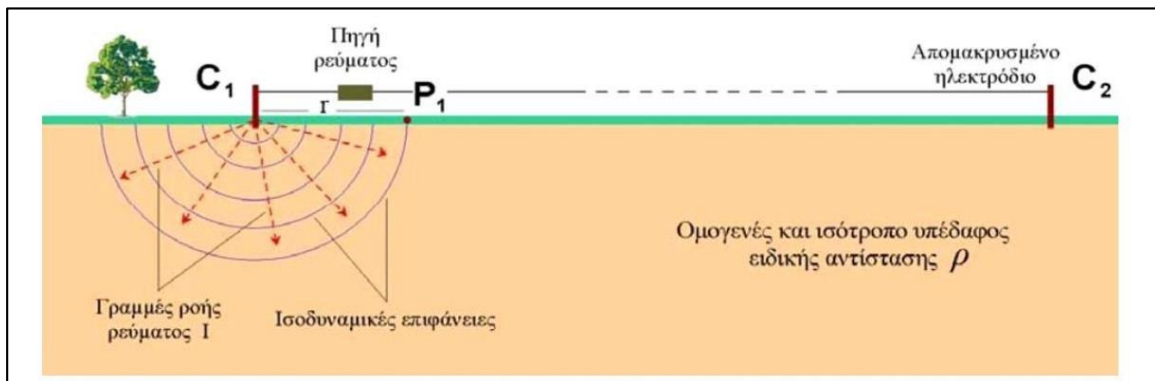
Για την εφαρμογή στην πράξη αυτού του μοντέλου τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο C1 μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά στο ομογενές και ισότροπο μέσο. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου C2, το οποίο τοποθετείται στη επιφάνεια της γης και σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στην διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος  $I$  είναι ακτινικές, ξεκινούν από την σημειακή πηγή C1 και κατευθύνονται επίσης τα έξω. Η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, παραμένει σταθερή κατά μήκος κυκλικών γραμμών, οι οποίες έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές (equipotentials) και όσον αφορά τις τρεις διαστάσεις, σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες, με κέντρο πάλι το ηλεκτρόδιο (Εικόνα 2.2).



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

### 2.1.6 Ροή ρεύματος σε Ημιάπειρο Ομογενή Χώρο

Το μοντέλο που αναλύθηκε παραπάνω, εφαρμόζεται και σε περίπτωση ημιάπειρου ομογενή χώρου. Η διαδικασία σε αυτήν την περίπτωση έχει ως εξής: Τοποθετούμε ένα ηλεκτρόδιο  $C_1$  στην επιφάνεια ηλεκτρικά ομογενούς μέσου. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου,  $C_2$ , το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια, αλλά σε αρκετά μακρινή απόσταση, έτσι ώστε η επίδρασή του στην διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος  $I$  είναι, και στην περίπτωση του άπειρου ομογενούς μέσου, ακτινικές και ξεκινούν από τη σημειακή πηγή επίσης τον ημιχώρο. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες, από την άλλη, είναι κάθετες στις γραμμές ροής και σχηματίζουν ομόκεντρα ημισφαίρια, με κέντρο το ηλεκτρόδιο  $C_1$  (Εικόνα 2.3).

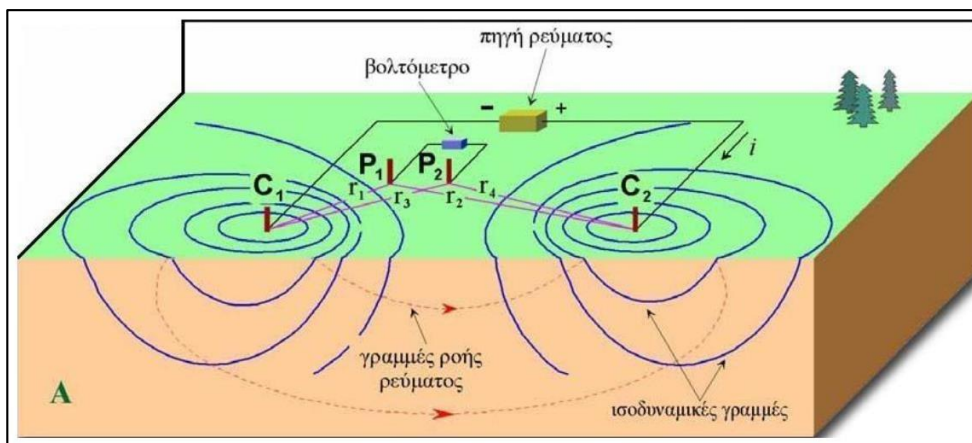


Εικόνα 2.3: Απεικόνιση της ροής ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο (Λούης, 2003)

## 2.1.7 Ροή ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου

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

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



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

## 2.1.8 Φαινόμενη ειδική Αντίσταση

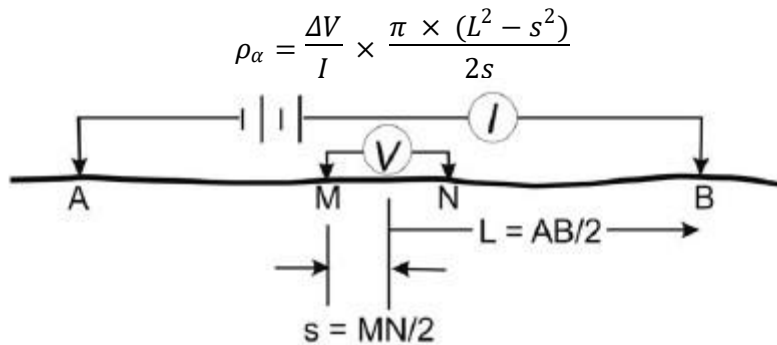
Σε ένα ισότροπο και ομογενές μέσο, η ειδική αντίσταση είναι σταθερή και ανεξάρτητη των σχετικών θέσεων των τεσσάρων ηλεκτροδίων και θα ισούται με την ειδική αντίσταση του μέσου.

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

## 2.1.9 Διατάξεις Ηλεκτροδίων

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

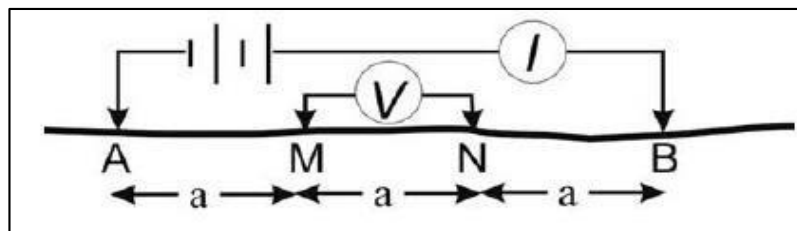
- Διάταξη Schlumberger:  
Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις  $L$  και  $s$  αντίστοιχα.



Εικόνα 2.5: Διάταξη Schlumberger

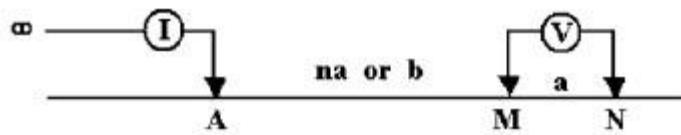
- Διάταξη Wenner:  
Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με  $a$ .

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



Εικόνα 2.6: Διάταξη Wenner

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

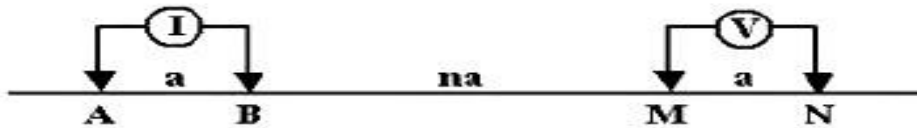


• Διάταξη Dipole-Dipole:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση

με  $a$ , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού μεταξύ τους. Όσον αφορά την

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

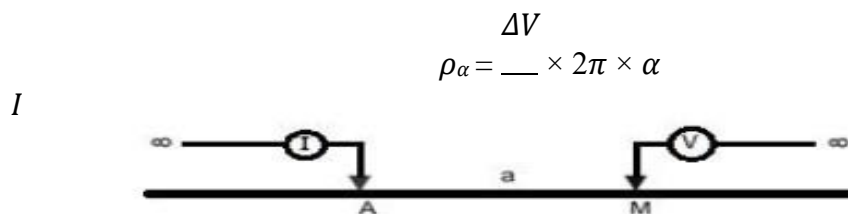


απόσταση μεταξύ των δύο δίπολων, είναι πολλαπλάσια της απόστασης  $a$  ( $na$ ).

Εικόνα 2.7: Διάταξη Dipole-Dipole

• Διάταξη Pole-Pole:

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



Εικόνα 2.8: Διάταξη Pole-Pole

• Διάταξη Pole-Dipole:

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

**Εικόνα 2.9:** Διάταξη Pole-Dipole

### **2.1.10 Επιλογή Κατάλληλης Διάταξης**

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

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



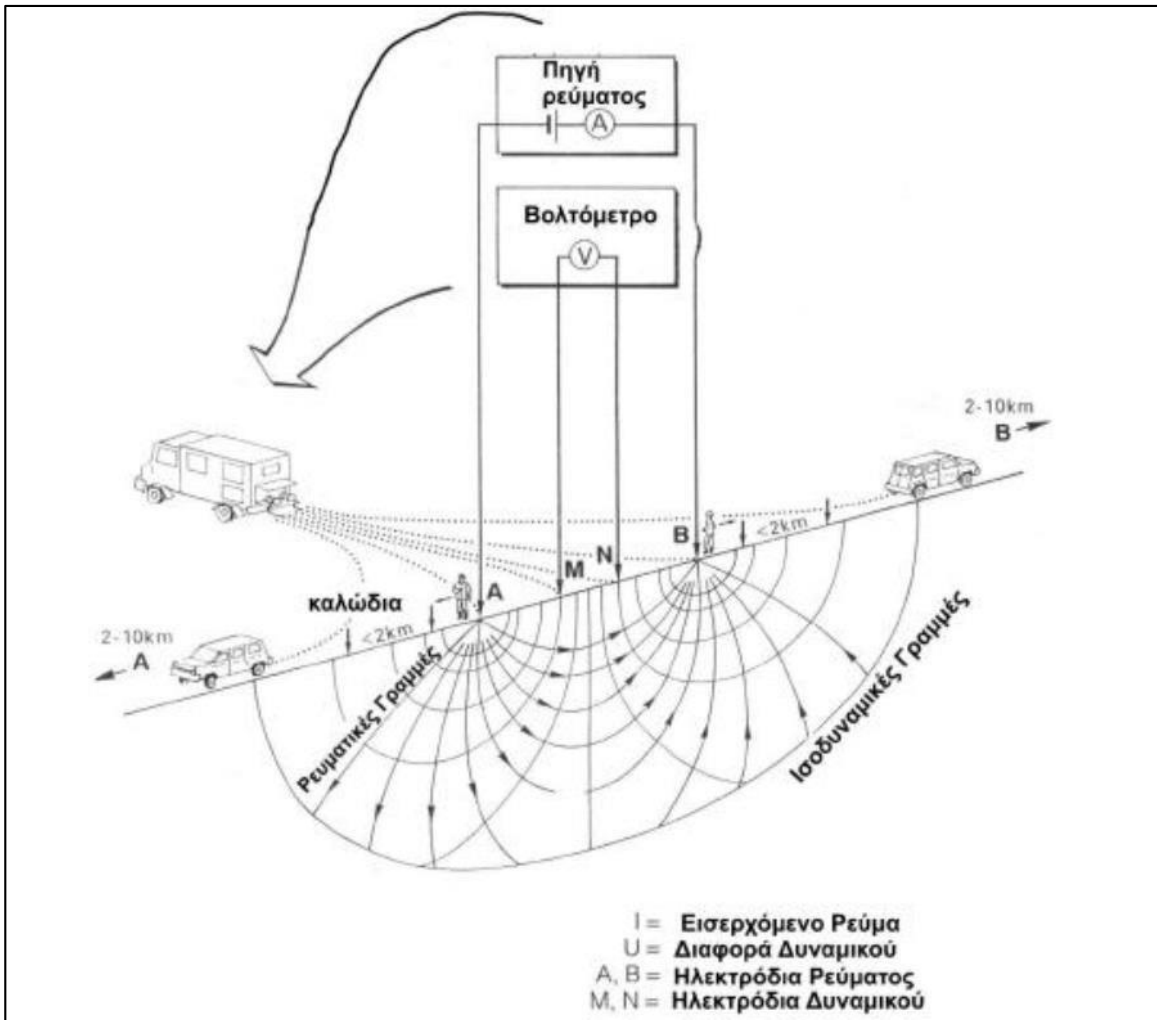
	<u>Wenner</u>	<u>Schlumberger</u>	<u>Pole-Dipole</u>	<u>Dipole-Dipole</u>
Λόγος σήματος προς θόρυβο	**	*		
Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες			*	**
Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση	*	**		
Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων	**	**		
Ευαισθησία στην μορφολογία του υποβάθρου			*	**
Βάθος διασκόπησης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

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

### 2.1.11 Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να μετρήσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση, δηλαδή τα  $\Delta V$  και  $I$ , χρειαζόμαστε:

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



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

### 2.1.12 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις

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

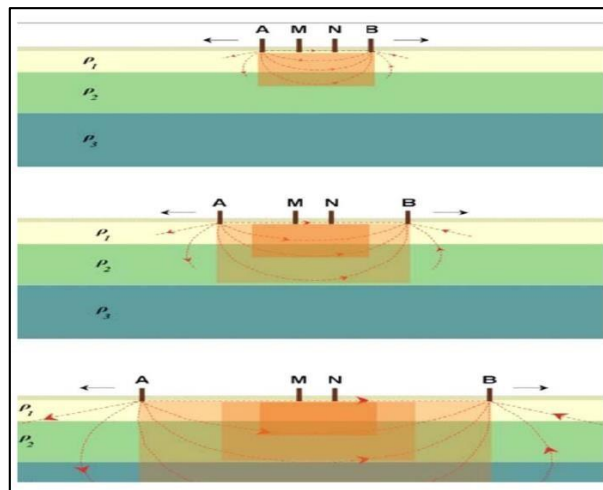
- **Ηλεκτρική βυθοσκόπηση**

Η περιγραφή επίσης γεωλογικής δομής του υπεδάφους κατά την εφαρμογή της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης, βασίζεται στις κατακόρυφες μεταβολές, με

αποτέλεσμα τον υπολογισμό των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του πάχους ή/και του βάθους των γεωλογικών στρωμάτων.

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

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



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

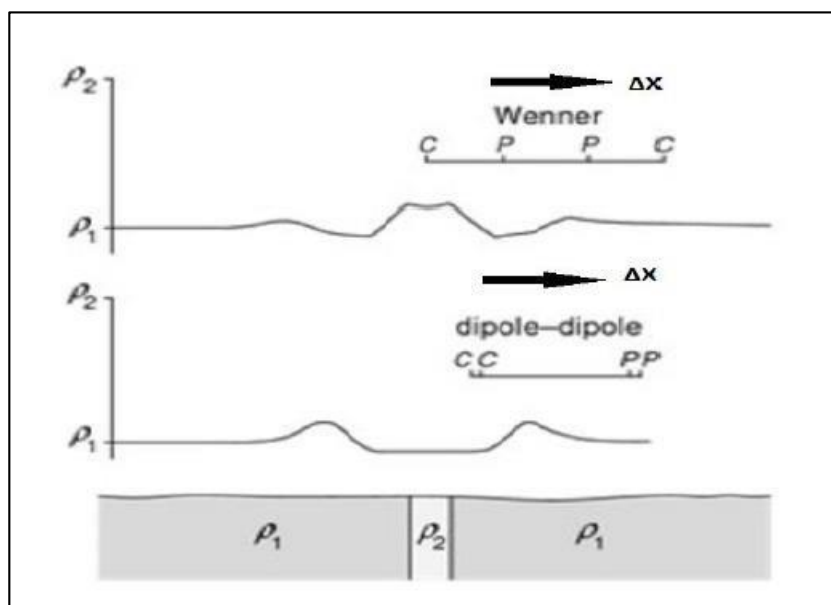
### • Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης

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

χαρτογράφηση είναι κατάλληλη για περιπτώσεις αναζήτησης μεταλλευμάτων ή αρχαιοτήτων.

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

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

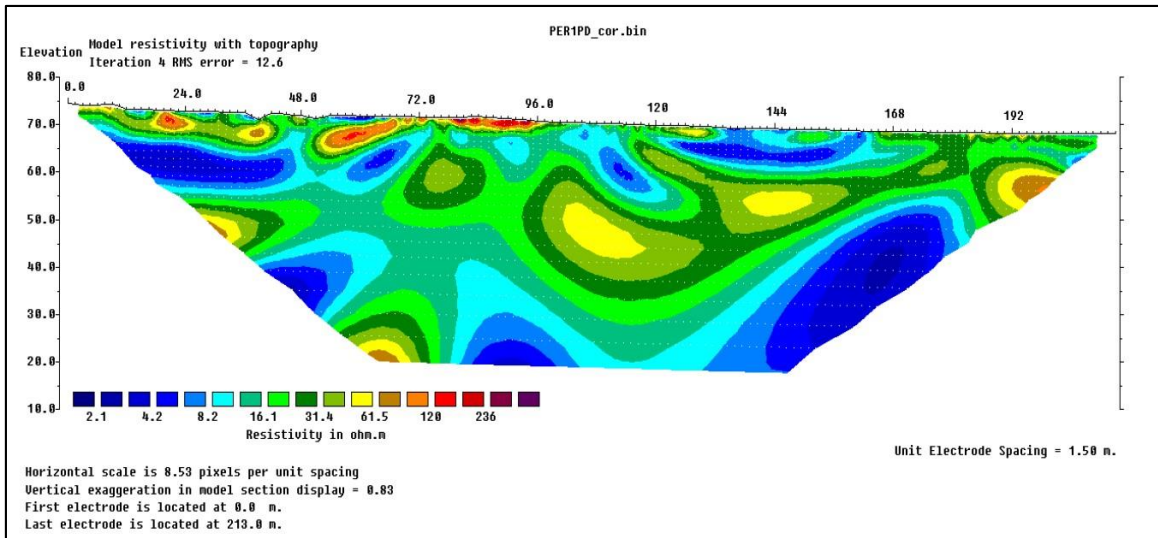


Εικόνα 2.12: Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner και Dipole-Dipole, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους.

### 2.1.13 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

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





**Εικόνα 2.14:** Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

## 2.2 Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

### 2.2.1 Εισαγωγή

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

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

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

Πίνακας 2.4: Εφαρμογές και στόχοι ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

### 2.2.2 Τύποι ηλεκτρομαγνητικών Συστημάτων – Εφαρμογές της Μεθόδου

Έχουμε συστήματα δύο ειδών:

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

Επιπροσθέτως, τα συστήματα διαφέρουν με βάση την πηγή:

- Παθητικά: Χρησιμοποιούνται φυσικά υπεδafικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα π.χ. Μαγνητοτελλουρικά.



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

Τέλος, τα επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά συστήματα διακρίνονται σε:

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

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

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

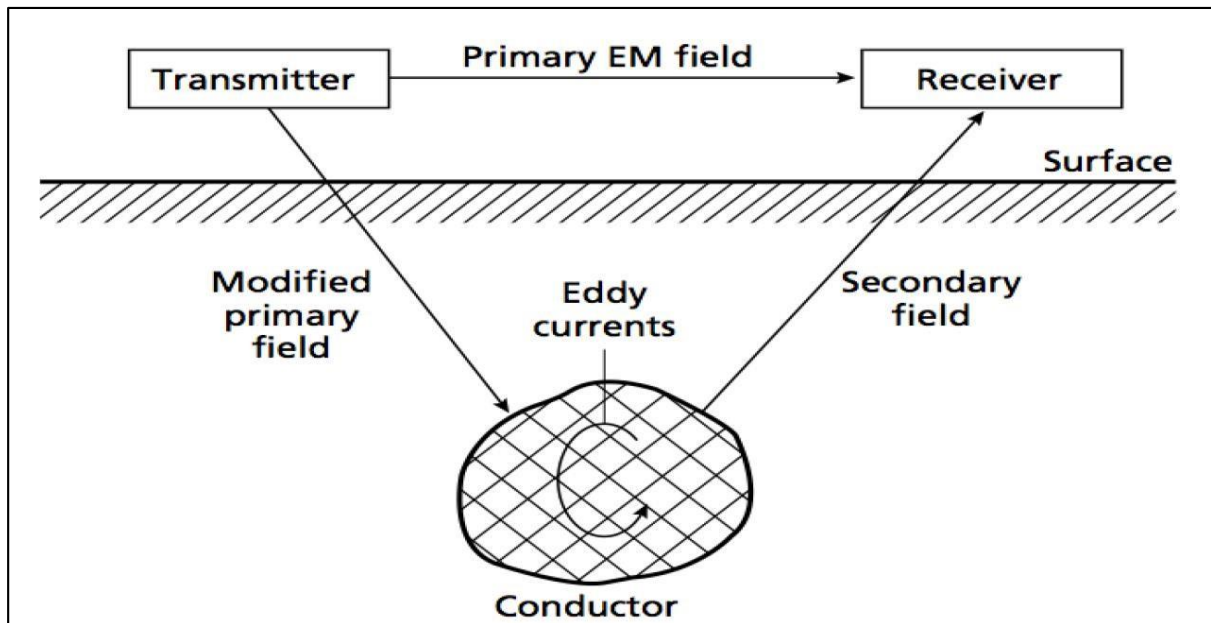
### 2.2.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα το ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό και μετριέται σε Siemens ανά μέτρο (S/m). Ένα Siemens είναι αντίστροφο του Ohm ( $S=1/Ohm$ ). Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι τα στοιχεία αγωγιμότητας είναι συχνά συγκρίσιμα με αυτά της αντίστασης που λαμβάνεται με τα σήματα των ηλεκτροδίων, στην Ηλεκτρική μέθοδο. Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται σε μετρήσεις που συλλέγονται με όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε όμως για αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε σε μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο επαγωγής (EMI). Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάσουν με αυτές των δεδομένων ειδικής αντίστασης και μπορούν να ερμηνευτούν χρησιμοποιώντας τις αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι πολλές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της EMI συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της EMI επηρεάζονται συνήθως από ένα μεγαλύτερο όγκο του εδάφους,

θολώνοντας έτσι ενδεχομένως τα όρια της ανωμαλίας. Η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος, για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βυθισμένες στις αντιθέσεις της 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.

## 2.2.4 Μεθοδολογία Μετρήσεων

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



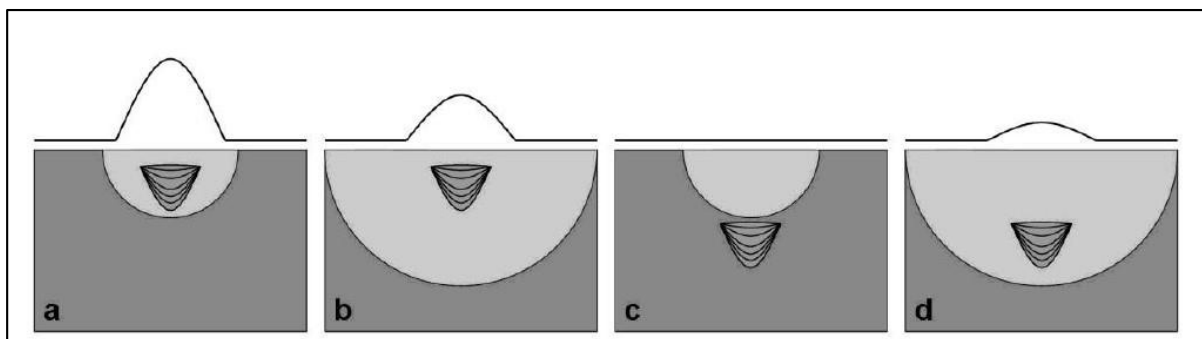
Εικόνα 2.15: Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

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

## 2.2.5 Βάθος και Ανάλυση

Το βάθος και η ανάλυση των δεδομένων αγωγιμότητας που μετρούνται με την «EMI», εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες είναι η ειδική συχνότητα, το ύψος των αισθητήρων πάνω από το έδαφος και ο προσανατολισμός των σπειρών. Αρχικά, εξετάζεται η συχνότητα. Τα πεδία χαμηλότερης συχνότητας της «EMI» έχουν πιο μεγάλα μήκη κύματος και επομένως, είναι ικανά να διαπεράσουν βαθύτερα στο έδαφος. Γενικότερα, η διείσδυση σε βάθος είναι μεγαλύτερη σε χαμηλότερες συχνότητες. Από την άλλη, το μειονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι ότι μετριέται μεγαλύτερος όγκος γης, οπότε τα μικρά αντικείμενα, όπως π.χ. αρχαιολογικά στοιχεία, δεν μπορούν να ανιχνευτούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μια υψηλότερη συχνότητα, η οποία θα έχει μικρότερο βάθος, και

επομένως τα αρχαιολογικά στοιχεία θα αποτελούν μεγαλύτερο μέρος του συνολικού όγκου. Με άλλα λόγια, οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερη ανάλυση ώστε να ανιχνευτούν τα μικρότερα στοιχεία, αλλά οι χαμηλότερες συχνότητες μπορούν να επιτρέψουν την ανίχνευση σχετικά μεγάλων ή υψηλών στόχων αντίθεσης, που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη και ειδάλλως δεν θα μπορούσαν να ανιχνευτούν (Εικόνα 2.16). Συνοψίζοντας, αν και τα ρηγά αντικείμενα, ίσως να μπορούσαν να ανιχνευθούν επαρκώς με χαμηλότερες συχνότητες, οι υψηλότερες συχνότητες είναι συνήθως καλύτερες και προτιμούνται για την ανίχνευση αρχαιολογικών στοιχείων.



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

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

Επίσης ένας σοβαρός παράγοντας ο οποίος έχει επιπτώσεις στο βάθος διείσδυσης είναι ο προσανατολισμός των πηνίων (σπειρών). Οι δύο πιο κοινοί προσανατολισμοί είναι να κρατηθούν οι σπείρες είτε οριζόντιες είτε κάθετες ως προς την επιφάνεια του εδάφους. Εάν οι δύο σπείρες τοποθετούνται οριζόντια στην επιφάνεια του εδάφους (φανταστείτε δύο ρόδες που βρίσκονται στο έδαφος) ο προσανατολισμός της καλείται οριζόντιο συνεπίπεδο. Σε αυτήν την θέση ο οριζόντιος πομπός παράγει ένα μαγνητικό

πεδίο του οποίου οι γραμμές ροής προέρχονται κάθετα. Αυτόν τον προσανατολισμό των γραμμών ροής τον ονομάζουμε κάθετο μαγνητικό δίπολο (Η απλούστερα «κάθετος τρόπος»). Σε αυτή τη θέση υπάρχει μέγιστη ενεργειακή διείσδυση στο έδαφος. Επίσης είναι ο πιο κοινός προσανατολισμός για τις περισσότερες αρχαιολογικές έρευνες. Από την άλλη, όταν οι σπείρες κρατιούνται κάθετα ως προς την επιφάνεια του εδάφους, ο προσανατολισμός ονομάζεται κάθετο συνεπίπεδο και η μαγνητική ροή που προέρχεται από τον πομπό είναι οριζόντια, αποκαλούμενη ως οριζόντιο μαγνητικό δίπολο («οριζόντιος τρόπος»). Σε αυτήν την θέση ένα πολύ μικρότερο μέρος του προκληθέντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαπερνά το έδαφος και έτσι η διείσδυση βάθους μειώνεται. (Witten, A. J. 2006)

## 2.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

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

## 2.2.7 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα (MS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας του υλικού να μαγνητιστεί παρουσία του μαγνητικού πεδίου. Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου ( $\kappa$ ) 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, έτσι επίσης οι ουσίες αντιδρούν (είναι ευαίσθητες) στα κοντινά μαγνητικά πεδία μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει την μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και των υδροξειδίων, σε εντονότερα μαγνητικές μορφές. Έτσι το χώμα είναι πολύ περισσότερο μαγνητικό από τα

στρώματα του υπεδάφους. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν ακόμα περισσότερο το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα επί των αρχαιολογικών τόπων είναι συνήθως πιο μαγνητικά από εκείνα των υπερβάλλουσων μη-πολιτιστικών περιοχών. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους των χωμάτων, αλλά και με την αύξηση της εδαφολογικής θερμοκρασίας μέσω μιας πυρκαγιάς. Μπορούν επίσης να ενσωματώσουν καμένα ή υψηλής επιδεκτικότητας υλικά στο έδαφος. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας επί των αρχαιολογικών τόπων και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα να ανιχνευτούν τα τεχνητά αντικείμενα. (Dalan, R. A. 2006)

### **2.2.8 Μεθοδολογία μετρήσεων**

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

### **2.2.9 Βάθος και ανάλυση**

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

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

Για παράδειγμα, ο «BartingtonMS2D» αισθητήρας μονού βρόγχου, διαπερνά 0,1 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι διπλοί αισθητήρες σπειρών όπως το «Geonics EM38» έχουν μια διείσδυση της τάξης του μισού μέτρου ή και περισσότερο (εντούτοις η ευαισθησία του βάθους είναι μεγαλύτερη για την αγωγιμότητα με αυτόν τον αισθητήρα).

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

## 2.2.10 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

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

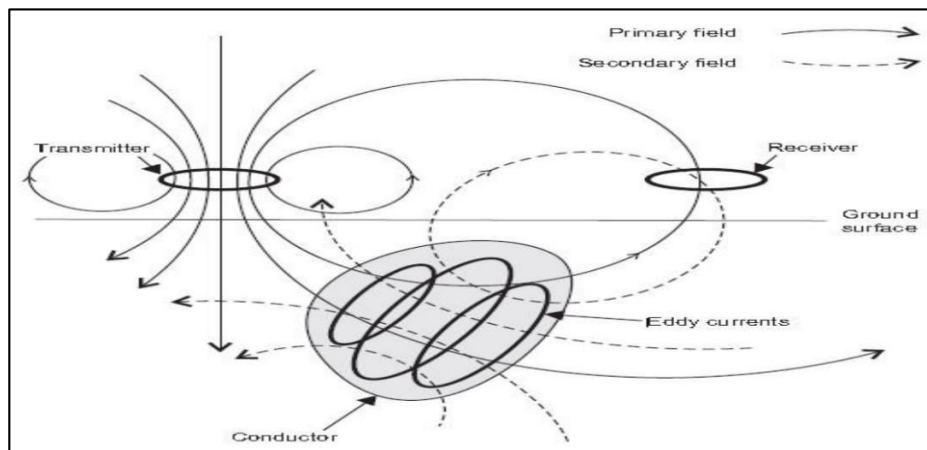
## 2.2.11 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

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

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

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

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



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

Το δευτερογενές πεδίο μπορεί να μετατραπεί σε συνιστώσες σε φάση και εκτός φάσης  $90^\circ$  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 μεταλλικά. Η μετρούμενη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι η μέση αγωγιμότητα των περισσότερων στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης του οργάνου, σε βάθος έρευνας που σχετίζεται με την απόσταση των πηνίων, την διεύθυνση, τη συχνότητα της λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους.

### 2.2.12 Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

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

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

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

Όπου το  $d$  είναι σε μέτρα, η αγωγιμότητα  $\sigma$  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. Συνεπώς, η συχνότητα που χρησιμοποιείται σε μια έρευνα EM μπορεί να καθορίσει το επιθυμητό βάθος σε οποιοδήποτε μέσο. Εμπειρικά, ένα αποτελεσματικό βάθος διείσδυσης  $z_e$  μπορεί να καθοριστεί ως το μέγιστο βάθος στο οποίο ο αγωγός μπορεί να βρεθεί και να παράγει μια αναγνωρίσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία.

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

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

### 2.2.13 Συστήματα μέτρησης φάσης

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

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

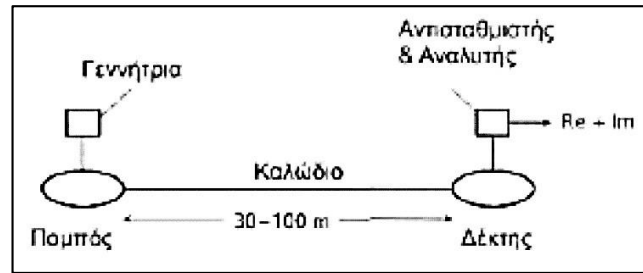
Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης  $\phi$ .

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

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

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

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



**Εικόνα 2.18:** Σύστημα μέτρησης φάσης δίδυμου πηνίου

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

Το σήμα εξόδου από το πηνίο-δέκτη περνάει από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο μετράει αρχικά στο έδαφος χωρίς αγωγίμο σώμα και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται ώστε να παράγει μηδενική έξοδο. Με τον τρόπο αυτό, το πρωταρχικό πεδίο αντισταθμίζεται, έτσι ώστε το σύστημα να αποκρίνεται στη συνέχεια μόνο στα δευτερογενή πεδία. Συνεπώς, τέτοιες ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι αποκαλύπτουν την παρουσία σωμάτων ανώμαλης αγωγιμότητας, χωρίς παροχή πληροφορίας για τις απόλυτες τιμές αγωγιμότητας. Στην περιοχή έρευνας, ο αναλυτής χωρίζει το δευτερογενές πεδίο από πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες, που συνήθως παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, του οποίου το μέγεθος αναμεταδίδεται μέσω του διασυνδεδεμένου καλωδίου. Τομές μέτρησης γίνονται γενικά κάθετα στις γεωλογικές ασυνέχειες και οι μετρήσεις αντιστοιχούν στη θέση του μεσαίου σημείου του συστήματος. Το μέγιστο βάθος ανίχνευσης είναι περίπου το μισό της απόστασης πομπού δέκτη.

