



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΑΚΗ ΗΛΙΑΝΑ

Γεωλόγος

*Διερεύνηση βέλτιστων διατάξεων
μετρήσεων ηλεκτρικής
τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων*

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2016

Διερεύνηση βέλτιστων διατάξεων μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού
Προγράμματος
Σπουδών 'Γεωλογία και Γεωπεριβάλλον'
Τομέας Γεωφυσικής
Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης : 18 Ιανουαρίου 2016

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°
© Παπαθανασάκη Ηλιάννα, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

ΤΣΟΥΡΛΟΣ Παναγιώτης, Καθηγητής ΑΠΘ (Επιβλέπων)
ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ
(Μέλος)
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Νίκος, Ερευνητής Γ', ΙΤΕ (Μέλος)

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου 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 ΑΠΘ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερεύνηση βέλτιστων διατάξεων μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων

Παπαθανασάκη Ηλιάννα

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα
Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής

Στην παρούσα διατριβή γίνεται μελέτη της μεθόδου της ηλεκτρικής διασκόπησης και συγκεκριμένα διερευνώνται οι βέλτιστες διατάξεις μετρήσεων για ηλεκτρική τομογραφία με ηλεκτρόδια που είναι τοποθετημένα σε δυο γεωτρήσεις συγκεκριμένων αποστάσεων η μία από την άλλη.

Τα βέλτιστα πρωτοκόλλα που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν συνθετικές μετρήσεις για συγκεκριμένα μοντέλα υπεδάφιας αντίστασης και αποστάσεις γεωτρήσεων και τέλος τα συνθετικά δεδομένα υποβλήθηκαν στη διαδικασία της αντιστροφής. Η παραπάνω διαδικασία εκτελέστηκε τόσο για στατικά όσο και για διαχρονικά μοντέλα αντίστασης.

Η ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της αντιστροφής σε σχέση με τα πρωτότυπα μοντέλα επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη σχετική απόδοση των πρωτοκόλλων. Ειδικότερα, το πλήρες πρωτόκολλο έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ενώ συγκρίσιμα αποτελέσματα έδωσε και το βέλτιστο πρωτόκολλο αλλά με υποπολλαπλάσιο αριθμό μετρήσεων σε σχέση με το πλήρες.

Λέξεις Κλειδιά: ηλεκτρική τομογραφία, γεωτρήσεις, ευθύ πρόβλημα, γεωηλεκτρική αντιστροφή, διαχρονική μελέτη.

ABSTRACT

Comparative study of optimum electrical resistivity tomography arrays for cross-hole measurements.

Papathanasaki Iliana

**Aristotle University of Thessaloniki, Faculty of Sciences, School of Geology,
Department of Geophysics**

In the present thesis we study the method of electrical prospecting and in particular the application of optimized measurement schemes for cross-borehole electrode arrangement. The optimum protocols we used were calculated using the Jacobian matrix method. For all tested protocols the forward modeling calculations were performed for several subsurface resistivity models and different cross-borehole distances. The produced synthetic data were subjected to inversion for both static and time-lapse geoelectrical models.

The qualitative and quantitative comparison of the inversion results with respect to the original models used to produce the synthetic data made it possible to draw conclusions about the relative performance of protocols. In particular, the comprehensive protocol gave the best results while good quality results were also obtained using the optimum protocol but with significant less measurements compared to the comprehensive protocol.

Key Words: electric resistivity tomography, cross-holes, immediate problem, inversion, time-lapse.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Τσούρλο, Καθηγητή Γεωφυσικής, για τις συμβουλές του, την καθοδήγηση του και την ουσιαστική στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής.

Ευχαριστώ τον κ. Βαργεμέζη Γεώργιο, Αναπληρωτή Καθηγητή, για τη συνεχή του καθοδήγηση και προσφορά του στην απόδοση του βέλτιστου αποτελέσματος.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Παπαδόπουλο Νίκο, ερευνητή Γ του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας, ο οποίος πέρα από τις γνώσεις που μου έχει μεταδώσει κατά το παρελθόν, βοήθησε ουσιαστικά στην εύρεση κατάλληλης έκδοσης λογισμικού επεξεργασίας των δεδομένων μου, χωρίς την οποία θα ήταν αρκετά δύσκολη η ολοκλήρωση της διατριβής μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία πίστεψε στις δυνάμεις μου και στάθηκε αρωγός στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο – Σκοπός Διατριβής	7
1.2 Μεθοδολογία	8
1.3 Δομή διατριβής	8

2. ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

2.1 Περίληψη	10
2.2 Ηλεκτρικές διασκοπήσεις	11
2.3 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ομογενή γη	12
2.4 Μέθοδος της ειδικής αντίστασης	15
2.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων	16
2.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων για διασκοπήσεις μεταξύ γεωτρήσεων	18
2.7 Θεωρία γεωφυσικής αντιστροφής	19
2.8 Ιακωβιανός Πίνακας	22

3. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

3.1 Περίληψη	25
3.2 Αλγόριθμος OPTCROS3	26
3.3 Παραγωγή συνθετικών δεδομένων και αντιστροφή	28
3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων παρουσίασης	32

4. ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ (TIME-LAPSE)

4.1 Περίληψη	56
4.2 Δημιουργία ενιαίου μοντέλου και εισαγωγή χρόνου	57
4.3 Αντιστροφή 4D αρχείου	59
4.4 Διαχρονική μελέτη των μοντέλων	64

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80
--------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ-ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η ηλεκτρική μέθοδος βασίζεται στη μελέτη ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και έχει πολλές εφαρμογές σε τομείς όπως η αρχαιολογία (Sarris et al. 2005, Papadopoulos and Sarris 2011) και η υδρογεωλογία (Tsourlos et al., 2005).

Τυπικά στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται επιφανειακές διατάξεις, οι οποίες όμως έχουν πολύ μικρή ευαισθησία και χαμηλή διακριτική ικανότητα σε μεγάλα βάθη. Γι' αυτό τον λόγο, για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, πλέον χρησιμοποιείται μια διαδομένη πρακτική. Τοποθετούνται ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις για βελτιωμένη διακριτική ικανότητα με το βάθος.

Ωστόσο, για επιφανειακές μετρήσεις υπάρχουν τυπικές διατάξεις αλλά για την περίπτωση μετρήσεων μεταξύ γεωτρήσεων δε συμβαίνει το ίδιο, ώστε είναι αναγκαία η μελέτη διατάξεων μέτρησης μεταξύ γεωτρήσεων.

Στη γεωηλεκτρική έρευνα είναι διαδεδομένη η εφαρμογή μεθόδων για την εύρεση βέλτιστων διατάξεων οι οποίες και απεικονίζουν τις υπεδάφειες δομές με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ανάμεσα στις διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης μετρήσεων η βελτιστοποίηση με χρήση Ιακωβιανού Πίνακα είναι σχετικά απλή και παράγει πολύ καλά αποτελέσματα σε δοκιμές που έγιναν για επιφανειακές μετρήσεις.

Έτσι αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας βέλτιστων διατάξεων με τη μέθοδο του Ιακωβιανού Πίνακα για μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων καθώς και η επέκταση της μελέτης για την περίπτωση διαχρονικών δεδομένων.

Η μελέτη βασίζεται στην παραγωγή συνθετικών δεδομένων για διαφορετικά μοντέλα και την αντιστροφή τους ώστε το αποτέλεσμα να συγκριθεί με τις αρχικές δομές.

1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση των στόχων της διατριβής είναι η ακόλουθη:

- Μελέτη βιβλιογραφίας. Μελετήθηκαν εργασίες για την ηλεκτρική τομογραφία και τις εφαρμογές της για την συλλογή γεωηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων μεταξύ και μέσα σε γεωτρήσεις.
- Μελέτη ενός υφιστάμενου αλγορίθμου (OPTCROS3, P. Tsourlos © 2014) και επεξεργασία για παραγωγή πρωτοκόλλων για μοντέλα διαφορετικών δομών και αντιστάσεων, αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 μέτρων με διαφορετικά clusters και flags(συνδυασμοί και δείκτες αντίστοιχα).
- Κατασκευή διαφορετικών γεωηλεκτρικών μοντέλων, καθορισμός γεωμετρίας και πρωτοκόλλου μέτρησης, υπολογισμός απόκρισης μοντέλου και υπολογισμός συνθετικών φαινόμενων αντιστάσεων, αντιστροφή συνθετικών δεδομένων για την ανακατασκευή του υπεδάφιου γεωηλεκτρικού μοντέλου, σύγκριση του μοντέλου αντιστροφής με το αρχικό μοντέλο.
- Διαχρονική μελέτη αγωγιμίου και μη αγωγιμίου σώματος ως προς τα διαφορετικά clusters και flags.

1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της θεωρίας της ηλεκτρικής μεθόδου γεωφυσικής διασκόπησης και αναλυτικότερα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Γίνεται επιπλέον ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου που στηρίζει την διαδικασία της επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται το πρωτόκολλο για τη λήψη των συνθετικών δεδομένων. Μετά από εφαρμογή του για διάφορα γεωμετρικά μοντέλα, παράγονται συνθετικά δεδομένα, δηλαδή συνθετικές φαινόμενες ηλεκτρικές αντιστάσεις. Μετά από αντιστροφή αυτών γίνεται ποιοτική σύγκριση με τα αρχικά μοντέλα και παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης για κάθε ένα, ώστε να υπάρχει και ποσοτική σύγκριση για διεξαγωγή καλύτερων συμπερασμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται διαχρονική μελέτη των μοντέλων. Αρχικά σε κάθε τομογραφία που έχει προκύψει από την αντιστροφή των συνθετικών μετρήσεων, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, γίνεται εισαγωγή της τέταρτης διάστασης, του χρόνου, και στη συνέχεια μετά από αντιστροφή όλων των τομογραφιών 4 διαστάσεων παράγεται ολοκληρωμένο μοντέλο για κάθε χρονική στιγμή. Στη συνέχεια γίνεται ποιοτική σύγκριση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν στην παρούσα διατριβή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

2.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λεπτομερής περιγραφή της ηλεκτρικής μεθόδου γεωφυσικής διασκόπησης και γίνεται περιγραφή των βασικών αρχών της θεωρίας της ηλεκτρικής αντίστασης.

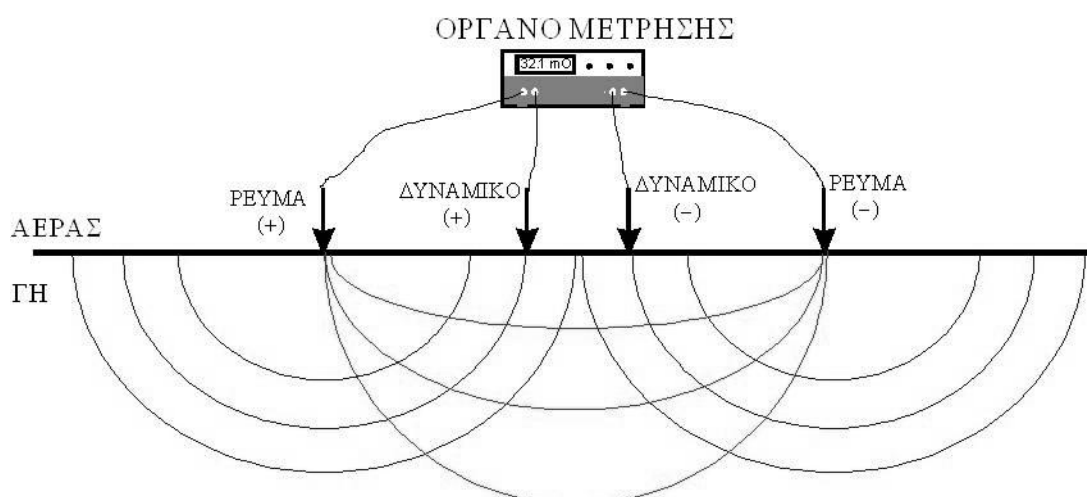
Αρχικά, περιγράφεται η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στη γη και ο υπολογισμός της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται για το υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης και παρουσιάζονται οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων.

Στη συνέχεια γίνεται εκτενής περιγραφή του Ιακωβιανού πίνακα και της λειτουργίας του ως προς τη λήψη βελτιστοποιημένων μετρήσεων.

2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ

Κατά την εφαρμογή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης γίνεται διαβίβαση συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος έντασης (I) στη γη με δύο ηλεκτρόδια (Α) και (Β) (σχήμα 2.2.1) και μετράται η διαφορά δυναμικού V_{MN} μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού Μ,Ν που προκαλείται από την ροή αυτή του ρεύματος στο υπέδαφος. Η ηλεκτρική αντίσταση R του υπεδάφους προκύπτει από το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού V_{MN} προς την ένταση του ρεύματος I . (Παπαζάχος 1986):

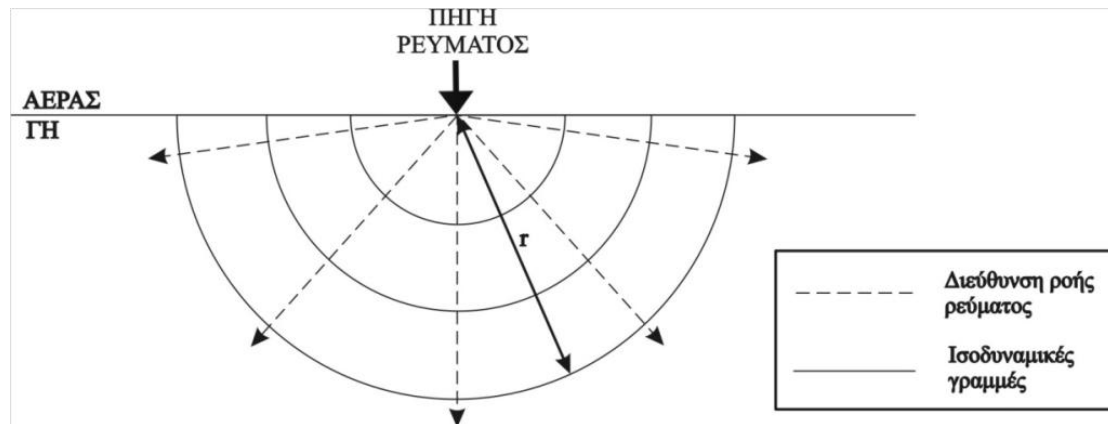
$$R = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (1)$$



Σχήμα 2.2.1: Βασική διάταξη ηλεκτροδίων στην ηλεκτρική διασκόπηση.
(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>)

2.3 ΡΟΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΓΗ

Η γη και ιδιαίτερα τα ανώτερα στρώματα του φλοιού της είναι ανομοιογενή. Όμως, προκειμένου να γίνει κατανοητή η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στα ανομοιογενή στρώματα πρέπει πρώτα να μελετηθεί η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ομογενές υπέδαφος.



Σχήμα 2.3.1: Εισάγεται ρεύμα σε ομογενές έδαφος όπου η πυκνότητα συμπίπτει με την κατεύθυνση του ρεύματος, έχει την κατεύθυνση των ακτίνων των κύκλων κέντρου πηγής, ενώ οι περιφέρειες των κύκλων παριστάνουν τις ισοδυναμικές γραμμές. (<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>)

Όταν το έδαφος είναι ομογενές και ισότροπο, το ρεύμα που εισέρχεται σε αυτό μέσω μιας πηγής (θετική) που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης, ρέει ακτινικά διερχόμενο από ένα ημισφαίριο όπου r είναι η απόσταση της περιφέρειας του ημισφαιρίου από το σημείο εισαγωγής του ρεύματος.

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες έχουν σχήμα ημισφαιρίου και οι γραμμές του ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες (σχήμα 2.3.1). Αν S το εμβαδόν του ημισφαιρίου και i είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος τότε η πυκνότητα ρεύματος J , που διαρρέει κάθετα το ημισφαίριο, δίνεται από τη σχέση:

$$J = \frac{i}{S} \quad (2)$$

Η πυκνότητα του ρεύματος J και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E συνδέονται μέσω του νόμου του Ohm με τη σχέση:

$$J = \sigma \cdot E \Rightarrow J = \frac{1}{\rho} \cdot E \quad (3)$$

όπου η ένταση του πεδίου E μετράται σε Volt /m, η πυκνότητα ρεύματος J σε Amp/m² και η αγωγιμότητα σε Siemens /m.

Αν V είναι το δυναμικό στην επιφάνεια του ημισφαιρίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια αυτή θα είναι:

$$E = \frac{dV}{dr} \quad (4)$$

Συνεπώς, η πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια του ημισφαιρίου, δηλαδή σε απόσταση r από τον πόλο θα είναι:

$$J = - \rho \frac{dV}{dr} \quad (5)$$

Από τις σχέσεις (2), (4) και (5) προκύπτει ότι:

$$dV = - \frac{\rho i}{S} dr \quad (6)$$

$$V = - \rho i \int_{\infty}^r \frac{dr}{S} \quad (7)$$

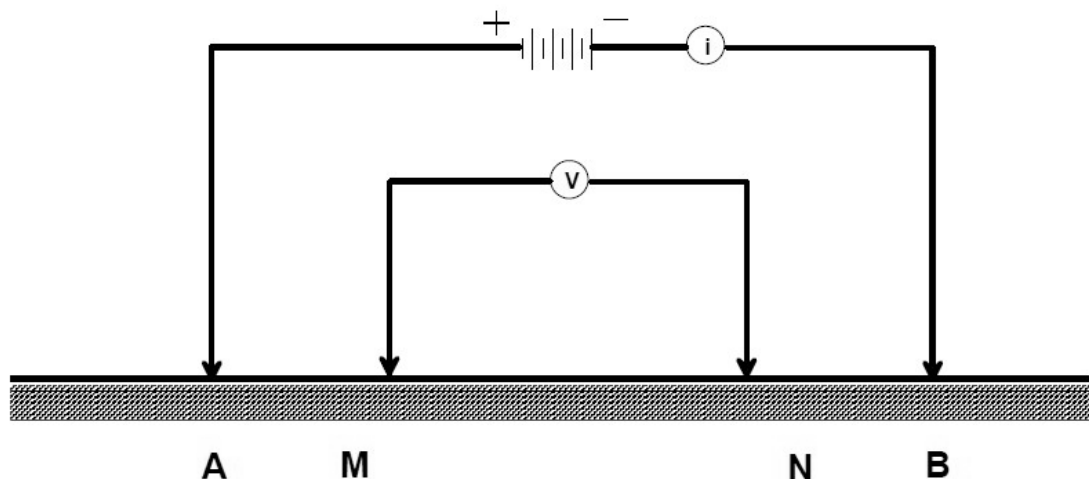
Με την ολοκλήρωση της σχέσης (7) προκύπτει ότι το δυναμικό που προκαλεί η πηγή ρεύματος σε απόσταση r από αυτή, όταν αυτή βρίσκεται στην επιφάνεια της γης και το έδαφος είναι ομογενές, είναι:

$$V = \frac{\rho i}{2\pi r} \quad (8)$$

Όταν η σημειακή πηγή δε βρίσκεται στην επιφάνεια αλλά μέσα στο ομογενές έδαφος τότε η σχέση (8) γίνεται:

$$V = \frac{\rho i}{4\pi r} \quad (9)$$

Στην πράξη χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια για να γίνει μέτρηση της αντίστασης ενός ημιχώρου. Τα δύο από αυτά χρησιμεύουν για την εισαγωγή και κυκλοφορία του ρεύματος (A και B), ενώ με τη βοήθεια των άλλων μετράμε τη διαφορά δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία (M και N).



Σχήμα 2.3.2: Βασική διάταξη 4 ηλεκτροδίων (<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>)

Έστω ότι AM είναι η απόσταση του ηλεκτροδίου M από το ηλεκτρόδιο A, BM από το ηλεκτρόδιο B και AN και BN οι αντίστοιχες αποστάσεις του ηλεκτροδίου N από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος (σχήμα 2.3.2).

Τότε, σύμφωνα με τη σχέση (8), η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων A και B για έναν ομογενή ημιχώρο με αντίσταση ρ και για μια διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, είναι:

$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (10)$$

Επομένως, η αντίσταση του ομογενούς ημιχώρου μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\rho = \frac{2\pi V}{iK} \quad (11)$$

Στην γενική περίπτωση που όλα ή κάποια από τα ηλεκτρόδια βρίσκονται μέσα στο έδαφος (π.χ. εγκατεστημένα μέσα σε γεωτρήσεις) ο γεωμετρικός παράγοντας K της σχέσης (10) θα πρέπει να λάβει υπ' όψιν του και τις θέσεις των ειδώλων A' και B' των ηλεκτροδίων ρεύματος A και B αντίστοιχα, ως προς την επιφάνεια του εδάφους:

$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{B'N} \right) \quad (12)$$

2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης είναι η πιο διαδεδομένη της ηλεκτρικής διασκόπησης και ανήκει σε εκείνες όπου το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται με τεχνητό τρόπο. Ο σκοπός της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ανάγεται στον προσδιορισμό της δομής του υπεδάφους, η οποία διαμορφώνει τις ιδιότητες του πεδίου.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, πραγματοποιούνται μετρήσεις της έντασης του ρεύματος I και της διαφοράς δυναμικού V που παράγεται με στόχο τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

Όμως δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης ρ , καθώς αυτή είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής τους υπεδάφους και της γεωμετρίας της μέτρησης μας. Γι αυτό υπολογίζεται αρχικά μια ανύπαρκτη ποσότητα, η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a , για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της γεωμετρίας.

2.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Οι πιο γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούμε στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις είναι (σχήμα 2.5.1). :

Wenner: $\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{i}$

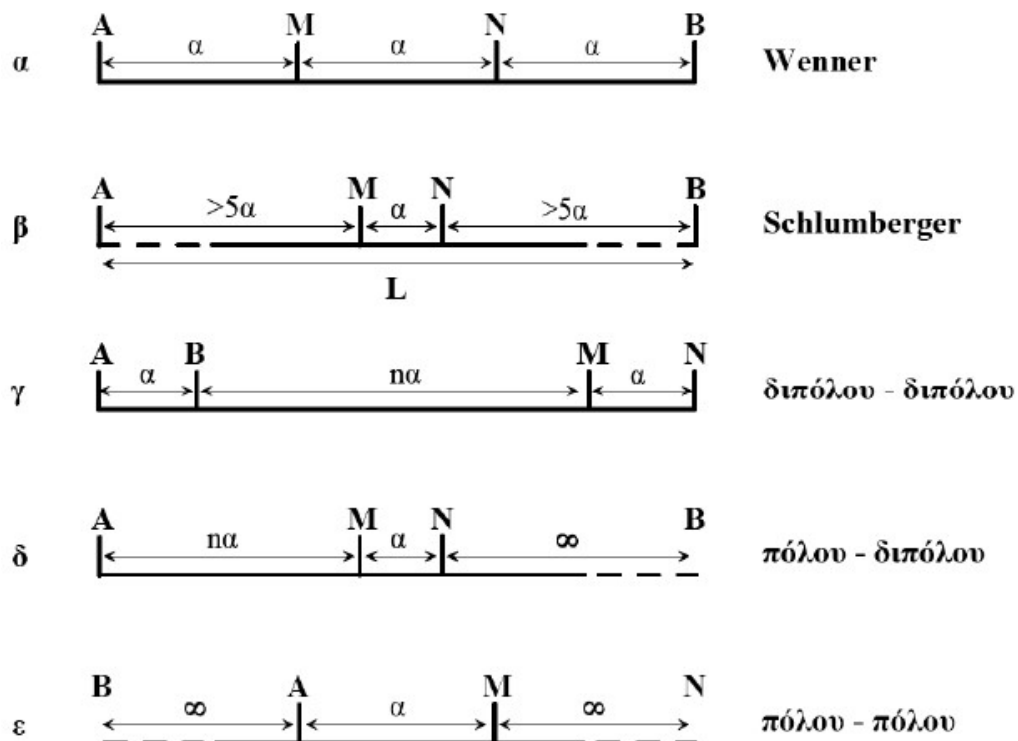
Schlumberger: $\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2\alpha} \cdot \frac{\Delta V}{i}$

Διπόλου-διπόλου: $\rho_{\alpha} = 2\pi n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{i}$

Πόλου-διπόλου: $\rho_{\alpha} = 2\pi n(n+1)\alpha \frac{\Delta V}{i}$

Πόλου-πόλου: $\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{i}$

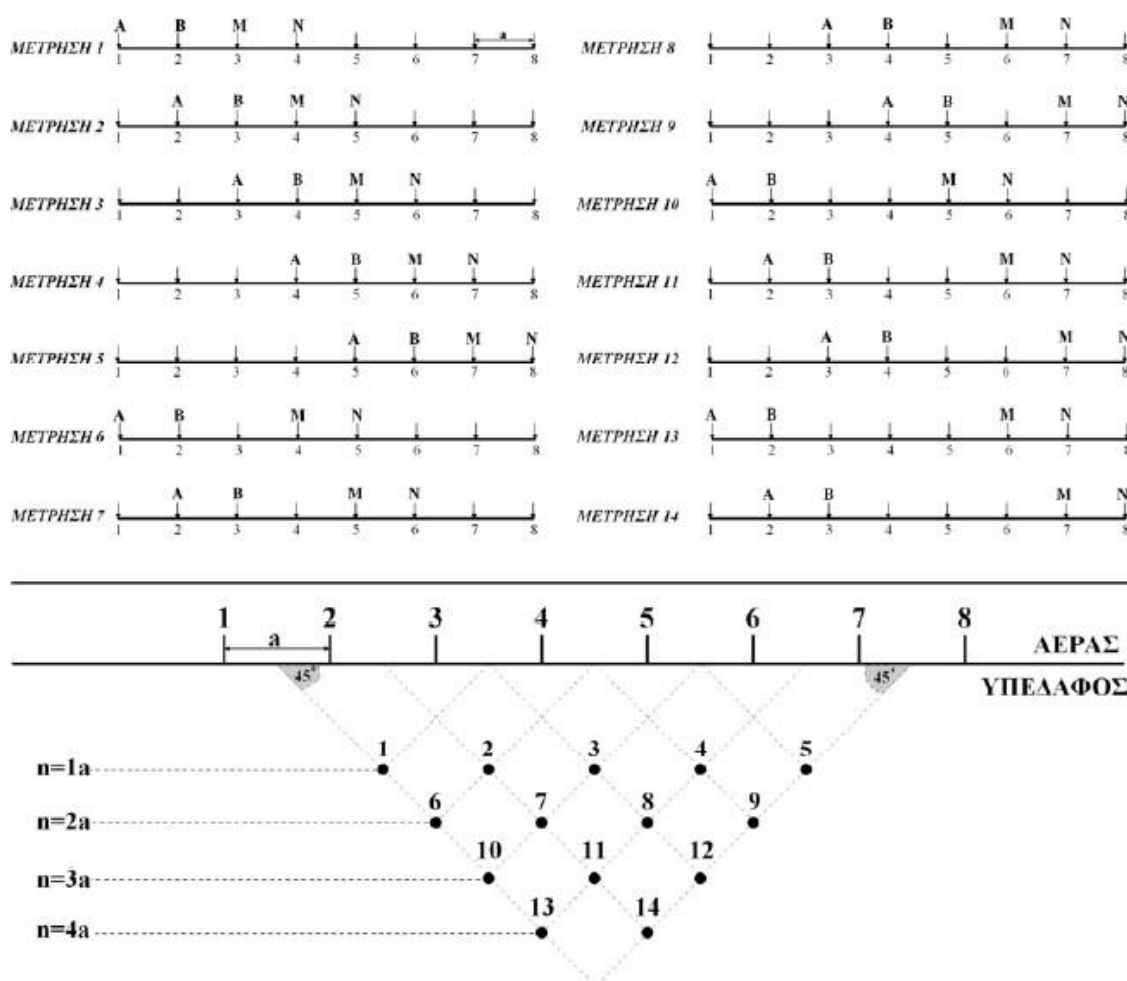
Όπου α ή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και n φυσικός αριθμός 1,2,3,4....



