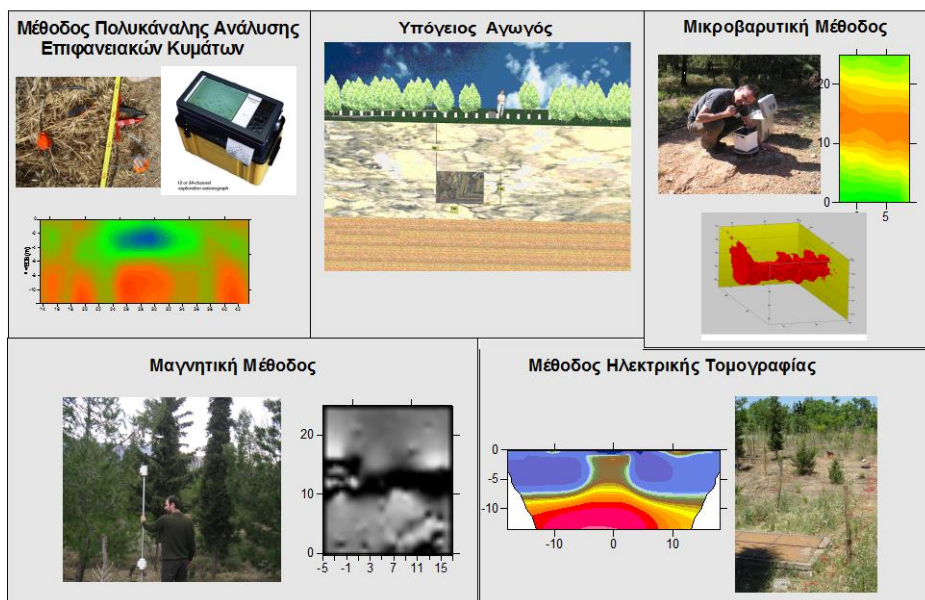




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών
Τομέας Μεταλλευτικής
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ

Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση Υπεδάφους



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΟΡΦΑΝΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2011
ΑΘΗΝΑ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών
Τομέας Μεταλλευτικής
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

ΤΙΤΛΟΣ:

**ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΥΠΕΛΑΦΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΥΠΟΓΕΙΩΝ
ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΟΡΦΑΝΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή: Αποστολόπουλος Γ. : Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π
Σταματάκη Σ. : Καθηγήτρια Ε.Μ.Π
Λούης Ι. : Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή στις 06/04/2011

Γεώργιος Αποστολόπουλος, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)
Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια ΕΜΠ, (Υπογραφή)
Αλέξανδρος Σοφιανός, Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)
Δημήτριος Καλιαμπάκος, Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)
Αντώνης Βαφείδης, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης, (Υπογραφή)
Παναγιώτης Τσούρλος, Αναπλ. Καθηγητής ΑΠΘ, (Υπογραφή)
Ιωάννης Αλεξόπουλος, Επικ. Καθηγητής ΕΚΠΑ, (Υπογραφή)

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2011, ΑΘΗΝΑ

Copyright © Ορφανός Χρήστος, 2011
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*«Ένας άνθρωπος παύει να είναι αρχάριος σε οποιαδήποτε επιστήμη
και γίνεται γνώστης αυτής όταν συνειδητοποιήσει ότι θα είναι
αρχάριος σε όλη του τη ζωή.»*

Ρομπιν Τζ. Κολινγκουντ (1889-1943), άγγλος φιλόσοφος.
(απόσπασμα από το βιβλίο “Bing Bang” του Simon Singh)

Πρόλογος

Ένα διαχρονικό ζήτημα, το οποίο απασχολεί την επιστημονική, και όχι μόνο κοινότητα, αποτελεί η σύνδεση της επιστημονικής γνώσης με την κοινωνία. Ιδιαίτερα στη σημερινή εποχή της έντονης εξειδίκευσης της γνώσης, στους διάφορους επιστημονικούς κλάδους, η ανάγκη για τη μετουσίωση των επιστημονικών επιτευγμάτων σε πραγματικό κοινωνικό όφελος πρέπει να αποτελεί πρωταρχικό ζήτημα για έναν ερευνητή. Η λογική της «επιστήμης για την επιστήμη» δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αποτελεί την βάση ή το σημείο εκκίνησης ενός ερευνητή, αφού η προαγωγή της επιστήμης απαιτείται να είναι συνυφασμένη με τον ανθρωπιστικό χαρακτήρα των αποτελεσμάτων της. Σε μια εποχή, όπου αναδεικνύεται συνεχώς η ανάγκη σύνδεσης και συνεργασίας διαφορετικών επιστημονικών κλάδων για τη βέλτιστη αντιμετώπιση-επίλυση σύνθετων ζητημάτων και προβλημάτων (κοινωνικών, τεχνικών, οικονομικών), η διεξαγωγή έρευνας σε αλληλοκαλυπτόμενα επιστημονικά πεδία και ο συνδυασμός-ανταλλαγή επιστημονικών επιτευγμάτων – γνώσης, μεταξύ διαφορετικών κλάδων της επιστήμης αποτελεί σημαντικότατο συστατικό για την εν δυνάμει συνεισφορά της επιστήμης στο κοινωνικό σύνολο. Στο πλαίσιο αυτό, κινείται η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή, η οποία έχει ως στόχο την επίλυση ενός σύνθετου προβλήματος το οποίο σχετίζεται με το επιστημονικό πεδίο των μηχανικών (πολιτικών-μεταλλειολόγων-χημικών κ.α) και άλλων ερευνητών και το οποίο αποτελεί τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων στο υπέδαφος μέσω της συνδυαστικής γεωφυσικής διερεύνησης.

Η κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων, όπως έργα υποδομής, ενεργειακά, συγκοινωνιακά κ.α. είναι δυνατόν να αποτελέσει ένα σημαντικό μοχλό ανάπτυξης για την Ελλάδα τα επόμενα χρόνια, ιδιαίτερα στη σημερινή χρονική περίοδο όπου η ελληνική οικονομία βρίσκεται σε ύφεση. Οι προδιαγραφές ασφάλειας, ο περιορισμός του κόστους, η συντήρηση και η καλή λειτουργία ενός τεχνικού έργου σχετίζονται άμεσα με την ακριβή και λεπτομερή μελέτη των συνθηκών του υπεδάφους και ακολούθως με την οριοθέτηση υπόγειων ανοιγμάτων, η ύπαρξη των οποίων αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα κατά την διαχείριση τεχνικών έργων. Τα κύρια προβλήματα που δημιουργούνται από την παρουσία τέτοιων δομών στο υπέδαφος σχετίζονται με φαινόμενα καθιζήσεων, με αστοχία σε θεμελιώσεις και σε ροή επικίνδυνων ρύπων μέσω αυτών. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική και ειδικότερα η Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση του Υπεδάφους αποτελεί ένα χρήσιμο, οικονομικό και μη καταστρεπτικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό τέτοιων στόχων.

Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή συμβάλει στην αντιμετώπιση του προβλήματος του εντοπισμού υπόγειων ανοιγμάτων, με τη διερεύνηση διάφορων παραγόντων που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα των επιμέρους μοντέλων ερμηνείας διαφορετικών επιφανειακών γεωφυσικών μεθόδων αλλά και με την ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας για τη συνδυαστική ερμηνεία γεωφυσικών μεθόδων η οποία συντελεί στη μείωση της αβεβαιότητας και στην αύξηση του ποσοστού της αξιοπιστίας της τελικής γεωφυσικής ερμηνείας.

Τα καινοτομικά στοιχεία της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτελούν αφενός η δυνατότητα ανταλλαγής «πληροφορίας» μεταξύ των διάφορων μεθόδων με τη χρήση στατιστικών τεχνικών, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης συγκεκριμένων σχέσεων-συναρτήσεων για την αλληλοσυσχέτιση των παραμέτρων των διάφορων μοντέλων ερμηνείας και αφετέρου η αντικειμενικότητα της διαδικασίας αυτής σε σχέση με την απλή συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διάφορων μεθόδων. Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο αποτελεί ότι η απεικόνιση και η κατανόηση του Τελικού Ενοποιημένου

Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.), το οποίο προκύπτει από τη στατιστική και απαλλαγμένη από υποκειμενικές κρίσεις διαδικασία, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή, σε μελετητές και ερευνητές διάφορων ειδικοτήτων για την περαιτέρω αξιοποίηση της παρεχόμενης πληροφορίας, χωρίς να είναι απαραίτητη εξειδικευμένη τεχνογνωσία σχετικά με την Εφαρμοσμένη Γεωφυσική.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την παρουσία και συμβολή σημαντικών ανθρώπων και συνεργατών, οι οποίοι με στήριξαν και με καθοδήγησαν σε όλη την διάρκεια της έρευνας μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Δρ Σοφία Σταματάκη, Καθηγήτρια ΕΜΠ, η οποία με εμπιστεύθηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και αποτελούσε συνεχή πηγή εμπνευσης, τον επιβλέποντα Δρ Γεώργιο Αποστολόπουλο, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ ο οποίος μου ενέπνευσε την αγάπη για την Εφαρμοσμένη Γεωφυσική και με καθοδήσε καθ'όλη την διάρκεια της έρευνας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τρίτο μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής Δρ Λούης Ι., Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α. αλλά και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Φυσικά δεν μπορώ να ξεχάσω να ευχαριστήσω τον κ Γεώργιο Αμολοχίτη και τον φίλο και κουμπάρο μου Κωνσταντίνο Λεονταράκη, οι οποίοι με βοήθησαν τόσο κατα την διαδικασία λήψης των μετρήσεων όσο και κατά την ερμηνεία τους. Περάσαμε πολλές ώρες στην ύπαιθρο αλλά και στο εργαστήριο, αναλύοντας και συζητώντας τα γεωφυσικά θέματα που άπτονται της παρούσας εργασίας. Επιπλέον ευχαριστώ κάθε προπτυχιακό και μεταπτυχιακό φοιτητή που μου παρείχε πολυτιμή βοήθεια κατα τη λήψη των μετρήσεων.

Παρόλο που δεν είχε την παραμικρή ιδέα για την εφαρμοσμένη γεωφυσική, εάν δεν υπήρχε στη ζωή μου η Ιωάννα Λεώνη, η φίλη μου και τώρα πια γυναίκα μου, είναι σίγουρο ότι η συγκεκριμένη εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί. Οι ατελείωτες συζητήσεις μας, μου έδωσαν το απαραίτητο κουράγιο, δύναμη και ηρεμία να συνεχίζω απερίσκεπτος την έρευνα μου.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διδακτορική διατριβή στους αγαπημένους γονείς Σπύρο και Χριστίνα Ορφανού και τις αδελφές μου Ειρήνη και Φωτεινή Ορφανού, που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξαν ψυχολογικά και οικονομικά, ως ένα μικρο δείγμα της απέραντης αγάπης μου για αυτούς.

Περίληψη

Η παρουσία υπόγειων ανοιγμάτων μπορεί να προκαλέσει αστοχίες σε κατασκευές, στη χάραξη δρόμων και διάφορων γεωτεχνικών έργων αλλά και να συντελέσει στην απορροή ρύπων στον υδάτινο ορίζοντα, δημιουργώντας προβλήματα από περιβαλλοντικής απόψεως. Επιπλέον, ένα υπόγειο κενό μπορεί να αποτελεί τον ζητούμενο στόχο σε μια αρχαιολογική έρευνα. Η εφαρμοσμένη γεωφυσική αποτελεί ένα χρήσιμο, οικονομικό και μη καταστρεπτικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό τέτοιων στόχων. Σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εκτέλεση γεωτρητικών ερευνών, ο καλύτερος τρόπος για την αύξηση της αξιοπιστίας της τελικής ερμηνείας είναι η εφαρμογή περισσότερων από μίας γεωφυσικής μεθόδου στην ίδια περιοχή έρευνας δηλαδή **Συνδυαστικής Γεωφυσικής Διερεύνησης του Υπεδάφους**. Ακόμα, όμως και στην περίπτωση της Συνδυαστικής Γεωφυσικής Διερεύνησης του Υπεδάφους, η αξιοπιστία της τελικής ερμηνείας εξαρτάται κατά πολύ από την ορθή και βέλτιστη εφαρμογή κάθε μεθόδου. Μεταξύ της εφαρμογής της μεθόδου και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων, μεσολαβούν πολυάριθμα βήματα που πρέπει να γίνουν με τον ορθότερο τρόπο, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι βέλτιστο. Σε αντίθετη περίπτωση τα αποτελέσματα μπορεί να μην είναι ικανοποιητικά ή ακόμη χειρότερα να είναι «παραπλανητικά».

Στόχος του συγκεκριμένου διδακτορικού αποτελεί η βέλτιστη συνδυαστική ερμηνεία των κυριότερων επιφανειακών γεωφυσικών μεθόδων, για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την ύπαρξη υπόγειων ανοιγμάτων στο υπέδαφος.

Η συγκεκριμένη εργασία χωρίζεται σε πέντε κύρια Κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 1** διασαφηνίζεται ο όρος υπόγεια ανοίγματα και παρουσιάζονται συνοπτικά οι επιπτώσεις της παρουσίας τους στα τεχνικά έργα.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται περιληπτικά οι κυριότερες επιφανειακές γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό υπόγειων στόχων και χαρακτηριστικά παραδείγματα διεθνών εφαρμογών τους. Επιπλέον, αναλύεται η ανάγκη και τα κίνητρα της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η ανάλυση των κυριότερων γεωφυσικών μεθόδων στον εντοπισμό υπόγειου στόχου γνωστών διαστάσεων σε πραγματικές αλλά ελεγχόμενες συνθήκες υπαίθρου. Κυρίως, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξάχθηκαν με τις παραπάνω μεθόδους για τον εντοπισμό ενός υπόγειου αγωγού στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε κάθε μέθοδο υπάρχουν διαφορετικές παράμετροι που πρέπει να ερευνηθούν, τα αποτελέσματα κάθε μεθόδου θα αναλυθούν και θα παρουσιαστούν ξεχωριστά. Κύριος στόχος αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με α) τη διαδικασία λήψης μετρήσεων β) την επεξεργασία των μετρήσεων γ) την ερμηνεία τους δ) την αξιοπιστία και ακρίβεια των αποτελεσμάτων. ε) την επίδραση της γεωλογικών σχηματισμών κ.α.

Στο **Κεφάλαιο 4**, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μεθόδων της 2D και 3D ηλεκτρικής τομογραφίας, της βαρτομετρίας και της μαγνητομετρίας σε πραγματική εφαρμογή, η οποία μεταφέρει το πρόβλημα του εντοπισμού στόχων από τις δύο διαστάσεις (οριοθέτηση αγωγού – x,z) στις τρεις διαστάσεις (εντοπισμός και οριοθέτηση προσανατολισμού αρχαίας - x,y,z) δίνοντας την ευκαιρία για τη σύγκριση μεταξύ των

διδιάστατων και τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόζονται, συγκρίνονται και αξιολογούνται τα συμπεράσματα και οι διαπιστώσεις που προκύπτουν κατά την πορεία της συγκεκριμένης διατριβής εμπλουτίζοντας τις επισημάνσεις και τα κύρια σημεία για τη βελτιστοποίηση της κάθε μεθόδου αλλά και τη συγκριτική αξιολόγηση τους.

Στο **Κεφάλαιο 5**, θα παρουσιαστεί μια νέα διαδικασία συνδυαστικής ερμηνείας πολλαπλών γεωφυσικών μεθόδων με τη βοήθεια της στατιστικής πολυπαραμετρικής ανάλυσης. Η διαδικασία που προτείνεται θα εφαρμοστεί αρχικά σε συνθετικά δεδομένα αλλά και σε πραγματικά δεδομένα ελεγχόμενων συνθηκών και έπειτα σε πραγματικό πρόβλημα, το οποίο αφορά τον εντοπισμό υπόγειων εγκοίλων σε γεωτεχνική εφαρμογή.

Στο **Κεφάλαιο 6**, θα παρουσιαστούν τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν, όσον αφορά τη συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων.

Τέλος, στο **Παράρτημα I** παρουσιάζονται περιληπτικά οι βασικές αρχές εφαρμογής των επιφανειακών γεωφυσικών μεθόδων, οι οποίες αναλύθηκαν στο πείραμα εντοπισμού του αγωγού στην περιοχή της Πολυτεχνειούπολης.

Περιεχόμενα

<i>Πρόλογος</i>	7
<i>Ευχαριστίες</i>	9
<i>Περίληψη</i>	11
<i>Ευρετήριο φωτογραφιών</i>	23
<i>Κεφάλαιο 1 :</i>	25
<i>Υπόγεια Ανοίγματα & Τεχνικά έργα</i>	25
1.2 Επιπτώσεις Υπόγειων Ανοιγμάτων σε Τεχνικά Έργα	28
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:</i>	35
<i>Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική στον εντοπισμό Υπόγειων Ανοιγμάτων</i>	35
2.1 Εφαρμοσμένη Γεωφυσική & Υπόγεια Ανοίγματα	36
2.3 Αναγκαιότητα & Κίνητρα της Έρευνας	45
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:</i>	49
<i>Ανάλυση Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Υπόγειου Στόχου Προσδιορισμένων Διαστάσεων</i>	49
3.1 Πείραμα Υπαίθρου- Συνθήκες.....	50
3.2 Εφαρμογή Ηλεκτρικής Τομογραφίας	57
3.2.1 Στόχος της Έρευνας	57
3.2.2 Εργασίες Υπαίθρου-Γραμμές Έρευνας	57
3.2.3 Συγκριτική Αξιολόγηση Διατάξεων Ηλεκτροδίων	58
3.2.3.1 Διάταξη Wenner Schlumberger (WS)	59
3.2.3.2 Διάταξη Dipole dipole (DD)	61
3.2.3.3 Διάταξη Pole Dipole (PD)	64
3.2.3.4 Διάταξη Pole Pole (PP).....	68
3.2.3.5 Διάταξη Half- Schlumberger (HS).....	70
3.2.4 Συνδυαστική Ερμηνεία των Μετρήσεων των Διαφόρων Διατάξεων	71
3.2.5 Τεχνική Βελτιστοποίησης Συνδυαστικής Επεξεργασίας Μοντέλων Ερμηνείας Διάφορων Διατάξεων	73
3.2.6 Επίδραση Παραμέτρων Αντιστροφής στα Μοντέλα Ερμηνείας	75
3.2.6 Χρήση Συνθετικών Μοντέλων για την Περαιτέρω Σύγκριση των Διατάξεων.....	79
3.3 Εφαρμογή Μικροβαρυντικής Μεθόδου.....	85
3.3.1 Στόχος Πειράματος	85
3.3.2 Εργασίες Υπαίθρου- Λήψη Μετρήσεων	85
3.3.3 Μικροβαρυντικές Διορθώσεις	88
3.3.4 Τοπογραφική Διόρθωση	88
3.3.5 Χαρακτηρισμός Ποιότητας Μετρήσεων	90
3.3.6 Μέθοδος και Βήμα Πλεγματοποίησης Μετρήσεων (Gridding)	94
3.3.7 Διαχωρισμός Τοπικής Κλίμακας Ανωμαλία από Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλίας.	95
3.3.8 Εφαρμογή Τεχνικών Επεξεργασίας Μετρήσεων	97
3.3.8.1 Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συνοτήτων (Lowpass Filters)	99
3.3.8.2 Προς τα άνω και προς τα κάτω Συνέχεια (Upward and Downward Continuation)	100
3.3.8.3 Παράγωγοι Διευθύνσεων	102
3.3.9 Αντιστροφή Δεδομένων Βαρυντικής Διασκόπησης	102
3.3.9.1 Διαδικασία Αντιστροφής	104
3.3.9.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	106
3.4 Εφαρμογή Μαγνητικής Μεθόδου.....	109

3.4.1 Στόχος Πειράματος	109
3.4.2 Εργασίες Υπαίθρου-Λήψη Μετρήσεων	109
3.4.4 Τεχνικές Επεξεργασίας Μετρήσεων	112
3.4.4.1 Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συχνοτήτων (low pass filters)	113
3.4.4.2 Προς τα Άνω Συνέχεια (upward continuation)	114
3.4.4.3 Αναγωγή στον Πόλο (Reduction to the pole)	114
3.4.4.4 Ψευδοβαρυντική Μετατροπή (Pseudogravity Transformation)	115
3.4.4.5 Παράγωγοι Διευθύνσεων	116
3.5 Εφαρμογή Μεθόδου Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων.....	119
3.5.1 Στόχος Πειράματος	119
3.5.2 Σχεδιασμός Έρευνας –Λήψη Μετρήσεων.....	119
3.5.3 Μονοδιάστατη Ερμηνεία Σεισμικών Γραμμών Διασκόπησης	121
3.5.4 Διδιάστατη Ερμηνεία Σεισμικών Τομών	138
3.5.5 Εμφάνιση Επίδρασης Υπόγειων Ανοιγμάτων στο Συχνολογικό Πεδίο	140
3.6: Σχολιασμός-Συμπεράσματα.....	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :	149
<i>Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση για τον Εντοπισμό Αρχαίας Στοάς στον Αρχαιολογικό Χώρο Μπερτσέκο Λαυρίου.....</i>	<i>149</i>
4.1 Εισαγωγή	150
4.2 Περιοχή-Αντικείμενο Έρευνας	150
4.3 Γεωλογία της Περιοχής	152
4.5 Εντοπισμός Αρχαίας Στοάς με τη Μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας	156
4.5.1 Στόχος του πειράματος	156
4.5.2 Ψευδο-τριδιάστατη και Τριδιάστατη Ηλεκτρική Τομογραφία μη Παράλληλα Διατεταγμένων Γραμμών Διασκόπησης με τη Διάταξη Pole Pole (PP).....	157
4.5.2.1 Σχεδιασμός Έρευνας	157
4.5.2.2 Επεξεργασία Μετρήσεων.....	158
4.5.2.3 Ερμηνεία Μετρήσεων με Διδιάστατες Τεχνικές	161
4.5.2.4 Ερμηνεία Μετρήσεων με Τριδιάστατες Τεχνικές.....	165
4.5.3 Τριδιάστατη Ηλεκτρική Τομογραφία Παράλληλα Διατεταγμένων Γραμμών Διασκόπησης με τη Διάταξη Pole Dipole	168
4.5.3.1 Σχεδιασμός Έρευνας	168
4.5.3.2 Επεξεργασία Μετρήσεων.....	169
4.5.3.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Τριδιάστατης Τεχνικής Ερμηνείας	170
4.5.4 Συνδυαστική Ερμηνεία Μοντέλων Ερμηνείας Διατάξεων Pole Dipole (PD) & Pole Pole (PP)	173
4.5.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Ψευδοτριδιάστατων & Τριδιάστατων Τεχνικών Ερμηνείας... ..	174
4.6 Εντοπισμός Αρχαίας Στοάς με τη Μικροβαρυντική Μέθοδο.....	176
4.6.1 Στόχος του Πειράματος	176
4.6.2 Σχεδιασμός Έρευνας.....	176
4.6.3 Λήψη Μετρήσεων	179
4.6.4 Μικροβαρυντικές Διορθώσεις	179
4.6.5 Επεξεργασία Μετρήσεων	182
4.6.6 Αντιστροφή Μετρήσεων Μικροβαρυντομετρίας	184
4.7: Εντοπισμός Αρχαίας Στοάς με τη Μαγνητική Μέθοδο.....	186
4.7.1 Στόχος Έρευνας.....	186
4.7.2 Σχεδιασμός Έρευνας- Λήψη Μετρήσεων	186
4.7.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	187
4.8 : Σχολιασμός-Συμπεράσματα.....	189
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:.....	191
<i>Πολυπαραμετρική Στατιστική Ανάλυση για τη Συνδυαστική Ερμηνεία Γεωφυσικών Μεθόδων</i>	<i>191</i>

5.1 Εισαγωγή	192
5.2 Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο του Υπεδάφους (Ε.Γ.Μ.Υ.).....	193
5.4: Πολυπαραμετρική Ανάλυση Γεωφυσικών Μεθόδων για τη Δημιουργία Ε.Γ.Μ.Υ σε Προσδιορισμένα Υπεδαφικά Μοντέλα.....	196
5.4.1 Συνθετικό Μοντέλο 1: Ύπαρξη Δύο Στοών σε Ομογενή Ημιχώρο	196
5.4.2. Πραγματικά Δεδομένα σε Ελεγχόμενες Συνθήκες.....	204
5.5: Ανάπτυξη Τεχνικής Επιλογής και Απεικόνισης ενός Τελικού Ενοποιημένου Μοντέλου του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ) στην Περίπτωση Εντοπισμού Υπόγειων Ανοιγμάτων	207
5.6 : Ανάλυση Τ.Ε.Γ.Μ.Υ για τον Εντοπισμό Υπόγειων Εγκοίλων σε Γεωτεχνική Εφαρμογή	210
5.6.1 Εισαγωγή	210
5.6.2 Περιγραφή του Προβλήματος	211
5.6.3 Σχεδιασμός Έρευνας-Λήψη Μετρήσεων	211
5.6.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μεμονωμένης Επεξεργασίας	213
5.6.4.1 Αποτελέσματα Μεθόδου Ηλεκτρικής Τομογραφίας	213
5.6.4.3 Αποτελέσματα Μικροβαρυτομετρίας	215
5.6.5 Συνδυαστική Ερμηνεία με τη Συγκριτική Αξιολόγηση των Διάφορων Γεωφυσικών Μεθόδων	217
5.6.6 Συνδυαστική Γεωφυσική Ερμηνεία με τη Δημιουργία του Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.	218
5.6 : Αντιστροφή Γεωφυσικών Μετρήσεων με τη Χρήση του (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.) ως Αρχικό Μοντέλο	220
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	225
<i>Συμπεράσματα- Μελλοντική Έρευνα</i>	225
<i>Παράρτημα Ι :</i>	241
<i>Βασικές Αρχές Λειτουργίας & Ερμηνείας Γεωφυσικών Μεθόδων</i>	241
I.1 Ηλεκτρική Τομογραφία	242
I.1.1 Βασικές Έννοιες της Ηλεκτρικής Μεθόδου	242
I.1.3 Ηλεκτρική Τομογραφία	247
I.1.3.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Διατάξεων Ηλεκτροδίων στην Ηλεκτρική Τομογραφία	250
I.2. Μεθόδος Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων	258
I.2.1 Βασικές Έννοιες της Σεισμικής Μεθόδου	258
I.2.2 Κύματα Rayleigh και Φαινόμενο διασποράς	262
I.2.3 Στάδια της Μεθόδου της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων	266
I.2.4 Σεισμικός Γεωτεχνικός Χαρακτηρισμός των εδαφών (Vs30).....	270
I.3 Μικροβαρυτική Μέθοδος	272
I.3.1 Βασικές έννοιες της βαρυτικής διασκόπησης	272
I.3.2 Πυκνότητα εδαφικών υλικών και πετρωμάτων.....	273
I.3.3 Διεξαγωγή της μικροβαρυτομετρικής έρευνας	274
I.3.4 Τεχνικές επεξεργασίας μετρήσεων	275
I.4 Μαγνητική Μέθοδος	276
I.4.1 Βασικές έννοιες της μαγνητικής διασκόπησης	277
I.4.2 Επιδεκτικότητες των Πετρωμάτων και των Ορυκτών	278
I.4.3 Ονοματολογία του Μαγνητικού Πεδίου της Γης	279
I.4.4 Διεξαγωγή της μαγνητικής έρευνας	280
I.4.5 Τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων	281

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1.1: α) Σχεδιάγραμμα με τις τρεις περιπτώσεις κατάρρευσης καρστικού εγκοίλου (Ρόζος, 2005) β) Φυσική κατάρρευση οροφής σπηλαίου σε ανθρακικά πετρώματα στην περιοχή Αργολίδας (Ρόζος, 2005).....	27
Εικόνα 1.2 : Τομή κατά μήκος του άξονα, της κουρτίνας τσιμεντενέσεων στην περιοχή Λογγας της Ελάτης για τη στεγανοποίηση του ταμειυτήρα του φράγματος του Ιλαρίωνα (Καραπαντελάκη, 2008).	29
Εικόνα 1.3: Η ύπαρξη εγκοίλων αποτελεί απαγορευτική συνθήκη κατά τη χωροθέτηση ενός Χ.Υ.Τ.Α (Βουδούρης, 2009).	33
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα πιθανότητας εντοπισμού ενός υπόγειου στόχου σε συνάρτηση με τον αριθμό των γεωτρήσεων (Matias, 2008).	37
Εικόνα 2.2 : Η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην παρουσία ανομοιογένειας που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ειδική αντίσταση. (Furman et. al., 2002).....	38
Εικόνα 2.3 : Παράδειγμα εφαρμογής ηλεκτρικής μεθόδου για τον εντοπισμού υπόγειας στοάς στη Γαλλία. (AGI Advanced Geosciences, web site:www.aguisa.com).	38
Εικόνα 2.4 : Η μεταβολή της βαρυτικής έλξης λόγω της παρουσίας ενός υπόγειου κενού.	39
Εικόνα 2.5 : Παράδειγμα εντοπισμού υπόγειων εγκοίλων σε περιοχή της Βουδαπέστης (Kis M. et al., 2005).....	40
Εικόνα 2.6 : Μετρούμενη μαγνητική ανωμαλία προερχόμενη από υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας σώμα (Λούης 2003).	40
Εικόνα 2.7: Παράδειγμα εφαρμογής μαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων στοών σε περιοχή του κεντρικού Μεξικού. (Azate J. et al, 1990).	41
Εικόνα 2.8: α) Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του Γεωραντάρ β) Παράδειγμα εντοπισμού υπόγειων στοών με τη μέθοδο του Γεωραντάρ (Lorenzo et. Al 2002)....	42
Εικόνα 2.9 : Η έμμεση επίδραση ενός εγκοίλου σε διαθλώμενα κύματα. (W. Ed Wightman et. al., 2003).	43
Εικόνα 2.10 : Παράδειγμα εντοπισμού υπόγειας στοάς με τη μέθοδο της Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών κυμάτων. (Xia et.al., 2000).	44
Εικόνα 2.11: Παράδειγμα εφαρμογής της Ηλεκτρικής τομογραφίας για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων στη περιοχή του Αιγάλεω (Tsokas et. al, 2005).	45
Εικόνα 2.12 : Το πρόβλημα της ισοδυναμίας και της μη μοναδικότητας της λύσης σε : α) στη βαρυτική μέθοδο β) στη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας.	46
Εικόνα 2.13: Υπέρθυση γραμμής σεισμικής διάθλασης πάνω στα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Βαφειδής et. al,2004).	47
Εικόνα 2.14 : Διαφορετικές προσεγγίσεις λήψεις μετρήσεων 48	48
Εικόνα 3.1: Η θέση του αγωγού σε σχέση με τις κτιριακές εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π.	51
Εικόνα 3.2 : Η Θέση της διερευνητικής γραμμής διασκόπησης με τη διάταξη Wenner-Schlumberger (WS) σε σχέση με τη θέση του αγωγού.	55
Εικόνα 3.3 : Ηλεκτρικό μοντέλο ερμηνείας το οποίο παρουσιάζει τη στρωματογραφία της περιοχής έρευνας.	56
Εικόνα 3.4: Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν και το σχεδιάγραμμα με τη θέση του αγωγού σε σχέση με τις γραμμές διασκόπησης σε κάτοψη και σε τομή. ...	58
Εικόνα 3.5: Σχεδιάγραμμα του στόχου έρευνας.....	59
Εικόνα 3.6: Κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Wenner Schlumberger (WS).	59
Εικόνα 3.7: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και το μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Wenner Schlumberger (WS).....	60

Εικόνα 3.8 : Το μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Wenner Schlumberger (WS) χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο βάθος για το αρχικό μοντέλο κατά την αντιστροφή των δεδομένων.....	61
Εικόνα 3.9: Κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Dipole Dipole (DD).....	62
Εικόνα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων : Dipole Dipole από αριστερά και Dipole Dipole από δεξιά.....	62
Εικόνα 3.11: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Dipole Dipole από αριστερά και από δεξιά.....	63
Εικόνα 3.12: Μοντέλο ερμηνείας του μέσου όρου των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων και των δύο διατάξεων Dipole Dipole από αριστερά και δεξιά, αποκλείοντας τις τιμές με απόκλιση μεγαλύτερη του 20%.....	64
Εικόνα 3.13 : Κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Pole Dipole (PD).....	64
Εικόνα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων: Pole Dipole από αριστερά και Pole Dipole από δεξιά.....	65
Εικόνα 3.15: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Pole Dipole από αριστερά και δεξιά.....	65
Εικόνα 3.16: Οι κατανομές ευαισθησίας για τη διάταξη Pole Dipole (PD) για n=1,2,4 (Loke 2003).....	66
Εικόνα 3.17 : Συνδυαστική ερμηνεία των μετρήσεων των διατάξεων Pole Dipole από αριστερά και από δεξιά.....	67
Εικόνα 3.18: Μοντέλο συνδυαστικής ερμηνείας διάταξεων Pole Dipole από αριστερά και από δεξιά με αφαίρεση τιμών «χαμηλής πληροφορίας».....	67
Εικόνα 3.19 : Η κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Pole Pole (PP).....	68
Εικόνα 3.20 : Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και το μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Pole Pole (PP).....	69
Εικόνα 3.21 : Μοντέλο ερμηνείας διάταξης Pole Pole (PP) με $a \leq 12$	69
Εικόνα 3.22: Μετρούμενες και υπολογιζόμενες φαινόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Half Schlumberger αριστερά και δεξιά.....	70
Εικόνα 3.23: Μοντέλα συνδυαστικής ερμηνείας διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων.....	71
Εικόνα 3.24 : Σύγκριση μοντέλων ερμηνείας που προκύπτουν από την τεχνική βελτιστοποίησης των μοντέλων ερμηνείας των διατάξεων Pole Pole (PP)- Pole Dipole (PD)- Dipole Dipole (DD)- Wenner Schlumberger (WS) και της συνδυαστικής ερμηνείας των μετρήσεων των διατάξεων Pole Pole (PP)- Pole Dipole (PD)- Dipole Dipole (DD)- Wenner Schlumberger (WS).....	74
Εικόνα 3.25: Μοντέλα ερμηνείας μετρήσεων διάταξης Dipole Dipole (DD) με διάφορες διαδικασίες αντιστροφής : α) ομαλοποιημένη- με περιορισμούς μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων β) Robust γ) συνδυαστική μέθοδος.....	76
Εικόνα 3.26: Επίδραση παραμέτρων αντιστροφής στα μοντέλα ερμηνείας.....	78
Εικόνα 3.27: Υπολογισμός μετρούμενων ειδικών Αντιστάσεων με τη βοήθεια συνθετικών μοντέλων.....	80
Εικόνα 3.28: Γραφική απεικόνιση διαδικασίας συσχέτισης μετρήσεων.....	81
Εικόνα 3.29: Η επίδραση του βάθους και του μεγέθους του στόχου στη διακριτική ικανότητα διαφόρων διατάξεων.....	82
Εικόνα 3.30 : Μοντέλα ερμηνείας της προσομοίωσης στόχου διαστάσεων 2x2 σε βάθος 4m, 5m, 6m, 7m, 8m για διάφορες διατάξεις.....	83

Εικόνα 3.31: Διάγραμμα της μεταβολής της διακριτική ικανότητα διάφορων διατάξεων στον εντοπισμό υπόγειων κενών σε σχέση με το βάθος του στόχου για ένα συγκεκριμένο μήκος γραμμής διασκόπησης.	84
Εικόνα 3.32: Ο κάρναβος των βαρυτικών μετρήσεων σε σχέση με τον αγωγό.	86
Εικόνα 3.33 : Α) Τριδιάστατο προσομοίωμα του αναγλύφου της περιοχής έρευνας Β) Φωτογραφία της περιοχής έρευνας Γ) Χάρτης υψομετρικών διαφορών μεταξύ σταθμών μετρήσης και σταθμού βάσης.	87
Εικόνα 3.34: Παράδειγμα βαρυτικών διορθώσεων.	88
Εικόνα 3.35 : α) Υπολογιζόμενες τοπογραφικές διορθώσεις β) Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής γ) Τριδιάστατο προσομοίωμα τοπικού ανάγλυφου δ) Χάρτης των υπολογιζόμενων τοπογραφικών διορθώσεων.	89
Εικόνα 3.36: Παράδειγμα υπολογισμού βαρυτικής ανωμαλίας που δημιουργείται από την ύπαρξη οδικής γέφυρας.(Radogna et al., 2004).	90
Εικόνα 3.37: Ποσοστά απόκλισης επαναληπτικών μετρήσεων (επί τοις εκατό %).	91
Εικόνα 3.38 : Χαρακτηριστικό παράδειγμα αφαίρεσης λανθασμένων μετρήσεων (despiking).	92
Εικόνα 3.39: Παρουσίαση αφαίρεσης μετρήσεων μικρής αξιοπιστίας.	93
Εικόνα 3.40: Εμφάνιση χαρακτηριστικής μετατόπισης στις μετρούμενες τιμές της γραμμής 15 λόγω απότομης μετακίνησης του βαρυτόμετρου.	93
Εικόνα 3.41: Χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας με διαφορετική μέθοδο και βήμα πλεγματοποίησης.	95
Εικόνα 3.42: Διαχωρισμός μικρής κλίμακας ανωμαλίας από μεγάλης κλίμακας ανωμαλία με διάφορους τρόπους.	96
Εικόνα 3.43 : Παράδειγμα περιοδογράμματος.	97
Εικόνα 3.44 : Υπολογισμός υπολειπόμενης ανωμαλίας Bouguer και παρουσίαση αντίστοιχων περιοδογραμμάτων.	98
Εικόνα 3.45 : Οι χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων Moving Average 3x3, 5x5, 7x7, και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα.	99
Εικόνα 3.46 : Διαδικασία εφαρμογής φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στο συχνοτικό επίπεδο.	100
Εικόνα 3.47 : Χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή της τεχνικής της προς τα πάνω συνέχειας.	101
Εικόνα 3.48 : Χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας που προκύπτουν από την εφαρμογή της πρώτης και δεύτερης παραγώγου διαφόρων διευθύνσεων.	102
Εικόνα 3.49: Το τριδιάστατο παραλληλεπίπεδο μοντέλο που προσεγγίζει την περιοχή υπό διερεύνηση, υποδιαιρεμένο σε μικρότερα κελιά (Pirttijarvi 2005).	103
Εικόνα 3.50: Παράδειγμα διδιάστατης τομής ερμηνείας με το λογισμικό Grablox από μικροβαρυτική εφαρμογή στη νότια Φιλανδία (Elo S., 2006).	104
Εικόνα 3.51: Παρουσίαση αρχικών μοντέλων με διαφορετικές παραμέτρους.(A,B,Γ,Δ).	105
Εικόνα 3.52: Παράδειγμα αντιστροφής βαρυτικών δεδομένων με το λογισμικό Grablox κατά μήκος μίας γραμμής διασκόπησης. Με μαύρους κύκλους απεικονίζονται οι μετρούμενες τιμές και με μαύρη συνεχή γραμμή οι υπολογιζόμενες τιμές.	106
Εικόνα 3.53: Απεικόνιση του αρχικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό του υπόγειου αγωγού.	107
Εικόνα 3.54 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων της αντιστροφής των μικροβαρυτικών δεδομένων στην περιοχή έρευνας : α) Η χωρική κατανομή της πυκνότητας σε βάθος 4m και ως προς το βάθος για τη γραμμή $\chi=3$ β) Η θέση της τομής AB γ) Η	

κατανομή της πυκνότητας ως προς το βάθος της γραμμής AB δ)Τριδιάστατη απεικόνιση των χαμηλών τιμών πυκνότητας, οι οποίες σχετίζονται με το στόχο.....	107
Εικόνα 3.55 : Κάνναβος μαγνητικών μετρήσεων σε σχέση με τη διεύθυνση του αγωγού.	110
Εικόνα 3.57: Οι διορθωμένοι χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας (diurnal corrections) του κάτω, άνω αισθητήρα και της κατακόρυφης βαθμίδας.	111
Εικόνα 3.58: Εφαρμογή φίλτρων διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων διαφόρων μεγεθών και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα.....	113
Εικόνα 3.59 : Εφαρμογή της προς τα άνω συνέχειας και αντίστοιχα περιοδογράμματα.	114
Εικόνα 3.60: Εφαρμογή της τεχνικής της αναγωγής στον πόλο	115
Εικόνα 3.61 : Ψευδοβαρυτική μετατροπή	116
Εικόνα 3.62 : Εφαρμογή της πρώτης παραγωγού σε διεύθυνση 90^0 και 0^0 στους χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας του κάτω και άνω αισθητήρα και στο χάρτη της κατακόρυφης βαθμίδας.	117
Εικόνα 3.63: Χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή της τεχνικής φωτοσκίασης.	118
Εικόνα 3.64 : Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας του πειράματος και της τεχνικής roll-along.	120
Εικόνα 3.65 α) Θέση Τομής 1 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 1 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 1..	121
Εικόνα 3.66: Τομή 1-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.	122
Εικόνα 3.68: Τομή 2-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	123
Εικόνα 3.70: Τομή 3-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	124
Εικόνα 3.72: Τομή 4-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	125
Εικόνα 3.74: Τομή 5-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	126
Εικόνα 3.76: Τομή 6-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	127
Εικόνα 3.78: Τομή 7-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	128
Εικόνα 3.80: Τομή 8-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	129
Εικόνα 3.82: Τομή 9-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος..	130
Εικόνα 3.84: Τομή 10-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος	131
Εικόνα 3.86: Τομή 11-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.	132
Εικόνα 3.88: Τομή 12-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.	133
Εικόνα 3.90: Τομή 13-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.	134
Εικόνα 3.92: Τομή 14-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.	135
Εικόνα 3.94: Τομή 15-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.	136
Εικόνα 3.96: Τομή 16-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.	137
Εικόνα 3.97: Τριδιάστατη απεικόνιση των διαγραμμάτων των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης.	138
Εικόνα 3.98 : Η διδιάστατη κατανομή της Vs ως προς το βάθος στην περιοχή έρευνας.	139
Εικόνα 3.99 : Παράδειγμα εφαρμογής διδιάστατων τεχνικών στα μοντέλα ερμηνείας της μεθόδου MASW.	140
Εικόνα 3.100: Παράδειγμα ενεργειακής συγκέντρωσης στο συχνοτικό πεδίο σε περιοχή ύπαρξης υπόγειου ανοίγματος (Anasserfi 2006).	141

Εικόνα 3.101: α) Φασματική ισχύος μετρήσεων της Τομής 1 (μη ύπαρξη στόχου-) β) Φασματική ισχύος μετρήσεων της Τομής 8 (Υπαρξη αγωγού).....	142
Εικόνα 3.102: Συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους για τον εντοπισμό υπόγειου αγωγού σε ελεγχόμενες συνθήκες.....	144
Εικόνα 4.1: Σχεδιάγραμμα του αρχαιολογικού χώρου και η θέση του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς.	152
Εικόνα 4.2: Οι τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Pole (PP) σε σχέση με το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς και τις εγκαταστάσεις του αρχαίου πλυντηρίου.....	158
Εικόνα 4.3: Παράδειγμα αρχείου αναλυτικής περιγραφής των μετρήσεων.....	159
Εικόνα 4.4: Αφαίρεση εμφανώς λανθασμένων μετρήσεων.	160
Εικόνα 4.5: Οι τομές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων και η τριδιάστατη κατανομή τους.	161
Εικόνα 4.6 : Το μοντέλο ερμηνείας της γραμμής διασκόπησης PP1, η οποία τέμνει το ανοιχτό κομμάτι της αρχαίας στοάς σχεδόν υπό γωνία 90°	162
Εικόνα 4.7: Παρουσίαση μοντέλων ερμηνείας της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Pole (PP): α) Τα μοντέλα ερμηνείας σε πραγματικές συντεταγμένες σε σχέση με την αρχαιολογική ανασκαφή και το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς β) Η ψευδοτριδιάστατη κατανομή των ειδικών αντιστάσεων σε βάθος 5m.	163
Εικόνα 4.8: Το μοντέλο ερμηνείας της τομής PP3 με βελτιωμένες παραμέτρους αντιστροφής.....	164
Εικόνα 4.9: Σύγκριση μοντέλων ερμηνείας της PP5 με τις τεχνικές L2- norm και L1-norm (robust).	164
Εικόνα 4.10: Η μορφή του αρχείου pro για την τοποθέτηση των γραμμών έρευνας.....	166
Εικόνα 4.11: Η χωρική κατανομή της ειδικής αντίστασης σε βάθος 5m , όπως προέκυψε από την τριδιάστατη ερμηνεία μη παράλληλων διαταγμένων τομών.	166
Εικόνα 4.12 : Οι γραμμές διασκόπησης της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Dipole (PD) σε σχέση με το ανοιχτό κομμάτι της αρχαίας στοάς και τις αρχαιολογικές εγκαταστάσεις.....	169
Εικόνα 4.13 : Η διδιάστατη και τριδιάστατη κατανομή των μετρούμενων φαινομένων ειδικών αντιστάσεων της διάταξης pole dipole.	170
Εικόνα 4.14: Παρουσίαση μοντέλων ερμηνείας της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Dipole (PD).	171
Εικόνα 4.15 :Σχετικό σφάλμα μετρήσεων διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων για ίση απόσταση ηλεκτροδίων 1m, για τάξη μεγέθους λάθους 0.01 m λόγω μη ακριβής τοποθέτησης των ηλεκτροδίων σε συνάρτηση με τη τιμή του n (Gunther, 2004). β) Το νέο μοντέλο ερμηνείας μετά την αφαίρεση των συνδυασμών μετρήσεων με $a=1$. ..	172
Εικόνα 4.16: Συνδυαστική τριδιάστατη απεικόνιση των μοντέλων ερμηνείας των διατάξεων Pole Pole & Pole Dipole	173
Εικόνα 4.17: Σύγκριση τριδιάστατων και διδιάστατων τεχνικών ερμηνείας.	174
Εικόνα 4.18: Η χωρική κατανομή των συναρτήσεων ευαισθησίας διάφορων διατάξεων ηλεκτροδίων	175
Εικόνα 4.19: Το μισό εύρος (half width) μιας βαρυτικής ανωμαλίας.....	177
Εικόνα 4.20 : Αποτύπωση βαρυτικής ανωμαλίας ανάλογα με το βήμα μέτρησης α) στοά κάθετη στην x διάσταση, όπου το βήμα μέτρησης είναι 1m β) Στοά κάθετη στη y διάσταση, όπου το βήμα μέτρησης είναι 3m.....	178
Εικόνα 4.21: Ο κάρναβος μετρήσεων της μικροβαρυτικής μεθόδου.	178
Εικόνα 4.22 : Τοπογραφικές διορθώσεις με βάση το τοπικό ανάγλυφο άλλα και της ευρύτερης περιοχής.	180
Εικόνα 4.23 :Ο χάρτης ανωμαλίας Bouguer.	181

Εικόνα 4.24 : Δημιουργία του υπολειπόμενου χάρτη Bouguer.....	182
Εικόνα 4.25: Ο τελικός επεξεργασμένος χάρτης της μικροβαρυτικής μεθόδου	183
Εικόνα 4.26 : Τα μοντέλα ερμηνείας που προέκυψαν από τη διαδικασία αντιστροφής των μικροβαρυτικών μετρήσεων.	185
Εικόνα 4.27 : Ο κάρναβος των μαγνητικών μετρήσεων σε σχέση με προσπελάσιμο τμήμα άλλα και την πιθανή πορεία της αρχαίας στοάς.	187
Εικόνα 4.28 : α) χάρτης μαγνητικής ανωμαλίας του κάτω αισθητήρα β) χάρτης μαγνητικής ανωμαλίας του άνω αισθητήρα γ) χάρτης μαγνητικής ανωμαλίας κατακόρυφης βαθμίδας δ) Ο χάρτης της κατακόρυφης βαθμίδας μετά την αφαίρεση των εμφανώς λανθασμένων τιμών (despiking) σε σχέση με τη θέση του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς άλλα και της πιθανής πορείας της σύμφωνα με τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους.	188
Εικόνα 5.1: Οργάνωση δεδομένων σε ομάδες.	193
Εικόνα 5.2: Παράδειγμα πολυπαραμετρικής ανάλυσης για τη δημιουργία Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους σε συνθετικά δεδομένα (Paashe 2006).	194
Εικόνα 5.3 : Παράδειγμα συσταδοποίησης δεδομένων σε δύο ομάδες με τη μέθοδο συσταδοποίησης Fuzzy c-means	195
Εικόνα 5.4 : α) Το ηλεκτρικό μοντέλο, το οποίο προσομοιάζει των στόχο έρευνας και οι συνθετικά υπολογιζόμενες τιμές μετρήσεων β) Το βαρυτικό μοντέλο, το οποίο προσομοιάζει των στόχο έρευνας και οι συνθετικά υπολογιζόμενες τιμές μετρήσεων.	197
Εικόνα 5.5: α) Το μοντέλο ερμηνείας με τη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας β) Το μοντέλο ερμηνείας της Μικροβαρυτικής Μεθόδου.	198
Εικόνα 5.6: Κάθε σημείο του πολυπαραμετρικού χώρου χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους που περιέχονται στα αυτόνομα μοντέλα ερμηνείας.	199
Εικόνα 5.7 : Ο διδιάστατος πολυπαραμετρικός χώρος και οι λύσεις για αριθμό cluster 2,3,4,5.	199
Εικόνα 5.8 : Τα Ενοποιημένα Γεωφυσικά Μοντέλα του Υπεδάφους για αριθμό cluster 2,3,4,5 (α,β,γ,δ).....	200
Εικόνα 5.9: Οι υπολογιζόμενες τιμές NCE για τα ενοποιημένα μοντέλα για clusters 2,3,4,5.	202
Εικόνα 5.10 : Ο τριδιάστατος πολυπαραμετρικός χώρος και οι λύσεις για αριθμό cluster 2,3,4,5.	204
Εικόνα 5.11 : (α,β,γ,δ) Τα Ενοποιημένα Γεωφυσικά Μοντέλα του Υπεδάφους για αριθμό cluster 2,3,4,5, ε) Οι υπολογιζόμενες τιμές NCE για τα ενοποιημένα μοντέλα για clusters 2,3,4,5.	205
Εικόνα 5.12 : Προτεινόμενη διαδικασία επιλογής και απεικόνισης του Τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους.	208
Εικόνα 5.13 : α) Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους για την περίπτωση των συνθετικών δεδομένων β) Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους για την περίπτωση των δεδομένων του αγωγού.	209
Εικόνα 5.14: Σχηματική απεικόνιση της συνδυαστικής γεωφυσικής προσέγγισης για τη διερεύνηση του υπεδάφους σε γεωτεχνική εφαρμογή.....	210
Εικόνα 5.15: α) Απεικόνιση του προσανατολισμού των γραμμών διασκόπησης στο χώρο β) Ο κάρναβος μετρήσεων για τις διάφορες γεωφυσικές μεθόδους.....	212
Εικόνα 5.16: Παρουσίαση αποτελεσμάτων μεθόδου γεωρανταρ προσανατολισμού της «επικίνδυνης ζώνης» στη φωτογραφία της περιοχής».	213
Εικόνα 5.17: α) Κατανομή Ειδικής αντίστασης σε βάθος 1.5 m β) Τριδιάστατο προσομοίωμα ηλεκτρικού μοντέλου ερμηνείας γ) Τοποθέτηση θέσεων πιθανών εγκοίλων στη φωτογραφία της	214

περιοχής.....	214
Εικόνα 5.18: α) χάρτης μη επεξεργασμένων βαρυτικών μετρήσεων β) Σχηματική απεικόνιση επίδρασης της κύριας εκσκαφής στις βαρυτικές μετρήσεις.....	215
Εικόνα 5.19: α) Αφαιρούμενες τιμές από τα μετρούμενα δεδομένα λόγω της εκσκαφής β) τελικός χάρτης βαρυτικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή της προς τα άνω συνέχειας για 1 m γ) Άποψη της τομής $y=-2$ με το λογισμικό Grablox δ) Η κατανομή της πυκνότητας για βάθος 1.5 m.....	216
Εικόνα 5.20: (α, β)) Ερμηνεία ηλεκτρικής τομογραφίας γ) Ερμηνεία Μικροβαρυτικής μεθόδου δ) Χαρακτηριστικές τομές μεθόδου Γεωραντάρ ε) συγκριτική αξιολόγηση όλων των γεωφυσικών μεθόδων.....	217
Εικόνα 5.21: α) Ανάλυση πολυπαραμετρικού χώρου σε διάφορες συστάδες β) οι τιμές NCE για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα γ,δ,ε,ζ) Τα ενοποιημένα μοντέλα για cluster 2,3,4,5 αντίστοιχα.....	218
Εικόνα 5.22 : Το τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους, το οποίο παρουσιάζει τις θέσεις των πιθανότερων υπόγειων εγκοίλων στην περιοχή έρευνας.....	219
Εικόνα 5.23 : Σχηματική αναπαράσταση αλγορίθμου αντιστροφής δεδομένων (Zonal Cooperative Inversion) προερχόμενα από διάφορες γεωφυσικές μεθόδους (Paashe et al., 2007).....	221
Εικόνα 5.24: Σχηματική αναπαράσταση προτεινόμενης διαδικασίας για τη συνδυαστική αντιστροφή γεωφυσικών μεθόδων με τη χρήση του Τελικού Ενοποιημένου Μοντέλου Υπεδάφους ως αρχική πληροφορία.....	222
Εικόνα 5.25: α) Μοντέλο ερμηνείας ηλεκτρικής Τομογραφίας με μεμονωμένη επεξεργασία β) Μοντέλο ερμηνείας Μικροβαυτομετρίας με μεμονωμένη επεξεργασία γ) Μοντέλο ερμηνείας ηλεκτρικής τομογραφίας με το Ε.Γ.Μ.Υ ως αρχικό μοντέλο δ) Μοντέλο ερμηνείας μικροβαρυτομετρίας με το Ε.Γ.Μ.Υ ως αρχικό μοντέλο.....	223
Εικόνα I.1 : Διάδοση του ρεύματος και κατανομή των δυναμικών γραμμών λόγω σημειακής πηγής σε ομογενή ημικόσμο.....	243
Εικόνα I.2 : Κατανομή του δυναμικού που δημιουργείται από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων σε ομογενή ημικόσμο (Loke,2003).....	244
Εικόνα I.3: Συνήθεις διατάξεις Ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται στην Ηλεκτρική τομογραφία.....	245
Εικόνα I.4 : Διάταξη των ηλεκτροδίων για τη διεξαγωγή μιας δισδιάστατης διασκόπησης και η σειρά των μετρήσεων που θα γίνουν με σκοπό τη δημιουργία μιας ψευδοτομής (Loke 2003).....	247
Εικόνα I.5 : Οι μετρούμενες τιμές στο ύπαιθρο δεν αποτελούν τις πραγματικές ειδικές αντιστάσεις του υπεδάφους αλλά τις φαινόμενες.....	248
Εικόνα I.6: Παράδειγμα ψευδοτομών μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών και το τελικό μοντέλο ερμηνείας.....	249
Εικόνα I.7 : Η καμπύλη μονοδιάστατης συνάρτησης ευαισθησίας για τη διάταξη Pole Pole. Με κόκκινο βέλος παρουσιάζεται το μέσο βάθος διασκόπησης, το οποίο δεν συμπίπτει με το σημείο μέγιστης ευαισθησίας (Loke 2003).....	250
Εικόνα I.8: Κατανομή ευαισθησίας μέτρησης με τη διάταξη Pole Pole (PP). (Loke 2003).....	252
Εικόνα I.9: Οι συναρτήσεις ευαισθησίας για τη διάταξη Pole Dipole (PD) για $n=1,2,4$ (Loke 2003).....	254
Εικόνα I.10 : Οι συναρτήσεις ευαισθησίας για τη Dpole Dipole (DD) για $n=1,2,4$ (Loke 2003).....	255
Εικόνα I.11 : Οι κατανομές ευαισθησίας για τη Wenner- Schlumberger (WS) για $n=1,2,4$ (Loke 2003).....	257

Εικόνα I.12 : Μορφή P-κυμάτων (Λούης, 2003)	258
Εικόνα I.13 : Μορφή S-κυμάτων (Λούης, 2003)	259
Εικόνα I.14: Μορφή κυμάτων Rayleigh (Λούης, 2003)	261
Εικόνα I.15 :Μορφή κυμάτων Love (Λούης, 2003).....	262
Εικόνα I.16: Η ενέργεια η οποία διαδίδεται στην οριζόντια διεύθυνση σε συνάρτηση με το βάθος (κανονικοποιημένο ως προς το μήκος κύματος). Η ενέργεια δεν διαδίδεται κατά την κάθετη διεύθυνση (Strobbia, 2002).....	263
Εικόνα I.17: Σε ομογενή χώρο όλα τα μήκη κύματος διασκοπούν το ίδιο υλικό, με αποτέλεσμα η ταχύτητα φάσης να είναι σταθερή. Όταν οι ιδιότητες του υπεδάφους αλλάζουν με το βάθος, η ταχύτητα φάσης εξαρτάται από το μήκος κύματος (Strobbia, 2002).....	264
Εικόνα I.18: Η καμπύλη διασποράς περιγράφει τη διασπορά των επιφανειακών κυμάτων και η οποία συνήθως απεικονίζεται ως ταχύτητα φάσης προς συχνότητα.....	264
Εικόνα I.19: Διαφορετικοί τρόποι δόνησης σημαίνουν διαφορετικά μήκη κύματος, και έτσι διαφορετικές ταχύτητες για την ίδια συχνότητα (Strobbia, 2002).	265
Εικόνα I.20: Σε ένα σύνθετες εύρος συχνοτήτων για εφαρμογές μηχανικού, μπορεί να υπάρχουν πολλοί τρόποι διάδοσης. Οι υψηλότεροι τρόποι διάδοσης μπορεί να υπάρχουν μόνο πάνω από τη συχνότητα- όριο (cut-off frequency) τους. (Strobbia, 2002).....	265
Εικόνα I.21: Σχηματικά τα τρία στάδια της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών κυμάτων (Strobbia, 2002).....	266
Εικόνα I.22 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων στην Πολυκάναλη Ανάλυση των Επιφανειακών κυμάτων. (Kansas Geological Survey). 267	
Εικόνα I.23: Παράδειγμα δημιουργίας της καμπύλης διασποράς από τα σεισμικά δεδομένα (Kansas Geological Survey).	268
Εικόνα I.24: Διάγραμμα ροής που περιγράφει τη μεθοδολογία της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (Κρητικάκης et al., 2004).	269
Εικόνα I.25: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας διδιάστατης διερεύνησης του υπεδάφους με την τεχνική roll-along. (Kansas Geological Survey).	270
Εικόνα I.26 : Παράδειγμα βαρυτικού προφίλ.	273
Εικόνα I.27: Ονοματολογία μαγνητικού πεδίου της Γης (Λούης 2003).	280

Ευρετήριο φωτογραφιών

Φωτογραφία 1.1: Χαρακτηριστικά παραδείγματα υπόγειων ανοιγμάτων σε ασβεστολιθικό σχηματισμό λόγω καρστικής διάβρωσης (Λαμπρινάκος, 2007).	26
Φωτογραφία 1.2 : α) Εγκαταλελειμμένα μεταλλεία στη περιοχή του Λαυρίου.....	27
Φωτογραφία 1.3: α) Ανασκαφή αρχαίου νεκροταφείου σε περιοχή της Αθήνας β) Αρχαίες μεταλλευτικές στοές σε περιοχή της Καβάλας.....	28
Φωτογραφία 1.4 : Πανοραμική άποψη εργασιών για την έδραση ανεμογεννητριών.	29
Φωτογραφία 1.5 : Προβλήματα που δημιουργήθηκαν από την ύπαρξη υπόγειων κενών κατά τη κατασκευή του μετρό στην Αθήνα.	30
Φωτογραφία 1.6 : α) Παρουσία καρστικού εγκοίλου στο μέτωπο της σήραγγα της Δωδώνης στην περιοχή της Ηπείρου στο Δυτικό Τομέα της Εγνατίας Οδού β) δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της ύπαρξης του καρστικού εγκοίλου (Marinos, 2005).....	31
Φωτογραφία 1.7 : Κατασκευή γέφυρας στην Εγνατία οδό (www.egnatia.gr).....	31

Φωτογραφία 1.8: α) Χαρακτηριστικό παράδειγμα καθίζησης του εδάφους λόγω παρουσίας υπόγειων μεταλλείων κάτω από κεντρικό δρόμο σε περιοχή του Λονδίνου (Styles P. et.al 2006) β) αστοχίες σε κατασκευές στη περιοχή του Περιστερίου λόγω της ύπαρξη εγκαταλελειμμένων μεταλλείων (Ρόζος, 2005).....	32
Φωτογραφία 1.9: Πανοραμικά άποψη της φάσης κατασκευής του X.Y.T.P.E. στο Λαύριο (Καλιαμπάκος, 2009).....	32
Φωτογραφία 2.1: Εφαρμογή μικροβαρυτομετρίας για τη χαρτογράφηση εγκαταλελειμμένου υπόγειου μεταλλείου σε περιοχή της Αγγλίας (Styles et al., 2004). ..	36
Φωτογραφία 3.1: Άποψη του φρεατίου επίσκεψης του αγωγού.	51
Φωτογραφία 3.2: Διεξαγωγή βαρυτικής μετρήσεως στη περιοχή ενδιαφέροντος.	86
Φωτογραφία 3.3: Λήψη μαγνητικών μετρήσεων με τη μέθοδο της διαφορικής μαγνητομέτρησης στο ύπαιθρο.	110
Φωτογραφία 4.1: Παράδειγμα κατάρρευσης εγκαταλελειμμένου υπόγειου μεταλλείου στην περιοχή Earlham Norwich στην Αγγλία (Styles et al., 2004).	150
Φωτογραφία 4.2: Άποψη της περιοχής έρευνας στον αρχαιολογικό χώρο Μπερτσέκο.	151
Φωτογραφία 4.3: Αρχικά επί τόπου επεξεργασία των μετρήσεων στο ύπαιθρο.....	158
Φωτογραφία 5.1 : Η περιοχή έρευνας.	211

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1: Πίνακας με τις σημαντικότερες αιτίες λάθους κατα τη χρησιμοποίηση του βαρυτόμετρου Lacoste & Romberg G (Rymer 1989).	92
Πίνακας 5.1 : Οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης και πυκνότητας και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα.	201
Πίνακας 5.2 : οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης, πυκνότητας και ταχύτητας των S-κυμάτων και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα.	206
Πίνακας 5.3: Οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης και πυκνότητας και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα.	219
Πίνακας I.1: Συνήθειες ειδικές αντιστάσεις διαφόρων υλικών της γης.....	246
Πίνακας I.2 : Το μέσο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation) , ο γεωμετρικός παράγοντας (για $a=1$) και ο αντίστροφος του, για μετρήσεις με διαφορετικά a & n για διάφορες διατάξεις (Loke, 2003 ; Edwards, 1977).....	251
Πίνακας I.3 : Κατηγοριοποίηση εδαφών με την Vs30 (www.masw.gr).	271
Πίνακας I.4: Οι πυκνότητες των κυριότερων πετρωμάτων.....	273
Πίνακας I.5 : Μαγνητικές επιδεκτικότητες διαφόρων πετρωμάτων και ορυκτών.....	279

Ευρετήριο Χαρτών

Χάρτης 3.1: Γεωλογικός Χάρτης Αττικής (Παπαδέας, 2003).....	54
Χάρτης 4.1: Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής έρευνας.	155

Κεφάλαιο 1 :

Υπόγεια Ανοίγματα & Τεχνικά έργα

1.1 Υπόγεια Ανοίγματα

Σημαντικό ζήτημα σε διάφορα τεχνικά έργα, τα οποία περιλαμβάνουν εκσκαφές στο υπέδαφος, αποτελεί η ύπαρξη υπόγειων ανοιγμάτων ή και η δημιουργία τους μετά την κατασκευή του έργου. Τα υπόγεια ανοίγματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν κυρίως σε φυσικά και σε τεχνητά ανοίγματα ανθρωπογενούς δραστηριότητας.

Τα κυριότερα από αυτά είναι :

- Τεχνητά έγκοιλα, φυσικά σπηλαιώματα.
- Στοές, γαλαρίες, φρέατα, εγκαταλελειμμένες υπόγειες μεταλλευτικές δραστηριότητες.
- Υπόγειες δεξαμενές και αγωγοί.
- Ενταφιασμένες δομές αρχαιολογικής δραστηριότητας όπως π.χ αρχαίοι τάφοι.

Τα φυσικά υπόγεια ανοίγματα συναντώνται κυρίως σε ασβεστολιθικούς, δολομιτικούς, και γυψούχους σχηματισμούς. Η τεχνική συμπεριφορά των σχηματισμών αυτών αλλάζει όταν προσβληθούν με καρστική διάβρωση. Ο όρος καρστ περιγράφει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που δημιουργούνται στα ανθρακικά πετρώματα εξαιτίας της διαλυτικής δράσης του νερού. Η διαδικασία της καρστικοποίησης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υπόγειων εγκοίλων και σπηλαιωμάτων. Το σχήμα των δομών αυτών μπορεί να είναι από ακανόνιστο έως και γραμμικό, το μέγεθος τους από λίγα mm έως δεκάδες m. Υπόγεια φυσικά κενά, επίσης, συναντώνται σε ηφαιστειακά πετρώματα όπως π.χ. η λάβα και οι ηφαιστειακοί τόφοι, που οφείλονται στη διαδικασία ψύξης της λάβας καθώς έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα.



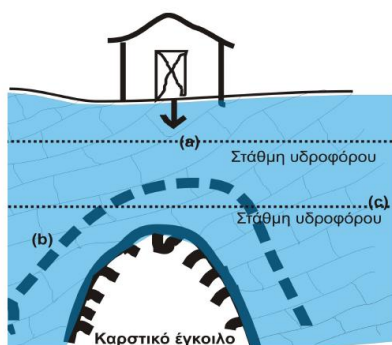
Φωτογραφία 1.1: Χαρακτηριστικά παραδείγματα υπόγειων ανοιγμάτων σε ασβεστολιθικό σχηματισμό λόγω καρστικής διάβρωσης (Λαμπρινάκος, 2007).

Τα κύρια προβλήματα που δημιουργούνται από την παρουσία τέτοιων δομών στο υπέδαφος σχετίζονται α) με φαινόμενα καθιζήσεων β) με αστοχία σε θεμελιώσεις λόγω

φαινομένων κατάρρευσης των υπόγειων ανοιγμάτων μετά την επιβάρυνση πρόσθετων φορτίων γ) ροή επικίνδυνων ρύπων.

Όσον αφορά στη δημιουργία καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους, ισχύει ότι η αρχική κατάσταση της βραχομάζας έχει τα χαρακτηριστικά εκείνα που απαιτούνται για να συντηρείται η ισορροπία των τάσεων στην οροφή του καρστικού σπηλαιού. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που αυτό μπορεί να πάψει να ισχύει, όπως (Ρόζος, 2005): α) Με την επιβολή φορτίων στην επιφάνεια β) Με τη συνεχή προς τα επάνω εξέλιξη του καρστικού σπηλαιού (φυσική κατάρρευση) γ) με την επιτάχυνση της φυσικής κατάρρευσης με τον υποβιβασμό της στάθμης του υδροφόρου (Εικ. 1.1).

Η γεωλογική δομή της Ελλάδας, όπου περίπου το 30% του ελλαδικού χώρου καλύπτεται από ανθρακικούς σχηματισμούς (Xeidakis et. al, 2004), καθιστά το πρόβλημα ακόμα πιο οξύμενο.



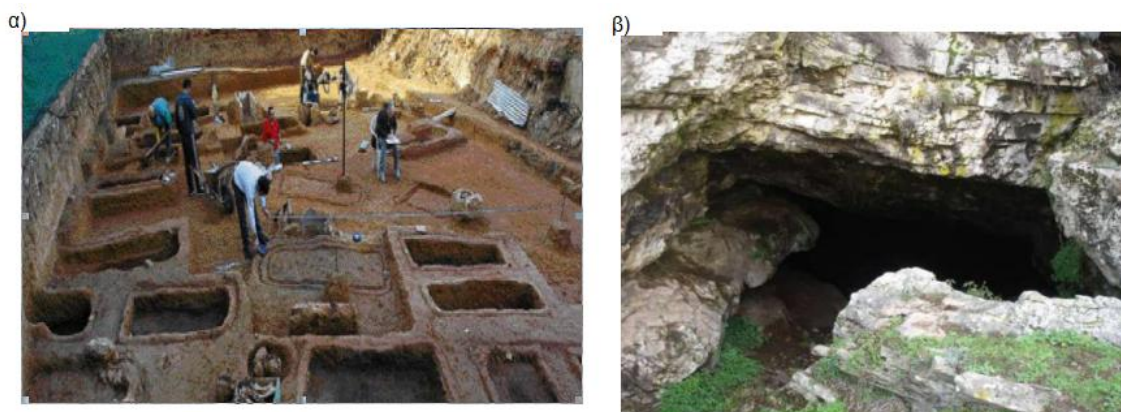
Εικόνα 1.1: α) Σχεδιάγραμμα με τις τρεις περιπτώσεις κατάρρευσης καρστικού εγκοίλου (Ρόζος, 2005) β) Φυσική κατάρρευση οροφής σπηλαιού σε ανθρακικά πετρώματα στην περιοχή Αργολίδας (Ρόζος, 2005).

Όσο αφορά στα υπόγεια ανοίγματα ανθρωπογενούς δραστηριότητας, τα κυριότερα προέρχονται από τη μεταλλευτική δραστηριότητα (Φωτ. 1.2). Φυσικές διαδικασίες αποσάθρωσης αλλά και επιβολή πρόσθετων τάσεων, λόγω διάφορων κατασκευών, μπορούν να συντελέσουν στη κατάρρευση εγκαταλελειμμένων υπόγειων στοών, φρεάτων και άλλων μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, με αποτέλεσμα την εκδήλωση εδαφικών υποχωρήσεων στην επιφάνεια με καταστροφικές συνέπειες.



Φωτογραφία 1.2 : α) Εγκαταλελειμμένα μεταλλεία στη περιοχή του Λαυρίου.

Η πολιτιστική και αρχαιολογική ιστορία της Ελλάδος, καθιστά πολύ συνηθισμένο φαινόμενο την ύπαρξη ανοιγμάτων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος στο υπέδαφος. Αρχαίοι τάφοι, στοές κ.α. αποτελούν συχνά αντικείμενο έρευνας αρχαιολογικών ανασκαφών. Στη Φωτογραφία 1.3. (α) παρουσιάζεται περιοχή της Αθήνας (Βούλα) όπου ανεβρέθησαν 28 αρχαίοι τάφοι με χρονολόγηση από τον 5ο και τον 4ο αιώνα π.Χ. Επίσης, στη Φωτογραφία 1.3 (β) παρουσιάζονται, τα αρχαία Σκάβαλα, ένα σπουδαίο μεταλλευτικό κέντρο το οποίο εκμεταλλεύτηκαν οι Θάσιοι, οι Αθηναίοι και οι βασιλείς της Μακεδονίας Φίλιππος Β΄ και Αλέξανδρος, σε περιοχή της Καβάλας.



Φωτογραφία 1.3: α) Ανασκαφή αρχαίου νεκροταφείου σε περιοχή της Αθήνας β) Αρχαίες μεταλλευτικές στοές σε περιοχή της Καβάλας.

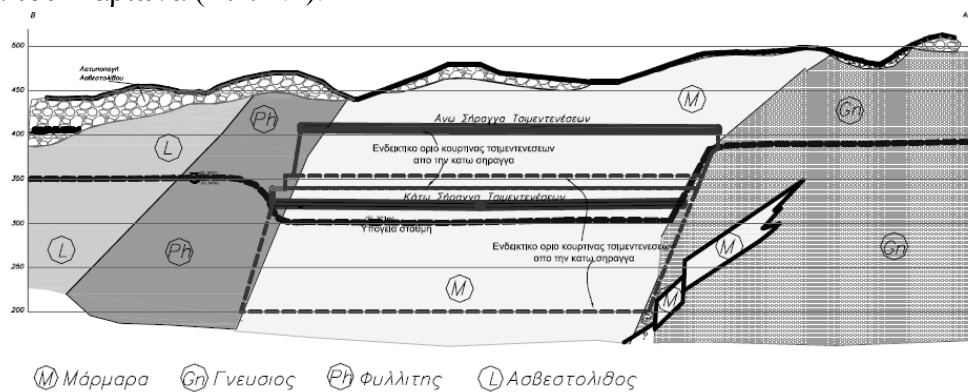
Ο εντοπισμός τέτοιων στόχων, συντελεί πολλές φορές στην αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων και στην αποφυγή σημαντικών χρονικών καθυστερήσεων.

1.2 Επιπτώσεις Υπόγειων Ανοιγμάτων σε Τεχνικά Έργα

Ο τομέας της κατασκευής τεχνικών έργων περιλαμβάνει ιδιωτικά έργα, δημόσια και συγχρηματοδοτούμενα και αποτελεί έναν από τους δυναμικότερους τομείς της ελληνικής οικονομίας, με σημαντική συμμετοχή στο ΑΕΠ και με μεγάλη συμβολή στη μείωση της ανεργίας. Ιδιαίτερα, στην παρούσα χρονική περίοδο, όπου η Ελληνική Οικονομία βρίσκεται σε βαθιά ύφεση, η κατασκευή τεχνικών έργων είναι δυνατόν να αποτελέσει ένα σημαντικό μοχλό ανάπτυξης. Πολλά από τα τεχνικά έργα που κατασκευάζονται σήμερα, είναι έργα μεγάλης κλίμακας με μεγάλες απαιτήσεις ασφάλειας. Οι προδιαγραφές ασφαλούς κατασκευής και ο περιορισμός του κόστους σχετίζονται άμεσα με την ακριβή και λεπτομερή μελέτη των συνθηκών του υπεδάφους. Ένα από τα σημαντικά προβλήματα κατά την κατασκευή τεχνικών έργων αποτελεί η ύπαρξη υπόγειων ανοιγμάτων. Η παρουσία υπόγειων ανοιγμάτων μπορεί να προκαλέσει αστοχίες σε κατασκευές, στη χάραξη δρόμων και διάφορων γεωτεχνικών έργων αλλά και να συντελέσει στην απορροή ρύπων στον υδάτινο ορίζοντα, δημιουργώντας προβλήματα από περιβαλλοντικής απόψεως.

Σημαντική κατηγορία τεχνικών έργων αποτελούν τα **ενεργειακά έργα**. Στη περίπτωση των υδροηλεκτρικών φραγμάτων ο εντοπισμός υπόγειων ανοιγμάτων αποτελεί σημαντικό παράγοντα, τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη φάση λειτουργίας. Πολλές φορές αστοχίες σε φράγματα σχετίζονται με την ύπαρξη υπόγειων ανοιγμάτων.

Πέρα από την ευστάθεια τού ίδιου του φράγματος, ο κίνδυνος διαρροών του Ταμιευτήρα, μέσω της ζώνης καρστικών δομών, είναι το πιο σημαντικό γεωλογικό πρόβλημα ενός φράγματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα από τον Ελλαδικό χώρο αποτελεί το φράγμα της Πέρδικας. Το φράγμα, κατασκευάστηκε το 1962, με σκοπό την υδροδότηση του Βιομηχανικού κέντρου Πτολεμαΐδας. Κατά την πρώτη πλήρωση του, αναπτύχθηκαν έντονες διαρροές, με αποτέλεσμα την ουσιαστική εκκένωση του ταμιευτήρα. Η διαρροή πραγματοποιήθηκε μέσω καρστικών υπόγειων ανοιγμάτων στους υποκείμενους ασβεστόλιθους. Δεν είναι σαφές εάν η παρουσία του καρστικού ασβεστολιθικού υποβάθρου είχε εντοπιστεί κατά τη φάση της μελέτης του έργου ή η σημασία της είχε απλώς υποεκτιμηθεί. Κατά συνέπεια η αστοχία οφείλεται σε ανεπαρκή έρευνα και ανεπαρκή ή ελλιπή σχεδιασμό του έργου (Μουτάφης, 2008). Για την αντιμετώπισή τέτοιων προβλημάτων συνηθίζεται να υλοποιείται σχέδιο εκτεταμένων επεμβάσεων στεγανοποίησης με τη πραγματοποίηση τσιμεντενέσεων, όπως για παράδειγμα στο φράγμα του Ιλαρίωνα (Εικ. 1.2).



Εικόνα 1.2 : Τομή κατά μήκος του άξονα, της κουρτίνας τσιμεντενέσεων στην περιοχή Λογγας της Ελάτης για τη στεγανοποίηση του ταμιευτήρα του φράγματος του Ιλαρίωνα (Καραπαντελάκη, 2008).

Επίσης στη περίπτωση εγκατάστασης ανεμογεννητριών και αγωγών φυσικού αερίου η διερεύνηση των γεωλογικών συνθηκών του υπεδάφους είναι απαραίτητη αφού ακατάλληλα εδάφη ή περιοχές με έγκοιλα ή καρστικά αποτρέπουν την τοποθέτησή τους στις θέσεις που αυτά εμφανίζονται.



Φωτογραφία 1.4 : Πανοραμική άποψη εργασιών για την έδραση ανεμογεννητριών.

Η ύπαρξη υπόγειων ανοιγμάτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα σε διάφορα **υπόγεια έργα**. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στο πλήθος και στο μέγεθος των υπόγειων κατασκευών. Τα υπόγεια έργα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα κατασκευών όπως, οδικές ή σιδηροδρομικές σήραγγες, υπόγειους χώρους στάθμευσης, υπόγειες αποθήκες καυσίμων και φυσικού αερίου, υπόγειους αποθηκευτικούς χώρους κ.α. Η παρουσία υπογείων ανοιγμάτων είναι δυνατόν να προκαλέσει αστοχίες σε τέτοιες υπόγειες κατασκευές, κυρίως είτε με τη δημιουργία υπερεκσκαφών και με την εισροή υλικών ή νερού κατά τη διάρκεια κατασκευής είτε με τη δημιουργία ανεπιθύμητων καθιζήσεων στην επιφάνεια.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν κατά τη φάση κατασκευής του μετρό της Αθήνας, από την ύπαρξη υπόγειων ανοιγμάτων (αρχαία πηγάδια, υπόγεια δίκτυα, έγκοιλα κ.α), με τη δημιουργία καθιζήσεων σε διάφορες περιοχές της Αθήνας με καταστρεπτικές συνέπειες για τις υπέργειες κατασκευές και σημαντικές καθυστερήσεις για την ολοκλήρωση του έργου. Για παράδειγμα, οι εκτεταμένες καθιζήσεις κοντά στο σταθμό Χαλανδρίου και η δημιουργία τεράστιων τάφρων στην επιφάνεια του εδάφους προκάλεσαν τη κατάρρευση του οδοστρώματος και γειτονικών σπιτιών (Φωτ. 1.5). Οι ιθύνοντες του έργου ανέφεραν ως αίτιο του φαινομένου την ύπαρξη των πηγαδιών στην περιοχή, τα οποία συναντήθηκαν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας.



Φωτογραφία 1.5 : Προβλήματα που δημιουργήθηκαν από την ύπαρξη υπόγειων κενών κατά τη κατασκευή του μετρό στην Αθήνα.

Άλλο ένα παράδειγμα αποτελεί η σήραγγα της Δωδώνης η οποία βρίσκεται στην περιοχή της Ηπείρου στο Δυτικό Τομέα της Εγνατίας Οδού. Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας Δωδώνης εμφανίστηκαν υπόγεια ανοίγματα, τα οποία δημιούργησαν σημαντικά προβλήματα και οδήγησαν σε τέσσερις μεγάλο μεγέθους καταπτώσεις με εισροή υλικών στη σήραγγα (Φωτ. 1.6 (α)). Επίσης, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας παρατηρήθηκαν αρκετές υπερεκσκαφές έως και 2 m. Σε γενικές γραμμές η εισροή υλικών στη σήραγγα οφειλόταν στα ρήγματα ή στα καρστικά έγκοιλα τα οποία συνοδεύονταν από ερυθροκάστανα, υγρά, χαλαρά εδαφικά υλικά και καταλάμβαναν ένα μέρος ή κατά θέσεις ολόκληρο το μέτωπο εκσκαφής (Κατσιβέλης, 2001). Πέρα από τα προβλήματα κατά τη κατασκευή της σήραγγας, η ύπαρξη των υπόγειων ανοιγμάτων είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρων στην επιφάνεια του εδάφους (Φωτ. 1. 6 (β)).

α)



β)



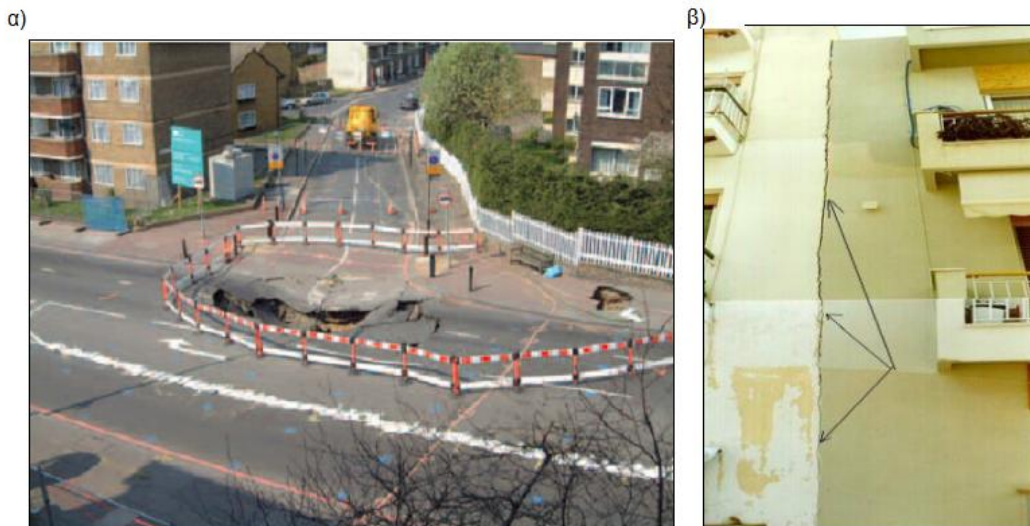
Φωτογραφία 1.6 : α) Παρουσία καρστικού εγκοίλου στο μέτωπο της σήραγγα της Δωδώνης στην περιοχή της Ηλείου στο Δυτικό Τομέα της Εγνατίας Οδού β) δημιουργία κρατήρα στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της ύπαρξης του καρστικού εγκοίλου (Marinos, 2005).

Μια άλλη σημαντική κατηγορία τεχνικών έργων αποτελούν τα **έργα υποδομής** όπως γέφυρες, αεροδρόμια, οδικοί άξονες, λιμενικά έργα, οικιστική ανάπτυξη περιοχών κ.α. με σημαντική ανάπτυξη στο διεθνή και ελλαδικό χώρο. Οι γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες και ειδικότερα η ύπαρξη υπόγειων κενών είναι στενά συνδεδεμένη με την άρτια κατασκευή τέτοιων έργων. Για παράδειγμα στη γεφυροποιία η γνώση ύπαρξης υπόγειων ανοιγμάτων αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της μελέτης θεμελιώσεως (Φωτ. 1.7)



Φωτογραφία 1.7 : Κατασκευή γέφυρας στην Εγνατία οδό (www.egnatia.gr).

Επιπλέον, η συνεχής ανάπτυξη των αστικών κέντρων οδηγεί πολλές φορές τη χωροθέτηση έργων υποδομής και κτιρίων σε περιοχές όπου είχαν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν εκτεταμένες μεταλλευτικές δραστηριότητες. Στη Φωτογραφία 1.8 παρουσιάζεται καθίζηση του οδοστρώματος σε περιοχή της Αγγλίας λόγω κατάρρευσης υπόγειων εγκαταλελειμμένων μεταλλευτικών στοών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα από τον ελλαδικό χώρο αποτελεί η περιοχή της Ανθούπολης στο Περιστέρι όπου η περιοχή έχει υποστεί σε μεγάλο τμήμα την άναρχη εκμετάλλευση του λιγνιτικού πεδίου σε τρία επίπεδα, μέχρι και το 1955 (Ρόζος, 2005). Υπάρχουν αστοχίες σε κατασκευές, που είτε έχουν εκδηλωθεί κατά το παρελθόν, είτε εκδηλώνονται ακόμη και σήμερα, ως αποτέλεσμα των εδαφικών υποχωρήσεων από την κατάρρευση των υπόγειων ανοιγμάτων.



Φωτογραφία 1.8: α) Χαρακτηριστικό παράδειγμα καθίζησης του εδάφους λόγω παρουσίας υπόγειων μεταλλείων κάτω από κεντρικό δρόμο σε περιοχή του Λονδίνου (Styles P. et.al 2006) β) αστοχίες σε κατασκευές στη περιοχή του Περιστερίου λόγω της ύπαρξη εγκαταλελειμμένων μεταλλείων (Ρόζος, 2005).

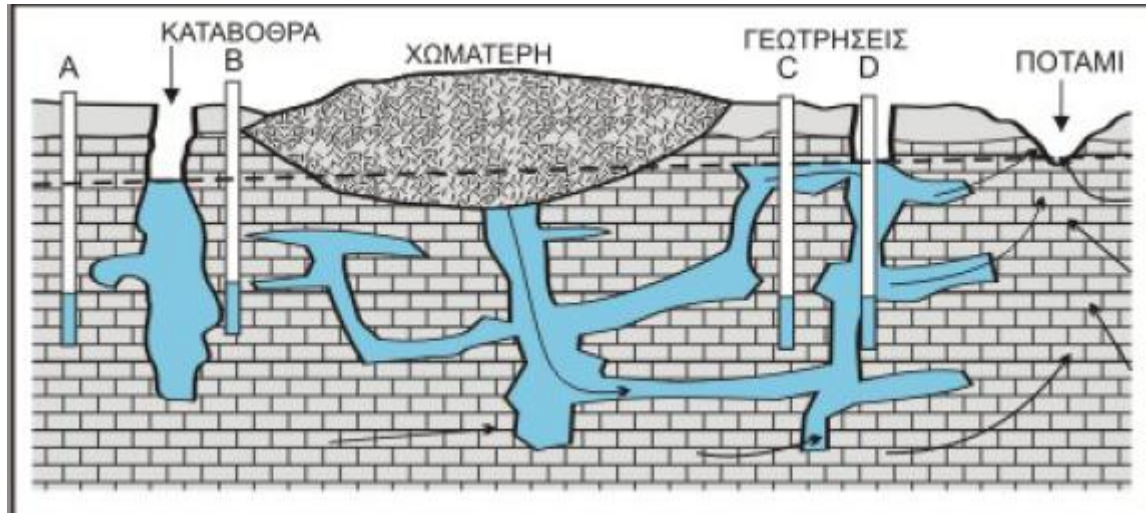
Τέλος, οι συνθήκες του υπεδάφους αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη θέση χωροθέτησης διαφόρων **περιβαλλοντικών έργων** όπως οι Χώροι Υγιεινομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.) ή οι Χώροι Υγιεινομικής Ταφής Ρυπασμένων Εδαφών (Χ.Υ.Τ.Ρ.Ε.). Στη Φωτογραφία παρουσιάζεται πανοραμική άποψη από τη κατασκευή ενός σημαντικότετου περιβαλλοντικού έργου για την ταφή ρυπασμένων εδαφών στο Τεχνολογικό Πάρκο του Λαυρίου.



Φωτογραφία 1.9: Πανοραμικά άποψη της φάσης κατασκευής του Χ.Υ.Τ.Ρ.Ε. στο Λαύριο (Καλιαμπάκος, 2009).

Για παράδειγμα, ένας σωστά σχεδιασμένος Χ.Υ.Τ.Α. πρέπει να εξασφαλίζει στεγανότητα, σταθερότητα των γεωλογικών σχηματισμών, να μην επηρεάζει τους υδροφόρους ορίζοντες της περιοχής, να είναι μακριά από αρχαιολογικούς χώρους, βιότοπους, αεροδρόμια κ.λπ. Σε τέτοιες περιπτώσεις εξετάζεται η λιθολογία και

στρωματογραφία (σύνθεση και ποιότητα εδάφους, φύση υποβάθρου, βάθος από τον πυθμένα του αποδέκτη, πάχος αποσαθρωμένου μανδύα, ύπαρξη καρστικών εγκοίλων), καθώς και η τεκτονική (ρήγματα, σεισμικότητα). Απαγορευτικές συνθήκες από γεωλογική άποψη είναι: η παρουσία ασβεστόλιθων και διερρηγμένων πετρωμάτων σε μικρό βάθος από τον πυθμένα και η ύπαρξη ενεργών ρηξιγενών ζωνών.



Εικόνα 1.3: Η ύπαρξη εγκοίλων αποτελεί απαγορευτική συνθήκη κατά τη χωροθέτηση ενός Χ.Υ.Τ.Α (Βουδούρης, 2009).

Συνοψίζοντας, η παρουσία υπόγειων ανοιγμάτων σχετίζεται άμεσα με διάφορες γεωτεχνικές, περιβαλλοντικές και αρχαιολογικές εφαρμογές και η σημασία της δυνατότητας εντοπισμού και χαρτογράφησης τέτοιων δομών στο υπέδαφος είναι μεγάλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Η Εφαρμοσμένη Γεωφυσική στον εντοπισμό Υπόγειων Ανοιγμάτων

2.1 Εφαρμοσμένη Γεωφυσική & Υπόγεια Ανοίγματα

Ο εντοπισμός και η ακριβής οριοθέτηση υπόγειων ανοιγμάτων στο υπέδαφος αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία, η οποία, ωστόσο, είναι απαραίτητη για την εκτίμηση του κινδύνου αστοχίας μιας κατασκευής ή για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων όπως π.χ. καθιζήσεων.

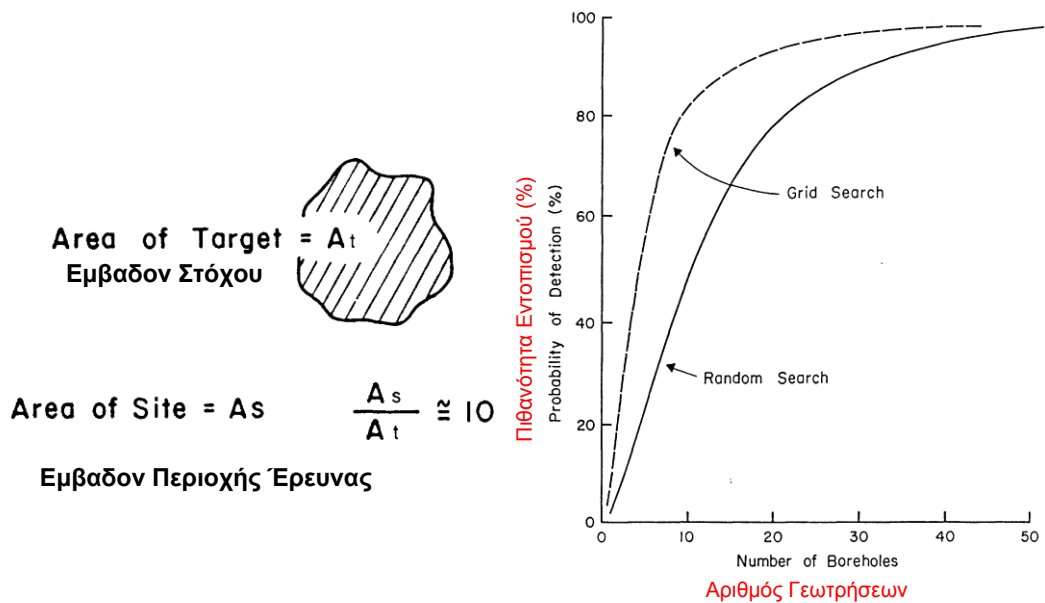


Φωτογραφία 2.1: Εφαρμογή μικροβαρυτομετρίας για τη χαρτογράφηση εγκαταλελειμμένου υπόγειου μεταλλείου σε περιοχή της Αγγλίας (Styles et al., 2004).

Επομένως, ο εντοπισμός υπόγειων ανοιγμάτων είναι ένα πρόβλημα το οποίο πολλές φορές αποτελεί αντικείμενο της γεωφυσικής έρευνας (Εικ 2.1). Φυσικά χρησιμοποιούνται και άλλες μέθοδοι όπως π.χ. η εξέταση αεροφωτογραφιών, η συλλογή παλαιών μεταλλευτικών χαρτών, η συγκέντρωση και μελέτη προηγούμενων γεωτεχνικών μελετών και φυσικά γεωτρήσεις, οι οποίες μπορούν άμεσα να εντοπίσουν την παρουσία ενός υπόγειου στόχου. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες και επιπλέον η κατασκευή των γεωτρήσεων μπορεί να αποτελεί μια προσέγγιση με υψηλότατο κόστος, ανάλογα με τις συνθήκες του προβλήματος. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με την πιθανότητα εντοπισμού ενός υπόγειου ανοίγματος εμβαδού A_t σε περιοχή έρευνας A_s σε σχέση με τον απαιτούμενο αριθμό γεωτρήσεων (Matias, 2008).

Για να αυξηθεί η πιθανότητα εντοπισμού ενός υπόγειου στόχου με τη χρήση γεωτρήσεων πρέπει να αυξηθεί κατά πολύ ο αριθμός τους και συνεπώς αυξάνεται κατά πολύ το κόστος της έρευνας. Άρα:

Η εφαρμοσμένη Γεωφυσική μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο, οικονομικό και μη καταστρεπτικό εργαλείο για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων είτε με την άμεση οριοθέτησή τους, είτε με τη δραστική μείωση των απαιτούμενων γεωτρήσεων.



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα πιθανότητας εντοπισμού ενός υπόγειου στόχου σε συνάρτηση με τον αριθμό των γεωτρήσεων (Matias, 2008).

Οι φυσικές παράμετροι του κενού και του μητρικού πετρώματος ή εδάφους αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την επιλογή της γεωφυσικής μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, όταν το ζητούμενο της έρευνας είναι ο εντοπισμός υπόγειων σπηλαιωμάτων, η φυσική παράμετρος ενδιαφέροντος μπορεί να είναι η έλλειψη μάζας για τη βαρυτική μέθοδο. Ωστόσο, εάν το σπηλαιώμα ήταν πλήρες με νερό ή φερτά υλικά, θα ήταν πολύ πιο δύσκολο να εντοπιστεί με τη μέθοδο της βαρυτομετρίας. Επιπλέον, πολλές φορές μαζί με την παρουσία ενός υπόγειου ανοίγματος μπορεί να παρουσιάζονται και δευτερεύοντες δομές, οι οποίες μπορεί να βοηθούν στον εντοπισμό ενός κενού π.χ κατακρημνίσεις μπορούν να συμβούν πάνω από την περιοχή ενός εγκοίλου ή παρουσία έντονων διακλάσεων και κατακερματισμού μπορούν να συντελέσουν στην ενδυνάμωση του σήματος που θα λάβει στην επιφάνεια μια γεωφυσική μέθοδος. Στο Παράρτημα I, παρουσιάζονται οι αρχές που διέπουν τις κυριότερες γεωφυσικές μεθόδους

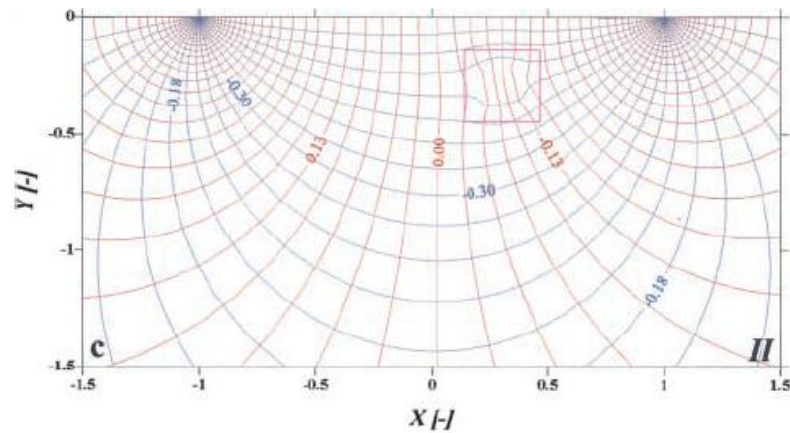
Οι κυριότερες γεωφυσικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση υπόγειων ανοιγμάτων παρουσιάζονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.:

1. Ηλεκτρική Μέθοδος

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Η κρίσιμη παράμετρος στις ηλεκτρικές μεθόδους είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών (μονάδες SI : Ohm.m).

Κατά την εφαρμογή της γεωηλεκτρικής έρευνας πραγματοποιούνται μετρήσεις με την τοποθέτηση τεσσάρων ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του εδάφους. Η διοχέτευση ρεύματος στο υπεδάφος από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων δίδει τη δυνατότητα μέτρησης της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ενός άλλου ζεύγους ηλεκτροδίων. Το βάθος των μετρήσεων σχετίζεται με τη μέγιστη απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος. Οι μετρήσεις αυτές, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, μπορούν να αποδώσουν την πραγματική κατανομή της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Την πιο εξελιγμένη ηλεκτρική μέθοδος αποτελεί η Ηλεκτρική τομογραφία, με την οποία επιταχύνεται η αποτύπωση της κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους στις δύο και τρεις διαστάσεις.

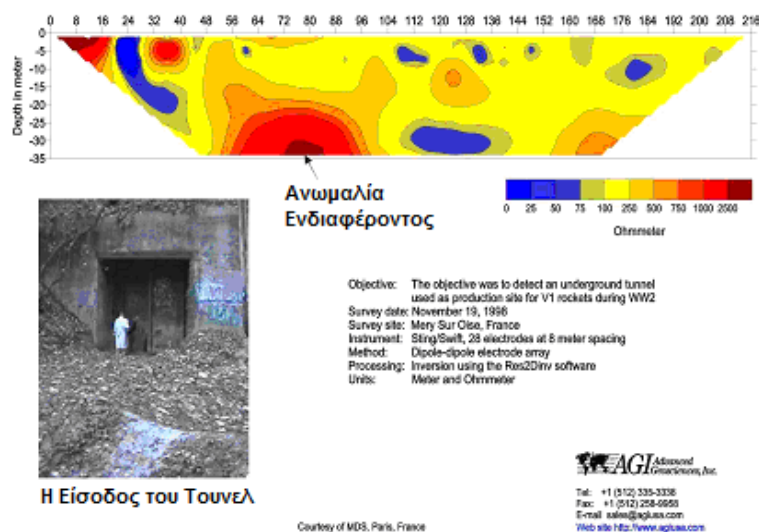
Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα υπόγειο κενό παρουσιάζει πρακτικά άπειρη ειδική αντίσταση σε σχέση ειδικότερα με την τιμή ειδικής αντίστασης του περιβάλλοντα σχηματισμού, τότε γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να δώσει απάντηση σε ένα τέτοιο πρόβλημα.



Εικόνα 2.2 : Η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην παρουσία ανομοιογένειας που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ειδική αντίσταση. (Furman et. al., 2002)

Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή των ρευματικών γραμμών και των αντίστοιχων γραμμών δυναμικού του ηλεκτρικού πεδίου, όταν σε ομογενή χώρο παρεμβάλλεται ανομοιογένεια μικρότερης αγωγιμότητας δηλαδή μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης (Furman et. al., 2002). Η ηλεκτρική μέθοδος εφαρμόζεται ευρύτατα στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων προσδιορίζοντας ανωμαλίες υψηλών ειδικών αντιστάσεων σε περίπτωση παρουσίας υπόγειων κενών, όπως φαίνεται και στο παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας (Εικ. 2.3) για τον εντοπισμό ενός υπόγειου τούνελ σε περιοχή της Γαλλίας.

Φυσικά σε περιπτώσεις όπου το υπόγειο άνοιγμα είναι πλήρες με φερτά υλικά ή νερό η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης είναι δυνατόν να εντοπίσει το στόχο, ως ανωμαλία μικρότερης ειδικής αντίστασης σε σχέση με τον περιβάλλοντα σχηματισμό.



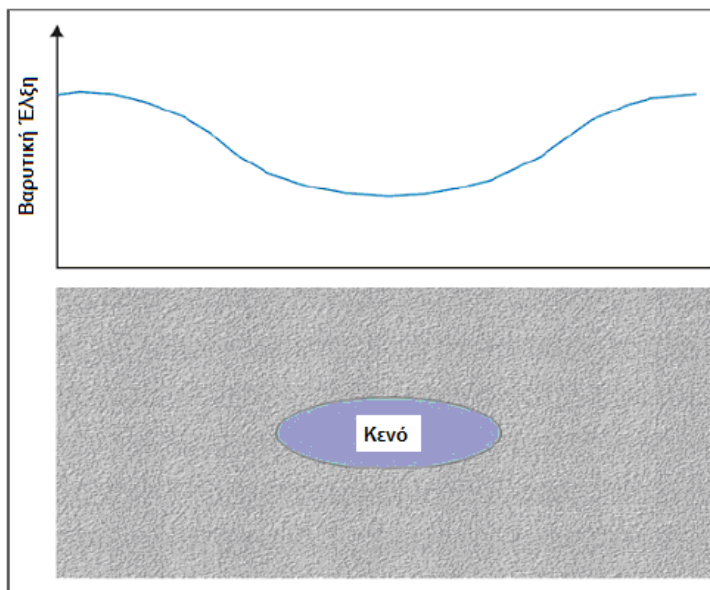
Εικόνα 2.3 : Παράδειγμα εφαρμογής ηλεκτρικής μεθόδου για τον εντοπισμού υπόγειας στοάς στη Γαλλία. (AGI Advanced Geosciences, web site:www.aguisa.com).

2. Μικροβαρυτομετρία

Αντικειμενικός σκοπός των τεχνικών βαρυτικής διασκόπησης είναι ο καθορισμός των μεταβολών της πυκνότητας του υπεδάφους πραγματοποιώντας μετρήσεις της έντασης του πεδίου βαρύτητας στην επιφάνεια της γης. Δηλαδή στη βαρυτομετρία γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν δομές που παρουσιάζουν αντίθεση πυκνότητας (είτε θετική είτε αρνητική) με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Η κρίσιμη παράμετρος είναι η πυκνότητα των σχηματισμών (μονάδες SI : kg/m^3).

Η εφαρμογή της βαρυτικής μεθόδου βασίζεται στη μέτρηση μικρών χωρικών διαφορών στη βαρυτική έλξη της γης. Κατά τη μέτρηση του βαρυτικού πεδίου πάνω από ένα υπόγειο άνοιγμα, το οποίο βρίσκεται πλησίον της επιφάνειας του εδάφους, θα παρατηρηθεί μείωση της βαρυτικής έλξης που θα μετρηθεί κατά μήκος του κενού. Αυτή η περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4 όπου φαίνεται η μεταβολή της βαρυτικής έλξης σε μια βαρυτική τομή πάνω από ένα υπόγειο έγκοιλο.

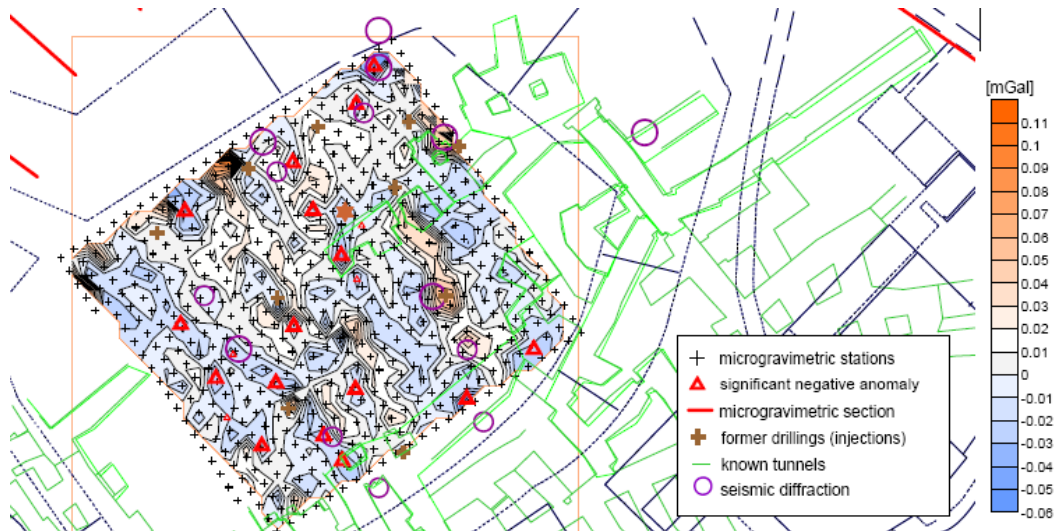
Το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της βαρύτητας ονομάζεται βαρυτόμετρο. Με το συγκεκριμένο όργανο δεν μετράται η απόλυτη τιμή της βαρύτητας αλλά οι χωρικές μεταβολές της βαρυτικής έλξης. Το εύρος και το μέγεθος της ανωμαλίας που δημιουργείται σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος και το βάθος του υπόγειου ανοίγματος που την προκαλεί.



Εικόνα 2.4 : Η μεταβολή της βαρυτικής έλξης λόγω της παρουσίας ενός υπόγειου κενού.

Φυσικά, από τη λήψη των μετρήσεων έως το τελικό στάδιο της ερμηνείας τους μεσολαβούν πολλά σημαντικά βήματα επεξεργασίας. Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μικροβαρυτικής μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων εγκοίλων σε δημόσιο πάρκο στη Βουδαπέστη της Ουγγαρίας (Kis et. al., 2005). Οι χαμηλές τιμές της επιτάχυνσης της βαρύτητας χαρακτηρίζουν τις πιθανές περιοχές ύπαρξης υπόγειων κενών.

Σε περιπτώσεις όπου το υπόγειο άνοιγμα έχει πληρωθεί από φερτά υλικά, η μικροβαρυτική μέθοδος είναι δυνατόν να εντοπίσει το στόχο με μεγαλύτερη δυσκολία και με την προϋπόθεση ότι παραμένει σημαντική διαφορά πυκνότητας μεταξύ του στόχου και του περιβάλλοντα σχηματισμού.



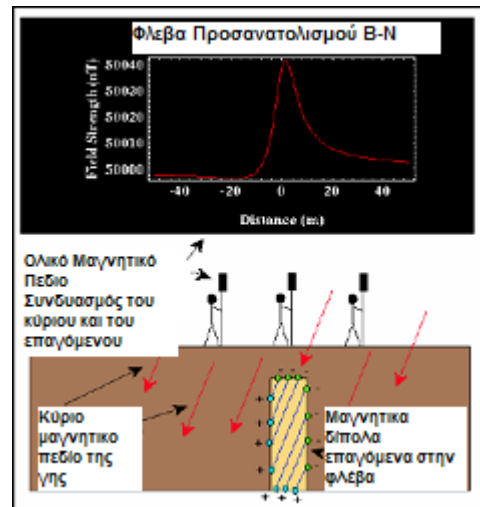
Εικόνα 2.5 : Παράδειγμα εντοπισμού υπόγειων εγκοίλων σε περιοχή της Βουδαπέστης (Kis M. et al., 2005).

3. Μαγνητική Μέθοδος

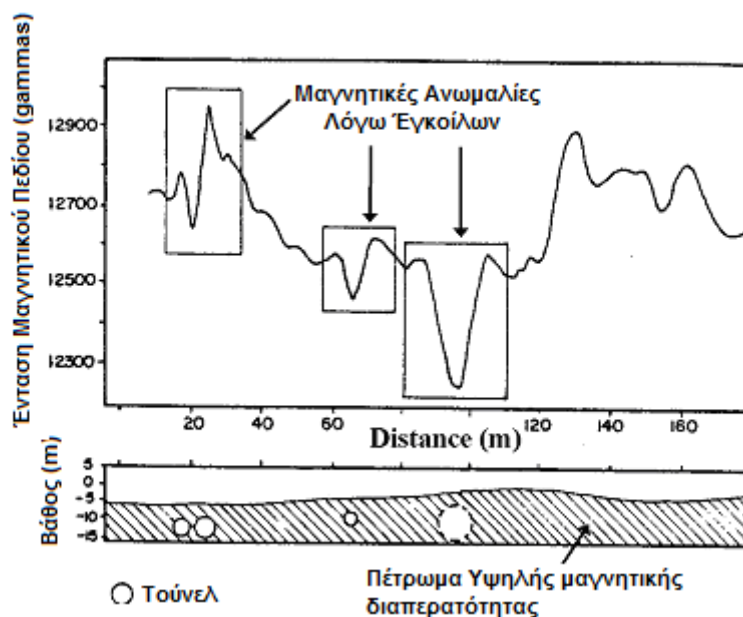
Οι μαγνητικές διασκοπήσεις έχουν ως στόχο την ανίχνευση της αλλαγής των μαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Βασική φυσική παράμετρος στη μαγνητική μέθοδο είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα των πετρωμάτων. Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μία αδιάστατη σταθερά που καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού και εκφράζει το μέτρο ευκολίας μαγνήτισης του.

Η μαγνητική μέθοδος μετρά της μεταβολές του μαγνητικού πεδίου με στόχο τον εντοπισμό διαφόρων υπεδαφικών δομών. Τα μαγνητικά δεδομένα συλλέγονται με κατάλληλα όργανα, τα μαγνητόμετρα, και οι μετρούμενες μαγνητικές μεταβολές επεξεργάζονται και ερμηνεύονται κατάλληλα για τον καθορισμό του βάθους και της γεωμετρίας των διάφορων δομών (Εικ. 2.6)

Όσο αφορά στον εντοπισμό υπόγειων κενών, η μηδενική μαγνητική επιδεκτικότητα του αέρα (κενό) αποτελεί την αιτία εντοπισμού τους από τη μαγνητική μέθοδο κυρίως σε περιπτώσεις όπου ο περιβάλλοντας σχηματισμός παρουσιάζει μεγάλη μαγνητική επιδεκτικότητα. Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται παράδειγμα εντοπισμού υπόγειων κενών σε υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας σχηματισμούς σε περιοχή του Μεξικού (Azate et. al., 1990).



Εικόνα 2.6 : Μετρούμενη μαγνητική ανωμαλία προερχόμενη από υψηλής μαγνητικής επιδεκτικότητας σώμα (Λούης 2003).



Εικόνα 2.7: Παράδειγμα εφαρμογής μαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων στοών σε περιοχή του κεντρικού Μεξικού. (Azate J. et al, 1990).

Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις η μαγνητική μέθοδος αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική όταν στόχο της έρευνας αποτελούν υπόγεια ανοίγματα ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως π.χ. μεταλλευτικά φρέατα, υπόγειες στοές κ.α. όπου η μαγνητική ανωμαλία οφείλεται κυρίως στα μεταλλικά μέρη τους.

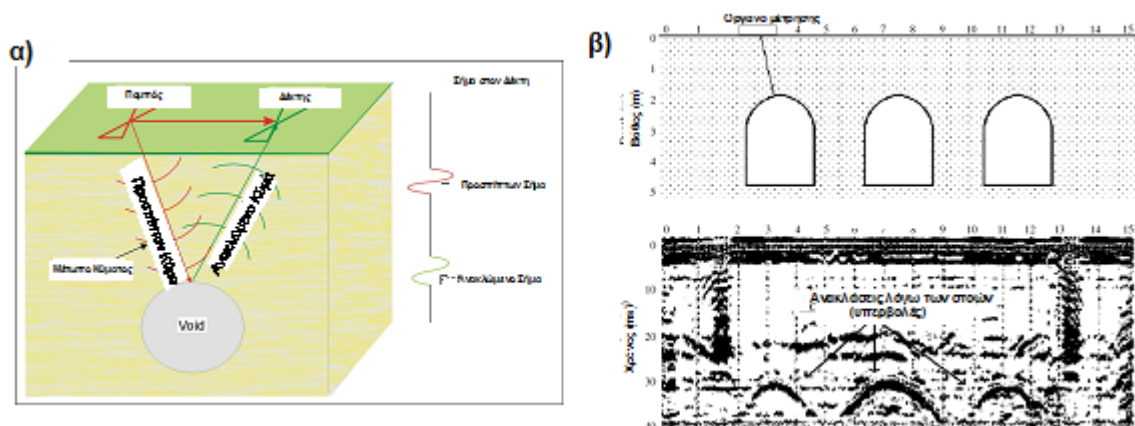
4. Μέθοδος του Γεωραντάρ

Η βασική αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, υψηλής συχνότητας, στο υπέδαφος και στην καταγραφή των επιστρεφόμενων κυμάτων. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που διαδίδεται στο υπέδαφος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες του, δηλαδή την διηλεκτρική σταθερά k (αδιαστατο μέγεθος) και την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα σ (μονάδες SI : S/m). Η μέθοδος στηρίζεται κυρίως στην καταγραφή των ανακλωμένων κυμάτων σε επιφάνειες που παρουσιάζουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες.

Το σύστημα του Γεωραντάρ περιλαμβάνει ένα σύστημα καταγραφής και μία κεραία πομπό και δέκτη. Ο πομπός εκπέμπει υψηλής συχνότητας (25 MHz έως 1500 MHz) ηλεκτρομαγνητικά σήματα, τα οποία διεισδύουν στο υπέδαφος και ανακλώνται σε αντικείμενα και όρια, τα οποία έχουν διαφορετική διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με το περιβάλλοντα σχηματισμό. Τα ανακλώμενα κύματα εντοπίζονται από το δέκτη και καταγράφονται. Η μέθοδος του Γεωραντάρ εφαρμόζεται συνήθως για τον εντοπισμό μικρού βάθους υπόγειων εγκοιλών. Ένα υπόγειο άνοιγμα είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα παρέχει μια αντίθεση στη διηλεκτρική ιδιότητα σε σχέση με το περιβάλλοντα σχηματισμό (διηλεκτρική σταθερά k αέρα =1, διηλεκτρική σταθερά k π.χ. ασβεστολιθικού πετρώματος $k=5$ έως 8).

Όσο μικρότερη η συχνότητα των κεραίων που χρησιμοποιούνται, τόσο μεγαλύτερο το βάθος διασκόπησης. Ωστόσο, το βάθος διασκόπησης εξαρτάται κατά πολύ από τις συνθήκες της περιοχής έρευνας και ειδικότερα από την αντίσταση του υπεδάφους και την περιεκτικότητα του σε άργιλο.

Στην Εικόνα 2.8 (α) παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα της αρχής λειτουργίας του Γεωραντάρ.



Εικόνα 2.8: α) Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του Γεωραντάρ β) Παράδειγμα εντοπισμού υπόγειων στοών με τη μέθοδο του Γεωραντάρ (Lorenzo et. Al 2002).

Στην Εικόνα 2.8 (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου του Γεωραντάρ για τον εντοπισμό υπόγειων μεταλλευτικών στοών σε περιοχή της Ισπανίας (Lorenzo et. Al 2002). Στο αντίστοιχο ραδόγραμμα διακρίνονται διάφορες ανακλάσεις που δημιουργούνται από την παρουσία των υπόγειων γαλαρίων διαστάσεων 2x3 m σε βάθος περίπου δύο μέτρων σχηματίζοντας χαρακτηριστικές υπερβολές. Σε περιπτώσεις όπου το υπόγειο άνοιγμα είναι πλήρες από φερτά υλικά, η αποτελεσματικότητα της μεθόδου του Γεωραντάρ εξαρτάται από τη διαφορά της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς στόχου και περιβάλλοντα σχηματισμού.

5. Σεισμικές Μέθοδοι

Με τις μεθόδους σεισμικής διασκόπησης επιδιώκεται η διερεύνηση του υπεδάφους με τον καθορισμό των μεταβολών των ταχυτήτων διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στο υπέδαφος. Οι μεταβολές στην ταχύτητα συνδέονται με τις ιδιότητες των πετρωμάτων ή εδαφών δια μέσου των οποίων διαδίδονται τα κύματα. Οι ταχύτητες αυτές ελέγχονται από ένα σύνολο φυσικών σταθερών, οι οποίες ονομάζονται ελαστικές παράμετροι (μέτρο ελαστικότητας, συντελεστή διάτμησης, συντελεστής ακαμψίας).

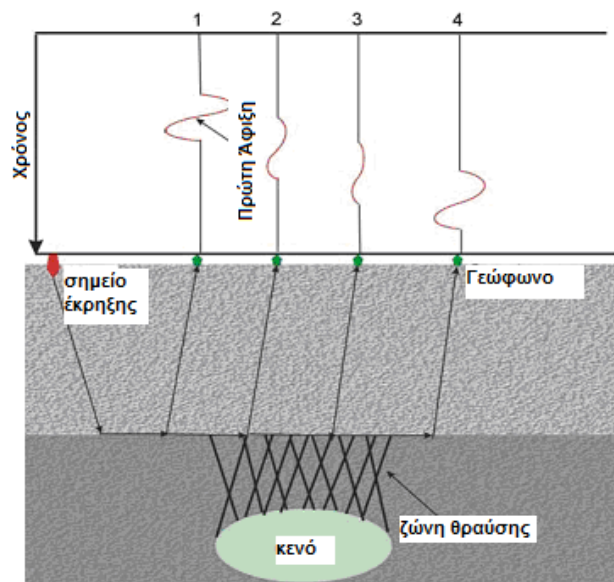
Με τις σεισμικές μεθόδους μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη στρωματογραφία, τη δομή και τις ιδιότητες των υλικών του υπεδάφους. Επιπλέον, οι σεισμικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό υπόγειων κενών, είτε με τον άμεσο ή έμμεσο προσδιορισμό της παρουσίας και της θέσης τους. Οι κυριότερες σεισμικές μέθοδοι είναι :

- Η μέθοδος της Σεισμικής Διάθλασης

Με τη μέθοδο της σεισμικής διάθλασης είναι δυνατός ο καθορισμός της ταχύτητα των διαμήκη κυμάτων P κατά τη διάδοσή τους στο υπέδαφος. Τα διαμήκη κύματα δημιουργούνται στην επιφάνεια του εδάφους, διαδίδονται μέσω του εδάφους και των πετρωμάτων και καταγράφονται με τη βοήθεια γεωφώνων, τα οποία βρίσκονται σε γνωστές αποστάσεις από την πηγή. Όταν τα σεισμικά κύματα συναντήσουν διεπιφάνειες

που διαχωρίζουν σχηματισμούς διαφορετικών σεισμικών ταχυτήτων, τα κύματα διαθλώνται σύμφωνα με το νόμο του Snell. Για μια κρίσιμη γωνία όπως ονομάζεται για κάθε διεπιφάνεια, το σεισμικό κύμα θα διαδίδεται κατά μήκος της διεπιφάνειας με την ταχύτητα του υποκείμενου στρώματος. Τα διαμήκη κύματα έχουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με άλλα είδη κυμάτων και αποτελούν την πρώτη άφιξη, η οποία καταγράφεται στα γεώφωνα. Με τη βοήθεια ενός σειсмоγράφου καταγράφονται οι χρόνοι αφίξεις των P κυμάτων και έτσι μπορούν να υπολογιστούν οι ταχύτητές τους. Επιπλέον μπορεί να καθοριστεί και το βάθος της διεπιφάνειας. Κύριος περιορισμός της μεθόδου αποτελεί η προϋπόθεση της παρουσίας σχηματισμών που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ταχύτητα σεισμικών κυμάτων όσο αυξάνεται το βάθος.

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται περισσότερο για τον εντοπισμό του βραχώδους υποβάθρου παρά για τον εντοπισμό υπόγειων εγκοίλων. Παρόλα αυτά όμως, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες εφαρμογής της μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων στόχων (Sheehan, 2005) με βασική όμως προϋπόθεση ότι υπάρχει υποκείμενο στρώμα μεγαλύτερης ταχύτητας σεισμικών κυμάτων.



Εικόνα 2.9 : Η έμμεση επίδραση ενός εγκοίλου σε διαθλώμενα κύματα. (W. Ed Wightman et. al., 2003).

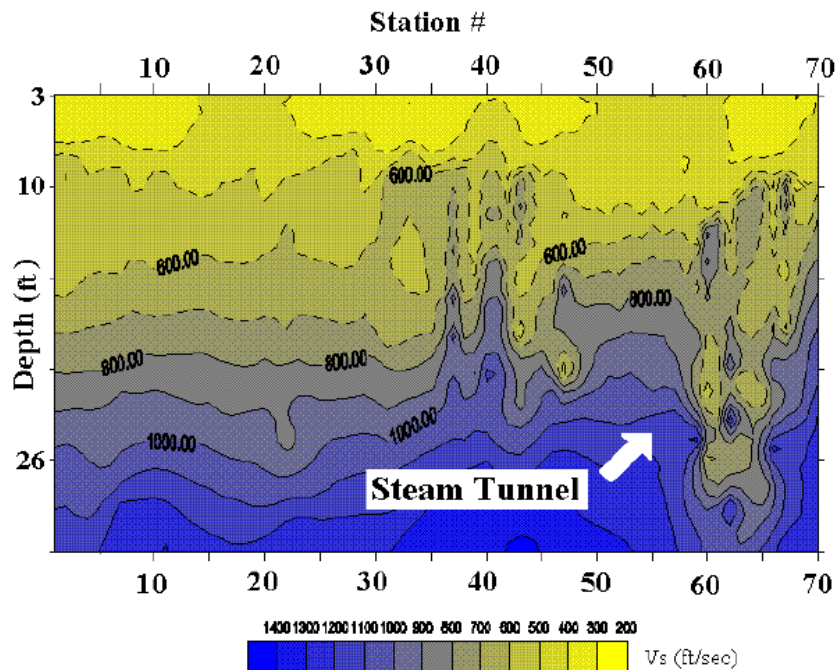
- Η μέθοδος της Σεισμικής Ανάκλασης

Στα πειράματα σεισμικής ανάκλασης, η ανάλυση εστιάζεται στην ενέργεια που καταφθάνει μετά την αρχική εδαφική κίνηση. Ειδικότερα, η ανάλυση επικεντρώνεται στην εδαφική κίνηση, την οποία δημιουργούν σεισμικά κύματα που έχουν ανακλαστεί από τις υπόγειες επιφάνειες ασυνέχειας. Τα δεδομένα επεξεργάζονται με κατάλληλες τεχνικές και προκύπτει μια κάθετη τομή του υπεδάφους που παρουσιάζει τη στρωματογραφία και τις γεωλογικές δομές του υπεδάφους. Βασική εφαρμογή της μεθόδου βρίσκεται στις έρευνες πετρελαίου και γενικότερα σε μεγάλου βάθους διασκοπήσεις. Στις επιφανειακές εφαρμογές, κύριο πρόβλημα για τη μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης αποτελούν τα επιφανειακά κύματα, τα οποία κυριαρχούν στις καταγραφές λόγω του μεγάλου πλάτους

τους, κυρίως στα 30 πρώτα μέτρα. Για αυτό και η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε βαθύτερες έρευνες όπου εξασθενούν τα επιφανειακά κύματα.

- Η μέθοδος της Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων

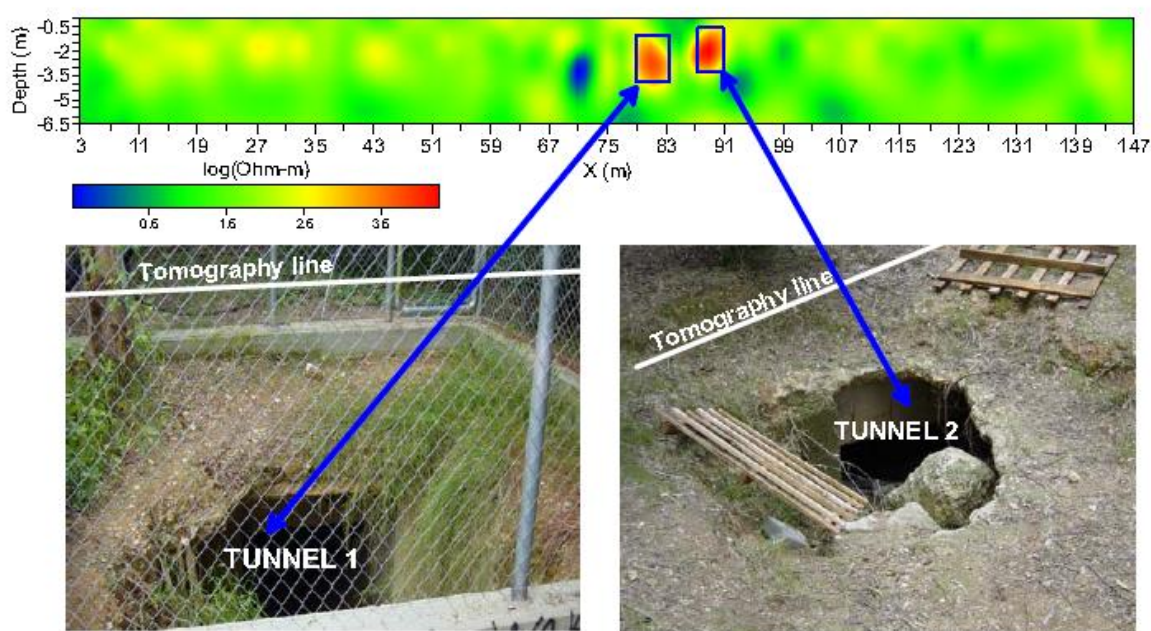
Η μέθοδος της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves) αποτελεί μια γεωφυσική μέθοδο η οποία χρησιμοποιεί τις ιδιότητες διασποράς (dispersive characteristics) των επιφανειακών κυμάτων με στόχο τον καθορισμό της μεταβολής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων (shear waves) με το βάθος (**Παράρτημα Ι**). Η λήψη των δεδομένων γίνεται με τη μέτρηση των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων, τα οποία δημιουργούνται από μια πηγή, χρησιμοποιώντας μια σειρά από γεώφωνα. Από τα δεδομένα υπολογίζεται η καμπύλη διασποράς, η οποία παρουσιάζει την ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων σε συνάρτηση με τη συχνότητά τους. Από την καμπύλη αυτή, ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία, προκύπτει η κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων S ως προς το βάθος. Με την επανάληψη της διαδικασίας μετρήσεων σε άλλα σημεία κατά μήκος μιας γραμμής έρευνας, μπορεί να προκύψει η διδιάστατη κατανομή των εγκάρσιων ταχυτήτων, οι οποίες σχετίζονται με τις ελαστικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για να εντοπίσει παράπλευρες ανομοιογένειες και πρόσφατα έχουν παρουσιαστεί διεθνείς εφαρμογές της για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων. Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζεται η διδιάστατη κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων που προέκυψε από τη μέθοδο MASW για τον εντοπισμό στοάς σε περιοχή του Κάνσας (Xia et.all, 2000).



Εικόνα 2.10 : Παράδειγμα εντοπισμού υπόγειας στοάς με τη μέθοδο της Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών κυμάτων. (Xia et.al., 2000).

