

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΣΑΚΙΡΜΠΑΛΟΓΛΟΥ ΚΩΝ/ΝΟΣ

Γεωλόγος

**Βελτιστοποίηση μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας
στο πλαίσιο εφαρμογής της διαχρονικής
παρακολούθησης φαινομένων**

Διατριβή ειδίκευσης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΕΦ. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2016

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α. ΤΣΑΚΙΡΜΠΑΛΟΓΛΟΥ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ
ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών
‘Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία’
Τομέας Γεωφυσικής
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 30/06/2016

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Τσούρλος Παναγιώτης, Επιβλέπων

Αναπληρωτής Καθηγητής Βαργεμέζης Γεώργιος, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Καθηγητής Τσόκας Γρηγόριος., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή	6
1.1 Αντικείμενο-Σκοπός Διατριβής	6
1.2 Δομή.....	7
2. Ηλεκτρική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης.....	8
2.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	8
2.2 Αρχές της ηλεκτρικής διασκόπησης	9
2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων	11
2.4 Μέθοδοι γεωηλεκτρικής διασκόπησης.....	15
Βυθοσκόπηση.	15
Οριζοντιογραφία.	16
Ηλεκτρική τομογραφία.	16
2.5 Ερμηνεία μετρήσεων	19
Ευθύ Πρόβλημα	20
Αντίστροφο Πρόβλημα.....	21
2.6 Υπολογισμός Ιακωβιανού πίνακα.....	25
2.7 Υπολογισμός Ιακωβιανού πίνακα για ομογενή γη	26
3. Εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης.....	28
3.1 Εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης με τη χρήση του πίνακα διακριτικής ικανότητας.....	28
3.2 Εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης με τη χρήση του Ιακωβιανού πίνακα	31
4. Προσαρμοσμένη εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης	35
4.1 Γενικά.....	35
4.2 Αλγόριθμοι προσαρμοσμένης εύρεσης βέλτιστων διατάξεων μέτρησης	37
4.3 Ο αλγόριθμος optimeas.....	40
Δήλωση αρχικών τιμών.	40
Δημιουργία παραμέτρων και εύρεση αριθμού clusters	41
Δημιουργία των μετρήσεων των πρωτοκόλλων	41
Υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα	43

Επιλογή των βέλτιστων μετρήσεων.....	44
Αποθήκευση των μετρήσεων ως πρωτόκολλα	44
4.4 Βελτιστοποίηση μετρήσεων για περιοχή	45
Ο αλγόριθμος image_area_selection	47
5. Εφαρμογή αλγορίθμων σε συνθετικά δεδομένα.....	48
1 ^ο παράδειγμα	48
2 ^ο παράδειγμα	50
3 ^ο παράδειγμα	52
4 ^ο παράδειγμα	54
5 ^ο παράδειγμα	55
6 ^ο παράδειγμα	57
7 ^ο παράδειγμα	57
Εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα.....	60
6. Συμπεράσματα	63
Γενικά.....	63
Συνθετικά μοντέλα.....	63
Πραγματικές συνθήκες	64
Μελλοντική δουλειά-Έρευνα	64
Βιβλιογραφία	66
Παράρτημα (εγχειρίδιο προγράμματος)	i

Ευχαριστίες

Νοιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω κάποια άτομα με την βοήθεια των οποίων ολοκληρώθηκε η παρούσα διατριβή ειδίκευσης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον κ. Τσούρλο Παναγιώτη, καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ για τη συνεχή καθοδήγησή του και τις σημαντικές συμβουλές του στη παρούσα εργασία αλλά και για την στήριξη και βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού.

Ευχαριστώ τον κ. Βαργεμέζη Γιώργο, αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ για τις πολύτιμες συμβουλές του και επισημάνσεις του στην εργασία μου καθώς και για την υποστήριξη του σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού.

Επίσης ευχαριστώ τον κ Τσόκα Γρηγόρη, καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ για τις ουσιαστικές επισημάνσεις του στην εργασία μου και την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστήσω στην οικογένειά μου.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ειδίκευσης μελετάται μία μέθοδος για την βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων μέτρησης δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας για διαχρονικές μετρήσεις. Αρχικά γίνεται μία ανασκόπηση της μεθόδου εύρεσης βέλτιστων διατάξεων μέτρησης με τη μέθοδο του ιακωβιανού πίνακα (πίνακας ευαισθησίας) η οποία και χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία πρωτοκόλλων.

Κατά τη διαχρονική παρακολούθηση με γεωηλεκτρικές μεθόδους χρειάζεται μία σειρά διαχρονικών μετρήσεων μίας δομής η οποία αναμένεται να μεταβάλλεται με το χρόνο. Η παρακολούθηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών μπορεί να οδηγήσει στην πρόβλεψη της περιοχής που αναμένεται να αλλάξει. Έτσι κύριος στόχος της εργασίας ήταν να αναπτυχθούν αλγόριθμοι και να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα που να επιτρέπει στο χρήστη να ορίζει μία περιοχή που αναμένεται να μεταβάλλεται με το χρόνο, και στη συνέχεια να επιλέγονται πρόσθετες μετρήσεις οι οποίες και θα αυξάνουν την ανάλυση της συγκεκριμένης περιοχής.

Για να ελεγχθούν ως προς την αξιοπιστία τους οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν, δοκιμάστηκαν με ένα πλήθος συνθετικών αλλά και πραγματικών δεδομένων. Οι δοκιμές έδειξαν ότι τα εστιασμένα σύνολα δεδομένων που παράγονται, οδηγούν έπειτα από την αντιστροφή σε ακριβέστερες εικόνες του υπεδάφους και σε μικρότερα στατιστικά λάθη σε σύγκριση με τις κλασικές διατάξεις.

Abstract

This thesis examines a method for optimizing electrical tomography time lapse measurements. The main purpose of the study was to create and test algorithms that can add extra geoelectrical measurements in a focused area, determined by the user. At first there is an overview of the methods used for finding the optimum data sets using the Jacobian method. These methods are also used as a part of this study to generate optimum data sets. It is known that for the 4D data inversion a set of time lapse measurements is required. A quick view and analysis of these inverted results can give us an image on how a resistivity area related with a host body changes in time, so we can “predict” its future position or shape of the body.

Defining an area with high probability of future resistivity change, we can select additional measurement which could enhance the resolution of the particular area. The tests with synthetic models showed that the focused arrays can produce better inversion results compared to the optimized or even full comprehensive data sets. This method has been also tested with real data and it is shown that the method can be a practical tool for measurement protocol creation in real life monitoring problems.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο-Σκοπός Διατριβής

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για την επίλυση προβλημάτων σχετικών με τη γεωλογία, κοιτασματολογία, τεχνική γεωλογία, αρχαιολογία, (Loke et al., 2013) κα. Η ανάπτυξη σύγχρονων οργάνων που επέτρεψαν την γρήγορη και αυτόματη συλλογή δεδομένων καθώς επίσης και η χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων αντιστροφής που επιτρέπουν την απεικόνιση των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους με μεγάλη λεπτομέρεια, κατέστησαν την ηλεκτρική τομογραφία την πλέον διαδεδομένη γεωφυσική μέθοδο. Τα τελευταία χρόνια λόγω των χαρακτηριστικών αυτών η ηλεκτρική τομογραφία άρχισε να χρησιμοποιείται και για τη διαχρονική παρακολούθηση περιοχών.

Σε αυτό το πλαίσιο η ηλεκτρική μέθοδος για την παρακολούθηση διεργασιών μπορεί να συνδυαστεί με έναν άλλο αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας, αυτό της εύρεσης βέλτιστων ηλεκτρικών διατάξεων. Τέτοιες μέθοδοι έχουν γίνει κοινές στις γεωηλεκτρικές μεθόδους και χρησιμοποιούνται όχι μόνο για την αντικατάσταση των κύριων διατάξεων αλλά κυρίως γιατί μπορούν να παράγουν πρωτόκολλα σε περιπτώσεις που οι συμβατικές μέθοδοι δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η χρήση βέλτιστων διατάξεων επεκτάθηκε τελευταία στη δημιουργία προσαρμόσιμων βέλτιστων πρωτοκόλλων για τη διαχρονική παρακολούθηση γεωηλεκτρικών αλλαγών με σκοπό την καλύτερη χαρτογράφηση τους. Μία τέτοια μέθοδος προτάθηκε από τους Wilkinson et al. (2015) οι οποίοι χρησιμοποιούν τον πίνακα διακριτικής ικανότητας ως βάση για την παραγωγή βέλτιστων διατάξεων και την επεξεργασία εικόνας για την εύρεση περιοχών με αλλαγές.

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων για επιλογή βέλτιστων πρωτοκόλλων για διαχρονικές (time-lapse) ηλεκτρικές μετρήσεις. Η μέθοδος βελτιστοποίησης βασίζεται στην χρήση του Ιακωβιανού πίνακα ως μέτρο για την επιλογή βέλτιστων διατάξεων (Athanasίου, 2009). Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab, για την επιλογή μιας συγκεκριμένης περιοχής που αναμένεται κάποια αλλαγή, ώστε στη περιοχή εκείνη να ληφθούν περισσότερες μετρήσεις για να αυξηθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων αντιστροφής.

Ο σκοπός της εργασίας είναι να ελεγχθούν με συνθετικά αλλά και με πραγματικά δεδομένα, τα πρωτόκολλα που προκύπτουν από το πρόγραμμα, ώστε να φανεί αν υπάρχει κάποια βελτίωση (ποιοτική είτε ποσοτική)σε σχέση με τα πλήρη σύνολα μετρήσεων

Για την υλοποίηση των παραπάνω υπολογίζεται καταρχήν ο Ιακωβιανός πίνακας των μετρήσεων μέσα από αυτοματοποιημένους αλγόριθμους, και στη συνέχεια, -με βάση την ευαισθησία των μετρήσεων που εκφράζεται με τον Ιακωβιανό πίνακα-, επιλέγονται οι μετρήσεις αυτές που θα έχουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε κάθε τμήμα της περιοχής μελέτης. Ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων καθορίζεται αυτόματα ενώ ο αριθμός των βέλτιστων μετρήσεων καθορίζεται από τον χρήστη. Επίσης η περιοχή της μεταβολής επιλέγεται άμεσα από το χρήστη. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να επιλέγονται τα καλύτερα πρωτόκολλα για την εκάστοτε περιοχή. Από τα πρωτόκολλα που προέκυψαν, δημιουργήθηκαν μοντέλα τόσο για απλή αλλά και για περίπλοκη υπεδάφια δομή ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχει διαφορά μεταξύ των βέλτιστων και των κανονικών διατάξεων.

1.2 Δομή

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης και ειδικότερα της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Παρατίθενται οι βασικές αρχές των ηλεκτρικών διασκοπήσεων και περιγράφονται συνοπτικά οι μέθοδοι μέτρησης της φαινόμενης αντίστασης. Παρουσιάζονται οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων. Επιπλέον γίνεται παρουσίαση της θεωρίας που χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των μετρήσεων και περιγράφονται συνοπτικά οι μέθοδοι επίλυσης του ευθέως και αντιστροφου προβλήματος για τον καθορισμό της κατανομής της υπεδάφιας αντίστασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος εύρεσης βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης με τη χρήση του ιακωβιανού πίνακα (πίνακας ευαισθησίας). Επιπλέον γίνεται αναφορά στον πίνακα διακριτικής ικανότητας που χρησιμοποιείται από άλλες μεθόδους εύρεσης βέλτιστων πρωτοκόλλων (Stummer et al, Wilkinson et al) και αναφέρονται οι διαφορές τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται ο αλγόριθμος *ortimeas* όπως επίσης και τμήματα του προγράμματος που γράφτηκαν για τον σκοπό της εργασίας. Επίσης περιγράφονται προγραμματιστικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του τελικού προγράμματος στο περιβάλλον *guide* της *Matlab*.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται τα αποτελέσματα των αντιστροφών από διάφορα συνθετικά μοντέλα. Δημιουργήθηκαν μοντέλα και για αντιστροφή σε 4D (*time-lapse inversion*) αλλά και για απλή αντιστροφή (*single inversion*). Παρουσιάζονται επίσης σε μορφή εικόνων, τα επί τοις εκατό σφάλματα των βέλτιστων μοντέλων σε σύγκριση με το πλήρες πρωτόκολλο.

Τέλος στο παράρτημα παρατίθενται οι οδηγίες χρήσης του προγράμματος καθώς και εικόνες από το γραφικό περιβάλλον.

2. Ηλεκτρική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία βασική ανασκόπηση στην ηλεκτρική μέθοδο γεωφυσικής διασκόπησης και συγκεκριμένα στην ηλεκτρική τομογραφία. Παρατίθενται οι βασικές αρχές της θεωρίας των ηλεκτρικών διασκοπήσεων, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση και αναφέρονται εφαρμογές της ηλεκτρικής διασκόπησης στον εντοπισμό υπεδάφινων δομών.

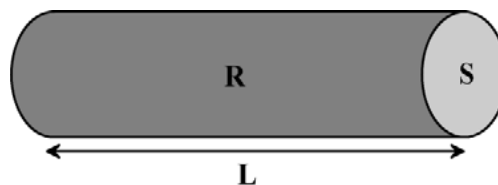
Αρχικά περιγράφεται η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στη γη και ο υπολογισμός της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Παρουσιάζονται οι κυριότερες διατάξεις ηλεκτροδίων και γίνεται αναφορά στο βάθος διασκόπησης. Τέλος γίνεται μια σύντομη περιγραφή της θεωρίας αντιστροφής, που χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των μετρήσεων και παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του ευθέος και αντιστροφου προβλήματος.

2.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Αυτό επιτυγχάνεται πραγματοποιώντας μετρήσεις του ηλεκτρικού δυναμικού είτε στην επιφάνεια της Γης είτε μέσα σε αυτήν με τη βοήθεια γεωτρήσεων για τον προσδιορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ρ , είναι η ιδιότητα των πετρωμάτων που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ηλεκτρική διασκόπηση και εκφράζει τη δυσκολία με την οποία ένα υλικό άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Έστω κυλινδρικό σώμα (σχήμα 2.1) διατομής S και μήκους L , τότε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται από τον τύπο:

$$\rho = R \frac{S}{L}, \quad R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλινδρικού σώματος.

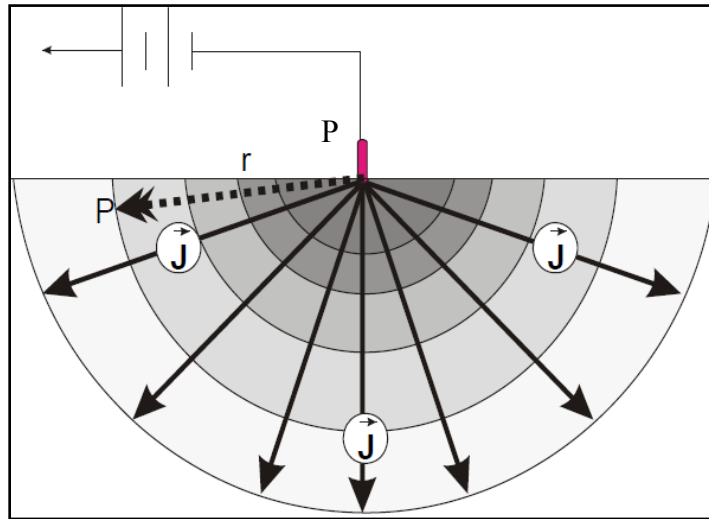
Η μονάδα μέτρησης της είναι το $1\Omega m$ στο διεθνές σύστημα μονάδων, SI, ωστόσο πολλές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα $1\Omega cm$ ($1\Omega m=100\Omega cm$).

Ο κύριος μηχανισμός που καθορίζει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στα πετρώματα της Γης είναι αυτός της ηλεκτρολυτικής αγωγής. Σύμφωνα με αυτόν, το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσω των ιόντων αλάτων και ορυκτών που είναι διαλυμένα μέσα στο νερό που γεμίζει τους πόρους των γεωλογικών σχηματισμών. Άλλοι τρόποι διάδοσης του ρεύματος στη γη είναι της ηλεκτρονικής αγωγιμότητας (κυρίως για τα μεταλλικά ορυκτά) και της διηλεκτρικής μετάδοσης. Το πλήθος των παραγόντων, αλλά και η συχνή μεταβολή μερικών από αυτών, έχει σαν αποτέλεσμα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση να παρουσιάζει πολύ μεγάλο εύρος τιμών, ακόμα και για τον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό. Έτσι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων είναι μια από τις περισσότερο μεταβαλλόμενες φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων. Οι τιμές κυμαίνονται από $10^{-6} \Omega m$, σε ορισμένα ορυκτά όπως ο γραφίτης, μέχρι $10^{15} \Omega m$, σε ορισμένα ξηρά χαλαζιακά πετρώματα. Τυπικές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης για διάφορα πετρώματα φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1	
Υλικό	Αντίσταση (Ωm)
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Χαλαζίας	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Γρανίτης	$100 - 1 \times 10^6$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Ασβεστόλιθος	$50 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτης	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθος	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$100 - 1 \times 10^4$
Άμμος	$1 - 1000$
Άργιλος	$1 - 100$

2.2 Αρχές της ηλεκτρικής διασκόπησης

Αν υποθέσουμε ότι θετικός πόλος (P) βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, το οποίο θεωρούμε ότι έχει αντίσταση, ρ , και ότι πρόκειται για ομογενές μέσο, τότε το ρεύμα θα διαρρέεται μόνο μέσα στη γη (λόγω της άπειρης αντίστασης του αέρα) και θα “κινείται” σαν σφαίρα (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Σφαιρική ροή ηλεκτρικού ρεύματος εξαιτίας ύπαρξης ηλεκτροδίου P.
<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>

Αποδεικνύεται ότι το δυναμικό, V , που προκαλείται σε απόσταση, r , από αυτόν το θετικό πόλο δίνεται από τη σχέση:

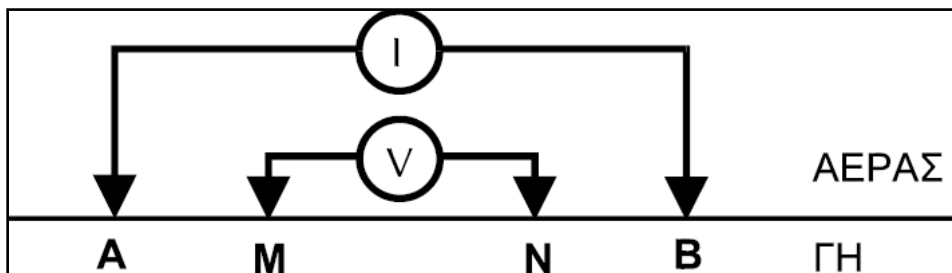
$$V^{(+)} = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.2)$$

Αντίστοιχα, για αρνητικό πόλο θα ισχύει :

$$V^{(-)} = -\frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.3)$$

Όπου ρ , η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, I , η ένταση του ρεύματος και r η απόσταση σε ένα σημείο από τον πόλο.

Για να μπορέσει να γίνει μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια. Τα δύο από αυτά (A και B) χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή ρεύματος I και με τα άλλα (M και N) γίνεται η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία. Ας υποθέσουμε τώρα την παρακάτω διάταξη:



Σχήμα 2.3 Τυπική διάταξη ηλεκτροδίων για γεωηλεκτρική έρευνα. <http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>

Στα ηλεκτρόδια A και B εισάγουμε ρεύμα έντασης I, ενώ στα ηλεκτρόδια M και N μετράμε την διαφορά δυναμικού. Αποδεικνύεται από τις σχέσεις (2.2) και (2.3) ότι η μετρούμενη διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια M-N είναι:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.4)$$

Λύνοντας ως προς ρ , προκύπτει:

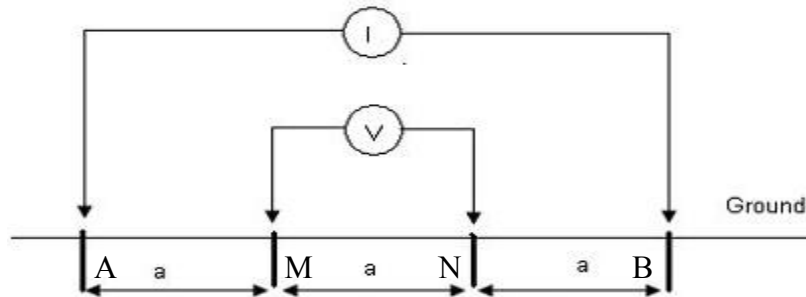
$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left(\frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (2.5)$$

Οι παραπάνω τύποι εκφράζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση και ισχύουν για ομογενές μέσο. Η γη όμως στα ανώτερα κυρίως στρώματα του φλοιού είναι έντονα ανομοιογενής. Παρατηρούμε ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι και η γεωμετρία της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης διάταξης, έτσι οι διακυμάνσεις της ειδικής αντίστασης, για τους ίδιους σχηματισμούς θα έχουν μεγάλο εύρος. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι δεν μπορούμε να αναφερόμαστε σε ειδική ηλεκτρική αντίσταση, αλλά **φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση**.

2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να διαταχθούν τα τέσσερα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους. Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται διατάξεις που έχουν εσωτερική συμμετρία και ελαχιστοποιούν τις μετρήσεις καλωδίων στην ύπαιθρο. Κάθε τρόπος έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο γνωστές διατάξεις.

Wenner

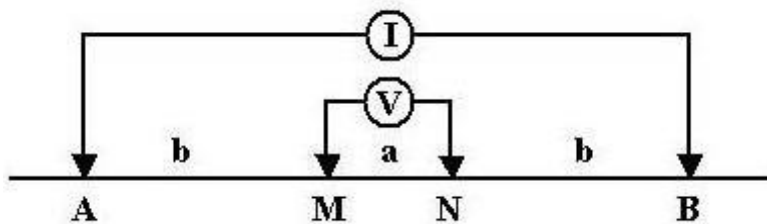


Σχήμα 2.4 Διάταξη Wenner. <http://hurricane193.wordpress.com>

Στη μέθοδο αυτή τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται πολύ εύκολα και στην ύπαιθρο και η ευαισθησία των οργάνων δεν είναι τόσο σημαντική όσο σε άλλες διατάξεις. Η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a \quad (2.6)$$

Schlumberger

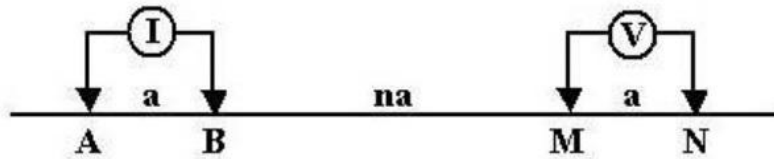


Σχήμα 2.5 Διάταξη Schlumberger. <http://appliedgeophysics.berkeley.edu/dc/index.html>

Στη συγκεκριμένη διάταξη τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι λιγότερα ηλεκτρόδια χρειάζεται να μετακινούνται για γραμμικές μετρήσεις εντός των A και B. Η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} \frac{b(b+a)}{a} \pi \quad (2.7)$$

Dipole-Dipole

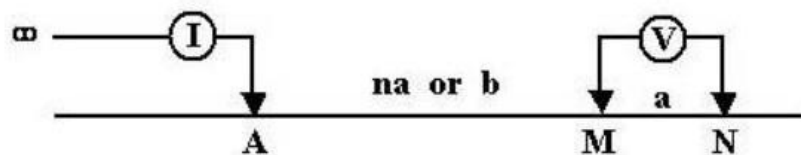


Σχήμα 2.6 Διάταξη Διπόλου-Διπόλου. <http://en.openet.org>

Κύριο πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η ευκολία της εγκατάστασης στο πεδίο, που οφείλεται κυρίως στο μικρό μήκος καλωδίων που απαιτούνται. Ωστόσο απαιτείται μεγάλη ένταση ρεύματος καθώς και σχετικά μεγάλη ευαισθησία των οργάνων. Η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται:

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} [-\pi n a (n + 1)(n + 2)] \quad (2.8)$$

Pole-Dipole

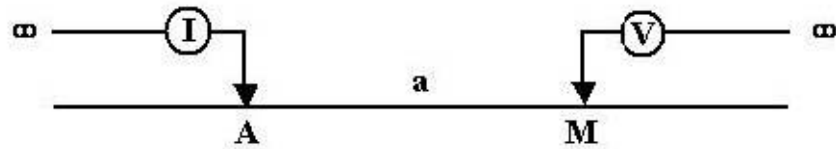


Σχήμα 2.7 Διάταξη Πόλου-Διπόλου. <http://appliedgeophysics.berkeley.edu>

Πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι η μείωση της παραμόρφωσης των ισοδυναμικών επιφανειών.

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} [2\pi n a (n + 1)] \quad (2.9)$$

Pole-Pole



Σχήμα 2.8. Διάταξη Πόλου-Διπόλου. <http://appliedgeophysics.berkeley.edu>

Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια B και N τοποθετούνται τόσο μακριά, που μπορούμε να τα θεωρήσουμε στο άπειρο. Έτσι η σχέση που δίνει τη φαινόμενη αντίσταση δίνεται:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi a \quad (2.10)$$

Με τις παραπάνω διατάξεις και με διαφορετικά ανοίγματα ηλεκτροδίων μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για την φαινόμενη αντίσταση με το βάθος (**βυθοσκόπηση**).

Επίσης μετακινώντας πλευρικά τα ηλεκτρόδια και πάντα με σταθερές αποστάσεις ηλεκτροδίων παίρνουμε πληροφορίες για τις μεταβολές (πλευρικές) της φαινόμενης αντίστασης (**οριζοντιογραφία**).

Γίνεται σαφές ότι η χρήση μιας συγκεκριμένης διάταξης για μια περιοχή, εξαρτάται από το είδος των στόχων, το βάθος των υποψήφιων δομών, τη μέγιστη επιθυμητή κατακόρυφη και οριζόντια ανάλυση, τη διαφορετική ευαισθησία κάθε διάταξης και τέλος από το λόγο σήματος προς θόρυβο της κάθε διάταξης. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο συνδέεται άμεσα με τον γεωμετρικό παράγοντα, καθώς οι τιμές του, αντανakλούν το εύρος των διαφορών δυναμικού που μπορούν να μετρηθούν με μια συγκεκριμένη διάταξη. Μεγάλες τιμές του γεωμετρικού παράγοντα, K, δείχνουν ότι χαμηλές τιμές δυναμικού θα καταγραφούν για την ίδια ένταση ρεύματος και αντίστροφα. Είναι λοιπόν προφανές ότι η τελική επιλογή δεν εξαρτάται μόνο από έναν από τους παραπάνω λόγους, αλλά ο συνδυασμός όλων αυτών θα βοηθήσει στη λήψη της βέλτιστης επιλογής. Όσον αφορά τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις επειδή διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία τους, η κάθε μια από αυτές έχει διαφορετικές δυνατότητες μεταβολών της αντίστασης σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μία αξιολόγηση των κυριότερων διατάξεων.

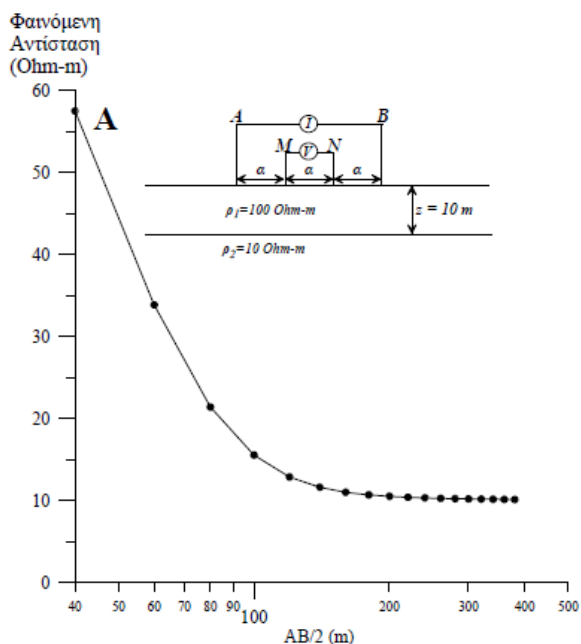
Πίνακας 2.2 Ενδεικτικός πίνακας αξιολόγησης των ευρύτερα χρησιμοποιούμενων διατάξεων (Ward 1990)			
Διάταξη	Λόγος σήματος/θορύβου	Ανίχνευση μεταβολών με το βάθος	Ανίχνευση πλευρικών μεταβολών
Wenner	1	1	4
Schlumberger	2	1	3
Dipole-Dipole	4	2	1
Pole-Dipole	3	2	2

1=Βέλτιστη 4=χείριστη

2.4 Μέθοδοι γεωηλεκτρικής διασκόπησης

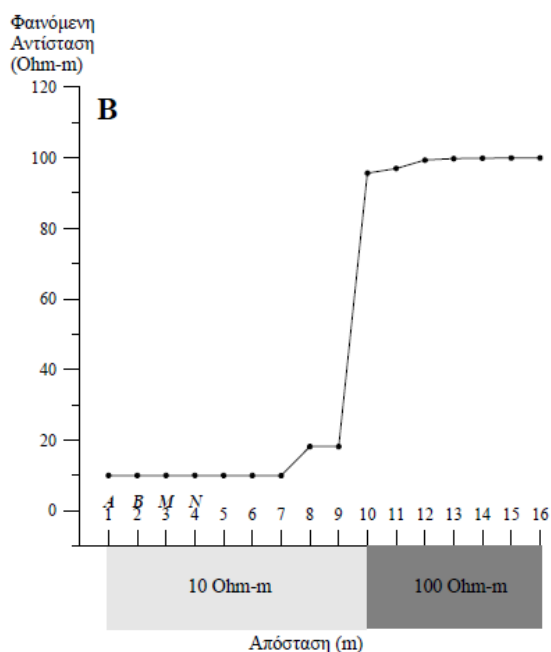
Οι συνηθέστερες τεχνικές μέτρησης για τη καταγραφή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους είναι η βυθοσκόπηση, η οριζοντιογραφία και η ηλεκτρική τομογραφία.