Σχήμα 2.5.1: Οι πιο γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων στην ηλεκτρική διασκόπηση

Για να έχουμε τη καλύτερη δυνατή εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, συχνά κρίνεται απαραίτητος ο συνδυασμός των διαφόρων διατάξεων της ηλεκτρικής διασκόπησης, καθώς η ερμηνεία θα είναι πιο αξιόπιστη (Αθανασίου, 2003).

Όσον αφορά στις μεθόδους έρευνας, μπορεί να γίνει επιλογή βυθοσκόπησης, οριζοντιογραφίας ή ηλεκτρικής τομογραφίας. Η τελευταία αποτελεί συνδυασμό των δυο πρώτων. Παρέχει δηλαδή πληροφορίες τόσο στη πλευρική όσο και στη κατακόρυφη μεταβολή. Έτσι προκύπτει μία δισδιάστατη εικόνα των αντιστάσεων της υπό εξέτασης περιοχής (σχήμα 2.5.2).



Σχήμα 2.3.2: Μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας διάταξης διπόλου-διπόλου με 8 ηλεκτρόδια και με $n=4$ (Τσούρλος, 1995)

2.6 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Η μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων (cross-hole DC), στην οποία ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα μέσα σε δύο απομακρυσμένες μεταξύ τους γεωτρήσεις, είναι ικανή να δώσει λεπτομερείς πληροφορίες για τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ των δύο γεωτρήσεων (Zhou και Greenhalgh, 2000), καθώς με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να έχουμε υψηλότερη ευκρίνεια σε μεγαλύτερα βάθη σε σχέση με τις διατάξεις στην επιφάνεια του εδάφους.

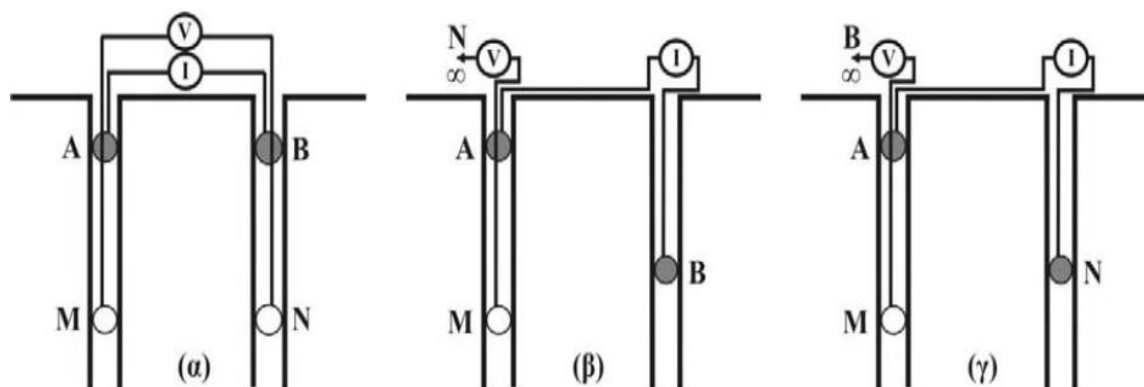
Μελέτες έχουν δείξει (Zhou και Greenhalgh, 1997) ότι υπάρχουν έξι ανεξάρτητοι συνδυασμοί μεταξύ γεωτρήσεων με διατάξεις πόλου-διπόλου ή διπόλου-πόλου και τρεις με διατάξεις διπόλου-διπόλου (σχήμα 2.6.1). Αυτές οι διατάξεις εντοπίζουν καλύτερα τους στόχους και έχουν καλύτερες δυνατότητες απεικόνισης μεταξύ δύο γεωτρήσεων από την διάταξη πόλου-πόλου (Zhou και Greenhalgh, 2000).

Διάταξη Ηλεκτροδίων	Σύνολο Δυνατών Διατάξεων	Σύνολο Ανεξάρτητων Διατάξεων	Ανεξάρτητες Διατάξεις	ρ_a διατάξεις με αδυναμία μέτρησης
Πόλου-Πόλου	2	1	A-M	
Πόλου-Διπόλου	12	6	AM-N, MA-N, MN-A, N-AM, N-MA, A-MN	A-MN, MN-A
Διπόλου-Πόλου	12	6	AM-B, MA-B, AB-M, B- AM, B-MA, M-AB	AB-M, M-AB
Διπόλου-Διπόλου	24	3	AM-BN, AM-NB, AB- MN	AB-MN, MN-AB

Ισοδύναμη Διάταξη: Πόλου-Διπόλου: AM-N, MA-N και MN-A= Διπόλου-Πόλου: MA-B, AM-B και AB-M

Σχήμα 2.4.1: Συνδυασμοί μεταξύ γεωτρήσεων για διάφορες διατάξεις (Zhou και Greenhalgh, 2000)

Οι Zhou και Greenhalgh (2000) μελέτησαν διάφορες διατάξεις δύο, τριών και τεσσάρων ηλεκτροδίων σε συνθετικά μοντέλα (σχήμα 2.6.2) και διαπίστωσαν ότι, εκτός από τη διάταξη πόλου-πόλου, κάποιες διατάξεις τριών και τεσσάρων ηλεκτροδίων (AM-N, AM-B και AM-BN) μπορούν επίσης να εφαρμοσθούν με επιτυχία σε μετρήσεις γεώτρησης. Οι διατάξεις αυτές, συγκρινόμενες με τη διάταξη πόλου-πόλου, έχουν εμφανή πλεονεκτήματα όταν πρόκειται για μετρήσεις πεδίου με αποτέλεσμα να παράγουν αξιόπιστα γεωηλεκτρικά μοντέλα αντιστροφής (Zhou και Greenhalgh, 1997).

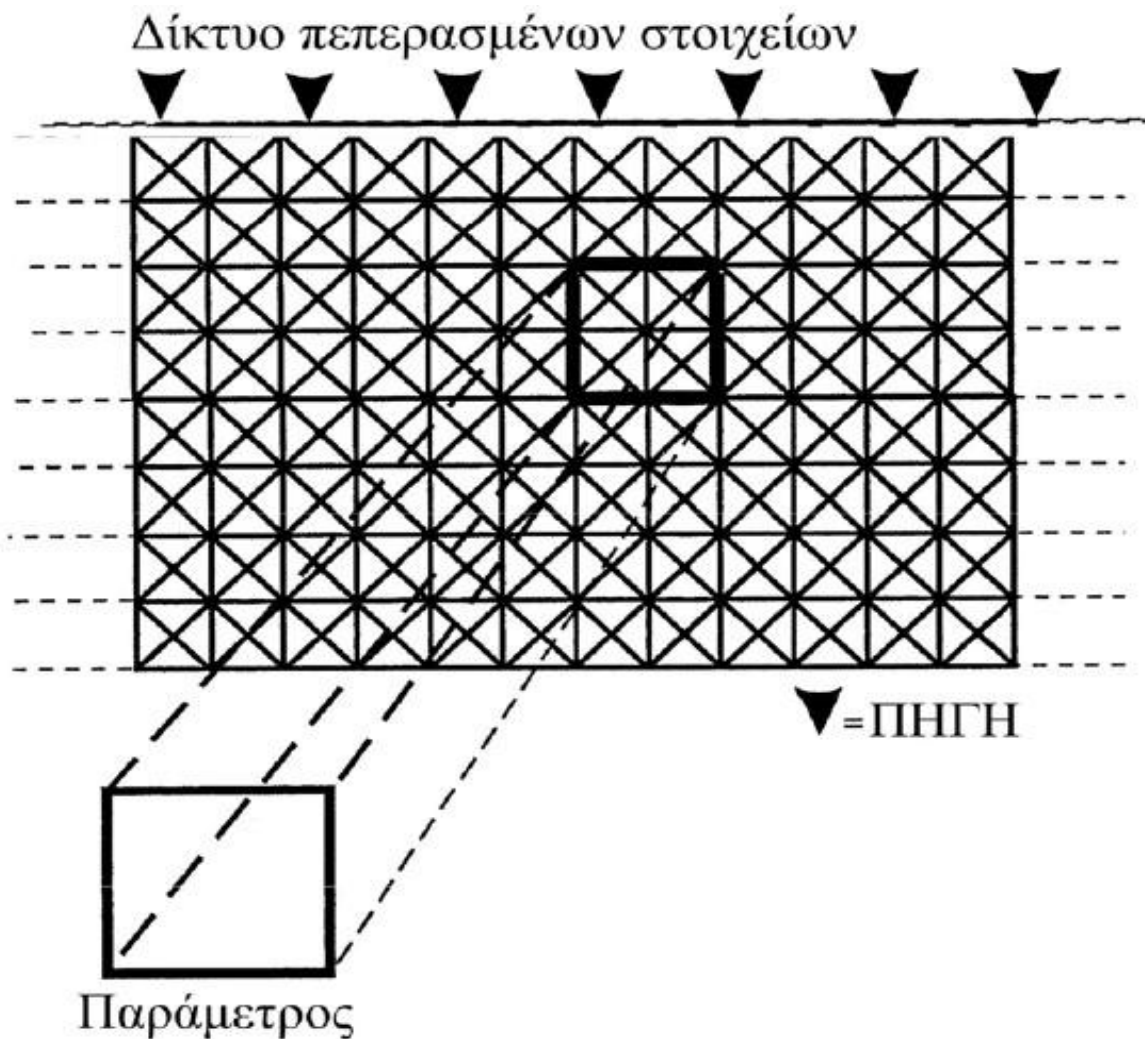


Σχήμα 2.6.2: Διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται μεταξύ γεωτρήσεων. (Zhou και Greenhalgh, 2000)

2.7 ΘΕΩΡΙΑ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

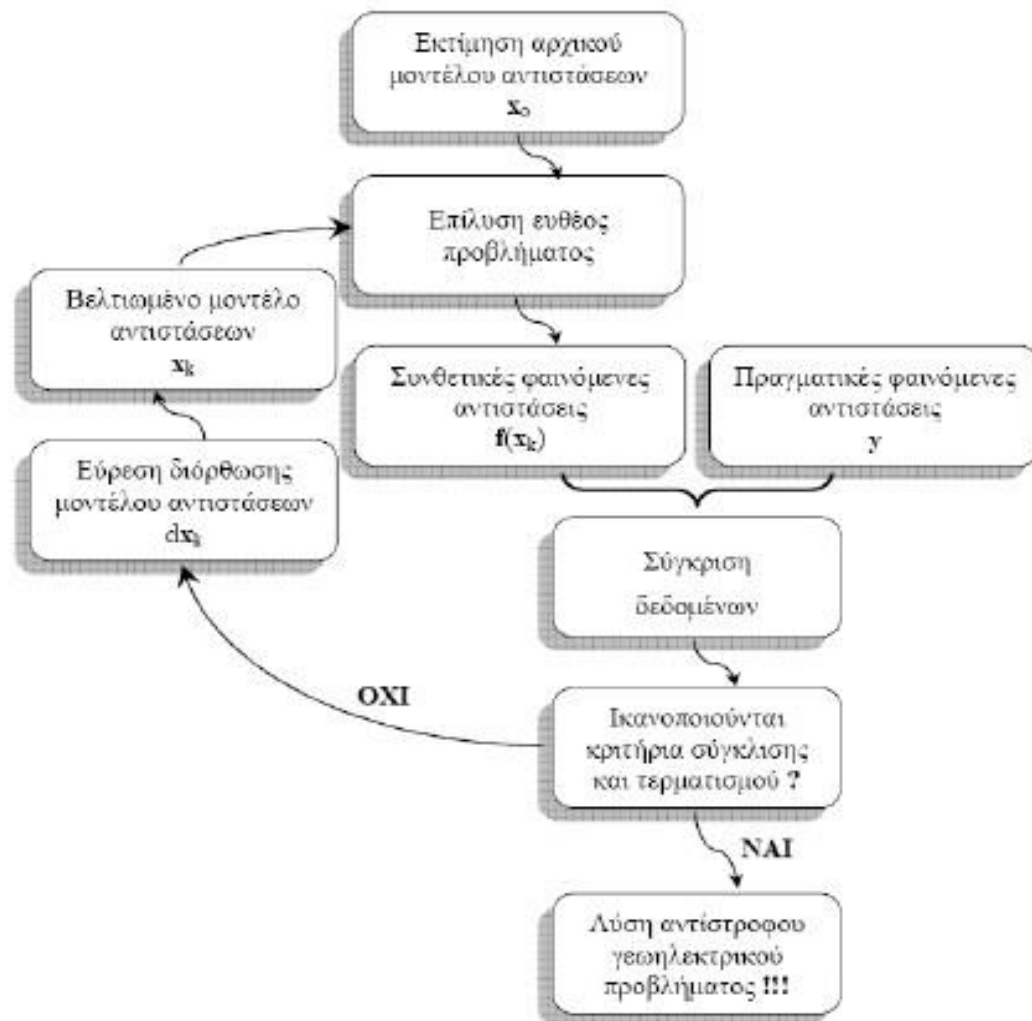
Η πιο γνωστή και αποτελεσματική τεχνική για την ανακατασκευή της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους από τις μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης, είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης, που να δίνει μετρήσεις από συνθετικά δεδομένα, οι οποίες είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση για αυτό είναι η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέος προβλήματος.

Στην επίλυση του ευθέος προβλήματος υπολογίζεται η φαινόμενη αντίσταση που θα προέκυπτε από τη διεξαγωγή μιας γεωφυσικής έρευνας, αν ήταν γνωστή η κατανομή της αντίστασης του υπεδάφους και η διάταξη των ηλεκτροδίων. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με τις αναλυτικές είτε με τις αριθμητικές μεθόδους. Με τη σειρά τους οι αριθμητικές μέθοδοι διακρίνονται σε μεθόδους ολοκληρωτικών εξισώσεων και διαφορικών μεθόδων. Από αυτές οι πιο γνωστές είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (σχήμα 2.7.1)., η οποία εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή, και των πεπερασμένων διαφορών.



Σχήμα 2.7.1: Παράμετρος όπως ορίζεται στα πλαίσια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Τσούρλος, 1995)

Η λύση του αντιστρόφου προβλήματος είναι ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία από αυτή του ευθέος προβλήματος. Η μέτρηση της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που προκύπτει από μια γεωφυσική έρευνα, αποσκοπεί στον προσδιορισμό της κατανομής της αντίστασης του υπεδάφους. Με κατάλληλο λογισμικό και σωστό χειρισμό γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων, ώστε τελικά προκύπτει ένα ακατέργαστο μοντέλο κατανομής των αντιστάσεων του υπεδάφους. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια, με διαδοχικές βελτιώσεις σφαλμάτων, να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης, που να δίνει μετρήσεις, οι οποίες είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. (σχήμα 2.7.2)



Σχήμα 2.7.2: Διάγραμμα ροής τυπικού αλγόριθμου επίλυσης μη γραμμικού αντιστρόφου γεωηλεκτρικού προβλήματος (Αθανασίου, 2004)

2.8 ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

Η κατανομή της αντίστασης αποτυπώνεται ως ένα σύνολο ομογενών παραμέτρων, όπου η τιμή της αντίστασης μιας παραμέτρου μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα από τις τιμές αντίστασης των άλλων παραμέτρων.

Στις περισσότερες μεθόδους αντιστροφής είναι απαραίτητη η χρήση ενός πίνακα, που ονομάζεται Ιακωβιανός πίνακας $\mathbf{J}$ και ο οποίος συνδέει τις μεταβολές των προηγούμενων παραμέτρων με τις μεταβολές των ιδιοτήτων των παρατηρούμενων μετρήσεων.

Αν n είναι ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος $\mathbf{p}$ της παραμέτρου του προβλήματος και m είναι ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος $\mathbf{d}$ των φαινόμενων αντιστάσεων, τότε ο Ιακωβιανός πίνακας έχει διαστάσεις $m \times n$ και το i, j στοιχείο του $\mathbf{J}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{J}_{ij} = \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial \rho_j} \quad (13)$$

όπου ρ_j είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της παραμέτρου ρ_j .

Ο Ιακωβιανός πίνακας είναι γνωστός και ως πίνακας ευαισθησίας, αφού εκφράζει την ευαισθησία των μετρήσεων της φαινόμενης αντίστασης σε μικρές μεταβολές των πραγματικών αντιστάσεων μιας παραμέτρου. Εάν τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι φαινόμενες αντιστάσεις ρ_{ai} , τότε η εξίσωση (13) μπορεί να γραφεί:

$$\mathbf{J}_{ij} = \frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \rho_j} = -\frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \sigma_j} = \frac{2\pi}{KI} \frac{\partial \Delta V_i}{\partial \sigma_j} \quad (14)$$

Ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα συνδέεται άμεσα με την επίλυση του ευθέος γεωηλεκτρικού προβλήματος. Πρέπει να τονιστεί ότι όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, τότε κάθε παράμετρος συνήθως αποτελείται από περισσότερα τριγωνικά υποστοιχεία.

Για τη δημιουργία των κριτηρίων κατάταξης και επιλογής των συνδυασμών ηλεκτροδίων που θα αποτελούν το βέλτιστο πρωτόκολλο μετρήσεων απαιτείται ο υπολογισμός του αντιστρόφου του Ιακωβιανού πίνακα J^{-1} (διαδικασία επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος) και στη συνέχεια του πίνακα διακριτικής ικανότητας R . Δεδομένου ότι το “πλήρες” πακέτο δεδομένων, από το οποίο επιλέγονται οι βέλτιστοι συνδυασμοί ηλεκτροδίων, είναι αρκετά μεγάλο, ο χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό και κατά συνέπεια για την κατασκευή μιας βέλτιστης διάταξης είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο κατασκευής μιας παραδοσιακής διάταξης.

Για την επιλογή των βέλτιστων μετρήσεων αρκεί ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα και δεν απαιτείται η εισαγωγή του αλγορίθμου στη διαδικασία της αντιστροφής, η οποία είναι χρονοβόρα όπως προαναφέρθηκε, και μεγεθύνει τα σφάλματα που προέρχονται από τη μοντελοποίηση του υπεδάφους εισάγοντας θόρυβο στη διαδικασία επιλογής των βέλτιστων μετρήσεων.

Κατασκευάζεται το “πλήρες” πακέτο δεδομένων όλων των πιθανών συνδυασμών ηλεκτροδίων. Από το σύνολο αυτό αφαιρούνται οι συνδυασμοί που έχουν εναλλάξ τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού, καθώς και αυτοί για τους οποίους ο γεωμετρικός παράγοντας K είναι μεγαλύτερος από μια τιμή και προκύπτει το “πλήρες” πακέτο δεδομένων.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό μεταβολής στην τιμή μιας μέτρησης της φαινόμενης αντίστασης αν μεταβληθεί η πραγματική αντίσταση μιας παραμέτρου στο μοντέλο.

Για κάθε παράμετρο, επιλέγονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη, κατά απόλυτη τιμή, ευαισθησία, δεδομένου ότι δεν έχουν ήδη επιλεγεί σε προηγούμενη επανάληψη του αλγορίθμου. Οι συνδυασμοί αυτοί αποτελούν το “βέλτιστο” πακέτο δεδομένων.

Οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων που θα επιλεγούν θα είναι τόσοι, όσες είναι και οι παράμετροι του μοντέλου.

Προκειμένου να ληφθεί περισσότερη πληροφορία για τις περιοχές του μοντέλου που είναι λιγότερο εμφανείς, γιατί είναι λιγότερο ευαίσθητες, προστίθεται ένα επιπλέον κριτήριο στη διαδικασία εύρεσης βέλτιστων διατάξεων με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα. Σύμφωνα με αυτό, υπολογίζονται καταρχήν τα αθροίσματα των απολύτων τιμών του Ιακωβιανού πίνακα για κάθε παράμετρο αυτού, τα οποία αποτελούν τα $L1$ -μέτρα κάθε παραμέτρου.

Στη συνέχεια οι παράμετροι κατατάσσονται από τις παραμέτρους που έχουν τη μικρότερη μέση εκτίμηση του L1-μέτρου τους και επομένως είναι λιγότερο ευαίσθητες σε μεταβολές της πραγματικής αντίστασης του μοντέλου προς τις παραμέτρους που έχουν τη μεγαλύτερη μέση εκτίμηση του L1- μέτρου τους και επομένως είναι περισσότερο ευαίσθητες σε μεταβολές της πραγματικής αντίστασης του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται ο αλγόριθμος OPTCROS3 με τροποποίηση διαφόρων μεταβλητών και για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των δυο γεωτρήσεων.

Στη συνέχεια στο λογισμικό DC-PRO εισάγονται οι τιμές- αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση του πρωτοκόλλου και γίνεται επεξεργασία αυτών και βελτιστοποίηση των σφαλμάτων. Στη συνέχεια γίνεται αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων και προβολή των δομών του κάθε μοντέλου. Μία σύγκριση των αρχικών με των τελικών μοντέλων γίνεται οπτικά αλλά και με τη χρήση του συντελεστή συσχέτισης.

3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ OPTCROSS3

Στην παρούσα διατριβή έγινε χρήση υφιστάμενου αλγορίθμου OPTCROSS3 (P. Tsourlos © 2014).

Πρόκειται για ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab, το οποίο παράγει βελτιστοποιημένα πρωτόκολλα για μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας μεταξύ γεωτρήσεων και το οποίο βασίζεται στη χρήση του Ιακωβιανού πίνακα.

Χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία της διάταξης που έχει ορισθεί από τον χρήστη, υπολογίζει τον γεωμετρικό παράγοντα K ώστε να ορισθεί η αντίσταση, καθώς και τις συντεταγμένες κάθε παραμέτρου. Στη συνέχεια υπολογίζει Ιακωβιανό πίνακα για κάθε μέτρηση και παράμετρο και οπτικοποιεί το αποτέλεσμα, ενώ παράλληλα υπολογίζει το πλήρες πακέτο δεδομένων για γνωστές διατάξεις αλλά και δυο πιθανά βέλτιστα πακέτα δεδομένων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην επεξήγηση του Ιακωβιανού Πίνακα (σχήμα 3.3.1).

Για κάθε μοντέλο μέσα στο πρόγραμμα δηλώνεται η απόσταση των γεωτρήσεων σε μέτρα, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων και το βάθος του πρώτου ηλεκτροδίου από την επιφάνεια.

```
% ***** inter borehole separation in m
brh_dist=20;

% ***** inter electrode spacing in m
e_dist=5;

% 1st electrode depth from surface in m
e_depth=0; % put zero if electrode starts form surface
```

Στη συνέχεια τροποποιούνται οι τιμές της τάσης για το όργανο και κάποιες τυπικές τιμές αντίστασης.

```
% ***** Calculate threshhold geometrical factor
source_volt=800; % the max voltage of the instrument source
volt_accur=0.0005; % intrument voltage accuracy
res_contact=2500; % the contact resistance
res_min=10; % min expected resistivity
gf_thres=(source_volt*res_min)/(res_contact*volt_accur)
gf_thres=3000;
```

“Clusters” είναι ο αριθμός συστάδων όπου οι παράμετροι χωρίζονται σε νόρμες(απόλυτες τιμές) στον Ιακωβιανό πίνακα.

Οι πιο κατάλληλες παράμετροι θα αντικατασταθούν στα πρώτα cluster ενώ εκείνες με τη χαμηλότερη ευαισθησία θα αντικατασταθούν στο τελευταίο cluster.

Στη συνέχεια περισσότερες μοναδικές τιμές προστίθενται για τη βελτιστοποίηση των λιγότερων κατάλληλων clusters.

Αυτό επιτυγχάνεται είτε γραμμικά "cl_flag=1" είτε σχεδόν-γραμμικά "cl_flag=2".

```
% ***** Optimization Clusters
clusters=6 % define number of clusters
cl_flag= 2 % linear= 1 quasi-linear =2
```

Για παράδειγμα για "clusters=5" και "cl_flag=1":

Για παραμέτρους σε cluster 1 , η 1^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

Για παραμέτρους σε cluster 2 , η 2^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

.....