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

## 2.2.14 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης

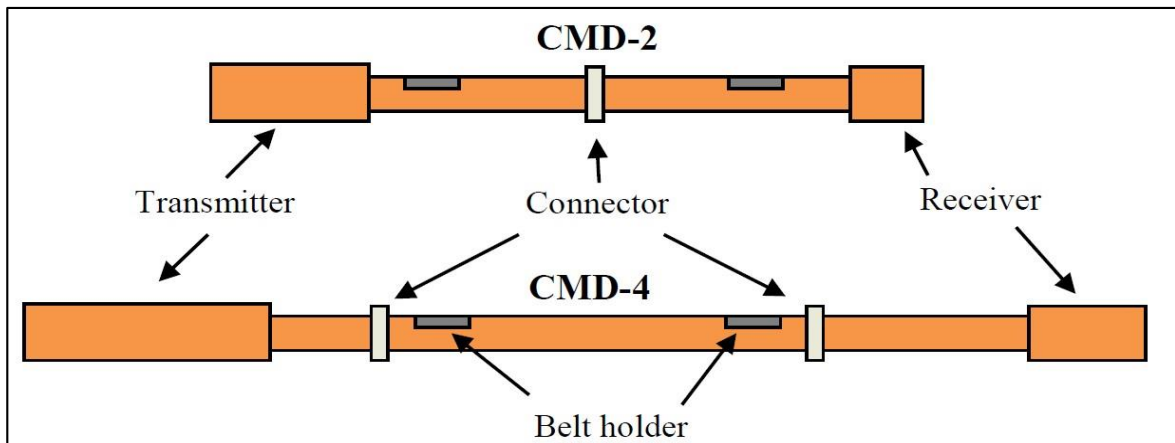
Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in-phase μέτρηση, ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με την διαμόρφωσή του. Το όργανο CMD μπορεί να διαθέτει κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο ώστε για κάθε θέση μέτρησης να καταγράφονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες.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

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

**Πίνακα 2.5:** Τυπικές εφαρμογές οργάνου CMD

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

Σε συνεχείς μετρήσεις, όταν το όργανο μετακινείται διαρκώς σε μια περιοχή έρευνας, η μετρούμενη αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα υπολογίζονται ως μέσοι όροι των τιμών που μετρήθηκαν σε κάθε θέση και σε κάθε στιγμή μέτρησης. Το λάθος κατά τη μέτρηση υπολογίζεται ως τυπική απόκλιση. Το CMD επιτρέπει, ωστόσο, τον αυτόματο έλεγχο σφάλματος. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει το μέγιστο αποδεκτό όριο σφάλματος (<1%, <2%, <5%, <10%) και σε τέτοιες περιπτώσεις, η μέτρηση επιμηκύνεται στο διπλάσιο.



Εικόνα 2.19: Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης CMD2, CMD4.

## 2.3 Γεωραντάρ – GPR (Ground-Penetrating Radar)

### 2.3.1 Γενικά

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

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

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

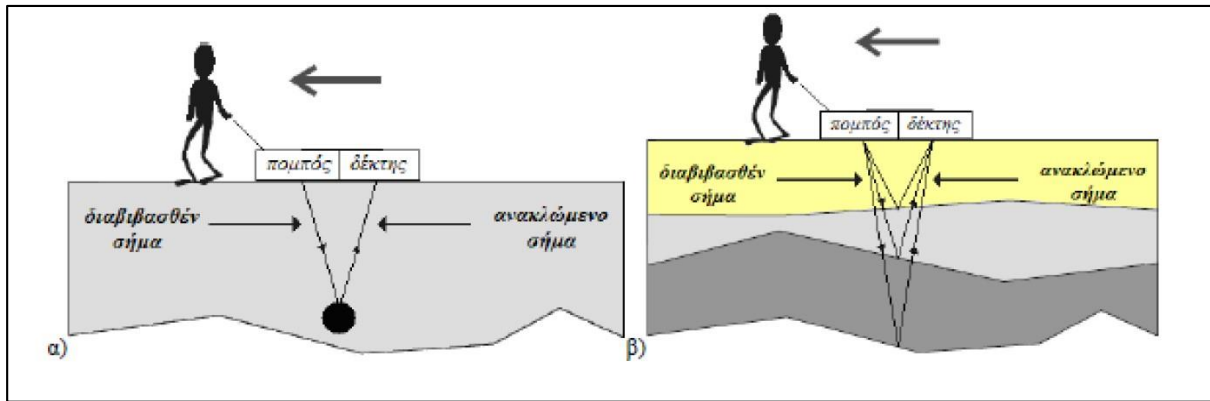
	<b>K</b>	<b><math>\sigma</math> (mS/m)</b>	<b><math>v</math> (m/ns)</b>
<b>Αέρας</b>	1	0	0,3
<b>Αποσταγμένο νερό</b>	80	0,01	0,033
<b>Θαλασσινό νερό</b>	80	3000	0,01
<b>Ξηρή άμμος</b>	3-5	0,01	0,15
<b>Διαποτισμένη άμμος</b>	20-30	0,1-1	0,06
<b>Ασβεστόλιθος</b>	4-8	0,5-2	0,12
<b>Σχιστόλιθος</b>	5-15	1-1000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

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

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

### **2.3.2 Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ**

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

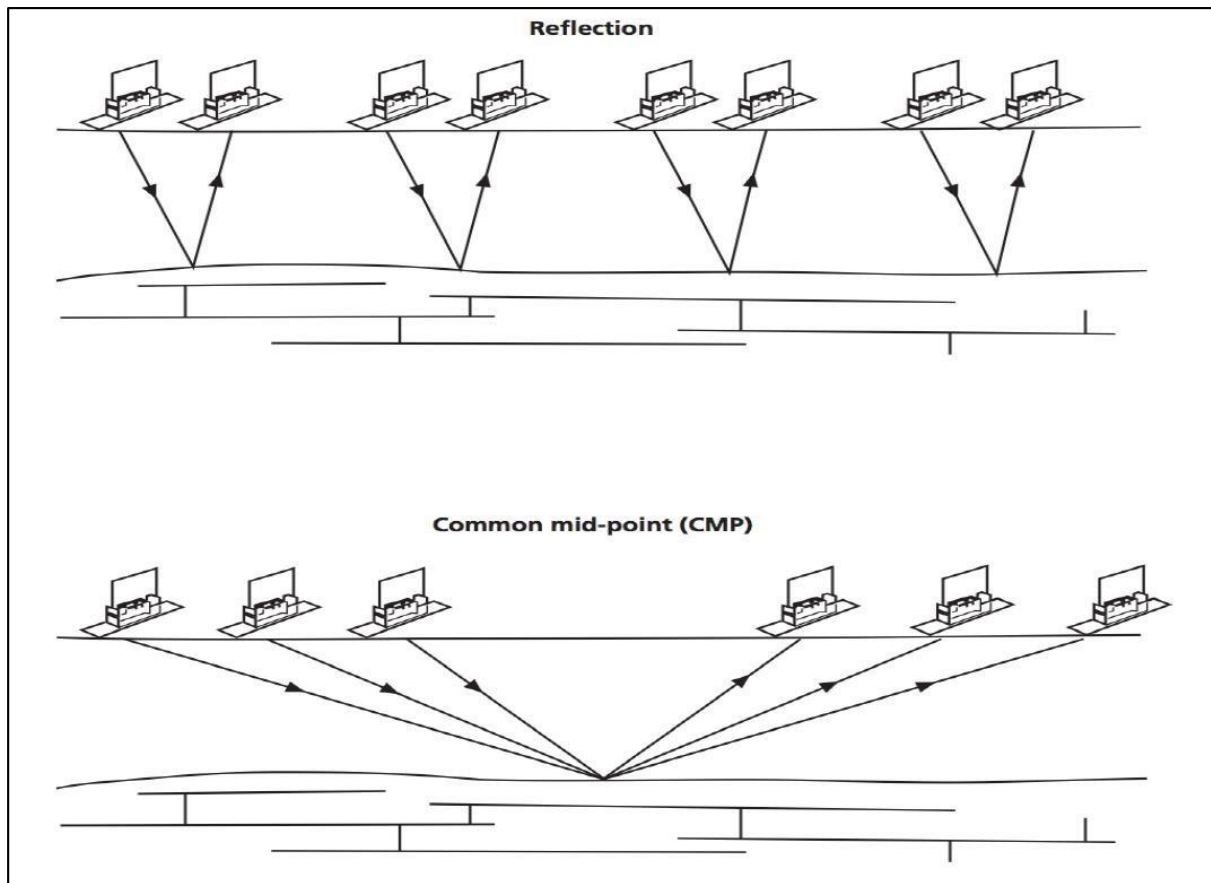


Εικόνα 2.20: Διάταξη και λειτουργία GPR (Αποστολόπουλος Γεώργιος, 2013)

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

### 2.3.3 Τρόποι μετρήσεων στο ύπαιθρο

Τα βασικά μοντέλα διάταξης είναι 2 (Εικόνα 2.21):



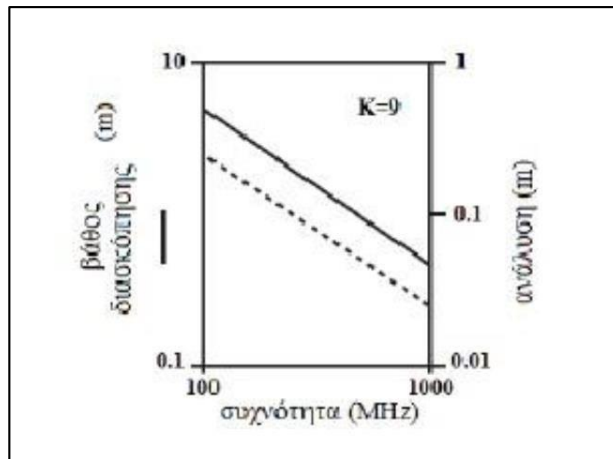
**Εικόνα 2.21:** Το πρώτο σχήμα απεικονίζει την λειτουργία Common Offset, ενώ το δεύτερο την λειτουργία Common Mid-point (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

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



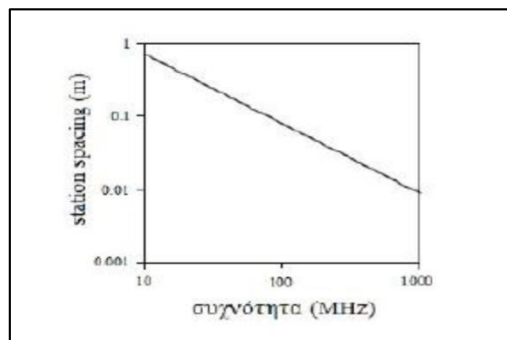
Σε μια τυπική διάταξη λειτουργίας ή αλλιώς σε μία Common Offset, κατά την έναρξη των μετρήσεων, καθορίζουμε μια σειρά από παραμέτρους:

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



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

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



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

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

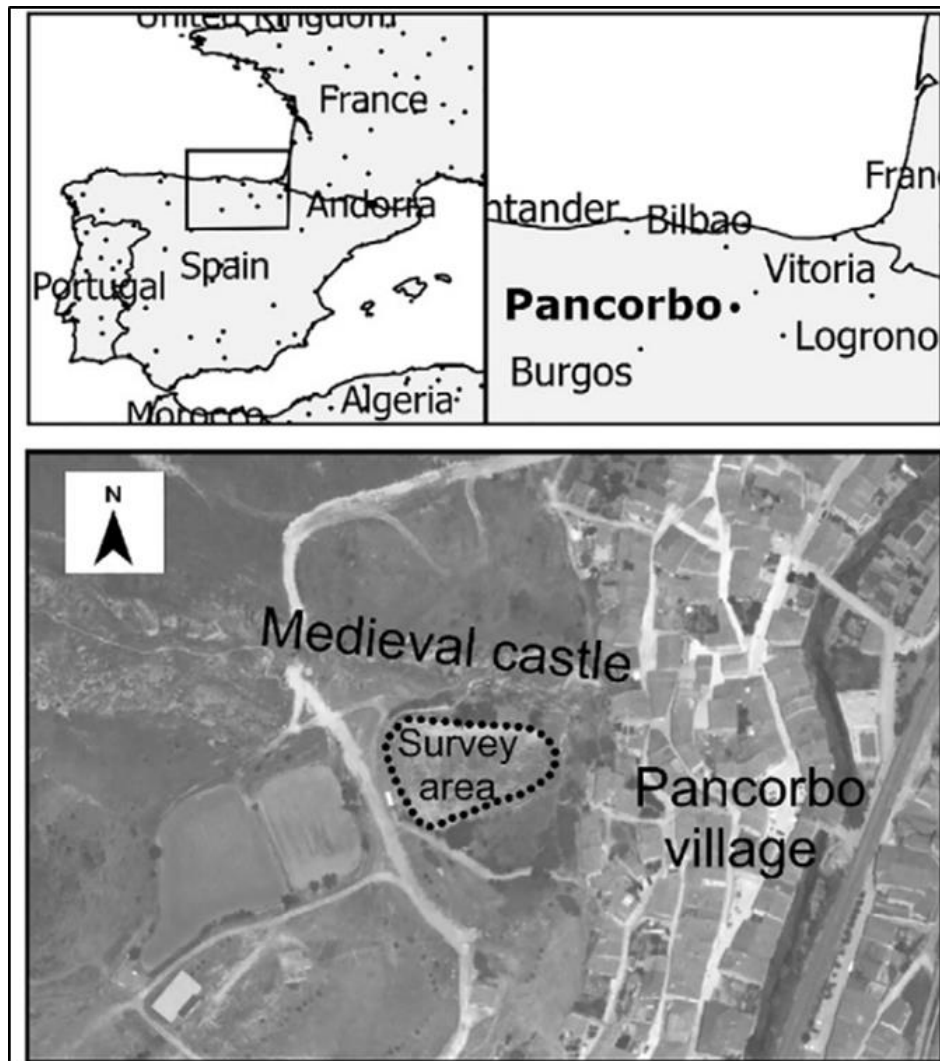
#### **2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου Γεωραντάρ**

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

### 3. Εφαρμογές

#### 3.1 Εφαρμογή Α: Διερευνητική γεωφυσική έρευνα με GPR και ERT του Μεσαιωνικού Χωριού του Κάστρου Pancorbo (Burgos, Ισπανία).

(José-Paulino Fernández-Álvarez, David Rubio-Melendi b, Juan Antonio Quirós Castillo, Andrés González-Quirós, David Cimadevilla-Fuente)



Εικόνα 3.1 : Χάρτης τοποθεσίας του Pancorbo καθώς και της περιοχής έρευνας.

### **3.1.1 Εισαγωγή**

Το κάστρο του Pancorbo υπήρξε κατά τα τέλη του Μεσαίωνα ο κύριος άξονας του δουκάτου της Καστίλλης νότια του ποταμού Ebro (Έβρου). Το κάστρο συναντάται ιστορικά ήδη από τον ΙΧ αιώνα, αλλά πολλές άγνωστες πτυχές του παραμένουν για τους λόγους της ίδρυσής του και τα αίτια της ανέλιξης της σημασίας του στο ιστορικό πολιτικό προσκήνιο. Η αρχαιολογική έρευνα των πολυάριθμων κάστρων νότια του ποταμού Έβρου είναι πολύ περιορισμένη. Ένα νέο αρχαιολογικό έργο λοιπόν ξεκίνησε για να μελετήσει τόσο τη θεμελίωση του κάστρου όσο και τη πιθανότητα ύπαρξης θαμμένου μεσαιωνικού χωριού στους πρόποδες του.

Η πρώτη φάση του έργου, ήταν η αξιολόγηση της αρχαιολογικής υπόθεσης του θαμμένου χωριού ως βάση για μια μεταγενέστερη εντατική και εστιασμένη αρχαιολογική ανασκαφή. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν ήταν το Γεωραντάρ (Ground-penetrating Radar (GPR)) και η Μέθοδος Ηλεκτρικής Αντίστασης (ERT). Και οι δύο μπορούν να παρέχουν γρήγορα επί τόπου κατά προσέγγιση αποτελέσματα, επιτρέποντας τροποποιήσεις του σχεδιασμού της έρευνας σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και γρήγορη λειτουργία σε ευρείες, τοπογραφικά απαιτητικές περιοχές όπως η συγκεκριμένη.

### **3.1.2 Τοποθεσία**

Το κάστρο Pancorbo βρίσκεται στην αριστερή όχθη του ποταμού Oroncillo, πάνω από το σύγχρονο χωριό Pancorbo στο Burgos (Βόρεια Ισπανία), στο βάθος του φαραγγιού Pancorbo, είναι ένα μέρος εξαιρετικής ιστορικής σημασίας.

Ο αρχαιολογικός χώρος στο σύνολο του περιλαμβάνει τρεις ενότητες: το ίδιο το κάστρο, το οποίο βρίσκεται πάνω σε μία σχεδόν απροσπέλαστη ασβεστολιθική προεξοχή σε υψόμετρο 696 μέτρων από το επίπεδο της θάλασσας. Μία δύσκολα προσβάσιμη εξέδρα σκαμμένη στο βράχο γνωστή ως το κάστρο Sala σε υψόμετρο 681 μέτρων, καθώς και μια οχυρωμένη περιοχή έκτασης 6000 τετραγωνικών μέτρων γνωστή ως Santa Marta. Το γεγονός ότι η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται μεταξύ του κάστρου και του σύγχρονου χωριού στο βάθος της κοιλάδας, σε συνδυασμό με τις μεσαιωνικές εκκλησίες και τα απομεινάρια ενός οχυρωματικού έργου υποδεικνύει κατά πάσα πιθανότητα και τον τόπο ύπαρξης του μεσαιωνικού χωριού.



**Εικόνα 3.2 :** Εικόνα του οχυρωματικού τειχίου στη περιοχή της Santa Marta.

### **3.1.3 Μεθοδολογία**

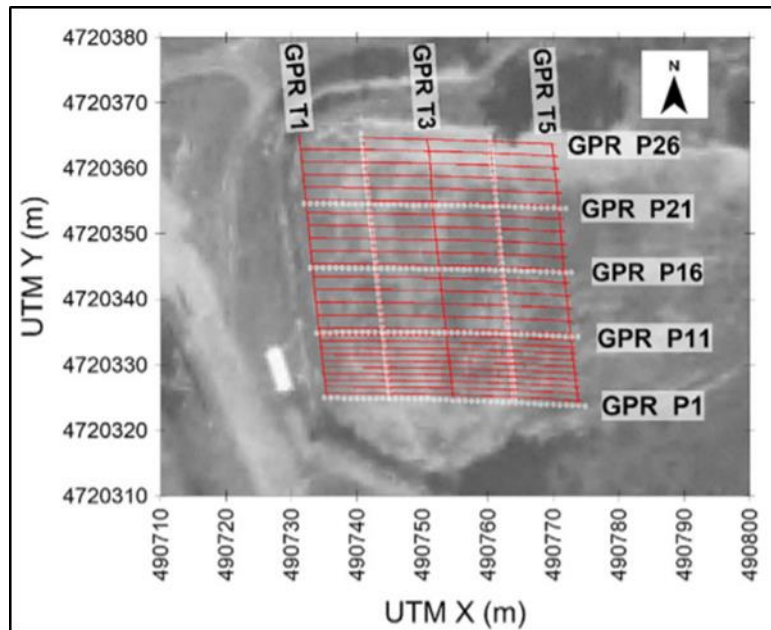
Είκοσι έξι γραμμές έρευνας GPR μήκους 40 μέτρων (περίπου) (με σήμανση P1 έως P26 από το Νότο) μετρήθηκαν σε κατεύθυνση Δύσης-Ανατολής. Ο χωρισμός μεταξύ των πρώτων δέκα γραμμών αυξήθηκε από 1 m, μετά από επιθεώρηση που έγινε σε πραγματικό χρόνο, στα 2 m μεταξύ των υπόλοιπων γραμμών. Πέντε επιπλέον εγκάρσια προφίλ (με την ένδειξη T1 έως T5 ξεκινώντας από τη Δύση), με μήκος περίπου 40 m και βήμα 10 m σημειώθηκαν και μετρήθηκαν κατά μήκος της διεύθυνσης Βορρά-Νότου, κάθετα στα 26 αρχικά προφίλ.

Τα δοκιμαστικά προφίλ έδειξαν ότι η κεραία 500 MHz παρείχε καλύτερη ποιότητα δεδομένων σε σύγκριση με την κεραία 250 MHz, καθώς και ικανοποιητικό βάθος διείσδυσης.

Το σύστημα GPR τοποθετήθηκε σε καρότσι με χιλιομετρητή και έγινε χρήση 2 cm απόστασης εκπομπής σήματος με αυτόματη λήψη σήματος. Το χρονικό παράθυρο των 150 ns και η συχνότητα δειγματοληψίας των 5337 MHz κρίθηκε επαρκής. Έγινε χρήση διαφορικού GPS για τη παροχή των συντεταγμένων.

Τα προφίλ των GPR λήφθηκαν και εισήχθησαν στο REFLEXW™ (Sandmeier, 2009) και στο MATLAB® (MathWorks Inc, 2016) για επεξεργασία. Το συνολικό χρονικό παράθυρο

κόπηκε στα 90 ns. Η ταχύτητα του εδάφους υπολογίστηκε με βάση το ταίριασμα των υπερβολών, σε 0,08 m/ns.

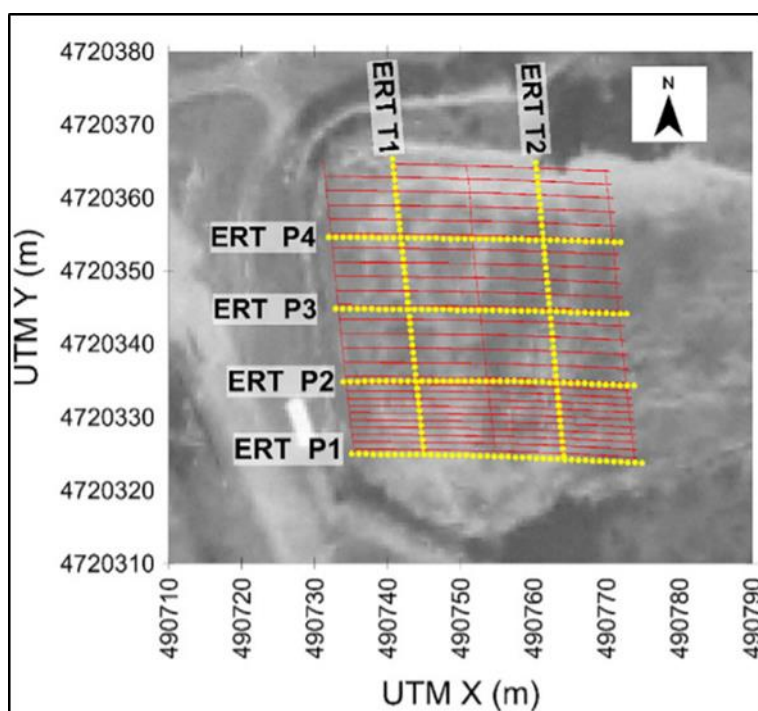


**Εικόνα 3.3 :** Η περιοχή έρευνας με συντεταγμένες UTM. Οι κόκκινες γραμμές αφορούν τα προφίλ GPR W-E (P1 έως P26) και Νότος-Βορράς (T1 έως T5). Εμφανίζονται επίσης τα προφίλ ERT (τα ηλεκτρόδια είναι οι γκρι κουκκίδες).

Πραγματοποιήθηκαν έξι προφίλ ERT μήκους 41 m με απόσταση 1 m μεταξύ των ηλεκτροδίων. Τέσσερα προφίλ με διεύθυνση Δύσης-Ανατολής (ERT P1 έως P4 που αντιστοιχεί σε GPR P1, P11, P16 και P21) και δύο προφίλ με διεύθυνση Βορρά-Νότου (ERT T1 και T2 που αντιστοιχούν σε GPR T2 και T4). Τα προφίλ ERT και GPR πρακτικά συμπίπτουν. Μετά από τη διαδικασία ποιοτικού ελέγχου έτσι ώστε να γίνει το φιλτράρισμα θορυβωδών δεδομένων (σφάλμα μεγαλύτερο από 3%), λιγότερο από το 2% των μετρήσεων από τη διάταξη Wenner-Schlumberger ( $n = 625$  μετρήσεις σε κάθε προφίλ) και λιγότερο από 4% από τη διάταξη δίπολο-δίπολο ( $n = 890$ ) αγνοήθηκαν για την κατασκευή της ψευδοτομής φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

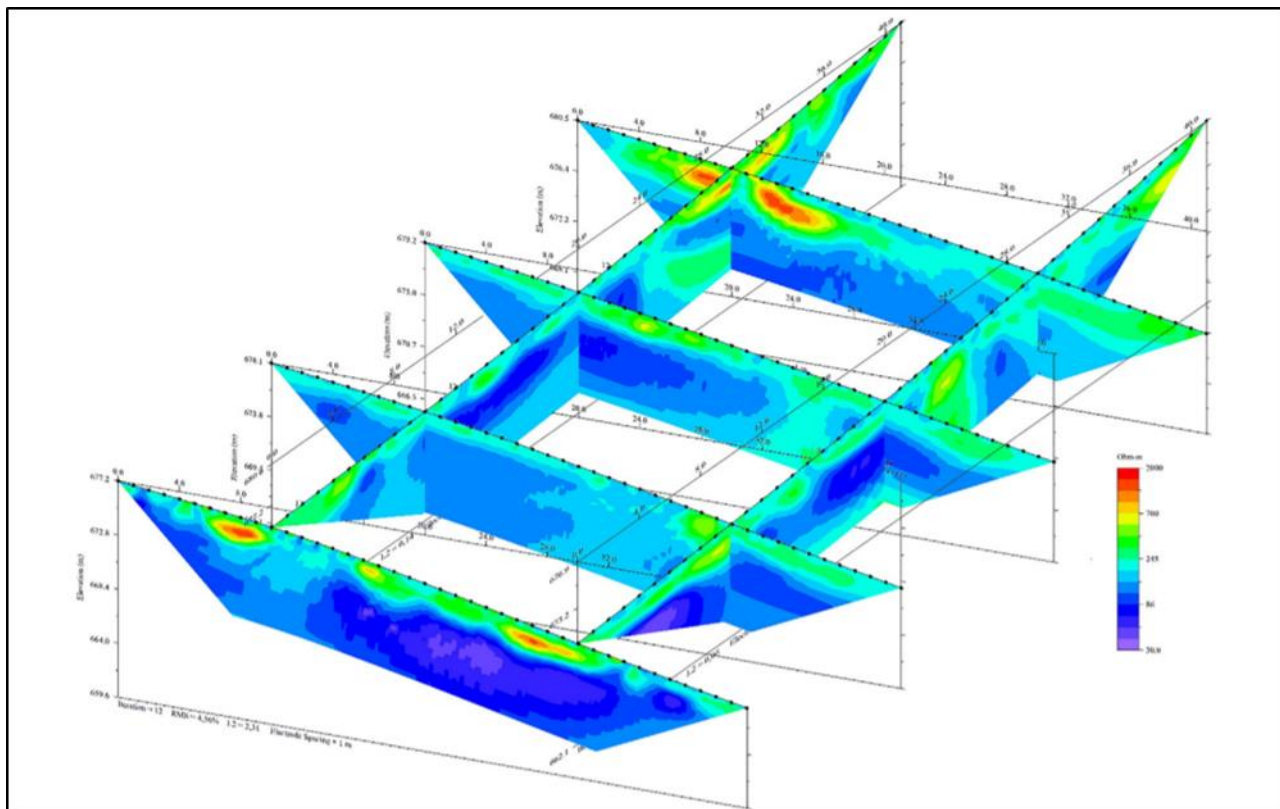
Ελήφθησε ένα σύνολο μοντέλων ειδικής αντίστασης συμβατό με ένα επίπεδο σφάλματος περίπου 3%. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω δισδιάστατων προφίλ δίνουν, μετά από μια διαδικασία 2D αντιστροφής, μια εικόνα της υποτιθέμενης θέσης των στόχων. Αυτό όμως παραμελεί και την αληθινή τρισδιάστατη φύση των πραγματικών αναζητούμενων στόχων και τις πιθανότητες να βρίσκονται κάτω από το συγκεκριμένο προφίλ.

Έγινε τρισδιάστατη μοντελοποίηση των ERT με το λογισμικό BERT με στόχο να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω περιορισμοί. Έγινε η υπόθεση για ορισμένα πολύ γενικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αναζητούμενων κατασκευών καθώς και για τη σχετική τους θέση σε σχέση τα προφίλ των ERT. Τα αποτελέσματα ήταν οι προβλεπόμενες τάσεις που θα είχαν μετρηθεί πάνω από τα προφίλ αν οι υπόγειες κατασκευές είχαν τα υποτιθέμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Αυτά τα αποτελέσματα έχουν στη συνέχεια αναστραφεί για να ανακτηθεί η αντίστοιχη τομή φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Θεωρητικά μοτίβα που φάνηκαν στις προσομοιώσεις αναζητήθηκαν στα αληθινά ανεστραμμένα τμήματα



**Εικόνα 3.4 :** Προφίλ ERT P1 έως P4 WEST-EAST και προφίλ T1-T2 SOUTH-NORTH (κίτρινο τελείες). Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα προφίλ GPR.





**Εικόνα 3.5 :** Τρισδιάστατη τοποθέτηση προφίλ ERT ειδικής αντίστασης Wenner-Schlumberger. Η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνεται με το βάθος. Τα δύο πρώτα μέτρα επιτρέπουν πιο λεπτομερή ερμηνεία.

### 3.1.4 Αποτελέσματα

Έγινε λήψη ενός αντιπροσωπευτικού τμήματος πραγματικής αντίστασης 2D για κάθε μετρούμενο προφίλ. Αυτά τα 2D τμήματα φαίνονται στη σωστή τρισδιάστατη θέση τους στην **εικόνα 3.5**.

Βάθη κάτω από περίπου 2 m έχουν μεγάλη αγωγιμότητα σε όλα τα προφίλ της ERT, πιο ρηχά στο δυτικό τμήμα και βαθύτερα προς το ανατολικό. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί γενικά από την αύξηση της υγρασίας του εδάφους με το βάθος, καθώς και από την ύπαρξη πηγής νερού σε ορισμένη απόσταση προς τα δυτικά. Τα δύο πρώτα επιφανειακά μέτρα, που εξετάστηκαν επίσης από την έρευνα GPR, παρουσιάζουν μια ετερογενή κατανομή ειδικής αντίστασης στο εύρος μεταξύ 100 και 2000 Ωm. Η σύγκριση μεταξύ εικόνων ERT και GPR είναι δυνατή μόνο –λόγω του κατακόρυφου ανοίγματος του GPR- σε βάθος δύο μέτρων. Η **εικόνα 3.6 c** δείχνει το μεγεθυμένο τμήμα της κατανομής ειδικής αντίστασης. Η τιμή αντίστασης του περιβάλλοντος είναι γενικά περίπου 200 Ωm (ανοιχτό γαλάζιο και πράσινο), υπάρχουν και



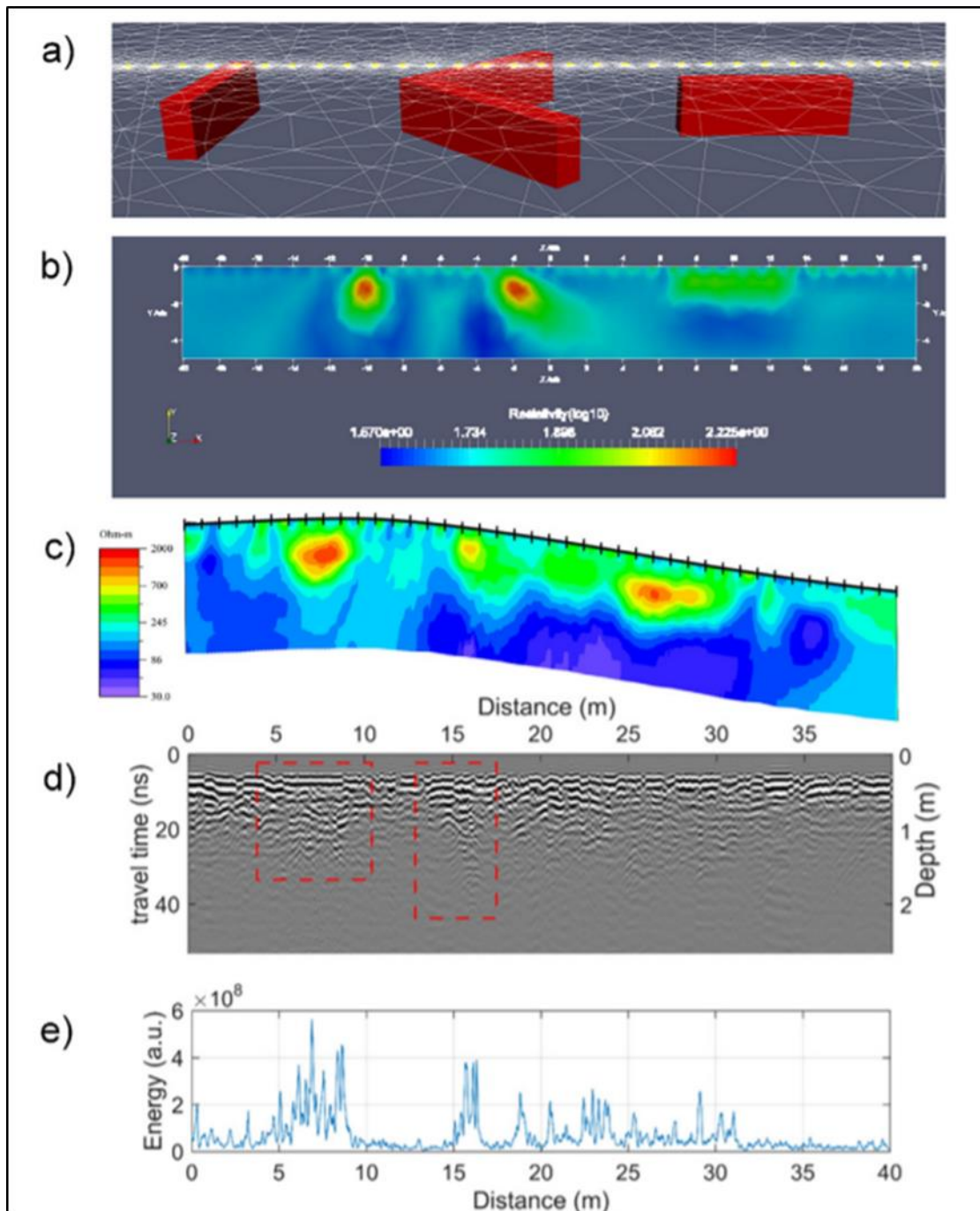
ενδιαφέρουσες δομές μεγέθους ενός μέτρου σε ένας εύρος ειδικής αντίστασης από 700 έως 2000  $\Omega\text{m}$  (κίτρινο, πορτοκαλί και κόκκινο) (βλ. Εικ. 3.6 c). Αυτά τα σημεία θεωρούνται ως σημαντικές ανωμαλίες με βάση τις προσδοκίες από προηγούμενες προσομοιώσεις των ERT (βλ. Εικ. 3.6 b).

Από την άλλη πλευρά, όλα τα προφίλ GPR παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά: (i) ένα ομοιόμορφο και σχεδόν οριζόντιο αρχικό τμήμα (περίπου 10 ns σε βάθος). (ii) ένα λιγότερο κανονικό δεύτερο στρώμα μέχρι περίπου 30 ns, και (iii) μία βαθύτερη ζώνη υψηλής εξασθένησης.

Οπτική επιθεώρηση και συνδυαστική ανάλυση όλων των διαγραμμάτων επιτρέπουν τον εντοπισμό ορισμένων ανωμαλιών στο δεύτερο στρώμα, που το καθιστούν βαθύτερο (περίπου 10 ns), και δείχνουν μια χαοτική υφή, με χαρακτηριστικά που μοιάζουν με υπερβολές. (βλ. Εικ. 3.6 d). Η αύξηση του βάθους διείσδυσης σε αυτές τις ανώμαλες ζώνες του GPR είναι συνεπής με τιμές υψηλότερης ειδικής αντίστασης και η σύνθετη υφή είναι εξηγήσιμη λόγω της συσσώρευσης λίθων. Συμπτωματικά, τα προφίλ EPT και GPR δείχνουν ανωμαλίες στις ίδιες ζώνες (Εικ. 3.6 c,d). Επομένως, καθώς τα προφίλ GPR καλύπτουν πιο πυκνά την περιοχή της έρευνας από τα προφίλ ERT, μπόρεσαν να προεκτείνουν την εικόνα από τα GPR όπου δεν υπήρχε προφίλ ERT.