2.3 Αναγκαιότητα & Κίνητρα της Έρευνας

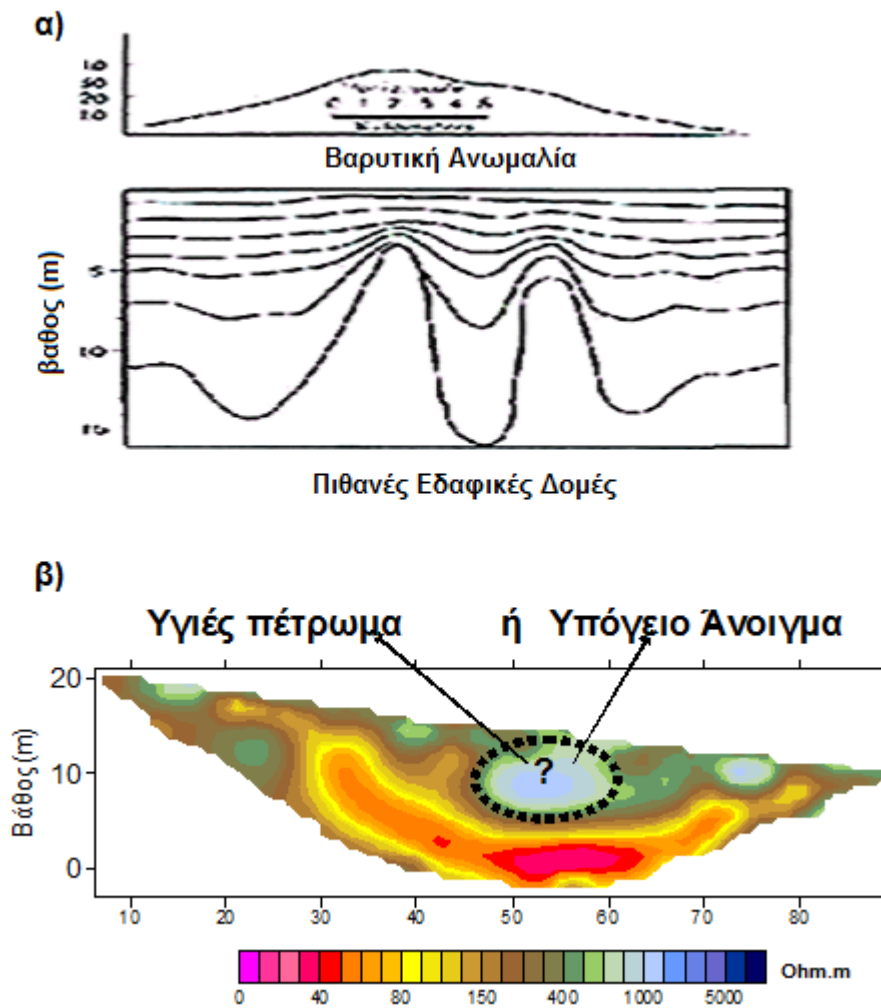
Η επιτυχής εφαρμογή διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων διεθνώς (Sheets, 1997, Johnson, 2003 Yule et al., 1997, Butler et al., 1984, Hinze, 1990, Branston et. al., 2006, Styles et. al., 2006, Rybakov, 2005 κ.α.) άλλα και στον ελλαδικό χώρο (Apostolopoulos et. al 2009, Sotiropoulos et. al. 2008, Tsokas et. al, 2005, Βαφειδης et al, 2004, Louis I. et al., 2002, Louis I, 2001) αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής. Επιπλέον, ενισχύουν την ανάγκη χρησιμοποίησης των γεωφυσικών μεθόδων για την αντιμετώπιση προβλημάτων, τα οποία σχετίζονται με την παρουσία υπόγειων ανοιγμάτων. Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζεται το μοντέλο ερμηνείας από τη διεξαγωγή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας για τον εντοπισμό στοών στην περιοχή της Αθήνας (Αιγάλεω) (Tsokas et. al, 2005).



Εικόνα 2.11: Παράδειγμα εφαρμογής της Ηλεκτρικής τομογραφίας για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων στη περιοχή του Αιγάλεω (Tsokas et. al, 2005).

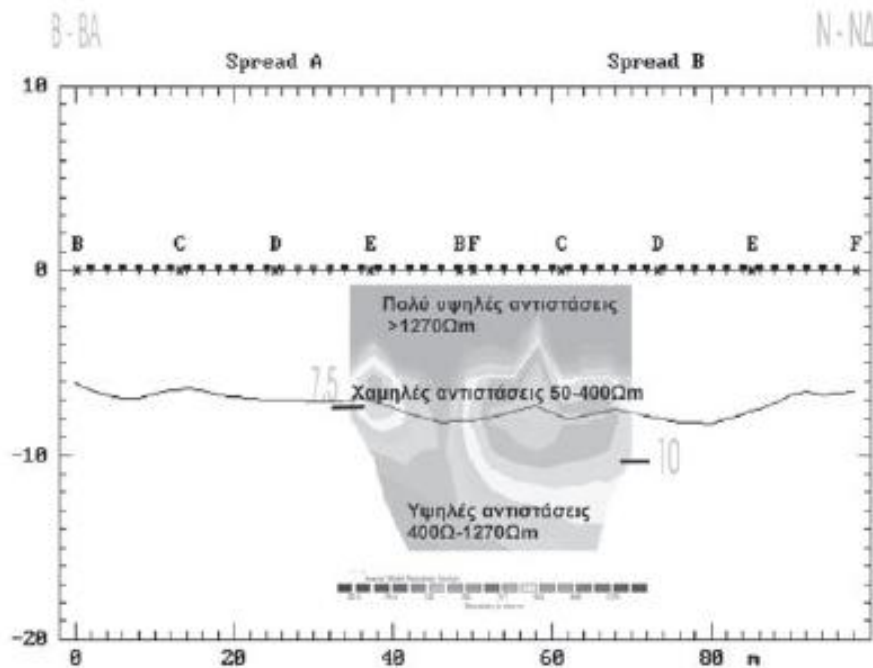
Από την άλλη πλευρά, όμως, το κύριο μειονέκτημα όλων των γεωφυσικών μεθόδων αποτελεί η μη μοναδικότητα της λύσης και η αβεβαιότητα της τελικής ερμηνείας. Για παράδειγμα, κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της βαρυτικής μεθόδου για ένα προφίλ μετρήσεων, το οποίο παρουσιάζει μια συγκεκριμένη βαρυτική ανωμαλία, δεν είναι δυνατός ο άμεσος προσδιορισμός της μορφής του υπεδάφους. Διάφορες υπεδαφικές δομές μπορούν να αντιστοιχούν στις μετρήσεις αυτές (Εικ. 2.12 (α)).

Επιπλέον, πολλές φορές, ο ερευνητής δεν είναι σε θέση να αντιστοιχήσει με απόλυτη βεβαιότητα μια διακριτή διακύμανση των μετρήσεων μιας μεθόδου, με την ύπαρξη ενός υπόγειου ανοίγματος. Όπως για παράδειγμα παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 2.12 (β), η περιοχή υψηλών ειδικών αντιστάσεων στο τελικό μοντέλο ερμηνείας, είναι δυνατόν να αντιστοιχεί στην ύπαρξη ενός εγκοίλου ή σε μια πιο συνεκτική φάση του ίδιου σχηματισμού. Μόνο με την εφαρμογή άμεσων τρόπων παρατηρήσεις, όπως π.χ. γεωτρήσεων, οι οποίες παρέχουν σημειακή πληροφορία, είναι δυνατός ο έλεγχος των γεωφυσικών μοντέλων ερμηνείας.



Εικόνα 2.12 : Το πρόβλημα της ισοδυναμίας και της μη μοναδικότητας της λύσης σε : α) στη βαρυτική μέθοδο β) στη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

Σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εκτέλεση γεωτρητικών ερευνών, ο καλύτερος τρόπος για τη μείωση του ποσοστού της αβεβαιότητας της τελικής ερμηνείας είναι η εφαρμογή περισσότερων από μίας γεωφυσικής μεθόδου στην ίδια περιοχή έρευνας, δηλαδή **Συνδυαστικής Γεωφυσικής Διερεύνησης του Υπεδάφους**. Πολλοί ερευνητές αναφέρουν την αξία και τη χρησιμότητα εφαρμογής της Συνδυαστικής Γεωφυσικής Διερεύνησης του Υπεδάφους για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων (Ezersky et. al., 2006; Debeglia et. al, 2006 ; Kim J. et. al., 2007; Torrese et. al., 2008, Tsokas et. al, 2005, Βαφειδής et al, 2004). Στην Εικόνα 2.13 παρουσιάζεται ο συνδυασμός των μεθόδων της ηλεκτρικής τομογραφίας και της σεισμικής διάθλασης κατά τη γεωφυσική διασκόπηση στη περιοχή του Ομαλού, Χανίων (Βαφειδής et. al, 2004) με την υπέρθεση των μοντέλων ερμηνείας των δύο μεθόδων.

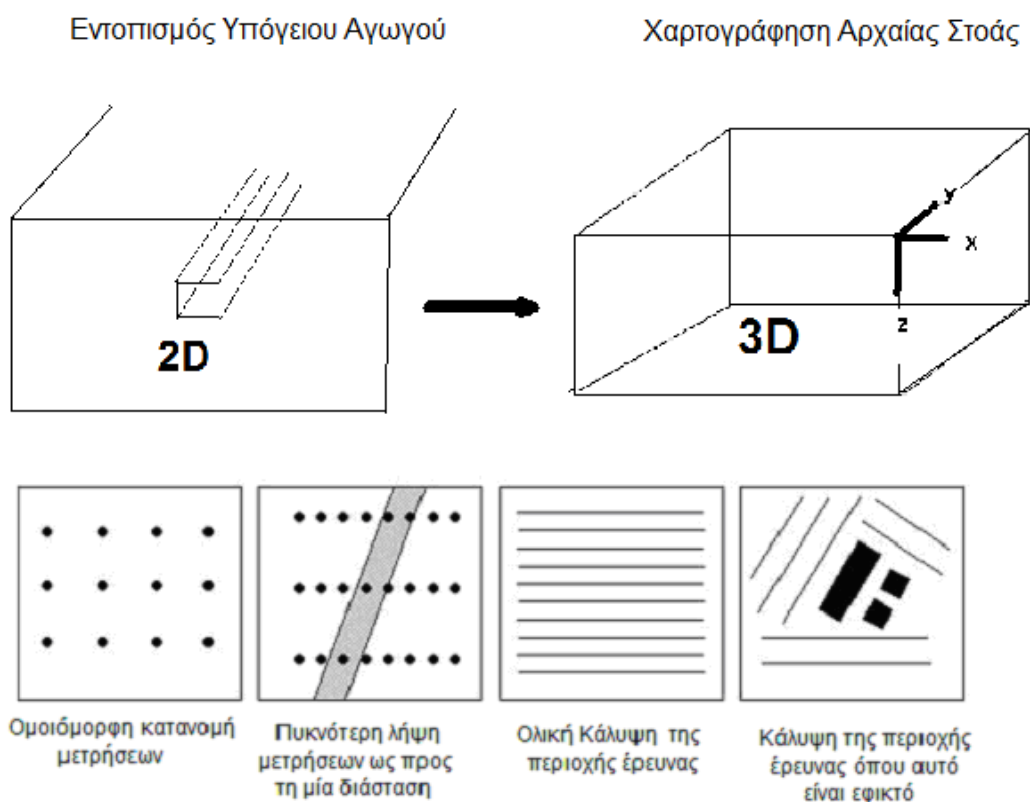


Εικόνα 2.13: Υπέρθωση γραμμής σεισμικής διάθλασης πάνω στα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Βαφειδής et. al,2004).

Ακόμα, όμως, και στη περίπτωση της Συνδυαστικής Γεωφυσικής Διερεύνησης του Υπεδάφους, η αξιοπιστία της τελικής ερμηνείας εξαρτάται κατά πολύ από την ορθή και βέλτιστη εφαρμογή κάθε μεθόδου. Εκτός από παράγοντες, όπως η γεωλογία της περιοχής έρευνας, η δομή του ίδιου του υπόγειου ανοίγματος (φυσικό κενό ή ανθρώπινη κατασκευή), το βάθος και το μέγεθος του στόχου, επιφανειακές και τοπογραφικές ανομοιογένειες, ύπαρξη ελεύθερου χώρου για τη λήψη των μετρήσεων, οι οποίοι εξαρτώνται κάθε φορά από την περιοχή και το στόχο της έρευνας, υπάρχουν κομβικά στάδια τα οποία επηρεάζουν την επιτυχία μιας γεωφυσικής μεθόδου και τα οποία είναι *α) Η στρατηγική λήψη των μετρήσεων β) Η επεξεργασία των μετρήσεων γ) Η ερμηνεία των μετρήσεων.*

Επομένως, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση των παραγόντων και των σταδίων που επιδρούν στην επιτυχή εφαρμογή κάθε μεθόδου και η συγκριτική αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των διαφόρων μεθόδων στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων. Η ανάλυση των κυριότερων επιφανειακών γεωφυσικών μεθόδων (Ηλεκτρική τομογραφία, Μικροβαρυτομετρία, Μαγνητική μέθοδος, μέθοδος Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων) για τον εντοπισμό ενός υπόγειου αγωγού γνωστών διαστάσεων σε ελεγχόμενες συνθήκες υπαίθρου (Κεφάλαιο 3) επιτρέπει τη διεξαγωγή έρευνας ως προς αυτήν τη κατεύθυνση.

Παράλληλα, η ανάλυση των μεθόδων της 2D και 3D ηλεκτρικής τομογραφίας, της μικροβαρυτομετρίας και της μαγνητικής μεθόδου, για τη χαρτογράφηση αρχαίας στοάς στην περιοχή του Λαυρίου (Κεφάλαιο 4), μεταφέρει το πρόβλημα από τις δύο στις τρεις διαστάσεις, επιτρέποντας τη σύγκριση διαφόρων προσεγγίσεων στη λήψη, επεξεργασία και ερμηνεία των μετρήσεων (Εικ. 2.14).



Εικόνα 2.14 : Διαφορετικές προσεγγίσεις λήψεις μετρήσεων

Η συνηθέστερη πρακτική, που ακολουθείται διεθνώς, όσον αφορά στη Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση του Υπεδάφους, αποτελεί η συγκριτική αξιολόγηση των γεωφυσικών μοντέλων ερμηνείας που προέρχονται από τη μεμονωμένη επεξεργασία διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων και τα οποία αλληλοκαλύπτουν την περιοχή έρευνας. Εάν και η συγκεκριμένη διαδικασία συντελεί στη μείωση της αβεβαιότητας της τελικής ερμηνείας, είναι εκ φύσεως ποιοτική και επομένως το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται σημαντικά από την εμπειρία και τις «προκαταλήψεις» του εκάστοτε ερευνητή. Τελικός στόχος της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής αποτελεί **η ανάπτυξη μιας νέας συνδυαστικής τεχνικής γεωφυσικών μεθόδων** για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων, με τη δημιουργία ενός τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους. Η ανάλυση της καινοτόμου τεχνικής σε συνθετικά δεδομένα αλλά και σε δεδομένα πραγματικών συνθηκών υπαίθρου (Κεφάλαιο 5) κρίνεται αναγκαία για τη διερεύνηση της εφικτότητας και της αποτελεσματικότητας εφαρμογή της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

Ανάλυση Γεωφυσικών Μεθόδων για τον Εντοπισμό Υπόγειου Στόχου Προσδιορισμένων Διαστάσεων

3.1 Πείραμα Υπαίθρου- Συνθήκες

Η πρώτη φάση της παρούσας εργασίας, είχε ως κύριο στόχο την εφαρμογή και την ανάλυση των κυριότερων επιφανειακών γεωφυσικών μεθόδων στον εντοπισμό ενός **υπόγειου στόχου πεπερασμένων διαστάσεων σε πραγματικές αλλά ταυτόχρονα και όσο το δυνατόν, ελεγχόμενες συνθήκες υπαίθρου.**

Η διεξαγωγή της συγκεκριμένης εφαρμογής επιτρέπει :

- τη σύγκριση των διαφόρων τεχνικών λήψης, επεξεργασίας και ερμηνείας των μετρήσεων της κάθε μεθόδου, ως προς τη βελτίωση του τελικού μοντέλου ερμηνείας,
- την αξιολόγηση των μοντέλων ερμηνείας των διαφόρων μεθόδων ως προς την αποτελεσματικότητα και την ορθότητα τους.

Η κάθε μέθοδος εφαρμόστηκε και ερμηνεύτηκε μεμονωμένα, δίνοντας την ευκαιρία για την πραγματοποίηση έρευνας σε συγκεκριμένους τομείς της κάθε μιας. Στη συγκεκριμένη περιοχή έρευνας εφαρμόστηκαν και θα παρουσιαστούν οι εξής επιφανειακές μέθοδοι :

- ✓ Ηλεκτρική Τομογραφία.
- ✓ Μικροβαρυτική Μέθοδος.
- ✓ Μαγνητική Μέθοδος.
- ✓ Μέθοδος Ανάλυσης Επιφανειακών Σεισμικών Κυμάτων.

Παρά το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ο στόχος έρευνας αναμένεται να είναι περίπου στα 2 με 2,5 μέτρα, στις επόμενες παραγράφους, θα αναπτυχθούν συνοπτικά στοιχεία για την περιοχή και το στόχο της έρευνας αλλά και για την ευρύτερη γεωλογία της περιοχής, με σκοπό να τονιστεί ότι κάθε γεωφυσική έρευνα πρέπει να ξεκινά πρωτίστως με τη συλλογή των απαραίτητων γεωλογικών στοιχείων άλλα και κάθε δυνατής πληροφορίας για το στόχο ενδιαφέροντος.

Η σημασία των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή έρευνας είναι σαφώς μεγάλη και η **γνώση της επιτακτική ανάγκη** για τον ερευνητή γεωφυσικό, αφού παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στο περιεχόμενο και την ποιότητα των ίδιων των μετρήσεων ανεξαρτήτως μεθόδου όσο και στην τελική ερμηνεία του γεωφυσικού μοντέλου που προσομοιάζει το υπέδαφος.

3.1.1 Περιοχή Έρευνας

Ο αγωγός αυτός βρίσκεται στο χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και εξυπηρετεί τα δίκτυα κοινής ωφελείας της Πολυτεχνειούπολης.



Εικόνα 3.1: Η θέση του αγωγού σε σχέση με τις κτιριακές εγκαταστάσεις του Ε.Μ.Π.

Ο αγωγός διέρχεται από την περιοχή του Πολυτεχνείου που βρίσκεται ανάμεσα στο Κτίριο Διοίκησης και τα Κτίρια των Πολιτικών Μηχανικών και έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Το ύψος του είναι περί τα 2 m, το πλάτος του 3 m και το βάθος της οροφής του από την επιφάνεια του εδάφους εκτιμάται στα 2 με 2.5 m. Σε συγκεκριμένο σημείο του αγωγού υπάρχει φρεάτιο επίσκεψης που φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και καλύπτεται με μεταλλική καταπακτή διαστάσεων 1.2x2.7 m από το οποίο ήταν δυνατή η παρατήρηση των διαστάσεων του αγωγού (Φωτ. 3.1).



Φωτογραφία 3.1: Άποψη του φρεατίου επίσκεψης του αγωγού.

3.1.2 Γεωλογία Περιοχής

Η υπό εξέταση περιοχή ανήκει στην περιοχή του Ζωγράφου, η οποία βρίσκεται στις βορειοδυτικές παρυφές του ορεινού όγκου του Υμηττού στο Νομό Αττικής, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα, να χαρακτηρίζεται από τη γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του Υμηττού.

Η στρωματογραφική διάρθρωση της περιοχής, στην οποία έλαβαν χώρα οι γεωφυσικές διασκοπήσεις, παρουσιάζοντας τους σχηματισμούς από τους νεότερους προς τους παλαιότερους, έχει ως εξής:

Τεταρτογενές σύστημα

Ολόκαινο: σχηματισμοί στο πεδινό, επαπτόμενο τμήμα του Υμηττού, οι οποίοι έχουν πάχος λίγα μέτρα και αποτελούνται από ερυθρές αργίλους, κροκάλες και άμμο.

Πλειστόκαινο: διακρίνεται στον ανώτερο και τον κατώτερο ορίζοντα. Ο πρώτος, αποτελείται από ερυθρές αργίλους και λατύπες, μικρού μεγέθους και βαθμού συνεκτικότητας. Όσον αφορά στον κατώτερο ορίζοντα, παρουσιάζει ασυμφωνία στο υπόβαθρό του, το οποίο, σε ορισμένες θέσεις, ανήκει στο Μεταμορφωμένο σύστημα, ενώ, σε άλλες, στο Νεογενές. Πρόκειται, ουσιαστικά, για ένα λατυποκροκαλοπαγές, ιδιαίτερα συνεκτικό, το οποίο αποτελείται από μεγάλες λατύπες και κροκάλες του Κατώτερου Μαρμάρου και του Δολομίτη. Λόγω του μεγέθους και του βαθμού αποστρωγγύλωσής τους, πιστεύεται ότι αυτές αποτελούν αποθέσεις χειμάρρων. Το πάχος του ορίζοντα αυτού κυμαίνεται από 10 έως 15m, παρόλο που, σε ορισμένα σημεία, δύναται να ξεπερνάει και τα 25 m.

Τριτογενές σύστημα

Αποτελούνται μόνο από Νεογενείς αποθέσεις. Διακρίνονται σε:

Θαλάσσιους και παράκτιους σχηματισμούς του ανώτερου Πλειόκαινου: (ψαμμούχες μάργες, ψαμμίτες, κροκαλολατυποπαγή και άστρωτοι κλαστικοί τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι).

Λιμναίους σχηματισμούς του κατώτερου Πλειόκαινου - ανώτερου Μειόκαινου: (ψαμμίτες, μάργες, πηλίτες και κροκαλοπαγή).

Επωθημένο κάλυμμα (Αλλόχθονη Ενότητα)

Πρόκειται για ένα σύστημα τεκτονικού καλύμματος εξ επωθήσεως, επάνω στο Αυτόχθονο σύστημα. Περιλαμβάνει στρώματα του Ιουρασικού και Κρητιδικού, με τον Αθηναϊκό σχιστόλιθο να υπέρκειται του Κατώτερου Ασβεστόλιθου. Στο Επωθημένο κάλυμμα διακρίνονται οι εξής λιθολογικές ενότητες:

Στρώματα Αλεποβουνίου: Ανθρακικά πετρώματα, ηλικίας Τουρωνίου έως Σενωνίου. Το συνολικό πάχος των στρωμάτων αυτών είναι ~100m. Τα ανώτερα στρώματα, πάχους ~85m, αποτελούνται από ποικιλόχρωμους κρυπτοκρυσταλλικούς, κοκκώδεις έως χονδροκοκκώδεις ασβεστόλιθους. Συνήθως, είναι μεσοστρωματώδεις, παχυστρωματώδεις έως και άστρωτοι. Κατά θέσεις, είναι δολομιτωμένοι και αγγεριτωμένοι. Παρουσιάζουν έντονη τεκτονική καταπόνηση (συνήθως διαρρήξεις) και καρστικοποίηση. Τα κατώτερα μέλη, πάχους ~15m, αποτελούνται από λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και λεπτομερείς έως μικρολατυποπαγείς σκληρές και σχιστοποιημένες ασβεστόμαργες.

Φυλλιτικό σύστημα: Αποτελείται, κυρίως, από φυλλίτες έως μοσχοβιτικούς σχιστόλιθους, με παρεμβολές πλακωδών κρυσταλλικών ασβεστόλιθων, καθώς και αγγεριτωμένους έως ερυθρούς χαλαζίτες. Χαρακτηρίζεται, δε, από τη συχνή συνύπαρξη μαζών πρασινιτών και πράσινου τάλκη. Το πάχος του Φυλλιτικού συστήματος πιστεύεται ότι ξεπερνά τα 100m, ενώ έχει διαπιστωθεί στις γεωτρήσεις του Ε.Μ.Π., σε πάχος τουλάχιστον 80m.

Μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής (Αυτόχθονη Ενότητα)

Πρόκειται, ουσιαστικά, για ένα σύστημα, το οποίο αποτελείται από επάλληλα και σε συμφωνία στρώματα μαρμάρων και σχιστολίθων. Κατά περιοχές, επικρατεί το ένα ή το άλλο μέρος του συστήματος, ενώ η μετάβαση, συνήθως, είναι βαθμιαία. Έτσι, συναντώνται παχύτερα ή λεπτότερα στρώματα από σχιστόλιθους μέσα στα μάρμαρα, καθώς και στρώματα μαρμάρων μέσα στους σχιστόλιθους. Οι δολομίτες που συνυπάρχουν δε χαρακτηρίζουν κάποιο συγκεκριμένο ορίζοντα, εφόσον, όπως και τα δολομιτικά μάρμαρα, βρίσκονται σε όλες τις βαθμίδες των μαρμάρων και των σχιστολίθων. Στο Μεταμορφωμένο σύστημα της Αττικής διακρίνονται, κατά βάθος, οι εξής λιθολογικές ενότητες:

Ανώτερο Μάρμαρο: Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι το τεφρόλευκο, κυανό έως τεφρό χρώμα του, η λεπτοπλακώδης δομή του και η καρστικοποίησή του. Δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανεξάρτητος σχηματισμός, υπερκείμενος του σχιστόλιθου, αφού, σε ορισμένα σημεία του, περικλείει λεπτά στρώματα σχιστολίθου, ενώ σε άλλα, μικρά τμήματά του εισχωρούν στον υποκείμενο σχιστόλιθο. Ωστόσο, σε ορισμένες θέσεις, δίνει την εντύπωση αυτοτελούς σχηματισμού, λόγω του μεγάλου πάχους του (~250m). Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να υπέρκειται απευθείας του Κατώτερου Μαρμάρου, ενώ, σε άλλες, έχει παρατηρηθεί μια πλευρική μετάβαση από τους λεπτοπλακώδεις οριζοντές του σε λευκούς, άστρωτους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι περιλαμβάνονται, από το Lepsius (1893), στο Ανώτερο Μάρμαρο.

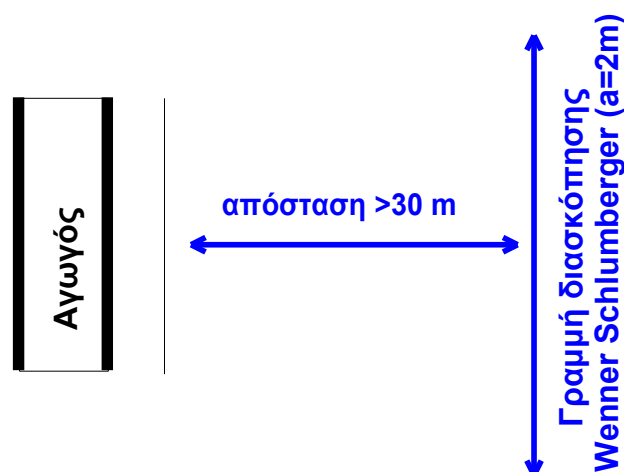
Σχιστόλιθος Καισαριανής: Παρεμβάλλεται μεταξύ του Ανώτερου και του Κατώτερου Μαρμάρου. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν εξαπλώνεται σε όλη την έκταση, ώστε να διακόπτει πλήρως την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ Ανώτερου και Κατώτερου Μαρμάρου, αλλά ότι πρόκειται για στρωματογραφικές αποσφηνώσεις σχιστολιθικών τεμαχίων. Αποτελείται από τεφρούς έως μαύρους, στιλπνούς, μαρμαρυγικούς, ασβεστιτικούς, γραφιτικούς και χλωριτικούς σχιστόλιθους, ενώ μπορεί να περιέχει και σώματα σχιστοποιημένων και εξαλλοιωμένων σερπεντινιτών, καθώς και φυλλίτες, συχνά πλούσιους σε ασβεστίτη. Μέσα στο σχιστόλιθο, παρεμβάλλονται και λεπτές στρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων, καθώς και φακοί από χαλαζία ή ασβεστίτη. Όλη η σειρά είναι έντονα πτυχωμένη και παρουσιάζει πολλά θλιπτικά και διατμητικά ρήγματα. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται από 50 – 350m.

Κατώτερο Μάρμαρο: Είναι λευκό, ροδόχρουν ή κυανότεφρο. Αποτελείται, κυρίως, από μεσοκρυσταλλικά έως χονδροκρυσταλλικά μεσοστρωματώδη, παχυστρωματώδη έως και άστρωτα μάρμαρα, τα οποία, με τη σειρά τους, αποτελούν την προς τα άνω στρωματογραφική εξέλιξη του Δολομιτικού Μαρμάρου Πιρναρής, έστω και αν οι δύο ανθρακικές σειρές βρίσκονται, τοπικά, σε στρωματογραφική ασυμφωνία. Η παχυστρωματώδης έως άστρωτη πρωτογενής δομή, σε συνδυασμό και με την τεκτονική καταπόνηση, ευνοεί την καρστικοποίηση του πετρώματος, η οποία παρουσιάζεται έντονη κατά θέσεις. Το πάχος του Κατώτερου Μαρμάρου εκτιμάται ότι φθάνει τα 500m.

3.1.3 Προσδιορισμός και Έλεγχος Συνθηκών Πειράματος

Για τον προσδιορισμό των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Wenner Schlumberger (WS), με την τοποθέτηση 41 ηλεκτροδίων σε απόσταση 2 m μεταξύ τους, κατά μήκος γραμμής παράλληλης με τη διεύθυνση του στόχου, σε απόσταση περίπου 30 m μακριά από τον άξονα του αγωγού (Εικ. 3.2).

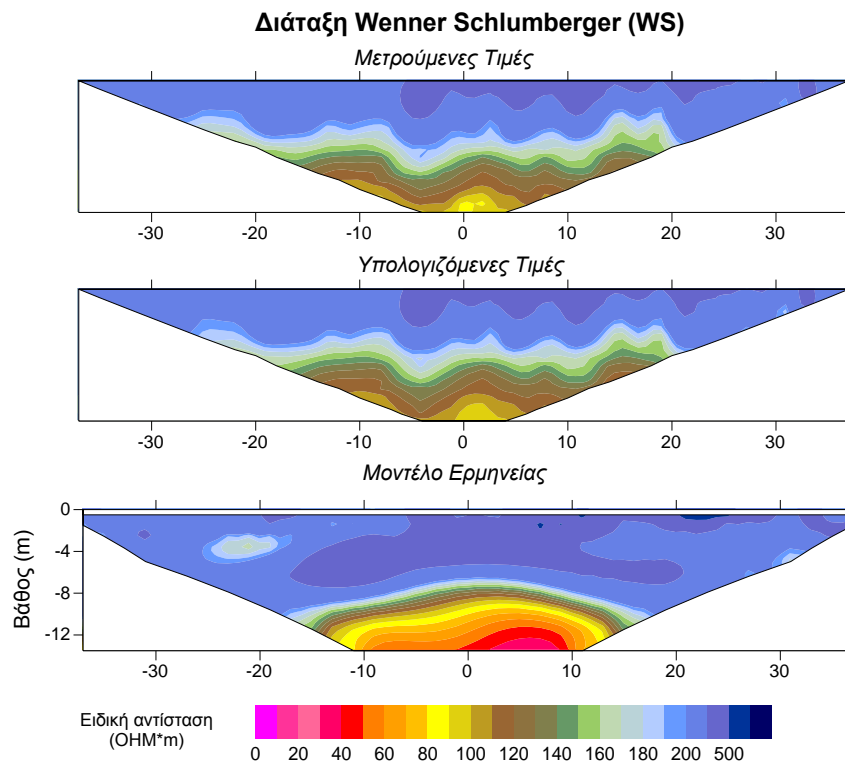
Η θέση της τομής επιλέχθηκε έτσι ώστε να απαλειφτεί κάθε πιθανότητα αλλοίωσης των αποτελεσμάτων λόγω της παρουσίας του αγωγού. Σκοπός αποτελεί ο χαρακτηρισμός της επιφανειακής γεωλογίας (πρώτα δέκα μέτρα) και η συγκεκριμένη γραμμή διασκόπησης δεν σχετίζεται με τον εντοπισμό του στόχου. Η επιλογή της διάταξης Wenner Schlumberger (WS) βασίζεται στη μεγάλη διακριτική ικανότητα της για τον εντοπισμό στρωματογραφικών οριζόντων (Ward 1990) καθώς και στη σχετική αδράνεια της σε επιδράσεις πλευρικών ανομοιογενειών, εκτός της γραμμής διασκόπησης, σε σχέση με τις άλλες διατάξεις (Nyari, 2003).



Εικόνα 3.2 : Η Θέση της διερευνητικής γραμμής διασκόπησης με τη διάταξη Wenner-Schlumberger (WS) σε σχέση με τη θέση του αγωγού.

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζονται οι μετρούμενες τιμές, οι υπολογιζόμενες και το τελικό μοντέλο ερμηνείας. Γενικότερα, στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας η τιμή του Rms αποτελεί ένα δείκτη αξιοπιστίας του μοντέλου ερμηνείας. Ο δείκτης Rms, δηλώνει το επί τοις εκατό (%) ποσοστό της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων τιμών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αξιοπιστία του τελικού μοντέλου ερμηνείας είναι μεγάλη αφού το $Rms < 1\%$ και η κατανομή των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων προσεγγίζει κατά πολύ την κατανομή των ειδικών αντιστάσεων του τελικού μοντέλου ερμηνείας.

Στο μοντέλο ερμηνείας παρουσιάζεται η στρωματογραφία του υπεδάφους, δηλαδή η ύπαρξη ενός στρώματος μέσης ειδικής αντίστασης (αδρομερή υλικά) και ενός υποκείμενου στρώματος χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων (πιθανότατα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άργιλο). Επομένως, στην περιοχή έρευνας, εκτός του αγωγού υπάρχει και ένα επιπλέον στρώμα, το οποίο προσδίδει στη συγκεκριμένη εφαρμογή μεγαλύτερο ενδιαφέρον και αποτελεί ένα πρόσθετο δεδομένο-ζητούμενο στη συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων διατάξεων.



Εικόνα 3.3 : Ηλεκτρικό μοντέλο ερμηνείας το οποίο παρουσιάζει τη στρωματογραφία της περιοχής έρευνας.

3.2 Εφαρμογή Ηλεκτρικής Τομογραφίας

3.2.1 Στόχος της Έρευνας

Στα πλαίσια αυτής της ενότητας, εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας στην περιοχή εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, για τον εντοπισμό του υπόγειου αγωγού γνωστών διαστάσεων (2x3 m και βάθος περίπου 2,5 m).

Κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας, σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων. Η κάθε διάταξη ηλεκτροδίων έχει διαφορετική απόκριση ακόμα και στο ίδιο υπεδαφικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχουν διαφορές, ανάλογα με το πως οι ρευματικές γραμμές διαπερνούν το στόχο και γενικότερα πως αλληλεπιδρά το δημιουργούμενο ηλεκτρικό πεδίο της κάθε διάταξης με το στόχο. Άρα είναι ευνόητο ότι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται κατά πολύ από τη διάταξη που χρησιμοποιείται.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε διάταξης αποτελούν αντικείμενο εκτενέστατης μελέτης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πρόσφατη δημοσίευση σε επιστημονικό περιοδικό της σύγκρισης της απόκρισης διαφόρων διατάξεων σε διαφορετικά γεωλογικά περιβάλλοντα, με τη βοήθεια συνθετικών-μαθηματικών μοντέλων (Dahlin 2004). Στη συγκεκριμένη δημοσίευση αναδεικνύεται η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τις διατάξεις ηλεκτροδίων.

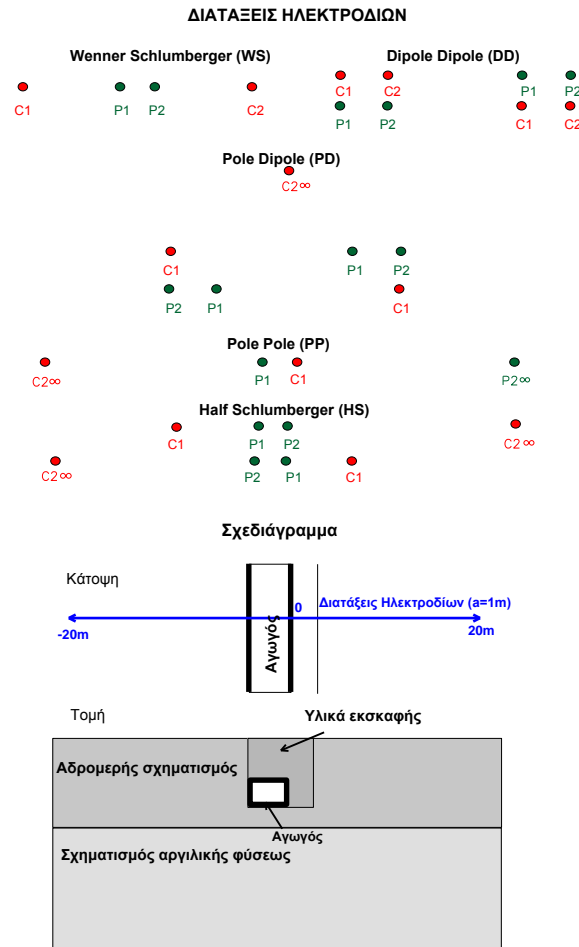
Άρα, μια εκτενέστερη και πιο επικεντρωμένη έρευνα για την ικανότητα των διαφόρων διατάξεων να εντοπίζουν πεπερασμένων διαστάσεων στόχους, κρίνεται απαραίτητη. ***Η σύγκριση των διάφορων διατάξεων σε πραγματικές συνθήκες επιτεύχθηκε με την εφαρμογή τους, κατά μήκος της ίδιας γραμμής διασκόπησης για τον εντοπισμό του ίδιου στόχου.***

Σκοπός των συγκεκριμένων πειραμάτων ήταν :

- Η αξιολόγηση και η σύγκριση των κυριότερων διατάξεων ηλεκτροδίων ως προς την ικανότητα τους στον εντοπισμό υπόγειων πεπερασμένων στόχων σε πραγματικές συνθήκες υπαίθρου.
- Η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους όσον αφορά την οριοθέτηση του στόχου.
- Η αξιολόγηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων της διαδικασίας της αντιστροφής στο τελικό μοντέλο ερμηνείας.
- Η ανάπτυξη νέων τεχνικών διδιάστατης ερμηνείας που θα βελτιώνουν το τελικό μοντέλο ερμηνείας.

3.2.2 Εργασίες Υπαίθρου-Γραμμές Έρευνας

Οι διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων εφαρμόστηκαν κατά μήκος γραμμής με διεύθυνση κάθετη στον αγωγό, με την τοποθέτηση 41 ηλεκτρόδια ανά 1m. Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζονται οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και η θέση και ο προσανατολισμός της γραμμής διασκόπησης σε σχέση με τον υφιστάμενο αγωγό σε κάτοψη και σε τομή.



Εικόνα 3.4: Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν και το σχεδιάγραμμα με τη θέση του αγωγού σε σχέση με τις γραμμές διασκόπησης σε κάτοψη και σε τομή.

3.2.3 Συγκριτική Αξιολόγηση Διατάξεων Ηλεκτροδίων

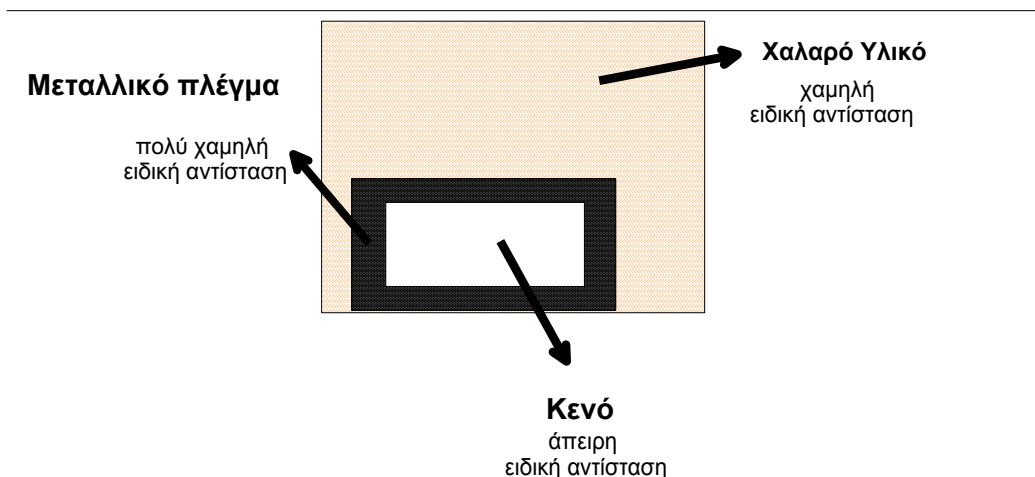
Για την επεξεργασία και την ερμηνεία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας των διαφόρων διατάξεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res2dinv. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια, ερμηνεύθηκαν ακριβώς με τις ίδιες παραμέτρους για να είναι αντικειμενική η σύγκρισή τους.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων στη συγκεκριμένη εφαρμογή προκύπτει ένα αρχικό συμπέρασμα :

- τα μοντέλα ερμηνείας όλων των διατάξεων (ανεξάρτητα από τις παραμέτρους αντιστροφής) επηρεάζονται περισσότερο από την παρουσία της εκσκαφής, παρά από την ύπαρξη του στόχου.

Αιτία του φαινομένου αυτού αποτελεί η συνύπαρξη στον αγωγό του κενού (μεγάλη ειδική αντίσταση) και του μεταλλικού οπλισμού του (μικρή ειδική αντίσταση), που συντελεί σε μία ενδιάμεση ειδική αντίσταση παρόμοια με αυτήν των υλικών εκσκαφής (Εικ. 3.5).

Υπόγειος Αγωγός



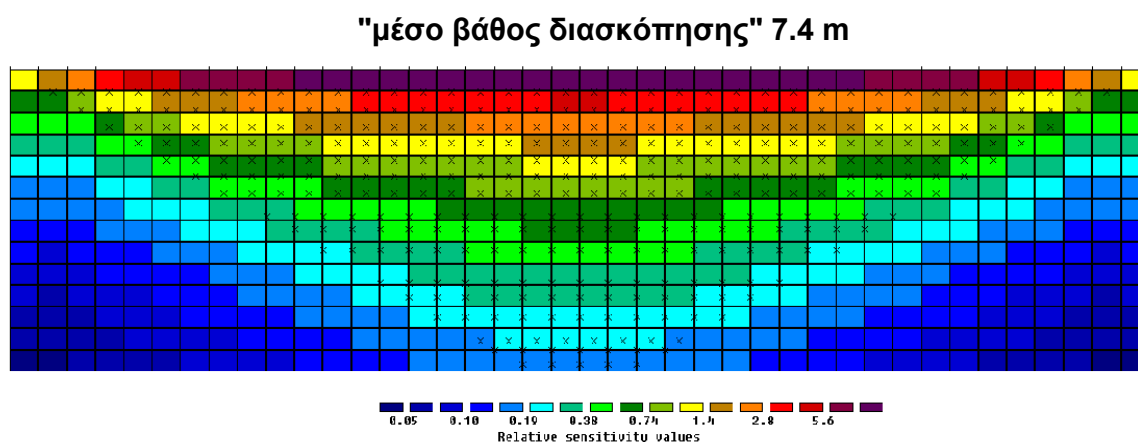
Εικόνα 3.5: Σχεδιάγραμμα του στόχου έρευνας.

Επομένως, τα μοντέλα ερμηνείας των διαφόρων διατάξεων αξιολογούνται ως προς την ορθή οριοθέτηση των ορίων της εκσκαφής. Ειδικότερα, στα επόμενα Κεφάλαια (3.2.3.1 έως 3.2.3.5) θα παρουσιαστούν διεξοδικά τα αποτελέσματα για κάθε διάταξη.

3.2.3.1 Διάταξη Wenner Schlumberger (WS)

Το πρωτόκολλο μετρήσεων (οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος που επιλέχθηκαν) αποτελείται από 351 μετρήσεις. Ο τρόπος που δημιουργήθηκε το πρωτόκολλο μετρήσεων είχε ως στόχο να υπάρχει μια ισοκατανομή μετρήσεων σε όλα τα βάθη και φυσικά ικανοποιητικός αριθμός μετρήσεων στο επιθυμητό βάθος. Επιπλέον ο λόγος σήματος προς θόρυβο αποτελεί ένα πρωταρχικό κριτήριο για την επιλογή των κατάλληλων μετρήσεων. Οι συνδυασμοί είναι οι εξής: $a=1$ & $n=1$ έως 7, $a=2$ & $n=4$ έως 8, $a=3n$ & $n=5,6$, $a=4$ & $n=2,3,4$.

Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται η συνολική κατανομή ευαισθησίας των μετρήσεων και η διδιάστατη κατανομή τους ως προς το βάθος (μαύροι σταυροί).

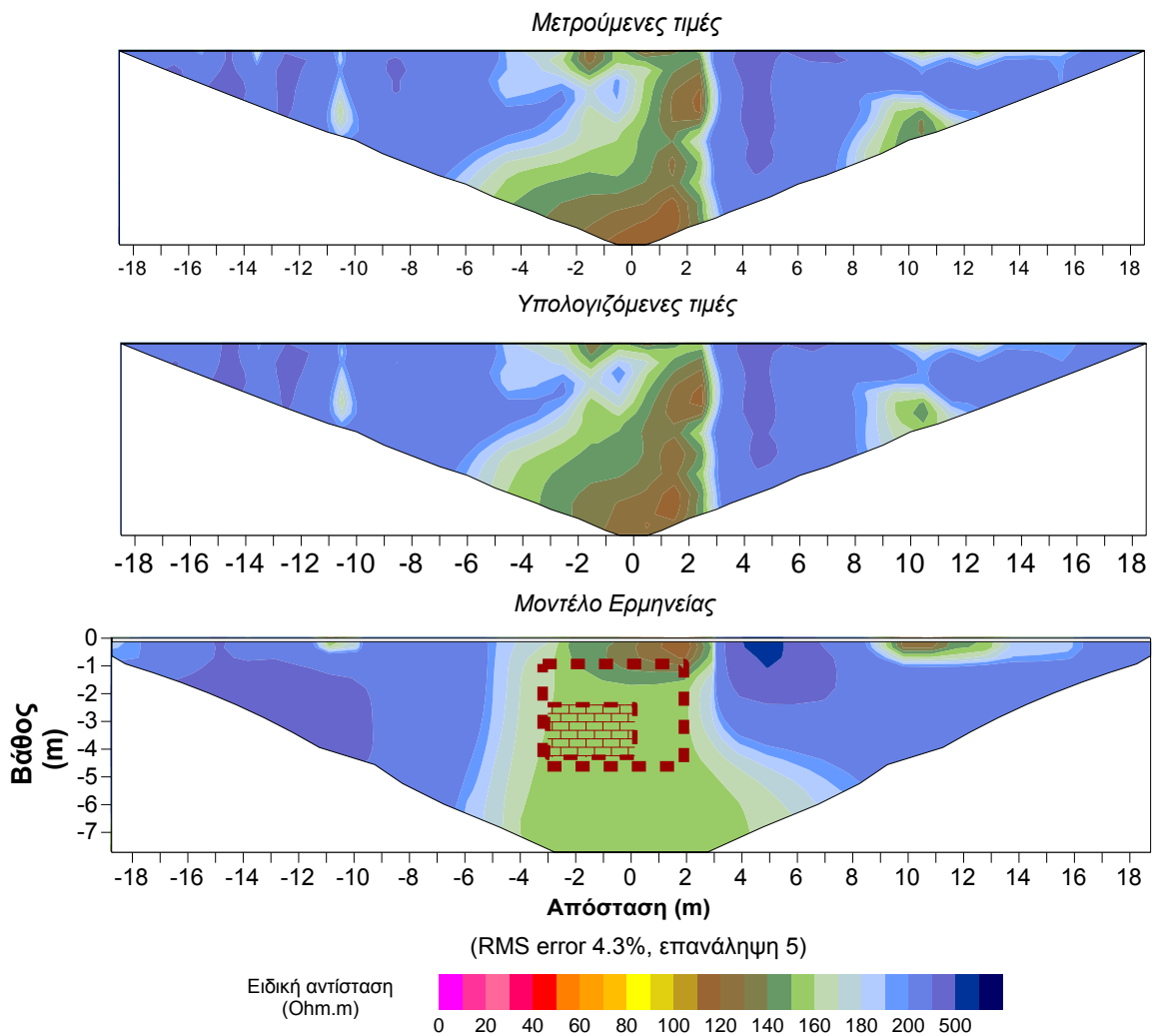


Εικόνα 3.6: Κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Wenner Schlumberger (WS).

Το τελικό μοντέλο ερμηνείας, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7, ακολουθεί τα βασικά στοιχεία, που παρουσιάζονται και στην τομή των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων. Γενικότερα, η τομή μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων της διάταξης Wenner Schlumberger (WS) είναι δυνατόν να παρέχει μια αρχική ποιοτική απεικόνιση του χώρου και να αποτελέσει ένα επιπλέον κριτήριο για την αξιοπιστία του τελικού μοντέλου ερμηνείας.

Στο μοντέλο ερμηνείας διακρίνεται η περιοχή της εκσκαφής (χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις) χωρίς όμως να είναι διακριτά τα όρια της (κυρίως το κάτω όριο της). Επίσης δεν απεικονίζεται ευκρινώς το υποκείμενο στρώμα χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων. Μια λογική εξήγηση των παραπάνω παρατηρήσεων είναι ότι στο συγκεκριμένο βάθος υπάρχει μικρός αριθμός μετρήσεων (δεν υπάρχουν πολύ διαθέσιμοι συνδυασμοί μετρήσεων Wenner ή Schlumberger με ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο για το συγκεκριμένο ανάπτυγμα) με αποτέλεσμα να παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία.

Διάταξη Wenner Schlumberger (WS)

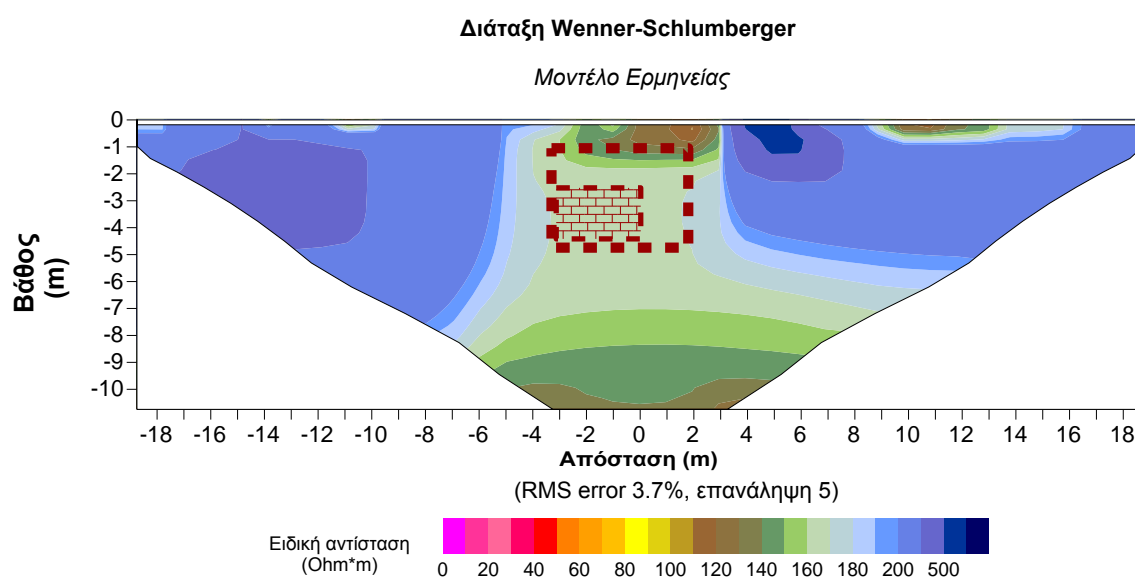


Εικόνα 3.7: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και το μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Wenner Schlumberger (WS).

Παρατηρήσεις:

Μεταβάλλοντας το μέγιστο βάθος του αρχικού μοντέλου κατά την αντιστροφή των μετρήσεων, παρατηρήθηκε χαρακτηριστική αλλαγή στην ποιότητα και στη μορφή του μοντέλου ερμηνείας.

Συγκεκριμένα, όταν κατά την αντιστροφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε αρχικό μοντέλο με μέγιστο βάθος 11m αντί των 8m (που χρησιμοποιεί by default το πρόγραμμα, σύμφωνα με το «μέσο βάθος διασκόπησης»), το οποίο ισχύει για ομογενές ημιχώρο), τότε το υποκείμενο στρώμα εντοπίζεται στο μοντέλο ερμηνείας και γενικότερα παρουσιάζεται μια βελτιωμένη και καλύτερη απεικόνιση του υπεδάφους (Εικ. 3.8). Παράλληλα μεταβάλλεται (αυξάνεται) και η τιμή της ειδικής αντίστασης η οποία αντιστοιχεί στην εκσκαφή, μειώνοντας την αντίθεση της ειδικής αντίστασης μεταξύ στόχου και περιβάλλοντος.



Εικόνα 3.8 : Το μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Wenner Schlumberger (WS) χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο βάθος για το αρχικό μοντέλο κατά την αντιστροφή των δεδομένων.

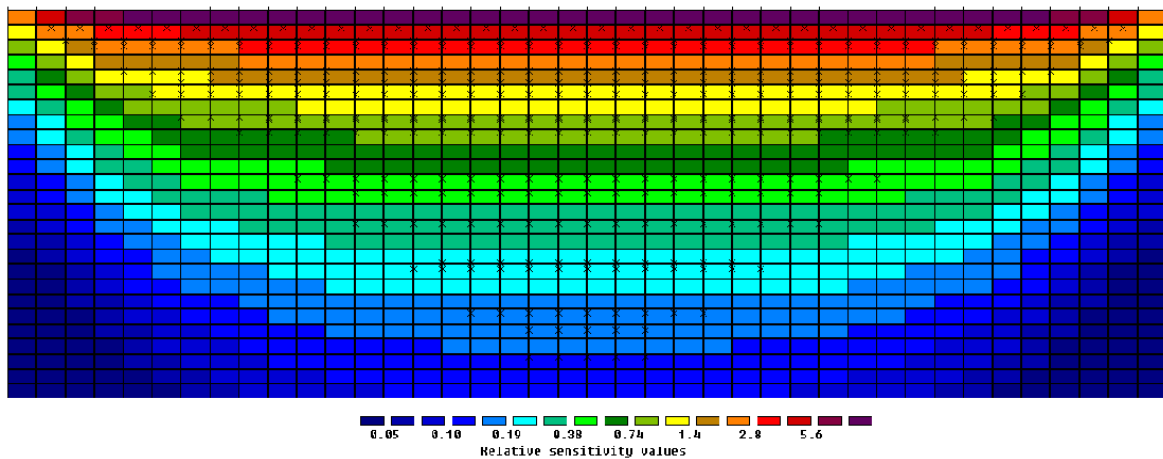
Σχόλια:

Είναι, επομένως, σημαντικό να τονιστεί ότι στην ερμηνεία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας επιδρά σημαντικά η επιλογή των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου. Μεταβάλλοντας τις παραμέτρους είναι δυνατή η βελτίωση της ανάλυσης του τελικού μοντέλου ερμηνείας.

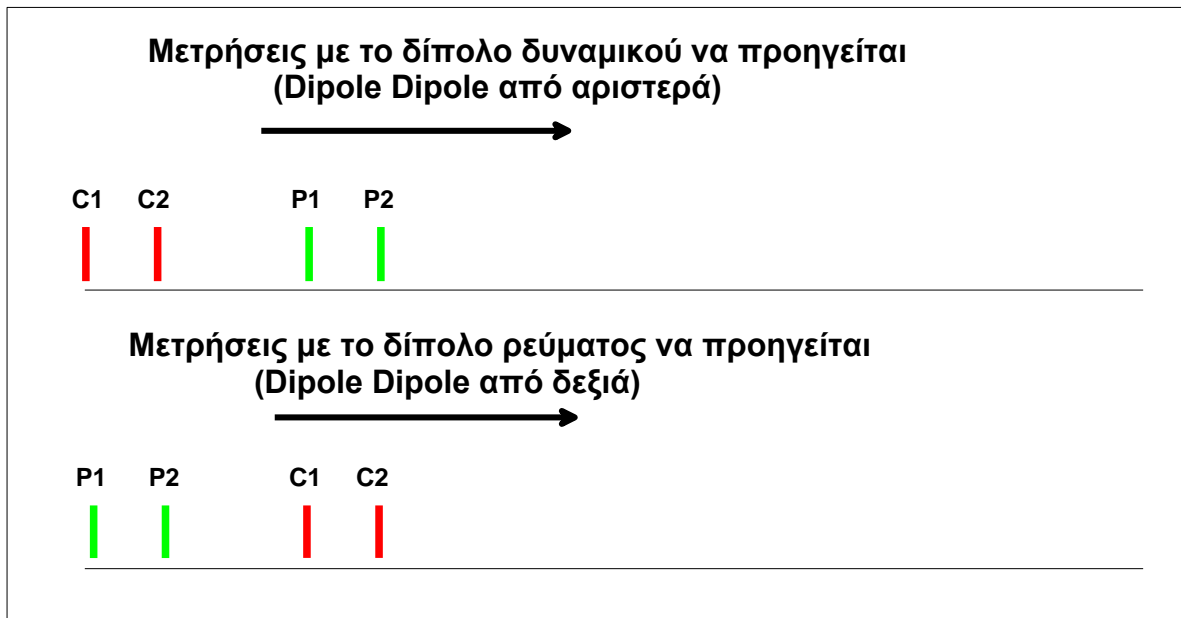
3.2.3.2 Διάταξη Dipole dipole (DD)

Το πρωτόκολλο μετρήσεων αποτελείται από 379 μετρήσεις. Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η συνολική κατανομή ευαισθησίας των μετρήσεων και η διδιάστατη κατανομή τους ως προς βάθος (μαύροι σταυροί). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με δύο τρόπους : Αρχικά με το δίπολο δυναμικού να προηγείται του δίπολου ρεύματος (Dipole Dipole από αριστερά) και αντίστροφα (Dipole Dipole από δεξιά). Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται σχηματικά ο τρόπος διάταξης των ηλεκτροδίων με τους δύο τρόπους.

"μέσο βάθος διασκόπησης" 8.9 m



Εικόνα 3.9: Κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Dipole Dipole (DD).



Εικόνα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων : Dipole Dipole από αριστερά κα Dipole Dipole από δεξιά.

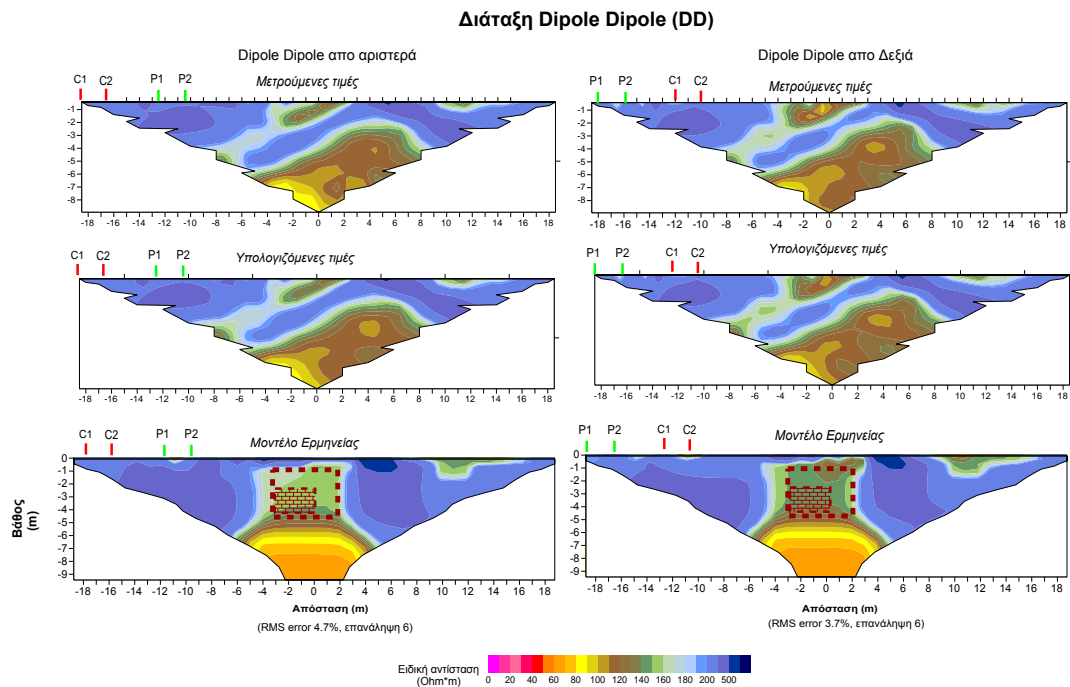
Το πρωτόκολλο μετρήσεων, όμοιο και για τους δύο τρόπους περιλαμβάνει συνδυασμούς όπου οι τιμές του $n \leq 6$, έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα με το λόγο σήματος προς θόρυβο.

Όσον αφορά στις τομές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων, παρατηρώντας την Εικόνα 3.11 συμπεραίνεται ότι υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη ανομοιογενειών που δηλώνουν πιθανή ύπαρξη υπόγειου στόχου, χωρίς όμως να είναι εύκολη η απευθείας ερμηνεία τους.

Σε γενικές γραμμές, στα μοντέλα ερμηνείας (Dipole Dipole από αριστερά και δεξιά) διακρίνεται τόσο η πλευρική όσο και η οριζόντια ανομοιογένεια λόγω της εκσκαφής όσο και του υποκείμενου στρώματος. Με τη συγκεκριμένη διάταξη και αφενός με το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι εφικτός ο εντοπισμός με μεγάλη ευκρίνεια πλευρικών αλλαγών στο υπέδαφος. Συνεπώς, κατατάσσεται υψηλά στη κλίμακα της ικανότητας εντοπισμού πεπερασμένων δομών ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν προβλήματα θορύβου.

Εάν συγκριθούν οι δύο τομές της διαφορετικής προσέγγισης Dipole Dipole μεταξύ τους, παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφορές, έστω και μικρές, τόσο στις τομές των

μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων όσο και στις τιμές των μοντέλων ερμηνείας. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στη διαφορετική θέση των δίπολων δυναμικού και ρεύματος αλλά και φυσικά στην ευαισθησία μέτρησης του οργάνου και του λόγου σήματος προς θόρυβο της κάθε μέτρησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι η περιοχή της εκσκαφής στο δεύτερο μοντέλο χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη τιμή ειδικής αντίστασης εν συγκρίσει με τη περιοχή της εκσκαφής στο πρώτο μοντέλο (υπάρχει δηλαδή διαφοροποίηση στη διακριτική ικανότητα).



Εικόνα 3.11: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Dipole Dipole από αριστερά και από δεξιά.

Παρατηρήσεις:

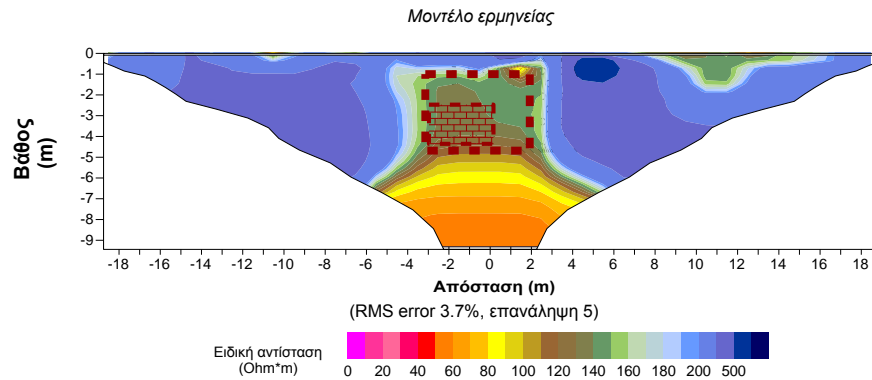
Η ερμηνεία του μέσου όρου των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων και των δύο διατάξεων (Εικ. 3.12), μετά την απαλοιφή των μετρήσεων ειδικών αντιστάσεων όπου παρατηρείται σημαντική απόκλιση ($>20\%$), παρέχει καλύτερα και μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα. Επιπλέον, παρατηρείται μεγαλύτερη αντίθεση τιμών ειδικής αντίστασης μεταξύ εκσκαφής και του περιβάλλοντα σχηματισμού σε σχέση με τα απλά μοντέλα ερμηνείας. Πρακτικά με τη συγκεκριμένη διαδικασία, μπορεί να διαπιστωθεί η αξιοπιστία και η ακρίβεια των μετρήσεων με στόχο τη βελτίωση του τελικού μοντέλου ερμηνείας.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από τις 379 μετρήσεις οι 40 εξ' αυτών παρουσίαζαν απόκλιση άνω του 20%. Οι μετρήσεις που αφαιρέθηκαν ήταν μετρήσεις είτε με μικρό a και μικρό n (λάθος προερχόμενο πιθανότατα από τη μη ακριβή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων) είτε με μεγάλο n , δηλαδή μετρήσεις με χαμηλότερο σήμα, άρα μεγαλύτερη ευαισθησία στο θόρυβο.

Σχόλια:

Πρέπει να τονιστεί ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή, λόγω των συνθηκών της περιοχής άλλα και του μικρού αναπτύγματος της γραμμής διασκόπησης, ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι ικανοποιητικά μεγάλος ώστε να μην αντιμετωπίζονται ιδιαίτερα προβλήματα θορύβου.

Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή σε περίπτωση χαμηλής ποιότητας δεδομένων, η εφαρμογή αυτής της τεχνικής θα ήταν ακόμη πιο σημαντική αφού μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο για τον εντοπισμό «ύποπτων» *Dipole Dipole (DD)* μετρήσεων και την αφαίρεση τους από τη διαδικασία ερμηνείας.



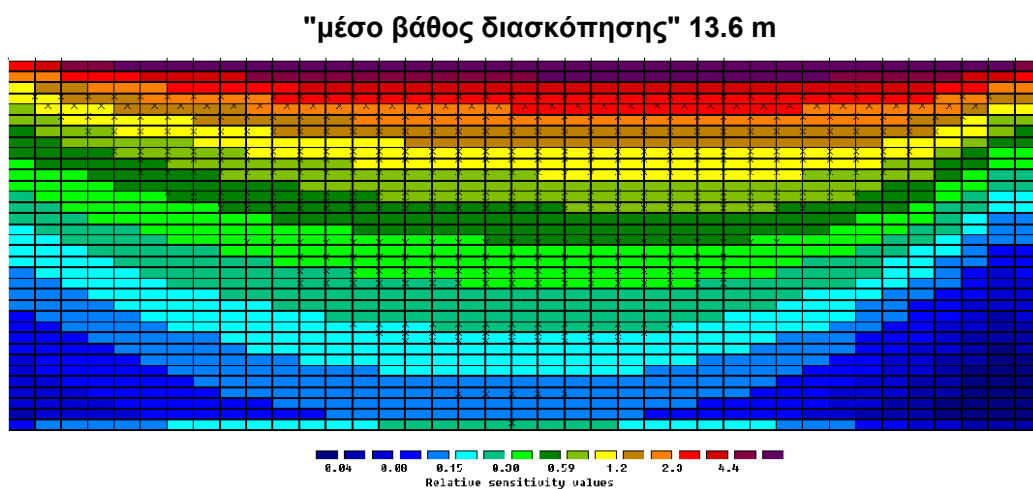
Εικόνα 3.12: Μοντέλο ερμηνείας του μέσου όρου των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων και των δύο διατάξεων *Dipole Dipole* από αριστερά και δεξιά, αποκλείοντας τις τιμές με απόκλιση μεγαλύτερη του 20%.

3.2.3.3 Διάταξη Pole Dipole (PD)

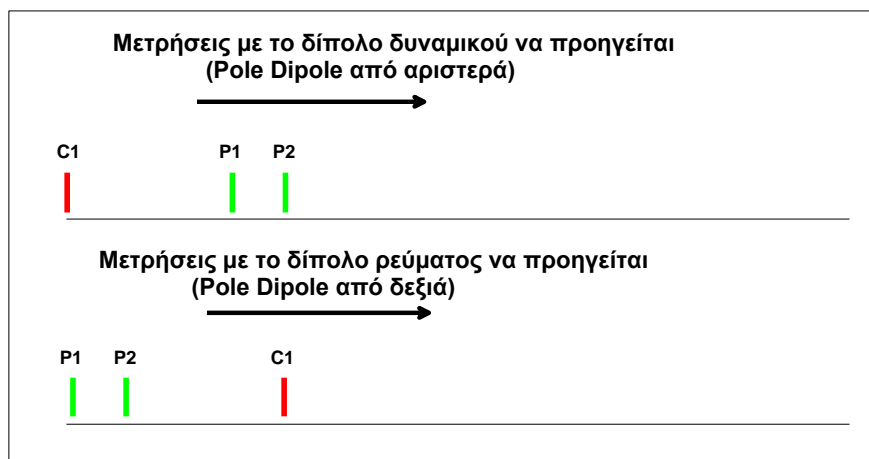
Το πρωτόκολλο μετρήσεων αποτελείται από 416 μετρήσεις. Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται η συνολική κατανομή ευαισθησίας των μετρήσεων και η διδιάστατη κατανομή τους ως προς το βάθος (μαύροι σταυροί).

Εφαρμόστηκαν δύο αντιδιαμετρικές διατάξεις Pole Dipole (PD) με το ηλεκτρόδιο ρεύματος αριστερά ή δεξιά σε σχέση με το δίπολο δυναμικού (Εικ. 3.14) και με το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο ρεύματος πολύ μακριά (<200m) και σε διεύθυνση κάθετη προς τη γραμμή διασκόπησης.

Το πρωτόκολλο μετρήσεων που ήταν ίδιο για τις Pole Dipole από αριστερά και δεξιά επικεντρώνεται κυρίως στο βάθος ενδιαφέροντος αλλά παράλληλα συντελεί στη διασκόπηση βαθύτερων οριζόντων.



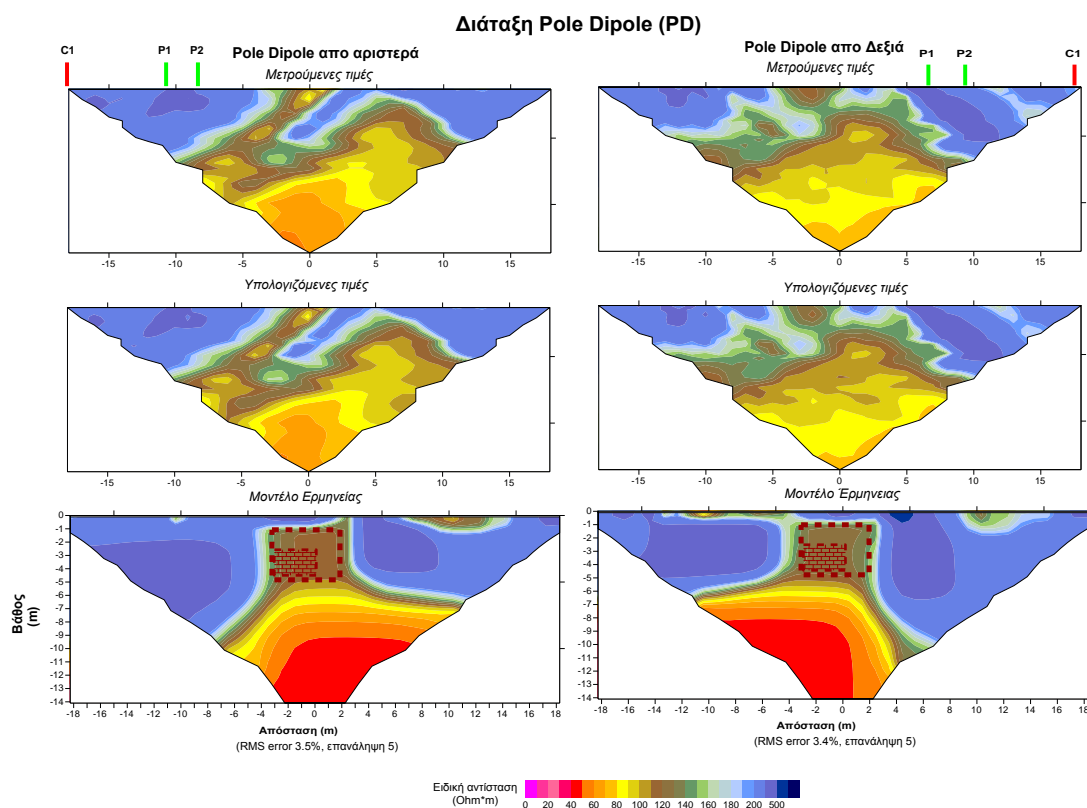
Εικόνα 3.13 : Κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Pole Dipole (PD).



Εικόνα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορετικών τρόπων μετρήσεων: Pole Dipole από αριστερά και Pole Dipole από δεξιά.

Στην τομή μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων, όπως ήταν αναμενόμενο, κυριαρχούν ασύμμετρες δομές, οι οποίες δυσχεραίνουν την απευθείας ερμηνεία των μετρήσεων. Όσο πιο σύνθετη η γεωλογική δομή, τόσο πιο σύνθετη και η τομή μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων.

Και στα δύο μοντέλα ερμηνείας που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.15 διακρίνεται τόσο η πλευρική και οριζόντια ανομοιογένεια λόγω της εκσκαφής με ακρίβεια και μεγάλη αντίθεση τιμών ειδικής αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλοντα σχηματισμό (resistivity contrast) όσο και του υποκειμένου στρώματος.



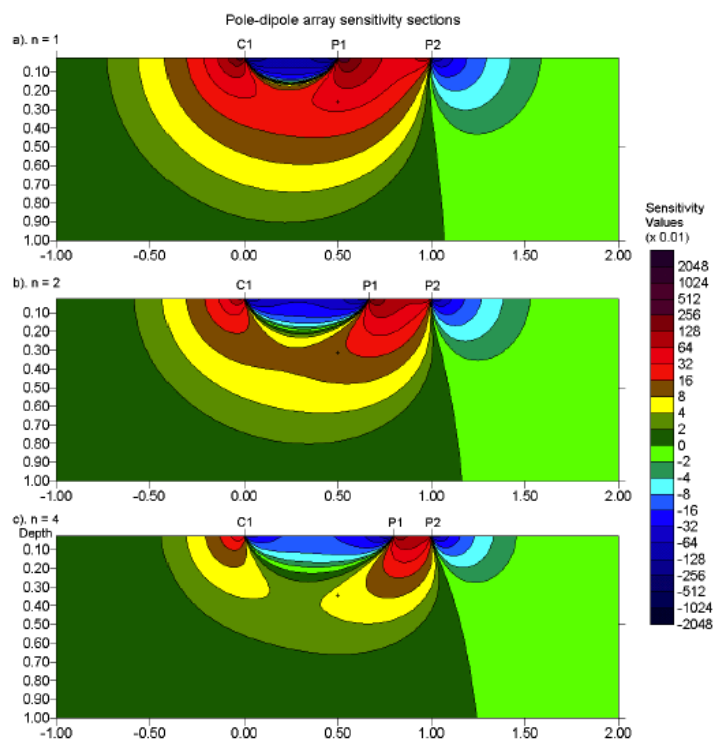
Εικόνα 3.15: Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Pole Dipole από αριστερά και δεξιά.

Παρατηρήσεις

Συγκρίνοντας τα μοντέλα ερμηνείας των Pole Dipole από αριστερά και δεξιά προκύπτουν ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

1) Από την πλευρά του ηλεκτροδίου ρεύματος, σε σχέση με τη θέση του στόχου, το κάθετο όριο της εκσκαφής εντοπίζεται καλύτερα (Εικ. 3.15). Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοροποίησης του δημιουργούμενου ηλεκτρικού πεδίου στους δύο τρόπους μέτρησης. Πρακτικά, παρατηρώντας τις συναρτήσεις ευαισθησίας μιας μέτρησης Pole Dipole (PD), διακρίνεται μια απότομη κάθετη μετάβαση μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών ευαισθησίας (Εικ. 3.16) στην εξωτερική πλευρά του δίπολου δυναμικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όπως η διάταξη κινείται με το δίπολο δυναμικού να προηγείται, να εντοπίζεται καλύτερα το πρώτο όριο του στόχου από ότι το δεύτερο, του οποίου οι αντίστοιχες μετρήσεις επηρεάζονται από τις τιμές ευαισθησίας μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος και δυναμικού άλλα και από την ύπαρξη του πρώτου ορίου.

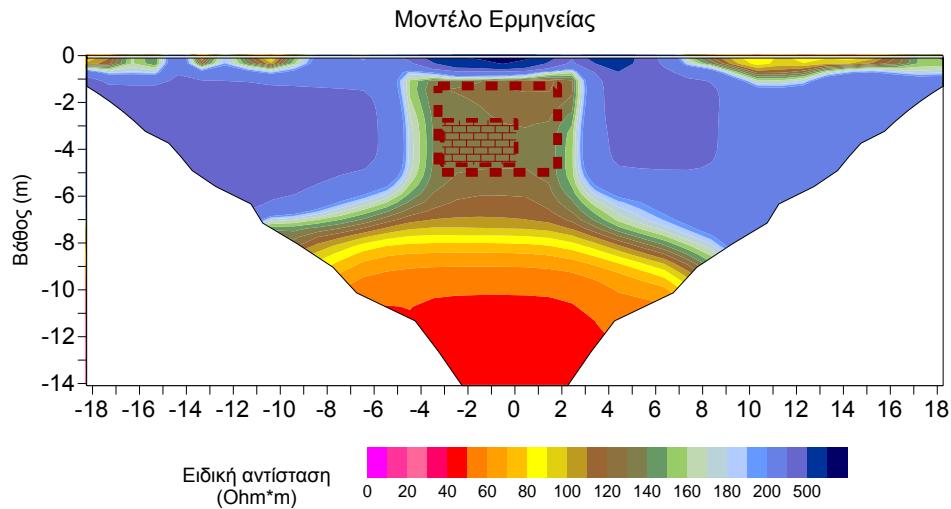
2) Στα δύο μοντέλα ερμηνείας, στην πλευρά του ηλεκτροδίου δυναμικού σε σχέση με τη θέση του στόχου δεν εντοπίζεται το υποκείμενο στρώμα χαμηλότερων ειδικών αντιστάσεων. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί κάθε ανομοιογένεια κοντά στο δίπολο δυναμικού επηρεάζει περισσότερο τις μετρήσεις και το μοντέλο ερμηνείας (Εικ.3.16). Έτσι όταν το δίπολο δυναμικού υπερβαίνει την περιοχή ανομοιογένειας, τότε είναι δυνατός ο εντοπισμός του υποκείμενου στρώματος με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 3.16: Οι κατανομές ευαισθησίας για τη διάταξη Pole Dipole (PD) για n=1,2,4 (Loke 2003).

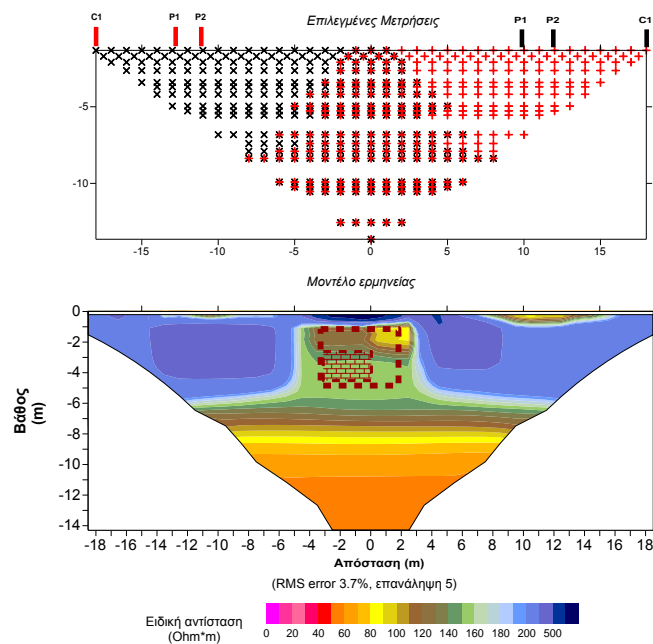
Η συνδυαστική ερμηνεία του συνόλου των μετρήσεων των αντιστροφών Pole Dipole (PD) διατάξεων μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να εξαλειφθούν κάθε τυχόν ασυμμετρίες και επιδράσεις λόγω επιφανειακών ανομοιογενειών και να ληφθεί η καλύτερη δυνατή απεικόνιση του υπεδάφους (Loke, 2003)

Αφού ενοποιήθηκαν τα δεδομένα των δύο τρόπων μέτρησης, επανερμηνεύτηκαν με τις ίδιες παραμέτρους αντιστροφής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η συνδυαστική ερμηνεία των Pole Dipole (PD) διατάξεων εμφανίζει τόσο τα όρια της εκσκαφής όσο και το υποκείμενο στρώμα ορθότερα και με καλή ακρίβεια (Εικ. 3.17).



Εικόνα 3.17 : Συνδυαστική ερμηνεία των μετρήσεων των διατάξεων Pole Dipole από αριστερά και από δεξιά.

Εάν για τις διατάξεις Pole Dipole από αριστερά και από δεξιά αφαιρεθούν αντίστοιχα οι μετρούμενες τιμές στις οποίες το δίπολο δυναμικού δεν έχει υπερβεί τα όρια του στόχου, τότε η ανάλυση των μοντέλων της συνδυαστικής ερμηνείας μειώνεται όσο αφορά στα όρια της εκσκαφής ενώ ενισχύεται η ανάλυση στον εντοπισμό του υποκειμένου στρώματος (Εικ. 3.18). Η διαπίστωση αυτή ισχύει μόνο για τη συγκεκριμένη περίπτωση, αλλά υποδεικνύει τη σημασία και την επίδραση του πρωτοκόλλου μετρήσεων στο βέλτιστο προσδιορισμό του υπεδαφικού μοντέλου ειδικών αντιστάσεων



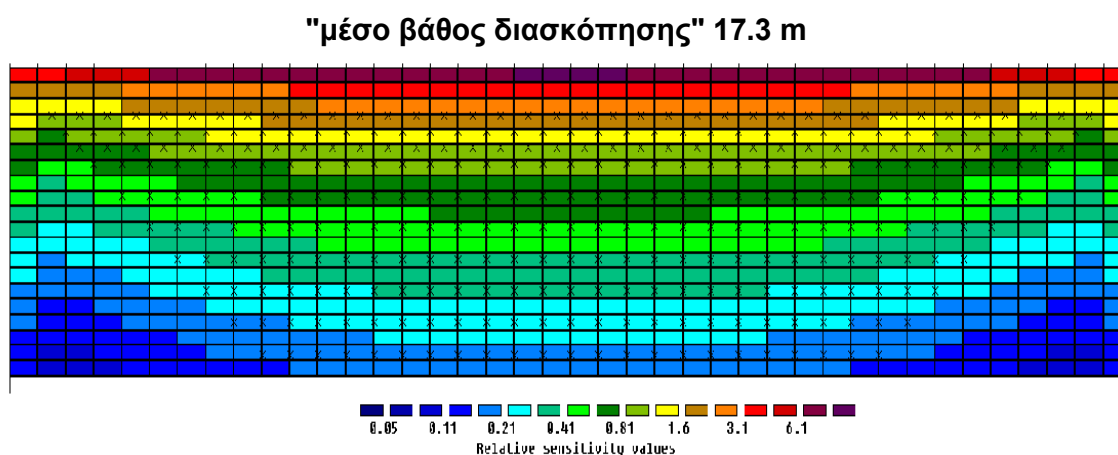
Εικόνα 3.18: Μοντέλο συνδυαστικής ερμηνείας διατάξεων Pole Dipole από αριστερά και από δεξιά με αφαίρεση τιμών «χαμηλής πληροφορίας».

Σχόλια:

Πρέπει ο ερευνητής να κατανοεί ότι δεν ισχύει πάντα, η κοινή, πολλές φορές, αντίληψη, ότι ο μεγαλύτερος αριθμός μετρήσεων ισοδυναμεί με καλύτερο τελικό μοντέλο ερμηνείας. Η πληροφορία που περιέχουν οι μετρήσεις, η ορθότητα τους και το ποσοστό θορύβου που περιέχουν, αποτελούν τα βασικότερα στοιχεία που επιδρούν στη βελτίωση του μοντέλου ερμηνείας

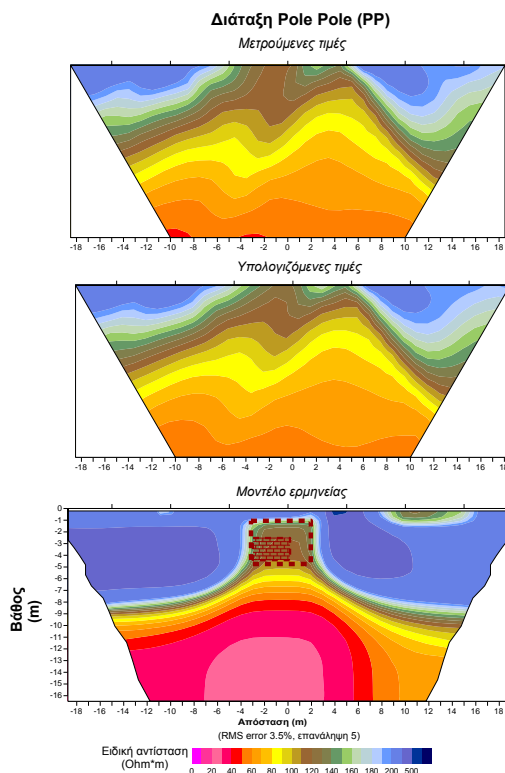
3.2.3.4 Διάταξη Pole Pole (PP)

Το πρωτόκολλο μετρήσεων αποτελείται από 335 μετρήσεις παρέχοντας τη μεγαλύτερη πλευρική κάλυψη από όλες τις άλλες διατάξεις. Στην εικόνα 3.19 παρουσιάζεται η συνολική κατανομή ευαισθησίας των μετρήσεων και η διδιάστατη κατανομή τους ως προς βάθος (μαύροι σταυροί). Οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων που επιλέχθηκαν είναι οι $a=3,4,5,6,8,10, 12,14,16,18,20$



Εικόνα 3.19 : Η κατανομή ευαισθησίας πρωτοκόλλου μετρήσεων της διάταξης Pole Pole (PP).

Στο μοντέλο ερμηνείας (Εικ. 3.20) παρουσιάζεται η θέση της εκσκαφής με μεγάλη ακρίβεια (μεγάλες και σχεδόν κάθετες αλλαγές των τιμών της ευαισθησίας πλησίον των ηλεκτροδίων) όπως και το υποκείμενο στρώμα σε μεγαλύτερο, όμως, βάθος από ότι αναμένεται, που πιθανώς οφείλεται στη χαμηλή διακριτική ικανότητα της μεθόδου ως προς τα οριζόντια στρώματα. Επιπλέον, το μεγάλο βάθος διασκόπησης και η πολύ καλή πλευρική κάλυψη, αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου.

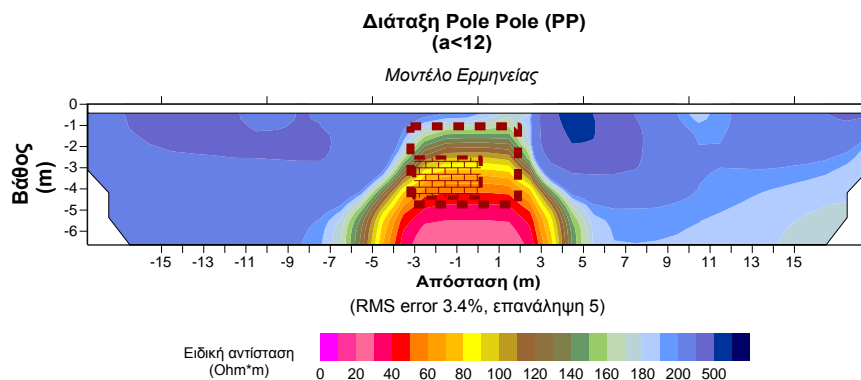


Εικόνα 3.20 : Μετρούμενες, υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και το μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Pole Pole (PP).

Παρατηρήσεις

Σε πολλές περιπτώσεις ο ερευνητής βρίσκεται στο δίλημμα της επιλογής των δόκιμων συνδυασμών μετρήσεων έτσι ώστε να έχει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το συγκεκριμένο πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε, εκτός από έναν σημαντικό αριθμό μετρήσεων περίπου στο βάθος που αναμενόταν ο στόχος, περιελάμβανε και μετρήσεις που αφορούσαν βαθύτερους ορίζοντες. Ο βαθμός στον οποίο επιδρούν οι μετρήσεις αυτές στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων μπορεί να διερευνηθεί από την παρακάτω διαδικασία.

Εάν αφαιρεθούν οι μετρήσεις που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάθη και επανερμηνευθούν τα δεδομένα, τότε προκύπτει το μοντέλο της Εικόνας 3.21. Παρατηρείται ότι σε αυτό το μοντέλο ερμηνείας δεν εντοπίζεται το υποκείμενο στρώμα και παράλληλα δυσχεραίνεται η καλή αποτύπωση του στόχου.



Εικόνα 3.21 : Μοντέλο ερμηνείας διάταξης Pole Pole (PP) με $a \leq 12$.

Πρακτικά, οι μετρήσεις που αφαιρέθηκαν, παρότι δεν αντιστοιχούν στο βάθος που βρίσκεται ο στόχος, επηρεάζουν κατά πολύ το μοντέλο ερμηνείας άμεσα, αφού η γενικότερη ευαισθησία του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου μετρήσεων είναι μικρή σε βαθύτερα τμήματα, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός μεταξύ της επίδρασης του στόχου και του υποκείμενου ορίζοντα.

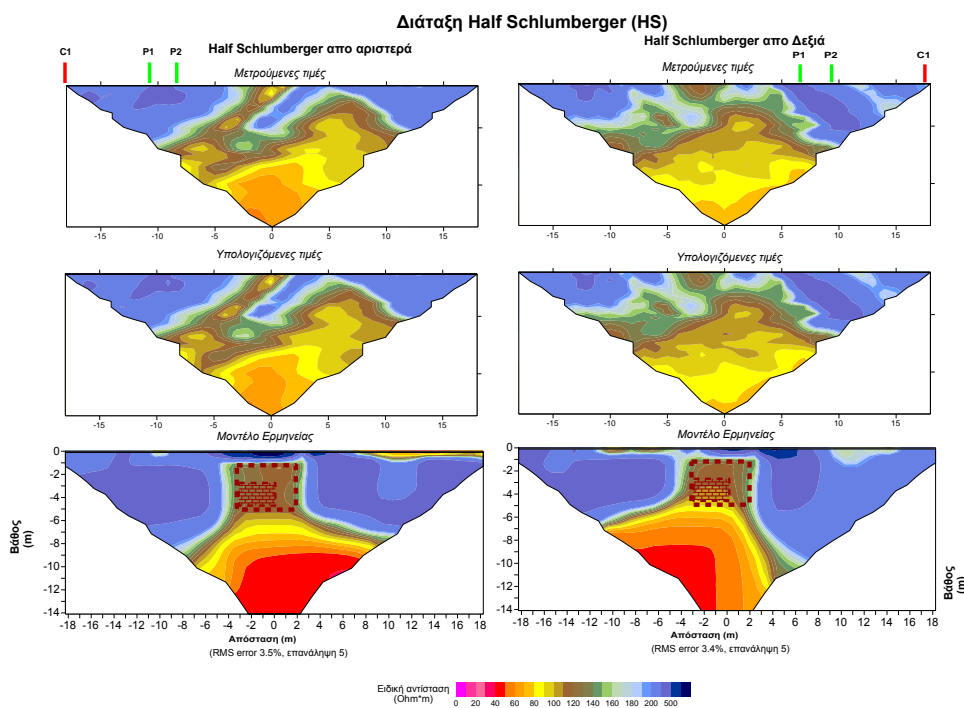
Σχόλια:

Είναι σημαντικό ο ερευνητής να λαμβάνει μετρήσεις που να καλύπτουν ένα ευρύτερο εύρος γύρω από την περιοχή έρευνας (σε μεγαλύτερα βάθη από το αναμενόμενο βάθος του στόχου) έτσι ώστε να έχει μια περισσότερο εποπτική εικόνα του υπεδάφους και να ενισχύεται ο βαθμός αξιοπιστίας της ερμηνείας των αποτελεσμάτων του. Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι δομές που βρίσκονται εκτός των ορίων του μοντέλου ερμηνείας, έχουν επίδραση στη διαμόρφωση των μετρούμενων τιμών με μέγεθος και ένταση που καθορίζεται από την κατανομή ευαισθησίας της μέτρησης και τη θέση της δομής.

3.2.3.5 Διάταξη Half- Schlumberger (HS)

Δύο αντίστροφες Half- Schlumberger (HS) διατάξεις (αντίστοιχα με τις Pole Dipole (PD) διατάξεις) με το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο ρεύματος τοποθετημένο σε μεγάλη απόσταση, στη διεύθυνση της γραμμής διασκόπησης και σε αντιδιαμετρική θέση σε σχέση με το πρώτο ηλεκτρόδιο ρεύματος.

Οι μετρήσεις με αυτή τη διάταξη πραγματοποιήθηκαν κυρίως για να διερευνηθεί η επίδραση της θέσης του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου ρεύματος σε σχέση με τη θέση της γραμμής διασκόπησης, στο τελικό μοντέλο ερμηνείας.



Εικόνα 3.22: Μετρούμενες και υπολογιζόμενες φαινόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και τα μοντέλα ερμηνείας των διατάξεων Half Schlumberger αριστερά και δεξιά.

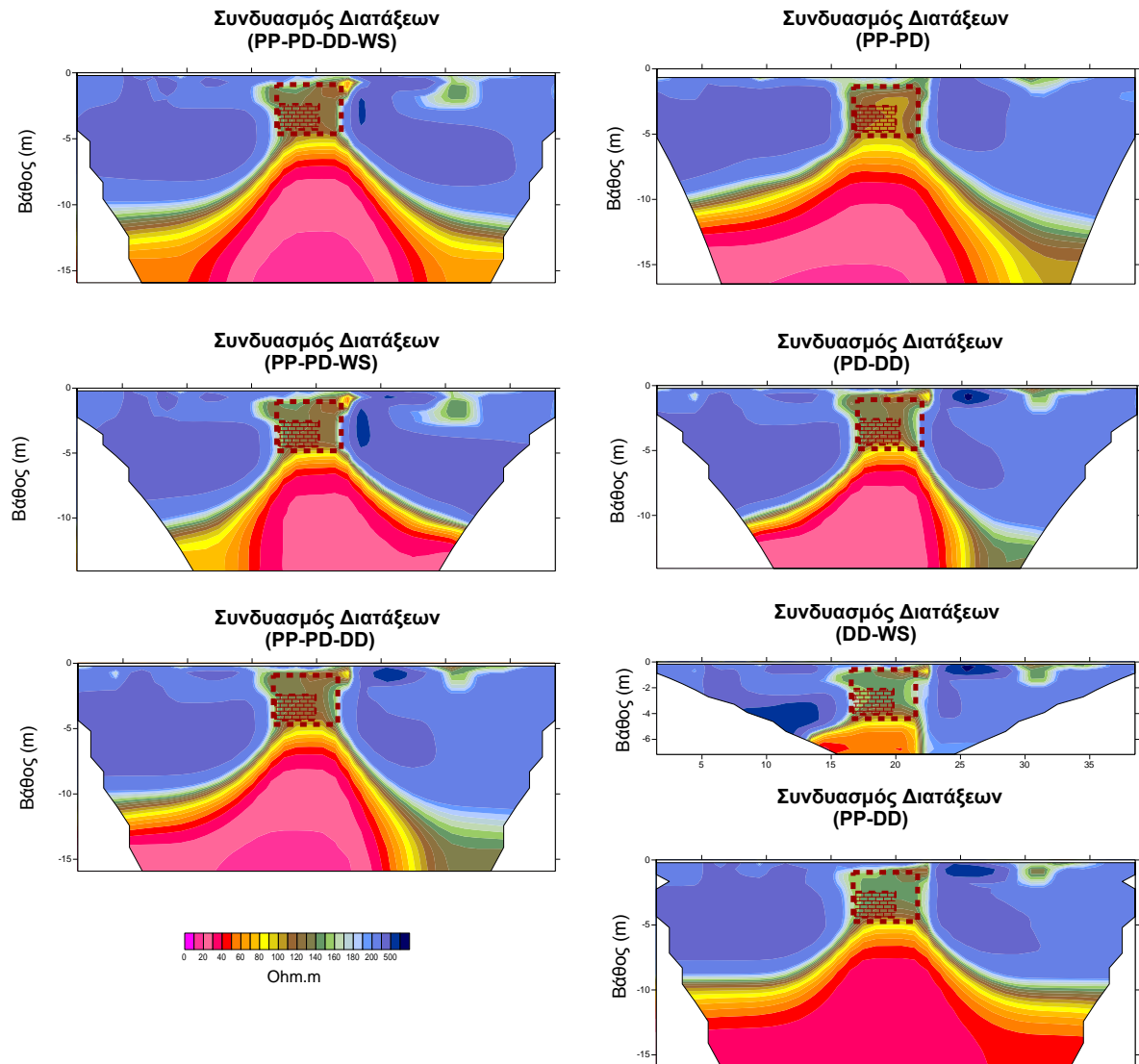
Παρατηρήσεις

Και τα δύο μοντέλα ερμηνείας (Εικ. 3.22) έχουν μεγάλη ομοιότητα με τα αντίστοιχα της Pole Dipole (PD) και επομένως τα συμπεράσματα είναι ανάλογα. Επιπρόσθετα, η θέση του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου ρεύματος δεν είναι σημαντική σε σχέση με τη γραμμή διασκόπησης αρκεί να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, δηλαδή περισσότερο από 10 φορές της μέγιστης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων C1-P2.

3.2.4 Συνδυαστική Ερμηνεία των Μετρήσεων των Διαφόρων Διατάξεων

Μετά από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων κάθε διάταξης, ακολουθεί η συνδυαστική ερμηνεία των μετρήσεων διαφόρων διατάξεων (combined data sets), δηλαδή, πρακτικά, η ερμηνεία μετρήσεων που έχουν προέλθει από την ενοποίηση ενός πλήθους μετρήσεων από διάφορες διατάξεις.

Αρχικά ενοποιήθηκε το σύνολο των μετρήσεων όλων των διατάξεων και στη συνέχεια διάφοροι συνδυασμοί αυτών όπως π.χ. Pole Pole (PP) – Pole Dipole (PD) – Dipole Dipole (DD), Pole Pole (PP) – Dipole Dipole (DD)- Wenner Schlumberger (WS) κ.α..



Εικόνα 3.23: Μοντέλα συνδυαστικής ερμηνείας διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων.

Παρατηρώντας και συγκρίνοντας τα μοντέλα της συνδυαστικής ερμηνείας των μετρήσεων των διαφόρων διατάξεων μεταξύ τους (Εικ. 3.23) αλλά και με τα μοντέλα ερμηνείας κάθε διάταξης που παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 3.2.3.1 έως 3.2.3.4 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Σε όλα τα μοντέλα συνδυαστικής ερμηνείας των μετρήσεων των διαφόρων διατάξεων οριοθετείται με πολύ καλή ακρίβεια η περιοχή της εκσκαφής ενώ αντίθετα δυσχεραίνεται η καλή αποτύπωση του υποκείμενου στρώματος.
- Ανάλογα με τους συνδυασμούς των διατάξεων, η τιμή ειδικής αντίστασης που χαρακτηρίζει την εκσκαφή μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ή να μειώνεται η διακριτική ικανότητα των διάφορων μοντέλων ερμηνείας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο συνδυασμός μετρήσεων των διατάξεων Pole Pole (PP)- Pole Dipole (PD) δίδει τη μεγαλύτερη αντίθεση ειδικής αντίστασης (resistivity contrast) μεταξύ περιβάλλοντα χώρου και εκσκαφής σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα συνδυαστικής ερμηνείας των διαφόρων διατάξεων.
- Τα μοντέλα συνδυαστικής ερμηνείας των μετρήσεων των διαφόρων διατάξεων, παρέχουν μεγαλύτερη λεπτομέρεια και ανάλυση, αποτυπώνοντας ακόμη και μικρές διαφορές στις τιμές ειδικής αντίστασης. Τούτο συμβάλλει μεν στον εντοπισμό στόχων μικρών διαστάσεων, δυσχεραίνει όμως την ερμηνεία λόγω της αύξησης ψευδών εικόνων (artifacts).
- Η κατανομή της ευαισθησίας των μετρήσεων και όχι ο αριθμός των μετρήσεων είναι ο κυριότερος παράγοντας βελτιστοποίησης του μοντέλου ερμηνείας ειδικών αντιστάσεων.

Παρατηρήσεις:

Οι Dahlin και ο Zhou (2004), μέσω της ανάλυσης και σύγκρισης συνθετικών μοντέλων, αναφέρουν ότι τα μοντέλα συνδυαστικής ερμηνείας των μετρήσεων των διαφόρων διατάξεων παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με το βέλτιστο μοντέλο ερμηνείας που προκύπτει από τη μεμονωμένη ερμηνεία των διατάξεων.

Η σύγκριση των μοντέλων ερμηνείας στη συγκεκριμένη εφαρμογή, **σε πραγματικές συνθήκες**, παρέχει επιπρόσθετες πληροφορίες και υποδεικνύει ότι η συνδυαστική ερμηνεία των μετρήσεων των διάφορων διατάξεων εκτός από χρήσιμη πληροφορία, προσθέτει στο μοντέλο ερμηνείας επιπλέον θόρυβο και μη χρήσιμη πληροφορία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα κατά τη διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων και η συνδυαστική ερμηνεία τους να μην δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα και την καλύτερη αποτύπωση του υπεδάφους. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των αρνητικών και θετικών σημείων των μοντέλων ερμηνείας της κάθε διάταξης.

Σχόλια:

Επομένως για να επιτευχθεί καλύτερη αποτύπωση της υπεδαφικής δομής, είναι προτιμότερο να ερμηνεύονται αρχικά οι μετρήσεις κάθε διάταξης χωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας και στη συνέχεια να αξιολογείται η επιπρόσθετη πληροφορία που προσφέρει η συνδυαστική ερμηνεία τους.

3.2.5 Τεχνική Βελτιστοποίησης Συνδυαστικής Επεξεργασίας Μοντέλων Ερμηνείας Διάφορων Διατάξεων.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.4 η συνδυαστική ερμηνεία μετρήσεων διαφόρων διατάξεων δεν δίνει πάντα το βέλτιστο αποτέλεσμα. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι το μοντέλο ερμηνείας αποτελείται από τα θετικά και αρνητικά στοιχεία της κάθε διάταξης και εμφανίζονται πολλές φορές ψευδείς εικόνες (artifacts) που οφείλονται στη διαδικασία της αντιστροφής.

Όπως είναι γνωστό πολύ σημαντικό ρόλο σε κάθε εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας παίζει ο λόγος σήματος προς θόρυβο, που αποτελεί και βασικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων σε πολλές περιπτώσεις. Φυσικά ο θόρυβος είναι τυχαίος και διάσπαρτος στο σύνολο των δεδομένων. Πολλές φορές ο τυχαίος αυτός θόρυβος αποτελεί την αιτία για τη δημιουργία πλασματικών μορφών στα αντεστραμμένα μοντέλα που δυσχεραίνουν την ερμηνεία. Παράλληλα όμως, σε κάθε διάταξη, αυτός ο θόρυβος είναι διαφορετικά κατανομημένος με αποτέλεσμα να εμφανίζεται με διαφορετική μορφή στα δεδομένα και κατά συνέπεια και στα μοντέλα ερμηνείας.

Επιπλέον, η διαδικασία της ερμηνείας των δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, η λεγόμενη διαδικασία αντιστροφής, αποτελεί μια σύνθετη μαθηματική διαδικασία, που πολλές φορές οδηγεί σε κατανομές ειδικής αντίστασης που οφείλονται περισσότερο στους σύνθετους μαθηματικούς υπολογισμούς παρά αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατανομή ειδικών αντιστάσεων του υπεδάφους.

Άρα για είναι δυνατή αρχικά η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε διάταξης όσον αφορά στη διακριτική τους ικανότητα και παράλληλα η μείωση της μη χρήσιμης-«ενοχλητικής» παρουσίας επιδράσεων στην τελική ερμηνεία προτείνεται η εξής διαδικασία:

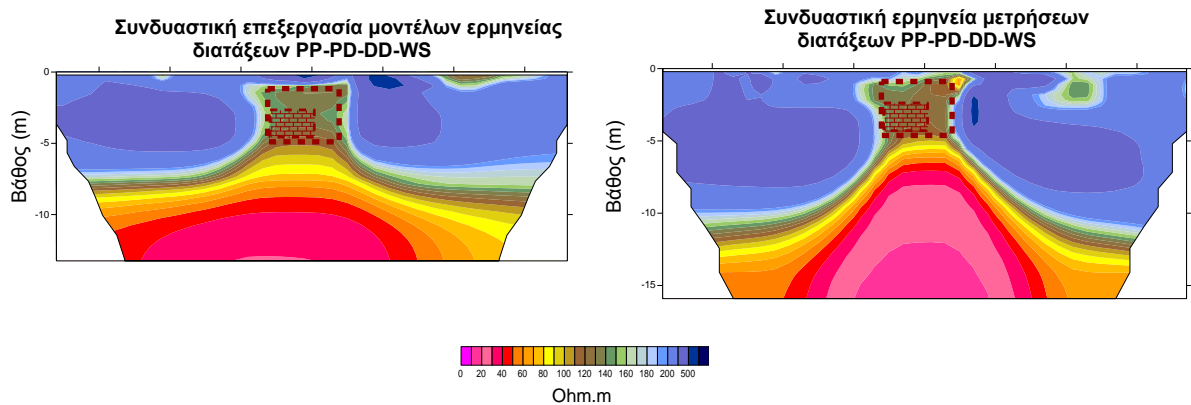
- Αρχικά ερμηνεύονται τα δεδομένα κάθε διάταξης χωριστά.

Έστω ρ_1 η τιμή ειδικής αντίστασης του μοντέλου ερμηνείας της διάταξης 1 για βάθος z_1 και x_1 απόσταση από την αρχή της γραμμής διασκόπησης και αντίστοιχα ρ_2, x_2, z_2 για τη διάταξη 2 και ρ_n, x_n, z_n για διάταξη n.

- Στη συνέχεια συνδυάζονται τα μοντέλα ερμηνείας των διαφόρων διατάξεων.

Λαμβάνοντας το μέσο όρο των τιμών ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο και ίδιο βάθος, προκύπτει ένα νέο μοντέλο ερμηνείας το οποίο είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των μοντέλων ερμηνείας των n διατάξεων.

Στην Εικόνα 3.24 παρουσιάζεται το μοντέλο ερμηνείας που προέκυψε από την τεχνική βελτιστοποίησης της επεξεργασίας των μοντέλων ερμηνείας των διατάξεων Pole Pole (PP)- Pole Dipole (PD)- Dipole Dipole (DD)- Wenner Schlumberger (WS) και **το οποίο είναι εμφανώς βελτιωμένο, ειδικότερα όσο αφορά τον εντοπισμό του υποκείμενου στρώματος** σε σχέση με το αντίστοιχο που προέκυψε από τη συνδυαστική ερμηνεία των μετρήσεων των διατάξεων Pole Pole (PP)- Pole Dipole (PD)- Dipole Dipole (DD)- Wenner Schlumberger (WS).



Εικόνα 3.24 : Σύγκριση μοντέλων ερμηνείας που προκύπτουν από την τεχνική βελτιστοποίησης των μοντέλων ερμηνείας των διατάξεων Pole Pole (PP)- Pole Dipole (PD)- Dipole Dipole (DD)- Wenner Schlumberger (WS) και της συνδυαστικής ερμηνείας των μετρήσεων των διατάξεων Pole Pole (PP)- Pole Dipole (PD)- Dipole Dipole (DD)- Wenner Schlumberger (WS).

Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί ένα είδος φιλτραρίσματος του τελικού μοντέλου ερμηνείας όπου τονίζεται και ενισχύεται η ύπαρξη των πραγματικών δομών με την παράλληλη μείωση των μη αξιόπιστων μορφών και του θορύβου..

Η σημασία της παραπάνω τεχνικής έγκειται στο γεγονός ότι πολλές φορές σε μια γεωφυσική διασκόπηση και ιδιαίτερα όταν πρόκειται για εντοπισμό στόχων, η αξιολόγηση και αναγνώριση των πλασματικών ενδείξεων που παραπέμπουν σε στόχους ή άλλες δομές έχει ιδιαίτερο ειδικό βάρος. Η ερμηνεία και υπόδειξη στον υπεύθυνο ενός γεωτεχνικού π.χ. έργου της ύπαρξης ενός υπόγειου κενού ενώ στην πραγματικότητα δεν υπάρχει, μπορεί να προκαλέσει αδικαιολόγητες καθυστερήσεις και επιπλέον κόστος.

3.2.6 Επίδραση Παραμέτρων Αντιστροφής στα Μοντέλα Ερμηνείας

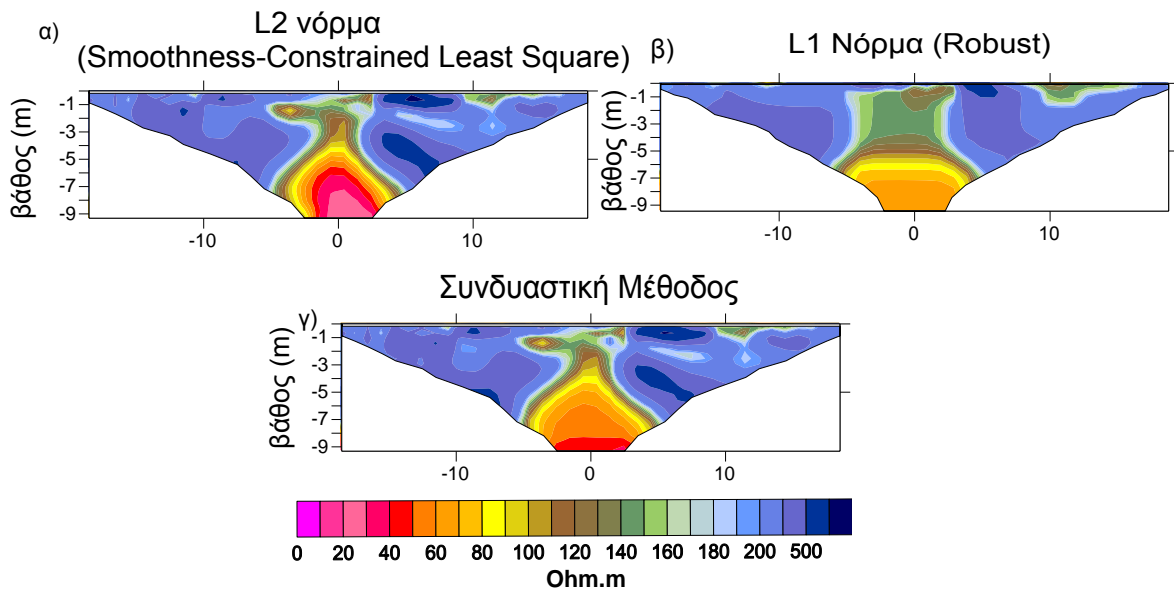
Ο αλγόριθμος αντιστροφής των δεδομένων αποτελεί βασικό εργαλείο για την ερμηνεία των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας. Στο πρόγραμμα Res2din χρησιμοποιούνται προκαθορισμένες παράμετροι αντιστροφής, που σε γενικές γραμμές δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όμως ανάλογα με τις συνθήκες της περιοχής έρευνας, το είδος του στόχου και το λόγο σήματος προς θόρυβο, οι παράμετροι αντιστροφής πρέπει να μεταβάλλονται έτσι ώστε να αποκτάται το βέλτιστο υπεδafικό μοντέλο ειδικής αντίστασης.

Μεταβάλλοντας μία παράμετρο κάθε φορά με σταθερές τις υπόλοιπες, γίνεται προσπάθεια ανάδειξης της επίδρασης κάθε παραμέτρου στα μοντέλα ερμηνείας αλλά και της σύγκρισης βασικών διαδικασιών αντιστροφής ειδικότερα όσον αφορά τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων. Η ανάλυση που ακολουθεί πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα πραγματικά δεδομένα από τον εντοπισμό του αγωγού. Σε επόμενα κεφάλαια της διδακτορικής διατριβής, τα συμπεράσματα της ανάλυσης αυτής θα συγκρίνονται και θα εμπλουτίζονται με την επεξεργασία νέων δεδομένων και γραμμών διασκόπησης.

Το συγκεκριμένο λογισμικό διαθέτει τρεις διαφορετικές βασικές διαδικασίες αντιστροφής (inversion routines) για τη δημιουργία υπεδafικών μοντέλων από δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας:

- Η πρώτη είναι μία L_2 νόρμα (L_2 norm smoothness-constrained least-squares method), η οποία προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το τετράγωνο της διαφοράς των μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών ειδικών αντιστάσεων και δημιουργεί υπεδafικά μοντέλα με βαθμιαίες μεταβάσεις σε ζώνες διαφορετικών ειδικών αντιστάσεων.
- Η δεύτερη είναι μία L_1 νόρμα (L_1 norm regularized inversion method) γνωστή και ως “Robust”. Αυτή η μέθοδος ελαχιστοποιεί την απόλυτη διαφορά μεταξύ μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών ειδικών αντιστάσεων και συνήθως δημιουργεί μοντέλα ειδικής αντίστασης με σχετικά απότομα όρια μεταξύ ζωνών διαφορετικής αντίστασης, όπου εντός της ίδιας ζώνης δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές.
- Η Τρίτη είναι η Συνδυαστική Μέθοδος Αντιστροφής η οποία συνδυάζει τις μεθόδους αντιστροφής Marquardt (ή ridge regression) και Occam (smoothness-constrained).

Στην Εικόνα 3.25 παρουσιάζονται τα μοντέλα ερμηνείας των μετρήσεων που ελήφθησαν με τη διάταξη Dipole Dipole (DD) (από τη διαφοροποίηση των παραμέτρων αντιστροφής προέκυψαν τα ίδια συμπεράσματα για όλες τις διατάξεις) πάνω από τον αγωγό με τις τρεις παραπάνω διαφορετικές διαδικασίες αντιστροφής.



Εικόνα 3.25: Μοντέλα ερμηνείας μετρήσεων διάταξης Dipole Dipole (DD) με διάφορες διαδικασίες αντιστροφής : α) ομαλοποιημένη– με περιορισμούς μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων β) Robust γ) συνδυαστική μέθοδος.

Από τη σύγκριση των μοντέλων ερμηνείας συμπεραίνεται σε πρώτη ανάγνωση ότι από τη L2 Νόρμα και τη Συνδυαστική μέθοδο, προκύπτουν μοντέλα με πιο κοινά χαρακτηριστικά έναντι της L1 Νόρμας.

Είναι χαρακτηριστικό ότι τα μοντέλα ερμηνείας των δύο τεχνικών παρουσιάζουν μεγαλύτερη λεπτομέρεια αποτυπώνοντας μικροδιαφορές στις τιμές ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Παράλληλα όμως αυξάνεται το ποσοστό των πλασματικών μορφών λόγω του θορύβου. Η L1 Νόρμα (Robust) δημιουργεί ένα μοντέλο με διακριτά όρια περιοχών διαφορετικής αντίστασης, τονίζοντας ευρύτερες ανωμαλίες εξομαλύνοντας τις μικροδιαφορές των δεδομένων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου υπάρχει ένας στόχος μεγάλων διαστάσεων αλλά και γενικότερα σε περιπτώσεις που προσεγγίζουν τη συγκεκριμένη δομή, η τεχνική Robust έχει ως αποτέλεσμα ένα μοντέλο ερμηνείας που προσομοιάζει καλύτερα τη γενικότερη δομή του υπεδάφους, με σαφώς οριοθετημένο το στόχο, ελαχιστοποιώντας την επίδραση του περιεχόμενου θορύβου στα δεδομένα.

Σε περιπτώσεις, όπου ζητούμενο θα ήταν η ανάδειξη των μικροδιαφορών των μετρούμενων τιμών ειδικής αντίστασης, όπως σε περιπτώσεις στόχων μικρών διαστάσεων, οι δύο πρώτες μέθοδοι θα ήταν πιο ενδεδειγμένες αφού όπως παρουσιάστηκε παρέχουν μοντέλα ερμηνείας μεγαλύτερης ανάλυσης. Παράλληλα, υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος, επίδρασης του θορύβου στην τελική ερμηνεία με δομές και περιοχές ειδικών αντιστάσεων στα τελικά μοντέλα ερμηνείας που μπορεί να είναι λανθασμένες (artifacts) και να μην αντιστοιχούν στην πραγματική κατανομή ειδικών αντιστάσεων του υπεδάφους.

Επιπλέον, το λογισμικό Res2din δίνει περαιτέρω δυνατότητες για αλλαγή των παραμέτρων της διαδικασίας αντιστροφής, οι οποίες επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στα μοντέλα ερμηνείας (Εικ. 3.26) :

- Διαφοροποίηση του συντελεστή απόσβεσης (damping factor)

Όσο μικρότερη η τιμή του συντελεστή απόσβεσης, τόσο λεπτομερέστερο το μοντέλο ερμηνείας και ο καθορισμός μικροδιαφορών ειδικής αντίστασης. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερη η τιμή του τόσο περισσότερο δρα ως φίλτρο αποκοπής των υψίσυχων ανωμαλιών και δίνει μια πιο ομογενοποιημένη εικόνα (Εικ. 3.26 (α)). Ανάλογα με την ποιότητα των δεδομένων (λόγος σήματος προς θόρυβο) πρέπει να καθορίζεται και η τιμή του. Όσο μεγαλύτερο ποσοστό θορύβου περιέχεται στις μετρήσεις τόσο μεγαλύτερος πρέπει να είναι ο συντελεστής απόσβεσης.

- Δημιουργία των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων με τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων (finite element, finite difference)

Οι εικόνες που προκύπτουν είναι σχεδόν παρόμοιες (Εικ. 3.26 (ε)). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά με τη διαφοροποίηση των δύο μεθόδων. Κύρια διαφορά του είναι ότι η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών δεν χρησιμοποιείται κατά την αντιστροφή δεδομένων με ύπαρξη τοπογραφίας.

- Αύξηση διακριτοποίησης πλέγματος (mesh refinement)

Αυξάνοντας την διακριτοποίηση του πλέγματος του αρχικού μοντέλου, το μοντέλο ερμηνείας (Εικ. 3.26 (β)) βελτιώνεται, μειώνοντας την επίδραση στην τελική ερμηνεία κάποιων επιφανειακών μετρούμενων τιμών ειδικής αντίστασης με μεγάλες αποκλίσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πράγματι μειώνεται η επίδραση των επιφανειακών ανομοιογενειών. Σε περιπτώσεις πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων μπορεί να αποτελέσει τελευταία επιλογή λόγω αύξησης του χρόνου αντιστροφής των δεδομένων.

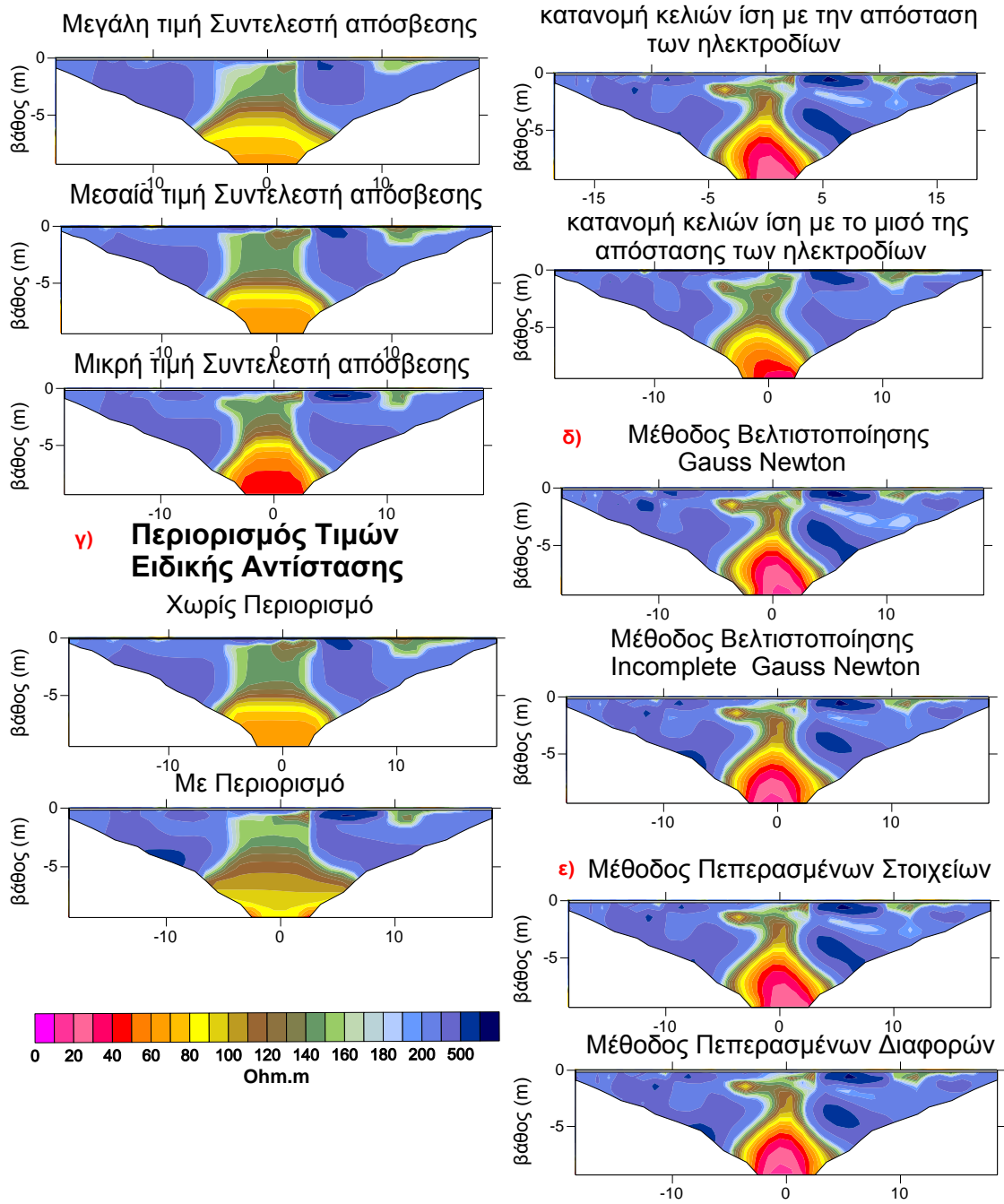
- Επιλογή μεθόδου βελτιστοποίησης της λύσης της εξίσωσης των ελαχίστων τετραγώνων με τις Μεθόδους Standard Gauss Newton και Incomplete Gauss-Newton

Τα μοντέλα ερμηνείας είναι ανάλογα (Εικ. 3.26 (δ)). Πρακτικά, αυτό υποδεικνύει ότι η μέθοδος incomplete Gauss Newton μπορεί να χρησιμοποιείται με αρκετή αξιοπιστία σε δεδομένα μεγάλου όγκου μετρήσεων όπου η Standard Gauss Newton απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο για την αντιστροφή των δεδομένων.

- Επιλογή περιορισμού του ορίου της ανώτατης και ελάχιστης τιμής των ειδικών αντιστάσεων

Η παράμετρος αυτή είναι πολύ χρήσιμη όταν παρατηρούνται ασυνήθιστες τιμές ειδικής αντίστασης στα μοντέλα ερμηνείας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο περιορισμός των τιμών ειδικής αντίστασης στη διαδικασία αντιστροφής είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του μοντέλου ερμηνείας (Εικ. 3.26 (γ)) ως προς την αποτύπωση του υποκείμενου στρώματος .

α) Επίδραση Συντελεστή Απόσβεσης (Damping Factor) **β) Επίδραση Διακριτοποίησης Πλέγματος**



Εικόνα 3.26: Επίδραση παραμέτρων αντιστροφής στα μοντέλα ερμηνείας.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι ενσωματωμένες στις δυνατότητες του λογισμικού Res2inv, το οποίο αποτελεί το πλέον διαδεδομένο παγκοσμίως πρόγραμμα αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, αλλά και αποτελούν βασικές παραμέτρους γενικότερα των διαδικασιών αντιστροφής και ερμηνείας που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στην εφαρμοσμένη γεωφυσική.

Σχόλιο:

Πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό, ότι με τη συγκεκριμένη ανάλυση επιχειρείται να προσδιοριστούν κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τις παραμέτρους αντιστροφής σε έρευνες εντοπισμού υπόγειων ανοιγμάτων και να αποτελέσει βοήθημα κατανόησης της επίδρασης και της αλληλεξάρτησης των παραμέτρων αυτών με τα μοντέλα ερμηνείας. Σε καμία περίπτωση δεν αποκλείονται παράμετροι ή μέθοδοι αντιστροφής κατά την επεξεργασία των δεδομένων. Κάθε γεωφυσική έρευνα αντιμετωπίζει διαφορετικές συνθήκες και ανάγκες και ο ερευνητής απαιτείται να διαμορφώνει τις βέλτιστες παραμέτρους με συνεχείς δοκιμές.

3.2.6 Χρήση Συνθετικών Μοντέλων για την Περαιτέρω Σύγκριση των Διατάξεων.

Η ηλεκτρική τομογραφία χρησιμοποιείται ευρέως σε περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές εφαρμογές. Πολλές φορές οι γεωφυσικές έρευνες με τη μέθοδο αυτή οδηγούν σε μη ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω ελλιπούς αρχικού σχεδιασμού της έρευνας. Οι μαθηματικές προσομοιώσεις μπορούν να αποτελέσουν έναν οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο για το σχεδιασμό κάθε γεωφυσικής έρευνας (Yang X. 2003).

Όπως προαναφέρθηκε η κάθε διάταξη ηλεκτροδίων παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τη φύση του στόχου έρευνας και τη γεωλογία της περιοχής. Μια πρώτη εκτίμηση της ανάλυσης και της αποδοτικότητας κάθε διάταξης μπορεί να γίνει με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων.

Διάφοροι γεωλογικοί στόχοι μπορούν να προσομοιαστούν με συνθετικά μαθηματικά μοντέλα και με τη βοήθεια των προγραμμάτων RES2MOD (Loke,2002) να υπολογιστούν οι διάφορες τιμές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων για την κάθε διάταξη αντίστοιχα. Η ερμηνεία αυτών των συνθετικών μοντέλων με τη χρήση των προγραμμάτων αντιστροφής Res2dinv, δίνει σημαντικές πληροφορίες για το βάθος διασκόπησης, την ευαισθησία σε κάθετες και οριζόντιες ανομοιογένειες του υπεδάφους και το οριζόντιο εύρος μετρήσεων της κάθε διάταξης.

