



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΛΟΥΒΑΡΗΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ ΣΤΟΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΧΩΡΟ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ
ΓΕΩΛΟΓΙΑ'*

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ'

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2020





ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΛΟΥΒΑΡΗΣ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

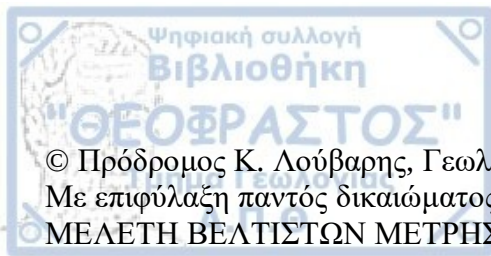
ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ ΣΤΟΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΧΩΡΟ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
‘Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία’, Κατεύθυνση ‘Εφαρμοσμένη Γεωφυσική

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 3/03/2020

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Τσούρλος Π., Επιβλέπων
Αναπληρωτής Καθηγητής Βαργεμέζης Γ., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Ερευνητής Δ' Παπαδόπουλος Ν., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής



© Πρόδρομος Κ. Λούβαρης, Γεωλόγος, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΩΝ ΣΤΟΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΧΩΡΟ – *Μεταπτυχιακή
Διπλωματική Εργασία*

© Prodromos K. Louvaris, Geologist, 2020

All rights reserved.

STUDY OF OPTIMIZED ERT MEASURING ARRAYS WITH ELECTRODES PLACED IN
3D SPACE – *Master Thesis*

Citation:

Λούβαρης Π.Κ., 2020. – Μελέτη βέλτιστων μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας με διατάξεις ηλεκτροδίων τοποθετημένων στον τρισδιάστατο χώρο. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 88 σελ.
Louvaris P.K., 2020. – Study of optimized ERT measuring arrays with electrodes placed in 3D space. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 88 pp.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

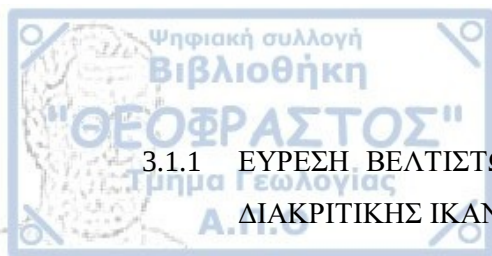
Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής μελετώνται βέλτιστες διατάξεις μέτρησης ηλεκτρικής τομογραφίας για ηλεκτρόδια των οποίων η θέση τους βρίσκεται σε γνωστές αλλά και σε τυχαίες θέσεις στον τρισδιάστατο χώρο. Η βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων υλοποιείται με τη μέθοδο του πίνακα διακριτικής ικανότητας (Stummer et al. 2004) όπως και με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα (Αθανασίου 2009), ενώ πραγματοποιείται επέκταση των μεθόδων σε χρήση τρισδιάστατων ηλεκτρικών τομογραφιών. Επίσης δημιουργήθηκε αλγόριθμος ο οποίος βελτιστοποιεί πρωτόκολλα μετρήσεων βασισμένος στη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα, ενώ παράλληλα υιοθετεί το κριτήριο της γραμμικής ανεξαρτησίας από τη μέθοδο του πίνακα διακριτικής ικανότητας. Προκειμένου να ελεγχθούν τόσο οι μέθοδοι βελτιστοποίησης όσο και οι τυχαίες θέσεις των ηλεκτροδίων, πραγματοποιήθηκαν πειράματα τόσο με συνθετικά μοντέλα όσο και με πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να απεικονίσουν με επιτυχία τους στόχους επιτυγχάνοντας παρόμοια αποτελέσματα με τα πλήρη πρωτόκολλα.



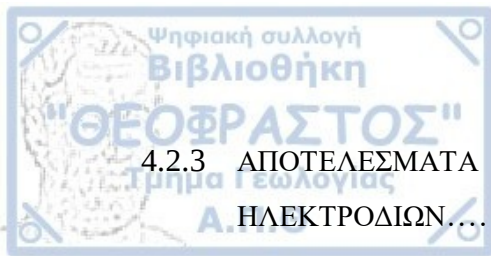
This master thesis examines the optimized ERT arrays for fixed or arbitrary electrode positions in the three dimensional space. Optimized arrays are calculated using the resolution matrix method (Stummer et al. 2004) and the Jacobian matrix method (Athanasίου 2009) extending the methodology in the three-dimensional (3D) space. Moreover, an optimizing algorithm was developed on the basis of the Jacobian matrix method while simultaneously adopting the linear independence criterion from the resolution matrix method. The effectiveness of the optimization methods in 3D ERTs with electrodes at arbitrary positions was tested using synthetic models and real field data. Results show that optimized protocols can depict the targets quite satisfactorily.



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	Σελ.10
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	Σελ.10
1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	Σελ.11
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	Σελ.12
2. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	Σελ.14
2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	Σελ.14
2.2 ΡΟΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΓΗ.....	Σελ.15
2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	Σελ.17
2.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	Σελ.18
2.4.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΕΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	Σελ.18
2.4.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΕΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	Σελ.20
2.5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	Σελ.24
2.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	Σελ.25
2.7 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	Σελ.27
2.7.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΘΕΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	Σελ.27
2.7.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ.....	Σελ.29
2.7.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	Σελ.30
2.7.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ.....	Σελ.31
2.7.5 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΥΘΕΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	Σελ.32
3. ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ.....	Σελ.35



3.1.1	ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ 3D ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ (STUMMER ET AL. 2004).....	Σελ.36
3.1.2	ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ 3D ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ (ATHANASIOY 2009).....	Σελ.38
3.2	ΝΕΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ (3Δ) ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ (J_opt3D).....	Σελ.41
3.2.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΓΙΑ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	Σελ.42
3.2.2	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΩΝ ΣΕΤ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (COMPREHENSIVE).....	Σελ.47
3.2.3	ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ.....	Σελ.47
3.2.4	ΝΕΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	Σελ.51
3.2.5	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ.....	Σελ.52
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	Σελ.57
4.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	Σελ.57
4.1.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	Σελ.57
4.1.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	Σελ.62
4.1.3	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	Σελ.68
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	Σελ.68
4.2.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 3D ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ 2D ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	Σελ.68
4.2.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	Σελ.69



4.2.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ.....	Σελ.71
4.2.4	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	Σελ.72
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	Σελ.73
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	Σελ.76
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	Σελ.87

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ – ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η ηλεκτρική μέθοδος αποτελεί μια από τις παλιότερες και πιο διαδεδομένες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης. Ο λόγος που είναι τόσο διαδεδομένη οφείλεται στο γεγονός ότι μπορεί να δώσει πληροφορία για τη γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους με μεγάλη ακρίβεια, σχετικά γρήγορα και για μεγάλη ποικιλία στόχων που συναντώνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως η υδρογεωλογική, γεωτεχνική, μεταλλευτική, αρχαιολογική, έρευνα κ.ο.κ.

Γενικά οι ηλεκτρικές μέθοδοι διεξάγονται τυπικά με την τοποθέτηση ηλεκτροδίων στο έδαφος και τη χρήση μιας πηγής η οποία εισάγει ηλεκτρικό ρεύμα μέσω των ηλεκτροδίων ενώ ο δέκτης μετράει τη διαφορά δυναμικού που δημιουργήθηκε από τη ροή ρεύματος στο υπέδαφος σε δυο άλλα ηλεκτρόδια. Τις περισσότερες φορές η πηγή και ο δέκτης αποτελούν ένα ενιαίο όργανο, το οποίο αυξάνει την ευκολία στη μεταφορά του εξοπλισμού. Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια στον χώρο ονομάζεται «διάταξη» και η κάθε αλλαγή στη θέση των ηλεκτροδίων μπορεί να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα. Ένα σύνολο από διατάξεις αποτελεί το πρωτόκολλο μετρήσεων, το οποίο καθοδηγεί το όργανο μέτρησης για τον τρόπο με τον οποίο θα εισαχθεί ρεύμα και θα μετρηθεί το δυναμικό.

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων και ανάλογα πρωτόκολλα μετρήσεων που έχουν προταθεί στην ηλεκτρική διασκόπηση για τη διεξαγωγή γεωφυσικών ερευνών τόσο σε δυο (2D) όσο και για τρεις (3D) διαστάσεις. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της δισδιάστατης διασκόπησης αυτές οι διατάξεις έχουν ευρεία χρήση γιατί έχει αποδειχτεί ότι είναι αποτελεσματικές για τον εντοπισμό πιθανών στόχων. Άλλα στην περίπτωση της τρισδιάστατης ηλεκτρικής διασκόπησης αν και έχουν προταθεί διατάξεις και σχετικά πρωτόκολλα, δεν υπάρχει μια ευρέως αποδεκτή μεθοδολογία μετρήσεων.

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας παρότι προσφέρει συνεχώς όργανα και λογισμικά τα οποία μειώνουν τον χρόνο λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων, δημιουργεί και την ανάγκη για λεπτομερέστερη και πιο αποτελεσματική έρευνα. Συγκεκριμένα στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας, η επιλογή των μετρήσεων ενός πρωτοκόλλου με βάση ποσοτικά αλλά και ποιοτικά κριτήρια μπορεί σαφώς να αυξήσει την πληροφορία που λαμβάνεται από μια

διασκόπηση. Από την άλλη η μεγάλη αύξηση του αριθμού των μετρήσεων συνδέεται και με σημαντική αύξηση της χρονικής επιβάρυνσης (άρα και του κόστους) τόσο στη λήψη όσο και στην επεξεργασία των μετρήσεων γεγονός που ενδεχομένως δεν αντισταθμίζει τα οφέλη ως προς το αποτέλεσμα της έρευνας. Η ανάγκη για βελτίωση της απόδοσης της έρευνας με επιλογή των πιο σημαντικών μόνο μετρήσεων οδήγησε στο να ακολουθηθεί στην ηλεκτρική διασκόπηση η διαδικασία της βελτιστοποίησης των πρωτοκόλλων, ώστε να μπορεί μέσω ενός βέλτιστου πρωτοκόλλου να ληφθεί η μέγιστη δυνατή πληροφορία με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό μετρήσεων.

Στην παρούσα εργασία μελετάται μια νέα τεχνική βελτιστοποίησης πρωτοκόλλων η οποία βασίζεται στη μέθοδο Ιακωβιανού πίνακα (Athanasίου 2009). Αυτή η μέθοδος βελτιστοποιεί τα πρωτόκολλα αποτελεσματικά και σε μικρό χρονικό διάστημα. Κύρια διαφοροποίηση της νέας μεθόδου από αυτή που προτείνεται κατά Athanasίου et al. 2009 είναι η προσθήκη δύο επιπλέον κριτηρίων όπως προτείνονται από τους Stummer et al. 2004 και Wilkinson et al. 2008, αυτό της γραμμικής ανεξαρτησίας και του σχετικού σφάλματος στο γεωμετρικό παράγοντα. Η διαφοροποίηση της νέας μεθόδου δεν περιορίζεται μόνο στη διαδικασία βελτιστοποίησης, αφού επεκτείνεται με στόχο να μπορεί να εφαρμοστεί σε τρισδιάστατες διασκοπήσεις.

1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η πορεία που ακολουθήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εξής

- Μελέτη των υπάρχοντων μεθόδων βελτιστοποίησης πρωτοκόλλων μέτρησης σε τρεις διαστάσεις.
- Δημιουργία ενός αλγορίθμου ο οποίος δημιουργεί πλήρη πρωτόκολλα και τα βελτιστοποιεί με τρεις μεθόδους: αυτή του πίνακα διακριτικής ικανότητας (Stummer et al. 2004), του Ιακωβιανού πίνακα (Αθανασίου 2009) καθώς και με ένα συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων.
- Χρήση συνθετικών μοντέλων τόσο με το πλήρες πρωτόκολλο μετρήσεων, όσο και με τα αντίστοιχα βέλτιστα και σύγκριση μεταξύ τους.

- Σύγκριση συνθετικών μοντέλων με το πλήρες σετ μετρήσεων, όσο και με τα βέλτιστα σετ, αλλά με ηλεκτρόδια «τυχαία καταναμημένα» στην επιφάνεια του εδάφους
- Εφαρμογή των βέλτιστων πρωτοκόλλων σε πραγματικές μετρήσεις πεδίου προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητα και διακριτική ικανότητα των βέλτιστων πρωτοκόλλων τόσο σε αυστηρά δομημένο κάρναβο, όσο και σε πιο αυθαίρετο.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία στην οποία βασίζονται οι ηλεκτρικές μέθοδοι και πιο συγκεκριμένα αυτή της ηλεκτρικής τομογραφίας. Αναλύονται οι βασικές έννοιες της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του νόμου του Ohm. Επίσης αναφέρεται ο τρόπος διεξαγωγής μιας γεωηλεκτρικής γεωφυσικής έρευνας ως προς την απόκτηση των δεδομένων και την επεξεργασία αυτών. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην επίλυση του ευθέως και αντίστροφου προβλήματος, προκειμένου να γίνει ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι διαδικασίες δημιουργίας πλήρων και βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης.. Αναφέρεται επιγραμματικά η χρήση του αλγορίθμου ο οποίος δημιουργεί το πλήρες σετ μετρήσεων. Στη συνέχεια αναλύονται τρεις τρόποι βελτιστοποίησης, αυτός του Stummer, της Αθανασίου και ο συνδυασμός των δύο παραπάνω. Παρουσιάζονται τμήματα των αλγορίθμων όπως αυτά έχουν προταθεί από τους γνωστούς τρόπους βελτιστοποίησης. Τέλος αναλύεται ο νέος κώδικας ο οποίος δημιουργεί το πλήρες σετ, υπολογίζει την ευαισθησία των μετρήσεων και βελτιστοποιεί το αρχικό σετ ως προς την επιλογή αντίστοιχων μετρήσεων ή πρωτοκόλλων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνθετικής μοντελοποίησης. Αναλυτικότερα, δημιουργήθηκαν μοντέλα για τα οποία υπολογίστηκε η απόκρισή τους θεωρώντας πλήρη πρωτόκολλα καθώς και συνδυασμούς μετρήσεων που παράχθηκαν από τις αντίστοιχες μεθόδους βελτιστοποίησης. Αφού συγκριθούν μεταξύ τους, αναπαράγονται τα ίδια συνθετικά μοντέλα, αυτή τη φορά με πιο τυχαία κατανομή των ηλεκτροδίων και τέλος συγκρίνονται με τα αρχικά. Έπειτα παρουσιάζονται και συγκρίνονται



πραγματικά δεδομένα, τα οποία αποκτήθηκαν από μετρήσεις πεδίου, σύμφωνα με τις μεθόδους βελτιστοποίησης που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τη συγκεκριμένη έρευνα όπου Αναφέρονται επιγραμματικά τα αποτελέσματα από τις συγκρίσεις τόσο των συνθετικών μοντέλων, όσο και από τα πραγματικά δεδομένα..

2. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η ηλεκτρική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης είναι μια διαδεδομένη μέθοδος σύμφωνα με την οποία μελετάται η κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Αυτό πραγματοποιείται μετρώντας τη διαφορά δυναμικού, αφού προηγουμένως εισαχθεί, με μια τεχνητή πηγή, ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου και σε συνδυασμό με τη χρήση της τεχνολογίας, οδηγεί σε μια αρκετά λεπτομερή και αξιόπιστη αποτύπωση των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους.

2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, στην ηλεκτρική μέθοδο ζητούμενη είναι η κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης. Η ηλεκτρική αντίσταση αντικατοπτρίζει τη δυσκολία στη ροή του ρεύματος μέσα σε έναν αγωγό-σχηματισμό. Είναι γνωστό ότι η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται πέρα των φυσικών του ιδιοτήτων του αγωγού (όπως του υλικού) και από τις διαστάσεις του. Συγκεκριμένα, εξαρτάται άμεσα από το μήκος και τη διατομή και η παράμετρος η οποία καθορίζει αυτόν τον αγωγό ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αντίσταση και δίνεται από τον τύπο

$$\rho = R * \frac{s}{l}$$

όπου

ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ohm*m)

R η τιμή της αντίστασης (ohm)

l το μήκος του αγωγού (m)

s η διατομή (m²)

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι μια από τις πιο μεταβαλλόμενες ιδιότητες των ορυκτών ή γεωλογικών σχηματισμών. Σε ορισμένα ορυκτά (μεταλλικά) η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Ωστόσο, τα περισσότερα ορυκτά που

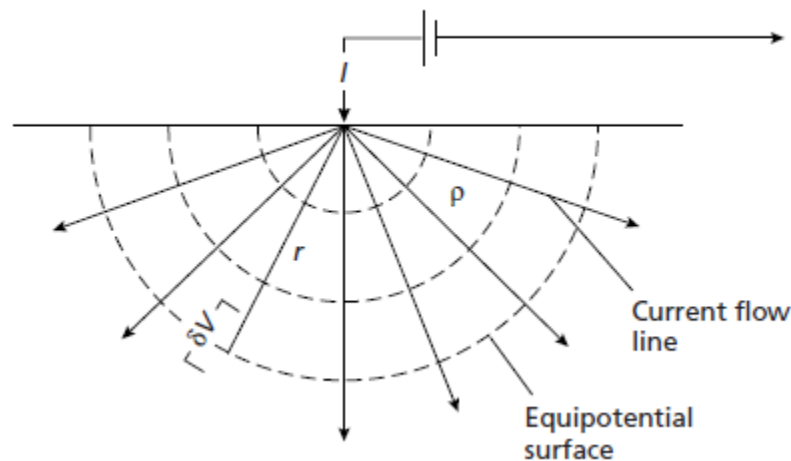
σχηματίζουν τα πετρώματα είναι μονωτές και η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος οφείλεται στα ιόντα του νερού το οποίο περιέχεται στους πόρους του σχηματισμού (ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα).

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για τη μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αναφορικά υπάρχει η τεχνική της οριζοντιογραφίας, της βυθοσκόπησης της ηλεκτρικής τομογραφίας κ.α. Η τελευταία αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω και χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της λεπτομερούς απεικόνισης που προσφέρει τόσο σε δύο όσο και σε τρεις διαστάσεις. Με την ηλεκτρική τομογραφία επιτυγχάνεται η λήψη μεγάλου αριθμού μετρήσεων σε λιγότερο χρόνο (συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους) και είναι η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για τη συνθετική μοντελοποίηση και τη συλλογή-ανάλυση πραγματικών δεδομένων από αντίστοιχες εργασίες πεδίου

2.2 ΡΟΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΓΗ

Έστω ότι η πηγή είναι ένας θετικά φορτισμένος πόλος, ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και αποτελεί το κέντρο μιας σφαίρας με ακτίνα r . Η πυκνότητα του ρεύματος J που διαρρέει τη σφαίρα αυτή είναι ίση με

$$J=i/S$$



Σχήμα 2.1: Η διάδοση του ρεύματος σε ομογενή Γη με σημειακή πηγή ρεύματος (Philip Kearey 3d Edition).

Όμως η πυκνότητα του ρεύματος δίνεται σύμφωνα με το γενικευμένο νόμο του Ohm και από τη σχέση

$$J = -\rho E \quad (1)$$

όπου ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου η οποία ισούται με

$$E = \frac{dV}{dr} \quad (2)$$

Αν αντικαταστήσουμε την ένταση E στη σχέση (1) θα έχουμε

$$J = -\rho \frac{dV}{dr}$$

$$dV = -\frac{\rho I}{S} dr$$

Το δυναμικό V σε απόσταση r υπολογίζεται με ολοκλήρωση του παραπάνω τύπου και δίνεται από τη σχέση

$$V_r = \int \partial V = - \int \frac{\rho I \partial r}{2\pi r^2} = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Στην περίπτωση που ο πόλος δεν βρίσκεται στην επιφάνεια αλλά μέσα στο έδαφος, το δυναμικό δίνεται από τη σχέση

$$V_r = \frac{\rho I}{4\pi r}$$

Στην πράξη, για να είναι εφικτή η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος τοποθετούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, δύο εκ των οποίων είναι ρεύματος (θετικός και αρνητικός πόλος A και B) και δύο είναι για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού (M και N). Η διαφορά δυναμικού που θα μετρηθεί, δίνεται από τη σχέση

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

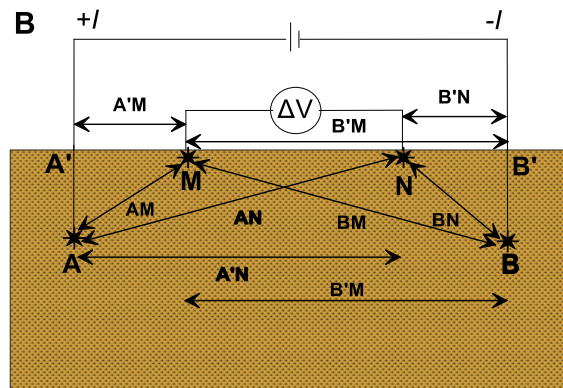
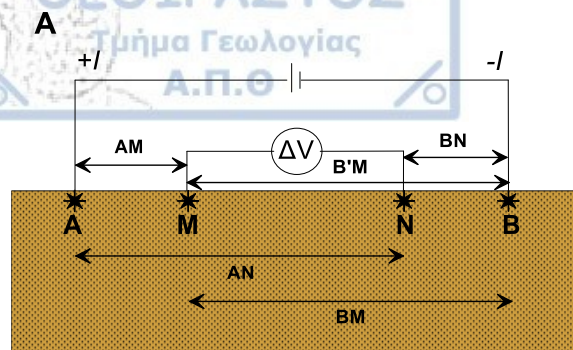
Όπου

AM η απόσταση των ηλεκτροδίων A και M

AN η απόσταση των ηλεκτροδίων A και N

BM η απόσταση των ηλεκτροδίων B και M

BN η απόσταση των ηλεκτροδίων B και N



Σχήμα 2.2: Η βασική διάταξη των ηλεκτροδίων ηλεκτρικών μετρήσεων (Philip Kearey 3d Edition).

Η παραπάνω σχέση ισχύει για διαφορά δυναμικού η οποία έχει μετρηθεί με ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της Γης. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η τοποθέτηση ηλεκτροδίων στην επιφάνεια δεν είναι δυνατή ή για λόγους διακριτικής ικανότητας τοποθετούνται ηλεκτρόδια στην επιφάνεια και μέσα στη Γη (εντός γεωτρήσεων-συράγγων κ.ο.κ). Σε αυτές τις περιπτώσεις η διαφορά δυναμικού δίνεται από μια πιο γενικευμένη σχέση όπου η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος δεν γίνεται σε ένα ημισφαίριο, αλλά σε μια θεωρητική σφαίρα:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{4\pi} * \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{B'N} \right)$$

Αν αντικατασταθεί με K ο όρος $\frac{4\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{B'N} \right)}$ τότε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τον τύπο $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$ όπου ο K είναι ο γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από τη θέση των ηλεκτροδίων στο χώρο.

2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, ο γεωμετρικός παράγοντας K εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων. Αν υποθέσουμε ότι πραγματοποιείται μια μέτρηση σε ένα ομογενές υλικό, η μετρημένη αντίσταση αφού πολλαπλασιαστεί με τον γεωμετρικό παράγοντα, θα δώσει την πραγματική τιμή της αντίστασης του υλικού. Σε πραγματικές συνθήκες

γεωφυσικής διασκόπησης όμως υπάρχει ανομοιογένεια και η μετρημένη τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αναπαριστά έναν μέσο όρο του ανομοιογενούς αυτού υλικού. Για το λόγο αυτόν, εισάγεται η έννοια της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ_a και η τιμή της εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων. Η πραγματική τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης βρίσκεται μετέπειτα, με τη λύση του αντίστροφου προβλήματος για το οποίο θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο.

2.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα ηλεκτρόδια στον χώρο αποτελεί την διάταξη. Υπάρχουν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων και η επιλογή της κάθε διάταξης γίνεται ανάλογα με τον αντικειμενικό σκοπό της έρευνας και τις εκάστοτε συνθήκες, δηλαδή το επιθυμητό βάθος διασκόπησης, την ευαισθησία σε πλευρικές μεταβολές, τον λόγο σήματος προς θόρυβο κ.α. Αυτό που ξεχωρίζει τις διατάξεις μεταξύ τους είναι η θέση των εκάστοτε ηλεκτροδίων και επομένως ο γεωμετρικός τους παράγοντας. Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι διαμόρφωσης των ηλεκτροδίων στο χώρο, ανάλογα με το είδος της διασκόπησης. Σε μια διασκόπηση δύο διαστάσεων τα ηλεκτρόδια διατάσσονται κατά μήκος μιας νοητής γραμμής, ενώ για τρισδιάστατη διασκόπηση θα πρέπει να διαταχθούν κατά μήκος πολλών παράλληλων γραμμών ή στους κόμβους ενός κανονικού καννάβου..