Οι ανωμαλίες στα διαγράμματα έχουν περιγραφεί , ποιοτικά, ως έχοντας σχετικά αυξημένα βάθη διείσδυσης και «σύνθετη» υφή. Για να τα χαρακτηρίσουμε με απλό αλλά πιο αντικειμενικό τρόπο, χρησιμοποιείται η έννοια του ίχνους ενέργειας. Το ίχνος ενέργειας είναι ο κανόνας του ίχνους που θεωρείται ως διάλυσμα. Αυτό ισοδυναμεί με το άθροισμα των τετραγώνων από τα δείγματα. Αυτό το άθροισμα είναι υψηλότερο για ισχυρά σήματα με μεγαλύτερα βάθη διείσδυσης.

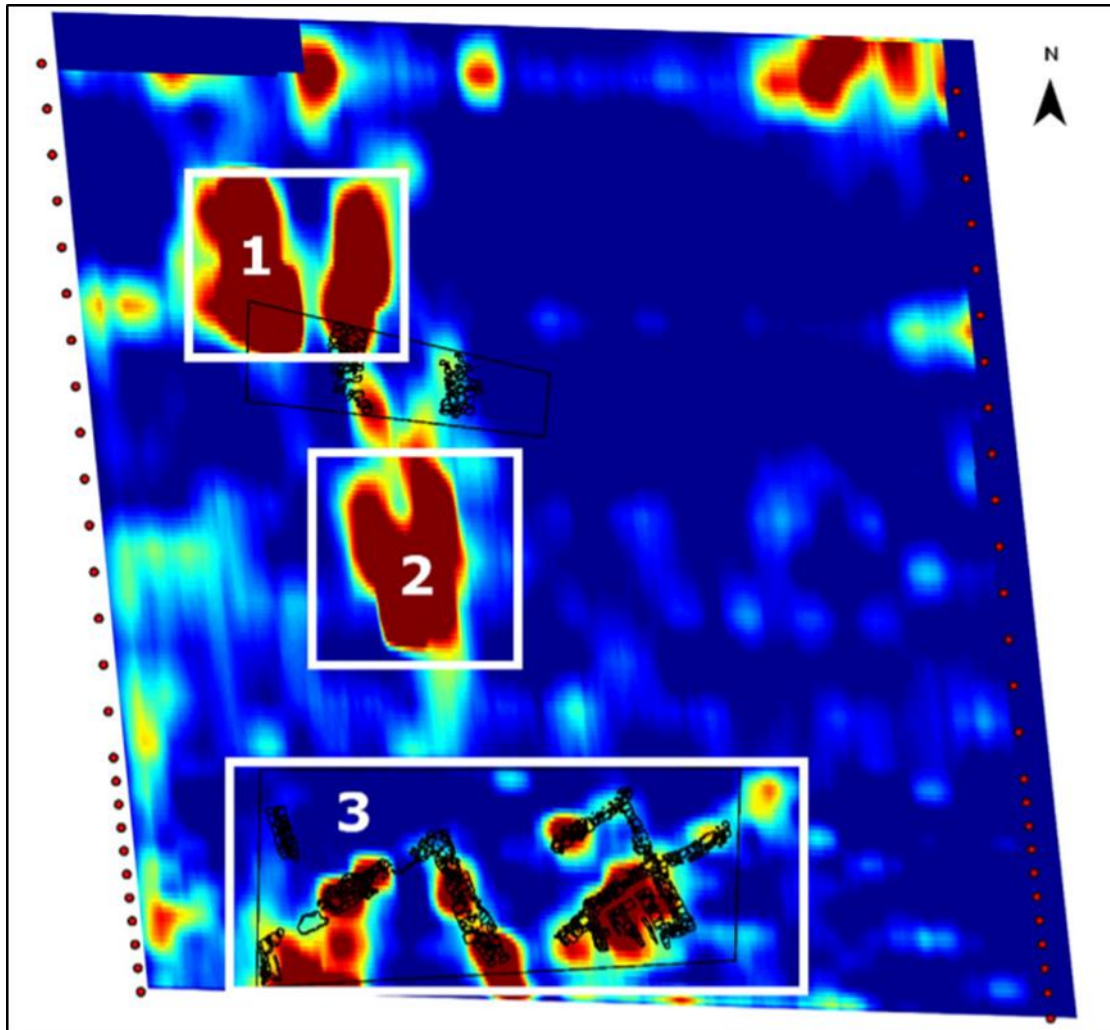
Το αρχικό μέρος των διαγραμμάτων -έως 20 ns- παραμένει αμετάβλητο. Όλα τα ίχνη φιλτράρονται και το ίχνος ενέργειας υπολογίζεται μετά από εφαρμογή που ενίσχυσε τα χαρακτηριστικά «υφής». Η **εικόνα 3.6 e** δείχνει το αποτέλεσμα ανάλυσης των χαρακτηριστικών όταν εφαρμόζεται στο ραδιόγραμμα μεταξύ 20 ns και 40 ns.



**Εικόνα 3.6 :** **a)** Μοντέλο BERT διαφορετικών διατάξεων τοιχίων, **b)** Αναμενόμενο προφίλ ειδικής αντίστασης (συνθετικό). **c)** Προφίλ πραγματικής ειδικής αντίστασης (ERT P1 έως 4,4 m σε βάθος) με παρόμοια χαρακτηριστικά. **d)** Προφίλ GPR (GPR P1). Ορατές ζώνες ανωμαλιών σημειώνονται με κόκκινο χρώμα. **e)** Ενέργεια υπολογισμένη για τη διάταξη GPR P1.

Η ενέργεια κάθε ίχνους αποδίδεται στις συντεταγμένες του επιπέδου της οριζόντιας θέσης του στην περιοχή μελέτης. Η εικόνα 3.7 δείχνει αυτό το χάρτη. Ένα 2D φίλτρο εξομάλυνσης (2D Gaussian kernel) εφαρμόστηκε για να κρατήσει μόνο τις τάσεις. Το σημείο υψηλής ενέργειας στη βορειοανατολική γωνία ερμηνεύτηκε ότι οφείλεται στην παρουσία ριζών από

δέντρα και επίσης λόγω της εγγύτητας με τη φυσική προεξοχή του ασβεστολιθικού τείχους κάτω από το Κάστρο. Σημεία υψηλής ενέργειας κοντά στο δυτικό όριο, ειδικά στο νότιο μισό, ερμηνεύτηκαν ότι οφείλονται πιθανώς από τα παραμένον τοιχία.



**Εικόνα 3.7:** Χάρτης, GPR, του ίχνους ενέργειας των ανωμαλιών. Τα μαύρα σχέδια είναι οι κατασκευές που βρέθηκαν μετά τις ανασκαφές.

Τρεις περιοχές ανωμαλιών προσδιορίστηκαν στη περιοχή ως υποψήφιες για ανασκαφή ελλείψει εναλλακτικών εύλογων εξηγήσεων, που παραπέμπονται ως περιοχές 1, 2 και 3. Η μεγαλύτερη ανασκαφή έγινε στην περιοχή 3 και η μικρότερη μεταξύ των περιοχών 1 και 2. Αυτές οι ανασκαφές έδειξαν ότι το έδαφος είχε διαμορφωθεί με σταδιακό τρόπο για να φιλοξενήσει κτίσματα των μεσαιωνικών χρόνων. Οι περιοχές αποδείχθηκε ότι έχουν μεγάλο στρωματογραφικό βάθος και φιλοξενούν υψηλής ποιότητας αρχαιολογικά κατάλοιπα σε πολύ καλή κατάσταση.

Στην ανασκαφή της περιοχής 3, έχουν βρεθεί τρία κτίρια που χρονολογούνται μεταξύ του XIII και XV αιώνα που ακολουθούν πολύ καθαρά τη γεωμετρία των γεωφυσικών ανωμαλιών. Στη δεύτερη ανασκαφή, τα ερείπια του έχουν βρεθεί αφορούν άλλα δύο κτίρια.

### **3.1.5 Συμπεράσματα**

Η συνδυασμένη έρευνα GPR και ERT, στη περιοχή Pancorbo στο Μπούρκος της Ισπανίας, οδήγησε στον εντοπισμό της παρουσίας και της γεωμετρικής δομής υπόγειων αρχαιολογικών κατασκευών. Οι ανωμαλίες των ERT που προβλέπονται από τις αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν πολύ καλή συσχέτιση με τις ανωμαλίες ίχνους ενέργειας των δεδομένων των GPR. Η συσχέτιση μεταξύ ERT και GPR καθιστά δυνατή την αντικατάσταση της απόκτησης στοιχείων από ακριβότερα και πιο δύσκολα στη διαχείριση προφίλ ERT, σε προφίλ GPR τα οποία είναι φθηνότερα και ευκολόχρηστα στην εξερεύνηση περιοχών με ιδιαίτερη τοπογραφία.

Τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας επιβεβαίωσαν τις υποψίες για την αρχαιολογική σημασία της περιοχής. Επίσης, παρείχαν μια τεκμηριωμένη επιλογή ως προς που έπρεπε να γίνουν δύο εξερευνητικές εκσκαφές έτσι ώστε να δοθούν στοιχεία για νέους πιθανούς στόχους. Στα επιλεγμένα σημεία βρέθηκαν απομεινάρια κτιρίων και κεραμικά κομμάτια. Σχεδιάζεται μια νέα πιο λεπτομερής αρχαιολογική έρευνα για την εξερεύνηση του χώρου.

## **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 Εισαγωγή**

Οι αρχαιολογικές έρευνες στην αρχαία πόλη Doliche (Τουρκία) ξεκίνησαν το 2015 ως συνεργασία μεταξύ του Τουρκικού Υπουργείου Πολιτισμού και Τουρισμού και του Κέντρου Μικρασιατικών Ερευνών στο Πανεπιστήμιο του Münster (Γερμανία) και χρηματοδοτούνται από το Γερμανικό Ερευνητικό Συμβούλιο. Στο έργο, το οποίο είναι ένα από τα 32 ανασκαφικά έργα που πραγματοποιήθηκαν από ξένους επιστήμονες το 2019, οι αρχαιογεωφυσικές έρευνες παίζουν καθοριστικό ρόλο για τη διερεύνηση της έκτασης και της διάταξης της αρχαίας Doliche. Αυτή η μελέτη παρουσιάζει τα αποτελέσματα των ερευνών GPR και ERT που πραγματοποιήθηκαν 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 αρχαιογεωφυσικές εξερευνήσεις. Ενώ οι αρχαιογεωφυσικές μελέτες του 2019 κάλυψαν δύο περιοχές έρευνας γύρω από μια σημαντική χριστιανική εκκλησία και ένα κτήριο ρωμαϊκών λουτρών, η αυλή της εκκλησίας εξερευνήθηκε το 2020. Το Keber Tepe αποτελείται κυρίως από αργιλώδη ασβεστόλιθο και το ίδιο υλικό είχε χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του έργου. Ως εκ τούτου, οι περιοχές μελέτης περιλαμβάνουν θαμμένες κατασκευές χτισμένες από πέτρα του ίδιου υλικού. Δεδομένου ότι αυτό μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή αντίθεση φυσικών ιδιοτήτων μεταξύ του εδάφους και των αρχαιολογικών στόχων, η εύρεση αργιλώδους ασβεστόλιθων λίθων σε ένα έδαφος πλούσιο σε άργιλο μπορεί να είναι δύσκολη, ειδικά με τη χρήση GPR. Επομένως, αυτή η μελέτη παρουσιάζει μια πιο απαιτητική εργασία ειδικά για την εξερεύνηση GPR. Οι αδύναμες αντανάκλασεις που προέκυψαν από αυτές τις δομές επιβεβαίωσαν τη δυσκολία των συνθηκών πεδίου για τη μέθοδο GPR. 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 ελπιδοφόρες ανωμαλίες που υποδεικνύουν την παρουσία κανονικών ιχνών στο υπέδαφος των αρχαιολογικών δομών. Οι πληροφορίες που

συλλέγονται είναι ζωτικής σημασίας για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη μελλοντική κατεύθυνση του έργου και την πιθανή απαλλοτρίωση ιδιόκτητης γης, η οποία είναι μια οικονομικά πολύ δύσκολη διαδικασία.

### 3.2.2 Ιστορία και γεωλογία

Η αρχαία Doliche βρίσκεται στην βόρεια πλευρά του όρους Gaziantep στη ΝΑ Τουρκία και ιδρύθηκε περίπου τον 3ο αιώνα π.Χ. (Εικ. 3.8). Τα αρχαία ερευνήθηκαν μεταξύ 2001 και 2015. Το 2015 τα έργα εστίασαν στην περιοχή της πόλης. Το νέο έργο στοχεύει να βελτιώσει τις γνώσεις μας για την αστικοποίηση στην αρχαία ΝΑ Ανατολίας. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, πρέπει να εφαρμοστούν ποικίλες μέθοδοι.

Πρώτον, διερευνώνται αρχαιολογικές και αρχαιο-γεωφυσικές έρευνες σε ολόκληρη την περιοχή της πόλης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί δεν υπάρχουν υπολείμματα αρχιτεκτονικής να έχουν επιβιώσει στην επιφάνεια του εδάφους. Λόγω αυτής της έλλειψης αστικών χαρακτηριστικών ορατές στο έδαφος, οι αρχαιο-γεωφυσικές έρευνες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην έρευνα της Doliche. 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 (Εικ. 3.9).

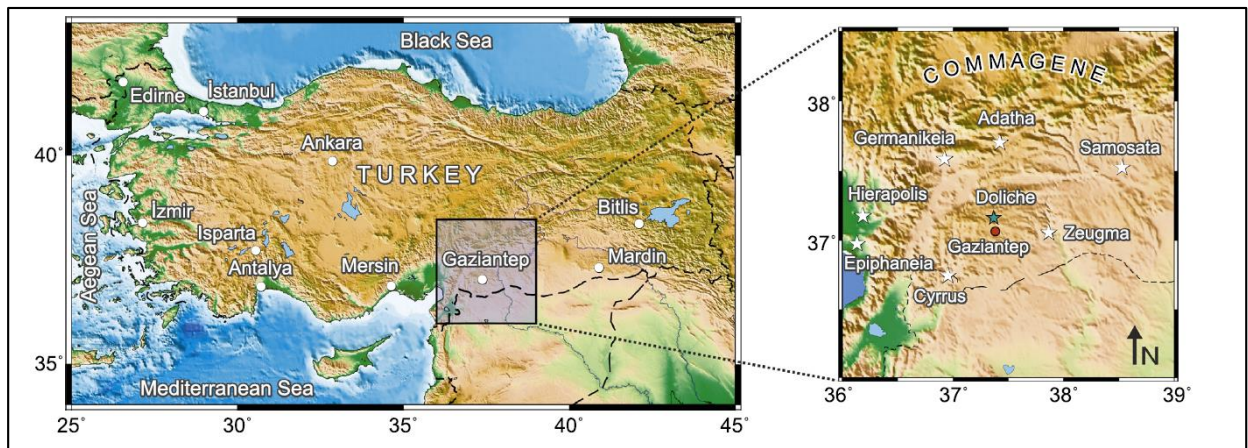
Η δεύτερη εστίαση είναι στην ανάπτυξη της πόλης στην ύστερη αρχαιότητα (4ος-7ος αι. μ.Χ.). Δοκιμαστικά ορύγματα, που είχαν σκαφτεί στη νοτιοδυτική πλαγιά του Keber Tere το 2015, έδειξε ότι σε αυτό το τμήμα η πόλη ήταν πυκνοκατοικημένη στην πρώιμη βυζαντινή περίοδο. Αυτό επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των μεταγενέστερων ανασκαφών. Το πιο σημαντικό εύρημα μέχρι στιγμής ήταν η ανακάλυψη ενός μεγάλου τρίκλιτου Χριστιανικής βασιλικής του τέλους του 4ου αιώνα (Εικ. 3.10a & b).

Η τρίτη εστίαση είναι σε μια μεγάλη περιοχή στο ανατολικό τμήμα της πόλης, η οποία είχε προηγουμένως αναγνωριστεί ως μέρος διοίκησης της Doliche. Οι δοκιμαστικές τάφροι απέδωσαν συναρπαστικά πρώτα αποτελέσματα. Ένα μεγάλο λουτρό της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορικής περιόδου έχει ανακαλύφθηκε (Εικ. 3.10c & d).



Η **Εικόνα 3.11a** δείχνει έναν τοπογραφικό χάρτη του Keber Tere, που σήμερα είναι ιδιωτικά κομμάτια γης που χρησιμοποιούνται για την γεωργία.

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.



**Εικόνα 3.8:** Χάρτες θέσης της περιοχής μελέτης.

### 3.2.3 Γεωφυσική έρευνα

Το 2019, οι αρχαιολογικές ανασκαφές επικεντρώθηκαν σε δύο περιοχές της πόλης, συμπεριλαμβανομένης μιας σημαντικής χριστιανικής βασιλικής στη νότια πλευρά της πόλης και ένα μεγάλο κτίριο αστικών λουτρών της ρωμαϊκής περιόδου στο ανατολικό τμήμα της πόλης. Για να λάβουν πρόσθετες πληροφορίες ορίστηκαν δύο περιοχές μελέτης (SA-1 και SA-2) που βρίσκονται κοντά στις περιοχές εκσκαφής (Εικ. 3.11b και c). Το GPR επιλέχθηκε ως η κύρια μέθοδος μέτρησης λόγω της γρήγορης, υψηλής ανάλυσης και μικρού χρόνου εργασίας. Η HERT μέθοδος, η οποία έχει χαμηλότερη ανάλυση είναι πιο χρονοβόρα αλλά είναι πιο αποτελεσματική σε αγώγιμα περιβάλλοντα, εφαρμόστηκε ως βοηθητική μέθοδος για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της μελέτης. Το 2020, μια πρόσθετη περιοχή μελέτης (SA-3) στα μη ανασκαμμένα τμήματα της βασιλικής (Εικ. 3.11d) ερευνήθηκε για να λάβει κάποιες πληροφορίες που θα βοηθήσει στην έρευνα.

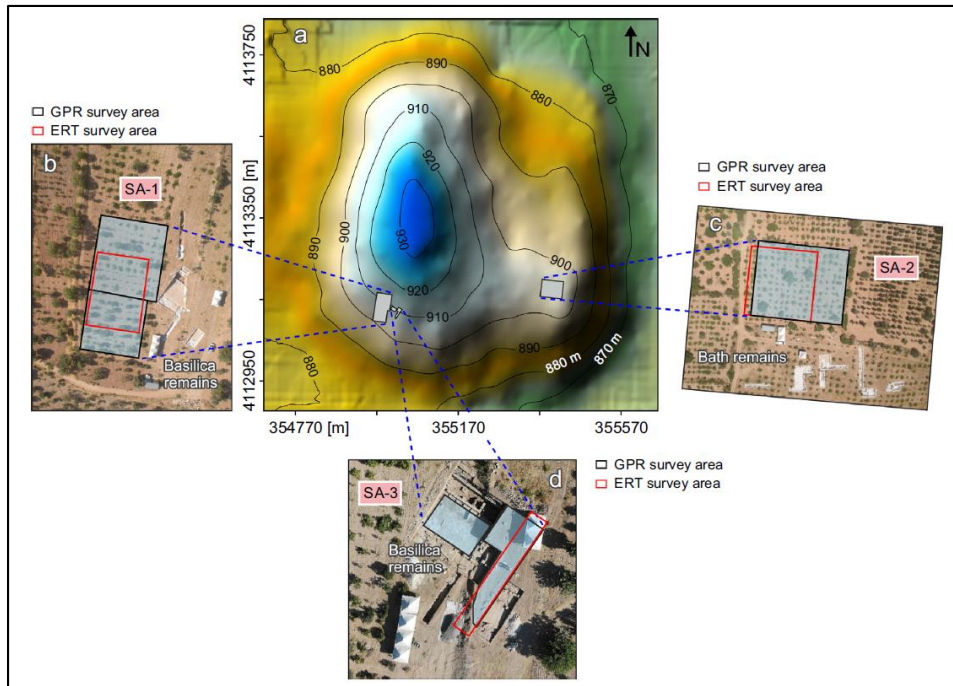


**Εικόνα 3.9:** Μερικές φωτογραφίες του προϊστορικού σπηλαιού από έξω και μέσα.



**Εικόνα 3.10:** (a, b) Όψεις από την αγίδα και τους κεντρικούς κλίτους της χριστιανικής βασιλικής στη νότια πλαγιά του λόφου της πόλης (c, d) Θέα από ένα μεγάλο κτίριο αστικών λουτρών της ρωμαϊκής περιόδου που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της πόλης.

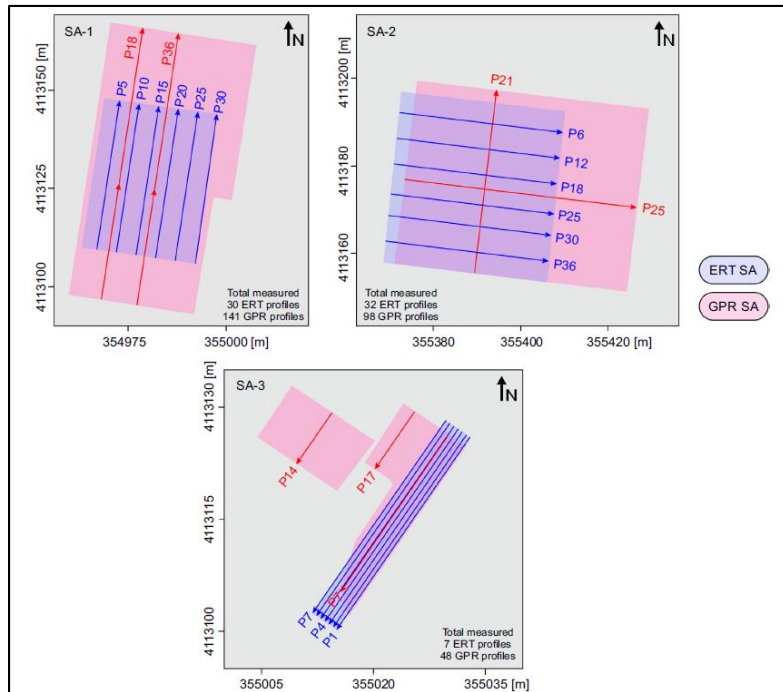




**Εικόνα 3.11:** (a) Τοπογραφικός χάρτης του Keber Tere, (b-d) SA-1, SA-2, και SA-3 φωτογραφημένες από drone και οι περιοχές γεωφυσικής μελέτης.

### 3.2.4 Έρευνα γεωραντάρ

Τα δεδομένα του GPR συλλέχθηκαν από μια κεραία συχνότητας 500 MHz σε παράλληλα προφίλ 0,5 m. Το SA-1 (Εικ. 3.12) χωρίστηκε σε δύο περιοχές μέτρησης λόγω της κατάστασης του τοπογραφικού πεδίου. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε κατευθύνσεις N-B κατά τη διάρκεια η έρευνα. Η πρώτη υποπεριοχή, με διαστάσεις 32m×30m, που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής αποτελείται από 65 προφίλ GPR ενώ η δεύτερη με διαστάσεις 37,5m × 37m περιλάμβανε 76 προφίλ μέτρησης. Στο SA-2 (45m × 51m), η έρευνα GPR πραγματοποιήθηκε με διευθύνσεις Α-Δ (46 προφίλ) και N-B (52 προφίλ) λόγω της πυκνότερης βλάστησης. Τέλος, μετρήθηκαν 48 προφίλ GPR στο SA-3, το οποίο καλύπτει έκταση περίπου 280m<sup>2</sup>.



**Εικόνα 3.12:** Τομείς μελέτης GPR και EPT και οι προσανατολισμοί ορισμένων προφίλ.

### 3.2.5 Έρευνα ERT

Η μέθοδος ERT είναι πιο δύσκολη στην εφαρμογή της στο ύπαιθρο σε σχέση με το GPR και οι περιοχές έρευνας επιλέχθηκαν με βάση τα υποσχόμενα αποτελέσματα του GPR. Έτσι επιλέχθηκαν περιοχές όπως φαίνονται στο SA-1 και στο SA-2 (Εικ. 3.12). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Dipole-Dipole (DD) με 48 ηλεκτρόδια και 62 διατομές συνολικά. Το SA-1 περιελάμβανε 30 προφίλ σε κατεύθυνση N-B όπως το GPR, ενώ το SA-2 αποτελούνταν από 32 προφίλ με διεύθυνση A-Δ. Παρόλο που προβλεπόταν να μετρηθούν 41 προφίλ ERT στο SA-2, δεν χρησιμοποιήσαμε 9 από αυτά λόγω της βλάστησης. Το μήκος του προφίλ είναι 37,6 m, λαμβάνοντας υπόψη την επιλεγμένη απόσταση ηλεκτροδίων 0,8 m και το βάθος έρευνας είναι περίπου 5 m. Συνολικά 629 σημεία μετρήθηκαν σε κάθε προφίλ. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τον ίδιο αριθμό ηλεκτροδίων και ίδια απόσταση, λάβαμε με διάταξη Wenner-Schlumberger (WS) δύο προφίλ για να αποκτήσουμε μια εικόνα για τις γεωλογικές ιδιότητες των βαθύτερων στρωμάτων των περιοχών που ερευνήθηκαν. Στο SA-3, η φαινομενική ειδική αντίσταση συλλέχθηκε κατά μήκος 7 προφίλ χρησιμοποιώντας τη διάταξη DD με απόσταση ηλεκτροδίων 0,7 m. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography) το οποίο έδωσε 2D και 3D διαγράμματα.

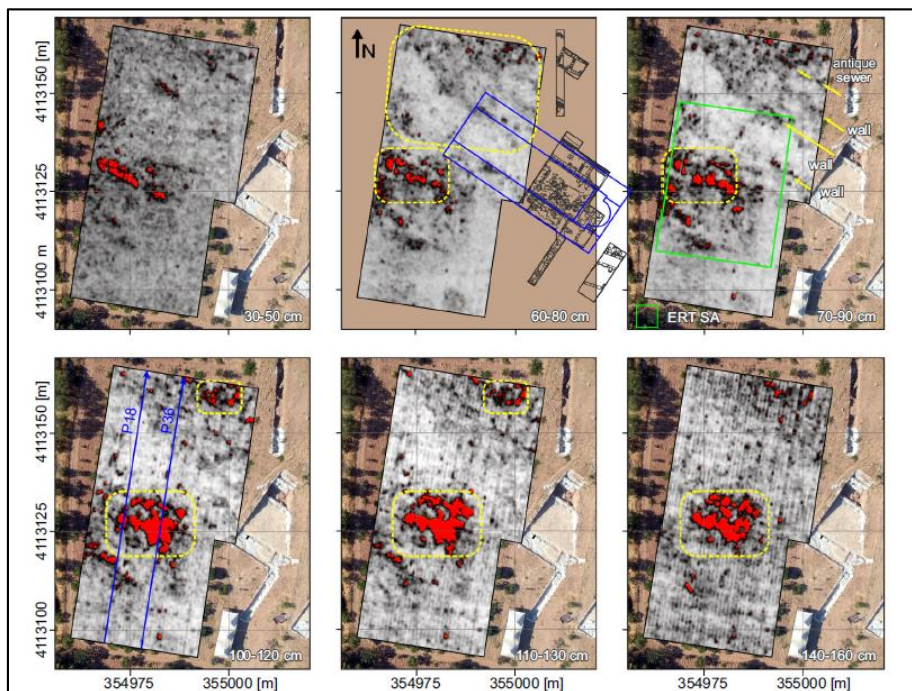


**Εικόνα 3.13:** Εικόνες από τις έρευνες GPR και ERT του 2020 που έγιναν στο SA-3.

### 3.2.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων

#### 3.2.6.1 Για το S-A 1

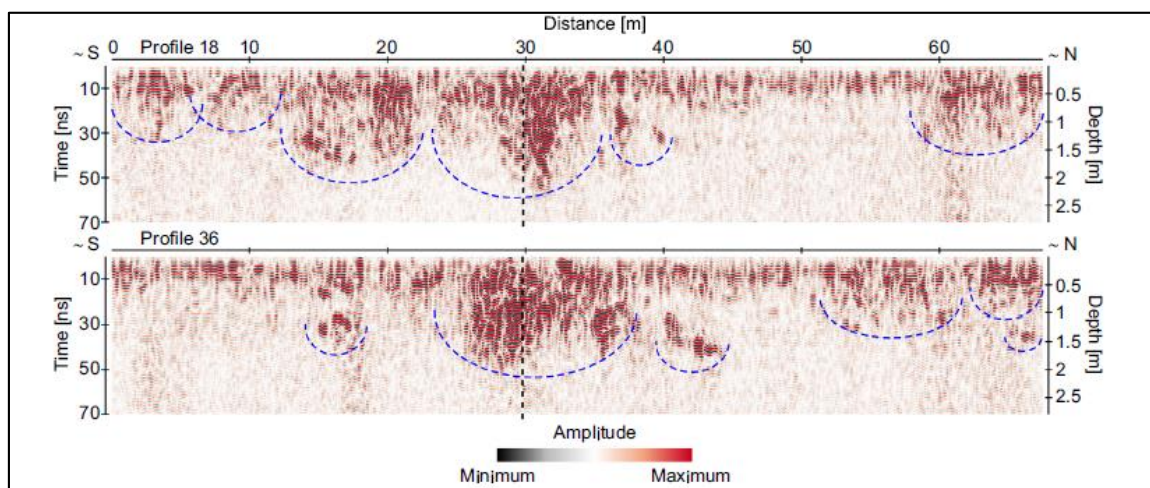
Στο SA-1, οι περιοχές έρευνας του GPR αποτελούνται από δύο μέρη λόγω των συνθηκών πεδίου όπως φαίνονται από την εναέρια εικόνα drone (Εικ. 3.11b). Οι περιοχές που φαίνονται με μαύρες γραμμές, βρίσκονται στα δυτικά της χριστιανικής βασιλικής (Εικ. 3.10a και Εικ. 3.11b). Τομές που δείχνουν επίπεδα βάθους μεταξύ 30 και 160 cm παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.14**.



**Εικόνα 3.14:** Οι χάρτες βάθους GPR που ελήφθησαν από το SA-1 επικαλύπτονταν στην εικόνα του drone.



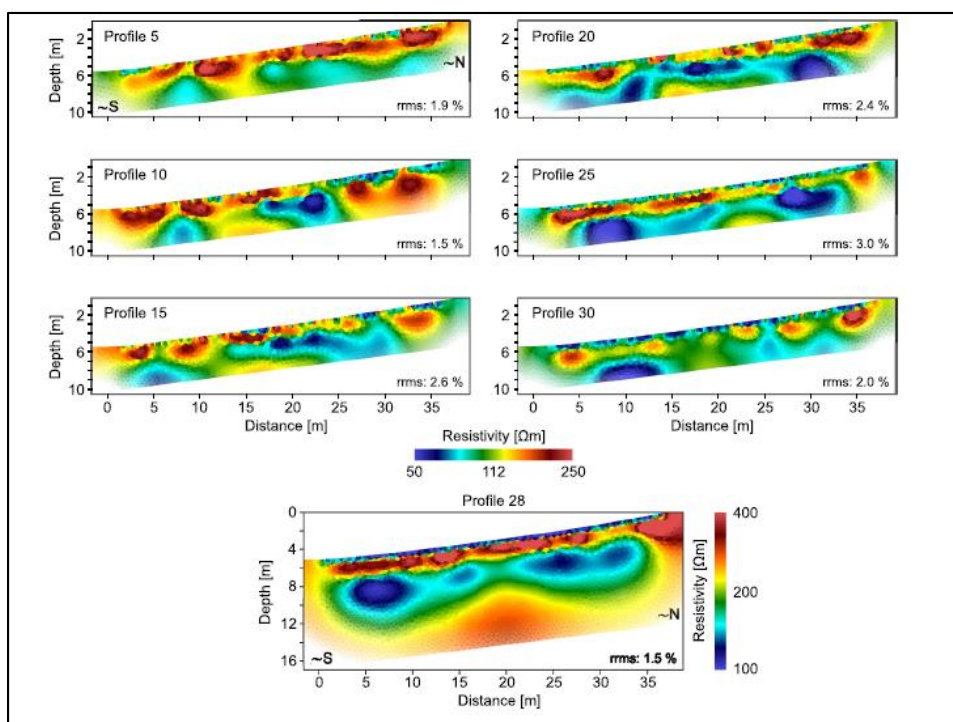
Οι πιο χαρακτηριστικές ανωμαλίες φαίνονται στις κίτρινες διακεκομμένες περιοχές. Μια λεπτομερής κάτοψη της θαμμένης εκκλησίας και κάποιες από τις παρακείμενες αρχαιολογικές κατασκευές φαίνονται στον χάρτη βάθους 60–80 cm στην **Εικόνα 3.14**. Λαμβάνοντας υπόψη τα κίτρινα βέλη που δίνεται στο χάρτη βάθους 70–90 cm, ίχνη του κεντρικού κλίτου της εκκλησίας φαίνονται να προχωράνε προς τα δυτικά. Στο πλαίσιο αυτό, το τρίτο βέλος από τα νότια μπορεί να υποδεικνύει το βόρειο κομμάτι της εκκλησίας. Επομένως, ανωμαλίες σχετικά χαμηλού πλάτους που φαίνονται με γκρι και μαύρα χρώματα στους χάρτες μπορούν να ερμηνευθούν ως πιθανά ευρήματα GPR με βάση τον κανονικό προσανατολισμό τους. Τα βόρεια τμήματα της περιοχής έρευνας GPR χαρακτηρίζονται κυρίως από ανωμαλίες πυκνής ανάκλασης που μπορούν να φανούν έως και 130 cm βάθος. Εδώ εντοπίζεται και η συνέχεια ενός υστεροπαλαϊκού υπονόμου. Επιπλέον, τα πιο χαρακτηριστικά ίχνη κόκκινου χρώματος που εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές πλάτους στους χάρτες βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Το πλάτος αυτού του μοτίβου ανάκλασης με κανονικό σχήμα που μπορεί να ακολουθηθεί στο βαθύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας είναι σχεδόν 15 m λαμβάνοντας υπόψη τον χάρτη τομής βάθους 100–120 cm. Τα προφίλ 18 (στα 7,5 m) και 36 (στα 17,5 m) των οποίων οι προσανατολισμοί είναι ορατοί στην **Εικόνα 3.12a και 7** επιλέχθηκαν για να δείξουν τον χαρακτηρισμό ανάκλασης αυτού του σχεδίου. Έτσι η **Εικόνα 3.15** αντιπροσωπεύει τα 2D επεξεργασμένα ραδιογράμματα με χρονική περικοπή παραθύρου των τελευταίων 30 ns.



