



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Π.Μ.Σ. ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΑΝΑΣΚΑΦΗ ΜΑΡΑΘΩΝΑ ΑΤΤΙΚΗΣ (ΘΕΣΗ ΠΛΑΣΙ)

ΣΟΥΓΛΑΚΟΣ Β. ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ
Α.Μ. 21525

Επιβλέπων: ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ,
Επικ. Καθηγητής Εφαρμ. Γεωφυσικής-Τεχνικής & Περιβαλλοντικής Γεωφυσικής

ΑΘΗΝΑ 2019

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

- Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ (Επιβλέπων)
Επικ. Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ
- Δρ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΒΟΥΛΓΑΡΗΣ
Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ
- Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΑΠΑΔΑΤΟΣ
Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Ιστορίας & Αρχαιολογίας, ΕΚΠΑ
Διευθυντής Πανεπιστημιακής Ανασκαφής στο Πλάσι Μαραθώνα, Αττικής.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ειδίκευσης, με τίτλο «Λεπτομερής γεωφυσική διασκόπηση στην αρχαιολογική πανεπιστημιακή ανασκαφή Μαραθώνα Αττικής (θέση Πλάσι)», μου ανατέθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης “Γεωφυσική”. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμοσμένης γεωφυσικής έρευνας, σε επιλεγμένη περιοχή που μας υποδείχτηκε από τον Διευθυντή της ανασκαφής, Αναπλ. Καθηγ. Γιάννη Παπαδάτο του Τμήματος Ιστορίας & Αρχαιολογίας ΕΚΠΑ.

Ειδικότερα, εφαρμόστηκε η ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση *γεωραντάρ* και η γεωηλεκτρική τομογραφική διασκόπηση. Στόχος της έρευνας, ήταν η διερεύνηση του υπεδάφους για την ανάδειξη αρχαιολογικών στόχων και η υπόδειξη θέσεων ανασκαφικού ενδιαφέροντος.

Η ανάθεση και η επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας έγινε από τον Επίκ. Καθηγ. Ιωάννη Αλεξόπουλο. Τον ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη που μου προσέφερε. Τον ευχαριστώ για τις επιστημονικές συζητήσεις, τις επισημάνσεις του και τις παροτρύνσεις του σε θέματα οργάνωσης, εκτέλεσης, επεξεργασίας και παρουσίασης θεμάτων εφαρμοσμένης γεωφυσικής. Η με κάθε τρόπο υποστήριξη και το αδιάλειπτο ενδιαφέρον του για ένα σωστά τεκμηριωμένο επιστημονικό αποτέλεσμα, υπήρξαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της προσπάθειας αυτής.

Τις θερμές ευχαριστίες μου εκφράζω στον Καθηγητή Νικόλαο Βούλγαρη, μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής. Η συμβολή του στη διαχείριση, στην επεξεργασία, στην ερμηνεία και στην αξιολόγηση του μεγάλου όγκου των γεωφυσικών δεδομένων υπήρξε πολύ σημαντική. Η υποστήριξη και βοήθεια που μου παρείχε καθ’ όλη τη περίοδο εκπόνησης της εργασίας μου, ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω επίσης στον Αναπλ. Καθηγ. Γιάννη Παπαδάτο, ως μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για την αρωγή του, τις συζητήσεις-υποδείξεις του και το βιβλιογραφικό του υλικό που μου παρείχε, χρήσιμο στην αξιολόγηση των γεωφυσικών αποτελεσμάτων.

Επί πλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Σπυρίδωνα Δίλαλο, γεωλόγο-γεωφυσικό (MSc), για τις πολύτιμες υποδείξεις και επικουρία του στις μετρήσεις πεδίου, τις επισημάνσεις του στη διαχείριση – επεξεργασία - αξιολόγηση των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων, τις επιστημονικές μας συζητήσεις και το επιστημονικό υλικό που μου παρείχε, σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ τη συνάδελφο Γεωργία Μήτσικα, γεωλόγο, μεταπτυχιακή φοιτήτρια και τους προπτυχιακούς φοιτητές και αγαπητούς φίλους Ιωάννα - Μαργαρίτα Λιάσκου, Θάνο Πετρά και Δημήτρη Καστόρα, για την πολύτιμη συμβολή τους στη διαδικασία λήψης των μετρήσεων υπαίθρου και τη γενικότερη συνεργασία μας.

Ευχαριστώ την εταιρεία TREE COMPANY CO A.E.B.E. για τον επίλυση των συντεταγμένων της «Βάσης Αναφοράς» που δημιουργήθηκε στο χώρο της ανασκαφής και χρησιμοποιήθηκε για τις γεωαναφορές όλων των γεωφυσικών εργασιών.

Ευχαριστώ την εταιρεία Terra-Marine για την ευγενική προσφορά συμπληρωματικού γεωφυσικού εξοπλισμού που μας παρείχε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τα οικεία μου άτομα, τόσο για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση σε αυτήν την προσπάθειά μου, όσο και για την υπομονή τους.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
SUMMARY	2
1. Εισαγωγή.....	3
1.1 Γεωλογικές – γεωμορφολογικές συνθήκες	7
1.2 Γεωφυσικές διασκοπήσεις - Τοπογραφικές αποτυπώσεις	9
2. Διασκόπηση γεωραντάρ.....	12
2.1 Κυματική φύση του ηλεκτρομαγνητικού (ΗΜ) κύματος	15
2.2 Συντελεστής απόσβεσης (<i>Loss Factor</i>) και εξασθένηση σήματος λόγω διάχυσης σήματος (<i>Scattering Attenuation</i>)	17
2.3 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις διεπιφάνειες	18
2.4 Διακριτική ικανότητα (<i>Range and Lateral Resolution</i>).....	20
2.5 Μετρήσεις σήματος γεωραντάρ (<i>Signal measurements</i>)	21
2.5.1 Εύρος χρόνου και συχνότητας καταγραφής.....	21
2.5.2 Κεντρική συχνότητα πομπού (<i>center frequency antenna</i>).....	22
2.5.3 Παράθυρο χρόνου καταγραφής (<i>time window</i>)	23
2.5.4 Αριθμός δειγμάτων ανά ίχνος (<i>time sampling rate</i>) & ανά τομή (<i>spatial sampling rate</i>).....	23
2.5.6 Υπέρθεση (<i>stacking</i>).....	24
2.6 Συστήματα γεωραντάρ	24
2.7 Διεργασίες πεδίου – Επεξεργασία δεδομένων	26
2.7.1 Σχεδιασμός της διασκόπησης γεωραντάρ.....	27
2.7.2 Καθορισμός των παραμέτρων του συστήματος γεωραντάρ για τη λήψη μετρήσεων.	27
2.7.3 Λήψη μετρήσεων στο πεδίο	28
2.7.4 Ανάλυση δεδομένων και παρουσίαση αποτελεσμάτων	28
2.8 Διασκόπηση γεωραντάρ στον αρχαιολογικό χώρο	35
2.8.1 Επεξεργασία ραδιογραφημάτων (<i>radargram, B-scan</i>).....	38
2.8.2 Οριζοντιογραφίες Όγκου/Βάθους (<i>Volume/Depth Slices</i>)	42
3. Γεωηλεκτρική διασκόπηση	49
3.1 Φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση	51
3.2 Γεωηλεκτρικές παράμετροι.....	52
3.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων (<i>arrays</i>)	52
3.4 Πλευρική έρευνα μεταβολής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης – Γεωηλεκτρικό Τομόγραμμα	54
3.5 Επεξεργασία Δεδομένων	56

3.6 Γεωηλεκτρική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο	59
3.6.1 Επεξεργασία μετρήσεων.....	61
3.6.2 Οριζοντιογραφίες Όγκου/Βάθους (<i>Volume/Depth Slices</i>)	64
4. Σύνοψη - Συμπεράσματα.....	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ειδίκευσης, αναφέρεται στη γεωφυσική έρευνα, που πραγματοποιήθηκε σε θέση της Πανεπιστημιακής Ανασκαφής του Τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας του ΕΚΠΑ, στη θέση Πλάσι του Μαραθώνα Αττικής. Στόχος της έρευνας, ήταν ο εντοπισμός πιθανών θαμμένων αρχαιολογικών υπολειμμάτων και η υπόδειξη νέων θέσεων ανασκαφικού ενδιαφέροντος, σε επιλεγμένη περιοχή 655 m² της Πανεπιστημιακής ανασκαφής.

Η πεδιάδα του Μαραθώνα έχει πληρωθεί με κλαστικά ιζήματα, ολοκαινικής και προ-ολοκαινικής ηλικίας. Ο παράκτιος χώρος αποτελείται από χαλαρά καστανόχρωμα αργίλο-αμμώδη υλικά με διάσπαρτες κροκαλολατύπες, ερυθρογή και λεπτόκοκκα υλικά χειμαρρωδών αναβαθμίδων. Οι λιθολογίες αυτές αποτελούν τα υλικά μέσα στα οποία είναι ενταφιασμένα τα αρχαιολογικά ευρήματα.

Για τη γεωφυσική έρευνα επιλέχθηκε ως προκαταρκτική μέθοδος εκείνη του *γεωραντάρ* (GPR). Χρησιμοποιήθηκε το μονοστατικό σύστημα της MALÅ Geoscience, εξοπλισμένο με κεραία 250 MHz θωρακισμένη. Υλοποιήθηκαν 34 τομές γεωραντάρ συνολικού μήκους 610 m, οι οποίες κάλυψαν το σύνολο της περιοχής, σε μία ισο-απόσταση ανά 2 m. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ReflexW. Εντοπίστηκαν υψηλές τιμές *έντασης ανάκλασης* (*envelope amplitude* > 3000), σε βάθος μεταξύ 15–85cm. Κατασκευάστηκαν τομές (cross sections) και οριζοντιογραφίες (slices) *όγκου/βάθους* κατανομής της έντασης του ανακλώμενου ηλεκτρομαγνητικού παλμού.

Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε και η γεωηλεκτρική μέθοδος πλευρικής μεταβολής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (ERT). Χρησιμοποιήθηκε το Terrameter Imaging System του οίκου ABEM, με 41 ηλεκτρόδια, σε ισο-απόσταση 25 cm. Συνολικά εκτελέστηκαν 20 τομές ERT, συνολικού μήκους 413 m, οι οποίες κάλυψαν το σύνολο της περιοχής, σε μία ισο-απόσταση περίπου ανά 3 μέτρα. Εντοπίστηκαν θέσεις με υψηλές τιμές *ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης* (*resistivity* > 90 Ohm.m) σε βάθος ίδιο με εκείνο της διασκόπησης *γεωραντάρ*, μεταξύ 15-85 cm. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό RES2DINV. Κατασκευάστηκαν τομές (2D cross sections) και χάρτες (slices) *όγκου/βάθους* κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.

Επί πλέον, δημιουργήθηκε τοπογραφική «Βάση» αναφοράς (*Base*) και πραγματοποιήθηκε τοπογραφική αποτύπωση όλων των γεωφυσικών εργασιών, με την τεχνική RTK-GPS (*Real Time Kinematics*).

Μετά την συνδυαστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δυο διασκοπικών τεχνικών, προέκυψαν και υποδεικνύονται για ανασκαφή, τρεις (3) θέσεις ενδιαφέροντος.

SUMMARY

This diploma thesis focuses on the geophysical research carried out at the University Excavation site of the Department of History and Archaeology of the National and Kapodistrian University of Athens, at Plasi in Marathon, Attica. The goal of this research was to identify possible buried archaeological remains and to indicate sites of interest in a selected area of 655m² of the University excavation.

The plain of Marathon is an area filled with clastic sediments of Holocene and pre-Holocene age. The coastal area incorporates brownish clayey-sandy materials with interspersed breccio-conglomerates, rubificated horizon and fine grained from river terrace material. The archaeological remains are concealed in these lithologies.

The Ground Penetrating Radar (GPR) method was chosen as the preliminary method of geophysical research. The MALÅ Geoscience monostatic system was used, equipped with a 250 MHz shielded antenna. A total of 34 radiogram radargram sections were acquired with a total length of 610m and inter section spacing of 2 meters, covering the whole area. After data processing with the ReflexW software high envelope amplitude values greater than 3000 were detected at depths between 15 cm and 85 cm. Cross sections and *volume/depth* slices of the intensity distribution of the reflected electromagnetic pulse were constructed.

Simultaneously, the Electrical Resistivity Tomography (ERT) method was applied for the investigation of the lateral resistivity distribution. The ABEM Terrameter Imaging System was used with 41 electrodes and a spacing equal to 25cm. A total of 20 electrical resistivity sections with total length 413 m were carried out at equal distance of 3 meters. High resistivity values (> 90 Ohm.m) were also detected at depths between 15 cm and 85 cm following data processing using the RES2DINV software. 2D cross sections and *volume/depth* slices of electrical resistivity, were constructed.

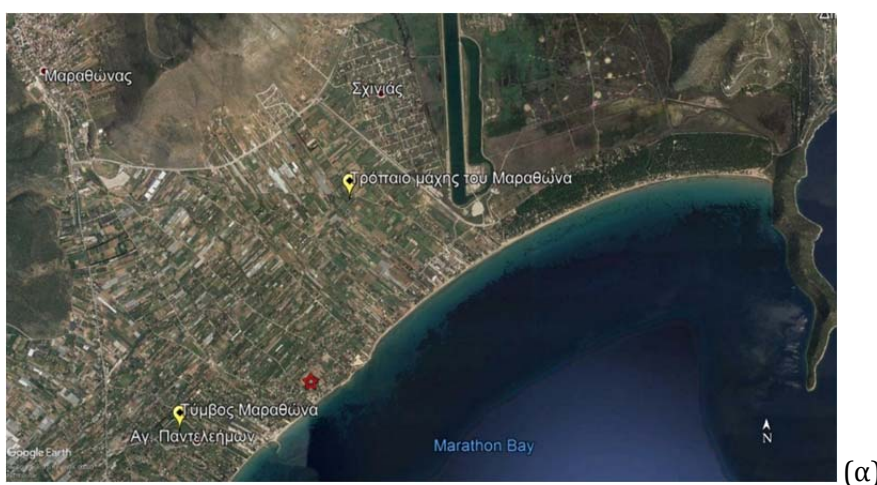
In order to secure accurate calculation of all the coordinates related to the geophysical measurements, a topographic reference “Base” was established in the area and measurements were performed using the Differential Global Positioning System (*dGPS*) and the RTK (*Real Time Kinematics*) technique.

From the combined evaluation of the results of both geophysical techniques, three (3) sites of interest have been identified and are proposed as suitable future excavation target areas.

1. Εισαγωγή

Η περιοχή μελέτης, ανήκει στο Δήμο Μαραθώνα, της Περιφερειακής ενότητας Ανατολικής Αττικής. Έχει προκύψει από την συνένωση (Καλλικράτης, 2010) των δήμων Μαραθώνα και Νέας Μάκρης και των κοινοτήτων Γραμματικού και Βαρνάβα. Είναι ο πέμπτος σε έκταση δήμος του νομού Αττικής.

Η Πανεπιστημιακή ανασκαφή του Τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας του ΕΚΠΑ, βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας του Μαραθώνα, δίπλα στην ακτή, 1,5 km βορειοανατολικά του Τύμβου του Μαραθώνα και 2 km νοτιοδυτικά του Τροπαίου της μάχης (βλ. εικ. 1.1). Πρόκειται για μια περιοχή ανάμεσα στα δύο ρέματα του ποταμού Οινόη, τον Χάραδρο ανατολικά και τον Καινούριο δυτικά.



Εικόνα 1.1 (α) Δορυφορική εικόνα της ευρύτερης περιοχής του Μαραθώνα και σημειωμένη η περιοχή της πανεπιστημιακής ανασκαφής (Google earth), **(β)** Ιστορικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής Μαραθώνα (πηγή: <https://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/curtius1900a/0007/image>)

Οι πρώτες ανασκαφικές δραστηριότητες στο Πλάσι (βλ. εικ. 1.2) πραγματοποιήθηκαν το 1969 από τον Ευθύμιο Μαστροκώστα και τον Σπυρίδωνα Μαρινάτο, σε συνεργασία με την Ελληνική Αρχαιολογική Υπηρεσία και είχαν δοκιμαστικό χαρακτήρα. Η διάνοιξη αβαθούς πηγαδιού από ιδιώτη αποκάλυψε μεγάλη ποσότητα κεραμικής της Μυκηναϊκής περιόδου η οποία οδήγησε στη διεξαγωγή των δοκιμαστικών τομών από την Αρχαιολογική Υπηρεσία. Παρά το δοκιμαστικό τους χαρακτήρα, οι ανασκαφές του 1969 αποκάλυψαν πολλά ίχνη ανθρώπινης δραστηριότητας σε πολύ μεγάλη έκταση. Ωστόσο τα αποτελέσματα των ανασκαφών δεν μελετήθηκαν και δεν δημοσιεύτηκαν πλήρως, με εξαίρεση μερικές ολιγοσέλιδες ανασκαφικές αναφορές στο περιοδικό 'Αρχαιολογικά Ανάλεκτα εξ Αθηνών' τη δεκαετία του 1970 από τους Ευθύμιο Μαστροκώστα και Σπυρίδωνα Μαρινάτο (Polychronakou-Sgouritsa N., Papadatos Y., Balitsari A., and Prevedorou E., 2016).



Εικόνα 1.2 Η Πανεπιστημιακή ανασκαφή στο Πλάσι (φωτογραφικό υλικό από Γ. Παπαδάτο).

Εξ όσων γνωρίζουμε, ο Μαραθώνας ήταν ένας σημαντικός δήμος της πόλης κράτους της αρχαίας Αθήνας. Στα αρχαϊκά χρόνια (700-480 π.Χ.), πριν τους περσικούς πολέμους δεν είχε ιδιαίτερη ιστορική σημασία, αλλά ξέρουμε ότι υπήρχε Δήμος Μαραθώνα. Ο Πλούταρχος μας πληροφορεί ότι οι Πέρσες πριν τη μάχη του Μαραθώνα κατάστρεψαν και λεηλάτησαν το δήμο, αφού μάλιστα ήταν πολύ κοντά στο στρατόπεδό τους. Μετά τη μάχη, στα κλασικά και ελληνιστικά χρόνια (480-146 π.Χ.) για συμβολικούς λόγους και λόγω της ιστορικής μνήμης, ο δήμος αποκτά μεγάλη σημασία για την αρχαία Αθήνα. Ήταν μία από τις σημαντικότερες επισκέψεις-προσκυνήματα που έπρεπε να κάνει ένας νεαρός Αθηναίος. Ωστόσο, παραμένει άγνωστο που είναι η έδρα του Δήμου Μαραθώνα κατά την αρχαϊκή, κλασική και ελληνιστική περίοδο, καθώς οι έως τώρα ανασκαφές, εκτός από κάποιες μεμονωμένες αγροικίες δεν έχουν αποκαλύψει ακόμα έναν αστικό ιστό με πυκνή κατοίκηση (προφορικές πληροφορίες Αναπλ. Καθηγ. Γιαν. Παπαδάτος).

Από την ερευνητική ομάδα του του Τομέα Αρχαιολογίας και Ιστορίας της Τέχνης, οι ανασκαφές στο Πλάσι, σε δύο πρόσφατες αρχαιολογικές τομές, αποκάλυψαν

αρχιτεκτονικά κατάλοιπα, αλλά αυτά από μόνα τους δεν αποτελούν έναν οικισμό. Συνεπώς τίθεται το ερώτημα αν τα αποκαλυφθέντα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα συνεχίζουν στην άσκαφη περιοχή, στο ίδιο βάθος με αυτά των ανασκαμμένων τομών. Η διερεύνηση της τυχόν ύπαρξης τους θα ενισχύσει την άποψη ότι δεν πρόκειται για μεμονωμένα κτήρια, αλλά για έναν μεγαλύτερο οικιστικό πυρήνα που θα μπορούσε να αποτελεί τμήμα του δήμου του Μαραθώνα. Με άλλα λόγια η έρευνα θα ενίσχυε την άποψη ότι ο αρχαίος Δήμος του Μαραθώνα βρισκόταν στο Πλάσι και ότι υπήρχε συμπαγής οικιστικός πυρήνας και ο δήμος δεν αποτελούνταν από διάσπαρτες αγροικίες.

Το πλέον ιδιαίτερο εύρημα του χώρου, είναι ένα ιδιαίτερα μεγάλο κτήριο (διαστάσεων 14x7 m) το οποίο κατασκευάστηκε κατά την Μέσο-Ελλαδική Περίοδο και αποκαλύφθηκε αρχικά από τον Καθηγητή Μαρινάτο κατά την διάρκεια των αρχαιολογικών ανασκαφών της περιόδου 1969. Οι ανασκαφές αποκάλυψαν επίσης αγγεία, τάφους και αρχιτεκτονικά λείψανα από την Γεωμετρική έως την Ύστερη Ρωμαϊκή και την Πρώιμη Βυζαντινή περίοδο, υποδεικνύοντας σαφώς τη μακρά ιστορία της κατοχής στο χώρο (Polychronakou-Sgouritsa N., *et al.*, 2016).

Το 2013, στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος του Τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών με επιστημονικά υπεύθυνο τον Αναπλ. Καθηγητή Γιάννη Παπαδάτο, πραγματοποιήθηκε επανέναρξη των ανασκαφών στον αρχαιολογικό χώρο.

Τα ευρήματα των ανασκαφικών περιόδων 2014 και 2015, αποκάλυψαν πως ο χώρος περιφερειακά του κτηρίου χρησιμοποιείτο για πύρωση κεραμικών και για βιοτεχνική δραστηριότητα. Τα αποκαλυφθέντα κτήρια, στα βόρεια του μεγάρου, χρονολογήθηκαν στην δεύτερη Μέσο Ελλαδική φάση και αποδεικνύουν ότι το μέγαρο ήταν το κεντρικό κτήριο ενός μεγαλύτερου οικισμού (Polychronakou-Sgouritsa N., *et al.*, 2016).



Εικόνα 1.3 Στην φωτογραφία παρουσιάζεται ο τάφος του μυκηναίου πολεμιστή και τα αρχιτεκτονικά κατάλοιπα του Ιερού (φωτογραφικό υλικό από Γ. Παπαδάτο).

Ανάμεσα στα αρχαιολογικά ευρήματα ξεχωρίζει το νεκροταφείο που εγκαταστάθηκε στην περιοχή την ύστερη Μέσο Ελλαδική Περίοδο και ο τάφος ενός μυκηναίου πολεμιστή (βλ. εικ. 1.3), με όλο το πολεμικό του εξοπλισμό. Το νεκροταφείο σταμάτησε να χρησιμοποιείται περί το 1400 π.Χ. και ο χώρος έγινε ξανά οικισμός, για να μετατραπεί για άλλη μία φορά σε νεκροταφείο περί το 1000 π.Χ. Περίπου το 700 π.Χ. οι ταφές σταμάτησαν πάλι και ο χώρος φαίνεται ότι έλαβε ιερό χαρακτήρα, με την ίδρυση ιερού πάνω από τον τάφο του μυκηναίου πολεμιστή, ο οποίος πιθανά τιμήθηκε ως ήρωας μία χιλιετία μετά τον θάνατό του. Το Ιερό φαίνεται να καταστράφηκε στις αρχές του 5ου αιώνα π.Χ., ίσως από τους Πέρσες, στο πλαίσιο των εχθροπραξιών που προηγήθηκαν της μεγάλης μάχης. Ωστόσο, η περιοχή δεν εγκαταλείφθηκε, αφού σπίτια της κλασικής περιόδου βρέθηκαν σε μικρή απόσταση από το κατεστραμμένο ιερό (Polychronakou-Sgouritsa N., *et al.*, 2016).

Στο ΝΑ άκρο της περιοχής του απαλλοτριωμένου χώρου και κατά την ανασκαφική περίοδο 2018, διανοίχθηκαν αρχαιολογικές τομές. Η ανασκαφή αυτών των τομών προχώρησε σε βάθος 30-50 cm από την επιφάνεια του εδάφους (εικόνα 1.4α). Σύμφωνα και πάλι με τις πληροφορίες του Αναπλ. Καθηγ. Γ. Παπαδάτου οι τομές είχαν διερευνητικό χαρακτήρα και στόχο να διαπιστωθεί αν υπάρχουν αρχιτεκτονικά κατάλοιπα και αρχαιολογικές επιχώσεις. Αποκαλύφθηκαν διατηρημένες επιφάνειες τοίχων οι οποίες φαίνεται να ανήκουν σε μεγάλα οικοδομήματα. Σύμφωνα με την κεραμική φαίνεται να χρονολογούνται στην υστεροκλασσική και ελληνιστική περίοδο. Στη ΝΔ γωνία της ανασκαφής βρέθηκε μεγάλη συγκέντρωση πήλινων αγνύθων. Για αυτό το λόγο, η ανασκαφική δραστηριότητα δεν προχώρησε περαιτέρω στο συγκεκριμένο σημείο **και αποφασίστηκε η γεωφυσική διερεύνηση υπεδάφους στο άσκαφο τμήμα του**. Η ερευνητική αυτή προσπάθεια, αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας (βλ. εικ. 1.4β και 1.6).



(α)



(β)

Εικόνα 1.4 (α) Τμήμα ανασκαφικής τομής στα νότιο-ανατολικά του απαλλοτριωμένου χώρου, όπου διακρίνονται τα δύο διαφορετικά βάθη όπου προχώρησε η αρχαιολογική ανασκαφή.

(β) Κάτοψη της ανασκαφικής τομής (μαύρη εστιγμένη πολυγωνική γραμμή) και η περιοχή της γεωφυσικής έρευνας στο άσκαφο τμήμα της (κόκκινη εστιγμένη γραμμή).

1.1 Γεωλογικές – γεωμορφολογικές συνθήκες

Η περιοχή μελέτης γεωλογικά, αποτελεί τμήμα της ενότητας της Β.Α. Αττικής, η οποία ανήκει στις κεντρικές Ελληνίδες. Σύμφωνα με τον Lozios (1993), η ενότητα αντιπροσωπεύει τη «*σχετικά αυτόχθονη*» μεταμορφωμένη ενότητα και αποτελείται από μια μέτα-ηφαιστειοϊζηματογενή ακολουθία στη βάση (Α. Τριαδικό και παλαιότερη) και μια υπερκείμενη ανθρακική σειρά (Α. Τριαδικό – Α. Κρητιδικό), αποτελούμενη από διαφορετικές φάσεις μαρμάρων και μετα-φλύσχη στην οροφή (Ηώκαινο) (βλ. εικ. 1.5).

Η ανθρακική σειρά εμφανίζεται στην ευρύτερη περιοχή, με τους παρακάτω σχηματισμούς:

1. **Μάρμαρα (MRm):** Τεφρά έως υπόλευκα και κατά θέσεις λευκά, κρυσταλλικά, μεσοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη, χωρίς σχιστολιθικές ενδιαστρώσεις, ηλικίας Α. Τριαδικού – Α. Κρητιδικό
2. **Μάρμαρα (MRp):** Λευκά κρυσταλλικά ή υποκύανα μάρμαρα, που χαρακτηρίζουν το κεντρικό τμήμα της περιοχής και αποτελούν πλευρική εξέλιξη των κατώτερων στρωμάτων της προηγούμενης ανθρακικής ακολουθίας.
3. **Σχιστόλιθοι:** Είναι κυρίως χλωριτικοί και μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, με ενστρώσεις ακάθαρτων μαρμάρων και μαρμάρων με silex. Παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στο πάχος τους.

Ο ποταμός σήμερα διακλαδώνεται πριν τις εκβολές του δημιουργώντας το ρέμα Σεχρί και το ρέμα Καινούργιο. Το Καινούργιο ρέμα λειτουργούσε μέχρι τη δεκαετία του 1920, αλλά η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα, το 1929, στον άνω ρου του Οινόη ποταμού, για την ύδρευση των Αθηνών προκάλεσε παρακράτηση του νερού στο φράγμα και κατά συνέπεια ελάττωση ροής του Καινούργιου ρέματος (Seni, *et al.*, 2010). Το ρέμα αυτό λειτουργεί σε περιπτώσεις υπερχείλισης του φράγματος. Όμως, η υπέρμετρη διόγκωση της πρωτεύουσας και οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες της σε νερό, δεν επέτρεψαν ποτέ τη διαφυγή του νερού κατάντη του φράγματος.

1.2 Γεωφυσικές διασκοπήσεις - Τοπογραφικές αποτυπώσεις

Η γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε σε επιλεγμένη περιοχή 655 m² στο νότιο τμήμα της Πανεπιστημιακής ανασκαφής (βλ. εικ. 1.4β και 1.6). Είχαν προηγηθεί προκαταρκτικές ανασκαφικές τομές (βλ. εικ. 1.4), όπου είχαν αναδείξει αρχιτεκτονικά κατάλοιπα της ύστερης κλασικής και ελληνιστικής περιόδου και στόχος της γεωφυσικής διασκόπησης ήταν να διερευνηθεί η ύπαρξη και η χωρική εξάπλωση πιθανών καταλοίπων στο άσκαφο τμήμα, στην περιοχή που υποδείχτηκε από τον Αναπλ. Καθηγ. Γ. Παπαδάτο.



(α)



(β)

Εικόνα 1.6 (α) Δορυφορική εικόνα από Google Earth της πανεπιστημιακής ανασκαφής. Με κόκκινο πλαίσιο η περιοχή της γεωφυσικής διασκόπησης.

(β) Πανοραμική εικόνα της περιοχής μελέτης. Αναγνωρίζονται οι τοπογραφικές σημάνσεις.

Με γνώμονα τα ευρήματα των ανασκαμμένων τομών και τα χαρακτηριστικά των γεω-περιβαλλοντικών συνθηκών του πεδίου, επιλέχτηκαν να εφαρμοστούν οι τεχνικές της ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης **γεωραντάρ** (GPR) και της υψηλής διακριτικής ικανότητας διασκόπησης **γεωηλεκτρικής τομογραφίας** (ERT).

Τελικός σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής ήταν, η συνδυαστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και των δυο μεθόδων, έτσι ώστε να υποδειχθούν πιθανές περιοχές ύπαρξης θαμμένων αρχαιολογικών 'στόχων'. Ένα ανασκαφικό πρόγραμμα στις υποδεικνυόμενες θέσεις, αναμένεται να επιβεβαιώσει την ύπαρξη θαμμένων αρχιτεκτονικών καταλοίπων.

Η εκτέλεση τέτοιου είδους τεχνικών υψηλής διακριτικής ευκρίνειας, απαιτούν υψηλού επιπέδου **τοπογραφική αποτύπωση και λεπτομέρεια**. Για τον λόγο αυτό, ιδρύθηκε στο χώρο της Πανεπιστημιακής ανασκαφής από την ερευνητική ομάδα του Τμήματος Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, **τοπική τοπογραφική «Βάση» αναφοράς** (βλ. εικ. 1.7).



Εικόνα 1.7 Η τοπογραφική «Βάση» αναφοράς.

Για τον ακριβή προσδιορισμό των συντεταγμένων της «Βάσης» της τοπογραφικής αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική *static* με ζεύγος διπλόσυχνων δεκτών GPS Hiper

Pro της TopCon, με ακρίβεια προσδιορισμού θέσης $10\text{mm} \pm 1.0\text{ppm}$ οριζοντιογραφικά και $15\text{mm} \pm 1.0\text{ppm}$ υψομετρικά. Η εξάρτηση και η επίλυση πραγματοποιήθηκε από το δίκτυο της εταιρείας TREE COMPANY CO Α.Ε.Β.Ε.Ε. Το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις τοπογραφικές αποτυπώσεις είναι το ΕΓΣΑ'87.

Στη συνέχεια, για την τοπογραφική αποτύπωση (σάρωση) όλων των εργασιών, πραγματοποιήθηκε η τεχνική *RTK-GPS (Real Time Kinematics)*, χρησιμοποιήθηκαν δέκτες *Hiper-Pro (Base & Rover)* της εταιρείας *TopCon* και το λογισμικό πεδίου *TopSurv* της ίδιας εταιρείας. Η επίλυση των μετρήσεων έγινε με λογισμικό *TopCon Tools*. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια μέτρησης με τον συγκεκριμένο εξοπλισμό είναι 0,1 cm και η υψομετρική 1,5 cm.

Στο πλαίσιο διαχείρισης των γεωφυσικών δεδομένων που συγκεντρώθηκαν για την παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες τοπογραφικές αποτυπώσεις.



Εικόνα 1.8 Λήψη μετρήσεων dGPS στο πεδίο έρευνας.

Και για τις δύο γεωφυσικές μεθόδους που πραγματοποιήθηκαν, καταγράφηκαν και υπολογίστηκαν συνολικά 1.476 μετρήσεις τοπογραφικής αποτύπωσης.

