



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΕΜ:5797

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΤΗ ΜΕΝΕΜΕΝΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023



ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ:5797

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΤΗ ΜΕΝΕΜΕΝΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέποντες

ΤΣΟΥΡΛΟΣ Π.

ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ Γ.

Καθηγητής Α.Π.Θ.

Καθηγητής Α.Π.Θ.

© Παπανικολάου Δημήτριος, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, Τομέας Γεωφυσικής, 2023

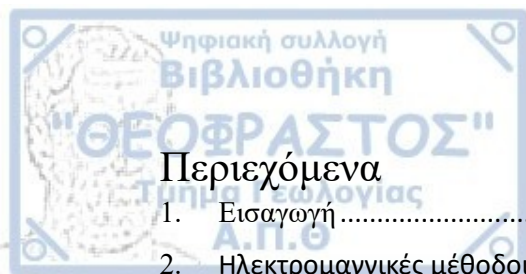
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΑΡΟΔΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΤΗ ΜΕΝΕΜΕΝΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ- Διπλωματική εργασία

© Papanikolaou Dimitrios, School of Geology, Department of Geophysics, 2023

All rights reserved.

INTERPRETATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC DATA APPLIED IN
AN AREA OF MENEMENI, THESSALONIKI – Bachelor Thesis



Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
2. Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι και η μέθοδος των παροδικών κυματομορφών (Μέθοδος TEM)	3
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Μέθοδοι παροδικών πεδίων (TEM)	4
2.3 Μετρήσεις με τη μέθοδο παροδικών πεδίων	5
2.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα και εφαρμογές της μεθόδου παροδικών πεδίων. .	8
2.5 Όργανα μέτρησης της μεθόδου TEM και δεδομένα USF	9
3. Βοηθητικό πρόγραμμα υπολογισμού φαινόμενης αντίστασης.....	13
3.1 Μέθοδος- Τύποι.....	13
3.2 Παράδειγμα Εφαρμογής σε μια βυθοσκόπηση.....	14
3.3 Εφαρμογή σε τομή (2D).....	16
3.4 Εφαρμογή σε τρισδιάστατη προβολή.....	17
3.5 Περιγραφή του βοηθητικού προγράμματος.....	18
3.6 Διάγραμμα ροής του προγράμματος.....	23
4. Εφαρμογή στην περιοχή Μενεμένης, Θεσσαλονίκη	24
4.1 Περιγραφή περιοχής.....	24
4.3 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων δισδιάστατων τομών TEM	29
4.3.1 Χαρακτηριστικά προφίλ TEM	31
Προφίλ 2d_In2.usf	32
Προφίλ 2d_In3.usf	33
Προφίλ 2d_In3_5.usf	34
Προφίλ 2d_In4.usf	35
4.4 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων τρισδιάστατων τομών	36
4.4.1 Γράφημα για το βάθος των 3.375 μέτρων.....	36
4.4.2 Γράφημα για το βάθος των 4.375 μέτρων.....	37
4.5 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων μέσω Voxler.....	38
5. Συμπεράσματα.....	41
6. Βιβλιογραφία.....	45
Παράρτημα.....	46



1. Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αφορά την εφαρμογή της μεθόδου παροδικών κυματομορφών (μέθοδος TEM) για τον εντοπισμό θαμμένων δεξαμενών.

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται και σχολιάζονται στα επόμενα κεφάλαια, όπως και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές αποτελούν μέρος μίας γεωφυσικής διασκόπησης μεγαλύτερης κλίμακας που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του πρώην στρατοπέδου και τώρα χώρου αναψυχής στο Δήμο Μενεμένης στη Θεσσαλονίκη. Σκοπός αυτής της γεωφυσικής διασκόπησης ήταν ο εντοπισμός θαμμένων δεξαμενών στην ευρύτερη περιοχή του πάρκου (πρώην στρατοπέδου) ώστε μετά από την εκταφή και την απομάκρυνσή τους ο χώρος να αποδοθεί για άλλες χρήσεις. Στην γενικότερη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν μαγνητικές, ηλεκτρομαγνητικές (GPE και TEM) και ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν από τα μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου των παροδικών κυματομορφών (μέθοδος TEM) που έγινε σε κάνναβο πάνω από μια δεξαμενή ενώ παρουσιάζεται και τομή ηλεκτρικής τομογραφίας που διέρχεται πάνω από τη θέση της θαμμένης δεξαμενής.

Γενικά, η μέθοδος παροδικών πεδίων διαφέρει από τις υπόλοιπες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης καθώς αποτελεί μέθοδο μέτρησης στο πεδίο των χρόνων, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους που αφορούν το πεδίο των συχνοτήτων. Το πρωτογενές πεδίο της μεθόδου αυτής δεν είναι συνεχές, αλλά αποτελείται από μία ακολουθία διακοπτόμενων παλμών που διαρκούν συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι παλμοί αυτοί διαχέονται στο έδαφος και όταν εντοπιστεί κάποιος καλός αγωγός του ρεύματος δημιουργούνται μέσα σε αυτόν επαγωγικά κύματα, τα οποία παράγουν ένα δευτερογενές μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό επιστρέφει στην επιφάνεια και καθώς ο πομπός γίνεται ανενεργός μετριέται η ένταση του δευτερογενούς πεδίου που διέρχεται από το δέκτη στην επιφάνεια απουσία του πρωτογενούς πεδίου.

Στο πλαίσιο της εργασίας έγιναν μετρήσεις παροδικών κυματομορφών (μέθοδος TEM) με το όργανο WTEM-2. Για της μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του συμπίπτοντος βρόγχου (ο βρόγχος του πομπού και του δέκτη πρακτικά ταυτίζονται χωρικά. Για την ακριβή καταγραφή των θέσεων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε διαφορικό GPS (Trimble R6 – TSC3) με σύστημα αναφοράς HEPOS, για τον ακριβή εντοπισμό των θέσεων των μετρήσεων. Οι συνταγμένες στην παρούσα εργασία είναι στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87.

Οι μετρήσεις που αναλύονται στη συγκεκριμένη εργασία εκτελέστηκαν σε κάρναβο που αποτελείται από 13 παράλληλα προφίλ που είχαν απόσταση μεταξύ τους 1 μέτρου, με εξαίρεση ενός προφίλ που μετρήθηκε σε απόσταση μισού μέτρου από το προηγούμενο και το επόμενο προφίλ. Σε κάθε προφίλ γινόταν μέτρηση με τη μέθοδο παροδικών κυματομορφών ανά 1 μέτρο για απόσταση 20 μέτρων (20 βυθοσκοπήσεις ανά προφίλ). Επομένως, συνολικά εκτελέστηκαν 13X20 βυθοσκοπήσεις με τη μέθοδο TEM.

Παράλληλα, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού MatLab ένα βοηθητικό πρόγραμμα μετατροπής των ηλεκτρικών τάσεων σε φαινόμενες ηλεκτρικές αντιστάσεις και κατόπιν σε φαινόμενη βάθη με τη χρήση συγκεκριμένων εξισώσεων που θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Το πρόγραμμα αυτό στη συνέχεια δημιουργεί τομές φαινόμενης αντίστασης (ψευδοτομές) σε δισδιάστατη απεικόνιση και έπειτα συνδυάζοντας τις πληροφορίες από τις 13 τομές (προφίλ) μπορεί να προκύψει μία τρισδιάστατη απεικόνιση των φαινόμενων αντιστάσεων για ολόκληρη την περιοχή του καννάβου στον οποίον πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γενικές αρχές της μεθόδου των παροδικών κυματομορφών TEM, παρουσιάζεται το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε και αναλύονται τα δεδομένα που λαμβάνονται από το όργανο μετά από κάθε μέτρηση.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται το βοηθητικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού MatLab για την επεξεργασία και αξιοποίηση των δεδομένων που προκύπτουν από τις μετρήσεις.

Σκοπός του 4^{ου} κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της έρευνας και των αποτελεσμάτων από την περιοχή του στρατοπέδου της Μενεμένης στη Θεσσαλονίκη.

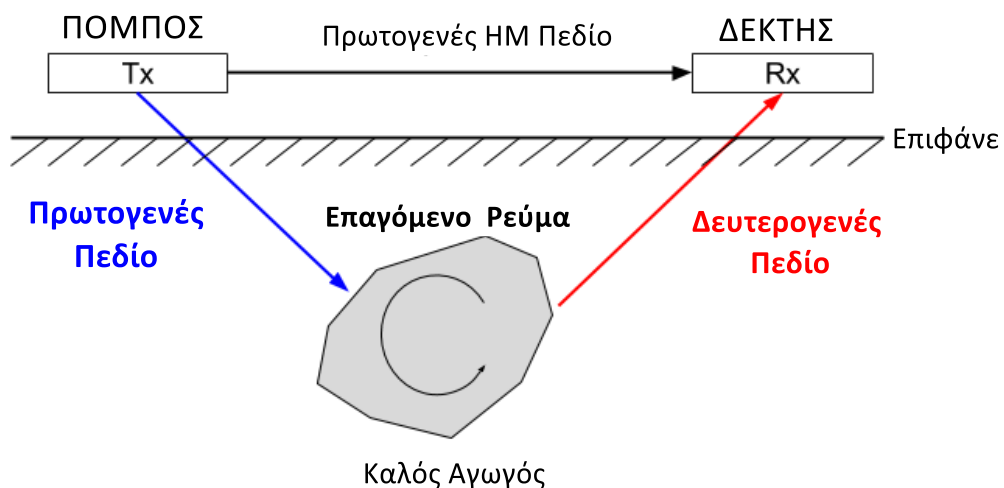
Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη έρευνα, ενώ τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες Καθηγητές του Τμήματος Γεωλογίας του ΑΠΘ κύριο Τσούρλο Παναγιώτη, και Βαργεμέζη Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια τους στην πρώτη μου επαφή στο πεδίο για την συλλογή και επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων και τις συμβουλές τους για την επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής μου. Τους ευχαριστώ επίσης όχι μόνο για την συνεργασία στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, αλλά για την εισαγωγή μου στο αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής κατά την διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

2. Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι και η μέθοδος των παροδικών κυματομορφών (Μέθοδος TEM)

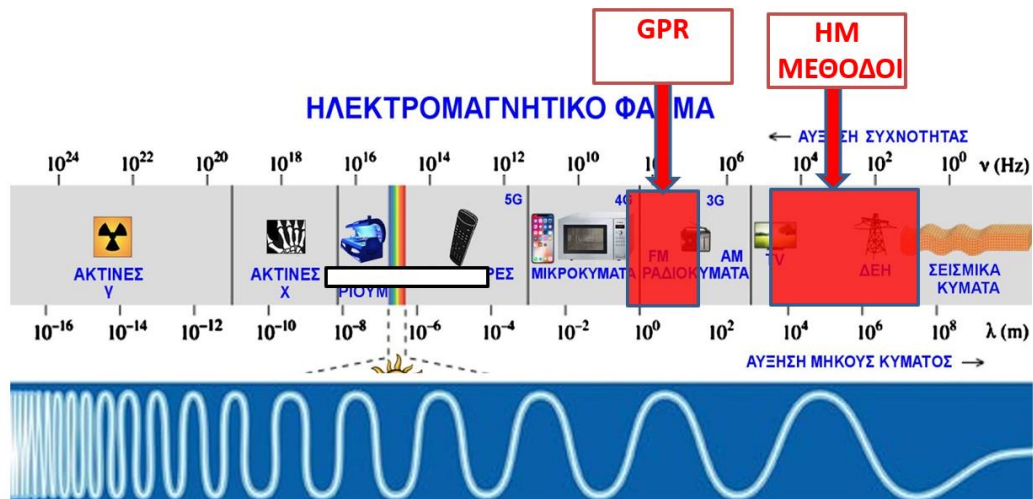
2.1 Γενικά

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι ερευνούν την απόκριση των εδαφών σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται από τον πομπό, τα οποία διαδίδονται στο έδαφος. Τα κύματα αυτά αποτελούν το πρωτογενές πεδίο. Όταν αυτά συναντήσουν έναν καλό αγωγό (π.χ. ένα μεταλλικό αντικείμενο) προκαλείται ροή εναλλασσόμενων ρευμάτων στο υπέδαφος, τα οποία επάγουν ένα δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο στην επιφάνεια καταγράφεται από τον δέκτη (εικόνα 2.1.1). Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αυτό εξαρτάται άμεσα από τις γεωηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στο οποίο διεξάγεται η έρευνα. Στόχος αποτελεί η εύρεση των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους μέσω των ιδιοτήτων του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που καταγράφεται στο δέκτη.



Εικόνα 2.1.1 Χρήση ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων για την εύρεση στόχου στο υπέδαφος (Τσούρλος Π, Βαργεμέζης Γ., 2023).

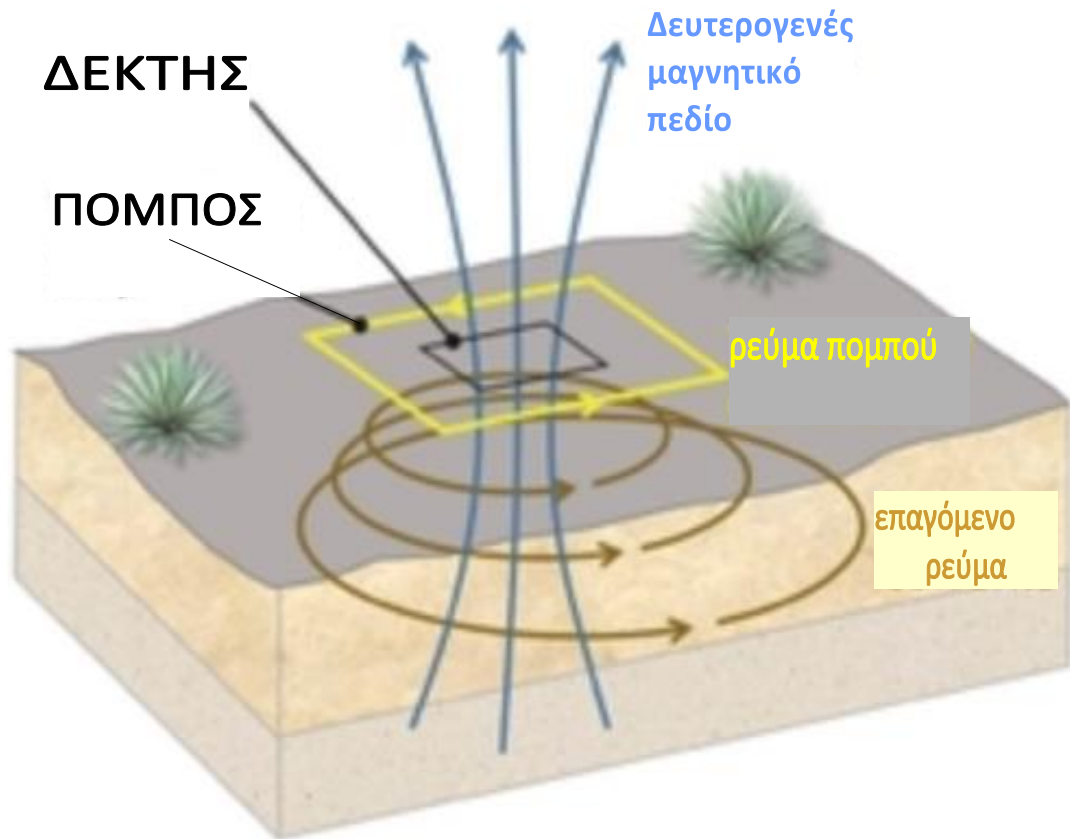
Οι ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση γίνεται με μεθόδους που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενα χαμηλής συχνότητας ρεύματα δίχως τη χρήση ηλεκτροδίων. Το εύρος των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται είναι 10-30.00 Hz (εικόνα 2.1.2).



Εικόνα 2.1.2 Εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση και σύγκριση με τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο GPR (Τσούρλος Π, Βαργεμέζης Γ., 2023).

2.2 Μέθοδοι παροδικών πεδίων (TEM)

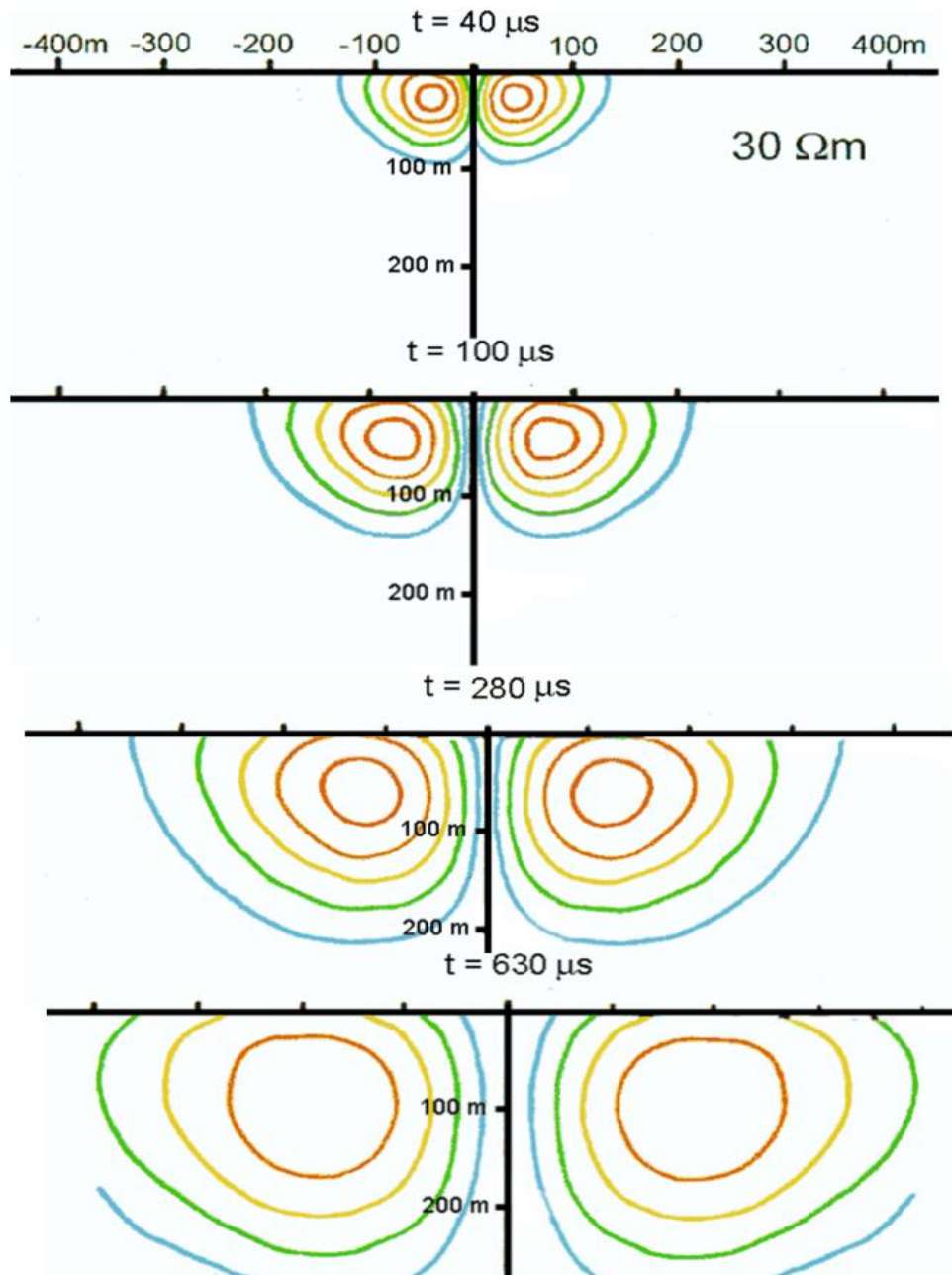
Η μέθοδος παροδικών κυματομορφών αποτελεί μία ηλεκτρομαγνητική μέθοδο που διαφέρει από τις υπόλοιπες καθώς οι μετρήσεις με αυτή τη μέθοδο γίνονται στο πεδίο του χρόνου και όχι των συχνοτήτων, όπως συμβαίνει με τις υπόλοιπες ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Κατά τη χρήση της μεθόδου αυτής παράγεται ένα πρωτογενές πεδίο από τον πομπό. Ωστόσο, το ρεύμα αυτό αποτελείται από διακοπτόμενους παλμούς συνεχούς ρεύματος. Οι παλμοί διαρκούν συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ενώ διακόπτονται απότομα. Όπως και στις υπόλοιπες ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους, έτσι και στη μέθοδο παροδικών πεδίων παράγεται το πρωτογενές πεδίο, το οποίο όταν συναντήσει έναν καλό αγωγό στο υπέδαφος προκαλεί στον αγωγό επαγωγικά ρεύματα, τα οποία με τη σειρά τους παράγουν το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο. Ο δέκτης στη συνέχεια καταγράφει στην επιφάνεια του εδάφους το δευτερεύον αυτό πεδίο, το οποίο καταφθάνει στον δέκτη όταν ο πομπός δεν εκπέμπει πια ρεύμα, είναι δηλαδή ανενεργός. Επομένως, το δευτερογενές πεδίο καταγράφεται δίχως την παρουσία πρωτογενούς (εικόνα 2.2.1).



Εικόνα 2.2.1 Παράδειγμα διάταξης της μεθόδου παροδικών πεδίων ((Τσούρλος Π , Βαργεμέζης Γ., 2023).