Βυθοσκόπηση. Ο σκοπός της βυθοσκόπησης είναι να διερευνηθούν οι μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος με το βάθος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαδοχική αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων από το σταθερό κέντρο της διάταξης σε κάθε μέτρηση, έτσι ώστε να αυξάνεται το βάθος διασκόπησης. Βασική υπόθεση της μεθόδου είναι ότι η γη αποτελείται από οριζόντια ομογενή και ισότροπα στρώματα. Οι κυριότερες διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι οι Wenner και Schlumberger, διατάξεις που χαρακτηρίζονται από συμμετρία και διευκολύνουν τη μετακίνηση ηλεκτροδίων στο ύπαιθρο.



Σχήμα 2.9 Σχηματική απεικόνιση χαρτογράφησης στρώματος πάνω από ημιχώρο με τη μέθοδο της βυθοσκόπησης (Papadopoulos, 2007)

Οριζοντιογραφία. Με τη μέθοδο αυτή οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης με σταθερό βήμα. Έτσι μετρούνται οι μεταβολές της αντίστασης σε σταθερό βάθος σε μία ευθεία και εντοπίζονται πλευρικές αλλαγές των υπεδάφιων δομών. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις είναι οι Wenner, Dipole-Dipole και Pole-Dipole. Η οριζοντιογραφία είναι κλασσική μέθοδος χαρτογράφησης των αρχαιολογικών χώρων για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων.



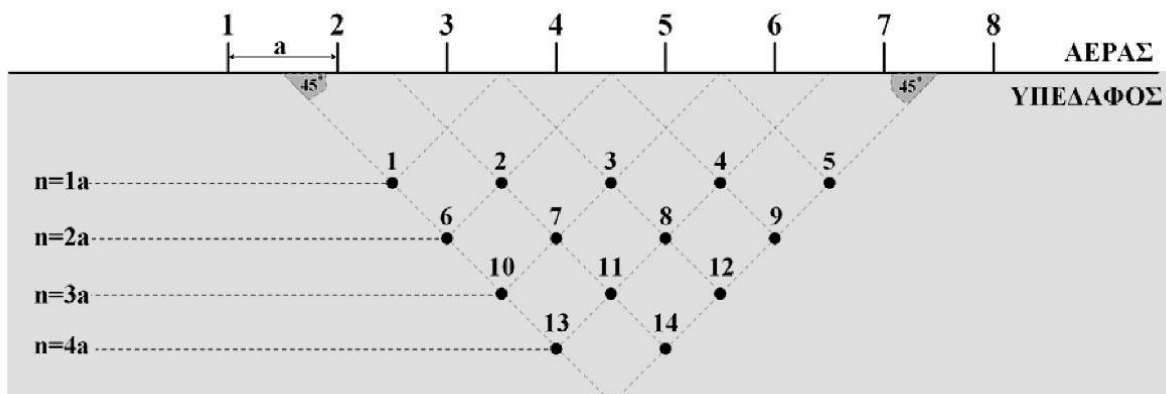
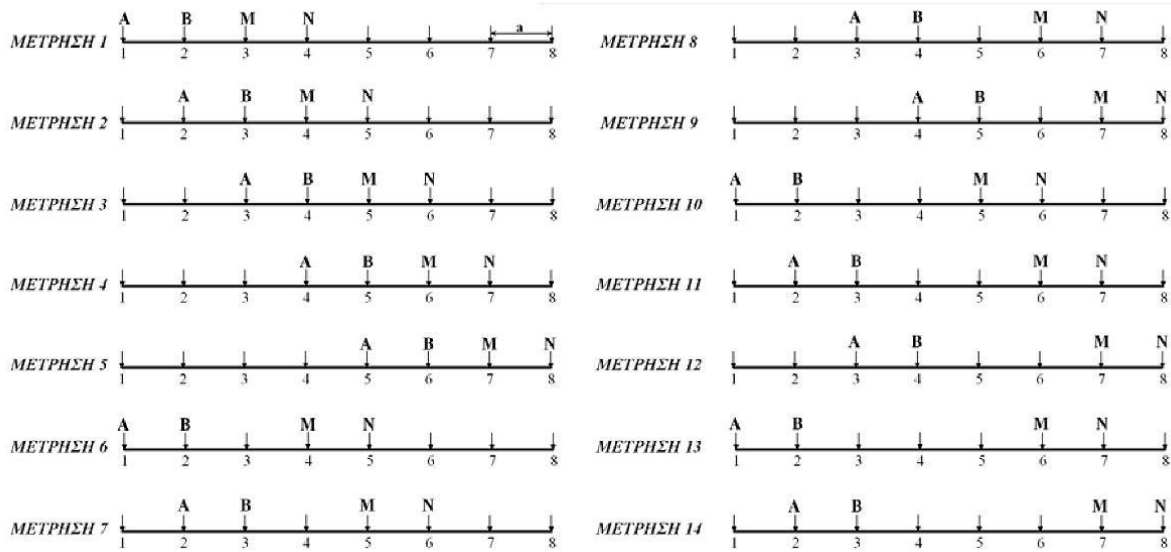
Σχήμα 2.10 Χαρτογράφηση πλευρικής μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης πάνω από μία κατακόρυφη επαφή (Papadopoulos, 2007)

Ηλεκτρική τομογραφία. Ο συνδυασμός των μεθόδων της βυθοσκόπησης και της οριζοντιογραφίας, αποτελούν την ηλεκτρική τομογραφία. Η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα λήψης πληροφοριών τόσο για την πλευρική, όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης. Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες δύο, λαμβάνεται μεγάλος αριθμός μετρήσεων που περιέχουν χρήσιμη πληροφορία. Ο αυξημένος αριθμός μετρήσεων καθιστά ιδιαίτερα χρονοβόρα την χειροκίνητη επιλογή των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και γι' αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών.

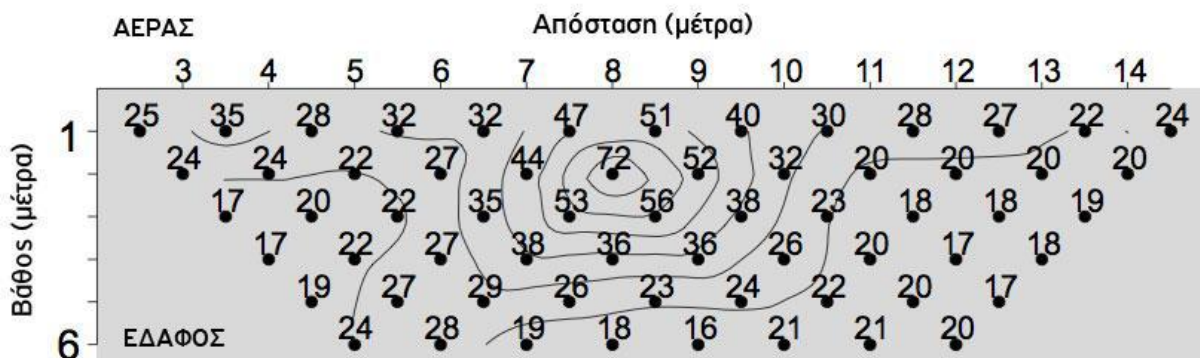
Στο σχήμα 2.11 απεικονίζεται ο τρόπος διεξαγωγής μιας δισδιάστατης διασκόπησης με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για μία διάταξη 8 ηλεκτροδίων, καθώς και η απεικόνιση των δεδομένων σε δύο διαστάσεις. Κάθε τιμή της αντίστασης θεωρείται ότι τοποθετείται στο σημείο

τομής δύο ευθειών που έχουν ως αρχή το κέντρο των διπόλων AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο. Πρόδρομος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η μέθοδος της «ψευδοτομής» (Hallof, 1967), όπου τα δεδομένα απεικονίζονται σαν κατακόρυφες τομές του εδάφους με τη μορφή καμπύλων ίσης φαινόμενης αντίστασης. Στην διαδικασία της «ψευδοτομής» μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-πόλου). Η ηλεκτρική τομογραφία όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις, καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις (Shima 1992) ή σήραγγα (Sasaki 1990).

Η ηλεκτρική τομογραφία διαδόθηκε ευρύτατα στις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ανάπτυξης των Η/Υ και των αντίστοιχων λογισμικών για την ερμηνεία των μετρήσεων. Τέλος η τομογραφία υπερτερεί σημαντικά σε σχέση με τις μονοδιάστατες μεθόδους καθώς στην ερμηνεία της δεν υπάρχει ο περιορισμός της οριζόντιας στρωματογραφίας.



Σχήμα 2.11 Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων $n=4*a$ (Tsourlos, 1995).



Σχήμα 2.12 Ψευδοτομή με καμπύλες ίσης φαινόμενης αντίστασης (Tsourlos, 1995).

2.5 Ερμηνεία μετρήσεων

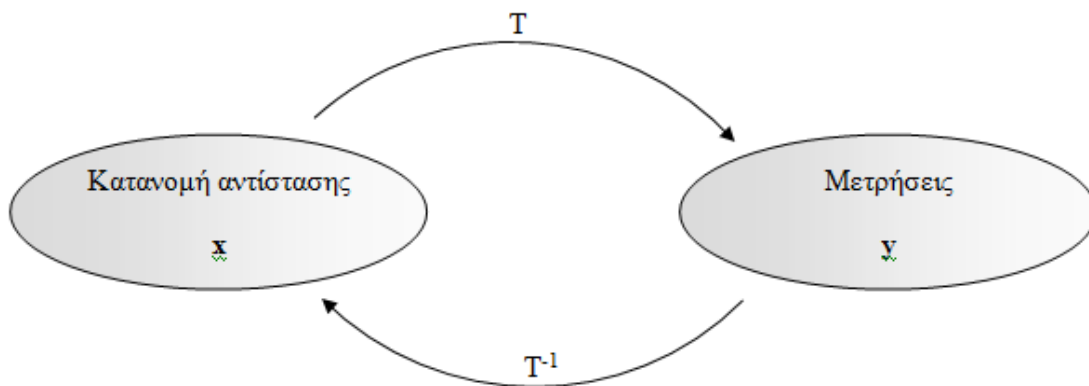
Η επικρατέστερη τεχνική για την απεικόνιση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι η εύρεση ενός μοντέλου αντιστάσεων που να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα. Βασική προϋπόθεση είναι να υπάρχει μία μέθοδος επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή να βρεθούν οι μετρήσεις (φαινόμενες αντιστάσεις) από την δοθείσα κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι με x αντιπροσωπεύεται η κατανομή της αντίστασης και με y συμβολίζονται οι μετρήσεις. Η επίλυση του ευθέως προβλήματος αφορά την εύρεση του μετασχηματισμού T (γραμμικού ή μη) που συνδέει τη γνωστή κατανομή της αντίστασης, x , με τις άγνωστες μετρήσεις, y .

$$y = T(x) \quad (2.11)$$

Η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος αφορά την εύρεση του αντίστροφου μετασχηματισμού T^{-1} ο οποίος συνδέει το γνωστό διάνυσμα των μετρήσεων, y , με την άγνωστη κατανομή της αντίστασης x .

$$x = T^{-1}(y) \quad (2.12)$$

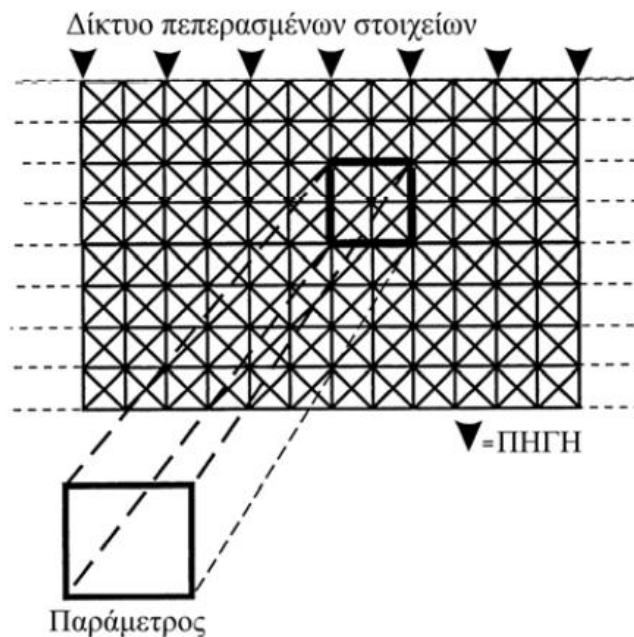


Σχήμα 2.13 Σχηματική απεικόνιση επίλυσης ευθέως και αντίστροφου προβλήματος μέσω του μετασχηματισμού T και T^{-1} αντίστοιχα.

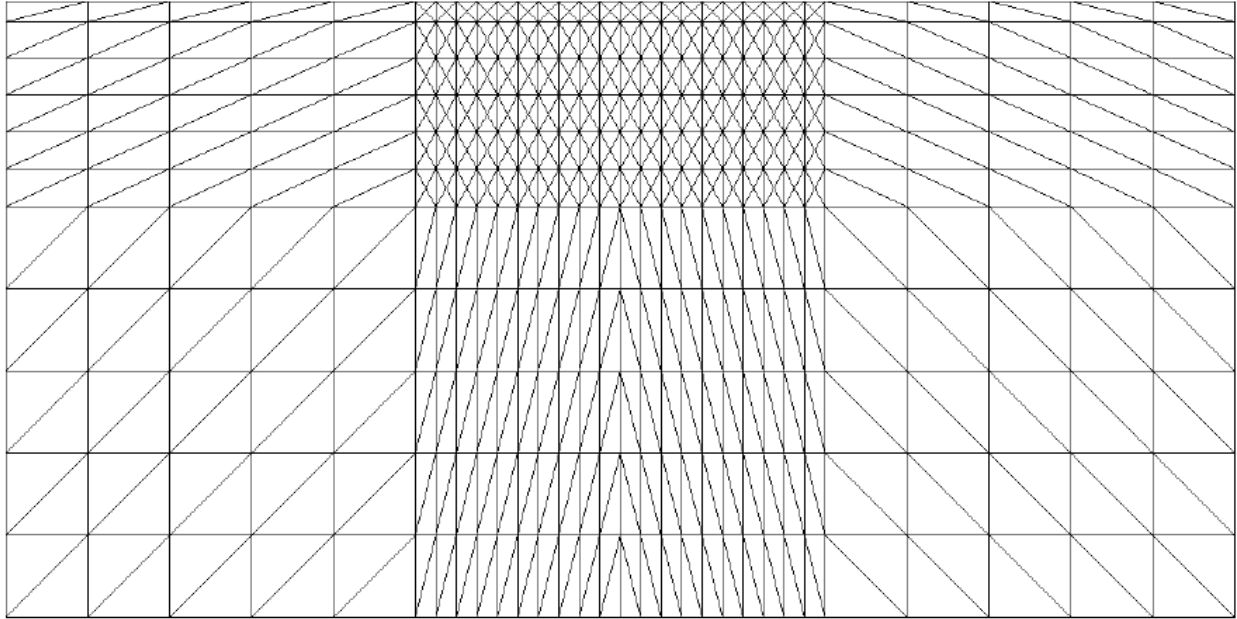
Ευθύ Πρόβλημα

Στην επίλυση του ευθέος προβλήματος υπολογίζεται η φαινόμενη αντίσταση που θα προέκυπτε από τη διεξαγωγή μιας γεωφυσικής έρευνας αν ήταν γνωστή η κατανομή της αντίστασης του υπεδάφους. Αυτό μπορεί να γίνει κυρίως με δύο μεθόδους. Είτε με τις αναλυτικές οι οποίες βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν το πεδίο, είτε με τις αριθμητικές μεθόδους οι οποίες αποτελούν μαθηματικές διαδικασίες που βασίζονται σε αριθμητικούς χειρισμούς και διεξάγονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στις μεθόδους αυτές πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος έκφρασης της λύσης των εξισώσεων συνεχούς πεδίου με έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων. Οι αριθμητικές μέθοδοι με τη σειρά τους διακρίνονται α) σε μεθόδους ολοκληρωτικών εξισώσεων και β) διαφορικών μεθόδων με γνωστότερες τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών.

Σύμφωνα με αυτές το υπέδαφος υποδιαιρείται σε όσα κελιά διαφορετικής αντίστασης είναι επιθυμητό και η τιμή της αντίστασης σε κάθε κελί θεωρείται σταθερή (σχήμα 2.14). Όσον αφορά τις διαστάσεις του μοντέλου, χρησιμοποιείται συνήθως ένα μοντέλο, γνωστό ως μοντέλο δυόμιση διαστάσεων (2.5D). Σε αυτό η μεταβολή της αντίστασης θεωρείται ότι γίνεται σε δύο διαστάσεις (x-z), ενώ η ροή του ρεύματος γίνεται σε τρεις διαστάσεις. Το πλεονέκτημα με αυτή τη προσέγγιση είναι ότι αποτελεί μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση της κατανομής των αντιστάσεων περιλαμβάνοντας μια πλήρη τριών διαστάσεων κατανομή των δυναμικών με τη χρήση γεωμετρίας δύο διαστάσεων. Έτσι μειώνονται οι δυσκολίες επίλυσης του προβλήματος (χρόνος υπολογισμού, μνήμη) σε σύγκριση με τις δυσκολίες που θα αντιμετωπίζαμε αν χρησιμοποιούσαμε μια προσέγγιση τριών διαστάσεων.



Σχήμα 2.14 Κάθε παράμετρος χωρίζεται σε τριγωνικά στοιχεία, στις κορυφές των οποίων υπολογίζεται το δυναμικό (Tsourlos, 1995).



Σχήμα 2.15 Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Tsourlos,1995).

Αντίστροφο Πρόβλημα

Η λύση του αντίστροφου προβλήματος είναι ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία από αυτή του ευθέως προβλήματος. Δηλαδή μετρώντας τη φαινόμενη αντίσταση, προσδιορίζεται η κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Πιο συγκεκριμένα μέσα από μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία γίνεται η επίλυση του ευθέως προβλήματος και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις πραγματικές φαινόμενες αντιστάσεις. Αυτή η επανάληψη γίνεται έως ότου ικανοποιηθούν κάποια κριτήρια σύγκλισης.

Μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος είναι: η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Lines&Treitel 1984), η μέθοδος των ιδιζουσών τιμών (Lanczos 1960, Golub&Reinsh 1970, Lawson&Hanson 1974, Strang 1998), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης (Levenberg 1944, Marquadt 1963, Franklin 1970) και η μέθοδος της εξομαλυμένης αντιστροφής (Tikhonov 1963, Tikhonov&Glasko 1965, Constable et al. 1987, deGroot-Hedlin&Constable 1990).

Στην παρούσα εργασία, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την αντιστροφή των μοντέλων χρησιμοποιεί τη μέθοδο της εξομαλυμένης αντιστροφής Occam (Constable et al. 1987). Η μέθοδος αυτή προσεγγίζει τη λύση συντηρητικά, επιδιώκοντας την απλούστερη δυνατή λύση που θα ικανοποιεί τα δεδομένα με ρεαλιστικό τρόπο, και όχι απαραίτητα την καλύτερη δυνατή λύση (Tsourlos 1995). Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η ανεξαρτησία της τελικής λύσης από την επιλογή του αρχικού μοντέλου.

Αν υποθέσουμε ότι η κατανομή της αντίστασης δίνεται από ένα διάνυσμα x , με N παραμέτρους $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ και οι μετρήσεις M συμβολίζονται με ένα διάνυσμα y , τότε η γενική μορφή της εξίσωσης του ευθέος προβλήματος που πρέπει να αντιστραφεί είναι:

$$f(x) = y \quad (2.13)$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν μπορεί να λυθεί με απ' ευθείας αντιστροφή γιατί η συνάρτηση f δεν είναι γραμμική. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι τεχνικές αντιστροφής οι οποίες ανάγουν ένα μη γραμμικό πρόβλημα σε μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης επιμέρους γραμμικών προβλημάτων.

Αρχικά ένας τυπικός αλγόριθμος επίλυσης μη γραμμικού αντίστροφου ηλεκτρικού προβλήματος υποθέτει ένα αρχικό γραμμικό μοντέλο αντίστασης x_0 . Στη συνέχεια μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία το μοντέλο βελτιώνεται μέχρι οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις $f(x_{\text{τρέχον}})$, να προσεγγίζουν τις μετρήσεις, y . Θεωρώντας μια πολύ μικρή αλλαγή της αντίστασης dx και χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor, η $f(x)$ μπορεί να γραφεί ως εξής (Meju, 1994):

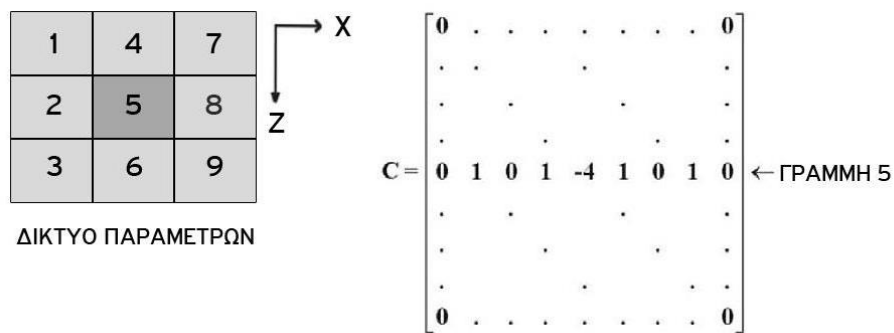
$$f(x_i + dx_i) = f(x_i) + \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} dx_i + O((dx_i)^2) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.14)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των παραμέτρων του διανύσματος κατανομής της αντίστασης, $O((dx_i)^2)$ είναι οι όροι μεγαλύτερης τάξης, που μπορούν να αγνοηθούν, εφ' όσον η μεταβολή dx είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με το x και ο $m \times n$ πίνακας των πρώτων όρων, $\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i}$, ισούται με τον Ιακωβιανό πίνακα J .

Άρα η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$f(x + dx) \cong f(x) + Jdx \quad f(x + dx) \cong f(x) + Jdx \quad (2.15)$$

Αφού καθοριστούν τα κριτήρια τερματισμού για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του dx από την πιο πάνω εξίσωση, και γνωρίζοντας τα υπόλοιπα στοιχεία της εξίσωσης μπορεί να καθοριστεί τώρα μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος.



Σχήμα 2.16 Μοντέλο 9 παραμέτρων και πίνακας εξομάλυνσης C (Tsourlos, 1995).

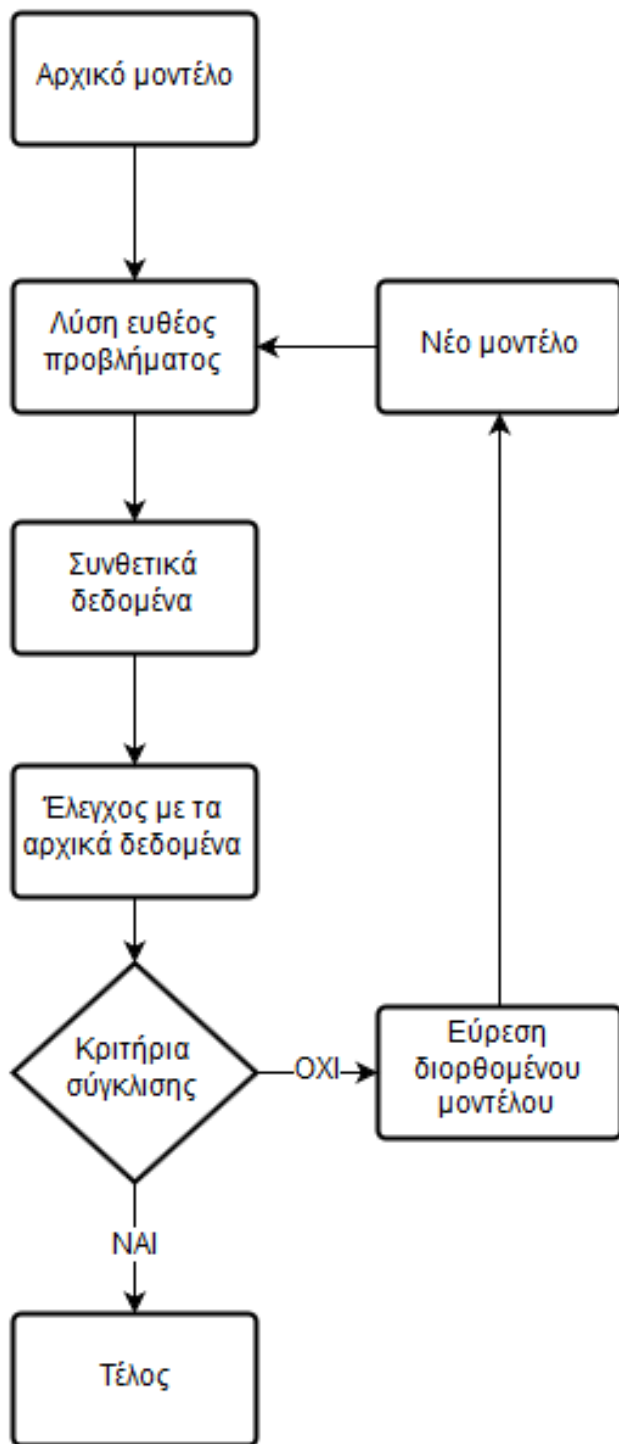
Ορίζεται ο πίνακας εξομάλυνσης C μεταξύ των παραμέτρων (Σχήμα 2.16) και ζητείται η ελαχιστοποίηση του λάθους dy σε συνδυασμό με τη μέγιστη εξομάλυνση:

$$\begin{aligned} S &= (W_d dy)^T (W_d dy) \rightarrow 0, & dy &= y - f(x) \\ dR &= (C dx)^T (C dx) \rightarrow \max \end{aligned} \quad (2.16)$$

Όπου W_d είναι ο πίνακας στατιστικών βαρών, C ο πίνακας εξομάλυνσης, dx το διάνυσμα διόρθωσης των αντιστάσεων του μοντέλου και dy είναι η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων y και των συνθετικών φαινομένων αντιστάσεων $f(x)$.

Αναλυτικότερα, γνωρίζοντας το σύνολο μετρήσεων d , προσδιορίζονται αρχικά οι παράμετροι του μοντέλου. Στη συνέχεια παράγεται ο πίνακας εξομάλυνσης C , προσδιορίζεται ο πίνακας στατιστικών βαρών W (που είναι ένας διαγώνιος πίνακας που περιγράφει την ακρίβεια των μετρήσεων και περιλαμβάνει τις αντίστροφες μετρήσεις και τις διακυμάνσεις των δεδομένων). Έπειτα προσδιορίζεται μια αρχική εκτίμηση της κατανομής της αντίστασης X_0 και υπολογίζεται η απόκριση του μοντέλου. Υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας και ορίζεται η αρχική τιμή μ_0 του πολλαπλασιαστή Lagrangian. Τέλος ορίζονται τα κριτήρια τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας.

Η διαδικασία αυτή της αντιστροφής φαίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα ροής (σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.17 Διάγραμμα ροής τυπικού αλγορίθμου επίλυσης μη γραμμικού γεωηλεκτρικού προβλήματος.

2.6 Υπολογισμός Ιακωβιανού πίνακα

Η διαδικασία της επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος όπως προαναφέρθηκε αποσκοπεί στον υπολογισμό της κατανομής της αντίστασης από ένα σύνολο συνθετικών δεδομένων που προσομοιάζουν τις πραγματικές συνθήκες. Η κατανομή της αντίστασης αποτυπώνεται σαν ένα σύνολο ομογενών παραμέτρων, ενώ η τιμή της αντίστασης μιας παραμέτρου μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα των άλλων παραμέτρων. Στις περισσότερες μεθόδους αντιστροφής είναι απαραίτητη η χρήση ενός πίνακα, του Ιακωβιανού, που συνδέει τις μεταβολές των παραμέτρων με τις μεταβολές των μετρούμενων δεδομένων.

Έστω n ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος των παραμέτρων, p , του προβλήματος και m ο αριθμός των στοιχείων των παρατηρούμενων δεδομένων, d . Ο Ιακωβιανός πίνακας έχει διαστάσεις $m \times n$ και το κάθε στοιχείο του δίνεται από τον τύπο:

$$J_{i,j} = \frac{\partial d_i}{\partial \sigma_j} \quad (2.17)$$

Όπου σ_j είναι η αγωγιμότητα της παραμέτρου p_j . Ο Ιακωβιανός πίνακας εκφράζει την ευαισθησία των μετρήσεων για μικρές αλλαγές της ιδιότητας της παραμέτρου. Αν τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι φαινόμενες αντιστάσεις, τότε η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$J_{i,j} = \frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \rho_j} = -\frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \sigma_j} = \frac{2\pi \partial \Delta V}{GI \partial \sigma_j} \quad (2.18)$$

Από την παραπάνω εξίσωση, ο γεωμετρικός παράγοντας G καθώς και η ένταση του ρεύματος (που εισάγεται στο έδαφος) είναι γνωστά, έτσι ο Ιακωβιανός πίνακας μπορεί να βρεθεί με τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής του δυναμικού προς τη μεταβολή της αγωγιμότητας.