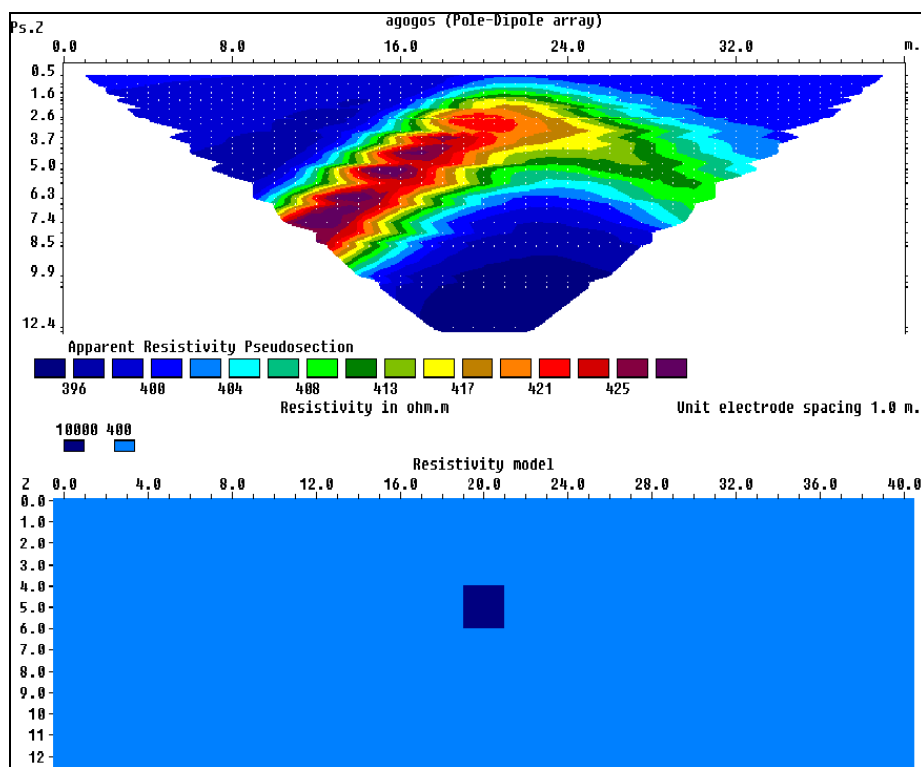
Περαιτέρω η σύγκριση των μοντέλων αυτών με στοιχεία από τις πραγματικές 2D-3D ηλεκτρικές τομογραφίες σε περιοχές ανάλογου γεωλογικού ενδιαφέροντος μπορεί να δώσει μια σαφή εικόνα των δυνατοτήτων και των περιορισμών της κάθε διάταξης στο ύπαιθρο, όπου επιδρούν και άλλοι εξωγενείς παράγοντες (θόρυβος λόγω χαμηλού σήματος, θόρυβος λόγω μη σωστής τοποθέτησης των ηλεκτροδίων, ανομοιογένεια, ανισοτροπία κ.α) και να αποτελεί σημαντική βοήθεια για την επιλογή της κατάλληλης διατάξεως και της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά την εφαρμογή της 2D-3D ηλεκτρικής τομογραφίας. Επιπλέον, οι πληροφορίες των συνθετικών μοντέλων ερμηνείας μπορούν βοηθήσουν σημαντικά στη βέλτιστη αξιοποίηση των μετρήσεων υπαίθρου.

Πολλές φορές στην ύπαιθρο, το επιτρεπόμενο ανάπτυγμα για τη γραμμή διασκόπησης επιβάλλεται από τις συνθήκες της περιοχής και είναι συγκεκριμένο. Επιπλέον, το βάθος διασκόπησης δεν συμπίπτει με το βάθος στο οποίο είναι δυνατόν να εντοπιστεί ένα υπόγειο άνοιγμα.

Προς τούτο, με τη βοήθεια των συνθετικών μοντέλων θα διερευνηθεί η επίδραση τριών βασικών παραγόντων στα μοντέλα ερμηνείας:

- Το μέγεθος του στόχου.
- Το βάθος του στόχου.
- Η επιλογή διάταξης ηλεκτροδίων.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση προσομοιάζεται ομογενής ημιχώρος αντίστασης 400 Ohm και ανομοιογένεια αντίστασης 10000 Ohm διαστάσεων 2x2 που αντιστοιχεί στο υπόγειο άνοιγμα (Εικ. 3.27). Μεταβάλλοντας το βάθος του στόχου αλλά και τη διάταξη που χρησιμοποιείται, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες αποτελούν τα δεδομένα επεξεργασίας για την αξιολόγηση της διακριτικής τους ικανότητας.



Εικόνα 3.27: Υπολογισμός μετρούμενων ειδικών Αντιστάσεων με τη βοήθεια συνθετικών μοντέλων.

Το ανάπτυγμα της γραμμής διασκόπησης παραμένει σταθερό στα 40 m ενώ τα ηλεκτρόδια διατάσσονται σε ίσες αποστάσεις του 1m. Το μέγεθος των στόχων που προσομοιάστηκαν είναι διαστάσεων 1x1 m, 2x2 m , 3x3 m σε βάθη 4m, 5m, 6m, 7m και 8m.

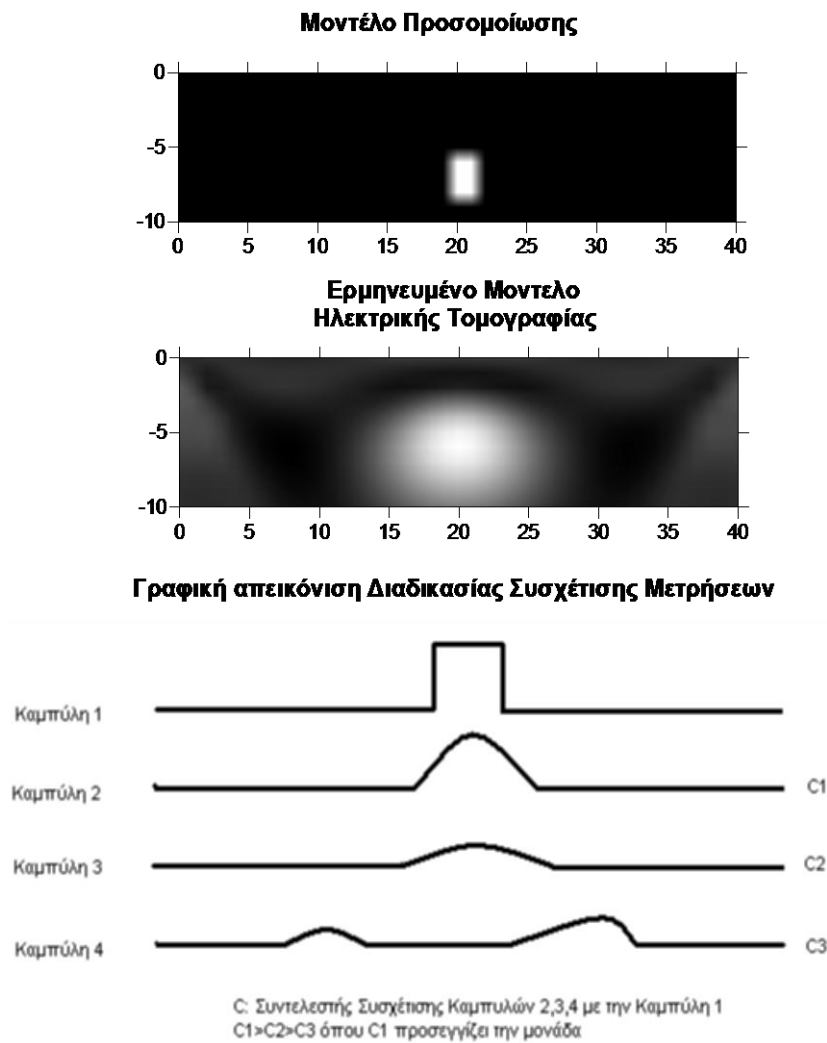
Όσον αφορά στην επιλογή του πρωτοκόλλου μετρήσεων επιλέχτηκαν όλες οι δυνατές τιμές με κάποιους λογικούς περιορισμούς που θα υπήρχαν σε πραγματικές συνθήκες.

Δηλαδή :

1. Για τις Pole Dipole και Dipole Dipole διατάξεις το $n \leq 6$
2. Για τη Wenner-Schlumberger διάταξη το $n \leq 8$
3. Για την Pole Pole διάταξη το $a \leq 20$.

Για την ανάλυση των μοντέλων ερμηνείας που προέκυψαν για στόχους διάφορων μεγεθών και βάθους, χρησιμοποιήθηκε ο **συντελεστής συσχέτισης**, ο οποίος συσχετίζει τις τιμές ειδικής αντίστασης των μοντέλων ερμηνείας με τις αντίστοιχες τιμές ειδικής

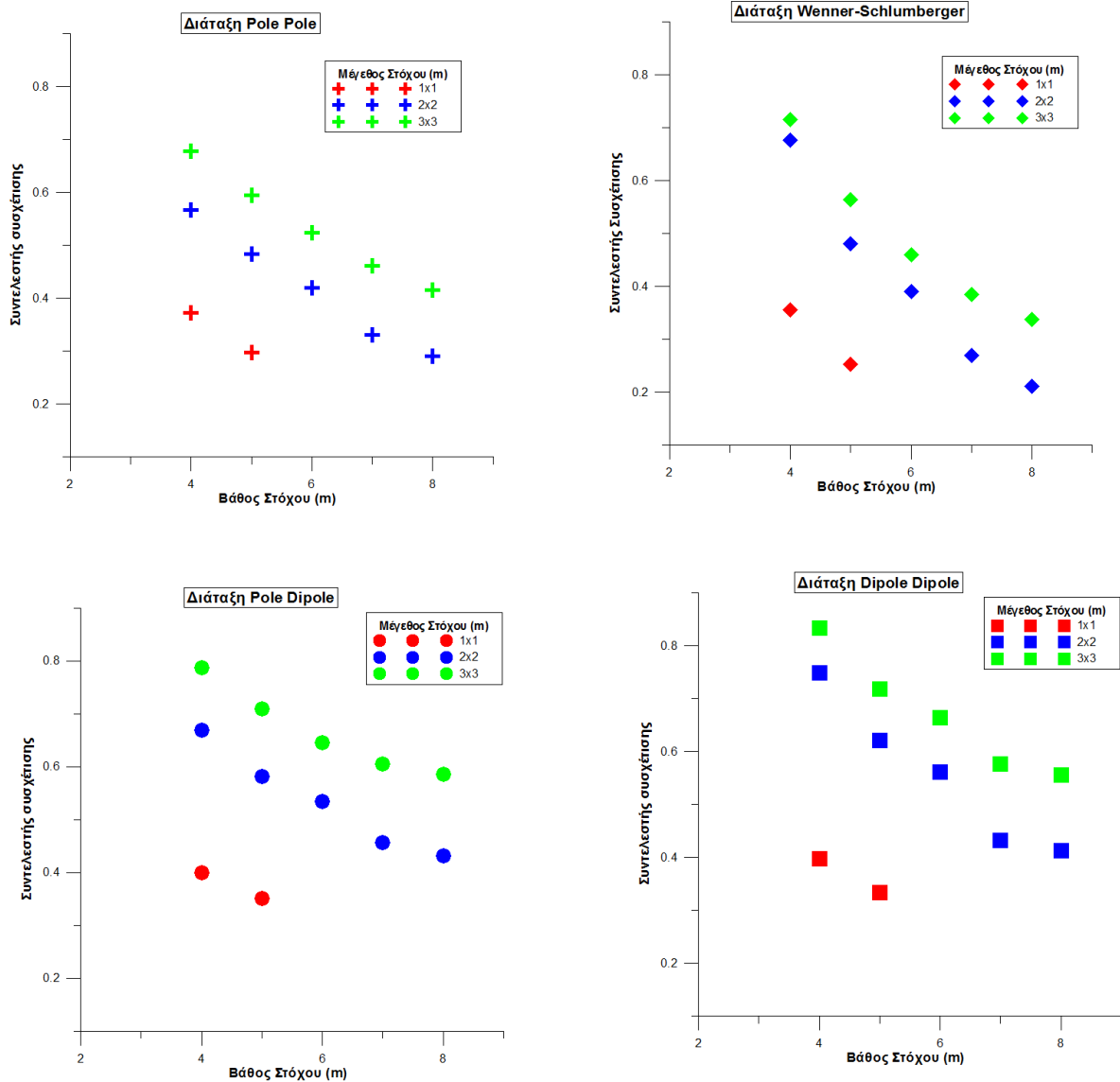
αντίστασης του μοντέλου προσομοίωσης. Όσο ο συντελεστής συσχέτισης πλησιάζει στη μονάδα τόσο καλύτερα οριοθετείται ο στόχος (Εικ. 3.28).



Εικόνα 3.28: Γραφική απεικόνιση διαδικασίας συσχέτισης μετρήσεων.

Οι γραφικές παραστάσεις της Εικόνας 3.29 παρουσιάζουν την επίδραση του μεγέθους και του βάθους του στόχου στις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων σε σχέση με την ικανότητα τους στην οριοθέτηση του στόχου που εκφράζεται από την τιμή του συντελεστή συσχέτισης. Για όλες τις διατάξεις ισχύει :

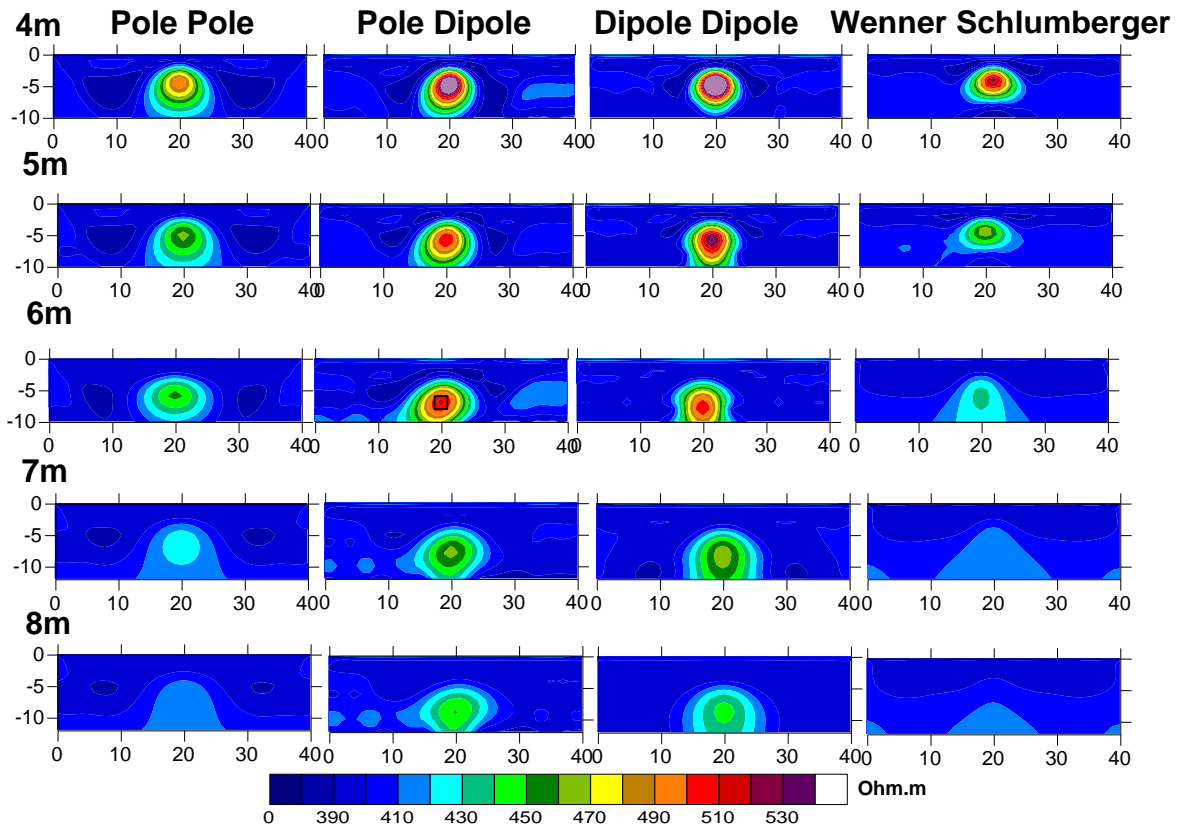
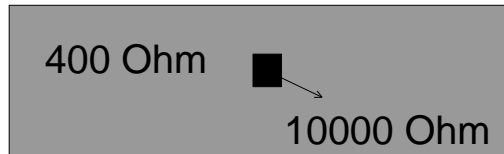
- Η ικανότητα σωστής οριοθέτησης του στόχου μειώνεται όσο μειώνεται το μέγεθος του στόχου.
- Η ικανότητα σωστής οριοθέτησης του στόχου μειώνεται όσο αυξάνει το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο στόχος.



Εικόνα 3.29: Η επίδραση του βάθους και του μεγέθους του στόχου στη διακριτική ικανότητα διαφόρων διατάξεων.

Για τη θεωρητική συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων διατάξεων υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες μετρούμενες ειδικές αντιστάσεις των τεσσάρων βασικών διατάξεων για σταθερό μέγεθος στόχου (2x2 m) με αντίσταση 10000 Ohm και αντίσταση ημιχώρου 400 Ohm, ενώ το βάθος μεταβάλλεται από 4 έως 8 m.

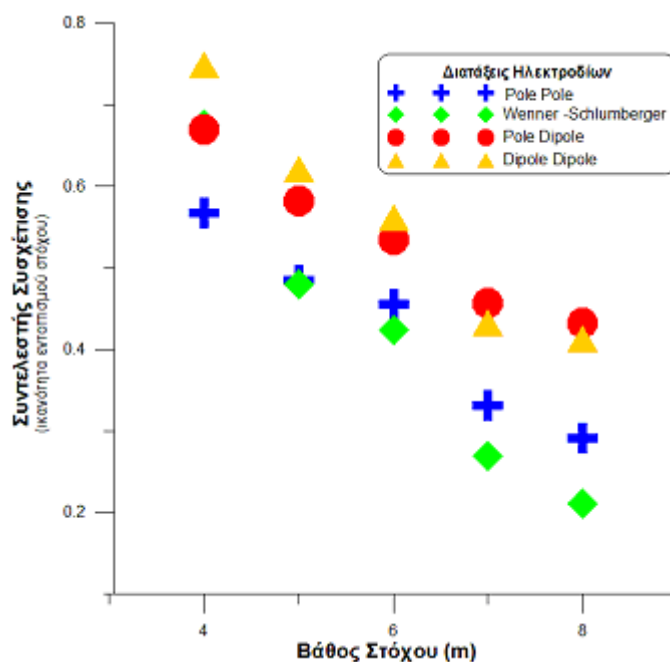
Στην Εικόνα 3.30 παρουσιάζονται τα μοντέλα ερμηνείας της προσομοίωσης στόχου διαστάσεων 2x2 σε βάθος 4m, 5m, 6m, 7m, 8m για τις διάφορες διατάξεις.



Εικόνα 3.30 : Μοντέλα ερμηνείας της προσομοίωσης στόχου διαστάσεων 2x2 σε βάθος 4m, 5m, 6m, 7m, 8m για διάφορες διατάξεις.

Είναι εμφανές ότι ανάλογα με τη διάταξη που χρησιμοποιείται και το βάθος του στόχου, η οριοθέτηση του μεταβάλλεται στα προκύπτοντα μοντέλα ερμηνείας.

Χρησιμοποιώντας το συντελεστή συσχέτισης, προκύπτει το διάγραμμα της Εικόνας 3.31, που παρουσιάζει τη μεταβολή της διακριτικής ικανότητας κάθε μεθόδου στον εντοπισμό υπόγειων κενών σε σχέση με το βάθος του στόχου, για ένα συγκεκριμένο μήκος γραμμής διασκόπησης.



Εικόνα 3.31: Διάγραμμα της μεταβολής της διακριτική ικανότητα διάφορων διατάξεων στον εντοπισμό υπόγειων κενών σε σχέση με το βάθος του στόχου για ένα συγκεκριμένο μήκος γραμμής διασκόπησης.

Με βάση το διάγραμμα της Εικόνας 3.31 εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα :

1. Η εμφανής υπεροχή των διατάξεων Pole Dipole (PD) & Dipole Dipole (DD) έναντι των υπολοίπων όσον αφορά στην οριοθέτηση και τον εντοπισμό του στόχου.

*Οι συγκεκριμένες διατάξεις αποτελούν ενδεδειγμένη επιλογή στον εντοπισμό υπόγειων πεπερασμένων ανοιγμάτων. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι στα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν συμπεριλαμβάνεται ένας σημαντικός παράγοντα, ο **Θόρυβος**.*

2. Ο υψηλός συντελεστής συσχέτισης της διάταξης Wenner Schlumberger (WS) για στόχους σε μικρά βάθη και η απότομη μείωση του καθώς το βάθος αυξάνει.

Η συγκριτικά μεγαλύτερη μείωση των διαθέσιμων μετρήσεων με το βάθος για τη διάταξη Wenner Schlumberger (WS) έχει ως αποτέλεσμα την άμβλυνση της ευαισθησίας της και την έντονη ελάττωση της διακριτικής ικανότητας της με το βάθος όσον αφορά τον εντοπισμό στόχων για συγκεκριμένο ανάπτυγμα γραμμής διασκόπησης..

3.3 Εφαρμογή Μικροβαρυτικής Μεθόδου

3.3.1 Στόχος Πειράματος

Παρά το γεγονός ότι η μικροβαρυτομετρία έχει πολλές εφαρμογές διεθνώς, στον ελλαδικό χώρο έχει περιορισμένη χρήση σε μικρού βάθους έρευνες όπως π.χ γεωτεχνικές, περιβαλλοντικές, αρχαιολογικές. Κύριος λόγος φυσικά αποτελεί η προτίμηση άλλων μεθόδων όπως η μαγνητική, η ηλεκτρική, το γεωραντάρ, οι οποίες είναι πολύ πιο γρήγορες στη λήψη δεδομένων στο ύπαιθρο και απαιτούν λιγότερο χρόνο επεξεργασίας.

Η μικροβαρυτομετρία είναι από τις βασικές γεωφυσικές μεθόδους στον εντοπισμό υπόγειων κενών. Η έρευνα για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών υπαίθρου αλλά και της επεξεργασίας των μετρήσεων δίνει την ευκαιρία για την εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων, διασαφηνίζοντας έτσι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου. Επιπλέον, η αξιολόγηση των διδιάστατων και τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας σε μικροβαρυτικά δεδομένα, αποτελεί σημαντικότερη πληροφορία για την περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου σε μελλοντικές έρευνες εντοπισμού υπόγειων ανοιγμάτων μικρού βάθους.

Βασικός στόχος του συγκεκριμένου πειράματος, εκτός από τη συγκριτική ανάλυση με τις άλλες μεθόδους, ήταν τα εξής:

- Η απόκριση της μεθόδου σε μια επιφανειακή εφαρμογή (λιγότερο από δέκα μέτρα).
- Ο έλεγχος της ανάλυσης του οργάνου σε σχέση με το βαθμό ανταπόκρισης στην απαιτούμενη ακρίβεια για τη λήψη μικροβαρυτομετρικών μετρήσεων.
- Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων στο ύπαιθρο.
- Η επίδραση της τοπογραφίας στις μετρήσεις.
- Η εξέταση της δυνατότητας επιτάχυνσης της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων π.χ παίρνοντας μόνο μια μέτρηση σε κάθε σταθμό.
- Η εφαρμογή τεχνικών αντιστροφής στα δεδομένα της μικροβαρυτομετρίας.

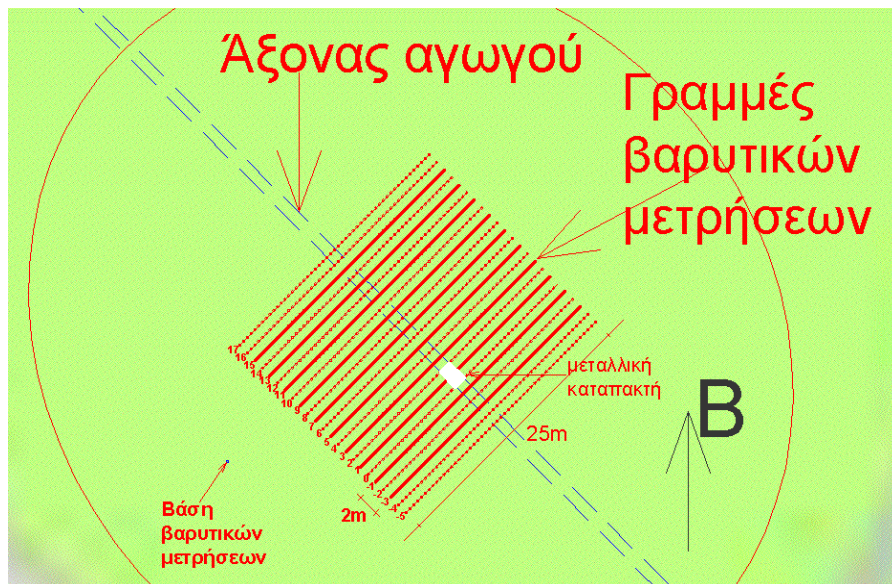
3.3.2 Εργασίες Υπαίθρου- Λήψη Μετρήσεων

Η διεξαγωγή των βαρυτικών μετρήσεων βασίστηκε σε κάρναβο, ο οποίος είχε διαστάσεις 25x22 m, αποτελούμενος από 23 παράλληλες γραμμές διασκόπησης μήκους 25 m με διεύθυνση κάθετη στην εκτιμώμενη διεύθυνση του αγωγού.



Φωτογραφία 3.2: Διεξαγωγή βαρυτικής μετρήσεως στη περιοχή ενδιαφέροντος.

Κατά τη βαρυτική διασκόπηση, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε γραμμές που ισαπέχουν κατά 2 m, κάθετες προς τον αγωγό. Κατά μήκος των γραμμών διασκόπησης, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 1 m για μεγάλες αποστάσεις από τον αναμενόμενο άξονα του αγωγού και ανά 0.5 m σε μία ζώνη ± 2.5 m από τον άξονα του αγωγού (Εικ. 3.32). Ως βάση των μετρήσεων για τη διόρθωση των ημερήσιων μεταβολών και της πορείας του οργάνου, επιλέγεται ένα σημείο εκτός του καννάβου, σε βραχάδες υπόβαθρο σταθερού υψομέτρου (Φωτ. 3.2). Η επιστροφή στη βάση για το κλείσιμο των μετρήσεων γινόταν περίπου κάθε μία ώρα.



Εικόνα 3.32: Ο κάνναβος των βαρυτικών μετρήσεων σε σχέση με τον αγωγό.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η επαναληψιμότητα του οργάνου ελέγχεται με λήψη διαδοχικών μετρήσεων στο ίδιο σημείο. Το βαρυτόμετρο κατά τη διάρκεια της μέτρησης, στηριζόταν σε μεταλλική βάση για τη βέλτιστη οριζοντίωση του.

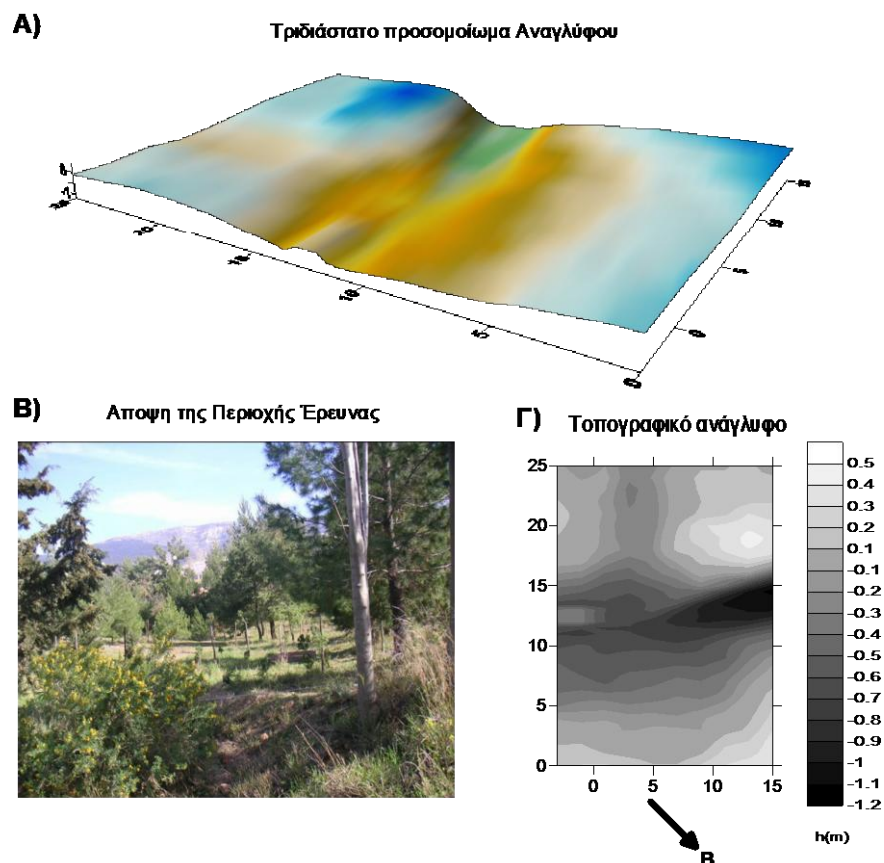
Όσον αφορά στις συνθήκες λήψης μετρήσεων, πρέπει να αναφερθεί ότι διάφοροι παράγοντες όπως:

- η χαμηλή βλάστηση και τα δέντρα,
- οι έντονες ανομοιογένειες στην επιφάνεια του εδάφους σε πολλά σημεία,
- η κλίση του εδάφους,

δημιουργούσαν προβλήματα στην οριζόντιωση του οργάνου και συνεπώς στη λήψη υψηλής ακρίβειας μετρήσεων, αποτελώντας έναν επιπλέον παράγοντα θορύβου.

Στις τρεις τελευταίες γραμμές διασκόπησης για τον έλεγχο της δυνατότητας επιτάχυνσης της λήψης των μετρήσεων, λαμβανόταν μόνο μία μέτρηση σε κάθε σταθμό (Σχετικά με την επαναληψιμότητα και την ανάλυση των μετρήσεων θα γίνει αναφορά στο Κεφάλαιο 3.3.5).

Παράλληλα με τις μετρήσεις βαρύτητας, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των σχετικών διαφορών των υψομέτρων μεταξύ κάθε σταθμού μέτρησης και του σταθμού βάσης. Στην Εικόνα 3.33 φαίνεται ο χάρτης των υψομετρικών διαφορών σε μέτρα (m) της περιοχής έρευνας, ως προς το σταθμό βάσης. Η μέση ανάλυση που επιτεύχθηκε στις μετρήσεις της τοπογραφίας ήταν της τάξης των 7 mm η οποία κρίνεται ικανοποιητική (οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των σταθμών βοήθησαν να επιτευχθεί η συγκεκριμένη ανάλυση).



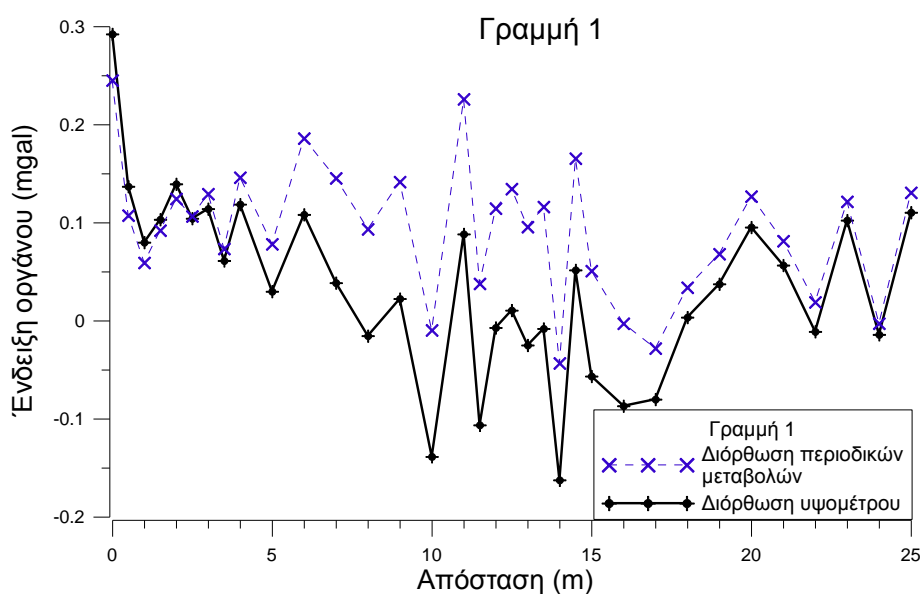
Εικόνα 3.33 : A) Τριδιάστατο προσομοίωμα του αναγλύφου της περιοχής έρευνας B) Φωτογραφία της περιοχής έρευνας Γ) Χάρτης υψομετρικών διαφορών μεταξύ σταθμών μέτρησης και σταθμού βάσης.

3.3.3 Μικροβαρυτικές Διορθώσεις

Για τη δημιουργία της βαρυτικής ανωμαλίας από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, έγινε, αρχικά, διόρθωση των τιμών που περιελάμβαναν:

- τις περιοδικές μεταβολές του βαρυτικού πεδίου της γης και της πορείας του οργάνου, με βάση τις μετρήσεις στο σταθμό βάσης (linear drift). (Εικ. 3.34),
- τις διορθώσεις του ελεύθερου αέρα και της πλάκας Bouguer, με βάση τις υψομετρικές διαφορές των σημείων μέτρησης και του σταθμού βάσης. (Εικ. 3.34),
- τη διόρθωση γεωγραφικού πλάτους και
- τις τοπογραφικές διορθώσεις.

Για την πραγματοποίηση της διόρθωσης ελεύθερου αέρα και της πλάκας Bouguer πρέπει να είναι γνωστή η μέση πυκνότητα των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών. Με τη μέθοδο Nettleton (Nettleton, 1971), προέκυψε ότι η μέση πυκνότητα είναι $\rho=2,52 \text{ gr/cm}^3$.

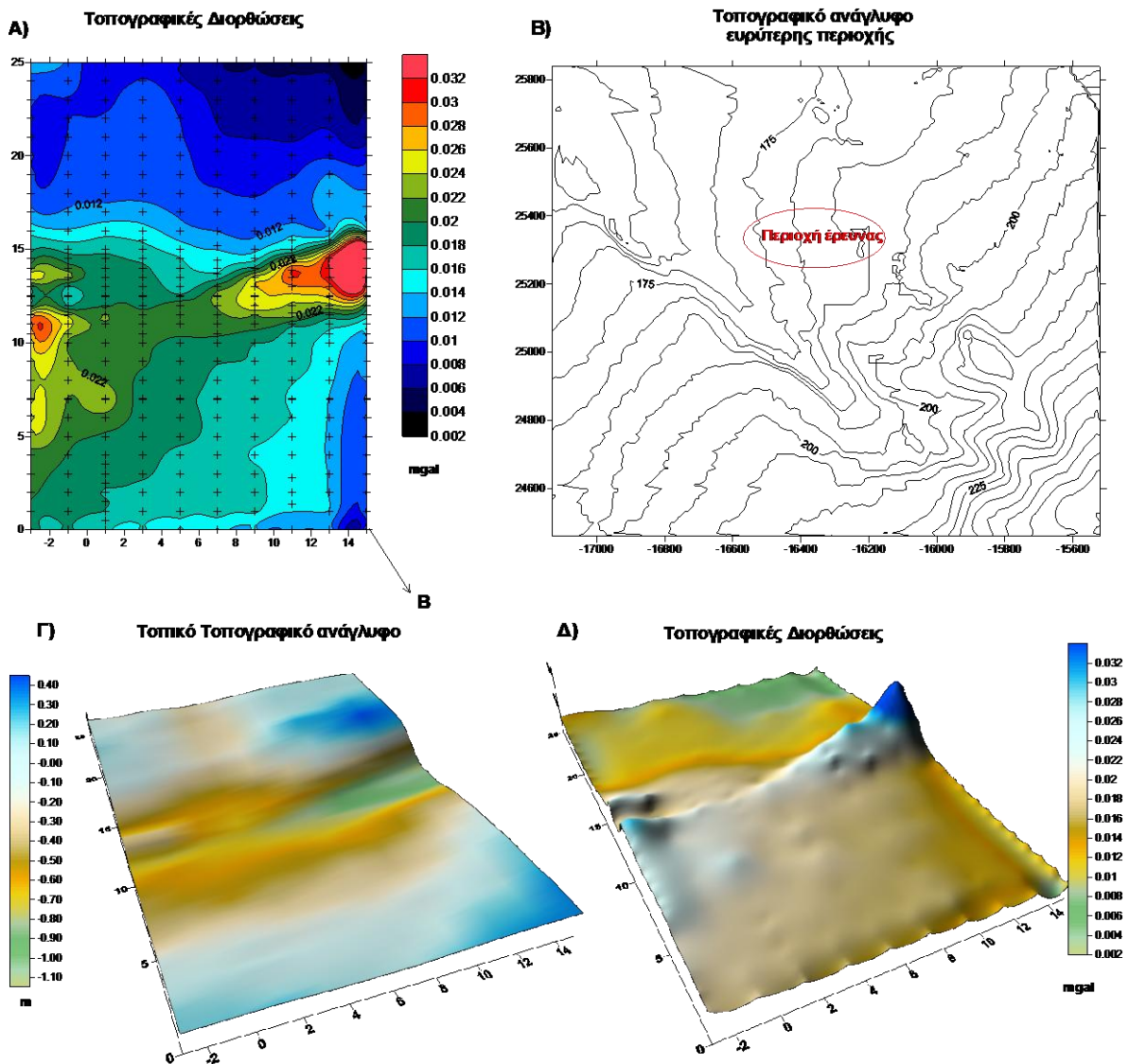


Εικόνα 3.34: Παράδειγμα βαρυτικών διορθώσεων.

3.3.4 Τοπογραφική Διόρθωση

Οι τοπογραφικές διορθώσεις έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού Tercor2d. Πρακτικά έγιναν διορθώσεις για τις ζώνες A,B,C,D,E αφού για μεγαλύτερες αποστάσεις οι σχετικές μεταβολές του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης μεταξύ των σταθμών ήταν πολύ μικρές. Στην Εικόνα 3.35 (α),(β) παρουσιάζεται ο χάρτης των τελικών τοπογραφικών διορθώσεων και το τοπογραφικό ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής. Ο χάρτης των

τοπογραφικών διορθώσεων δηλώνει την επίδραση της τοπογραφίας στα δεδομένα των μικροβαρυτικών μετρήσεων (μαύροι σταυροί).



Εικόνα 3.35 : α) Υπολογιζόμενες τοπογραφικές διορθώσεις β) Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής γ) Τριδιάστατο προσομοίωμα τοπικού ανάγλυφου δ) Χάρτης των υπολογιζόμενων τοπογραφικών διορθώσεων.

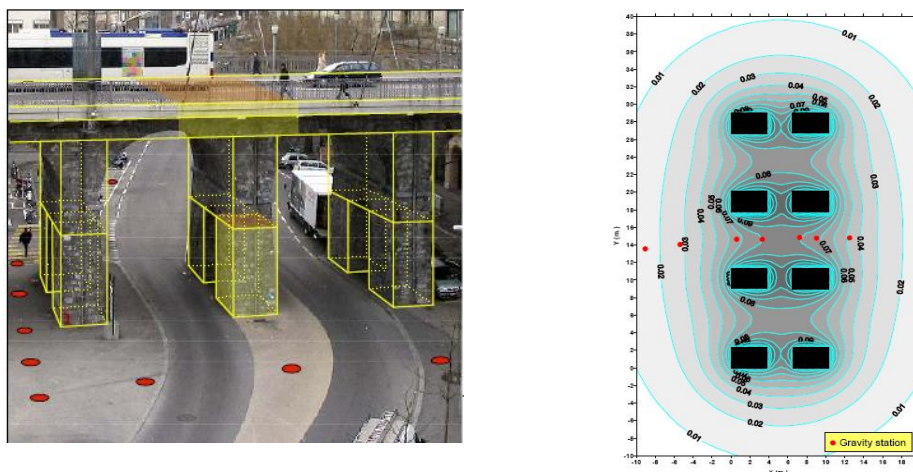
Επίσης παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο προσομοίωμα του τοπικού ανάγλυφου της περιοχής και το αντίστοιχο τρισδιάστατο προσομοίωμα των τοπογραφικών διορθώσεων (Εικ 2.35 (γ),(δ)).

Η μέγιστη τιμή του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης είναι της τάξεως των 0.032 mgal. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο χάρτης τοπογραφικών διορθώσεων ακολουθεί κυρίως τη μορφή του τοπικού ανάγλυφου. Είναι γεγονός ότι η γειτνιάζουσα τοπογραφία είναι αυτή που επιδρά κυρίως στις μετρήσεις. Η επίδραση της απομακρυσμένης τοπογραφίας αποτελεί μια μορφή μεγάλου κύματος ανωμαλίας στα δεδομένα, δίνοντας σχετικές μεταβολές του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης μεταξύ των μετρήσεων στους διάφορους σταθμούς της τάξεως του 10^{-4} με 10^{-5} mgal, πρακτικά δηλαδή ελάχιστες.

Κύρια αίτια για τη μικρή επίδραση της μακρινής τοπογραφίας στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελούν :

1. οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των σταθμών μέτρησης,
2. το μικρό ανάπτυγμα της γραμμής έρευνας,
3. το μικρό βάθος διασκόπησης,
4. το μικρό μέγεθος του στόχου.

Επιπλέον, στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κάρναβος μετρήσεων βρίσκεται μακριά από κατασκευές π.χ. κτίρια ή και τοπικές επιφανειακές εκσκαφές, οι οποίες θα επηρέαζαν τη μετρούμενη τιμή της βαρύτητας και θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, με τη μοντελοποίηση αυτών των μορφών μπορεί να υπολογιστούν, με βάσει μαθηματικές σχέσεις, οι ανωμαλίες που δημιουργούνται στο τοπικό βαρυτικό πεδίο, άρα, να διευκρινιστεί αντίστοιχα η επίδραση τους στις μετρούμενες τιμές (Εικ. 3.36).



Εικόνα 3.36: Παράδειγμα υπολογισμού βαρυτικής ανωμαλίας που δημιουργείται από την ύπαρξη οδικής γέφυρας.(Radogna et al., 2004).

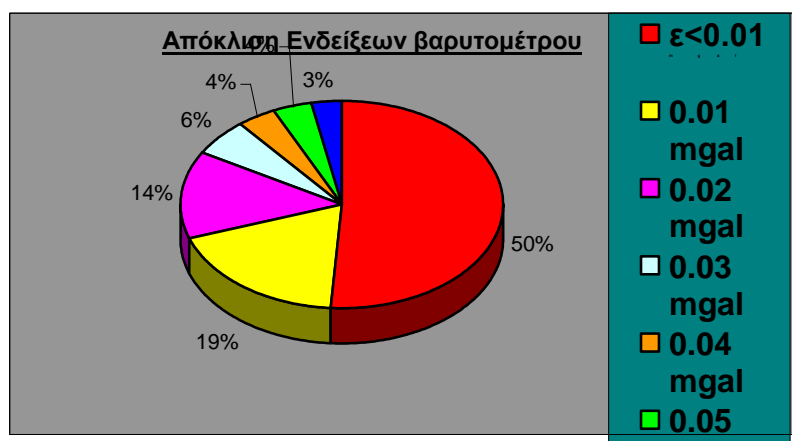
3.3.5 Χαρακτηρισμός Ποιότητας Μετρήσεων

Η τάξη μεγέθους του σφάλματος μιας μέτρησης είναι σημαντικό έτσι ώστε να είναι σε θέση ο ερευνητής να γνωρίζει κατά πόσο είναι δυνατόν να εντοπιστεί με ακρίβεια μια ανωμαλία. Δηλαδή η επίδραση της ανωμαλίας στις μετρήσεις θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ποσοστό σφάλματος.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας για κάθε σταθμό μέτρησης καταγράφονταν τρεις τουλάχιστον ενδείξεις δίδοντας τη δυνατότητα για τη διερεύνηση της επαναληψιμότητας και την εξακρίβωση της πραγματικής ανάλυσης που μπορεί να επιτευχθεί στο ύπαιθρο (όσον αφορά την επαναληψιμότητα των μετρήσεων). Επιπλέον, για να επιτευχθεί η αύξηση του ποσοστού σήματος προς θόρυβο, λαμβάνονταν ως τελική μέτρηση είτε ο

μέσος όρος των τριών μετρήσεων είτε ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων αποκλείοντας τη μέτρηση με τη μεγαλύτερη απόκλιση. Σε μερικές περιπτώσεις κρίθηκε απαραίτητη η λήψη και τέταρτης μέτρησης.

Το συγκεκριμένο όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε έχει βασική υποδιαίρεση μέτρησης το 0,01 mgal. Στο σύνολο των ενδείξεων, ο μέσος όρος της απόκλισης των καταγραφών στον ίδιο σταθμό ήταν της τάξεως των 0,012 (mean) mgal. Στην Εικόνα 3.37 παρουσιάζονται οι τάξεις μεγέθους των αποκλίσεων των μετρήσεων σε ποσοστό επί τοις εκατό επί του συνόλου των επαναληπτικών μετρήσεων.



Εικόνα 3.37: Ποσοστά απόκλισης επαναληπτικών μετρήσεων (επί τοις εκατό %).

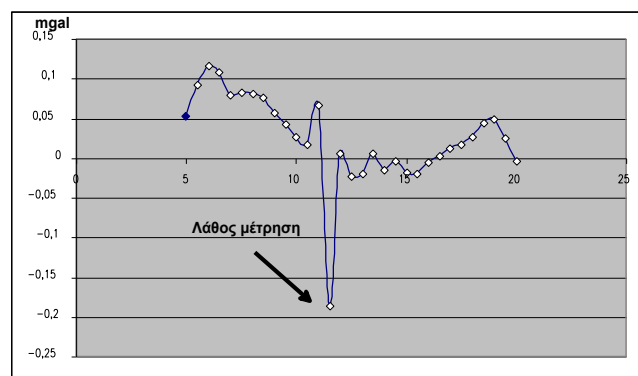
Παρόλο που το 69% των μετρήσεων είχε απόκλιση μικρότερη ή ίση με 0.01 mgal (το μεγαλύτερο ποσοστό εξ αυτών είχαν απόκλιση της τάξης του 0.005) το ποσοστό με απόκλιση μεγαλύτερη του 0.01 είναι σημαντικό και υποδηλώνει ότι είναι οπωσδήποτε απαραίτητη η λήψη επαναλαμβανόμενων μετρήσεων για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας. Πρέπει να τονιστεί επίσης ότι υπήρξαν πολύ μεγάλες αποκλίσεις (μεγαλύτερες του 0.03 mgal) οι οποίες σχετίζονται κυρίως με σταθμούς μέτρησης που βρίσκονταν σε σημεία όπου υπήρχαν δυσκολίες για την καλή οριζοντίωση του οργάνου αλλά και σε τυχόν απότομες μετακινήσεις του βαρυτόμετρου πριν τη λήψη της μέτρησης.

Στον Πίνακα. 3.1 παρουσιάζονται πιθανές αιτίες που μπορεί να προσθέσουν λάθος στις μετρούμενες τιμές (Rymer, 1989).

Πίνακας 3.1: Πίνακας με τις σημαντικότερες αιτίες λάθους κατά τη χρησιμοποίηση του βαρυτόμετρου Lacoste & Romberg G (Rymer 1989).

Cause	Comments	Approx. size of error	
		maximum	minimum
External			
Earth tide amplification factor	Value ranges from 1.155 to 1.165 depending on Love numbers and latitude	< 2 μ gal	< 1 μ gal
Phase lag	Observed and predicted tides may be out of phase by -6° to +3°	Unknown but small	(< 1 μ gal)
Ocean loading	Caused by tilting the shoreline and the gravitational attraction of mass of water in the oceans	< 10 μ gal	1 μ gal
Noise	Low frequency (< 1 Hz) disturbances caused by wind, surf, and distant earthquakes cause beam to swing: also produce tares	< 50 μ gal	1 μ gal
Reading			
Leg length	Height of meter is varied by changing leg lengths, gravity varies according to the free air gradient of -3 μ Gal cm^{-1}	10 μ gal	< 1 μ gal
Sensitivity and levelling	Sensitivity can be varied manually, but it drifts with time. Failure to level, especially along the long level, effectively changes the reading line and changes the sensitivity.	< 20 μ gal	
Dial movements	Slack (backlash) in the gears will cause errors unless the reading is approached from the same side each time	< 40 μ gal	< 1 μ gal
Timing	Provided the reading is steady, there is no evidence that there is an advantage in waiting before making a reading	Negligible	-
Instrumental			
Movement of instrument	The rms deviation about the mean reading when the gravity meter is moved between readings is greater than if it is not moved between readings		
Meter calibration	Polynomials and Fourier series can be used to model the calibration features. There are periodic terms due to the way the LCR is constructed, but over small ranges the effect can be kept down to a few microgals.	500 μ gal in 500 mgal or 0.1%	< 1 μ gal
Thermally-induced tares	Low battery power or a sudden change in external temperature may cause a thermal shock to the measuring system unless a secondary thermostat is fitted. If the internal temperature is allowed to fall to room temperature the effect is much larger.	~ 10 mgal	
Shock-induced tares	Hysteresis effects in the spring and physical jolting of the system can cause tares of almost any magnitude	~ 10 mgal	< 1 μ gal
Total		50 μ gal to several mgal	< 10 μ gal

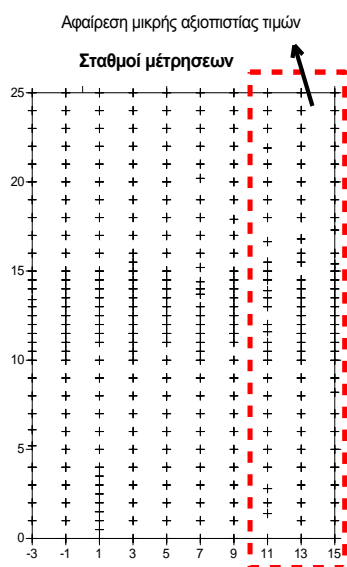
Αφού γίνουν όλες οι απαραίτητες μικροβαρυτικές διορθώσεις, το επόμενο στάδιο της επεξεργασίας αποτελείται από τη διαδικασία αφαίρεσης των προφανώς λάθος τιμών ή και των τιμών που υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο όριο σχετικής μεταβολής (despiking). Η αφαίρεση αυτών των τιμών βοηθά στην ομαλοποίηση των δεδομένων και την αποφυγή λανθασμένων ερμηνειών ιδιαίτερα κατά την επεξεργασία των μετρήσεων (Εικ.3.38).



Εικόνα 3.38 : Χαρακτηριστικό παράδειγμα αφαίρεσης λανθασμένων μετρήσεων (despiking).

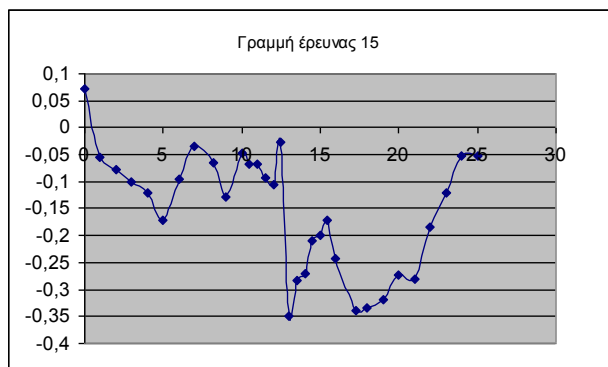
Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ερμηνεία της επαναληψιμότητας των μετρήσεων και παρατηρώντας «ύποπτες τιμές» με μεγάλες αποκλίσεις ακόμη και σε κοντινούς σταθμούς στις τρεις τελευταίες γραμμές διασκόπησης (η διαδικασία λήψης σε αυτές τις τρεις γραμμές έγινε καταγράφοντας μόνο μία τιμή σε κάθε σταθμό), αφαιρέθηκε το σύνολο των μετρήσεων αυτών των τριών γραμμών (3.39).

Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να γίνεται προσπάθεια εξοικονόμησης χρόνου σε βάρος της ακρίβειας των μετρήσεων. Η λήψη επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στο ίδιο σταθμό μέτρησης είναι επιβεβλημένη. Όσο περισσότερες οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις τόσο αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο.



Εικόνα 3.39: Παρουσίαση αφαίρεσης μετρήσεων μικρής αξιοπιστίας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γραμμή διασκόπησης 15 όπου πέρα των περιεργων μεταβολών των τιμών, παρατηρείται και μια απότομη μετατόπιση των τιμών μέτρησης που ίσως οφείλεται σε κάποιο πρόβλημα του οργάνου μέτρησης λόγω απότομης μετακίνησης του (Εικ. 3.40). Τέτοια φαινόμενα (tares) είναι συνηθισμένα κατά τη διάρκεια μικροβαρυτικών μετρήσεων λόγω της ευαισθησίας του οργάνου και εμφανίζονται ως ολική μετατόπιση του επιπέδου των τιμών κατά ένα συγκεκριμένο αριθμό που μπορεί να φτάσει έως πολλά mgal.



Εικόνα 3.40: Εμφάνιση χαρακτηριστικής μετατόπισης στις μετρούμενες τιμές της γραμμής 15 λόγω απότομης μετακίνησης του βαρυτόμετρου.

Αυτές οι μετατοπίσεις διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες (Torge, 1989):

- I. Θερμικές, οι οποίες συμβαίνουν όταν ο θερμοστάτης και το θερμομέτρο αδυνατούν να ρυθμίσουν την εσωτερική θερμοκρασία του οργάνου εξαιτίας απότομων εξωτερικών μεταβολών της θερμοκρασίας. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να συμβούν όταν το όργανό είναι εκτός της θήκης μεταφοράς του σε κρύο περιβάλλον ή και αντίθετα. Επιπλέον, η κακή επαφή της μπαταρίας ή κατεστραμμένη παροχή ρεύματος μπορεί να αποτελούν λόγους εμφάνισης θερμικών μετατοπίσεων. Κάθε μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του οργάνου έστω και για λίγα λεπτά μπορεί να επιφέρει μετατοπίσεις πολλών mgal.
- II. Μηχανικές, οι οποίες συμβαίνουν είτε όταν το όργανο μετακινείται απότομα είτε όταν το ελατήριο είναι ασφαλισμένο ή όχι. Πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τις μετακινήσεις του οργάνου εντός και εκτός της θήκης μεταφοράς του αλλά και κατά τη διάρκεια της μέτρησης

Γενικότερα, όταν διαπιστωθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα στο ύπαιθρο, για να αποφευχθεί η καταγραφή λανθασμένων τιμών μέτρησης, πρέπει να ακολουθηθούν τα επόμενα βήματα :

- Επιστροφή στη βάση και επανάληψη μέτρησης.
- Επανάληψη των δύο ή τριών αμέσως προηγούμενων «σωστών» μετρήσεων.
- Μέτρηση των επομένων σταθμών αφού έχουν σημειωθεί όλες οι απαραίτητες παρατηρήσεις (χρόνος-σημείο μέτρησης που έγινε η μετατόπιση αυτή) έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

3.3.6 Μέθοδος και Βήμα Πλεγματοποίησης Μετρήσεων (Gridding)

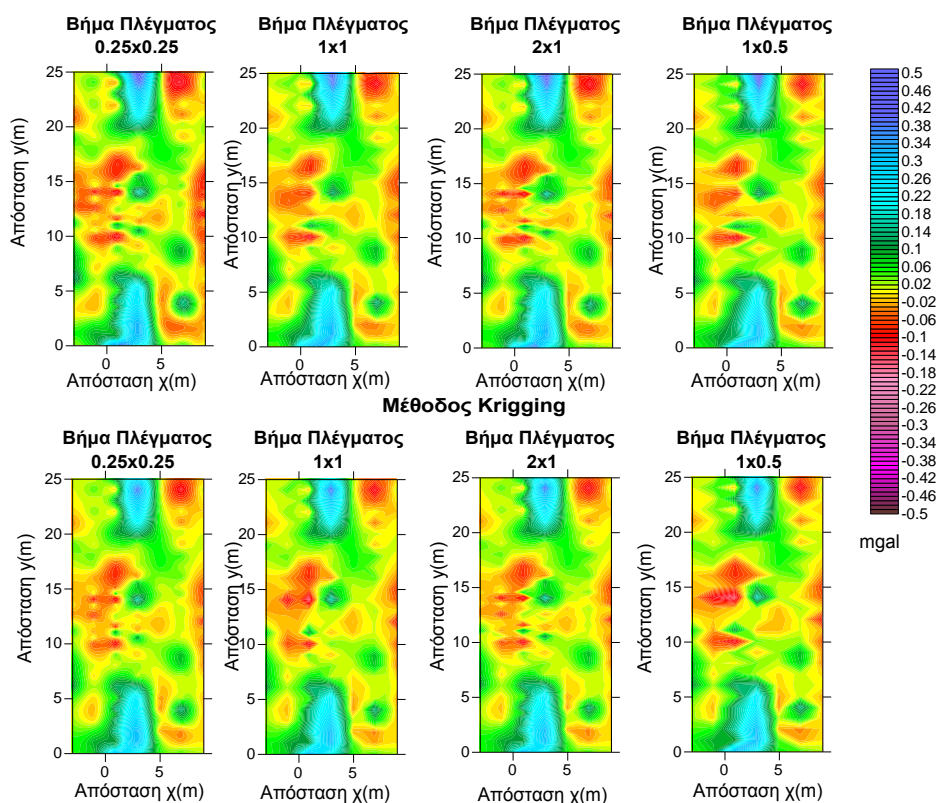
Για την καλύτερη απεικόνιση των βαρυτικών ανωμαλιών της περιοχής, δημιουργούνται διδιάστατοι χάρτες με τη βοήθεια του προγράμματος Surfer. Σε αυτούς τους χάρτες, στη συνέχεια, εφαρμόζονται κατάλληλα φίλτρα για τη διευκόλυνση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων της βαρυτικής διασκόπησης και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Για τη δημιουργία των χαρτών της βαρυτικής ανωμαλίας πρέπει ο ερευνητής να επιλέξει τη μέθοδο και το βήμα πλεγματοποίησης (gridding). Οι δύο κύριες επιλογές που προσφέρει το λογισμικό Surfer, οι οποίες αποτελούν και τις κυριότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις βαρυτικές διασκοπήσεις, είναι η μέθοδος Kriging και η μέθοδος ελάχιστης καμπυλότητας (minimum curvature). Συνηθέστερα χρησιμοποιείται η δεύτερη μέθοδος, ιδιαίτερα όταν οι σταθμοί μετρήσεις έχουν ακανόνιστη διάταξη (Nabighian et al 2005).

Επιπλέον, όσον αφορά το βήμα πλέγματος πρέπει να επιλέγεται ανάλογα με τις αποστάσεις μεταξύ των σταθμών μέτρησης αλλά και με τις ιδιαιτερότητες του στόχου έρευνας.

Χάρτες ανωμαλίας Bouguer

Μέθοδος Minimum Curvature



Εικόνα 3.41: Χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας με διαφορετική μέθοδο και βήμα πλεγματοποίησης.

Στην Εικόνα 3.41 παρουσιάζονται οι χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας που προέκυψαν από διαφορετικές μεθόδους και διαφορετικό βήμα πλεγματοποίησης. Οι διαφορές που παρατηρούνται στους διάφορους χάρτες είναι μικρές και κυρίως επικεντρώνονται στη μεγαλύτερη λεπτομέρεια που προσφέρουν οι χάρτες με μικρότερο βήμα πλέγματος.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου ο στόχος είναι αρκετά μεγάλος και οι σταθμοί βρίσκονται σε μη τετραγωνικό κάρναβο, επιλέχθηκε η μέθοδος ελάχιστης καμπυλότητας (minimum curvature) και βήμα πλεγματοποίησης 1x2.

Είναι γεγονός ότι σε αυτήν την εφαρμογή όπως και στις περισσότερες εφαρμογές τις μικροβαρυτομετρίας όπου οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών έρευνας είναι αρκετά μικρές και διατάσσονται συνήθως σε τετραγωνικούς καννάβους η διαφοροποίηση που προκύπτει με τις διάφορες τεχνικές πλεγματοποίησης είναι μικρή.

3.3.7 Διαχωρισμός Τοπικής Κλίμακας Ανωμαλία από Μεγάλης Κλίμακας Ανωμαλίας.

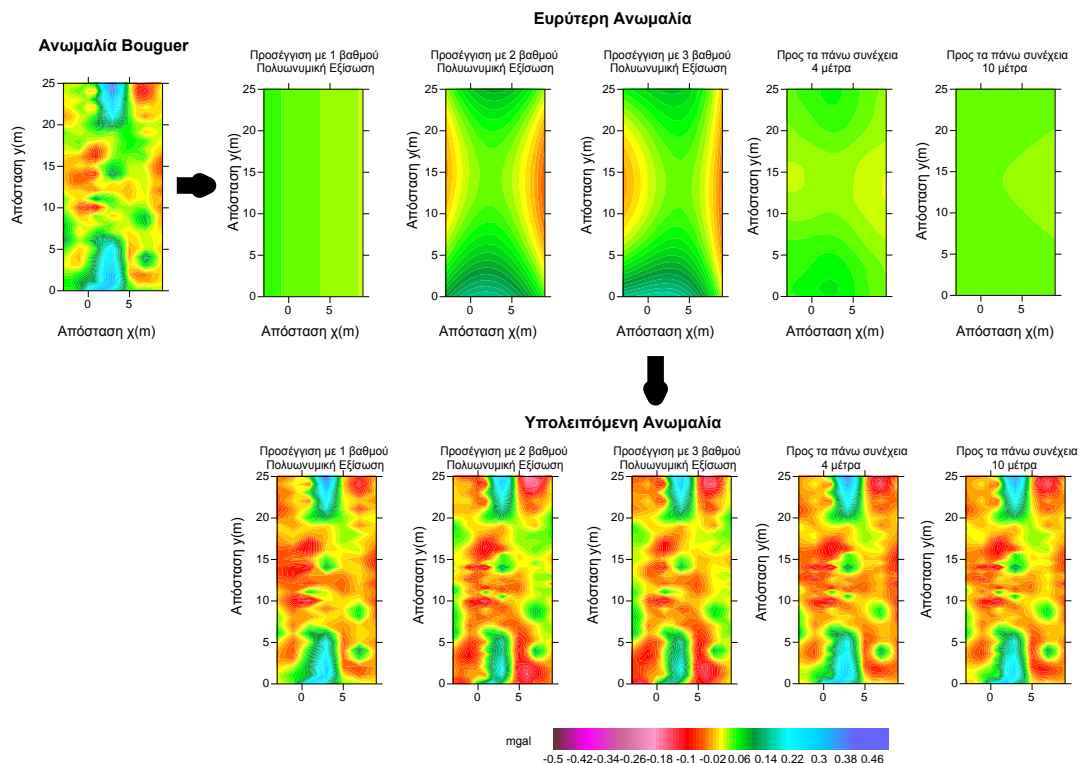
Ο διαχωρισμός της ευρύτερης ανωμαλίας, που αφορά βαθύτερες δομές από τη μικρής κλίμακας ανωμαλία που αφορά πιο επιφανειακές δομές, είναι ένα σημαντικό βήμα πριν την ερμηνεία. Για να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της επίδρασης του στόχου έρευνας στη βαρύτερη καμπύλη, θα πρέπει να τονιστεί όσο το δυνατόν ο υψίσυχνος χαρακτήρας του με την εξάλειψη της επίδρασης μεγαλύτερων ή και βαθύτερων δομών.

Από τη μελέτη πρόσφατων διεθνών δημοσιευμένων άρθρων σχετικά με την εφαρμογή της μικροβαρτομετρίας (Styles et al,2006; Branston 2006; Rybakov 2001) για τον εντοπισμό στόχων, προκύπτει ότι για το διαχωρισμό της μικρής από τη μεγάλη κλίμακα ανωμαλίας εφαρμόζονται κυρίως πολωνυμικές εξισώσεις, δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα και επιτυγχάνοντας σε μεγάλο βαθμό την προσομοίωση της ευρύτερης ανωμαλίας.

Η διαδικασία αυτή υιοθετήθηκε για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων της μικροβαρτομετρίας. Επιπλέον, διερευνήθηκε και η δυνατότητα διαχωρισμού της υπολειπόμενης ανωμαλίας με τη βοήθεια της προς τα πάνω συνέχειας (upward continuation).

Στην Εικόνα 3.42 παρουσιάζονται οι χάρτες υπολειπόμενης ανωμαλίας των μετρήσεων στην περιοχή έρευνας του αγωγού, που προκύπτουν με διαφορετικές προσεγγίσεις για τον εντοπισμό της ευρύτερης ανωμαλίας :

- I. Πολωνυμική εξίσωση πρώτου βαθμού.
- II. Πολωνυμική εξίσωση δεύτερου βαθμού.
- III. Πολωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού.
- IV. Προσδιορισμός της προς τα πάνω συνέχειας.



Εικόνα 3.42: Διαχωρισμός μικρής κλίμακας ανωμαλίας από μεγάλης κλίμακας ανωμαλία με διάφορους τρόπους.

Κατά τον υπολογισμό της ευρύτερης ανωμαλίας με την προσεγγιστική μέθοδο πολωνυμικών εξισώσεων, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να μην

απαλείφεται μαζί με την ευρύτερη ανωμαλία και χρήσιμη πληροφορία που αφορά τον στόχο έρευνας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου ο στόχος είναι αρκετά μεγάλος σε σχέση με το ανάπτυγμα της γραμμής διασκόπησης και η ανωμαλία που προκαλεί είναι μεγάλου μήκους κύματος, είναι εμφανέςτατο ότι ο χάρτης που προκύπτει με 2^ο ή 3^ο βαθμού πολωνυμική εξίσωση είτε με τη χρήση της προς τα άνω συνέχειας 4 μέτρων, εκτός από την ευρύτερη ανωμαλία, περιέχει και πληροφορία που σχετίζεται με την ύπαρξη του υπόγειου αγωγού.

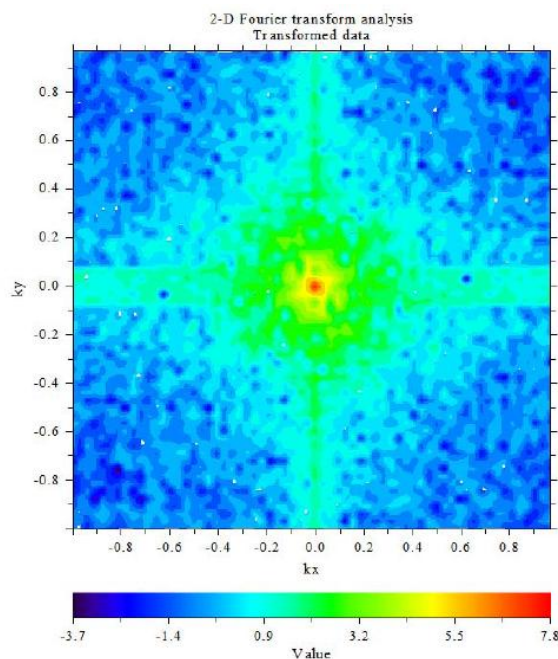
Αντιθέτως ο χάρτης που προκύπτει είτε από την 1^ο βαθμού πολωνυμική εξίσωση, είτε από την προς τα άνω συνέχεια των 10 μέτρων αντικατοπτρίζει, καλύτερα την επίδραση στις μετρήσεις των βαθύτερων οριζόντων και δεν μεταβάλλει το ποιοτικό περιεχόμενο των δεδομένων. (Η περαιτέρω επεξεργασία των υπολειπόμενων ανωμαλιών που προέκυψε με τους δύο τρόπους έδωσε παρόμοια αποτελέσματα).

3.3.8 Εφαρμογή Τεχνικών Επεξεργασίας Μετρήσεων

Μετά από τη διαδικασία του διαχωρισμού της τοπικής από την ευρύτερη ανωμαλία, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η πρώτου βαθμού πολωνυμική εξίσωση, προκύπτει ο χάρτης υπολειπόμενης ανωμαλίας.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την εφαρμογή διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας, με στόχο την ενδυνάμωση της παρουσίας των στόχων ενδιαφέροντος στο χάρτη υπολειπόμενων βαρυτικών ανωμαλιών. Οι τεχνικές αυτές χωρίζονται σε αυτές που τονίζουν τις ανωμαλίες μεγάλου μήκους κύματος που σχετίζονται με διαταραχές ευρύτερου χαρακτήρα και σε αυτές που τονίζουν τις ανωμαλίες μικρού μήκους κύματος που σχετίζονται με τοπικές διαταραχές μικρού βάθους.

Παράλληλα με την παρουσίαση των χαρτών που προκύπτουν από τις διάφορες τεχνικές ενδυνάμωσης του σήματος θα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα (Διδιάστατη Ανάλυση Fourier), τα οποία θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση του συχνοτικού περιεχομένου των δεδομένων της μικροβαρυτομετρίας (Εικ 3.43).



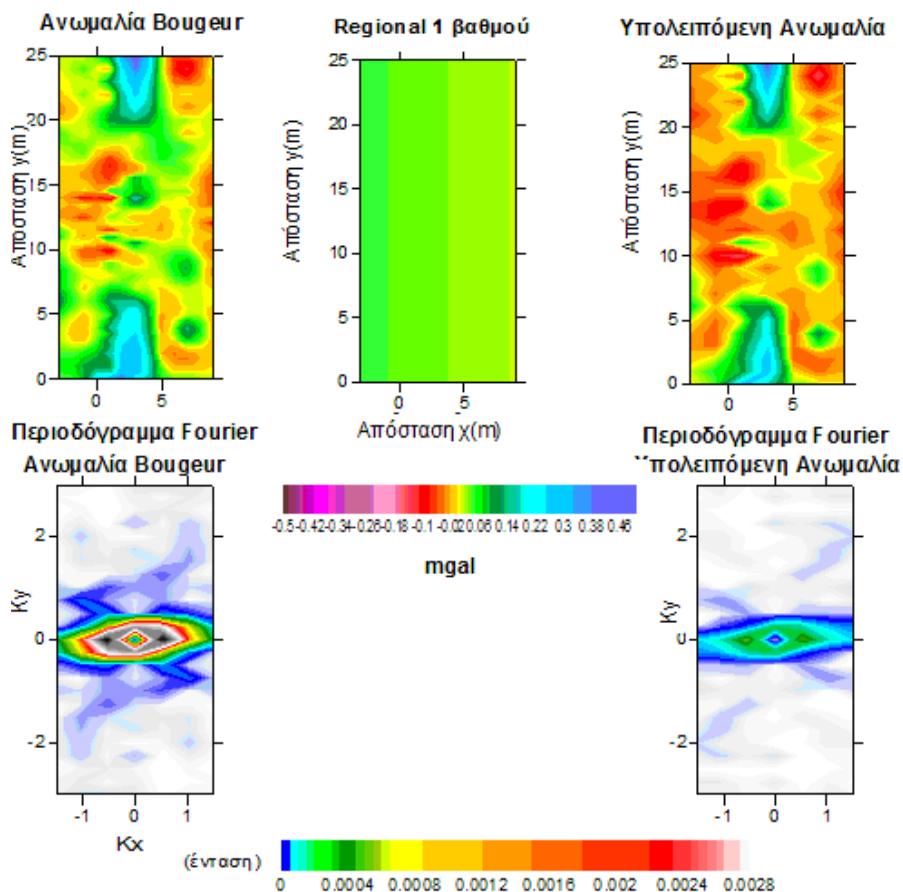
Εικόνα 3.43 : Παράδειγμα περιοδογράμματος.

Το Περιοδόγραμμα είναι η ανάλυση ενός διδιάστατου χάρτη ανωμαλίας σε ένα σταθμισμένο (weighted) άθροισμα πολλών και διάφορων διδιάστατων ημιτονοειδών. Με τον τρόπο αυτό εμφανίζεται η «κρυμμένη» περιοδικότητα ($T=1/v$) ή οι επαναλαμβανόμενες μορφές οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι εμφανείς σε ένα απλό διδιάστατο χάρτη.

Με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Surfer υπολογίζονται από τους διδιάστατους χάρτες ανωμαλίας, τα Περιοδογράμματα. Τα περιοδογράμματα που προκύπτουν έχουν τις ίδιες διαστάσεις με τους μητρικούς χάρτες, αλλά οι άξονες αντιπροσωπεύουν τους κυματαριθμούς (wave number) οι οποίοι σχετίζονται με τα μήκη κύματος των ανωμαλιών.

Ο κυματαριθμός k δίδεται από τη σχέση $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ όπου λ το μήκος κύματος.

Από την Εικόνα 3.44, επιβεβαιώνεται η διαπίστωση στο Κεφάλαιο 3.3.7 ότι δηλαδή η αφαίρεση της ευρύτερης ανωμαλίας στη συγκεκριμένη περίπτωση (πρώτου βαθμού πολυωνμική εξίσωση) δεν επηρεάζει κατά πολύ το συχνοτικό περιεχόμενο των μετρήσεων (δεν χάνεται πληροφορία σχετικά με τον αγωγό) αλλά απλά μεταφέρει σε χαμηλότερο επίπεδο τις μετρούμενες τιμές.



Εικόνα 3.44 : Υπολογισμός υπολειπόμενης ανωμαλίας Bouguer και παρουσίαση αντίστοιχων περιοδογραμμάτων.

Επιπλέον παρατηρείται ότι ο χάρτης υπολειπόμενης ανωμαλίας περιέχει υψηλό ποσοστό θορύβου και δεν δίνει ξεκάθαρες πληροφορίες για την ύπαρξη και τη θέση του υπόγειου αγωγού ή κάποιου άλλου σώματος με διαφορετική πυκνότητα σε σχέση με το

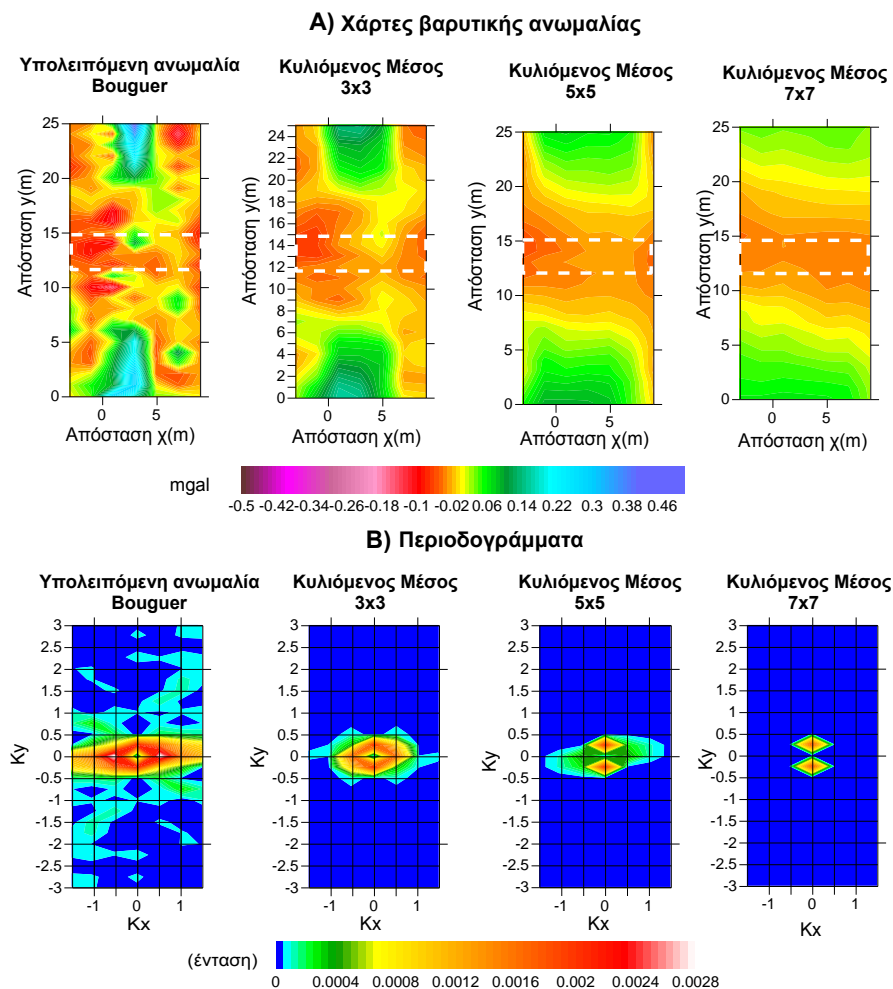
περιβάλλοντα χώρο. Η παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από το αντίστοιχο περιοδογράμμα, το οποίο παρουσιάζει ανωμαλίες διάφορων μήκων κύματος που καθιστούν δύσκολο τον απευθείας καθορισμό του μήκους κύματος της ανωμαλίας ενδιαφέροντος

Πρέπει, επομένως, να εφαρμοστούν κατάλληλες τεχνικές για την εξάλειψη του θορύβου και την καλύτερη απεικόνιση της βαρυτικής ανωμαλίας που προκαλεί η ύπαρξη του αγωγού.

Ειδικότερα, στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου ο στόχος είναι μεγάλος και αναμένεται αρκετά μεγάλη μήκους κύματος ανωμαλία σε σχέση με το ανάπτυγμα της γραμμής διασκόπησης, θα χρησιμοποιηθούν, αρχικά, τεχνικές επεξεργασίας που εντείνουν και ενδυναμώνουν τις μεγάλες μήκους κύματος ανωμαλίες, ελαττώνοντας παράλληλα τις υψίσυχνες ανωμαλίες και το θόρυβο.

3.3.8.1 Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συχνοτήτων (Lowpass Filters)

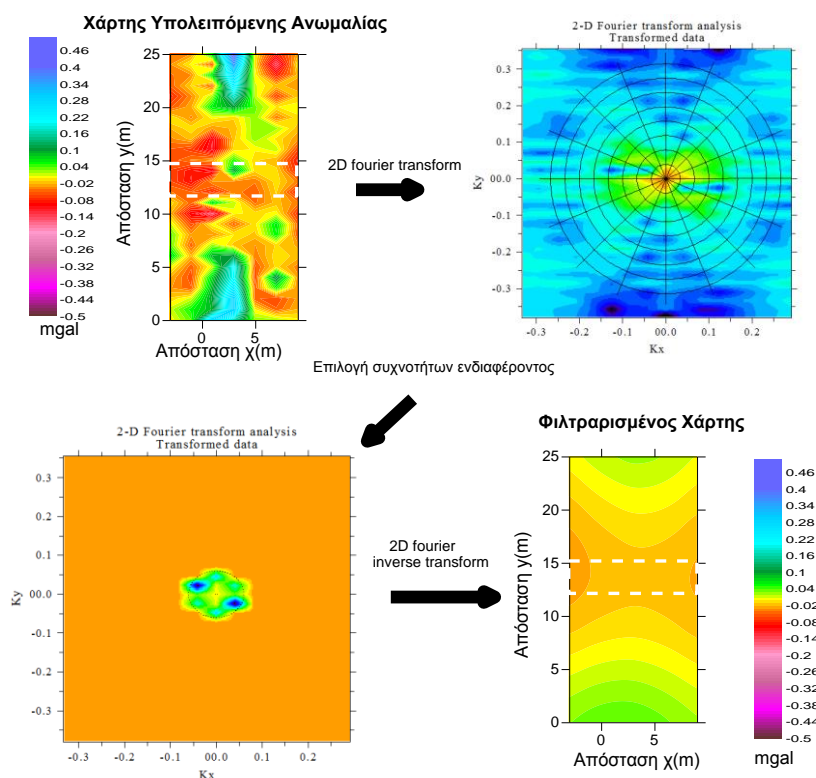
Για την περαιτέρω επεξεργασία του χάρτη υπολειπόμενης ανωμαλίας της Εικόνας 3.45 εφαρμόστηκε το φίλτρο του κυλιόμενου μέσου (moving average) επιλέγοντας διάφορες τιμές. Στην Εικόνα 3.45 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων του κυλιόμενου μέσου για διάφορα μεγέθη. (3x3, 5x5, 7x7) στο χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας. Επιπλέον παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα για κάθε χάρτη.



Εικόνα 3.45 : Οι χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων Moving Average 3x3, 5x5, 7x7, και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα.

Είναι εμφανές τόσο από τους χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας όσο και από τα αντίστοιχα περιοδογράμματα, ότι όσο μεγαλύτερο το μέγεθος του φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων τόσο περισσότερο μειώνεται η παρουσία των μικρότερων μήκους ανωμαλιών με την παράλληλη ενίσχυση των μεγάλου μήκους κύματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται χαρακτηριστικά στον τελικό χάρτη πως ενισχύεται η ανωμαλία που οφείλεται στην παρουσία του αγωγού σε σχέση με άλλες μικρότερες δομές και θόρυβο οι οποίες σχεδόν εκμηδενίζονται.

Επιπλέον, η εφαρμογή των χαμηλών ή υψηλών φίλτρων διέλευσης είναι δυνατή να εφαρμοστεί στο συχνοτικό πεδίο, στο οποίο πολλές φορές δίδει ακριβέστερα αποτελέσματα. Για την εφαρμογή της τεχνικής αυτής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Fourier (Pirttijärvi, 2006-2009). Στο χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας, εφαρμόζεται ο διδιάστατος μετασχηματισμός fourier και επιλέγονται οι συχνότητες ενδιαφέροντος (στη συγκεκριμένη περίπτωση μικρές συχνότητες), δίδοντας την ακτίνα της επιθυμητής διακύμανσης των συχνοτήτων. Έπειτα, με την εφαρμογή του αντίστροφου διδιάστατου μετασχηματισμού fourier, προκύπτει ο νέος χάρτης βαρυτικής ανωμαλίας, ο οποίος παρουσιάζει καλύτερα την ανωμαλία που οφείλεται στο στόχο ενδιαφέροντος (Εικ. 3.46).



Εικόνα 3.46 : Διαδικασία εφαρμογής φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων στο συχνοτικό επίπεδο.

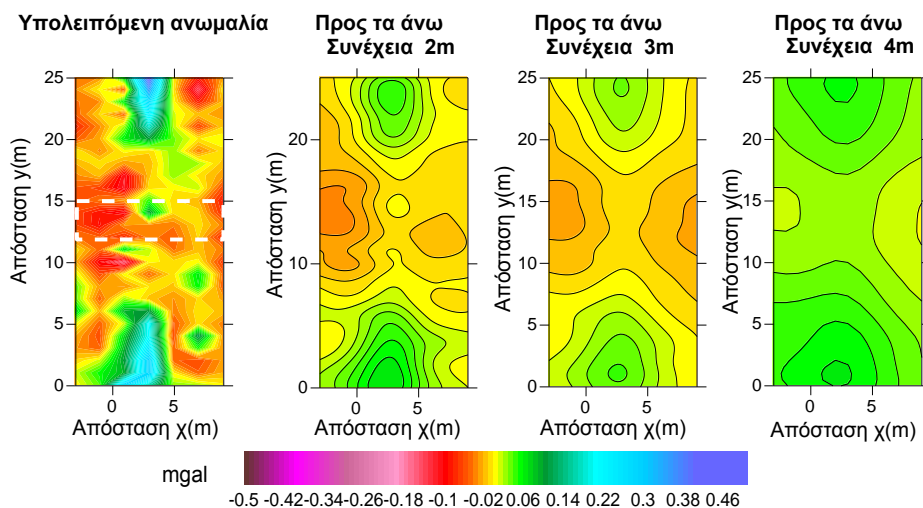
3.3.8.2 Προς τα άνω και προς τα κάτω Συνέχεια (Upward and Downward Continuation)

Στην Εικόνα 3.47 παρουσιάζονται οι χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας που προκύπτουν μετά την εφαρμογή της τεχνικής προς τα άνω συνέχειας για τιμή 2,3,4 μέτρα στο χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας Bouguer και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα.

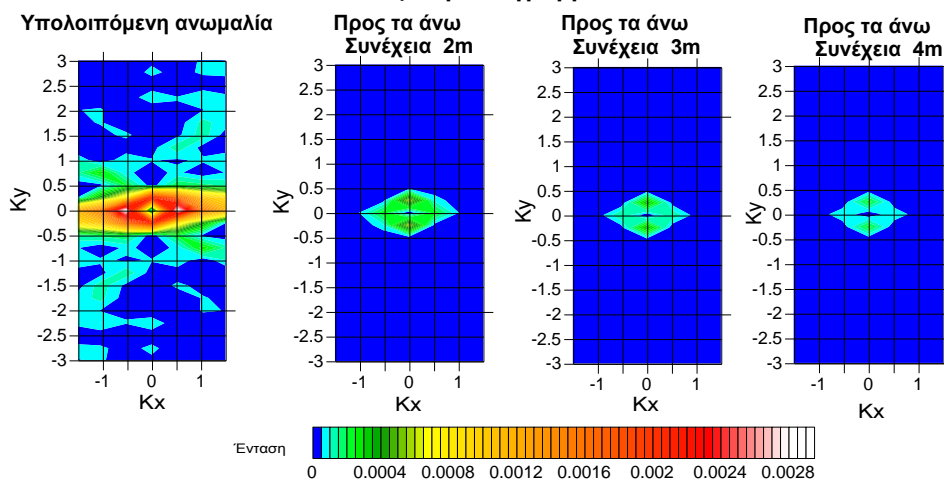
Με αυτή τη διαδικασία οι μετρήσεις, μεταφέρονται σε ένα άλλο επίπεδο που βρίσκεται ψηλότερα από το πραγματικό επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται εξομάλυνση των αρχικών δεδομένων, καθώς, με την απομάκρυνση από την πηγή της διαταραχής, οι υψίσυχνες τοπικές ανωμαλίες εξασθενούν και απομένει η ευρύτερη ανωμαλία. Το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με αυτό που προκύπτει από την εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Όσο μεγαλύτερο είναι το υψόμετρο που μεταφέρουμε τις τιμές, τόσο μειώνονται οι μικρού κύματος ανωμαλίες. Γεγονός που πιστοποιείται και από τα αντίστοιχα περιοδογράμματα. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι, παράλληλα με την απομάκρυνση του «θορύβου», υπάρχει και η πιθανότητα απώλειας μέρους χρήσιμης πληροφορίας κατά την αναγωγή των μετρήσεων σε ένα υψηλότερο επίπεδο και για αυτό κάθε φορά ανάλογα με τις συνθήκες της έρευνας και τα χαρακτηριστικά του στόχου, πρέπει να επιλέγεται το κατάλληλο υψομετρικό επίπεδο μεταφοράς.

Η εξασθένηση των μικρών κύματος ανωμαλιών, που στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελούν θόρυβο, έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση του υπόγειου αγωγού στους τελικούς χάρτες της βαρυτικής ανωμαλίας σε σχέση με τον αρχικό χάρτη υπολειπόμενης ανωμαλίας bouguer.

A) Χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας



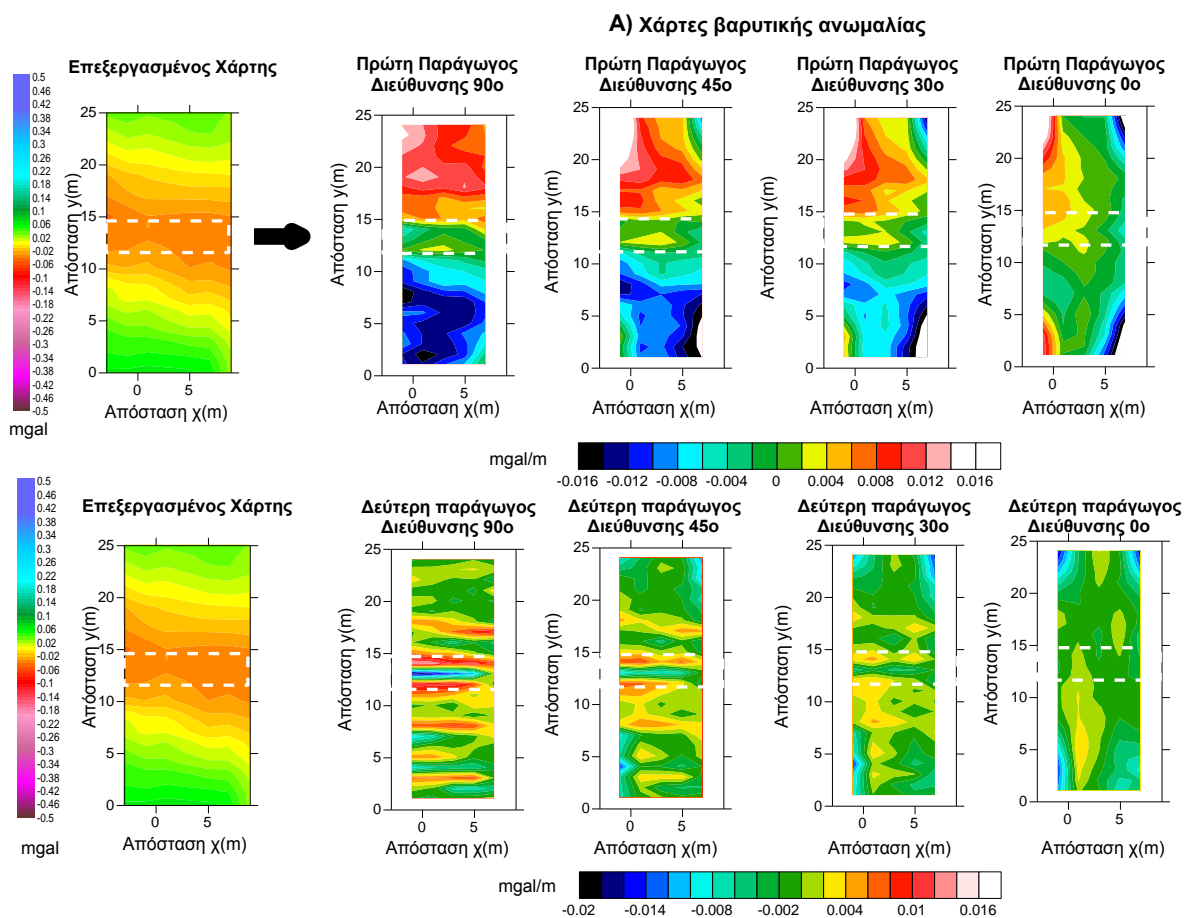
B) Περιοδογράμματα



Εικόνα 3.47 : Χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή της τεχνικής της προς τα πάνω συνέχειας.

3.3.8.3 Παράγωγοι Διευθύνσεων

Αφού έχει εφαρμοστεί το κατάλληλο φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, εφαρμόζεται η τεχνική επεξεργασίας των παραγώγων διευθύνσεων. Στην Εικόνα 3.48 παρουσιάζονται οι χάρτες πρώτης παραγώγου για διευθύνσεις από 90° μέχρι 0° μοίρες και οι αντίστοιχοι χάρτες της δεύτερης παραγώγου. Είναι γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή της πρώτης παραγώγου (μεταβατική ζώνη) και της δεύτερης παραγώγου (υψηλές τιμές μεταβολής), παρατηρείται πολύ καλή οριοθέτηση του αγωγού σε διεύθυνση 90 μοίρες (κάθετα στη διεύθυνση του αγωγού) ενώ παράλληλα φαίνεται χαρακτηριστικά ότι όσο μεταβάλλεται η γωνία διεύθυνσης σε σχέση με τη διεύθυνση του στόχου, τόσο ελαττώνεται η εμφάνιση των ορίων του αγωγού στους αντίστοιχους χάρτες.



Εικόνα 3.48 : Χάρτες βαρυτικής ανωμαλίας που προκύπτουν από την εφαρμογή της πρώτης και δεύτερης παραγώγου διαφόρων διευθύνσεων.

Επομένως, μεταβάλλοντας τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου φίλτρου, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της αποτύπωσης των ορίων του αγωγού.

3.3.9 Αντιστροφή Δεδομένων Βαρυτικής Διασκόπησης

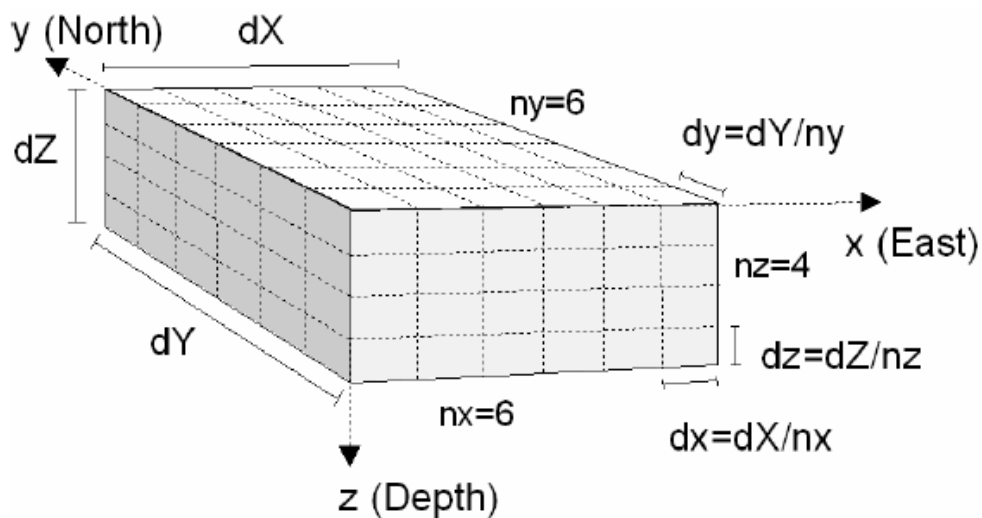
Οι μετρήσεις του βαρυτικού πεδίου αποτελούν μια ισχυρή μέθοδο για τη μελέτη του εσωτερικού της Γης. Όπως είναι γνωστό, στις γεωφυσικές έρευνες η κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει το βαρυτικό πεδίο είναι η πυκνότητα. Οι σχετικές μετρήσεις που

πραγματοποιούνται στη γεωφυσική, έχουν ως στόχο τον υπολογισμό της διαφοράς της βαρυτικής επιτάχυνσης σε σχέση με ένα σταθερό σημείο.

Το μετρούμενο βαρυτικό πεδίο, φυσικά, δεν είναι σταθερό. Η τοπογραφία και η κατανομή της διαφοροποίησης των πυκνοτήτων στο υπέδαφος καθορίζουν το μέγεθος και τη χωρική μορφή της βαρυτικής ανωμαλίας. Πρακτικά, η ερμηνεία των βαρυτικών μετρήσεων που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια του εδάφους είναι *ένα πρόβλημα αντιστροφής*. Κύριος στόχος αποτελεί η κατασκευή ενός μοντέλου του οποίου η κατανομή των πυκνοτήτων να ικανοποιεί και να εξηγεί τις μετρούμενες τιμές.

Για τη διαδικασία αντιστροφής των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Grablox (Pirttijarvi, 2005).

Το λογισμικό Grablox υπολογίζει το βαρυτικό πεδίο ενός μοντέλου γεωμετρίας ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου (3d block model). Στην Εικόνα 3.49 παρουσιάζεται αυτό το μοντέλο, το οποίο χωρίζεται σε μικρότερα τριδιάστατα ορθογώνια κελιά.



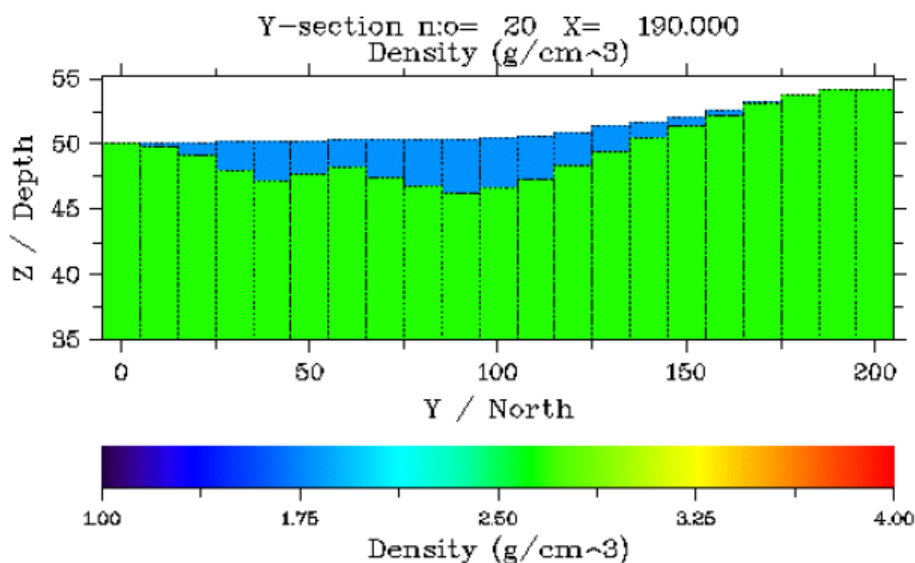
Εικόνα 3.49: Το τριδιάστατο παραλληλεπίπεδο μοντέλο που προσεγγίζει την περιοχή υπό διερεύνηση, υποδιαιρεμένο σε μικρότερα κελιά (Pirttijarvi 2005).

Με τη μέθοδο της αντιστροφής επιχειρείται η βελτιστοποίηση των τιμών της πυκνότητας των μεμονωμένων μικρότερων κελιών έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών βαρύτητας να ελαχιστοποιείται.

Το λογισμικό Grablox μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλης αλλά και σε μικρής κλίμακας έρευνες όπως είναι η μικροβαρυτομετρία.

Η κατανομή των τιμών βαρύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γεωλογική ερμηνεία αλλά, επιπλέον, για τον εντοπισμό της θέσης και του βάθους ενός υπόγειου κενού.

Στην Εικόνα 3.50 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της αντιστροφής μικροβαρυτικών δεδομένων με το πρόγραμμα Grablox, από γεωφυσική έρευνα σε περιοχή της νότιας Φιλανδίας με στόχο τον προσδιορισμό του πάχους του υπερκείμενου στρώματος και του βάθους του βραχώδους υποβάθρου (Elo S., 2006).



Εικόνα 3.50: Παράδειγμα διδιάστατης τομής ερμηνείας με το λογισμικό Grablox από μικροβαρυτική εφαρμογή στη νότια Φιλανδία (Elo S., 2006).

Παρόλα αυτά, τα βαρυτικά δεδομένα δεν μπορούν να ερμηνευτούν μονοσήμαντα και για αυτό πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη προσοχή όταν εκτιμάται η γεωλογική αξιοπιστία των βαρυτικών μοντέλων ερμηνείας. Είναι γεγονός ότι για ένα σύνολο μετρήσεων μπορεί να αντιστοιχούν περισσότερα από ένα μοντέλα ερμηνείας.

Ωστόσο, η πληροφορία από άλλες γεωφυσικές μεθόδους, είτε από άλλα γεωτεχνικά στοιχεία π.χ. γεωτρήσεις, μπορεί να περιορίσουν τις βέλτιστες λύσεις παρέχοντας μεγαλύτερη αξιοπιστία στο τελικό μοντέλο ερμηνείας.

Στόχος της συγκεκριμένης εφαρμογής αποτελεί η αντιστροφή των βαρυτικών μετρήσεων που ελήφθησαν για τον εντοπισμού του υπόγειου αγωγού και η διερεύνηση και αξιολόγηση των μοντέλων ερμηνείας, που θα προκύψουν όσο αφορά την ικανότητα τους να οριοθετούν το στόχο.

3.3.9.1 Διαδικασία Αντιστροφής

Με τη χρήση του λογισμικού Grablox είναι δυνατή η αντιστροφή μικροβαρυτικών δεδομένων τα οποία προέρχονται είτε από ένα μόνο βαρυτικό προφίλ, είτε από ένα τριδιάστατο κάναβο μετρήσεων. Επομένως, στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι δυνατή η αντιστροφή και η ερμηνεία του συνόλου των μετρήσεων.

Το λογισμικό Grablox παρέχει μια εύκολη σχετικά μέθοδο για τον καθορισμό μιας λύσης σε ένα τριδιάστατο πολύπλοκο πρόβλημα. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις αντιστροφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Είτε οι πυκνότητες των κελιών βελτιστοποιούνται διατηρώντας σταθερό το μέγεθος τους, είτε αντίθετα, το ύψος των κελιών βελτιστοποιείται ενώ οι τιμές πυκνότητας τους παραμένουν σταθερές.

Η αντιστροφή των βαρυτικών δεδομένων έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός ρεαλιστικού γεωλογικού μοντέλου, του οποίου η απόκριση (forward synthetic response) να συμπίπτει με τις μετρούμενες τιμές με ικανοποιητική ακρίβεια.

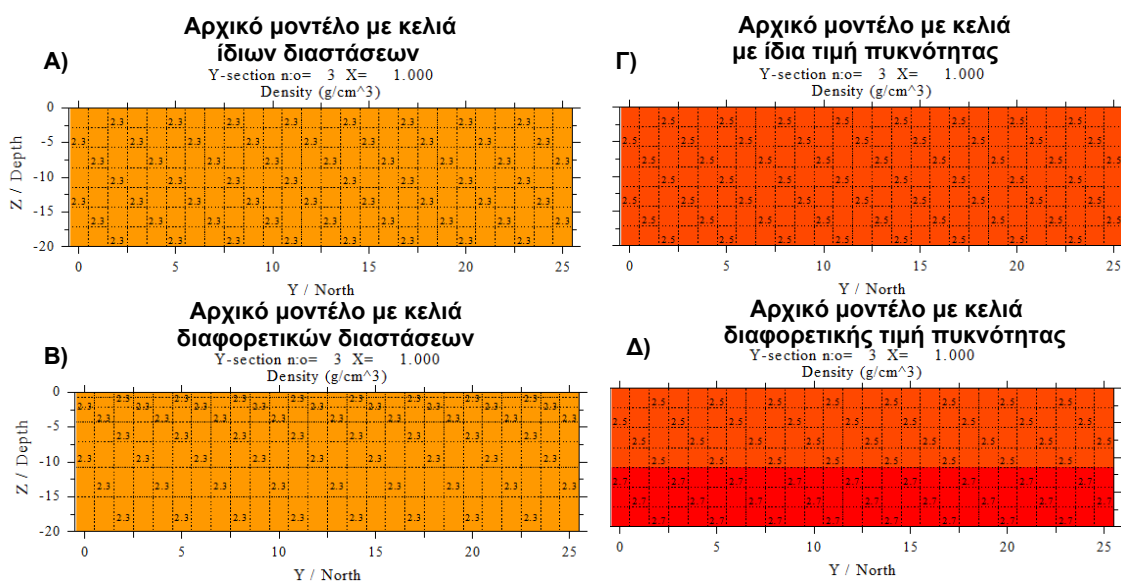
Οι βαρυτικές μετρήσεις πριν εισαχθούν με την κατάλληλη μορφή στο λογισμικό Grablox πρέπει να έχουν ήδη επεξεργαστεί με τις διαδικασίες, οι οποίες αναλύθηκαν στο

Κεφάλαιο 3.3.8. Οι βαρυτικές τιμές, οι οποίες θα ερμηνευτούν, πρέπει να αφορούν κατά το δυνατόν τη βαρυτική ανωμαλία που προκαλεί ο στόχος έρευνας.

Κύριος σκοπός της ερμηνείας αποτελεί η οριοθέτηση και ο προσδιορισμός του βάθους του στόχου και όχι τόσο ο προσδιορισμός της πραγματικής κατανομής πυκνοτήτων των σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής έρευνας.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τον καθορισμό των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου (superblock). Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα του αυτόματου προσδιορισμού των διαστάσεων του αρχικού μοντέλου, τοποθετώντας τα στοιχειώδη κελιά κάτω ακριβώς από τις μετρούμενες τιμές. Φυσικά δίδει την επιλογή στο χρήστη να μεταβάλλει τις διαστάσεις x,y,z αλλά επιπλέον δίδει και τη δυνατότητα χρησιμοποίησης επιπρόσθετων κελιών στα άκρα του μοντέλου, έτσι ώστε να αποφεύγονται μη επιθυμητά φαινόμενα κατά τη διαδικασία της ερμηνείας γνωστά και ως πλευρικές επιδράσεις (edge effects). Επιπλέον, το λογισμικό δίδει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο τρόπων σχηματισμού των κελιών : α) κελιά ίδιου μεγέθους για το σύνολο του αρχικού μοντέλου β) κελιά των οποίων οι διαστάσεις (διάσταση z) αυξάνει για βαθύτερα τμήματα του αρχικού μοντέλου (επιλογή που λαμβάνει υπόψη ότι όσο αυξάνει το βάθος μειώνεται και η διακριτική ικανότητα) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.51.

Εκτός από τις διαστάσεις του αρχικού μοντέλου πρόσθετη παράμετρος, η οποία πρέπει να καθοριστεί είναι η τιμή της πυκνότητας των κελιών. Συνήθως μια αρχική προσέγγιση αποτελεί η χρησιμοποίηση της τιμής της πυκνότητας που έχει υπολογιστεί από τη μέθοδο Nettleton και η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για τις διορθώσεις υψομέτρου και τοπογραφίας.

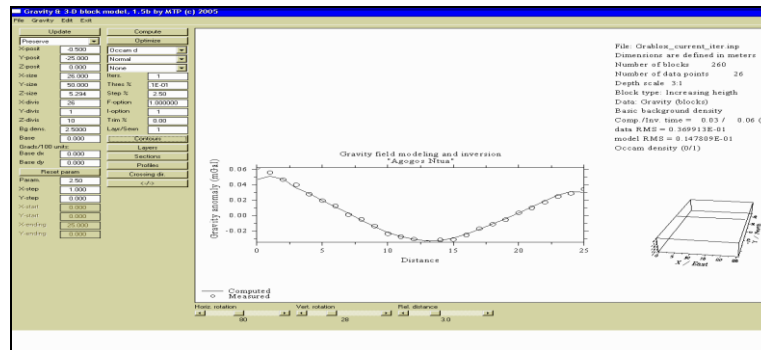


Εικόνα 3.51: Παρουσίαση αρχικών μοντέλων με διαφορετικές παραμέτρους.(A,B,Γ,Δ).

Μια επιπλέον δυνατότητα παρέμβασης του χρήστη αποτελεί η αλλαγή της τιμής πυκνότητας σε μια ή περισσότερες σειρές κελιών ίδιου βάθους, για περιπτώσεις όπου υπάρχουν πληροφορίες, είτε από γεωτρήσεις, είτε από άλλες γεωφυσικές μεθόδους για την ύπαρξη κάποιου άλλου σχηματισμού διαφορετικής πυκνότητας. (Εικ. 3.51)

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα σε περιπτώσεις γνωστών στρωμάτων να παραμένει σταθερή η τιμή της πυκνότητας μιας σειράς κελιών ίδιου βάθους κατά τη διάρκεια της αντιστροφής. Το εύρος μεταβολής της τιμής της πυκνότητας καθορίζεται με επιλογή (layer wise-reset) ενός αριθμού μεταξύ του 0 (παραμένει σταθερή) έως 100 (μεταβάλλεται ελεύθερα).

Στην Εικόνα 3.52 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από τη διαδικασία αντίστροφης των μικροβαρυτικών δεδομένων με το λογισμικό Grablox, όπου φαίνεται χαρακτηριστικά η ταύτιση των μετρούμενων τιμών με τις υπολογιζόμενες τιμές του βαρυτικού μοντέλου. Με μαύρους κύκλους απεικονίζονται τα μετρούμενα δεδομένα και με μαύρη συνεχή γραμμή οι υπολογιζόμενες τιμές.



Εικόνα 3.52: Παράδειγμα αντίστροφης βαρυτικών δεδομένων με το λογισμικό Grablox κατά μήκος μιας γραμμής διασκόπησης. Με μαύρους κύκλους απεικονίζονται οι μετρούμενες τιμές και με μαύρη συνεχή γραμμή οι υπολογιζόμενες τιμές.

3.3.9.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.3.8 μετά από την κατάλληλη επεξεργασία των μετρούμενων βαρυτικών μετρήσεων προκύπτει ο χάρτης βαρυτικής ανωμαλίας, ο οποίος παρουσιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα την ανωμαλία που προκαλεί ο στόχος ενδιαφέροντος, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο υπόγειος αγωγός. Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τον καθορισμό των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου (Εικ. 3.53). Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι παράμετροι του αρχικού μοντέλου οι οποίες επιλέχθηκαν είναι:

- Διαστάσεις : παρεμφερείς με αυτές του καννάβου μετρήσεων

Στην x διάσταση από -4 έως 10 ανά 2m,

Στην y διάσταση από -0.5 έως 25.5 ανά 1m

Στην z διάσταση από 0 έως 7 ανά 1m, με σταθερό ύψος κελιών

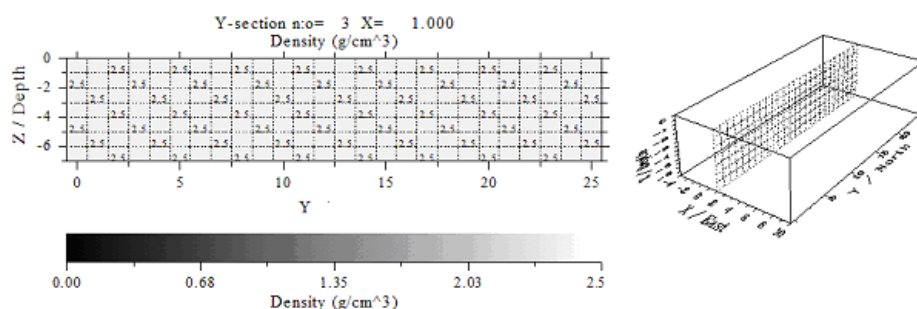
- Τιμή πυκνότητας : 2.52 gr/cm^3

Είναι η τιμή που υπολογίστηκε από τη μέθοδο Nettleton και χρησιμοποιήθηκε για τις μικροβαρυτικές διορθώσεις.

- Ίδια τιμή πυκνότητας για όλα τα κελιά, με ελάχιστο και μέγιστο όριο επιτρεπόμενης μεταβολής

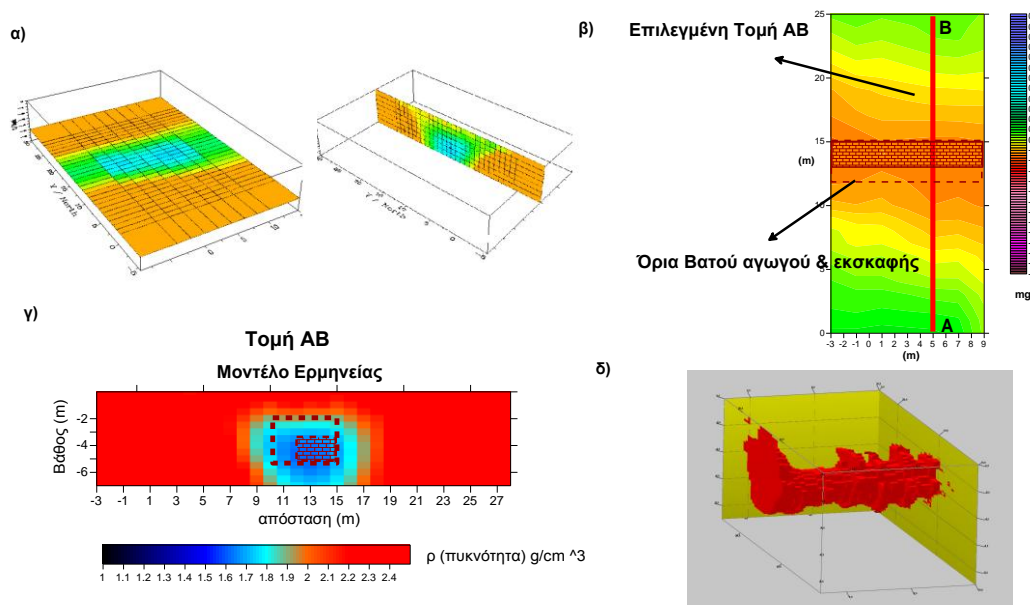
Η τιμή της πυκνότητας όλων των κελιών είχε τη δυνατότητα να μεταβάλλεται πλήρως (100%), μεταξύ όμως των τιμών 0 έως 2.52 gr/cm^3 .

Τα όρια αυτά των ελάχιστων και μέγιστων τιμών πυκνότητας ορίσθηκαν για να είναι δυνατή η δημιουργία ενός γεωφυσικού μοντέλου το οποίο να προσεγγίζει όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερα τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής.



Εικόνα 3.53: Απεικόνιση του αρχικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό του υπόγειου αγωγού.

Τέλος εφαρμόστηκαν οι τεχνικές αντιστροφής οι οποίες έδωσαν το τελικό μοντέλο ερμηνείας της τριδιάστατης κατανομής της πυκνότητας. Η διαφορά μεταξύ υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών (Rms error) ήταν της τάξεως του 5%. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, λόγω των περιορισμένων γραφικών δυνατοτήτων του Grablox, χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω τα προγράμματα Bloxer και Surfer. Στην Εικόνα 3.54 (α) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της πυκνότητας σε επίπεδο βάθους 4m και σε κάθετη τομή με την κατανομή της πυκνότητας στη θέση $x=5$ ως προς το βάθος (λογισμικό Grablox), όπου οριοθετείται με ικανοποιητική ακρίβεια η θέση του υπόγειου αγωγού.



Εικόνα 3.54 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων της αντιστροφής των μικροβαρυτικών δεδομένων στην περιοχή έρευνας : α) Η χωρική κατανομή της πυκνότητας σε βάθος 4m και ως προς το βάθος για τη γραμμή $\chi=3$ β) Η θέση της τομής ΑΒ γ) Η κατανομή της πυκνότητας ως προς το βάθος της γραμμής ΑΒ δ) Τριδιάστατη απεικόνιση των χαμηλών τιμών πυκνότητας, οι οποίες σχετίζονται με το στόχο.

Επιπλέον στην Εικόνα 3.54 (γ) εμφανίζεται με τη βοήθεια του λογισμικού Surfer το μοντέλο ερμηνείας από τη διαδικασία της αντιστροφής της τομής AB (Εικ. 3.54 (β)) όσο και τα όρια του αγωγού και της εκσκαφής. Είναι εμφανές ότι το μοντέλο ερμηνείας οριοθετεί το στόχο έρευνας με επαρκή ευκρίνεια. Επιπλέον συνδυάζοντας όλες τις τιμές του μοντέλου ερμηνείας και επιλέγοντας έπειτα αυτές που παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές πυκνότητας, προκύπτει το μοντέλο της Εικόνας 3.54 (δ) όπου οριοθετείται το σύνολο των τιμών χαμηλής πυκνότητας, οι οποίες σχετίζονται με την παρουσία του αγωγού. Το συγκεκριμένο μοντέλο ερμηνείας δημιουργήθηκε με το λογισμικό Rockware.

3.4 Εφαρμογή Μαγνητικής Μεθόδου

3.4.1 Στόχος Πειράματος

Για να είναι δυνατός ο εντοπισμός ενός υπόγειου ανοίγματος με τη μέθοδο της μαγνητικής μεθόδου πρέπει να υφίσταται σημαντική διαφορά μεταξύ της μαγνητικής επιδεκτικότητας του στόχου και του περιβάλλοντος σχηματισμού. Φυσικά για να είναι αυτό εφικτό, πρέπει το πέτρωμα που «φιλοξενεί» το υπόγειο άνοιγμα (κενό) να παρουσιάζει μεγάλη μαγνητική επιδεκτικότητα. Οι σχηματισμοί, όμως, που συναντώνται συνήθως σε μικρού βάθους εφαρμογές (ιζηματογενείς) δεν παρουσιάζουν μεγάλη μαγνητική επιδεκτικότητα. Για αυτό συνήθως η μαγνητική μέθοδος εφαρμόζεται για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων που προέρχονται από ανθρώπινη δραστηριότητα. Η ύπαρξη του μεταλλικού οπλισμού στις περιπτώσεις εντοπισμού στοών και μεταλλευτικών φρεάτων, ή ακόμη η μεταλλική φύση των υλικών κατασκευής στις περιπτώσεις υπόγειων αγωγών και δεξαμενών, καθιστούν τη μαγνητική μέθοδο πολύ αποτελεσματική.

Κύριος στόχος του συγκεκριμένου πειράματος αποτελεί η επιβεβαίωση της ύπαρξης μεταλλικού οπλισμού στα τοιχώματα του υπόγειου αγωγού.

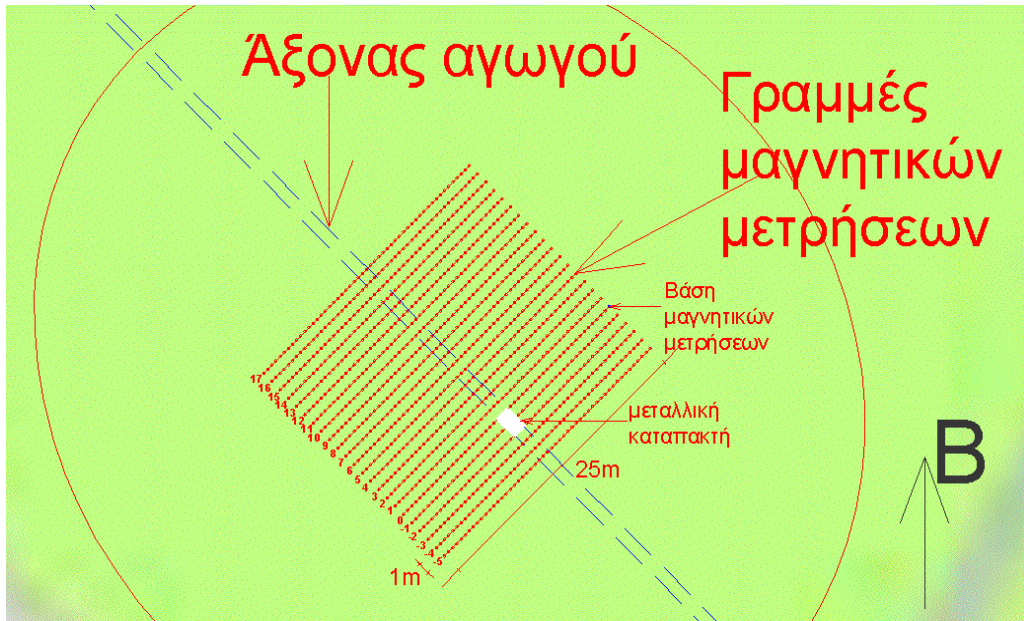
Επιπλέον σκοπός αποτελεί η περαιτέρω αξιολόγηση της μεθόδου όσον αφορά :

- Την ικανότητα της στην οριοθέτηση του αγωγού.
- Την αξιολόγηση της μεθόδου της διαφορικής μαγνητομέτρησης.
- Την επίδραση των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας στη μορφή του τελικού χάρτη μαγνητικών ανωμαλιών.
- Τη διερεύνηση των επιπλέον πληροφοριών που μπορεί να προκύψουν από την εφαρμογή της μαγνητικής μεθόδου, σε σχέση με τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους.

3.4.2 Εργασίες Υπαίθρου-Λήψη Μετρήσεων

Για τον εντοπισμό της θέσης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού πραγματοποιείται στην υπό έρευνα περιοχή, μαγνητική διασκόπηση. Αρχικά δημιουργείται κάνναβος διαστάσεων 25x22m, αποτελούμενος από 23 παράλληλες γραμμές μήκους 25 m με διεύθυνση κάθετα στην εκτιμώμενη διεύθυνση του αγωγού. Οι γραμμές αυτές ισαπέχουν πλευρικά κατά 1 m, ενώ κατά μήκος τους ορίζονται σημεία μετρήσεων ανά 0.5 m (Εικ. 3.55). Δημιουργούνται επομένως 1173 σημεία παρατήρησης, στα οποία θα μετρηθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου της γης.

Ένα από τα σημεία του καννάβου επιλέχθηκε ως βάση των μετρήσεων για τη διόρθωση των ημερήσιων μεταβολών και της πορείας του οργάνου. Στο σταθμό βάσης πραγματοποιούταν λήψη μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα.(Σχεδόν κάθε 45 λεπτά).



Εικόνα 3.55 : Κάνναβος μαγνητικών μετρήσεων σε σχέση με τη διεύθυνση του αγωγού.

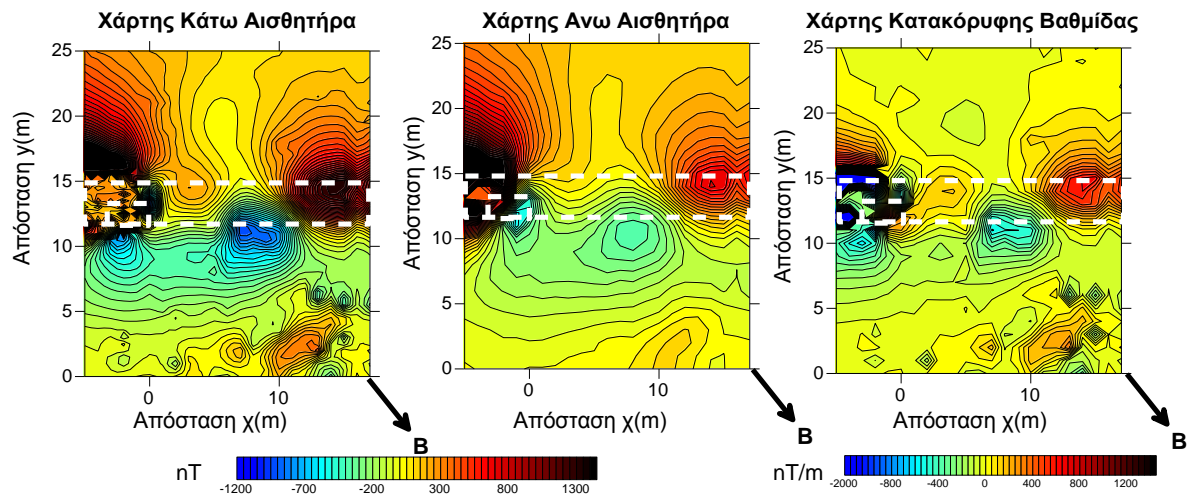
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της διαφορικής μαγνητομέτρησης. Σε κάθε σημείο παρατήρησης μετρήθηκε η ολική τιμή του μαγνητικού πεδίου της γης συγχρόνως σε δύο διαφορετικές υψομετρικές στάθμες, με τη χρησιμοποίηση δύο αισθητήρων γνωστής μεταξύ τους απόστασης (μέθοδος διαφορικής μαγνητομέτρησης). Ο πρώτος αισθητήρας βρίσκεται σε απόσταση 0.70 m από την επιφάνεια του εδάφους και ο δεύτερος 1.4 m ψηλότερα από τον πρώτο (Φωτ. 3.3).



Φωτογραφία 3.3: Λήψη μαγνητικών μετρήσεων με τη μέθοδο της διαφορικής μαγνητομέτρησης στο ύπαιθρο.

Η επιφανειακή μεταλλική καταπακτή που καλύπτει το φρεάτιο επίσκεψης αναμένεται να παρουσιάζει υψηλή μαγνήτιση, κάτι που αποτελεί ένα είδος «θορύβου» για τη μαγνητική διασκόπηση, στην προσπάθεια εντοπισμού του υπόγειου αγωγού.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε στη μαγνητική διασκόπηση είναι το G-856 AX Proton Precession Magnetometer της Geometrics. Το συγκεκριμένο όργανο είναι ένα πυρηνικό μαγνητόμετρο, που μετρά το ολικό μαγνητικό πεδίο της γης.



Εικόνα 3.57: Οι διορθωμένοι χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας (diurnal corrections) του κάτω, άνω αισθητήρα και της κατακόρυφης βαθμίδας.

Στους τρεις χάρτες διακρίνεται μια περιοχή χαμηλών τιμών μαγνητικής έντασης στο βόρειο-βορειοανατολικό τμήμα, σε αντίθεση με μια περιοχή υψηλών μαγνητικών εντάσεων στο νότιο-νοτιοδυτικό τμήμα του χάρτη. Οι δύο αυτές περιοχές συνιστούν ένα μαγνητικό δίπολο, το οποίο αποτελεί την ευρύτερη μαγνητική ανωμαλία του χάρτη.

Η μαγνητική ανωμαλία υποδηλώνει την ύπαρξη ενός σώματος αυξημένης μαγνητικής επιδεκτικότητας, με διεύθυνση τον άξονα που διαχωρίζει τις περιοχές υψηλής και χαμηλής μαγνητικής έντασης. Επομένως, η δημιουργία αυτής της μαγνητικής ανωμαλίας φαίνεται να οφείλεται περισσότερο στον οπλισμό των τοιχωμάτων του αγωγού και λιγότερο στη μηδενική μαγνητική επιδεκτικότητα του κενού. Ο αγωγός αναμένεται να βρίσκεται περίπου στο όριο των δύο αυτών περιοχών.

Πέραν της ανωμαλίας που οφείλεται στην παρουσία του αγωγού, παρουσιάζονται και άλλες ανωμαλίες μικρότερου μήκους κύματος, οι οποίες δυσχεραίνουν την καλή αποτύπωση του στόχου. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι στο χάρτη του άνω αισθητήρα οι ανωμαλίες μικρού μήκους κύματος τείνουν να εξαλειφτούν σε σχέση με το χάρτη του κάτω αισθητήρα. Ο χάρτης της κατακόρυφης βαθμίδας εστιάζεται και οριοθετεί καλύτερα τις μικρές μήκους κύματος ανωμαλίες.

3.4.4 Τεχνικές Επεξεργασίας Μετρήσεων

Όπως και στην περίπτωση των βαρυτικών μετρήσεων έτσι και στη μαγνητική μέθοδο, για να είναι δυνατή η μείωση του υψίσυχνου θορύβου και η καλύτερη αποτύπωση της ανωμαλίας ενδιαφέροντος εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές επεξεργασίας. Οι κυριότερες από αυτές και οι οποίες θα εφαρμοστούν στα δεδομένα του συγκεκριμένου πειράματος είναι :

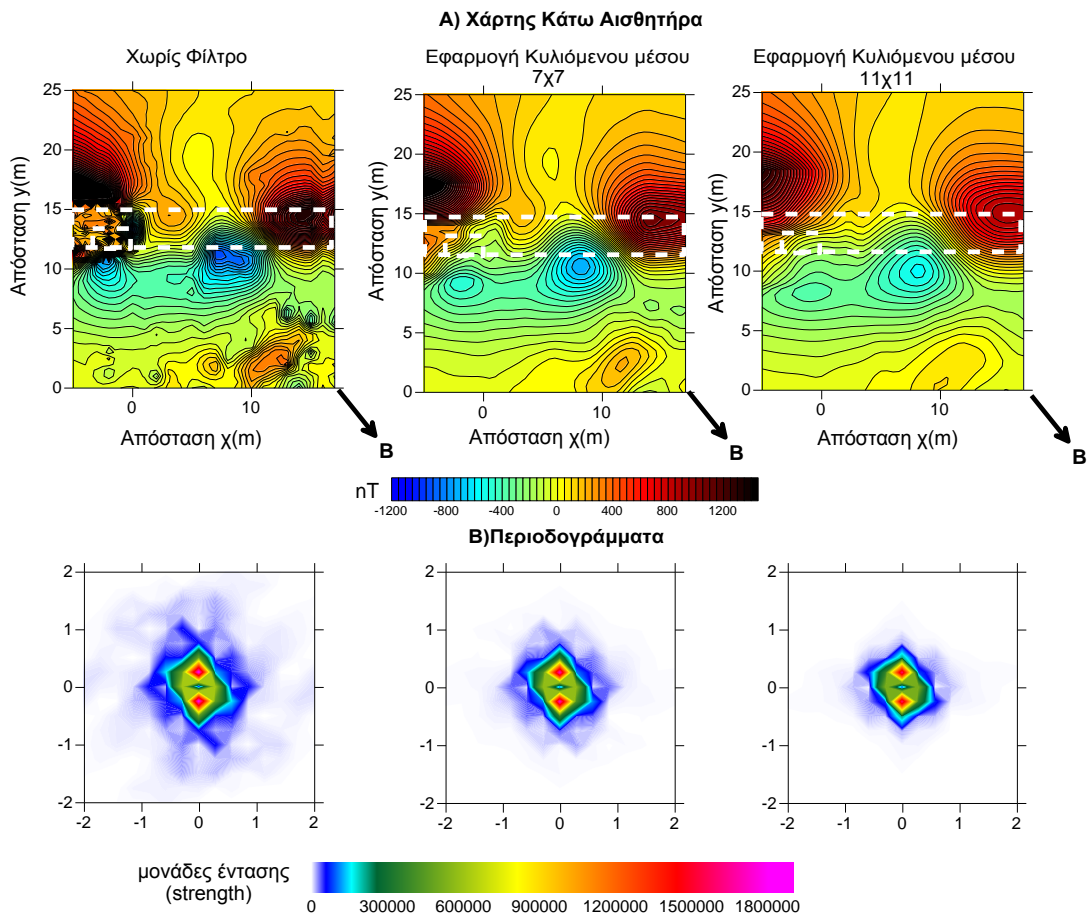
- Διαχωρισμός μικρής από μεγάλη κλίμακα ανωμαλία (Regional-residual separation).
- Φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων (low pass filters).
- Προς τα άνω συνέχεια (upward continuation).
- Αναγωγή στον πόλο (Reduction to the pole).
- Ψευδοβαρυτική μετατροπή (Pseudogravity Transformation).
- Παράγωγοι διευθύνσεων (Directional Derivatives)
- Κατακόρυφη παράγωγος (Vertical Gradient).

