



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ
ΟΡΥΚΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Επεξεργασία ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων
από την μέθοδο VLF (Very Low Frequency), για
την απεικόνιση της υφαλμύρινσης στα
Φαλάσαρνα»**



ΓΕΩΡΓΙΑΔΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

**ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ,
ΜΑΝΟΥΤΣΟΓΛΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ,
ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΕΛΕΝΗ,**

**Καθηγητής
Καθηγητής
Καθηγήτρια**

**(Καθηγητής - Επιβλέπων)
(Καθηγητής)
(Αν.Καθηγήτρια)**

ΧΑΝΙΑ, 2018

...Αφιερώνεται στους γονείς μου Νίκο και Ρίτσα για την υπομονή τους, την αγάπη τους και την στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Επεξεργασία ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων από την μέθοδο VLF, για την απεικόνιση της υφαλμύρισης στα Φαλάσαρνα» εκπονήθηκε τόσο στην περιοχή Φαλάσαρνα της Κρήτης όσο και στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας καλείται να εξετάσει τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF στην περιοχή Φαλάσαρνα του Νομού Χανίων. Η συνολική προσέγγιση και δομή της εργασίας αποτελεί την συνισταμένη πολλών εισροών που χωρίς την ουσιαστική συμβολή τους δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί στον βαθμό που αυτή ολοκληρώθηκε.

Για τους ανθρώπους που με βοήθησαν, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, κατά την εξέλιξη της μεταπτυχιακής μου εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, άλλα και την έως τώρα καριέρα μου ως μηχανικός αυτές οι γραμμές δεν είναι αρκετές. Επομένως αισθάνομαι ιδιαίτερη ευθύνη και τιμή να ευχαριστήσω από καρδιάς:

- *Τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κο Βαφείδη Αντώνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση ενός τόσο εξειδικευμένου θέματος και για την καθοδήγηση του αλλά και την συνολική συνδρομή του στην ολοκλήρωση της εργασίας*
- *Τον διδάκτορα μέλος ΕΥΔΙΠ, καθηγητή κο Οικονόμου Νίκο για την αμέριστη υποστήριξη τόσο στο κομμάτι των μετρήσεων όσο και στο Εργαστηριακό μέρος με την καταλυτική, αλλά και ουσιαστική του βοήθεια, την συνεχή παρακίνηση και την ενθάρρυνση ώστε να προσεγγίσω το θέμα της εργασίας σωστά.*
- *Τον διδάκτορα μέλος ΙΔΑΑΧ, καθηγητή κο Κρητικάκη Γεώργιο για την καθημερινή αμέριστη υποστήριξη και την βοήθεια του.*
- *Τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ.κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου και κ. Κόκκινου Ελένη, οι οποίοι με τις εξαιρετικές παρατηρήσεις τους, συνέβαλλαν στην ουσία του επιστημονικού αποτυπώματος της εργασίας μου.*

Τους παρακάτω συναδέλφους μου της Σχολής για την άοκνη βοήθεια και την συνθετική τους συνδρομή:

- *Μιχάλη Παγιαλάκη για την γνώση και την συμβολή, αλλά του στην επεξεργασία ECXEL.*
- *Βασίλη Φίλο για τις συμβουλές του αγόγγιστα στην επεξεργασία και εκμάθηση του προγράμματος matlab, αλλά και το κουράγιο που μου έδινε κάθε στιγμή.*
- *Στέλιο Σπαντιδάκη για την καθοδήγηση και στις στοχευμένες εκφράσεις και παρατηρήσεις του στην γραφή στο γεωλογικό κομμάτι της περιοχής.*

Τέλος αισθάνομαι ιερή υποχρέωση και τιμή να ευχαριστήσω τους γονείς μου Νίκο Γεωργιλά και Ρίτσα Καρούτσου για την ηθική στήριξη, την συνεχή έμπνευση στο σθένος να εξελίξω τις σπουδές μου και την περηφάνια που μου προσθέτουν σ' όλη αυτήν την διαδρομή.

Η συμβολή όλων των ανωτέρω ήταν, είναι και θα παραμείνει περισσότερο από ανεκτίμητη εφόσον αυτή η εργασία στην κορύφωση της οικονομικής και κοινωνικής κρίσης που μαστίζει την χώρα μας, αποτελεί ένα πρώτο ίχνος και ελάχιστη συμβολή στην κατεύθυνση αντιμετώπισης του προβλήματος με γνώση ζώσα και διαρκή.....

ABSTRACT

This post-graduate thesis completes the number of geophysical studies carried out in the Prefecture of Chania in the context of rural studies to identify salinisation at sites near Falasarna beach.

Geophysical methods are mainly used to identify areas that may have undergone salinisation. The phenomenon of salinisation may be the greatest risk for the ground aquifers in Greece. The main cause is the unlimited water abstraction from ground aquifer areas. One of the methods used to identify brackish ground water is the Very Low – Frequency (VLF) geophysical method.

In the Falasarna coastal area, the methods of electric and seismic tomography were additionally used.

The geological formations found in the broader area are surface strata, consisting of scree, marl, limestone and conglomerate mostly in fragmented form. Limestone and conglomerate were regarded of salinisation. Geophysical data were collected in Falasarna, in the western section of the Prefecture of Chania, near the shore. Subsequently, the data were processed in matlab and were combined with electrical tomography data aiming to validate results of the VLF method and identify the geoelectrical strata in the area.

Finally, the results of processing of both the electrical tomography and the slices deriving from VLF data, following suitable filtering of results using TRANSFORM3 and Karouse software, are presented and evaluated. The phenomenon of salinisation mainly occurs at the sites of the geoelectrical slices where very low resistivity is observed.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά την γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Νομό Χανίων στα πλαίσια των εργασιών υπαίθρου για τον εντοπισμό υφαλμύρινσης, στις θέσεις κοντά στην παραλία στην περιοχή Φαλάσαρνα.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι είναι χρήσιμες για τον εντοπισμό περιοχών που μπορεί να έχουν υφαλμύριση. Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης αποτελεί ίσως τον μεγαλύτερο κίνδυνο των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων στον Ελλαδικό χώρο. Η κύρια αιτία, είναι η ανεξέλεγκτη άντληση υπόγειου νερού. Μια από αυτές τις μεθόδους για τον εντοπισμό υφάλμυρων υπογείων νερών είναι και αυτή της πολύ χαμηλής συχνότητας, της ηλεκτομαγνητικής μεθόδου VLF (Very Low Frequency).

Στην περιοχή της παραλίας των Φαλασάρνων χρησιμοποιήθηκαν επίσης οι μέθοδοι ηλεκτρικής τομογραφίας και σεισμικής τομογραφίας.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης είναι επιφανειακά στρώματα αποτελούμενα από πλευρικά κορήματα, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και κροκαλοπαγείς στην πλειονότητα τους κατακερματισμένα. Ως φορείς υφαλμύρωσης θεωρούνται οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και τα κροκαλοπαγεί. Η συλλογή των γεωφυσικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε στα Φαλάσαρνα στο δυτικό τμήμα του νομού Χανίων κοντά στην παραλία. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των δεδομένων σε πρόγραμμα επεξεργασίας (matlab), καθώς και ο συνδυασμός με δεδομένα ηλεκτρικής τομογραφίας για την σύγκριση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να προκύψουν τα γεωηλεκτρικά στρώματα της περιοχής.

Τέλος συγκρίνονται τα αποτελέσματα επεξεργασίας της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF με τις γεωηλεκτρικές τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας, ύστερα από κατάλληλο φιλτράρισμα των δεδομένων με την χρήση προγραμμάτων TRANSFORM3 και Karouse. Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης εμφανίζεται κυρίως στις θέσεις των γεωηλεκτρικών τομών όπου παρατηρούνται πολύ χαμηλές αντιστάσεις.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή	1
1.1 Υφαλμύριση και Γεωφυσική	1
1.2 Το Φαινόμενο της Υφαλμύρωσης	4
1.3 Γεωλογία της Περιοχής Μελέτης	4
1.4 Μεθοδολογία	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο Γεωφυσικής Μεθόδου VLF και Αναλυτικά Βήματα Επεξεργασίας	11
2.1 Βασικές Αρχές της Μεθόδου VLF	11
2.1.1 Συλλογή Γεωφυσικών Δεδομένων	12
2.1.3 Δημιουργία «script» στη matlab για εξαγωγή καλύτρων αποτελεσμάτων	20
2.1.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων με τη χρήση του TRANSFORM3	23
2.1.5 Εφαρμογή του “φιλτραρίσματος Karouse”	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Αποτελέσματα Γεωφυσικής Έρευνας	27
3.1 Θέσεις Μετρήσεων	27
3.2 Συλλογή Γεωφυσικών Δεδομένων	27
3.3 Ηλεκτρική Τομογραφία	31
3.3.1 Βασικές Αρχές της Ηλεκτρικής Τομογραφίας	31
3.3.2 Μέθοδος Απόκτησης Δεδομένων	31
3.3.3 Μεθοδολογία Επεξεργασίας	32
3.4 Αποτελέσματα Επεξεργασίας Γεωφυσικών Δεδομένων	38
3.4.1 Αποτελέσματα Μεθόδου VLF	38
3.4.2 VLF Γεωηλεκτρικές Τομές	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σύγκριση Αποτελεσμάτων	45
4.1 Συνδυαστική Ερμηνεία Γεωηλεκτρικών Τομών	45
4.2 Προσδιορισμός των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής των Φαλασάρνων	50
5.1 Συμπεράσματα	51
5.2 Προτάσεις	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	57

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

Η γεωφυσική ως επιστήμη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Η εφαρμογή της γεωφυσικής αλλά και των μεθόδων της, η ανάπτυξη και η εξέλιξη νέων γεωφυσικών τεχνολογιών, οδήγησε στη δυνατότητα άντλησης πληροφοριών που αφορούν το υπέδαφος.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια γενική εισαγωγή για την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Αναφέρεται συνοπτικά η σημασία και η συνεισφορά της Γεωφυσικής στην ανίχνευση ζωνών υφαλμύρινσης στην περιοχή, η γεωλογία της περιοχής καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της μεταπτυχιακής εργασίας. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο βασικός στόχος της μεταπτυχιακής εργασίας και το κύριο αντικείμενο το οποίο πραγματεύεται. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στα βασικά βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, τόσο κατά την διάρκεια των μετρήσεων όσο και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, ενώ τέλος γίνεται η συνδυαστική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων με σκοπό την παρουσίαση των στρωμάτων του υπεδάφους, την πιθανή ύπαρξη υφάλμυρου νερού, καθώς και την ύπαρξη ρηγμάτων στην περιοχή μελέτης.

1.1 Υφαλμύριση και Γεωφυσική

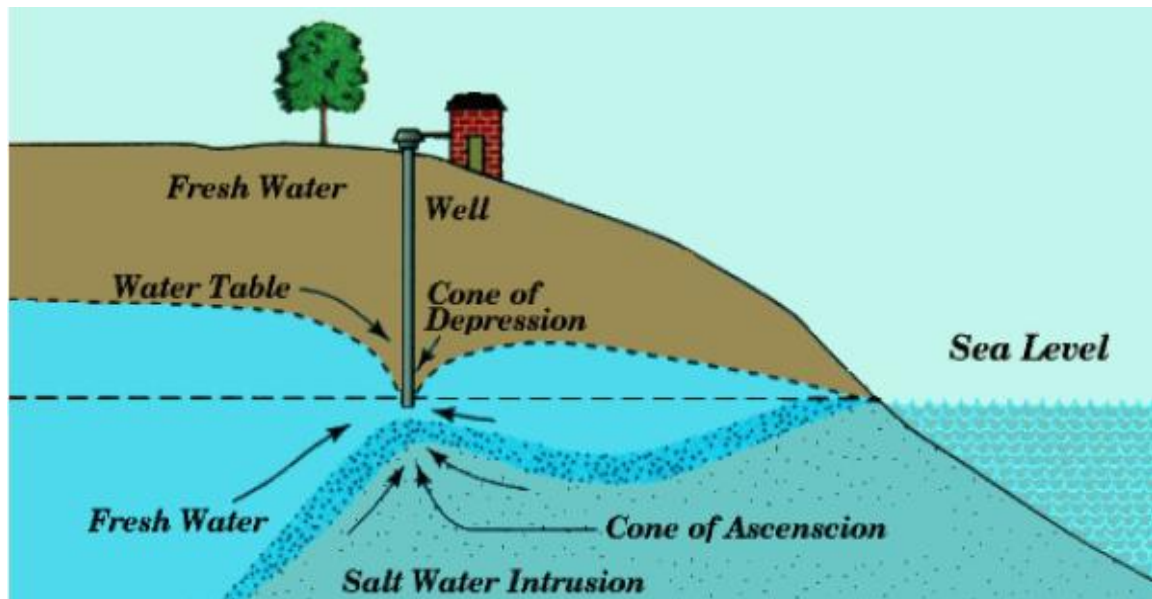
Τα τελευταία χρόνια οι γεωφυσικές μέθοδοι παρουσίασαν σημαντική τεχνολογική άνθιση, με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται ευρέως στην απεικόνιση του υπεδάφους. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι οι παραδοσιακές γεωφυσικές τεχνικές που αρχικά εφαρμόζονταν στην αναζήτηση κοιτασμάτων πετρελαίου και μεταλλευμάτων βρίσκουν πια πρόσφορο έδαφος στον εντοπισμό υπόγειων νερών και εδαφικών σχηματισμών.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που εντοπίζεται στον ελληνικό χώρο είναι η υφαλμύριση. Υφαλμύριση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία το νερό της θάλασσας ρέει υπόγεια και εισέρχεται στο υπέδαφος σε αρκετή απόσταση από την ακτή της θάλασσας. Το πρόβλημα της υφαλμύρισης σε παράκτιες κυρίως περιοχές οφείλεται στην υπεράντληση των υπόγειων υδάτων. Η υφαλμύριση σαν φαινόμενο είναι καταστρεπτικό για τους υδροφόρους ορίζοντες. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στις περισσότερες ακτές, ηπειρωτικές αλλά και νησιώτικες περιοχές μιας και στην χώρα μας το συνολικό μήκος ακτογραμμής ξεπερνά τα 20.000 χλμ (km). Οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή της παραλίας των Φαλασάρνων που μελετάμε, παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 1.3 του παρόντος κεφαλαίου. Τα αίτια της υφαλμύρισης μπορεί να είναι φυσικά (όπως το γεωλογικό υπόστρωμα, η ξηρασία κτλ) ή ανθρωπογενή (υπεράντληση υπογείων νερών, λειψυδρία) ή και συνδυασμός των δύο παραπάνω.

Η άντληση του γλυκού νερού με πολύ γρήγορους ρυθμούς έχει ως αποτέλεσμα την ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα, την δημιουργία ανεστραμμένου κώνου, ο οποίος ονομάζεται κώνος πτώσης στάθμης (Σχήμα 1.1) (Πλιάμπας, 2014).

Γενικά το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι πολύ δύσκολο αναστρέψιμο και πολλές φορές η επαναφορά στην αρχική κατάσταση απαιτεί δεκαετίες. Η λήψη αποφάσεων για το συγκεκριμένο πρόβλημα σχετίζεται κυρίως με οικονομικούς, πολιτικούς και

κοινωνικούς παράγοντες με αποτέλεσμα αυτό να δυσκολεύει το πρόβλημα διότι προκύπτουν εμπόδια (Σκορδυλάκης, 2016).



Σχήμα 1.1: Σχηματιζόμενος κώνος πτώσης στάθμης με την άντληση του νερού. (www.lenntech.com)

Η παρακάτω εξίσωση είναι γνωστή και ως εξίσωση των Ghyben – Herzberg:

$$z_1 = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} z_2,$$

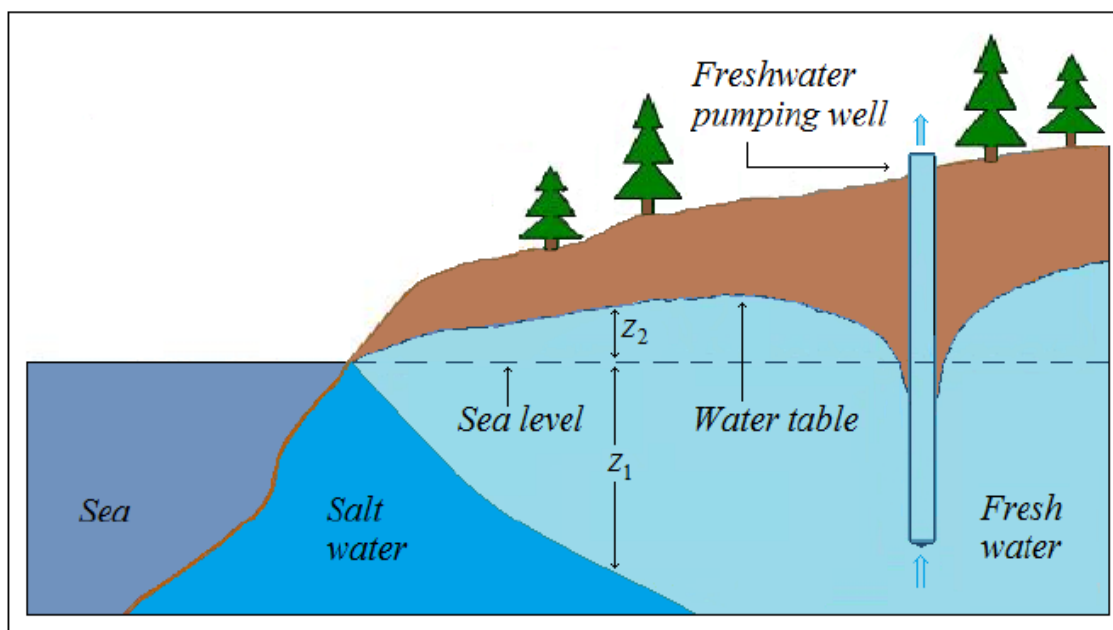
ορίζοντας το z_2 ως το ύψος του γλυκού νερού πάνω από την στάθμη της θάλασσας και z_1 ως την απόσταση της διεπιφάνειας της υφαλμύρινης από την θάλασσα όπως φαίνεται στο (Σχήμα 1.2).

Οι W.B Ghyben και Herzberg απέδειξαν ανεξάρτητα το γεγονός ότι η στάθμη του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η συγκεκριμένη εξίσωση βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία αλμυρού και γλυκού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα και για να κατασκευαστεί πρέπει να λυφθούν υπόψη οι παρακάτω παραδοχές:

- Η υφάλμυρη σφήνα παραμένει ακίνητη.
- Η πίεση στην διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές, $\rho_s = \rho_f$.
- Ισχύει η παραδοχή του Dupuit.

(Στρατής, 2017)

Η συγκεκριμένη εξίσωση με τα πορώδη υλικά της περιοχής στην παραλία των Φαλασάρνων, από τις μετρήσεις μας θα αναλυθεί στο 4^ο κεφάλαιο της εργασίας, όπου γίνεται και η σύγκριση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 1.2: Εφαρμογή της εξίσωσης των Ghyben – Herzberg στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Στρατής, 2017).

Κατά την διαδικασία μιας γεωφυσικής διασκόπησης πραγματοποιούνται πολλές μετρήσεις με όσο το δυνατόν περισσότερες μεθόδους, έτσι ώστε όλα τα αποτελέσματα να συγκριθούν μεταξύ τους και να προκύψει η καλύτερη δυνατή λύση. Το πρόβλημα της υφαλμύρισης συγκεκριμένα, έχει απασχολήσει αρκετές φορές την επιστήμη της γεωφυσικής και στο παρελθόν σε διάφορες περιοχές, καθώς πρόκειται για ένα φαινόμενο με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης σε παραθαλάσσιες κατοικημένες περιοχές. Τόσο οι μετρήσεις, όσο και το στάδιο της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι επίπονες και δύσκολες διαδικασίες που απαιτούν μεγάλη εμπειρία από τον γεωφυσικό.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπως η ηλεκτρική βυθοσκόπηση και η ηλεκτρική τομογραφία, έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση των ζωνών ανάμειξης του θαλασσινού με το γλυκό νερό, καθώς οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των διαφόρων πετρωμάτων επηρεάζονται από την αλατότητα του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους αυτές να είναι δυνατός ο διαχωρισμός των υδροφορέων που περιέχουν υφάλμυρο, από αυτούς με γλυκό νερό (Πλιάμπας, 2014).

1.2 Το Φαινόμενο της Υφαλμύρωσης

Μέθοδοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην γεωφυσική μπορούν να αναλύσουν μερικές από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, κάποιες από αυτές είναι η πυκνότητα, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, καθώς και η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Το πρόβλημα της υφαλμύρισης απασχολεί την γεωφυσική σαν επιστήμη από το παρελθόν, κυρίως κοντά σε παραθαλάσσιες περιοχές.

Για την εκτίμηση του βαθμού υφαλμύρισης στον υδροφόρο ορίζοντα της παράκτιας περιοχής Big Cypress στη Νότια Φλόριντα χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός γεωφυσικών διασκοπήσεων και ανάλυσης νερού (Paillet, 1999).

Η μελέτη αυτή έγινε για να καθοριστούν οι συνέπειες που θα επέφερε το φαινόμενο αυτό στις τεχνικές κατασκευές της περιοχής.

Στα Φαλάσαρνα έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης, λόγω της άντλησης του νερού από γεωτρήσεις στην περιοχή. Το συγκεκριμένο πρόβλημα διογκώνεται ακόμα περισσότερο, διότι οι μόνιμοι κάτοικοι χρησιμοποιούν μεγάλο μέρος του νερού για την άρδρευση των καλλιεργειών τους, με αποτέλεσμα το γλυκό νερό να αντλείται με ρυθμούς ταχύτερους από αυτούς που αναπληρώνεται. Στην προσπάθεια να περιοριστεί η έντονη υφαλμύριση εδώ και μερικά χρόνια λόγω της υπεράντλησης και των εντατικών δραστηριοτήτων των μόνιμων κατοίκων η περιοχή υπάγεται στα μέτρα προστασίας υδάτινου δυναμικού τα οποία απαγορεύουν την διάτρηση νέων γεωτρήσεων και πηγαδιών. Υπάρχει συνεχής ανάγκη στην περιοχή για την εξασφάλιση νερού, έτσι ώστε να καλυφθούν οι αρδρευτικές δραστηριότητες των μόνιμων κατοίκων, που αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση των υπόγειων νερών. Μέσα από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια η καλλιεργούμενη γη αυξήθηκε κατά 52%, ενώ σε αντίθεση οι εκτάσεις του φυσικού περιβάλλοντος μειώθηκαν κατά 47%. Μεγάλη αύξηση βέβαια παρατηρείται και στις θερμοκηπιακές μονάδες, καλλιέργειες για τις οποίες φημίζεται η συγκεκριμένη περιοχή, όπου από 13 που είχαν καταμετρηθεί το 1970 φτάνουν σήμερα τις 270 χωρίς προσπάθεια προστασίας των προϊόντων του εδάφους και του νερού. (Χανιώτικα νέα, 2007).

1.3 Γεωλογία της Περιοχής Μελέτης

Η γεωλογία της Κρήτης, χαρακτηρίζεται από τα αλληπάλλληλα επωθημένα τεκτονικά καλύμματα των Ελληνικών ζωνών τα οποία συνωθούνται στον μικρό σχετικά γεωγραφικό χώρο του νησιού, με γενική κατεύθυνση από Βορρά προς το Νότο (Μουντράκης, 1985).

Τα Φαλάσαρνα βρίσκονται στο νομό Χανίων και πιο συγκεκριμένα στην επαρχία Κισσάμου, σε απόσταση 52 χιλιομέτρων από την πόλη των Χανίων (Σχήμα 1.3). Το ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης οριοθετείται από σχηματισμούς που δημιουργούν έντονο ανάγλυφο (πρανές), ενώ στο δυτικό εκτείνεται η ακτογραμμή.



Σχήμα 1.3: Θέση και περιοχή μελέτης στο νομό Χανίων (www.explorecrete.com/greek/crete-maps-GR.html).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται (νεότεροι, παλαιότεροι) στην περιοχή της παραλίας των Φαλασάρνων επεξηγούνται σύμφωνα με το γεωλογικό φύλλο, χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε ΦΥΛΛΟ (ΚΑΣΤΕΛΛΙ) με αρχική κλίμακα 1:50000 (Σχήμα 1.4) και είναι οι παρακάτω:

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

ΟΛΟΚΑΙΝΟ

Σύγχρονες παράκτιες αποθέσεις και θίνες (Qal).

Αλλουβιακές αποθέσεις: Πηλοί, άργιλλοι, άμμοι και ψηφίδες, μικρής συνοχής. Το πάχος των αλλουβιακών αποθέσεων δεν υπερβαίνει τα 3 m (Qal₂).

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

Παλαιότερη ποτάμια αναβάθμιση αποτελούμενη από ερυθροκαστανόχρωες αργύλους με μεγάλο ποσοστό άμμου, κροκάλων και ψηφίδων (κατά τύπους εμφανίζονται και ογκόλιθοι). Οι άμμοι, οι ψηφίδες και οι κροκάλες είναι συνήθως ασβεστολιθικής και κερατολιθικής σύστασης και σπανιότερα προέρχονται από ψαμμίτες και από φλύσχη (Qt).

ΜΕΣΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ

Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι: Συμπαγείς, υπόφαιοι έως υποκίτρινοι της σειράς Clypeaster (η περιγραφή τους δίνεται αναλυτικότερα στο φύλλο γεωλογικού χάρτη Πλατανιάς) (Mi, mk).

Κροκαλοπαγή: Συμπαγείς κροκάλες, προερχόμενες από τους ασβεστόλιθους μεσοζωικής ηλικίας από κερατόλιθους και κρυσταλλικά πετρώματα (π.χ σχιστόλιθους και χαλαζίτες). Η συνδετική ύλη είναι φαιοκίτρινες μάργες (Mk).

ΖΩΝΗ ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

ΗΩΚΑΙΝΟΝ

Ασβεστόλιθοι: Μελανόφαιοι, συμπαγείς, μικροκρυσταλλικοί με έντονη οσμή βιτουμένων και απολιθωματοφόρων. Η ηλικία τους εκτιμάται στο μέσο έως ανώτερο Ηώκαινο (e).

ΖΩΝΗ ΩΛΟΝΟΥ – ΠΙΝΔΟΥ

ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

Ασβεστόλιθοι: Λευκοί έως φαιοί, συμπαγείς, συνήθως στιφροί ή και μικροκρυσταλλικοί κατά τύπους λιθογραφικοί και λεπτοπλακώδεις. Κατά τύπους εμφανίζουν έντονη καρστικοποίηση. Η ηλικία των ασβεστολίθων αυτών εκτιμάται στο Κρητιδικό (j – k).

Δίδεται ο χάρτης (Ι.Γ.Μ.Ε. ΚΑΣΤΕΛΛΙ) (Σχήμα 1.4) στον οποίο φαίνεται ακριβώς η περιοχή της παραλίας που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις μας και απεικονίζονται οι παραπάνω γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή μελέτης.

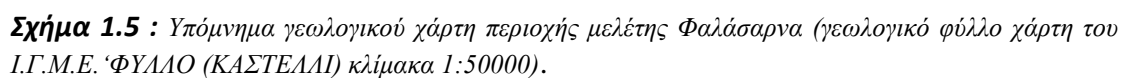
Παρακάτω παρουσιάζεται ο (Πίνακας 1.1) στον οποίο εμφανίζονται οι τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων για κάποια πετρώματα των οποίων η σύγκριση και ανάλυση για την συγκεκριμένη περιοχή θα γίνει αναλυτικά στο 4^ο κεφάλαιο, σε σχέση τόσο με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας όσο και με την μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF. Στην παραλιακή περιοχή μελέτης σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής ο οποίος και μελετήθηκε με σκοπό την καλύτερη ανάλυση της περιοχής, αναμένονται κυρίως κροκαλοπαγή κατακερματισμένα και υπάρχει πολύ πιθανή ύπαρξη ρήγματος στα σημεία των ηλεκτρικών τομογραφιών αλλά και της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF όπου οι αντιστάσεις κυμαίνονται περίπου στα 100 Ωm.

Πίνακας 1.1: Τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντιστάσης πετρωμάτων (Βαφείδης και συνεργάτες, 1991, Βαφείδης και Αμολοχίτης 1995).

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ohm.m)
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	80-250
ΝΕΟΓΕΝΗ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Άργιλοι	2-20
Μάργες	20-60
Άμμοι και χαλίκια	50-500
κορεσμένα	
Εβαπορίτες (Γύψοι)	200
Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	150-500
Κροκαλοπαγή βάσεως	200-300
Ψαμμίτες	50-70
ΑΛΠΙΚΑ ΙΖΗΜΑΤΑ	
Φλύσχης	70-80
Σχιστόλιθοι – Οφιόλιθοι	100-300
Ασβεστόλιθοι	>500



Σχήμα 1.4: Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης Φαλάσαρνα (γεωλογικό φύλλο χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. ΦΥΛΛΟ (ΚΑΣΤΕΛΛΙ) κλίμακα 1:50000).