2.3 Μετρήσεις με τη μέθοδο παροδικών πεδίων

Αρχικά, χρησιμοποιείται ένας πομπός ο οποίος παράγει ηλεκτρικό παλμό συνεχούς διακοπτόμενου ρεύματος, ο οποίος ανοίγει και κλείνει με πολύ γρήγορο ρυθμό. Έτσι, ο παλμός αυτός φτάνει σε έναν βρόγχο καλωδίων συγκεκριμένου μήκους (π.χ. από 2 έως 500 μέτρα) που τοποθετείται στο έδαφος. Ο παλμός αυτός αποτελεί το πρωτογενές πεδίο. Μέσω του βρόγχου το ρεύμα διαχέεται στο έδαφος ως μία σειρά παλμών.

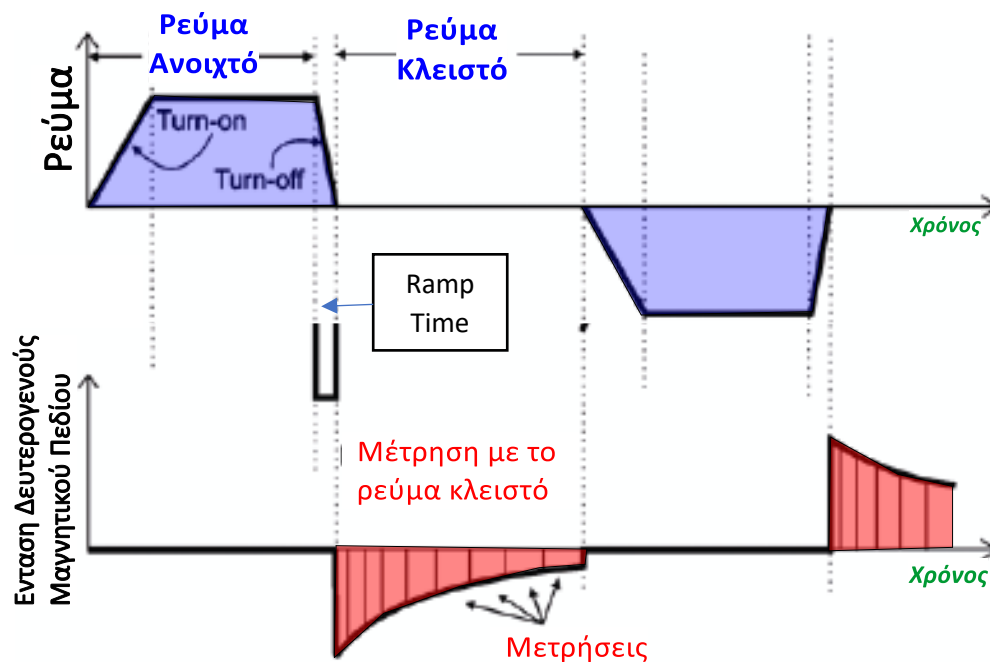


Εικόνα 2.3.1 Συνεχόμενοι διακοπτόμενοι παλμοί (πρωτογενές πεδίο) που διαχέονται όλο και βαθύτερα όσο περνάει ο χρόνος (Τσούρλος Π, Βαργεμέζης Γ., 2023).

Το δευτερεύον πεδίο που παράγεται όταν το πρωτογενές πεδίο συναντήσει κάποιον καλό αγωγό καταγράφεται στην επιφάνεια από τον δέκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο. Από την μειούμενη με τον χρόνο τάση του δευτερογενούς πεδίου γίνεται υπολογισμός της φαινόμενης αντίστασης καθώς και του βάθους σε συνάρτηση με τον χρόνο.

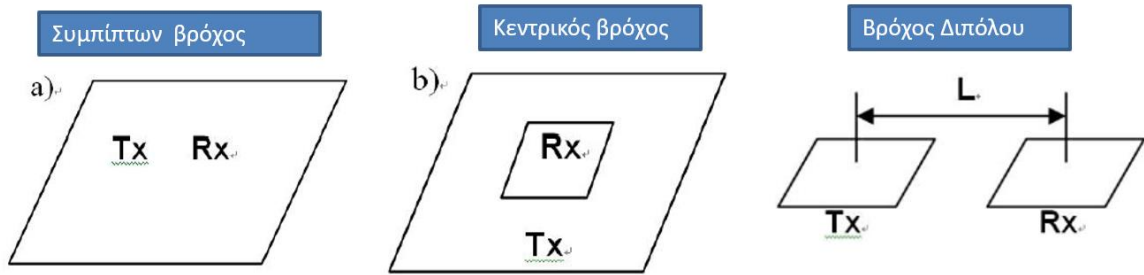
Επίσης, όσο περνάει ο χρόνος το σήμα διαχέεται όλο και βαθύτερα στο έδαφος, επομένως όσο πιο αργά καταφθάνει το σήμα στον δέκτη, τόσο μεγαλύτερο είναι το βάθος από το οποίο φθάνει (εικόνα 2.3.1). Επιπλέον, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το ασθενές δευτερογενές πεδίο καταγράφεται δίχως την ύπαρξη του ισχυρού πρωτογενούς, επομένως είναι αδύνατο αυτό να επηρεάσει την καταγραφή. Ο

χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που διακόπτεται το ρεύμα του πομπού μέχρι την πρώτη καταγραφή του δευτερεύοντος πεδίου ονομάζεται Ramp Time (εικόνα 2.3.2).



Εικόνα 2.3.2 Καταγραφή πρωτογενούς και δευτερογενούς πεδίου με τη μέθοδο TEM σε συνάρτηση με τον χρόνο (Τσούρλος Π , Βαργεμέζης Γ., 2023).

Το βάθος στο οποίο φτάνει το ρεύμα του πρωτογενούς πεδίου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του βρόγχου των καλωδίων που χρησιμοποιείται. Ένας εμπειρικός κανόνας υπολογίζει πως το βάθος στο οποίο θα φτάσει το ρεύμα είναι 5 φορές μεγαλύτερο από το μέγεθος βρόγχου. Για παράδειγμα ένας βρόγχος 10 μέτρων σημαίνει πως το ρεύμα του πρωτογενούς πεδίου θα φτάσει σε βάθος 50 μέτρων στο υπέδαφος. Ωστόσο, το πραγματικό βάθος στο οποίο θα φτάσει το ρεύμα κατά τη διάρκεια μίας μέτρησης εξαρτάται επίσης τόσο από τις ιδιότητες του εδάφους (π.χ. την αγωγιμότητά του) όσο και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οργάνων της μέτρησης. Οι 3 κυριότερες διαμορφώσεις της μέτρησης TEM είναι ο συμπίπτων βρόχος, ο κεντρικός βρόχος και ο βρόχος δίπολου. Οι διαμορφώσεις αυτές παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 2.3.3).



Εικόνα 2.3.3 Οι 3 κυριότερες διαμορφώσεις της μέτρησης TEM ((Τσούρλος Π , Βαργεμέζης Γ., 2023).

2.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα και εφαρμογές της μεθόδου παροδικών πεδίων.

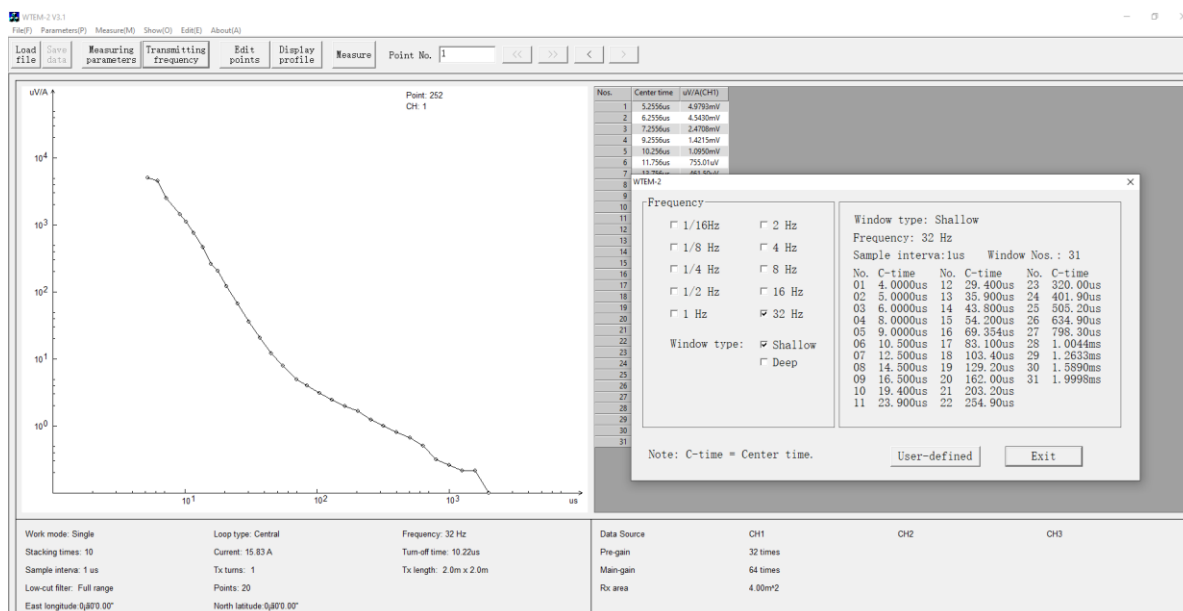
Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου παροδικών πεδίων είναι η ταχύτητα της διαδικασίας της μέτρησης, καθώς η κάθε μέτρηση διαρκεί δευτερόλεπτα ενώ η πλευρική ανάλυση είναι πολύ ικανοποιητική λόγω της διάχυσης του ρεύματος του πρωτογενούς πεδίου. Επίσης, παρέχει μεγάλη λεπτομέρεια σε μετρήσεις σε περιβάλλον αγώγιμο και δεν παρουσιάζει προβλήματα στη διάδοση του ρεύματος σε εδάφη μεγάλης αντίστασης.

Από την άλλη ως μειονέκτημα λογίζεται το γεγονός ότι δεν ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε περιοχές και εδάφη πολύ μεγάλων αντιστάσεων. Επίσης, είναι ευαίσθητη στον θόρυβο και τα δεδομένα επηρεάζονται από αυτόν καθώς το δευτερογενές πεδίο που δημιουργείται από τους αγωγούς που εντοπίζονται είναι πολύ ασθενές. Τέλος, η υλοποίηση βρόγχων μεγάλου μεγέθους, οι οποίοι ευνοούν την έρευνα σε μεγαλύτερα βάθη, είναι δύσκολη σε δύσβατες περιοχές.

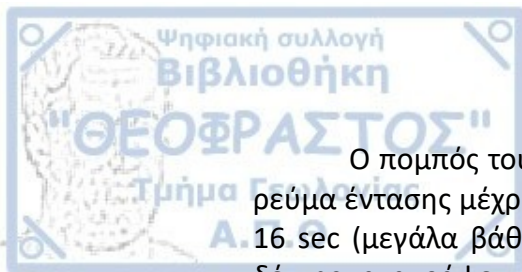
Εφαρμογές η μέθοδος παροδικών πεδίων βρίσκει σε μεταλλευτικές έρευνες, περιβαλλοντικές και γεωτεχνικές έρευνες, έρευνα γεωθερμικών πεδίων και στον εντοπισμό ρηχών μεταλλικών στόχων καθώς και υδροφόρων και υφάλμυρων οριζόντων.

2.5 Όργανα μέτρησης της μεθόδου TEM και δεδομένα USF

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων που αναλύονται στη συγκεκριμένη εργασία είναι το Wtem-2 του οίκου LandGeo (εικόνα 2.5.1-πάνω).



Εικόνα 2.5.1 (επάνω) Το όργανο μέτρησης WTEM-2 και η πηγή ρεύματος (μπαταρία) που το τροφοδοτεί (WTEM-2 User's Manual). (κάτω) Το λογισμικό ελέγχου του οργάνου.



Ο πομπός του οργάνου έχει τάση από 12-200V και μπορεί να επάγει ρεύμα έντασης μέχρι και η 60 A. Η διάρκεια του παλμού μπορεί να είναι από 16 sec (μεγάλα βάθη) έως και 0.03 sec με 10 ενδιάμεσες διαβαθμίσεις. Ο δέκτης καταγράφει το δυναμικό σε μέχρι και 31 χρονικά παράθυρα. Το όργανο ελέγχεται από ειδικό λογισμικό (Εικόνα 2.5.1 -κάτω) που είναι φορτωμένο σε tablet και επικοινωνεί με το όργανο μέσω Bluetooth.

Οι μετρήσεις που προκύπτουν αποθηκεύονται στο tablet σε τυποποιημένο αρχείο με κατάληξη USF (Universal Subtitle Format) το οποίο είναι τύπου ASCII και μπορεί άμεσα να διαβαστεί μέσω σημειωματάριου ή οποιουδήποτε προγράμματος ανοίγει και επεξεργάζεται αρχεία τύπου .txt (αρχεία ASCII). Το αρχείο αυτό παρέχει όλες τις χρήσιμες πληροφορίες για την μέτρηση που πραγματοποιείται. Αρχικά καταγράφει πόσες βυθοσκοπήσεις (Soundings) έγιναν στο συγκεκριμένο προφίλ. Επίσης, καταγράφει πληροφορίες για το αζιμούθιο, το όργανο που χρησιμοποιείται, τη μονάδα μέτρησης της τάσης, την ημερομηνία που πραγματοποιείται η μέτρηση, το μέγεθος του βρόγχου που χρησιμοποιείται, τη χρονική διάρκεια της ράμπας (Ramp Time, δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί από τη διακοπή του πομπού μέχρι την πρώτη καταγραφή). Στη συνέχεια σε διαδοχικές σειρές δείχνει το δυναμικό (VOLTAGE) και το σφάλμα (ERROR_BAR) που κατέγραψε ο πομπός σε κάθε ένα από τα 31 χρονικά παράθυρα (TIME,WIDTH). Στην εικόνα 2.5.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό δείγμα αρχείου USF.

Η καταγραφή των δεδομένων συνεχίζει και επαναλαμβάνεται για όσες βυθοσκοπήσεις (Soundings) πραγματοποιούνται.

```
//USF: Universal Sounding Format
//SOUNDINGS: 20
//END

/ARRAY: CENTRAL LOOP TEM
/AZIMUTH: 0.0
/INSTRUMENT: WTEM-2
/VOLTAGE_UNITS: V/AM2
/DATE: 20220204
/LOOP_SIZE: 2.0, 2.0
/LOOP_TURNS: 1
/PROFILE: 100
/RAMP_TIME: 1.0111e-5
/SWEEPS: 1
/POINTS: 31
/SOUNDING_NAME: TEST1
/SOUNDING_NUMBER: 1
/LOCATION: 0.0 ,1.0, 0.0000
/COIL_SIZE: 4.0000

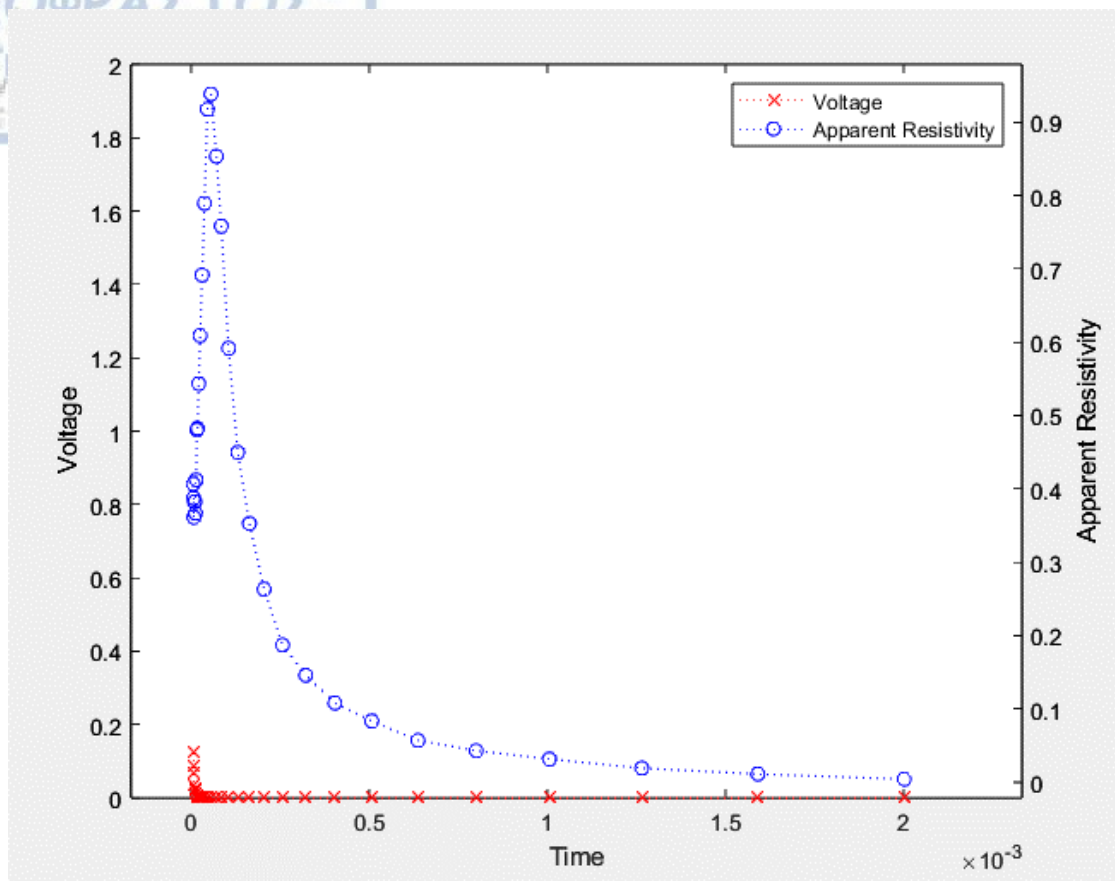
/SWEEP_NUMBER: 1
/CURRENT: 1.0
/FREQUENCY: 32.000
/END
```

INDEX,	TIME,	WIDTH,	VOLTAGE,	ERROR_BAR,	MASK
1,	5.3334e-6,	1.0000e-6,	1.2102e-3,	3.1623e-4,	1
2,	6.3334e-6,	1.0000e-6,	9.7153e-4,	3.1623e-4,	1
3,	7.3334e-6,	1.0000e-6,	6.2187e-4,	3.1623e-4,	1
4,	9.3334e-6,	1.0000e-6,	3.2806e-4,	3.1623e-4,	1
5,	1.0333e-5,	1.0000e-6,	2.4977e-4,	3.1623e-4,	1
6,	1.1833e-5,	2.0000e-6,	1.8423e-4,	3.1623e-4,	1
7,	1.3833e-5,	2.0000e-6,	1.0534e-4,	3.1623e-4,	1
8,	1.5833e-5,	2.0000e-6,	5.8215e-5,	3.1623e-4,	1
9,	1.7833e-5,	2.0000e-6,	4.2247e-5,	3.1623e-4,	1
10,	2.0733e-5,	4.0000e-6,	2.3810e-5,	3.1623e-4,	1
11,	2.5233e-5,	5.0000e-6,	1.1855e-5,	3.1623e-4,	1
12,	3.0733e-5,	6.0000e-6,	5.6264e-6,	3.1623e-4,	1
13,	3.7233e-5,	7.0000e-6,	2.5499e-6,	3.1623e-4,	1
14,	4.5133e-5,	9.0000e-6,	1.1409e-6,	3.1623e-4,	1
15,	5.5533e-5,	1.2000e-5,	5.2279e-7,	3.1623e-4,	1
16,	7.0688e-5,	1.0000e-5,	2.8670e-7,	3.1623e-4,	1
17,	8.4433e-5,	1.8000e-5,	1.6617e-7,	3.1623e-4,	1
18,	1.0473e-4,	2.3000e-5,	1.1465e-7,	3.1623e-4,	1
19,	1.3053e-4,	2.9000e-5,	6.8144e-8,	3.1623e-4,	1
20,	1.6333e-4,	3.7000e-5,	7.4308e-8,	3.1623e-4,	1
21,	2.0453e-4,	4.6000e-5,	5.7783e-8,	3.1623e-4,	1
22,	2.5623e-4,	5.8000e-5,	4.0439e-8,	3.1623e-4,	1
23,	3.2133e-4,	7.3000e-5,	4.1676e-8,	3.1623e-4,	1
24,	4.0323e-4,	9.2000e-5,	2.7111e-8,	3.1623e-4,	1
25,	5.0653e-4,	1.1600e-4,	2.3372e-8,	3.1623e-4,	1
26,	6.3623e-4,	1.4500e-4,	1.8895e-8,	3.1623e-4,	1
27,	7.9963e-4,	1.8400e-4,	5.8513e-9,	3.1623e-4,	1
28,	1.0057e-3,	2.3100e-4,	1.4095e-8,	3.1623e-4,	1
29,	1.2646e-3,	2.9000e-4,	5.5110e-9,	3.1623e-4,	1
30,	1.5903e-3,	3.6600e-4,	3.1528e-9,	3.1623e-4,	1
31,	2.0011e-3,	4.6100e-4,	3.4697e-9,	3.1623e-4,	1

```
/END
```

Εικόνα 2.5.2 Αρχείο USF και οι καταγραφές που προκύπτουν για μία μέτρηση.

