ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Γεωφυσική Έρευνα για τον εντοπισμό θαμμένων πεπερασμένων δομών

Βαχτσεβάνος Αθανάσιος

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2022

Πρόλογος

Πρώτη φορά ήρθα σε επαφή με το αντικείμενο της γεωφυσικής στο 4^{ο} εξάμηνο της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών στα πλαίσια του μαθήματος «Μεταλλευτική Έρευνα», από την αρχή με είχε ενθουσιάσει σαν αντικείμενο. Σημαντικό ρόλο είχε βέβαια και ο διδάσκον καθηγητής, όπου με τον τρόπο διεξαγωγής του μαθήματος το έκανε ιδιαίτερα ενδιαφέρον.

Στην συνέχεια, η επόμενη σοβαρή, κατά μια έννοια, επαφή με το αντικείμενο της γεωφυσικής ήταν στο μάθημα του 9^{ου} εξαμήνου «Εφαρμοσμένη Γεωφυσική». Εκεί αναφερθήκαμε εκτενώς και σε βάθος στις περισσότερες γεωφυσικές μεθόδους καθώς και τις εφαρμογές που έχουν στον αντικείμενο του μηχανικού και όχι μόνο. Τότε ήταν και η στιγμή που αποφάσισα ότι θα ήθελα να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο στην Διπλωματική Εργασία μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Αποστολόπουλο Γιώργο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών καθώς ήταν δίπλα μου σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής για να με συμβουλεύει κατάλληλα και να με βοηθάει. Ήταν επίσης ο άνθρωπος που με έκανε να αποκτήσω έντονο ενδιαφέρον για το αντικείμενο της γεωφυσικής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γεωλόγο κύριο Κοσμά Παυλόπουλο καθηγητή του πανεπιστημίου Sorbonne στο Abu Dhabi για την έρευνα που είχε πραγματοποιήσει για την γεωλογία-γεωμορφολογία της περιοχής έρευνας και την οποία μου παραχώρησε.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω του φίλους μου που ήταν δίπλα μου καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Περσεφόνη Μίχου η οποία με στήριζε διαρκώς όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που μου στάθηκαν όλα αυτά τα χρόνια, στήριξαν τις επιλογές μου και με βοήθησαν να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες που προέκυψαν.

Περίληψη

«Γεωφυσική Έρευνα για τον εντοπισμό θαμμένων πεπερασμένων δομών»

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας σε περιοχή με σκοπό την εύρεση αρχαιολογικών αντικειμένων. Πιο αναλυτικά, σε μια κοιλάδα με χαλαρά ιζήματα είναι εμφανείς πάνω από την επιφάνεια του εδάφους κάποιες κολώνες από γρανίτη που εκτιμάται ότι βρίσκονται εκεί από την αρχαιότητα. Σκοπός λοιπόν είναι η έρευνα του υπεδάφους με μη-καταστροφικές μεθόδους για εντοπισμό θαμμένων αρχαίων αντικειμένων που συνδέονται με τις κολώνες αυτές. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε με γεωφυσικές μεθόδους και συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις με την χρήση Ηλεκτρομαγνητικών οργάνων (EM) και Γεωραντάρ (GPR). Στην συνέχει αυτά τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Surfer της Golden Software για τα ηλεκτρομαγνητικά και το λογισμικό REFLEXW για το γεωραντάρ. Η διπλωματική διαρθρώνεται σε 4 Κεφάλαια.

Στο 1ο Κεφάλαιο γίνεται μια μικρή εισαγωγή στο αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας και της εφαρμογές που έχει στις μέρες μας.

Στο 2ο Κεφάλαιο γίνεται ανάπτυξη του θεωρητικού υποβάθρου των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα. Του φυσικού νόμους πάνω στους οποίους βασίζεται η λειτουργία τους.

Στο 3ο Κεφάλαιο αναπτύσσονται 3 Μελέτες Περίπτωσης που σχετίζονται με την έρευνα που πραγματοποιήσαμε. Συγκεκριμένα, αναφέρονται σε αντίστοιχες εφαρμογές με τη δική μας και τον τρόπο με τον οποίο τις προσέγγισαν, τις μεθόδους που επέλεξαν καθώς και την μεθοδολογία των μετρήσεων. Αυτές αποτέλεσαν αναφορά σύγκρισης για τον σχεδιασμό της δικής μας έρευνας και την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων.

Στο 4ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για την περιοχή μελέτης, αρχικά αναλύεται η γεωλογία της. Γνωρίζοντας την γεωλογία της περιοχής και τις διεργασίες τις οποίες την δημιούργησαν μπορούμε να δώσουμε και μια ακριβέστερη ερμηνεία στα αποτελέσματά μας. Στην συνέχεια αναλύεται η κάθε μέθοδος ξεχωριστά, γίνεται αναφορά στα όργανα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των μετρήσεων. Παραθέτονται οι χάρτες που προκύπτουν για κάθε περίπτωση καθώς και μια σύντομη ανάλυσή τους. Τέλος, έχοντας λάβει υπόψιν τα αποτελέσματα και από τις δύο γεωφυσικές μεθόδους που πραγματοποιήσαμε εξάγουμε το τελικό συμπέρασμα.

Abstract

«Integrated Geophysical Investigation for the identification of buried finite structures»

This thesis deals with the geophysical investigation that aims to locate possible archaeological features in an area. Specifically, in a valley consisting of loose sentiments several granite columns are estimated to be in the area since antiquity. The goal is to investigate the subsurface with non-destructive methods in order to locate buried archaeological relics connected with these columns. This research was done by means of geophysical methods, with the use of Electromagnetic Induction (EM) and Ground Penetrating Radar (GPR) to be precise. Then the date acquired in the field were processed with Surfer from Golden Software for the EM and REFLEXW for the GPR. This thesis consists of 4 chapters.

The 1st Chapter has a small introduction concerning geophysical investigations and their uses.

The 2nd Chapter has the theoretical background of the methods used and the physical laws upon they are based.

The 3rd Chapter has some Case Studies similar with our investigation. The have to do with problems similar to ours and the way the approached their solutions, the specific methods they used and the design of data acquisition. These cases studied were our reference through the solution of the problem we faced.

The 4th Chapter contains some introduction for the area of interest and we analyze its geology. Having know the geological conditions of the area, we are able to better interpret investigation's results. Then each geophysical method is analyzed separately, we mention the instruments used for data acquisition. The maps occurred for every different instance and a sort analysis. Finally, combining the results from every method used we provide our conclusions.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος 3
Περίληψη 4
Abstract 5
Ευρετήριο εικόνων 8
1. Εισαγωγή 11
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας 14
2. Θεωρητικό Μέρος 15
2.1 Κλασική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος 15
2.1.1 Γενικά 15
2.1.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα 15
2.1.3 Μαγνητική Επιδεκτικότητα 16
2.1.4 Μέτρηση Φάσης 17
2.1.5 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης 19
2.1.6 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων 21
2.2 Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR) 25
2.2.1 Γενικά 25
2.2.2 Αρχές λειτουργίας 26
2.2.3 Λήψη δεδομένων 27
2.2.4 Επεξεργασία δεδομένων 28
2.2.5 Ερμηνεία των δεδομένων 28
2.2.6 Διηλεκτρικές Ιδιότητες των υλικών (γεωλογικών σχηματισμών) 29
3. Εφαρμογές της Γεωφυσικής στην Αρχαιολογική Έρευνα 31
3.1 Γεωφυσική έρευνα στην κοιλάδα του Θορικού. 31
3.1.1 Εισαγωγή 31
3.1.2 Γεωλογία της περιοχής 31
3.1.3 Γεωφυσική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή της Κοιλάδας του Θορικού 32
3.1.4 Γεωφυσική έρευνα σε τοπικό επίπεδο 34
3.1.5 Συμπεράσματα 36
3.2 Γεωφυσική έρευνα στην περιοχή της Σμύρνης στην Τουρκία. 40
3.2.1 Εισαγωγή 40
3.2.2 Οι τοποθεσίες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν έρευνες. 40
3.2.4 Λήψη, επεξεργασία και αποτελέσματα των δεδομένων από τις περιοχές έρευνας 41

3.2.5 Συμπεράσματα 45
3.3 Γεωφυσική έρευνα σε Ρωμαϊκό στρατόπεδο λεγεωνάριων στο Legio στο Ισραήλ. 46
3.3.1 Εισαγωγή 46
3.3.2 Σκοπός 48
3.3.3 Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR) 48
3.3.4 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος 49
3.3.5 Συνδυασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα 52
4. Γεωφυσική Έρευνα στην Περιοχή Bisri 54
4.1 Εισαγωγή 54
4.2 Γεωλογία της περιοχής 55
4.2.1 Κλιματολογικά δεδομένα 55
4.2.2 Γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής 55
4.2.3 Γεωμορφολογικό υπόβαθρο της περιοχής 58
4.4 Γεωφυσική Έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου 59
4.4.2 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (EM) 59
4.4.3 Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR) 66
4.4.4 Συμπεράσματα 69
5. Βιβλιογραφία 72

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2.1: a) Η διαφορά φάσης θ μεταξύ δύο κυματομορφών. b) Διανυσματικό διάγραμμα που επεξηγεί την σχέση φάσης και πλάτους κύματος μεταξύ πρωτογενούς, δευτερογενούς και τελικού Η/Μ πεδίου. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002) 18
Εικόνα 2.2: Φορητό σύστημα Πομπού-Δέκτη Η/Μ πεδίου 18
Εικόνα 2.3: Το σύστημα Η/Μ CMD4 (αριστερά) και το διαφορικό GPS Leica 1200 (δεξιά) που συνδυάζονται για τις ακριβείς θέσεις των μετρήσεων. 20
Εικόνα 2.4: Απεικόνιση πρωτογενών και δευτερευόντων πεδίων στη μέθοδο Η/Μ επαγωγής οριζόντιου βρόχου για έρευνα αβαθών μεταλλευμάτων. (William Lowrie. 2007) 23
Εικόνα 2.5: Σύστημα Γεωραντάρ κατά την λήψη δεδομένων. 25
Εικόνα 2.6: Οι τρεις βασικές διατάξεις έρευνας με Γεωραντάρ 27
Εικόνα 3.1: a), b) το καρότσι που χρησιμοποιήθηκε για την Ηλεκτρομαγνητική έρευνα της ευρύτερης περιοχή. c) Οι Η/Μ μετρήσει φαίνονται με κόκκινο χρώμα (CMD 2) και κυανό (CMD4) όπου πραγματοποιήθηκαν σε δρόμους της περιοχής σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι ηλεκτρικές τομές. 32
Εικόνα 3.2: a) έως d) Οι χάρτες φαινόμενης αγωγιμότητας και της Σε Φάση συνηστώσας για την ευρύτερη περιοχή. e) ο χάρτης που προέκυψε από την αφαίρεση των χαρτών αγωγιμότητας για βάθη 6m και 3m. f) ο χάρτης που προέκυψε από την αφαίρεση των χαρτών αγωγιμότητας για βάθη 6m και 3m αν το υπερθέσουμε στο χάρτη του Google Earth.g) Η Διπλή Δωρική Στοά που δείχνει ότι η σημερινή στάθμη του εδάφους είναι αρκετά ψηλότερη από την αρχαία. h) Η λιθογραφία του ναού της Δήμητρας και της Περσεφόνης (Διπλή Δωρική Στοά) του J.D. Le Roy του 1758. 33
Εικόνα 3.3: a) και b) οι τομές ηλεκτρικής αντίστασης των προφίλ TR7 και TR1 μαζί με την γεωλογική ερμηνεία. c) Τομές ηλεκτρικής αντίστασης σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο που προέκυψε απο την χρήση όλων των τομών που έγιναν στην ευρύτερη περιοχή. 34
Εικόνα 3.4: Χάρτης της Κοιλάδας του Θορικού, η μπλε γραμμή αναπαριστά τα όρια της περιοχές με υψηλή αγωγιμότητα (πιθανή παλαιοακτή) βασισμένο στον χάρτη που προέκυψε από την αφαίρεση των δύο χαρτών της αγωγιμότητας (για 6m και 3m). 35
Εικόνα 3.5: a) Εικόνα του Google Earth από την Κοιλάδα του Θορικού που δείχνει τις διάφορες περιοχές ενδιαφέροντος. Η περιοχή που περιγράφεται ως αγορά είναι περιεγραμμένη με την συνεχόμενη κόκκινη γραμμή. b) Φωτογραφία της Διπλής Δωρικής Στοάς. c) Χάρτης του Google Earth που δείχνει τις υπό-περιοχές που έγιναν Η/Μ μετρήσεις (κίτρινες γραμμές), τα προφίλ του γεωραντάρ (μπλε, μωβ και καφέ γραμμές) και οι Τομές Ηλεκτρικής Αντίστασης (πράσινες γραμμές) όλα για την τοπική έρευνα. d) και e) φωτογραφίες που πάρθηκαν κατά την λήψη των δεδομένων με τα Ηλεκτρομαγνητικά και το γεωραντάρ αντίστοιχα. 35
Εικόνα 3.6: Οι χάρτες φαινόμενης αγωγιμότητας (α και b) και σκιασμένου ανάγλυφου (d και e) για βάθη 1.5m και 3m. c) Ο χάρτης που προέκυψε με την αφαίρεση των χαρτών α) και b), ο χάρτης αυτός δημιουργήθηκε για να δώσει έμφαση στην επιρροή που έχουν επιφανειακά στοιχεία, αυτά φαίνονται και πιο καθαρά στον χάρτη

σκιασμένου ανάγλυφου που προέκυψε (f). g) Τα γραμμικά και τοπικά στοιχεία που προέκυψαν από τους χάρτες σκιασμένου ανάγλυφου φαίνονται με υπέρθεση στο Google Earth μαζί με το σύμβολο που έχει δοθεί στο κάθε στοιχείο. Στην ενσωματωμένη εικόνα διακρίνονται ευμεγέθη κομμάτια μαρμάρου και πέτρα που βρίσκονται στον πυθμένα της κοίτης η οποία διατρέχει την περιοχή έρευνας. 37
Εικόνα 3.7: Οι Τομές Ηλεκτρικής Αντίστασης που πραγματοποιήθηκαν γύρω από την Δωρική Στοά, οι υψηλής αγωγιμότητας περιοχές σκιαγραφούνται με μωβ χρώμα και αναπαριστούν πιθανές ανθρωπογενείς δομές. 38
Εικόνα 3.8: a) Διαγώνια, από άνω δεξιά έως κάτω αριστερά: Τα προφίλ του γεωραντάρ γύρω από την Δωρική Στοά, (b-d) Τομές του γεωραντάρ από τα προφίλ T2312, T237R και T213 με τα τοπικά χαρακτηριστικά (τοπικές ανακλάσεις και διαθλάσεις) να έχουν σκιαγραφηθεί με κόκκινες γραμμές, οι διεπαφές των στρωμάτων με πράσινο. (e,f) Όλες οι τομές του γεωραντάρ σε τρισδιάστατη απεικόνιση, φαίνεται το ΒΑ και κεντρικό μέρος της έρευνας (πάνω) και το Β και κεντρικό (κάτω). Τα χαρακτηριστικά που ανοιχνεύθηκαν με τα Ηλεκτρομαγνητικά ανταποκρίνονται σε αυτά που ανιχνεύθηκαν με το γεωραντάρ. 39
Εικόνα 3.9: Χάρτης με τις τοποθεσίες όπου πραγματοποιήθηκαν οι έρευνες.1) Το παλιό Höyük της Σμύρνης, 2) Η Ρωμαϊκή Αγορά της Σμύρνης, 3) Κοιμητήριο της Εποχής του Χαλκού του Ulucak Höyük, 4) Ο ναό του Αγίου Βουκόλου. 40
Εικόνα 3.10 Οι τομές βάθους που αποκτήθηκαν στο παλιό Höyük της Σμύρνης από a) ERT και b) GPR. 41
Εικόνα 3.11: a) ο χάρτης Φυσικού Δυναμικού, b) ο χάρτης των προβαλλόμενων κέντρο πόλωσης του Φυσικού Δυναμικού, c) ο χάρτης των H/M VLF, d) ο χάρτης VLF-R. 42
Εικόνα 3.12: Οι τομές βάθους ERT. 43
Εικόνα 3.13: a) Κάτοψη της Αγοράς τις Σμύρνης όπου φαίνονται οι γεωφυσικές έρευνες που έγιναν. b) Εικόνα του γκραντιόμετρου από την περιοχή έρευνας μετά την επεξεργασία με low-pass φίλτρο.....43
Εικόνα 3.14: a)Κάτοψη της περιοχής έρευνας η οποία έχει γίνει υπέρθεση σε τοπογραφικό χάρτη της περιοχής. b) εικόνα του γκραντιόμετρου μετά το πέρασμά της από low-pass φίλτρο (το μπλε ορθογώνιο δείχνει την περιοχή εκσκαφής. c) τα αποτελέσματα της εκσκαφής. 44
Εικόνα 3.15: Τα διαγράμματα του Γεωραντάρ σε διάφορες τοποθεσίες εντός της εκκλησίας. Οι τομές T01 και T02 πραγματοποιήθηκαν με κεραία 500 MHz ενώ οι τομές T03 και T04 με 1000MHz κεραία.....44
Εικόνα 3.16: a) Το διάγραμμα της γεωφυσικής μελέτης σε υπέρθεση με την κάτοψη του ναού. b) Εικόνα του γκραντιόμετρου μετά το low-pass φίλτρο. c) Τομή για βάθος 54-66 cm του γεωραντάρ. 44
Εικόνα 3.17: Χάρτης της Κοιλάδας Jezreel όπου βρίσκεται το Legio. 46
Εικόνα 3.18: Ορθοφωτογραφία των αρχαιολογικών χώρων Megiddo και Legio. 47
Εικόνα 3.19: Χάρτης lidar του el-Manach όπου στην κορυφή του βρίσκεται το Legio. Το λευκό διακεκομμένο περίγραμμα δείχνει τα θεωρητικά όρια του αρχαιολογικού χώρου, ενώ με μαύρο βλέπουμε τις περιοχές μελέτης. 47

Εικόνα 3.20: «Φέτα» του γεωραντάρ σε βάθος 42-82 cm όπου απεικονίζονται όλες οι ανωμαλίες. 49
Εικόνα 3.21: Ο χάρτης εικονοστοιχείων THD φαινόμενης αγωγιμότητας του EM31 με φίλτρο ανίχνευσης έντονων μεταβολών. Τα δεδομένα είναι προσανατολισμένα με τον βορά. Το πλάτος της κλίμακας είναι σε mS/m/m. 49
Εικόνα 3.22: Προφίλ φαινόμενης αγωγιμότητας στον άξονα y στα: a)80, b)100 και c) 120 m. 50
Εικόνα 3.23: Συνδυασμός της «φέτας» GPR και τα δεδομένα από το EM31. 50
Εικόνα 3.24: Κοντινό πλάνο της περιοχής έρευνας με τα δεδομένα της «φέτας» του γεωραντάρ στο βάθος 0.42-0.85 m με σημειωμένες τις ανωμαλίες. 51
Εικόνα 3.25: Εικόνα του lidar μαζί με τις δύο πιθανές ερμηνείες που υπάρχουν. Η πρώτη είναι σημειωμένη με άσπρο και η δεύτερη είναι συνδυασμός άσπρου και μαύρου. Η τοποθεσία της ανατολικής και δυτικής άκρης είναι κατά προσέγγιση. ... 52
Εικόνα 4.1: Οι 3 από τις τέσσερεις κολώνες γρανίτη που βρίσκονται στην περιοχή. 54
Εικόνα 4.2: Τοπογραφικός χάρτης της κοιλάδας Bisri. 55
Εικόνα 4.3: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής. 57
Εικόνα 4.4: Χάρτης με τις θέσεις μέτρησης των Ηλεκτρομαγνητικών στον αρχαιολογικό χώρο του Bisri με τα όργανα CMD-2 και CMD-4 σε σύστημα συντεταγμένων UTM (36N). 59
Εικόνα 4.5: Χάρτης με τις θέσεις μέτρησης των Ηλεκτρομαγνητικών στον αρχαιολογικό χώρο του Bisri με τα όργανα CMD-2 και CMD-4 στο Google Earth. 60
Εικόνα 4.6: Χάρτης αγωγιμότητας με το CMD-2 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m. 62
Εικόνα 4.7: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας με το CMD-2 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m. 62
Εικόνα 4.8: Χάρτης αγωγιμότητας για βάθος διασκόπησης 3 m τον οποίο έχουμε υπερθέσει στο Google Earth. 63
Εικόνα 4.9: Χάρτης αγωγιμότητας με το CMD-4 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m. 64
Εικόνα 4.10: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας με το CMD-4 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m. 64
Εικόνα 4.11: Χάρτης αγωγιμότητας για βάθος διασκόπησης 6 m τον οποίο έχουμε υπερθέσει στο Google Earth. 65
Εικόνα 4.12: Χάρτης με τα προφίλ μέτρησης του Γεωραντάρ στον αρχαιολογικό χώρο του Bisri στο σύστημα συντεταγμένων UTM (36N). 66
Εικόνα 4.13: Χάρτης με της τομές του Γεωραντάρ στην περιοχή έρευνας με υπέρθεση στο Google Earth. 67
Εικόνα 4.14: Τομές του Γεωραντάρ όπου φαίνονται τα μέγιστα πλάτη (διακρίνονται με την γκρι σκίαση). 68

1. Εισαγωγή

Η Γεωφυσική είναι η επιστήμη η οποία ασχολείται με τις φυσικές ιδιότητες της Γης αξιοποιώντας τους νόμους της Φυσικής. Μελετά δηλαδή τα φυσικά φαινόμενα όπως η Βαρύτητα, ο Ηλεκτρισμός, ο Μαγνητισμός, τα Σεισμικά Κύματα κ.ο.κ. που υφίστανται τόσο στο εσωτερικό της γης όσο στην επιφάνεια και την ατμόσφαιρα. Από τα φυσικά αυτά φαινόμενα προκύπτουν και αντίστοιχες ιδιότητες στα υλικά που αποτελούν τη γη, τέτοιες ιδιότητες είναι η πυκνότητα, η ηλεκτρική αντίσταση και αγωγιμότητα, η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ταχύτητα με την οποία διαδίδοντα τα διάφορα σεισμικά κύματα κ.α. Είναι σχετικά πρόσφατη επιστήμη καθώς γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη ως ξεχωριστή επιστήμη στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. (Τσελέντης Α. 2013)

Οι ιδιότητες διαφέρουν μεταξύ των υλικών σε διάφορους βαθμούς, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που μία ιδιότητα είναι σχεδόν ίδια σε δύο υλικά. Την διαφορά στις ιδιότητες αυτές εκμεταλλεύεται η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική με μη-καταστροφικές μεθόδους και συχνά οικονομικές για την διερεύνηση του υπεδάφους, όπου καλείται να λύσει γεωλογικά, αρχαιολογικά ή προβλήματα μηχανικού τις περισσότερες φορές. Μερικοί από τους τομείς της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής είναι:

- έρευνα θέσεων τεχνικών έργων
- έρευνα υδρογονανθράκων
- περιβαλλοντικές έρευνες (έκταση ρύπανσης)
- θέσεις αρχαιολογικών δομών
- έρευνα υπόγειων υδάτων
- εύρεση εγκοίλων, υπόγειων καλωδίων, σωλήνων και στοών
- μεταλλευτική έρευνα

Οι μέθοδοι με τις οποίες γίνεται η διερεύνηση του υπεδάφους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις **παθητικές** (passive) και τις **ενεργητικές** (active). Οι παθητικές μέθοδοι βασίζονται στην καταγραφή φυσικών πεδίων και των μεταβολών τους στην περιοχή έρευνας όπως το βαρυτικό, το ηλεκτρικό φυσικού δυναμικού καθώς και η χρήση των σεισμικών κυμάτων που προκύπτουν από τους σεισμούς. Αντιθέτως οι ενεργητικές μέθοδοι αντί για φυσικά πεδία καταγράφουν την απόκριση του εδάφους αν διοχετεύσουμε σε αυτό τεχνητά πεδία (π.χ. Ηλεκτρομαγνητικά ή Ηλεκτρικά) καθώς επίσης και η διέγερση του εδάφους με ελαστικά κύματα (π.χ. από εκρήξεις). Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 1) παρουσιάζονται συνοπτικά οι σημαντικότερες μέθοδοι καθώς και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλεύεται η κάθε μία.

Μέθοδος	Μετρούμενη Φυσική Ποσότητα	Στόχος
Βαρυτική	Ένταση πεδίου βαρύτητας	Προσδιορισμός της κατανομής της πυκνότητας των πετρωμάτων
Μαγνητική	Ένταση γεωμαγνητικού πεδίου	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω μαγνητικής επιδεκτικότητας και παραμένουσας μαγνήτισης
Σεισμική	• 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	• Ειδική ηλεκτρική αντίσταση • Ηλεκτρικά δυναμικά	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροχωριτικότητα)
Ηλεκτρομαγνητική	Αντίδραση σε ηλεκτρομαγνητική διέγερση	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού (ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαγωγή)
Ραδιομετρική	Φυσική ραδιενέργεια	Προσδιορισμός της φυσικής ραδιενέργειας των πετρωμάτων
Θερμική	Ροή θερμότητας από το εσωτερικό της γης	Προσδιορισμός της θερμοκρασίας των πετρωμάτων

Πίνακας 1: Τα χαρακτηριστικά των κύριων γεωφυσικών μεθόδων και οι στόχοι τους

Τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης μεθόδου εξαρτώνται από τις ιδιότητες του σχηματισμού ή αντικειμένου που θέλουμε να εντοπίσουμε καθώς και από την γεωλογία της περιοχής. Στην συνεχεία σημαντικό ρόλο παίζει και η πραγματοποίηση προηγούμενων ερευνών στην περιοχή ή αν θα είναι η πρώτη αυτή, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν προηγούμενα αποτελέσματα για καλύτερο σχεδιασμό της μεθόδου. Συνηθίζεται επίσης η εφαρμογή περισσότερων της μια μεθόδου με σκοπό την διασταύρωση των δεδομένων και την δημιουργία καλύτερης συνολικής εικόνας του υπεδάφους. Στον *Πίνακα 2* αναφέρονται διάφοροι τύποι γεωφυσικών προβλημάτων και ενδεικνυόμενες μέθοδοι.