**Εικόνα 3.15:** Εικόνες GPR ορισμένων προφίλ στο SA-1.

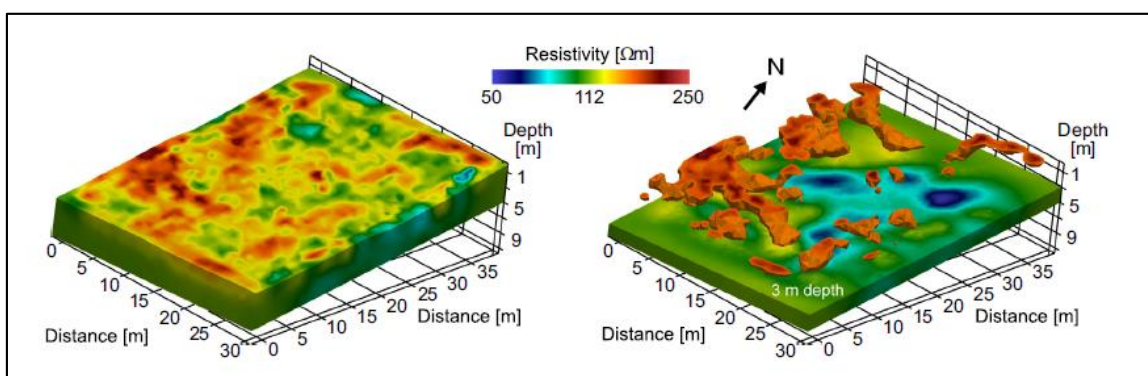
Οι κάθετες μαύρες διακεκομμένες γραμμές που φαίνονται στα 30 m υποδεικνύουν το όριο μεταξύ των δύο υποπεριοχών του SA-1, ενώ οι διακεκομμένες μπλε γραμμές σηματοδοτούν

υποσχόμενες ανωμαλίες. Και τα δύο ραδιογράμματα παρουσιάζουν αντανakλάσεις υψηλού πλάτους ειδικά στη ζώνη μετάβασης μεταξύ των δύο υποπεριοχών μέχρι το βάθος των 2 m. Η απουσία ανακλάσεων και η ρηχή διείσδυση σήματος σε ορισμένα σημεία των ραδιογραμμάτων υποδηλώνουν την υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα στο μέσο. Η έκταση της περιοχής έρευνας του ERT επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα του GPR που συζητήθηκε παραπάνω. Τα όρια της περιοχής έρευνας απεικονίζονται επίσης στον χάρτη βάθους τομής 70–90 cm με συμπαγείς πράσινες γραμμές (Εικ. 3.14). Επτά παραδείγματα μοντέλων ειδικής αντίστασης παρουσιάζονται στη **Εικόνα 3.16** ως 2D κάθετες τομές. Οι τομές 2D που λαμβάνονται στο τέλος της 3 ή 4 επανάληψης εμφανίζουν κατανομές ειδικής αντίστασης εντός του μέσου εύρους περίπου 50 και 250Ωm. Σύμφωνα με το ERT η περιοχή SA-1 εμφανίζει μετρήσεις σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης που υπερβαίνουν τα 150 Ωm (πορτοκαλί έως κόκκινο). Με βάση τον προσανατολισμό και τα σχήματα στο μέσο που χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης μεταξύ 50 και 75 Ωm (μπλε έως τυρκουάζ), μπορούμε να αναμένουμε την ύπαρξη αρχαιολογικών κατασκευών σε βάθος περίπου 3 m. Το τελευταίο τμήμα στο κάτω πλαίσιο της **Εικόνα 3.16** δείχνει το μοντέλο φαινομενικής ειδικής αντίστασης που λαμβάνονται μέσω της διάταξης WS.



**Εικόνα 3.16:** Εικόνες ERT ορισμένων προφίλ στο SA-1.

Τα βαθύτερα τμήματα της περιοχής μελέτης δείχνουν μια τάση μέτριας έως υψηλής ειδικής αντίστασης, η οποία πιθανότατα οφείλεται στη μετάβαση στα κορυφαία επίπεδα του βράχου. Αν και οι τιμές ειδικής αντίστασης φαίνεται να είναι χαμηλές για τον ασβεστόλιθο, η περιεκτικότητα σε άργιλο του βράχου συμβάλλει στη μείωση της ειδικής αντίστασης. Έτσι, οι ζώνες υψηλής ειδικής αντίστασης στο ανώτερο τμήμα του ERT πιστεύεται ότι είναι οι αποκρίσεις των θαμμένων αρχαιολογικών κατασκευών από αργιλοασβεστόλιθο, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το μεγαλύτερο μέρος του αρχαιολογικού υλικού που έχει αποκαλυφθεί στον χώρο. Η **Εικόνα 3.17** δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας το ParaView και δείχνει το τρισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο που λήφθηκε από την αξιολόγηση των δεδομένων του ERT τα οποία συλλέχθηκαν σε παράλληλες διατομές του SA-1.



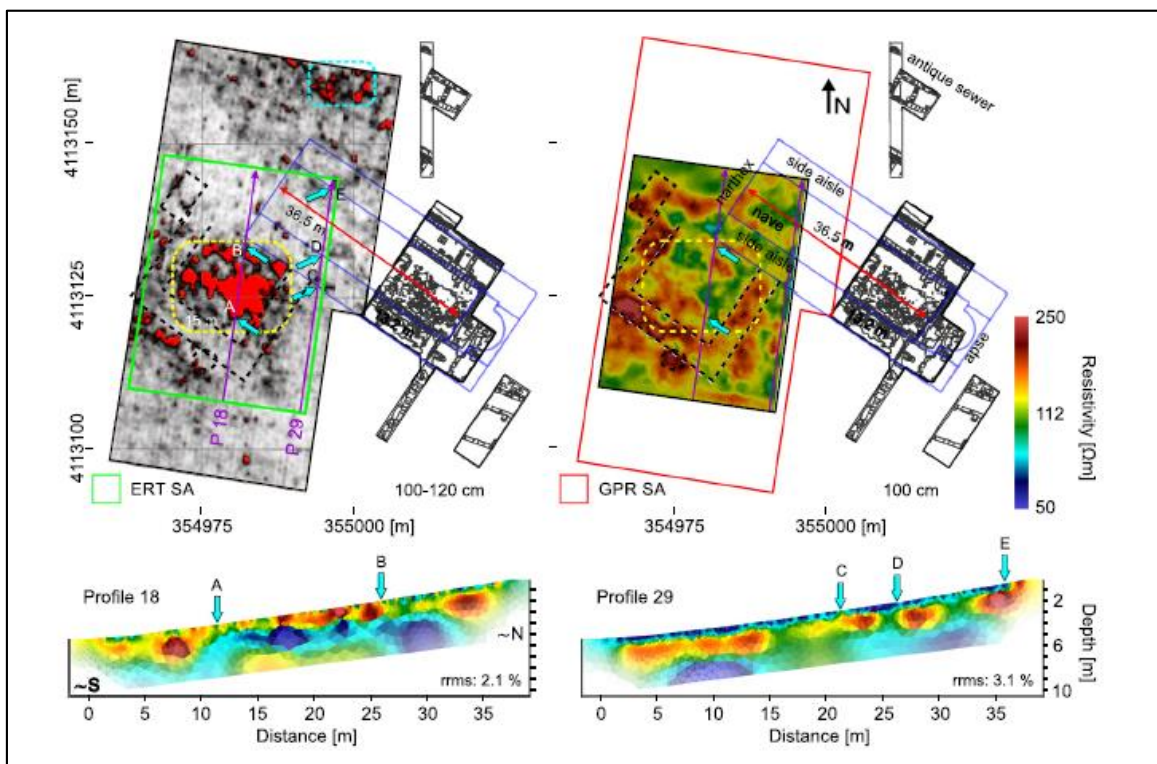
**Εικόνα 3.17:** Μερικές ογκομετρικές αναπαραστάσεις της κατανομής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στο SA-1.

Λαμβάνοντας υπόψη τις δομές αντίστασης που φαίνονται στο αριστερό πλαίσιο του σχήματος, η επιφάνεια της περιοχής έρευνας του ERT εμφανίζει συνήθως κατανομή μεγαλύτερη από την τιμή ειδικής αντίστασης των  $100\Omega\text{m}$ . Μια άλλη εικόνα δημιουργήθηκε επίσης για να δώσει μια γενική άποψη της κατανομής ειδικής αντίστασης που μπορεί να συσχετιστεί με αρχαιολογικές δομές στο SA-1. Έτσι, το δεξί πλαίσιο της **Εικόνας 3.17** δείχνει έναν όγκο ισοεπιφανειακών τιμών υψηλότερο από  $150\Omega\text{m}$  με επιφάνεια κοπής έως  $3\text{ m}$  βάθος. Αυτός ο συνδυασμός υποδεικνύει ότι η περιοχή εξερεύνησης συνήθως χαρακτηρίζεται από τιμές ειδικής αντίστασης μικρότερες από  $100\Omega\text{m}$ . Είναι επίσης προφανές ότι η καθορισμένη περιοχή όγκου ( $>150\Omega\text{m}$ ) προσελκύει την προσοχή τόσο με κανονικά σχήματα όσο και με προεκτάσεις, κάτι που μπορεί να είναι δείκτης ανθρωπογενών δομών που κρύβονται κάτω από την επιφάνεια. Τα αποτελέσματα των τεχνικών απεικόνισης

GPR και ERT υποστηρίζουν το ένα το άλλο στις γεωφυσικές μελέτες που πραγματοποιούνται στους αρχαίους χώρους. Από την άλλη, με την ύπαρξη της χαμηλής διηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ του εδάφους και του αρχιτεκτονικού υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή, η μέθοδος GPR μπορεί να επιδείξει σχετικά ασθενές ανακλάσεις σε ορισμένα τμήματα της περιοχής ενώ το ERT μπορεί να υποδεικνύει ανωμαλίες σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο βράχος στην περιοχή μελέτης είναι ένας πολύ μαλακός αργιλώδης ασβεστόλιθος και ο οποίος χρησιμοποιείται για αρχαιολογικές κατασκευές στην τοποθεσία, όπως φαίνεται στη **Εικόνα 3.10a**. Η εικόνα δείχνει την εκκλησία με ψηφιδωτό δάπεδο σε χοντρή στρώση από κονίαμα, όψιμους τοίχους που αποτελούνται από μάζα και μεγάλους, τοπικά λατομημένους ασβεστολιθικούς λίθους που είχαν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του ναού. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της πολυπλοκότητας της περιοχής SA-1. Επίσης, η άργιλος ως υλικό υψηλής αγωγιμότητας πιθανώς εξασθενεί ή απορροφά τα σήματα του γεωραντάρ, μειώνοντας σημαντικά το βάθος διείσδυσης. Αν και η περιεκτικότητα σε άργιλο στην επιφάνεια γενικά εμπόδιζε τη διείσδυση του σήματος GPR, τα λεπτά στρώματα αρχαιολογικών υλικών από άλλες γεωλογικές δομές μπορεί να ενισχύσουν την ανακλαστικότητα και να βοηθήσουν στην ερμηνεία. Στην περίπτωση του ERT ο αργιλώδης ασβεστόλιθος έχει υψηλότερο εύρος ειδικής αντίστασης από το έδαφος κάλυψης. Έτσι, και οι δύο τεχνικές μπορούν να παρέχουν σχετικά διαφορετικής προέλευσης ανωμαλίες που σχετίζονται με αρχαιολογικές δομές που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια λόγω της ειδικής γεωλογικής κατάστασης της περιοχής μελέτης. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι εικόνες που λαμβάνονται και από τις δύο μεθόδους για να παρέχεται πιο αξιόπιστη ερμηνεία. Η **Εικόνα 3.18** δείχνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις έρευνες GPR και ERT που πραγματοποιήθηκαν στο SA-1 λαμβάνοντας υπόψη τον χάρτη τομών βάθους 100–120 cm (αριστερό πλαίσιο) και 100 cm (δεξιό πλαίσιο) αντίστοιχα. Η περιοχή που ερευνηθήκε παρουσιάζει ορισμένες γεωφυσικές ανωμαλίες οι οποίες πρέπει να σχετίζονται με αρχαιολογικές κατασκευές στο υπέδαφος. Το πλάτος των ανωμαλιών μεταξύ των κίτρινων διακεκομμένων γραμμών στον χάρτη τομής βάθους GPR είναι περίπου 15 μέτρα. Η απόσταση μεταξύ των κεντρικών κλιτών της βασιλικής είναι περίπου 10 μέτρα, ενώ τα μήκη των αποκαλυφθέντων τοίχων της είναι περίπου 13,2 μέτρα και 7 μέτρα. Μπορούμε να δούμε τις επεκτάσεις τους στην περιοχή έρευνας GPR (Εικ. 3.14). Ομοίως, οι κύριες κατευθύνσεις των ανωμαλιών είναι σύμφωνες με τον βόρειο τοίχο της βασιλικής και τον υπόγειο υπόνομο. Οι ανωμαλίες υψηλής ειδικής αντίστασης που εμφανίζουν κανονικά σχήματα εμφανίζονται με μαύρες διακεκομμένες γραμμές στον χάρτη τομής βάθους του ERT. Αυτές οι ανωμαλίες μπορεί να προκληθούν από



τις κατασκευές που είναι προσαρτημένες στην εκκλησία ή που στέκονται δίπλα της. Οι ανωμαλίες κάθε εφαρμογής υπερτίθενται για να παρέχουν μια σαφέστερη σύγκριση. Με βάση τη σύγκριση και των δύο χαρτών μπορεί να δηλωθεί ότι αντιπροσωπεύουν ανωμαλίες σε διαφορετικές τοποθεσίες της περιοχής που ερευνήθηκε. Οι αντανάκλασεις υψηλού πλάτους μέσα στις κίτρινες διακεκομμένες γραμμές συσχετίζονται καλά με τη ζώνη μέτριας ειδικής αντίστασης. Από την άλλη ανωμαλίες υψηλής αντίστασης μεταξύ των μαύρων διακεκομμένων γραμμών, όπου οι αντανάκλασεις έχουν χαμηλά πλάτη, μπορεί να υποδεικνύουν συμπαγείς τοίχους. Δισδιάστατες τομές για τα προφίλ 18 και 29 δίνονται επίσης στο κάτω μέρος της **Εικόνας 3.18**.



**Εικόνα 3.18:** Σύγκριση ορισμένων χαρτών βάθους GPR και ERT που ελήφθησαν από το SA-1.

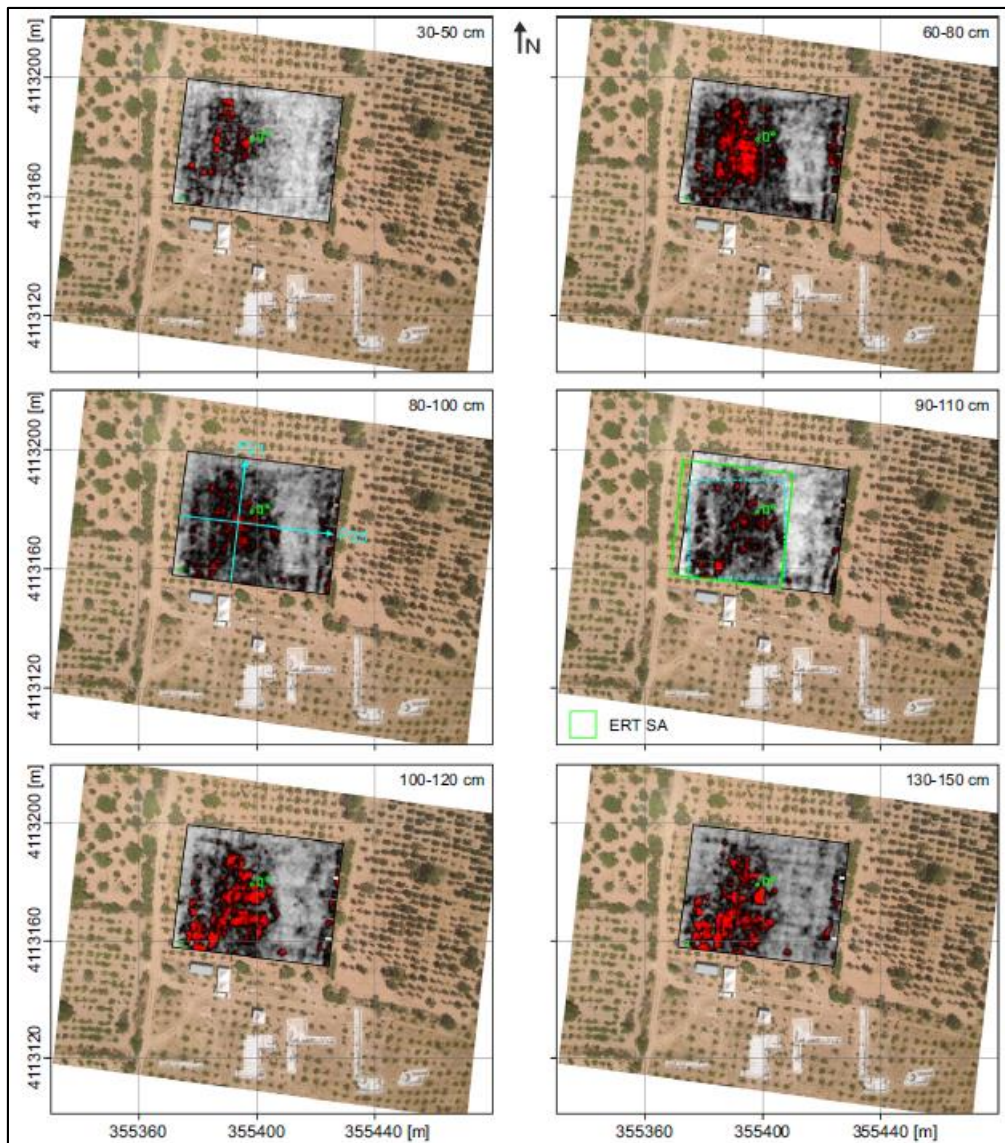
Μεταξύ αυτών, το προφίλ 18 αφορούσε τη ζώνη υψηλού πλάτους της τομής GPR ενώ το προφίλ 29 κόβει πιθανές επεκτάσεις των τοίχων του κλίτου της βασιλικής. Επιπλέον, οι ακριβείς τοποθεσίες τους επισημαίνονται με γράμματα από το A έως το D. Λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή ειδικής αντίστασης στο προφίλ 18, υπάρχει καλή αντιστοιχία μεταξύ των ίδιων επιπέδων βάθους της τομής GPR και του τμήματος ERT. Επίσης, το προφίλ 29 παρουσιάζει χαρακτηριστικές ανωμαλίες σχετικά υψηλής ειδικής αντίστασης σε βάθος μικρότερο από 1 m κάτω από την επιφάνεια και κοντά στα τοιχώματα του κλίτου που απεικονίζονται με τα βέλη C, D και E. Ενώ η συνέχεια του ναού μπορεί να εντοπιστεί στο



GPR με τις κατακερματισμένες ανωμαλίες, αυτά τα λεπτά τοιχώματα του κλίτου ακολουθούνται από το ERT με χαμηλότερη ανάλυση λόγω της απόστασης ηλεκτροδίων 0,8 m που χρησιμοποιείται. Από την άλλη, τα αποτελέσματα του ERT προσφέρουν πρόσθετες πληροφορίες και επισημαίνουν περαιτέρω κατασκευές στα νότια και νοτιοδυτικά του ναού. Ωστόσο, είναι δύσκολο να εξακριβωθεί η φύση και η λειτουργία αυτών των δομών. Αυτά φαίνεται να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό με την εκκλησία άρα πιθανότατα αποτελούν μέρος του εκκλησιαστικού συνόλου.

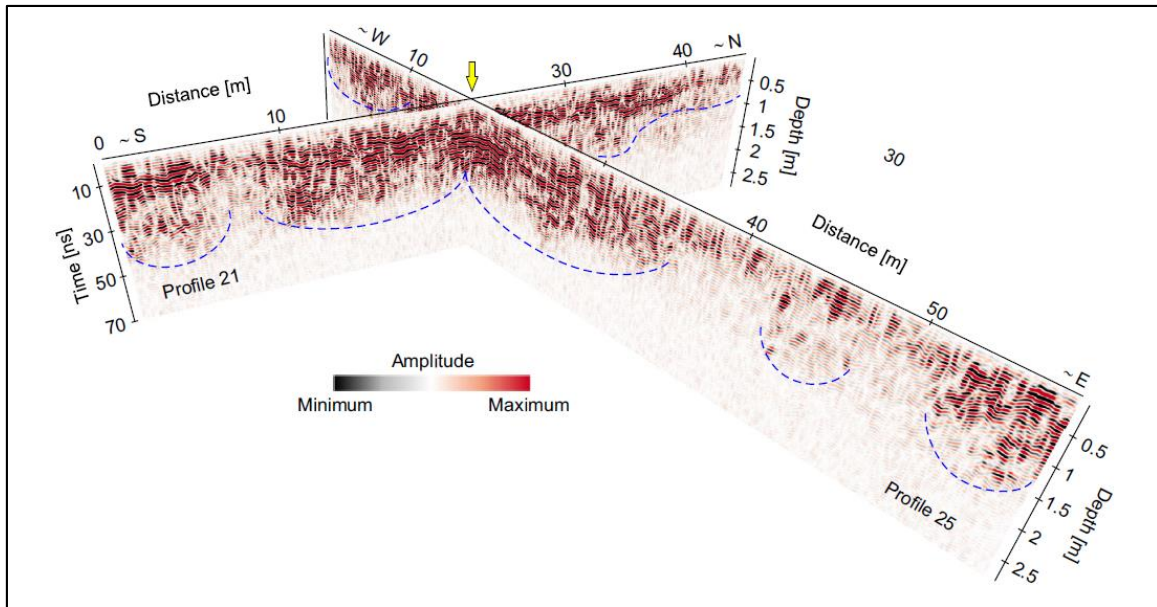
### **3.2.6.2. Για το S-A 2**

Η **Εικόνα 3.11c** δείχνει την περιοχή SA-2 στην οποία επιτεύχθηκαν μελέτες GPR και ERT κοντά στο λουτρό που φαίνεται στη **Εικόνα 3.10c και d**. Σε σύγκριση με το SA-1, η περιοχή έχει επίπεδη επιφάνεια και το βάθος των αρχαιολογικών κατασκευών είναι πολύ μικρό (Εικ. 3.10c και d). Γενικά, η βλάστηση στην περιοχή αυτή προκαλεί κάποιες δυσκολίες στην εφαρμογή των γεωφυσικών μετρήσεων, ιδιαίτερα στην περίπτωση του GPR. Ως εκ τούτου, η μελέτη GPR διεξήχθη σχεδόν σε κατευθύνσεις A-Δ και N-B, κόβοντας η μία την άλλη σχεδόν κάθετα για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Η **Εικόνα 3.19** εμφανίζει διάφορους χάρτες τομών βάθους που κυμαίνονται από 30 έως 150 cm, οι οποίοι ελήφθησαν από την ανάλυση των δεδομένων GPR. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η περιοχή έρευνας παρουσιάζει υποσχόμενες ανωμαλίες περίπου από το κέντρο προς το δυτικό τμήμα του SA-2. Αυτές οι ανωμαλίες φαίνονται μεταξύ των μπλε διακεκομμένων γραμμών στον χάρτη τομής βάθους 90–110 cm. Λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή με ελάχιστη ή καθόλου αντανάκλαση, από το μεσαίο τμήμα της περιοχής προς τα ανατολικά, πιστεύουμε ότι τα υλικά που ανήκουν στην αρχαιολογική δομή εδώ μεταφέρθηκαν για να χρησιμοποιηθούν αλλού. Σχεδόν όλες οι τομές παρουσιάζουν κανονικό προσανατολισμό και είναι από το νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής προς τα βορειοδυτικά. Επιπλέον, ίχνη ανάκλασης μεγάλου πλάτους είναι πολύ αισθητά στο κεντρικό τμήμα του ανατολικού τμήματος αυτής της δομής.



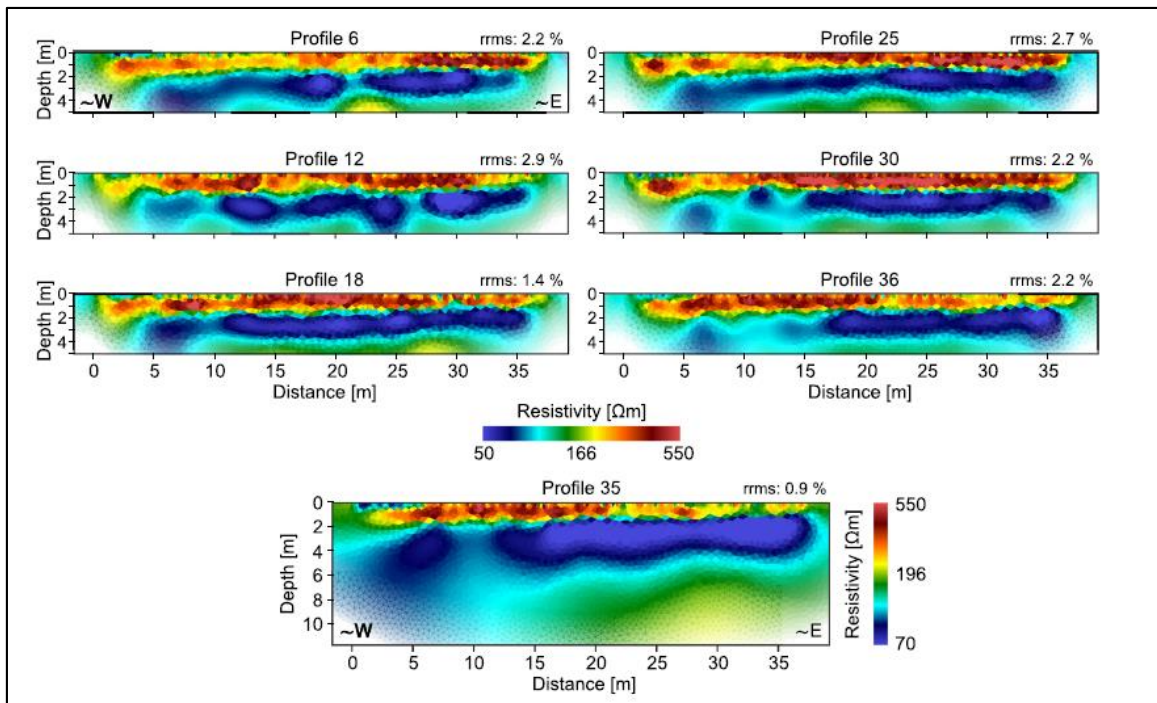
**Εικόνα 3.19:** Οι χάρτες βάθους GPR που ελήφθησαν από το SA-2 επικαλύπτονταν στην εικόνα του drone.

Η **Εικόνα 3.20** δείχνει ένα διάγραμμα δύο επεξεργασμένων ραδιογραμμάτων που αποτελούνται από τα προφίλ 21 και 25, και οι προσανατολισμοί τους μπορούν επίσης να φανούν στην **Εικόνα 3.12b**. Τα σημεία τομής τους που σημειώνονται με ένα κίτρινο βέλος είναι στα 17 m και 22,5 m μαζί με τις κατευθύνσεις μέτρησης. Οι μπλε διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν πολλά υποσχόμενες ανωμαλίες. Τα ισχυρά μοτίβα ανάκλασης υποστηρίζουν επίσης το ένα το άλλο στην περιοχή αυτού του σημείου. Επομένως η έρευνα του ERT πραγματοποιήθηκε σε μια περιορισμένη περιοχή που φαίνεται ανάμεσα στις πράσινες γραμμές που καλύπτουν αυτές τις ανωμαλίες που προέκυψαν από την έρευνα GPR.



**Εικόνα 3.20:** Εικόνες GPR ορισμένων προφίλ στο SA-2.

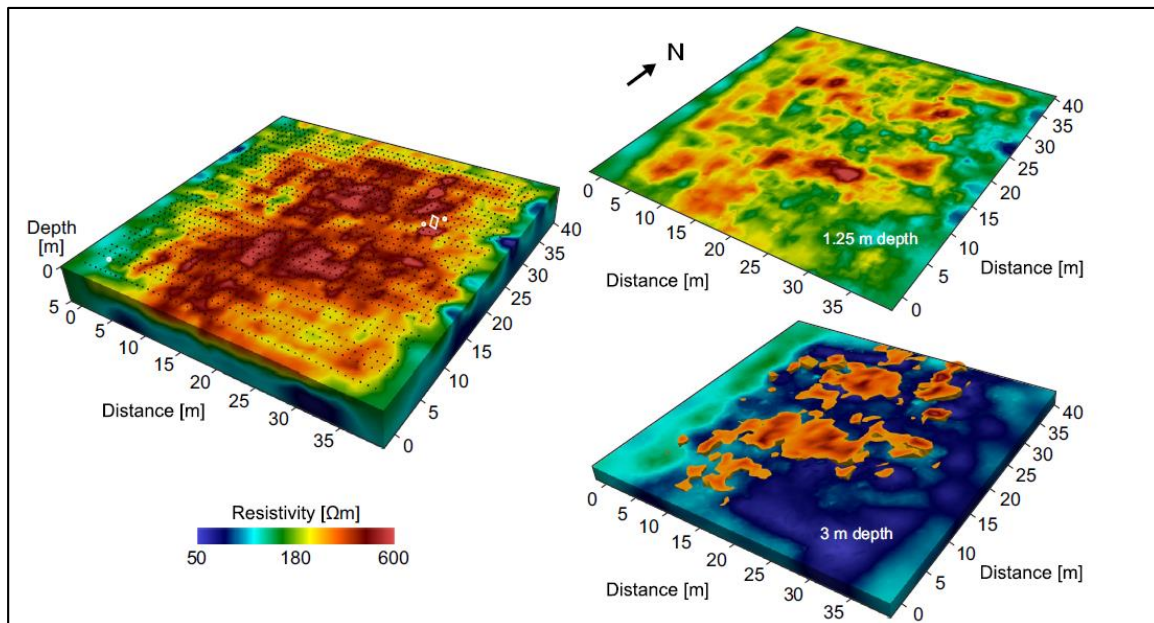
Η **Εικόνα 3.21** εμφανίζει έξι διατομές DD ERT που ελήφθησαν στο τέλος της 3-8 επανάληψης. Αυτή η περιοχή παρουσιάζει σχετικά υψηλότερη τιμή μέγιστης ειδικής αντίστασης σε σύγκριση με το SA-1. Σύμφωνα με αυτά, το SA-2 παρουσιάζει μια ζώνη σχετικά υψηλής αντίστασης ( $>300 \Omega\text{m}$ ) που φαίνεται να εκτείνεται πλευρικά στην κατεύθυνση A-Δ. Αυτή η ζώνη που βρίσκεται πάνω από το μέσο χαμηλής ειδικής αντίστασης ( $< 100 \Omega\text{m}$ ) μπορεί να φανεί μεταξύ 20 και 30 cm και βάθους 1,5–2 m. Τέτοιες ανωμαλίες υψηλής αντίστασης στο υπέδαφος που είναι σύμφωνες με το βάθος των υπολειμμάτων του λουτρού (Εικ. 3.10c και d) δεν μπορούν να εξηγηθούν από λιθολογικής άποψης στην ύπαρξη ενός αγωγίμου μέσου. Επομένως, τα ευρήματα αυτά πιθανότατα προκαλούνται από αρχαιολογικά κατάλοιπα. Το κάτω πλαίσιο της **Εικόνας 3.21** δείχνει το μοντέλο ειδικής αντίστασης των δεδομένων που αποκτήθηκαν μέσω της διάταξης WS. Παρόμοια με αυτή του SA-1, εκτός από το ανώτερο στρώμα, οι τιμές 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 7 m. Τα τομογράμματα ειδικής αντίστασης της διάταξης WS (Εικ. 3.16 και Εικ. 3.21) υποδεικνύουν μια ήπια κυματοειδή τοπογραφία. Αυτό το εύρημα είναι επίσης συμβατό με πληροφορίες που ελήφθησαν από τις αρχαιολογικές ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν σε πολλά σημεία του Keber Tere.



**Εικόνα 3.21:** Εικόνες ERT ορισμένων προφίλ στο SA-2.

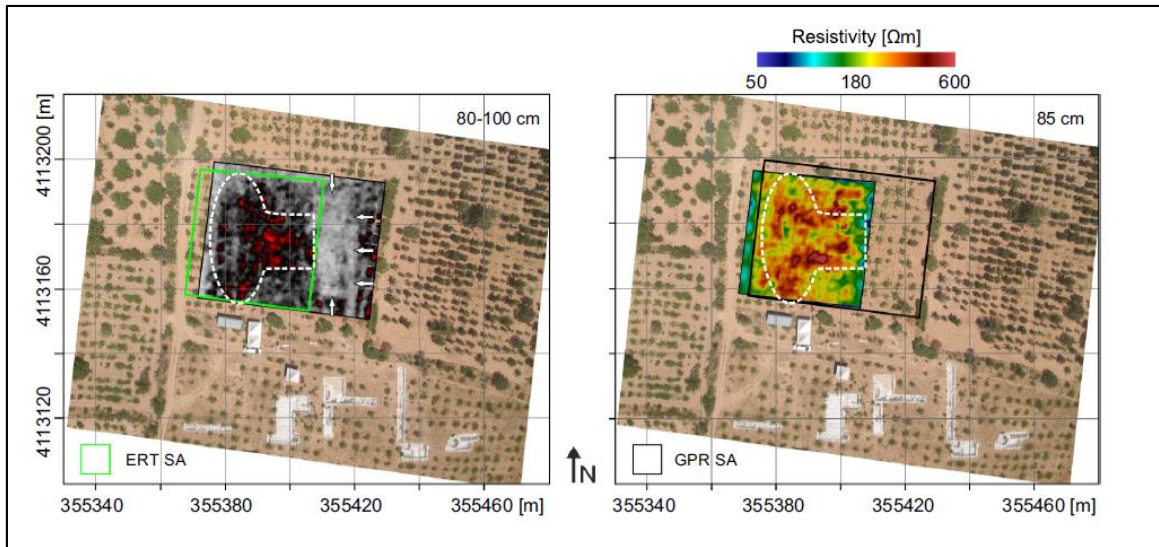
Ένα τρισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο που προέκυψε από τρισδιάστατη αναστροφή 2D μετρήσεων ERT του SA-2 δίνεται στην **Εικόνα 3.22**. Όταν διερευνούμε την τρισδιάστατη απεικόνιση όγκου του SA-2 που φαίνεται στο αριστερό πλαίσιο της εικόνας, η επιφάνεια της περιοχής έρευνας ERT παρουσιάζει ως επί το πλείστον τιμές υψηλής ειδικής αντίστασης ( $>300 \Omega\text{m}$ ), που είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα των περιπτώσεων 2D. Τα ηλεκτρόδια φαίνονται επίσης ως μαύρες κουκκίδες στην επιφάνεια για να δείχνουν τα μετρημένα προφίλ. Παρατηρήσαμε ότι τα 3 δέντρα (λευκοί κύκλοι) και ένας λάκκος (λευκό ορθογώνιο) που σημειώνονται στην **Εικόνα 3.22** δεν παράγουν ψευδείς ανωμαλίες που μπορεί να προκαλέσουν παρερμηνεία. Το δεξί πλαίσιο της εικόνας παρουσιάζει δύο χάρτες βάθους που δείχνουν κανονικές ανωμαλίες και στις δύο κατευθύνσεις. Λαμβάνοντας υπόψη την ευθυγράμμισή τους στην περιοχή, μπορούμε να θεωρήσουμε την ύπαρξη μιας αρχαιολογικής κατασκευής ακριβώς κάτω από την επιφάνεια. Σε αυτά τα επίπεδα βάθους, το μέσο έχει τιμή ειδικής αντίστασης μικρότερη από  $100 \Omega\text{m}$  ενώ τα ίχνη των πιθανών αρχαιολογικών δομών εμφανίζουν αντίσταση (πράσινη έως κόκκινη) που κυμαίνονται μεταξύ περίπου 150 και  $550 \Omega\text{m}$ .