Όσον αφορά στο διαχωρισμό της μικρής από τη μεγάλη κλίμακας ανωμαλία, στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω του μεγάλου μεγέθους του στόχου σε σχέση με το ανάπτυγμα του καννάβου μετρήσεων, η μεγάλη κλίμακας ανωμαλία πρακτικά αφορά στην ανωμαλία που προκαλεί ο ίδιος ο αγωγός και δεν αφορά κάποια άλλη βαθύτερη δομή. Για αυτό το λόγο δεν θα εφαρμοστεί κάποια τεχνική διαχωρισμού και ως εκ τούτου ακολουθεί το επόμενο στάδιο που περιλαμβάνει την περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων με τις υπόλοιπες τεχνικές επεξεργασίας.

Οι διάφορες τεχνικές επεξεργασίας εφαρμόστηκαν στα δεδομένα του κάτω, άνω αισθητήρα και στην κατακόρυφη βαθμίδα αλλά θα παρουσιαστούν ενδεικτικά ορισμένα χαρακτηριστικά αποτελέσματα, αφού σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι ανάλογα.

3.4.4.1 Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συχνοτήτων (low pass filters)

Στα δεδομένα των δύο αισθητήρων όσο και στην κατακόρυφη βαθμίδα εφαρμόζεται φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (κυλιόμενος μέσος) διαφόρων μεγεθών. Στην Εικόνα 3.58 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χάρτες που προκύπτουν με την εφαρμογή του φίλτρου στα διορθωμένα (diurnal) δεδομένα του κάτω αισθητήρα.



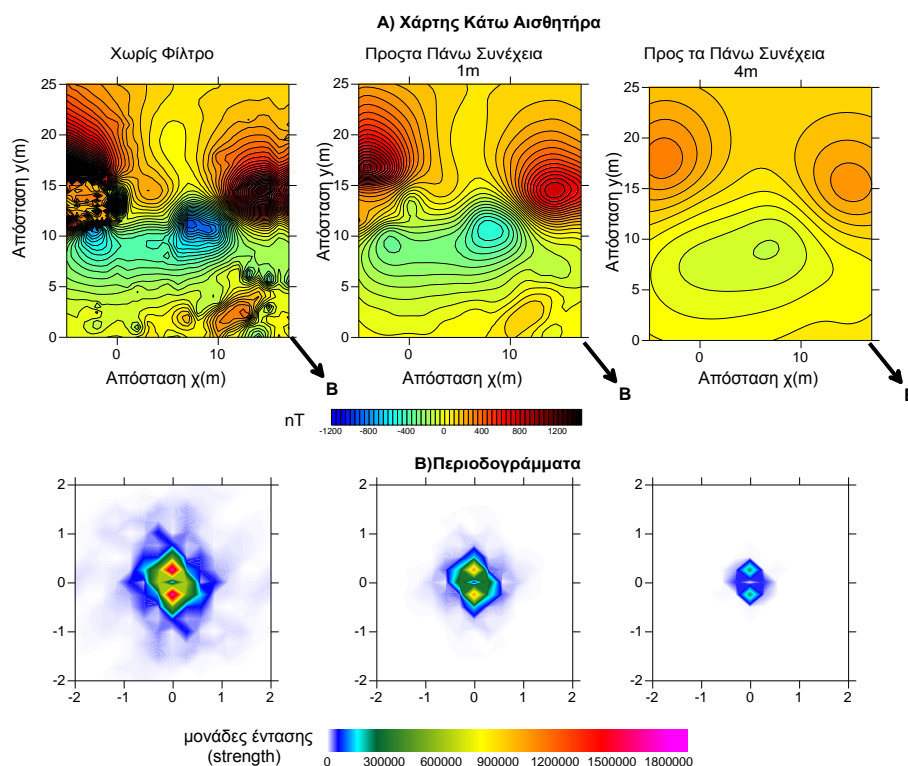
Εικόνα 3.58: Εφαρμογή φίλτρων διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων διαφόρων μεγεθών και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα.

Στους χάρτες αυτούς φαίνεται εντονότερα η μαγνητική ανωμαλία που προκύπτει λόγω της ύπαρξης του αγωγού. Διακρίνονται εμφανώς δύο περιοχές, μία με χαμηλές και μία με υψηλές τιμές μαγνητικής έντασης, στο διαχωριστικό όριο των οποίων βρίσκεται κατά προσέγγιση ο άξονας του αγωγού. Οι έντονες τοπικές υψίσυχνες ανωμαλίες που δεν σχετίζονται με την παρουσία του αγωγού και δυσχέραιναν την ερμηνεία τείνουν να εξαλειφθούν. Παρατηρώντας τα αντίστοιχα περιοδογράμματα φαίνεται χαρακτηριστικά η μείωση των υψίσυχνων ανωμαλιών με την εφαρμογή των φίλτρων διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για τους χάρτες του άνω αισθητήρα και της κατακόρυφης βαθμίδας.

3.4.4.2 Προς τα Άνω Συνέχεια (upward continuation)

Στην Εικόνα 3.59 φαίνεται η επίδραση της εφαρμογής της προς τα άνω συνέχειας (Upward Continuation) στο χάρτη των διορθωμένων τιμών του κάτω αισθητήρα, η οποία περιορίζει τις υψίσυχνες τοπικές ανωμαλίες και τονίζει περισσότερο την ευρύτερη ανωμαλία της περιοχής, που οφείλεται στην ύπαρξη του αγωγού.

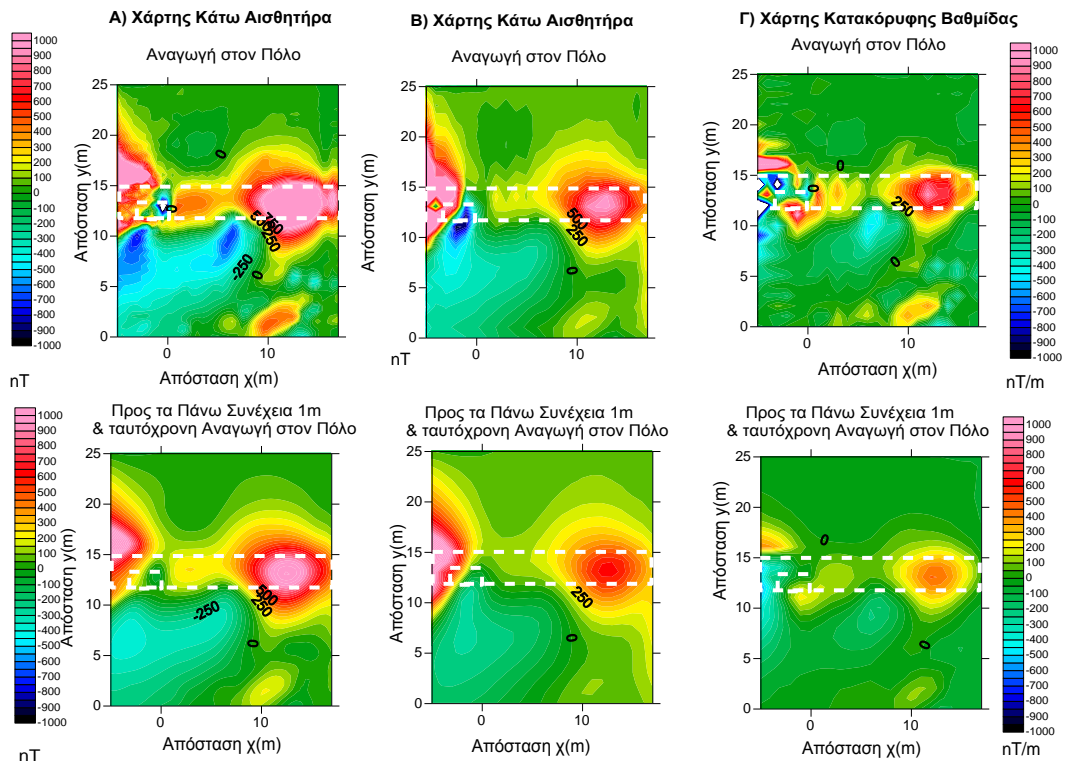
Με αυτή τη διαδικασία οι μετρήσεις μεταφέρονται σε ένα άλλο επίπεδο που βρίσκεται 4m υψηλότερα από το πραγματικό επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται εξομάλυνση των αρχικών δεδομένων, καθώς, με την απομάκρυνση από την πηγή της διαταραχής, οι υψίσυχνες τοπικές ανωμαλίες εξασθενούν και απομένει η ευρύτερη ανωμαλία. Το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με αυτό που προκύπτει από την εφαρμογή φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων. Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι παράλληλα με την απομάκρυνση του «θορύβου», υπάρχει κίνδυνος απώλειας και χρήσιμων πληροφοριών, κατά την αναγωγή των μετρήσεων σε ένα άλλο επίπεδο.



Εικόνα 3.59 : Εφαρμογή της προς τα άνω συνέχειας και αντίστοιχα περιοδογράμματα.

3.4.4.3 Αναγωγή στον Πόλο (Reduction to the pole)

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η τεχνική της αναγωγής στον πόλο (Reduction to the pole). Η τεχνική της αναγωγής στον πόλο μετατρέπει μια μαγνητική ανωμαλία που έχει καταγραφεί σε κάποιο τυχαίο γεωγραφικό πλάτος, στην ανωμαλία που θα προέκυπτε αν το μαγνητικό πεδίο ήταν κατακόρυφο, όπως είναι στους πόλους. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει σχεδόν συμμετρική ανωμαλία, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται ο προσδιορισμός της θέσης του σώματος που την προκαλεί και που, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι ο αγωγός.

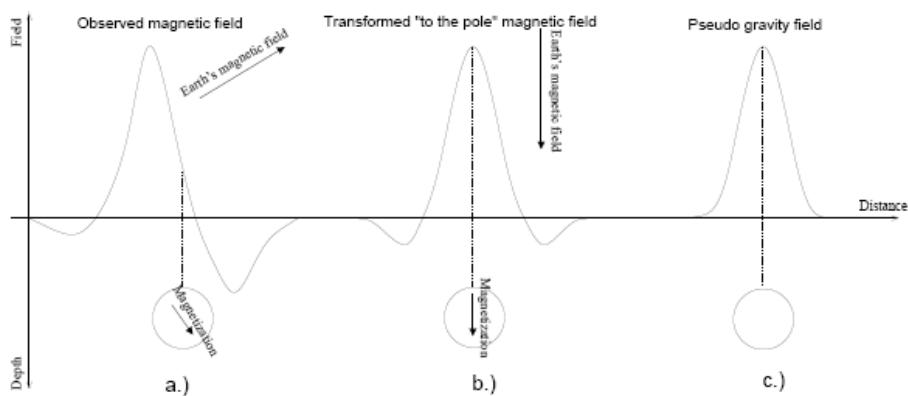
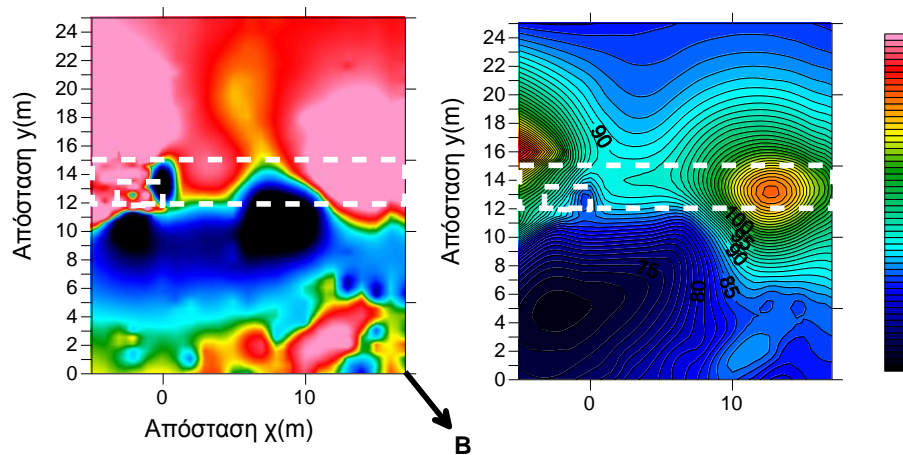


Εικόνα 3.60: Εφαρμογή της τεχνικής της αναγωγής στον πόλο

Στην Εικόνα 3.60 παρουσιάζονται οι χάρτες που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής στα δεδομένα του κάτω, άνω αισθητήρα και της κατακόρυφης βαθμίδας. Επιπλέον, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχοι χάρτες με την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής και την παράλληλη εφαρμογή της τεχνικής της προς τα άνω συνέχειας (1m). Σε όλους τους χάρτες εμφανίζεται η ανωμαλία που προκύπτει από την ύπαρξη του αγωγού, οριοθετώντας τη θέση του. Επιπλέον, παρατηρείται και η ανωμαλία λόγω της ύπαρξης της επιφανειακής μεταλλικής καταπακτής.

3.4.4.4 Ψευδοβαρυτική Μετατροπή (Pseudogravity Transformation)

Στην Εικόνα 3.61 απεικονίζεται η ψευδοβαρυτική ανωμαλία που προκύπτει από τη μαγνητική ανωμαλία των διορθωμένων τιμών του κάτω αισθητήρα. Οι βαρυτικές ανωμαλίες είναι συμμετρικές αν το σώμα που τις δημιουργεί είναι συμμετρικό και διευκολύνουν τον προσδιορισμό της θέσης του σώματος. Επομένως, από την προκαλούμενη συμμετρική ανωμαλία του ψευδοβαρυτικού χάρτη επιτυγχάνεται καλύτερη εκτίμηση για τη θέση του αγωγού. Επιπλέον είναι δυνατή η άμεση σύγκριση της μορφής της ανωμαλίας με την αντίστοιχη ανωμαλία που θα παρείχε η εφαρμογή της μεθόδου της μικροβαρυτομετρίας στην αντίστοιχη περιοχή.

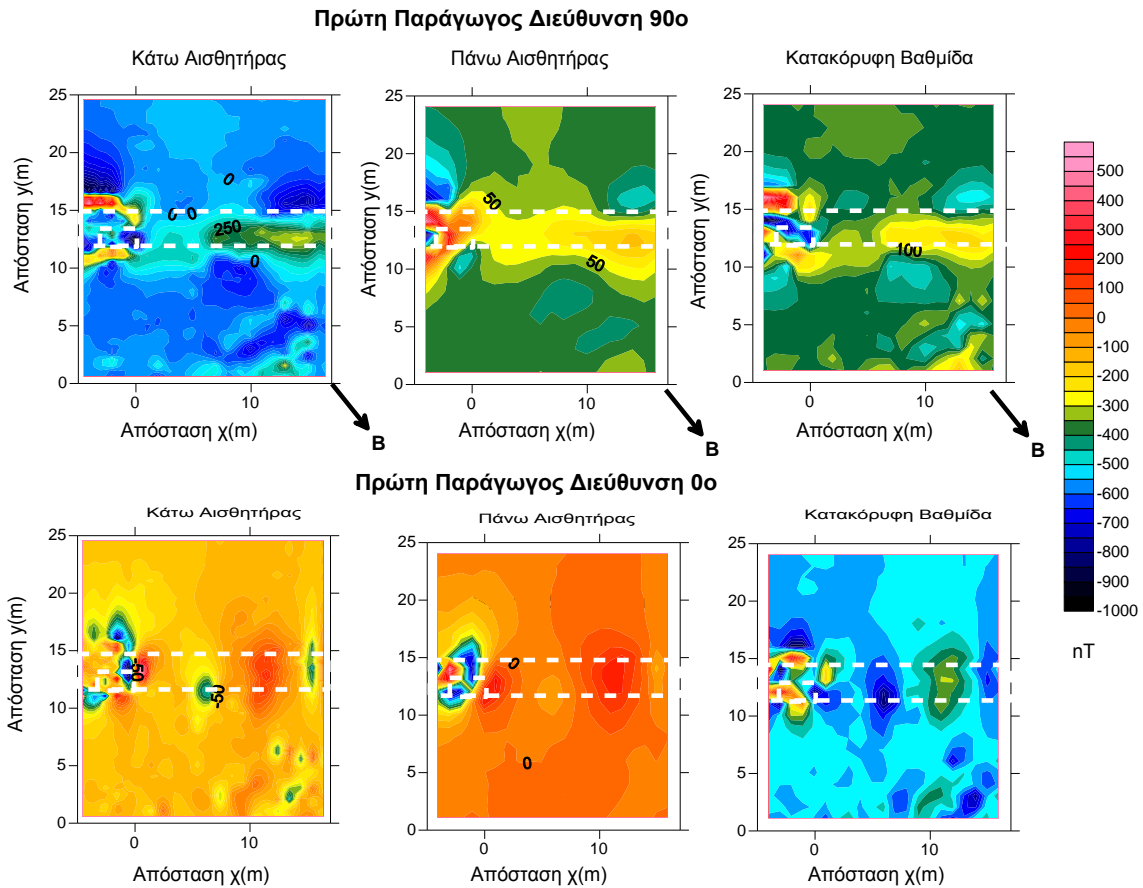


Εικόνα 3.61 : Ψευδοβαρυντική μετατροπή

Η σύγκριση είναι κυρίως ποιοτική αφού για να είναι δυνατή μια ποσοτική εκτίμηση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες παράμετροι κατά το μετασχηματισμό του πεδίου, όπως η ακριβής τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας των σχηματισμών της περιοχής έρευνας.

3.4.4.5 Παράγωγοι Διευθύνσεων

Η εφαρμογή των οριζόντιων παραγώγων προς διάφορες διευθύνσεις, τονίζουν τις υψίσυχνες ανωμαλίες και βοηθούν στον καλύτερο εντοπισμό των ορίων ενός στόχου. Στην Εικόνα 3.62 παρουσιάζεται η εφαρμογή της πρώτης παραγώγου σε διεύθυνση 90^0 και 0^0 , στους χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας του κάτω και άνω αισθητήρα άλλα και στο χάρτη της κατακόρυφης βαθμίδας.

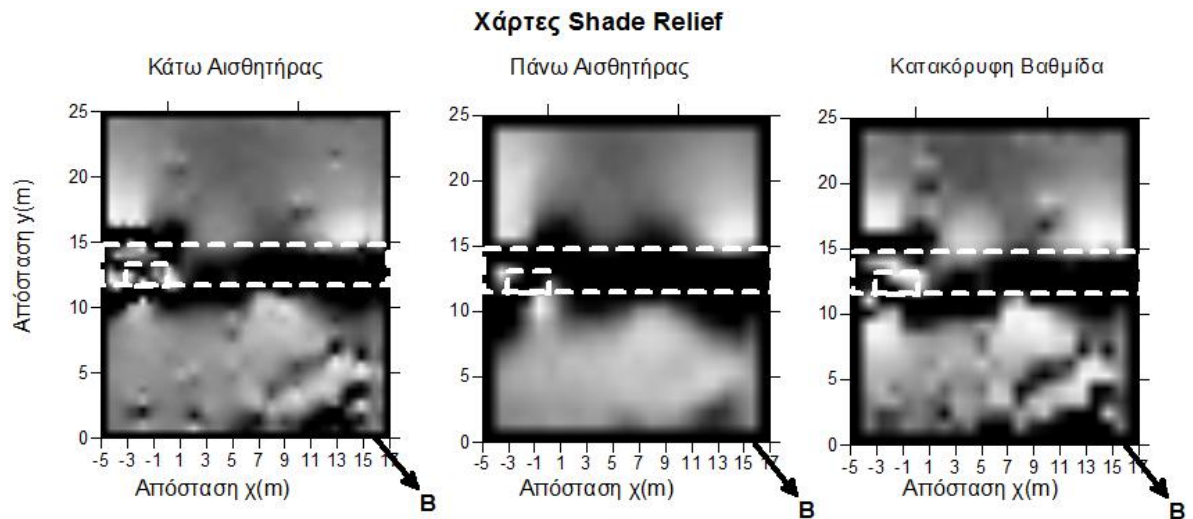


Εικόνα 3.62 : Εφαρμογή της πρώτης παραγώγου σε διεύθυνση 90^ο και 0^ο στους χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας του κάτω και άνω αισθητήρα και στο χάρτη της κατακόρυφης βαθμίδα.

Είναι εμφανές, ότι στην περίπτωση της εφαρμογής της παραγώγου ως προς 90^ο οριοθετείτε με μεγάλη ακρίβεια ο αγωγός ενώ αντίστοιχα στη περίπτωση της εφαρμογής της παραγώγου προς 0^ο τονίζεται περισσότερο η ανωμαλία που οφείλεται στην επιφανειακή καταπακτή.

Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν με την εφαρμογή της τεχνικής της φωτοσκίασης (shade relief). Στους χάρτες φωτοσκίασης (shade relief maps) αποτυπώνεται με τη βοήθεια των χρωματικών αποχρώσεων του λευκού και του μαύρου, η ένταση της αντανάκλασης του φωτός σε μια τοπογραφική επιφάνεια (στη συγκεκριμένη περίπτωση στο χάρτη μαγνητικής ανωμαλίας) που δημιουργείται από σημειακή πηγή φωτός.

Στην Εικόνα 3.63 παρουσιάζονται οι χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας που προέκυψαν με την τεχνική shade relief για τον κάτω και άνω αισθητήρα αλλά και για την κατακόρυφη βαθμίδα. Και στους τρεις χάρτες εντοπίζονται τα όρια του αγωγού με μεγάλη ευκρίνεια.



Εικόνα 3.63: Χάρτες μαγνητικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή της τεχνικής φωτοσκίασης.

3.5 Εφαρμογή Μεθόδου Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων

3.5.1 Στόχος Πειράματος

Από όλες τις γεωφυσικές μεθόδους οι σεισμικές είναι αυτές οι οποίες σχετίζονται περισσότερο με τις μηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών και μπορούν να προσφέρουν πολύ χρήσιμη πληροφορία σε ένα μηχανικό. Η σεισμική μέθοδος η οποία επιλέχθηκε να εφαρμοστεί για τον εντοπισμό του αγωγού είναι αυτή της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων. Κύριοι λόγοι για την επιλογή της ήταν: α) Η μέθοδος μπορεί να εντοπίσει με επιτυχία την αλληλουχία μεταξύ δομών που παρουσιάζουν μεταβάσεις από υψηλές σε χαμηλές ταχύτητες ως προς το βάθος. (το πρόβλημα του τυφλού στρώματος στη σεισμική διάθλαση) β) Η μέθοδος για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιεί οικονομικό και ευέλικτο εξοπλισμό γεγονός που βοηθά πολύ για τη χρησιμοποίησή τους σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές μικρού βάθους. Επιπλέον, τα επιφανειακά κύματα κυριαρχούν στις σεισμικές καταγραφές για τα βάθη ενδιαφέροντος (βασικό πρόβλημα της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης) γ) Η εφαρμογή της μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων είναι υπό διερεύνηση τα τελευταία χρόνια, γεγονός που κάνει ακόμη πιο ενδιαφέρουσα την εφαρμογή της.

Κύριος στόχος του πειράματος αποτελεί:

- Η διερεύνηση της ικανότητας της μεθόδου στον εντοπισμό υπόγειων στόχων και γενικότερα παράπλευρων ανομοιογενειών σε πραγματικές συνθήκες υπαίθρου.
- Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διδιάστατης τεχνικής roll along σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους.

3.5.2 Σχεδιασμός Έρευνας –Λήψη Μετρήσεων

Ο σχεδιασμός της έρευνας με τη μέθοδο της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών κυμάτων είχε ως στόχο τη διερεύνηση της ικανότητας της μεθόδου στον εντοπισμό παράπλευρων ανομοιογενειών (ύπαρξη αγωγού) αλλά και η σύγκριση του μοντέλου ερμηνείας με τα αποτελέσματα των άλλων γεωφυσικών μεθόδων.

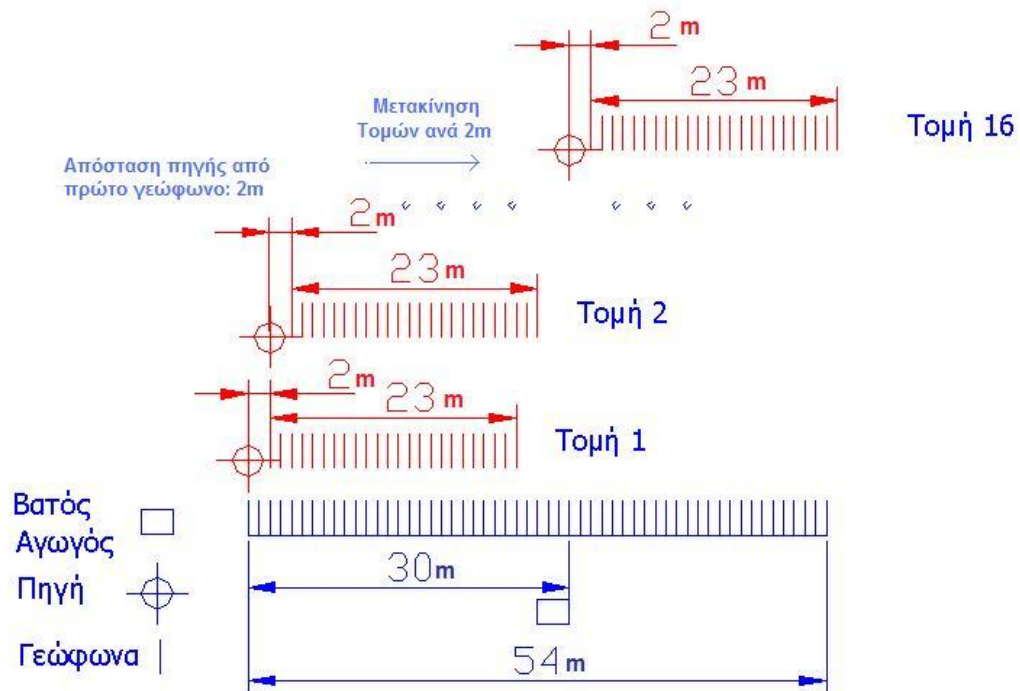
Για να επιτευχθεί αυτό, εφαρμόστηκε η μέθοδος με τη βοήθεια της τεχνικής roll-along κατά μήκος γραμμής διασκόπησης, η οποία τέμνει κάθετα τον αγωγό και βρίσκεται σε αντίστοιχη θέση με τις μετρήσεις των άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Ο σχεδιασμός των παραμέτρων καταγραφής των μετρήσεων έγινε λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέγιστο επιθυμητό βάθος διασκόπησης δεν υπερβαίνει τα 10 μέτρα περίπου αλλά και επιπλέον με βάση τις διαστάσεις του υπόγειου στόχου. Πρακτικά, χρησιμοποιήθηκαν 24 γεώφωνα ιδιοσυχνότητας 4 Hz ανά 1m. Ως σεισμική πηγή χρησιμοποιήθηκε σφυρί 5kg με το σημείο της έκρηξης να βρίσκεται σε απόσταση 2 m από το πρώτο γεώφωνο.

Οι παράμετροι καταγραφής συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 : Παράμετροι καταγραφής του πειράματος των επιφανειακών κυμάτων.

Αριθμός ενεργών γεωφώνων	24
Ιδιοσυχνότητα γεωφώνων	4 Hz
Ρυθμός δειγματοληψίας	1.0 msec
Διάρκεια καταγραφής	1024 msec
Είδος σεισμικής πηγής	Σφύρι 5 kg
Τύπος καταγραφικού	Σεισμογράφος SmartSeis Geometrics

Η συγκεκριμένη διάταξη εφαρμόστηκε αρχικά σε περιοχή εκτός της ζώνης του αγωγού και η οποία μετακινήθηκε σταδιακά ανά δύο μέτρα σταθερά κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης προς την πλευρά του αγωγού, έτσι ώστε να είναι δυνατή η διδιάστατη διασκόπηση της περιοχής έρευνας (Εικ. 3.64). Πραγματοποιήθηκαν, δηλαδή, εκρήξεις σε 16 διαφορετικά σημεία, παρέχοντας το αντίστοιχο σεισμόγραμμα και δίδοντας τη δυνατότητα υπολογισμού της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων ως προς βάθος, θεωρώντας ως θέση της κατανομής το αντίστοιχο κέντρο της διάταξης γεωφώνων σε κάθε έκρηξη. Σε κάθε θέση για την αύξηση της ποιότητας των μετρήσεων και τη μείωση του θορύβου, πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από μία εκρήξεις καταγράφοντας, παράλληλα όλα, τα παραγόμενα σεισμογράμματα (μέθοδος stacking).



Εικόνα 3.64 : Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας του πειράματος και της τεχνικής roll-along.

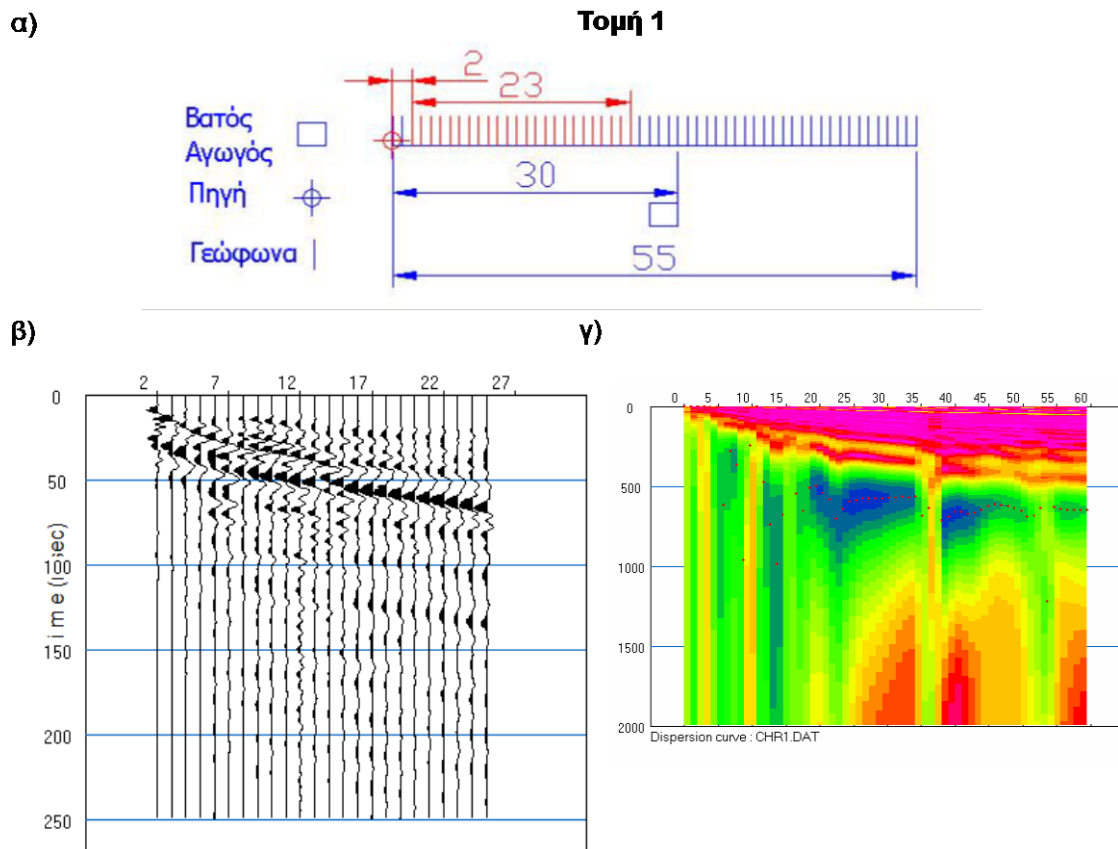
Για να είναι δυνατή η διδιάστατη διασκόπηση της περιοχής έρευνας αρχικά, κάθε τομή ή καλύτερα κάθε στιγμιότυπο, επεξεργάστηκε χωριστά, παρέχοντας τη μονοδιάστατη ερμηνεία. Στο κεφάλαιο 3.5.3 θα παρουσιαστούν διεξοδικά τα αποτελέσματα τη

μονοδιάστατης ερμηνεία κάθε τομής (στιγμιότυπου) και στη συνέχεια θα παρουσιαστεί και η διδιάστατη απεικόνιση της περιοχής έρευνας (Κεφάλαιο 3.5.4).

3.5.3 Μονοδιάστατη Ερμηνεία Σεισμικών Γραμμών Διασκόπησης

Τομή 1

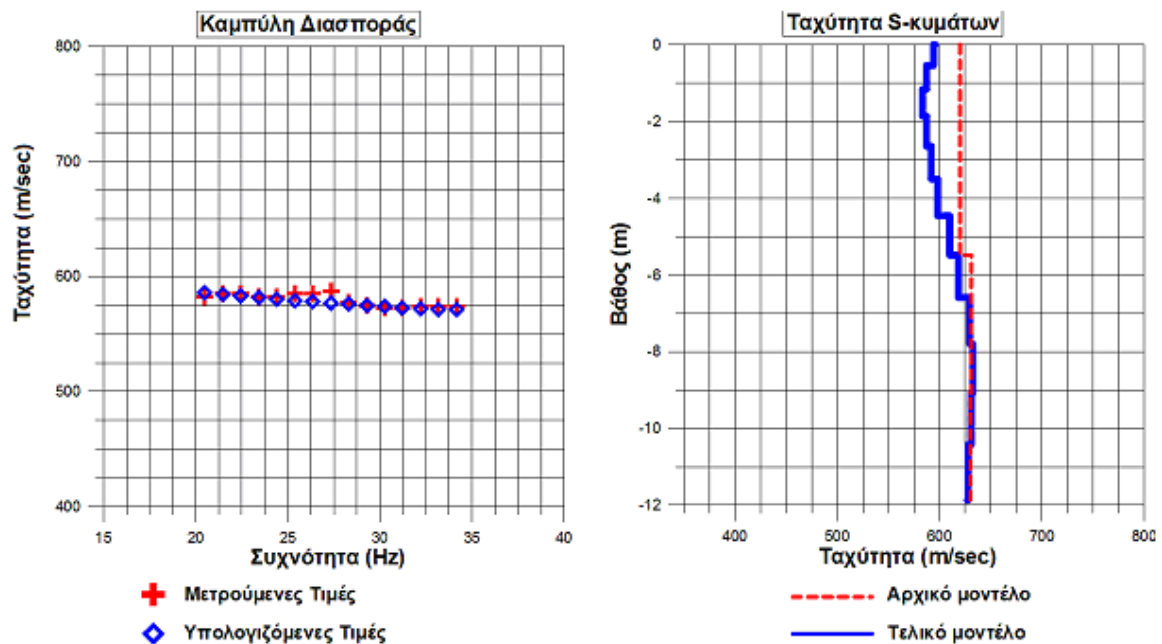
Στην Εικόνα 3.65 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 1 σε σχέση με τον αγωγό. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 0 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 2 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή. Στην τομή αυτή κανένα από τα γεώφωνα δεν βρίσκεται πάνω από τον αγωγό.



Εικόνα 3.65 α) Θέση Τομής 1 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 1 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 1.

Επιπλέον παρουσιάζεται το σεισμόγραμμα της συγκεκριμένης τομής όπου διακρίνονται οι καταγραφές των σεισμικών κυμάτων σε κάθε γεώφωνο ως προς το χρόνο (Εικ. 3.65 (β)). Χρόνος καταγραφής είχε οριστεί στα 1024 msec (παρουσιάζονται οι καταγραφές έως τα 250 msec για λόγους καλύτερης απεικόνισης του σειсмоγράμματος). Από τα σεισμικά δεδομένα με τη βοήθεια κατάλληλων μετασχηματισμών, προκύπτει η καμπύλη διασποράς των επιφανειακών κυμάτων της Εικόνας 3.65 (γ) όπου παρουσιάζεται η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με την ταχύτητα φάσης. Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **Seisimager**. Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες έως 60 Hz. Με κόκκινες τελείες απεικονίζονται τα σχετικά ενεργειακά μέγιστα.

Αφού εφαρμοστεί φίλτρο κυλιόμενου μέσου (median filter) για την επιλογή των σχετικών μέγιστων και επιλεγούν οι συχνότητες που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αξιοπιστία αφαιρώντας εκείνες που μπορεί να χαρακτηρίζουν υψηλότερους τρόπους διάδοσης (higher modes), προκύπτει η καμπύλη διασποράς της Εικόνας 3.66, η οποία αποτελεί και τη βάση για τον επόμενο στάδιο της διαδικασίας, δηλαδή την αντιστροφή των δεδομένων. Οι συχνότητες, οι οποίες ήταν δυνατόν να καθοριστούν με σαφήνεια, κυμαίνονταν από 20 έως 35 Hz δίνοντας τη δυνατότητα διασκόπησης πραγματικού βάθους περίπου 10 μέτρων. (Το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε για όλες τις τομές).



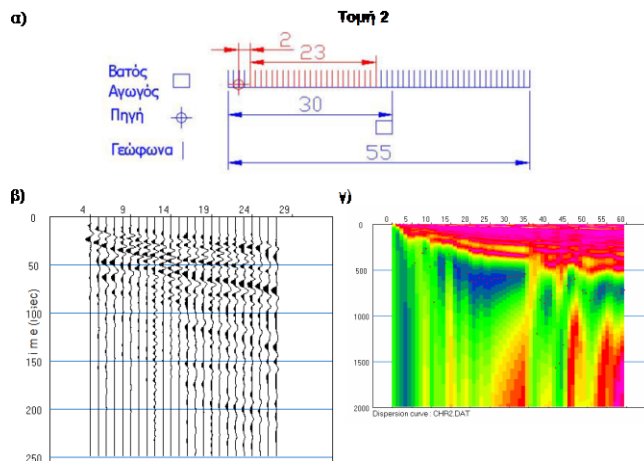
Εικόνα 3.66: Τομή 1-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

Δημιουργώντας ένα αρχικό μοντέλο, το οποίο υπολογίζεται με βάση τις καθορισμένες συχνότητες και την αντίστοιχη ταχύτητα φάσης και μέσω της διαδικασίας αντιστροφής προκύπτει το μοντέλο ερμηνείας, δηλαδή η κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων ως προς το βάθος, για θέση που αντιστοιχεί στο μέσο της τομής έρευνας. Το αρχικό μοντέλο μεταβάλλεται συνεχώς έως η διαφορά μεταξύ των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών της καμπύλης διασποράς να βρίσκεται σε αποδεκτά όρια. Για το αρχικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν 15 οριζόντια στρώματα, το πάχος και η θέση των οποίων ορίστηκαν με βάση τις καθορισμένες συχνότητες από την πειραματική καμπύλη διασποράς με μέγιστο βάθος τα 12 μέτρα.

Παρατηρώντας το μοντέλο ερμηνείας της Τομής 1, (RMS <2%) είναι εμφανές ότι δεν παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα. Πρακτικά παρατηρείται μια ελαφρά αύξηση της ταχύτητας όσο αυξάνει το βάθος διασκόπησης. (Από τα 600 στα 650 m/sec).

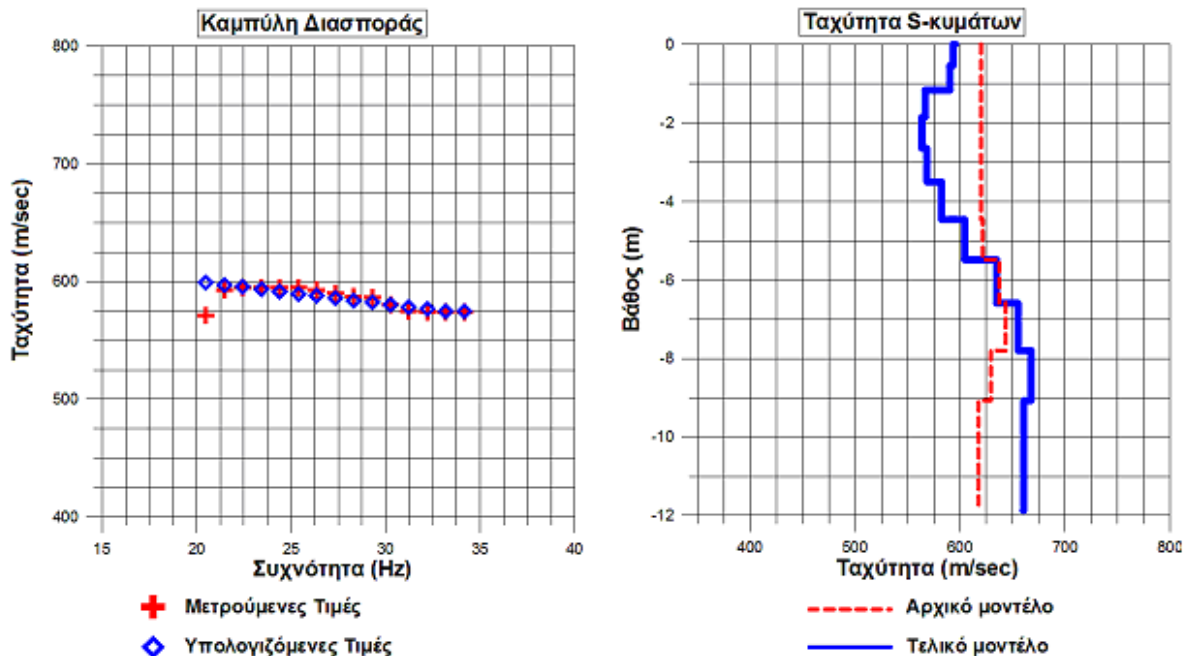
Τομή 2

Στην Εικόνα 3.67 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 2 σε σχέση με τον αγωγό. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 2 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 4 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιάτερα από την Τομή 1. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες από 0 έως 60 Hz.



Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία Εικόνα 3.67: α) Θέση Τομής 2 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 2 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 2.

που αναλύθηκε παραπάνω προκύπτει η καμπύλη διασποράς με βάση την οποία θα ακολουθήσει η περαιτέρω ανάλυση. Και σε αυτήν την περίπτωση επιλέχθηκαν συχνότητες μεταξύ 20 έως 35 Hz με βάση τις οποίες δημιουργήθηκε το αρχικό μοντέλο. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας (Rms < 2%), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.68.



Εικόνα 3.68: Τομή 2-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

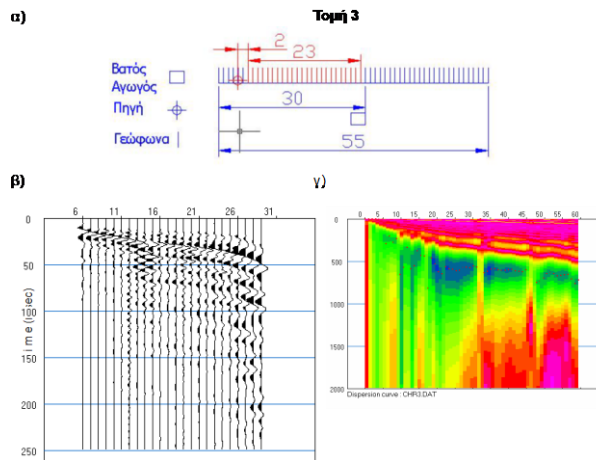
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων στην εικόνα παρατηρείται ότι η ταχύτητα παρουσιάζει ελαφρά μείωση στα πρώτα μέτρα (από τα 600 στα 575 m/sec)

και σταδιακή αύξηση από τα 4 μέτρα περίπου έως τα 7m) όπου και σταθεροποιείται (625 m/sec) μέχρι το μέγιστο βάθος.

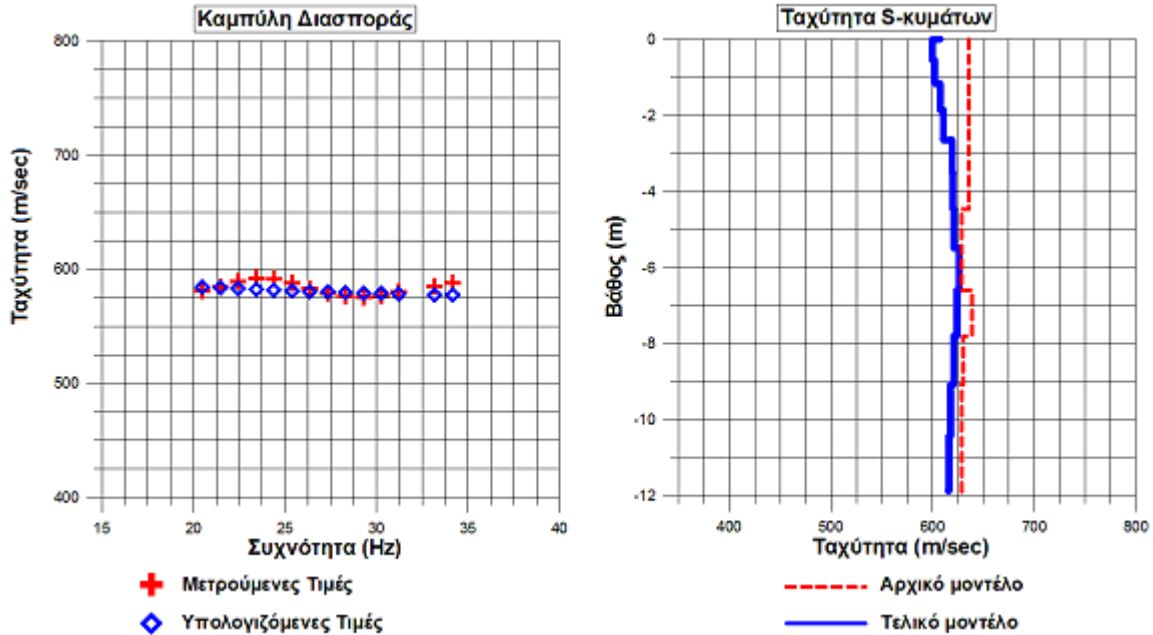
Τομή 3

Στην Εικόνα 3.69 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 3 σε σχέση με τον αγωγό. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 4 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 6 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 2. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες από 0 έως 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας (Rms < 4%), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.70.

Η κατανομή της ταχύτητας Vs παραμένει σχεδόν σταθερή (περίπου στα 615 m/sec) έως το μέγιστο βάθος.



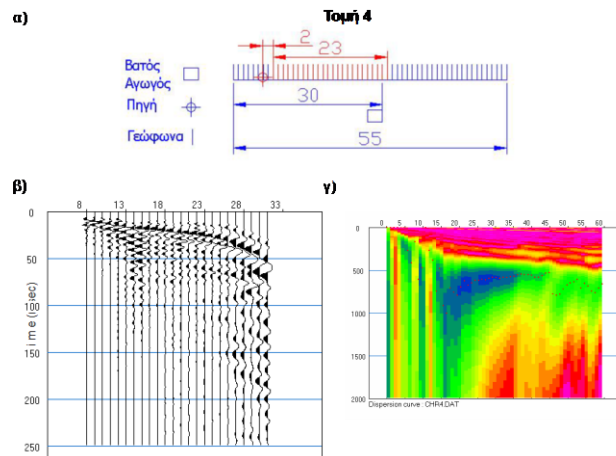
Εικόνα 3.69: α) Θέση Τομής 3 σε σχέση με τον βατό αγωγό β) το σεισμογράμμα της Τομής 3 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 3.



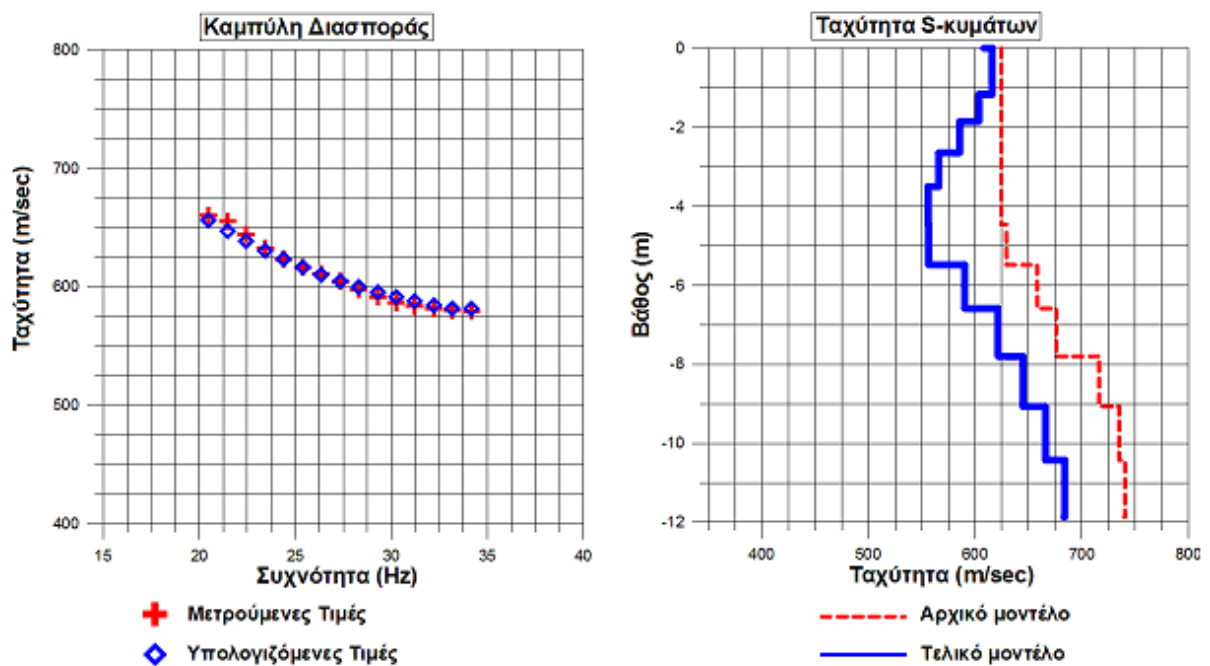
Εικόνα 3.70: Τομή 3-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

Τομή 4

Στην Εικόνα 3.71 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 4 σε σχέση με τον αγωγό. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 6 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 8 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιάτερα από την Τομή 3. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες από 0 έως 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 2\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.72.



Εικόνα 3.71: α) Θέση Τομής 4 σε σχέση με τον βατό αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 4 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 4.

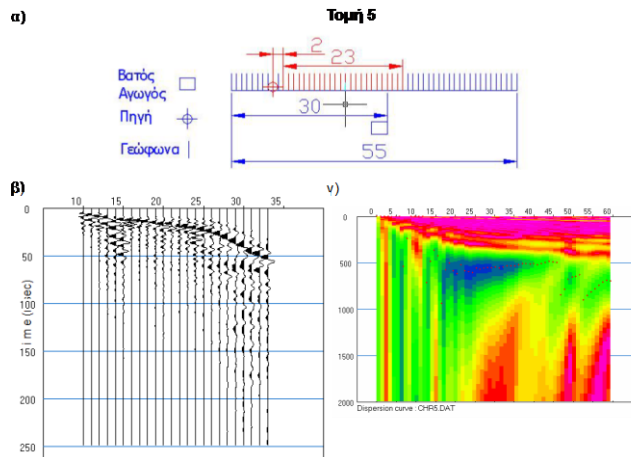


Εικόνα 3.72: Τομή 4-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος

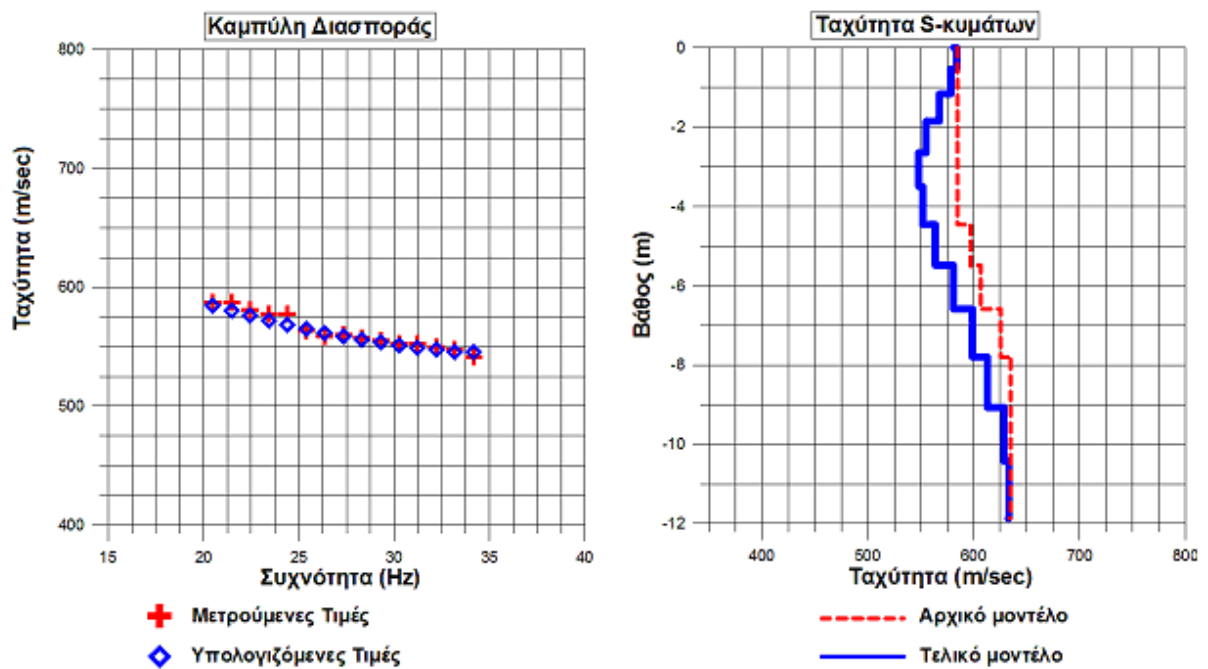
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας για τα τέσσερα πρώτα μέτρα από τα 600 στα 550 m/sec περίπου και στη συνέχεια σταδιακή αύξηση έως τα 675 m/sec, από τα 5 m περίπου έως το μέγιστο βάθος

Τομή 5

Στην Εικόνα 3.72 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 5. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 8 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 10 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 4. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες από 0 έως 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 2\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.74.



Εικόνα 3.73: α) Θέση Τομής 5 σε σχέση με τον βατό αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 5 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 5.

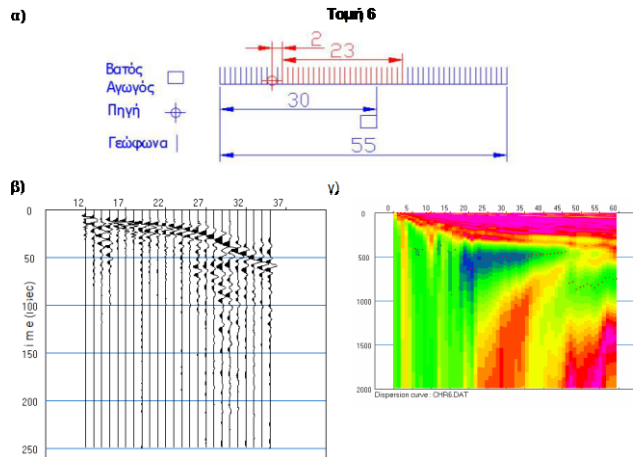


Εικόνα 3.74: Τομή 5-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

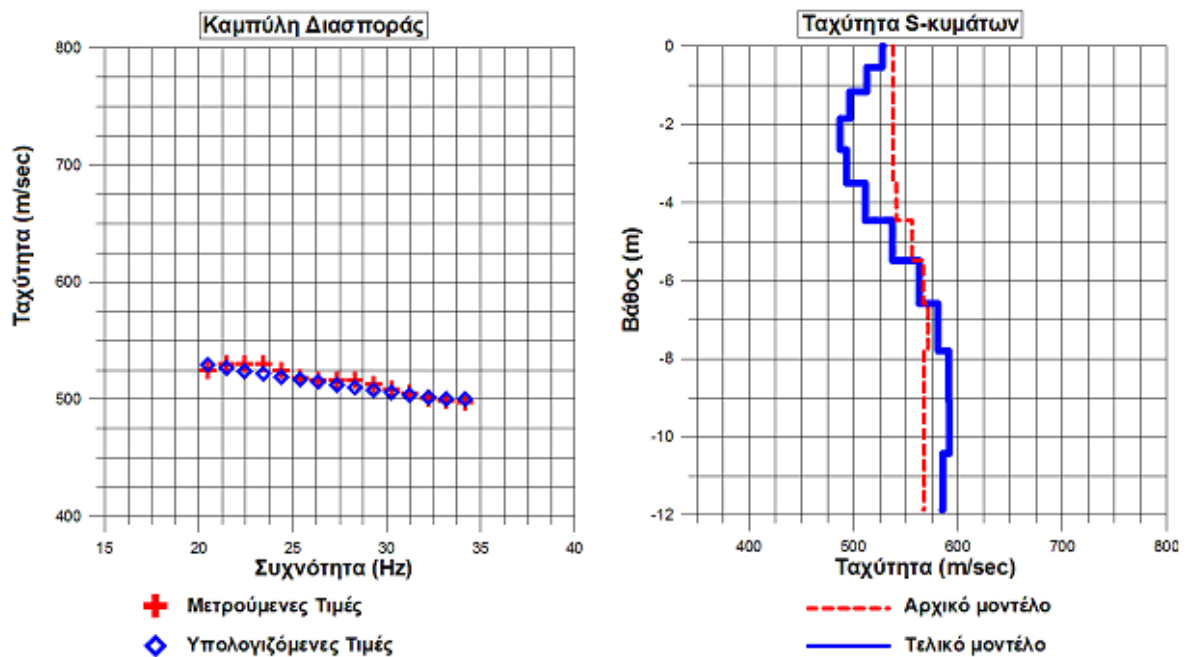
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας έως στα 3 πρώτα μέτρα από τα 575 στα 550 m/sec περίπου και σταδιακή αύξηση έως περίπου τα 625 m/sec από τα 5 μέτρα έως το μέγιστο βάθος .

Τομή 6

Στην Εικόνα 3.75 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 6. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 10 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 12 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 5. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες από 0 έως 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 3\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.76.



Εικόνα 3.75: α) Θέση Τομής 6 σε σχέση με τον βατό αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 6 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 6.

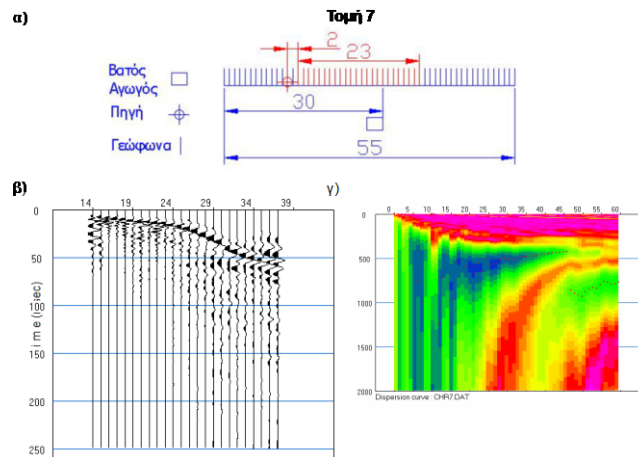


Εικόνα 3.76: Τομή 6-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

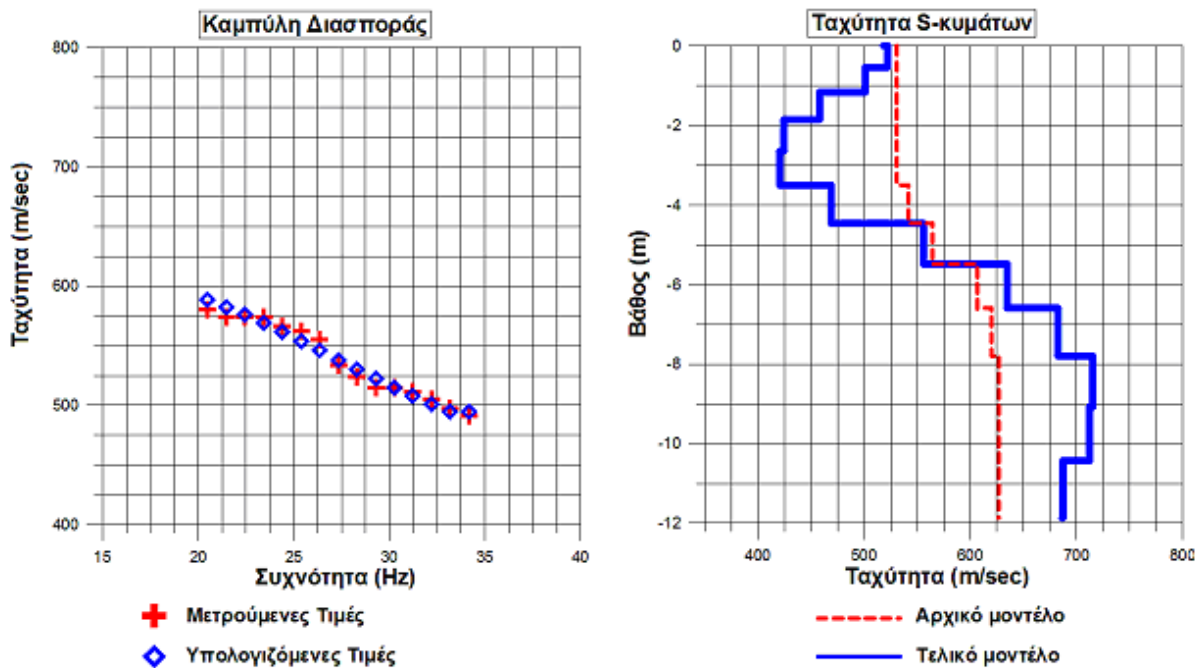
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας στα 2 πρώτα μέτρα από τα 525 στα 480 m/sec περίπου και σταδιακή αύξηση έως περίπου 590 m/sec έως τα 7 μέτρα όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σταθερή έως το μέγιστο βάθος.

Τομή 7

Στην Εικόνα 3.77 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 7. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 12 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 14 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 6. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 3\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.78.



Εικόνα 3.77: α) Θέση Τομής 7 σε σχέση με τον βατό αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 7 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 7.

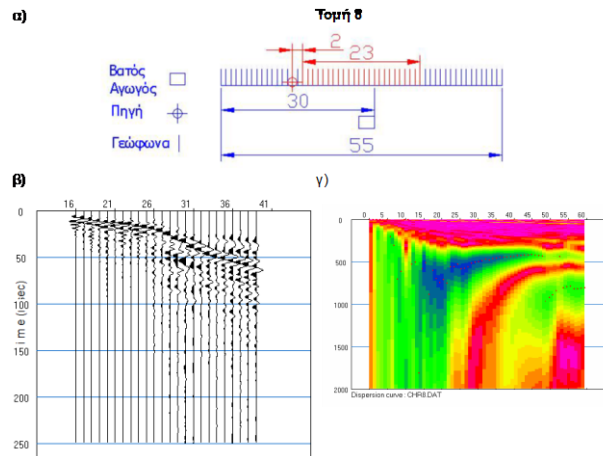


Εικόνα 3.78: Τομή 7-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

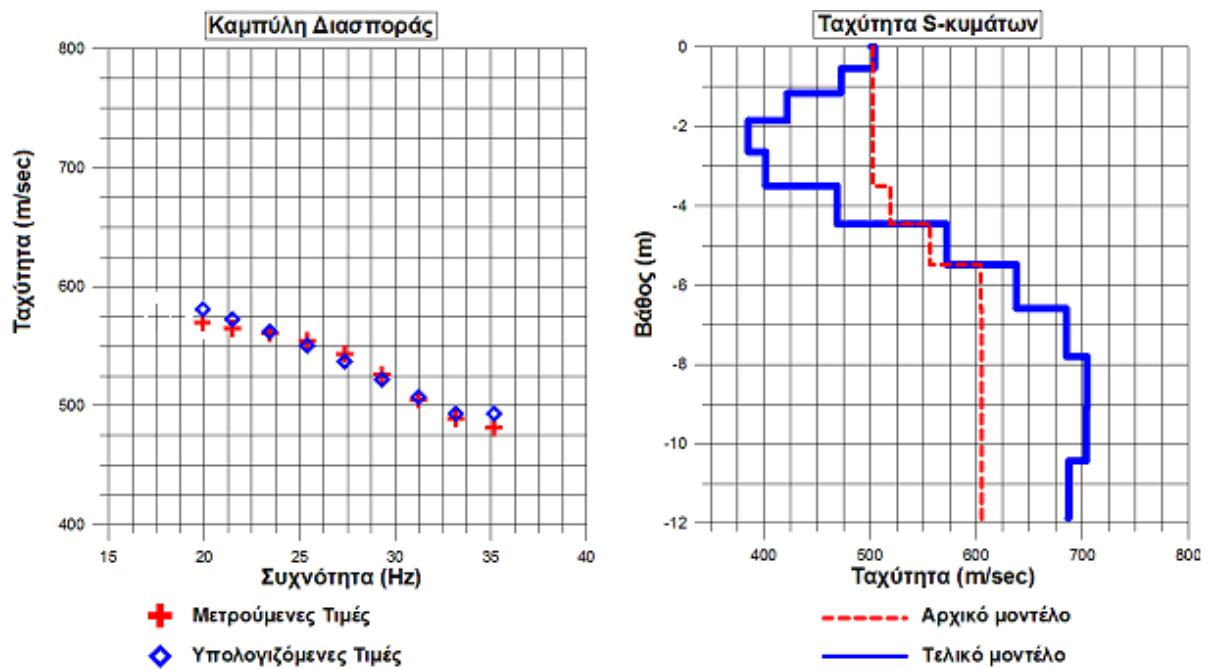
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 525 στα 425 m/sec για τα δύο πρώτα μέτρα περίπου και σταδιακή αύξηση έως τα 690 m/sec μέχρι τα 7 μέτρα όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το μέγιστο βάθος.

Τομή 8

Στην Εικόνα 3.79 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 8. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 14 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 16 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 7. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας (Rms < 2%), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.80.



Εικόνα 3.79: α) Θέση Τομής 8 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 8 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 8.

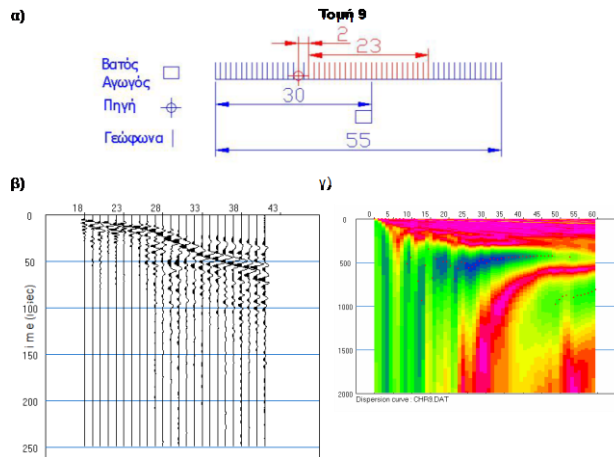


Εικόνα 3.80: Τομή 8-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

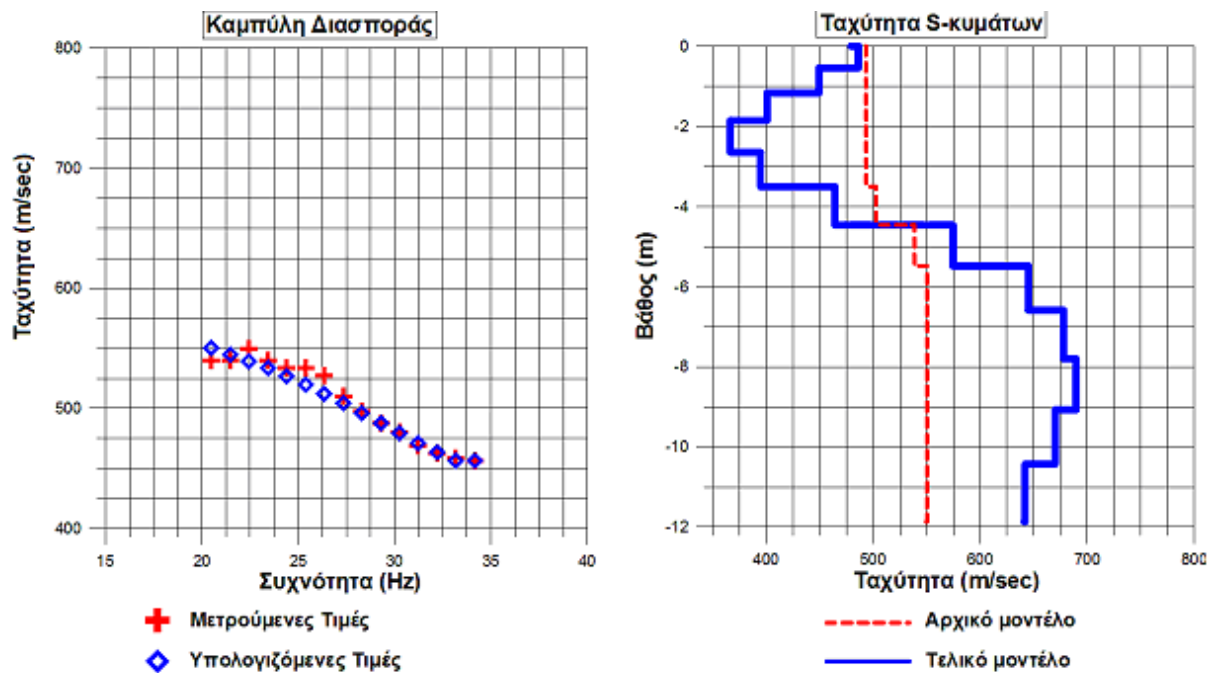
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 500 στα 380 m/sec για τα δύο πρώτα μέτρα περίπου και σταδιακή αύξηση έως τα 680 m/sec μέχρι τα 7 μέτρα, όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το μέγιστο βάθος.

Τομή 9

Στην Εικόνα 3.81 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 9. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 16 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 18 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 8. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 3\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.82.



Εικόνα 3.81: α) Θέση Τομής 9 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 9 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 9.

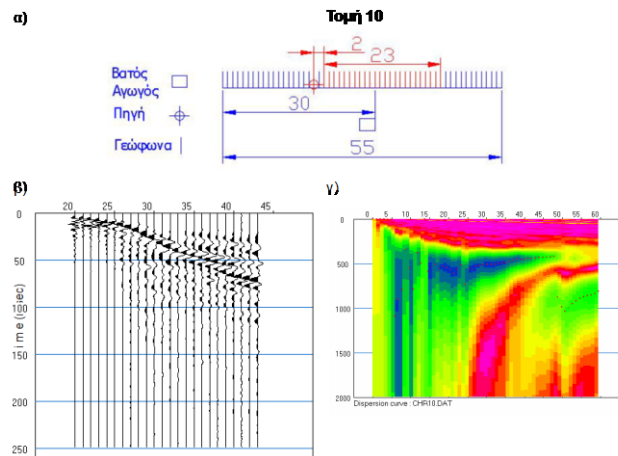


Εικόνα 3.82: Τομή 9-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

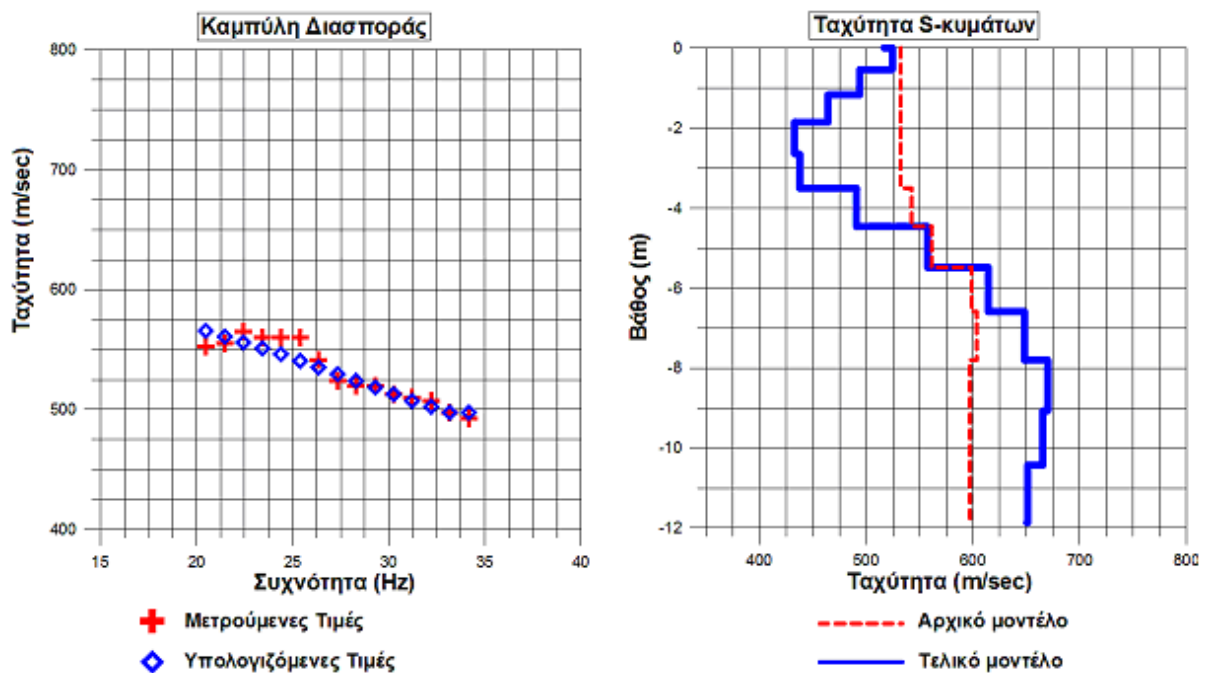
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 480 στα 370 m/sec περίπου για τα δύο πρώτα μέτρα και σταδιακή αύξηση έως τα 675 m/sec μέχρι τα 7 μέτρα, όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το μέγιστο βάθος.

Τομή 10

Στην Εικόνα 3.83 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 10. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 18 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 20 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 9. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας (Rms < 5%), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.84.



Εικόνα 3.83: α) Θέση Τομής 10 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 10 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 10.

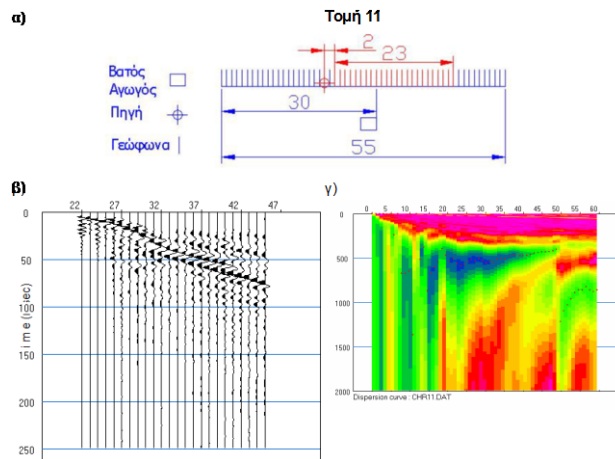


Εικόνα 3.84: Τομή 10-H καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος

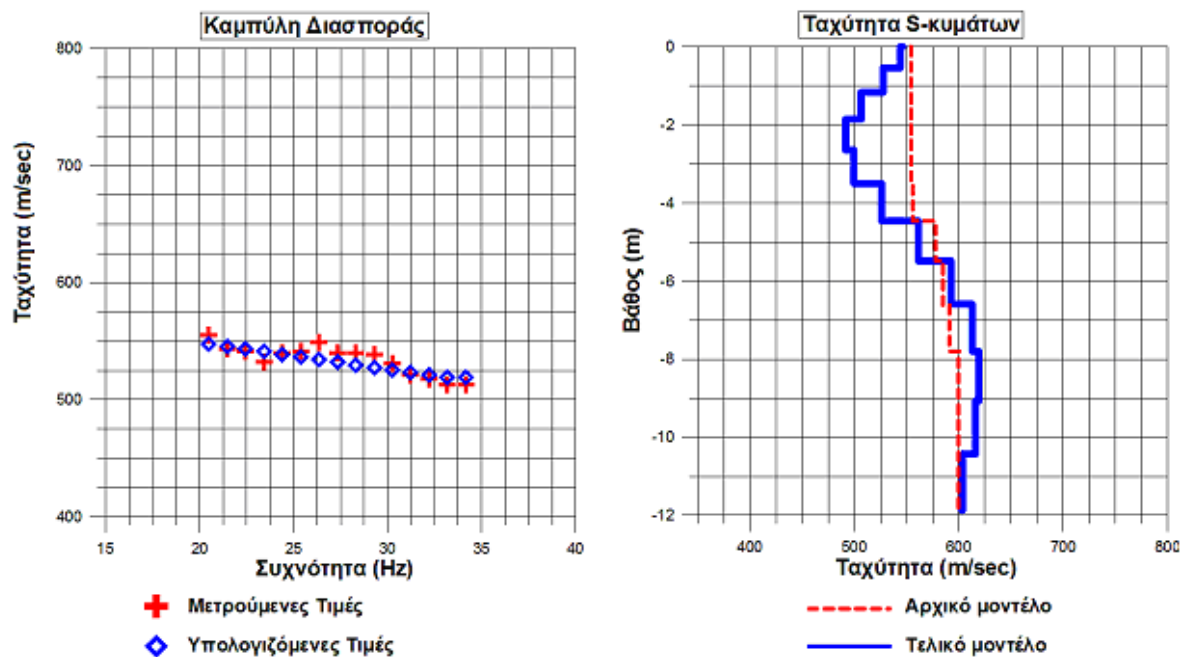
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων στην εικόνα, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 525 στα 430 m/sec περίπου για τα δύο πρώτα μέτρα και σταδιακή αύξηση έως τα 650 m/sec μέχρι τα 7 μέτρα, όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το μέγιστο βάθος.

Τομή 11

Στην Εικόνα 3.85 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 11. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 20 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 22 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 10. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 4\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.86.



Εικόνα 3.85 : α) Θέση Τομής 11 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 11 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσεις της Τομής 11.

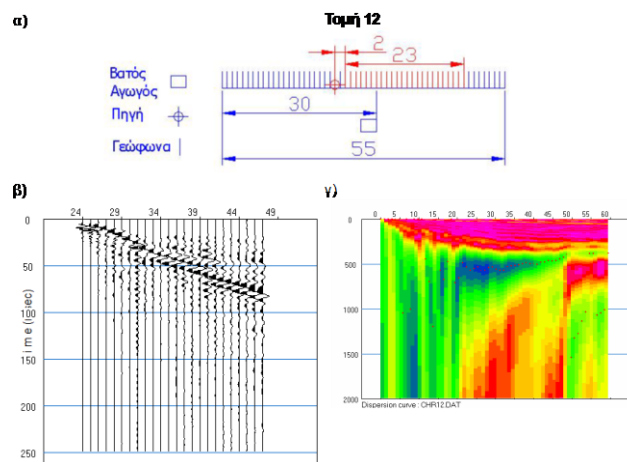


Εικόνα 3.86: Τομή 11-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

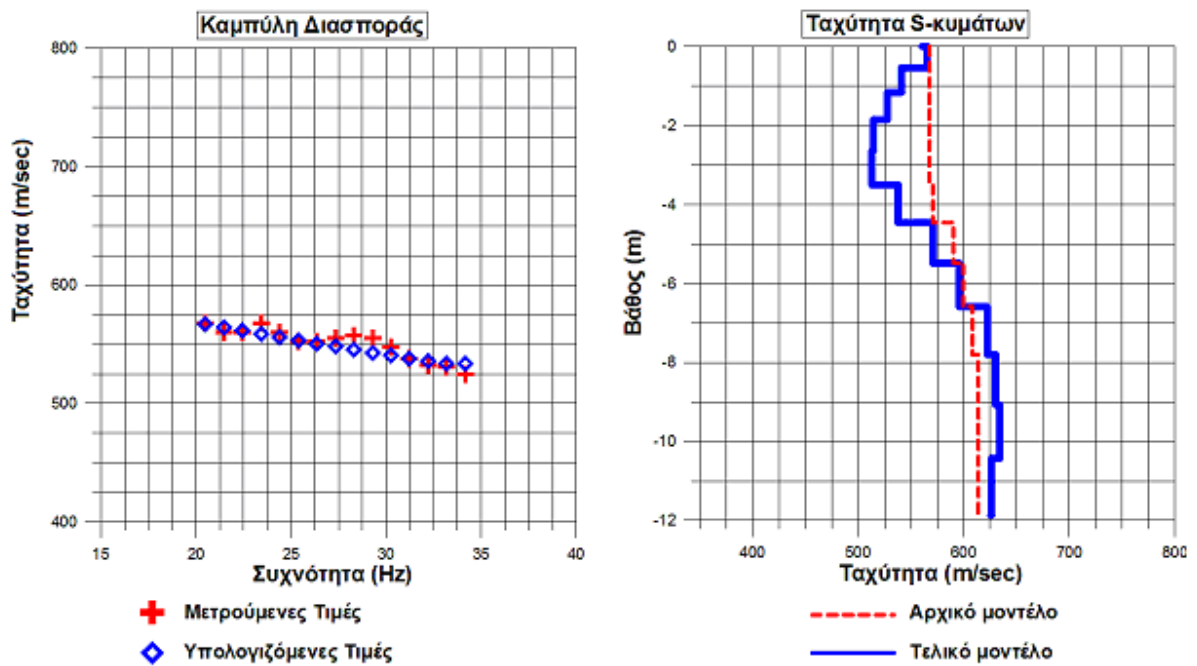
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 550 στα 500 m/sec για τα δύο πρώτα μέτρα περίπου και σταδιακή αύξηση έως τα 600 m/sec μέχρι τα 7 μέτρα, όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το μέγιστο βάθος.

Τομή 12

Στην Εικόνα 3.87 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 12. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 22 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 24 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 11. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 4\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.88.



Εικόνα 3.87: α) Θέση Τομής 12 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 12 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 12.

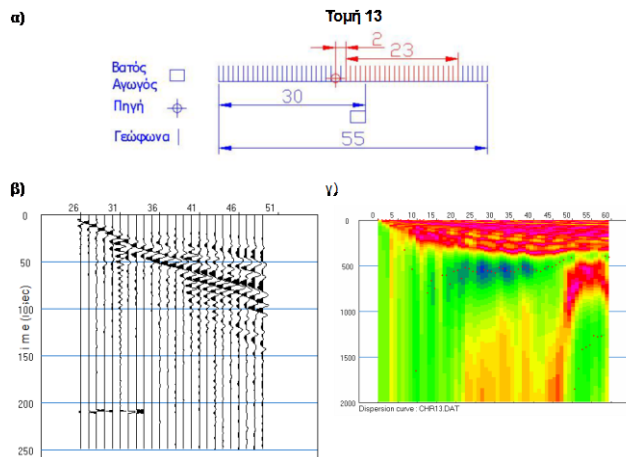


Εικόνα 3.88: Τομή 12-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

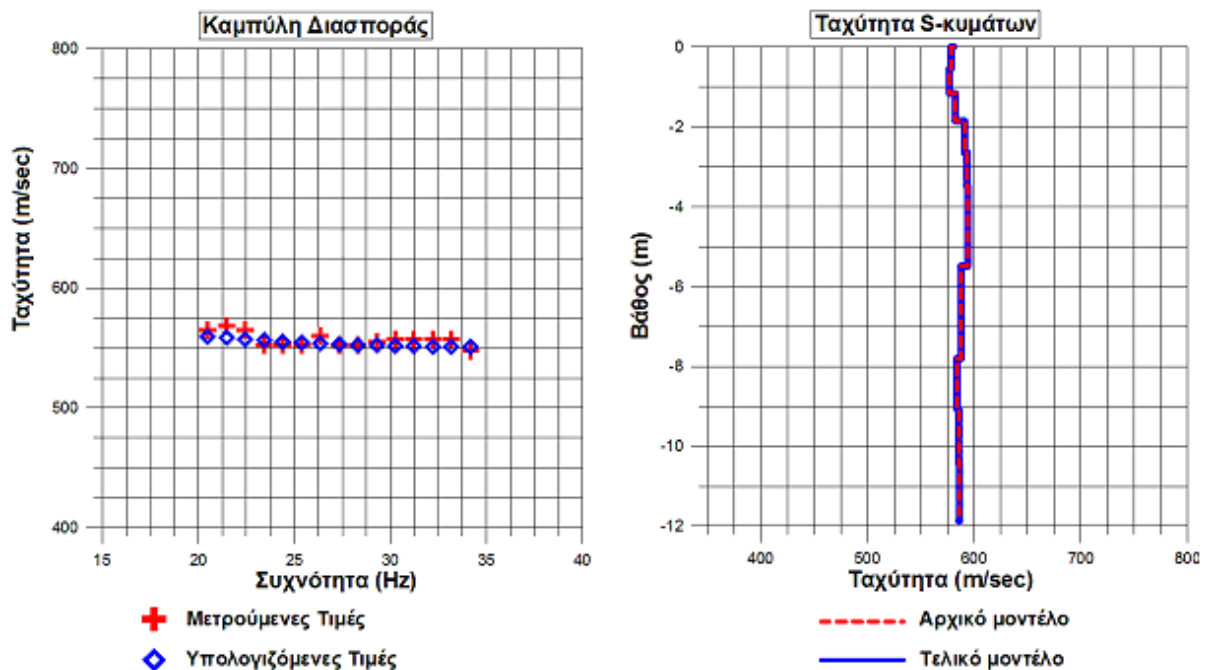
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 550 στα 510 m/sec περίπου για τα δύο πρώτα μέτρα και σταδιακή αύξηση μέχρι τα 7 μέτρα έως τα 625 m/sec, όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το μέγιστο βάθος.

Τομή 13

Στην Εικόνα 3.89 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 13. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 24 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 26 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 12. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 4\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.90.



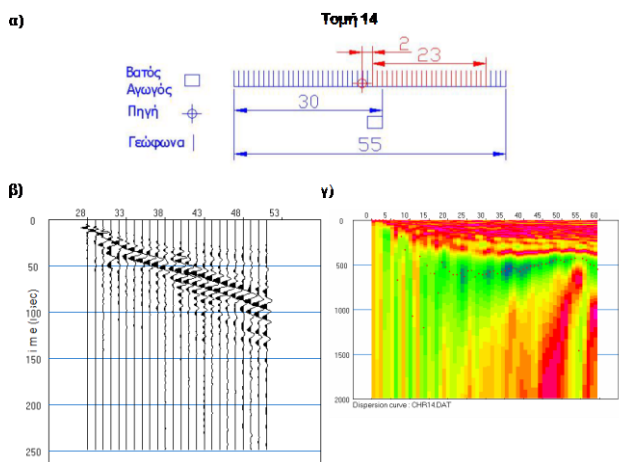
Εικόνα 3.89: α) Θέση Τομής 13 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 13 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 13.



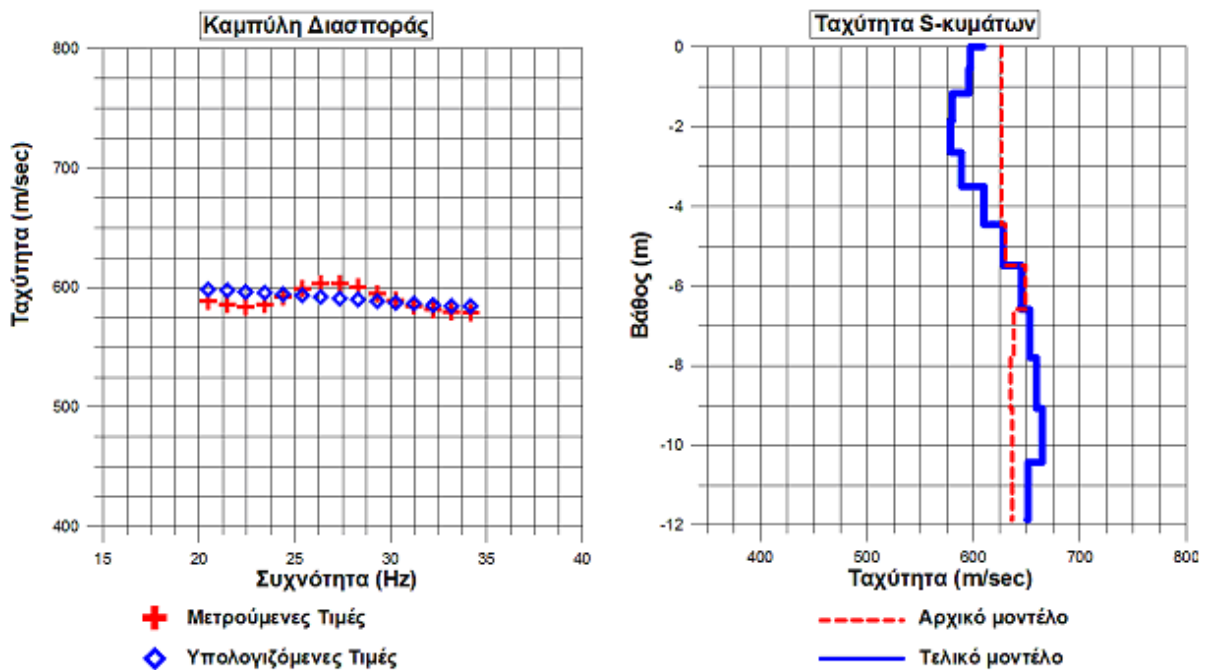
Εικόνα 3.90: Τομή 13-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της V_s ως προς το βάθος. Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων συμπεραίνεται ότι η ταχύτητα παραμένει σχεδόν σταθερή (περίπου στα 580 m/sec) μέχρι το μέγιστο βάθος.

Τομή 14

Στην Εικόνα 3.91 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 14. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 26 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 28 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 13. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας (Rms < 6%), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.92.



Εικόνα 3.91: α) Θέση Τομής 14 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 14 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 14.

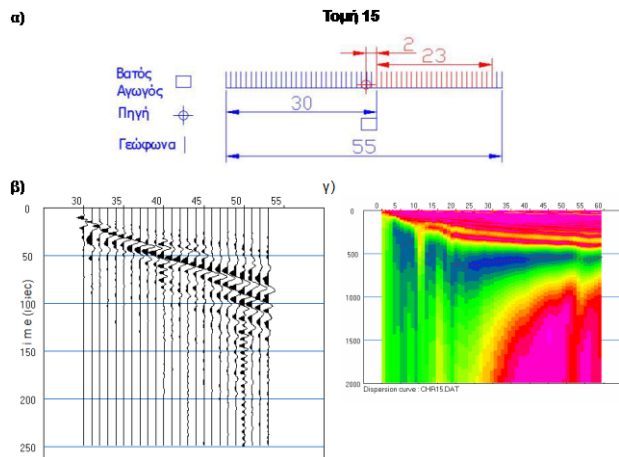


Εικόνα 3.92: Τομή 14-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

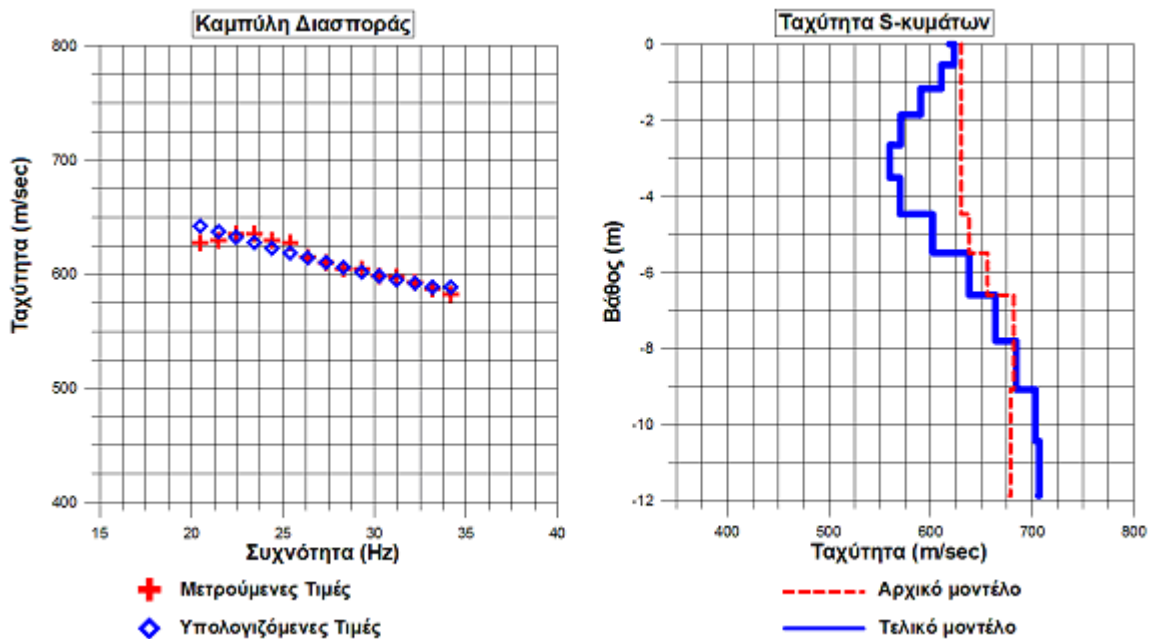
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται σταδιακή αύξηση της ταχύτητας (από τα 600 στα 650 m/sec) από τα δύο πρώτα μέτρα έως τα 7 μέτρα όπου σταθεροποιείται έως το μέγιστο βάθος.

Τομή 15

Στην Εικόνα 3.93 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 15. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 28 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 30 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 14. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας (Rms < 4%), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.94.



Εικόνα 3.93: α) Θέση Τομής 15 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 15 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 15.

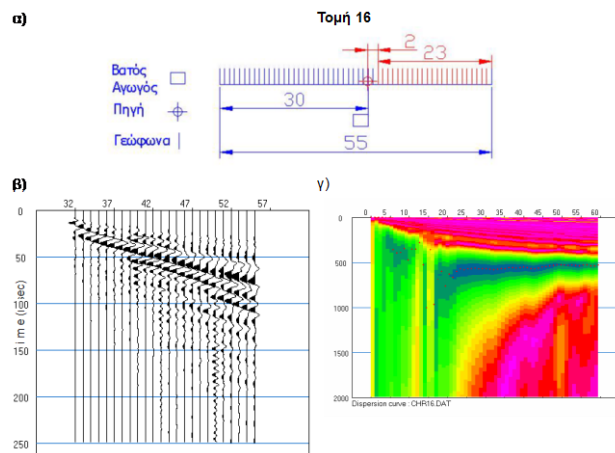


Εικόνα 3.94: Τομή 15-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

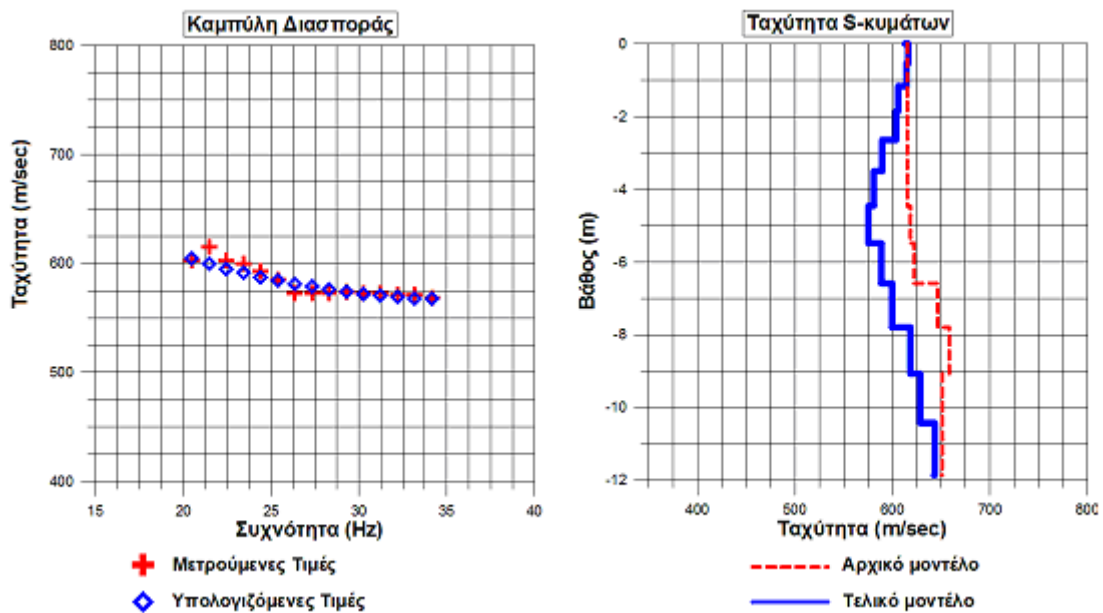
Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 480 στα 370 m/sec περίπου για τα δύο πρώτα μέτρα και σταδιακή αύξηση έως τα 675 m/sec, μέχρι τα 7 μέτρα όπου πέρα του βάθους αυτού παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το μέγιστο βάθος

Τομή 16

Στην Εικόνα 3.95 (α) παρουσιάζεται η θέση της Τομής 16. Η θέση της πηγής βρίσκεται στη θέση 30 και το πρώτο γεώφωνο στη θέση 32 δηλαδή σε απόσταση δύο μέτρα από την πηγή και δύο μέτρα δεξιότερα από την Τομή 15. Επιπλέον παρουσιάζονται τα σεισμικά δεδομένα και η καμπύλη διασποράς με την τοποθέτηση των σχετικών μεγίστων (κόκκινες τελείες). Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε για συχνότητες μικρότερες από 60 Hz. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας ($Rms < 6\%$), το αρχικό όσο και η καμπύλη διασποράς (εύρος συχνοτήτων 20 έως 35) των υπολογιζόμενων και μετρούμενων τιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.96.



Εικόνα 3.95: α) Θέση Τομής 16 σε σχέση με τον αγωγό β) το σεισμόγραμμα της Τομής 16 γ) η κατανομή των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης της Τομής 16.

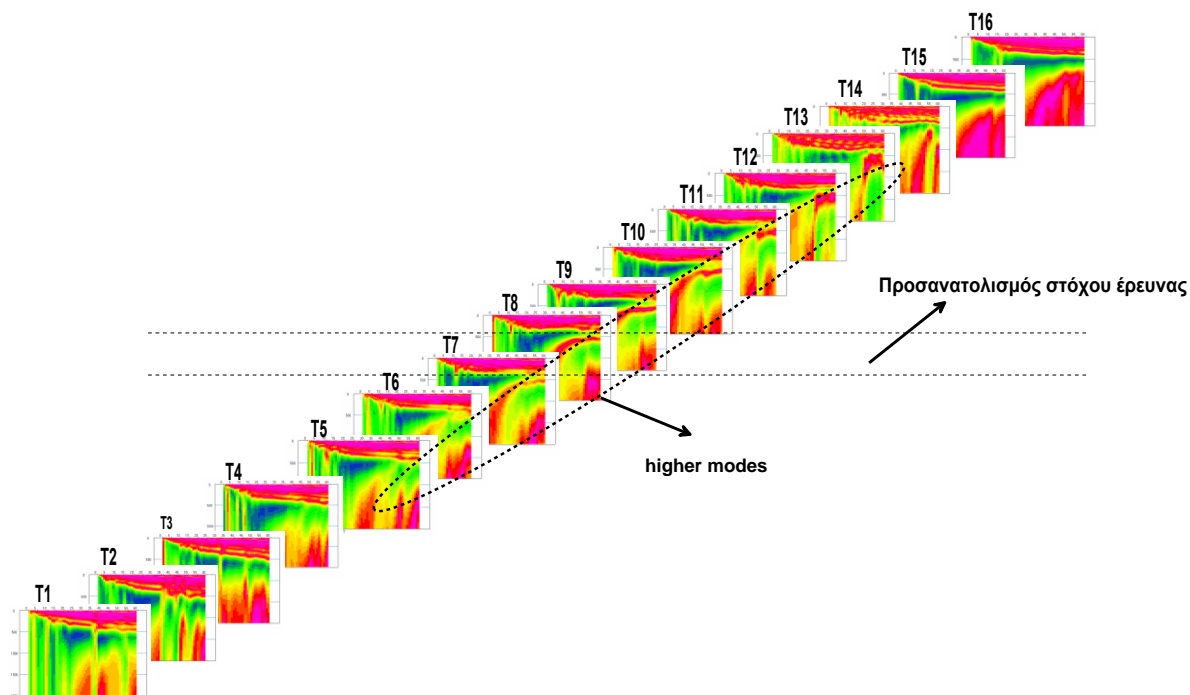


Εικόνα 3.96: Τομή 16-Η καμπύλη διασποράς και η κατανομή της Vs ως προς το βάθος.

Από την κατανομή της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας από τα 625 στα 575 m/sec μέχρι τα 6 m περίπου και σταδιακή αύξηση μέχρι το μέγιστο βάθος

3.5.4 Διδιάστατη Ερμηνεία Σεισμικών Τομών

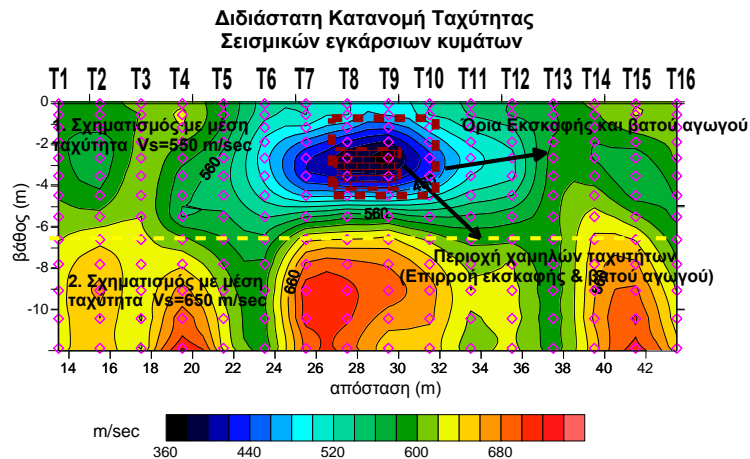
Στο Κεφάλαιο 3.5.3, όπου παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της μονοδιάστατης ερμηνείας των διαφόρων τομών, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση της κατανομής της ταχύτητας V_s ως προς το βάθος για τις διάφορες θέσεις των τομών έρευνας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ύπαρξη της εκσκαφής και του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων. Επιπλέον, είναι χαρακτηριστικό ότι στις τομές, οι οποίες βρίσκονται κοντά στα όρια του στόχου, παρατηρείται στα διαγράμματα της κατανομής των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσεις, αύξηση των υψηλότερων τρόπων διάδοσης (higher modes).



Εικόνα 3.97: Τριδιάστατη απεικόνιση των διαγραμμάτων των συχνοτήτων σε συνάρτηση με τις ταχύτητες φάσης.

Για να είναι δυνατή η διδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους, το επόμενο στάδιο της ερμηνείας περιελάμβανε τη σύνδεση των αποτελεσμάτων όλων των τομών μεταξύ τους

Συνδυάζοντας τις κατανομές των ταχυτήτων που προέκυψαν για κάθε τομή, ήταν δυνατόν να δημιουργηθεί η διδιάστατη κατανομή των ταχυτήτων των σεισμικών εγκάρσιων κυμάτων, η οποία δίδει τη δυνατότητα για τη διερεύνηση και πλευρικών μεταβολών κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση συνδυάστηκαν τα αποτελέσματα των 16 τομών (στιγμιότυπων) και με τη βοήθεια του λογισμικού Surfer δημιουργήθηκε η κατανομή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.97. Για τη δημιουργία της διδιάστατης κατανομής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πλεγματοποίησης Kriging.



Εικόνα 3.98 : Η διδιάστατη κατανομή της V_s ως προς το βάθος στην περιοχή έρευνας.

Από την Εικόνα 3.98, όπου παρουσιάζεται η διδιάστατη κατανομή της V_s ως προς το βάθος και στην οποία απεικονίζονται, επιπλέον, τα όρια του αγωγού και τα κέντρα των τομών της μονοδιάστατης ερμηνείας, προκύπτει:

- Η ύπαρξη χαρακτηριστικής ανωμαλίας χαμηλών ταχυτήτων ($V_s < 500$) όπου χαρακτηρίζει το χώρο στον οποίο βρίσκεται η περιοχή της εκσκαφής και ο αγωγός.
- Η ύπαρξη επιφανειακού σχηματισμού μέσης ταχύτητας 550 m/sec πάχους περίπου 6.5-7 m.
- Η ύπαρξη υποκείμενου σχηματισμού μέσης ταχύτητας 650 m/sec από τα 6.5-7m περίπου έως το μέγιστο βάθος διασκόπησης.

Λαμβάνοντας επίσης υπόψη και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της ηλεκτρικής τομογραφίας προκύπτει ότι η στρωματογραφία της περιοχής έρευνας χαρακτηρίζεται από ένα σχηματισμό ασύνδετων αδρομερών στοιχείων έως περίπου τα 7 m βάθος ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται ένας περισσότερο συνεκτικός σχηματισμός αργιλικής φύσης. Τα μοντέλα ερμηνείας των δύο μεθόδων συμφωνούν και συμπίπτουν κατά πολύ ως προς τη λιθολογία της περιοχής.

Επιπλέον συγκρίνοντας το διδιάστατο μοντέλο ερμηνείας της μεθόδου της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων με τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας, της μικροβαρυτομετρίας και της μαγνητικής μεθόδου ως προς τον εντοπισμό του στόχου, προκύπτει ότι :

Με τη μέθοδο Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων και ειδικότερα χρησιμοποιώντας την τεχνική roll-along είναι δυνατός ο εντοπισμός στόχων πεπερασμένων διαστάσεων και γενικότερα πλευρικών ανομοιογενειών.

Επομένως, εάν ο στόχος έρευνας αποτελεί τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων, η μέθοδος της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως μια επιπλέον γεωφυσική μέθοδος έτσι ώστε να είναι εφικτή η Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση του υπεδάφους για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των άλλων γεωφυσικών μεθόδων και τη μείωση της αβεβαιότητας της τελικής ερμηνείας.

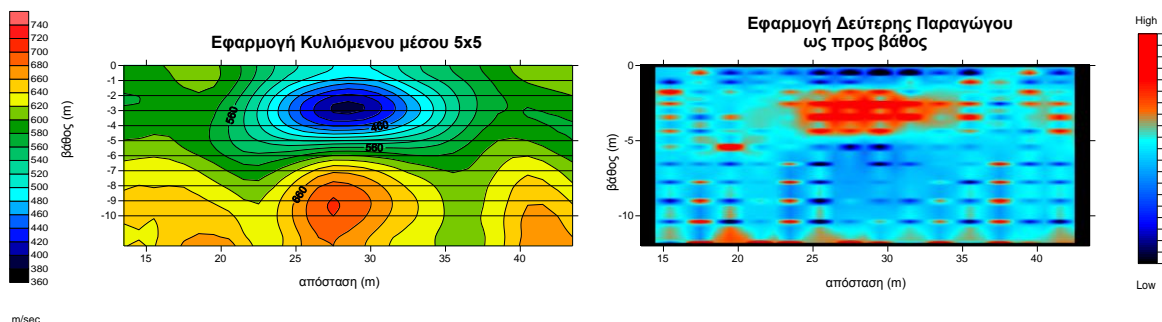
Παρατηρήσεις:

Ενώ η μέθοδος είναι ικανή να εντοπίσει πλευρικές ανομοιογένειες, η τελική εικόνα είναι αρκετά εξομαλυμένη, παρουσιάζοντας κυρίως χαμηλή ανάλυση ως προς την οριζόντια διεύθυνση, όσον αφορά την οριοθέτηση του στόχου έρευνας.

Αυτό συμβαίνει διότι η κατανομή της ταχύτητας των S-κυμάτων για κάθε τομή έρευνας αποτελεί τη συνολική επίδραση της περιοχής που καλύπτει η γραμμή, ανεξάρτητα αν το σημείο όπου τοποθετείται για ερμηνεία βρίσκεται στο κέντρο του αναπτύγματος της γραμμής. Επομένως, αυτό το μοντέλο της ψευδοδιδιάστατης κατανομής της ταχύτητας παρουσιάζεται εξομαλυμένο όσον αφορά στην οριζόντια διεύθυνση. Άρα, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την ερμηνεία τέτοιων μοντέλων αφού η αξιοπιστία των ανωμαλιών που δημιουργούνται άλλα και η οριζόντια ανάλυση της μεθόδου εξαρτάται κατά πολύ από την πυκνότητα των τομών που χρησιμοποιούνται (το βήμα σταδιακής μετακίνησης των τομών), την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των γεωφώνων αλλά κυρίως από το ανάπτυγμα της γραμμής έρευνας. το οποίο όσο μικρότερο είναι, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η οριζόντια ανάλυση του μοντέλου.

Ο Xia et. al., 2005 αναφέρει ότι για την περαιτέρω επεξεργασία του διδιάστατου μοντέλου ερμηνείας, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση διαφόρων διδιάστατων τεχνικών για την καλύτερη αποτύπωση του στόχου έρευνας. Στην Εικόνα 3.99 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διδιάστατοι χάρτες που προκύπτουν από την εφαρμογή κυλιόμενου μέσου 5x5 και της δεύτερης παραγώγου ως προς το βάθος, στις τιμές του μοντέλου ερμηνείας της εικ. 2.98. Είναι εμφανές ότι στην πρώτη περίπτωση μειώνεται η επίδραση των υψίσυχνων ανωμαλιών στο μοντέλο ερμηνείας με αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση του υποκείμενου στρώματος ενώ στη δεύτερη περίπτωση τονίζονται οι μικροδιαφορές στο μοντέλο ερμηνείας με αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση του πεπερασμένου στόχου.

Εφαρμογές Διδιάστατων Τεχνικών



Εικόνα 3.99 : Παράδειγμα εφαρμογής διδιάστατων τεχνικών στα μοντέλα ερμηνείας της μεθόδου MASW.

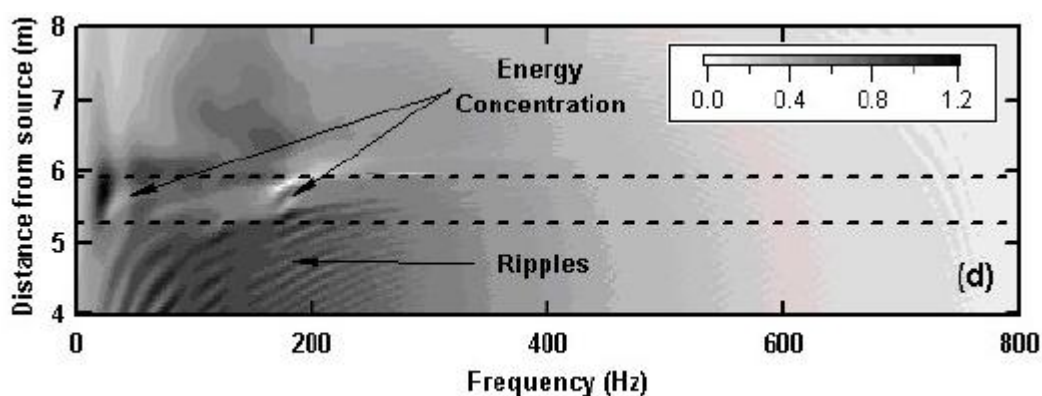
3.5.5 Εμφάνιση Επίδρασης Υπόγειων Ανοιγμάτων στο Συχνολογικό Πεδίο

Η μελέτη της συμπεριφοράς των κυμάτων Rayleigh σε ελαστικό μέσο με διαφορετικές οριακές συνθήκες (boundary conditions), έχει κερδίσει την προσοχή των ερευνητών το τελευταίο διάστημα. Κύριος λόγος είναι η χρησιμοποίηση των κυμάτων Rayleigh για τη μη καταστροφική δοκιμή εδαφών αλλά και άλλων υλικών. Μια από τις εφαρμογές της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών κυμάτων, η οποία αποτελεί αντικείμενο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής είναι και ο εντοπισμός υπόγειων

ανοιγμάτων και γενικότερα υπόγειων στόχων δηλαδή πρακτικά πλευρικών ανομοιογενειών σε ομογενή ή στρωματομένα μέσα.

Σύμφωνα με πρόσφατη διδακτορική διατριβή (Ali Nasser-Moghaddam, Waterloo, Ontario, Canada 2006) όπου μελετήθηκε η επίδραση παράπλευρων ανομοιογενειών στη διάδοση των Rayleigh κυμάτων σε ελαστικό μέσο (forward modeling), οι αποκρίσεις στο πεδίο του χρόνου (time domain), των συχνοτήτων (frequency domain) και των συχνοτήτων-κυματαριθμών (f-k domain) έδειξαν ότι το υπόγειο κενό αλληλεπιδρά με το προσπίπτον κύμα Rayleigh. Ο βαθμός αυτής της αλληλεπίδρασης εξαρτάται από μέγεθος του κενού, το βάθος στο οποίο βρίσκεται, καθώς και το συχνοτικό περιεχόμενο της προσπίπτουσας ενέργειας.

Το κενό αρχίζει να δονείται σε απόκριση της διέγερσης από το Rayleigh κύμα, το οποίο προκαλεί διαμερισμό ενέργειας. Μέρος της ενέργειας ανακλάται προς την πηγή με τη μορφή κυμάτων Rayleigh. Η αλληλεπίδραση της προσπίπτουσας ενέργειας με τα όρια του υπόγειου κενού, προκαλεί τη μετατροπή μέρους της ενέργειας σε μετωπικά κύματα. Τα μετωπικά κύματα εμφανίζονται κυρίως με τη μορφή κυμάτων-p και διαδίδονται εντός του μέσου. Άλλο μέρος της ενέργειας παγιδεύεται στην περιοχή του υπόγειου κενού. **Η επίδραση της παγιδευμένης ενέργειας παρουσιάζεται ως ενεργειακή συγκέντρωση στην περιοχή του υπόγειου κενού, στο συχνοτικό πεδίο (Εικ. 3.100).**



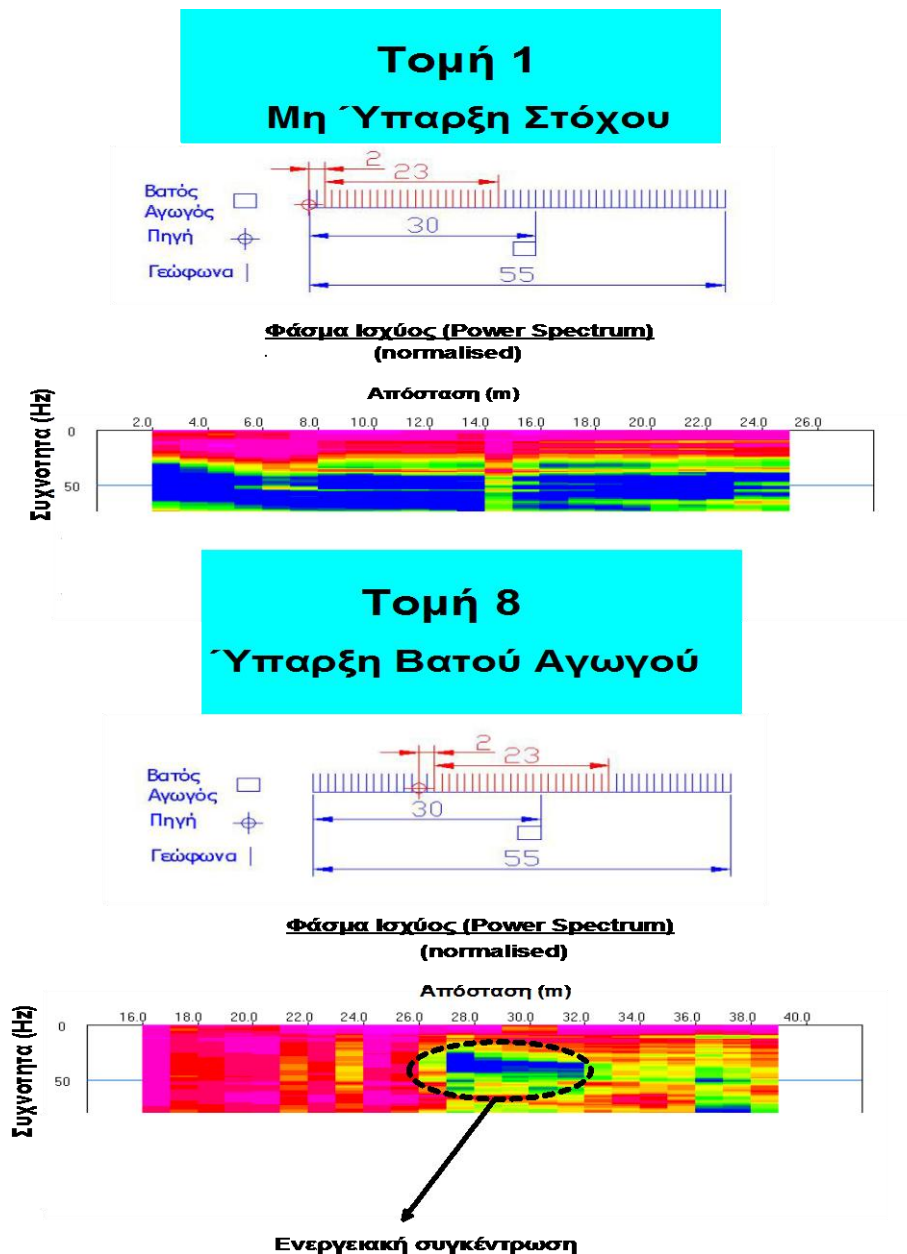
Εικόνα 3.100: Παράδειγμα ενεργειακής συγκέντρωσης στο συχνοτικό πεδίο σε περιοχή ύπαρξης υπόγειου ανοίγματος (Anasser 2006).

Με την εφαρμογή της μεθόδου της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων για τον εντοπισμό του υπόγειου αγωγού ήταν δυνατή η αξιολόγηση των παραπάνω παρατηρήσεων σε πραγματικές συνθήκες υπαίθρου. Με σκοπό την παρατήρηση της επίδρασης του υπόγειου στόχου στο συχνοτικό πεδίο επιλέχθηκαν να αναλυθούν αρχικά δύο τομές, από τις οποίες η μεν πρώτη να μην περιλαμβάνει το στόχο και ενώ η δεύτερη να βρίσκεται πάνω από το στόχο.

Εφαρμόστηκε συχνοτική ανάλυση στα σειсмоγράμματα της Τομής 1, η οποία βρίσκεται μακριά από τον αγωγό αλλά και στο σεισογράμμα της Τομής 8, στην οποία ο αγωγός διέρχεται περίπου από το μέσο της. Για τη συχνοτική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Seisimager, το οποίο δίδει τη δυνατότητα υπολογισμού του Φάσματος Ισχύος (power spectrum) από το σεισογράμμα κάθε τομής αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 3.101 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την Τομή 1 και την Τομή 8 αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της συχνοτικής ανάλυσης των δύο τομών επισημαίνεται ότι :

- Στην Τομή 1, όπου δεν υπάρχει υπόγειος στόχος, στο διάγραμμα του Φάσματος Ισχύος που έχει πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση των συχνοτήτων, παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή τους κατά μήκος ολόκληρης της τομής έρευνας.
- Στην Τομή 8, όπου υπάρχει ο αγωγός, στο διάγραμμα του Φάσματος Ισχύος που έχει πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση των συχνοτήτων, παρατηρείται ενεργειακή συγκέντρωση στην περιοχή όπου βρίσκεται ο αγωγός.



Εικόνα 3.101: α) Φασματική ισχύος μετρήσεων της Τομής 1 (μη ύπαρξη στόχου-) β) Φασματική ισχύος μετρήσεων της Τομής 8 (Ύπαρξη αγωγού).

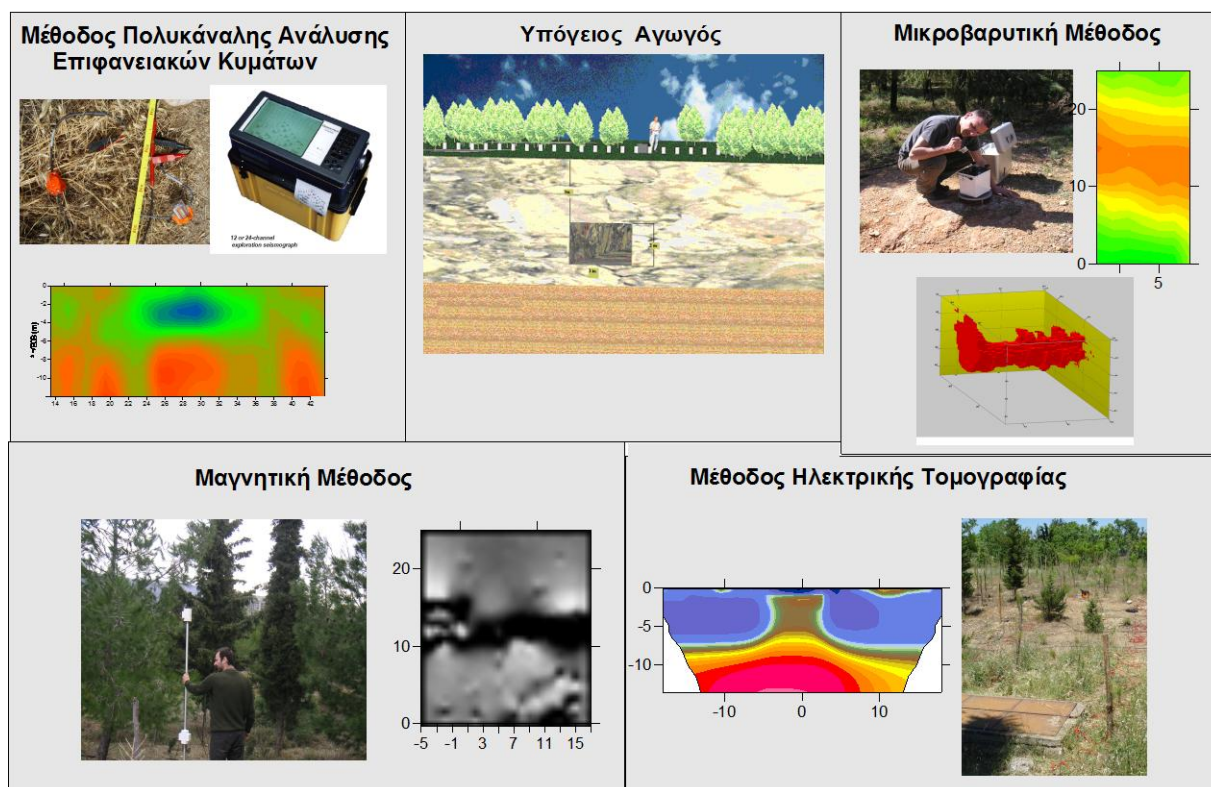
Συνεπώς, η κυριότερη παρατήρηση αποτελεί ότι εκτός από το χάρτη διδιάστατης κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, είναι δυνατός ο εντοπισμός της επίδρασης ενός υπόγειου στόχου στο συχνοτικό πεδίο. Χρησιμοποιώντας το Φάσμα

ισχύος που προκύπτει από το αντίστοιχο σεισμόγραμμα είναι δυνατή η οριοθέτηση του στόχου έρευνας. Το υπόγειο άνοιγμα αλληλεπιδρά με το προσπίπτον επιφανειακό κύμα με αποτέλεσμα στο συχνοτικό πεδίο να παρουσιάζεται ενεργειακή συγκέντρωση σε συγκεκριμένες συχνότητες, διαγράφοντας έτσι τα όρια του υπόγειου ανοίγματος.

3.6: Σχολιασμός-Συμπεράσματα

Η πραγματοποίηση μετρήσεων με τέσσερις διαφορετικές επιφανειακές γεωφυσικές μεθόδους για τον εντοπισμό ενός υπόγειου αγωγού γνωστών διαστάσεων *σε ελεγχόμενες συνθήκες υπαίθρου*, επέτρεψε τη διερεύνηση των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας των δεδομένων κάθε μιας μεθόδου αλλά και τη συγκριτική τους αξιολόγηση όσον αφορά τη διακριτική ικανότητα τους σε υπόγεια ανοίγματα.

Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση Υπεδάφους



Εικόνα 3.102: Συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους για τον εντοπισμό υπόγειου αγωγού σε ελεγχόμενες συνθήκες.

Τα κύρια συμπεράσματα του Κεφαλαίου 3 είναι τα εξής :

- i. Με τη συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους, ήταν δυνατόν να εξαχθεί η μέγιστη δυνατή πληροφορία σχετικά με το στόχο έρευνας αλλά και η ενίσχυση της αξιοπιστίας της τελικής ερμηνείας με ταυτόχρονη μείωση της αβεβαιότητας. Το πρόβλημα της μη μοναδικότητας της λύσης μπορεί να αντιμετωπισθεί μόνο με την εφαρμογή περισσότερων από μιας γεωφυσικής μεθόδου, όταν ειδικότερα, δεν υπάρχει άλλη διαθέσιμη πληροφορία.
- ii. Ακόμα και σε μικρού βάθους εφαρμογές, το γεωλογικό περιβάλλον αλλά και η δομή του ίδιου του υπόγειου ανοίγματος είναι εκείνη που θα καθορίσει κατά πολύ την επιτυχία εφαρμογής μιας μεθόδου. Όπως χαρακτηριστικά παρατηρήθηκε ο οπλισμός του υπόγειου αγωγού όσο και η περιοχή της εκσκαφής επηρεάζουν κατά πολύ τα μοντέλα ερμηνείας ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Επομένως,

είναι δύσκολο να καθορίσει κάποιος εξ' αρχής ποιά μέθοδος είναι η καταλληλότερη.