Πρόβλημα		Παραδείγματα	Κύριες μέθοδοι
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ	Στρωματογραφικό	1) Αλλούβια πάνω από βραχώδες υπόβαθρο 2) Διαστρωμάτωση αργίλων και άμμων	Σεισμ. διάθλαση, γεωηλεκτρική, Η/Μ Σεισμ. ανάκλαση, γεωηλεκτρική
	Διάβρωσης	Παλαιοκοίτες	Σεισμ. διάθλαση, βαρυτική, Η/Μ, γεωηλεκτρική, σεισμ. ανάκλαση
	Αποσάθρωσης	Καρστικοί σχηματισμοί	Η/Μ, γεωηλεκτρική, βαρυτική, GPR
	Γεωτεκτονικό	Ρήγματα και ζώνες ρηγμάτωσης	Η/Μ, γεωηλεκτρική, σεισμ. διάθλαση & ανάκλαση, μαγνητική, βαρυτική
ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ	Νερό	1) Εντοπισμός υδροφόρων στρωμάτων 2) Εντοπισμός διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού	Γεωηλεκτρική, Η/Μ, σεισμ. διάθλαση & ανάκλαση Γεωηλεκτρική, Η/Μ, ΜΤ
	Άμμοι-χάλικες	1)Άμμοι-χάλικες πάνω από άργιλο 2)Συγκεντρώσεις χαλίκων στον πυθμένα	Γεωηλεκτρική, Η/Μ Θαλάσσια σεισμ. ανάκλαση, Side Scan Sonar
	Πετρώματα	Μαγματικές διεισδύσεις σε ιζηματογενή πετρώματα	Μαγνητικά, γεωηλεκτρικά
	Άργιλοι	Αργιλικοί φακοί σε άμμους-χάλικες	Γεωηλεκτρικά, Η/Μ
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΟ	Παραμόρφωση εδάφους	Ελαστικές σταθερές	Σεισμ. διάθλαση, σεισμ. τομογραφία, μέθοδος επιφανειακών κυμάτων
	Εκσκαψιμότητα (Ripability)	Επιλογή μεθόδου εκσκαφής	Σεισμ. διάθλαση
	Διαβρωτικότητα εδαφών (corrosivity)	Εγκατάσταση αγωγών	Γεωηλεκτρική
ΘΑΜΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΑ	Καλώδια και αγωγοί	1) Στο υπέδαφος 2) Σε κατασκευές 3) Στον πυθμένα υδάτινου σώματος	Μαγνητική, Η/Μ, GPR GPR Προφίλ σεισμ. ανάκλασης
	Στοές ορυχείων	1) Φρεάτια 2) Βαθιές στοές	Μαγνητική, Η/Μ, GPR Μικροβαρυτομετρική, σεισμ. τομογραφία
	Αρχαιολογικοί στόχοι	Θεμελιώσεις παλαιών κτισμάτων	Μαγνητική, Η/Μ, γεωηλεκτρική, GPR

Πίνακας 2: Διάφοροι τύποι γεωφυσικών προβλημάτων και ενδεικνυόμενες λύσεις (Τσελέντης Α. et al)

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την πραγματοποίηση γεωφυσικής έρευνας στην κοιλάδα του Bisri στον Λίβανο για την εύρεση πιθανών αρχαιολογικών ευρημάτων που μπορεί να βρίσκονται θαμμένα στην περιοχή. Η κοιλάδα του Bisri στο σημείο της έρευνας έχει τέσσερεις κίονες από γρανίτη όπου πιστεύεται ότι αποτελούσαν τμήμα ενός Ρωμαϊκού ναού η συγκεκριμένη μέθοδος έρευνες επιλέχθηκε καθώς είναι μη-καταστροφική και αποτελεί επίσης οικονομικότερη λύση από την πραγματοποίηση εκσκαφών.

Με βάση τη φύση της έρευνας, αλλά λαμβάνοντας υπόψιν και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν οι εξής γεωφυσικές έρευνες:

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

Για κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν τα γεωφυσικά όργανα που διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων με την Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης αγωγιμότητας της εταιρίας GF Instruments CMD-2 με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m και το CMD-4 με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m. Για την έρευνα με τη χρήση του Γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκαν δύο θωρακισμένες κεραίες της MALA Geoscience με τις εξής διατάξεις: πηγή και δέκτης με κεραία 250 MHz και πηγή με κεραία 250 MHz και δέκτης με κεραία 500 MHz.

Στην συνέχεια η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με την χρήση του λογισμικού Surfer της Golden Software για τα δεδομένα των Ηλεκτρομαγνητικών και το λογισμικό REFLEXW της Sandmeier Scientific Software για τα δεδομένα από το Γεωραντάρ.

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων και σε συνδυασμό με την γεωλογική και γεωμορφολογική έρευνα που είχε πραγματοποιηθεί πρωτύτερα στην περιοχή έγινε μια ερμηνεία των δεδομένων. Αν όντως τελικά υπάρχου θαμμένες αρχαιολογικές κατασκευές στην περιοχή και οι κίονες που βρίσκονται στην επιφάνεια δεν είναι μόνοι τους.

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1 Κλασική Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος

2.1.1 Γενικά

Η Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (ΕΜ) αξιοποιεί την αντίδραση του εδάφους κατά την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία απαρτίζονται από εναλλασσόμενη ηλεκτρική ισχύ και μαγνητικότητα. Μπορούμε να δημιουργήσουμε πρωτεύοντα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διατρέχοντας εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα από ένα μικρό πηνίο, το οποίο αποτελείται από πολλές περιελίξεις σύρματος ή από έναν μεγάλο κύκλο αυτού. Η ανταπόκριση του εδάφους σε αυτά τα πεδία είναι η δημιουργία δευτερευόντων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία με την σειρά τους μπορούν να ανιχνευθούν από ένα πηνίο-δέκτη. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με αρκετές παραλλαγές τόσο επίγεια όσο και από αέρος, όπου και καθίσταται ικανή για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών:

- Εντοπισμός κοιτασμάτων
- Εντοπισμός ρύπων σε υπόγειους υδατικούς πόρους
- Εντοπισμός μετώπου υφαλμύρινσης
- Γεωλογική χαρτογράφηση
- Εντοπισμός θαμμένων αντικειμένων (αγωγοί, τοιχία, δεξαμενές, κλπ.)
- Αρχαιολογική έρευνα
- Εντοπισμός εγκοίλων (σπήλια, καρστικοποιημένες δομές, στοές, κλπ.)

Είναι από της ταχύτερες μεθόδους απόκτησης δεδομένων για το υπέδαφος χωρίς την ανάγκη ηλεκτροδίων σε αυτό. Το βάθος διασκόπησης είναι εξαρτώμενο από την συχνότητα ή την απόσταση του συστήματος πομπού-δέκτη.

2.1.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η Ηλεκτρική Αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα ηλεκτρικό ρεύμα διατρέχει ένα υλικό και μετριέται σε Siemens ή milliSiemens (mS). Ένα Siemens είναι το αντίστροφο ενός Ohm, ή ίσο με 1/Ohm. Οι παλαιότερες αναφορές χρησιμοποιούν την ισοδύναμη μονάδα «Mho», η οποία είναι απλά το «Ohm» αν γραφτεί ανάποδα. Είναι το θεωρητικό αντίστροφο της ειδικής αντίστασης και τα στοιχεία της αγωγιμότητας δεν είναι συχνά συγκρίσιμα με τις μετρήσεις αντίστασης που λαμβάνονται με τα συστήματα ηλεκτροδίων.

Συνήθως, όταν μιλούν οι αρχαιολόγοι για την ειδική αντίσταση ή την αντίσταση, αναφέρονται συνήθως σε μετρήσεις που συλλέγονται με ένα όργανο που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στο έδαφος. Όταν μιλάμε για την αγωγιμότητα, σχεδόν πάντα αναφερόμαστε στις μετρήσεις που λαμβάνονται με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (ΕΜ) επαγωγής. Οι χάρτες αγωγιμότητας τείνουν να μοιάσουν με τους χάρτες των δεδομένων αντίστασης και μπορούν να ερμηνευθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες

αρχές, αν και η ανάλυση της αγωγιμότητας είναι μερικές φορές φτωχότερη λόγω διαφορών στις βαθιές ευαισθησίες. Παρά το γεγονός ότι τα στοιχεία της Η/Μ επαγωγής συλλέγονται συχνά σε μια υψηλότερη πυκνότητα από τα δεδομένα αντίστασης, οι μετρήσεις της Η/Μ επαγωγής επηρεάζονται συνήθως από έναν μεγαλύτερο όγκο του εδάφους, θολώνοντας ενδεχομένως τα όρια ανωμαλίας. Όπως στην αντίσταση, η αγωγιμότητα είναι μια άριστη μέθοδος για τον εντοπισμό ανωμαλιών που είναι βασισμένες στις αντιθέσεις της επίγειας υγρασίας ή του τύπου υλικού. Τα μικρά κοιλώματα δεν ανιχνεύονται εύκολα, αλλά μεγαλύτερα κοιλώματα, τάφροι, και τα υπολείμματα των χωματουργικών έργων μπορούν να ανιχνευθούν πολύ αποτελεσματικά.

2.1.3 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η Μαγνητική Επιδεκτικότητα (MS) αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να μαγνητιστεί, συγκεκριμένα αυτή η ιδιότητα ποσοτικοποιεί την αντίδραση ενός υλικού στην παρουσία ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Μπορεί να μετρηθεί με την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου και είναι διαφορετική από τον εναπομένοντα ή μόνιμο μαγνητισμό, ο οποίος μετριέται και με την απουσία μαγνητικού πεδίου.

Μπορεί να μετρηθεί ανά μονάδα όγκου (κ) ή ως ομαλοποιημένη μάζα επιδεκτικότητας (χ), αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις δίνεται σαν αναλογία του αρχικού προς του δευτερεύον πεδίου. Όλα τα άτομα περιέχουν μαγνητικά πεδία, προερχόμενα από την εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων, έτσι ώστε όλες οι ουσίες αντιδρούν στα κοινά μαγνητικά πεδία, μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Ο φυσικός σχηματισμός των εδαφών περιλαμβάνει τη μετατροπή των αδύναμων μαγνητικών οξειδίων και των υδροξειδίων στις εντονότερες μαγνητικές μορφές, έτσι το χώμα είναι πολύ πιο μαγνητικό από τα στρώματα του υπεδάφους.

Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χώμα, έτσι ώστε τα χώματα που βρίσκονται σε αρχαιολογικούς χώρους να είναι αρκετά πιο μαγνητικά από αυτά που βρίσκονται στον περιβάλλοντα χώρο αυτών. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διεργασίες και επομένως τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους του χώματος. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει και η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χώματος αυξάνει συχνά την αντίθεση στις μετρήσεις επιδεκτικότητας επί των αρχαιολογικών χώρων και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα ανίχνευσης τεχνητών αντικειμένων.

2.1.4 Μέτρηση 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 με ένα μήκος κύματος 2π (360°). Όταν ένα τέτοιο κύμα καθυστερεί πίσω από άλλο, τα κύματα θεωρούνται ότι είναι εκτός φάσης. Η διαφορά φάσης μπορεί να αντιπροσωπευθεί με γωνία φάσης θ στον γωνιακό διαχωρισμό των κυματομορφών. Οι σχέσεις φάσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορούν να αναπαρασταθούν σε ειδικά διανυσματικά διαγράμματα, στα οποία το διανυσματικό μήκος είναι ανάλογο προς το πλάτος του πεδίου και η γωνία που μετριέται αντίθετα προς τη φορά των δεικτών του ρολογιού από το πρωτογενές διάνυσμα στο δευτερογενές διάνυσμα, αντιπροσωπεύει τη γωνιακή καθυστέρηση φάσης του δευτερογενούς πεδίου πίσω από το πρωτογενές.

Το πρωτογενές πεδίο P ταξιδεύει άμεσα από τον πομπό στο δέκτη πάνω από το έδαφος και δεν υφίσταται καμία τροποποίηση, εκτός από μια μικρή μείωση του πλάτους που προκαλείται με τη γεωμετρική διάδοση. Επίσης, το πρωτογενές πεδίο εισχωρεί στο έδαφος, μειώνεται πολύ το πλάτος του, αλλά παραμένει σε φάση με το επιφανειακό πρωτογενές. Το πρωτογενές πεδίο προκαλεί μια εναλλασσόμενη τάση σε έναν υπεδαφικό αγωγό με την ίδια συχνότητα με το πρωτογενές αλλά με μια καθυστέρηση φάσης π/2 (90°) σύμφωνα με τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες τους αγωγού προκαλούν μια περαιτέρω καθυστέρηση φάσης **φ**, όπως φαίνεται στον παρακάτω εξίσωση (2.1):

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{2\pi * f * L}{r}\right) \qquad (2.1)$$

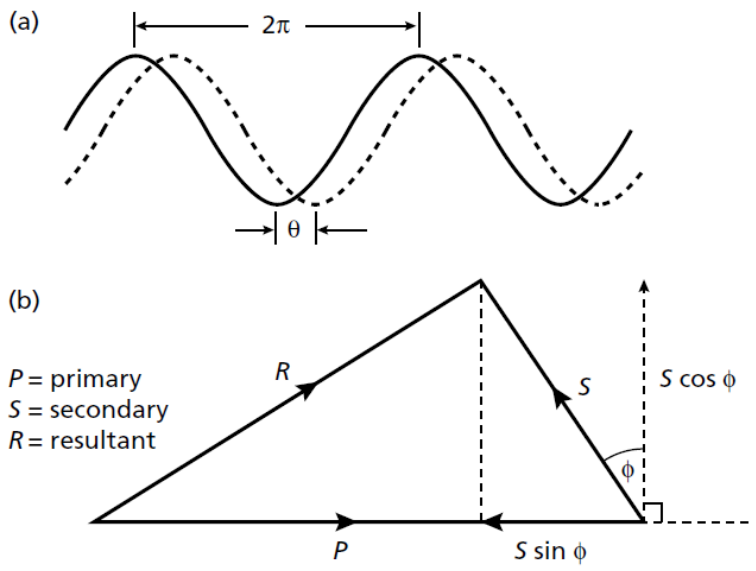
Όπου **f** η συχνότητα το Η/Μ πεδίου, **L** η αυτεπαγωγή του αγωγού (η τάση του να αντιτάξει μια αλλαγή στο εφαρμοζόμενο πεδίο) και **r** η αντίσταση του αγωγού.

Για έναν καλό αγωγό η καθυστέρηση φάσης **φ** θα προσεγγίζει το π/2, ενώ για έναν κακό αγωγό η καθυστέρηση φάσης **φ** θα είναι κοντά στο 0.

Η καθαρή επίδραση είναι το δευτερογενές πεδίο S που παράγεται από τον αγωγό καθυστερεί πίσω από το πρωτογενές σε μια γωνία φάσης (π/2 + φ). Το τελικό πεδίο R μπορεί τώρα να βρεθεί.

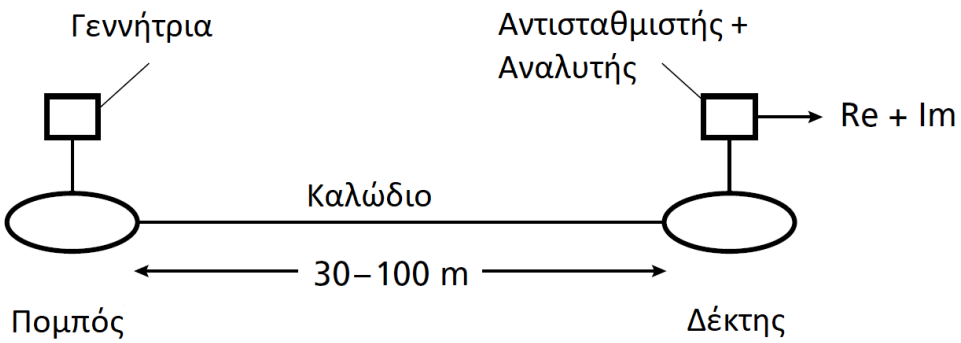
Η προβολή του S στον οριζόντιο (πρωτογενές πεδίο) άξονα είναι S*sinφ και είναι σε γωνία π, εκτός φάσης ως προς το P. Είναι γνωστή ως σε φάση (In-phase) ή πραγματική συνιστώσα του S. Η κάθετη προβολή είναι S*cosφ, π/2 εκτός φάσης ως προς το P, και είναι γνωστή ως εκτός φάσης ή φανταστική συνιστώσα.

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



Εικόνα 2.1: a) Η διαφορά φάσης ϑ μεταξύ δύο κυματομορφών. b) Διανυσματικό διάγραμμα που επεξηγεί την σχέση φάσης και πλάτους κύματος μεταξύ πρωτογενούς, δευτερογενούς και τελικού Η/Μ πεδίου. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002)

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



Εικόνα 2.2: Φορητό σύστημα Πομπού-Δέκτη Η/Μ πεδίου

Το σήμα εξόδου από το πηνίο δέκτης περνάει από έναν αντισταθμιστή και έναν αναλυτή. Το όργανο μετράει αρχικά στο «άγονο» έδαφος (χωρίς αγώγιμο σώμα) και ο αντισταθμιστής ρυθμίζεται στο να παράγει μηδενική έξοδο. Με τον τρόπο αυτό, το πρωταρχικό πεδίο αντισταθμίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποκρίνεται στη συνέχεια μόνο στα δευτερογενή πεδία. Συνεπώς, τέτοιες μέθοδοι ΕΜ αποκαλύπτουν την παρουσία σωμάτων ανώμαλης αγωγιμότητας, χωρίς παροχή πληροφορίας για τις απόλυτες τιμές αγωγιμότητας. Στην περιοχή έρευνας, ο αναλυτής χωρίζει το δευτερογενές πεδίο στις πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες που συνήθως παρουσιάζονται ως ποσοστό του πρωτογενούς πεδίου, του οποίου το μέγεθος αναμεταδίδεται μέσω του διασυνδέοντος 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 ένα πλήρωμα μόνο δύο ή τριών χειριστών. Η απόσταση και ο προσανατολισμός των πηνίων είναι κρίσιμα, δεδομένου ότι ένα μικρό ποσοστιαία λάθος στην απόσταση, μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση φάσης. Τα πηνία πρέπει επίσης να κρατηθούν ακριβώς οριζόντια και συνεπίπεδα, δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Η απαραίτητη ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε μεγάλες αποστάσεις και πάνω από ανώμαλη τοπογραφία.

2.1.5 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης

Είναι δυνατό με ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις να βρούμε την αγωγιμότητα του υπεδάφους. Το δευτερογενές ΕΜ πεδίο μετράται με ένα κινητό σύστημα πομπού – δέκτη μέσω μιας σύνθετης συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των πηνίων s, της συχνότητας λειτουργίας f και της αγωγιμότητας του υπεδάφους σ. Ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί ότι, αν το πηλίκο του s δια του βάθους διείσδυσης d, γνωστό ως «αριθμός επαγωγής», είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα, τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{H_s}{H_p} \approx \frac{i*\omega*\mu_0*\sigma*s^2}{4} \qquad (2.2)$$

Όπου, Hs και Hp είναι τα πλάτη του δευτερογενούς και πρωτογενούς ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αντίστοιχα, ω=2π*f, μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, και η παρουσία του i= $\sqrt{(-1)}$, δείχνει ότι μετράται η εκτός φάσης (φανταστική) συνιστώσα.

Έτσι, η αναλογία H_S/H_P είναι ανάλογη με την αγωγιμότητα του εδάφους **σ**. Δεδομένου ότι το d εξαρτάται από το γινόμενο σ*f, εκτίμηση της μέγιστης πιθανής τιμής του σ, μας επιτρέπει την επιλογή του f, έτσι ώστε η ανωτέρω προϋπόθεση για χαμηλό

«αριθμό επαγωγής» ικανοποιείται. Το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από το s και είναι ανεξάρτητο από την κατανομή της αγωγιμότητας του υπεδάφους.

Μετρήσεις που λαμβάνονται με χαμηλό «αριθμό επαγωγής», δίνουν την φαινόμενη αγωγιμότητα σ_α :

$$\sigma_\alpha = \frac{4}{\omega * \mu_0 * s^2} \frac{H_s}{H_p} \tag{2.3}$$

Η παραπάνω σχέση επιτρέπει την κατασκευή των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων που παρέχουν άμεση ανάγνωση της αγωγιμότητας εδάφους σε ένα προκαθορισμένο βάθος. Μια τέτοια εφαρμογή του πομπού – δέκτη τοποθετημένων σε έναν βραχίονα 3,7m μεταξύ τους, παρέχοντας ένα σταθερό βάθος διείσδυσης περίπου 6m, είναι το όργανο CMD4. Το όργανο αυτό επιτρέπει την γρήγορη εκτέλεση έρευνας κατά μήκος γραμμών σε βάθος χρήσιμο για τους μηχανικούς και για αρχαιολογικές έρευνες. Όταν ένα μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης απαιτείται, ένα άλλο σύστημα μέτρησης χρησιμοποιείται με τα πηνία πομπού και δέκτη σε μεταβαλλόμενη απόσταση ανάλογα με το βάθος. Μεταβάλλοντας την απόσταση, άρα και το βάθος, διενεργούμε ηλεκτρομαγνητική βυθοσκόπηση.

Εικόνα 2.3: Το σύστημα Η/Μ CMD4 (αριστερά) και το διαφορικό GPS Leica 1200 (δεξιά) που συνδυάζονται για τις ακριβείς θέσεις των μετρήσεων.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υπεδάφους είναι :

- Πετρολογία της περιοχής
- Παρουσία αργίλων που είναι πολύ αγώγιμοι
- Υγρασία
- Πορώδες
- Αγωγιμότητα του υπεδαφικού ύδατος
- Στρωματογραφία
- Πρόσκαιρες αλλαγές στην αγωγιμότητα του υπεδάφους, λόγω αλλαγής της υγρασίας, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της θερμοκρασίας
- Πρόσθεση ή αφαίρεση διαλελυμένων ρυπαντών

2.1.6 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων

Τα Η/Μ συστήματα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- **TEM** (Time-domain Electromagnetic Measurements): οι μετρήσεις γίνονται σε συνάρτηση του χρόνου.
- **FEM** (Frequency-domain Electromagnetic Measurements): οι μετρήσεις γίνονται σε συνάρτηση της συχνότητας.

Τα είδη διάφορα είδη συστημάτων μπορούν να χωριστούν σε σχέση με την πηγή:

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

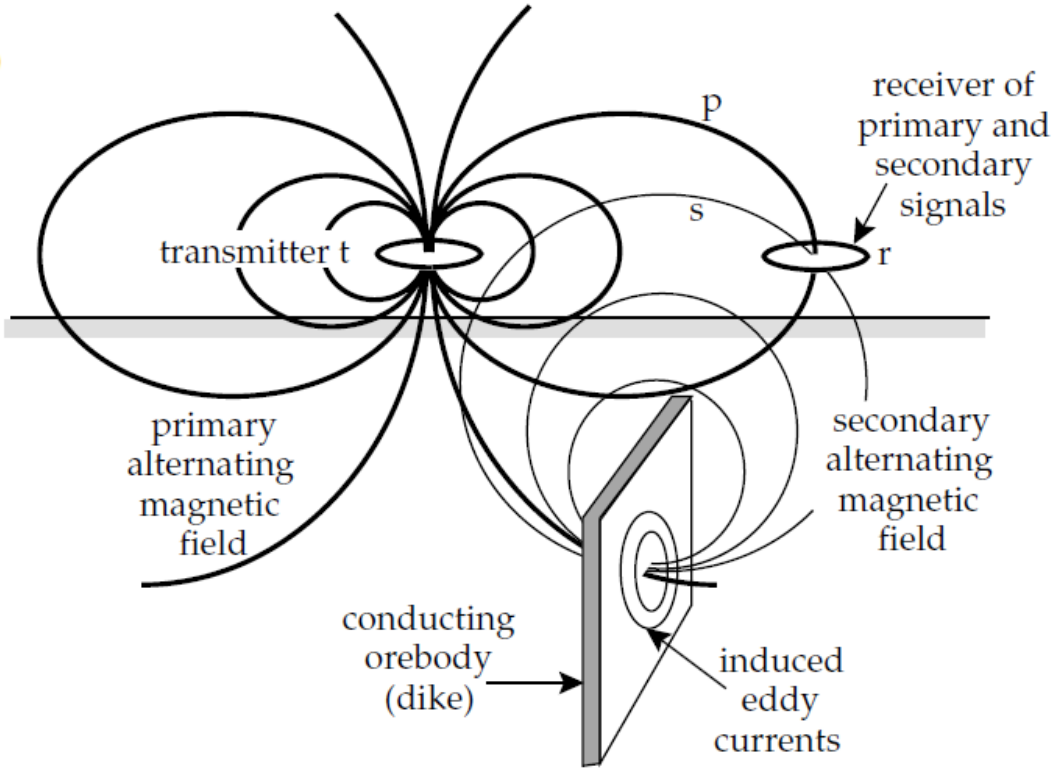
Τα επαγωγικά Η/Μ συστήματα (Ενεργητικά) διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Μικρού βρόγχου** : Είναι τα περισσότερα συστήματα που δουλεύουν στον χώρο των συχνοτήτων και κάποια στον χώρο του χρόνου. Η κύρια χρήση τους είναι οι περιβαλλοντικές εφαρμογές.
- **Μεγάλου βρόγχου** : (5m με 100m βρόχοι) Κυρίως συστήματα στον χώρο του χρόνου που χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα.
- **Επίπεδου κύματος** : (VLF, μαγνητοτελλουρικά) Χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα και στον εντοπισμό βαθέων γεωλογικών δομών.

Οι ηλεκτρομαγνητικές (ΕΜ) μέθοδοι έρευνας χρησιμοποιούν την απόκριση του εδάφους στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα αρχικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να παραχθούν με τη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός μικρού πηνίου φτιαγμένου με πολλές περιελίξεις καλωδίου ή μέσω ενός μεγάλου βρόγχου του καλωδίου. Η απόκριση του εδάφους είναι η παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα τελικά πεδία μπορούν να ανιχνευθούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που ρέουν σε ένα πηνίο δέκτη με τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όλοι οι σχηματισμοί με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μερικοί χώροι μεταλλεύματος που περιέχουν τα μεταλλεύματα που είναι μονωτές, μπορούν να παράγουν δευτερογενή πεδία εάν επαρκείς ποσότητες ενός βοηθητικού μεταλλεύματος με μια υψηλή αγωγιμότητα είναι παρούσες. Παραδείγματος χάριν, ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούνται πάνω από συγκεκριμένου σουλφιδίου μεταλλεύματα, οφείλονται στην παρουσία αγώγιμου ορυκτού πυρροτίτη που είναι διεσπαρμένο σε όλο τον όγκο του μεταλλεύματος.

Αν υπάρχει λοιπόν αγώγιμο υλικό στο υπέδαφος, με βάση την προηγούμενη συνοπτική θεωρητική ανάλυση, η μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος 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 το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς που διαφέρουν ως προς τη φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από τις σχετικές θέσεις και τους προσανατολισμούς των πηνίων) και το μέγεθος και η σχετική φάση του δευτερογενούς πεδίου μπορούν να υπολογιστούν. Η διαφορά στο τελικό πεδίο από το πρωτογενές δίνει πληροφορία για τη γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού στο υπέδαφος.

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



Εικόνα 2.4: Απεικόνιση πρωτογενών και δευτερευόντων πεδίων στη μέθοδο Η/Μ επαγωγής οριζόντιου βρόχου για έρευνα αβαθών μεταλλευμάτων. (William Lowrie. 2007)

2.1.7 Βάθος διείσδυσης

Το βάθος το οποίο διεισδύει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι άμεσα εξαρτώμενο από την συχνότητά του και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου στο οποίο διαδίδεται. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται με το πέρασμά τους μέσω των γεωλογικών σχηματισμών, συγκεκριμένα το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος. Το βάθος d στο οποίο διεισδύουν τα Η/Μ πεδία μπορεί να οριστεί ως το βάθος στο οποίο το πλάτος Ad του πεδίου μειώνεται κατά έναν συντελεστή e-1 (~37%) συγκρινόμενο με το πλάτος A0 που έχει στην επιφάνεια.

$$A_d=A_0*e^{(-1)} \qquad (2.4)$$

Στην περίπτωση αυτή,

$$d= 503.8/\sqrt{(\sigma*f)} \qquad (2.5)$$

Όπου το d είναι σε μέτρα, το σ η αγωγιμότητα του εδάφους σε S*m-1 και f η συχνότητα του πεδίου σε Hz.