2.4.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΕΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Παρακάτω αναφέρονται μερικές τις διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στη δισδιάστατη διασκόπηση:

Διάταξη Wenner: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού Μ και Ν τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων Α και Β (Σχήμα 2.3) και οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι όλες ίσες με a . Ο γεωμετρικός παράγοντας είναι $K = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)$ και η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

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

Διάταξη Schlumberger: Είναι παρόμοια διάταξη με τη Wenner με τη διαφορά ότι τα ηλεκτρόδια ρεύματος Α και Β είναι τοποθετημένα σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από την

απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού (Σχήμα 2.3). Έστω ότι $2L$ είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος και $2a$ η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού και $L \gg a$ (στην πράξη

$L \geq 10a$. Τότε η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση $\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2a} \frac{\Delta V}{I}$

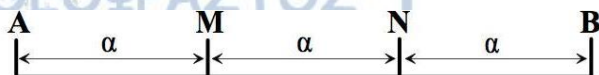
Διάταξη διπόλου διπόλου: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Τα δύο δίπολα έχουν σταθερή απόσταση και ίση με a ($AB=MN=a$), ενώ η απόσταση μεταξύ τους είναι na . Η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

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

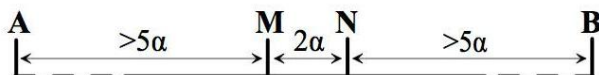
Διάταξη πόλου διπόλου: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, αλλά ηλεκτρόδιο ρεύματος, π.χ. το B, είναι τοποθετημένο σε θεωρητικά άπειρη απόσταση. Συνεπώς οι όροι $1/BM$ και $1/BN$ μηδενίζονται. Αν η απόσταση MN είναι ίση με a και η απόσταση $AM=na$, τότε η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

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

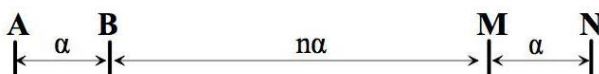
Διάταξη πόλου πόλου: όπως και στην πόλου διπόλου, έτσι και στην πόλου πόλου ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος βρίσκεται σε θεωρητικά άπειρη απόσταση και διαφοροποιείται από την παραπάνω, τοποθετώντας ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού επίσης σε άπειρη απόσταση (πχ B και N). Συνεπώς οι όροι $1/AN$, $1/BM$ και $1/BN$ μηδενίζονται. Αν η απόσταση $AM=a$ τότε η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση $\rho_{\alpha} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$



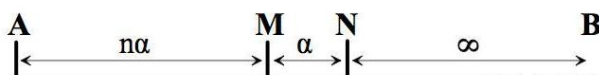
Wenner



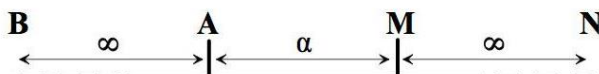
Schlumberger



διπόλου - διπόλου



πόλου - διπόλου



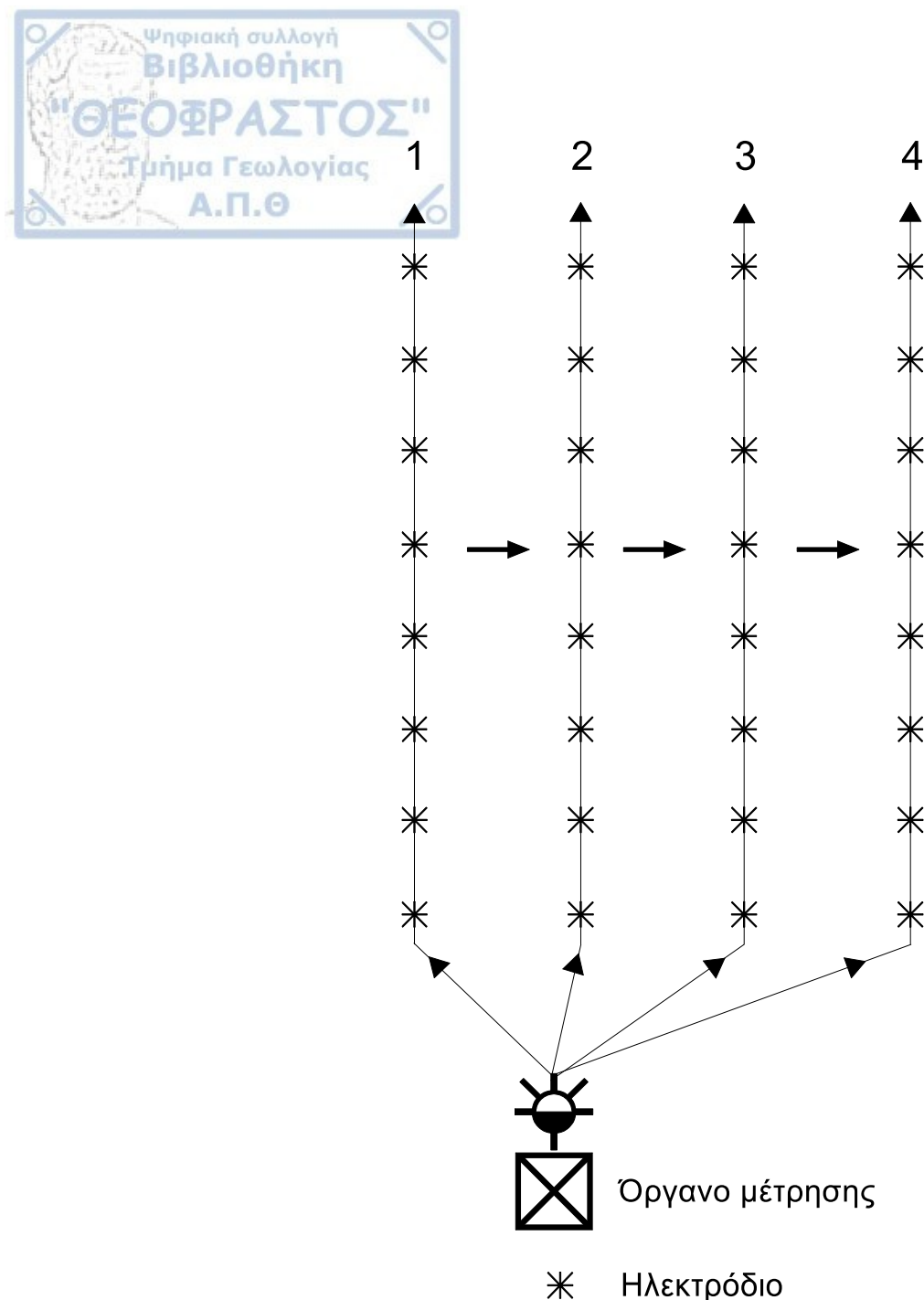
πόλου - πόλου

Σχήμα 2.3: Γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων επιφανειακών μετρήσεων (Tsourlos 1995).

2.4.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Πέρα των παραπάνω διατάξεων, υπάρχουν και οι διατάξεις που εφαρμόζονται για τρισδιάστατη έρευνα. Η διαφορά τους είναι ότι τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται όχι μόνο κατά μήκος ενός άξονα (πχ του άξονα x) αλλά και του y και του z. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από τις γνωστές διατάξεις.

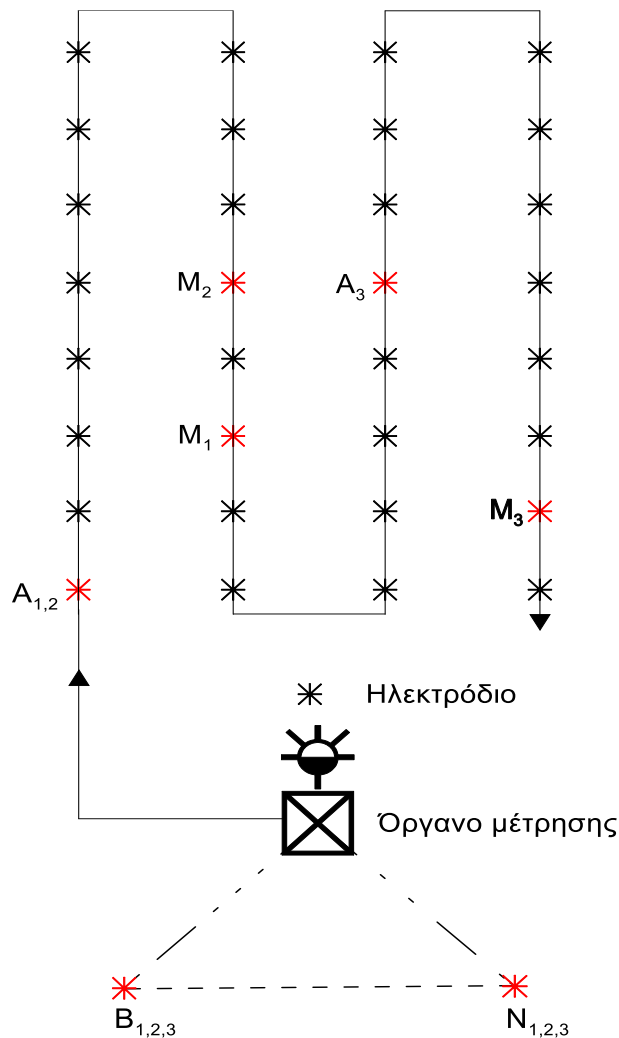
Παράλληλες δισδιάστατες (2Δ) διατάξεις: Μία διαδεδομένη μέθοδος τρισδιάστατης διασκόπησης είναι αυτή με χρήση πολλών παράλληλων 2Δ τομογραφιών (Papadopoulos et al. 2011) και στη συνέχεια η συνολική τρισδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων (βλ. Παράγραφο 2.7). Συνήθως πραγματοποιείται με διατάξεις οι οποίες έχουν καλή πλευρική ανάλυση (π.χ. διπόλου διπόλου). Με αυτή την τεχνική επιτυγχάνεται η χρήση περισσότερων ηλεκτροδίων από αυτά που μπορεί να προσφέρει το όργανο μέτρησης.



Σχήμα 2.4: Τεχνική τρισδιάστατης τομογραφίας με χρήση παράλληλων 2Δ τομογραφιών.

Διάταξη Πόλου πόλου 3Δ: Από τις πιο διαδεδομένες διατάξεις τρισδιάστατης διασκόπησης είναι η πόλου πόλου (Σχήμα 2.5). Σε αυτή τη διάταξη χρησιμοποιούνται 4 ηλεκτρόδια, με το ένα ζευγάρι (π.χ. Β και Ν) να βρίσκεται σε θεωρητικά άπειρη απόσταση. Κάθε ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο ρεύματος, ενώ σε όλα τα υπόλοιπα μετράται η διαφορά δυναμικού. Παρόλη την ευρεία χρήση της, παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως της

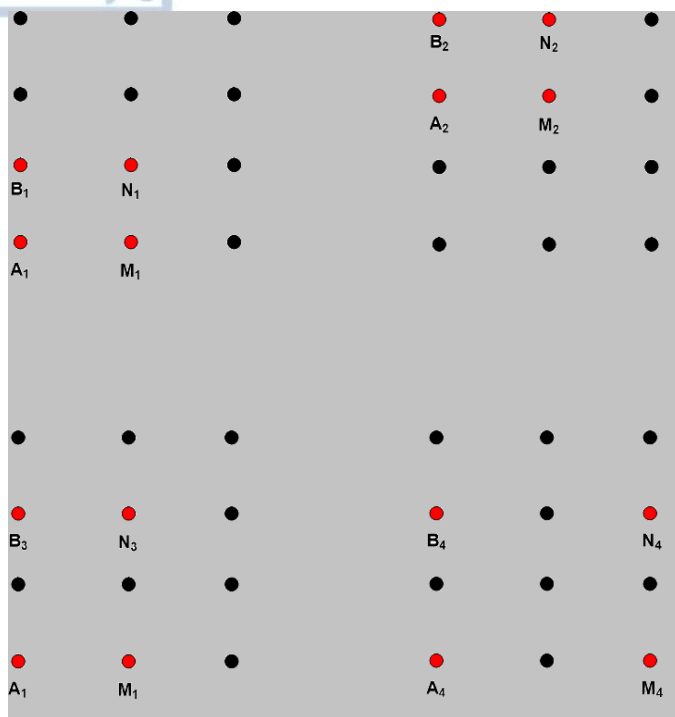
χαμηλής διακριτικής ικανότητας και της υψηλής επιδεκτικότητας σε θόρυβο (Aizebeokhai et al. 2010).



Σχήμα 2.5: Μια πιθανή διαμόρφωση ηλεκτροδίων με χρήση της διάταξης πόλου πόλου σε τρισδιάστατη διασκόπηση. Με διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύεται η άπειρη απόσταση των ηλεκτροδίων.

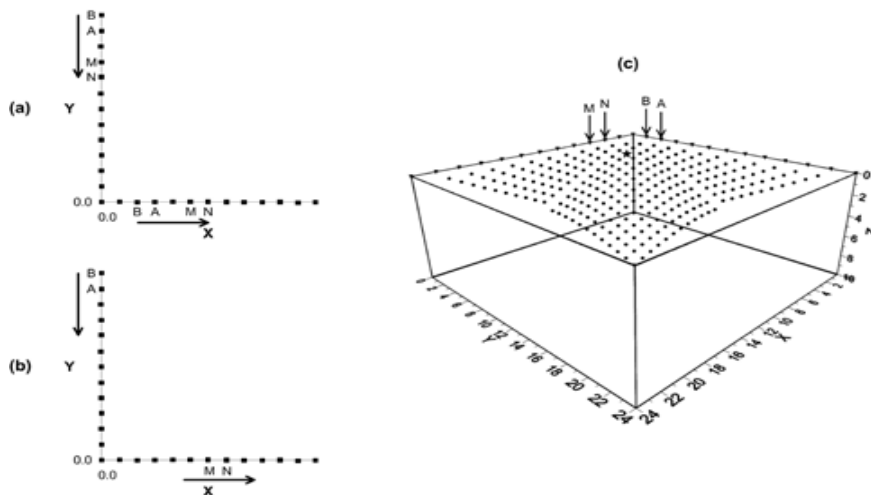
Τετραγωνική διάταξη: Σε μια τέτοια διάταξη χρειάζονται δύο ή παραπάνω παράλληλες σειρές ηλεκτροδίων όπου τα ηλεκτρόδια ρεύματος παραμένουν σταθερά στα άκρα των δύο παράλληλων γραμμών. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού μετακινούνται μέχρις ότου φτάσουν στην

τελευταία θέση των παράλληλων. Τότε τα ηλεκτρόδια ρεύματος μετακινούνται κατά μία θέση και επαναλαμβάνεται η διαδικασία (Σχήμα 2.4)



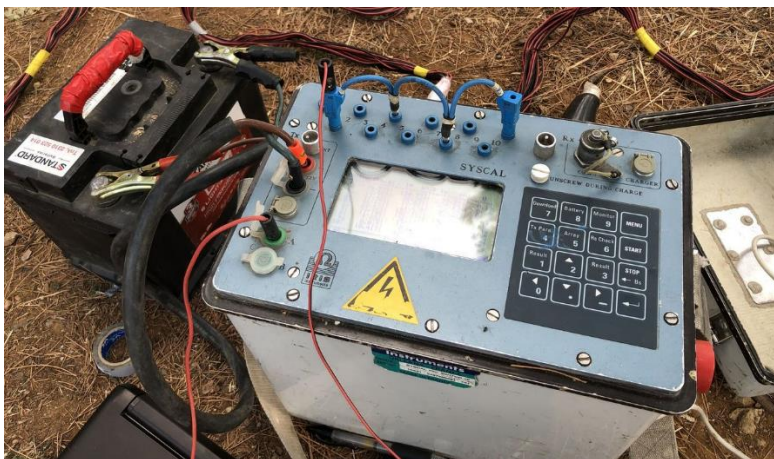
Σχήμα 2.4: Ένας τρόπος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων με την τετραγωνική διάταξη (κάτοψη)

Διάταξη τύπου L: Για αυτή τη διάταξη χρειάζονται δύο κάθετες σειρές ηλεκτροδίων. Αρχικά γίνεται μέτρηση κατά μήκος των γραμμών με μια διάταξη 2D (πχ διπόλου διπόλου). Στη συνέχεια η μέτρηση γίνεται με τα ηλεκτρόδια ρεύματος να βρίσκονται στη μια σειρά και τα ηλεκτρόδια δυναμικού να μετακινούνται πάνω στην κάθετη (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Διαδικασία λήψης μετρήσεων με τη διάταξη τύπου L (Nava 2015)

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο Syscal Pro της IRIS INSTRUMENTS. Το όργανο αυτό είναι ικανό να μετρά με ένα έναν πλήρως αυτοματοποιημένο τρόπο, έχει μέγιστη ισχύ εξόδου 1000W και η μέγιστη ένταξη του ρεύματος τυπικά φτάνει τα 2.5A. Είναι πολυκάναλο με δυνατότητα χρήσης 10 καναλιών και επομένως έχει δυνατότητα λήψης έως και 10 ταυτόχρονων μετρήσεων, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο απόκτησης των δεδομένων.



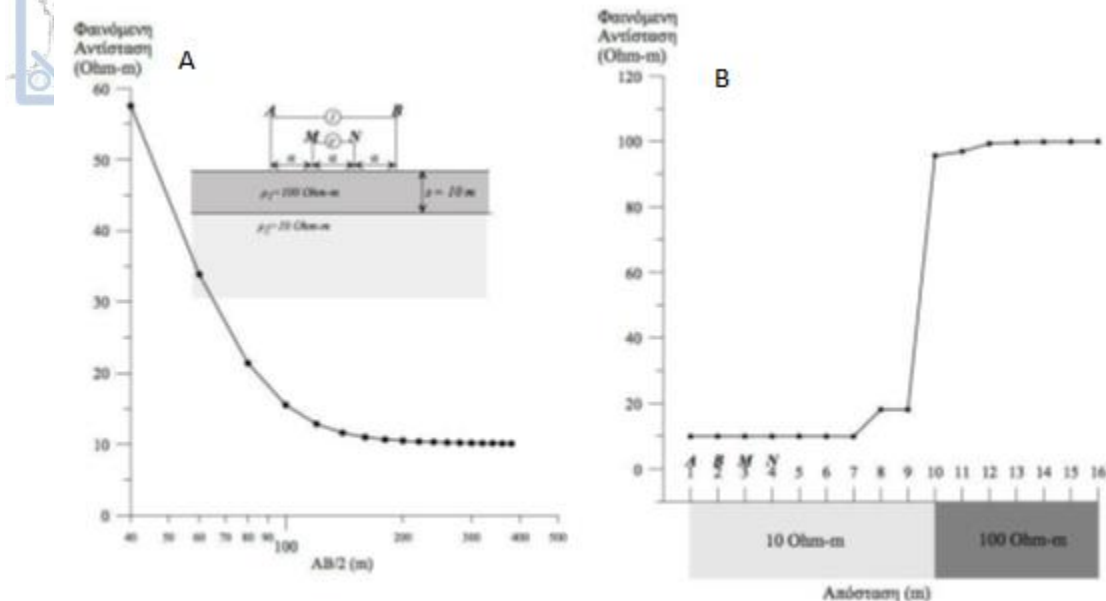
Σχήμα 2.6: Το όργανο Syscal Pro της IRIS INSTRUMENTS σε μετρήσεις πεδίου

2.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Γενικά στην ηλεκτρική γεωφυσική διασκόπηση χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις μέθοδοι, αυτή της βυθοσκόπησης, της οριζοντιογραφίας και της ηλεκτρικής τομογραφίας.

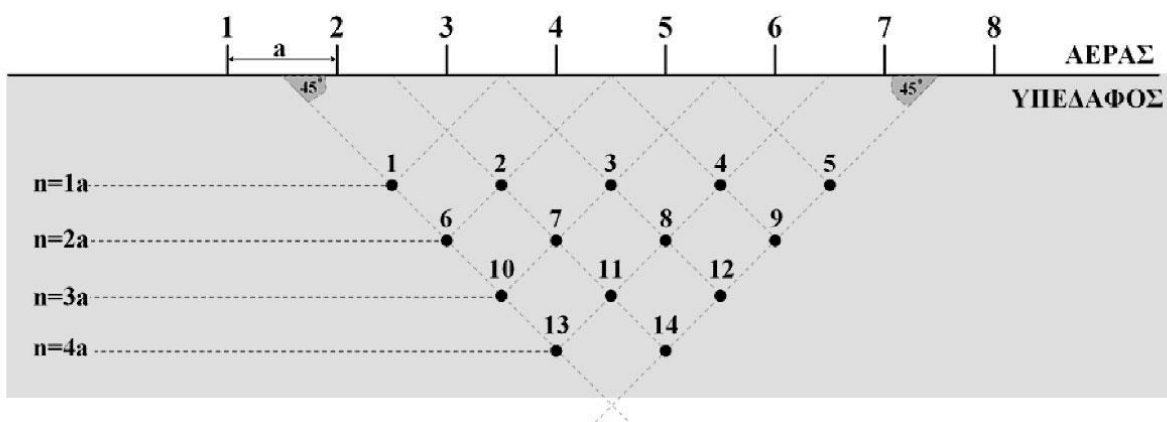
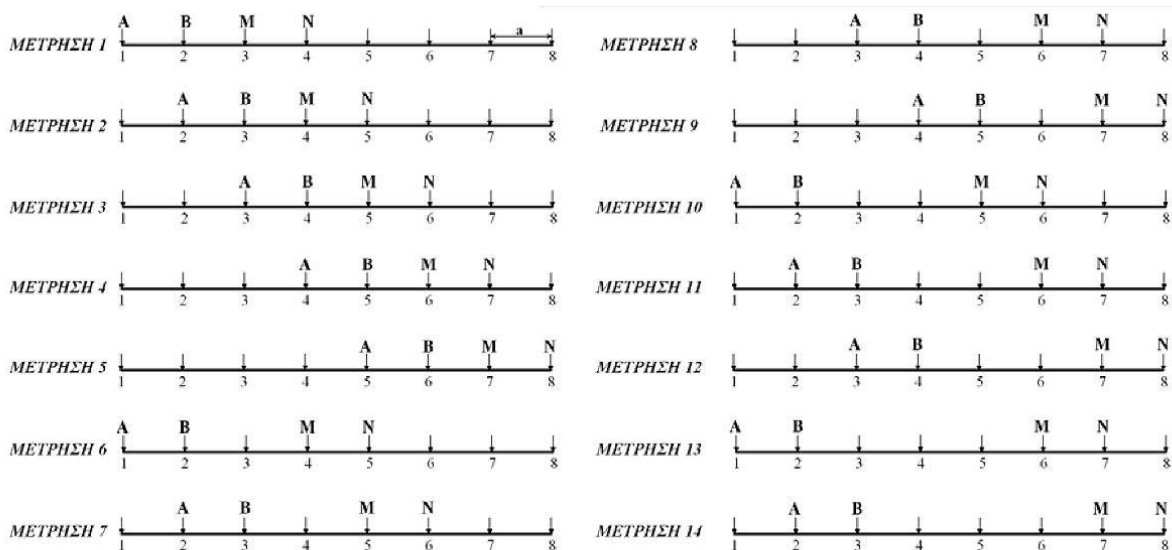
Βυθοσκόπηση. Με τη μέθοδο της βυθοσκόπησης καταγράφεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος, θεωρώντας ότι το υπέδαφος έχει οριζόντια στρωματογραφία. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η διάταξη Schlumberger. Πραγματοποιείται μια σειρά μετρήσεων με μεταβαλλόμενες (αυξανόμενες) αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά. Με τη σταδιακή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος, οπότε λαμβάνεται πληροφορία για τη κατακόρυφη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε μια στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης. Βασικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αποτελεί η έρευνα για εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών (Σχήμα 2.7Α).

Οριζοντιογραφία. Με τη μέθοδο της οριζοντιογραφίας εντοπίζονται πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σε αντίθεση με τις βυθοσκοπήσεις, δεν αλλάζουν οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων και γίνεται λήψη μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων και σταθερό βήμα. Έτσι, καταγράφεται η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης σε ένα συγκεκριμένο βάθος (σε μια έκταση ή ευθεία) και εντοπίζονται οι δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως οι διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στον εντοπισμό ρηγμάτων ενώ αποτελεί κλασσική μέθοδο χαρτογράφησης αρχαιολογικών χώρων για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων (Σχήμα 2.7Β).



Σχήμα 2.7: Α) εφαρμογή της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης (Παπαδόπουλος 2007). Β) εφαρμογή της μεθόδου οριζοντιογραφίας για τον εντοπισμό πλευρικής μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Παπαδόπουλος 2007).

Ηλεκτρική τομογραφία. Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελεί συνδυασμό των μεθόδων βυθοσκόπησης και οριζοντιογραφίας και μπορεί να καταγράψει τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης στην κατακόρυφη αλλά και πλευρική συνιστώσα (δισδιάστατη διασκόπηση). Η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μια σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μια σειρά οριζοντιογραφιών πάνω από της ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Στο Σχήμα 2.8 περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται μια ηλεκτρική τομογραφία, χρησιμοποιώντας τη διάταξη διπόλου-διπόλου με 8 ηλεκτρόδια και απεικονίζονται τα δεδομένα σε δύο διαστάσεις.



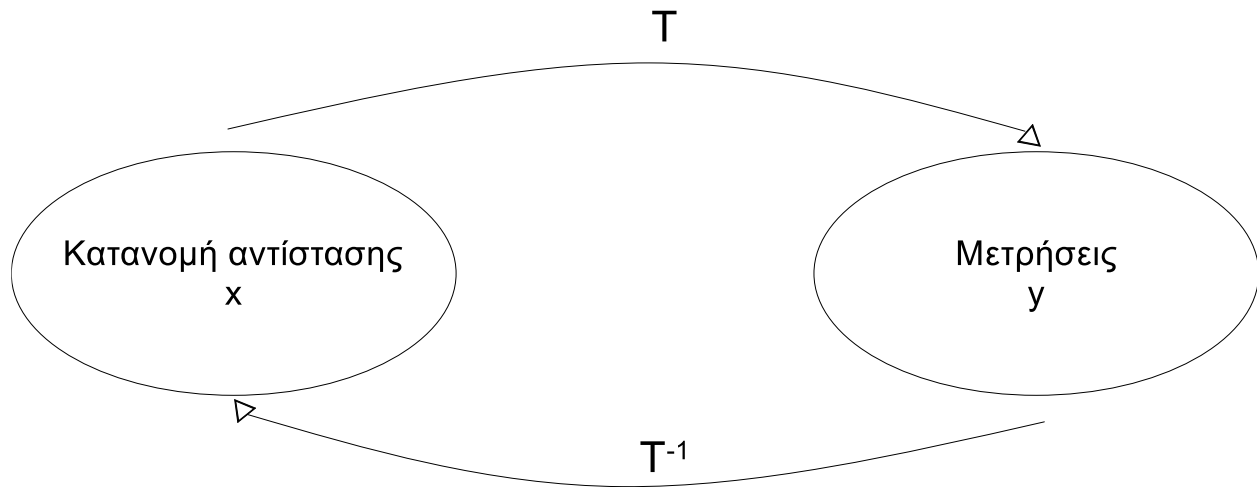
Σχήμα 2.8: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων (Tsourlos 1995).

2.7 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

2.7.1 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΥΘΕΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η ερμηνεία των μετρήσεων πραγματοποιείται με την επίλυση του αντιστρόφου ηλεκτρικού προβλήματος. Με τη μέθοδο της αντιστροφής είναι δυνατή η εύρεση ενός γεωηλεκτρικού μοντέλου το οποίο αναπαράγει μετρήσεις οι οποίες είναι συγκρίσιμες με τις πραγματικές. Για να γίνει αυτό εφικτό όμως, είναι απαραίτητη η επίλυση του ευθέως προβλήματος. Η επίλυση του ευθέως προβλήματος αναπαράγει τις φαινόμενες αντιστάσεις που θα προέκυπταν, αν ήταν γνωστό το μοντέλο, δηλαδή η κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης και οι θέσεις των ηλεκτροδίων στο χώρο.

Αν θεωρήσουμε την μεταβλητή x η οποία αναπαριστά τη κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης και y τις πραγματικές μετρήσεις, τότε για την επίλυση του ευθέως προβλήματος πρέπει να βρεθεί ο μετασχηματισμός T που συνδέει τη κατανομή της αντίστασης x με τις πραγματικές μετρήσεις y , δηλαδή $y=T(x)$. Αντιστρόφως, για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος, πρέπει να βρεθεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός $x=T^{-1}(y)$, δηλαδή η συνάρτηση που συνδέει τις γνωστές μετρήσεις με την άγνωστη κατανομή της αντίστασης x (μοντέλο).



Σχήμα 2.9: Σχηματική απεικόνιση επίλυσης του ευθέως και αντιστρόφου προβλήματος

Υπάρχουν δυο μέθοδοι για την επίλυση του ευθέως προβλήματος: οι αναλυτικές και οι αριθμητικές μέθοδοι. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν λογισμικά τα οποία επιλύουν το ευθύ πρόβλημα με χρήση αριθμητικών μεθόδων και συγκεκριμένα με διαφορικές μεθόδους και χρήση της τεχνικής των πεπερασμένων στοιχείων. Με αυτή την τεχνική χωρίζεται η περιοχή έρευνας σε κελιά όπου αποδίδεται στο κάθε κελί μια τιμή αντίστασης.

Η τεχνική επίλυσης του ευθέως προβλήματος αναζητά μια λύση της διαφορικής εξίσωσης Poisson η οποία διέπει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος

$$\left[\nabla(\sigma_{(x,y,z)} \nabla V_{(x,y,z)}) = I\delta(x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s) \right]$$

Όπου

σ είναι η αγωγιμότητα

V είναι το δυναμικό

I είναι η ένταση του ρεύματος στο σημείο x_s, y_s, z_s

δ είναι η συνάρτηση Dirac δέλτα

Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή έρευνας χωρίζεται σε έναν αριθμό στοιχείων. Το σύνολο αυτών των στοιχείων αποτελεί το πλέγμα και αφού το κάθε στοιχείο είναι κομμάτι του πλέγματος, θα έχει κοινούς κόμβους με κάποια από τα υπόλοιπα στοιχεία. Έτσι, οι εξισώσεις που περιγράφουν το κάθε στοιχείο, μπορούν να ενωθούν σε ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων και το συνολικό γραμμικό σύστημα θα έχει τη μορφή

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{F}$$

Όπου:

K είναι ο πίνακας με τους όρους δυσκαμψίας

A είναι ο πίνακας με τα άγνωστα δυναμικά των κόμβων

F είναι ο πίνακας με τις πηγές ρεύματος και τους όρους των ορίων

2.7.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ

Προκειμένου να γίνει η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος, είναι απαραίτητη η χρήση του Ιακωβιανού πίνακα J. Ο πίνακας αυτός συνδέει τις μεταβολές των παραμέτρων με τις μεταβολές των ιδιοτήτων των δεδομένων. Αναλυτικότερα, Έστω ότι n είναι ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος p της παραμέτρου του προβλήματος (ειδική αντίσταση), δηλαδή $p = \text{col}(p_1, p_2, \dots, p_n)$ και m είναι ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος 'd' των φαινόμενων αντιστάσεων, δηλαδή $d = \text{col}(d_1, d_2, \dots, d_m)$. Τότε ο Ιακωβιανός πίνακας θα έχει διαστάσεις $m \times n$ και το κάθε στοιχείο του θα δίνεται από τη σχέση

$$J_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial p_j}$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας είναι γνωστός και ως πίνακας ευαισθησίας αφού εκφράζει την ευαισθησία της μέτρησης της φαινόμενης αντίστασης σε μικρές μεταβολές της πραγματικής αντίστασης. Αν τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι φαινόμενες αντιστάσεις ρ_a τότε η εξίσωση γίνεται:

$$J_{ij} = \frac{\partial \rho_{ai}}{\partial p_j} = -\frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \sigma_j} = \frac{2\pi \partial \rho V_i}{KI \partial \sigma_j}$$

Όπου ο μοναδικός άγνωστος όρος είναι ο ρυθμός μεταβολής του δυναμικού προς τη μεταβολή της αγωγιμότητας.