Για παραμέτρους σε cluster 5 , η 5^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

Για παράδειγμα για "clusters=5" και "cl_flag=2":

Για παραμέτρους σε cluster 1 , η 1^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

Για παραμέτρους σε cluster 2 , η 2^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

Για παραμέτρους σε cluster 3 , η $3+3-2=4$ ^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

Για παραμέτρους σε cluster 4 , η $4+4-2=6$ ^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

Για παραμέτρους σε cluster 5 , η $5+5-2=8$ ^η καλύτερη τιμή επιλέγεται

3.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ

Τα συνθετικά δεδομένα προέκυψαν ύστερα από εφαρμογή του πρωτοκόλλου OPTCROSS3 για συγκεκριμένες αποστάσεις γεωτρήσεων, clusters και flags.

Η διάταξη των μετρήσεων έχει ως εξής:

- Ζευγάρια γεωτρήσεων αποστάσεων 20 και 30 μέτρων αντίστοιχα.
- Απόσταση ηλεκτροδίων: 5 μέτρα
- Βάθος 1^{ου} ηλεκτροδίου από την επιφάνεια του εδάφους: 0 μέτρα
- Αριθμός ηλεκτροδίων ανά γεώτρηση: 24

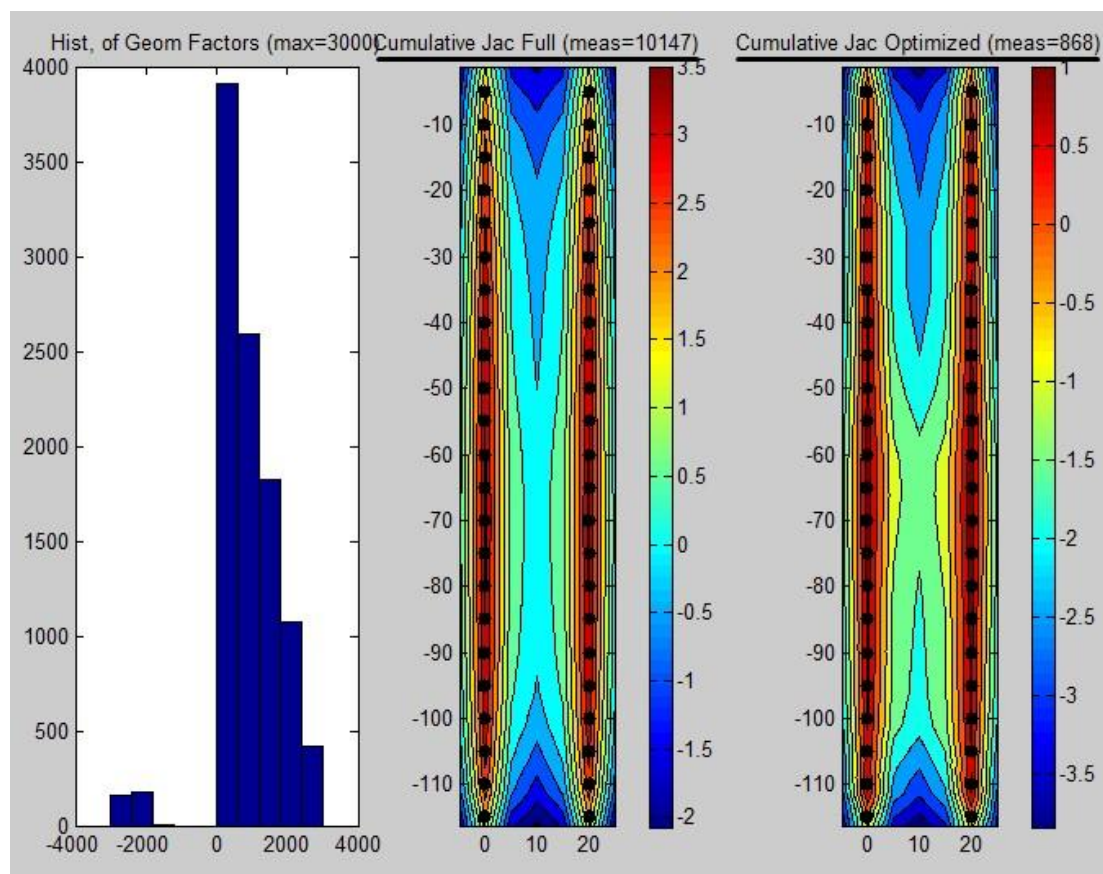
Έτσι παρουσιάζονται 14 διαφορετικά μοντέλα για γεωτρήσεις αποστάσεως 20 μέτρα και 14 παρόμοια μοντέλα για γεωτρήσεις με μεταξύ τους απόσταση 30 μέτρα.

Για κάθε μοντέλο είτε των 20 μέτρων είτε των 30 μέτρων, παρουσιάζεται ένα κοινό πλήρες πακέτο μετρήσεων clusters=6" και "cl_flag=2, ένα πακέτο βελτιστοποιημένων μετρήσεων clusters=6" και "cl_flag=2 (opt-1) και ένα πακέτο βελτιστοποιημένων μετρήσεων clusters=1" και "cl_flag=1 (opt-2). (σχήμα 3.3.1)

Οι συνολικές μετρήσεις για κάθε πακέτο μετρήσεων κατανέμονται ως εξής (πίνακας 1):

Αποστάσεις/ Πακέτα μετρήσεων	Πλήρες clusters=6" "cl_flag=2 <i><u>FULL</u></i>	Βελτ. clusters=6" "cl_flag=2 <i><u>OPT-1</u></i>	Βελτ. clusters=1" "cl_flag=1 <i><u>OPT-2</u></i>
Γεωτρήσεις 20 μ.	10147	868	168
Γεωτρήσεις 30 μ.	9670	1116	216

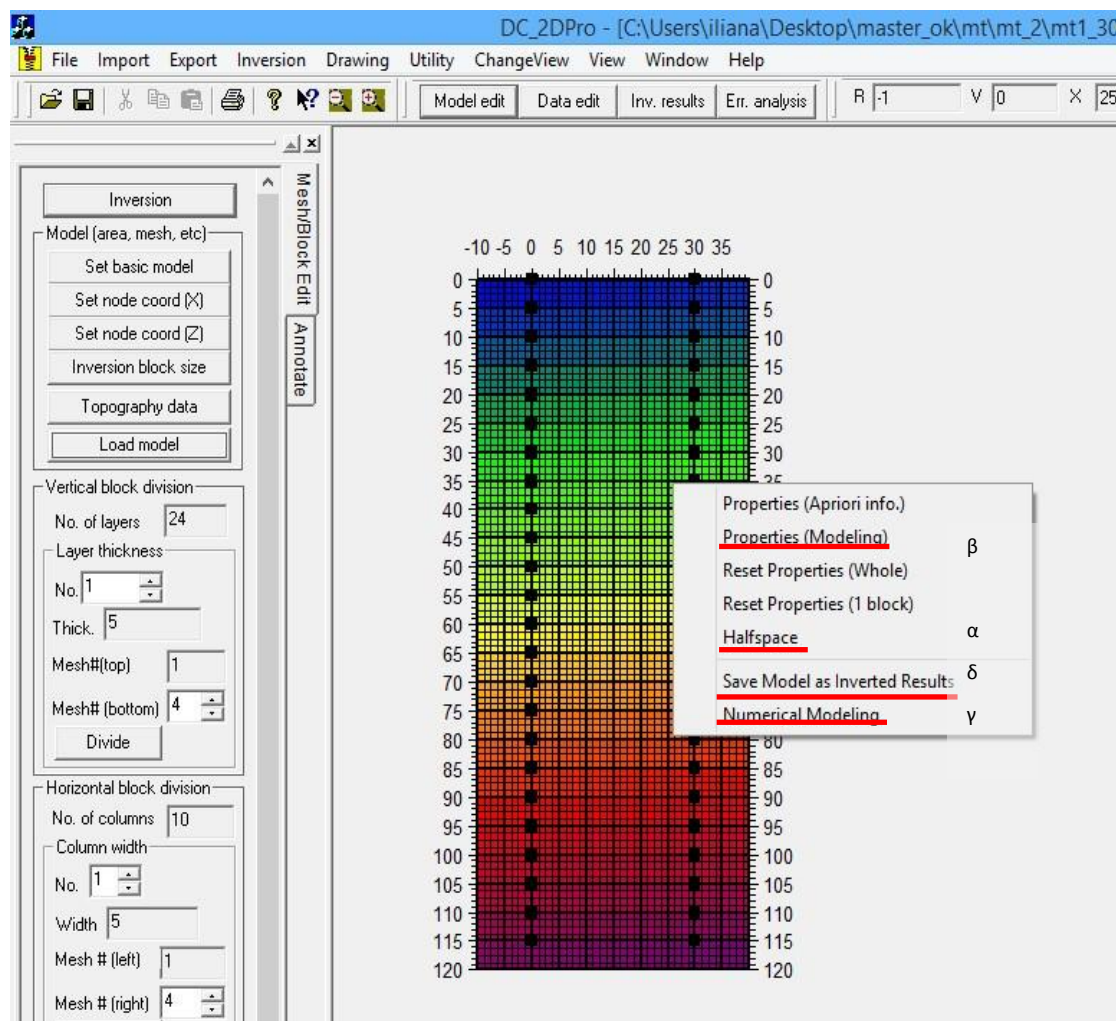
Πίνακας 1: προβολή συνολικού πλήθους μετρήσεων για κάθε πρωτόκολλο



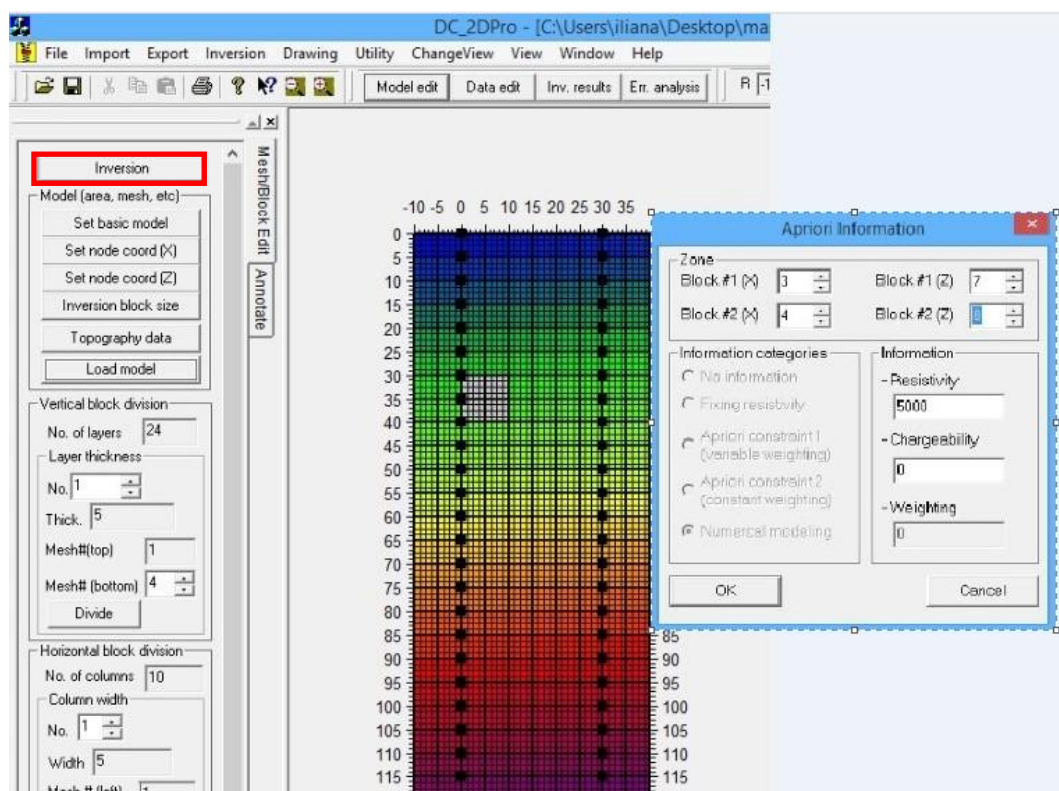
Σχήμα 3.3.1: Με τη χρήση του πρωτοκόλλου *OPTCROSS3* παράγονται κάθε φορά δύο αρχεία *a2d*, ένα για το πλήρες πακέτο μετρήσεων και ένα για των βελτιστοποιημένων, τα οποία στη συνέχεια εισάγονται στο λογισμικό *DC_2DPro* για την παραγωγή των συνθετικών μοντέλων.

Ύστερα από εφαρμογή του πρωτοκόλλου προκύπτει ένα αρχείο το οποίο εισάγεται στο λογισμικό *DC_2DPro* (2-D interpretation system of DC resistivity tomography, by Jung-Ho Kim, Geoelectric Imaging Lab, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), ένα δισδιάστατο σύστημα ερμηνείας ηλεκτρικών τομογραφιών.

Μέσω του λογισμικού αυτού (σχήματα 3.3.1 και 3.3.2), εισάγονται οι τιμές της αντίστασης του περιβάλλοντος (ενέργεια α), της αντίστασης και της δομής των σωμάτων και τα βάθη στα οποία βρίσκονται, ορίζοντας συντεταγμένες στους άξονες *X* και *Z* (ενέργεια β). Στη συνέχεια γίνεται αποθήκευση των δεδομένων (ενέργεια δ) αυτών για να γίνει αντιστροφή στη συνέχεια, εφόσον έχει περαστεί θόρυβος (ενέργεια γ), όπου στην παρούσα διατριβή είναι μηδέν.



Σχήμα 3.3.2: Εισαγωγή των τιμών των αντιστάσεων του περιβάλλοντος και στη συνέχεια των δομών.



Σχήμα 3.3.3: Ορίζονται οι άξονες X και Y για τον σχεδιασμό των δομών καθώς και η τιμή της αντίστασης για κάθε σώμα.

Μετά από την αντιστροφή με χρήση της L1 νόρμας (σχήμα 3.3.4) προκύπτει η τελική «εικόνα» της τομής, δηλαδή η κατανομή των αντιστάσεων, η οποία είναι παρόμοια με την αρχική πρωτότυπη. Στη συνέχεια γίνεται βελτιστοποίηση της απεικόνισης μειώνοντας το σφάλμα όσο αυτό είναι δυνατό.

```

10  48
      10      5940      48
      4799424      2058816
>> No. of zeroed input data = 0
>> No. of data exceeding limits = 0
>> No. of data deleted by CRFP = 0
>> No. of negative data = 0
>> No of input data = 10147
>> No of used data = 10147
10  48
JACOBIAN CAL : 192      1922      192
>> ITERATION NO = 0
> Unweighted RMS ERROR(App.R.) = 0.000005
> Weighted RMS ERROR(App.R.) = 0.000005
> Lmin, Lmax, L (original) = 1.000000E-01      10.000000      1.000000
> Roughness measure (Data)
> -Damping (L1 norm): 1.231791E-07      2.463583E-06
> -L1, L2 norms 3.508261E-02      2.579264E-07
> Data misfit roughness (space) 2.579264E-07
3  23

```

Σχήμα 3.3.4: Η διαδικασία της αντιστροφής είναι βασική για την παραγωγή τομογραφίας όπου φαίνεται η κατανομή των αντιστάσεων των υπεδάφινων δομών. Φαίνεται ο αριθμός των μετρήσεων που επεξεργάστηκαν και πληροφορίες για κάθε μια επανάληψη από τις 7 που έχει οριστεί για τη διατριβή. Με τη συνεχή επανάληψη το σφάλμα συνεχώς μειώνεται και μετά την παραγωγή τομογραφίας αν χρειαστεί μειώνεται και άλλο για λήψη καλύτερης εικόνας. Επιπλέον στην παρούσα διατριβή έγινε χρήση της L1 νόρμας.

3.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής που προέκυψαν από την επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων που παρήχθησαν για διαφορετικά μοντέλα και αποστάσεις γεωτρήσεων. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτά που φαίνονται στον Πίνακα 1 τα οποία και θα αναφέρονται για συντομία παρακάτω ως «Πλήρες», «OPT-1» (αυτό με τα 6 clusters) και «OPT-2» (αυτό με το 1 cluster).

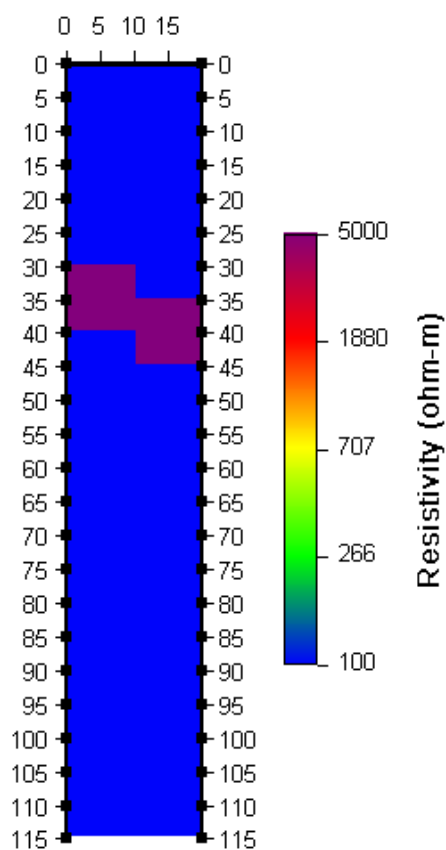
Εκτός από την ποιοτική σύγκριση των μοντέλων παρουσιάζεται και η ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της αντιστροφής με τις τιμές των αντιστάσεων του πρωτότυπου μοντέλου με βάση τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης. Για δυο διανύσματα X, Y με n στοιχεία ο συντελεστής συσχέτισης δίνεται από της σχέση

$$cor(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

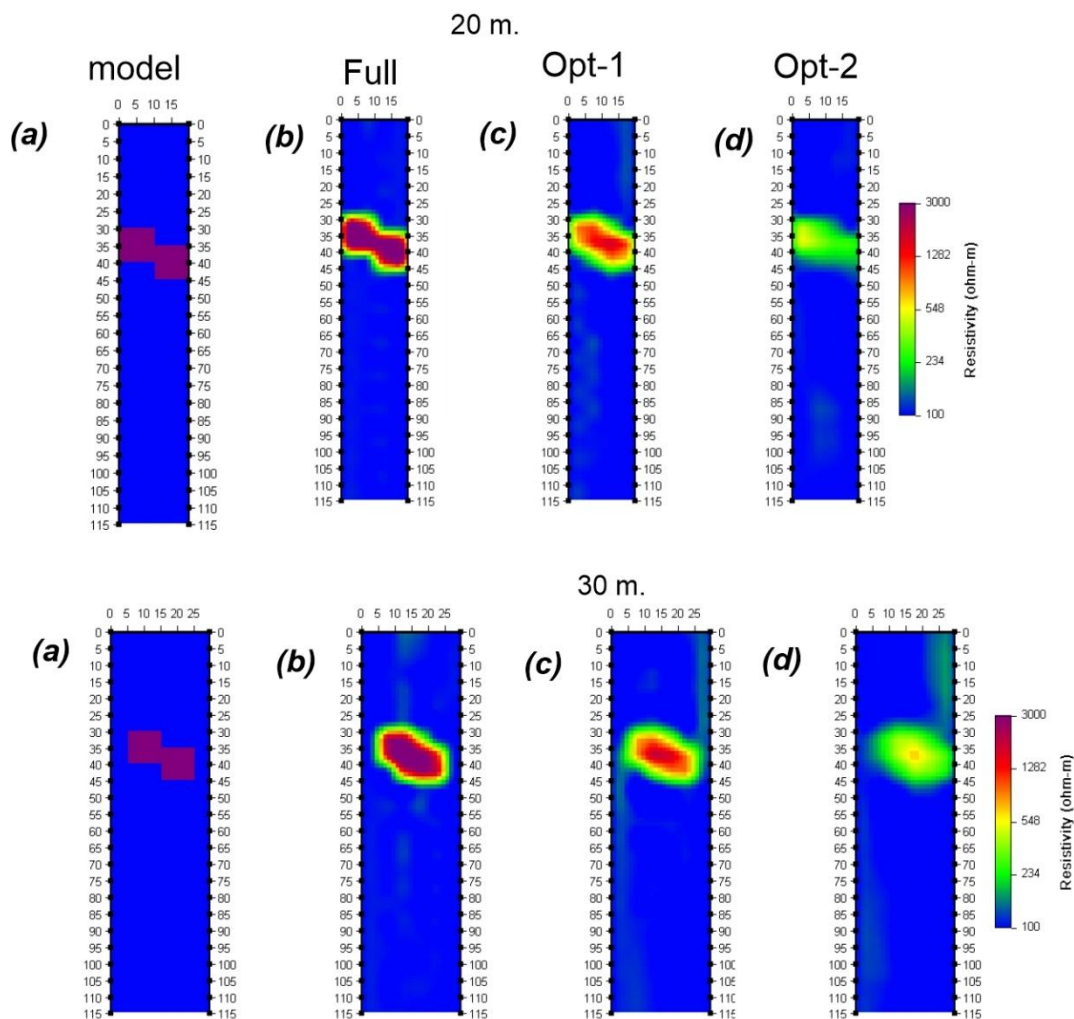
Λαμβάνει τιμές μεταξύ 0,1 και εκφράζει έναν αριθμητικό βαθμό ομοιότητας μεταξύ τους: 1 για την πλήρη ταύτιση και 0 για την πλήρη διαφοροποίηση. Ο υπολογισμός του έγινε με τη βοήθεια της συνάρτησης «CORREL» του Microsoft Office Excel.

ΜΟΝΤΕΛΟ 0

Το μοντέλο προσομοιάζει ένα «κεκλιμένο» στρώμα αντίστασης 5000 Ohm-m πάχους 10m που βρίσκεται σε βάθος 30-45 m σε ομογενή ημιχώρο αντίστασης 100 Ohm-m (σχήμα 3.4.1).



Σχήμα 3.4.1: Το πρωτότυπο μοντέλο 0 μεταξύ γεωτρήσεων που απέχουν 20 μέτρα



Σχήμα 3.4.2: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρης (γ) opt-1 (δ) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.2. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m ενώ η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι λιγότερο καλή για το opt-1 και καθόλου καλή για το πρωτόκολλο opt-2, στα οποία απλά διακρίνεται το αντιστατικό σώμα με λιγότερο καλή αντιστοίχιση στο σχήμα και αντιστάσεις με το αρχικό. Είναι φανερό ότι η ευκρίνεια των αποτελεσμάτων της αντιστροφής είναι ανάλογη του πλήθους των μετρήσεων ανά περίπτωση.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης για την ποσοτική σύγκριση του αρχικού μοντέλου με τα μοντέλα αντιστροφής.

Στον παρακάτω πίνακα (2) παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης για κάθε μοντέλο ξεχωριστά συναρτήσει του πρωτότυπου.

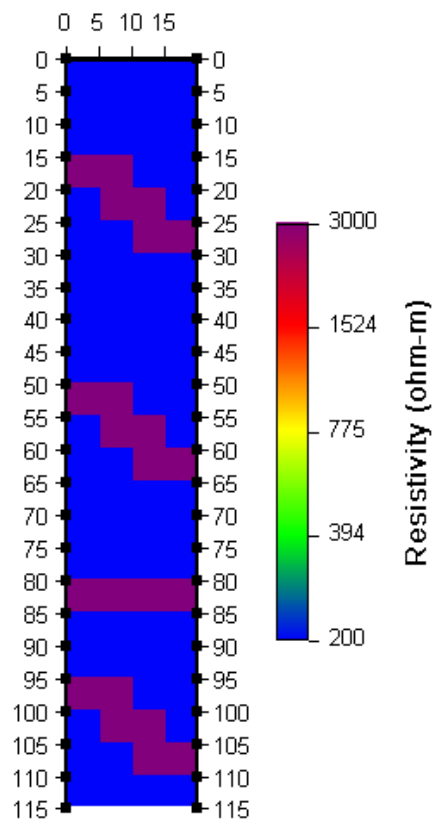
Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.93	0.903	0.806
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.698	0.868	0.747

Πίνακας 2: προβολή συντελεστή συσχέτισης για κάθε γεωμετρία και κάθε πρωτόκολλο του μοντέλου

Για απόσταση γεωτρήσεων 20 m επιβεβαιώνεται η υπεροχή του πλήρους πρωτοκόλλου και η καλύτερη απόδοση του opt-1 έναντι του opt-2. Για απόσταση γεωτρήσεων 30 m δεν επιβεβαιώνεται η υπεροχή του πλήρους πρωτοκόλλου βάσει του συντελεστή συσχέτισης παρά τη προφανή ποιοτική υπεροχή του. Αυτό οφείλεται πιθανά σε τοπικά μεγάλες αποκλίσεις των τιμών αντίστασης του μοντέλου αυτού που όμως δίνουν την εσφαλμένη εντύπωση βάσει των υπολογισμών ότι έχει μη ικανοποιητική απόδοση. Επομένως στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής συσχέτισης δεν αρκεί για την ουσιαστική αξιολόγηση των μοντέλων και η χρήση του ως μέσο αξιολόγησης πρέπει να γίνεται πάντα σε συνδυασμό με τον ποιοτικό έλεγχο ταύτισης.