2.7 Υπολογισμός Ιακωβιανού πίνακα για ομογενή γη

Ο πίνακας ευαισθησίας για ομογενή γη μπορεί να υπολογιστεί μαθηματικά από την παράγωγο Φρεσέτ (McGillivray και Oldenburg 1990). Αν υποθέσουμε την απλή διάταξη πόλου-πόλου που φαίνεται στο σχήμα 2.18, με το ηλεκτρόδιο ρεύματος να βρίσκεται στη θέση (0,0,0) και το ηλεκτρόδιο δυναμικού στη θέση (α,0,0), και εισάγουμε ρεύμα ένταση 1A τότε θα παρατηρήσουμε στο ηλεκτρόδιο δυναμικού, μία διαφορά δυναμικού φ. Αν τώρα αλλάξουμε κατά δρ την αντίσταση σε μια σημειακή περιοχή στο έδαφος με όγκο dτ, στη θέση (x,y,z), έχει αποδειχθεί (Loke και Barker 1995) ότι η διαφορά δυναμικού που θα παρατηρήσουμε στο ηλεκτρόδιο P1 δίνεται από τον τύπο:

$$\delta\varphi = \frac{\delta\rho}{\rho^2} \int_V \nabla\varphi \cdot \nabla\varphi' d\tau \quad (2.19)$$

Όπου η αλλαγή της αντίστασης έχει σταθερή τιμή σε σημειακό στοιχείο όγκου dτ και μηδέν στην υπόλοιπη περιοχή. Η παράμετρος φ' είναι το δυναμικό που προκύπτει από ηλεκτρόδιο ρεύματος στη θέση P1. Σε ομογενή γη το δυναμικό φ σε σημείο στον ημιχώρο από σημειακή πηγή στην επιφάνεια δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

$$\varphi = \frac{\rho}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \text{ και} \quad (2.20)$$
$$\varphi' = \frac{\rho}{2\pi\sqrt{(x - \alpha)^2 + y^2 + z^2}}$$

Μετά την παραγωγή των εξισώσεων (2.20) και την αντικατάστασή τους στην (2.19) προκύπτει:

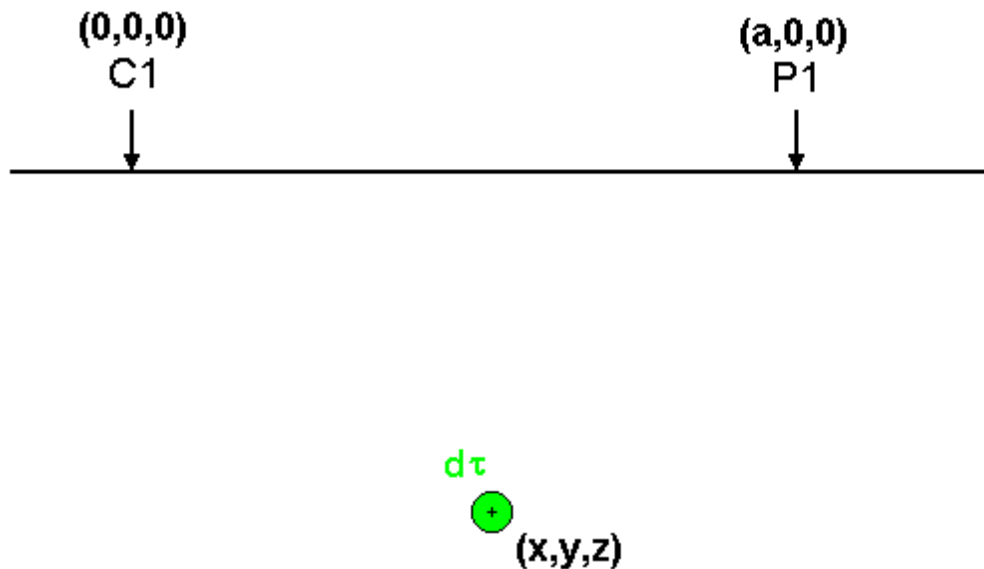
$$\frac{\delta\varphi}{\delta\rho} = \int_V \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{x(x - \alpha) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}((x - \alpha)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx dy dz \quad (2.21)$$

Η 3D παράγωγος Φρεσέτ δίνεται από τον όρο μέσα στο ολοκλήρωμα, έτσι έχουμε:

$$F(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{x(x - \alpha) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}((x - \alpha)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2.22)$$

Η εξίσωση (2.22) είναι η εξίσωση ευαισθησίας για τη διάταξη πόλου-πόλου, με ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού. Για να πάρουμε την εξίσωση ευαισθησίας για μία διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, χρειάζεται απλά να προσθέσουμε τις συνεισφορές από τα τέσσερα ζεύγη ηλεκτροδίων δυναμικού-ρεύματος (AM, AN, BM, BN).

Η συγκεκριμένη εξίσωση (2.22) χρησιμοποιείται και για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα για ομογενή γη στο πρόγραμμα της παρούσας διατριβής.



Σχήμα 2.18 Διάταξη pole-pole για τον υπολογισμό της συνάρτησης ευαισθησίας σε σημείο (x,y,z). Το C1 δηλώνει το ηλεκτρόδιο ρεύματος, ενώ το P1 το ηλεκτρόδιο δυναμικού (Loke 2004).

3. Εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες μέθοδοι εύρεσης βέλτιστων πρωτοκόλλων. Μία εκτενέστερη ανάλυση γίνεται στη μέθοδο εύρεσης βέλτιστων διατάξεων μέτρησης με τη χρήση του Ιακωβιανού πίνακα, καθώς αυτή χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του προγράμματος της παρούσας εργασίας.

3.1 Εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης με τη χρήση του πίνακα διακριτικής ικανότητας

Ο πίνακας διακριτικής ικανότητας, \mathbf{R} , ορίζεται ως:

$$\mathbf{R} = \mathbf{m}_{\text{fit}} / \mathbf{m}_{\text{true}}$$

όπου \mathbf{m}_{fit} είναι η εκτίμηση των αντιστάσεων του μοντέλου όπως αυτές προσδιορίζονται από τη διαδικασία της αντιστροφής και \mathbf{m}_{true} είναι οι πραγματικές αντιστάσεις, οι οποίες είναι άγνωστες (Menke, 1984). Εάν κάθε παράμετρος του μοντέλου έχει τέλεια ανάλυση τότε $\mathbf{R}=\mathbf{I}$, όπου \mathbf{I} είναι ο μοναδιαίος πίνακας, ειδάλως η κάθε γραμμή του πίνακα \mathbf{R} δίνει την καλύτερη δυνατή προσέγγιση της αντίστοιχης γραμμής του \mathbf{I} βάση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων με περιορισμό (Jackson, 1972).

Ο πίνακας \mathbf{R} μπορεί να ορισθεί μόνο για γραμμικά προβλήματα αντιστροφής (Friedel, 2003). Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι το ευθύ πρόβλημα είναι μη γραμμικό, η αντιστροφή των ηλεκτρικών τομογραφιών εφαρμόζεται μέσω μιας επαναληπτικής σειράς γραμμικών βημάτων (Loke & Barker, 1995) που επιτρέπει μια πρώτη εκτίμηση του πίνακα διακριτικής ικανότητας \mathbf{R} που ορίζεται ως:

$$\mathbf{R} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mathbf{C})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{J}$$

όπου το στοιχείο \mathbf{J}_{ij} του Ιακωβιανού πίνακα είναι ο λογάριθμος της ευαισθησίας της i μέτρησης σε μια μεταβολή της αντίστασης της j παραμέτρου του μοντέλου και ο πίνακας \mathbf{C} περιλαμβάνει τους παράγοντες απόσβεσης, τους περιορισμούς και τα χωρικά φίλτρα που εξομαλύνουν την αντιστροφή (Loke et al., 2003). Εφόσον ο πίνακας \mathbf{R} είναι η καλύτερη δυνατή προσέγγιση του πίνακα \mathbf{I} , με βάση τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, το εύρος τιμών της διακριτικής ικανότητας του μοντέλου είναι $0 \leq \mathbf{R}(j) \leq 1$. Δηλαδή ο πίνακας \mathbf{R} δίνει με απλό τρόπο μια μέτρηση του πόσο καλά αναλύεται η j παράμετρος του μοντέλου αντιστάσεων από τα δεδομένα (το $\mathbf{R}(j)$ είναι 0 όταν η παράμετρος δεν αναλύεται καθόλου και 1 όταν αναλύεται τέλεια).

Αρχικά, οι Stummer et al. (2004) ανέπτυξαν πρώτοι μία μέθοδο για την εύρεση βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης που στηρίζεται στον πίνακα διακριτικής ικανότητας R. Ο αλγόριθμος ξεκινά με ένα “αρχικό” σύνολο συνδυασμών ηλεκτροδίων, το οποίο έχει καταγραφεί με μια από τις καθιερωμένες διατάξεις ηλεκτροδίων (π.χ. διπόλου-διπόλου). Στη συνέχεια, με βάση κάποια κριτήρια, αναγνωρίζονται και επιλέγονται από το “ολικό” σύνολο δεδομένων οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων που δίνουν την περισσότερη επιπλέον πληροφορία. Έτσι δημιουργείται ένα βέλτιστο σύνολο συνδυασμών ηλεκτροδίων.

Έστω ότι υπάρχουν $n \cdot m$ παράμετροι αντιστροφής και ότι ο Ιακωβιανός πίνακας J του “ολικού” συνόλου δεδομένων ορίζεται ως J^{compr} . Τότε, από τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων του “ολικού” συνόλου επιλέγονται οι “βασικοί” συνδυασμοί, οι οποίοι επιτρέπουν την υποδιαίρεση του πίνακα J^{compr} σε έναν βασικό (J^{base}) πίνακα και σε έναν υπολειπόμενο (J^{add}) πίνακα. Στην αρχή της διαδικασίας εύρεσης βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης οι συνδυασμοί αντιστοιχούν σε μια από τις παραδοσιακές διατάξεις (π.χ. διπόλου-διπόλου), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή του “αρχικού” συνόλου δεδομένων. Όταν ξεκινάει δηλαδή η διαδικασία βελτιστοποίησης, το “βασικό” σύνολο δεδομένων αντιστοιχεί στο “αρχικό” σύνολο δεδομένων. Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο χρησιμοποιείται ως αρχικό μοντέλο σε όλους τους υπολογισμούς ένας ομογενής ημιχώρος. Στο επόμενο βήμα οι συνδυασμοί που περιέχονται στον J^{add} πίνακα κατατάσσονται με βάση μία συνάρτηση βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση αυτή όταν παίρνει τη μέγιστη τιμή της (που είναι ίση με ένα), σημαίνει ότι απαιτείται η προσθήκη επιπλέον συνδυασμών ηλεκτροδίων στο “βασικό” σύνολο δεδομένων, προκειμένου να ερμηνευτεί η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Συνεπώς, από τους υπολειπόμενους συνδυασμούς ηλεκτροδίων επιλέγονται οι συνδυασμοί αυτοί που βρίσκονται υψηλά στη σειρά κατάταξης με βάση τη συνάρτηση βελτιστοποίησης. Προκειμένου, οι υποψήφιοι συνδυασμοί ηλεκτροδίων να θεωρηθούν κατάλληλοι για να προστεθούν στο “βασικό” σύνολο δεδομένων, πρέπει να ελεγχθεί η γραμμική τους ανεξαρτησία σε σχέση με το “βασικό” σύνολο δεδομένων.

Το 2006 οι Wilkinson et al. βασίζόμενοι στη μεθοδολογία των Stummer et al. (2004) ανέπτυξαν μία μέθοδο εύρεσης βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης η οποία στηρίζεται και αυτή στον πίνακα διακριτικής ικανότητας R. Η διαδικασία εύρεσης βέλτιστων διατάξεων ξεκινά με ένα μικρό σύνολο δεδομένων (π.χ. τη διάταξη διπόλου-διπόλου). Στη συνέχεια υπολογίζονται δύο πίνακες διακριτικής ικανότητας, ο R^{base} για το “βασικό” σύνολο δεδομένων και ο R^{compr} για το “ολικό” σύνολο που περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τετράδων ηλεκτροδίων. Κάθε συνδυασμός που δεν περιλαμβάνεται στο “βασικό” σύνολο δεδομένων κατατάσσεται βάση μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης. Και εδώ, όπως και στους Stummer et al. (2004), χρησιμοποιείται ως αρχικό μοντέλο ένας ομογενής ημιχώρος. Ωστόσο η συνάρτηση βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται εδώ έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με εκείνη που εφαρμόζεται από τους Stummer et al. (2004). Η χρήση των “βασικών” συνδυασμών τείνει να αναγκάσει την επιλογή συνδυασμών, οι οποίοι είναι σε μεγάλο βαθμό γραμμικά ανεξάρτητοι από το “βασικό” σύνολο δεδομένων και επιπλέον βελτιώνουν τη διακριτική ικανότητα περιοχών

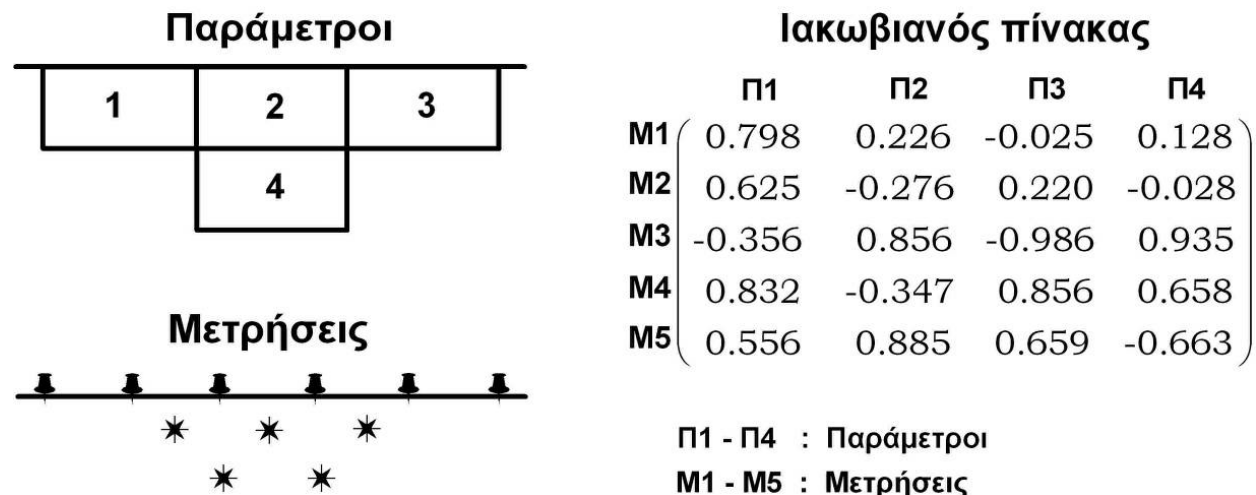
του μοντέλου που έχουν χαμηλή ανάλυση. Εφόσον η συνάρτηση βελτιστοποίησης υπολογιστεί για όλους τους “υπολειπόμενους” συνδυασμούς, ένα μικρό ποσοστό συνδυασμών που βρίσκονται υψηλά στη σειρά κατάταξης προστίθεται στο “βασικό” σύνολο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η διακριτική ικανότητα του μοντέλου κριθεί ως επαρκής ή έως ότου το “βασικό” σύνολο δεδομένων αποκτήσει τον επιθυμητό αριθμό συνδυασμών τετράδων ηλεκτροδίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεθοδολογίες εύρεσης βέλτιστων διατάξεων μέτρησης τόσο κατά τους Stummer et al. (2004) όσο και κατά τους Wilkinson et al. (2006), προκειμένου να υπολογίσουν τον πίνακα διακριτικής ικανότητας R καθώς και τις συναρτήσεις βελτιστοποίησης, που είναι απαραίτητα για την εύρεση των βέλτιστων συνδυασμών ηλεκτροδίων, εισέρχονται στη διαδικασία της αντιστροφής. Κατά την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος, τα σφάλματα που προέρχονται από τη μοντελοποίηση του υπεδάφους, λόγω παραδοχών που γίνονται και των περιορισμών που λαμβάνονται υπόψη, μεγεθύνονται και “μολύνουν” με θόρυβο τη διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων συνδυασμών ηλεκτροδίων, κάνοντάς τη λιγότερο αξιόπιστη σε σύγκριση με μεθόδους εύρεσης βέλτιστων διατάξεων μέτρησης που δεν εισέρχονται στη διαδικασία της αντιστροφής.

3.2 Εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης με τη χρήση του Ιακωβιανού πίνακα

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο (Athanasίου et al 2009), για την επιλογή των βέλτιστων μετρήσεων αρκεί ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα και δεν απαιτείται η εισαγωγή του αλγορίθμου στη διαδικασία της αντιστροφής, η οποία (α) είναι χρονοβόρα, ιδιαίτερα στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται πολλά ηλεκτρόδια για τη δημιουργία του πλήρους συνόλου δεδομένων και (β) μεγεθύνει τα σφάλματα που προέρχονται από τη μοντελοποίηση του υπεδάφους εισάγοντας θόρυβο στη διαδικασία επιλογής των βέλτιστων μετρήσεων.

Για να γίνει δυνατή η εύρεση των βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης πρέπει αρχικά να κατασκευαστεί ένα πλήρες σύνολο δεδομένων (full). Το πλήρες αυτό σετ στη συγκεκριμένη εργασία περιλαμβάνει όλους τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων για τέσσερις επιλεγμένες διατάξεις. Οι διατάξεις που έχουν ενσωματωθεί στο πρόγραμμα είναι: α) μία τροποποιημένη μορφή της διάταξης πόλου-πόλου, β) η διάταξη διπόλου-διπόλου γ) η multiple gradient και δ) η διάταξη N11. Από το σύνολο αυτό αφαιρούνται αρχικά οι συνδυασμοί αυτοί για τους οποίους ο γεωμετρικός παράγοντας K είναι μεγαλύτερος από μια τιμή (π.χ. $K > 7500$) και προκύπτει το “ολικό” σύνολο δεδομένων.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας J , ο οποίος εκφράζει το ποσοστό μεταβολής στην τιμή μιας μέτρησης της φαινόμενης αντίστασης αν μεταβληθεί η αντίσταση μιας παραμέτρου του μοντέλου. Ο Ιακωβιανός υπολογίζεται από την συνάρτηση ευαισθησίας (2.22) για κάθε παράμετρο του μοντέλου και για κάθε μέτρηση. Για παράδειγμα, το μοντέλο του σχήματος (3.1), το οποίο αποτελείται από τέσσερις παραμέτρους και για τη διασκόπηση του οποίου πραγματοποιήθηκαν πέντε μετρήσεις, ο Ιακωβιανός πίνακας δίνεται ως ένας πίνακας πέντε γραμμών και τεσσάρων στηλών.

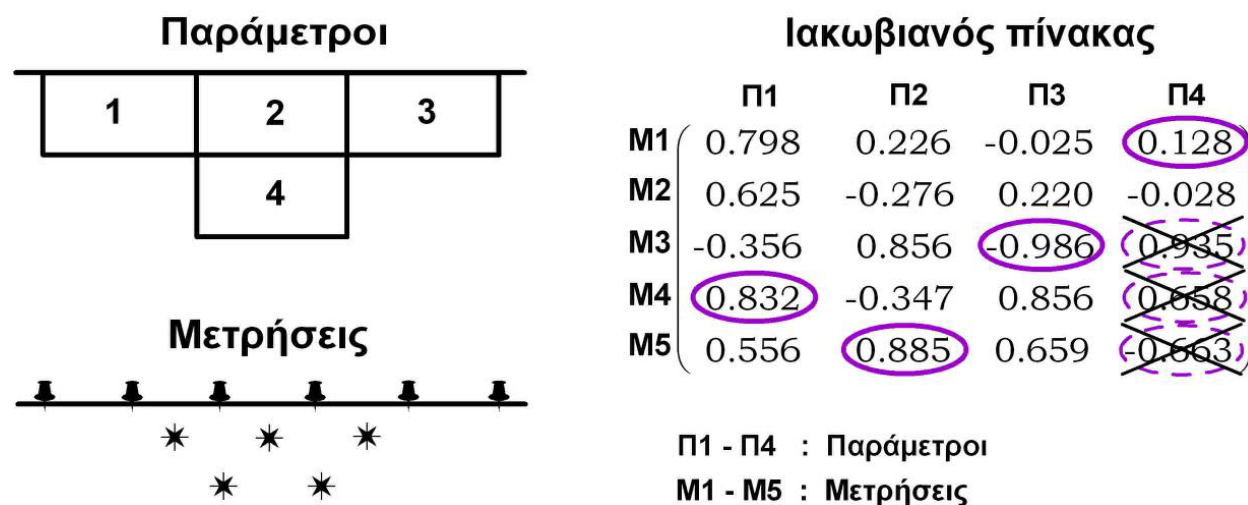


Σχήμα 3.1 Ιακωβιανός πίνακας για ένα μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων (Athanasίου et al 2009).

Στη συνέχεια, για κάθε παράμετρο, επιλέγονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη, κατά απόλυτη τιμή, ευαισθησία,

με την προϋπόθεση ότι δεν έχουν ήδη επιλεγεί από προηγούμενη επανάληψη. Οι συνδυασμοί αυτοί αποτελούν το “βέλτιστο” σύνολο δεδομένων.

Έτσι, για το μοντέλο του σχήματος (3.1) και για την παράμετρο Π1 επιλέγεται ο συνδυασμός ηλεκτροδίων που παρουσιάζει για τη συγκεκριμένη παράμετρο τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία, δηλαδή ο συνδυασμός ηλεκτροδίων που δίνει τη μέτρηση M4. Αντίστοιχα, για την παράμετρο Π2 επιλέγεται ο συνδυασμός ηλεκτροδίων που δίνει τη μέτρηση M5 και για την παράμετρο Π3 επιλέγεται ο συνδυασμός ηλεκτροδίων που δίνει τη μέτρηση M3. Στην παράμετρο Π4 ο συνδυασμός ηλεκτροδίων που έχει τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία δίνει τη μέτρηση M3. Όμως, η μέτρηση αυτή έχει ήδη επιλεγεί από την παράμετρο Π3, έτσι αναζητείται ο συνδυασμός ηλεκτροδίων που έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία, δηλαδή αυτός που δίνει τη μέτρηση M5. Αλλά και αυτή η μέτρηση έχει ήδη επιλεγεί, όπως επίσης και η μέτρηση M4 που έχει την τρίτη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία. Επομένως, για την παράμετρο Π4 επιλέγεται τελικά ο συνδυασμός ηλεκτροδίων που δίνει τη μέτρηση M1, ο οποίος έχει τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία από τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων που δεν έχουν επιλεγεί από κάποια προηγούμενη παράμετρο.

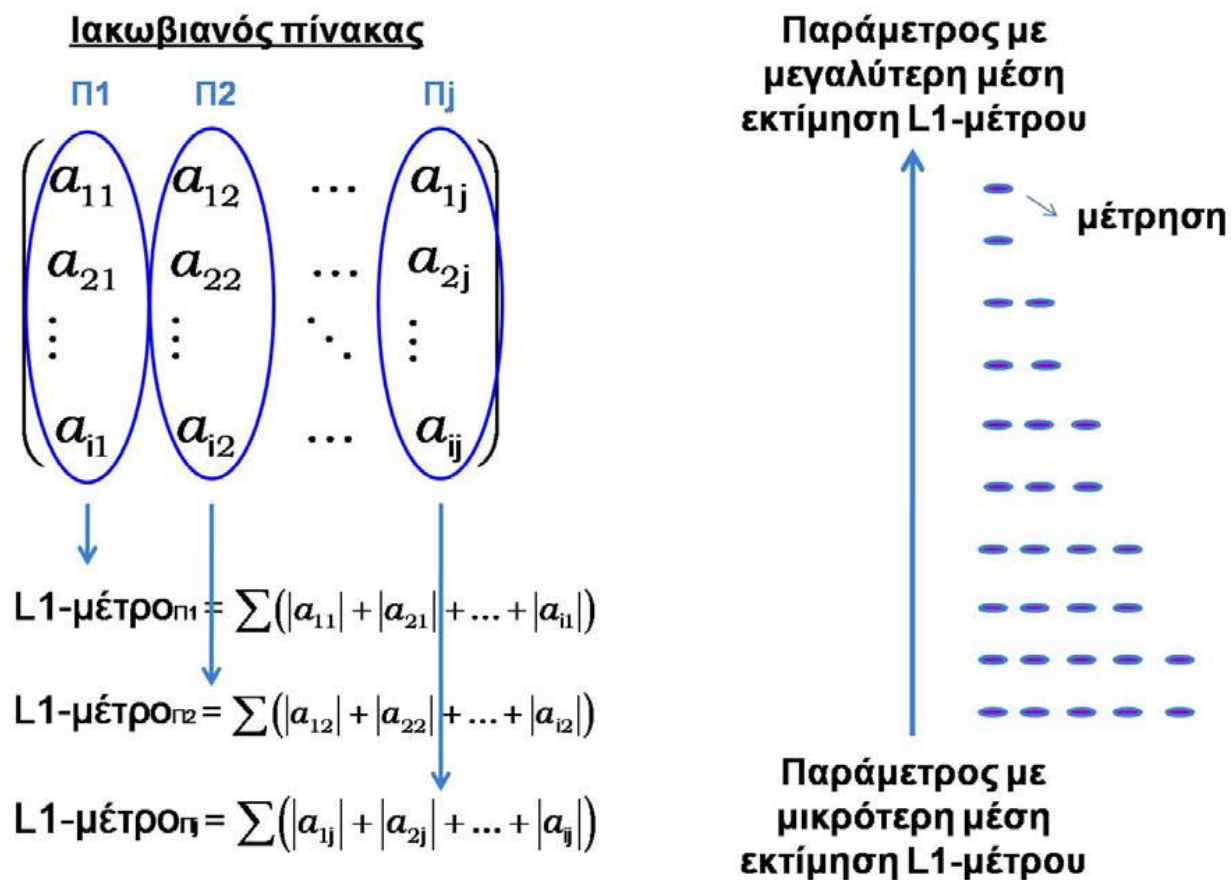


Σχήμα 3.2 Διαδικασία επιλογής συνδυασμών ηλεκτροδίων σύμφωνα με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα (Athanasiou et al 2009).

Οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων που θα επιλεγούν σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία θα είναι τουλάχιστον τόσοι, όσες και οι παράμετροι του μοντέλου και αποτελούν το βέλτιστο σύνολο δεδομένων. Όμως η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί για να επιλεγούν περισσότεροι συνδυασμοί ηλεκτροδίων από κάθε παράμετρο του.

Προκειμένου να ληφθεί περισσότερη πληροφορία για τις περιοχές του μοντέλου που είναι λιγότερο ευαίσθητες, προστίθεται ένα επιπλέον κριτήριο στη διαδικασία εύρεσης βέλτιστων διατάξεων με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα. Σύμφωνα με αυτό, υπολογίζονται αρχικά τα

αθροίσματα των απολύτων τιμών του Ιακωβιανού πίνακα για κάθε παράμετρο, τα οποία αποτελούν τα L1-μέτρα κάθε παραμέτρου (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Υπολογισμός των L1-μέτρων των παραμέτρων του Ιακωβιανού πίνακα και κατάταξη των παραμέτρων με βάση των μέσων εκτιμήσεων L1-μέτρων (Athanasίου et al 2009).

Στη συνέχεια, οι παράμετροι ταξινομούνται βάσει της μέσης εκτίμησης των L1-μέτρων τους, από τις παραμέτρους που έχουν τη μικρότερη μέση εκτίμηση του L1-μέτρου τους και επομένως είναι λιγότερο ευαίσθητες σε μεταβολές της πραγματικής αντίστασης του μοντέλου προς τις παραμέτρους που έχουν τη μεγαλύτερη μέση εκτίμηση του L1-μέτρου τους και επομένως είναι περισσότερο ευαίσθητες σε μεταβολές της πραγματικής αντίστασης του μοντέλου. Η μέση εκτίμηση του L1-μέτρου μιας παραμέτρου δίνεται από το λόγο του L1-μέτρου προς τον αριθμό των μετρήσεων της παραμέτρου. Περισσότερες μετρήσεις επιλέγονται από τις παραμέτρους που έχουν μικρότερη μέση εκτίμηση του L1- μέτρου τους.

Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας εύρεσης των βέλτιστων συνδυασμών ηλεκτροδίων, οι καταταγμένες παράμετροι χωρίζονται σε κλάσεις. Ο αριθμός των κλάσεων είναι ίσος με τον αριθμό της τρέχουσας επανάληψης. Το εύρος της κάθε κλάσης δίνεται από τη σχέση:

$$step = P_{max} / iter \quad (3.1)$$

όπου P_{max} είναι ο αριθμός των καταταγμένων παραμέτρων του μοντέλου.

Μια μέτρηση, δηλαδή ένας συνδυασμός ηλεκτροδίων, που έχει τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία για μια παράμετρο και δεν έχει ήδη επιλεγεί από κάποια προηγούμενη παράμετρο, θα επιλεγεί μόνο εάν η κλάση στην οποία έχει καταταγεί η παράμετρος είναι ίση με τον αριθμό της τρέχουσας επανάληψης της διαδικασίας εύρεσης βέλτιστων μετρήσεων. Η τιμή P_{class} δίνεται από τη σχέση:

$$P_{class} = \text{floor}[(P_{max} - P_j)/step] + 1 \quad (3.2)$$

όπου P_j είναι η εξεταζόμενη παράμετρος. Έτσι, αν παραδείγματος χάριν, έχουμε ένα μοντέλο 100 παραμέτρων ($P_{max}=100$) και η διαδικασία εύρεσης βέλτιστων συνδυασμών ηλεκτροδίων βρίσκεται στην πέμπτη επανάληψη ($iter=5$) τότε οι καταταγμένες παράμετροι θα χωριστούν σε πέντε κλάσεις και το εύρος της κάθε κλάσης θα είναι: $step=100/5=20$. Η μέτρηση που έχει τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία σε μεταβολές της πραγματικής αντίστασης του μοντέλου για μια παράμετρο και δεν έχει ήδη επιλεγεί από προηγούμενη παράμετρο, θα επιλεγεί μόνο εάν $P_{class}=5$.