- iii. Η αρχική πληροφορία που προκύπτει από τα αποτελέσματα μιας μεθόδου μπορούν να βοηθήσουν ουσιαστικά στην καλύτερη ερμηνεία μιας άλλης μεθόδου είτε ως ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων είτε ως προς τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων κατά την ερμηνεία. Για παράδειγμα τα αποτελέσματα των μεθόδων της ηλεκτρικής τομογραφίας και της M.A.S.W έδωσαν τις κύριες κατευθυντήριες γραμμές για την επιλογή των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου στη μικροβαρυτική μέθοδο, άλλα απετέλεσαν και βάση για τη μείωση των διαθέσιμων τελικών μοντέλων (πρόβλημα ισοδυναμίας της βαρυτικής μεθόδου).
- iv. Η **μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας**, με μέτριο χρόνο διαδικασίας λήψης μετρήσεων στο ύπαιθρο, μπορεί να δώσει πληροφορίες τόσο για τον υπόγειο στόχο όσο και για τη γενικότερη γεωλογία της περιοχής με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό, μπορεί να είναι πολύ σημαντικό σε περιπτώσεις όπου ο στόχος βρίσκεται σε έντονα ετερογενή χώρο.

Σχετικά με τις διατάξεις ηλεκτροδίων διατυπώνεται ο ακόλουθος σχολιασμός:·

- Η διάταξη Wenner-Schlumberger έχει περιορισμένη ικανότητα στον εντοπισμό πεπερασμένων στόχων, ειδικότερα όταν ο στόχος βρίσκεται σε περιοχές χαμηλής ευαισθησίας (βαθύτεροι στόχοι). Η διάταξη ενδείκνυται να χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ευρύτερης στρωματογραφίας και γενικότερα του γεωλογικού υποβάθρου. Επίσης, η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό μικρού βάθους στόχων ιδιαίτερα όταν υπάρχουν προβλήματα θορύβου ή άλλων περιορισμών στην περιοχή που αποτρέπουν την εφαρμογή των άλλων διατάξεων (π.χ. Dipole Dipole (DD)).
- Η διάταξη Dipole Dipole (DD) παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα στην οριοθέτηση υπόγειων ανοιγμάτων και αποτελεί ενδεδειγμένη επιλογή για τον εντοπισμό τέτοιων στόχων. Κύριο μειονέκτημα αποτελεί ο χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να μετριαστεί είτε με την επιλογή μετρήσεων όπου το $n \leq 6$ είτε με την επιλογή σχετικά μεγαλύτερων δίπολων ρεύματος για την ενδυνάμωση του σήματος. Επιπλέον με την εφαρμογή μετρήσεων με την αντιδιαμετρική τοποθέτηση των δίπολων ρεύματος και δυναμικού (forward & reversed) είναι δυνατός ο έλεγχος της αξιοπιστία «ύποπτων» μετρήσεων.
- Η διάταξη Pole Pole (PP), με περιορισμένο αριθμό μετρήσεων παρέχει τη μεγαλύτερη κατά βάθος άλλα και πλευρικά διασκόπηση, για ένα συγκεκριμένο μήκος αναπτύγματος, σε σχέση με τις άλλες διατάξεις, οριοθετώντας με καλή ακρίβεια πεπερασμένες δομές και δίδει τη δυνατότητα μιας ευρύτερης αποτύπωσης βαθύτερων σχηματισμών. Παρουσιάζει, όμως, μικρότερη διακριτική ικανότητα σε σχέση με τις διατάξεις Pole Dipole (PD) και Dipole Dipole (DD) και υπάρχουν προβλήματα όσον αφορά την τοποθέτηση των απομακρυσμένων ηλεκτροδίων άλλα και την πιθανή ύπαρξη τελουρικού θορύβου.
- Η διάταξη Pole Dipole (PD) παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων και κατατάσσεται, μαζί με την Dipole Dipole (DD), στις ενδεδειγμένες διατάξεις για υψηλής ανάλυσης αποτελέσματα όσον αφορά τον

εντοπισμό υπόγειων στόχων. Η διακριτική ικανότητα της μεθόδου ενισχύονται με την εφαρμογή forward και reversed μετρήσεων, αυξάνοντας όμως κατά πολύ τον απαιτούμενο αριθμό μετρήσεων. Ενώ ο υψηλότερος λόγος σήματος προς θόρυβο και το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα γραμμής αποτελεί πλεονέκτημα σε σχέση με τη Dipole Dipole (DD), η έλλειψη δυνατότητας στο ύπαιθρο για την τοποθέτηση του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου σε μεγάλη απόσταση μπορεί να αποτελέσει κύριο μειονέκτημα σε σχέση με την Dipole Dipole (DD).

- Όσον αφορά στη συνδυαστική ερμηνεία μετρήσεων διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων, για να επιτευχθεί η καλύτερη ερμηνεία της υπεδάφικης δομής, συνιστάται η ερμηνεία αρχικά των μετρήσεων κάθε διάταξης εκτιμώντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της και συνέχεια να αξιολογείται η επιπρόσθετη πληροφορία που προσφέρει η συνδυαστική ερμηνεία τους.
 - Η τεχνική βελτιστοποίησης της συνδυαστικής επεξεργασίας μοντέλων ερμηνείας διαφόρων διατάξεων, μπορεί να αποτελέσει ένα είδος φιλτραρίσματος του τελικού μοντέλου ερμηνείας όπου τονίζεται και ενισχύεται η ύπαρξη των πραγματικών δομών με την παράλληλη μείωση των μη αξιόπιστων μορφών και του θορύβου.
 - Όσον αφορά το πρωτόκολλο μετρήσεων είναι σημαντικό ο ερευνητής να λαμβάνει μετρήσεις που να καλύπτουν ένα ευρύτερο εύρος περίξ της περιοχής ενδιαφέροντος (σε μεγαλύτερα βάθη από το αναμενόμενο βάθος του στόχου) έτσι ώστε να αποκτάται μια περισσότερο εποπτική εικόνα του υπεδάφους και να αυξάνεται η διακριτική ικανότητα όσον αφορά τον υπόγειο στόχο. Επιπλέον η «ποιότητα» των μετρήσεων και η κατανομή της ευαισθησίας τους και όχι ο αριθμός τους, αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα για τη βελτίωση του τελικού μοντέλου ερμηνείας.
- v. Η **μικροβαρυντική μέθοδος** με πολύ μεγαλύτερο απαιτούμενο χρόνο λήψης μετρήσεων και «επίπונες» διαδικασίες υπαίθρου, παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την οριοθέτηση του στόχου χωρίς, όμως να είναι εύκολος ο άμεσος προσδιορισμός και η αποτύπωση της ευρύτερης γεωλογίας όπως π.χ. η ύπαρξη οριζόντιας στρωματογραφίας. Το αποτέλεσμα της επιτυχίας της μεθόδου εξαρτάται κατά πολύ από τις σωστές και προσεκτικές διαδικασίες λήψης των μετρήσεων αλλά και από την εφαρμογή των διάφορων απαιτούμενων διορθώσεων και τεχνικών επεξεργασίας των μετρήσεων.

Από την εφαρμογή της μικροβαρυντικής μεθόδου προκύπτουν τα παρακάτω:

- Οι προσεκτικές διαδικασίες λήψης σωστών μετρήσεων (κλείσιμο στη βάση σε μικρά χρονικά διαστήματα, επαναληπτικές μετρήσεις για την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο κ.α.) αποτελούν κύρια συστατικά μιας επιτυχής μικροβαρυντικής έρευνας.

- Με την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας (φίλτρα διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, διαχωρισμός μικρής από μεγάλη κλίμακας ανωμαλία κ.α.) είναι δυνατός ο καλύτερος εντοπισμός της ανωμαλίας που προκύπτει από τον στόχο ενδιαφέροντος, βελτιώνοντας κατά πολύ την τελική ερμηνεία
 - Ο μη τετραγωνικός κάρναβος μετρήσεων δεν δημιουργήσε προβλήματα στην ανάλυση της μεθόδου. Καλύτερα να μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των σταθμών μέτρησης ως προς τη μία διάσταση (για την επίτευξη μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης της έρευνας) παρά να γίνεται προσπάθεια επιτάχυνσης των διαδικασιών λήψης των μετρήσεων εις βάρος της ακρίβειας.
 - Η επίδραση της μακρινής τοπογραφίας (πέρα των 160 m) είναι σχεδόν αμελητέα στην περίπτωση μικρών αναπτυγμάτων γραμμών διασκόπησης. Οι τοπογραφικές διορθώσεις οφείλονται κυρίως στην εγγύς τοπογραφία.
 - Τα μοντέλα ερμηνείας που προκύπτουν από την αντιστροφή των μικροβαρυντικών μετρήσεων και παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή της πυκνότητας του υπεδάφους, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη θέση του στόχου ενδιαφέροντος και δίνουν τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης τους με τα αποτελέσματα άλλων γεωφυσικών μεθόδων.
 - Η διαθέσιμη πληροφορία από άλλες γεωφυσικές μεθόδους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου κατά τη διαδικασία της αντιστροφής των μετρήσεων.
 - Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται στη γεωλογική ερμηνεία τέτοιων μοντέλων λόγω του προβλήματος της ισοδυναμίας. Η ταύτιση της ερμηνείας τους με άλλες γεωφυσικές μεθόδους ή γεωτεχνικές πληροφορίες, αυξάνει κατά πολύ την αξιοπιστία τους και εξισορροπεί το πρόβλημα της ισοδυναμίας.
- vi. **Η μέθοδος της Πολυκάναλης Ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων** με μέτριο χρόνο λήψης μετρήσεων (μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της ηλεκτρικής τομογραφίας και με δυσκολότερη διαδικασία υπαίθρου –μετακίνηση καλωδίων και επαναληπτικές εκρήξεις) μπορεί να δώσει πληροφορίες για την ύπαρξη πλευρικών ανομοιογενειών άλλα και στρωματογραφίας στην περιοχή έρευνας. Κύριο μειονέκτημα κατά την ερμηνεία της μεθόδου είναι η παραδοχή της μονοδιάστατης προσέγγισης και η μη ύπαρξη διδιάστατων και τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας.

Από την εφαρμογή της μεθόδου Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων διατυπώνονται τα κάτωθι:

- Χρησιμοποιώντας την τεχνική roll- along είναι δυνατή η διδιάστατη διασκόπηση του υπεδάφους με τη δημιουργία ψευδοδιδιάστατου χάρτη της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων.
- Πέραν της οριοθέτησης πλευρικών ανομοιογενειών ήταν δυνατός ο χαρακτηρισμός της στρωματογραφίας της περιοχής με ικανοποιητική ακρίβεια.

- Η εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας (φίλτρα διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων) στο ψευδοδιδιάστατο χάρτη της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων είναι δυνατή και έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση του στόχου έρευνας.
 - Πέραν του χάρτη διδιάστατης κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, είναι εφικτός ο εντοπισμός της επιδρασης ενός υπόγειου στόχου στο συχνοτικό πεδίο. Χρησιμοποιώντας το Φάσμα ισχύος που προκύπτει από το αντίστοιχο σεισμόγραμμα είναι δυνατή η οριοθέτηση του στόχου έρευνας. Το υπόγειο άνοιγμα αλληλεπιδρά με το προσπίπτον επιφανειακό κύμα με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ενεργειακή συγκέντρωση σε συγκεκριμένες συχνότητες στο συχνοτικό πεδίο.
 - Τα μοντέλα ερμηνείας που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα μοντέλα ερμηνείας των άλλων μεθόδων βοηθώντας σημαντικά στο καλύτερο χαρακτηρισμό του υπεδάφους στην περιοχή έρευνας.
- vii. Η μέθοδος της μαγνητικής μεθόδου και ιδιαίτερα της διαφορικής μαγνητομέτρησης με μικρό απαιτούμενο χρόνο συλλογής μετρήσεων και εύκολες διαδικασίες υπαίθρου μπορεί, να οριοθετήσει με επιτυχία τον υπόγειο στόχο με βασική προϋπόθεση, όσον αφορά στην περίπτωση των υπόγειων ανοιγμάτων, την ύπαρξη μεγάλης διαφοράς μαγνητικής επιδεκτικότητας μεταξύ στόχου και περιβάλλοντα σχηματισμού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιβεβαίωσε απόλυτα το ισχυρισμό ύπαρξης του οπλισμού στον αγωγό.

Από την εφαρμογή της μαγνητικής μεθόδου προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Η μαγνητική έρευνα δίδει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις υπόγειων ανοιγμάτων ανθρωπογενούς δραστηριότητας αφού τα μεταλλικά μέρη τέτοιων κατασκευών αποτελούν πολύ σημαντική πηγή δημιουργίας μιας μαγνητικής ανωμαλίας εύκολα παρατηρούμενης στην επιφάνεια του εδάφους
- Η μέθοδος τη διαφορικής μαγνητομέτρησης παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα μειώνοντας κατά πολύ τον απαιτούμενο χρόνο για τη λήψη και την επεξεργασία των μετρήσεων (δεν απαιτούνται διορθώσεις των τιμών λόγω της χρονικής μεταβολής του μαγνητικού πεδίου) και αυξάνοντας ταυτόχρονα και τη διακριτική ικανότητα της μεθόδου.
- Οι διάφορες τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων βοηθούν κατά πολύ στην καλύτερη οριοθέτηση, άλλα και στην καλύτερη απεικόνιση του στόχου έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :

**Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση για
τον Εντοπισμό Αρχαίας Στοάς στον
Αρχαιολογικό Χώρο Μπερτσέκο Λαυρίου**

4.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο στάδιο της παρούσας εργασίας κύριος στόχος αποτέλεσε η αξιολόγηση της συνδυαστικής γεωφυσικής διερεύνησης του υπεδάφους όσον αφορά στην ικανότητα εντοπισμού και χαρτογράφησης υπόγειων ανοιγμάτων και ειδικότερα υπόγειων στοών.

Συγκεκριμένα, στόχος αποτέλεσε η χαρτογράφηση αρχαίας στοάς στον αρχαιολογικό χώρο Μπερτσέκο στη περιοχή του Λαυρίου (Φωτ. 4.1).

Η κύρια διαφοροποίηση με το προηγούμενο πείραμα στον αγωγό της Πολυτεχνειούπολης, αποτελεί το γεγονός ότι η διεύθυνση της στοάς είναι άγνωστη, με αποτέλεσμα το πρόβλημα να μεταφέρεται από τις δύο στις τρεις διαστάσεις. Επίσης, το μικρό μέγεθος της στοάς αποτελεί ένα επιπλέον παράγοντα που συντελεί στη καλύτερη σύγκριση των μεθόδων αλλά και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.



Φωτογραφία 4.1: Παράδειγμα κατάρρευσης εγκαταλελειμμένου υπόγειου μεταλλείου στην περιοχή Earham Norwich στην Αγγλία (Styles et al., 2004).

Πέρα όμως από το στενό ενδιαφέρον της συγκεκριμένης εφαρμογής, ο εντοπισμός παλαιών εγκαταλελειμμένων μεταλλευτικών δραστηριοτήτων αποτελεί πολλές φορές αντικείμενο έρευνας των γεωφυσικών μεθόδων. Όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 1, η ύπαρξη τέτοιων δομών στο υπέδαφος και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι μεταλλευτικοί χάρτες που να υποδεικνύουν την ακριβή θέση τους, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα.

4.2 Περιοχή-Αντικείμενο Έρευνας

Το Λαύριο είναι απόλυτα συνυφασμένο με τα μεταλλεία του, τα οποία καθόρισαν την ιστορική μοίρα του για 5000 χρόνια, από το 3000 π.Χ. έως σήμερα.

Τη μεταλλευτική δραστηριότητα ξεκίνησαν οι αρχαίοι Έλληνες πριν το 3.000 π.Χ. Η συστηματική και εντατική εκμετάλλευση των αργυρομολυβδούχων μεταλλευμάτων αρχίζει με τη γέννηση της Αθηναϊκής Δημοκρατίας το 508 π.Χ. Με τον άργυρο του Λαυρίου και τους φόρους των συμμάχων ο Περικλής κατασκεύασε τα αθάνατα μνημεία του Χρυσού Αιώνα των Αθηνών. Μετά την κλασική αρχαιότητα διακόπτεται κάθε

σοβαρή μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα και ακολουθούν πολλοί αιώνες σιωπής (Δερμάτης, 2003).

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στην αρχαιολογική θέση Μπερτσέκο. Το συγκρότημα Μπερτσέκο καθορίστηκε ως χώρος ανασκαφής, αφού το έτος 1968 στην περιοχή είχαν εντοπιστεί δύο ασβεστολιθικά τμήματα από ελικοειδές πλυντήριο με τις χαρακτηριστικές κοιλότητες (Τσάμιου, 2005).

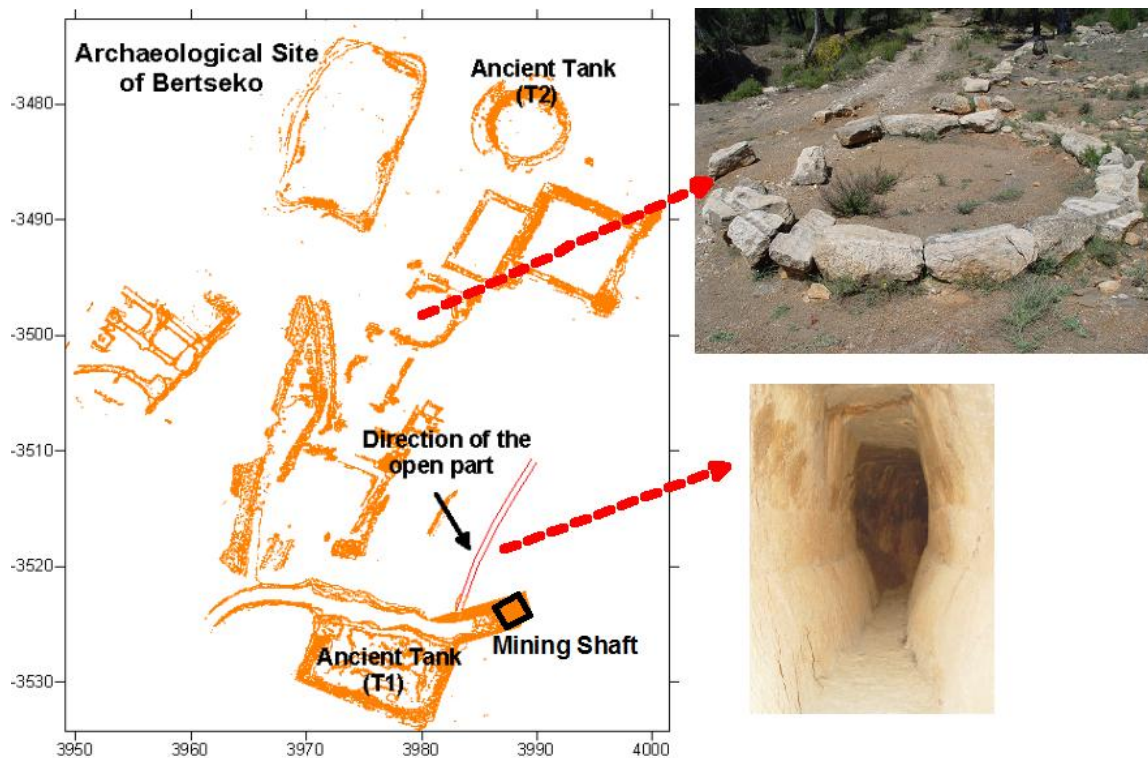
Πρόκειται για ένα συγκρότημα εμπλουτισμού μεταλλευμάτων που περιλαμβάνει εκτός από το ελικοειδές πλυντήριο και τρία επίπεδα πλυντήρια πλαισιωμένα με τριβεία, δεξαμενές νερού, και με τα διάφορα δωμάτια. Το συγκρότημα έχει υποστεί μεγάλη καταστροφή από τη σύγχρονη μεταλλευτική δραστηριότητα που αναπτύχθηκε στην περιοχή τον προηγούμενο αιώνα. Κατά την ανάπλαση του αρχαιολογικού χώρου πραγματοποιήθηκε η αποκατάσταση του ελικοειδούς πλυντηρίου με τα μαρμάρινα τμήματα του πλυντηρίου που βρέθηκαν διάσπαρτα στη γύρω περιοχή (Φωτ. 4.2).

Το συγκρότημα Μπερτσέκο βρίσκεται σε απόσταση 400 m περίπου από το χωριό Καμάριζα (Άγιος Κωνσταντίνος) και σε μικρή απόσταση από το δρόμο που οδηγεί από Καμάριζα στα Λεγραινά. Το συγκρότημα χρονολογείται από τα τέλη του 5ου π.Χ. αιώνα μέχρι και την υστερορωμαϊκή εποχή.



Φωτογραφία 4.2: Άποψη της περιοχής έρευνας στον αρχαιολογικό χώρο Μπερτσέκο.

Στον αρχαιολογικό χώρο του Μπερτσέκο, κατά τη διάρκεια των αρχαιολογικών ανασκαφών, αποκαλύφθηκε η είσοδος αρχαίας στοάς. Η στοά ήταν προσπελάσιμη τα πρώτα 15 m, ενώ γινόταν μη προσβάσιμη λόγω διάφορων προσχώσεων και φερτών υλικών. Είναι πεταλοειδούς μορφής διαστάσεων 0.7m x 1.5 m , περίπου σε βάθος 4-6 m από την επιφάνεια του εδάφους και βρίσκεται σε σχιστολιθικό σχηματισμό. Λίγα μέτρα από την είσοδο της στοάς, το ύψος μειώνεται περίπου στο 1 m. Με κόκκινη γραμμή εμφανίζεται στην Εικόνα 4.1 η πορεία του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς στον αρχαιολογικό χώρο.



Εικόνα 4.1: Σχεδιάγραμμα του αρχαιολογικού χώρου και η θέση του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς.

Επιπλέον στον αρχαιολογικό χώρο ανακαλύφθηκαν δύο αρχαίες δεξαμενές T1, T2 (Εικ. 4.1) οι οποίες χρησίμευαν για την κάλυψη των αναγκών σε νερό του εμπλουτισμού.

Το κύριο ερώτημα των αρχαιολόγων αφορούσε εάν η στοά συνδεόταν με τις αρχαίες δεξαμενές T1-T2 ή ήταν τμήμα ενός αρχαίου μεταλλείου. Επομένως, στόχος της συνδυαστικής γεωφυσικής διερεύνησης αποτελούσε η διερεύνηση της προσπελασιμότητας της στοάς μετά το σημείο παύσης των αρχαιολογικών εργασιών και η χαρτογράφηση της πορείας της.

4.3 Γεωλογία της Περιοχής

Η ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου, όπως και όλη η ΝΑ Αττική αποτελεί τμήμα της μεταμορφωμένης Αττικοκυκλαδικής Μάζας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της Λαυρεωτικής είναι μεταμορφωμένοι ή ημιμεταμορφωμένοι, αποτελούμενοι από μάρμαρα, δολομιτικά μάρμαρα ή δολομίτες, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους και φυλλίτες. Περιορισμένης έκτασης τριτογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμοί εμφανίζονται σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο.

Η πρώτη συστηματική γεωλογική και πετρολογική μελέτη της Αττικής έγινε από τον LEPSIUS (1893), σύμφωνα με τον οποίον υπάρχει ένα μεταμορφωμένο σύστημα από σχιστόλιθους, μάρμαρα και δολομίτες, (προκάμβριας ηλικίας) στο οποίο επικάθεται με

στρωματογραφική ασυμφωνία, κατόπιν επικλύσεως, άλλο σύστημα αποτελούμενο από ασβεστολίθους και σχιστόλιθους (Ιουρασικό - Κρητιδικό).

Αργότερα ο KOBER (1929) υποστήριξε ότι στην ορεινή περιοχή νότια των Αθηνών επικρατεί σε γενικές γραμμές η τεκτονική των επωθήσεων και ότι τα Θεωρούμενα ως προκάμβριας ηλικίας μεταμορφωμένα στρώματα αυτής (μάρμαρα και σχιστόλιθοι) είναι μεσοζωικής ηλικίας.

Οι εργασίες των MAPINOY - PETRASCHECK (1951 - 1953) έδειξαν ότι στην περιοχή της Λαυρεωτικής υπάρχουν δύο συστήματα στρωμάτων. Το αυτόχθονα μεταμορφωμένο σύστημα, που αποτελεί τη σειρά Υμηττού - Νότιας Αττικής και οι σχηματισμοί που παλαιότερα είχαν θεωρηθεί επικλυσιογενείς αποτελούν ένα τεκτονικό κάλυμμα το οποίο ονόμασαν Φυλλιτικό τεκτονικό κάλυμμα.

Σειρά Υμηττού - Νότιας Αττικής (αυτόχθονα σύστημα)

Η σειρά Υμηττού - Νότιας Αττικής αποτελείται από μάρμαρα, δολομίτες και κρυσταλλικούς ασβεστολίθους, έχει δε γνωστό πάχος άνω των 1000 μέτρων (το υπόβαθρο αυτού είναι άγνωστο). Χωρίζεται συνήθως σε τρεις διαπλάσεις, το κατώτερο μάρμαρο, το σχιστόλιθο Καισαριανής ή Καμάριζας και το ανώτερο μάρμαρο. Ο παραπάνω διαχωρισμός σε τρεις βαθμίδες είναι γενικός, καθώς σε πολλά μέρη το σύνολο του αυτόχθονου συστήματος αποτελείται από εναλλαγές μαρμάρων και σχιστολίθων ποικίλου πάχους, χωρίς να είναι πάντα δυνατή η διάκριση σε σαφείς ξεχωριστούς ορίζοντες.

Η διαδοχή των στρωμάτων του αυτόχθονου συστήματος (μάρμαρα και σχιστόλιθοι) είναι κανονική, με βαθμιαίες πολλές φορές μεταβάσεις από το ένα πέτρωμα στο άλλο. Παρατηρούνται μόνο σε μερικές θέσεις τοπικές ασυμφωνίες με λεπτά κροκαλοπαγή επικλύσεως, μεταξύ μαρμάρων και σχιστολίθων.

Κατά τους Γ. MAPINO - W. PETRASCHECK η ηλικία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων του αυτόχθονου συστήματος είναι μεσοζωϊκή και μάλιστα ανωτριάδικη (ίσως και κατωϊουρασική), καθώς εντός του κατωτέρου μαρμάρου του Κερατοβουνίου βρέθηκαν απολιθώματα (τομές Βραχιονοπόδων και Ασβεστοφύκη).

Το κατώτερο μάρμαρο

Έχει μεγάλο πάχος (άνω των 800 μέτρων) και σημαντική εξάπλωση σε όλη τη ΝΑ Αττική. Μέσα στα βαθύτερα γνωστά τμήματα αυτού (Νότιος Υμηττός, Κερατοβούνι, Όλυμπος, Καμάριζα) υπάρχουν δολομίτες και κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι (δολομίτες Πιρναρής, σχιστόλιθοι Βάρης). Είναι λευκό έως κυανότεφο κοκκώδες μάρμαρο, ενώ κατά θέσεις εμφανίζεται ροδόχρουν. Το ανώτερο τμήμα του κατώτερου μαρμάρου εμφανίζει διαφορετική όψη στα δύο μισά της Λαυρεωτικής χερσονήσου. Στο ανατολικό τμήμα είναι λευκό και σε στρώματα μεγάλου πάχους, ενώ στο δυτικό τμήμα είναι σχεδόν χωρίς στρώση, λατυποπαγές και συνήθως ροδόχρουν έως καστανό.

Σχιστόλιθοι Καισαριανής (Καμάριζας)

Είναι κυρίως μοσχοβιτικοί και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και φυλλίτες, συνήθως μαύροι (με γραφίτοειδή), με ενστρώσεις μαρμάρων συνήθως λεπτοστρωματωδών. Το πάχος των σχιστολίθων μεταξύ των δύο μαρμάρων κυμαίνεται από μηδέν έως τριακόσια (300) και πλέον m. Η διαφορά αυτή είναι κυρίως πρωτογενής από την περίοδο της ιζηματογένεσης. Στην περιοχή της Πλάκας οι σχιστόλιθοι έχουν μεταμορφωθεί εξ επαφής σε κερατίτες, γύρω από το γνωστό γρανοδιοριτικό όγκο της Πλάκας.

Ανώτερο μάρμαρο

Είναι λευκό έως τεφρό, σε λεπτότερα συνήθως στρώματα απ' ότι εμφανίζεται το κατώτερο μάρμαρο. Σε εκσκαφή λατομείου κοντά στο Λαύριο εμφανίζεται σε δύο οριζόντες, πλήρως διαχωρισμένους χρωματικά. Ο κατώτερος ορίζοντας είναι χρώματος λευκού, ενώ ο ανώτερος είναι χρώματος τεφρού. Το συνολικό πάχος του ανώτερου μαρμάρου κυμαίνεται από λίγα έως και 100 m. Έχει σημαντική εξάπλωση κυρίως στη νοτιοανατολική πλευρά της Λαυρεωτικής και στο βόρειο Υμηττό.

Η σειρά του επωθημένου φυλλιτικού καλύμματος

Οι σχηματισμοί Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος που εμφανίζονται σε διάφορες περιοχές της Νότιας Αττικής, βρίσκονται επωθημένοι πάνω στους σχηματισμούς του αυτόχθονου συστήματος της σειράς Υμηττού - Νότιας Αττικής.

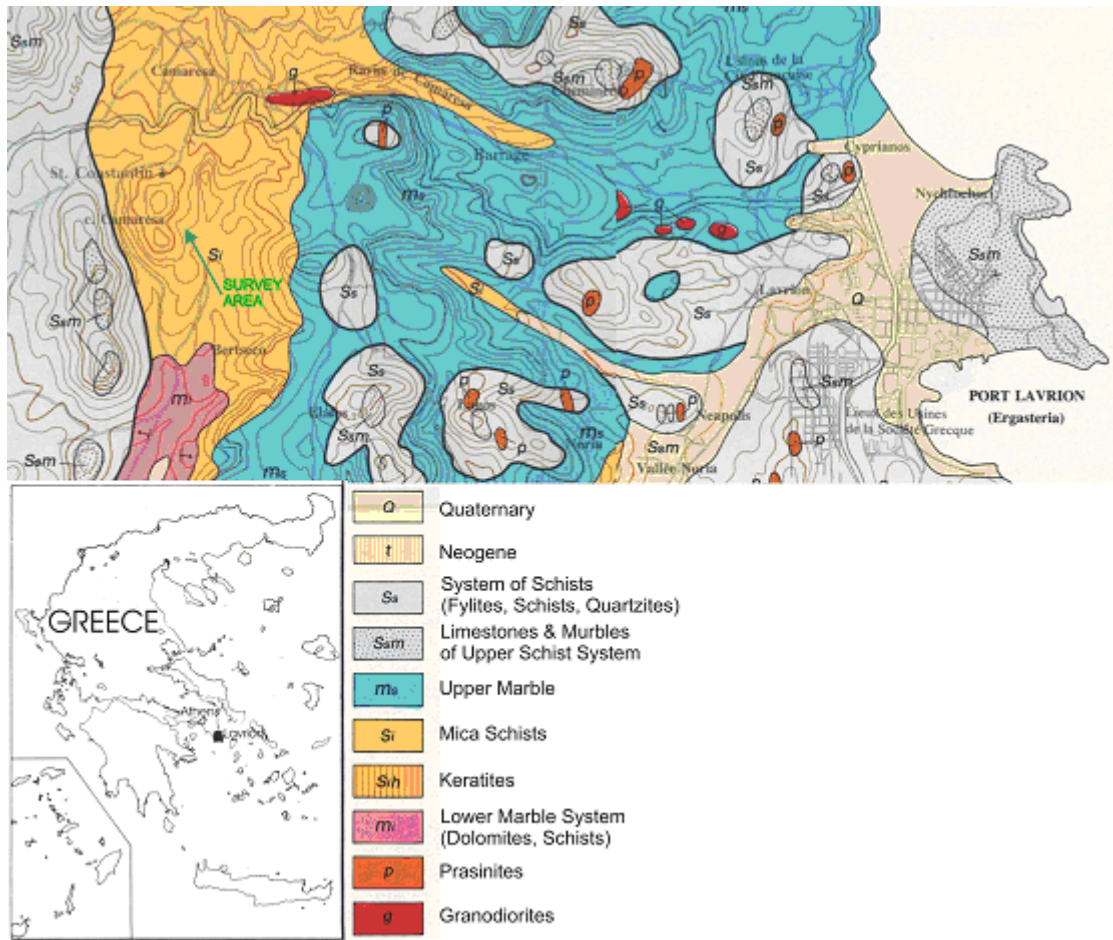
Οι σχηματισμοί του Νεοελληνικού τεκτονικού καλύμματος της Νότιας Αττικής, όπως προαναφέρθηκε, παλαιότερα είχαν θεωρηθεί ως επικλυσιογενείς (LEPSIUS 1891/1893). Ο L. KOBER το 1929 κάνει λόγο για τεκτονική επωθήσεων και αργότερα οι Γ. ΜΑΡΙΝΟΣ - W. PETRASCHECK (1956) διαπίστωσαν ότι οι σχηματισμοί αυτοί είναι επωθημένοι και αποτελούν ένα τεκτονικό κάλυμμα, το οποίο ονόμασαν Φυλλιτικό τεκτονικό κάλυμμα.

Το συνολικό πάχος των σχηματισμών του Φυλλιτικού καλύμματος υπερβαίνει πολλές φορές τα 800 m. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούνται, κυρίως, από φυλλίτες, σερικιτικούς και χαλαζιακούς σχιστόλιθους και χαλαζίτες, με παρεμβολές μεταμορφωμένων βασικών εκρηξιγενών (πρασινιτών). Επίσης απαντώνται σ' αυτούς ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, ποικίλου πάχους, κυρίως στα ανώτερα μέλη των σχηματισμών του τεκτονικού καλύμματος. Πρόκειται για μυλονιτιωμένα μάρμαρα, συνήθως χρώματος καστανού λόγω αγκεριτώσεως από τη δράση μεταγενέστερων σιδηρούχων διαλυμάτων. Μυλονιτίωση, δολομιτίωση και αγκεριτίωση υπέστη επίσης και το ανώτερο τμήμα του ανώτερου ή του κατώτερου μαρμάρου, το οποίο βρέθηκε κάτω από την επιφάνεια της επώθησης. Τα αγκεριτιωμένα αυτά μάρμαρα, στη βάση του επωθημένου καλύμματος θεώρησε ο LEPSIUS σαν ιδιαίτερο στρωματογραφικό ορίζοντα, τον οποίο ονόμασε κατώτερο ασβεστόλιθο ή σιδηρούχο ασβεστόλιθο.

Η ηλικία των πετρωμάτων του επωθημένου καλύμματος δεν είναι γνωστή καθώς δεν βρέθηκαν απολιθώματα. Από συγκριτικές γεωλογικές και πετρολογικές παρατηρήσεις, στην ανατολική Ελλάδα, φαίνεται πιθανό ότι μάλλον πρόκειται για ημιμεταμορφωμένα μεσοζωϊκά σχιστοπυριτικά ιζήματα, με οφειολίθους εντός αυτών.

Τεταρτογενείς αποθέσεις

Οι μικρές κοιλάδες που αναπτύσσονται στην περιοχή της Λαυρεωτικής και κυρίως οι ζώνες αυτών με χαμηλό υψόμετρο έχουν καλυφθεί από προσχωματικές αλλουβιακές αποθέσεις. Αποτελούνται κυρίως από ασύνδετα κοκκώδη υλικά, σε ποικίλες προσμίξεις από άμμους, αμμοχάλικα και αργίλους, τα οποία εμφανίζονται άλλοτε υπό οριζόντια στρώση και άλλοτε υπό μικρή κλίση ή φακοειδή ανάπτυξη.



Χάρτης 4.1: Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής έρευνας.

4.5 Εντοπισμός Αρχαίας Στοάς με τη Μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας

4.5.1 Στόχος του πειράματος

Πέρα από τη χαρτογράφηση της αρχαίας στοάς, η εφαρμογή αυτή παρείχε την ευκαιρία για περαιτέρω διερεύνηση παραγόντων που επιδρούν σημαντικά στο βαθμό επιτυχίας της μεθόδου της Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

Ο σχεδιασμός της έρευνας, που περιλαμβάνει την επιλογή της διάταξης, το πρωτόκολλο και τον κάνναβο των μετρήσεων, τον προσανατολισμό των γραμμών διασκόπησης, την εφαρμογή διδιάστατων ή τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας αλλά και την απεικόνιση και την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι κάποιιοι από τους παράγοντες που επιδρούν καθοριστικά στην αξιοπιστία των μοντέλων ερμηνείας.

Όσον αφορά στην ηλεκτρική τομογραφία, ανάλογα με τις συνθήκες και τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος που πρέπει να αντιμετωπιστεί, οι επικρατούσες διεθνείς αλλά και ελληνικές πρακτικές βασίζονται:

α) Στην εφαρμογή μη παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης ηλεκτρικής τομογραφίας, οι οποίες ερμηνεύονται με διδιάστατες τεχνικές ερμηνείας και παρέχουν την ψευδοτριδιάστατη κατανομή της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

Η βασική παραδοχή ότι η ειδική αντίσταση του υπεδάφους μεταβάλλεται μόνο ως προς τις δύο διαστάσεις (x,z), μπορεί να εισαγάγει σημαντικά λάθη στη ερμηνεία των μετρήσεων, με αποτέλεσμα τα μοντέλα ερμηνείας να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματική δομή του υπεδάφους.

β) Στην εφαρμογή παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης ηλεκτρικής τομογραφίας, οι οποίες ερμηνεύονται με τριδιάστατες τεχνικές ερμηνείας (Dahlin, 1997).

Σύμφωνα με διάφορους ερευνητές (Loke, 2003 ; Tsourlos 2004 ; Dahlin, 2007), στη τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία η λήψη πυκνών παράλληλων γραμμών διασκόπησης αρκεί για να είναι δυνατή η ικανοποιητική τριδιάστατη διασκόπηση του υπεδάφους, παρόλο που είναι επιθυμητή η λήψη μετρήσεων και προς τις δύο διαστάσεις x και y (cross line measurements). Μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων (Yang 2006, Johansson et al., 2007, Dahlin 2007) αναδεικνύει την αποτελεσματικότητα των τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας σε σύγκριση με τις διδιάστατες (ψευδοτριδιάστατες). Όμως, η εφαρμογή της πολλές φορές στο ύπαιθρο συνοδεύεται με προβλήματα όπως η παρουσία διαφόρων εμποδίων ή έντονων επιφανειακών ανομοιογένειών ή η έλλειψη πυκνού κάνναβου μετρήσεων, με αποτέλεσμα την αρνητική επίδραση στην ανάλυση της μεθόδου.

Στην εφαρμογή αυτή, εκτός από τη σύγκριση των ψευδοτριδιάστατων και τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας, αναπτύσσεται συγκεκριμένη στρατηγική λήψης, επεξεργασίας και ερμηνείας των μετρήσεων που συνδυάζει τις δύο ανωτέρω προσεγγίσεις, με στόχο τη βέλτιστη αποτύπωση του στόχου έρευνας.

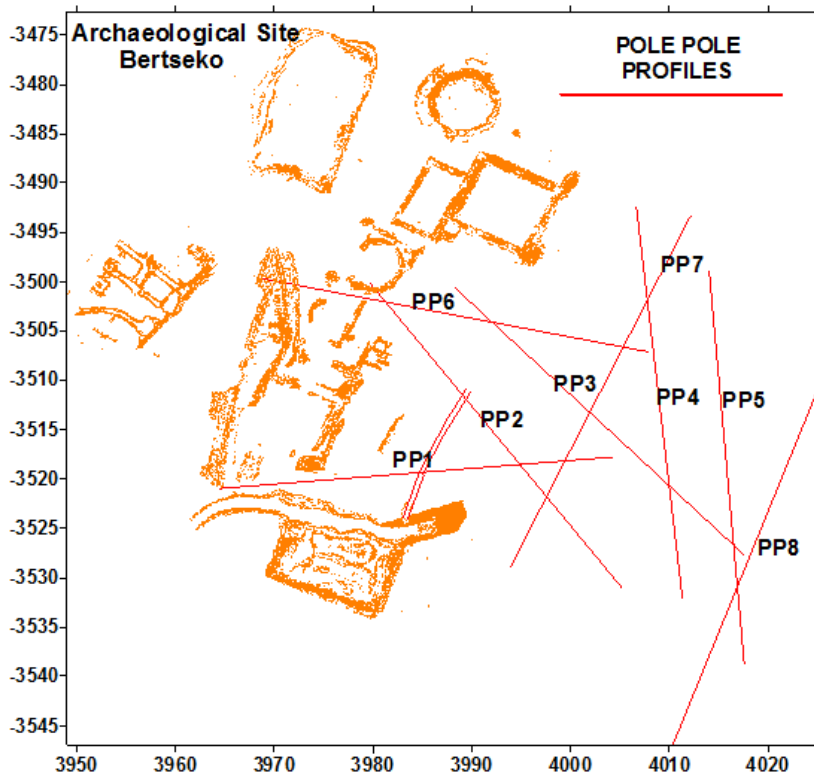
4.5.2 Ψευδο-τριδιάστατη και Τριδιάστατη Ηλεκτρική Τομογραφία μη Παράλληλα Διατεταγμένων Γραμμών Διασκόπησης με τη Διάταξη Pole Pole (PP)

4.5.2.1 Σχεδιασμός Έρευνας

Από την ανάλυση των διάφορων διατάξεων ηλεκτροδίων που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3, η διάταξη Pole Pole (PP) με αρκετά μικρό αριθμό απαραίτητων μετρήσεων δίδει μοντέλα ερμηνείας με μεγάλη πλευρική κάλυψη, μεγάλο βάθος διασκόπησης και επιπλέον καλή οριοθέτηση του στόχου.

Όσο αφορά στο σχεδιασμό της έρευνας για τον εντοπισμό της αρχαίας στοάς ακολουθήθηκε συγκεκριμένη στρατηγική για τη λήψη των μετρήσεων :

- Πραγματοποιήθηκαν 8 τομές ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Pole (PP) με το αυτοματοποιημένο σύστημα Lund.
- Κάθε γραμμή διασκόπησης περιελάμβανε 41 ηλεκτρόδια σε απόσταση 1m μεταξύ τους, ώστε να υπάρχει επαρκής κάλυψη τιμών στο επιθυμητό βάθος αλλά και ικανοποιητική ανάλυση κατά μήκος της γραμμής.
- Το πρωτόκολλο μετρήσεων ($a=3,4,5,6,8,10,12,14,16,18,20$) επιλέχτηκε έτσι ώστε να διασκοπείται με μεγάλη ευαισθησία το επιθυμητό βάθος (τα πρώτα 8m) αλλά να είναι δυνατή και η βαθύτερη διασκόπηση του υπεδάφους.
- Τα απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν σε απόσταση μεγαλύτερη των 300 m από τη γραμμή διασκόπησης και σε σχεδόν αντιδιαμετρική θέση μεταξύ τους ώστε να μην επηρεάζεται η ορθότητα των μετρήσεων.
- Οι γραμμές διασκόπησης δεν ακολουθούσαν ορθογωνικό κάναβο έτσι ώστε να είναι δυνατή η διασκόπηση μιας ευρύτερης περιοχής αλλά και η αποφυγή διαφόρων επιφανειακών ανομοιογενειών, όπως αρχαία τείχια αλλά και μικρά επιφανειακά κοιλώματα (Εικ. 4.2).
- Τα δεδομένα κάθε γραμμής διασκόπησης ερμηνεύονταν επί τόπου στο ύπαιθρο. Με βάση το προκύπτον μοντέλο ερμηνείας οριζόταν η θέση και η διεύθυνση της νέας γραμμής διασκόπησης έτσι ώστε να ακολουθείται κατά το δυνατόν η πιθανή πορεία της αρχαίας στοάς.
- Η πρώτη γραμμή πραγματοποιήθηκε πάνω από τη θέση του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς ώστε να διερευνηθεί η διακριτική ικανότητα της Pole Pole (PP) και γενικότερα της ηλεκτρικής τομογραφίας στην αποτύπωση της στοάς, καθώς και να δημιουργηθεί βάση σύγκρισης των υπόλοιπων γραμμών διασκόπησης. Επιπλέον, από την ερμηνεία της πρώτης γραμμής προσδιορίστηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές για τη βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων αντιστροφής των επόμενων τομών.



Εικόνα 4.2: Οι τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Pole (PP) σε σχέση με το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς και τις εγκαταστάσεις του αρχαίου πλυντηρίου

B

4.5.2.2 Επεξεργασία Μετρήσεων

Μετά την αρχική ερμηνεία των μετρήσεων στο ύπαιθρο (Φωτ. 4.3) ακολούθησε η περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων στο εργαστήριο.



Φωτογραφία 4.3: Αρχικά επί τόπου επεξεργασία των μετρήσεων στο ύπαιθρο.

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων αποτέλεσε η δημιουργία των τομών μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων για κάθε γραμμή διασκόπησης, με σκοπό να επιτευχθεί μια πρώτη αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων.

Σε γενικές γραμμές τα δεδομένα παρουσίαζαν αρκετά μεγάλη αξιοπιστία χωρίς να εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ γειτονικών μετρήσεων, εκτός από ορισμένες τιμές οι οποίες ήταν εμφανώς λανθασμένες λόγω της μεγάλης αντίστασης επαφής σε ορισμένα σημεία άλλα και λόγω προβληματικής επαφής ορισμένων ηλεκτροδίων (ελάχιστος αριθμός σε σχέση με το σύνολο των μετρήσεων).

Μια πρώτη αξιολόγηση των μετρήσεων, έγινε με τη διερεύνηση του αρχικού αρχείου μετρήσεων (amp file), το οποίο παρέχει αναλυτικά στοιχεία για τη παρεχόμενη ένταση του ρεύματος, το μετρούμενο δυναμικό αλλά και το ποσοστό λάθους μεταξύ μετρήσεων επαναλαμβανόμενων στο ίδιο σημείο (Εικ. 4.3). Ήταν, επομένως, δυνατόν να αφαιρεθούν απευθείας οι μετρήσεις που παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση. Επίσης, η τάξη μεγέθους του μετρούμενου δυναμικού αποτελεί βασικό παράγοντα για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων. Δηλαδή μετρήσεις με μετρούμενο δυναμικό μικρότερο από τα όρια του θορύβου, πρέπει να αφαιρούνται.

```

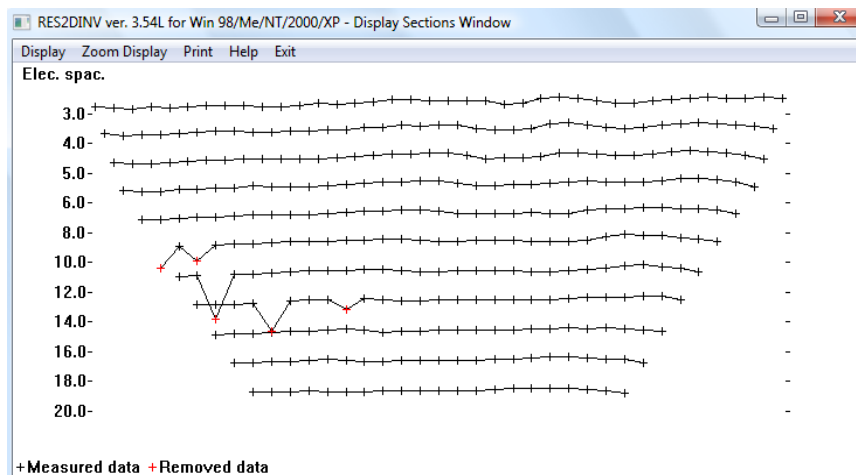
Filename: C:\MYDOCU~1\chris\DIDAKT~2\METRIS~1\LAYRIO~1\POLE-D~1\lr00015.s4k
Instrument ID: SAS1000 2992331
Date & Time: 06/07/2005 08:03:45
Base station: 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
Rows header/data/topography: 27 264 0
Acquisition mode: 2
Measurement method: Section
Electrode layout: 6 Pole-Dipole PDP
Co-ordinate type: Index
Smallest electrode spacing: 1.00
Marine survey (R,h,a,b): - - - -

```

No.	Time	Tx	Rx	Dx	I(mA)	Voltage(V)	App.R. (ohmm)	Error(%)
1	208	-20.000	24.000	6.000	200	0.179085	675.136134	nan
2	221	-19.000	24.000	6.000	200	0.176232	664.379093	nan
3	234	-18.000	24.000	6.000	200	0.158713	598.332367	nan
4	253	-20.000	18.000	6.000	200	0.384630	870.011621	nan
5	266	-19.000	18.000	6.000	200	0.349611	790.800688	nan
6	282	-18.000	18.000	6.000	100	0.175514	794.005204	nan
7	295	-17.000	18.000	6.000	200	0.375890	850.242701	nan
8	308	-16.000	18.000	6.000	200	0.351446	794.953006	nan
9	321	-15.000	18.000	6.000	200	0.328519	743.093520	nan
10	341	-14.000	18.000	6.000	50	0.076625	693.288298	nan
11	354	-13.000	18.000	6.000	200	0.229708	519.587749	nan
12	684	-12.000	18.000	6.000	200	0.268279	606.832649	nan
13	708	-20.000	20.000	5.000	200	0.256446	805.649856	nan
14	721	-19.000	20.000	5.000	200	0.257244	808.157330	nan
15	747	-18.000	20.000	5.000	50	0.063132	793.340334	nan
16	760	-17.000	20.000	5.000	200	0.245791	772.175144	nan
17	773	-16.000	20.000	5.000	200	0.226176	710.554057	nan

Εικόνα 4.3: Παράδειγμα αρχείου αναλυτικής περιγραφής των μετρήσεων.

Επιπλέον, με την επιλογή «exterminate bad datum points» που παρέχει το πρόγραμμα Res2dinv μπορεί εύκολα να αφαιρεθούν οι εμφανώς λανθασμένες τιμές από το χρήστη έτσι ώστε να προχωρήσει η διαδικασία της αντιστροφής χωρίς την ύπαρξη λανθασμένων μετρήσεων που μπορεί να δυσχεραίνουν την ερμηνεία (Εικ. 4.4).



Εικόνα 4.4: Αφαίρεση εμφανώς λανθασμένων μετρήσεων.

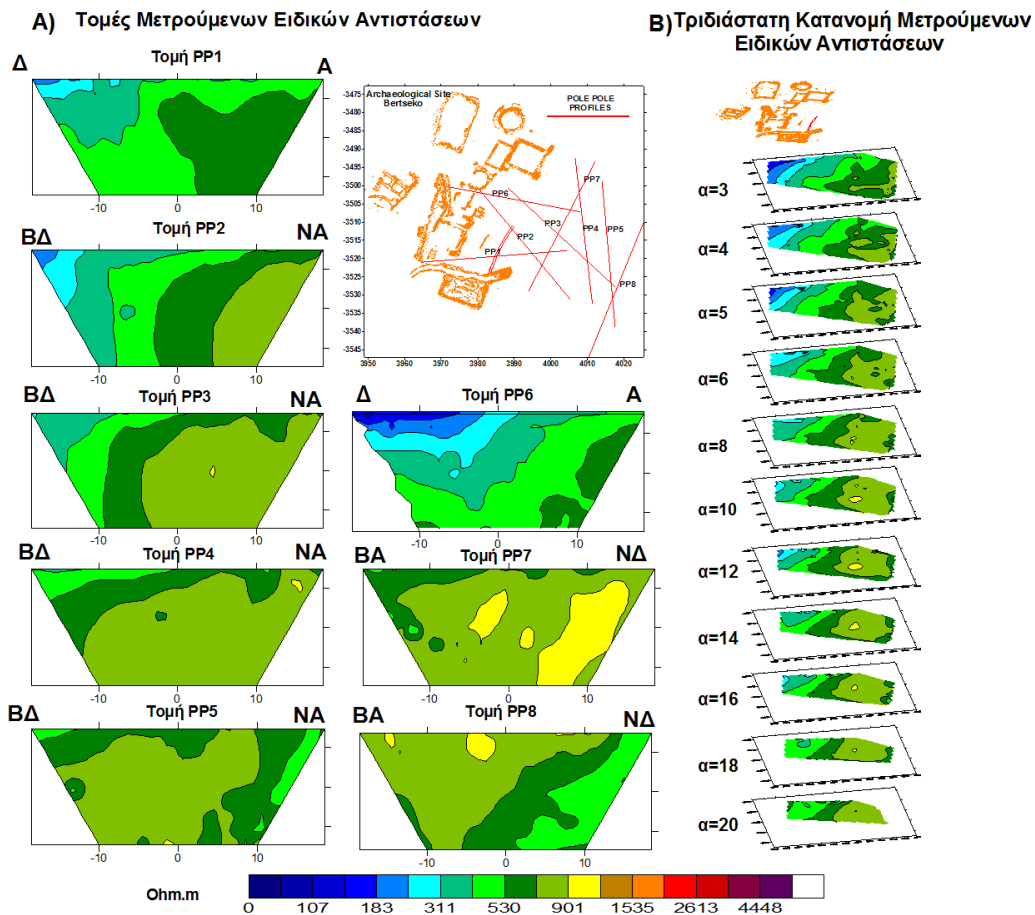
Από τις τομές των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων όπως είναι γνωστό παρέχεται μια ποιοτική εικόνα της κατανομής της ειδικής αντίστασης αλλά σε καμία περίπτωση οι μετρούμενες τιμές (φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις) δεν αποδίδουν τις πραγματικές τιμές ειδικής αντίστασης των σχηματισμών.

Επίσης δεν μπορούν να προσδιοριστούν ποσοτικά χαρακτηριστικά όπως π.χ. το βάθος των σχηματισμών και επιπλέον η μορφή των ανωμαλιών που παρουσιάζονται σε αυτές διαφέρουν και επηρεάζονται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων. Όμως, σε μη πολύπλοκες υπεδάφικες δομές, στόχοι διάφορων διαστάσεων δημιουργούν συγκεκριμένες μορφές ανωμαλιών στις αντίστοιχες τομές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων της κάθε διάταξης και μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση των μοντέλων ερμηνείας.

Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζονται οι τομές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων κάθε γραμμής διασκόπησης. Επιπλέον, συνδυάζοντας τις μετρούμενες ειδικές αντιστάσεις όλων των γραμμών διασκόπησης δημιουργήθηκε η ψευδοτριδιάστατη κατανομή τους στην περιοχή έρευνας.

Είναι εμφανές τόσο από τις τομές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων όσο και από τη χωρική κατανομή τους, ότι υπάρχει μια αύξηση των τιμών προς το ανατολικό μέρος της περιοχής έρευνας (περιοχή, όπου όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.5.2.3 εμφανίζεται ότι υπάρχει παρουσία κενού). Παρατηρούνται επίσης διάφορες τοπικές ανωμαλίες υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης, οι οποίες παραπέμπουν στην παρουσία της αρχαίας στοάς. Είναι δύσκολη η διαπίστωση της ακριβούς θέσης της αρχαίας στοάς, ανάλογα κάθε φορά με την πολυπλοκότητα των μορφών που παρουσιάζονται στις διάφορες τομές των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων.

Η περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων με τεχνικές και αλγόριθμους αντιστροφής είναι αναγκαία για να προσδιοριστεί το μοντέλο ειδικών αντιστάσεων το οποίο να προσεγγίζει όσο το δυνατόν την πραγματική μορφή του υπεδάφους και το οποίο να δίδει με ακρίβεια την πραγματική θέση και το βάθος του στόχου.

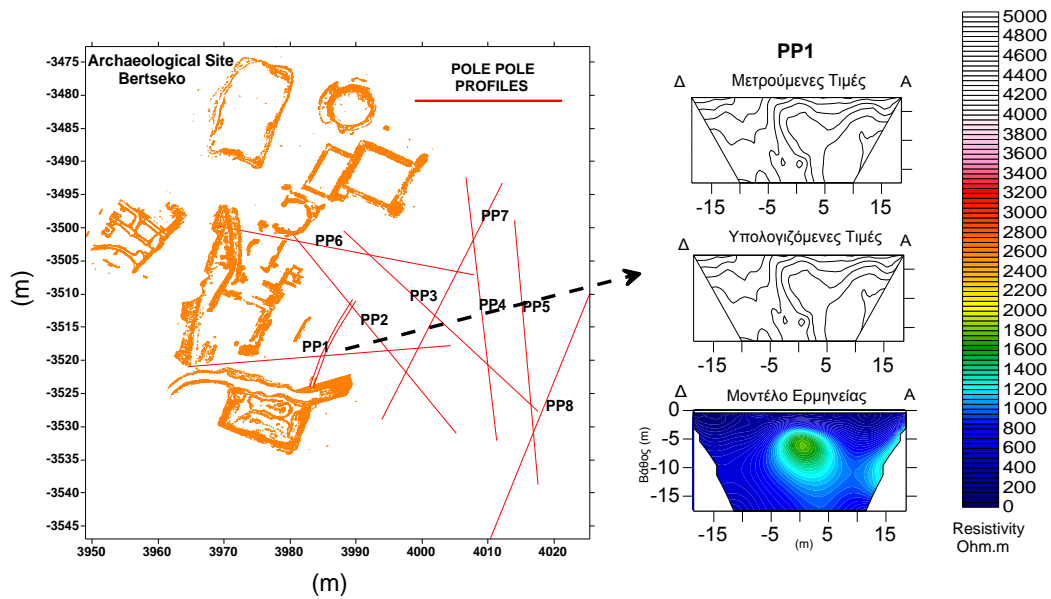


Εικόνα 4.5: Οι τομές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων και η τριδιάστατη κατανομή τους.

4.5.2.3 Ερμηνεία Μετρήσεων με Διδιάστατες Τεχνικές

Όπως προαναφέρθηκε, η πρώτη γραμμή διασκόπησης **PP1** πραγματοποιήθηκε πάνω από τη θέση του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς και με διεύθυνση σχεδόν κάθετη σε αυτήν ώστε να διερευνηθεί η διακριτική ικανότητα της διάταξης Pole Pole (PP). Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6, από το μοντέλο ερμηνείας εντοπίζεται και οριοθετείται με μεγάλη ακρίβεια η θέση της αρχαίας στοάς. Είναι χαρακτηριστική η ανωμαλία υψηλών ειδικών αντιστάσεων που υποδηλώνει την παρουσία κενού και συνεπώς το προσπελάσιμο τμήμα της στοάς.

Η διάταξη Pole Pole (PP) παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα οριοθετώντας σωστά το στόχο δίδοντας παράλληλα μια ευρύτερη και σε μεγαλύτερο βάθος διασκόπηση, η οποία βοηθά στην καλύτερη αποτύπωση των συνθηκών του υπεδάφους. Επιπλέον, γνωρίζοντας την ακριβή θέση της αρχαίας στοάς, με την ερμηνεία της συγκεκριμένης γραμμής διασκόπησης ήταν εφικτή η σύγκριση και η αξιολόγηση των μοντέλων ερμηνείας, που προέκυπταν με την αλλαγή διαφόρων παραμέτρων της αντιστροφής. Οι παράμετροι που προέκυψαν από το βέλτιστο μοντέλο ερμηνείας της πρώτης γραμμής χρησιμοποιήθηκαν στην ερμηνεία και των επόμενων γραμμών.



Εικόνα 4.6 : Το μοντέλο ερμηνείας της γραμμής διασκόπησης PP1, η οποία τέμνει το ανοιχτό κομμάτι της αρχαίας στοάς σχεδόν υπό γωνία 90° .

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τρόποι παρουσίασης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή των διδιάστατων τεχνικών ερμηνείας, για τη βέλτιστη αξιοποίηση των δεδομένων και την καλύτερη χαρτογράφηση της αρχαίας στοάς.

Αρχικά έγινε η παρουσίαση όλων των μοντέλων ερμηνείας σε διδιάστατες τομές της οριζόντιας κατανομής της ειδικής αντίστασης ως προς το βάθος. Ακολούθησε η τριδιάστατη απεικόνιση των μοντέλων ερμηνείας στις πραγματικές τους συντεταγμένες σε σχέση με τις αρχαιολογικές ανασκαφές, με τη χρήση του λογισμικού Autocad, έτσι ώστε να είναι δυνατή μια προοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο χώρο. Τέλος, έγινε συνδυασμός των αποτελεσμάτων όλων των μοντέλων ερμηνείας για τη δημιουργία της ψευδοτριδιάστατης κατανομής της ειδικής αντίστασης στην περιοχή έρευνας.

Η ερμηνεία βασίστηκε στη μελέτη όλων των γεωηλεκτρικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν με τους διάφορους τρόπους.

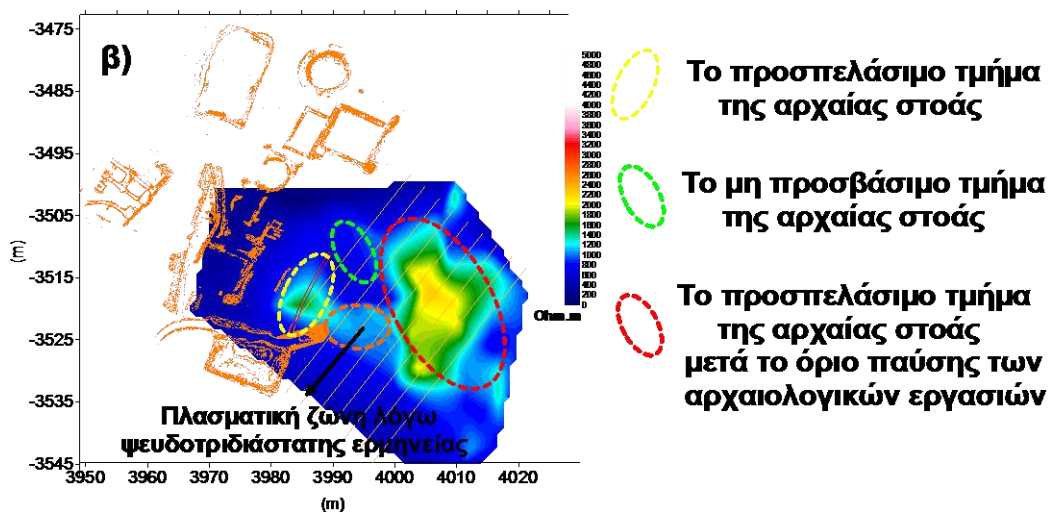
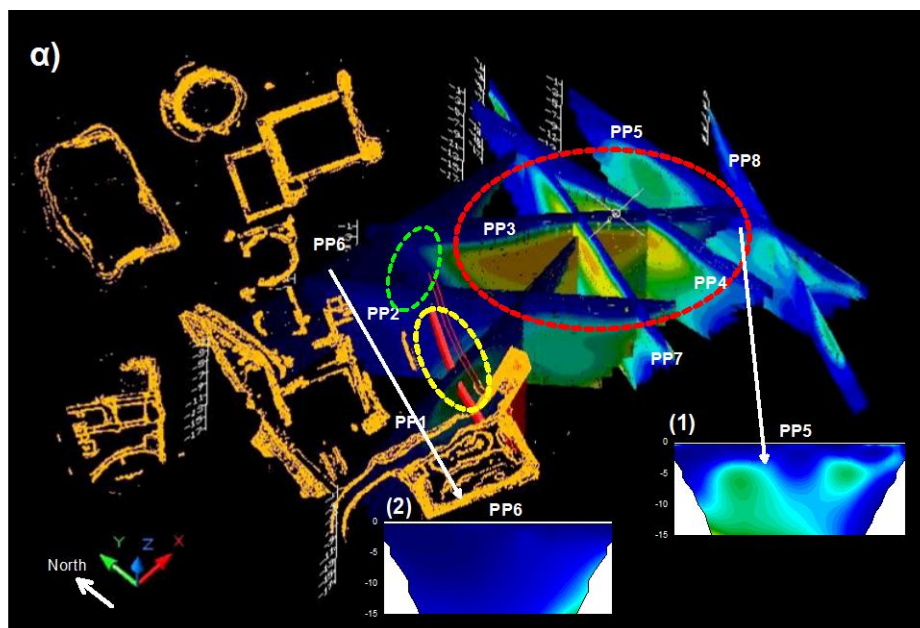
Διακρίνοντας τις περιοχές υψηλών ειδικών αντιστάσεων στην Εικόνα 4.7 (α) μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την πορεία της στοάς:

- Ανεξαρτήτως του γεγονότος ότι στη γραμμή διασκόπησης PP2 δεν παρατηρούνται ανωμαλίες υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης, εκεί όπου αναμενόταν να διέρχεται το αποτυπωμένο προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς (η γραμμή διασκόπησης βρίσκεται περίπου στο όριο παύσης των αρχαιολογικών εργασιών), στις τομές PP 3, 4, 5, 7, 8 παρατηρούνται τοπικές ανωμαλίες υψηλών ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες υποδηλώνουν την πιθανή ύπαρξη κενού στο υπέδαφος. Συνεπώς η αρχαία στοά είναι προσπελάσιμη μετά το όριο παύσης των αρχαιολογικών εργασιών με διεύθυνση νότιο-ανατολική.
- Από την τομή PP6, η οποία βρίσκεται μεταξύ των δύο αρχαίων δεξαμενών και στην οποία δεν παρουσιάζεται καμία χαρακτηριστική ανωμαλία που να σχετίζεται με την ύπαρξη της αρχαίας στοάς, αποκλείεται το ενδεχόμενο σύνδεσης της στοάς με τις δύο υπάρχουσες αρχαίες δεξαμενές.

- Στην τομή PP5 παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές τοπικές ανωμαλίες υψηλών ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες σχετίζονται με πιθανή ύπαρξη κενού στο υπέδαφος. Πιθανώς να υφίσταται διακλάδωση της στοάς, ενισχύοντας την άποψη ότι αποτελεί μέρος ενός αρχαίου υπόγειου μεταλλείου.

Από τους χάρτες της ψευδοτριδιάστατης κατανομής ειδικής αντίστασης και ειδικότερα σε βάθος 5 m (Εικ. 4.7(β)) διακρίνονται χαρακτηριστικές ζώνες που οριοθετούν:

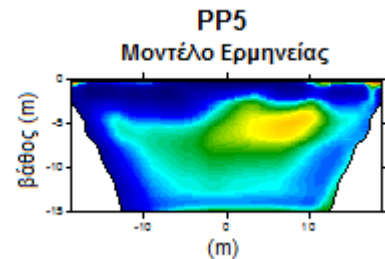
1. το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς (κίτρινη γραμμή).
2. το μη προσβάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς (πράσινη γραμμή).
3. τη θέση και την πορεία του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς μετά το όριο παύσης των αρχαιολογικών εργασιών.



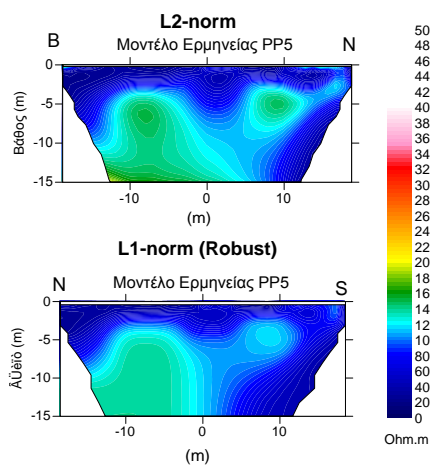
Εικόνα 4.7: Παρουσίαση μοντέλων ερμηνείας της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Pole (PP): α) Τα μοντέλα ερμηνείας σε πραγματικές συντεταγμένες σε σχέση με την αρχαιολογική ανασκαφή και το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς β) Η ψευδοτριδιάστατη κατανομή των ειδικών αντιστάσεων σε βάθος 5m.

Παρατηρήσεις:

Όταν αλλάζει η διεύθυνση του στόχου σε σχέση με τη γραμμή διασκόπησης, τότε αλλάζει και η διακριτική ικανότητα των μοντέλων ερμηνείας ως προς τον προσδιορισμό της θέσης και του σχήματος του στόχου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γραμμή διασκόπησης PP3 η οποία πιθανότατα τέμνει την αρχαία στοά υπό μεγάλη γωνία, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ευρύτερη ανωμαλία υψηλών ειδικών αντιστάσεων, δυσχεραίνοντας την ερμηνεία και την οριοθέτηση του στόχου. Με τη μεταβολή των παραμέτρων αντιστροφής (μικρότερος συντελεστής απόσβεσης, περιορισμός τιμών αντιστάσεων) στη συγκεκριμένη γραμμή διασκόπησης, το τελικό μοντέλο ερμηνείας βελτιώνεται σε σχέση με το αρχικό (Εικ. 4.8).



Εικόνα 4.8: Το μοντέλο ερμηνείας της τομής PP3 με βελτιωμένες παραμέτρους αντιστροφής



Εικόνα 4.9: Σύγκριση μοντέλων ερμηνείας της PP5 με τις τεχνικές L2- norm και L1-norm (robust).

Επιπλέον στη συγκεκριμένη εφαρμογή όπου ο στόχος είναι μικρών διαστάσεων, η διδιάστατη τεχνική ερμηνείας L2- norm (standard smoothness least square method) παρείχε λεπτομερέστερα και καλύτερης ανάλυσης μοντέλα ερμηνείας σε σχέση με την τεχνική ερμηνείας L1- norm (Robust). Είναι ενδεικτικό στο μοντέλο ερμηνείας της PP5 (Εικ. 4.9) η ευδιάκριτη αποτύπωση του στόχου έρευνας. Η L1 Νόρμα (Robust) δημιουργεί ένα μοντέλο με διακριτά όρια περιοχών διαφορετικής αντίστασης, τονίζοντας, όμως, μια ευρύτερη ανωμαλία και εξομαλύνοντας τις μικροδιαφορές στη κατανομή των ειδικών αντιστάσεων. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα συμφωνεί και ενισχύει τις διαπιστώσεις που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3.2.6 σε σχέση με τις διδιάστατες τεχνικές ερμηνείας

Πρέπει να επισημανθεί, επίσης, πως η εξαγωγή συμπερασμάτων από ψευδοτριδιάστατα μοντέλα ερμηνείας πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή αφού η αξιοπιστία τους εξαρτάται κατά πολύ από: α) την πυκνότητα και τη διεύθυνση των γραμμών διασκόπησης β) τριδιάστατες επιδράσεις (3d effects) λόγω της βασικής παραδοχής της διδιάστατης τεχνικής ερμηνείας ότι η ειδική αντίσταση του υπεδάφους μεταβάλλεται μόνο ως προς τις δύο διαστάσεις (x,z), η οποία μπορεί να εισαγάγει σημαντικά λάθη στη ερμηνεία των μετρήσεων. Στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζεται ζώνη υψηλών τιμών ειδικής αντίστασης (πορτοκαλί γραμμή) η οποία οφείλεται περισσότερο στη διαδικασία παρεμβολής (interpolation) και πλεγματοποίησης των τιμών ειδικής αντίστασης των μοντέλων ερμηνείας κατά τη δημιουργία της ψευδοτριδιάστατης κατανομής της ειδικής αντίστασης πάρα στην πραγματική κατανομή της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

4.5.2.4 Ερμηνεία Μετρήσεων με Τριδιάστατες Τεχνικές

Κατά τη διάρκεια ερμηνείας των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας με διδιάστατες τεχνικές αντιστροφής, βασική παραδοχή αποτελεί ότι η ειδική αντίσταση του υπεδάφους μεταβάλλεται μόνο ως προς τις δύο διαστάσεις (x,z). Η συγκεκριμένη παραδοχή ισχύει σε ιζηματογενής σχηματισμούς με κανονική διαστρωμάτωση.

Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις περιοχών με πολύπλοκες γεωλογικές δομές και ιδιόμορφη κατανομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης των σχηματισμών, η παραδοχή αυτή μπορεί να εισάγει σημαντικά λάθη στην ερμηνεία των μετρήσεων, με αποτέλεσμα τα προκύπτοντα μοντέλα ερμηνείας να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις από την πραγματική δομή του υπεδάφους.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που αφορά στον εντοπισμό της αρχαίας στοάς, παρόλο ότι τα μοντέλα ερμηνείας με διδιάστατες τεχνικές παρέχουν την επιθυμητή πληροφορία σχετικά με τη θέση και τη διεύθυνση της αρχαίας στοάς, οι μετρήσεις ερμηνεύτηκαν επιπλέον και με τριδιάστατες τεχνικές αντιστροφής.

Κύριος στόχος αποτέλεσε, αρχικά, ο έλεγχος της αξιοπιστίας των διδιάστατων μοντέλων ερμηνείας και η εξάλειψη διάφορων πιθανών τριδιάστατων επιδράσεων (3d effects).

Επιπλέον δίδεται η ευκαιρία να αξιολογηθεί η εφαρμογή της **τριδιάστατης τομογραφίας με τη χρησιμοποίηση μη παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης**.

Η συγκεκριμένη διαδικασία λήψης μετρήσεων η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη γραμμών διασκόπησης διαφορετικού προσανατολισμού και διεύθυνσης μεταξύ τους με την ταυτόχρονη τριδιάστατη ερμηνεία τους, αποτελεί καινοτόμο πρακτική αφού στις περισσότερες περιπτώσεις η εφαρμογή της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας βασίζεται στη λήψη μετρήσεων με τη χρήση παράλληλων μεταξύ τους γραμμών διασκόπησης.

Οι μετρήσεις από όλες τις γραμμές διασκόπησης, ενοποιούνται ώστε να δημιουργηθεί ένα κοινό σύνολο μετρήσεων, το οποίο είναι δυνατόν να επεξεργαστεί με την εφαρμογή τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας.

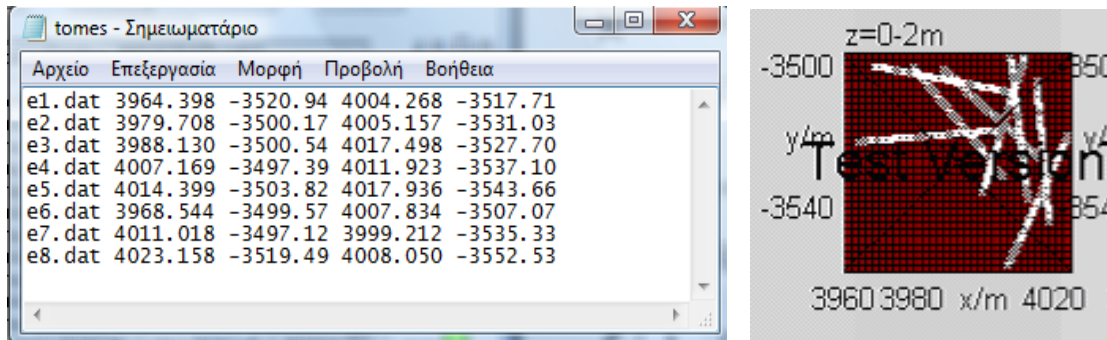
Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **DC3dresinv** (Günther 2003), το οποίο υποστηρίζει την αντιστροφή δεδομένων τέτοιας μορφής.

Για να είναι δυνατή η τριδιάστατη ερμηνεία των μετρήσεων με τη χρήση του λογισμικού **DC3dresinv**, είναι απαραίτητο να ακολουθηθούν συγκεκριμένα βήματα :

- Δημιουργία κοινού φακέλου που να εμπεριέχει τα δεδομένα των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων κάθε γραμμής διασκόπησης σε διακριτά αρχεία συγκεκριμένης μορφής και δομής. (*Αρχείο Δεδομένων* : *.dat).
- Δημιουργία αρχείου *.pro το οποίο να εμπεριέχει τα ονόματα των *Αρχείων Δεδομένων* κάθε γραμμής διασκόπησης και τις αντίστοιχες συντεταγμένες του πρώτου και του τελευταίου ηλεκτροδίου κάθε γραμμής (Εικ 4.10).

Με αυτήν τη διαδικασία είναι δυνατή η τοποθέτηση όλων των γραμμών διασκόπησης στο χώρο (Εικ 4.11) και η πραγματοποίηση όλων των απαραίτητων υπολογισμών με βάση τις μετρούμενες ειδικές αντιστάσεις όλων των γραμμών διασκόπησης, οι οποίες απαιτούνται από την τριδιάστατη τεχνική ερμηνείας.

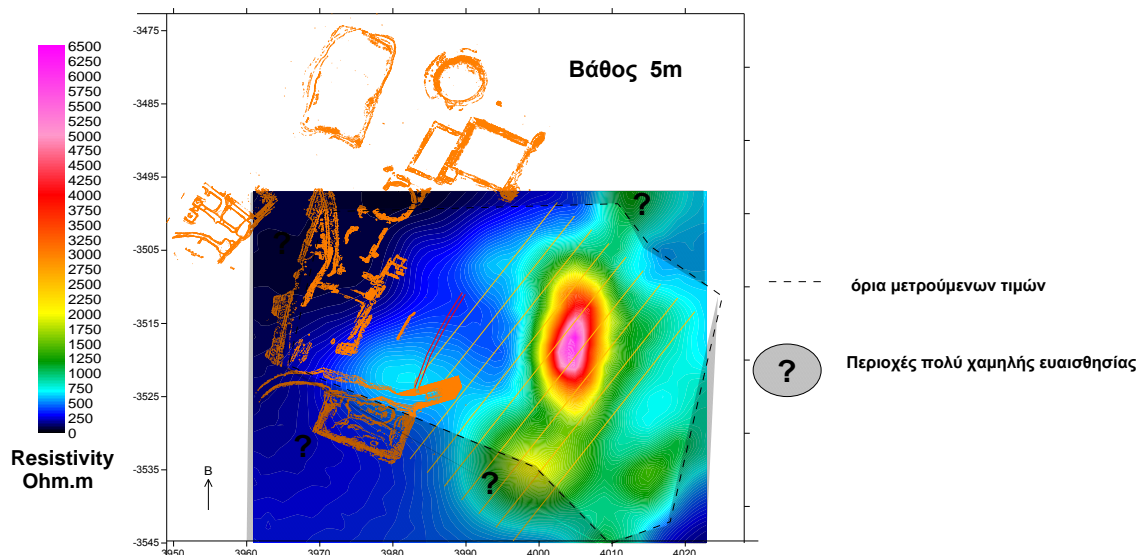
Τα όρια του παραλληλεπίπεδου το οποίο θα αποτελέσει το χώρο βάσης της ερμηνείας, καθορίζεται από τις συντεταγμένες των ηλεκτροδίων που βρίσκονται αντίστοιχα νοτιότερα- βορειότερα-ανατολικότερα-δυτικότερα.



Εικόνα 4.10: Η μορφή του αρχείου pro για την τοποθέτηση των γραμμών έρευνας.

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι διαδικασίες που αφορούν την προετοιμασία των αρχείων που περιέχουν τις μετρούμενες τιμές, το επόμενο στάδιο περιελάμβανε τη δημιουργία του αρχικού μοντέλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ομογενές αρχικό μοντέλο με τιμές αντίστασης των παραμέτρων του (κελιά), ίσες με το μέσο όρο όλων των μετρούμενων τιμών. Επιπλέον, ως προς τις x,y διαστάσεις χρησιμοποιήθηκε μέγεθος κελιού 3x3 m ενώ ως προς το βάθος επιλέχτηκαν 10 στρώματα με μέγιστο βάθος διασκόπησης τα 10 m. Όσον αφορά στις παραμέτρους αντιστροφής εφαρμόστηκε η L1-norm με συντελεστή απόσβεσης 0,2.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της τριδιάστατης τεχνικής ερμηνείας παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.11 όπου εμφανίζεται η κατανομή της ειδικής αντίστασης σε βάθος 5 m. Και σε αυτή την Εικόνα όπως και στην περίπτωση του ψευδοτριδιάστατου μοντέλου του Κεφαλαίου 4.5.2.3 διακρίνονται οι περιοχές υψηλών ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες σχετίζονται με την ύπαρξη της αρχαίας στοάς.



Εικόνα 4.11: Η χωρική κατανομή της ειδικής αντίστασης σε βάθος 5m , όπως προέκυψε από την τριδιάστατη ερμηνεία μη παράλληλων διαταγμένων τομών

Το αποτέλεσμα της τριδιάστατης τεχνικής ερμηνείας είναι ανάλογο με το ψευδοτριδιάστατο μοντέλο ερμηνείας (Εικ. 4.7 (β)), γεγονός που επιβεβαιώνει και ενισχύει τα συμπεράσματα που αναδείχθηκαν στο κεφάλαιο 4.5.2.3 σε σχέση με τη χαρτογράφηση της αρχαίας στοάς. Η ομοιότητα των μοντέλων ερμηνείας αποδεικνύει ότι τα προκύπτοντα μοντέλα ερμηνείας από τη διδιάστατη τεχνική ερμηνείας, δεν έχουν επηρεαστεί κατά μεγάλο βαθμό από τριδιάστατες επιδράσεις και δομές, άρα μπορούν να ερμηνευθούν με μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας.

Λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των γραμμών διασκόπησης σε αρκετά σημεία της περιοχής έρευνας, δεν είναι δυνατή η πραγματική τριδιάστατη συσχέτιση των μετρούμενων τιμών. Αν και χρησιμοποιήθηκε τριδιάστατη τεχνική ερμηνείας, η ανάλυση του τελικού μοντέλου εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα των μετρήσεων στα διάφορα σημεία του χώρου. Ο στόχος της εφαρμογής της τριδιάστατης τεχνικής ερμηνείας δεν ήταν η δημιουργία ενός τελικού μοντέλου υψηλής ανάλυσης, αλλά ενός μοντέλου το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της ψευδοτριδιάστατης ερμηνείας.

Με την ακολουθούμενη στρατηγική ήταν δυνατόν να διασκοπηθεί μια ευρύτερη περιοχή λαμβάνοντας μια αρκετά αξιόπιστη εικόνα του υπεδάφους ώστε να υποδειχθούν σημεία και περιοχές όπου πιθανώς να χρειάζονται μεγαλύτερη ανάλυση και διερεύνηση. Επομένως ο χώρος ενδιαφέροντος περιορίζεται και επιλέγεται η θέση πραγματοποίησης μιας υψηλής ανάλυσης τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας με την χρησιμοποίηση πυκνών παράλληλων γραμμών διασκόπησης.

4.5.3 Τριδιάστατη Ηλεκτρική Τομογραφία Παράλληλα Διατεταγμένων Γραμμών Διασκόπησης με τη Διάταξη Pole Dipole

Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή τόσο της τριδιάστατης όσο και της ψευδοτριδιάστατης ερμηνείας των γραμμών διασκόπησης με την διάταξη Pole Pole (PP), οριοθετήθηκε συγκεκριμένη περιοχή στην οποία εφαρμόστηκε τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης.

Ο στόχος ήταν η περαιτέρω μελέτη της συγκεκριμένης περιοχής με μεγαλύτερη ανάλυση αλλά και ο πρόσθετος έλεγχος της αξιοπιστίας και ορθότητας των αποτελεσμάτων και ερμηνειών που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 4.5.2.

4.5.3.1 Σχεδιασμός Έρευνας

Για να είναι δυνατή η πραγματική τριδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους στην επιλεγμένη περιοχή, με τη μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση, ακολουθήθηκε συγκεκριμένος σχεδιασμός της έρευνας. Η διάταξη ηλεκτροδίων, το πρωτόκολλο μετρήσεων, η απόσταση των ηλεκτροδίων αλλά και η απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για μια επιτυχή εφαρμογή της τριδιάστατης τομογραφίας.

Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της μεθόδου περιελάμβανε :

1. Τη λήψη μετρήσεων σε 9 (εννέα) γραμμές διασκόπησης παράλληλες μεταξύ τους με τη διάταξη Pole Dipole (PD).

Όσον αφορά στην επιλογή της διάταξης ηλεκτροδίων, χρησιμοποιήθηκε η Pole Dipole (PD), η οποία, όπως δείχθηκε στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζει μαζί με την Dipole Dipole (DD) μεγάλη ικανότητα στον εντοπισμό υπόγειων πεπερασμένων δομών. Επιπροσθέτως, η Pole Dipole (PD) παρέχει καλύτερο ποσοστό σήματος προς θόρυβο σε σχέση με την Dipole Dipole, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι υπήρχε ικανός ελεύθερος χώρος ώστε να τοποθετηθεί το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο ρεύματος.

2. Κάθε γραμμή διασκόπησης περιελάμβανε 41 ηλεκτρόδια σε απόσταση 1 m μεταξύ τους.

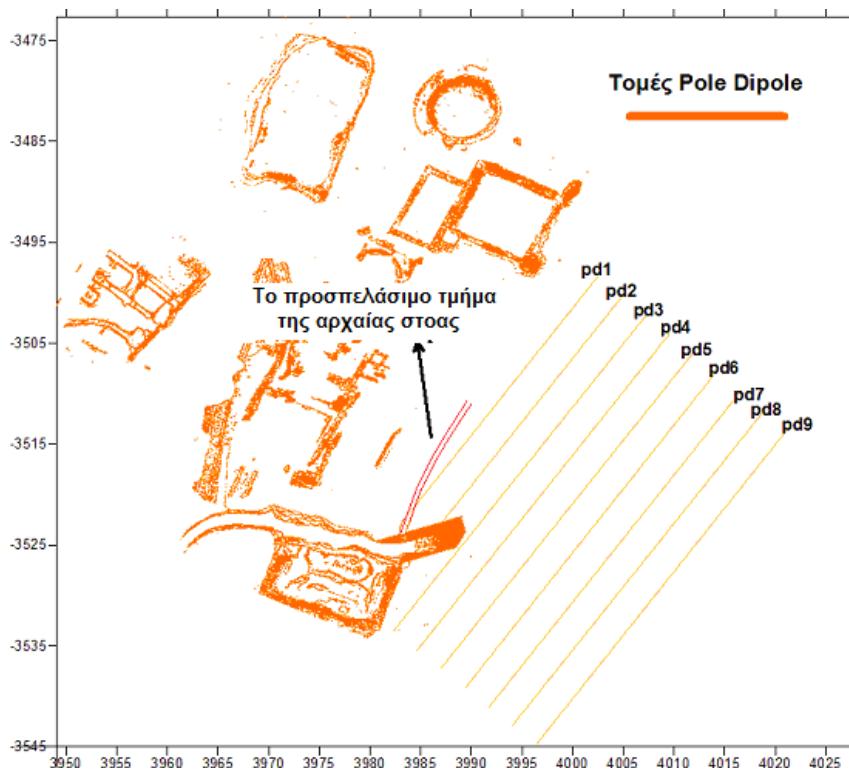
Το συγκεκριμένο ανάπτυγμα της γραμμής δίδει τη δυνατότητα διασκόπησης έως το επιθυμητό βάθος, αλλά επιπλέον και το βήμα μέτρησης παρέχει την απαραίτητη ανάλυση και διακριτική ικανότητα. Οι δύο πρώτες γραμμές αποτελούνταν από 31 ηλεκτρόδια λόγω έλλειψης ικανού ελεύθερου χώρου .

3. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών έρευνας ήταν 3 m.

Για να είναι δυνατή η επαρκής πλευρική κάλυψη του χώρου μεταξύ των γραμμών διασκόπησης, πρέπει η μέγιστη απόσταση μεταξύ των γραμμών όταν χρησιμοποιείται η διάταξη Pole Dipole (PD) να είναι περίπου δύο με τρεις φορές η ελάχιστη απόσταση των ηλεκτροδίων (Loke 2003).

4. Η κατανομή των μετρήσεων επιλέχτηκε έτσι ώστε να διασκοπείται όσο δυνατόν καλύτερα το βάθος ενδιαφέροντος αλλά επιπλέον εμπεριείχε μετρήσεις που αντιστοιχούσαν σε μεγαλύτερα βάθη.

Για τις μετρήσεις που αντιστοιχούσαν σε μεγαλύτερα βάθη επιλέχτηκαν μεγαλύτερα δίπολα όπου η τιμή του $n \leq 6$, για την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο.



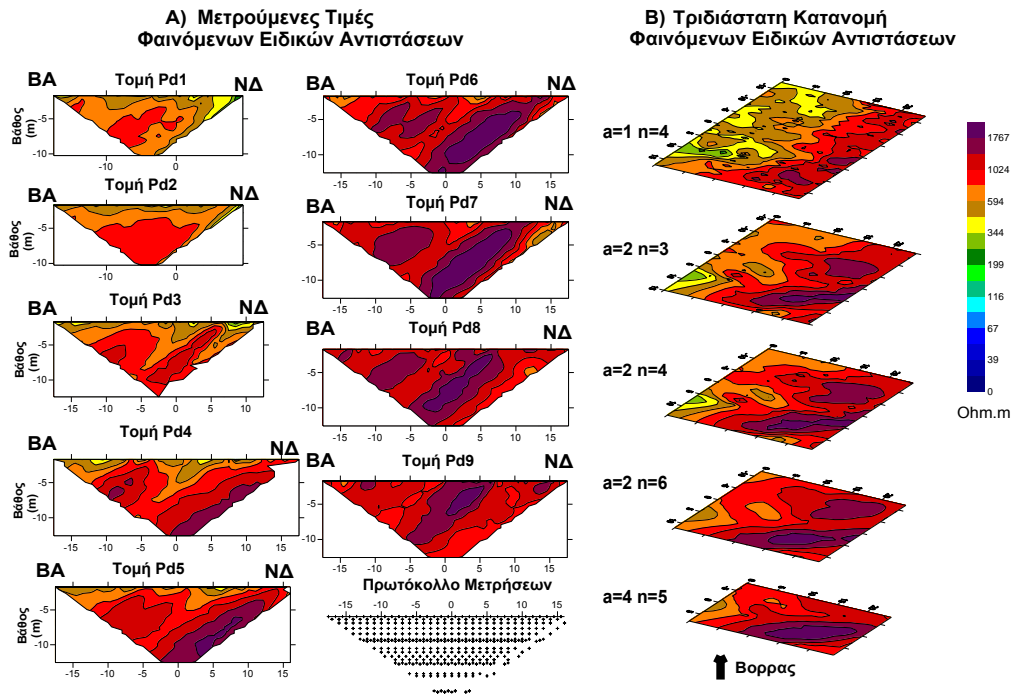
Εικόνα 4.12 : Οι γραμμές διασκόπησης της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Dipole (PD) σε σχέση με το ανοιχτό κομμάτι της αρχαίας στοάς και τις αρχαιολογικές εγκαταστάσεις.

Στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται η θέση του τριδιάστατου καννάβου μετρήσεων σε σχέση με το αποτυπωμένο προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς και την ευρύτερη αρχαιολογική περιοχή.

4.5.3.2 Επεξεργασία Μετρήσεων

Όπως και στην περίπτωση της διδιάστατης ερμηνείας, το πρώτο στάδιο επεξεργασίας των μετρήσεων αποτελεί η απαλοιφή των λανθασμένων μετρήσεων (despiking) από τις μετρούμενες ειδικές αντιστάσεις

Επιπλέον, συνδυάζοντας τις μετρούμενες τιμές όλων των γραμμών διασκόπησης είναι δυνατή η δημιουργία της χωρικής μεταβολής των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων στην περιοχή έρευνας. Στην Εικόνα 4.13 παρουσιάζονται οι διδιάστατες τομές μετρούμενων τιμών ειδικής αντίστασης των 9 γραμμών διασκόπησης αλλά και η χωρική κατανομή τους στην περιοχή έρευνας για κάποιους χαρακτηριστικούς συνδυασμούς ηλεκτροδίων.



Εικόνα 4.13 : Η διδιάστατη και τριδιάστατη κατανομή των μετρούμενων φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων της διάταξης pole dipole.

Είναι γεγονός ότι παρόλο που δεν είναι εύκολος ο άμεσος προσδιορισμός της θέσης της αρχαίας στοάς (η pole dipole χαρακτηρίζεται από την ασυμμετρία της), παρουσιάζονται συγκεκριμένες μορφές στα δεδομένα των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων οι οποίες μπορούν να συσχετισθούν με την ύπαρξη της αρχαίας στοάς. Είναι εμφανές ότι σε πολλές τομές παρουσιάζονται περισσότερες από μία χαρακτηριστικές ανωμαλίες, γεγονός το οποίο συμβαδίζει με τα συμπεράσματα του Κεφαλαίου 4.5.2.3, δηλαδή την πιθανή ύπαρξη διακλάδωση της αρχαίας στοάς.

4.5.3.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Τριδιάστατης Τεχνικής Ερμηνείας

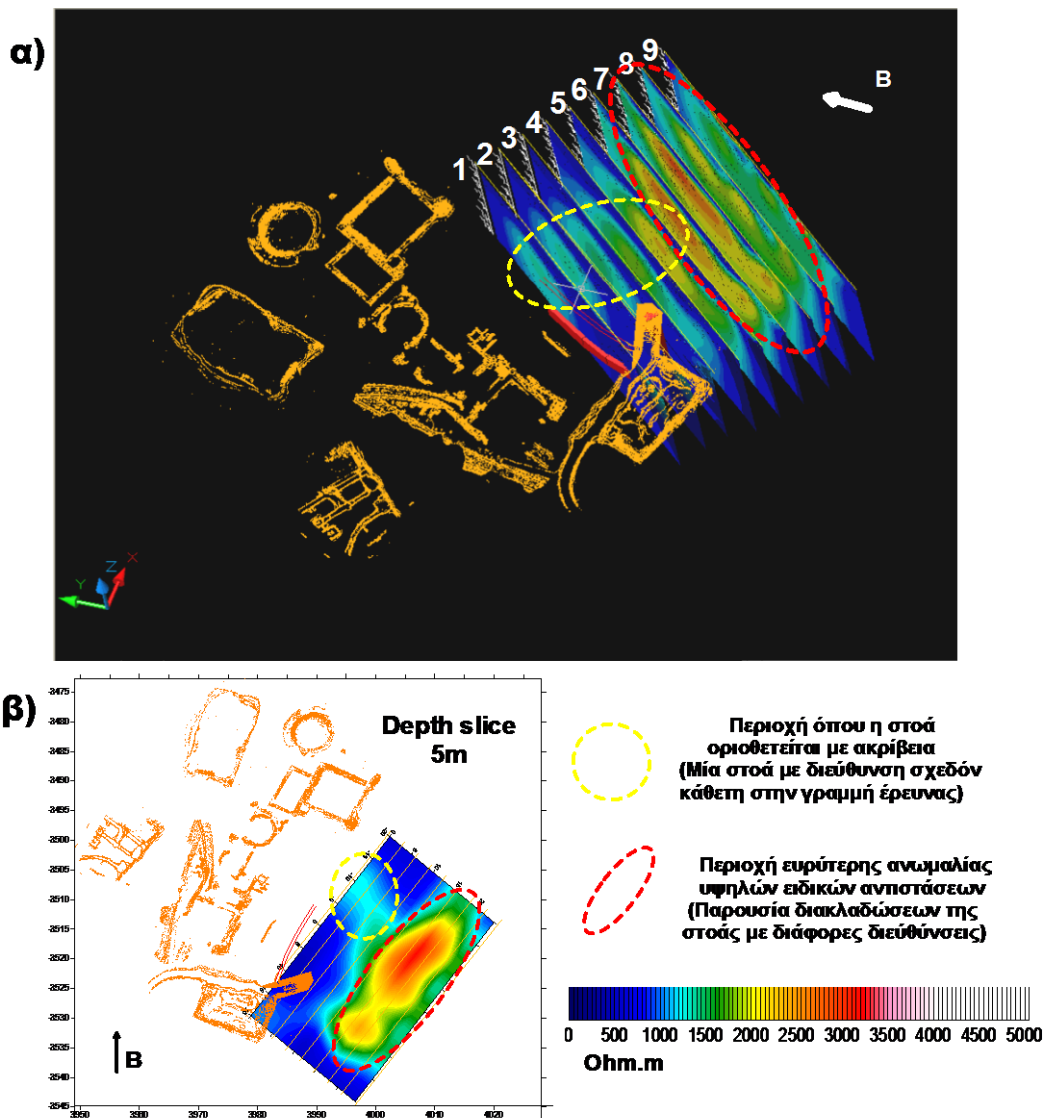
Αφού εξαλείφθηκαν κατά το πρώτο στάδιο επεξεργασίας οι εμφανώς λανθασμένες μετρούμενες τιμές, τα δεδομένα όλων των γραμμών διασκόπησης ενοποιούνται σε ένα κοινό αρχείο συγκεκριμένης μορφής ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας με το λογισμικό Res3dinv.. Για την αντιστροφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος standard smoothness least square (L2-norm) με συντελεστή απόσβεση 0.16. Το λάθος RMS του τελικού μοντέλου ερμηνείας ήταν 8%, το οποίο κυμαίνεται σε αποδεκτά όρια. Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω τα προγράμματα Surfer και Autocad. Στην Εικόνα 4.14 (α) παρουσιάζονται τα μοντέλα ερμηνείας της κατανομής της ειδικής αντίστασης ως προς το βάθος στις πραγματικές συντεταγμένες σε σχέση με τον αρχαιολογικό χώρο και επιπλέον η χωρική κατανομή της ειδικής αντίστασης σε βάθος 5m (Εικ 4.14 (β)).

Παρατηρώντας τις εικόνες, είναι εμφανείς δύο χαρακτηριστικές περιοχές.

- Η πρώτη, όπου παρουσιάζεται ανωμαλία υψηλών ειδικών αντιστάσεων (κίτρινη οριοθετημένη περιοχή), σχετίζεται με το προσπελάσιμο τμήμα της

αρχαίας στοάς μετά το όριο παύσης των αρχαιολογικών εργασιών. Παρατηρείται ότι επειδή οι γραμμές διασκόπησης τέμνουν τη στοά υπό γωνία σχεδόν 90 μοιρών, είναι δυνατή η οριοθέτηση της με μεγάλη ακρίβεια.

- Η δεύτερη περιοχή όπου παρουσιάζονται ακόμη μεγαλύτερες ειδικές αντιστάσεις (κόκκινη οριοθετημένη περιοχή) σχετίζεται με την περιοχή όπου πιθανώς υπάρχει διακλάδωση της αρχαίας στοάς και οι γραμμές διασκόπησης τέμνουν τη στοά υπό μεγαλύτερη γωνία. Η ύπαρξη περισσότερων από μία στοά και ίσως μεγαλύτερου μεγέθους σε ορισμένα σημεία (σημεία διακλάδωσης) είναι το βασικό αίτιο όπου η συγκεκριμένη ανωμαλία είναι ευρύτερη και παρουσιάζει διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης σε σχέση με την ανωμαλία που προκύπτει από την ύπαρξη της μεμονωμένης στοάς.



Εικόνα 4.14: Παρουσίαση μοντέλων ερμηνείας της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Dipole (PD).

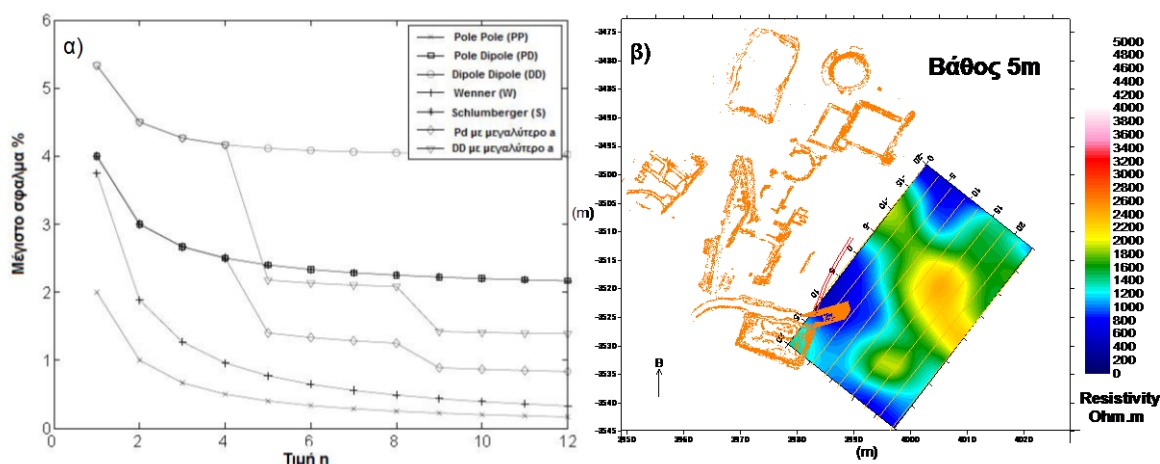
Λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα μοντέλα ερμηνείας, είναι σαφές ότι η αρχαία στοά είναι προσπελάσιμη μετά το όριο πάσης των αρχαιολογικών εργασιών και ότι αποτελεί μέρος ενός αρχαίου μεταλλείου αφού δεν είχε κατασκευαστεί για να συνδέει τις δύο αρχαίες δεξαμενές.

Παρατηρήσεις:

Η απόσταση μεταξύ δύο στόχων, ο προσανατολισμός των γραμμών διασκόπησης, η παρουσία επιφανειακών ανομοιογενειών αλλά φυσικά και η γενικότερη γεωλογία της περιοχής αποτελούν βασικές παραμέτρους για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας.

Πολλές φορές η σύνθετη δομή είτε του υπεδάφους είτε του ίδιου του στόχου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διακριτικής ικανότητας της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η ακριβής οριοθέτηση των διάφορων υπόγειων στόχων. Στο μοντέλο ερμηνείας της Εικόνας 4.14 είναι εμφανές ότι μεταβάλλεται η δυνατότητα ευκρινής αποτύπωσης του στόχου ανάλογα με τον προσανατολισμό των γραμμών διασκόπησης σε σχέση με τη στοά.

Επίσης, σημαντική επίδραση στην ανάλυση του τελικού μοντέλου ερμηνείας έχει το πρωτόκολλο μετρήσεων. Σύμφωνα με τον Gunther (2004), το σφάλμα που εισέρχεται στις μετρούμενες τιμές λόγω μη ακριβούς τοποθέτησης των ηλεκτροδίων σε ίσες αποστάσεις στο ύπαιθρο, μειώνεται όσο αυξάνει η τιμή του n (Εικ. 4.15 (α)). Επιπλέον το σημαντικό εισερχόμενο λάθος στις διατάξεις Pole Dipole (PD) και Dipole Dipole (DD), μειώνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η απόσταση των δίπολων δηλαδή όταν αυξάνεται η τιμή του a . Συνεπώς, αφού αφαιρέθηκαν οι συνδυασμοί των μετρήσεων με $a=1$, οι οποίες πιθανότατα να παρουσιάζουν σημαντικό ποσοστό λάθους, και επανερμηνεύτηκαν οι εναπομείναντες μετρήσεις, προκύπτει ένα νέο μοντέλο ερμηνείας βελτιωμένης διακριτικής ικανότητας (Εικ. 4.15 (β)) παρά το γεγονός ότι μειώνεται ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων.



Εικόνα 4.15 :Σχετικό σφάλμα μετρήσεων διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων για ίση απόσταση ηλεκτροδίων 1m, για τάξη μεγέθους λάθους 0.01 m λόγω μη ακριβούς τοποθέτησης των ηλεκτροδίων σε συνάρτηση με τη τιμή του n (Gunther, 2004). β) Το νέο μοντέλο ερμηνείας μετά την αφαίρεση των συνδυασμών μετρήσεων με $a=1$.

Σχόλια:

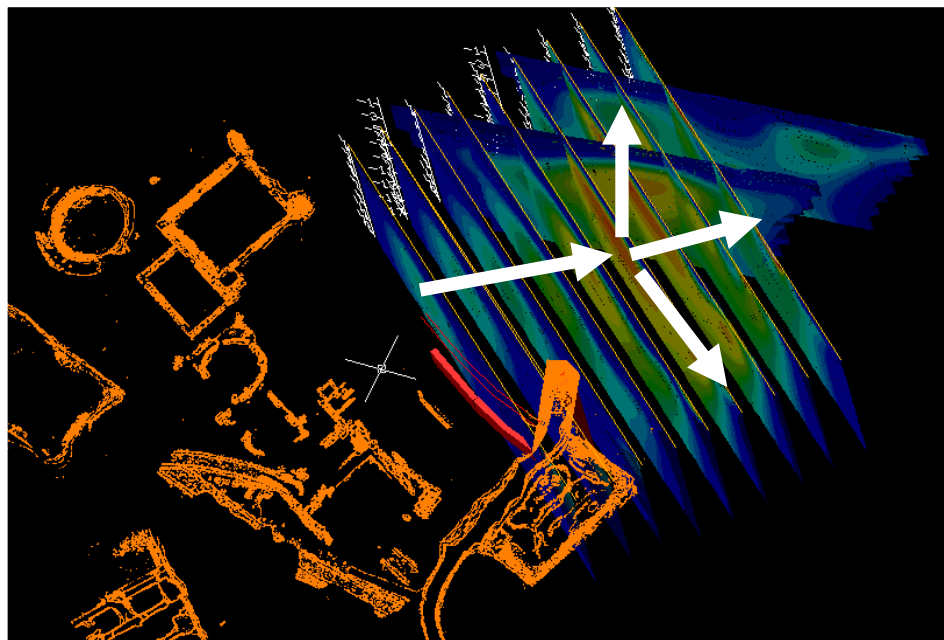
Συνεπώς και στη περίπτωση της εφαρμογής της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας είναι πάρα πολύ σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με τη

γεωλογία της περιοχής και το στόχο έρευνας, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αρχική πληροφορία για το βέλτιστο σχεδιασμό της έρευνας, όσον αφορά τον προσανατολισμό και το μέγιστο ανάπτυγμα των γραμμών διασκόπησης, αλλά και το πρωτόκολλο των μετρήσεων. Η αρχική αυτή πληροφορία όταν δεν είναι διαθέσιμη από άλλες μελέτες (γεωλογικές, γεωτεχνικές, γεωτρήσεις, παλιούς χάρτες κ.α) μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μιας άλλης γεωφυσικής μεθόδου ή ακόμη και της διαδικασίας που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.5.2, δηλαδή της εφαρμογής γραμμών διασκόπησης ηλεκτρικής τομογραφίας διάφορων διευθύνσεων σε διάφορες αποστάσεις μεταξύ τους με σκοπό τη διασκόπηση μεγαλύτερης περιοχής έρευνας και μιας αρχικής αποτύπωσης της κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

4.5.4 Συνδυαστική Ερμηνεία Μοντέλων Ερμηνείας Διατάξεων Pole Dipole (PD) & Pole Pole (PP)

Η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων ως αρχική πληροφορία (ψευδο-τριδιάστατη και τριδιάστατη ερμηνεία), μιας έρευνας η οποία περιελάμβανε την εφαρμογή μη παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στη βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας υψηλότερης ανάλυσης με παράλληλα διατεταγμένες γραμμές διασκόπησης και πυκνό κάναβο μετρήσεων. Επιπλέον, δίδεται η ευκαιρία για τη συνδυαστική ερμηνεία των δύο αυτών διαφορετικών προσεγγίσεων.

Εάν συνδυαστούν τα χαρακτηριστικότερα μοντέλα ερμηνείας της διάταξης Pole Pole (PP) (μοντέλα ερμηνείας προερχόμενα από την εφαρμογή διδιάστατης τεχνικής ερμηνείας) και τα μοντέλα ερμηνείας της διάταξης Pole Dipole (PD) (μοντέλα ερμηνείας προερχόμενα από την εφαρμογή τριδιάστατης τεχνικής ερμηνείας), προκύπτει **μια συνδυαστική τριδιάστατη απεικόνιση** από την οποία είναι δυνατή η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4.16, υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων των μοντέλων ερμηνείας και επιβεβαιώνεται η πορεία της αρχαίας στοάς άλλα και η πιθανή διακλάδωση της.

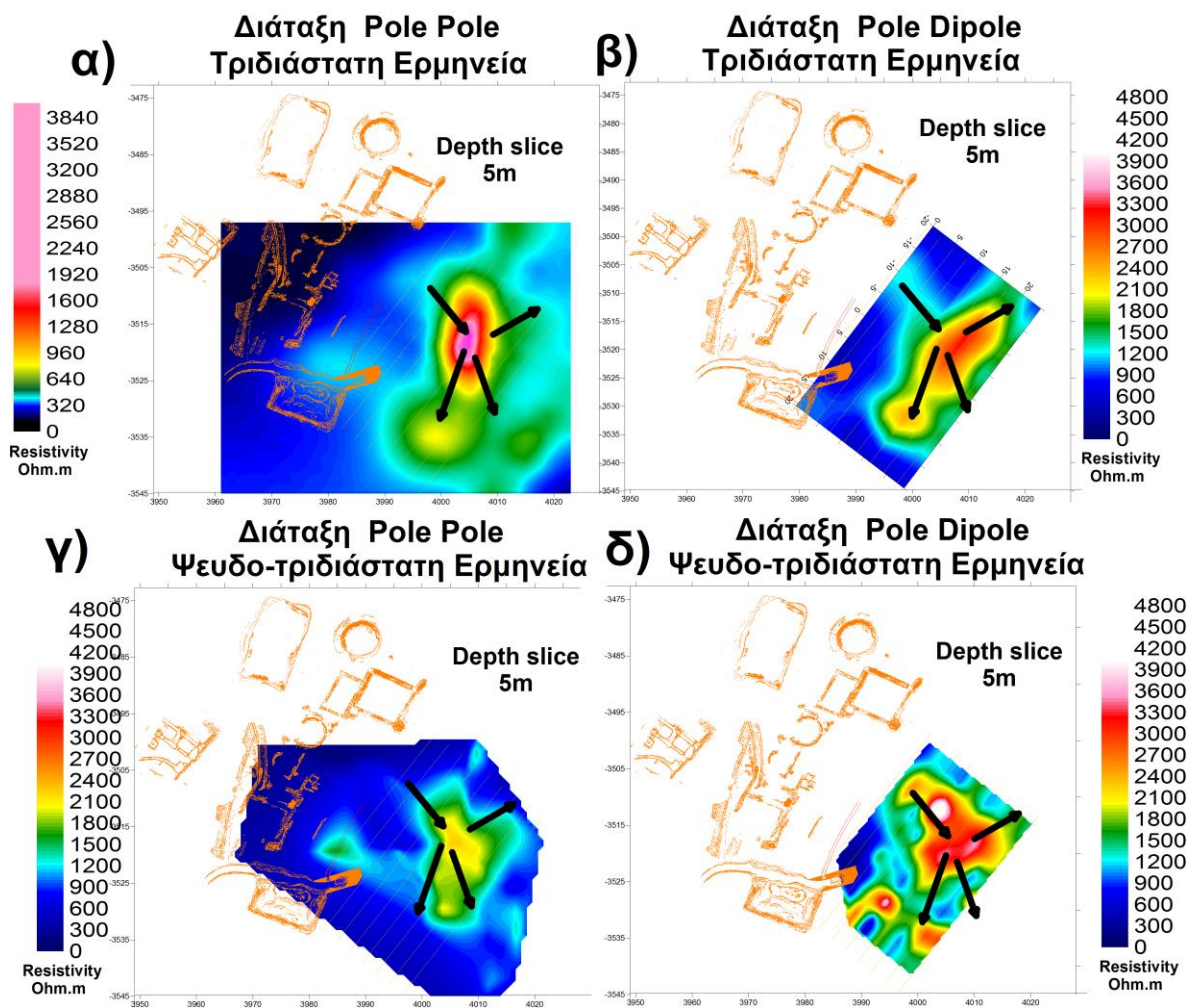


Εικόνα 4.16: Συνδυαστική τριδιάστατη απεικόνιση των μοντέλων ερμηνείας των διατάξεων Pole Pole & Pole Dipole

4.5.5 Σύγκριση Αποτελεσμάτων Ψευδοτριδιάστατων & Τριδιάστατων Τεχνικών Ερμηνείας

Η σύγκριση μεταξύ των ψευδοτριδιάστατων και τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας έχει πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (Dahlin, 1997 ; Bently et. al., L 2004 ; Yang, 2006, Johansson et al., 2007 ; Dahlin, 2007) με κύριο συμπέρασμα ότι οι τριδιάστατες τεχνικές ερμηνείας υπερτερούν και έχουν ως αποτέλεσμα πιο αξιόπιστα μοντέλα ερμηνείας με καλύτερη οριοθέτηση των στόχων έρευνας και λιγότερες ψευδείς εικόνες.

Στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζονται τα μοντέλα ερμηνείας που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων με τη διάταξη Pole Pole (PP) και Pole Dipole (PD) χρησιμοποιώντας τριδιάστατες τεχνικές ερμηνείας (α,β) και διδιάστατες (ψευδοτριδιάστατες) (γ,δ) αντίστοιχα.



Εικόνα 4.17: Σύγκριση τριδιάστατων και διδιάστατων τεχνικών ερμηνείας.

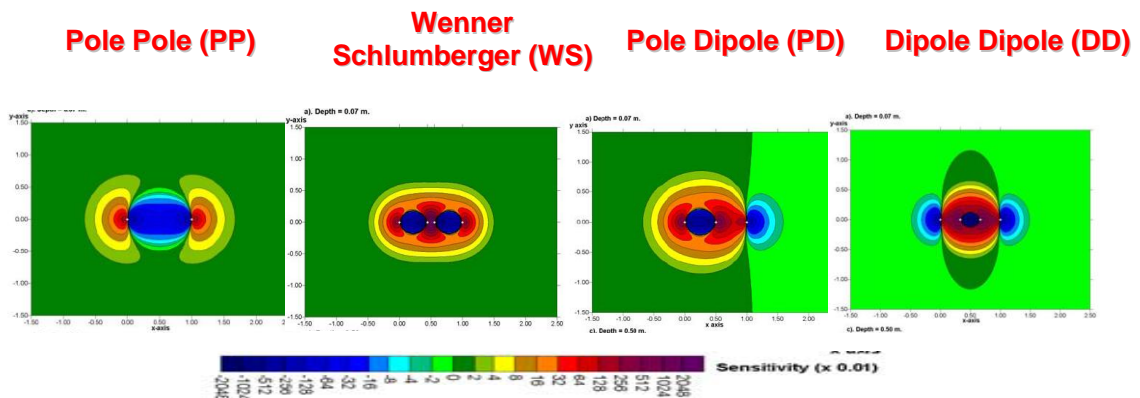
Αρχική παρατήρηση αποτελεί ότι το τριδιάστατο μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Pole Pole (PP) δεν παρουσιάζει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα και ανάλυση σε σχέση με το ψευδοτριδιάστατο μοντέλο. Ο μη πυκνός κάρναβος μετρήσεων, λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των γραμμών έρευνας, συντελεί στη μείωση της διακριτικής ικανότητας του τριδιάστατου μοντέλου.

Δεύτερη παρατήρηση αποτελεί ότι το μοντέλο που προκύπτει από τη τριδιάστατη ερμηνεία των μη παράλληλων διατεταγμένων τομών της διάταξης Pole Pole (PP) συμφωνεί κατά πολύ με το τριδιάστατο μοντέλο ερμηνείας της διάταξης Pole Dipole (PD), ειδικότερα σε σημεία όπου υπάρχει ικανοποιητική αλληλοκάλυψη μεταξύ των γραμμών έρευνας. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα, τονίζει και ενδυναμώνει την πρακτική λήψης γραμμών διασκόπησης σε διαφορετικές διευθύνσεις (σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η λήψη πυκνών παράλληλων γραμμών) παρέχοντας ένα αξιόπιστο μοντέλο ερμηνείας μιας ευρύτερης περιοχής.

Τρίτη σημαντική παρατήρηση είναι ότι ενώ στην περίπτωση της διάταξης Pole Pole (PP) υπάρχει σημαντική ταύτιση μεταξύ της τριδιάστατης και ψευδοτριδιάστατης ερμηνείας (A,C) αντίθετα στην περίπτωση της διάταξης Pole Dipole (PD), το τριδιάστατο μοντέλο ερμηνείας είναι σαφώς ανώτερο από το αντίστοιχο ψευδοτριδιάστατο. Είναι εμφανές ότι η ψευδοτριδιάστατη ερμηνεία της διάταξης Pole Dipole (PD) δημιουργεί ένα «αμφιλεγόμενο» υπεδαφικό μοντέλο με πολλές πλασματικές παρά πραγματικές μορφές.

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην τριδιάστατη φύση του υπεδάφους άλλα και του ίδιου του στόχου, όπου επηρεάζει πολύ περισσότερο την ψευδοτριδιάστατη ερμηνεία της διάταξης Pole Dipole (PD) σε σχέση με τη διάταξη Pole Pole (PP).

Η ύπαρξη πλευρικών ανωμαλιών εκτός της γραμμής διασκόπησης επηρεάζει το μοντέλο ερμηνείας κατά τη διδιάστατη ερμηνεία. Ο Nyari (2003) κατέταξε τις διατάξεις όσον αφορά στην επίδραση πλευρικών ανομοιογενειών στις μετρούμενες τιμές (από την πιο έντονη επίδραση στη λιγότερο έντονη) ως εξής : Dipole Dipole (DD), Pole Pole (PP) , Wenner Schlumberger (WS). Επιπλέον, όσον αφορά στην επίδραση των πλευρικών ανομοιογενειών στις διάφορες διατάξεις σημαντικά συμπεράσματα μπορεί να εξαχθούν από τη χωρική κατανομή των τιμών ευαισθησίας των διάφορων διατάξεων. Από την Εικόνα 4.18 συμπεραίνεται ότι η επίδραση λόγω πλευρικών ανομοιογενειών, είναι πιο αισθητή στις περιπτώσεις των Dipole Dipole (DD), Pole Dipole (PD) σε σχέση με την Pole Pole (PP) και ειδικότερα με την Wenner-Schlumberger (WS), αφού οι περιοχές θετικών και αρνητικών ευαισθησιών επεκτείνονται περισσότερο, πλευρικά της γραμμής διασκόπησης.



Εικόνα 4.18: Η χωρική κατανομή των συναρτήσεων ευαισθησίας διάφορων διατάξεων ηλεκτροδίων

Η συγκεκριμένη επίδραση αποτελεί μειονέκτημα για τη χρησιμοποίηση των διατάξεων Pole Dipole (PD) και Dipole Dipole (DD) όταν ακολουθείται ψευδοτριδιάστατη προσέγγιση ενώ αποτελεί πλεονέκτημα όταν ακολουθείται τριδιάστατη προσέγγιση, αφού θα είναι μεγαλύτερη η επίδραση ενός υπόγειου στόχου στις μετρήσεις και στο μοντέλο ερμηνείας ακόμη και αν η γραμμή διασκόπησης δεν τέμνει το στόχο.

4.6 Εντοπισμός Αρχαίας Στοάς με τη Μικροβαρυτική Μέθοδο

4.6.1 Στόχος του Πειράματος

Μετά την αρχική εφαρμογή της μεθόδου της μικροβαρυτομετρίας στον ελεγχόμενο χώρο γνωστών συνθηκών της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, η εφαρμογή της στην περιοχή Μπερτσέκο Λαυρίου δίδει τη δυνατότητα ανάλυσης της σε ένα πραγματικό και δύσκολο πρόβλημα που αφορά στον εντοπισμό αρχαίας στοάς μικρών διαστάσεων.

Τα αποτελέσματα της μικροβαρυτομετρίας μπορούν να αποτελέσουν μέτρο σύγκρισης και αξιολόγησης των συμπερασμάτων της ηλεκτρικής τομογραφίας σχετικά με την οριοθέτηση της αρχαίας στοάς και να επιτευχθεί η συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους. Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής κάποιου γεωτρητικού προγράμματος για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων μιας γεωφυσικής έρευνας, η καλύτερη προσέγγιση αποτελεί η συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες γεωφυσικές μεθόδους θα αποτελέσει τη βάση για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της μεθόδου, των προτερημάτων – πλεονεκτημάτων και των σημείων που θέλουν ιδιαίτερη προσοχή κατά την εφαρμογή της μεθόδου στο ύπαιθρο. Επίσης, στη συγκεκριμένη περιοχή είναι δυνατόν να εξεταστεί περαιτέρω η δυνατότητα εντοπισμού ενός στόχου που παρουσιάζει διαφορετικές διευθύνσεις στο χώρο αλλά και να αξιολογηθεί η δυνατότητα χαρτογράφησης του στόχου με τη διαδικασία αντιστροφής του συνόλου των βαρυτικών μετρήσεων.

4.6.2 Σχεδιασμός Έρευνας

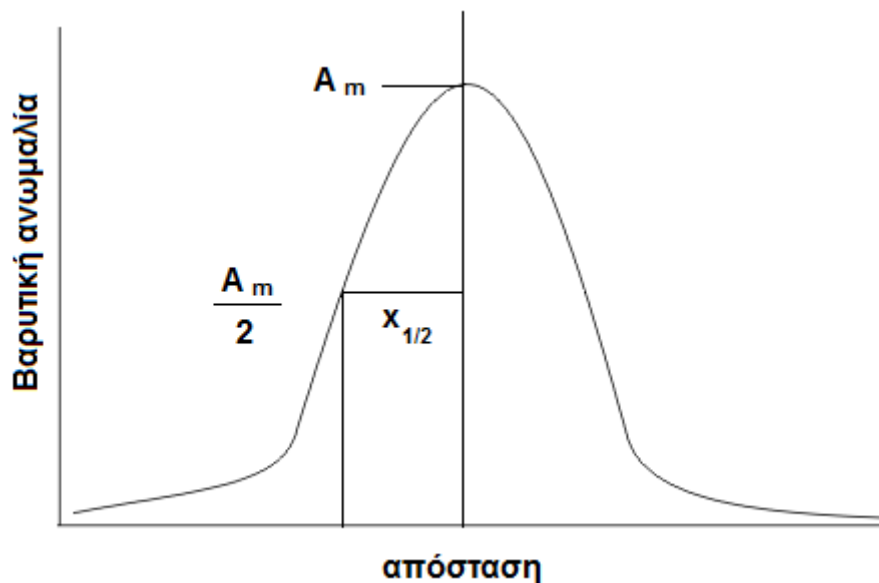
Ένα από τα σημαντικότερα στάδια κατά την εφαρμογή της μικροβαρυτικής μεθόδου, αποτελεί ο αρχικός σχεδιασμός της έρευνας. Το βήμα του κάνναβου μετρήσεων, ο προσανατολισμός των γραμμών έρευνας και γενικότερα όλες οι διαδικασίες που αφορούν τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων, αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ο σχεδιασμός του κάνναβου μετρήσεων έγινε έτσι ώστε :

- Να περιλαμβάνει το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς.
- Να αποφευχθούν όσο το δυνατόν έντονες τοπογραφικές ανωμαλίες.
- Ο αριθμός των μετρήσεων να επιτρέπει την πραγματοποίηση των εργασιών υπαίθρου σε εύλογο χρονικό διάστημα.
- Τα αποτελέσματα των άλλων μεθόδων (ηλεκτρική τομογραφία) να αποτελούν αρχική πληροφορία (prior information) για τον καθορισμό του προσανατολισμού των βαρυτικών γραμμών διασκόπησης.

Συνεπώς, σχεδιάστηκε κάνναβος μετρήσεων, διαστάσεων 21x39 m αποτελούμενος από 8 παράλληλες γραμμές διασκόπησης 39m σε απόσταση 3m μεταξύ τους. Λόγω του μικρού μεγέθους και του βάθους της στοάς επιλέχθηκε βήμα μέτρησης 1m κατά μήκος των γραμμών διασκόπησης.

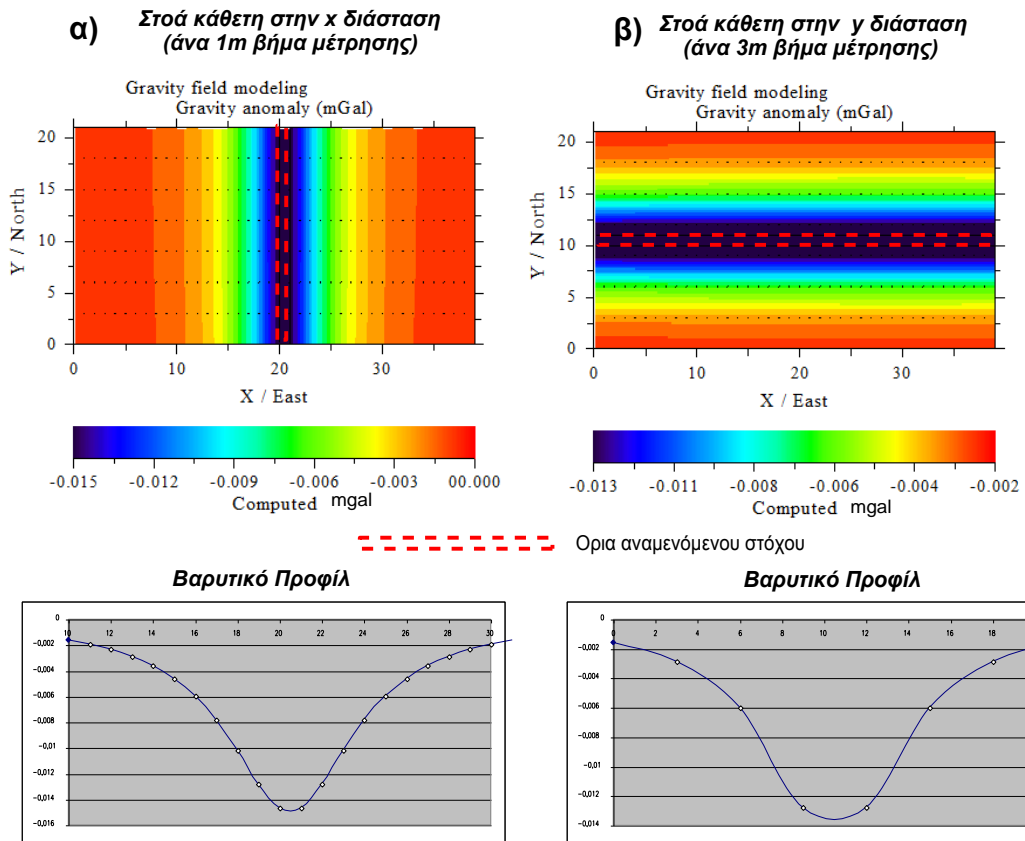
Εάν και για απόσταση 1m μεταξύ των γραμμών διασκόπησης η πυκνότητα των μετρήσεων θα ήταν μεγαλύτερη και η διακριτική ικανότητα της μεθόδου αυξημένη, επιλέχθηκε απόσταση 3m για να περιοριστεί ο χρόνος λήψης των δεδομένων ώστε να συμβαδίζει με τις ανάγκες διάφορων γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών εφαρμογών όπου συνήθως ο χρόνος είναι περιορισμένος. Είναι πολύ σημαντικό να επιλέγεται κάρναβος μετρήσεων με ενδεδειγμένο βήμα μέτρησης έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή και ικανοποιητική περιγραφή της βαρυτικής ανωμαλίας. Ένας συνήθης κανόνας (rule of thumb) είναι ότι η απόσταση μεταξύ των σταθμών μετρήσεων πρέπει να είναι ίση ή λιγότερη από το μισό εύρος (half width) της ανωμαλίας διαιρούμενο δια δύο. Το μισό εύρος της ανωμαλίας (half width) $X_{1/2}$ (Εικ. 4.19) ισούται με την οριζόντια απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και του σημείου του μισού μέγιστου ή ελάχιστου πλάτους (Sheriff 1984, Branston, 2006).



Εικόνα 4.19: Το μισό εύρος (half width) μιας βαρυτικής ανωμαλίας.