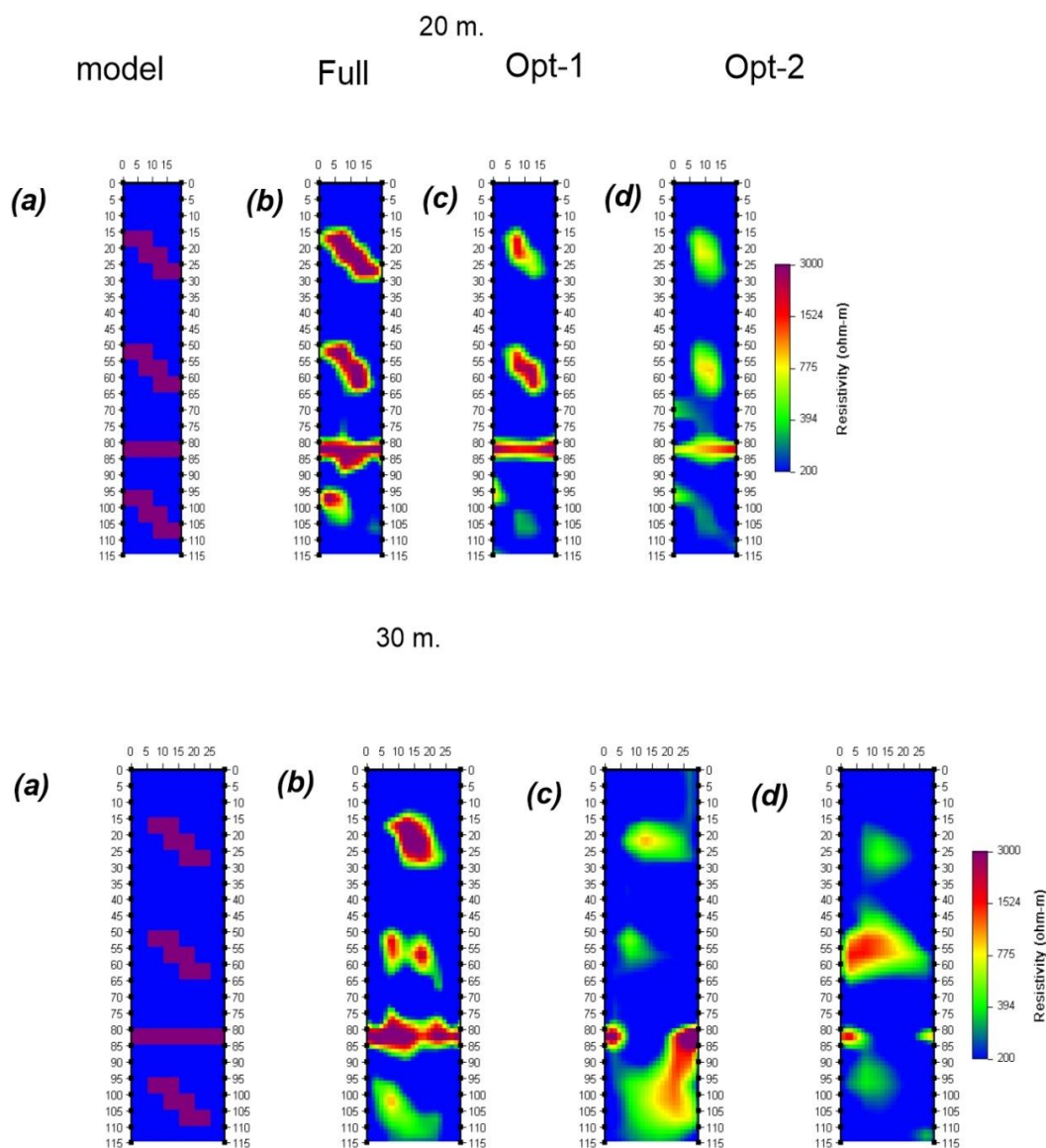
ΜΟΝΤΕΛΟ 1

Το μοντέλο προσομοιάζει 3 «κεκλιμένα» στρώματα και ένα οριζόντιο αντίσταση. Τα σώματα έχουν αντίσταση 5000 Ohm-m και βρίσκονται σε ομογενή ημιχώρο αντίστασης 100 Ohm-m (σχήμα 3.4.3).



Σχήμα 3.4.3: Το πρωτότυπο μοντέλο 1 μεταξύ γεωτρήσεων που απέχουν 20 μέτρα

Η δομή των σωμάτων είναι σχετικά πολύπλοκη με σκοπό να μελετηθεί κατά πόσο η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να αποδώσει και σε ποιο βαθμό μία εικόνα πολλαπλών σωμάτων.



Σχήμα 3.4.4: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (b) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.4. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα για αποστάσεις 20m ενώ για αποστάσεις 30m η ευκρίνεια είναι μειωμένη και για τα τρία πρωτόκολλα, ακόμα και για το πλήρες. Η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι λιγότερο καλή για το opt-1 και καθόλου καλή για το πρωτόκολλο opt-2, στα οποία απλά διακρίνεται το αντιστατικό σώμα με λιγότερο καλή αντιστοίχιση στο σχήμα και αντιστάσεις με το αρχικό.

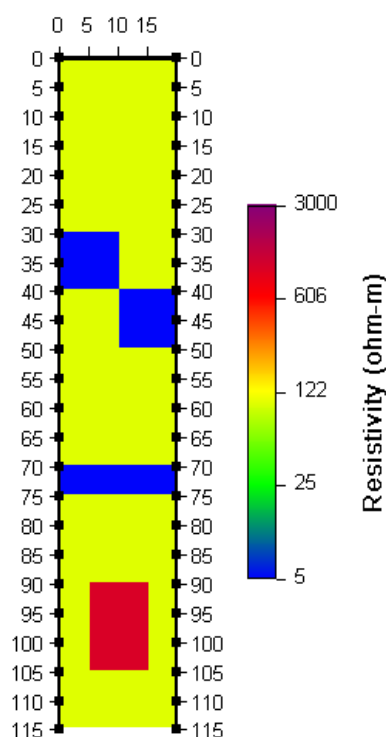
Στον παρακάτω πίνακα (3) παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης.

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.915	0.861	0.78
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.521	0.354	0.403

Πίνακας 3: προβολή συντελεστή συσχέτισης για κάθε γεωμετρία και κάθε πρωτόκολλο του μοντέλου

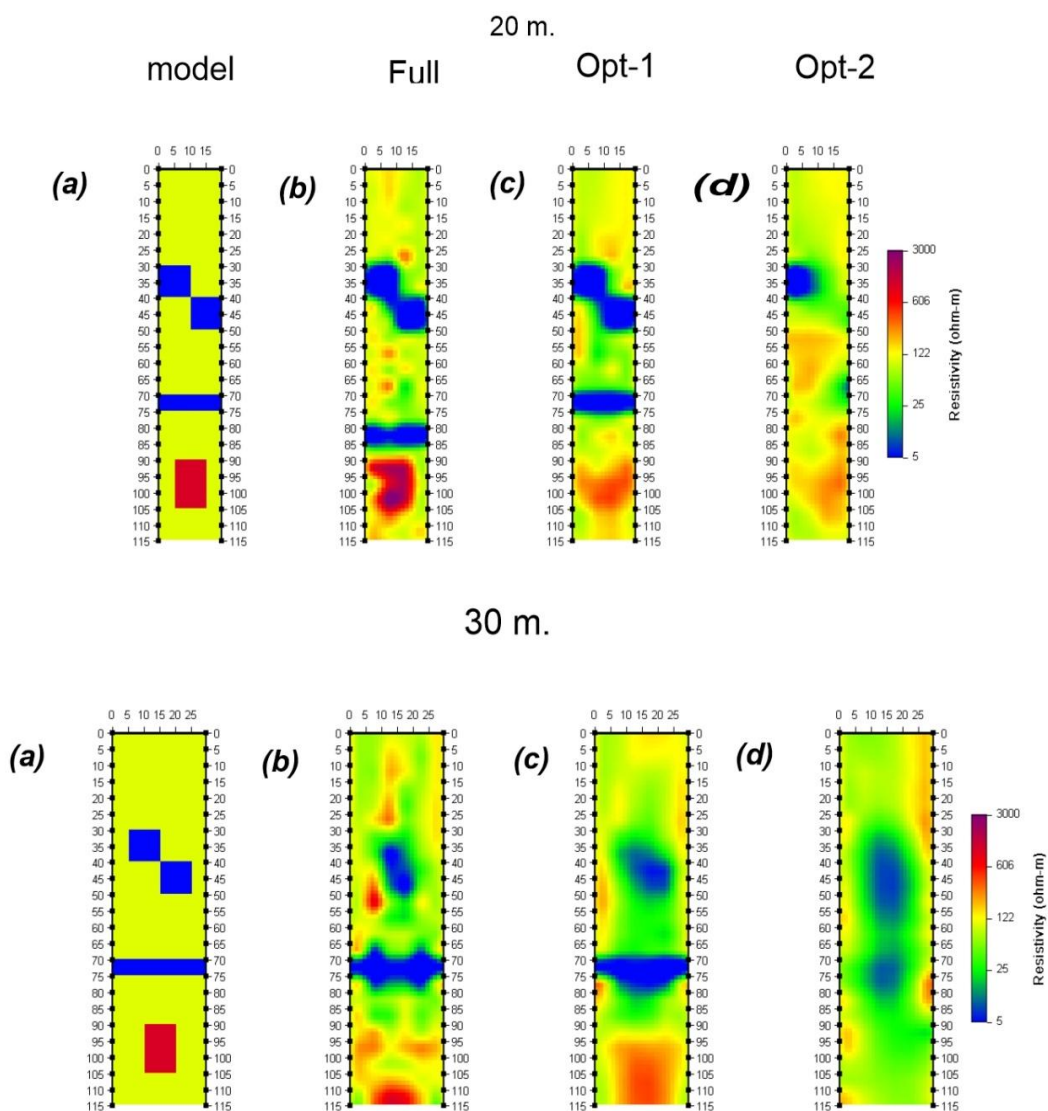
ΜΟΝΤΕΛΟ 2

Το μοντέλο προσομοιάζει δύο στρώματα αντίστασης 1 Ohm-m πάχους 20m και 5 m αντίστοιχα και ένα αντίστασης 1000 Ohm-m και πάχους 15m που βρίσκονται σε ομογενή ημιχώρο αντίστασης 100 Ohm-m (σχήμα 3.4.5).



Σχήμα 3.4.5: Το πρωτότυπο μοντέλο 2 μεταξύ γεωτρήσεων που απέχουν 20 μέτρα

Στο συγκεκριμένο μοντέλο γίνεται η προσομοίωση αντιστατικού σώματος που βρίσκεται σε μεγάλο βάθος κάτω από αγωγίμα σώματα (σχήμα 3.4.6).



Σχήμα 3.4.6: (a) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (b) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.6. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα για αποστάσεις 20m και για το πλήρες και opt-1 πρωτόκολλα, ενώ για τα 30m κανένα πρωτόκολλο δεν δίνει καλά αποτελέσματα. Ο συντελεστής συσχέτισης (πίνακας 4) συμφωνεί με την παραπάνω ποιοτική ανάλυση.

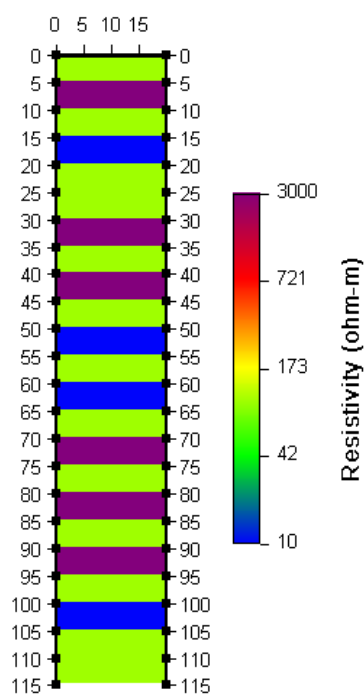
Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.816	0.682	0.178
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.406	0.217	0.089

Πίνακας 4: προβολή συντελεστή συσχέτισης για κάθε γεωμετρία και κάθε πρωτόκολλο του μοντέλου

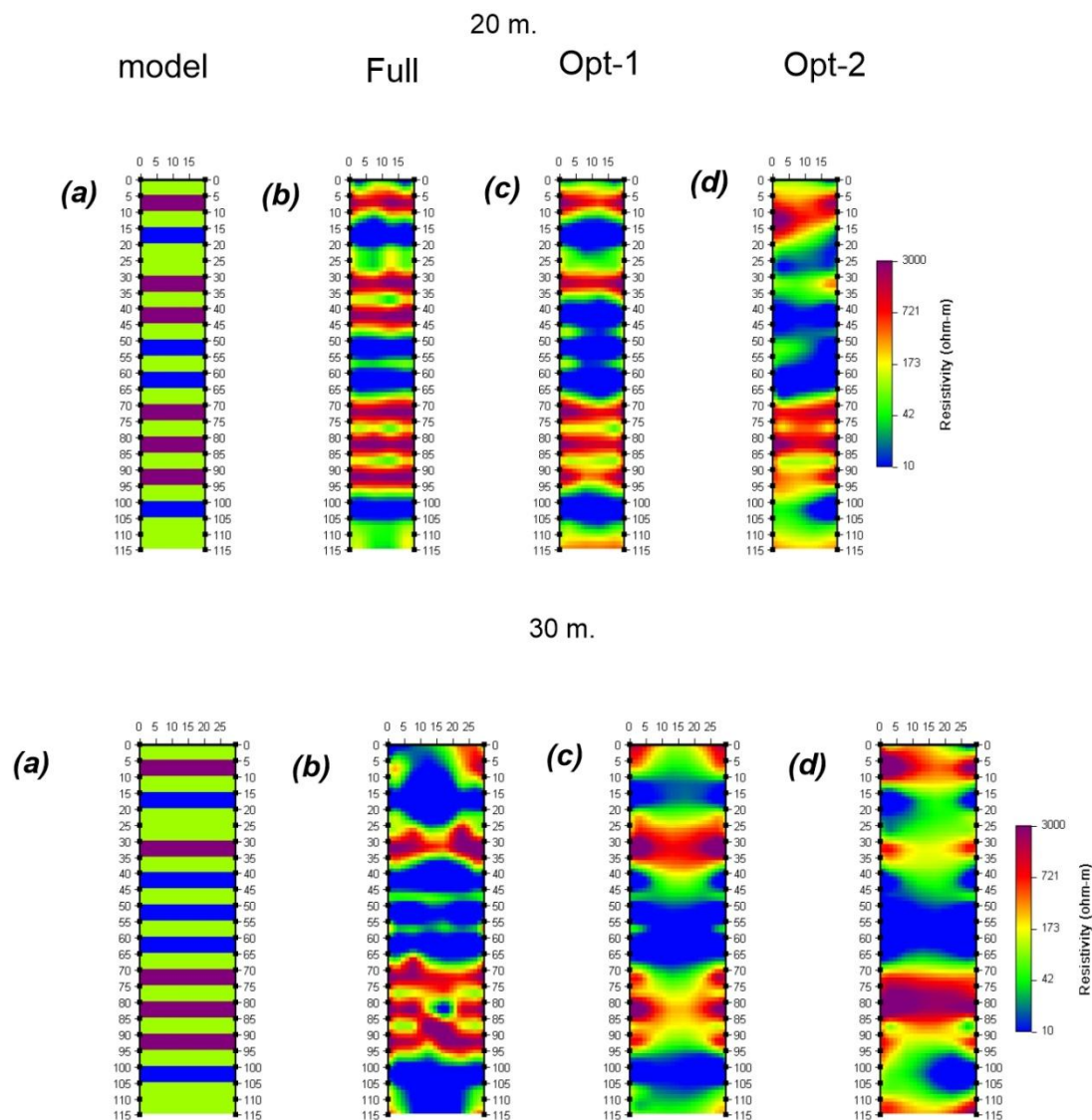
ΜΟΝΤΕΛΟ 3

Στο συγκεκριμένο μοντέλο μελετάται η διακριτική ικανότητα της ηλεκτρικής τομογραφίας όταν υπάρχει εναλλαγή αγωγίμων και αντιστατικών στρωμάτων (σχήμα 3.4.7).

Το μοντέλο προσομοιάζει στρώματα αντίστασης 1 Ohm-m και 1000 Ohm-m και πάχους που βρίσκονται σε ομογενή ημιχώρο αντίστασης 100 Ohm-m .



Σχήμα 3.4.7: Το πρωτότυπο μοντέλο 3 μεταξύ γεωτρήσεων που απέχουν 20 μέτρα



Σχήμα 3.4.8: (a) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (b) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

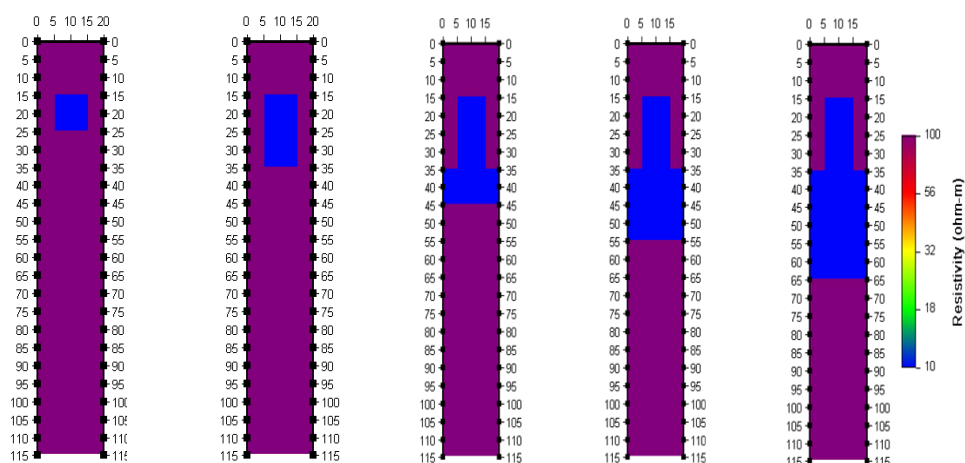
Στις γεωτρήσεις των 20 μέτρων φαίνεται αρκετά καλά η εναλλαγή των στρωμάτων ακόμα και σε μεγάλα βάθη (σχήμα 3.4.8) σε σύγκριση με το πρωτότυπο μοντέλο. Οι βέλτιστες διατάξεις λόγω μικρού αριθμού μετρήσεων δε δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, ωστόσο υπάρχει μια αρκετά ικανοποιητική εικόνα εναλλασσόμενων στρωμάτων διαφορετικών αντιστάσεων. Στις γεωτρήσεις των 30 μέτρων δεν υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση στρωμάτων του αρχικού μοντέλου με το μοντέλο αντιστροφής, ωστόσο η μορφή των στρωμάτων ταιριάζει σε ικανοποιητικό βαθμό. Ο συντελεστής συσχέτισης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.865	0.606	0.35
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.411	0.349	0.222

Πίνακας 5: προβολή συντελεστή συσχέτισης για κάθε γεωμετρία και κάθε πρωτόκολλο του μοντέλου

ΜΟΝΤΕΛΑ 4-8

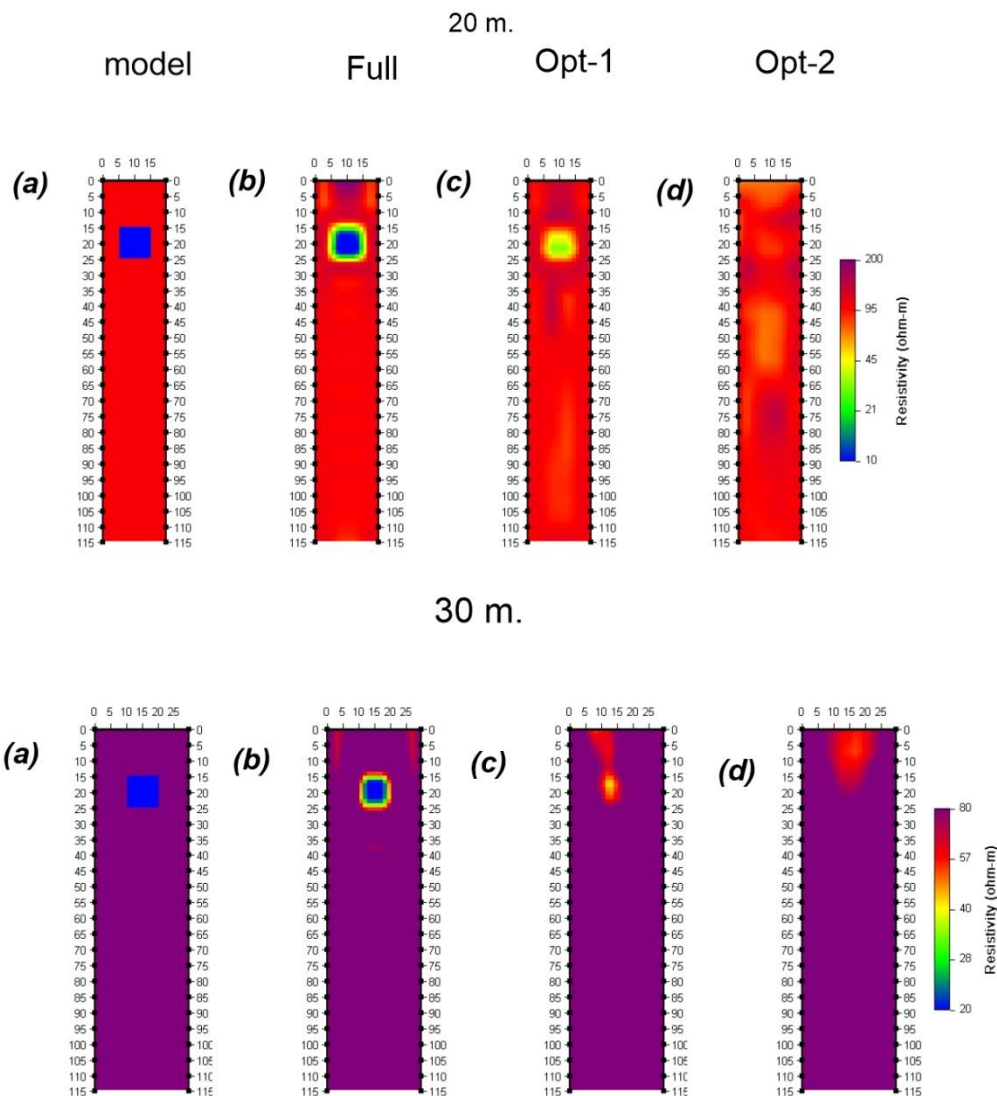
Αυτά τα πέντε μοντέλα θα μελετηθούν μαζί καθώς στη συνέχεια θα αποτελέσουν κομμάτι περαιτέρω επεξεργασίας. Πρόκειται για ένα αγωγίμο σώμα αντίστασης 1 Ohm-m το οποίο εξαπλώνεται σε περιβάλλον 100 Ohm-m φτάνοντας από τα 15 στα 60 μέτρα (σχήμα 3.4.9).



Σχήμα 3.4.9: Το πρωτότυπα μοντέλα 4-8 μεταξύ γεωτρήσεων που απέχουν 20 μέτρα

Στα μοντέλα προσμοιάζει ένα σώμα (π.χ. αγωγίμος ρύπος) το οποίο εξαπλώνεται σε πλάτος και βάθος (σχήματα 3.4.10 – 3.4.14).

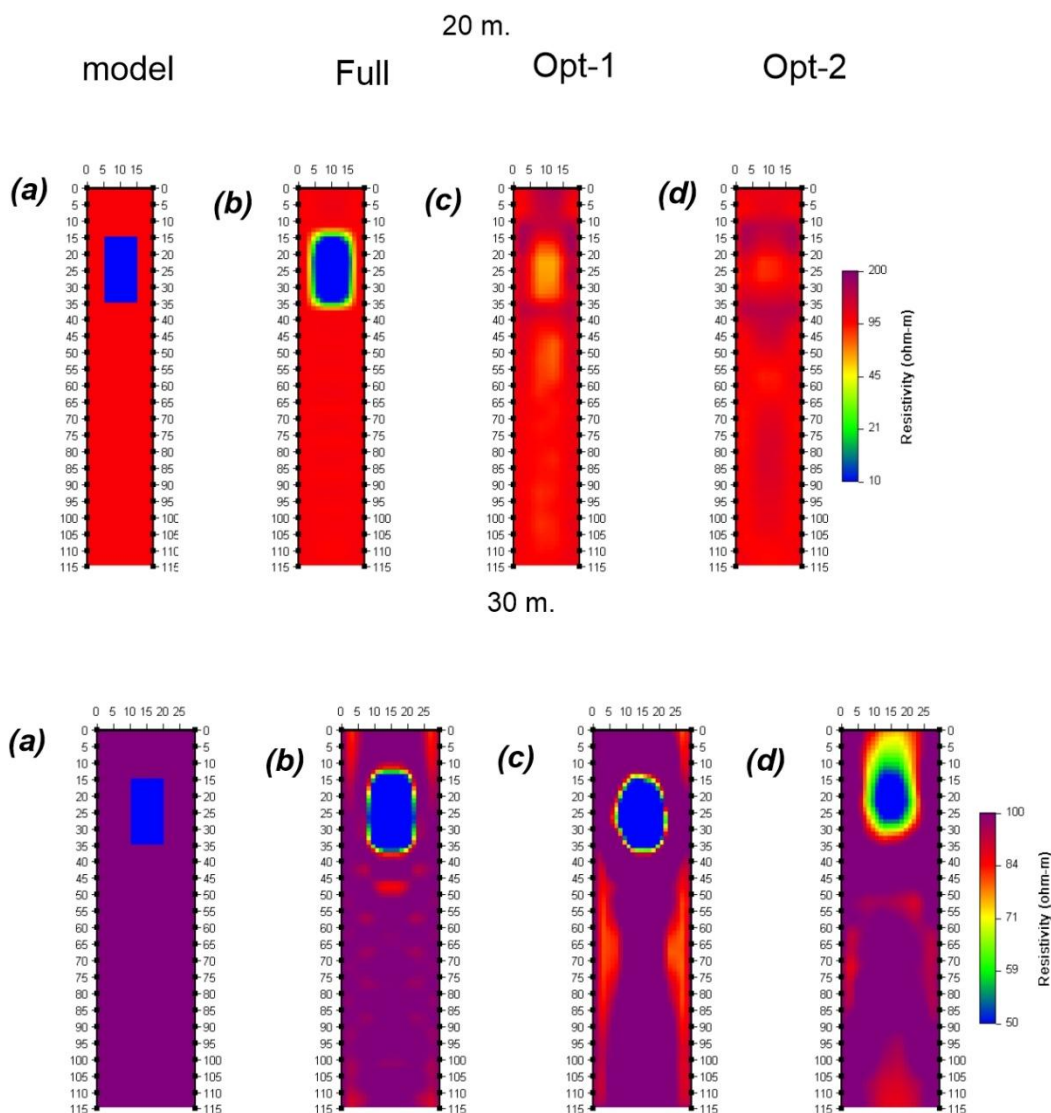
- **Μοντέλο 4**



Σχήμα 3.4.10: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.10. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m ενώ η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι λιγότερο καλή για το opt-1 και καθόλου καλή για το πρωτόκολλο opt-2.