Οι αποτυπώσεις περιλάμβαναν:

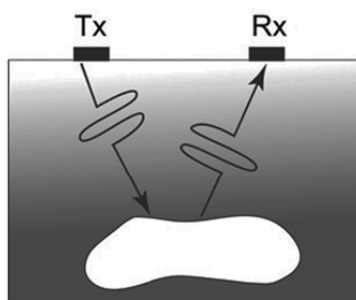
- i. Τα άκρα των ηλεκτρομαγνητικών τομών GPR και των τομών γεωηλεκτρικής τομογραφικής διασκόπησης ERT.
- ii. Όλες τις θέσεις δειγματοληψίας (ηλεκτρόδια) των γεωηλεκτρικών τομών, απαραίτητες για την τοπογραφική διόρθωση στην επεξεργασία των δεδομένων.
- iii. Την αποτύπωση ιχνών ερευνητικών των εγγύς αρχαιολογικών εργασιών και των ευρημάτων (βλ. εικ.1.8).

Μετά την επεξεργασία των τοπογραφικών στοιχείων, δημιουργήθηκε τοπογραφικό υπόβαθρο υψηλής χωρικής ανάλυσης και κατασκευάστηκαν οι αντίστοιχες χαρτογραφικές απεικονίσεις (βλ. παράγραφο 2.8 & 3.6).

2. Διασκόπηση γεωραντάρ

Το γεωραντάρ (*ground penetrating radar GPR*) είναι μια κοινά αποδεκτή γεωφυσική τεχνική για σχετικά ρηχούς στόχους και με εφαρμογή σε συγκεκριμένα γεωπεριβάλλοντα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, για να εντοπίζει στόχους σε μέσα όπου το σήμα αποσβένεται βραδέως. Στα αρχικά στάδια εφαρμογής της μεθόδου, το γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε σε γεωλογικές εφαρμογές. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, παρουσίασε ραγδαία ανάπτυξη, καθώς αποτελεί μια μη-καταστρεπτική τεχνική, όπου μπορεί να εφαρμοστεί σε μέσα με χαμηλές τιμές *διηλεκτρικής σταθεράς*, όπως η άσφαλτος, το ξύλο και το σκυρόδεμα. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι το γεωραντάρ να καταστεί μια ιδιαίτερα δημοφιλής γεωφυσική μέθοδος διασκόπησης, με ευρύ φάσμα ιδιαίτερα τεχνικών εφαρμογών.

Η πιο κοινή μορφή λήψης μετρήσεων με τη μέθοδο/τεχνική του γεωραντάρ, περιλαμβάνει έναν «πομπό» και έναν «δέκτη» με σταθερή απόσταση. Το σύστημα αυτό κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους για να εντοπίσει ανακλάσεις από τις υπεδάφινες δομές (βλ. εικ. 2.1).



Εικόνα 2.1 Η πιο κοινή μορφή λήψης μετρήσεων της μεθόδου κατά μήκος της επιφάνειας (Jol, 2009).

Η χρήση *ραδιοφωνικών κυμάτων* για την διερεύνηση της γης, χρησιμοποιείτο πολλές δεκαετίες πριν από τα πρώτα αποτελέσματα της δεκαετίας του 1950 (El Said, 1956; Waite and Schmidt, 1961). Ο Waite αρχικά παρουσίασε διασκόπηση στρώματος πάγου με την χρήση *ραντάρ* υπολογισμού του υψομέτρου αεροσκάφους, γεγονός που οδήγησε στην επανάληψη της διασκόπησης σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Με αυτό ως αρχή, η μέθοδος μεταφέρθηκε σε διασκοπήσεις εδάφους και βραχομάζας, η οποία ξεκίνησε την δεκαετία του 1960.

Η εφαρμογή της μεθόδου του γεωραντάρ, βοήθησε στην κατανόηση θεμελιωδών αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού και γενικότερα της κυματικής φυσικής, καθώς επίσης και των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (Davis and Annan, 1989). Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω, το γεωραντάρ ως τεχνική ανέπτυξε τη δική του ορολογία και τις δικές του διαδικασίες πρακτικής εφαρμογής, απέκτησε τη δική του οντότητα και κατέκτησε μια θέση στις μεθόδους γεωφυσικών διασκοπήσεων.

Τα θεμέλια της μεθόδου του γεωραντάρ βρίσκονται στην *ΗλεκτροΜαγνητική (ΗΜ)* θεωρία. Η ιστορία και η εξέλιξη έχει διαρκέσει πάνω από δύο αιώνες και έχει αποτελέσει θέμα πολλών μελετών και δημοσιεύσεων, όπως των Jackson (1962) και Smythe (1989). Οι **εξισώσεις του Maxwell's** περιγράφουν μαθηματικά την φύση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ενώ οι **καταστατικές εξισώσεις** ποσοτικοποιούν τις ιδιότητες της ύλης. Ο συνδυασμός αυτών των δύο αποτελεί την αρχή λειτουργίας της μεθόδου και την ποσοτική περιγραφή του σήματος γεωραντάρ.

Τα ΗΜ πεδία περιγράφονται, από τις **εξισώσεις του Maxwell's** ως εξής:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

όπου: E η ένταση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου (V/m);

ρ η πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου (C/m³);

B η πυκνότητα του διανύσματος της μαγνητικής ροής (T)

J η πυκνότητα του διανύσματος του ηλεκτρικού ρεύματος (A/m²);

D το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης (C/m²);

t ο χρόνος (sec);

H η ένταση του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου (A/m).

Οι **καταστατικές εξισώσεις** περιγράφουν την απόκριση των υλικών στα ΗΜ πεδία. Για το γεωραντάρ, οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες είναι πολύ σημαντικές καθώς προσφέρουν μια μακροσκοπική περιγραφή του πώς τα ηλεκτρόνια, τα άτομα και τα μόρια αποκρίνονται στην εφαρμογή ενός ΗΜ πεδίου.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

Η **ηλεκτρική αγωγιμότητα, σ** , εκφράζει τη δυνατότητα ελεύθερης κίνησης των ηλεκτρονίων (δηλαδή τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος) κατά την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Η αντίσταση στην ροή της ενέργειας οδηγεί στη μείωση αυτής. Η **ηλεκτρική διαπερατότητα, ϵ** , περιγράφει τη μετατόπιση του φορτίου, κατά την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Η μετατόπιση του φορτίου αφορά την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας των υλικών. Η **μαγνητική διαπερατότητα, μ** , περιγράφει το πώς τα άτομα και τα μόρια των υλικών, αντιδρούν στην εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου. Τα παραπάνω μεγέθη είναι διανυσματικά, παρόλο που πρακτικά μπορούν να θεωρηθούν και ως βαθμωτά.

Ωστόσο, οι ιδιότητες των υλικών μπορεί να εξαρτηθούν και από την προηγούμενη έκθεσή τους σε κάποιο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ανάλογα με το υλικό λοιπόν, αυτό μπορεί να αποκριθεί γρήγορα ή αργότερα στο πεδίο του χρόνου (λόγω εφαρμογής

κάποιου πεδίου). Έτσι οι **καταστατικές εξισώσεις** στο πεδίο του χρόνου μετατρέπονται στην παρακάτω μορφή,

$$\bar{J}(t) = \int_0^{\infty} \tilde{\sigma}(\beta) * \bar{E}(t - \beta) d\beta \quad (2.8)$$

Για τη διασκόπηση γεωραντάρ, η **διηλεκτρική διαπερατότητα** ή **διηλεκτρική σταθερά, κ** (αδιάστατο μέγεθος), είναι ένα σημαντικό μέγεθος και εκφράζεται ως εξής,

$$\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

όπου, ϵ είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού

ϵ_0 εκφράζει την **ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού**, $8,89 \times 10^{-12}$ F/m.

Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής του γεωραντάρ, η διακύμανση της **ηλεκτρικής διαπερατότητας** και **αγωγιμότητας** είναι ιδιαίτερα σημαντική, ενώ της **μαγνητικής** είναι ήσσονος σημασίας. Το γεωραντάρ έχει καλύτερη εφαρμογή σε περιβάλλοντα όπου επικρατούν συνθήκες χαμηλής απώλειας ενέργειας.

Εάν η **ηλεκτρική αγωγιμότητα**, του μέσου που διαδίδεται το σήμα του GPR είναι ίση με μηδέν ($\sigma=0$), το βάθος διείσδυσης του σήματος αυξάνει, καθώς και η διακριτική του ικανότητα. Ωστόσο, οι επικρατούσες συνθήκες στα περισσότερα μέσα-γεωυλικά απέχουν πολύ από συνθήκες χαμηλού επιπέδου απώλειας ενέργειας. Για παράδειγμα, σε περιβάλλοντα πλούσια σε άργιλο ή υφάλμυρης υδροφορίας, η διεισδυτική ικανότητα του γεωραντάρ μειώνεται κατακόρυφα.

Τα γεωυλικά κατά κανόνα, είναι σύνθετα υλικά, αποτελούμενα από τους κόκκους, το συνδετικό υλικό και το πορώδες το οποίο μπορεί να είναι πληρωμένο ή όχι με νερό ή αέρα, με αποτέλεσμα η ποσοτικοποίηση των φυσικών ιδιοτήτων τους καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη. Ωστόσο, το συχνοτικό εύρος μεταξύ 10 έως 1000 MHz, στο οποίο εκπέμπεται το σήμα του γεωραντάρ, η κυρίαρχη συμπεριφορά των υλικών μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- Τα ορυκτά είναι καλοί μονωτές, έχουν **διηλεκτρική σταθερά** μεταξύ 3 - 8 F/m και συνήθως προσομοιώνονται ως μηδενικής **ηλεκτρικής αγωγιμότητας** υλικά.
- Τα εδάφη, η βραχομάζα και τα υλικά κατασκευών (σκυρόδεμα κ.λπ.), έχουν πορώδες, ενεργό ή μη, το οποίο στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι πληρωμένο με νερό.
- Τα **νερό** είναι το υλικό με την μεγαλύτερη πολικότητα (οι φυσικοχημικές του ιδιότητες αποτελούν απόρροια της πολικότητάς του και της ικανότητας των μορίων του να συνδέονται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου) και **διηλεκτρική σταθερά $\kappa \approx 80$** . Το πορικό νερό περιέχει ιόντα, γεγονός που οδηγεί σε κατακόρυφη αύξηση της **ηλεκτρικής αγωγιμότητας** του μέσου. Έτσι το εύρος διακύμανσης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μέσου αυξάνει και παίρνει τιμές μεταξύ 1 έως 1000 mS/m.

Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται προσεγγιστικές τιμές των φυσικών ιδιοτήτων για διάφορους τύπους γεωυλικών.

Πίνακας 2.1 Προσεγγιστικές τιμές διηλεκτρικής σταθεράς, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και εξασθένισης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος διαφόρων γεωυλικών (Leckebusch, 2003, Annan, 2005)

Material	ϵ_r	v (m ns ⁻¹)	σ (mS m ⁻¹)	α (dB m ⁻¹)
Air	1	0.3	0	0
Salt water	80	0.033	3000	600
Fresh water	80	0.033	0.5	0.1
Granite, dry	5	0.13	0.01	0.01
Sand, dry	5	0.13	0.01	0.01
Clay, wet	10	0.095	500	300
Soils:				
sandy, dry	2.6	0.19	1.4	1
sandy, wet	25	0.06	69	23
clayey, dry	2.5	0.19	2.7	3
clayey, wet	19	0.07	500	200
frozen	6	0.12	0.1	0.1
Lacustrine chalk	50	0.04	—	—
Cultural layer underwater	70	0.04	—	—

2.1 Κυματική φύση του ηλεκτρομαγνητικού (ΗΜ) κύματος

Ο κυματικός χαρακτήρας γίνεται εμφανής, όταν ξαναγράφοντας τις **εξισώσεις του Maxwell** μηδενίζεται είτε το ηλεκτρικό είτε το μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιώντας το ηλεκτρικό πεδίο, η εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{array}{c} \nabla \times \nabla \times \vec{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \uparrow \quad \quad \uparrow \quad \quad \uparrow \\ A \quad \quad B \quad \quad C \end{array} \quad (2.10)$$

Το *γεωραντάρ* είναι αποτελεσματικό σε περιβάλλοντα χαμηλής απώλειας ενέργειας, όπου η απορρόφηση ενέργειας (όρος *B*) είναι μικρός σε σχέση με την αποθήκευση ενέργειας (όρος *C*).

Το ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}$, μετράται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\vec{E} = f(\vec{r} \cdot \vec{k}, t) \vec{u} \quad (2.11)$$

όπου, $\vec{r}$ είναι το διάνυσμα που περιγράφει την κατεύθυνση και $f(\vec{r} \cdot \vec{k}, t)$ ικανοποιεί την βαθμωτή εξίσωση

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) \equiv 0 \quad (2.12)$$

όπου, $\beta = \vec{r} \cdot \vec{k}$ (2.13)

Σε συνθήκες χαμηλής απώλειας ενέργειας

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \mp vt) e^{\mp \alpha \beta} \quad (2.14)$$

όπου, v είναι η **ταχύτητα διάδοσης** και α η **εξασθένιση του σήματος**, με

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.15) \quad \text{και} \quad \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.16)$$

Σε πολλές των περιπτώσεων η εξίσωση διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου, δίνεται σε ημιτονοειδή μορφή, σε σχέση με την **γωνιακή ταχύτητα** $\omega = 2\pi f$ και το **μήκος κύματος** $\lambda = 2\pi v/\omega$.

$$f(\beta, t) = A \exp \left(- \left(i \left(\frac{\beta}{v} - \omega t \right) \right) \right) e^{-\alpha\beta} \quad (2.17)$$

όπου, A (amplitude) είναι η **μέγιστη τιμή έντασης** του εκπεμπόμενου σήματος.

Οι βασικές ιδιότητες της κυματικής διάδοσης του σήματος του GPR (Annan, 2003), είναι

1. η **ταχύτητα v** ,
2. η **εξασθένιση σήματος α** και
3. η **ηλεκτρομαγνητική εμπέδηση Z** .

Το εύρος των συχνοτήτων, στο οποίο εκπέμπει το γεωραντάρ, δηλαδή πάνω από την **κρίσιμη συχνότητα**, $f_t = \sigma/2\pi\epsilon$, ο παλμός κινείται με άθικτο το σχήμα του και χωρίς διασπορά (Annan, 1996).

Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα, η εξασθένιση και η ηλεκτρομαγνητική εμπέδηση, μπορούν να εκφραστούν ως:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad (2.18)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2 \cdot \sqrt{\kappa}} \quad (2.19)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\kappa}} \quad (2.20)$$

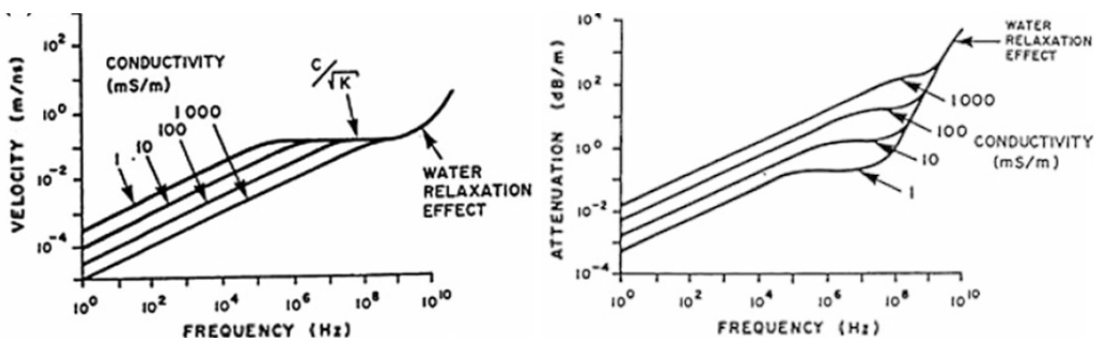
$$Z_0(\Omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.21)$$

όπου, η **μαγνητική επιδεκτικότητα του κενού** $\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} \text{H/m}$ και η **ταχύτητα διάδοσης του φωτός** $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$.

Στην περίπτωση του γεωραντάρ παρουσιάζεται μια βαθμιαία αύξηση της ταχύτητας και της εξασθένισης του σήματος, σε σχέση με την συχνότητα (βλ. εικ. 2.2). Οι δύο κύριοι παράγοντες που προκαλούν αυτήν την αύξηση είναι:

- το **νερό** απορροφά περισσότερη ενέργεια, όσο αυξάνεται η συχνότητα του εκπεμπόμενου κύματος, καθώς η συχνότητα «χαλάρωσης» (*water relaxation effect*) του νερού βρίσκεται στα 10-20GHz (Hasted, 1972).
- η **αγωγιμότητα** (*conductivity*) του μέσου, βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση από την αύξηση της συχνότητας, καθώς η εξασθένιση αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας και της αγωγιμότητας.

Τυπικές τιμές της **ταχύτητας διάδοσης** (v) είναι μεταξύ **0.07-0.15 m/ns**, της **εξασθένησης σήματος** (α) είναι **1dB/m** και της **ηλεκτρομαγνητικής εμπέδησης** (Z) είναι **100-150 Ω** .



Εικόνα 2.2 Τιμές της ταχύτητας (v) και της εξασθένησης σήματος (α) για διαφορετικές συχνότητες του ΗΜ κύματος και για διαφορετικές ηλεκτρικές αγωγιμότητες (σ) (Davis & Annan, 1989)

2.2 Συντελεστής απόσβεσης (*Loss Factor*) και εξασθένηση σήματος λόγω διάχυσης σήματος (*Scattering Attenuation*)

Ο **συντελεστής απόσβεσης** είναι ανάλογος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μέσου (Davis & Annan, 1989).

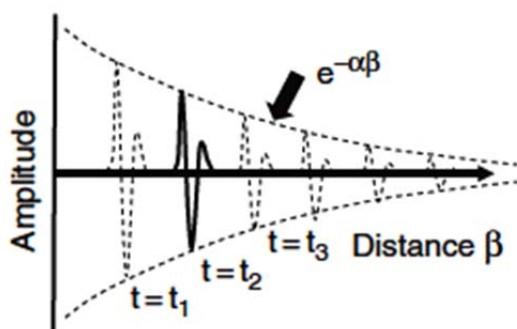
Η **απόσβεση** του ηλεκτρομαγνητικού σήματος είναι ανάλογη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μέσου διάδοσης του σήματος και μπορεί να εκφραστεί σε dB/m (βλ. εικ. 2.3). Η **συντελεστής απόσβεσης** δίνεται από την εξίσωση

$$\frac{|A_z|}{|A_0|} = e^{-dz} \quad (2.22)$$

όπου, A_0 και A_z είναι το αρχικό και τελικό πλάτος του κύματος και

d είναι ο συντελεστής απωλειών και εκφράζεται από την εξίσωση:

$$d = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (2.23)$$



Εικόνα 2.3 Διάδοση του ΗΜ παλμού σε μέσο με χαμηλό συντελεστή απόσβεσης (Jol, 2009).

Ως **επιδερμικό βάθος** (δ) ορίζεται το αντίστροφο του συντελεστή απόσβεσης και αντιστοιχεί στο βάθος εκείνο στο οποίο η ένταση της εξασθένησης του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίση με $1/e$. (Jol, 2009)

$$\delta = \frac{5.31\sqrt{\epsilon_r}\omega}{\sigma} \quad (2.24)$$

όπου, ϵ_r η **σχετική διηλεκτρική σταθερά**.

Η εξασθένηση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, λόγω **διάχυσης** α_s (Annan, 2005), σε απόσταση r περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση

$$E = E_0 e^{-\alpha_s r} \quad (2.25)$$

$$\alpha_s = \frac{NA}{2} \quad (2.26)$$

όπου, A είναι η διατομή της επιφάνειας που διέρχεται το ΗΜ κύμα.

Η εξασθένηση λόγω **διάχυσης**, είναι άμεσα εξαρτώμενη από την συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος

$$A = C a^6 f^4 \quad (2.27)$$

όπου, C σταθερά με μονάδες μέτρησης $1\text{m}^4 \text{Hz}^4$,

a η ακτίνα της σφαίρας και

f η συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος.

Συνεπώς, η ολική εξασθένηση (a_{total}) του σήματος περιγράφεται από το άθροισμα της ωμικής εξασθένησης (a_{ohmic}), που περιγράφει την εξασθένηση λόγω παραγωγής ρεύματος στο μέσο και της εξασθένησης λόγω διάχυσης ($a_{scattering}$).

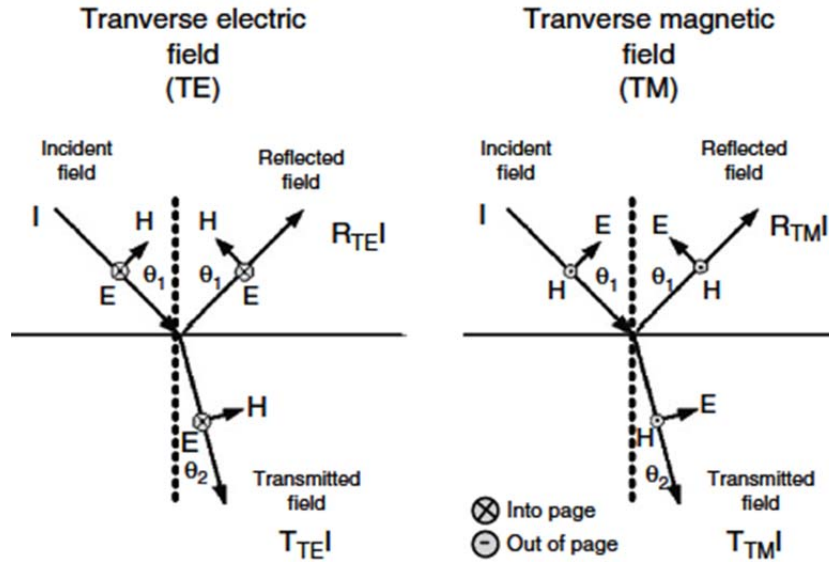
$$a_{total} = a_{ohmic} + a_{scattering} \quad (2.28)$$

2.3 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις διεπιφάνειες

Σκοπός του *γεωραντάρ* είναι ο εντοπισμός των διεπιφανειών μεταξύ των υλικών, μέσω σκιαγράφησης του ανακλώμενου και του διαχεόμενου σήματος.

Η ανάκλαση και διάδοση κατά τον *Frensel*, περιγράφει (Jackson, 1962; Born and Wolf, 1980; Annan, 2003, Burhl, M., *et al.*, 1996) πως το ηλεκτρομαγνητικό κύμα συμπεριφέρεται στην διεπιφάνεια δύο υλικών (βλ. εικ. 2.4).

Το διανυσματικό πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού κύματος EM, διαχωρίζεται σε δυο ανεξάρτητα μέλη, το **εγκάρσιο ηλεκτρικό** (*transverse electric field – TE*) και το **εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο** (*transverse magnetic field – TM*).



Εικόνα 2.4 Ανάκλαση και διάθλαση των δυο ανεξάρτητων μελών του HM κύματος, το εγκάρσιο ηλεκτρικό (*transverse electric field* - TE) και το εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο (*transverse magnetic field* - TM) (Jol, 2009).

Η σχέση του **εκπεμπόμενου**, του **ανακλώμενου** και του **διαθλώμενου** κύματος περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις και πρέπει να ικανοποιεί το νόμο του Snell:

$$I + R \cdot I = T \cdot I \quad (2.29)$$

$$R_{TE} = \frac{Y_1 \cdot \cos\theta_1 - Y_2 \cdot \cos\theta_2}{Y_1 \cdot \cos\theta_2 + Y_2 \cdot \cos\theta_2} \quad (2.30)$$

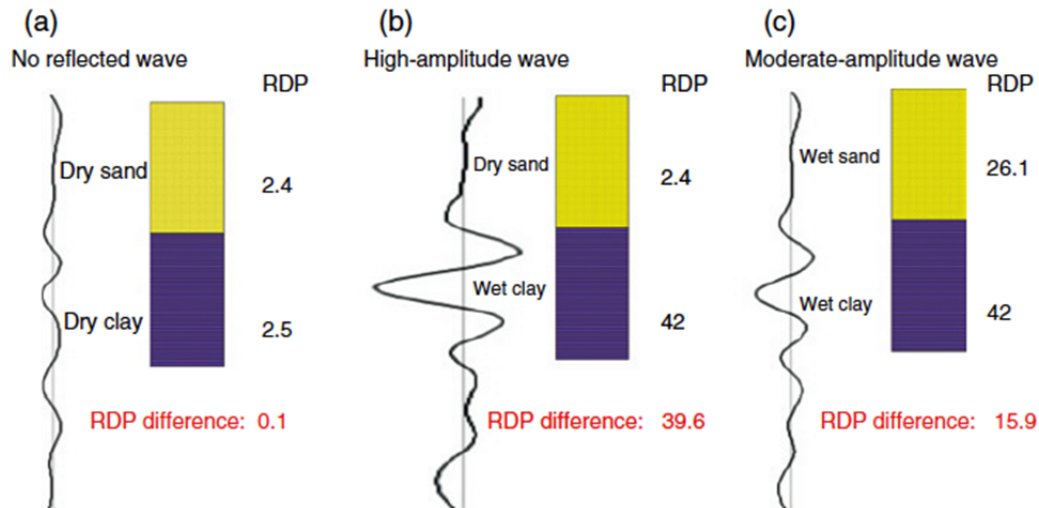
$$R_{TM} = \frac{Z_1 \cdot \cos\theta_1 - Z_2 \cdot \cos\theta_2}{Z_1 \cdot \cos\theta_2 + Z_2 \cdot \cos\theta_2} \quad (2.31)$$

$$T_{TE} = 1 + R_{TE} \quad (2.32)$$

$$T_{TM} = 1 + R_{TM} \quad (2.33)$$

όπου, Z_i και Y_i είναι η εμπίδηση και αγωγιμότητα ($Y_i = 1/Z_i$) του n -οστού υλικού-στρώματος.

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες, που κρίνει αν ο στόχος θα είναι ορατός κατά την διασκόπηση, είναι η **διαφορά μεταξύ των διηλεκτρικών σταθερών** (*relative dielectric permittivity, RDP*) των υλικών, έτσι ώστε να υπάρχει απόκριση (ανάκλαση) του εκπεμπόμενου κύματος (βλ. εικ. 2.5).

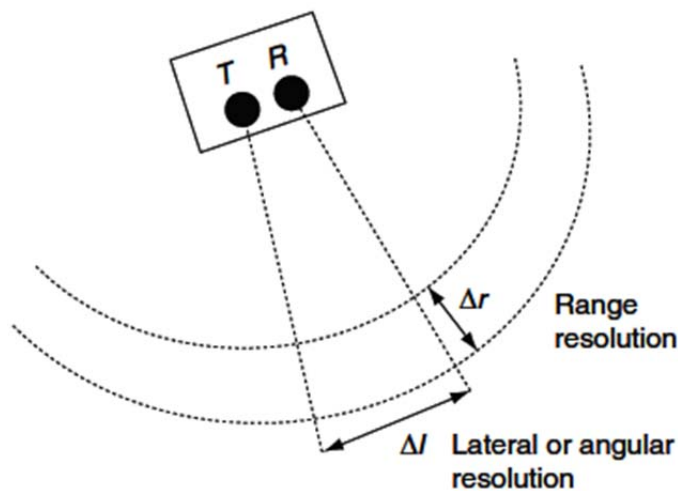


Εικόνα 2.5 Τα μοντέλα παρουσιάζουν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διαφοράς διηλεκτρικών σταθερών (RDP) και το πώς επηρεάζουν την ανάκλαση του ΗΜ κύματος (Conyers, 2012),

2.4 Διακριτική ικανότητα (Range and Lateral Resolution)

Η διακριτική ικανότητα του γεωραντάρ χαρακτηρίζεται από δυο (2) συνιστώσες (resolution components) (βλ. εικ. 2.6).

- [1] την **κατακόρυφη διακριτική ικανότητα** (depth or range resolution), Δr και
- [2] την **επιμήκη διακριτική ικανότητα** (angular or sideways or horizontal displacement) Δl



Εικόνα 2.6 Οι συνιστώσες της διακριτικής ικανότητας του γεωραντάρ, η κατακόρυφη & η επιμήκης (Jol, 2009).

Η **κατακόρυφη διακριτική ικανότητα** εκφράζεται από την εξίσωση

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad (2.34)$$

όπου, W είναι το **πλάτος** του **ηλεκτρομαγνητικού παλμού** και v η **ταχύτητα** διάδοσης του **ηλεκτρομαγνητικού κύματος** στο μέσο.

Το πλάτος του παλμού W είναι άμεσα εξαρτώμενο από το εύρος της ζώνης εκπομπής B , αλλά το γεωραντάρ εκπέμπει σε συγκεκριμένη κεντρική συχνότητα f_c , συνεπώς

$$W = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad (2.35)$$

Το μήκος κύματος της κεντρικής συχνότητας είναι $\lambda_c = f_c/v$ (2.36).

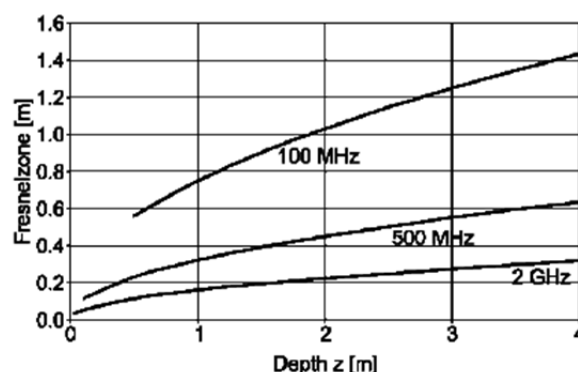
Ένας εμπειρικός κανόνας που περιγράφει την κατακόρυφη διακριτική ικανότητα, είναι ότι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ δύο στόχων πρέπει να είναι ίση με το $1/4$ του μήκους κύματος λ_c (βλ. εικ. 2.7).

Η **επιμήκης διακριτική ικανότητα** εκφράζεται από την εξίσωση

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrW}{2}} = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad (2.37)$$

όπου, r είναι η απόσταση από τον στόχο.

Ο λόγος της κατακόρυφης προς την επιμήκη διακριτική ικανότητα ονομάζεται **Fresnel Zone** (Knapp, R.W., 1991).



Εικόνα 2.7 Το διάγραμμα παρουσιάζει τον λόγο της κατακόρυφης προς την επιμήκη διακριτική ικανότητα (Fresnel Zone) κεραιών διαφορετικών κεντρικών συχνοτήτων (f_c) (Leckebusch, 2003).

2.5 Μετρήσεις σήματος γεωραντάρ (Signal measurements)

Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος γεωραντάρ είναι απλή. Έχει ως βασικό της στόχο την μέτρηση της έντασης του ληφθέντος σήματος (field amplitude) σε σχέση με τον χρόνο καταγραφής, μετά την εκπομπή του παλμού.

Η ‘καρδιά’ του συστήματος GPR είναι η μονάδα μέτρησης χρόνου, η οποία ελέγχει την παραγωγή και καταγραφή του σήματος. Τα περισσότερα συστήματα GPR λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου, παρόλα αυτά το πεδίο συχνότητας χρησιμοποιείται για να συνθέσει την απόκριση στο πεδίο του χρόνου.

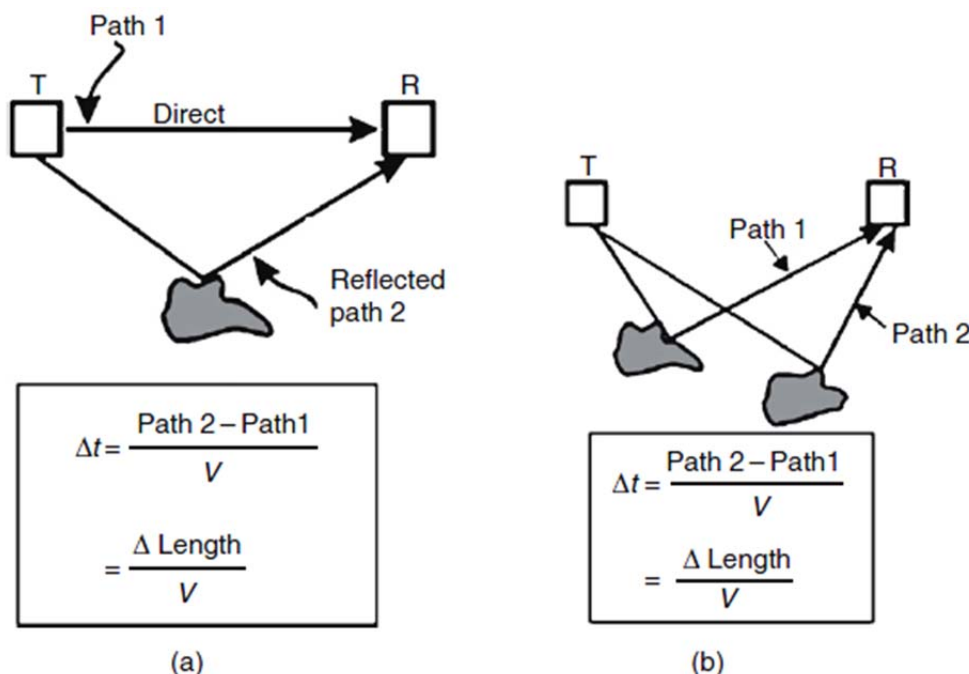
2.5.1 Εύρος χρόνου και συχνότητας καταγραφής

Τα συστήματα γεωραντάρ τυπικά είναι αναγκαίο να λαμβάνουν δεδομένα με ακρίβεια μικρότερη των 10 ps (pico-second) σε διάρκεια μετρήσεων της τάξης των 10.000 ns. Το

εύρος των μετρήσεων έχει άμεση εξάρτηση λοιπόν από τη διακριτική ικανότητα του συστήματος.