**Εικόνα 3.22:** Μερικές ογκομετρικές αναπαραστάσεις της κατανομής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στο SA-2.

Μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και από τις δύο μεθόδους γεωφυσικής απεικόνισης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.23** λαμβάνοντας υπόψη τους χάρτες τομής βάθους 80–100 cm (αριστερό πλαίσιο) και 85 cm (δεξιό πλαίσιο). Και οι δύο μέθοδοι παρείχαν αποτελέσματα που εμφανίζουν συμφωνία όταν εξετάζουμε τις ανωμαλίες που παρατηρούνται μεταξύ των λευκών διακεκομμένων γραμμών. Εξάλλου, οι πιο ουσιαστικές ανωμαλίες εκτείνονται σε κατεύθυνση N-B και συμπίπτει με τις προεκτάσεις των υπολειμμάτων λουτρού. Αυτά τα ευρήματα πιθανώς υποδηλώνουν την ύπαρξη αρχαιολογικών δομών στο SA-2 ακριβώς κάτω από την επιφάνεια. Ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα. Δεν προκύπτει σαφές μοτίβο που να επιτρέπει την αναγνώριση μεμονωμένων κτιρίων ή μονάδων. Οι εικόνες του GPR και του ERT επιβεβαιώνουν τη θέση μιας πολύ μεγάλης τεχνητής κατασκευής στο κέντρο της περιοχής. Στα δυτικά, η δομή διευρύνεται σημαντικά. Επιπλέον, ο γενικός προσανατολισμός και οι ευθυγραμμίσεις των ανωμαλιών είναι σύμφωνοι με τον προσανατολισμό των κτηρίων της ρωμαϊκής περιόδου που ανασκάφηκαν νοτιότερα. Μπορούμε επομένως να συμπεράνουμε την ύπαρξη ενός μνημειώδους κτηρίου από τη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορική περίοδο. Γενικά, τα αποτελέσματα υποστηρίζουν την ερμηνεία αυτής της περιοχής ως ζώνης με μεγάλα δημόσια κτίρια.



**Εικόνα 3.23:** Σύγκριση ορισμένων χαρτών βάθους GPR και ERT που ελήφθησαν από το SA-2.

### 3.2.6.3 Για το S-A 3

Η πρόσφατη αρχαιο-γεωφυσική έρευνα περιλαμβάνει δύο μικρής κλίμακας ερευνητικά τμήματα στη ανατολική πλευρά του SA-1. Το πρώτο μέρος είναι ένα γνωστό ψηφιδωτό δάπεδο που καλύπτει το κεντρικό κλίτο του ναού, το δεύτερο περιέχει έναν χώρο σε σχήμα L. Λεπτομερείς όψεις για το SA-3 φαίνονται στην **Εικόνα 3.10b**, **3.11d**, και στο κάτω πάνελ της **Εικόνας 3.12**.

Το πρώτο μέρος του SA-3 ερευνήθηκε μόνο με τη μέθοδο GPR καθώς είναι καλυμμένο με μωσαϊκό δάπεδο. Η **Εικόνα 3.24** δείχνει χάρτες τομής βάθους 30–160 cm που ελήφθησαν από την επεξεργασία σαρώσεων GPR. Λαμβάνοντας υπόψη τους πρώτους δύο χάρτες τομών (δηλαδή 30–50 cm και 60–80 cm) της περιοχής του ψηφιδωτού, παρατηρήσαμε ότι το δάπεδο που περιέχει κονίαμα με λιγότερα κομμάτια μωσαϊκού εμφανίζει ανωμαλίες υψηλότερου πλάτους από τις περιοχές που καλύπτονται από πυκνό μωσαϊκό.

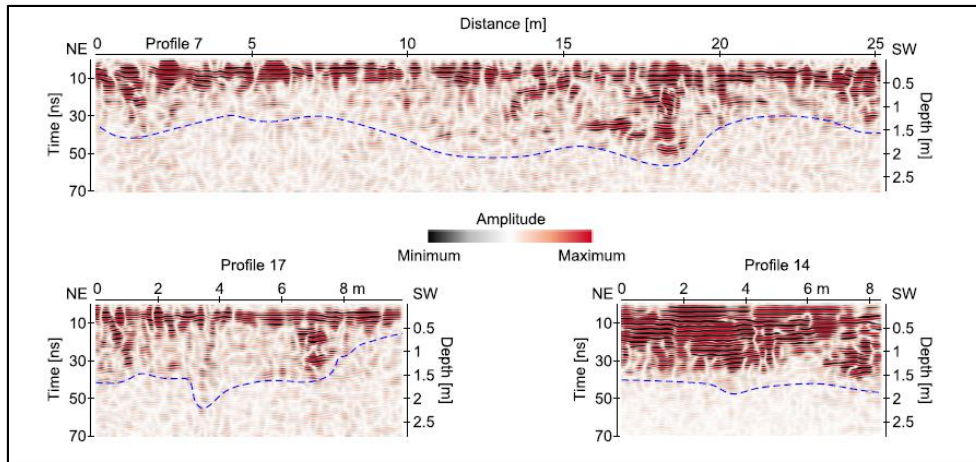


**Εικόνα 3.24:** Οι χάρτες βάθους GPR που ελήφθησαν από το SA-3 επικαλύπτονται στην εικόνα του drone.

Στη δεύτερη περιοχή κυριαρχούν κόκκινες ανωμαλίες μεγάλου πλάτους και γκρι-μαύρες ανωμαλίες σχετικά χαμηλού πλάτους, τα οποία μπορούν να ερμηνευθούν ως πιθανά πολλά υποσχόμενα ευρήματα GPR λαμβάνοντας υπόψη τις επεκτάσεις τους στους χάρτες (Εικ. 3.24). Οι εναέριες απεικονίσεις της περιοχής μελέτης δείχνουν μια τοιχοποιία που αποκαλύφθηκε σε μια αρχαιολογική τάφρο και ένα δάπεδο που βρίσκεται στα νότια αυτής. Με βάση τα αποτελέσματα, αυτή η ανωμαλία του τοίχου εκτείνεται περίπου 1,5 m προς την κατεύθυνση της ασπίδας του ναού και στη συνέχεια προσανατολίζεται βορειοανατολικά παράλληλα με την ασπίδα από το μέσο της περιοχής μελέτης. Η ανωμαλία που προέρχεται από το δάπεδο που αναφέρεται παραπάνω είναι επίσης ορατή. Μια άλλη ζώνη ανωμαλίας γειτνιάζει με τον αναμενόμενη προέκταση του τοίχου του ναού. Επιπλέον, μια συνέχεια των τοίχων που βρίσκονται στη βορειότερη πλευρά του πρώτου τμήματος παρατηρείται και στον χάρτη βάθους 60–80 cm.

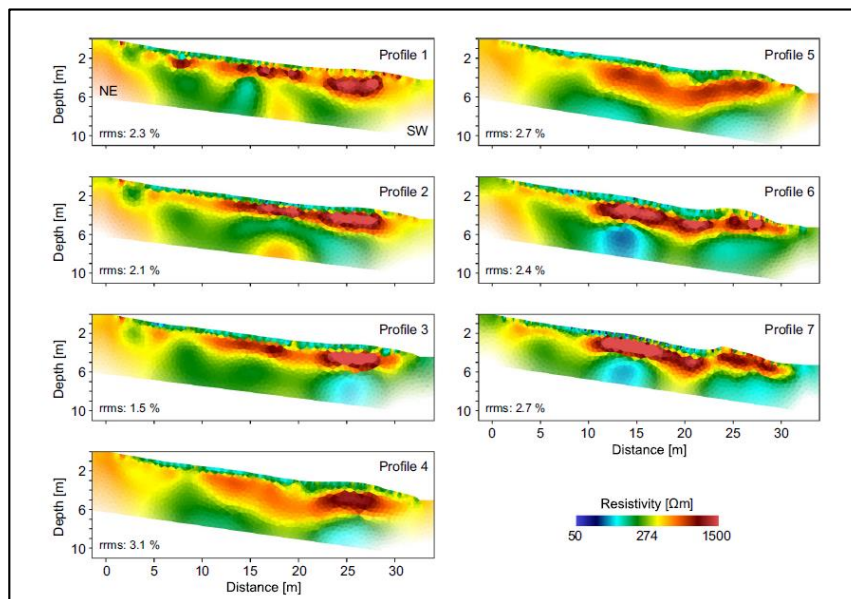
Η **Εικόνα 3.25** παρουσιάζει δισδιάστατα επεξεργασμένα ραδιογράμματα για το προφίλ 14 από το ψηφιδωτό δάπεδο του κεντρικού ναού και τα προφίλ 7 και 17 που μετρήθηκαν στην αυλή της εκκλησίας. Οι αντανάκλασεις που φαίνονται πάνω από τις μπλε διακεκομμένες γραμμές είναι υποσχόμενες ανωμαλίες σε κάθε τμήμα βάθους.





**Εικόνα 3.25:** Εικόνες GPR ορισμένων προφίλ στο SA-3.

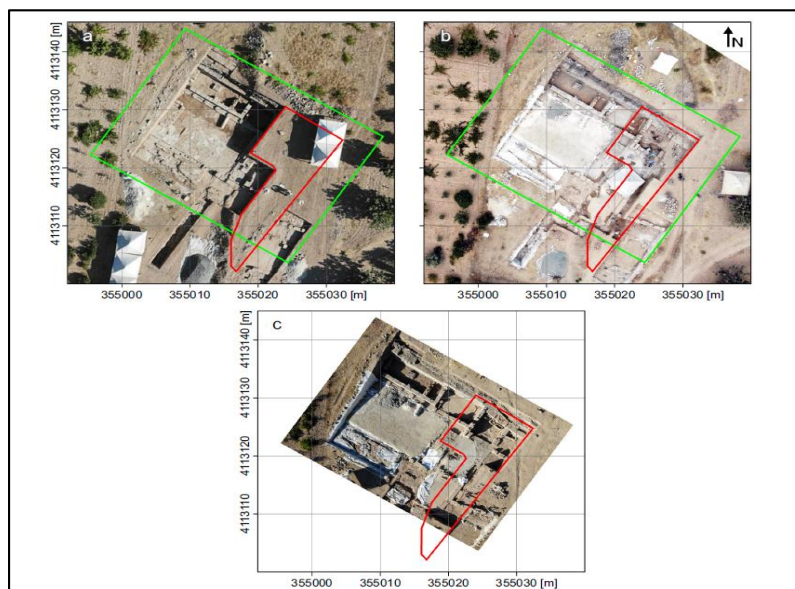
Η **Εικόνα 3.26** παρουσιάζει τομογραφήματα ειδικής αντίστασης που ελήφθησαν από 7 προφίλ που μετρήθηκαν στην κατεύθυνση από ΒΑ προς ΝΔ. Το πρώτο προφίλ βρίσκεται κοντά στον τοίχο ενώ το τελευταίο βρίσκεται κοντά στην αψίδα του ναού. Το συμπαγές έδαφος που παρατηρήθηκε σε αυτήν την περιοχή προκάλεσε υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης σε σύγκριση με το SA-1 που περιέχει γεωργικό έδαφος στην επιφάνεια. Αυτές οι ανωμαλίες υψηλής ειδικής αντίστασης ( $>500 \Omega\text{m}$ ) στο μέσο υποδοχής, που χαρακτηρίζονται από ειδική αντίσταση μικρότερη από  $200 \Omega\text{m}$ , παρατηρούνται περίπου 50 cm κάτω από την επιφάνεια και ξεκινούν κυρίως από το 10ο μέτρο κάθε τομογραφίας.



**Εικόνα 3.26:** Εικόνες ERT ορισμένων προφίλ στο SA-3.



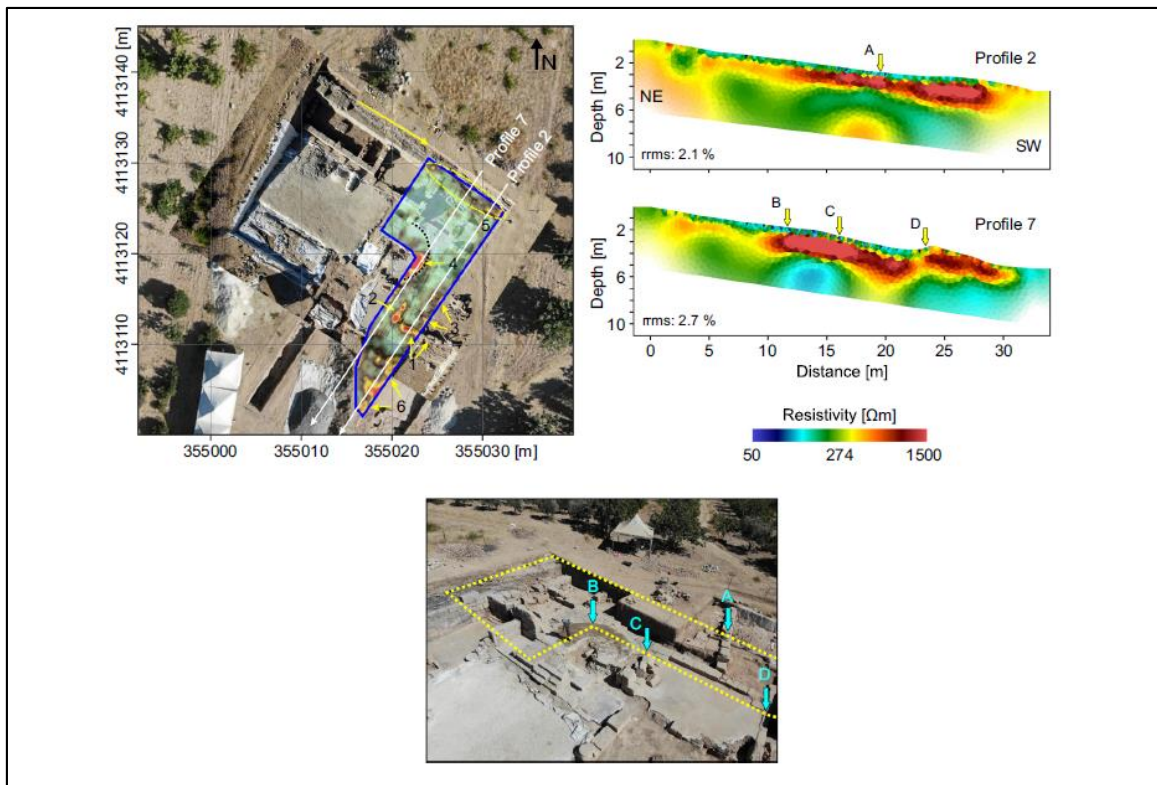
Η **Εικόνα 3.27** δείχνει αεροφωτογραφίες που ελήφθησαν πριν από το (α), κατά το (β) και στο τέλος (γ) της αρχαιολογικής ανασκαφής που πραγματοποιήθηκε στην αυλή της εκκλησίας. Στην **Εικόνα 3.27c**, φαίνεται η αυλή της βασιλικής να έχει ανασκαφεί σχεδόν πλήρως στο ανατολικό τμήμα, και αποκαλύπτονται πλήρως και τα δύο δωμάτια που συνορεύουν με την αψίδα και η ίδια η αψίδα. Λαμβάνοντας υπόψη την τάφρο διαστάσεων  $10 \times 10$  m, παρατηρείται μια σειρά από κανάλια νερού και λεκάνες που κατά κάποιον τρόπο συνδέονταν με τη χρήση του ναού



**Εικόνα 3.27:** Αεροφωτογραφίες με το drone τραβηγμένες (α) πριν (β) κατά τη διάρκεια και (γ) μετά την αρχαιολογική τάφρο στην αυλή της εκκλησίας.

Μια σύγκριση μεταξύ των αρχαιολογικών ευρημάτων στη δεύτερη περιοχή του SA-3 και των γεωφυσικών αποτελεσμάτων των ερευνών GPR και ERT παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.28**. Η εξερεύνηση GPR παρείχε καλή αλλά περιορισμένη εικόνα λαμβάνοντας υπόψη την ανασκαφική περιοχή. 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 προηγούμενως εκτεθειμένου τοίχου που συγχωνεύεται με τον ανατολικό τοίχο του ναού που αναφέρεται παραπάνω. Στην εικόνα, ο τοίχος με αριθμό 2 μπορεί να εντοπιστεί περίπου 2 m στην κατεύθυνση ΝΔ-ΒΑ, παρόλο που 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

τιμήμα της ασίδας του ναού παρουσιάζει αντανακλάσεις μεγάλου πλάτους, ενώ ορισμένα τιμήματα που βρίσκονται στο όριο της τετράγωνης τάφρου εμφανίζουν αντανακλάσεις σχετικά μέτριου πλάτους. Επίσης, αυτό ισχύει σχεδόν για το πέμπτο που σχετίζεται με τη δομή του τοίχου που απεικονίζεται από ένα κίτρινο βέλος στην εικόνα. Τέλος, οι υψηλότερες αντανακλάσεις επιτεύχθηκαν στην έκτη ζώνη ανωμαλίας που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τιμήμα του SA-3, η οποία βρίσκεται κοντά σε μωσαϊκό δάπεδο. Ως αποτέλεσμα, οι ανωμαλίες GPR υψηλού πλάτους που αναφέρονται παραπάνω είναι ουσιαστικά συνεπείς με τις αρχαιολογικές δομές που ανακαλύφθηκαν. Συγκεκριμένα, το όριο του δαπέδου της ασίδας μπορεί να εντοπιστεί, αλλά όχι και με τόση υψηλή ανάλυση. Επιπλέον, η έρευνα GPR δεν μπόρεσε να προσδιορίσει όλες τις δομές που εκτέθηκαν, ειδικά στο μεσαίο και βόρειο τιμήμα της περιοχής μελέτης. Γενικά χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλού πλάτους ίχνη που εμφανίζονται με σκούρο γκρι στην εικόνα. Ως εκ τούτου, στην ερμηνεία, 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. Επίσης, η ετερογενής κατανομή της περιεκτικότητας σε άργιλο στο δομικό υλικό μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση μικρών ανωμαλιών στο GPR. Η **Εικόνα 3.28** δείχνει τομογραφίες ERT που ελήφθησαν από 2D δεδομένα που συλλέχθηκαν στα Προφίλ 2 και 7 και τη θέση των γραμμμάτων που σημειώνονται σε αυτά για να βοηθήσουν στην ερμηνεία. Και στις δύο τομογραφίες, το βέλος με την ένδειξη Α στα 19,6 m δείχνει την ακριβή θέση του προηγουμένως αποκαλυφθέντος τοίχου με προσανατολισμό ΝΑ-ΒΔ. Το βέλος Β στα 11,7 μέτρα δείχνει τη γωνία της τετράγωνης αρχαιολογικής τάφρου ενώ το βέλος Γ στα 16,7 μέτρα είναι η θέση του τοίχου της ασίδας που ήταν ορατός πριν από την ανασκαφή. Τέλος, το βέλος D στα 23,5 μέτρα απεικονίζει έναν τοίχο που βρίσκεται στο άκρο ενός ψηφιδωτού δαπέδου που μπορεί να παρατηρηθεί μετά τον τοίχο της ασίδας. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την παρατήρηση από την περιοχή, μπορούμε να 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 τιμήματα 2D του ERT κατάφεραν επίσης να απεικονίσουν τις βόρειες αρχαιολογικές κατασκευές εντός της τετράγωνης τάφρου, οι οποίες παράγουν σχετικά χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης.



**Εικόνα 3.28:** Σύγκριση ορισμένων τομογραφιών βάθους GPR και ορισμένων τομογραφιών ERT με τα αρχαιολογικά ευρήματα που εκτέθηκαν στο SA-3.

### 3.2.7 Συμπεράσματα

Η Doliche, που βρίσκεται στη ΝΑ Τουρκία, ήταν κάποτε περιφερειακό κέντρο της αρχαίας Commagene. Μέχρι στιγμής έχουν ανακαλυφθεί αξιόλογα αρχαιολογικά ευρήματα. Ωστόσο, τα υπόγεια αρχαιολογικά κατάλοιπα της αρχαίας πόλης διατρέχουν σοβαρό κίνδυνο λόγω των γεωργικών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται στη περιοχή. Έτσι, διεξήχθη μια αρχαιογεωφυσική έρευνα που παρέχει γρήγορες και μη καταστροφικές σαρώσεις του υπεδάφους χρησιμοποιώντας μετρήσεις GPR και ERT σε τρεις διαφορετικές περιοχές της τοποθεσίας στις εκστρατείες 2019 και 2020. Οι περιοχές SA-1 και SA-3 γειτνιάζουν και στις δύο πλευρές της χριστιανικής βασιλικής στη νότια πλαγιά του λόφου της πόλης και η περιοχή SA-3 βρίσκεται δίπλα σε ένα μεγάλο κτίριο πολιτικών λουτρών της Ρωμαϊκής περιόδου που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της πόλης. Όλες οι περιοχές έρευνας του ERT επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της έρευνας GPR. Στο SA-1, οι προκύπτουσες εικόνες τομής και ογκομετρικής ανωμαλίας που ελήφθησαν από έρευνες GPR και ERT

παρουσιάζουν μερικά αξιοσημείωτα γεωφυσικά ίχνη, τα οποία μπορούν να ερμηνευθούν ως αρχαιολογικές δομές. Το GPR εντόπισε μερικούς από τους τοίχους του κλίτου που εκτείνονται στη βορειοδυτική πλευρά της βασιλικής. Οι πιο υποσχόμενες ανωμαλίες υψηλού πλάτους λήφθηκαν στο μεσαίο τμήμα του SA-1. Στο SA-2 και οι δύο μέθοδοι παρείχαν έναν καλό συνδυασμό των χωρικών παραμέτρων πιθανών θαμμένων αρχαιολογικών καταλοίπων. Μπορεί να εξηγηθεί από τη σχετικά χαμηλή αναλογία αργίλου στο υλικό που χρησιμοποιείται στις αρχαιολογικές κατασκευές αυτής της περιοχής. Εξάλλου, για μια περιοχή όπου τα μοτίβα ανάκλασης ξαφνικά εξαφανίστηκαν στις τομές βάθους GPR, πιστεύεται ότι το υλικό που ανήκει στο κτήριο εδώ πιθανότατα αφαιρέθηκε για χρήση αλλού. Γεωφυσικές έρευνες έγιναν και στο SA-3 στο ψηφιδωτό δάπεδο του κεντρικού κλίτου και στην αυλή της εκκλησίας. Λαμβάνοντας υπόψη τις αρχαιολογικές τάφρους που πραγματοποιήθηκαν στην αυλή της εκκλησίας, φαίνεται ότι η μέθοδος GPR μπορεί να καθορίσει εν μέρει τις αρχαιολογικές κατασκευές, παρόμοια με την περίπτωση του SA-1. Από την άλλη, η έρευνα του ERT έδωσε ικανοποιητικές υποεπιφανειακές εικόνες ειδικής αντίστασης, σύμφωνες με τις εκκλησιαστικές κατασκευές που εκτέθηκαν από τις αρχαιολογικές ανασκαφές. Δεδομένου ότι οι αρχαιολογικές κατασκευές που αποκαλύφθηκαν και τα προφίλ μέτρησης του ERT είναι στην ίδια κατεύθυνση, παρατηρούνται ανωμαλίες με περιορισμένη πλευρική ανάλυση. Δεδομένων όλων των τομογραφιών ERT που ελήφθησαν από τρεις περιοχές, παρατηρήθηκε ότι στην αρχαία πόλη λήφθηκαν υποεπιφανειακές εικόνες με σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος ERT είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την ανίχνευση των ρηχών αρχαιολογικών χαρακτηριστικών της αρχαίας Doliche. Εξάλλου, τα βάθη των γεωφυσικών ιχνών που φαίνονται τόσο από τα τμήματα GPR όσο και από το ERT συμφωνούν με τα λείψανα που ανακαλύφθηκαν σε προηγούμενες αρχαιολογικές μελέτες που αυξάνουν την αξιοπιστία του γεωφυσικού έργου. Αυτά τα ευρήματα παρείχαν μερικές χρήσιμες πληροφορίες πριν ξεκινήσουμε τις σκληρές και 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 αρχαιο-γεωφυσική έρευνα, μια συνδυασμένη ερμηνεία των εικόνων GPR και ERT μπορεί να αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

### 3.3 Γεωφυσική έρευνα στο Khirbat Faynan, μια τοποθεσία αρχαίου αναχώματος στη Νότια Ιορδανία

(Alexandre Novo, Matthew L. Vincent, and Thomas E. Levy)



Εικόνα 3.29: Χάρτης της περιοχής που δείχνει την τοποθεσία του Khirbet Faynan

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Η περιοχή Faynan στην Ιορδανία περιέχει τη μεγαλύτερη ζώνη μεταλλεύματος χαλκού στο νότιο Λεβάντ (Ισραήλ, Ιορδανία, παλαιστινιακά εδάφη, Λίβανος, Συρία και Χερσόνησος του Σινά). Βρίσκεται 50 χλμ νοτιοανατολικά της Νεκράς Θάλασσας και φιλοξενεί ένα από τα



καλύτερα διατηρημένα, στον κόσμο, αρχαία συγκροτήματα εξόρυξης και μεταλλουργίας που καλύπτουν έκταση περίπου 400 τετραγωνικών χλμ.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, οι αρχαιολόγοι έχουν πραγματοποιήσει πολυάριθμες ανασκαφές καταγράφοντας εκατοντάδες ορυχεία και τοποθεσίες που σχετίζονται με μεταλλουργικές δραστηριότητες που εκτείνονται στο πέρασμα των τελευταίων 10 χιλιάδων ετών. Το Khirbat Faynan (Βιβλικό Punon), βρίσκεται στην κοιλάδα Faynan και αποτελεί τον μεγαλύτερο (περίπου 15 εκτάρια) οικισμό στην περιοχή. Παρέμεινε μη ανασκαμμένο μέχρι το 2011.



**Εικόνα 3.30:** Το Khirbat Faynan, στη κοιλάδα Faynan.

Ως ο νοτιότερος λόφος της Ιορδανίας και γεμάτος με ενδείξεις διαδομένης αρχαίας αρχιτεκτονικής, χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά μη επεμβατικών μεθόδων γεωφυσικής έρευνας για να εντοπιστούν περιοχές κατάλληλες για ανασκαφές. Στο παρελθόν πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες στην περιοχή Faynan από την ίδια ομάδα στα τέλη της δεκαετίας του 1990 με τη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τη περίοδο 2002 –2010, η κύρια αρχαιολογική ερευνητική εστίαση ήταν στην αρχική περίοδο της Εποχής του Σιδήρου (περίπου 1200–500 π.Χ.), όταν και διαμορφώθηκαν τα πρώτα κρατίδια σε κοινωνικό επίπεδο σε αυτό το τμήμα της ανατολικής Μεσογείου και έγινε η πρώτη βιομηχανική επανάσταση της αρχαίας Εγγύς Ανατολής.

Μεγάλης κλίμακας ανασκαφές πραγματοποιήθηκαν στο Khirbat en-Nahas (περίπου 10 εκτάρια), το οποίο ήταν το μεγαλύτερο συγκρότημα επεξεργασίας μεταλλευμάτων χαλκού. Περιλάμβανε μικρότερα μεταλλευτικά συγκροτήματα και φρούρια. Λόγω της έλλειψης στοιχείων που καθιστούσαν τη συγκεκριμένη περιοχή ως πολιτικό και οικονομικό κέντρο της περιοχής, οι περισσότεροι ερευνητές πιστεύουν ότι μια μεγάλη (περίπου 15 εκτάρια) τοποθεσία αρχαίου λοφίσκου που ονομάζεται Khirbat Faynan (γνωστό ως Punon (Πούνον) στην Εβραϊκή Βίβλο και Φαίνον στα ύστερα ρωμαϊκά/βυζαντινά κείμενα) μπορεί να ήταν το κέντρο κατά την Εποχή του Σιδήρου.



**Εικόνα 3.31:** Ανασκαφές στην πύλη φρουρίου της Εποχής του Σιδήρου στο Khirbat en-Nahas.

Η περιοχή έχει ένα σημαντικό αριθμό καλά διατηρημένων ερειπίων ρωμαϊκής και βυζαντινής προέλευσης.

Η αποστολή ELRAP (Edom Lowlands Regional Archaeology Project) του 2011 ξεκίνησε για να απαντήσει σε ερωτήσεις που αφορούν την κοινωνικοοικονομική λειτουργία της τοποθεσίας κατά την Εποχή του Σιδήρου. Ως μέρος αυτής της αποστολής, διεξήχθη μια γεωφυσική έρευνα του χώρου και του άμεσου περιβάλλοντος προκειμένου να δημιουργηθεί το γεωλογικό προφίλ της περιοχής και να εντοπίσει τους πρωταρχικές θέσεις υποψήφιες για ανασκαφή.

Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν ήταν η Ηλεκτρομαγνητική (EM) και η μέθοδος Τομογραφίας Ηλεκτρικής Αντίστασης (ERT) καθώς παρείχαν μια ευέλικτη προσέγγιση στο δύσκολο στη προσπέλαση έδαφος. Ο τελικός στόχος ήταν να ερευνηθούν θαμμένες κατασκευές, ειδικά της εποχής του Σίδηρου.

### **3.3.2 Μεθοδολογία**

Λόγο εδάφους η μέθοδος του GPR ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθεί. Η επιφάνεια του εδάφους είναι γενικά καλυμμένη με χαλάσματα που θα έπρεπε να καθαριστούν πριν οποιαδήποτε έρευνα λάβει χώρα. Η διαδικασία καθαρισμού των βράχων δεν θα ήταν μόνο ακριβή από την άποψη του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση μιας τέτοιας εργασίας, αλλά θα ήταν επίσης δυνητικά επεμβατική καθώς θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο εκτεθειμένες αρχαίες κατασκευές που δεν είναι πάντα άμεσα ορατές ανάμεσα στα συντρίμια των βράχων. Αποφασίστηκε ότι οι επόμενες καλύτερες επιλογές ήταν οι EM, ERT. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό του υπεδάφους καθώς και την ικανότητα ανίχνευσης ανωμαλιών που θα μπορούσαν να σχετίζονται με θαμμένες κατασκευές ή αντικείμενα.

Αρχικά έγινε η χρήση των EM, καθώς δεν απαιτούταν άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους, έτσι ερευνήθηκαν μεγάλες περιοχές γρήγορα. Στη συνέχεια έγινε επιλογή των τοποθεσιών για την εκτέλεση προφίλ ERT με τη μέθοδο δίπολο-δίπολο σε όλη την τοποθεσία για να ληφθούν κάθετες διατομές των πρώτων 5 μέτρων από την επιφάνεια. Αυτά τα δεδομένα αντιστράφηκαν για να ληφθούν δισδιάστατες ηλεκτρικές τομογραφίες. Τέλος, έγινε επιλογή ενός κατάλληλου μέρους για να πραγματοποιηθεί ένα πλέγμα 3D υψηλής ανάλυσης. Η τρισδιάστατη ηλεκτρική εικόνα που προέκυψε από αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκε για να αποφασιστεί η τοποθεσία της τελικής ανασκαφής.

#### **3.3.2.1 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος**

Μεταξύ πολλών εφαρμογών, τα όργανα ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής χρησιμοποιούνται για αρχαιολογικές έρευνες κοντά στην επιφάνεια για την ανίχνευση θαμμένων κατασκευών, όπως θεμέλια κτιρίων καθώς και για την ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων υψηλής αγωγιμότητας. Η μέθοδος EM χρησιμοποιήθηκε, ως εκ τούτου, σε αυτή τη μελέτη για τον

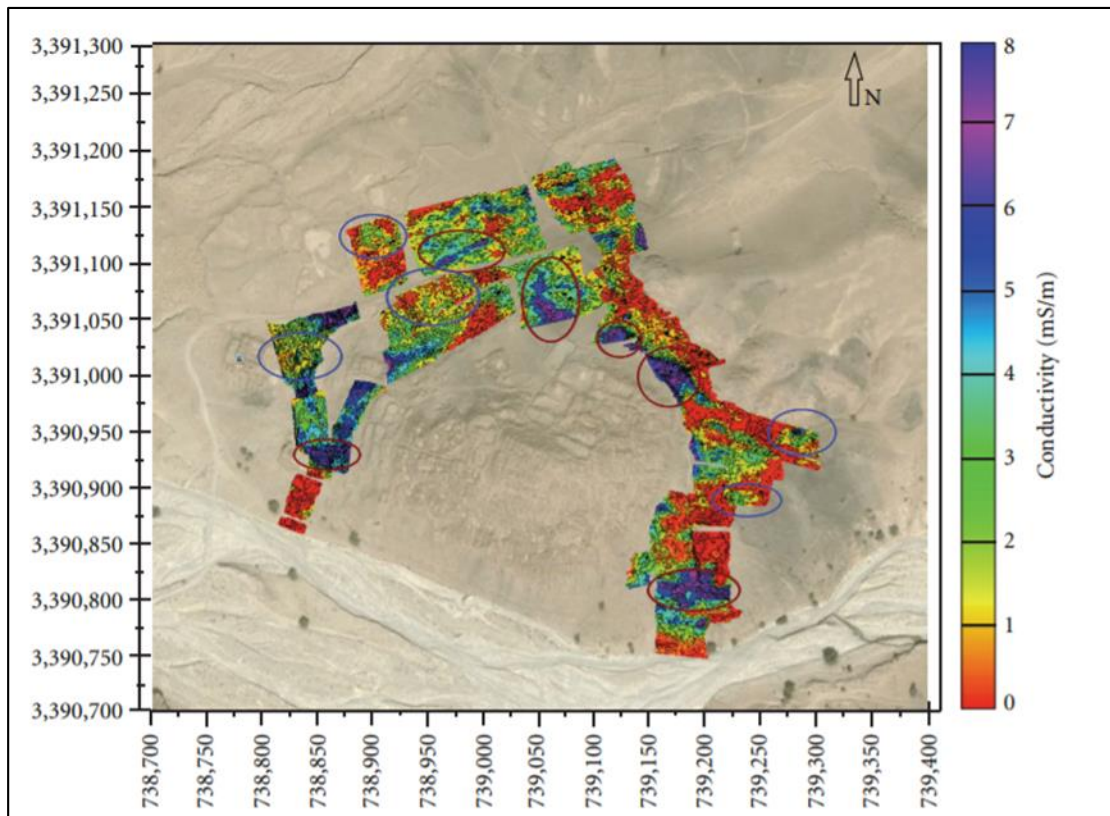


εντοπισμό θαμμένων υπολειμμάτων κτηρίων, ενδείξεις προηγούμενης ανθρώπινης δραστηριότητας στη περιοχή του Khirbat. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την έρευνα είναι ένας ψηφιακός, φορητός, πολλαπλών συχνοτήτων αισθητήρας ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής με το όνομα Profiler EMP400 (GSSI, ΗΠΑ). Το εύρος ζώνης του συστήματος εκτείνεται από 1 kHz έως 16 kHz. Το σύστημα συλλέγει τρεις διαφορετικές συχνότητες ταυτόχρονα. Η σε φάση συνιστώσα και η φαινόμενη αγωγιμότητα συλλέγεται και αποθηκεύεται για κάθε μία μέτρηση ξεχωριστά μαζί με μια χρονική σήμανση. Επίσης γίνεται η καταγραφή της θέσης της μέτρησης μέσω GPS.