1.4 Μεθοδολογία

Παρακάτω θα αναλυθεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της μεταπτυχιακής εργασίας:

- Ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σε θέματα που αφορούν τις γεωφυσικές μεθόδους υψηλής ανάλυσης και την εφαρμογή τους στην υδρογεωλογία, καθώς και την συγκέντρωση γεωλογικών στοιχείων από υπάρχουσες μελέτες.
- Σχεδιασμός της γεωφυσικής διασκόπησης η οποία και πραγματοποιήθηκε στα Φαλάσαρνα. Χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και VLF για την ανίχνευση της ζώνης υφαλμύρισης. Οι θέσεις των γραμμών μελέτης επιλέχθηκαν με βάση το ανάγλυφο της περιοχής.
- Η επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων έγινε με την χρησιμοποίηση γνωστών εμπορικών λογισμικών.
- Μελετήθηκε και τροποποιήθηκε αλγόριθμος αντιστροφής των VLF δεδομένων του Baranwal (Franke, Börner και Spitzer, 2009).
- Τέλος πραγματοποιήθηκε:
 - η εφαρμογή του αλγορίθμου αντιστροφής
 - η ερμηνεία των αποτελεσμάτων και
 - η σύγκριση τους με αυτά των ηλεκτρικών δεδομένων.

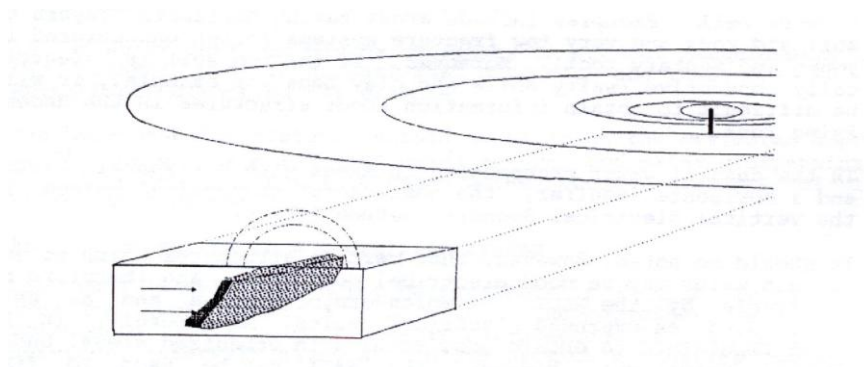
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο Γεωφυσικής Μεθόδου VLF και Αναλυτικά Βήματα Επεξεργασίας

Στο εν λόγω κεφάλαιο θα αναφερθούν οι βασικές αρχές, της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF (very low frequency), καθώς και τα αναλυτικά βήματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής κατά την διάρκεια της επεξεργασίας.

2.1 Βασικές Αρχές της Μεθόδου VLF

Η μέθοδος VLF ανήκει στις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι ότι κατά την εφαρμογή της μελετώνται ήδη υπάρχοντα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Υπάρχουν VLF πομποί σε λειτουργία σε όλον τον κόσμο για την ναυσιπλοΐα. Ένας τέτοιος πομπός αποτελείται από ένα κατακόρυφο καλώδιο το οποίο παράγει πολύ ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της τάξης των 300-1000 kWatt. Το επίπεδο διάδοσης αυτού του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι οριζόντιο και οι μαγνητικές του γραμμές απλώνονται σαν ομόκεντρα δαχτυλίδια γύρω από την κεραία, φτάνοντας στον δέκτη του WADI (της Σουηδικής εταιρίας ABEM), με συχνότητες 15-25 KHz. (Βαφείδης και Αμολοχίτης, 1995).

Όταν ηλεκτρομαγνητικό κύμα περνάει μέσα από ένα αγώγιμο σώμα τότε στο σώμα αυτό δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα εξ' επαγωγής όπως φαίνεται στο (Σχήμα 2.1). Αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο (δευτερεύον πεδίο). Η συνισταμένη του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου είναι το ολικό μαγνητικό πεδίο (ABEM, 2000).



Σχήμα 2.1: Οριζόντια διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων VLF, τα οποία συναντούν υψηλή αγωγιμότητα δομής (ABEM, 2000).

2.1.1 Συλλογή Γεωφυσικών Δεδομένων

Ένα τυπικό όργανο μέτρησης για την μέθοδο του VLF είναι το WADI. Το συγκεκριμένο όργανο μετράει και υπολογίζει την πραγματική και την φανταστική συνιστώσα του δευτερογενές πεδίου. Η συνισταμένη των δύο πεδίων μεταβάλλεται στο χώρο συναρτήσει του χρόνου. Η ανάλυση του οργάνου WADI γίνεται στο 3^ο κεφάλαιο, τόσο για τις μετρήσεις που καταγράφει το όργανο, όσο και μέσα από τις εξισώσεις που υπάρχουν και αναλύθηκαν από την εργασία του Baranwal V (2011).

Ακολουθώς περιγράφονται αναλυτικά τα κυριότερα βήματα που ακολουθήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων της μεθόδου VLF. Με τη χρήση του προγράμματος επεξεργασίας (matlab) και εν συνεχεία η χρησιμοποίηση του προγράμματος TRANSFORM3, όσο και το «φιλτράρισμα» των γραμμών που επιλέχθηκαν με την μέθοδο Karouse.

Επίλυση του Ευθέως Προβλήματος

Η μέθοδος ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (EM) πολύ χαμηλών συχνοτήτων VLF έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην εξερεύνηση των υπόγειων υδάτων, των αγωγίων μετάλλων, σε διάφορους φορείς μεταλλευμάτων, σε διάφορους τύπους πετρωμάτων βραχώδους μάζας (Arcone, 1978., Paal, 1968., Sharma και Baranwal, 2005), σε γεωθερμικές μελέτες (Baranwal και Sharma, 2006., Zlotnicki et al, 2006), στη ρύπανση των υπόγειων υδάτων και σε μελέτες διαχείρισης αποβλήτων (Monteiro Santos et al, 2006., Poddar και Rathor, 1983) όπως και για να λύσει αρχαιολογικά προβλήματα (Drahor, 2006). Η μέθοδος VLF χρησιμοποιεί συχνότητες των 3 -30 kHz (Paal, 1968), στην πράξη, ωστόσο περιορίζεται σε 15 – 30 kHz, επειδή βρίσκονται πολύ σποραδικοί πομποί στο φάσμα των 3 – 15 kHz.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FE) με χρήση δομημένων ορθογώνιων ή τριγωνικών πλεγμάτων έχει εφαρμοστεί στην διάδοση γεω – ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε δύο διαστάσεις εδώ και δεκαετίες (Coggon, 1971, Fox et al, 1980., Wannamaker και Stodt, 1987). Μια πιο ευέλικτη διακριτοποίηση των γεωλογικών μοντέλων, μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας μη δομημένα τριγωνικά πλέγματα. Πρόσφατα, αλγόριθμοι μοντελοποίησης επιπέδου γεω-ηλεκτρομαγνητικού κύματος, με χρήση μη δομημένων πλεγμάτων έχουν παρουσιαστεί από Franke et al. (2004, 2007) και Key and Weiss (2006). Η εφαρμογή μη δομημένων πλεγμάτων έχει πρόσφατα αναφερθεί από Guenther et al. (2006) και Ruecker et al. (2006) για την μοντελοποίηση ηλεκτρικών δεδομένων στις τρεις διαστάσεις, καθώς επίσης και από Börner et al. (2008) στη διάδοση παροδικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (EM) (Baranwal V, Franke, Börner R - U, Spitzer K, 2011).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος των Baranwal V et al (2011) σε περιβάλλον matlab για την επεξεργασία των δεδομένων VLF.

Στην περίπτωση επιπέδου αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος, η διάδοσή του σε δύο διαστάσεις περιγράφεται από την εξίσωση Maxwell, σε καρτεσιανό δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων, με θετικό τον z – άξονα προς τα πάνω ως εξής :

$$\left[\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}\right] + \left[\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2}\right] - i\omega\mu\sigma E_y = 0 \quad (1)$$

Οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου για την ηλεκτρική – πόλωση (E – polarization), μπορούν να προσδιοριστούν σε κάθε κόμβο δικτύου με αριθμητική διαφοροποίηση σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις :

$$H_x = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad \text{και} \quad H_z = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2)$$

Στην μέθοδο VLF, η οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου H_x αντιστοιχεί στο πρωτεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι :

Πραγματικό (Real/Inphase anomaly) = $100 \Re (H_z/H_x)$ και

Φανταστικό (Imaginary/Quadrature anomaly) = $100 \Im (H_z/H_x)$ (3)

του Πραγματικού (Real) και του Φανταστικού μέρους (Imaginary), τα οποία και πιο συγκεκριμένα το Φανταστικό (Imaginary/Quadrature anomaly) έχει διαφορά φάσης 90° με το Πραγματικό (Real/Inphase anomaly)

(Baranwal et al., 2011).

Στην συνέχεια, μετά την εισαγωγή των δεδομένων από την περιοχή των Φαλασάρνων, αναφέρονται αναλυτικά τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα επεξεργασίας (matlab).

- Αδόμητο πλέγμα με βάση 2-D αντιστροφή, των δεδομένων VLF για μοντέλα τοπογραφίας

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για την αντιστροφή των δεδομένων για μοντέλα με ανάγλυφο. Η πρώτη προσέγγιση θεωρεί ότι τα δεδομένα πρέπει να διορθωθούν για την επίδραση της τοπογραφίας πριν από την αντιστροφή τους (Baker και Myers, 1980, Chouteau και Bouchard, 1988, Jiracek et al, 1989). Οι προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν για να διορθωθούν τα δεδομένα για την τοπογραφία, δεν εφαρμόζονται για όλες τις περιπτώσεις. Στη δεύτερη προσέγγιση, η τοπογραφία ενσωματώνεται κατά την διάρκεια της αντιστροφής (Baba και Chave, 2005, Key et al, 2006, Li et al, 2008). Η ανάπτυξη κώδικα που μπορεί να μοντελοποιήσει τοπογραφικές παραλλαγές (Franke et al., 2007) δίνει την ευκαιρία της αντιστροφής των πρωτογενών δεδομένων από περιοχή με έντονο ανάγλυφο χωρίς να υπάρχει ανάγκη διόρθωσης για τις τοπογραφικές μεταβολές. Η αντιστροφή στον συγκεκριμένο αλγόριθμο στηρίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Για την αντιστροφή των δεδομένων, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων με εξομάλυνση από Gauss – Newton είναι καθιερωμένη τεχνική αντιστροφής που ομαλοποιεί τη λύση βάζοντας όριο για την μέγιστη μεταβολή στην τροποποίηση των παραμέτρων μοντέλου, ενώ η δεύτερη προσέγγιση ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ του μοντέλου και ενός προτύπου αναφοράς και ως εκ τούτου το τελικό μοντέλο θα είναι ανεξάρτητο του αρχικού μοντέλου (Aster et al., 2005, Farquharson και Oldenburg, 2004, Meju, 1994, Menke, 1989).

Η περιοχή ενδιαφέροντος παραμετροποιείται από κανονικό τύπο πλέγματος που περιέχει ορθογώνια και τραπεζοειδή κελιά. Η λογαριθμική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται ως παράμετρος του μοντέλου στη διαδικασία αντιστροφής. Εφαρμόστηκαν διαφορετικά συστήματα διακριτοποίησης για την επίλυση του ευθέως και του αντίστροφου προβλήματος. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής λαμβάνονται χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα εκκίνησης, εξετάζεται επίσης η εμφάνιση και η εξάρτηση των αποτελεσμάτων αναστροφής με το μοντέλο εκκίνησης. Οι κώδικες αντιστροφής αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον matlab (Baranwal V et al., 2011).

• Απόσβεση των ελαχίστων τετραγώνων

Εφαρμόζονται τα ελάχιστα τετραγώνα στην αντικειμενική συνάρτηση Φ η οποία δίνεται από την σχέση

$$\Phi = \Phi_d(m) + \lambda \Phi_m(m) \quad (4)$$

όπου Φ_d και Φ_m αντιστοιχούν στα δεδομένα και το μοντέλο, λ είναι η παράμετρος η οποία εξισορροπεί τα Φ_d και Φ_m

Εκφράζονται ως

$$\Phi_d(m) = \|W_d(\Delta d - S\Delta m)\|^2, \text{ και } \Phi_m(m) = \|M\|^2, \quad (5)$$

όπου M θεωρείται το μέτρο της μεταβολής των παραμέτρων στο μοντέλο $\Delta m = m^n - m^{n-1}$, ενώ n είναι ο αριθμός των επαναλήψεων. Το $\Delta d = d^{obs} - d^{comp}$, περιγράφει την απόκλιση μεταξύ των δεδομένων d^{obs} και των υπολογιζόμενων δεδομένων d^{comp} και W_d είναι ένας διαγώνιος πίνακας που περιέχει την τυπική απόκλιση του θορύβου στα δεδομένα. Το σύμβολο S υποδηλώνει τον πίνακα ευαισθησίας. Για το ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης Φ , απαιτούνται οι μερικές παράγωγοι σε σχέση με τα στοιχεία του Δm που πρέπει να είναι μηδέν. Ως εκ τούτου, η εξίσωση για την επίλυση του Δm είναι η εξής:

$$(S^T W_d^T W_d S + \lambda I) \Delta m = S^T W_d^T W_d \Delta d \quad (6)$$

και

Το σύμβολο I δηλώνει μοναδιαίο πίνακα. Οι παραπάνω εξισώσεις επιλύονται σε κάθε στάδιο της επαναληπτικής διαδικασίας της αντιστροφής (Baranwal V et al., 2011).

Μεγάλη τιμή της παραμέτρου λ στις αρχικές επαναλήψεις οδηγεί σε ομαλή τροποποίηση του μοντέλου, ωστόσο μια μικρή τιμή του λ στην τελική επανάληψη επιτρέπει εισαγωγή λεπτομερειών στο μοντέλο. Ξεκινώντας από μια μεγάλη τιμή λ είναι λογικό να μειωθεί η τιμή λ σε κάθε επανάληψη (Loke and Barker, 1996). Οι Farquharson και Oldenburg (2004) έχουν προτείνει ένα χρονοδιάγραμμα φθίνουσας τιμής λ .

Οι Baranwal et al. (2011) επιλέγουν με την παράμετρο λ από τη μέγιστη τιμή του ιδιάζοντος σημείου του πίνακα ευαισθησίας. Αναφέρουν ότι το λ με την μέθοδο του κριτηρίου $L - \text{καμπύλης}$ είναι πολύ μικρό σε σχέση με τη μέγιστη τιμή του ιδιάζοντος σημείου του πίνακα ευαισθησίας S . Επομένως στον κώδικα και κατ' επέκταση στην συγκεκριμένη εργασία παίρνουμε, την πρώτη επανάληψη σαν τιμή

του λ την μέγιστη μοναδιαία τιμή του ιδιάζοντος σημείου του πίνακα ευαισθησίας S και στις επόμενες επαναλήψεις μειώνουμε την τιμή του λ κατά 0.7 σε κάθε επανάληψη που πραγματοποιείται.

- Υπολογισμός του πίνακα ευαισθησίας

Το στοιχείο του S πίνακα ευαισθησίας για την παράμετρο i παρατήρησης και τη παράμετρο j του μοντέλου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη μέθοδο ευαισθησίας, της εξίσωσης που παρουσιάστηκε από τον Rodi (1976), η οποία απαιτεί $(N + 1)$ υπολογισμούς. Υποθέτουμε δύο ειδών διανύσματα a_i και b_i τέτοια ώστε να δίνουν το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο στην περίπτωση του E-πόλωσης:

$$E_{y,i} = a_i^T u \text{ και } H_{x,i} = b_i^T u, \quad (7)$$

Στην απλούστερη μορφή του το u σχηματίζεται θέτοντας μονάδα το στοιχείο στην θέση i και μηδεν αλλού. Το b_i είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να εκτελεί μια αριθμητική διαφοροποίηση πάνω στο u , σύμφωνα με τις σχέσεις που αναφέρθηκαν στην “Επίλυση του Ευθέως Προβλήματος” (3) και (4). Εάν η θέση παρατήρησης δεν βρίσκεται ακριβώς σε δεδομένο κόμβο - πλέγμα τότε οι επιθυμητές τιμές πεδίου μπορεί να ληφθούν με γραμμική παρεμβολή γειτονικών πλεγμάτων κόμβων οι οποίες εκφράζονται με μία τροποποίηση των συμβόλων a και b .

Ως εκ τούτου, S_{ij}^{VLF} (για τα δεδομένα VLF) υπολογίζεται από την εξίσωση

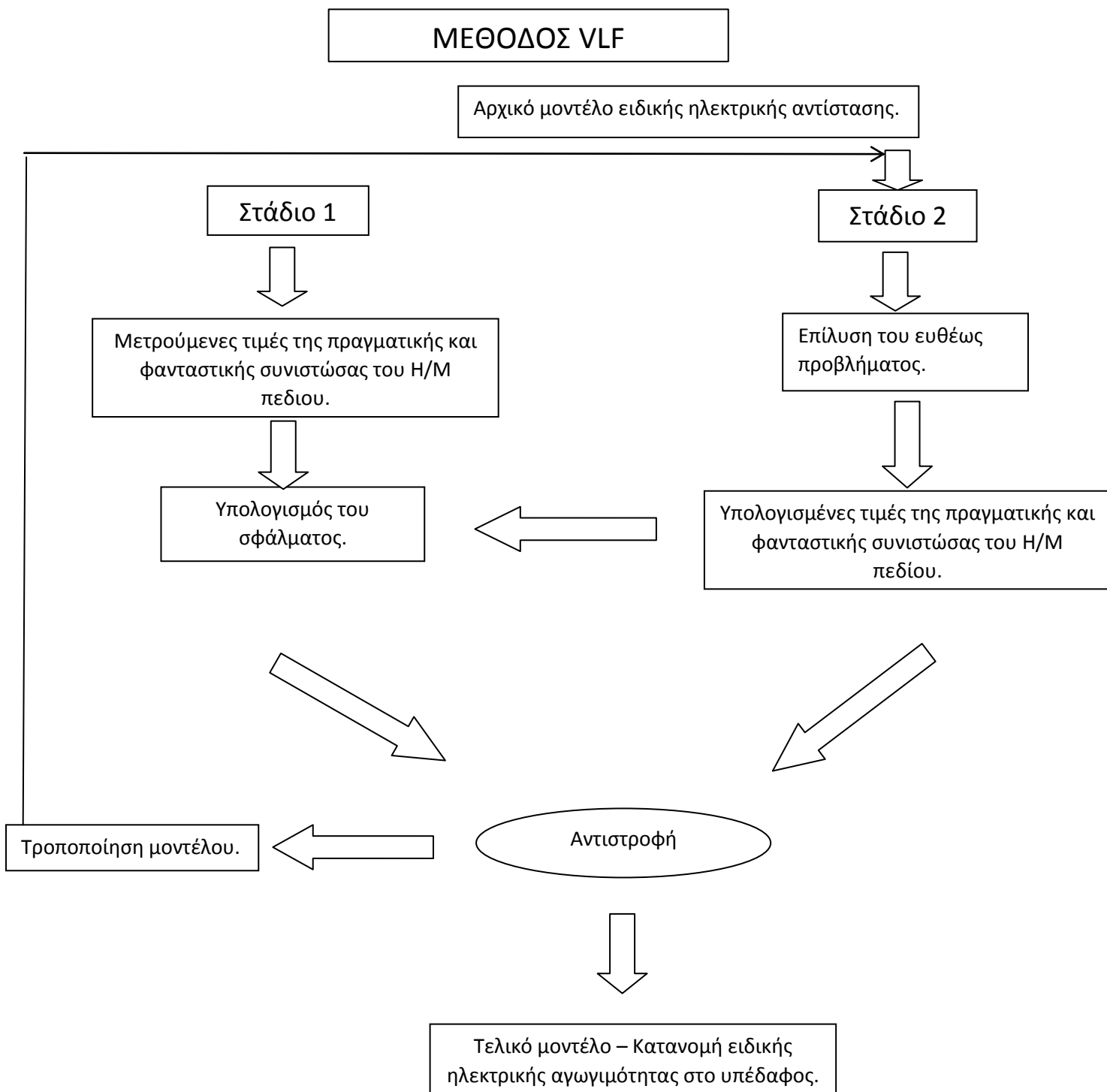
$$S_{ij}^{VLF} = \frac{1}{b_i^T u} \left(a_i - \frac{a_i^T u}{b_i^T u} b_i \right)^T (K + M)^{-1} \frac{\partial (K + M)}{\partial \ln \sigma_i} u, \quad (8)$$

Οι ευαισθησίες μπορεί να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας πραγματικά και φανταστικά μέρη του S_{ij}^{VLF} όπως η παρακάτω εξίσωση

$$S_{ij}^{RE} = 100 - \Re (S_{ij}^{VLF}), \quad S_{ij}^{IM} = 100 \Im (S_{ij}^{VLF}) \quad (9)$$

Ο αναγνώστης παραπέμπεται στον Baranwal (2007), Farquharson και Oldenburg (1996) για λεπτομέρειες σχετικά με αυτά τα παράγωγα (Baranwal et al., 2011).

Στη συνέχεια παρατίθεται διάγραμμα ροής (Σχήμα 2.2) στο οποίο παρουσιάζεται η επεξεργασία δεδομένων της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF. Η συγκεκριμένη μέθοδος μετράει και υπολογίζει την πραγματική και την φανταστική συνιστώσα του δευτερογενούς πεδίου (δηλαδή τόσο την οριζόντια συνιστώσα όσο και την κατακόρυφη συνιστώσα του ολικού μαγνητικού πεδίου).



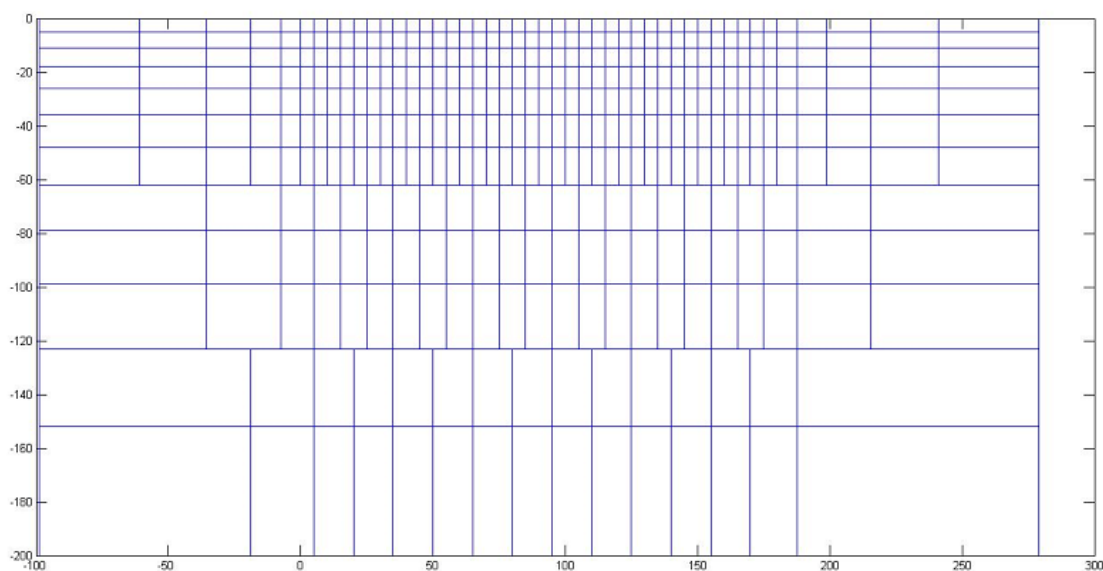
Σχήμα 2.2: Αναλυτικό διάγραμμα ροής επεξεργασίας των δεδομένων της μεθόδου VLF.

2.1.2 Παράδειγμα Αντιστροφής

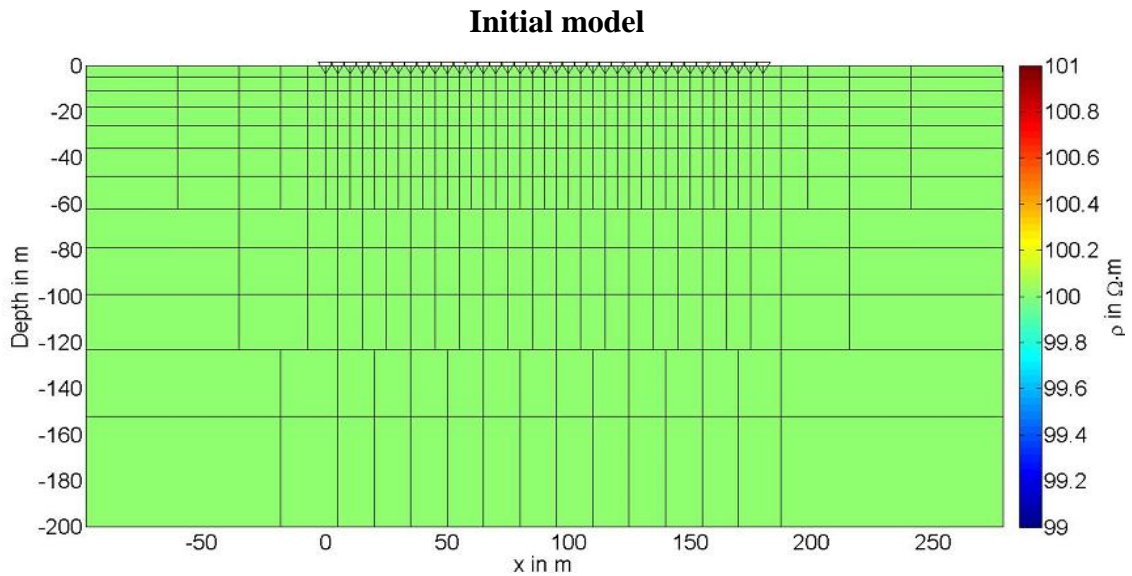
Καθορισμός των αρχικών παραμέτρων στο πρόγραμμα επεξεργασίας (matlab) οι οποίες αναφέρονται παρακάτω. Πραγματοποιήθηκαν δέκα επαναλήψεις (iteration 10) για δεδομένα σε συχνότητες των 20.3 kHz και 21.7 kHz. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση στο αρχικό ομοιογενές μοντέλο ορίστηκε στα 100 Ohmm. Στόχος του βήματος είναι να καθοριστούν οι κατάλληλες ρυθμίσεις, αλλά και οι καταλληλότερες γραμμές (μέσω των αποτελεσμάτων) για να εμφανιστούν τα καλύτερα και δυνατά αποτελέσματα των γραμμών της περιοχής της παραλίας στα Φαλάσαρνα μέσω του προγράμματος επεξεργασίας (matlab). Εμφανίζονται για κάθε γραμμή με την σειρά οι παρακάτω εικόνες – παράμετροι για δύο συχνότητες:

Η συγκεκριμένη γραμμή έχει μήκος 180 m και ο προσανατολισμός της είναι Νότος – Βορράς. Οι μετρήσεις της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας συλλέγονταν για κάθε γραμμή από το μηχανήμα WADI ανά 5 m.

Grid

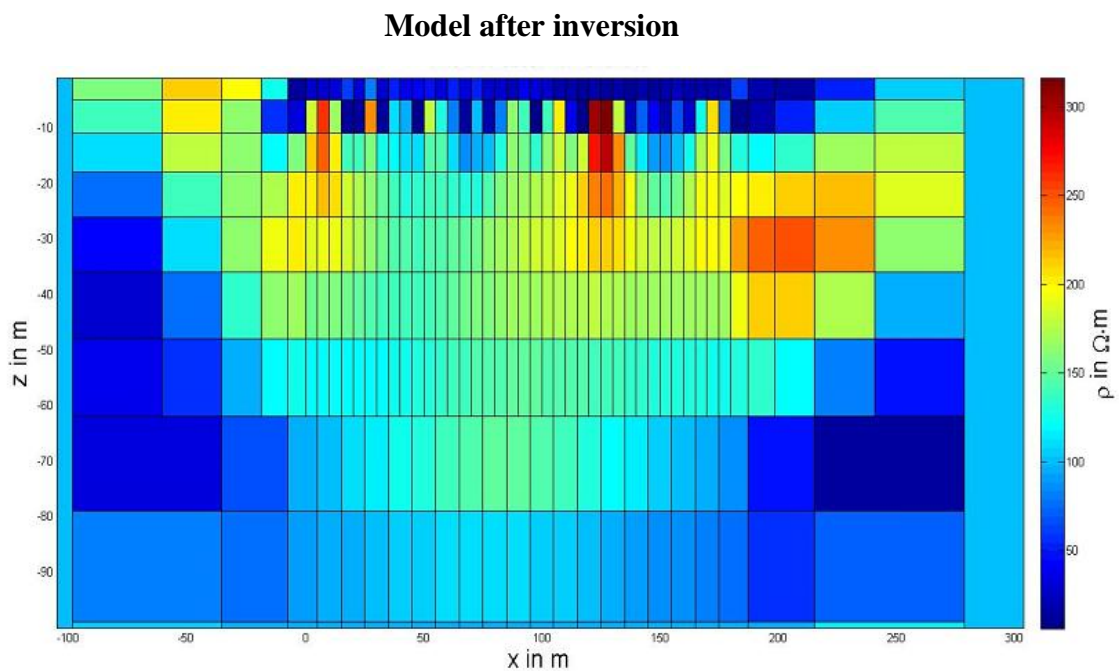


Σχήμα 2.3: Παραμετροποίηση του μοντέλου σε ορθογώνια κελιά. Αρχικό πλέγμα για την γραμμής (line 5) στο πρόγραμμα matlab.