Η διακριτική ικανότητα εμπλέκει δύο σημαντικά θέματα,

- του **διαχωρισμού των στόχων** (*target separation*) και
- της **επικάλυψης του σήματος πομπού** (*transmitter blanking*) (βλ. εικ. 2.8).



Εικόνα 2.8 Η **επικάλυψη του σήματος του πομπού** (*transmitter blanking*), αφορά το απευθείας σήμα που καταγράφει ο δέκτης (path 1), στον ίδιο χρόνο όπου λαμβάνει και το ανακλώμενο (path 2). Παρόμοια επικάλυψη παρατηρείται και στην δεύτερη περίπτωση των δυο στόχων (Jol, 2009).

Η **επικάλυψη του σήματος του πομπού** (*transmitter blanking*), αφορά την ανικανότητα του δέκτη να λαμβάνει σήμα μετά το πέρας εκπομπής του σήματος. Καθώς ο πομπός εκπέμπει ένα πολύ μεγάλο σήμα, σε πολύ κοντινή απόσταση από τον δέκτη, ο τελευταίος λαμβάνει και καταγράφει ένα μεγάλης **έντασης** απευθείας σήμα. Το παραπάνω γεγονός οδηγεί στην κάλυψη του σήματος που έχει ανακλαστεί και έχει επιστρέψει στον δέκτη, από το απευθείας σήμα από τον πομπό.

Συμπερασματικά η **κατακόρυφη διακριτική ικανότητα** υποδεικνύει το απαραίτητο εύρος της εκπεμπόμενης ζώνης του ΗΜ παλμού.

$$B \geq \frac{v}{4\Delta r} \quad (2.38)$$

2.5.2 Κεντρική συχνότητα πομπού (*center frequency antenna*)

Για να είναι αποτελεσματική η λειτουργία του GPR, επιβάλλεται να επιλέγονται κεραίες σχετικά **χαμηλής κεντρικής συχνότητας**, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η **απόσβεση** του σήματος. Καθώς η **απόσβεση** είναι συνάρτηση των ηλεκτρικών απωλειών και τις διάχυσης στο μέσο διάδοσης, όσο μικρότερη είναι η **κεντρική συχνότητα** f_c τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος διείσδυσης και το αντίστροφο. Ο λόγος είναι ότι οι πιο βραχείς παλμοί εκπέμπουν στενότερο και κοντινότερο κώνο σήματος.

Το σύστημα του γεωραντάρ χαρακτηρίζεται από το λόγο του εύρους εκπομπής του παλμού B , προς την κεντρική συχνότητα f_c .

$$R = \frac{B}{f_c} \quad (2.39)$$

Σκοπός είναι ο λόγος να γίνει όσο μεγαλύτερος μπορεί, αυξάνοντας την εκπομπή του παλμού B και μειώνοντας την κεντρική συχνότητα f_c (Jol, 2009).

2.5.3 Παράθυρο χρόνου καταγραφής (time window)

Το **παράθυρο του χρόνου καταγραφής** W_t (time window) βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το **βάθος διεύθυνσης** Δr και εκφράζει το χρονικό διάστημα όπου ο δέκτης θα λαμβάνει το ανακλώμενο σήμα.

Η εξίσωση που το υπολογίζει είναι η εξής

$$W_t = \frac{2.6 * \Delta r_{\max}}{v} \quad (2.40)$$

Τα κριτήρια επιλογής του **παράθυρου χρόνου** καταγραφής είναι το μέγιστο βάθος $\Delta r_{\max}$, που η μελέτη απαιτεί και την ελάχιστη ταχύτητα v που μπορεί να παρατηρηθεί στο μέσο όπου διαδίδεται ο παλμός.

Καθώς η ταχύτητα v του μέσου δεν είναι γνωστή, συνήθως επιλέγεται βιβλιογραφικά (σύμφωνα με τις ηλεκτρικές ιδιότητες του μέσου όπου θα γίνει η διασκόπηση), αυξάνοντας τον εκτιμώμενο χρόνο έως και 30%.

Η επιλογή του **παράθυρου του χρόνου καταγραφής** θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, καθώς, εάν ο ολικός χρόνος καταγραφής είναι,

- μικρός, δεν θα μπορέσουν να καταγραφούν τα ανακλώμενα κύματα από τους πιθανούς στόχους, και αντίθετα
- πολύ μεγάλος, θα αυξήσει κατακόρυφα τον όγκο δεδομένων.

2.5.4 Αριθμός δειγμάτων ανά ίχνος (time sampling rate) & ανά τομή (spatial sampling rate)

Αντικειμενικός σκοπός μιας διασκόπησης γεωραντάρ είναι να αποκτήσει τις απαιτούμενες πληροφορίες για να σκιαγραφήσει τις υπεδαφικές δομές. Αυτό επιτυγχάνεται με δειγματοληψία του ανακλώμενου ΗΜ σήματος στο πεδίο του χρόνου και του χώρου αντίστοιχα.

Ο **αριθμός δειγμάτων ανά ίχνος** (time sampling rate) αφορά τον αριθμό των δειγμάτων που απαιτούνται για να συντεθεί ένα ίχνος ανάκλασης στο χρόνο/βάθος.

Ο **αριθμός δειγμάτων ανά τομή** (spatial sampling rate) αφορά το ρυθμό δειγματοληψίας στο χώρο (βλ. εικ. 2.9).

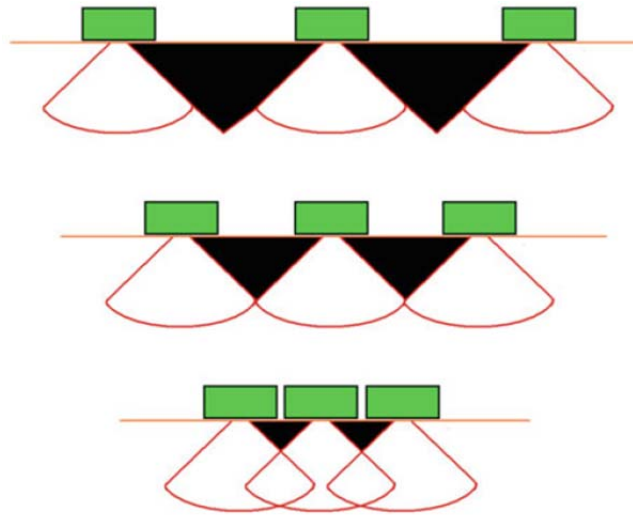
Τα κριτήρια για την επιλογή του ρυθμού δειγματοληψίας, πρέπει να ικανοποιούν τα κριτήρια δειγματοληψίας του Nyquist.

$$\Delta_t \leq \frac{1}{2f} = \frac{1}{3f_c} \quad (2.41)$$

$$\Delta_x \leq \frac{v}{2f} = \frac{v}{3f_c} \quad (2.42)$$

Οι συγκεκριμένες παράμετροι επηρεάζουν την ανάλυση και τη διακριτική ικανότητα των μετρήσεων, με συνέπεια η συλλογή περισσότερων δειγμάτων να αυξάνει την ανάλυση της ανακλώμενης κυματομορφής. Μεγαλύτεροι ρυθμοί δειγματοληψίας ανά ίχνος, απαιτούν μεγαλύτερα παράθυρα χρόνου καταγραφής W_t για τη συλλογή τους.

Συμπερασματικά η κεντρική συχνότητα f_c της κεραίας καθορίζει τον απαιτούμενο αριθμό δειγμάτων ώστε να έχει προσδιοριστεί επαρκώς η ανακλώμενη κυματομορφή.



Εικόνα 2.9 Αλληλοεπικάλυψη των μετρήσεων ανάλογα με τον διαφορετικό αριθμό δειγμάτων ανά τομή (*spatial sampling rate*). Το μαύρο τρίγωνο περιγράφει την ζώνη σκίασης (*shadow zone*), όπου δεν υπάρχουν καταγραφές (Goodman & Piro, 2013)

2.5.6 Υπέρθεση (*stacking*)

Η **υπέρθεση** (*stacking*) είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πλάτη των πολλαπλών καταγραφών αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους με στόχο την μείωση του τυχαίου θορύβου και την ανάδειξη των συχνοτήτων εκπομπής των στόχων.

Σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο η βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων επιτυγχάνεται με πολλαπλές καταγραφές, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο λόγος του σήματος ως προς το θόρυβο (*S/N ratio*) (Goodman, D. and Piro, S., 2013).

2.6 Συστήματα γεωραντάρ

Τα βασικά μέρη ενός τυπικού συστήματος γεωραντάρ είναι τα ακόλουθα (Jol, 2009):

1. Η **γεννήτρια** του σήματος (*pulse generator*).
2. Ο **πομπός εκπομπής** (*transmitting antenna Tx*) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ραδιοκύματα) τα οποία μπορούν να διεισδύσουν διά του υπεδάφους στον στόχο. Η κεραία πομπός μετασχηματίζει τα ηλεκτρικής τάσης σήματα σε εξωτερικά διαδιδόμενη ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

3. Ο **δέκτης** (*receiving antenna Rx*) που ανιχνεύει τα ανακλώμενα ηλεκτρομαγνητικά σήματα και τα μετασχηματίζει και καταγράφει την ηλεκτρική τάση.
4. Η **μονάδα ελέγχου** (*computer console*), καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων με δυνατότητες γραφικής απεικόνισης.

Τα συστήματα *γεωραντάρ* χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το αν η κεραία λειτουργεί και ως πομπός και ως δέκτης,

- a. σε **μοναστατικά** όταν ο πομπός είναι και δέκτης,
- b. σε **διστατικά** στην περίπτωση ξεχωριστών κεραίων.

Ανάλογα με το εάν η κεραία είναι εγκιβωτισμένη, μπορεί να είναι (βλ. εικ.2.10)

[1] **κλειστού** τύπου (*shielded*) ή

[2] **ανοιχτού** τύπου (*unshielded*).

Η συγκεκριμένη αρχή λειτουργίας επηρεάζει την εκπομπή του σήματος, καθώς στην προστατευμένη κεραία κλειστού τύπου το σήμα-παλμός εκπέμπεται με τη μορφή «**κώνου**», ενώ στην ανοιχτού τύπου κεραία ως «**ημισφαίριο**».



Εικόνα 2.10 Μονοστατικό, κλειστού (*shielded*) τύπου κεραία (αριστερά) και διστατικού, ανοιχτού (*unshielded*) τύπου κεραία (δεξιά)

Οι **ανοιχτού τύπου κεραίες** (*unshielded antennas*) είτε αποτελούνται από δύο ξεχωριστά τμήματα πομπού και δέκτη, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως για τους τύπους έρευνας *CMP* (*common mid point*), είτε είναι ενιαίες. Μειονέκτημα του ανοιχτού τύπου κεραίων, είναι ότι το σήμα εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να καταγράφονται και ανεπιθύμητοι στόχοι. Επομένως είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου υπάρχουν επιφανειακά εμπόδια (Neal, 2004; Robinson, M., *et al.*, 2013). Επομένως, όλες οι αντανakλάσεις στο ραδιογράφημα δεν προέρχονται απαραίτητα από τα χαρακτηριστικά του υπεδάφικου στόχου, αλλά και από επιφανειακά απευθείας κύματα.

Οι **κλειστού τύπου κεραίες** (*shielded antennas*) περικλείονται συνήθως από μεταλλικό κέλυφος το οποίο είναι θωρακισμένο, δρώντας ως προστατευτικό κάλυμμα για την εξάλειψη πιθανών εξωτερικών ανακλάσεων και την αποφυγή διάδοσης επιφανειακών κυμάτων. Τα εσωτερικά τοιχώματα των αγωγίμων αυτών κελυφών είναι επικαλυμμένα με απορροφητικό υλικό για την απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και την ελαχιστοποίηση ανεπιθύμητων εσωτερικών ανακλάσεων, εξασφαλίζοντας παράλληλα μέγιστη κατευθυντικότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προς το έδαφος.

Μια άλλη ταξινόμηση των συστημάτων *γεωραντάρ* είναι ανάλογα με το εάν λειτουργούν

- a. στο **πεδίο του χρόνου** (*time domain*) ή

b. στο **πεδίο των συχνοτήτων** (*frequency domain*).

Η πλειοψηφία των συστημάτων **γεωραντάρ** λειτουργεί στο **πεδίο του χρόνου** (*time domain*), όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μετάδοση διακριτών παλμών μικρής χρονικής διάρκειας (*nsec*) από έναν πομπό, με μία δεδομένη συχνότητα επανάληψης και τη καταγραφή του ανακλώμενου σήματος από τον δέκτη συναρτήσει του χρόνου καθυστέρησης.

Στα συστήματα **γεωραντάρ** τα οποία λειτουργούν στο **πεδίο των συχνοτήτων** (*frequency domain*), το σήμα μεταδίδεται ως ημιτονοειδές κύμα συνεχούς κυματομορφής και η απόκριση στο πεδίο του χρόνου μπορεί να ληφθεί μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού *Fourier*.

Υπάρχουν διάφοροι **τρόποι διάταξης πομπού-δέκτη** που χρησιμοποιούν τα διστατικά συστήματα **γεωραντάρ**, ανάλογα με τον σκοπό της έρευνας. Η τυπική διάταξη λειτουργίας για τη συλλογή δεδομένων είναι αυτή της **σταθερής απόστασης πομπού-δέκτη** ή ανάκλασης (*common offset, CO*), κατά την οποία ο πομπός (*Tx*) και ο δέκτης (*Rx*), βρίσκονται σε σταθερή πάντα απόσταση μεταξύ τους και μετακινούνται κατά μήκος μιας γραμμής σάρωσης (*profile line*) στην επιφάνεια του εδάφους συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την καταγραφή συνεχόμενων ανακλάσεων κατά μήκος του γραμμικού προφίλ. Μια άλλη κοινή διάταξη είναι αυτή του **κοινού μέσου σημείου ανάκλασης** (*common mid-point, CMP*). Κατά τη συλλογή δεδομένων με τη διάταξη αυτή, επιλέγεται στην επιφάνεια του εδάφους κάποιο σταθερό σημείο εκατέρωθεν του οποίου τοποθετούνται οι δύο ξεχωριστές κεραίες εκπομπής και λήψης. Οι κεραίες απομακρύνονται σταδιακά, μεταβάλλοντας τη μεταξύ τους απόσταση κατά μία καθορισμένη απόσταση, διατηρώντας ωστόσο κάθε φορά το κέντρο της διάταξης σταθερό. Τέλος, στην περίπτωση της διάταξης **ευρυγώνιας ανάκλασης και διάθλασης** (*Wide-Angle Reflection-Refraction, WARR*), η κεραία του πομπού παραμένει σταθερή σε μία συγκεκριμένη θέση και μόνο η κεραία του δέκτη απομακρύνεται από τον πομπό. Η διάταξη *WARR* εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση ανίχνευσης οριζόντιων υπεδάφικων δομών.

Ο **προσανατολισμός των κεραιών** αφορά τη σχετική θέση μεταξύ τους και σε σχέση με τη γραμμή μελέτης. Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στα GPR είναι ωμικές, διπολικές και ο προσανατολισμός τους καθίσταται σημαντικός για την επιτυχή έκβαση των μελετών. Η πιο συνηθισμένη διάταξη είναι αυτή κατά την οποία το ηλεκτρικό πεδίο πολώνεται παράλληλα με το μεγάλο άξονα των κεραιών (πομπού και δέκτη) και κάθετα ή παράλληλα με τη γραμμή μελέτης. Εάν οι κεραίες χρησιμοποιούν κυκλικά πολωμένο σήμα, ο προσανατολισμός των κεραιών είναι ασήμαντος.

2.7 Διεργασίες πεδίου – Επεξεργασία δεδομένων

Η διασκόπηση **γεωραντάρ** συνήθως περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Σχεδιασμός της διασκόπησης **γεωραντάρ**
2. Καθορισμός των παραμέτρων του συστήματος **γεωραντάρ** για τη λήψη των μετρήσεων
3. Λήψη μετρήσεων στο πεδίο
4. Ανάλυση δεδομένων και Παρουσίαση αποτελεσμάτων

2.7.1 Σχεδιασμός της διασκόπησης γεωραντάρ

Για το σχεδιασμό λήψης των δεδομένων, υπάρχουν δυο (2) ζητήματα τα οποία πρέπει να καθοριστούν:

- [1] Η μορφή και η γεωμετρία (αποστάσεις) του κανάβου των τομών, σε μόνο παράλληλες οδεύσεις ή και σε κάθετες, και
- [2] Η διεύθυνση των οδεύσεων, σε ίδια ή σε εναλλαγή κατεύθυνσης για εξοικονόμηση χρόνου (Goodman, D., Piro, S., 2013).

Η επιλογή εξαρτάται κυρίως από

- (α) την αναμενόμενη γεωμετρία και το βάθος του/των στόχου/στόχων,
- (β) την τοπογραφία της περιοχής,
- (γ) το στάδιο της μελέτης (προκαταρκτική ή κύρια) και
- (δ) τον διαθέσιμο χρόνο για την λήψη των μετρήσεων (διάρκεια ενεργειακής αυτονομίας συστήματος γεωραντάρ).

2.7.2 Καθορισμός των παραμέτρων του συστήματος γεωραντάρ για τη λήψη μετρήσεων.

Οι παράμετροι αφορούν τη συσκευή του GPR και τον τρόπο που εκπέμπει και λαμβάνει το σήμα. Συνήθως οι ρυθμίσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν αφορούν:

- i. Την **κεντρική συχνότητα του πομπού** (f_c)
- ii. Τη **συχνότητα δειγματοληψίας του ληφθέντος σήματος** (f_s)
- iii. Το **παράθυρο του χρόνου καταγραφής** του ηλεκτρομαγνητικού παλμού (W_t)
- iv. Την **απόσταση των ιχνών** (Δx_s)
- v. Τον **αριθμό των υπερθέσεων** (Stacking)

Αναλυτικότερα,

- i. Αφορά την καλύτερη επιλογή κεραίας σε σχέση με τον τύπο του στόχου που θέλουμε να εντοπίσουμε και το πιθανό του βάθος. Κεραίες υψηλών συχνοτήτων ($>400\text{MHz}$) έχουν πολύ καλή διακριτική ικανότητα, αλλά το σήμα αποσβένεται γρήγορα, ενώ κεραίες πιο χαμηλών συχνοτήτων ($<250\text{MHz}$) μπορούν να διεισδύσουν βαθύτερα αλλά με μικρότερη διακριτική ικανότητα.
- ii. Ως **συχνότητα δειγματοληψίας** (f_s) ορίζεται το αντίστροφο της περιόδου δειγματοληψίας (T_s) και δηλώνει πόσα δείγματα από το σήμα, λαμβάνονται ανά ns. Η ψηφιακή καταγραφή του ληφθέντος σήματος πρέπει να ακολουθεί τα κριτήρια του θεωρήματος *Shannon-Nyquist* όπου περιγράφονται στη σχέση 2.43. Η δειγματοληψία με συχνότητα χαμηλότερη από την επιτρεπτή, παραμορφώνει το σήμα, χάνοντας τις υψηλές συχνότητες και αναδιπλώνοντας κάποιες (*aliasing*). Ο ρυθμός δειγματοληψίας που προτιμάται, πρέπει να υπακούει την παρακάτω εξίσωση,

$$f_s = a * 2 * f_{max} > 2 * f_{max} \quad (2.43)$$

όπου, a είναι ο συντελεστή ασφαλείας και καθορίζεται από την ταχύτητα και τον όγκο των δεδομένων συγκριτικά με την ποιότητα των δεδομένων.

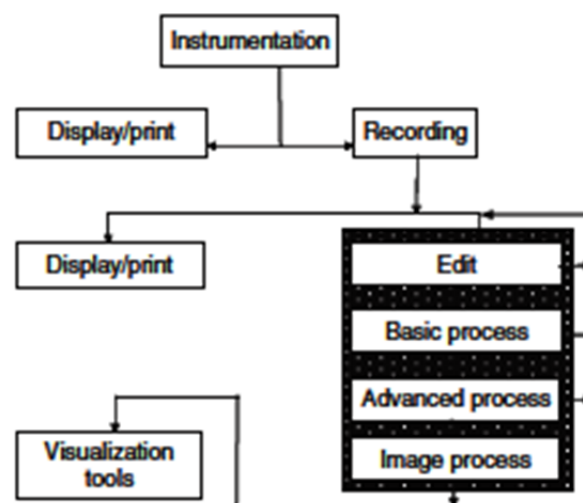
- iii. Το **παράθυρο του χρόνου καταγραφής** (W_t) του ηλεκτρομαγνητικού παλμού όπου υπολογίζεται ως συνάρτηση του επιθυμητού βάθους διασκόπησης (*depth*) και της ταχύτητας του παλμού στο μέσο διάδοσης (v).
- iv. Η τέταρτη παράμετρος αφορά τη διακριτική ικανότητα στην καταγραφή στο χώρο, δηλαδή την οριζόντια απόσταση των ιχνών (*traces*). Όσο πιο πυκνή είναι η καταγραφή τόσο καλύτερη ανάλυση (*resolution*) θα έχει το ραδιογράφημα, αλλά ο όγκος των δεδομένων αυξάνεται κατακόρυφα.
- v. Η τελευταία παράμετρος της **υπέρθεσης** (*stacking*) αφορά τον αριθμό των δειγμάτων που θα ληφθούν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο λόγος του σήματος ως προς το θόρυβο (*signal to noise ratio*) με σκοπό να αναδειχθούν οι στόχοι ευκρινέστερα.

2.7.3 Λήψη μετρήσεων στο πεδίο

Για την λήψη μετρήσεων στο πεδίο πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εξής παράγοντες: η τοπογραφία της περιοχής, οι καιρικές συνθήκες και το ποσοστό εδαφικής υγρασίας. Η περιοχή από πλευράς τοπογραφίας πρέπει να είναι σχετικά ποσβάσιμη, χωρίς έντονες τοπογραφικές ανωμαλίες. Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο δυσχεραίνει την λήψη μετρήσεων και την επεξεργασία - χωροθέτηση των αποτελεσμάτων. Οι μετρήσεις πεδίου εξαρτώνται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες κάτω από τις οποίες θα πραγματοποιηθούν, η υπερβολική ζέστη θα δημιουργήσει πρόβλημα υπερθέρμανσης στον εξοπλισμό καταγραφής, ενώ η υψηλή εδαφική υγρασία οδηγεί σε απόσβεση σήματος.

2.7.4 Ανάλυση δεδομένων και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Μια τυπική διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων GPR παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11 Η ροή επεξεργασίας των δεδομένων GPR (Jol, 2009).

Τα κύρια στάδια επεξεργασίας ομοιάζουν κατά πολύ με εκείνα της διασκόπησης της σεισμικής ανάκλασης και αποτελούνται από:

- I. Την αρχική επεξεργασία (*Data Editing*),
- II. Τη βασική επεξεργασία (*Basic Processing*),

- III. Την προηγμένη επεξεργασία (*Advanced Data Processing*),
- IV. Τη διδιάστατη και τριδιάστατη απεικόνιση (*2D & 3D Interpretation*).

Η ροή επεξεργασίας των δεδομένων είναι μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία, η οποία αρχικά εφαρμόζεται και ελέγχεται σε ένα μέρος των δεδομένων και εν συνεχεία σε όλο τον όγκο των μετρήσεων (βλ. εικ. 2.11).

I. Αρχική επεξεργασία (Data Editing)

Από τη στιγμή καταγραφής των δεδομένων, το πρώτο στάδιο επεξεργασίας είναι ιδιαίτερα βασικό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον τρόπο απόκτησης των δεδομένων όπου δεν επιδέχεται σφάλματα, παραλείψεις και πλεονασμούς δεδομένων. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει βήματα όπως αναδιοργάνωση δεδομένων, συγχωνεύσεις αρχείων, επικεφαλίδες και ανανέωση του ιστορικού, τοποθέτηση σε πραγματικές συντεταγμένες των μετρήσεων.

Όλα τα παραπάνω μοιάζουν με ασήμαντη διαδικασία, που όμως αποκτά ιδιαίτερη σημασία μπροστά στον μεγάλο όγκο δεδομένων. Πολλά από τα δεδομένα του ιστορικού των τομών όπως οι ρυθμοί δειγματοληψίας, οι γεωγραφικές συντεταγμένες και το υψόμετρο είναι ιδιαίτερα σημαντικές πληροφορίες, που θα χρειαστούν στα παρακάτω βήματα επεξεργασίας.

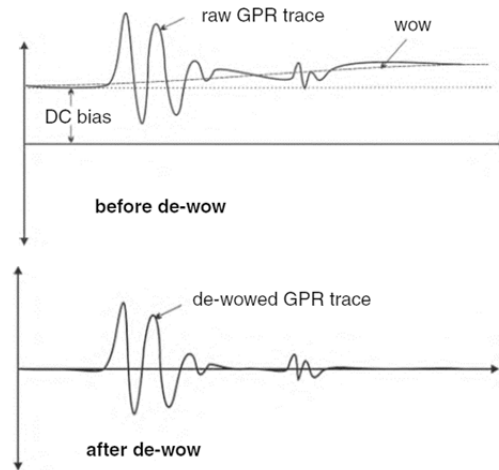
II. Βασική επεξεργασία (Basic Processing)

Σκοπός της βασικής επεξεργασίας είναι να πραγματοποιηθούν τα απαραίτητα εκείνα βήματα, έτσι ώστε το τελικό προϊόν επεξεργασίας να είναι αποδεκτό για την αρχική ερμηνεία και αξιολόγηση. Στις περισσότερες των περιπτώσεων αυτού του τύπου η επεξεργασία εφαρμόζεται κατά την διάρκεια λήψης των μετρήσεων έτσι ώστε να προβληθούν οι καταγραφές.

Αποτελείται από τα παρακάτω στάδια επεξεργασίας:

Απομάκρυνση αρχικού χαμηλού συχνοτικού περιεχομένου (dewow)

Αφορά τη διαδικασία απομάκρυνσης του πλάτους της συχνότητας DC (wow component) ή της ανοδικής τάσης (trend) χαμηλών συχνοτήτων (βλ. εικ. 2.12). Οι πολύ χαμηλές συχνότητες σχετίζονται είτε με επαγωγικά φαινόμενα είτε με τους περιορισμούς λήψης των μετρήσεων λόγω του οργάνου. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από τις αφίξεις των απευθείας κυμάτων. Η απομάκρυνση του πλάτους στη συχνότητα μηδέν γίνεται στο πεδίο των συχνοτήτων, με τον διακριτό μετασχηματισμό *Fourier* και την απλή αφαίρεση του πρώτου όρου της σειράς. Η αφαίρεση της ανοδικής τάσης (trend) πραγματοποιείται με τον υπολογισμό και την αφαίρεση αυτής (detrend). Πρόκειται για ένα βασικό βήμα με την χρήση αναλογικών φίλτρων (Gerlitz *et al.*, 1993), καθώς τοποθετεί το ίχνος στην πραγματική του θέση



Εικόνα 2. 12 Σχηματική αναπαράσταση επίδρασης της διαδικασίας *dewow* στο ίχνος (Cassidy, 2009)

Διόρθωση και αναγωγή στο χρόνο μηδέν (time-zero correction)

Όταν η κεραία του GPR δεν είναι σε πλήρη επαφή με την επιφάνεια του εδάφους, προκαλείται μετατόπιση στην καταγραφή των αφίξεων λόγω του στρώματος αέρα που μεσολαβεί. Η μετατόπιση αυτή μπορεί να είναι ακόμα και της τάξης των 10 ns. Αυτό το στάδιο επεξεργασίας είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς τοποθετεί την άφιξη των πρώτων ανακλώμενων κυμάτων στον πραγματικό χρόνο άφιξής τους και επιδρά στην χωροθέτηση των στόχων με το βάθος. Για την αναγωγή στο χρόνο μηδέν υπάρχουν τρεις κοινώς αποδεκτές περιπτώσεις αναγωγής (α) στο πρώτο σημείο καμπής του ίχνους, (β) στο πρώτο θετικό λοβό (αν πρόκειται για διεπιφάνεια αέρα-εδάφους) και (γ) μεταξύ του πρώτου θετικού και του πρώτου αρνητικού λοβού, στο σημείο όπου μηδενίζεται η τιμή του πλάτους (Yelf, R., 2004).

Χωρικό φίλτρο αφαίρεσης θορύβου (background removal)

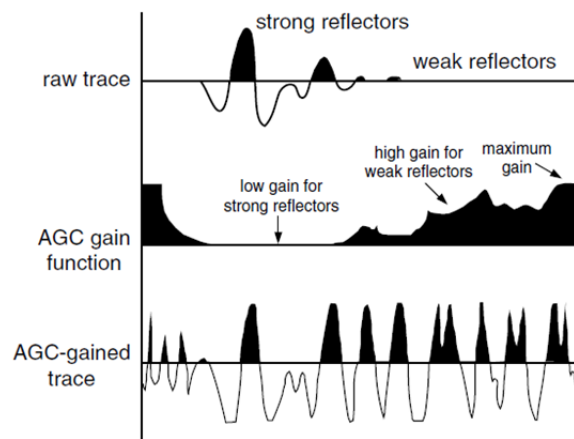
Ένα άλλο εργαλείο επεξεργασίας των δεδομένων που χρησιμοποιείται για την βελτίωση του καταγραφέντος σήματος είναι αυτό του **χωρικού φίλτρου αφαίρεσης θορύβου (background removal)**. Πρόκειται για τη διαδικασία αφαίρεσης ενός μέσου ίχνους, που προκύπτει πρόσθεση όλων των πλατών των ιχνών και εν συνεχεία διαιρείται με τον αριθμό αυτών (Neal, *et al.*, 2004). Η διαδικασία αυτή δημιουργεί μια «καθαρότερη» καταγραφή, καθώς αφαιρεί τις πιθανές αντηχήσεις που έχουν καλύψει τις καταγραφές χαμηλής **έντασης** (Conyers, 2013) Ουσιαστικά αφαιρεί τις **οριζόντιες ζώνες (horizontal bands)** που παρατηρούνται στην αρχική καταγραφή και που προέρχονται κυρίως από την αλληλεπίδραση πομπού-δέκτη και την άφιξη των πρώτων κυμάτων. Ωστόσο, επειδή το **χωρικό φίλτρο** ενεργεί κατά μήκος του άξονα της απόστασης και πρόκειται για την αφαίρεση της υπολογισθείσας μέσης τιμής από όλα τα ίχνη, θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή καθώς μπορεί να καταστρέψει πραγματικές ανακλάσεις από επίπεδες επιφάνειες (Conyers, 2013).

Ενίσχυση σήματος (gain)

Βασικό βήμα επεξεργασίας είναι η επιλογή του τύπου ενίσχυσης του σήματος, ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στο πλάτος της **έντασης** που αποτυπώνεται στο τελικό επεξεργασμένο **ραδιογράφημα (radargram, B-scan)**, και

αποφεύγοντας την δημιουργία τεχνουργημάτων (*artifacts*). Το βήμα αυτό είναι ιδιαίτερα υποκειμενικό. Βασικό στάδιο-κριτήριο για την επιλογή του τύπου ενίσχυσης είναι εξέταση της απομείωσης της **έντασης** του σήματος σε σχέση με το χρόνο. Αυτό μπορεί να γίνει είτε για κάθε ίχνος ξεχωριστά, είτε κατά μήκος όλης της τομής. Ωστόσο η δεύτερη επιλογή είναι σαφώς πιο χρήσιμη και κοινός αποδεκτή. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι ενίσχυσης, όπου επιλέγονται από τον ερευνητή με γνώμονα την πιστότητα των ληφθέντων δεδομένων και το τι θέλει να παρουσιάσει.

Δυο βασικοί τύποι ενίσχυσης σήματος είναι το AGC (*Automatic Gain Control*)(βλ. εικ. 2.13) και το SEC (*Spherical and Exponential Compensation gain*).