Μελετήθηκε μια έκταση περίπου 6 εκταρίων. Το σύστημα βαθμονομούταν κάθε μέρα πριν από την έναρξη της απόκτησης δεδομένων. Τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν σε ορθογώνια πλέγματα παράλληλων γραμμών σε απόσταση μεταξύ τους 1 μέτρου.

Για λόγους συνέπειας της απόκτησης δεδομένων, το ίδιο άτομο συνέλεξε όλα τα δεδομένα των EM. Η βαθμονόμηση του συστήματος πεδίου ήταν μια κρίσιμη και απαιτητική διαδικασία για κάθε πλέγμα έρευνας λόγω των ακραίων αλλαγών στη θερμοκρασία κατά τη λήψη δεδομένων καθώς και της δύσκολης τοπογραφίας σε όλη την τοποθεσία.

Μετά τη συλλογή, τα δεδομένα στάλθηκαν στο Λιβόρνο της Ιταλίας για επεξεργασία. Αρχικά, οι τροχιές δεδομένων καθαρίστηκαν από ψευδή σημεία του GPS προκειμένου να ευθυγραμμιστούν σωστά τα προφίλ. Δεύτερον, τα δεδομένα ταξινομήθηκαν στο λογισμικό MVS/EVS (CTech, ΗΠΑ) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Kriging. Τέλος, τα επεξεργασμένα αποτελέσματα στάλθηκαν πίσω ώστε να ενσωματωθούν στη βάση δεδομένων του έργου. Η ταχεία επεξεργασία επέτρεψε να γίνουν μικρές προσαρμογές στο σχεδιασμό της έρευνας, με την ιεράρχηση περιοχών σε περιοχές με μεγαλύτερες δυνατότητες και σε περιοχές όπου δεν υπήρχε καθόλου παρουσία αρχαιοτήτων.



**Εικόνα 3.32:** Στοιχεία EMI που αποκτήθηκαν στο Khirbat Faynan. Οι ελλείψεις με μπλε χρώμα δείχνουν ενδιαφέρουσες περιοχές χαμηλής αγωγιμότητας. Οι μωβ ελλείψεις υποδεικνύουν περιοχές υψηλής αγωγιμότητας που μπορεί να σχετίζονται με προηγούμενη ανθρώπινη δραστηριότητα.

### 3.3.2.2 Μέθοδος Ηλεκτρικής Αντίστασης

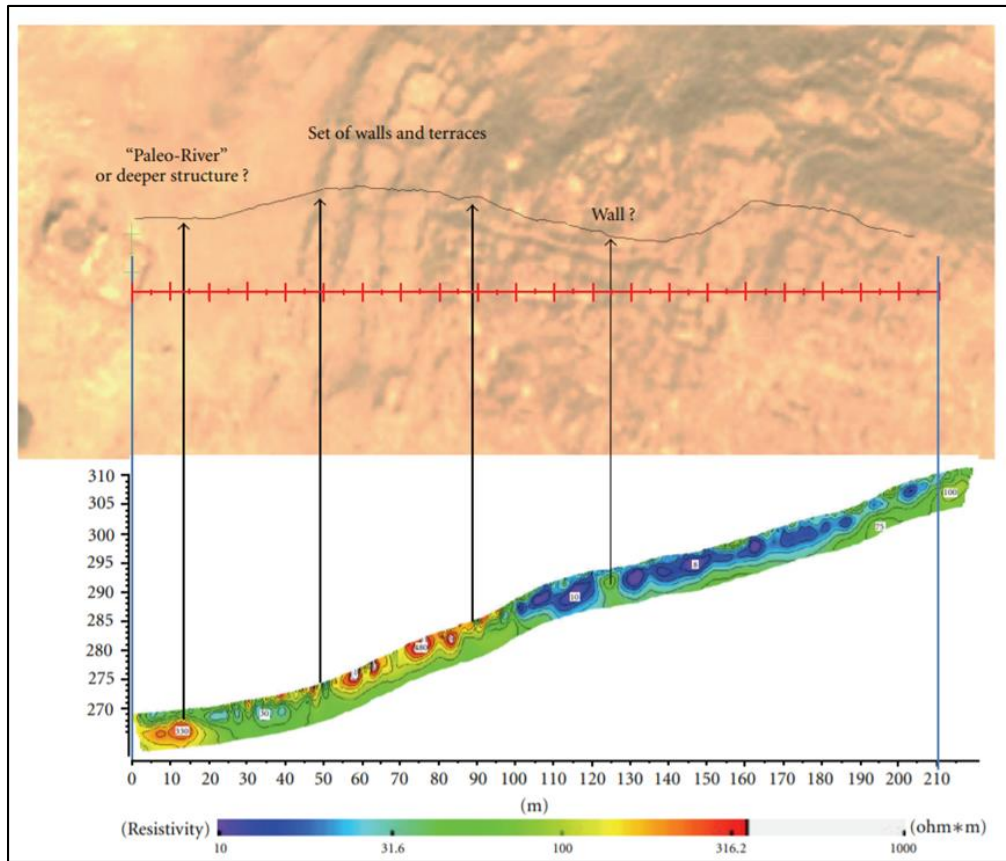
Χρησιμοποιήθηκε ένα Syscal Pro μετρητής αντίστασης (Iris Instruments, Γαλλία) με 48 ηλεκτρόδια σε απόσταση 0,5 μέτρων το ένα από το άλλο. Τέσσερα διαφορετικά σείτ 2D γραμμών ERT (24 ηλεκτρόδια σε απόσταση 1 m το καθένα) συλλέχθηκαν σε 4 πλευρές (βόρεια, νότια, ανατολικά και δυτικά) του λόφου Khirbat Faynan. Ο κύριος στόχος ήταν να ληφθούν κάθετες τομές έως και 6 μέτρα από την επιφάνεια κατά μήκος του λόφου προκειμένου να διερευνηθούν τα διαφορετικά στρώματα και να γίνει διάκριση μεταξύ φυσικών και τεχνητών στρωμάτων. Επιπλέον, συλλέχθηκε μια μικρή τρισδιάστατη ERT προκειμένου να διευκολυνθεί η ανασκαφή. Στην τρισδιάστατη έρευνα της ERT χρησιμοποιήθηκε ένα σείτ παράλληλων δισδιάστατων προφίλ με διαχωρισμό 0,5 m μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η έκταση υπό έρευνα (24 m × 5 m) περιελάμβανε 6 ERT προφίλ. Εκτελέστηκαν και οι δύο συστοιχίες διπόλου-διπόλου και Wenner. Η απόκτηση δεδομένων αποδείχθηκε ιδιαίτερα δύσκολη λόγω του εξαιρετικά ξηρού εδάφους, εμποδίζοντας την

ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς λόγω της αφθονίας των πετρωμάτων κάτω από την επιφάνεια, εμποδίζοντας την εύκολη εισαγωγή των μεταλλικών πασσάλων στο έδαφος. Ενώ το τελευταίο δεν ξεπερνιόταν εύκολα, το πρώτο βελτιώθηκε μέσω ενός μείγματος νερού, αργίλου και αλατιού που δημιουργεί ένα εξαιρετικά αγωγίμο μέσο που μπορούσε να χυθεί σε κάθε ηλεκτρόδιο.

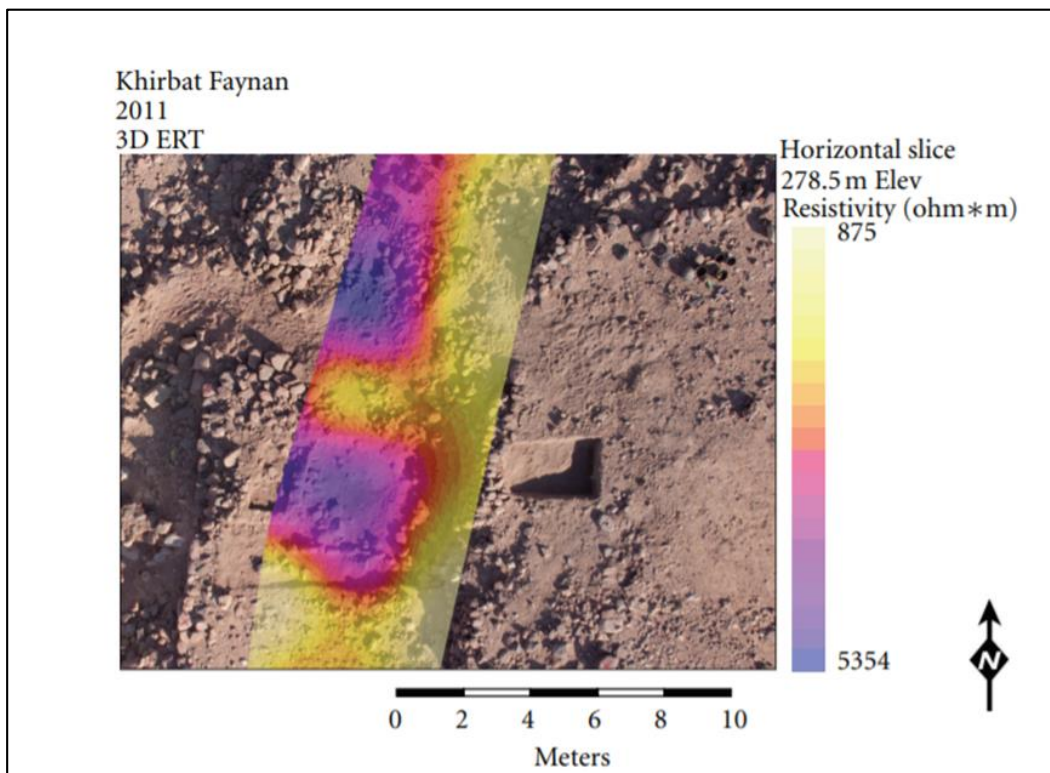
Μετά τη συλλογή, τα δεδομένα στάλθηκαν στο Geostudi Astier (Λιβόρνο, Ιταλία) για αντιστροφή με χρήση λογισμικού ERTLlab (MultiPhase Technologies LLC, ΗΠΑ και Geostudi Astier srl, Ιταλία) και τη δημιουργία των τελικών χαρτών εντός του λογισμικού MVS/EVS (CTech, ΗΠΑ) και ArcMap 10 (ESRI, ΗΠΑ). Ο κύριος σκοπός της τρισδιάστατης έρευνας της EPT ήταν να οριοθετήσει θαμμένους πέτρινους τοίχους και να καθοδηγήσει τις αρχαιολογικές ανασκαφές.

Τοποθετήθηκαν νέα σημεία αναφοράς στη περιφέρεια και πάνω στο λόφο με ένα σύστημα RTK GPS για να εξασφαλιστεί ακριβής έλεγχος της τοπογραφίας. Σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά η ERT δεν έχει κάποιο σύστημα αυτοαναφοράς. Ως εκ τούτου, έγινε γεωαναφορά με τη χρήση ενός σταθμού χωρίς ανακλαστήρα, ο οποίος μπορούσε να μετρήσει την ακριβή θέση των πασσάλων με ή χωρίς πρίσμα.

Δεδομένου ότι το GIS ήταν σημαντικό στοιχείο του συστήματος καταγραφής πεδίου του ELRAP από το 1999, υπήρχε ήδη μια υποδομή για να γίνει η συσχέτιση των γεωφυσικών δεδομένων με τα αρχαιολογικά δεδομένα. Ως μέρος αυτού του συστήματος καταγραφής, λαμβάνονταν καθημερινές αεροφωτογραφίες που τεκμηρίωναν τη θέση σημαντικών αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών. Κάθε φωτογραφία μπορεί να συσχετιστεί με τα υψόμετρα έτσι ώστε να υπάρχει γνώση ακριβώς ποια είναι τα υψόμετρα των εκτεθειμένων στρωμάτων. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα να τοποθετηθούν οι τρισδιάστατες φέτες ERT που αντιστοιχούσαν στο υψόμετρο κάθε αεροφωτογραφίας προκειμένου να μελετηθεί η συσχέτιση της γεωφυσικής έρευνας με το αρχαιολογικό αρχείο.



**Εικόνα 3.33 :** Δισδιάστατη γραμμή ERT στη δυτική πλευρά του λόφου.

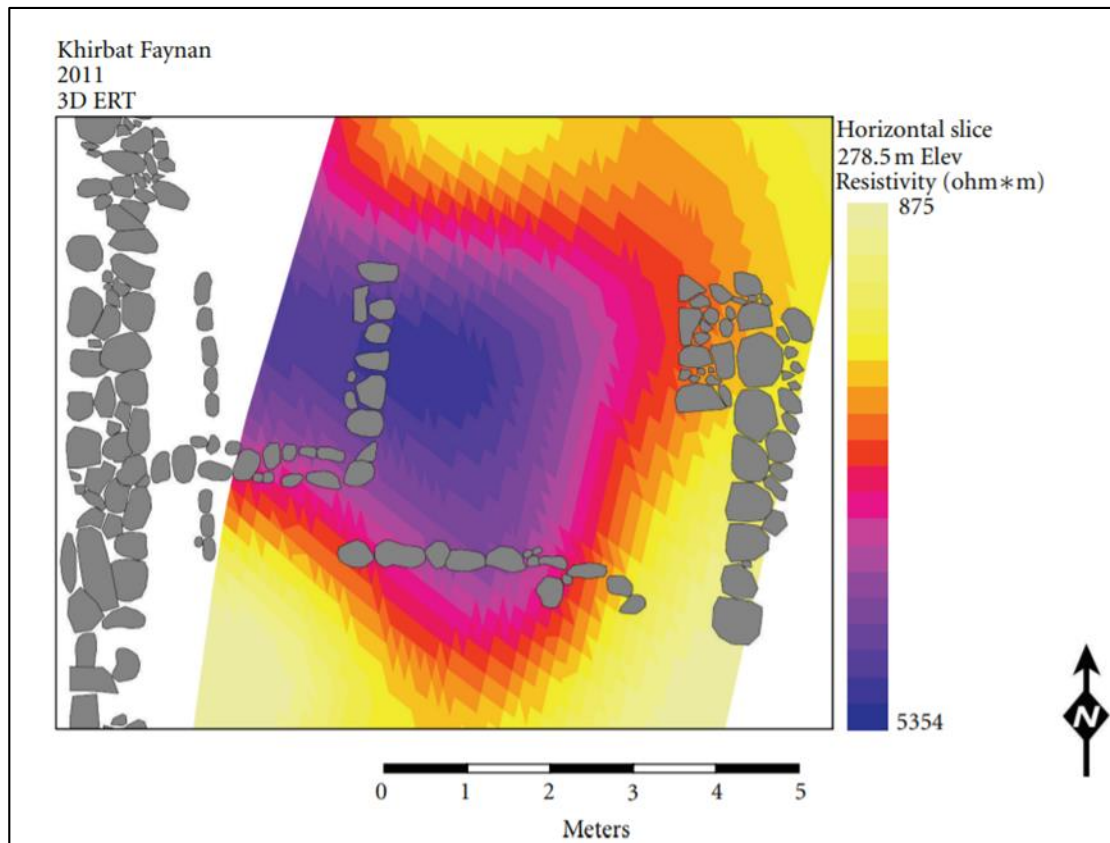


**Εικόνα 3.34 :** Ημιδιάφανη οριζόντια φέτα ERT σε βάθος 1 m, τοποθετημένη πάνω από αεροφωτογραφία της ανασκαφής.

### 3.3.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Δεν εμφανίστηκαν χαρακτηριστικά που να υποδηλώνουν θαμμένες κατασκευές με τα ηλεκτρομαγνητικά χαμηλότερης συχνότητας. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των EM που παρουσιάζονται εδώ αφορούν την υψηλότερη (15 kHz) συχνότητα λειτουργίας (βλ. **εικόνα 3.32**). Οι πιο ενδιαφέρουσες περιοχές, πιθανότατα σχετιζόμενες με ανθρώπινη δραστηριότητα, έχουν επισημανθεί. Κάποιες από αυτές δείχνουν καθαρά γραμμικά σχέδια, άλλες εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές αγωγιμότητας (μωβ και μπλε χρώμα) που μπορεί να υποδηλώνουν την παρουσία συσσωρευμένης μεταλλουργικής ύλης. Δυστυχώς, σε ορισμένες περιοχές, η παρουσία πολλών κομματιών σκραπ που καλύπτουν την επιφάνεια μπορεί να έχουν επηρεάσει τα δεδομένα των EM λόγω της υψηλής ευαισθησίας τους στα μέταλλα. Έτσι, υπάρχει η πιθανότητα περιοχές με υψηλότερη αγωγιμότητα να υποδηλώνουν μόνο θέσεις υψηλής συγκέντρωση σκραπ που καλύπτει την επιφάνεια. Ωστόσο, άλλες περιοχές που παρουσιάζουν χαρακτηριστικά χαμηλότερων τιμών (πράσινα και κίτρινα χρώματα) μπορεί να αντιπροσωπεύουν τοιχία. Προηγούμενες έρευνες στην περιοχή περιελάμβαναν EM και GPR, αλλά η ERT μέθοδος δεν είχε ακόμη επιστρατευθεί. Τα 2D προφίλ έδωσαν τη δυνατότητα να χαρακτηριστεί ο λοφίσκος και πλέον υπάρχει μια καλύτερη ιδέα για το συνολικό αρχαιολογικό αρχείο. Ενώ τα 2D δεν έδωσε μια ακριβή εικόνα της αρχαιολογίας, υποδηλώνει τουλάχιστον πιθανά βάθη αρχαιολογικών εναποθέσεων (βλ. **εικόνα 3.33**).

Λόγω της έλλειψης προηγούμενων ERT στη περιοχή θεωρήθηκε ότι θα ήταν καλό να γινόταν μια μικρή εκσκαφή έτσι ώστε να υπάρξει συσχετισμός με το αρχαιολογικό αρχείο. Το μισό του τετραγώνου 16–56 ανασκάφηκε, μια περιοχή που αντιπροσωπεύει πάνω από το ήμισυ της τρισδιάστατης ERT. Ο τρισδιάστατος όγκος έδειξε ότι υπήρχαν πιθανότατα θαμμένοι τοίχοι κάτω από την επιφάνεια (βλ. **εικόνα 3.34** και **εικόνα 3.35**).



**Εικόνα 3.35:** Οι τοίχοι που βρέθηκαν κατά την ανασκαφή, επάλληλοι στην ERT σε βάθος 1 m.

Ωστόσο τα ERT έδειξαν ότι οι τιμές χαμηλής αγωγιμότητας, μεταξύ 0 και 1 mS/m, ταιριάζουν καλά με περιοχές όπου η ειδική αντίσταση είναι μεγαλύτερη από 1000 Ohm·m. Ως εκ τούτου, τα τμήματα των ERT χρησιμοποιήθηκαν και για την επαλήθευση και βαθμονόμηση της σωστής τιμής αγωγιμότητας σε μια κατάσταση που δεν ήταν ευνοϊκή για τα όργανα των EM.

Το κεντρικό σύστημα αρχαιολογικής καταγραφής, GIS, που χρησιμοποιήθηκε από την ομάδα ELRAP επέτρεψε να συγκριθεί στενά η αρχαιολογία της περιοχής με τη γεωφυσική έρευνα, όπως φαίνεται στην **εικόνα 3.33** και στην **εικόνα 3.34**.

### 3.3.4 Συμπεράσματα

Οι δύο τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στο Khirbat Faynan και τα δύο είχαν επιτυχία, η κάθε μια με το δικό της τρόπο. Τα δεδομένα των EM μας δίνουν μια γενική ιδέα για πιθανές περιοχές, έτσι ώστε να ελεγχθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις επόμενες έρευνες.

Μελλοντικές γεωφυσικές έρευνες θα πρέπει να εστιάσουν στη χρήση GPR έτσι ώστε να εντοπιστούν περισσότερες κατασκευές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο για να γίνει η χρήση του GPR θα πρέπει να απομακρυνθούν τα βράχια από τη περιοχή έρευνας, πράγμα εξαιρετικά δύσκολο. Η μέθοδος ERT αποτελεί πιθανόν τη πιο χρήσιμη ερευνητική μέθοδο σε ένα τόσο απαιτητικό έδαφος.

Ο χρόνος και ο κόπος για να καθαριστεί η επιφάνεια, δίνοντας και προσοχή ώστε να μην καταστραφεί η υπάρχουσα αρχιτεκτονική, θα ήταν ασύμμετρος ως προς το τελικό αποτέλεσμα. Παρότι η 3D ERT είναι μια απαιτητική μέθοδος ως προς το εργατικό δυναμικό και τις ώρες που απαιτούνται για να προετοιμαστεί, η τεχνική είναι πολύ λιγότερο παρεμβατική με υψηλές δυνατότητες για εξαιρετικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η 3D ERT είναι μια χρήσιμη μέθοδος για γεωφυσική έρευνα σε δύσκολες συνθήκες που εμποδίζουν τη χρήση GPR. Ωστόσο, μελλοντική έρευνα θα πρέπει να περιλαμβάνει τη συνέχιση της 3D ERT έρευνας έτσι ώστε να διερευνηθεί περισσότερο η συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων και της αρχαιολογικής καταγραφής



## 4. Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στη περιοχή Πεταλίδι του Νομού Μεσσηνίας

### 4.1 Γενικά και γεωλογία

Η γεωφυσική έρευνα έλαβε χώρα στο λόφο "Κάστρο" στην Ακρόπολη της αρχαίας Κορώνης. Η περιοχή βρίσκεται κοντά στο σύγχρονο Πεταλίδι, και ανήκει στην περιφέρεια της Μεσσηνίας κοντά στην πόλη της Καλαμάτας.



**Εικόνα 4.1:** Η εικόνα της περιοχής που έγινε η έρευνα, όπως φαίνεται από το Google Earth.

Η χερσόνησος της Μεσσηνίας βρίσκεται περίπου 60χλμ ΒΑ από το δυτικό σημείο του Ελληνικού τόξου (Ιόνια Τάφρος), όπου λαμβάνει χώρα η υποβύθιση της Αφρικανικής τεκτονικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Η θέση της κοντά στο τόξο την καθιστά μία από τις πιο τεκτονικά ενεργές περιοχές. Οι Αλπικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή της Μεσσηνίας ανήκουν σε δύο γεωτεκτονικές ενότητες. Στην ενότητα Γαβρόβου – Τριπόλεως, που περιλαμβάνει νηριτικά ανθρακικά πετρώματα καθώς και κλαστικά ιζήματα

τύπου Φλύσχη και στην ενότητα Πίνδου, που αποτελείται κυρίως από πολυπτυχωμένους, λεπτοπλακώσεις πελαγικούς ασβεστολίθους, ραδιολαρίτες και φλύσχη. Η ενότητα της Πίνδου αποτελεί και το τεκτονικό κάλυμμα της ενότητας Γαβρόβου – Τριπόλεως. Οι μεταλλικές αποθέσεις της περιοχής μπορούν να διαχωριστούν σε θαλάσσιες και χερσαίες. Οι θαλάσσιες αποθέσεις υπέρκεινται ασύμφωνα του αλπικού υποβάθρου και αντιπροσωπεύουν ρηχές θαλάσσιες φάσεις. Αποτελούνται από ασβεστιτικούς ψαμμίτες, μαργαϊκούς ψαμμίτες, μάργες και κροκαλοπαγή. Τα πάχη τους διαφέρουν από θέση σε θέση. Οι αποθέσεις αυτές είναι Πλειοκαινικής – Πλειστοκαινικής ηλικίας. Οι χερσαίες αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή, πυριτικές άμμους κόκκινου χρώματος και ψαμμίτες. Η ηλικία των κοκκινωπών άμμων που υπέρκεινται των θαλάσσιων μεταλλικών αποθέσεων, θεωρείται Μέσο – Άνω Πλειστοκαινική.

## 4.2 Ιστορική αναδρομή της περιοχής

Η μεσσηνιακή γη κατοικήθηκε σε όλη τη διάρκεια της προϊστορικής περιόδου (7000-1000 π.Χ.), όπως βεβαιώνουν οι πολλές προϊστορικές θέσεις που έχει φέρει στο φως η αρχαιολογική σκαπάνη κυρίως στα δυτικά του νομού, στις περιοχές της Πυλίας και της Τριφυλίας (Χώρα, Επάνω Εγκλιανός, Μάλθη, Χανδρινού, Κορυφάσιο). Οι πρώτοι κάτοικοι ήταν Λέλεγες και Καύκωνες, οι οποίοι δεν ήταν ελληνικής καταγωγής. Οι Αιολείς, που κατέβηκαν από τη Θεσσαλία και εγκαταστάθηκαν στην αρχαία Ανδανία, ήταν οι πρώτοι Έλληνες της Μεσσηνίας. Τότε εγκαταστάθηκε στην περιοχή της Πύλου και ο Νηλέας, ο πατέρας του Νέστορα, ο οποίος ίδρυσε το κράτος των Πυλίων. Η κάθοδος των Ελλήνων τοποθετείται γύρω στο 1900 π.Χ., η δε ακμή του κράτους της Πύλου τοποθετείται μεταξύ 1600-1100 π.Χ., δηλαδή στη μυκηναϊκή εποχή. Τα μυκηναϊκά ευρήματα που συνεχώς ανακαλύπτονται σε όλη τη Μεσσηνία μαρτυρούν τη μεγάλη ακμή που γνώρισε αυτός ο πολιτισμός στην περιοχή.

Την περίοδο αυτή η Μεσσηνία είναι η πιο πυκνοκατοικημένη περιοχή της Πελοποννήσου με πλούσια αρχαιολογικά ευρήματα σε 50 περίπου τοποθεσίες: θολωτοί και λαξευτοί τάφοι, λείψανα οικοδομικών εγκαταστάσεων και συνοικισμών, χαρακτηριστική κεραμική τέχνη. Τα σημαντικότερα από αυτά έχουν αποκαλυφθεί στις θέσεις Βολμιδία Χώρας, Κουκουνάρα, Χαρακοπιό, Βίγλα, Κορυφάσιο, Ριζόμυλος, Παπούλια, Τραγάνα, Μυρσινοχώρι, Άνω Εγκλιανός, Θουρία, Μουριατάδα, Μύρο, Μάλθη. Στον Άνω Εγκλιανό μάλιστα εντοπίστηκε ένα από τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα μυκηναϊκά κέντρα της Μεσσηνίας και όλης της

Ελλάδας με ανάκτορο, πόλη και τάφους, το οποίο αποτέλεσε την έδρα των Μυκηναίων βασιλιάδων της Πύλου και το ανάκτορο του Νέστορα, του σοφού της Ιλιάδας. Η προσωπικότητα του Μεσσήνιου αυτού βασιλιά υπήρξε υπόδειγμα σωφροσύνης, πραότητας και βαθιάς σοφίας, και παρέμεινε στη συνείδηση των ανθρώπων ως η προσωποποιημένη έκφραση των σημαντικότερων αρετών του ελληνικού πνεύματος.

Με τη λεγόμενη «κάθοδο των Δωριέων», όταν καταστράφηκαν τα μυκηναϊκά κέντρα, το κράτος της Πύλου δέχτηκε την επίθεση των ηγετών των Δωριέων Τημένου, Κρεσφόντη και Αριστόδημου. Σύμφωνα με την παράδοση, η εύφορη χώρα του Νέστορα έλαχε με κλήρο στον Κρεσφόντη, ο οποίος εγκαταστάθηκε στην περιοχή της Στενυκλάρου. Οι περισσότεροι από τους ντόπιους προτίμησαν να εκπατριστούν και να καταφύγουν σε άλλες χώρες, και κυρίως στην Αττική, παρά να υποταχθούν στους Δωριείς. Οι Δωριείς στη Μεσσηνία δημιούργησαν νέο καθεστώς, ενώ όσοι Μεσσήνιοι παρέμειναν στην περιοχή στερήθηκαν την περιουσία τους.

Τον 8ο αιώνα π.Χ. αρχίζει η δραματικότερη περιπέτεια του μεσσηνιακού λαού, όταν το στρατιωτικό κράτος της γειτονικής Σπάρτης αποφασίζει να αυξήσει τα εδάφη του κατακτώντας την εύφορη γη της Μεσσηνίας. Οι μεταξύ των Σπαρτιατών και Μεσσηνίων τρεις μεγάλοι πόλεμοι διήρκεσαν από τα μέσα του 8ου αιώνα μέχρι τα μέσα του 5ου αιώνα π.Χ. (743-454 π.Χ.) και κατέληξαν στην υποδούλωση της Μεσσηνίας στη Σπάρτη. Παρά τη δυσμενή κατάληξή τους, οι Μεσσηνιακοί πόλεμοι έδωσαν την αφορμή και τη δυνατότητα στους κατοίκους της Μεσσηνίας να αποκτήσουν ισχυρή εθνική συνείδηση αμυνόμενοι υπέρ του πατρίου εδάφους. Η Μεσσηνία παρέμεινε υπό το σπαρτιατικό ζυγό μέχρι την εποχή της κατάλυσης της ηγεμονίας των Λακεδαιμονίων από τους Θηβαίους. Ο Θηβαίος Επαμεινώνδας ελευθέρωσε τη χώρα (369 π.Χ. ) και έχτισε στις υπώρειες του όρους Ιθώμη την πρωτεύουσα της ανεξάρτητης πια Μεσσηνίας, τη Μεσσήνη, η οποία εξελίχθηκε σε σπουδαίο πολιτιστικό κέντρο. Στα χρόνια που ακολούθησαν ως τη ρωμαϊκή κατοχή η Μεσσηνία θα καταστραφεί δύο φορές: Η πρώτη από το στρατηγό του Φιλίππου Ε' Δημήτριο Φάρο το 214 π.Χ. και η δεύτερη από τον τύραννο της Σπάρτης Νάβι το 202 π.Χ. Οι εν συνεχεία πόλεμοι και οι διενέξεις μεταξύ των ελληνικών πόλεων επέφεραν τελικώς την επικράτηση των Ρωμαίων και την εξ ολοκλήρου υποταγή της Ελλάδας σε αυτούς (146 π.Χ.). Τότε και η Μεσσηνία ακολουθεί την τύχη της υπόλοιπης Ελλάδας, τόσο στην περίοδο της Ρωμαιοκρατίας όσο και κατά τους βυζαντινούς χρόνους.

Από τον 4ο μ.Χ. αιώνα και μέχρι τις αρχές του 9ου η Πελοπόννησος δέχεται επιδρομές από Γότθους, Αβάρους και Σλάβους, από τις οποίες πλήττεται και η Μεσσηνία. Οι κάτοικοί της από το φόβο αυτών των επιδρομών τρέπονται προς τη θάλασσα και από τότε χρονολογείται

η ίδρυση των πόλεων της Καλαμάτας, της Κορώνης και της Μεθώνης. Μετά την άλωση της Κωνσταντινούπολης από τους Λατίνους, η Μεσσηνία συμπεριλήφθηκε στο Πριγκιπάτο της Αχαΐας (1205) υπό την ηγεμονία του Φράγκου Γοδεφρείδου Βιλλεαρδουίνου, με κέντρο την Καλαμάτα και το κάστρο της και με την εξαίρεση των κάστρων της Μεθώνης και της Κορώνης, τα οποία έγιναν βενετικές κτήσεις. Η Φραγκοκρατία στην Πελοπόννησο διήρκεσε 200 και πλέον έτη, ενώ από τα τέλη του 14ου αιώνα άρχισε η βαθμιαία κατάκτηση περιοχών και πόλεων της Μεσσηνίας από τους Τούρκους, η οποία ολοκληρώθηκε το 1498.

Στην περιοχή Νιχώρια, κοντά στο Πεταλίδι, έχει ανασκαφεί σημαντικός προϊστορικός οικισμός, ο οποίος άκμασε ιδιαίτερα στην μυκηναϊκή εποχή. Εγκαταλείφθηκε στα μέσα του 8ου αιώνα π.Χ. Το Πεταλίδι έχει αναγνωριστεί ως θέση όπου βρισκόταν η αρχαία Αίπεια. Η Αίπεια ήταν μία από τις επτά Μεσσηνιακές πόλεις που παραχωρούσε ο Αγαμέμνονας σαν προίκα της κόρης του Ιφιγένειας, εάν την παντρευόταν ο Αχιλλέας. Η Αίπεια καταστράφηκε από τους Λακεδαιμόνιους στον Γ΄ Μεσσηνιακό πόλεμο, καθώς είχε συμμαχήσει με την Μεσσήνη, και οι κάτοικοί της κατέφυγαν στη Σικελία.

## 5. Γεωφυσική έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου και αποτελέσματα

### 5.1 Γενικά

Ξεκινώντας, για να επιλέξουμε τις κατάλληλες γεωφυσικές μεθόδους, για την εκάστοτε περιοχή έρευνας θα πρέπει να εξετάσουμε τον σκοπό της έρευνας, το σημείο αναζήτησης και τη γεωλογία της περιοχής (καταλληλότητα εδάφους για διέλευση των γεωφυσικών οργάνων). Απαραίτητο είναι επίσης να έχουμε άρτια γνώση του αντικειμένου, στόχου, που ψάχνουμε (υλικό κατασκευής των αρχαίων στόχων που αναζητούμε, το μέγεθος και το βάθος του).