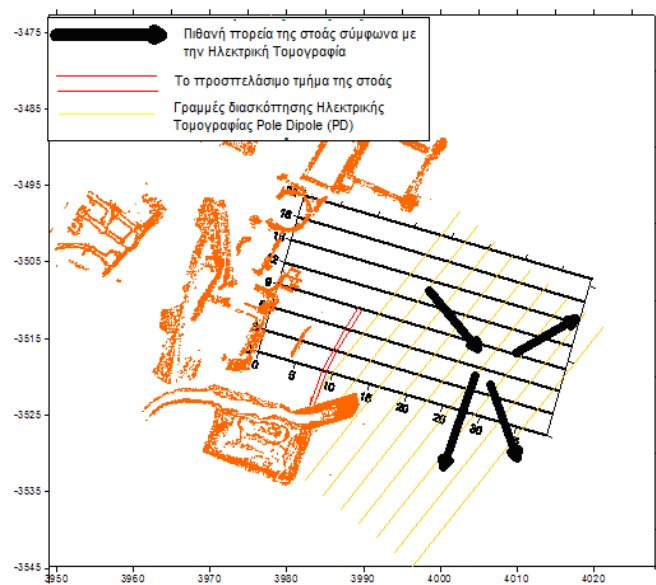
Φυσικά, με τη βοήθεια συνθετικών μοντέλων μπορεί να καθοριστεί το πλάτος και το εύρος της ανωμαλίας που προκαλεί ο αναμενόμενος στόχος έρευνας. Επομένως, είναι εφικτό να διερευνηθεί η διακριτική ικανότητα της μεθόδου ως προς τον εντοπισμό του στόχου άλλα και να αξιολογηθεί το βήμα του κάρναβου μετρήσεων.

Επομένως, σύμφωνα με την καμπύλη βαρυτικής ανωμαλίας η οποία προέκυψε με τη βοήθεια του λογισμικού Grablox (Εικ. 4.20) για την πιθανή ύπαρξη της αρχαίας στοάς, το επιλεγμένο βήμα (1x3) του κάρναβου μετρήσεων αποτελεί ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ της ταχύτητας λήψης των μετρήσεων και της επιθυμητής ανάλυσης.



Εικόνα 4.20 : Αποτύπωση βαρυτικής ανωμαλίας ανάλογα με το βήμα μέτρησης α) στοά κάθετη στην x διάσταση, όπου το βήμα μέτρησης είναι 1m β) Στοά κάθετη στη y διάσταση, όπου το βήμα μέτρησης είναι 3m

Επομένως, ο κάναβος μετρήσεων σχεδιάστηκε να περιλαμβάνει το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς για να υπάρχει ένας άμεσος έλεγχος των αποτελεσμάτων αλλά και περιοχές όπου τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας υποδείκνυαν παρουσία κενού (Εικ. 4.21).



Εικόνα 4.21: Ο κάναβος μετρήσεων της μικροβαρυτικής μεθόδου.

4.6.3 Λήψη Μετρήσεων

Κύριο συμπέρασμα από την εφαρμογή της μεθόδου στη μελέτη περίπτωσης της πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου ήταν ότι η επιτυχία της εφαρμογής της μεθόδου εξαρτάται σημαντικά από τις προσεκτικές διαδικασίες λήψης μετρήσεων στο ύπαιθρο.

Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων ήταν οι εξής :

- Ως βάση των μετρήσεων για τη διόρθωση των ημερήσιων μεταβολών και της πορείας του οργάνου επιλέγεται ένα σημείο του κάρναβου, σε ομαλό και σταθερό υπόβαθρο σε περιοχή όπου δεν αναμενόταν παρουσία κενού.
- Σε κάθε σταθμό βάσης γινόταν έλεγχος της επαναληψιμότητας του οργάνου με τη λήψη διαδοχικών μετρήσεων (ανάλυση επαναληψιμότητας) έτσι ώστε να αυξηθεί όσο το δυνατόν ο λόγος σήματος προς θόρυβο.
- Κάθε τουλάχιστον 45 λεπτά λαμβάνονταν επαναληπτικές μετρήσεις στη βάση (κλείσιμο σταθμών μέτρησης με βάση) για να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις.
- Μετά την ολοκλήρωση μέτρησης σε όλους τους σταθμούς , επιλέχθηκαν τυχαίοι σταθμοί για επαναληπτικές μετρήσεις, έτσι ώστε να καθοριστεί η πραγματική ανάλυση της μεθόδου. (μέτρηση τυχαίου σταθμού –κλείσιμο με σταθμό βάσης)

Πραγματοποιήθηκαν 25 μετρήσεις σε σταθμούς διάφορων γραμμών διασκόπησης και θέσεων και όπου παρατηρήθηκαν τα εξής :

Μέση ανάλυση : 11 μgal .

Μέγιστη απόκλιση: 15 μgal .

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν σε σημεία όπου παρουσιαζόταν δυσκολία στην καλή οριζοντίωση του βαρυτόμετρου

4.6.4 Μικροβαρυτικές Διορθώσεις

Όπως ισχύει σε κάθε βαρυτική διασκόπηση, και στη συγκεκριμένη εφαρμογή στο αρχικό στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν οι διάφορες απαιτούμενες μικροβαρυτικές διορθώσεις.

Για τη δημιουργία της βαρυτικής ανωμαλίας πραγματοποιήθηκαν :

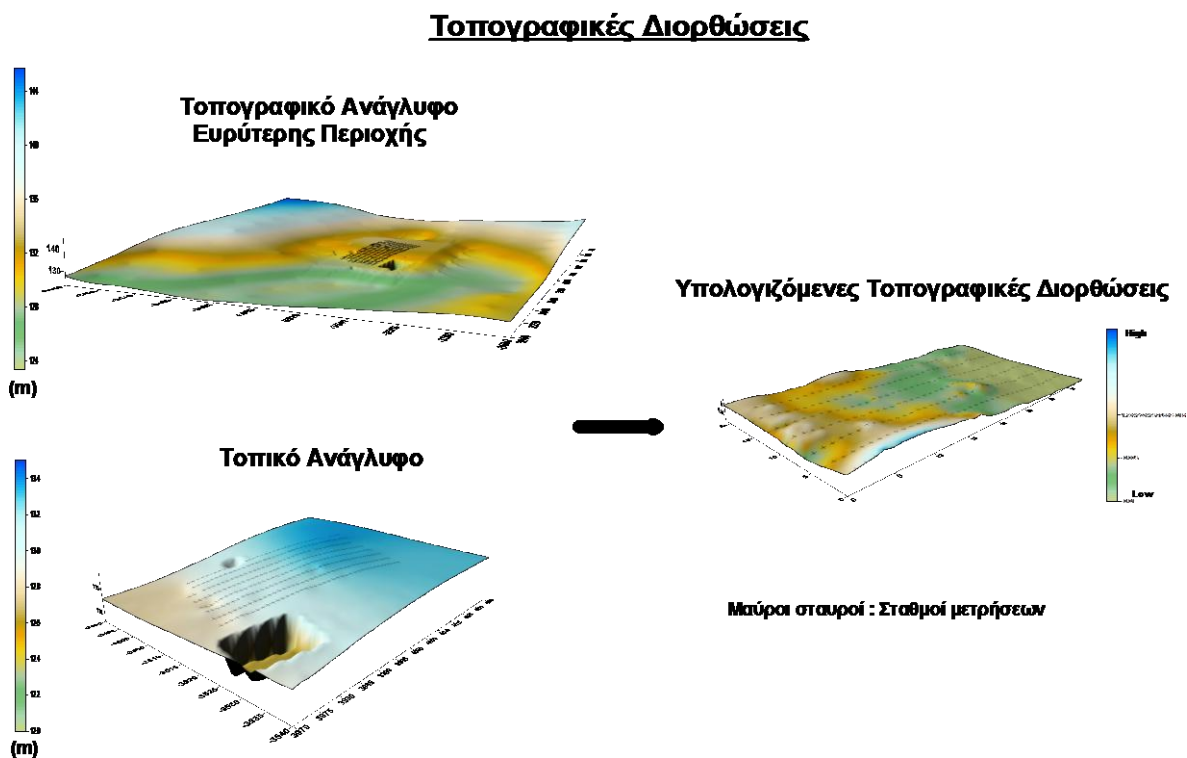
- Οι διορθώσεις για τις περιοδικές μεταβολές του βαρυτικού πεδίου της γης και της πορείας του οργάνου, με βάση τις μετρήσεις στο σταθμό βάσης.

- Οι διορθώσεις ελεύθερου αέρα και της πλάκας Bouguer, με βάση τις υψομετρικές διαφορές των σημείων μέτρησης και του σταθμού βάσης.
- Η διόρθωση γεωγραφικού πλάτους.
- Τοπογραφικές διορθώσεις.

Για την πραγματοποίηση της διόρθωσης ελεύθερου αέρα και της πλάκας Bouguer πρέπει να είναι γνωστή η μέση πυκνότητα των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών. Με τη μέθοδο Nettleton προέκυψε ότι η μέση πυκνότητα είναι $\rho=2,59 \text{ gr/cm}^3$.

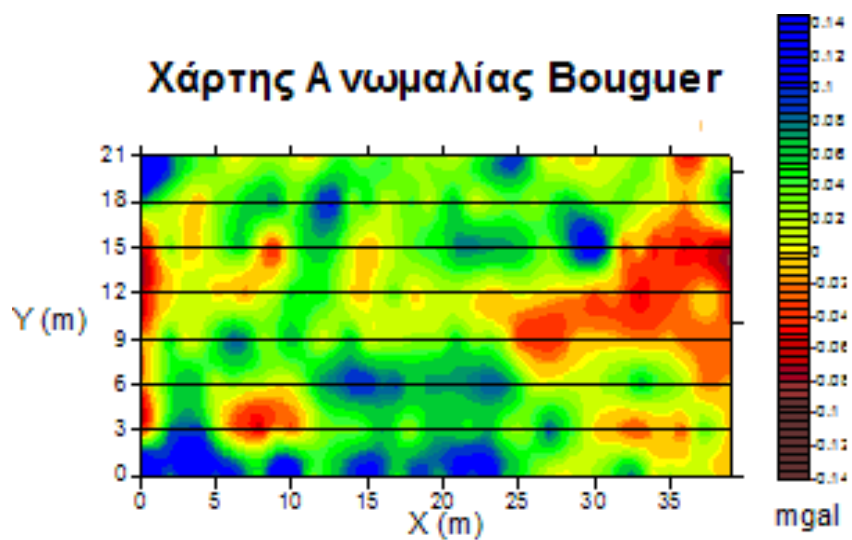
Όσον αφορά στις τοπογραφικές διορθώσεις, η πραγματοποίηση των διορθώσεων πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Tercor και βασίστηκε στα εξής:

- Στον τοπογραφικό χάρτη 1: 5000 της ευρύτερης περιοχής έρευνας.
- Στο χάρτη του τοπικού τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 4.22 : Τοπογραφικές διορθώσεις με βάση το τοπικό ανάγλυφο αλλά και της ευρύτερης περιοχής.

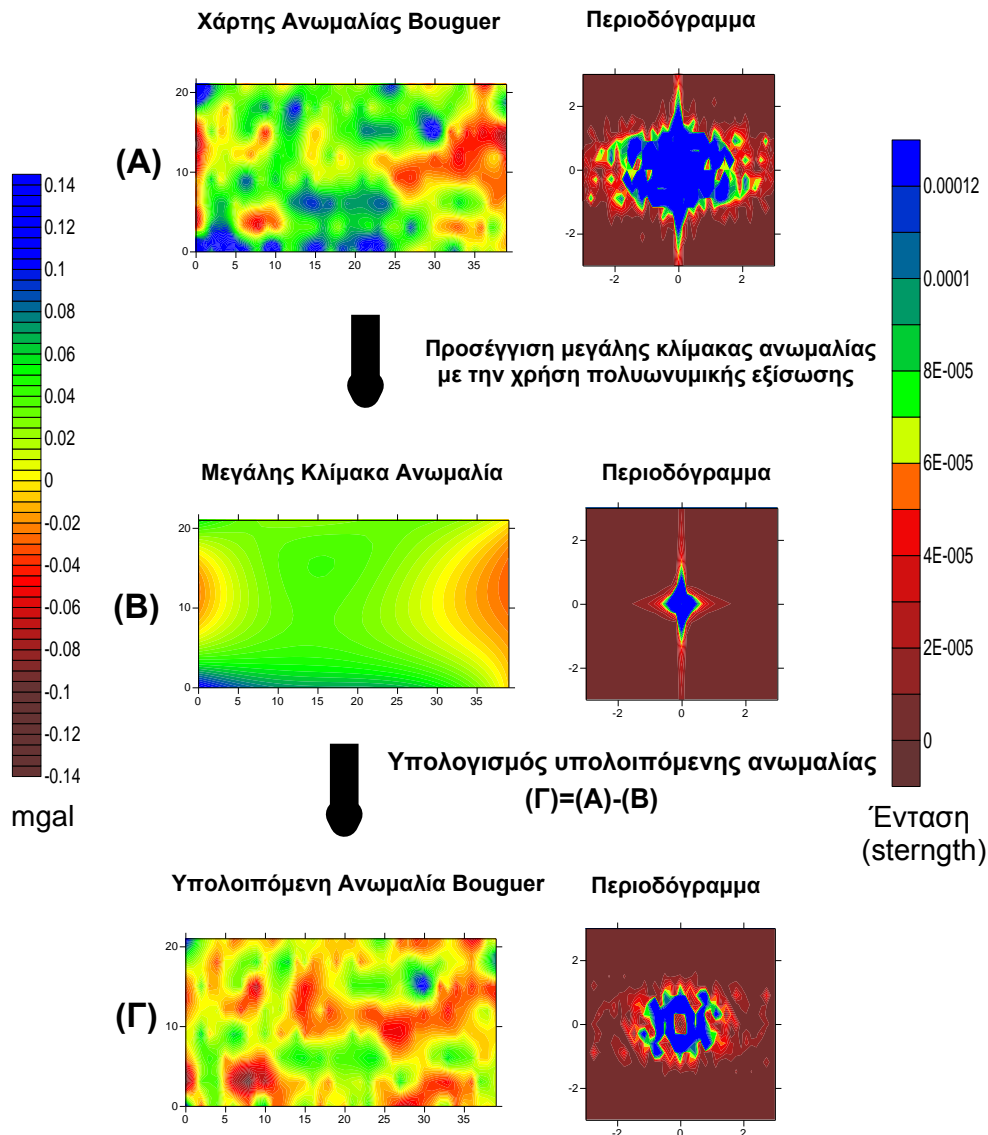
Με τη βοήθεια του λογισμικού Surfer, επιλέγοντας τη μέθοδο πλεγματοποίησης ελάχιστης καμπυλότητας (minimum curvature) και βήμα 1x1 m, προέκυψε ο διδιάστατος χάρτης της ανωμαλίας Bouguer που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.23.



Εικόνα 4.23 :Ο χάρτης ανωμαλίας Bouguer.

4.6.5 Επεξεργασία Μετρήσεων

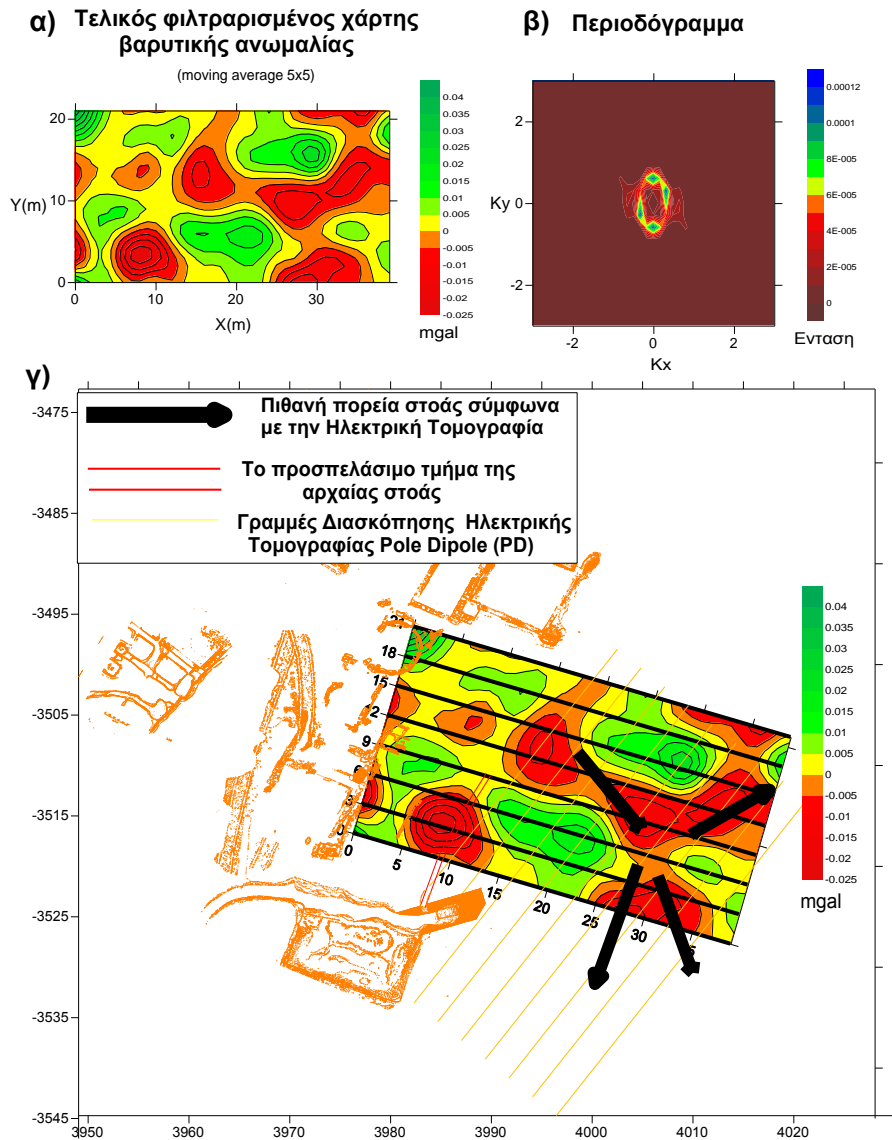
Το επόμενο στάδιο της επεξεργασίας των βαρυτικών μετρήσεων αποτέλεσε η δημιουργία του χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας Bouguer. Η μεγάλη κλίμακας ανωμαλία προσεγγίστηκε με τη χρήση πολυωνμικής εξίσωσης 3⁰ βαθμού, η οποία παρουσίαζε τη μεγαλύτερη συσχέτιση με τις μετρούμενες τιμές. Στην Εικόνα 4.24 παρουσιάζονται οι χάρτες της ανωμαλίας Bouguer, της υπολογιζόμενης ανωμαλίας μεγάλης κλίμακας και της υπολοιπόμενης βαρυτικής ανωμαλίας. Επιπλέον παρουσιάζονται για κάθε χάρτη και τα αντίστοιχα περιοδογράμματα, υποδεικνύοντας το συχνοτικό περιεχόμενο του κάθε χάρτη.



Εικόνα 4.24 : Δημιουργία του υπολειπόμενου χάρτη Bouguer.

Στο χάρτη της υπολειπόμενης ανωμαλίας Bouguer παρόλο που υπάρχει αυξημένο ποσοστό θορύβου, υπάρχουν ευδιάκριτες ανωμαλίες οι οποίες μπορούν να συσχετισθούν με την ύπαρξη κενού άρα και με την ύπαρξη της αρχαίας στοάς.

Για την καλύτερη αποτύπωση του μήκος κύματος της ανωμαλίας ενδιαφέροντος, εφαρμόζεται το φίλτρο της προς τα άνω συνέχειας (1m) και προκύπτει ο τελικός χάρτης της Εικόνας 4.25, στον οποίο έχει μειωθεί κατά πολύ η παρουσία του υψίσυχνου θορύβου.



Εικόνα 4.25: Ο τελικός επεξεργασμένος χάρτης της μικροβαρυτικής μεθόδου

Στον τελικό επεξεργασμένο χάρτη παρουσιάζεται τόσο η ανωμαλία που προκύπτει λόγω του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς, όσο και χαρακτηριστική περιοχή χαμηλών τιμών, η οποία επιβεβαιώνει πλήρως τα συμπεράσματα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας όσον αφορά τη χαρτογράφηση της αρχαίας στοάς

4.6.6 Αντιστροφή Μετρήσεων Μικροβαρυτομετρίας

Το επόμενο στάδιο της επεξεργασίας των μικροβαρυτικών μετρήσεων, είχε ως στόχο ένα μοντέλο ερμηνείας το οποίο να δίδει τη τριδιάστατη κατανομή της πυκνότητας στην περιοχή έρευνας, με κύριο στόχο τη χαρτογράφηση της αρχαία στοάς.

Η αντιστροφή των μετρήσεων έγινε με το λογισμικό Grablox. Όσο αφορά στις παραμέτρους του αρχικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ισοδύναμη κατανομή κελιών διαστάσεων 1x3x1 m, πυκνότητας 2.6 gr/cm³ και συνολικό βάθος 9 m.

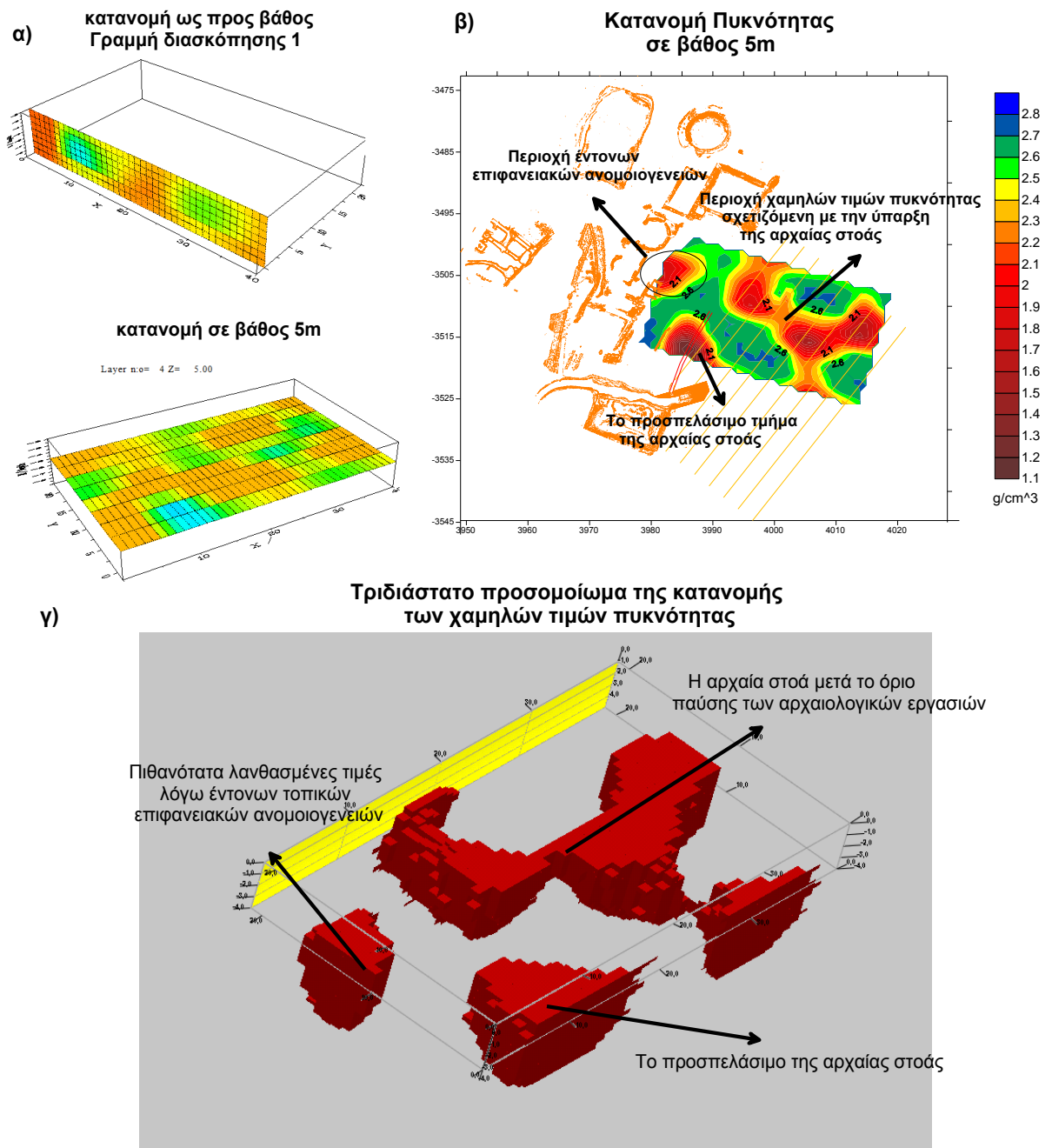
Τα αποτελέσματα της διαδικασίας της αντιστροφής (Rms 4.5%) παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.26 ως εξής :

- Η διδιάστατη κατανομή της πυκνότητας ως προς το βάθος για τη γραμμή διασκόπησης 1 (Εικ. 4.26 (α)) άλλα και η χωρική κατανομή της πυκνότητας σε βάθος 5m με τη βοήθεια του λογισμικού Bloxer
- Η χωρική κατανομή της πυκνότητας σε βάθος 5m στις πραγματικές συντεταγμένες σε σχέση με την περιοχή έρευνας (Εικ 4.26 (β)).
- Το τριδιάστατο προσομοίωμα της χωρικής κατανομής των χαμηλών τιμών πυκνότητας, το οποίο προέκυψε με τη χρήση του λογισμικού Rockware (Εικ 4.26 (γ)).

Οι κύριες μορφές που παρουσιάζονται στις διάφορες απεικονίσεις των αποτελεσμάτων αποτελούνται από χαρακτηριστικές περιοχές χαμηλών πυκνοτήτων, οι οποίες υποδεικνύουν το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς άλλα και ότι η στοά είναι προσπελάσιμη μετά το όριο παύσης των αρχαιολογικών εργασιών και υφίσταται πιθανή διακλάδωση της . Επιπλέον παρατηρείται μια περιοχή χαμηλών πυκνοτήτων, η οποία πιθανότατα οφείλεται περισσότερο σε έντονες επιφανειακές ανομοιογένειες στο σημείο εκείνο (οι οποίες ήταν εμφανείς κατά τη διάρκεια των μετρήσεων) παρά στην παρουσία κενού στο υπέδαφος.

Είναι εμφανές, ότι τα μοντέλα ερμηνείας με τη διαδικασία της αντιστροφής δίδουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για τη θέση και το βάθος της αρχαίας στοάς και επιπλέον παρέχουν τη δυνατότητα για την άμεση σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα μοντέλα ερμηνείας άλλων μεθόδων. Η ταύτιση με την ερμηνεία της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι πολύ μεγάλη, αυξάνοντας το ποσοστό αξιοπιστίας των συμπερασμάτων που αναπτύχθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο για την επιτυχή αντιστροφή των μετρήσεων της μικροβαρυτομετρίας, αποτέλεσε η αρχική πληροφορία που υπήρχε από την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας, η οποία βοήθησε σημαντικά στον καθορισμό των παραμέτρων αντιστροφής άλλα και στον περιορισμό των δυνατών μοντέλων, λόγω του προβλήματος της ισοδυναμίας.



Εικόνα 4.26 : Τα μοντέλα ερμηνείας που προέκυψαν από τη διαδικασία αντιστροφής των μικροβαρυτικών μετρήσεων.

4.7: Εντοπισμός Αρχαίας Στοάς με τη Μαγνητική Μέθοδο

4.7.1 Στόχος Έρευνας

Βασική προϋπόθεση για να είναι δυνατός ο εντοπισμός ενός υπόγειου ανοίγματος με τη μαγνητική μέθοδο, αποτελεί η σημαντική διαφοροποίηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας μεταξύ του στόχου και περιβάλλοντα σχηματισμού.

Στην περίπτωση των υπόγειων κενών τις περισσότερες φορές δεν είναι εφικτό, αφού συνήθως οι ιζηματογενείς σχηματισμοί (συνήθεις σχηματισμοί σε μικρού βάθους εφαρμογές) παρουσιάζουν χαμηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας. Παρόλο αυτά, σε πρόσφατη δημοσίευση (Rybakov, 2005) παρουσιάστηκε η επιτυχημένη εφαρμογή της μαγνητικής μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων κενών σε ιζηματογενείς σχηματισμούς. Επιπλέον, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.4, η μαγνητική μέθοδος παρουσίασε υψηλή ικανότητα οριοθέτησης του αγωγού λόγω της παρουσίας του οπλισμού, επομένως σε περίπτωση ύπαρξης πιθανών μεταλλικών στοιχείων στην αρχαία στοά θα ήταν δυνατόν να προσφέρει επιπλέον σημαντική πληροφόρηση.

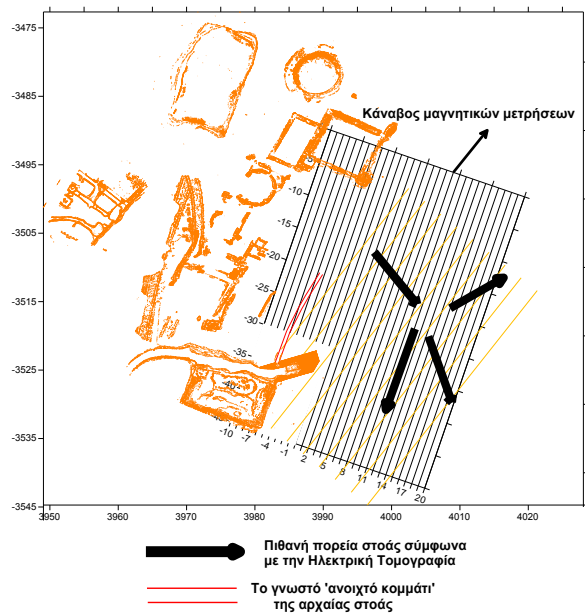
Επομένως κύριος στόχος της συγκεκριμένης έρευνας αποτελεί :

- Η διερεύνηση της ικανότητας της μαγνητικής μεθόδου να εντοπίσει την αρχαία στοά (κενό), την οποία με επιτυχία εντόπισαν οι μέθοδοι της ηλεκτρικής τομογραφίας και μικροβαρυτομετρίας
- Τη διερεύνηση ύπαρξης ή μη μεταλλικών μερών στις περιοχές, όπου οι άλλες μέθοδοι υποδείκνυαν την παρουσία υπόγειων κενών.

4.7.2 Σχεδιασμός Έρευνας- Λήψη Μετρήσεων

Και σε αυτήν την περίπτωση, ο κάνναβος των μαγνητικών μετρήσεων δημιουργήθηκε έτσι ώστε να εμπεριέχεται το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς άλλα και η περιοχή στην οποία υποδείκνυαν οι άλλες μέθοδοι την ύπαρξη κενού.

Επομένως πραγματοποιήθηκαν 30 γραμμές διασκόπησης σε ίση απόσταση 1m και με βήμα μέτρησης 1m. Ο κάνναβος μετρήσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.27.



Εικόνα 4.27 : Ο κάναβος των μαγνητικών μετρήσεων σε σχέση με προσπελάσιμο τμήμα άλλα και την πιθανή πορεία της αρχαίας στοάς.

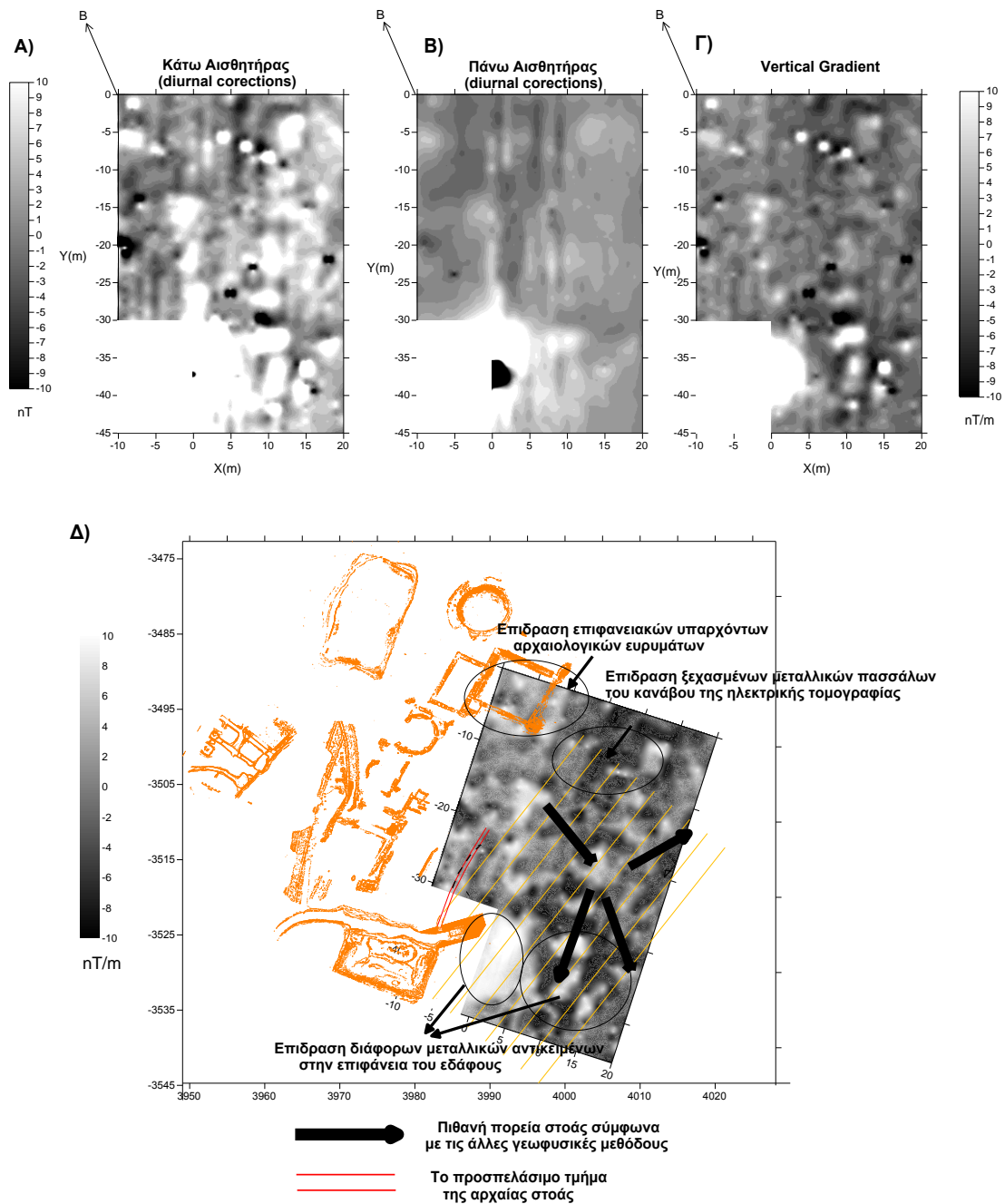
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της διαφορικής μαγνητομέτρησης. Σε κάθε σημείο παρατήρησης μετρήθηκε η ολική τιμή του μαγνητικού πεδίου της γης συγχρόνως σε δύο διαφορετικές υψομετρικές στάθμες, με τη χρησιμοποίηση δύο αισθητήρων γνωστής μεταξύ τους απόστασης. Ο πρώτος αισθητήρας βρίσκεται σε απόσταση 0.70 m από την επιφάνεια του εδάφους και ο δεύτερος 1.4 m ψηλότερα από τον πρώτο. (μέθοδος διαφορικής μαγνητομέτρησης). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε σταθερό σημείο ως βάση για τη διόρθωση των χρονικών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία των δεδομένων κάθε αισθητήρα χωριστά.

4.7.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες διορθώσεις για τη χρονική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου (για τον κάτω και άνω αισθητήρα) προκύπτουν οι χάρτες μαγνητικών ανωμαλιών του κάτω, άνω αισθητήρα και της κατακόρυφης βαθμίδας, οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.28.

Είναι εμφανές παρατηρώντας τους τρεις χάρτες, ότι ο χάρτης του κάτω αισθητήρα παρουσιάζει καλύτερη ανάλυση από το χάρτη του άνω αισθητήρα άλλα μικρότερη σε σχέση με το χάρτη της κατακόρυφης βαθμίδας. Ακόμα και μετά την περαιτέρω επεξεργασία των χαρτών του κάτω και άνω αισθητήρα (διαχωρισμού μεγάλης από μικρής κλίμακα ανωμαλία), ο χάρτης της κατακόρυφης βαθμίδας παρουσιάζει καλύτερη ανάλυση.

Εάν και τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με διάφορους τρόπους (despiking, χάρτες πρώτης παραγωγού, χάρτες shade relief, προς τα άνω συνέχεια, φίλτρα υψηλής και χαμηλής διέλευσης συχνότητας, αναγωγή στον πόλο κ.α.) η τελική εικόνα δεν βελτιωνόταν, μη παρέχοντας ουσιαστική πληροφορία σχετικά με τη θέση και την πορεία της αρχαίας στοάς. Η επίδραση διάφορων επιφανειακών μεταλλικών αντικειμένων άλλα και διάφορων επιφανειακών υπαρχόντων αρχαιολογικών ευρημάτων δυσχεραίνουν ακόμη περισσότερο την αναγνώριση του αναμενόμενου «ασθενούς» σήματος της μεθόδου.



Εικόνα 4.28 : α) χάρτης μαγνητικής ανωμαλίας του κάτω αισθητήρα β) χάρτης μαγνητικής ανωμαλίας του άνω αισθητήρα γ) χάρτης μαγνητικής ανωμαλίας κατακόρυφης βαθμίδας δ) Ο χάρτης της κατακόρυφης βαθμίδας μετά την αφαίρεση των εμφανώς λανθασμένων τιμών (despiking) σε σχέση με τη θέση του προσπελάσιμου τμήματος της αρχαίας στοάς άλλα και της πιθανής πορείας της σύμφωνα με τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους.

4.8 : Σχολιασμός-Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους για τον εντοπισμό της αρχαίας στοάς στον αρχαιολογικό χώρο Μπερτσέκο στο Λαύριο, είναι τα εξής :

- Η αρχαία στοά είναι προσπελάσιμη μετά το όριο παύσης των αρχαιολογικών εργασιών και κατευθύνεται νοτιοανατολικά. Επίσης σε κάποιο σημείο υφίσταται διακλάδωση της στοάς. Η στοά αποτελεί μέρος ενός αρχαίου υπόγειου μεταλλείου και δεν κατασκευάστηκε σε καμία περίπτωση για τη σύνδεση των δύο αρχαίων δεξαμενών.
- Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας και της μικροβαρυτομετρίας στη συγκεκριμένη περίπτωση, ήταν αυτές που απέδωσαν και οριοθέτησαν με τον καλύτερο τρόπο τη θέση και την πορεία της αρχαίας στοάς. Η μαγνητική μέθοδος, λόγω της μικρής μαγνητικής επιδεκτικότητας μεταξύ του κενού και του μητρικού πετρώματος δεν παρουσίασε αξιοσημείωτα αποτελέσματα.
- Κάθε αρχική πληροφορία σχετικά με το στόχο ενδιαφέροντος είναι σημαντική για τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό μιας γεωφυσικής έρευνας.
- Για τη λήψη των μετρήσεων ακολουθήθηκε συγκεκριμένη στρατηγική. Αρχικά εφαρμόστηκαν διάφορες γραμμές διασκόπησης ηλεκτρικής τομογραφίας σε διάφορες διευθύνσεις, ώστε να είναι δυνατή η διασκόπηση μιας ευρύτερης περιοχής σε ικανοποιητικό βάθος άλλα και για την αποφυγή διάφορων επιφανειακών εμποδίων και έντονων ανομοιογενειών. Εφαρμόζοντας την πρώτη γραμμή διασκόπησης πάνω από το προσπελάσιμο τμήμα της αρχαίας στοάς άλλα και ερμηνεύοντας τις μετρήσεις κάθε γραμμής διασκόπησης επιτόπου στο ύπαιθρο, σχεδιάζονταν η θέση και ο προσανατολισμός της νέας γραμμής με βάση τα προκύπτοντα μοντέλα ερμηνείας έτσι ώστε να «ακολουθείται» όσο το δυνατόν η πορεία της αρχαίας στοάς.
- Οι μετρήσεις κάθε γραμμής διασκόπησης ερμηνεύτηκαν αρχικά με διδιάστατες τεχνικές ερμηνείας. Με συγκεκριμένες απεικονίσεις όπως τα μοντέλα ερμηνείας κάθε γραμμής διασκόπησης (κατανομή ειδικής αντίστασης ως προς το βάθος) στις πραγματικές συντεταγμένες τους στο χώρο και τη ψευδοτριδιάστατη κατανομή της ειδικής αντίστασης για το βάθος ενδιαφέροντος, ήταν δυνατή η εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών σχετικά με την αρχαία στοά.
- Ενοποιώντας όλες μετρήσεις από τις διάφορες γραμμές διασκόπησης ήταν δυνατή η τριδιάστατη ερμηνεία των μη παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης. Η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται με στόχο κυρίως τον έλεγχο της αξιοπιστίας της ψευδοτριδιάστατης ερμηνείας και όχι για τη δημιουργία ενός μοντέλου υψηλότερης ανάλυσης. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης καθιστά δύσκολη την αποτύπωση της πραγματικής τριδιάστατης κατανομής της ειδικής αντίστασης άλλα μπορεί να υποδείξει το βαθμό επίδρασης διάφορων τριδιάστατων μορφών στα μοντέλα ερμηνείας της διδιάστατης ερμηνείας.

- Με τη συγκεκριμένη στρατηγική ήταν δυνατή η διασκόπηση μια ευρύτερης περιοχής σε μέτριο απαιτούμενο χρόνο, παρέχοντας μια γενικότερη απεικόνιση του υπεδάφους άλλα και υποδεικνύοντας συγκεκριμένα σημεία όπου ένα υψηλότερης ανάλυσης γεωφυσικό μοντέλο θα ήταν επιθυμητό.
- Χρησιμοποιώντας ως αρχική πληροφορία τα αποτελέσματα της αρχικής έρευνας, ήταν δυνατή η βελτιστοποίηση των παραμέτρων σχεδιασμού των επόμενων γεωφυσικών μεθόδων (τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία και μικροβαρυτομετρία).
- Ο προσανατολισμός των γραμμών διασκόπησης άλλα και το πρωτόκολλο μετρήσεων παίζει σημαντικό ρόλο ακόμα και στην τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία όσον αφορά στην καλύτερη οριοθέτηση του στόχου.
- Η αντιστροφή των μετρήσεων της μικροβαρυτικής μεθόδου παρείχε μοντέλα ικανοποιητικής ανάλυσης, τα οποία είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα μοντέλα ερμηνείας της ηλεκτρικής τομογραφίας.
- Η συγκριτική αξιολόγηση όλων των γεωφυσικών μεθόδων, παρείχε τη μέγιστη δυνατή πληροφορία όσον αφορά στο στόχο ενδιαφέροντος, αυξάνοντας την αξιοπιστία και μειώνοντας την αβεβαιότητα της τελικής ερμηνείας και σε αυτήν την περίπτωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Πολυπαραμετρική Στατιστική Ανάλυση για τη Συνδυαστική Ερμηνεία Γεωφυσικών Μεθόδων

5.1 Εισαγωγή

Η ερμηνεία των μετρήσεων προερχόμενων από μία και μόνο γεωφυσική μέθοδο, τις περισσότερες φορές συντελεί σε ένα μη μονοσήμαντο γεωφυσικό μοντέλο ερμηνείας. Ειδικότερα, όσον αφορά στον εντοπισμό υπόγειων στόχων, στα Κεφάλαια 3 & 4 αναδείχθηκε η ανάγκη χρησιμοποίησης περισσότερων από μία γεωφυσικές μεθόδους. Ακόμα και σε περιπτώσεις όπου μια μέθοδος παρουσίαζε υψηλή ικανότητα εντοπισμού του στόχου, μόνο με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων των άλλων μεθόδων, ήταν δυνατή η σύγκλιση σε μία τελική βέλτιστη απεικόνιση των συνθηκών του υπεδάφους και χαρτογράφησης του στόχου έρευνας.

Ο συνδυασμός των διάφορων γεωφυσικών δεδομένων μπορεί να συντελεστεί με διάφορους τρόπους :

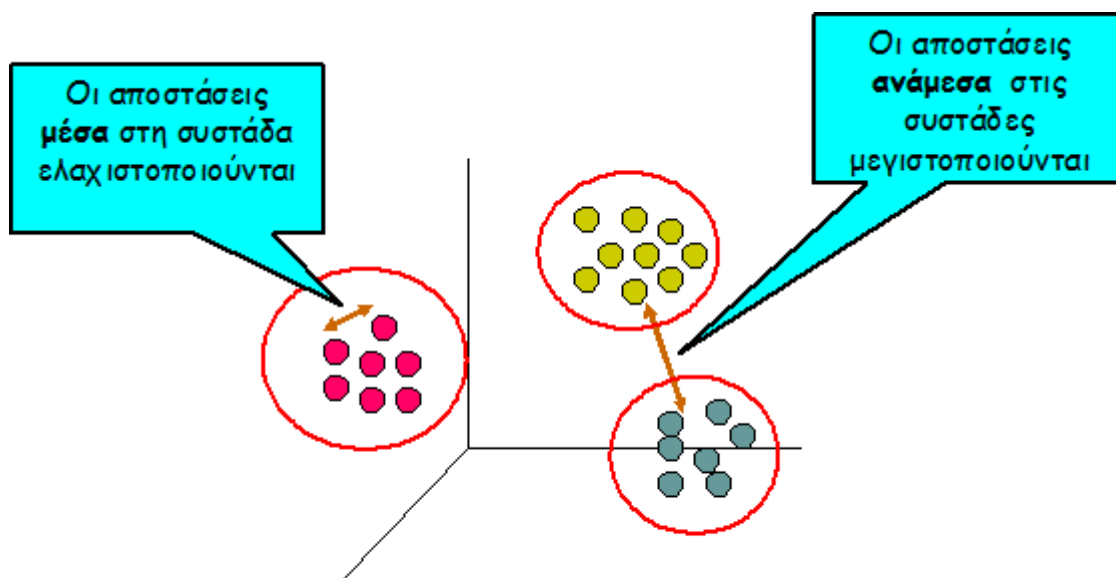
1. Η συνηθέστερη προσέγγιση αποτελεί η συγκριτική αξιολόγηση των γεωφυσικών μοντέλων ερμηνείας που προέρχονται από τη μεμονωμένη ερμηνεία μετρήσεων διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων και τα οποία αλληλοκαλύπτουν την περιοχή έρευνας. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ακολουθήθηκε, έως τώρα, κατά τη συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση των διάφορων περιπτώσεων, οι οποίες αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 3 & 4. Εάν και η διαδικασία αυτή συντελεί στη μείωση της αβεβαιότητας της τελικής ερμηνείας, *είναι εκ φύσεως ποιοτική*, και ως εκ τούτου το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται κατά πολύ από την εμπειρία και τις «προκαταλήψεις» του ερευνητή, χωρίς να είναι εφικτή πολλές φορές η αντικειμενική εκτίμηση της πραγματικής αξιοπιστίας της γεωφυσικής ερμηνείας.
2. Μια εναλλακτική προσέγγιση απαιτεί τη σύνδεση διαφορετικών γεωφυσικών μετρήσεων κατά τη διαδικασία αντιστροφής (joint inversion). **Κύριο μειονέκτημα της συνδυαστικής αντιστροφής μετρήσεων, προερχόμενων από διάφορες γεωφυσικές μεθόδους, αποτελεί η ανάγκη ύπαρξης καλά καθορισμένων (well defined) σχέσεων-συναρτήσεων μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων** (Musil et al., 2003; Bosch, 2004, Paashe 2006). Η ποιότητα και η συνοχή των τελικών αυτών μοντέλων εξαρτάται κατά πολύ από την αξιοπιστία των παραδοχών και των συναρτήσεων συσχέτισης των παραμέτρων. Είναι γεγονός ότι οι σχέσεις μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων συντείνουν να μην είναι μονοσήμαντες και συνήθως είναι εξαρτώμενες από τις συνθήκες της περιοχής έρευνας. (Schön, 1998, Paashe et al, 2006). Επίσης κατά τη συνδυαστική αντιστροφή των δεδομένων η επίδραση του τυχαίου θορύβου είναι σημαντική και δύσκολα προβλέψιμη.
3. Μια διαφορετική προσέγγιση, όσον αφορά στο συνδυασμό μοντέλων ερμηνείας διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων και η οποία αναλύεται σε πρόσφατη δημοσίευση (Paashe et al, 2006) αποτελεί **η στατιστική πολυπαραμετρική ανάλυση** (multivariate statistics). Οι μέθοδοι Συσταδοποίησης ή Ομαδοποίησης (Clustering methods, Kaufmann and Rousseeuw, 1990; Höppner et al., 1999), οι οποίες δεν απαιτούν αρχική πληροφορία για την ενδο-συσχέτιση των διαφόρων παραμέτρων, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό.

Η τελευταία προσέγγιση είναι αυτή που θα υιοθετηθεί και θα διερευνηθεί περαιτέρω για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων.

Συγκεκριμένα, θα αναλυθεί η δημιουργία ενός τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους (Ε.Γ.Μ.Υ), το οποίο παρουσιάζει την κατανομή των διάφορων μετρούμενων παραμέτρων του υπεδάφους, συνδυάζοντας όλα τα γεωφυσικά μοντέλα ερμηνείας που προκύπτουν από την εφαρμογή των διάφορων γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, με κύριο στόχο τη βέλτιστη συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους όσον αφορά στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων.

5.2 Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο του Υπεδάφους (Ε.Γ.Μ.Υ.)

Με τον όρο συσταδοποίηση (clustering) εννοούμε τη στατιστική διαδικασία με την οποία προσπαθούμε να οργανώσουμε διάφορα δεδομένα σε ομάδες (clusters), οι οποίες δεν είναι από πριν γνωστές, αλλά προκύπτουν δυναμικά (Εικ. 5.1). Οι τεχνικές συσταδοποίησης εφαρμόζονται σε διάφορους ερευνητικούς τομείς της επιστήμης όπως βιολογία, ιατρική, σεισμολογία κ.α.



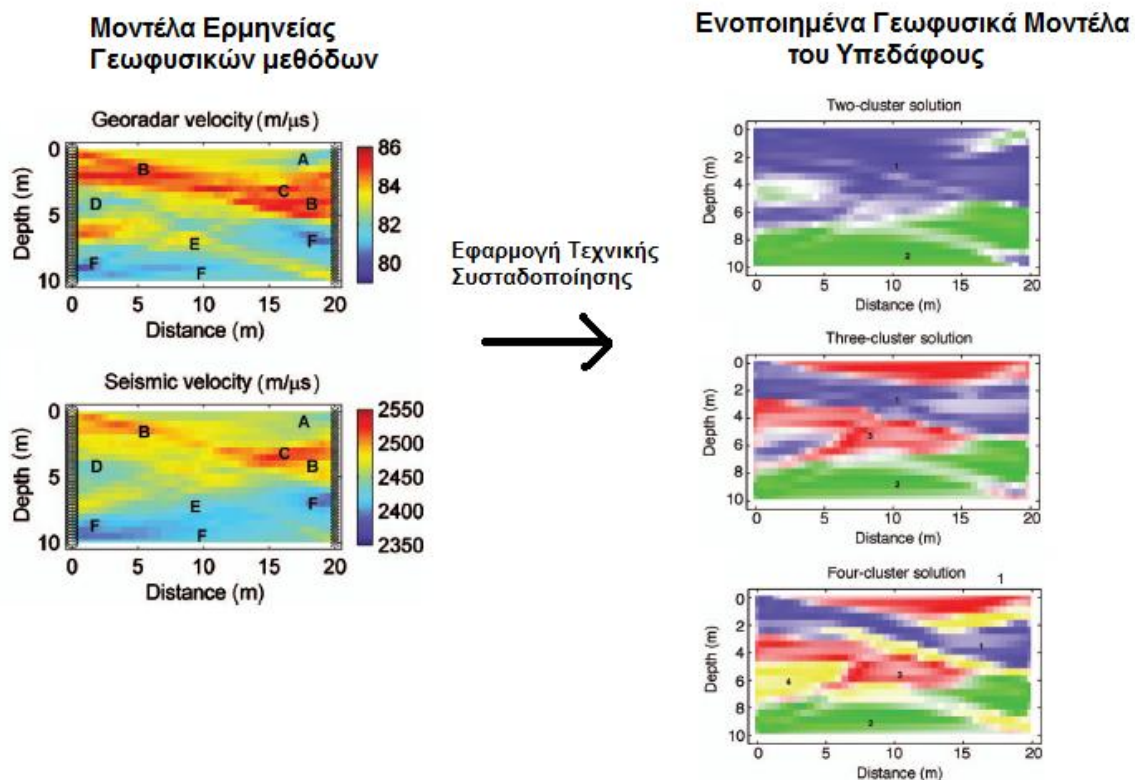
Εικόνα 5.1: Οργάνωση δεδομένων σε ομάδες.

Ο Paashe το 2006 παρουσίασε, σε σχετική δημοσίευση, ότι με την εφαρμογή συγκεκριμένης τεχνικής συσταδοποίησης (fuzzy c-means clustering), είναι δυνατός ο συνδυασμός αυτόνομων γεωφυσικών μοντέλων ερμηνείας για τη δημιουργία ενός Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους. Συγκεκριμένα, εφάρμοσε τη τεχνική συσταδοποίησης fuzzy c-means clustering για τη συνδυαστική ερμηνεία μοντέλων

δύο διαφορετικών μεθόδων (Γεωραντάρ και σεισμικής μεθόδου μεταξύ γεωτρήσεων) για το χαρακτηρισμό της διαστρωμάτωσης του υπεδάφους (Εικ. 5.2).

Γενικότερα, στη περίπτωση της εφαρμοσμένης γεωφυσικής, οι παράμετροι μπορεί να είναι η ηλεκτρική ειδική αντίσταση, η πυκνότητα, η ταχύτητα σεισμικών ή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η μαγνητική επιδεκτικότητα κ.α.

Το Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο του Υπεδάφους (Ε.Γ.Μ.Υ) είναι ένα τελικό μοντέλο ερμηνείας στο οποίο αποτυπώνονται διάφορες ζώνες με κοινές ιδιότητες, οι οποίες καθορίζονται κάθε φορά από τις μετρούμενες χαρακτηριστικές παραμέτρους των γεωφυσικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 5.2: Παράδειγμα πολυπαραμετρικής ανάλυσης για τη δημιουργία Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους σε συνθετικά δεδομένα (Paashe 2006).

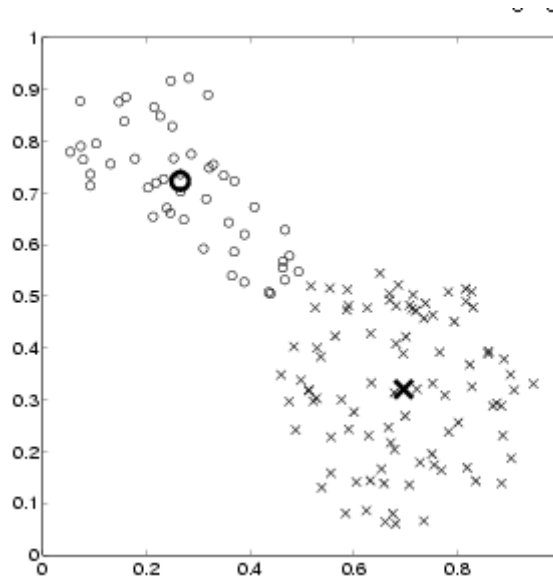
Για τη συσταδοποίηση δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές. Η τεχνική Fuzzy c-means είναι μια τεχνική συσταδοποίησης δεδομένων, στην οποία κάθε σημείο ανήκει σε κάθε ομάδα (cluster) σε κάποιο βαθμό, ο οποίος καθορίζεται από τη συνάρτηση συμμετοχής (membership function). Οι βαθμοί συμμετοχής (membership values), οι οποίοι ποσοτικοποιούν το βαθμό συμμετοχής στις διάφορες ομάδες (clusters), κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Όσο μεγαλύτερος ο βαθμός συμμετοχής τόσο προσεγγίζει το σημείο στο αντίστοιχο κέντρο του cluster. Για ένα συγκεκριμένο σημείο, το άθροισμα όλων των βαθμών συμμετοχής είναι μονάδα.

Η εφαρμογή της τεχνικής Fuzzy c-means πραγματοποιείται στο περιβάλλον του λογισμικού matlab με την εντολή «fcm». Κατα το πρώτο στάδιο, με την εντολή πραγματοποιείται μια αρχική πρόβλεψη για το κέντρο των clusters. Παράλληλα, με τη συγκεκριμένη εντολή υπολογίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής όλων των σημείων για κάθε cluster. Με τον επαναληπτικό επαναπροσδιορισμό των κέντρων των cluster και των

βαθμών συμμετοχής, επιτυγχάνεται η μετακίνηση των κέντρων των cluster στη σωστή θέση μέσα σε ένα σύνολο δεδομένων (Εικ. 5.3). Η επαναληπτική διαδικασία βασίζεται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function), η οποία αντιπροσωπεύει την απόσταση από ένα συγκεκριμένο σημείο στο κέντρο ενός cluster, σταθμισμένο (weighted) από το βαθμό συμμετοχής αυτού του σημείου :

$$J_{FCM} = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n m d_{ij}^f \|x_j - u_i\|^2 \quad (\text{εξίσωση 5.1})$$

όπου c ο αριθμός των cluster, n ο αριθμός των σημείων, και $m d_{ij}$ ο βαθμός συμμετοχής ενός σημείου x_j στο cluster i με κέντρο u_i . Ο εκθέτης f αποτελεί την παράμετρο ασαφοποίησης (fuzzification) η οποία αντιπροσωπεύει το βαθμό αλληλοκάλυψης μεταξύ των clusters. (η τιμή $f=2$ είναι η πιο ευρέως αποδεκτή ως η καταλληλότερη (Hathaway and Bezdek, 2001)



Εικόνα 5.3 : Παράδειγμα συσταδοποίησης δεδομένων σε δύο ομάδες με τη μέθοδο συσταδοποίησης Fuzzy c-means

Τελικά, το αποτέλεσμα της εντολής fcm αποτελεί μια λίστα με τα κέντρα των clusters και τις συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε σημείο. Αποδίδοντας κάθε σημείο στην ομάδα για την οποία έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής (αποσαφοποίηση) τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να μετατραπούν σε ισοδύναμα μοντέλα διαφορετικών ζωνών με ίδια χαρακτηριστικά.

Στην περίπτωση της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής η χωρική κατανομή των χαρακτηριστικών ομάδων αποτελούν ζώνες του υπεδάφους, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τις παραμέτρους των εκάστοτε εφαρμοζόμενων γεωφυσικών μεθόδων.

5.4: Πολυπαραμετρική Ανάλυση Γεωφυσικών Μεθόδων για τη Δημιουργία Ε.Γ.Μ.Υ σε Προσδιορισμένα Υπεδαφικά Μοντέλα

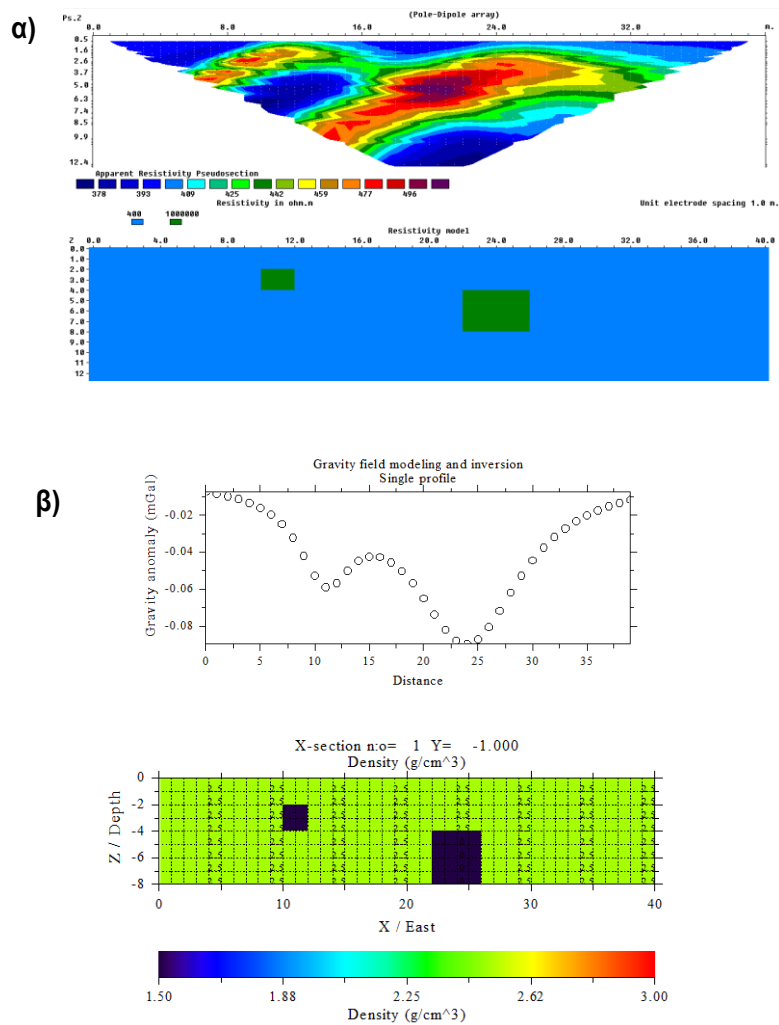
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθεί η εφαρμογή της πολυπαραμετρικής ανάλυσης για το συνδυασμό διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων σε δύο διαφορετικά σετ δεδομένων, τα οποία είναι τα εξής :

- Συνθετικά δεδομένα προερχόμενα από τις δύο κυριότερες επιφανειακές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων: την ηλεκτρική τομογραφία και τη μικροβαρυτομετρία. Οι στόχοι στη συγκεκριμένη περίπτωση θα προσομοιάζουν την ύπαρξη δυο στοών σε ομογενές ημιχώρο.
- Πραγματικά δεδομένα σε ελεγχόμενες συνθήκες υπαίθρου, που προέρχονται από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3, για τον εντοπισμό του υπόγειου αγωγού. Συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα ερμηνείας τριών διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων: της Ηλεκτρικής τομογραφίας, της Μικροβαρυτομετρία και της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων.

Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτό να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη δυνατότητα εφαρμογής της πολυπαραμετρικής ανάλυσης στις συγκεκριμένες μεθόδους και ειδικότερα αναφορικά με το πρόβλημα του εντοπισμού υπόγειων ανοιγμάτων.

5.4.1 Συνθετικό Μοντέλο 1: Ύπαρξη Δύο Στοών σε Ομογενή Ημιχώρο

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, με τη βοήθεια συνθετικών μοντέλων προσομοιάζονται δύο υπόγειες στοές (άπειρη ηλεκτρική ειδική αντίσταση, μηδενική πυκνότητα) διαφορετικών διαστάσεων και βάθους σε ομογενή ημιχώρο ($\rho_{\text{ειδική αντίσταση}} = 400 \text{ Ohm.m}$, $\rho_{\text{πυκνότητα}} = 2,5 \text{ gr/cm}^3$). Ο πρώτος στόχος έχει διαστάσεις $2 \times 2 \text{ m}$, σε βάθος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους και βρίσκεται σε απόσταση 10 m από την αρχή της γραμμής διασκόπησης ενώ ο δεύτερος στόχος έχει διαστάσεις $4 \times 4 \text{ m}$ σε βάθος 4 m από την επιφάνεια και βρίσκεται σε απόσταση 22 m από την αρχή της γραμμής διασκόπησης. Με τη βοήθεια των λογισμικών Grablox-Bloxer και Res2mode υπολογίσθηκαν αντίστοιχα οι τιμές των βαρυτικών μετρήσεων (40 σταθμοί με βήμα μέτρησης 1 m) και των ηλεκτρικών μετρήσεων (41 ηλεκτρόδια σε ίση απόσταση του 1 m με τη διάταξη Pole Dipole (PD) με $a, n = 1$ έως 6) που θα λαμβάνονταν στην επιφάνεια του ημιχώρου.

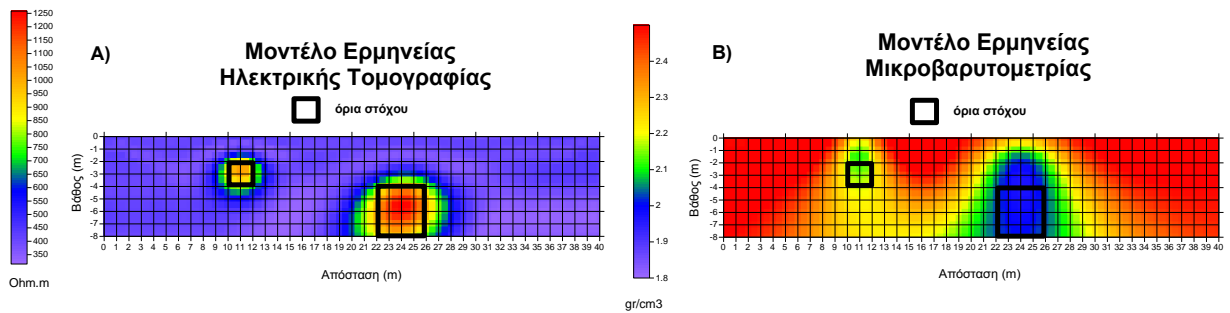


Εικόνα 5.4 : α) Το ηλεκτρικό μοντέλο, το οποίο προσομοιάζει των στόχο έρευνας και οι συνθετικά υπολογιζόμενες τιμές μετρήσεων β) Το βαρυτικό μοντέλο, το οποίο προσομοιάζει των στόχο έρευνας και οι συνθετικά υπολογιζόμενες τιμές μετρήσεων.

Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζονται τα συνθετικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και οι αντίστοιχες υπολογιζόμενες τιμές μετρήσεων για κάθε μέθοδο.

Το επόμενο στάδιο περιελάμβανε την ερμηνεία των συνθετικών δεδομένων. Για την αντιστροφή των μικροβαρυτικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Grablox και για την ερμηνεία των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Res2dinv.

Τα αποτελέσματα της ερμηνείας των συνθετικών δεδομένων για τις δύο μεθόδους αντίστοιχα παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5: α) Το μοντέλο ερμηνείας με τη μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας β) Το μοντέλο ερμηνείας της Μικροβαρυτικής Μεθόδου.

Είναι εμφανές, ότι οι στόχοι εντοπίζονται στα δύο μοντέλα ερμηνείας, ως υψηλές ειδικές αντιστάσεις στο γεωηλεκτρικό μοντέλο και ως χαμηλές πυκνότητες στο αντίστοιχο μικροβαρυτικό μοντέλο, παρουσιάζοντας όμως διαφορετική διακριτική ικανότητα και ακρίβεια αποτύπωσης του στόχου ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται.

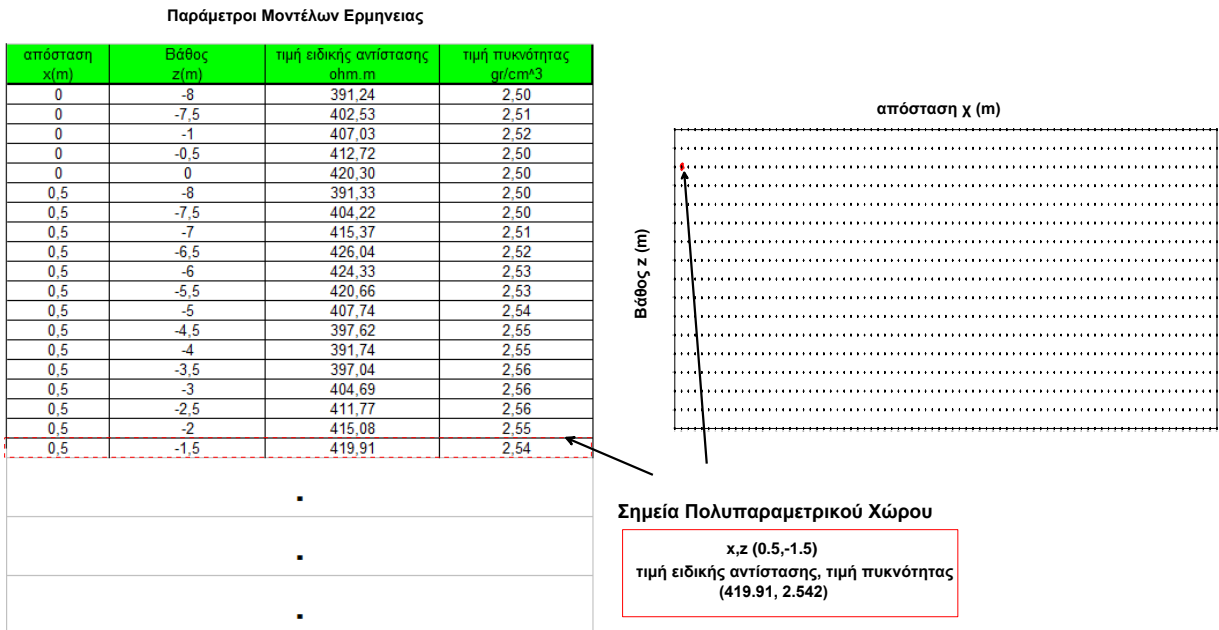
Κατά το επόμενο στάδιο εφαρμόζεται η ανάλυση συσταδοποίησης (Cluster Analysis) των δύο μοντέλων ερμηνείας της Εικόνας 5.5, με τη μέθοδο συσταδοποίησης **Fuzzy c-means clustering**. Η ανάλυση συσταδοποίησης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab.

Για την εφαρμογή της τεχνικής συσταδοποίησης, δημιουργείται αρχικά ένας πολυπαραμετρικός χώρος. Το κάθε σημείο του δημιουργούμενου πολυπαραμετρικού χώρου πρέπει να χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους που περιέχονται στα αυτόνομα μοντέλα ερμηνείας (Εικ. 5.6). Συνεπώς, πρέπει για κάθε καθορισμένη θέση x,z ενός σημείου, να υπάρχει η αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου κάθε μεθόδου. Για να είναι αυτό εφικτό χρησιμοποιούνται ακριβώς οι ίδιοι παράμετροι πλεγματοποίησης (gridding) και για τα δύο μοντέλα ερμηνείας (διαστάσεις, βήμα πλεγματοποίησης). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το κάθε σημείο χαρακτηρίζεται από την τιμή ειδικής αντίστασης και την τιμή της πυκνότητας, για συγκεκριμένη θέση απόστασης x και βάθους z. Ο πολυπαραμετρικός χώρος στην περίπτωση αυτή είναι διδιάστατος, ενώ σε περιπτώσεις συνδυασμού περισσότερων από δυο γεωφυσικών μεθόδων, ο πολυπαραμετρικός χώρος θα ήταν πολυδιάστατος.

Για να αποφευχθούν προβλήματα λόγω διαφορετικής κλίμακας (scaling effects) των παραμέτρων των διάφορων μοντέλων ερμηνείας, για κάθε μέθοδο οι παράμετροι V κανονικοποιούνται σύμφωνα με την εξίσωση:

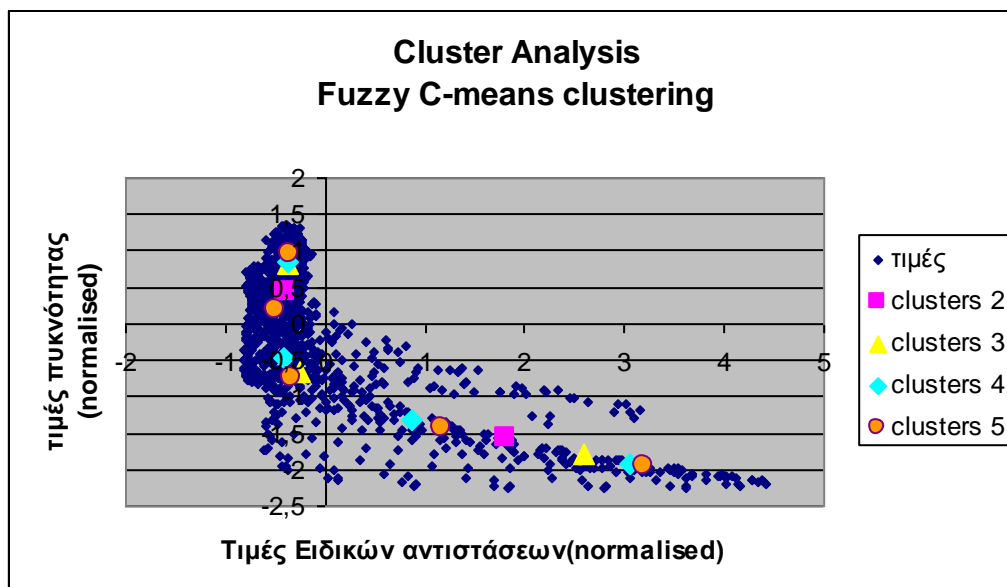
$$Z_{norm} = \frac{V - V_{mean}}{std(V)} \quad (\text{εξίσωση 5.2})$$

Όπου Z_{norm} , η κανονικοποιημένη τιμή, V_{mean} η μέση τιμή των παραμέτρων, και $std(V)$ η τυπική απόκλιση των παραμέτρων, η οποία αποτελεί ένα μέτρο της απόκλισης των σημείων από τη μέση τιμή.



Εικόνα 5.6: Κάθε σημείο του πολυπαραμετρικού χώρου χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους που περιέχονται στα αυτόνομα μοντέλα ερμηνείας.

Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζεται ο διδιάστατος πολυπαραμετρικός χώρος, ο οποίος παρουσιάζει τη συσχέτιση των τιμών πυκνότητας και ειδικής αντίστασης, όπως και τις λύσεις (τα κέντρα των clusters) που προέκυψαν με την εφαρμογή της τεχνικής fuzzy c means clustering για αριθμό clusters 2,3,4,5, αντίστοιχα (και λύσεις για διάφορα cluster).



Εικόνα 5.7 : Ο διδιάστατος πολυπαραμετρικός χώρος και οι λύσεις για αριθμό cluster 2,3,4,5.

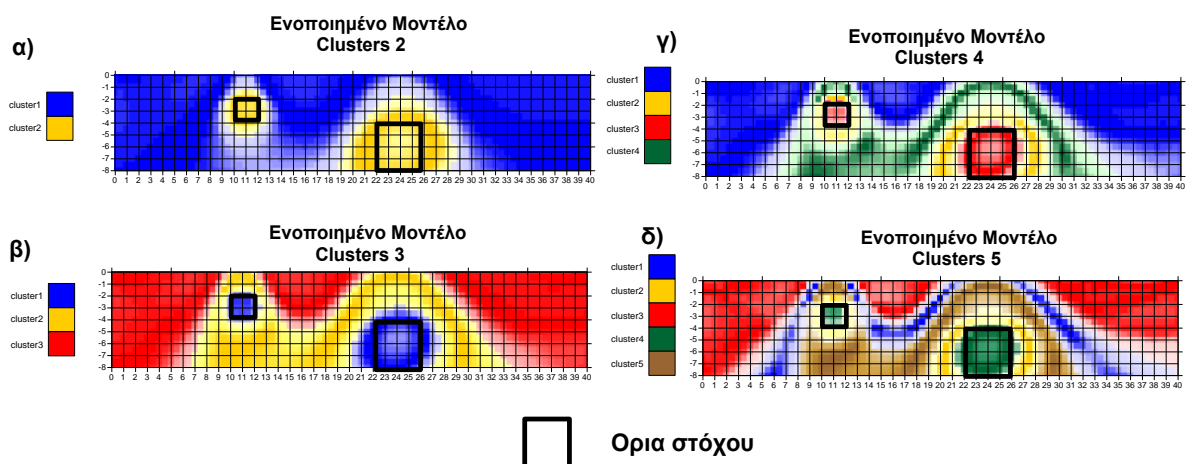
Εκτός από τα κέντρα των clusters, επιπλέον υπολογίζονται και οι συναρτήσεις συμμετοχής (membership functions, mf_{ij}) για κάθε cluster, για τα ενοποιημένα μοντέλα των 2,3,4,5 cluster.

Στην Εικόνα 5.8 παρουσιάζονται τα ενοποιημένα μοντέλα που δημιουργήθηκαν από το διαχωρισμό του πολυπαραμετρικού χώρου σε 2,3,4,5 clusters (ζώνες ενδιαφέροντος), έτσι

ώστε κάθε σημείο του ενοποιημένου μοντέλου να αντιπροσωπεύεται από cluster για το οποίο έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής. Σε αυτά τα μοντέλα, κάθε cluster αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη ζώνη (κάθε cluster διαφορετικός χρωματισμός) κοινών χαρακτηριστικών. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης και πυκνότητας και οι τυπικές αποκλίσεις, για κάθε cluster, για τα ενοποιημένα μοντέλα της Εικόνας 5.8.

Για παράδειγμα, στο ενοποιημένο μοντέλο των 2 clusters (Εικ. 5.8 (β)) παρουσιάζονται δύο ευδιάκριτες ζώνες, όπου για την πρώτη (cluster 1, μπλε χρωματισμός) προκύπτει μέση τιμή ειδικής αντίστασης 393,5 Ohm.m και μέση τιμή πυκνότητας 2.41 gr/cm³ (ο μέσος όρος των τιμών που ανήκουν στη ζώνη αυτή) προσομοιάζοντας τον ημιχώρο και για τη δεύτερη (cluster 2, κίτρινος χρωματισμός) προκύπτει η μέση τιμή ειδικής αντίστασης 793.4 και μέση τιμή πυκνότητας 2.08 gr/cm³ αποτυπώνοντας τα υπόγεια κενά.

Fuzzy c- means Clustering



Εικόνα 5.8 : Τα Ενοποιημένα Γεωφυσικά Μοντέλα του Υπεδάφους για αριθμό cluster 2,3,4,5 (α,β,γ,δ)

Επιπλέον, η διακύμανση των χρωματισμών σε κάθε ζώνη είναι ανάλογη με τις τιμές συμμετοχής. Σκούροι χρωματισμοί υποδεικνύουν τιμές συμμετοχής που προσεγγίζουν τη μονάδα (π.χ. σκούρο μπλε) ενώ οι πιο ανοιχτοί χρωματισμοί υποδηλώνουν τιμές συμμετοχής κοντά στις ελάχιστες δυνατές. Πρακτικά η διακύμανση του χρωματισμού κάθε ζώνης, η οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο cluster, αποτελεί ένα μέτρο της ομοιομορφίας ή της ετερογένειας των διάφορων ζωνών.

Πίνακας 5.1 : Οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης και πυκνότητας και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα.

Μοντέλο	clusters	Ειδική αντίσταση (Ohm.m)	Τυπική απόκλιση (+,-)	πυκνότητα (gr/cm ³)	Τυπική απόκλιση (+,-)
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 2	1	393,5	41,2	2,41	0,12
	2	793,4	215,9	2,08	0,08
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 3	1	912,3	165,4	2,05	0,07
	2	428,7	88,8	2,23	0,08
	3	390,8	28,5	2,48	0,05
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 4	1	392,0	27,5	2,49	0,05
	2	621,3	104,6	2,12	0,08
	3	1003,4	124,7	2,03	0,06
	4	389,5	48,5	2,27	0,07
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 5	1	374,3	38,7	2,38	0,04
	2	679,3	40,2	2,11	0,05
	3	398,0	22,6	2,51	0,03
	4	1029,2	113,8	2,02	0,05
	5	408,6	61,8	2,22	0,06

Επομένως αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία δημιουργίας των ενοποιημένων μοντέλων για διάφορους αριθμούς clusters, το επόμενο βήμα αποτελεί η επιλογή εκείνου, το οποίο θα ληφθεί υπόψη για την τελική ερμηνεία.

Ο Paashe (2006) αναφέρει ότι ένα από τα κυρίαρχα μειονεκτήματα όλων τεχνικών συσταδοποίησης αποτελεί το γεγονός ότι η επιλογή του βέλτιστου αριθμού των διάφορων cluster (ζώνες ενδιαφέροντος) είναι εν γένει μια υποκειμενική διαδικασία (Bezdek, 1981) και ότι η επιλογή αυτή πρέπει να κατευθύνεται από τρεις κύριους παράγοντες:

1. Ένα στατιστικό παράγοντα όπως είναι η κανονικοποιημένη ταξινόμηση της εντροπίας (normalized classification entropy (NCE)), η οποία περιγράφει το βαθμό αταξίας (disorder) ενός συστήματος (Bezdek, 1981).
2. Προσεκτική ανάλυση της διακριτικής ικανότητας των εισερχόμενων δεδομένων, δηλαδή των μοντέλων ερμηνείας των διαφόρων μεθόδων .
3. Σύγκριση των διάφορων λύσεων (ενοποιημένων μοντέλων) για διάφορους αριθμούς cluster, με τυχόν υπάρχουσες πληροφορίες σχετικά με το στόχο έρευνας. Οι συνθήκες του προβλήματος άλλα και η γνώση της γεωλογία της περιοχής είναι δυνατόν να βοηθήσει σημαντικά στην επιλογή του βέλτιστου αριθμού των clusters.

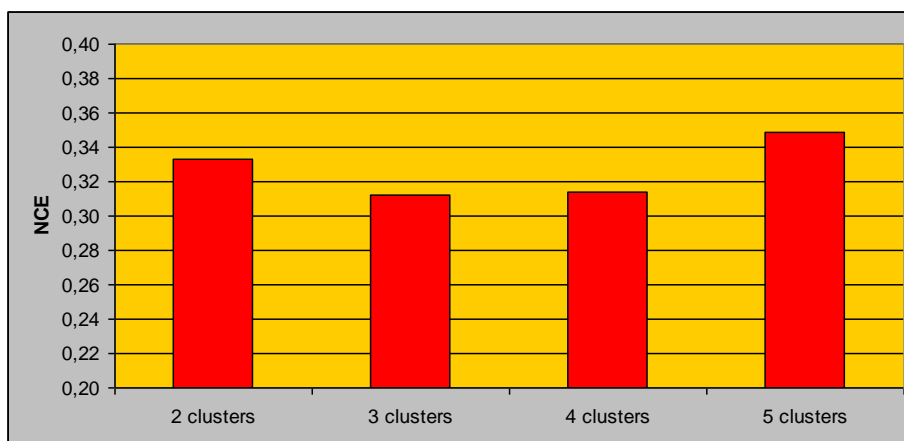
Οι τιμές NCE των ενοποιημένων μοντέλων για διάφορους αριθμών cluster δίδονται από την εξίσωση :

$$NCE = \frac{-\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n md_{ij} * \log(md_{ij})}{\log(c)} \quad (\text{Εξίσωση 5.3})$$

όπου το γινόμενο $md_{ij} \times \log(md_{ij})$ καθορίζεται ως μηδέν όταν το $md_{ij}=0$, το c είναι ο αριθμός των clusters και n ο αριθμός των σημείων του ενοποιημένου μοντέλου.

Οι NCE τιμές μπορούν να διακυμανθούν μεταξύ 0 και 1, για ενοποιημένα μοντέλα με clusters, τα οποία είναι πλήρως διαχωρισμένα μεταξύ τους και για clusters τα οποία αλληλοκαλύπτονται πλήρως αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 5.9 παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες NCE τιμές για τα ενοποιημένα μοντέλα των 2,3,4,5 clusters της Εικόνας 5.9, όπου το ενοποιημένο μοντέλο των τριών clusters παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή. Το αμέσως επόμενο, είναι το ενοποιημένο μοντέλο των 4 clusters.



Εικόνα 5.9: Οι υπολογιζόμενες τιμές NCE για τα ενοποιημένα μοντέλα για clusters 2,3,4,5.

Επομένως, όσον αφορά στις NCE τιμές, το ενοποιημένο μοντέλο των 3 clusters είναι αυτό που έχει τη μικρότερη τιμή.

Συγκρίνοντας, όμως, τα ενοποιημένα μοντέλα της Εικόνας 5.9 μεταξύ τους άλλα και λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 5.1 παρατηρείται ότι :

- Στο ενοποιημένο μοντέλο των 2 clusters αποτυπώνεται καλύτερα η γενικότερη μορφή του υπεδάφους, χωρίζοντας το υπέδαφος σε μια ζώνη μέσων-μέτριων τιμών ειδικών αντιστάσεων και πυκνοτήτων και σε μια δεύτερη υψηλών αντιστάσεων και χαμηλών πυκνοτήτων, πλήρως ενδεικτικής για την ύπαρξη υπόγειου ανοίγματος . Υπολείπεται, όμως, σε ανάλυση όσον αφορά στη σωστή οριοθέτηση των υπόγειων στοών.
- Το ενοποιημένο μοντέλο 3 clusters δίδει πολύ καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην οριοθέτηση των υπόγειων στοών (cluster 1, χρώματος μπλε) σε σχέση με το μοντέλο των 2 clusters άλλα δημιουργεί μια επιπλέον ζώνη (cluster 2, χρώματος κίτρινου) εντός της ζώνης που προσεγγίζει τον ημιχώρο (cluster 3, χρώματος κόκκινου), όπου οφείλεται στην ανάλυση του μικροβαρυτικού μοντέλου ερμηνείας (ομαλή μετάβαση από τις χαμηλές τιμές πυκνότητας στις υψηλές) και όχι στην πραγματική μορφή του υπεδάφους. Το ίδιο συμβαίνει και για τα άλλα ενοποιημένα μοντέλα ερμηνείας με μεγαλύτερους αριθμούς clusters όπου ο ημιχώρος χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες αλλά παράλληλα οριοθετούνται καλύτερα τα υπόγεια ανοίγματα

- Σε όλα τα ενοποιημένα μοντέλα, στη ζώνη που χαρακτηρίζουν τους στόχους (ειδικότερα για το μεγαλύτερο στόχο), οι τιμές με μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής δεν βρίσκονται στο κέντρο του στόχου αλλά στα όρια του στόχου. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί ενώ τα μοντέλα ερμηνείας παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους στο κέντρο του στόχου, το κέντρο του αντίστοιχου cluster της ζώνη αυτής (προκύπτουσα λύση από την εφαρμογή της τεχνικής συσταδοποίησης), δεν συμπίπτει με τις μέγιστες τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι τιμές των συναρτήσεων συμμετοχής αυτών των μετρήσεων όσο απομακρύνονται από το μέσο όρο των τιμών των παραμέτρων της συγκεκριμένης ζώνης.

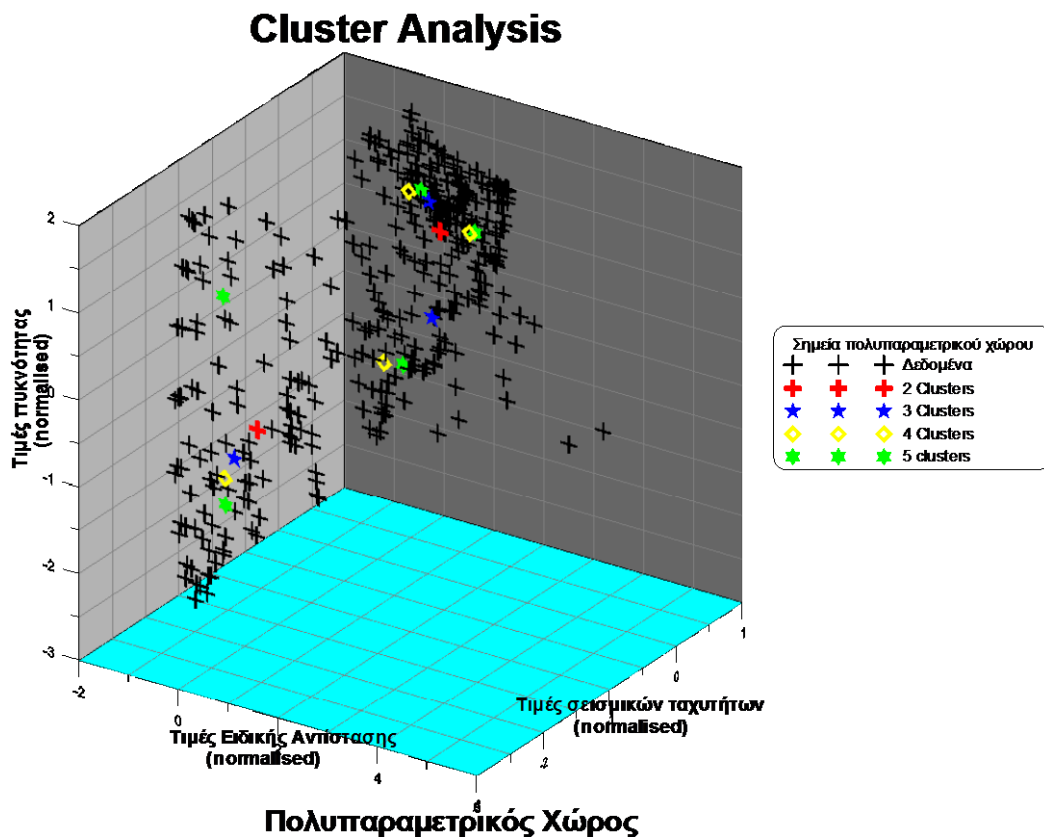
Επομένως, όπως φαίνεται από τις παραπάνω παρατηρήσεις, παρόλο που οι τιμές NCE (κριτήριο 1) μπορεί να αποτελέσουν ένα αντικειμενικό κριτήριο για την επιλογή του αριθμού των clusters, η ανάλυση και σύγκριση όλων των ενοποιημένων μοντέλων αποτελεί βασικότερο κριτήριο (κριτήριο 2), και ιδιαίτερα όταν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία της περιοχής ή τον ίδιο το στόχο της έρευνας (κριτήριο 3).

5.4.2. Πραγματικά Δεδομένα σε Ελεγχόμενες Συνθήκες.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί η πολυπαραμετρική ανάλυση τριών διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων (ηλεκτρική τομογραφία, μικροβαρτομετρία, Πολυκάναλη Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων) στην περίπτωση εντοπισμού του υπόγειου αγωγού, η οποία παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η συγκεκριμένη ανάλυση επιτρέπει την αξιολόγηση της διαδικασίας της δημιουργίας του Ε.Γ.Μ.Υ. σε δεδομένα τα οποία ελήφθησαν σε πραγματικές συνθήκες υπαίθρου άλλα παράλληλα όσο το δυνατόν ελεγχόμενες.

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.4.1, εφαρμόζεται η τεχνική συσταδοποίησης fuzzy C-means clustering στα μοντέλα ερμηνείας των τριών μεθόδων. Τα μοντέλα ερμηνείας των τριών μεθόδων, δημιουργούνται έτσι ώστε η κατανομή των παραμέτρων τους να συμπίπτουν (ίδιο x και z) και έπειτα κανονικοποιούνται.

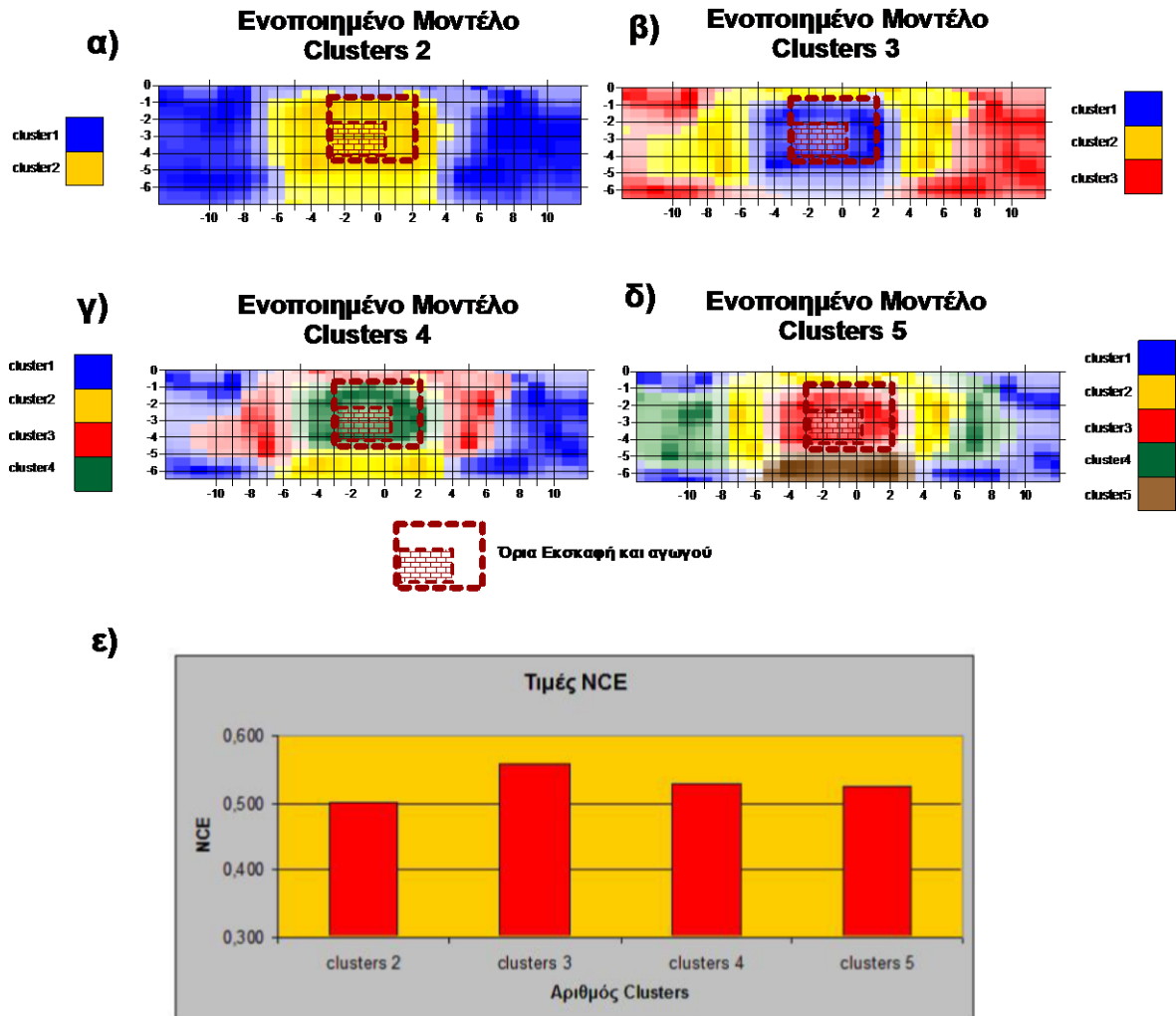
Σε αυτή την περίπτωση, όπου θα χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα ερμηνείας από τρεις διαφορετικές μεθόδους, ο πολυπαραμετρικός χώρος είναι τριδιάστατος. Στην Εικόνα 5.10 παρουσιάζεται ο τριδιάστατος πολυπαραμετρικός χώρος, ο οποίος παρουσιάζει τη συσχέτιση των τιμών πυκνότητας, ειδικής αντίστασης, σεισμικών ταχυτήτων, όπως και τα κέντρα των clusters που προέκυψαν με τη μέθοδο fuzzy c means clustering για αριθμό clusters 2,3,4,5, αντίστοιχα.



Εικόνα 5.10 : Ο τριδιάστατος πολυπαραμετρικός χώρος και οι λύσεις για αριθμό cluster 2,3,4,5.

Εκτός από τα κέντρα των clusters, επιπλέον υπολογίζονται και οι συναρτήσεις συμμετοχής (membership functions, md_{ij}) για κάθε cluster, για τα ενοποιημένα μοντέλα των 2,3,4,5 cluster.

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζονται τα ενοποιημένα μοντέλα που δημιουργήθηκαν, από το διαχωρισμό του πολυπαραμετρικού χώρου σε 2,3,4,5 clusters (ζώνες ενδιαφέροντος) αντίστοιχα, έτσι ώστε κάθε σημείο του υπεδάφους να αντιπροσωπεύεται από cluster για το οποίο έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής. Επίσης παρουσιάζονται και οι NCE τιμές για διάφορα clusters.



Εικόνα 5.11 : (α,β,γ,δ) Τα Ενοποιημένα Γεωφυσικά Μοντέλα του Υπεδάφους για αριθμό cluster 2,3,4,5, ε) Οι υπολογιζόμενες τιμές NCE για τα ενοποιημένα μοντέλα για clusters 2,3,4,5.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης, πυκνότητας και ταχύτητας των S-κυμάτων και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα ενοποιημένα μοντέλα της Εικόνας 5.11.

Πίνακας 5.2 : οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης, πυκνότητας και ταχύτητας των S-κυμάτων και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα.

Μοντέλο	clusters	Ειδική αντίσταση (Ohm.m)	standard deviation (+,-)	Ταχύτητα S-κυμάτων (m/sec)	standard deviation (+,-)	πυκνότητα (gr/cm ³)	standard deviation (+,-)
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 2	1	305,3	89,9	573,5	33,3	2,4	0,1
	2	168,1	68,0	491,6	66,6	1,9	0,2
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 3	1	166,3	48,5	486,0	67,7	1,9	0,09
	2	366,6	82,9	531,5	28,5	2,29	0,15
	3	270,4	65,8	593,3	21,1	2,45	0,12
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 4	1	277,3	62,7	594,3	18,9	2,5	0,05
	2	132,8	43,6	567,2	40,4	1,9	0,15
	3	366,1	84,5	529,3	64,9	2,3	0,14
	4	162,9	45,3	445,9	35,5	1,9	0,10
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 5	1	231,3	44,8	595,1	20,9	2,5	0,07
	2	342,2	97,5	513,1	19,2	2,2	0,1
	3	159,9	43,1	442,3	33,3	1,8	0,13
	4	358,8	33,0	578,1	38,6	2,5	0,14
	5	122,0	33,0	573,2	38,6	1,8	0,14

Παρατηρώντας τα ενοποιημένα μοντέλα και τον Πίνακα 5.2 με τις μέσες τιμές των παραμέτρων, φαίνεται ότι :

- Σε όλα τα ενοποιημένα μοντέλα η ζώνη που χαρακτηρίζει τα όρια του στόχου αποτελείται από χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης, πυκνότητας και σεισμικών ταχυτήτων (γκρι γραμμοσκιασμένες ζώνες στον Πίνακα 5.2).
- Οι μικρότερες NCE τιμές παρατηρούνται για το ενοποιημένο μοντέλο των δύο cluster ενώ η αμέσως μικρότερη τιμή είναι του μοντέλου με 5 clusters.
- Τα όρια της εκσκαφής οριοθετούνται καλύτερα και σε αυτήν την περίπτωση (όπως και στα συνθετικά δεδομένα) σε γενικές γραμμές όσο μεγαλώνει ο αριθμός των clusters ενώ μια γενικότερη απεικόνιση του υπεδάφους την παρουσιάζει το ενοποιημένο μοντέλο των 2 clusters.

5.5: Ανάπτυξη Τεχνικής Επιλογής και Απεικόνισης ενός Τελικού Ενοποιημένου Μοντέλου του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ) στην Περίπτωση Εντοπισμού Υπόγειων Ανοιγμάτων

Από την ανάλυση, η οποία έγινε στο Κεφάλαιο 5.4 αποδεικνύεται η δυνατότητα της δημιουργίας ενός Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους με την πολυπαραμετρική ανάλυση μοντέλων ερμηνείας διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων. Λαμβάνοντας υπόψη σημαντικές παρατηρήσεις που αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 5.4.1 & 5.4.2 στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα, προτείνεται μια νέα διαδικασία επιλογής και απεικόνισης ενός Τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ) όσον αφορά στην οριοθέτηση υπόγειων ανοιγμάτων.

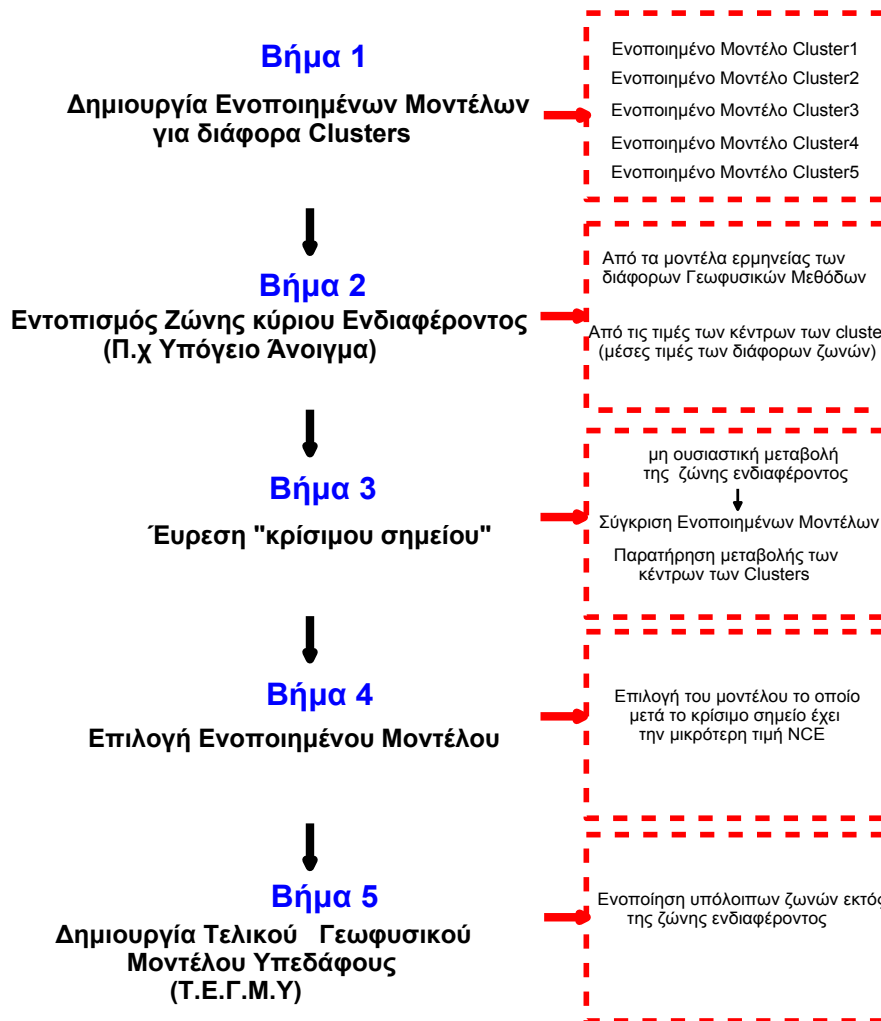
Οι παρατηρήσεις στις οποίες βασίζεται η προτεινόμενη διαδικασία είναι οι εξής :

- Οι τιμές NCE δεν δίνουν πάντα το βέλτιστο μοντέλο, όσο αφορά στην οριοθέτηση των υπόγειων στόχων και η σύγκριση όλων των δημιουργούμενων ενοποιημένων μοντέλων είναι πολύ σημαντική για την επιλογή του τελικού.
- Πολλές φορές δημιουργούνται στα ενοποιημένα μοντέλα ζώνες, οι οποίες δεν παρουσιάζουν τις πραγματικές παραμέτρους του υπεδάφους, άλλα σχετίζονται με την ανάλυση και τους περιορισμούς της ερμηνείας των διάφορων γεωφυσικών μεθόδων.
- Από την ερμηνεία των μεμονωμένων γεωφυσικών μεθόδων άλλα και από τις μέσες τιμές των ζωνών των ενοποιημένων μοντέλων είναι εύκολη η επιλογή της ζώνης ή των ζωνών ενδιαφέροντος σε κάθε περίπτωση.
- Όσο μεγαλώνει ο αριθμός των clusters, σε γενικές γραμμές, η οριοθέτηση των στόχων είναι καλύτερη στα αντίστοιχα ενοποιημένα μοντέλα και στις δύο περιπτώσεις. Παρατηρώντας με μεγαλύτερη προσοχή τα ενοποιημένα μοντέλα, συμπεραίνεται ότι από έναν αριθμό clusters και μετά δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή της ζώνης που αφορά το στόχο της έρευνας. Δηλαδή η επιπλέον ζώνη που δημιουργείται με την αύξηση του αριθμού των clusters δεν μεταβάλλει τη ζώνη που αφορά το στόχο έρευνας άλλα τον υπόλοιπο χώρο.

Επομένως, εντοπίζοντας τη ζώνη ενδιαφέροντος και μετά τον αριθμό του cluster για την οποία δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή στη μορφή της (κρίσιμο σημείο), επιλέγεται το ενοποιημένο μοντέλο, το οποίο έχει τη μικρότερη τιμή NCE, μετά το κρίσιμο σημείο. Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να επιλεγεί το τελικό ενοποιημένο μοντέλο, το οποίο θα ληφθεί υπόψη για την τελική ερμηνεία.

Κατά το επόμενο στάδιο, για την καλύτερη απεικόνιση των στόχων έρευνας, ενοποιούνται (χρωματικά) οι υπόλοιπες ζώνες εκτός της ζώνης ενδιαφέροντος, παρέχοντας το Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ) όσον αφορά στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων ή γενικότερα πεπερασμένων δομών.

Στην Εικόνα 5.12 παρουσιάζονται σχηματικά τα βήματα που πρέπει να ακολουθούνται για την επιλογή και την απεικόνιση του **Τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.)**, όσον αφορά στον εντοπισμό υπόγειων κενών.



Εικόνα 5.12 : Προτεινόμενη διαδικασία επιλογής και απεικόνισης του Τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους.

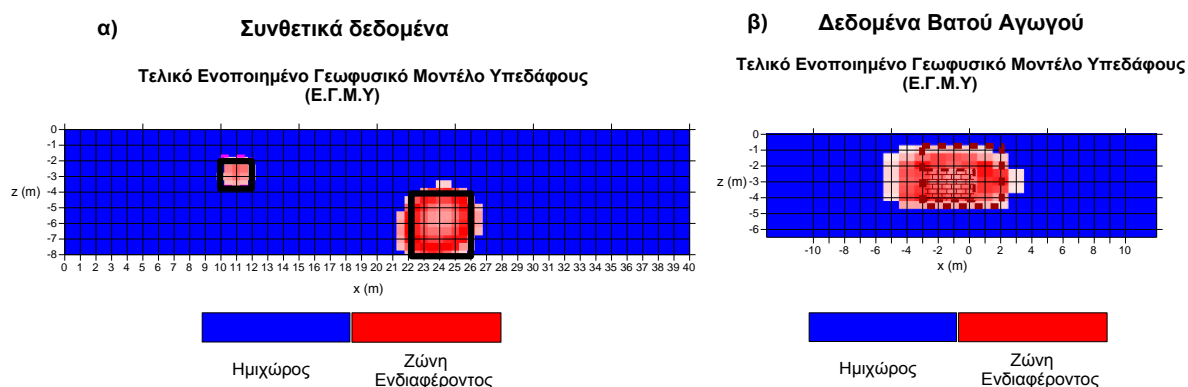
Επομένως, ακολουθώντας τη συγκεκριμένη διαδικασία για τις δύο περιπτώσεις, οι οποίες παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια προκύπτουν τα εξής :

Περίπτωση συνθετικών δεδομένων

Παρατηρώντας τα μοντέλα ερμηνείας, τα ενοποιημένα μοντέλα και τον Πίνακα 5.1 με τις μέσες τιμές για τις διάφορες ζώνες, είναι εμφανές ότι η ζώνη ενδιαφέροντος είναι αυτή που αντιστοιχεί στις υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης και χαμηλής πυκνότητας. Βρίσκοντας το «κρίσιμο σημείο», όπου δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή στη ζώνη αυτή (στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μετά το ενοποιημένο μοντέλο των 3 clusters), επιλέγεται το μοντέλο με τη μικρότερη NCE τιμή, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το ενοποιημένο μοντέλο των 4 clusters. Έπειτα ενοποιώντας τις υπόλοιπες ζώνες εκτός της ζώνης ενδιαφέροντος προκύπτει το **Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους (T.E.G.M.Y.)** της Εικόνας 5.13 (α), το οποίο παρουσιάζει με μεγάλη ακρίβεια τα όρια των δύο στόχων.

Περίπτωση δεδομένων αγωγού

Αντίστοιχα σε αυτήν την περίπτωση, η ζώνη ενδιαφέροντος αντιστοιχεί σε χαμηλές τιμές ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, πυκνότητας και σεισμικών ταχυτήτων. Επιπλέον, αφού το κρίσιμο σημείο βρίσκεται μετά το ενοποιημένο μοντέλο των 2 clusters, επιλέγεται το ενοποιημένο μοντέλο των 5 clusters, το οποίο παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή NCE μετά το κρίσιμο σημείο. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση μετά την ενοποίηση των υπόλοιπων ζωνών εκτός της ζώνης ενδιαφέροντος προκύπτει το **Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους** της Εικόνας 5.13 (β), το οποίο παρουσιάζει το στόχο ενδιαφέροντος (όρια εκσκαφής) σε σχέση με το περιβάλλοντα σχηματισμό της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 5.13 : α) Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους για την περίπτωση των συνθετικών δεδομένων β) Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους για την περίπτωση των δεδομένων του αγωγού.

5.6 : Ανάλυση Τ.Ε.Γ.Μ.Υ για τον Εντοπισμό Υπόγειων Εγκοίλων σε Γεωτεχνική Εφαρμογή

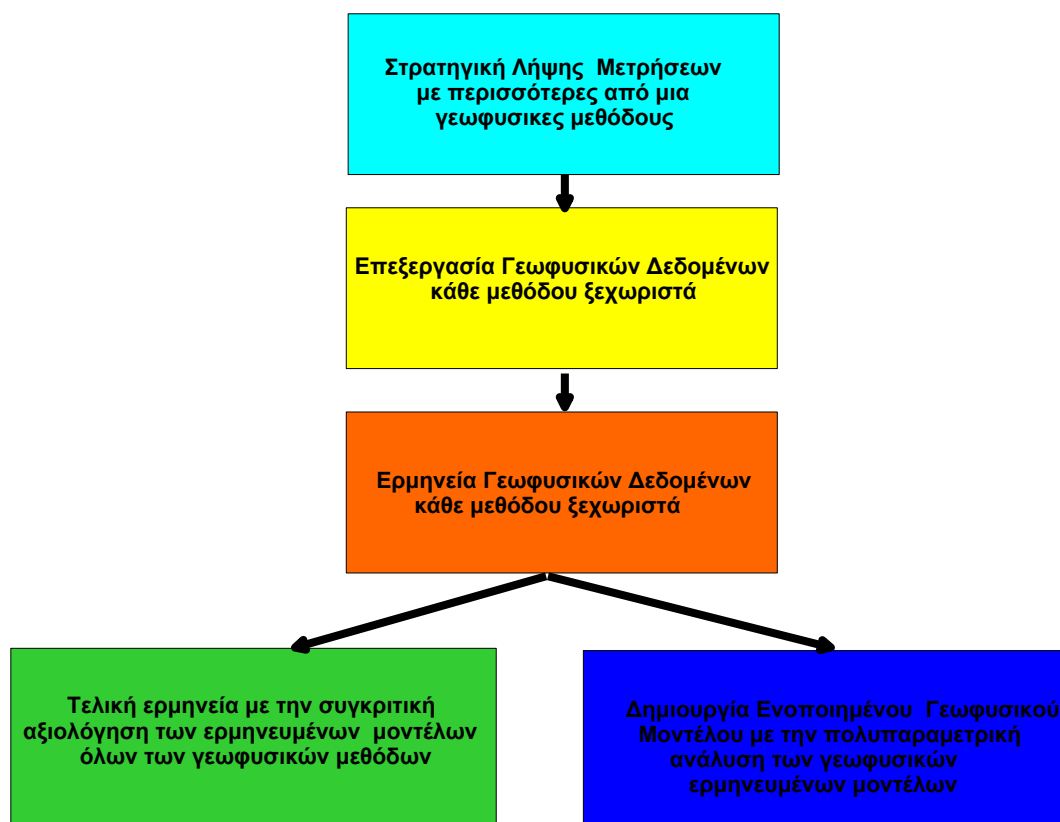
5.6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 5.4 αναλύθηκε η εφαρμογή της πολυπαραμετρικής ανάλυσης γεωφυσικών μεθόδων για τη δημιουργία ενός Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους σε παραδείγματα όπου ήταν γνωστή η μορφή του υπεδάφους, αφού στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν συνθετικά δεδομένα ενώ στη δεύτερη πραγματικά δεδομένα σε ελεγχόμενες, όμως, συνθήκες υπαίθρου (αγωγός).

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο, θα αναλυθεί η εφαρμογή της σε ένα πραγματικό γεωτεχνικό πρόβλημα, για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων ακολουθώντας τη ροή που παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 5.14.

Αρχικά, θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι διαδικασίες λήψης, επεξεργασίας και ερμηνείας των μετρήσεων κάθε μεθόδου, δίδοντας την ευκαιρία για την εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων όσον αφορά στη συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων, σε μια νέα μελέτη περίπτωσης. Η τελική γεωφυσική ερμηνεία θα στηριχθεί στη συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων ερμηνείας όλων των γεωφυσικών μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν.

Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί η πολυπαραμετρική ανάλυση των γεωφυσικών μοντέλων ερμηνείας έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ενοποιημένο γεωφυσικό μοντέλο, το οποίο θα είναι δυνατόν να συγκριθεί άμεσα με την τελική ερμηνεία που προέκυψε από την προηγούμενη διαδικασία.



Εικόνα 5.14: Σχηματική απεικόνιση της συνδυαστικής γεωφυσικής προσέγγισης για τη διερεύνηση του υπεδάφους σε γεωτεχνική εφαρμογή.

5.6.2 Περιγραφή του Προβλήματος

Κατά τη διάρκεια εκσκαφής για τη θεμελίωση ενός πολυώροφου κτιρίου στο κέντρο της Αθήνας, παρουσιάστηκαν μεγάλα υπόγεια ανοίγματα. Η εκσκαφή πραγματοποιήθηκε σε ασβεστολιθικό σχηματισμό, όπου εμφανίζονταν τοπικά διάφορες καρστικοποιημένες ζώνες από χαλαρά υλικά και έγκοιλα διαφόρων διαστάσεων. Για να αποφευχθούν οι συγκεκριμένες ζώνες, η εκσκαφή συνεχίστηκε σε μεγαλύτερο βάθος, έτσι ώστε η θεμελίωση να γινόταν σε, όσον ήταν δυνατόν, πιο «υγιές» πέτρωμα (Φωτ. 5.1).

Φυσικά, όμως το κύριο ερώτημα παρέμενε για τους μηχανικούς του συγκεκριμένου έργου και αφορούσε την κατάσταση του υπεδάφους κάτω από το επίπεδο που είχε σταματήσει η εκσκαφή.



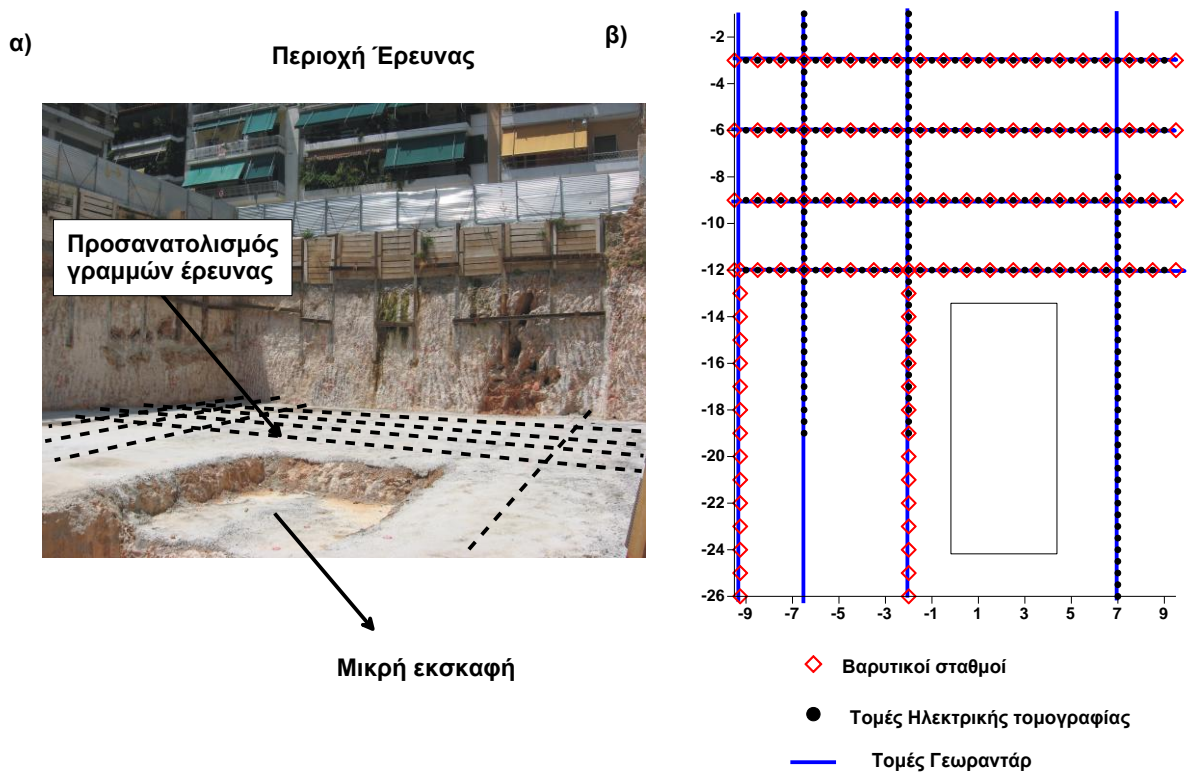
Φωτογραφία 5.1 : Η περιοχή έρευνας.

Στόχος της γεωφυσικής έρευνας αποτέλεσε η οριοθέτηση πιθανών υπόγειων εγκοίλων στον ασβεστολιθικό σχηματισμό, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της επικινδυνότητας της κατασκευής είτε ακόμη και η αλλαγή του αρχικού σχεδιασμού θεμελίωσης του έργου.

5.6.3 Σχεδιασμός Έρευνας-Λήψη Μετρήσεων

Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης γεωφυσικής έρευνας έγινε έτσι ώστε ικανοποιηθούν ορισμένες απαιτήσεις :

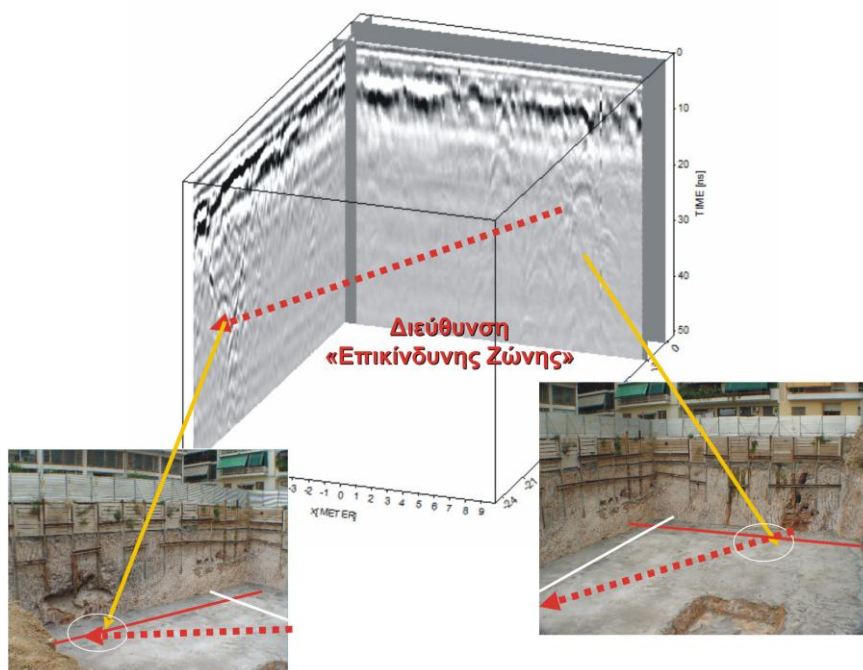
- Ο σχεδιασμός έγινε λαμβάνοντας υπόψη ότι υπήρχε περιορισμένος χρόνος για τη λήψη των μετρήσεων, λόγω επικείμενων εργασιών στην περιοχή έρευνας.
- Σύμφωνα με τους μηχανικούς του έργου, κύριο ενδιαφέρον, αποτελούσε η αποφυγή μεγάλων εγκοίλων σε βάθος έως τα 2-3 m κάτω από το επίπεδο της εκσκαφής.
- Η παρουσία μιας μικρότερης εκσκαφής μέσα στο χώρο της κύριας εκσκαφής (Εικ. 5.15 (α)) έπρεπε να ληφθεί υπόψη όσον αφορούσε στη θέση των γραμμών διασκόπησης.



Εικόνα 5.15: α) Απεικόνιση του προσανατολισμού των γραμμών διασκόπησης στο χώρο β) Ο κάρναβος μετρήσεων για τις διάφορες γεωφυσικές μεθόδους.

Επομένως, ακολουθήθηκε συγκεκριμένη στρατηγική, έχοντας ως κύρια αντίληψη την απαίτηση για εφαρμογή Συνδυαστικής Γεωφυσικής Διερεύνησης του υπεδάφους με την εφαρμογή διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο του Γεωραντάρ κατά μήκος διάφορων γραμμών διασκόπησης, λαμβάνοντας μια αρχική αποτύπωση του υπεδάφους *επί τόπου* (in situ) στην περιοχή έρευνας. Τοποθετώντας τις τομές στις πραγματικές τους συντεταγμένες στο χώρο (Εικ. 5.16) ήταν δυνατόν να οριοθετηθεί η κύρια διεύθυνση της «επικίνδυνης ζώνης» παρέχοντας σημαντική αρχική πληροφορία για τον περαιτέρω σχεδιασμό της έρευνας, χρησιμοποιώντας άλλες γεωφυσικές μεθόδους (μικροβαρυτομετρία και ηλεκτρική τομογραφία).



Εικόνα 5.16: Παρουσίαση αποτελεσμάτων μεθόδου γεωρανταρ προσανατολισμού της «επικίνδυνης ζώνης» στη φωτογραφία της περιοχής».

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας με τη λήψη γραμμών διασκόπησης σε μη τετραγωνικό κάναβο και μικροβαρτομετρικής έρευνας ταυτόχρονα. Παράλληλα με την πραγματοποίηση των γραμμών διασκόπησης της ηλεκτρικής τομογραφίας, ταυτόχρονα σε άλλο σημείο της περιοχής έρευνας λαμβάνονταν μικροβαρτομετρικές μετρήσεις για να ελαχιστοποιηθεί ο απαιτούμενος χρόνος ολοκλήρωσης της γεωφυσικής έρευνας. Ο κάναβος μετρήσεων για τις διάφορες μεθόδους παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.15 (β).

5.6.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μεμονωμένης Επεξεργασίας

5.6.4.1 Αποτελέσματα Μεθόδου Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Το επόμενο στάδιο της γεωφυσικής έρευνας περιελάμβανε την εφαρμογή τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας. Στη συγκεκριμένη έρευνα, πραγματοποιήθηκαν 7 γραμμές διασκόπησης ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Dipole Dipole (DD) με 41 ηλεκτρόδια σε απόσταση 0.5 m μεταξύ τους, με το πολυκάναλο σύστημα της Lund.

Η διάταξη της Dipole Dipole (DD) στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχτηκε κυρίως για δύο λόγους

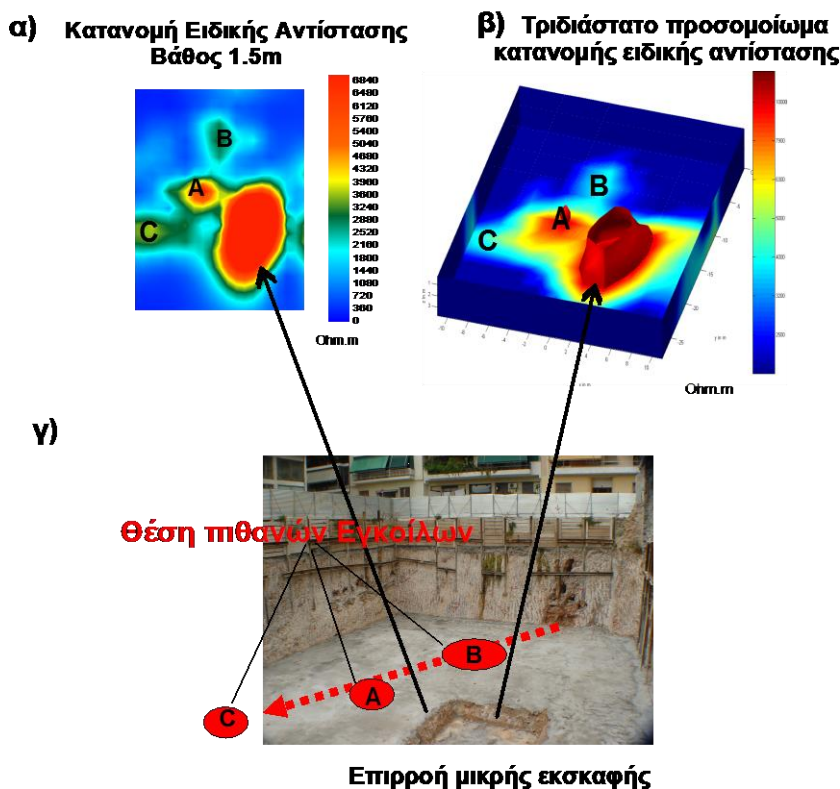
- Για την αυξημένη διακριτική ικανότητα της στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων (Κεφάλαιο 3).
- Για την αυξημένη ικανότητα της να εντοπίζει παράπλευρες ανομοιογένειες (πλευρικά από τη γραμμή διασκόπησης), η οποία την καθιστά ικανή να παρέχει τη βέλτιστη τριδιάστατη κατανομή της ειδικής αντίστασης για τις συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ των γραμμών διασκόπησης (Κεφάλαιο 4).

Όσον αφορά στην ερμηνεία των μετρήσεων, αρχικά όλες οι τομές ερμηνεύτηκαν με διδιάστατη τεχνική ερμηνείας (λογισμικό Res2dinv). Τα αποτελέσματα της διδιάστατης ερμηνείας ήταν μη ικανοποιητικά, δίδοντας μοντέλα ερμηνείας με πολύ ασυνήθιστες υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Οι διαφορές τριδιάστατες επιδράσεις και η παρουσία της μικρότερης εκσκαφής, δημιούργησαν πολύ σημαντικά προβλήματα στην διδιάστατη ερμηνεία των γραμμών διασκόπησης, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη ερμηνείας των μετρήσεων με τριδιάστατη τεχνική ερμηνείας.

Επομένως, στο επόμενο στάδιο της ερμηνείας ακολουθήθηκε η τριδιάστατη προσέγγιση. Για την τριδιάστατη ερμηνεία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DC3dresinv (Günther 2003), το οποίο υποστηρίζει την τριδιάστατη ερμηνεία μη παράλληλα διατεταγμένων τομών.

Στην Εικόνα 5.17 παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής αντίστασης σε βάθος 1.5 m (Εικ. 5.17 (α)) αλλά και το τριδιάστατο προσομοίωμα της κατανομής της ειδικής αντίστασης (Εικ. 5.17 (β)). Στα μοντέλα ερμηνείας παρουσιάζονται τρεις χαρακτηριστικές ανωμαλίες υψηλών ειδικών αντιστάσεων, οι οποίες υποδεικνύουν την πιθανή θέση ανοιχτών εγκοίλων. Οι θέσεις των συγκεκριμένων ανωμαλιών βρίσκονται πάνω στην ίδια διεύθυνση της ζώνης που είχε οριοθετηθεί με τη μέθοδο του γεωραντάρ και η οποία συνδέει τα δύο υπάρχοντα υπόγεια ανοίγματα στα πλευρικά μέρη της εκσκαφής (Εικ. 5.17 (γ)). Επιπλέον, παρουσιάζεται χαρακτηριστική ανωμαλία πολύ υψηλών ειδικών αντιστάσεων που συνδέεται με την ύπαρξη της μικρότερης εκσκαφής. Είναι εμφανές ότι η μικρή εκσκαφή οριοθετείται ικανοποιητικά βοηθώντας στην καλύτερη αποτύπωση του υπόλοιπου χώρου, εάν και δεν υπάρχουν μετρήσεις ακριβώς πάνω από αυτή.