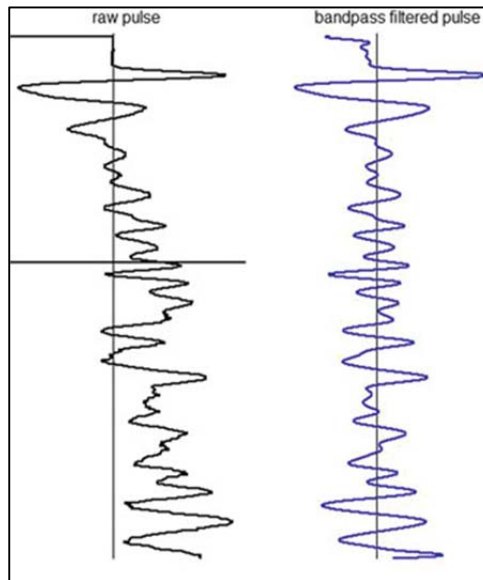


Εικόνα 2.13 Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του φίλτρου AGC Gain σε ένα ίχνος (Everett M.E., 2013)

Φιλτράρισμα (*bandpass filtering*)

Άλλο ένα κοινό βήμα επεξεργασίας είναι αυτό του **φιλτραρίσματος** (Woodward *et al.*, 2003). Περιλαμβάνει κατακόρυφα φίλτρα που ονομάζονται **φίλτρα ζώνης διέλευσης** (*band-pass filter*) (βλ. εικ. 2.14) και χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν τον ανώμαλο θόρυβο χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων (Neal, 2004; Conyers, 2013).

Οι **χαμηλές** συχνότητες αφαιρούνται καθώς παράγονται από το ίδιο το σύστημα του γεωραντάρ (***high-pass filter***) και οι **υψηλές** συχνότητες καθώς είναι αποτέλεσμα εξωτερικών παραγόντων (***low-pass filter***). Πρόκειται λοιπόν για μια διαδικασία στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου το ίχνος που λαμβάνεται μετασχηματίζεται, μέσω **μετασχηματισμού Fourier** (***Fast Fourier Transformation - FFT***) στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου αποκόπτονται οι ανεπιθύμητες συχνότητες των ιχνών μέσα από τον καθορισμό συγκεκριμένου παραθύρου αποκοπής.



Εικόνα 2.14 Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του φίλτρου *bandpass* σε ένα ίχνος (Goodman & Piro, 2013)

III. Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας (advanced data processing)

Σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας, η κρίση του ερευνητή και η εμπειρία του είναι καθοριστικής σημασίας καθώς η επιλογή και χρήση των παρακάτω σταδίων επεξεργασίας επιδρά δραστικά στα αρχικά δεδομένα και προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα.

Προσθήκη λευκού θορύβου στο φάσμα (spectral whitening)

Η προσθήκη λευκού θορύβου στο κάθε ίχνος επιτρέπει την αντιστάθμιση της εξασθένησης της συχνότητας σε σχέση με το χρόνο. Ο σκοπός του φίλτρου είναι να τονιστεί το φάσμα για δεδομένη συχνοτική ζώνη, για αυτό και πρέπει να ορίζεται ως παράμετρος από τον ερευνητή, η αρχική και τελική συχνότητα όπου θα εφαρμόζεται το φίλτρο. Το φίλτρο έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει τα συνολικά πλάτη, διατηρώντας τα χαρακτηριστικά εύρους (bandwidth) του αρχικού ίχνους. Θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμο, εάν εφαρμοστεί σε προηγούμενο στάδιο επεξεργασίας πριν τη διαδικασία της *προγνωστικής αποσυνέλιξης (predictive deconvolution)*, καθώς σταθεροποιεί το σήμα σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.

Αποσυνέλιξη (deconvolution)

Σκοπός της *αποσυνέλιξης* είναι η μεγιστοποίηση του εύρους ζώνης (bandwidth) και η μείωση της διασποράς του σήματος (Todeschuck *et. al.*, 1992; Turner, 1992). Ιδανικά στο τελικό αποτέλεσμα της καταγραφής του ραδιογραφήματος καταγράφεται η συνέλιξη της συνάρτησης ανάκλασης, από την διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών και του εκπεμπόμενου παλμού από την πηγή μαζί με τον θόρυβο. Ωστόσο στις περισσότερες των περιπτώσεων στο τελικό ραδιογράφημα, παρατηρούνται καταγραφές, λόγω πολλαπλών ανακλάσεων στον ίδιο ανακλαστήρα, αλλά και άλλων δευτερευουσών ανακλάσεων. Καθώς ο παλμός του GPR είναι ιδιαίτερα βραχύς και συμπίεσμένος για δεδομένο εύρος ζώνης (bandwidth) και για το λόγο σήματος

προς θόρυβο (S/N), η χρήση της *προγνωστικής αποσυνέλιξης* είναι ευεργετική μόνο σε περιπτώσεις όπου έχουμε φαινόμενα *αντήχησης* (εξωτερικής ή συστήματος).

Με τη διαδικασία της *προγνωστικής αποσυνέλιξης*, εφαρμόζεται το *φίλτρο Wiener*, το οποίο επιδρά πάνω στην καταγραφή και στοχεύει στο να προσεγγίσει όσο το δυνατόν καλύτερα τη *συνάρτηση ανάκλασης* καταστέλλοντας τις πολλαπλές ανακλάσεις. Η *συνάρτηση ανάκλασης* είναι ουσιαστικά μια χρονικά μετατοπισμένη έκδοση της αρχικής καταγραφής. Το μήκος της *συνάρτησης αυτοσυσχέτισης* δεν μπορεί να υπερβαίνει το μισό του μήκους ίχνους και η υστέρηση πρέπει να είναι μικρότερη από το μήκος της *συνάρτησης αυτοσυσχέτισης*. Κατά τη διαδικασία της *αποσυνέλιξης (deconvolution)*, το *φίλτρο Wiener* επιδρά επάνω στο σήμα που προκύπτει από την *αυτοσυσχέτιση*, έτσι ώστε το σήμα να απαλλαχτεί από φαινόμενα *αντήχησης*.

Μετανάστευση ιχνών (migration)

Η **μετανάστευση (migration)** της ληφθείσας καταγραφής, αποτελεί ένα είδος χωρικής αποσυνέλιξης (Fisher *et al.*, 1992) και χρησιμοποιείται για την σωστότερη τοποθέτηση των εντάσεων του ραδιογραφήματος σε σχέση με το βάθος (Conyers, 2013). Είναι μία διαδικασία απεικόνισης των δεδομένων στην αρχική τους θέση, η οποία παρέχει ακριβέστερη εικόνα των στόχων εντός του υπεδάφους (Lehmann, F. and Green, A.G., 2000).

Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής έχει ως αποτέλεσμα την εστίαση της δέσμης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκπέμπεται από τον πομπό σε κωνική μορφή, με βάση την ταχύτητα που έχουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσα στο μέσο διάδοσης. Όσο πιο προσεκτικά επιλέγεται η ταχύτητα διάδοσης του EM παλμού μέσα στο μέσο, τόσο πιο ακριβής θα είναι η τοποθέτηση των στόχων σε σχέση με το βάθος. Καθώς οι πλευρικές και κατακόρυφες αλλαγές στην ταχύτητα είναι αναπόφευκτες, είναι πολύ πιθανόν μια λαθεμένη επιλογή ταχύτητας να οδηγήσει σε θολά ή παραμορφωμένα ραδιογραφήματα.

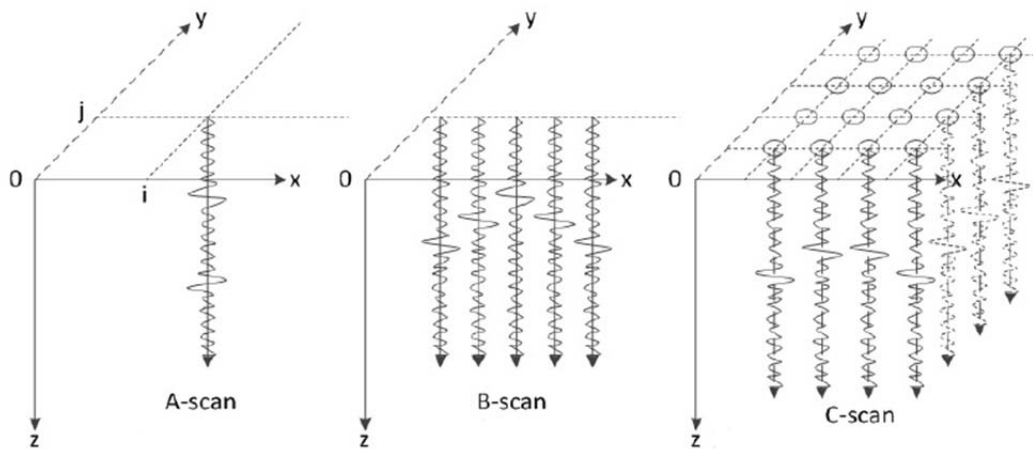
Μετασχηματισμός Hilbert (envelope)

Με τον **μετασχηματισμό Hilbert**, η χρονοσειρά του σήματος καταγραφής αποσυνελλίσσεται σε δύο χρονοσειρές, μια φανταστική και μια πραγματική, στις οποίες μπορεί να εκτιμηθεί σε οποιοδήποτε σημείο τους, η συχνότητα και η περιβάλλουσα (*envelope*) (White, 1991). Το πλεονέκτημα της παρουσίας των αποτελεσμάτων, ύστερα από την εφαρμογή αυτού του φίλτρου, είναι η ευκολότερη χωρική αποτύπωσή τους.

IV. Διδιάστατη και Τριδιάστατη παρουσίαση αποτελεσμάτων (2D - 3D Interpretation)

Τα δεδομένα των μετρήσεων γεωραντάρ μπορούν να παρουσιαστούν με διάφορους τρόπους, με κυριότερους αυτούς των **μονοδιάστατων ιχνών**, των **διδιάστατων τομών** και των **τριδιάστατων αναπαραστάσεων** (Annan, 2009; Conyers, 2013), οι οποίοι με βάση την ορολογία της ακουστικής μπορούν να επονομαστούν αντιστοίχως ως (βλ. εικ. 2.15-2.16):

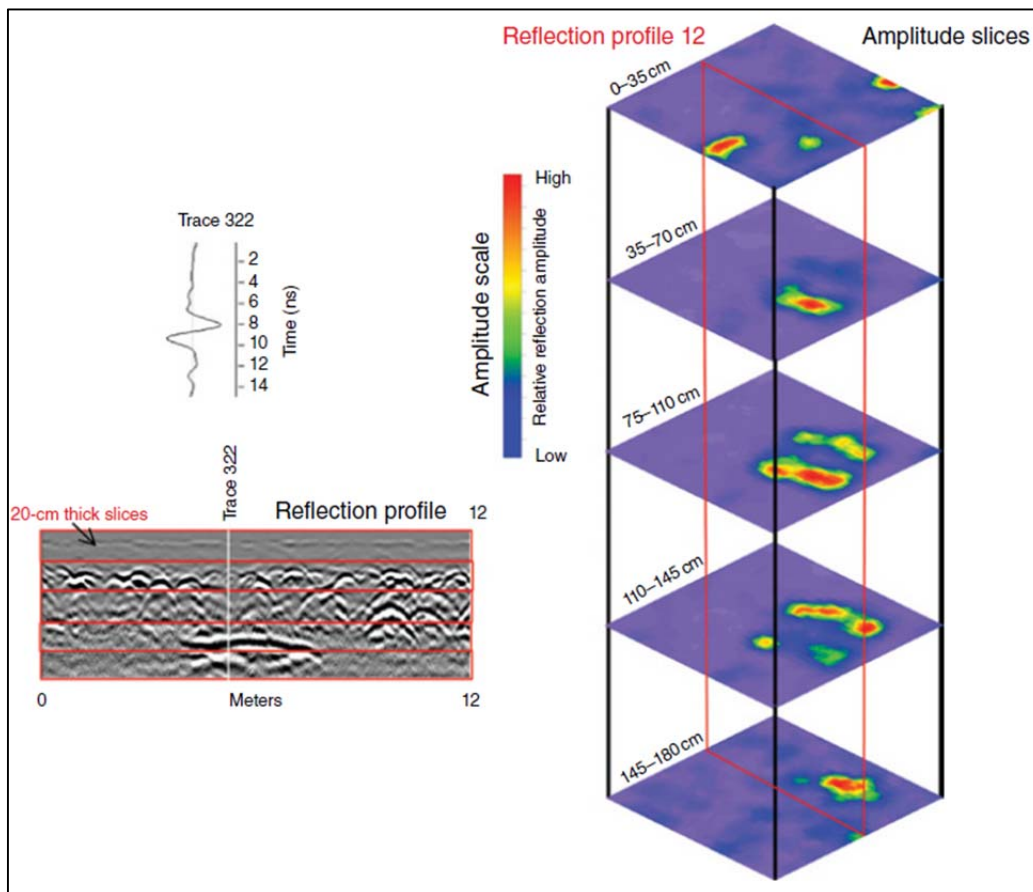
- i. **σάρωση τύπου A (A-scan)** - απεικόνιση εύρους (*Amplitude scan*)
- ii. **σάρωση τύπου B (B-scan)** - απεικόνιση φωτεινότητας (*Brightness scan*)
- iii. **σάρωση τύπου C (C-scan)** - απεικόνιση αντίθεσης (*Contrast scan*) - χάρτες όγκων σε σχέση με το βάθος/χρόνο (*Volume/depth slices*).



Εικόνα 2. 15 Τρόποι παρουσίασης των αποτελεσμάτων επεξεργασίας δεδομένων διασκόπησης γεωραντάρ (Conyers, 2013)

Τα **μονοδιάστατα ίχνη** (*A-scan*) αναφέρονται σε ένα μοναδικό σημείο στην επιφάνεια, που αναπαριστά το *εύρος του σήματος* (*amplitude*) συναρτήσει του χρόνου διπλής διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που αντιστοιχεί σε βάθος. Στον οριζόντιο άξονα καταγράφεται η ένταση και πολικότητα του σήματος και στον κατακόρυφο ο χρόνος.

Οι **διδιάστατες τομές** (*B-scan*) προκύπτουν από τα επιμέρους μονοδιάστατα ίχνη (*A-scans*) που συλλέγονται κατά μήκος της διαδρομής της κεραίας. Τα ληφθέντα δεδομένα μπορούν να απεικονιστούν μέσω της χρήσης μίας προκαθορισμένης χρωματικής κλίμακας, αντιστοιχίζοντας την ισχύ του καταγεγραμμένου σήματος με συγκεκριμένη απόχρωση της παλέτας που έχει επιλεγεί. Η εικόνα αυτή, η οποία αναφέρεται και ως **ραδιογράφημα** (*radargram, B-scan*), αναπαριστά μία κάθετη διατομή στο έδαφος, όπου ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στη θέση της κεραίας κατά μήκος της σάρωσης (απόσταση) και ο κατακόρυφος άξονας στο χρόνο της διπλής διαδρομής ηλεκτρομαγνητικού κύματος που αντιστοιχεί σε βάθος.



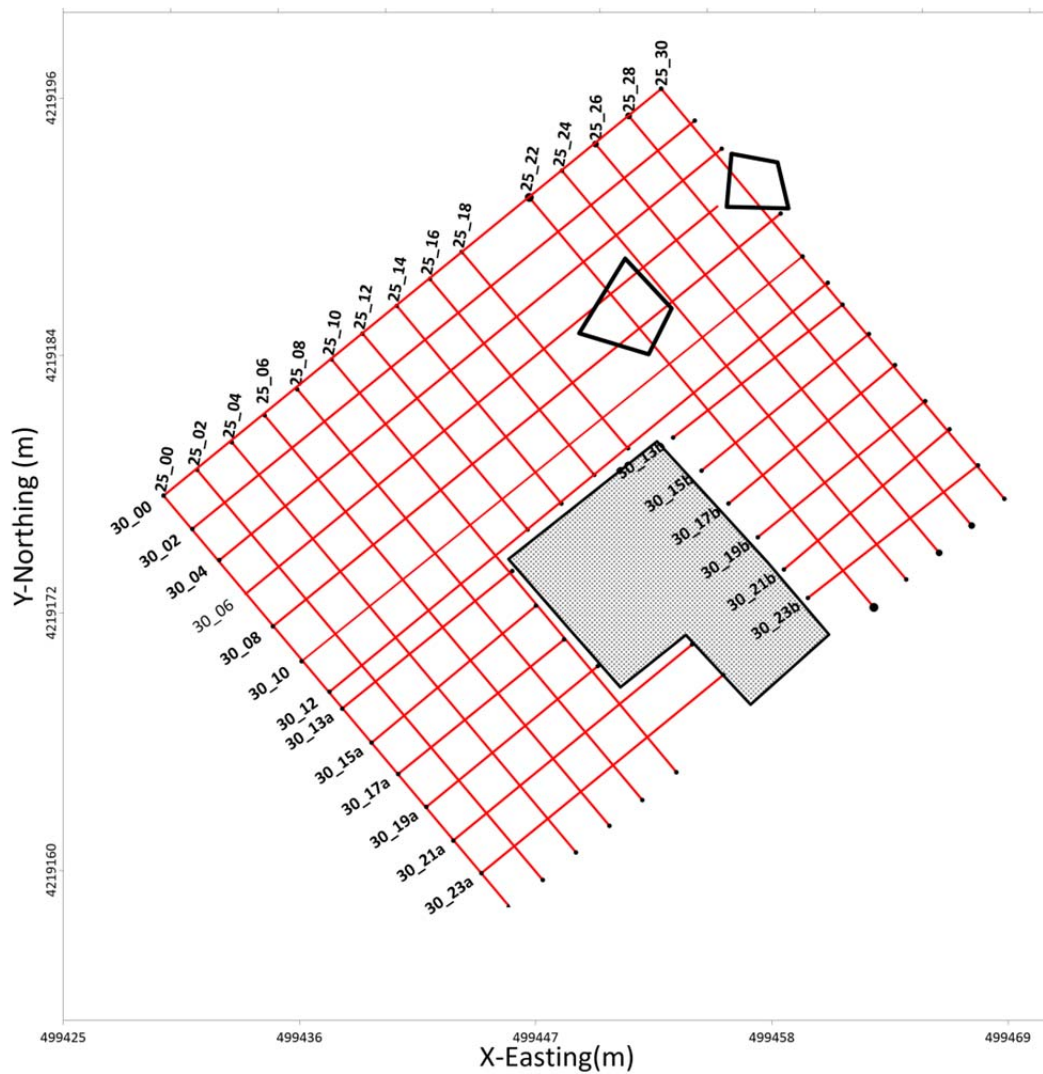
Εικόνα 2.16 Στην εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής GPR, ξεκινώντας από μεμονωμένα ίχνη (*A-scan*), σε προφίλ ανάκλασης (*B-scan*), σε χάρτης όγκων σε σχέση με το βάθος/χρόνο (*Volume/depth slices*) (Conyers, 2013)

Οι **τριδιάστατες απεικονίσεις (*C-scan*)** παράγονται, από την συλλογή πολλαπλών παράλληλων διδιάστατων τομών (*B-scan*) υπό τη μορφή **πλέγματος (*fence diagram*)**. Για την απεικόνιση 3D αποτελεσμάτων, απαιτείται η χρήση κατάλληλα σχεδιασμένου κανάβου μετρήσεων, έτσι ώστε να συλλεχθεί ο απαραίτητος αριθμός μετρήσεων, που θα δημιουργήσει την τριδιάστατη απεικόνιση με όσον το δυνατό λιγότερη αβεβαιότητα και χωρίς τον φόβο δημιουργίας τεχνουργμάτων (*artifacts*).

Καλύτερα αποτελέσματα στην 3D-απεικόνιση επιτυγχάνονται όταν προηγουμένως έχουν εφαρμοστεί τα φίλτρα της μετανάστευσης (*migration*) και του μετασχηματισμού Hilbert (*envelope*).

2.8 Διασκόπηση γεωραντάρ στον αρχαιολογικό χώρο

Στο στάδιο προκαταρκτικής έρευνας πραγματοποιήθηκε αραιή δειγματοληψία η οποία ήταν χρήσιμη ώστε να καθοριστεί η γενική εικόνα των πιθανών στόχων ως προς τη θέση τους. Σε δεύτερο στάδιο και με βάση τις διαστάσεις των αναμενόμενων στόχων και της τοπογραφίας της περιοχής, θεωρήθηκε ιδανική η περίπτωση καταγραφής τομών σε διάταξη κανάβου, διαστάσεων 2 x 2 m (βλ. εικ. 2.17), έτσι ώστε να ληφθούν αξιόπιστα τριδιάστατα δεδομένα (*C-scan*).



Εικόνα 2.17 Χάρτης των ηλεκτρομαγνητικών τομών GPR. Οι περιγεγραμμένες περιοχές, αποτυπώνουν δέντρα που βρίσκονταν στην περιοχή μελέτης.

Με βάση το γεγονός ότι υπήρχε ήδη αρχαιολογικό όρυγμα-σκάμμα με αποκαλυφθέντες αρχαιολογικούς στόχους, κατέστη εφικτό να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των στόχων.

Αυτό είναι το γεγονός που καθόρισε και την απόσταση καταγραφής μεταξύ των ιχνών (*spatial sampling rate* Δx_s), αλλά και την απόσταση του πλέγματος των τομών – ραδιογραφημάτων (*B-scan*). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν **34 τομές γεωραντάρ, συνολικού μήκους 610 m** (βλ. εικ. 2.17 και 2.18).



Εικόνα 2.18 Στιγμιότυπα από την λήψη μετρήσεων GPR.

Χρησιμοποιήθηκε το μονοστατικό σύστημα της εταιρείας MALÅ Geoscience, εξοπλισμένο με θωρακισμένη (*shielded*) κεραία 250 MHz.

Για τη ρύθμιση των παραμέτρων (βλ. Πίνακα 2.2) λήψης μετρήσεων του γεωραντάρ, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Ground Vision* της ίδιας εταιρείας.

Πίνακας 2.2 Ρυθμίσεις παραμέτρων διασκόπησης γεωραντάρ.	
Κεντρική συχνότητα κεραίας γεωραντάρ (<i>central frequency antenna f_c</i>)	250 MHz
Συχνότητα δειγματοληψίας καταγραφής (<i>sampling frequency f_s</i>)	2611 MHz
Αριθμός δειγμάτων ανά ίχνος (<i>time sampling rate Δt_s</i>)	512
Απόσταση καταγραφής μεταξύ ίχνων (<i>spatial sampling rate Δx_s</i>)	0.02 m
Παράθυρο καταγραφής (<i>time window W_t</i>)	196 ns
Σώρευση (<i>stacking</i>)	16

Οι παραπάνω ρυθμίσεις είχαν ως στόχο να μεγιστοποιηθεί ο λόγος του σήματος ως προς το θόρυβο (*signal to noise ratio*) και να δοθεί έμφαση στα επίμονα σήματα.

2.8.1 Επεξεργασία ραδιογραφήματων (*radargram, B-scan*)

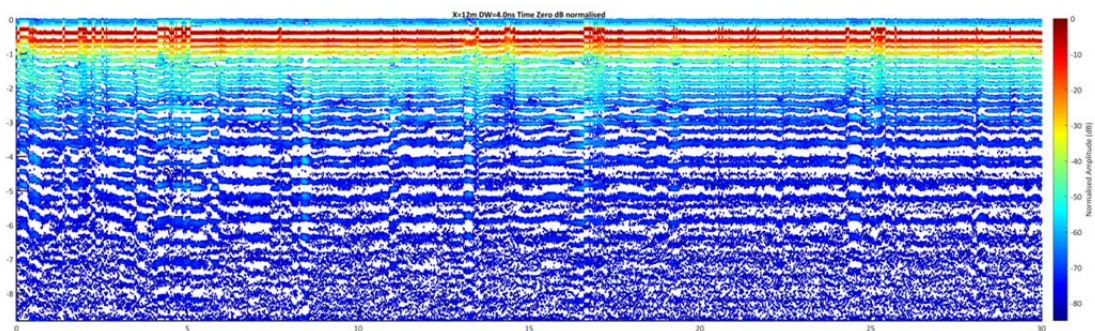
Η συγκεκριμένη ενότητα περιγράφει την αλληλουχία των βημάτων επεξεργασίας, μετά την λήψη των μετρήσεων, που πραγματοποιήθηκε για τα ληφθέντα ραδιογραφήματα (B-scan) χρησιμοποιώντας το λογισμικό *ReflexW ver7.5.8* (*Sandmeier Scientific Software*).

Subtract-mean (dewow)

Το φίλτρο λειτουργεί ανεξάρτητα σε κάθε ίχνος (*A-scan*). Με την χρήση αυτού του φίλτρου (βλ. εικ. 2.19), αφαιρείται το πλάτος συχνότητας DC (DC-bias) καθώς και η ανοδική τάση (*trend-wow*). Ως παράμετρος του φίλτρου καθορίστηκε το παράθυρο καταγραφής (W_t) των 4 ns.

Time-zero correction

Η διόρθωση αυτή επιτρέπει την επανατοποθέτηση της θέσης του πρώτου παλμού που εισήλθε στο υπέδαφος (βλ. εικ. 2.19). Στη συγκεκριμένη εργασία, υιοθετήθηκε η άποψη ότι ο χρόνος μηδέν ταυτίζεται με το πρώτο σημείο του ίχνους που έχει θετικό λοβό στα πρώτα 10 ns καταγραφής του κάθε ίχνους (*A-scan*).



Εικόνα 2.19 Ραδιογράφημα (*B-scan*) μετά από την απομάκρυνση του χαμηλού συχνοτικού περιεχομένου (*dewow*) & τη διόρθωση στο χρόνο μηδέν (*time zero correction*)

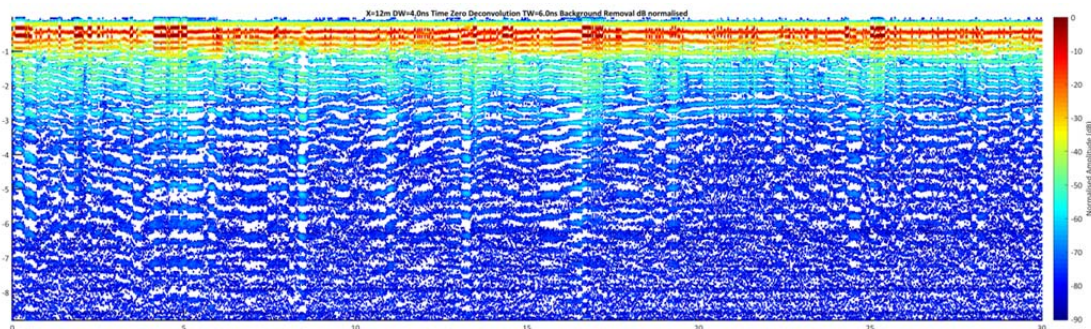
Background removal

Πρόκειται για τη διαδικασία (βλ. εικ. 2.20) αφαίρεσης ενός μέσου ίχνους που προκύπτει από όλα τα ίχνη (*B-scan*) και έχει σκοπό να αφαιρέσει τον τυχαίο θόρυβο από τα δεδομένα.

Bandpass filter

Χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τον ανώμαλο θόρυβο χαμηλών (*low-pass filter*) και υψηλών συχνοτήτων (*high-pass filter*). Το φίλτρο χαρακτηρίζεται από 4 συχνότητες

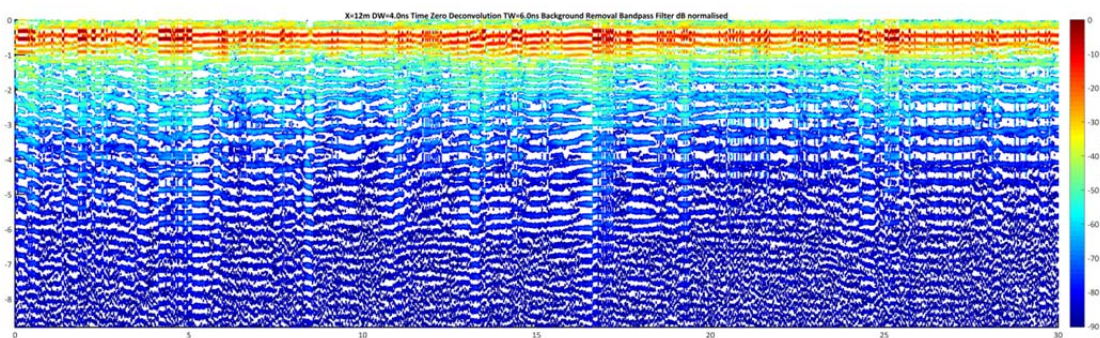
($f_{c1}, 0, f_{p1}, f_{p2}, f_{c2}$) και αφαιρεί όλες τις τιμές πάνω και κάτω από τις συχνότητες f_{c1} και f_{c2} σε κάθε ίχνος (*A-scan*) ξεχωριστά. Για τη συγκεκριμένη έρευνα, το εύρος του φίλτρου καθορίστηκε στα 100 MHz – 400 MHz (βλ. εικ. 2.20).



Εικόνα 2.20 Ραδιογράφημα (*B-scan*) μετά από τη χρήση χωρικού φίλτρου αφαίρεση θορύβου (*background removal*) και φιλτραρίσματος συχνοτήτων μεσοπερατού φίλτρου (*bandpass filtering*).

Spectral Whitening και Deconvolution

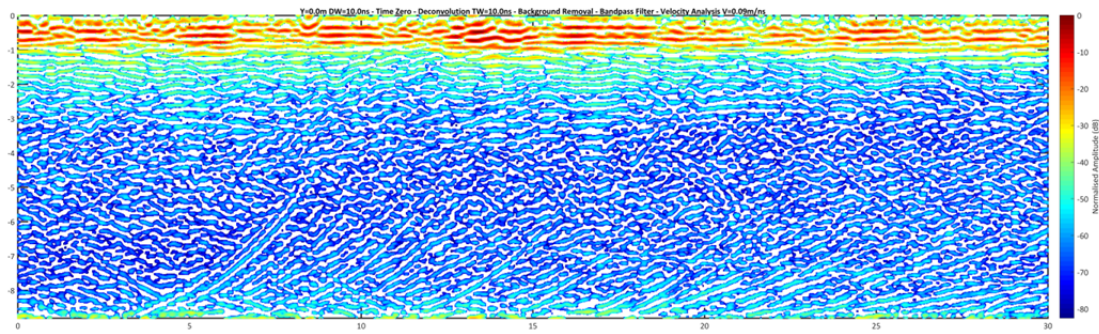
Το **φίλτρο *Spectral Whitening*** λειτουργεί ανεξάρτητα σε κάθε ίχνος (*A-scan*). Η προσθήκη λευκού θορύβου (*white noise*) στο κάθε ίχνος επιτρέπει την αντιστάθμιση της εξασθένισης συχνότητας με το χρόνο και εφαρμόζεται για να σταθεροποιήσει την διαδικασία της αποσυνέλιξης (*deconvolution*). Το φίλτρο *deconvolution* εφαρμόζεται και αυτό σε κάθε ίχνος (*A-scan*) ξεχωριστά (βλ. εικ. 2.21). Αναλυτικότερα, εφαρμόζεται το **φίλτρο *Wiener*** και στοχεύει στο να προσεγγίσει όσο το δυνατόν καλύτερα τη **συνάρτηση ανάκλασης**, καταστέλλοντας τις πολλαπλές και δευτερεύουσες ανακλάσεις. Το μήκος της **συνάρτησης αυτοσυσχέτισης** δεν μπορεί να υπερβαίνει το 1/2 του μήκους ίχνους. Η **υστέρηση (*lag*)** πρέπει να είναι μικρότερη από το μήκος της **συνάρτησης αυτοσυσχέτισης**. Για τη συγκεκριμένη εργασία, επελέγη **μήκος φίλτρου 6 ns** και **χρονική καθυστέρηση (*lag*) ίση με 2 ns**.



Εικόνα 2.21 Ραδιογράφημα (*B-scan*) μετά από την προσθήκη λευκού θορύβου (*white noise*) στο φάσμα (*spectral whitening*) και μετά από αποσυνέλιξη (*predictive deconvolution*).

Migration

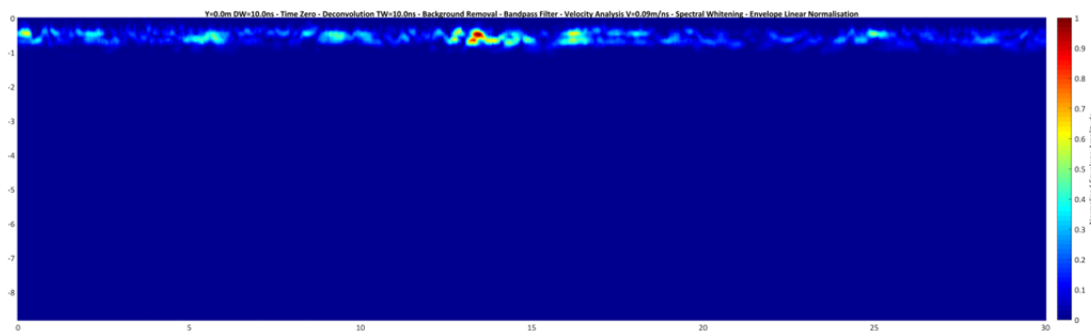
Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής έχει ως αποτέλεσμα την εστίαση της δέσμης των ΗΜ κυμάτων που εκπέμπεται από τον πομπό σε κωνική μορφή, με βάση την ταχύτητα που έχουν τα ΗΜ κύματα μέσα στο μέσο διάδοσης. Στην παρούσα επεξεργασία επελέγη ***Kirchhoff migration*** (βλ. εικ. 2.22) **με ταχύτητα διάδοσης 0.09 m/ns, λόγω της αργυλικής σύστασης του υπεδάφους**.