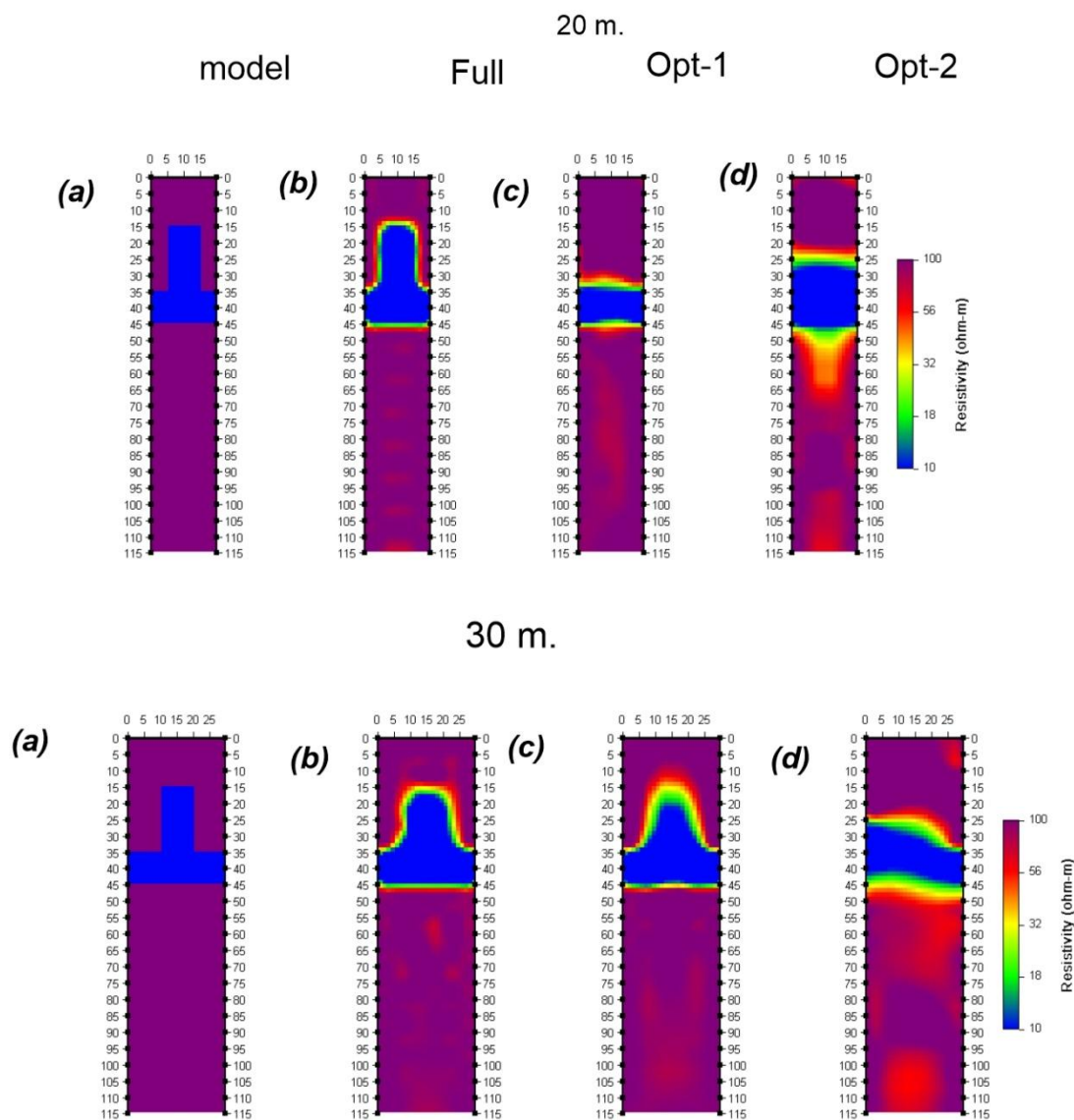
- **Μοντέλο 5**



Σχήμα 3.4.11: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.11. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα και για αποστάσεις 30m. Για τα 20m η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι καλή μόνο για το πλήρες πρωτόκολλο.

- **Μοντέλο 6**

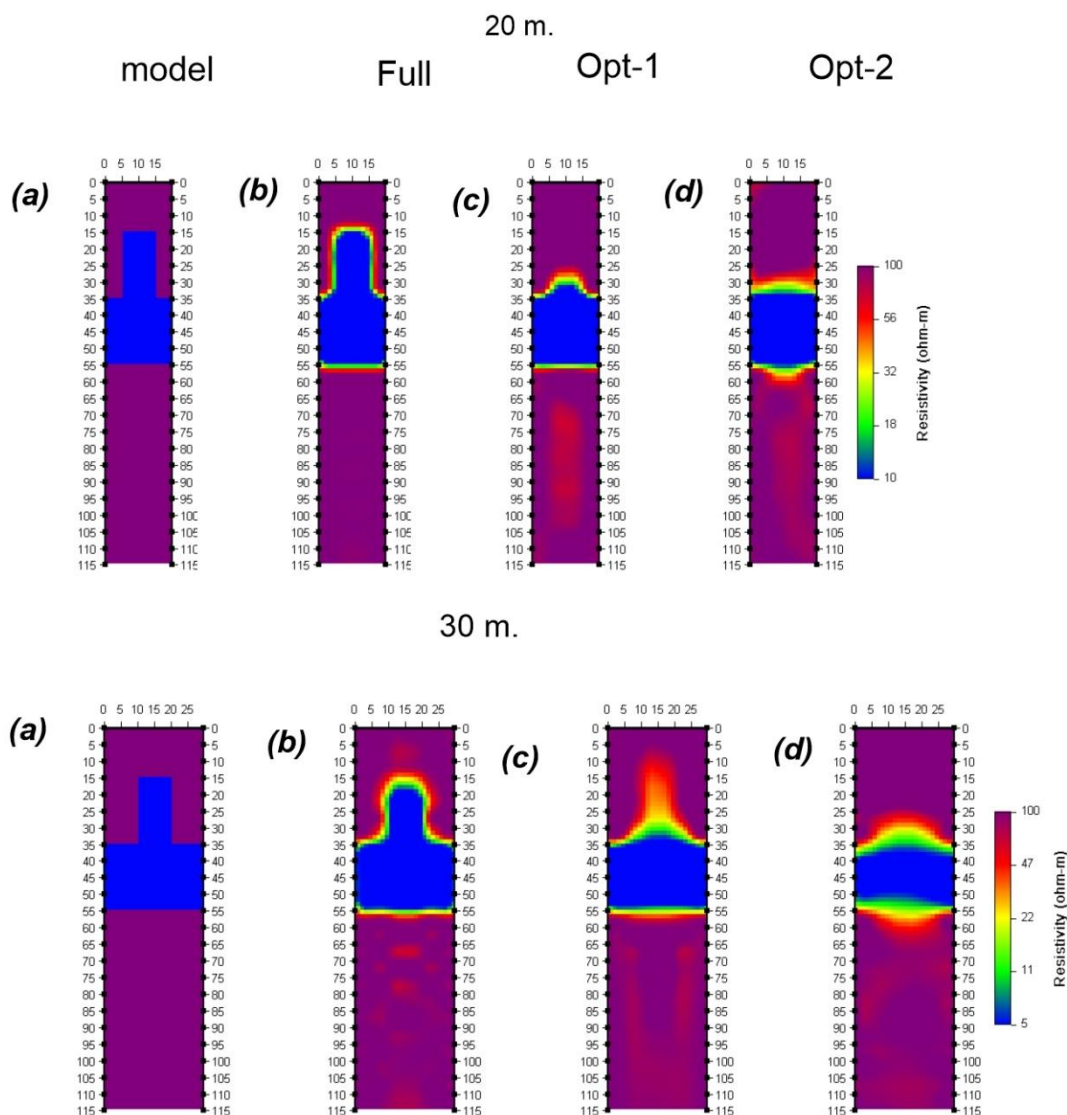


Σχήμα 3.4.12: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.12. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m μόνο για τα πλήρη πακέτα μετρήσεων.

Το τμήμα του σώματος από 15-35 μέτρα «χάνεται» στις βελτιστοποιημένες μετρήσεις των γεωτρήσεων των 20m, ενώ λίγο φαίνεται στις γεωτρήσεις των 30 μέτρων

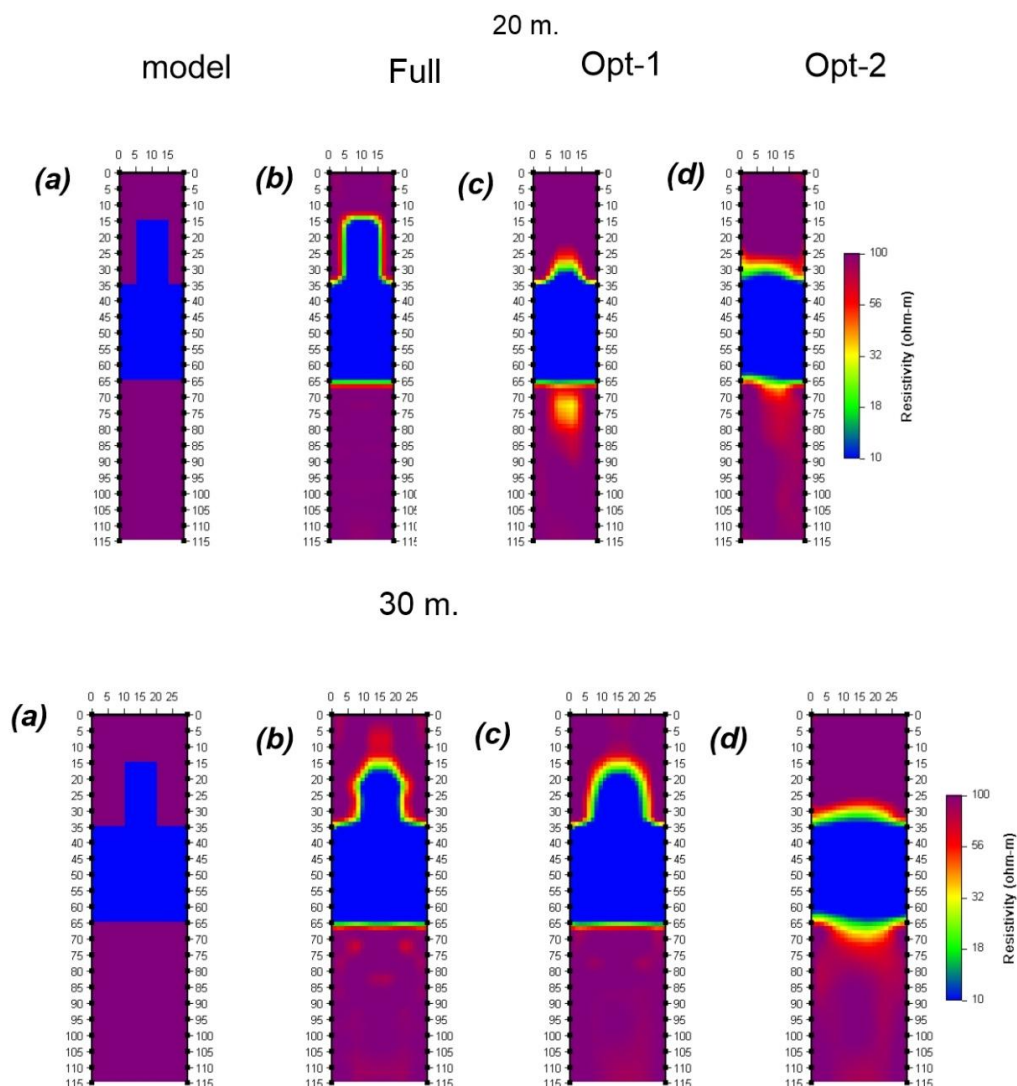
• **Μοντέλο 7**



Σχήμα 3.4.13: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.13. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m μόνο για τα πλήρη πακέτα μετρήσεων. Στα opt-1 και για τις δυο γεωμετρίες υπάρχει λίγο καλύτερη ταύτιση με το πρωτότυπο σε σχέση με τα opt-2.

• **Μοντέλο 8**



Σχήμα 3.4.14 (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.14. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m μόνο για τα πλήρη πακέτα. Στα opt-1 και για τις δυο γεωμετρίες υπάρχει καλύτερη ταύτιση με το πρωτότυπο από τα opt-2.

Οι συντελεστές συσχέτισης για όλα τα μοντέλα παρουσιάζεται στους Πίνακες 6-10.

- Μοντέλο 4

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες clusters 6- flags 2	Βελτιστοπ. clusters 6- flags 2	Βελτιστοπ. clusters 1- flags 1
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.909	0.492	0.066
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.889	0.181	0.154

- Μοντέλο 5

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.971	0.223	0.196
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.896	0.753	0.325

- Μοντέλο 6

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.895	0.105	0.167
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.75	0.553	0.198

- Μοντέλο 7

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.988	0.365	0.109
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.848	0.329	0.113

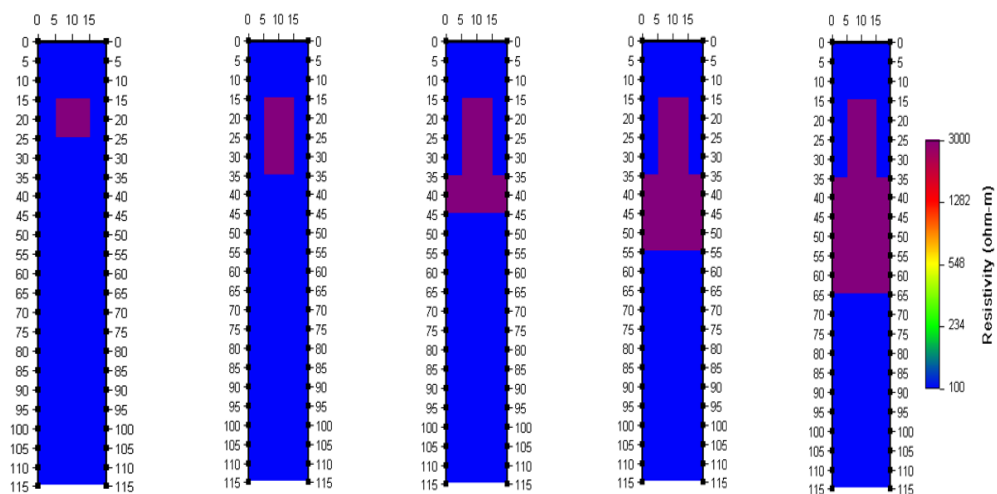
- Μοντέλο 8

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.866	0.389	0.222
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.865	0.798	0.263

Πίνακες 6-10: προβολή συντελεστή συσχέτισης για κάθε γεωμετρία και κάθε πρωτόκολλο του μοντέλου

ΜΟΝΤΕΛΑ 9-13

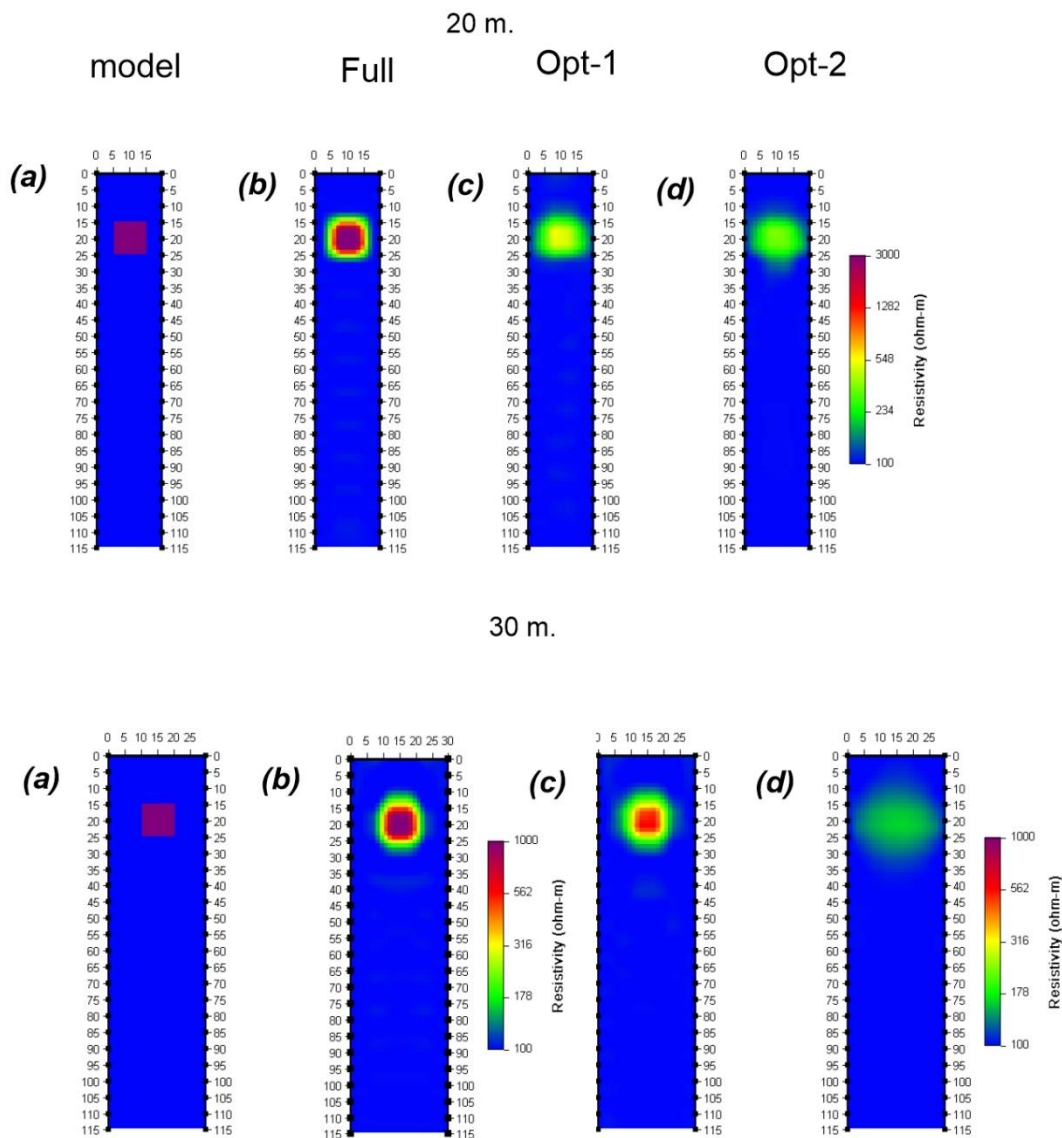
Τα μοντέλα αυτά ακολουθούν την ίδια μορφή με αυτά της προηγούμενης ομάδας με μοναδική διαφορά ότι το σώμα πλέον είναι αντιστατικό αντίστασης 5000 Ohm-m ενώ το περιβάλλον παραμένει 100 Ohm-m (σχήμα 3.4.15).



Σχήμα 3.4.15: Τα πρωτότυπα μοντέλα 9-13 μεταξύ γεωτρήσεων που απέχουν 20 μέτρα

Στα σχήματα (3.4.16 - 3.4.20) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αντιστροφής για τα μοντέλα αυτά.

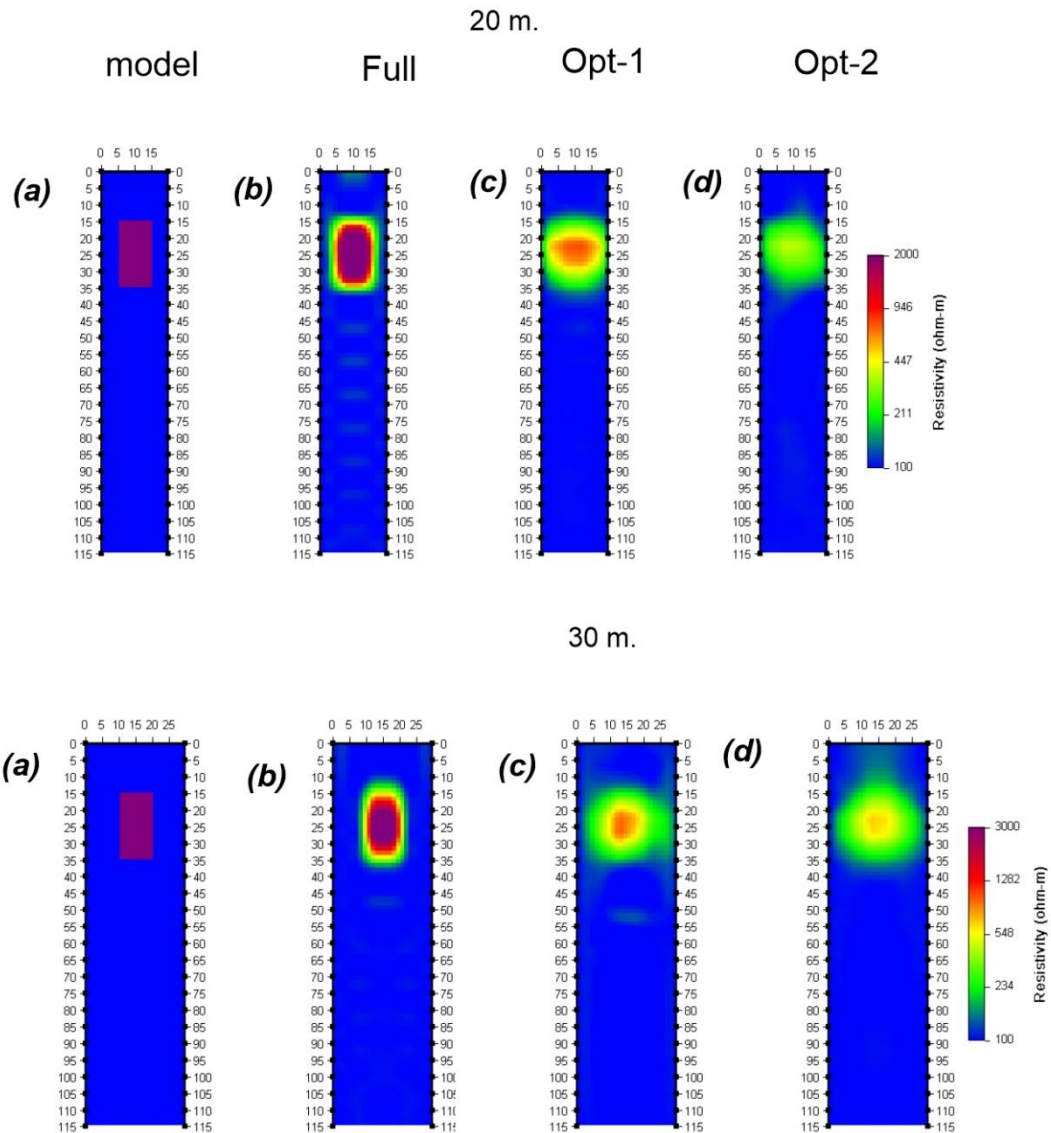
- **Μοντέλο 9**



Σχήμα 3.4.16: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (γ) opt-1 (δ) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.16. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m αλλά η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι λιγότερο καλή για το opt-1 και για το πρωτόκολλο opt-2 και για τις δυο γεωμετρίες.

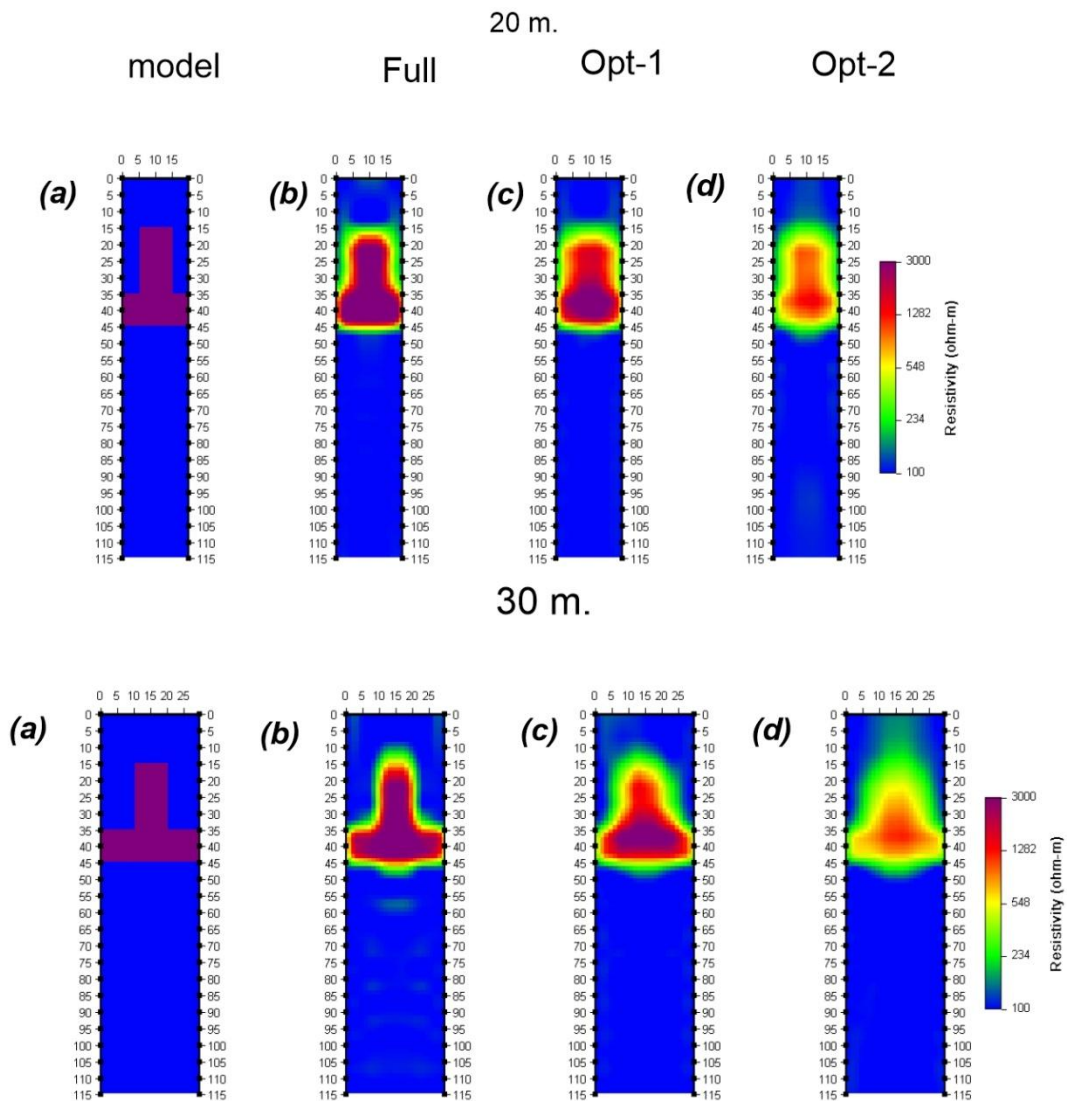
- **Μοντέλο 10**



Σχήμα 3.4.17 (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (γ) opt-1 (δ) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.17. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m ενώ η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών δεν είναι καλή για το opt-1 και για το opt-2.