Το βάθος διείσδυσης αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και την αγωγιμότητα του εδάφους. Επομένως για συγκεκριμένο βάθος έρευνα επιλέγουμε και την ανάλογη συχνότητα για οποιοδήποτε συγκεκριμένο μέσο.

Στην *Εξίσωση 2.6* φαίνεται ο εμπειρικός τύπος υπολογισμού ενός μέγιστου βάθους $\mathbf{z_e}$ στο οποίο μπορεί να βρίσκεται ένας αγωγός και να παράγει μια ανιχνεύσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία.

$$z_e = \frac{100}{\sqrt{\sigma * f}} \tag{2.6}$$

Η εξάρτηση του βάθος διείσδυσης από την συχνότητα του Η/Μ πεδίου είναι ο περιοριστικός παράγοντας της συγκεκριμένης μεθόδου. Κανονικά, οι πολύ χαμηλές συχνότητες είναι δύσκολες να παραχθούν και να μετρηθούν, επομένως το μέγιστο βάθος διείσδυσης είναι περίπου τα 500m. (Kearey P., Brooks M., Hill I. 2002). Αλλά ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούμε να ανιχνεύσουμε μόνο δομές μεγάλου όγκου ή/και αγωγιμότητας.

2.2 Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR)

Εικόνα 2.5: Σύστημα Γεωραντάρ κατά την λήψη δεδομένων.

2.2.1 Γενικά

Το Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR) είναι μια γεωφυσική μέθοδος η οποία μπορεί να δημιουργήσει συνεχή τομή υψηλής ανάλυσης που απεικονίζει χαρακτηριστικά του υπεδάφους με μη επεμβατικό τρόπο (χωρίς εκσκαφή, γεώτρηση κτλ). Οι πρώτες εφαρμογές του ήταν τη δεκαετία του 1960 σε σχέση με την ανάπτυξη ενός συστήματος διασκόπησης των πολικών καλυμμάτων πάγων με την ηχώ ραδιοκυμάτων. Μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1980 άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως σε τεχνικά έργα, διερεύνηση ρηχών υπεδαφικών δομών, αρχαιολογικές έρευνες και πολλές ακόμα εφαρμογές.

Οι μετρήσεις γίνονται κυρίως επίγεια και στόχος είναι η απεικόνιση των ανώτερων στρωμάτων, η παρουσία και συνέχεια στον χώρο στρωμάτων και άλλων χαρακτηριστικών και η εκτίμηση της θέσης θαμμένων αντικειμένων. Για διερεύνηση μεγάλων εκτάσεων έχουν γίνει και μετρήσεις από αεροπλάνα και δορυφόρους. (Τσελέντης Α. 2013)

2.2.2 Αρχές λειτουργίας

Το σύστημα του γεωραντάρ αποτελείται από μία γεννήτρια σήματος, κεραίες εκπομπής λήψης της ενέργειας και την ψηφιακή μονάδα ελέγχου καταγραφής. Το γεωραντάρ λειτουργεί εκπέμποντας παλμούς ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας (ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μικροκυμάτων) στην περιοχή συχνοτήτων από 10 MHz έως 1 GHz. Η ενέργεια αυτή εκπέμπεται από μια κεραία-πομπό στο έδαφος με τη μορφή λοβών. Εκεί η ενέργεια έρχεται σε επαφή με αντικείμενα ή διεπιφάνιες μεταξύ υλικών με διαφορετικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες και διηλεκτρικές σταθερές (π.χ. εναλλαγή στρωμάτων, θαμμένα αντικείμενα κ.α.). Μέρος της ενέργειας ανακλάται προς την επιφάνεια, ενώ η υπόλοιπη περνά μέχρι να συναντήσει την επόμενη αλλαγή ιδιοτήτων στο μέσο όπου διαδίδεται. Η ανομοιογένεια του υλικού στο οποίο διαδίδεται η ενέργεια είναι ο κύριος παράγωντας που ελέγχει τον αριθμό των ανακλάσεων που θα ληφθούν.

Η ενέργεια που ανακλάται προς την επιφάνεια λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη. Οι κεραίες του συστήματος μπορεί να είναι μονοστατικές (monostatic) ή διστατικές (bistatic). Στην πρώτη περίπτωση η κεραία χρησιμοποιείται ως πομπός και ως δέκτης. Στην δεύτερη περίπτωση υπάρχουν 2 οι περισσότερες κεραίες από τις οποίες η μια χρησιμοποιείται ως πομπός και οι υπόλοιπες ως δέκτες. Το σήμα που λαμβάνεται στην συνέχεια ενισχύεται και καταγράφεται σε σχέση με τον χρόνο διπλής διαδρομής από την ψηφιακή μονάδα ελέγχου. Για κάθε ανακλώμενο κύμα το σήμα που λαμβάνει το γεωραντάρ αλλάζει πολικότητα δύο φορές. Το γεωραντάρ μετακινείται στην επόμενη θέση κατά μήκος του προφίλ με το χέρι ή κάποιο όχημα που κινείται με σταθερή ταχύτητα περίπου 1-2 Km/h μέχρις ότου ολοκληρωθούν οι μετρήσεις. (Τσελέντης Α. 2013)

Σε γενικές γραμμές το βάθος διείσδυσης ενός γεωραντάρ μπορεί να αγγίξει τα 30 m σε υπέδαφος με χαμηλή αγωγιμότητα (ξερή άμμος ή γρανίτης), ενώ εδάφη υψηλής αγωγιμότητας (π.χ. άργιλοι) εξασθενούν ή απορροφούν την ενέργεια του κύματος μειώνοντας το βάθος διείσδυσης στο 1 m ή σε ορισμένες περιπτώσεις και λιγότερο. Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει το βάθος διείσδυσης και τη διακριτική ικανότητα (resolution) της καταγραφής είναι ο τύπος της κεραίας που χρησιμοποιείται. Κεραίες χαμηλών συχνοτήτων από 25-200 MHz είναι ικανές να καταγράψουν ενέργεια από βαθύτερες ανακλάσεις (10-35 m) αλλά έχουν αρκετά μικρότερη διακριτική ικανότητα.

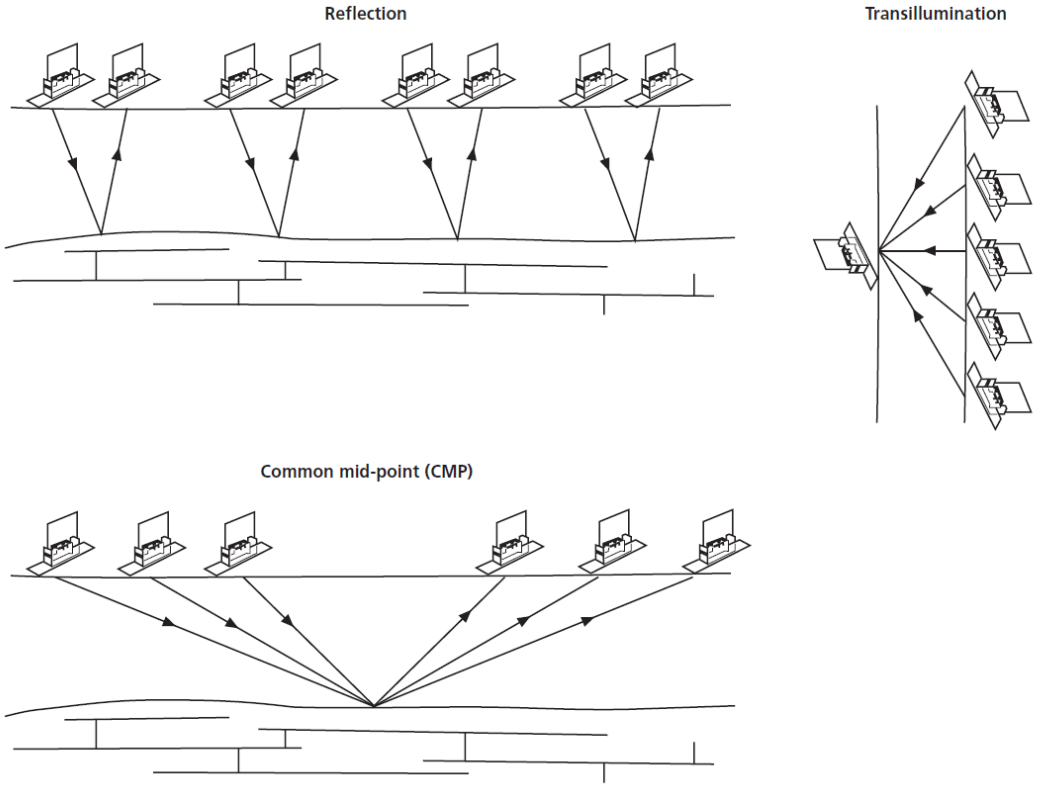
Με βάση τα παραπάνω, ο στόχος ο οποίος θέλουμε να εντοπίσουμε καθορίζει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά της διάταξης που θα επιλέξουμε. Οι κεραίες χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για την γεωλογική απεικόνιση και πιθανών αδρών χαρακτηριστικών (γεωλογικά στρώματα, μεγάλα καρστικά χαρακτηριστικά, ρήγματα κτλ.). Οι κεραίες υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για την έρευνα σε πολύ χαμηλά βάθη, κυρίως για την εύρεση μικρών ή μεγάλων αντικειμένων, εντοπισμό ατσάλινων δοκών, σωλήνων και καλωδίων στο σκυρόδεμα και άλλες πρακτικές εφαρμογές μηχανικού και όχι μόνο.

2.2.3 Λήψη δεδομένων

Υπάρχουν 3 τρόποι με τους οποίους πραγματοποιούνται οι έρευνες με το γεωραντάρ. Αρχικά είναι η τομή ανακλάσεων (reflection profiling) όπου η κεραία του πομπού και του/των δέκτη-ων σύρονται ταυτόχρονα στην επιφάνεια. Στόχος είναι η καταγραφή της ανακλώμενης ενέργειας από διεπιφάνιες που χωρίζουν στρώματα ή αντικείμενα με διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες και η δημιουργία μιας τομής ανάλογης με αυτής της σεισμικής ανάκλασης. Η μέθοδος αυτή συναντάται και ως Common Offset.

Άλλη μέθοδος είναι η διαγραφία ταχυτήτων (velocity sounding) όπου κεραία πομπού και δέκτη τοποθετούνται σε όλο και μεγαλύτερες αποστάσεις, ενώ το σημείο ημιαπόστασής τους (κοινό σημείο βάθους, CDP) παραμένει σταθερό.

Τέλος υπάρχει και η μέθοδος της τομογραφίας όπου οι κεραίες του πομπού και των δεκτών τοποθετούνται στις αντίθετες πλευρές της περιοχής ενδιαφέροντος και τα δεδομένα αναλύονται αντίστοιχα με αυτά της σεισμικής τομογραφίας. Αυτός ο τρόπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε υπόγεια για μελέτη του χώρου μεταξύ στοών ορυχείων είτε μεταξύ γεωτρήσεων. Παράλληλα με πιο υψίσυχνες κεραίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον μη-καταστροφικό έλεγχο (Non Destructive Testing, NDT) κατασκευών όπως τσιμεντένιων πυλώνων, γεφυρών κ.ο.κ.



Εικόνα 2.6: Οι τρεις βασικές διατάξεις έρευνας με Γεωραντάρ

2.2.4 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των μετρήσεων του γεωραντάρ, συνήθως ακολουθείται η επεξεργασία που χρησιμοποιείται στη σεισμική ανάκλαση, αλλά η κλίμακα του χρόνου διπλής διαδρομής είναι σε nanosecond (ns). Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η ενέργεια που εκπέμπεται είναι ηλεκτρομαγνητική στη φύση της και διέπεται από τους νόμους του Maxwell. Το μέγεθος και το σχήμα των λοβών διάδοσης των κυμάτων αυτών εξαρτώνται από τις διηλεκτρικές σταθερές του μέσου. Η σύγκριση των σημάτων του γεωραντάρ με τα σεισμογράμματα μπορεί να οδηγήσει σε λάθος υποθέσεις για την διάδοση της εκπεμπόμενης ενέργειας. Έτσι, ενώ η επεξεργασία των δεδομένων του γεωραντάρ μπορεί να γίνει με αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στη σεισμική ανάκλαση, τα ραδιοκύματα είναι περισσότερο ανάλογα με τα S-κύματα παρά με τα P. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας είναι τομές παρόμοιες με αυτές τις σεισμικής ανάκλασης.

2.2.5 Ερμηνεία των δεδομένων

Η ερμηνεία των δεδομένων που λαμβάνουμε από το γεωραντάρ μπορεί να χωριστεί σε 2 σκέλη:

- <u>Βασική Ερμηνεία</u>
  Οι καταγραφές του γεωραντάρ συνήθως αναλύονται με τον εντοπισμό των ανακλάσεων και περιθλάσεων στην τομή και εύρεση της θέσης τους στη γραμμή των μετρήσεων και παρατηρώντας τη συνέχεια τους στον χώρο (στην περίπτωση των ανακλάσεων). Χρησιμοποιώντας τον χρόνο διπλής διαδρομής και εκτιμώντας ή χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ταχύτητας των ραδιοκυμάτων, είναι δυνατή και η προσεγγιστική τοποθέτηση των χαρακτηριστικών στο βάθος. Για μια ταχύτητα που είναι σχετικά κοντά στην πραγματική είναι δυνατή η δημιουργία διαγραμμάτων που δείχνουν τη θέση του ανακλαστήρα με το βάθος και η δημιουργία διαγραμμάτων του πάχους του κάθε στρώματος.
  Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται στον έλεγχο της ασφαλτόστρωσης όπου τα στρώματα που υπάρχουν είναι γνωστά και ενδιαφέρουν τα πιθανά σημεία όπου υπάρχουν διαταραχές στη δομή. Ακόμα, χρησιμοποιείται και σε έλεγχο τεχνικών έργων, όπως κατασκευές από σκυρόδεμα, αναχώματα κ.ο.κ. Επιπλέον, από τη χαρτογράφηση της συνέχειας των ανακλάσεων στον χώρο είναι δυνατή η παρακολούθηση της συνέχειας γεωλογικών στρωμάτων και τα χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών. Επιπρόσθετα, με μέθοδο αντίστοιχη με αυτήν της σεισμικής ανάκλασης εντοπίζονται στην τομή του γεωραντάρ ζώνες με κοινό χαρακτήρα (facies) και που αυτός διακόπτεται. Τα σχετικά πλάτη των ανακλάσεων δίνουν μια ποιοτική εκτίμηση της σχετικής εξασθένησης των στρωμάτων.

- <u>Ποσοτική</u>
  Ο καθορισμός του βάθος των χαρακτηριστικών των μετρήσεων εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία είναι γνωστή η ταχύτητα των ραδιοκυμάτων στον σχηματισμό. Σε αυτό βοηθά η λήψη δεδομένων με τις τεχνικές κοινού σημείου βάθους (CDP) και βαθοσκόπηση ευρείας γωνία ανάκλασης και διάθλασης (wide angle Reflection and Refraction sounding, WARR) για τον καθορισμό τους. Στη συνέχεια, η γνώση της ταχύτητας των ραδιοκυμάτων και ο καθορισμός των σχετικών διηλεκτρικών σταθερών μπορεί να βοηθήσει στην ερμηνεία και στο διαχωρισμό των χαρακτηριστικών στα οποία παρατηρούνται στις μετρήσεις.
  Επιπλέον, μια πιο ολοκληρωμένη ποσοτική ανάλυση για τον χαρακτηρισμό της περιοχής μέτρησης και τα λιθολογικά χαρακτηρίστηκα της μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ανάλυση πλατών των κυματομορφών, καθορισμό του συντελεστή ανάκλασης (reflection coefficient), καθώς και με υπολογισμό των μεταβολών του ε_r. Όπου ε_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του πετρώματος.

2.2.6 Διηλεκτρικές Ιδιότητες των υλικών (γεωλογικών σχηματισμών)

Η διηλεκτρική συμπεριφορά ενός γεωλογικού υλικού περιγράφεται με βάση τη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά (complex permittivity ε*) και τη μιγαδική αγωγιμότητα (complex conductivity σ*).

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά ε_r κυμαίνεται από 1 για τον αέρα έως ~81 για το νερό, αν και για την πλειονότητα των γεωλογικών υλικών κυμαίνεται μεταξύ 3 – 30. Οι ταχύτητες έχουν μεγαλύτερο εύρος και κυμαίνονται από 0.06-0.175 m/ns. Οι τιμές για τα γεωλογικά υλικά στην πράξη μπορεί να μεταβάλλονται λόγω ύπαρξης νερό στους πόρους των υλικών και της ανομοιογένειάς τους. Για τον αέρα η ταχύτητα των ραδιοκυμάτων είναι 299.8 mm/ns.

Υλικά με περισσότερη υγρασία έχουν υψηλότερη ε_r, συνεπώς καλύτερη κατακόρυφη διακριτική ικανότητα και μικρότερο βάθος διείσδυσης σε σχέση με τα αντίστοιχα άνυδρα. Τέλος, η σχετική διηλεκτρική σταθερά έχει δειχθεί ότι σχετίζεται με το πορώδες φ, ενώ έχουν προταθεί εμπειρικοί τύποι που τη σχετίζουν και με τον κορεσμό του πετρώματος. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) βλέπουμε ενδεικτικές ηλεκτρικές ιδιότητες διαφόρων γεωλογικών υλικών.

Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά	Αγωγιμότητα (mS/m)	Ταχύτητα (m/ns)	Εξασθένιση (dB/m)
Αέρας	1	0	0.3	0
Απιονισμένο νερό	80	0.01	0.033	0.008
Νερό	80	0.5	0.033	0.1
Θαλασσινό νερό	80	30,000	0.01	1,000
Ξηρή άμμος	3-5	0.01	0.15	0.01
Κορεσμένη άμμος	20-30	0.1-1.0	0.06	0.03-0.3
Ασβεστόλιθος	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Άργιλος	4-40	2-1,000	0.06	1-300
Γρανίτης	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Αλάτι (άνυδρο)	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Πάγος	3-4	0.01	0.16	0.01

Πίνακας 3: Ηλεκτρικές ιδιότητες για γεωλογικά υλικά

3. Εφαρμογές της Γεωφυσικής στην Αρχαιολογική Έρευνα

3.1 Γεωφυσική έρευνα στην κοιλάδα του Θορικού.

(Apostolopoulos G., Kapetanios A., 2021)

3.1.1 Εισαγωγή

Η Λαυρεωτική χερσόνησος αποτελεί το νότιο-ανατολικότερο τμήμα της Αττικής και για χιλιετίες οι άνθρωποι εξήγαγαν μεταλλεύματα από την περιοχή. Αρχαιολογικές έρευνες έχουν δείξει ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα στην περιοχή υπάρχει τουλάχιστον από την 4η χιλιετία π.Χ., όπου γινόταν εξαγωγή αργύρου. Η δραστηριότητα αυτή συνεχίστηκε μέχρι και τον 20ο αιώνα. Ο κάθε Δήμος της Λαυρεωτικής αποτελούταν από διάσπαρτα κτίσματα ή συμπλέγματα που συνδύαζαν παραγωγή και κατοικία. Ο Θορικός ήταν ένας από τους δέκα Δήμους της Λαυρεωτικής και εκτείνονταν πάνω από ένα πολύπλοκο σύμπλεγμα κοιλάδων με αλλούβια. Οι αρχαιολογικοί χώροι που έχουν βρεθεί είναι διάσπαρτοι στις πλαγιές και τους λόφους των περιβαλλόντων κοιλάδων. Δεν αποκλείεται όμως η πιθανότητα να υπάρχουν αρχαιολογικοί χώροι οι οποίοι δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμα και βρίσκονται εντός των αλλούβιων.

Στην ίδια κοιλάδα είναι ορατή η Διπλή Δωρική Στοά (ΔΔΣ) η οποία είναι πλαισιωμένη από τα θεμέλια πιθανόν τριών ακόμη κτιρίων, τα οποία είναι ορατά ανά περιόδους στην κοίτη του ποταμού. Τα κτήρια αυτά είναι υποψήφια για ένα σημαντικό συλλογικό κέντρο, την Θορική Αγορά. Το κέντρο και έναν λιμάνι από τα τέλη της Εποχής του Χαλκού δεν έχουν ανακαλυφθεί ακόμα. Η πιθανότητα να βρίσκονται κάτω από τα αλλούβια αξίζει να ερευνηθεί. Έτσι ο πρωταρχικός στόχος της γεωφυσικής μελέτης είναι ο έλεγχος της υπόθεσης της «Αγοράς». Ο 2ος στόχος της έρευνας είναι ο εντοπισμός του αρχαίου λιμανιού. Τέλος, προαπαιτούμενο για τους αρχαιολόγους είναι και η γνώστη του τρόπου εξέλιξης του τοπίου του Θορικού από την αρχαιότητα έως σήμερα. Συμπερασματικά αποφασίστηκε ότι η έρευνα στην κοιλάδα του Θορικού θα έχει μια πολύπλευρη γεωφυσική προσέγγιση όπου θα περιλαμβάνει τόσο την περιοχή ενδιαφέροντος όσο και την ευρύτερη περιοχή του Θορικού.

3.1.2 Γεωλογία της περιοχής

Σε γενικές γραμμές η Κοιλάδα του Θορικού αποτελείται από 3 γεωλογικές ενότητες:

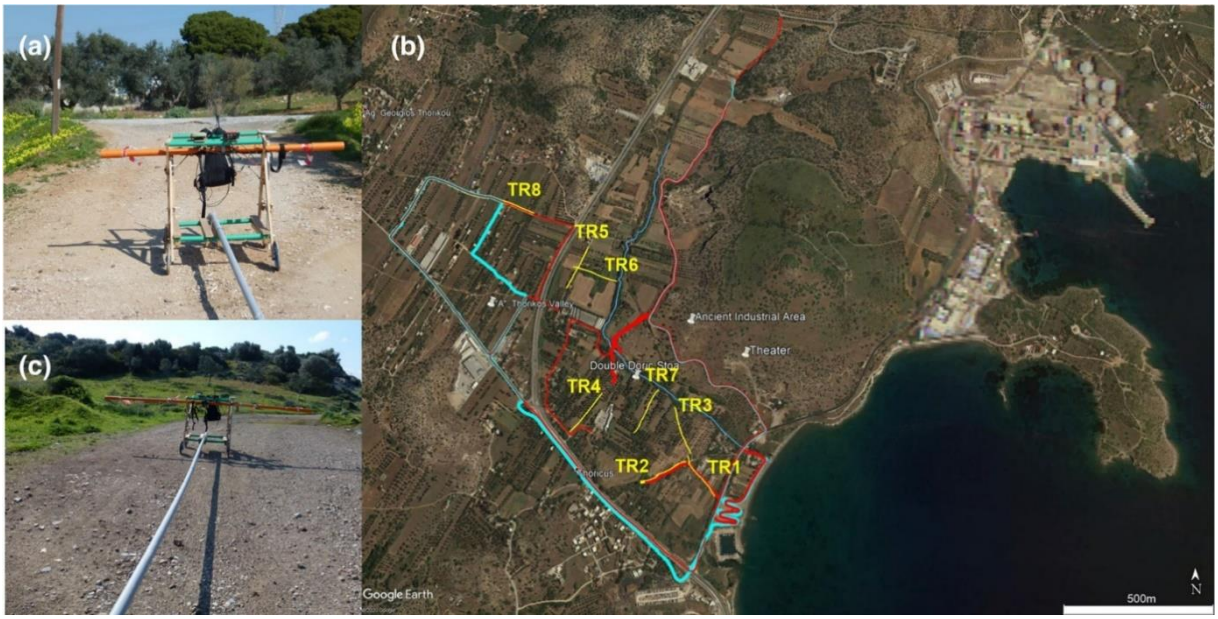
- Την κάτω αυτόχθονη γεωτεκτονική ενότητα που αποτελείται από ασβεστόλιθους, δολομίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους σε εναλλασσόμενες αλληλουχίες που χρονολογούνται στην Τριασική-Ιουρασική εποχή.
- Η αλλόχθονη επώθηση ενότητα φυλλιτών (φυλλιτικό κάλυμμα) σε ζώνες με παρεμβολές μαρμάρων, χαλαζιτών και μεταμορφωμένων βασικών πυριγενών πετρωμάτων.

- Μια σειρά Νεογενών και Τεταρτογενών βρίσκονται υπερκείμενα των προηγούμενων στρωμάτων. Τα Νεογενή αποτελούνται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, είναι λιμναίες αποθέσεις και σχετίζονται με περιβάλλον γλυκών και υφάλμυρων νερών. Οι Τεταρτογενής σχηματισμοί αποτελούνται από αλλούβιες αποθέσεις, υλικό καταπτώσεων, ψαμμίτες και ποτάμιες αποθέσεις.