Εικόνα 2. 22 Ραδιογράφημα (*B-scan*) μετά από τη μετανάστευση ιχνών (*migration*), έγινε χρήση της επιλογής *Kirchhoff migration* με ταχύτητα 0,09m/ns.

Hilbert transformation - envelope

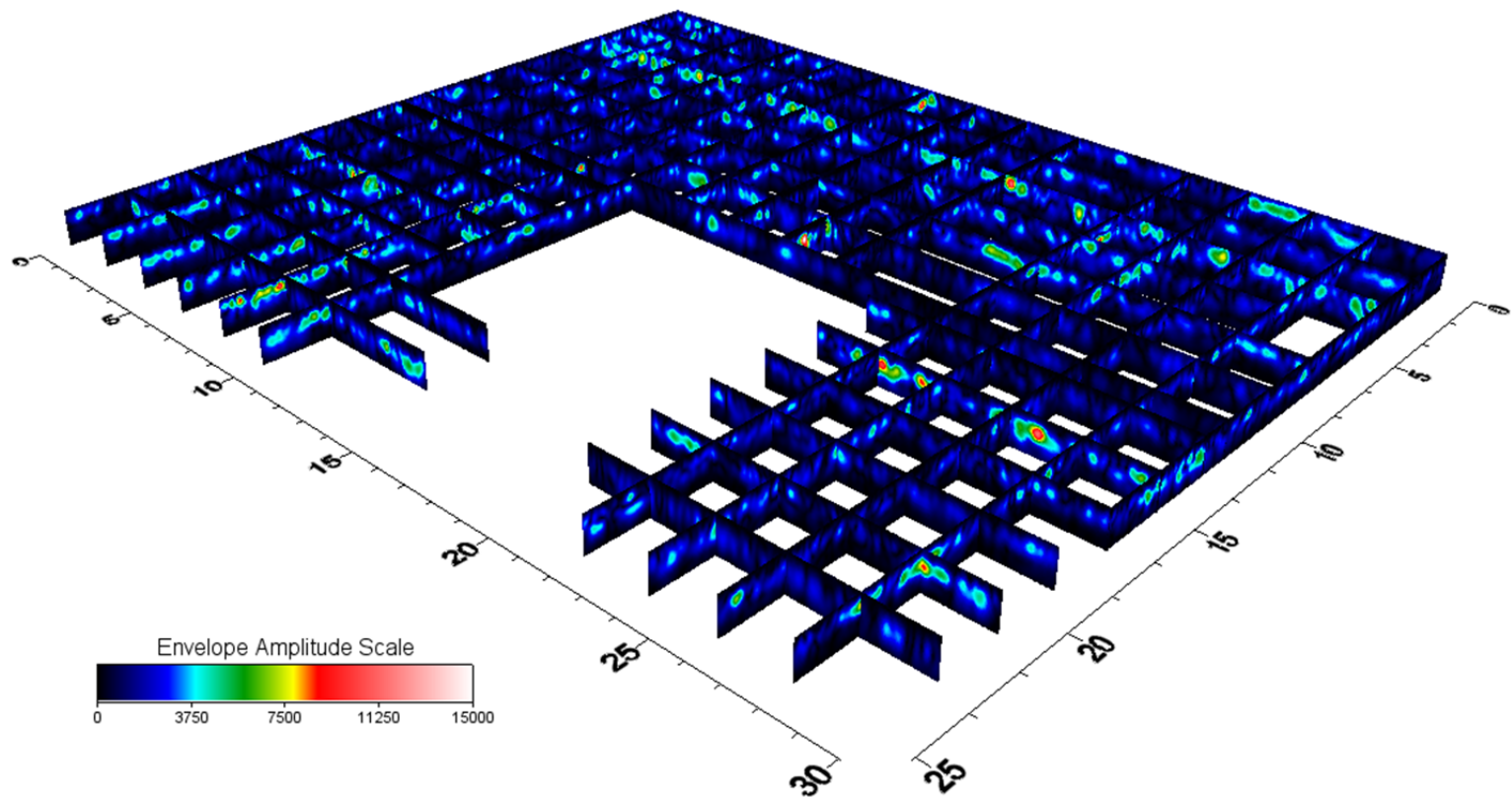
Το φίλτρο εφαρμόστηκε καθώς δίνει πλεονέκτημα στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και καθιστά ευκολότερη τη χωρική τους αποτύπωση (βλ. εικ. 2.23).



Εικόνα 2. 23 Ραδιογράφημα (*B-scan*) μετά από την χρήση του φίλτρου *Hilbert*.

Όλα τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των ραδιογραφημάτων (*B-scan*) παρατίθενται στο **Παράρτημα 1**.

Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων στο χώρο έρευνας, επιλέγει η 3D απεικόνιση σε μορφή *fence diagram* (βλ εικ. 2.24), όλων των ραδιογραφημάτων (*B-scan*) της περιοχής που μελετήθηκε.



Εικόνα 2. 24 Τριδιάστατη απεικόνιση του πλέγματος των ραδιογραφημάτων, με την μορφή *fence diagram*.

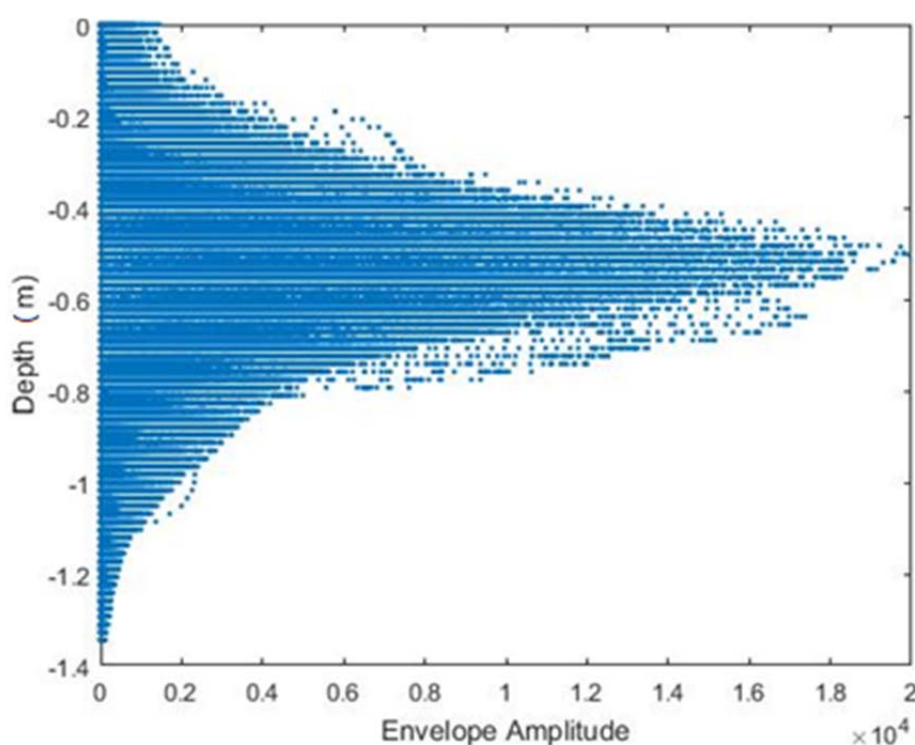
2.8.2 Οριζοντιογραφίες Όγκου/Βάθους (*Volume/Depth Slices*)

Το στάδιο αυτό επεξεργασίας είναι χρονοβόρο και απαιτεί σύστημα υψηλής υπολογιστικής ισχύος, καθώς ο όγκος των μετρήσεων είναι ιδιαίτερα μεγάλος.

Σε αυτό υπολογίζεται και κατασκευάζεται το διάγραμμα της κατανομής της **έντασης ανάκλασης (*Amp*)** σε σχέση με το βάθος. Η δημιουργία τέτοιων απεικονίσεων, έχει το πλεονέκτημα, την εξαγωγή και την σύνθεση της χωρικής πληροφορίας στο σύνολο της περιοχής έρευνας, η οποία πιθανόν να μην είναι εύκολα ανιχνεύσιμη και εμφανής στα μεμονωμένα ραδιογραφήματα (B-scan). Αποτελεί μια διαδικασία επεξεργασίας και ερμηνείας, που ακολουθείται από την διεθνή επιστημονική κοινότητα, στην διασκόπηση γεωραντάρ και ιδιαίτερα στην αρχαιολογία (Imposa S. et al., 2018; Lowe K. M. et al., 2018; Wenke Zhao et al., 2015; Porsani J.L. et al., 2010).

Για την επεξεργασία των τριδιάστατων οριζοντιογραφιών όγκου/βάθους (*volume/depth slices*), δημιουργήθηκε κώδικας στο λογισμικό MATLAB και πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες:

- Όλα τα αποτελέσματα της μεθόδου (*X, Y, Z, Amp*) συγκεντρώθηκαν και κατασκευάστηκε το γράφημα της Εικόνας 2.25. Στο γράφημα αποτυπώνεται η κατανομή της **έντασης (*Amp*)** όλων των μοναδιαίων κυψελίδων του ημιχώρου σε σχέση με το βάθος που παρουσιάζουν όλα τα δεδομένα (συνολικά 2.574.768 τιμές), με σκοπό την καλύτερη επιλογή των ορίων βάθους/όγκου.



Εικόνα 2.25 Διάγραμμα κατανομής της **έντασης ανάκλασης (*envelope amplitude*)**, σε σχέση με το βάθος. Στο διάγραμμα περιλαμβάνονται 2.574.768 τιμές.

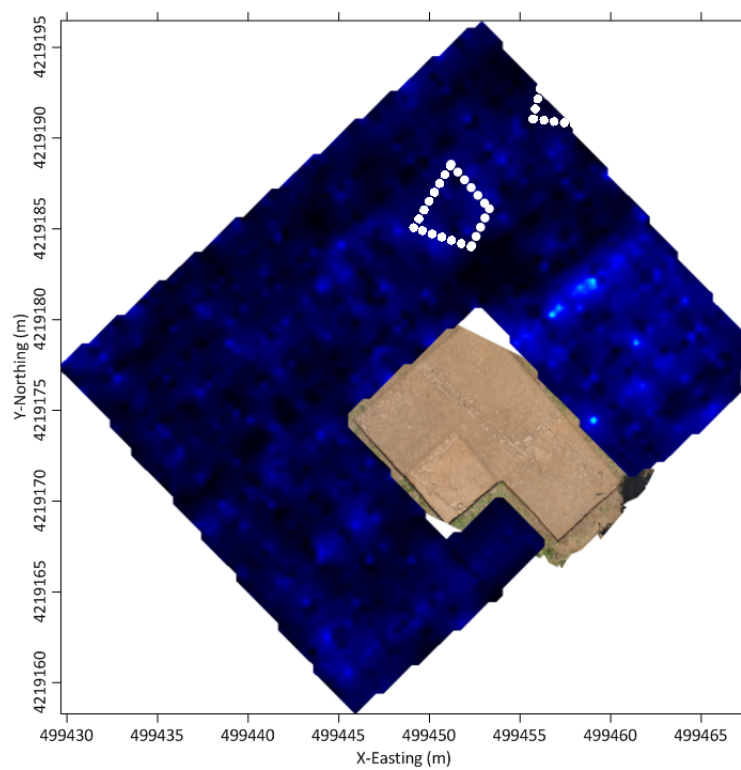
- Από την κατανομή που προέκυψε στο διάγραμμα (βλ. εικ. 2.25), διαπιστώνεται ότι **οι μέγιστες τιμές έντασης** (*envelope amplitude*) **τοποθετούνται μεταξύ των 20 cm και 80 cm**. Αυτό συνάδει με το βάθος των στόχων που έχουν ανακαλυφθεί στο ανασκαφέν τμήμα της περιοχής μελέτης. Πέραν του βάθους αυτού, **δεν** φαίνεται να αναγνωρίζεται κάποιος στόχος.
- Από την διαπίστωση αυτή, επελέγησαν οι όγκοι μεταξύ των βαθών **15-25 cm, 25-35 cm, 35-45 cm, 45-55 cm, 55-65 cm, 65-75 cm** και **75-85 cm** (βλ. εικ. 2.33).
- Με αλγοριθμική διαδικασία στο περιβάλλον MATLAB απομονώθηκαν τα δεδομένα *X, Y, Z, έντασης ανάκλασης (Amp)* που αντιστοιχούν στους παραπάνω καθορισμένους όγκους, και
- Τέλος, με την χρήση του λογισμικού Surfer, κατασκευάστηκαν, οι **οριζοντιογραφίες όγκου/βάθους** (*volume/depth slices*) των Εικόνων 2.26, 2.27 ... έως και 2.32.

Οι οριζοντιογραφίες όγκου/βάθους των εικόνων αυτών, κατασκευάστηκαν:

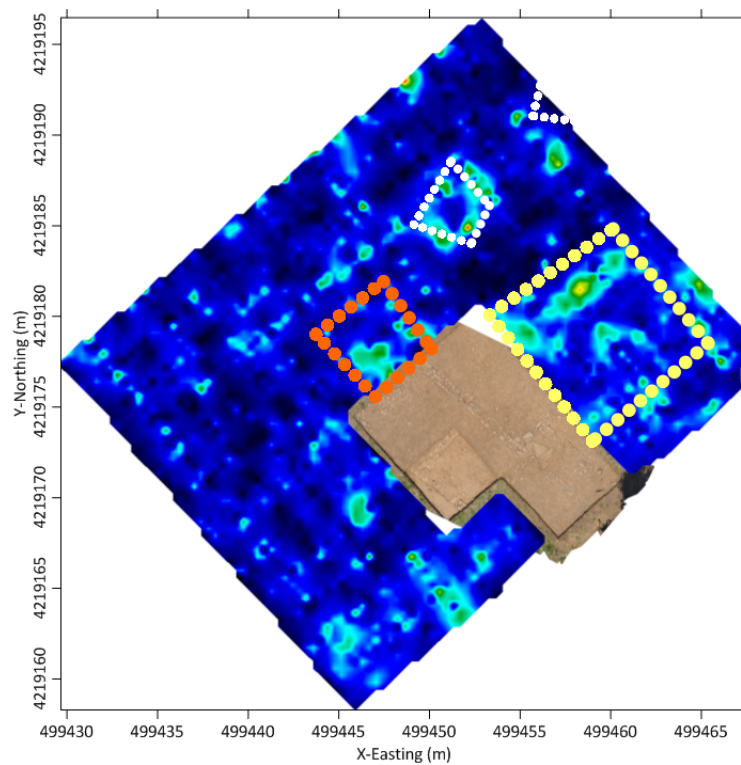
- [1] Επιλέγοντας τη **μέγιστη** (*max filter data*) **τιμή έντασης** (*Amp*) σε κάθε θέση (*X, Y*) της περιοχής έρευνας, για το συγκεκριμένο όγκο/βάθος.
- [2] Με την ίδια χρωματική κλίμακα, προκειμένου να γίνει ευχερέστερη η αξιολόγησή τους. Οι περιοχές με **θερμά χρώματα** αντιπροσωπεύουν ανακλάσεις (μέγιστα πλάτη ιχνών) που προέρχονται από **πιθανούς θαμμένους στόχους**.
- [3] Σημειώνοντας με **λευκή εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** την παρουσία **δύο (2) δένδρων** στην περιοχή μελέτης. Για την παρουσία τους και τη σχέση του **ριζικού τους συστήματος** με τους υπεδαφικούς στόχους **υψηλής τιμής έντασης**, θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο **Κεφάλαιο 4**

Παρατηρώντας τις επτά (7) οριζοντιογραφίες επισημαίνονται :

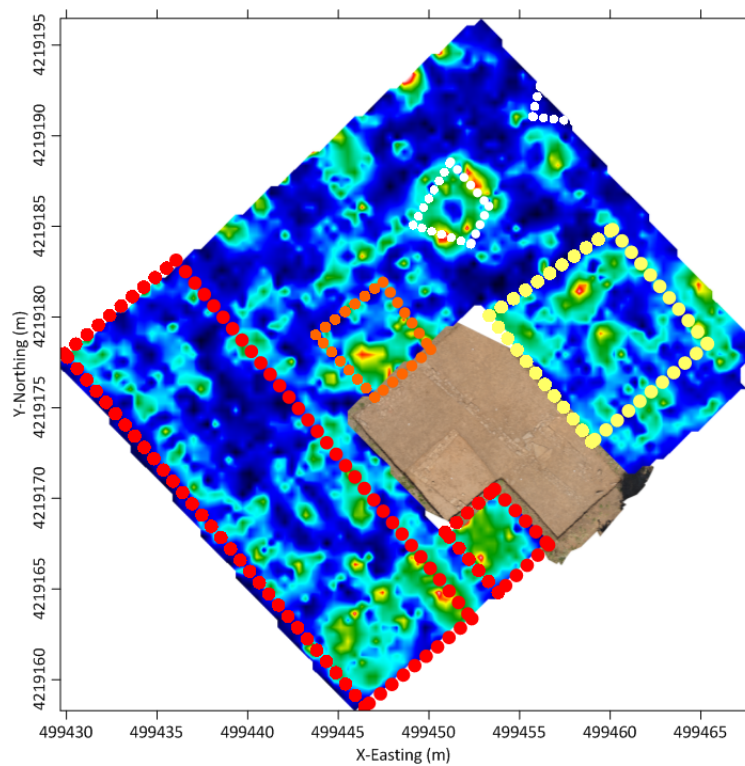
- Υπεδαφικοί στόχοι φαίνεται να διερευνώνται σε εκείνες των **35-45 cm** (βλ. εικ. 2.28) και **45-55 cm** (βλ. εικ. 2.29),
- Σε αυτές κυριαρχεί μία επιμήκης περιοχή, μεγάλης έκτασης και με γραμμικότητα διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ και μία μικρότερη, τετραγωνική, στο ΝΔ τμήμα. Οι δύο (2) αυτές περιοχές σημειώνονται με **κόκκινη εστιγμένη πολυγωνική γραμμή**.
- Στις ίδιες οριζοντιογραφίες σημειώνεται με **πορτοκαλί εστιγμένη πολυγωνική γραμμή**, μία περιοχή στο κεντρικό τμήμα της περιοχής που μάλλον αποτελεί προέκταση ήδη ανακαλυφθέντος τοιχίου.
- Με **κίτρινη εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** οριοθετείται μία σχεδόν τετράγωνη περιοχή στο ΒΑ τμήμα, η οποία φαίνεται να παρουσιάζει ενδιαφέρον λαμβάνοντας υπόψη τα ήδη αποκαλυφθέντα τοιχία.
- Τέλος, η **λευκή εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** που σημειώνει τις θέσεις των δύο δένδρων, φαίνεται να οριοθετεί την περιοχή των δύο δένδρων, με τις μεγάλες εντάσεις στις διαδοχικές οριζοντιογραφίες. Οι υψηλές αυτές τιμές αποδίδονται σε ανακλάσεις από το ριζικό σύστημα των δύο ελαιόδεντρων.



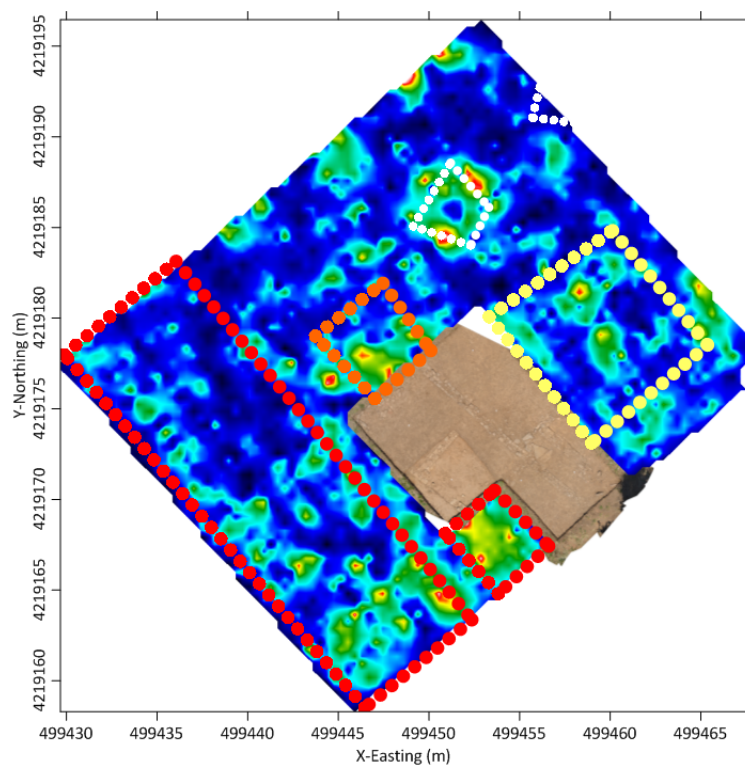
Εικόνα 2.26 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 15-25 cm.



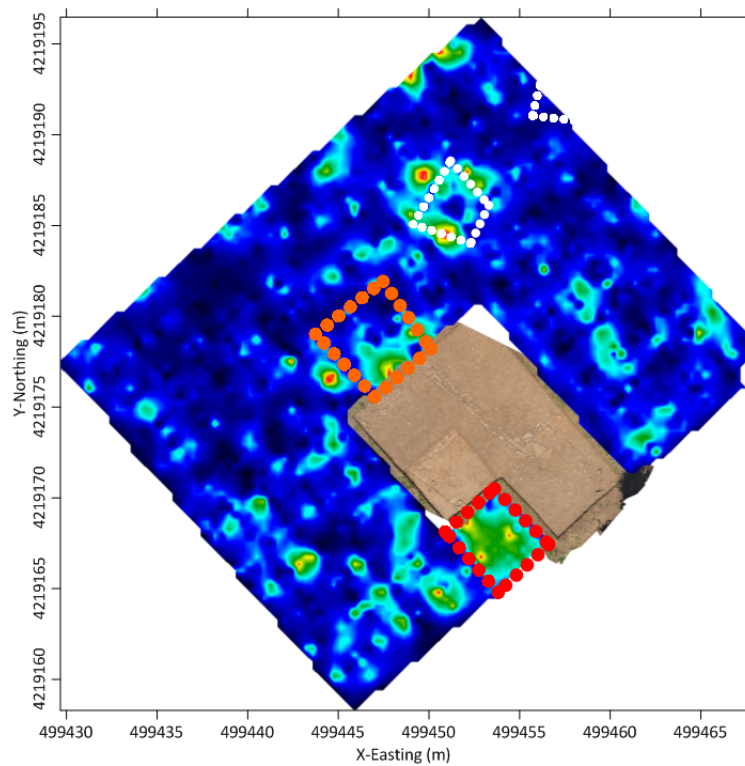
Εικόνα 2.27 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 25-35 cm.



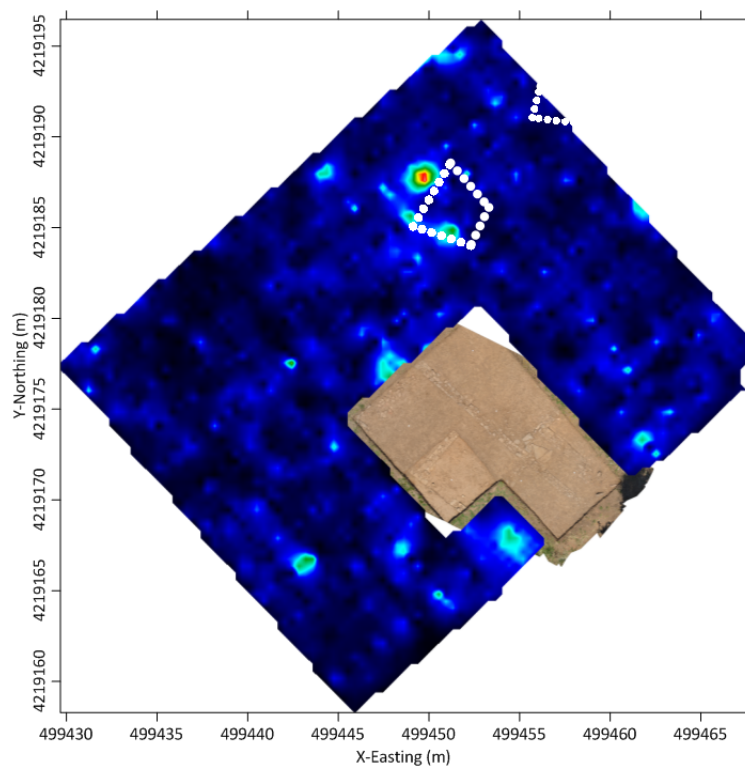
Εικόνα 2.28 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 35-45 cm.



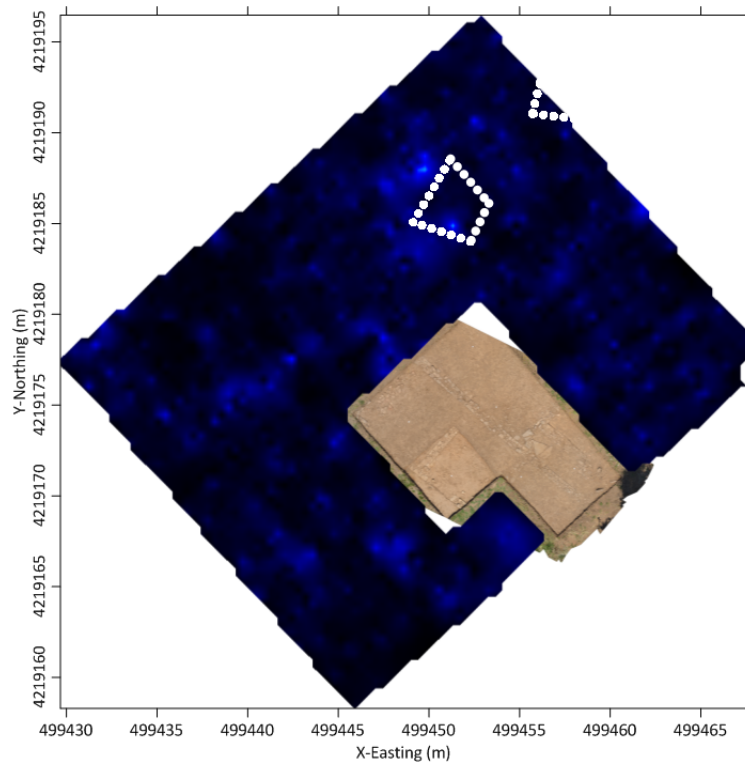
Εικόνα 2.29 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 45-55 cm.



Εικόνα 2.30 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 55-65 cm.

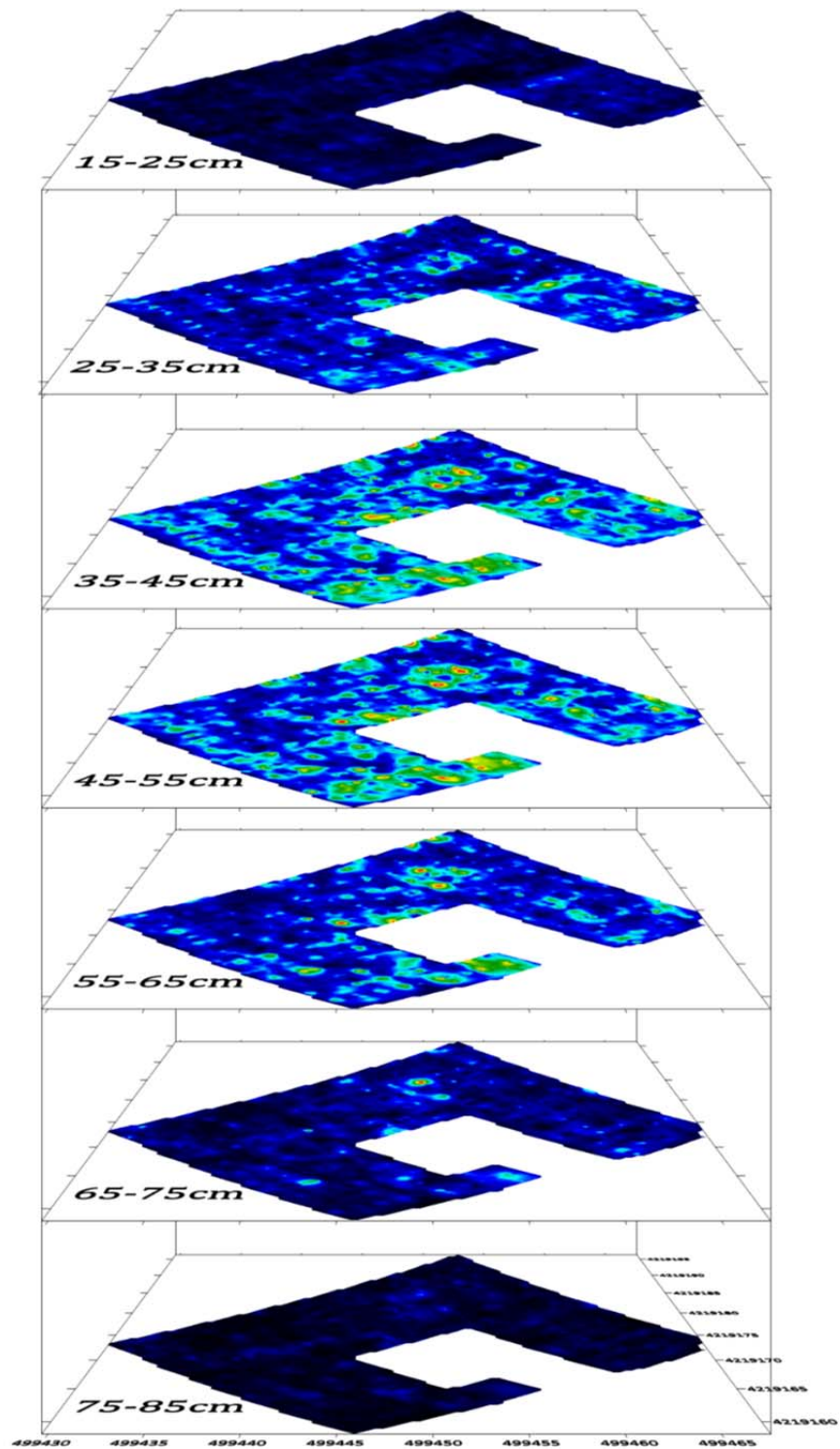


Εικόνα 2.31 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 65-75 cm.



Εικόνα 2.32 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 75-85 cm.

Στην Εικόνα 2.33 παρουσιάζονται όλες οι οριζοντιογραφίες σε ψευδο-3D απεικόνιση, προκειμένου να αναδειχθεί καλύτερα η μεταβολή των τιμών έντασης (*envelope amplitude*) των οριζοντιογραφιών όγκου/βάθους, σε σχέση με το βάθος.



Εικόνα 2.33 Ψευδο-3D απεικόνιση οριζοντιογραφιών όγκου/βάθους των τιμών έντασης (envelope amplitude).

3. Γεωηλεκτρική διασκόπηση

Η γεωηλεκτρική μέθοδος εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1912 από τον Conrad Schlumberger. Η τεχνική βασίζεται στη διέλευση ελεγχόμενου συνεχούς ή χαμηλής συχνότητας (μικρότερης των 5Hz) εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω δυο μεταλλικών πασσάλων (ηλεκτρόδια ρεύματος) και την ταυτόχρονη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μέσω δύο άλλων μεταλλικών πασσάλων (ηλεκτρόδια δυναμικού). Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού επιτρέπει τον υπολογισμό της **ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ)**, διαμέσου της **ωμικής αντίστασης (R)**.

Με την παραπάνω διαδικασία και εναλλάσσοντας (αυξάνοντας) τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, εκτελείται η κατακόρυφη (*vertical*) διερεύνηση της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, πραγματοποιώντας την **γεωηλεκτρική βαθοσκόπηση** (*Vertical Electrical Sounding – VES*)

Η τεχνική της **γεωηλεκτρικής τομογραφικής διασκόπησης** (*Electrical Resistivity Tomography - ERT*) αποσκοπεί στη διερεύνηση της πλευρικής κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος. Αποτελεί μία υψηλής διακριτικής ικανότητας τεχνική (*high resolution technique*), η οποία απαιτεί ειδικό γεωηλεκτρικό εξοπλισμό, ικανό προσωπικό και αρκετό χρόνο εφαρμογής της στο πεδίο. Επιπλέον απαιτεί τοπογραφική αποτύπωση των θέσεων δειγματοληψίας, καθώς η διαδικασία επεξεργασία επιβάλλει τοπογραφική διόρθωση των αποτελεσμάτων. Όλα αυτά καθιστούν τη μέθοδο κοστοβόρα, εστιασμένης και εξειδικευμένης εφαρμογής, ικανή να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά σε 2D την πλευρική ανομοιογένεια σε σχετικά μικρά βάθη (<50 m) και αξιόπιστη στη διερεύνηση γεωπεριβαλλοντικών, γεωτεχνικών, κ.ά. προβλημάτων.