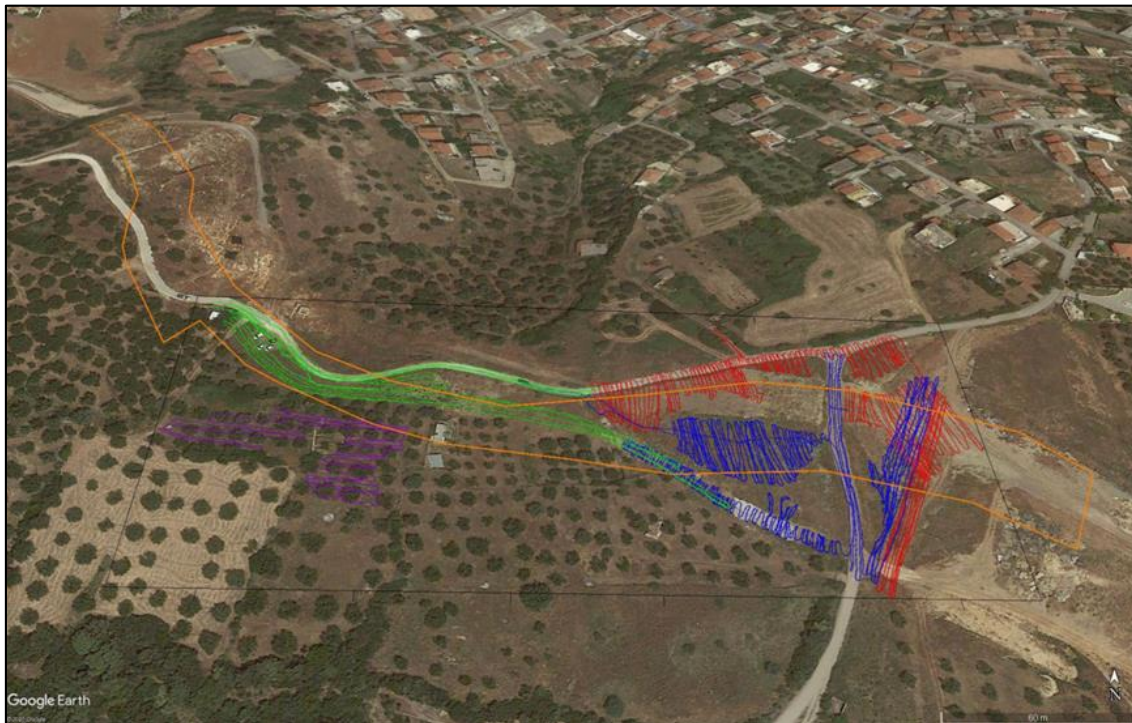
Στη περιοχή του λόφου Κάστρο διενεργήθηκαν τρεις τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας με στόχο την απόδοση με μεγάλη ακρίβεια της στρωματογραφίας του υπεδάφους έως βάθους τουλάχιστον 25 μέτρων (**εικόνα 5.1**).

Στη συνέχεια με σκοπό τον εντοπισμό τυχόν θαμμένων ανθρωπογενών (αρχαίων) κατασκευών εφαρμόστηκαν η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος επαγωγής και η μέθοδος του γεωραντάρ με μετρήσεις ώστε να καλυφθούν περιοχές ενδιαφέροντος που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την όδευση της υπό κατασκευή οδού. Στην **εικόνα 5.2** φαίνεται η κάλυψη της περιοχής έρευνας με ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής ενώ στην **εικόνα 5.3** με μετρήσεις γεωραντάρ.





**Εικόνα 5.1:** Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι τρεις τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας.



**Εικόνα 5.2:** Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής (με πράσινο, κόκκινο, μπλε για συνολικό βάθος 6μ, με μωβ για συνολικό βάθος 3μ).



**Εικόνα 5.3:** Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι μετρήσεις γεωραντάρ (με κόκκινο, έως βάθος 6μ, με μωβ έως βάθος 3μ)



## 5.2 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

### 5.2.1 Γενικά

Οι μετρήσεις με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο της επαγωγής έχουν γίνει με πύκνωση σε διεύθυνση κάθετη σε αναμενόμενη θαμμένη αρχαία τοιχοποιία. Οι μετρήσεις που λαμβάνουμε είτε της αγωγιμότητας είτε της σε φάση συνιστώσας αφορούν τον ημισφαιρικό χώρο ακτίνας 6 ή 3 μέτρων. Οι μετρήσεις μέχρι συνολικό βάθος 6 μέτρων (ακτίνα ημισφαιρικού χώρου) έχουν γίνει με το όργανο CMD-4 της GF Instruments (**Εικόνα 5.4**) με ταυτόχρονη ακριβή αποτύπωση θέσης με διαφορικό GPS LEICA σε σύνδεση με το δίκτυο Metrica ενώ έως συνολικό βάθος 3μ έχουν γίνει με το όργανο CMD-2 (**Εικόνα 5.5**).



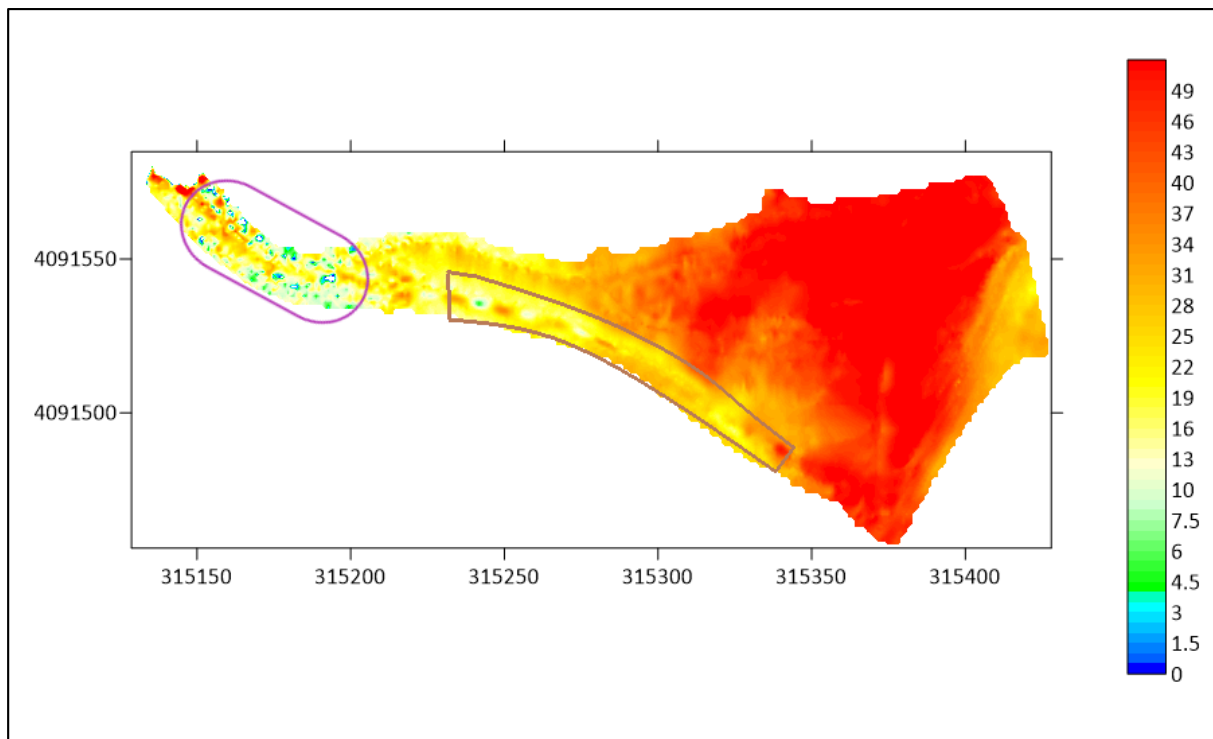
**Εικόνα 5.4:** Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής με CMD-2 για συνολικό βάθος 3μ.



**Εικόνα 5.5 :** Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής με CMD-4 για συνολικό βάθος 6μ.

## 5.2.2 Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες

Στην **εικόνα 5.6** φαίνεται ο χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας έως βάθους 6μ. Οι περιοχές που πιθανά βρίσκονται θαμμένα τοιχεία θα πρέπει να παρουσιάζουν χαμηλή αγωγιμότητα σε αντίθεση με την υψηλή των χαλαρών αργιλικών υλικών με ορισμένα αδρομερή που βρίσκονται στην περιοχή ως έδαφος. Στην περιοχή που περιβάλλεται από τη μωβ γραμμή φαίνονται σποραδικές περιοχές χαμηλής αγωγιμότητας που θα μπορούσαμε να τις συνδέσουμε με κατασκευές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Στο κέντρο του χάρτη, η περιοχή που περιβάλλεται από τη καφέ γραμμή, αφορά τα όρια του επιχώματος και των αποθέσεων του. Επίσης στη συγκεκριμένη περιοχή φαίνονται κατά τόπους χώροι χαμηλής αγωγιμότητας, εφόσον όμως παρουσιάζουν ομοιότητα με την διεύθυνση των μετρήσεων υφίσταται ασάφεια ως προς τον χαρακτηρισμό τους.



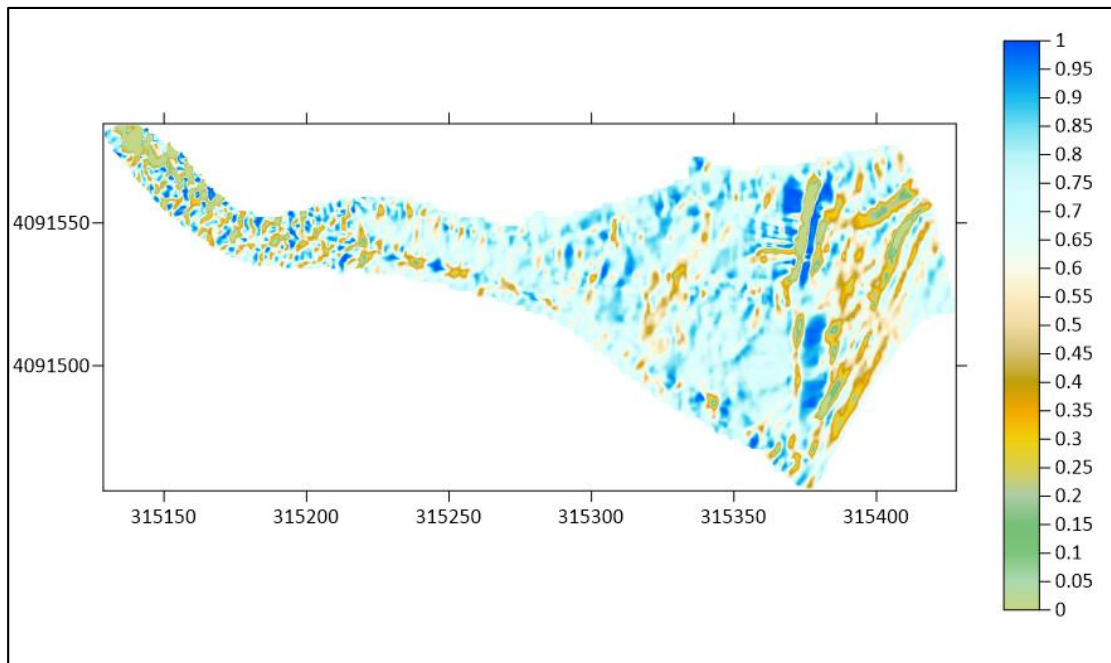
**Εικόνα 5.6:** Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας μέχρι βάθους 6μ. Στη άνω αριστερά περιοχή (μωβ περίγραμμα) του χάρτη έχει τοπικά πολύ χαμηλές αγωγιμότητες που μπορεί να συνδέονται με αρχαίες κατασκευές. Το καφέ περίγραμμα συμβολίζει τα όρια του επιχώματος και των αποθέσεων του, βλέπουμε ότι και εκεί υπάρχουν περιοχές με χαμηλές αγωγιμότητες.



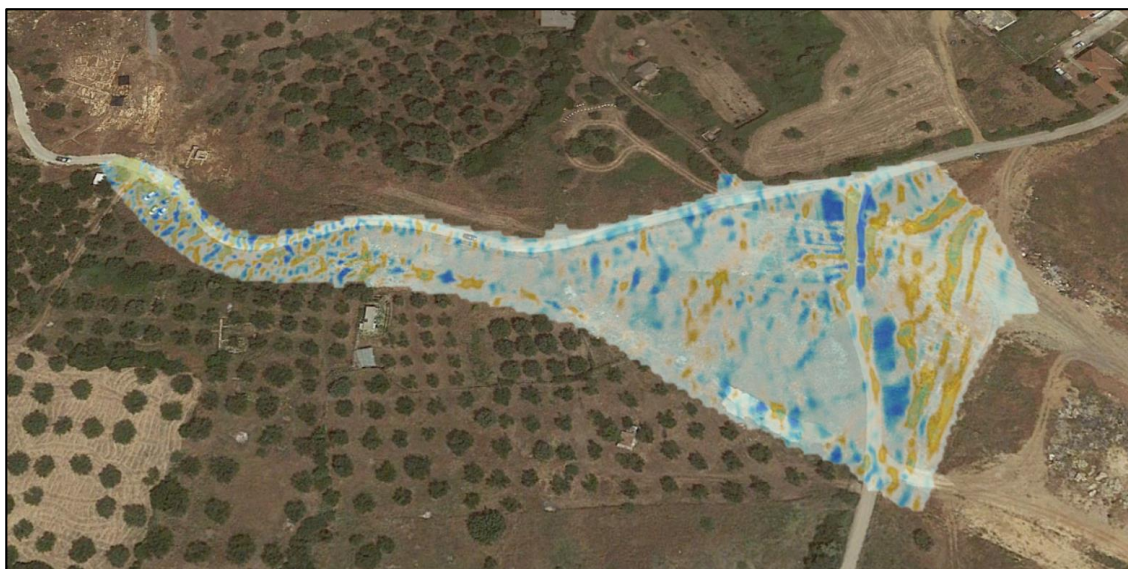


**Εικόνα 5.7:** Ο χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.6 όπως φαίνεται στο Google Earth.

Η επόμενη φάση της ανάλυσης, αφορά την ανάδειξη παράπλευρων ανομοιογενειών, στη δική μας περίπτωση μας ενδιαφέρει να βρεθούν τοιχία. Ο τρόπος με τον οποίο θα μπορέσει να γίνει αυτό είναι με την φωτοσκίαση, «φωτίζοντας» έναν γεωφυσικό χάρτη από μία γωνία. Με την φωτοσκίαση του χάρτη αγωγιμότητας της **εικόνας 5.6** προκύπτει ο χάρτης της **εικόνας 5.8** όπου φαίνονται καθαρά οι παρατηρήσεις που έγιναν σε προηγούμενη φάση και η περιοχή που παρουσιάζει ενδιαφέροντα στοιχεία. Στην **εικόνα 5.9** φαίνεται ο χάρτης φωτοσκίασης στο Google Earth.

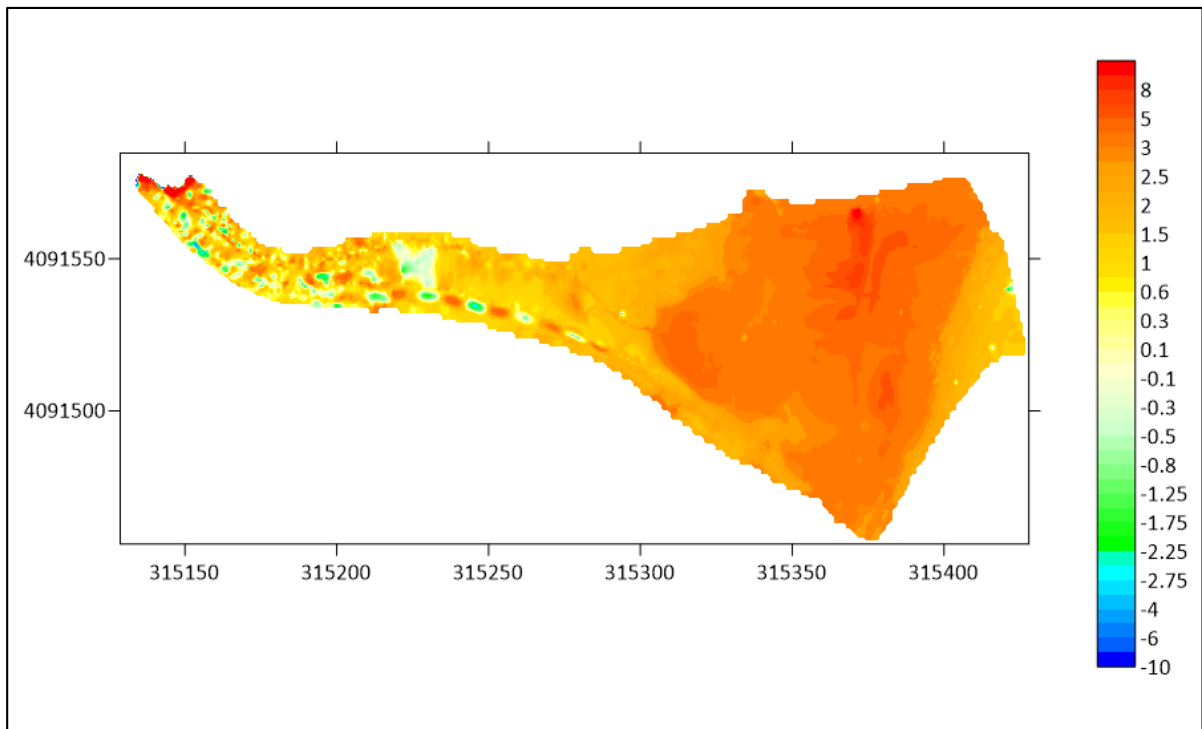


**Εικόνα 5.8:** Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.6.



**Εικόνα 5.9:** Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.6 όπως φαίνεται στο Google Earth.

Η άλλη παράμετρος που υπολογίζουμε, αυτή της σε φάση συνιστώσας, που έχει συσχέτιση με την μαγνητική επιδεκτικότητα που επηρεάζεται κυρίως από μεταλλική παρουσία, αποτελεί συνήθως αποτέλεσμα ανθρωπογενούς δραστηριότητας, φαίνεται στην **εικόνα 5.10**. Τοπικές ανωμαλίες πιθανά να υποδηλώνουν ανθρωπογενές δημιουργούμενο θόρυβο που είναι περισσότερο πιθανό να οφείλεται σε σύγχρονη δραστηριότητα παρά σε αρχαία.



**Εικόνα 5.10:** Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της σε φάση συνιστώσας μέχρι βάθους 6μ.

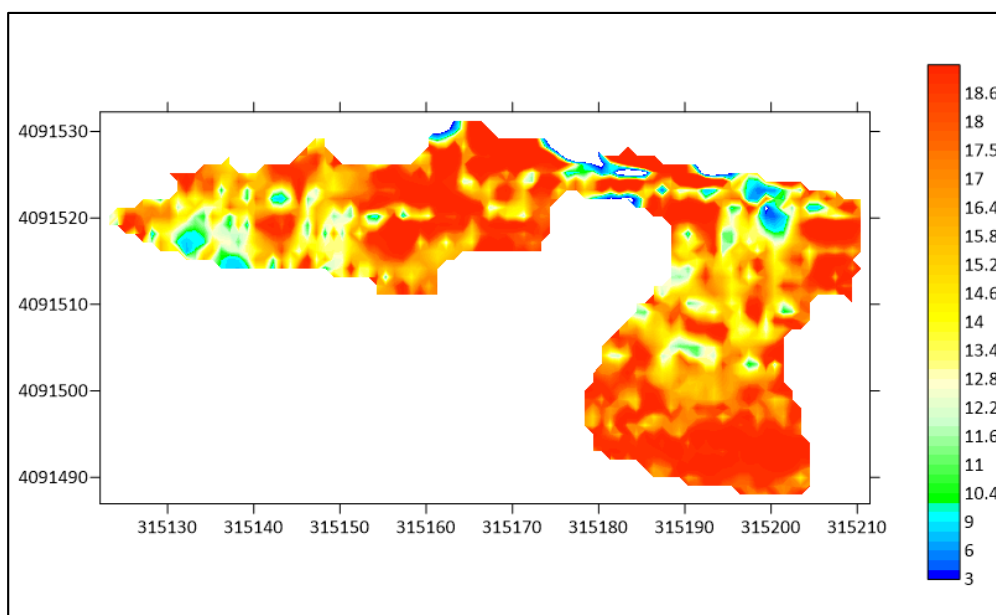


**Εικόνα 5.11:** Ο χάρτης της σε φάσης συνιστώσας όπως φαίνεται στο Google Earth.

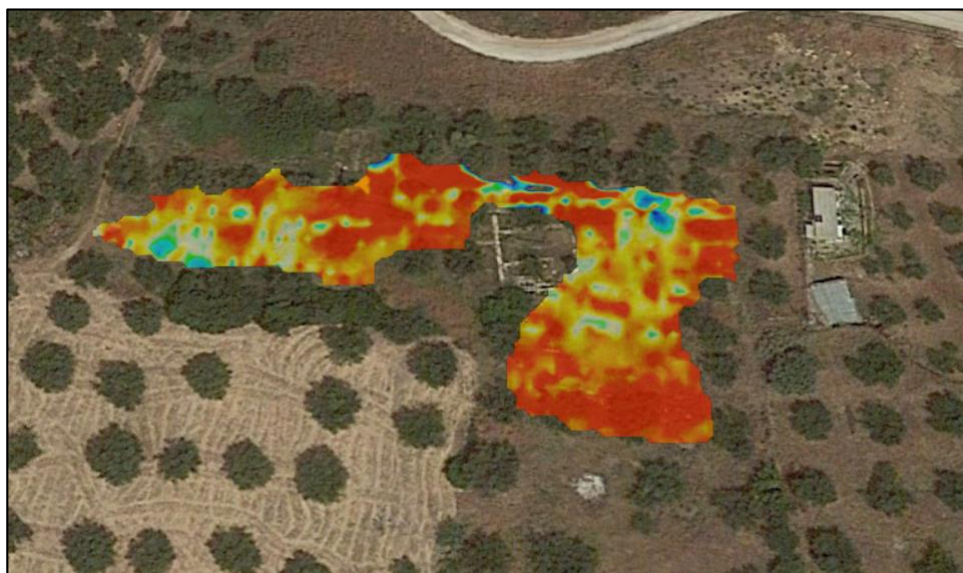
Νότιο-Δυτικά της προηγούμενης περιοχής έρευνας, σε περιοχή που έχει ήδη γίνει ανασκαφή και έχουν αναδειχθεί αρχαία τοιχία, πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις επαγωγής σε χώρο όπου δεν υπήρχαν τοιχία, με το όργανο CMD-2 για συνολικό βάθος 3 μέτρα, όπως φαίνεται με μωβ γραμμοσκίαση στον χάρτη της **εικόνας 5.2**.



Ο χάρτης φαινόμενης αγωγιμότητας έως συνολικό βάθος 3μ φαίνεται στην **εικόνα 5.12**. Το ενδιαφέρον προκύπτει για περιοχές χαμηλής αγωγιμότητας και ιδιαίτερα όταν αυτές εμφανίζουν γραμμικότητα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τέτοιες περιοχές μπορούν ευκολότερα να αναδειχθούν με φωτοσκίαση. Έτσι δημιουργήθηκε και εδώ χάρτης φωτοσκίασης (**εικόνα 5.14**) όπου παρατηρούνται περιοχές ενδιαφέροντος των οποίων η θέση φαίνεται καλύτερα όταν τον συγκεκριμένο χάρτη τον αποθέσουμε στο Google Earth (**Εικόνα 5.15**).

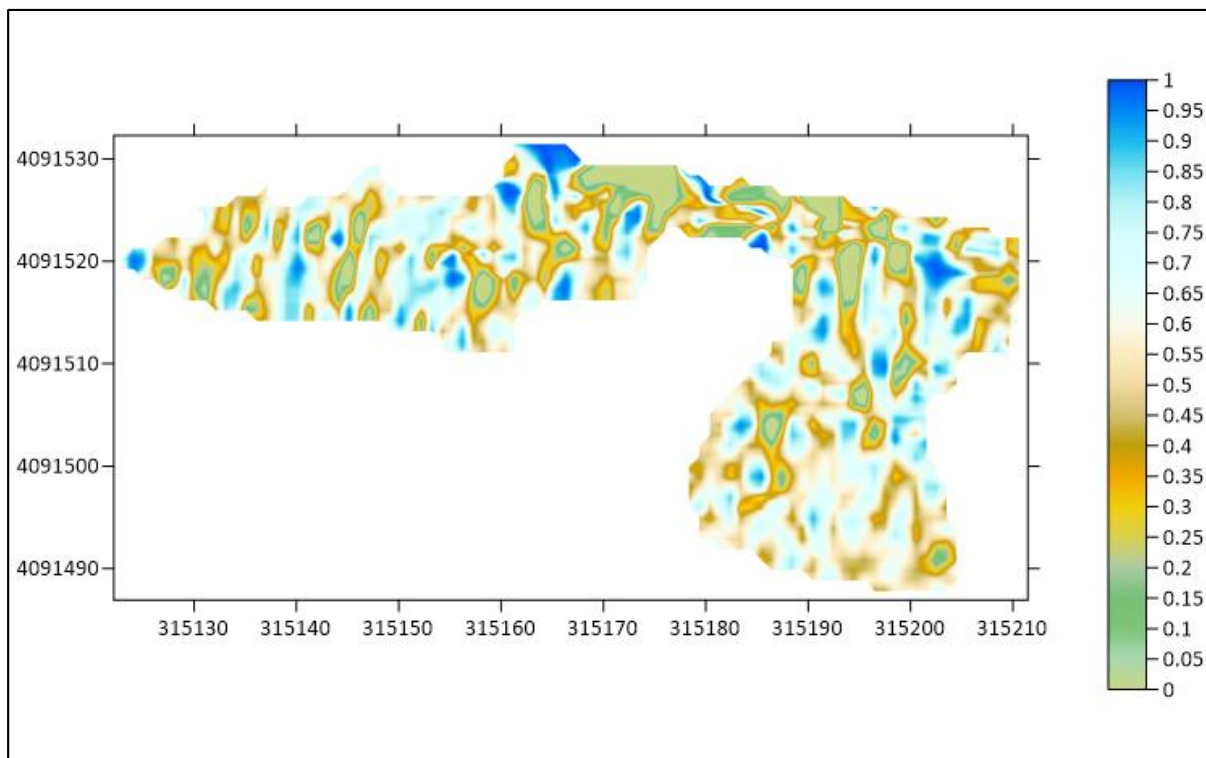


**Εικόνα 5.12:** Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας έως βάθους 3μ.

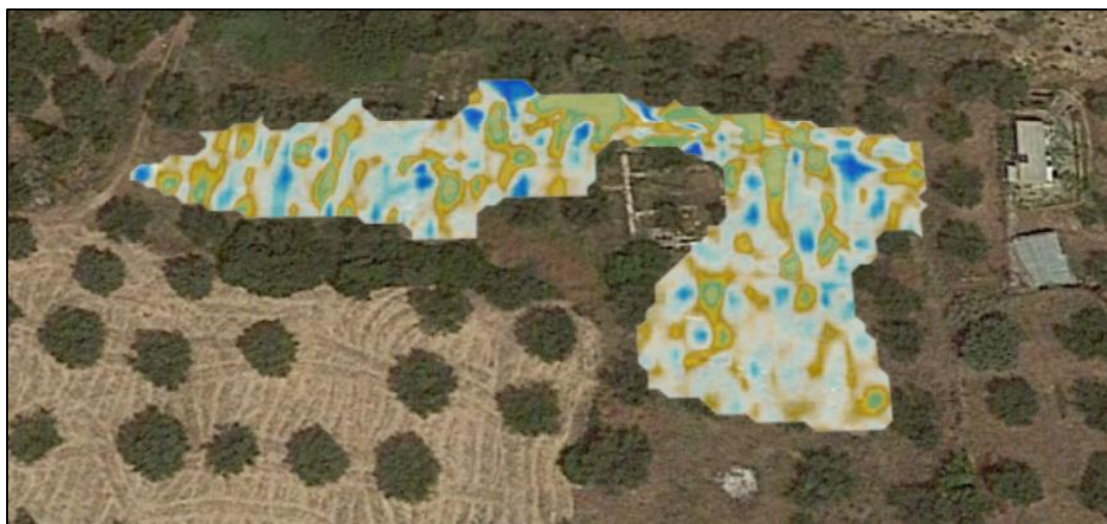


**Εικόνα 5.13:** Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας έως βάθους 3μ όπως φαίνεται στο Google Earth.





**Εικόνα 5.14:** Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της εικόνας 5.12.



**Εικόνα 5.15:** Ο χάρτης μέσω φωτοσκίασης του χάρτη ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων κατανομής της φαινόμενης αγωγιμότητας της 5.12 όπως φαίνεται στο Google Earth.

## 5.3 Μέθοδος γεωηλεκτρικής τομογραφίας

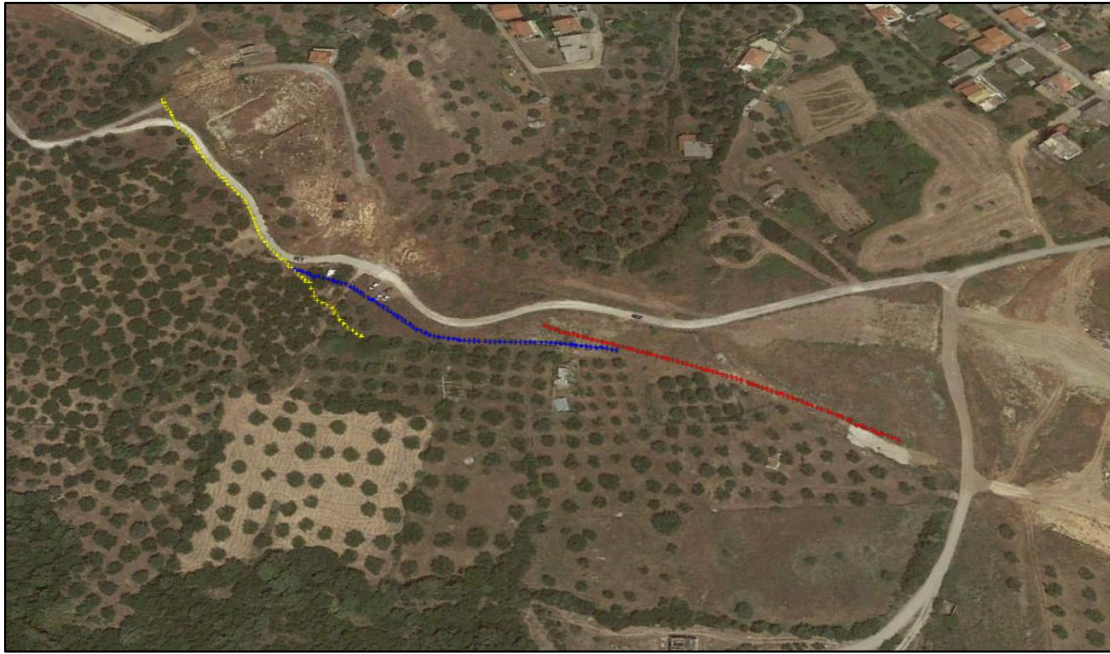
### 5.3.1 Γενικά

Με την γεωηλεκτρική τομογραφία μπορούμε με ακρίβεια να αποτυπώσουμε το βραχώδες υπόβαθρο, να προσδιορίσουμε την τεκτονική και οποιαδήποτε χαρακτηριστικά από ανθρωπογενή ή φυσικά αίτια, ωστόσο κύριος σκοπός της στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν η αποτύπωση της στρωματογραφίας. Έτσι ώστε, να δοθούν χρήσιμες πληροφορίες για τη προσέγγιση κατασκευής της νέας οδού. Οι πιθανοί τρόποι κατασκευής θα μπορούν να είναι η υπόγεια, η cut and cover και η κατασκευή στην επιφάνεια του εδάφους. Στις τομές γεωηλεκτρικής τομογραφίας υπάρχει πιθανότητα να φανούν τυχόν θαμμένες αρχαίες κατασκευές.

Στις μετρήσεις με την μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Schlumberger αλλά και η dipole – dipole

Η εφαρμογή της μεθόδου της γεωηλεκτρικής τομογραφίας έγινε χρησιμοποιώντας το όργανο Syscal Pro της IRIS Instruments 72 ηλεκτροδίων και 10 καναλιών παράλληλης μέτρησης, χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις ηλεκτροδίων, Schlumberger και Dipole-Dipole, με κάθε μία να δίνει γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους αλλά με διαφορετική ευαισθησία. Η διάταξη Schlumberger δίνει καλύτερα την στρωματογραφία ενώ η διάταξη Dipole-Dipole εντοπίζει καλύτερα τις τοπικές ανομοιογένειες.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις τομογραφίες, ξεκινώντας στον δρόμο επάνω στον λόφο και καταλήγοντας στο επίχωμα που έχει δημιουργηθεί το οποίο έχει πάχος 2-3μ.



**Εικόνα 5.16:** Με τις κίτρινες κουκκίδες φαίνεται η PET-RES-1, με τις μπλε η PET-RES-2 και με τις κόκκινες πάνω στο επίχωμα η PET-RES-3.



**Εικόνα 5.17:** Φωτογραφία από την θέση της PET-RES-1





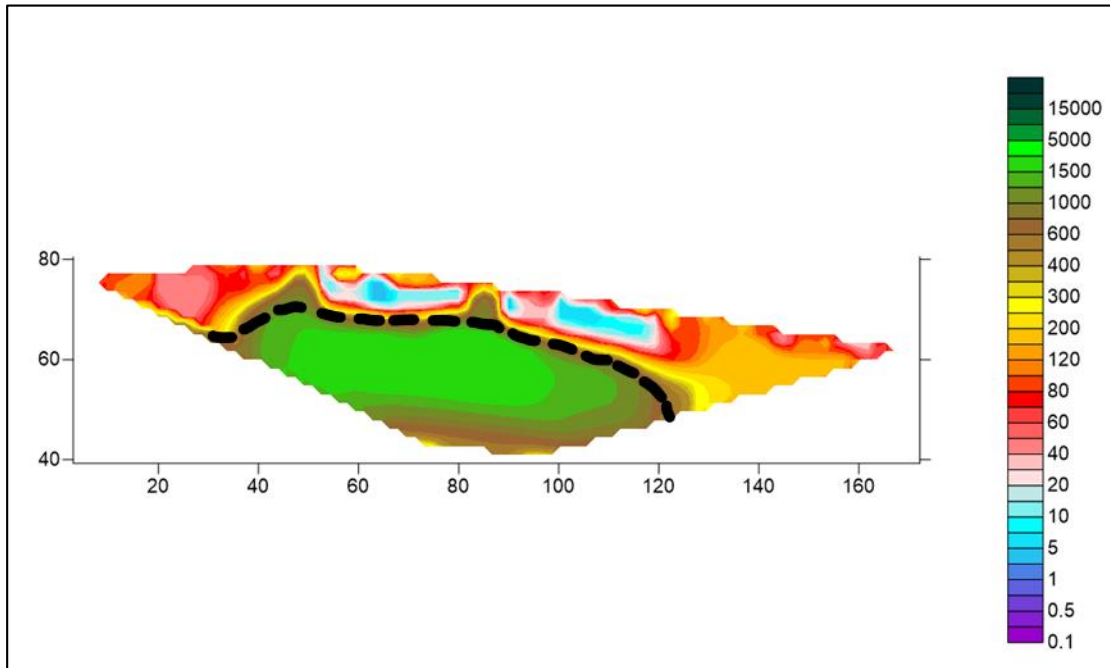
**Εικόνα 5.18:** Φωτογραφία από την θέση της PET-RES-2.