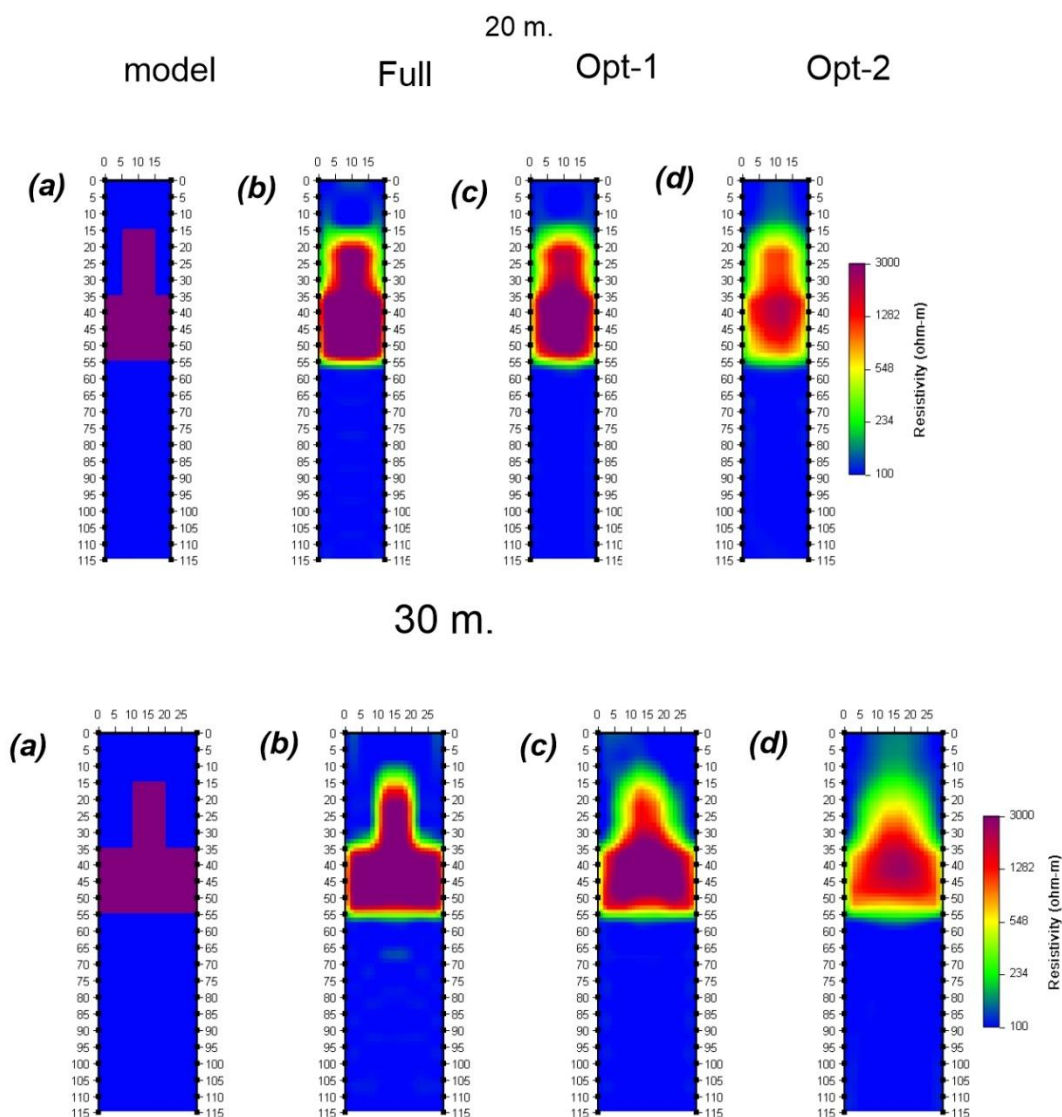
- **Μοντέλο 11**



Σχήμα 3.4.18: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.18. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m αλλά και η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι καλή για το opt-1 και για το πρωτόκολλο opt-2.

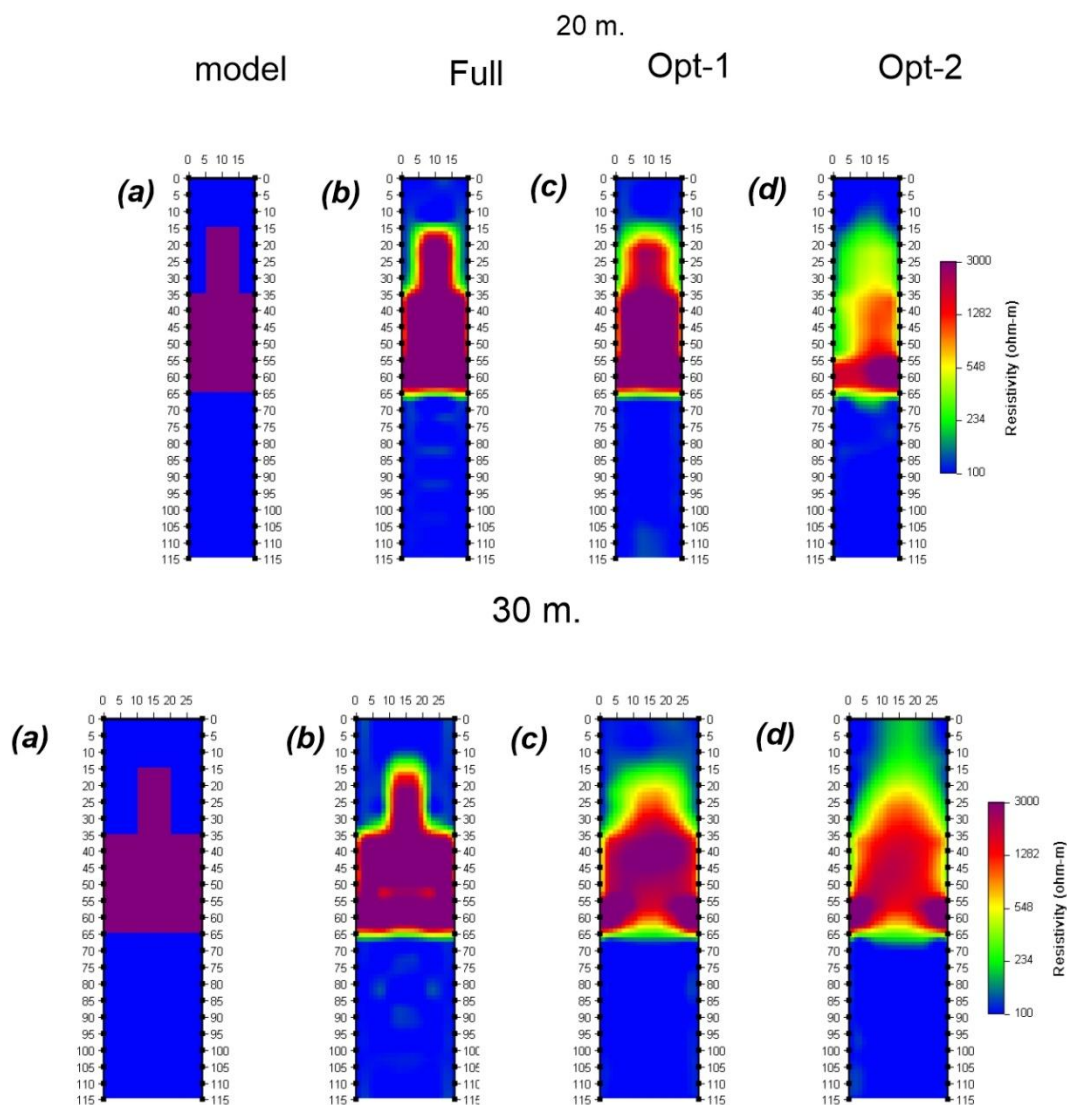
- **Μοντέλο 12**



Σχήμα 3.4.19: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.19. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα τόσο για αποστάσεις 20 όσο και 30m ενώ η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι αρκετά καλή για το opt-1 και λίγο καλή για το πρωτόκολλο opt-2.

- **Μοντέλο 13**



Σχήμα 3.4.20: (α) Το πρωτότυπο μοντέλο και αποτελέσματα αντιστροφής για τα πρωτόκολλα: (β) πλήρες (c) opt-1 (d) opt-2 για γεωτρήσεις με αποστάσεις 20 μέτρων (επάνω) και γεωτρήσεις 30 μέτρων (κάτω).

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.4.20. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταιριάζουν περισσότερο στα πρωτότυπα και για τις δυο γεωμετρίες ενώ η ποιοτική ταύτιση των αντιστροφών είναι λιγότερο καλή για το opt-1 και καθόλου καλή για το opt-2. Στους επόμενους πίνακες φαίνεται και η αριθμητική σύγκριση με συντελεστή συσχέτισης των απεικονίσεων για κάθε μοντέλο και τύπο μετρήσεων (πίνακες 11-15).

- Μοντέλο 9

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.982	0.965	0.92
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.99	0.977	0.592

- Μοντέλο 10

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.829	0.759	0.764
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.84	0.813	0.808

- Μοντέλο 11

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.893	0.82	0.9
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.857	0.803	0.885

- Μοντέλο 12

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.91	0.762	0.871
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.825	0.776	0.839

- Μοντέλο 13

Γεωτρήσεις/ μετρήσεις	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0.878	0.925	0.553
Γεωτρήσεις 30 μ.	0.805	0.601	0.631

Πίνακες 11-15: προβολή συντελεστή συσχέτισης για κάθε γεωμετρία και κάθε πρωτόκολλο του μοντέλου

Η απεικόνιση του σώματος που εξαπλώνεται είναι πολύ καλύτερη σε όλα τα πακέτα μετρήσεων όταν το σώμα είναι αντιστατικό. Ακόμα και για opt-2, όπου οι μετρήσεις είναι πολύ λίγες το αποτέλεσμα είναι αρκετά καλό. Αντιθέτως, για τα ίδια πρωτόκολλα μετρήσεων και αγώγιμο σώμα, η διακριτική ικανότητα είναι αρκετά μειωμένη.

Επιπλέον, προκύπτει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο αριθμός των μετρήσεων επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας, και αυτό φαίνεται με σύγκριση ενός πλήρους πακέτου μετρήσεων σε σύγκριση με ένα βελτιστοποιημένο opt-1, όπου στην πρώτη περίπτωση οι μετρήσεις φτάνουν τις 10000 κατά προσέγγιση ενώ στη δεύτερη τις 1000 ή 200 κατά προσέγγιση για opt-1 και opt-2 αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ (TIME-LAPSE)

4.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία μελέτη που είναι εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης για διαχρονική παρακολούθηση εξάπλωσης ρύπων, για περιβαλλοντικούς σκοπούς ή μελέτη σωμάτων που εξαπλώνονται και αφορούν άλλους κλάδους των γεωεπιστημών.

Η διαχρονική μελέτη σώματος που εξαπλώνεται παρουσιάζει στάδια επεξεργασίας παρόμοια με εκείνα που αναφέρθηκαν προηγουμένως για απλές δομές. Στη περίπτωση αυτή η διαφορά είναι ότι τα έτοιμα δεδομένα από αντιστροφή, μετά την εισαγωγή χρόνων, υπόκεινται και πάλι στη διαδικασία της αντιστροφής, αυτή τη φορά όμως όλα ταυτόχρονα, για να δοθεί το διαχρονικό αποτέλεσμα που επιθυμούμε.

4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΙΑΙΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΧΡΟΝΟΥ

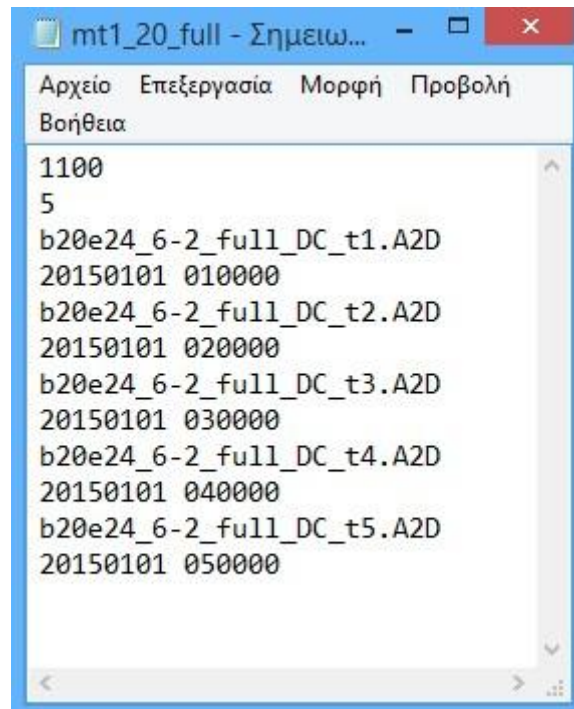
Αρχικά τα συνθετικά μοντέλα παράγονται με την ίδια διαδικασία όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής. Πλέον τα μοντέλα αυτά θα περαστούν από νέα αντιστροφή για εξαγωγή 4D αποτελέσματος.

Πρώτο βήμα είναι η εισαγωγή χρόνων και ημερομηνίας στις τομογραφίες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στη διαχρονική μελέτη (σχήμα 4.2.1). Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του λογισμικού DC_2DPRO. Η διαδικασία γίνεται για όλες τις τομογραφίες κάθε μία ξεχωριστά.

	Data.#	yyyymmdd	hhmmss
1) ref. time	1	20150101	010000
2) ref. time	10147	20150101	010001

Σχήμα 4.2.1: Εισαγωγή ημερομηνίας και ώρας με την ημερομηνία να διατηρείται σταθερή ενώ για κάθε τομογραφία η αρχική και τελική ώρα έχουν διαφορά 1 δευτερόλεπτο. Ωστόσο κάθε τομογραφία διαφέρει από την επομένη της κατά 1 ώρα.

Στη συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία αρχείου p4d, όπου προβάλλονται οι τροποποιημένες τομογραφίες με χρόνους, η ημερομηνία και η αρχική ώρα για κάθε μια, αλλά και το πλήθος των τομογραφιών, όπου στην περίπτωση μας είναι 5 κάθε φορά. (σχήμα 4.2.2).



Σχήμα 4.2.2: Οι τομογραφίες που έχουν δεχθεί εισαγωγή χρόνου, μέσω αρχείου rfd όπως εικονίζεται, και με αναφορά της χρονικής στιγμής και ημερομηνίας, είναι έτοιμες για την τελική αντιστροφή που θα δώσει το αποτέλεσμα 4 διαστάσεων.

Το αρχείο αυτό θα εισαχθεί στο πρόγραμμα DC_2DPRO, το οποίο είναι σχεδιασμένο για αντιστροφή 4 διαστάσεων.

4.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ 4D ΑΡΧΕΙΟΥ

Η αντιστροφή του αρχείου r4d, είναι λίγο πιο πολύπλοκη από εκείνη για μία απλή τομογραφία, καθώς ταυτόχρονα επεξεργάζονται 5 τομογραφίες με διαφορετικούς χρόνους οι οποίες αντιστρέφονται σε κοινό επίπεδο.

Ορίζονται συγκεκριμένες παράμετροι (σχήμα 4.3.1), όπως η νόρμα που στην παρούσα διατριβή είναι L1 και ο αριθμός των επαναλήψεων (6), και εκτελείται αντιστροφή(σχήματα 4.3.2 - 4.3.5).

Στη συνέχεια μέσω του προγράμματος DRAW 4D, εξάγεται η εικόνα όπως προκύπτει μετά την αντιστροφή όπου προβάλλονται οι τομογραφίες για κάθε χρονική στιγμή (σχήμα 4.3.6).

Σχήμα 4.3.1: Αφού οριστούν οι παράμετροι που επιθυμούμε εκτελείται στη συνέχεια η αντιστροφή

```
>> RMS err =      1.364363E-04
6.077663E-03      3.133618E-02      8.567084E-02      2.221831E-01
5.414143E-01      1.466786          3.284249
1.170191E-02      1.829871E-02      5.770135E-02      1.233812E-01
3.243849E-01      9.602938E-01      1.098558
7 48 =      1.348569E-04
7          5940          48
50701440      51470400
>> No. of zeroed input data =      201
>> No. of data exceeding limits =      201
>> No. of data deletd by CRFP =      0
>> No. of negative data =      387
>> No of input data =      50735
>> No of used data =      50344
7 48

JACOBIAN CAL :      192      1922      192
4 48
```

Σχήμα 4.3.2: Στα πρώτα στάδια της αντιστροφής αναφέρονται τα σφάλματα και το πλήθος των μετρήσεων που εισάχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν. Για την αντιστροφή καλείται ο Ιακωβιανός Πίνακας.

```

>>>> Update of Lagrangian multipliers <<<<
> Roughness measure (Model perturbation)
  -Damping (L1 norm):    3.246665E-04
  -L1, L2 norms         33.026894      11.804037
> Lmin, Lmax, L =       1.615245E-03      16.152447      1.615245E-01
> Roughness measure (Model perturbation)
  -Damping (L1 norm):    3.246665E-04
  -L1, L2 norms         33.026894      11.804037
> Roughness measure (Model)
  -Damping (L1 norm):    1.855326E-03
  -L1, L2 norms         212.759521      451.604767
> Roughness measure (4D Model)
  -Damping (L1 norm):    1.883477E-04
  -L1, L2 norms         17.781416      4.322232
Model rgh (L1,L2)       746.284668      2771.406006
Model rgh4D (L1,L2)    201.510757      555.100708

>>>> Update of Lagrangian multipliers (4D) <<<<
> Roughness measure (Data)
  -Damping (L1 norm):    7.991863E-05      1.598373E-03
  -L1, L2 norms         318.946655      13.969506
> Expeccted misfit rouhness (space)      318.946655      13.969506
  - 4D Roughness measure      26.831450
  - 4D Roughness target      26.831450
> Betta =      1.772931E-02
      26.831450      26.831450

```

Σχήμα 4.3.3: Στη συνέχεια γίνεται χρήση της νόρμας L1

```

Roughness measure (4D Model)
  -Damping (L1 norm):    6.452381E-04
  -L1, L2 norms         35.210461      15.494520
Model rgh (L1,L2)       506.942780      1203.215454
Model rgh4D (L1,L2)    173.164871      374.761139

>>>> Update of Lagrangian multipliers (4D) <<<<
  Roughness measure (Data)
  -Damping (L1 norm):    3.011098E-04      6.022196E-03
  -L1, L2 norms         1009.893616      181.174484
> Expeccted misfit rouhness (space)      1009.893616      181.174484
  - 4D Roughness measure      29.473547
  - 4D Roughness target      29.473547
> Betta =      2.896978E-02
      29.473547      29.473547
  Roughness measure (4D Model)
  -Damping (L1 norm):    5.401135E-04
  -L1, L2 norms         29.473547      10.856749
    7    48

```

Σχήμα 4.3.4: Συνέχιση της διαδικασίας

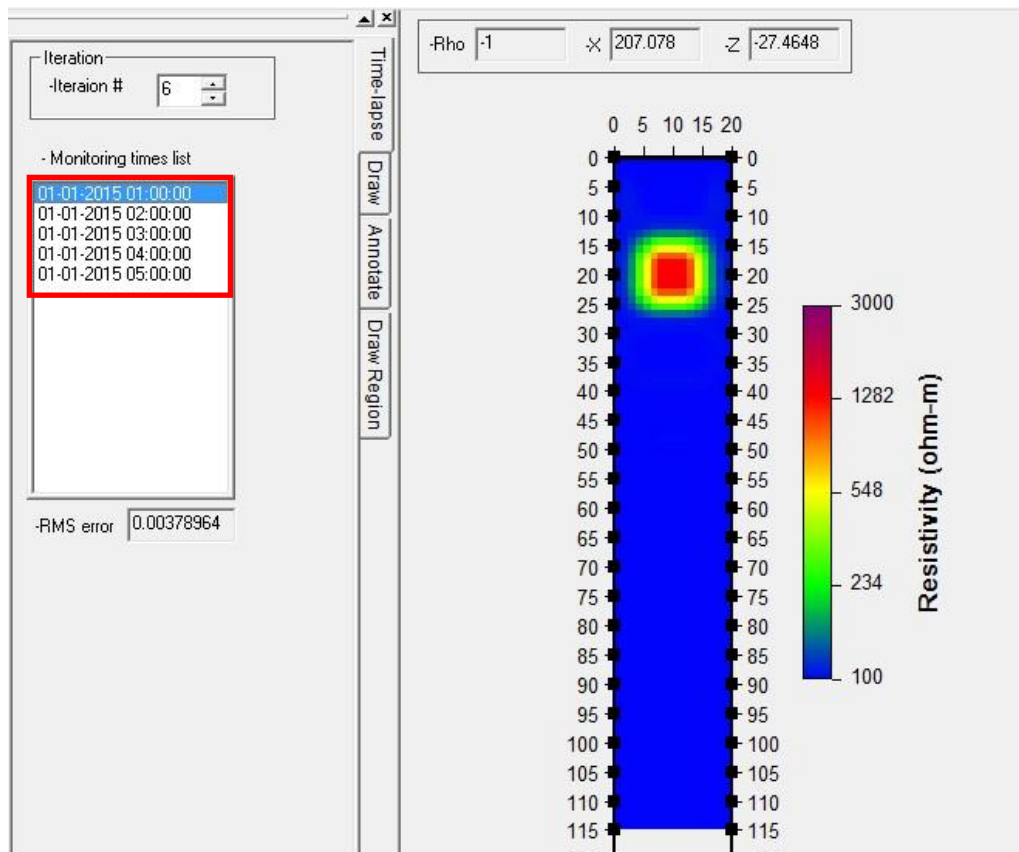
```

JACOBIAN CAL : 192 192
>> ITERATION NO = 0
> Unweighted RMS ERROR(App.R.) = 0.485214
> Weighted RMS ERROR(App.R.) = 0.471868
>> Time-lapse RMS error (Unweighted, weighted)
> Time lapse# 1 10147 0.117693 0.113243
> Time lapse# 2 10062 0.180606 0.178387
> Time lapse# 3 10031 0.297130 0.292864
> Time lapse# 4 10093 0.400485 0.380547
> Time lapse# 5 10011 0.941789 0.918044
>> Lmin, Lmax, L (original) = 1.000000E-01 10.000000 1.000000
> Roughness measure (Data)
> -Damping (L1 norm): 2.927540E-03 5.855079E-02
> -L1, L2 norms 12110.982422 11486.998047
> Data misfit roughness (space) 11486.998047
L1, L2 = 9417.614258 9762.008789
> Data misfit roughness ( time) 9762.008789
> Roughness ratio (Rgh_4D/Rgh_3D) 8.498312E-01
>> Betta = 1.000000E-01
7 48

JACOBIAN CAL : 192 192
7 48

```

Σχήμα 4.3.5: Αμέσως μετά ξεκινούν οι 6 επαναλήψεις της αντιστροφής προς εξαγωγή αποτελέσματος. Κάθε φορά ορίζεται το σφάλμα και γίνεται προσπάθεια μείωσής του. Επιπλέον για κάθε επανάληψη ορίζονται οι νόρμες. Για κάθε επανάληψη καλείται ο Ιακωβιανός Πίνακας.

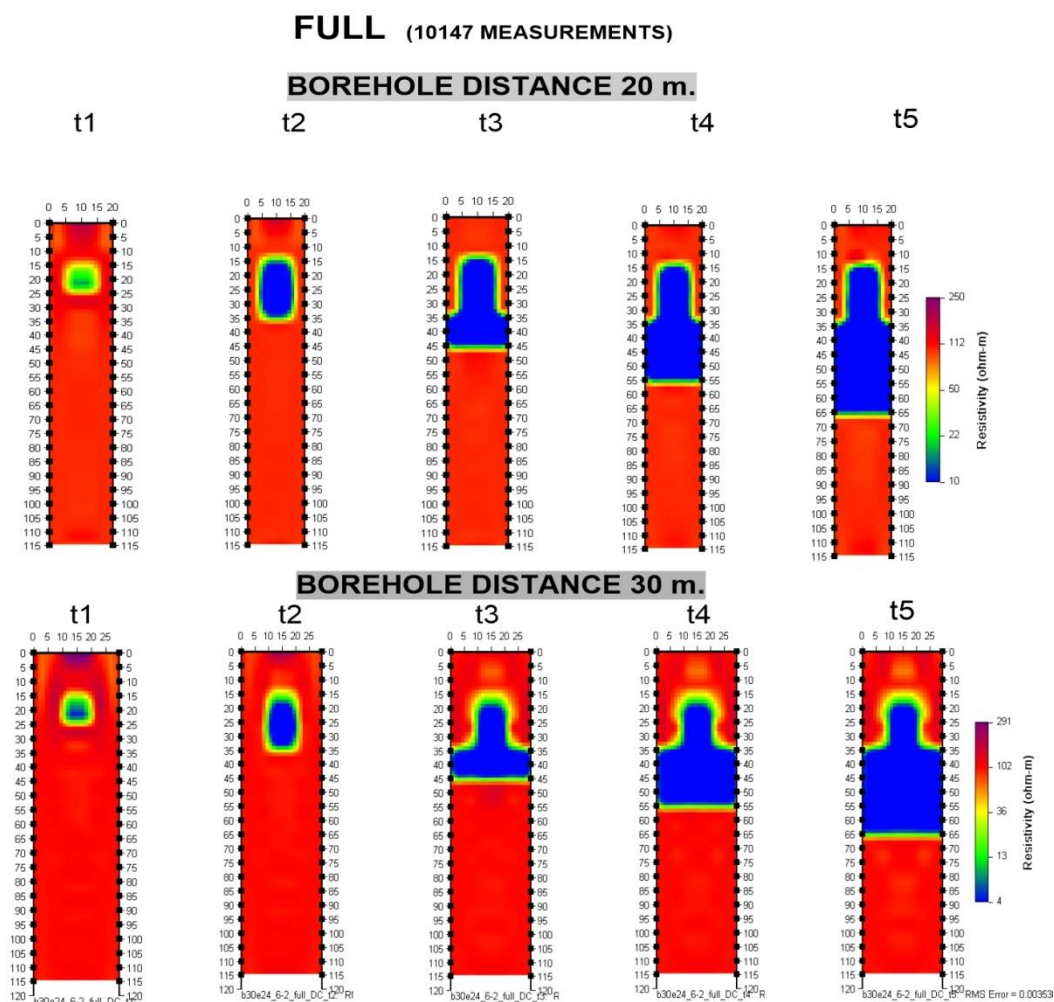


Σχήμα 4.3.5: Το αρχείο P4D μετά την αντιστροφή εισάγεται στο πρόγραμμα DRAW 4D, όπου εμφανίζεται όλες οι τομογραφίες με κοινά χαρακτηριστικά και με αντιστοίχιση χρόνου για κάθε μια t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 .