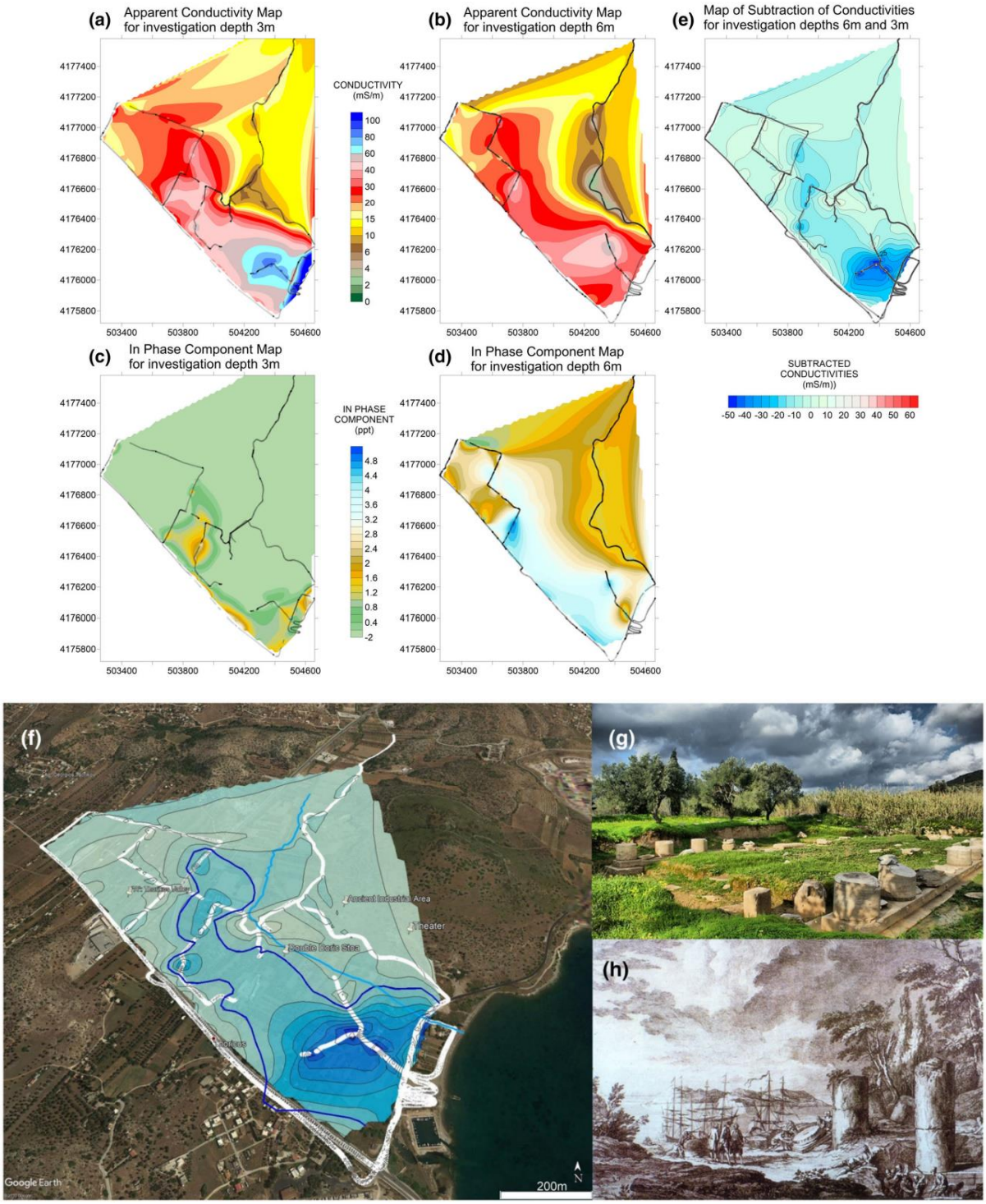
3.1.3 Γεωφυσική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή της Κοιλάδας του Θορικού

Η γεωφυσική έρευνα έγινε τόσο τοπικά όσο και στην ευρύτερη περιοχή, όπου αποτελούταν από την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM), Γεωραντάρ και Τομογραφία Ηλεκτρικής Αντίστασης. Η γεωμορφολογία της περιοχής έχει αλλάξει από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα σαν αποτέλεσμα της απόθεσης ιζημάτων από μια υπάρχουσα κοίτη στην περιοχή και από πλημμυρικά φαινόμενα. Αρχικά για τον εντοπισμό των ιζημάτων της ευρύτερης περιοχής και την σύστασή τους επιλέχθηκε μια αναγνωριστική γεωφυσική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή με βάθος μέχρι τα 6 m χρησιμοποιώντας την Η/Μ μέθοδο

Το όργανο μέτρησης Η/Μ ήταν στερεωμένο σε ένα αυτοσχέδιο καρότσι κατασκευασμένο από ξύλο και πλαστικό το οποίο το ρυμουλκούσε ένα όχημα, κατά αυτόν τον τρόπο καλύφθηκε μια μεγάλη περιοχή σε λίγο χρόνο. Η Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος πραγματοποιήθηκε για δύο βάθη διασκόπησης, τα 3 m και τα 6 m, ακολουθήθηκε από Τομογραφίες Ηλεκτρικής Αντίστασης με σκοπό της αναγνώρισης των χαρακτηριστικών του εδάφους σε βάθος μεγαλύτερο των 6 m για τον προσδιορισμό της γενικής στρωματογραφίας. Η τομές αυτές είχαν μήκος 175 m η κάθε μια με απόσταση ηλεκτροδίων τα 5 m και πραγματοποιήθηκαν με την διάταξη pole-dipole, εξαίρεση αποτελεί τη τομή TR8 που έγινε με την διάταξη Schlumberger και μήκος τομής τα 355 m.



Εικόνα 3.1: a), b) το καρότσι που χρησιμοποιήθηκε για την Ηλεκτρομαγνητική έρευνα της ευρύτερης περιοχή. c) Οι Η/Μ μετρήσει φαίνονται με κόκκινο χρώμα (CMD 2) και κυανό (CMD4) όπου πραγματοποιήθηκαν σε δρόμους της περιοχής σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι ηλεκτρικές τομές.

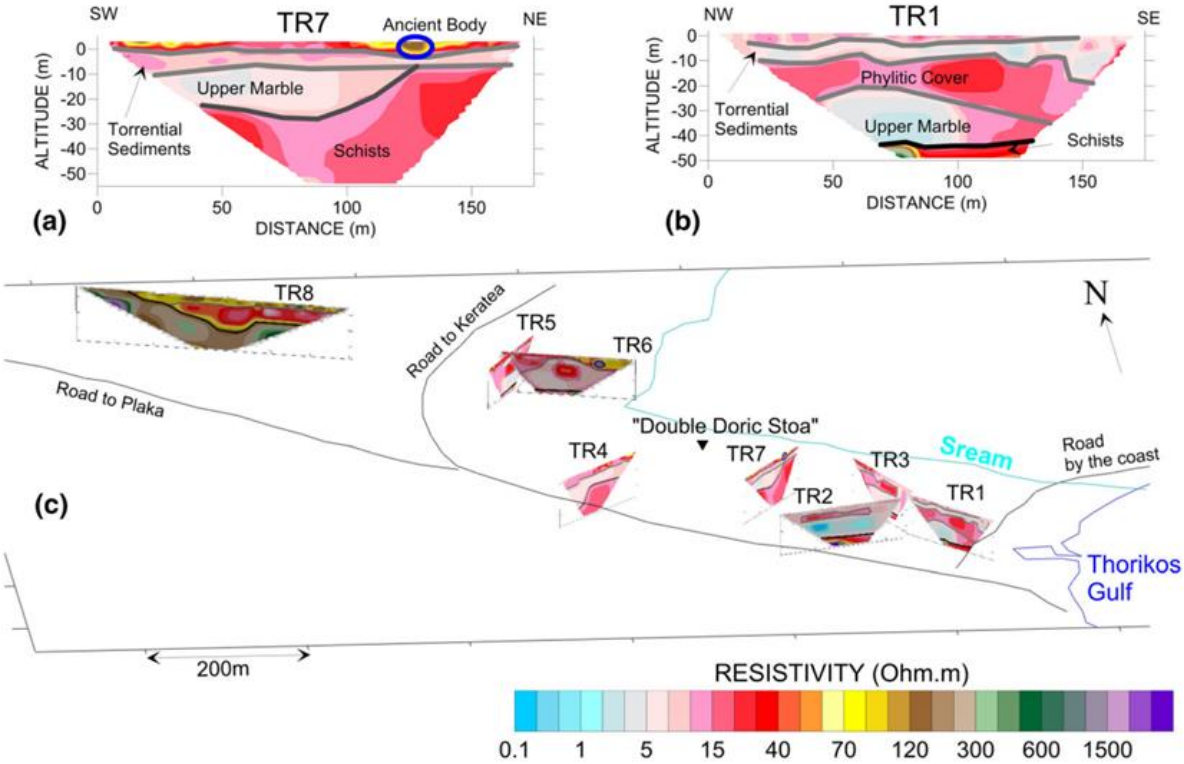


Εικόνα 3.2: a) έως d) Οι χάρτες φαινόμενης αγωγιμότητας και της Σε Φάση συνηστώσας για την ευρύτερη περιοχή. e) ο χάρτης που προέκυψε από την αφαίρεση των χαρτών αγωγιμότητας για βάθη 6m και 3m. f) ο χάρτης που προέκυψε από την αφαίρεση των χαρτών αγωγιμότητας για βάθη 6m και 3m αν το υπερθέσουμε στο χάρτη του Google Earth.g) Η Διπλή Δωρική Στοά που δείχνει ότι η σημερινή στάθμη του εδάφους είναι αρκετά ψηλότερη από την αρχαία. h) Η λιθογραφία του ναού της Δήμητρας και της Περσεφόνης (Διπλή Δωρική Στοά) του J.D. Le Roy του 1758.

3.1.4 Γεωφυσική έρευνα σε τοπικό επίπεδο

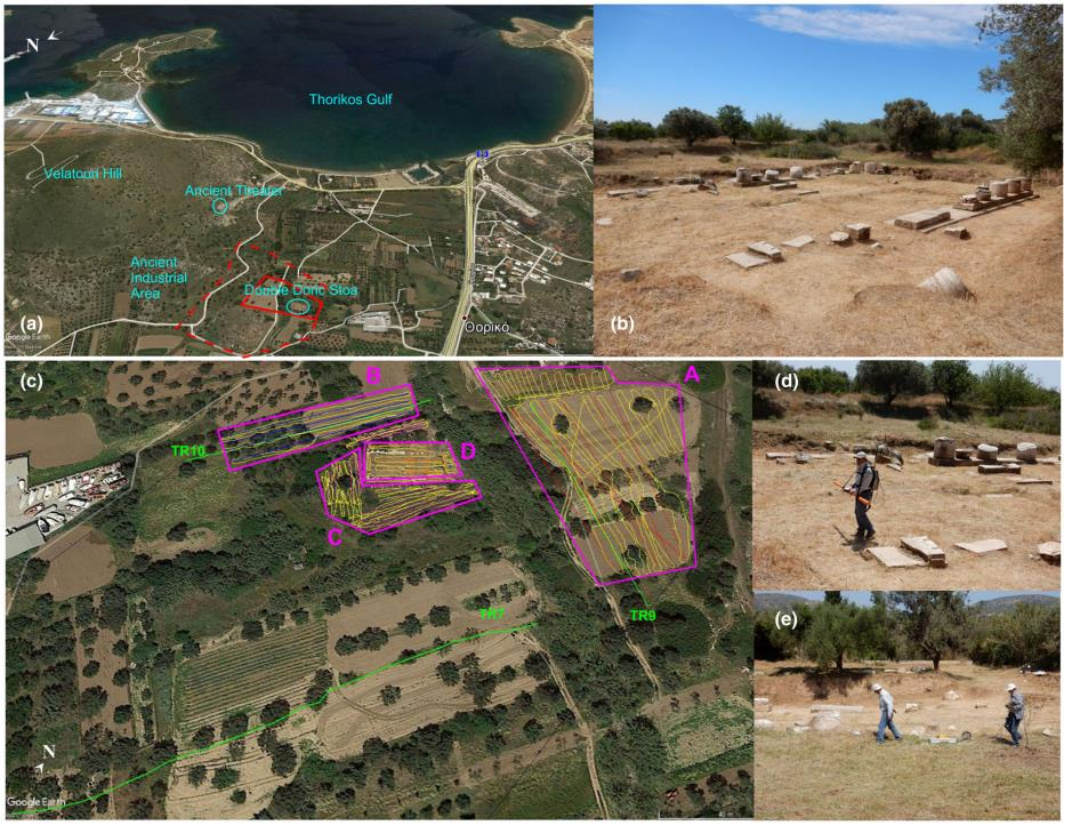
Τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στην ευρύτερη περιοχή έδειξαν ότι η Δωρική Στοά βρίσκεται στη βραχώδη χερσόνησο. Έτσι αποφασίστηκε η διεξαγωγή έρευνας στην εγγύτητα της «Αγοράς» με σκοπό την ταυτοποίηση πιθανής προέκτασης αρχαιολογικών χαρακτηριστικών που θάφτηκαν από την έντονη ιζηματογένεση στην περιοχή.

Έγιναν Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις για βάθη διασκόπησης το 1.5 m και τα 3 m, έγιναν μετρήσεις με γεωραντάρ και τέλος έγιναν δύο Ηλεκτρικές Τομές με διάταξη dipole-dipole, αξιοποιήθηκε επίσης η τομή TR7 από την έρευνα της ευρύτερης περιοχής. Σε δεύτερο χρόνο και αφού είχαν προκύψει τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών, πραγματοποιήθηκαν και τρισδιάστατες μετρήσεις με το Γεωραντάρ.



Εικόνα 3.3: a) και b) οι τομές ηλεκτρικής αντίστασης των προφίλ TR7 και TR1 μαζί με την γεωλογική ερμηνεία. c) Τομές ηλεκτρικής αντίστασης σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο που προέκυψε απο την χρήση όλων των τομών που έγιναν στην ευρύτερη περιοχή.

Εικόνα 3.4: Χάρτης της Κοιλάδας του Θορικού, η μπλε γραμμή αναπαριστά τα όρια της περιοχές με υψηλή αγωγιμότητα (πιθανή παλαιοακτή) βασισμένο στον χάρτη που προέκυψε από την αφαίρεση των δύο χαρτών της αγωγιμότητας (για 6m και 3m).



Εικόνα 3.5: a) Εικόνα του Google Earth από την Κοιλάδα του Θορικού που δείχνει τις διάφορες περιοχές ενδιαφέροντος. Η περιοχή που περιγράφεται ως αγορά είναι περιεγραμμένη με την συνεχόμενη κόκκινη γραμμή. b) Φωτογραφία της Διπλής Δωρικής Στοάς. c) Χάρτης του Google Earth που δείχνει τις υπό-περιοχές που έγιναν Η/Μ μετρήσεις (κίτρινες γραμμές), τα προφίλ του γεωραντάρ (μπλε, μωβ και καφέ γραμμές) και οι Τομές Ηλεκτρικής Αντίστασης (πράσινες γραμμές) όλα για την τοπική έρευνα. d) και e) φωτογραφίες που πάρθηκαν κατά την λήψη των δεδομένων με τα Ηλεκτρομαγνητικά και το γεωραντάρ αντίστοιχα.

3.1.5 Συμπεράσματα

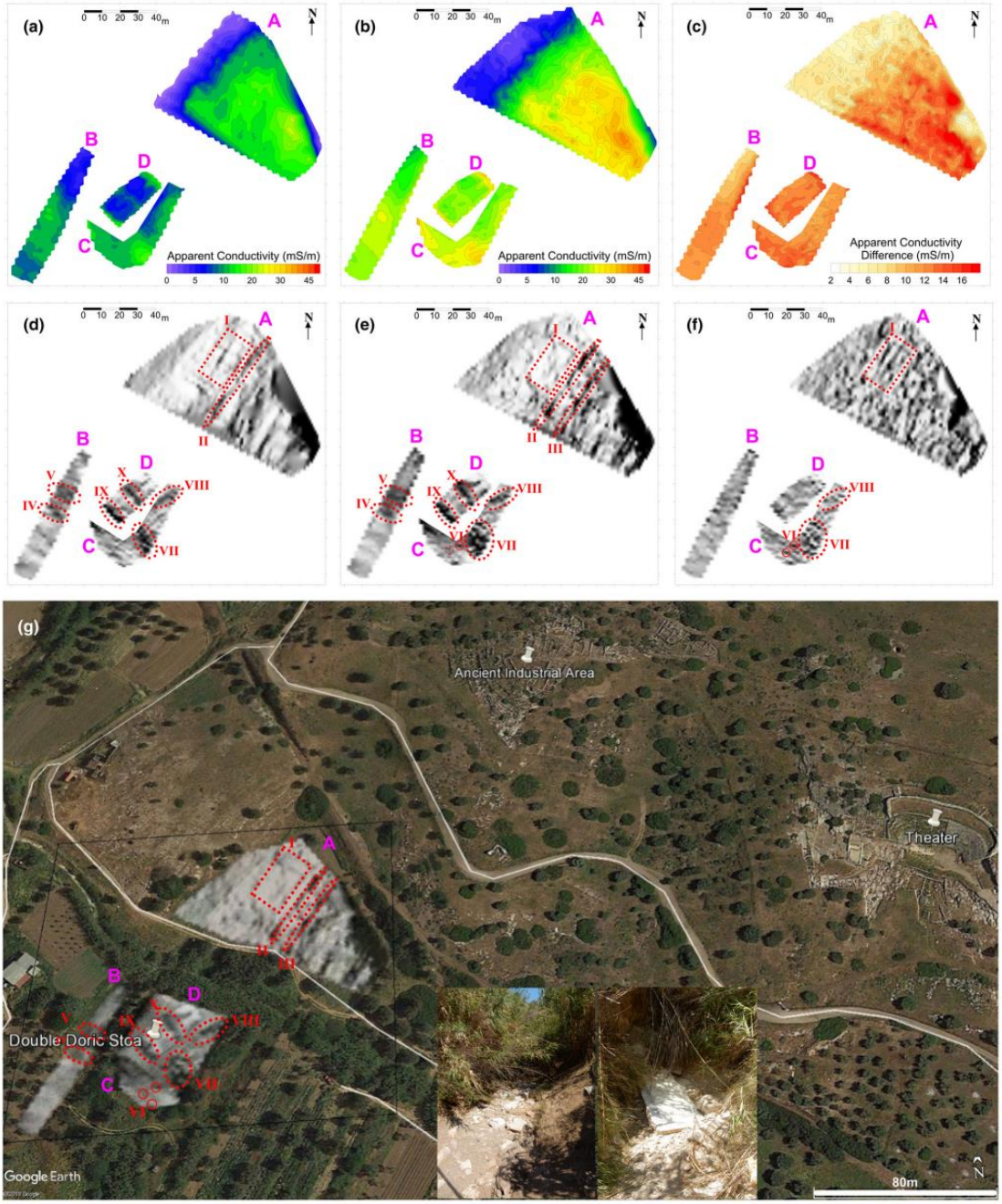
Η χρήση της Ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου έδωσε γρήγορα τα στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή. Με τις μετρήσεις αυτές δημιουργήθηκαν χάρτες αγωγιμότητας της ευρύτερης περιοχής, όπου δείχνουν την κατανομή χαλαρών ιζημάτων. Η κατανομή αυτή είναι ικανή να αποκαλύψει την πορεία αρχαίων ποταμών και την απόθεση ιζημάτων από πλημμυρικά φαινόμενα. Βρέθηκε επίσης διείσδυση θαλασσινού νερού με την ανάλυση δεδομένων από γεωτρήσεις, επιβεβαιώνοντας έτσι τα αποτελέσματα των Ηλεκτρομαγνητικών.

Η αξιοποίηση των Ηλεκτρικών τομών σε τοποθεσίες που υποδείχτηκαν από την Ηλεκτρομαγνητική έρευνα αποκάλυψε την γενική στρωματογραφία της κοιλάδας, έδωσαν την σε βάθος ανάλυση χαλαρών ιζημάτων και του βραχώδους υπόβαθρου.

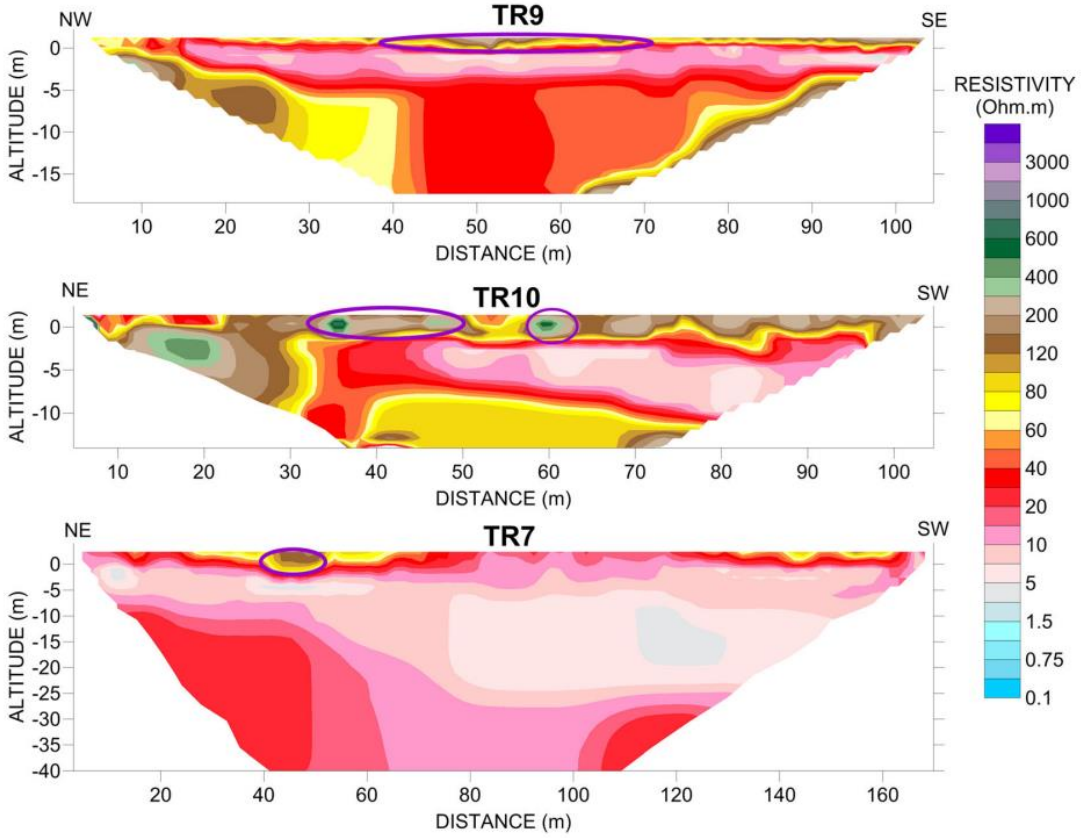
Η Η/Μ μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε αποκαλύπτει την κατανομή των ιζημάτων και πώς επηρεάζεται από την πιθανή παρουσία θαμμένων ανθρωπογενών δομών αντί να «βλέπει» απευθείας της δομές αυτές. Εν συνεχεία, το γεωραντάρ μπορεί να επιβεβαιώσει την παρουσία (ή απουσία) τέτοιων δομών. Οι Ηλεκτρικές τομές μπορούν να εντοπίσουν στο υπέδαφος θέσεις όπου υπάρχουν ανθρωπογενείς κατασκευές.

Τα αποτελέσματα της έρευνας παρείχαν κατευθυντικές απαντήσεις στα αρχαιολογικά ερωτήματα. Αρχικά η υπόθεση της Αγοράς τεκμηριώνεται περαιτέρω και σε καμία περίπτωση δεν διαψεύδεται. Ως αποτέλεσμα έχουν ταυτοποιηθεί περιοχές για μελλοντικές εκσκαφές. Έπειτα, έχουν περιγραφεί με ικανοποιητική λεπτομέρεια τα όρια της παλαιοακτής και άλλες σημαντικές πτυχές του παλαιοπεριβάλλοντος τα οποία καταδεικνύουν το ορθότερο σημείο για εύρεση αποδείξεων για το αρχαίο λιμάνι.

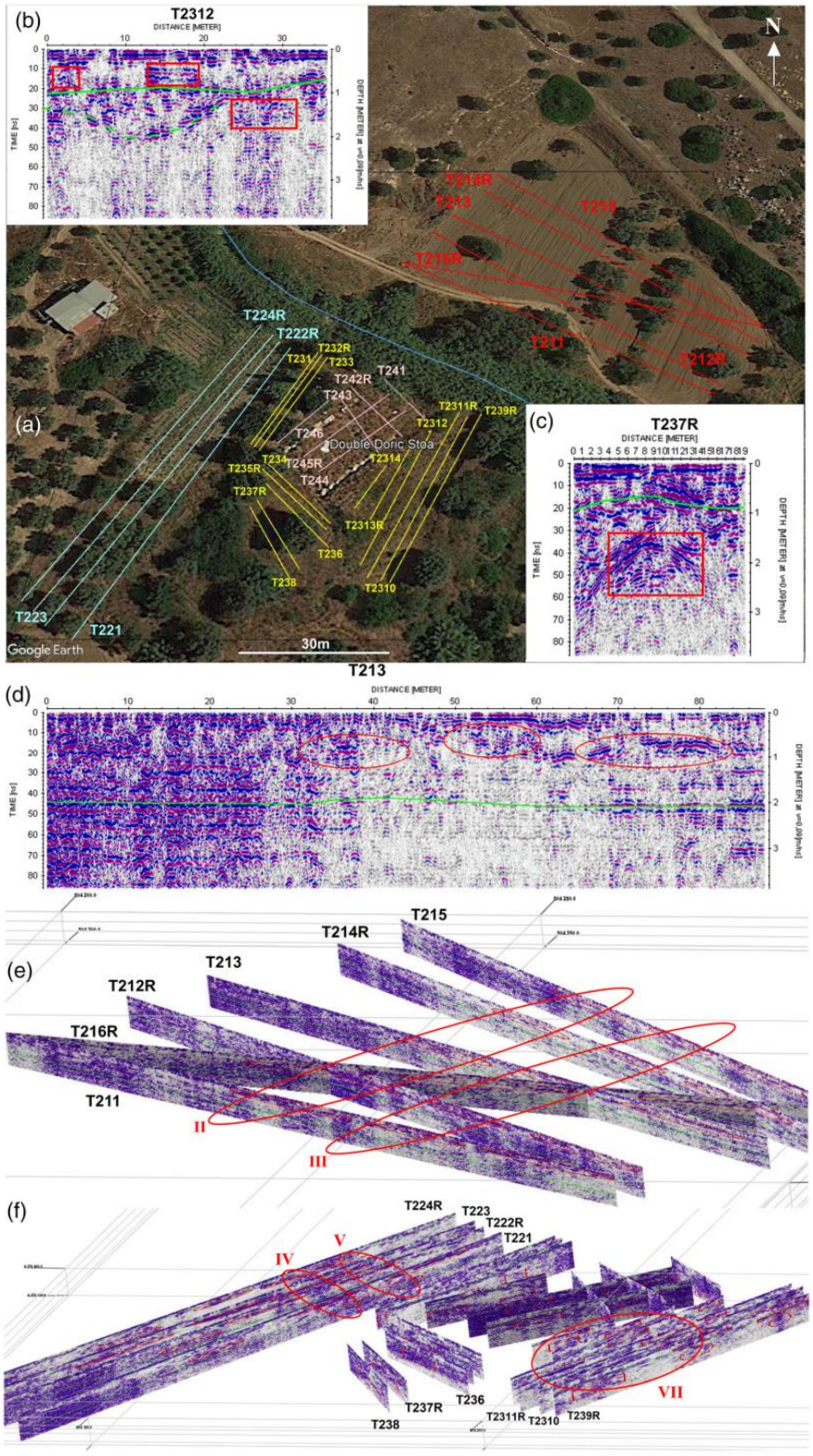
Με μία ευρύτερη έννοια η γεωφυσική έρευνα στον Θορικό μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο πρότυπο για αντίστοιχες μελέτες περίπτωσης στο μέλλον εκμεταλλεύοντας τον σχεδιασμό της παρούσας μελέτης.



Εικόνα 3.6: Οι χάρτες φαινόμενης αγωγιμότητας (α και b) και σκιασμένου ανάγλυφου (d και e) για βάθη 1.5m και 3m. c) Ο χάρτης που προέκυψε με την αφαίρεση των χαρτών α) και b), ο χάρτης αυτός δημιουργήθηκε για να δώσει έμφαση στην επιρροή που έχουν επιφανειακά στοιχεία, αυτά φαίνονται και πιο καθαρά στον χάρτη σκιασμένου ανάγλυφου που προέκυψε (f). g) Τα γραμμικά και τοπικά στοιχεία που προέκυψαν από τους χάρτες σκιασμένου ανάγλυφου φαίνονται με υπέρθεση στο Google Earth μαζί με το σύμβολο που έχει δοθεί στο κάθε στοιχείο. Στην ενσωματωμένη εικόνα διακρίνονται ευμεγέθη κομμάτια μαρμάρου και πέτρα που βρίσκονται στον πυθμένα της κοίτης η οποία διατρέχει την περιοχή έρευνας.