2.7.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος ακολουθεί την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Είναι δηλαδή μια διαδικασία όπου δεδομένης της φαινόμενης αντίστασης, υπολογίζεται η κατανομή της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους.

Οι τεχνικές που συνήθως χρησιμοποιούνται για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος είναι: η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Lines και Treitel 1984), η μέθοδος των ιδιζουσών τιμών (Lanczos 1960, Golub και Reinsh 1970, Lawson και Hanson 1974, Strang 1998), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων με απόσβεση (Lavenberg 1944, Marquat 1965, Franklin 1970) και η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής (Tikhonov 1963, Tikhonov και Glasko 1965, Constable et al 1987, deGroot-Hedlin και Constable 1990).

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής η οποία βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k$$

Όπου

$$F = \alpha_x q C_x^T C_x + \alpha_y q C_y^T C_y + \alpha_z q C_z^T C_z$$

C_x , C_y οι πίνακες εξομάλυνσης για τις οριζόντιες συνιστώσες

C_z ο πίνακας εξομάλυνσης για την κατακόρυφη συνιστώσα

J ο Ιακωβιανός πίνακας

J^T ο ανάστροφος πίνακας του Ιακωβιανού

q το διάνυσμα του μοντέλου

λ ο συντελεστής απόσβεσης

Δq το διάνυσμα βελτίωσης του μοντέλου

g το διάνυσμα της διαφοράς πραγματικών και συνθετικών δεδομένων

2.7.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ (RMS)

Η διαδικασία επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος όπως αναφέρθηκε αποσκοπεί στην εύρεση της πραγματικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους όταν είναι γνωστή η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση. Αυτή η διαδικασία είναι επαναληπτική, και κάθε επανάληψη αποσκοπεί στη μείωση των διαφορών μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων. Στην ουσία δεν πρόκειται για απλή διαφορά, αλλά για το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) το οποίο αποτελεί κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας αυτής όταν σταματήσει να μειώνεται δραστικά. Επίσης αποτελεί κριτήριο ποιότητας της αντιστροφής και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\% \text{ RMS error} = 100 * \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(d_i^{\text{obs}} - d_i^{\text{calc}})^2}{(d_i^{\text{obs}})^2}}$$

Όπου:

m ο αριθμός των μετρήσεων

d_i^{obs} ο παρατηρούμενος λογάριθμος της μέτρησης

d_i^{calc} ο υπολογιζόμενος λογάριθμος της μέτρησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Ο πίνακας R είναι ένας πίνακας $m \times m$ ο οποίος δίνει το βαθμό που μπορεί να αναλυθεί η κάθε παράμετρος του μοντέλου αντιστάσεων από τα παρατηρούμενα δεδομένα, δηλαδή:

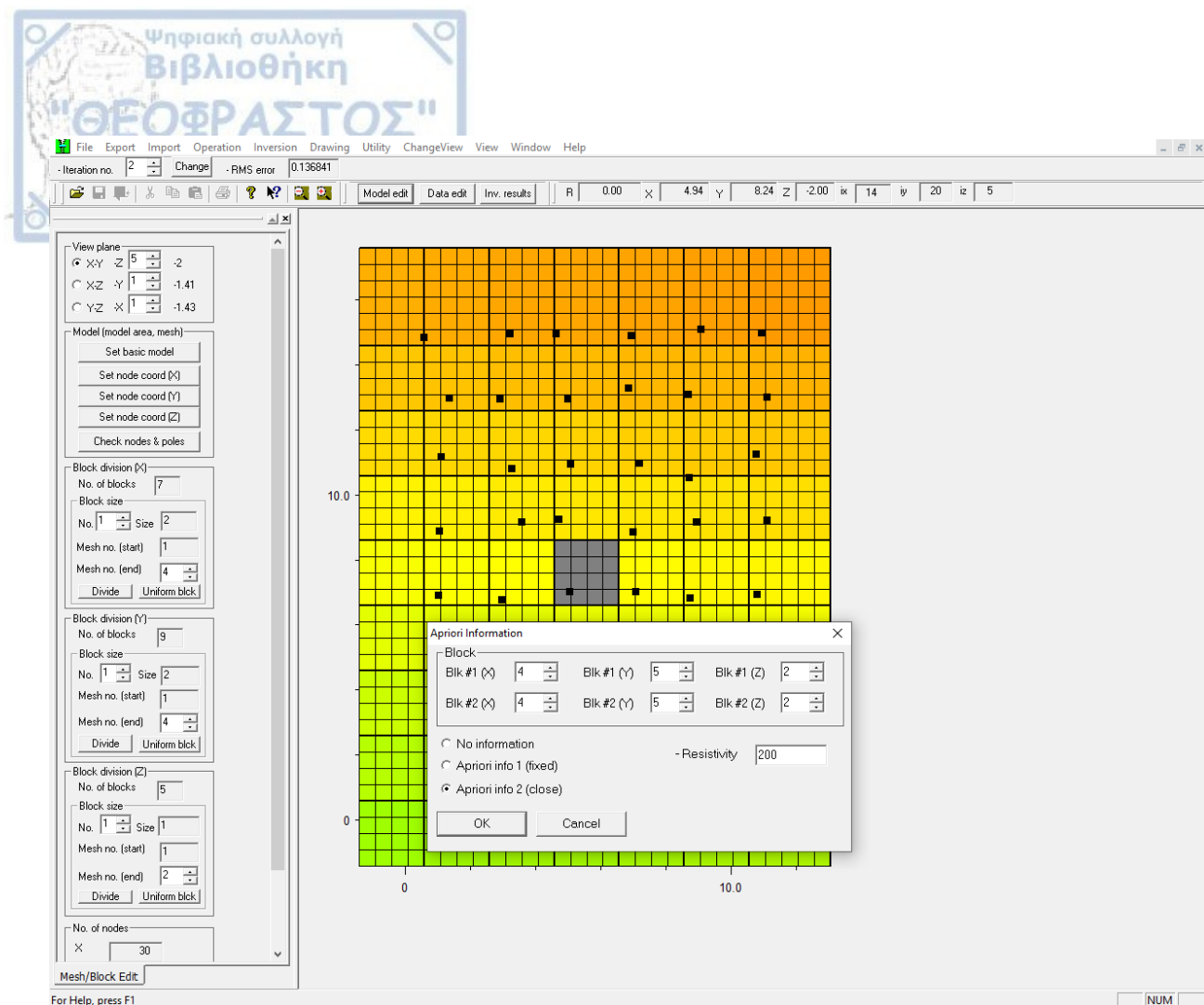
$$\mathbf{m}^{\text{est}} = \mathbf{R} \mathbf{m}^{\text{true}}$$

Αν $\mathbf{R} = \mathbf{I}$ (δηλαδή αν ισούται με τον μοναδιαίο πίνακα) τότε κάθε παράμετρος μοντέλου προσδιορίζεται με μοναδικό τρόπο. Αντιθέτως αν $\mathbf{R} \neq \mathbf{I}$ τότε οι εκτιμήσεις των αντιστάσεων είναι σταθμισμένοι μέσοι όροι των πραγματικών αντιστάσεων του μοντέλου (Menke 1984). Συγκεκριμένα το εύρος των τιμών του πίνακα R θα είναι $[0,1]$ και πρακτικά όταν σε μια παράμετρο m θα αντιστοιχεί το $R_{jj}=0$ τότε αυτή δεν θα αναλύεται καθόλου, ενώ όταν θα ισχύει $R_{jj}=1$ τότε αυτή θα αναλύεται τέλεια. Ο υπολογισμός του πίνακα R δίνεται από τη σχέση

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

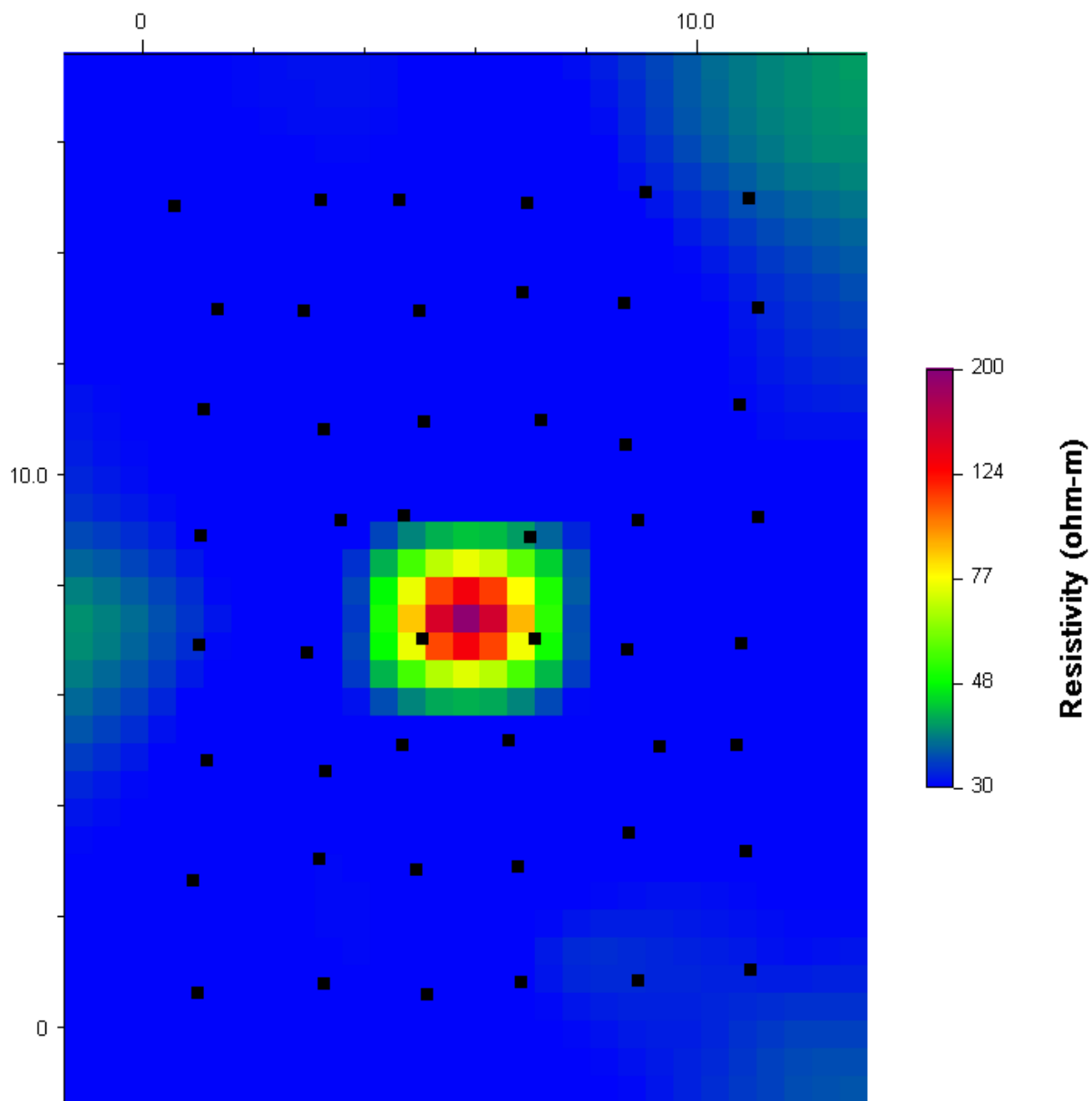
2.7.5 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΥΘΕΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την επίλυση του ευθέος και του αντίστροφου προβλήματος είναι το DC-3DPro (Kim και Yi, 2010). Στο συγκεκριμένο λογισμικό είναι δυνατή η δημιουργία τρισδιάστατων στόχων (Σχήμα 2.10) καθώς και η τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε οποιαδήποτε θέση στον χώρο. Για τη δημιουργία συνθετικών μοντέλων, γίνεται εισαγωγή ενός αρχείου το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες όλων των ηλεκτροδίων καθώς και το πρωτόκολλο, δηλαδή τα ηλεκτρόδια A, B, M, N, με το οποίο θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα δημιουργεί τον συνολικό χώρο του μοντέλου αυτόματα, αλλά εάν είναι επιθυμητό, μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί με τις εκάστοτε συνθήκες έρευνας. Τέλος, μπορεί να γίνει η εισαγωγή στόχου σε συγκεκριμένη θέση και με συγκεκριμένη τιμή ηλεκτρικής αντίστασης. Τα αποτελέσματα της επίλυσης του ευθέος προβλήματος εξάγονται σε ένα αρχείο ASCII το οποίο περιέχει τις διατάξεις με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συνθετικές μετρήσεις (πρωτόκολλο) καθώς και τις τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης για κάθε μέτρηση.



Σχήμα 2.10: Εισαγωγή τρισδιάστατου αντιστατικού στόχου σε συγκεκριμένη θέση με τη χρήση του λογισμικού DC-3DPro.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση των πρωτόκολλων σε συνθετικά δεδομένα αλλά και στις πραγματικές μετρήσεις, το πρόγραμμα DC-3DPro χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Αρχικά γίνεται η εισαγωγή του αρχείου το οποίο περιέχει τις θέσεις των ηλεκτροδίων καθώς και το πρωτόκολλο με τις φαινόμενες αντιστάσεις. Έπειτα, όπως και στην επίλυση του ευθέος προβλήματος, δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής του χώρου καθώς και κριτήρια για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος, όπως αριθμό επαναλήψεων κτλ. Το αποτέλεσμα της αντιστροφής για ένα τυχαίο συνθετικό μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Αποτέλεσμα αντιστροφής συνθετικού μοντέλου (σχήματος 2.10) για το βάθος των 3μ. με τη χρήση του λογισμικού DC-3DPro.

3. ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα πρωτόκολλο μέτρησης αποτελεί ένα σύνολο διατάξεων που υποδεικνύουν τα εκάστοτε ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Ένα πρωτόκολλο μπορεί να αποτελείται από μετρήσεις με συγκεκριμένη διάταξη, όπως διπόλου διπόλου, Wenner κ.α. Είναι επίσης δυνατός ο συνδυασμός δύο ή και παραπάνω διατάξεων. Στις τρισδιάστατες διασκοπήσεις είναι σύνηθες να τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια όχι μόνο κατά μια διεύθυνση, δηλαδή ως προς τον άξονα x, αλλά και ως προς τον άξονα y. Μια τέτοια τοποθέτηση των ηλεκτροδίων δίνει τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων με διατάξεις οι οποίες άλλες φορές υπακούν σε μια γεωμετρική φόρμα (π.χ στη τετραγωνική διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού βρίσκονται απέναντι, αυξομειώνοντας την εσωτερική τους απόσταση) και άλλες φορές όχι. Αυτές οι διατάξεις είναι μη συμβατικές και η παρουσία τους σε ένα πρωτόκολλο μέτρησης είναι αναγκαία σε μια τρισδιάστατη διασκόπηση. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν μη συμβατικές διατάξεις οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα πλήρες σύνολο μετρήσεων.

Ένα πρωτόκολλο το οποίο περιέχει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ηλεκτροδίων, δηλαδή όλες τις πιθανές διατάξεις, αποτελεί ένα πλήρες πρωτόκολλο. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών ηλεκτροδίων ποικίλλει αναλόγως του αριθμού των ηλεκτροδίων, δηλαδή για μια διασκόπηση με $n=48$ ηλεκτρόδια οι πιθανοί συνδυασμοί βρίσκονται από την σχέση $nd = n \times (n - 1) \times (n - 2) \times (n - 3)/8$. και είναι περίπου 600.000. Αυτός ο αριθμός μετρήσεων είναι πρακτικά αδύνατο να πραγματοποιηθεί, ακόμη και με όργανα τα οποία εκμεταλλεύονται δύο ή και περισσότερα κανάλια. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν τεχνικές μείωσης αυτών των μετρήσεων, καταλήγοντας σε ένα σετ μετρήσεων με έναν ικανοποιητικό και εφικτό αριθμό λήψης τους. Η διαδικασία μείωσης των μετρήσεων αποτελεί τη διαδικασία της βελτιστοποίησης ενός πρωτοκόλλου και παρακάτω θα γίνει αναφορά στις διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

3.1.1 ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ 3D ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ (STUMMER ET AL. 2004)

Η μέθοδος είναι η πρώτη και πιο δημοφιλής η οποία προτάθηκε για την βελτιστοποίηση διατάξεων δυο διαστάσεων. Οι Wilkinson et al (2007) και Loke et al (2014) σε διαδοχικές δημοσιευμένες εργασίες τροποποίησαν μερικώς τη μέθοδο αυτή και επέκτειναν την εφαρμογή της σε τρισδιάστατες διασκοπήσεις (Loke et al. 2014). Στην παρούσα εργασία επεκτείναμε την αρχική μέθοδο Stummer ώστε να χρησιμοποιείται σε 3 διαστάσεις ώστε το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης των μετρήσεων να αποτιμηθεί αυτόνομα αλλά και σε συνδυασμό με τη νέα μέθοδο που προτείνεται στην παρούσα εργασία.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης του Stummer βασίζεται στον πίνακα διακριτικής ικανότητας R. Για την έναρξη αυτής της τεχνικής βελτιστοποίησης, ορίζεται ένα αρχικό σεντ μετρήσεων με κάποιες από τις ήδη γνωστές διατάξεις (πχ τετραγωνική διάταξη ή διπόλου διπόλου). Στη συνέχεια ο αλγόριθμος αναγνωρίζει την αμέσως επόμενη καλύτερη μέτρηση η οποία θα προστεθεί στο αρχικό σεντ μετρήσεων μέχρις ότου συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός μετρήσεων στο βέλτιστο πρωτόκολλο.

Έστω ότι υπάρχουν n_{m} παράμετροι αντιστροφής και ο Ιακωβιανός πίνακας J του ολικού συνόλου μετρήσεων είναι J^{compr} . Τότε από τους n_{d} συνδυασμούς ηλεκτροδίων του ολικού συνόλου, επιλέγονται n^{base} βασικοί συνδυασμοί και ο Ιακωβιανός πίνακας J^{compr} ($n_{\text{d}} \times n_{\text{m}}$) διαιρείται σε έναν πίνακα J^{base} ($n_{\text{base}} \times n_{\text{m}}$) ,ο οποίος αποτελεί τον πίνακα ευαισθησίας για το αρχικό σεντ μετρήσεων και σε ένα πίνακα J^{add} ($(n_{\text{d}} - n_{\text{base}}) \times n_{\text{m}}$) ο οποίος αποτελεί τον πίνακα ευαισθησίας του υπόλοιπου συνόλου.

Στην αρχή της διαδικασίας οι n^{base} συνδυασμοί αντιστοιχούν σε μια από τις παραδοσιακές διατάξεις (πχ τετραγωνική διάταξη). Δηλαδή όταν γίνεται εκκίνηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, το βασικό σύνολο είναι το αρχικό σύνολο. Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης δεν καθορίζεται αρχικό μοντέλο, αλλά υπολογίζονται οι βέλτιστες μετρήσεις για έναν ομογενή ημιχώρο.

Επόμενο βήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η κατάταξη των μετρήσεων, που περιέχονται στον J^{add} . Η κατάταξη βασίζεται στη συνάρτησης βελτιστοποίησης GF:

$$GF_{(i)} = \sum_{j=1}^{nm} \frac{|J_{ij}^{add}|}{J_j^{sum}} \left(1 - \frac{R_{jj}^{base}}{R_{jj}^{compr}} \right) \quad i=1, \dots, (nd-nbase)$$

$$J_j^{sum} = \frac{1}{nd} \sum_{i=1}^{nd} |J_{ij}^{compr}|$$

Όπου J_j^{sum} είναι ο παράγοντας κανονικοποίησης που αντισταθμίζει τις σχετικά μεγάλες τιμές ευαισθησίας των παραμέτρων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια με τις μικρότερες τιμές των βαθύτερων παραμέτρων. Ο όρος $(1-R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr})$ αναγκάζει τη συνάρτηση βελτιστοποίησης να προάγει αυτούς τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων που δίνουν πληροφορία για εκείνες τις περιοχές του μοντέλου που έχουν χαμηλή ανάλυση.

Όταν η τιμή του πίνακα R_{jj}^{base} είναι σχεδόν ίση με την τιμή του πίνακα R_{jj}^{compr} τότε το βασικό σύνολο δεδομένων έχει σχεδόν όλη την πληροφορία που μπορεί να προσφέρει το ολικό σύνολο δεδομένων για την ερμηνεία της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Στην περίπτωση αυτή το κλάσμα $R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr}$ είναι περίπου ίσο με τη μονάδα [$R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr} \approx 1$] και ο όρος $(1-R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr})$ τείνει στο μηδέν [$(1-R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr}) \rightarrow 0$]. Ως εκ τούτου, η συνάρτηση βελτιστοποίησης τείνει επίσης στο μηδέν ($GF \rightarrow 0$), γεγονός που σημαίνει ότι δεν απαιτείται η προσθήκη επιπλέον συνδυασμών ηλεκτροδίων και άρα πληροφορίας στο βασικό σύνολο δεδομένων.

Αντίθετα όταν η τιμή του πίνακα R_{jj}^{base} είναι πολύ μικρότερη του πίνακα R_{jj}^{compr} τότε το βασικό σύνολο δεδομένων περιέχει πολύ λιγότερη πληροφορία από την πληροφορία του ολικού συνόλου δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή το κλάσμα $R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr}$ τείνει στο μηδέν [$R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr} \rightarrow 0$] και ο όρος $(1-R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr})$ είναι περίπου ίσος με τη μονάδα [$(1-R_{jj}^{base}/R_{jj}^{compr}) \approx 1$]. Κατά συνέπεια, η συνάρτηση βελτιστοποίησης GF παίρνει τη μέγιστη τιμή της, δηλαδή κρίνεται αναγκαία η προσθήκη επιπλέον μετρήσεων στο βασικό σύνολο, προκειμένου να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα του βασικού συνόλου.

Επομένως από τους συνδυασμούς που μένουν $(nd-n^{base})$ θα επιλεχθούν εκείνοι που έχουν μεγάλη τιμή της συνάρτησης βελτιστοποίησης GF . Όμως αυτοί οι υποψήφιοι συνδυασμοί ηλεκτροδίων για να προστεθούν στο βασικό σύνολο θα πρέπει να ελεγχθούν ως προς τη

γραμμική τους ανεξαρτησία σε σχέση με τις προϋπάρχουσες μετρήσεις που βρίσκονται στο βασικό σύνολο σύμφωνα με την εξίσωση: i

$$LI_{(i)} = \left| \frac{\sum_{j=1}^m J_{ij}^{base} J_{kj}^{add}}{J_i^{base} J_k^{add}} \right| \quad i=1, \dots, n^{base}$$

Εφόσον η τιμή LI είναι μικρότερη από μια τιμή (πχ τη μέση τιμή του LI), οι συνδυασμοί προστίθενται στο βασικό σύνολο δεδομένων. Μετά την προσθήκη ενός αριθμού νέων συνδυασμών στο βασικό σύνολο δεδομένων, ο πίνακας διακριτικής ικανότητας R^{base} του μοντέλου πρέπει να επανυπολογιστεί ώστε να λάβει υπόψη του τις βελτιωμένες δυνατότητες ανάλυσης του J^{base} .

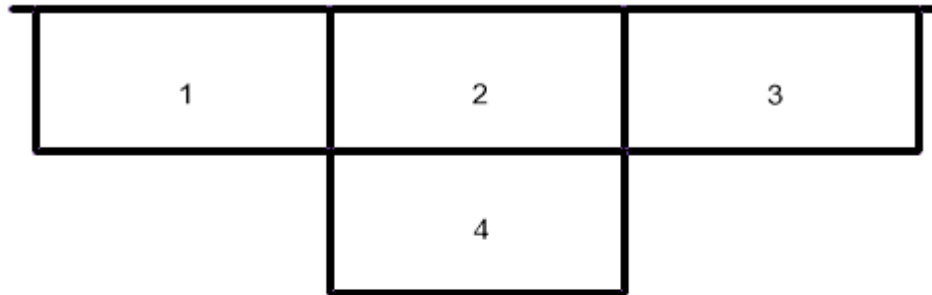
3.1.2 ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ 3D ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ (ATHANASIOY 2009)

Αυτή η μέθοδος βελτιστοποίησης, σε αντίθεση με την προηγούμενη, βασίζεται αποκλειστικά στον πίνακα ευαισθησίας. Η μέθοδος προτάθηκε από την Αθανασίου (2009) και περιορίζεται στην εφαρμογή σε δυο διαστάσεις. Αναλύεται εδώ καθώς αποτελεί τη βάση του αλγορίθμου για την βελτιστοποίηση των τρισδιάστατων μετρήσεων που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο αρκεί ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα χωρίς να απαιτείται η διαδικασία του υπολογισμού του αντιστρόφου του (υπολογισμός πίνακα της ανάλυσης των παραμέτρων - model resolution matrix), η οποία είναι χρονοβόρα ειδικά σε περίπτωση χρήσης πολλών ηλεκτροδίων-μετρήσεων.

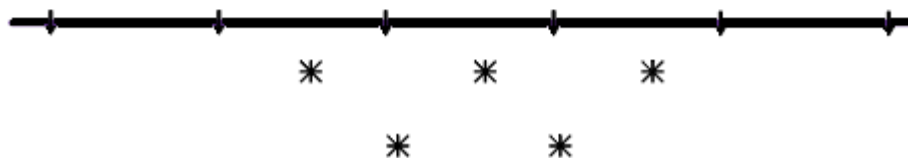
Αρχικά δημιουργείται το πλήρες σύνολο δεδομένων με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ηλεκτροδίων. Αφού αφαιρεθούν διατάξεις που έχουν μεγάλους γεωμετρικούς παράγοντες, προκύπτει το φιλτραρισμένο ολικό σύνολο μετρήσεων.

Στο επόμενο βήμα υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας J. Έστω ότι υπάρχει ένα απλό μοντέλο (σχήμα 3.1) με τέσσερις παραμέτρους και πραγματοποιούνται πέντε μετρήσεις. Τότε ο Ιακωβιανός πίνακας θα είναι ένας πίνακας πέντε γραμμών, όσες και οι μετρήσεις και τεσσάρων στηλών, όσες και οι παράμετροι του μοντέλου.

Παράμετροι



Μετρήσεις



Ιακωβιανός Πίνακας

	P1	P2	P3	P4
M1	0.798	0.226	-0.025	0.658
M2	0.625	-0.276	0.220	-0.028
M3	-0.356	0.856	-0.986	0.935
M4	0.832	-0.347	0.856	0.128
M5	0.556	0.885	0.659	-0.663

Σχήμα 3.1: Μοντέλο με 4 παραμέτρους στο οποίο πραγματοποιούνται 5 μετρήσεις (πάνω) και ο αντίστοιχος Ιακωβιανός πίνακας (κάτω).