Συνεπώς, εάν αναζητείται η μέτρηση που έχει τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία για την ογδοηκοστή πέμπτη παράμετρο, τότε $P_{class}=\text{floor}[(100-85)/20]+1 \Rightarrow P=1$ και η μέτρηση αυτή δεν θα επιλεγεί. Αντίθετα, εάν αναζητείται η μέτρηση που έχει τη μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή ευαισθησία για την έβδομη παράμετρο, τότε $P_{class}=\text{floor}[(100-7)/20]+1 \Rightarrow P=5$ και η μέτρηση αυτή θα επιλεγεί για να συμπεριληφθεί στο “βέλτιστο” σύνολο δεδομένων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος εύρεσης βέλτιστων διατάξεων βάσει του Ιακωβιανού πίνακα απαιτεί τη λύση μόνο του ευθέως προβλήματος και δεν εισέρχεται στη διαδικασία της αντιστροφής για τον υπολογισμό του αντιστρόφου του Ιακωβιανού πίνακα J^{-1} και στη συνέχεια του πίνακα διακριτικής ικανότητας R , όπως στις μεθοδολογίες των Stummer et al. (2004) και Wilkinson et al. (2006). Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος κατασκευής μιας βέλτιστης διάταξης, και επιπλέον να γίνεται η διαδικασία επιλογής βέλτιστων συνδυασμών ηλεκτροδίων πιο αξιόπιστη σε σύγκριση με τις άλλες μεθοδολογίες, αφού δεν θα επηρεάζεται από τα μεγεθυμένα κατά την αντιστροφή σφάλματα μοντελοποίησης του υπεδάφους.

4. Προσαρμοσμένη εύρεση βέλτιστων διατάξεων μέτρησης

4.1 Γενικά

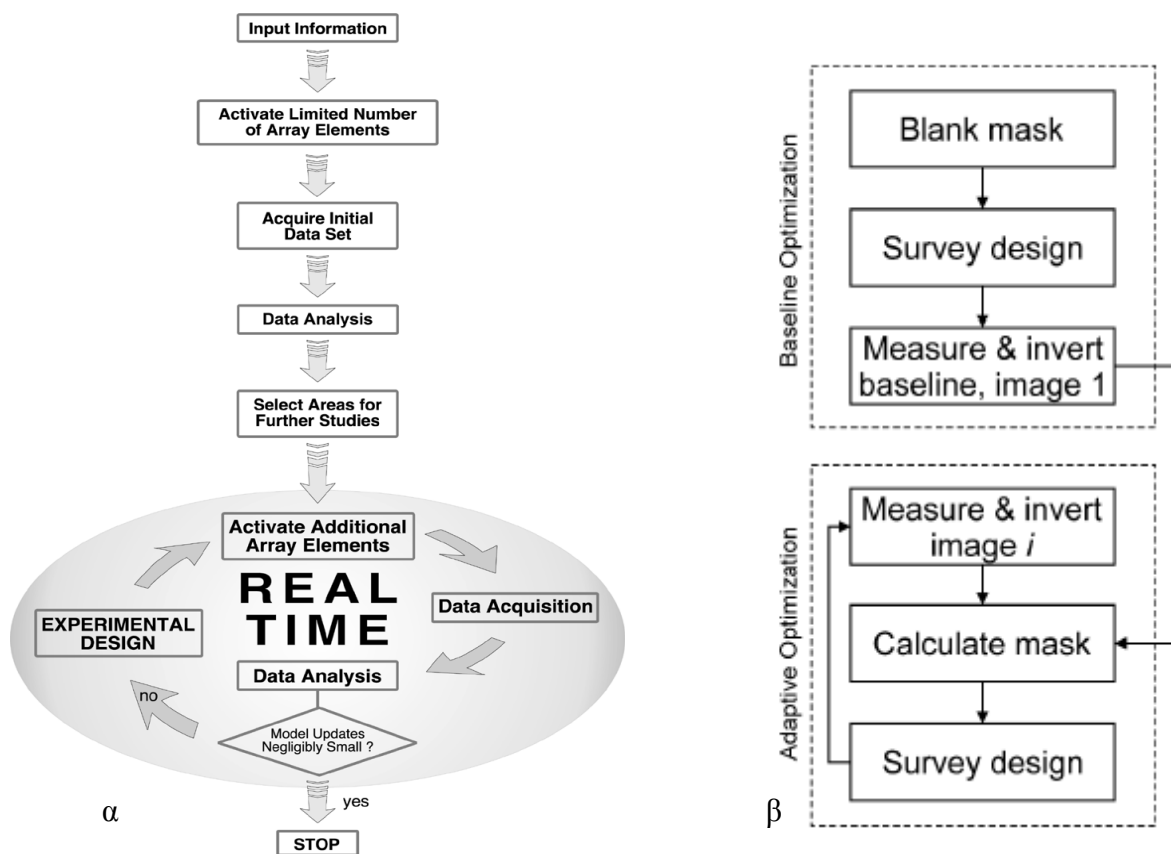
Η εισαγωγή και ανάπτυξη αυτοματοποιημένων οργάνων με τη χρήση πολλών ηλεκτροδίων για τη λήψη μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας έχει επιφέρει τη δημιουργία πολλών μεθόδων που σχετίζονται με τη σχεδίαση διατάξεων και την επεξεργασία των μετρήσεων. Ωστόσο η πλειονότητα των μεθόδων αυτών χρησιμοποιούνται κυρίως για τη κατασκευή στατικών (στο χρόνο) διατάξεων. Η χρήση προσαρμοσμένων βέλτιστων διατάξεων αρχικά προτάθηκε από τους Stummer et al. (2002). Η χρήση τέτοιων μεθόδων, που προσαρμόζουν δηλαδή των αριθμό των μετρήσεων ανάλογα με το περιβάλλον, είναι δυνατόν να αυξήσουν την διακριτική ικανότητα ορισμένων τμημάτων της εκάστοτε γεωφυσικής εικόνας. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην αύξηση της διαθέσιμης πληροφορίας καθώς επίσης και στη δημιουργία διατάξεων για την παρακολούθηση δυναμικών υπεδάφιαν διεργασιών (Khodja et al. 2010).

Αρχικά οι Stummer et al (2002) πρότειναν τη χρήση τέτοιων μεθόδων ώστε να γίνεται αρχικά μία *insitu* αξιολόγηση των στοιχείων ώστε να καθοριστούν οι περιοχές με χαμηλή ανάλυση και να παρθούν επιπλέον μετρήσεις στη περιοχή με τη χρήση κατάλληλων συνδυασμών ηλεκτροδίων. Αναλυτικότερα πρότειναν να λαμβάνεται αρχικά ένας περιορισμένος αριθμός μετρήσεων στη περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια μέσω γρήγορων αλγορίθμων αντιστροφής, όπως της quasi-Newton μεθόδου ή μέσω της προσέγγισης της πολυκάναλης αποσυνέλιξης, που θα γίνονται στην ύπαιθρο αμέσως μετά τη λήψη των μετρήσεων, θα παρέχεται μία πρώτη γρήγορη εκτίμηση της κατανομής αντίστασης. Για να εξαχθεί επιπλέον πληροφορία για τις περιοχές με χαμηλή ανάλυση, θα προσαρμόζονται οι διατάξεις έτσι ώστε να παίρνονται παραπάνω μετρήσεις στις συγκεκριμένες περιοχές. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και των ανωμαλιών που παρατηρούνται, θα πρέπει να επιλέγεται αν οι επιπλέον μετρήσεις θα αποτελούνται από μετρήσεις μίας κλασσικής διάταξης, ή αν θα είναι αποτέλεσμα συνδυασμού διαφόρων διατάξεων. Για να είναι χρήσιμη μία τέτοια μέθοδος άμεσης εφαρμογής (*real-time*), θα πρέπει τα αποτελέσματα να αξιολογούνται άμεσα. Αυτό οδηγεί σε μία σειρά διαδικασιών όπως η συλλογή δεδομένων, η ανάλυση τους και η ανανέωση του μοντέλου. Ένα κριτήριο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφασιστεί αν θα παρθούν πρόσθετες μετρήσεις, είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*rms*). Αν παρατηρείται σημαντική διαφορά στη τιμή του *rms* μεταξύ δυο διαδοχικών μοντέλων αντιστροφής, τότε η διαδικασία συνεχίζεται.

Η εξέλιξη των υπολογιστών και της υπολογιστικής ισχύος τα τελευταία χρόνια έκανε δυνατή τη ανάπτυξη τέτοιων τεχνικών. Οι Wilkinson et al. (2015) με τη χρήση επαναληπτικών αλγορίθμων τροποποίησαν μία μέθοδο εύρεσης στατικών βέλτιστων πρωτοκόλλων ώστε να προσαρμόζεται και να εστιάζει σε συγκεκριμένες περιοχές. Με τη χρησιμοποίηση τεχνικών ανάλυσης εικόνας, κατάφεραν να εντοπίζουν ποιες υπεδάφιας περιοχές υπόκεινται σε σημαντικές αλλαγές και να

αυξάνουν την ανάλυση τους. Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος που ανέπτυξαν βασίζεται στη σύγκριση του πίνακα διακριτικής ικανότητας R.

Στο σχήμα 4.1β το διάγραμμα ροής παρουσιάζει συνοπτικά την μέθοδο αυτή. Αρχικά παίρνονται οι βασικές μετρήσεις χωρίς να επιλέγεται κάποια περιοχή (κενή "μάσκα"). Τα δεδομένα αντιστρέφονται και το αποτέλεσμα αποτελεί τη βασική εικόνα. Στη συνέχεια λαμβάνεται ένα δεύτερο σετ βασικών μετρήσεων (πρώτο σετ δεδομένων). Οι αλλαγές που παρατηρούνται μεταξύ των δύο εικόνων ("πρώτης" και "βασικής") χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επόμενης μάσκας. Αυτή αποτελεί τη βάση για το σχεδιασμό των επόμενων μετρήσεων. Η σύγκριση των μετρήσεων με τις βασικές και ο υπολογισμός της μάσκας επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενη μέτρηση.



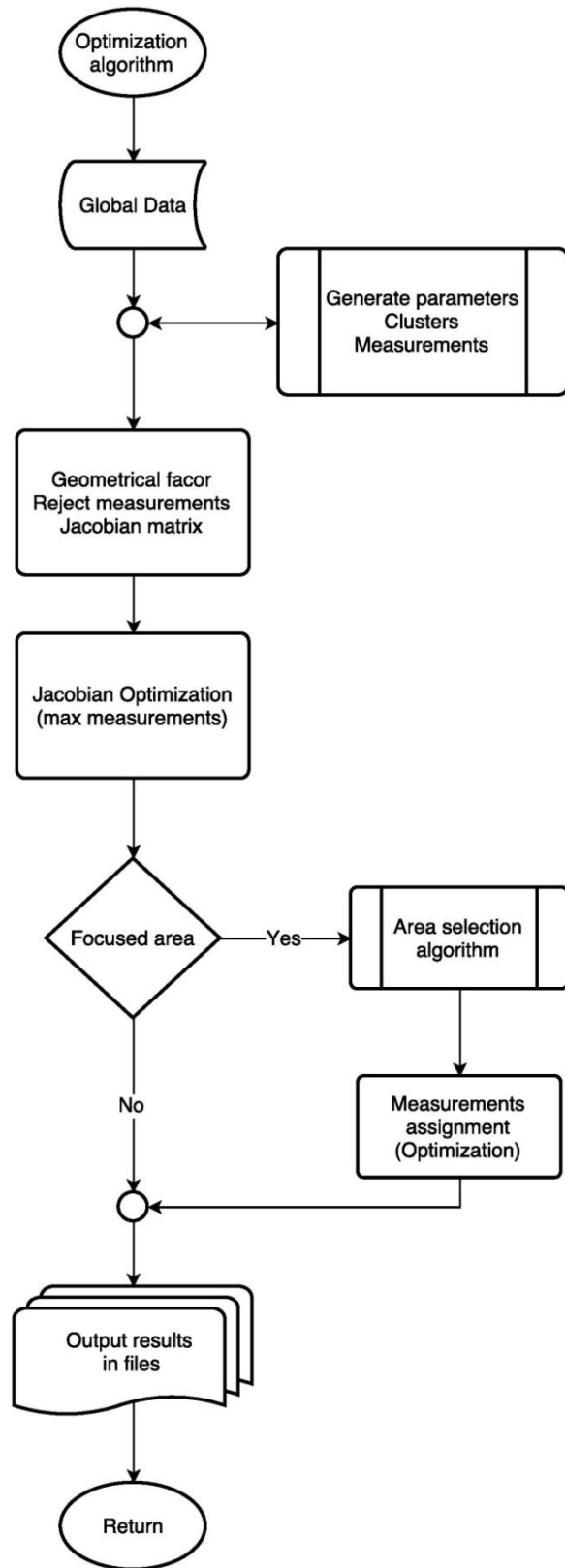
Σχήμα 4.1 α) Διάγραμμα ροής για την παρακολούθηση υπεδάφιων στόχων σε πραγματικό χρόνο (Stummer et al. 2002) β) Διάγραμμα ροής της μεθόδου προσαρμοσμένων μετρήσεων με τη χρήση μάσκας (Wilkinson et al. 2015)

4.2 Αλγόριθμοι προσαρμοσμένης εύρεσης βέλτιστων διατάξεων μέτρησης

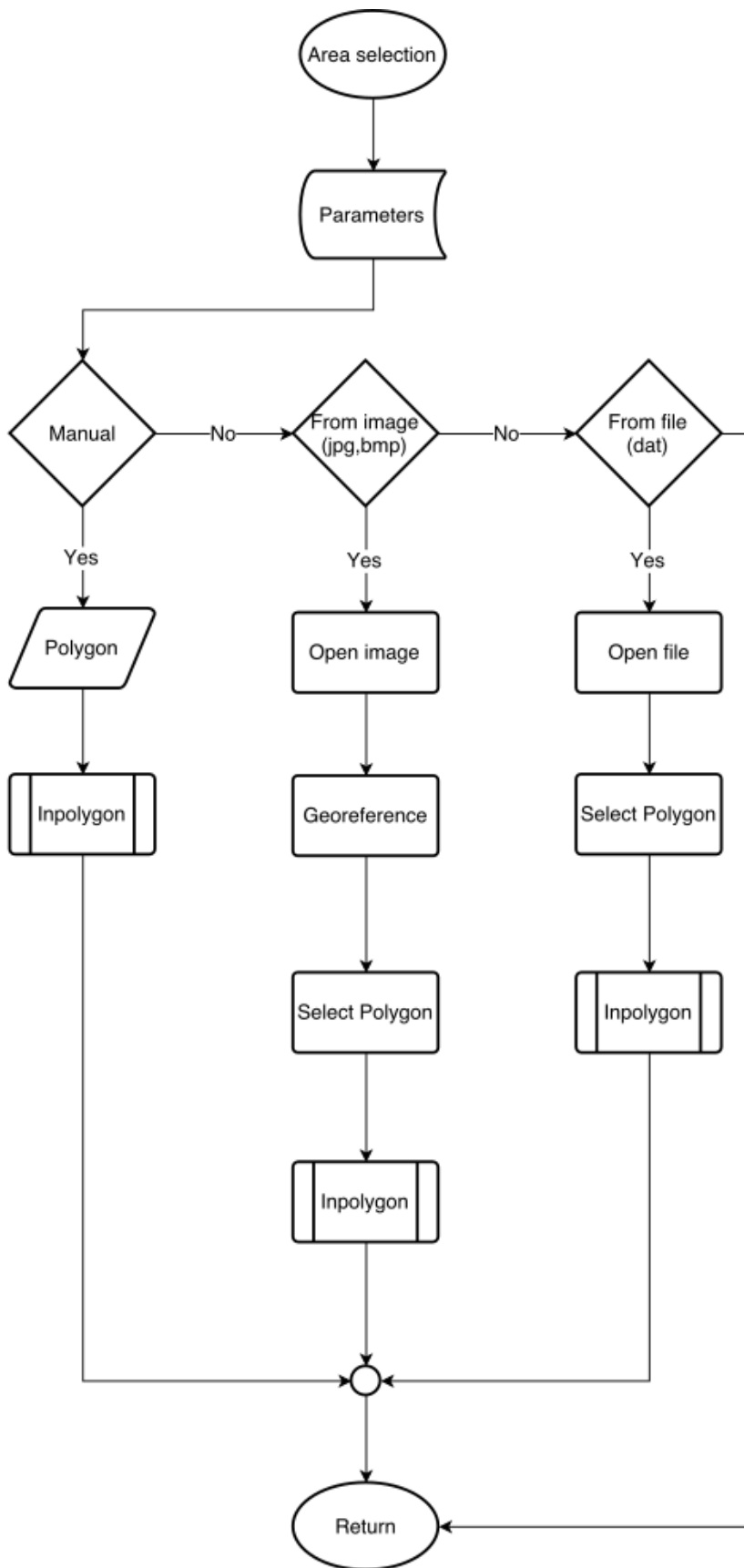
Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων για επιλογή βέλτιστων πρωτοκόλλων για διαχρονικές ηλεκτρικές μετρήσεις. Η μέθοδος βελτιστοποίησης βασίζεται στην χρήση του Ιακωβιανού πίνακα ως μέτρο για την επιλογή βέλτιστων διατάξεων (Athanasίου, 2009). Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab, για την επιλογή μιας συγκεκριμένης περιοχής, που αναμένεται κάποια αλλαγή, ώστε στη περιοχή εκείνη να ληφθούν περισσότερες μετρήσεις για να αυξηθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων αντιστροφής.

Ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων καθορίζεται αυτόματα ενώ ο αριθμός των βέλτιστων μετρήσεων καθορίζεται από τον χρήστη. Επιπλέον η περιοχή της μεταβολής επιλέγεται άμεσα από το χρήστη. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να επιλέγονται τα καλύτερα πρωτόκολλα για την εκάστοτε περιοχή.

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον *guide* της Matlab ονομάζεται **Opt4Tim** και βασίστηκε σε ένα μέρος του στον αλγόριθμο *optsurf* που γράφηκε από τον κ. Π. Τσούρλο, ωστόσο έγιναν αρκετές μετατροπές στον κώδικα. Αποτελείται από δύο κύριους αλγορίθμους. Αμέσως μετά την εισαγωγή των δεδομένων από τον χρήστη καλείται ο αλγόριθμος *optimeas* (σχήμα 4.2). Σε αυτόν, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω, δηλώνονται οι αρχικές τιμές και, σε συνδυασμό με άλλες συναρτήσεις που καλούνται, δημιουργείται το αρχικό σετ των μετρήσεων. Έπειτα υπολογίζεται ο πίνακας ευαισθησίας (Ιακωβιανός) και επιλέγονται οι βέλτιστες μετρήσεις. Στη συνέχεια ελέγχεται εάν θέλει ο χρήστης να ορίσει περιοχή για πρόσθετες μετρήσεις. Εάν ισχύει η συνθήκη, τότε, καλείται ένα δεύτερο υποπρόγραμμα (σχήμα 4.3). Σε αυτό, ο χρήστης επιλέγει αρχικά τον τρόπο εισαγωγής και μετά τη περιοχή ενδιαφέροντος. Το αποτέλεσμα επιστρέφει στον αλγόριθμο *optimeas* και αφού υπολογιστούν και οι επιπλέον μετρήσεις τα αποτελέσματα γράφονται σε αρχεία. Παρακάτω γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν καθώς επίσης αναφέρονται και τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του τελικού προγράμματος.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου βελτιστοποίησης.



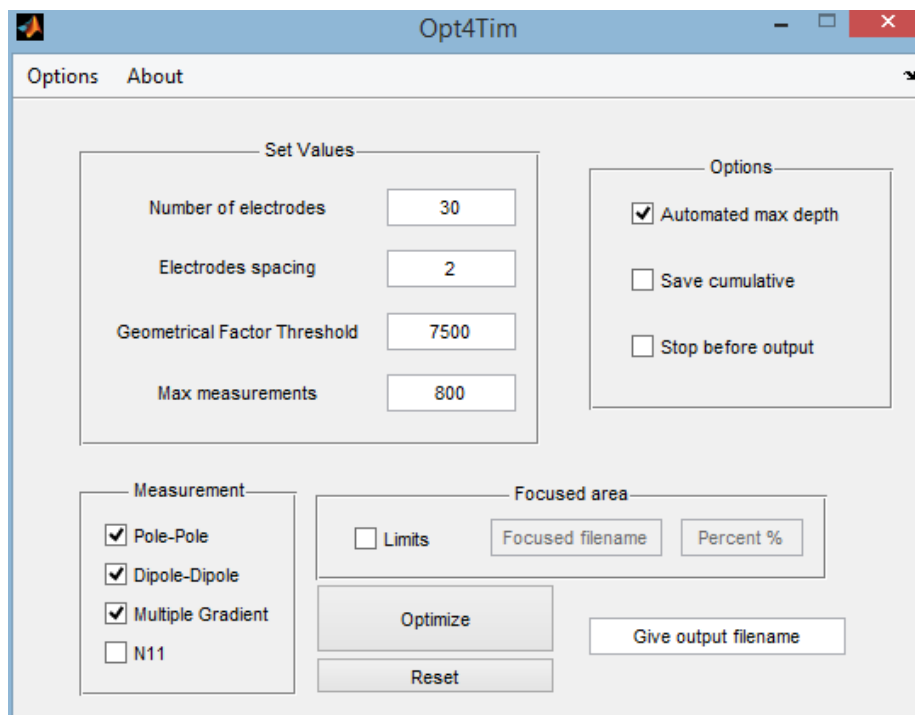
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου επιλογής της περιοχής που εμφανίζεται η αλλαγή.

4.3 Ο αλγόριθμος optimeas

Ο αλγόριθμος *optimeas* (σχήμα 4.2) αποτελεί ένα κώδικα γραμμένο σε γλώσσα Matlab που έχει σκοπό τη δημιουργία βέλτιστων πρωτοκόλλων με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται από ένα τμήμα του κύριου προγράμματος, καλείται δηλαδή σαν ξεχωριστή συνάρτηση. Αναλυτικότερα, έχει χωριστεί σε έξι βασικές υποκατηγορίες, οι οποίες είναι: 1) η δήλωση των αρχικών τιμών των μεταβλητών, 2) διαδικασίες που ασχολούνται με τη δημιουργία των παραμέτρων των πρωτοκόλλων και την εύρεση των clusters (βλ. κεφ. 3), 3) τη δημιουργία των μετρήσεων των πρωτοκόλλων, 4) την εύρεση του Ιακωβιανού πίνακα καθώς και του αθροιστικού (cumulative) Ιακωβιανού, 5) τη βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων και τον έλεγχο για εστιασμένη περιοχή και τέλος 6) τη αποθήκευση των πρωτοκόλλων.

Δήλωση αρχικών τιμών.

Αρχικά γίνεται η εκχώρηση των τιμών που έχουν δηλωθεί από το χρήστη στις κατάλληλες μεταβλητές. Οι τιμές που εισάγει ο χρήστης μέσα από το γραφικό περιβάλλον (σχήμα 4.4) αποθηκεύονται στα λεγόμενα **structures** τα οποία είναι δομές της Matlab που χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύονται τιμές από διάφορα πεδία (μπορούν να συγκριθούν κατά μία έννοια με τα αντικείμενα στη java). Στη συνέχεια και εάν το έχει επιλέξει ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον τρόπο υπολογισμού του μέγιστου βάθους. Τέλος πρέπει να τονισθεί ότι όλες οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται και από άλλες συναρτήσεις ή διαδικασίες ή εισάγονται από τον χρήστη σε άλλα μέρη του κύριου προγράμματος έχουν δηλωθεί ως **global** ώστε να αλληλεπιδρούν μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του gui.



Σχήμα 4.4 Κύριο παράθυρο προγράμματος.

Δημιουργία παραμέτρων και εύρεση αριθμού clusters

Η παραγωγή των παραμέτρων της μέτρησης γίνεται μέσα από μία συνάρτηση. Μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας παράγονται οι παράμετροι ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διάταξης. Οι παράμετροι αυτοί είναι τα σημεία στα οποία θα γίνουν οι μετέπειτα μετρήσεις και κατ' επέκταση τα σημεία εκείνα που θα χρησιμοποιηθούν για την αντιστροφή. Στο πρόγραμμα επιστρέφονται τρεις μεταβλητές που δηλώνουν τα σημεία των παραμέτρων (x και z) και επιπλέον ο αριθμός των παραμέτρων.

Όσον αφορά τώρα την επιλογή των clusters, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει από το αρχικό μενού εάν θα εισάγει χειροκίνητα τον αριθμό των clusters ή αν θα υπολογιστούν αυτόματα από το πρόγραμμα. Στη πρώτη περίπτωση παρακάμπτεται το τμήμα αυτό και το πρόγραμμα συνεχίζει. Στην αντίθετη περίπτωση, η επιλογή του αριθμού των cluster με αυτόματο τρόπο γίνεται από μία συνάρτηση με τη χρήση μιας επαναληπτικής διαδικασίας στην οποία συγκρίνεται ο αριθμός των παραμέτρων που μπορεί εν δυνάμει να περιέχονται σε ένα cluster με τον μέγιστο αριθμό των μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει και ο αριθμός των clusters. Έχουν οριστεί ως μέγιστο όριο cluster τα 20, κι' αυτό γιατί πρακτικά πάνω από αυτόν τον αριθμό δεν εμφανίζεται κάποια σημαντική διαφορά στο τελικό αποτέλεσμα. Τέλος να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα ενημερώνει τον χρήστη για το μέγιστο βάθος καθώς και για τον τελικό αριθμό των clusters που θα χρησιμοποιηθούν.

Δημιουργία των μετρήσεων των πρωτοκόλλων

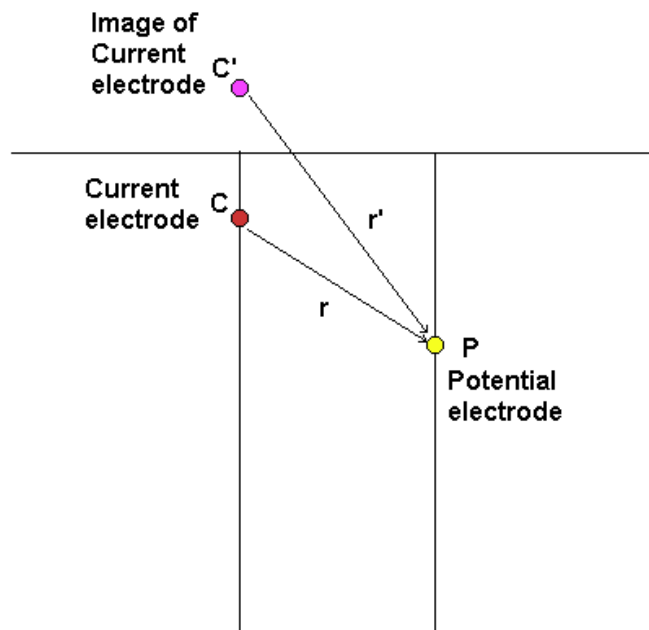
Το κομμάτι αυτό του κώδικα έχει χωριστεί σε τρία επιμέρους τμήματα τα οποία επικεντρώνονται κυρίως στις μετρήσεις και στον γεωμετρικό παράγοντα. Στο πρώτο μέρος του κώδικα δημιουργούνται οι συντεταγμένες των ηλεκτροδίων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν καθώς επίσης σε κάθε ηλεκτρόδιο ανατίθεται και ένας αριθμός. Στη συνέχεια πάλι με τη χρήση συναρτήσεων υπολογίζεται ο πίνακας με τις μετρήσεις από τις επιλεγμένες διατάξεις και ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων. Η χρήση συναρτήσεων γίνεται κυρίως για τη μείωση των μεταβλητών στο πρόγραμμα και για να γλυτώσουμε από τον επαναλαμβανόμενο προγραμματισμό.

Η συνάρτηση αυτή έχει σαν στοιχεία εισόδου τις απαραίτητες μεταβλητές που καθορίζουν τη γεωμετρία των μετρήσεων καθώς επίσης και τις επιλογές του χρήστη για το ποια ή ποιες διατάξεις θα χρησιμοποιηθούν. Όπως φαίνεται και στο αρχικό παράθυρο του προγράμματος, οι διαθέσιμες διατάξεις είναι οι modified pole-pole (μια παραλλαγή της) , dipole-dipole, multiple gradient και N11.

Στο δεύτερο τμήμα αυτού του κομματιού υπολογίζεται ο γεωμετρικός παράγοντας για την κάθε μέτρηση. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του γεωμετρικού παράγοντα είναι αυτός που χρησιμοποιείται για ηλεκτρόδια μέσα σε γεώτρηση και δίνεται από τη σχέση:

$$\kappa = 4\pi \frac{r_1 * r_2}{r_1 + r_2} \quad (4.1)$$

Ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιείται επειδή το πρόγραμμα δεν προορίζεται μόνο για τη δημιουργία πρωτοκόλλων επιφανειακών μετρήσεων αλλά και για μετρήσεις σε γεωτρήσεις. Οι τιμές r_1 και r_2 είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος – δυναμικού. Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι γίνεται η χρήση δύο τιμών απόστασης, γιατί στη περίπτωση που τα ηλεκτρόδια είναι μέσα στη γεώτρηση εμφανίζεται το λεγόμενο “mirroring effect” που έχει σαν αποτέλεσμα το δυναμικό που μετράται στο ηλεκτρόδιο του δυναμικού να θεωρείται ότι είναι το άθροισμα της συνεισφοράς του ρεύματος από το ηλεκτρόδιο ρεύματος και της εικόνας του, πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 Το δυναμικό που μετράται στο P, θεωρείται ότι είναι το άθροισμα του ρεύματος από την πηγή C και της εικόνας C' πάνω από την επιφάνεια (Loke 2004).