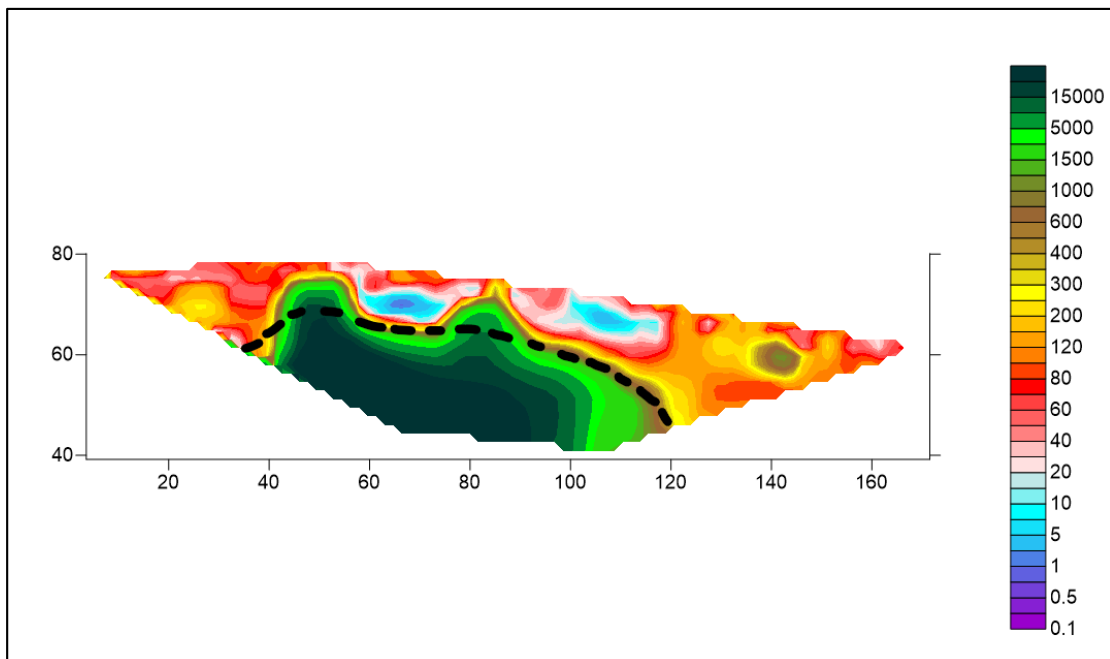
**Εικόνα 5.19:** Φωτογραφία από την θέση της PET-RES-3.

### 5.3.2 Γεωηλεκτρικές τομές

- PET-RES-1



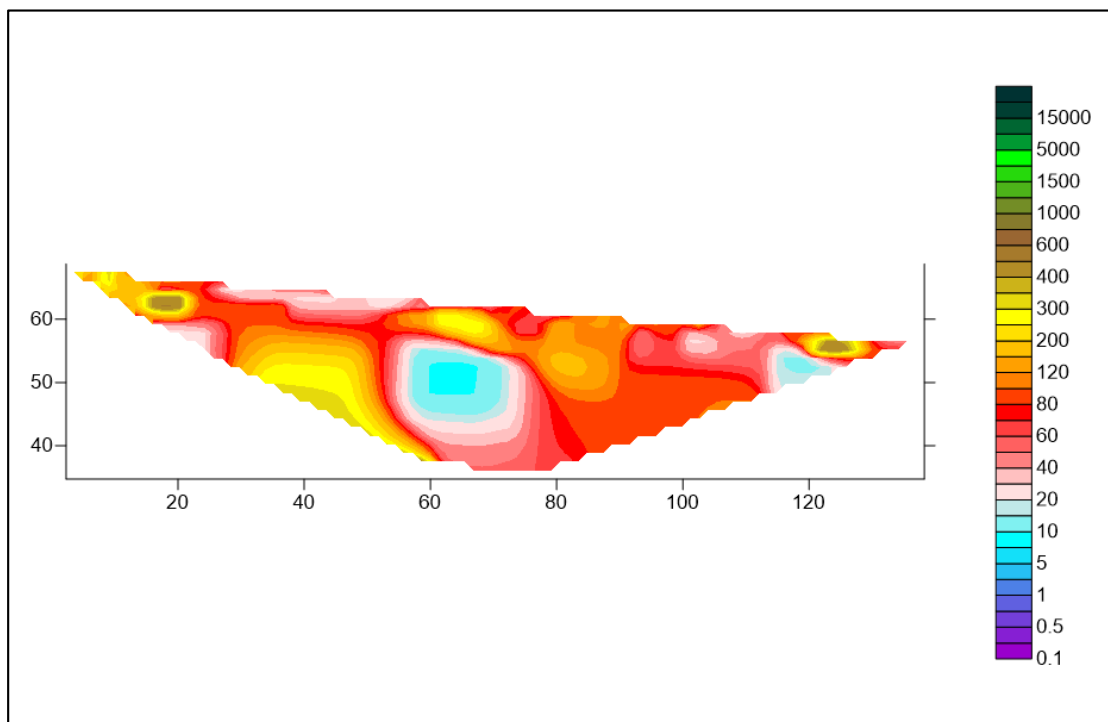
Εικόνα 5.20: Η τομογραφία με τη διάταξη Schlumberger.



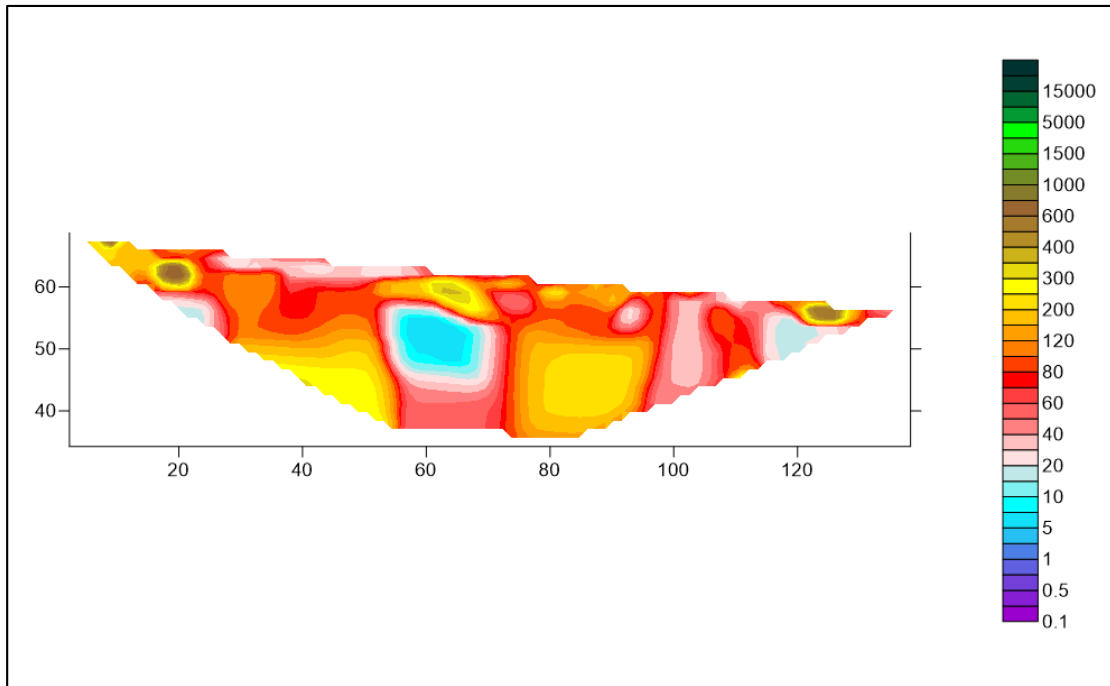
Εικόνα 5.21: Η τομογραφία με τη διάταξη dipole-dipole.

Εκεί που υπάρχουν οι εξαιρετικά υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης βρίσκεται ξεκάθαρα ο βράχωσης σχηματισμός. Στην τομή το σύνολο της περιοχής καταλαμβάνουν χαλαροί έως σχετικά συνεκτικοί αργιλικό σχηματισμοί με τους πιο λεπτόκοκκους να έχουν χαμηλές ειδικές αντιστάσεις ενώ όταν υπάρχει παρουσία αδρομερούς υλικού αυτές οι ειδικές αντιστάσεις μεγαλώνουν. Ενδιαφέρων παρουσιάζουν ορισμένοι κατά τύπους χώροι υψηλότερης ειδικής αντίστασης οι οποίοι περιβάλλονται από χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις και βρίσκονται σχετικά επιφανειακά. Αυτοί οι χώροι είναι πιθανότατα δομές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

- **PET-RES-2**



**Εικόνα 5.22:** Η τομογραφία με τη διάταξη Schlumberger.

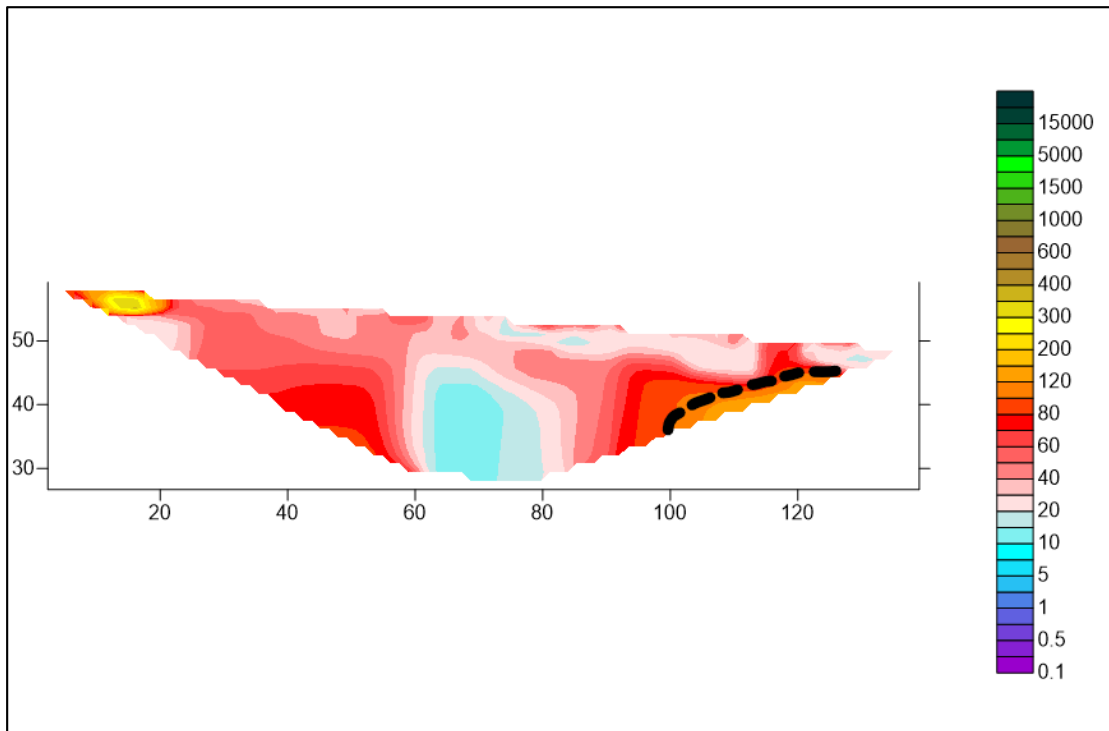


**Εικόνα 5.23:** Η τομογραφία με τη διάταξη dipole-dipole.

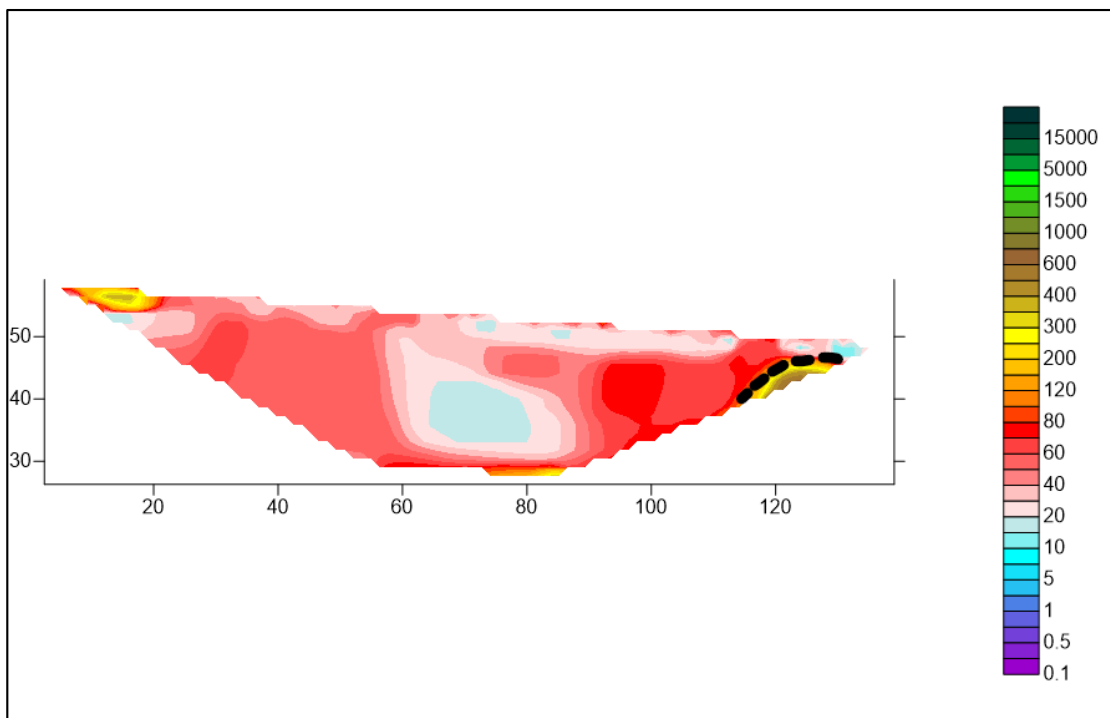
Στην τομή Schlumberger πάλι αναγνωρίζουμε τον βραχώδη σχηματισμό από τις υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, ο οποίος φαίνεται δυτικά να βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο 50 μέτρων και να βυθίζεται προς ανατολάς και να χάνεται από την τομή στην απόσταση των 60 μέτρων. Την υπόλοιπη περιοχή στην τομή καταλαμβάνουν χαλαροί έως σχετικά συνεκτικοί αργιλοκοί σχηματισμοί με τους πιο λεπτόκοκκους να έχουν χαμηλές ειδικές αντιστάσεις ενώ η παρουσία αδρομερούς υλικού να τις ανεβάζει. Και σε αυτή τη τομή βλέπουμε κατά τόπους χώρους υψηλότερης ειδικής αντίστασης οι οποίοι περιβάλλονται από χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις και υποδεικνύουν αρχαίες κατασκευές.



- **PET-RES-3**



**Εικόνα 5.24:** Η τομογραφία με τη διάταξη Schlumberger.



**Εικόνα 5.25:** Η τομογραφία με τη διάταξη dipole-dipole.

Ενώ στη διάταξη Schlumberger δεν μπορεί κανείς να διακρίνει τον βραχώδη σχηματισμό, στη τομή Dipole-Dipole οι εξαιρετικά υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης που τον υποδεικνύουν φαίνεται να βρίσκονται σε απόλυτο υψόμετρο 45 μέτρων στο δεξιό μέρος της τομής. Την υπόλοιπη περιοχή στην τομή καταλαμβάνουν χαλαροί έως σχετικά συνεκτικοί αργιλικοί σχηματισμοί με τους πιο λεπτόκοκκους να έχουν χαμηλές ειδικές αντιστάσεις ενώ η παρουσία αδρομερούς υλικού τις ανεβάζει. Τοπικά σχετικά υψηλότερης ειδικής αντίστασης που περικλείονται από χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις πιθανά να αντιστοιχούν σε θαμμένες αρχαίες κατασκευές.

## 5.4 Μέθοδος Γεωραντάρ

### 5.4.1 Εισαγωγή

Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η μεγάλη ταχύτητα λήψης των αποτελεσμάτων καθώς και η αξιοπιστία της. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ανωμαλιών, που υποδηλώνουν ανθρωπογενή παρέμβαση, αρχαίων δομών καθώς και ιζηματογενέσεις που θα είναι αποτελέσματα αυτών των δομών. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται κυρίως για μια πρώτη εκτίμηση και στη συνέχεια μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση στο εργαστήριο έτσι ώστε να ενισχυθούν τα σήματα και να παραλάβουμε πιο ευδιάκριτα αποτελέσματα.

Στη περιοχή ενδιαφέροντος υπήρξαν μετρήσεις για δύο βασικά βάθη διασκόπησης, 8 και 4 μέτρα. Οι μετρήσεις έως βάθος 8μ έχουν γίνει με σύστημα MALA και θωρακισμένη αντένα 100MHz με ταυτόχρονη ακριβή αποτύπωση θέσης με διαφορικό GPS LEICA σε σύνδεση με το δίκτυο Metrica, ενώ έως βάθος 4μ έχουν γίνει με σύστημα MALA και θωρακισμένη αντένα 250MHz. Οι μετρήσεις με την μέθοδο γεωραντάρ έχουν γίνει με πύκνωση σε διεύθυνση κάθετη σε αναμενόμενη θαμμένη αρχαία τοιχοποιία.



**Εικόνα 5.26:** Η θωρακισμένη αντένα 100MHz.

Στη περιοχή του δρόμου και του επιχώματος οι μετρήσεις έγιναν με τη αντένα των 100 MHz, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με βάση την παρατήρηση στα ήδη ανασκαμμένα και αποκαλυμμένα αρχαία τοιχεία ότι αναμένουμε θαμμένο είναι σε βάθος 3 μέτρα και βαθύτερα.



**Εικόνα 5.27:** Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι μετρήσεις γεωραντάρ (με κόκκινο για βάθος διασκόπησης 8μ, με μωβ για βάθος 4μ).

#### **5.4.2 Οριζόντιες τομές γεωραντάρ μετά από τρισδιάστατη επεξεργασία.**

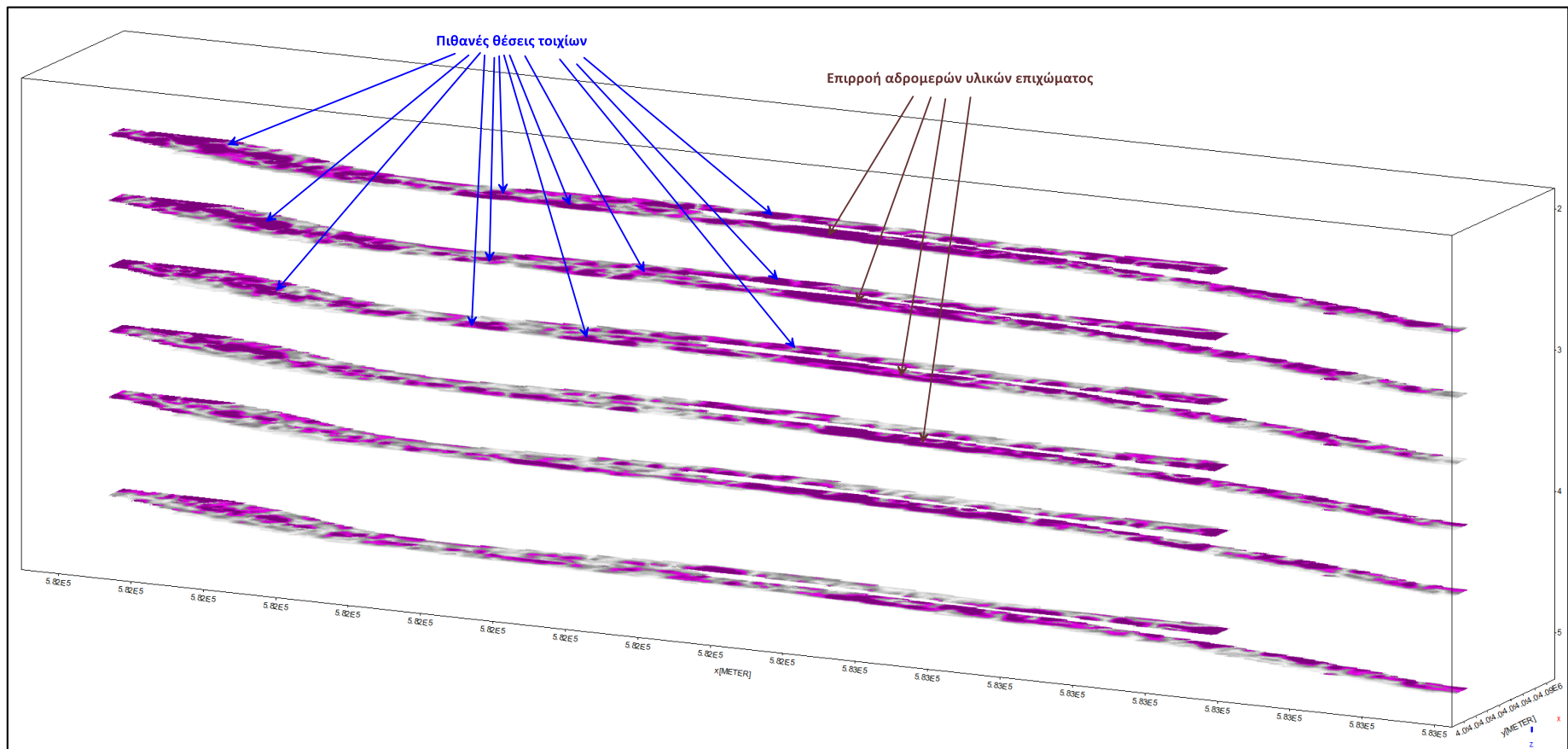
Στην **εικόνα 5.28** φαίνονται με τρισδιάστατο τρόπο οριζόντιες τομές γεωραντάρ αποτύπωσης μεγέθους του πλάτους των ανακλάσεων του σήματος γεωραντάρ που δημιουργούνται από ασυνέχειες δομών διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς και αγωγιμότητας για βάθη 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 και 5 μέτρα. Σε περίπτωση όπου παρουσιάζεται γραμμικότητα και στένωση στις ανακλάσεις μπορούμε να πούμε ότι οφείλεται στην ύπαρξη τοιχείων, ενώ σε άλλη περιοχή όπου μάλλον οφείλεται στα αδρομερή υλικά του επιχώματος φαίνεται η ευρύτητα στον χώρο που καταλαμβάνουν οι ανακλάσεις.

Η **εικόνα 5.29** επιβεβαιώνει τις παραπάνω παρατηρήσεις.

Με διαφορετικό λογισμικό από αυτό που βγήκαν τα αποτελέσματα της **εικόνας 5.28**, στην **εικόνα 5.30** φαίνεται οριζόντια τομή γεωραντάρ αποτύπωσης μεγέθους πλάτους ανάκλασης για βάθος 3μ όπου οι κόκκινες αποχρώσεις μας δείχνουν θέσεις δομών που δημιουργούν τοπικές ισχυρές ανακλάσεις και μπορεί να σχετίζονται με θέσεις αρχαίων τοιχείων. Η τομή γεωραντάρ έχει αποτεθεί επάνω στο Google Earth χάρτη.

Στην Νότιο-Δυτική πλευρά της προηγούμενης περιοχής έρευνας, σε περιοχή που έχουν ήδη ανασκαφεί και αναδειχθεί αρχαία τοιχεία, έγιναν μετρήσεις γεωραντάρ όπου δεν υπήρχαν τοιχεία, όπως φαίνονται με μωβ οι μετρήσεις στον χάρτη της **εικόνας 5.31**.

Στην **εικόνα 5.32** φαίνονται με τρισδιάστατο τρόπο οριζόντιες τομές γεωραντάρ αποτύπωσης μεγέθους του πλάτους των ανακλάσεων του σήματος γεωραντάρ που δημιουργούνται από ασυνέχειες δομών διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς και αγωγιμότητας για βάθη 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 και 0.8 μέτρων. Στην περίπτωση μας φαίνεται σε δύο περιοχές δυτικά και νότιο-ανατολικά να παρουσιάζονται ισχυρές ανακλάσεις γραμμικά στον χώρο που μάλλον οφείλονται στην ύπαρξη τοιχείων (παρουσιάζουν γραμμικότητα και στένωση). Αντίστοιχες παρατηρήσεις έγιναν και κατά την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο.



**Εικόνα 5.28:** Οριζόντιες τομές γεωραντάρ, παρουσιαζόμενες με τρισδιάστατο τρόπο, αποτύπωσης μεγέθους του πλάτους των ανακλάσεων του σήματος γεωραντάρ που δημιουργούνται από ασυνέχειες δομών διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς και αγωγιμότητας για βάθη 2.5m, 3.0m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 5.0m.

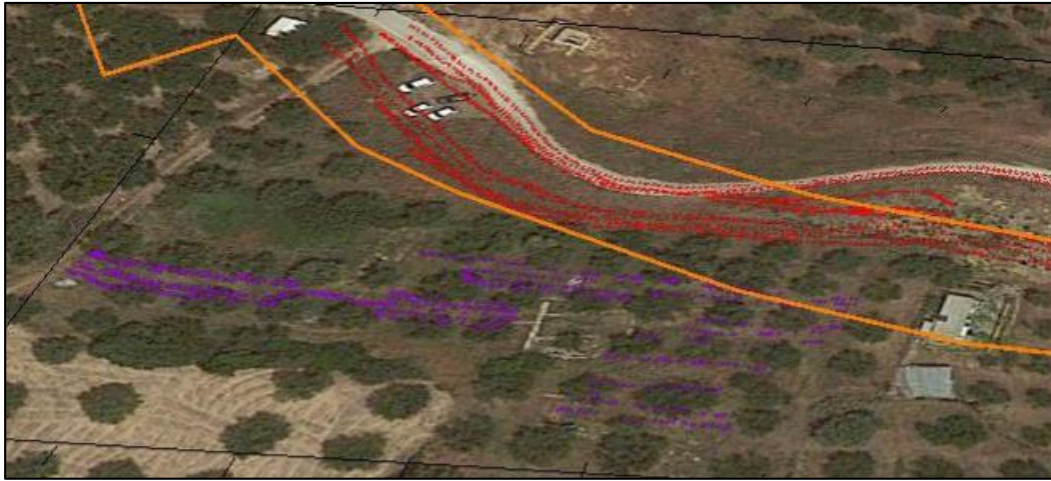




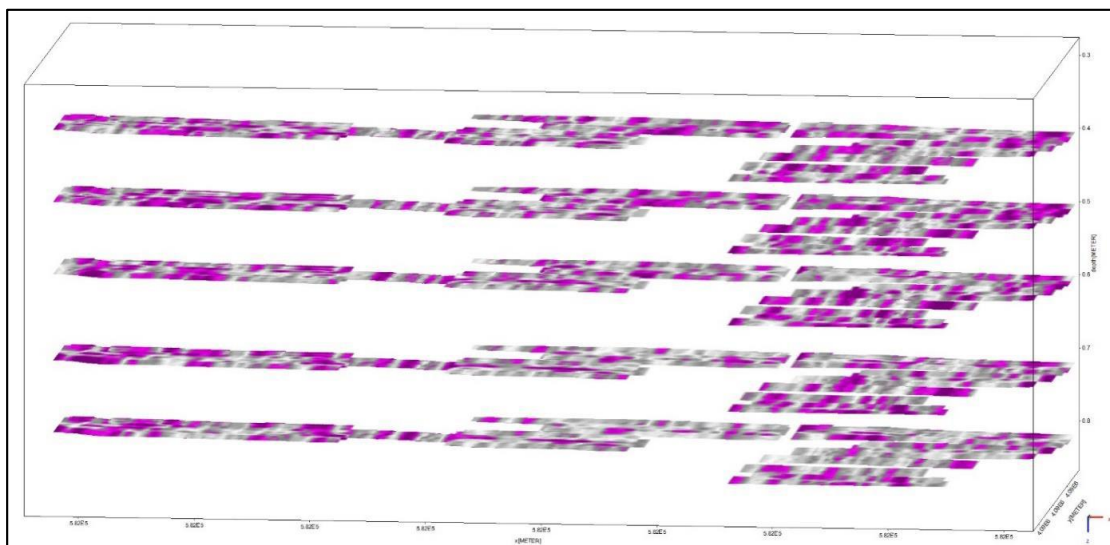
**Εικόνα 5.29:** Φωτογραφία από την απόκτηση μετρήσεων στον δρόμο με την θωρακισμένη αντένα 100MHz όπου φαίνονται και ήδη αποκαλυμμένα αρχαία τοιχία.



**Εικόνα 5.30:** Οριζόντια τομή γεωραντάρ αποτύπωσης μεγέθους πλάτους ανάκλασης με διαφορετικό λογισμικό απ' ότι προηγούμενα για βάθος 3μ όπου οι κόκκινες αποχρώσεις μας δείχνουν θέσεις δομών που δημιουργούν τοπικές ισχυρές ανακλάσεις και μπορεί να σχετίζονται με θέσεις αρχαίων τοιχίων. Η τομή γεωραντάρ έχει αποτεθεί επάνω στο Google Earth χάρτη.



**Εικόνα 5.31:** Χάρτης Google Earth της περιοχής έρευνας κοντά στο Πεταλίδι όπου με καφέ περιγράφεται η περιοχή ενδιαφέροντος και φαίνονται επίσης οι μετρήσεις γεωραντάρ με μωβ για βάθος 4μ.



**Εικόνα 5.32:** Οριζόντιες τομές γεωραντάρ, παρουσιαζόμενες με τρισδιάστατο τρόπο, αποτύπωσης μεγέθους του πλάτους των ανακλάσεων του σήματος γεωραντάρ που δημιουργούνται από ασυνέχειες δομών διηλεκτρικής σταθεράς και αγωγιμότητας για βάθη 0.4m, 0.5m, 0.6m, 0.7m, 0.8m.

## 6. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το υπέδαφος αλλά και η ύπαρξη ανθρωπογενών δομών στη περιοχή λόφος Κάστρο, που αποτελούσε την ακρόπολη της αρχαίας Κορώνης, στο σύγχρονο Πεταλίδι. με γεωφυσικές μεθόδους. Απώτερος στόχος της συγκεκριμένης έρευνας, είναι να δοθούν απαντήσεις στα ερωτήματά που συνδέονται με την κατασκευή έργου οδοποιίας και τον εντοπισμό/προστασία τυχόν θαμμένων αρχαίων κατασκευών αλλά και την προστασία των ήδη ανεσκαμμένων αρχαίων κατασκευών.

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

Έτσι, στην δική μας εφαρμογή στο Πεταλίδι, όπου ερευνήθηκε η περιοχή με βάση την γεωλογία αλλά και την αρχαιολογία της, επιλέχτηκε συνδυασμός από τρεις διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους.

Με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μετρήθηκε η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα για δύο βάθη των 6 και 3 μέτρων στην περιοχή που φαίνεται στην **εικόνα 5.2**. Η συγκεκριμένη μέθοδος έφερε στο φως κάποιες ενδιαφέρουσες ανωμαλίες αλλά και μια γενική εικόνα για την λιθολογία μέχρι αυτό το βάθος. Επίσης με τους χάρτες για βάθος συνολικής διασκόπησης 6 μέτρων εντοπίστηκαν πιθανά τοιχία στο υπέδαφος, τα οποία είχαν μικρότερες τιμές αγωγιμότητας από το περιβάλλοντα χώρο. Επιπρόσθετα, με τους χάρτες φωτοσκίασης μπορέσαμε να διακρίνουμε πιο ξεκάθαρα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τα τοιχία και τις δομές που είχαν βρεθεί στους αρχικούς χάρτες.



Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η μέθοδος του γεωραντάρ. Με τη μέθοδο του γεωραντάρ που στηρίζεται στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο έδαφος, τη μέτρηση του ποσού ενέργειας που ανακλάται πίσω και του χρόνου που παίρνει για να φθάσει στην επιφάνεια, ανιχνεύθηκαν ανακλάσεις που πιθανά να αντιστοιχούν σε τοιχία, στις περισσότερες περιπτώσεις επιβεβαιώνονται από τα ήδη ανασκαμμένα τοιχία τα οποία παρουσιάζουν γραμμικότητα με τις μετρήσεις που κάναμε. Το βάθος των τοπικών αυτών δομών είναι περίπου 3μ κάτω από τον δρόμο ή κάτω από το επίχωμα.

Τέλος, εφαρμόστηκε η Ηλεκτρική μέθοδος με στόχο την αναγνώριση της θέσης του βραχώδους υποβάθρου. Επιστρατεύσαμε την ηλεκτρική μέθοδο καθώς είναι η ενδεδειγμένη για την αναγνώριση στρωματογραφίας αλλά και για να πετύχουμε μεγάλο βάθος διασκόπησης και έγινε εφαρμογή των διατάξεων Schlumberger και Dipole – Dipole. Βρέθηκε με επιτυχία το βάθος και η ανάπτυξη του βραχώδους υποβάθρου καθώς και ενδιαφέρουσες ανομοιογένειες που εικάζουμε ότι έχουν σχέση με αρχαίες δομές. Η οροφή του βραχώδους σχηματισμού μπορούμε να πούμε ότι βρίσκεται σε 70 μέτρα απόλυτο υψόμετρο στη πρώτη τομή, στη δεύτερη τομή φαίνεται δυτικά να βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο 50 μέτρων, να βυθίζεται προς την ανατολή και να χάνεται από την τομή στην απόσταση των 60 μέτρων. Στην τρίτη εμφανίζεται πάλι ο βραχώδης σχηματισμός, αυτή τη φορά η οροφή του στο απόλυτο υψόμετρο των 45 μέτρων.

## 7. Βιβλιογραφία

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

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

Μιχαλόπουλος, Φώτης (2020). *Γεωφυσική Έρευνα με ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους στις περιοχές Καστέλι και Λιβιάδι της Νήσου Κεφαλληνίας*. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

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

CMD. 2013. *Electromagnetic Conductivity User Manual*. 2013.

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

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

José-Paulino Fernández-Álvarez, David Rubio-Melendi b, Juan Antonio Quirós Castillo, Andrés González-Quirós, David Cimadevilla-Fuente (2017). *Combined GPR and ERT exploratory geophysical survey of the Medieval Village of Pancorbo Castle*. *Journal of Applied Geophysics*.

Çağlayan B, Yunus L.E, Olcay Ç, Michael B, Julia A, Mehmet Ali K. (2021). *A challenging archaeo-geophysical exploration through GPR and ERT surveys on the Keber Tepe, City Hill of Doliche, Commagene*. *Journal of Applied Geophysics*.

Alexandre Novo, Matthew L. Vincent, and Thomas E. Levy. *Geophysical Surveys at Khirbat Faynan, an Ancient Mound Site in Southern Jordan*. *Journal of Applied Geophysics*.