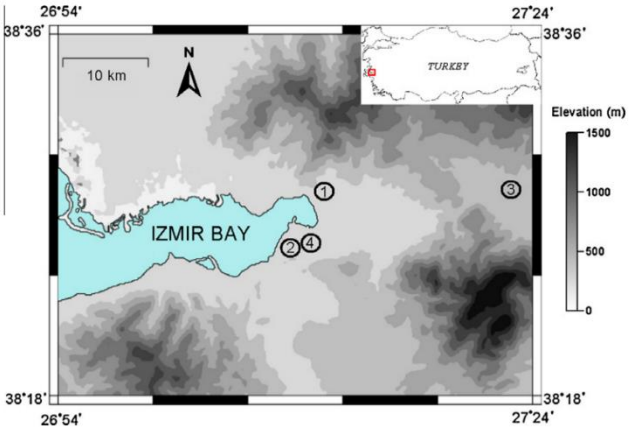
Εικόνα 3.7: Οι Τομές Ηλεκτρικής Αντίστασης που πραγματοποιήθηκαν γύρω από την Δωρική Στοά, οι υψηλής αγωγιμότητας περιοχές σκιαγραφούνται με μωβ χρώμα και αναπαριστούν πιθανές ανθρωπογενείς δομές.



Εικόνα 3.8: a) Διαγώνια, από άνω δεξιά έως κάτω αριστερά: Τα προφίλ του γεωραντάρ γύρω από την Δωρική Στοά, (b-d) Τομές του γεωραντάρ από τα προφίλ T2312, T237R και T213 με τα τοπικά χαρακτηριστικά (τοπικές ανακλάσεις και διαθλάσεις) να έχουν σκιαγραφηθεί με κόκκινες γραμμές, οι διεπαφές των στρωμάτων με πράσινο. (e,f) Όλες οι τομές του γεωραντάρ σε τρισδιάστατη απεικόνιση, φαίνεται το ΒΑ και κεντρικό μέρος της έρευνας (πάνω) και το Β και κεντρικό (κάτω). Τα χαρακτηριστικά που ανοιχνεύθηκαν με τα Ηλεκτρομαγνητικά ανταποκρίνονται σε αυτά που ανιχνεύθηκαν με το γεωραντάρ.

3.2 Γεωφυσική έρευνα στην περιοχή της Σμύρνης στην Τουρκία.

(Göktuğ Drahor Mahmut, 2011)



Εικόνα 3.9: Χάρτης με τις τοποθεσίες όπου πραγματοποιήθηκαν οι έρευνες.1) Το παλιό Höyük της Σμύρνης, 2) Η Ρωμαϊκή Αγορά της Σμύρνης, 3) Κοιμητήριο της Εποχής του Χαλκού του Ulucak Höyük, 4) Ο ναό του Αγίου Βουκόλου.

3.2.1 Εισαγωγή

Η συνεχιζόμενη αστικοποίηση και ειδικά η αστική εξάπλωση φυσικά επηρεάζουν και τους αρχαιολογικούς χώρους και τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς στις αστικές περιοχές και στα περίχωρά τους. Τα υπόγεια ύδατα, οι νέες κατασκευές πάνω από αρχαιολογικούς χώρους και οι εκσκαφές λόγω είναι από τις δραστηριότητες που επηρεάζουν τους αρχαιολογικούς χώρους. Προβλήματα και αρνητικές επιρροές σε αυτούς τους χώρους πρέπει να ερευνηθούν με μη-καταστροφικές τεχνικές. Μια από αυτές τις τεχνικές είναι η γεωφυσική, η οποία διαθέτει πληθώρα εφαρμογών στην έρευνα αρχαιοτήτων καθώς και στην εκτίμηση της κατάστασής τους.

Στην συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από 4 διαφορετικές μελέτες περίπτωσης που πραγματοποιήθηκαν στο κέντρο της περιοχής της Σμύρνης και στα περίχωρά της. Οι περιοχές έρευνας χαρακτηρίζονται από αρχαιολογικά και πολιτιστικά ευρήματα όπου έχουν καταπατηθεί από την αστικοποίηση. Για τον καθορισμό των πολύπλοκων ιδιοτήτων του υπεδάφους αξιοποιήθηκαν το Γεωραντάρ, Τομογραφίες Ηλεκτρικής Αντίστασης, Μαγνητικά, Ηλεκτρομαγνητικά πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF) και μέθοδος Φυσικού Δυναμικού. Αξιοποιήθηκαν επίσης τεχνικές δισδιάστατης και τρισδιάστατης απεικόνισης οι οποίες έδωσαν ερμηνεύσιμες εικόνες των στόχων, απεικονίσεις τομών συγκεκριμένου βάθους και τρισδιάστατες ογκομετρικές αναπαραστάσεις.

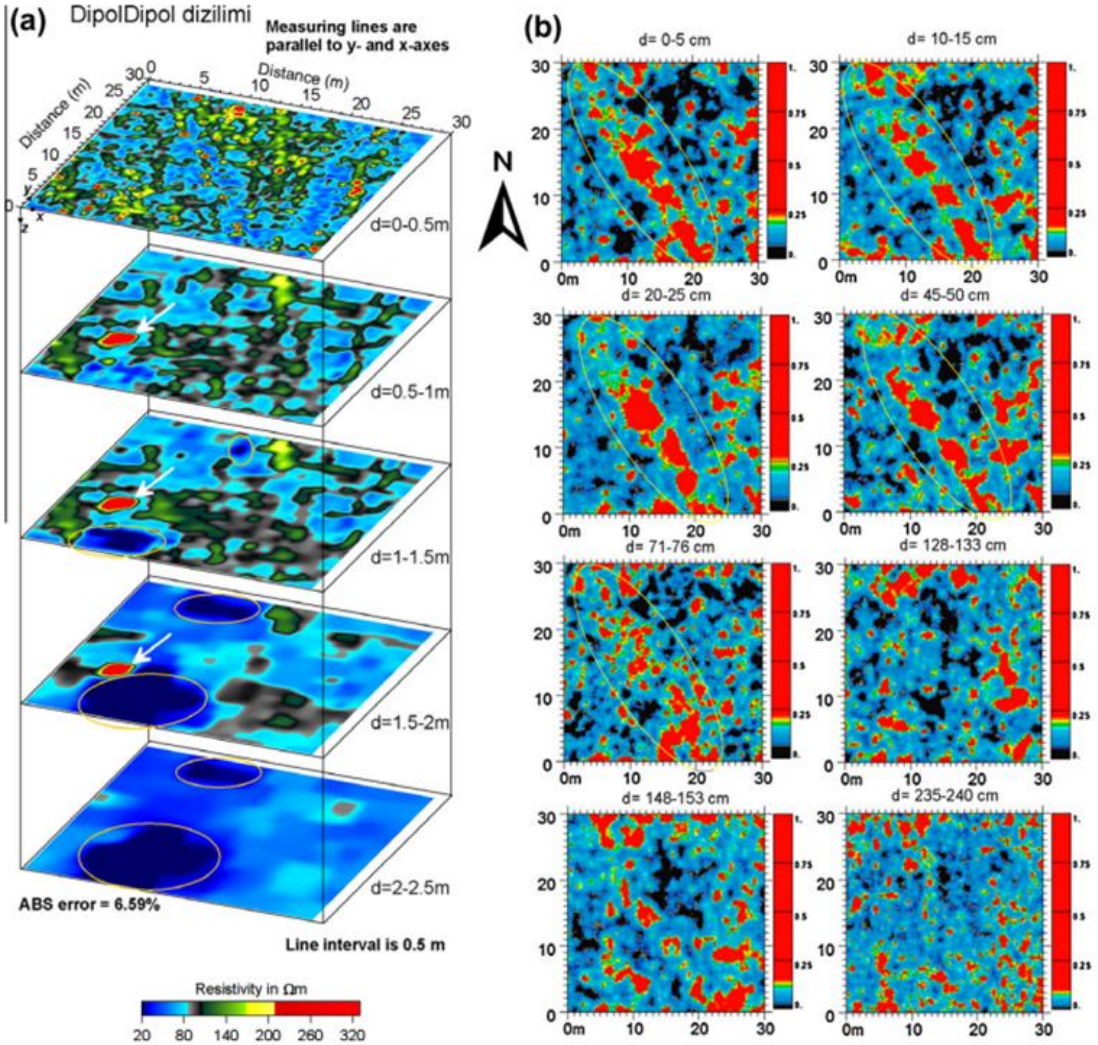
3.2.2 Οι τοποθεσίες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν έρευνες.

- **Το παλιό Höyük της Σμύρνης**
- **Η Ρωμαϊκή Αγορά της Σμύρνης**
- **Κοιμητήριο του Ulucak Höyük**
- **Εκκλησία του Αγίου Βουκόλου**

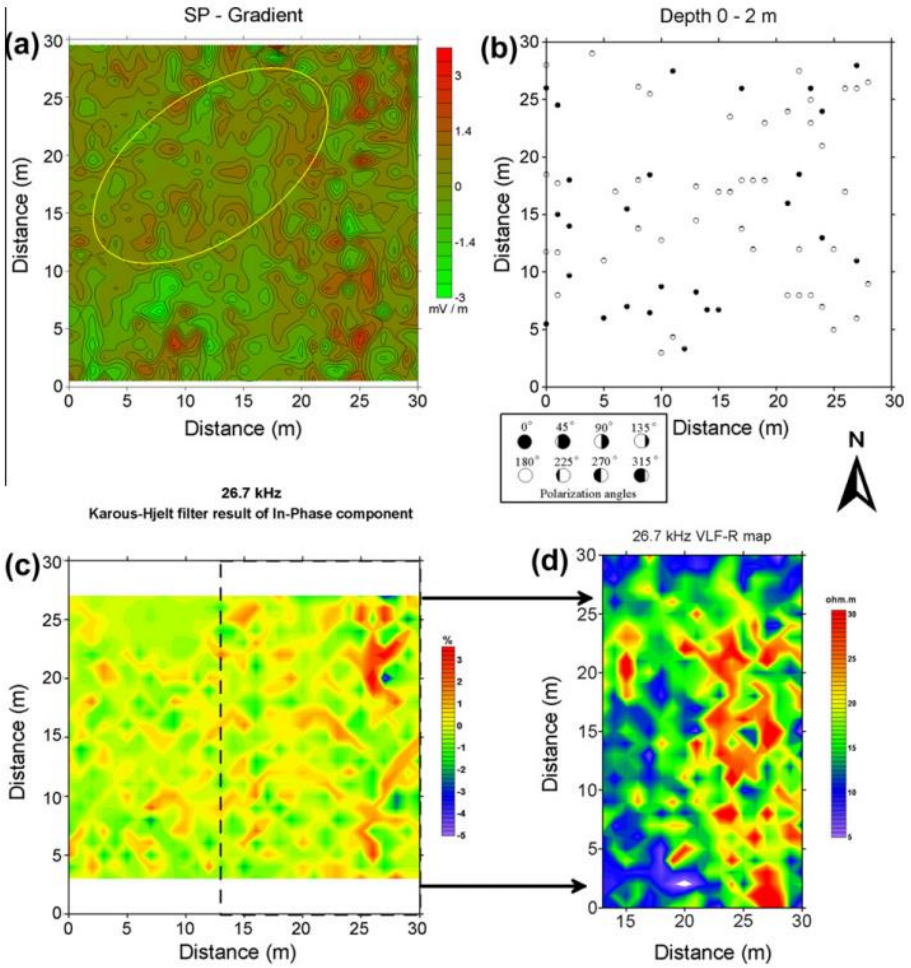
3.2.4 Λήψη, επεξεργασία και αποτελέσματα των δεδομένων από τις περιοχές έρευνας

Το παλιό Höyük της Σμύρνης

Για την έρευνα του Höyük χρησιμοποιήθηκαν 6 διαφορετικές τεχνικές γεωφυσικής έρευνας. Αυτές ήταν η Μαγνητική Γκραντιομετρία, Τομογραφία Ηλεκτρικής Αντίστασης, Γεωραντάρ, Ηλεκτρομαγνητικά VLF και VLF-R καθώς και η μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού. Στους χάρτες παρατηρήθηκαν ανωμαλίες όπου ήταν ίδιες και για τις 6 μεθόδους, επομένως η χρήση παραπάνω της μιας μεθόδου έρχονται συνήθως να επιβεβαιώσουν την αρχική και στην συνέχεια τις επόμενες. Ανάλογα τις συνθήκες βέβαια υπάρχουν δομές που δεν φαίνονται σε μια ή περισσότερες μεθόδους, επομένως η χρήση μόνο μιας μπορεί να μην επαρκεί.



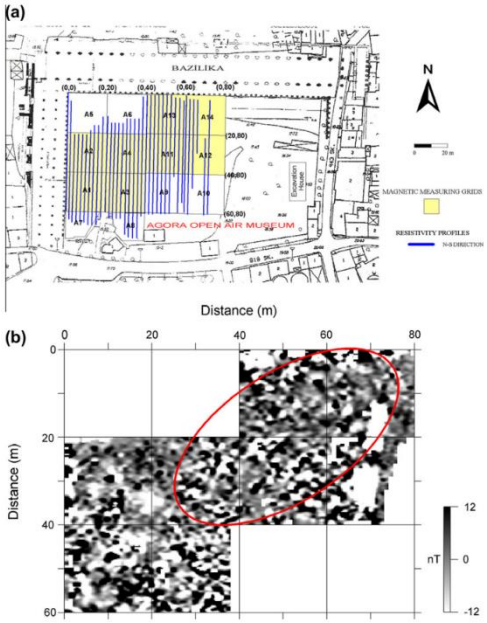
Εικόνα 3.10 Οι τομές βάθους που αποκτήθηκαν στο παλιό Höyük της Σμύρνης από a) ERT και b) GPR.



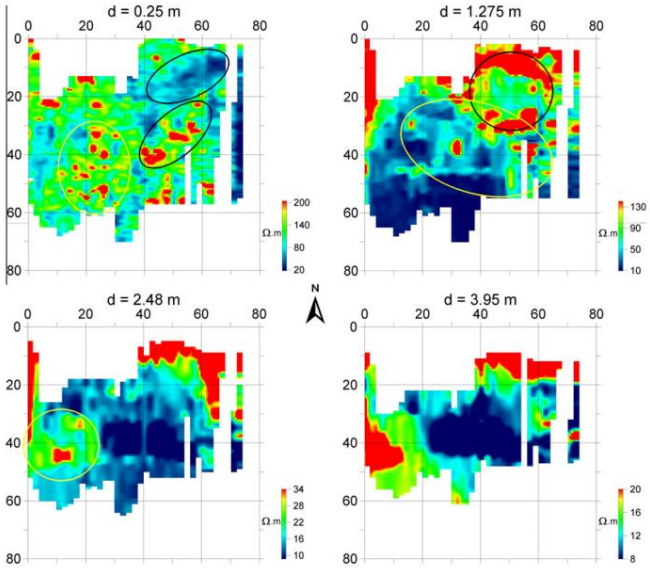
Εικόνα 3.11: a) ο χάρτης Φυσικού Δυναμικού, b) ο χάρτης των προβαλλόμενων κέντρο πόλωσης του Φυσικού Δυναμικού, c) ο χάρτης των H/M VLF, d) ο χάρτης VLF-R.

Ρωμαϊκή Αγορά της Σμύρνης

Πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές μελέτες Μαγνητικών και Τομογραφία Ηλεκτρικής Αντίστασης δύο διαστάσεων εντός της Αγοράς της Σμύρνης. Τα δεδομένα των Μαγνητικών λήφθηκαν με το διαφορικό μαγνητόμετρο FM36 fluxgate,στην συνέχεια διορθώθηκαν με βάση ένα σημείο-βάση για την μείωση ανεπιθύμητων παρεμβολών. Συνολικά τα μαγνητικά δεδομένα παρήγαγαν μια εικόνα περίπου 3.2 στρεμμάτων. Τα επεξεργασμένα δεδομένα έδειξαν μια ομάδα από ανωμαλίες με κατεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ, οι ανωμαλίες αυτές πιθανότατα προκλήθηκαν από την ύπαρξη αρχαιολογικών δομών. Στην συνέχεια, στόχος της Τομογραφίας Ηλεκτρικής Αντίστασης ήταν ο προσδιορισμός της έκτασης και του βάθος των αρχαιολογικών δομών, συνεπώς πραγματοποιήθηκε μια δισδιάστατη μελέτη.



Εικόνα 3.13: a) Κάτοψη της Αγοράς τις Σμύρνης όπου φαίνονται οι γεωφυσικές έρευνες που έγιναν. b) Εικόνα του γκραντιόμετρου από την περιοχή έρευνας μετά την επεξεργασία με low-pass φίλτρο.



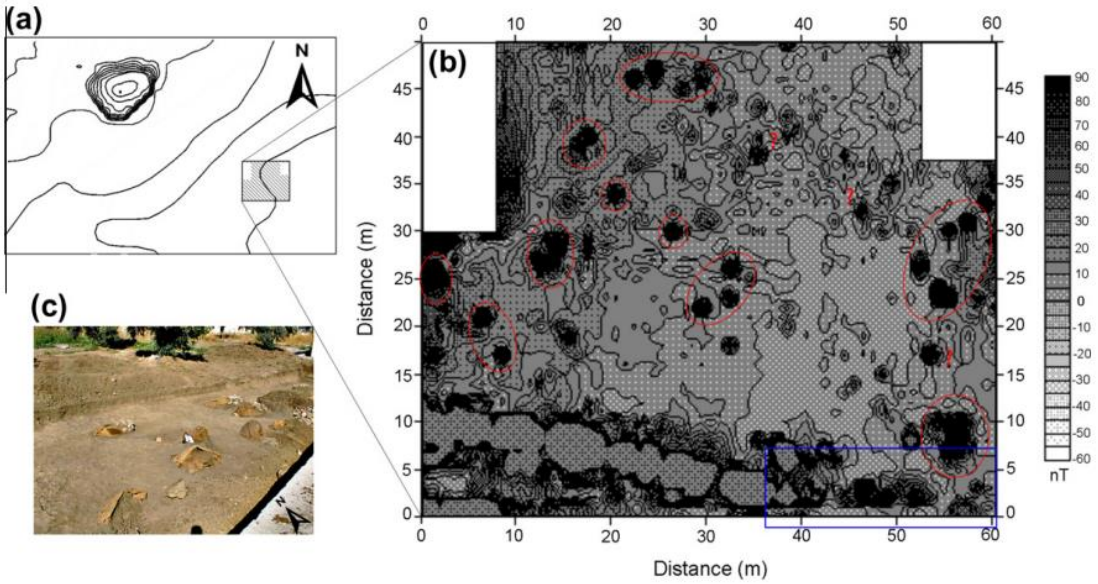
Εικόνα 3.12: Οι τομές βάθους ERT.

Το κοιμητήριο του Ulucak höyük

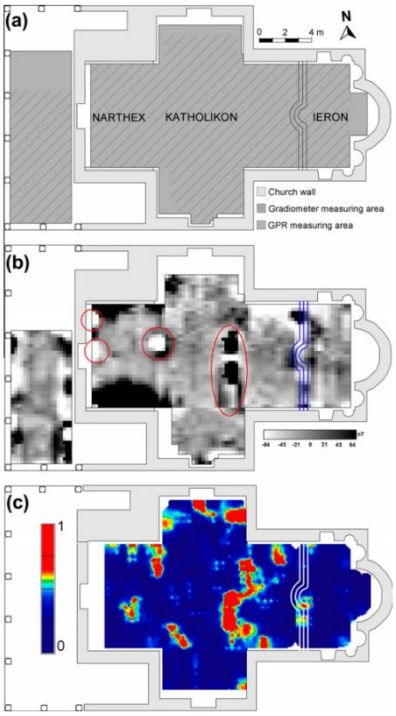
Πραγματοποιήθηκε έρευνα με το διαφορικό μαγνητόμετρο στην περιοχή του κοιμητηρίου με σκοπό την εξερεύνηση των τάφων σε πίθους, οι τάφοι αυτοί είναι κατασκευασμένοι με δοχεία από τερακότα. Όταν αργιλικά ορυκτά εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες δημιουργείται θερμική μαγνήτιση λόγω του μαγνητικού πεδίου της γης. Οι πίθοι που βρίσκονται στην περιοχή αποτελούνται από τέτοια υλικά, επομένως έχουν μαγνητικές ιδιότητες. Το πρόβλημα με την συγκεκριμένοι περιοχή είναι η ύπαρξη μεταλλικών απορριμμάτων στην περιοχή τα οποία γεμίζουν με θόρυβο τις μετρήσεις μας.

Ναός του Αγίου Βουκόλου

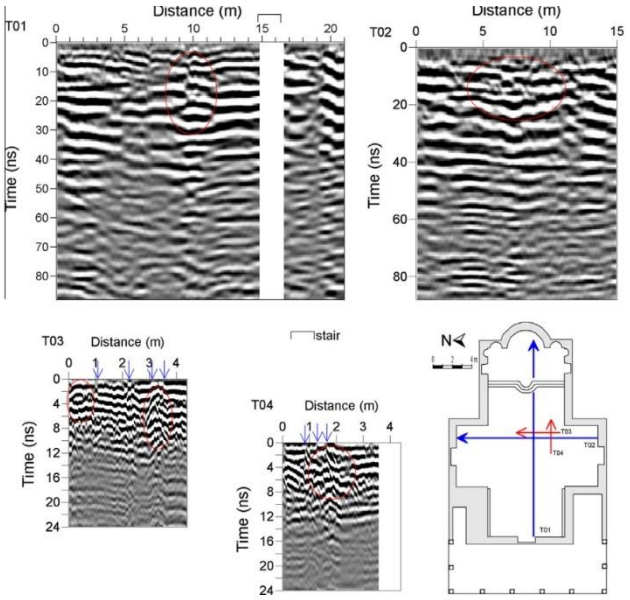
Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στον εσωτερικό χώρο του ναού και αξιοποιήθηκε η Μαγνητικά γραντιομετρία και το Γεωραντάρ για τον εντοπισμό πιθανών κενών, κρυπτών και τάφων που μπορεί να υπάρχουν κάτω από την εκκλησία. Η μαγνητική έρευνα με το διαφορικό μαγνητόμετρο είναι η πρώτη γνωστή εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε σε εσωτερικό χώρο και έγινε σε δύο διακριτά τμήματα, στην είσοδο και σε όλο το εσωτερικό του ναού.



Εικόνα 3.14: a)Κάτοψη της περιοχής έρευνας η οποία έχει γίνει υπέρθεση σε τοπογραφικό χάρτη της περιοχής. b) εικόνα του γκραντιόμετρου μετά το πέρασμά της από low-pass φίλτρο (το μπλε ορθογώνιο δείχνει την περιοχή εκσκαφής. c) τα αποτελέσματα της εκσκαφής.



Εικόνα 3.16: a) Το διάγραμμα της γεωφυσικής μελέτης σε υπέρθεση με την κάτοψη του ναού. b) Εικόνα του γκραντιόμετρου μετά το low-pass φίλτρο. c) Τομή για βάθος 54-66 cm του γεωραντάρ.



Εικόνα 3.15: Τα διαγράμματα του Γεωραντάρ σε διάφορες τοποθεσίες εντός της εκκλησίας. Οι τομές T01 και T02 πραγματοποιήθηκαν με κεραία 500 MHz ενώ οι τομές T03 και T04 με 1000MHz κεραία.

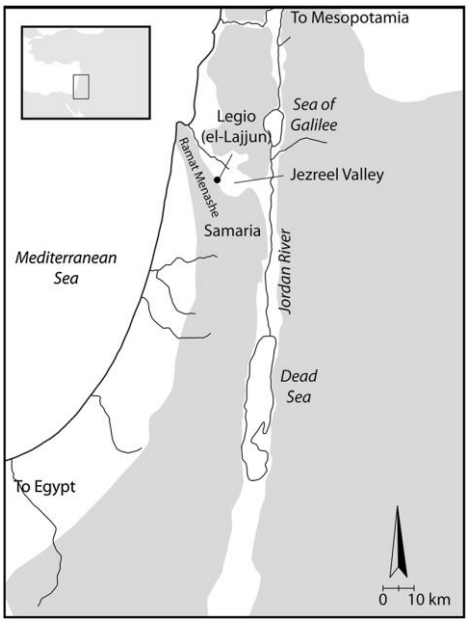
3.2.5 Συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή αποδεικνύει ότι ολοκληρωμένη χρήση γεωφυσικών τεχνικών μπορούν να προσφέρουν καλύτερες πληροφορίες για τον χαρακτηρισμό αρχαιολογικών χώρων σε αστικές περιοχές. Στόχος της έρευνας ήταν ο προσδιορισμός διαφόρων αρχαιολογικών δομών θαμμένες στο υπέδαφος σε διαφορετικά βάθη. Η γεωφυσική έρευνα σε μνημεία μπορεί επίσης να δώσει τις απαραίτητες πληροφορίες για ορισμένες δομικές φθορές. Ο συνδυασμός πολλαπλών μεθόδων έδωσε επίσης καλή αντιστοίχιση αποτελεσμάτων, αυτό σημαίνει ότι η κάθε έρευνα εντόπισε επιτυχώς αρχαιολογικές δομές ανάλογα με τις φυσικές τους ιδιότητες και επιβεβαιώθηκε η συσχέτιση μεταξύ τους.

Τόσο η Τομογραφία Ηλεκτρικής Αντίστασης όσο και το Γεωραντάρ έδωσαν κατατοπιστικά αποτελέσματα για θαμμένα αρχαιολογικά και πολιτιστικά ευρήματα. Ωστόσο οι μαγνητικές μελέτες δεν απέφερα τόσο καλά αποτελέσματα σε περιοχές με θόρυβο λόγω τις αφθονίες σε παρατημένα υλικά όπως π.χ. θαμμένα μέταλλα. Οι μέθοδοι του Φυσικού Δυναμικού και τα Ηλεκτρομαγνητικά VLF και VLF-R ενώ δεν χρησιμοποιούνται συχνά μπορούν να δώσουν κατατοπιστικές πληροφορίες. Γενικά μιλώντας, η μέθοδος του Γεωραντάρ μπορεί να δώσει πληροφορίες με την βοήθεια εικόνων υψηλής ανάλυσης σχετικά με τις κατακόρυφες και οριζόντιες επεκτάσεις του υπεδάφους. Ενώ η Τομογραφία λειτουργεί σαν απαραίτητο συμπληρωματικό εργαλείο για να επιβεβαιώσει και να βελτιώσει τα αποτελέσματα του Γεωραντάρ.

3.3 Γεωφυσική έρευνα σε Ρωμαϊκό στρατόπεδο λεγεωνάριων στο Legio στο Ισραήλ.

(Jessie A. Pincus, Timothy S. De Smet, Yotam Tepper, Matthew J. Adams, 2013)



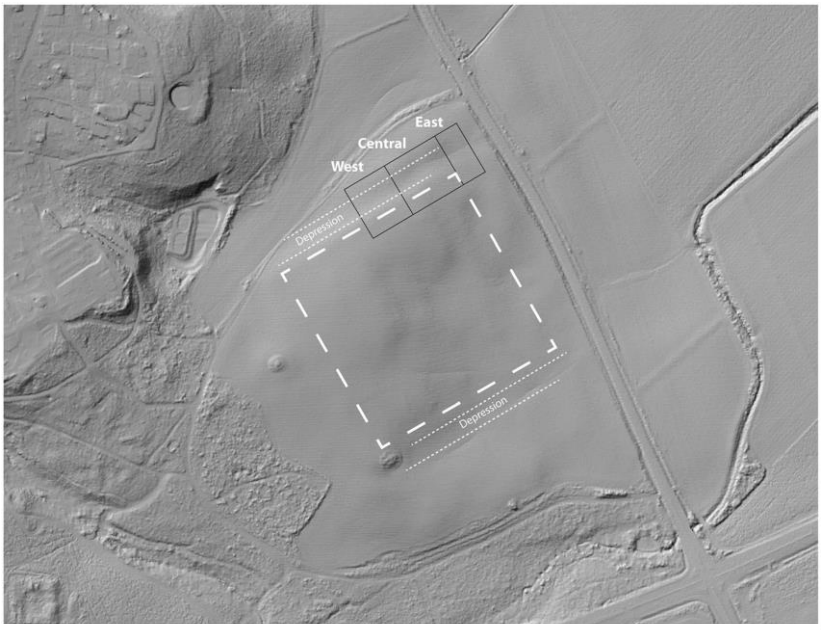
Εικόνα 3.17: Χάρτης της Κοιλάδας Jezreel όπου βρίσκεται το Legio.