Οι εφαρμογές της γεωηλεκτρικής τομογραφίας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα διαφόρων επιστημονικών πεδίων. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στη διερεύνηση πολύπλοκων υπεδάφικών συνθηκών, είτε σε αμιγώς γεωλογικές εφαρμογές, είτε σε τεχνικής φύσεως προβλήματα. Ενδεικτικά παρατίθενται ορισμένα παραδείγματα, όπως ο προσδιορισμός μικρού πάχους καλύμματος μεταλλικών ιζημάτων και του συμπαγούς υποβάθρου, ο προσδιορισμός ενεργών νεοτεκτονικών ζωνών, ο προσδιορισμός υδροφόρων οριζόντων και η διαφοροποίηση γλυκού και αλμυρού νερού (μέτωπα υφαλμύρισης), η διερεύνηση για τη θεμελίωση τεχνικών εργασιών και έργων υψηλής σπουδαιότητας (φράγματα, γέφυρες, κ.ά.), η εφαρμογή στην αρχαιολογία, κ.λπ.

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί, στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς, με τρεις τρόπους: (a) ηλεκτρονικά (ωμικά), (b) ηλεκτρολυτικά και (c) διηλεκτρικά. Ο πρώτος τρόπος είναι και ο πλέον συνηθισμένος σε υλικά που έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως είναι τα μέταλλα. Ηλεκτρολυτικά, το ρεύμα μεταφέρεται από τα ιόντα, τα οποία όμως μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό. Τέλος, διηλεκτρικά μεταδίδεται το ρεύμα σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές, στους οποίους οι ελεύθεροι φορείς είναι ελάχιστοι έως και μηδενικοί.

Γενικά, σε γεωλογικά περιβάλλοντα, ο τρόπος διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος είναι εκείνος της ηλεκτρονικής – ωμικής μετάδοσης.

Όταν στα άκρα ενός σώματος με ηλεκτρική αντίσταση R , εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού V , τότε αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα εντάσεως I που δίνεται από τον **Νόμος του Ohm** από τη σχέση:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.1)$$

Η **ηλεκτρική ειδική αντίσταση, ρ** , (*resistivity*) του υλικού, είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητά του, που μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (3.2)$$

όπου, A σε m^2 , L σε m και υπολογίζεται σε $\Omega m.m$.

Η **ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, σ** , (*conductivity*) είναι το αντίστροφο μέγεθος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των γεω-υλικών εξαρτάται από:

- Το πορώδες. Η έλλειψη πόρων σημαίνει συμπαγής σχηματισμός με υψηλή ειδική αντίσταση.
- Την περιεκτικότητα σε νερό. Σχηματισμοί με έλλειψη νερού στους πόρους έχουν υψηλή ειδική αντίσταση, σε αντίθεση με τους διαποτισμένους.
- Την ποιότητα του νερού. Σχηματισμός διαποτισμένος με αλμυρό νερό (ιόντα αλάτων), παρουσιάζει χαμηλότερη ειδική αντίσταση από τον αντίστοιχο με γλυκό νερό.
- Την περιεκτικότητα σε αργίλους. Η παρουσία αργιλικών ορυκτών ελαττώνει την ειδική αντίσταση.
- Τη θερμοκρασία. Το παγωμένο έδαφος έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από το έδαφος που βρίσκεται σε κανονική θερμοκρασία.

Η εμπειρική σχέση η οποία παρέχει αρκετά ικανοποιητικά την εξάρτηση της *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* ενός πετρώματος σε συνάρτηση με τις παραπάνω παραμέτρους, είναι ο **νόμος του Archie** (Archie, 1942).

Σύμφωνα με την εμπειρική του σχέση που προτείνει, έχουμε:

$$\rho = \rho_w a \phi^{-m} S^{-n} \quad (3.4)$$

όπου, ϕ είναι ο κλασματικός όγκος των διακένων (πορώδες)

S είναι το κλάσμα των πόρων που περιέχουν νερό

ρ_w , είναι η ειδική αντίσταση του νερού,

m είναι περίπου 2 και

οι σταθερές a και n μεταξύ $0,5 < a < 2,5$ και $1,3 < m < 2,5$ αντίστοιχα.

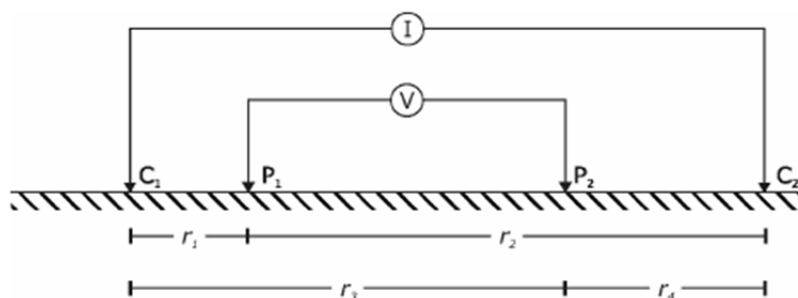
Ο νόμος τους Archie δεν ισχύει στην περίπτωση των αργιλικών πετρωμάτων.

3.1 Φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση

Στην **Εικόνα 3.1** φαίνεται η γεωμετρία μιας γεωηλεκτρικής διάταξης, που αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (C1 και C2) και δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (P1 και P2).

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των ηλεκτροδίων P1 και P2, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (3.5)$$



Εικόνα 3.1 Γεωηλεκτρική διάταξη, με δυο ηλεκτρόδια ρεύματος και δυο ηλεκτρόδια δυναμικού, στην επιφάνεια ομογενούς και ιστροπικού εδάφους ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Telford *et al.*, 1990).

Επιλύοντας τη σχέση αυτή, ως προς ρ , έχουμε τη σχέση:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]} = \left(\frac{2\pi\Delta V}{I} \right) k \quad (3.6)$$

στην οποία ο **παράγοντας k** εξαρτάται από την **γεωμετρία της διάταξης** και δίδεται από τη σχέση:

$$k = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right]} \quad (3.7)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της διάταξης (αποστάσεις ηλεκτροδίων), μπορεί να υπολογιστεί η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ρ** .

Αν πρόκειται για ένα μέσο ομογενές, ισότροπο και απείρου βάθους, η τιμή της μετρούμενης **ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ** , θα είναι σταθερή, ανεξάρτητα της τιμής του **γεωμετρικού παράγοντα, k** .

Αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την ένταση του παρεχόμενου ρεύματος, αν μεταβληθεί η γεωμετρία της διάταξης θα πρέπει να μεταβληθεί ο λόγος $k \frac{\Delta V}{I}$, ώστε να παραμένει πάντα σταθερός και η τιμή ρ πάντα ίδια.

Στην περίπτωση όμως, πολλών στρωματοποιημένων, οριζοντίων και ομογενών μέσων, ο λόγος αυτός θα μεταβάλλεται με αποτέλεσμα τη λήψη διαφορετικών τιμών ειδικής

αντίστασης σε κάθε θέση των ηλεκτροδίων, λόγω της παραμόρφωσης των γραμμών ροής ρεύματος και των ισοδυναμικών γραμμών του πεδίου.

Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιείται ο όρος **φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση**, ρ_α , ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_\alpha = \left(\frac{2\pi\Delta V}{I} \right) k \quad (3.8)$$

Έτσι, η ρ_α ισούται με την **ειδική ηλεκτρική αντίσταση** του ανώτερου σχηματισμού, ρ_1 , όταν η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι μικρή σχετικά με το πάχος του, όπου το ποσοστό του ρεύματος που διέρχεται στο κατώτερο στρώμα είναι το ελάχιστο δυνατό. Σε μεγάλες όμως αποστάσεις ηλεκτροδίων, συγκριτικά με το πάχος του πρώτου σχηματισμού, η φαινόμενη ειδική αντίσταση πλησιάζει την (πραγματική) **ειδική ηλεκτρική αντίσταση** του δεύτερου στρώματος, ρ_2 , αφού σε αυτή την περίπτωση η διερχόμενη ποσότητα ρεύματος από το ανώτερο στρώμα είναι ελάχιστη.

3.2 Γεωηλεκτρικές παράμετροι

Ένας σημαντικός παράγοντας στις μεθόδους προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης είναι η ανισοτροπία του υλικού στις διάφορες διευθύνσεις, κάτι σύνηθες στα στρωματοποιημένα πετρώματα, τα οποία είναι περισσότερο αγωγίμα παράλληλα προς τη στρώση τους παρά κάθετα προς αυτήν. Γι' αυτό ορίζεται ο συντελεστής ανισοτροπίας λ , που είναι ο λόγος της μέγιστης ειδικής αντίστασης, ρ_t , προς την ελάχιστη, ρ_L , η οποία κυμαίνεται κατά μέσο όρο μεταξύ 1,0-1,2. Φυσικά όταν πρόκειται για ισότροπο μέσο, θα είναι $\lambda=1$.

Η σχέση που αναδεικνύει την ανισοτροπία ενός σχηματισμού είναι:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_L}} \quad (3.9)$$

Γνωρίζοντας ότι ένα γεωηλεκτρικό στρώμα προσδιορίζεται από δυο θεμελιώδεις παραμέτρους, την ειδική αντίσταση, ρ και το πάχος, h , θα πρέπει να αναφερθούν οι γεωηλεκτρικές παράμετροι, που είναι:

- Η **διαμήκης αγωγιμότητα**, $S = h/\rho$
- Η **εγκάρσια αντίσταση**, $T = h\rho$
- Η **διαμήκης ειδική αντίσταση**, $\rho_L = h/S$
- Η **εγκάρσια ειδική αντίσταση**, $\rho_t = T/h$

3.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων (*arrays*)

Στην εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο και ανάλογα με τις ανάγκες της έρευνας, εφαρμόζεται και η αντίστοιχη διάταξη ηλεκτροδίων (βλ. εικ. 3.2). Καθεμία έχει συγκεκριμένο τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και ανάλογα με τη γεωμετρία τους μεταβάλλεται η τιμή του **γεωμετρικού παράγοντα**. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις είναι:

- Διάταξη Wenner*

Στη διάταξη *Wenner* χρησιμοποιούνται τέσσερα (4) ηλεκτρόδια που διατάσσονται επί μιας ευθείας τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a . Τα δύο (2) χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια ρεύματος (εξωτερικά) και τα δύο (2) ως ηλεκτρόδια δυναμικού (εσωτερικά). Η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την παρακάτω σχέση

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

ii. *Διάταξη Schlumberger*

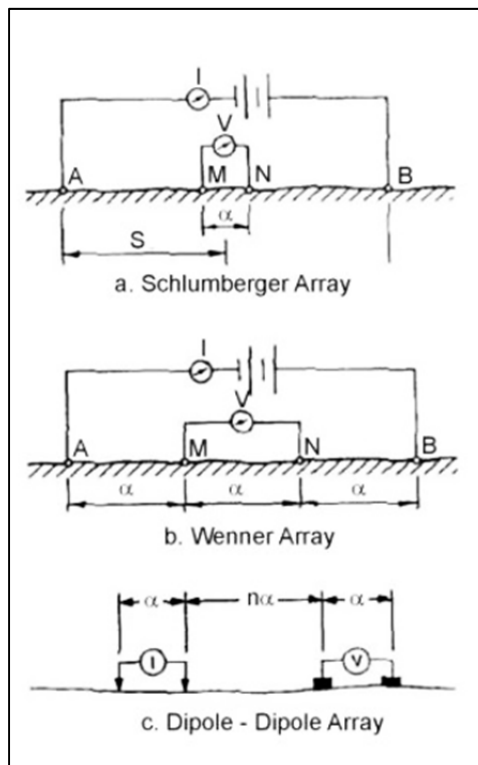
Στη διάταξη *Schlumberger* τα τέσσερα (4) ηλεκτρόδια τοποθετούνται επί ευθύγραμμης ανάπτυξης επίσης, πάνω στην οποία μετακινούνται καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Στηριζόμενοι στους γενικούς τύπους για τον υπολογισμό του γεωμετρικού παράγοντα, k και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, ρ_{α} , προκύπτει η εξής σχέση

$$\rho_{\alpha} = \pi \frac{L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I}$$

iii. *Διάταξη Dipole - Dipole*

Η διάταξη χρησιμοποιεί δυο (2) ζεύγη ηλεκτροδίων, από τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις το ένα αποτελείται από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, ενώ το άλλο από τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού.

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



Εικόνα 3.2 Οι πλέον συνήθεις χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων

3.4 Πλευρική έρευνα μεταβολής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης – Γεωηλεκτρικό Τομόγραμμα

Η ανάπτυξη της οργανολογίας έχει δώσει την δυνατότητα λήψης μετρήσεων με πολυκαναλικές συσκευές. Με τη διαδικασία αυτή, επιτυγχάνει η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη (βαθοσκόπηση-VES) όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (*resistivity profiling*).

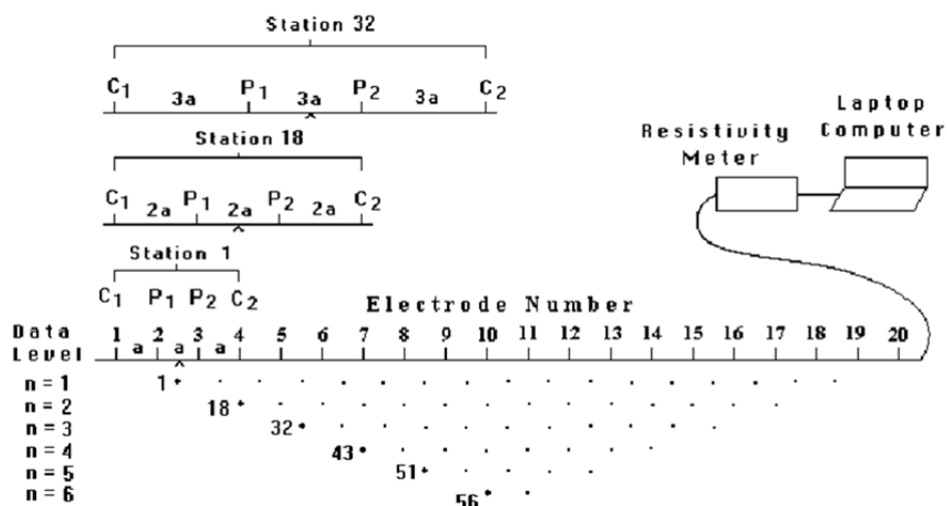
Έτσι παρέχετε μία πλήρης εικόνα της **πλευρικής κατανομής** της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος και κατά συνέπεια της λιθολογικής και της γεωλογικής δομής.

Η διασκόπηση της γεωηλεκτρικής πλευρικής έρευνας, πραγματοποιείται με την προ-εγκατάσταση και χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων, που τοποθετούνται συνευθειακά, σε ίση οριζόντια απόσταση, κατά μήκος μίας τομής, η οποία συνθέτει την **τομή γεωηλεκτρικής τομογραφικής διασκόπησης (ERT)**. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας της, δημιουργεί το **γεωηλεκτρικό τομόγραμμα** ή **μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης** (*inverse model resistivity section*).

Όλα τα ηλεκτρόδια συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας **πολυκαναλικά καλώδια**, που καταλήγουν στην **μονάδα διακοπών** (πολυπλέκτης). Αυτή, συνδέεται με την **μονάδα μετρήσεων** (*resistivity meter*) και με τον **φορητό η/υ υπαίθρου** (*laptop computer*) για τη διαχείριση και καταγραφή της γεωηλεκτρικής πληροφορίας, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 3.3. Το εξειδικευμένο λογισμικό στον **φορητό η/υ υπαίθρου** επιλέγει αυτόματα τα εκάστοτε τέσσερα (4) ενεργά ηλεκτρόδια που εμπλέκονται σε κάθε μέτρηση, λαμβάνοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των προ-εγκατεστημένων ηλεκτροδίων και της διάταξης (*array*) που έχει επιλεγεί.

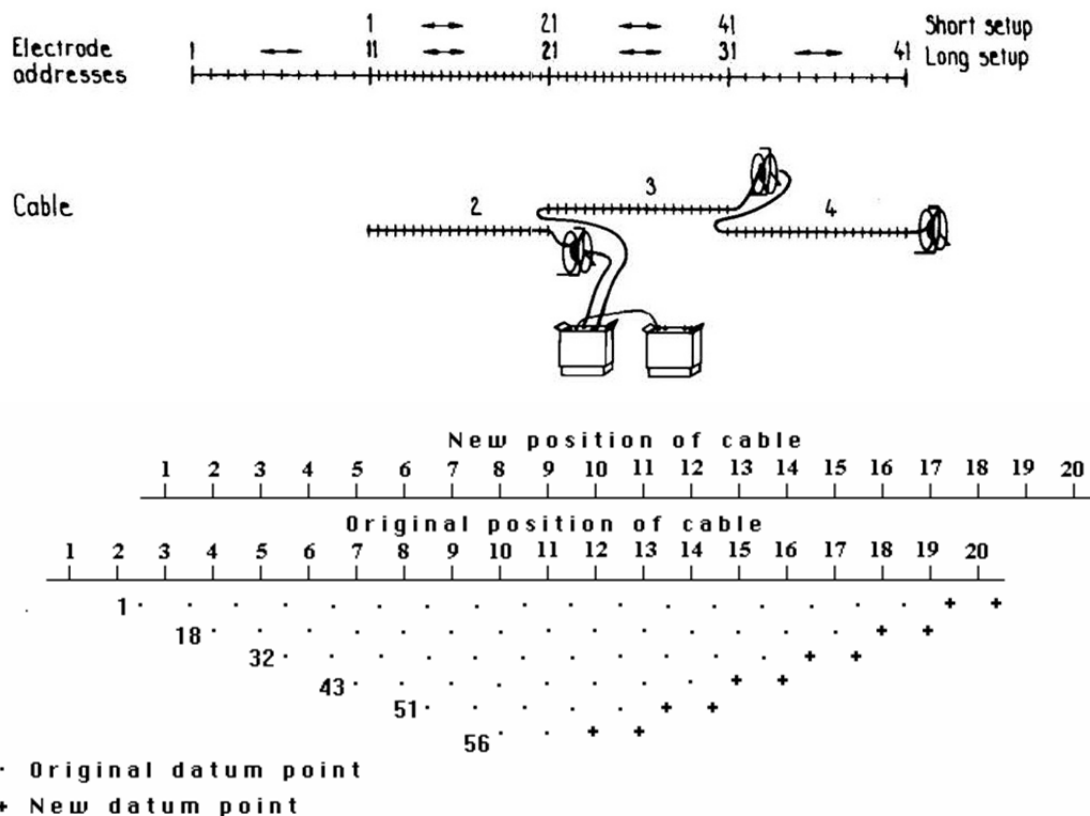
Στις τελευταίες γενεάς **γεωηλεκτρικές συσκευές**, όλες αυτές οι μονάδες ενοποιούνται σε μία, δραστικά αναβαθμισμένη. Οι συσκευές αυτές, διαθέτουν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και παρέχουν την δυνατότητα χρήσης τους σε πολλές γεωηλεκτρικές τεχνικές (*borehole logging*, κ.λπ.) με το κατάλληλο παρελκόμενο επιστημονικό εξοπλισμό.

Σε κάθε μέτρηση χρησιμοποιούνται συνήθως τέσσερα (4) ηλεκτρόδια και κάθε φορά μεταβάλλεται η μεταξύ τους απόσταση (όλα τα ηλεκτρόδια παραμένουν σταθερά πακτωμένα στο έδαφος). Μετά το πέρας της λήψεως των πρώτων μετρήσεων, δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς και τοποθέτησης τμήματος του συνολικού αριθμού των ηλεκτροδίων στο τέλος της γραμμής διασκόπησης. Αυτή η τεχνική λήψεως μετρήσεων αποτελεί μια γραμμικά μεταβαλλόμενη διάταξη, που καλείται *roll along* (βλ. εικ. 3.4).



Εικόνα 3.3 Απεικόνιση της διάταξης των ηλεκτροδίων και του συνδυασμού της λήψης των μετρήσεων κατά τη διδιάστατη γεωηλεκτρική έρευνα (Loke, M.H., 1999).

Η ταχύτητα λήψης, η πυκνότητα των μετρήσεων και το βάθος διασκόπησης, εξαρτώνται από την απόσταση τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, τον αριθμό που μπορεί να διαχειριστεί ο εξοπλισμός, τη διάταξη και τη μέγιστη απόσταση που μπορούν να απέχουν μεταξύ τους. Συμπερασματικά η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, καθορίζει τη εκάστοτε **διακριτική ικανότητα** η οποία θα πρέπει να είναι αντίστοιχη με τις διαστάσεις του υπό διερεύνηση στόχου.



Εικόνα 3.4: Τεχνική Roll Along (Loke, M.H., 1999)

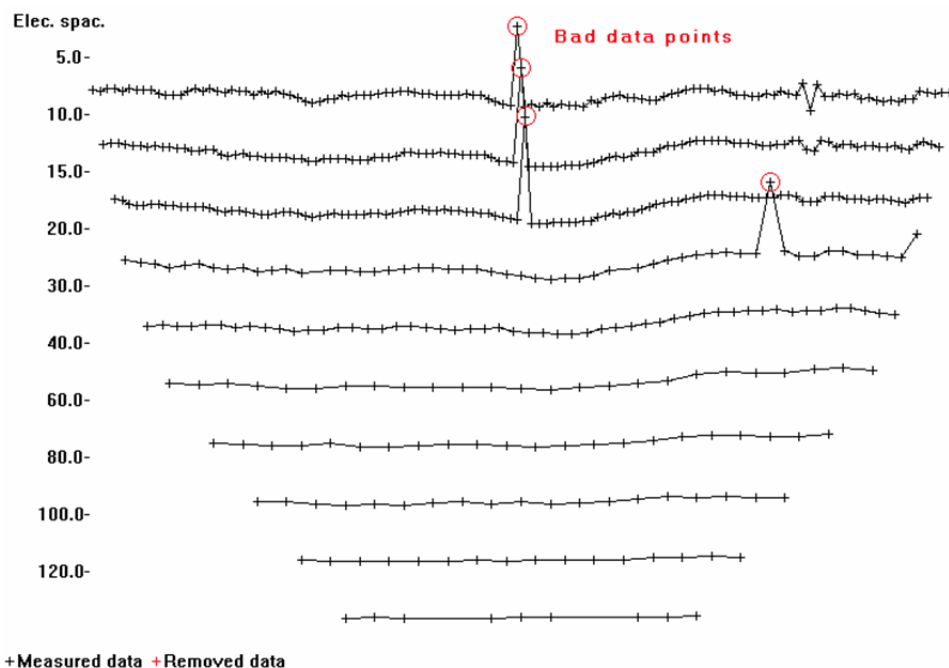
Το προκαταρκτικά αποτέλεσμα της μεθόδου, είναι η κατασκευή της **ψευδοτομής φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης** (measured apparent resistivity *pseudo-section*). Η ψευδοτομή αυτή αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση της υπεδάφικης δομής. Στις τελευταίες γενεάς γεωηλεκτρικές συσκευές, η αναπαράσταση αυτή πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα, ταυτόχρονα με τη λήψη των μετρήσεων. Με τη διαδικασία αυτή, παρέχεται η δυνατότητα αυτοματοποιημένης **ποιοτικής** επεξεργασίας και αναθεώρηση του σχεδιασμού των μετρήσεων στο πεδίο.

Ο υπολογισμός των (πραγματικών) τιμών των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων πραγματοποιείται αργότερα, μέσω της μαθηματικής διαδικασίας της αντιστροφής.

3.5 Επεξεργασία Δεδομένων

Για την δημιουργία του **μοντέλου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης** (*inverse model resistivity section*), που παρουσιάζει την κατανομή των ειδικών αντιστάσεων στον ημιχώρο, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι αντιστροφής 2D δεδομένων. Με αυτούς υπολογίζεται η κατανομή των ειδικών αντιστάσεων που θα έδινε τις μετρήσεις των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων που πραγματοποιήθηκαν. Επιδιώκεται, λοιπόν, με αυτό τον τρόπο η εύρεση ενός **προτύπου** (*model*) το οποίο να ανταποκρίνεται στις ληφθείσες μετρήσεις.

Της διαδικασίας αντιστροφής προηγείται το στάδιο **εξαίρεσης** των "**μη αποδεκτών μετρήσεων**" (*bad data points*), της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με μορφή σχεδιαγράμματος, οι οποίες προκαλούν «θόρυβο» στην **ψευδοτομή φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης** (*Measured Apparent Resistivity Pseudo-section*) (βλ. εικ. 3.5). Αφαιρούνται εκείνες οι τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης που παρουσιάζουν υπερβολικά μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές σε σύγκριση με τα γειτονικά σημεία μετρήσεων.



Εικόνα 3.5 Παράδειγμα εφαρμογής αφαίρεσης *bad points*, από την απεικόνιση δεδομένων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με μορφή σχεδιαγράμματος, αφαιρούνται δεδομένα που προκαλούν θόρυβο (Loke, M.H., 1999).

Για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζονται επαναληπτικές προσεγγίσεις (*iterations*), ξεκινώντας από ένα αρχικό αυθαίρετο μοντέλο. Το πρώτο βήμα είναι να υπολογιστούν οι φαινόμενες αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό. Οι θεωρητικές τιμές, οι πραγματικές μετρήσεις και οι παράμετροι του μοντέλου καθορίζουν ένα σύστημα εξισώσεων.

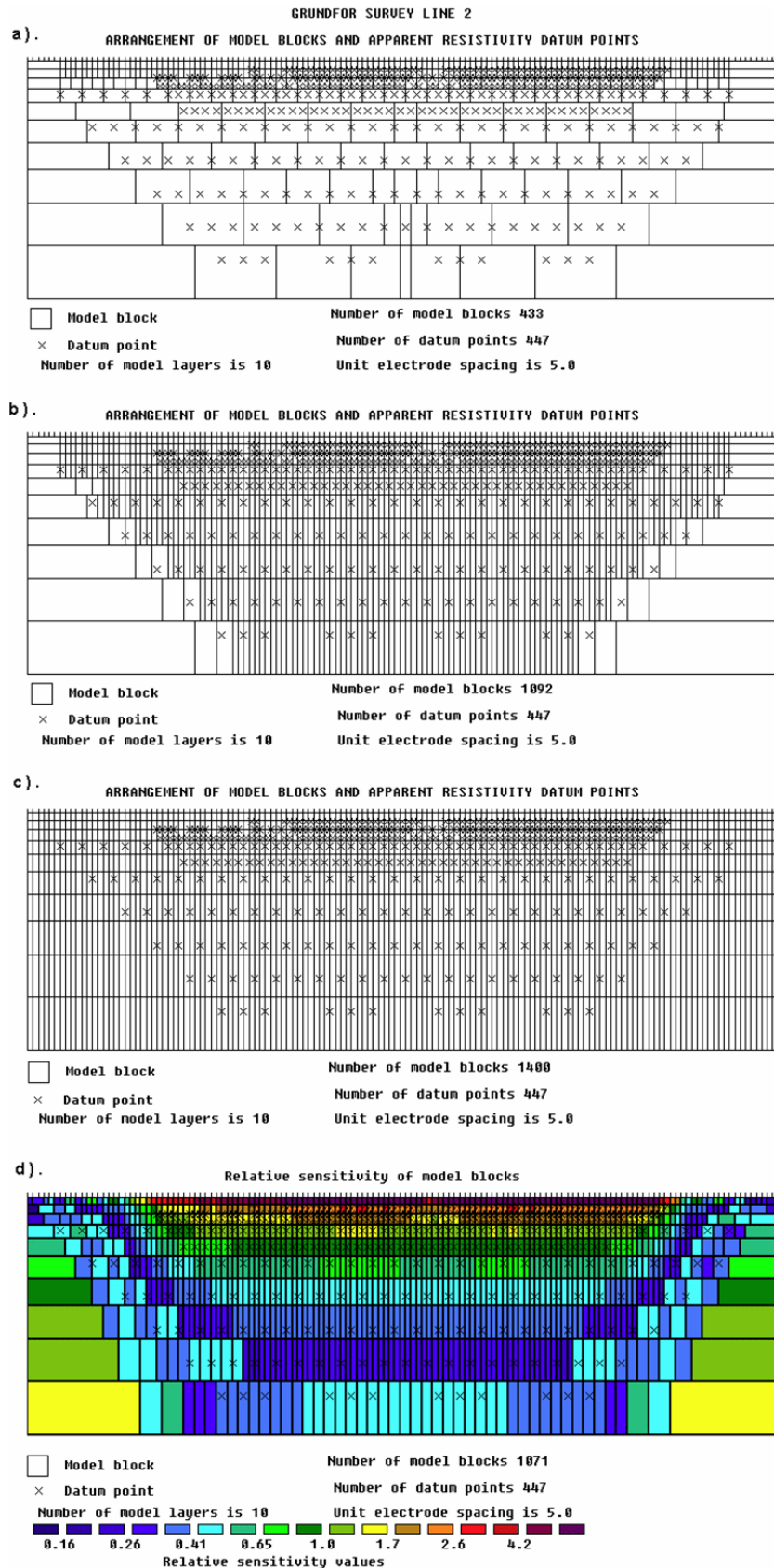
Ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής, όπου επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων με αγνώστους τις παραμέτρους του μοντέλου. Στη συνέχεια με τη διαδικασία αυτή, παράγεται ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο. Η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας για το βελτιωμένο μοντέλο τις φαινόμενες αντιστάσεις, οι οποίες συγκρίνονται με τη σειρά τους με τις πραγματικές μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Το μοντέλο, που χρησιμοποιείται από τα προγράμματα αντιστροφής, αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό **ορθογώνιων τεμαχών** (*blocks*) (βλ. εικ. 3.6). Η κατανομή και το μέγεθος τους δημιουργούνται αυτόματα από το λογισμικό, με βάση την κατανομή των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που του δίδεται.

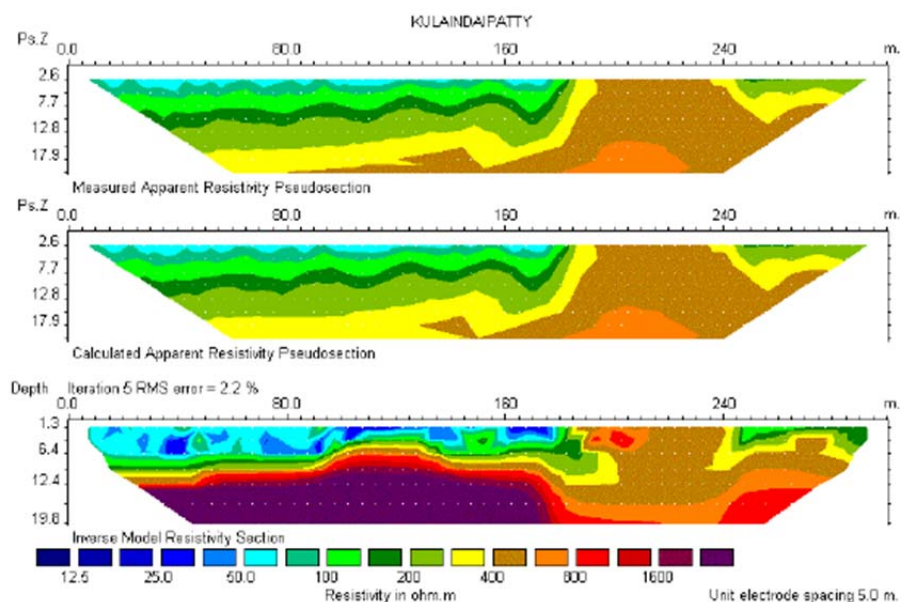
Με την αντιστροφή, λοιπόν, γίνεται ο υπολογισμός των 'πραγματικών' ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις, σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που αφορά την επίλυση της εξίσωσης Laplace για τη διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος εντός του υπεδάφους (βλ. εικ. 3.7). Στην περίπτωση της αντιστροφής των φαινόμενων ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων το πρόβλημα είναι μη γραμμικό και είναι υπερ-προσδιορισμένο, δηλαδή ο αριθμός των δεδομένων υπερβαίνει τον αριθμό των παραμέτρων του μοντέλου.

Για τον υπολογισμό των τιμών της 'calculated' φαινόμενης ειδικής αντίστασης (βλ. εικ. 3.7), χρησιμοποιείται μια υπό-ρουτίνα μοντελοποίησης, η οποία είναι είτε πεπερασμένων διαφορών (*finite-difference modelling*), είτε πεπερασμένων στοιχείων (*finite-element modelling*). Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης των ορθογώνιων τεμαχών (*blocks*) του μοντέλου, χρησιμοποιείται η μη-γραμμική τεχνική (deGroot-Hedlin and Constable, 1990) βελτιστοποίησης των ελαχίστων τετραγώνων (*least squares*).

Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι συντελεστές απόσβεσης (*damping factors*) και τα φίλτρα εξομάλυνσης (*roughness filters*), μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ταιριάζουν σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων-αναμενόμενων στόχων.



Εικόνα 3.6 Υποδιαίρεσεις του υπεδάφους σε ορθογώνια τεμάχια (*blocks*) για την ερμηνεία των δεδομένων από μία 2-D έρευνα, με τη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων (Loke, M.H., 1999).



Εικόνα 3.7: Παράδειγμα επεξεργασίας δεδομένων γεωηλεκτρικής τομογραφίας με το λογισμικό RES2DINV (Loke, M.H., 1999).

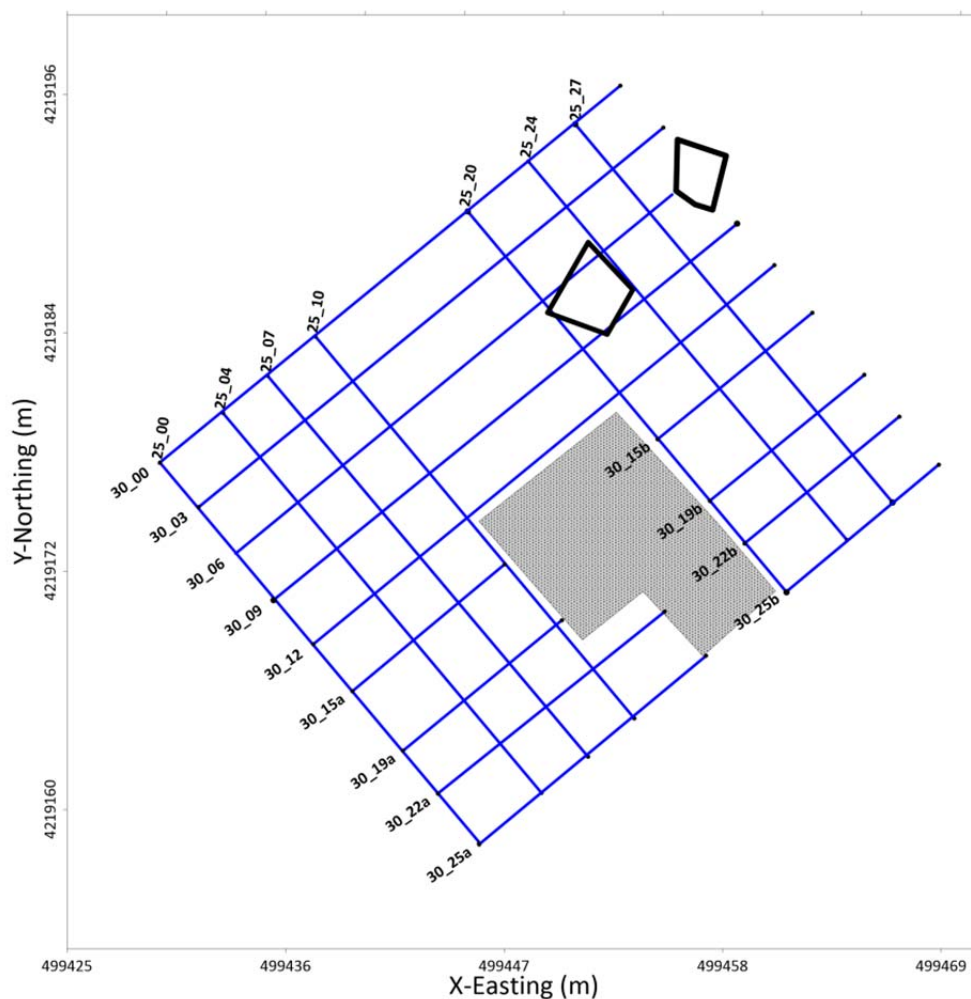
Η μέθοδος βελτιστοποίησης (*optimization method*) προσπαθεί να μειώσει τη διαφορά μεταξύ των υπολογιζόμενων και μετρημένων τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, προσαρμόζοντας την ειδική αντίσταση των ορθογώνιων τεμαχίων (*blocks*) του μοντέλου.

Ένα μέτρο αυτής της διαφοράς, δίνεται από τη **ρίζα του μέσου τετραγωνικού «σφάλματος»** (*Root Mean Squared, RMS*). Ωστόσο, το μοντέλο με το μικρότερο δυνατό «σφάλμα» RMS εμφανίζει μερικές φορές μεγάλες και μη ρεαλιστικές διακυμάνσεις στις τιμές της ειδικής αντίστασης και ίσως να μην είναι πάντα το βέλτιστο μοντέλο, σύμφωνα με τα αναμενόμενα υπεδαφικά αποτελέσματα (γεωλογική - λιθολογική διάρθρωση, υπεδαφικά ευρήματα, κ.ά.). Γενικά, η πιο συνετή προσέγγιση είναι η επιλογή του μοντέλου με το μικρότερο δυνατό «σφάλμα» RMS.

3.6 Γεωηλεκτρική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο

Δεδομένου ότι στην περιοχή της γεωφυσικής έρευνας υφίσταται αρχαιολογική εκσκαφή με αποκαλυφθέντες στόχους, για τη διερεύνηση της πλευρικής κατανομής την ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, επιλέχτηκε η δειγματοληψία (ίση απόσταση ηλεκτροδίων) των 0,25 m.

Χρησιμοποιήθηκε το Terrameter Imaging System του οίκου ABEM, με 41 ηλεκτρόδια. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι υψηλής πιστότητας και αξιοπιστίας. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα πολλαπλών, αυτόματων διαδοχικών μετρήσεων κάθε φορά, υπολογίζοντας την ωμική αντίσταση μέσω της αυτόματης μεθόδου προσδιορισμού της μέσης τιμής. Η **μονάδα μετρήσεων** (*resistivity meter*) υπολογίζει αυτόματα την ωμική αντίσταση, δηλαδή το λόγο $\Delta V/I$, αφού διοχετεύσει την επιθυμητή ποσότητα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 3.8 Τοπογραφική αποτύπωση των γεωηλεκτρικών τομογραμμάτων (ERT). Οι περιγεγραμμένες περιοχές, αποτυπώνουν δέντρα που βρίσκονταν στην περιοχή μελέτης.

Στο προκαταρκτικό/δοκιμαστικό στάδιο εφαρμογής της τεχνικής της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις dipole-dipole, Schlumberger και Wenner.

Ύστερα από σύγκριση των αποτελεσμάτων, επιλέχτηκε η μέθοδος Wenner, ως η πλέον κατάλληλη για την παρούσα μελέτη.. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν **20 τομές ERT**, συνολικού **μήκους 413 m**, (βλ. εικ. 3.8) που κάλυψαν το σύνολο του χώρου έρευνας (βλ. εικ. 3.9), σε ισο-απόσταση 3 μέτρων.



Εικόνα 3.9 Στιγμιότυπα από τις εργασίες υπαίθρου.

3.6.1 Επεξεργασία μετρήσεων

Για την επεξεργασία των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RES2DINV (Loke and Barker, 1996). Η διαδικασία επεξεργασίας του κάθε γεωηλεκτρικού τομογράμματος, περιελάμβανε τα παρακάτω στάδια:

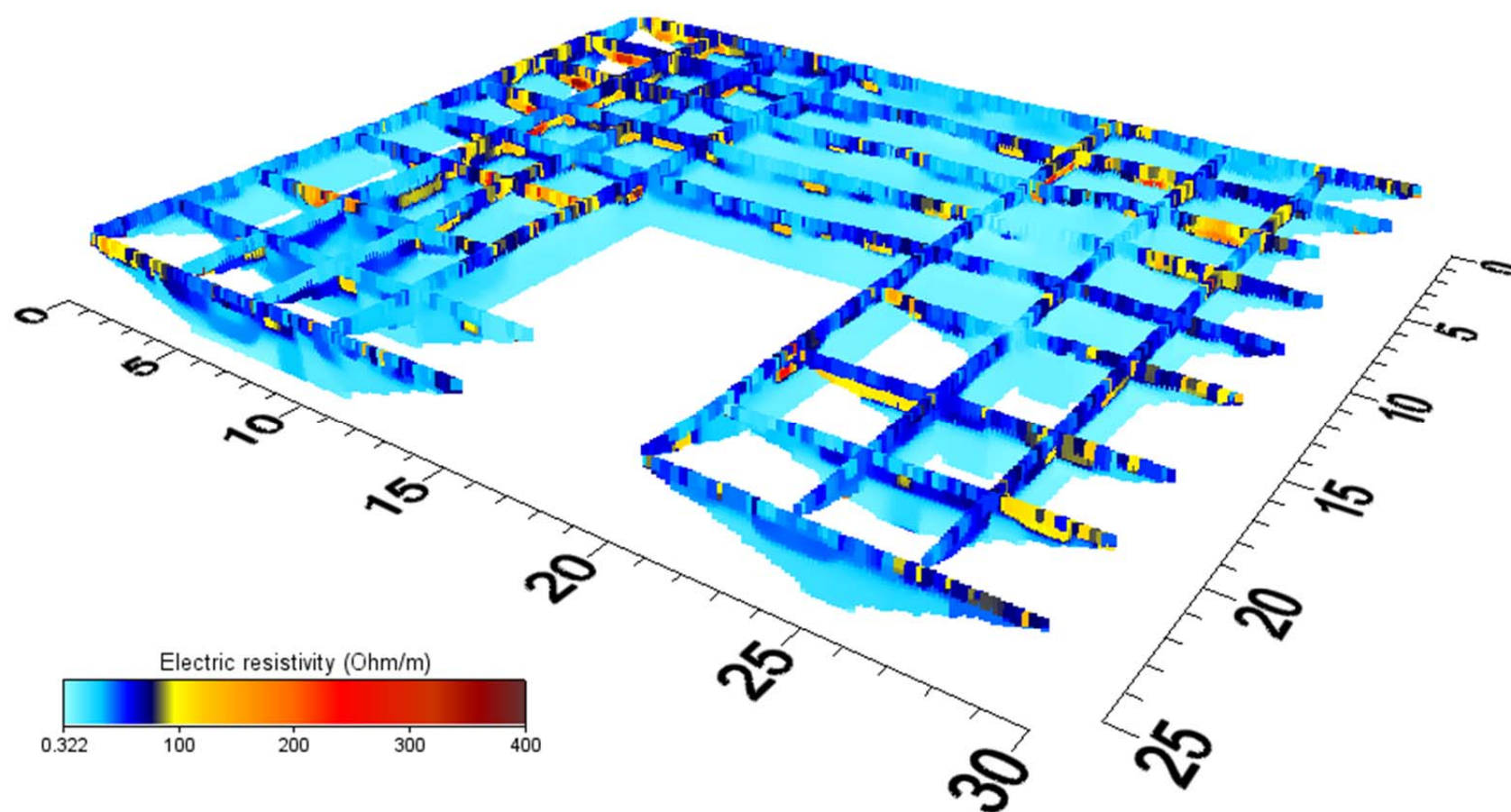
- Το λογισμικό χρησιμοποιεί ως προεπιλογή, μοντέλο όπου το πλάτος των ορθογωνίων τεμαχίων (*blocks*) είναι το ίδιο με την απόσταση μεταξύ των

ηλεκτροδίων. Σε περιπτώσεις όμως όπου υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, μπορούν να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα μειώνοντας το μέγεθος του κελιού, όπως και πραγματοποιήθηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση. Η ρύθμιση αυτή αναφέρεται ως "use model refinement" και δίνει την δυνατότητα δημιουργίας μοντέλου με το μισό της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων

- Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εξαίρεση των μετρήσεων τα οποία θεωρούνται ως "μη αποδεκτές μετρήσεις" (*bad data points*) καθώς παρουσιάζουν τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης που είναι υπερβολικά μεγάλες ή πολύ μικρές σε σύγκριση με τα γειτονικά σημεία μετρήσεων.
- Για τη διαδικασία της αντιστροφής χρησιμοποιήθηκε η επιλογή *robust inversion*. Η διαδικασία αυτής της αντιστροφής προσδίδει έμφαση στην οριζόντια μεταβολή της ειδικής αντίστασης.

Τα αποτελέσματα της 2D επεξεργασίας με το λογισμικό *RES2DINV*, εισήχθησαν στο λογισμικό *Surfer*, με το οποίο κατασκευάστηκαν ομοιόμορφης κατανομής χρωματικής κλίμακας **γεωηλεκτρικά τομογράμματα**, τα οποία παρατίθενται στο **Παράρτημα 2**.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η τριδιάστατη απεικόνιση (*fence diagram*) όλων των γεωηλεκτρικών τομογραμμάτων (όπως και στη διασκόπηση γεωραντάρ), έτσι ώστε καταστεί καλύτερη η κατανομή της πληροφορίας στον ημι-χώρο. Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται η απεικόνιση σε *fence diagram*, όλων των γεωηλεκτρικών τομογραμμάτων της περιοχής μελέτης.



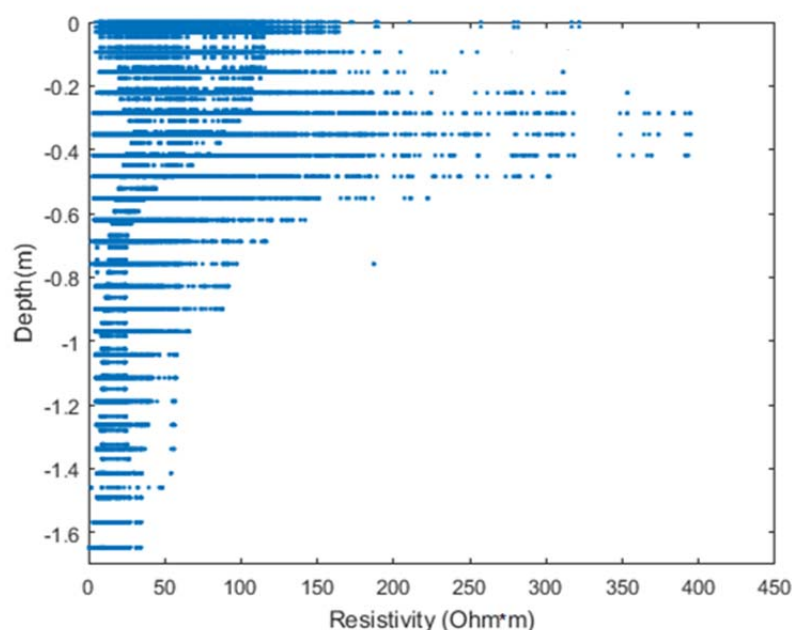
Εικόνα 3.10 Τριδιάστατη απεικόνιση όλων των γεωηλεκτρικών τομογραμμάτων σε *fence diagram*.

3.6.2 Οριζοντιογραφίες Όγκου/Βάθους (*Volume/Depth Slices*)

Ο σκοπός δημιουργίας αυτών των απεικονίσεων, είναι να εξαχθεί η χωρική πληροφορία, η οποία πιθανόν να μην είναι εύκολα ανιχνεύσιμη στα μεμονωμένα **γεωηλεκτρικά τομογράμματα** (*inverse model resistivity section*). Για την επεξεργασία και παρουσίαση των οριζοντιογραφιών όγκου/βάθους (*volume/depth slices*), πραγματοποιήθηκαν τα ίδια στάδια επεξεργασίας όπως και στη μέθοδο γεωραντάρ (βλ.παρ.2.8.2).

Χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος κώδικας στο λογισμικό MATLAB και πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω ενέργειες:

- Όλα τα αποτελέσματα της γεωηλεκτρικής διασκόπησης (X , Y , Z , ***Ohm.m***) συγκεντρώθηκαν και κατασκευάστηκε το γράφημα της Εικόνας 3.11. Στο γράφημα αποτυπώνεται η κατανομή της (πραγματικής) **ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης** (***Ohm.m***) όλων των μοναδιαίων κυψελίδων του ημιχώρου σε σχέση με το βάθος που παρουσιάζουν όλα τα δεδομένα (συνολικά 72.438 τιμές), με σκοπό την καλύτερη επιλογή των ορίων βάθους/όγκου.



Εικόνα 3.11 Διάγραμμα κατανομής (*distribution*) της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σε σχέση με το βάθος. Στο διάγραμμα περιλαμβάνονται 72.438 τιμές.

- Από το γράφημα κατανομής διαπιστώθηκε ότι οι **μέγιστες τιμές ειδικής αντίστασης**, τοποθετούνται στα βάθη μεταξύ των **15 και 80 cm**. Αυτό συνάδει με το βάθος των στόχων που έχουν ανακαλυφθεί στην εφαρμογή της τεχνικής γεωραντάρ και στο ανασκαφέν τμήμα της περιοχής μελέτης. Πέραν του βάθους αυτού, **δεν** φαίνεται να αναγνωρίζεται κάποιος στόχος.
- Το γεγονός αυτό οδήγησε στην επιλογή και στην κατασκευή των όγκων **15-25 cm**, **25-35 cm**, **35-45 cm**, **45-55 cm**, **55-65 cm**, **65-75 cm** και **75-85 cm**. Οι

όγκοι που επελέγησαν, ταυτίζονται με εκείνους της μεθόδου γεωραντάρ, προκειμένου να καταστεί δυνατή η συν-αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

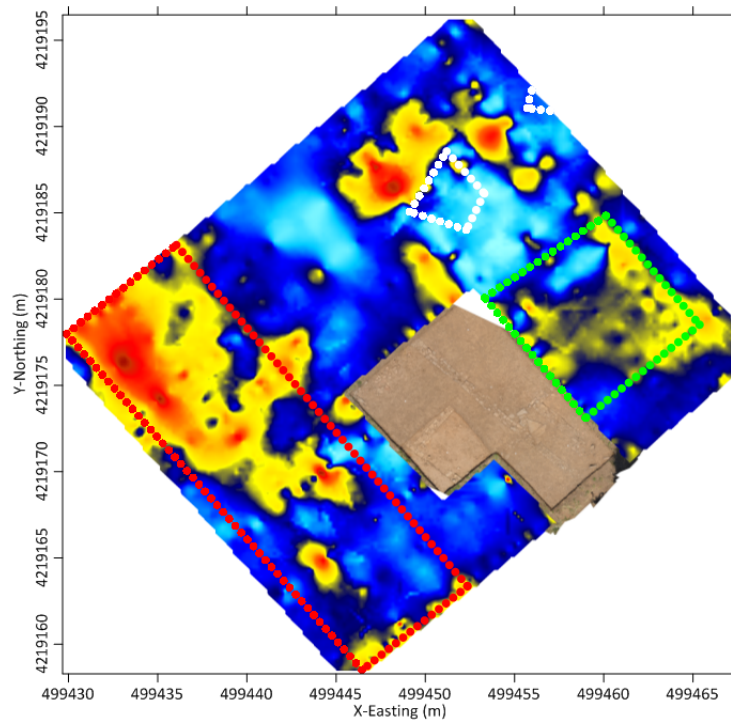
- Με αλγοριθμική διαδικασία στο περιβάλλον MATLAB απομονώθηκαν τα δεδομένα X , Y , Z , $resistivity$ που αντιστοιχούν στους παραπάνω καθορισμένους όγκους, και
- Με την χρήση του λογισμικού Surfer, κατασκευάστηκαν οι **οριζοντιογραφίες όγκου/βάθους** των Εικόνων 3.12, 3.16, ... 3.18 και 3.19.

Οι οριζοντιογραφίες όγκου/βάθους των εικόνων αυτών, κατασκευάστηκαν:

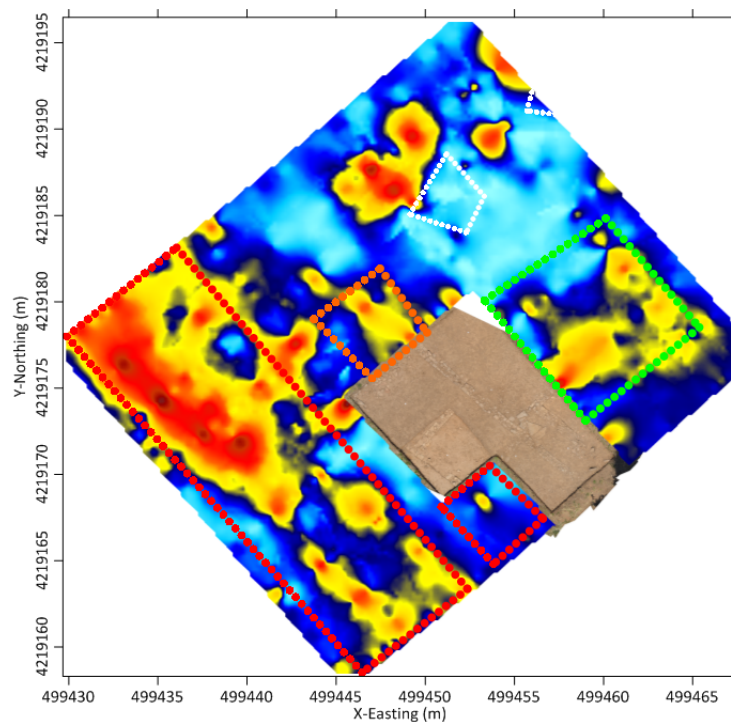
- [1] Επιλέγοντας την **μέση** (*average filter data*) **τιμή ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης** (*resistivity*) σε κάθε θέση (X , Y) της περιοχής έρευνας, για το συγκεκριμένο όγκο/βάθος.
- [2] Με την ίδια χρωματική κλίμακα, προκειμένου να γίνει ευχερέστερη η αξιολόγησή τους. Οι περιοχές με **θερμά χρώματα** αντιπροσωπεύουν **υψηλές τιμές** ($> 100 \text{ Ohm.m}$) που προέρχονται από **πιθανούς θαμμένους στόχους**.
- [3] Σημειώνοντας με **λευκή εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** την παρουσία **δυο (2) δένδρων** στην περιοχή μελέτης.

Παρατηρώντας τις επτά (7) οριζοντιογραφίες επισημαίνονται :

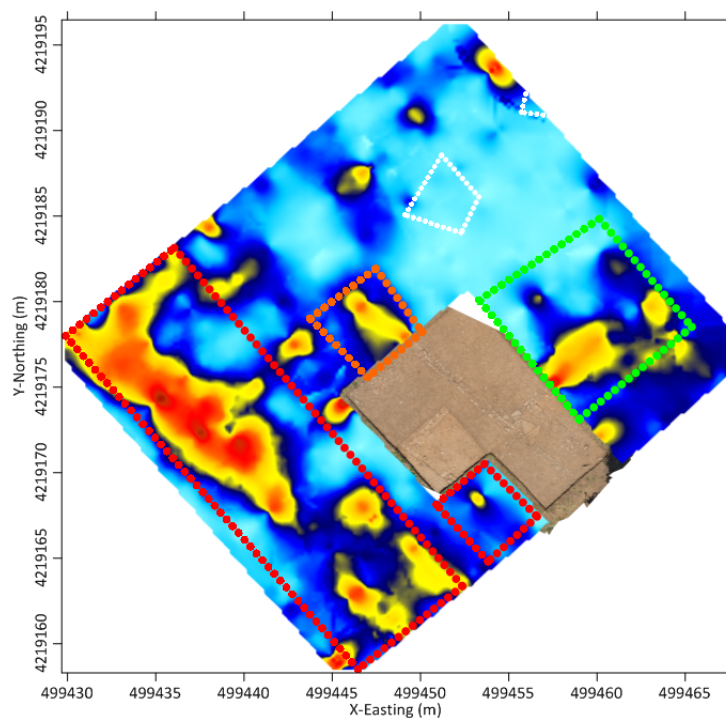
- Στους **όγκους/βάθους μεταξύ των 15 και 65 cm** (βλ. εικ. 3.12-3.17), σημειώνεται με **κόκκινη εστιγμένη πολυγωνική γραμμή**, μια ευρεία ζώνη, με ιδιαίτερα αυξημένες τιμές ειδικής αντίστασης ($100\text{-}400 \text{ Ohm.m}$), η οποία παρουσιάζει γραμμικότητα, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.
- Στους **όγκους/βάθους μεταξύ των 15 και 55 cm** (βλ. εικ. 3.12-3.15), σημειώνεται με **πράσινη εστιγμένη πολυγωνική γραμμή**, περιοχή με τιμές ειδικής αντίστασης $100\text{-}300 \text{ Ohm.m}$), οι οποίες μειώνονται και τελικά εξασθενούν στην ΒΔ πλευρά της περιοχής έρευνας.
- Στους **όγκους/βάθους μεταξύ των 25 και 45 cm** (βλ. εικ. 3.13-3.14), σημειώνεται με **πορτοκαλί εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** περιοχή με τιμές ειδικής αντίστασης, μεταξύ 100 και 200 Ohm.m . Η ανάπτυξη τους παρουσιάζει γραμμικότητα στο βάθος των 25 έως 35cm και διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



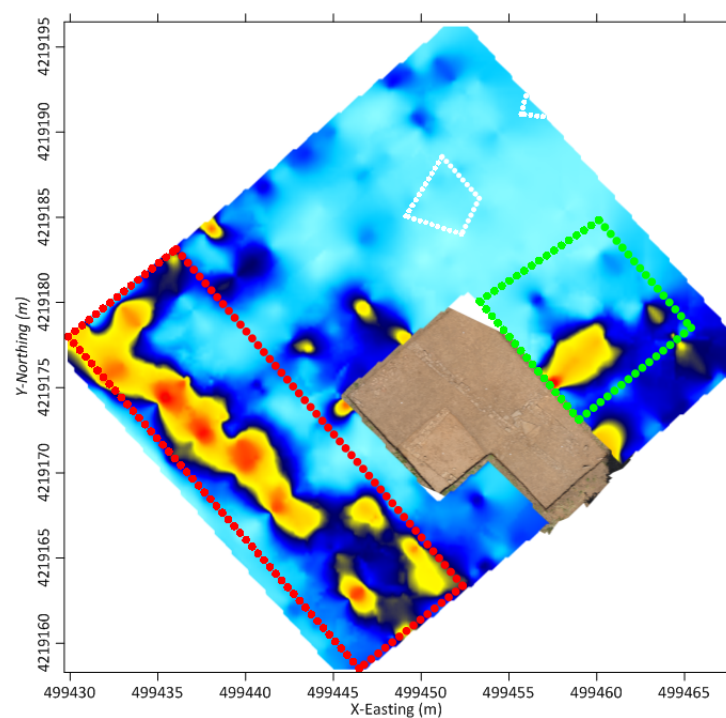
Εικόνα 3.12 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 15-25 cm.



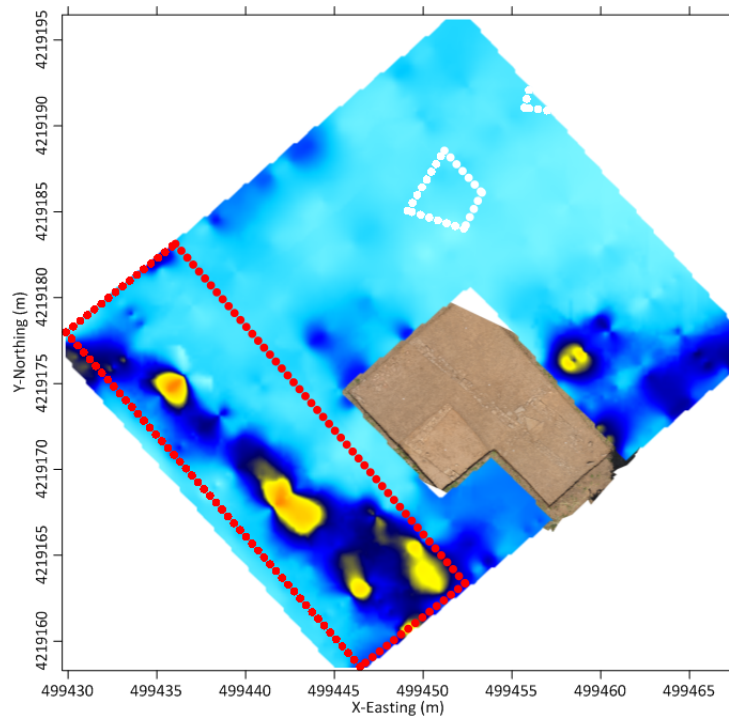
Εικόνα 3.13 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 25-35 cm.



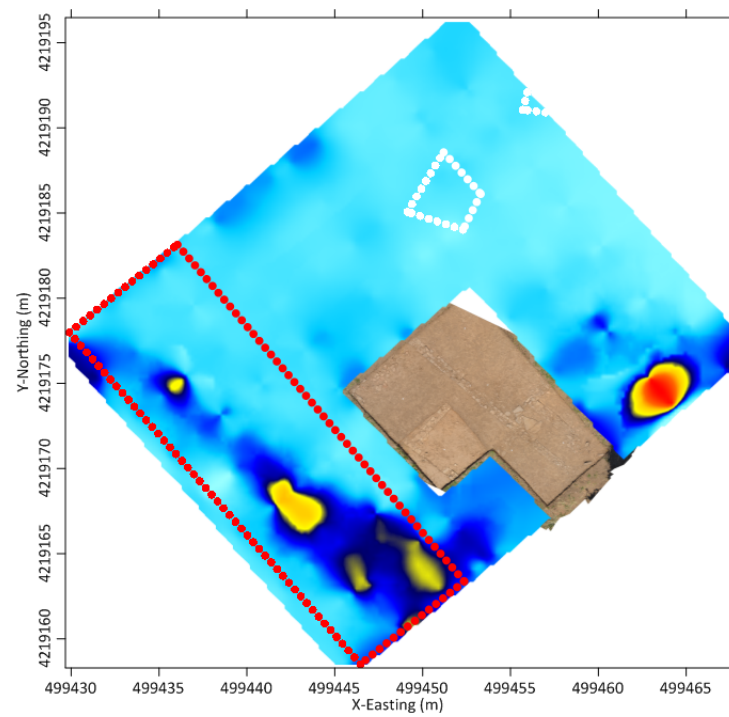
Εικόνα 3.14 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 35-45 cm.



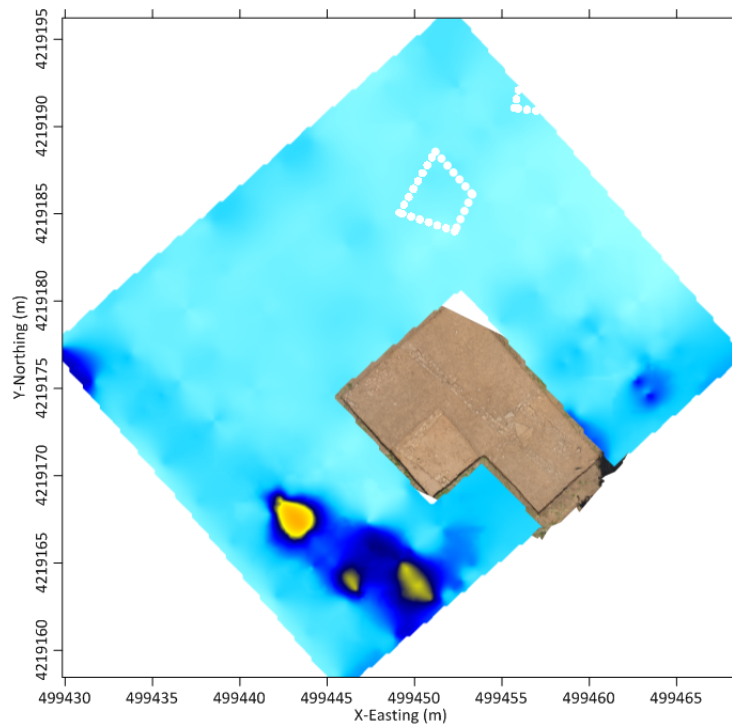
Εικόνα 3.15 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 45-55 cm.



Εικόνα 3.16 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 55-65 cm.