Στη συνέχεια, από τις μετρήσεις της μειούμενης με τον χρόνο τάση με κατάλληλη επεξεργασία προκύπτει η φαινόμενη αντίσταση του εδάφους σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 2.5.3 Μέτρηση της μειούμενης τάσης μίας μέτρησης TEM και υπολογισμός της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης της ίδιας μέτρησης σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα που προκύπτει από τις μετρήσεις, η τάση λόγω της μεγάλης απόσβεσης μειώνεται διαρκώς όσο περνάει ο χρόνος, ωστόσο η υπολογισμένη φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται ή μειώνεται όταν το ρεύμα συναντήσει έναν κακό ή καλό αγωγό, αντίστοιχα (εικόνα 2.5.3).

3. Βοηθητικό πρόγραμμα υπολογισμού φαινόμενης αντίστασης

3.1 Μέθοδος- Τύποι

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας αναπτύχθηκε ένα βοηθητικό πρόγραμμα στη γλώσσα προγραμματισμού MatLab, το οποίο υπολογίζει τη φαινόμενη αντίσταση καθώς και το φαινόμενο βάθος που προκύπτουν από τις βυθοσκοπήσεις με τη μέθοδο παροδικών πεδίων.

Για τον υπολογισμό των φαινόμενων αντιστάσεων χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις που αναλύονται στην εργασία Shu Yan κ.α. (2009). Η πρώτη εξίσωση που αξιοποιήθηκε στον κώδικα αφορά την φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση.

$$\rho_a = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{2\mu_0 ab}{5tV} \right)^{2/3}, \quad (3.1)$$

Με την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a) σε συνάρτηση με την απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού μ_0 , η οποία ισούται με $\mu_0=4\pi 10^{-7}$, τον χρόνο (t) και την τάση (V) που αντιστοιχούν στο χρονικό παράθυρο της βυθοσκόπησης καθώς και στα a,b τα οποία αποτελούν το μήκος και το πλάτος του βρόγχου που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις ($a=b$ στην περίπτωση τετραγωνικού βρόγχου).

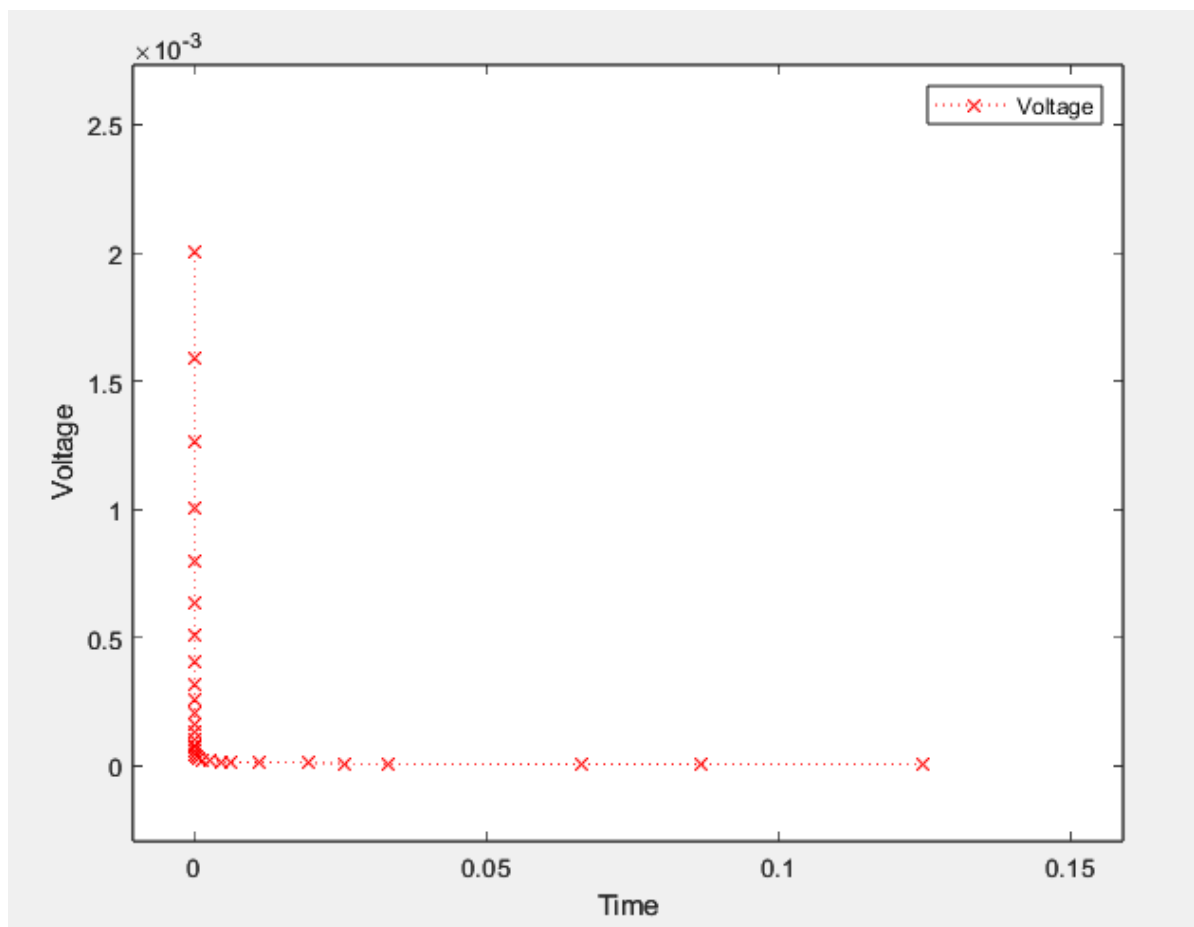
Στη συνέχεια αξιοποιείται μία ακόμα εξίσωση της ίδιας δημοσίευσης, η οποία υπολογίζει το φαινόμενο βάθος. Αυτό προκύπτει αφού υπολογιστεί η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση, αφού το φαινόμενο βάθος εξαρτάται από αυτή.

$$H = K \left(\frac{\rho_a t}{2\mu_0} \right)^{1/2}, \quad (3.2)$$

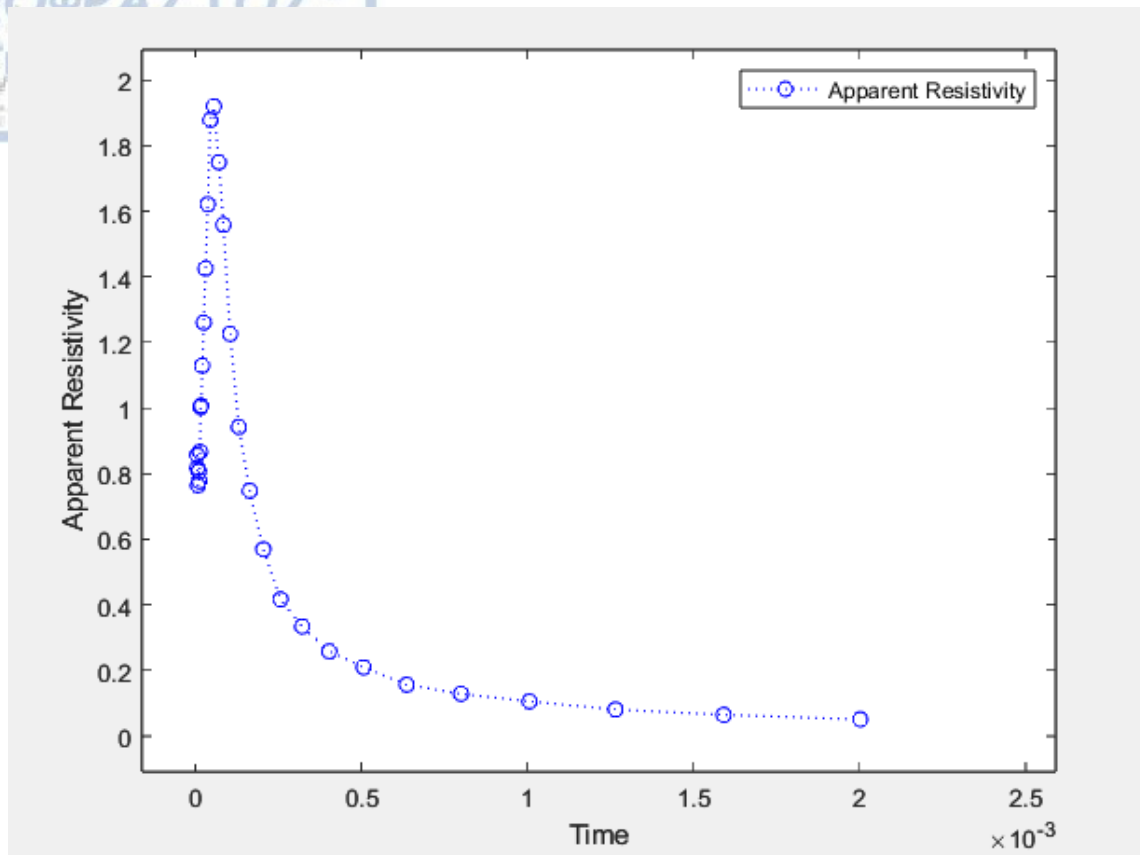
Το φαινόμενο βάθος (H) υπολογίζεται σε συνάρτηση με έναν συντελεστή διόρθωσης K, ο οποίος συνήθως είναι μικρότερος του 1 ($K<1$, 0.4 στην παρούσα εργασία), την φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση (ρ_a) που υπολογίστηκε από την προηγούμενη εξίσωση, τον χρόνο (t) που προέκυψε από τις μετρήσεις και την απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού μ_0 , ίση με $\mu_0=4\pi 10^{-7}$.

3.2 Παράδειγμα Εφαρμογής σε μια βυθοσκόπηση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή των τύπων ενδεικτικά στις μετρήσεις μίας βυθοσκόπησης. Τα δεδομένα που προκύπτουν από μία βυθοσκόπηση αφορούν τη μέτρηση του δευτερογενούς πεδίου σε ένα σημείο που προκαλείται από τη διάχυση ρεύματος μέσω του πομπού. Προκύπτει η μέτρηση της μειούμενης τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο. Έπειτα, μέσω της επεξεργασίας με τις εξισώσεις που προαναφέρθηκαν προκύπτει η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση και το φαινόμενο βάθος στο σημείο που πραγματοποιήθηκε η βυθοσκόπηση (εικόνα 3.2.1) και στην συνέχεια έπειτα από την εφαρμογή της εξίσωσης 3.1 προκύπτει η φαινόμενη αντίσταση (εικόνα 3.2.2).

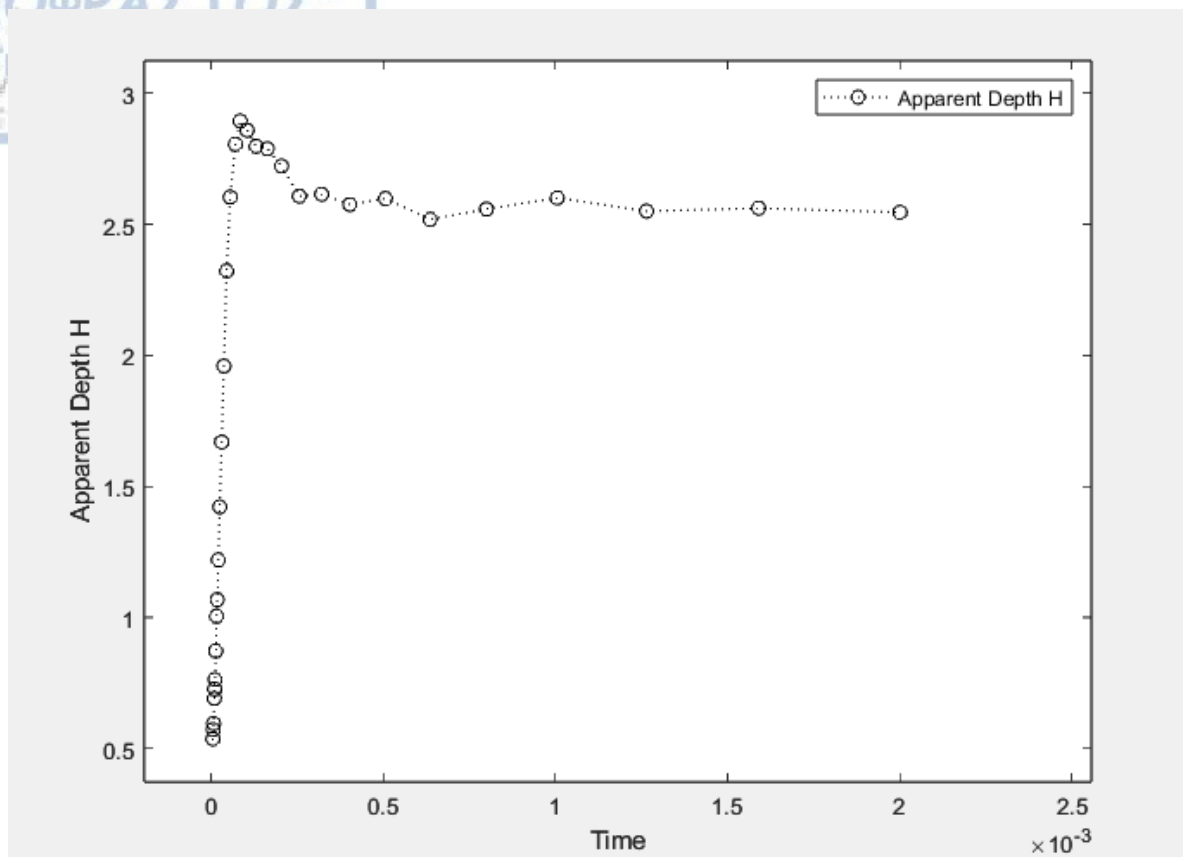


Εικόνα 3.2.1 Η μέτρηση της μειούμενης τάσης που προκύπτει από μία βυθοσκόπηση σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Εικόνα 3.2.2 Οι τιμές της φαινόμενης αντίστασης που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων της μειούμενης τάσης.

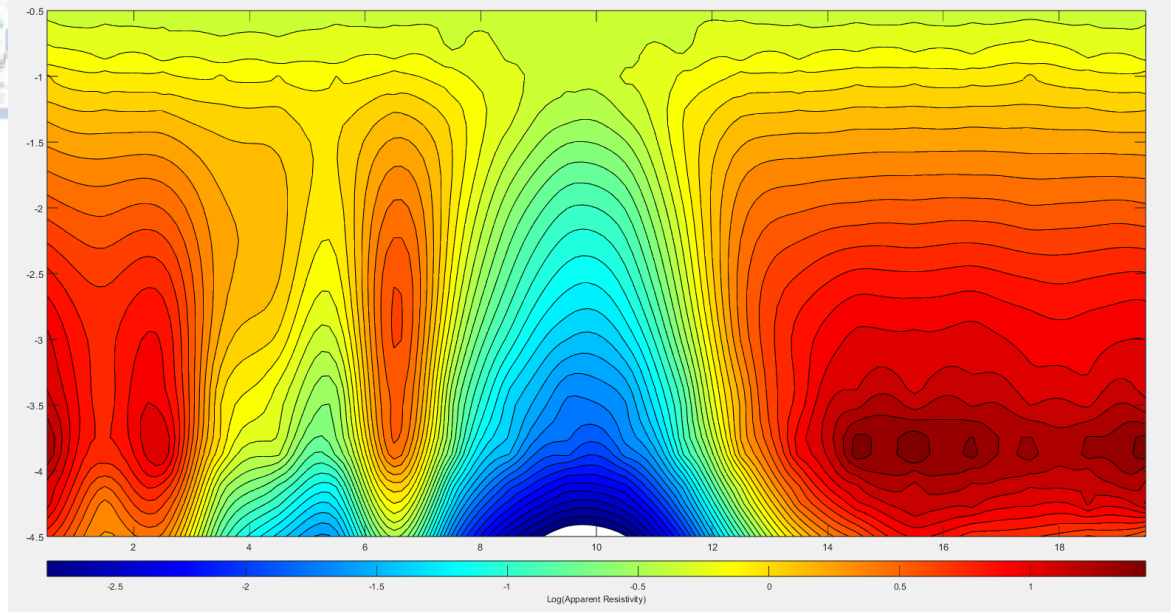
Τέλος, αφού υπολογιστεί η φαινόμενη αντίσταση, υπολογίζεται το φαινόμενο βάθος (εικόνα 3.2.3) για κάθε παράθυρο με εφαρμογή της εξίσωσης 3.2.



Εικόνα 3.2.3 Οι τιμές του φαινομένου βάθους που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων της μειούμενης τάσης και τον υπολογισμό της φαινομένου αντίστασης.

3.3 Εφαρμογή σε τομή (2D)

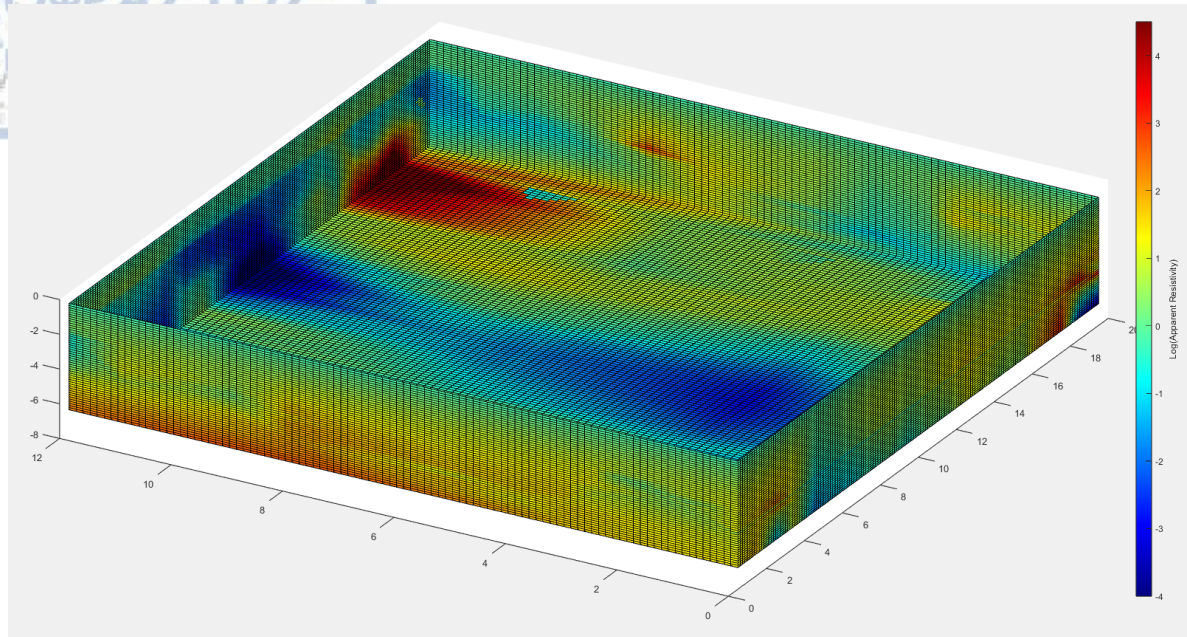
Η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω αφορά μία βυθοσκόπηση. Όταν η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε όλες τις βυθοσκοπήσεις που έχουν ληφθεί σε ένα προφίλ προκύπτει μία τομή για την οποία έχει υπολογιστεί το φαινόμενο βάθος και η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση για κάθε μέτρηση της βυθοσκόπησης του προφίλ. Για τη συγκεκριμένη εργασία κάθε προφίλ αποτελείται από 20 βυθοσκοπήσεις μετρημένες ανά 1 μέτρο, επομένως κάθε προφίλ μέτρησης έχει μήκος 20 μέτρα. Αφού υπολογιστεί η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση και το φαινόμενο βάθος για κάθε χρονικό παράθυρο κάθε βυθοσκόπησης μέσω του βοηθητικού προγράμματος δημιουργείται τομή με τις ισο-αντιστατικές καμπύλες γεμισμένες με χρώματα βάσει χρωματικής κλίμακας ουράνιου τόξου. Τυπικό παράδειγμα τέτοιας τομής παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3.1.



Εικόνα 3.3.1 Τομή (προφίλ) των φαινόμενων αντιστάσεων και των φαινόμενων βαθών με κλίμακα ουράνιου τόξου.