3.3.1 Εισαγωγή

Το Legio βρίσκεται στην εγγύτητα του Tel Megiddo όπου έχει καταγραφεί ανθρώπινη δραστηριότητα από την εποχή του χαλκού και του σιδήρου. Η συγκεκριμένη περιοχή αποτέλεσε σταυροδρόμι για το διεθνές εμπόριο από την Αίγυπτο μέχρι την Μεσοποταμία. Αναφορές για 3 οικισμούς στην περιοχή υπάρχουν και κατά τους Ρωμαϊκούς και Βυζαντινούς χρόνους, όπου ο ένας εκ των οποίων είναι το Στρατόπεδο της 6^{ης} Ρωμαϊκής Λεγεώνας *Ferrata*. Από εκεί πιθανότατα προέκυψε και το όνομα Legio κατά τους αρχαίους χρόνους.

Η πιο πρόσφατη έρευνα στην περιοχή έφερε στο φως ενδείξεις για τεχνητές κατασκευές. Στην *Εικόνα 3.18* διακρίνονται επιμήκεις γραμμικές αποτυπώσεις όπου σχηματίζουν ορθές γωνίες μεταξύ τους δημιουργώντας έναν μεγάλο περιφραγμένο χώρο, οι δύο εκ των οποίων γίνονται πιο εύκολα αντιληπτές στην απεικόνιση με lidar (*Εικόνα 3.19*). Η αρχική υπόθεση που έγινε για την περιοχή αναφέρεται σε έναν χώρο διαστάσεων 250 m x 250 m.

Εικόνα 3.18: Ορθοφωτογραφία των αρχαιολογικών χώρων Megiddo και Legio.



Εικόνα 3.19: Χάρτης lidar του el-Manach όπου στην κορυφή του βρίσκεται το Legio. Το λευκό διακεκομμένο περίγραμμα δείχνει τα θεωρητικά όρια του αρχαιολογικού χώρου, ενώ με μαύρο βλέπουμε τις περιοχές μελέτης.

3.3.2 Σκοπός

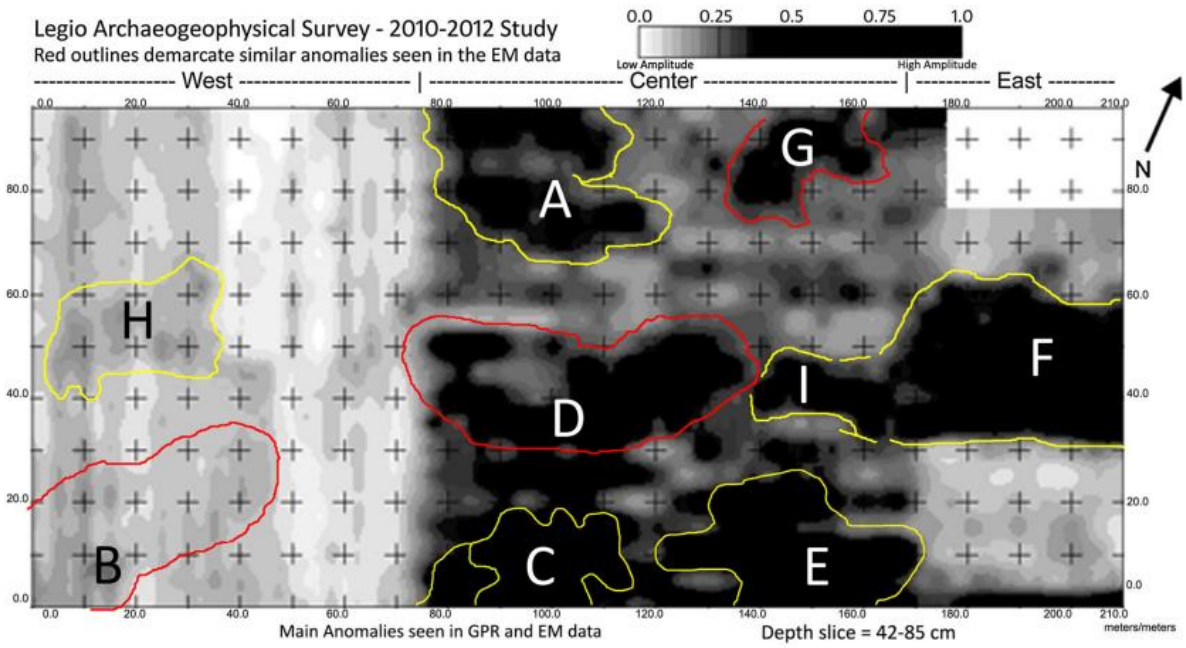
Σκοπός της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή είναι ο εντοπισμός θαμμένων δομών όπως είχαν υποθέσει αρχικά οι αρχαιολόγοι. Λόγω της μεγάλης έκτασης της περιοχής επιλέχθηκε στο Βόρειο τμήμα της μια περιοχή 210 m στην διεύθυνση ΑΔ και 95m στην διεύθυνση ΒΝ. Στην συνέχεια χωρίστηκε σε 3 τμήματα, το Δυτικό (75 m x 95 m), το Κεντρικό (95 m x 95 m) και το Ανατολικό (40 m x 70 m), οι 3 περιοχές διακρίνονται και στην *Εικόνα 3.19*. Η έρευνα πεδίου πραγματοποιήθηκε σε 2 φάσεις, τον Δεκέμβριο του 2010 αποκτήθηκαν τα δεδομένα Γεωραντάρ για το Κεντρικό και Ανατολικό τμήμα και τον Ιούλιο του 2011 τα δεδομένα Γεωραντάρ για το Δυτικό τμήμα καθώς και τα δεδομένα των Ηλεκτρομαγνητικών για όλα τα τμήματα. Τέλος τα δεδομένα εξετάστηκαν ξεχωριστά και στην συνέχεια συνδυαστικά.

3.3.3 Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR)

Κατά την έρευνα με γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Geophysical Survey Systems, Inc (GSSI) SIR System 2000 με 400 MHz κεραία, με εκτιμώμενο βάθος διείσδυσης τα 2 με 5 m.

Τα δεδομένα στο Κεντρικό και Ανατολικό τμήμα λήφθηκαν τις 2 και 21 Δεκεμβρίου 2010, η πρώτη βροχή του χειμώνα έγινε στο μεσοδιάστημα. Κατά την διάρκεια του post-processing έγινε φιλτράρισμα και εξισορρόπηση των δεδομένων, αυτό είχε σκοπό να μετριάσει τις αλλαγές στις μετρήσεις που προκάλεσε η διαφορά υγρασίας του εδάφους. Η λήψη των μετρήσεων για το Δυτικό τμήμα έγινε τον Αύγουστο του 2011 χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους με τα άλλα δύο τμήματα. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με 2 διαφορετικά λογισμικά για ακριβέστερη ερμηνεία τους.

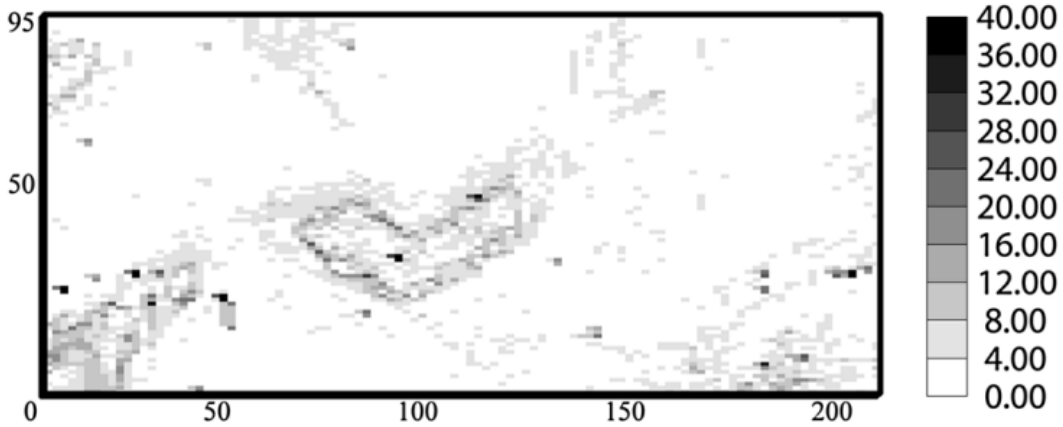
Πρωταρχικός στόχος της έρευνας με το γεωραντάρ ήταν η χαρτογράφηση πιθανών γεωλογικών επαφών και ο εντοπισμός σημαντικών αλλαγών στο υπέδαφος. Τα δεδομένα του γεωραντάρ έδειξαν την παρουσία 8 συμπλεγμάτων με υψηλό πλάτος τα οποία ταυτοποιούνται ως ανωμαλίες με πιθανό αρχαιολογικό ενδιαφέρον και χαρακτηρίζονται με τα γράμματα Α έως Η. Τα υψηλά πλάτη που χαρακτηρίζουν την κάθε ανωμαλία καταδεικνύουν ότι η σύστασή τους διαφέρει σημαντικά από την σύσταση του περιβάλλοντος υλικού. Η ερμηνεία αυτών των ανωμαλιών εξαρτάται από την τοπογραφία της περιοχής καθώς και από την σύγκρισή τους με τα Ηλεκτρομαγνητικά.



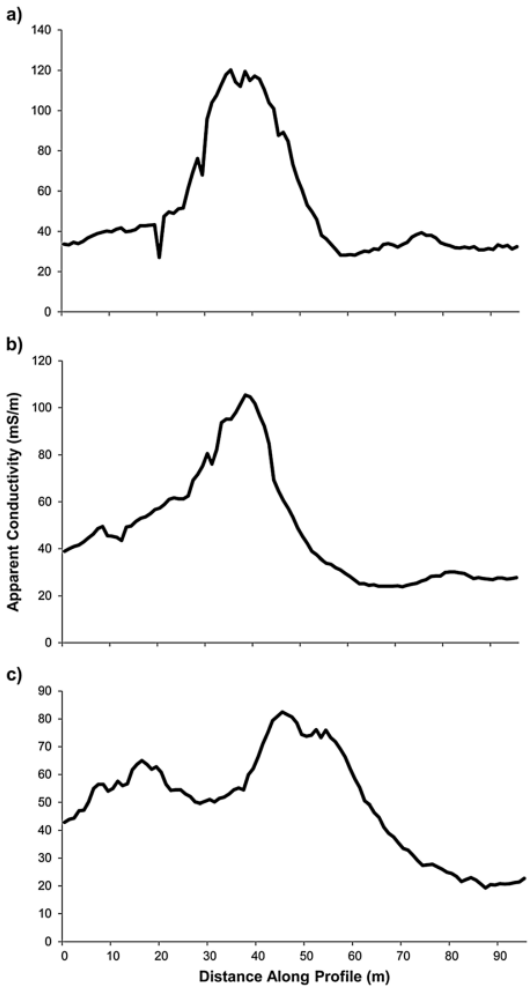
Εικόνα 3.20: «Φέτα» του γεωραντάρ σε βάθος 42-82 cm όπου απεικονίζονται όλες οι ανωμαλίες.

3.3.4 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

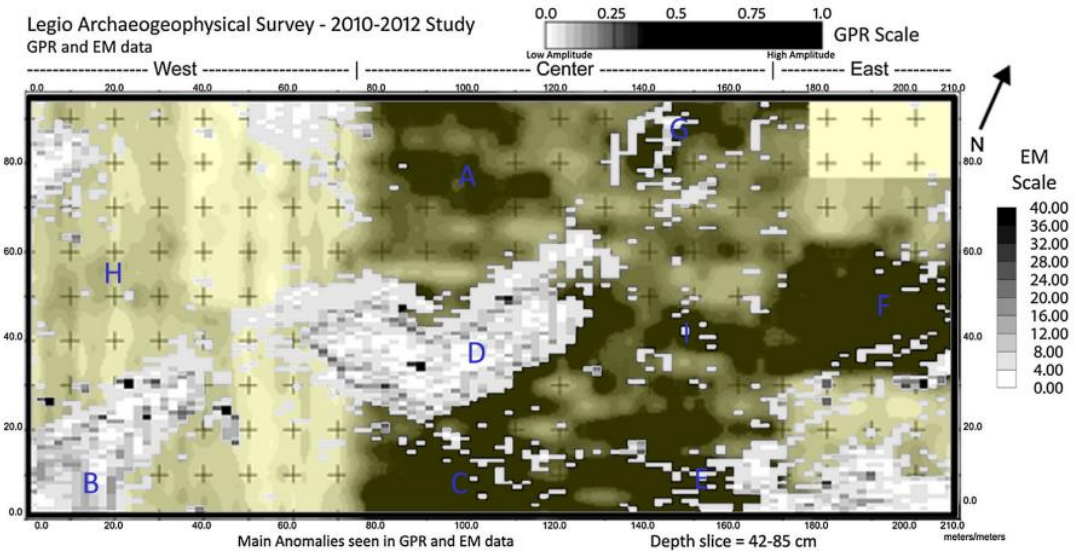
Για την Ηλεκτρομαγνητική έρευνα χρησιμοποιήθηκε το σύστημα EM31 της εταιρίας Geonics και το οποίο μετρούσε την φαινόμενη αγωγιμότητα. Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε ευθύγραμμα τμήματα ανά 1 m και τα τμήματα είχαν μεταξύ τους απόσταση 2 m σε ένα κάναβο διαστάσεων 210 m x 95 m. Το EM31 λειτουργεί στον χώρο των συχνοτήτων (FEM, Κεφάλαιο 2.1.6) , Η μέτρηση που λαμβάνουμε από το EM31 είναι αυτή της φαινόμενης αγωγιμότητας, η οποία ταυτίζεται με την πραγματική αγωγιμότητα κάνοντας την υπόθεση ότι η γη είναι ομογενής.



Εικόνα 3.21: Ο χάρτης εικονοστοιχείων THD φαινόμενης αγωγιμότητας του EM31 με φίλτρο ανίχνευσης έντονων μεταβολών. Τα δεδομένα είναι προσανατολισμένα με τον βορά. Το πλάτος της κλίμακας είναι σε mS/m/m.



Εικόνα 3.22: Προφίλ φαινόμενης αγωγιμότητας στον άξονα y στα: a)80, b)100 και c) 120 m.

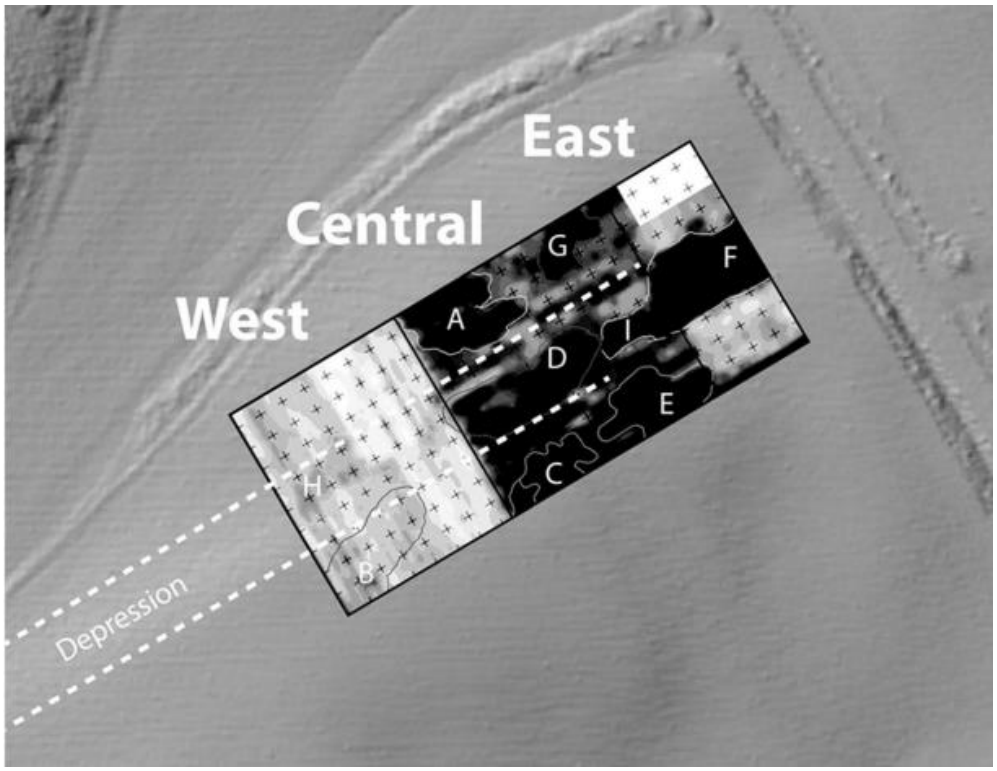


Εικόνα 3.23: Συνδυασμός της «φέτας» GPR και τα δεδομένα από το EM31.

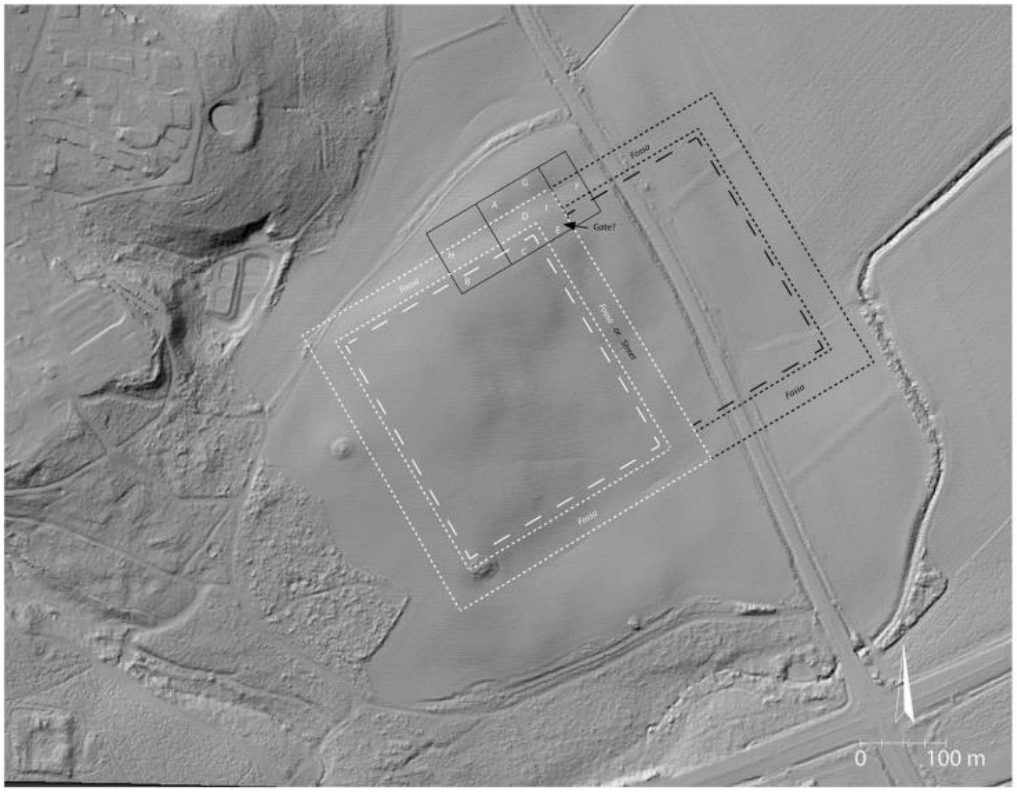
Γενικά οι περιοχές με υψηλή φαινόμενη αγωγιμότητα έχουν και υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, οι τιμές αυτές είναι πιθανό να οφείλονται σε συσσώρευση υδάτων ή λεπτόκοκκα ιζήματα. Αντιθέτως τιμές χαμηλής αγωγιμότητα έχουν περιοχές με στεγανά/αδρόκκοκα ιζήματα ή συμπαγής βράχος, στην περίπτωση αρχαιολογικής έρευνας αντίστοιχα θα μπορούσε να οφείλεται σε κάποιο τοίχος ή δρόμο.

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων ορίστηκε ένα σημείο αυθαίρετα σαν βάση όπου ανά 3 γραμμές μετρήσεων γινόταν επιστροφή στην βάση και λαμβάνονταν μέτρηση με σκοπό την διόρθωση drift-correction, παρ' όλα αυτά δεν παρατηρήθηκε σημαντική απόκλιση. Ωστόσο κατά την μέτρηση των γραμμών 132 m και 134 m παρατηρήθηκε μια αδικαιολόγητη αλλαγή στις μετρήσεις της φαινόμενης αγωγιμότητας, αυτές οι τιμές αντικαταστάθηκαν με γραμμική παρεμβολή από ανεπηρέαστες τιμές στις γειτονικές γραμμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην *Εικόνα 3.21* και *Εικόνα 3.22*.

Στην *Εικόνα 3.21* φαίνεται ο χάρτης εικονοστοιχείων, όπου αντί για τον κλασικό contour σε αυτόν αναπαρίσταται η κάθε μέτρηση χωριστά. Η συγκεκριμένη μέθοδος απεικόνισης έγινε για την ανάδειξη των απότομων μεταβολών που μπορεί να υπάρχουν στην αγωγιμότητα. Η απεικόνιση αυτή έγινε με την χρήση της Ολικής Οριζόντιας Παραγώγου (THD).



Εικόνα 3.24: Κοντινό πλάνο της περιοχής έρευνας με τα δεδομένα της «φέτας» του γεωραντάρ στο βάθος 0.42-0.85 m με σημειωμένες τις ανωμαλίες.



Εικόνα 3.25: Εικόνα του lidar μαζί με τις δύο πιθανές ερμηνείες που υπάρχουν. Η πρώτη είναι σημειωμένη με άσπρο και η δεύτερη είναι συνδυασμός άσπρου και μαύρου. Η τοποθεσία της ανατολικής και δυτικής άκρης είναι κατά προσέγγιση.

3.3.5 Συνδυασμός των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Αφού επεξεργάστηκαν τα δεδομένα και αναλύθηκαν ανεξάρτητα, στην συνέχεια τοποθετήθηκαν το ίδιο σύστημα συντεταγμένων και το ένα πάνω στο άλλο (*Εικόνα 3.23*). Ο συνδυασμός των δύο δείχνει ένα γραμμικό στοιχείο να εισέρχεται από τα δυτικά (ανωμαλία Η) του χώρου έρευνας και με ορθή γωνία προς τα νότια (ανωμαλίες D,I και E). Η γωνία είναι η ίδια με αυτή που παρατηρείται στις αεροφωτογραφίες, τις δορυφορικές εικόνες και τα δεδομένα από το lidar.

Πιστεύεται ότι η περιοχές υψηλής αγωγιμότητας οφείλονται σε συμπιεσμένες ή/και αργιλώδεις περιοχές, όπου στην περίπτωσή μας είναι αμυντικές τάφροι. Αυτού του είδους δομές συγκεντρώνουν τα απορρέοντα ύδατα και έχουν υψηλή αγωγιμότητα.

Αναθεώρηση των γραμμικών στοιχείων που είναι ορατά από τις αεροφωτογραφίες, τις δορυφορικές εικόνες και το lidar, των δεδομένων από τα Ηλεκτρομαγνητικά και το Γεωραντάρ, καθώς και από τα όσα είναι γνωστά για τα ρωμαϊκά στρατόπεδα επιτρέπουν στην πρόταση δύο πιθανών μοντέλων για το σχήμα και μέγεθος του περίκλειστου χώρου.

Το πρώτο μοντέλο επιβεβαιώνει την αρχική θεωρία και αναφέρεται σε έναν τετραγωνικό χώρο με πλευρές 250-300 m. Σε αυτή την περίπτωση με την γεωφυσική

έρευνα εντοπίστηκε η ΒΑ γωνία του στρατοπέδου και οι ανωμαλίες οφείλονται σε αμυντικές τάφρους (fossa) που βρίσκονται περιμετρικά αυτού.

Στο δεύτερο μοντέλο η ανωμαλία F (Εικόνα 3.20 και 3.23) μπορεί να ερμηνευτεί ως η συνέχεια της γραμμικής ανωμαλίας D-H-I και να αντιπροσωπεύουν επίσης αμυντικές τάφρους που βρίσκονται περιμετρικά του στρατοπέδου. Σε αυτή την περίπτωση η ανωμαλία I, λόγω μεγαλύτερου πάχους από τις ανωμαλίες D και F, μπορεί να αντιπροσωπεύει κάποια δομή πύλης (portae).Τυπικά, τα ρωμαϊκά στρατόπεδα κατασκευάζονται με 4 πύλες, μια στο κέντρο κάθε πλευράς του τοίχους. Αν προκύψει το συμπέρασμα με αυτό το στάνταρ, το μήκος του τοίχου εκτιμάτε γύρω στα 450-500 m. Υπό αυτά τα δεδομένα ο χώρος έχει παραλληλόγραμμο σχήμα με πλευρές 250-300 m x 500-600 m (Εικόνα 3.25, οι μαύρες γραμμές). Αυτά τα ευρήματα δεν αποκλείουν το πρώτο σενάριο καθώς τα ρωμαϊκά στρατόπεδα συχνά συνδέονται με εξωτερικά κτήρια.

4. Γεωφυσική Έρευνα στην Περιοχή Bisri

Εικόνα 4.1: Οι 3 από τις τέσσερεις κολώνες γρανίτη που βρίσκονται στην περιοχή.

4.1 Εισαγωγή

Ο ναός του Bisri ή αλλιώς ο ναός του Marj Bisri, είναι ένας βυθισμένος ναός στην κοιλάδα Marj Bisri, στα δυτικά του χωριού Bisri στον Λίβανο. Στην περιοχή τώρα το μόνο που είναι ορατό είναι τέσσερεις κίονες από γρανίτη με διάμετρο που αγγίζει το 1 m και πιστεύεται ότι ανήκουν σε έναν Ρωμαϊκό ναό. Η ταφή του ναού πιστεύεται ότι οφείλεται σε σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή που προκαλείται από το ρήγμα Roum, η οποία προκάλεσε κατολίσθηση και αυτή με την σειρά της μπλόκαρε τον ποταμό Awali. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την συσσώρευση αλλούβιων τα οποία σταδιακά σκέπασαν τον ναό και την γύρω περιοχή.

Στα πλαίσια ενός μεγάλου έργο θα γίνει η κατασκευή ενός φράγματος στην περιοχή και προβλέπεται να πλημμυρίζουν αρκετές περιοχές της κοιλάδας με την έναρξη λειτουργίας του. Επομένως θα γίνουν αρκετές αρχαιολογικές και γεωφυσικές έρευνες καθώς και ανασκαφές στην περιοχή.