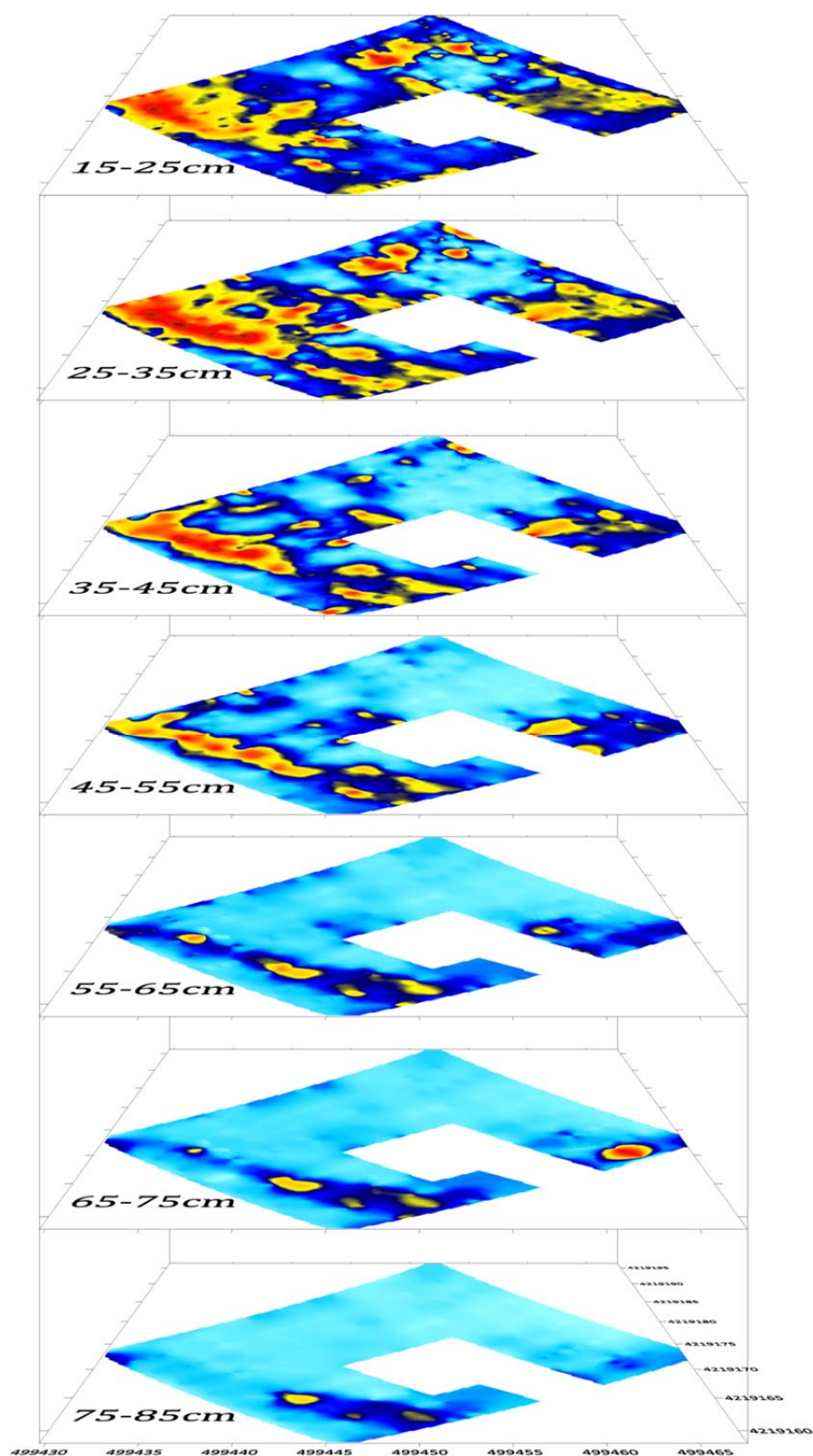


Εικόνα 3.17 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 65-75 cm.



Εικόνα 3.18 Οριζοντιογραφία όγκου/βάθους 75-85 cm.

Στην Εικόνα 3.19 παρουσιάζονται όλες οι οριζοντιογραφίες σε ψευδο-3D απεικόνιση, προκειμένου να αναδειχθεί καλύτερα η μεταβολή των ηλεκτρικών ειδικών αντιστάσεων των οριζοντιογραφιών όγκου/βάθους, σε σχέση με το βάθος.



Εικόνα 3.19 Ψευδο-3D απεικόνιση οριζοντιογραφιών όγκου/βάθους της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.

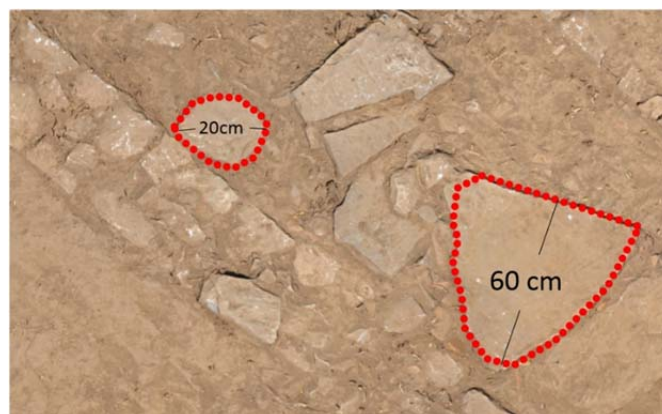
4. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Το αρχαιολογικό φωτογραφικό υλικό που είχαμε στην διάθεσή μας από τον Αναπλ. Καθηγ. Γιάννη Παπαδάτο από την εκσκαφή του αρχαιολογικού ορύγματος στην περιοχή της γεωφυσικής έρευνας, μας παρείχε τη δυνατότητα να διαπιστώσουμε ότι η ανασκαφή έχει αποκαλύψει αρχαιολογικούς στόχους και πιο συγκριμένα τοιχοδομές, με κύριες διευθύνσεις, ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ -ΝΔ (βλ. εικ. 4.1). Το βάθος στο οποίο εντοπίζονται τα αποκαλυφθέντα αρχαιολογικά ευρήματα είναι μεταξύ των 30 - 50 cm.



Εικόνα 4.1 Αποκαλυφθείσες τοιχοδομές με κύριες διευθύνσεις ΒΔ-ΝΑ και ΝΔ-ΒΑ

Επίσης, οι διαστάσεις των οικοδομικών στοιχείων-λίθων που διαφαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν, κυμαίνονται στα 15-60 cm και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Οικοδομικά στοιχεία τοιχοδομών.

Στην περιοχή έρευνας πραγματοποιήθηκαν:

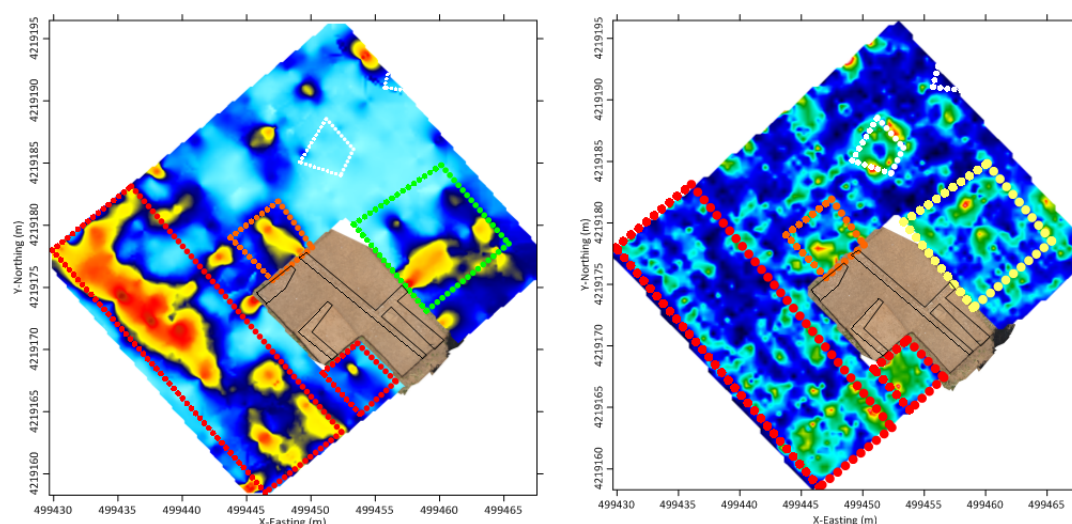
- [1] 34 τομές γεωραντάρ, συνολικού μήκους 610 m και
- [2] 20 τομές γεωηλεκτρικής τομογραφικής διασκόπησης, συνολικού μήκους 413 m.

Και για τις δύο γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης, καταγράφηκαν και υπολογίστηκαν συνολικά 1.476 μετρήσεις τοπογραφικής αποτύπωσης, με σκοπό την δημιουργία τοπογραφικού υπόβαθρου υψηλής χωρικής ανάλυσης.

Και για τις δύο διασκοπικές τεχνικές/μεθόδους, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία επεξεργασίας και παρουσίασης των αποτελεσμάτων, με απώτερο σκοπό την μεταξύ τους σύγκριση και την ανάδειξη των υπεδαφικών στόχων.

Κατόπιν της ποιοτικής επεξεργασίας, της κάθε μεθόδου ξεχωριστά, επιλέχθηκε ως η πλέον αντιπροσωπευτική, η συνδυαστική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των οριζοντιογραφιών (*slices*) όγκου/βάθους των **35-45 cm** (βλ. εικ. 4.3).

Θεωρείται ότι στον συγκεκριμένο όγκο/βάθος, είναι εμφανής η κατανομή της φυσικής παραμέτρου που διαπραγματεύεται η κάθε διασκόπηση, με αποτέλεσμα να καταλήξουμε σε κοινές περιοχές – θέσεις ανάδειξης στόχων.



Εικόνα 4.31 Οριζοντιογραφίες όγκου/βάθους 35-45 cm για τη γεωηλεκτρική διασκόπηση (αριστερά) και για τη διασκόπηση γεωραντάρ (δεξιά).

Λαμβάνοντας υπόψη (α) τα αρχαιολογικά ευρήματα, (β) το γεγονός ότι οι δύο (2) διασκοπικές γεωφυσικές μέθοδοι/τεχνικές διαχειρίζονται διαφορετικές φυσικές παραμέτρους και (γ) τα αποτελέσματα τους όπως αυτά αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν, αναγνωρίζουμε **τρεις (3) θέσεις**, όπου εντοπίζονται:

- A. Υψηλές τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης ($\rho > 90 \text{ Ohm.m}$) και αντίστοιχα
- B. Μεγάλης έντασης ανακλάσεις (*envelope amplitude* > 3000).

Στις δύο (2) οριζοντιογραφίες όγκου/βάθους της Εικόνας 4.3 παρατηρούνται:

- Στο δυτικό τμήμα του οικοπέδου (**κόκκινη εστιγμένη πολυγωνική γραμμή**), αναδεικνύεται μια ευρεία ζώνη ανακλάσεων, με ένταση ανάκλασης, *envelope amplitude*=3000-4000, μεγάλης έκτασης και γραμμικότητας ανάπτυξης ΒΔ-ΝΑ, η οποία φαίνεται να αντιστοιχίζεται με εκείνη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, $\rho=90-130 \text{ Ohm.m}$. Η έκταση της ζώνης αυτής εκτιμάται στα 200 m².
- Με **πορτοκαλί εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** σημειώνονται και στις δύο οριζοντιογραφίες, η περιοχή με τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, $\rho=100 -300 \text{ Ohm.m}$ και ένταση ανάκλασης, *envelope amplitude* >4000.
- Με **πράσινη** (στην γεωηλεκτρική οριζοντιογραφία) και **κίτρινη** (στη οριζοντιογραφία γεωραντάρ) **εστιγμένη γραμμή** σημειώνεται μια επιπλέον θέση, με μικρής έκτασης αλλά με έντονη γραμμική ένταση ανάκλασης, *envelope amplitude* >5000 και μεγάλες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, $\rho=90-130 \text{ Ohm.m}$, διεύθυνσης ΝΑ-ΒΔ.
- Με τη **λευκή εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** στον χάρτη όγκου/βάθους της διασκόπησης γεωραντάρ παρατηρούμε υψηλές τιμές έντασης ανάκλασης, *envelope amplitude* >5000. Αντιθέτως στο χάρτη όγκου/βάθους της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, στην συγκεκριμένη περιοχή, παρατηρείται απουσία υψηλών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην συμπεράσμα ότι στο χάρτη γεωραντάρ οι ανακλάσεις φαίνεται να προέρχονται από το ριζικό σύστημα του δένδρου που βρίσκεται στο συγκεκριμένο σημείο.

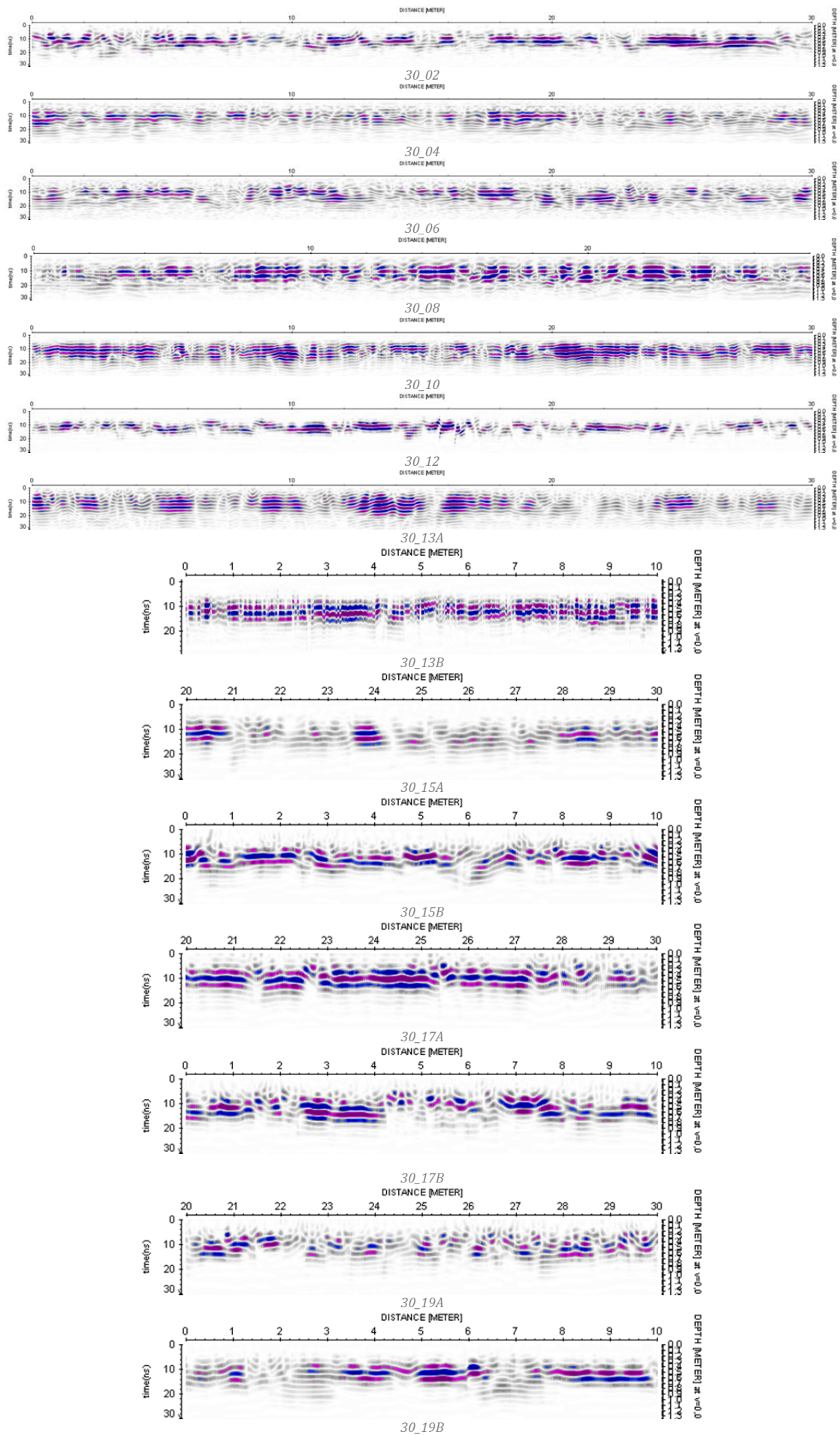
Ολοκληρώνοντας, η γεωμετρική διάταξη των αρχαιολογικών τοιχίων (βλ. εικ. 4.1), το μέγεθος των οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (βλ. εικ. 4.2), σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής διασκόπησης (κυρίως στο βάθος των 35-45 cm - βλ. εικ. 4.3), μας επιτρέπει να υποθέσουμε ότι οι αποκαλυφθείσες δομές συνεχίζονται και στο άσκαφο τμήμα. Στην **Εικόνα 4.4** παρουσιάζονται με **κίτρινη εστιγμένη πολυγωνική γραμμή** οι τρεις (3) προτεινόμενες περιοχές εκσκαφής.

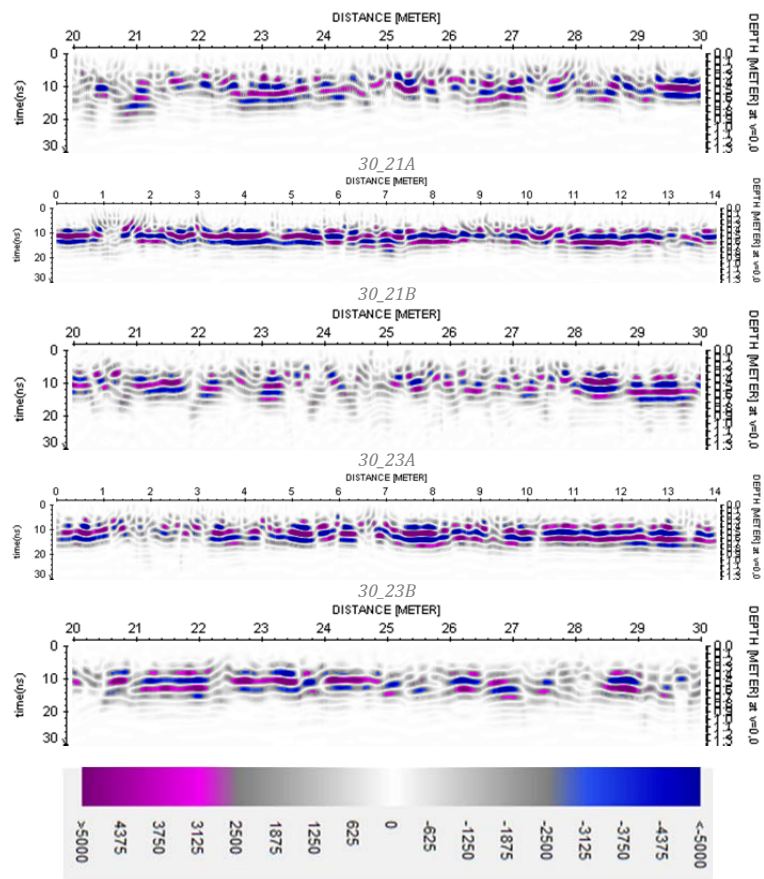


Εικόνα 4.4 Θέσεις προτεινόμενων εκσκαφών (κίτρινες εστιγμένες περιοχές).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

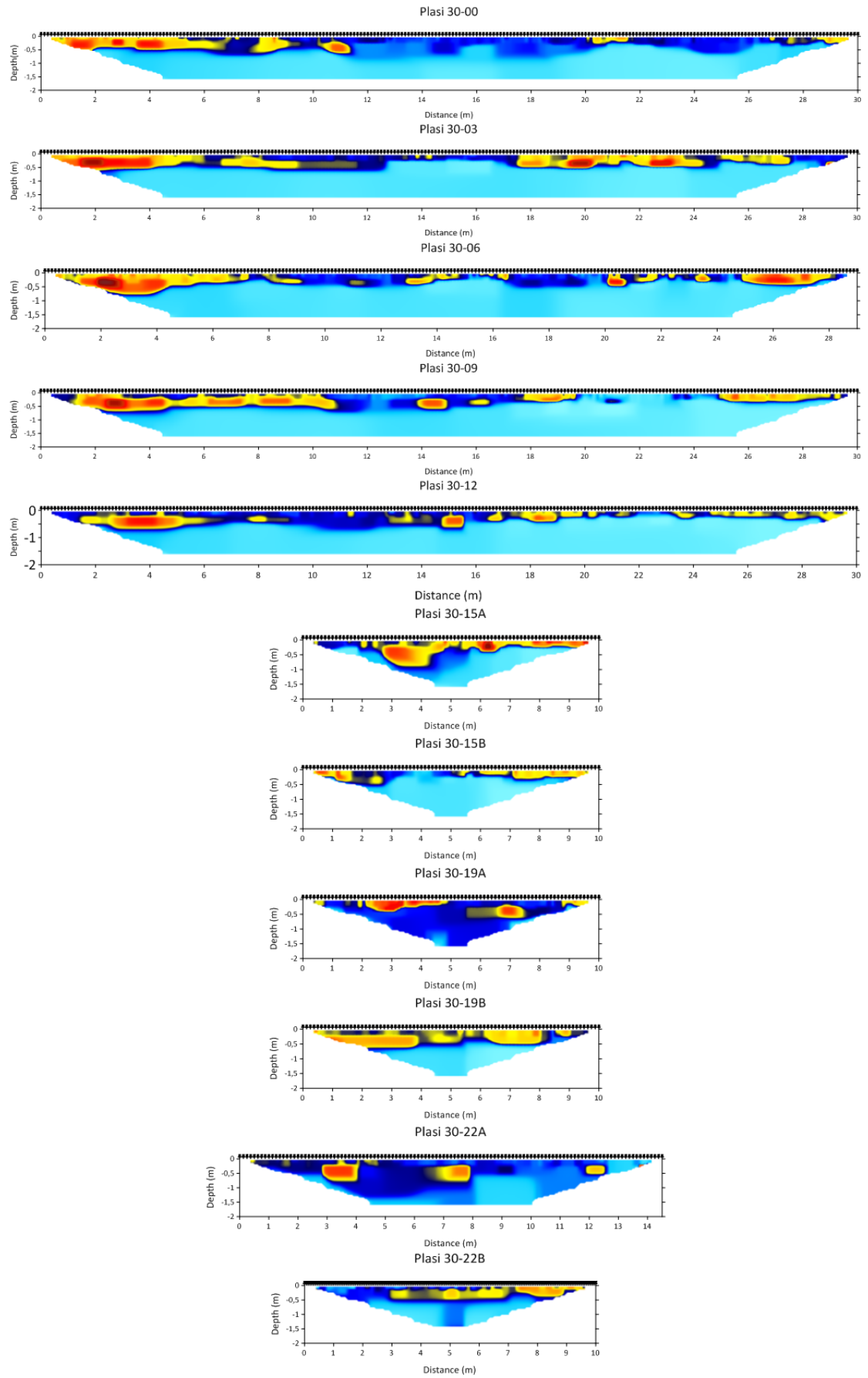
*Αποτελέσματα διασκόπησης γεωραντάρ
[επεξεργασία ραδιογραφημάτων (B-scan)]*

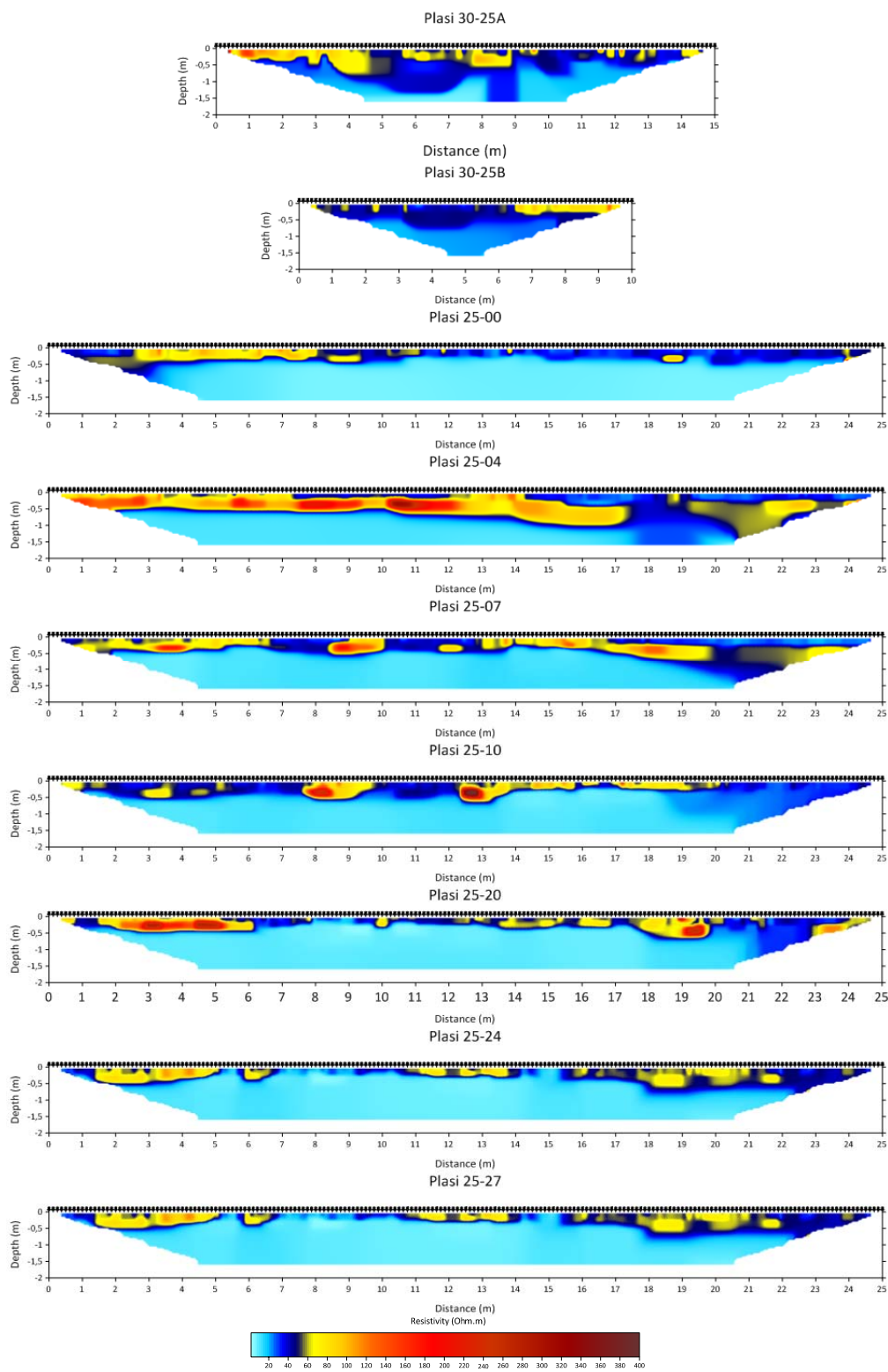




ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Γεωηλεκτρικά τομογράμματα





BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Annan, A.P. (1996). Transmission dispersion and GPR. JEEG, Vol. 0, January 1996, pp. 125–136.
- Annan, A.P. (2003). Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications. Sensors & Software Inc. Technical Paper.
- Annan, A.P. (2005). Ground penetrating radar, in near surface geophysics, in D.K. Butler (eds), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, USA, Investigations in Geophysics No. 13, pp. 357–438.
- Annan, A.P. (2009). Chapter 1 - Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In Ground Penetrating Radar Theory and Applications, Harry M. Jol, ed. (Amsterdam: Elsevier), pp. 1–40.
- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, Vol. 146, pp. 54–62.
- Born, M. and Wolf, E. (1980). Principles of Optics, 6th edition, Pergamon Press, Oxford, UK.
- Burhl, M., Vermeer, G.J.O. and Kiehn, M. (1996). Fresnel zones for broadband data. Geophysics, Vol. 61, pp. 600–604.
- Cassidy, N.J. (2009). Chapter 2 - Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In Ground Penetrating Radar Theory and Applications, Harry M. Jol, ed. (Amsterdam: Elsevier), pp. 41–72.
- Conyers, Lawrence B. (2009). Ground-penetrating radar for landscape archaeology. In: Campana, Stefano & Salvatore Piro (eds.) Seeing the Unseen-Geophysics and Landscape Archaeology, pp. 245–56. CRC Press/Balkema: Taylor and Francis Group, London.
- Conyers Lawrence B. (2013). Ground-penetrating Radar for Archaeology, 3rd Edition. Altamira Press, Rowman and Littlefield Publishers, Lantham, Maryland.
- Davis, J.L. and Annan, A.P. (1989). Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, Vol. 37, pp. 531–551.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data. Geophysics, 55, p. 1613-1624.
- El Said, M.A.H. (1956). Geophyprospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes, Proc. I.R.E., Vol. 44, pp. 24–30 and 940.
- Edwards L. S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP, Geophysics, 42(5), 1020-1036.
- Everett, M. E. (2013). Near-Surface Applied Geophysics, Cambridge University Press.
- Fisher, E., McMechan, G.A. and Annan, A.P. (1992). Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data. Geophysics, Vol. 57, p. 495.
- Gerlitz, K., Knoll, M.D., Cross, G.M., Luzitano, R.D., and Knight, R. (1993). Processing ground penetrating radardata to improve resolution of near-surface targets:

- in Proceedings: Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems, 561–574
- Goodman, Dean & Piro, Salvatore (2013). GPR Remote Sensing in Archaeology. Geotechnologies and the Environment, Volume 9, Springer Science, New York.
- Hasted, J.B. (1972). Liquid water -dielectric properties, in F. Franks (ed.), Water a Comprehensive Treatise, Vol. 1, The Physics and Physical Chemistry of Water, Plenum Press, New York, p. 255–310.
- Imposa, S., Grassi, S., Patti, G., Boso, D. (2018). New data on buried archaeological ruins in Messina area (Sicily-Italy) from a ground penetrating radar survey, Journal of Archaeological Science: Reports 17, p. 358–365
- Jackson, J.D. (1962). Classical Electrodynamics, John Wiley and Sons, New York.
- Jol, M., Harry (2009). Ground penetrating radar: Theory and Applications, Elsevier Science
- Knapp R.W. (1991). Fresnel zones in the light of broadband data. Geophysics, Vol. 56, pp. 354–359.
- Lehmann, F. and Green, A.G. (2000). Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing. Geophysics, Vol. 65, No. 3, pp. 836–848.
- Leckebusch Jurg (2003). Ground-penetrating Radar: A Modern Three-dimensional Prospection Method, Archaeol. Prospect. 10, p.213–240.
- Lozios, S. (1993). Tectonic Analysis of Transformed Formations of Northeast Attica. PhD thesis, 317 pp., Athens 1993. (in Greek)
- Loke, M.H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Malaysia.
- Loke M. H., Barker R.D. (1996). Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections Using A Quasi-Newton Method, Geophysical Prospecting p131-152
- Lowe, K., Fogel, A.S., Sneddon, A. (2018). Archaeological geophysical survey of a Prehistoric Bronze Age site in Cyprus (Alambra Mouttes)—applications and limitations, Archaeological Anthropol. Sci. 10, p.1971–1989
- Neal, A. (2004). Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: Principle, Problem and Progress. Earth Science Reviews, 66
- Nuzzo L., Leucci G., Negri S. (2009). GPR, ERT and Magnetic Investigations Inside the Martyrium of St Philip, Hierapolis, Turkey, Archaeol. Prospect. 16, p.177–192
- Porsani J.L., Jangelme G., Kipnis R. (2010). GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil, Journal of Archaeological Science 37, p.1141–1148
- Polychronakou-Sgouritsa, Naya, Papadatos, Yiannis, Balitsari, Anthi and Prevedorou, Eleanna. (2016). Marathon in the Middle and Late Bronze Age: New Evidence from an Old Excavation. Preliminary Results from the Excavation of the

- University of Athens at Plasi. J. Driessen (ed.) *Ra-pi-ne-u: Studies on the Mycenaean World offered to Robert Laffineur for his 70th Birthday*, Aegis 10, Louvain-la-Neuve: Presses universitaires de Louvain. p. 305-315.
- Robinson, M., Bristow C., McKinley, J., & Ruffell, A. (2013). *Ground Penetrating Radar: Geomorphological Techniques*, Part 1, sec 5.5, British Society for Geomorphology
- Seni, A., Kapsimalis, B., & Pavlopoulos, K. (2010). Determination of recent changes in the Marathon coastal plain of Attica, using Geographical Information Systems. *Proceedings of the Pan-Hellenic Geographical Conference* (pp. 478-485). Mytilene.
- Smythe, W.R. (1989). *Static & Dynamic Electricity*, Taylor & Francis, A SUMMA book.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge Univ. Press, p. 843.
- Todoeschuck, J.P., Lafleche, P.T., Jensen, O.G., Judge, A.S. and Pilon, J.A. (1992). Deconvolution of ground probing radar data, ed. J. Pilon. Geological Survey of Canada, Paper 90-4, pp. 227-230.
- Turner, G. (1992). Propagation deconvolution. Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, June 8-13, 1992, Rovaniemi, Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 16, 365 pp.
- Waite, A.H. and Schmidt, S.J. (1961). Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow. *IRE International Convention Record*, Part 5, pp. 38-54.
- White, R.E. (1991). Properties of instantaneous seismic attributes, *The Leading Edge*. Society of Exploration Geophysicists, Vol. 10, No. 7, pp. 26-32.
- Woodward, J., Ashworth, P.J., Best, J.L., Gregory H. Smith, S., Simpson, C.J. (2003). The use and application of GPR in sandy fluvial environments: methodological considerations, Geological Society, London, Special Publications, 211, p.127-142,
- Zhao, W., Forte, E., Levi, S.T., Pipan, M., Tian, G. (2015). Improved high-resolution GPR imaging and characterization of prehistoric archaeological features by means of attribute analysis, *Journal of Archaeological Science* p.77-85.
- Yelf, R.J. (2004). Where is True Time Zero?, *Proc. of the 10-th International GPR Conference* Vol. 1 (Delft University, Netherlands), p. 279-282.