Στην περίπτωση που τα ηλεκτρόδια βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, τότε ο τύπος παίρνει τη μορφή:

$$\kappa = 2\pi r \quad (4.2)$$

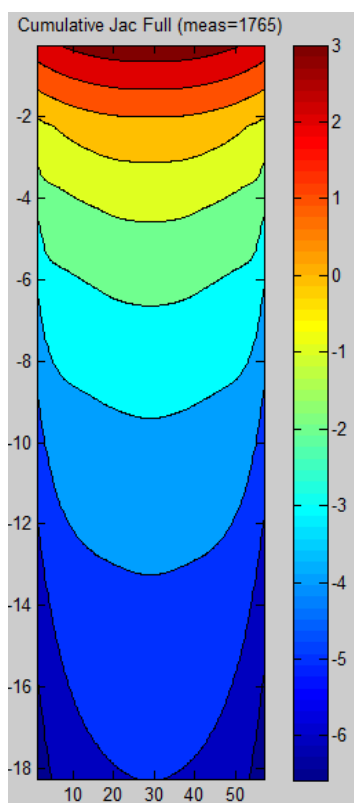
Αφού υπολογισθεί ο γεωμετρικός παράγοντας γίνεται μία επιλογή των μετρήσεων. Η επιλογή αυτή γίνεται με κριτήριο μια ελάχιστη τιμή, ένα κατώφλι, γεωμετρικού παράγοντα. Η τιμή αυτή

έχει τη δυνατότητα να οριστεί από το χρήστη είτε να υπολογισθεί αυτόματα από τις δυνατότητες του οργάνου, όπως πχ. τη μέγιστη τάση εξόδου, τη ακρίβεια του οργάνου, κα.

Υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα

Όπως και στον υπολογισμό του γεωμετρικού παράγοντα, έτσι και στην εύρεση του ιακωβιανού πίνακα χρησιμοποιείται μία επαναληπτική διαδικασία, μόνο που στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό γίνεται για κάθε παράμετρο της κάθε μέτρησης. Αφού υπολογισθεί ο ιακωβιανός θα έχει διαστάσεις $N \times M$, όπου N ο αριθμός των μετρήσεων και M ο αριθμός των παραμέτρων. Ο ιακωβιανός υπολογίζεται με βάση τον τύπο 2.22 για όλα τα ζεύγη ηλεκτροδίων AM, AN, BM, BN και τέλος προστίθενται όπως και στον γεωμετρικό παράγοντα

Στη συνέχεια αθροίζεται **κατά στήλες** και δημιουργείται έτσι ο cumulative (αθροιστικός) ιακωβιανός ο οποίος απεικονίζεται γραφικά σε σχέση με το συνολικό μήκος και το μέγιστο βάθος της διάταξης. Από αυτό το γράφημα (σχήμα 4.6) μπορούμε να έχουμε και μια εικόνα σχετικά με την ευκρίνεια των παραγόμενων μετρήσεων με το βάθος.



Σχήμα 4.6 Αθροιστικός Ιακωβιανός πίνακας για τις συνολικές μετρήσεις. Οι υψηλές τιμές είναι δείκτης καλής ανάλυσης.

Επιλογή των βέλτιστων μετρήσεων

Στο στάδιο αυτό, ένα τμήμα του αλγορίθμου επιλέγει από το σύνολο των μετρήσεων που παράχθηκαν παραπάνω, τις βέλτιστες (όπως περιγράφηκε στο κεφ. 3), τον αριθμό των οποίων έχει επιλέξει ο χρήστης.

Για να γίνει η επιλογή των καλύτερων μετρήσεων πρέπει να χωριστούν όλες οι παράμετροι σε “ομάδες” οι οποίες να έχουν και έναν αριθμό μετρήσεων ανάλογα με κάποια κριτήρια. Ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε παράμετρο καθορίζεται από τα clusters. Αρχικά από τον αριθμό των clusters υπολογίζονται τα εύρη τιμών μέσα στα οποία γίνεται η ανάθεση του αριθμού των μετρήσεων. Στη συνέχεια για κάθε παράμετρο ανατίθεται και ο αριθμός των μετρήσεων με βάση τον Ιακωβιανό πίνακα.

Τέλος, για να γίνει η επιλογή των βέλτιστων μετρήσεων γίνεται ένας έλεγχος ώστε να μην υπάρχει η ίδια μέτρηση για περισσότερες από μία παραμέτρους και επίσης ο συνολικός αριθμός των βέλτιστων μετρήσεων να μην υπερβαίνει τον προκαθορισμένο. Ο τρόπος αυτός επιλογής έχει ένα μικρό μειονέκτημα, ότι από όλες τις δυνατές μετρήσεις επιλέγει αυτές που θα έρθουν στην αναζήτηση πρώτες, δηλαδή κάνει μία αναζήτηση που μπορεί να χαρακτηριστεί “top-down”. Η βέλτιστη αναζήτηση θα ήταν η “global”, ωστόσο πρακτικά δεν φαίνεται να επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα.

Αποθήκευση των μετρήσεων ως πρωτόκολλα

Τελευταίο τμήμα του αλγορίθμου είναι να αποθηκεύσει τα πρωτόκολλα που παρήχθησαν. Τα αρχεία που δημιουργούνται είναι τρία, τόσο για το πλήρες σετ μετρήσεων, όσο και για το βέλτιστο. Το format των αρχείων αυτών είναι .txt και .org που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν από το όργανο για μετρήσεις και το τρίτο αρχείο έχει format .a2d και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τα κατάλληλα προγράμματα (πχ DC_2DPRO) για τη δημιουργία μοντέλων.

4.4 Βελτιστοποίηση μετρήσεων για περιοχή

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης έγινε με σκοπό να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος που να δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέγει μια περιοχή που αναμένεται να έχει αλλαγή και να λαμβάνονται περισσότερες μετρήσεις στη συγκεκριμένη περιοχή, πάντα όμως οι μετρήσεις να μην υπερβαίνουν το πλήρες σετ μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν τρεις αλγόριθμοι οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους καθώς και με το υπόλοιπο πρόγραμμα. Να αναφερθεί εδώ ότι το πρόγραμμα προορίζεται κυρίως για time-lapse μετρήσεις αφού σε αυτές είναι ευκολότερο να παρατηρηθεί και να προβλεφθεί μια περιοχή με αλλαγές.

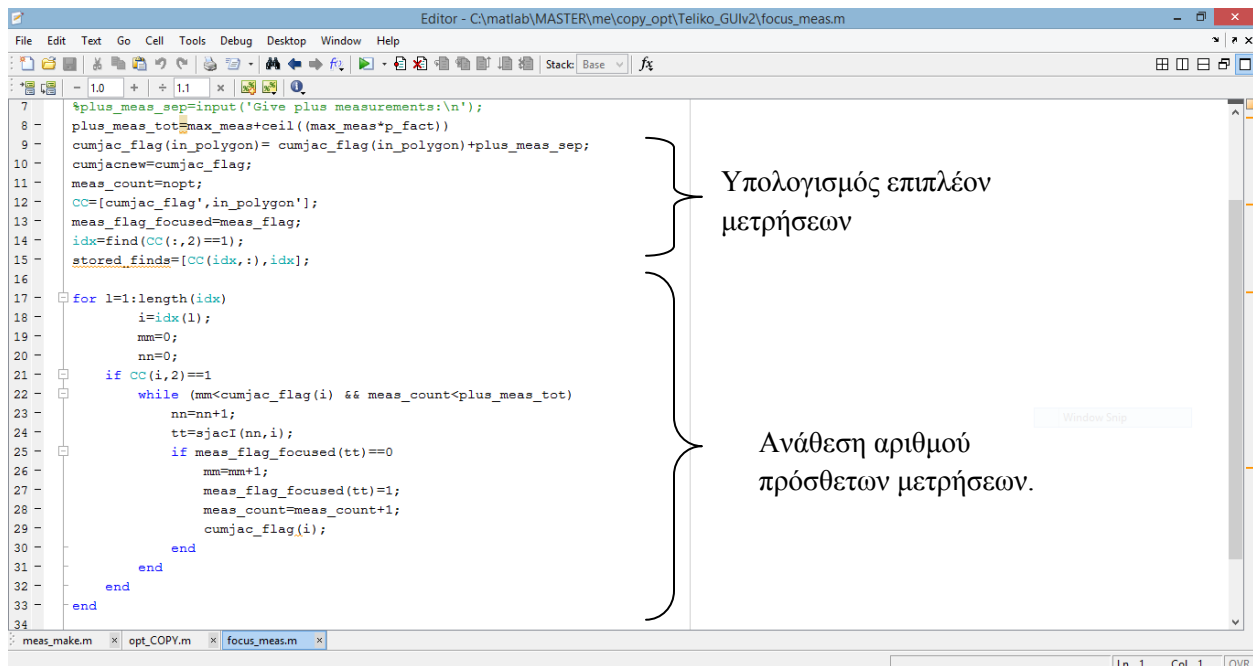
Για να μπορέσουν να εστιαστούν παραπάνω μετρήσεις σε μία περιοχή θα πρέπει αρχικά ο χρήστης να το δηλώσει στο αρχικό menu του προγράμματος μέσω του πλαισίου **Focused area** (σχήμα 4.4). Στη συνέχεια θα πρέπει να δηλώσει το ποσοστό των επιπλέον μετρήσεων που θέλει για εκείνη τη περιοχή. Για παράδειγμα εάν ο αριθμός των μέγιστων μετρήσεων που έχουν δηλωθεί είναι 800 και το ποσοστό που δηλώσει ο χρήστης είναι 30%, τότε το τελικό πρωτόκολλο θα περιέχει 1040 μετρήσεις (800 για όλη τη περιοχή και 240 για την επιλεγμένη). Γίνεται αντιληπτό ότι εάν ο χρήστης δώσει μεγάλο αριθμό μέγιστων μετρήσεων και μεγάλο ποσοστό, τότε υπάρχει πιθανότητα το τελικό βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο να περιέχει περισσότερες μετρήσεις από το πλήρες σετ. Για το λόγο αυτό καλό είναι να γίνεται ένας έλεγχος από το χρήστη και επίσης το ποσοστό να μην υπερβαίνει το 60%.

Αφού εισαχθεί το ποσοστό καλείται κανονικά ο αλγόριθμος *optimeas*. Μέσα στον αλγόριθμο γίνεται ένας έλεγχος για το αν υπάρχει η επιλογή για εστιασμένη περιοχή. Αν υπάρχει καλείται αρχικά μια συνάρτηση για τον τρόπο επιλογής του πολυγώνου. Η συνάρτηση αυτή έχει σαν output μεταβλητή την *in_polygon* που δηλώνει ποιες **παράμετροι** είναι μέσα στην περιοχή που επέλεξε ο χρήστης. Η επιλογή μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους όπως φαίνεται παρακάτω.

Ο πρώτος τρόπος είναι να δώσει ο χρήστης ένα παραλληλόγραμμο σχήμα με βάση την οριζόντια θέση (απόσταση από την αρχή της τομογραφίας) και το βάθος που αναμένεται η αλλαγή. Ο δεύτερος τρόπος είναι να επιλέξει τη περιοχή ενδιαφέροντος από μία προϋπάρχουσα εικόνα αντιστροφής. Η κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματά της. Για παράδειγμα ο πρώτος τρόπος είναι πιο γρήγορος ωστόσο η περιοχή πρέπει να είναι ένα παραλληλόγραμμο. Στην δεύτερη περίπτωση αντίθετα ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία είναι μεγαλύτερος, όπως θα δούμε στη συνέχεια, όμως η περιοχή είναι πιο στοχευμένη και ακριβής.

Στη συνέχεια καλείται μία διαδικασία για την επιλογή των πρόσθετων μετρήσεων. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει σαν στοιχεία εισόδου τις παραμέτρους των μετρήσεων, όπως ο αριθμός των παραμέτρων, ο μέγιστος αριθμός των μετρήσεων, ο αθροιστικός Ιακωβιανός, κ.α., καθώς επίσης και το αποτέλεσμα της προηγούμενης συνάρτησης που είναι ένας πίνακας με τις παραμέτρους μέσα στην επιλεγμένη περιοχή. Συνεχίζοντας, υπολογίζει τον επιπλέον αριθμό των μετρήσεων που πρέπει να έχει το πρωτόκολλο. Τέλος, μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία, όμοια με

αυτή για τα βέλτιστα πρωτόκολλα, προκύπτουν οι καινούργιες πρόσθετες μετρήσεις, οι οποίες και επιστρέφονται στον κύριο αλγόριθμο *optimeas*.



```
7 $plus_meas_sep=input('Give plus measurements:\n');
8 plus_meas_tot=max_meas+ceil((max_meas*p_fact))
9 cumjac_flag(in_polygon)= cumjac_flag(in_polygon)+plus_meas_sep;
10 cumjacnew=cumjac_flag;
11 meas_count=nopt;
12 CC=[cumjac_flag',in_polygon'];
13 meas_flag_focused=meas_flag;
14 idx=find(CC(:,2)==1);
15 stored_finds=[CC(idx,:),idx];
16
17 for l=1:length(idx)
18     i=idx(l);
19     mm=0;
20     nn=0;
21     if CC(i,2)==1
22         while (mm<cumjac_flag(i) && meas_count<plus_meas_tot)
23             nn=nn+1;
24             tt=sjacI(nn,i);
25             if meas_flag_focused(tt)==0
26                 mm=mm+1;
27                 meas_flag_focused(tt)=1;
28                 meas_count=meas_count+1;
29                 cumjac_flag(i);
30             end
31         end
32     end
33 end
34
```

Υπολογισμός επιπλέον μετρήσεων

Ανάθεση αριθμού πρόσθετων μετρήσεων.

Σχήμα 4.7 Τμήμα του αλγορίθμου επιλογής πρόσθετων μετρήσεων

Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι μερικές παράμετροι της διαδικασίας αυτής είναι δηλωμένες ως *global*. Αυτό σημαίνει ότι τους ανατίθεται τιμή άμεσα από το αρχικό μενού του προγράμματος χωρίς τη μεσολάβηση συναρτήσεων ή στοιχείων εισόδου μέσω συναρτήσεων. Αυτό όπως είναι λογικό έχει τόσο θετικά όσο και αρνητικά αποτελέσματα. Γενικά οι *global* μεταβλητές κάνουν το πέρασμα τιμών από τις διάφορες συναρτήσεις-διαδικασίες πιο εύκολο και δεν έχουν ιδιαίτερη επίδραση στη χρήση της μνήμης. Από την άλλη, αυτές οι μεταβλητές πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή γιατί εφόσον είναι προσβάσιμες από όλο το πρόγραμμα μπορεί εύκολα να αλλάξουν τιμές εάν μπερδευτούν με άλλες (πχ με όμοιο όνομα). Επίσης μπορεί να δυσχεράνουν το διάβασμα του κώδικα από τρίτους.

Ο αλγόριθμος image_area_selection

Ο αλγόριθμος image_area_selection αποτελεί ένα πρόγραμμα ξεχωριστό από το κύριο που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τη περιοχή που θέλει από μία προϋπάρχουσα **εικόνα**. Αποτελείται από τρία κύρια μέρη, το πρώτο μέρος αφορά το άνοιγμα της εικόνας, το δεύτερο τη γεωαναφορά της εικόνας και τέλος την επιλογή της περιοχής.

Αρχικά ανοίγει ένα παράθυρο και ζητά από το χρήστη να επιλέξει την εικόνα που επιθυμεί. Τα formats των εικόνων που υποστηρίζονται είναι bmp και gif. Στη συνέχεια ζητείται από το χρήστη να βάλει δύο σημεία ώστε να μπορέσει να γεωαναφέρει την εικόνα. Σε κάθε σημείο που μπαίνει ζητείται το μέτρο από την αρχή της μέτρησης καθώς επίσης και το βάθος. Έτσι προκύπτει μία εικόνα η οποία μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια ένα message-box ζητάει από το χρήστη να επιλέξει τη περιοχή που θέλει. Η επιλογή γίνεται με το ποντίκι και η περιοχή κλείνει με το πάτημα του Enter. Με το που επιλεγεί η περιοχή, απεικονίζεται γραφικά ώστε να φανούν τυχόν λάθη ή παραλήψεις.

Τέλος το πρόγραμμα εντοπίζει ποιες παράμετροι είναι μέσα στη περιοχή και τις αποθηκεύει σε ένα structure για να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Επιπλέον το πρόγραμμα βγάζει ένα διάγραμμα που δείχνει ποιες παράμετροι είναι στη συγκεκριμένη περιοχή και πόσες επιλέχθηκαν.

Τέλος, ένας πρόσθετος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε είναι ο **report**. Αυτός αποτελεί ένα ακόμη πρόγραμμα ανεπτυγμένο σε gui που τρέχει στο τέλος του κύριου προγράμματος και προβάλλει όλα τα στοιχεία που χρειάζεται να ξέρει ο χρήστης. Δηλαδή το μέγιστο βάθος, τις συνολικές μετρήσεις που λήφθηκαν υπόψη στο πλήρες σετ όπως και το ποσοστό των μετρήσεων που απορρίφθηκαν λόγω του γεωμετρικού παράγοντα, τον αριθμό των μέγιστων (βέλτιστων) μετρήσεων, τον αριθμό των clusters και τέλος, αν υπάρχουν, τις επιπλέον μετρήσεις για την επιλεγμένη περιοχή

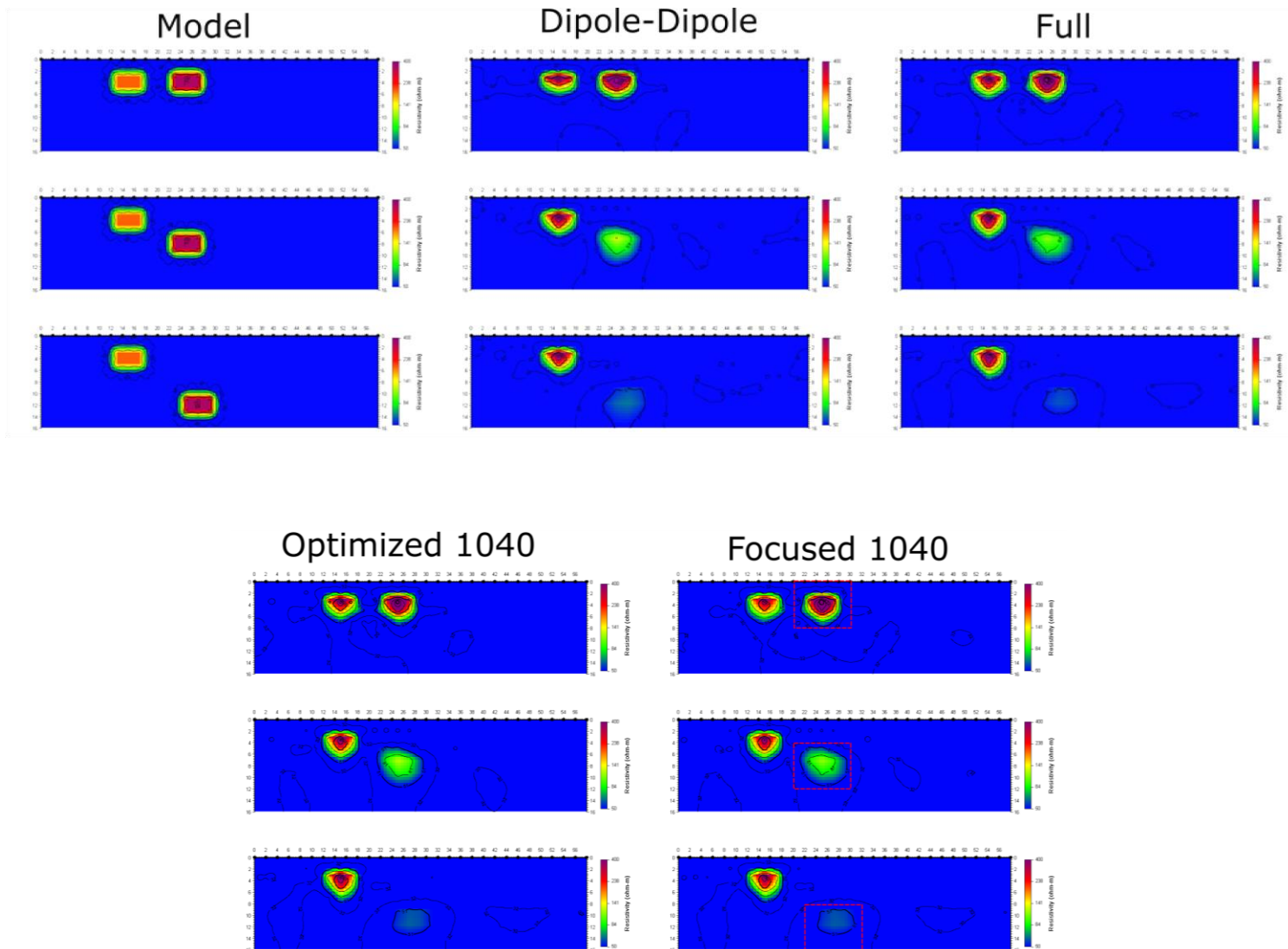
5. Εφαρμογή αλγορίθμων σε συνθετικά δεδομένα

Η παραπάνω μεθοδολογία δοκιμάστηκε σε ένα πλήθος παραδειγμάτων που χρησιμοποιούν συνθετικά δεδομένα προκειμένου να ελεγχθεί ως προς την αξιοπιστία της και να συγκριθεί με τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες παραδοσιακές διατάξεις (διπόλου-διπόλου, πόλου-διπόλου, multiple gradient). Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα μετρήσεων επιφανείας από ένα σύνολο, που παράχθηκαν για την εργασία αυτή. Τα παραδείγματα αφορούν κυρίως time-lapse μοντέλα ωστόσο έγιναν και μοντέλα για single inversion δοκιμές.

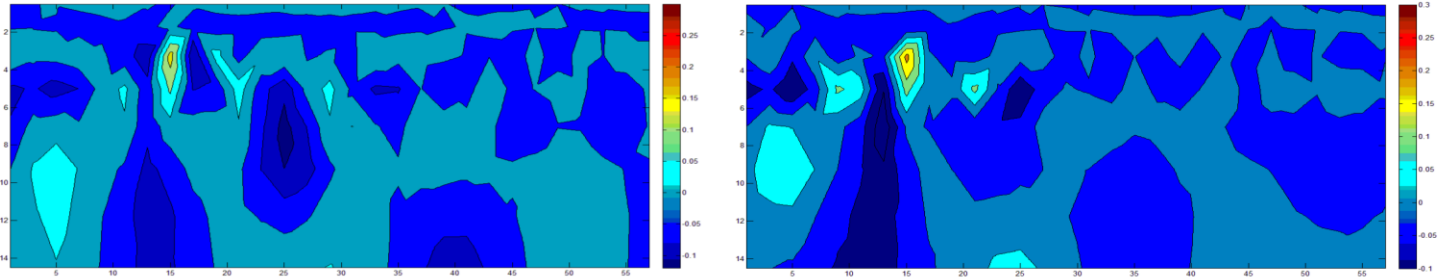
1^ο παράδειγμα

Το πρώτο μοντέλο που δημιουργήθηκε είναι απλό και αποτελείται από 2 σώματα σε έναν ημιχώρο αντίστασης $\rho=30\Omega\text{m}$. Το ένα σώμα έχει αντίσταση $\rho_1=200\Omega\text{m}$ και μένει σταθερό σε βάθος 2 μέτρων ενώ το άλλο με αντίσταση $\rho_2=350\Omega\text{m}$ κινείται από την επιφάνεια βαθύτερα. Και τα δύο σώματα έχουν διαστάσεις $6\times 4\text{ m}$. Στο σχήμα 5.1 φαίνονται οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν. Να αναφερθεί εδώ ότι όλες οι διατάξεις αποτελούνται από 30 ηλεκτρόδια με άνοιγμα 2 μέτρα. Έτσι το συνολικό μήκος της τομογραφίας θα είναι 57 μέτρα και το μέγιστο βάθος διασκόπησης είναι περίπου 16 μέτρα. Τα πρωτόκολλα που δημιουργήθηκαν είναι τα εξής: α) ένα σετ 290 μετρήσεων διπόλου-διπόλου, β) ένα πλήρες σετ 1765 μετρήσεων που αποτελείται από τις διατάξεις dipole-dipole, multiple gradient και pole-pole, γ) ένα σετ βέλτιστων μετρήσεων (1040) και τέλος ένα σετ 800 μετρήσεων για όλη τη περιοχή και επιπλέον 240 για την περιοχή της αναμενόμενης αλλαγής (σύνολο 1040 μετρήσεις).

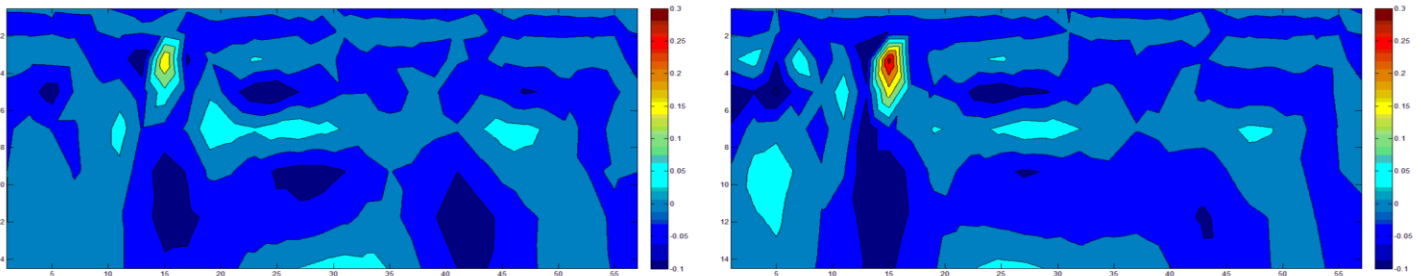
Αρχικά φαίνεται ότι όλες οι μετρήσεις δεν έχουν κάποια διαφορά μεταξύ τους ωστόσο μια πιο προσεκτική ματιά τόσο στις εικόνες, όσο και στα αριθμητικά αποτελέσματα της αντιστροφής δείχνει ότι το μοντέλο με την επιλεγμένη περιοχή έχει τη μικρότερη διαφορά από το πλήρες σετ μετρήσεων. Αυτό φαίνεται στα σχήματα 5.2 και 5.3 που απεικονίζουν το ποσοστό της διαφοροποίησης τους από το πλήρες σετ. Υπόψη ότι λαμβάνεται ως αναφορά το πλήρες σετ. Τα δύο αυτά σχήματα είναι τα αντίστοιχα για το 2^ο και 3^ο βάθος του μοντέλου. Επιλέχθηκαν αυτά και όχι το 1^ο γιατί στο βάθος εκείνο δεν εμφανίζεται κάποια ιδιαίτερη αριθμητική διαφορά. Τέλος να σημειωθεί ότι γενικά το πρωτόκολλο στο οποίο επιλέγεται μια περιοχή θα παρουσιάζεται χειρότερο απ' ότι του βέλτιστου και αυτό γιατί έχει λιγότερες μετρήσεις σε όλη τη περιοχή. Μόνο η περιοχή που έχει επιλεχθεί από το χρήστη τονίζεται με περισσότερες μετρήσεις.



Σχήμα 5.1 Αποτελέσματα αντιστροφής για το πρώτο μοντέλο. Με κόκκινη διακεκομμένη φαίνεται η περιοχή στην οποία έγιναν επιπλέον μετρήσεις. Στο πρωτόκολλο με την εστιασμένη περιοχή οι συνολικές μετρήσεις είναι 1040, ωστόσο ο αριθμός των μετρήσεων στο σύνολο του μοντέλου είναι 800 και μόνο στην περιοχή ενδιαφέροντος προστίθενται παραπάνω μετρήσεις.