4.4 ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει η διαχρονική μελέτη των μοντέλων 4-8 και 9-13 όπως προέκυψαν από την αντιστροφή, όπου το σώμα που μεταβάλλεται έχει αντίσταση 1 Ohm-m στην πρώτη ομάδα και 5000 Ohm-m στη δεύτερη (σχήματα 3.5.1-3.5.12).

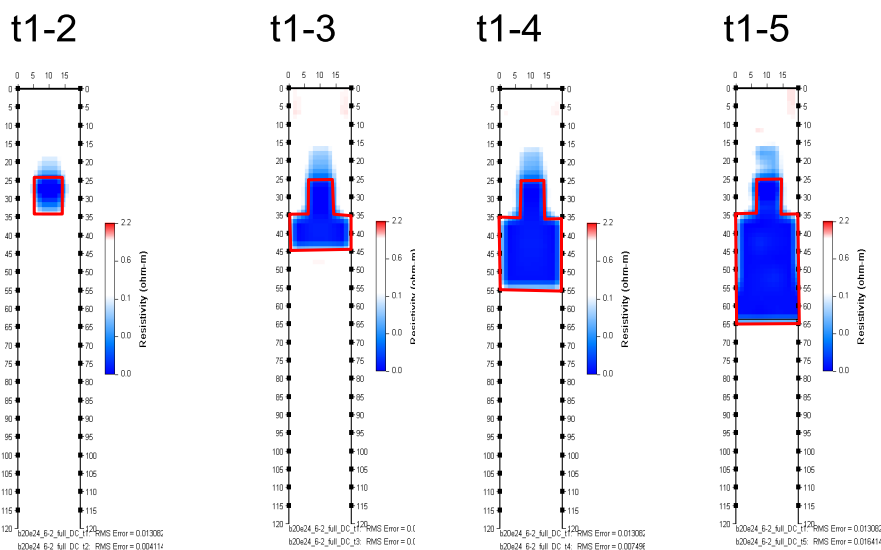
- **Μοντέλα 4-8 με αντίσταση 1 Ohm-m** (σχήματα 3.5.1-3.5.6)



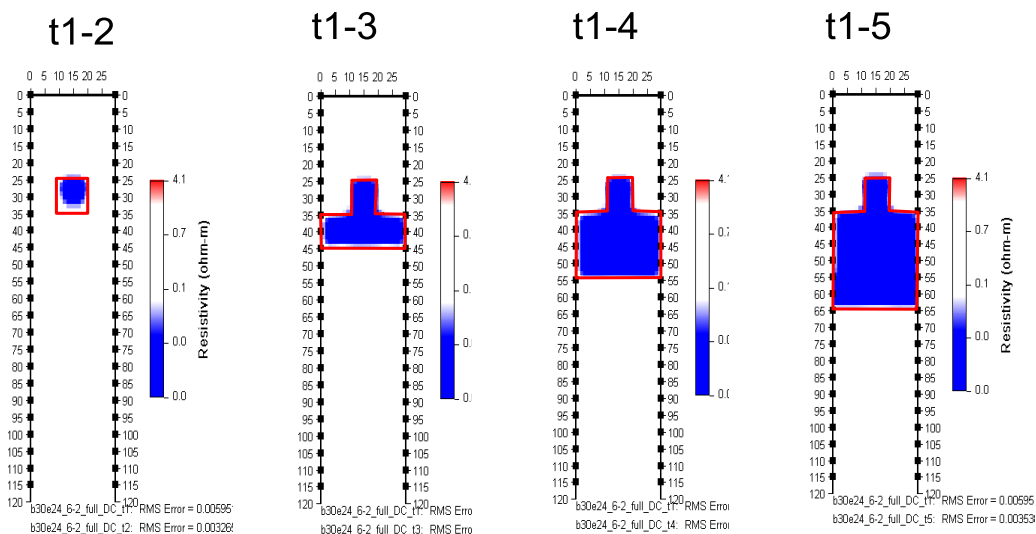
Σχήμα 3.5.1: Διαχρονική μελέτη αγωγίμου σώματος σε 5 χρονικές στιγμές διαφοράς 1 ώρας για το πλήρες σετ μετρήσεων και για τα δυο ζεύγη γεωτρήσεων.

FULL (difference image)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



BOREHOLE DISTANCE 30 m.

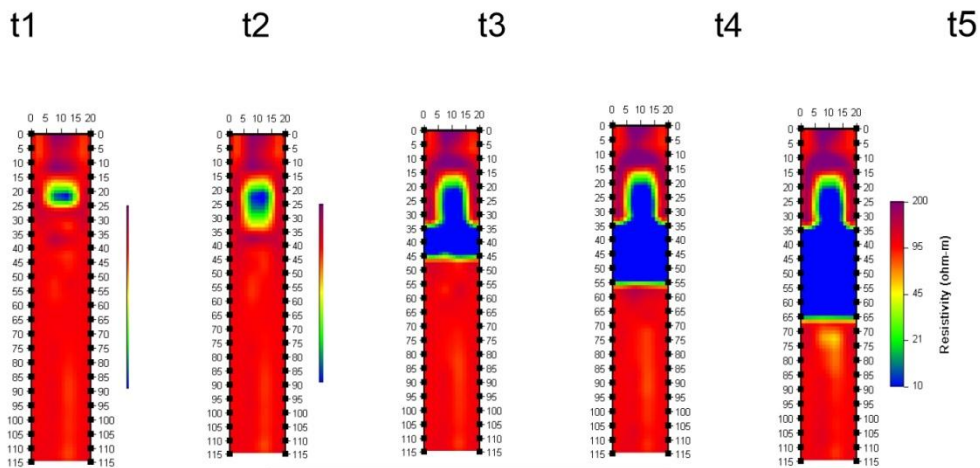


Σχήμα 3.5.2: Σύγκριση των σωμάτων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και παρουσίαση των μεταβολών τους σε κάθε περίπτωση. Σε κόκκινο πλαίσιο φαίνεται η ιδανική μορφή του σώματος που αναμένεται σε κάθε σύγκριση.

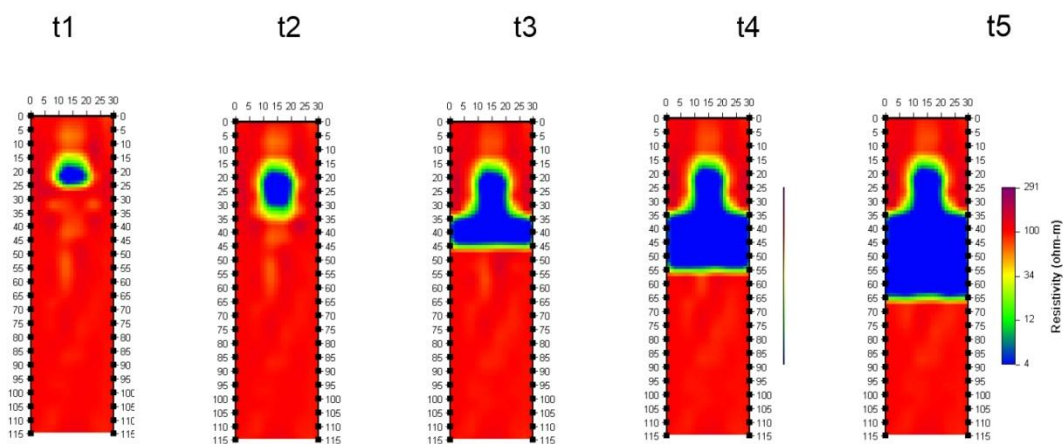
Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.5.1. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταυτίζονται πολύ καλά με τα αρχικά πρωτότυπα μοντέλα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.2.

OPTIMIZED:CLUSTERS 6-FLAG 2 (868 MEASUREMENTS)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



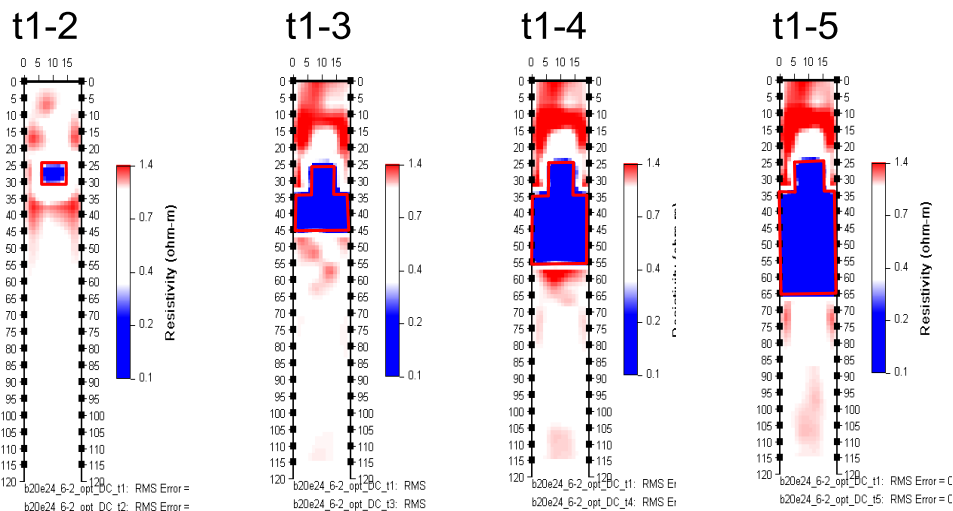
BOREHOLE DISTANCE 30 m.



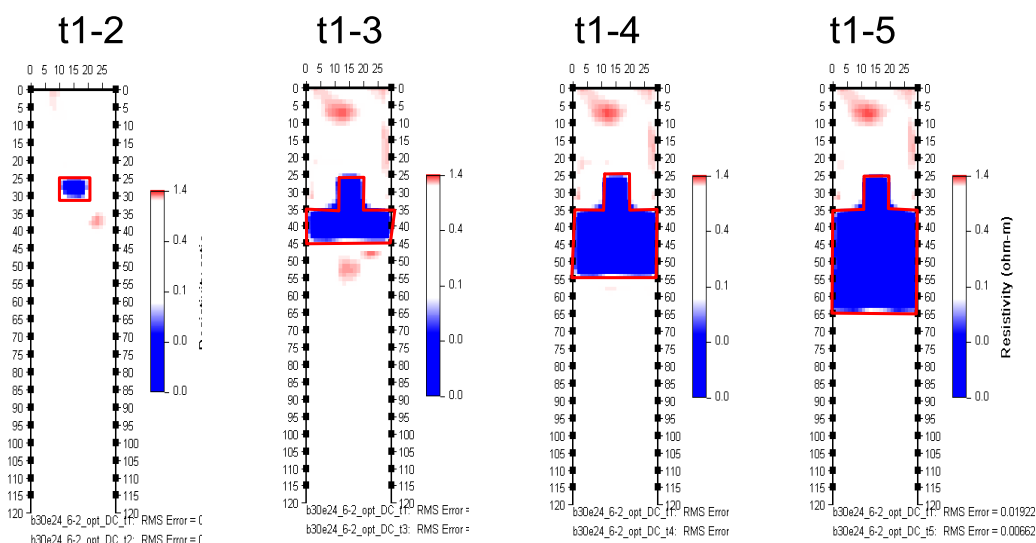
Σχήμα 3.5.3: Διαχρονική μελέτη αγωγίμου σώματος σε 5 χρονικές στιγμές διαφοράς 1 ώρας για το πλήρες σετ μετρήσεων και για τα δυο ζεύγη γεωτρήσεων.

OPTIMIZED:CLUSTERS 6-FLAG 2(difference image)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



BOREHOLE DISTANCE 30 m.

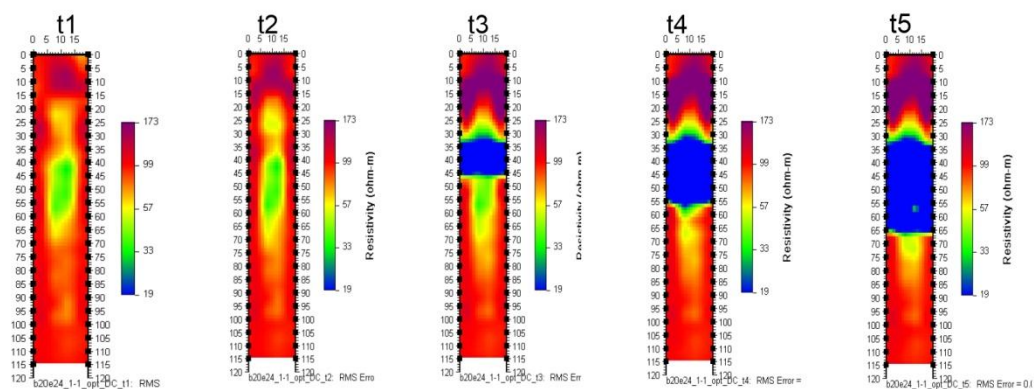


Σχήμα 3.5.4: Σύγκριση των σωμάτων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και παρουσίαση των μεταβολών τους σε κάθε περίπτωση. Σε κόκκινο πλαίσιο φαίνεται η ιδανική μορφή του σώματος που αναμένεται σε κάθε σύγκριση.

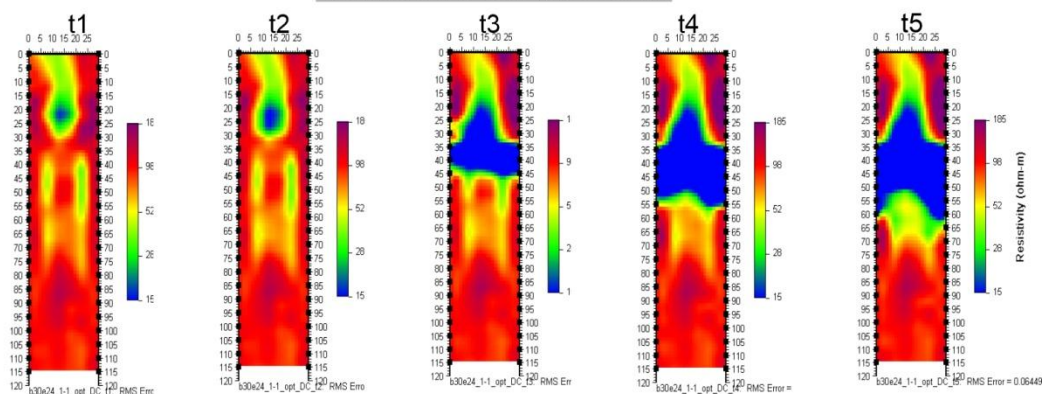
Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.5.3. Τα μοντέλα αντιστροφής των opt-1 μετρήσεων ταυτίζονται αρκετά καλά με τα αρχικά πρωτότυπα μοντέλα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.4.

OPTIMIZED:CLUSTERS 1-FLAG 1 (168 MEASUREMENTS)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



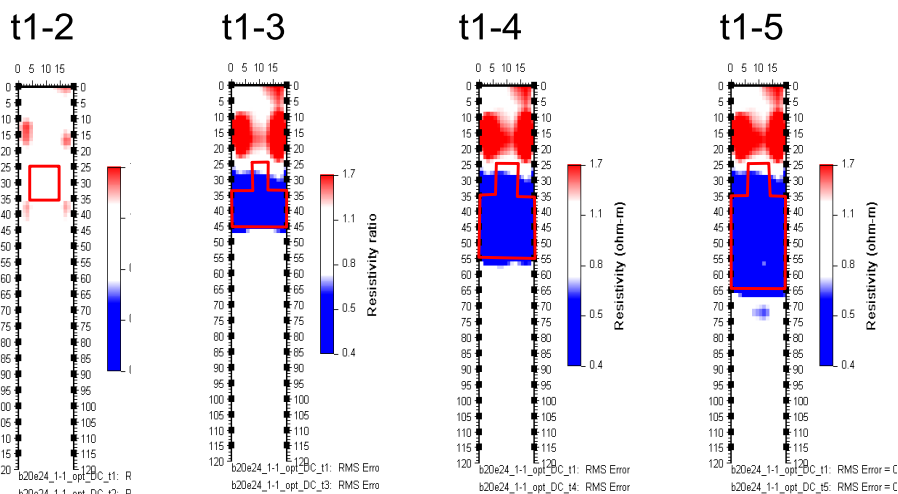
BOREHOLE DISTANCE 30 m.



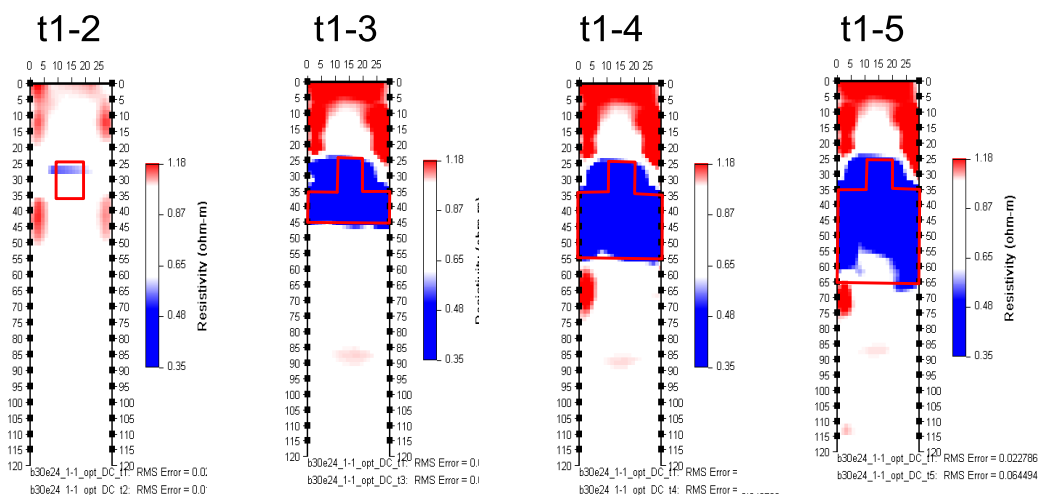
Σχήμα 3.5.5: Διαχρονική μελέτη αγωγιμότητας σε 5 χρονικές στιγμές διαφοράς 1 ώρας για το πλήρες σετ μετρήσεων και για τα δυο ζεύγη γεωτρήσεων.

OPTIMIZED:CLUSTERS 1-FLAG 1 (difference image)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



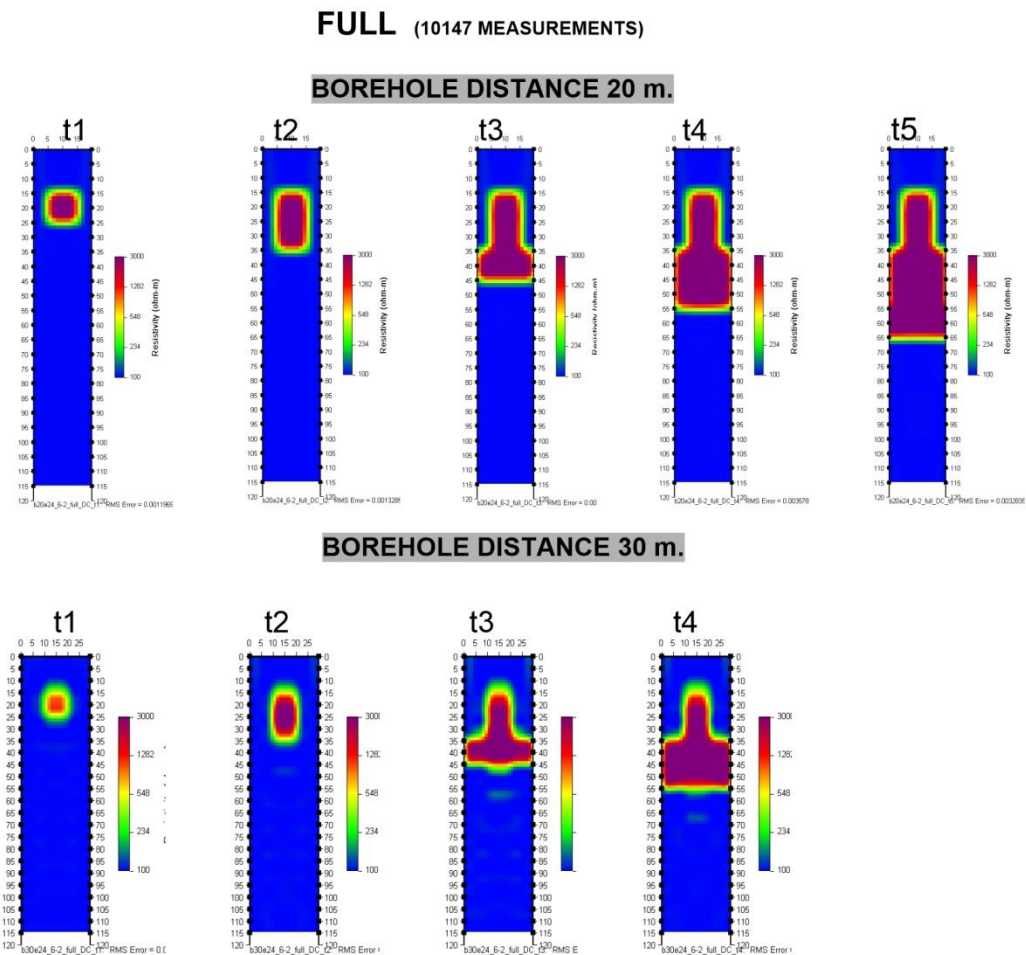
BOREHOLE DISTANCE 30 m.



Σχήμα 3.5.6: Σύγκριση των σωμάτων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και παρουσίαση των μεταβολών τους σε κάθε περίπτωση. Σε κόκκινο πλαίσιο φαίνεται η ιδανική μορφή του σώματος που αναμένεται σε κάθε σύγκριση.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.5.5. Τα μοντέλα αντιστροφής των opt-2 μετρήσεων δεν ταυτίζονται καθόλου με τα αρχικά πρωτότυπα μοντέλα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.6.

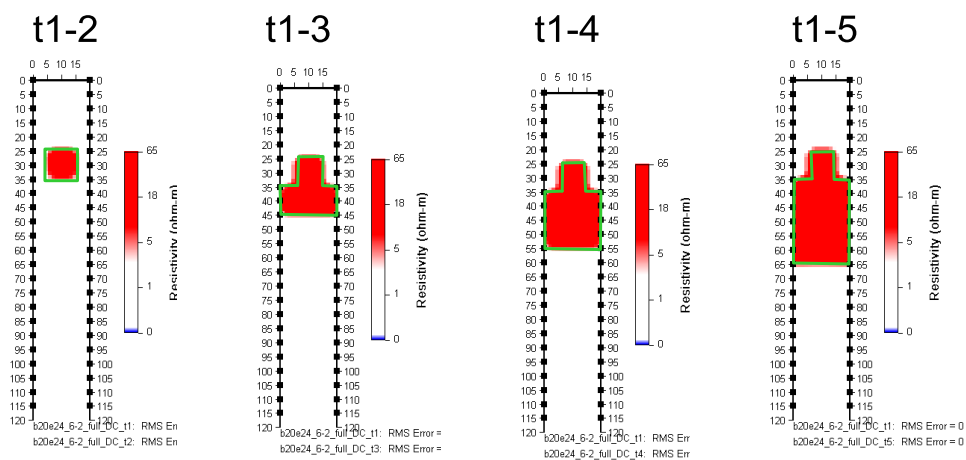
- **Μοντέλα 9-13 με αντίσταση 5000 Ohm-m** (σχήματα 3.5.7-3.5.12)



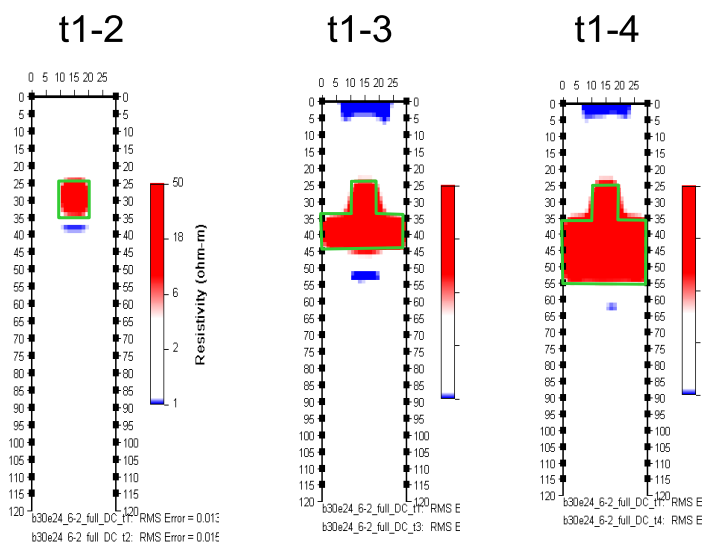
Σχήμα 3.5.7: Διαχρονική μελέτη μη αγώγιμου σώματος σε 5 χρονικές στιγμές διαφοράς 1 ώρας για το πλήρες σετ μετρήσεων και για τα δυο ζεύγη γεωτρήσεων.

FULL (difference image)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



BOREHOLE DISTANCE 30 m.