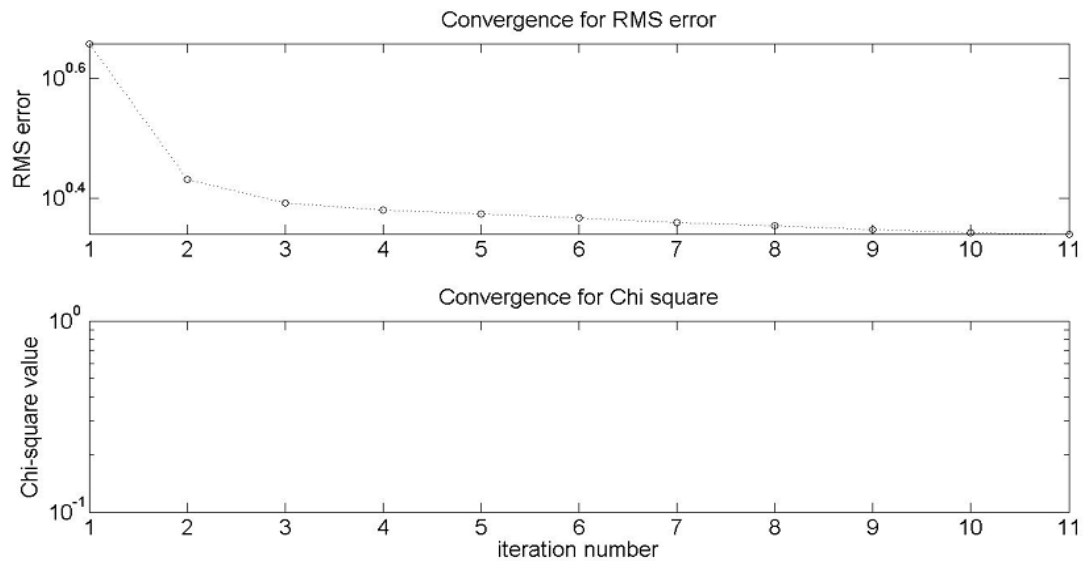
Σχήμα 2.4: Αρχικό μοντέλο γραμμής (line 5).

Το πρόγραμμα επεξεργασίας για την αντιστροφή (matlab) ξεκινάει να εμφανίζει τις επαναλήψεις για την γραμμή πέντε (line 5) και πραγματοποιεί άλλες εννιά επαναλήψεις. Στο παράρτημα της εργασίας εμφανίζονται αναλυτικά όλα τα στάδια που πραγματοποιούνται στη matlab μέχρι και το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή το σφάλμα για τα δεδομένα της γραμμής 5 (line 5), το ίδιο γίνεται και για τις δεκαεπτά γραμμές μελέτης. Παρακάτω παρουσιάζονται το τελικό μοντέλο μετά την αντιστροφή και το σφάλμα για κάθε επανάληψη.



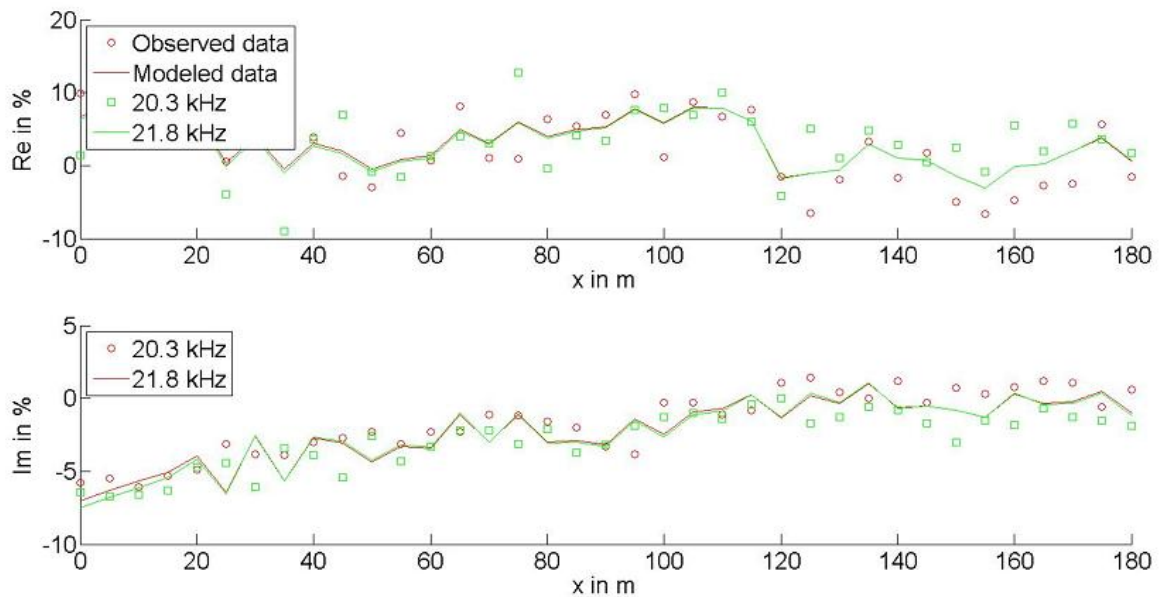
Σχήμα 2.5: Εμφάνιση τελικού αποτελέσματος στη matlab για το μοντέλο μετά την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

Error



Σχήμα 2.6: Σφάλμα αντιστροφής για την γραμμή (line 5).

Διάγραμμα από την τελευταία επανάληψη της γραμμής πέντε (line 5)



Σχήμα 2.7: Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

Στο παράρτημα της εργασίας παρατίθενται αναλυτικά όλες οι επαναλήψεις για την συγκεκριμένη γραμμή (line 5), αλλά και τα διαγράμματα με τις μετρούμενες και υπολογισμένες τιμές της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας για τις συχνότητες των 20.3 kHz και 21.8 kHz με κόκκινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα.

2.1.3 Δημιουργία «script» στη matlab για εξαγωγή καλύπτρων αποτελεσμάτων

Δημιουργήθηκε το «script» plotconstr.m, για την απεικόνιση επιλεγμένου τμήματος του μοντέλου που αντιστοιχεί στον οριζόντιο άξονα στις θέσεις των μετρήσεων (συνολικό μήκος γραμμής 0 – 180 m) και στο κατακόρυφο σε βάθος, περίπου στα 60 m), με κριτήριο την διείσδυση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το συγκεκριμένο «script» λειτουργεί με βάση το log10, δηλαδή το λογάριθμο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

```
% Acquire the
parameters_____

nvert=(size(gdd,1)-3)/2;
avert=gdd(2,2:end);
dvert=nvert-avert;
x1=gdd(3:avert+2,2:end);
y1=gdd(3+avert:end-2*dvert-1,2:end);

for ii=1:length(dvert),
    if dvert(ii)~=0
        x1(1:avert(ii),ii)=gdd(3:avert(ii)+2,ii+1);
        y1(1:avert(ii),ii)=gdd(3+avert(ii):end-
2*dvert(ii)-1,ii+1);
        for iii=1:dvert(ii),
            x1(avert(ii)+iii,ii)=x1(1,ii);

            y1(avert(ii)+iii,ii)=y1(1,ii);
        end
    end
end

c1=cm(end,2:end);
% End of Acquire the
parameters_____

clear x1a y1a cla
%x limits
xa=0;xb=180;
%depth limits
ya=0;yb=60;

count1=0;

for k=1:length(x1)
```

```

        if x1(1,k)>=xa && x1(1,k)<xb &&
y1(1,k)>=-yb
                                count1=count1+1;
% This counter counts when "if" is valid
    x1a(:,count1)=x1(:,k);
    y1a(:,count1)=y1(:,k);
    cla(:,count1)=c1(:,k);

    end

end

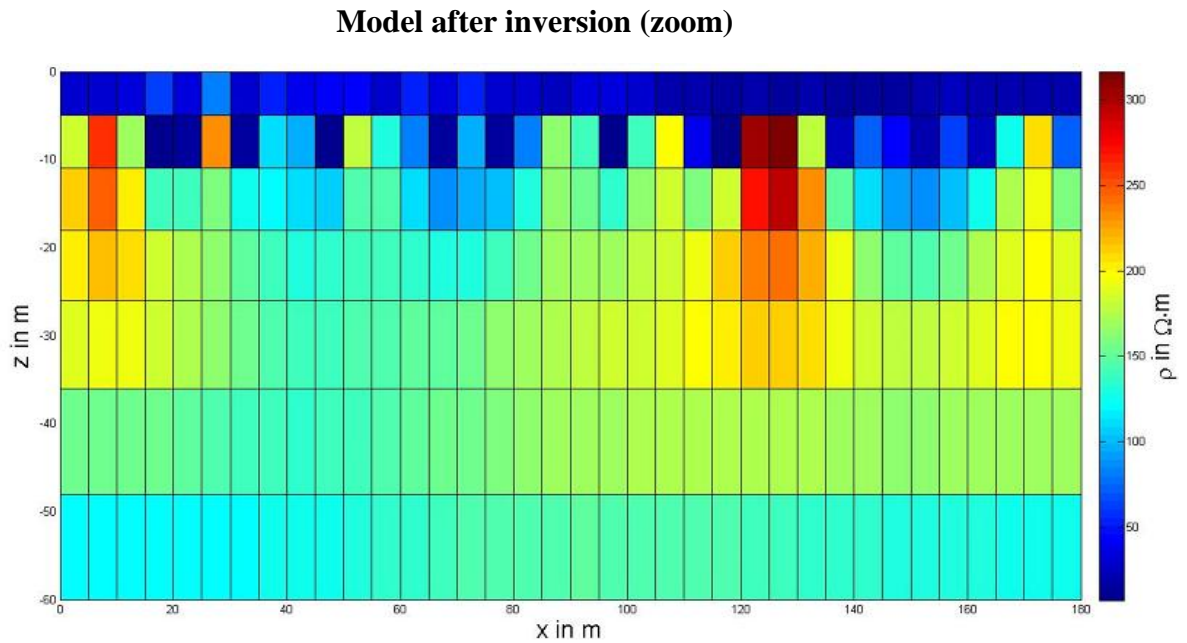
figure
fill(x1a,y1a,(1./cla));
%*****
colorbar;
title('model after inversion','fontsize',a);
hc=colorbar;
%set(get(hc,'YLabel'),'string','Conductivity in
S\cdot m^{-1}','fontsize',a);
set(get(hc,'YLabel'),'string','\rho in
\Omega\cdot m','fontsize',a);

xlabel('x in m','fontsize',a);
ylabel('z in m','fontsize',a);

axis([xa xb -yb ya])

```

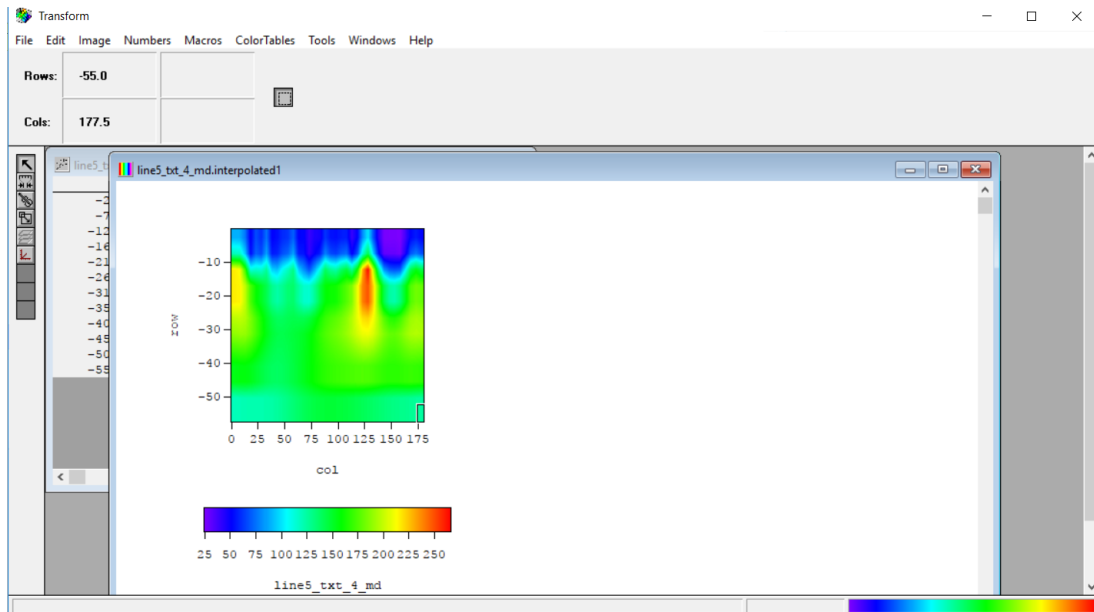
Από το παραπάνω πρόγραμμα, προκύπτει η απεικόνιση του μοντέλου μετά την αντιστροφή των δεδομένων (Σχήμα 2.8).



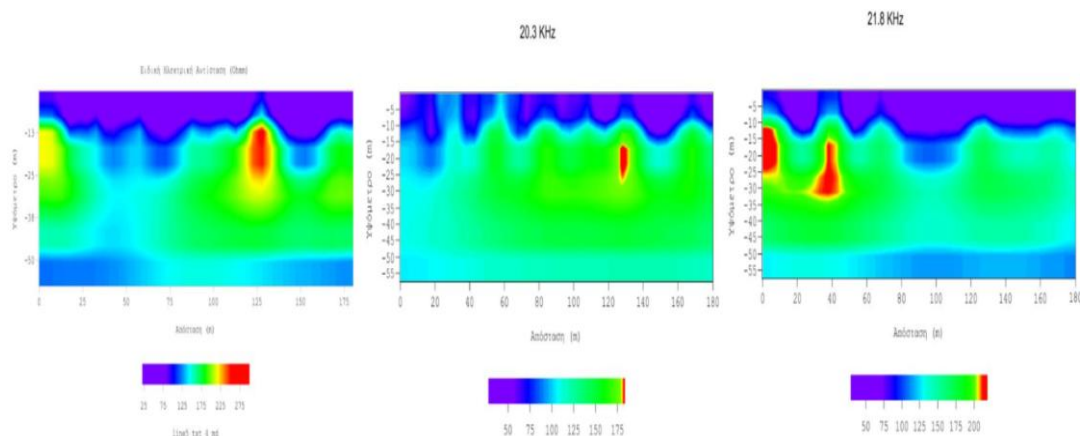
Σχήμα 2.8: Εμφάνιση αποτελέσματος του «script» *plotconstr.m* για το μοντέλο μετά την αντιστροφή, της γραμμής (line 5).

2.1.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων με τη χρήση του TRANSFORM3

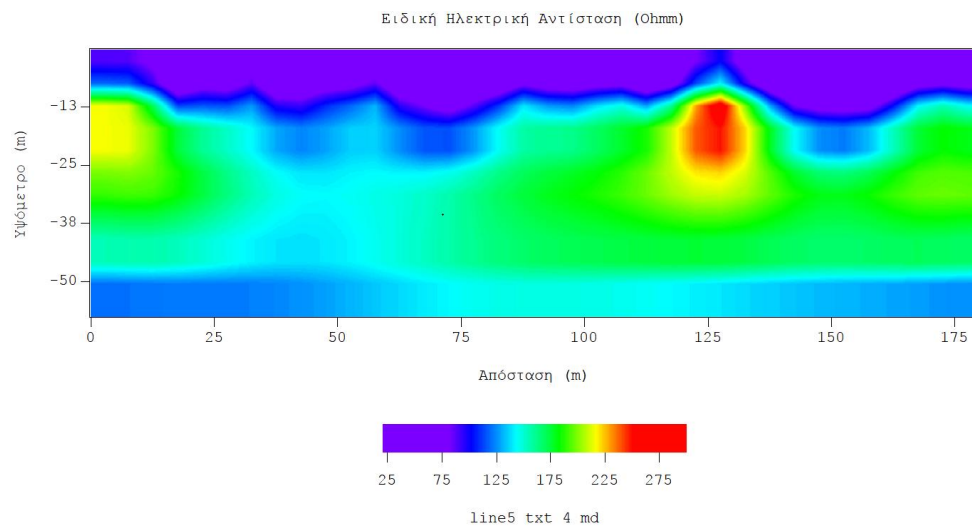
Στόχος του βήματος είναι να αντιστοιχήσουμε το κέντρο του κάθε πολυγώνου σε μια τιμή για να τα απεικονίσουμε στο TRANSFORM3, έτσι ώστε να επιλεγούν οι κατάλληλες ρυθμίσεις για να τρέξει το πρόγραμμα και να εμφανιστούν τα επιθυμητά αποτελέσματα που θέλουμε μέσω του προγράμματος TRANSFORM3. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε η γεωηλεκτρική τομή VLF να απεικονιστεί παρόμοια με την αντίστοιχη της ηλεκτρικής τομογραφίας. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για το συγκεκριμένο πρόγραμμα TRANSFORM3 παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα της εργασίας.



Σχήμα 2.9: Γεωηλεκτρική τομή VLF για την γραμμή 5.



Σχήμα 2.10: Γεωηλεκτρικές τομές VLF για την γραμμή 5, η εικόνα αριστερά αντιστοιχεί στις συχνότητες 20.3 kHz και 21.7 kHz, ενώ οι άλλες δύο στις συχνότητες 20.3 και 21.7 kHz αντίστοιχα.



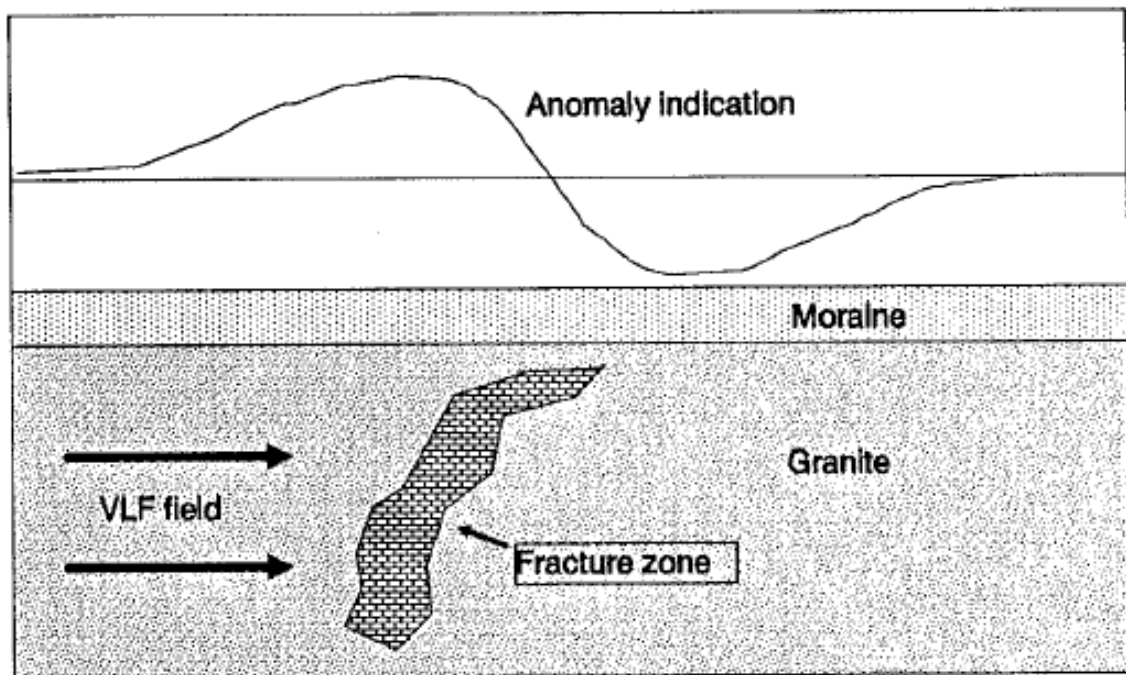
Σχήμα 2.11: Γεωηλεκτρική τομή VLF για την γραμμή 5.

2.1.5 Εφαρμογή του “φιλτραρίσματος Karouse”

Το φίλτρο “Karouse” βοηθάει έτσι ώστε να γίνει καλύτερη εξακρίβωση για ύπαρξη ρηγμάτων. Η συγκεκριμένη επεξεργασία πραγματοποιείται για κάθε γραμμή των μετρηθέντων δεδομένων VLF με τη χρήση φίλτρου:

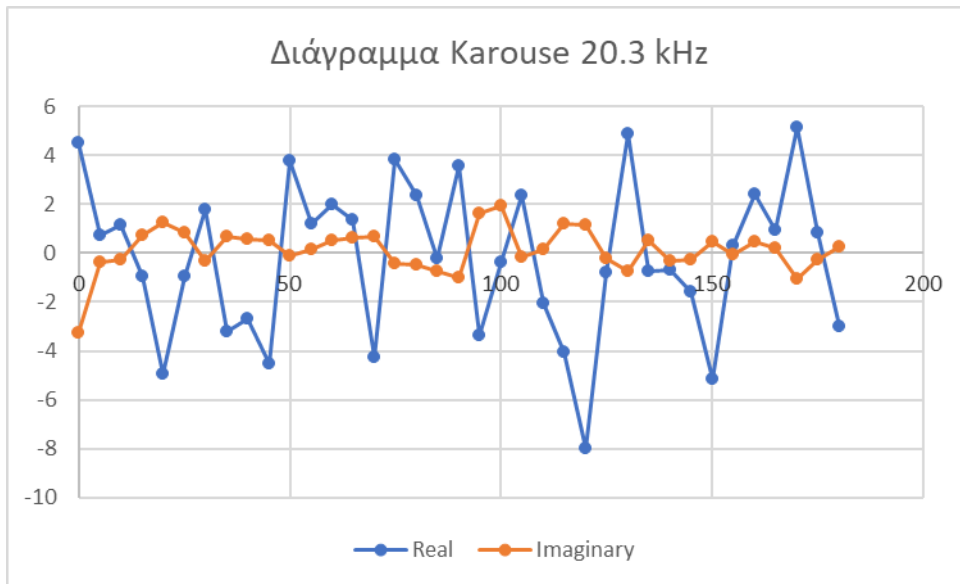
$$F_0 = -0.102H_{.3} + 0.059H_{.2} - 0.561H_{.1} + 0H_0 + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3$$

όπου $H_{.3}$ έως H_3 είναι τα αρχικά δεδομένα VLF (όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12), και το F_0 είναι το φιλτραρισμένο αποτέλεσμα.

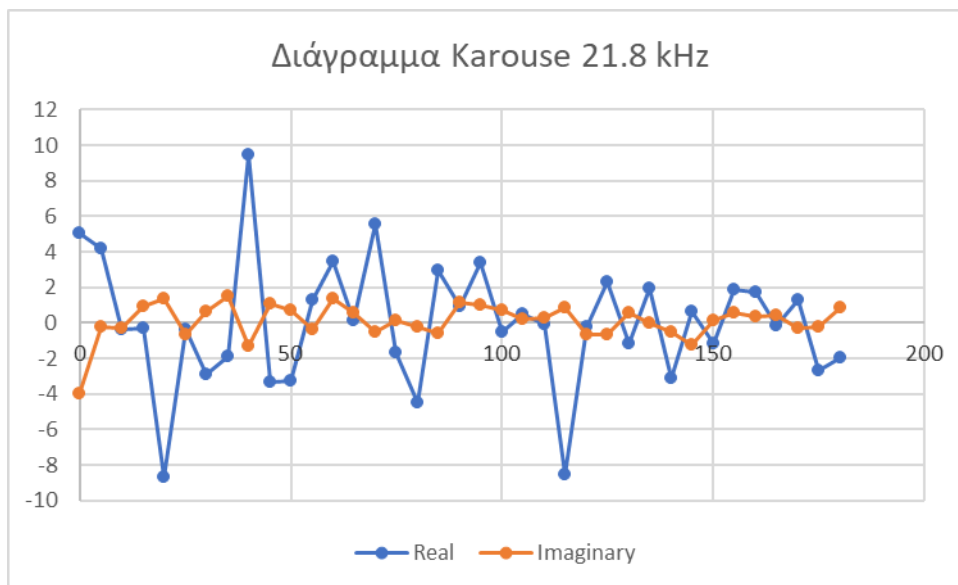


Σχήμα 2.12: Μια τυπική ένδειξη ανωμαλίας (φιλτραρισμένα δεδομένα), (ABEM Interpretation Guide, Sweden).

Ακολουθούν διαγράμματα (Σχήματα 2.12 και 2.13) όπου απεικονίζονται Πραγματικό και Φανταστικό μέρος για την γραμμή μελέτης 5 (line 5) και για τις δύο συχνότητες. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φιλτραρισμένα δεδομένα και για τις υπόλοιπες γραμμές στην συγκεκριμένη περιοχή των Φαλασάρνων.



Σχήμα 2.13: Πραγματικό και φανταστικό μέρος με την μέθοδο “Karouse” για την γραμμή (line 5, συχνότητα 20.3 kHz), ο κάθετος άξονας απεικονίζει τους σταθμούς παρατήρησης, ενώ ο οριζόντιος την απόσταση σε m, με μπλέ χρώμα είναι οι μετρήσεις για το πραγματικό (Real) και με πορτοκαλί χρώμα οι μετρήσεις για το φανταστικό (Imaginary).



Σχήμα 2.14 Πραγματικό και φανταστικό μέρος με την μέθοδο “Karouse” για την γραμμή (line 5, συχνότητα 21.8 kHz), ο κάθετος άξονας απεικονίζει τους σταθμούς παρατήρησης, ενώ ο οριζόντιος την απόσταση σε m, με μπλέ χρώμα είναι οι μετρήσεις για το πραγματικό (Real) και με πορτοκαλί χρώμα οι μετρήσεις για το φανταστικό (Imaginary)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Αποτελέσματα Γεωφυσικής Έρευνας

3.1 Θέσεις Μετρήσεων

Οι μετρήσεις με το όργανο VLF πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της παραλίας στα Φαλάσαρνα, στο πλαίσιο του μαθήματος «Ασκήσεις Υπαίθρου IV» σε διάστημα 5 ημερών (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Περιοχή της γραμμής μελέτης της μεθόδου VLF στην περιοχή Φαλάσαρνα του νομού Χανίων. Στο συγκεκριμένο σχήμα αυτό απεικονίζεται η θέση στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

3.2 Συλλογή Γεωφυσικών Δεδομένων

Ένα τυπικό όργανο μέτρησης για την μέθοδο του VLF είναι το WADI (Σχήμα 3.2). Το συγκεκριμένο όργανο μετράει τόσο την οριζόντια συνιστώσα όσο και την κατακόρυφη συνιστώσα του ολικού μαγνητικού πεδίου. Η συνισταμένη των δύο πεδίων μεταβάλλεται στον χώρο συναρτήσει του χρόνου και η μεταβολή της διαγράφει μία έλλειψη σε χρόνο $2\pi/\omega$. Το WADI καταγράφει το μέρος του πηλίκου της κατακόρυφης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου πραγματικό “Real” προς την οριζόντια συνιστώσα δηλαδή το φανταστικό “Imaginary” μέρος του. Οι τιμές του πραγματικού “Real” και του φανταστικού “Imaginary” μέρους επηρεάζονται από την αγωγιμότητα του υπεδάφους και το βάθος στο οποίο βρίσκεται το αγωγίμο σώμα. Μεταβολές των τιμών του πραγματικού “Real”, από θετικές σε αρνητικές είναι πιθανόν να οφείλονται σε δομές υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, στα σημεία όπου η τιμή του πραγματικού μέρους μηδενίζεται.

Για την περιοχή της παραλίας των Φαλασάρνων συλλέχθηκαν δεδομένα μεθόδου VLF κατά μήκος 17 γραμμών μελέτης με διεύθυνση από τη δύση στην ανατολή.

Οι πρώτες 7 γραμμές έχουν μήκος 180 m και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν λαμβάνονταν ανά 5 m για τρεις συχνότητες των 20.3kHz, 21.8kHz και 26.7 kHz.

Η κεραία εκπομπής των H/M κυμάτων συχνότητας 20.3 kHz βρίσκεται στην πόλη Tanolara της Ιταλίας, η κεραία συχνότητας 21.8 kHz βρίσκεται στην πόλη Rosnay της Γαλλίας και τέλος η κεραία συχνότητας 26.7 kHz βρίσκεται στην πόλη Bafra της Τουρκίας. Η ισαπόσταση των γραμμών είναι 5 m.

Οι υπόλοιπες γραμμές βρίσκονται δυτικά του χωματόδρομου. Οι γραμμές 8 και 9 έχουν συνολικό μήκος 180 m, ενώ οι γραμμές 10, 11, 12, 13 και 14 έχουν συνολικό μήκος 130 m. Τέλος οι γραμμές 15, 16 και 17 πραγματοποιήθηκαν ως επαλήθευση στον αρχικό μας κάναβο και συμπίπτουν με τις γραμμές 13, 5 και 4 αντίστοιχα.

Αρχικά γίνεται έλεγχος για τον συντονισμό κάθε μιας συχνότητας. Ο βασικός εξοπλισμός περιλαμβάνει το όργανο ABEM WADI (πορτοκαλί χρώμα) από το οποίο γίνεται λήψη όλων των δεδομένων. Αποτελείται από ένα μαύρο κουτί με τις μπαταρίες του μηχανήματος. Το συγκεκριμένο κουτί συνδέεται με μια ορθογώνια λεπτή πλάκα “μετρητής” περίπου 5-8 cm η οποία είναι τοποθετημένη στο δεξί μέρος της ζώνης του γεωφυσικού – χειριστή. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων η συγκεκριμένη πλάκα πρέπει να είναι όσο πιο κάθετα γίνεται με το έδαφος για την λήψη καλύτερων μετρήσεων - δεδομένων. Στα αριστερά της ζώνης βρίσκεται μια πλαστική θήκη στην οποία τοποθετούνται οι μπαταρίες του μηχανήματος. Τέλος υπάρχουν δύο καλώδια το ένα συνδέει τις μπαταρίες με το μηχάνημα ABEM WADI, λήψης των δεδομένων, ενώ το καλώδιο με το γκρι έντονο χρώμα το οποίο έχει και μεγαλύτερο πάχος, συνδέει την μπαταρία με τον “μετρητή” που λαμβάνει τις μετρήσεις από το έδαφος.