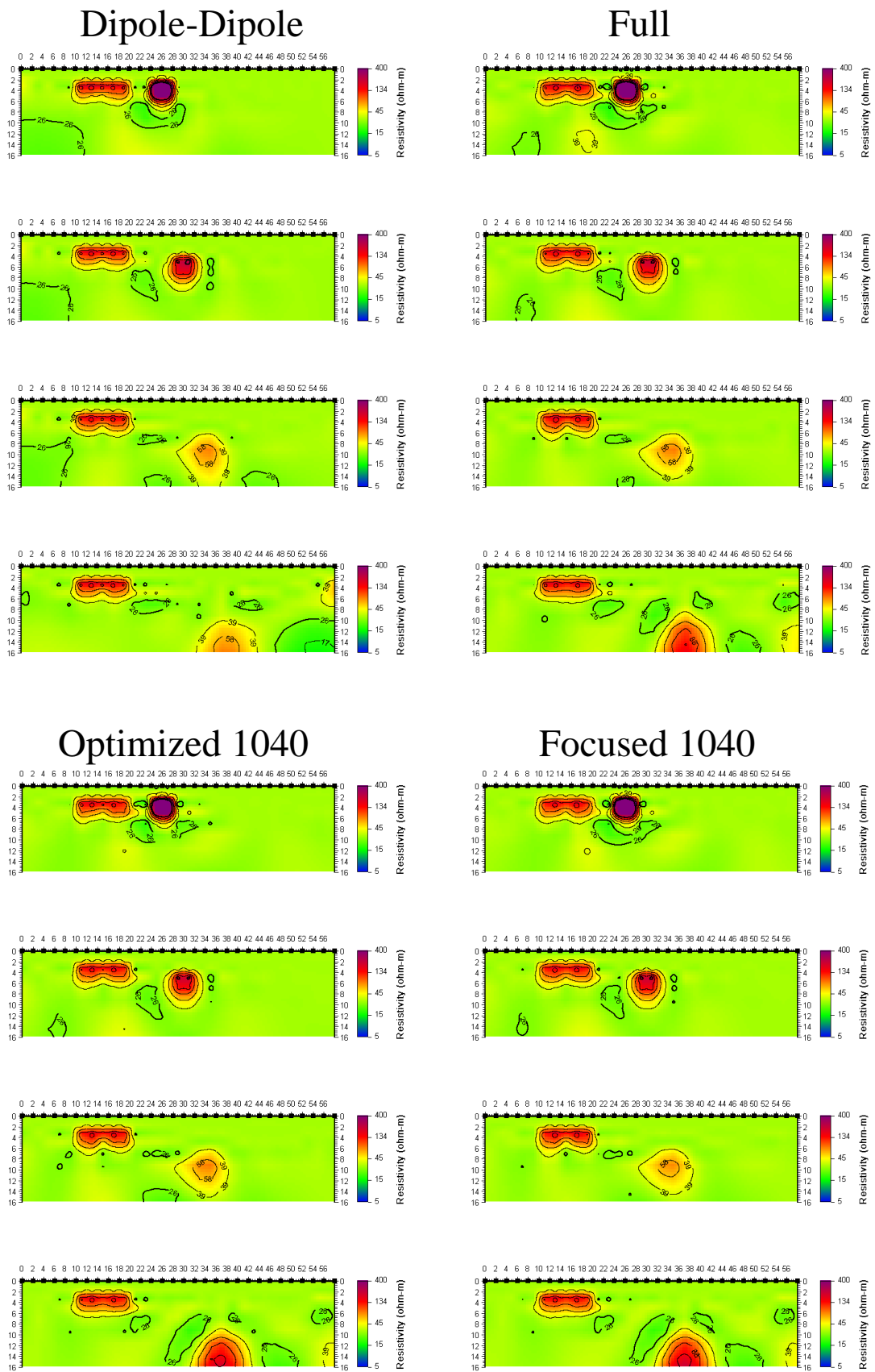
Σχήμα 5.2 Ποσοστό διαφοροποίησης για το 2^ο βάθος (4-12m) optimized (αριστερά) και focused (δεξιά) σε σχέση με το full πρωτόκολλο. Η περιοχή ενδιαφέροντος στο focused πρωτόκολλο έχει τη μικρότερη διαφορά από το full.



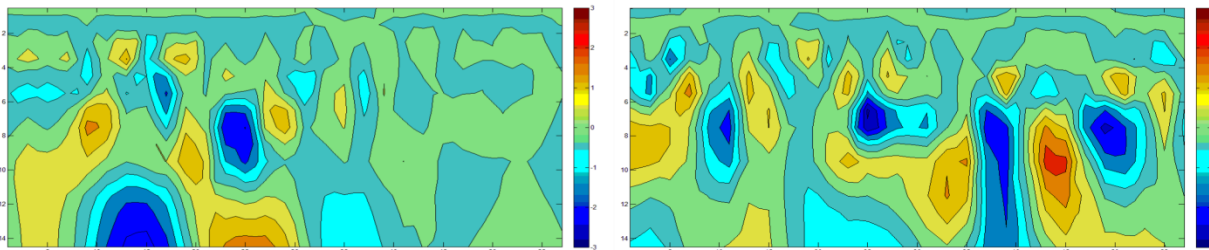
Σχήμα 5.3 Ποσοστό διαφοροποίησης για το 2^ο βάθος (4-12m) optimized (αριστερά) και focused (δεξιά) σε σχέση με το full πρωτόκολλο. Η εστιασμένη περιοχή που έγιναν επιπλέον μετρήσεις φαίνεται ενιαία σε σχέση με το optimized, ωστόσο το σταθερό σώμα δείχνει να επηρεάζεται περισσότερο από τις λιγότερες μετρήσεις.

2^ο παράδειγμα

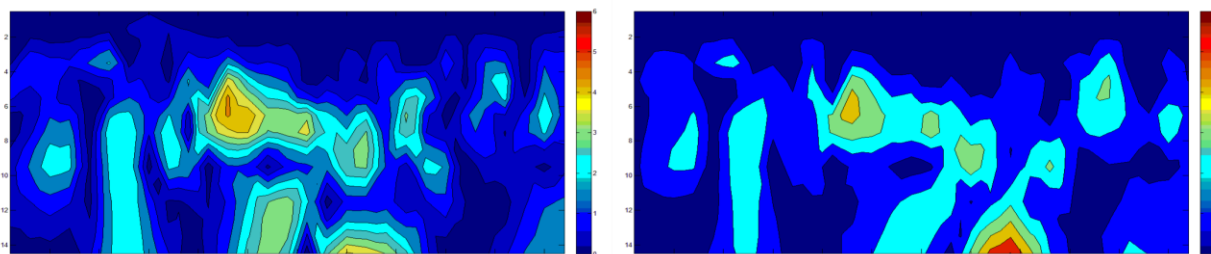
Παρόμοιο με το πρώτο μοντέλο, έτσι και σε αυτό βρίσκονται δύο αντιστατικά σώματα με το ένα να κινείται βαθύτερα. Το πρώτο σώμα έχει διαστάσεις 10x4m και αντίσταση $\rho_1=100\Omega\text{m}$ ενώ το δεύτερο 4x4m με αντίσταση $\rho_2=600\Omega\text{m}$. Τέλος ο ημιχώρος έχει αντίσταση $30\Omega\text{m}$. Αρχικά στα δύο πρώτα steps δεν παρατηρείται κάποια διαφορά και στα 4 σετ. Από το 3^ο βάθος αρχίζει το σετ των μετρήσεων με τη διάταξη dipole-dipole να επηρεάζεται από το βάθος και να “χάνει” τη διακριτική του ικανότητα.



Σχήμα 5.4 Εικόνες από την αντιστροφή του 2^{ου} μοντέλου. Το focused πρωτόκολλο φαίνεται να έχει καλύτερη συσχέτιση με το πλήρες σετ κυρίως στο 3^ο βάθος.



Σχήμα 5.5 Ποσοστό διαφοροποίησης για το 3^ο βάθος (6-14m) optimized (αριστερά) και focused (δεξιά) σε σχέση με το full πρωτόκολλο.

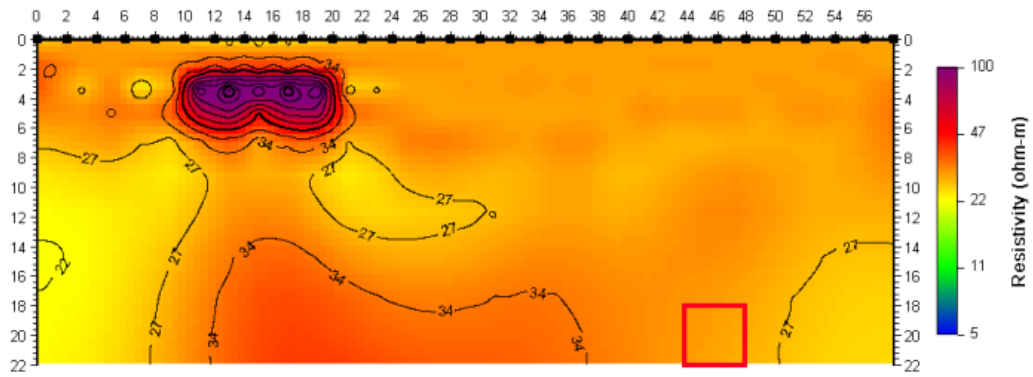


Σχήμα 5.6 Ποσοστό διαφοροποίησης για το 4^ο βάθος (12-15m) optimized (αριστερά) και focused (δεξιά) σε σχέση με το full πρωτόκολλο.

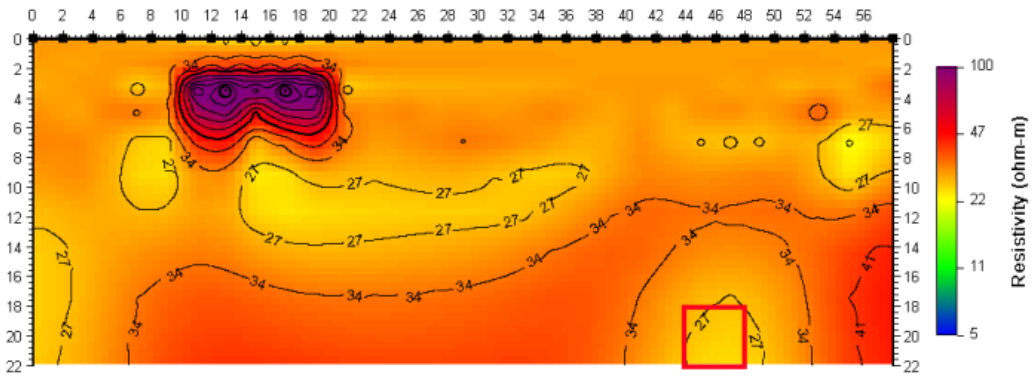
3^ο παράδειγμα

Το παράδειγμα αυτό αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου. Είναι ακριβώς το ίδιο μοντέλο ωστόσο κατά την δημιουργία των πρωτοκόλλων επιλέχθηκε το βάθος να υπολογιστεί ως το 1/3 του συνολικού ανοίγματος ηλεκτροδίων (σε αντίθεση με το 1/4 των προηγούμενων). Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο βάθος είναι περίπου 20m. Για να έρθει το μοντέλο στα “όρια” του το βάθος αυξήθηκε στα 22m. Τέλος, η αντιστροφή δεν έγινε σε time-lapse μετρήσεις αλλά μόνο στο τελευταίο “στιγμιότυπο”. Από τα αποτελέσματα της αντιστροφής γίνεται εμφανές ότι το σώμα σε καμία από τις τέσσερις περιπτώσεις δεν γίνεται έντονα αντιληπτό, όμως στο πρωτόκολλο με την εστιασμένη περιοχή φαίνεται μία περιοχή, καλά διακριτή, όπου υπάρχει μία έντονη ανωμαλία σε σχέση με το περιβάλλον. Επειδή τα μοντέλα είναι συνθετικά, καταλαβαίνουμε ότι η ανωμαλία αυτή αν και μικρή οφείλεται στο σώμα.

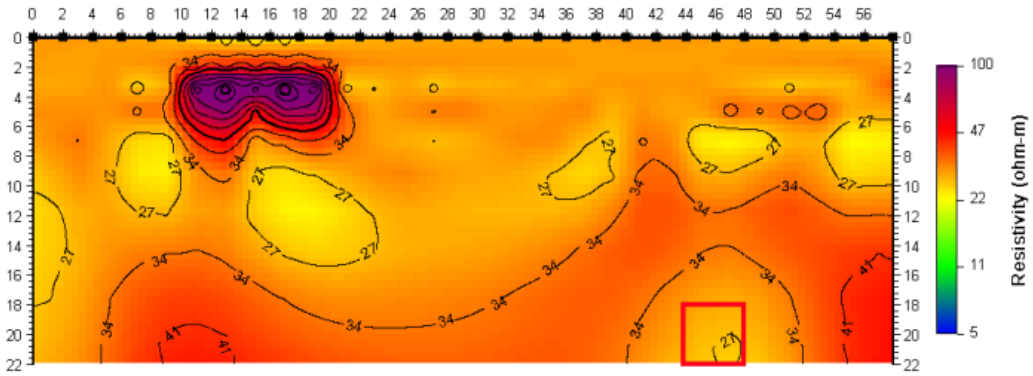
Dipole
Dipole



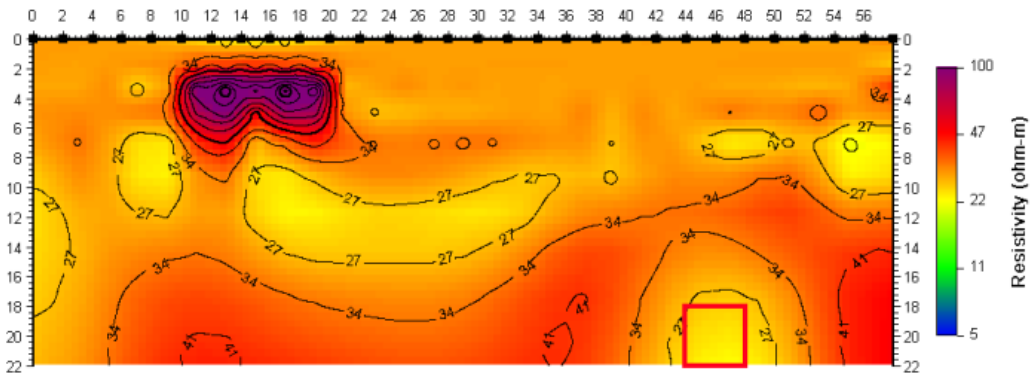
Full



Optimized
1040



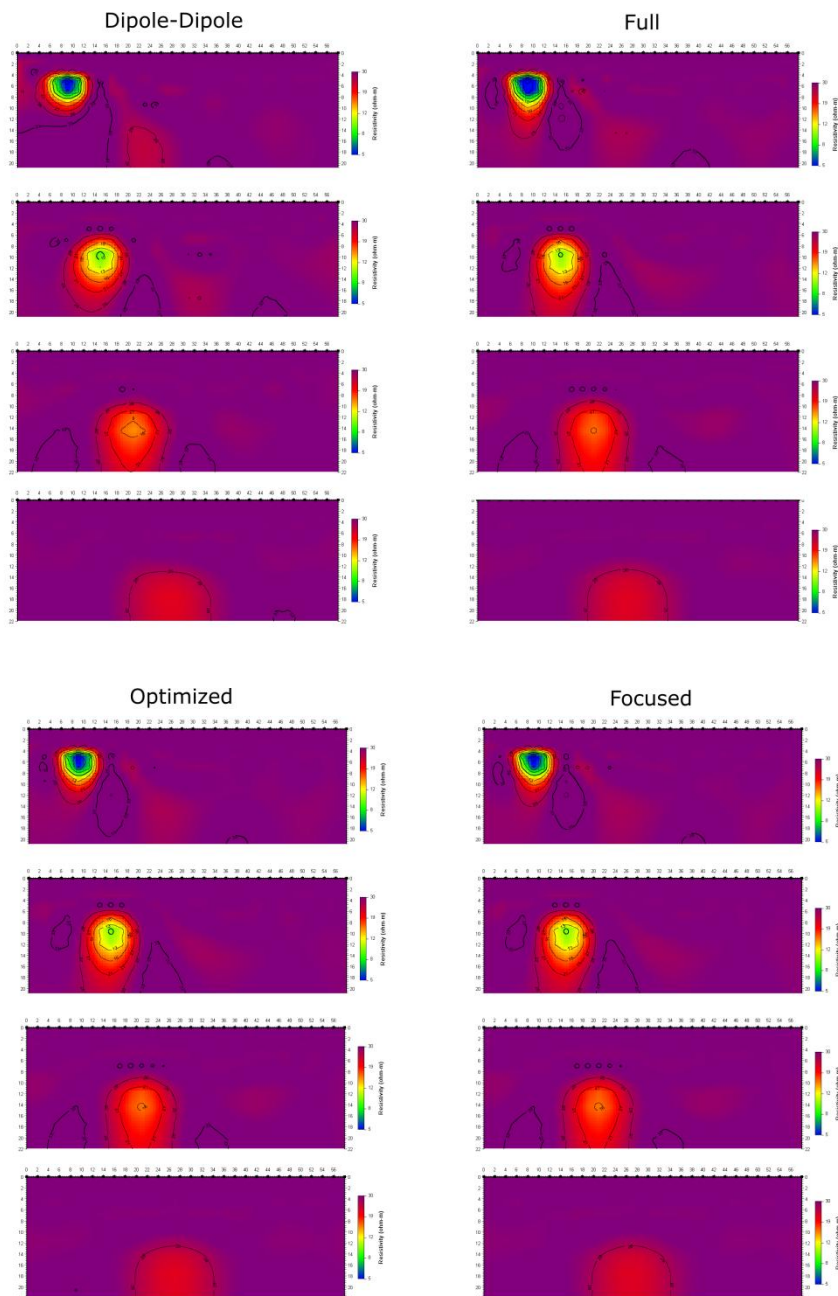
Focused
1040



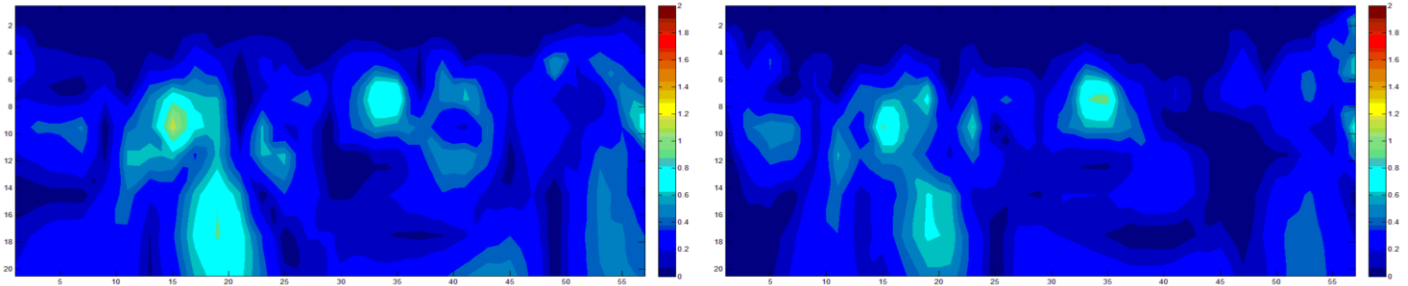
Σχήμα 5.7 Αποτελέσματα αντιστροφής για το 3^ο μοντέλο. Με κόκκινο είναι η περιοχή που βρίσκεται το δεύτερο σώμα. Εδώ το focused πρωτόκολλο φαίνεται να δείχνει καλύτερα την ανωμαλία που προκαλεί το σώμα

4^ο παράδειγμα

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το μοντέλο που κατασκευάστηκε αποτελείται από ένα αγώγιμο σώμα αντίστασης $\rho=5\Omega\text{m}$ και διαστάσεων $6\times 4\text{m}$ που βρίσκεται σε ημιχώρο αντίστασης $30\Omega\text{m}$. Και σε αυτή τη περίπτωση το σώμα βαθαίνει με το χρόνο. Η πρώτη εικόνα που παίρνουμε από την αντιστροφή είναι παρόμοια σε όλα τα πρωτόκολλα με μικρές διαφορές μεταξύ τους. Το σώμα χάνεται σχεδόν από το 3^ο βάθος και τελικά διακρίνεται αμυδρά μία περιοχή ανωμαλίας (σχήμα 5.8). Αν κοιτάξουμε το σφάλμα του βέλτιστου και του εστιασμένου πρωτοκόλλου σε σχέση με το πλήρες πακέτο βλέπουμε ότι η περιοχή που έγινε η αλλαγή στο εστιασμένο πρωτόκολλο εντοπίζεται με πολύ λιγότερη διαφορά απ' ό τι το optimized (σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.8 Αποτέλεσμα αντιστροφής για το4ο μοντέλο.

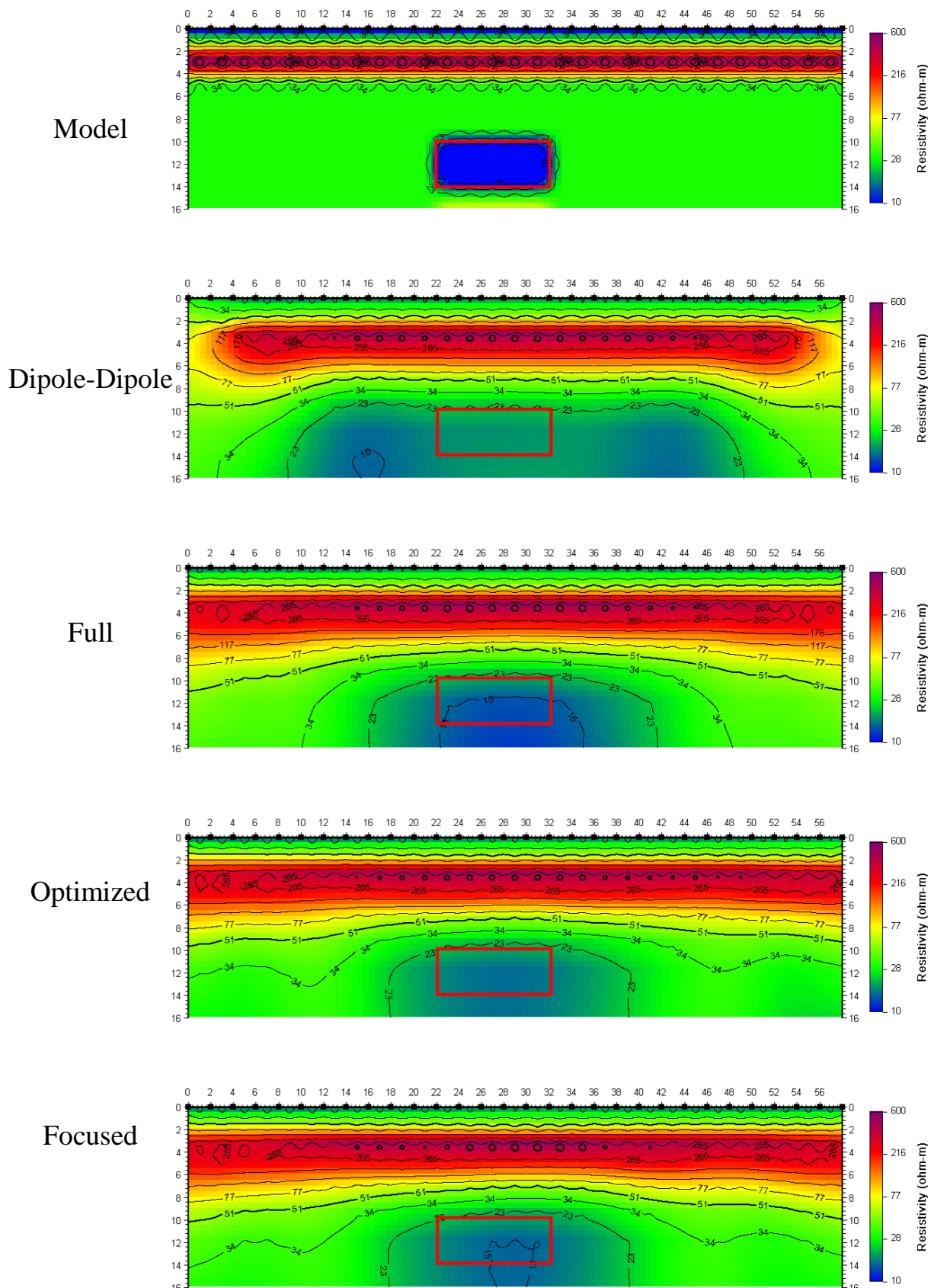


Σχήμα 5.9 Ποσοστιαία διαφορά επί τοις εκατό για το 3^ο βάθος του optimized (αριστερά) και του focused (δεξιά) σε σύγκριση με το πλήρες πρωτόκολλο. Βλέπουμε καθαρά ότι η περιοχή η οποία επιλέχθηκε και ανζήθηκαν οι μετρήσεις της έχει τη μικρότερη διαφορά από το full πρωτόκολλο μετρήσεων.

5^ο παράδειγμα

Σώμα αντίστασης $\rho_1=5\Omega\text{m}$ και διαστάσεων $10\times 4\text{m}$ βρίσκεται κάτω από στρώμα αντίστασης $\rho_2=600\Omega\text{m}$ και πάχους 2 μέτρων, σε βάθος 10 μέτρων και σε ημιχώρο αντίστασης $30\Omega\text{m}$. Για το συγκεκριμένο μοντέλο έγινε αντιστροφή μόνο για το συγκεκριμένο βάθος για να ελεγχθεί η μέθοδος και σε απλές αντιστροφές. Αν και σε καμία εικόνα αντιστροφής δεν φαίνεται ξεκάθαρα το σώμα μπορούμε να δούμε ότι το εστιασμένο πρωτόκολλο (με τον ίδιο αριθμό μετρήσεων με το βέλτιστο) είναι σαφώς βελτιωμένο. Στο πρωτόκολλο μόνο με τις μετρήσεις dipole-dipole το σώμα δεν εμφανίζεται καθόλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την αντιστροφή η θέση της ανωμαλίας στα τρία πρωτόκολλα, πλήρες (1765 μετρήσεις), βέλτιστο (1040 μετρήσεις), προσαρμοσμένο (800+240 μετρήσεις), που υποδηλώνει το σώμα είναι αρκετά μετατοπισμένη από τη πραγματική θέση, προς βαθύτερα και ελαφρώς προς το κέντρο της διάταξης.

Και εδώ όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα χρησιμοποιήθηκαν 30 ηλεκτρόδια με άνοιγμα 2 μέτρων και οι διατάξεις ήταν οι dipole-dipole, pole-dipole και multiple gradient. Το μέγιστο βάθος της διάταξη είναι περίπου 16 μέτρα.



Σχήμα 5.10 Αποτελέσματα αντιστροφής για το 5^ο μοντέλο.

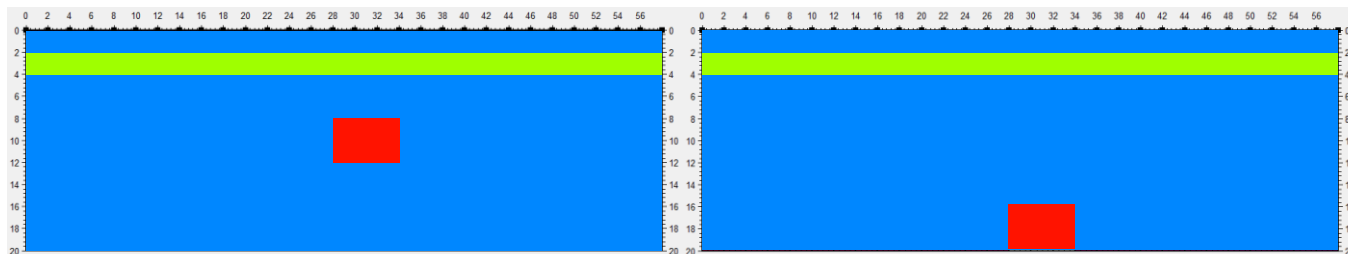
6^ο παράδειγμα

Παρόμοιο με το προηγούμενο μοντέλο, αυτό αποτελείται από ένα στρώμα πάχους 2 μέτρων και αντίστασης 100Ωm. Κάτω από το στρώμα υπάρχει σώμα αντίστασης 300Ωm και διαστάσεων 6x4m. Το μοντέλο αυτό έγινε με σκοπό να αναδειχθεί ο ρόλος που παίζει η επιλεγόμενη περιοχή στην μετέπειτα αντιστροφή. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρία, το πλήρες σετ, το βελτιστοποιημένο και το βελτιστοποιημένο με την επιλεγμένη περιοχή. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής φαίνονται στο σχήμα 5.11. Το πρώτο πράγμα που βλέπουμε είναι ότι στο πρώτο βάθος το σώμα φαίνεται καθαρά και στις τέσσερις περιπτώσεις, ωστόσο στο βελτιστοποιημένο σετ διακρίνεται η ανωμαλία που παράγει το σώμα να διαχέεται βαθύτερα, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται ούτε στο πλήρες σετ αλλά και σε κανένα από τα δύο προσαρμοσμένα (focused) σετ. Στο συγκεκριμένο βάθος το μέγεθος της επιλεγμένης περιοχής δεν δείχνει να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Όσον αφορά τώρα το δεύτερο βάθος, το σώμα τοποθετήθηκε αρκετά βαθιά, στα όρια της διακριτικής ικανότητας της διάταξης για να δούμε πως ανταποκρίνεται η μέθοδος σε “ακραίες καταστάσεις”. Αυτό που βλέπουμε είναι ότι το σώμα αν και δίνει ανωμαλίες δεν είναι ευδιάκριτο το σχήμα του. Και εδώ βλέπουμε ότι τα focused πρωτόκολλα διαφοροποιούνται αρκετά από τα βέλτιστα (optimized) στη περιοχή ενδιαφέροντος. Επιπλέον γίνεται εδώ εμφανές ότι το μέγεθος της περιοχής που θα επιλεγεί έχει ουσιαστικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα.

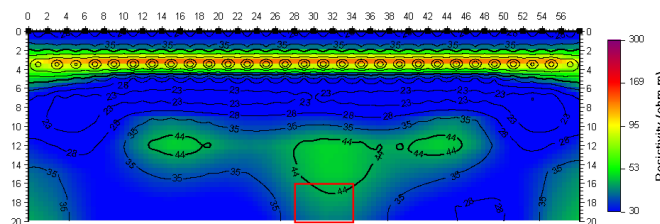
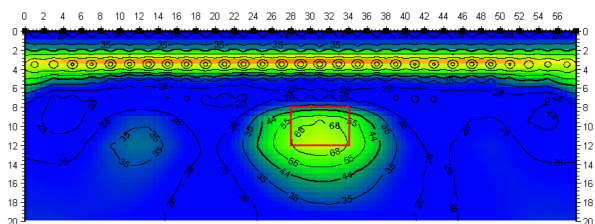
7^ο παράδειγμα

Σε αυτό το μοντέλο δόθηκε μια πιο περίπλοκη δομή, με ένα στρώμα και έναν ημιχώρο και δύο σώματα με το ένα σταθερό και το δεύτερο να κινείται βαθύτερα. Αναλυτικότερα, το πρώτο στρώμα έχει αντίσταση 30Ωm, ο ημιχώρος έχει αντίσταση 100Ωm και τα δύο σώματα έχουν αντίσταση 300Ωm. Οι διαστάσεις του πρώτου (σταθερό) σώματος είναι 6x4m και του δεύτερου 4x4m. Η περιοχή που επιλέχθηκε για επιπλέον μετρήσεις έχει διαστάσεις 8x8 μέτρα. Τα αποτελέσματα της time-lapse αντιστροφής φαίνονται στο σχήμα 5.12. Πάλι αυτό που παρατηρείται είναι ότι το σώμα χάνεται αρκετά γρήγορα, όμως αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι παρόλο που το σώμα δεν εμφανίζεται στο πλήρες σετ (3^ο βάθος), στο εστιασμένο πρωτόκολλο εντοπίζεται. Επίσης για το ίδιο βάθος φαίνεται και στις μετρήσεις διπόλου-διπόλου μία ανωμαλία περίπου στην περιοχή του σώματος όμως λόγω της ύπαρξης συμμετρικής ανωμαλίας δεν είναι εύκολο να διαπιστωθεί αν η ανωμαλία οφείλεται στο σώμα ή στις “ιδιαιτερότητες” της διάταξης αυτής. Τέλος αν και φαίνεται κάποια ανωμαλία στο τέταρτο βάθος (12-14m) και για τα τέσσερα πρωτόκολλα, δεν γίνεται να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για τη θέση του σώματος μιας και η ανωμαλία είναι αρκετά μετατοπισμένη.