Οι μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν το 2019 από την ομάδα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μηχανικών

Μεταλλείων Μεταλλουργών όπου και είχε συνταχθεί μια ανάλογη τεχνική έκθεση με τα ευρήματά της.

4.2 Γεωλογία της περιοχής

Εικόνα 4.2: Τοπογραφικός χάρτης της κοιλάδας Bisri.

4.2.1 Κλιματολογικά δεδομένα

Ο Λίβανος χαρακτηρίζεται από Μεσογειακό κλίμα με μια θερμή ξηρή περίοδο (Μάιος με Οκτώβριος) και μια ψυχρή υγρή περίοδο (από το Νοέμβριο μέχρι τον Απρίλιο), λόγω της γεωγραφικής του θέσης παρατηρούνται πολλά μικροκλίματα. Με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς κοντά στο Bisri η ετήσια βροχόπτωση έχει ύψος 1,250mm με ισχυρές μέσες μηνιαίες διακυμάνσεις. Η ετήσια μέση θερμοκρασία είναι οι 15.5°C και η σχετική υγρασία κυμαίνεται από 72% τον Ιανουάριο σε 57% τον Αύγουστο, ενώ ο ετήσιος ρυθμός εξάτμισης είναι τα 1,486 mm.

4.2.2 Γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από μια γεωλογική ακολουθία από την Μέση Ιουρασική έως την Μέση Κρητιδική περίοδο, με Τεταρτογενείς αλλούβιες αποθέσεις εντός των κοιλάδων. Οι εκτεθειμένοι βράχοι αποτελούνται κυρίως από ιζηματογενή πετρώματα, ασβεστόλιθος, μάργες και ψαμμίτες. Με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση οι γεωλογικές ακολουθίες της ευρύτερης περιοχής είναι οι εξής:

- Μέση Ιουρασική

- Σχηματισμός Kesrouane: γκριζωπός ασβεστόλιθος, έντονα ρωγματομένος και καρστικοποιημένος. Έχει πάχος πάνω από 1000 m.

- Άνω Ιουρασική
  - Σχηματισμός Salima: μεταβλητή ακολουθία καφέ-κίτρινου οολιθικού ασβεστόλιθου που περιέχει σίδηρο με παρεμβολές από μαργαϊκές και ψαμμιτικές παρεμβολές. Έχει πάχος μεταξύ 80 και 180 m.
  - Σχηματισμός Bikfaya: ανθρακική ενότητα απαλού γκρί χρώματος, έντονα ρωγματομένη και καρστικοποιημένη. Έχει πάχος μεταξύ 60 και 80 m.
  - Σχηματισμός Bhannes: ασβεστόλιθοι, βασάλτης, πυροκλαστικά και σχιστόλιθοι. Έχει πάχος μεταξύ 50 και 150 m.

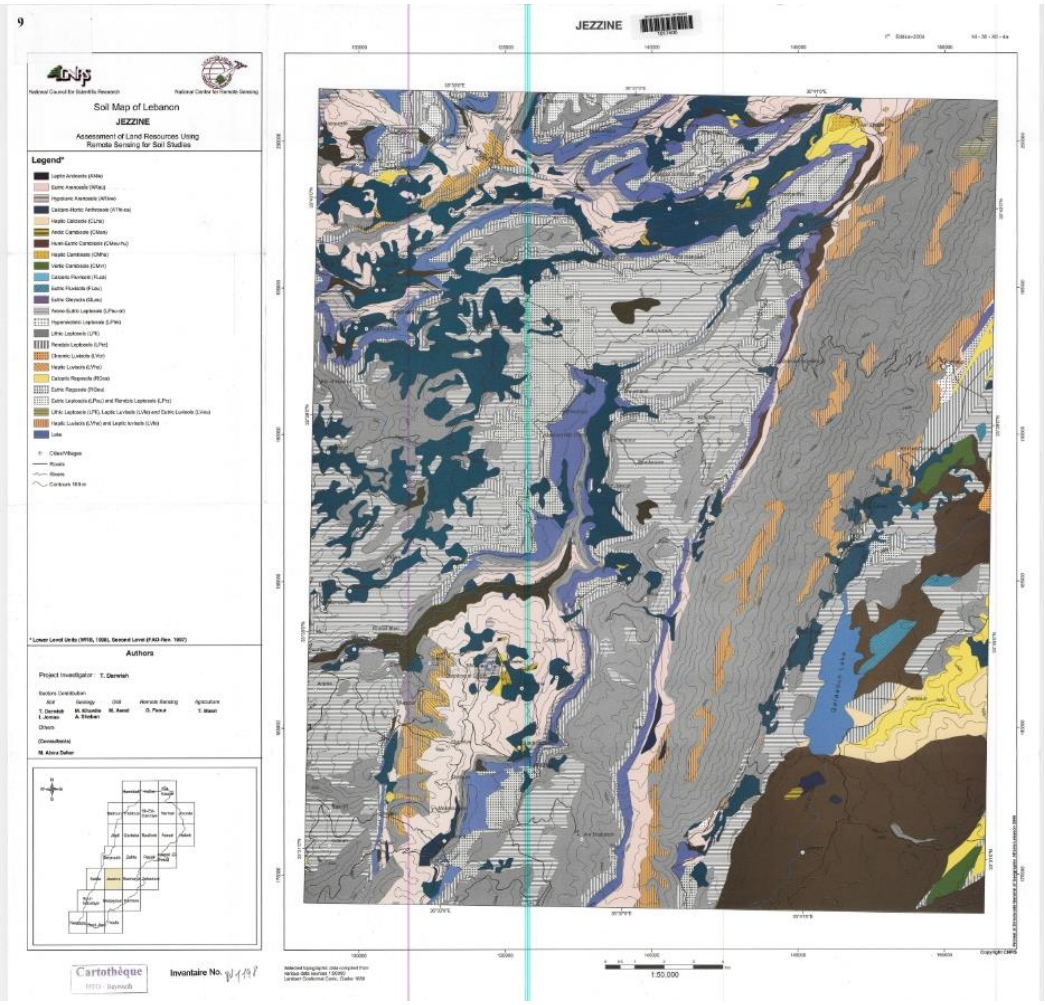
- Κάτω Κρητιδική
  - Σχηματισμός Mdairej: συμπαγή ενότητα ασβεστολίθου με απάχρωση απαλό γκρι. Το πάχος του είναι περίπου 40-50 m.
  - Σχηματισμός Abeih: μεταβλητή ενότητα ασβεστόλιθου με απολιθώματα. Το πάχος του είναι περίπου 170 m.
  - Σχηματισμός Chouf: ψαμμίτες που περιέχουν σίδηρο από καφέ έως άσπρου χρώματος οι οποίοι είναι συσχετισμένοι με αργίλους, σχιστόλιθους και λιγνίτες. Τοπικά, υπάρχει παρουσία βασαλτικών ηφαιστειακών και ερυθρών αρχιλούχων στρωμάτων. Έντονα μεταβλητό πάχος (σε ορισμένα σημεία έως και 300 m) με απότομες κατακόρυφες μεταβολές.

- Μέση Κρητιδική
  - Σχηματισμός Sannine: λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθοι και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, έντονα ρωγματομένοι και καρστικοποιημένοι. Το πάχος υπολογίζεται στα 600 m.
  - Σχηματισμός Hammana: ανθρακικά λεπτών στρώσεων, μάργες και άμμοι. Το πάχος εκτιμάται στα 140 m.

Τα εκτεθειμένα πετρώματα στην περιοχή αποτελούνται κυρίως από σχηματισμούς του Κάτω Κρητιδικού: ασβεστολιθικοί γκρεμοί του σχηματισμού Mdairej, οι οποίοι επικαλύπτουν τους σχηματισμούς Abeih και Chouf. Λόγω των απότομων μεταβολών δεν είναι εύκολος ο διαχωρισμός μεταξύ των σχηματισμών Chouf και Abeih. Ψαμμίτες και από τους δύο σχηματισμούς εμφανίζονται ελαφρώς λιθοποιημένοι . Παρουσιάζουν χαμηλότερη κλίση η οποία έρχεται σε αντίθεση με τους υπερκείμενους βράχους. Σε υψηλότερες περιοχές, άλλες ανθρακικές ενότητες βρίσκονται πάνω από τους γκρεμούς του σχηματισμού Mdairej.

Η περιοχή έχει μια περίπλοκη αλληλεπίδραση με ρήγματα, πτυχές και μαζικές μετακινήσεις. Γύρω από το Bisri, οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν παραμορφωθεί από τεκτονικές κινήσεις με ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης τα οποία ακολουθούνται από κανονικά ρήγματα. Κάποια από τα κυριότερα ρήγματα που βρίσκονται κοντά στο Bisri είναι: το ρήγμα Roum και το ρήγμα Yammouneh. Λόγω της τοποθεσίας του, στον Λίβανο γίνονται συχνά σεισμοί και ενώ είναι αρκετά σπάνιο έχουν συμβεί και αρκετά ισχυροί σεισμοί.

Εν τέλη, στην κοιλάδα εντοπίζονται αλλούβιοι σχηματισμοί του ύστερου Τεταρτογενούς. Αυτά αποτελούνται από βότσαλα, χαλίκια, άμμοι, ιλύες και αργίλους. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 30 m.



Εικόνα 4.3: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής.

4.2.3 Γεωμορφολογικό υπόβαθρο της περιοχής

Η κοιλάδα του Bisri είναι τυπική επιγενετική κοιλάδα που διαμορφώθηκε σε ένα Μέσο Κρητιδικό πλατό ασβεστολίθου και μαργών κατά την διάρκεια του Πλειόκαινο προς Τεταρτογενές. Το πλατό αντιστοιχεί σε ασβεστολιθικούς λόφους όπου τα άνω τμήματά τους είναι ιδιαίτερα καρστικοποιημένα, εμφανίζονται καταβόθρες και πόλγες. Η κοιλάδα του Bisri πλαταίνει στην συμβολή των δύο παραπόταμων, τα χαμηλά μέρη των πρανών έχουν ενδιάμεση κλίση σε αντίθεση με τους υψηλής κλίσης λόφους. Οι κύριες γεωμορφολογικές διεργασίες είναι:

- Λόφοι από ασβεστόλιθο οι οποίοι υπόκεινται σε καταπτώσεις βράχων, όλα αυτά τα θραύσματα συσσωρεύονται στα πρανή και εν τέλει καταλήγουν στον ποταμό. Η δημιουργία βαθμίδων από τους ανθρώπους έχουν μειώσει τις κατολισθήσεις και την έντονη συσσώρευση ιζήματος.

Η κοιλάδα αποτελείται από πρόσφατες αλλούβιες αποθέσεις του Πλειστόκαινου διευθετημένες σε αλλούβιες βαθμίδες. Η κοίτη του ποταμού αποτελείται κυρίως από χαλίκια, βότσαλα και άμμους. Δεν έχουν παρατηρηθεί ευμεγέθη μπλοκ. Ο ρυθμός ιζηματογένεσης εκτιμάται σε 1,000 t/m^2/yr και παρατηρούνται μερικές βαθμίδες:

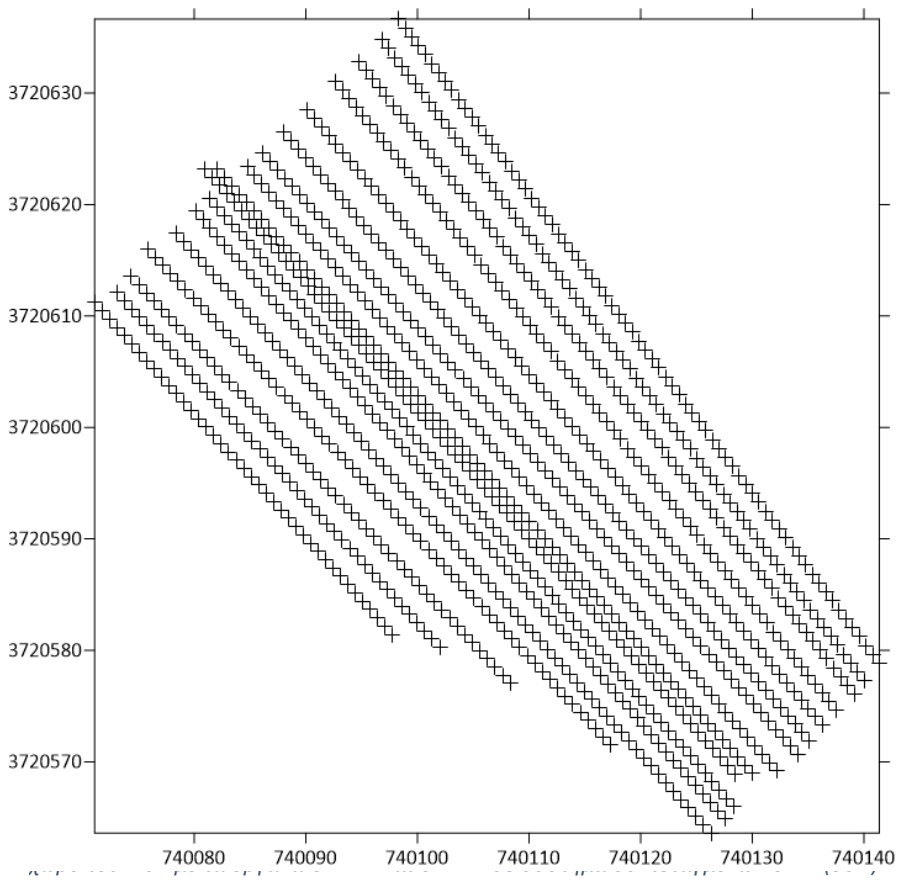
- Η υψηλότερη βαθμίδα παρατηρείται σε αρκετά τμήματα της κύριας κοιλάδας, κυρίως στο δυτικό μέρος και γύρο από το χωριό Bisri. Με βάση τους ερευνητές, η βαθμίδα αποτελείται από «ιλύες με ελαφριές οριζόντιες στρώσεις οι οποίες εναλλάσσονται με λεπτούς έως μέσους προς παχιούς κόκκους άμμων». Το ύψος της είναι 7 με 22 m.
- Η κατώτερη βαθμίδα εμφανίζεται σε περισσότερα σημεία στην κοιλάδα, είναι 2 με 3 m χαμηλότερη από την άνω βαθμίδα και το ύψος της είναι από 1 έως 11 m. Τα ιζήματα είναι αλλούβια και λιμναίες αποθέσεις που αποτελούνται από χαλίκια, άμμους και ιλύες. **Αυτά είναι και τα ιζήματα που καλύπτουν την περιοχή έρευνας.**
- Η κατώτατη βαθμίδα είναι το τρέχον πλημμυρικό πεδίο, το οποίο βρίσκεται 1 m πάνω από τον ποταμό κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

4.4 Γεωφυσική Έρευνα: Μετρήσεις υπαίθρου

4.4.2 Ηλεκτρομαγνητική Μέθοδος (EM)

Εισαγωγή

Για την Ηλεκτρομαγνητική μέθοδο σχηματίσαμε κάναβο μετρήσεων στην περιοχή μελέτης όπου κινούμασταν σε διαμήκεις γραμμές με φορά ΒΔ-ΝΑ οι οποίες είχαν μικρή απόσταση μεταξύ τους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις του Ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μετρήσεων, μία για συνολικό βάθος διασκόπησης τα 3 m και μια για συνολικά βάθος διασκόπησης τα 6 m. Και στις δύο περιπτώσεις οι μετρήσεις έγιναν γύρω από τον χώρο που βρίσκονταν οι κολώνες και προς τα βόρειο-ανατολικά. Κατά την διάρκεια της έρευνας λάβαμε μετρήσεις για την αγωγιμότητα και την μαγνητική επιδεκτικότητα. Οι θέσεις μέτρησης και τις δύο φορές είναι σχεδόν ταυτόσημες, στα δεδομένα όμως φαίνονται ίδιες. Αυτό συνέβη διότι πρώτα λήφθηκαν τα δεδομένα με το GPS για τις θέσεις των μετρήσεων και στην συνέχεια περάσαμε με το ηλεκτρομαγνητικό όργανο και λάβαμε τις μετρήσεις. Οι συντεταγμένες μας είναι στο σύστημα UTM (36N), στην *Εικόνα 4.4* φαίνονται οι θέσεις μέτρησης και στους άξονες x και y είναι οι γεωγραφικές συντεταγμένες του συστήματος που προαναφέραμε. Στην συνέχεια μπορούμε να δούμε τις θέσεις μέτρησης αφού έχει γίνει υπέρθεση στο Google Maps (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Χάρτης με τις θέσεις μέτρησης των Ηλεκτρομαγνητικών στον αρχαιολογικό χώρο του Bisri με τα όργανα CMD-2 και CMD-4 στο Google Earth.

Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments "CMD" με την διαμόρφωση "High" του CMD-2 και CMD-4 με βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 και 6 m αντίστοιχα. Τα όργανα με κατάλληλη σύνδεση με όργανο GPS μπορεί να παρέχει και τα στοιχεία γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.

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

Μονάδα Ελέγχου:

- Η Μονάδα ελέγχου Attachable CMD λειτουργεί με όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού δέκτη
- Πέντε τρόποι μέτρησης:
    - Χειροκίνητη μέτρηση - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πιέζοντας το πλήκτρο. Η θέση του σημείου ενημερώνεται αυτόματα στο προκαθορισμένο δίκτυο ή μπορεί να εισαχθεί απευθείας. Κάθε σημείο μπορεί να μετρηθεί και πάλι ή να παραλειφθεί και να ολοκληρωθεί με ένα σχόλιο.
    - Συνεχής μέτρηση - Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Οι θέσεις για το προφίλ καθορίζεται από τα σήματα μήκους με συνεχή συνυπολογισμό των θέσεων των μεμονωμένων μετρήσεων.

- Χειροκίνητη μέτρηση GPS - ο χρήστης ξεκινά τη μέτρηση σε κάθε σημείο πατώντας το πλήκτρο. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
- Συνεχής μέτρηση GPS - Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται συνεχώς στην επιλεγμένη χρονική περίοδο μέτρησης. Η θέση προσδιορίζεται από το δέκτη GPS.
- Λειτουργία αναζήτησης - τα δεδομένα μετρώνται συνεχώς, αλλά δεν σώζονται.

Εμείς χρησιμοποιήσαμε τον τρόπο μέτρησης GPS με χειροκίνητη μέτρηση.

- Άμεση υποστήριξη του δέκτη GPS. Γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το υψόμετρο εμφανίζονται και αποθηκεύονται αυτόματα.
- Εύκολη μεταφορά δεδομένων σε USB.
- Χρόνος μέτρησης: 0,1 - 20 s.
- 128 MB μνήμη δεδομένων:
  - max. 64 αρχεία.
  - max. 4,8 εκατομμύρια σημεία μετρήσεων.
- Οθόνη LCD 320 x 240, με λευκό φωτισμό.
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -10 ° C έως +50 ° C.
- Διαστάσεις: 270 x 90 (145) x 60 mm.
- Βάρος: 0,7 kg (με μπαταρία Li-Ion μπαταρία).
- Σύστημα πομπού δέκτη

- Μεγέθη που μετρώνται:
  - Ηλεκτρική Αγωγιμότητα
  - Μαγνητική Επιδεκτικότητα

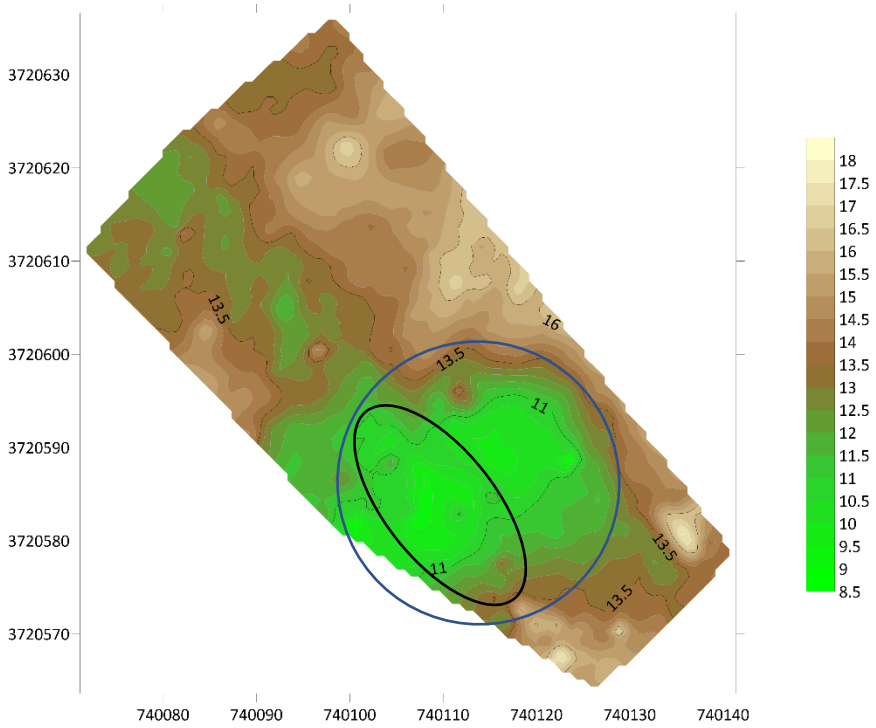
- Ακρίβεια μέτρησης: ± 4% σε 50 mS / m.
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 10 Hz.
- Θερμοκρασίαλειτουργίας:-10°Cέως+50°C.

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

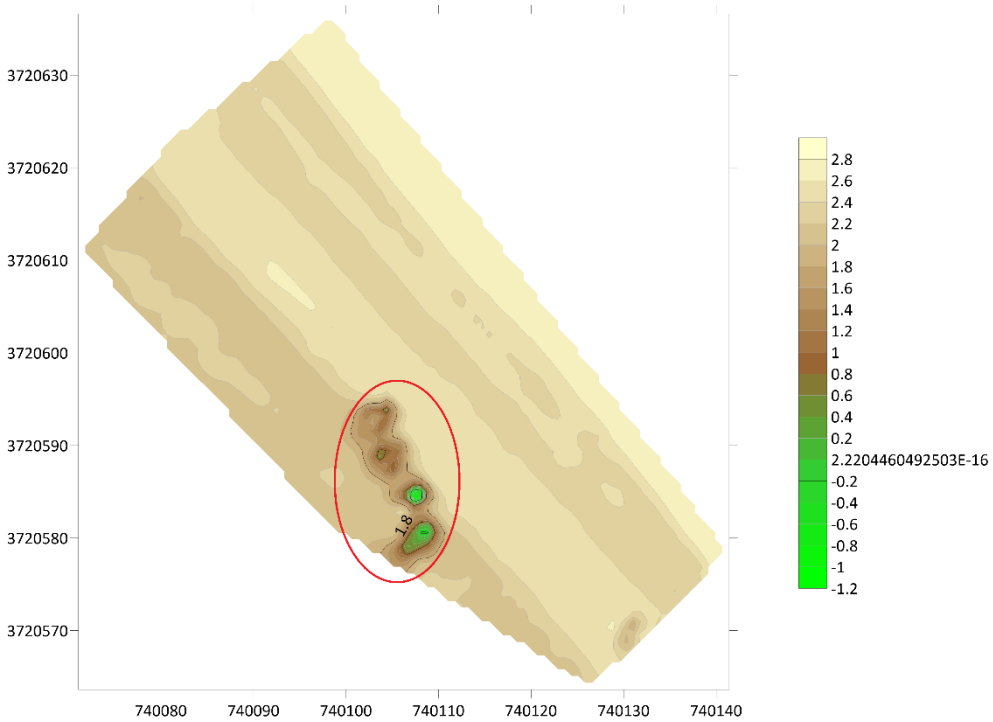
Τέλος, τα αποτελέσματα που έδωσαν οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν από το πρόγραμμα Surfer της Golden Software και φαίνονται παρακάτω.

Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες

Χάρτες από τις μετρήσεις του CMD-2 (βάθος συνολικής διασκόπησης 3 m)



Εικόνα 4.6: Χάρτης αγωγιμότητας με το CMD-2 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m.



Εικόνα 4.7: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας με το CMD-2 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 3 m.

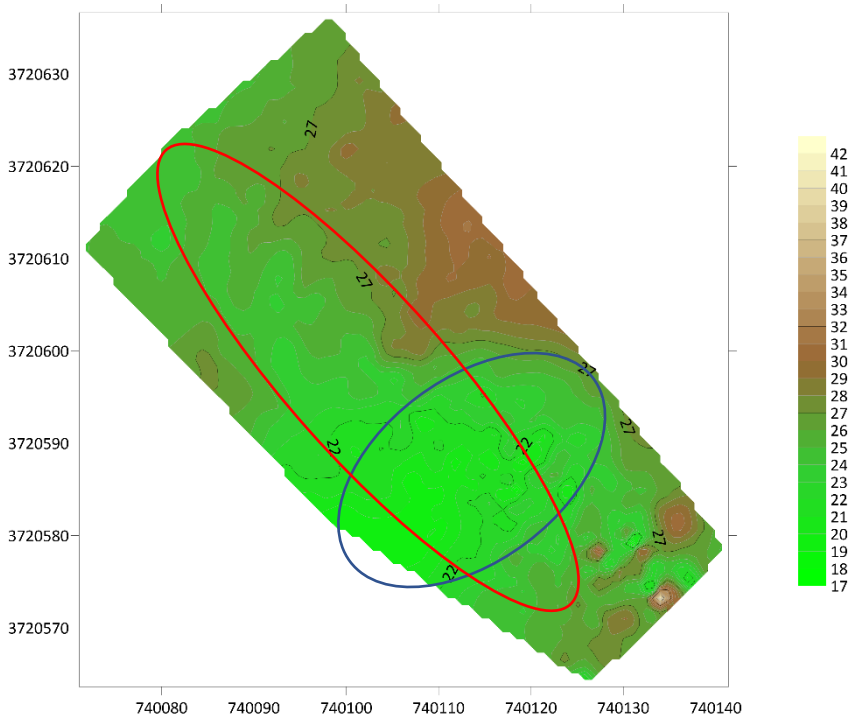
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Για τους χάρτες που προκύπτουν από την αποτύπωση της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης τα 3 m μπορούμε να πούμε τα εξής:

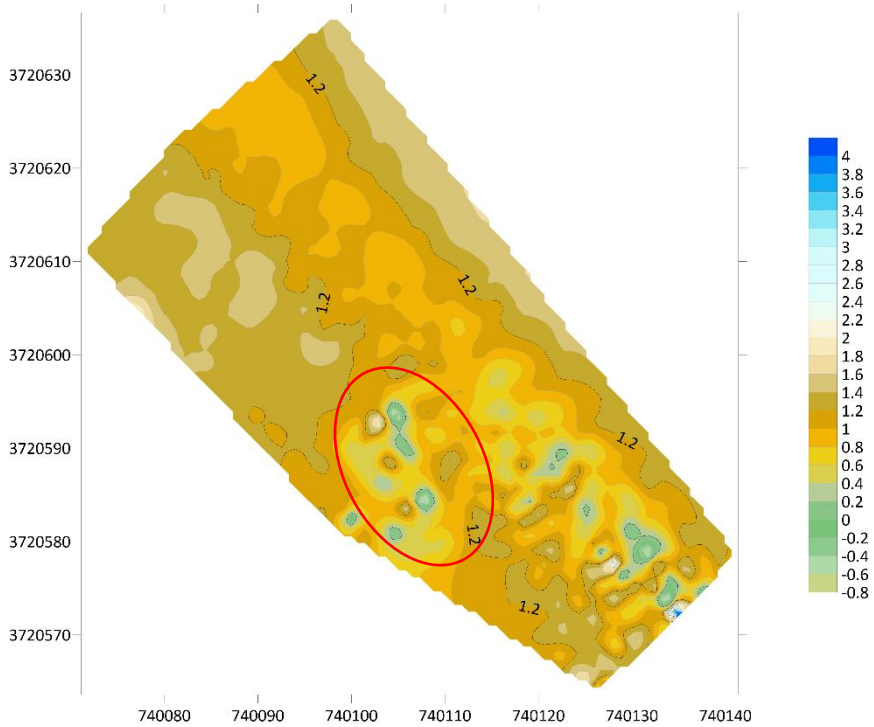
- Στην *Εικόνα 4.6* παρατηρούμε αρκετές τιμές όπου είναι χαμηλή η αγωγιμότητα (κυρίως εντός μπλε κύκλου), οι περιοχές αυτές συνδέονται με υλικό αυξημένης πυκνότητας. Όσο μεγαλύτερη πυκνότητα, τόσο μικρότερη αγωγιμότητα θα είχαμε.
- Οι περισσότερες τιμές είναι συγκεντρωμένες εκεί που βρίσκονται και οι κολώνες από γρανίτη (Μαύρη ελλειψοειδής περιοχή), επομένως μπορεί να μην είναι πέτρωμα αυτό που δίνει τις χαμηλές αγωγιμότητες αλλά κάποια θαμμένη αρχαιολογική δομή.
- Στην *Εικόνα 4.7* όλες οι έντονες διαφορές που παρατηρούμε βρίσκονται στην περιοχή που είναι οι κολώνες, επομένως αυτές οι αλλαγές οφείλονται στις ίδιες τις κολώνες. Αυτό είναι θετικό καθώς έχουμε μια ένδειξη ότι το υλικό κατασκευής του πιθανού ναού ανιχνεύεται με ικανοποιητικό τρόπο από τους χάρτες της μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Εικόνα 4.8: Χάρτης αγωγιμότητας για βάθος διασκόπησης 3 m τον οποίο έχουμε υπερθέσει στο Google Earth

Χάρτες από τις μετρήσεις του CMD-4 (βάθος συνολικής διασκόπησης 6 m)



Εικόνα 4.9: Χάρτης αγωγιμότητας με το CMD-4 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m.