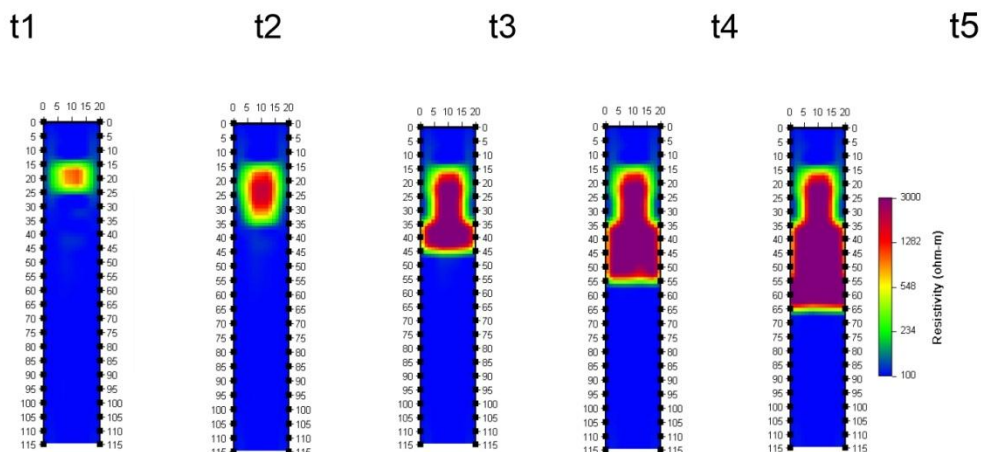
Σχήμα 3.5.8: Σύγκριση των σωμάτων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και παρουσίαση των μεταβολών τους σε κάθε περίπτωση. Σε πράσινο πλαίσιο φαίνεται η ιδανική μορφή του σώματος που αναμένεται σε κάθε σύγκριση.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.5.7. Τα μοντέλα αντιστροφής των πλήρων μετρήσεων ταυτίζονται πολύ καλά με τα αρχικά πρωτότυπα μοντέλα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.8.

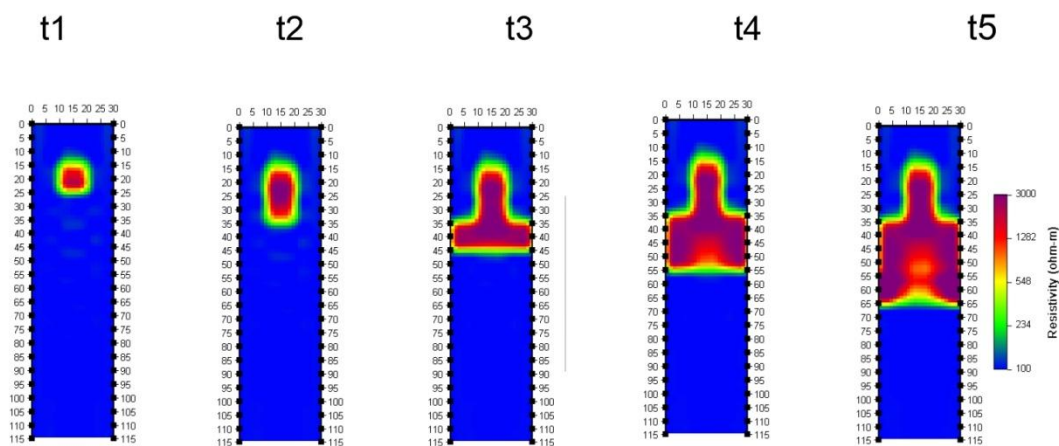
Μόνο για τη χρονική στιγμή t_5 και για το ζεύγος γεωτρήσεων 30m το μοντέλο δεν αποκρίνεται τόσο καλά όσο αναμενόταν. Αυτό μπορεί να συμβαίνει από ακραίες τιμές στο πακέτο μετρήσεων και επηρεάζουν αρνητικά τη διακριτική ικανότητα.

OPTIMIZED:CLUSTERS 6-FLAG 2 (868 MEASUREMENTS)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



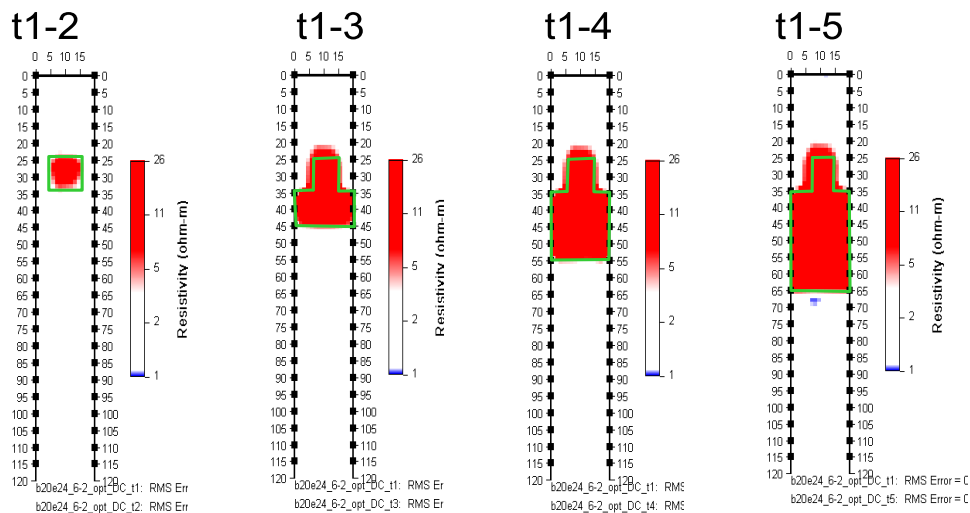
BOREHOLE DISTANCE 30 m.



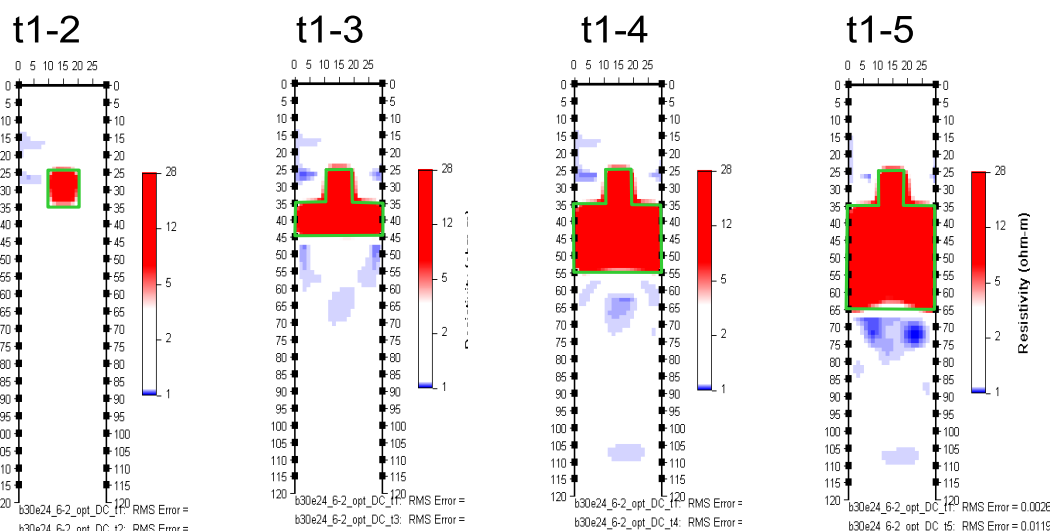
Σχήμα 3.5.9: Διαχρονική μελέτη μη αγωγίμου σώματος σε 5 χρονικές στιγμές διαφοράς 1 ώρας για το πλήρες σετ μετρήσεων και για τα δυο ζεύγη γεωτρήσεων.

OPTIMIZED:CLUSTERS 6-FLAG 2(difference image)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



BOREHOLE DISTANCE 30 m.

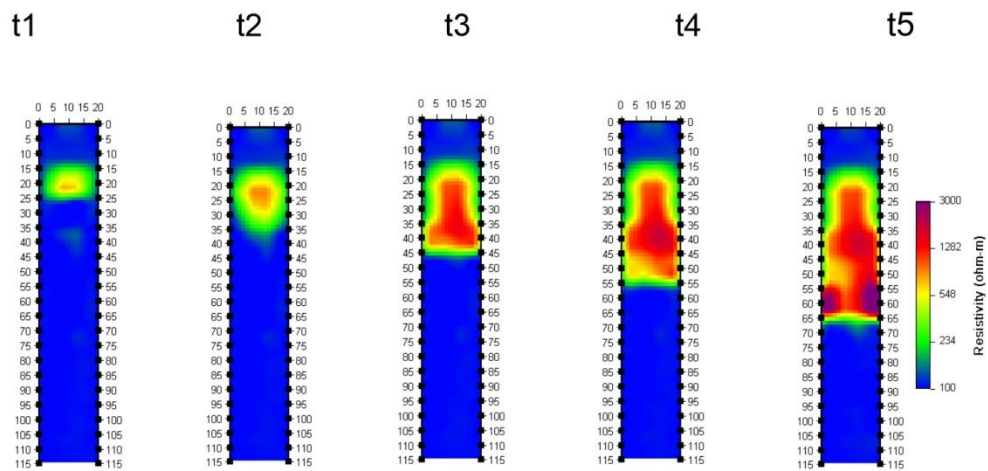


Σχήμα 3.5.10: Σύγκριση των σωμάτων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και παρουσίαση των μεταβολών τους σε κάθε περίπτωση. Σε πράσινο πλαίσιο φαίνεται η ιδανική μορφή του σώματος που αναμένεται σε κάθε σύγκριση.

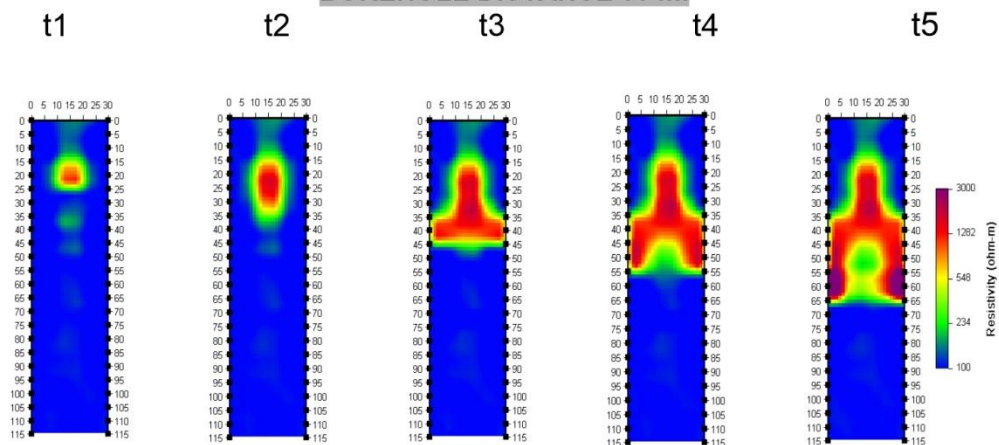
Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.5.9. Τα μοντέλα αντιστροφής των opt-1 μετρήσεων ταυτίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με τα αρχικά πρωτότυπα μοντέλα όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5.10. τα όρια των σωμάτων χάνονται λίγο στις γεωτρήσεις των 20m.

OPTIMIZED:CLUSTERS 1-FLAG 1 (168 MEASUREMENTS)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



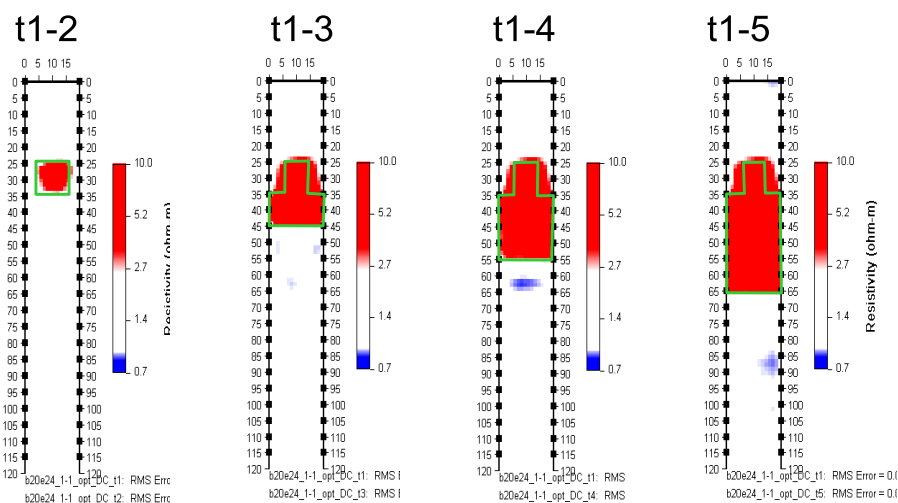
BOREHOLE DISTANCE 30 m.



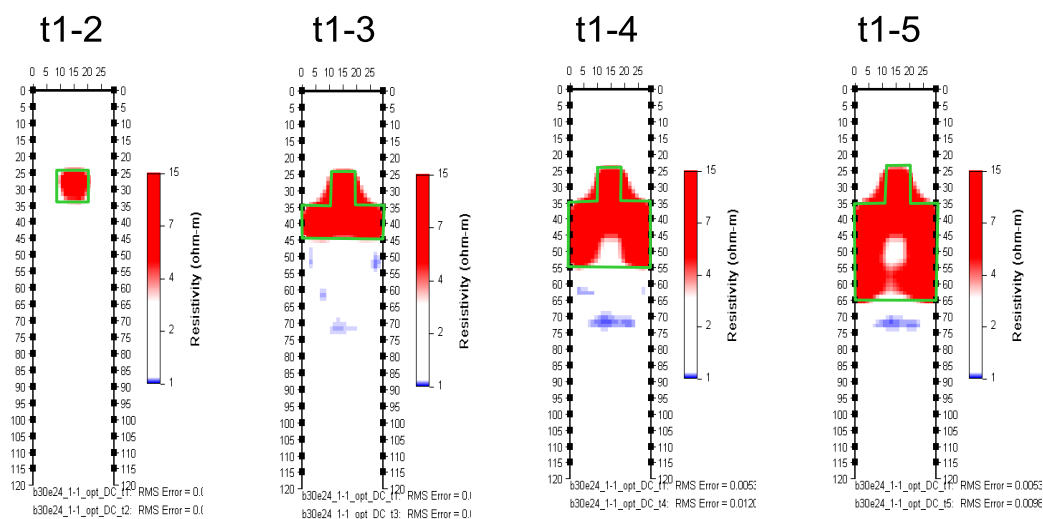
Σχήμα 3.5.11: Διαχρονική μελέτη μη αγώγιμου σώματος σε 5 χρονικές στιγμές διαφοράς 1 ώρας για το πλήρες σετ μετρήσεων και για τα δυο ζεύγη γεωτρήσεων.

OPTIMIZED:CLUSTERS 1-FLAG 1(difference image)

BOREHOLE DISTANCE 20 m.



BOREHOLE DISTANCE 30 m.



Σχήμα 3.5.12: Σύγκριση των σωμάτων για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και παρουσίαση των μεταβολών τους σε κάθε περίπτωση. Σε πράσινο πλαίσιο φαίνεται η ιδανική μορφή του σώματος που αναμένεται σε κάθε σύγκριση.

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τα τρία πρωτόκολλα για αποστάσεις γεωτρήσεων 20 και 30 m παρουσιάζονται μαζί με το αρχικό μοντέλο στο Σχ. 3.5.11. Τα μοντέλα αντιστροφής των opt-2 μετρήσεων δεν ταυτίζονται καλά με τα αρχικά πρωτότυπα καθώς τα όρια των στόχων δεν είναι εμφανή παρά μόνο η μορφή και το βάθος που εκτείνονται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.12.

Η διαχρονική μελέτη τόσο για αγώγιμο όσο και για αντιστατικό σώμα δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως παρατηρήθηκε και στην μελέτη των μεμονωμένων μοντέλων, περισσότερες μετρήσεις οδηγούν σε υψηλότερη ευκρίνεια.

Επιπλέον, τόσο για τα ζεύγη γεωτρήσεων αποστάσεως 20 μέτρων όσο και για εκείνα των 30 μέτρων, τα συμπεράσματα είναι ίδια αναφορικά με τη σύγκριση των σετ μετρήσεων.

Για τα πλήρη σετ μετρήσεων η σύγκριση σε διαφορετικές χρονικές τιμές δίνει μεταβολή που ταιριάζει σχεδόν απόλυτα με το ιδανικό σχήμα. Το ίδιο ισχύει και για τα βελτιστοποιημένα σετ orf-1, όπου η μεταβολή ταυτίζεται σε καλό βαθμό με την ιδανική μορφή. Όμως για το σετ orf-2, η μεταβολή και η πρωτότυπη μορφή εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες, ωστόσο δεν ορίζονται ακριβώς τα όρια του στόχου (χαρακτηριστικό το παράδειγμα του σχήματος 3.5.6).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκαν οι βέλτιστες διατάξεις μετρήσεων για ηλεκτρική τομογραφία με ηλεκτρόδια που είναι τοποθετημένα σε δυο γεωτρήσεις συγκεκριμένων αποστάσεων η μία από την άλλη.

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε γεωτρήσεις, με αποστάσεις 20 και 30 μέτρα μεταξύ τους, δεδομένου ότι οι μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων υπερτερούν από τις επιφανειακές ως προς την διακριτική ικανότητα. Η διακριτική ικανότητα μιας τομογραφίας με επιφανειακή διάταξη ηλεκτροδίων είναι αρκετά περιορισμένη καθώς με την αύξηση του βάθους επηρεάζεται από μεγαλύτερες σε έκταση και όγκο περιοχές. Ωστόσο με τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε γεωτρήσεις, το σήμα βρίσκεται πιο κοντά στις υπό εξέταση δομές, άρα κατά μήκος του στόχου υπάρχει καλύτερη κάλυψη με αποτέλεσμα την αναμενόμενη καλύτερη διακριτική ικανότητα.

Η εφαρμογή της μεθόδου του Ιακωβιανού πίνακα είχε σαν αποτέλεσμα τη λήψη συγκεκριμένων πακέτων βέλτιστων μετρήσεων τα οποία αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν με τα ιδανικά πρωτότυπα μοντέλα. Ειδικότερα εξετάστηκαν τρία διαφορετικά πρωτόκολλα μετρήσεων, το πλήρες, opt-1 και opt-2.

Οι τιμές των μετρήσεων κατανεμήθηκαν ως εξής:

Αποστάσεις/ Πακέτα μετρήσεων	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	10147	868	168
Γεωτρήσεις 30 μ.	9670	1116	216

Πίνακας: προβολή συνολικού πλήθους μετρήσεων για κάθε γεωμετρία και κάθε μοντέλο

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν συνθετικές μετρήσεις για συγκεκριμένα μοντέλα υπεδάφιας αντίστασης και αποστάσεις γεωτρήσεων και τέλος τα συνθετικά δεδομένα υποβλήθηκαν στη διαδικασία της αντιστροφής. Η παραπάνω διαδικασία εκτελέστηκε τόσο για στατικά όσο και για διαχρονικά μοντέλα αντίστασης. Η ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της αντιστροφής σε σχέση με τα πρωτότυπα μοντέλα επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη σχετική απόδοση των πρωτοκόλλων.

Σε σχέση με την ποσοτική σύγκριση στον Πίνακα 16 παρουσιάζεται ένας μέσος όρος όλων των συντελεστών συσχέτισης. Καθώς πολλές φορές ο συντελεστής συσχέτισης δίνει την εσφαλμένη εντύπωση ότι η αντιστροφή έχει μη ικανοποιητική απόδοση δεν αρκεί από μόνος του για την ουσιαστική αξιολόγηση των μοντέλων και η χρήση του ως μέσο αξιολόγησης πρέπει να γίνεται πάντα σε συνδυασμό με τον ποιοτικό έλεγχο ταύτισης.

Αποστάσεις/ Πακέτα μετρήσεων	Πλήρες	Opt-1	Opt-2
Γεωτρήσεις 20 μ.	0,903	0,668	0,492
Γεωτρήσεις 30 μ.	0,76	0,601	0,448

Πίνακας 16: προβολή συντελεστή συσχέτισης για κάθε γεωμετρία και κάθε πρωτόκολλο του μοντέλου

Επομένως με βάση τόσο την ποιοτική όσο και την ποσοτική σύγκριση των μοντέλων συμπεραίνονται τα εξής:

- Γενικά το πλήρες σετ δεδομένων δίνει και τα καλύτερα αποτελέσματα όπως αποδεικνύεται τόσο οπτικά όσο και με τον συντελεστή συσχέτισης.
- Το opt1 δίνει ποιοτικά πολύ καλά αποτελέσματα συγκρίσιμα σε ποιότητα με αυτά του πλήρους σετ δεδομένων σημειώνεται όμως ότι χρησιμοποιεί υποδεκαπλάσιες μετρήσεις σε σχέση με το πλήρες.
- Αντιθέτως το opt2 δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο για απλά μοντέλα. Έτσι όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα των μοντέλων τόσο το πλήρες σετ έχει καλύτερα αποτελέσματα.
- Όλα τα σετ δεδομένων παρουσιάζουν μείωση της διακριτικής ικανότητας για αποστάσεις γεωτρήσεων 30μ. Αυτό αποδεικνύεται τόσο από τον συντελεστή συσχέτισης (Πίνακας 16) όσο και από τις ποιοτικές συγκρίσεις
- Γενικά η απόδοση όλων των πρωτοκόλλων μειώνεται αναλογικά όσο πιο περίπλοκο είναι το μοντέλο.
- Γενικά η διακριτική ικανότητα όταν το σώμα είναι αντιστατικό είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με την περίπτωση που το σώμα είναι αγωγίμο

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για τα μοντέλα που μελετήθηκαν διαχρονικά. Η διαχρονική μελέτη τόσο για αγωγίμο όσο και για αντιστατικό σώμα δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως παρατηρήθηκε και στην ερμηνεία των συνθετικών μοντέλων μεμονωμένα, περισσότερες μετρήσεις δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα.

Βέβαια σημαντικός παράγοντας είναι και η πολυπλοκότητα των μοντέλων. Σε εκείνα της διαχρονικής μελέτης, ο συντελεστής συσχετισμού είναι αρκετά μεγάλος και για τα σετ βελτιστοποιημένων μετρήσεων orf-2, όπου κανείς θα ανέμενε περιορισμένη ευκρίνεια ως προς το σχήμα και τα όρια του στόχου, πλην ορισμένων εξαιρέσεων.

Μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια συμβολή στη μελέτη του προβλήματος εύρεσης βέλτιστων πρωτοκόλλων για γεωηλεκτρικές μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων. Το γενικότερο θέμα μελέτης δεν έχει σαφώς εξαντληθεί και επιδέχεται περαιτέρω έρευνας. Ειδικότερα η έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί τόσο σε μεγαλύτερο εύρος πρωτοκόλλων όσο και σε μεγαλύτερο εύρος μοντέλων, ειδικότερα σε σχέση με τις αποστάσεις των γεωτρήσεων. Επίσης θα μπορούσαν να δοκιμαστούν άλλες μεθοδολογίες εύρεσης βέλτιστων μετρήσεων και να συγκριθούν με αυτές που έχουν προταθεί από άλλους μελετητές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασίου Ελένη (2009). Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη βέλτιστη στρατηγική μέτρησης και αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας. *Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*
- Παπαζάχος Β.Κ. (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.*
- Σιμουρδάνης Κλεάνθης (2009). Πειραματική μελέτη ηλεκτρικής τομογραφίας με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις. *Διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*
- Σιμουρδάνης Κλεάνθης (2013). Ανάπτυξη τομογραφιών γεωφυσικών τεχνικών για τη μελέτη γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων. *Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*
- Zhou, B., and Greenhalgh, S.A., 1997. A synthetic study on cross-hole resistivity imaging with different electrode arrays: *Exploration Geophysics*, 28, 1-5.
- Zhou, B., and Greenhalgh, S.A., 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations: *Geophysical Prospecting*, 48, 887-912
- Papadopoulos, N., and Sarris, A., (2005). *Geophysical Investigation of Archaeological Sites through the Application of 2D and 3D Geoelectrical Models*. 7th Two-Day Meeting of FORTH, Academic Village of Anogia, 10-11 June 2005.
- Papadopoulos, N., Tsokas, G.N., Tsourlos, P., and Sarris, A., (2005). *Archaeological Investigations by Means of Resistivity Inversion*. Oral presentation in the 11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Palermo, Italy, 4 -7 September 2005

- Stamatis, G., Sarris, A., Papadopoulos, N., Kokkinou, E., Topouzi, S., Kokkinaki, E., Moissi, E., Iakovou, M., Kassianidou, V., Papassavas, Papantoniou, G., Dikomitou, M., Stylianidis. St.(2005). *Palaepaphos, Cyprus: The contribution of Geographical Information Systems and Geophysical Prospection in the study of the archaeological topography and settlement patterns*. Proceedings of the XXXIII Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, March, 2005 –Tomar, Portugal, ed.Alexandra Figueiredo and Concalo Velho, 199-204.
- Sarris, A. and Papadopoulos, N., (2011). *Geophysical Surveying in Urban Centers of Greece*. 15th International Congress “Cultural Heritage and New Technologies”, Vienna, 2011
- Sarris, A., Papadopoulos, N., and Soupios, P., (2012). *The Contribution of Geophysical Approaches to the Study of Priniatikos Pyrgos*, Conference on Fieldwork and Research at Priniatikos Pyrgos and Environs 1912 – 2012, British School of Athens, 1-2 June 2012.
- Sarris, A., Papadopoulos, N., Déderix, S., Salvi, M.C., (2013). *Geophysical approaches applied in the ancient theatre of Demetriada, Volos*. First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation 2013, 8-10 April 2013, Paphos, Cyprus
- Stampolidis, A., Tsourlos, P., Soupios, P., Mimides, Th., Tsokas, G., Vargemezis, G. and Vafidis, A. (2005). Integrated geophysical investigation around the brackish spring of Rina, Kalimnos Isle, SW Greece, *Journal of Balkan Geoph. Society*, Vol. 8, No. 3, pp. 63-73.