3.4 Εφαρμογή σε τρισδιάστατη προβολή

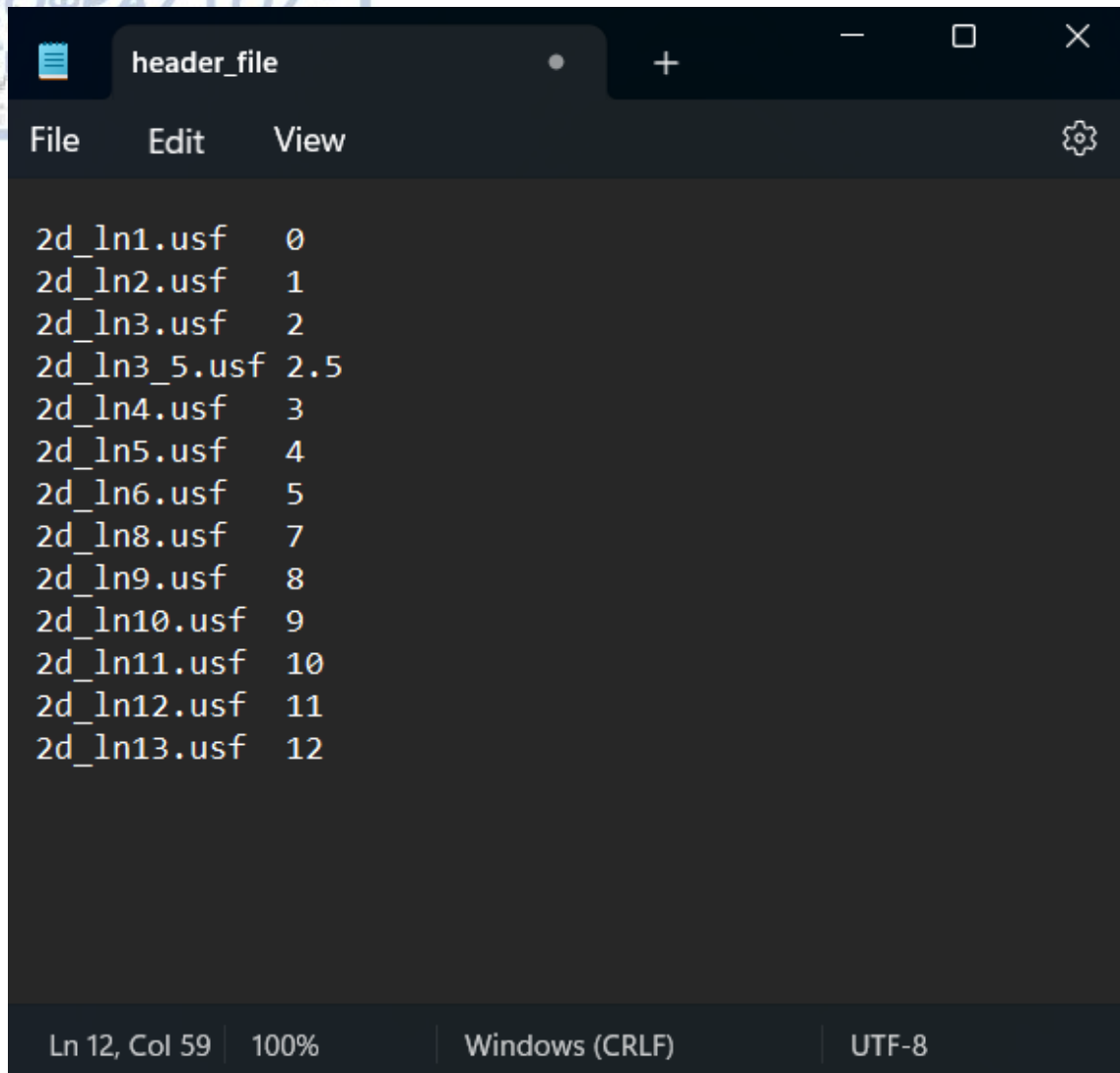
Στη συνέχεια, συνδυάζοντας τα δεδομένα όλων των δισδιάστατων προβολών, δηλαδή όλων των γραμμών στις οποίες πραγματοποιήθηκαν βυθοσκοπήσεις, προκύπτει μέσω του βοηθητικού προγράμματος τρισδιάστατη προβολή ολόκληρου του χώρου στον οποίο λήφθηκαν μετρήσεις με πληροφορία για την φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση και του φαινομένου βάθους για κάθε σημείο (εικόνα 3.4.1.).



Εικόνα 3.4.1 Τρισδιάστατη προβολή της περιμέτρου της περιοχής μετρήσεων με πληροφρία της φαινόμενης αντίστασης και του φαινόμενου βάθους σε όλα τα σημεία της περιοχής με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου.

3.5 Περιγραφή του βοηθητικού προγράμματος

Στην ενότητα αυτή δίνεται μια σύντομη περιγραφή του βοηθητικού προγράμματος που περιεγράφηκε. Στο Παράρτημα της εργασίας παρατίθεται ο σχετικός κώδικας `tem_usf.m` (γλώσσα MatLab). Αρχικά, πρέπει να δημιουργηθεί ένα αρχείο επικεφαλίδα (header file), το οποίο ουσιαστικά κατευθύνει το πρόγραμμα στο ποια αρχεία θα χρησιμοποιήσει κατά την εκτέλεση του προγράμματος (εικόνα 3.5.1).



```

2d_ln1.usf    0
2d_ln2.usf    1
2d_ln3.usf    2
2d_ln3_5.usf  2.5
2d_ln4.usf    3
2d_ln5.usf    4
2d_ln6.usf    5
2d_ln8.usf    7
2d_ln9.usf    8
2d_ln10.usf   9
2d_ln11.usf  10
2d_ln12.usf  11
2d_ln13.usf  12
  
```

Εικόνα 3.5.1 Το αρχείο επικεφαλίδα (header file), το οποίο περιλαμβάνει όλες τις γραμμές βυθοσκοπήσεως που πραγματοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκε για τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα το αρχείο αυτό είναι ένα αρχείο .txt, στο οποίο στην πρώτη στήλη αναγράφεται το όνομα του .usf αρχείου που πρέπει να ανοίξει και να διαβάσει το πρόγραμμα και στη δεύτερη στήλη αναγράφεται το σημείο στον άξονα Y που αντιστοιχεί το κάθε προφίλ με τις βυθοσκοπήσεις TEM. Το σημείο έναρξης αναγράφεται στο αρχείο επικεφαλίδα διότι η απόσταση μεταξύ των μετρήσεων δεν είναι πάντα σταθερή και το αρχείο χρησιμοποιεί τις αποστάσεις αυτές στα διάφορα γραφήματα που δημιουργεί, επομένως χρειάζεται εξ' αρχής η πληροφορία του σημείου έναρξης των μετρήσεων στον άξονα Y. Για παράδειγμα, στις μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία παρατηρείται πως μία μέτρηση απέχει μισό μέτρο από την προηγούμενη και την επόμενη αντί για 1 μέτρο, ενώ μία άλλη απέχει 2 μέτρα αντί για 1 από την επόμενη.

Το πρόγραμμα μόλις εκτελεστεί δημιουργεί στον φάκελο που βρίσκονται τα αρχεία .usf έναν νέο φάκελο με όνομα 'Output_Graphs' όπου αποθηκεύονται όλα τα γραφήματα που θα δημιουργήσει κατά την εκτέλεσή

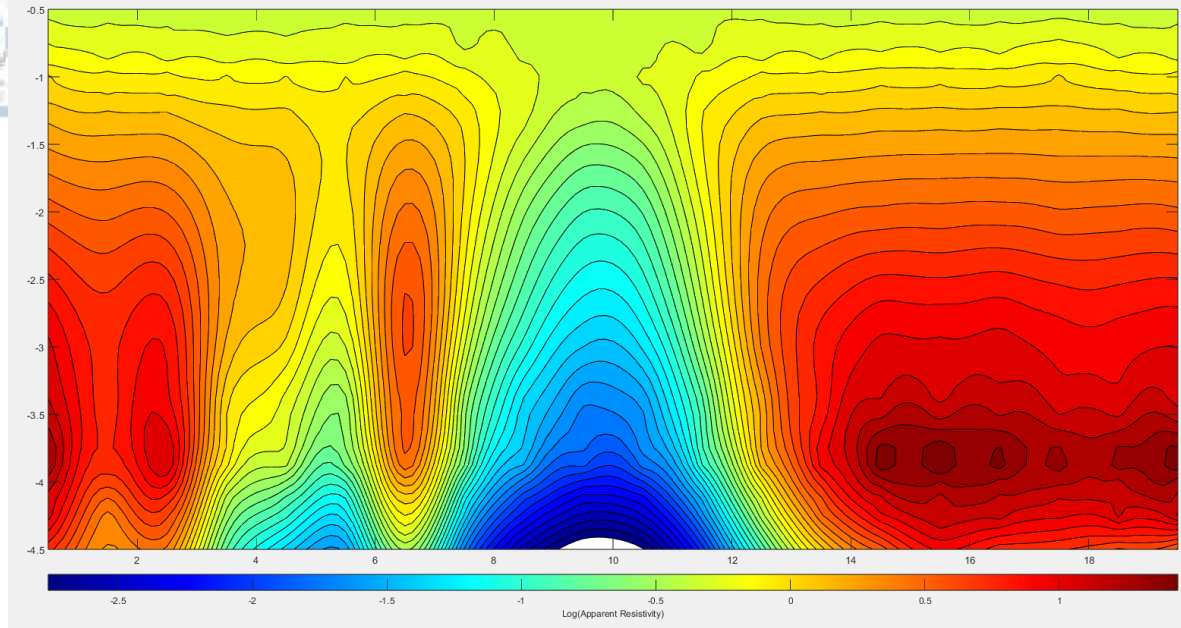
του. Επίσης, προτού ξεκινήσει την επεξεργασία ζητάει από τον χρήστη την εισαγωγή της τιμής του K , ο οποίος είναι ένας διορθωτικός συντελεστής στην εξίσωση 3.1 και παίρνει τιμές συνήθως μικρότερες του 1 και επηρεάζει τις τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης και του φαινομένου βάθους που υπολογίζει αργότερα. Μετά από δοκιμές καταλήξαμε ότι για τις μετρήσεις που αναλύονται ο πιο αντιπροσωπευτικός συντελεστής διόρθωσης είναι ο $K=0.4$ καθώς δίνει ρεαλιστικές τιμές για τα φαινόμενα βάθη.

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα ανοίγει και διαβάζει με τη σειρά που προκύπτει από το header file τα .usf αρχεία. Επομένως, στην πρώτη εκτέλεση ανοίγει και διαβάζει το αρχείο '2d_in1.usf'. Σε αυτό, διαβάζει και αποθηκεύει διάφορες χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν τα γενικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων. Για παράδειγμα, αποθηκεύει το μέγεθος του βρόγχου που χρησιμοποιείται, καθώς αυτό χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης, και τον αριθμό των φορών που στάλθηκε ρεύμα από τον πομπό στο έδαφος σε κάθε βυθοσκόπηση (points).

Έπειτα, το πρόγραμμα διαβάζει τις στήλες του .usf αρχείου στις οποίες καταγράφονται η τιμή της τάσης καθώς και η χρονική στιγμή που έγινε η καταγραφή για κάθε μια βυθοσκόπηση του προφίλ. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές υπολογίζει τη φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση και το φαινόμενο βάθος για το προφίλ κάνοντας χρήση των εξισώσεων που περιεγράφηκαν (εξισώσεις 3.1 και 3.2).

Μετά από αυτή τη διαδικασία, το πρόγραμμα δημιουργεί μια τομή δεδομένων X, Z με το X να είναι η θέση του σημείου στον άξονα του μήκους (ουσιαστικά ταυτίζεται με τη θέση της κάθε βυθοσκόπησης) και το Z να είναι το φαινόμενο βάθος του σημείου. Πάνω σε αυτόν το δίκτυο τοποθετούνται οι αντίστοιχες τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίστηκαν προηγουμένως και δημιουργεί έναν διδιάστατο χρωματισμένο χάρτη ισοϋψών (Filled 2-D contour plot) όπου αποτυπώνονται οι τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στα διάφορα βάθη με τη χρήση χρωματικής κλίμακας ουράνιου τόξου (π.χ. Εικόνα 3.5.2).

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό στο σημείο ότι για λόγους καλύτερης απεικόνισης (μικρότερο δυναμικό εύρος) επιλέγεται να χαρτογραφηθεί ο λογάριθμος της φαινόμενης αντίστασης που υπολογίστηκε και όχι απευθείας η φαινόμενη αντίσταση.

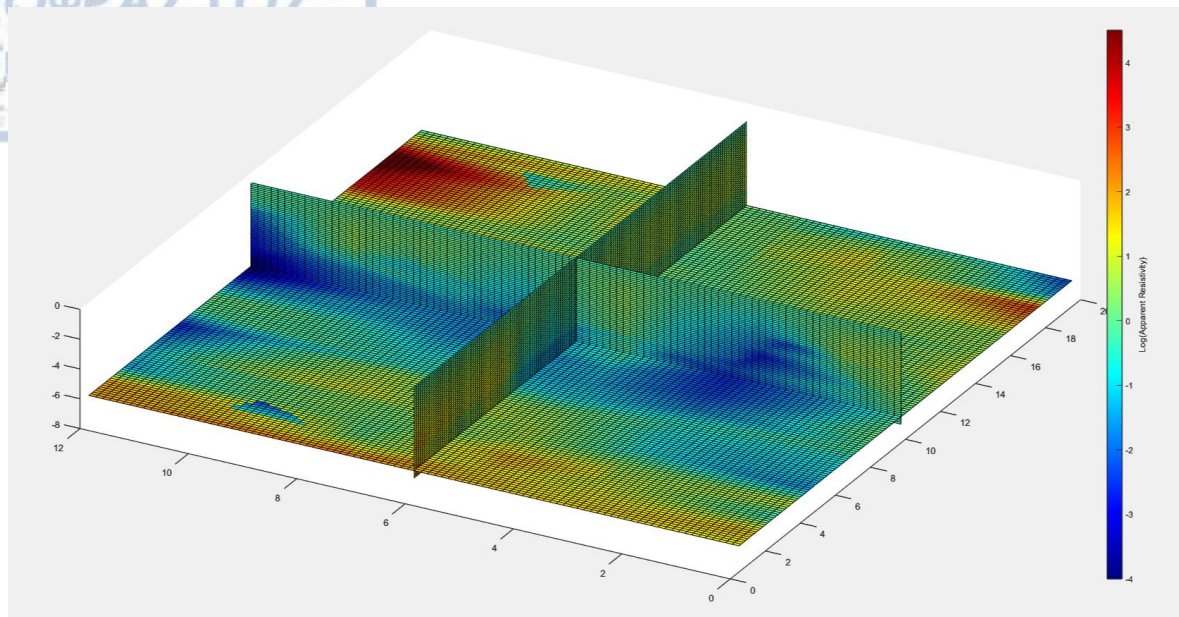


Εικόνα 3.5.2 Παράδειγμα τρισδιάστατου χρωματισμένου χάρτη ισοϋψών που δημιουργεί το πρόγραμμα.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή για το πρώτο αρχείο (δηλ. προφίλ), το λογισμικό προχωράει στα επόμενα προφίλ που περιλαμβάνονται στο αρχείο επικεφαλίδα (Header file) και επαναλαμβάνει ακριβώς την ίδια διαδικασία για κάθε ένα από αυτά.

Μόλις ολοκληρωθεί η δημιουργία των τομών για κάθε προφίλ του header file το πρόγραμμα δημιουργεί έναν νέο κάνναβο δεδομένων, αυτή τη φορά τρισδιάστατο συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω προφίλ με βάση τη θέση τους στο άξονα Y (πλάτος) βάσει της δεύτερης στήλης του αρχείου επικεφαλίδας (header file) (εικόνα 3.5.1). Στο τελικό αρχείο κάθε μέτρηση έχει συντεταγμένες X, Y, Z. Ως X ορίζεται η θέση της μέτρησης στο άξονα του μήκους, Y η θέση της στον άξονα του πλάτους και Z το φαινόμενο βάθος της. Σε κάθε σημείο αντιστοιχίζεται η τιμή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης και ειδικότερα του λογαρίθμου της ώστε να δημιουργείται ένας πλήρως τρισδιάστατος χάρτης των αποτελεσμάτων.

Βάσει αυτού του χάρτη προβάλλονται αυτοματοποιημένα οριζόντιες τομές για συγκεκριμένα βάθη (depth-slices) του όγκου, κατακόρυφες τομές (sections) σε συγκεκριμένα πλάτη και μήκη του όγκου καθώς και συνδυασμοί των παραπάνω (π.χ. εικόνα 3.5.3).



Εικόνα 3.5.3 Παράδειγμα τρισδιάστατου χάρτη με χρωματική κλίμακα και οριζόντιες τομές (Depth-Slices) στον άξονα Z και κατακόρυφες τομές (sections) στους άξονες X και Y για βάθος ίσο με 6.25m.

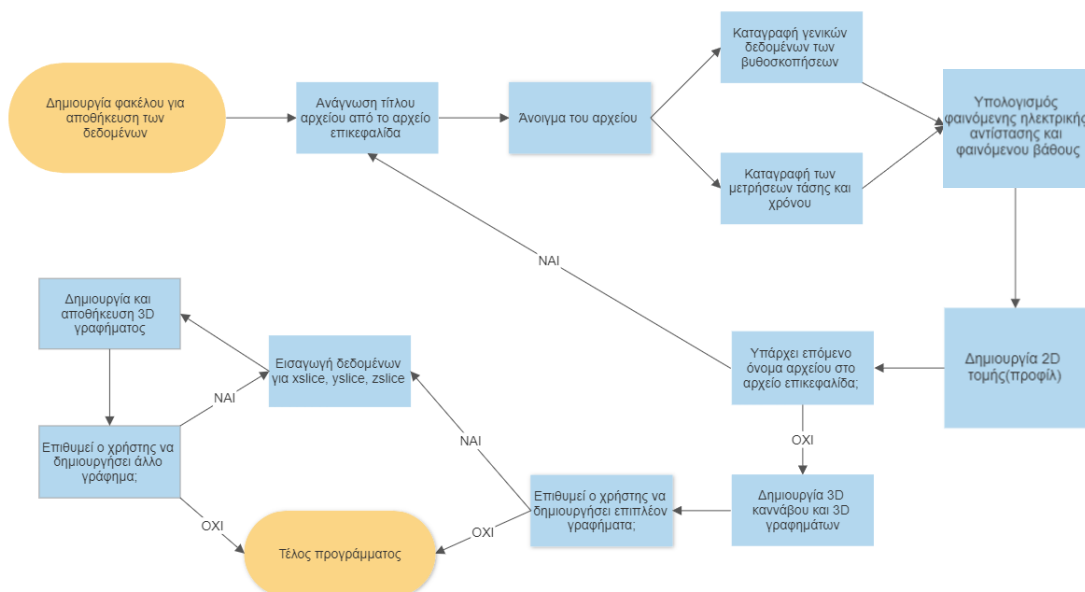
Τέλος, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη που το εκτελεί να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο γράφημα με όσες επιφάνειες (slices) επιθυμεί και να το σώσει στον φάκελο μαζί με τα υπόλοιπα γραφήματα (εικόνα 3.5.4).

```
Command Window
Do you want to create another figure? (1 means Yes, 2 means No): 1
Input xslice(0.5-19.5): 10
Input yslice(0-12): []
Input zslice(-0.625-(-6.75)): [-3 -5]
fx Do you want to create another figure? (1 means Yes, 2 means No): 2
```

Εικόνα 3.5.4 Η γραμμή εντολών στην οποία ο χρήστης θέτει τα δεδομένα του γραφήματος που θέλει να δημιουργήσει το πρόγραμμα.

3.6 Διάγραμμα ροής του προγράμματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του βοηθητικού προγράμματος `tem_usf.m`. Στο Παράρτημα της εργασίας παρατίθεται ο σχετικός κώδικας σε γλώσσα MatLab.



4. Εφαρμογή στην περιοχή Μενεμένης, Θεσσαλονίκη

4.1 Περιγραφή περιοχής

Στην περιοχή της Μενεμένης στη Θεσσαλονίκη ζητήθηκε να γίνει μία έρευνα στην περιοχή ενός παλιού στρατοπέδου για την ανάπλαση της περιοχής και τη δημιουργία δημοτικού χώρου αναψυχής (εικόνα 4.1.1). Η έρευνα αυτή αφορούσε κάποιες θαμμένες δεξαμενές στην περιοχή αυτή. Με σκοπό να βρεθούν τα σημεία στα οποία είναι θαμμένες έγιναν έρευνες με γεωφυσικές μεθόδους και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν διάφορες μετρήσεις με τη μέθοδο παροδικών πεδίων.



Εικόνα 4.1.1 Αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης.

Στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο παροδικών πεδίων σε διάφορα σημεία της καθώς έπρεπε να ερευνηθεί το ενδεχόμενο ύπαρξης πολλών θαμμένων στόχων σε όλη της την έκταση (εικόνα 4.1.2).



Εικόνα 4.1.2 Διάφορες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή.

Τελικά, στην περιοχή έπειτα από τις μετρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων διαπιστώθηκε η ύπαρξη 3 θαμμένων δεξαμενών στην ευρύτερη περιοχή του εγκαταλελειμμένου στρατοπέδου (εικόνα 4.2.1). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εκταφή και απομάκρυνσή τους.