Για κάθε παράμετρο επιλέγονται οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων οι οποίοι έχουν τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας (κατά απόλυτη τιμή) με την προϋπόθεση ότι δεν έχουν επιλεγθεί ξανά για άλλη παράμετρο. Οι συνδυασμοί αυτοί αποτελούν το βέλτιστο σύνολο δεδομένων.

Για το μοντέλο του παραπάνω σχήματος για την παράμετρο P1 θα επιλεγθεί η μέτρηση η οποία παρουσιάζει για τη συγκεκριμένη παράμετρο τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας (κατά απόλυτη τιμή), δηλαδή η μέτρηση M4. Για την παράμετρο P2 θα επιλεγθεί ο η μέτρηση M5 και για την παράμετρο P3 η M3. Για την παράμετρο P4 τη μεγαλύτερη τιμή της ευαισθησίας έχει η μέτρηση M3. Επειδή όμως, αυτή η μέτρηση επιλέχθηκε σε προηγούμενο στάδιο από την παράμετρο P3 θα αναζητηθεί η αμέσως επόμενη μέτρηση με τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας, η οποία είναι η μέτρηση M5. Όμως η μέτρηση αυτή επιλέχθηκε ξανά όπως και η μέτρηση M4 η οποία έχει την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας. Τελικά για την παράμετρο P4 θα επιλεγθεί η μέτρηση M1, η οποία έχει τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας από τις υπόλοιπες μετρήσεις που δεν επιλέχθηκαν για κάποια παράμετρο.

Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, οι μετρήσεις που θα επιλεγούν θα είναι τόσες, όσες και οι παράμετροι του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί για να επιλεγούν δύο τρεις ή και περισσότεροι συνδυασμοί ηλεκτροδίων από κάθε παράμετρο για τη δημιουργία του βέλτιστου συνόλου δεδομένων.

Προκειμένου να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα για τις περιοχές του μοντέλου που είναι λιγότερο φωτισμένες, προστίθεται ένα επιπλέον κριτήριο στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Αρχικά υπολογίζονται τα L1 μέτρα για κάθε παράμετρο, δηλαδή τα αθροίσματα των απόλυτων τιμών του Ιακωβιανού πίνακα.

Έπειτα οι παράμετροι ταξινομούνται με βάση τη μέση εκτίμηση των L1 μέτρων τους. Παράμετροι οι οποίες έχουν μεγαλύτερη μέση εκτίμηση του L1 μέτρου τους είναι περισσότερο ευαίσθητες σε μεταβολές της πραγματικής αντίστασης του μοντέλου και αντιθέτως, παράμετροι με μικρή μέση εκτίμηση του L1 μέτρου, είναι λιγότερο ευαίσθητες σε μεταβολές. Η μέση εκτίμηση του L1 μέτρου μιας παραμέτρου προκύπτει από το λόγο του L1 μέτρου προς τον αριθμό των μετρήσεων της παραμέτρου. Έτσι, θα επιλεγθούν περισσότερες μετρήσεις για τις παραμέτρους που έχουν μικρότερη μέση εκτίμηση του L1 μέτρου.

Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οι ταξινομημένες 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



όπου $iter$ είναι η τρέχουσα επανάληψη και P_{max} ο αριθμός των ταξινομημένων παραμέτρων. Μια μέτρηση που έχει τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας για μια παράμετρο και δεν έχει επιλεγεί από άλλη παράμετρο, θα επιλεγεί μόνο εάν ισχύει $P_{class}=iter$. Δηλαδή θα επιλεγεί η μέτρηση μονοαν η κλάση στην οποία έχει καταταγεί η παράμετρος είναι ίση με τον αριθμό της τρέχουσας επανάληψης βελτιστοποίησης. Η τιμή P_{class} ορίζεται ως:

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

Όπου P_j είναι η εξεταζόμενη παράμετρος και floor σημαίνει ότι λαμβάνεται υπόψη μόνο το ακέραιο μέρος της τιμής που δίνει η αγκύλη.

3.2 ΝΕΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ (3Δ) ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ (J_{opt3D})

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος βελτιστοποίησης μετρήσεων με τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

Ο νέος αλγόριθμος επιτρέπει τον υπολογισμό βέλτιστων τρισδιάστατων πρωτοκόλλων ηλεκτρικών μετρήσεων με τα ηλεκτρόδια να μπορούν να είναι τοποθετημένα οπουδήποτε στον τρισδιάστατο χώρο.

Η αρχική επιλογή των υποψηφίων προς βελτιστοποίηση μετρήσεων γίνεται με την χρήση όλων πιθανών συνδυασμών ηλεκτροδίων οι οποίοι όμως φιλτράρονται όχι μόνο βάσει του γεωμετρικού παράγοντα της κάθε μέτρησης (σήμα/θόρυβο) αλλά και με βάση το κριτήριο ευαισθησίας της θέσης ηλεκτροδίου όπως αυτό έχει προταθεί από τους Wilkinson et al. (2008) καθώς αποδείχτηκε σε δοκιμές ιδιαίτερα σημαντικό στη «σταθεροποίηση» των αποτελεσμάτων της αντιστροφής.

Ο κύριος αλγόριθμος της βελτιστοποίησης βασίζεται στη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα (Athanasίου et al., 2009) ο οποίος επεκτάθηκε ώστε να υποστηρίζει δεδομένα τριών διαστάσεων αλλά και τροποποιήθηκε ώστε να αποκλείει την επιλογή μετρήσεων που είναι γραμμικά

εξαρτημένες μεταξύ τους και δεν προσφέρουν νέες πληροφορίες. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται ο αλγόριθμος καθώς και οι υπολογιστικές λεπτομέρειες

3.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΓΙΑ ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Βασική προϋπόθεση της υλοποίησης του αλγορίθμου είναι να υπάρχει η δυνατότητα να υπολογίζονται οι πιθανές μετρήσεις (γεωμετρικός παράγοντας, ευαισθησία της θέσης των ηλεκτροδίων) καθώς και ο αντίστοιχος Ιακωβιανός πίνακας τους για διαμορφώσεις ηλεκτροδίων τοποθετημένων στον τρισδιάστατο χώρο.

Είναι γνωστό ότι μια διάταξη χαρακτηρίζεται από διάφορα κριτήρια όπως το βάθος διασκόπησης, η ευαισθησία σε κατακόρυφες και πλευρικές αλλαγές της αντίστασης του εδάφους, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N) κ.α. Για τα πρώτα δύο χαρακτηριστικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση της ευαισθησίας για τη συγκεκριμένη διάταξη. Αυτή η σχέση στην ουσία περιγράφει τον βαθμό με τον οποίο μια μικρή αλλαγή της αντίστασης του υπεδάφους (για παράδειγμα μιας παραμέτρου διαστάσεων dt) κατά $\delta\rho$, μπορεί να επηρεάσει τη διαφορά δυναμικού $\delta\varphi$ της μέτρησης. Στην πιο απλή μέθοδο μέτρησης με δύο ηλεκτρόδια (Σχήμα 3.2), δηλαδή ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος στο σημείο $O(0,0,0)$ και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού στο σημείο $(\alpha,0,0)$, η μαθηματική σχέση που δίνει την ευαισθησία είναι η παράγωγος Frechet (McGillivray and Oldenburg 1990)

$$\delta\varphi = \frac{\delta\rho}{\rho^2} \int_V \nabla\varphi \nabla\varphi' dt \quad (3.1)$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

$$\frac{\delta\varphi}{\delta\rho} = \int_V \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-\alpha)+y^2+z^2}{[x^2+y^2+z^2]^{1.5}[(x-\alpha)^2+y^2+z^2]^{1.5}} dx dy dz \quad (3.2)$$

όπου x,y,z είναι οι συντεταγμένες της παραμέτρου στο τρισσορθογώνιο σύστημα και α η απόσταση του ηλεκτροδίου δυναμικού από την αρχή των αξόνων. Τελικά η παράγωγος Frechet δίνεται από τη σχέση εντός του ολοκληρώματος, δηλαδή:

$$F_{3D}(x,y,z) = \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a)+y^2+z^2}{[x^2+y^2+z^2]^{1.5}[(x-a)^2+y^2+z^2]^{1.5}} \quad (3.3)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την ευαισθησία για κάθε παράμετρο στην πιο απλή διάταξη με ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα δυναμικού (π.χ. A και M). Όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα ηλεκτρόδια, η ολική ευαισθησία μιας διάταξης δίνεται από την πρόσθεση όλων των επιμέρους ευαισθησιών, δηλαδή ισχύει $J_{ABMN} = J_{AM} - J_{AN} - J_{BM} + J_{BN}$

A (0,0,0)



M (α,0,0)



dt (x,y,z)

Σχήμα 3.2: Η απλή περίπτωση των 2 ηλεκτροδίων A και M, για τον υπολογισμό της ευαισθησίας της παραμέτρου dt η οποία βρίσκεται σε ομογενή ημιχώρο.

Για να εφαρμοστεί όμως η παραπάνω σχέση για μη συμβατικές διατάξεις, θα πρέπει κάθε φορά να πραγματοποιείται περιστροφή και μεταφορά των αξόνων, έτσι ώστε πάντα το ηλεκτρόδιο ρεύματος να βρίσκεται στο σημείο O (0,0) και ο άξονας x να τέμνει το ηλεκτρόδιο δυναμικού στο σημείο A (α,0). Επειδή τα ηλεκτρόδια μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε θέση στον τρισδιάστατο χώρο, οι περιστροφές των αξόνων πραγματοποιούνται με τη χρήση πινάκων περιστροφής.

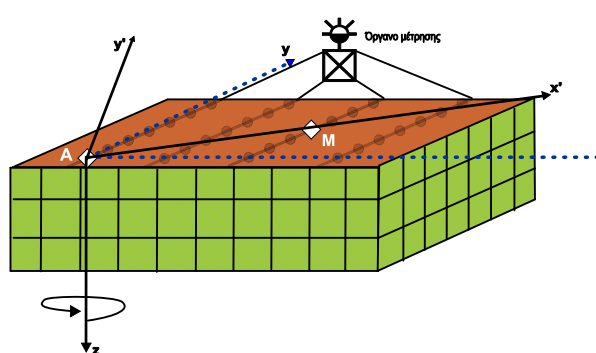
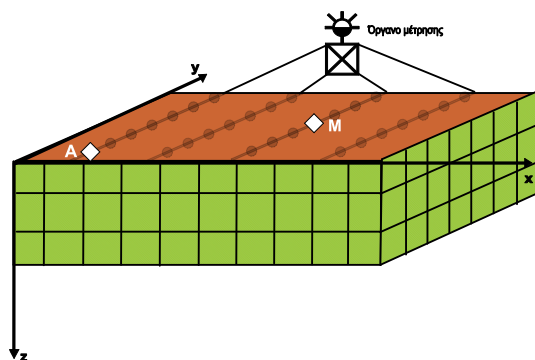
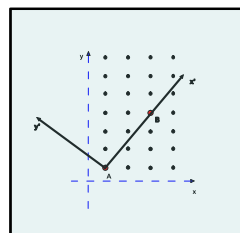
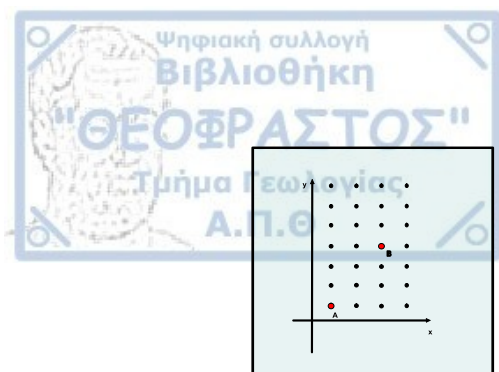
$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ο κάθε πίνακας περιστρέφει το σύστημα κατά γωνία θ ως προς τον συγκεκριμένο άξονα, για παράδειγμα ο πίνακας $R_x(\theta)$ περιστρέφει το σύστημα αριστερόστροφα κατά γωνία θ ως προς τον άξονα x. Για ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια του εδάφους, αρκεί μόνο μια περιστροφή. Επειδή όμως τα ηλεκτρόδια μπορούν να τοποθετηθούν όχι μόνο στην επιφάνεια του εδάφους αλλά και μέσα στο υπέδαφος μέσω γεωτρήσεων ή σηράγγων, απαιτείται και άλλη περιστροφή. Αν υποθέσουμε ότι το σύστημα πρέπει να περιστραφεί κατά γωνία α ως προς τον x άξονα, κατά γωνία β ως προς τον y άξονα και κατά γωνία γ ως προς τον z άξονα, τότε σχέση που δίνει αυτή την περιστροφή, δεν είναι άλλη από έναν πολλαπλασιασμό των πινάκων περιστροφής, δηλαδή $R_{xyz} = R_x(\alpha) * R_y(\beta) * R_z(\gamma)$

Και αν λάβουμε υπόψη την μεταφορά του συστήματος, τότε

$$\begin{bmatrix} \cos(\beta) * \cos(\gamma) & \cos(\beta) * \sin(\gamma) & -\sin(\beta) \\ \cos(\gamma) * \sin(\alpha) * \sin(\beta) - \cos(\alpha) * \sin(\gamma) & \cos(\alpha) * \cos(\gamma) + \sin(\alpha) * \sin(\beta) * \sin(\gamma) & \cos(\beta) * \sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) * \sin(\gamma) + \cos(\alpha) * \cos(\gamma) * \sin(\beta) & \cos(\alpha) * \sin(\beta) * \sin(\gamma) - \cos(\gamma) * \sin(\alpha) & \cos(\alpha) * \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

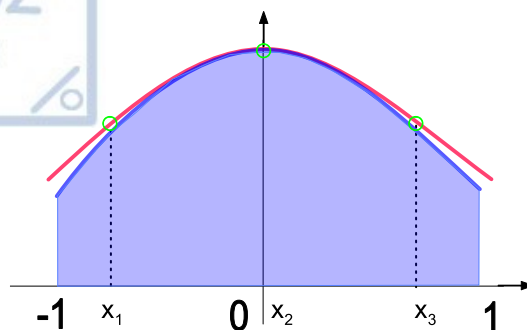
$$\begin{bmatrix} \cos(\beta) * \cos(\gamma) & \cos(\beta) * \sin(\gamma) & -\sin(\beta) \\ \cos(\gamma) * \sin(\alpha) * \sin(\beta) - \cos(\alpha) * \sin(\gamma) & \cos(\alpha) * \cos(\gamma) + \sin(\alpha) * \sin(\beta) * \sin(\gamma) & \cos(\beta) * \sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) * \sin(\gamma) + \cos(\alpha) * \cos(\gamma) * \sin(\beta) & \cos(\alpha) * \sin(\beta) * \sin(\gamma) - \cos(\gamma) * \sin(\alpha) & \cos(\alpha) * \cos(\beta) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \delta_x - a \\ \delta_y - b \\ \delta_z - g \end{bmatrix}$$



Σχήμα 3.3: Περίπτωση μεταφοράς και περιστροφής του συστήματος συντεταγμένων για σωστό υπολογισμό της ευαισθησίας

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΕΞΑΕΔΡΩΝ

Παραπάνω ορίστηκε η μαθηματική σχέση (σχέση 3.3) η οποία υπολογίζει την ευαισθησία μιας παραμέτρου εξαιτίας της ροής ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Η παράμετρος σε αυτή την περίπτωση είναι ένα σημείο και επομένως η ευαισθησία που υπολογίζεται είναι σημειακή. Στην παρούσα εργασία, η περιοχή έρευνας χωρίζεται σε παραμέτρους οι οποίες δεν αποτελούν σημεία, αλλά εξάεδρα και κατά συνέπεια είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της ευαισθησίας για τον όγκο που ορίζει το εκάστοτε εξάεδρο. Ο υπολογισμός του παραπάνω ολοκληρώματος (σχέση 3.2) μπορεί να πραγματοποιηθεί με αριθμητικές μεθόδους ολοκλήρωσης (π.χ κανόνας του Simpson, του τραπεζίου). Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται σε σημεία τα οποία απέχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Όταν υπάρχει ελευθερία ως προς την επιλογή των σημείων, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια (Iqbal 2008). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Gauss, οποία βασίζεται στις τιμές βαρών και τετμημένων.



Σχήμα 3.4: Η γραφική απεικόνιση αριθμητικής ολοκλήρωσης με τη μέθοδο Gauss στην πιο απλή της μορφή με χρήση 3 σημείων.

Οι τετμημένες στην συγκεκριμένη μέθοδο αποτελούν τα σημεία Gauss τα οποία εύκολα μπορούν να υπολογιστούν ή να αναζητηθούν σε μαθηματικούς πίνακες (π.χ. Abramowitz and Stegun 1972). Αφού βρεθούν αυτά τα σημεία, ο υπολογισμός του ολοκληρώματος δίνεται από τη σχέση:

$$I = \int_a^b f(x) dx \approx w_1 f(x_1) + w_2 f(x_2) + w_3 f(x_3)$$

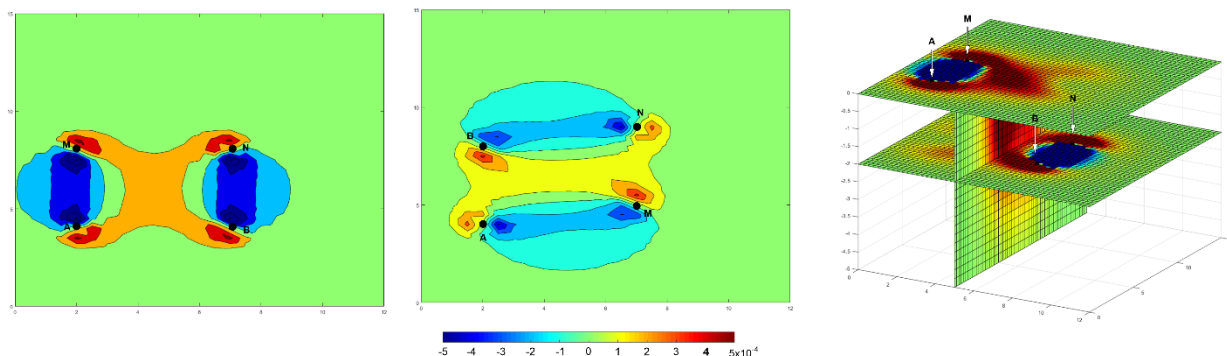
Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιεί τρία σημεία για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος όπου w_i είναι τα βάρη και x_i οι τιμές των τετμημένων, ενώ με f συμβολίζεται η συνάρτηση (στη συγκεκριμένη περίπτωση η σχέση που δίνει την ευαισθησία). Όσο περισσότερα σημεία υπάρχουν, τόσο πιο ακριβής θα είναι η προσέγγιση του ολοκληρώματος. Για τον λόγο αυτό, ο αριθμός των σημείων που επιλέχθηκαν κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου ήταν 6:

$$I = \int_a^b f(x) dx \approx w_1 f(x_1) + w_2 f(x_2) + w_3 f(x_3) + w_4 f(x_4) + w_5 f(x_5) + w_6 f(x_6)$$

ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η ευαισθησία μιας διάταξης ορίζει την περιοχή, δηλαδή τις παραμέτρους για τις οποίες η συγκεκριμένη μέτρηση έχει τη δυνατότητα να λάβει πληροφορία. Οι τιμές της ευαισθησίας μπορεί να είναι θετικές ή αρνητικές (σχήμα 3.5). Αυτό σημαίνει ότι αν ένα σώμα έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τον ημιχώρο και βρίσκεται μέσα σε αυτές τις ζώνες (π.χ. αρνητικές), τότε η μετρούμενη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που θα μετρηθεί, θα μειωθεί. Αντιστρόφως αν ένα αντιστατικό σώμα τοποθετηθεί στις θέσεις με θετικές τιμές ευαισθησίας,

τότε η μετρούμενη φαινόμενη αντίσταση θα αυξηθεί. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό και ως ανωμαλία αντιστροφής. Στην περίπτωση που η ευαισθησία είναι μηδενική, η συγκεκριμένη περιοχή δεν επηρεάζεται από τη μέτρηση.



Σχήμα 3.5: Γραφική απεικόνιση της ευαισθησίας για τρεις διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων στον χώρο.

3.2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΣΥΝΟΛΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (COMPREHENSIVE)

Βασικό τμήμα κάθε αλγορίθμου βελτιστοποίησης αποτελεί η αρχική επιλογή των υποψηφίων προς βελτιστοποίηση μετρήσεων. Στην παρούσα εργασία αυτό γίνεται με την χρήση όλων των πιθανών συνδυασμών ηλεκτροδίων. Η αναπαραγωγή του πλήρους πρωτόκολλου μετρήσεων βασίστηκε στον αλγόριθμο GENCOMPv3 (Papadopoulos –personal communication) με τη προσθήκη δυνατότητας χρήσης ηλεκτροδίων τόσο στην επιφάνεια όσο και στο υπέδαφος. Η λειτουργία του είναι απλή, αφού δημιουργεί ένα αρχείο με τις συντεταγμένες των ηλεκτροδίων οι οποίες έχουν οριστεί από τον χρήστη και ένα δεύτερο αρχείο με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ηλεκτροδίων οι οποίοι και ακολούθως υπόκεινται σε φιλτράρισμα.

3.2.3 ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ

Αρχικά θα πρέπει να αφαιρεθούν μετρήσεις οι οποίες είναι πρακτικά αδύνατο να ληφθούν στην πράξη λόγω φυσικών και τεχνικών περιορισμών. Ορίζεται κάθε φορά ένα κατώφλι σήματος (δλδ. γεωμετρικού παράγοντα της μέτρησης) που είναι συνδυασμός τριών παραγόντων: α) των τεχνικών χαρακτηριστικών του οργάνου (ακρίβεια μέτρησης δυναμικού, και τάση της πηγής), β) των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στην περιοχή μέτρησης (π.χ.

αναμενόμενη μέση τιμή αντιστάσεων) και γ) της αναμενόμενης αντίστασης επαφής ηλεκτροδίων και εδάφους στην περιοχή μέτρησης. Συχνά τα παραπάνω β) και γ) (μέση αντίσταση, αντίσταση επαφής) εκτιμώνται κατά προσέγγιση. Το όριο K_{thres} (κατώφλι γεωμετρικού παράγοντα), βάσει των εκάστοτε συνθηκών μέτρησης, πάνω από το οποίο η λήψη μετρήσεων δεν είναι εφικτή δίνεται από τη σχέση:

$$K_{thres} = \frac{p_a^{site} * V_{source}}{R_c * V_{min_meas}^{instr}}$$

Όπου p_a^{site} είναι η μέση ηλεκτρική αντίσταση στην περιοχή έρευνας, V_{source} η μέγιστη τάση που μπορεί να εξασφαλίσει το όργανο μέτρησης, R_c η αντίσταση επαφής και $V_{min_meas}^{instr}$ η ελάχιστη διαφορά δυναμικού που μπορεί να καταγράψει το όργανο. Για τις ανάγκες της εργασίας επιλέχθηκαν διατάξεις οι οποίες είχαν γεωμετρικό παράγοντα μικρότερο των 1000 m.

ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΘΕΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Πολλές φορές, ειδικά σε διασκοπήσεις δύο διαστάσεων, το κριτήριο του γεωμετρικού παράγοντα είναι αρκετό, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Όμως όταν σε ένα πλήρες σετ μετρήσεων βρίσκονται μη συμβατικές διατάξεις, είναι αναγκαίο να οριστεί ένα κατώφλι στην ευαισθησία του γεωμετρικού παράγοντα της κάθε διάταξης σε σφάλματα που αφορά τις θέσεις των ηλεκτροδίων. Σύμφωνα με τον Wilkinson et al. 2008 αυτό το κριτήριο το οποίο και ονομάζει «σχετικό σφάλμα γεωμετρικού παράγοντα» (geometric factor relative error) αφαιρεί πιθανές μετρήσεις από το πρωτόκολλο οι οποίες συμβάλλουν στην αστάθεια του αποτελέσματος της διαδικασίας αντιστροφής (π.χ. εκτεταμένες ψευδείς δομές) παρά το γεγονός ότι το σήμα των μετρήσεων είναι ικανοποιητικό.

Η ευαισθησία του γεωμετρικού παράγοντα σε σφάλματα λόγω θέσης των ηλεκτροδίων δίνεται από τη σχέση:

$$s^2 = \left(\frac{\partial K}{\partial A}\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial B}\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial M}\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial N}\right)^2$$

Όπου K είναι ο γεωμετρικός παράγοντας και για το ηλεκτρόδιο ρεύματος A ισχύει:

$$\left(\frac{\partial K}{\partial A}\right)^2 = \left(\frac{\partial K}{\partial x_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial y_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial z_a}\right)^2 \quad (3.4)$$

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ.2, ο γεωμετρικός παράγοντας K είναι ίσος με:

$$K = \frac{4\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{B'N}\right)}$$

$$\text{Έστω ότι } H = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{B'N}\right)$$

$$\text{Επομένως } K = \frac{4\pi}{H}.$$

Ο υπολογισμός της σχέσης (3.4) γίνεται αριθμητικά και ένα σφάλμα ως προς το x_a , δηλαδή

$\left(\frac{\partial K}{\partial x_a}\right)$ θα επηρεάσει μόνο τις ποσότητες $\frac{1}{AM}, \frac{1}{AN}, \frac{1}{A'M}, \frac{1}{A'N}$, συνεπώς:

$$\left(\frac{\partial K}{\partial x_a}\right) = -\frac{4\pi}{H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial AM} \frac{\partial AM}{\partial x_a} + \frac{\partial H}{\partial AN} \frac{\partial AN}{\partial x_a} + \frac{\partial H}{\partial A'M} \frac{\partial A'M}{\partial x_a} + \frac{\partial H}{\partial A'N} \frac{\partial A'N}{\partial x_a} \right)$$

Όπου:

$$\frac{\partial H}{\partial AM} = -\frac{1}{AM^2},$$

$$AM^2 = (x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2 + (z_A - z_M)^2 \text{ και}$$

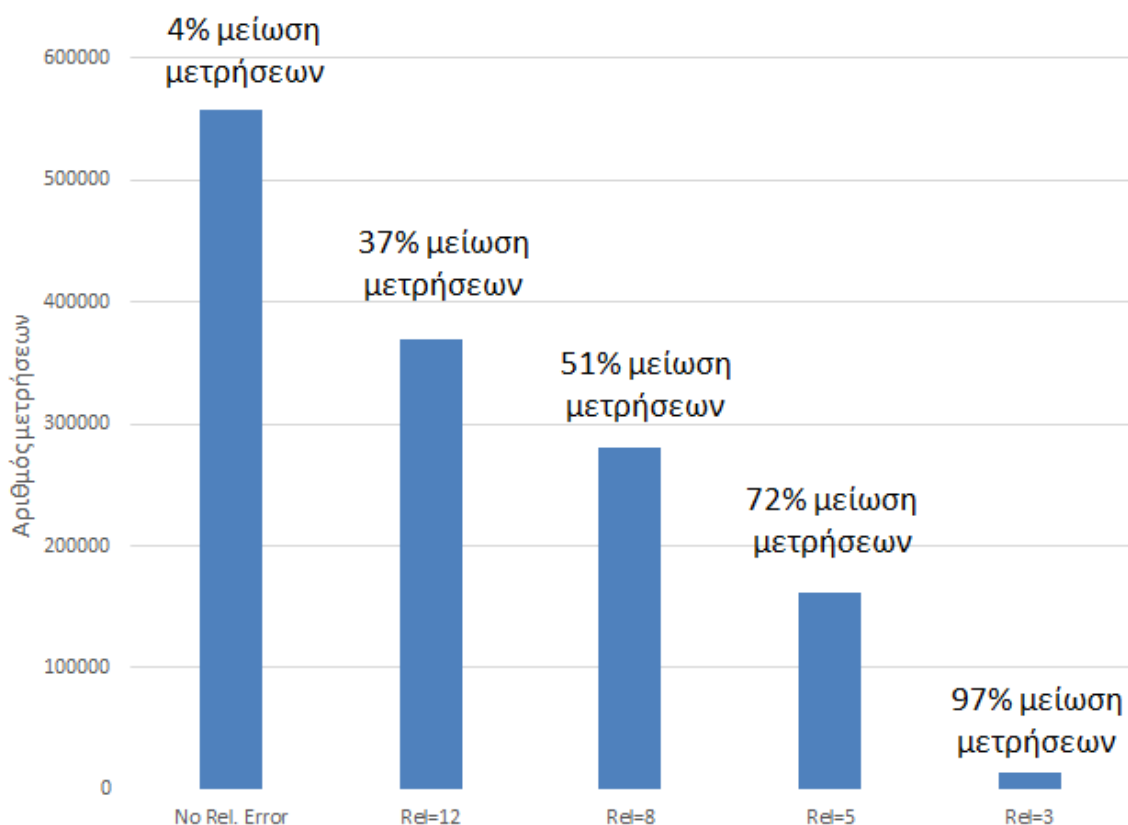
$$\frac{\partial AM}{\partial x_a} = -2(x_A - x_M).$$

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται οι παραπάνω σχέσεις για το y_a και για τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια B, M και N.