Τριδιάστατη Ερμηνεία Ηλεκτρικής Τομογραφίας

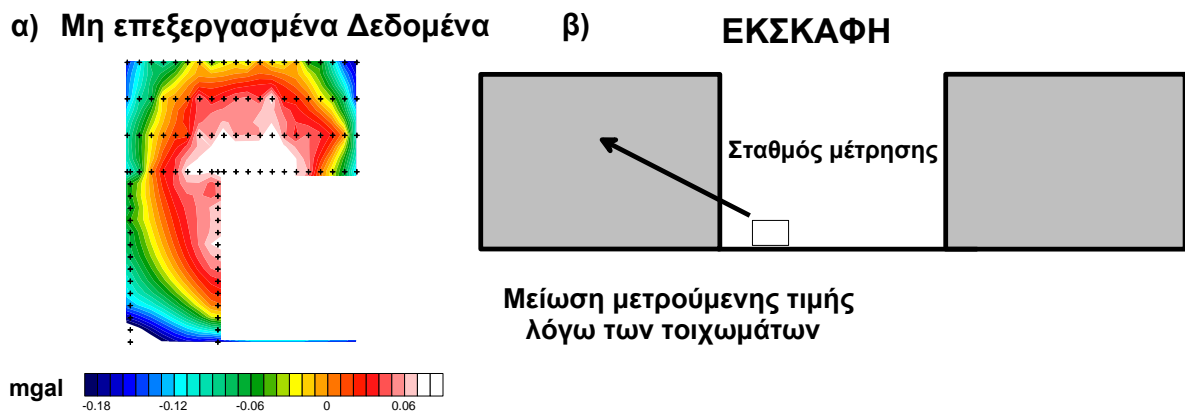


Εικόνα 5.17: α) Κατανομή Ειδικής αντίστασης σε βάθος 1.5 m β) Τριδιάστατο προσομοίωμα ηλεκτρικού μοντέλου ερμηνείας γ) Τοποθέτηση θέσεων πιθανών εγκοίλων στη φωτογραφία της περιοχής.

5.6.4.3 Αποτελέσματα Μικροβαρυτομετρίας

Για την εφαρμογή της μικροβαρυτικής μεθόδου μετρήθηκε η επιτάχυνση της βαρύτητας σε 110 σταθμούς κατά μήκος διάφορων γραμμών διασκόπησης. Σε κάθε σταθμό λαμβάνονταν επαναληπτικές μετρήσεις ώστε να αυξηθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Όλοι οι σταθμοί βρίσκονταν στο ίδιο υψόμετρο με αποτέλεσμα να μην γίνουν οι διορθώσεις της πλάκας Bouguer και ελεύθερου υψομέτρου. Για τη διόρθωση της πορείας του οργάνου και των χρονικών μεταβολών χρησιμοποιήθηκε σταθερή βάση, στην οποία επαναλαμβάνονταν οι μετρήσεις περίπου κάθε 30 λεπτά.

Για την πλεγματοποίηση (gridding) των μικροβαρυτικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελάχιστης καμπυλότητας (minimum curvature) με βήμα 1x1 m. Οι μη επεξεργασμένες μετρήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.18 (α), εμφανίζουν μια χαρακτηριστική μορφή σχήματος «καμπάνας». Κοντά στα πλαϊνά μέρη της εκσκαφής, οι βαρυτικές μετρήσεις παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με το κέντρο της εκσκαφής, λόγω της μείωσης της μετρούμενης τιμής από την επίδραση των τοιχωμάτων της εκσκαφής (Εικ. 5.18 (β)).



Εικόνα 5.18: α) χάρτης μη επεξεργασμένων βαρυτικών μετρήσεων β) Σχηματική απεικόνιση επίδρασης της κύριας εκσκαφής στις βαρυτικές μετρήσεις.

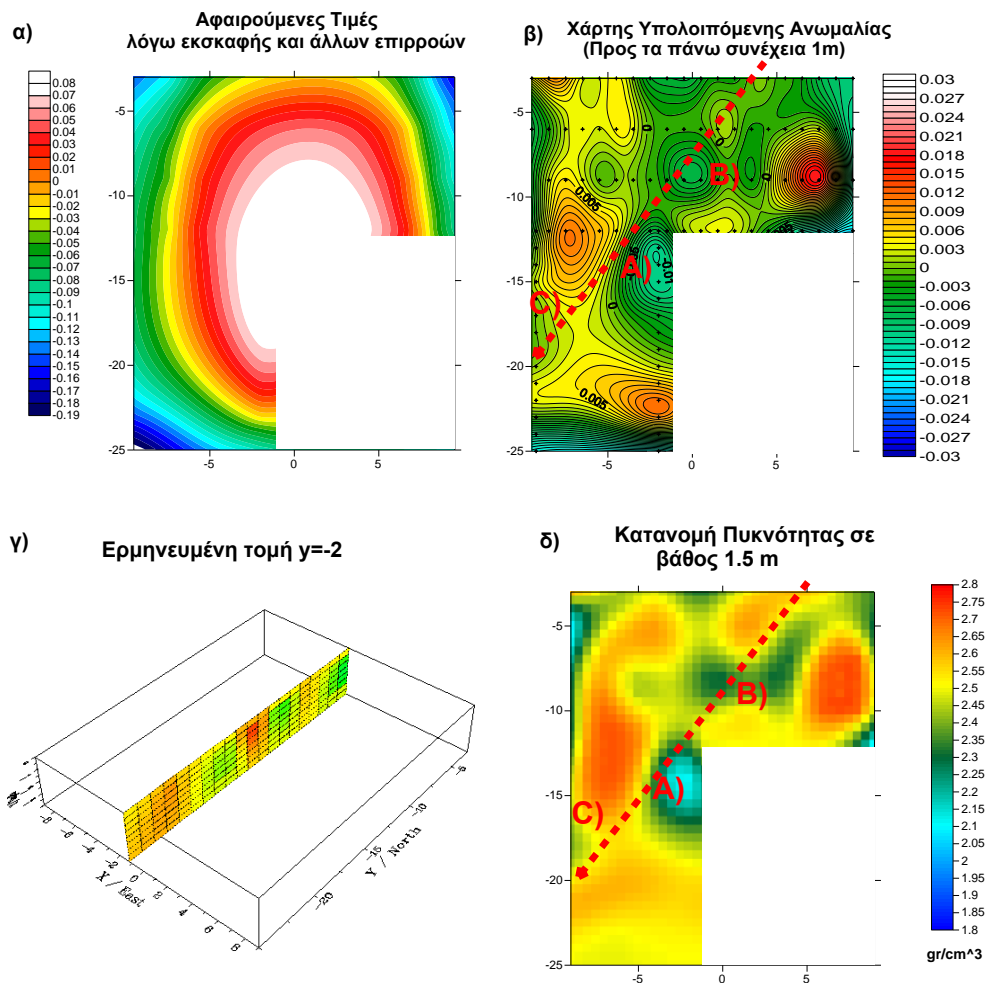
Για την αφαίρεση της επίδρασης της εκσκαφής από τις μετρήσεις, εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες έδωσαν ταυτόσημα αποτελέσματα. Στον πρώτο τρόπο η επίδραση της εκσκαφής και των άλλων τοπογραφικών ανωμαλιών προσεγγίστηκαν κατευθείαν από τις μη επεξεργασμένες μετρήσεις με τη χρήση πολυωνμικής εξίσωσης τρίτου βαθμού. Στο δεύτερο τρόπο, αρχικά δημιουργήθηκε τριδιάστατο τοπογραφικό μοντέλο το οποίο προσομοίαζε την κύρια και τη μικρή εκσκαφή, με τη βοήθεια του οποίου υπολογίστηκαν οι τοπογραφικές διορθώσεις. Στη συνέχεια, για την εξάλειψη της επίδρασης στις μετρούμενες τιμές διάφορων άλλων τοπογραφικών ανωμαλιών (γύρω πολυκατοικίες κ.α) αφαιρέθηκε η τρίτου βαθμού πολυωνμική εξίσωση των τιμών που είχαν προκύψει από την προηγούμενη διαδικασία. Στην Εικόνα 5.19 (α) παρουσιάζεται ο χάρτης των τιμών οι οποίες τελικά αφαιρέθηκαν από τις μετρούμενες τιμές.

Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (προς τα άνω συνέχεια 1m) για να περιοριστεί ο υψίσυχνος θόρυβος, προέκυψε ο τελικός χάρτης υπολειπόμενης ανωμαλίας, ο οποίος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.19 (β).

Στο συγκεκριμένο χάρτη εμφανίζεται μια ζώνη χαμηλών τιμών, η οποία συμπίπτει με τη διεύθυνση της ζώνης που είχε οριοθετηθεί με τη μέθοδο του Γεωραντάρ αλλά και κάποιες χαρακτηριστικές τοπικές ανωμαλίες οι οποίες υποδεικνύουν την πιθανή θέση

υπόγειων εγκοίλων και οι οποίες συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Είναι εμφανές ότι σε σημεία όπου υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός μετρήσεων υπάρχει καλύτερη αποτύπωση του υπεδάφους.

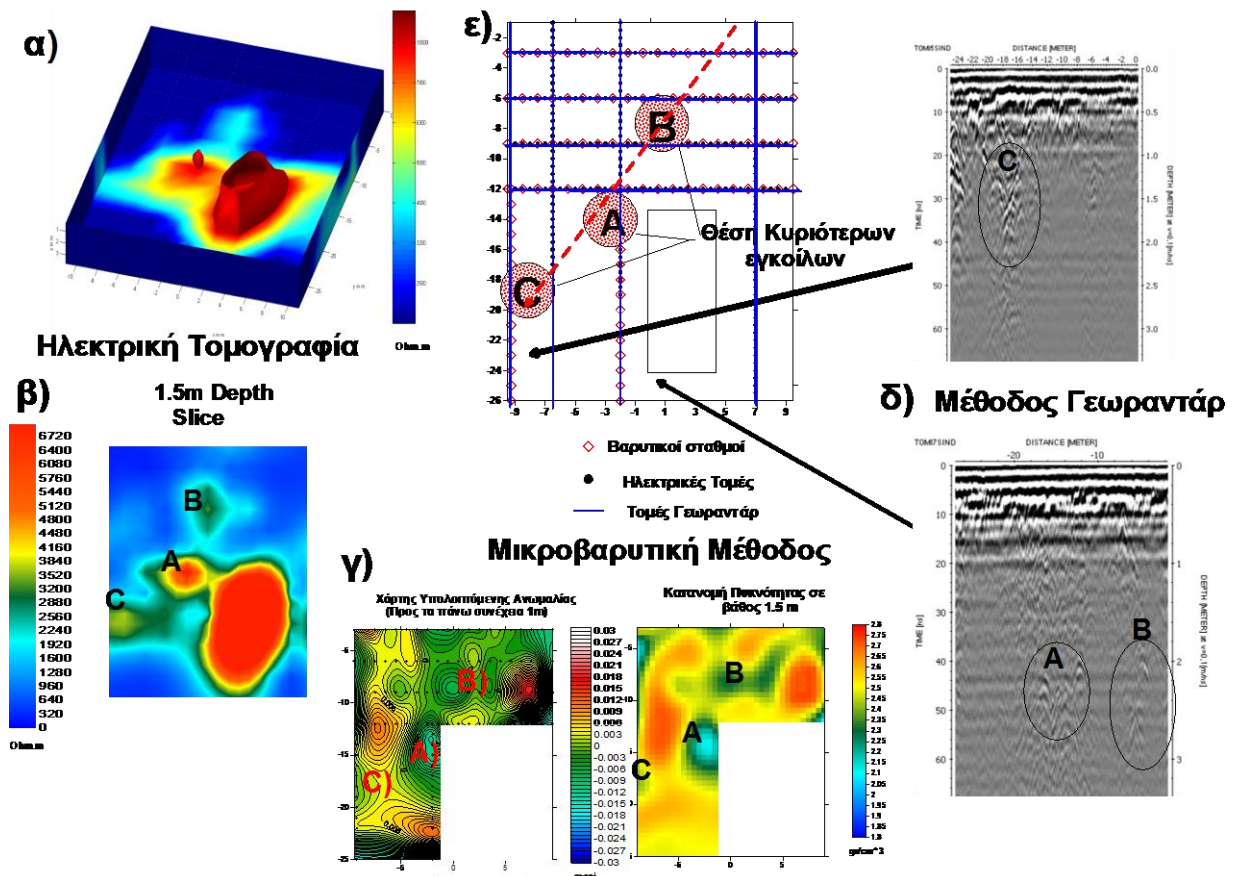
Επιπλέον, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Grablox, πραγματοποιήθηκε η αντιστροφή του συνόλου των μικροβαρυτικών μετρήσεων παρέχοντας τη διδιάστατη κατανομή της πυκνότητας ως προς το βάθος για τις διάφορες γραμμές διασκόπησης αλλά και τη χωρική κατανομή της πυκνότητας σε διάφορα βάθη. Στην Εικόνα 5.19 (γ,δ) παρουσιάζεται αντίστοιχα η κατανομή της πυκνότητας ως προς το βάθος για τη γραμμή $y=-2$ και η κατανομή της πυκνότητας σε βάθος 1.5 m. Τα συγκεκριμένα μοντέλα ερμηνείας είναι δυνατόν να συγκριθούν άμεσα με τα αντίστοιχα μοντέλα της ηλεκτρικής τομογραφίας και για αυτό θα χρησιμοποιηθούν κατά την πολυπαραμετρική ανάλυση για τη δημιουργία του Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους.



Εικόνα 5.19: α) Αφαιρούμενες τιμές από τα μετρούμενα δεδομένα λόγω της εκσκαφής β) τελικός χάρτης βαρυτικής ανωμαλίας μετά την εφαρμογή της προς τα άνω συνέχειας για 1 m γ) Άποψη της τομής $y=-2$ με το λογισμικό Grablox δ) Η κατανομή της πυκνότητας για βάθος 1.5 m.

5.6.5 Συνδυαστική Ερμηνεία με τη Συγκριτική Αξιολόγηση των Διάφορων Γεωφυσικών Μεθόδων

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων (ηλεκτρική τομογραφία, μικροβαρυτομετρία, μέθοδος Γεωραντάρ) πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη ερμηνεία η οποία παρουσιάζει τη διεύθυνση της επικίνδυνης καρστικής ζώνης αλλά και τη θέση όπου όλες οι γεωφυσικές μέθοδοι συμφωνούν ως προς την ύπαρξη πιθανών ανοιχτών εγκοίλων (Εικ 5.20 (ε)).



Εικόνα 5.20: (α, β) Ερμηνεία ηλεκτρικής τομογραφίας γ) Ερμηνεία Μικροβαρυτικής μεθόδου δ) Χαρακτηριστικές τομές μεθόδου Γεωραντάρ ε) συγκριτική αξιολόγηση όλων των γεωφυσικών μεθόδων.

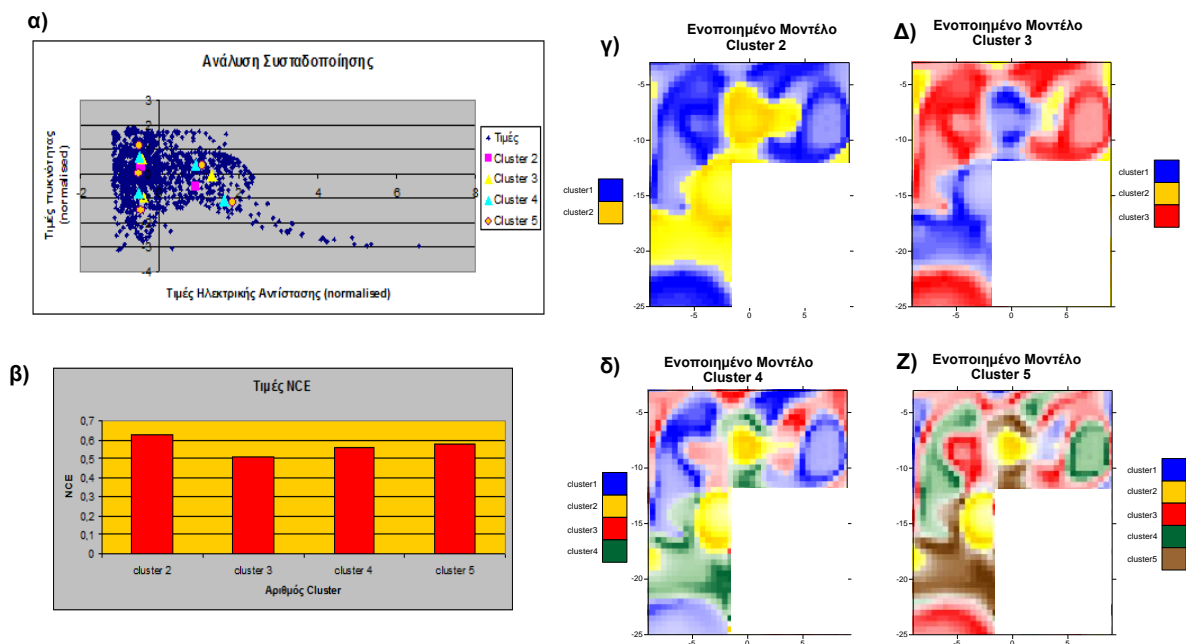
Ο σχεδιασμός της έρευνας με το συνδυασμό τριών διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων, επέτρεψε να πραγματοποιηθεί μια γρήγορη, ευέλικτη και αξιόπιστη γεωφυσική έρευνα, η οποία είχε ως αποτέλεσμα ένα τελικό υπεδafικό μοντέλο προερχόμενο από τη συγκριτική αξιολόγηση όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων, μειώνοντας το ποσοστό της αβεβαιότητας στη τελική ερμηνεία.

Το συγκεκριμένο υπεδafικό μοντέλο θα αποτελέσει μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων του Τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.) που θα δημιουργηθεί κατά την πολυπαραμετρική ανάλυση των μοντέλων ερμηνείας.

5.6.6 Συνδυαστική Γεωφυσική Ερμηνεία με τη Δημιουργία του Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο θα αναλυθεί η δημιουργία του Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους για τη συνδυαστική ερμηνεία σε ένα **πραγματικό γεωφυσικό πρόβλημα**.

Για την παραμετρική ανάλυση θα χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα ερμηνείας των μεθόδων της ηλεκτρικής τομογραφίας και της μικροβαρυτομετρίας και συγκεκριμένα οι χάρτες διδιάστατης κατανομής σε βάθος 1.5 m. Τα μοντέλα ερμηνείας των δύο μεθόδων δημιουργούνται ώστε η κατανομή των παραμέτρων τους να συμπίπτουν (ίδιο x και y σε αυτήν την περίπτωση και για ένα συγκεκριμένο βάθος z) και έπειτα κανονικοποιούνται. Ο πολυπαραμετρικός χώρος, τα ενοποιημένα μοντέλα, όπως και οι υπολογιζόμενες NCE τιμές, που προέκυψαν με την τεχνική συσταδοποίησης fuzzy c-means παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.21.



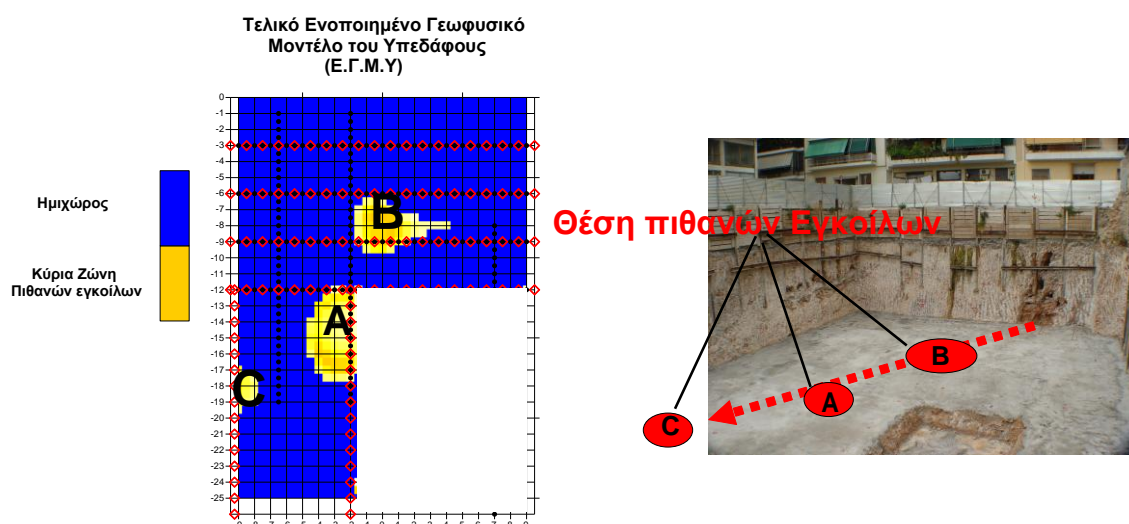
Εικόνα 5.21: α) Ανάλυση πολυπαραμετρικού χώρου σε διάφορες συστάδες β) οι τιμές NCE για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα γ,δ,ε,ζ) Τα ενοποιημένα μοντέλα για cluster 2,3,4,5 αντίστοιχα.

Επιπλέον, στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης και πυκνότητας και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα ενοποιημένα μοντέλα της Εικόνας 5.21.

Πίνακας 5.3: Οι μέσες τιμές ειδικής αντίστασης και πυκνότητας και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε cluster, για τα διάφορα ενοποιημένα μοντέλα.

Μοντέλο	clusters	Ειδική αντίσταση (Ohm.m)	Τυπική απόκλιση (+,-)	πυκνότητα (gr/cm ³)	Τυπική απόκλιση (+,-)
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 2	1	898,4	414,8	2,54	0,10
	2	2343,9	1053,9	2,41	0,14
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 3	1	934,2	411,3	2,58	0,07
	2	2820,0	856,8	2,47	0,12
	3	937,5	435,0	2,36	0,09
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 4	1	868,3	342,3	2,58	0,07
	2	3272,6	1110,1	2,34	0,10
	3	898,6	397,2	2,38	0,09
	4	2355,7	496,8	2,54	0,06
Ενοποιημένο μοντέλο clusters 5	1	957,9	423,4	2,30	0,08
	2	3436,5	1127,3	2,33	0,09
	3	894,9	366,6	2,49	0,04
	4	886,7	398,2	2,64	0,05
	5	2433,8	475,8	2,54	0,06

Από τα ενοποιημένα μοντέλα της Εικόνας 5.21 άλλα και τον Πίνακα 5.3 προκύπτει ότι τα ενοποιημένα μοντέλα των 4 και 5 clusters είναι αυτά στα οποία παρουσιάζεται χαρακτηριστική ζώνη, η οποία σχετίζεται με την παρουσία εγκοίλων δηλαδή ζώνη με υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης και χαμηλής πυκνότητας (γκρι γραμμοσκιασμένες περιοχές στον Πίνακα 5.3) και όχι στο ενοποιημένο μοντέλο των 3 clusters, παρόλο που παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή NCE. Επομένως, ακολουθώντας την προτεινόμενη διαδικασία η οποία αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5.5, παρατηρείται ότι μετά το «κρίσιμο σημείο» (μη ουσιαστική μεταβολή της ζώνης που αφορά στο στόχο) βρίσκονται τα ενοποιημένα μοντέλα των 4 και 5 clusters. Επιλέγοντας αυτό με τη μικρότερη τιμή NCE (το ενοποιημένο μοντέλο των 4 clusters σε αυτή την περίπτωση) και ενοποιώντας τις υπόλοιπες ζώνες εκτός της ζώνης που αφορά στο στόχο έρευνας, προκύπτει το Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.22.



Εικόνα 5.22 : Το τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους, το οποίο παρουσιάζει τις θέσεις των πιθανότερων υπόγειων εγκοίλων στην περιοχή έρευνας.

Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάζει με ικανοποιητική ακρίβεια τη θέση των κυριότερων πιθανών υπόγειων εγκοίλων στην περιοχή έρευνας. Επιπλέον, συγκρίνοντας

το με την απεικόνιση που προέκυψε από τη συγκριτική αξιολόγηση όλων των γεωφυσικών μεθόδων (Εικ. 5.22 (ε)) είναι σαφής η ταύτιση των αποτελεσμάτων.

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι:

Η συγκεκριμένη τεχνική καθιστά δυνατή τη δημιουργία ενός ενοποιημένου μοντέλου το οποίο να συνδυάζει τις πληροφορίες που παρέχουν τα μοντέλα ερμηνείας διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων χωρίς να είναι απαραίτητη η σύνδεση των παραμέτρων των μοντέλων με οποιαδήποτε σχέση – συνάρτηση, προσφέροντας ένα σημαντικό εργαλείο για τη μείωση της αβεβαιότητας στη γεωφυσική ερμηνεία.

Σε κάθε περίπτωση η πολυπαραμετρική ανάλυση των μοντέλων ερμηνείας διάφορων γεωφυσικών μεθόδων είναι εφικτή και το ενοποιημένο μοντέλο που προκύπτει μπορεί να αποτελεί ένα ακόμη κριτήριο για την ποιοτική ερμηνεία που προκύπτει από τη συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων.

5.6 : Αντιστροφή Γεωφυσικών Μετρήσεων με τη Χρήση του (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.) ως Αρχικό Μοντέλο

Η πολυπαραμετρική ανάλυση των διάφορων μοντέλων ερμηνείας που προέκυψαν από τη μεμονωμένη αντιστροφή κάθε γεωφυσικής μεθόδου, εκτός από τη δημιουργία ενός τελικού ενοποιημένου μοντέλου μπορεί να αποτελέσει πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη μεταφορά πληροφορίας από το ένα μοντέλο ερμηνείας στο άλλο ή στα άλλα, ανάλογα με πόσες γεωφυσικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται. (π.χ. στη συγκεκριμένη περίπτωση από το ηλεκτρικό μοντέλο στο βαρυτικό και αντίστροφα).

Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ανανέωση των παραμέτρων των μοντέλων ερμηνείας κάθε γεωφυσικής μεθόδου με βάση το Τελικό Ενοποιημένο Γεωφυσικό Μοντέλο του Υπεδάφους.

Η δημιουργία των νέων παραμέτρων των μοντέλων ερμηνείας μπορεί να πραγματοποιηθεί (Paashe, 2006) χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις συμμετοχής του ενοποιημένου μοντέλου. Πρακτικά, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις συμμετοχής ως συντελεστές βαρύτητας, είναι δυνατός ο υπολογισμός των νέων τιμών των παραμέτρων p_k ενός μοντέλου ερμηνείας στο στοιχείο j από την εξίσωση :

$$p_{kj} = \sum_{i=1}^c m d_{ij} * p_{mean(ki)} \quad (\text{εξίσωση 5.4})$$

όπου $k=1, \dots, n$, n ο αριθμός των παραμέτρων και $p_{mean(ki)}$ η μέση τιμή της παραμέτρου p_k για τον i -στο cluster.

Επομένως, η νέα τιμή μιας παραμέτρου είναι ο συνδυασμός των αντίστοιχων τιμών των κέντρων των clusters σταθμισμένα (weighted) με το βαθμό συμμετοχής των στοιχείων στο cluster αριθμού c .

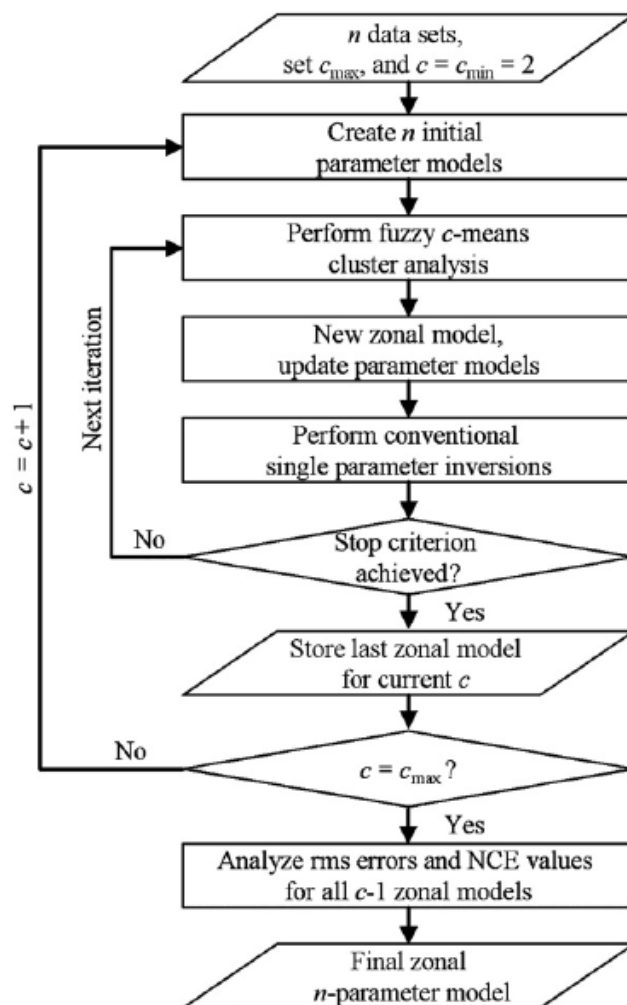
Σε αυτά τα ανανεωμένα μοντέλα ερμηνείας βασίζεται και η διαδικασία **Zonal Cooperative Inversion** (Paashe et al, 2007), η οποία αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη διαδικασία συνδυαστικής αντιστροφής δεδομένων προερχόμενων από διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους.

Η κύρια ιδέα της **Zonal Cooperative Inversion** είναι ο συνδυασμός κοινών αλγορίθμων αντιστροφής γεωφυσικών μεθόδων, με την εφαρμογή της τεχνικής

συσταδοποίησης Fuzzy c - means. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας n σετ δεδομένων για αντιστροφή σε συνδυασμό με έναν καθορισμένο αριθμό cluster c ως δεδομένα εισόδου (input). Εφαρμόζοντας την τεχνική συσταδοποίησης Fuzzy c -means, μετά από κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας της αντιστροφής των n σετ δεδομένων, εξασφαλίζεται η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των διαφόρων γεωφυσικών δεδομένων και μοντέλων, κατά τη διάρκεια της αντιστροφής.

Τα κύρια στοιχεία της μεθοδολογία παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.23 και μια πιο λεπτομερής περιγραφή δίδεται από του Paashe και Tronicke (2007).

Η λύση με το βέλτιστο αριθμό c περιλαμβάνει τη μικρότερη τιμή NCE για το ενοποιημένο μοντέλο και την ελάχιστη τιμή RMS των νέων n μοντέλων ερμηνείας.



Εικόνα 5.23 : Σχηματική αναπαράσταση αλγορίθμου αντιστροφής δεδομένων (Zonal Cooperative Inversion) προερχόμενα από διάφορες γεωφυσικές μεθόδους (Paashe et al., 2007).

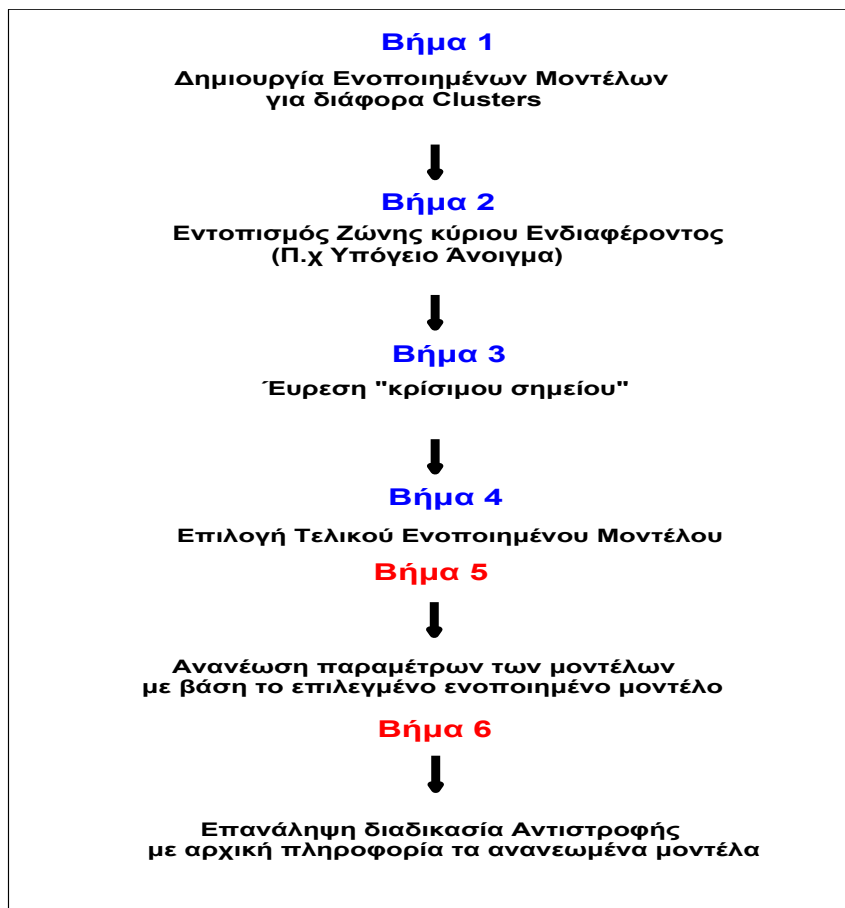
Με στόχο τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων άλλα και για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, όσον αφορά στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων, προτείνεται η συγκεκριμένη διαδικασία.

Αφού ερμηνευτούν οι μετρήσεις κάθε γεωφυσικής μεθόδου με τους κοινούς αλγορίθμους, εφαρμόζεται η τεχνική συσταδοποίησης fuzzy c -means για τα προκύπτοντα μοντέλα ερμηνείας τους. Στη συνέχεια, επιλέγοντας το τελικό ενοποιημένο μοντέλο με τη διαδικασία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.5 είναι δυνατή η ανανέωση των παραμέτρων

των μοντέλων με βάση την εξίσωση 5.4. Στο επόμενο στάδιο επαναλαμβάνεται η αντιστροφή των γεωφυσικών μετρήσεων κάθε μεθόδου, χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα ανανεωμένα μοντέλα ως αρχική πληροφορία (initial models) για τη μέθοδο που αντιστοιχούν.

Στην Εικόνα 5.24 παρουσιάζονται σχηματικά τα βήματα της προτεινόμενης διαδικασίας.

Διαδικασία συνδυαστικής αντιστροφής γεωφυσικών μεθόδων με την χρήση της τεχνικής συσταδοποίησης Fuzzy c-means

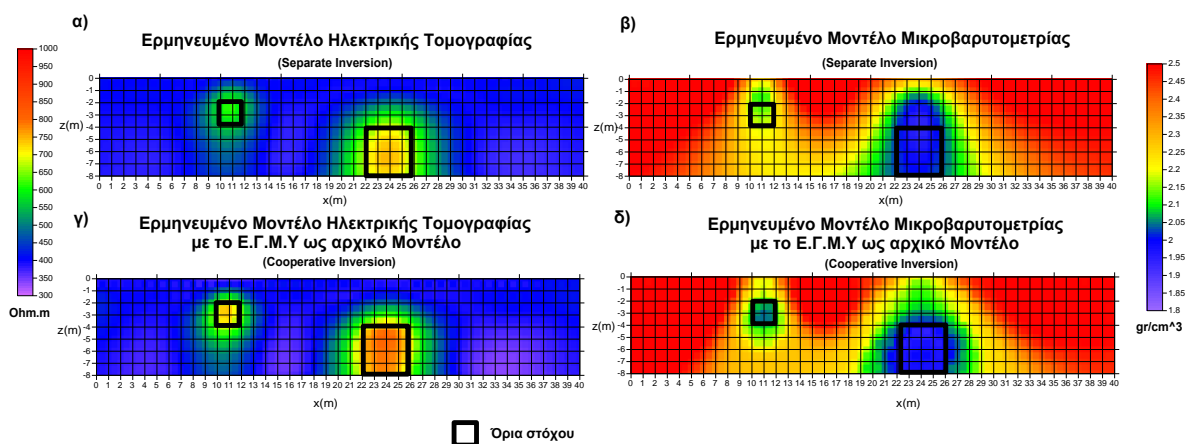


Εικόνα 5.24: Σχηματική αναπαράσταση προτεινόμενης διαδικασίας για τη συνδυαστική αντιστροφή γεωφυσικών μεθόδων με τη χρήση του Τελικού Ενοποιημένου Μοντέλου Υπεδάφους ως αρχική πληροφορία.

Επομένως, εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη διαδικασία, στην περίπτωση των συνθετικών δεδομένων, τα οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.4.1 και αρχικά επιλέγοντας ως τελικό ενοποιημένο μοντέλο αυτό των 4 clusters, και υπολογίζοντας τις παραμέτρους των ανανεωμένων παραμέτρων για τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και της μικροβαρυτομετρίας, είναι δυνατός ο καθορισμός των αρχικών μοντέλων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη νέα αντιστροφή των μετρήσεων κάθε μεθόδου με τους κοινούς αλγόριθμους.

Τα μοντέλα ερμηνείας τα οποία προήλθαν από τη μεμονωμένη αντιστροφή κάθε μεθόδου (για την περίπτωση της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό De2dinv, στο οποίο είναι δυνατός ο καθορισμός αρχικού μοντέλου στη διαδικασία αντιστροφής), αλλά και τα αντίστοιχα τα οποία προήλθαν από την αντιστροφή των δεδομένων με τη χρησιμοποίηση του τελικού ενοποιημένου γεωφυσικού μοντέλου του

υπεδάφους (T.E.G.M.Y) ως αρχικό μοντέλο (initial model) παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.25.



Εικόνα 5.25: α) Μοντέλο ερμηνείας ηλεκτρικής Τομογραφίας με μεμονωμένη επεξεργασία β) Μοντέλο ερμηνείας Μικροβαρυτομετρίας με μεμονωμένη επεξεργασία γ) Μοντέλο ερμηνείας ηλεκτρικής τομογραφίας με το Ε.Γ.Μ.Υ ως αρχικό μοντέλο δ) Μοντέλο ερμηνείας μικροβαρυτομετρίας με το Ε.Γ.Μ.Υ ως αρχικό μοντέλο.

Παρατηρώντας τα μοντέλα ερμηνείας κάθε μεθόδου με τις δύο προσεγγίσεις είναι εμφανές ότι :

- Στα μοντέλα ερμηνείας της ηλεκτρικής τομογραφίας, παρόλο που δεν υπάρχει ουσιαστική βελτίωση όσον αφορά στην οριοθέτηση του στόχου (καλή οριοθέτηση υπάρχει και στα δύο μοντέλα) η τιμή της διαφοράς της ειδικής αντίστασης του στόχου με τον ημιχώρο αυξάνεται σημαντικά (σημαντικός παράγοντας ως προς την ικανότητα εντοπισμού ενός στόχου).
- Στην περίπτωση της μικροβαρυτομετρίας, τόσο η οριοθέτηση του στόχου όσο και η διαφορά πυκνότητα στόχου-ημιχώρου βελτιώνεται σημαντικά, δίδοντας ένα υψηλότερης ανάλυσης γεωφυσικό μοντέλο.
- Και στις δύο περιπτώσεις τα νέα μοντέλα ερμηνείας παρουσιάζουν μικρότερες τιμές RMS.

Η χρήση του T.E.G.M.Y ως αρχικό μοντέλο για την αντιστροφή μετρήσεων διάφορων γεωφυσικών μεθόδων είναι δυνατό να βελτιώσει την τελική ερμηνεία, με την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των διάφορων γεωφυσικών μεθόδων κατά τη διάρκεια αντιστροφής, χωρίς την ανάγκη άμεσης σύνδεσης των μετρήσεων με καθορισμένη σχέση-συνάρτηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Συμπεράσματα- Μελλοντική Έρευνα

Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή έχει ως θέμα την επίλυση ενός σύνθετου προβλήματος το οποίο σχετίζεται με το επιστημονικό πεδίο των μηχανικών και το οποίο αποτελεί τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων στο υπέδαφος μέσω της συνδυαστικής γεωφυσικής διερεύνησης. Η παρουσία υπόγειων ανοιγμάτων στο υπέδαφος αποτελεί σημαντικό και ιδιαίτερο πρόβλημα, σε διάφορες γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Για παράδειγμα η παρουσία υπόγειων ανοιγμάτων μπορεί να προκαλέσει αστοχίες σε κατασκευές, στη χάραξη δρόμων και διάφορων γεωτεχνικών έργων αλλά και να συντελέσει στην απορροή ρύπων στον υδάτινο ορίζοντα, δημιουργώντας προβλήματα από περιβαλλοντική άποψη. Επιπλέον, ένα υπόγειο κενό μπορεί να αποτελεί το ζητούμενο στόχο σε μια αρχαιολογική έρευνα.

Κύριο πρόβλημα όλων των μεθόδων της εφαρμοσμένης γεωφυσικής αποτελεί η **αβεβαιότητα της τελικής ερμηνείας** και η ανάγκη επαλήθευσης με άμεσους τρόπους παρατήρησης του υπεδάφους όπως π.χ. οι γεωτρήσεις. Ένας τρόπος μείωσης του ποσοστού της αβεβαιότητας αποτελεί η χρησιμοποίηση περισσότερων από μιας γεωφυσικής μεθόδου στην ίδια περιοχή έρευνας και η συνδυαστική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων τους. Όμως, η αξιοπιστία της τελικής ερμηνείας ακόμα και στην περίπτωση της **συνδυαστικής γεωφυσικής έρευνας** εξαρτάται από τη σωστή και βέλτιστη ερμηνεία κάθε μεθόδου.

Ανάλυση Γεωφυσικών Μεθόδων

Διάφοροι παράγοντες, όπως η γεωλογία της περιοχής έρευνας, η δομή του ίδιου του υπόγειου ανοίγματος (φυσικό κενό ή ανθρώπινη κατασκευή), το βάθος και το μέγεθος του στόχου, επιφανειακές και τοπογραφικές ανομοιογένειες, ύπαρξη ελεύθερου χώρου για τη λήψη των μετρήσεων κ.α., επιδρούν καθοριστικά στην επιτυχία εφαρμογής κάθε μεθόδου. Επιπλέον, εκτός από τους παραπάνω παράγοντες, οι οποίοι εξαρτώνται κάθε φορά από την περιοχή και το στόχο της έρευνας, υπάρχουν κομβικά στάδια τα οποία επηρεάζουν την επιτυχία μιας γεωφυσικής μεθόδου και τα οποία είναι:

- 1. Η στρατηγική λήψη των μετρήσεων**
- 2. Η επεξεργασία των μετρήσεων**
- 3. Η ερμηνεία των μετρήσεων.**

Επομένως, με την πραγματοποίηση ενός πειράματος σε πραγματικές άλλα ελεγχόμενες συνθήκες (εντοπισμός υπόγειου αγωγού γνωστών διαστάσεων), με την ανάλυση συνθετικών μοντέλων αλλά και επιπλέον με την πραγματοποίηση δύο πειραμάτων σε πραγματικές συνθήκες, όπου δεν ήταν γνωστές οι παράμετροι του στόχου (εντοπισμός αρχαίας στοάς στο Λαύριο, εντοπισμός υπόγειων εγκοίλων σε γεωτεχνική εφαρμογή) διερευνήθηκαν διάφορες πτυχές των τριών παραπάνω σταδίων, για τέσσερις διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους:

- 1. διδιάστατη και τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία,**
- 2. μικροβαρυτομετρία,**

3. μέθοδος πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων,
4. μαγνητομετρία

με απώτερο σκοπό τη βέλτιστη συνδυαστική αξιοποίηση τους για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων και γενικότερα πεπερασμένων δομών.

Τα κύρια συμπεράσματα της έρευνας συνοψίζονται παρακάτω ανά μέθοδο :

Ηλεκτρική τομογραφία

Η επιλογή της διάταξης ηλεκτροδίων κατά την εφαρμογή τόσο της διδιάστατης όσο και της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας παίζει σημαντικό ρόλο για την επιτυχία της μεθόδου. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ερμηνείας των συνηθέστερων διατάξεων ηλεκτροδίων, οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά μήκος της ίδιας γραμμής διασκόπησης για τον εντοπισμό ενός αγωγού σε πραγματικές και ελεγχόμενες συνθήκες υπαίθρου αλλά και επιπλέον μέσω της ανάλυσης συνθετικών μοντέλων συμπεραίνεται ότι :

Οι διατάξεις οι οποίες παρουσίασαν την υψηλότερη διακριτική ικανότητα όσον αφορά στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων αλλά και γενικότερα πεπερασμένων δομών είναι οι Dipole Dipole (DD) και Pole Dipole (PD). Αντιθέτως η διάταξη με τη χαμηλότερη διακριτική ικανότητα, ιδιαίτερα όταν μεγαλώνει το βάθος του στόχου, είναι η Wenner-Schlumberger (WS). Η διάταξη Pole Pole (PP) βρίσκεται μετά από τις Dipole Dipole (DD) και Pole Dipole (PD) στην κατάταξη διακριτικής ικανότητας υπόγειων στόχων.

Επιπλέον, ήταν δυνατή η εξαγωγή διαφόρων σημαντικών συμπερασμάτων που αφορούν την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας :

Η διάταξη **Dipole Dipole (DD)** πράγματι παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα στην οριοθέτηση υπόγειων ανοιγμάτων και αποτελεί ενδεδειγμένη επιλογή για τον εντοπισμό τέτοιων στόχων. Κύριο μειονέκτημα αποτελεί ο χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο.

Για να μετριαστούν όσο το δυνατόν τα προβλήματα σχετικά με το θόρυβο, κατά τη δημιουργία του πρωτοκόλλου μετρήσεων, προτείνεται είτε η επιλογή μετρήσεων όπου το $n \leq 6$, είτε σχετικά μεγάλα δίπολα για την ενδυνάμωση του σήματος με μικρή απόσταση ηλεκτροδίων (βήμα μέτρησης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλή ποιότητα των μετρήσεων και κατά συνέπεια αξιόπιστα μοντέλα ερμηνείας.

Επιπλέον στο πείραμα του εντοπισμού του αγωγού, για να μειωθεί περαιτέρω η επίδραση διαφόρων «λανθασμένων» Dipole Dipole μετρήσεων, δηλαδή μετρήσεων όπου ο θόρυβος παρουσιάζοταν σε σημαντικά επίπεδα, πραγματοποιήθηκαν και προτείνονται μετρήσεις *forward & reversed*, (δηλαδή με το δίπολο δυναμικού να προηγείται του δίπολου ρεύματος και αντίστροφα) και επεξεργάστηκαν με συγκεκριμένο τρόπο. Πρακτικά, πραγματοποιήθηκε και προτείνεται η ερμηνεία του μέσου όρου των μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων και των δύο διατάξεων, αφού πρώτα έχουν απαλειφθεί οι μετρήσεις στις οποίες παρατηρείται σημαντική απόκλιση (>20%). Οι μετρήσεις που αφαιρέθηκαν ήταν μετρήσεις είτε με μικρό a και μικρό n (λάθος προερχόμενο πιθανότατα από τη μη ακριβή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων) είτε με μεγάλο n , δηλαδή μετρήσεις με χαμηλότερο σήμα άρα μεγαλύτερη ευαισθησία στο θόρυβο. Το τελικό μοντέλο συνδυαστικής ερμηνείας μετρήσεων Dipole Dipole αριστερά & δεξιά δίδει καλύτερα και μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα, με το στόχο έρευνας να παρουσιάζεται με μεγαλύτερη αντίθεση αντίστασης σε σχέση με τα μοντέλα ερμηνείας *forward* ή *reversed*. Πρακτικά με τη συγκεκριμένη

διαδικασία μπορεί να διαπιστωθεί η αξιοπιστία και η ακρίβεια των μετρήσεων με στόχο τη βελτίωση του τελικού μοντέλου ερμηνείας.

Η διάταξη **Pole Dipole (PD)** παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων και κατατάσσεται μαζί με την Dipole Dipole (DD) στις ενδεδειγμένες διατάξεις για υψηλής ανάλυσης αποτελέσματα όσον αφορά στον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων.

Ενώ ο υψηλότερος λόγος σήματος προς θόρυβο και το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα γραμμής αποτελεί πλεονέκτημα σε σχέση με την Dipole Dipole (DD), η έλλειψη δυνατότητας στο ύπαιθρο για την τοποθέτηση του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου σε μεγάλη απόσταση μπορεί να αποτελέσει κύριο μειονέκτημα.

Ειδικότερα, από το πείραμα για τον εντοπισμό του αγωγού προκύπτουν δύο σημαντικότερες παρατηρήσεις:

Αρχικά παρατηρείται ότι στο μοντέλο ερμηνείας δεν εντοπίζεται η υποκείμενη του στόχου στρωματογραφία, στην πλευρά που το δίπολο δυναμικού προσεγγίζει το στόχο ακολουθούμενο από το ηλεκτρόδιο ρεύματος. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί κάθε ανομοιογένεια κοντά στο δίπολο δυναμικού επηρεάζει πολύ τις μετρήσεις και το μοντέλο ερμηνείας. Όταν το δίπολο δυναμικού υπερβεί την περιοχή ανομοιογένειας (στόχο), τότε στο μοντέλο ερμηνείας εντοπίζεται η υποκείμενη στρωματογραφία με μεγαλύτερη ακρίβεια. Πρακτικά, η παρουσία της ανομοιογένειας δημιουργεί προβλήματα στη διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων.

Η δεύτερη παρατήρηση αφορά τον καλύτερο εντοπισμό του καθέτου ορίου του στόχου από την πλευρά που το συναντά το δίπολο δυναμικού ακολουθούμενο από το ηλεκτρόδιο ρεύματος. Παρατηρώντας την κατανομή της ευαισθησίας μιας μέτρησης Pole Dipole (PD), διακρίνεται μια απότομη, κάθετη μετάβαση μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών ευαισθησίας στην εξωτερική πλευρά του δίπολου δυναμικού, απέναντι από το ηλεκτρόδιο ρεύματος, από ότι στην υπόλοιπη περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όπως η διάταξη κινείται με το δίπολο δυναμικού να προηγείται, το πρώτο όριο του στόχου να εντοπίζεται καλύτερα από ότι το δεύτερο, του οποίου οι αντίστοιχες μετρήσεις επηρεάζονται από τις τιμές ευαισθησίας μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος και δίπολου δυναμικού και της παρουσίας του πρώτου ορίου.

Για να εξαλειφθούν κάθε τυχόν ασυμμετρίες και επιδράσεις λόγω επιφανειακών ανομοιογενειών και να ληφθεί η καλύτερη δυνατή απεικόνιση του υπεδάφους, εφαρμόστηκαν και προτείνονται δύο αντιδιαμετρικές διατάξεις Pole Dipole (PD) με το ηλεκτρόδιο ρεύματος αριστερά ή δεξιά σε σχέση με το δίπολο δυναμικού και έχοντας το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο ρεύματος πολύ μακριά και σε διεύθυνση κάθετη στη γραμμή. Στο μοντέλο ερμηνείας που προκύπτει από τη συνδυαστική ερμηνεία του συνόλου των μετρήσεων των αντιστροφών Pole Dipole (PD) διατάξεων εμφανίζονται τόσο τα όρια του στόχου όσο και την υποκείμενη στρωματογραφία με καλή ακρίβεια. Η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με την εφαρμογή forward και reversed μετρήσεων αυξάνει όμως κατά πολύ τον απαιτούμενο αριθμό μετρήσεων.

Πραγματοποιώντας περαιτέρω επεξεργασία στα δεδομένα της forward & reversed pole dipole διάταξης, με την αφαίρεση μετρούμενων τιμών που αφορούν περιοχή που δεν βρίσκεται ο στόχος αλλά έχουν πραγματοποιηθεί με το δίπολο δυναμικού κοντά στο στόχο, τότε η συνδυαστική ερμηνεία εμφανίζεται να χάνει σε ανάλυση όσον αφορά στα όρια του στόχου αλλά κερδίζει σε ανάλυση στον εντοπισμό της υποκείμενης στρωματογραφίας. Η διαπίστωση αυτή γίνεται για να υποδείξει τη σημασία και την επίδραση του πρωτοκόλλου μετρήσεων στο βέλτιστο προσδιορισμό του υπεδάφικου μοντέλου ειδικών αντιστάσεων.

Δεν ισχύει πάντα, η κοινή πολλές φορές αντίληψη, ότι περισσότερες μετρήσεις δίδουν καλύτερο τελικό μοντέλο ερμηνείας. Η πληροφορία που περιέχουν οι μετρήσεις, η ορθότητα τους και το ποσοστό θορύβου που περιέχουν, αποτελούν τα βασικότερα στοιχεία που επιδρούν στη βελτίωση του μοντέλου ερμηνείας.

Η διάταξη **Pole Pole (PP)**, με περιορισμένο αριθμό μετρήσεων παρέχει τη μεγαλύτερη σε βάθος άλλα και πλευρικά διασκόπηση για ένα συγκεκριμένο μήκος αναπτύγματος σε σχέση με τις άλλες διατάξεις, οριοθετώντας με καλή ακρίβεια πεπερασμένες δομές και διευκολύνοντας την απόκτηση ευρύτερης άποψης σχετικά με την ύπαρξη βαθύτερων σχηματισμών. Από την άλλη πλευρά παρουσιάζει μικρότερη διακριτική ικανότητα σε σχέση με τις Pole Dipole (PD) και Dipole Dipole (DD) και υπάρχουν προβλήματα όσον αφορά στην τοποθέτηση των απομακρυσμένων ηλεκτροδίων άλλα και την πιθανή ύπαρξη τελουρικού θορύβου.

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε και προτείνεται, εκτός από έναν σημαντικό αριθμό μετρήσεων περίπου στο βάθος που αναμενόταν ο στόχος, είχε και μετρήσεις που αντιστοιχούσαν σε βαθύτερους ορίζοντες. Εάν αφαιρεθούν οι μετρήσεις που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάθη και γίνει νέα ερμηνεία των δεδομένων τότε παρατηρείται ότι σε αυτό το μοντέλο ερμηνείας δεν εντοπίζεται το υποκείμενο στρώμα αλλά και επιπλέον δυσχεραίνεται η καλή αποτύπωση του στόχου. Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι δομές που βρίσκονται εκτός των ορίων του μοντέλου ερμηνείας έχουν επίδραση στη διαμόρφωση των μετρούμενων τιμών με μέγεθος και ένταση που καθορίζεται από την κατανομή ευαισθησίας της μέτρησης και τη θέση της δομής αυτής.

Είναι σημαντικό ο ερευνητής να λαμβάνει μετρήσεις που να καλύπτουν ένα ευρύτερο εύρος γύρω από την περιοχή έρευνας (σε μεγαλύτερα βάθη από το αναμενόμενο βάθος του στόχου) έτσι ώστε να έχει μια πιο εποπτική εικόνα του υπεδάφους και να γίνεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων του με μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας.

Η διάταξη **Wenner Schlumberger (WS)** έχει περιορισμένη ικανότητα στον εντοπισμό πεπερασμένων στόχων, ειδικότερα όταν ο στόχος βρίσκεται σε περιοχές χαμηλής ευαισθησίας (βαθύτεροι στόχοι). Ενδείκνυται να χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ευρύτερης στρωματογραφίας και γενικότερα του προσδιορισμού του γεωλογικού υπόβαθρου. Επίσης η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό μικρού βάθους στόχων ιδιαίτερα όταν υπάρχουν προβλήματα θορύβου ή άλλων περιορισμών στην περιοχή που αποτρέπουν την εφαρμογή των άλλων διατάξεων (π.χ. Dipole Dipole (DD)). Είναι χαρακτηριστικό ότι από την ανάλυση συνθετικών δεδομένων προκύπτει η διάταξη **Wenner-Schlumberger** παρουσιάζει υψηλό συντελεστή συσχέτισης (μεταξύ μοντέλου ερμηνείας και πραγματικού μοντέλου) για μικρά βάθη και απότομη μείωση του συντελεστή συσχέτισης για βαθύτερους στόχους. Η μείωση των διαθέσιμων μετρήσεων (μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις άλλες διατάξεις) της διατάξεως με το βάθος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ευαισθησίας της και την έντονη ελάττωση της διακριτικής ικανότητας της με το βάθος όσον αφορά τον εντοπισμό στόχων για συγκεκριμένο ανάπτυγμα γραμμής.

Μετά από την επεξεργασία κάθε μεθόδου ξεχωριστά ακολούθησε η **συνδυαστική ερμηνεία μετρήσεων διαφόρων διατάξεων (combined data sets)**, δηλαδή πρακτικά η ερμηνεία δεδομένων που έχουν προέλθει από την ενοποίηση ενός πλήθους μετρήσεων από διάφορες διατάξεις.

Αρχικά ενοποιήθηκε το σύνολο των μετρήσεων όλων των διατάξεων και μετά διάφοροι συνδυασμοί διατάξεων όπως PD-PP-WS, DD-PD, WS-DD κ.α. Η σύγκριση των μοντέλων ερμηνείας στη συγκεκριμένη εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες υποδεικνύει ότι ο συνδυασμός των τιμών των διάφορων διατάξεων εκτός από χρήσιμη πληροφορία

προσθέτουν στο μοντέλο ερμηνείας επιπλέον θόρυβο και μη χρήσιμη πληροφορία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα κατά τη διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων και η συνδυαστική ερμηνεία τους να μην δίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα και την καλύτερη αποτύπωση του υπεδάφους. Το τελικό μοντέλο ερμηνείας είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των αρνητικών και θετικών σημείων των μοντέλων ερμηνείας της κάθε διάταξης.

Έτσι για να επιτευχθεί η καλύτερη ερμηνεία της υπεδαφικής δομής, είναι προτιμότερο να ερμηνεύονται αρχικά τα δεδομένα κάθε διάταξης λαμβάνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας υπόψη και έπειτα να αξιολογείται η επιπρόσθετη πληροφορία που προσφέρει η συνδυαστική ερμηνεία τους.

Επιπλέον, για να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου όσον αφορά στη διακριτική τους ικανότητα αλλά και να μειώσουμε τη μη χρήσιμη-«ενοχλητική» παρουσία επιδράσεων στην τελική ερμηνεία προτείνεται μια νέα **Τεχνική Συνδυαστικής Ερμηνείας μοντέλων ερμηνείας** διάφορων διατάξεων Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

Αρχικά ερμηνεύονται οι μετρήσεις κάθε διάταξης χωριστά. Έστω ρ_1 η τιμή ειδική αντίστασης του μοντέλου ερμηνείας της διάταξης 1 για βάθος z_1 και x_1 απόσταση από την αρχή της γραμμής διασκόπησης και αντίστοιχα ρ_2, x_2, z_2 για τη διάταξη 2 και ρ_n, x_n, z_n για διάταξη n . Στη συνέχεια, συνδυάζονται τα μοντέλα ερμηνείας των διαφόρων διατάξεων. Λαμβάνοντας το μέσο όρο των τιμών ειδικής αντίστασης που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο και ίδιο βάθος προκύπτει ένα νέο μοντέλο ερμηνείας το οποίο είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των μοντέλων ερμηνείας των n διατάξεων. Τα μοντέλα ερμηνείας που προέκυψαν από αυτήν την τεχνική είναι εμφανώς βελτιωμένα, ειδικότερα όσο αφορά στον εντοπισμό της στρωματογραφίας.

Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί ένα είδος φιλτραρίσματος του τελικού μοντέλου ερμηνείας όπου τονίζεται και ενισχύεται η ύπαρξη των πραγματικών δομών με την παράλληλη μείωση των μη αξιόπιστων μορφών και του θορύβου.

Όσον αφορά στο στάδιο της ερμηνείας των μετρήσεων είναι γεγονός ότι αλγόριθμος αντιστροφής των δεδομένων αποτελεί βασικό εργαλείο για την ερμηνεία των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας. Στο πρόγραμμα Res2inv χρησιμοποιούνται κάποιες προκαθορισμένες παράμετροι αντιστροφής που σε γενικές γραμμές δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Φυσικά όμως ανάλογα με της συνθήκες της περιοχής έρευνας, το είδος του στόχου του, του λόγου σήματος προς θόρυβο **οι παράμετροι αντιστροφής** πρέπει να μεταβάλλονται έτσι ώστε να αποκτάται το βέλτιστο υπεδαφικό μοντέλο ειδικής αντίστασης.

Από τη σύγκριση των μοντέλων ερμηνείας προκύπτει ότι με τη χρησιμοποίηση της L2 Νόρμας και της Συνδυαστικής μεθόδου προκύπτουν μοντέλα με πιο κοινά χαρακτηριστικά έναντι αυτών της L1 Νόρμας.

Είναι χαρακτηριστικό ότι και οι δύο πρώτες μέθοδοι δίνουν μοντέλα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τονίζοντας τις μικροδιαφορές που προκύπτουν από τις μετρούμενες τιμές αλλά και από τον εμπειριεχόμενο θόρυβο. Η L1 Νόρμα (Robust) δημιουργεί ένα μοντέλο με ξεκάθαρα όρια περιοχών διαφορετικής αντίστασης, τονίζοντας ευρύτερες ανωμαλίες «καταπραΰνοντας» τις μικροδιαφορές των δεδομένων. Στην περίπτωση όπου υπάρχει ένας στόχος μεγάλων διαστάσεων η τεχνική Robust παρέχει ένα μοντέλο ερμηνείας που προσομοιάζεται καλύτερα η γενικότερη δομή του υπεδάφους δίδοντας καλά οριοθετημένο το στόχο και ελαχιστοποιώντας την επίδραση του περιεχόμενου θορύβου στα δεδομένα. Η περίπτωση αυτή φαίνεται χαρακτηριστικά στην περίπτωση του πειράματος του αγωγού.

Σε άλλες περιπτώσεις όπου το ζητούμενο είναι η ανάδειξη των μικροδιαφορών των μετρούμενων τιμών ειδικής αντίστασης, όπως σε περιπτώσεις στόχων μικρών διαστάσεων, οι δύο πρώτες μέθοδοι θα ήταν πιο ενδεδειγμένες, όπως παρουσιάστηκε στις περιπτώσεις των πειραμάτων του εντοπισμού της αρχαίας στοάς άλλα και στη γεωτεχνική εφαρμογή. Παράλληλα, όμως, εμπεριέχουν σε μεγαλύτερο βαθμό το ρίσκο της επίδρασης του θορύβου στην τελική ερμηνεία με δομές και περιοχές ειδικών αντιστάσεων στα τελικά μοντέλα ερμηνείας που μπορεί να είναι λανθασμένες (artifacts) και να μην αντιστοιχούν στην πραγματική κατανομή ειδικών αντιστάσεων του υπεδάφους.

Τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία

Η εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας στα πειράματα του εντοπισμού της αρχαίας στοάς άλλα και των υπόγειων εγκοίλων στη γεωτεχνική εφαρμογή επέτρεψε τη διερεύνηση διαφόρων παραγόντων που σχετίζονται με τεχνικές υπαίθρου, επεξεργασίας και ερμηνείας που συνθέτουν την εφαρμογή της **τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας**.

Όπως στην περίπτωση του εντοπισμού της αρχαίας στοάς, αρχικά προτείνονται διάφορες διδιάστατες τομές ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη Pole Pole (PP) σε διάφορες διευθύνσεις για να είναι δυνατή η διασκόπηση μιας ευρύτερης περιοχής σε ικανοποιητικό βάθος άλλα και για την αποφυγή διάφορων επιφανειακών εμποδίων και έντονων ανομοιογενειών. Εφαρμόζοντας την πρώτη γραμμής διασκόπησης, πάνω από το γνωστό μέρος ύπαρξης ενός στόχου (αρχαία στοά στην προκειμένη περίπτωση), άλλα και ερμηνεύοντας κάθε γραμμή επιτόπου στο ύπαιθρο, σχεδιάζονται η θέση και ο προσανατολισμός της νέας γραμμής με βάση τα προηγούμενα αποτέλεσμα έτσι ώστε να «ακολουθείται» όσο το δυνατόν η πορεία του στόχου.

Τα δεδομένα όλων των γραμμών διασκόπησης ερμηνεύονται αρχικά με διδιάστατη προσέγγιση. Με συγκεκριμένες μορφές απεικόνισης όπως τα διδιάστατα μοντέλα ερμηνείας κάθε γραμμής διασκόπησης (κατανομή ειδικής αντίστασης ως προς το βάθος) στις πραγματικές συντεταγμένες τους στο χώρο και η ψευδοτριδιάστατη κατανομή της ειδικής αντίστασης για το βάθος ενδιαφέροντος, είναι δυνατή η εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών σχετικά με χωρική αποτύπωση του στόχου. Φυσικά κατά την ερμηνεία των μοντέλων που παρουσιάζουν τη ψευδοτριδιάστατη κατανομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή αφού πολλές μορφές μπορεί να υφίστανται τριδιάστατες επιδράσεις (3d effects) και να μην παρουσιάζεται η πραγματική κατανομή ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

Αν χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις από τις διάφορες γραμμές διασκόπησης και εφαρμόσει ένας τριδιάστατος αλγόριθμος, είναι δυνατή η **τριδιάστατη ερμηνεία των μη παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης**. Η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται με στόχο κυρίως τον έλεγχο της αξιοπιστίας της ψευδοτριδιάστατης ερμηνείας και όχι τόσο για τη δημιουργία ενός μοντέλου υψηλότερης ανάλυσης. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ των γραμμών διασκόπησης καθιστά δύσκολη την περιγραφή της αληθινής τριδιάστατης κατανομής της ειδικής αντίστασης άλλα μπορεί να υποδείξει κατά πόσο η διδιάστατη ερμηνεία έχει επηρεαστεί ή όχι από διάφορες τριδιάστατες επιδράσεις.

Η τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία με τη χρησιμοποίηση πυκνών παράλληλων γραμμών και τη διάταξη Pole Dipole (PD) ή *Dipole Dipole (DD)* επιτυγχάνει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα. Αρχικά κάθε γραμμή διασκόπησης ερμηνεύεται με διδιάστατη τεχνική ερμηνείας και μετά όλα τα δεδομένα ερμηνεύονται με τριδιάστατη τεχνική ερμηνείας.

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι :

- οι τριδιάστατες τεχνικές ερμηνείας παρέχουν πιο αξιόπιστα μοντέλα ερμηνείας περιγράφοντας καλύτερα την πραγματική κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η απόσταση μεταξύ των γραμμών έρευνας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πραγματική τριδιάστατη απεικόνιση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση της γεωτεχνικής εφαρμογής όπου τα αποτελέσματα της διδιάστατης ερμηνείας ήταν μη ικανοποιητικά, δίδοντας μοντέλα ερμηνείας με πολύ ασυνήθιστες υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης ενώ αντίθετα με την τριδιάστατη ερμηνεία αποδόθηκαν με μεγάλη ακρίβεια οι συνθήκες του υπεδάφους.
- Στην τριδιάστατη ερμηνεία η ανάλυση των μοντέλων ερμηνείας επηρεάζεται από τον προσανατολισμό των γραμμών διασκόπησης σε σχέση με τη θέση του στόχου άλλα και την ύπαρξη επιφανειακών ανομοιογενειών.
- Στην εφαρμογή της τριδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας είναι πολύ σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με τη γεωλογία της περιοχής και το στόχο έρευνας έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αρχική πληροφορία για το βέλτιστο σχεδιασμό της έρευνας, όσον αφορά στον προσανατολισμό των γραμμών διασκόπησης, το μέγιστο ανάπτυγμα των γραμμών αλλά και το πρωτόκολλο των μετρήσεων.
- Στην περίπτωση της διάταξης Pole Pole (PP) υπάρχει σημαντική ταύτιση μεταξύ της τριδιάστατης και διδιάστατης ερμηνείας. Αντίθετα, στην περίπτωση της διάταξης της Pole Dipole (PD), είναι εμφανές ότι η διδιάστατη ερμηνεία δημιουργεί ένα «αμφιλεγόμενο» υπεδαφικό μοντέλο με πολλές πλασματικές παρά πραγματικές μορφές. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην τριδιάστατη φύση του υπεδάφους άλλα και του ίδιου του στόχου, όπου επηρεάζει πολύ περισσότερο τη διδιάστατη ερμηνεία της διάταξης Pole Dipole (PD) και της Dipole Dipole (DD) σε σχέση με τη διάταξη Pole Pole (PP) και την Wenner Schlumberger (WS). Η συγκεκριμένη επίδραση μπορεί να αποτελέσει ένα επιπλέον πλεονέκτημα για τη χρησιμοποίηση των διατάξεων Pole Dipole (PD) και Dipole Dipole (DD) στην τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία, αφού πιθανώς να είναι σημαντική η παρουσία της επίδρασης ενός υπόγειου στόχου στις μετρήσεις και στο μοντέλο ερμηνείας ακόμη και αν η γραμμή διασκόπησης δεν τέμνει το στόχο.

Μικροβαρυτομετρία

Η μικροβαρυτομετρία είναι από τις βασικές γεωφυσικές μεθόδους στον εντοπισμό υπόγειων κενών. Η έρευνα προς της βελτιστοποίηση των διαδικασιών υπαίθρου αλλά και της επεξεργασίας των μετρήσεων δίδει την ευκαιρία για την εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων, διασαφηνίζοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου. Επιπλέον η αξιολόγηση των διδιάστατων και τριδιάστατων τεχνικών ερμηνείας σε μικροβαρυτικά δεδομένα αποτελεί σημαντικότερη πληροφορία για την περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου σε μελλοντικές έρευνες εντοπισμού υπόγειων ανοιγμάτων μικρού βάθους.

Οι προσεκτικές διαδικασίες λήψης σωστών μετρήσεων (κλείσιμο στη βάση σε μικρά χρονικά διαστήματα, επαναληπτικές μετρήσεις για την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο κ.α., τοπογραφική αποτύπωση) αποτελεί το πρωταρχικό συστατικό μιας επιτυχής μικροβαρυτικής έρευνας. Όσον αφορά στις συνθήκες λήψης μετρήσεων πρέπει να αναφερθεί ότι διάφοροι παράγοντες όπως, η χαμηλή βλάστηση και τα δέντρα, οι έντονες ανομοιογένειες στην επιφάνεια του εδάφους σε πολλά σημεία, η κλίση του εδάφους, δημιουργούν προβλήματα στην καλή οριζοντιοποίηση του οργάνου και συντελούν στη

δυσκολία λήψης μεγάλης ακρίβειας μετρήσεων, αποτελώντας έναν επιπλέον παράγοντα θορύβου στις μετρήσεις. Είναι χαρακτηριστικό στην περίπτωση του εντοπισμού της αρχαίας στοάς ότι σε συγκεκριμένη περιοχή όπου υπήρχαν μεγάλες τοπικές επιφανειακές ανομοιογένειες, δημιουργήθηκε ψευδής περιοχή χαμηλών πυκνοτήτων στο τελικό μοντέλο ερμηνείας.

Όσο αφορά στη **διάταξη των μετρήσεων**, ο μη τετραγωνικός κάρναβος μετρήσεων δεν δημιούργησε προβλήματα στην ανάλυση της μεθόδου. *Καλύτερα να μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των σταθμών μέτρησης ως προς τη μία διάσταση (για την επίτευξη μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης της έρευνας) παρά να γίνεται προσπάθεια επιτάχυνσης των διαδικασιών λήψης των μετρήσεων εις βάρος της ακρίβειας.* Στην περίπτωση του αγωγού, όπου στις τρεις τελευταίες γραμμές λαμβανόταν μόνο μια μέτρηση (χωρίς επαναληπτικές μετρήσεις στον ίδιο σταθμό) η ποιότητα των μετρήσεων ήταν πολύ χαμηλή, εάν και η απόσταση των σταθμών μετρήσεων ήταν μικρή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα στην αφαίρεση των συγκεκριμένων μετρήσεων, για είναι δυνατή η σωστή ερμηνεία των δεδομένων. Εν τέλει, όμως, *το τελικό μοντέλο ερμηνείας παρουσιάζει μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα σε σημεία με μεγαλύτερο πλήθος μετρήσεων, γεγονός που παρατηρείται χαρακτηριστικά στο μοντέλο ερμηνείας της περίπτωσης της γεωτεχνικής εφαρμογής.*

Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι είναι πολύ σημαντικό να επιλέγεται κάρναβος μετρήσεων με **ενδεδειγμένο βήμα μέτρησης** έτσι ώστε να είναι δυνατή η σωστή και ικανοποιητική περιγραφή της βαρυτικής ανωμαλίας. *Φυσικά, με τη βοήθεια συνθετικών μοντέλων μπορεί να καθοριστεί το πλάτος και το εύρος της ανωμαλίας που προκαλεί ο αναμενόμενος στόχος έρευνας. Άρα είναι δυνατόν να καθοριστεί η διακριτική ικανότητα της μεθόδου άλλα και να αξιολογηθεί το βήμα του κάρναβου μετρήσεων που επιλέγετε κάθε φορά.* Στην περίπτωση της αρχαίας στοάς χρησιμοποιώντας συνθετικά μοντέλα, ήταν δυνατός ο συγκερασμός μεταξύ επιθυμητής ανάλυσης και απαιτούμενου χρόνου μετρήσεων. *Ακόμη, η επιλογή του σωστού αναπτύγματος των γραμμών διασκόπησης μπορεί να αποτελέσει ένα αρχικό φίλτρο αποκοπής συγκεκριμένων συχνοτήτων, οι οποίες δεν αποτελούν αντικείμενο της έρευνας.*

Όσον αφορά στην **επεξεργασία των μετρήσεων** προέκυψαν διάφορα συμπεράσματα.

- Από τη διερεύνηση και των τριών εφαρμογών προκύπτει ότι **η επίδραση της μακρινής τοπογραφίας (πέρα των 170 m) είναι σχεδόν μηδαμινή στην περίπτωση μικρών αναπτυγμάτων για τις γραμμές διασκόπησης.** Οι τοπογραφικές διορθώσεις οφείλονται κυρίως στην κοντινή τοπογραφία. Κύριο χαρακτηριστικό αποτελεί ότι ο χάρτης τοπογραφικών διορθώσεων ακολουθεί κυρίως τη μορφή του τοπικού ανάγλυφου. Είναι γεγονός ότι η κοντινή τοπογραφία είναι αυτή που επιδρά κυρίως στις μετρήσεις. Η επίδραση της μακρινής τοπογραφίας αποτελεί μια μορφή μεγάλου κύματος ανωμαλίας στα δεδομένα, δίδοντας μικρές σχετικές μεταβολές του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης μεταξύ των μετρήσεων στους διάφορους σταθμούς. Κύριο λόγο για τη μικρή επίδραση της μακρινής τοπογραφίας στις συγκεκριμένες περιπτώσεις αποτελούν : 1) οι μικρές αποστάσεις μεταξύ των σταθμών μετρήσεων. 2) το μικρό ανάπτυγμα της γραμμής έρευνας 3) Το μικρό βάθος διασκόπησης 4) Το μικρό μέγεθος του στόχου.
- Για τη δημιουργία των βαρυτικών χαρτών χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι **μέθοδοι πλεγματοποίησης** (kriging, minimum curvature) οι οποίοι έδωσαν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα. Είναι γεγονός ότι και στις τρεις εφαρμογές που μελετήθηκαν, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών έρευνας είναι αρκετά μικρές, η διαφοροποίηση που προκύπτει με τις διάφορες τεχνικές πλεγματοποίησης είναι μικρή. Όσον αφορά στο βήμα πλεγματοποίησης πρέπει να επιλέγεται ανάλογα

με τις αποστάσεις μεταξύ των σταθμών μετρήσης αλλά και τις ιδιαιτερότητες του στόχου έρευνας.

- Για το διαχωρισμό της μικρής από τη μεγάλη κλίμακα ανωμαλίας, η χρήση πολυωνυμικών εξισώσεων δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα πραγματοποιώντας επιτυχώς την προσομοίωση της ευρύτερης ανωμαλίας. Κατά τον υπολογισμό της ευρύτερης ανωμαλίας με την προσεγγιστική μέθοδο πολυωνυμικών εξισώσεων πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην απαλείφεται ταυτόχρονα με την ευρύτερη ανωμαλία και χρήσιμη πληροφορία που αφορά στο στόχο έρευνας, όπως παρουσιάστηκε στην περίπτωση του αγωγού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου ο στόχος είναι αρκετά μεγάλος σε σχέση με το ανάπτυγμα της γραμμής διασκόπησης και η ανωμαλία που προκαλεί είναι μεγάλου μήκους κύματος, είναι εμφανέςτατο ότι ο χάρτης που προκύπτει είτε με 2^{ου} ή 3^{ου} βαθμού πολυωνυμική εξίσωση είτε με τη χρήση προς τα άνω συνέχειας 4 μέτρων, εκτός από την ευρύτερη ανωμαλία, περιέχει και πληροφορία που σχετίζεται με την ύπαρξη του υπόγειου αγωγού.
- Με την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας (φίλτρα διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων, παραγωγοί) είναι δυνατόν να εντοπιστεί καλύτερα η ανωμαλία που προκύπτει από το στόχο ενδιαφέροντος, βελτιώνοντας κατά πολύ την τελική ερμηνεία. Η συχνοτική ανάλυση των βαρυτικών χαρτών αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για την απομόνωση του στόχου ενδιαφέροντος με ταυτόχρονο περιορισμό του θορύβου άλλα και αποκοπή συχνοτήτων οι οποίες οφείλονται σε άλλες δομές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αποκοπή της επίδρασης της εκσκαφής (μεγάλου κύματος ανωμαλία) στην περίπτωση της γεωτεχνικής εφαρμογής με τις κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας έτσι ώστε να είναι η δυνατή η απεικόνιση στους βαρυτικούς χάρτες των ανωμαλιών που οφείλονταν στα υπόγεια έγκοιλα.

Χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν από τη διερεύνηση της **ερμηνείας των μικροβαρυτικών δεδομένων** με διδιάστατες και τριδιάστατες τεχνικές ερμηνείας:

- Η διαθέσιμη πληροφορία από άλλες γεωφυσικές μεθόδους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου κατά τη διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων. (μέγεθος κελιών αντιστροφής, μέγιστο βάθος ερμηνείας, διαστάσεις κ.α). Για παράδειγμα στην περίπτωση της γεωτεχνικής εφαρμογής οι διαστάσεις του μοντέλου ερμηνείας επιλέχτηκαν παρόμοιες με αυτές του τριδιάστατου ηλεκτρικού μοντέλου, για να υπάρχει άμεση σύγκριση.
- Για την επιτυχή αντιστροφή των μικροβαρυτικών δεδομένων οι βαρυτικές μετρήσεις, πριν εισαχθούν με την κατάλληλη μορφή στο λογισμικό Grablox, πρέπει να έχουν ήδη επεξεργαστεί με διάφορες τεχνικές για την εξάλειψη του θορύβου άλλα και την επίδραση άλλων δομών. Οι βαρυτικές τιμές οι οποίες θα ερμηνευτούν πρέπει να αφορούν όσο είναι δυνατόν τη βαρυτική ανωμαλία που προκαλεί ο στόχος έρευνας. Και στις τρεις περιπτώσεις μετά την επεξεργασία των μικροβαρυτικών δεδομένων και επιλέγοντας το βαρυτικό χάρτη που παρουσιάζει καλύτερα την ανωμαλία ενδιαφέροντος είναι δυνατή η δημιουργία μοντέλων ερμηνείας με την αντιστροφή των δεδομένων, που αποτυπώνουν με υψηλή ακρίβεια, το στόχο έρευνας.
- Τα μοντέλα ερμηνείας, τα οποία προκύπτουν από την αντιστροφή των μικροβαρυτικών δεδομένων και παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή της πυκνότητας του υπεδάφους, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη θέση του στόχου ενδιαφέροντος και δίδουν τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης τους με τα αποτελέσματα άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Και στις τρεις περιπτώσεις εφαρμογών τα τελικά βαρυτικά μοντέλα ερμηνείας παρουσίασαν υψηλή ανάλυση και συντέλεσαν κατά πολύ στη συνδυαστική γεωφυσική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων και των άλλων μεθόδων.

- *Κύριος σκοπός της ερμηνείας αποτελεί η οριοθέτηση και ο προσδιορισμός του βάθους του στόχου και όχι ο προσδιορισμός της πραγματικής κατανομής πυκνοτήτων των σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής έρευνας.*

Μέθοδος Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων

Η σεισμική μέθοδος η οποία επιλέχτηκε να διερευνηθεί για τον εντοπισμό του υπόγειου αγωγού είναι αυτή της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων. Κύριοι λόγοι αποτέλεσαν ότι η μέθοδος μπορεί να εντοπίσει με επιτυχία την αλληλουχία μεταξύ δομών που παρουσιάζουν μεταβάσεις από υψηλές σε χαμηλές ταχύτητες ως προς το βάθος. (το πρόβλημα του τυφλού στρώματος στη σεισμική διάθλαση), η μέθοδος για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιεί οικονομικό και ευέλικτο εξοπλισμό γεγονός που βοηθάει πολύ για την εφαρμογή σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές μικρού βάθους και τα επιφανειακά κύματα δεσπόζουν στις σεισμικές καταγραφές για τα βάθη ενδιαφέροντος (βασικό πρόβλημα της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης). Επιπλέον, η εφαρμογή της μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων είναι υπό διερεύνηση τα τελευταία χρόνια, γεγονός που κάνει ακόμη πιο ενδιαφέρουσα την εφαρμογή της. Τέλος ο υπολογισμός της ταχύτητας V_s 30 με τη μέθοδο των επιφανειακών κυμάτων, της ταχύτητας δηλαδή των εγκάρσιων κυμάτων στα πρώτα 30 μέτρα μιας περιοχής, αποτελεί δείκτη της καταλληλότητας του εδάφους για τη δημιουργία διαφόρων κατασκευών, θεσμοθετημένη σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο σχεδιασμός των **παραμέτρων καταγραφής των μετρήσεων** γίνεται λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο επιθυμητό βάθος διασκόπησης (δεν ξεπερνά τα 10 με 12 μέτρα περίπου για την περίπτωση του αγωγού) αλλά και τις διαστάσεις του υπόγειου στόχου. Χρησιμοποιούνται 24 γεώφωνα ιδιοσυχνότητας 4 Hz (απόσταση m μεταξύ τους για την περίπτωση του αγωγού). Ως σεισμική πηγή χρησιμοποιείται σφυρί 5kg με το σημείο της έκρηξης να βρίσκεται σε απόσταση από το πρώτο γεώφωνο (2m για την περίπτωση του αγωγού).

Η σεισμική διάταξη γεωφώνων μετακινείται κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης κάθετα στο στόχο με βήμα μετακίνησης εξαρτώμενο από το μέγεθος του στόχου (2m για την περίπτωση του αγωγού) αρχίζοντας από περιοχή μη ύπαρξης του στόχου. Πραγματοποιείται έκρηξη για κάθε θέση της σεισμικής διάταξης, όπου το παραγόμενο σεισμόγραμμα δίδει τη δυνατότητα υπολογισμού της μονοδιάστατης κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων ως προς βάθος κάτω από το κέντρο της διάταξης γεωφώνων. Σε κάθε θέση για την αύξηση της ποιότητας των μετρήσεων και τη μείωση του θορύβου, πραγματοποιούνται περισσότερες από μία εκρήξεις καταγράφοντας παράλληλα όλα τα παραγόμενα σειсмоγράμματα (μέθοδος **stacking**). Χρησιμοποιώντας την **τεχνική roll- along** και συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της μονοδιάστατης ερμηνείας είναι δυνατή η διδιάστατη διασκόπηση του υπεδάφους με τη δημιουργία του διδιάστατου χάρτη της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων.

Από την ερμηνεία των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι *παρόλο που η μέθοδος είναι ικανή να εντοπίσει παράπλευρες ανομοιογένειες, η τελική εικόνα είναι αρκετά εξομαλυμένη, παρουσιάζοντας κυρίως χαμηλή ανάλυση ως προς την οριζόντια κυρίως διεύθυνση, όσον αφορά στην οριοθέτηση του στόχου έρευνας. Αυτό φυσικά συμβαίνει διότι η κατανομή της ταχύτητας των S-κυμάτων για κάθε γραμμή διασκόπησης αποτελεί τη συνολική επίδραση της περιοχής που καλύπτει η γραμμή, παρόλο που το σημείο της μονοδιάστατης ερμηνείας βρίσκεται στο κέντρο του αναπτύγματος της γραμμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μοντέλο της ψευδοδιδιάστατης κατανομής της ταχύτητας να παρουσιάζεται εξομαλυμένο όσον αφορά στην οριζόντια διεύθυνση. Συνεπώς, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την ερμηνεία τέτοιων μοντέλων αφού η αξιοπιστία των ανωμαλιών που δημιουργούνται άλλα και η*

οριζόντια ανάλυση της μεθόδου εξαρτάται κατά πολύ από την πυκνότητα των διατάξεων που χρησιμοποιούνται (το βήμα σταδιακής μετακίνησης των τομών) αλλά κυρίως από το ανάπτυγμα της γραμμής διασκόπησης. το οποίο όσο μικρότερο είναι, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η οριζόντια ανάλυση του μοντέλου. Επιπλέον, εκτός από την οριοθέτηση των πλευρικών ανομοιογενειών ήταν δυνατός ο χαρακτηρισμός της στρωματογραφίας της περιοχής με ικανοποιητική ακρίβεια.

Η εφαρμογή **διδιάστατων τεχνικών επεξεργασίας** στο διδιάστατο χάρτη της κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων είναι δυνατή και έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση του στόχου έρευνας. Για παράδειγμα, δημιουργήθηκαν διδιάστατοι χάρτες με την εφαρμογή κυλιόμενου μέσου 5x5 και της δεύτερης παραγώγου ως προς το βάθος. Στη πρώτη περίπτωση μειώνεται η επίδραση των υψίσυχων ανωμαλιών στο μοντέλο ερμηνείας με αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση του υποκείμενου στρώματος ενώ στη δεύτερη περίπτωση τονίζονται οι μικροδιαφορές στο μοντέλο ερμηνείας με αποτέλεσμα την καλύτερη αποτύπωση του πεπερασμένου στόχου.

Άλλο ένα σημαντικό στοιχείο αποτελεί ότι τα μοντέλα ερμηνείας που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα μοντέλα ερμηνείας των άλλων μεθόδων βοηθώντας σημαντικά στο καλύτερο χαρακτηρισμό του υπεδάφους στην περιοχή έρευνας.

Επιπλέον, με σκοπό την παρατήρηση της επίδρασης του υπόγειου στόχου στο συχνοτικό πεδίο, επιλέχθηκαν να αναλυθούν αρχικά δύο τομές, από τις οποίες η πρώτη να μην περιέχει το στόχο και αντίθετα η δεύτερη να βρίσκεται πάνω από το στόχο. Έτσι εφαρμόστηκε συχνοτική ανάλυση στο σεισμόγραμμα της Τομής 1, η οποία βρίσκεται μακριά από τον υπόγειο αγωγό αλλά και της Τομής 8, όπου διέρχεται ο αγωγός περίπου στο μέσο της. Για τη συχνοτική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Seisimager, το οποίο δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του Φάσματος Ισχύος (power spectrum) από το σεισμόγραμμα κάθε τομής αντίστοιχα. Στην Τομή 1, όπου δεν υπάρχει υπόγειος στόχος στο διάγραμμα του Φάσματος Ισχύος που έχει πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση των συχνοτήτων, παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή τους κατά μήκος ολόκληρης της τομής έρευνας. Στην Τομή 8, όπου υπάρχει ο αγωγός, παρατηρείται ενεργειακή συγκέντρωση στην περιοχή όπου βρίσκεται ο αγωγός στο κανονικοποιημένο διάγραμμα του Φάσματος Ισχύος. Κατά την ανάλυση και των υπόλοιπων γραμμών έρευνας προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα.

Συνεπώς, η κυριότερη παρατήρηση αποτελεί ότι εκτός από το χάρτη διδιάστατης κατανομής της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, είναι δυνατός ο **εντοπισμός της επίδρασης ενός υπόγειου στόχου στο συχνοτικό πεδίο**. Χρησιμοποιώντας το **Φάσμα ισχύος** που προκύπτει από το αντίστοιχο σεισμόγραμμα είναι δυνατή η οριοθέτηση του στόχου έρευνας. Το υπόγειο άνοιγμα αλληλεπιδρά με το προσπίπτον επιφανειακό κύμα με αποτέλεσμα στο συχνοτικό πεδίο να παρουσιάζεται ενεργειακή συγκέντρωση σε συγκεκριμένες συχνότητες, διαγράφοντας έτσι τα όρια του υπόγειου ανοίγματος.

Είναι γεγονός ότι, η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων παρέχοντας τη δυνατότητα βελτίωσης των αποτελεσμάτων με την περαιτέρω διερεύνηση των φαινομένων στις δύο και τρεις διαστάσεις.

Μαγνητική μέθοδος

Βασική προϋπόθεση για να είναι δυνατός ο εντοπισμός ενός υπόγειου ανοίγματος με τη μαγνητική μέθοδο, αποτελεί η σημαντική διαφοροποίηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας μεταξύ του στόχου και του περιβάλλοντα χώρου. Φυσικά αυτό στην περίπτωση των υπόγειων κενών δεν είναι πάντα εφικτό αφού συνήθως οι ιζηματογενείς

σηματισμοί (συνήθεις σχηματισμοί σε μικρού βάθους εφαρμογές) παρουσιάζουν χαμηλές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας. Στην περίπτωση του εντοπισμού του αγωγού, η μαγνητική μέθοδος επιβεβαίωσε απόλυτα τον ισχυρισμό ύπαρξης του οπλισμού, παρέχοντας μοντέλα ερμηνείας υψηλής διακριτικής ικανότητας. Γενικότερα η μαγνητική έρευνα μπορεί να παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιπτώσεις υπόγειων ανοιγμάτων ανθρώπινης δραστηριότητας αφού τα μεταλλικά μέρη τέτοιων κατασκευών αποτελούν πολύ σημαντική πηγή δημιουργίας μαγνητικής ανωμαλίας, εύκολα παρατηρούμενης στην επιφάνεια του εδάφους. Αντιθέτως στην περίπτωση του εντοπισμού της αρχαίας στοάς δεν παρείχε αξιοσημείωτα αποτελέσματα.

Η μέθοδος τη διαφορικής μαγνητομέτρησης δίδει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα μειώνοντας κατά πολύ τον απαιτούμενο χρόνο για τη λήψη και την επεξεργασία των μετρήσεων (δεν απαιτούνται διορθώσεις των τιμών λόγω της χρονικής μεταβολής του μαγνητικού πεδίου) και αυξάνοντας τη διακριτική ανάλυση της μεθόδου.

Η χρησιμοποίηση όμως σταθμού βάσης επιτρέπει την επεξεργασία των δεδομένων κάθε αισθητήρα χωριστά, σε περιπτώσεις όπου ο χάρτης διαφορικής μαγνητομέτρησης δεν δίδει αρκετές πληροφορίες.

Οι γνωστές τεχνικές επεξεργασίας των μαγνητικών δεδομένων βοηθούν κατά πολύ στην καλύτερη οριοθέτηση άλλα και στην καλύτερη απεικόνιση του στόχου έρευνας.

Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση

Ο κύριος στόχος της συγκεκριμένης διατριβής αποτελεί η συνδυαστική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων. Κάθε μέθοδος και στα τρία πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ερμηνεύτηκε χωριστά και μετά πραγματοποιήθηκε η συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Πράγματι, επιβεβαιώθηκε μέσα από τη διερεύνηση και των τριών περιπτώσεων, ότι σε μια γεωτεχνική, περιβαλλοντική, αρχαιολογική ή κάθε είδους έρευνας, εάν ζητούμενο είναι ο εντοπισμός και η οριοθέτηση πιθανών υπόγειων ανοιγμάτων, **η Συνδυαστική Γεωφυσική Διερεύνηση του Υπεδάφους αυξάνει κατά πολύ την εξαγόμενη πληροφορία σχετικά με το στόχο έρευνας, σε σχέση με την εφαρμογή μιας και μόνο μεθόδου.** Η συγκριτική αξιολόγηση, όλων των μοντέλων ερμηνείας, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή κάθε μεθόδου και τα οποία αλληλοκαλύπτουν την περιοχή έρευνας, δίδει τη δυνατότητα της δημιουργίας ενός τελικού γεωφυσικού μοντέλου, το οποίο να περιγράφει και να απεικονίζει, όσο το δυνατόν καλύτερα, τη δομή του υπεδάφους και φυσικά να οριοθετεί τα όρια και τη θέση πιθανών υπόγειων ανοιγμάτων. Διάφοροι παράγοντες, όπως η γεωλογία της περιοχής έρευνας, η δομή του ίδιου του υπόγειου ανοίγματος (φυσικό κενό ή ανθρώπινη κατασκευή), επιφανειακές και τοπογραφικές ανομοιογένειες, επιδρούν καθοριστικά στην επιτυχία εφαρμογής κάθε μεθόδου, καθιστώντας δύσκολη την εξ' αρχής επιλογή της καταλληλότερης γεωφυσικής μεθόδου, δηλαδή της μεθόδου αυτής η οποία θα παρέχει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Κάθε αρχική πληροφορία σχετικά με την περιοχή και το στόχο έρευνας είναι πολύ σημαντική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για το σχεδιασμό μιας γεωφυσικής έρευνας. Σε περιπτώσεις, όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία, είναι δυνατόν η αρχική πληροφορία να προέλθει από την εφαρμογή μιας ή περισσότερων γεωφυσικών μεθόδων που παρέχουν τη δυνατότητα διασκόπησης ευρύτερων περιοχών με μέτριο απαιτούμενο χρόνο. Τέτοιο ρόλο, μπορούν να παρέχουν π.χ. οι μέθοδοι της διαφορικής μαγνητομέτρησης ή του Γεωραντάρ, όπου η λήψη των μετρήσεων περιλαμβάνει εύκολες και γρήγορες διαδικασίες υπαίθρου αλλά και η εφαρμογή διδιάστατων μη παράλληλα διατεταγμένων γραμμών διασκόπησης ηλεκτρικής τομογραφίας. Τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών, δίδουν τη δυνατότητα για την απόκτηση της επιθυμητής αρχικής πληροφορίας, ακόμα και

επί τόπου στο ύπαιθρο (in situ), με στόχο τον περαιτέρω βέλτιστο σχεδιασμό της γεωφυσικής έρευνας, με την εφαρμογή πυκνού καννάβου μετρήσεων σε περιοχές όπου μεγαλύτερη ανάλυση είναι επιθυμητή (π.χ. τριδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία, μικροβαρυτομετρία, γεωραντάρ, MASW κ.α). **Ο εξ' αρχής σχεδιασμός της έρευνας με το συνδυασμό διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων** στην περίπτωση εντοπισμού της αρχαίας στοάς αλλά και στην περίπτωση του εντοπισμού των υπόγειων εγκοίλων στη γεωτεχνική εφαρμογή, επέτρεψε να πραγματοποιηθεί μια γρήγορη, ευέλικτη και αξιόπιστη γεωφυσική έρευνα, η οποία είχε ως αποτέλεσμα ένα τελικό υπεδάφικό μοντέλο με τη μικρότερη αβεβαιότητα, προερχόμενο από τη συγκριτική αξιολόγηση όλων των αποτελεσμάτων των μεθόδων.

Εκτός από τη **συγκριτική αξιολόγηση** των γεωφυσικών μοντέλων ερμηνείας που προέρχονται από τη μεμονωμένη επεξεργασία διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων και τα οποία αλληλοκαλύπτουν την περιοχή έρευνας, μια διαφορετική προσέγγιση, όσον αφορά στο συνδυασμό μοντέλων ερμηνείας διαφορετικών γεωφυσικών μεθόδων αποτελεί η **στατιστική πολυπαραμετρική ανάλυση** (multivariate statistics).

Για να μειωθούν κυρίως προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με την υποκειμενικότητα του ερευνητή κατά την τελική ερμηνεία που προκύπτει από τη συγκριτική αξιολόγηση των διάφορων μεθόδων, είναι δυνατή η **εφαρμογή της διαδικασίας της πολυπαραμετρικής ανάλυσης των μοντέλων ερμηνείας των διαφόρων μεθόδων, με σκοπό τη δημιουργία ενός Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου Υπεδάφους (Ε.Γ.Μ.Υ.), το οποίο συνδυάζει την πληροφορία όλων των γεωφυσικών μοντέλων ερμηνείας.**

Συγκεκριμένα αναλύεται η δημιουργία ενός τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Υπεδάφικού Μοντέλου (Ε.Γ.Μ.Υ), που παρουσιάζει την κατανομή των διάφορων μετρούμενων παραμέτρων του υπεδάφους, συνδυάζοντας όλα τα γεωφυσικά μοντέλα ερμηνείας, που προκύπτουν από τις διάφορες γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, με κύριο στόχο τη βέλτιστη συνδυαστική γεωφυσική διερεύνηση του υπεδάφους όσον αφορά τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων.

Για να επιτευχθεί η δημιουργία του Ε.Γ.Μ.Υ χρησιμοποιείται η τεχνική συσταδοποίησης «fuzzy c means». Με το όρο συσταδοποίηση (clustering) εννοούμε τη στατιστική διαδικασία με την οποία προσπαθούμε να οργανώσουμε διάφορα δεδομένα σε ομάδες (clusters), οι οποίες δεν είναι από πριν γνωστές, αλλά προκύπτουν δυναμικά.

Η εφαρμογή της πολυπαραμετρικής ανάλυσης σε συνθετικά δεδομένα, σε πραγματικά δεδομένα ελεγχόμενων συνθηκών άλλα και σε δεδομένα, τα οποία αφορούσαν ένα πραγματικό γεωτεχνικό πρόβλημα, διερεύνησαν και ανέδειξαν επιτυχία τη δυνατότητα εφαρμογής της δημιουργίας του Ε.Γ.Μ.Υ., όσον αφορά τις μεθόδους οι οποίες αναλύθηκαν.

Επιπλέον, με την εφαρμογή διαδικασίας η οποία αναπτύχθηκε και προτείνεται στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή, είναι δυνατή η βέλτιστη επιλογή και απεικόνιση ενός **Τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.)**, όσον αφορά στον εντοπισμό και την οριοθέτηση υπόγειων ανοιγμάτων.

Κύρια πλεονεκτήματα της διαδικασίας συνδυαστικής ερμηνείας των διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων με την πολυπαραμετρική ανάλυση αποτελεί το γεγονός ότι:

1. είναι δυνατή η ανταλλαγή «πληροφορίας» μεταξύ των διάφορων μεθόδων, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης συγκεκριμένων σχέσεων-συναρτήσεων για την αλληλοσυσχέτιση των παραμέτρων των διαφόρων ερμηνευμένων μοντέλων και
2. αποτελεί μια αντικειμενική διαδικασία συνδυαστικής ερμηνείας σε σχέση με την απλή συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διάφορων μεθόδων, δίδοντας τη δυνατότητα σύγκρισης της ερμηνείας, η οποία προκύπτει από τις δύο προσεγγίσεις
3. η απεικόνιση και η κατανόηση του Τελικού Ενοποιημένου Γεωφυσικού Μοντέλου του Υπεδάφους (Τ.Ε.Γ.Μ.Υ.), μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή, σε μελετητές και

ερευνητές διάφορων ειδικοτήτων για την περαιτέρω αξιοποίηση της παρεχόμενης πληροφορίας, χωρίς να είναι απαραίτητη εξειδικευμένη τεχνογνωσία σχετικά με την Εφαρμοσμένη Γεωφυσική.

Φυσικά, η ανάλυση και η αξιοπιστία του Τ.Ε.Γ.Μ.Υ εξαρτάται σημαντικά από τη διακριτική ικανότητα και τους περιορισμούς που προκύπτουν από τα μοντέλα ερμηνείας των γεωφυσικών μεθόδων που συνδυάζονται.

Επιπλέον, η χρήση του Τ.Ε.Γ.Μ.Υ ως αρχικό μοντέλο για την αντιστροφή δεδομένων διάφορων γεωφυσικών δεδομένων, σε συνθετικά δεδομένα έδειξε ότι μπορεί να βελτιώσει την τελική ερμηνεία, με την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων κατά τη διάρκεια αντιστροφής, χωρίς την ανάγκη άμεσης σύνδεσης των μετρούμενων δεδομένων με καθορισμένη σχέση-συνάρτηση.

Συμπερασματικά, η έρευνα για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της κάθε γεωφυσικής μεθόδου για τον εντοπισμό υπόγειων ανοιγμάτων στο υπέδαφος κατέληξε στη βέλτιστη μεθοδολογία τόσο στη στρατηγική λήψης των μετρήσεων όσο και στην επεξεργασία και την ερμηνεία τους. Το τελικό αποτέλεσμα είναι το Ενοποιημένου Γεωφυσικό Μοντέλο Υπεδάφους (Ε.Γ.Μ.Υ.).

Η περαιτέρω διερεύνηση της εφαρμογής του Τ.Ε.Γ.Μ.Υ. στις τρεις διαστάσεις αλλά και η σύνδεση των αποτελεσμάτων της συνδυαστικής γεωφυσικής διερεύνησης με άλλες παραμέτρους όπως π.χ. γεωτεχνικές ή και γεωθερμικές παραμέτρους, με τη χρησιμοποίηση της πολυπαραμετρικής ανάλυσης μπορεί να αποτελέσει ένα νέο σημαντικότερο πεδίο έρευνας της εφαρμοσμένης γεωφυσικής για μικρού βάθους εφαρμογές.

Παράρτημα Ι :

Βασικές Αρχές Λειτουργίας & Ερμηνείας Γεωφυσικών Μεθόδων

I.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

I.1.1 Βασικές Έννοιες της Ηλεκτρικής Μεθόδου

Σκοπός της ηλεκτρικής μεθόδου είναι να καθορίσει την κατανομή της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος με τη λήψη μετρήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. Από αυτές τις μετρήσεις είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η πραγματική ειδική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους. Η αντίσταση του υπεδάφους σχετίζεται με διάφορες γεωλογικές παραμέτρους όπως την περιεκτικότητα σε ορυκτά και ρευστά, το πορώδες και το βαθμό κορεσμού του νερού στο πέτρωμα.

Ο θεμελιώδης Φυσικός νόμος που ισχύει στις γεωηλεκτρικές έρευνες είναι ο νόμος του Ohm, ο οποίος περιγράφει τη ροή του ρεύματος στο υπέδαφος. Η εξίσωση του νόμου του Ohm, σε διανυσματική μορφή για τη ροή του ρεύματος σε ένα ομογενές μέσο είναι :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{εξίσωση I.1})$$

Όπου σ είναι η ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα του μέσου (S/m), \mathbf{J} η πυκνότητα του ρεύματος (A/m) και \mathbf{E} η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m). Στις γεωηλεκτρικές έρευνες συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος ειδική αντίσταση ρ (Ohm.m), που ισούται με το αντίστροφο της ειδικής αγωγιμότητας ($\sigma=1/\rho$) με μονάδες το Ohm.m. Η σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου δίδεται από τη βαθμίδα του δυναμικού από τη σχέση:

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi \quad (\text{εξίσωση I.2})$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις I.1., I.2 προκύπτει :

$$\mathbf{J} = -\sigma\nabla\Phi \quad (\text{εξίσωση I.3})$$

Σε όλες σχεδόν τις έρευνες, οι πηγές ρεύματος είναι στη μορφή σημειακών πηγών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, σε ένα στοιχειώδη όγκο ΔV που περικλείει μια πηγή ρεύματος \mathbf{I} , που βρίσκεται σε θέση (x_s, y_s, z_s) , η σχέση μεταξύ της πυκνότητας ρεύματος και του ρεύματος (Dey and Morrison, 1979) δίδεται από την εξίσωση:

$$\nabla J = \left[\frac{I}{\Delta V} \right] \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (\text{εξίσωση I.4})$$

όπου δ είναι η εξίσωση Dirac. Η εξίσωση I.4 μπορεί να γραφτεί επίσης ως :

$$-\nabla x[\sigma(x, y, z)\nabla\phi(x, y, z)] = \left[\frac{I}{\Delta V} \right] \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (\text{εξίσωση I.5})$$

Αυτή είναι η βασική εξίσωση η οποία δίνει την κατανομή του δυναμικού στο υπέδαφος λόγω μιας σημειακής πηγής. Ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών έχει αναπτυχθεί για την επίλυση της. **Αυτό είναι το λεγόμενο πρόβλημα της Ευθέως Λύσης (Forward Problem).**

Η πιο απλή περίπτωση περιλαμβάνει ένα ομογενή ημιχώρο και μια σημειακή πηγή στην επιφάνεια του εδάφους. Σε αυτήν την περίπτωση το ρεύμα ρέει ακτινικά από την πηγή και το δυναμικό μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από την πηγή. Οι ισοδυναμικές γραμμές έχουν ημισφαιρικό σχήμα και οι ρευματικές γραμμές ρέουν κάθετα στις ισοδυναμικές γραμμές (Εικ. I.1).

Το δυναμικό δίνεται σε αυτή την περίπτωση από την εξίσωση :

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad \text{(εξίσωση I.6)}$$

όπου r , η απόσταση ενός σημείου από το πρώτο ηλεκτρόδιο.



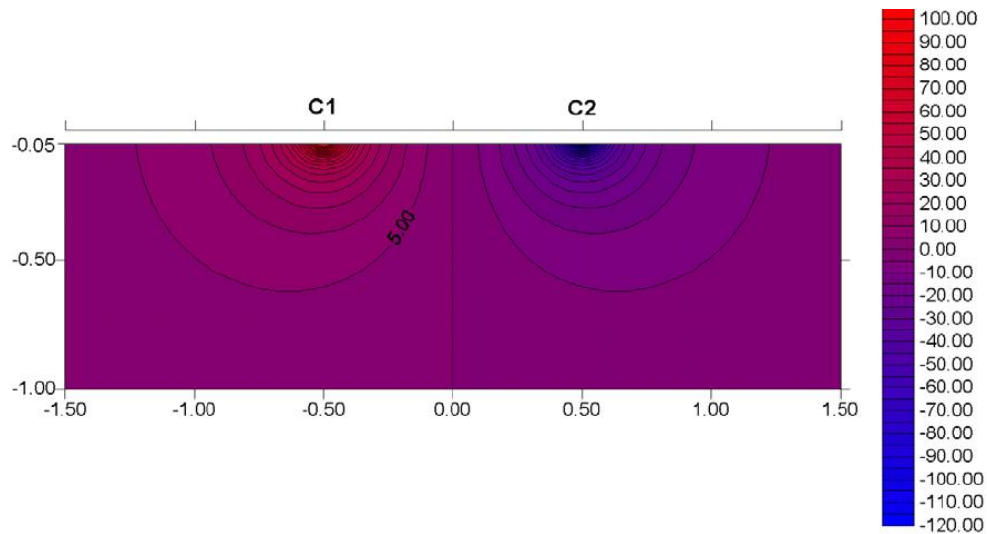
Εικόνα I.1 : Διάδοση του ρεύματος και κατανομή των δυναμικών γραμμών λόγω σημειακής πηγής σε ομογενή ημιχώρο.

Συνήθως, χρησιμοποιούνται κατ' ελάχιστον 2 ηλεκτρόδια, μια θετική και μία αρνητική πηγή ρεύματος. Στην Εικόνα I.2 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού που δημιουργείται από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων. Οι δυναμικές γραμμές παρουσιάζουν συμμετρία σε σχέση με την κάθετη γραμμή που περνά από το μέσο μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Το δυναμικό δίνεται σε αυτή την περίπτωση από την εξίσωση :

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{c1}} - \frac{1}{r_{c2}} \right] \quad \text{(εξίσωση I.7)}$$

όπου r_{c1}, r_{c2} οι αποστάσεις ενός σημείου από το πρώτο και το δεύτερο ηλεκτρόδιο αντίστοιχα



Εικόνα I.2 : Κατανομή του δυναμικού που δημιουργείται από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων σε ομογενή ημιάωρο (Loke,2003).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου στην πράξη, η βασική διαδικασία μέτρησης είναι η εξής: για κάθε μέτρηση χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια τα οποία εισάγονται στο έδαφος σε ένα βάθος και σε αποστάσεις μεταξύ τους που ποικίλουν από μερικά μέτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Χρησιμοποιείται όργανο μέτρησης το οποίο συνδέεται με τα ηλεκτρόδια μέσω καλωδίων. Διαβιβάζεται συνεχές έντασης ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στη γη με δυο ηλεκτρόδια ρεύματος C1, C2 και μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού P1, P2

Η διαφορά δυναμικού τότε δίνεται από την εξίσωση :

$$\Delta\phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{c1p1}} - \frac{1}{r_{c2p1}} - \frac{1}{r_{c1p2}} - \frac{1}{r_{c2p2}} \right] \quad (\text{εξίσωση I.8})$$

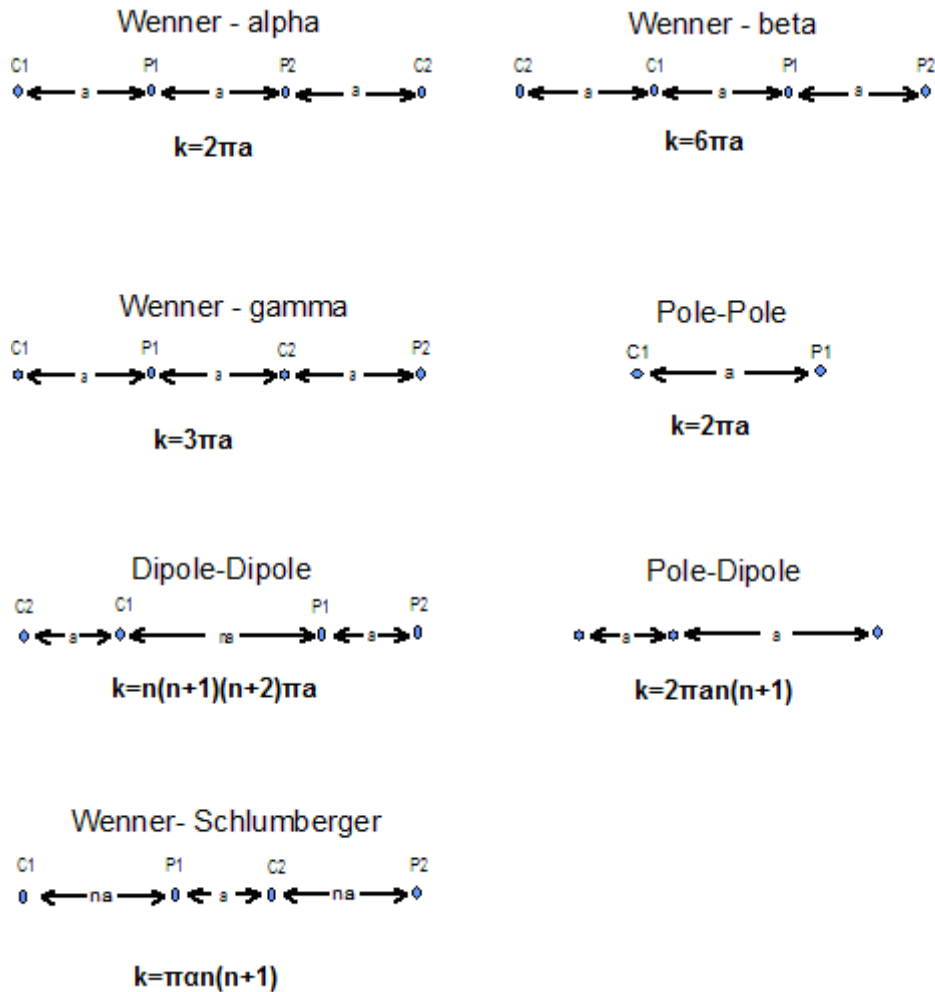
Από τις τιμές ρεύματος (I) και δυναμικού ($\Delta\phi$) υπολογίζεται μια φαινόμενη ειδική αντίσταση (ρ_a) από τη σχέση

$$\rho_a = k \frac{\Delta\phi}{I} \quad (\text{εξίσωση I.9})$$

όπου k είναι ο γεωμετρικός παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από τη διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων :

$$k = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{r_{c1p1}} - \frac{1}{r_{c2p1}} - \frac{1}{r_{c1p2}} - \frac{1}{r_{c2p2}} \right]} \quad (\text{εξίσωση I.10})$$

Οι συνήθεις διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στις γεωηλεκτρικές έρευνες και ο γεωμετρικός παράγοντας για κάθε μία παρουσιάζονται στην Εικόνα I.3



Εικόνα I.3: Συνήθεις διατάξεις Ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται στην Ηλεκτρική τομογραφία

Η μετρούμενη ειδική αντίσταση ρ δεν αποτελεί την πραγματική ειδική αντίσταση του υπεδάφους αλλά τη φαινόμενη ειδική αντίσταση.

Ο καθορισμός της πραγματικής ειδικής αντίστασης από τη φαινόμενη ειδική αντίσταση αποτελεί το λεγόμενο πρόβλημα *αντιστροφής των δεδομένων* (inverse problem).

1.1.2 Ειδική Αντίσταση Πετρωμάτων

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση των υλικών της γης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Κυρίως το βαθμό ρωγμάτωσης και το ποσοστό των ρωγμών που είναι γεμάτο με νερό. Έτσι ένα συγκεκριμένο πέτρωμα μπορεί να εμφανίζει διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης, π.χ. από 1000 μέχρι $10^6 \Omega\text{m}$, που οφείλονται στην ύπαρξη ή μη νερού στις ρωγμές. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό στον προσδιορισμό ρηγμάτων και αποσαθρωμένων σχηματισμών, δομών που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά την κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων.

Τα ιζηματογενή πετρώματα, που έχουν συνήθως μεγαλύτερο πορώδες και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό, έχουν μικρότερες τιμές ειδικής αντιστάσεως εν σύγκριση με τα πυριγενή και τα μεταμορφωμένα πετρώματα. Οι τιμές των ειδικών αντιστάσεων τους κυμαίνονται από 10 έως 10.000 Ωm , με πιο συνηθισμένες εκείνες κάτω των 1.000 Ωm . Οι τιμές εξαρτώνται κυρίως από το πορώδες και την αλμυρότητα του περιεχόμενου νερού.

Τα χαλαρά ιζήματα έχουν συνήθως ακόμα χαμηλότερες τιμές ειδικών αντιστάσεων από τα ιζηματογενή πετρώματα, με τιμές που κυμαίνονται από 10 έως λιγότερα από 1.000 Ωm . Η τιμή της ειδικής αντίστασης εξαρτάται και πάλι από το πορώδες καθώς και από την περιεκτικότητα σε άργιλο. Τα αργιλικά εδάφη έχουν κανονικά χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης από τα αμμώδη εδάφη. Παρόλα αυτά, πολλές φορές οι τιμές των ειδικών αντιστάσεων διαφορετικών ειδών πετρωμάτων και εδαφών συμπίπτουν. Αυτό συμβαίνει γιατί η τιμή της ειδικής αντίστασης ενός συγκεκριμένου πετρώματος ή εδαφικού δείγματος εξαρτάται από παράγοντες όπως το πορώδες, ο βαθμός κορεσμού και η περιεκτικότητα των διαλυμένων σε αυτά αλάτων. Η ειδική αντίσταση του εδαφικού νερού ποικίλει από 10 έως 100 Ωm εξαρτώμενη κυρίως από την περιεκτικότητά του σε άλατα. Άλλωστε η εξαιρετικά χαμηλή τιμή της ειδικής αντίστασης του θαλάσσιου νερού, περίπου 0,2 Ωm , οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητά του σε αλάτι.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ειδικές αντιστάσεις διαφόρων σχηματισμών.

Πίνακας 1.1: Συνήθεις ειδικές αντιστάσεις διαφόρων υλικών της γης.

Υλικό	Ειδική αντίσταση ($\Omega\text{m}\cdot\text{m}$)
Αέρας	∞
γρανίτης	$100 - 1 \cdot 10^{16}$
Γάβρος	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$
βασάλτης	$10 - 1 \cdot 10^7$
ασβεστόλιθοι	$50 - 1 \cdot 10^7$
ψαμμίτες	$1 - 1 \cdot 10^8$
σχιστόλιθοι	$20 - 2 \cdot 10^3$
δολομίτης	10- 10.000
Άμμος	1-1.000
άργιλος	1-100
εδαφικό νερό	0,5 - 300
θαλασσινό νερό	0,2

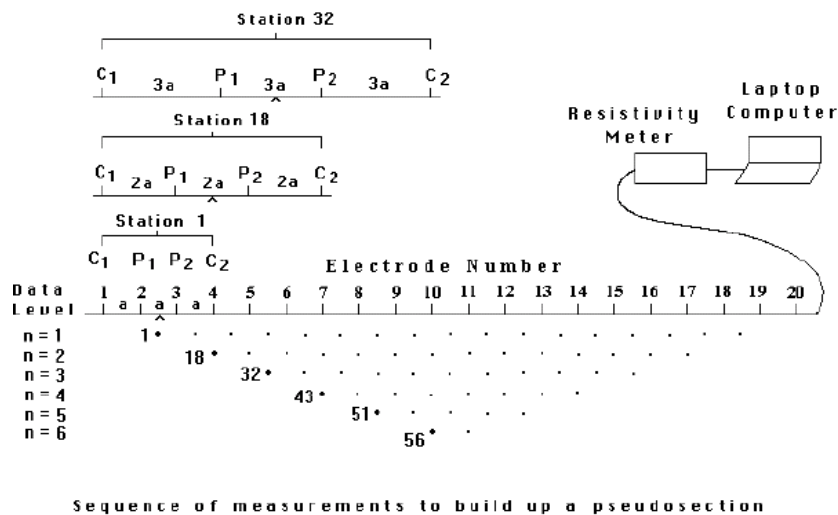
I.1.3 Ηλεκτρική Τομογραφία

Η ταχεία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε υπολογιστική ισχύ και ταχύτητα την τελευταία εικοσαετία, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη, βελτίωση και προσαρμογή των μαθηματικών μεθόδων αντιστροφής στο χώρο της γεωφυσικής επιστήμης, με παράλληλη ανάπτυξη σύγχρονων λογισμικών πακέτων για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Η προσαρμογή των μεθόδων της δισδιάστατης και τρισδιάστατης αντιστροφής στη γεωηλεκτρική έρευνα είναι ευρέως γνωστή ως σήμερα ως **γεωηλεκτρική τομογραφία** με εφαρμογές στην τεχνική και περιβαλλοντική γεωλογία, στην αρχαιολογία, στην υδρογεωλογία κτλ.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της γεωηλεκτρικής τομογραφίας είναι ότι αντιμετωπίζει σύνθετες γεωλογικές δομές, αίροντας τις παραδοχές της μονοδιάστατης προσέγγισης. Τα γεωηλεκτρικά μοντέλα ερμηνείας απεικονίζουν είτε τη χωρική κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ως προς το βάθος (διδιάστατη ερμηνεία), είτε τη χωρική κατανομή της ειδικής αντίστασης σε διάφορα βάθη (τριδιάστατη ερμηνεία)

Μια διασκόπηση που γίνεται με σκοπό τη δισδιάστατη χαρτογράφηση, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων που είναι συνδεδεμένα με ένα πολύκλωνο καλώδιο (Ghriffiths and Barker, 1993). Ένας υπολογιστής μαζί με ένα ηλεκτρονικό διακόπτη χρησιμοποιούνται για να επιλέξουν αυτόματα τα τέσσερα ηλεκτρόδια που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε μέτρηση.

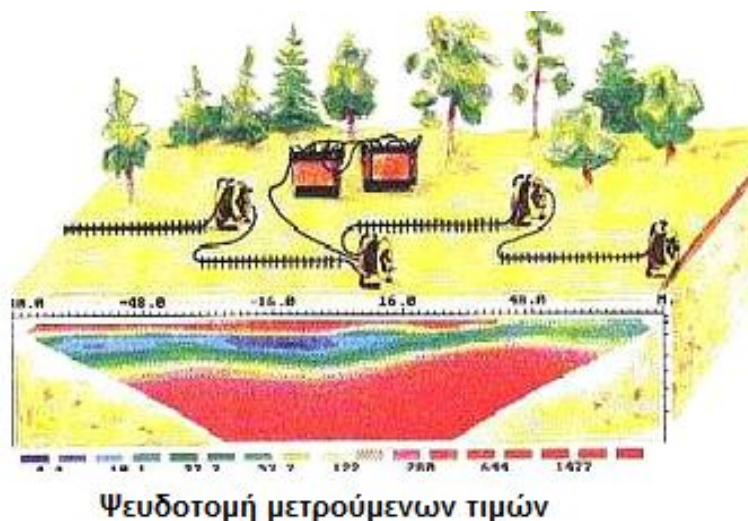
Στην Εικόνα I.4 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη για διδιάστατη διασκόπηση (τομογραφία) με τα ηλεκτρόδια ανεπτυγμένα εν σειρά και συνδεδεμένα μέσω του καλωδίου. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ίση. Το πολύκλωνο καλώδιο συνδέεται με τον ηλεκτρονικό διακόπτη που συνδέεται με έναν υπολογιστή. Η σειρά των μετρήσεων, η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί και άλλες παράμετροι (όπως η ένταση του ρεύματος που θα διοχετευτεί) προσδιορίζονται συνήθως σε ένα πρωτόκολλο δεδομένων, το οποίο προσδιορίζει εξ' αρχής ο ερευνητής. Με την ανάγνωση των δεδομένων, επιλέγονται αυτόματα τα κατάλληλα ηλεκτρόδια για κάθε μέτρηση.



Εικόνα I.4 : Διάταξη των ηλεκτροδίων για τη διεξαγωγή μιας δισδιάστατης διασκόπησης και η σειρά των μετρήσεων που θα γίνουν με σκοπό τη δημιουργία μιας ψευδοτομής (Loke 2003).

Τα δεδομένα από την εφαρμογή της διδιάστατης τομογραφίας παρουσιάζονται σε μορφή **ψευδοτομών** (μετρούμενες τιμές ειδικής αντίστασης) οι οποίες δίδουν μία πρώτη εικόνα της μεταβολής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους (Εικ. I.5). Φυσικά όμως, οι

μετρούμενες τιμές δεν εξαρτώνται μόνο από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος αλλά και από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Ακόμη και για ένα απλό στόχο, έχουμε διαφορές στις ψευδοτομές ανάλογα με τη διάταξη των ηλεκτροδίων.

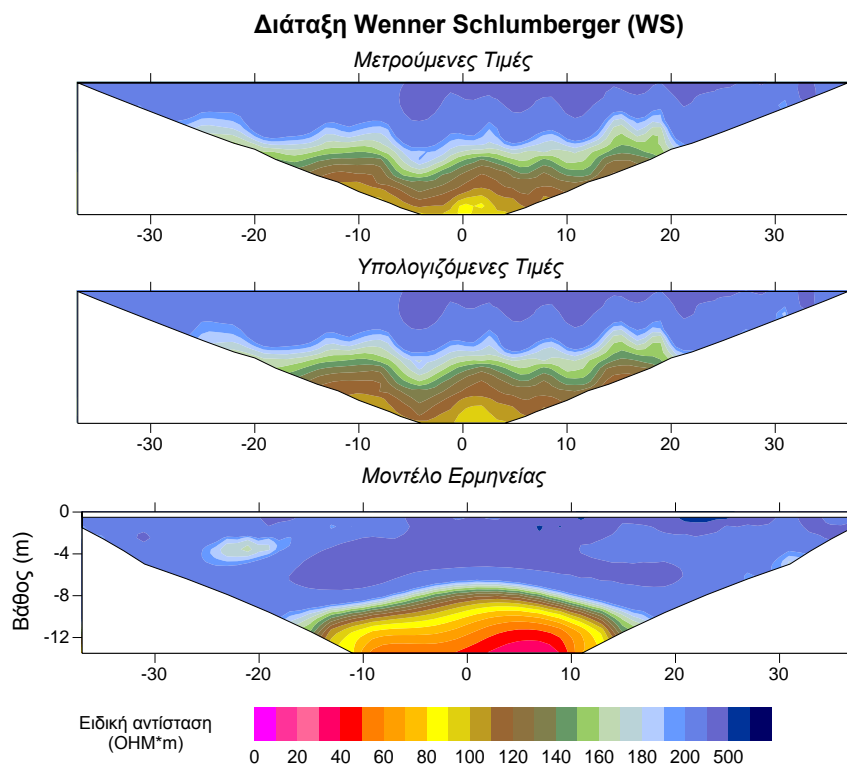


Εικόνα I.5 : Οι μετρούμενες τιμές στο ύπαιθρο δεν αποτελούν τις πραγματικές ειδικές αντιστάσεις του υπεδάφους αλλά τις φαινόμενες.

Για να αποκτηθεί η κατανομή της πραγματική ειδικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η **αντιστροφή** των μετρούμενων τιμών ειδικής αντίστασης (φαινόμενες αντιστάσεις).

Η βασική ιδέα της θεωρίας αντιστροφής στις γεωφυσικές μεθόδους αποτελεί η εύρεση ενός μοντέλου, του οποίου η απόκριση να είναι παρόμοια με τις μετρούμενες τιμές στο ύπαιθρο. Το μοντέλο είναι μια ιδεατή μαθηματική παρουσίαση ενός τμήματος του υπεδάφους. Το μοντέλο αποτελείται από ένα σύνολο από παραμέτρους (model parameters) οι οποίες είναι οι φυσικές ποσότητες που είναι επιθυμητό να υπολογιστούν από τα παρατηρούμενα δεδομένα (observed data). Στη περίπτωση της ηλεκτρικής τομογραφίας οι παράμετροι του μοντέλου είναι οι πραγματικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους ενώ τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι οι μετρούμενες ειδικές αντιστάσεις στο ύπαιθρο.

Η απόκριση του μοντέλου (model response) είναι τα συνθετικά δεδομένα τα οποία μπορούν να υπολογιστούν από μαθηματικές σχέσεις και καθορίζουν το μοντέλο για μια συγκεκριμένη σειρά παραμέτρων. Στη περίπτωση της ηλεκτρικής τομογραφίας τα συνθετικά δεδομένα είναι οι υπολογιζόμενες τιμές ειδικής αντίστασης



Εικόνα I.6: Παράδειγμα ψευδοτομών μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών και το τελικό μοντέλο ερμηνείας.

Όλες οι μέθοδοι αντιστροφής πρακτικά προσπαθούν να καθορίσουν ένα μοντέλο του υπεδάφους του οποίου η απόκριση να συμφωνεί με τα μετρούμενα δεδομένα με την εφαρμογή διάφορων περιορισμών (Loke 2003). Σε όλες τις μεθόδους αντιστροφής, ένα αρχικό μοντέλο τροποποιείται με επαναληπτική διαδικασία έτσι ώστε η διαφορά μεταξύ της απόκρισης του μοντέλου και των παρατηρούμενων δεδομένων να μειωθεί.