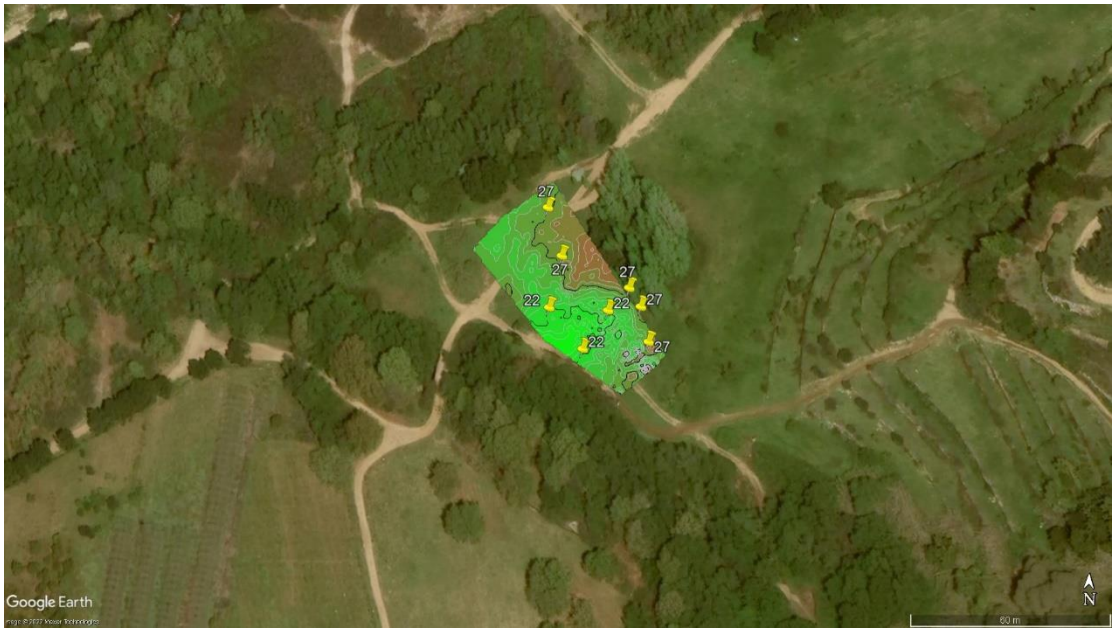


Εικόνα 4.10: Χάρτης μαγνητικής επιδεκτικότητας με το CMD-4 για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 6 m.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Για τους χάρτες που προκύπτουν από την αποτύπωση της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας για συνολικό βάθος διασκόπησης τα 6 m μπορούμε να πούμε τα εξής:

- Και εδώ στην εικόνα με τις αγωγιμότητες (Εικόνα 4.8) παρατηρούμε χαμηλές τιμές αγωγιμότητας στην ίδια περιοχή (μπλε έλλειψη) καθώς και σε προσανατολισμό ΒΔ-ΝΑ (κόκκινη έλλειψη) διακρίνουμε επίσης αρκετά χαμηλές τιμές αγωγιμότητας και μάλιστα σε πολύ μεγαλύτερη ένταση από ότι στον χάρτη για βάθος 3 m. Αυτή η περιοχή λοιπόν είναι πιθανό να δίνει τόσο χαμηλές τιμές γιατί από κάτω βρίσκεται σε μικρό βάθος το βραχώδες υπόβαθρο ή προκαλείται από την παρουσία κάποιας θαμμένης κατασκευής (π.χ. δρόμος)
- Στη *Εικόνα 4.9* παρατηρούμε κάποιες ανωμαλίες στο ίδιο σημείο με πριν (κόκκινη έλλειψη) που πιθανότατα οφείλονται στις κολώνες που βρίσκονται στον χώρο. Αυτή την φορά όπως υπάρχουν και αρκετές διάσπαρτες ανωμαλίες οι οποίες συνολικά έχουν την ίδια φορά με αυτές που εντοπίσαμε από τις μετρήσεις αγωγιμότητας αλλά με μια μικρή μετατόπιση προς τα βόρειο-ανατολικά. Οι ανωμαλίες αυτές μπορούν να οφείλονται σε υλικά ίδια με αυτά που είναι φτιαγμένες οι κολώνες καθώς όπως είδαμε και στην έρευνα για συνολικό βάθος διασκόπησης τα 3 m δίνουν τις ίδιες ανωμαλίες.

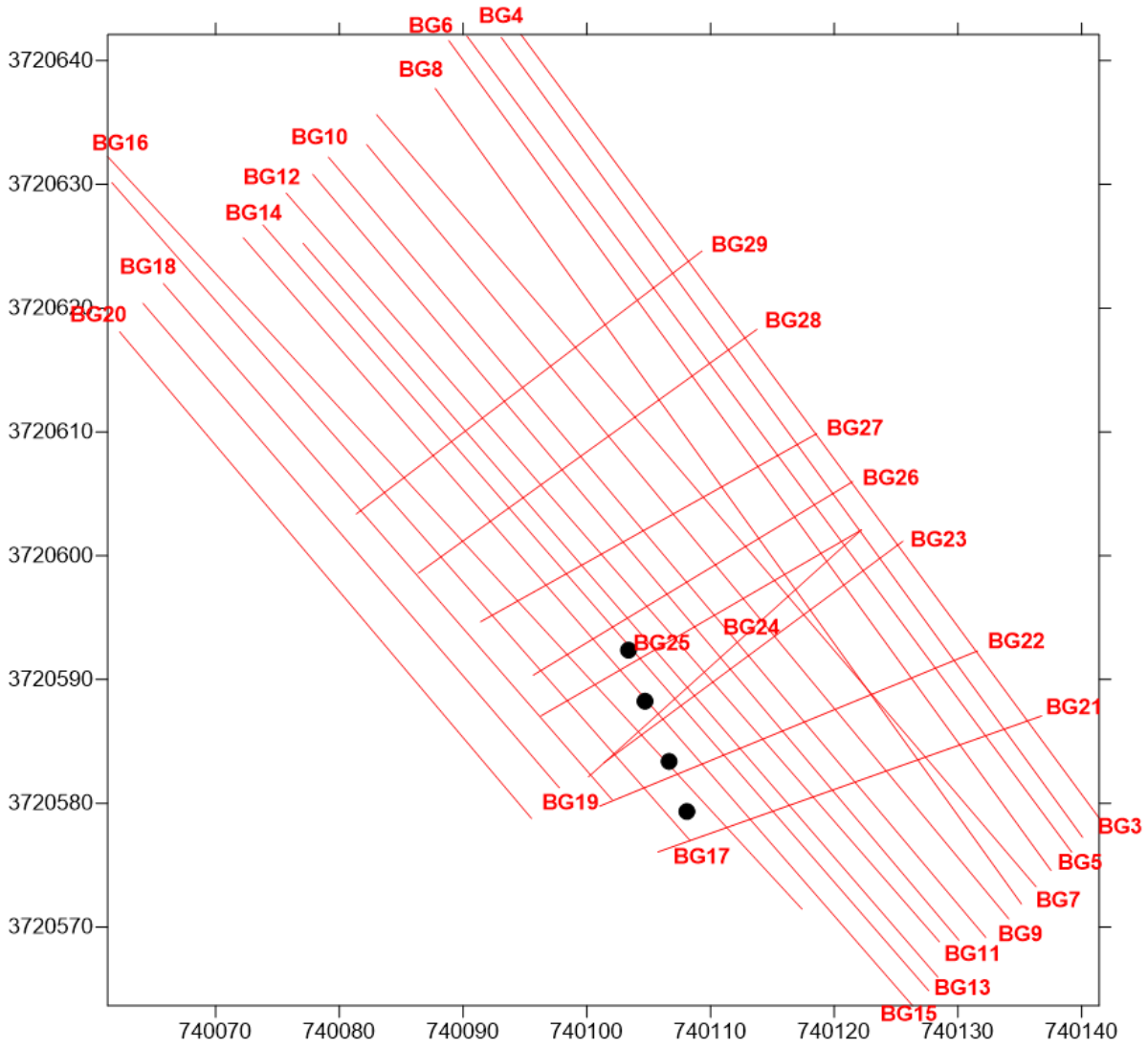


Εικόνα 4.11: Χάρτης αγωγιμότητας για βάθος διασκόπησης 6 m τον οποίο έχουμε υπερθέσει στο Google Earth

4.4.3 Μέθοδος Γεωραντάρ (GPR)

Εισαγωγή

Η δεύτερη μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή μελέτης ήταν αυτή του Γεωραντάρ (GPR). Συνολικά έγιναν 27 τομές, οι 18 με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και οι υπόλοιπες 9 με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (Εικόνα 10). Χρησιμοποιήθηκε σύστημα της Mala και είχε διάταξη με Πηγή και Δέκτης να έχουν κεραία 250 MHz.



Εικόνα 4.12: Χάρτης με τα προφίλ μέτρησης του Γεωραντάρ στον αρχαιολογικό χώρο του Bisri στο σύστημα συντεταγμένων UTM (36N).

Εικόνα 4.13: Χάρτης με της τομές του Γεωραντάρ στην περιοχή έρευνας με υπέρθεση στο Google Earth.

Επεξεργασία μετρήσεων

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

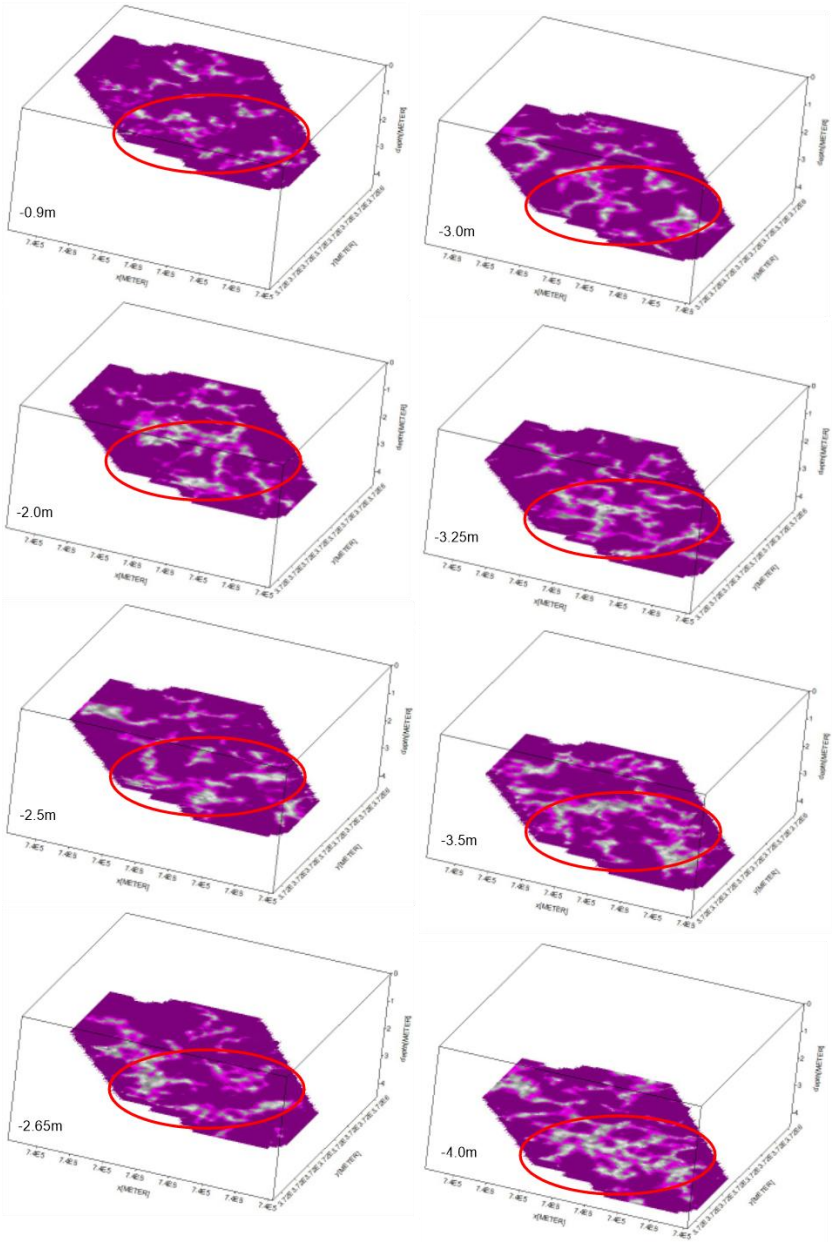
- Subtract Mean (Dewaw)
- Correct Maximum Phase
- Move Start-time
- Energy Decay
- BandPass Butterworth
- Background Removal
- Spectral Whitening
- fk Migration (Stolt)

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε το αρχείο των τρισδιάστατων δεδομένων του γεωραντάρ (3D GPR) με τις ακριβείς συντεταγμένες από τις άκρες της κάθε τομής.

Το αρχείο αυτό στην συνέχεια τροφοδοτήθηκε στο λογισμικό REFLEX3DSCAN για την δημιουργία τομών στα διάφορα βάθη με τις ανακλάσεις όπου είχαν το μεγαλύτερο πλάτος, το οποίο προκαλείται από θαμμένες δομές που έχουν μεγάλη διαφορά στην αγωγιμότητα σε σχέση με τα περιβάλλοντα ιζήματα. Οι τομές αυτές για τα διάφορα βάθη (0.9-4.0 m) φαίνονται στην *Εικόνα 11*.

Τομές Γεωραντάρ

Παρατηρούμε ότι οι περιοχές με υψηλά πλάτη (γκρι σκίαση), σε διάφορα σχήματα (μερικά από αυτά γραμμικά) βρίσκονται στο ίδιο μέρος σε όλες τις τομές για όλα τα βάθη (0.9-4 m) το οποίο περιγράφεται με την κόκκινη γραμμή. Αυτή η περιοχή αποτελεί θέση πιθανού ενδιαφέροντος καθώς βρίσκεται στην δεξιά πλευρά των υπαρχόντων αρχαίων στύλων.



Εικόνα 4.14: Τομές του Γεωραντάρ όπου φαίνονται τα μέγιστα πλάτη (διακρίνονται με την γκρι σκίαση).

4.4.4 Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας, όπως προαναφέρθηκε, ήταν ο εντοπισμός αρχαιολογικών δομών στην περιοχή Bisri στον Λίβανο, όπου είχαν εντοπιστεί στην επιφάνεια κάποιοι κίονες. Σημαντική ήταν η διερεύνηση της πιθανότητας ύπαρξης αρχαιολογικών δομών καθώς η κοιλάδα που βρίσκεται ο χώρος είναι υποψήφια για την δημιουργία ενός φράγματος το οποίο και θα την πλημμυρίσει.

Αρχικά έγινε μελέτη της γεωλογίας και γεωμορφολογίας της περιοχής καθώς και κάποιων κλιματολογικών στοιχείων. Στην συνέχεια έπρεπε να γίνει ο σχεδιασμός της έρευνας και να επιλεχθούν οι πλέον κατάλληλες μέθοδοι με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και των χαρακτηριστικών των δομών που θέλαμε να εντοπίσουμε. Προκειμένου να έχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα ανατρέξαμε στην διεθνή βιβλιογραφία και βρήκαμε παρόμοιες περιπτώσεις γεωφυσικής έρευνας. Οι περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται σαν μελέτες περίπτωσης (case studies) και αναλύονται συνοπτικά.

Η 1η Μελέτη Περίπτωσης αφορούσε έρευνα στην περιοχή της κοιλάδας του Θορικού με σκοπό τον εντοπισμό της χωρικής οργάνωσης του αρχαίου Δήμου και τον τρόπο εξέλιξης του παλαιοπεριβάλλοντος. Αρχικά έγινε μια έρευνα στην ευρύτερη περιοχή με Ηλεκτρομαγνητικές Μεθόδους και στην συνέχεια με Τομές Ηλεκτρικής Αντίστασης για να βρεθεί η γεωλογία της περιοχής και ο τρόπος εξέλιξής της. Στην συνέχεια σε τοπικό επίπεδο έγιναν πάλι Ηλεκτρομαγνητικά και Ηλεκτρικές Τομογραφίες, αλλά επίσης και έρευνα με Γεωραντάρ. Το γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση των δεδομένων που προέκυψαν από τα Ηλεκτρομαγνητικά. Έτσι, υπήρξε περαιτέρω επιβεβαίωση για την προέλευση των δομών που εντοπίστηκαν.

Στην 2η Μελέτη Περίπτωσης έγιναν έρευνες σε πολλαπλές τοποθεσίες στην περιοχή της Σμύρνης και με διάφορες γεωφυσικές μεθόδους. Οι συνήθεις μέθοδοι ήταν τα Ηλεκτρομαγνητικά, οι Τομές Ηλεκτρικής Αντίστασης, το Γεωραντάρ και τα Μαγνητικά. Από την έρευνα προέκυψε ότι η χρήση των μαγνητικών είναι λίγο δυσχερής καθώς μπορεί εύκολα να εμφανιστεί θόρυβος από την παρουσία μεταλλικών αντικειμένων άσχετα με την έρευνα μας. Έτσι θα πρέπει να γίνει έντονη επεξεργασία των δεδομένων πριν την ανάλυσή τους. Γενικά παρατηρήθηκε ότι με την χρήση παραπάνω των δύο μεθόδων δεν προκύπτουν δομές οι οποίες δεν ανιχνεύθηκαν με τις προηγούμενες δύο μεθόδους, παρά επιβεβαίωση κυρίων των δομών που έχουν ήδη εντοπιστεί. Σε δύσκολες περιπτώσεις όμως και μια τρίτη μέθοδος μπορεί να δώσει στοιχεία που δεν κατάφεραν να δώσουν οι άλλες δύο.

Τέλος, στην 3η Μελέτη Περίπτωσης έγινε έρευνα σε έναν λόφο όπου είχαν προηγηθεί παλαιότερα αρχαιολογικές έρευνες αλλά όχι ανασκαφές. Λόγω τον ευρημάτων που βρέθηκα στην περιοχή πραγματοποιήθηκε έρευνα με Δορυφορικές Εικόνες, Αεροφωτογραφίες και lidar όπου εντοπίστηκαν γραμμικά στοιχεία πάνω στον λόφο. Έτσι, πραγματοποιήθηκε γεωφυσική έρευνα με Γεωραντάρ και Ηλεκτρομαγνητικά για την διερεύνηση των στοιχείων αυτών. Λόγω όμως της έκτασης της περιοχής επιλέχθηκε μόνο ένα τμήμα της για την διεξαγωγή των ερευνών, οι οποίες και

εντόπισαν κάποιες ανωμαλίες που πιθανότατα οφείλονταν σε ανθρωπογενείς δομές του υπεδάφους. Οπότε και προέκυψαν δύο πιθανά μοντέλα για αν ερμηνευθούν τα δεδομένα αυτά.

Μελετώντας τα παραπάνω διαπιστώθηκε ότι η χρήση των Ηλεκτρομαγνητικών και του Γεωραντάρ σαν μια πρώτη έρευνα της περιοχής ήταν η καταλληλότερη επιλογή. Όπου αρχικά με τα Ηλεκτρομαγνητικά συντάξαμε χάρτες Αγωγιμότητας και Μαγνητικής Επιδεκτικότητας για τον εντοπισμό συμπαγών δομών οι οποίες μπορεί να αποτελούν ένδειξη για αρχαιολογικές δομές σε ένα περιβάλλον με χαλαρά ιζήματα. Το Γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση αρχαιολογικών δομών και της επιφανειακή στρωματογραφίας. Παρατηρήσαμε επίσης τις αποστάσεις των μετρήσεων που χρησιμοποιούσαν με την κάθε μέθοδο σε συνδυασμό με την γεωλογία της περιοχής και το μέγεθος του στόχου που αναζητούσαν. Έτσι σχεδιάστηκε και στον αρχαιολογικό χώρο του Bisri ο ανάλογος κάναβος μετρήσεων τόσο για τα Ηλεκτρομαγνητικά όσο και για το Γεωραντάρ.

Συγκρίνοντας τόσο τους χάρτες που προέκυψαν από την Ηλεκτρομαγνητική μέθοδο όσο και αυτούς που προέκυψαν από την μέθοδο του γεωραντάρ παρατηρούμε ανωμαλίες στα δεξιά από την θέση που βρίσκονται οι στύλοι. Οι ανωμαλίες αυτές πιθανότατα οφείλονται σε ανθρωπογενείς παράγοντες και δεν έχουν να κάνουν με την γεωλογία της περιοχής, καθώς τις παρατηρούμε και με τις δύο μεθόδους και δεν μπορούν εύκολα να αιτιολογηθούν με την γεωλογία της περιοχής. Μάλιστα, στα Ηλεκτρομαγνητικά, κατά τις μετρήσεις κοντά στους στύλους είχαμε ανωμαλίες όμοιες με αυτές και στην υπόλοιπη περιοχή. Επομένως οι ανωμαλίες τις περιοχής είναι πιθανό να προκαλούνται από δομές αποτελούμενες από τα ίδια υλικά με τους στύλους.

Συμπερασματικά, η επιλογή των μεθόδων ήταν η καταλληλότερη για μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος, η πυκνότητα των μετρήσεων ήταν σωστή και αποτύπωσε με λεπτομέρεια το υπέδαφος. Η επιλογή του CMD-2 και CMD-4 μας βοήθησε τόσο στον εντοπισμό των συμπαγών δομών όσο και στην πιθανή σύνδεση του υλικού που δίνει τις ανωμαλίες στην περιοχή έρευνας με αυτό που είναι κατασκευασμένοι (λαξευμένοι) οι στύλοι. Το γεωραντάρ από την άλλη με κεραία και δέκτη 250 MHz είχε ένα μέγιστο βάθος εντοπισμού περί τα 4 m και με τα δεδομένα που λάβαμε μαζί με τη χρήση του λογισμικού REFLEX3DSCAN κατασκευάσαμε τομές για τα βάθη από 0.9-4 m. Στις τομές αυτές παρατηρήθηκα έντονες ανακλάσεις του σήματος σε μια περιοχή κοντά στους στύλοι, οι ανακλάσεις αυτές αποτελούν πιθανές αρχαιολογικές δομές και βρίσκονται στην θέση που εντοπίσαμε και τις ελάχιστες αγωγιμότητας από τα Ηλεκτρομαγνητικά. Επομένως ενισχύεται περαιτέρω η υπόθεση ότι η ανωμαλίες που εντοπίσαμε οφείλονται σε αρχαιολογικές δομές.

Ωστόσο, για να μπορέσουμε να πούμε με ακόμα μεγαλύτερη βεβαιότητα ότι οι ανωμαλίες που παρουσιάζονται στους χάρτες είναι ανθρωπογενείς πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες στην περιοχή. Η καταλληλότερη μέθοδος είναι η Τομογραφία Ηλεκτρική Αντίστασης καθώς όπως είδαμε και στις μελέτες περίπτωσης είναι ικανή να απεικονίσει την στρωματογραφία του εδάφους και να διακρίνει αν οι χαμηλές αγωγιμότητες που εντοπίσαμε με τα Ηλεκτρομαγνητικά είναι τοπικές ή εκτείνονται σε βάθος. Δηλαδή αν είναι το μητρικό πέτρωμα της περιοχής ή πιθανότατα κάποια ανθρωπογενής δομή η οποία θάφτηκε από τα ιζήματα.

5. Βιβλιογραφία

Αποστολόπουλος Γ. (2013). Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

Λοΐζος Φ. (2014). Γεωφυσική Έρευνα στον Ναό του Ποσειδώνα στο Σούνιο. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Μιχαλόπουλος Κ. (2015) Γεωφυσική Έρευνα στο Ναό του Ηφαίστου στο Θησείο. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Μιχαλόπουλος Φ. (2020). Γεωφυσική Έρευνα με ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους στις περιοχές Καστέλι και Λιβάδι της Νήσου Κεφαλληνίας. Διπλωματική Εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Παπαδοπούλου Μ. (2015). Γεωφυσική Έρευνα στη Μονή Καισαριανής για την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Τσελέντης Α., Παρασκευόπουλος Π. (2013). Εφαρμοσμένη Γεωφυσική.

CMD. 2020. Electromagnetic Conductivity User Manual.

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

George Apostolopoulos, Andreas Kapetanios. (2021). Geophysical investigation, in a regional and local mode, at Thorikos Valley, Attica, Greece, trying to answer archaeological questions.

https://en.wikipedia.org/wiki/Ground-penetrating_radar#/media/File:Ground_Penetrating_Radar_in_use.jpg

https://everipedia.org/wiki/lang_en/bisri

Göktuğ Drahor Mahmut. (2011). A review of integrated geophysical investigations from archaeological.

and cultural sites under encroaching urbanisation in _Izmir, Turkey

Jessie A. Pincus, Timothy S. De Smet, Yotam Tepper, Matthew J. Adams. (2013). Ground-penetrating Radar and Electromagnetic Archaeogeophysical Investigations at the Roman Legionary Camp at Legio, Israel.

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

Pavlopoulos Kosmas, Arhan Damien. (2018). Preliminary Report of Bisri gomorphological-geoarchaeological mission.

William Lowrie. (2007). Fundamentals of Geophysics Second Edition