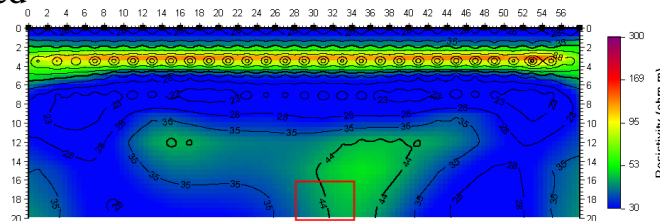
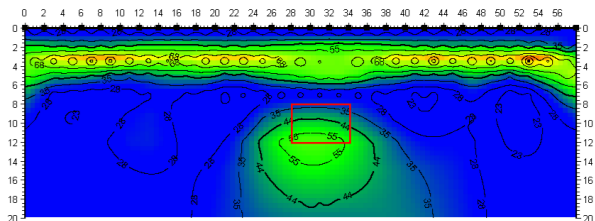
Model



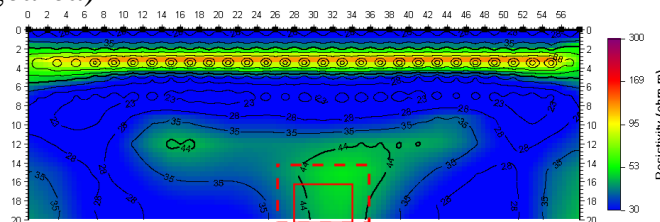
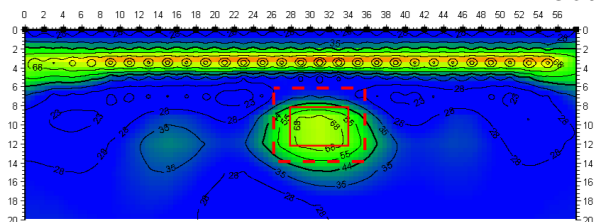
Full



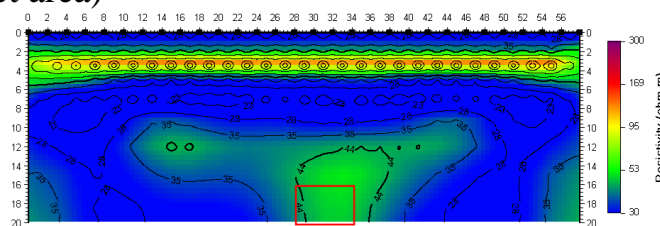
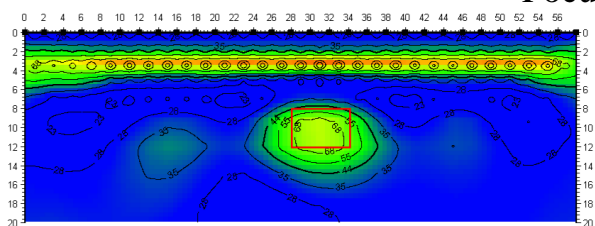
Optimized



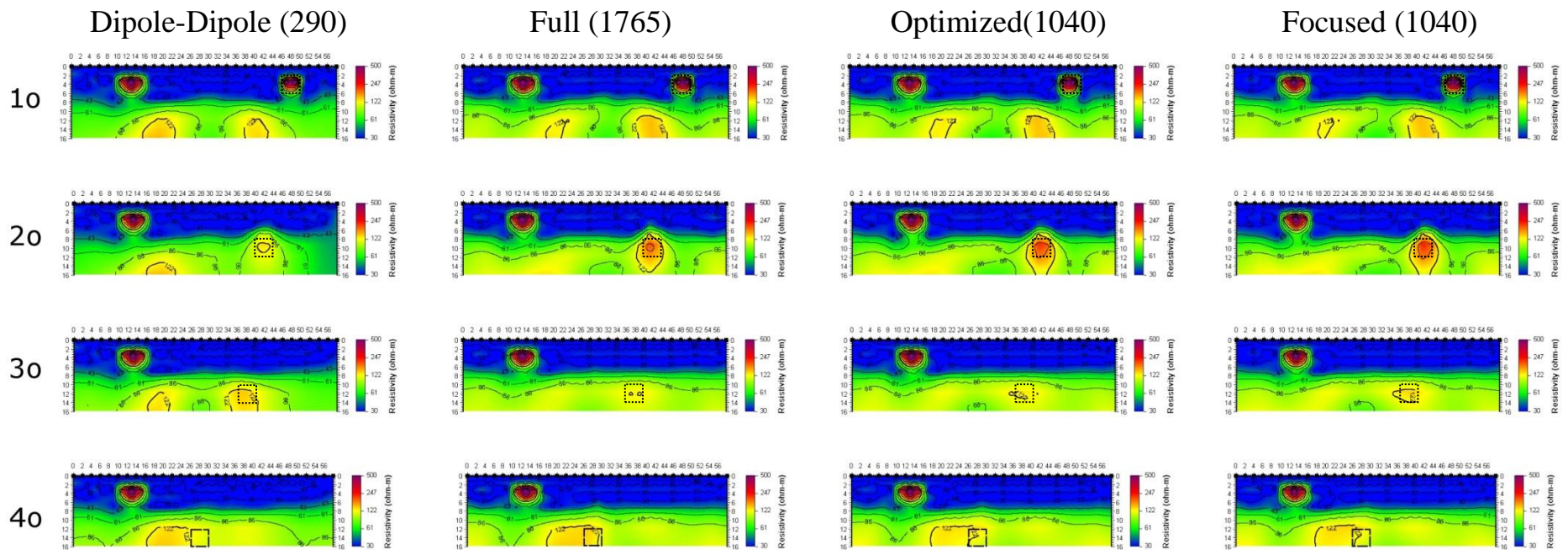
Focused (largearea)



Focused (exact area)



Σχήμα 5.11 Μοντέλα και τα αντίστοιχα αποτελέσματα αντιστροφής (6^ο παράδειγμα). Σε αυτή τη περίπτωση έγινε staticinversion. Η περιοχή στην οποία έγινε focusing φαίνεται ότι εμφανίζει βελτίωση και στα 2 μοντέλα σε σχέση με το optimized πρωτόκολλο. Το εύρος της περιοχής που επιλέγεται δείχνει να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 5.12 Αποτελέσματα για την αντιστροφή διαχρονικού μοντέλου (7^ο παράδειγμα). Η θέση του σώματος φαίνεται με μαύρη διακεκομμένη γραμμή. Αυτό που παρατηρείται αρκετά ξεκάθαρα είναι ότι στο πρωτόκολλο που έγινε επί πλέον μετρήσεις στη περιοχή της αλλαγής το σώμα διακρίνεται αρκετά καλύτερα ακόμη και από το πλήρες πρωτόκολλο με το μέγιστο αριθμό μετρήσεων.

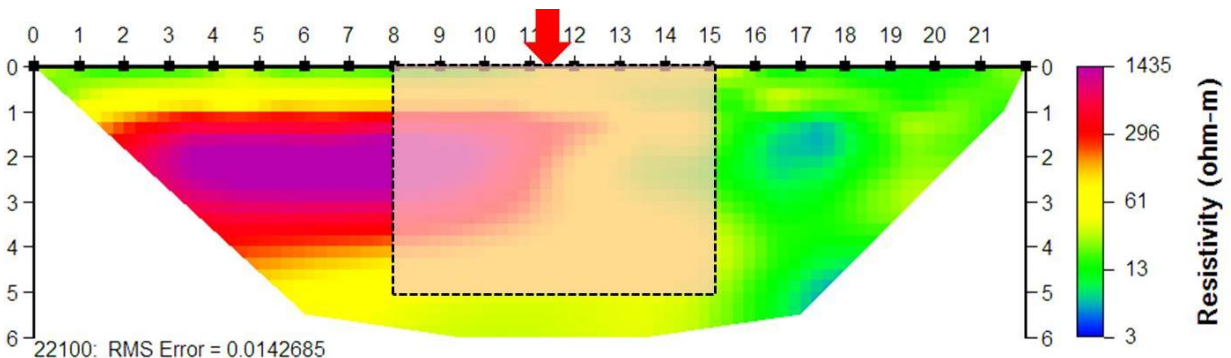
Εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα

Οι παραπάνω αλγόριθμοι ελέγχθηκαν και σε πραγματικές συνθήκες, στη παλαιά χωματερή της περιοχής του Δερβενίου Θεσσαλονίκης. Συγκεκριμένα στην περιοχή διενεργήθηκαν γεωηλεκτρικές τομογραφίες για την διαχρονική παρακολούθηση των σκουπιδιών, των διασταλλάζοντων υγρών, του βιοαερίου και της περατότητας του επιφανειακού στρώματος.

Για τη μέτρηση της κατείσδυσης χρησιμοποιήθηκε διάταξη 24 ηλεκτροδίων με απόσταση ενός μέτρου και το μέγιστο βάθος να φτάνει τα 6 μέτρα. Στο κέντρο της διάταξης ανοίχθηκε ένα σκάμμα από το οποίο αφαιρέθηκε το επιφανειακό στρώμα εδάφους και πληρώθηκε με νερό. Στη συνέχεια και για χρονικό διάστημα κάποιων ωρών λαμβάνονταν συνεχόμενες μετρήσεις. Λήφθηκαν 2 πρωτόκολλα μετρήσεων, ένα κανονικό και ένα με εστιασμένη περιοχή, τη περιοχή του σκάμματος. Ωστόσο και τα δύο πρωτόκολλα είχαν τον ίδιο συνολικό αριθμό μετρήσεων. Το προσαρμοσμένο πρωτόκολλο αποτελείται από 800 μετρήσεις με 300 επιπλέον για την εστιασμένη περιοχή. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αντιστράφηκαν και παρουσιάζονται στο σχήμα 5.15 ως διαφορές 2 μετρήσεων.

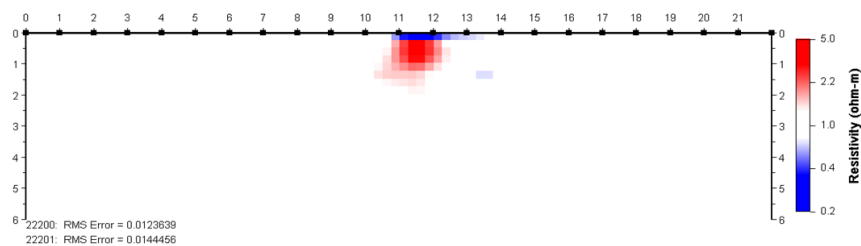


Σχήμα 5.13 Περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Δεξιά φαίνεται το σκάμμα που ανοίχτηκε και πληρώθηκε με νερό για τη μέτρηση της κατείσδυσης. Η παροχή του νερού ήταν σταθερή και τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας συγκρίθηκαν και με υδρογεωλογικές μετρήσεις κατείσδυσης.

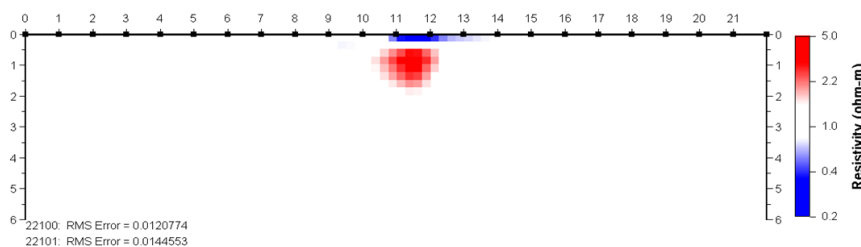


Σχήμα 5.14 Περιοχή στην οποία έγιναν οι επιπλέον μετρήσεις

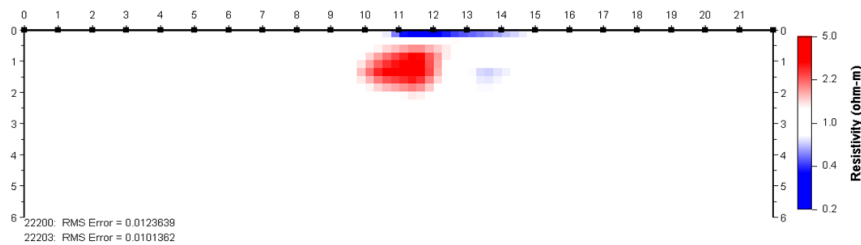
Focused (800+300)



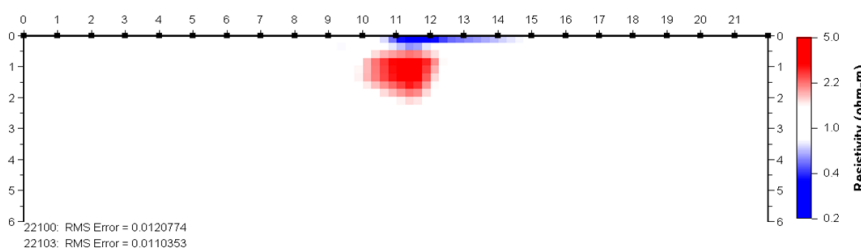
Optimized (1100)



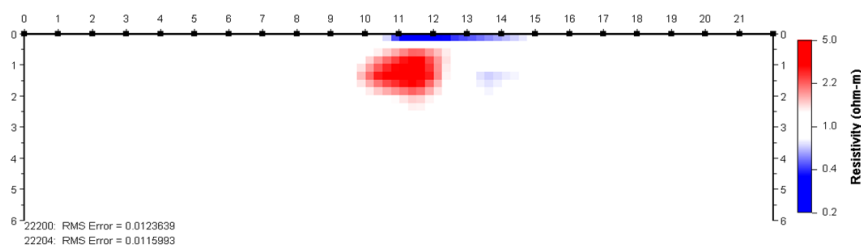
Focused (800+300)



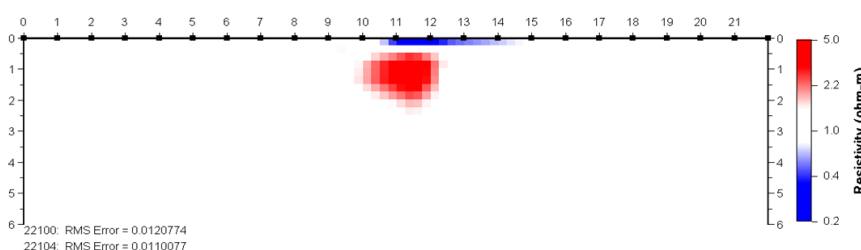
Optimized (1100)



Focused (800+300)



Optimized (1100)



Σχήμα 5.15 Σύγκριση δύο διαδοχικών αποτελεσμάτων μετρήσεων για τρία σετ δεδομένων

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται μία διαφορά μεταξύ των δυο πρωτοκόλλων μέτρησης. Το πρωτόκολλο με την εστιασμένη περιοχή φαίνεται να επηρεάζεται σε μεγαλύτερη περιοχή σε σχέση με το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο. Επιπλέον στο εστιασμένο πρωτόκολλο γίνονται εμφανείς και μικρότερες διαφορές, πράγμα που σημαίνει ότι έχει αυξηθεί η ευαισθησία του.

6. Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία διατριβής ειδίκευσης μελετήθηκε η βελτιστοποίηση των διαχρονικών μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται συνοπτικά παρακάτω.

Γενικά

Η βελτιστοποίηση των μετρήσεων της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης καθώς επιτρέπει τη δημιουργία αξιόπιστων πρωτοκόλλων με τον ελάχιστο αριθμό μετρήσεων και το μέγιστο αποτέλεσμα διακριτικότητας. Ο ελάχιστος αριθμός μετρήσεων αποσκοπεί στο λιγότερο χρόνο που χρειάζεται για να ληφθούν οι μετρήσεις. Ο χρόνος λήψης των μετρήσεων στις κλασσικές εφαρμογές δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας, η χρησιμοποίηση όμως της ηλεκτρικής μεθόδου για τη διαχρονική παρακολούθηση μιας περιοχής απέδειξε με σαφήνεια ότι ο χρόνος λήψης των μετρήσεων (και άρα ο αριθμός των μετρήσεων ενός πρωτοκόλλου μέτρησης) είναι σημαντικός. Η επιλογή των βέλτιστων διατάξεων βασίζεται στη μέθοδο του ιακωβιανού πίνακα, η οποία είναι αρκετά γρηγορότερη στην παραγωγή αποτελεσμάτων σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Επίσης οι διαχρονικές μετρήσεις λόγω του δυναμικού τους χαρακτήρα πρέπει να “ενισχύονται” με επιπλέον μετρήσεις στη περιοχή που εμφανίζονται οι αλλαγές έτσι ώστε να αναπαρίστανται με τον ακριβέστερο τρόπο οι υπεδάφειες δομές μετά την αντιστροφή.

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται, παράγονται από τους αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν. Ένα μέρος των αλγορίθμων βασίστηκε σε προϋπάρχοντα κώδικα και στη συνέχεια αναπτύχθηκαν οι κατάλληλοι κώδικες οι οποίοι ενσωματώθηκαν σε ένα ενιαίο γραφικό περιβάλλον που αποτελεί το τελικό προϊόν της εργασίας. Το πρόγραμμα είναι φιλικό προς τον τελικό χρήστη, παραμετροποιήσιμο, και με μειωμένη κατανάλωση πόρων. Η επιλογή της περιοχής μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της τοποθεσίας που εφαρμόζεται και του χρήστη. Τα παραπάνω έγιναν δυνατά χάρις στη χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της MATLAB.

Συνθετικά μοντέλα

Για τον έλεγχο της λειτουργίας των αλγορίθμων δημιουργήθηκαν συνθετικά μοντέλα, με βάση τα πρωτόκολλα που προέκυψαν, στο πρόγραμμα DC2DPRO. Τα πρωτόκολλα που παράχθηκαν αποτελούνταν από μετρήσεις με τις κυριότερες διατάξεις που χρησιμοποιούνται (διπόλου-διπόλου, πόλου-διπόλου, multiple gradient). Δημιουργήθηκαν μοντέλα τα οποία καλύπτουν

σχεδόν όλες τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται η ηλεκτρική τομογραφία για τη διαχρονική παρακολούθηση μίας περιοχής και προσεγγίζουν πραγματικές συνθήκες.

Τα αποτελέσματα έπειτα από την αντιστροφή έδειξαν ότι τα μοντέλα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν πρωτόκολλα με επιπρόσθετες μετρήσεις, στην περιοχή της αλλαγής, προσεγγίζουν περισσότερο αυτό του πλήρους πρωτοκόλλου σε σχέση με το βέλτιστο (optimized). Ενώ για σχετικά απλά μοντέλα όπου το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο για όλα τα πρωτόκολλα (full, optimized, focused, dipole-dipole) για σχετικά πιο σύνθετα μοντέλα (π.χ. με περισσότερα του ενός στρώματα και περιπλοκότερη υπεδάφια δομή) τα εστιασμένα πρωτόκολλα δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Η διαφορά αυτή εντοπίζεται τόσο στα ποιοτικά όσο και στα ποσοτικά χαρακτηριστικά των αντιστραμμένων αποτελεσμάτων

Πραγματικές συνθήκες

Τα αποτελέσματα και στις πραγματικές συνθήκες επιβεβαίωσαν τα συνθετικά μοντέλα. Η πειραματική εφαρμογή που έλαβε χώρα στη περιοχή του Δερβενίου Θεσσαλονίκης επαλήθευσε την εγκυρότητα της μεθόδου. Συγκεκριμένα τα πρωτόκολλα που μετρήθηκαν: βέλτιστο και προσαρμοσμένο με τον ίδιο αριθμό μετρήσεων, έδειξαν ότι στο προσαρμοσμένο γίνονται διακριτές, μικρότερες αλλαγές οι οποίες δεν φαίνονται στο βέλτιστο πρωτόκολλο.

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η μέθοδος της βελτιστοποίησης των πρωτοκόλλων στις ηλεκτρικές τομογραφίες για διαχρονικές μετρήσεις που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία είναι εφαρμόσιμη και επιτυχής. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της είναι ότι είναι γρήγορη, δίνει αποτελέσματα αντάξια των full πρωτοκόλλων και προσαρμόζεται ανάλογα με τις αλλαγές που εντοπίζονται σε κάθε εφαρμογή.

Μελλοντική δουλειά-Έρευνα

Στην παρούσα εργασία λόγω του περιορισμένου χρόνου δεν καλύφθηκαν όλες οι δυνατές περιπτώσεις χρήσης του προγράμματος (και της μεθόδου).

Σε σχέση με τον κώδικα περαιτέρω ανάπτυξη θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη συγγραφή του σε άλλη γλώσσα (πχ python 3, C++, Java) ή στο περιβάλλον GNU Octave, έτσι ώστε να αναπτυχθεί σε open source. Επίσης η δομή του κώδικα θα μπορούσε να γίνει αντικειμενοστραφής (object oriented) για τη καλύτερη διαχείριση των δεδομένων.

Σε σχέση με τον αλγόριθμο θα μπορούσε να διευρυνθεί το πλήρες σύνολο δεδομένων με την εισαγωγή περισσότερων διατάξεων. Επιπλέον η μέθοδος πρέπει να δοκιμαστεί με διατάξεις που χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια σε γεώτρηση αλλά και τρισδιάστατες διατάξεις ηλεκτροδίων.

Ο αλγόριθμος θα πρέπει να εμπλουτιστεί με πιο αυτοματοποιημένες μεθόδους για την επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος με το να αναπτυχθούν αλγόριθμοι ώστε να εντοπίζουν την ανωμαλία και την πορεία της και να επιλέγεται αυτόματα η περιοχή που αναμένεται η αλλαγή (πχ με τη χρήση νευρωνικών δικτύων). Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος πολύ γρήγορης αντιστροφής για την αμεσότερη επιλογή των περιοχών ενδιαφέροντος.

Τέλος, είναι απαραίτητη η περαιτέρω δοκιμή του αλγορίθμου με το να ελεγχθούν πολυπλοκότερα συνθετικά μοντέλα (πχ ρήγματα, περισσότερα στρώματα, μεγαλύτερα βάθη κα) αλλά και με το να πραγματοποιηθούν περισσότερες πραγματικές δοκιμές καθώς επίσης και εργαστηριακές δοκιμές σε ελεγχόμενες συνθήκες.

Βιβλιογραφία

Αθανασίου Ελένη 2009. *Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη βέλτιστη στρατηγική μέτρησης και αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας*. Διακτορική διατριβή Α.Π.Θ.

Παπαδόπουλος Ταξιάρχης 2010. *Εισαγωγή στη Γεωφυσική*. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα.

Παπαζάχος Βασίλης 1996. *Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Συμυρδάνης Κλεάνθης, 2009. *Πειραματική Μελέτη Ηλεκτρικής Τομογραφίας με Ηλεκτρόδια σε Γεώτρηση*. Διατριβή Ειδίκευσης Α.Π.Θ.

Συμυρδάνης Κλεάνθης, 2013. *Ανάπτυξη Τομογραφικών Γεωφυσικών Τεχνικών για τη Μελέτη Γεωτεχνικών και Περιβαλλοντικών Προβλημάτων*. Διακτορική Διατριβή Α.Π.Θ.

Φίκος Ηλίας, 2010. *Αντιστροφή Γεωηλεκτρικών Τομογραφικών Δεδομένων: Εφαρμογή στη Λεκάνη Ανθεμόντα*. Διακτορική Διατριβή Α.Π.Θ.

Friedel S. 2003. *Resolution, stability and efficiency of resistivity tomography estimated from a generalized inverse approach*. Geophys. J. Int., 153, 305–316.

Jackson D.D. 1972. *Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data*. Geophysical Journal of Royal Astronomy Society, 28, 97–109.

Khodja M.R., Prange M.D., Djikpesse H.A., 2010. Guided Bayesian optimal experimental design, Inverse Problems, 26, 055008.

Loke M.H., Barker R.D. 1995. *Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections*. Geophysics, 60, 1682–1690.

Loke M.H., Acworth I., Dahlin T. 2003. *A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys*. Exploration Geophysics, 34, 182–187.

Loke M.H. 2004. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*

Menke W. 1984. *Geophysical data analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press, London.

Noel M., Xu B. 1991. *Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study*. Geophys. J. Int., 107: 95-102.

Stummer P., Maurer H., Horstmeyer, H., Green A.G., 2002. Optimization of DC resistivity data acquisition: Real-time experimental design and a new multielectrode system, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40, 2727–2735.

Stummer P., Maurer H., Green A. (2004): Experimental design. Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, 69, No.1: 120-139.

Tsourlos P.I. 1995. *Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data*. Ph.D Thesis, Department of Electronics, University of York

Wilkinson P.B., Chambers J.E., Meldrum P.I., Oglivie R.D. and S. Caunt (2006): Optimization of array configurations and geometries for the detection of abandoned mineshafts by 3D cross-hole electrical resistivity tomography. *Geophys. J. Int.*, 167: 1119-1126.

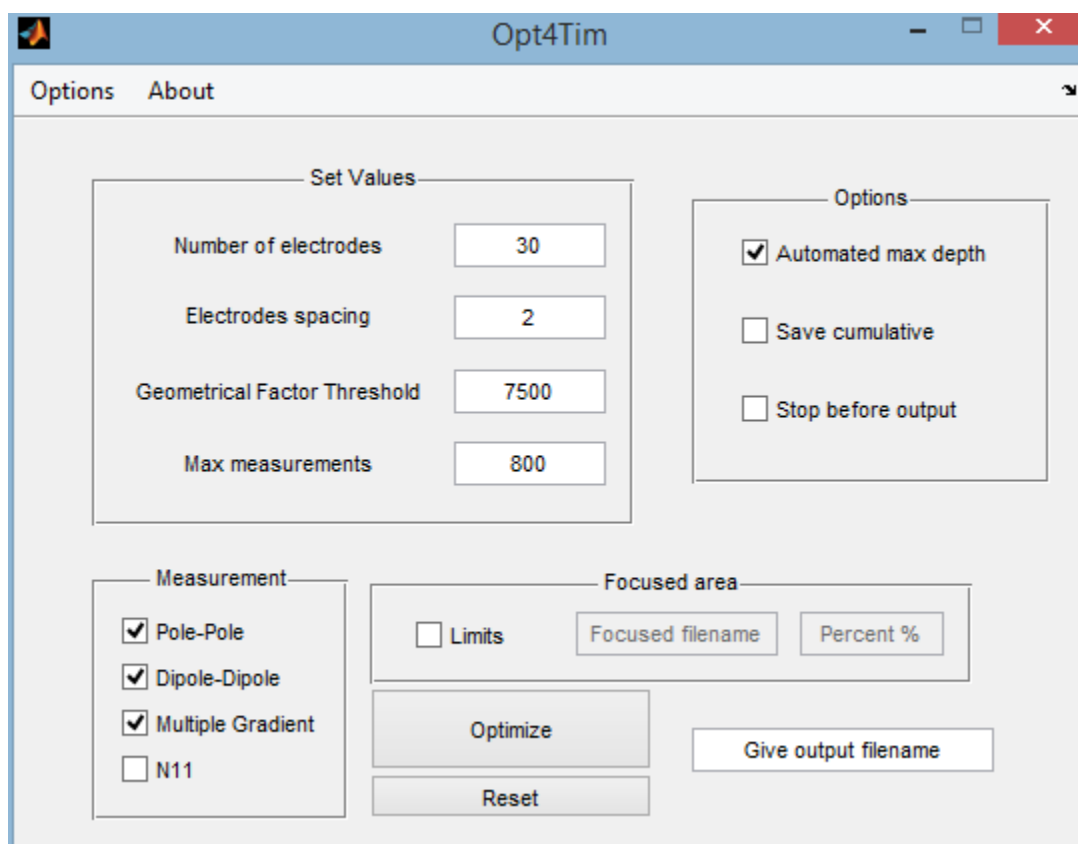
Wilkinson Paul B., Sebastian Uhlemann, Philip I. Meldrum, Jonathan E. Chambers, Simon Carrière, Lucy S. Oxby, M.H. Loke 2015. *Adaptive time-lapse optimized survey design for electrical resistivity tomography monitoring*. *Geophys. J. Int.*, 203, 755-766

Xu B., Noel M. 1993. *On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey*. *Geophysical Prospecting*, 41: 791-801.

Παράρτημα (εγχειρίδιο προγράμματος)

Το πρόγραμμα Opt4Tim καθώς και το εγχειρίδιο μπορείτε να το βρείτε σε δύο τύπους: α) τους κώδικες μαζί με όλες τις συναρτήσεις σε αρχείο zip για να χρησιμοποιηθεί μέσα στη Matlab β) το εκτελέσιμο αρχείο exe, το οποίο εγκαθιστά τις απαραίτητες βιβλιοθήκες στον υπολογιστή στη περίπτωση που δεν έχετε εγκατεστημένη τη Matlab. Και οι δύο τύποι αρχείων μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα <http://tiny.cc/opt4tim>. Για να τρέξει το πρόγραμμα μέσα από το περιβάλλον της Matlab, αρκεί να τρέξετε τον κώδικα pms.

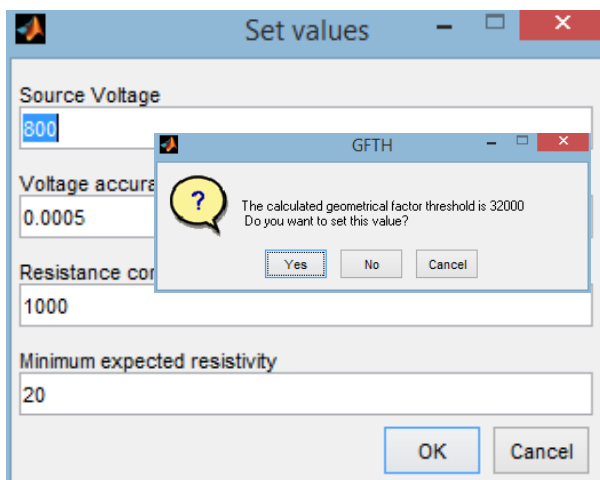
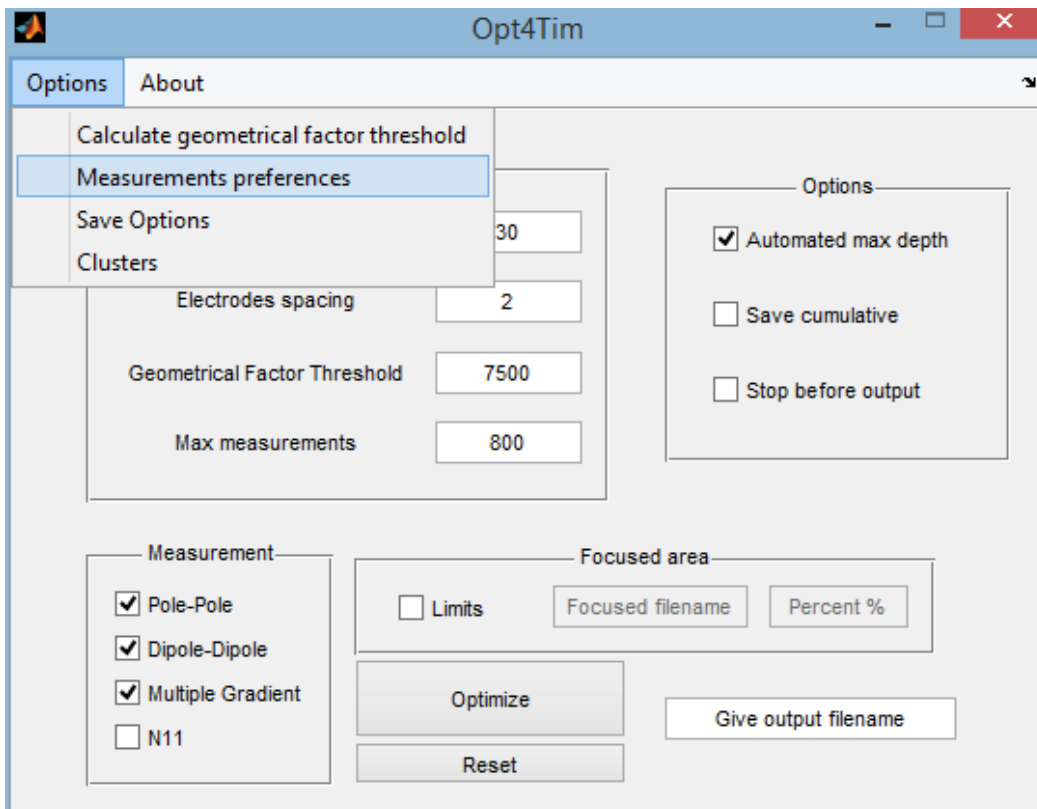
Αρχικά με το που ανοίγει το πρόγραμμα η εικόνα που παίρνουμε είναι η παρακάτω.



Στο κεντρικό αυτό παράθυρο μπορούμε να ορίσουμε τις κύριες μεταβλητές, ανάλογα με τη διάταξη που επιθυμούμε να μετρήσουμε. Μπορούμε να επιλέξουμε τον αριθμό των ηλεκτροδίων, το spacing που θα έχουν, το κατώφλι του γεωμετρικού παράγοντα και το μέγιστο αριθμό (βέλτιστων) μετρήσεων. Στη περιοχή Measurement μπορούμε να επιλέξουμε ποιες διατάξεις ηλεκτροδίων θα χρησιμοποιηθούν. Στη περιοχή Options δίνεται η δυνατότητα να επιλέξει ο χρήστης τον τρόπο υπολογισμού του μέγιστου βάθους (αυτόματα ή χειροκίνητα), εάν θέλουμε να σωθεί ο αθροιστικός Ιακωβιανός πίνακας και τέλος εάν επιθυμούμε το πρόγραμμα να μην δημιουργήσει τα πρωτόκολλα. Αυτό μπορεί να το κάνουμε για να δούμε εάν το τελικό

αποτέλεσμα διακριτικότητας-βάθους, που φαίνεται από τους αθροιστικούς Ιακωβιανούς (βλ. παρακάτω), μας ικανοποιεί. Τέλος μπορούμε να επιλέξουμε εάν θέλουμε να συμπεριλάβουμε μια περιοχή, που θα καθοριστεί παρακάτω, στη οποία θα γίνουν επιπλέον μετρήσεις, όπως και το ποσοστό αυτών των μετρήσεων. Το ποσοστό αυτό είναι επί του συνόλου των βέλτιστων μετρήσεων.

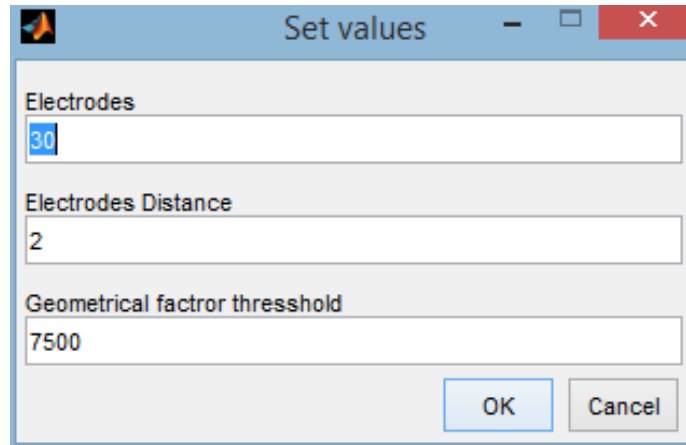
Στη συνέχεια πατώντας στο menu Options ανοίγει μία λίστα με κάποιες επιλογές που οδηγούν σε πιο σύνθετες επιλογές όπως το Calculate geometrical factor threshold, το Measurements preferences, το Save options και το Clusters.



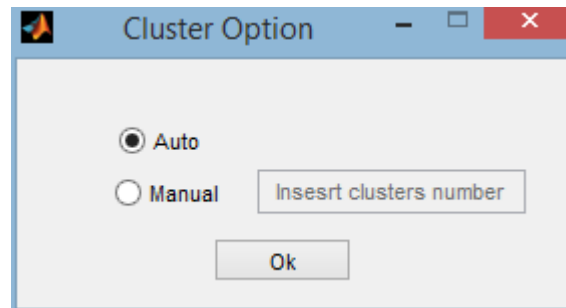
Στην επιλογή Calculate geometrical factor threshold μπορούμε να εισάγουμε τις παραμέτρους του οργάνου όπως φαίνεται στο σχήμα, και να υπολογιστεί αυτόματα το κατώφλι για το “κόψιμο” ακραίων μετρήσεων. Εάν το αποτέλεσμα το κρίνουμε σωστό (εξαρτάται από τις διατάξεις που θα χρησιμοποιηθούν και τη περιοχή), το

πρόγραμμα μας ρωτάει εάν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή την τιμή.

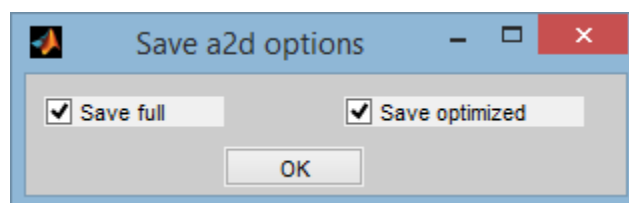
Στην επιλογή Measurements preferences μπορούμε να βρούμε τις βασικές παραμέτρους των μετρήσεων dipole-dipole και multiple gradient. Αυτές ορίζονται ανάλογα με τις διατάξεις που θα χρησιμοποιηθούν, το μέγιστο βάθος που επιθυμούμε και κυρίως την διακριτική ικανότητα που προσδοκούμε.



Η επιλογή clusters ανοίγει ένα νέο παράθυρο gui το οποίο δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε τον τρόπο υπολογισμού των κλάσεων για τον αθροιστικό ιακωβιανό. Μπορούμε να επιλέξουμε είτε να υπολογιστούν αυτόματα, μέσα από το κύριο πρόγραμμα, είτε να εισάγουμε χειροκίνητα τον αριθμό τους. Στη περίπτωση του αυτόματου υπολογισμού των clusters, εάν αυτά υπερβαίνουν τα είκοσι, τότε ενημερώνεται ο χρήστης να ορίσει μια τιμή χειροκίνητα.

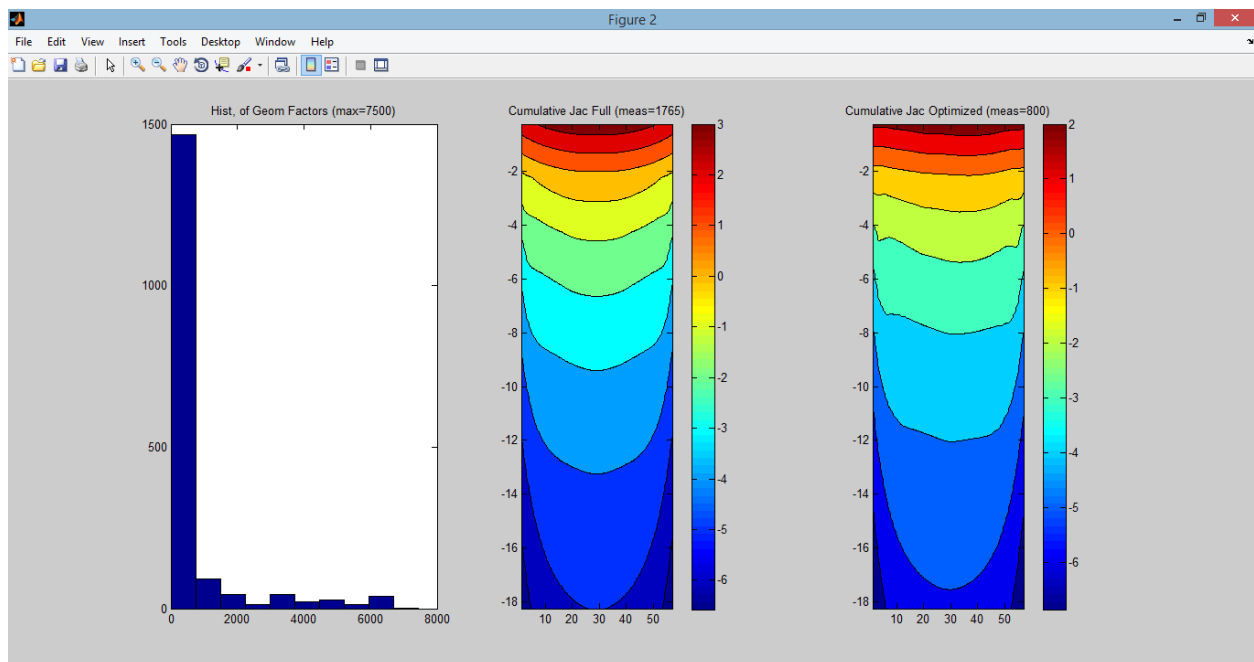


Τέλος η τελευταία επιλογή Save options επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει ποια πρωτόκολλα θέλει τελικά να σωθούν. Η προκαθορισμένη επιλογή είναι να σώζονται και τα δύο πρωτόκολλα, πλήρες και βέλτιστο.

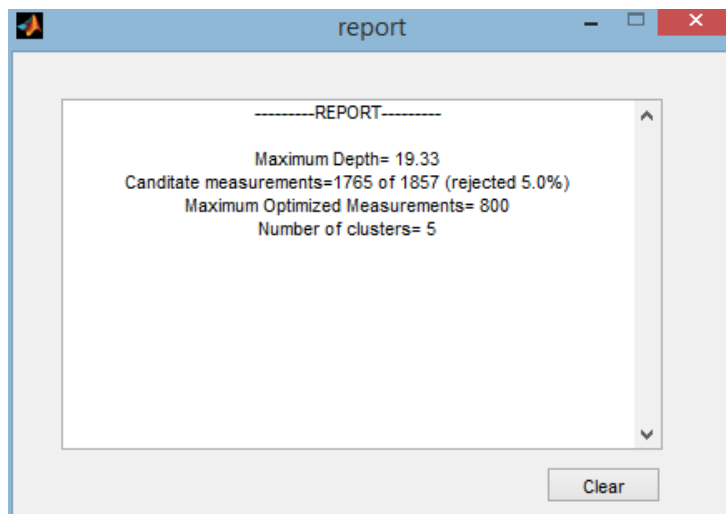


Στη συνέχεια αφού εισάγουμε όλα τα απαραίτητα στοιχεία και τροποποιήσουμε τις κατάλληλες ιδιότητες, πατάμε το Optimize και αρχίζει το πρόγραμμα. Αρχικά θα μας εμφανίσει για κάποια δευτερόλεπτα το μέγιστο βάθος της διάταξης και τον αριθμό των clusters. Έπειτα το πρόγραμμα εμφανίζει μια progress bar, στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου αυτού υπολογίζεται Ιακωβιανός και στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των βέλτιστων μετρήσεων, ανάλογα με τις τιμές του αθροιστικού Ιακωβιανού πίνακα.

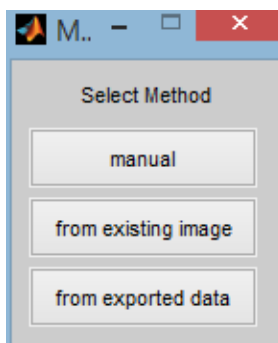
Αφού γίνει η επιλογή των μετρήσεων το πρόγραμμα τελειώνει ανοίγοντας δύο παράθυρα. Στο ένα παράθυρο σχεδιάζονται τρία διαγράμματα, το πρώτο είναι ένα ιστόγραμμα των γεωμετρικών παραγόντων που υπολογίστηκαν για κάθε μέτρηση, με μέγιστη τιμή το επιλεγμένο κατώφλι. Τα υπόλοιπα δύο διαγράμματα απεικονίζουν τον αθροιστικό ιακωβιανό με το βάθος, για το πλήρες σετ μετρήσεων και για το βέλτιστο. Στην ουσία τα διαγράμματα αυτά δείχνουν πόσο επηρεάζεται η ανάλυση των μετρήσεων με το βάθος.



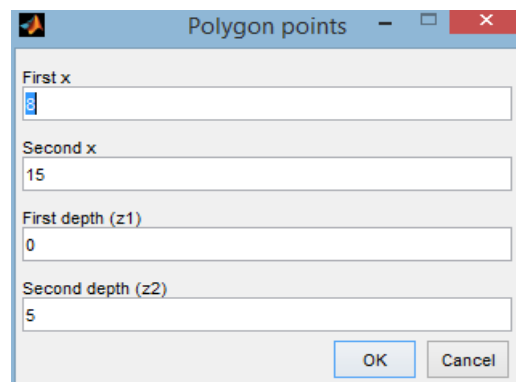
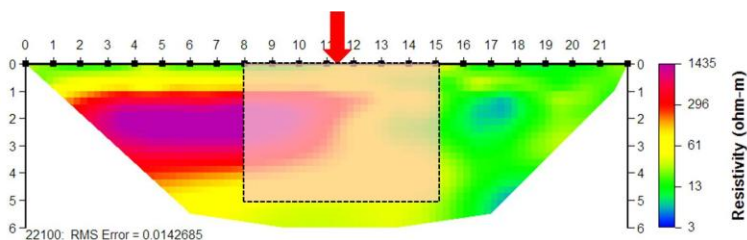
Το δεύτερο παράθυρο είναι ένα σύντομο report των χαρακτηριστικών των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν και μερικών παραμέτρων που υπολογίστηκαν στο πρόγραμμα. Στη περίπτωση που το πρόγραμμα έχει αρχεία output (δεν έχει τσεκαριστεί δηλαδή η επιλογή **Stop before output**) παράγεται και ένα αρχείο με όνομα *GivenFilename_report.txt*.



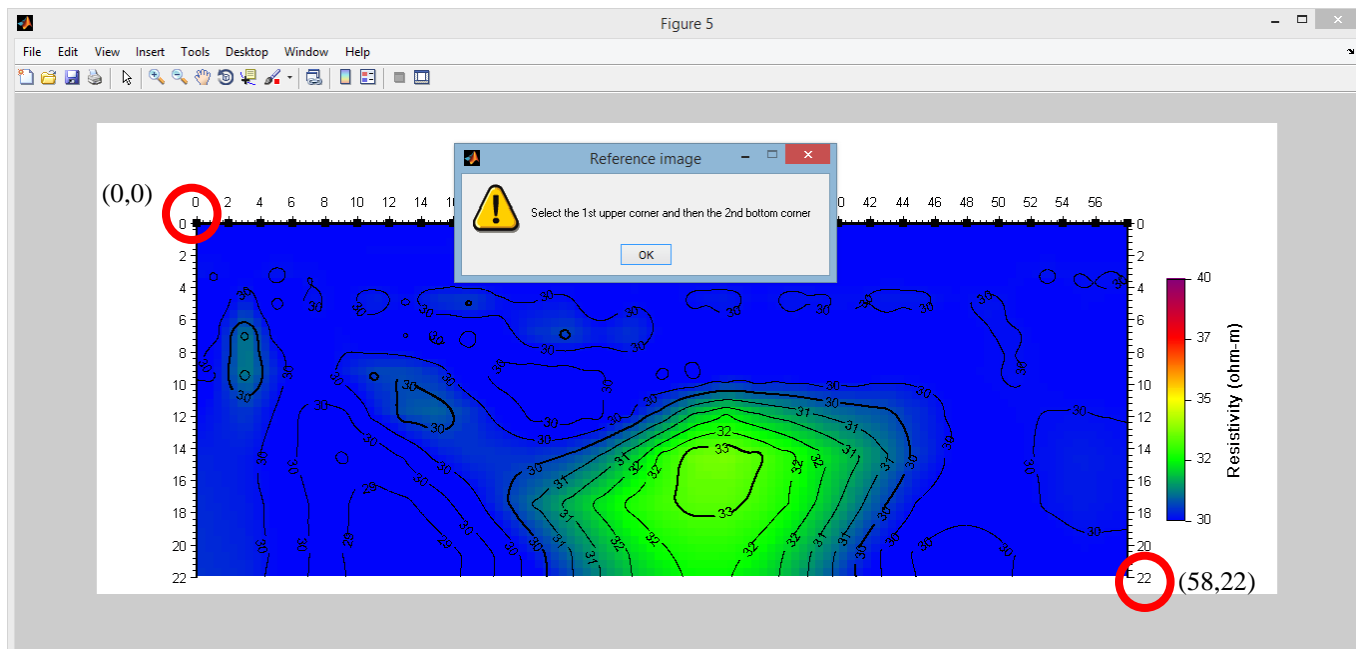
Στην περίπτωση που στην αρχική οθόνη τσεκάρουμε την επιλογή Limits, τότε πρέπει να εισάγουμε το όνομα που θέλουμε να έχει το αρχείο με τις επιπλέον μετρήσεις και να ορίσουμε το ποσοστό των μετρήσεων. Αφού τρέξουμε κανονικά το πρόγραμμα, μετά τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα ανοίγει ένα παράθυρο που μας ρωτάει με ποιο τρόπο θα εισάγουμε την περιοχή. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω παράδειγμα υπάρχουν τρεις τρόποι εισαγωγής μιας περιοχής.



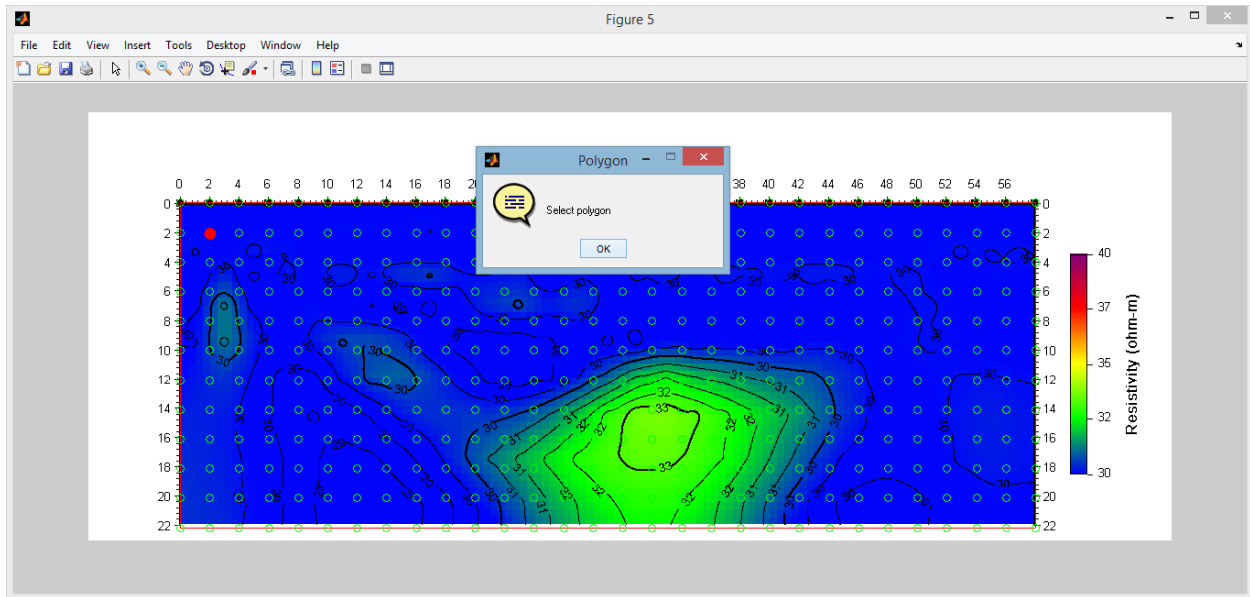
Ο πρώτος τρόπος είναι ο χειροκίνητος, δηλαδή ορίζουμε τις τέσσερις γωνίες ενός τετραπλεύρου ανάλογα με το μέτρο τους στην μέτρηση. Για παράδειγμα στο παρακάτω σχήμα η επιλεγμένη περιοχή φαίνεται με μαύρη γραμμή και δίπλα φαίνεται το παράθυρο με τα σημεία του τετραπλεύρου.



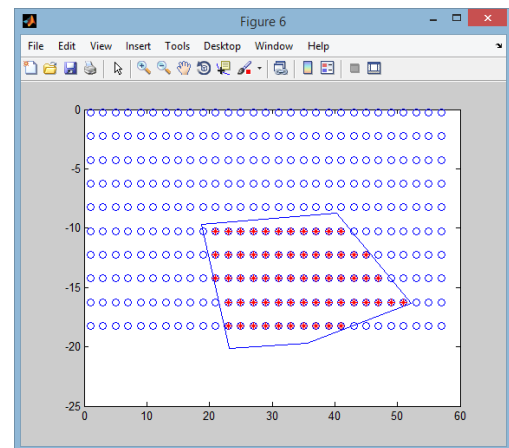
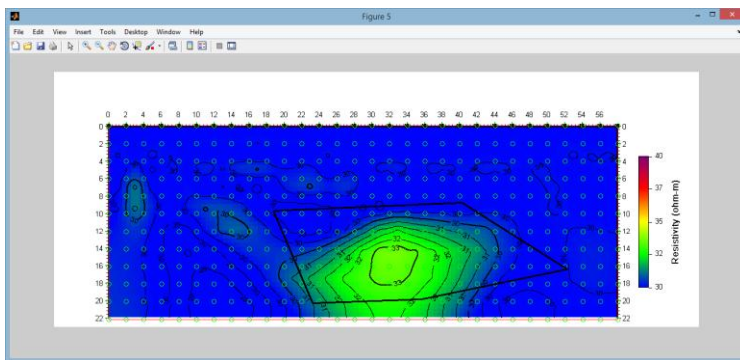
Ο δεύτερος τρόπος είναι να σχεδιάσουμε την περιοχή που θέλουμε σε μία προϋπάρχουσα εικόνα αντιστροφής. Εδώ γεννάται το ερώτημα, κατά πόσο είναι σωστό να επιλεγεί η περιοχή από παλαιότερες εικόνες. Ωστόσο σε γενικές γραμμές για διαχρονικές παρακολουθήσεις μιας περιοχής μπορούμε να προσδιορίσουμε τη πορεία της αλλαγής και επομένως να ξέρουμε την θέση της. Συνεχίζοντας, το πρόγραμμα αφού μας ζητήσει να ανοίξουμε μια εικόνα (bmp ή gif) μας ζητάει να την αναφέρουμε. Αυτό γίνεται επιλέγοντας την πρώτη (πάνω αριστερή) και την τελευταία (κάτω δεξιά) γωνία της εικόνας και δίνοντας τις συντεταγμένες της (μέτρο και βάθος).



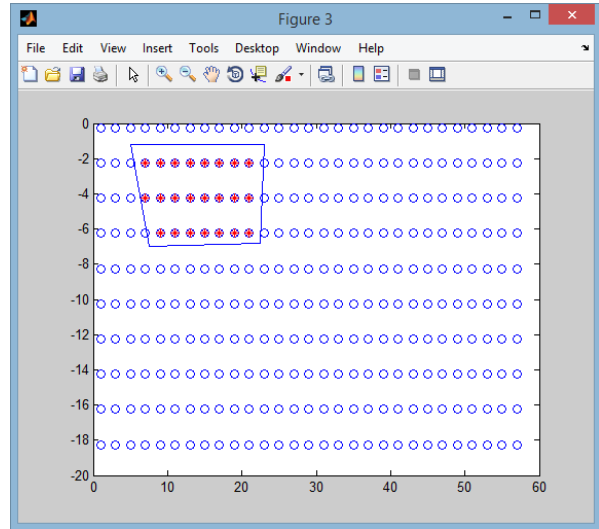
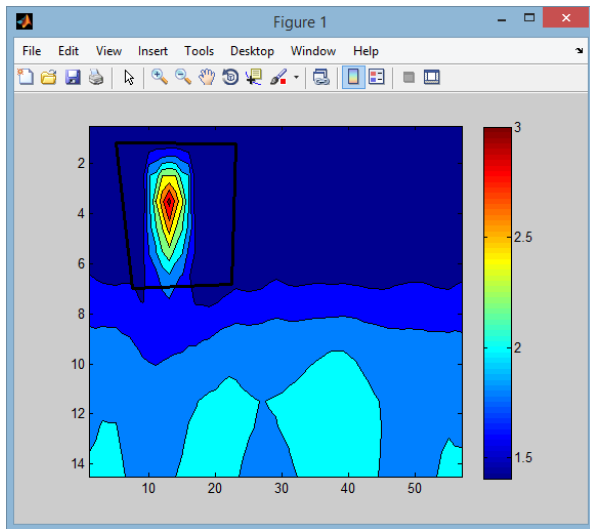
Αφού κάνουμε την αναφορά της εικόνας ακολουθεί ένα βήμα για να επαληθεύσουμε το αποτέλεσμα. Εδώ δημιουργούμε ένα grid απλά “κλικάροντας” σε ένα σημείο μέσα στην εικόνα ανάλογα με την απόσταση που θέλουμε να έχει τόσο στον x άξονα όσο και στον y. Έτσι για το προηγούμενο παράδειγμα και για ένα grid με ισοδιαστήματα 2x2, “κλικάρουμε” στο σημείο που απέχει απόσταση από την αρχή 2m και σε βάθος επίσης 2m. Στο σχήμα φαίνεται με κόκκινο το σημείο που επιλέξαμε.



Στη συνέχεια μας ζητείται να επιλέξουμε την περιοχή που μας ενδιαφέρει. Αφού επιλέξουμε την περιοχή αυτόματα εμφανίζεται ένα νέο διάγραμμα που δείχνει την υποθετική θέση των παραμέτρων στη διάταξη και με κόκκινο εκείνες που έχουν επιλεγεί και τους προστέθηκαν μετρήσεις



Τελευταίος τρόπος είναι να επιλέξουμε την περιοχή από αρχεία dat που έχουν εξαχθεί μετά την αντιστροφή παλαιότερων δεδομένων. Και πάλι εδώ ισχύει η λογική ότι μπορεί να γίνει “πρόβλεψη” για την θέση της αλλαγής. Αρχικά εισάγουμε το αρχείο και στη συνέχεια επιλέγουμε την περιοχή. Και σε αυτή την περίπτωση παίρνουμε ένα διάγραμμα με τις θέσεις των παραμέτρων που ενισχύθηκαν με μετρήσεις



Τέλος να αναφερθεί ότι μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας επιλογής περιοχής το πρόγραμμα σχεδιάζει στο γράφημα των αθροιστικών ιακωβιανών, στη θέση του βέλτιστου πρωτοκόλλου τον αθροιστικό ιακωβιανό με τις πρόσθετες μετρήσεις.