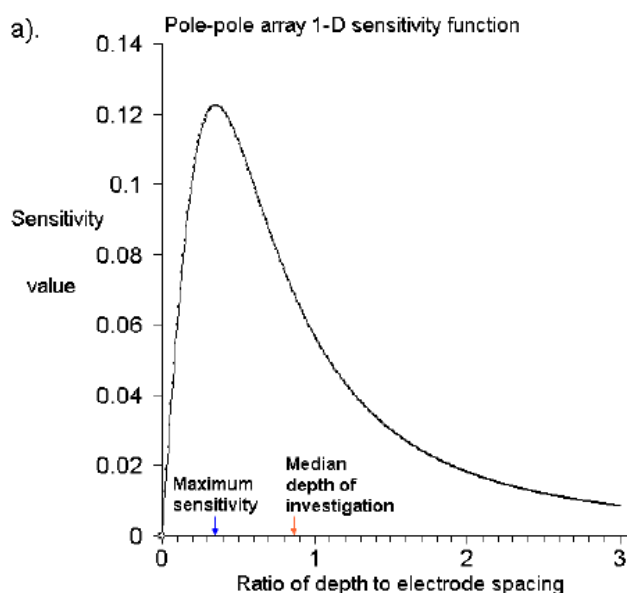
1.1.3.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Διατάξεων Ηλεκτροδίων στην Ηλεκτρική Τομογραφία

Κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας, σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων. Η επιλογή της καταλληλότερης διάταξης για την έρευνα μιας περιοχής εξαρτάται κυρίως από το είδος του στόχου, την ευαισθησία του οργάνου και το επίπεδο θορύβου στην περιοχή. Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την ορθότερη επιλογή είναι (Loke 2003):

- Το βάθος διασκόπησης.
- Η ευαισθησία της διάταξης σε κάθετες και οριζόντιες ανομοιογένειες του υπεδάφους.
- Η οριζόντια ικανότητα διασκόπησης της διάταξης (horizontal data coverage).
- Η Ποιότητα του σήματος (signal strength).

Τα δύο πρώτα χαρακτηριστικά μπορούν να ερευνηθούν με τη συνάρτηση ευαισθησίας της κάθε διάταξης για ομογενές υπεδάφικό μοντέλο. **Η συνάρτηση ευαισθησίας, πρακτικά, παρουσιάζει το βαθμό, που μια μεταβολή στην ειδική αντίσταση μιας περιοχής του υπεδάφους θα επηρεάσει το μετρούμενο δυναμικό μιας διάταξης.** Όσο μεγαλύτερη η τιμή ευαισθησίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιδραση της συγκεκριμένης περιοχής στο υπέδαφος.

Επιπλέον, οι Edwards (1977) και Barker (1991) χρησιμοποιώντας την εξίσωση «χαρακτηριστικού βάθους διασκόπησης» (Roy and Apparao 1971), όρισαν το μέσο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation) μιας διάταξης (Εικ. 1.7).



Εικόνα 1.7 : Η καμπύλη μονοδιάστατης συνάρτησης ευαισθησίας για τη διάταξη Pole Pole. Με κόκκινο βέλος παρουσιάζεται το μέσο βάθος διασκόπησης, το οποίο δεν συμπίπτει με το σημείο μέγιστης ευαισθησίας (Loke 2003).

Ο πίνακας 1.2 δίδει το «μέσο βάθος διασκόπησης» για διάφορες διατάξεις. Για τον καθορισμό του μέγιστου βάθους διασκόπησης μιας συγκεκριμένης διάταξης, αρκεί να

πολλαπλασιαστεί η μέγιστη τιμή του «a» ή το μέγιστο μήκος του αναπτύγματος «L», με τον αντίστοιχο παράγοντα βάθους, ο οποίος δίδεται στον Πίνακα I.2.

Πίνακας I.2 : Το μέσο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation), ο γεωμετρικός παράγοντας (για a=1) και ο αντίστροφος του, για μετρήσεις με διαφορετικά a & n για διάφορες διατάξεις (Loke, 2003 ; Edwards, 1977)

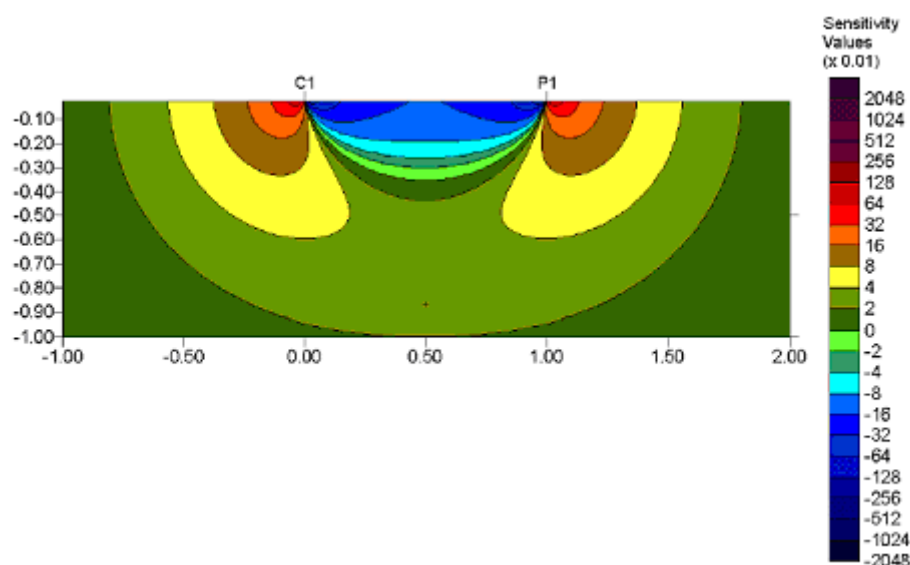
Διάταξη Ηλεκτροδίων	Ze/a	Ze/L	Γεωμετρικός Παράγοντας	Αντίστροφος Γεωμετρικού Παράγοντα
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832	0.15915
Wenner Beta	0.416	0.139	18.850	0.05305
Wenner Gamma	0.594	0.198	9.4248	0.10610
Dipole-dipole				
n = 1	0.416	0.139	18.850	0.05305
n = 2	0.697	0.174	75.398	0.01326
n = 3	0.962	0.192	188.50	0.00531
n = 4	1.220	0.203	376.99	0.00265
n = 5	1.476	0.211	659.73	0.00152
n = 6	1.730	0.216	1055.6	0.00095
n = 7	1.983	0.220	1583.4	0.00063
n = 8	2.236	0.224	2261.9	0.00044
Equatorial dipole-dipole				
n = 1	0.451	0.319	21.452	0.04662
n = 2	0.809	0.362	119.03	0.00840
n = 3	1.180	0.373	367.31	0.00272
n = 4	1.556	0.377	841.75	0.00119
Wenner - Schlumberger				
n = 1	0.519	0.173	6.2832	0.15915
n = 2	0.925	0.186	18.850	0.05305
n = 3	1.318	0.189	37.699	0.02653
n = 4	1.706	0.190	62.832	0.01592
n = 5	2.093	0.190	94.248	0.01061
n = 6	2.478	0.191	131.95	0.00758
n = 7	2.863	0.191	175.93	0.00568
n = 8	3.247	0.191	226.19	0.00442
n = 9	3.632	0.191	282.74	0.00354
n = 10	4.015	0.191	345.58	0.00289
Pole-dipole				
n = 1	0.519		12.566	0.07958
n = 2	0.925		37.699	0.02653
n = 3	1.318		75.398	0.01326
n = 4	1.706		125.66	0.00796
n = 5	2.093		188.50	0.00531
n = 6	2.478		263.89	0.00379
n = 7	2.863		351.86	0.00284
n = 8	3.247		452.39	0.00221
Pole-Pole	0.867		6.28319	0.15915

Επιπλέον, στον Πίνακα I.2 εκτός από το μέσο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation) διάφορων διατάξεων, παρουσιάζεται και ο γεωμετρικός παράγοντας **k** για a= 1.0 m. Ο αντίστροφος του γεωμετρικού παράγοντα παρέχει μια ένδειξη του μετρούμενου δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού, παρέχοντας πληροφορία για την ισχύ του σήματος.

Διάταξη Pole Pole (PP)

Στη διάταξη Pole Pole (PP), τα ηλεκτρόδια ρεύματος (P_2) και δυναμικού (V_2) πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση περίπου 10- 20 φορές μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων C_1 - P_1 . Η επίδραση του ηλεκτροδίου C_2 (αντίστοιχα και του P_2) είναι περίπου ανάλογη του λόγου της απόστασης των C_1 - P_1 προς την απόσταση των C_2 - P_1 . Έτσι ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι μπορεί να προκύψουν πρακτικά προβλήματα για την τοποθέτηση των απομακρυσμένων ηλεκτροδίων σε κατάλληλη θέση.

Η κατανομή ευαισθησίας για ένα συγκεκριμένο ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού της διάταξης αυτής, παρουσιάζεται στην Εικόνα I.8 .



Εικόνα I.8: Κατανομή ευαισθησίας μέτρησης με τη διάταξη Pole Pole (PP). (Loke 2003)

Βάθος διασκόπησης

Η Pole Pole (PP) έχει το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation, Πίνακας 2.2.2) από όλες τις διατάξεις για συγκεκριμένο μήκος γραμμής διασκόπησης. Το μέσο βάθος διασκόπησης είναι $H = 0,867 a$, όπου a είναι η απόσταση μεταξύ των C_1 - P_1 .

Οριζόντια κάλυψη (horizontal coverage)

Από την κατανομή των μετρήσεων κατά μήκος της γραμμής διασκόπησης προκύπτει ότι έχει την ευρύτερη οριζόντια κάλυψη, γεγονός που την κάνει ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις ερευνών με μικρά αναπτύγματα.

Ευαισθησία σε οριζόντιες και κάθετες ανομοιογένειες:

Παρουσιάζει αρκετά μεγάλη ευαισθησία σε κάθετες ανομοιογένειες, με αποτέλεσμα να ενδείκνυται για τον εντοπισμό οριζόντιων μεταβολών στην ειδική αντίσταση. Αντιθέτως έχει χαμηλή ευαισθησία σε οριζόντιες ανομοιογένειες με αποτέλεσμα το μη ακριβή υπολογισμό του βάθους οριζόντιων δομών. Τα παραπάνω γίνονται αντιληπτά από τις έντονες ή μη μεταβολές της ευαισθησίας οριζόντια και κάθετα αντίστοιχα.

Ποιότητα σήματος (signal strength):

Η μεγάλη απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού δίδει μεγαλύτερο σήμα στη διάταξη Pole Pole (PP) σε σχέση με τις άλλες διατάξεις και για αυτό η ένταση του ρεύματος δεν απαιτείται να αυξάνει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Από την άλλη πλευρά, όμως, το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο δυναμικού ενισχύει την επίδραση του τελουρικού και άλλων τύπων θορύβου, ο οποίος είναι ανάλογος του μήκους του δίπολου δυναμικού, με αποτέλεσμα πολλές φορές ο λόγος σήματος προς θόρυβο να είναι δύσκολο να προβλεφθεί (Robain, 1999).

Διάταξη Pole Dipole (PD)

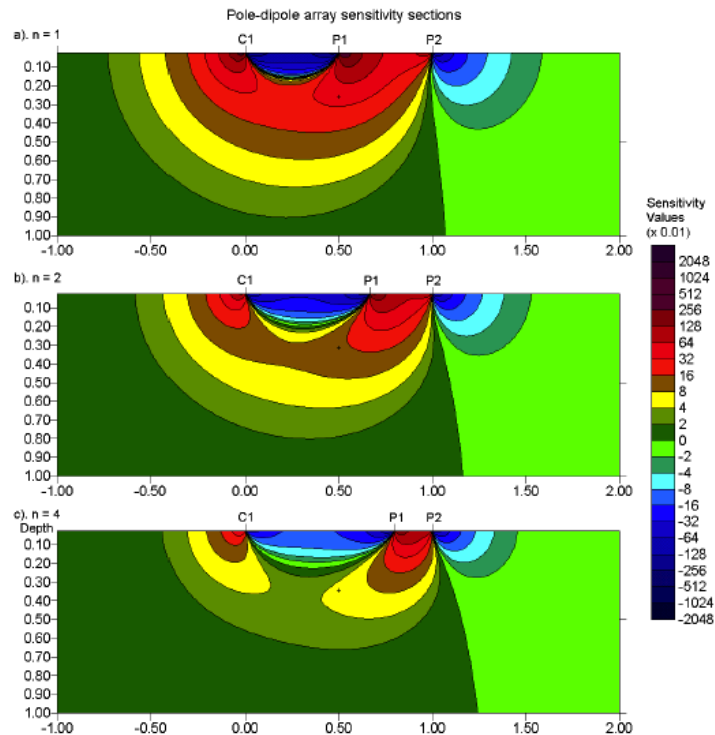
Για τη διάταξη Pole Dipole (PD) απαιτείται ένα απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο, (C_2) ηλεκτρόδιο, το οποίο πρέπει να τοποθετείται σε ικανοποιητική απόσταση από τη θέση της διάταξης. Απόσταση 5 με 10 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη απόσταση των $P_1 - C_1$ επηρεάζει τις μετρήσεις λιγότερο από 5%.

Κύριο μειονέκτημα είναι ότι είναι ασύμμετρη διάταξη. Δηλαδή ακόμα και συμμετρικοί στόχοι δημιουργούν ασύμμετρες ανωμαλίες στις ψευδοτομές μετρούμενων ειδικών αντιστάσεων. Πολλές φορές, το τελικό μοντέλο ερμηνείας (inverse model) μπορεί να επηρεαστεί λόγω της ασυμμετρίας στις μετρούμενες τιμές ειδικής αντίστασης. Ένας τρόπος να εξαλειφθεί η επίδραση αυτή είναι η επανάληψη των μετρήσεων αντίστροφα. Γεγονός όμως που χρειάζεται διπλάσιο αριθμό μετρήσεων άρα και διπλάσιο τουλάχιστον χρόνο έρευνας στο ύπαιθρο. Επίσης, όπως και στη διάταξη Pole Pole (PP), μπορεί να υπάρξουν πρακτικά προβλήματα για την τοποθέτηση του απομακρυσμένου ηλεκτροδίου.

Η κατανομή ευαισθησίας για τη Pole Dipole (PD) για $n=1,2,4$ παρουσιάζεται στην Εικόνα I.10

Βάθος διασκόπησης

Η Pole Dipole (PD) έχει αρκετά μεγάλο βάθος διασκόπησης για ένα συγκεκριμένο μήκος γραμμής διασκόπησης. Το μέσο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation) σχετίζεται με τις αποστάσεις μεταξύ ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού \mathbf{a} και \mathbf{n} . Για παράδειγμα όταν $n=1$, το ψευδοβάθος ισούται με $H=0.519a$. (Πίνακας I.2).



Εικόνα I.9: Οι συναρτήσεις ευαισθησίας για τη διάταξη Pole Dipole (PD) για $n=1,2,4$ (Loke 2003).

Οριζόντια κάλυψη (horizontal coverage)

Η διάταξη Pole Dipole (PD) έχει αρκετά καλή οριζόντια κάλυψη (μεγαλύτερη από τις διατάξεις Dipole Dipole (DD) και Wenner-Schlumberger (WS) αλλά μικρότερη σε σχέση με τη διάταξη Pole Pole (PP).

Ευαισθησία σε οριζόντιες και κάθετες ανομοιογένειες

Από τις συναρτήσεις ευαισθησίας παρατηρείται ότι η περιοχή μεγαλύτερης ευαισθησίας βρίσκεται κάτω από το δίπολο $P_1 - P_2$. Για τιμές του $n \geq 4$ η περιοχή υψηλών τιμών ευαισθησίας, κάτω από το δίπολο $P_1 - P_2$ γίνεται σχεδόν κατακόρυφη. Για αυτό και η διάταξη Pole Dipole (PD) είναι περισσότερο ευαίσθητη στον εντοπισμό κάθετων δομών/στόχων.

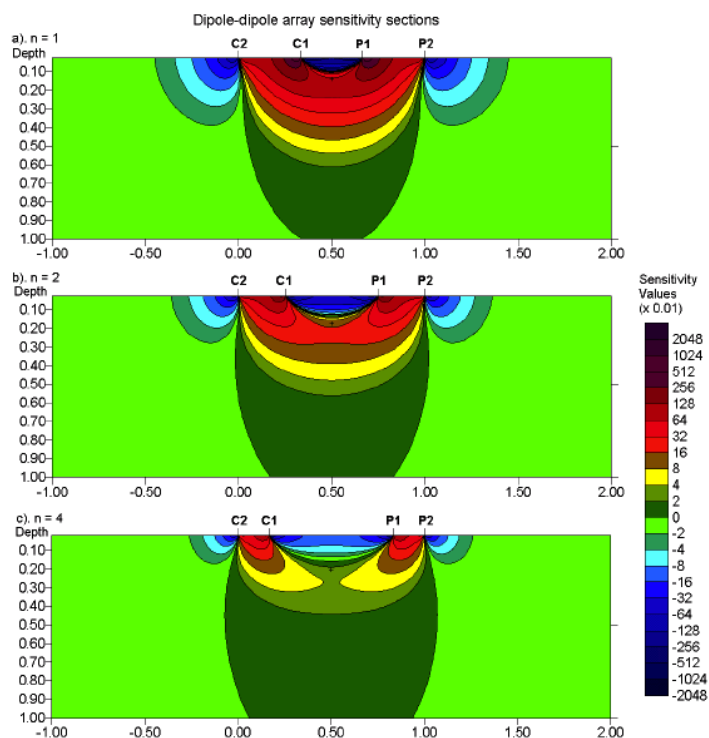
Ποιότητα σήματος(signal strength):

Έχει σαφώς καλύτερο σήμα σε σχέση με τη διάταξη Dipole Dipole (DD) και μικρότερη ευαισθησία σε θόρυβο λόγω τελλουρικών ρευμάτων, σε σχέση με τη διάταξη Pole Pole (PP).

Διάταξη Dipole Dipole (DD)

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος C_2-C_1 δίδεται ως a και είναι ίδια με την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού P_1-P_2 . Η διάταξη χαρακτηρίζεται και από τον παράγοντα n , με την αύξηση του οποίου επιτυγχάνεται μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης.

Στην Εικόνα I.10 παρουσιάζονται κατανομές ευαισθησίας για τιμές του n 1,2,4.



Εικόνα I.10 : Οι συναρτήσεις ευαισθησίας για τη Dipole Dipole (DD) για $n=1,2,4$ (Loke 2003).

Βάθος διασκόπησης

Η Dipole Dipole (DD) έχει αρκετά μικρό βάθος διασκόπησης για ένα συγκεκριμένο μήκος γραμμής διασκόπησης. Το μέσο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation) σχετίζεται με τις αποστάσεις μεταξύ ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού \mathbf{a} και \mathbf{n} . Για παράδειγμα όταν $n=1$ το ψευδοβάθος ισούται με $H=0.416a$. (Πίνακας. I.2)

Οριζόντια κάλυψη (horizontal coverage)

Η διάταξη Dipole Dipole (DD) έχει αρκετά μικρή οριζόντια κάλυψη και βρίσκεται χαμηλά στην κατάταξη σχετικά με τις άλλες διατάξεις.

Ευαισθησία σε οριζόντιες και κάθετες ανομοιογένειες

Οι μεγαλύτερες τιμές ευαισθησίας γενικότερα εντοπίζονται μεταξύ των δίπολων C1-C2 και P1-P2. Αυτό σημαίνει ότι είναι περισσότερο ευαίσθητη σε αλλαγές της ειδικής αντίστασης κάτω από τα ηλεκτρόδια κάθε ζεύγους δίπολων. Καθώς αυξάνεται το n , οι υψηλές τιμές ευαισθησίας συγκεντρώνονται ολοένα και περισσότερο κάτω από τα δίπολα C1-C2 και P1-P2, ενώ οι τιμές ευαισθησίας, κάτω από το κέντρο της διάταξης μεταξύ των ηλεκτροδίων C1-P1, μειώνονται. Για τιμές του $n > 2$, οι τιμές ευαισθησίας στην ψευδοτομή (pseudosection plotting) είναι αμελητέες και το σχήμα των κατανομών ευαισθησίας γίνεται σχεδόν κατακόρυφο. Για αυτό η Dipole Dipole (DD) είναι πολύ ευαίσθητη σε

οριζόντιες αλλαγές της ειδικής αντίστασης, αλλά σχετικά μη ευαίσθητη σε κάθετες αλλαγές της ειδικής αντίστασης.

Ποιότητα σήματος (signal strength):

Κύριο μειονέκτημα της διάταξης αποτελεί το μικρό ποσοστό σήματος προς θόρυβο, ειδικά όταν το n λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές. Το μετρούμενο δυναμικό είναι αντιστρόφως ανάλογο n^3 . Για την ίδια ένταση ρεύματος, το μετρούμενο δυναμικό ελαττώνεται κατά 56 φορές όταν το n αυξάνει από 1 έως 6. (Πίνακας I.2) Ως εκ τούτου, το όργανο μέτρησης πρέπει να έχει μεγάλη ευαισθησία και καλό κύκλωμα εξάλειψης του θορύβου.

Διάταξη Wenner-Schlumberger (WS)

Η διάταξη Wenner-Schlumberger (WS) αποτελεί ένα συνδυασμό δύο από τις κλασικότερες μεθόδους τη Wenner (W) και τη Schlumberger (S).

Ο παράγοντας n σε αυτή τη διάταξη είναι ο λόγος της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων C1-P1 (Εικ. I.11). Η διάταξη Wenner είναι μια ειδική περίπτωση αυτής της διάταξης όπου ο παράγοντας $n = 1$.

Η κατανομή ευαισθησίας της παρουσιάζεται στην Εικόνα I.11.

Βάθος διασκόπησης

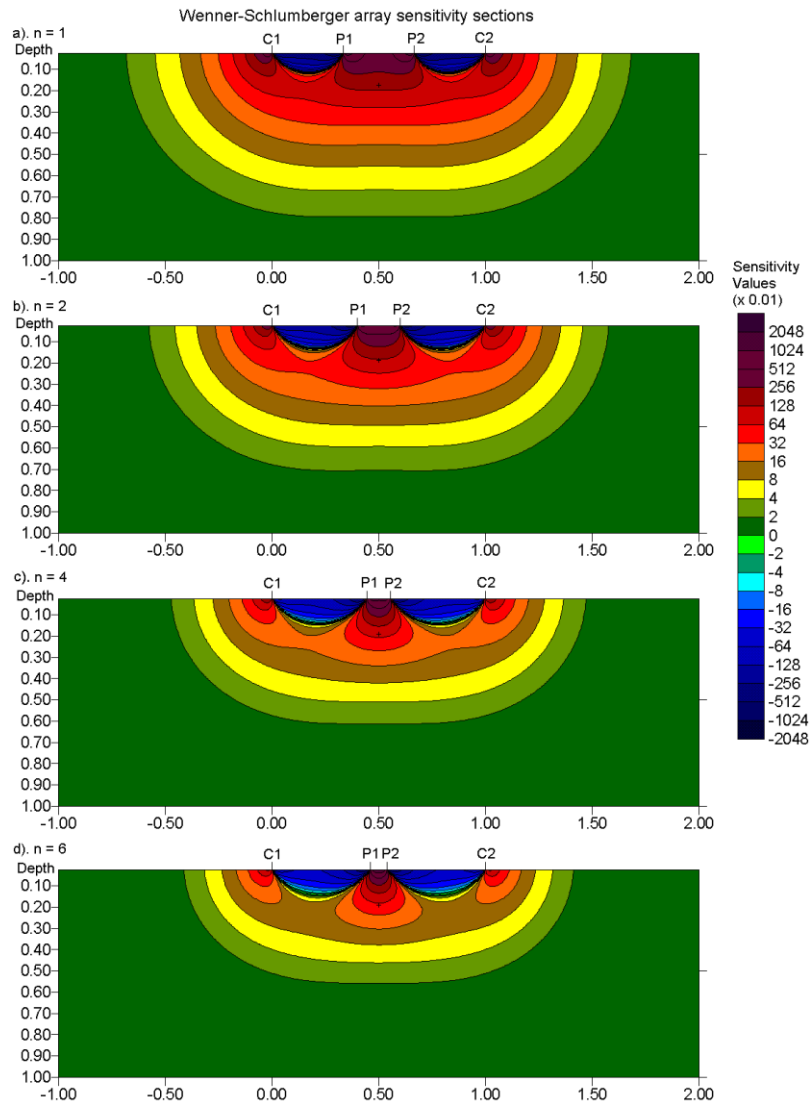
Η Wenner Schlumberger (WS) έχει αρκετά μικρό βάθος διασκόπησης για ένα συγκεκριμένο μήκος γραμμής διασκόπησης. Το μέσο βάθος διασκόπησης (median depth of investigation) σχετίζεται με τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού a και n . Για παράδειγμα όταν $n=1$, το μέσο βάθος διασκόπησης ισούται με $H=0.452a$. (Πίνακας 2.2.2)

Οριζόντια κάλυψη (horizontal coverage)

Η διάταξη Wenner-Schlumberger (WS) έχει αρκετά μικρή οριζόντια κάλυψη σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις.

Ευαισθησία σε οριζόντιες και κάθετες ανομοιογένειες

Η περιοχή μεγαλύτερων θετικών τιμών ευαισθησίας, κάτω από το κέντρο της διάταξης, συγκεντρώνεται περισσότερο κάτω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού όσο το n αυξάνεται. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει πολύ καλή ανάλυση ως προς το βάθος, με καλή οριοθέτηση οριζόντιων στρωμάτων (Ward 1990).



Εικόνα I.11 : Οι κατανομές ευαισθησίας για τη Wenner- Schlumberger (WS) για $n=1,2,4$ (Loke 2003).

Ποιότητα σήματος (signal strength):

Η ισχύς του σήματος είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της τιμής του n . Η διάταξη Wenner-Schlumberger (WS) έχει χαμηλότερο σήμα από την απλή Wenner, αλλά πολύ υψηλότερο από την Dipole Dipole (DD).

Ι.2. Μεθόδος Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων

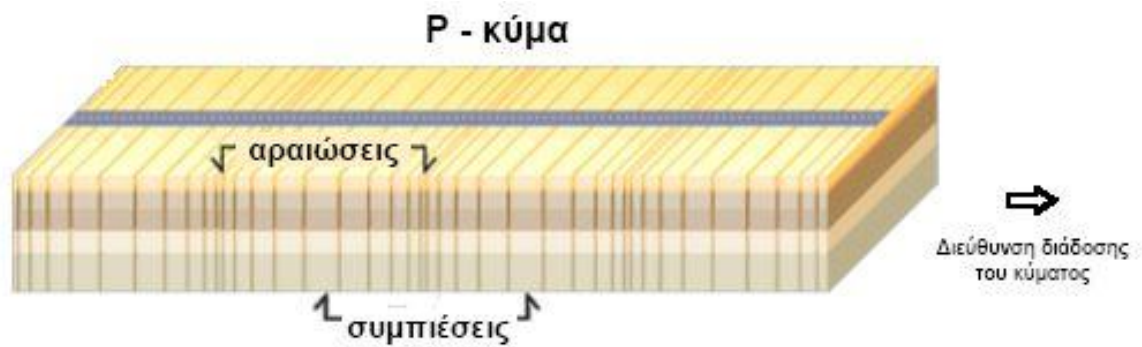
Ι.2.1 Βασικές Έννοιες της Σεισμικής Μεθόδου

Κύματα Χώρου

Δύο ειδών κύματα χώρου μπορούν να διαδοθούν, μέσω ενός ελαστικού μέσου. Αυτά, τα οποία παρουσιάζονται και στα ακόλουθα σχήματα, είναι:

- Συμπιεστικά κύματα ή p-κύματα

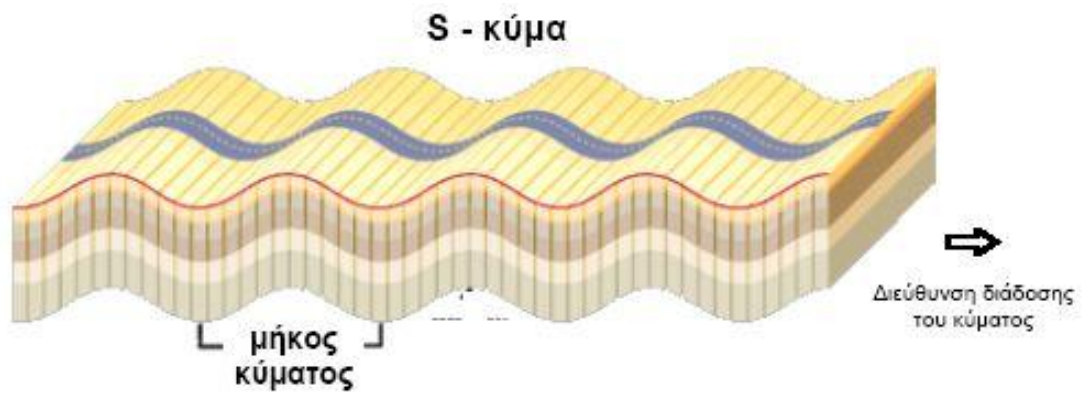
Πρόκειται για τα διαμήκη ή πρώτα κύματα της κλασικής σεισμολογίας. Αυτά διαδίδονται μέσω συμπιεστικών και εφελκυστικών μονοαξονικών παραμορφώσεων (συμπιέσεων και αραιώσεων), στην κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Η κίνηση ενός τεμαχίου, η οποία σχετίζεται με το πέρασμα ενός συμπιεστικού κύματος, περιλαμβάνει ταλάντωση, γύρω από ένα σταθερό σημείο, στην κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος.



Εικόνα Ι.12 : Μορφή P-κυμάτων (Λούης, 2003)

- Διατμητικά κύματα ή s-κύματα

Πρόκειται για τα εγκάρσια ή δεύτερα κύματα της κλασικής σεισμολογίας. Διαδίδονται με μία καθαρή διατμητική παραμόρφωση κάθετη προς τη διεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Η κίνηση ενός τεμαχίου, η οποία σχετίζεται με το πέρασμα ενός διατμητικού κύματος, περιλαμβάνει ταλάντωση, γύρω από ένα σταθερό σημείο, σε ένα επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος.



Εικόνα I.13 : Μορφή S-κυμάτων (Λούης, 2003)

Η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος χώρου, σε κάποιο υλικό, δίνεται από τη σχέση:

$$v = \left[\frac{\text{κατάλληλη ελαστική παράμετρος του υλικού}}{\text{πυκνότητα } \rho \text{ του υλικού}} \right]^{1/2} \quad (\text{εξίσωση I.11})$$

Επομένως, η ταχύτητα v_p ενός P-κύματος χώρου, το οποίο περιλαμβάνει μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση, δίνεται από τη σχέση:

$$v_p = \left[\frac{\psi}{\rho} \right]^{1/2} \quad (\text{εξίσωση I.12})$$

όπου: ψ → ο Συντελεστής Αξονικής Παραμόρφωσης και
 ρ → η πυκνότητα του υλικού

Ή, εφόσον $\psi = K + \frac{4}{3} \cdot \mu$, από την ισοδύναμη σχέση:

$$v_p = \left[\frac{K + \frac{4}{3} \cdot \mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad (\text{εξίσωση I.13})$$

όπου: K → ο Συντελεστής Ακαμψίας
 μ → ο Συντελεστής Διάτμησης και
 ρ → η πυκνότητα του υλικού

Αντίστοιχα, η ταχύτητα v_s ενός s-κύματος χώρου, το οποίο περιλαμβάνει καθαρή διατμητική παραμόρφωση, δίνεται από τη σχέση:

$$v_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad (\text{εξίσωση I.14})$$

όπου: μ → ο Συντελεστής Διάτμησης και
 ρ → η πυκνότητα του υλικού

Από τις παραπάνω σχέσεις, καθίσταται σαφές ότι τα συμπιεστικά κύματα πάντα διαδίδονται ταχύτερα, στο ίδιο μέσο, από τα διατμητικά.

Ο λόγος v_p/v_s , για κάθε υλικό, καθορίζεται μόνο από το λόγο του Poisson (σ), για αυτό το υλικό. Δηλαδή:

$$\frac{v_p}{v_s} = \left[\frac{2 \cdot (1 - \sigma)}{1 - 2\sigma} \right]^{1/2} \quad (\text{εξίσωση I.15})$$

όπου: σ → ο λόγος Poisson του υλικού

Επιπλέον, δεδομένου ότι ο λόγος Poisson, για συμπαγές πέτρωμα, ισούται με 0,25, η προηγούμενη σχέση προσεγγιστικά γράφεται:

$$v_p \approx 1,7 \cdot v_s \quad (\text{εξίσωση I.16})$$

Από όλη την προηγούμενη ανάλυση, λοιπόν, προκύπτει ότι οι ελαστικές παράμετροι ενός υλικού μπορούν να υπολογισθούν με τη βοήθεια των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στο υλικό αυτό, με τη βοήθεια των ακόλουθων σχέσεων:

$$\sigma = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{v_p}{v_s} \right)^2 - 2} \quad (\text{εξίσωση I.17})$$

Λόγος Poisson:

$$\text{Συντελεστής Διάτμησης: } \mu = \rho \cdot v_s^2 \quad (\text{εξίσωση I.18})$$

$$\text{Μέτρο Ελαστικότητας: } E = 2 \cdot \mu \cdot (1 + \sigma) \Rightarrow$$

$$E = 2 \cdot (\rho \cdot v_s^2) \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2} \right] \Rightarrow$$

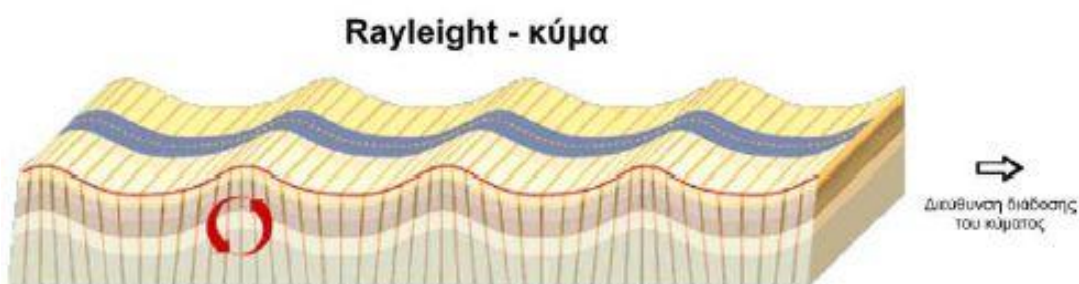
$$E = \rho \cdot \frac{3 \cdot v_p^2 - 4 \cdot v_s^2}{\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1} \quad (\text{εξίσωση I.19})$$

Επιφανειακά κύματα

Σε ένα καθορισμένο ελαστικό μέσο, σεισμικά κύματα, γνωστά ως κύματα επιφάνειας, μπορούν να διαδοθούν, κατά μήκος των ορίων του μέσου. Τα κύματα αυτά, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Κύματα Rayleigh

Τα κύματα αυτά διαδίδονται κατά μήκος μιας ελεύθερης επιφάνειας, ή κατά μήκος των ορίων δύο διαφορετικών στερεών μέσων. Οι σχετικές κινήσεις τεμαχίων είναι ελλειπτικές και λαμβάνουν χώρα σε ένα επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια, το οποίο περιλαμβάνει τη διεύθυνση διάδοσης του σεισμικού κύματος. Η τροχιακή κίνηση των τεμαχίων, ορισμένες φορές, περιγράφεται και ως ανάδρομη. Επιπλέον, τα κύματα Rayleigh περιλαμβάνουν διατμητική παραμόρφωση και, κατά συνέπεια, περιορίζονται σε στερεά μέσα. Το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με την απόσταση από την επιφάνεια, ενώ η ταχύτητα διάδοσής τους είναι μικρότερη από αυτή των s-κυμάτων χώρου.

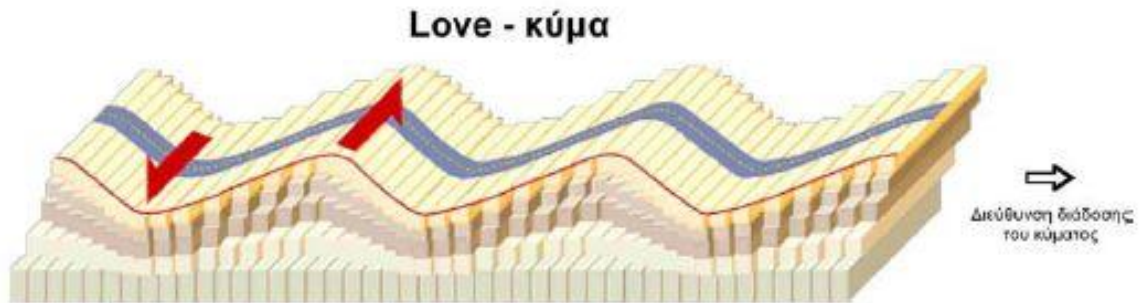


Εικόνα I.14: Μορφή κυμάτων Rayleigh (Λούης, 2003)

- Κύματα Love

Τα κύματα αυτά διαδίδονται κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας του επιφανειακού στρώματος ενός μοντέλου στρωμάτων, εάν η ταχύτητα των s-κυμάτων χώρου του στρώματος αυτού είναι χαμηλότερη από αυτή του υποκείμενου. Τα κύματα Love είναι πολωμένα διατμητικά κύματα, ενώ ένα τεμάχιο, από το οποίο διέρχεται ένα τέτοιο κύμα,

εκτελεί ταλάντωση, παράλληλη στην ελεύθερη επιφάνεια και κάθετη στη διεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Η ταχύτητα των κυμάτων Love είναι ενδιάμεση, ανάμεσα στην ταχύτητα των s-κυμάτων του επιφανειακού στρώματος και αυτής των βαθύτερων στρωμάτων.



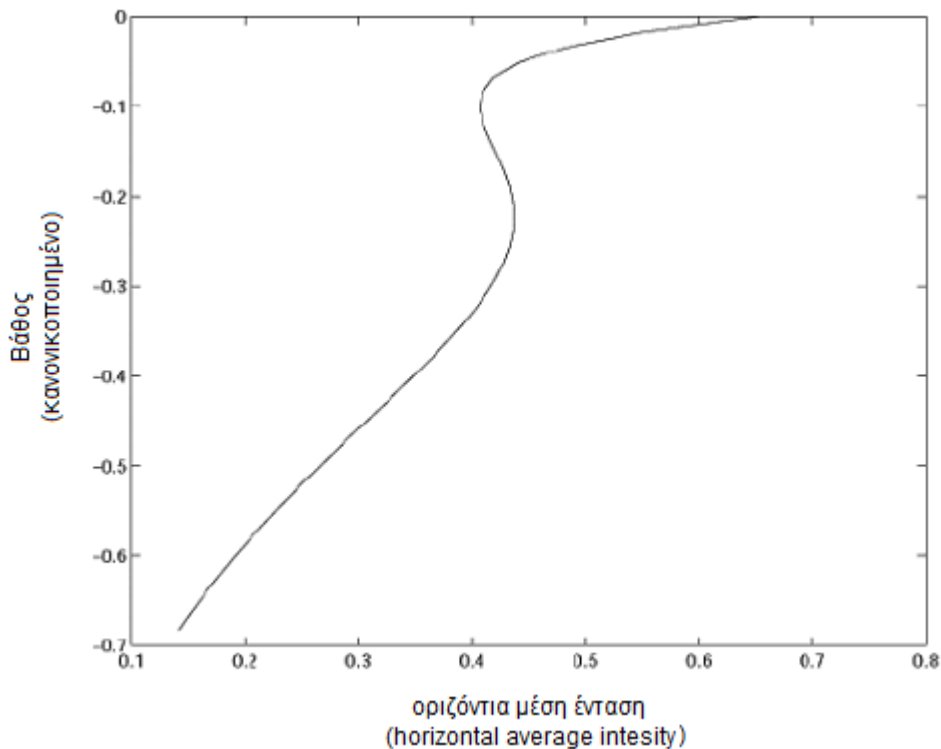
Εικόνα I.15 :Μορφή κυμάτων Love (Λούης, 2003)

Τα κύματα Rayleigh και Love παρουσιάζουν εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσής τους από την περίοδο (ή τη συχνότητα) τους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκέδαση και αποδίδεται ευθέως στις διακυμάνσεις της ταχύτητας με το βάθος, στο εσωτερικό της γης.

I.2.2 Κύματα Rayleigh και Φαινόμενο διασποράς

Τα κύματα τα οποία εξετάζει η μέθοδος Πολυκάναλης Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων (Multichannel Analysis of Surface Waves) είναι τα επιφανειακά κύματα Rayleigh. Τα επιφανειακά κύματα είναι κύματα τα οποία διαδίδονται παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους με το πλάτος τους να μειώνεται εκθετικά με το βάθος και η περισσότερη από την ενέργεια τους διαδίδεται σε μια μικρού βάθους ζώνη, σε προσέγγιση ισοδύναμη με ένα μήκος κύματος τους. Η ζώνη αυτή είναι τόσο περιορισμένη σε βάθος, με συνέπεια η διάδοση των κυμάτων να επηρεάζεται από τις ιδιότητες μόνο μιας ορισμένης περιοχής του υπεδάφους (Εικ. I.19).

Τα επιφανειακά κύματα Rayleigh είναι συνήθως κυρίαρχες μορφές στα σεισμικά δεδομένα, λόγω της μεγαλύτερης ενέργειας τους και λόγω της γεωμετρικής διασποράς, η οποία είναι μικρότερη από των μεταπικών κυμάτων, τα οποία διαδίδουν ενέργεια προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ενέργεια μιας σεισμικής πηγής στην επιφάνεια του εδάφους μεταφέρει το μεγαλύτερο ποσοστό της στα επιφανειακά κύματα. Σε ένα ομογενή χώρο περίπου το 67% της ενέργειας εκπέμπεται με τη μορφή επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (Woods, 1968). Αυτός είναι και ο κύριος λόγος γιατί συνήθως τα επιφανειακά κύματα κυριαρχούν στις σεισμικές καταγραφές.



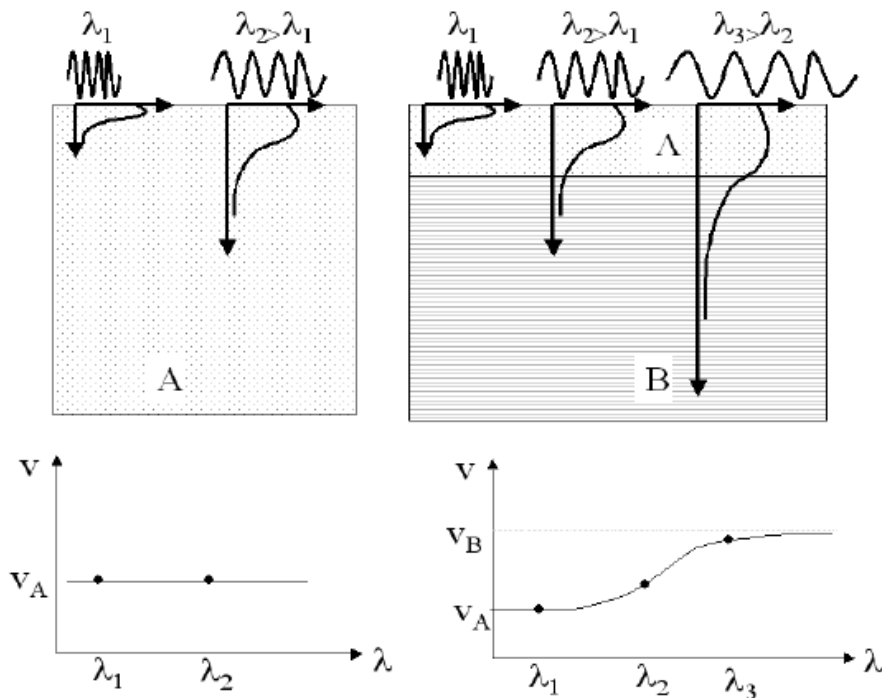
Εικόνα I.16: Η ενέργεια η οποία διαδίδεται στην οριζόντια διεύθυνση σε συνάρτηση με το βάθος (κανονικοποιημένο ως προς το μήκος κύματος). Η ενέργεια δεν διαδίδεται κατά την κάθετη διεύθυνση (Strobbia, 2002).

Επιπλέον, δεν υπάρχει διάδοση τους προς το εσωτερικό της Γης και τα μέτωπα κύματος τους είναι κυλινδρικά σε πλευρικά ομογενή χώρο. Η ταχύτητα διάδοσης τους εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων V_s , όπου σε ομογενή ημιχώρο η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh V_R είναι λίγο μικρότερη από ότι η V_s ($0.87V_s < V_R < 0.96 V_s$ ανάλογα με το ποσοστό του Poisson (Richart et al., 1970).

Η διάδοση των επιφανειακών κυμάτων σε ένα μη ομογενές κατακόρυφα μέσο παρουσιάζουν συμπεριφορά διασποράς (dispersive behavior). Με τον όρο διασπορά (dispersion), εννοείται ότι διαφορετικές συχνότητες έχουν διαφορετικές ταχύτητες φάσης. Ειδικότερα η γεωμετρική διασπορά (geometric dispersion) σε αντίθεση με την εσωτερική διασπορά (intrinsic dispersion) που οφείλεται στα υλικά, εξαρτάται από τη γεωμετρία της υπό εξέτασης περιοχής.

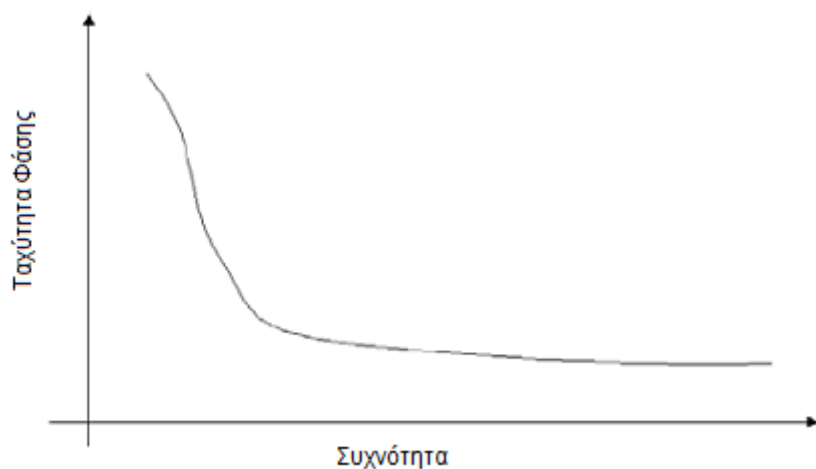
Σε ένα ομογενές μέσο, διάφορα μήκη κύματος «διασκοπούν» διαφορετικά βάθη του υπεδάφους, αλλά λόγω της ομογένειας που χαρακτηρίζει το μέσο, όλα τα μήκη κύματος έχουν την ίδια ταχύτητα.

Εάν ένα μέσο είναι κατακόρυφα ανομοιογενές, π.χ. παρουσιάζει μια στρωματογραφία, όπου τα στρώματα έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, η συμπεριφορά των επιφανειακών κυμάτων είναι διαφορετική. Τα διάφορα μήκη κύματος «διασκοπούν» διαφορετικά βάθη, τα οποία σχετίζονται με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Συνεπώς, το κάθε μήκος κύματος διαδίδεται με μια ταχύτητα φάσης που εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των στρωμάτων που εμπλέκονται στη διάδοση.



Εικόνα I.17: Σε ομογενή χώρο όλα τα μήκη κύματος διασκοπούν το ίδιο υλικό, με αποτέλεσμα η ταχύτητα φάσης να είναι σταθερή. Όταν οι ιδιότητες του υπεδάφους αλλάζουν με το βάθος, η ταχύτητα φάσης εξαρτάται από το μήκος κύματος (Strobbia, 2002).

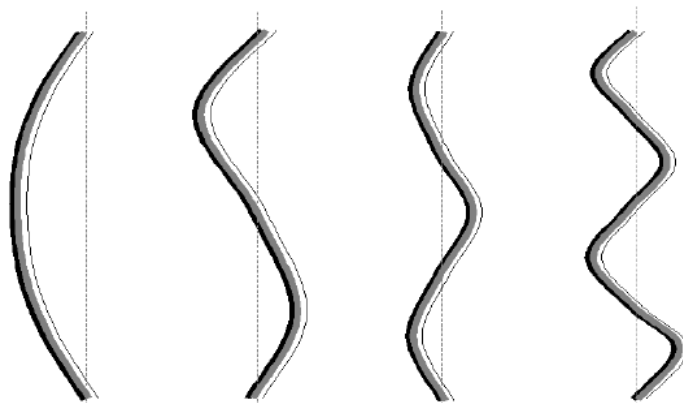
Άρα τα επιφανειακά κύματα δεν έχουν μια και μόνο ταχύτητα αλλά μια ταχύτητα φάσης σε σχέση με τη συχνότητα. Η σχέση μεταξύ της συχνότητας και της ταχύτητας φάσης ονομάζεται καμπύλη διασποράς (dispersion curve) και εξαρτάται από τη δομή του υπεδάφους. Στις υψηλές συχνότητες η ταχύτητα φάσης, είναι η ταχύτητα των επιφανειακών στρωμάτων ενώ στις χαμηλές συχνότητες, η επίδραση των βαθύτερων στρωμάτων γίνεται σημαντικότερη. Η ταχύτητα φάσης τείνει ασυμπτωτικά στην ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh των βαθύτερων δομών όσο τείνει στο άπειρο ως προς το βάθος (ημιχώρος) (Socco et. al., 2004).



Εικόνα I.18: Η καμπύλη διασποράς περιγράφει τη διασπορά των επιφανειακών κυμάτων και η οποία συνήθως απεικονίζεται ως ταχύτητα φάσης προς συχνότητα.

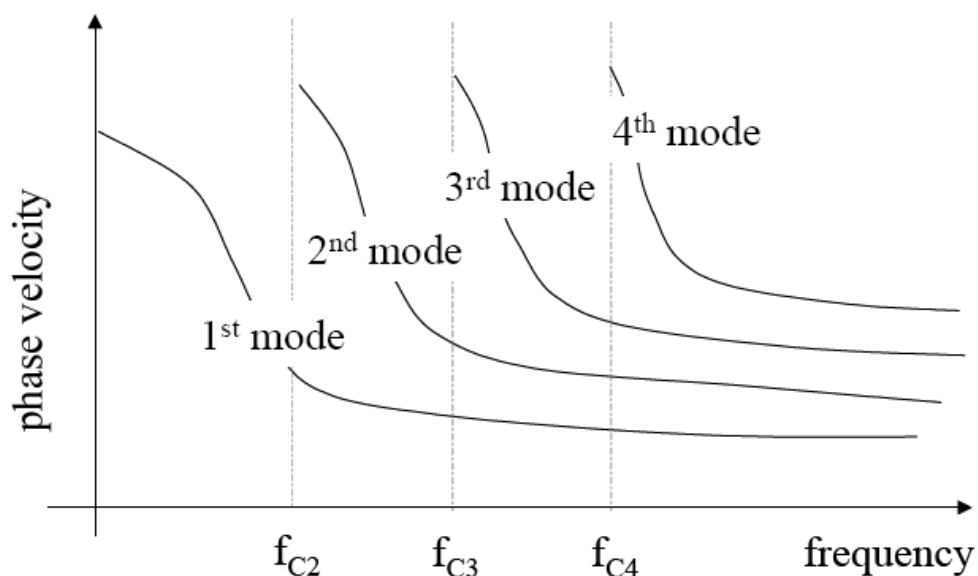
Η καμπύλη διασποράς μπορεί να μετρηθεί πειραματικά με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ερμηνεία της για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του εδάφους.

Η διάδοση των κυμάτων Rayleigh σε μη ομογενές κατακόρυφο μέσο είναι ένα πολύ-τρόπο φαινόμενο. Για συγκεκριμένη στρωματογραφία, σε κάθε συχνότητα μπορεί να υπάρχουν διαφορετικά μήκη κύματος, με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης (Εικ. I.19).



Εικόνα I.19: Διαφορετικοί τρόποι δόνησης σημαίνουν διαφορετικά μήκη κύματος, και έτσι διαφορετικές ταχύτητες για την ίδια συχνότητα (Strobbia, 2002).

Συνεπώς, διαφορετικές ταχύτητες φάσης είναι δυνατές για κάθε συχνότητα, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα τρόπο διάδοσης (mode of propagation) όπου διαφορετικοί τρόποι μπορεί να υπάρχουν ταυτόχρονα (Εικ. I.20).



Εικόνα I.20: Σε ένα σύνηθες εύρος συχνοτήτων για εφαρμογές μηχανικού, μπορεί να υπάρχουν πολλοί τρόποι διάδοσης. Οι υψηλότεροι τρόποι διάδοσης μπορεί να υπάρχουν μόνο πάνω από τη συχνότητα- όριο (cut-off frequency) τους. (Strobbia, 2002).

Οι διάφοροι τρόποι διάδοσης (modes), εκτός από τον πρώτο, υπάρχουν μόνο πάνω από μια συγκεκριμένη συχνότητα γνωστή ως συχνότητα-όριο (cut-off frequency) η οποία είναι για κάθε τρόπο διάδοσης το χαμηλότερο όριο συχνότητας στην οποία μπορεί ο τρόπος

διάδοσης να υπάρχει. Στις πολύ χαμηλές συχνότητες, κάτω από τη συχνότητα-όριο του δεύτερου τρόπου διάδοσης (second mode), μόνο ο πρώτος τρόπος διάδοσης, γνωστός ως βασικός τρόπος διάδοσης (fundamental mode) υπάρχει.

Η ενέργεια που σχετίζεται με τους διάφορους τρόπους διάδοσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η στρωματογραφία καταρχάς, άλλα και το βάθος και το είδος της πηγής.

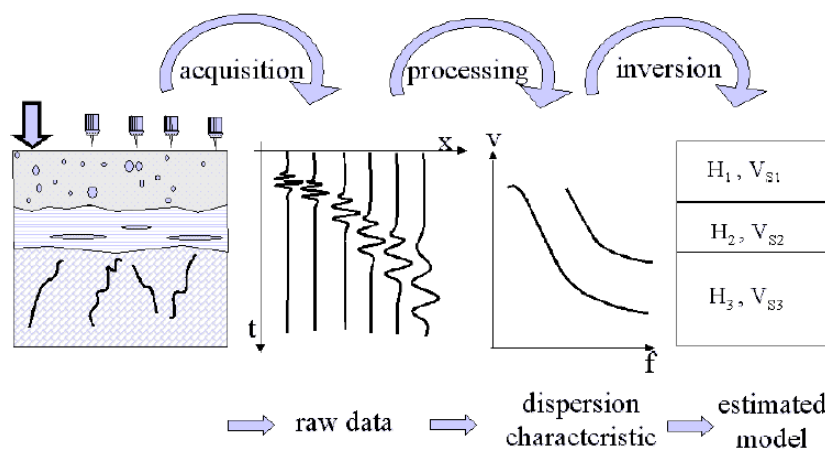
Μερικές φορές ο βασικός τρόπος διάδοσης κυριαρχεί σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, αλλά μερικές φορές και οι υψηλότεροι τρόποι διάδοσης γίνονται κυρίαρχοι και δεν μπορούν να αγνοηθούν. Οι διάφοροι τρόποι διάδοσης έχουν διαφορετική ταχύτητα φάσης και έτσι μπορούν να διαχωριστούν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή. Σε αντίθετη περίπτωση, επικαλύπτονται (superimpose) μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η αναγνώριση των διάφορων τρόπων διάδοσης να είναι αδύνατη.

1.2.3 Στάδια της Μεθόδου της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων

Η μέθοδος της Ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων είναι συνηθισμένο να θεωρείται ως ένας συνδυασμός τριών διαφορετικών σταδίων (Strobbia 2002):

- Της λήψης των μετρήσεων (acquisition)
- Της επεξεργασίας των δεδομένων (processing)
- Της αντιστροφής-ερμηνείας των δεδομένων (inversion)

Η λήψη των μετρήσεων περιλαμβάνει τη συλλογή των μη επεξεργασμένων δεδομένων της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων τα οποία περιέχουν κύματα Rayleigh σε ένα ευρύ συχνοτικό φάσμα. Από αυτά τα δεδομένα, με τη διαδικασία της επεξεργασίας προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με τη διασπορά των κυμάτων Rayleigh, οι οποίες με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται από τη διαδικασία αντιστροφής για να υπολογιστούν οι παράμετροι του μοντέλου, όπως π.χ. οι μηχανικές ιδιότητες του υπεδάφους. Η διαδικασία αντιστροφής βεβαίως βασίζεται στην ευθεία λύση του προβλήματος (forward modeling) με την οποία μπορεί να υπολογιστεί η διάδοση των Rayleigh κυμάτων για ένα γνωστό μοντέλο.



ικόνα I.21: Σχηματικά τα τρία στάδια της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών κυμάτων (Strobbia, 2002).

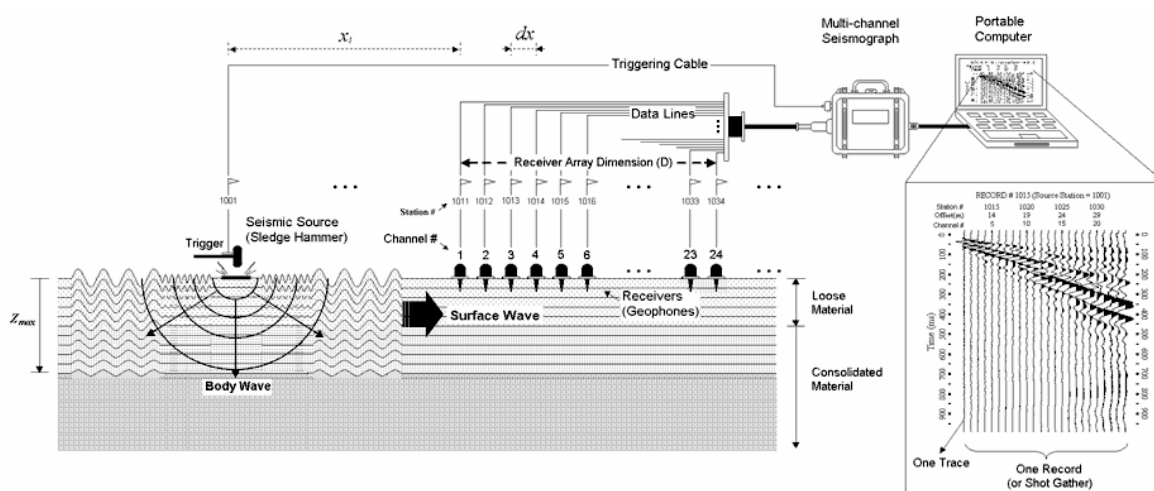
1.Λήψη Μετρήσεων

Η λήψη των μετρήσεων συνήθως πραγματοποιείται με τη δημιουργία σεισμικών κυμάτων με τη χρήση διάφορων σεισμικών πηγών και με την καταγραφή του ολικού σεισμογράμματος.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κυρίως αποτελείται

- από τη σεισμική πηγή που μπορεί να είναι διάφορες, όπως π.χ. σφύρα ή πίπτον βάρος ή vibroseis ή ακομή και απλός θόρυβος σε περιπτώσεις εφαρμογής παθητικών μεθόδων (passive methods) για τη δημιουργία σεισμικών κυμάτων
- Από κάθετα ή οριζόντια γεώφωνα χαμηλής συνήθως χαμηλής συχνότητας (4Hz) για την καταγραφή των δονήσεων
- Ψηφιακοί σειсмоγράφοι για την καταγραφή και την ανάλυση των σεισμικών κυμάτων.

Από θεωρητικής απόψης, λόγω της υπόθεσης της μονοδιάστατης φύσης του υπεδάφους, η παρατήρηση και καταγραφή σε δύο μόνο σημεία θα ήταν αρκετή σε περιπτώσεις όπου ένας τρόπος διάδοσης (θεμελιώδη καμπύλη διασποράς) θα ήταν κυρίαρχος. Όμως η πολυκάναλη προσέγγιση πολλές φορές αποδεικνύεται απαραίτητη για τη μείωση των διακυμάνσεων των υπολογιζόμενων χαρακτηριστικών της καμπύλης διασποράς αλλά και την αύξηση του ποσού της εξαγόμενης πληροφορίας με την αναγνώριση και μείωση του τυχαίου θορύβου, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα καλύτερου υπολογισμού των παραμέτρων του μοντέλου προς ερμηνεία.



Εικόνα I.22 : Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων στην Πολυκάναλη Ανάλυση των Επιφανειακών κυμάτων. (Kansas Geological Survey).

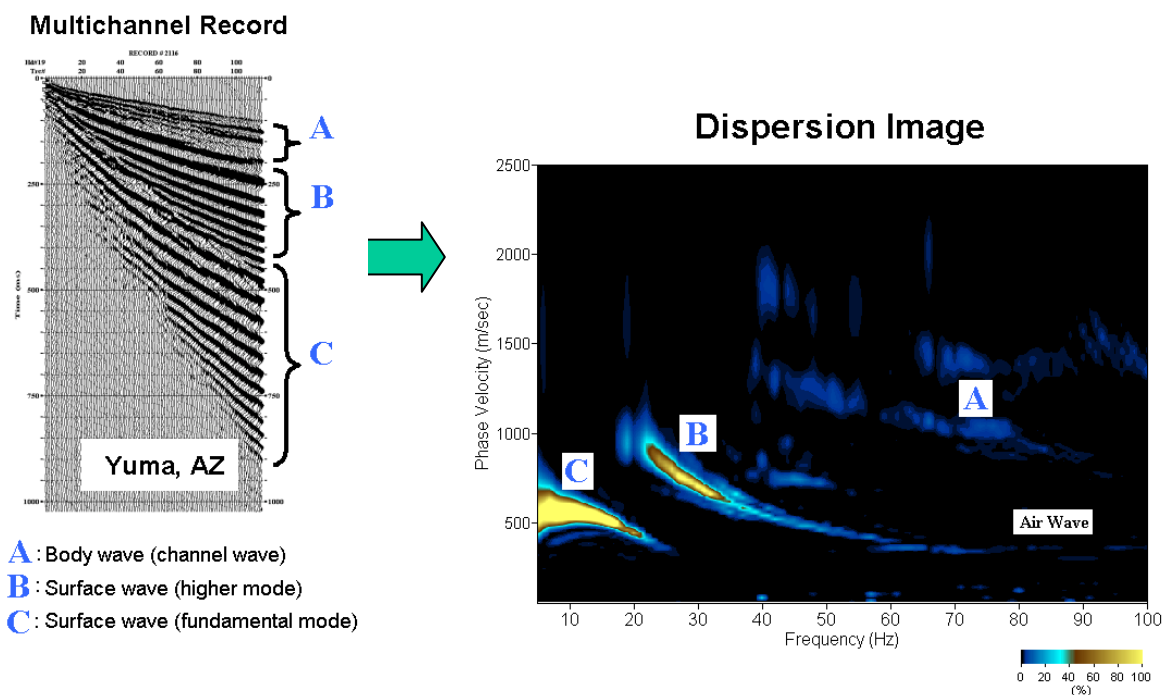
Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκινά με την προσεκτική λήψη των σεισμογραμμάτων στο πεδίο. Η τεχνική λήψης του σήματος, στο οποίο θα πρέπει να δεσπόζουν τα επιφανειακά κύματα, απαιτεί ορισμένες ρυθμίσεις (Κρητικάκης et. al., 2004) όπως είναι η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού (γεώφωνα κατάλληλης ιδιοσυχνότητας και σεισμική πηγή με ευρύ φασματικό περιεχόμενο), η ρύθμιση της απόστασης πηγής – γεωφώνου και της ισαπόστασης των γεωφώνων, η ρύθμιση του διαστήματος δειγματοληψίας και της διάρκειας καταγραφής. Η διάταξη των γεωφώνων συνήθως είναι ίδια με εκείνη που εφαρμόζεται στις συμβατικές εργασίες της σεισμικής διάθλασης.

Η σεισμική πηγή παίζει σημαντικό ρόλο για τη λήψη των δεδομένων, καθώς, όσο πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο παρέχει, τόσο περισσότερα μήκη κύματος παράγονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, αφενός την καλύτερη διάκριση λεπτών επιφανειακών στρωμάτων, τα οποία προσδιορίζονται μελετώντας μικρά μήκη κύματος και αφετέρου, βαθύτερους σχηματισμούς από τη μελέτη μεγάλων μήκων κύματος.

2.Επεξεργασία

Η διαδικασία της επεξεργασίας περιλαμβάνει την εξαγωγή από τα ακατέργαστα δεδομένα (raw data) των χαρακτηριστικών της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων δηλαδή συνήθως την ταχύτητα φάσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Η φασματική ανάλυση των δεδομένων αποτελεί κοινό τόπο των διάφορων διαδικασιών επεξεργασίας.

Κύρια διαδικασία αποτελεί η μετατροπή του ολικού κυματικού πεδίου σε ένα διαφορετικό πεδίο όπου η ενέργεια διάδοσης απεικονίζεται ως συνάρτηση της συχνότητας και της ταχύτητας ή της βραδύτητας ή του κυματαριθμού. Αυτές οι μετατροπές είναι αναστρέψιμες και δεν παρουσιάζεται καμία απώλεια χρήσιμης πληροφορίας. Έτσι, σε αυτά τα πεδία οι διάφορες μορφές αναγνωρίζονται, φιλτράρονται και είναι δυνατή η εξαγωγή των χαρακτηριστικών διασποράς των επιφανειακών κυμάτων. (Εικ. I.26)



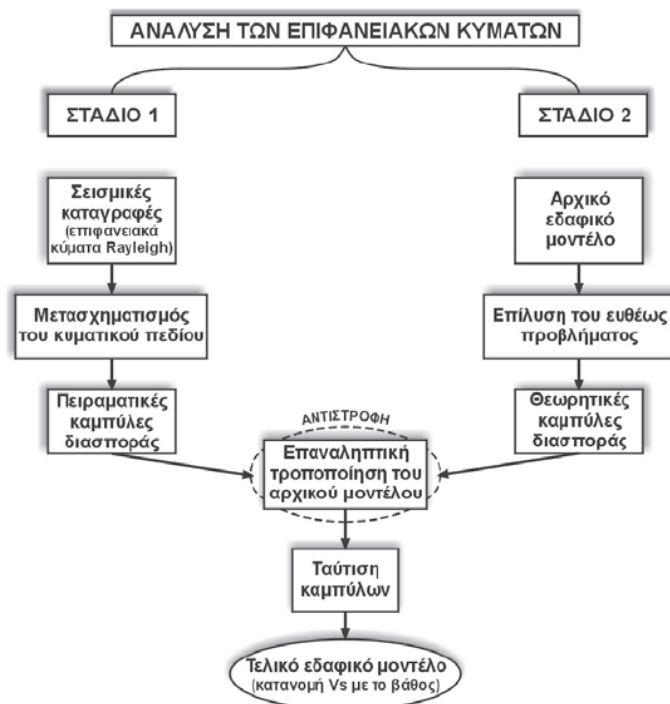
Εικόνα I.23: Παράδειγμα δημιουργίας της καμπύλης διασποράς από τα σεισμικά δεδομένα (Kansas Geological Survey).

Ειδικότερα, η σεισμική ενέργεια των επιφανειακών κυμάτων στο χώρο $p - \omega$ (βραδύτητας-γωνιακής συχνότητας) ή $C - f$ (ταχύτητας- συχνότητας) εμφανίζει ενεργειακά μέγιστα, τα οποία οριοθετούν τις καμπύλες διασποράς (McMechan et. al, 1981)

Τόσο οι καμπύλες διασποράς ανώτερης τάξης (mode overtones) των επιφανειακών κυμάτων, όσο και η θεμελιώδης καμπύλη διασποράς (fundamental mode) παρατηρούνται στο μετασχηματισμένο κυματικό πεδίο στο χώρο $p - \omega$ ή $C - f$, όπου κάθε χαρακτηριστική καμπύλη διασποράς (mode) διαχωρίζεται από τις άλλες.

3. Αντιστροφή

Η ερμηνεία των επιφανειακών σεισμικών κυμάτων πραγματοποιείται σε δύο κυρίως στάδια (Κρητικάκης et al., 2004 - Εικ. 1.27). Το πρώτο στάδιο υπολογίζεται η πειραματική καμπύλη διασποράς μέσω μετασχηματισμού των αρχικών καταγραφών στο χώρο (p, f). Κατά το δεύτερο στάδιο επιλέγεται αρχικό εδαφικό μοντέλο (initial model) με στόχο τον υπολογισμό της θεωρητικής καμπύλης διασποράς. Τέλος, μέσω επαναληπτικής διαδικασίας προσαρμογής της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική, προκύπτει η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων συναρτήσει του βάθους



Εικόνα 1.24: Διάγραμμα ροής που περιγράφει τη μεθοδολογία της πολυκάναλης ανάλυσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (Κρητικάκης et al., 2004).

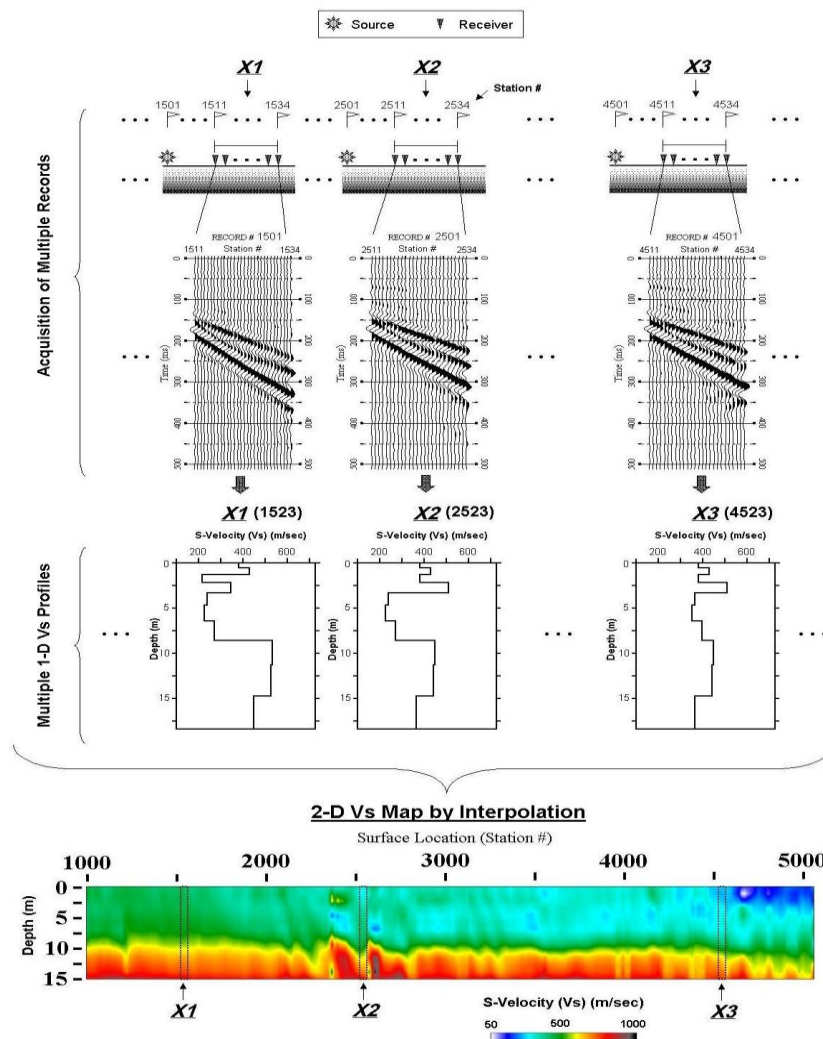
Διδιάστατη Απεικόνιση του Υπεδάφους

Μια σημαντική παραδοχή της μεθόδου της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών κυμάτων αποτελεί το γεγονός ότι θεωρεί μεταβολές στην ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων μόνο προς τη μία διάσταση, δηλαδή ως προς το βάθος. Επομένως, για να είναι δυνατή η διδιάστατη διασκόπηση του υπεδάφους χρησιμοποιείται συγκεκριμένη διαδικασία (Park et al., 1996; Xia et al., 1997; Xia et al., 1998; Park et al., 1999; Xia et al., 1999; Xia et al., 2000), η οποία συνοψίζεται ως (Εικ.2.3.15) :

1. Συλλογή ενός αριθμού πολυκάναλων καταγραφών με τη βοήθεια της τεχνικής roll-along
2. Υπολογίζεται η ταχύτητα φάση των επιφανειακών κυμάτων για κάθε έκρηξη – καταγραφή ξεχωριστά.

3. Γίνεται αντιστροφή της καμπύλης διασποράς για τη δημιουργία της μονοδιάστατης κατανομής της Vs ως προς το βάθος για κάθε σημείο έκρηξης. Ως σημείο της μονοδιάστατης ερμηνείας θεωρείται το μέσο της διάταξης των γεωφώνων.
4. Δημιουργία ενός χάρτη διδιάστατης κατανομής της Vs ως προς το βάθος χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο πλεγματοποίησης (gridding algorithm).

Σε ένα διδιάστατο χάρτη ταχύτητας των S- κυμάτων, η επιφάνεια του υποβάθρου σχετίζεται συνήθως με υψηλές μεταβολές της ταχύτητας των εγκάρσιων κυμάτων, ενώ διαρηγμένες ζώνες, υπόγεια κενά, τα όρια χαλαρών ζωνών μπορεί να υποδεικνύονται από ανωμαλίες των S-κυμάτων όπως χαμηλές ζώνες ταχύτητων.



Εικόνα I.25: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας διδιάστατης διερεύνησης του υπεδάφους με την τεχνική roll-along. (Kansas Geological Survey).

I.2.4 Σεισμικός Γεωτεχνικός Χαρακτηρισμός των εδαφών (Vs30)

Ο Ιταλικός σεισμικός κανονισμός (O.P.C.M n. 3274/2003) και οι επακόλουθες τροποποιήσεις και αλλαγές, αλλά και οι Ευρωπαϊκοί τεχνικοί κανονισμοί (Eurocode EC7

& EC8), δίδουν το απαραίτητο επίπεδο σημασίας στο σεισμικό γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των εδαφών στα οποία πρόκειται να κατασκευαστούν έργα κάθε φύσης (οικιστικά, βιομηχανικά κτίρια, σήραγγες, φράγματα, γέφυρες κ.α.)

Ο χαρακτηρισμός των εδαφών, και ειδικότερα από μια σεισμική οπτική γωνία, χρειάζεται σαν ουσιώδη-επιτακτικό στοιχείο τη γνώση της ταχύτητας των εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων Vs στο υπέδαφος της περιοχής έρευνας, σε βάθος τουλάχιστον 30 m από την επιφάνεια του εδάφους, όπως απαιτείται από τους προαναφερόμενους κανονισμούς. Η Vs ταχύτητα στα πρώτα 30 μέτρα είναι αναγκαία για την αξιολόγηση :

1. Του σεισμικού σχεδιασμού στο επίπεδο έδρασης κάθε κατασκευής
2. του ρίσκου ρευστοποίησης του εδάφους στην περιοχή
3. του ρίσκου αστάθειας πρανών και έργων αντιστήριξης
4. του ρίσκου καθιζήσεων διαφόρων κατασκευών.
5. της μετάδοσης δονήσεων που δημιουργούνται από τρένα, μηχανές δονήσεως, επιφανειακές και υπόγειες εκρήξεις, οχήματα κ.α.

Με βάση την Vs ταχύτητα στα πρώτα 30 μέτρα η οποία μπορεί να υπολογιστεί με τη μέθοδο της Πολυκάναλης Ανάλυσης των Επιφανειακών Κυμάτων (MASW) , είναι δυνατόν να καθοριστεί η Vs30 στην υπό εξέταση περιοχή, με την οποία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάφορες ποιότητες εδάφους (A, B, C, D, E, S1, S2) σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό Eurocode 8 και τον αντίστοιχο ιταλικό (Πιν. I.3.)

Πίνακας I.3 : Κατηγοριοποίηση εδαφών με την Vs30 (www.masw.gr).

Soil	Geotechnical description	Vs30(m/s)
A	Lithoid formations or very rigid homogenous soils characterized by values of Vs30>800m/s, inclusive of any superficial alteration strata with a maximum thickness of 5m	>800
B	Deposits of very thickened gravels or sands or very consistent clays, with a thickness of several tens of meters, characterized by a gradual improvement of mechanical properties with depth and by Vs30 values between 360m/s and 800m/s	360÷800
C	Deposits of medium thickened gravels or sands or medium consistent clays, with a thickness varying from several tens to hundreds of meters, characterized by Vs30 values between 180m/s and 360m/s	180÷360
D	Deposits of granular matter, from loose to lightly thickened, or cohesive matter, of light to medium consistence, characterized by values of Vs30 < 180m/s	<180
E	Soil profiles made of alluvial surface strata, with Vs values similar to the C or D type and with a thickness between 5m and 20m, lying on a substratum of more rigid material with Vs > 800m/s	
S1	Deposits made of, or including, one stratum at least 10 m thick of clays/silts of low consistency, with a high level of plasticity (IP>40) and water content, characterized by values of Vs30 < 100m/s	<100
S2	Deposits of soils that are subject to liquefaction, of sensitive clays or of any other soil category that cannot be classified in the previous types	

I.3 Μικροβαρυτική Μέθοδος

Η βαρυτομετρική μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό των διαφορών των πυκνοτήτων των πετρωμάτων που συνιστούν το υπέδαφος, μέσω της μέτρησης της εντάσεως της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης. Η πυκνότητα των εδαφικών σχηματισμών επιδρά στην κατανομή της εντάσεως της βαρύτητας. Παρατηρώντας αυτήν την κατανομή, μπορούν να υπολογιστούν οι διαφορές πυκνότητας των υπεδαφικών στρωμάτων.

Σκοπός της βαρυτομετρικής μεθόδου είναι ο εντοπισμός υπεδαφικών δομών ενδιαφέροντος δηλαδή να εντοπίσει μια δομές διαφορετικής πυκνότητας. Παρότι η μέθοδος είναι πολύ απλή από άποψη θεωρητικών αρχών, οι διαταραχές που δημιουργούν στην επιφάνεια της γης οι υπεδαφικές δομές ενδιαφέροντος, είναι τόσο πολύ μικρές με αποτέλεσμα στη πράξη να απαιτούνται υψηλής διακριτικής ικανότητας όργανα και σύνθετες τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων. Η μικροβαρυτομετρία αποτελεί την εφαρμογή της βαρυτικής μεθόδου με υψηλή ανάλυση και με μικρές αποστάσεις μεταξύ των σταθμών μετρήσεων.

I.3.1 Βασικές έννοιες της βαρυτικής διασκόπησης

Βαρυτική Δύναμη

Η γεωφυσική ερμηνεία των βαρυτικών ερευνών βασίζεται στην αμοιβαία έλξη που ασκείται μεταξύ δύο μαζών, όπως εκφράστηκε από τον Isaac Newton στην εργασία του “Philosophiae naturalis principia mathematica”. Ο νόμος του Newton για την παγκόσμια έλξη αναφέρει ότι η αμοιβαία έλξη που ασκείται μεταξύ δύο σημειακών μαζών, m_1 και m_2 , είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ τους. Η σταθερά της αναλογίας συνήθως ορίζεται ως παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας $G=6,672 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2$. Επομένως, ο νόμος της βαρύτητας ή νόμος της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα γράφεται:

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (\text{εξίσωση I.20})$$

όπου F είναι η ελκτική δύναμη, G η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας και r η απόσταση μεταξύ των δύο μαζών, m_1 και m_2 .

Επιτάχυνση της Βαρύτητας

Κατά την εφαρμογή της βαρυτομετρικής μεθόδου δεν μετράται η δύναμη της βαρύτητας, F , αλλά η επιτάχυνση της βαρύτητας, g . Η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας ενός σώματος υπό την επίδραση της βαρυτικής δύναμης.

Ο Newton όρισε τη σχέση μεταξύ της δύναμης και της επιτάχυνσης με το Δεύτερο Νόμο του Newton σύμφωνα με τον οποίο η δύναμη είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Σταθερά της αναλογίας αυτής είναι η μάζα του αντικειμένου.

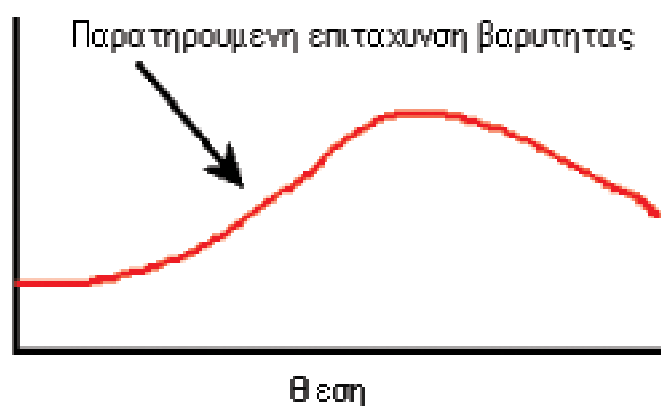
$$F = m_2g \quad (\text{εξίσωση I.21})$$

Συνδυάζοντας το Δεύτερο Νόμο του Newton με το Νόμο της παγκόσμιας έλξης, προκύπτει ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας της μάζας m_2 ισούται με τη μάζα του ελκόμενου σώματος m_1 , δια το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ των κέντρων μάζας αυτών, r

$$g = \frac{Gm_1}{r^2} \quad (\text{εξίσωση I.22})$$

Ως μονάδες για την περιγραφή των μεταβολών της επιτάχυνσης της βαρύτητας στις ερευνητικές βαρυτομετρικές διασκοπήσεις έχει καθοριστεί το miliGal. Η μονάδα μέτρησης Gal ορίζεται ως cm/sec^2 και πήρε το όνομά της από τον Galileo Galilei. Η Γήινη επιτάχυνση της βαρύτητας ισούται με 980 Gals περίπου ή 980.000 mgal. Άλλη μονάδα που επίσης χρησιμοποιείται είναι το gravity unit, (g.u.), και είναι $1\text{mgal} = 10\text{g.u.}$

Το διάγραμμα μεταβολής της επιτάχυνσης της βαρύτητας με την τοποθεσία καλείται βαρυτικό προφίλ.



Εικόνα I.26 : Παράδειγμα βαρυτικού προφίλ.

I.3.2 Πυκνότητα εδαφικών υλικών και πετρωμάτων

Η μορφή ενός βαρυτικού προφίλ είναι αποτέλεσμα της διαφοράς στη πυκνότητα μεταξύ ενός σώματος και του περιβάλλοντος χώρου και όχι η απόλυτη πυκνότητα ενός σχηματισμού.

Είναι γεγονός ότι, με εξαίρεση ορισμένα ορυκτά, η σχετική μεταβολή στην πυκνότητα των περισσότερων πετρωμάτων είναι αρκετά μικρή, περίπου $0,8 \text{ g/cm}^3$, και υπάρχει μια αξιοσημείωτη επικάλυψη στις μετρούμενες πυκνότητες. Επομένως, η γνώση της πυκνότητας του πετρώματος μόνο, δεν είναι αρκετή για να καθοριστεί ο τύπος του πετρώματος.

Οι πυκνότητες που σχετίζονται με διάφορα υλικά της γης παρουσιάζονται στον Πίνακα I.4.

Πίνακας I.4: Οι πυκνότητες των κυριότερων πετρωμάτων.

ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ(gr/cm ³)
Αέρας	~0
Νερό	1
Ψαμμίτης	2.0-2.6
Ασβεστόλιθος	2.5-2.8
Αργιλικός Σχιστόλιθος	2.0-2.7
Δολομίτης	2.1-2.6
Άμμοι	1.4-1.8
Μάρμαρο	2.6-2.9
Γνεύσιος	2.6-3.0
Σερπεντίνης	2.4-2.8
Γρανίτης	2.5-2.8
Βασάλτης	2.7-3.2
Γάββρος	2.9-3.1
Περιδοτίτης	3.1-3.3
Ρυόλιθος	2.4-2.7
Πετρέλαιο	0.6-0.9
Ορυκτό άλας	2.1-2.4
Γύψος	2.2-2.6
Σιδηροπυρίτης	4.9-5.2
Μαγνητίτης	5.0-5.2

Η μεταβολή στο πορώδες είναι ο κύριος λόγος μεταβολής της πυκνότητας στα ιζηματογενή πετρώματα, όπου η πυκνότητα αυξάνει με το βάθος λόγω συμπίεσης και με την ηλικία λόγω συγκόλλησης. Όσον αφορά τα πυριγενή πετρώματα η σύνθεσή του είναι αυτή που επηρεάζει κυρίως την πυκνότητα τους, η οποία αυξάνει κατά τη μετάβαση από τα όξινα στα βασικά και υπερβασικά.

1.3.3 Διεξαγωγή της μικροβαρυτομετρικής έρευνας

Η μικροβαρυτική μέθοδος περιλαμβάνει κυρίως είτε έρευνες σε συγκεκριμένα προφίλ, δηλαδή λαμβάνοντας μετρήσεις κατα μήκος συγκεκριμένης γραμμής έρευνας με διεύθυνση συνήθως κάθετη στον πιθανό προσανατολισμό του στόχου, ή της δομής, είτε χωρικές έρευνες, όπου μετρήσεις γίνονται σε συγκεκριμένο κάναβο. Παράλληλα με τη διεξαγωγή των μετρήσεων, υπολογίζονται με τοπογραφική αποτύπωση οι σχετικές θέσεις αλλά και οι σχετικές υψομετρικές διαφορές των σταθμών έρευνας. Οι μικροβαρυτικές μετρήσεις πραγματοποιούνται σε σχέση με ένα σταθερό σημείο, το σταθμό βάσης και δεν είναι απαραίτητος ο καθορισμός της απόλυτης τιμής της βαρύτητας (δέσιμο με γνωστό σημείο, που έχει μετρηθεί η απόλυτη τιμή της βαρύτητας). Για τη διόρθωση των χρονικών μεταβολών του βαρυτικού πεδίου άλλα και της πορείας (drift) του οργάνου, επαναλαμβάνονται μετρήσεις στη βάση ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Η βαρυτική έλξη στην επιφάνεια της γης μεταβάλλεται με το χρόνο, την τοποθεσία, το υψόμετρο και επιπρόσθετα από τις μεταβολές που προκαλούνται από τη γεωλογία του υπεδάφους. (Telford,1990, Dobrin 1988).

Οι κύριες διορθώσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται κατά τη διεξαγωγή μιας μικροβαρυτικής έρευνας είναι οι εξής :

1. *Μετατροπή των ενδείξεων του οργάνου (meter factor)* : αφορούν στη μετατροπή της ένδειξης του οργάνου σε μονάδες mgal.
2. *Διορθώσεις λόγω χρονικών μεταβολών του πεδίου* : με επαναληπτικές μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε σταθερο σημείο (σταθμός βάσης) και θεωρώντας γραμμική μεταβολή των τιμών (linear drift), είναι δυνατή η διόρθωση των τιμών στους διάφορους σταθμούς
3. *Διόρθωση γεωγραφικού πλάτους* : Στις μικροβαρυτικές έρευνες είναι συνήθως ικανοποιητικό να καθορίζεται το γεωγραφικό πλάτος στο σταθμό βάσης και να υπολογίζεται η διόρθωση σε μονάδες mgal από την εξίσωση (Buttler, 1980):

$$\Delta g_{zL} = \pm 0.81 \sin 2\phi \Delta L \quad (\text{εξίσωση I.23})$$

Όπου ΔL η βόρεια-νότια απόσταση σε μέτρα από το σταθμό βάσης, και ϕ το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού βάσης.

4. *Η διόρθωση ελεύθερου αέρα* : η οποία δίδεται σε mgal από την εξίσωση

$$\Delta g_{FA} = \pm 308.55 \Delta h \quad (\text{εξίσωση I.24})$$

όπου Δh η υψομετρική διαφορά σε μέτρα του σταθμού μέτρησης και του σταθμού βάσης.

5. *Η διόρθωση Bouguer* : η οποία δίδεται σε μονάδες mgal από την εξίσωση

$$\Delta g_{BC} = \pm 41.91 \rho \Delta h \quad (\text{εξίσωση I.25})$$

όπου ρ η πυκνότητα (slab density) σε gr/cm^3 και Δh (m) η υψομετρική διαφορά του σταθμού μέτρησης και του σταθμού βάσης

6. *Τοπογραφική διόρθωση λόγω του τοπογραφικού ανάγλυφου γύρω από του σταθμούς μέτρησης*, το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη από τη διόρθωση Bouguer.

I.3.4 Τεχνικές επεξεργασίας μετρήσεων

Πριν την τελική ερμηνεία των βαρυτικών δεδομένων, είναι κοινός τόπος η εφαρμογή διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας για την ενδυνάμωση του σήματος, το οποίο προέρχεται από το στόχο ενδιαφέροντος. Οι κυριότερες από αυτές τις τεχνικές είναι οι εξής (Nabighian et al, 2005):

- Διαχωρισμός μικρής από μεγάλης κλίμακα ανωμαλία (regional–residual separation)

Οι ανωμαλίες ενδιαφέροντος είναι συνήθως επικαλύπτοντες σε ανωμαλίες ευρύτερες οι οποίες προκαλούνται είτε από μεγαλύτερες πηγές σε σχέση με την κλίμακα της έρευνας ή πολύ βαθύτερες από τις δομές ενδιαφέροντος. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο διαχωρισμός της μικρής από την ευρύτερη ανωμαλία είναι ένα σημαντικότερο πρώτο βήμα επεξεργασίας των δεδομένων.

- Φίλτρα διέλευσης χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων (lowpass and highpass filters)

Τα φίλτρα διέλευσης συχνοτήτων διαχωρίζουν τις υψίσυχνες ανωμαλίες από τις ανωμαλίες χαμηλής συχνότητας. Τα φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων τονίζουν τις ανωμαλίες μεγάλου μήκους κύματος που σχετίζονται με βαθιές διαταραχές ευρύτερου χαρακτήρα, ενώ τα φίλτρα υψηλών συχνοτήτων τονίζουν τις ανωμαλίες μικρού μήκους κύματος, που σχετίζονται με τοπικές διαταραχές μικρού βάθους.

- Προς τα πάνω και κάτω συνέχεια (upward and downward continuation)

Προς τα πάνω συνέχεια είναι η διαδικασία μετατροπής των μετρήσεων ενός επιπέδου σε μετρήσεις ενός άλλου επιπέδου με μεγαλύτερο υψόμετρο. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εξομάλυνση των αρχικών δεδομένων καθώς, με την απομάκρυνση από την πηγή της διαταραχής, οι υψίσυχνες τοπικές ανωμαλίες εξασθενούν και απομένει η ευρύτερη ανωμαλία. Η προς τα κάτω συνέχεια μεταφέρει τις παρατηρήσεις σε ένα επίπεδο χαμηλότερου υψομέτρου, δίνοντας έτσι έμφαση στις τοπικές διαταραχές, αυξάνοντας όμως και το «θόρυβο» των μετρήσεων.

- Φίλτρα παραγώγων (derivative based filters)

Τα διάφορα φίλτρα παραγώγων εφαρμόζονται συνήθως για την ενδυνάμωση των μικρού κύματος ανωμαλιών και πολλές φορές για την καλύτερη οριοθέτηση των στόχων ενδιαφέροντος. Τέτοια φίλτρα είναι η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος (df/dz , d^2f/dz^2), η πρώτη και δεύτερη οριζόντια παράγωγος ως προς διάφορες διευθύνσεις (df/dx ή df/dy , d^2f/dx^2 ή d^2f/dy^2), η ολική παράγωγος (analytical signal, $[d^2f/dx^2 + d^2f/dy^2 + d^2f/dz^2]^{1/2}$) κ.α.

- Εύρεση συγκεκριμένου φάσματος συχνοτήτων (match filtering)

Εάν το φάσμα συχνοτήτων του αναμενόμενου στόχου είναι γνωστό, η εύρεση ενός συγκεκριμένου φάσματος συχνοτήτων μπορεί να βοηθήσει στην εύρεση αυτού του σήματος σε ένα σύνολο δεδομένων.

I.4 Μαγνητική Μέθοδος

Η μαγνητική μέθοδος διασκόπησης βασίζεται στην ακριβή μέτρηση των τοπικών ανωμαλιών του μαγνητικού πεδίου της γης. Οι τοπικές αυτές ανωμαλίες οφείλονται στις διαφορές της έντασης μαγνήτισης των πετρωμάτων.

Εκτός από τον εντοπισμό των μεταλλευμάτων η μαγνητική μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα πετρελαίων και στον εντοπισμό ρηγμάτων και τεκτονικών κινήσεων. Άλλες χρήσεις της μεθόδου είναι στη γεωθερμική έρευνα ή οι αρχαιολογικές αναζητήσεις.

I.4.1 Βασικές έννοιες της μαγνητικής διασκόπησης

Μαγνητικά Μονόπολα

Ο Charles Augustin de Coulomb, το 1785, έδειξε ότι η ελκτική ή απωστική δύναμη μεταξύ ηλεκτρικά φορτισμένων σωμάτων και μεταξύ μαγνητικών πόλων υπακούουν σε ένα νόμο αντίστροφου τετραγώνου, όπως αυτόν που διατύπωσε ο Newton για τη βαρύτητα. Η μαθηματική έκφραση για τη μαγνητική δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο μαγνητικών μονόπολων είναι

$$F_m = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (\text{εξίσωση I.26)}$$

I.26)

όπου μ είναι μια σταθερά αναλογίας που καλείται μαγνητική διαπερατότητα, p_1 και p_2 είναι οι εντάσεις των δύο μονόπολων που αναφέρονται και ως ποσότητες μαγνητισμού, και r είναι η απόσταση μεταξύ τους. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι εξ ορισμού αδιάστατη σταθερά. Οι μονάδες της έντασης των πόλων ορίζονται, αν η δύναμη, F , είναι 1N και οι δύο μαγνητικοί πόλοι έχουν απόσταση 1m, τότε κάθε πόλος έχει ένταση 1 Amp – m.

Σε μορφή, η έκφραση αυτή είναι πανομοιότυπη με την έκφραση της βαρυτικής δύναμης. Υπάρχουν, ωστόσο, δύο σημαντικές διαφορές:

- Σε αντίθεση με την παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας, G , η μαγνητική διαπερατότητα, μ , είναι μια ιδιότητα του υλικού μέσα στο οποίο βρίσκονται τα μονόπολα p_1 και p_2 . Αν τα μονόπολα βρίσκονται στο κενό, τότε το μ καλείται μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι ίση με τη μονάδα στο κενό και σχεδόν ίση με τη μονάδα στον αέρα.
- Αντίθετα με τις σημειακές μάζες m_1 και m_2 , τα p_1 και p_2 μπορούν να είναι είτε θετικά είτε αρνητικά. Αν τα p_1 και p_2 έχουν το ίδιο πρόσημο, τότε η δύναμη μεταξύ τους είναι απωστική. Αν τα p_1 και p_2 έχουν αντίθετα πρόσημα, τότε η δύναμη μεταξύ τους είναι ελκτική.

Μαγνητικά Δίπολα

Η κατανομή της δύναμης του μαγνητικού δίπολου δεν είναι τίποτα περισσότερο από την κατανομή της μαγνητικής δύναμης που παρατηρούμε γύρω από μία μαγνητική ράβδο. Για την ακρίβεια, μια μαγνητική ράβδος αντιστοιχεί σε δύο μαγνητικά μονόπολα που χωρίζονται από το μήκος του μαγνήτη. Η μαγνητική δύναμη φαίνεται να προέρχεται από το βόρειο πόλο του μαγνήτη, N , και να τερματίζει στο νότιο πόλο, S , του μαγνήτη.

Η μαγνητική ροπή ενός μαγνητικού δίπολου, του οποίου οι εντάσεις των πόλων, p_1 και p_2 απέχουν απόσταση l , είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, M , του οποίου το μέτρο δίδεται από τη σχέση

$$M = pl \quad (\text{εξίσωση I.27)}$$

I.27)

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου, H , ορίζεται ως η δύναμη ανά ένταση μοναδιαίου πόλου που ασκείται από το μονόπολο, p_1 . Η ένταση του μαγνητικού πεδίου, H , είναι το μαγνητικό ανάλογο της επιτάχυνσης της βαρύτητας, g .

$$H = \frac{F_m}{p_2} = \frac{p_1}{\mu r^2} \quad (\text{εξίσωση I.28})$$

Μονάδα της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι το $N/(Amp\cdot m)$ ή tesla (T), από το όνομα του εφευρέτη Nikola Tesla. Επειδή οι τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης που μετριοούνται στη μαγνητική διασκόπηση είναι μικρές, συνήθως χρησιμοποιείται η υποδιαίρεση nanotesla (nT), όπου $1nT = 10^{-9}T$. Το nanotesla συνήθως αναφέρεται και ως γ (γάμμα). Η μέση ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι περίπου 50.000 nT ή 50.000 γ . Μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων είναι το 1oe (oersted), όπου $1oe = 10^5 \gamma$.

Μαγνητική Επαγωγή

Όταν ένα μαγνητικό υλικό, όπως ο σίδηρος, τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, H , το μαγνητικό υλικό θα παράγει τη δική του μαγνήτιση. Το φαινόμενο αυτό καλείται μαγνητική επαγωγή.

Η ένταση του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου του μαγνητικού υλικού καλείται ένταση μαγνήτισης I .

Η ένταση της μαγνήτισης, I , συνδέεται με την ένταση του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου, H , μέσω μιας σταθεράς αναλογίας, k , η οποία ονομάζεται μαγνητική επιδεκτικότητα

$$I = kH \quad (\text{εξίσωση I.29})$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μία αδιάστατη σταθερά που καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού και εκφράζει το μέτρο ευκολίας μαγνήτισής του. Μπορεί να πάρει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές. Οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο, I , είναι στην ίδια διεύθυνση με το επαγωγικό πεδίο, H . Οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν ότι το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο είναι σε αντίθετη διεύθυνση από το επαγωγικό πεδίο.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο θα είναι το άθροισμα του επαγωγικού και του επαγόμενου πεδίου, δηλαδή

$$B = H + 4\pi I = H + 4\pi kH = (1 + 4\pi k)H = \mu H \quad (\text{εξίσωση I.30})$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα.

Στις μαγνητικές έρευνες, η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι η θεμελιώδης ιδιότητα των υλικών, των οποίων η χωρική κατανομή επιχειρείται να καθορισθεί. Κατά αυτήν την έννοια, η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι ανάλογη της πυκνότητας στις βαρυτομετρικές έρευνες.

I.4.2 Επιδεκτικότητες των Πετρωμάτων και των Ορυκτών

Σε αντίθεση με την πυκνότητα, στην περίπτωση της επιδεκτικότητας παρατηρείται μεγάλο εύρος τιμών, όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών πετρωμάτων αλλά και σε πετρώματα του ίδιου τύπου. Δεν είναι σπάνιο να βλέπει κανείς μεταβολές στην επιδεκτικότητα αρκετών τάξεων μεγέθους για διαφορετικά δείγματα πυριγενών πετρωμάτων. Επιπλέον,

όπως συμβαίνει και με την πυκνότητα, υπάρχει σημαντική επικάλυψη στις μετρούμενες επιδεκτικότητες. Επομένως, μόνο η γνώση της επιδεκτικότητας δεν είναι επαρκής για τον προσδιορισμό του είδους του πετρώματος και, αντίστροφα, η γνώση του είδους του πετρώματος συχνά δεν είναι επαρκής για τον υπολογισμό της αναμενόμενης επιδεκτικότητας. Στον Πίνακα I.5 παρουσιάζονται οι τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας διαφόρων πετρωμάτων και ορυκτών

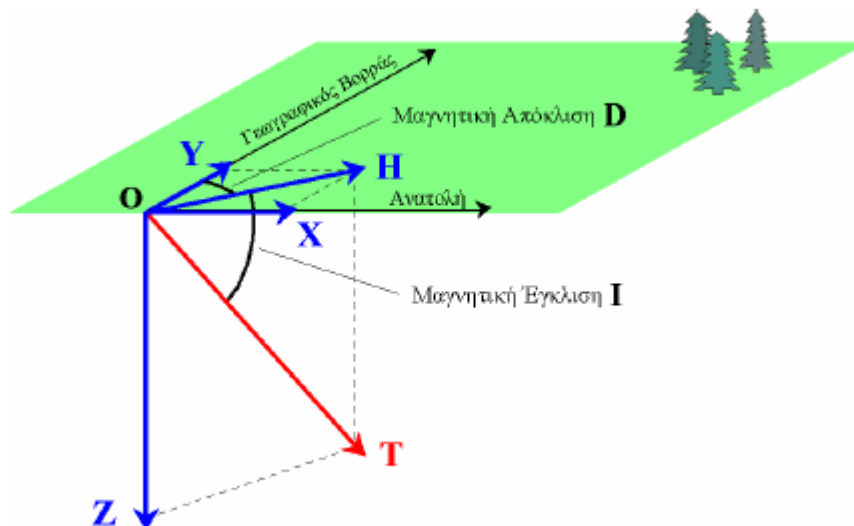
Πίνακας I.5 : Μαγνητικές επιδεκτικότητες διαφόρων πετρωμάτων και ορυκτών

Υλικό	Επιδεκτικότητα * 10 ³
Αέρας	~0
Χαλαζίας	-0.01
Ορυκτό άλας	-0.01
Ασβεστίτης	-0.001 - 0.01
Σφαλερίτης	0.4
Σιδηροπυρίτης	0.05 - 5
Αιματίτης	0.5 - 35
Ιμηνίτης	300 - 3500
Μαγνητίτης	1200 - 19200
Ασβεστόλιθος	0 - 3
Ψαμμίτης	0 - 20
Αργιλικός σχιστόλιθος(shale)	0.01 - 15
Σχίστης(schist)	0.3 - 3
Γνεύσιος	0.1 - 25
Σχιστόλιθος (Slate)	0 - 35
Γρανίτης	0 - 50
Γάββρος	1 - 90
Βασάλτης	0.2 - 175
Περιδοτίτης	90 - 200

Παρατηρείται πως η μέση τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι αρκετά μικρότερη από αυτή των μεταμορφωμένων και των εκρηξιγενών.

I.4.3 Ονοματολογία του Μαγνητικού Πεδίου της Γης

Σε κάθε σημείο πάνω στη Γη, το διάνυσμα του ολικού μαγνητικού πεδίου, T, έχει κάποια ένταση και δείχνει προς κάποια κατεύθυνση. Για το λόγο αυτό το διάνυσμα T πρέπει να προσδιορίζεται ως προς ορισμένο σύστημα αναφοράς για να είναι δυνατός ο καθορισμός των μεταβολών της έντασης. Ως σύστημα αναφοράς θεωρείται ένα τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων, που έχει αρχή το σημείο O, στο οποίο επιδιώκεται να προσδιοριστεί το διάνυσμα της έντασης, T, ως άξονα x τη διεύθυνση ανατολής – δύσης, ως άξονα y τη διεύθυνση βορρά – νότου και ως άξονα z την κατακόρυφη διεύθυνση.



Εικόνα I.27: Ονοματολογία μαγνητικού πεδίου της Γης (Λούης 2003).

Το διάνυσμα T αναλύεται στη κατακόρυφη συνιστώσα Z , που θεωρείται θετική όταν έχει φορά προς τα κάτω και στην οριζόντια συνιστώσα H , η οποία αναλύεται στη μεσημβρινή συνιστώσα Y , που θεωρείται θετική όταν έχει φορά προς το βορρά και στη συνιστώσα X , που θεωρείται θετική όταν έχει φορά προς την ανατολή.

Το κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από το O και περιλαμβάνει τις συνιστώσες H και Z ονομάζεται μαγνητικός μεσημβρινός, ενώ αυτό που περιλαμβάνει τις X και Z είναι ο γεωγραφικός μεσημβρινός.

Οι παρακάτω όροι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της γης.

- Μαγνητική απόκλιση D (Declination) – είναι η γωνία μεταξύ του Βορρά και της οριζόντιας προβολής, H , του T . Η τιμή που μετριέται είναι θετική προς τα ανατολικά και μεταβάλλεται από 0 έως 360 μοίρες.

- Μαγνητική έγκλιση I (Inclination) – είναι η γωνία μεταξύ της επιφάνειας της γης και του T . Θετική έγκλιση υποδηλώνει ότι το T έχει φορά προς τα κάτω, ενώ αρνητική έγκλιση υποδηλώνει ότι το T έχει φορά προς τα πάνω. Η έγκλιση παίρνει τιμές από -90 έως 90 μοίρες.

- Μαγνητικός Ισημερινός (Magnetic Equator) – η θέση γύρω από την επιφάνεια της γης όπου το γήινο μαγνητικό πεδίο έχει έγκλιση μηδέν. Η θέση αυτή δεν αντιστοιχεί στον ισημερινό της περιστροφής της γης.

- Μαγνητικοί Πόλοι (Magnetic Poles) – οι θέσεις στην επιφάνεια της γης όπου το γήινο μαγνητικό πεδίο έχει έγκλιση είτε -90 είτε $+90$. Οι θέσεις αυτές δεν αντιστοιχούν στο βόρειο και νότιο πόλο. Ο βόρειος μαγνητικός πόλος έχει γεωγραφικές συντεταγμένες $75^{\circ}N$, $101^{\circ}W$ περίπου και ο νότιος πόλος έχει γεωγραφικές συντεταγμένες $67^{\circ}S$, $143^{\circ}E$ περίπου.

I.4.4 Διεξαγωγή της μαγνητικής έρευνας

Η μαγνητική διασκόπηση περιλαμβάνει τη μέτρηση της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου της γης ή κάποιας συνιστώσας της σε διάφορα σημεία της υπό έρευνα

περιοχής. Τα σημεία των μετρήσεων διατάσσονται σε κανονικές συνήθως αποστάσεις κατά μήκος γραμμών και πρέπει να βρίσκονται μακριά από πηγές μαγνητικών διαταραχών όπως ηλεκτρικά καλώδια, γέφυρες ή κτίρια. Οι αποστάσεις των σημείων εξαρτώνται από το σκοπό της έρευνας και το αναμενόμενο μέγεθος του στόχου. Οι γραμμές της έρευνας συνήθως διατάσσονται παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα στην αναμενόμενη διεύθυνση του στόχου, έτσι ώστε να σχηματίζεται ένα κανονικό δίκτυο που να καλύπτει επαρκώς την περιοχή που πρόκειται να ερευνηθεί. Όπως το βαρυτικό πεδίο, έτσι και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με το χρόνο. Όταν περιγράφονται παροδικές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου, είναι χρήσιμο να κατατάσσονται αυτές οι μεταβολές σε έναν από τους τρεις παρακάτω τύπους ανάλογα με το ρυθμό εμφάνισης και την πηγή: α) Αιώνιες Μεταβολές β) Κανονικές / Ημερήσιες Μεταβολές γ) Μαγνητικές Καταιγίδες.

Πριν την έναρξη της έρευνας επιλέγεται στην ευρύτερη περιοχή, αλλά μακριά από πιθανές φυσικές ή τεχνητές πηγές ανωμαλιών, ένα σημείο αναφοράς που καλείται βάση των μετρήσεων. Το σημείο αυτό χρησιμοποιείται για τη διόρθωση των ημερήσιων μεταβολών και της πορείας του οργάνου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη λήψη μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα στη βάση για τον έλεγχο των μεταβολών αυτών και την αφαίρεσή τους από τις μετρήσεις των επόμενων σημείων της έρευνας.

Η τοπογραφική διόρθωση κατά τη μαγνητική διασκόπηση είναι σχετικά μικρή και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Επομένως, δεν απαιτείται λεπτομερής τοπογραφική αποτύπωση, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της βαρυτομετρικής διασκόπησης. Τα μαγνητικά αποτελέσματα μπορούν να απεικονισθούν είτε ως τομές των διάφορων μαγνητικών εντάσεων κατά μήκος μιας γραμμής μετρήσεων είτε ως χάρτες ισοανωμάτων καμπυλών.

I.4.5 Τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων

Για την επεξεργασία των μετρήσεων και την καλύτερη παρουσίασή τους έχουν αναπτυχθεί ορισμένες υπολογιστικές τεχνικές που διευκολύνουν την εξαγωγή συμπερασμάτων και τον προσδιορισμό των στόχων. Από αυτές οι βασικότερες είναι οι εξής:

- *Αναγωγή στον πόλο (Reduction to the pole)*

Η αναγωγή στον πόλο μετατρέπει μια ανωμαλία που έχει καταγραφεί λόγω του μαγνητικού πεδίου σε κάποιο τυχαίο γεωγραφικό πλάτος, στην ανωμαλία που θα προέκυπτε αν το μαγνητικό πεδίο ήταν κατακόρυφο, όπως είναι στους πόλους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα συμμετρικό σώμα να παράγει συμμετρική ανωμαλία κάτι που διευκολύνει τον προσδιορισμό της θέσης του σώματος.

- *Ψευδοβαρυτική Μετατροπή (Pseudogravity Transformation)*

Με αυτήν την τεχνική από τα δεδομένα των μαγνητικών μετρήσεων προκύπτει μια υποθετική βαρυτική ανωμαλία μέσω κατάλληλης αντιστοίχισης της μαγνητικής επιδεκτικότητας και μιας διαφοράς πυκνότητας. Η βαρυτική αυτή ανωμαλία πιθανόν να διευκολύνει τον προσδιορισμό του υπεδάφικου σώματος που προκαλεί τη διαταραχή. Επιπλέον ισχύουν οι διάφορες τεχνικές που παρουσιάστηκαν στη βαρυτική μέθοδο

Βιβλιογραφία

Azate, J., Flores, L., Chavez, R., Barba, L., and Manzanilla, 1990, Magnetic prospecting for tunnels and caves in Teotihuacan, Mexico, *in* Ward, S.H., Ed., Geotechnical and environmental geophysics: **1**, Society Exploration Geophysicists, 155-162 L.,

Apostolopoulos G., Pavlopoulos K., Stamataki S., 2009, Geophysical Survey in Lavrion City for the Detection of Water Resources and Underground Voids or Cavities, 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.

Barker, R.D., 1991. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, 1031-1037.

Benson R., Kaufmann R., Yuhr L., Hopkins R., 2003, Locating and Characterizing abandoned mines using microgravity. *Geophysical Technologies For Detecting Underground Coal Mine Voids Forum*, July 28-30, Lexington Kentucky.

Bezdek, J., 1981, *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*: Plenum Press.

Bosch, M., 2004, The optimization approach to lithological tomography: Combining seismic data and petrophysics for porosity prediction, *Geophysics*, 69, 1272–1282.

Branston M.W., and Styles P., 2006, Site characterization and assessment using the microgravity technique: a case history, *Near Surface Geophysics*, 377-385.

Butler D. K., 1984, Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities, *Geophysics* **49**, 1084-1096.

Dahlin T. and Zhou B., 2004, A numerical Comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays, *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.

Dahlin T., Wisén R., & Zhang D., 2007, 3D Effects on 2D Resistivity Imaging – Modelling and Field Surveying Results, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, Turkey, 3–5 September.

Dahlin, T. and Bernstone, C., 1997, A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multielectrode arrays, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Reno, Nevada, vol 2, 927-935.

Debeglia N., Bitri A. and Thierry P., 2006, Karst investigations using microgravity and MASW; Application to Orléans, France, *Near Surface Geophysics* 4, 215-225.

Dobrin M. and Savit C., 1988, *Intoduction to Geophysical Prospecting*, McGraw-Hill Inc, 4th edition.

Edwards L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.

Elo S., 2006, Problems and Progress in Near Surface Gravity, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Helsinki, Finland.

Ezersky M., Bruner I., Keydar S., Trachtman P. and Rybakov M., 2006, Integrated study of the sinkhole development site on the Western shores of the Dead Sea using geophysical methods, Near Surface Geophysics 4, 335-343.

Fourpot, Fourier transform based processing of 2D potential field data Version 1.0a User's guide, January 2009 University of Oulu Department of Physics Geophysics, <http://www.cc.oulu.fi/~mpi/softat>

Furman A., Warrick A., Ferre Ty., 2002, Electrical Properties Distributions in a Heterogeneous Subsurface in Response to Applied Current: Solution for Circular Inclusions. Vadose Zone Journal, Vol. 1, p 273-280, November

Gunter T., 2004, Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements, phd thesis, university of Freiberg.

Günther T., (2003-2007). DC3dinvres-Direct Current 3d inversion and Resolution. Online available at <http://dc2dinvres.resistivity.net>.

Griffiths D.H. and Barker R.D., 1993, Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226.

Hathaway R. and Bezdek J. C., 2001, Fuzzy *c*-means clustering of incomplete data: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 31, 735–744.

Hinze, 1990, The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies, Geotechnical and Environmental Geophysics: Investigations in Geophysics No 5, Vol. 1, SEG. pp. 75-126.

Höppner F., Klawonn F., Kruse R., and Runkler T., 1999, Fuzzy cluster analysis: Methods for classification, data analysis and image recognition, John Wiley & Sons, Inc.

Johansson B., Jones. S, Dahlin T., Flyhammar P., 2007, Comparisons of 2D- and 3D-Inverted Resistivity Data As Well As of Resistivity- and IP-Surveys on a Landfill, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, Turkey, 3–5 September.

Johnson W.J., 2003, Case Histories of DC resistivity measurements to map shallow coal mine workings, The Leading Edge 22, 571-573.

Kaufmann L., and Rousseeuw P., 1990, Finding groups in data: An introduction to cluster analysis, John Wiley & Sons, Inc.

Keary Ph. & Brooks M., 1991, An Introduction to Geophysical Exploration, 2nd edition, Blackwell Scientific Publishers

Keller G.V. and Frischknecht F.C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon Press Inc., Oxford,

Kim J., Song Y., Seol S. and Kim K., 2007, Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam, Journal of Environmental and Engineering Geophysics 12, 221-235.

Kis L., Szabo Z., 2005, Microgravimetric investigations for shallow depth cavity detection, Near Surface 2005, Palermo Italy.

Loke, 2003, Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. (www.geoelectrical.com)

Lorenzo H. ,Hernandez M., Cuellar V., 2002, Selected Radar Images of Man-made Underground Galleries, Archaeological Prospection Vol. 7, p 1-7.

Lowry, T., and Shive, P. N., 1990, An evaluation of Bristow's method for the detection of subsurface cavities: Geophysics, 55, 514-520.

Louis I, Karastarhis V., Vafidis A., and Louis F, 2002, Resistivity modelling and imaging methods for mapping near-surface features: Application to a site characterization at the ancient Temple of Olympian Zeus in Athens, Journal of the Balkan Geophysical Society, Vol. 5, No 4, November 2002, p. 135-144

Louis, I. and Papadopoulos, T., 2001, Geophysical Site Assessment at the Ancient Temple of Olympian Zeus in Athens: Technical Report, part B (towers C, D, E and F), Athens.

Matias M. 2008, Electrical methods and cavity research and location (tripotential methods, Wenner array, resistivity imaging, modelling, EM, location of cavities in karst and old mines), Workshop in Engineering and Environmental Geophysics, National Technical University of Athens.

McGillivray, P.R. and Oldenburg, D.W., 1990. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem : A comparative study, Geophysical Prospecting, **38**, 499-524.

McMechan, G. A., Yedlin, M. J., 1981, Analysis of dispersive waves by wave field transformation, Geophysics, Vol. 46, pp. 869 – 874.

Musil, M., Maurer H., and Green A., 2003, Discrete tomography and joint inversion for loosely connected or unconnected physical properties: Application to crosshole seismic and georadar data sets: Geophysical Journal International, 153, 389–402.

Nabighian M. , Ander M., Grauch V., Hansen R., LaFehr T., Li Y., Pearson W., J. Peirce7, Phillips J., and Ruder M., 2005, Historical development of the gravity method in exploration Geophysics, VOL. 70, NO. 6.

Nasseri A., 2006, Study of the effect of lateral inhomogeneities on the propagation of Rayleigh waves in an elastic medium, phd thesis, Waterloo, Ontario, Canada.

Nazarian, S., Stokoe, K. H., and Hudson, W. R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: *Transport. Res. Record*, 930, 38–45.

NETTLETON L. L., 1971, "ELEMENTARY GRAVITY AND MAGNETICS FOR GEOLOGISTS AND SEISMOLOGISTS", TULSA, SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS

Noel M., and Xu, B., 1991, Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study: *Geophys. J. Int.*, 107, 95-102.

Nyari Zs., 2003, Problems of detecting buried 3D objects with 2D geoelectric profiling methods 65th EAGE Conference & Exhibition, Stavanger, Norway, Extended Abstract.

Orfanos C., Apostolopoulos G., Amolochitis G. and Leontarakis K., 2008. Integrated Geophysical Approach for the Detection of Underground Voids in a Construction Site. 70th EAGE Conference & Exhibition, Rome, Italy.

Paasche H and Tronicke J, 2007, Cooperative inversion of 2D geophysical data sets: a zonal approach based on fuzzy *c*-means cluster analysis, *Geophysics* 72.

Paasche H., Wendrich A., Tronicke J. and Trela C., 2008, Detecting voids in masonry by cooperatively inverting P-wave and georadar traveltimes, *J. Geophys. Eng.* 5, 256–267.

Paasche, H., Tronicke J., Holliger K., Green A., and Maurer H., 2006, Integration of diverse physical-property models: Subsurface zonation and petrophysical parameter estimation based on fuzzy *c*-means cluster analyses: *Geophysics*, 71, no. 3, H33–H44.

Park C., Miller R. and Xia J., 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800–808.

Park, C. B., Xia, J., and Miller, R. D., 1998, Ground roll as a tool to image near-surface anomaly: 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 874–877.

Park, C.B., Miller R.D., and Xia J., 1996, Multi-channel analysis of surface waves using Vibroseis, Soc. Expl. Geophys., p. 68-71.

Pirttijärvi, M. and Elo, S., 2006. Constrained inversion of gravity data. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, Special issue 1, p. 124.

Pirttijärvi M, 2009. GRABLOX2 : Gravity interpretation and modeling software based on 3-D block models, User's guide to version 2.0, University of Oulu Department of Physics.

Radogna, P.V., Chasseriau, P., Logean, P. & Olivier, R., 2004, Bedrock modelling in urban environment by microgravimetry: methodology for topographic correction, 2nd Swiss Geoscience Meeting, Lausanne.

Rene R., 1996, «GRAVIMETRIC MAPPING OF AN ABANDONED UNDERGROUND LIMESTONE MINE IN CLARK COUNTY, INDIANA», Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering And Environmental Problems, 1996.

Res2dinv, Geoelectrical Imaging 2D & 3D, Geotomo software, 2004. (www.geoelectrical.com).

Res2mode, 2d Resistivity & IP forward modeling by Loke M., 2002.

Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D., 1970, Vibrations of soils sand foundations, Prentice-Hall, Inc.

Robain H., 1999, The location of infinite electrodes in pole-pole electrical surveys: consequences for 2D imaging, *Journal of Applied Geophysics* 41 313-333.

Rybakov M. and Rotstein Y., 2005, Cave detection near the Dead Sea—a micromagnetic feasibility study, *The Leading Edge*; v. 24; no. 6; p. 585-590

Rybakov, M., Goldshmidt, V., Fleischer, L. and Rotstein, Y., 2001. Cave detection and 4-d monitoring: a microgravity case history near the Dead Sea, *The Leading Edge*. V. 20, 8: 896-900

Rymer, H., 1989, A contribution to precision microgravity data analysis using LaCoste and Romberg gravity meters, *Geophysical Journal*, 97, 311–322.

Sheets R., 1997, Use of Electrical Resistivity to Detect Underground Mine Voids in Ohio, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 02–4041.

Sheehan, J.R., Doll W. E., Mandell W.A., and Watson D.B., 2005. Detecting Cavities with Seismic Refraction Tomography: Can it be done?. Extended abstract, presented at the 2005 Annual Meeting of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Atlanta, GA, April 3-7.

Sheriff R.E. 1984. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 2nd edition. Society of Exploration Geophysicists.

Silvester P.P. and Ferrari R.L., 1990, Finite elements for electrical engineers, Cambridge University Press.

Socco V. and Strobbia C., 2004, Surface wave method for near characterization: a tutorial, *Near Surface Geophysics*, 165-185,

Sotiropoulos P., Kaplanidis G, Sideris G. and Pantelopoulos K., 2008, Georadar and geotechnical investigations of foundation conditions at the proposed aeolian park of

Ktenias, Tripoli, (Greece), Workshop in Engineering and Environmental Geophysics, National Technical University of Athens.

Stokoe, K. H., Wright, G. W., James, A. B., and Jose, M. R., 1994, Characterization of geotechnical sites by SASW method, *in* Woods, R. D., Ed., Geophysical characterization of sites: Oxford Publ. , 1994

Strobbia C., 2002, Surface wave method: acquisition, processing and inversion. PhD dissertation, Politecnico di Torino.

Stummer P., Maurer H., and Green A., 2004, Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information, *GEOPHYSICS*, VOL. 69, NO. 1; P. 120–139.

Styles P., Toon S., Thomas E., Skittral M., 2006. Microgravity as a tool for the detection, characterization and prediction of geohazard posed by abandoned mining activities. *First Break*, 24,51-60.

Styles P., Toon S., Thomas E., Skittral. M., 2004, The use of microgravity for the detection and characterization of sinkholes and Historic extraction features in the chalk, Near Surface - 10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht, The Netherlands

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 860p.

Torrese P., Rainone M. and Signanini P., 2008, Integrated Approach Using Body Waves, Surface Waves and Gravimetric Prospections for Solving an Urban Geology Problem: The Abbadia San Salvatore Case (Siena, Italy), Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP '08), Philadelphia, Pennsylvania, SAGEEP v.21, 973-987.

Torge W., *Gravimetry*, 1989, Walter De Gruyter, Berlin-NY.

Tsokas G., Tsourlos P., Vargemezis G., Sotiropoulos P. and Psarinopoulos N. 2005. ERT and GPR survey for the detection of tunnels in the park of Aegaleo (Athens). Near Surface, Palermo, Italy.

Tsourlos P., 2004, Inversion of electrical resistivity tomography data deriving from 3d structures, *Bulletin of Geological Survey of Greece*, Proceedings of the 10 International Congress, Thessaloniki

Ward S.H., 1990, Resistivity and induced polarization methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics. Investigations in Geophysics No 5, Vol. 1, SEG.*

Wightman W., 2003, Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems, Technical Manual, September 2003. (<http://www.cflhd.gov/geotechnical>)

Wilkinson P., Meldrum P., Chambers J., Kuras O. and Ogilvy R., Improved strategies for the automatic selection of optimized sets of electrical resistivity tomography measurement configurations, *Geophys. J. Int.* **167**, 1119–1126, 2006.

Xeidakis. G.S., Torok A., Skias S. and Kleb B., 2004. Engineering Geological Problems Associated With Karst Terrains: Their Investigation, Monitoring, And Mitigation And Design Of Engineering Structures On Karst Terrains, Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVI.

Xia J., Miller R., Park C., Ivanov J., 2000, Construction of 2-D Vertical Shear Wave Velocity Field By the Multichannel Analysis of Surface Wave Technique, Proceedings of the S.A.G.E.E.P, Arlington, Va, February 20-24,

Xia, J., Miller R.D., and Park C.B, and Ivanov J., 2000, CONSTRUCTION OF 2-D VERTICAL SHEAR-WAVE VELOCITY FIELD BY THE MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVE TECHNIQUE, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Arlington, Va., February 20-24, p. 1197–1206.

Xia, J., Miller R.D., and Park C.B., 1997, Estimation of shear wave velocity in a compressible Gibson half-space by inverting Rayleigh wave phase velocity: Technical Program with Biographies, SEG, 67th Annual Meeting, Dallas, TX, p. 1927-1920.

Xia, J., Miller R.D., and Park C.B., 1998, Construction of vertical seismic section of near-surface shear-wave velocity from groundroll [Exp. Abs.]: Soc. Explor. Geophys./AEGE/CPS, Beijing, p. 29-33.

Xia, J., Miller R.D., and Park C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics*, v. 64, p. 691-700.

Yang X, Lagmanson M., 2006, Comparison of 2D and 3D Electrical Resistivity Imaging Methods, 19 sageep,

Yang X. and Lagmanson M., 2003, Planning resistivity surveys using numerical simulations» Sageep, 488-501,

Yule et al., 1997, Microgravity investigations of foundation conditions, *Geophysics*, 63, 95-103

Βαφείδης Α., Μανούτσουγλου Ε., Ανδρονικίδης Ν., Hamdan Η., Κουκαδάκη Μ., Κρητικιάκης Γ., Οικονόμου Ν., και Σπανουδάκης Ν, 2004, Γεωφυσική διασκόπηση στο οροπέδιο Ομαλού, Ν. Χανίων, Πρακτικά του 10ου Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής γεωλογικής Εταιρίας, 15 – 17 Απριλίου, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, 1204-1213.

Βουδούρης 2009, Σημειώσεις Μάθηματος : Θέματα Υδρογεωλογίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Δερμάτης Γ, 2003, ΛΑΥΡΕΙΟ ΤΟ ΜΑΥΡΟ ΦΩΣ « Η ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΣΤΟ ΛΑΥΡΕΙΟ 1860-1917. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΚΑΙ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ., Τεχνολογικό Πάρκο Λαυρίου.

Καλιαμπάκος Δ. 2009, Εξυγίανση εδαφών στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου: Ένα πρωτοποριακό εγχείρημα του Ε.Μ.Π., www.ntua.gr

Καραπαντελάκη, 2008, ΥΠΕ Ιαρίωνα: Τα σημαντικότερα γεωλογικά & γεωτεχνικά προβλήματα που αντιμετώπισε η μελέτη & η κατασκευή μέχρι τώρα, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, Τ.Ε.Ε.

Κατσιβέλης, Μάλιος Ι., 2001, Σήραγγα Δωδώνης σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς με καρστικά έγκοιλα- εμπειρίες, αντιμετώπιση, Ημερίδα Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.: Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού.

Κρητικάκης, Γ., Βαφείδης, Α., Gourry, J., C., 2004, Ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh και εφαρμογή σε χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Β. Ιταλία και στη βιομηχανική περιοχή Porto Petroli, Genoa, Πρακτικά του 10ου Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 15 – 17 Απριλίου, Θεσσαλονίκη.

Λαμπρινάκος Π., Μαρίνος Π., 2007, Νέες Εξελιγμένες Μέθοδοι Μηχανικής Διάνοιξης Σηράγγων, Ημερίδα Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.

Λούης Ι. 2003, Εισαγωγή στη Γεωφυσική Έρευνα, Πανεπιστημιακές εκδόσεις, Αθήνα

Marinos, 2005, Experience in Tunneling through Karstic Rocks, Serbian & Montenegro national committee, Water resources and Environmental problems in Karst, Belgrade.

Μαρίνος Γ. & Petrascheck W., 1956, “ΛΑΥΡΙΟΝ”, Ι.Γ.Ε.Υ. Γεωλογικά και Γεωφυσικά μελέται, τόμος IV, τεύχος 1, σελ. 247.

Μουτάφης Ι., 2008, Αστοχίες και ατυχή συμβάντα Ελληνικών Φραγμάτων, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων, Τ.Ε.Ε.

Παπαδέας Γ., 2003, “Γεωλογικός Χάρτης Αττικής κλίμακας 1:50.000 – Επεξηγηματική Μελέτη”, ΙΓΜΕ, Αθήνα.

Ρόζος 2005, Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας, Ηλεκτρονικές σημειώσεις.

Τσαΐμου Γ.Κ., 2005, « Η μεταλλευτική στοά στο Μπερτσέκο», ΑΔ, Υπουργείο Πολιτισμού, τόμος 60