4.2 Μετρήσεις της γραμμής ERT2

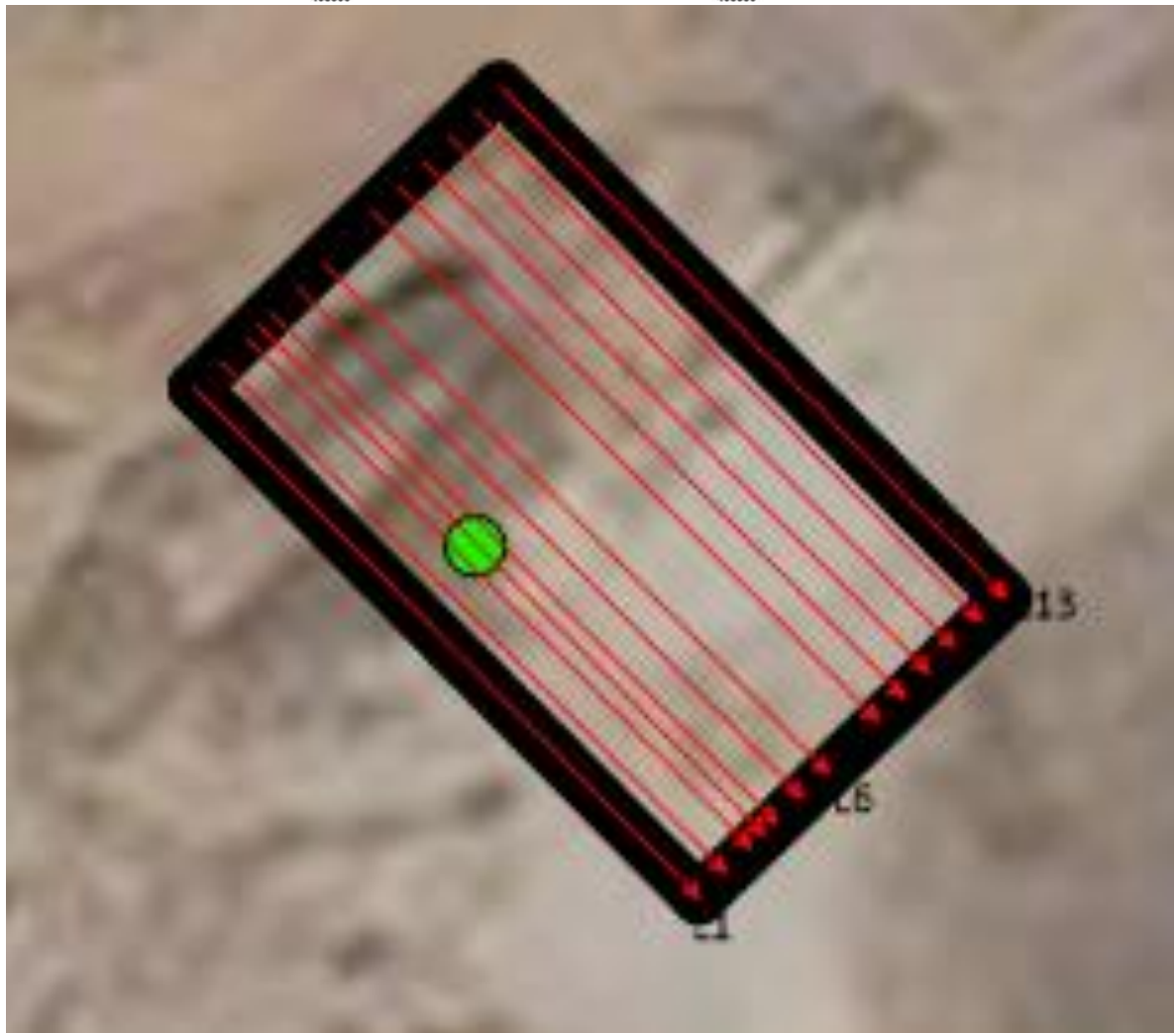
Οι μετρήσεις που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούν τις μετρήσεις της γραμμής ERT2 και αφορούν τον εντοπισμό της δεξαμενής Δ2 (εικόνα 4.2.1). Ο τρόπος που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αυτές είναι ο εξής: Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν 13 μετρήσεις σε παράλληλες ευθείες με απόσταση 1 μέτρου μεταξύ τους, εκτός κάποιων εξαιρέσεων που θα αναλυθούν στη συνέχεια, με σημείο αφετηρίας τα 0 μέτρα. Επίσης, σε καθεμία από τις ευθείες αυτές πραγματοποιήθηκαν 20 βυθοσκοπήσεις σε απόσταση 1 μέτρου η καθεμία. Επομένως, κάθε γραμμή έχει μήκος 20 μέτρα.

Εξαιρέσεις του 1 μέτρου απόσταση μεταξύ των παράλληλων γραμμών των βυθοσκοπήσεων αποτελούν η γραμμή με σημείο έναρξης τα 2.5 μέτρα

('2d_In3_5.usf'), η οποία βρίσκεται σε απόσταση 0.5 μέτρου από την προηγούμενη και την επόμενη γραμμή. Επίσης, απουσιάζει η μέτρηση με σημείο έναρξης τα 6 μέτρα, επομένως η γραμμή με σημείο έναρξης τα 5 μέτρα ('2d_In6.usf') και η γραμμή με σημείο έναρξης τα 7 μέτρα ('2d_In8.usf') έχουν απόσταση 2 μέτρων μεταξύ τους. Στην εικόνα 4.2.3 εμφανίζεται ο κάνναβος και τα προφίλ των μετρήσεων TEM καθώς και η θέση του στόχου που εντοπίστηκε ως πράσινος κύκλος.



Εικόνα 4.2.1 Οι διάφορες δεξαμενές που εντοπίστηκαν στην περιοχή και η μαύρη γραμμή αποτελεί τη γραμμή μετρήσεων που αφορά τον εντοπισμό της δεξαμενής Δ2.



Εικόνα 4.2.3 Αποτύπωση του καννάβου των μετρήσεων καθώς και των προφίλ που μετρήθηκαν με τη μέθοδο TEM σε γεωαναφερμένη εικόνα (επάνω) και σε μεγέθυνση (κάτω). Η θέση του στόχου που εντοπίστηκε εμφανίζεται ως πράσινος κύκλος.

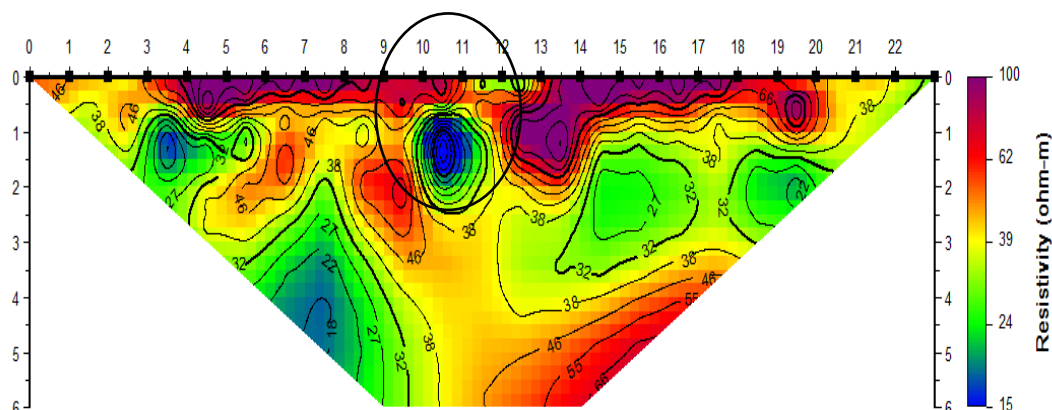
Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Wtem-2 το οποίο περιεγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και ο βρόγχος που χρησιμοποιήθηκε είχε μήκος 2 μέτρα και πλάτος επίσης 2 μέτρα.



Εικόνα 4.2.4 Μετρήσεις παροδικών πεδίων με το Wtem-2 και ο βρόγχος που χρησιμοποιήθηκε.

Επίσης, στο σημείο αυτό πραγματοποιήθηκαν επιπλέον μετρήσεις με μία διαφορετική μέθοδο γεωφυσικής διασκόπησης, αυτή της ηλεκτρικής τομογραφίας. Με τη μέθοδο αυτή επιβεβαιώθηκε (εικόνα 4.2.5) η ύπαρξη ενός μεταλλικού στόχου (αρκετά χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις – γαλάζιο χρώμα) σε βάθος από ~0.6 έως και 2m από την επιφάνεια καθώς είναι έντονη η αντίθεση της ηλεκτρικής αντίστασης στο συγκεκριμένο σημείο συγκριτικά με το περιβάλλον, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

ERT



Εικόνα 4.2.5 Αποτέλεσμα μέτρησης με τη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας και ο στόχος μέσα στον μαύρο κύκλο.

Τέλος σε ύστερη φάση εντοπίστηκε η δεξαμενή Δ2 (εικόνα 4.2.6) μήκους 3.5μ με διάμετρο $D=2\mu$ και πραγματοποιήθηκε η εκταφή της.



Εικόνα 4.2.6 Η δεξαμενή Δ2 αφού πραγματοποιήθηκε η εκταφή της.

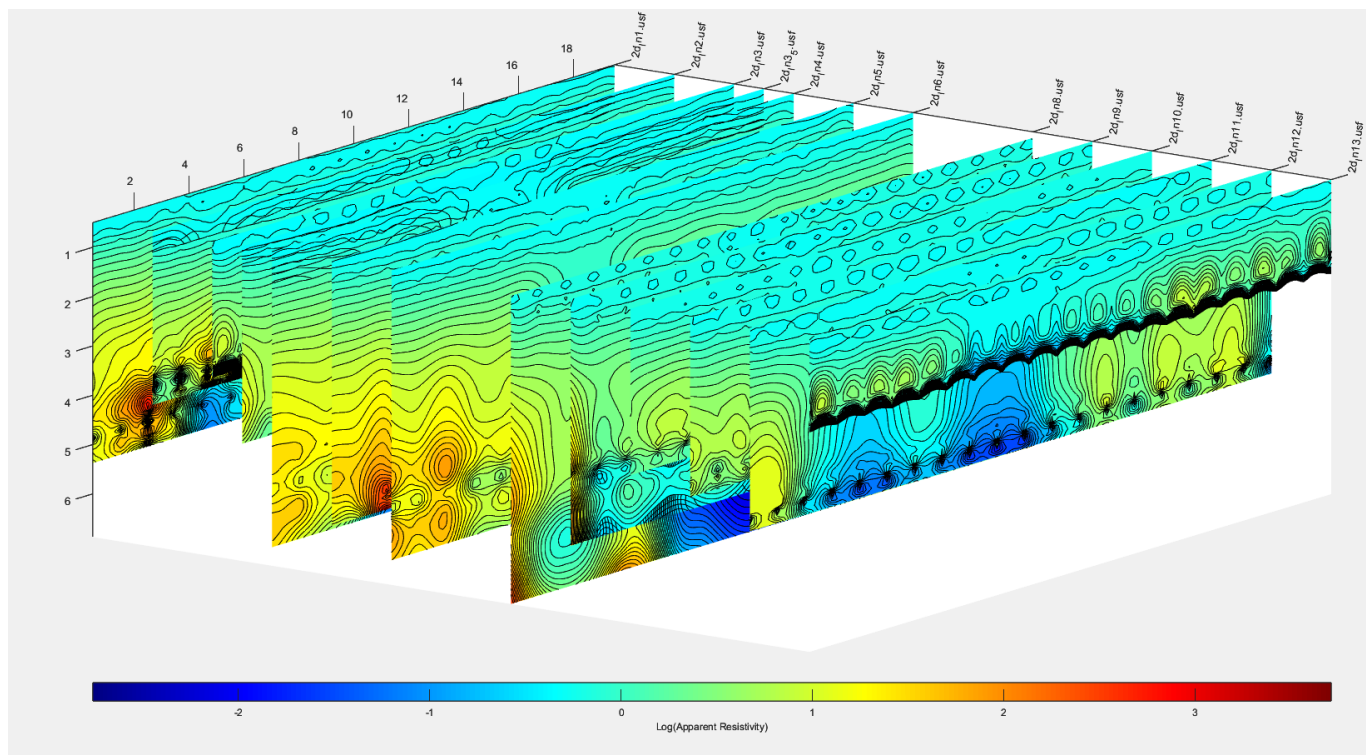
4.3 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων δισδιάστατων τομών TEM

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων μέσω του βοηθητικού προγράμματος που αναπτύχθηκε και αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, σε γλώσσα προγραμματισμού MatLab.

Γενικά, σε όλα τα σχήματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια χρησιμοποιείται χρωματική κλίμακα του «ουράνιου τόξου» για εμφανή αποτύπωση των διάφορων αντιστάσεων στο βάθος, με κόκκινα χρώματα να αντιπροσωπεύουν μεγάλες τιμές και μπλε χρώματα να αντιστοιχούν σε μικρές τιμές. Για καλύτερη σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η ίδια χρωματική κλίμακα, με το ίδιο εύρος τιμών. Επίσης, για καλύτερη και πιο κατανοητή αποτύπωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται σε όλα τα σχήματα ο λογάριθμος της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης.

Επιπλέον, υπενθυμίζεται πως όλες οι μετρήσεις έχουν μήκος 20 μέτρα, καθώς σε κάθε γραμμή μέτρησης έγιναν 20 βυθοσκοπήσεις ανά 1 μέτρο.

Επιπροσθέτως, πριν ξεκινήσει ο εκτενής σχολιασμός και ανάλυση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται μία γραφική απεικόνιση της περιοχής (καννάβου) των μετρήσεων και οι τομές που δημιουργήθηκαν μέσω του βοηθητικού προγράμματος που αναπτύχθηκε (εικόνα 4.3.1.1).

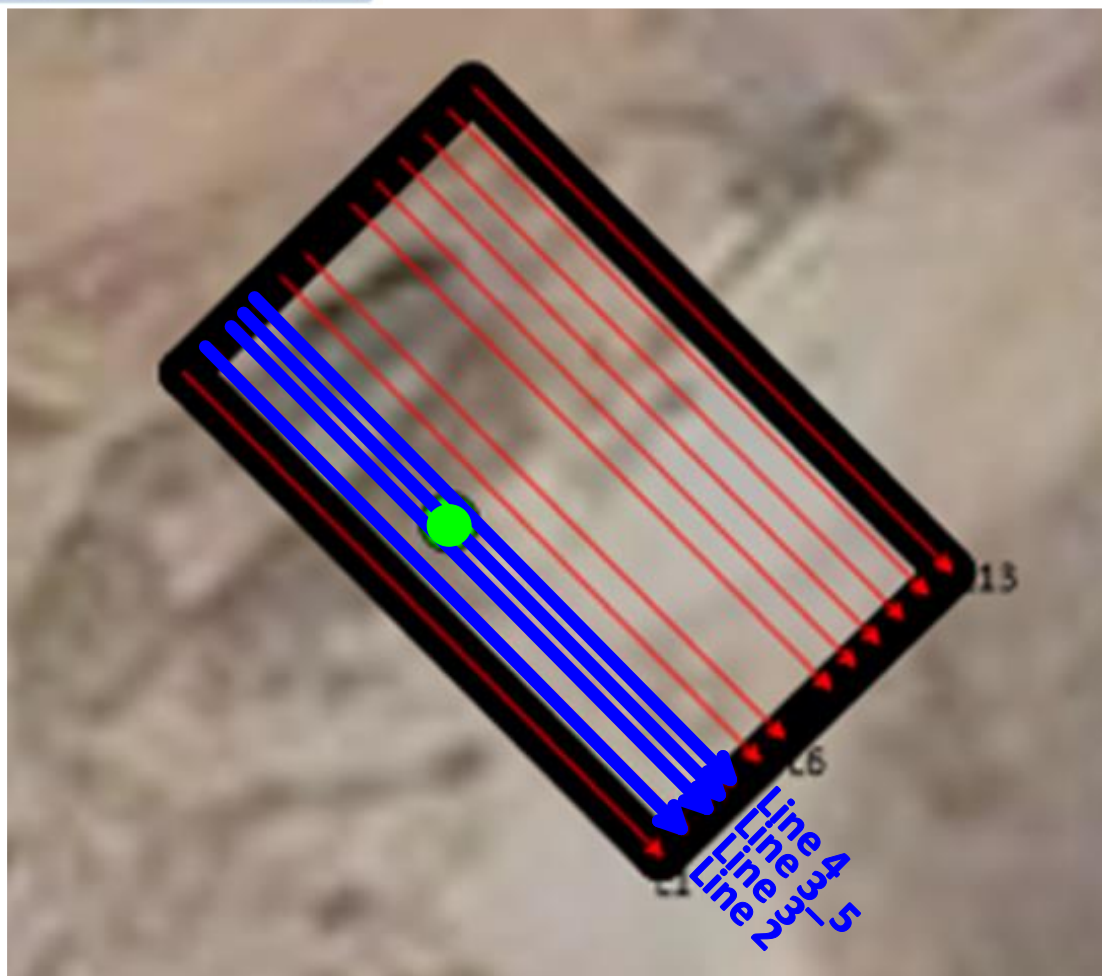


Εικόνα 4.3.1.1 Γραφική αναπαράσταση όλων των μετρήσεων και προφίλ που δημιουργήθηκαν.

Στο γράφημα αυτό φαίνονται όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Επίσης, η κάθε μέτρηση έχει διαφορετικό μέγιστο βάθος καθώς το πραγματικό βάθος στο οποίο θα φτάσει το ρεύμα κατά τη διάρκεια μίας μέτρησης εξαρτάται επίσης τόσο από τις ιδιότητες του εδάφους (π.χ. την αγωγιμότητά του) όσο και από τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά της μέτρησης. Επιπλέον, παρατηρείται πως, παρόλο που οι περισσότερες μετρήσεις απέχουν 1 μέτρο μεταξύ τους στον Y άξονα (πλάτος), η τέταρτη μέτρηση ('2d_in3_5.usf') απέχει μισό μέτρο τόσο από την προηγούμενη όσο και από την επόμενη μέτρηση. Επίσης, η όγδοη μέτρηση ('2d_in8.usf') απέχει 2 μέτρα από την προηγούμενη μέτρηση ('2d_in6.usf') καθώς αναμεσά τους δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση. Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές τομές που μετρήθηκαν.

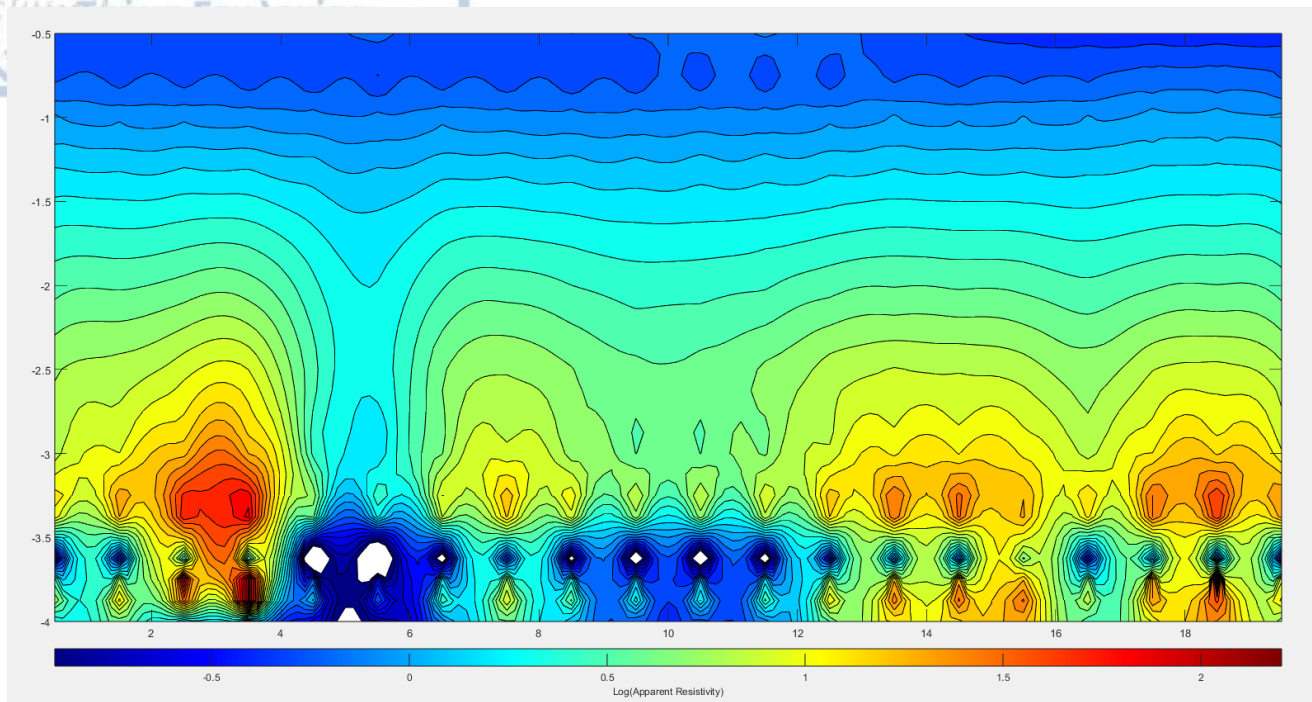
4.3.1 Χαρακτηριστικά προφίλ TEM

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν χαρακτηριστικά προφίλ TEM. Ειδικότερα θα παρουσιαστούν και σχολιαστούν τα τέσσερα προφίλ όπως φαίνονται στην Εικόνα 4.3.1.1.



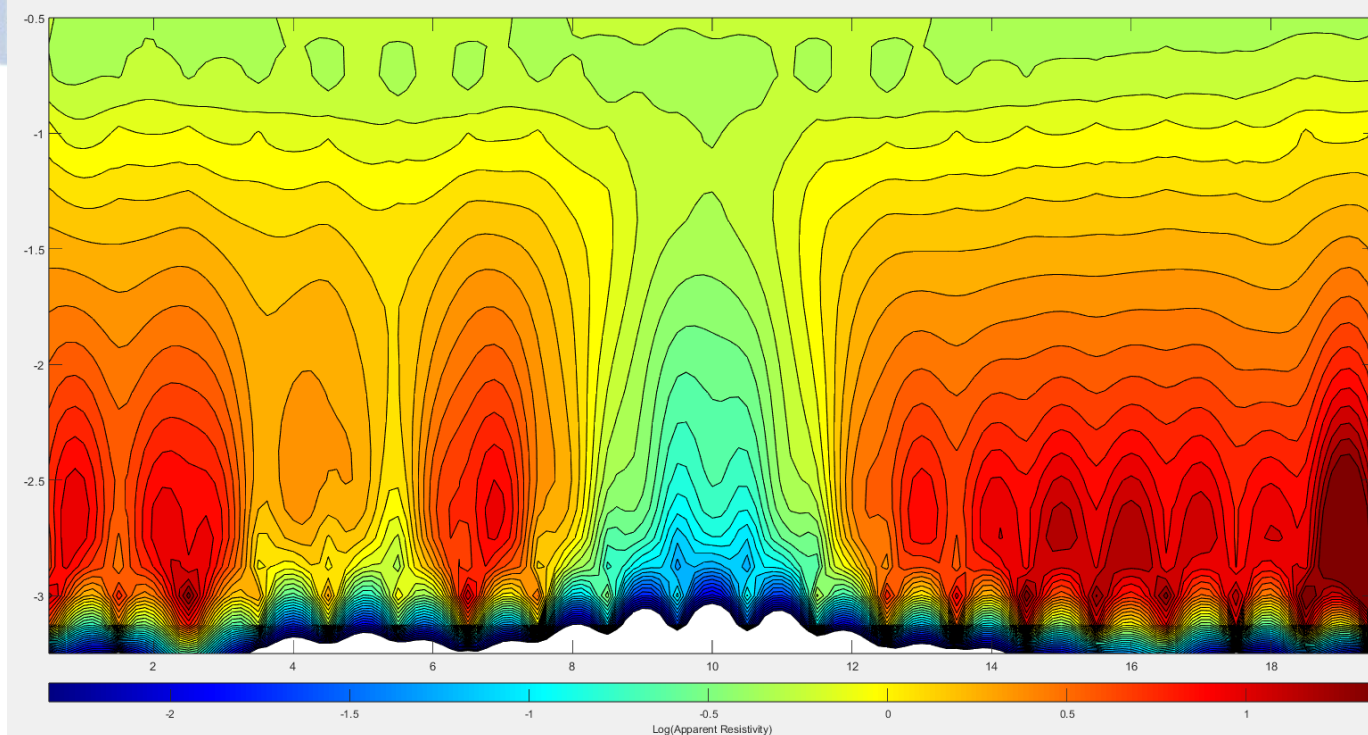
Σχήμα 4.3.1.1 Η θέση των προφίλ TEM που παρουσιάζονται.

Τα προφίλ αυτά επιλέχθηκαν ενδεικτικά ώστε να παρουσιαστεί η εικόνα των προφίλ που βρίσκονται πάνω από τον στόχο και λαμβάνουν πληροφορία από αυτόν καθώς και ένα προφίλ που βρίσκεται μακριά από τον στόχο και δεν παρέχει πληροφορίες γι' αυτόν. Συγκεκριμένα τα προφίλ 'Line 3', 'Line 3_5', 'Line 4' βρίσκονται πάνω από τον στόχο (δεξαμενή), επομένως οι μετρήσεις επηρεάζονται από αυτόν, ενώ το προφίλ 'Line 2' βρίσκεται μακριά από τον στόχο, επομένως οι μετρήσεις στο προφίλ αυτό δεν επηρεάζονται από τον στόχο.



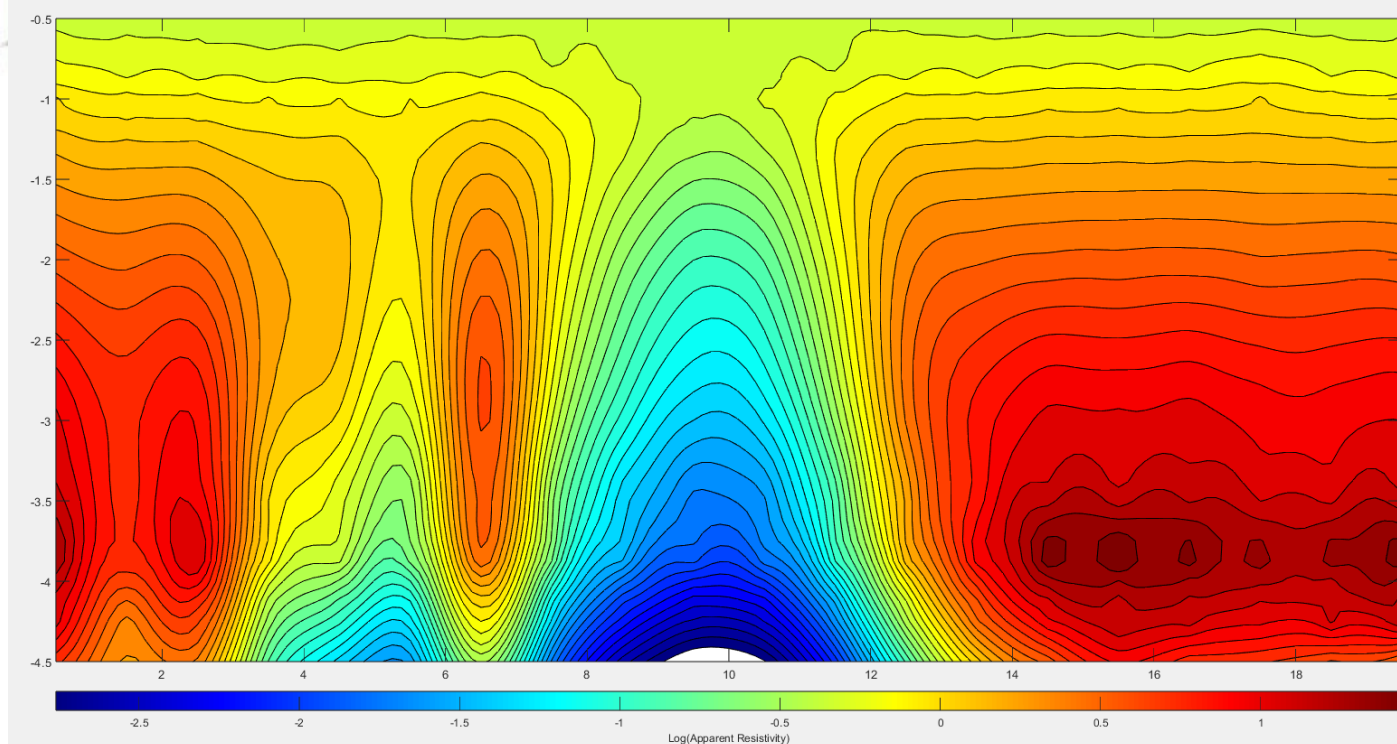
Σχήμα 4.3.1.2 Μέτρηση στη γραμμή 2d_In2.usf.

Πρόκειται για την δεύτερη γραμμή μέτρησης με σημείο έναρξης στον άξονα Y το 1 μέτρο. Στο προφίλ αυτό δεν παρατηρείται κάποια αντίθεση και μικρές τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, επομένως στο βάθος δεν υπάρχει κάποιο αντικείμενο ενδιαφέροντος (π.χ. κάποιο μεταλλικό αντικείμενο, όπως η δεξαμενή που αφορά την παρούσα έρευνα).



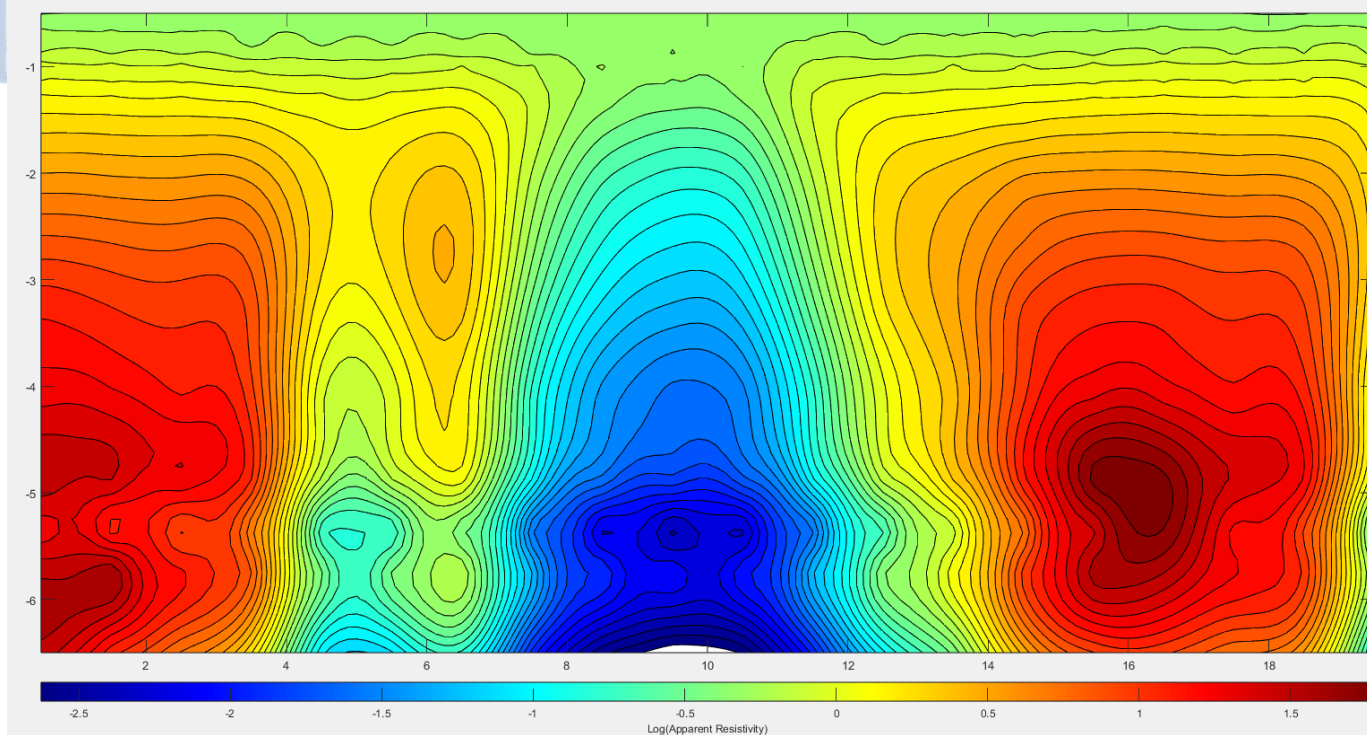
Σχήμα 4.3.1.3 Μέτρηση στη γραμμή 2d_In3.usf.

Πρόκειται για την δεύτερη γραμμή μέτρησης με σημείο έναρξης στον άξονα Y τα 2 μέτρα. Σε αυτό το προφίλ παρατηρείται μία έντονη αντίθεση στις τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στο σημείο των 10 μέτρων στον άξονα X. Παρατηρείται μία κλιμακωτή μείωση στις τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος με τιμές από -0.5 μέχρι -1.5, ενώ οι τιμές στον υπόλοιπο χώρο είναι μηδενικές και θετικές. Αυτή η έντονη αντίθεση και συγκεκριμένα οι μικρές τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης υποδεικνύουν την ύπαρξη ενός μεταλλικού αντικειμένου (δηλαδή του στόχου που ερευνάται) στα σημεία που παρατηρούνται οι τιμές αυτές.



Σχήμα 4.3.1.4 Μέτρηση στη γραμμή 2d_In3.usf.

Πρόκειται για την τέταρτη γραμμή μέτρησης με σημείο έναρξης στον άξονα Y τα 2.5 μέτρα. Το συγκεκριμένο προφίλ απέχει 0.5 μέτρα από την προηγούμενη και την επόμενη γραμμή μέτρησης καθώς βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο του στόχου. Στο σημείο των 10 μέτρων του άξονα X παρατηρείται μία κλιμακωτή μείωση της τιμής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος με τιμές από -0.5 μέχρι -2.5, ενώ στον υπόλοιπο χώρο κυριαρχούν μηδενικές και θετικές τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτή η έντονη αντίθεση και συγκεκριμένα οι μικρές τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης φανερώνουν χαρακτηριστικά την ύπαρξη του στόχου (δεξαμενή) στο σημείο αυτό.



Σχήμα 4.3.1.5 Μέτρηση στη γραμμή 2d_In3_5.usf.

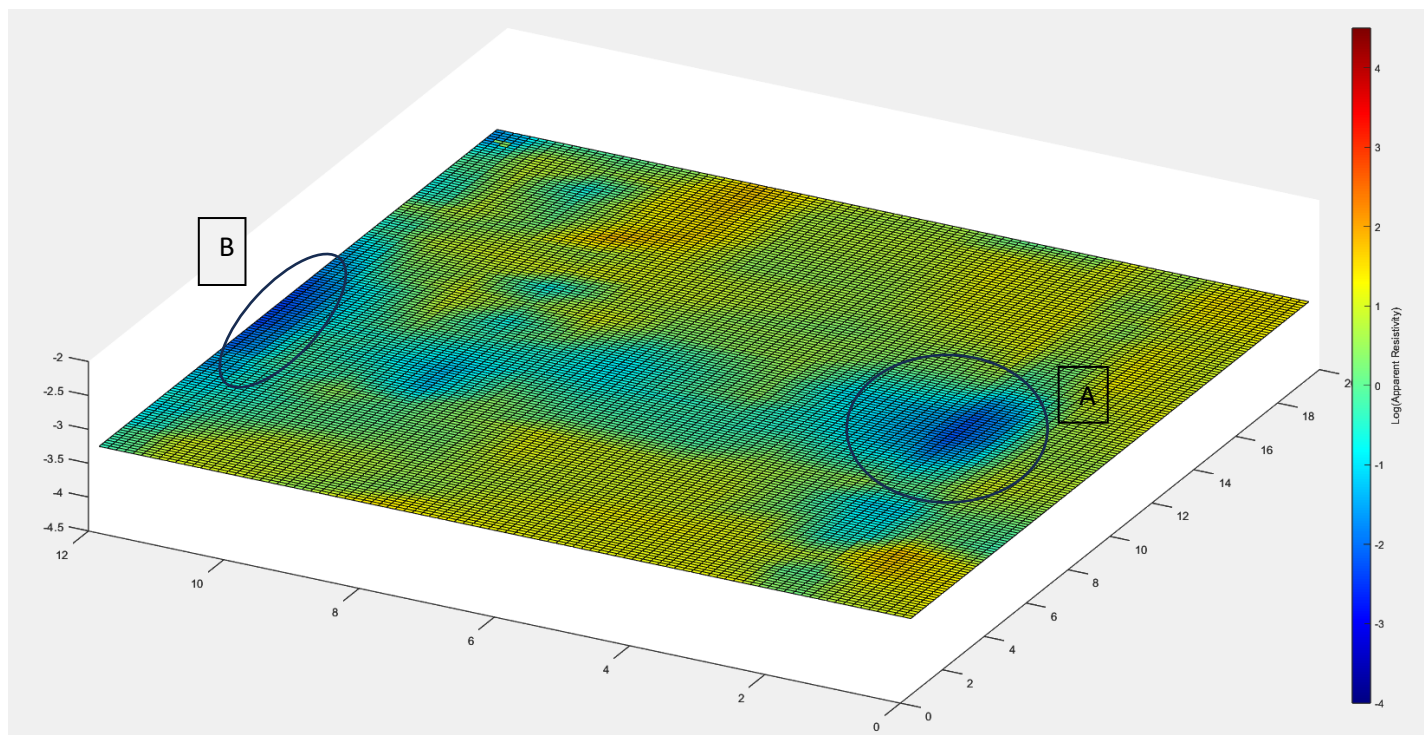
Πρόκειται για την πέμπτη γραμμή μέτρησης με σημείο έναρξης στον άξονα Y τα 3 μέτρα. Στο σημείο των 10 μέτρων του άξονα X παρατηρείται και σε αυτό το προφίλ μία κλιμακωτή μείωση της τιμής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος με τιμές από -1 μέχρι -2.5, ενώ στον υπόλοιπο χώρο (αριστερά και δεξιά από τις αρνητικές τιμές) κυριαρχούν μηδενικές και θετικές τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτή η έντονη αντίθεση και συγκεκριμένα οι μικρές τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης φανερώνουν χαρακτηριστικά την ύπαρξη του στόχου (δεξαμενή) στο σημείο αυτό.

4.4 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων τρισδιάστατων τομών

Στη συνέχεια το βοηθητικό πρόγραμμα δημιουργεί τρία τρισδιάστατα γραφήματα ενδεικτικά για διάφορα βάθη των μετρήσεων και στη συνέχεια επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει τα δικά του τρισδιάστατα γραφήματα με τα δεδομένα σε οποιοδήποτε σημείο επιθυμεί και για οποιονδήποτε άξονα (X, Y, Z) επιθυμεί. Τέλος, η κλίμακα που χρησιμοποιείται είναι η ίδια με αυτή των δισδιάστατων γραφημάτων. Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο από αυτά.

4.4.1 Γράφημα για το βάθος των 3.375 μέτρων

Το πρόγραμμα δημιουργεί ένα τρισδιάστατο γράφημα με προβολή των σημείων με τιμή στον άξονα Z την μισή από αυτή του μέγιστου βάθους μέτρησης, τιμή που προκύπτει ανάλογα με τα δεδομένα των μετρήσεων. Για τα δεδομένα των συγκεκριμένων μετρήσεων η τιμή αυτή είναι το 3.375 (εικόνα 4.4.1.1).



Εικόνα 4.4.1.1 Τρισδιάστατος χάρτης των μετρήσεων του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης για βάθος ίσο με 3,375m.

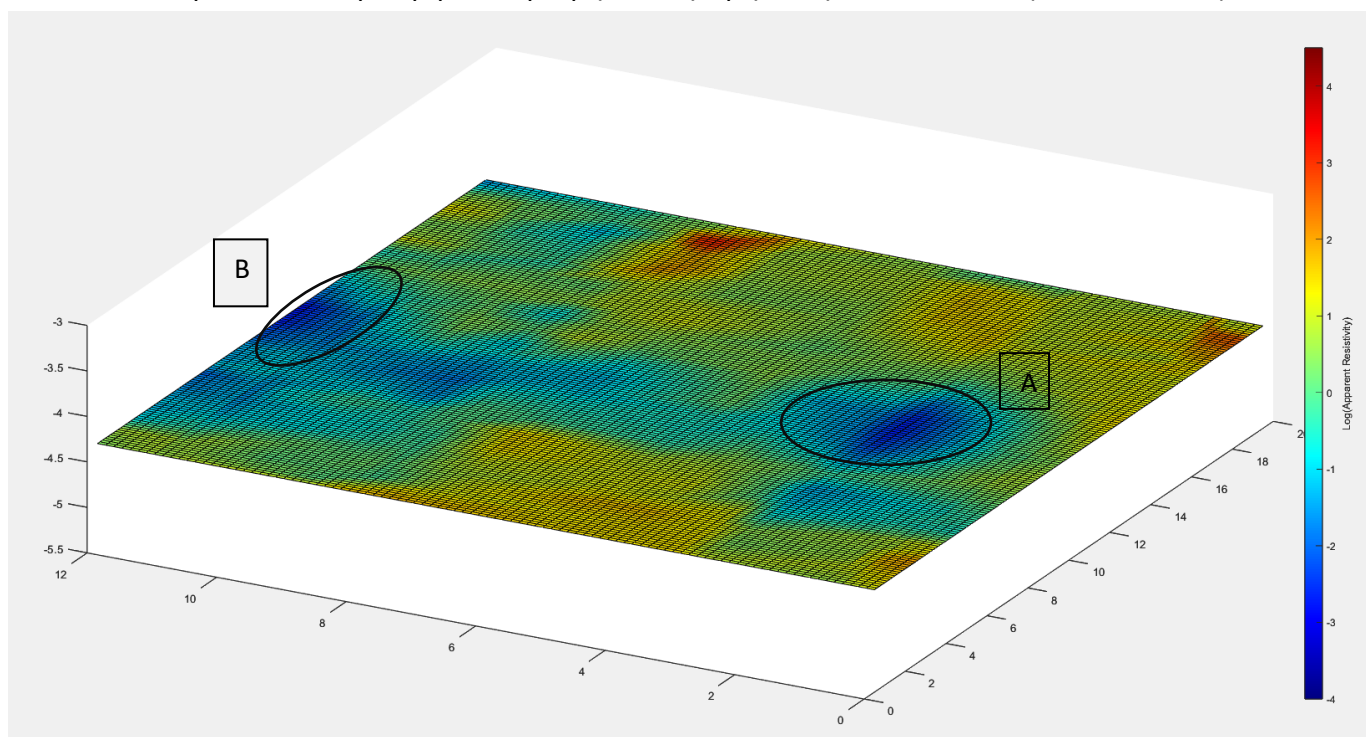
Στο συγκεκριμένο γράφημα παρουσιάζεται η τιμή του τιμή του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης σε ολόκληρο τον χώρο που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για βάθος 3.375 μέτρα. Στην θέση A στην κυκλωμένη περιοχή παρατηρείται πτώση στην τιμή του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης (τιμή μεταξύ του -3 και του -4), καθώς στο σημείο εκείνο εντοπίζεται ο στόχος (δεξαμενή) και η αντίθεση των τιμών συγκριτικά με αυτές της περιοχής γύρω του είναι έντονες.

Επιπλέον, στην θέση B παρατηρείται μία ακόμα έντονη αντίθεση στις τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με αρνητικές τιμές μεταξύ

του -3 και του -4. Οι τιμές αυτές μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη κάποιου μεταλλικού αντικειμένου στο υπέδαφος, όπως σωληνώσεις για παράδειγμα. Ωστόσο, αποδείχθηκε πως οι τιμές αυτές οφείλονται στο αποτύπωμα μίας άλλης δεξαμενής που βρίσκεται βορειότερα του καννάβου (ξεκινά στα όρια του) στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις TEM.

4.4.2 Γράφημα για το βάθος των 4.375 μέτρων

Επιπλέον, το πρόγραμμα δημιουργεί ένα τρισδιάστατο γράφημα με προβολή των σημείων με τιμή στον άξονα Z την μισή από αυτή του μέγιστου βάθους μέτρησης συν 1 μέτρο, τιμή που προκύπτει ανάλογα με τα δεδομένα των μετρήσεων. Για τα δεδομένα των συγκεκριμένων μετρήσεων η τιμή αυτή είναι το 4.375 (εικόνα 4.4.1.2).



Εικόνα 4.4.1.2 Τρισδιάστατος χάρτης των μετρήσεων του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης για βάθος ίσο με 4,375m.

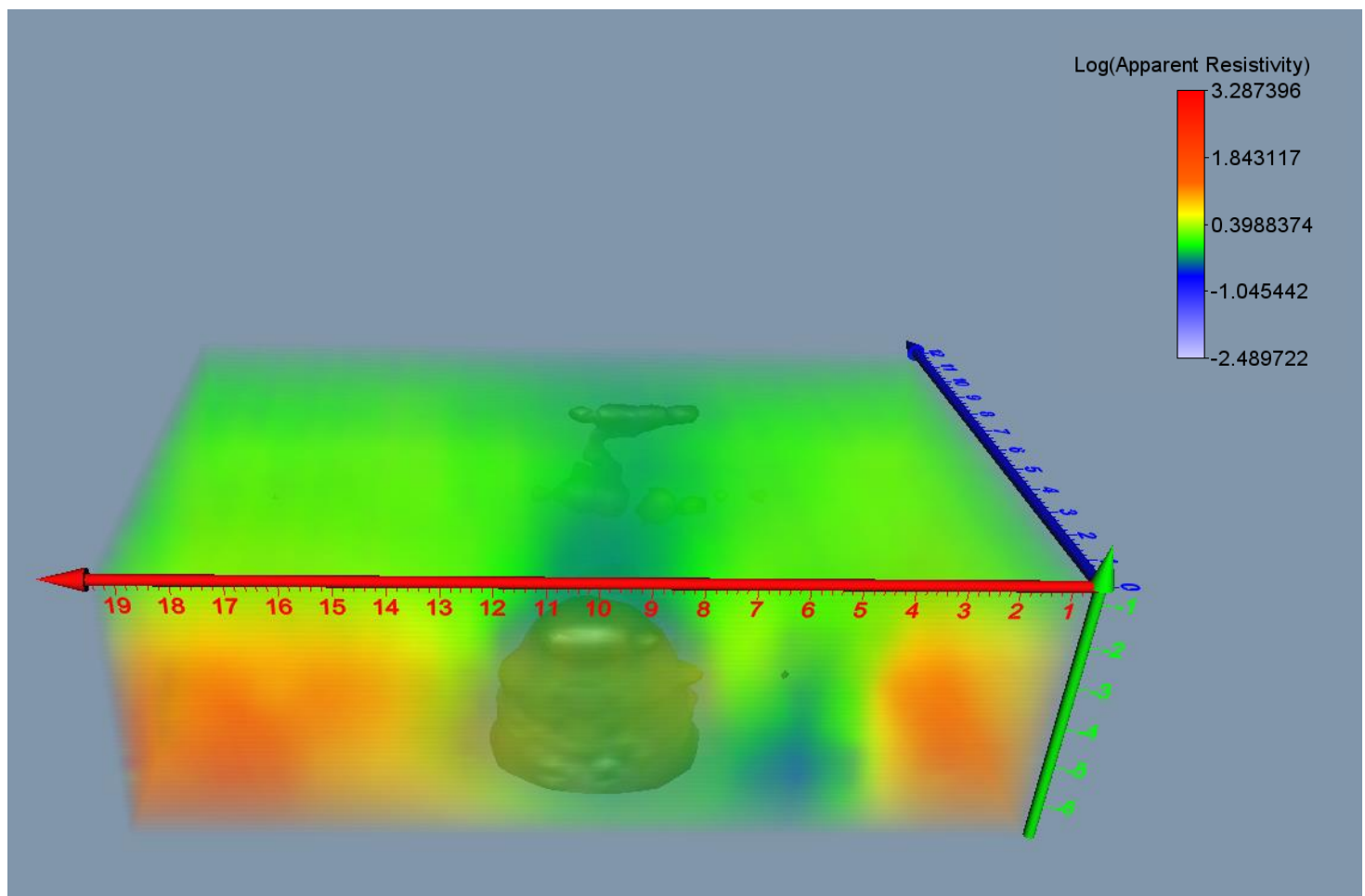
Στο συγκεκριμένο γράφημα παρουσιάζεται η τιμή του τιμή του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης σε ολόκληρο τον χώρο που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για βάθος 4.375 μέτρα. Στη θέση A στην κυκλωμένη περιοχή παρατηρείται σημαντική μείωση στην τιμή του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης (τιμή μεταξύ του -3 και του -4) , καθώς στο σημείο εκείνο εντοπίζεται ο στόχος (δεξαμενή) και η αντίθεση των τιμών συγκριτικά με αυτές της περιοχής γύρω του είναι έντονες. Επιπλέον, στην θέση B παρατηρείται μία ακόμα έντονη αντίθεση στις τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, συγκριτικά με τις τιμές που επικρατούν στο περιβάλλον γύρω τους, με αρνητικές τιμές μεταξύ του -3 και του -4. Οι τιμές αυτές μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη κάποιου μεταλλικού αντικειμένου στο υπέδαφος, όπως σωληνώσεις για παράδειγμα. Ωστόσο, αποδείχθηκε πως οι τιμές αυτές οφείλονται στο αποτύπωμα μίας άλλης δεξαμενής

που βρίσκεται βορειότερα του καννάβου (ξεκινά στα όρια του) στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις TEM.

4.5 Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων μέσω Voxler

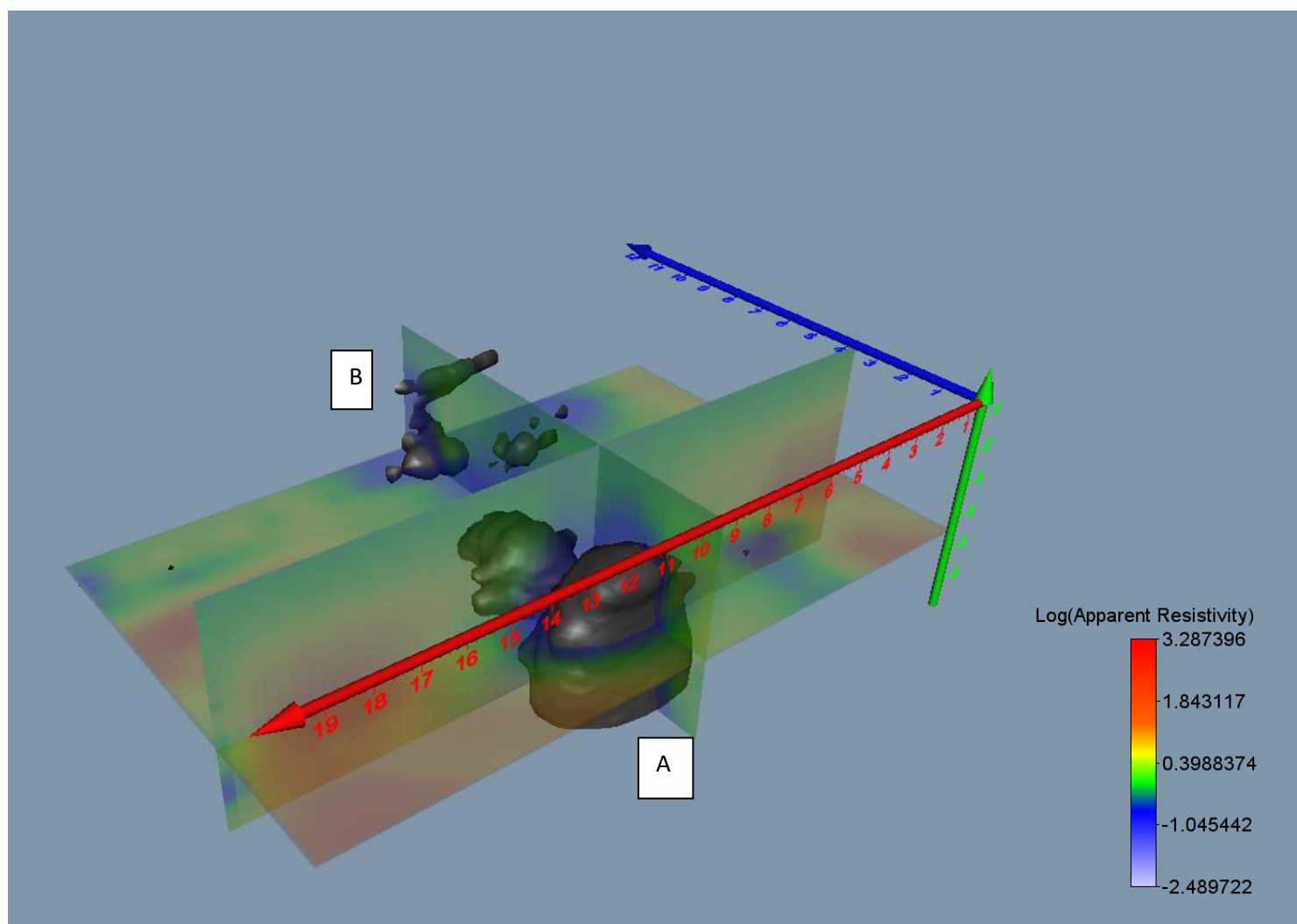
Το πρόγραμμα Voxler, δημιουργεί τρισδιάστατες εικόνες και μοντέλα και γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στις γεωλογικές έρευνες. Παρακάτω, παρουσιάζονται αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων με το Voxler, έπειτα από τον υπολογισμό του λογαρίθμου της τιμής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης καθώς και του φαινόμενου βάθους. Όπως είναι λογικό, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα γραφήματα αυτά είναι ίδια με αυτά που προκύπτουν από την επεξεργασία μέσω του βοηθητικού προγράμματος που αναπτύχθηκε.

Όπως και στα προηγούμενα γραφήματα έτσι και σε αυτά χρησιμοποιείται χρωματική κλίμακα του «ουράνιου τόξου» για εμφανή αποτύπωση των διάφορων αντιστάσεων στο βάθος, με κόκκινα χρώματα να αντιπροσωπεύουν μεγάλες τιμές και μωβ χρώματα να αντιστοιχούν μικρές τιμές, με την κλίμακα και τις τιμές της να παρουσιάζονται σε κάθε γράφημα.



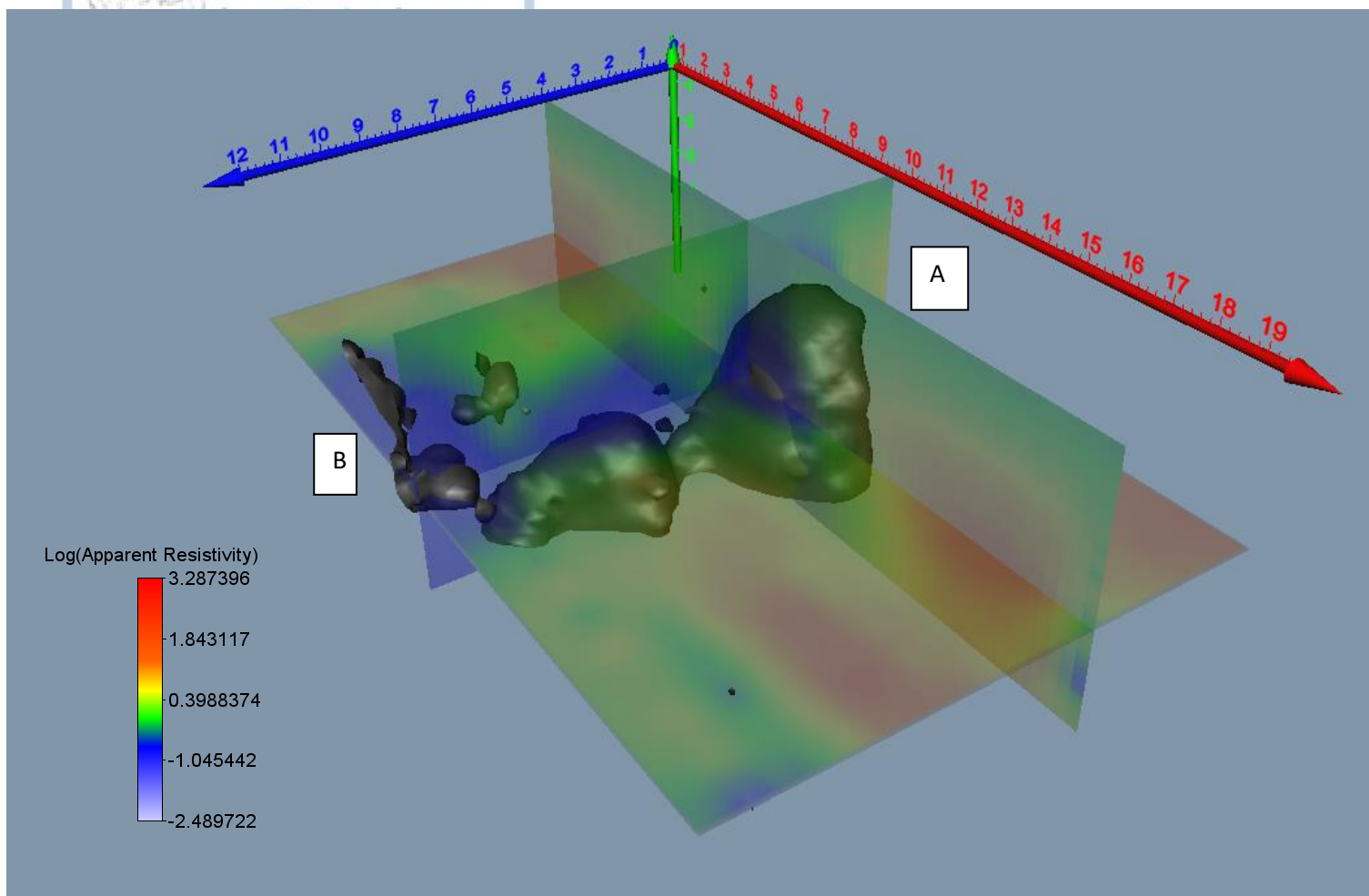
Εικόνα 4.5.1 Τρισδιάστατος χάρτης των μετρήσεων του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με ισοεπιφάνεια στο Voxler.

Στο γράφημα της εικόνας 4.5.1 παρατηρούνται οι διάφορες τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης σε ολόκληρη την περιοχή των μετρήσεων, ενώ παράλληλα φαίνεται και η ισοεπιφάνεια, δηλαδή επιφάνεια που αποτελείται από το σύνολο των σημείων με την ίδια τιμή, με τιμή -1.085935904 του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Η επιφάνεια αυτή αποκαλύπτει και τον στόχο (δεξαμενή) και όπως παρατηρείται στο σημείο αυτό οι τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης είναι πολύ μικρές (μπλε χρώμα) και αγγίζουν τις ελάχιστες της κλίμακας.



Εικόνα 4.5.2 Τρισδιάστατος χάρτης των μετρήσεων του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με προβολή επιφανειών στο Voxler.

Στο γράφημα της εικόνας 4.5.2 παρουσιάζεται ολόκληρη η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, με όλες τις τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης και η ισοεπιφάνεια με την ίδια τιμή του λογαρίθμου της φαινόμενης αντίστασης (-1.085935904). Παράλληλα προβάλλονται και 3 επιφάνειες, μία για κάθε άξονα (X,Y,Z). Η επιφάνεια YZ έχει τιμή $X=9.4$ μέτρα, η επιφάνεια XZ έχει τιμή $Z=4.5$ μέτρα και η επιφάνεια XY έχει τιμή $Z=3.9$ μέτρα. Στην περιοχή του στόχου (δεξαμενή), δηλαδή στη θέση A, παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης (μπλε χρώμα), κάτι που επιβεβαιώνει την ύπαρξη του στόχου στο σημείο εκείνο.



Εικόνα 4.5.3 Τρισδιάστατος χάρτης των μετρήσεων του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με προβολή επιφανειών στο Voxler.

Το γράφημα στην εικόνα 4.5.3 είναι ίδιο με το προηγούμενο της εικόνας 4.5.2 από διαφορετική οπτική γωνία. Σε αυτό το γράφημα παρατηρείται πως εκτός από την δεξαμενή της θέσης A υπάρχουν και στη θέση B κάποιες ισοεπιφάνειες με την ίδια τιμή του λογαρίθμου της φαινόμενης αντίστασης, δηλαδή -1.085935904 . Οι τιμές αυτές μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη κάποιου μεταλλικού αντικειμένου στο υπέδαφος, όπως σωληνώσεις για παράδειγμα. Ωστόσο, αποδείχθηκε πως οι τιμές αυτές οφείλονται στο αποτύπωμα μίας άλλης δεξαμενής που βρίσκεται βορειότερα του καννάβου (ξεκινά στα όρια του) στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις TEM.

5. Συμπεράσματα

Η μέθοδος των παροδικών πεδίων αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στην μελέτη των ηλεκτρικών παραμέτρων και ιδιοτήτων του υπεδάφους και στην εύρεση στόχων με έντονη αντίθεση των ιδιοτήτων τους σε σχέση με το περιβάλλον. Επιπλέον, η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων βοηθάει στον ακριβή εντοπισμό και απεικόνιση μέσω μοντέλων και γραφημάτων του στόχου που ερευνάται αλλά και γενικότερα προκύπτει μία πολύ αντιπροσωπευτική εικόνα των τιμών των φαινομένων αντιστάσεων σε ολόκληρη την περιοχή που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

Συγκεκριμένα, στην έρευνα που αναλύθηκε στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την εύρεση ενός θαμμένου στόχου (δεξαμενή) στην περιοχή ενός παλιού στρατοπέδου στην περιοχής Μενεμένης στη Θεσσαλονίκη. Εκεί, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από την έρευνα εντοπίστηκε επιτυχώς ο θαμμένος στόχος (δεξαμενή).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση επιβεβαίωσαν την ύπαρξη ενός θαμμένου μεταλλικού αντικειμένου στο σημείο των μετρήσεων. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν εργασίες και ανασκαφές για την εκταφή του.

Επιπλέον, στην τελευταία γραμμή μέτρησης, δηλαδή για $Z = 12$ m, παρατηρείται μία σημαντική αντίθεση με την ύπαρξη χαμηλών τιμών της φαινομένης ηλεκτρικής αντίστασης στο σημείο αυτό. Οι τιμές αυτές μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη κάποιου μεταλλικού αντικειμένου στο υπέδαφος, όπως σωληνώσεις για παράδειγμα. Ωστόσο, αποδείχθηκε πως οι τιμές αυτές οφείλονται στο αποτύπωμα μίας άλλης δεξαμενής που βρίσκεται βορειότερα του καννάβου (ξεκινά στα όρια του) στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις TEM. Ο στόχος αυτός εντοπίστηκε με άλλες γεωφυσικές μεθόδους που πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή.

Στον χάρτη παρακάτω (εικόνα 5.1) παρουσιάζονται τελικώς ο κάνναβος, δηλαδή τα ακριβή σημεία και συνολικές διαστάσεις, στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία καθώς και ο στόχος στην ακριβή θέση που εντοπίστηκε στο υπέδαφος.



Εικόνα 5.1 Ο κάναβος των μετρήσεων και ο στόχος (δεξαμενή).

Στην παραπάνω αεροφωτογραφία (εικόνα 5.1) φαίνεται στο μαύρο πλαίσιο ολόκληρη η περιοχή χαρτογράφησης με διαστάσεις 20x12, δηλαδή με μήκος 20 μέτρα μήκος με μία βυθοσκόπηση ανά μέτρο σε κάθε γραμμή και 12 μέτρα πλάτος με τη πραγματοποίηση 13 διαφορετικών γραμμών μετρήσεων.