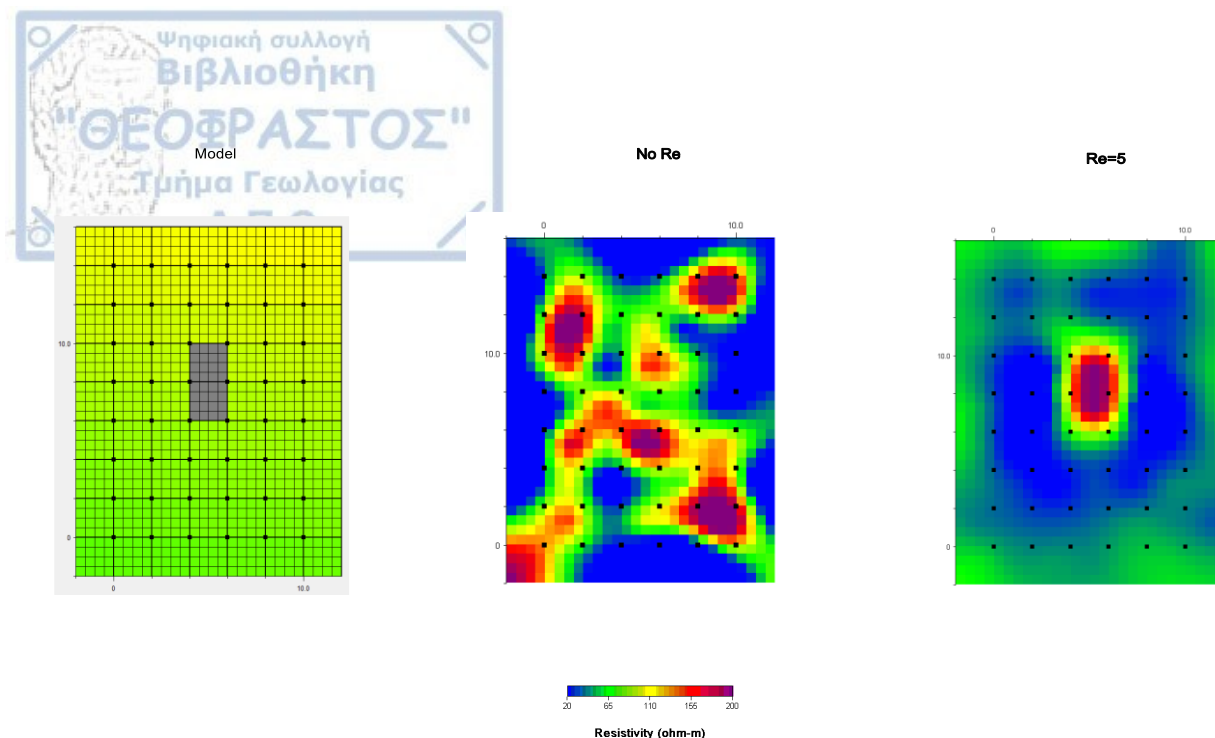
$$\text{Επομένως } s = \sqrt{s^2} \text{ και το σχετικό σφάλμα } R_e \text{ δίνεται από τη σχέση } R_e = \frac{s}{K}$$

Ο ορισμός για το κατώφλι του σχετικού σφάλματος R_e έγινε κατόπιν δοκιμών με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση ηλεκτροδίων για την παρούσα εργασία (αναφέρεται στο κεφάλαιο 4). Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.6), το κριτήριο του σχετικού σφάλματος είναι ένα δραστικό φίλτρο το οποίο αφαιρεί ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων από το πλήρες σετ

δεδομένων. Μετά από δοκιμές με συνθετικά μοντέλα που έγιναν με πλήρη πρωτόκολλα, επιλέχθηκε κατώφλι φιλτραρίσματος με τιμή $Re=5$. (Σχήμα 3.7)



Σχήμα 3.6: Σχεδιάγραμμα το οποίο δείχνει το ποσοστό μείωσης των μετρήσεων σε συνάρτηση με τον γεωμετρικό παράγοντα.



Σχήμα 3.7: Αποτελέσματα αντιστροφής σε συνθετικά δεδομένα για πρωτόκολλο χωρίς εφαρμογή φίλτρου σχετικού σφάλματος (μεσαίο) και με εφαρμογή φίλτρου με τιμή ίση με 5 (δεξιά)

3.2.4 ΝΕΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης στις φιλτραρισμένες μετρήσεις έγινε με τον αλγόριθμο της Αθανασίου (2009) ο οποίος μπορεί να επεκταθεί σε τρεις διαστάσεις χωρίς σημαντική διαφοροποίηση στην ουσία των διαδικασιών του. Αυτή η νέα μέθοδος λαμβάνει υπόψιν της το κατά πόσο οι νέες βέλτιστες μετρήσεις που συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά, είναι γραμμικά ανεξάρτητες σε σχέση με τις ήδη επιλεγμένες (άρα και προσφέρουν πραγματική νέα πληροφορία). Για αυτό το λόγο αυτός τροποποιήθηκε ώστε να προστεθεί και ο έλεγχος της γραμμικής ανεξαρτησίας.

Υιοθετήθηκε (βλ. προηγούμενο κεφάλαιο) το κριτήριο γραμμικής ανεξαρτησίας που προτείνει ο Stummer το οποίο είναι καθαρά γεωμετρικό και αποτρέπει την εισαγωγή μιας νέας μέτρησης στην περίπτωση που είναι γραμμικά εξαρτημένη με τις υπάρχουσες. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής (σχήμα 3.11), η εισαγωγή αυτού του κριτηρίου στη μέθοδο της Αθανασίου (2009) αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν την προσθήκη της διάταξης στο σύνολο των βέλτιστων μετρήσεων. Υπενθυμίζεται ότι η γραμμική συσχέτιση για κάθε διάταξη ενός πρωτοκόλλου δίνεται από τη σχέση:

$$LI_{(i)} = \left| \frac{\sum_{j=1}^m J_{ij}^{base} J_{kj}^{add}}{|J_i^{base}| |J_k^{add}|} \right| \quad i=1, \dots, n^{base}$$

όπου J^{base} είναι ο Ιακωβιανός πίνακας για το αρχικό σετ μετρήσεων και J^{add} ο Ιακωβιανός πίνακας του υπόλοιπου σετ μετρήσεων. Σημειώνεται ότι προκειμένου να εφαρμοστεί αυτή η προσθήκη στη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα, θα πρέπει το νέο βέλτιστο σετ μετρήσεων να ξεκινήσει με ένα βασικό σετ μιας τυπικής διάταξης (π.χ. τετραγωνική), όπως ακριβώς συμβαίνει και στη μέθοδο του πίνακα διακριτικής ικανότητας.

Η τιμή που ορίστηκε σαν κατώφλι γραμμικής ανεξαρτησίας στην παρούσα εργασία είναι 0.85. Έπειτα από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη δημιουργία βέλτιστων πρωτοκόλλων με τη συγκεκριμένη μέθοδο, για τη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων στην παρούσα εργασία, προέκυψε ότι αν δοθεί από τον χρήστη σαν κατώφλι γραμμικής ανεξαρτησίας η τιμή 1, τότε ο κώδικας λειτουργεί όπως η μέθοδος του Ιακωβιανού πίνακα (Αθανασίου 2009), αναπαράγοντας το ίδιο βέλτιστο πρωτόκολλο. Σε κάθε άλλη περίπτωση, προκύπτει διαφορετικό σετ μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν οριστεί κατώφλι πολύ μικρό (π.χ 0.6), τότε ο κώδικας θα απορρίψει έναν πολύ μεγάλο αριθμό μετρήσεων στις οποίες θα περιλαμβάνονται και γραμμικά ανεξάρτητες διατάξεις, οπότε το παραγόμενο αποτέλεσμα δεν είναι αντιπροσωπευτικό.

Το συγκεκριμένο κριτήριο που υλοποιήθηκε, αναπαράγει διαφορετικά πρωτόκολλα μετρήσεων σε σύγκριση με τη μέθοδο της Αθανασίου. Στην πραγματικότητα το κριτήριο αυτό δεν αναμένεται να παράγει σημαντικά διαφοροποιημένα αποτελέσματα της αντιστροφής και ουσιαστικά δίνει τη δυνατότητα να αποφεύγονται πρόσθετες μετρήσεις που δεν προσφέρουν σημαντική νέα πληροφορία.

3.2.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ

Ο τελικός αλγόριθμος ο οποίος δημιουργήθηκε για την υλοποίηση τόσο της νέας μεθόδου βελτιστοποίησης όσο και των μεθόδων στις οποίες βασίστηκε (Stummer et al. 2004; Athanasiou et al. 2009), συντάχθηκε με τη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB ενώ εντάχθηκαν και υπορουτίνες της γλώσσας C. Αρχικά ζητείται ο καθορισμός των συντεταγμένων

των ηλεκτροδίων. Όπως ήδη αναφέρθηκε, δίνεται η δυνατότητα τυχαίας κατανομής των ηλεκτροδίων στο χώρο.

::

```

11 -         if max_probes_x>1
12 -             x_dist=input(' GIVE X INTER-PROBE SPACING (m)=>');
13 -         else
14 -             x_dist=0;
15 -         end
16 -         y_dist=input(' GIVE Y INTER-PROBE SPACING (m)=>');
17 -
18 -
19 -         xcor=input(' GIVE STARTING X COORDINATE (m)=>');
20 -         ycor=input(' GIVE STARTING Y COORDINATE (m)=>');
21 -         zcor=input(' GIVE STARTING Z COORDINATE (m)=>');
22 -
23 -
24 -         x=xcor;
25 -         y=ycor;
26 -         z=zcor;
27 -
28 -         TF=isempty(k)
29 -         if TF==1
30 -             k=0;
31 -         end
32 -         %*****Surface electrodes*****
33 -         for i=1:(max_probes_y*max_probes_x)
34 -             %
35 -             %
36 -             %
37 -             %
38 -             %
39 -             %
40 -             %
41 -             %
42 -             %
43 -             %
44 -             %
45 -             %
46 -         else
47 -             table1=[];
48 -         end
49 -
50 -
51 -
52 -         %*****Tunnel electrodes*****
53 -
54 -         ans=input(' /////ASSIGN TUNNEL ELECTRODES?/////\\n','s')
55 -         if ans=='Y' || ans=='y'

```

Σχήμα 3.8: Τμήμα του αλγορίθμου στο οποίο υπολογίζονται οι συντεταγμένες των ηλεκτροδίων.

Στη συνέχεια υπολογίζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων (Σχήμα 3.8), ώστε να δημιουργηθεί ένα πλήρες σύνολο μετρήσεων ενώ έπειτα φιλτράρονται διατάξεις οι οποίες δεν πληρούν τα κριτήρια που τέθηκαν στο Κεφ. 3.2.3 και γίνεται εξαγωγή ενός αρχείου τύπου ASCII (Σχήμα 3.9) το οποίο περιέχει τις συντεταγμένες των ηλεκτροδίων και το πλήρες πρωτόκολλο.

34	30	6.600	5.190	0.000	0.000
35	31	6.770	2.890	0.000	0.000
36	32	6.830	0.800	0.000	0.000
37	33	8.940	0.830	0.000	0.000
38	34	8.780	3.510	0.000	0.000
39	35	9.330	5.060	0.000	0.000
40	36	8.750	6.830	0.000	0.000
41	37	8.960	9.160	0.000	0.000
42	38	8.730	10.530	0.000	0.000
43	39	8.710	13.070	0.000	0.000
44	40	9.080	15.090	0.000	0.000
45	41	10.960	14.960	0.000	0.000
46	42	11.130	12.990	0.000	0.000
47	43	10.780	11.250	0.000	0.000
48	44	11.110	9.210	0.000	0.000
49	45	10.830	6.930	0.000	0.000
50	46	10.730	5.090	0.000	0.000
51	47	10.900	3.170	0.000	0.000
52	48	10.970	1.040	0.000	0.000
53	0				
54		5000	0		
55	1	2	3	4	30.000
56	1	2	3	5	30.000
57	1	2	3	6	30.000
58	1	2	3	7	30.000
59	1	2	3	8	30.000
60	1	2	3	13	30.000
61	1	2	3	12	30.000
62	1	2	3	11	30.000
63	1	2	3	10	30.000
64	1	2	3	9	30.000
65	1	2	3	20	30.000
66	1	2	3	21	30.000
67	1	2	3	22	30.000
68	1	2	3	23	30.000
69	1	2	3	24	30.000

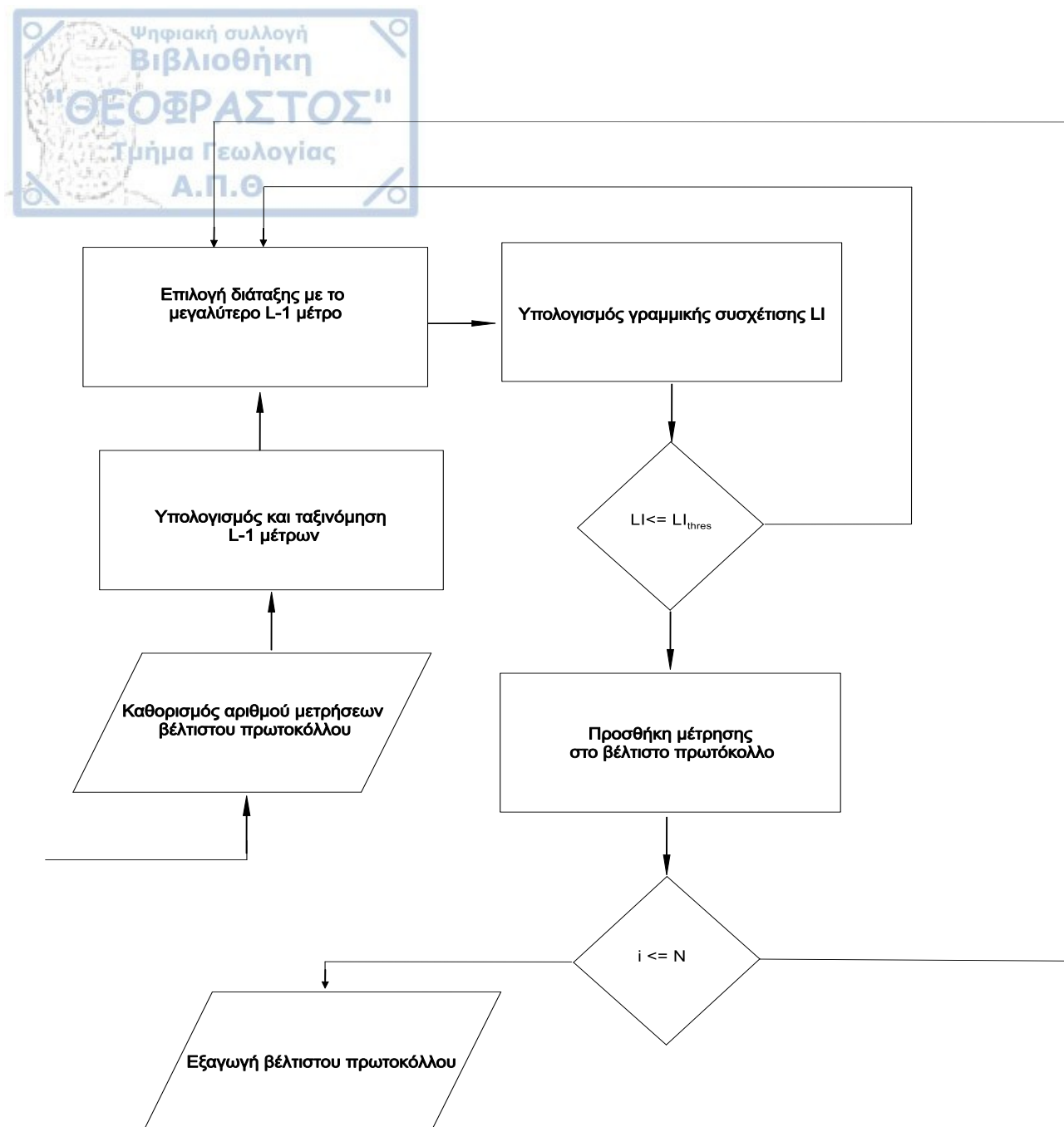
Σχήμα 3.9: Το αρχείο με τις συντεταγμένες των ηλεκτροδίων καθώς και με το πρωτόκολλο μέτρησης.

Αυτό το αρχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία συνθετικών δεδομένων με τη χρήση του λογισμικού DC-3DPro. Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η βελτιστοποίηση του πλήρους πρωτοκόλλου, ο αλγόριθμος ξεκινάει τις διαδικασίες που αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Αρχικά πραγματοποιείται διαίρεση του χώρου έρευνας ανάλογα με τις συντεταγμένες των ηλεκτροδίων και υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας. Για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα συντάχθηκε συνάρτηση στη γλώσσα C η οποία καλείται από τον κώδικα (Σχήμα 3.10), προκειμένου να επιταχύνει τη διαδικασία υπολογισμού. Επιλέγεται η επιθυμητή μέθοδος βελτιστοποίησης καθώς και ο επιθυμητός αριθμός μετρήσεων. Το αρχείο το οποίο προκύπτει είναι ένα αρχείο τύπου ASCII (Σχήμα 3.9) στο οποίο περιέχονται οι θέσεις των ηλεκτροδίων, καθώς και το βέλτιστο πρωτόκολλο μέτρησης.

```
7.000000 1.000000 0.000000
7.000000 3.000000 0.000000
7.000000 5.000000 0.000000
7.000000 7.000000 0.000000
7.000000 9.000000 0.000000
7.000000 11.000000 0.000000
7.000000 13.000000 0.000000
7.000000 15.000000 0.000000
9.000000 1.000000 0.000000
9.000000 3.000000 0.000000
9.000000 5.000000 0.000000
9.000000 7.000000 0.000000
9.000000 9.000000 0.000000
9.000000 11.000000 0.000000
9.000000 13.000000 0.000000
9.000000 15.000000 0.000000
11.000000 1.000000 0.000000
11.000000 3.000000 0.000000
11.000000 5.000000 0.000000
11.000000 7.000000 0.000000
11.000000 9.000000 0.000000
11.000000 11.000000 0.000000
11.000000 13.000000 0.000000
11.000000 15.000000 0.000000
give protocol filename: gm48pp.txt
save jac: j.txt
give number of measurements: 1128

Jacobian calculating...Please wait...
29/1128
```

Σχήμα 3.10: Υπολογισμός Ιακωβιανού πίνακα μέσω υπορουτίνας σε γλώσσα C



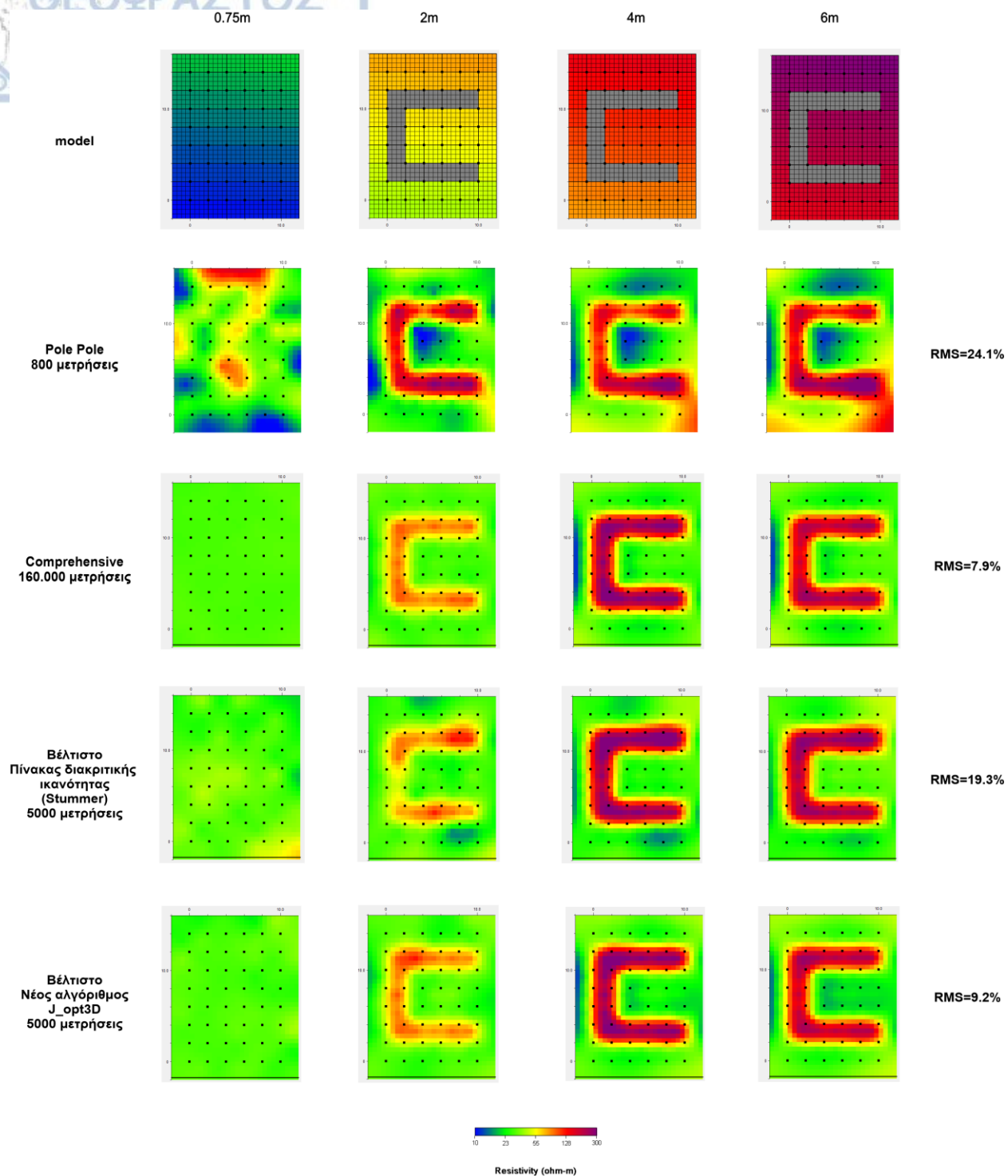
Σχήμα 3.11: Τμήμα από το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου με επιλογή μεθόδου βελτιστοποίησης

Η χρήση συνθετικών μοντέλων είναι ένα ισχυρό εργαλείο ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά των βέλτιστων διατάξεων. Παρακάτω συγκρίνονται τα συνθετικά μοντέλα που προκύπτουν από το πλήρες πρωτόκολλο με τα αντίστοιχα βέλτιστα της κάθε μεθόδου. Πέρα από τη σύγκριση της κάθε μεθόδου, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την αλλαγή θέσης των ηλεκτροδίων. Σε κάθε παράδειγμα, χρησιμοποιούνται τα ίδια πρωτόκολλα μετρήσεων, τα οποία περιλαμβάνουν την διάταξη πόλου πόλου, το πλήρες με 161.000 μετρήσεις και τα βέλτιστα με 5.000 μετρήσεις με τη μέθοδο του πίνακα διακριτικής ικανότητας και της τροποποιημένης μεθόδου του Ιακωβιανού πίνακα. Η διαμόρφωση των ηλεκτροδίων και στα 3 παραδείγματα είναι η ίδια, και όπως φαίνεται και στα σχήματα καθορίζεται από 6 γραμμές ηλεκτροδίων στον x άξονα με 8 ηλεκτρόδια σε κάθε γραμμή. Οι αντιστροφές των δεδομένων που προέκυψαν τόσο από τα συνθετικά δεδομένα όσο και από τις μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό DC-3DPro.

4.1.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Παράδειγμα 1.

Αντιστατικό σώμα αντίστασης 300 Ωm το οποίο σχηματίζει το γράμμα Π μέσα σε ημιχώρο αντίστασης 30 Ωm (Σχήμα 4.1). Το σώμα βρίσκεται σε βάθος 2 μέτρων, έχει πάχος 2 μέτρα και εκτείνεται 10 μέτρα στον άξονα x και 12 μέτρα στον άξονα y. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση 2m. Τα αποτελέσματα αντιστροφής τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1 δείχνουν ότι και οι δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης, σε σύγκριση με το πλήρες σετ και την διάταξη πόλου πόλου, απεικονίζουν εξαιρετικά το αντιστατικό σώμα. Η διάταξη πόλου πόλου παρόλο που εντοπίζει τον αντιστατικό στόχο, δημιουργεί ψευδείς δομές στην επιφάνεια αλλά και σε μεγαλύτερα βάθη (αγώγιμες ζώνες δίπλα από τον αντιστατικό στόχο).

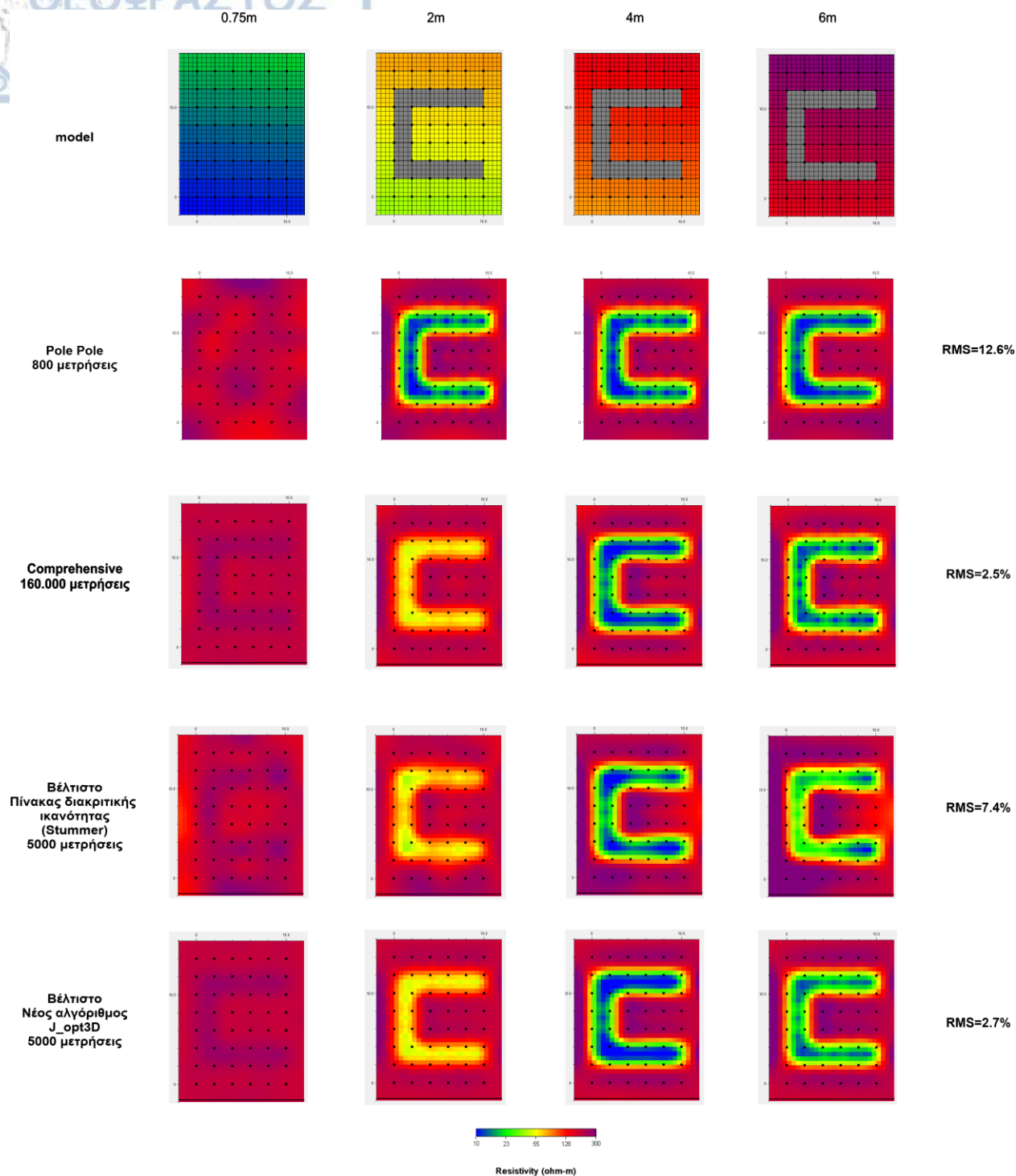


Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 1^{ov} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ.