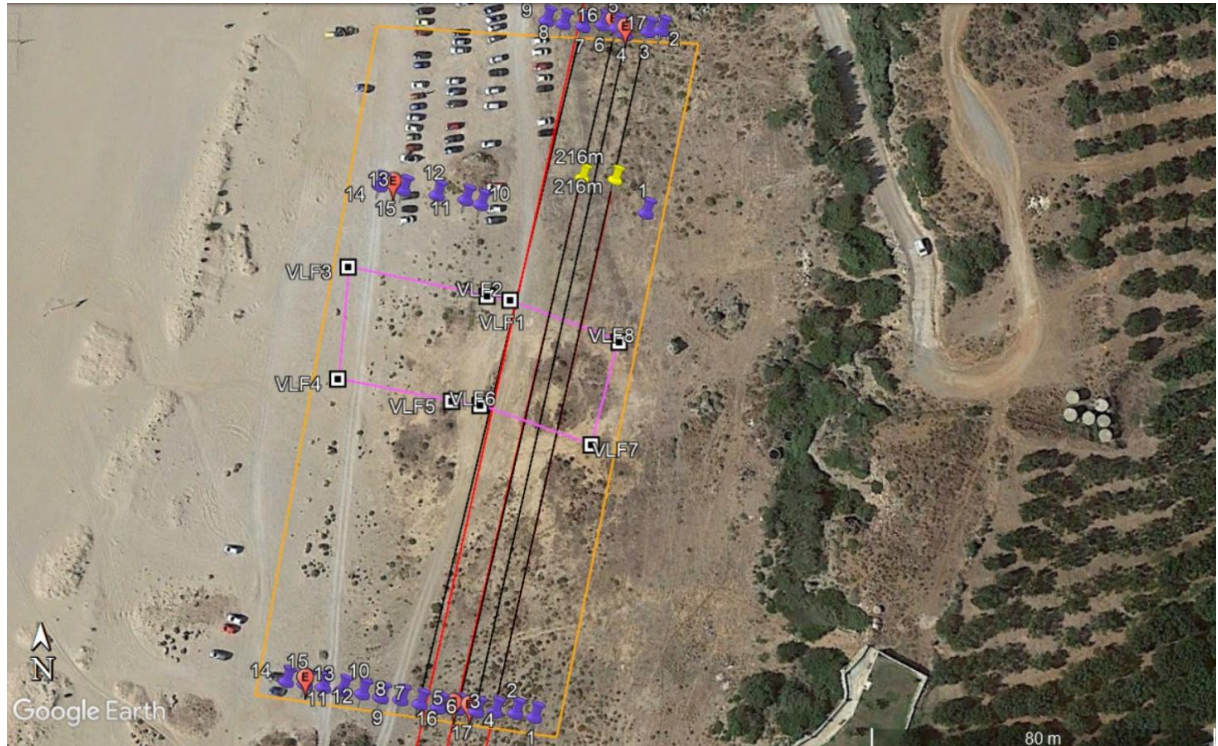
Σχήμα 3.2: Όργανο μετρήσεων VLF (WADI της ABEM), με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στην περιοχή της παραλίας στα Φαλάσαρνα.

Οι γραμμές μέτρησης επιλέγονται όσο το δυνατόν κάθετες στην διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Δηλαδή, πριν την έναρξη των μετρήσεων ο χρήστης περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του μέχρι το σήμα του WADI να γίνει μέγιστο. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στην διεύθυνση που το σήμα είναι μέγιστο με περιθώριο απόκλισης 20° .



Σχήμα 3.3: Γραμμές μελέτης της μεθόδου VLF (με μαύρο χρώμα), ο κάναβος με ροζ χρώμα είναι αυτός που δημιουργήσαμε και περιλαμβάνει μέσα και τις 17 γραμμές μελέτης, ενώ το ορθογώνιο πλαίσιο με πορτοκαλί χρώμα είναι το περίγραμμα γύρω από την συνολική περιοχή μελέτης μας στην παραλία των Φαλάσαρνα.

Το (Σχήμα 3.3.) δείχνει τις γραμμές μελέτης στην περιοχή της παραλίας των Φαλασάρνων. Στο επόμενο (Σχήμα 3.4) παρουσιάζονται οι θέσεις των γραμμών μελέτης line3, line4, line5 και line7. Με χρώμα ροζ φαίνεται ο κανάβος που σχηματίστηκε έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν με ακρίβεια οι μετρήσεις για την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF στην συγκεκριμένη περιοχή. Επίσης παρουσιάζονται οι θέσεις των γραμμών μελέτης της ηλεκτρικής τομογραφίας.



Σχήμα 3.4: Θέσεις των γραμμών μελέτης ηλεκτρικής τομογραφίας (κόκκινες γραμμές), της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF (μαύρο χρώμα), καθώς και του κανάβου (ροζ τετράγωνο) στην περιοχή των Φαλασάρνων

3.3 Ηλεκτρική Τομογραφία

3.3.1 Βασικές Αρχές της Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι έχουν σαν στόχο τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης. Οι μεταβολές του ηλεκτρικού δυναμικού οφείλονται στις μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων στο υπέδαφος.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ , αποτελεί ιδιότητα των υλικών και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

όπου L αγωγός μήκους, διατομής A και αντίστασης R .

Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αντίστασης στο διεθνές σύστημα μονάδων SI, είναι το Ωm .

Η ηλεκτρική τομογραφία ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και συμβάλλει στη λεπτομερή απεικόνιση του υπεδάφους, καθώς είναι μέθοδος υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στην ηλεκτρική τομογραφία απεικονίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος σε 2 ή 3 διαστάσεις. (Βαφείδης, 1993 Βαφείδης και Αμολοχίτης 1995).

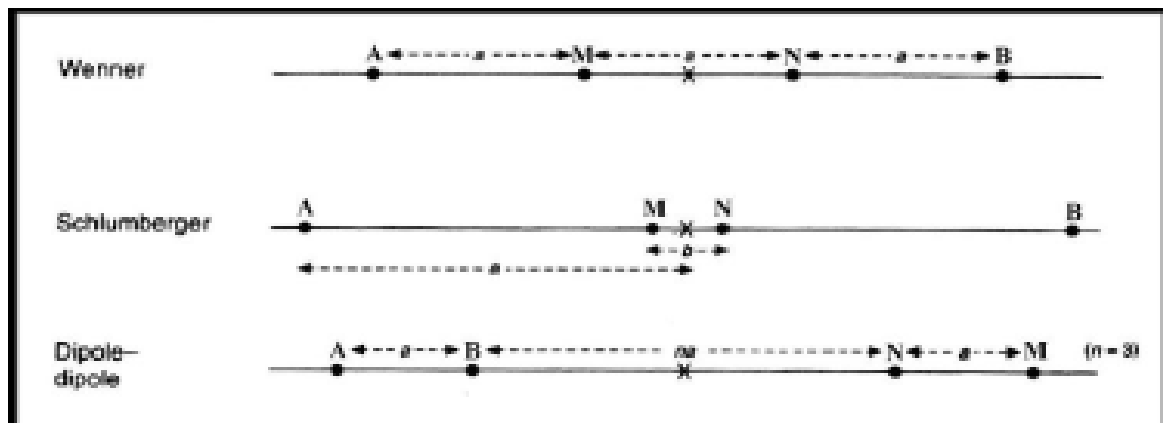
Η περιγραφή της γεωλογικής δομής βασίζεται στην μελέτη των μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση, εντοπίζοντας έτσι ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως ρήγματα ή έγκοιλα (Κουφόπουλος, 2012).

3.3.2 Μέθοδος Απόκτησης Δεδομένων

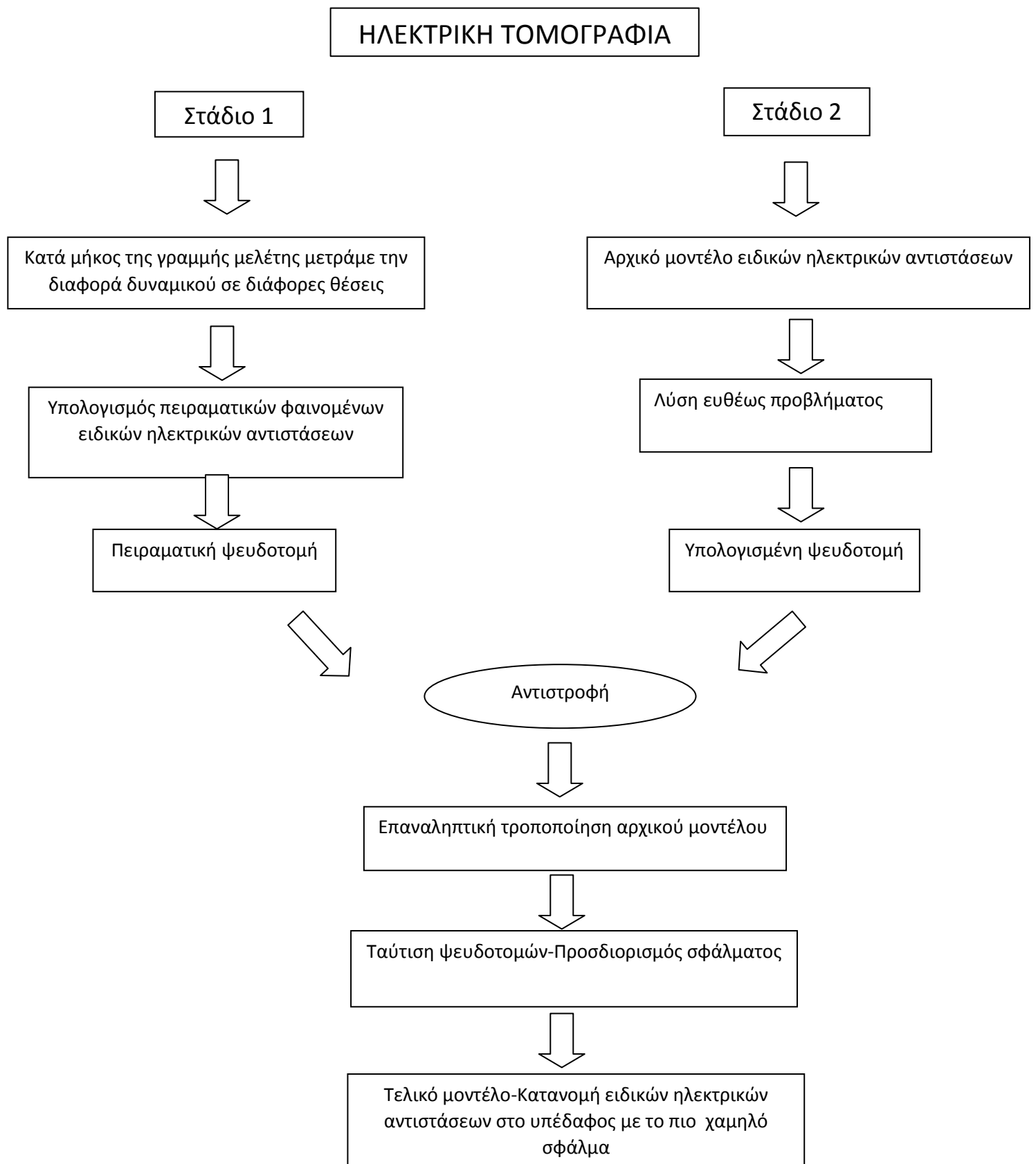
Μια σειρά από μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται μετακινώντας τη διάταξη των ηλεκτροδίων σώματος ή δυναμικού από θέση σε θέση κατά μήκος μιας γραμμής μελέτης. Υπάρχει μια κεντρική μονάδα, υπολογιστής ο οποίος επιλέγει αυτόματα τα ενεργά ηλεκτρόδια (ρεύματος και δυναμικού) που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση, αναλόγως της διάταξης των ηλεκτροδίων. Τα δεδομένα της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης διατάσσονται σε ψευδοτομή που απεικονίζεται η κατανομή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. (Βαφείδης, 1993)

3.3.3 Μεθοδολογία Επεξεργασίας

Η μεθοδολογία επεξεργασίας περιλαμβάνει μέθοδο αντιστροφής σε δύο διαστάσεις για τον υπολογισμό των πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων από τις φαινόμενες αντιστάσεις. Τα κυριότερα βήματα που ακολουθούνται για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας έγιναν με τη χρήση του λογισμικού του προγράμματος επεξεργασίας Res2dinv (Res2dinv, 2001) παρατίθεται σε διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.5: Διατάξεις Ηλεκτρικής Τομογραφίας (Βαφείδης, 1993, Βαφείδης και Αμολοχίτης 1995).



Σχήμα 3.6: Αναλυτικό διάγραμμα ροής επεξεργασίας των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας.

3.3.4 Αποτελέσματα Ηλεκτρικής Τομογραφίας

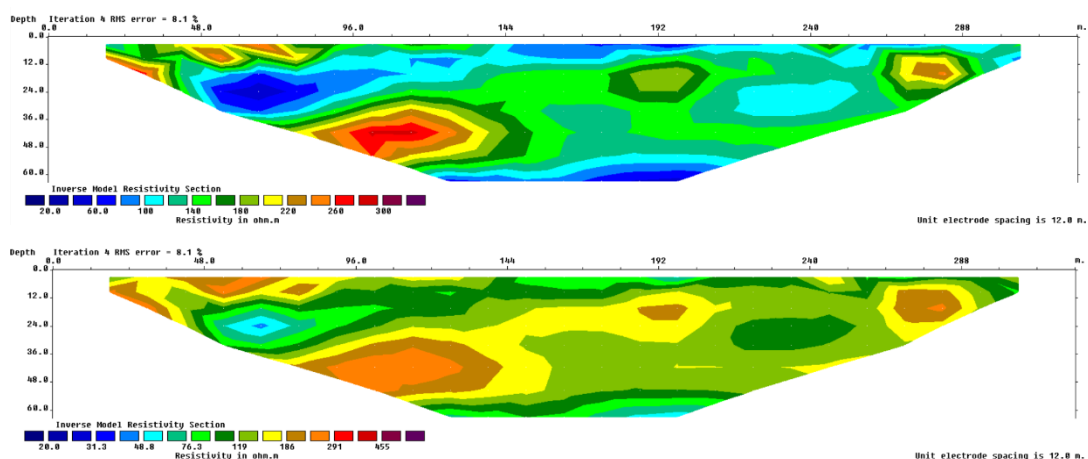
Το πρόγραμμα Res2dinv χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία δεδομένων από την περιοχή του νομού Χανίων. Χρησιμοποιήθηκαν έξι διατάξεις (1 DD, 1 GR, 2B DD, 2B GR, 2C DD, 2C GR), όπου απεικονίζονται με γραμμική και λογαριθμική κλίμακα, η οποία έχει προκύψει από την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα θα εμφανιστούν μόνο οι εικόνες από τα τελικά τους μοντέλα, μετά την μείωση του σφάλματος που πραγματοποιήθηκε. Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων για την μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας,

Η συλλογή δεδομένων με τη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας, πραγματοποιήθηκε για τις γραμμές:

- a) 1 - DD, η οποία έχει μήκος 324 m, πραγματοποιήθηκε με δύο διατάξεις a) Dipole - Dipole (Διπόλου – Διπόλου) (σχήματα 3.7) και b) Gradient (σχήματα 3.8), τόσο για γραμμική, όσο και για τη λογαριθμική κλίμακα.
- b) 2B (Δυτική) μήκους 216 m, πραγματοποιήθηκε με δύο διατάξεις a) Dipole - Dipole (Διπόλου – Διπόλου) (σχήματα 3.9) και b) Gradient (σχήματα 3.10).
- c) 2C (Ανατολική), μήκους ίσου με αυτού της 2B (Δυτική) (Σχήματα 3.11 και 3.12)

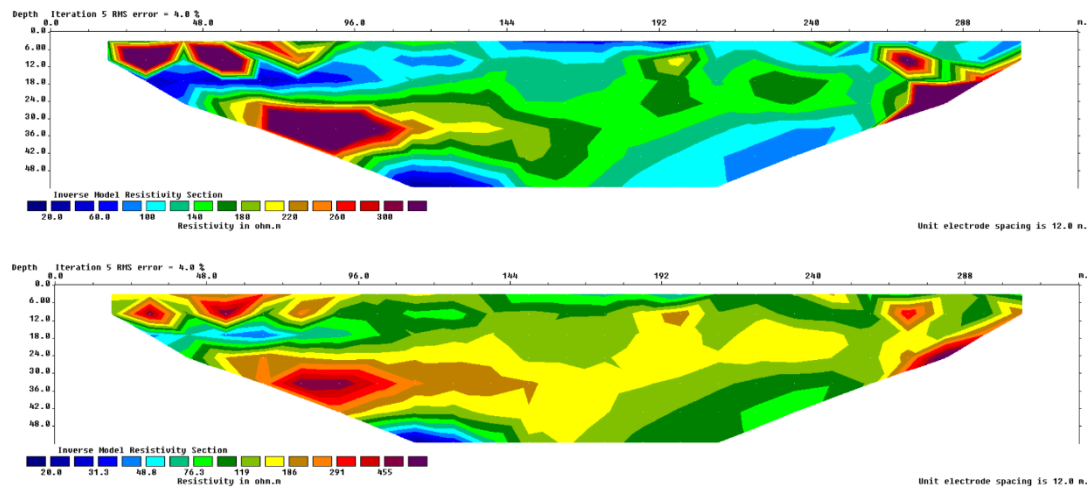
Οι ηλεκτρικές τομογραφίες δόθηκαν έτοιμες έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκριση με τα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF και να βγουν καλύτερα αποτελέσματα και συμπεράσματα στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία.

a) Dipole – Dipole γραμμική και λογαριθμική κλίμακα.



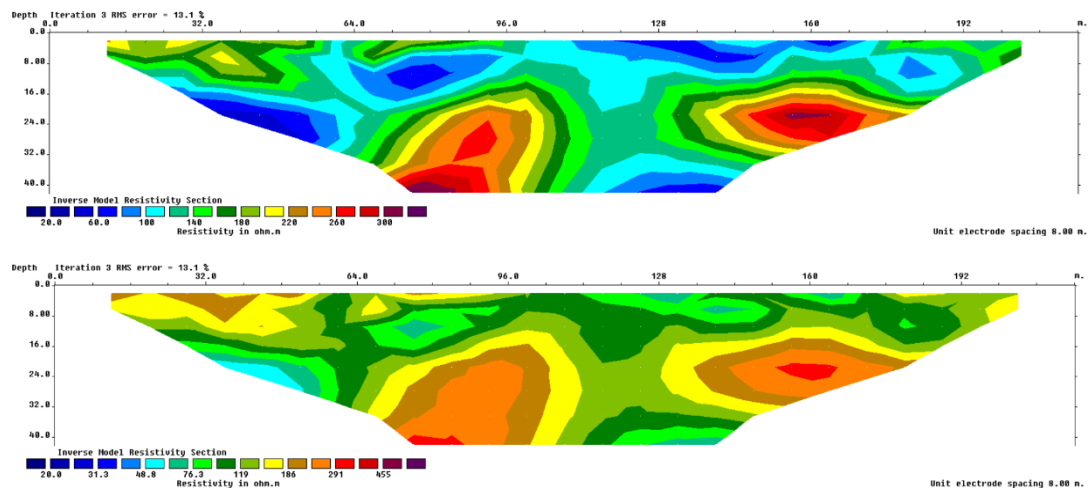
Σχήμα 3.7: Γεωηλεκτρικές τομές των πραγματικών τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την περιοχή (1 DD) των Φαλασάρων του νομού Χανίων με τη χρήση της διάταξης ηλεκτροδίων Διπόλου – Διπόλου για γραμμική κλίμακα (πάνω) και λογαριθμική κλίμακα (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους σε m, ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε m και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωm .

b) Gradient γραμμική και λογαριθμική κλίμακα.



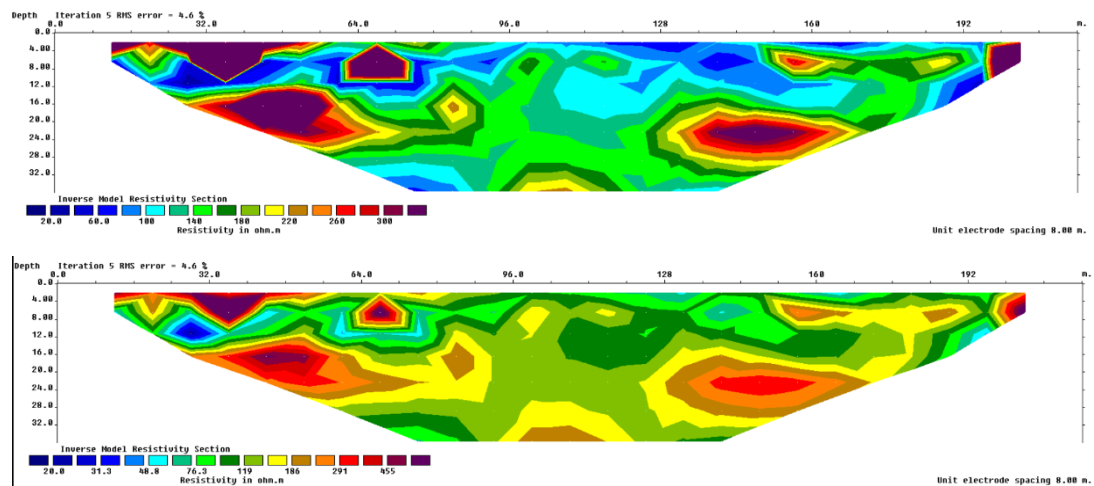
Σχήμα 3.8: Γεωηλεκτρικές τομές για την περιοχή (1_GR) με τη χρήση της διάταξης ηλεκτροδίων Gradient για γραμμική κλίμακα (πάνω) και για λογαριθμική κλίμακα (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους σε m, ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε m και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωhm .

a) Dipole – Dipole γραμμική και λογαριθμική κλίμακα.



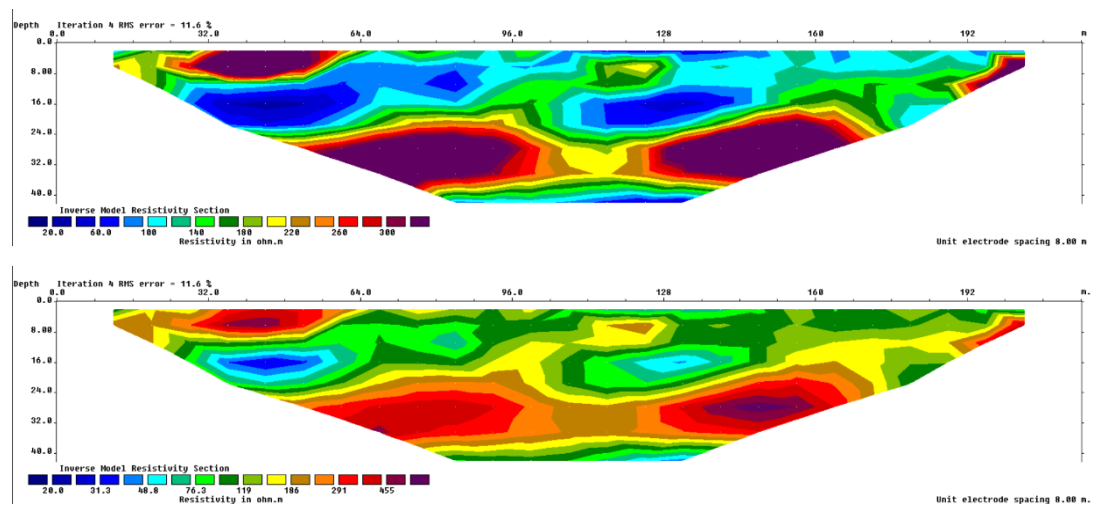
Σχήμα 3.9: Γεωηλεκτρικές τομές για την γραμμή (2B_DD) (Δυτική) με τη χρήση της διάταξης ηλεκτροδίων Διπόλου – Διπόλου για γραμμική κλίμακα (πάνω) και λογαριθμική κλίμακα (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους σε m, ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε m και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωhm .

b) Gradient γραμμική και λογαριθμική κλίμακα.



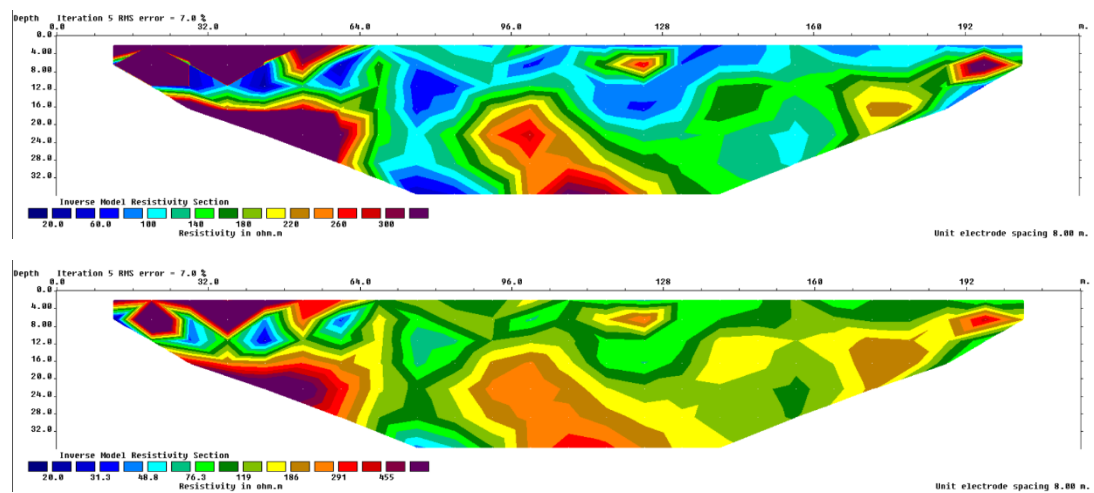
Σχήμα 3.10: Γεωηλεκτρικές τομές για την γραμμή (2B _GR) (Δυτική) με τη χρήση της διάταξης ηλεκτροδίων Gradient για γραμμική κλίμακα (πάνω) και για λογαριθμική κλίμακα (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους σε m, ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε m και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωm .

a) Dipole – Dipole γραμμική και λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 3.11: Γεωηλεκτρικές τομές για την γραμμή (2C_DD) (Ανατολική) με τη χρήση της διάταξης ηλεκτροδίων Διπόλου - Διπόλου για γραμμική κλίμακα (πάνω) και για λογαριθμική κλίμακα (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους σε m, ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε m και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωm .

b) Gradient γραμμική και λογαριθμική κλίμακα.



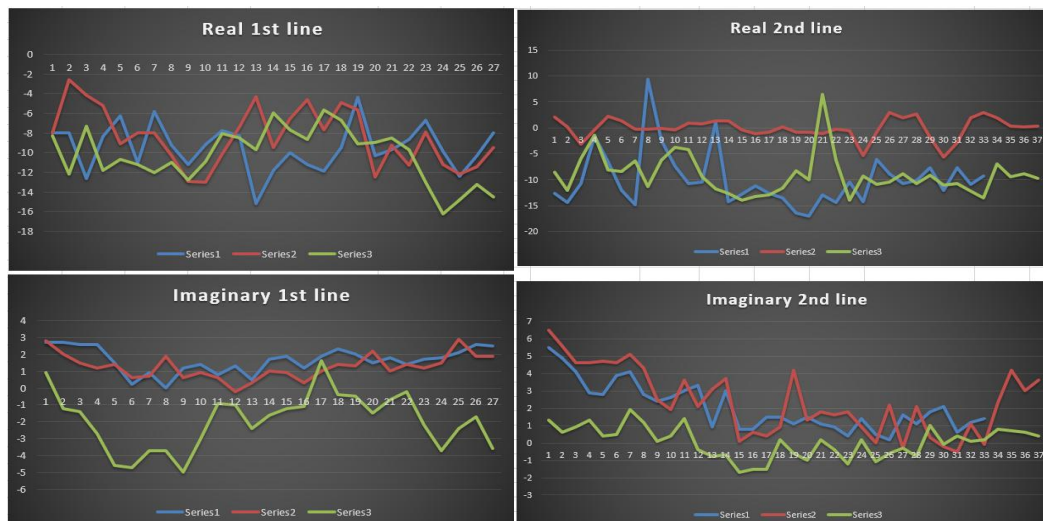
Σχήμα 3.12: Γεωηλεκτρικές τομές για την γραμμή (2C_GR) Χανίων με τη χρήση της διάταξης ηλεκτροδίων Gradient για γραμμική κλίμακα (πάνω) και για λογαριθμική κλίμακα (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους σε m, ο οριζόντιος το μήκος της γραμμής μελέτης σε m και η χρωματική κλίμακα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε Ωhm .