Επιπλέον, με την πράσινη κουκίδα απεικονίζεται ο στόχος, δηλαδή η δεξαμενή που εντοπίστηκε. Τελικά, η δεξαμενή εντοπίστηκε και είχε μήκος $M=3.5$ μέτρα και διάμετρος $D=2$ μέτρα και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

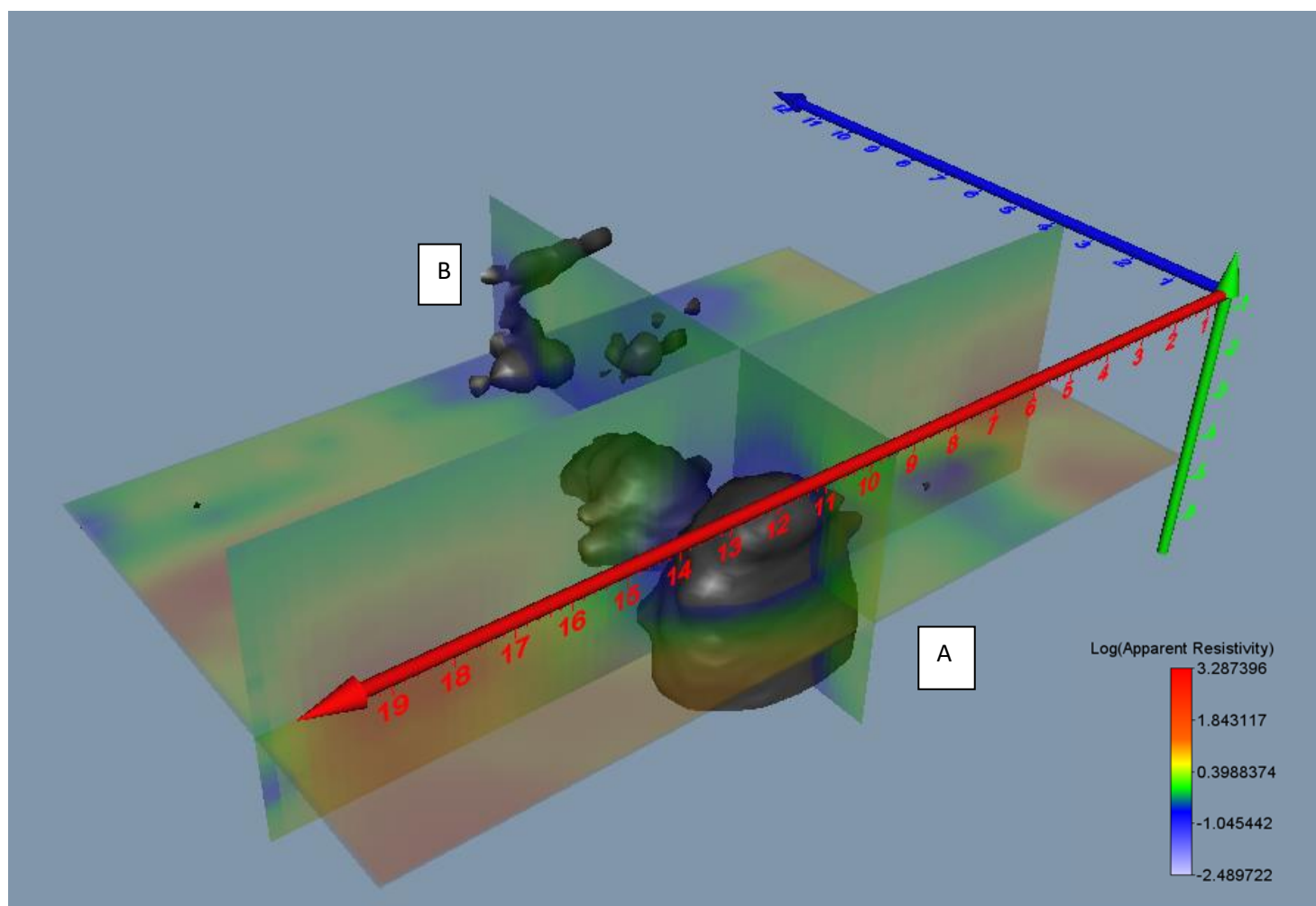


Εικόνα 5.2 Η δεξαμενή που εντοπίστηκε στην περιοχή.

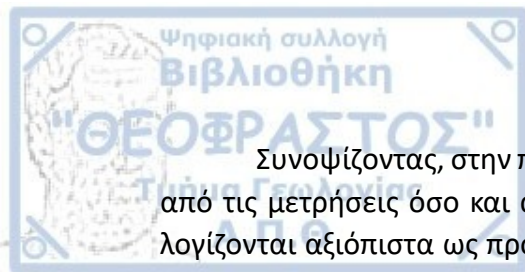
Στην εικόνα 5.3 παρατηρείται μία ισοεπιφάνεια με τιμή του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης (-1.085935904), ωστόσο παρατηρούνται επιφάνειες σε δύο διαφορετικές θέσεις (Α και Β). Η θέση Α βρίσκεται στα 2.5 μέτρα του άξονα Χ ενώ η θέση Β. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έπειτα από τις μετρήσεις υπέδειξαν την ύπαρξη μίας θαμμένης δεξαμενής στην θέση Α (εικόνα 5.2) στην περιοχή των μετρήσεων που επιβεβαιώθηκε από την μετέπειτα εκσκαφή.

Ωστόσο, παρατηρείται στη θέση Β και μία ισοεπιφάνεια με την ίδια τιμή. Οι τιμές αυτές μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη κάποιου μεταλλικού αντικειμένου στο υπέδαφος, όπως σωληνώσεις για παράδειγμα. Ωστόσο, αποδείχθηκε πως οι τιμές αυτές οφείλονται στο αποτύπωμα μίας άλλης δεξαμενής, και συγκεκριμένα της Δ1 (εικόνα 4.2.1), που βρίσκεται βορειότερα του καννάβου (ξεκινά στα όρια του) στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις TEM.

Συμπερασματικά η χρήση του λογισμικού βοήθησε στην καλύτερη απεικόνιση και ερμηνεία των δεδομένων TEM όπως αυτό επιβεβαιώνεται από τη ακριβή τρισδιάστατη χαρτογράφηση της δομής ενδιαφέροντος που υποδεικνύει τη διαπιστωμένη θέση της.



Εικόνα 5.3 Τρισδιάστατος χάρτης των μετρήσεων του λογαρίθμου της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης με προβολή επιφανειών στο Voxler.



Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από τις μετρήσεις όσο και από τα δεδομένα που προέκυψαν από την επεξεργασία λογίζονται αξιόπιστα ως προς την ποιότητά τους. Την επιβεβαίωση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων δίνει το γεγονός πως πραγματοποιήθηκε εκσκαφή στην περιοχή των μετρήσεων και επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη μίας μεταλλικής δεξαμενής, η οποία στη συνέχεια ανασύρθηκε.



6. Βιβλιογραφία

Shu Yan, Ming Sheng Chen & Xian Xin Shi (2009) Transient electromagnetic sounding using a 5 m square loop, Exploration Geophysics, 40:2, 193-196, DOI: 10.1071/EG08122

Βλαχονάσιος Χριστοφορίδης Επαμεινώνδας, Θεσσαλονίκη. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΛΕΙΨΑΝΩΝ ΘΑΜΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΟΥ. Διπλωματική εργασία.

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Παπαζάχος Βασίλειος, Θεσσαλονίκη 1996. Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Τσελέντης Άκης, Παρασκευόπουλος Π. Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Εκδόσεις Liberal Books. , Αθήνα 2013

Τσούρλος Π., Βαργεμέζης Γ. (2023), Παρουσιάσεις μαθήματος Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης. <https://elearning.auth.gr/>

WTEM-2 user's manual

[http://www.langeoinstrument.com/Transient Electromagnetic Instrument/ 33.html](http://www.langeoinstrument.com/Transient_Electromagnetic_Instrument/33.html)

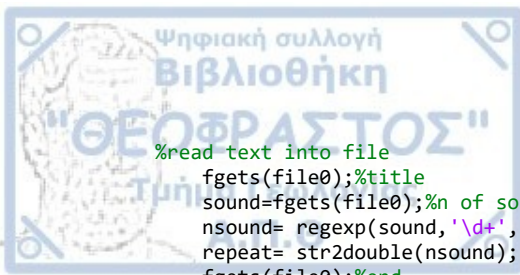


Παράρτημα

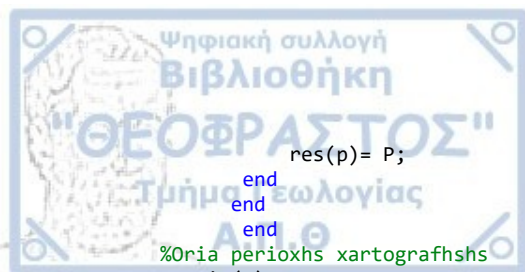
Στο παράρτημα αυτό βρίσκεται το βοηθητικό πρόγραμμα υπολογισμού φαινόμενης αντίστασης που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες επεξεργασίας των δεδομένων της παρούσας εργασίας (γλώσσα MatLab).

```
% ***** tem_usf.m *****
% voithitiko programma ypologismou fainomenis antistasis
% kai fainomenou vathous kai dhmiourgia 2D kai 3D grafhmmatwn twn apotelesmatwn
% Diplwmatikh ergasia, Papanikolaou Dimitrios, AEM:5797
% Tmhma Geologias AUTH- 06/23

clc
clear
m0=4*pi*(10^(-7));
%%user inserts K value
K= input('Input K : ');
%%Create folder for output files
mkdir Output_Graphs
fname= [pwd '/Output_Graphs'];
%%Graph for profile
graphname2= 'Profile for all soundings';
stack=figure('Name',graphname2,'NumberTitle','off');
%Create colorbar
colormap(jet);
c = colorbar;
c.Label.String = 'Log(Apparent Resistivity)';
c.Location = 'southoutside'; %change location of colorbar
hold on
%%Open header file
filename='header_file.txt';
trg=fopen(filename,'r');
%count number of files
fid = fopen(filename,'r');
M = 0;
while ~feof(fid)
    fgetl(fid);
    M = M+1;
end
fclose(fid);
M;
%Count starting points of each measurement
for l=1:M
    fline1=fgets(trg);
    line1= textscan(fline1,'%s %s');
    num_all(l)=line1{2};
    numdouble(l) = str2double(num_all(1));
end
%read file names
filename='header_file.txt';
trg=fopen(filename,'r');
fid = fopen(filename,'r');
N = 0;
while ~feof(fid)
    fgetl(fid);
    N = N+1;
end
fclose(fid);
N;
for k=1:N
    fline=fgets(trg);
    line= textscan(fline,'%s %s');
    name(k)=line{1};
    num(k)=line{2};
    f=char(name(k));
    numchar(k) = str2double(num(k));
    file0=fopen(f,"r");
```



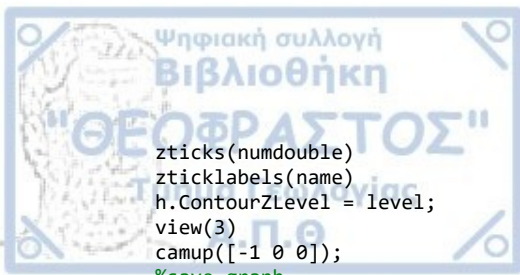
```
%read text into file
fgets(file0);%title
sound=fgets(file0);%n of soundings
nsound= regexp(sound,'\d+','match');
repeat= str2double(nsound);
fgets(file0);%end
for r=1:repeat %loop for all soundings
fgets(file0);%void
fgets(file0);%array
fgets(file0);%azimuth
fgets(file0);%instrument
fgets(file0);%volt_units
fgets(file0);%date
str1=fgets(file0);%loop_size
loop= regexp(str1,'\d+','match') ;
size= str2double(loop) ;
a=size(1);
b=size(3);
fgets(file0);%loop_turns
fgets(file0);%profile
fgets(file0);%ramp_time
fgets(file0);%sweeps
str2= fgets(file0);%points
p= regexp(str2,'\d+','match') ;
iwant = str2double(p) ;
fgets(file0);%sname
fgets(file0);%snumber
fgets(file0);%location
fgets(file0);%coil_size
fgets(file0);%void
fgets(file0);%sweep_number
fgets(file0);%current
fgets(file0);%frequency
fgets(file0);%end
fgets(file0);%header_indx
% read_sounding
for i=1:iwant
tline=fgets(file0);
se=textscan(tline,'%d %s %f %s %f %s %f %s %f %s %d %s');
time(i,r)=se{2};
volt(i,r)=se{4};
volt(i,r)= max(volt(i,r),0);
end
%Calculate apparent resistivity
for i=1:iwant
ar(i,r)= (m0/(4*pi*time(i,r)))*power( ((2*m0*a*b)/(5*time(i,r)*volt(i,r))),2/3);
if ar(i,r)==inf
ar(i,r)=0; % replaces with zero
end
end
%Calculate apparent depth
for i=1:iwant
H(i,r)= K* power( (ar(i,r)*time(i,r))/(2*m0),0.5);
end
fgets(file0);%/end
end
apres=ar(3:20,1:20);
all_depth=H(3:20,1:20);
zz=mean(H(3:20,1:2),2);
% subplot (2,1,1);
% imagesc(log(apres))
% subplot (2,1,2);
% imagesc(all_depth)
m=height(apres);
n=width(apres);
p=0;
for j=1:n % soundings
for i=1:m % channels
p=p+1;
x(p)=j-0.5;
z(p)=-zz(i);
res(p)=apres(i,j);
P=mean(res);
if res(p)==0 %error if res(p) is 0
```



```

res(p)= P;
end
end
end
%Oria perioxhs xartografhshs
x1=min(x);
x2=max(x);
y1=min(z);
y2=max(z);
%Orismos grid interval
d=0.125;
%Strogilopoiisi oriwn
x1n=(floor(x1/d))*d;
x2n=(ceil(x2/d))*d;
y1n=(floor(y1/d))*d;
y2n=(ceil(y2/d))*d;
%Dhmiourgia kannavou dedomenwn (grid)
[X,Y]=meshgrid(x1n:d:x2n,y1n:d:y2n);
%Ypologismos antistasis sta shmeia tou kannavou (grid)
ires=griddata(x,z,log(res),X,Y,'v4');
%KATASKEYH XARTH
%Orismos isoilektrikis
iso=0.1;
%Elaxisti antistasi
res1=min(res);
%Megisti antistasi
res2=max(res);
%Pinakas me isoilektrikes
rr=log(res1):iso:log(res2);
%Figures names
graphname = sprintf('%s',f);
graphname= graphname(1:end-4);
figure('Name',graphname,'NumberTitle','off');
%Sxediasmos xarth
c=contourf(X,Y,ires,rr);
%Xrwmatikh klimaka
colormap(jet);
c1=colorbar;
c1.Location = 'southoutside';
c1.Label.String = 'Log(Apparent Resistivity)';
%save files
saveas(gcf,fullfile(fname,graphname));
close(graphname);
%%plot all contours in one plot
%Oria perioxhs xartografhshs
x1=min(x);
x2=max(x);
y1=min(abs(z));
y2=max(abs(z));
%Orismos grid interval
d=0.125;
%Strogilopoiisi oriwn
x1n=(floor(x1/d))*d;
x2n=(ceil(x2/d))*d;
y1n=(floor(y1/d))*d;
y2n=(ceil(y2/d))*d;
%Dhmiourgia kannavou dedomenwn (grid)
[X,Y]=meshgrid(x1n:d:x2n,y1n:d:y2n);
%Ypologismos antistasis sta shmeia tou kannavou (grid)
ires=griddata(x,abs(z),log(res),X,Y,'v4');
%KATASKEYH XARTH
%Orismos isoilektrikis
iso=0.1;
%Elaxisti antistasi
res1=min(res);
%Megisti antistasi
res2=max(res);
%Pinakas me isoilektrikes
rr=log(res1):iso:log(res2);
% Figure's name
figure(stack)
%Create profiles
level= numchar(k);
[~,h] = contourf(Y,X,ires,rr);

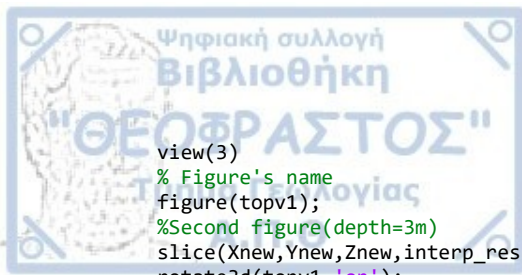
```



```

zticks(numdouble)
zticklabels(name)
h.ContourZLevel = level;
view(3)
camup([-1 0 0]);
%save graph
saveas(gcf,fullfile(fname,graphname2));
%%plot 4D map
%Create matrix with all the info
tv1=length(res);
tv2=tv1*k;
tv3=((k-1)*tv1)+1;
    for l=tv3:tv2
        y(l)=numchar(k);
        xall(tv3:tv2)=x;
        zall(tv3:tv2)=z;
        resall(tv3:tv2)=res;
    end
end
%save all info in a 4680x4 matrix
resall=log(resall);
info=[xall;y;zall;resall];
info3=[xall;y;zall];
info=(info)';
info3=info3';
resall=resall';
%Create 4D map
F=scatteredInterpolant(info3,resall);
%Oria perioxhs xartografhshs
x1=min(xall);
x2=max(xall);
y1=min(y);
y2=max(y);
z1=min(zall);
z2=max(zall);
%Orismos grid interval
d=0.125;
%Strogilopoiisi oriwn
x1new=(floor(x1/d))*d;
x2new=(ceil(x2/d))*d;
y1new=(floor(y1/d))*d;
y2new=(ceil(y2/d))*d;
z1new=(ceil(z1/d))*d;
z2new=(floor(z2/d))*d;
%Dhmiourgia kannavou dedomenwn (grid)
[Xnew,Ynew,Znew]=meshgrid(x1new:d:x2new,y1new:d:y2new,z1new:d:z2new);
interp_res= F(Xnew,Ynew,Znew);
%graph for top view (6m)
hd=abs(z1new)-0.5;
hdname=num2str(hd);
hdcomma=replace(hdname,".",",");
graphname3= ['Graph for depth(z)=',hdcomma,' m'];
topv=figure('Name',graphname3,'NumberTitle','off');
hold on
view(3)
% Figure's name
figure(topv);
%%First figure(depth=6m)
slice(Xnew,Ynew,Znew,interp_res,(x2new/2),(y2new/2),-hd)
rotate3d(topv,'on');
%Xrwmatikh klimaka
colormap(jet);
clim([-4 4.5])
c2=colorbar;
c2.Label.String = 'Log(Apparent Resistivity)';
%save files
saveas(gcf,fullfile(fname,graphname3));
%graph for top view (3m)
hd1=abs(z1new)/2;
hd1name=num2str(hd1);
hd1comma=replace(hd1name,".",",");
graphname4=['Graph for depth(z)=',hd1comma,' m'];
topv1=figure('Name',graphname4,'NumberTitle','off');
hold on

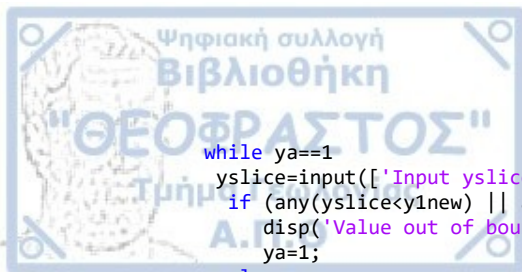
```



```

view(3)
% Figure's name
figure(topv1);
%Second figure(depth=3m)
slice(Xnew,Ynew,Znew,interp_res,[],[],-hd1)
rotate3d(topv1,'on');
%Xrwmatickh klimaka
colormap(jet);
clim([-4 4.5])
c3=colorbar;
c3.Label.String = 'Log(Apparent Resistivity)';
%save files
saveas(gcf,fullfile(fname,graphname4));
%graph for top view (4m)
hd2=hd1+1;
hd2name=num2str(hd2);
hd2comma=replace(hd2name,".",",");
graphname5=['Graph for depth(z)=',hd2comma, ' m'];
topv2=figure('Name',graphname5,'NumberTitle','off');
hold on
view(3)
% Figure's name
figure(topv2);
%Third figure(depth=4m)
slice(Xnew,Ynew,Znew,interp_res,[],[],-hd2)
rotate3d(topv2,'on');
%Xrwmatickh klimaka
colormap(jet);
clim([-4 4.5])
c4=colorbar;
c4.Label.String = 'Log(Apparent Resistivity)';
%save files
saveas(gcf,fullfile(fname,graphname5));
%graph for top view
graphname6= 'All measurements';
topv3=figure('Name',graphname6,'NumberTitle','off');
hold on
view(3)
% Figure's name
figure(topv3);
%Second figure(depth=3m)
slice(Xnew,Ynew,Znew,interp_res,[x1new x2new],[y1new y2new],z1new);
rotate3d(topv3,'on');
%Xrwmatickh klimaka
colormap(jet);
clim([-4 4.5])
c5=colorbar;
c5.Label.String = 'Log(Apparent Resistivity)';
%save files
saveas(gcf,fullfile(fname,graphname6));
%User creates figures
ys=1;
gr=0;
numx1new=num2str(x1new);
numx2new=num2str(x2new);
numy1new=num2str(y1new);
numy2new=num2str(y2new);
numz1new=num2str(z1new);
numz2new=num2str(z2new);
while ys==1
xa=1;
ya=1;
za=1;
choice= input('Do you want to create another figure? (1 means Yes, 2 means No): ');
if choice==1
while xa==1
xslice=input(['Input xslice(' numx1new '-' numx2new '): ']);
if (any(xslice<x1new) || any(xslice>x2new))
disp('Value out of boundaries!')
xa=1;
else
xa=0;
end
end
end

```



```

while ya==1
    yslice=input(['Input yslice(' numy1new '-' numy2new '): ']);
    if (any(yslice<y1new) || any(yslice>y2new))
        disp('Value out of boundaries!')
        ya=1;
    else
        ya=0;
    end
end
while za==1
    zslice=input(['Input zslice(' numz2new '-' '(' numz1new ')' '): ']);
    if (any(zslice<z1new) || any(zslice>z2new))
        disp('Value out of boundaries!')
        za=1;
    else
        za=0;
    end
end
%user created graph for top view
gr=gr+1;
gr1=num2str(gr);
user_graph=num2str(abs(zslice));
user_graph= strrep(user_graph, ' ', '&');

graphname6=['User created top view figure ',gr1];
topv4=figure('Name',graphname6,'NumberTitle','off');
title(['Depth(z)= ',user_graph, ' m']);
hold on
view(3)
% Figure's name
figure(topv4);
%Create slices
slice(Xnew,Ynew,Znew,interp_res,xslice,yslice,zslice);
rotate3d(topv4,'on');
%Xrwmatikh klimaka
colormap(jet);
clim([-4 4.5])
c6=colorbar;
c6.Label.String = 'Log(Apparent Resistivity)';
%save files
saveas(gcf,fullfile(fname,graphname6));
ys=1;
else
    clc
    return
end
end

```