Παράδειγμα 2

Αγώγιμο σώμα αντίστασης $10\ \Omega\text{m}$ το οποίο σχηματίζει το γράμμα Π μέσα σε ημιχώρο αντίστασης $200\ \Omega\text{m}$ (σχήμα 4.2). Το σώμα, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, βρίσκεται σε βάθος 2 μέτρων, έχει πάχος 2 μέτρα και εκτείνεται 10 μέτρα στον άξονα x και 12 μέτρα στον άξονα y. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση 2m. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα αντιστροφής, φαίνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή αγώγιμος στόχος σε αντιστατικό ημιχώρο, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης αποδίδουν εξίσου καλά. Σε μικρά βάθη, δηλαδή βάθη μικρότερα των 2 μέτρων, δημιουργείται ένα είδωλο του αγώγιμου στόχου με αντιστατικά χαρακτηριστικά (ψευδής δομή), που όμως εξαφανίζεται αμέσως με το βάθος.

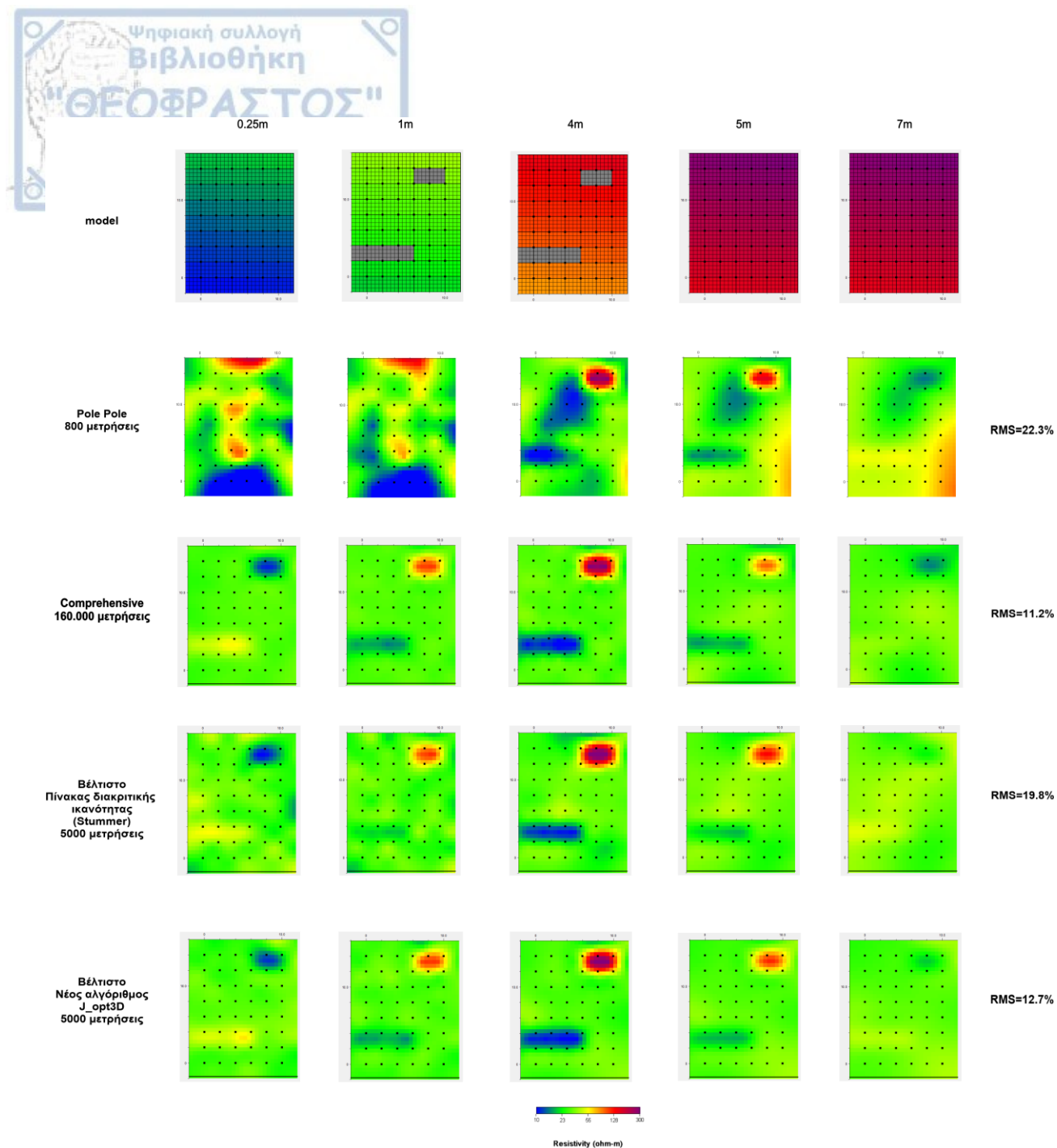


Σχήμα 4.2: Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 2^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ.



Παράδειγμα 3

Δύο σώματα διαστάσεων $4 \times 2\text{m}$ και $8 \times 2\text{m}$ με αντιστάσεις $300\ \Omega\text{m}$ και $10\ \Omega\text{m}$ αντίστοιχα, βρίσκονται σε ημιχώρο αντίστασης $30\ \Omega\text{m}$. Τα δύο σώματα βρίσκονται σε βάθη 2 έως 5 μέτρων (σχήμα 4.3). Ο αριθμός των ηλεκτροδίων είναι 48 με την μεταξύ τους απόσταση ίση με 2m . Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αντιστροφής (Σχήμα 4.3), φαίνεται ότι η διάταξη πόλου πόλου αν και εντοπίζει τους δύο στόχους, δημιουργεί πολλές τεχνητές δομές που αλλοιώνουν την εικόνα. Ψευδείς δομές δημιουργούνται και με το πλήρες πρωτόκολλο αλλά και με τα βέλτιστα, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό.



Σχήμα 4.3: Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 3^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ.

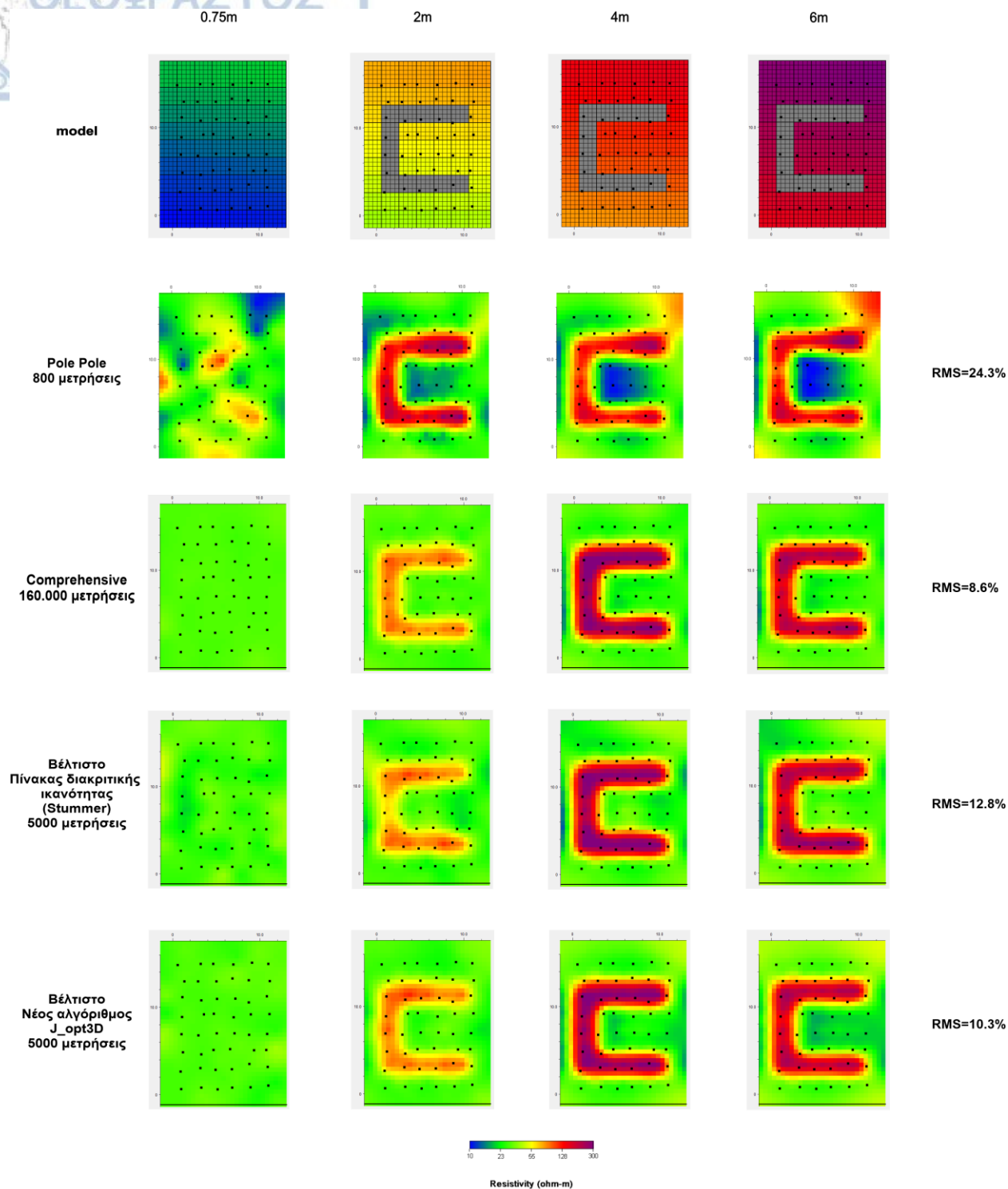
4.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται τα αποτελέσματα αντιστροφής των συνθετικών δεδομένων με τη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων να είναι πιο αυθαίρετη. Συγκεκριμένα

επιλέχθηκε η διαμόρφωση των ηλεκτροδίων των παραπάνω παραδειγμάτων (Παράγραφος 4.1.1), δηλαδή 6 νοητές γραμμές ηλεκτροδίων με 8 τοποθετημένα ηλεκτρόδια σε κάθε γραμμή, αλλά με ένα ποσοστό 25% λάθους στις υπάρχουσες θέσεις. Στα σχήματα 4.4, 4.5 και 4.6 διακρίνεται αυτή η τυχαία κατανομή των ηλεκτροδίων.

Παράδειγμα 1

Αντιστατικό σώμα αντίστασης $300\ \Omega$ m το οποίο σχηματίζει το γράμμα Π μέσα σε ημιχώρο αντίστασης $30\ \Omega$ m (σχήμα 4.4). Το σώμα βρίσκεται σε βάθος 2 μέτρων, έχει πάχος 2 μέτρων και εκτείνεται 10 μέτρα στον άξονα x και 12 μέτρα στον άξονα y. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια τα οποία απέχουν μεταξύ τους τυχαία απόσταση. Από τα αποτελέσματα αντιστροφής τα οποία προκύπτουν, διαπιστώνεται ότι παρά τη μετακίνηση των ηλεκτροδίων, τόσο το πλήρες πρωτόκολλο όσο και οι δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης απεικονίζουν εξαιρετικά το αντιστατικό σώμα. Η τομογραφία με τη διάταξη πόλου πόλου παρότι απεικονίζει σωστά το αντιστατικό σώμα, δημιουργεί τεχνητές δομές (αγώγιμες ζώνες).

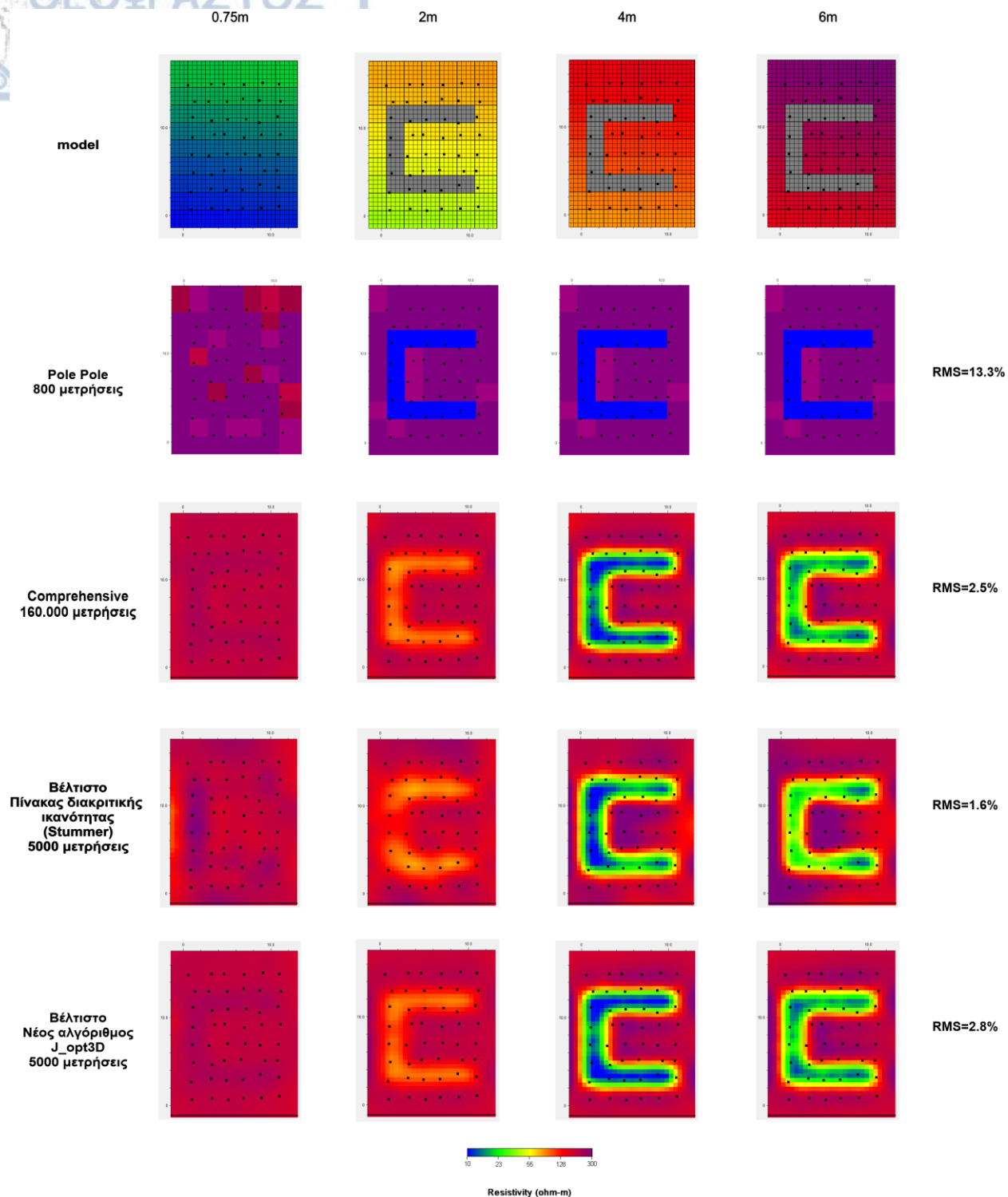


Σχήμα 4.4: Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 1^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σύνολο για ηλεκτρόδια με τυχαίες θέσεις.



Παράδειγμα 2

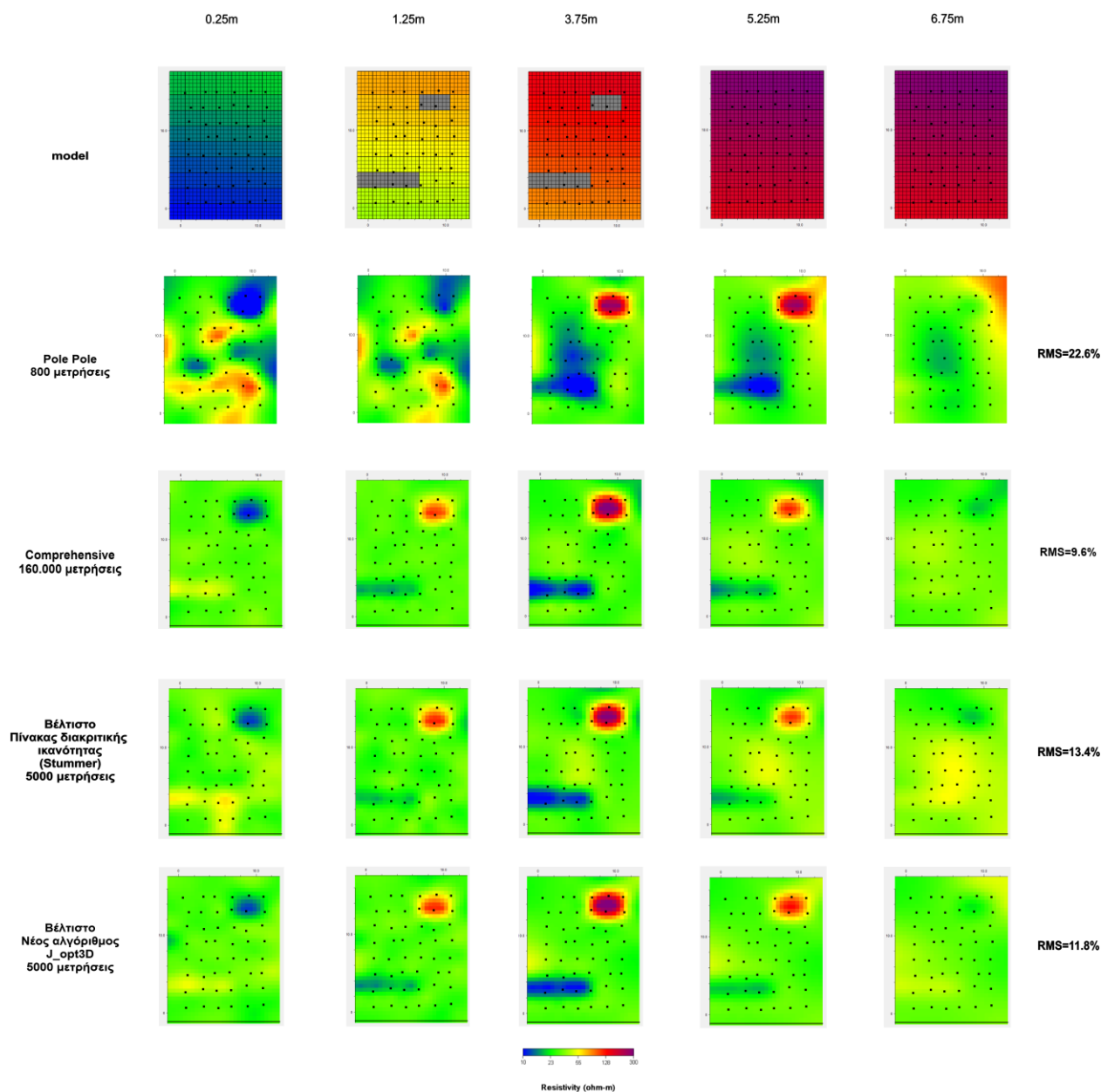
Αγώγιμο σώμα αντίστασης $10\ \Omega\text{m}$ το οποίο σχηματίζει το γράμμα Π μέσα σε ημιχώρο αντίστασης $200\ \Omega\text{m}$ (σχήμα 4.5). Το σώμα, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, βρίσκεται σε βάθος 2 μέτρων, έχει πάχος 2 μέτρων και εκτείνεται 10 μέτρα στον άξονα x και 12 μέτρα στον άξονα y . Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια τα οποία απέχουν μεταξύ τους τυχαία απόσταση. Και σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνεται ότι οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να απεικονίσουν ικανοποιητικά το γεωηλεκτρικό μοντέλο.



Σχήμα 4.5: Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 2^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σύνολο για ηλεκτρόδια με τυχαίες θέσεις.

Παράδειγμα 3

Δύο σώματα διαστάσεων 4x2m και 8x2m με αντιστάσεις 300 Ωm και 10 Ωm αντίστοιχα, βρίσκονται σε ημιχώρο αντίστασης 30 Ωm. Τα δύο σώματα βρίσκονται σε βάθη 2 έως 5 μέτρων (σχήμα 4.6). Ο αριθμός των ηλεκτροδίων είναι 48 με την μεταξύ τους απόσταση τυχαία. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα αντιστροφής και σε αυτή την περίπτωση δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα με εξαίρεση τα αποτελέσματα αντιστροφής με τη διάταξη πόλου πόλου η οποία δημιουργεί έντονα τεχνητές δομές.





Σχήμα 4.6: Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 3^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σύνολο για ηλεκτροδία με τυχαίες θέσεις.

4.1.3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής των συνθετικών δεδομένων αποδεικνύουν ότι η νέα μέθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί και να μελετηθούν σε πραγματικές μετρήσεις, αφού έχουν τη δυνατότητα αναπαραγωγής αξιόπιστων μετρήσεων. Η σύγκρισή της τόσο με την μέθοδο του πίνακα διακριτικής ικανότητας όσο και με άλλα πρωτόκολλα (πλήρες και πόλου πόλου) δεν παρουσιάζει διαφορές, γεγονός που ενισχύει τις βλέψεις για εφαρμογή σε πραγματικές μετρήσεις. Επίσης εντυπωσιακά είναι τα αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων με τυχαία κατανομή ηλεκτροδίων στο χώρο. Αυτή η αυθαίρετη κατανομή των ηλεκτροδίων δεν φαίνεται να επηρεάζει δραματικά τα αποτελέσματα, εφόσον όμως είναι γνωστή η ακριβής θέση τους.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

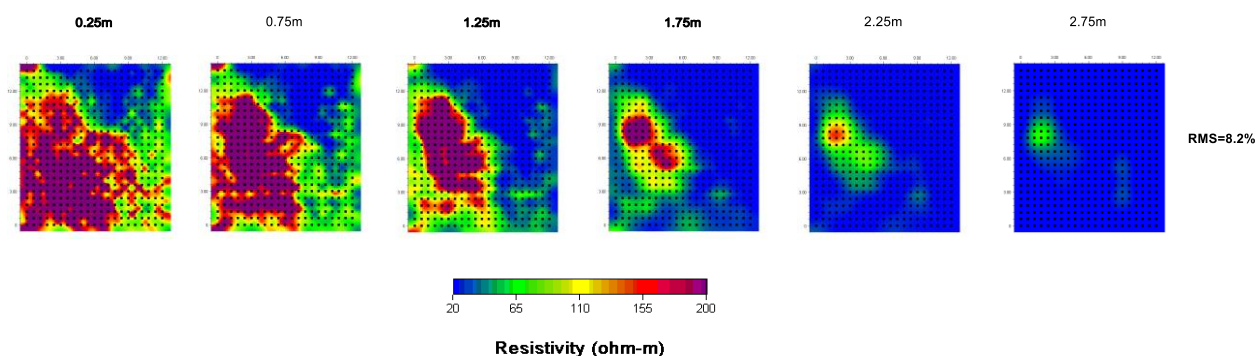
Προκειμένου να επαληθευθεί η αξιοπιστία της μεθόδου βελτιστοποίησης, πέρα των συνθετικών μοντέλων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υπαίθρου. Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται αποτελέσματα τα οποία αποκτήθηκαν από πραγματικές μετρήσεις τόσο με συμβατικές όσο και με μη συμβατικές διατάξεις. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν εντός της Πανεπιστημιούπολης Α.Π.Θ σε έναν ορθογώνιο κήνο 16x12m.

4.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ 2Δ

Μια πολύ γνωστή και εύκολη μέθοδος τρισδιάστατης αποτύπωσης είναι μέσω της συλλογής παράλληλων 2Δ τομογραφιών. Με αυτή τη μέθοδο είναι πιο εύκολο να ελεγχθεί η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και συνεπώς το βάθος διασκόπησης, αφού κάθε τομογραφία είναι ξεχωριστή. Ένα επίσης πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο θεωρητικά μεγαλύτερος αριθμός

των ηλεκτροδίων που υπάρχουν στον κάνναβο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για πιο λεπτομερή τρισδιάστατη απεικόνιση.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τοποθετήθηκαν 24 ηλεκτρόδια κατά μήκος και η μεταξύ τους απόσταση ήταν ίση με 0.6m. Η διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των δεδομένων ήταν η διπόλου διπόλου, λόγω της μεγάλης ευαισθησίας της διάταξης σε πλευρικές μεταβολές. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 21 τομογραφίες και το αποτέλεσμα της 3Δ αντιστροφής αυτών φαίνεται στο σχήμα 4.7. Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα αντιστατικό στρώμα πάχους ~30 cm, ενώ από το 1 έως 2m ένας αντιστατικός στόχος (400 Ωm) μέσα σε αγωγίμο σχηματισμό (10 Ωm). Ο αντιστατικός στόχος που εντοπίζεται μεταξύ του 1^{ου} και 2^{ου} μέτρου πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη τάφου.



