



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

«Γεωφυσική έρευνα στον Πειραιά για τον
εντοπισμό στρωματογραφίας και πιθανών
ανθρωπογενών δομών»

Διπλωματική εργασία

ΕΛΕΝΗ ΣΜΥΡΝΙΟΥ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ
Αναπληρωτής καθηγητής
ΙΟΥΛΙΟΣ, 2016

1 Περιεχόμενα

1	Περιεχόμενα	3
1.1	Ευρετήριο Εικόνων	6
1.2	Ευρετήριο πινάκων.....	9
2	Ευχαριστίες.....	10
3	Περίληψη.....	11
4	Abstract	12
1	Εισαγωγή-Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	13
2	Θεωρητικό Μέρος	15
2.1	Εισαγωγή.....	15
2.2	Ηλεκτρική μέθοδος.....	17
2.2.1	Εισαγωγή.....	17
2.2.2	Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	18
2.3	Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	32
2.3.1	Εισαγωγή.....	32
2.3.2	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	32
2.3.3	Μαγνητική Επιδεκτικότητα.....	32
2.3.4	Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων. Εφαρμογές της μεθόδου.....	33
2.3.5	Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	34
2.3.6	Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων	35
2.3.7	Συστήματα μέτρησης Φάσης.....	36
2.3.8	Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης	38
2.4	Γεωραντάρ-GPR (Ground Penetrating Radar)	39
2.4.1	Εισαγωγή.....	39
2.4.2	Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ.....	41
2.4.3	Μετρήσεις στο ύπαιθρο.....	41
3	Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό ανθρωπογενών (αρχαιολογικών) σχηματισμών στην διεθνή βιβλιογραφία.....	43

3.1	Εφαρμογή Α:Χρήση μεθόδου γεωραντάρ για την χαρτογράφηση αρχαιολογικών στοιχείων σε αστική τοποθεσία (Mesange,Ιταλία)(Leucci ,Negri ,2005)	43
3.1.1	Εισαγωγή.....	43
3.1.2	Περιγραφή περιοχής έρευνας.....	44
3.1.3	Εξοπλισμός και τρόπος απόκτησης δεδομένων.....	45
3.1.4	Περιοχή Α: Ανάλυση δεδομένων, μέτρηση ταχύτητας διάδοσης κυμάτων και απεικόνιση αποτελεσμάτων σε οριζόντιες τομές	46
3.1.5	Περιοχή Β: Ανάλυση δεδομένων, μέτρηση ταχύτητας διάδοσης κυμάτων και απεικόνιση αποτελεσμάτων σε οριζόντιες τομές	49
3.1.6	Συμπεράσματα.....	51
3.2	Εφαρμογή Β: Αξιολόγηση γεωφυσικών ερευνών σε αρχαιολογικούς και πολιτιστικούς χώρους κάτω από περιβάλλον αστικοποίησης, Σμύρνη, Τουρκία (Drahor, 2011) 52	
3.2.1	Εισαγωγή.....	52
3.2.2	Περιοχή Έρευνας.....	52
3.2.3	Απόκτηση δεδομένων, επεξεργασία και αποτελέσματα.....	53
3.2.4	Συμπεράσματα.....	56
3.3	Εφαρμογή Γ:Γεωφυσικός χαρακτηρισμός μολυσμένων αστικών ανθρωπογενών πληρώσεων Μόντρεαλ, Καναδάς (Boudreault, 2010).....	57
3.4	Εισαγωγή.....	57
3.4.1	Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις.....	59
3.4.2	Ηλεκτρική Τομογραφία.....	59
3.4.3	Μέθοδος γεωραντάρ-GPR.....	60
3.4.4	Αποτελέσματα	60
4	Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό ανθρώπινων (αρχαιολογικών) σχηματισμών στον Πειραιά.....	65
4.1	Εισαγωγή.....	65
4.2	Γεωλογία Περιοχής	66
4.2.1	Γεωλογία Λεκανοπεδίου	66
4.2.2	Γεωλογικά χαρακτηριστικά Πειραιά	68

4.2.3	Λιθολογία και Στρωματογραφία Περιοχής Έρευνας.....	70
4.3	Ιστορική και Αρχαιολογική Ανασκόπηση της περιοχής του Πειραιά.....	73
4.3.1	Γενικά ιστορικά στοιχεία.....	73
4.3.2	Τα μακρά Τείχη	74
4.3.3	Οι οχυρώσεις του Πειραιά.....	75
5	Κεφάλαιο: Γεωφυσική Έρευνα Μετρήσεις και Αποτελέσματα	76
5.1	Εισαγωγή.....	76
5.2	Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	78
5.2.1	Εισαγωγή.....	78
5.2.2	Εξοπλισμός.....	79
5.2.3	Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες.....	81
5.3	Ηλεκτρική Μέθοδος.....	84
5.3.1	Εισαγωγή.....	84
5.4	Εξοπλισμός.....	85
5.4.1	Επεξεργασία Μετρήσεων	86
5.4.2	Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου	87
5.5	Μέθοδος Γεωραντάρ	88
5.5.1	Εισαγωγή.....	88
5.5.2	Επεξεργασία των μετρήσεων.....	88
5.5.3	Αποτελέσματα μετρήσεων Γεωραντάρ	90
5.5.4	Τρισδιάστατες αποτυπώσεις τομών γεωραντάρ	101
5.6	Συμπεράσματα και Σχόλια	103
5.6.1	Συμπεράσματα.....	103
5.6.2	Σχόλια.....	106
6	Βιβλιογραφία.....	108

1.1 Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.2.1.....	18
Εικόνα 2.2.2 Ροή ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο	22
Εικόνα 2.3 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου.....	23
Εικόνα 2.4 διάταξη Schlumberger.....	24
Εικόνα 2.5 διάταξη Wenner	24
Εικόνα 2.6 διάταξη Dipole-Dipole	25
Εικόνα 2.7 Διάταξη Pole-Pole.....	25
Εικόνα 2.8 Διάταξη Pole-Dipole	25
Εικόνα 2.9 Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με την περίπτωση της έρευνας.....	26
Εικόνα 2.10 Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Vogelsang,1995).....	27
Εικόνα2.11 Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης	28
Εικόνα 2.12 Οριζόντια χαρτογράφηση διάταξης Wenner, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους	29
Εικόνα 2.13 Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για την δημιουργία ψευδοτομής ..	30
Εικόνα 2.14Διαίρεση της επιφάνειας του υπεδάφους δισδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα , με περισσότερα κελιά από τα δεδομένα	31
Εικόνα 2.2.15 Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων.....	31
Εικόνα 2.16 Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής.....	34
Εικόνα 2.17Σύστημα μέτρησης φάσης διδύμου πηνίου.....	37
Εικόνα 2.18 γενική έννοια του τρόπου που πραγματοποιείται η ανίχνευση με γεωραντάρ. ..	40
Εικόνα 2.19 Common offset.....	41
Εικόνα 2.20 Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάση της συχνότητας αντένας του γεωραντάρ.....	42
Εικόνα 2.21 Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων	42
Εικόνα 3.1 Ιστορικό κέντρο της Mesange (Ιταλία) με λευκό χρώμα ο χώρος έρευνας.(Leucci,Negri,2005).....	44
Εικόνα 3.2 Η περιοχή έρευνας μαζί με τις τομές από	44
Εικόνα 3.3Περιοχή A: τομές GPR ,200Hzαντένα, (a) τομή χωρίς επεξεργασία (b) επεξεργασμένη τομή (Leucci, Negri, 2005)	46

Εικόνα 3.4 Επεξεργασμένο προφίλ από την περιοχή Α. (b) Η ανάλυση ταχύτητας με την μέθοδο περίθλασης υπερβολών. Οι τιμές πάνω από τις υπερβολές μας δείχνουν κοινές ταχύτητες (Leucci, Negri, 2005)	47
Εικόνα 3.5 Περιοχή Α, οριζόντιες τομές τα μεγάλα πλάτη κύματος που παρουσιάζονται με Β είναι η δομή "ίρογεο"(Leucci,Negri,2005)	48
Εικόνα 3.6 Περιοχή Β: Τομές GPR, 500Hzαντένα, (a) τομή χωρίς επεξεργασία (b) επεξεργασμένη τομή.....	49
Εικόνα 3.7 Μη επεξεργασμένο προφίλ GPR το οποίο αντιστοιχεί στο προφίλ Β4 της περιοχής Β. Η ανάλυση ταχύτητας με την μέθοδο περίθλασης υπερβολών. Οι αριθμοί πάνω από τις υπερβολές είναι οι αντίστοιχες τιμές των ταχυτήτων (m/ms) (Leucci, Negri, 2005).....	49
Εικόνα 3.8Περιοχή Β, οριζόντιες τομές τα μεγάλα πλάτη κύματος που παρουσιάζονται με Μ είναι πιθανά τα τείχη που οροθετούσαν τν αρχαίο δρόμο προς την νεκρόπολη. (Leucci,Negri,2005)	50
Εικόνα 3.9 Περιοχή Β: φωτογραφία από τις αρχαιολογικές ανασκαφές	51
Εικόνα 3.10 Περιοχή έρευνας (Drahor, 2011)	52
Εικόνα 3.11 Άποψη της περιοχής έρευνας.....	53
Εικόνα 3.12 οριζόντιες τομές βάθους α) ERT b) GPR (Drahor, 2011).....	55
Εικόνα 3.13Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών c) ο χάρτης της σε φάση συνιστώσας (μαγνητική επιδεκτικότητα) στα 26,7 Hz b) ένα μέρος του χάρτη (Drahor, 2011).....	55
Εικόνα 3.14Γενική άποψη της περιοχής έρευνας. Στην γραμμοσκιασμένη περιοχή θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις (Boudreault, 2010)	57
Εικόνα 3.15 Περιεχόμενα πλήρωσης παρατηρούμε υλικά όπως τούβλα θεμέλια από οπλισμένο σκυρόδεμα και μεταλλικές ράβδους και σωλήνες (Boudreault , 2010).....	58
Εικόνα 3.16 Κάναβος μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου (Boudreault, 2010)	59
Εικόνα 3.17Κάναβος μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας (Boudreault, 2010)	59
Εικόνα 3.18 Κάναβος μετρήσεων GPR (Boudreault, 2010)	60
Εικόνα 3.19 Αγωγιμότητα στα 3m(Boudreault,2010).....	61
Εικόνα 3.20 αγωγιμότητα στα 6m (Boudreault,2010)	61
Εικόνα 3.21 Τομές ηλεκτρικής τομογραφίας(Boudreault, 2010).....	62
Εικόνα 3.22 a) Συνολική τρισδιάστατη εικόνα των ηλεκτρικών τομογραφιών (b) οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν την στρωματογραφία της πλήρωσης και την οριοθέτηση του «τύπου 4» εδάφους το οποίο περιέχει περισσότερο από 75% μπάζα (Boudreault, 2010).....	62
Εικόνα 3.23(a) Συνολική τρισδιάστατη εικόνα των τομών GPR (b) οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν την στρωματογραφία της πλήρωσης και την οριοθέτηση του «τύπου 4» εδάφους το οποίο περιέχει περισσότερο από 75% μπάζα (Boudreault,2010).....	63
Εικόνα 3.24 Τομές GPR (Boudreault, 2010).....	64

Εικόνα 4.1 Περιοχή έρευνας με μπλε χρώμα απεικονίζονται αρχαιολογικές τοποθεσίες.....	65
Εικόνα 4.2 Χάρτης Πειραιά με μωβ χρώμα επισημάνονται οι αρχαιολογικοί χώροι της περιοχής.....	66
Εικόνα 4.3 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής της Αττικής (από γεωλογικούς χάρτες ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50000, με συσχετισμό και ενοποίηση σχηματισμών από Αντωνίου, 2000).....	67
Εικόνα 4.4 Γεωλογικός χάρτης Πειραιά (Αποστολόπουλος, 2013).....	69
Εικόνα 4.5 Περιοχή λιθοστρωματογραφικών γεωτρήσεων και περιοχή έρευνας (κόκκινος κύκλος) (Βανδαράκης, 2013)	70
Εικόνα 4.6 Λιθολογικές γεωτρήσεις (Βανδαράκης, 2013).....	72
Εικόνα 4.7 Γεωτρήσεις χωρισμένες σε στρωματογραφικές ενότητες (Βανδαράκης,2013)....	72
Εικόνα 4.8 Χάρτης της Αθήνας όπου απεικονίζονται τα Μακρά Τείχη η Ακρόπολη και τα λιμάνια του Κάνθαρου της Ζέας και της Μουνηχίας	73
Εικόνα 4.9 Στα αριστερά το τείχος της Ιεράς Πύλης με πλίθινη ανωδομή που αποκαλύφθηκε στο εσωτερικό της μεταγενέστερης λίθινης θεμελιώσης και στα δεξιά τομή στον τοίχο που εικονίζει τις διαδοχικές θεμελιώσεις	74
Εικόνα 4.10 Οδευση τείχους και αστικές πύλες με κόκκινο χρώμα η περιοχής έρευνας	75
Εικόνα 4.11 Ο αρχαίος Πειραιάς (φωτ. Εφορεία Αρχαιοτήτων Δυτικής Αττικής, Πειραιώς και Νήσων).....	75
Εικόνα 5.1 Κάνναβος μετρήσεων για το σύνολο των γεωφυσικών μεθόδων στον Πειραιά....	77
Εικόνα 5.2 Χάρτης Google Earth όπου απεικονίζονται οι τοποθεσίες των μετρήσεων με πράσινο χρώμα του γεωραντάρ με κίτρινο των ηλεκτρομαγνητικών και με κόκκινο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι μπλε κουκίδες απεικονίζουν τις θέσεις των προτεινόμενων στύλων.....	77
Εικόνα 5.3 Κάνναβος μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.	78
Εικόνα 5.4 Θέσεις ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων με μπλε χρώμα οι προτεινόμενες θέσεις των στύλων.....	78
Εικόνα 5.5 Χάρτης κατανομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 1,5m.....	81
Εικόνα 5.6 Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 1,5m.....	81
Εικόνα 5.7 Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m.....	82
Εικόνα 5.8 Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m.....	82
Εικόνα 5.9 Τοποθέτηση ηλεκτροδίων ηλεκτρικής μεθόδου	84
Εικόνα 5.10 Αξιολόγηση (βαθμός και βάθος) των εξεταζόμενων διατάξεων.....	85
Εικόνα 5.11 Μετρήσεις ηλεκτρικής μεθόδου στην οδό Ομηρίδου Σκυλίτση.....	86

Εικόνα 5.12 Κάναβος μετρήσεων GPR.....	89
Εικόνα 5.13Μετρήσεις GPRεπί της οδού Αλιπεδίου	89
Εικόνα 5.14Μετρήσεις GPRεπί της οδού Ομηρίδου Σκυλίτση	89
Εικόνα 5.15τριδιάστατη αποτύπωση των ραδογραμμάτων με αντένα 250MHz.....	101
Εικόνα 5.16τριδιάστατη αποτύπωση των ραδογραμμάτων συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz.....	102

1.2 Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1Τιμές ειδικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα.....	19
Πίνακας 2.2 Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών	20
Πίνακας 2.3 Εφαρμογές και στόχοι ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	32
Πίνακας 2.4 Εφαρμογές του οργάνου	38
Πίνακας 2.5 Ταχύτητες διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων(v) τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (K) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας(σ) για διάφορους τύπους υλικών.....	39
Πίνακας 3.1Απόκτηση δεδομένων, αξιολόγηση και καταγραφή διαδικασίας γεωφυσικών μεθόδων.....	54
Πίνακας 5.2Γεωηλεκτρική τομή SK-RES	87
Πίνακας 5.4 Συντεταγμένες των προτεινόμενων στύλων	105

2 Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κύριο Γεώργιο Αποστολόπουλο, αναπληρωτή καθηγητή του Τομέα Μεταλλευτικής, τόσο για την αρχική ανάθεση του θέματος όσο και για την συνολική του στήριξη και καθοδήγηση του στο θέμα της διπλωματικής αλλά και σε όλη την πορεία του τελευταίου έτους της σχολής. Επίσης καθοριστική ήταν και η βοήθεια του κυρίου Γεώργιου Αμολοχίτη στην διεξαγωγή των μετρήσεων.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Σταύρο Καριζόνη, Δημήτρη Καραϊσκό, Χριστίνα Βασιλοπούλου, Γεωργία Καπνιά και Γιώργου Γιαννάτο για την βοήθεια τους κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ευχαριστώ, στην συνέχεια, τον κύριο Βανδαράκη Δημήτριο και κύριο Κοσμά Παυλόπουλο μέλη του Χαροκοπιού Πανεπιστημίου Αθηνών οι οποίοι βοήθησαν στην κατανόηση της γεωλογίας και την αρχαιολογίας της περιοχής του Πειραιά. Επιπρόσθετα στην διπλωματική μου βοήθησε και ο κύριος Βασίλης Γκανιάτσας καθηγητής της Αρχιτεκτονικής σχολής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ο οποίος παρείχε πληροφορίες για την αρχαιολογία της περιοχής.

Ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου και τα αδέρφια μου που πάντα με στηρίζουν ψυχολογικά και πρακτικά σε οποιοδήποτε βήμα μου. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους που βρίσκονται δίπλα μου και ιδιαίτερα τον φίλο μου Αναστάση που πάντα με βοηθά από την αρχή της γνωριμίας μας.

Ελένη Σμυρνιού

Ιούνιος 2016

3 Περίληψη

«Γεωφυσική έρευνα στον Πειραιά για τον εντοπισμό στρωματογραφίας και πιθανών ανθρωπογενών δομών»»

Στην παρούσα διπλωματική διερευνάται το υπέδαφος των οδών Ομηρίδου Σκυλίτση, Πύλης, Αλιπεδίου και Παλλάδος στην περιοχή του Πειραιά με γεωφυσικές μεθόδους. Ο σκοπός της έρευνας είναι η αποτύπωση της στρωματογραφίας αλλά και ο εντοπισμός πιθανών αρχαιολογικών δομών στο υπέδαφος των οδών αυτών έτσι ώστε να καθοριστεί η θέση τοποθέτησης δύο στύλων γείωσης βάθους 4m οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την διέλευση του TRAM από την οδό Ομηρίδου Σκυλίτση. Αρχικά έγινε σχεδιασμός της έρευνας με την βοήθεια πληροφοριών από γεωλογικά και αρχαιολογικά στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη το αστικό περιβάλλον και την κίνηση αυτοκινήτων στην συγκεκριμένη οδό. Επιπλέον, στον σχεδιασμό της έρευνας βοήθησαν στοιχεία που συλλέχθηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία από γεωφυσικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε αστικό ιστό. Αφού σχεδιάστηκε η γεωφυσική έρευνα έγιναν μετρήσεις με 3 διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους, την ηλεκτρομαγνητική (EM), το γεωραντάρ (GPR) και την ηλεκτρική μέθοδο (ERT). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές της μεθόδους στην συνέχεια επεξεργάστηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Σχολής Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων πρόεκυψε η στρωματογραφία της περιοχής η οποία ήρθε σε συμφωνία με την βιβλιογραφία. Οι πιθανές θέσεις ανθρωπογενών δομών εντοπίστηκαν στην περιοχή χωρίς την εμφανή ύπαρξη τοιχίων. Τελικά καθορίστηκαν οι θέσεις των στύλων γείωσης σε περιοχές απουσίας πιθανών ανθρωπογενών δομών.

Λέξεις κλειδιά: γεωφυσικές μέθοδοι, ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, γεωραντάρ, ηλεκτρική μέθοδος, Πειραιάς, αρχαιολογία, εντοπισμός αρχαιοτήτων, στρωματογραφία, αστικό περιβάλλον

4 Abstract

“Geophysical investigation in Piraeus city for the detection of stratigraphy and possible anthropogenic structures”

The present thesis investigates the subsoil of the road Omiridou Skylitsi, Pylis, Alipediou and Pallados in Piraeus with geophysical methods. The purposes of the research are the detection of the stratigraphy and the identification of possible archeological structures buried in the subsoil in order to determine the mounting positions of two grounding columns that are 4m deep that are necessary for the railway passing through the road Omiridou Skylitsi. Firstly, the research design was determined by geological and archeological information but also by considering the highly urbanized environment of this location. This investigation was conducted by using 3 different geophysical methods the electromagnetic (EM), the ground penetrating radar (GPR) and electrical method (ERT). The results were processed in the Laboratory of Applied Geophysics in the School of Mining and Metallurgical Engineering at the National Technical University of Athens. An analysis of the results showed the stratigraphy of the area which came to an agreement with the literature. Possible anthropogenic structures positions were established without an apparent existence of ancient walls. In that way the final position of the columns were established.

Keywords: geophysical methods, electromagnetic methods, ground penetrating radar, electrical method, Piraeus, archeology, antiquities identification, stratification, urban investigation

1 Εισαγωγή-Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Στο σύγχρονο αστικοποιημένο περιβάλλον οι εφαρμογές του μηχανικού αρχίζουν να περιορίζονται. Στο αστικό περιβάλλον και ιδιαίτερα σε μια πολυσύχναστη οδό δημιουργούνται προβλήματα χώρου λόγω της πυκνής πολεοδομίας και χρόνου καθώς η έρευνα δεν πρέπει να δυσχεράνει την κυκλοφορία των οχημάτων. Από αυτή την άποψη η έρευνα για την πραγματοποίηση ενός έργου πρέπει να είναι αποδοτική χωρικά, χρονικά και οικονομικά έτσι αμέσως οι κλασσικοί τρόποι έρευνας υπεδάφους (γεωτρήσεις) αποκλείονται. Επίσης, σε πόλεις όπως είναι η Αθήνα, η Θεσσαλονίκη ή η Ρώμη, οι οποίες στην ουσία είναι χτισμένες πάνω σε περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος προστίθεται και ο παράγοντας της διατήρησης αυτών των δομών.

Σε αυτά τα προβλήματα μπορεί να δώσει λύση η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων. Καθώς αποτελούν φθηνές μέθοδοι οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε περιβάλλοντα μειωμένου χώρου είναι μη καταστρεπτικές και γρήγορες στην εφαρμογή τους.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η πραγματοποίηση Γεωφυσικής έρευνας στην Οδό Ομηρίδου Σκυλίτση στην περιοχή του Πειραιά. Η συγκεκριμένη περιοχή η οποία είναι εξαιρετικά αστικοποιημένη αποτελεί ίσως μια από τις πιο πολυσύχναστες περιοχές του Πειραιά καθώς η οδός Ομηρίδου Σκυλίτση αποτελεί την κύρια έξοδο οχημάτων από το λιμάνι του Πειραιά προς το κέντρο της Αθήνας αλλά και της Εθνικής Οδού. Στο πρόβλημα αυτό συνεισφέρει και το παζάρι του Πειραιά το οποίο βρίσκεται στην οδό Αλιπεδίου. Επιπλέον στην συγκεκριμένη περιοχή βρίσκονται και οι αστικές πύλες του Πειραιά το οποίο προσδίδει στην περιοχή υψηλό αρχαιολογικό ενδιαφέρον.

Ο σκοπός της διπλωματικής είναι ο εντοπισμός πιθανών αρχαιολογικών δομών καθώς και της στρωματογραφίας της περιοχής αφού στην οδό Ομηρίδου Σκυλίτση θα πρέπει να τοποθετηθούν δύο στύλοι γείωσης, ώστε να μπορέσει να γίνει η διέλευση του TRAM. Οι στύλοι αυτοί θα έχουν βάθος 4m οπότε η γεωφυσική έρευνα θα πρέπει με ακρίβεια να καθορίσει την θέση τοποθέτησης τους.

Βάση των παραπάνω επιλέχθηκε να γίνει γεωφυσική έρευνα η οποία θα έδινε αποτελέσματα χωρίς να είναι κυρίως καταστρεπτική προς τις πιθανές αρχαιολογικές δομές. Κατά την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων απερρίφθησαν:

- Η βαρυτική λόγω δυσκολίας εφαρμογής της σε αστικό περιβάλλον.
- Η μαγνητική καθώς βρισκόμαστε σε αστικό περιβάλλον με υψηλό θόρυβο λόγω μεταλλικών κατασκευών (καπάκια αποχετεύσεων, σιδηροδρομικές γραμμές, κίνηση οχημάτων).
- Η σεισμική λόγω του υψηλού θορύβου.

Ενώ επιλέχθηκαν:

- Η ηλεκτρική με την τεχνική της τομογραφίας (ERT) καθώς θέλαμε μια ακριβή αποτύπωση του υπεδάφους.
- Η μέθοδος γεωραντάρ (GPR) για την εξακρίβωση τις τοποθεσίας των δομών.
- Η ηλεκτρομαγνητική για την εύρεση της χωρικής εξάπλωσης τους.

Στην συνέχεια θα αναλυθούν τα θεωρητικά στοιχεία των μεθόδων, μελέτες περιπτώσεων οι οποίες αναφέρονται σε παρόμοιες έρευνες, θα γίνει παρουσίαση της περιοχής έρευνας γεωλογικά αλλά και αρχαιολογικά και τέλος τα αποτελέσματα της εφαρμογής των γεωφυσικών μεθόδων καθώς και τα συμπεράσματα και σχόλια που προκύπτουν από αυτές.

2 Θεωρητικό Μέρος

2.1 Εισαγωγή

Η γεωφυσική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων της Γης, στηριζόμενη στις βασικές αρχές της φυσικής. Οι γεωφυσικές έρευνες του υπεδάφους της Γης περιλαμβάνουν την συλλογή μετρήσεων κοντά ή στο έδαφος της Γης οι οποίες επηρεάζονται από την εσωτερική κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων μπορεί να αποκαλύψει την εναλλαγή των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Δουλεύοντας σε διαφορετικές κλίμακες, οι γεωφυσικές έρευνες μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα ερευνών από έρευνες που αφορούν ολόκληρη την Γη έως την έρευνα μιας συγκεκριμένης περιοχής μικρού βάθους για εφαρμογές μηχανικού ή άλλους λόγους. Μέσω των γεωφυσικών μεθόδων, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από στην περιοχή ενδιαφέροντος χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων σε βάθη που αντιστοιχούν στην γεωλογία του υποβάθρου της περιοχής.

Οι γεωφυσικές έρευνες παρόλο που ενδεχομένως ενέχουν σε μεγάλες ασάφειες και αβεβαιότητες ερμηνείας, παρέχουν μια γρήγορη και φθηνή πληροφορία για το υπέδαφος.

Υπάρχει μεγάλο εύρος γεωφυσικών μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την διασκόπηση του υπεδάφους. Οι σημαντικότερες μέθοδοι, καθώς και οι φυσικές ιδιότητες τις οποίες εκμεταλλεύεται η κάθε μία, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1 Γεωφυσικές μέθοδοι και ιδιότητες

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΣΤΟΧΟΣ
Βαρυτομετρική	Ένταση πεδίου βαρύτητας	Προσδιορισμός κατανομής πυκνότητας των πετρωμάτων
Μαγνητική	Ένταση γεωμαγνητικού πεδίου	Εντοπισμός μαγνητισμένων πετρωμάτων, μέσω μαγνητικής επιδεκτικότητας και παραμένουσας μαγνήτισης
Σεισμική	Χρόνοι διάδοσης σεισμικών κυμάτων Περίοδοι σεισμικών κυμάτων Πλάτη σεισμικών κυμάτων	Καθορισμός δομών των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων

Ηλεκτρική	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση της γης Ηλεκτρικά δυναμικά	Καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού(ηλεκτρική αγωγιμότητα και ηλεκτροχωρητικότητα
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

2.2 Ηλεκτρική μέθοδος

2.2.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης του υπεδάφους βασίζονται στην ανίχνευση φυσικών φαινομένων μέσω της υπεδαφικής ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους μετρώνται διαφορές δυναμικού, ρεύματα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν φυσικά ή εισάγονται τεχνητά στην Γη (Αποστολόπουλος, 2008).

2.2.1.1 Ηλεκτρικές μέθοδοι

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

- **Παθητικές μέθοδοι:**
 - **Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού (Self Potential Method):** Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών, τα οποία, είτε σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων, είτε είναι ηλεκτροκινητικής ή γεωθερμικής προέλευσης.
 - **Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric Method) :** Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις φυσικών τελλουρικών ρευμάτων, τα οποία παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, τα οποία βρίσκονται σε σχετικά μεγάλα βάθη, μέχρι τον μανδύα της Γης, μέσα στην Γη.
- **Ενεργητικές μέθοδοι:**
 - **Μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης (Resistivity Method):** Χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές μελέτες, μέσα στα βάθη διασκόπησης.
 - **Μέθοδος της Επαγόμενης Πολικότητας (Induced Polarization Method):** Πραγματοποιείται σε συνδυασμό με την μέθοδο της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) χρονικών μεταβολών του δυναμικού όταν, το ρεύμα που αρχικά διαβιβάζεται, παύει να διαβιβάζεται, στο έδαφος. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγωγίμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

2.2.2 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

2.2.2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης έχει μακρά ιστορία στον τομέα της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, συμπεριλαμβανομένης της πρωτοποριακής εργασίας από τον Conrad Schlumberger το 1912 στην Γαλλία. Λίγα χρόνια νωρίτερα μια ομάδα Σουηδών ερευνητών είχαν πειραματιστεί με τον εντοπισμό αγωγίμων σωμάτων κουνώντας ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων κρατώντας ένα δεύτερο ζευγάρι ηλεκτροδίων σταθερό. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται εντονότερα από τα μέσα της δεκαετίας του ενενήντα λόγω των ταχειών και εντυπωσιακών εξελίξεων στην απόκτηση δεδομένων, στο forward και inverse modeling.

2.2.2.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλεκτρική ειδική αντίσταση

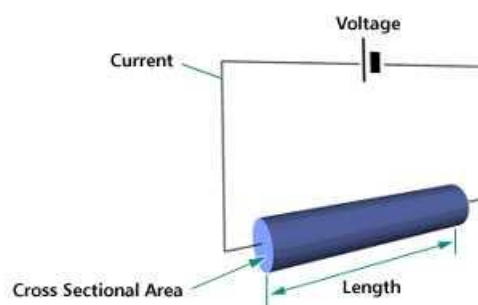
Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται στα πετρώματα και τα ορυκτά με τρεις τρόπους:

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

Για την ηλεκτρονική αγωγιμότητα ισχύει πως αν έχουμε έναν κυλινδρικό αγωγό μήκους L και διατομής A και στα άκρα του μετράμε διαφορά δυναμικού ΔV , τότε, με βάση τον νόμο του Ohm, η ηλεκτρική αντίσταση R δίνεται από τον τύπο :

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

Ενώ για τις διαστάσεις του αγωγού : $R = \rho \times \frac{L}{A}$



Εικόνα 2.1

Όπου ρ η ηλεκτρική ειδική αντίσταση του αγωγού, ανεξάρτητη των διαστάσεων του. Τα περισσότερα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί και οι ειδικές αντιστάσεις τους θα ήταν πολύ υψηλές αν δεν είχαν πόρους με ρευστά, κυρίως νερό. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα πετρώματα είναι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί και η αγωγιμότητα είναι περισσότερο ηλεκτρολυτική παρά ωμική. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω ιόντων.

2.2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική αντίσταση

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

Το είδος του πετρώματος:

Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται τα εύρη τιμών ειδικής αντίστασης ανάλογα με το είδος του ορυκτού, εδάφους ή πετρώματος. Παρατηρούμε πως τα πυριγενή πετρώματα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ τα ιζηματογενή, τις χαμηλότερες, επειδή συνήθως έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε ρευστά. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές, με έντονες όμως, τάσεις αλληλοεπικάλυψης.

Δομή και πορώδες:

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

Πίνακας 2.1 Τιμές ειδικής αντίστασης για χαρακτηριστικά πετρώματα

ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ(Ohm.m)
Αέρας	∞
Μαρμαρυγίας	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Σιδηροπυρίτης	$3 - 10^{-1}$
Γαληνίτης	$2 - 10^{-3}$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Συμπαγής γρανίτης	$1 \times 10^2 - 1 \times 10^6$
Αποσαθρωμένος Γρανίτης	$1 - 1 \times 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$

Ψαμμίτης	1-1x10 ⁸
Σχιστόλιθος	20-2x10 ³
Δολομίτης	1x10 ² -1x10 ¹⁴
Άμμος	1-1x10 ³
Άργιλος	1-1x10 ²
Εδαφικό Νερό	0,5-1x300
Θαλασσινό Νερό	0,2

Περιεκτικότητα σε άλατα:

Για δεδομένο πορώδες, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης των πόρων σε άλατα, τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Επιδράσεις γεωλογικών διεργασιών:

Στον **Πίνακα 2.2** παρουσιάζονται οι επιδράσεις των διαφόρων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων. Κατά κανόνα, οι γεωλογικές διεργασίες μειώνουν την ειδική αντίσταση αλλά υπάρχουν εξαιρέσεις.

Πίνακας 2.2 Επιδράσεις διάφορων γεωλογικών διεργασιών στις ειδικές αντιστάσεις των πετρωμάτων

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

Ηλικία πετρώματος:

Τα παλαιότερα πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Επιδράσεις αργιλικών ορυκτών

Λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας των αργιλικών ορυκτών, η ύπαρξη τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλών τιμών επιφανειακής ειδικής αντίστασης.

Βαθμός κορεσμού:

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

Θερμοκρασία:

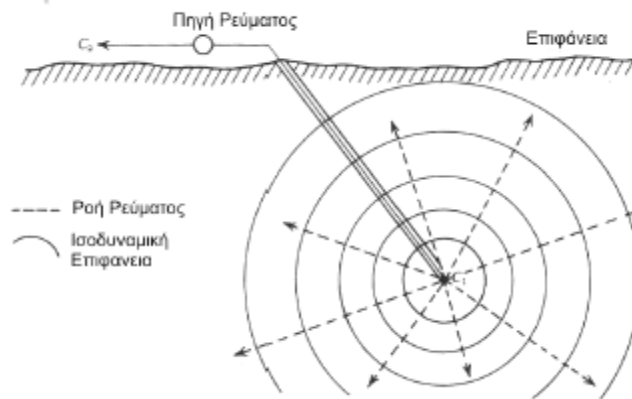
Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο μικρότερη είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος. Αυτός ο παράγοντας, ωστόσο, έχει μικρή επίδραση και διαδραματίζει αξιοσημείωτο ρόλο μόνο σε γεωθερμικά συστήματα.