3.4 Αποτελέσματα Επεξεργασίας Γεωφυσικών Δεδομένων

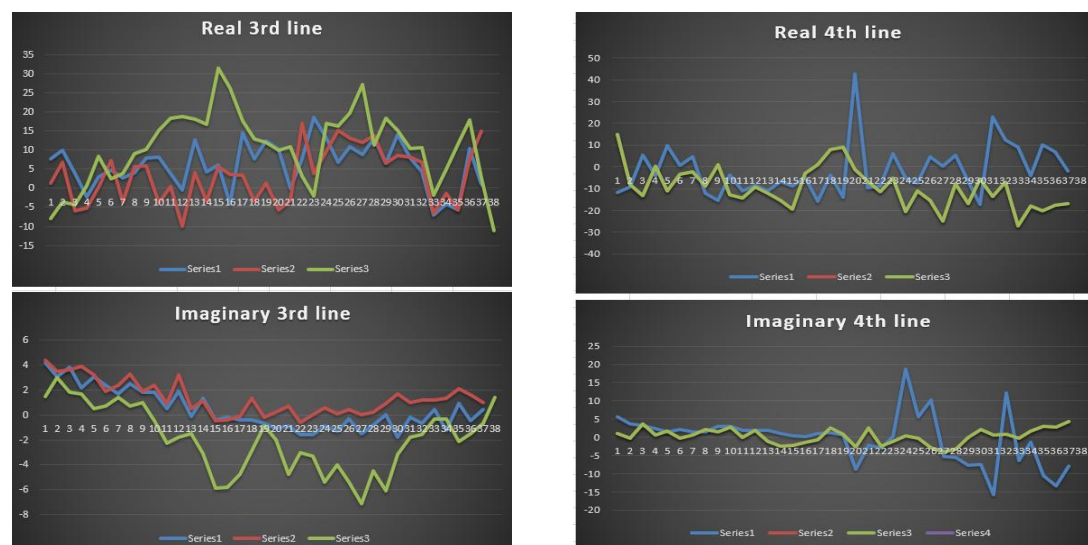
3.4.1 Αποτελέσματα Μεθόδου VLF

Η μέθοδος της αντιστροφής με περιορισμούς εξομάλυνσης αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την ερμηνεία γεωηλεκτρικών δεδομένων και για την ανακατασκευή ακόμα και πολύπλοκων δομών του υπεδάφους σε δύο και τρεις διαστάσεις.

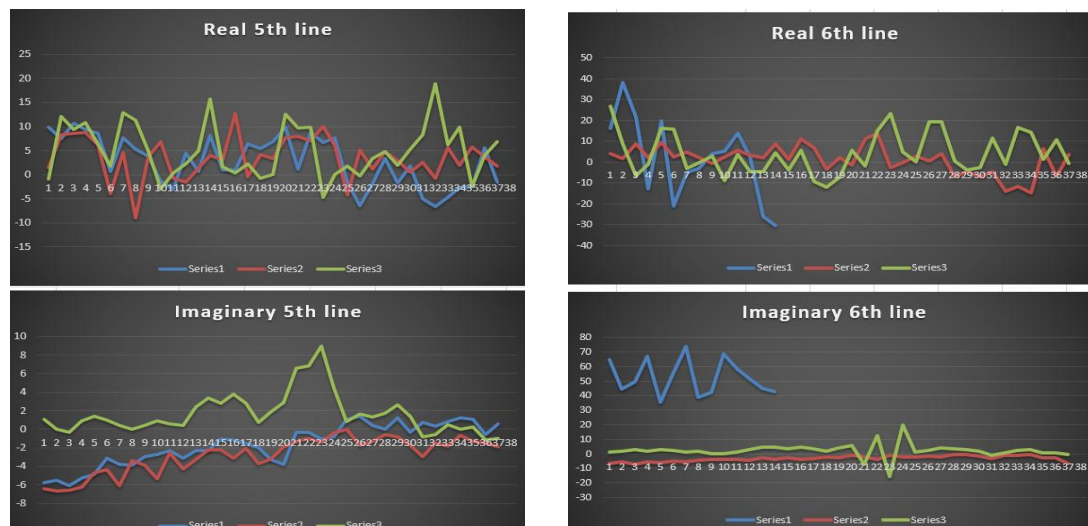
Αρχικά πραγματοποιήθηκε η μεταφορά των δεδομένων τα οποία συλλέχθηκαν στην περιοχή του νομού Χανίων από το όργανο ABEM WADI για δεκαεπτά γραμμές (line1, line2, line3, line4, line5, line6, line7, line8, line9, line10, line11, line12, line13, line14, line15, line16, line17) στον υπολογιστή. (Σχήματα 3.13 έως και 3.21).



Σχήμα 3.13: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την πρώτη γραμμή μελέτης (line 1) αριστερά και δεξιά για την δεύτερη γραμμή μελέτης (line 2). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m.



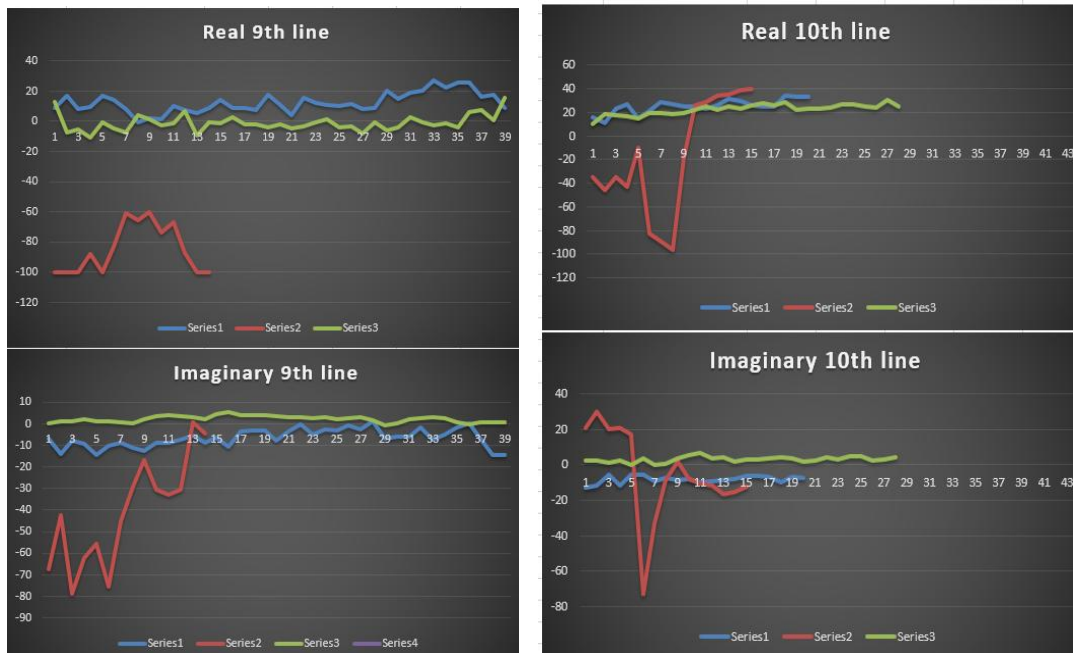
Σχήμα 3.14: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την τρίτη γραμμή μελέτης (line 3) αριστερά και δεξιά για την τέταρτη γραμμή μελέτης (line 4). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχνη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχνη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m .



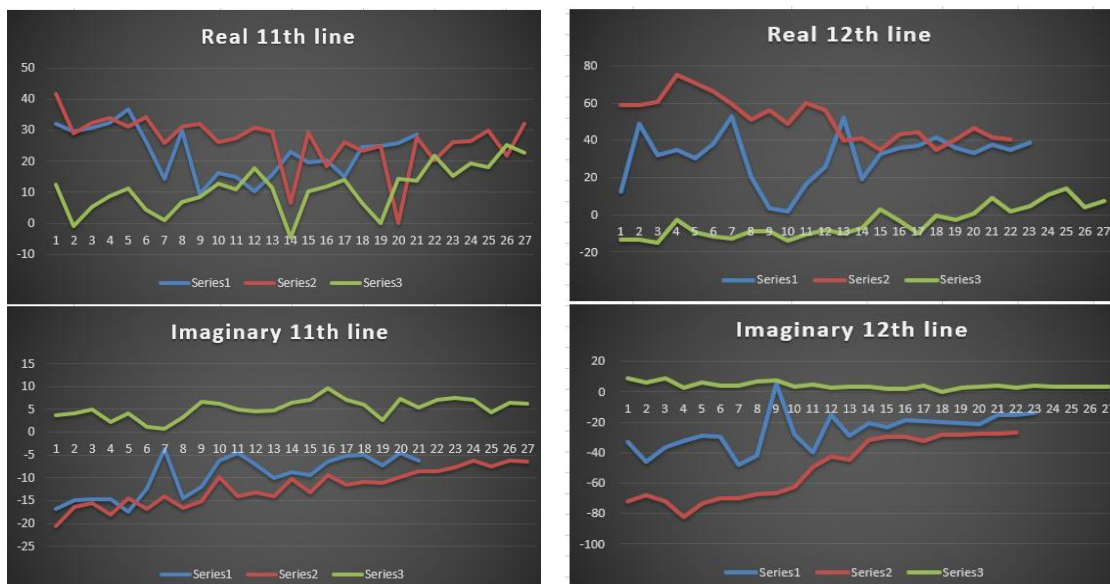
Σχήμα 3.15: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την πέμπτη γραμμή μελέτης (line 5) αριστερά και δεξιά για την έκτη γραμμή μελέτης (line 6). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχνη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχνη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m .



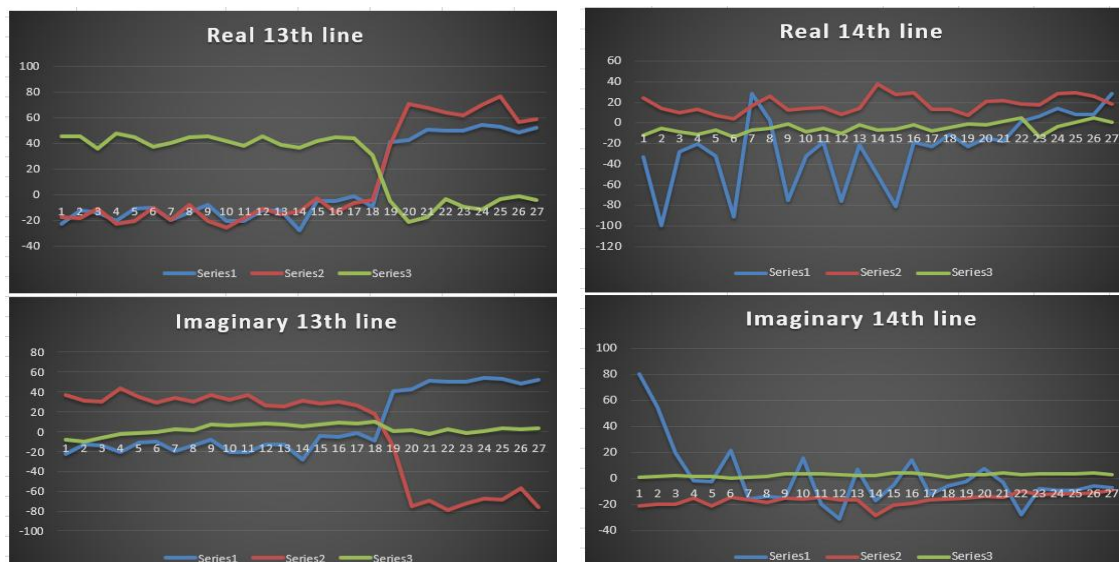
Σχήμα 3.16: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την έβδομη γραμμή μελέτης (line 7) αριστερά και δεξιά για την όγδοη γραμμή μελέτης (line 8). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχνη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχνη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m .



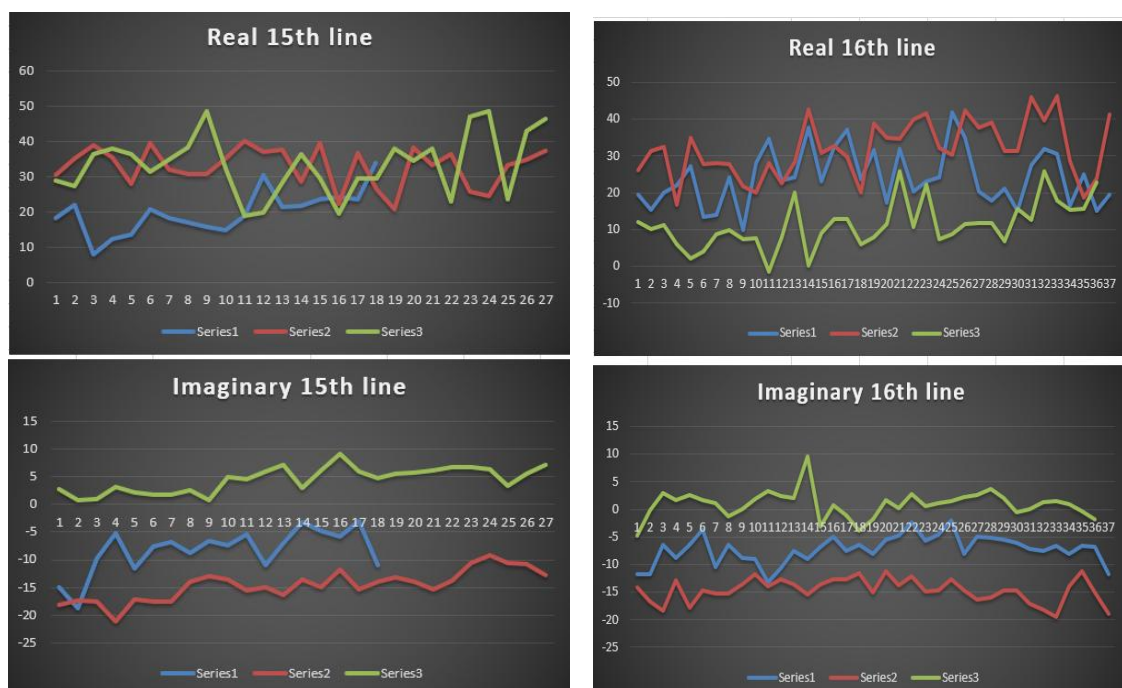
Σχήμα 3.17: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την ένατη γραμμή μελέτης (line 9) αριστερά και δεξιά για την δέκατη γραμμή μελέτης (line 10). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m .



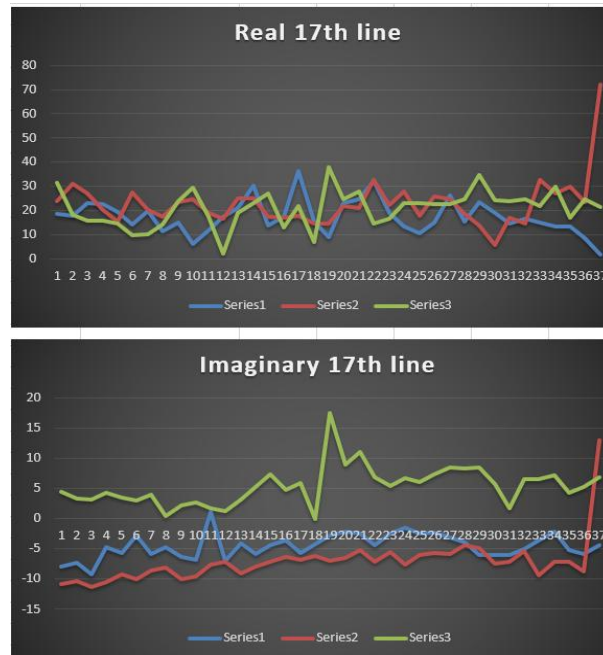
Σχήμα 3.18: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την ενδέκατη γραμμή μελέτης (line 11) αριστερά και δεξιά για την δωδέκατη γραμμή μελέτης (line 12). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m .



Σχήμα 3.19: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την δέκατη τρίτη γραμμή μελέτης (line 13) αριστερά και δεξιά για την δέκατη τέταρτη γραμμή μελέτης (line 14). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m.



Σχήμα 3.20: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την δέκατη πέμπτη γραμμή μελέτης (line 15) αριστερά και δεξιά για την δέκατη έκτη γραμμή μελέτης (line 16). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m.



Σχήμα 3.21: Πραγματικό και φανταστικό μέρος των δεδομένων για την δέκατη έβδομη γραμμή μελέτης (line 17). Με μπλέ χρώμα είναι η συχνότητα 20.3 kHz (χαμηλόσυχνη), με κόκκινο χρώμα είναι η συχνότητα 21.8 kHz και με πράσινο χρώμα είναι η συχνότητα 26.7 kHz (υψίσυχνη). Ο κατακόρυφος άξονας (για τα επάνω διαγράμματα) απεικονίζει το πραγματικό “Real”, ενώ (για τα κάτω διαγράμματα) το φανταστικό “Imaginary” και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της γραμμής μελέτης σε m.

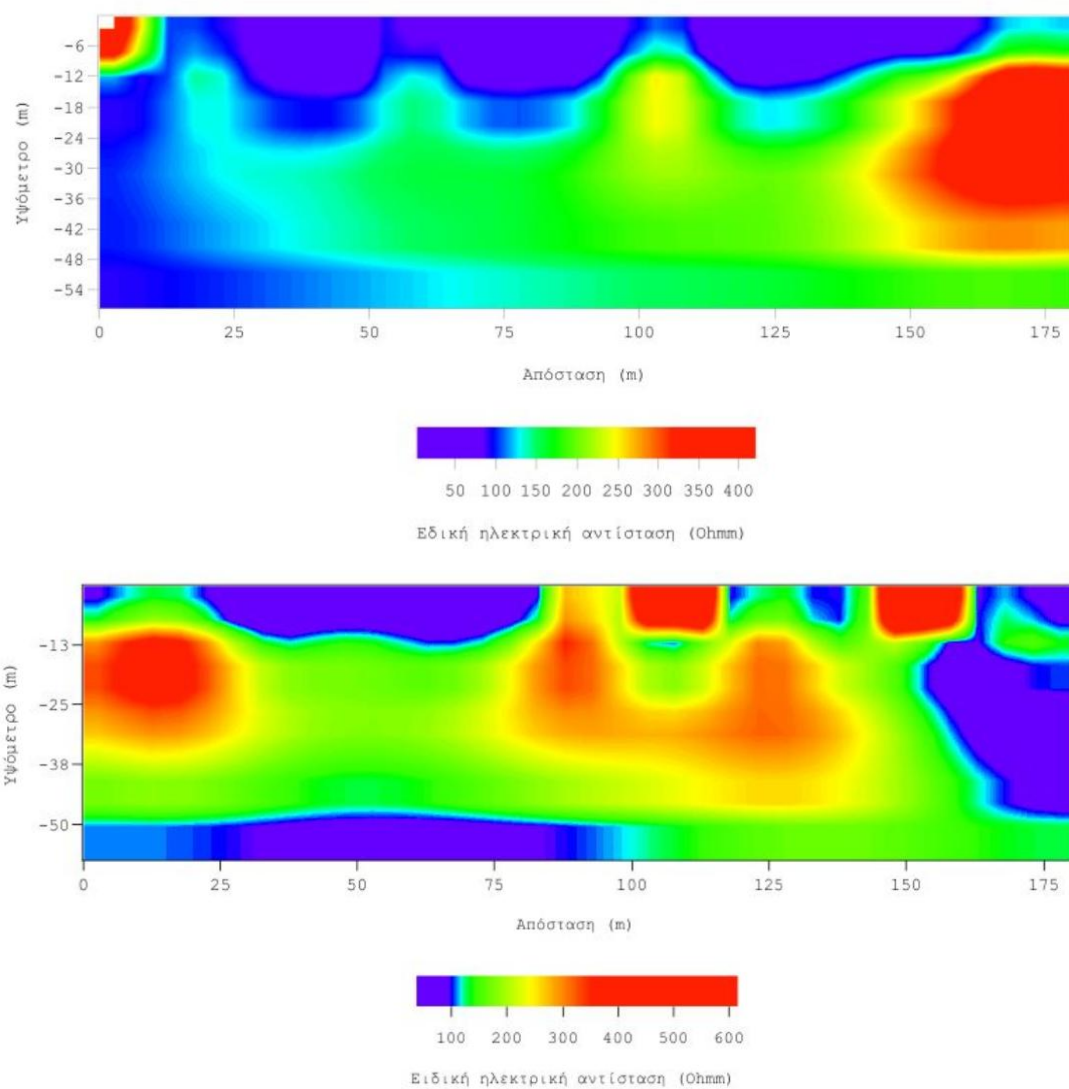
3.4.2 VLF Γεωηλεκτρικές Τομές

Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε αντιστροφή των δεδομένων σε όλες τις γραμμές (17 γραμμές μελέτης) και για όλες τις συχνότητες με την μέθοδο που περιγράφεται στο 3^ο κεφάλαιο. Τέλος οι γεωηλεκτρικές τομές απεικονίζονται με το πρόγραμμα TRANSFORM3.

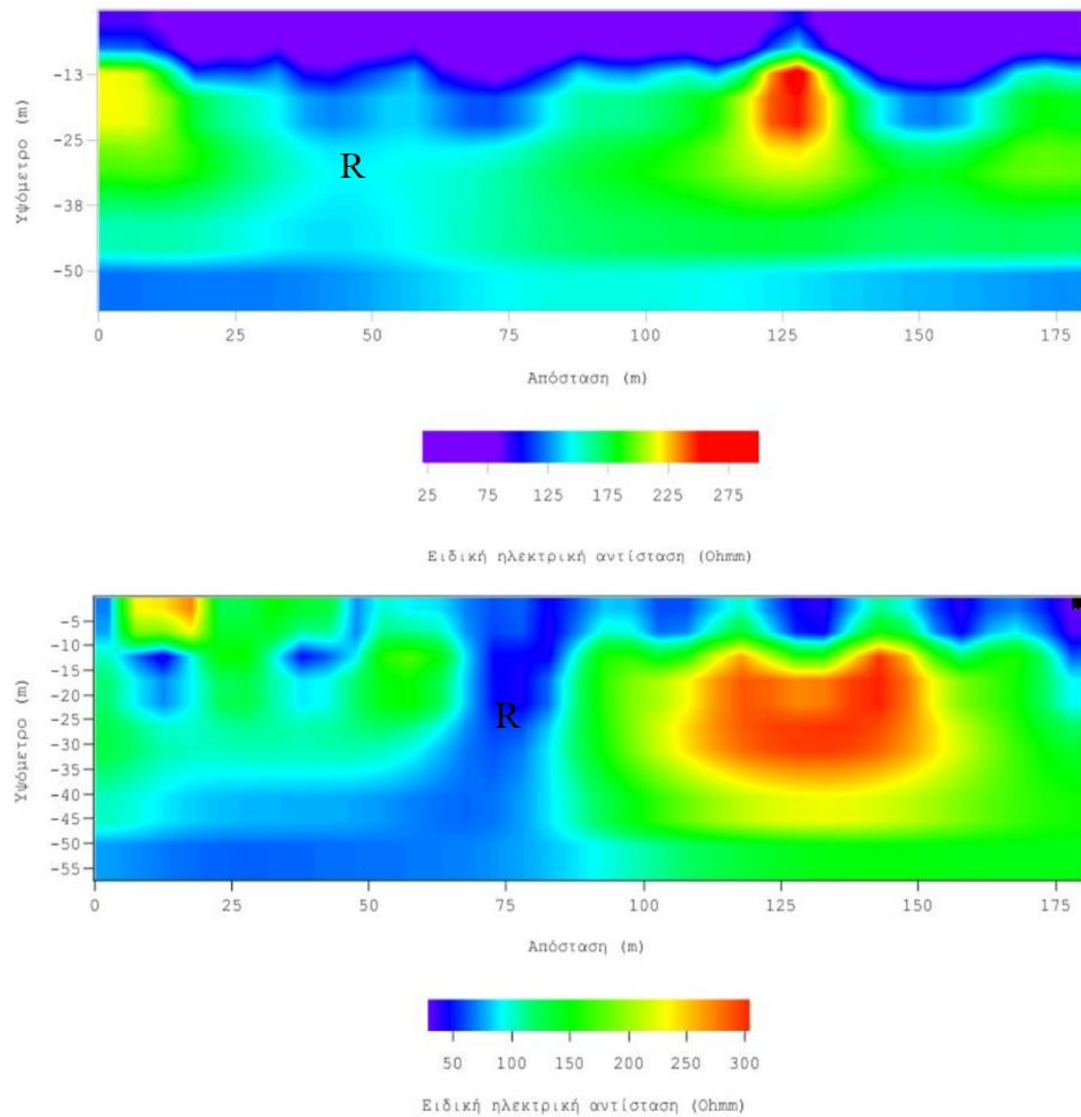
Ακολουθούν οι γραμμές της αντιστροφής δεδομένων VLF από δύο συχνότητες για τις γραμμές 3, 4, 5 και 7 (Σχήματα 3.22 έως 3.23). Οι γραμμές line3 και line4 έχουν μήκος 180 m και αναπτύσσονται από νότο προς βορρά. Στις τομές (Σχήμα 3.22) απεικονίζονται τρία στρώματα.

- Το πρώτο πάχους 12 m είναι ανομοιογενές με ειδική ηλεκτρική αντίσταση από 60 έως και πάνω από 100 Ωm.
- Το δεύτερο στρώμα παρουσιάζει υψηλότερο εύρος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, από 150 έως και πάνω από 400 Ωm και εκτείνεται μέχρι το βάθος των 50 m.
- Το τρίτο που είναι βαθύτερο είναι πιο αγωγίμο (με ειδική ηλεκτρική αντίσταση από 4 έως και 120 Ωm).

Στις γεωηλεκτρικές τομές line 5 και line 7 (Σχήμα 3.23) απεικονίζονται τρία στρώματα και ζώνη χαμηλότερων αντιστάσεων η οποία αποδίδεται σε πιθανό ρήγμα.



Σχήμα 3.22: Γεωηλεκτρικές τομές line3 (πάνω) και line4 (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (σε m) και ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την απόσταση (m).



Σχήμα 3.23: Γεωηλεκτρικές τομές line5 (πάνω) και line7 (κάτω). Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (σε m) και ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την απόσταση (m).

Η ζώνη χαμηλότερων αντιστάσεων R αποδίδεται σε πιθανό ρήγμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σύγκριση Αποτελεσμάτων

4.1 Συνδυαστική Ερμηνεία Γεωηλεκτρικών Τομών

Στη συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιείται συνδυαστική ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομών της ηλεκτρικής μεθόδου (ηλεκτρικής τομογραφίας) και της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου VLF.

Η γραμμή line3 έχει κοινό τμήμα με την γραμμή 2C GR της ηλεκτρικής τομογραφίας. Στην γεωηλεκτρική τομή (Σχήμα 4.1) από την ηλεκτρική τομογραφία παρατηρούνται τρία στρώματα. Το μέγιστο βάθος της γεωηλεκτρικής τομής 2C GR είναι 32 m, ενώ το αντίστοιχο για την line3 είναι 54 m.

Το πρώτο στρώμα πάχους 8 m περίπου στην γεωηλεκτρική τομή από την ηλεκτρική τομογραφία, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυμαίνεται από 60 Ohm μέχρι και 350 Ohm, αποδίδεται σε κροκαλοπαγή μεταβλητού πορώδους.

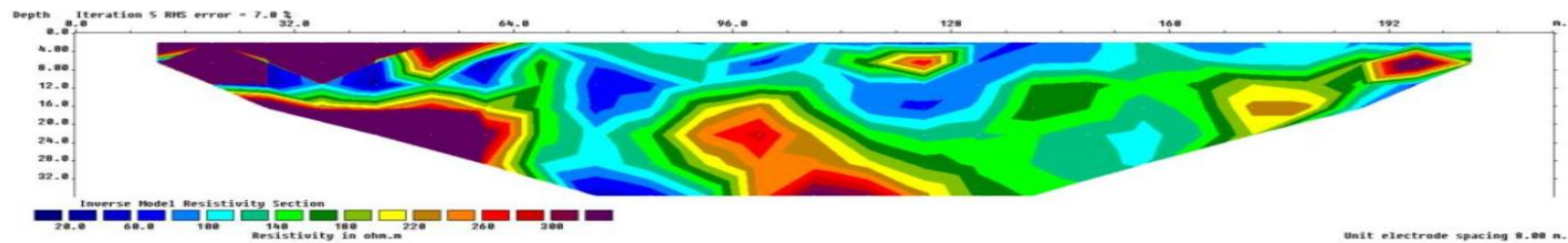
Το δεύτερο στρώμα ξεκινάει από τα 9 m φτάνοντας μέχρι τα 15 m. Χαρακτηρίζεται από ειδική ηλεκτρική αντίσταση που φτάνει μέχρι και τα 250 Ohm.

Το τρίτο και τελευταίο στρώμα ξεκινάει από τα 16 m βάθος. Οι αντιστάσεις είναι υψηλότερες, φτάνοντας μέχρι τα 380 Ohm.

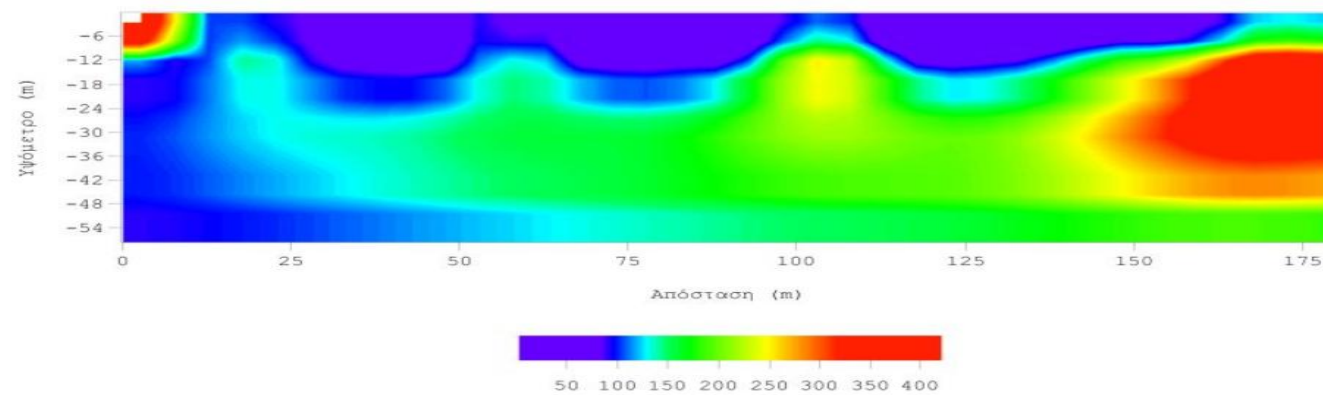
Περιορισμένη διείσδυση υφάλμυρου νερού σχετίζεται με την ζώνη χαμηλότερων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία εμφανίζεται και στις δύο τομές και αποδόθηκε σε ρηγματογενή ζώνη. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις τομές των γραμμών line4, line5 και line7 (Σχήματα 4.2 – 4.4).