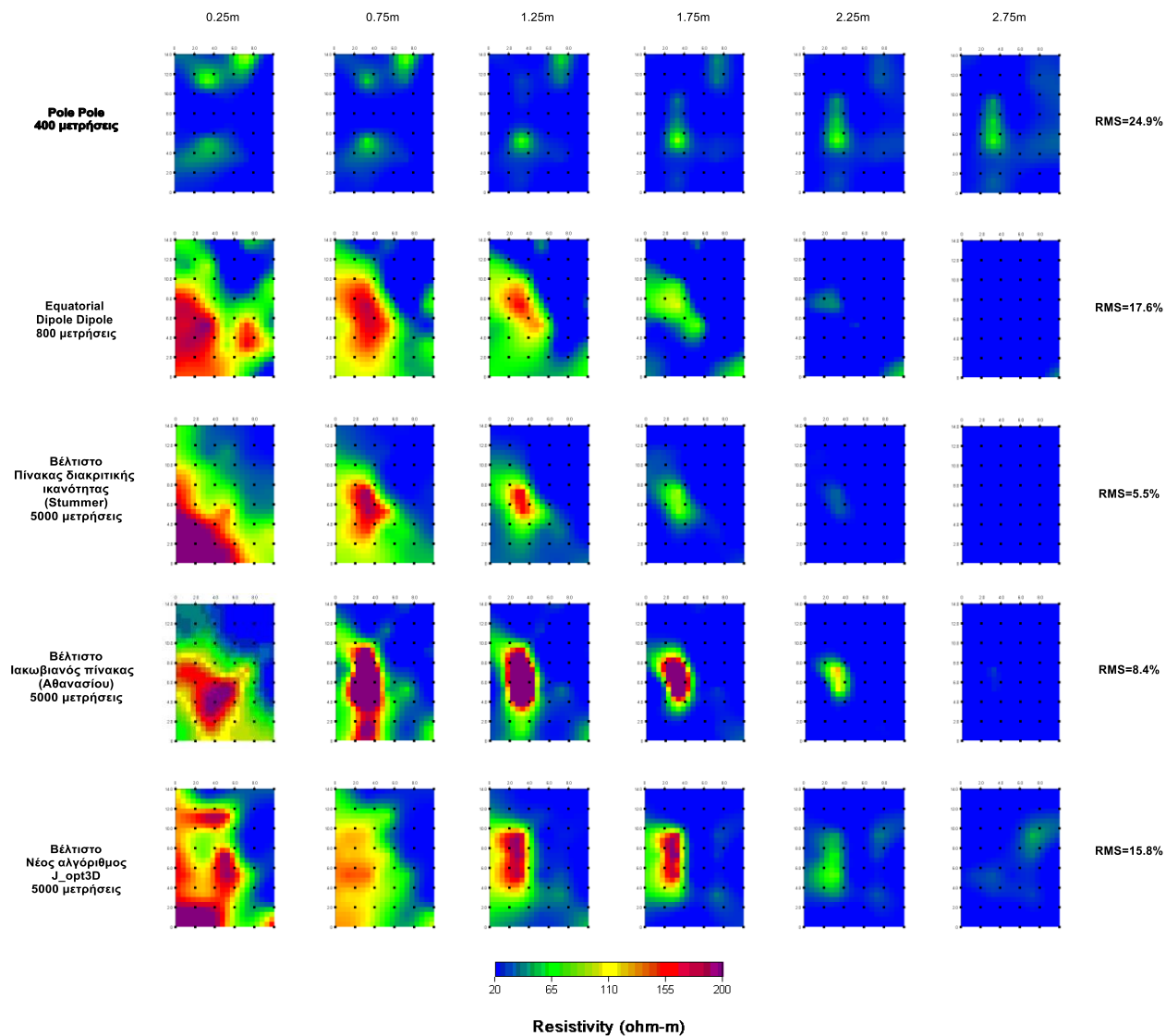
Σχήμα 4.7: Αποτελέσματα αντιστροφής μετρήσεων πεδίου τη χρήση παράλληλων 2Δ τομογραφιών.

4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, δηλαδή πολλαπλών 2Δ τομογραφιών, πραγματοποιήθηκαν πραγματικές 3Δ τομογραφίες. Με αυτή τη μέθοδο όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι διατάξεις, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η λήψη των μετρήσεων δεν ακολουθούν κάποια γεωμετρία (όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε μια διάταξη πόλου-διπόλου).

Αρχικά τοποθετήθηκαν 48 ηλεκτρόδια επί του καννάβου με τη μεταξύ τους απόσταση τόσο ως προς τον x και τον y άξονα, να είναι ίση με 2m. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν 6 ηλεκτρόδια κατά τον x άξονα και 8 ηλεκτρόδια κατά τον y άξονα. Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν 5 πρωτόκολλα, 3 εκ των οποίων αποτελούν βέλτιστα ενός πλήρους σετ

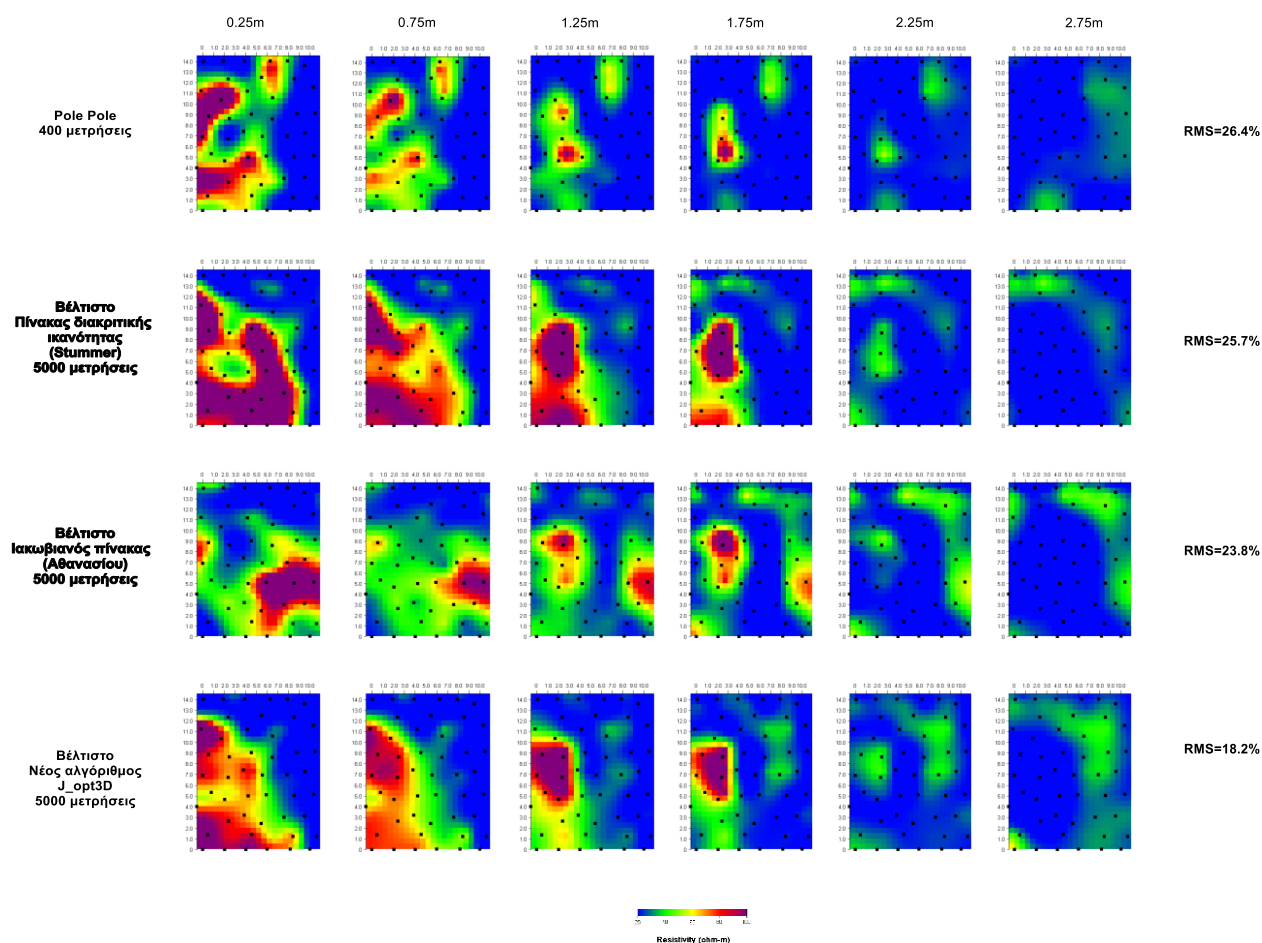
μετρήσεων. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8 φαίνεται ότι τόσο η διατάξη πόλου πόλου όσο και η τετραγωνική μπορούν να δώσουν μια σχετικά καλή πρώτη εκτίμηση για τον αντιστατικό στόχο, αλλά δεν μπορούν να τον αποτυπώσουν με μεγάλη ακρίβεια. Σε αντίθεση, οι βέλτιστες διατάξεις φαίνεται να οριοθετούν αυτόν τον στόχο αρκετά καλά.



Σχήμα 4.8: Αποτελέσματα αντιστροφής μετρήσεων πεδίου τη χρήση βέλτιστων πρωτοκόλλων καθώς και με τις διατάξεις πόλου πόλου και τετραγωνική.

4.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΥΧΑΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Στην ίδια περιοχή έρευνας πραγματοποιήθηκε επανάληψη των μετρήσεων, με τη διαφορά όμως στις θέσεις των ηλεκτροδίων. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια, 6 στον άξονα x και 8 στον άξονα y (όπως ακριβώς και στο προηγούμενο πείραμα) αλλά με διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους. Συγκεκριμένα οι τυχαίες θέσεις των ηλεκτροδίων ήταν εντός ποσοστού σφάλματος 25%, δηλαδή τα ηλεκτρόδια απείχαν έως και 50cm κατά πάσα διεύθυνση από τις αρχικές τους θέσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.9: Αποτελέσματα αντιστροφής μετρήσεων πεδίου τη χρήση βέλτιστων πρωτοκόλλων καθώς και με τη διάταξη πόλου πόλου για τυχαίες θέσεις ηλεκτροδίων

4.2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Από τις μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν γίνεται αντιληπτό ότι τόσο η νέα μέθοδος βελτιστοποίησης, όσο και οι άλλες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε τρισδιάστατες διασκοπήσεις. Η χρήση τυχαίων θέσεων ηλεκτροδίων φαίνεται να επηρεάζει ελαφρώς τα αποτελέσματα ως προς την ένταση του σήματος (Σχήμα 4.9), με σχετικά υψηλά ποσοστά σφάλματος RMS, αλλά όλα τα πρωτόκολλα καταφέρνουν και εντοπίζουν τον αντιστατικό στόχο. Σε αντίθεση με την μέθοδο πολλαπλών 2D τομογραφιών, η οποία παρέχει πολύ πιο λεπτομερή εικόνα αντιστροφής, η χρήση βέλτιστων πρωτοκόλλων με χρήση 3D διατάξεων κατάφερε να ανταπεξέλθει, παρόλο τον μικρό αριθμό ηλεκτροδίων για μια τέτοια έρευνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρόνος λήψης ενός βέλτιστου πρωτοκόλλου ήταν ο ίδιος με αυτόν για τη λήψη όλων των 2D τομογραφιών.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή μελετώνται βέλτιστες μετρήσεις τρισδιάστατων τομογραφιών οι οποίες έχουν αποκτηθεί με τη χρήση ηλεκτροδίων τόσο με κανονική κατανομή όσο και με τυχαίες θέσεις. Για τις ανάγκες λοιπόν της εργασίας αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος αναπαράγει πλήρη πρωτόκολλα για ηλεκτρόδια τοποθετημένα στον τρισδιάστατο χώρο και στη συνέχεια τα βελτιστοποιεί με μια από τις τρεις μεθόδους που προτείνονται, αυτή του πίνακα διακριτικής ικανότητας (Stummer et al. 2004), του Ιακωβιανού πίνακα (Αθανασίου 2009) και της τροποποιημένης μεθόδου του Ιακωβιανού πίνακα η οποία υιοθετεί το κριτήριο της γραμμικής ανεξαρτησίας.

Αρχικά ελέγχεται η απόκριση των βέλτιστων αυτών πρωτοκόλλων με τη χρήση συνθετικών μετρήσεων. Από τη χρήση συνθετικών μοντέλων προκύπτει ότι:

- Κάθε ένα από τα 3 βέλτιστα πρωτόκολλα μπορεί αξιόπιστα να απεικονίσει τους στόχους οι οποίοι υπήρχαν.
- Οι διαφορές σε συνθετικές μετρήσεις μεταξύ των τριών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι μηδαμινές.
- Η τροποποιημένη μέθοδος βελτιστοποίησης δεν παράγει σημαντικά διαφοροποιημένα αποτελέσματα, αλλά δίνει τη δυνατότητα να αποφεύγονται πρόσθετες μετρήσεις που δεν προσφέρουν σημαντική νέα πληροφορία.
- Η χρήση τυχαίων θέσεων ηλεκτροδίων επηρεάζει ελαφρώς την απεικόνιση των μοντέλων, αλλά πάλι είναι ικανή να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα
- Η μέθοδος του Ιακωβιανού πίνακα (Αθανασίου 2009) απαιτεί πολύ λιγότερο χρόνο υπολογισμού του βέλτιστου πρωτοκόλλου σε σύγκριση με τις υπόλοιπες δύο, αναπαράγοντας σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα.

Για να ελεγχθούν τα βέλτιστα πρωτόκολλα σε πραγματικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου τόσο με καθορισμένες όσο και με τυχαίες θέσεις ηλεκτροδίων. Συμπερασματικά προκύπτει ότι:

- Τόσο οι τομογραφίες με καθορισμένες θέσεις ηλεκτροδίων όσο και με τυχαίες, μπορούν να εντοπίσουν στόχους.



- Η τρισδιάστατη τομογραφία με πολλαπλές 2Δ τομογραφίες υπερέχει σαφώς σε ότι αφορά την διακριτική ικανότητα με την 3Δ τομογραφία που αποκτήθηκε με χρήση μη συμβατικών διατάξεων.
- Η πλήρως τρισδιάστατη διασκόπηση για μια τέτοια περιοχή έρευνας απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτροδίων
- Ο χρόνος λήψης ενός βέλτιστου πρωτοκόλλου ισούται με τη λήψη όλων των 2Δ τομογραφιών.
- Οι τυχαίες θέσεις των ηλεκτροδίων πρέπει να καταγραφούν με μεγάλη ακρίβεια, προκειμένου να υπολογιστεί σωστά ο γεωμετρικός παράγοντας
- Η χρήση τυχαίων θέσεων ηλεκτροδίων επηρεάζει ελαφρώς την απεικόνιση των μοντέλων, με μεγαλύτερο ποσοστό σφαλμάτων

Μέσα από την εργασία και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα διατριβή, δημιουργούνται νέες ιδέες για περαιτέρω μελέτη και διεύρυνση των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν δοκιμές του αλγορίθμου με πιο περίπλοκες διαμορφώσεις ηλεκτροδίων και να εφαρμοστούν τα βέλτιστα πρωτόκολλα τόσο σε συνθετικά και πραγματικά δεδομένα.

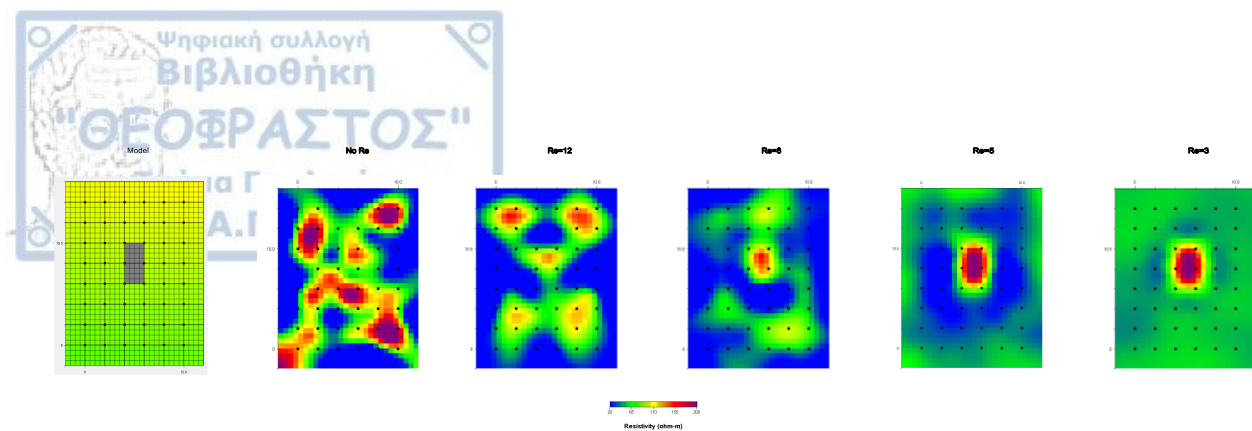
Δεδομένου ότι ο νέος αλγόριθμος βελτιστοποίησης έχει τη δυνατότητα αναπαραγωγής συγκεκριμένων αριθμού βέλτιστων μετρήσεων, εύκολα μπορούν να υπολογιστούν νέα πρωτόκολλα με διαφορετικό αριθμό μετρήσεων και να επαναληφθεί το πείραμα.

Στην παρούσα εργασία γίνεται εκκίνηση της βελτιστοποίησης των πρωτοκόλλων θεωρώντας τη Γη ως ένα ομογενή ημχώρο. Για ειδικότερες περιπτώσεις και πιο ακριβείς σε λεπτομέρεια μπορεί να γίνει χρήση αρχικού μοντέλου στη διαδικασία υπολογισμού του Ιακωβιανού πίνακα.

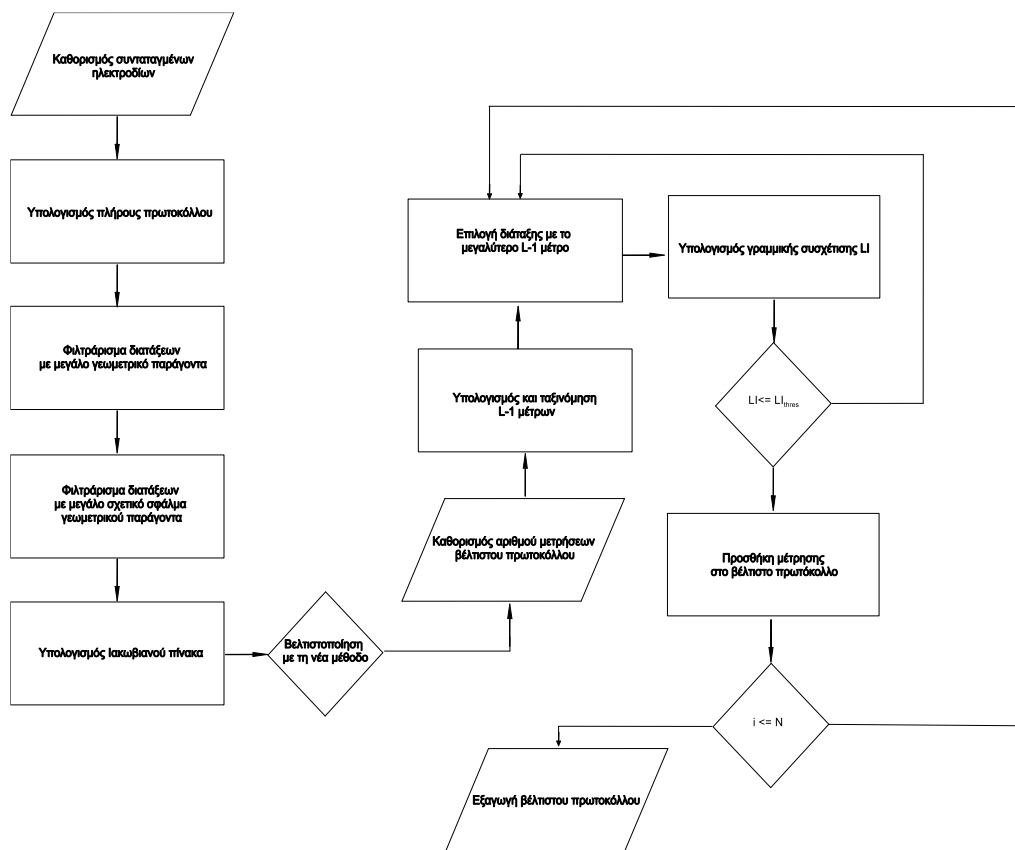
Παρόλο που η τρισδιάστατη διασκόπηση για μια περιοχή έρευνας, όπως αυτή που επιλέχθηκε για τις πραγματικές μετρήσεις, απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτροδίων, η επανάληψη των μετρήσεων τόσο με τμηματικές 3Δ ηλεκτρικές τομογραφίες ή με διαφορετικό αριθμό ηλεκτροδίων θα ήταν ενδιαφέρουσα.

Τέλος θα ήταν αρκετά ενδιαφέρουσα η μελέτη μιας περιοχής με τη μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης, χρησιμοποιώντας βέλτιστα πρωτόκολλα που προκύπτουν από το νέο αλγόριθμο.

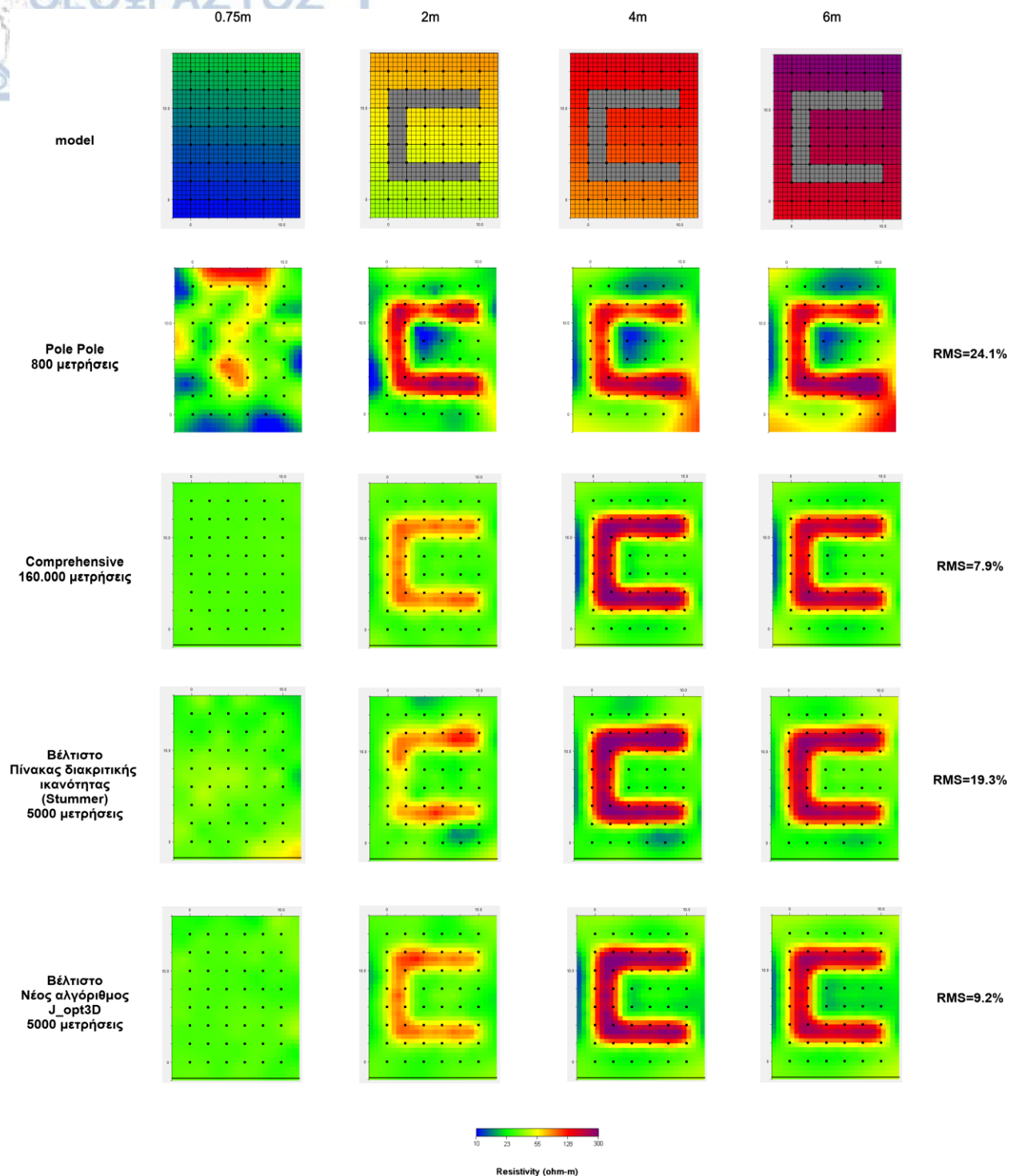




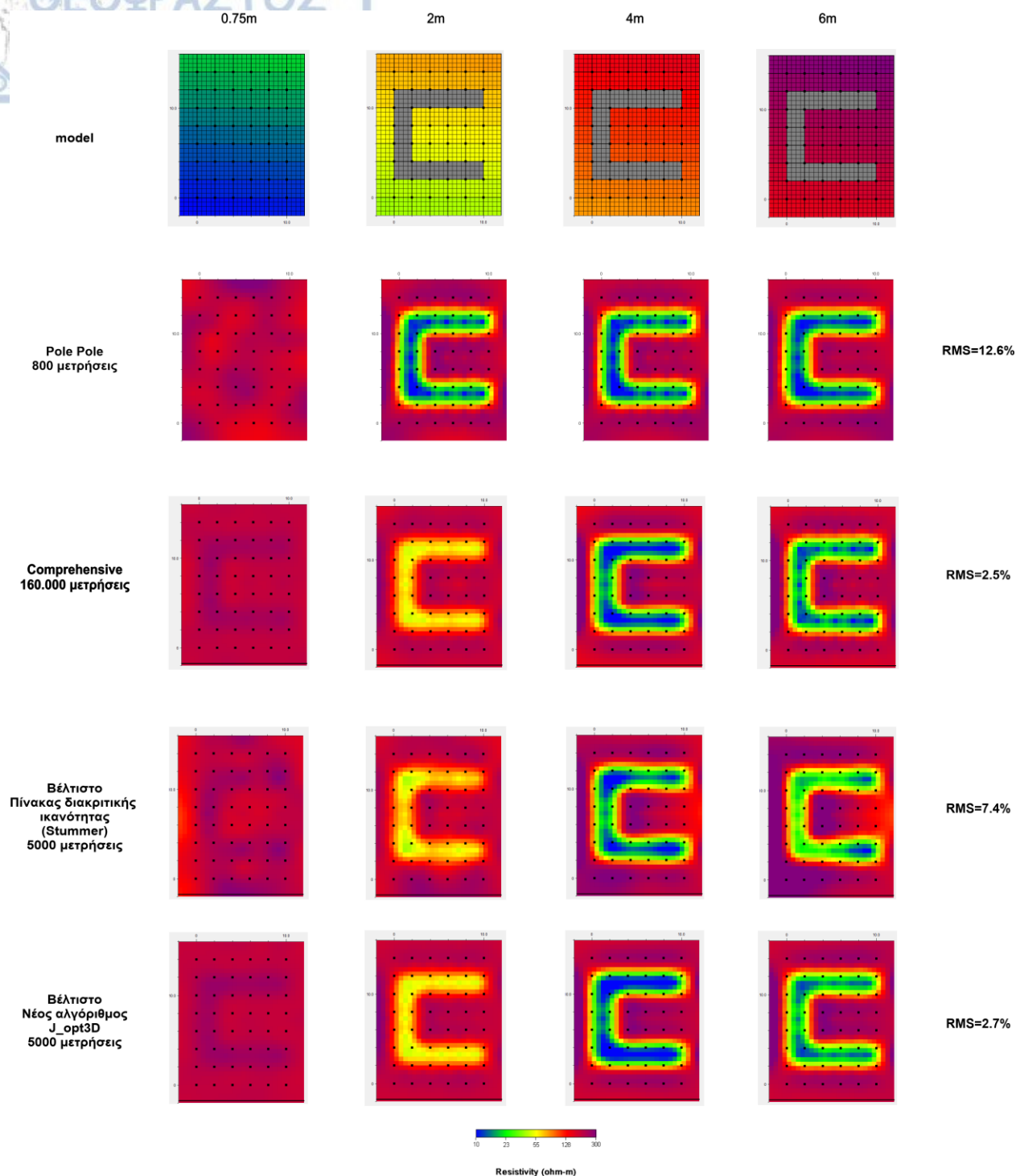
Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων με διαφορετικό κατώφλι σχετικού σφάλματος γεωμετρικού παράγοντα