2.2.2.4 Ηλεκτρόδιο ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο

Στην γεωφυσική μέθοδο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης έχουμε διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στην γη και όχι μόνο σε συρμάτινο καλώδιο. Η ροή ρεύματος μέσα σε ένα τρισδιάστατο σώμα παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με τη ροή μέσω ενός γραμμικού αγωγού. Για αυτό τον λόγο θα εξεταστεί η ροή του ρεύματος στον χώρο.

Ως χώρο μελέτης θεωρούμε το έδαφος της γης, το οποίο όμως για λόγους ευκολίας και απλοποίησης, θεωρούμε ότι είναι ένα άπειρο, ομογενές και ισότροπο μέσο. Επίσης θεωρούμε ότι η ειδική του αντίσταση είναι ίδια και σταθερή σε ολόκληρη την μάζα του (ηλεκτρικά ομογενής γη).

Συνθήκες άπειρου ομογενή χώρου δημιουργούνται όταν τοποθετηθεί ένα ηλεκτρόδιο C1 μικρών διαστάσεων (σημειακή πηγή ρεύματος) βαθιά σε ομογενές και ισότροπο μέσο. Το ηλεκτρόδιο στη συνέχεια συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου, C2, που τοποθετείται στην επιφάνεια της γης και σε απόσταση ώστε η διαμόρφωση του δυναμικού να είναι αμελητέα.

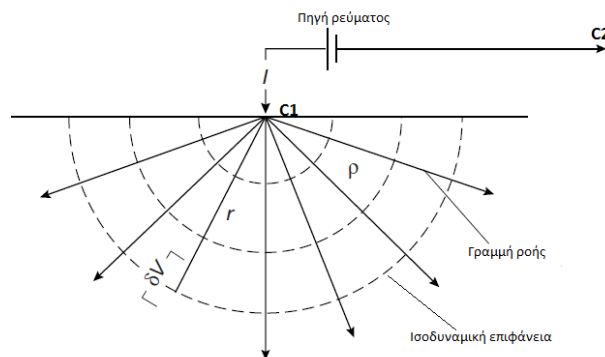


Εικόνα 2.2 Ροή ρεύματος σε άπειρο ομογενή χώρο

Οι γραμμές ροής του ρεύματος είναι ακτινικές και ξεκινούν από την σημειακή πηγή και κατευθύνονται προς τα έξω. Επίσης η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) που προκαλείται από την ηλεκτρική αντίσταση του μέσου, οι διαφορές αποστάσεις από το ηλεκτρόδιο ρεύματος, παραμένει σταθερή κατά μήκος των κυκλικών γραμμών, οι οποίες έχουν ως κέντρο το ηλεκτρόδιο. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές και στις τρεις διαστάσεις σχηματίζουν ισοδυναμικές σφαιρικές επιφάνειες, με κέντρο το ηλεκτρόδιο.

2.2.2.5 Ροή ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

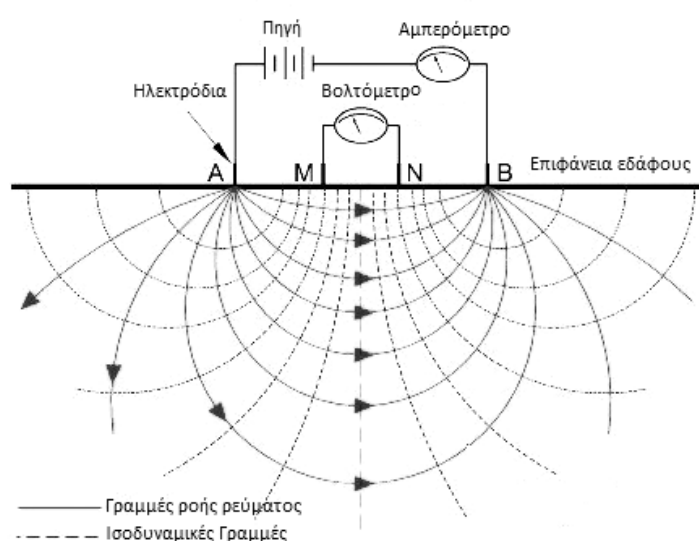
Τοποθετώντας ηλεκτρόδιο C1 στην επιφάνεια ηλεκτρικά ομογενούς μέσου. Το ηλεκτρόδιο συνδέεται με πηγή ρεύματος και το κύκλωμα κλείνει μέσω δεύτερου ηλεκτροδίου C2, το οποίο τοποθετείται επίσης στην επιφάνεια, αλλά σε μακρινή απόσταση έτσι ώστε η επίδραση του στην διαμόρφωση δυναμικού να είναι αμελητέα. Οι γραμμές ροής του ρεύματος I είναι, όπως και στην περίπτωση του άπειρου ομογενούς μέσου ακτινικές, ενώ οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ομόκεντρα ημισφαίρια.



Εικόνα 2.2 Ροή ρεύματος σε ημιάπειρο ομογενή χώρο

2.2.2.6 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου

Στην περίπτωση αυτή τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ τους στην επιφάνεια της γης. Το καθένα από αυτά λειτουργεί σαν μία σημειακή πηγή και επηρεάζει την διαμόρφωση του δυναμικού. Επομένως το δυναμικό σε ένα τυχαίο σημείο P1 θα ισούται με το αποτέλεσμα της συνεισφοράς του δυναμικού V1, λόγω της σημειακής πηγής A και του δυναμικού V2, λόγω της πηγής B. Τέλος, οι γραμμές ροής του ρεύματος δεν είναι πλέον ακτινικές, αλλά καμπύλες γραμμές που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.3**.



Εικόνα 2.3 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στην επιφάνεια ημιάπειρου ομογενούς χώρου

2.2.2.7 Φαινόμενη ειδική αντίσταση

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

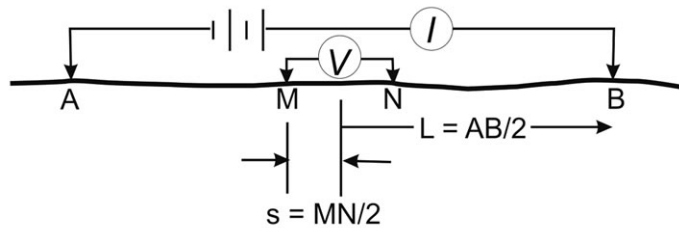
Σε ανομοιογενές μέσο, η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση ποικίλει ανάλογα με τις σχετικές θέσεις των ηλεκτροδίων και λέγεται φαινόμενη ειδική αντίσταση. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετράμε για κάθε θέση ή/και διεύθυνση της διάταξης των ηλεκτροδίων, δεν είναι αντιπροσωπευτική των πραγματικών ειδικών αντιστάσεων των μερών του υπεδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με την κατανομή των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων που διαρρέουν οι ρευματικές γραμμές και είναι αντιπροσωπευτική και των στρωμάτων του υπεδάφους και των αγωγίμων ή μη ανομοιογενών.

2.2.2.8 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Σε κάθε γεωφυσική μέτρηση τα ηλεκτρόδια ρεύματος, δυναμικού και οι μεταξύ τους αποστάσεις διατάσσονται στο έδαφος με συγκεκριμένο τρόπο ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο της έρευνας. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διατάξεις ηλεκτροδίων και αναλύονται οι αντίστοιχες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις:

Διάταξη Schlumberger:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται συμμετρικά από το κέντρο της διάταξης απέχοντας αποστάσεις L και s αντίστοιχα.

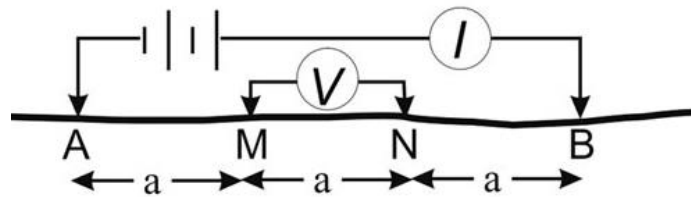


Εικόνα 2.4 διάταξη Schlumberger

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

Διάταξη Wenner:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a .

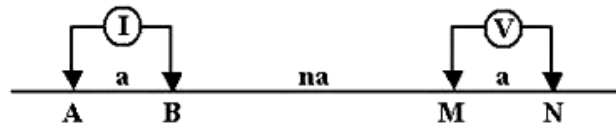


Εικόνα 2.5 διάταξη Wenner

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

Διάταξη Dipole-Dipole:

Τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν απόσταση a , όσο απέχουν και τα ηλεκτρόδια δυναμικού, ενώ τα δίπολα μεταξύ τους απέχουν απόσταση πολλαπλάσια της απόστασης a (na).

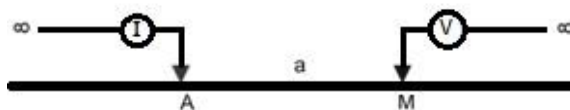


Εικόνα 2.6 διάταξη Dipole-Dipole

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

Διάταξη Pole-Pole:

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

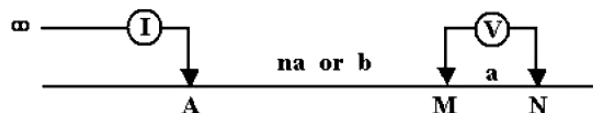


Εικόνα 2.7 Διάταξη Pole-Pole

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

Διάταξη Pole-Dipole:

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



Εικόνα 2.8 Διάταξη Pole-Dipole

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

2.2.2.9 Επιλογή κατάλληλης διάταξης

Στην **Εικόνα 2.9** παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν την επιλογή της κατάλληλης κάθε φοράς διάταξης ηλεκτροδίων με φθίνουσα σειρά απόδοσης. Συμπερασματικά σε περιπτώσεις βυθοσκοπήσεων τα περισσότερα πλεονεκτήματα έχει η διάταξη Schlumberger. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνουν συνεχώς, με σταθερή απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία αλλάζει μόνο όταν το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού γίνεται τόσο μικρό ώστε να μην είναι δυνατό να μετρηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια. Όταν πρόκειται να μεταβληθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού, λαμβάνονται διπλομετρήσεις και με τις δύο αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού. Γίνονται έξι μετρήσεις ανά λογαριθμικό κύκλο του μισού της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος. Η διάταξη Dipole-Dipole, παρόλο που έχει μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης λόγω της μετακίνησης των ηλεκτροδίων δυναμικού υφίσταται το θόρυβο που δημιουργούν οι παράπλευρες επιφανειακές ανομοιογένειες.

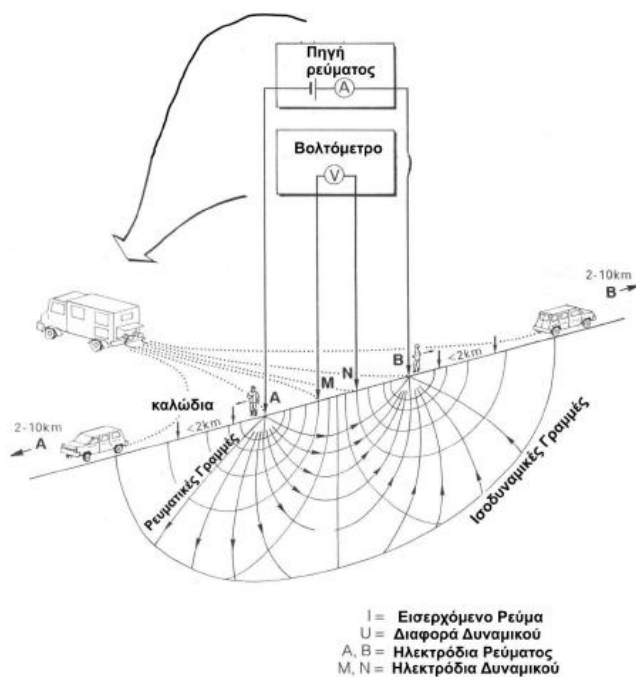
Λόγος σήματος προς θόρυβο	• Wenner, Schlumberger, Pole-Dipole, Dipole-Dipole
Ευαισθησία σε παράπλευρες ανομοιογένειες	• Dipole-Dipole, Pole-Dipole, Schlumberger, Wenner
Διαχωρισμός δομών με απότομη κλίση	• Schlumberger, Wenner, Dipole-Dipole, Pole-Dipole
Διαχωρισμός οριζόντιων στρωμάτων	• Schlumberger και Wenner, Dipole-Dipole και Pole-Dipole
Ευαισθησία στην μορφολογία του υποβάθρου	• Dipole-Dipole, Pole-Dipole, Schlumberger και Wenner
Βάθος διασκόπησης	• Dipole-dipole, Schlumberger
Ευαισθησία σε βάθος και διεισδυτικότητα δια μέσου επιφανειακού αγωγίμου στρώματος	• Schlumberger και Wenner, Dipole-Dipole, Pole-Dipole
Ευαισθησία στην κλίση	• Schlumberger και Wenner, Dipole-Dipole, Pole-Dipole
Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση βυθοσκοπήσεων	• Schlumberger
Ευαισθησία στις επιφανειακές ανομοιογένειες στην περίπτωση ηλεκτρικών χαρτογραφήσεων	• Pole-Dipole, Dipole-Dipole, Schlumberger και Wenner

Εικόνα 2.9 Καταλληλότητα κάθε διάταξης ανάλογα με την περίπτωση της έρευνας

2.2.2.10 Εξοπλισμός Υπαίθρου

Για να μετρήσουμε τη φαινόμενη ειδική αντίσταση, δηλαδή τα ΔV και I , χρειαζόμαστε:

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



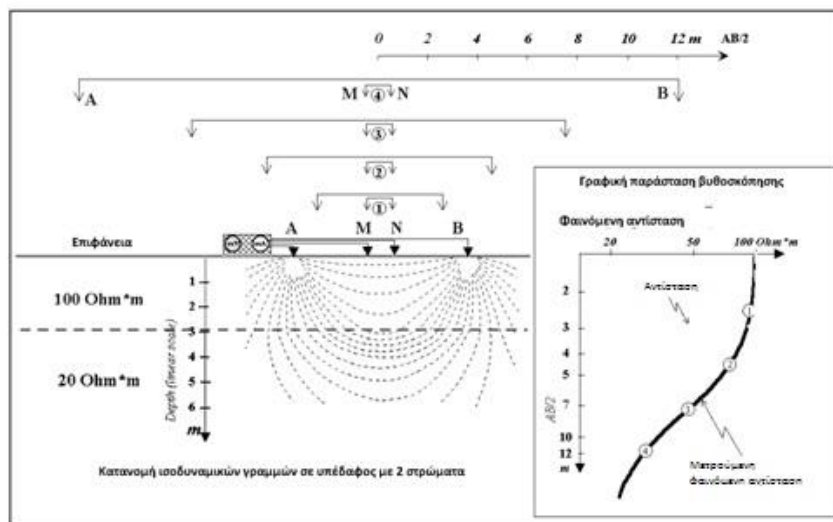
Εικόνα 2.10 Βασική αρχή των μετρήσεων και πιθανό ηλεκτρικό πεδίο γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων συνεχούς ρεύματος (Vogelsang,1995)

2.2.2.11 Γεωηλεκτρικές Διασκοπήσεις

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

2.2.2.11.1 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερό ενώ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την διασκόπηση του υπεδάφους εις βάθος κάτω από το κέντρο της διάταξης. Η μεταβολή των τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δίνει μια πρώτη εικόνα των μεταβολών των ειδικών αντιστάσεων των διαφόρων στρωμάτων σε βάθος. Στόχος της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης είναι η δημιουργία του γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους από τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στις διαφορές αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

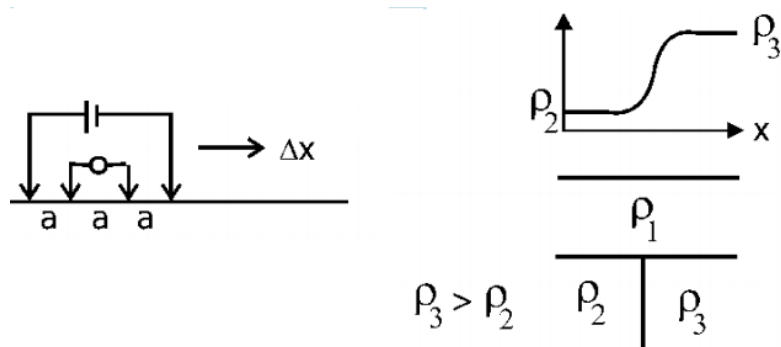


Εικόνα2.11 Ηλεκτρική βυθοσκόπηση με σταδιακή απομάκρυνση των ηλεκτροδίων από το κέντρο της διάταξης

2.2.2.11.2 Οριζόντιες Ηλεκτρικές Χαρτογραφήσεις Ειδικής Αντίστασης

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

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

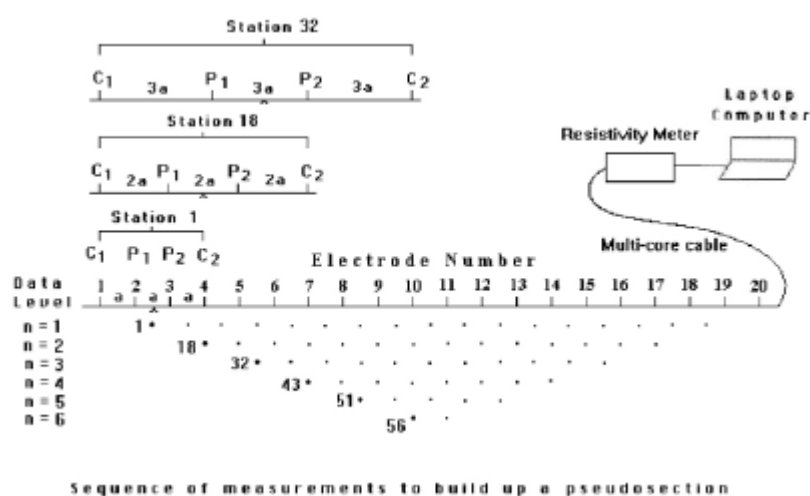


Εικόνα 2.12 Οριζόντια χαρτογράφιση διάταξης Wenner, διάγραμμα φαινόμενης αντίστασης, προφίλ υπεδάφους

2.2.2.11.3 Μέθοδος Δισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να έχουμε σε συγκεκριμένες θέσεις, μεγάλης ακρίβειας διασκοπήσεις, τόσο παράπλευρα, όσο και σε βάθος. Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελείται από πολλές βυθοσκοπήσεις πολύ κοντά μεταξύ τους. Ο τρόπος μέτρησης, οι αποστάσεις και οι θέσεις των ηλεκτροδίων καθορίζονται από την επιλογή των διατάξεων που θέλουμε. Όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία ερμηνείας, που τελικά δίνει μια δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή μεγάλης ακριβείας, δηλαδή μια γεωηλεκτρική τομογραφία.

Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι αντιμετωπίζει σύνθετες γεωλογικές τομές, χωρίς να λαμβάνει υπόψη την θεώρηση της οριζόντιας στρωματωμένης γης, προλαμβάνοντας με αυτό τον τρόπο με ασφάλεια στην ποσοτική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών μετρήσεων. Τα γεωηλεκτρικά τομογράμματα απεικονίζουν τομές βάθους, όπου αποτυπώνονται τόσο οι κατακόρυφες όσο και οι πλευρικές κατανομές της ειδικής αντίστασης των υπεδάφικων σχηματισμών. Η πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην κατεύθυνση αυτοματοποίησης της λήψης γεωφυσικών δεδομένων και της αντιστροφής αύξησε δραστικά την εφαρμοσιμότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η μέθοδος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, στην αρχαιομετρία καθώς και στην υδρογεωλογία.

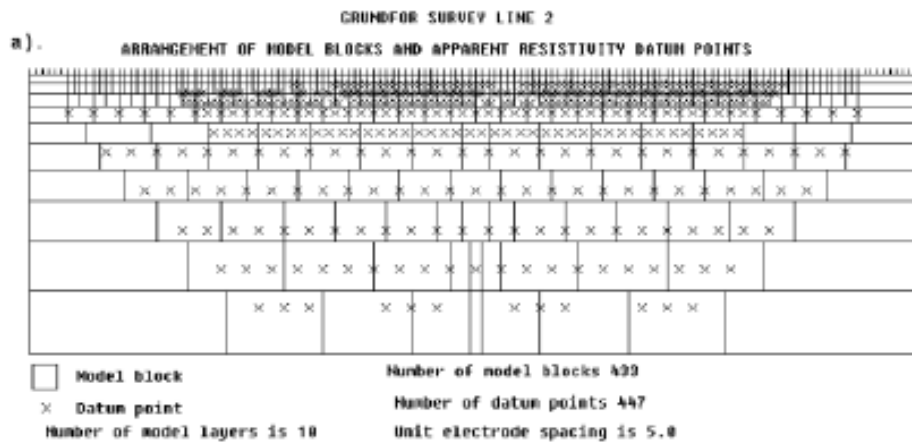


Εικόνα 2.13 Η διάταξη των ηλεκτροδίων για την πραγματοποίηση δισδιάστατης γεωηλεκτρικής τομογραφίας και η σειρά των μετρήσεων για την δημιουργία ψευδοτομής

Στην ηλεκτρική τομογραφία γίνεται καταγραφή δεδομένων με πολλές διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων, κατά μήκος μιας γραμμής. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει αρκετά πυκνή πλευρική κάλυψη, από πλευράς λήψης δεδομένων, προκειμένου να γίνει εφικτή η ανίχνευση πολύπλοκων δομών του υπεδάφους, το οποίο επιβάλλει τη χρησιμοποίηση τυποποιημένων πολύ-ηλεκτροδιακών συστημάτων λήψης δεδομένων.

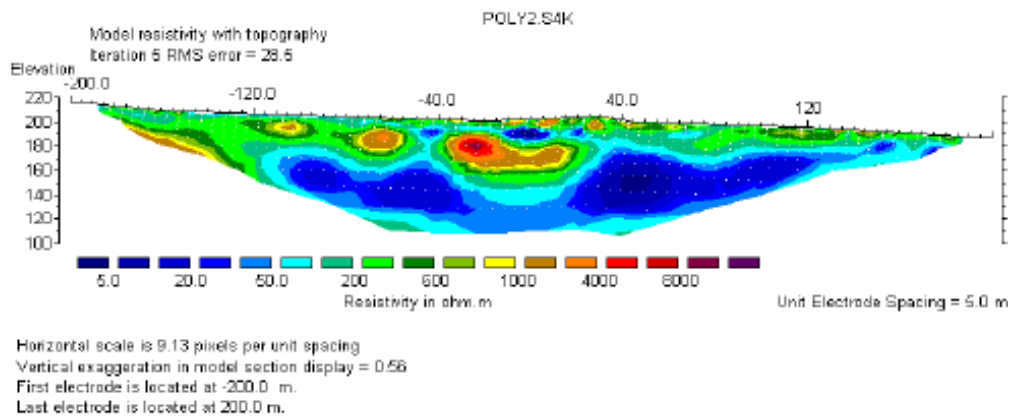
Λόγω της μεγάλης ποσότητας δεδομένων που παράγουν τα συστήματα αυτά απαιτείται αυτοματοποιημένος χειρισμός και επεξεργασία δεδομένων. Αυτόματες τεχνικές αντιστροφής δημιουργίας μοντέλων, οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν την ανάγκη αυτή.

Με την τεχνική αυτή το έδαφος χωρίζεται σε κελιά σταθερών διαστάσεων, το μέγεθος των οποίων συνήθως αυξάνει με το βάθος.



Εικόνα 2.14 Λιαίρεση της επιφάνειας του υεδάφους διςδιάστατου μοντέλου σε ορθογώνια πρίσματα , με περισσότερα κελιά από τα δεδομένα

Οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις προσαρμόζονται, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή συμφωνία ανάμεσα στα δεδομένα εισόδου και στην απόκριση του μοντέλου. Όσον αφορά στην τοπογραφία είτε αντιμετωπίζεται με διορθώσεις είτε με απευθείας εισαγωγή στο πλέγμα.



Εικόνα 2.2.15 Μοντέλο απεικόνισης ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων

2.3 Κλασσική Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

2.3.1 Εισαγωγή

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

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

Πίνακας 2.3 Εφαρμογές και στόχοι ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

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

2.3.2 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι ένα μέτρο για το πόσο εύκολα ένα ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει ένα υλικό, και μετριέται σε Siemens/m ή milli Siemens/m. Ένα Siemens/m είναι το αντίστροφο ενός Ohm ή ίσο με 1/Ohm.

2.3.3 Μαγνητική Επιδεκτικότητα

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

Επιπλέον οι ανθρώπινες δραστηριότητες ενισχύουν περαιτέρω το χόμα, έτσι ώστε τα χόματα επί των αρχαιολογικών τόπων να είναι πολύ πιο μαγνητικά από εκείνα στις περιβάλλουσες. Οι άνθρωποι ενισχύουν τις νεογενείς διαδικασίες και επομένως αντιθέσεις επιδεκτικότητας, με την αύξηση της οργανικής ουσίας και την αλλαγή του πορώδους των χωμάτων και επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η ανθρώπινη μαγνητική ενίσχυση του χόματος αυξάνει συχνά την αντίθεση επιδεκτικότητας στους αρχαιολογικούς χώρους και με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η δυνατότητα ανίχνευσης τεχνητών αντικειμένων.

2.3.4 Τύποι Ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων. Εφαρμογές της μεθόδου

Δύο ειδών συστήματα:

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

Συστήματα σε σχέση με την πηγή:

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

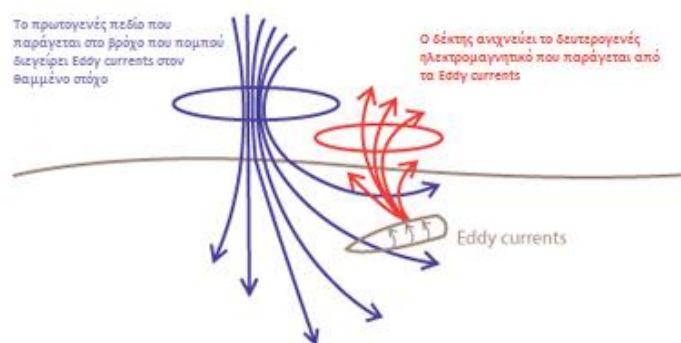
Επαγωγικά ηλεκτρομαγνητικά συστήματα :

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

2.3.5 Αρχές της γεωφυσικής ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Οι ηλεκτρομαγνητικές (EM) 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 φτιαγμένο με πολλές περιελίξεις καλωδίου ή μέσω ενός μεγάλου βρόχου του καλωδίου. Η απόκριση του εδάφους είναι η παραγωγή των δευτερογενών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τα τελικά πεδία μπορούν να ανιχνευθούν από τα εναλλασσόμενα ρεύματα που ρέουν σε ένα πηνίο δέκτη με τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Οι σχηματισμοί με υψηλή αγωγιμότητα παράγουν ισχυρά δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Δηλαδή, αν υπάρχει αγωγίμο υλικό στο υπέδαφος η μαγνητική συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος επάγει εναλλασσόμενα ρεύματα (Eddy Currents) μέσα στον αγωγό. Τα ρεύματα αυτά παράγουν δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό που ανιχνεύεται από το πηνίο-δέκτη. Ο δέκτης επίσης ανιχνεύει και το πρωτογενές πεδίο. Το τελικό πεδίο είναι συνδυασμός πρωτογενούς και δευτερογενούς που διαφέρουν ως προς την φάση και το πλάτος. Μετά την αντιστάθμιση για το πρωτογενές πεδίο (που μπορεί να υπολογιστεί από τις σχετικές θέσεις και προσανατολισμούς των πηνίων) και το μέγεθος και η σχετική φάση του δευτερογενούς πεδίου μπορούν να υπολογιστούν. Η διαφορά στο τελικό πεδίο από το πρωτογενές δίνει πληροφορία για την γεωμετρία, το μέγεθος και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού στο υπέδαφος.



Εικόνα 2.16 Ηλεκτρομαγνητικό πρότυπο επαγωγής

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 φαινομενική αγωγιμότητα. Η σε φάση συνιστώσα, η οποία γενικά δεν είναι υπεύθυνη για τις αλλαγές της χωρικής αγωγιμότητας σωμάτων όπως τα μεταλλικά. Η μετρούμενη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι η μέση αγωγιμότητα ενός ή περισσοτέρων στρωμάτων του υπεδάφους στην περιοχή μέτρησης του οργάνου σε βάθος έρευνας που σχετίζεται με την απόσταση των πηνίων, την διεύθυνση, την συχνότητα λειτουργίας του οργάνου και την αγωγιμότητα του κάθε στρώματος του υπεδάφους.

2.3.6 Βάθος διείσδυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

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

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

Στην περίπτωση αυτή

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

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

Το βάθος διείσδυσης είναι αντίστροφος ανάλογο της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της αγωγιμότητας του εδάφους. Συνεπώς, η συχνότητα που χρησιμοποιείται σε μια έρευνα EM μπορεί να καθορίσει το επιθυμητό βάθος σε οποιοδήποτε μέσο. Εμπειρικά, ένα αποτελεσματικό βάθος διείσδυσης z_e μπορεί να καθοριστεί ως το μέγιστο βάθος στο οποίο ο αγωγός μπορεί να βρεθεί και να παράγει μια αναγνωρίσιμη ηλεκτρομαγνητική ανωμαλία .

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

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

2.3.7 Συστήματα μέτρησης Φάσης

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

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

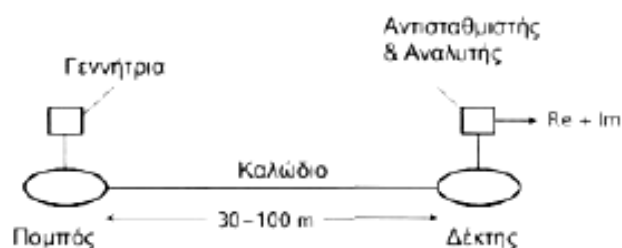
Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του αγωγού προκαλούν μια περεταίρω καθυστέρηση φάσης ϕ .

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

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

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

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



Εικόνα 2.17 Σύστημα μέτρησης φάσης διδύμου πηνίου

Τα κλασικά συστήματα μέτρησης φάσης χρησιμοποιούν κινούμενους πομπούς και δέκτες και αναφέρονται ως δίδυμοι πηνίου (twin-coil) ή slingram συστήματα. Τα πηνία πομπού και δέκτη είναι διαμέτρου 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 μία φορητή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος.

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

Οι μετρήσεις υπαίθρου είναι απλή διαδικασία και απαιτεί μια ομάδα μόνο δύο ή τριών χειριστών. Η απόσταση και ο προσανατολισμός των πηνίων είναι κρίσιμα, δεδομένου ότι ένα μικρό λάθος στην απόσταση μπορεί να δημιουργήσει αξιόλογο λάθος στη μέτρηση φάσης.

Τα πηνία πρέπει επίσης να διατηρηθούν ακριβώς οριζόντια και συνεπίπεδα δεδομένου ότι οι μικρές σχετικές κλίσεις μπορούν να παράγουν επίσης ουσιαστικά λάθη. Η απαιτητή ακρίβεια της απόστασης και του προσανατολισμού είναι δύσκολο να διατηρηθεί σε μεγάλες αποστάσεις με ανώμαλη τοπογραφία.

2.3.8 Ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης

CMD-EM

Το όργανο CMD μετράει την φαινόμενη αγωγιμότητα και την in-phase μέτρηση, ανάλογη της μαγνητικής επιδεκτικότητας, σε ένα συγκεκριμένο βάθος ανάλογα με τη διαμόρφωση του. Το όργανο CMD μπορεί να διαθέτει κατάλληλη σύνδεση με GPS όργανο ώστε για κάθε θέση μέτρησης να καταγράφονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες

Πίνακας 2.4 Εφαρμογές του οργάνου

Γεωτεχνική έρευνα	Γεωλογική χαρογράφιση περιοχών	Γεωργία
<ul style="list-style-type: none"> • αξιολόγηση βραχώδους • αποτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων 	<ul style="list-style-type: none"> • αναζήτηση κοιτασμάτων • γεωλογική έρευνα • εντοπισμός σπηλαιωμάτων 	<ul style="list-style-type: none"> • προσδιορισμός ποιότητας εδάφους • διαχείριση νερού και λιπασμάτων
Αρχαιολογία		Περιβαλλοντικούς σκοπούς
<ul style="list-style-type: none"> • εντοπισμός τοιχίων • ιστορική έρευνα σπηλαιωμάτων • εντοπισμός υπόγειων στοών 		<ul style="list-style-type: none"> • υδρογεωλογικές εφαρμογές • σε σημεία ρυπανσης • διαχείριση νερού λεκανών

2.4 Γεωραντάρ-GPR (Ground Penetrating Radar)

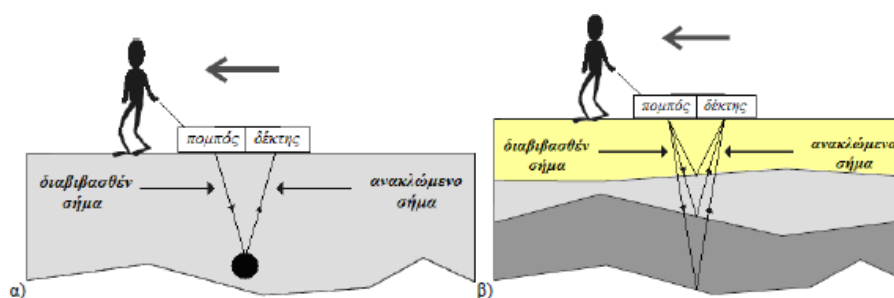
2.4.1 Εισαγωγή

Ενώ οι σεισμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνά για την χαρτογράφηση επιφανειακών στρωμάτων άλλα δεν διαθέτουν την ακρίβεια (εντοπισμός υπόγειων κατασκευών με μήκος μικρότερο του 1m) που χρειάζεται σε πολλές εφαρμογές. Το γεωραντάρ είναι η κατάλληλη γεωφυσική μέθοδος σε αυτές τις περιπτώσεις. Η μέθοδος του γεωραντάρ ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Το γεωραντάρ αποτελείται από μια κεραία που λειτουργεί σαν πομπός, ο οποίος εκπέμπει έναν μικρής διάρκειας ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Ο παλμός αυτός ανακλάται από αντικείμενα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, και κατόπιν λαμβάνεται από κεραία δέκτη. Βασίζεται στην ανάκλαση υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από 8MHz έως 4GHz, σε ασυνέχειες μέσω των οποίων η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα μεταβάλλονται.

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

	K	σ (mS/m)	v (m/ns)
Αέρας	1	0	0,3
Αποσταγμένο νερό	80	0,01	0,033
Γλυκό νερό	80	0,5	0,033
Θαλασσινό νερό	80	3×10^3	0,01
Ξηρά άμμος	3-5	0,01	0,15
Διαποτισμένη άμμος	20-30	0,1-1	0,06
Ασβεστόλιθος	4-8	0,5-2	0,12
Σχιστόλιθος	5-15	1-100	0,09
Πλύς	5-30	1-100	0,07
Άργιλος	5-40	2-1000	0,06
Γρανίτης	4-6	0,01-1	0,13
Ξηρό άλας	5-6	0,01-1	0,13
Πάγος	3-4	0,01	0,16

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



Εικόνα 2.18 γενική έννοια του τρόπου που πραγματοποιείται η ανίχνευση με γεωραντάρ.

Ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα για να διαδοθεί από τον πομπό στο δέκτη ανεξαρτήτως της διαδρομής του, ονομάζεται χρόνος διαδρομής. Βασική μονάδα μέτρησης του χρόνου διαδρομής είναι το νάνο-δευτερόλεπτο (ns).

Ο δέκτης καταγράφει τα κύματα που οδεύουν απευθείας από τον πομπό στον δέκτη μέσω του αέρα. Αυτά τα κύματα, αφενός μεν φτάνουν πρώτα, επειδή η ταχύτητα διάδοσης στον αέρα είναι μεγαλύτερη απ'ότι σε οποιοδήποτε υλικό, αφετέρου δεν έχουν μεγάλο πλάτος, αφού δεν υφίσταται εξασθένιση. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κύματα που διαδίδονται στο υπέδαφος. Η καταγραφή του πλάτους των κυμάτων σε σχέση με το χρόνο διαδρομής ονομάζεται ίχνος. Όταν το κύμα συναντήσει υλικό με διαφορετική ηλεκτρική διαπερατότητα, αλλάζει κατεύθυνση δηλαδή διαθλάται ή ανακλάται. Περίθλαση συμβαίνει όταν το κύμα συναντήσει εμπόδια μικρού μεγέθους, τα οποία αναγκάζουν να διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντήχηση συμβαίνει, όταν το κύμα «παγιδευτεί» σε κάποιο γεωλογικό στρώμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις το κύμα ανακλάται πολλές φορές με συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών ανακλάσεων.

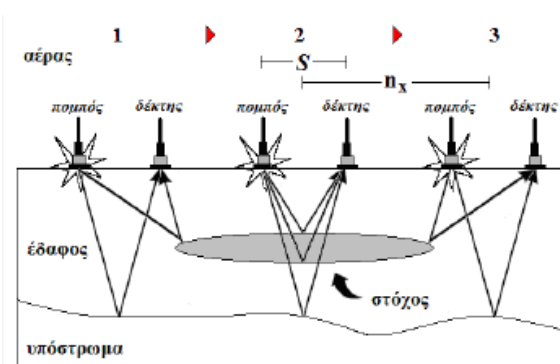
2.4.2 Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γεωραντάρ

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα γεωραντάρ είναι τα ακόλουθα:

- Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (πηγή) που μπορεί να παραγάγει χρονικά κυμαινόμενες τάσεις στο εκάστοτε απαιτούμενο φάσμα συχνοτήτων με ενεχόμενο και καταγράψιμο τρόπο.
- Μια κεραία πομπός που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε ένα ακτινοβολούμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ραδιοκύματα), το οποίο μπορεί να διεισδύσει δια του υπεδάφους στο στόχο. Η κεραία πομπός, μετασχηματίζει τα ηλεκτρικής τάσης σήματα σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Ένα σύστημα ανίχνευσης (δέκτης), που αποτελείται συνήθως από μία κεραία και ηλεκτρονικά στοιχεία κυκλώματος, που μπορούν να ανιχνεύσουν τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και να μετασχηματίσουν σε μια ηλεκτρική τάση που μπορεί να καταγραφεί και να επεξεργαστεί.

2.4.3 Μετρήσεις στο ύπαιθρο

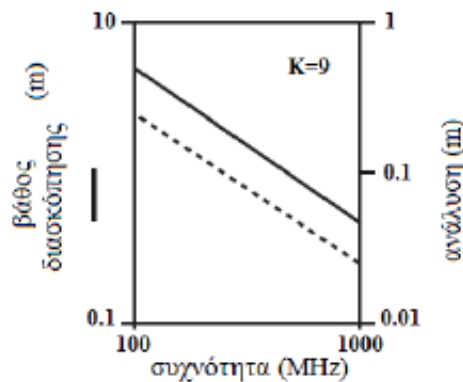
Στη τυπική διάταξη λειτουργίας ενός συστήματος γεωραντάρ (common offset) ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση και μετακινούνται κατά την γραμμή διασκόπησης συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα. Συνήθως ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται μέσα σε κουτί θωρακισμένο για μέγιστη κατευθυντικότητα προς τα κάτω και για αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων.



Εικόνα 2.19 Common offset

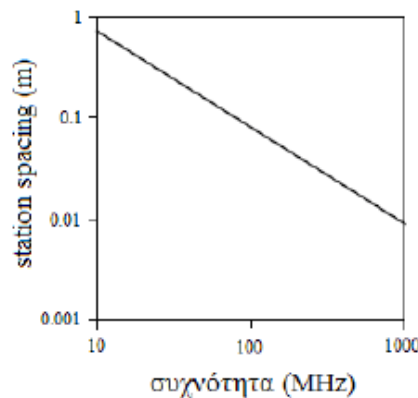
Κατά την έναρξη των μετρήσεων καθορίζουμε την συχνότητα λειτουργίας (operating frequency), το χρονικό παράθυρο (time-window), την χρονική διάφορα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (temporal sampling interval), την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (spatial sampling interval ή station spacing) και τέλος την θέση των γραμμών διασκόπησης και την πυκνότητά τους (line location and spacing).

Όσο μικρότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας των κεραιών του συστήματος γεωραντάρ που χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση σε βάθος με σαφή όμως μείωση στην ανάλυση που επιτυγχάνεται δηλαδή στην διακριτική ικανότητα ανίχνευσης μεταξύ δύο σημείων του υπεδάφους.



Εικόνα 2.20 Διάγραμμα υπολογισμού διακριτικής ικανότητας βάσει της συχνότητας αντένας του γεωραντάρ

Η επιλογή του διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων, συνδέεται κυρίως με την κεντρική συχνότητα των κεραιών.



Εικόνα 2.21 Διάγραμμα επιλογής διαστήματος μεταξύ δύο διαδοχικών, διακριτών μετρήσεων

Οι γραμμές διασκόπησης καθορίζονται έτσι ώστε να περνούν όσο το δυνατόν κάθετα στη μεγαλύτερη διάσταση των στόχων που ερευνώνται, και με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός των γραμμών που εκτελούνται οι μετρήσεις.

3 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό ανθρωπογενών (αρχαιολογικών) σχηματισμών στην διεθνή βιβλιογραφία

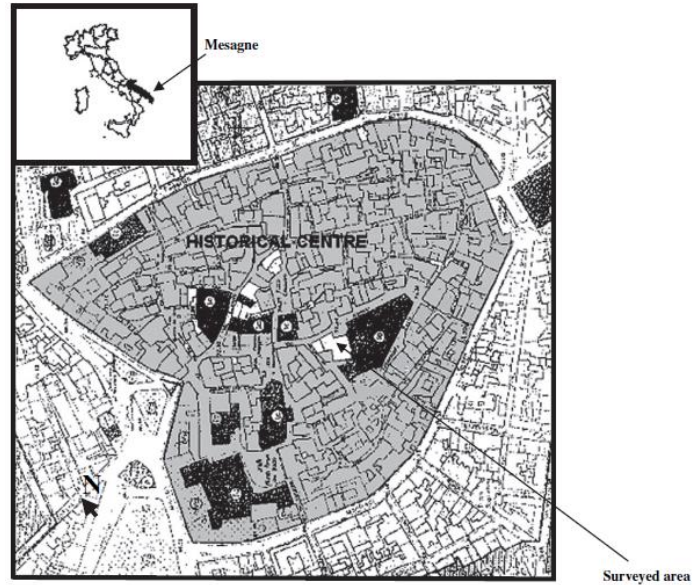
3.1 Εφαρμογή A: Χρήση μεθόδου γεωραντάρ για την χαρτογράφηση αρχαιολογικών στοιχείων σε αστική τοποθεσία (Mesange, Ιταλία) (Leucci, Negri, 2005)

3.1.1 Εισαγωγή

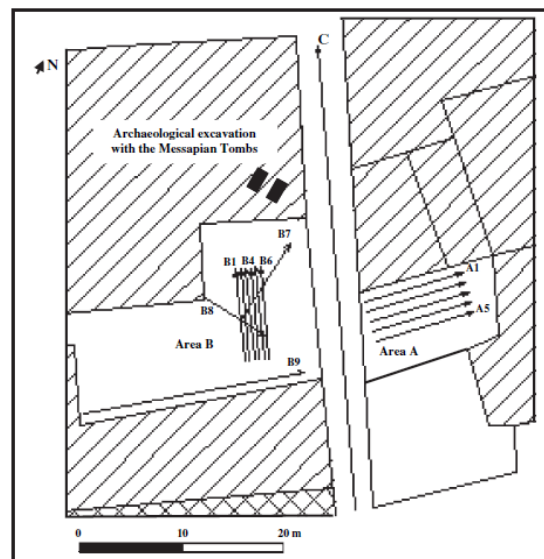
Σε αυτή την έρευνα έγινε χρήση της μεθόδου γεωραντάρ για την απεικόνιση του υπεδάφους. Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται από την απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, το οποίο μεγαλώνει όσο η αγωγιμότητα των υπεδαφικών υλικών αυξάνεται, όσο αναφορά συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν: όσο μικρότερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διασκόπησης, το οποίο κυμαίνεται συνήθως από 1m έως μερικά δεκάδες μέτρα. Παρά το μικρό βάθος διασκόπησης (ειδικά με την αντένα μεγάλης συχνότητας σε μέτρια αγωγιμα περιβάλλοντα), η ικανότητα ανάλυσης του GPR (που και αυτή εξαρτάται από της ιδιότητες του υπεδάφους), είναι μακράν μεγαλύτερη από άλλων γεωφυσικών μεθόδων, και συνεπώς κάνει την μέθοδο αυτή κατάλληλη για έρευνες που θέλουμε αποτελέσματα υψηλής ευκρίνειας σε μικρό βάθος. Για παράδειγμα αρχαιολογικές εφαρμογές και αποτύπωση στρωματογραφίας μικρού βάθους. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο ιστορικό κέντρο της πόλης της Mesange και ο σκοπός της ήταν να προκύψουν πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη αρχαιολογικών ευρημάτων στο υπέδαφος ώστε να βοηθηθούν οι αρχαιολόγοι κατά την ανασκαφή.

Οι δύο περιοχές που επιλέχθηκαν είναι:

- Περιοχή A: βρίσκεται μέσα σε οικία όπου οι αρχαιολόγοι πιστεύουν πως υπάρχουν υπόγειες δομές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.
- Περιοχή B: κοντά σε ένα αρχαίο νεκροταφείο



Εικόνα 3.1 Ιστορικό κέντρο της Mesagne (Ιταλία) με λευκό χρώμα ο χώρος έρευνας.(Leucci,Negri,2005)



Εικόνα 3.2 Η περιοχή έρευνας μαζί με τις τομές από (Leucci, Negri, 2005)

3.1.2 Περιγραφή περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στο ιστορικό κέντρο της Mesagne κοντά στην πόλη Brindisi στην Ιταλία. Σύμφωνα με τα γεωλογικά δεδομένα τα πρώτα μέτρα εδάφους αποτελούνται από κτρινωπή αργιλόδη άμμο χαλαρά κολλημένη. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος 4m.

Το πιθανό αρχαιολογικό ενδιαφέρον της περιοχής έρευνας προκύπτει το γεγονός ότι πρόκειται μια περιοχή όπου έχουν βρεθεί και άλλα αρχαιολογικά ευρήματα. Ο τύπος και το μέγεθος των τάφων που αποκαλύφθηκαν στην περιοχή ονομάζονται “tombe a fossa” (ένα είδος τάφων διαστάσεων: 1,8 m X 0,5 m X 0,5 m). Υπάρχουν και άλλοι τύποι θαμμένων αρχαιολογικών δομών που ονομάζονται “ιρογεί” (οι διαστάσεις αυτού του τύπου είναι 3m X 3m X 3m). Αυτός ο δεύτερος τύπος είναι στην ουσία ένα υπόγειο που χρησιμοποιούταν σαν αποθήκη τροφίμων. Το βάθος των δομών αυτών έχει μεγάλες διακυμάνσεις από 1m έως 3m από την επιφάνεια.

Η περιοχή έρευνας, γενικά, επηρεάζεται από το υδρογεωλογική υποχώρηση που προκλήθηκε από παλιούς σωλήνες ύδρευσης και συστήματα αποχέτευσης. Το δημοτικό τεχνικό γραφείο της Mesagne έχει προγραμματίσει την κατασκευή νέων αγωγών ύδρευσης και αποχέτευσης. Η πιθανότητα καταστροφής πιθανών αρχαιολογικών δομών κατά την διάρκεια των οικοδομικών εργασιών κινητοποίησε τις αρχαιολογικές έρευνες. Οι σχετικά μεγάλες διαστάσεις της περιοχής έρευνας, σε συνδυασμό των περιορισμών στο κόστος και στον χρόνο έκαναν την γεωφυσική έρευνα την καταλληλότερη μέθοδο για την εξακρίβωση αρχαιολογικών δομών. Αφού οι πιο σημαντικοί στόχοι (τάφοι και υπολείμματα τοίχων) αναμένεται να βρίσκονται στο όριο εδάφους και υποβάθρου, το βάθος αποτέλεσε μια σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό της αρχαιολογικής έρευνας.

3.1.3 Εξοπλισμός και τρόπος απόκτησης δεδομένων

Η μελέτη έγινε με χρήση γεωραντάρ με κεραίες 200MHz και 500MHz της εταιρίας Geophysical Survey Systems Inc. Επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές συχνότητες και αντένες γιατί κάθε στόχος χρειάζεται διαφορετική ικανότητα ανάλυσης. Στην συγκεκριμένη μελέτη από τα δεδομένα θα έπρεπε να προκύψει ένα 3D μοντέλο του υπεδάφους έτσι ο τρόπος απόκτησης δεδομένων αποτελείται από ένα πλέγμα (grid) τομών GPR.

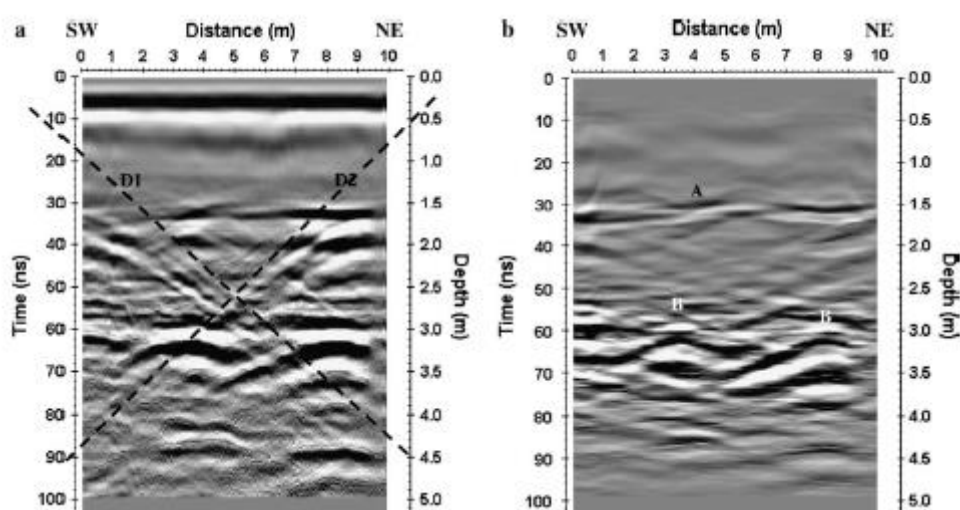
Συνεπώς, η περιοχή A ήταν ένα ορθογώνιο με διατάσεις 10X4m. Όπου σε αυτό περιέχονταν γραμμές μετρήσεων GPR με κατεύθυνση νοτιοδυτική προς βορειοανατολική με απόσταση γραμμών 1m και με αντένα 200MHz. Οι μετρήσεις που έγιναν μέσα στο σπίτι όπου και ήταν πιο πιθανή η ύπαρξη αρχαιοτήτων ,η περιοχή B, ήταν ένα ορθογώνιο διαστάσεων 7 X 2,5m. Οι γραμμές μετρήσεων είχαν απόσταση μεταξύ τους 0,5m και κατεύθυνση νοτιοανατολική προς βορειοδυτική. Η αντένα που χρησιμοποιήθηκε ήταν συχνότητας 500MHz. **(Εικόνα 3.2)**

3.1.4 Περιοχή A: Ανάλυση δεδομένων, μέτρηση ταχύτητας διάδοσης κυμάτων και απεικόνιση αποτελεσμάτων σε οριζόντιες τομές

Η ποιότητα των αρχικών δεδομένων απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία ώστε να είναι πιο εύκολη η ερμηνεία τους. Τα βήματα της επεξεργασίας ήταν : horizontal scaling, amplitude normalization, background removal, FK filter και Kirchhoff 2D-velocity migration.

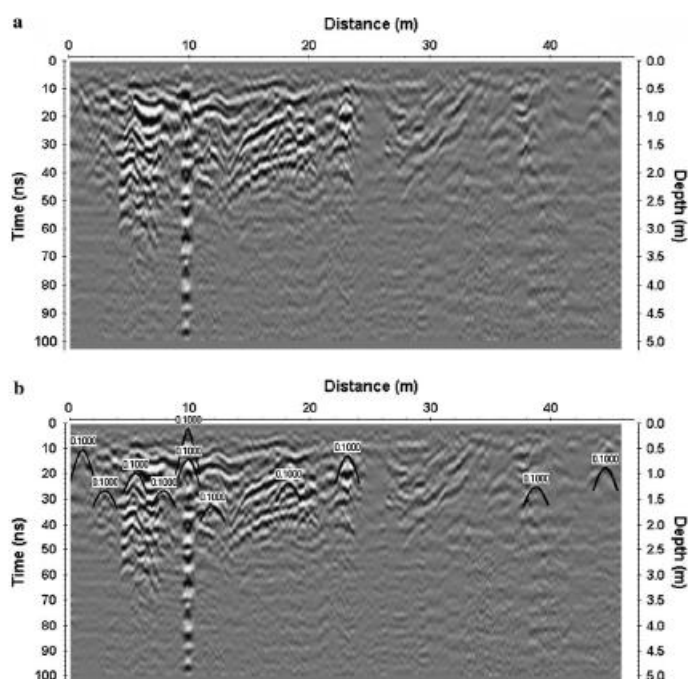
Όταν χρησιμοποιήθηκε το γεωραντάρ μέσα στην οικία το όργανο κατέγραψε ανωμαλίες οι οποίες προέρχονταν από θαμμένα αντικείμενα εκτός των αρχαιολογικών δομών. Αυτά τα αντικείμενα απεικονίζονται σαν υπερβολές και χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα των κυμάτων στον αέρα (0,3 m/ns) ή σαν γραμμικά φαινόμενα, τα οποία συχνά παρεμβαίνουν με αποκρίσεις από γεωλογικούς σχηματισμούς.

Ο θόρυβος αφαιρέθηκε μερικώς χρησιμοποιώντας το FK filter το οποίο είναι ένα δυσδιάστατο φίλτρο ορισμένο μέσα στο πεδίο συχνότητας και κύματος. Η **Εικόνα 3.3** δείχνει την τομή του γεωραντάρ πριν **(a)** και μετά **(b)** της εφαρμογής της παραπάνω επεξεργασίας. Το σχήμα και η παράταξη των ανωμαλιών της περιοχής έρευνας (με ένδειξη B στην **Εικόνα 3.3b**) υποδηλώνουν σχέση με την ύπαρξη αρχαιολογικών δομών. Επιπλέον σε όλες τις τομές του γεωραντάρ παρουσιάζεται μια ελαφρός κυματιστή γραμμή (με την ένδειξη A στην **Εικόνα 3.3b**) του οποίου το βάθος φαίνεται να κυμαίνεται μεταξύ 1,5 έως 2m. Εξαιτίας του υψηλού πλάτους του, το οποίο υποδηλώνει μια ισχυρή ηλεκτρομαγνητική αντίθεση, η εκδήλωση του υποδηλώνει την ύπαρξη μιας πιο συμπαγούς στρώσης που ενδέχεται να είναι αρχαία επιφάνεια του εδάφους έτσι όπως επιβεβαιώνουν και αρχαιολογικά ευρήματα στην περιοχή.



Εικόνα 3.3 Περιοχή A: τομές GPR ,200Hz αντένα, (a) τομή χωρίς επεξεργασία (b) επεξεργασμένη τομή (Leucci, Negri, 2005)

Η ηλεκτρομαγνητική ταχύτητα των κυμάτων έχει μεγάλη σημασία στον καθορισμό του βάθους των αρχαιολογικών δομών. Η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τις μετρήσεις του GPR μπορούν να υπολογιστούν με πολλούς τρόπους η πιο συνήθης διαδικασία περιλαμβάνει την εύρεση ενός common depth-point (CMD) και μιας μεγάλης γωνίας ανάκλασης και σύνολα δεδομένων αντανάκλασης (WARP). Στα δεδομένα της περιοχής A υπάρχουν ανακλάσεις με μορφή υπερβολών, οι οποίες επιτρέπουν μια ακριβή ανάλυση των ταχυτήτων. Στο σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανάλυσης ταχυτήτων η οποία έγινε μέσω του προγράμματος ReflexW 3.0.

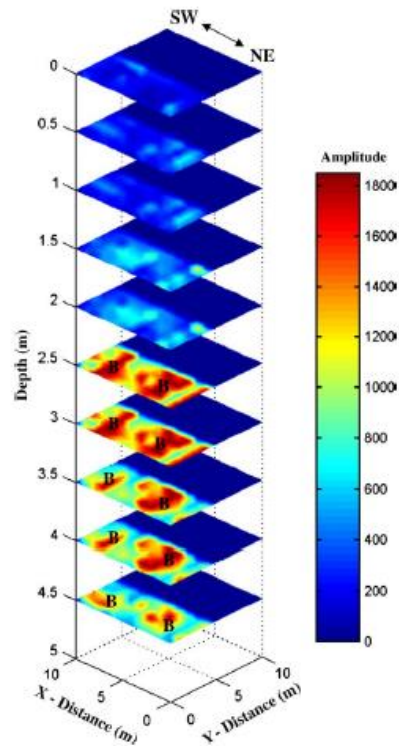


PR section related to the C profile acquired in area A. Velocity analysis with the diffraction hyperbolas method. L1

Εικόνα 3.4 Επεξεργασμένο προφίλ από την περιοχή A. (b) Η ανάλυση ταχύτητας με την μέθοδο περίθλασης υπερβολών. Οι τιμές πάνω από τις υπερβολές μας δείχνουν κοινές ταχύτητες (Leucci, Negri, 2005)

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν και οριζόντιες τομές χρόνου (horizontal time slices). Αυτοί οι χάρτες είναι ένας τρόπος απεικόνισης των αποτελεσμάτων του γεωραντάρ με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της κατανομής των πλατών των ανακλάσεων σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτός ο τρόπος απεικόνισης των δεδομένων του GPR καθώς επιτρέπει την εύκολη συσχέτιση των πιο σημαντικών ανωμαλιών που εντοπίζονται στο ίδιο βάθος στην περιοχή. Στην συγκεκριμένη έρευνα η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε για να απεικονιστούν διακύμανσης στο πλάτος των κυμάτων με διαδοχικά χρονικά «παράθυρα» (time windows) πλάτους $\Delta t=10\text{ns}$. Για το συγκεκριμένο τύπο εδάφους αυτό αντιστοιχεί σε 0,5m βάθος ανά τομή με μέγιστο βάθος τα 4,5m (**Εικόνα 3.5**).

Οι τομές που προέκυψαν και παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.5** δείχνουν γεγονότα με ανωμαλίες υψηλού πλάτους (ένδειξη Β στην **Εικόνα 3.5**) οι οποίες θα μπορούσαν να ερμηνευθούν ως αρχαιολογική δομή “ίρογεο”.

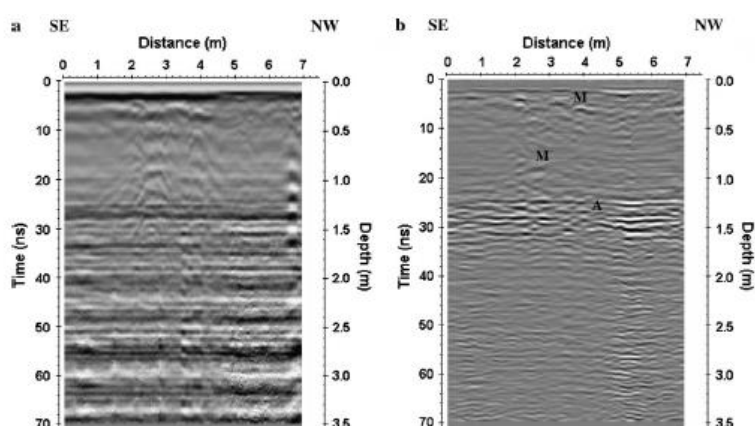


Εικόνα 3.5 Περιοχή Α, οριζόντιες τομές τα μεγάλα πλάτη κύματος που παρουσιάζονται με Β είναι η δομή "ίρογεο" (Leucci, Negri, 2005)

3.1.5 Περιοχή Β: Ανάλυση δεδομένων, μέτρηση ταχύτητας διάδοσης κυμάτων και απεικόνιση αποτελεσμάτων σε οριζόντιες τομές

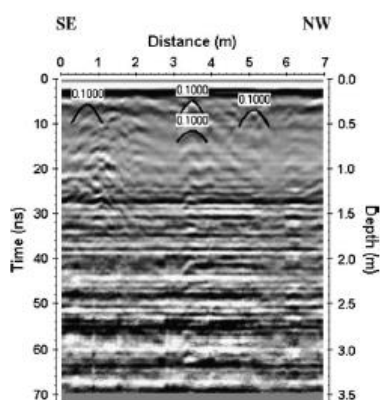
Η ποιότητα των αρχικών δεδομένων δεν απαιτεί προχωρημένες τεχνικές επεξεργασίας. Παρόλα αυτά έγινε κατάλληλη επεξεργασία για καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα βήματα επεξεργασίας που εφαρμόστηκαν ήταν horizontal scaling (80scans/m), background removal filter, Kirchhoff 2D-velocity migration.

Το σχήμα και μέγεθος των ανωμαλιών που βρέθηκαν στην περιοχή Β (με την ένδειξη Μ στην **Εικόνα 3.6**) υποδηλώνουν την ύπαρξη αρχαιολογικών δομών (πιθανών τοιχιών).



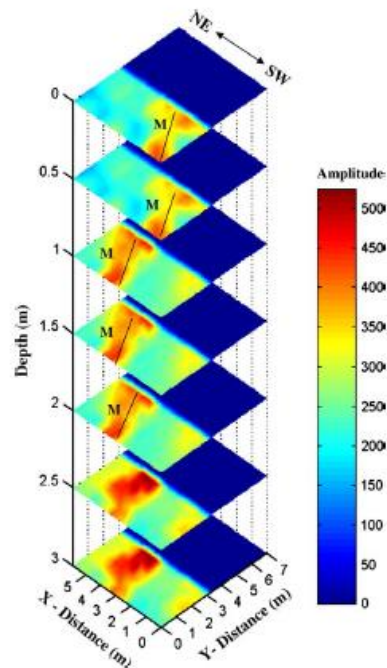
Εικόνα 3.6 Περιοχή Β: Τομές GPR, 500Hzαντένα, (a) τομή χωρίς επεξεργασία (b) επεξεργασμένη τομή

Η ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος προσδιορίστηκε από τα προφίλ ανάκλασης που αποκτήθηκαν κατά την διάρκεια συνεχούς λήψης μετρήσεων με το γεωραντάρ. Χρησιμοποιώντας το χαρακτηριστικό σχήμα υπερβολής το οποίο προκύπτει από την ανάκλαση μιας σημειακής πηγής. Στην **Εικόνα 3.7** παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανάλυσης ταχύτητας.



Εικόνα 3.7 Μη επεξεργασμένο προφίλ GPR το οποίο αντιστοιχεί στο προφίλ B4 της περιοχής Β. Η ανάλυση ταχύτητας με την μέθοδο περιθλασης υπερβολών. Οι αριθμοί πάνω από τις υπερβολές είναι οι αντίστοιχες τιμές των ταχυτήτων (m/ms) (Leucci, Negri, 2005)

Στην συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος οριζοντίων χρονικών τομών (horizontal time slices) οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για να απεικονίσουν της διακυμάνσεις πλάτους σε συγκεκριμένα «παράθυρα» χρόνου με πλάτος $\Delta t=10\text{ns}$. Αυτός ο χρόνος αντιστοιχεί σε βάθος 0,5m και οι οριζόντιες τομές έγιναν μεταξύ 0m και 3m. Στην **Εικόνα 3.8** εμφανίζονται περιοχές υψηλού πλάτους με την ένδειξη M. Ο προσανατολισμός τους ο οποίος είναι κάθετος από αυτόν των ταφών υποστηρίζει την ερμηνεία ότι αυτές οι ανωμαλίες θα μπορούσαν να είναι τα τείχη που οροθετούσαν τον αρχαίο δρόμο προς την νεκρόπολη.

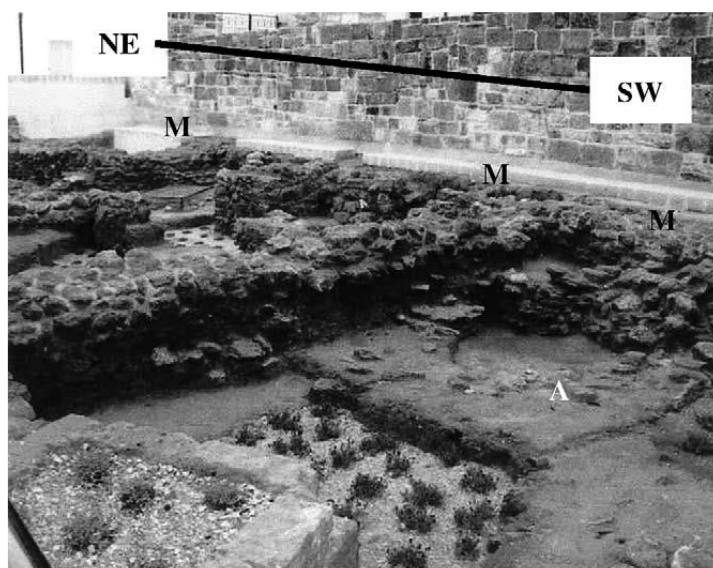


Εικόνα 3.8 Περιοχή Β, οριζόντιες τομές τα μεγάλα πλάτη κύματος που παρουσιάζονται με M είναι πιθανά τα τείχη που οροθετούσαν τον αρχαίο δρόμο προς την νεκρόπολη.
(Leucci, Negri, 2005)

3.1.6 Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης επιβεβαιώνει την καταλληλότητα της εφαρμογής της μεθόδου γεωραντάρ σε αστική περιοχή για τον εντοπισμό της τοποθεσίας περιοχών αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Η παρουσία στις τιμές των γεωραντάρ των ανωμαλιών σε σχήμα υπερβολών οφείλονται είτε σε μικρές ανομοιογένειες είτε σε μικρά αρχαιολογικά ευρήματα. Οι μετρήσεις που έγιναν στις περιοχές Α και Β μας δίνουν στοιχεία για την παρουσία αρχαιολογικών δομών σε βάθη μεταξύ 1,5m και 2m. Στην περιοχή Α υπάρχει η αρχαιολογική δομή που αναφέρεται σαν «ίρογεο». Ενώ στην περιοχή Β παρουσιάζεται η δομή τοιχίων οι οποίοι οριοθετούσαν τον αρχαίο δρόμο προς την νεκρόπολη.

Σημείωση: Κατά την επεξεργασία δεδομένων που προέκυψαν στην παρούσα διπλωματική δεν θα γίνει ανάλυση της ταχύτητας ούτε απεικόνιση των δεδομένων σε οριζόντιες χρονικές τομές.

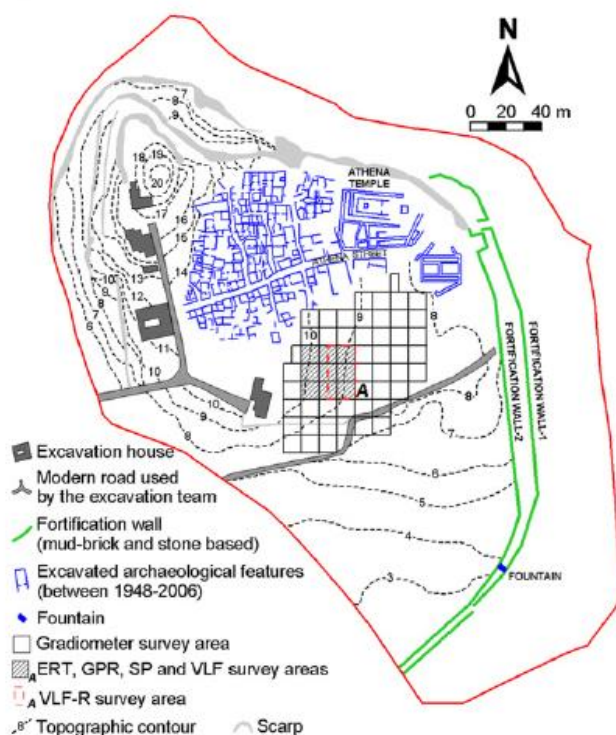


Εικόνα 3.9 Περιοχή Β: φωτογραφία από τις αρχαιολογικές ανασκαφές

3.2 Εφαρμογή Β: Αξιολόγηση γεωφυσικών ερευνών σε αρχαιολογικούς και πολιτιστικούς χώρους κάτω από περιβάλλον αστικοποίησης, Σμύρνη, Τουρκία (Drahor, 2011)

3.2.1 Εισαγωγή

Η μελέτη αυτή έγινε σε 4 διαφορετικές περιοχές για την έρευνα πολιτιστικών και αρχαιολογικών προβλημάτων στην πόλη της Σμύρνης χρησιμοποιώντας γεωφυσικές μεθόδους. Στην συγκεκριμένη εργασία θα αναλυθεί μόνο η έρευνα μιας τοποθεσίας, το Ηϋϋϊκ της παλιάς Σμύρνης, το οποίο βρίσκεται μέσα στην πόλη επειδή σε αυτή εφαρμόστηκαν παρόμοιες γεωφυσικές μέθοδοι.



Εικόνα 3.10 Περιοχή έρευνας (Drahor, 2011)

3.2.2 Περιοχή Έρευνας

Οι οικισμοί τύπου Ηϋϋϊκ αποτελούν πολύ σημαντικές τοποθεσίες αρχαιολογικής έρευνας. Το Ηϋϋϊκ είναι ένα κυκλικός οικισμός που περιέχει σύνθετα αρχαιολογικά ευρήματα. Ο οικισμός που έχει σχήμα αναχώματος αποτελείται από στρώματα λάσπης και υλικά βραχώδους προέλευσης από διαφορετικές αρχαιολογικές περιόδους. (Berge et al, 2011).

Το Höyük της παλαιάς Σμύρνης βρίσκεται στην πόλη της Σμύρνης στην δυτική Ανατολία, στην Τουρκία. Η Σμύρνη αποτελούσε μια από τις πιο σημαντικές πόλεις στα Ελληνιστικά και Ρωμαϊκά χρόνια. Στην περιοχή έχουν βρεθεί 5 διαφορετικά Höyük. Η πρώτη ανασκαφή της περιοχής έγινε το 1948 και οι ανασκαφές συνεχίστηκαν το 1966. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ο οικισμός ιδρύθηκε το 3000 π.Χ.. Επίσης στην ανασκαφή βρέθηκαν 10 συνεχή αρχαιολογικά επίπεδα που χρονολογούνται από το 1050 έως 333 π.Χ.

Γεωλογικά η περιοχή έρευνας αποτελείται από Κρητιδο-Παλαιογενή Φλύσχη της Σμύρνης, μειόκαινους ηφαιστειακούς και ιζηματογενείς σχηματισμούς και τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις. Η τεκτονική δραστηριότητα στην περιοχή δημιουργεί πολλούς καταστροφικούς σεισμούς. Ο οικισμός τοποθετείται στους πρόποδες του βουνού Yamanlar το οποίο αποτελείται από ηφαιστειακά πετρώματα. Έτσι τα ηφαιστειακά πετρώματα όπως είναι οι ανδεσίτες, οι βασάλτες και ηφαιστειακή κίσηρη είναι τα κύρια υλικά για την κατασκευή των κτηρίων. Ένα άλλο δομικό υλικό είναι τούβλα κατασκευασμένα από λάσπη το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή τοίχων σε σπίτια και οχυρώσεων. Σήμερα ο οικισμός βρίσκεται μακριά από την θάλασσα και περιτοιχίζεται από μοντέρνους οικισμούς.



Εικόνα 3.11 Αποψη της περιοχής έρευνας

3.2.3 Απόκτηση δεδομένων, επεξεργασία και αποτελέσματα

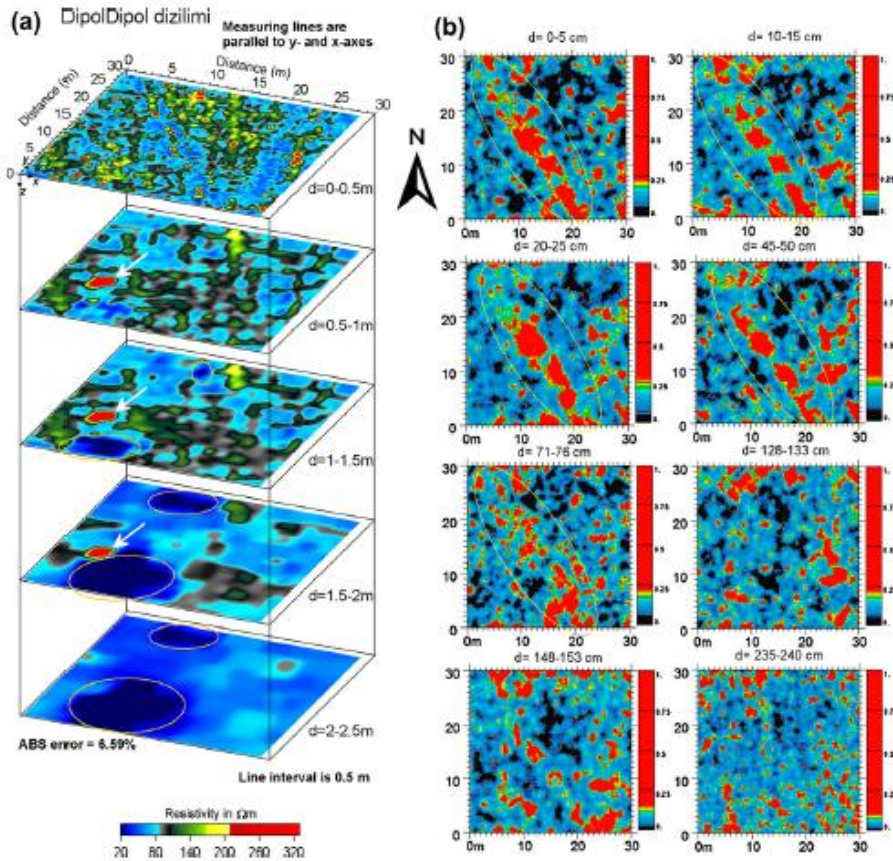
Για να μελετηθεί η περιοχή αυτή χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικές γεωφυσικές μέθοδοι. Αυτές οι μέθοδοι είναι η μαγνητική, η ηλεκτρική τομογραφία, γεωραντάρ, VLF, VLF-R και μέθοδος φυσικού δυναμικού (SP measurements). Στην συγκεκριμένη διπλωματική θα αναλύσουμε την ηλεκτρική τομογραφία, την μέθοδο γεωραντάρ και ηλεκτρομαγνητικά VLF, VLF-R.

Πίνακας 3.1 Απόκτηση δεδομένων, αξιολόγηση και καταγραφή διαδικασίας γεωφυσικών μεθόδων

Method	Equipment/acquisition	Data evaluation	Visualisation
Magnetic	Instrument: FM36 fluxgate gradiometer Sensor spacing: 0.5 m Line interval: 0.5 m Measuring interval: 0.25 m Data acquisition: manual log	Geoplot v3.00mx software Zero mean grid and traverse, interpolation, despiking, low (2 × 2) and high-pass (8 × 8) filtering, clip and brightness-contrast	Grey-scale magnetic images
GPR 500 MHz	Instrument: Mala Ramac CUII Line interval: 0.5 m Time window: 100 ns Time sampling: 252 Trace increment: 0.04943 Data type: constant offset	GPR-Slice v6.0 software (Goodman, 2008) Background removal, Static correction, Regain, Boxcar smoothing, DC drift removal, Bandpass filter, Migration	Grey-scale radargrams, coloured depth slices and volumetric representation
1000 MHz	Source-receiver distance: 0.18 m Line interval: 0.5 m Time window: 2.5 ns Time sampling: 278 Trace increment: 0.010377 Data type: constant offset Source-receiver distance: 0.1 m		
ERT	Instrument: Metz-SAS 503 resistivitymeter with a multikore cable Configuration: Wenner-Schlumberger Data acquisition: 2D Inter-electrode interval (a): from 1 m up to 10 m (max)	RES2Dinv software 2D robust inversion using finite-element forward routine for six iterations	Coloured 2D inverse model sections and depth slices

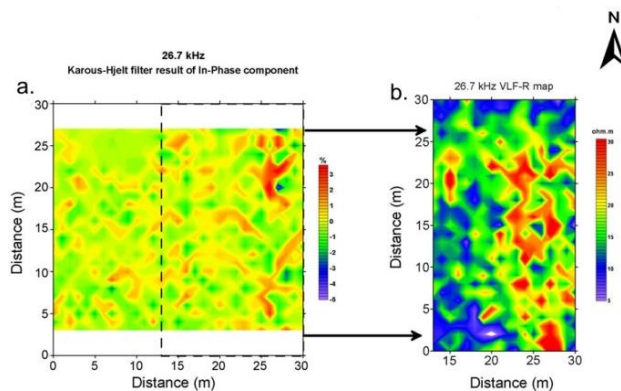
Για την ηλεκτρική τομογραφία επιλέχθηκε μια περιοχή 30 επί 30m ενώ η επιφάνεια ήταν αρκετά ομαλή. Χρησιμοποιήθηκε διάταξη ηλεκτροδίων dipole-dipole η οποία εφαρμόστηκε έτσι ώστε οι κατευθύνσεις γραμμών των μετρήσεων να είναι Βορράς προς Νότο και Ανατολή προς Δύση οι οποίες περιείχαν 5 περιοχές έρευνας. Σαν αποτέλεσμα προέκυψαν 118 ορθογωνικές γραμμές οι οποίες μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας δισδιάστατη μέθοδο απόκτησης αποτελεσμάτων. Μετά την επεξεργασία δεδομένων προέκυψαν τα ημιτριδιάστατα αποτελέσματα έτσι όπως φαίνονται στις **Εικόνα 3.12**. Η μέγιστες ειδικές αντιστάσεις οι οποίες στην **Εικόνα 3.12** παρουσιάζονται στην περιοχή που δείχνουν τα λευκά βέλη, είναι πιθανά αρχαία πηγάδια και μπορούν να παρατηρηθούν επίσης μεταξύ της δεύτερης και τέταρτης τομής. Έκτος αυτής της δομής, η πρώτη τομή παρουσιάζει μια περίπλοκη εικόνα λόγω του διαταραγμένου εδάφους της περιοχής έρευνας. Οι μικρότερες ειδικές αγωγιμότητες δείχνουν ένα αγωγίμο στρώμα το οποίο συνήθως εντοπιζόταν σε μεγαλύτερα βάθη να ξεκινά από τα 1,5m στην περιοχή έρευνας. Εκτός αυτού παρατηρούνται και ίχνη μικρής ειδικής αντίστασης τα οποία μπορεί να οφείλονται σε δομές κατασκευασμένες από τούβλα λάσπης.

Για να μπορούν να συγκριθούν οι τομές γεωραντάρ έγιναν σε δύο κατευθύνσεις Βορρά προς Νότο και Ανατολή προς Δύση. Οι οριζόντιες τομές παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.12b**. Έτσι όπως φαίνεται από τις τομές οι ανωμαλίες έχουν προσανατολισμό Βορειοανατολικά προς Νοτιοανατολικά και Βορειοανατολικά προς Νοτιοδυτικά. Τα μεγάλα πλάτη που παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα πρέπει να προέρχονται από κάποιες ανομοιογένειες στο δρόμο (κίτρινες ελλείψεις). Γενικά οι ανωμαλίες του γεωραντάρ έρχονται σε συμφωνία με αυτές της ηλεκτρικής τομογραφίας.



Εικόνα 3.12 οριζόντιες τομές βάθους α) ERT β) GPR (Drahor, 2011)

Επίσης σε αυτή την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν και οι μέθοδοι VLF και VLF-R οι διαδικασίες απόκτησης δεδομένων περιγράφεται στον πίνακα. Οι χάρτες που προέκυψαν παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.13a,b**. Στις εικόνες αυτές, και οι δύο χάρτες παρουσιάζουν ανωμαλίες παρόμοιες με τις προηγούμενες γεωφυσικές μεθόδους. Η γενικές κατευθύνσεις της ανωμαλίας είναι Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά και Βορειοανατολικά προς Νοτιοδυτικά. Η μετρούμενη ειδική αντίσταση είναι μικρότερη της ηλεκτρική τομογραφίας αλλά η κατεύθυνση και τοποθεσία της ανωμαλίας παρουσιάζει καλή συσχέτιση.



Εικόνα 3.13 Χάρτης ηλεκτρομαγνητικών α) ο χάρτης της σε φάση συνιστώσας (μαγνητική επιδεκτικότητα) στα 26,7 Hz β) ένα μέρος του χάρτη (Drahor, 2011)

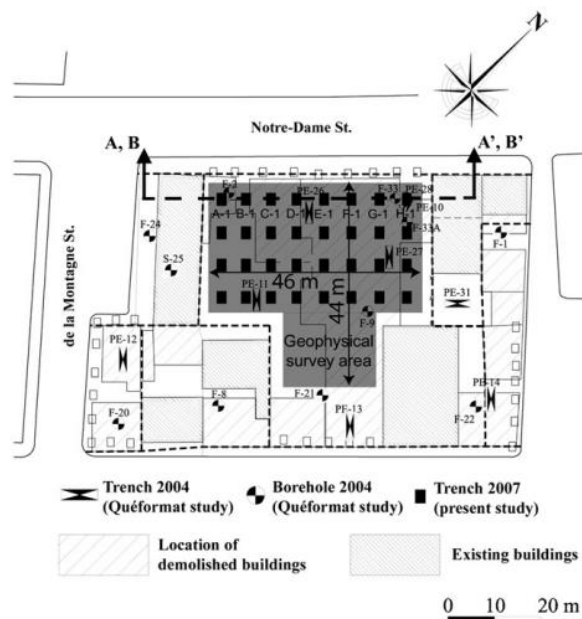
3.2.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας η χρησιμοποίηση διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων δίνει πιο αξιόλογα αποτελέσματα ,τα οποία μπορούν να ερμηνευτούν πιο εύκολα. Κάθε μια από της μεθόδους εντόπισε τα αρχαιολογικά ευρήματα (και την μεταξύ τους συσχέτιση). Αυτό αποδεικνύει πως η επιβολή διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε αστικό περιβάλλον.

3.3 Εφαρμογή Γ:Γεωφυσικός χαρακτηρισμός μολυσμένων αστικών ανθρωπογενών πληρώσεων Μόντρεαλ, Καναδάς (Boudreault, 2010)

3.4 Εισαγωγή

Στην παρούσα μελέτη περίπτωσης γίνεται χρήση γεωφυσικών μεθόδων για τον χαρακτηρισμό αστικών πληρώσεων κυρίως για την εκτίμηση της χωρικής μεταβλητότητας της εσωτερικής δομής τους. Η περιοχή έρευνας βρίσκεται κοντά στο κέντρο της πόλης του Μόντρεαλ (Καναδάς) και είναι μια περιοχή 1600m². Η περιοχή της έρευνας αποτελείται από μια ετερογενή πλήρωση η οποία αποτελείται από ένα κύριο μέρος φυσικού εδάφους με διάφορα υπολείμματα (π.χ. τσιμέντο, τούβλα, μέταλλα) καθώς και βιομηχανικών και οικιακών αποβλήτων. Πιστεύεται πως τα παλιά τείχη των θεμελίων είναι ακόμη στη θέση της πλήρωσης στην περιοχή των παλιών κτηρίων. Σκοπός είναι η επιβεβαίωση της παρουσίας των ετερογενών υλικών, η φύση τους και η έκτασή τους.



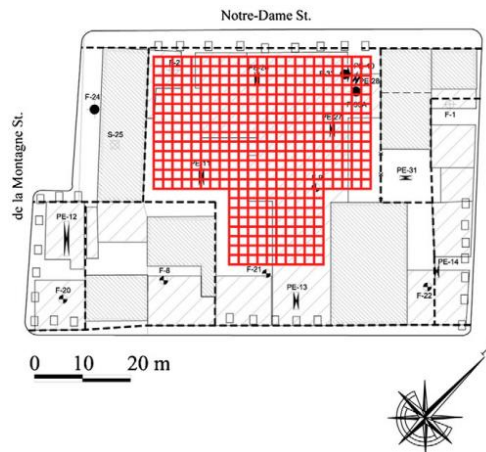
Εικόνα 3.14 Γενική άποψη της περιοχής έρευνας. Στην γραμμοσκιασμένη περιοχή θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις (Boudreault, 2010)



Εικόνα 3.15 Περιεχόμενα πλήρωσης παρατηρούμε υλικά όπως τούβλα θεμέλια από σπλισμένο σκυρόδεμα και μεταλλικές ράβδους και σωλήνες (Boudreault , 2010)

3.4.1 Ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις

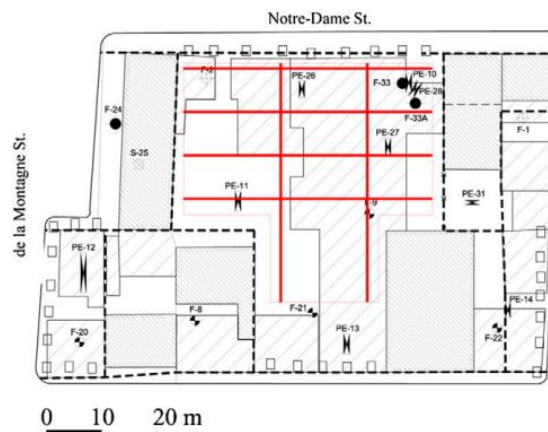
Χρησιμοποιήθηκε μηχανήμα EM31 της εταιρείας Geonics Limited. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με κατευθύνσεις βορά προς νότο και ανατολή προς δύση. Με απόσταση 2m μεταξύ των μετρήσεων και βήμα 1m. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με δίπολα κάθετα και οριζόντια τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα τελικά βάθη διασκοπήσεων 3m και 6m.



Εικόνα 3.16 Κάναβος μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου (Boudreault, 2010)

3.4.2 Ηλεκτρική Τομογραφία

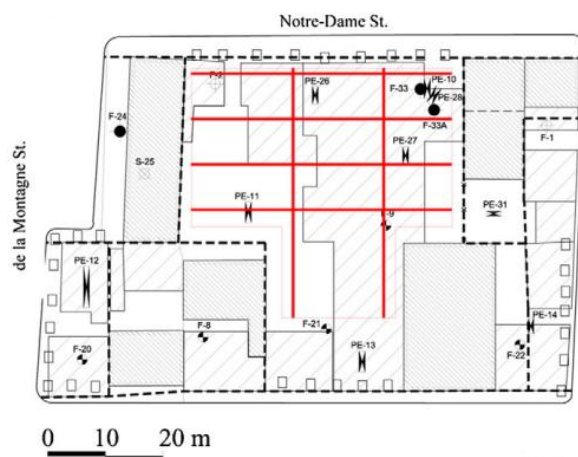
Η ηλεκτρική τομογραφία πραγματοποιήθηκε με ένα Terrameter SAS4000 και ένα ES10-64 switchbox με δύο πολλαπλά καλώδια ηλεκτροδίων. Έγιναν δύο τομογραφίες με διεύθυνση βορά νότου και τέσσερις με διεύθυνση ανατολής δύσης διαχωρισμένες με 16m και 8m αντίστοιχα. Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν στο έδαφος με απόσταση μεταξύ τους 1m για να προκύψει ανάλυση με βάθος 5m. Χρησιμοποιήθηκε η Dipole-Dipole για να βελτιωθεί η πλευρική ευαισθησία της μεθόδου αφού σε μια τυπική αστική πλήρωση η σύνθεση έχει μεγάλη μικρής κλίμακας πλευρική μεταβλητότητα.



Εικόνα 3.17 Κάναβος μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας (Boudreault, 2010)

3.4.3 Μέθοδος γεωραντάρ-GPR

Οι μετρήσεις έγιναν με το Ramac CUII της εταιρείας Mala Geoscience χρησιμοποιώντας συχνότητα 100MHz. Η συχνότητα αυτή επιλέχθηκε για την επίτευξη μέγιστου βάθους έρευνας και διακριτικής ικανότητας 33cm. Οι μετρήσεις έγιναν με 4m απόσταση στην διεύθυνση βοράς-νότος και 8m απόσταση στην ανατολή-δύση.

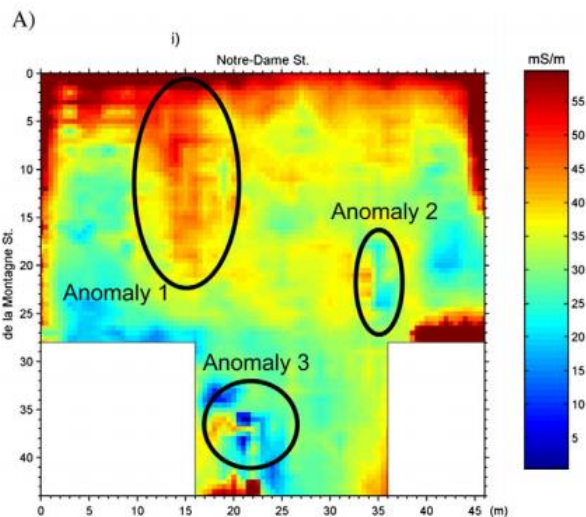


Εικόνα 3.18 Κάναβος μετρήσεων GPR (Boudreault, 2010)

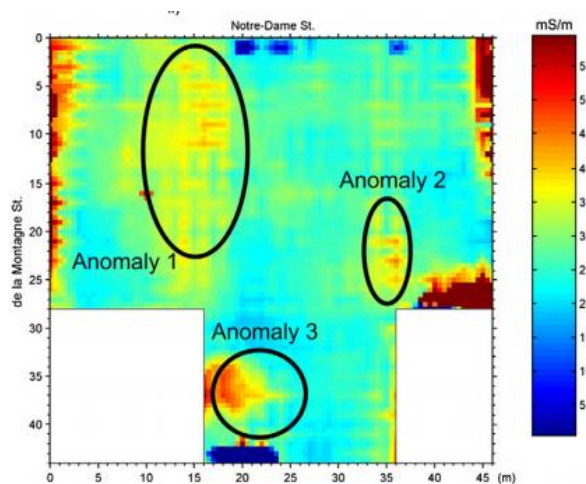
3.4.4 Αποτελέσματα

3.4.4.1 Ηλεκτρομαγνητικά

Συγκρίνοντας τους ηλεκτρομαγνητικούς χάρτες τις **Εικόνες 3.19, 3.20** παρατηρούμε αύξηση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα σε βάθη μεγαλύτερα των 3m. Αυτή η αύξηση οφείλεται σε αλλαγές στα εδάφη αλλά και στο περιεχόμενο νερό. Από την εκσκαφή 32 τάφρων προκύπτουν δεδομένα που υποστηρίζουν την παραπάνω θεώρηση. Η πλήρωση είχε βάθος 1,8m σύμφωνα με την μελέτη και περιέχει μάζα μεγάλης αντίστασης (μπετόν, τούβλα). Γενικά έχει χαλαρή έως πολύ χαλαρή δομή πράγμα το οποίο σημαίνει πως έχει μικρή δυνατότητα συγκράτησης νερού. Σε σύγκριση με το υποκείμενο φυσικό έδαφος το οποίο αποτελείται από υλικά παγετώδους προέλευσης έχοντας μεγάλο κλάσμα λάσπης η οποία έχει μεγαλύτερη δυνατότητα συγκράτησης νερού. Τέλος η αρχική εκτίμηση της τοποθεσίας έδειξε ότι το υδατικό υπόβαθρο βρίσκεται μεταξύ 3 και 6m. Κάποιες υψηλές ανωμαλίες αγωγιμότητας παρατηρούνται στην **Εικόνα 3.19** κοντά στα όρια των υπάρχοντων κτηρίων. Είναι πλευρικές επιδράσεις από οπλισμένους τοίχους κτηρίων.



Εικόνα 3.19 Αγωγιμότητα στα 3m(Boudreault,2010)

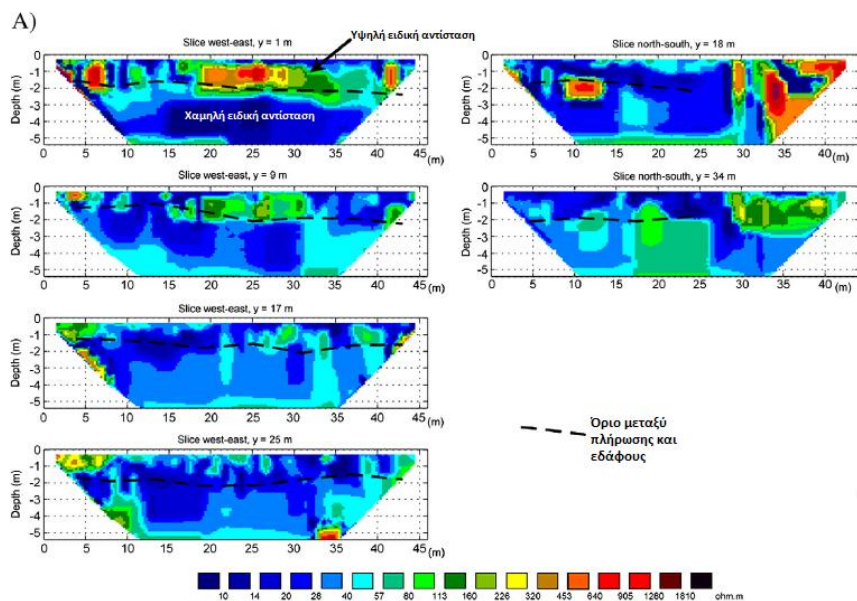


Εικόνα 3.20 αγωγιμότητα στα 6m (Boudreault,2010)

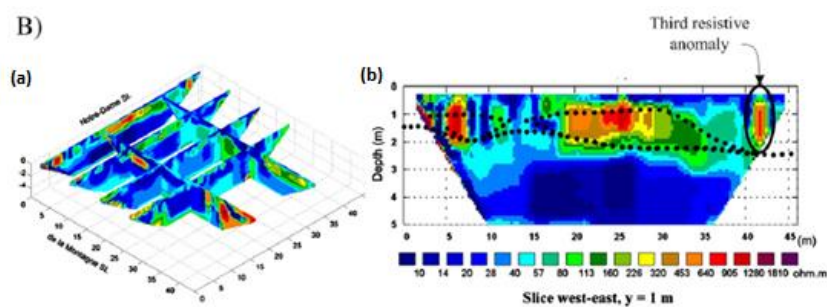
3.4.4.2 Ηλεκτρική τομογραφία (ERT)

Μέσω των 6 τομών γεωηλεκτρικής τομογραφίας φαίνεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της πλήρωσης. Το πάχος της παρουσιάζεται με διακεκομμένη γραμμή σε αυτά τα προφίλ. Μπορούμε να ξεχωρίσουμε δύο ζώνες στην 1^η τομή: μια πρώτη με μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση (<30 ohm/m) που έχει πάχος 2m και μια δεύτερη με μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση βαθύτερα από τα 2m. Αυτή η αντίθεση στην αντίσταση ανταποκρίνεται στο μέσο βάθος της πλήρωσης (1,8m). Σύμφωνα με τα δεδομένα της εκσκαφής οι ζώνες υψηλής αντίστασης περιείχαν πιο πολλά κατασκευαστικά υπολείμματα όπως είναι τα τούβλα. Συγκεντρώνοντας όλα τα προφίλ μπορούμε να εντοπίσουμε τα υπολείμματα αυτά λόγω της μεγάλης τους ηλεκτρικής αντίστασης. Η μέγιστη ειδική αντίσταση η οποία μετρήθηκε στα 2000ohm.m. Για παράδειγμα, το τσιμέντο μπορεί να έχει ειδική αντίσταση μεταξύ 10 και 2000ohm.m, το οποίο εξαρτάται από το πόσο διαβρωμένο είναι.

Όπως αναφέρθηκε, τα μπάζα ήταν πολύ αδρομερή και είχαν πολύ μικρή ικανότητα συγκράτησης νερού. Σε γενικές γραμμές παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ακόρεστα. Συγκριτικά αναφέρεται πως το ξηρό χόμα έχει ειδική αντίσταση πάνω από 1000ohm.m. Στην **Εικόνα 3.21** φαίνεται επίσης η ανωμαλία της ειδικής ανάστασης έχει μεγάλη πλευρική συνέχεια. Κατά την διάρκεια εκσκαφής των τάφων, παρατηρήθηκε επίσης ότι στο βορειότερο τομέα της πλήρωσης (δηλαδή κατά μήκος της οδού Notre-Dame) αποτελούταν κυρίως από θαμμένα τούβλα το οποίο φαίνεται και στην **Εικόνα 3.22** όπου η ειδική αντίσταση είναι ιδιαίτερα υψηλή. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τις ηλεκτρικές τομογραφίες στις περιοχές υψηλής αντίστασης βρίσκονται απόβλητα από κατεδαφίσεις τα οποία κυρίως περιορίζονται περίπου πάνω από τα 2m και συγκεκριμένα πάνω από την διακεκομμένη γραμμή στην **Εικόνα 3.21**. Επίσης στην τρισδιάστατη απεικόνιση των ηλεκτρικών τομογραφιών στην **Εικόνα 3.22** φαίνεται η συνέχεια των ανωμαλιών στο χώρο.



Εικόνα 3.21 Τομές ηλεκτρικής τομογραφίας(Boudreault, 2010)

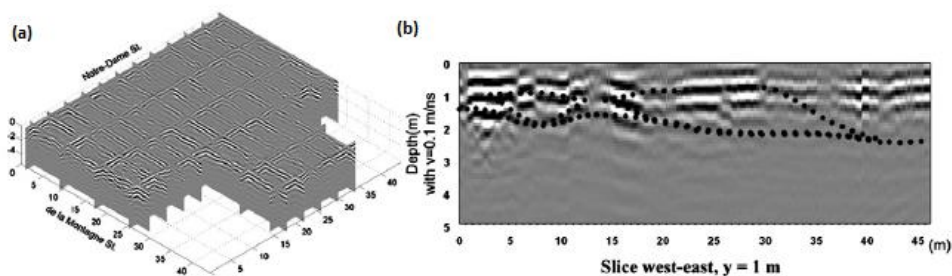


Εικόνα 3.22 α) Συνολική τρισδιάστατη εικόνα των ηλεκτρικών τομογραφιών (b) οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν την στρωματογραφία της πλήρωσης και την οριοθέτηση του «τύπου 4» εδάφους το οποίο περιέχει περισσότερο από 75% μπάζα (Boudreault, 2010)

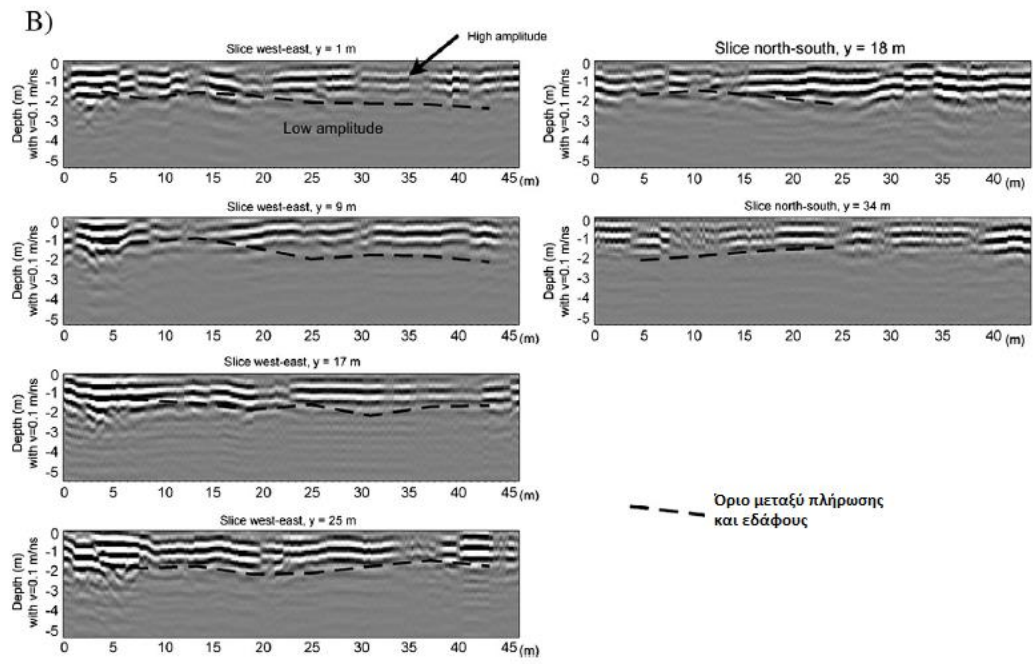
3.4.4.3 Μέθοδος γεωραντάρ-GPR

Η **Εικόνα 3.23** παρουσιάζει τις 6 τομές που έγιναν με το γεωραντάρ οι οποίες έγιναν στις ίδιες θέσεις με τις ηλεκτρικές τομογραφίες. Σε αυτές τις τομές μπορούμε να ξεχωρίσουμε δύο ζώνες μια με μεγάλα πλάτη κύματος που απεικονίζονται σαν αλληπάλληλες ζώνες μαύρου και λευκού, και ζώνες μικρότερων πλατών κύματος που έχουν ένα περισσότερο ομοιόμορφο γκριζωπό τόνο και λιγότερο ευδιάκριτη υφή. Σε όλα τα προφίλ, αυτές οι δύο ζώνες οριοθετούνται χοντρικά σε βάθος 1,8m από την διακεκομμένη γραμμή η οποία αντιστοιχεί και στο βάθος της πλήρωσης. Η απότομη πτώση του πλάτους του κύματος σε αυτό το βάθος συνάδει με την μεγάλη αλλαγή σε συμπαγές έδαφος από την πλήρωση σε ένα πυκνότερο υποκείμενο φυσικό έδαφος. Στην εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων η οποία έγινε το 2004 είχε προσδιοριστεί αυτό το υλικό σαν ιλύς και ως εκ τούτου αποτελούμενο από πολύ μικρά σωματίδια το οποία έδιναν στο υλικό μεγάλη ικανότητα συγκράτησης νερού και υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σε τέτοια μέσα το σήμα του γεωραντάρ εξασθενεί έντονα η διάδοση του κύματος του γεωραντάρ και ως εκ τούτου μειώνεται η ικανότητα ανίχνευσης βαθύτερων ανακλάσεων. Η πλήρωση, αντίθετα, ήταν πιο αδρομερής λιγότερο συμπαγής και πιο ξηρή έτσι είναι και λιγότερο αγωγίμη ηλεκτρικά και δεν εξασθενούσε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Ανάμεσα σε βάθος 2m ήταν δυνατόν να ερμηνευθεί ποιοτικά η δομή και η υφή του σήματος. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σκέδασης κυμάτων που οφείλεται σε αδρομερή μάζα όπως σκυρόδεμα ή τούβλα θα προκαλέσει τοπικά μια σημαντική διαταραχή στο ανακλώμενο σήμα. Αντίθετα σε απουσία αδρομερών το καταγεγραμμένο σήμα δείχνει ένα επίπεδο μοτίβο. Αυτές οι παρατηρήσεις επιβεβαιώθηκαν στην συνέχεια κατά την διάρκεια εκσκαφής της πλήρωσης.



Εικόνα 3.23(a) Συνολική τρισδιάστατη εικόνα των τομών GPR **(b)** οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν την στρωματογραφία της πλήρωσης και την οριοθέτηση του «τύπου 4» εδάφους το οποίο περιέχει περισσότερο από 75% μάζα (Boudreault,2010)



Εικόνα 3.24 Τομές GPR (Boudreault, 2010)

4 Εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό ανθρώπινων (αρχαιολογικών) σχηματισμών στον Πειραιά

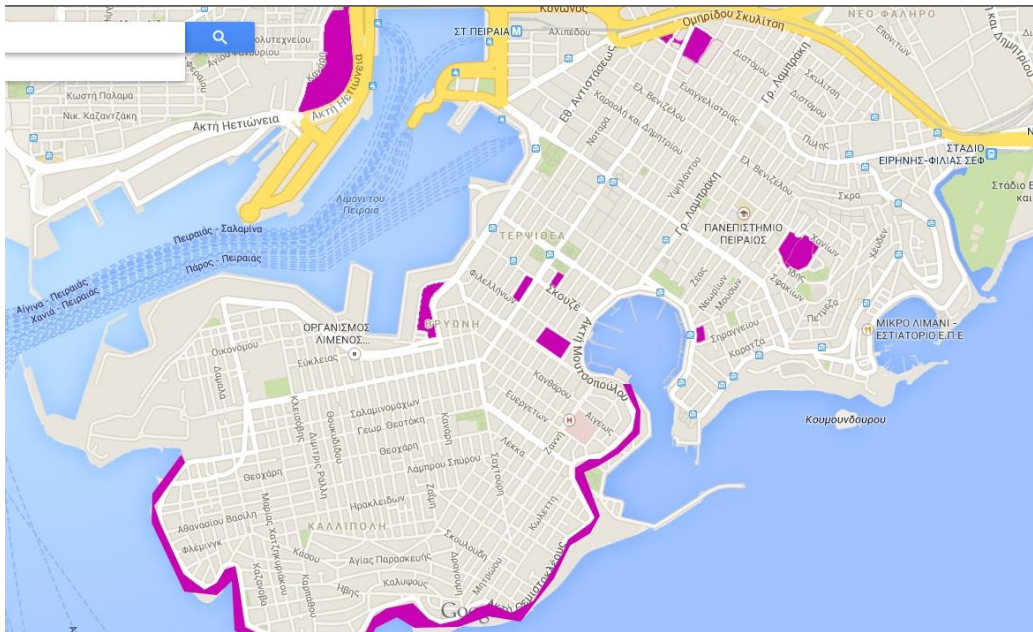
4.1 Εισαγωγή

Η τοποθεσία της περιοχής έρευνας βρίσκεται στον Πειραιά. Η περιοχή που πραγματοποιήθηκε η έρευνα είναι οι δρόμοι Ομηρίδου Σκυλίτση, Αλιπεδίου, Πύλης και Παλλάδος. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε για την εξακρίβωση τυχόν αρχαιολογικών ή/και ανθρωπογενών δομών αφού στην οδό Ομηρίδου Σκυλίτση θα πρέπει να τοποθετηθούν δύο στύλοι γείωσης, ώστε να μπορέσει να γίνει η διέλευση του TRAM. Οι στύλοι αυτοί θα έχουν βάθος 4m οπότε η γεωφυσική έρευνα θα πρέπει με ακρίβεια να καθορίσει το που θα τοποθετηθούν.

Πρωτού πραγματοποιηθεί η γεωφυσική έρευνα θα πρέπει να εξεταστεί η γεωλογία και η στρωματογραφία της περιοχής έτσι ώστε να μπορούν να συσχετιστούν τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας με συγκεκριμένους σχηματισμούς. Επίσης, ο Πειραιάς είναι περιοχή υψηλού αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Συνεπώς εκτός της γεωλογίας θα πρέπει να εξεταστεί η περιοχή και ως προς την αρχαιολογία καθώς υπάρχει περίπτωση να εντοπιστούν αρχαιολογικές ανθρωπογενείς δομές. Η πιθανότητα ύπαρξης τέτοιων δομών υποστηρίζεται και από το γεγονός ότι πολύ κοντά στην περιοχή έρευνας υπάρχουν ήδη αποκαλυμμένα αρχαιολογικά ευρήματα. (Εικόνα 4.1)



Εικόνα 4.1 Περιοχή έρευνας με μπλε χρώμα απεικονίζονται αρχαιολογικές τοποθεσίες



Εικόνα 4.2 Χάρτης Πειραιά με μωβ χρώμα επισημάνονται οι αρχαιολογικοί χώροι της περιοχής

4.2 Γεωλογία Περιοχής

4.2.1 Γεωλογία Λεκανοπεδίου

Οι σχηματισμοί οι οποίοι απαρτίζουν την γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου των Αθηνών είναι οι Αλπικοί και οι Μεταλπικοί. Οι αλπικοί σχηματισμοί εντοπίζονται στους ορεινούς όγκους που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο αλλά και σε μικρούς λόφους «μάρτυρες» που εμφανίζονται μέσα σε αυτό. Οι μεταλπικοί σχηματισμοί πληρούν το εσωτερικό του λεκανοπεδίου.

Σε ολόκληρη την Αττική συναντάται ένα αλλόθθονο σύστημα πετρωμάτων επωθημένο με σχετικά αυτόχθονα πετρώματα. Πρόκειται είτε για μεταμορφωμένα (ανώτερο-κατώτερο μάρμαρο σχιστόλιθοι Καισαριανής, Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι) είτε για αμεταμόρφωτα (Τριαδικοί και Κρητιδικοί Σχιστόλιθοι). Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει στα κατώτερα στρώματα εκρηξιγενή πετρώματα και στα ανώτερα κρητιδικούς ασβεστόλιθους. (Katsikatsos et al., 1976, Clement et al. 1983, Katsikatsos et al., 1986).

4.2.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά Πειραιά

Η Πειραιϊκή χερσόνησος εντοπίζεται στο νοτιοδυτικό άκρο του λεκανοπεδίου Αττικής. Αποτελείται ουσιαστικά από δύο λόφους της Καστέλας και του Αγίου Βασιλείου, οι οποίοι χωρίζονται από ένα βύθισμα εκατέρωθεν του οποίου σχηματίζονται ο κόλπος του Πειραιά και ο κόλπος της μαρίνας Ζέας.

Οι υπάρχοντες σχηματισμοί που καλύπτουν την μεγαλύτερη περιοχή γύρω από την περιοχή έρευνας είναι Πλειοκαινικές και Πλειστοκαινικές αποθέσεις καθώς και Ολοκαινικές ποταμοχειμάρειες αποθέσεις. Σε κάποιες περιοχές, υπάρχουν και παράκτιες αποθέσεις άμμου και αργίλου οι οποίες πλέον καλύπτονται από ανθρωπογενείς αποθέσεις των τελευταίων δεκαετιών.

Περιγράφοντας την γεωλογία της περιοχής, όπως φαίνεται και από τον χάρτη της **Εικόνας 4.4** συναντούμε τα παρακάτω:

- **Ασβεστόλιθοι Ανώτερου Κρητιδικού και κατά τύπους μάρμαρα με πυριτόλιθους.**

Στις περιοχές της Αττικής, όπου τα πετρώματα δεν έχουν υποστεί μεταμόρφωση (Πάρνηθα, Ελευσίνα και Αιγάλεω) έχουν βρεθεί ασβεστολιθικά ιζήματα κενομανίου-σενωνίου ηλικίας. Τα ιζήματα αυτά επικάθονται ασύμφωνα πάνω σε κροκαλοπαγή ή πάνω σε διαβρωμένους ιουρασικούς ή τριασικούς ασβεστόλιθους. Τοπικά μπορεί να έχουν αποθεθεί πάνω σε οφιόλιθους, λατερίτες και σιδερονικελιούχα μεταλλεύματα.

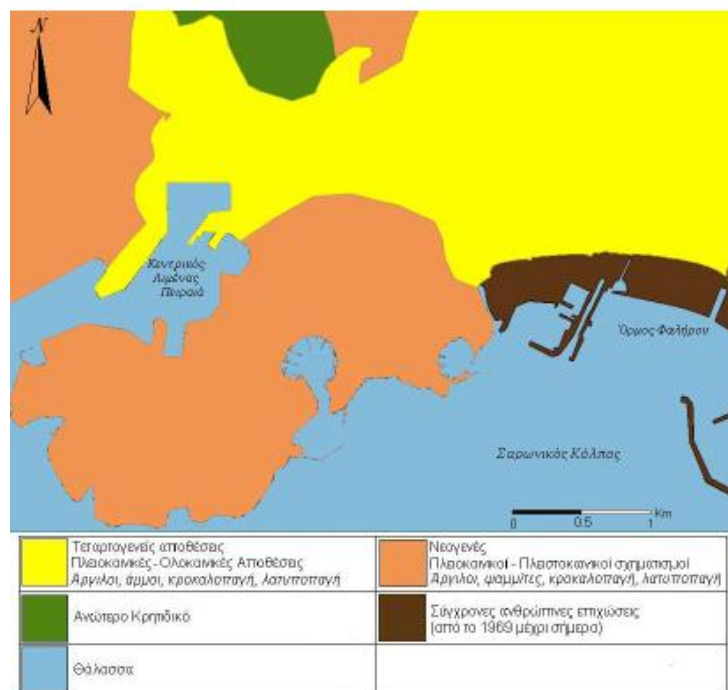
- **Τεφροκίτρινες μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και κροκαλοπαγή του κατώτερου Πλειόκαινου ή «Μάργες του Πειραιά».**

Το σύστημα περιλαμβάνει σε εναλλασσόμενες στρώσεις ασβεστιτικές μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ασβεστιτικούς ή/και μαργαϊκούς ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. Επίσης συναντώνται σε λεπτές στρώσεις ιλυόλιθοι, κιμωλία, άργιλοι, αργιλοϊλύες, και αμμοϊλύες. Η ποσοστιαία αναλογία των στρωμάτων σε μια γεωτροπική στήλη διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, κυριαρχούν όμως συνήθως οι μάργες και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι σε εναλλαγές, που περιέχουν υψηλό σχετικά ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου (πάνω από 50%). Οι υπερκείμενες χαλαρές στρώσεις αποτελούνται συνήθως από εναλλαγές αργιλικών ή αμμοδών ιλύων και ιλυούχων άμμων και άμμων με όστρακα και οργανικά υλικά. Πολύ συχνά μεταξύ της μάργας και των χαλαρών ιλυωδών στρώσεων εμφανίζονται λεπτές στρώσεις αμμοχάλικου, που σε ορισμένα σημεία με την παρουσία συνδετικού υλικού μετατρέπονται σε χαλαρό κροκαλοπαγές.

Στην ουσία οι μάργες του Πειραιά είναι νεογενή ιζημάτα αβαθούς θάλασσας και μπορούν να διαχωριστούν σε ανώτερη και κατώτερη ενότητα. Η ανώτερη ενότητα του νεογενούς είναι το αποτέλεσμα μιας περίπου συνεχούς ιζηματογένεσης αβαθούς θάλασσας σε ήπιες κλιματολογικές συνθήκες (Χαραλαμπίδης, 1964). Εμφανίζεται σαν μια περίπου συνεχής υπό-οριζόντια ακολουθία στρωμάτων, που επικάθεται ασύμφωνα στην ιδιαίτερα τεκτονισμένη κατώτερη ενότητα. Η δεύτερη ενότητα είναι περίπου ίδιας σύστασης και ηλικίας με την πρώτη. Οι μαργαϊκοί ψαμμίτες και οι μάργες χαρακτηρίζονται από διαφορές που προέκυψαν κατά την φάση ιζηματογένεσης και οφείλονται στην επικράτηση κατά περιόδους των περισσότερο ή λιγότερο λεπτόκοκκων υλικών. Αντίθετα, οι μάργες και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι χαρακτηρίζονται από διαφορές που προέκυψαν κατά την διαδικασία αποσάθρωσης και μεταφοράς υλικών και οφείλονται στο εναπομένον από τη χημική διάλυση ανθρακικό ασβέστιο

- **Άνω-πλειστοκαινικές-Ολοκαινικές αποθέσεις .**

Είναι η νεότερη σειρά ιζημάτων και στρωματογραφικά μπορεί να είναι ασύμφωνη. Αποτελείται από αποθέσεις πλευρικών κορημάτων των Πλειοκαινικών κλιτύων της Πειραιϊκής χερσονήσου, από ποταμό-χειμάρριες αποθέσεις του Κηφισού ποταμού (κατά θέσεις), από ανθρωπογενείς αποθέσεις και επιχώσεις (από τουλάχιστον τα κλασικά χρόνια 5^{ος} αι. π.Χ. μέχρι σήμερα) και τέλος από παράκτιες αποθέσεις (σήμερα καλυμμένες από σύγχρονες και παλαιότερες επιχώσεις) άμμων και ιλυούχων άμμων, καθώς και ιλύων και αργίλων λιμνοθαλάσσιας προέλευσης.

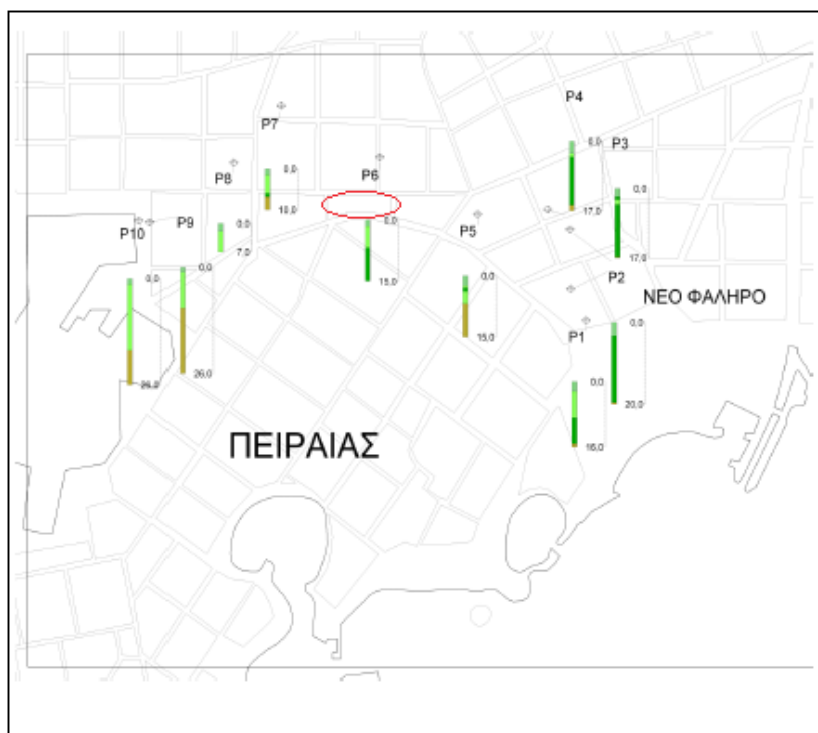


Εικόνα 4.4 Γεωλογικός χάρτης Πειραιά (Αποστολόπουλος, 2013)

4.2.3 Λιθολογία και Στρωματογραφία Περιοχής Έρευνας

Εξετάζοντας την στρωματογραφία της περιοχής μπορούμε να ερμηνεύσουμε με μεγαλύτερη βεβαιότητα τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την γεωφυσική έρευνα. Τα δεδομένα των γεωτρητικών στηλών προήλθαν από την διδακτορική διατριβή του Βανδαράκη Δημήτριου «Η παλαιογεωγραφική εξέλιξη της πεδιάδας των Αθηνών τα τελευταία 6.000 έτη». Στην συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή έγινε δειγματοληψία 10 ερευνητικών γεωτρήσεων. Από αυτές επιλέχθηκαν οι πλησιέστερες στην περιοχή έρευνας έτσι ώστε να χαρακτηριστεί η στρωματογραφία της περιοχής. Αυτές οι γεωτρήσεις είναι οι P6, P7, P8.

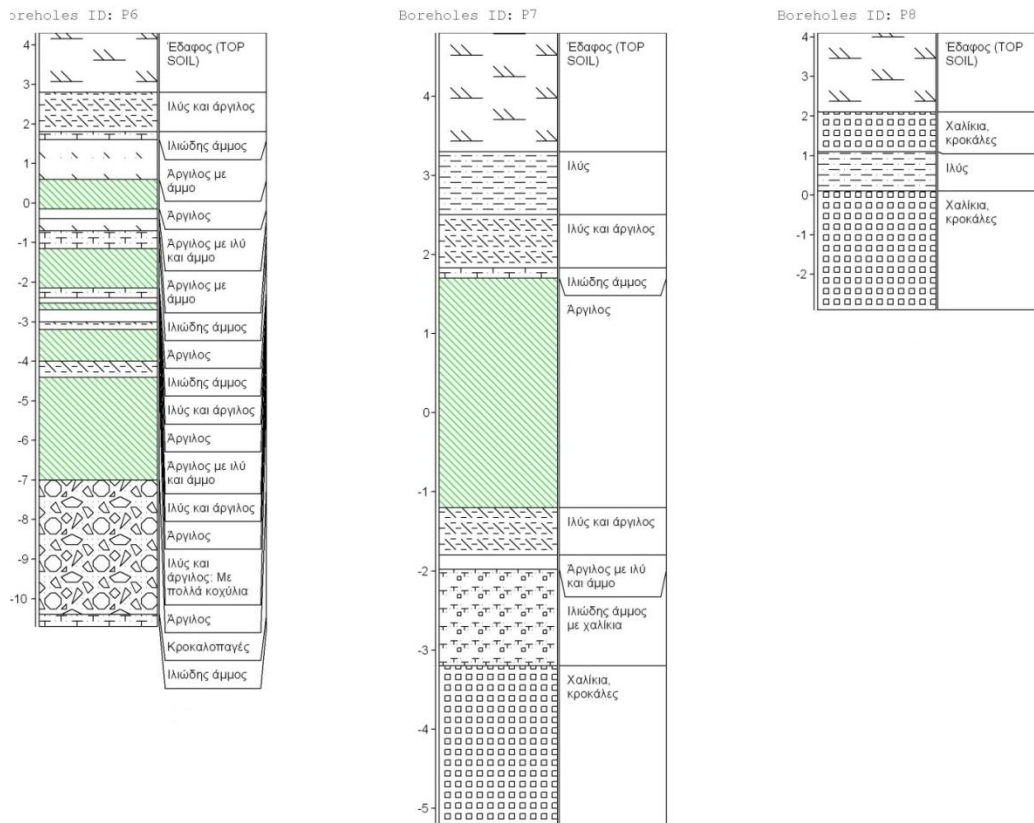
Ουσιαστικά στις γεωτρήσεις αυτές παρατηρείται αρχικά ένα έδαφος ανθρωπογενούς προέλευσης και στην συνέχεια στρώσεις εναλλασσόμενες από άμμο και άργιλο μέχρι να βρεθεί το υπόβαθρο το οποίο αποτελείται από χαλίκια, κροκάλες ή κροκαλοπαγή σχηματισμό. Στις γεωτρήσεις P6, P7 φαίνεται να επικρατεί η άργιλος σχεδόν σε όλα τα βάθη αλλά πιο συχνά με προσμίξεις άμμου ή ιλύος. Η παρουσία κοχυλιών παρατηρείται στην P6 πράγμα το οποίο δηλώνει την θαλάσσια προέλευση αυτών των σχηματισμών. Η παρουσία ιλύος και αργίλου μαρτυρά την ύπαρξη περιβάλλοντος χαμηλής ενέργειας δηλαδή μιας περιοχής με εποχιακά στάσιμα νερά, δηλαδή μιας λιμνοθάλασσας.



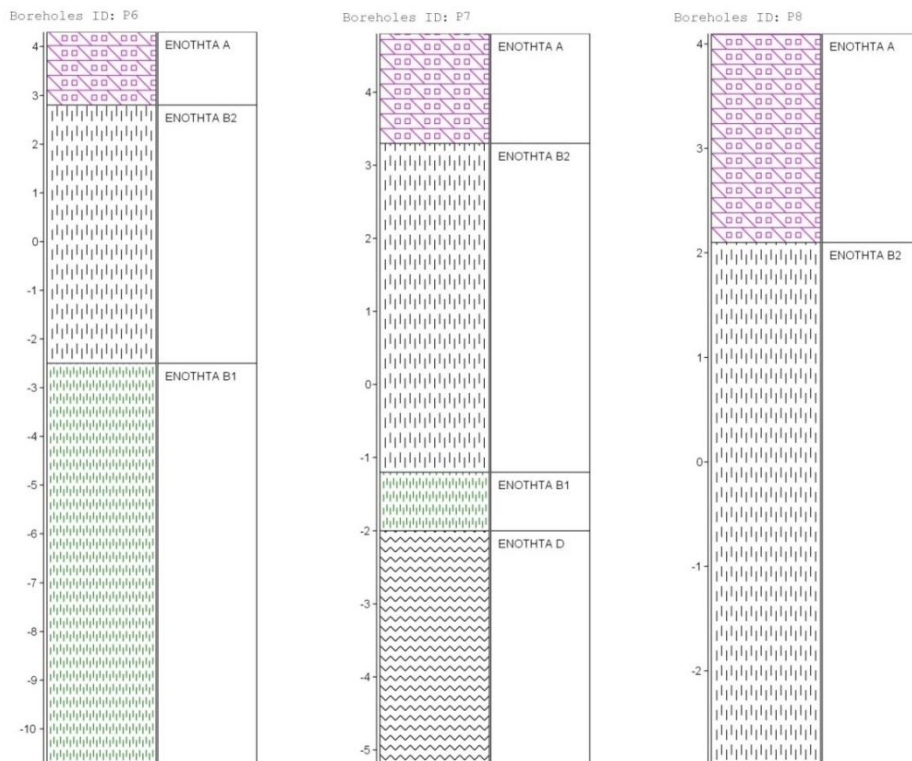
Εικόνα 4.5 Περιοχή λιθοστρωματογραφικών γεωτρήσεων και περιοχή έρευνας (κόκκινος κύκλος) (Βανδαράκης, 2013)

Τα δεδομένα αυτά μπορούμε να τα χωρίσουμε σε 6 λιθοστρωματικές ενότητες. Οι ενότητες αυτές είναι:

- **Ανθρωπογενείς αποθέσεις (Ενότητα Α):** Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται ανθρωπογενείς αποθέσεις (σύγχρονες επιχώσεις-μπάζα, και αρχαιολογικά στρώματα). Η σύσταση της ενότητας αυτής περιλαμβάνει χονδρόκοκκα υλικά (χάλικες, κροκάλες, άμμους, ιλύες και αργίλους), κατά την διάρκεια του Ολοκαίνου.
- **Ολοκαινικά ιζήματα (Ενότητες Β1, Β2):** Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται λιμνοθαλάσσιες και παράκτιες αποθέσεις (Β1) καθώς και ποταμοχειμμάριες αποθέσεις (Β2) του Ολοκαίνου. Η ενότητα Β1 απαντάται σε περιοχές κοντά στην ακτή. Εμφανίζεται σε βάθη από 0,5 έως 19,62m όμως σε αυτές παρεμβάλλονται και ποταμοχειμμάριες αποθέσεις (Β2). Η ενότητα Β1 συνίσταται κυρίως από τεφρές ιλυσιαμμόδεις-αμμώδεις αποθέσεις πλούσιες σε θαλάσσια απολιθώματα. Η εμφάνιση των απολιθωμάτων αυτών στις αποθέσεις σημαίνει πως το περιβάλλον ήταν θαλάσσιο έως λιμνοθαλάσσιο μικρού βάθους. Η ενότητα Β2 αποτελείται κυρίως από άμμους, αργίλους, ιλύες ιλυώδεις άμμους, ιλυώδεις αργίλους και αργιλώδεις άμμους, με παρεμβολές χαλίκων και εμφανίζεται σε βάθη από 1,20 έως 17,64m με παρεμβολές της ενότητας Β1. Αποτελούν ποτάμιες αποθέσεις, συνήθως υπερόχθιες πλημμυρικές, ενώ η συγκέντρωση χαλίκων και άμμων κατά θέσεις υποδηλώνει αποθέσεις κοίτης.
- **Προ-Ολοκαινικό Υπόβαθρο**
 - **Πλειστοκαινικά ιζήματα (Ενότητα C):** Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται αποθέσεις του Πλειστόκαινου με καστανές αργίλους και κροκαλοπαγή με καστανό συνδετικό υλικό.
 - **Νεογενείς αποθέσεις (Ενότητα D):** Νεογενείς αποθέσεις με μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και κροκαλοπαγή. (Χαραλαμπίκης 1952, Δούνας 1962, Σαμπατακάκης 1991)
 - **Υπόβαθρο (Ενότητα E):** το υπόβαθρο του λεκανοπεδίου χωρίζεται σε δύο συστήματα το αυτόχθονο και το αλλόχθονο. Το αυτόχθονο αποτελείται από ασβεστόλιθους, χαλαζίτες, κροκαλοπαγή, Λευκούς-Λευκότεφρους, παχυστρωματώδεις-άστρωτους ασβεστόλιθους ηλικίας Μέσο-Άνω Τριαδικού. Μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες ψαμμίτες που αποτελούν την βάση των Αθηναϊκών Σχιστόλιθων. Τέλος εμφανίζονται οι Αθηναϊκοί Σχιστόλιθοι με ηλικία που τοποθετείται στο Μαϊστριχτιο μέχρι το Ηώκαινο. (Σαμπατακάκης, 1991)



Εικόνα 4.6 Λιθολογικές γεωτρήσεις (Βανδαράκης, 2013)

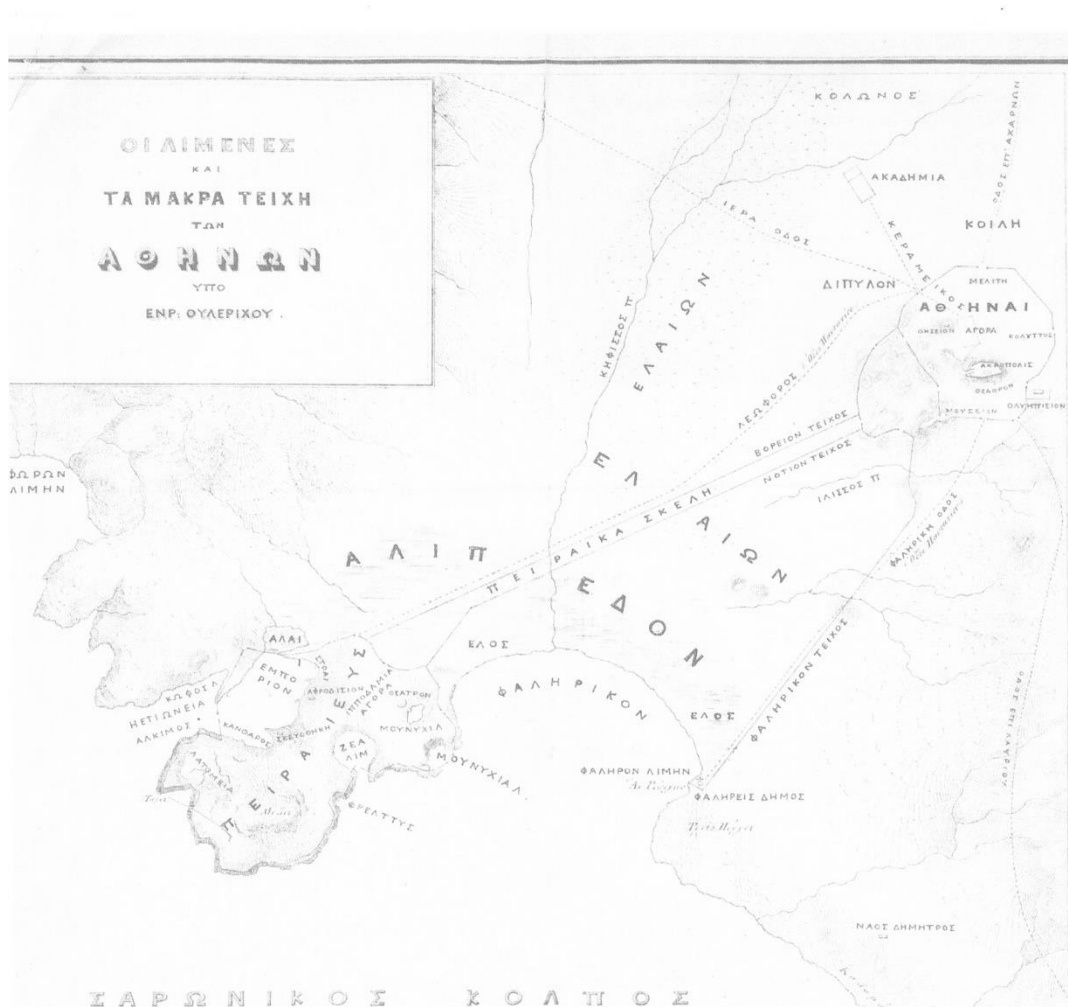


Εικόνα 4.7 Γεωτρήσεις χωρισμένες σε στρωματογραφικές ενότητες (Βανδαράκης, 2013)

4.3 Ιστορική και Αρχαιολογική Ανασκόπηση της περιοχής του Πειραιά

4.3.1 Γενικά ιστορικά στοιχεία

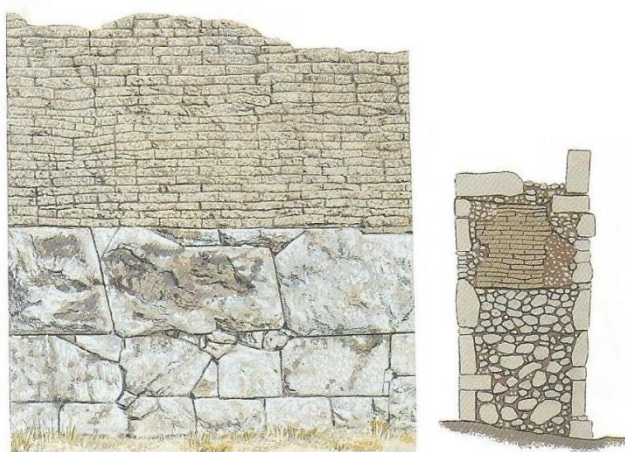
Η περιοχή του Πειραιά, κατά τον Πausανία, πήρε το όνομά της από την λέξη «Πέραν» που σημαίνει πέρασμα, αφού κατά την προϊστορική περίοδο ήταν νησί που ενωνόταν με την ξηρά με μια στενή λωρίδα γης. Η θαλάσσια ζώνη που χώριζε τον Πειραιά από την ξηρά πληρώθηκε από ποτάμια (κυρίως τον Κηφισό) και σχημάτιζε ελώδη περιοχή γνωστή ως Αλίπεδο ή Αλαί.



Εικόνα 4.8 Χάρτης της Αθήνας όπου απεικονίζονται τα Μακρά Τείχη η Ακρόπολη και τα λιμάνια του Κάνθαρου της Ζέας και της Μουνιχίας

Ο Στράβωνας και ο Πλίνιος (Ulrich, 1843) υποστηρίζουν πως η θάλασσα χώριζε τον Πειραιά από την Αθήνα. Στην συνέχεια αυτή η περιοχή προσχώθηκε από θαλάσσια ιζήματα. Ο Κηφισός και οι άλλοι χείμαρροι σχημάτισαν το Αλίπεδο μια αλμυρή και ελώδη πεδιάδα που σήμερα ενώνει τον Πειραιά με τον Ελαιώνα. Η συγκεκριμένη περιοχή δημιούργησε προβλήματα στην θεμελίωση των Μακρών τειχών. Στην ουσία το τείχος ξαναχτίστηκε πολλές φορές στο πέρασμα των αιώνων. Το πλινθόκτιστο τμήμα καταστρεφόταν και κτιζόταν στην κορυφή της προηγούμενης. Σήμερα το ορατό τείχος φαίνεται να είναι χτισμένο εξολοκλήρου από πέτρα, στην πραγματικότητα όμως αποτελείται από τις διαδοχικές λίθινες βάσεις που έχουν χτιστεί η μία πάνω στην άλλη (Εικόνα 4.9).

Ο Στράβων αναφέρει ότι στο λεκανοπέδιο μετά από βροχοπτώσεις το χώμα χανόταν στην θάλασσα, χωρίς να επικάθεται στις γύρω περιοχές, γεγονός που μαρτυρά πως υπάρχει το φαινόμενο της έντονης διάβρωσης.



Εικόνα 4.9 Στα αριστερά το τείχος της Ιεράς Πύλης με πλίνθη ανοδομή που αποκαλύφθηκε στο εσωτερικό της μεταγενέστερης λίθινης θεμελίωσης και στα δεξιά τομή στον τοίχο που εικονίζει τις διαδοχικές θεμελιώσεις

4.3.2 Τα μακρά Τείχη

Ένα από τα σημαντικότερα σωζόμενα αρχαιολογικά μνημεία της περιοχής των Αθηνών είναι τα Μακρά Τείχη. Όταν οι Αθηναίοι υπερασπιστήκαν τα Μέγαρα το 460 π.Χ., κατάλαβαν γρήγορα την αμυντική αδυναμία της πόλης. Το χτίσιμο των τειχών έγινε εκατέρωθεν του δρόμου που συνέδεε την πόλη με το λιμάνι. Αρχικά κτιστήκαν δύο τείχη, το ένα με μήκος 6 χιλιόμετρα., από τον λόφο της Πνύκας μέχρι τον Πειραιά, και το άλλο με μήκος 5χλμ., από τους πρόποδες του λόφου των Μουσών μέχρι το Φάληρο. Η διαδρομή του διπλού τείχους που κατέληγε στον Πειραιά έχει εντοπιστεί με μεγάλη ακρίβεια από τα κατάλοιπα που έχουν

σωθεί. Τα Μακρά Τείχη καταστράφηκαν με βάση της συνθήκη ειρήνης του 404π.Χ., αλλά τα δύο τείχη του Πειραιά ξανακτίστηκαν στις αρχές του 4^{ου} αι π.Χ.

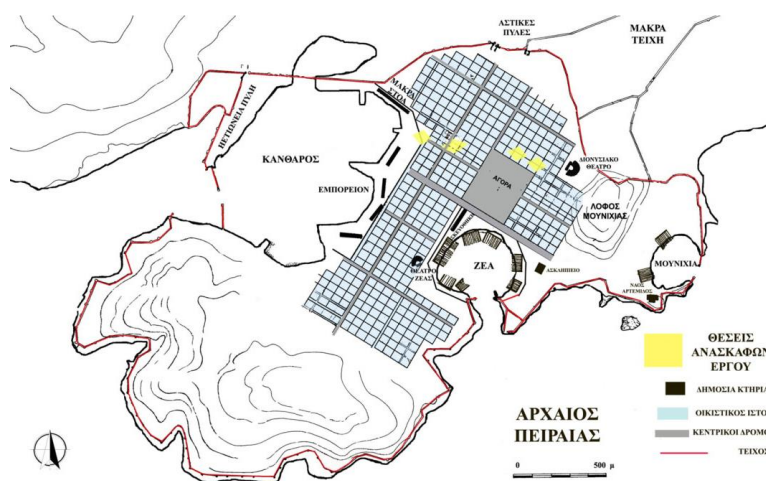
Στην περιοχή έρευνας και στην ουσία νότια της Ομηρίδου Σκυλίτση βρίσκονται οι αστικές πύλες του Πειραιά. Στην **Εικόνα 4.10** παρουσιάζεται η όδευση του τείχους έτσι όπως παρουσιάζεται από την Εφορεία Αρχαιοτήτων.



Εικόνα 4.10 Όδευση τείχους και αστικές πύλες με κόκκινο χρώμα η περιοχής έρευνας

4.3.3 Οι οχυρώσεις του Πειραιά

Τα έργα ανάπτυξης και η οχύρωση του Πειραιά πραγματοποιήθηκαν λόγω πρωτοβουλίας του Θεμιστοκλή ο οποίος έπεισε τους Αθηναίους να τα ολοκληρώσουν. Ο Πειραιάς είχε ένα κλειστό λιμάνι τον Κάνθαρο, στην βόρεια πλευρά του και δύο μικρότερα λιμάνια στην νότια πλευρά την Μουνιχία και την Ζέα. Οι οχυρώσεις έκαναν τις εισόδους των λιμανιών στενότερες και έτσι μπορούσαν να παραμένουν κλειστές με αλυσίδες. Οι οχυρώσεις αυτές ολοκληρώθηκαν το 476 π.Χ. .



Εικόνα 4.11 Ο αρχαίος Πειραιάς (φωτ. Εφορεία Αρχαιοτήτων Δυτικής Αττικής, Πειραιώς και Νήσων).

5 Κεφάλαιο: Γεωφυσική Έρευνα Μετρήσεις και Αποτελέσματα

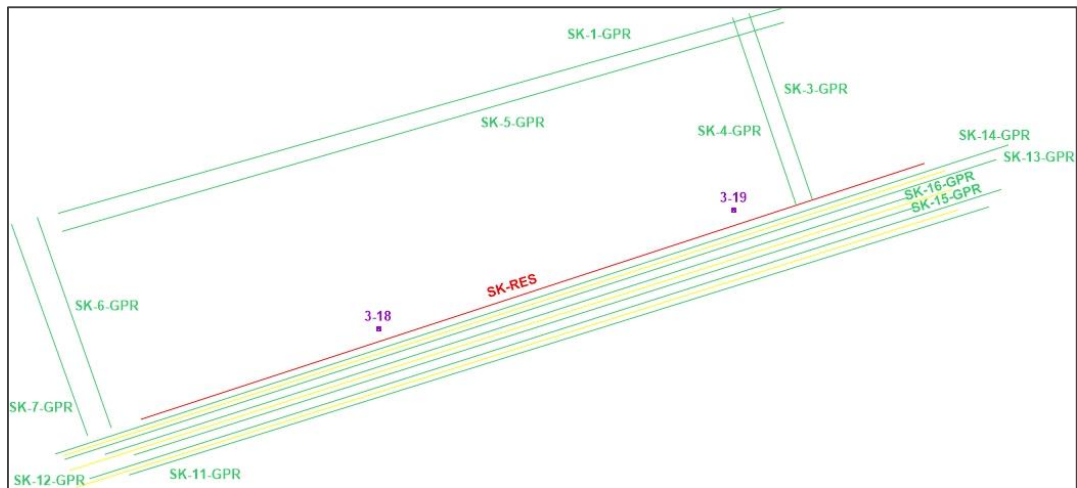
5.1 Εισαγωγή

Η πρώτη γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ηλεκτρομαγνητική. Στόχος ήταν τόσο η αποτύπωση της στρωματογραφίας της περιοχής όσο και ο εντοπισμός πιθανών τοπικών ανθρωπογενών δομών, οι οποίες θα μπορούσαν να ξεχωρίζουν εξαιτίας των διαφορετικών τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο και συνδυασμό με τις τιμές της inphase συνιστώσας, η οποία μας δίνει τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Σημειώνουμε ότι η ανάλυση της inphase συνιστώσας βοηθά στην εξακρίβωση των ανωμαλιών που προέρχονται από μεταλλικά αντικείμενα. Η αποτύπωση αυτή έγινε σε βάθη 1,5m και 3m. Στην ουσία αναζητούνται σχετικά «γραμμικές μορφές» ισοκαμπυλών χαμηλής αγωγιμότητας οι οποίες σχετίζονται με τοιχία ή απότομές αλλαγές που να ξεχωρίζουν χώρους οι οποίοι υποδηλώνουν την παρουσία ανθρωπογενών κατασκευών.

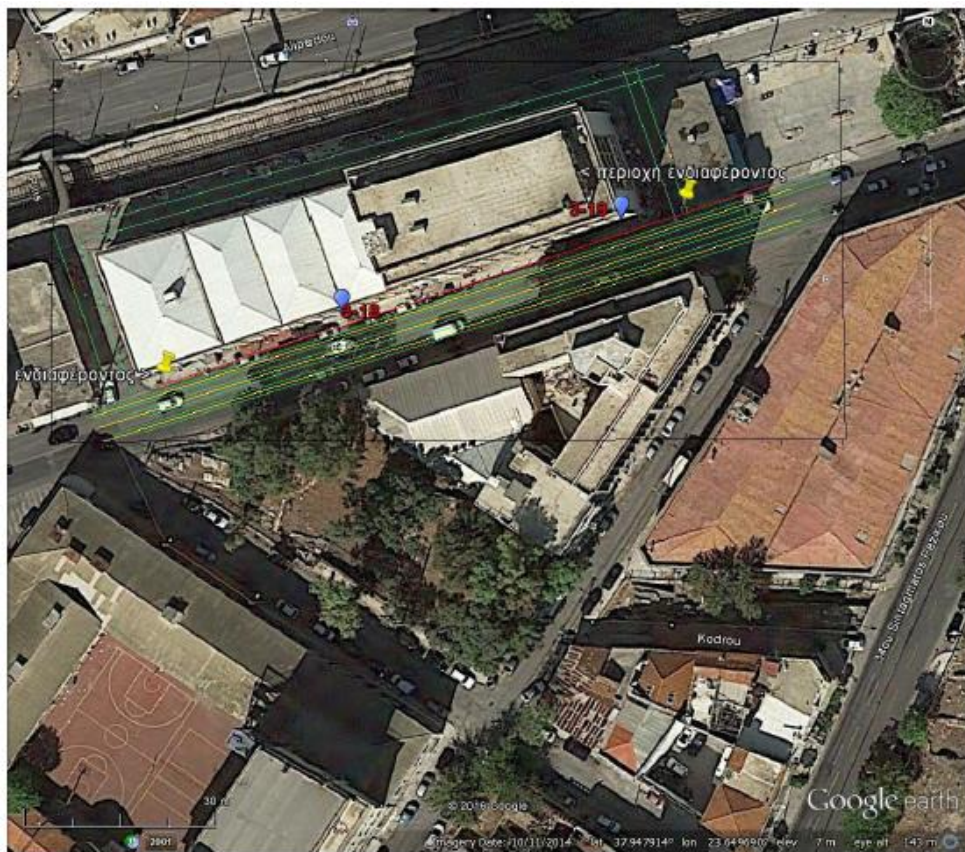
Η δεύτερη γεωφυσική μέθοδος που πραγματοποιήθηκε ήταν η γεωηλεκτρική τομογραφία. Μέσω αυτής της μεθόδου προκύπτει δισδιάστατη γεωηλεκτρική τομή η οποία αποτυπώνει με μεγάλη λεπτομέρεια το υπέδαφος και μέσω αυτής μπορούν να εντοπιστούν στρωματογραφικές ασυνέχειες και τοπικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης.

Τέλος έγιναν μετρήσεις γεωραντάρ. Μέσω αυτής της μεθόδου καταγράφονται περιθλάσεις από τοπικούς στόχους στην περίπτωση τοιχίων ή συνεχείς ανακλάσεις σε περιπτώσεις ανθρωπογενών αποθέσεων ενώ διακριτές σε χρονικά διαστήματα ανακλάσεις υποδηλώνουν στρωματογραφικές ασυνέχειες.

Οι μετρήσεις όλων των μεθόδων αποτυπώνονται στην **Εικόνα 5.1**. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η ηλεκτρική τομογραφία, με πράσινο οι μετρήσεις του γεωραντάρ και με κίτρινο οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις. Επίσης με μωβ χρώμα αποτυπώνονται οι θέσεις των προτεινόμενων στύλων.



Εικόνα 5.1 Κάνναβος μετρήσεων για το σύνολο των γεωφυσικών μεθόδων στον Πειραιά.

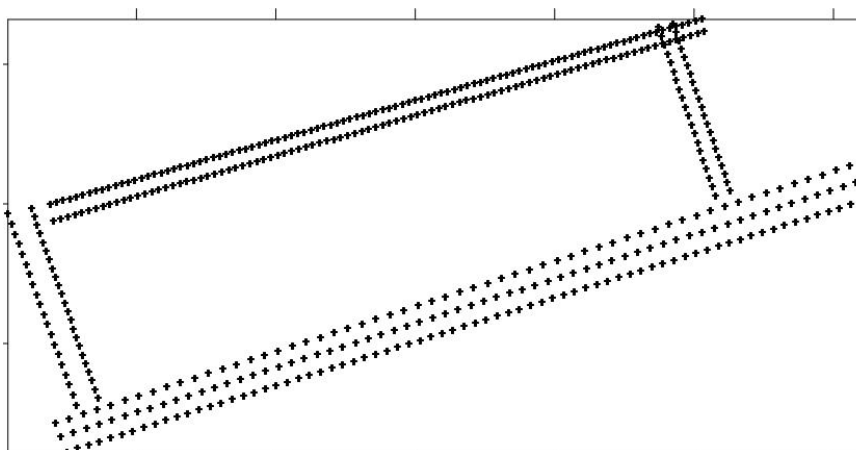


Εικόνα 5.2 Χάρτης Google Earth όπου απεικονίζονται οι τοποθεσίες των μετρήσεων με πράσινο χρώμα του γεωραντάρ με κίτρινο των ηλεκτρομαγνητικών και με κόκκινο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι μπλε κοκκίδες απεικονίζουν τις θέσεις των προτεινόμενων στύλων.

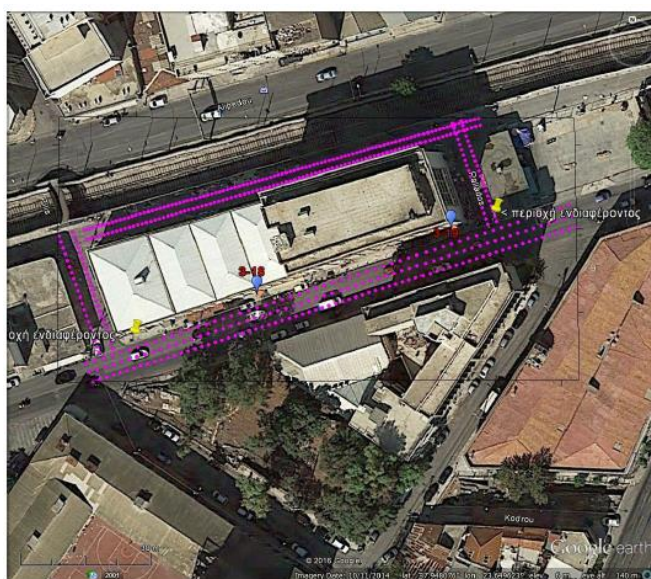
5.2 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

5.2.1 Εισαγωγή

Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 5.3** οι γραμμές των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων είναι παράλληλες με τους δρόμους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαμορφώσεις του ηλεκτρομαγνητικού οργάνου μετρήσεων, μια για βάθος συνολικής διασκόπησης τα 1,5m και μια για 3m. Οι μετρήσεις και στις δύο περιπτώσεις έγιναν με βήμα 1m. Αξίζει να σημειωθεί πριν προχωρήσουμε στον σχολιασμό των αποτελεσμάτων πως στην συγκεκριμένη έρευνα ,όπως φαίνεται και στις **Εικόνες 5.3 και 5.4**, οι ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις δεν έγιναν σε όλη την έκταση των χαρτών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι χάρτες που θα προκύψουν να παρουσιάζουν τα broad features της περιοχής και μέσω αυτών μπορούμε να έχουμε μια γενική άποψη της εξάπλωσης πιθανών ανωμαλιών.



Εικόνα 5.3Κάνναβος μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.



Εικόνα 5.4 Θέσεις ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων με μπλε χρώμα οι προτεινόμενες θέσεις των στύλων

5.2.2 Εξοπλισμός

Χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό όργανο μέτρησης αγωγιμότητας της GF Instruments “CMD” με τις δύο διαμορφώσεις του CMD-2 με συνολικό βάθος διασκόπησης τα 3m. Το όργανο μπορεί να συνδεθεί με GPS μέσω του οποίου γίνεται καταγραφή των στοιχείων των γεωγραφικών συντεταγμένων της κάθε θέσης μέτρησης.

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

Μονάδα ελέγχου:

- Η Μονάδα έλεγχου Attachable CMD λειτουργεί σε όλους τους τύπους των συστημάτων πομπού-δέκτη.
- Χρησιμοποιούνται 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 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 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 τον δέκτη GPS.
 - Λειτουργία αναζήτησης: Τα δεδομένα μετρώνται συνεχώς, αλλά δεν σώζονται.

Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε ο τρόπος μέτρησης GPS με χειροκίνητη μέτρηση.

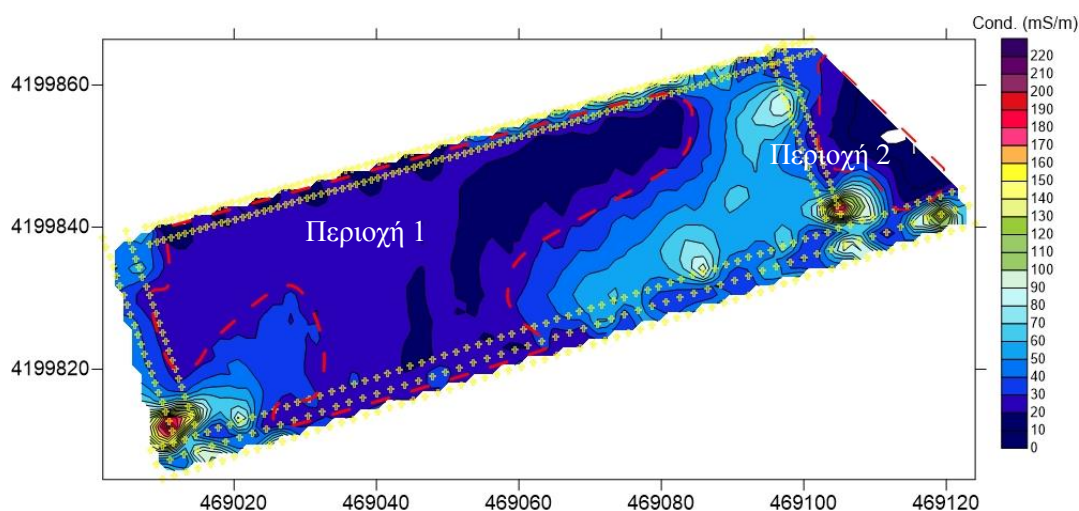
- Άμεση υποστήριξη του δέκτη GPS. Γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το υψόμετρο εμφανίζονται και αποθηκεύονται αυτόματα.
- Εύκολη μεταφορά δεδομένων σε USB.
- Χρόνος μέτρησης: 0,1-20 sec

- Μνήμη δεδομένων (128 MB):
 - 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: 270x90(145)x60mm
- Βάρος: 0,7kg
- Σύστημα πομπού δέκτη
- Μεγέθη που μετρώνται:
 - Ηλεκτρική Αγωγιμότητα
 - Μαγνητική Επιδεκτικότητα
- Ακρίβεια μέτρησης: $\pm 4\%$ σε $50\text{mS}/\text{m}$
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 10 Hz

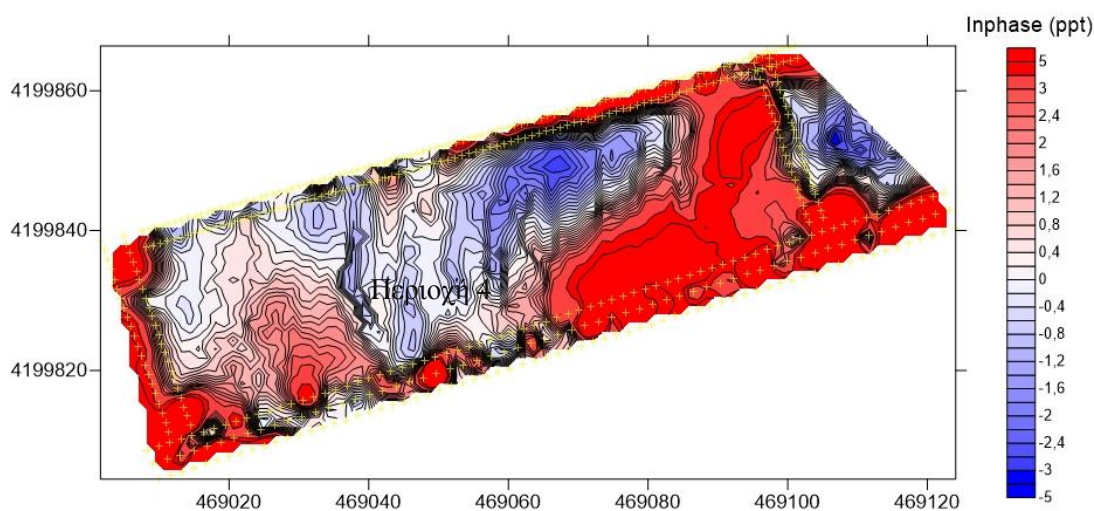
Τέλος τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer της Goldensoftware και παρουσιάζονται στην συνέχεια.

5.2.3 Ηλεκτρομαγνητικοί χάρτες

5.2.3.1 Διαμόρφωση CMD-2 και βάθος διασκόπησης 1,5m



Εικόνα 5.5 Χάρτης κατανομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 1,5m

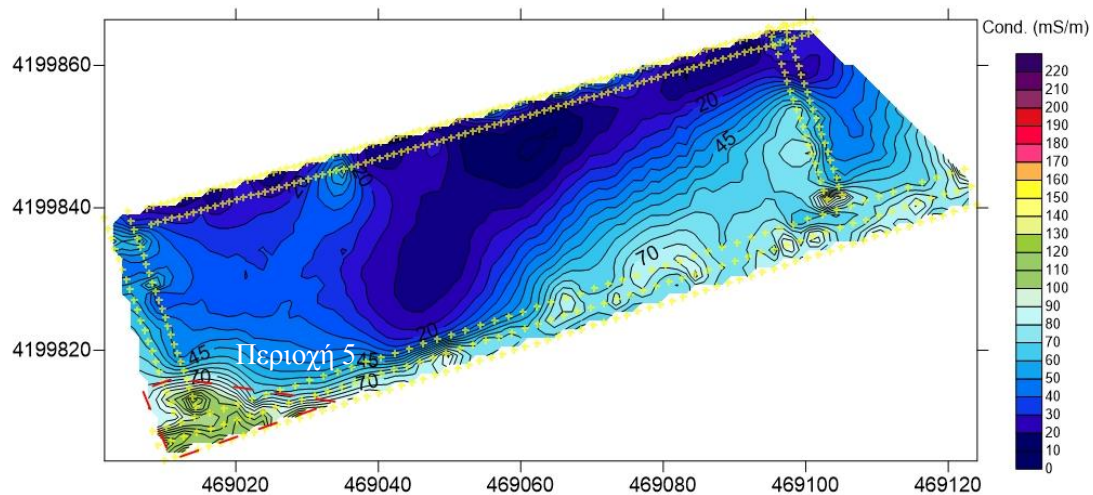


Εικόνα 5.6 Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 1,5m

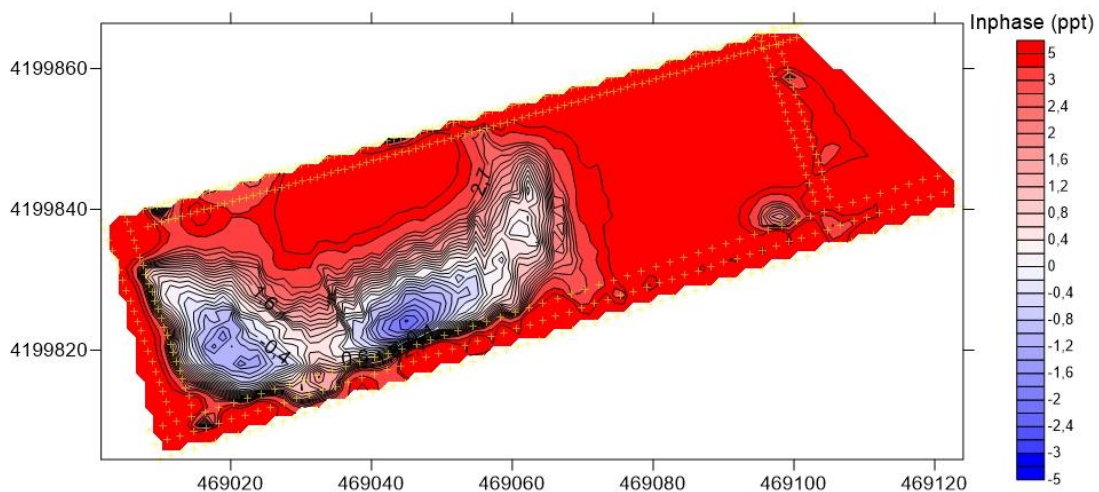
- Παρατηρούμε 2 περιοχές χαμηλής φαινόμενης αγωγιμότητας (**περιοχή 1 και περιοχή 2 Εικόνα 5.5**) που φανερώνουν την ύπαρξη ενός αδρομερούς υλικού. Οι περιοχές με υψηλότερη φαινόμενη αγωγιμότητα είναι περιοχές με αργιλικό υλικό ή χαλαρό λεπτόκοκκο υλικό.
- Οι τοπικές ανωμαλίες υψηλών φαινόμενων αγωγιμοτήτων (**Εικόνα 5.5**) με πράσινο και κόκκινο χρώμα δηλώνουν την ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων (φρέατα, καπάκια) και στην συγκεκριμένη έρευνα αποτελούν θόρυβο.

- Δεν υπάρχει εμφάνιση ισοκαμπυλών οι οποίες να διαθέτουν «γραμμική» μορφή και οι οποίες θα υποδήλωναν τείχη ή έστω τοιχία κάποιων κατασκευών.
- Στην περιοχή 4 παρουσιάζονται χαμηλές τιμές σε φάση συνιστώσας οι οποίες επιβεβαιώνουν ότι η περιοχή έχει αδρομερές υλικό και έρχονται σε συμφωνία με την αντίστοιχη περιοχή στον χάρτη αγωγιμότητας. Στην ουσία οι τιμές που βρίσκονται κοντά στο 0 δηλώνουν την ύπαρξη μη μαγνητικού υλικού.

5.2.3.2 Διαμόρφωση CMD-2 για βάθος 3m



Εικόνα 5.7 Χάρτης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m



Εικόνα 5.8 Χάρτης κατανομής της μαγνητικής επιδεκτικότητας για βάθος συνολικής διασκόπησης 3m

- Όσον αφορά την φαινόμενη αγωγιμότητα πλέον στα 3m συνολικού βάθους διασκόπησης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι προς τα βόρεια κυριαρχεί πάλι περιοχή χαμηλών αγωγιμοτήτων άρα και πιθανή ύπαρξη αδρομερούς υλικού.

- Όσο κατευθυνόμαστε προς τα νότια (Ομηρίδου Σκυλίτση) περνάμε σε περιοχή μεγαλύτερης αγωγιμότητας άρα και σε περιοχή λεπτομερούς αργλικού υλικού. Στην ουσία από τα 1,5 στα 3m παρατηρούμε την εξάπλωση αυτού του αδρομερούς υλικού.
- Στην νοτιοδυτική πλευρά του χάρτη παρατηρούμε μια περιοχή με σχετικά υψηλότερες τιμές αγωγιμότητας και γενικότερα και επί της οδού Ομηρίδου Σκυλίτση οι τιμές της φαινόμενης αγωγιμότητας φαίνεται να αυξάνονται. Το οποίο πιθανά να δηλώνει την ύπαρξη τάφρου που πληρώθηκε με λεπτόκοκκο υλικό.(περιοχή 5)
- Και σε αυτόν τον χάρτη δεν υπάρχουν «γραμμικές» ισοκαμπύλες άρα και ύπαρξη τοιχίων.
- Και στον χάρτη της φάσης συνιστώσας εμφανίζεται η περιοχή αρκετά χαμηλών τιμών το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τον χάρτη της αγωγιμότητας και δηλώνει την ύπαρξη περιοχής αδρομερούς υλικού χωρίς μαγνητικά μεταλλικά υλικά.

5.3 Ηλεκτρική Μέθοδος

5.3.1 Εισαγωγή

Η δεύτερη μέθοδος που εφαρμόστηκε στην περιοχή ήταν η ηλεκτρική. Πραγματοποιήθηκε μια τομή (SK-RES) επί της οδού Ομηρίδου Σκυλίτση σε διεύθυνση παράλληλη με τον δρόμο και στην βόρεια πλευρά του. Στην μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Pole-Dipole. Επίσης σε κάθε τομή έγιναν δύο τρόποι ανάπτυξης της μεθόδου pole-dipole, δηλαδή forward και reverse, ανάλογα με το αν το ηλεκτρόδιο ρεύματος προπορεύεται ή έπεται του δίπολου δυναμικού.



Εικόνα 5.9 Τοποθέτηση ηλεκτροδίων ηλεκτρικής μεθόδου

5.3.1.1 Επιλογή κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων

Κατά την επιλογή κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων πρέπει να λάβουμε υπόψη το περιβάλλον και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα πραγματοποιηθεί η έρευνα. Σε αστικά περιβάλλοντα, όπως είναι και αυτό της συγκεκριμένης περιοχής έρευνας, οι δύο κύριες δυσκολίες είναι οι εξής:

- Η περιοχή που είναι διαθέσιμη για της μετρήσεις είναι περιορισμένη και συνεπώς το μήκος της γεωηλεκτρικής διάταξης είναι επίσης περιορισμένο.
- Το επίπεδο θορύβου (ανθρωπογενής δραστηριότητα) είναι πολύ υψηλό και κατά συνέπεια αυτό μειώνει την ποιότητα των μετρήσεων.

Στην περίπτωση της Ομηρίδου Σκυλίτση υπάρχουν τα ανωτέρω προβλήματα και η επιλογή της θέσης τομής έγινε με τον βέλτιστο τρόπο ώστε να έχουμε την περισσότερη πληροφορία για τον χώρο που θα τοποθετηθούν οι στύλοι γείωσης και τον λιγότερο θόρυβο. Η μέθοδος Pole-Dipole επιλέχθηκε τελικά καθώς προσφέρει μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης. (Szalai et al.2010).

Table 2
Evaluation (order and depth value) of the investigated arrays according to DIC and DD.

Array	DIC (R: array length)	DD conductive dyke (5% noise)
P-DP	3rd (0.16–0.24R)	1st (5.8 m)
DP-ax	4th (0.195R)	2nd (5.6 m)
W-β	6th (0.1R)	3rd (4.9 m)
DP-eq	2nd (0.25R)	4th (4.1 m)
P-P	1st (0.35R)	5th (3.6 m)
W-α	5th (0.11R)	6th (1.9 m)

Εικόνα 5.10 Αξιολόγηση (βαθμός και βάθος) των εξεταζόμενων διατάξεων

5.4 Εξοπλισμός

Το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης είναι το SYSCALPro. Πρόκειται για έναν διαβιβαστή ρεύματος, ο οποίος στέλνει ρεύμα στο υπέδαφος μέσω των ηλεκτροδίων ρεύματος και μετράει στην συνέχεια την τάση που αναπτύσσεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού. Ο μετρητής SYSCALPro αποτελείται από 10 ταυτόχρονα κανάλια λήψης δεδομένων, είναι 1000V-250W-2.5A. Έχει την δυνατότητα αυτόματου injection ranging και έχει την επιλογή αλλαγής ηλεκτροδίων. Περιλαμβάνει αρκετές επιλογές δίνοντας τη δυνατότητα εργασίας σε κάθε είδους συνθήκες και πεδία. Δηλαδή έχει την προοπτική για εξερεύνηση υπογείων νερών, για γεωτεχνικές μελέτες των πολιτικών μηχανικών και για διάφορες περιβαλλοντικές εφαρμογές.

Γενικά Χαρακτηριστικά του μηχανήματος:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως 4000 ηλεκτρόδια
- Διαθέτει μνήμη flash δεδομένων: για πάνω από 21000 αναγνώσεις
- Η τροφοδοσία του γίνεται με δύο εσωτερικές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (12V,7.2A), μια προαιρετική εξωτερική μπαταρία 12V μπορεί να συνδεθεί με το τμήμα πομπού
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε καιρό
- Η θήκη του δεν καταστρέφεται ούτε φθείρεται
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -20 έως +70°C
- Διαστάσεις (SYSCAL Pro Switch-48): 31x23x36 cm

- Βάρος (SYSCAL Pro Switch-48): 13kg (IRIS INSTRUMENTS: SYSCAL Pro Manual Guide).

5.4.1 Επεξεργασία Μετρήσεων

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία λήψης των μετρήσεων ακολούθησε η ανάλυση και η επεξεργασία της γεωηλεκτρικής τομής.

Για την ερμηνεία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Res2dinv (Loke and Barker, 1996) . Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει την δυνατότητα διαφόρων παραμέτρων ερμηνείας. Τα βήματα επεξεργασίας είναι τα παρακάτω:

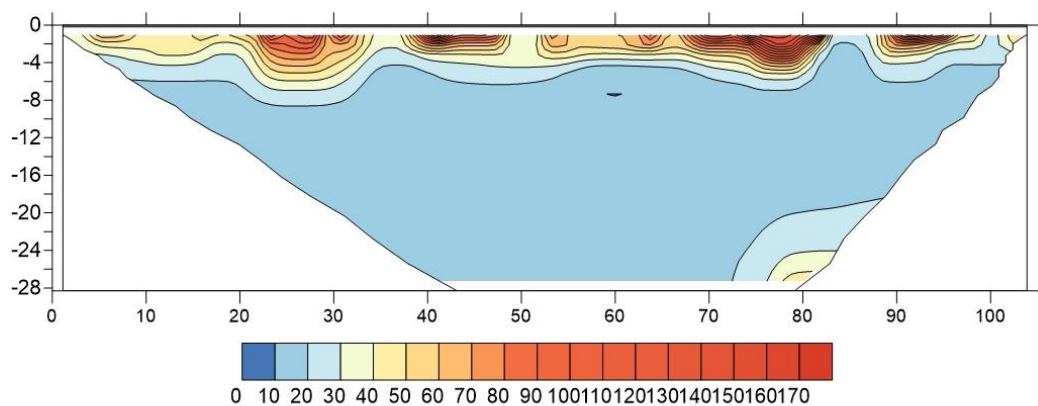
1. Επιλέχθηκε η ρύθμιση «use model refinement» ώστε να δημιουργηθούν μετρήσεις περισσότερες από αυτές που εισάγονται. Πιο συγκεκριμένα έχει την δυνατότητα να δημιουργεί μετρήσεις με το μισό της απόστασης των ηλεκτροδίων. Έτσι το τελικό μοντέλο πραγματοποιείται στις παράλληλες τομές 0,5m και κατά συνέπεια διακρίνει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το υπέδαφος.
2. Επιλέχθηκε για την δημιουργία του μοντέλου κατά την αντιστροφή των μετρήσεων (inversion) η εξής διαδικασία ερμηνείας:
 - a. Robust-Robust: Με αυτή την επιλογή έχουμε ερμηνεία μετρήσεων όπου οι παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης και στην παρουσία θορύβου στις μετρήσεις.



Εικόνα 5.11 Μετρήσεις ηλεκτρικής μεθόδου στην οδό Ομηρίδου Σκυλίτση

5.4.2 Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Μεθόδου

5.4.2.1 Γεωηλεκτρική τομή SK-RES



Ειδική Αντίσταση (Ohm·m)
Πίνακας 5.1 Γεωηλεκτρική τομή SK-RES

5.4.2.2 Σχόλια-Αποτελέσματα

- Κοντά στην επιφάνεια περιοχές με υψηλή ειδική αντίσταση φανερώνουν την ύπαρξη αδρομερούς υλικού ή δομές που οφείλονται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα (ΕΝΟΤΗΤΑ Α) όπως εκσκαφές και πληρώσεις με μπάζα.
- Καθώς αυξάνεται το βάθος περνάμε από περιοχή πολύ υψηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε μέσης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όπου είναι πιθανό να συναντάμε και τα ολοκαινικά ιζήματα (ΕΝΟΤΗΤΕΣ Β1 και Β2)
- Παρατηρούμε μια περιοχή με πολύ χαμηλές τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η περιοχή αυτή βρίσκεται μετά τα 6m βάθος και είναι η περιοχή του προ-ολοκαινικού υποβάθρου (ΕΝΟΤΗΤΑ C και ΕΝΟΤΗΤΑ D Κεφάλαιο 4.2.3 της παρούσας διπλωματικής). Αυτό το συμπέρασμα υποστηρίζεται επίσης από το γεγονός ότι γεωτρητικά δεδομένα έχουμε μέχρι βάθη από 6 έως 10m όπου μέχρι εκείνο το βάθος έχουν εντοπιστεί ανθρωπογενείς αποθέσεις και ολοκαινικά ιζήματα.

5.5 Μέθοδος Γεωραντάρ

5.5.1 Εισαγωγή

Η τελευταία μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η μέθοδος του γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar-GPR). Συνολικά έγιναν 12 τομές, 2 στην οδό Αλιπεδίου, 2 στην οδό Πύλης, 2 στην οδό Παλλάδος και 6 στην οδό Ομηρίδου Σκυλίτση.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο αντένες 250MHz και 500MHz δίνοντας την δυνατότητα να λαμβάνονται ταυτόχρονα τρία ραδογράμματα. Ένα της αντένας 250MHz, ένα της αντένας 500MHz και ένα με τον συνδυασμό τους.

Με την αντένα των 250MHz η οποία έχει μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης μπορούμε να παρατηρήσουμε κυρίως την στρωματογραφία της περιοχής ενώ οι τομές συνδυασμού των δύο αντενών έχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα και διευκολύνουν στον εντοπισμό τοπικών δομών.

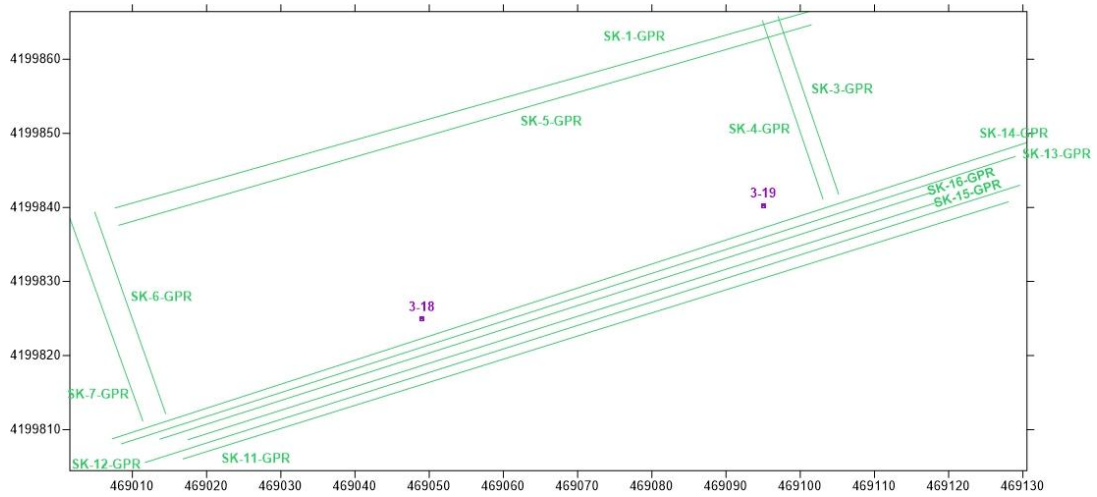
Σε όλα τα ραδογράμματα παρουσιάζονται κάποιες ασυνέχειες που διαχωρίζουν χώρους διαφορετικής σύστασης του υπεδάφους. Αυτοί οι χώροι αποτυπώνονται από την επιφάνεια με τα εξής χρώματα: ροζ, καφέ, πράσινο, γαλάζιο. Περιοχές πολλαπλών ανακλάσεων οι οποίες έχουν και μεγαλύτερο ενδιαφέρον και υποδηλώνουν πολλαπλές στρώσεις αδρομερούς υλικού περιγράφονται με κίτρινες γραμμές, ενώ με κόκκινες γραμμές ορίζονται οι θέσεις των μεταλλικών αντικείμενων. Επίσης με διακεκομμένες μπλε γραμμές αποτυπώνονται περιοχές υψηλού ενδιαφέροντος.

5.5.2 Επεξεργασία των μετρήσεων

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

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

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



Εικόνα 5.12 Κάναβος μετρήσεων GPR



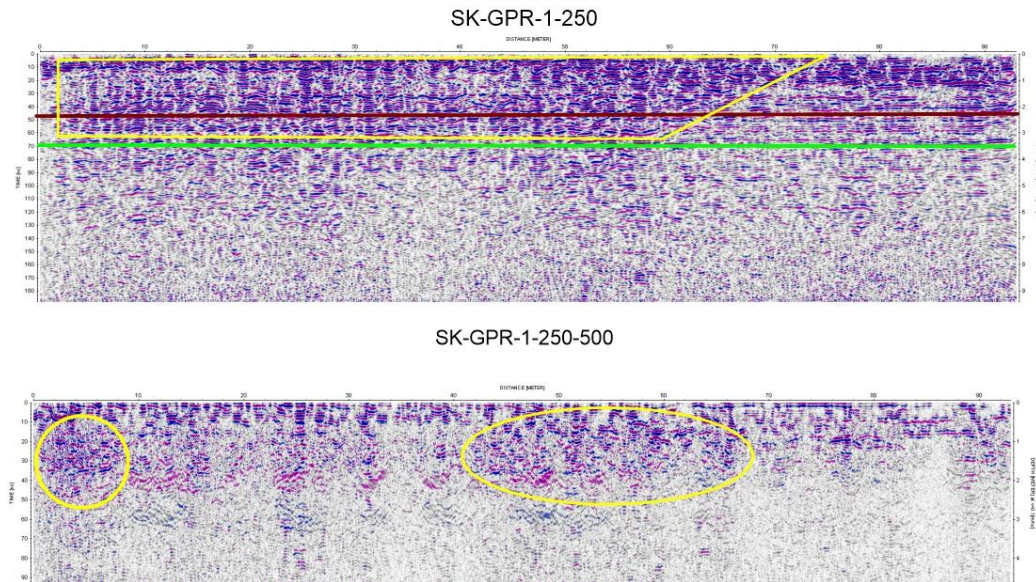
Εικόνα 5.13 Μετρήσεις GPR επί της οδού Αλιπεδίου



Εικόνα 5.14 Μετρήσεις GPR επί της οδού Ομηρίδου Σκυλίτση

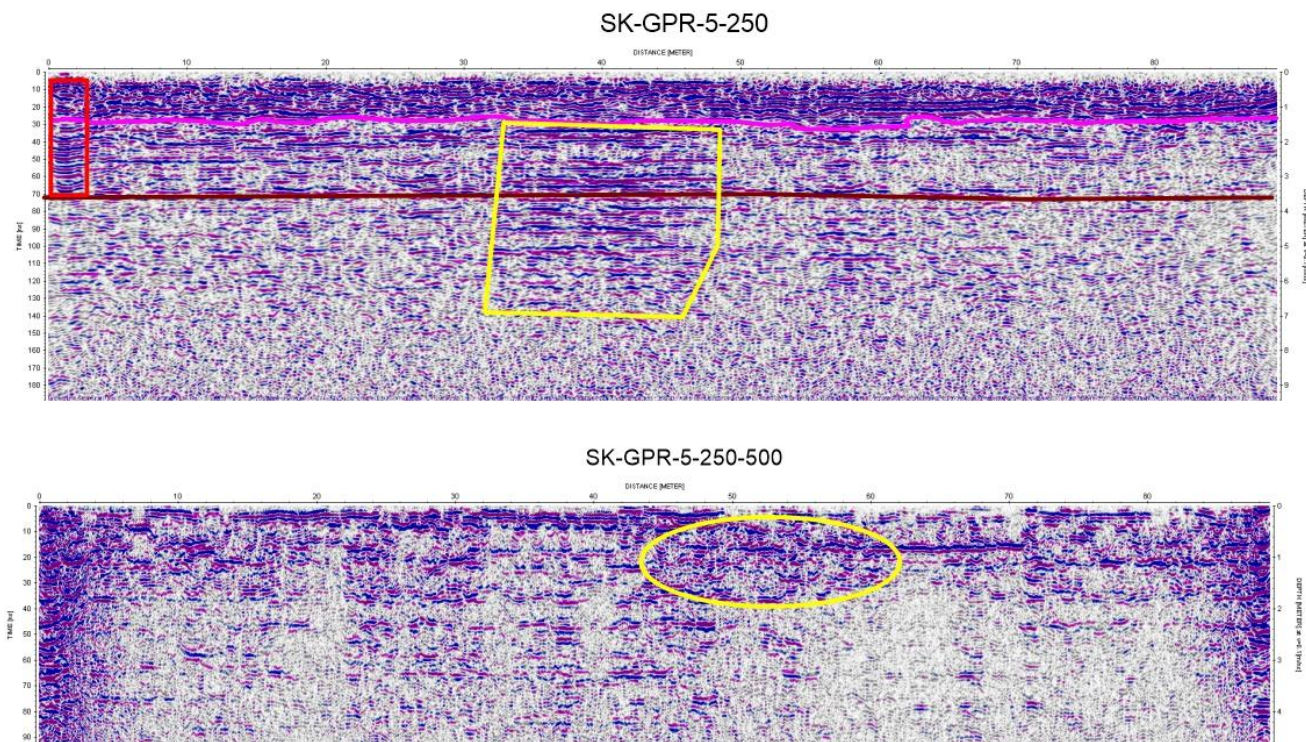
5.5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων Γεωραντάρ

5.5.3.1 SK-GPR-1



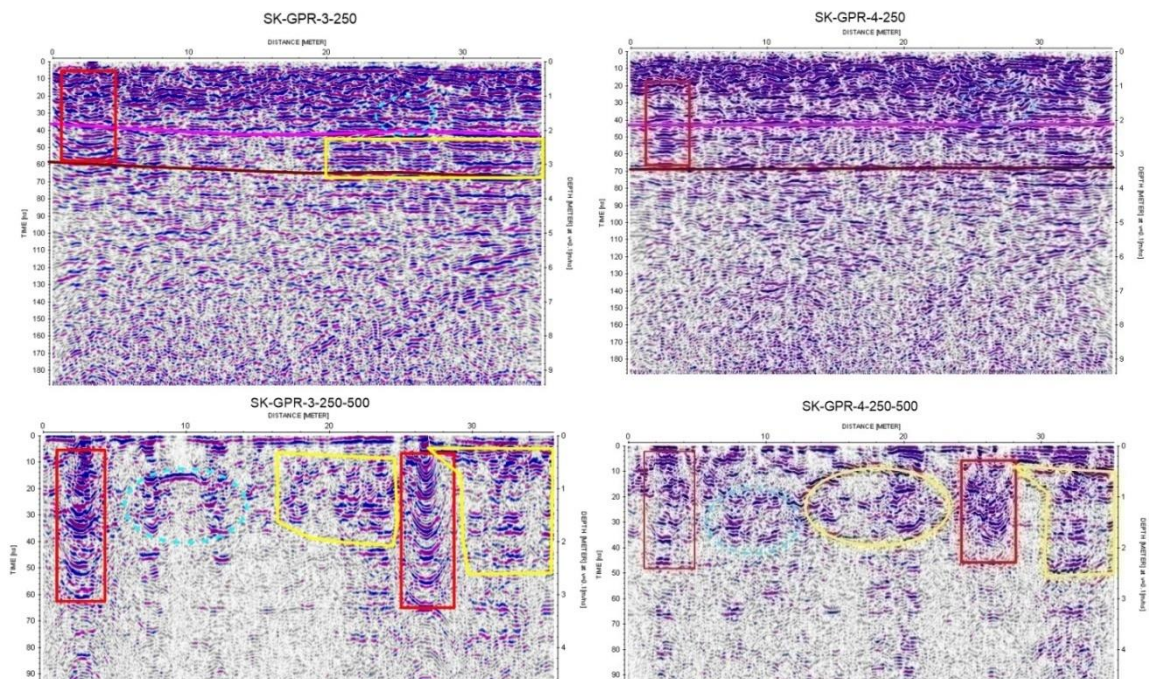
- Στο ραδόγραμμα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις σε βάθος 2m και 3,2m ενώ ο χώρος που ορίζεται με κίτρινη γραμμή όπου φαίνονται πολλά υψηλού πλάτους σήματα ανακλάσεων που υποδηλώνουν την ύπαρξη αδρομερούς υλικού.
- Στο ραδόγραμμα συνδυασμού των αντενών 250MHz και 500MHz φαίνονται δύο περιοχές μέσα στις κίτρινες γραμμές με ανακλάσεις που υποδηλώνουν παρουσία αδρομερούς υλικού.

5.5.3.2 SK-GPR-5



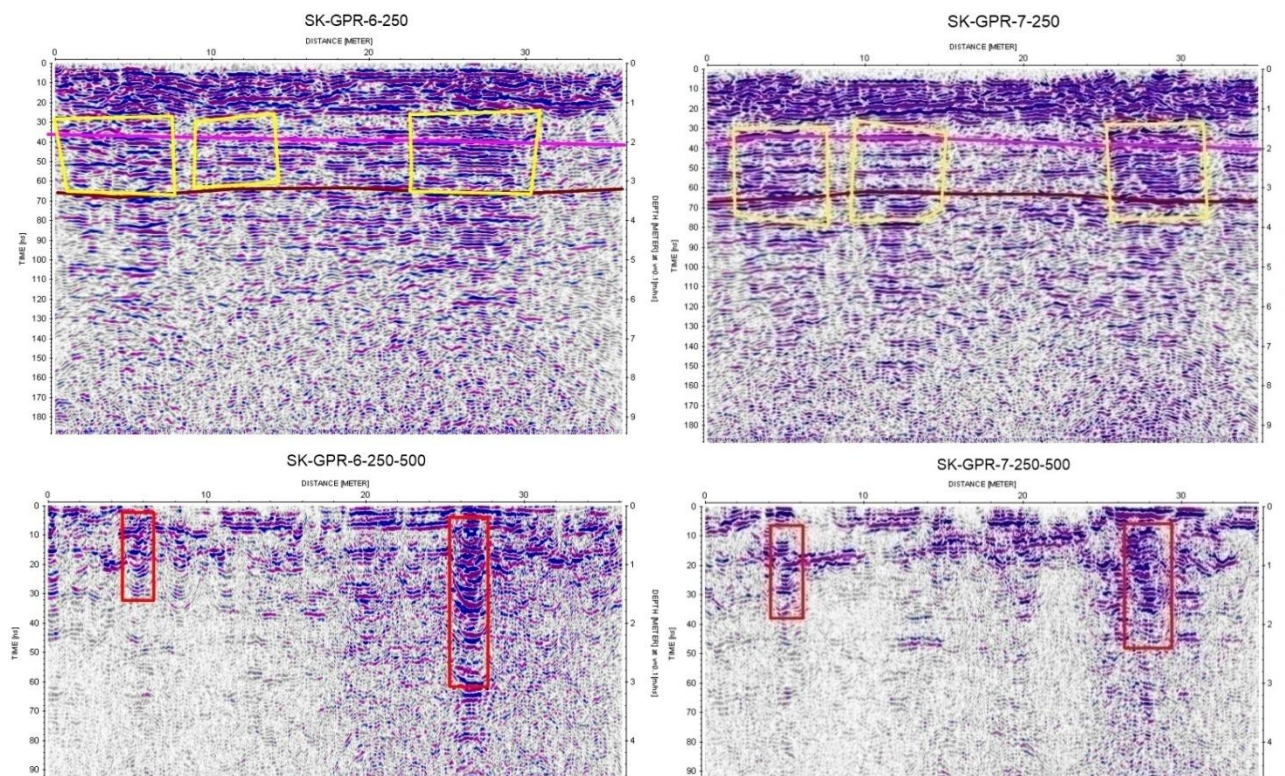
- Στο ραδογράμμα με αντένα 250MHz φαίνονται οι διαφορετικές στρώσεις σε βάθος 1,8m και 3,2m ενώ υπάρχει χώρος περιγεγραμμένος με κίτρινη γραμμή ο οποίος περιέχει αδρομερές υλικό. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται ένα μεταλλικό αντικείμενο.
- Στο ραδογράμμα συνδυασμού των αντενών 250 MHz και 500MHz φαίνεται μια περιοχή με πολλαπλές ανακλάσεις η οποία είναι περιγεγραμμένη με κίτρινη γραμμή και υποδηλώνει την ύπαρξη αδρομερούς υλικού.

5.5.3.3 SK-GPR-3 και SK-GPR-4



- Στα ραδογράμματα με αντένα 250MHz φαίνονται δύο διαφορετικές στρώσεις σε βάθος 2m και 3,4m ενώ υπάρχουν δύο περιγεγραμμένοι χώροι με κίτρινο χρώμα οι οποίοι λόγο των πολλαπλών τους ανακλάσεων υποδηλώνουν την ύπαρξη αδρομερούς υλικού. Επίσης παρατηρείται και η ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων.
- Στο ραδογράμματα συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz φαίνονται δύο περιοχές αδρομερούς υλικού και κατά συνέπεια πολλαπλών ανακλάσεων οι οποίες είναι περικλείονται από μια κίτρινη γραμμή. Επίσης παρουσιάζονται και δύο μεταλλικά αντικείμενα. Τέλος με διακεκομμένη γαλάζια γραμμή φαίνεται χώρος περίθλασης που υποδηλώνει την ύπαρξη συνεκτικής δομής.

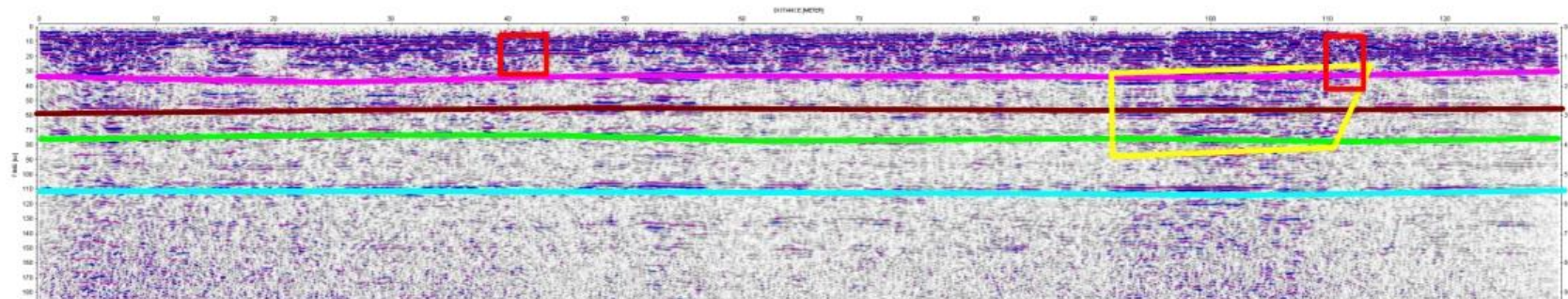
5.5.3.4 SK-GPR-6 και SK-GPR-7



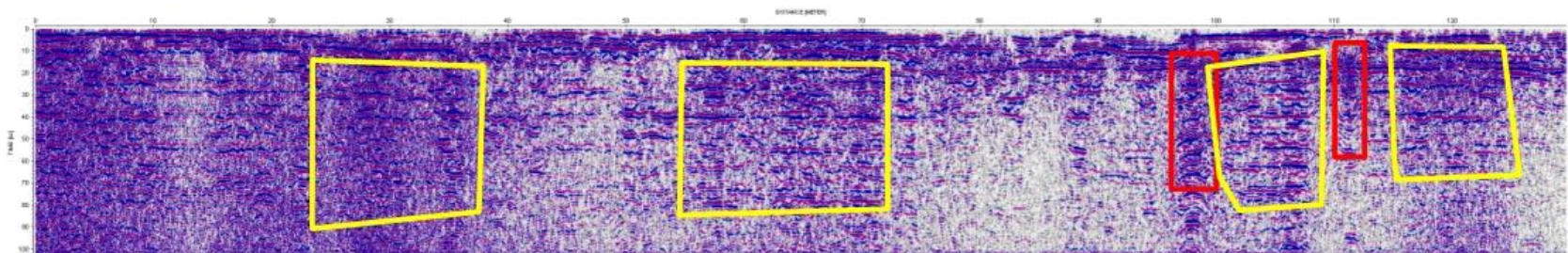
- Στα ραδογράμματα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις σε βάθος 2m και 3,4m ενώ υπάρχουν χώροι περιγεγραμμένοι με κίτρινες γραμμές όπου φαίνονται πολλαπλές ανακλάσεις-στρώσεις αδρομερούς υλικού.
- Στα ραδογράμματα συνδυασμού αντενών 250 MHz και 500MHz φαίνονται περιοχές με μεταλλικό υλικό οι οποίες έχουν σημειωθεί με κόκκινο χρώμα.

5.5.3.5 SK-GPR-14

SK-GPR-14-250

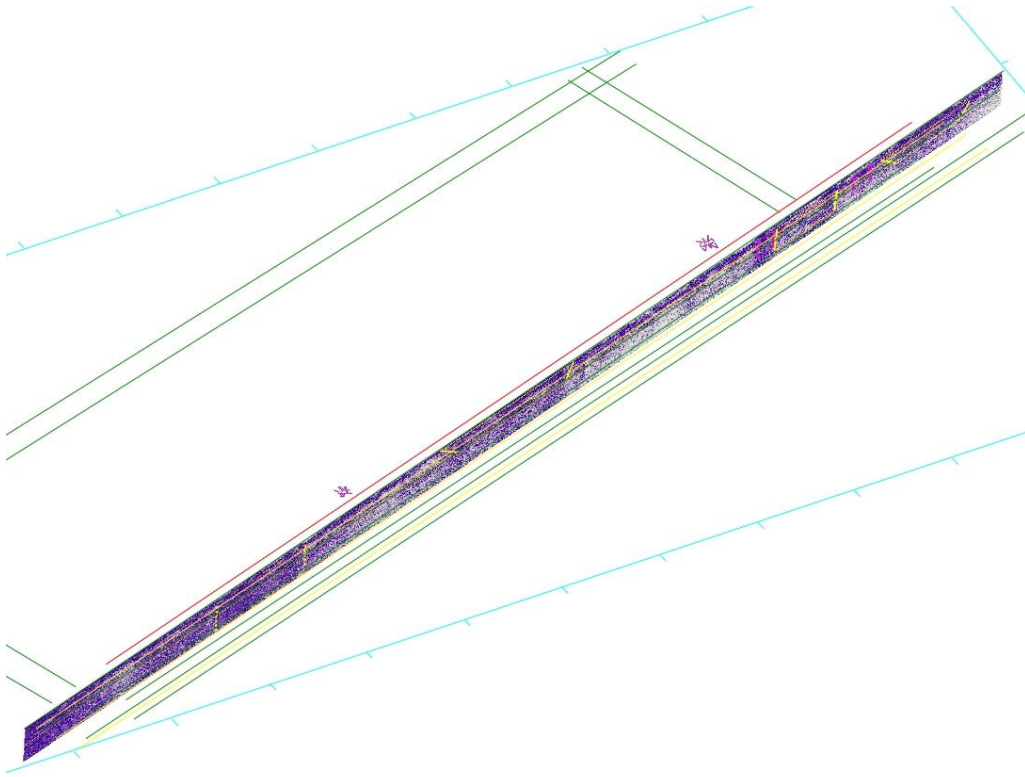


SK-GPR-14-250-500

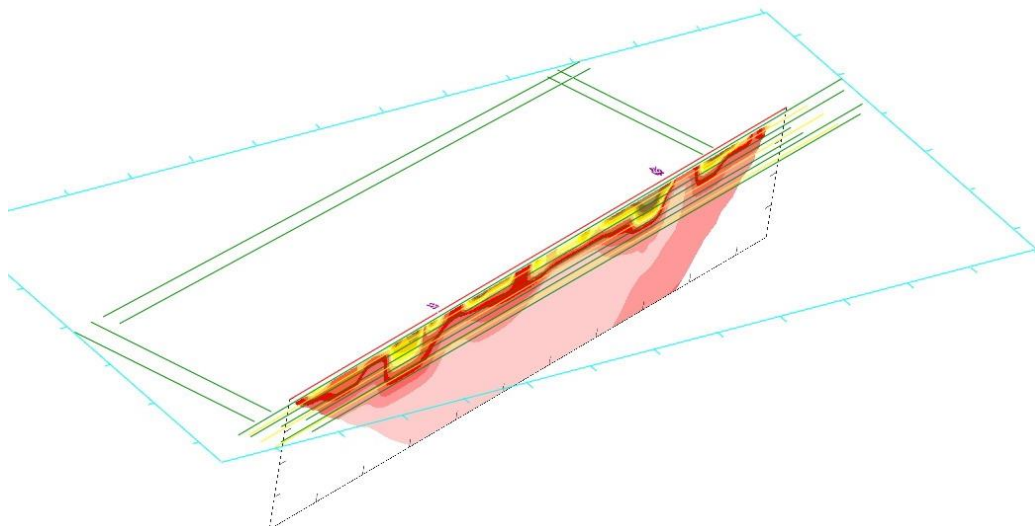


- Στο ραδόγραμμα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις σε βάθη 1,8m, 2,6m, 3,8m, και 5,4m ενώ υπάρχει χώρος μέσα σε κίτρινη γραμμή όπου φαίνονται πολλαπλές ανακλάσεις –στρώσεις αδρομερούς υλικού. Επίσης περιγεγραμμένες σε κόκκινη γραμμή φαίνονται χώροι με μεταλλικό υλικό.
- Στο ραδόγραμμα συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz φαίνονται τέσσερις χώροι περιγεγραμμένη με κίτρινο χρώμα όπου υπάρχουν πολλαπλές ανακλάσεις άρα στρώσεις αδρομερούς υλικού. Οι περιοχές μεταλλικού υλικού παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα.

Η τομή SK-GPR-14 είναι και πιο κοντινή σαν τοποθεσία στην θέση που θα τοποθετηθούν οι στύλοι. Στην τρισδιάστατη απεικόνιση της τοποθετούνται και οι προτεινόμενες θέσεις των στύλων οι οποίες δεν συμπίπτουν με τις τοπικές δομές που παρατηρήθηκαν.

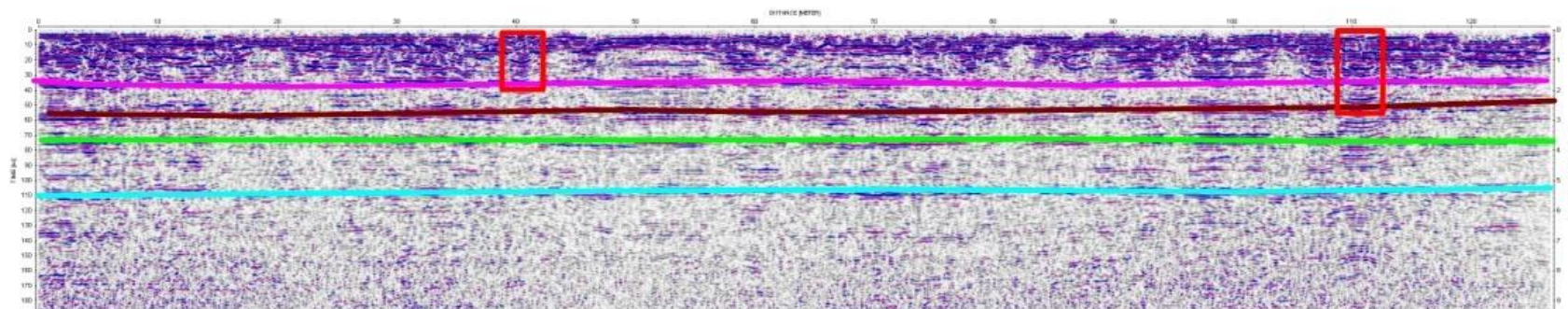


Παρατηρώντας επίσης και την γεωηλεκτρικής τομογραφία επιβεβαιώνεται πως στις συγκεκριμένες θέσεις δεν υπάρχουν τοπικές δομές ανθρωπογενούς προέλευσης.

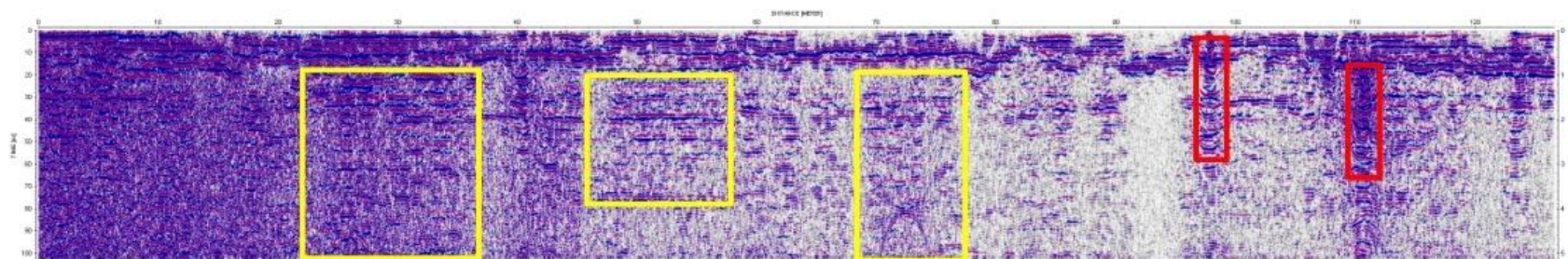


5.5.3.6 SK-GPR-13

SK-GPR-13-250

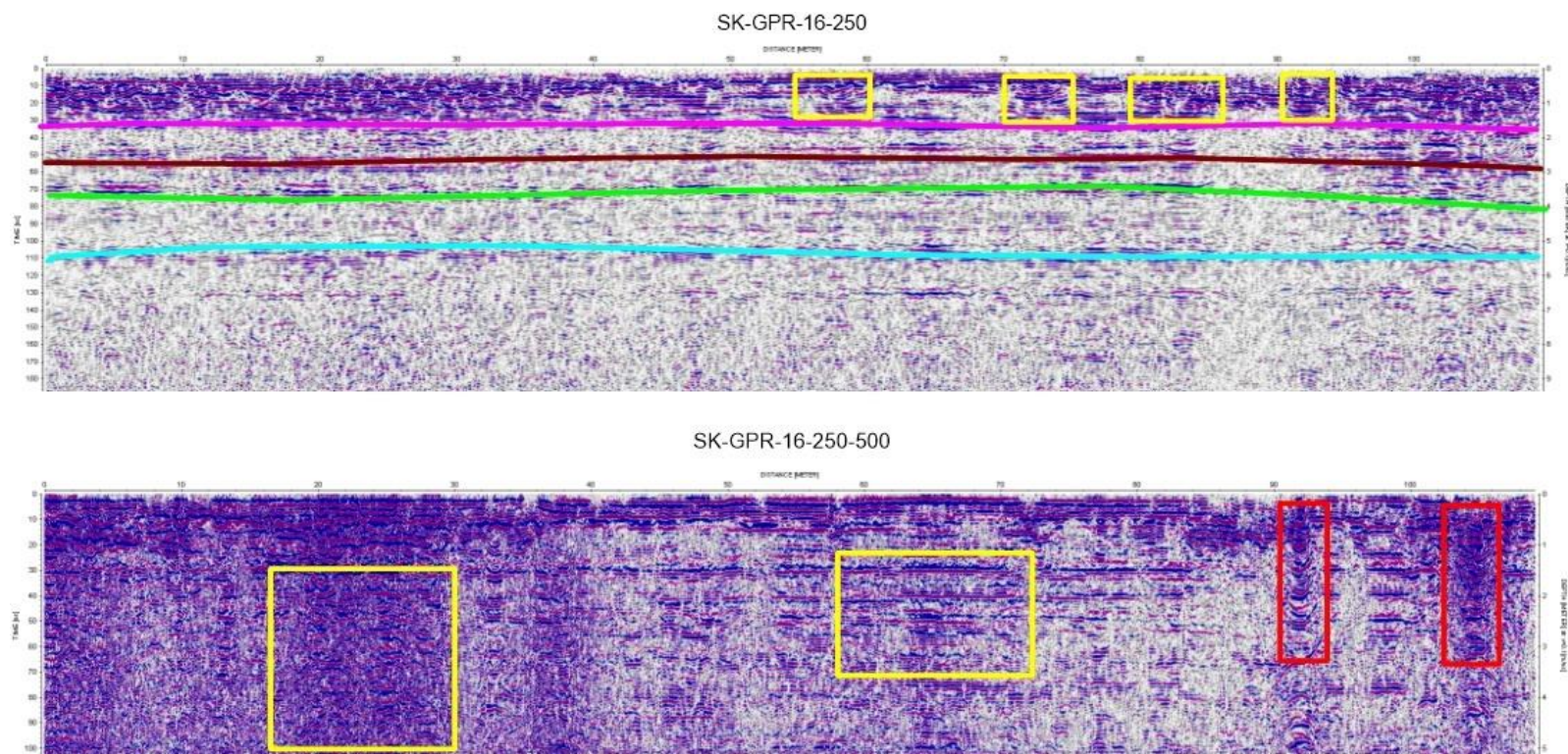


SK-GPR-13-250-500



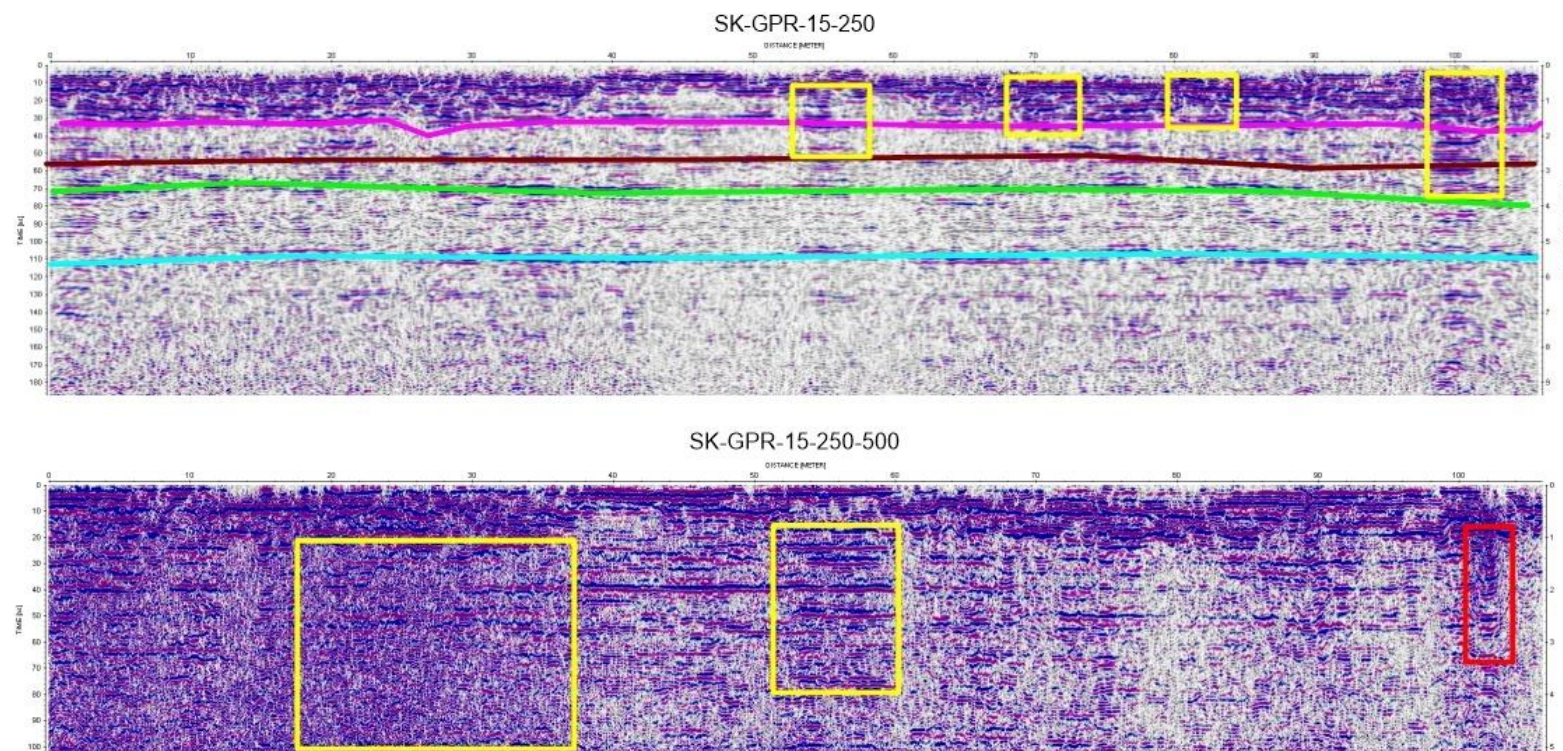
- Στο ραδόγραμμα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις υλικού σε βάθη 1,8m, 2,6m, 3,8m, 5,4m. Οι περιοχές που έχουν μεταλλικό υλικό είναι περιγεγραμμένες με κόκκινο χρώμα.
- Στο ραδόγραμμα συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz φαίνονται τρεις περιοχές οι περιγεγραμμένες με κίτρινο χρώμα στις οποίες υπάρχει παρουσία αδρομερούς υλικού. Ενώ οι περιοχές σημειωμένες με κόκκινη γραμμή είναι περιοχές με μεταλλικό υλικό.

5.5.3.7 SK-GPR-16



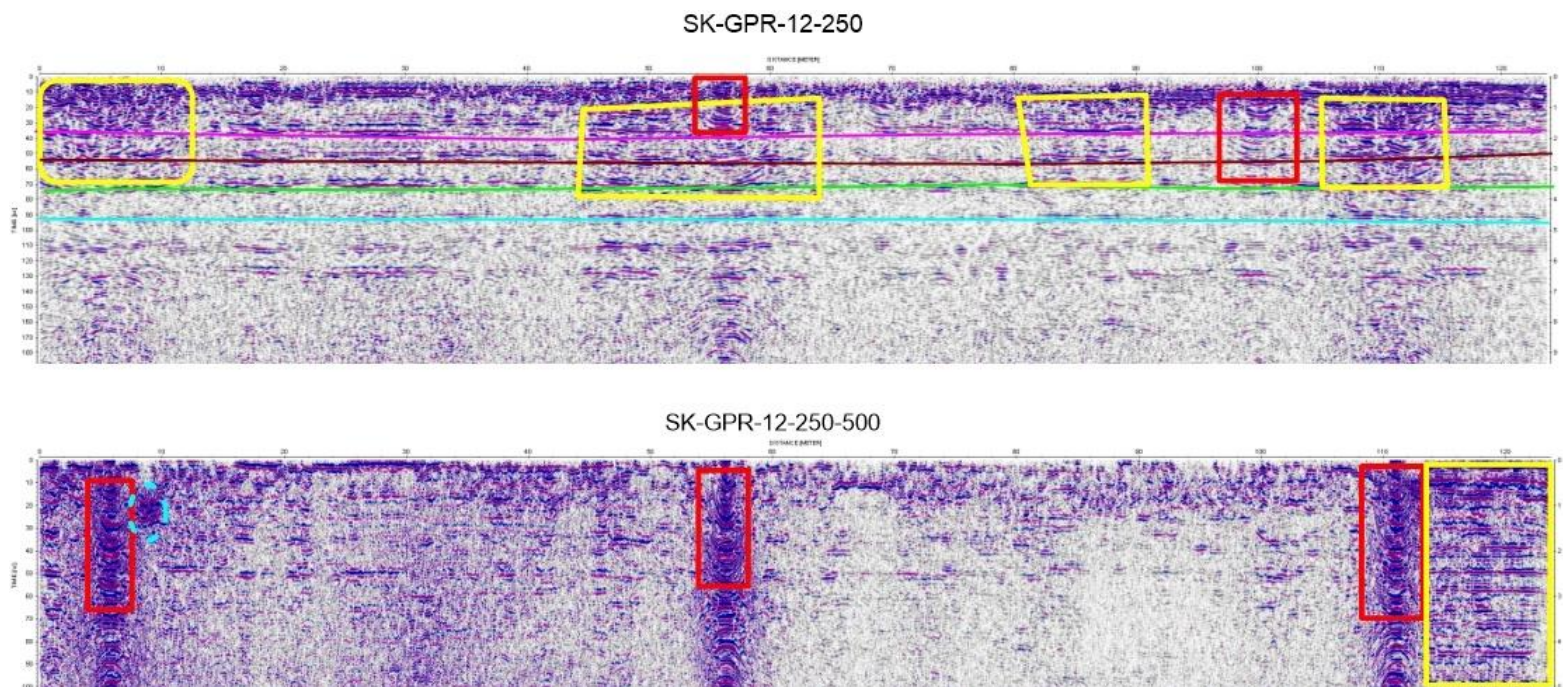
- Στο ραδόγραμμα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις υλικού σε βάθη 1,8m, 2,8m, 3,8m, 5,4m ενώ υπάρχουν χώροι περιγεγραμμένοι με κίτρινη γραμμή όπου φαίνονται πολλαπλές ανακλάσεις-στρώσεις αδρομερούς υλικού.
- Στο ραδόγραμμα συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz φαίνονται δύο περιοχές περιγεγραμμένες με κίτρινο χρώμα στις οποίες υπάρχει παρουσία αδρομερούς υλικού. Ενώ οι περιοχές σημειωμένες με κόκκινη γραμμή είναι περιοχές με μεταλλικό υλικό.

5.5.3.8 SK-GPR-15



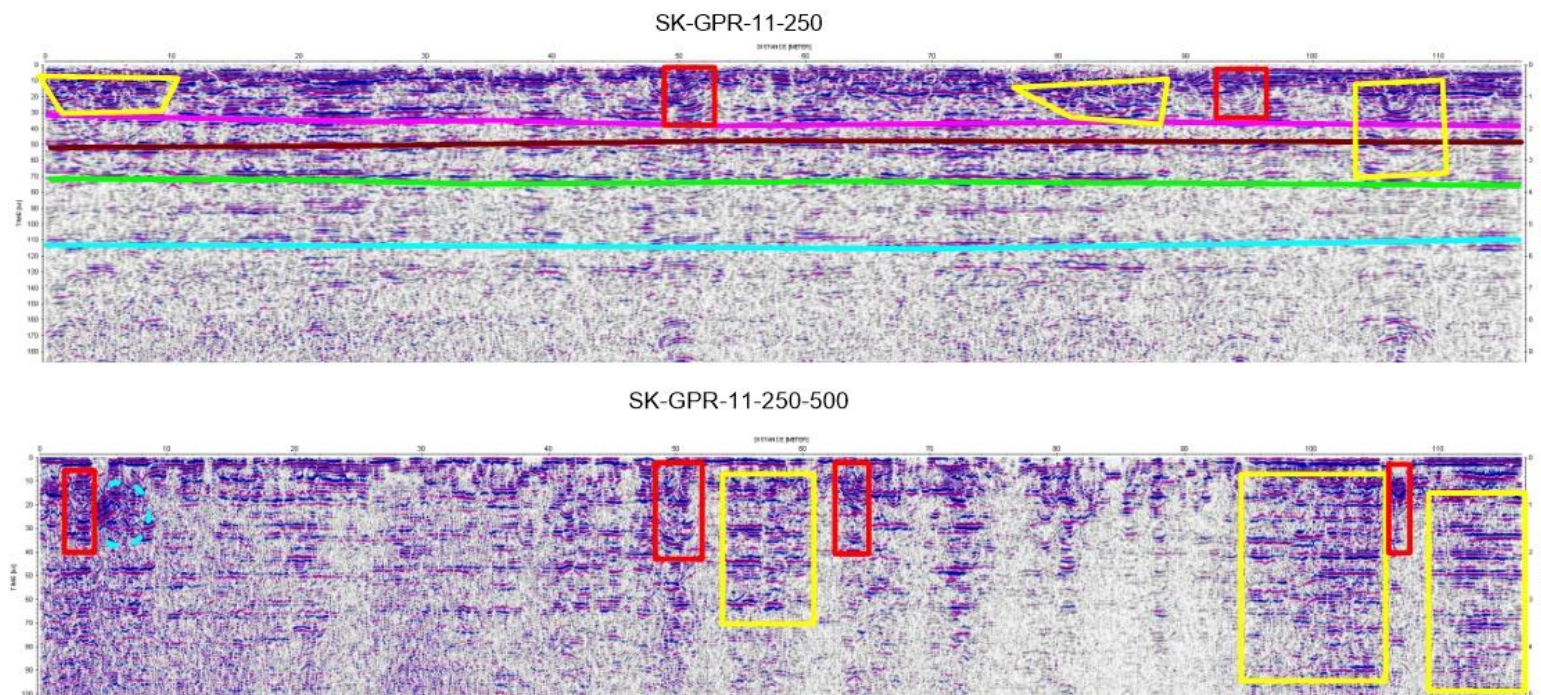
- Στο ραδόγραμμα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις υλικού σε βάθη 1,6m, 2,5m, 3,6m, 5,3m ενώ υπάρχουν χώροι περιγεγραμμένοι με κίτρινη γραμμή όπου φαίνονται πολλαπλές ανακλάσεις-στρώσεις αδρομερούς υλικού.
- Στο ραδόγραμμα συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz φαίνονται δύο περιοχές οι περιγεγραμμένες με κίτρινο χρώμα στις οποίες υπάρχει παρουσία αδρομερούς υλικού. Ενώ οι περιοχή σημειωμένη με κόκκινη γραμμή είναι περιοχή μεταλλικού υλικού.

5.5.3.9 SK-GPR-12



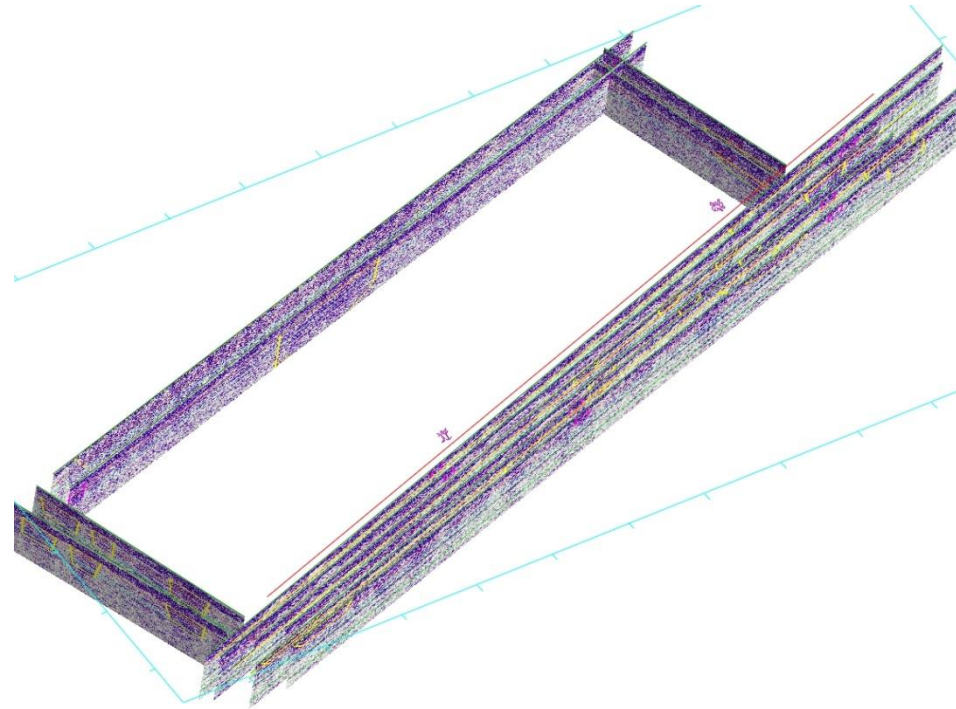
- Στο ραδόγραμμα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις υλικού σε βάθη 1,8m, 2,3m, 3,2m, 5,6m ενώ υπάρχουν χώροι περιγεγραμμένοι με κίτρινη γραμμή όπου φαίνονται πολλαπλές ανακλάσεις-στρώσεις αδρομερούς υλικού. Οι περιοχές που έχουν μεταλλικό υλικό είναι περιγεγραμμένες με κόκκινο χρώμα.
- Στο ραδόγραμμα συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz φαίνεται μια περιοχή περιγεγραμμένη με κίτρινο χρώμα στην οποία υπάρχει παρουσία αδρομερούς υλικού. Ενώ οι περιοχές σημειωμένες με κόκκινη γραμμή είναι περιοχές με μεταλλικό υλικό.
- Η περιοχή με διακεκομμένη γαλάζια γραμμή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς ενδέχεται να είναι δομή με συνεκτικό υλικό.

5.5.3.10 SK-GPR-11



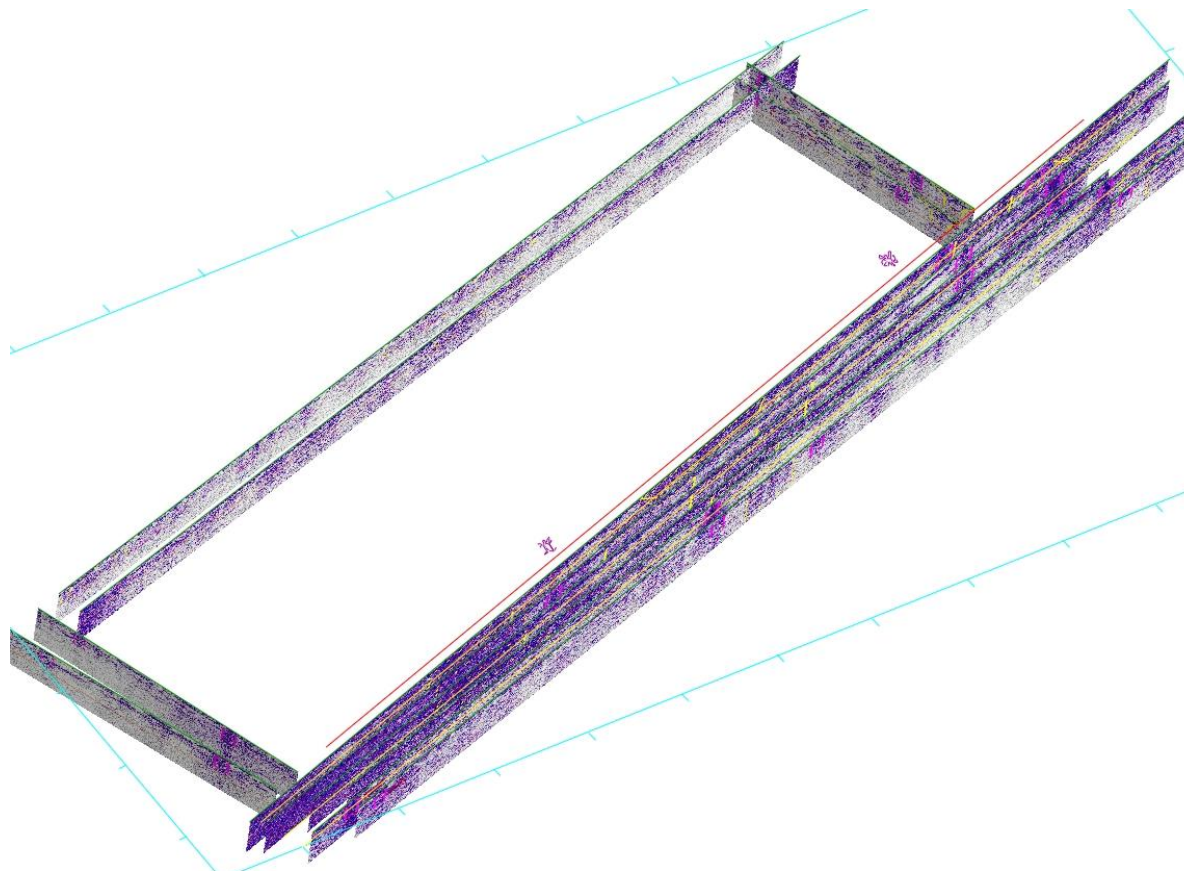
- Στο ραδόγραμμα με αντένα 250MHz φαίνονται διαφορετικές στρώσεις υλικού σε βάθη 1,8m, 2,2m, 3,5m, 5,5m ενώ υπάρχουν χώροι περιγεγραμμένοι με κίτρινη γραμμή όπου φαίνονται πολλαπλές ανακλάσεις-στρώσεις αδρομερούς υλικού. Οι περιοχές που έχουν μεταλλικό υλικό είναι περιγεγραμμένες με κόκκινο χρώμα.
- Στο ραδόγραμμα συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz φαίνονται δύο περιοχές περιγεγραμμένη με κίτρινο χρώμα στις οποίες υπάρχει παρουσία αδρομερούς υλικού. Ενώ οι περιοχές σημειωμένες με κόκκινη γραμμή είναι περιοχές με μεταλλικό υλικό.
- Η περιοχή με διακεκομμένη γαλάζια γραμμή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς ενδέχεται να είναι δομή με συνεκτικό υλικό.

5.5.4 Τρισδιάστατες αποτυπώσεις τομών γεωραντάρ



Εικόνα 5.15 τρισδιάστατη αποτύπωση των ραδογραμμάτων με αντένα 250MHz

Στην **Εικόνα 5.15** όπου παρουσιάζονται τρισδιάστατα τα ραδογράμματα που προέκυψαν με την αντένα 250MHz μπορούμε να παρατηρήσουμε συνέχεια τόσο στις διαφορετικές στρώσεις του υλικού όσο και στις περιοχές αδρομερούς υλικού και στις περιοχές που έχουν μεταλλικά αντικείμενα.



Εικόνα 5.16 τρισδιάστατη αποτύπωση των ραδιογραμμάτων συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz

Και στην **Εικόνα 5.16** η οποία αποτυπώνει τα ραδιογράμματα συνδυασμού των αντενών 250 και 500MHz παρατηρούμε συνέχεια τόσο στα μεταλλικά αντικείμενα όσο και στις περιοχές που περιέχουν αδρομερή υλικά.

5.6 Συμπεράσματα και Σχόλια

5.6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται το υπέδαφος στην περιοχή της οδού Ομηρίδου Σκυλίτση με γεωφυσικές μεθόδους. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να διερευνηθεί τόσο η στρωματογραφία της περιοχής όσο και το εάν υπάρχουν ανθρωπογενείς ή/και αρχαιολογικές δομές στο υπέδαφος ώστε να τοποθετηθούν δύο στύλοι γείωσης, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την διέλευση του TRAM. Οι στύλοι αυτοί θα έχουν βάθος 4m οπότε η γεωφυσική έρευνα θα πρέπει με ακρίβεια να καθορίσει την θέση τοποθέτησής τους. Το μεγάλο αρχαιολογικό ενδιαφέρον της περιοχής σε συνδυασμό με την υψηλά πυκνοκατοικημένη και αστικοποιημένη περιοχή έρευνας, επιβάλλει η έρευνα να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας γρήγορες και μη καταστρεπτικές μεθόδους. Η επιλογή των επιστημονικών μεθόδων της Γεωφυσικής κρίνεται αναγκαία γιατί δίνει λύση στα παραπάνω αναφερθέντα προβλήματα.

Μέσω της εφαρμογής τρεις γεωφυσικών μεθόδων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους προκύπτουν μια σειρά από συμπεράσματα τα οποία παρατίθεται στην συνέχεια:

- Οι μελέτες περιπτώσεων (case studies), οι οποίες αναζητήθηκαν στην βιβλιογραφία βοήθησαν σημαντικά την έρευνα μας. Πιο συγκεκριμένα στις τρεις εφαρμογές που μελετήθηκαν αντιμετωπίστηκαν παρόμοια προβλήματα με την γεωφυσική έρευνα στην Ομηρίδου Σκυλίτση. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές ακολουθώντας σχεδόν όμοιο σχεδιασμό κατάφεραν να φέρουν εις πέρας δύσκολα γεωφυσικά προβλήματα. Για αυτό το λόγο έγινε εκτενής ανάλυση του σχεδιασμού των τεσσάρων εφαρμογών ώστε να δημιουργηθεί ένα αρχικό πλάνο σχεδιασμού για την γεωφυσική έρευνα στον Πειραιά. Μέσω των ερευνών αυτών προέκυψε το συμπέρασμα πως οι γεωφυσικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε αστικό περιβάλλον με επιτυχία. Οι αντένες των γεωραντάρ επιλέχθηκαν με βάση των αποτελεσμάτων των τριών αυτών εφαρμογών, δηλαδή με βάση το βάθος και την ευκρίνεια την οποία θέλαμε να επιτύχουμε. Η γεωφυσική έρευνα στο Μόντρεαλ βοήθησε στον σχεδιασμό των κανάβων μετρήσεων. Για παράδειγμα τα ηλεκτρομαγνητικά πραγματοποιήθηκαν με βήμα 1m.
- Οι γεωφυσικές μέθοδοι εφαρμόστηκαν σχετικά επιτυχώς σε συνθήκες αστικού ιστού όπου ο θόρυβος σε όλες τις γεωφυσικές μετρήσεις ήταν αρκετά υψηλός.

- Στην περίπτωση των μετρήσεων GPR έχουμε ανθρωπογενή αδρομερή υλικά που δημιουργούν πολλαπλές ανακλάσεις επιφανειακά ενώ βαθύτερα τα αργιλικά υλικά απορροφούν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα και παρουσιάζεται απουσία οποιουδήποτε σήματος. Έτσι επιφανειακά είναι δύσκολο να διαχωρίσουμε ενδιαφέρουσες ανθρωπογενείς δομές από άλλα αδρομερή υλικά ενώ βαθύτερα δεν μπορούμε να έχουμε πληροφορία.
- Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος εφαρμόστηκε με πυκνές μετρήσεις όπου επέτρεπε η περιοχή έρευνας (περιμετρικά του οικοδομικού τετραγώνου) και δεν έδειξε περιοχή τείχους με συνέχεια.
- Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος σε συνολικό βάθος διασκόπησης 3m με διαμόρφωση CMD-2 στην αρχή της οδού Ομηρίδου Σκυλίτση και ουσιαστικά δίπλα από τον αρχαιολογικό χώρο που βρίσκεται στην οδό έδειξε μια περιοχή υψηλών φαινομένων αγωγιμοτήτων το οποίο αποτελεί πιθανά πλήρωση κάποιας τάφρου με χαλαρό υλικό.
- Όλες οι τιμές της σε φάση συνιστώσας, η οποία δηλώνει την μαγνητική επιδεκτικότητα, είναι αρκετά χαμηλές.
- Μέσω της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτυπώθηκε τόσο η στρωματογραφία της περιοχής ενώ εντοπίστηκαν και τοπικές δομές μεγάλης ειδικής αντίστασης που πιθανά παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Σημειώνουμε ωστόσο ότι οι συνθήκες μέτρησης δεν ήταν οι πλήρως ενδεδειγμένες λόγω της μεγάλης αντίστασης επαφής των ηλεκτροδίων.
- Με την μέθοδο του γεωραντάρ εντοπίστηκαν:
 - Μέσω της αντένας 250MHz η στρωματογραφία της περιοχής και κάποιες πολλαπλές ανακλάσεις πιθανών δομών ενδιαφέροντος
 - Μέσω του συνδυασμού αντενών 250MHz και 500MHz εντοπίστηκαν τόσο περιοχές πολλαπλών ανακλάσεων όσο και τοπικές δομές περιθλάσεων οι οποίες δηλώνουν την ύπαρξη συνεκτικών ή αδρομερών δομών.
- Η επιλογή των θέσεων των στύλων «3-18» και «3-19» παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.4** άλλα και στην **Εικόνα 5.2**. Σημειώνουμε ότι από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων στο πεδίο προκύπτει ότι η επιλογή των θέσεων είναι σχετικά ασφαλής . Η επιλογή της θέσης του στύλου «3-19» ήταν δυσκολότερη για τον λόγο ότι η ειδική αντίσταση στην περιοχή αυτή είναι λίγο πιο υψηλή από ότι στην «3-18».

Πίνακας 5.2 Συντεταγμένες των προτεινόμενων στύλων

	x	y	Longitude(°)	Latitude(°)
3-18	469049.058	4199824.899	N37.948081	E23.649417
3-19	469095.067	4199840.26	N37.948221	E23.649940

- Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων κάθε μεθόδου έγινε χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα προγράμματα: Surfer GoldenSoftware, RES2DINV Geotomo (η διαδικασία ερμηνείας Robust-Robust με την οποία η παράμετροι του γεωηλεκτρικού μοντέλου μεταβάλλονται δίνοντας έμφαση σε απότομες αλλαγές της ειδικής αντίστασης ήταν η κατάλληλη στην συγκεκριμένη περίπτωση) και REFLEXW Sandmeier Scientific .

5.6.2 Σχόλια

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας σε σχέση με τους στόχους που θέλαμε να πετύχουμε αφενός και την εφαρμογή των μεθόδων και την διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων αφετέρου προκύπτουν τα παρακάτω σχόλια:

- Το ζήτημα της εντοπισμού και αποφυγής αρχαιολογικών δομών κατά την διάρκεια έργων σε αστικό περιβάλλον είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα του μηχανικού και ιδιαίτερα σε πόλεις όπως η Αθήνα. Η επιτυχία της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε αποδεικνύει τη αποτελεσματικότητα των γεωφυσικών μεθόδων στην επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τον μη καταστρεπτικό χαρακτήρα αυτών των μεθόδων είναι προφανές ότι η χρήση τους είναι η μόνη λύση για την ολοκλήρωση ενός κατασκευαστικού έργου. Έτσι συμπεραίνουμε ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η κατάλληλη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ανάλογες περιπτώσεις.
- Σημαντική είναι επίσης η παράλληλη εφαρμογή όσο τον δυνατόν περισσότερων γεωφυσικών μεθόδων καθώς η μια μέθοδος επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της επόμενης και συνεπώς παρέχει παραπάνω ασφάλεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος δίνει εύκολα, γρήγορα και οικονομικά αποτελέσματα. Με την αυτή μπορούμε να εξάγουμε κάποια αρχικά αποτελέσματα για την περιοχή σε σχέση με την φύση του υπεδάφικου υλικού και την έκταση του στον χώρο.
- Με την γεωηλεκτρική τομογραφία, η οποία είναι η πιο επίτονη και ακριβή μέθοδος, μπορούμε να έχουν μια αρκετά λεπτομερή άποψη του υπεδάφους η οποία ταυτόχρονα είναι και η πιο αξιόπιστη.
- Η μέθοδος του γεωραντάρ μας εξασφαλίζει αποτελέσματα τόσο για την στρωματογραφία όσο και για πιθανές ανθρωπογενείς δομές παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή λόγω της ύπαρξης ανθρωπογενών αδρομερών υλικών σε μικρό βάθος και αργλικών υλικών σε μεγαλύτερο βάθος δυσχεραίνει τον εντοπισμό ενδιαφερουσών ανθρωπογενών δομών και κατά συνέπεια δεν θα έδινε αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα εάν εφαρμόζονταν μόνη της.
- Για την επιτυχή εφαρμογή γεωφυσικής έρευνας σε έντονα αστικοποιημένο περιβάλλον χρειάζεται σωστός προγραμματισμός του τρόπου εφαρμογής της. Αυτό συνίσταται τόσο στην επιλογή κατάλληλων γεωφυσικών μεθόδων άλλα και στο καθορισμό της ώρας και μέρας που θα ληφθούν οι μετρήσεις καθώς και στο μέγεθος της ομάδας που συμμετέχει στην γεωφυσική έρευνα. Για αυτό το λόγο πρέπει να πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση της περιοχής έρευνας πριν γίνουν οι μετρήσεις.

Για παράδειγμα στην οδό Ομηρίδου Σκυλίτση όπου οι μετρήσεις έγιναν πάνω στον δρόμο κλείνοντας διαδοχικά την εκάστοτε λωρίδα κυκλοφορίας έπρεπε η έρευνα να προγραμματιστεί ώστε να αποφευχθούν οι ώρες αιχμής όπου θα δυσχέραιναν την κυκλοφορία των οχημάτων.

6 Βιβλιογραφία

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

E.Everett, Mark. 2013. *Near-Surface Applied Geophysics.* New York : Gambridge Universtity Press, 2013.

G.Drahor, Mahmut. 2010. A review of integrated geophysical investigations from archaeological and cultural sites under encroaching urbanisation in Izmir,Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth.* 2010, σσ. 1294-1309.

Jean-Philippe Boudreault, Jean-Sebastien Dube, Michel Chouteau ,Thierry Winiarski, Erix Hardy. 2009. *Geophysical characterization of contaminated urban fills.* 2009, *Engineering Geology,* σσ. 196-206.

H.N.Ulrichs. 1817. *Topography of the harbours and position of the long walls of Athens.* London : Stewart and Murray , 1817.

INSTRUMENTS, IRIS. 2003. *SYSCAL Pro.Manual Guide.* 2003.

Philip Keary, Michael Brooks ,Ian Hill. 2002. *An Introduction To Geophysical Eploration.* Hong Kong : Blackwell Science Ltd, 2002.

Giovanni Leucci, Sergio Negri. 2006. *Use of ground penetrating radar to map subsurface archaeological features in an urban area.* 2006, *Journal of archaeological science,* σσ. 502-512.

Vogelsang, Dieter. 2012. *Environmental Geophysics: A Practical Guide.* s.l. : Springer Science & Business Media, 2012.

W.M.Telford, L.P.Geldart ,R.E.Sheriff. 1990. *Applied Geophysics.* New York : Press Syndicate of University of Cambridge, 1990.

G.Apostolopoulos, K.Pavlopoulos , J-P Goiran, E.Fouache. 2014. *Was the Piraeus peninsula (Greece) a rocky island? Detection of pre-Holocene rocky relief with borehole data and resistivity tomography analysis* 2014, *Journal of Archaeological Science ,* σσ. 412-421.

Sándor Szalai, Attila Novák, László Szarka. 2011. *Which geoelectric array sees the deepest in a noisy environment? Depth of detectability values of multielectrode systems for various two-dimensional models.* 2011, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,Volume 36, Issue 16,* σσ. 1398–1404.

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

Γ.Βανδαράκης, Δημήτρης. 2013. *Η παλαιογεωγραφική εξέλιξη της πεδιάδας των Αθηνών τα τελευταία 6000 έτη*. Αθήνα : Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 2013. Διδακτορική Διατριβή.

Γκανιάτσας, Βασίλης. 2007. Αρχαιολογικό πάρκο στις αστικές πύλες του Πειραιά. *monumenta*. [Ηλεκτρονικό] 01 03 2007.

<http://www.monumenta.org/article.php?IssueID=2&ArticleID=45&CategoryID=3&lang=gr>.

Δ.Μαυρομάτης. 2007. *Συνδυασμός Στρωματογραφικών δεδομένων και γεωηλεκτρικών τομογραφιών για τον εντοπισμό του Προολοκαινικού Υποβάθρου στην περιοχή του Πειραιά - Νέου Φαλήρου*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007. Διπλωματική Εργασία.

Δ.Ι.Παπανικολάου, Σ.Γ.Λόζιος, Εμ.Ν.Σκούρτσος. 2004. *Η γεωλογική δομή του αλλόχθονου συστήματος των "Σχιστόλιθων Αθηνών"*. Αθήνα : Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2004. Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη .

Λοΐζος, Φοκίων. 2014. *Γεωφυσική έρευνα στο ναό του ποσειδώνα στο Σούνιο*. Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014. Διπλωματική εργασία.

Μαρίνος Γ., Κατσικάτσος Γ., Μίρκος-Περιποπούλος Ρ.Μ. 1971. Το σύστημα των σχιστολίθων Αθηνών ΙΙ, Στρωματογραφία και τεκτονική. *Annales geologiques des pays hellénique*. s.l. : Athens laboratoire de l'universite, 1971, σσ. 439-444.

Μπάση, Ελεύθερα- Κατερίνα. 2004. *Παλαιογεωγραφική Εξέλιξη του Λεκανοπεδίου Αθηνών από το Αν.Μειόκαινο εως Σήμερα*. Αθήνα : Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, 2004. Μεταπτυχιακή Διατριβή.

Μυρτώ, Παπαδοπούλου. 2015. *Γεωφυσική έρευνα στην Μονη Καισαριανής για την επίλυσης Γεωτεχνικών προβλημάτων*. Αθήνα : Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, 2015. Διπλωματική Εργασία.

Πίτερ Κόννολλυ, Χάζελ Ντοτζ. 2001. *Η Αρχαία Πόλη: Η ζωή στην Αθήνα και στην Ρώμη*. Αθήνα : Εκδόσεις Πατάκη, 2001.

Σ., Σαμπατακάκης Νικόλαος. 1991. *Τεχνικογεωλογική έρευνα του Λεκανοπεδίου των Αθηνών*. s.l. : Γεωλογικό Τμήμα Πανεπιστημίου Πατρών, 1991.

Γ.Πέππας. 2015. *Το Ιπποδάμειο σύστημα και η μορφή των οικιών*. Αθήνα : Εφορεία Αρχαιοτήτων Δυτικής Αττικής, Πειραιώς και Νήσων.