Επίσης προκύπτει ότι η ηλεκτρική τομογραφία σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF έχει το πλεονέκτημα της καλύτερης ανάλυσης, αλλά στην συγκεκριμένη εφαρμογή παρουσιάζεται μικρότερο βάθος διασκόπησης σε σχέση με τη μέθοδο VLF η οποία συνήθως χρησιμοποιείται στον εντοπισμό ρηγμάτων γρήγορα και με μικρότερο κόστος.

Τα ρήγματα χαρακτηρίζονται από συγκέντρωση υγρασίας δηλαδή απεικονίζονται σαν ζώνες μειωμένης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, επομένως εντοπίζονται με σχετική ευκολία από την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF. Για τον ίδιο λόγο η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για να εντοπίζει περιοχές με υφαλμύριση στις οποίες εμφανίζονται γεωηλεκτρικά στρώματα πολύ χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πράγμα το οποίο δεν παρατηρήθηκε στην υπό μελέτη περιοχή και πιθανόν να οφείλεται σε μη περατούς σχηματισμούς που εμποδίζουν την εκτεταμένη διείσδυση του υφάλμυρου νερού.



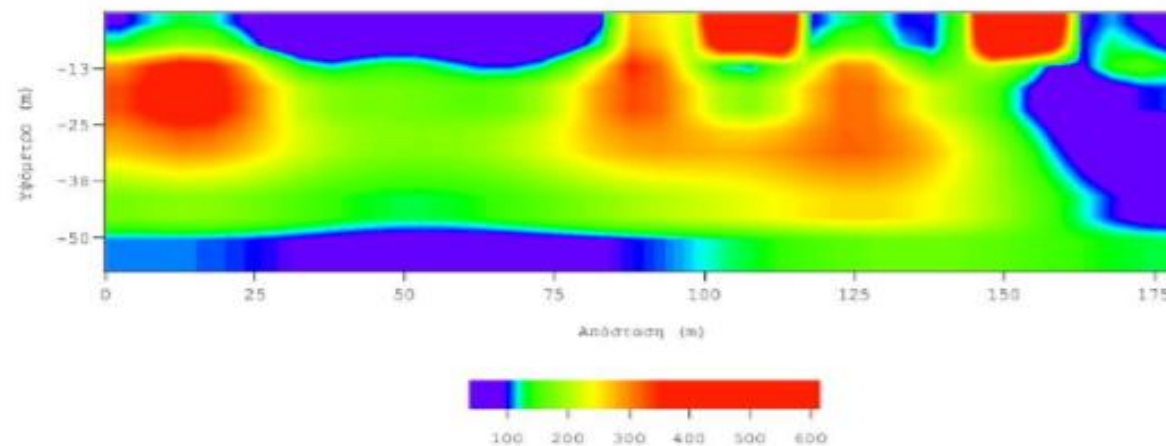
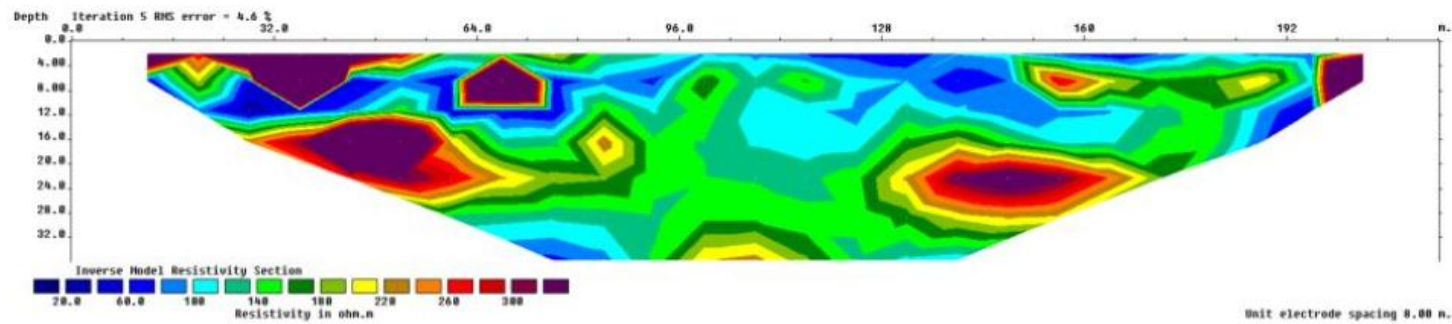
line3_2



S

N

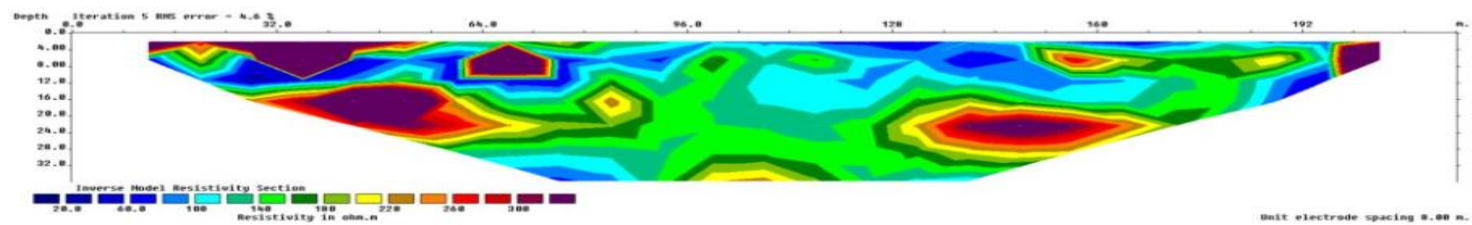
Σχήμα 4.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικής τομογραφίας (διάταξη gradient), και μεθόδου VLF της γραμμής μελέτης 2C GR (Line 3).



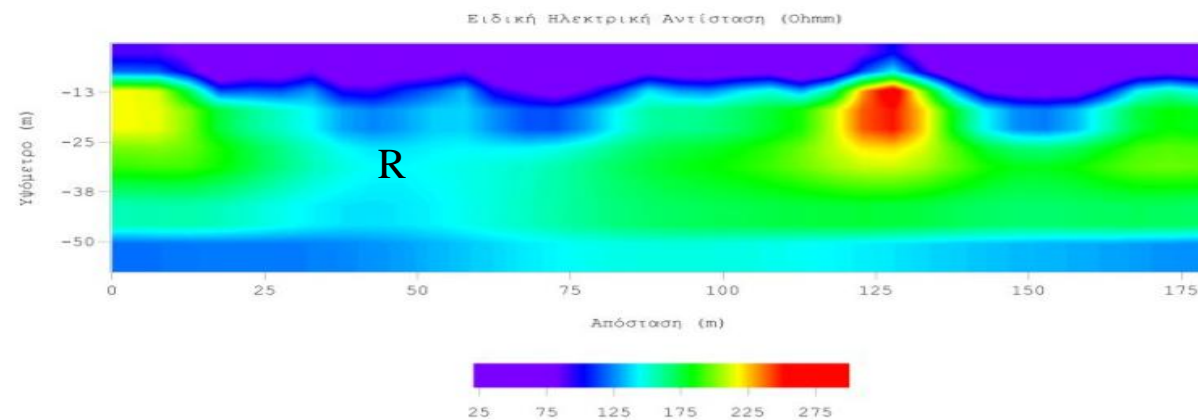
S

N

Σχήμα 4.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικής τομογραφίας (διάταξη gradient), και μεθόδου VLF της γραμμής μελέτης 2B GR (Line 4).



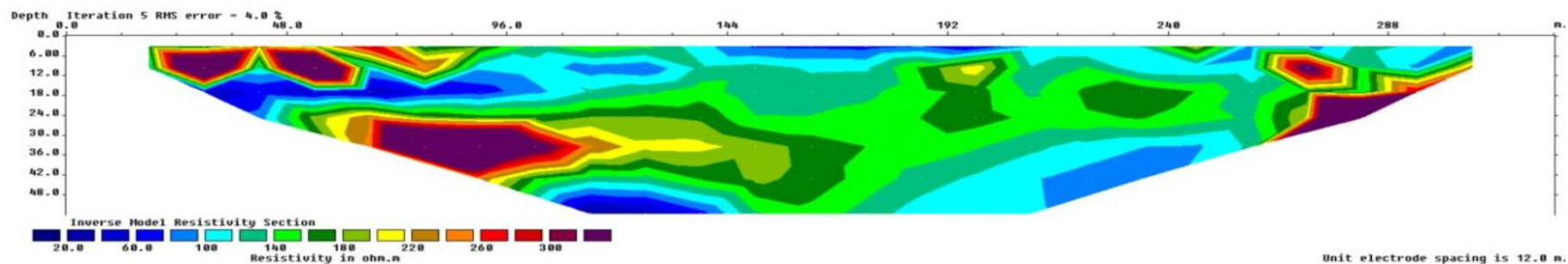
line5_2



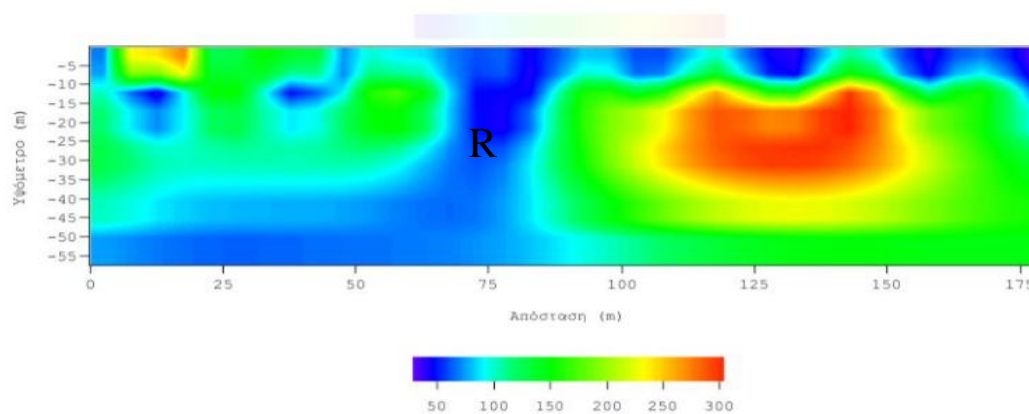
S

N

Σχήμα 4.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικής τομογραφίας (διάταξη gradient), και μεθόδου VLF της γραμμής μελέτης 2B GR (Line 5).



line7



S

N

Σχήμα 4.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικής τομογραφίας (διάταξη gradient) και μεθόδου VLF της γραμμής μελέτης 1 GR (Line 7).

4.2 Προσδιορισμός των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής των Φαλασάρνων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν και εξετάστηκαν δεδομένα από μετρήσεις στην περιοχή της παραλίας των Φαλασάρνων, από την ηλεκτρική τομογραφία και την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο VLF για την διερεύνηση του φαινομένου της υφαλμύρινσης.

Από την επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων αλλά και από την συνδυαστική αναπαράσταση και ερμηνεία των γεωφυσικών αποτελεσμάτων, έγινε προσπάθεια έτσι ώστε στη συγκεκριμένη περιοχή να προσδιοριστεί πόσο έχει εισχωρήσει το θαλασσινό νερό στον υπόγειο υδροφόρα.

Με βάση τους υπολογισμούς για την περιοχή της παραλίας καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το θαλασσινό νερό έχει εισχωρήσει ελάχιστα.

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες μας δίνουν καλύτερη ανάλυση σε σχέση με τα ηλεκτρομαγνητικά.

Στο ενδιάμεσο στρώμα όλων των εικόνων παρατηρείται συμφωνία. Το ενδιάμεσο στρώμα (2^ο στρώμα) με μικρότερες αντιστάσεις, αποδίδεται κυρίως σε κροκαλοπαγή κατακερματισμένα σύμφωνα με τις ενδείξεις της επιφανειακής γεωλογίας (κ. Μανούτσογλου) ή ύπαρξη ρηγματογενούς ζώνης. Κροκαλοπαγή με υψηλό πορώδες δεν εμφανίζουν πρόβλημα υφαλμύρινσης.

Ζώνη χαμηλότερων τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εμφανίζεται σε όλες τις VLF γεωηλεκτρικές τομές σε βάθος μεγαλύτερο από 50 m.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα γεωφυσικής διασκόπησης στην περιοχή Φαλάσαρνα του νομού Χανίων, με σκοπό την ανίχνευση και τον εντοπισμό τόσο της ύπαρξης υφάλμυρου νερού, όσο και τον εντοπισμό ρηγμάτων στην συγκεκριμένη περιοχή. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή των Φαλασάρνων και έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, είναι οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τα κροκαλοπαγή και οι αμμώδεις σχηματισμοί, οι οποίοι είναι σχηματισμοί που θεωρούνται υδροπερατοί.

Πιο συγκεκριμένα από τις μεθόδους τόσο της ηλεκτρικής τομογραφίας όσο και της μεθόδου VLF καθορίστηκε ο αριθμός και το πάχος των στρωμάτων για την περιοχή. Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία και με την σύγκριση των αποτελεσμάτων τους που έγινε στη συνέχεια, προσδιόρισαν την θέση πιθανών ρηγμάτων, καθώς και το ενδεχόμενο διείσδυσης υφάλμυρου νερού.

Ο εντοπισμός τόσο του υφάλμυρου νερού, όσο και των ρηγμάτων στις εικόνες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, διερευνήθηκε για τις θέσεις όπου οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας, καθώς και η μέθοδος VLF είναι της τάξεως από 20 μέχρι και 140 Ohm μέχρι και το βάθος των 40 με 50 m. Οι γραμμές μελέτης που παρουσιάστηκαν και εξετάστηκαν για την ύπαρξη υφαλμύρινσης και ρηγμάτων είναι οι 3, 4, 5 και 7. Οι συγκεκριμένες γεωηλεκτρικές τομές δεν εμφανίζουν μικρές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κάτι το οποίο δείχνει ότι στην περιοχή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι περιορισμένης έκτασης.

5.2 Προτάσεις

Με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας, αλλά και λόγω της πολυπλοκότητας της περιοχής των Φαλασάρνων, προτείνεται

- Γεωφυσική έρευνα με τη χρήση μεθόδων βάθους διασκόπησης μεγαλύτερου των 100 m.
- Πραγματοποίηση νέας εργασίας με τη μέθοδο VLF με περισσότερες γραμμές, αλλά και μεγαλύτερες των 180 m.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ *Ελληνική Βιβλιογραφία*

- Βαφείδης, Α., και Αμολοχίτης, Γ., (1995). Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων του μαθήματος “ Εφαρμοσμένη Γεωφυσική ΙΙ”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Βαφείδης Α., 1993, “ Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Γ’ Σεισμικές Μέθοδοι, Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Μιχαλάκης Ι., 2007, “Συμβολή της Ηλεκτρικής Τομογραφίας στην Παρακολούθηση της Υφαλμύρισης Πριν, Κατά την Διάρκεια και Μετά τη Δοκιμή Άντλησης στον Οικισμό Φαράγγι Αποκορώνου”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Δεκέμβρης, Χανιά.
- Μουντράκης, Δ.Μ., (1985), “Γεωλογία της Ελλάδας”,Θεσσαλονίκη.
- Κορνελάκης Γεώργιος, 2013, “Παρουσίαση και Ερμηνεία Γεωφυσικών Δεδομένων με τη χρήση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) από τη Περιοχή Φαλασσάρνων, Ν. Χανίων”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Χανιά.
- Κουφόπουλος Γιάννης, 2012, “Συμβολή των Γεωφυσικών Μεθόδων στην Επίλυση Γεωτεχνικών Προβλημάτων. Παραδείγματα από την ανατολική Κρήτη”., Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Στρατής Παρασκευάς, 2017, “Υψηλής Τάξης Προσεγγίσεις και Στοχαστική Βελτιστοποίηση για Μοντέλα Υφαλμύρισης Υπόγειων Υδροφορέων”., Διδακτορική ΕΣεργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Εφαρμοσμένα Μαθηματικά στις Επιστήμες Μηχανικών, Χανιά.
- Σκορδυλάκης Νίκος, 2016, “Συμβολή της Γεωηλεκτρικής Τομογραφίας στην Παρακολούθηση της Υφαλμύρωσης στα Φαλάσαρνα”., Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Χανιά.
- Παπά Αλεξάνδρα, 2016, “Το Φαινόμενο της Υφαλμύρισης και η Αντιμετώπιση του. Περιπτώσεις Υφαλμύρισης Παράκτιων υδροφορέων στην Ελλάδα ”.
- Πλιάμπας Γεώργιος, 2014, “Γεωφυσική Διασκόπηση στα Φαλάσαρνα με την Μέθοδο της Τρισδιάστατης Ηλεκτρικής Τομογραφίας”., Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο

Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

- Λούης Φ. Ιωάννης, 2008, Σύγχρονες Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Γεωφυσικής, Τομέας Γεωφυσικής - Γεωθερμίας, Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Κρητικάκης Γ., Βαφείδης Α., Gourry J., (2003), “Ανάλυση των Επιφανειακών Κυμάτων Rayleigh και Εφαρμογή σε Χώρο Απόθεσης Απορριμμάτων στη Β.Ιταλία και στην Βιομηχανική Περιοχή Porto Petroli”, Genova.
- Σούλιος Γ., 1996 Γενική Υδρογεωλογία, Α Τόμος, University Studios Press, Θεσσαλονίκη.
- Ι.Γ.Μ.Ε. “Φύλλο Καστέλι” (Κλίμακα 1:50000).
- [www.thalassa-apt.gr/Prospectus/Χανιώτικα Νέα](http://www.thalassa-apt.gr/Prospectus/Χανιώτικα%20Νέα).

➤ *Διεθνής Βιβλιογραφία*

- **ABEM Interpretation Guide., 1989.** ABEM WADI VLF INSTRUMENT., Theory, practice and case stories for WADI operators, Bromma, Sweden.
- Arcone, S.A., 1978. Investigation of a VLF airborne resistivity survey conducted in northern Maine. Geophysics 43, 1399 – 1417.
- Aster, R.C., Borchers, B., Thurber, C., 2005. Parameter Estimation and Inverse Problems. Elsevier Academic Press.
- Baba, K., Chave, A.D., 2005. Correction of seafloor magnetotelluric data for topographic effects during inversion. Journal of Geophysical Research 110, B12105.
- Baker, H.A., Myyrs. J.O., 1980. A topographic correction for VLF – EM profiles based on model studies. Geoexploration 18, 135 – 144.
- Börne, R.-U., Ernst, O.G., Spitzer, K., 2008. Fast 3D simulation of transient electromagnetic fields by model reduction in the frequency domain using Krylov subspace projection. Geophysical Journal International 173, 766-780.
- Baranwal V.C., 2007. Integrated interpretation of VLF data with other geophysical data and study of two – dimensional VLF modeling and inversion. Ph.D. Thesis, Dept. Of Geology and Geophysics, IIT Kharagpur, India.

- Baranwal V., Franke A., Börne R – U., Spitzer K., 2009. Unstructured grid based 2-D inversion of VLF data for models including topography, Germany.
- Baranwal V.C., Sharma, S.P., 2006, Integrated geophysical studies in the East Indian geothermal province. *Pure and Applied Geophysics* 163, 209-227.
- Corriols M., Dahlin T., (2009). «Geophysical characterization of the Leon Chinandega aquifer», *Hydrogeology Journal*, Vol.6, p.28, Managua, Nicaragua.
- Chouteau, M., Bouchard, K., 1988. Two – dimensional terrain correction magnetotelluric surveys. *Geophysics* 53,854 – 862.
- Coggon, J.H., 1971. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics* 36, 132 – 155.
- Drahor, M.G., 2006. Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey. *Journal of Applied Geophysics* 59. 205 – 223.
- Fraquharson, C.G., Oldenburg, D.W., 2004. A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non – linear inverse problems. *Geophysical Journal International* 156, 411 – 425.
- Fischer, G.A., 1989. A strong topographic valley effect in AMT and VLF – R measurements. *Geophysical Journal International* 96, 469 – 475.
- Franke, A., Börne, R. – U., Spitzer, K., 2004. 2D finite element modelling of plane – wave diffusive time – harmonic electromagnetic fields using adaptive unstructured grids. Extended abstract, 17th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Hyderabad, India, pp. 1 – 6 [www-documenthttp://www.emindia2004.org](http://www.emindia2004.org). S.2-O.01.
- Franke, A., Börne, R. – U., Spitzer, K., 2007. Adaptive unstructured grid finite element simulation of two – dimensional magnetotelluric fields for arbitrary surface and seafloor topography. *Geophysical Journal International* 171, 71-86.
- Guenther, T., Ruecker, C., Spitzer, K., 2006. Three - dimensional modeling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II. Inversion. *Geophysical Journal International* 166, 506 – 517.
- Paal, G., 1968. Very low frequency measurements in northern Sweden. *Geoexploration* 6, 141 – 149.
- Meju, M.A., 1994, *Geophysical data analysis: understanding inverse problem theory and practice*, Vol. 6. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

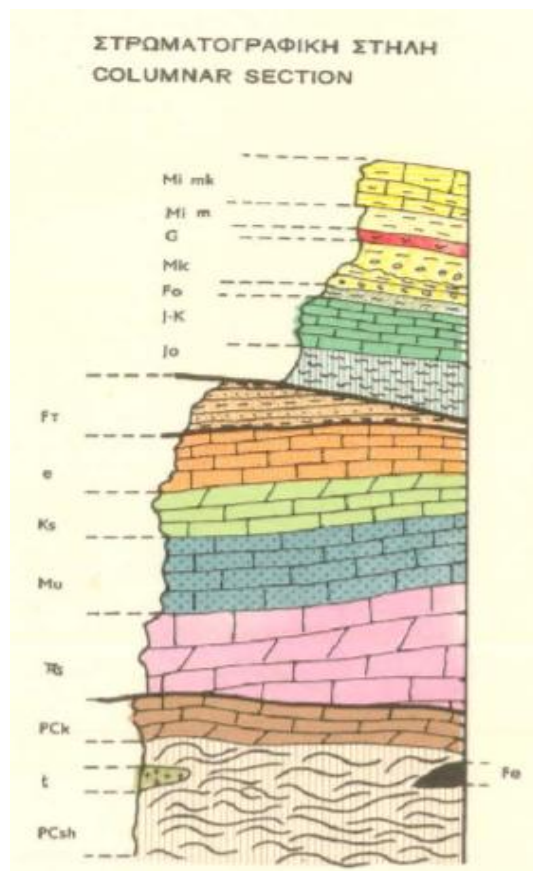
- Menke, W., 1989. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press Inc., San Diego, California.
- Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Figueiras, J., Goncalves, M.A., 2006. Mapping groundwater contamination around a landfill facility using the VLF – EM method – a case study. Journal of Applied Geophysics 60, 115 – 125.
- Pedersen, L.B., Oskooi, B., 2004. Airborne VLF measurements and variations of ground conductivity: a tutorial. Surveys in Geophysics 25, 151 – 181.
- Karous, M.R., 1979. Effects of relief in EM methods with very distant source. Geoexploration 17, 33 – 42.
- Key, K., Weiss, C., 2006. Adaptive finite – element modeling using unstructured grids: the 2D magnetotelluric example. Geophysics 71, g 291 – g299.
- Liu, G., Becker, A., 1992. Evaluation of terrain in AEM surveys using the effects boundary element method. Geophysics 57, 272 – 278.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least – squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi – Newton method. Geophysical Prospecting 44, 131 – 152.
- Sharma, S.P. Baranwal, V.C., 2005. Delineation of groundwater bearing fracture zones in a hard rock area integrating very low frequency electromagnetic and resistivity data. Journal of Applied Geophysics 57, 155 – 166.
- Wannamaker, P.E., Stodt, J.A., Rijo, L., 1986. Two – dimensional topographic responses in magnetotellurics modeled using finite elements. Geophysics 51, 2131 – 2144.
- Paillet F. L., (1999). «Integrating surface and borehole geophysics in the characterization of salinity in a coastal aquifer», Society of Exploration, Geophysics.
- **Res2dinv, (2001).** Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Manual, Version 3.4, Geotomo Software.
- **Res2dinv, 2D Resistivity and IP Inversion, (1995-2001)** Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού, Geotomo Software, Malaysia.

➤ Διαδίκτυο

- www.haniotika-nea.gr

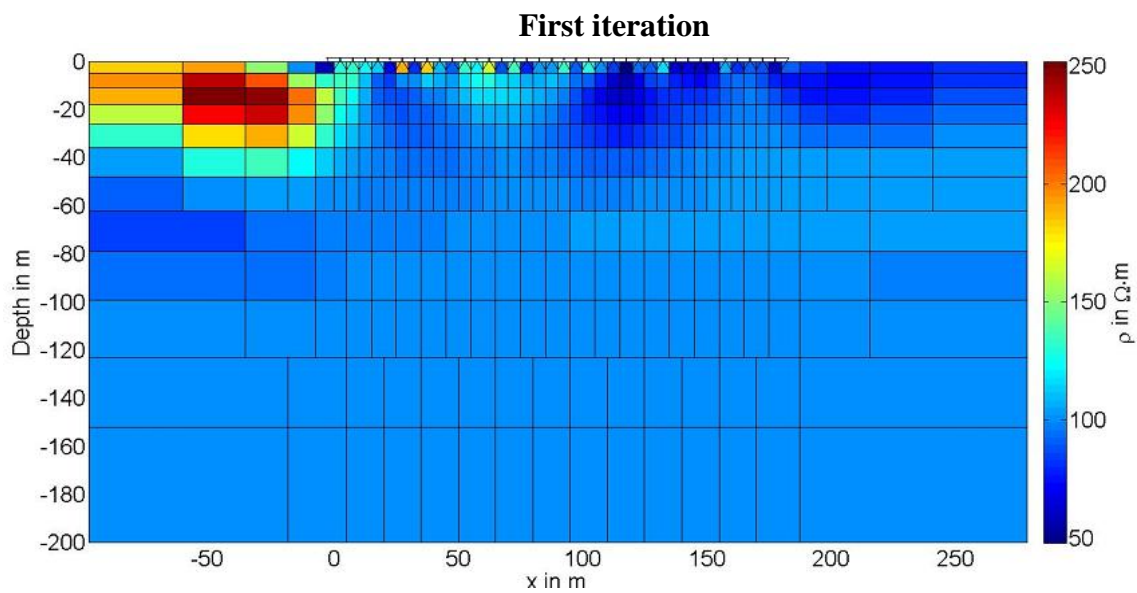
- www.lenntech.com
- www.wikipedia.com/karst
- www.google-earth.com
- www.explorecrete.com
- www.thalassa.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

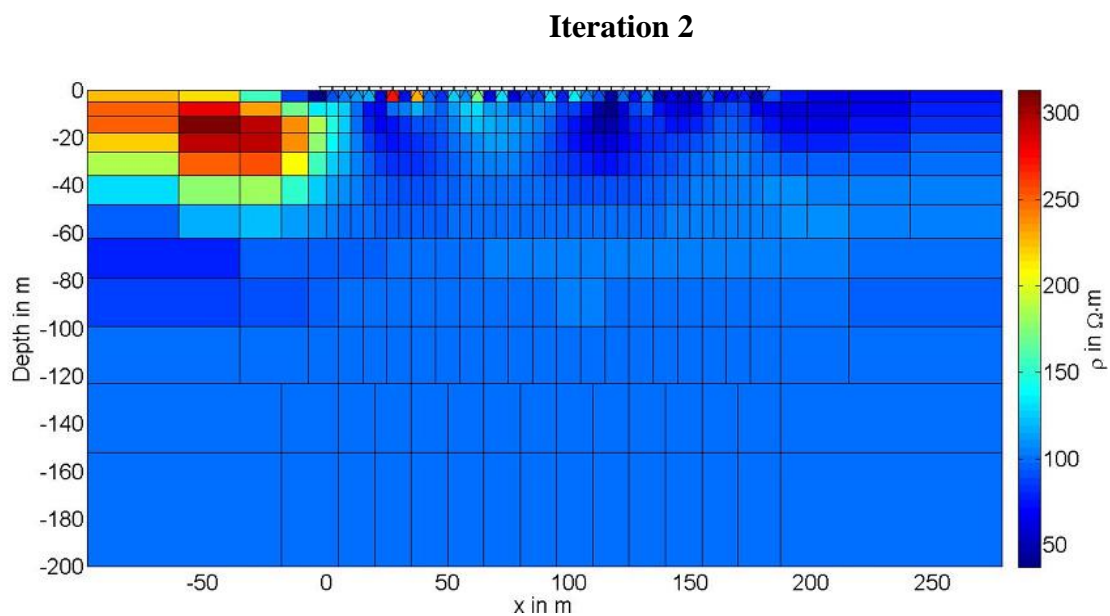


Σχήμα Α 2 : Στρωματογραφική στήλη από το γεωλογικό φύλλο χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β
ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΙ Η MATLAB ΣΕ ΚΑΘΕ
ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

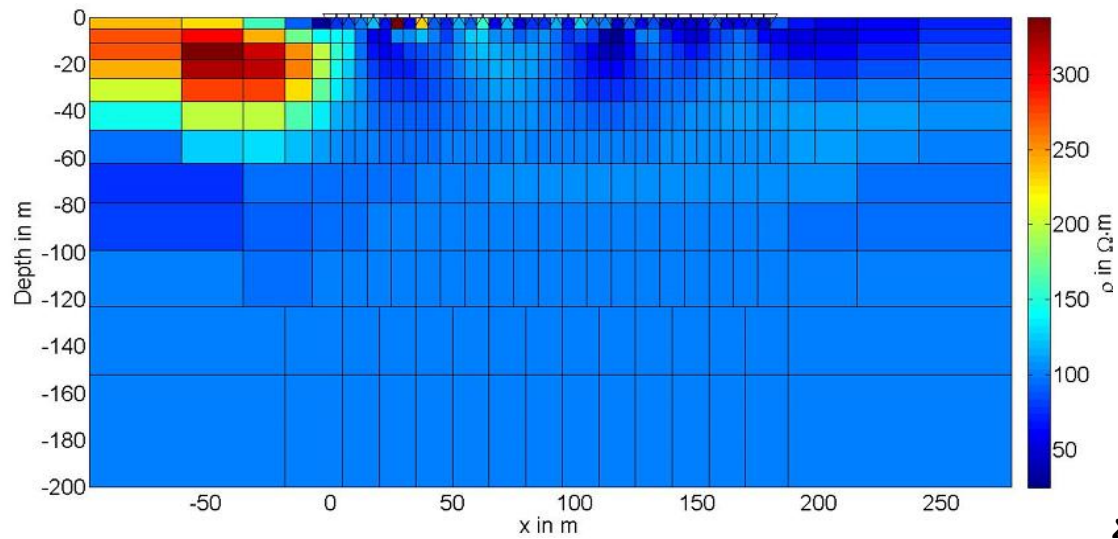


Σχήμα Β 1: *Πρώτη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.*



Σχήμα Β 2: *Δεύτερη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.*

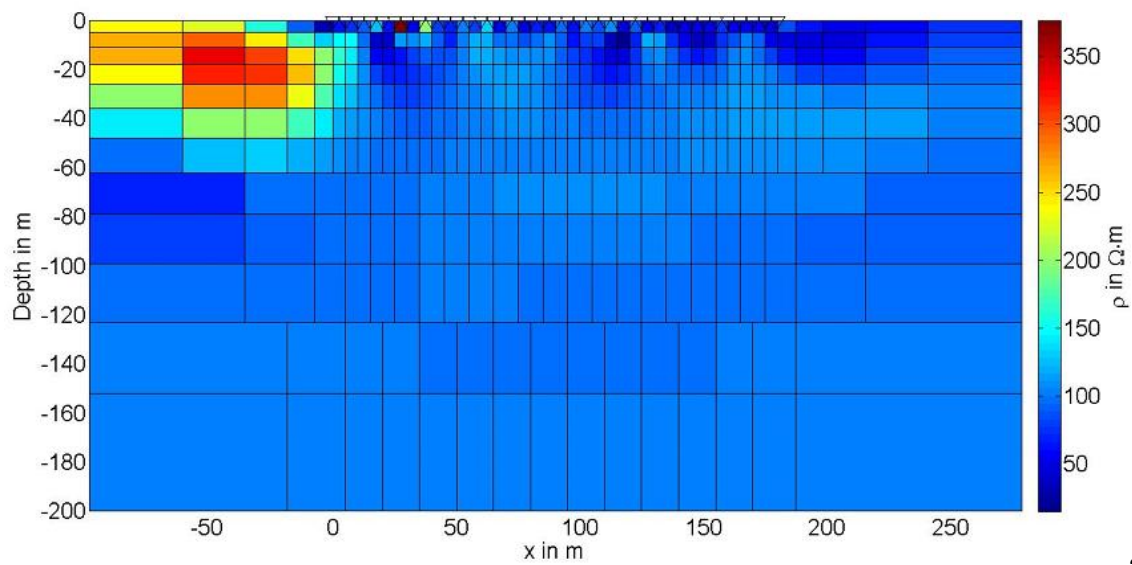
Iteration 3



Σχήμα Β 3:

Τρίτη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.

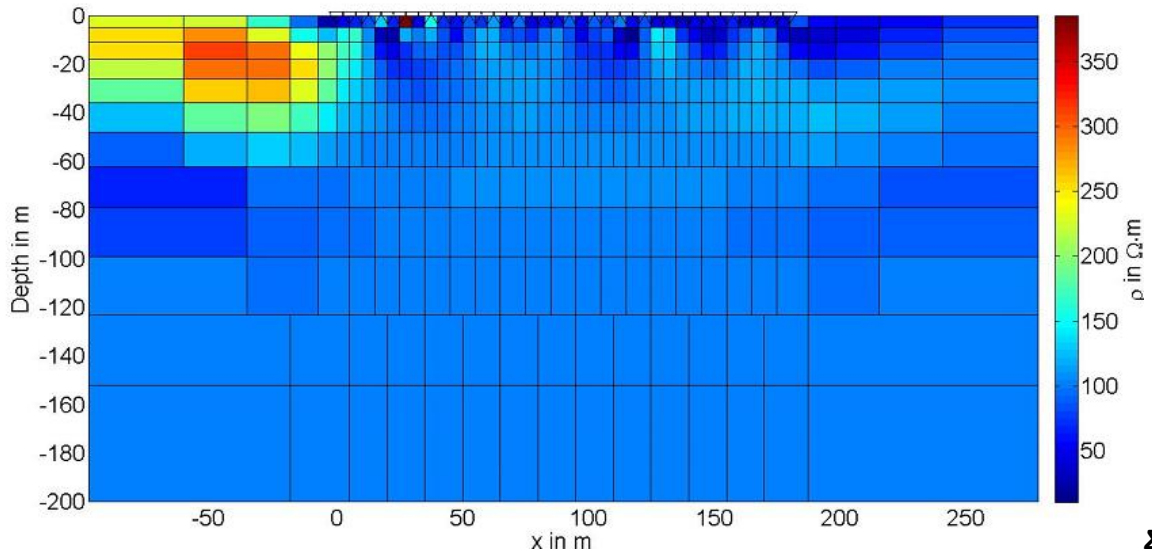
Iteration 4



Σχήμα Β

4: Τέταρτη επανάληψη γραμμής (line5) στη matlab.

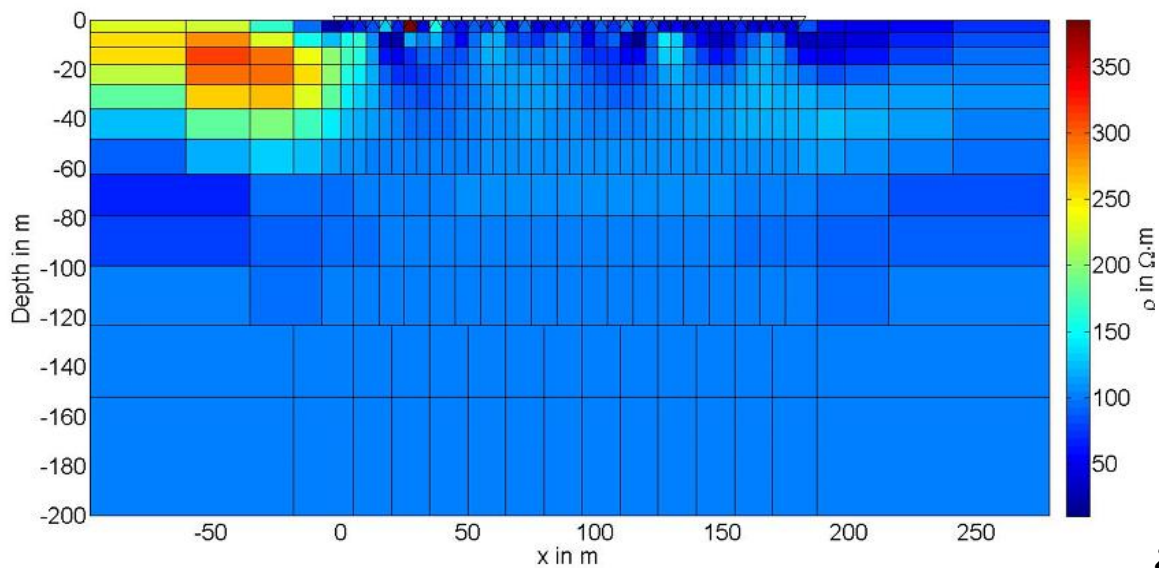
Iteration 5



Σχήμα

B 5: Πέμπτη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.

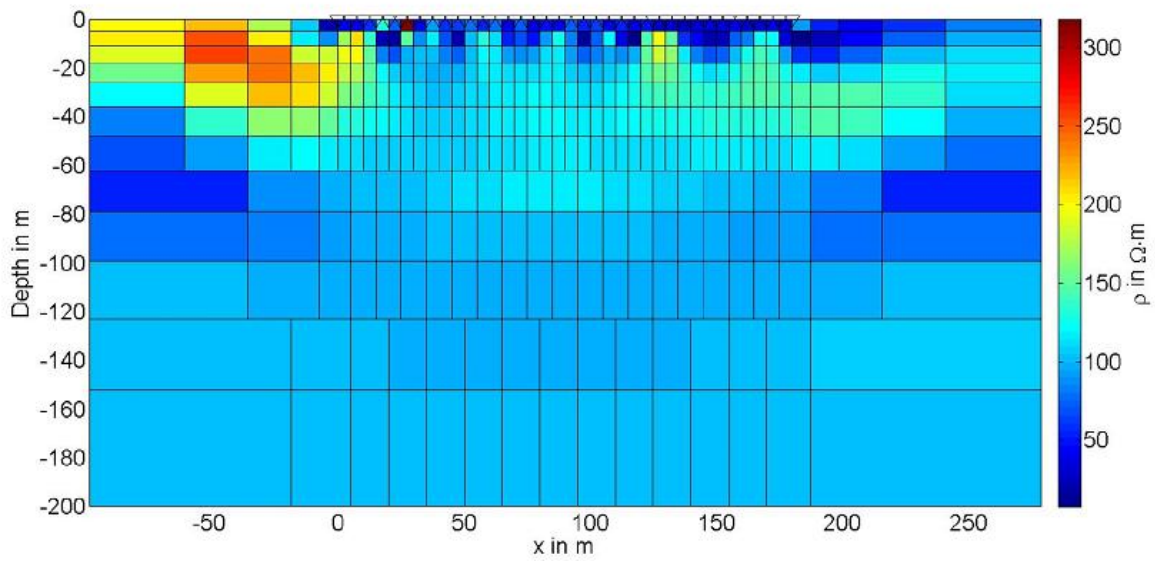
Iteration 6



Σχήμα

B 6: Έκτη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.

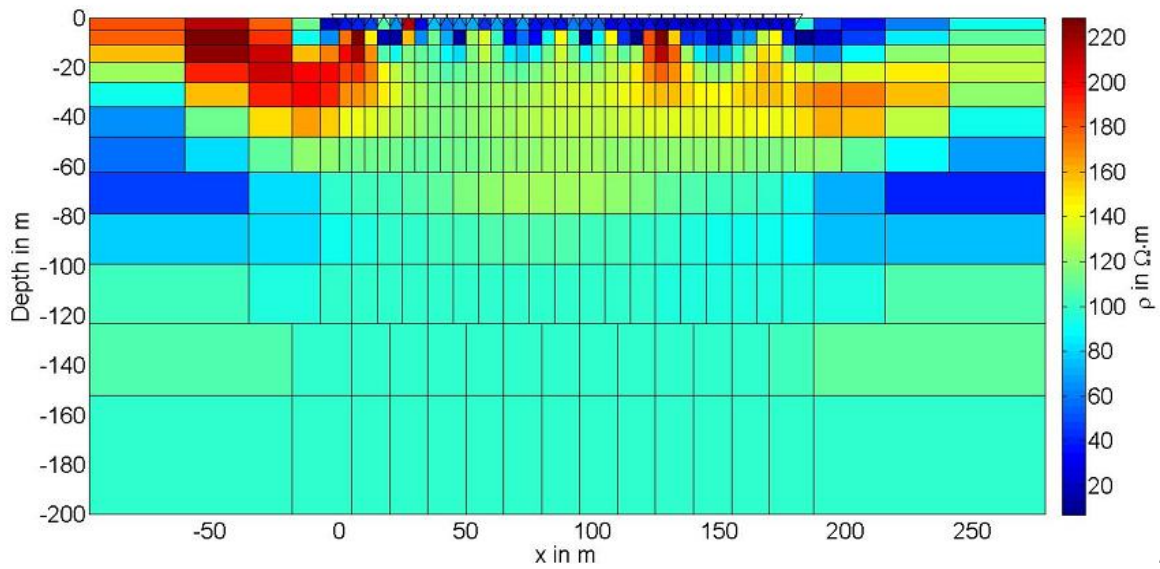
Iteration 7



Σχήμα

α Β 7: Έβδομη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.

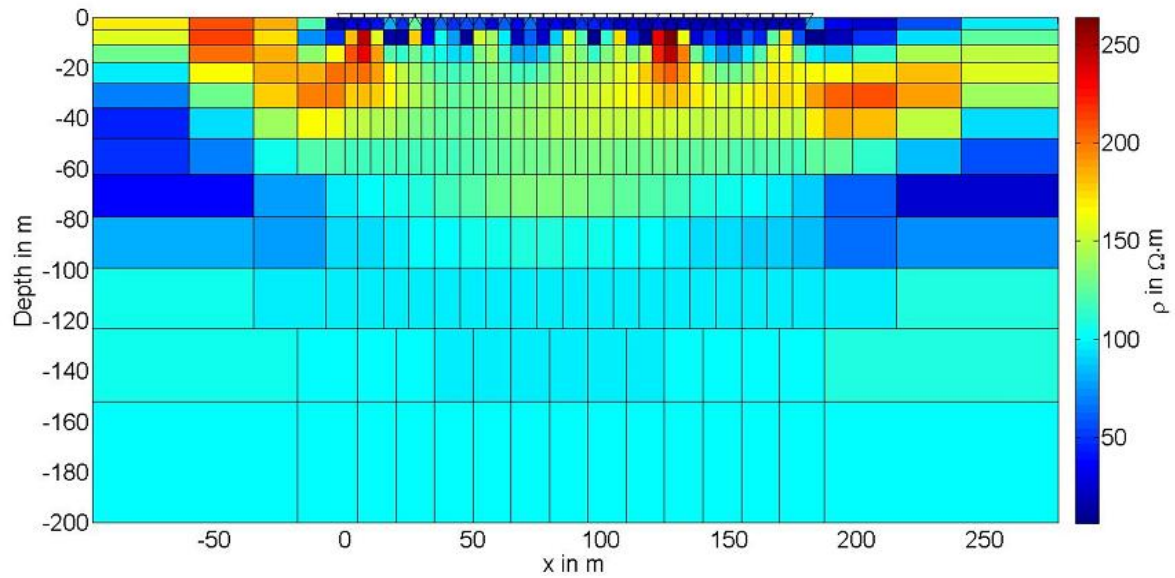
Iteration 8



Σχήμα

Β 8: Όγδοη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.

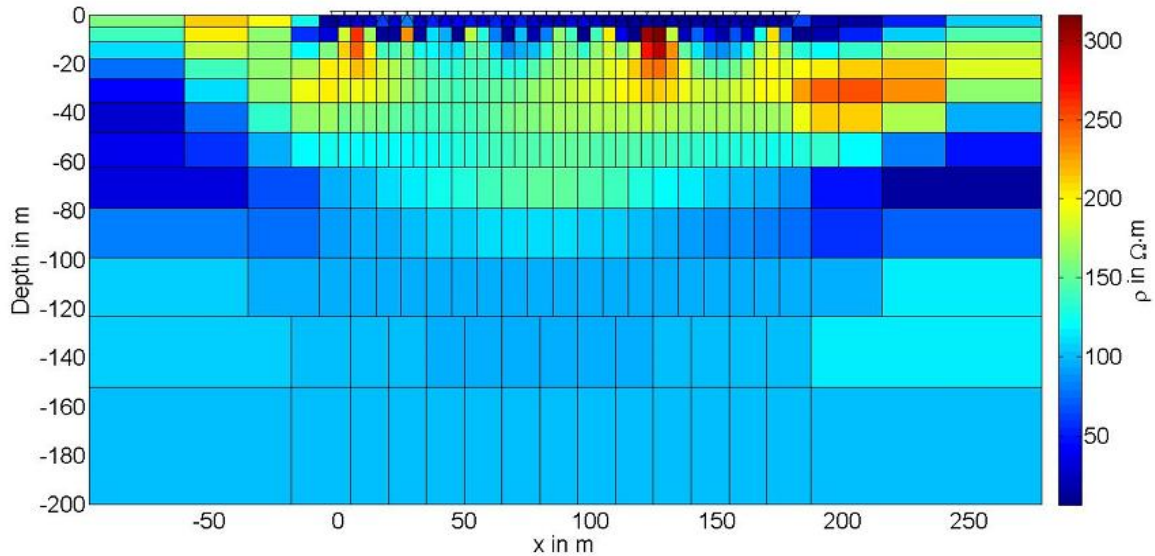
Iteration 9



Σχήμα

α Β 9: Ένατη επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab.

Iteration 10

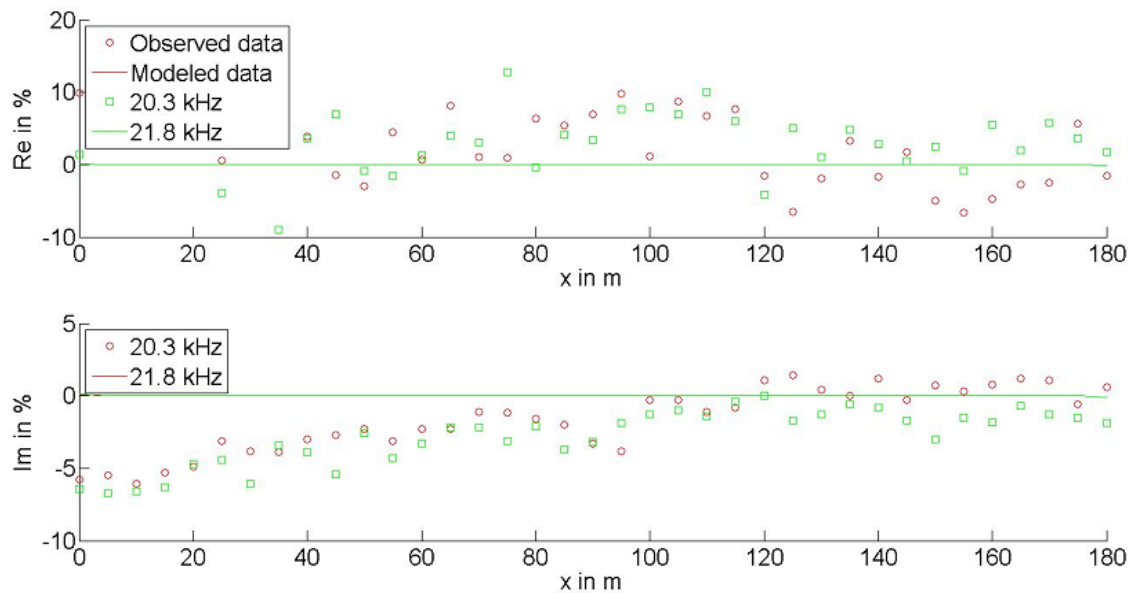


Σχήμα

Β 10: Δέκατη (τελευταία) επανάληψη γραμμής (line 5) στη matlab και εμφάνισι του τελικού μοντέλου.

Τα επόμενα διαγράμματα είναι τα πραγματικά και φανταστικά μέρη για κάθε επανάληψη που γίνεται στην matlab για δύο συχνότητες των 20,3 kHz και 21,8 kHz με κόκκινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα.

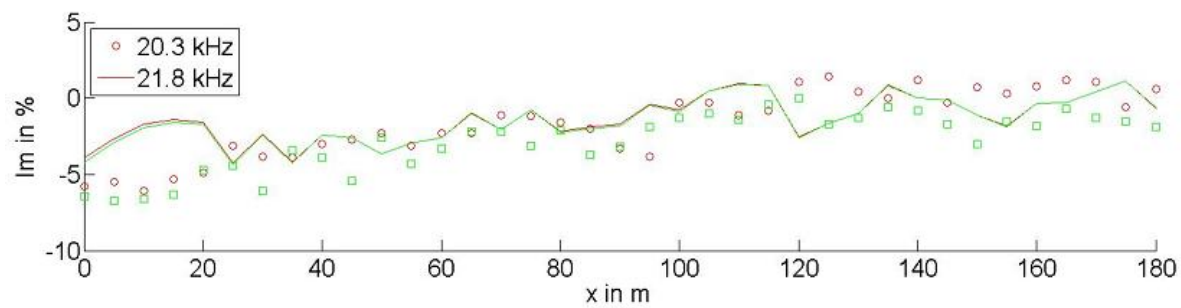
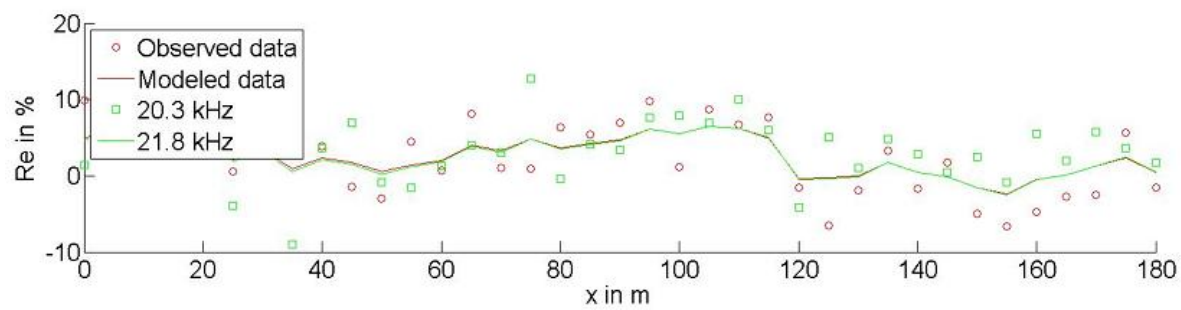
Real, Imaginary 1



Σχήμα Β

11: Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

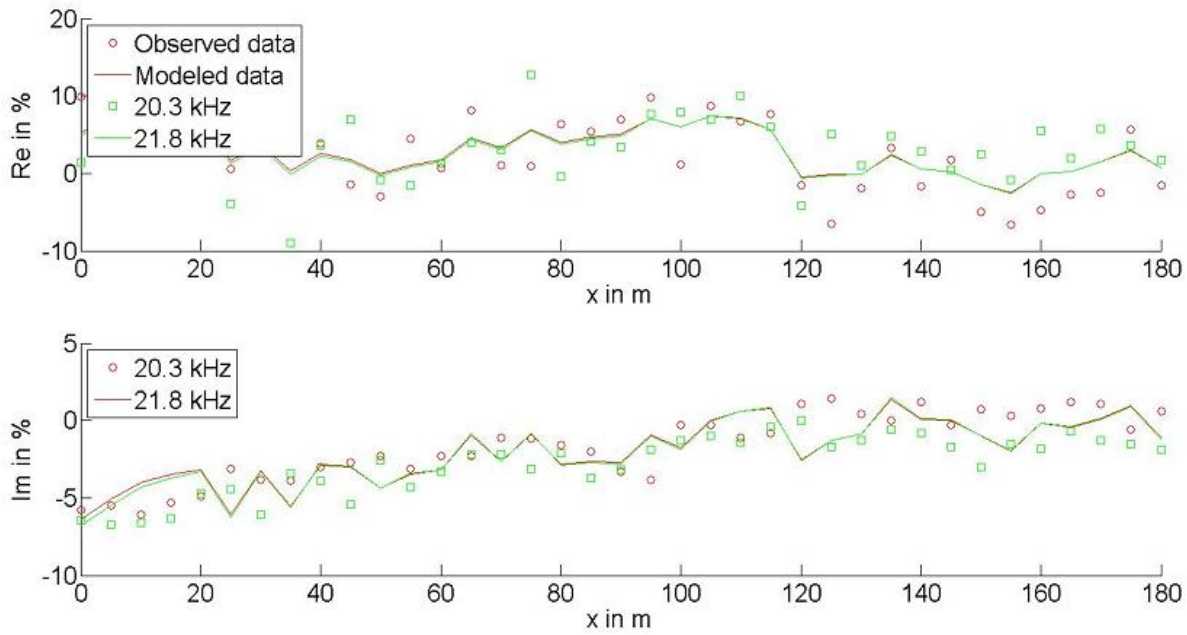
Real, Imaginary 2



Σχήμ

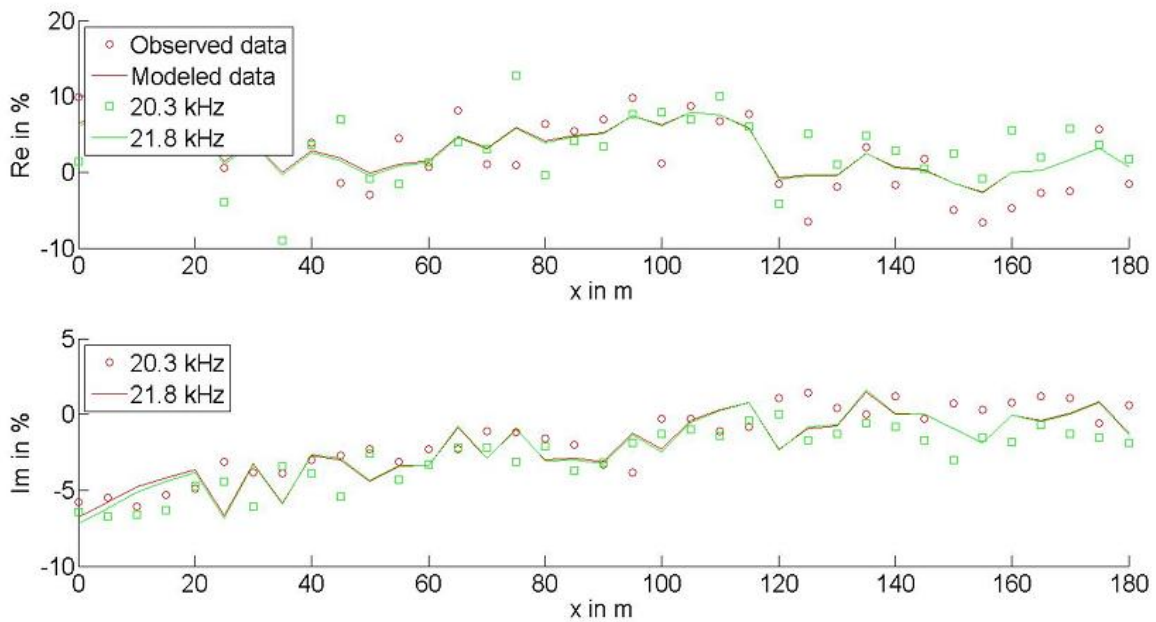
α Β 12 : Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

Real, Imaginary 3



Σχήμα Β 13: Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

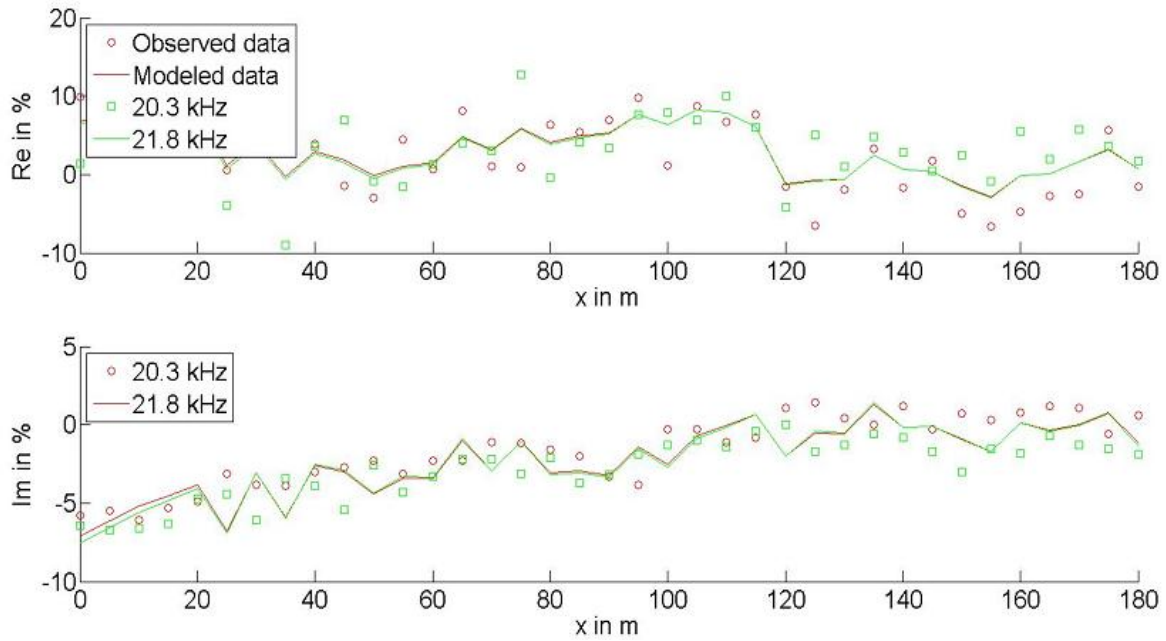
Real, Imaginary 4



Σχήμ

α Β 14: Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

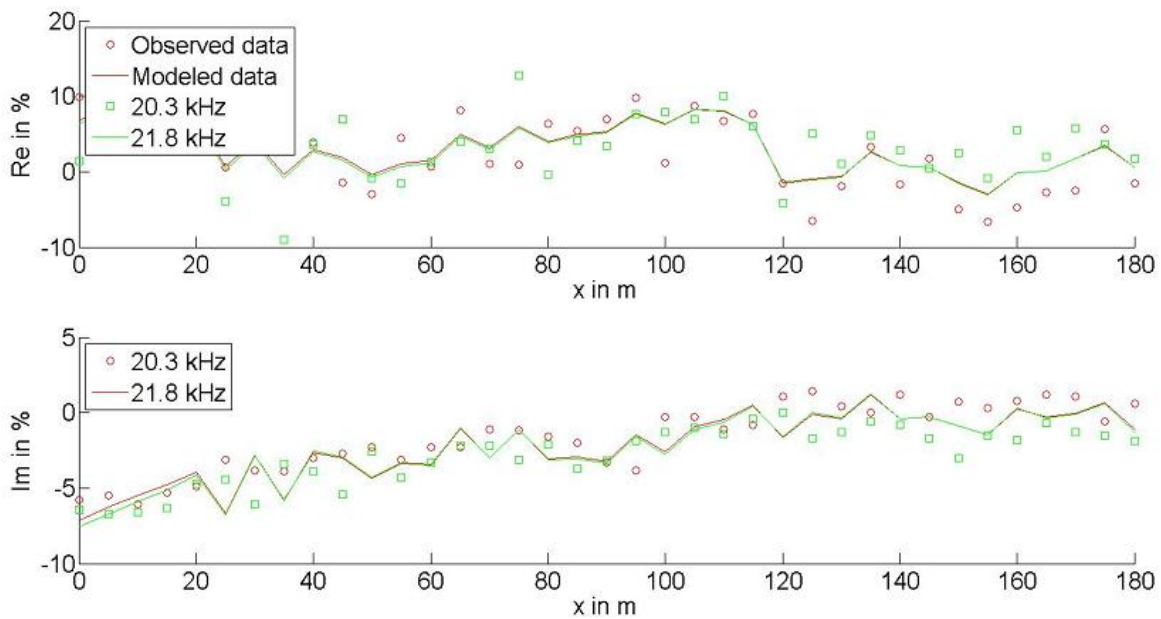
Real, Imaginary 5



Σχήμ

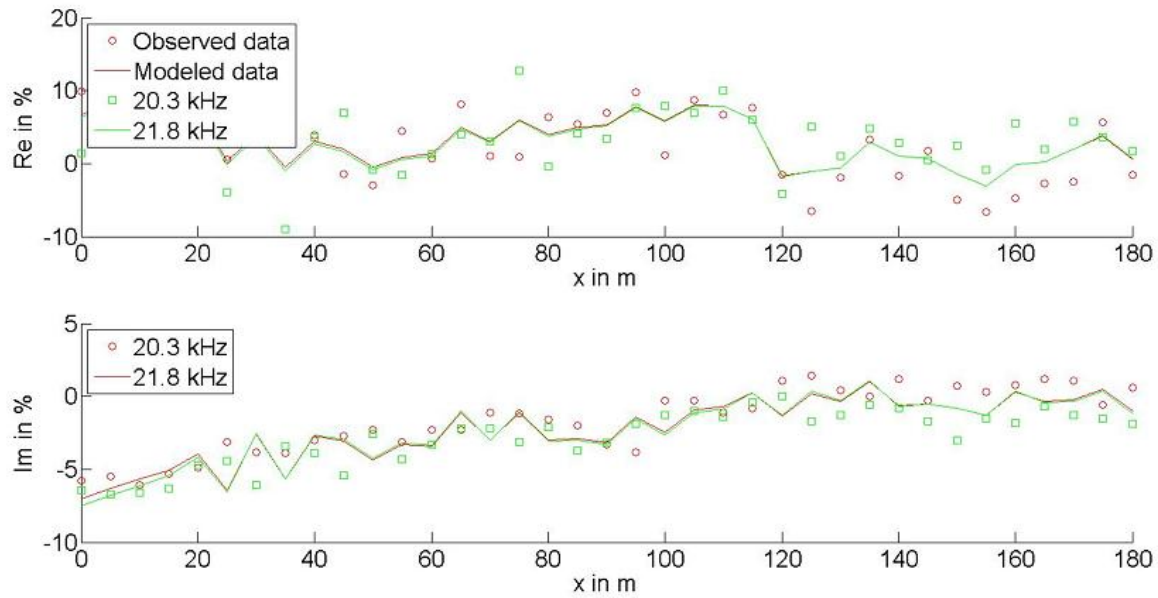
α Β 15: Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

Real, Imaginary 6



Σχήμα Β 16: Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

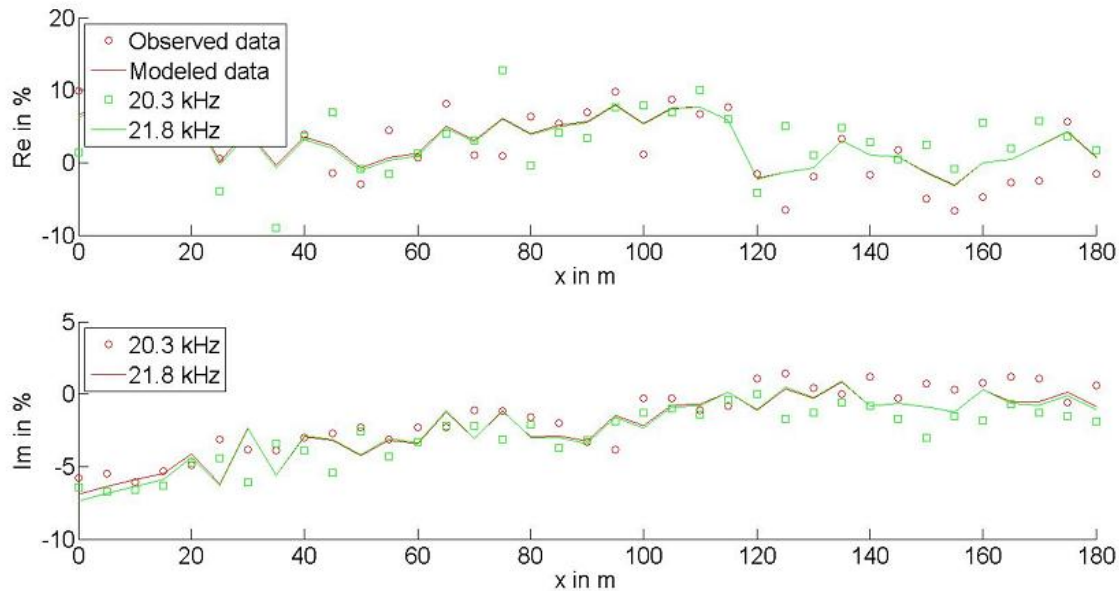
Real, Imaginary 7



Σχήμα Β 17: Πραγματικό και φανταστικό μέρος πριν την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

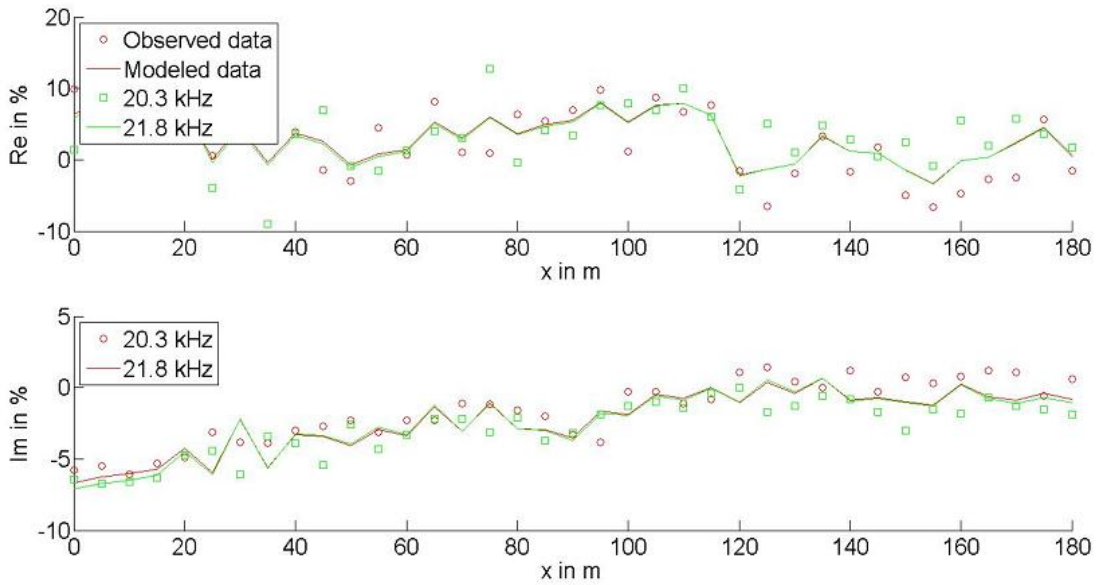
Τα διαγράμματα με τα πραγματικά και φανταστικά μέρη που παραθέτονται παρακάτω, είναι για κάθε επανάληψη που γίνεται στην matlab από την δημιουργία του «script» plotconstr.m, για δύο συχνότητες των 20,3 kHz και 21,8 kHz με κόκκινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα.

Real, Imaginary 1



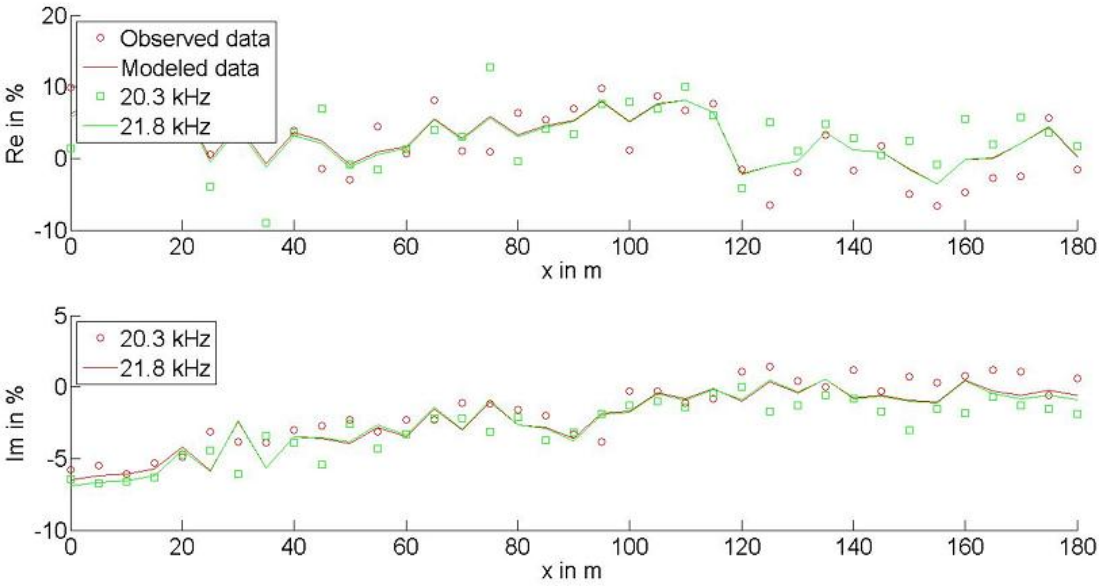
Σχήμα Β 18: Πραγματικό και φανταστικό μέρος μετά την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

Real, Imaginary 2



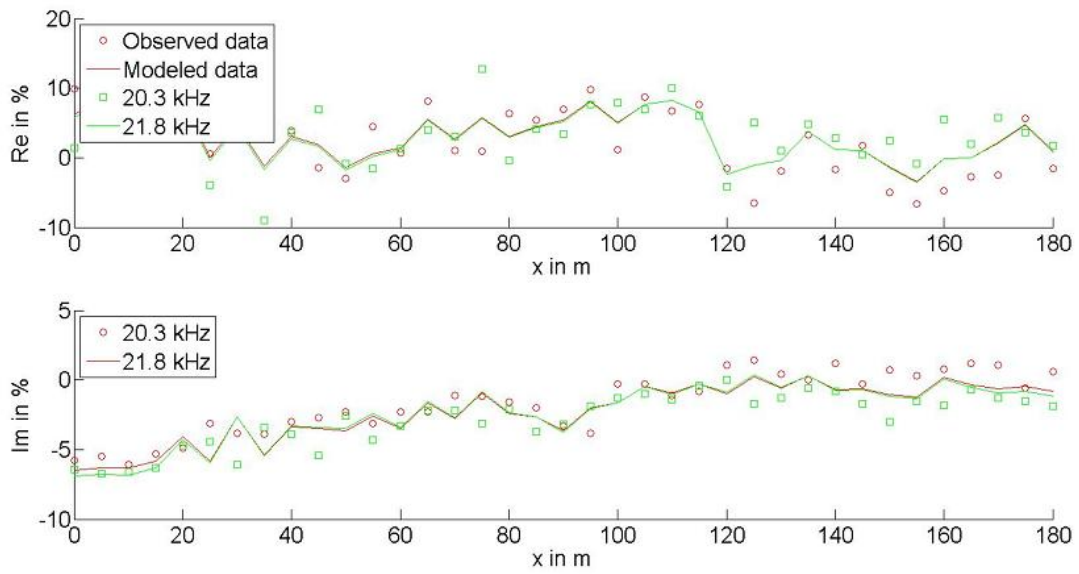
Σχήμα Β 19: Πραγματικό και φανταστικό μέρος μετά την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

Real, Imaginary 3



Σχήμα Β 20: Πραγματικό και φανταστικό μέρος μετά την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

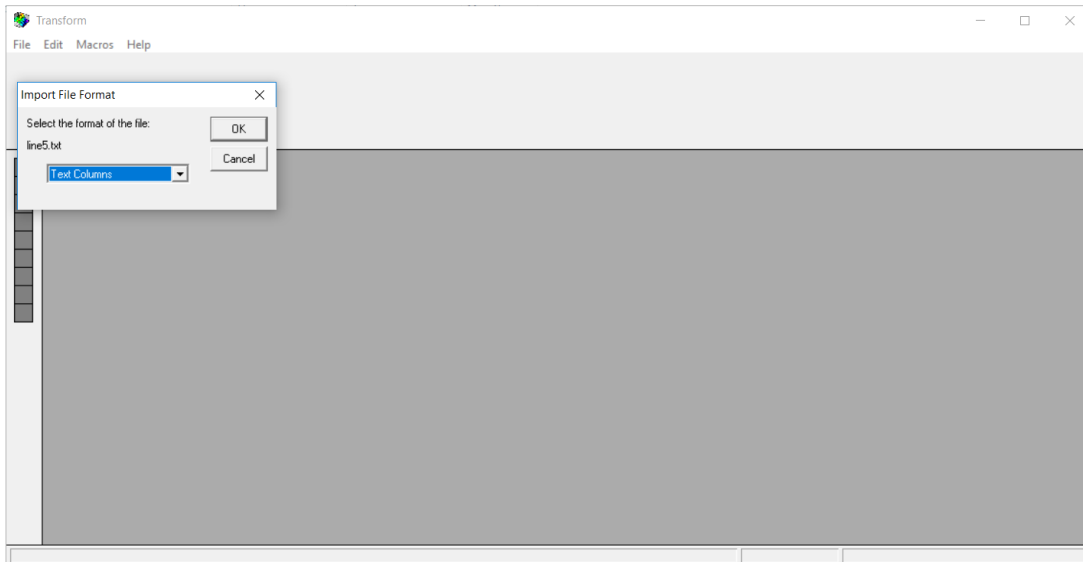
Real, Imaginary 4



Σχήμα Β 21: Πραγματικό και φανταστικό μέρος μετά την αντιστροφή για την γραμμή (line 5).

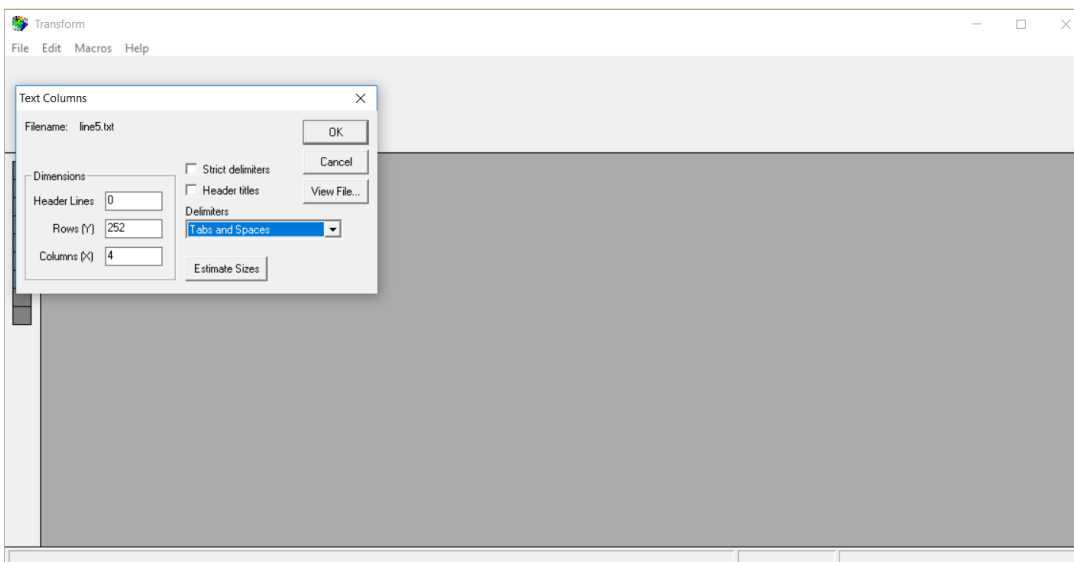
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ
ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ TRANSFORM3

Πρόγραμμα TRANSFORM3 → File → Open → Text Column → OK, Εισαγωγή δεδομένων γραμμών μελέτης.



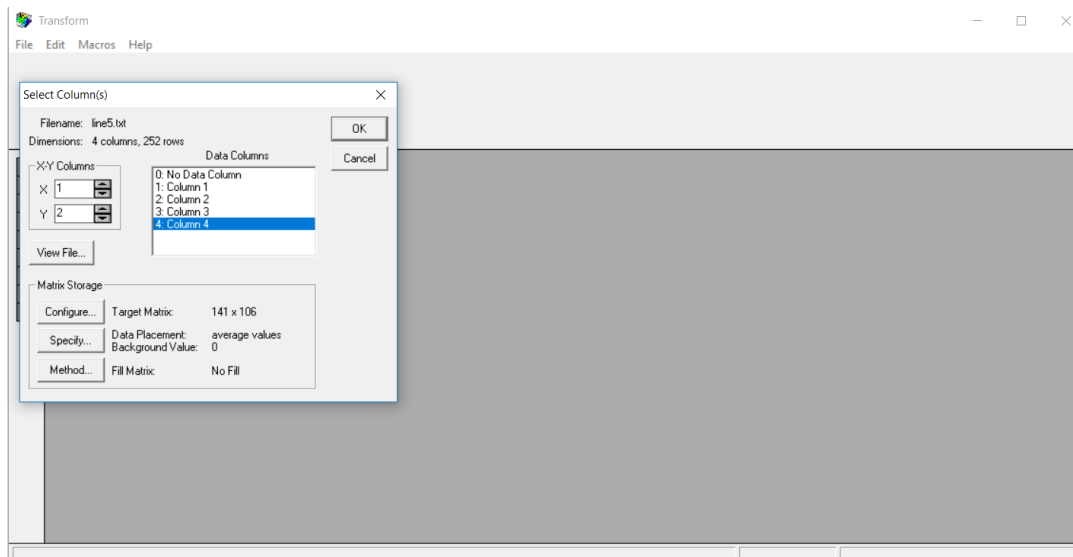
Σχήμα Γ 1: Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα TRANSFORM3, για την γραμμή (line 5), αρχικό βήμα.

Συνεχίζουμε το πρόγραμμα πατώντας → OK.



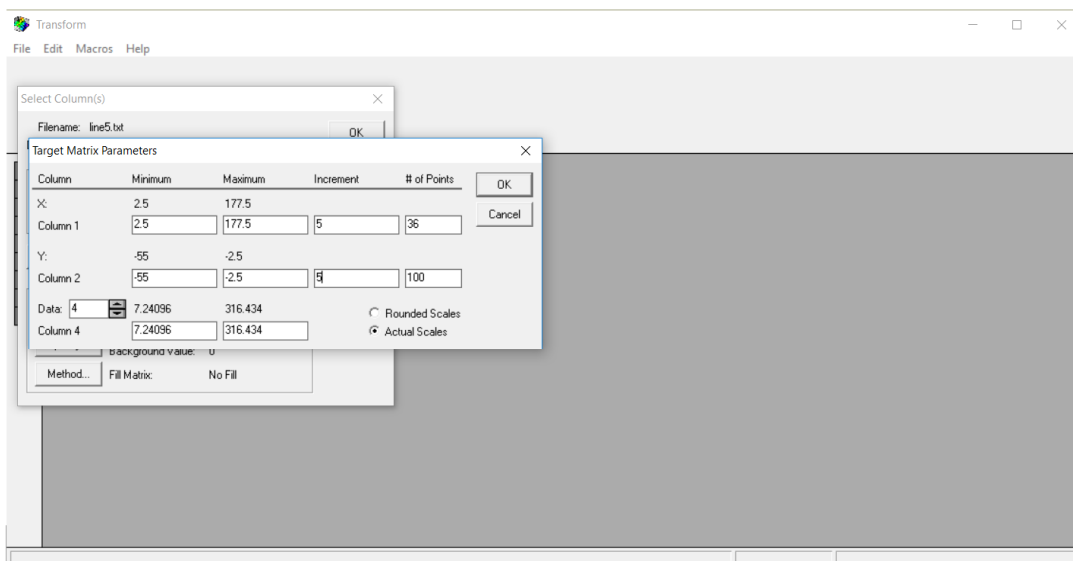
Σχήμα Γ 2: Επιλογή OK για την συνέχιση του προγράμματος.

Επιλέγουμε Column 4, διότι τα δεδομένα για κάθε γραμμή μελέτης εισάγονται και αποτελούνται από τέσσερις στήλες, στην συνέχεια επιλέγουμε → Configure.



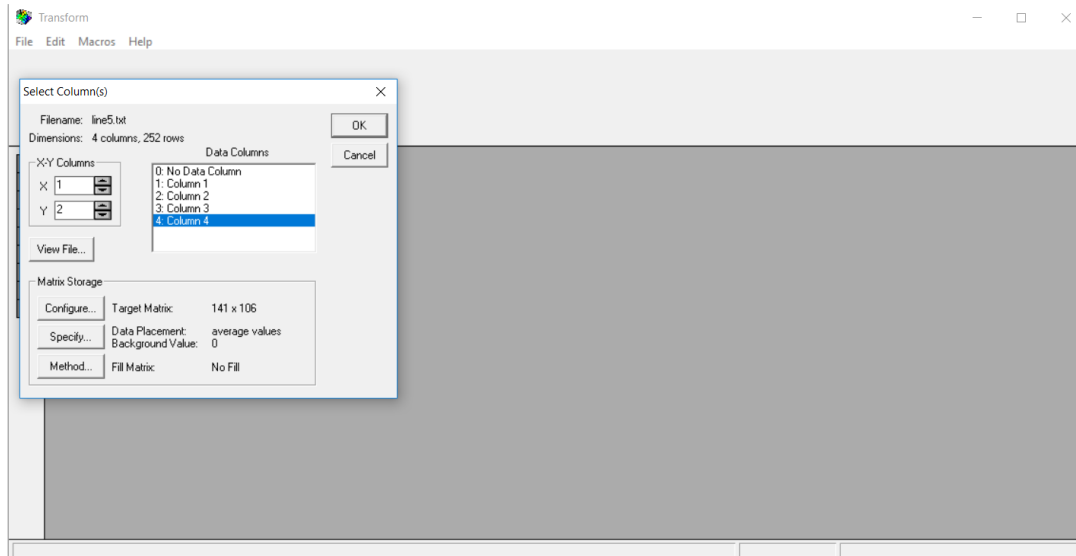
Σχήμα Γ 3: Επιλογή τεσσάρων στηλών (Column 4) και εν συνεχεία Configure.

Actual Scales → Increment (βάζουμε τον αριθμό 5 και στα δύο κουτιά) → OK.



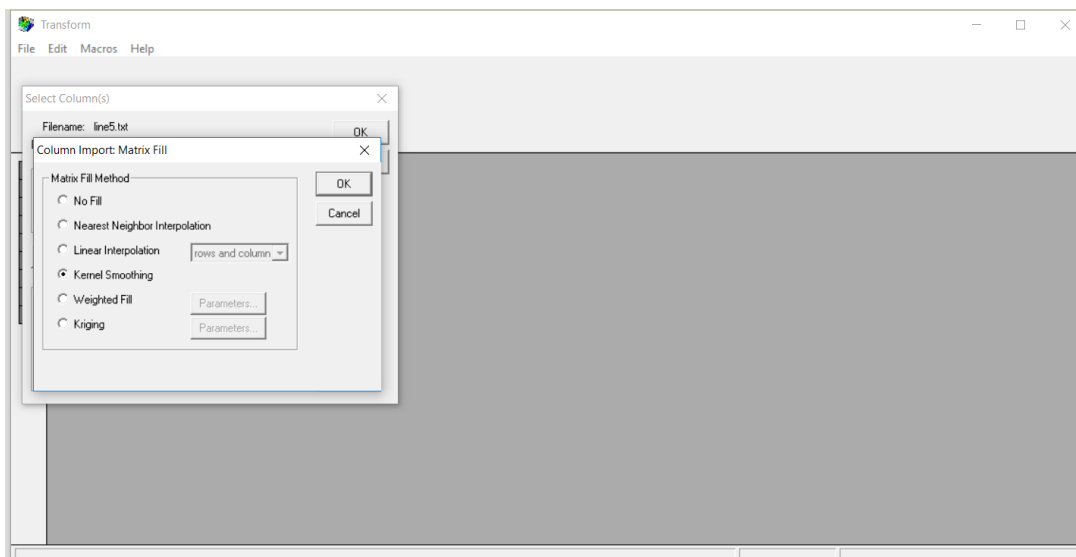
Σχήμα Γ 4: Επιλογή Actual Scales και στην συνέχεια OK.

Column 4 → Method.



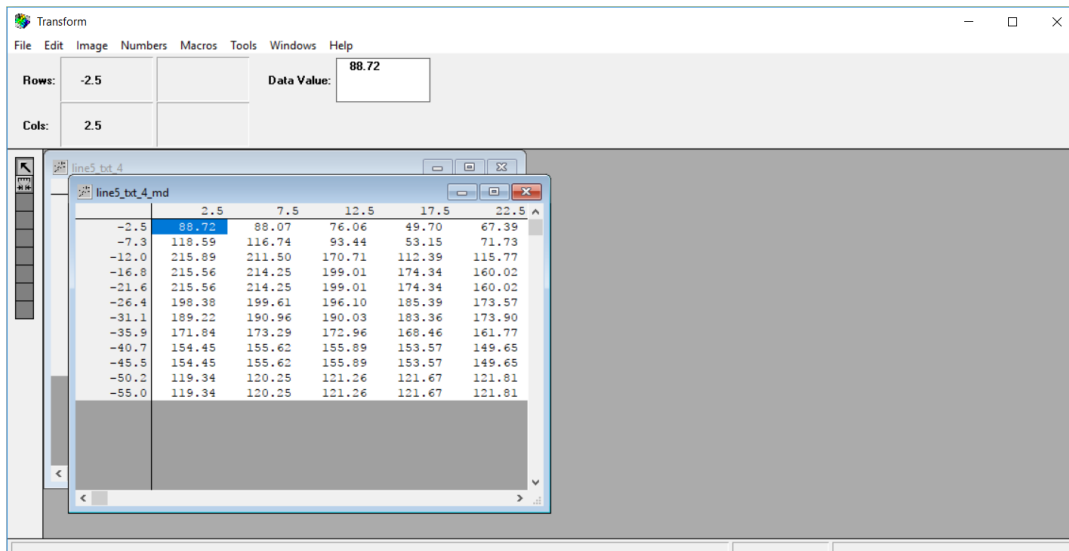
Σχήμα Γ 5: Επιλογή τεσσάρων στηλών (Column 4) και εν συνεχεία Method.

Kernel Smoothing → OK.



Σχήμα Γ 6: Επιλογή Kernel Smoothing και εν συνεχεία OK.

Εμφανίζονται οι στήλες των δεδομένων της γραμμής, επιλέγουμε για την αποθήκευση το αρχείο md.



Σχήμα Γ 7: Τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν είναι στο παράθυρο line5_txt_4_md.

Για να σώσουμε την εικόνα, επιλέγουμε Image → Interpolate, με αυτό τον τρόπο εμφανίζεται η τελική εικόνα που μας ενδιαφέρει και εν συνεχεία την αποθηκεύουμε με File → Save Image. Στο αρχείο θα αποθηκευτούν μόνο τα δεδομένα που τρέξαμε για μια γραμμή μελέτης.



*“ Τιμή σε όλα τα ασήμαντα σημαντικότετα
για τον καθένα ξεχωριστά
που τα φυλάει στην καρδιά του
για το λόγο που αυτός ξέρει. ”*

(Οδυσσέας Ελύτης, « Ο κήπος με τις αυταπάτες»)

Η εκτύπωση και η βιβλιοδεσία έγιναν
στο καλλιτεχνικό βιβλιοδετείο
ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗ
ΠΑΠΑΦΗ 7, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