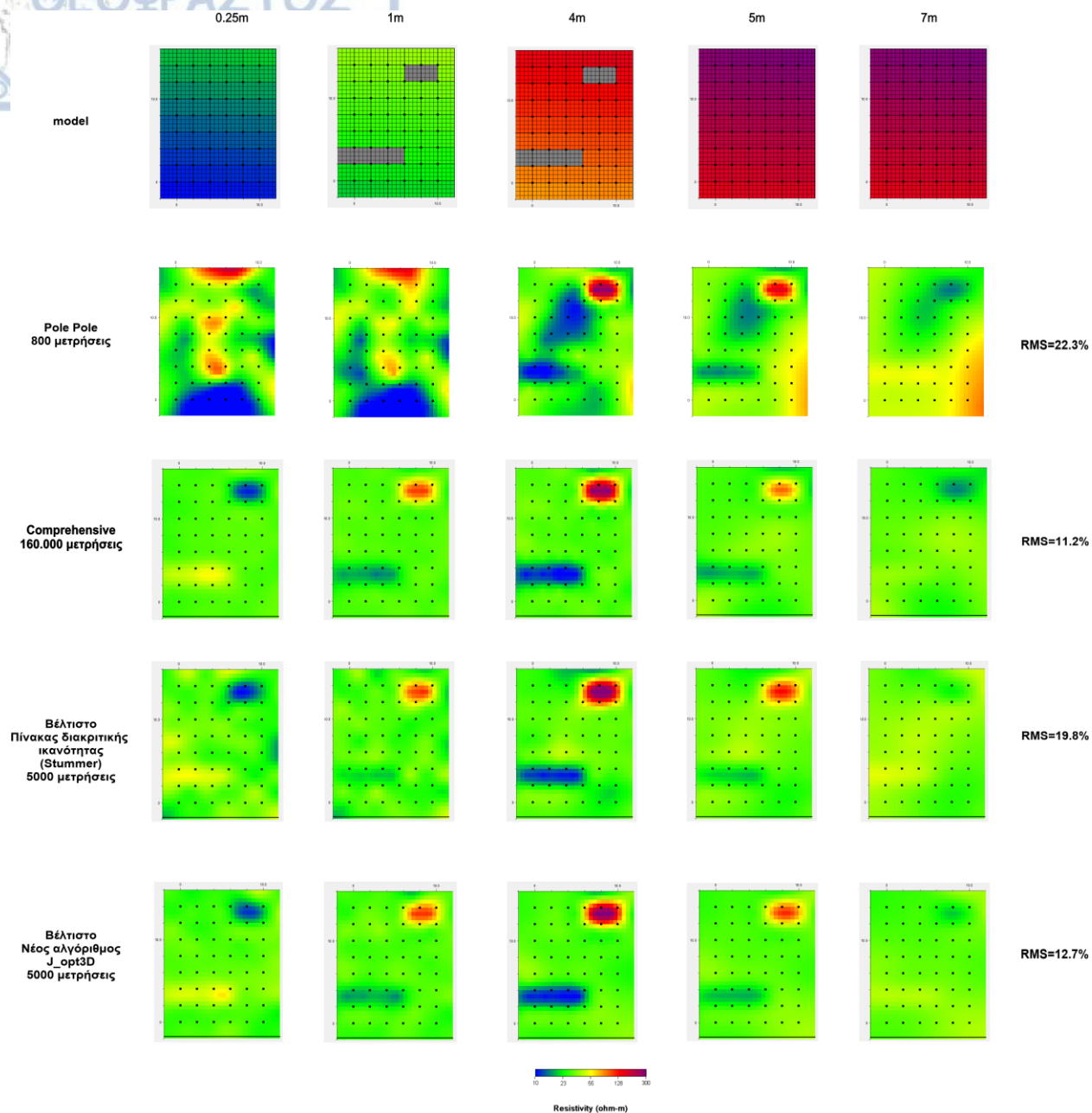
Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στην περίπτωση βελτιστοποίησης με τη νέα μέθοδο



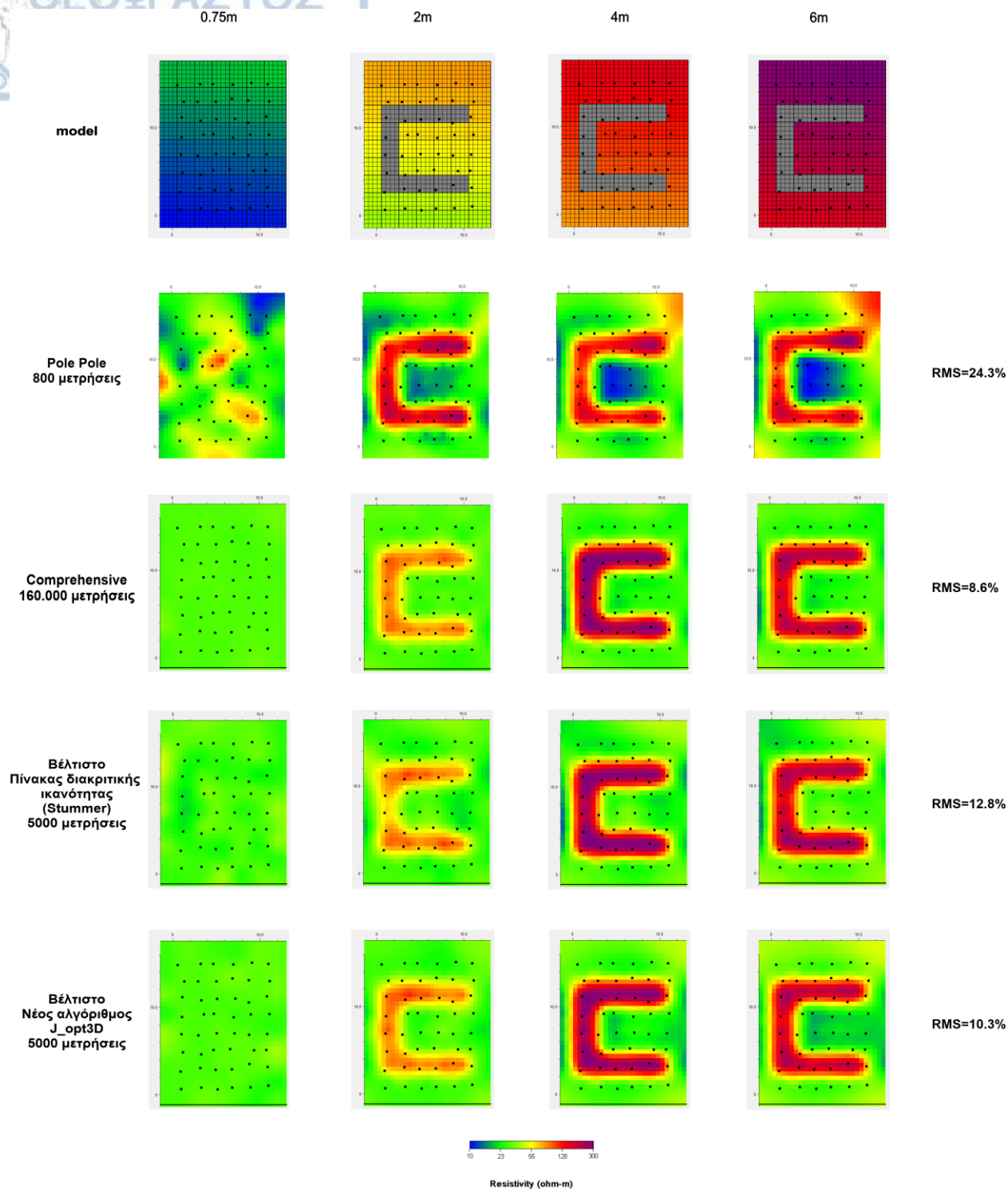
Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 1^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ.



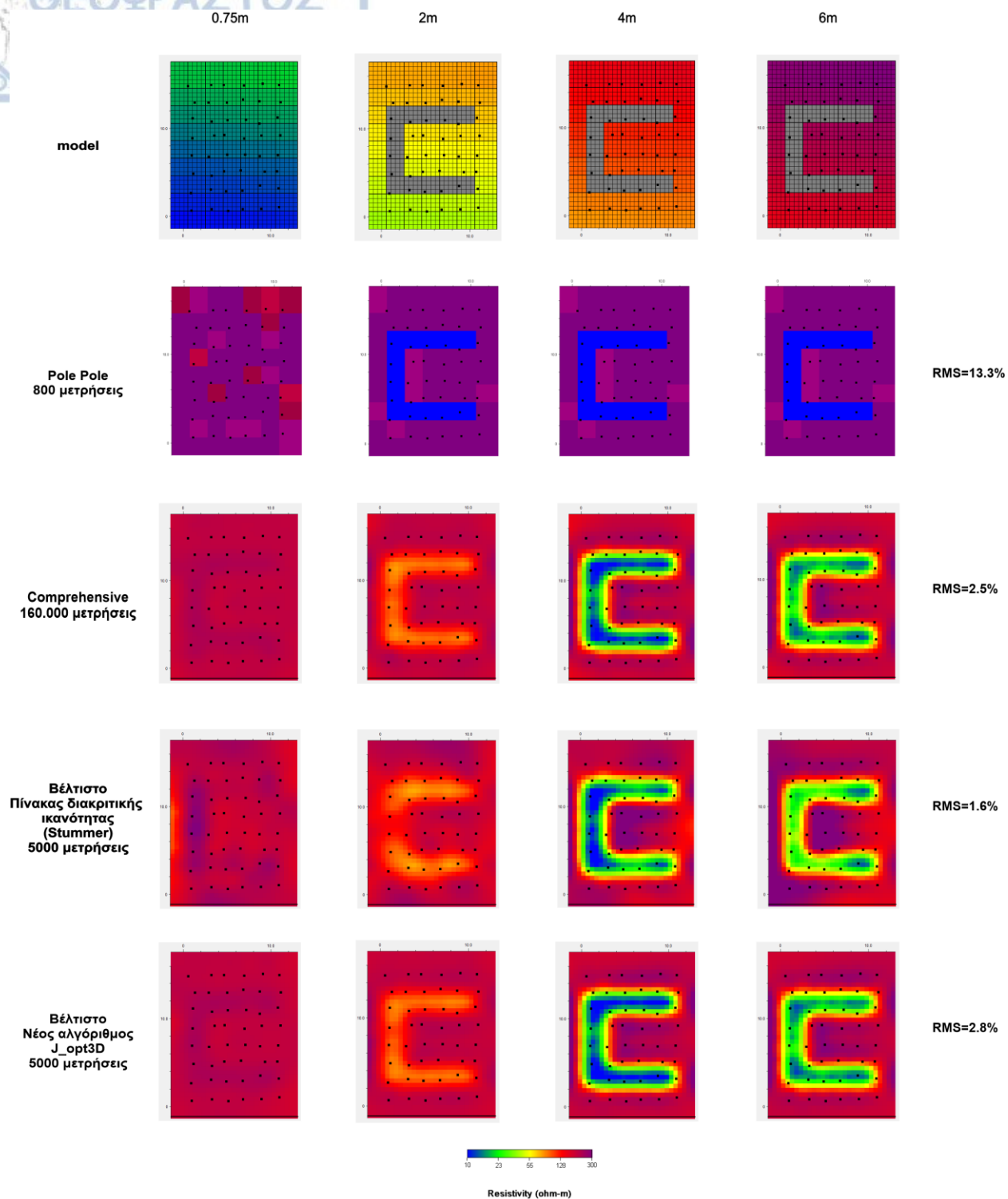
Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 2^{ov} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ.



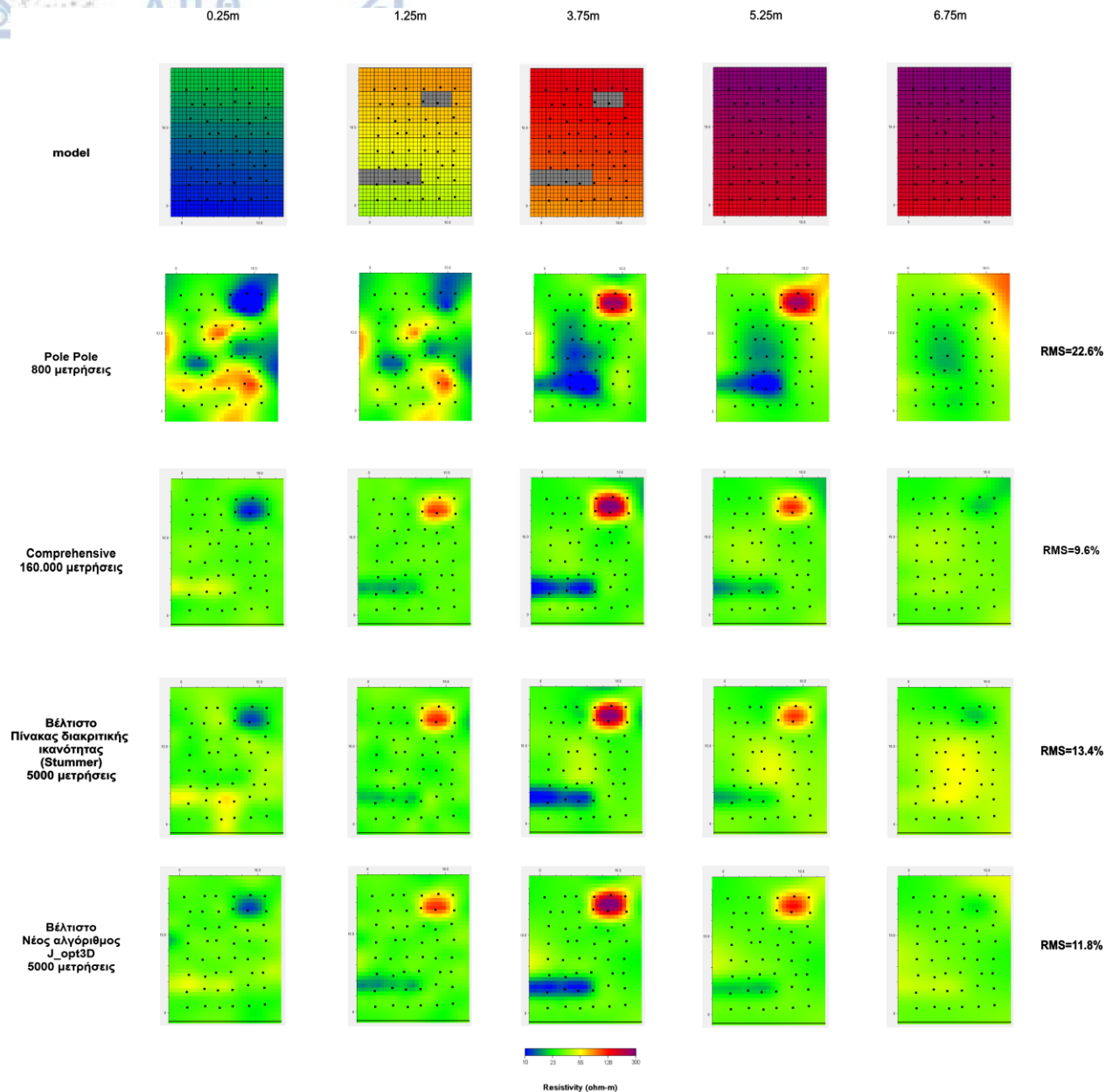
Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 3^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ.



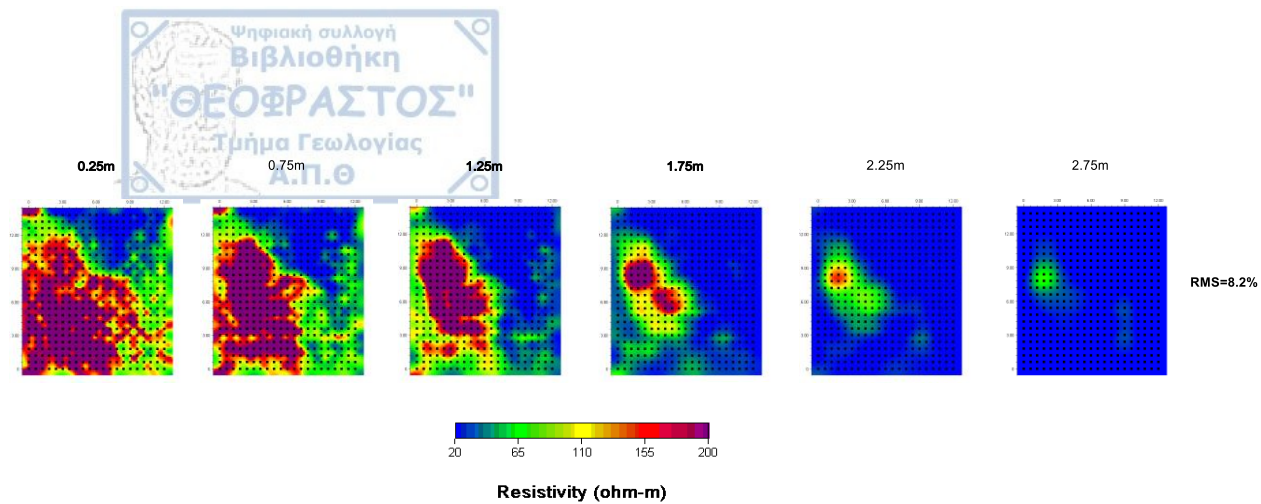
Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 1^{ov} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ για ηλεκτρόδια με τυχαίες θέσεις.



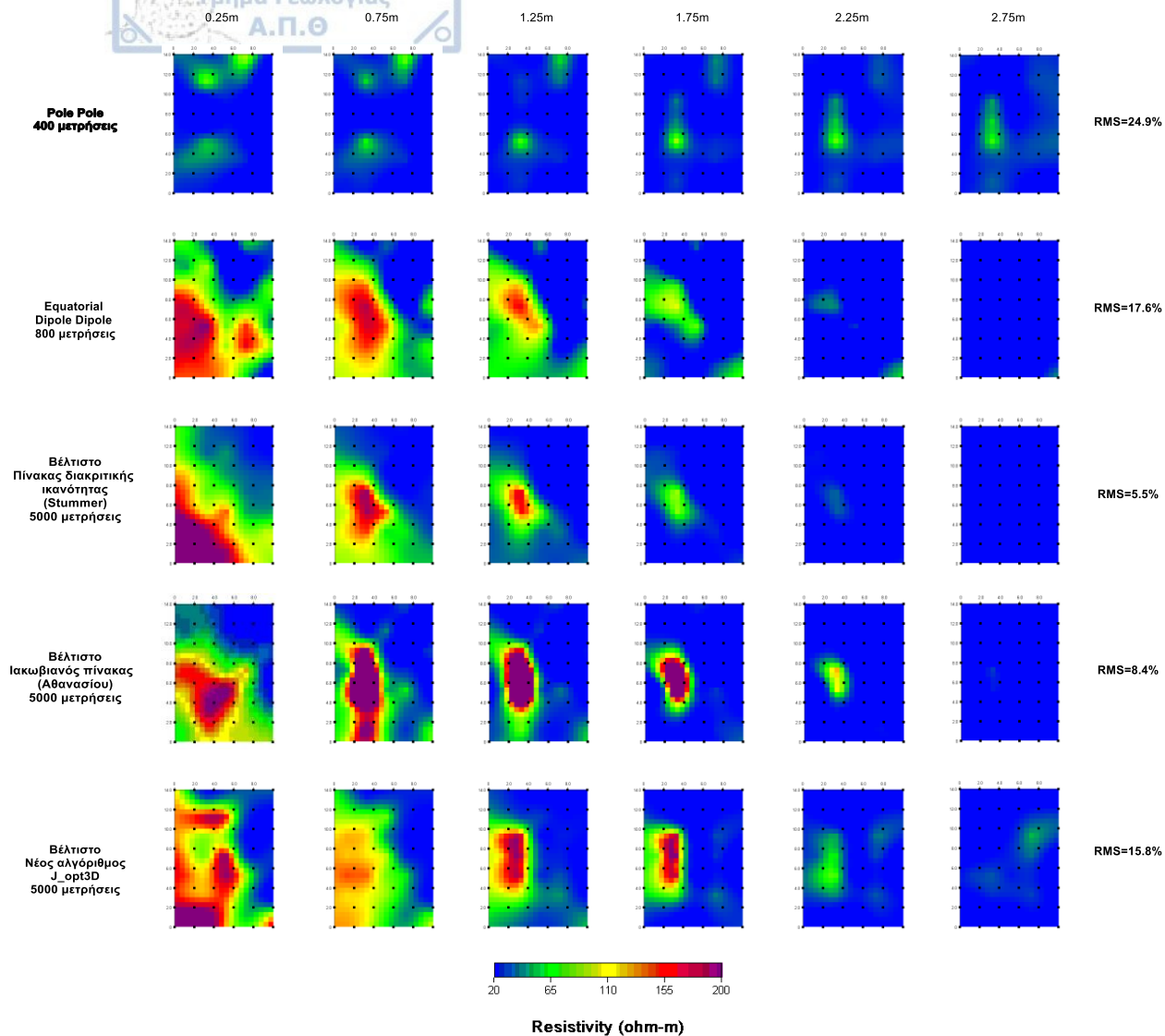
Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 2^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ για ηλεκτρόδια με τυχαίες θέσεις.



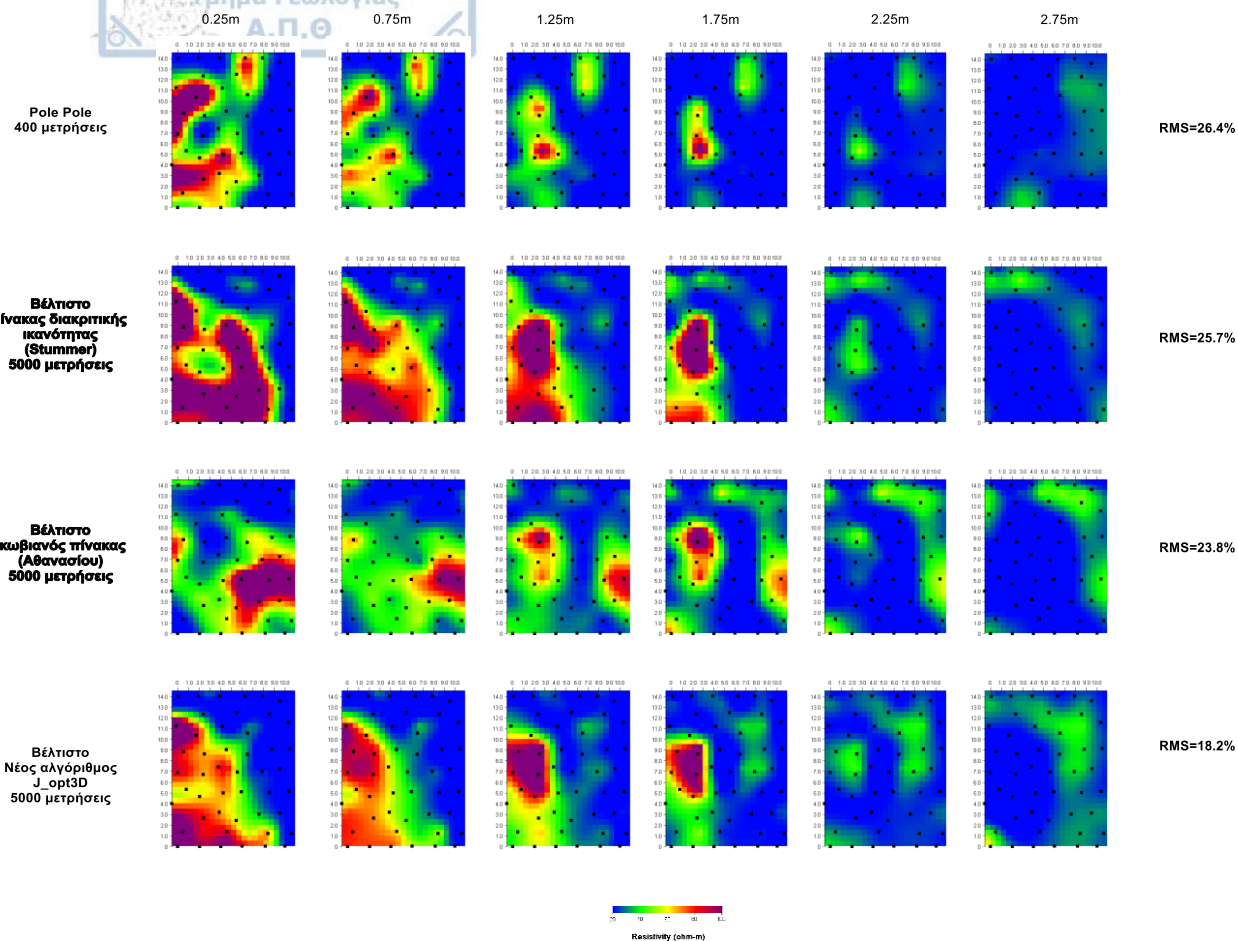
Αποτελέσματα αντιστροφής συνθετικών δεδομένων του 3^{ου} μοντέλου με τη διάταξη πόλου πόλου, τα βέλτιστα πρωτόκολλα καθώς και με το πλήρες σετ για ηλεκτρόδια με τυχαίες θέσεις.



Αποτελέσματα αντιστροφής μετρήσεων πεδίου τη χρήση πολλαπλών 2D τομογραφιών.



Αποτελέσματα αντιστροφής μετρήσεων πεδίου τη χρήση βέλτιστων πρωτοκόλλων καθώς και με τις διατάξεις πόλου πόλου και τετραγωνική.



Αποτελέσματα αντιστροφής μετρήσεων πεδίου τη χρήση βέλτιστων πρωτοκόλλων καθώς και με τη διάταξη πόλου πόλου για τυχαίες θέσεις ηλεκτροδίων



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abramowitz M and Stegun I. (1972) Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs and Mathematical Tables *U.S. Department. of Commerce, Washington, D.C :*

Aizebeokhai, P.A (2010). 2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design. *Scientific Research and Essays Vol. 5(23), pp. 3592-3605*

Chávez R.E., Cifuentes-Nava G.C, Tejero A, Hernandez-Quintero J.E, Vargas D. (2014). Special 3D electric resistivity tomography (ERT) array applied to detect buried fractures on urban areas: San Antonio Tecómitl, Milpa Alta, México

Iqbal, R.Z (2008). Computation of nodes and weights of Gaussian quadrature rule by using Jacobi's method. *Master Thesis, University of Birmingham*

Kearey P., Brooks M. Hill I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration *John Wiley & Sons, Ltd*

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

Loke, M.H and Barker, R.D. (2006). Practical technique for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting 44(3):499 - 523*

Loke, M. H., Wilkinson, P. B., Uhlemann, S. S., Chambers, J. E. and Oxby, L. S. (2014). Computation of optimized arrays for 3-D electrical imaging surveys *Geophysical Journal International 199, 1751-1764*

Loke, M.H., Kiflu, H., Wilkinson, P.B., Harro, D, Kruse, S. (2015). Optimized arrays for 2D resistivity surveys with combined surface and buried arrays *Near Surface Geophysics vol 13, 505-517.*

McGillivray P. and Oldenburg D. (1990). Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the Non-linear inverse problem: A comparative study. *Geophysical Prospecting, 38, 499-524.*

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

Milsom J. (2011) Field Geophysics *John Wiley & Sons, Ltd*

Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Papazachos, C., Tsokas, G.N., Sarris, A., and Kim, J.H. 2011. An algorithm for fast 3D inversion of surface ERT data: Application on imaging buried antiquities. *Geophysical Prospecting 59, 557-575.*

Tejero-Adrande, A, Cifuentes-Nava, G. Chavez, R (2015) L- and Corner-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones *Near Surface Geophysics 13(4):355-367*

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

Tsourlos P. I Inversion of Electrical Resistivity Tomography Data Deriving from 3D Structures. *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXVI, 2004

Tsourlos P.I and Ogilvy R.D. (1998). An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarisation data: Preliminary results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, Vol 2, No. 2: 30-45.

Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Lelliott, M., Wealthall, G.P., Ogilvy, R.D. (2008). Extreme sensitivity of crosshole electrical resistivity tomography measurements to geometric factors. *Geophysical Journal International*, 173, 49-62.

Wilkinson P.B. Loke M.H, Meldrum P.I, Chambers J.E, Kuras O., Gunn, D.A, Oligvy R.D. (2012). Practical aspects of applied optimized survey design for electrical resistivity tomography. *Geophysical Journal International*, 189, 428-440.

Σιμυρδάνης Κ. (2013). Ανάπτυξη τομογραφικών γεωφυσικών τεχνικών για τη μελέτη γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων, *Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

Αθανασίου Ε. (2009). Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη βέλτιστη στρατηγική μέτρησης και αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, *Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

Παπαζάχος Β.Κ (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη. *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη*