Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΜΑΥΡΟΣ ΣΕΡΑΦΕΙΜ

Πτυχιούχος Φυσικός

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΤΟΜΕΣ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
‘ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ’

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : ‘ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ’

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2020

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΣΕΡΑΦΕΙΜ ΜΑΥΡΟΣ
Πτυχιούχος Φυσικός

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΤΟΜΕΣ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία',
Κατεύθυνση : 'Εφαρμοσμένη Γεωφυσική και Σεισμολογία'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης : 22/10/2020

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Τσούρλος Π., Επιβλέπων
Αναπληρωτής Καθηγητής Βαργεμέζης Γ., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
ΕΔΙΠ Φίκος Η., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

© Σεραφείμ Μαύρος, Φυσικός, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΕ ΤΟΜΕΣ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Serafeim Mavros, Physicist, 2020

All rights reserved.

Study of the application of electrical resistivity tomography in very long sections – *Master Thesis*

<u>Citation:</u>

Μαύρος Σ., 2020. – Μελέτη της εφαρμογής της ηλεκτρικής τομογραφίας σε τομές πολύ μεγάλου μήκους. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Mavros S., 2020 – Study of the application of electrical resistivity tomography in very long sections. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki.

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 τον 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.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Ευχαριστίες

Με το τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους και τους καθηγητές μου που συνέβαλαν σε όλη τη διάρκειά της.

Πρώτα από όλα, ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Παναγιώτη Τσούρλο, Καθηγητή του Τομέα Γεωφυσικής του Α.Π.Θ, ο οποίος με έκανε να αισθανθώ την επιστήμη της Γεωφυσικής ως ένα από τα κομμάτια του εαυτού μου και να καταφέρω να τη συνδέσω επιτυχώς με τις προπτυχιακές σπουδές μου στην επιστήμη της Φυσικής. Θέλω επίσης να τον ευχαριστήσω για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, τη συνεχή και αδιάκοπη στήριξή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τις σφαιρικές γνώσεις που μου μετέδωσε τόσο σε θέματα γεωφυσικής, όσο και σε θέματα προγραμματισμού και σκέψης.

Ένα ευχαριστώ είναι λίγο στον κ. Γεώργιο Βαργεμέζη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Α.Π.Θ. για όλες τις πολύτιμες συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής φοίτησής μου. Τον ευχαριστώ επίσης, για την ευκαιρία που μου προσέφερε για τη συμμετοχή μου σε μετρήσεις υπαίθρου και τη συλλογή εμπειριών και ουσιαστικής γνώσης πολλών αντικειμένων της επιστήμης της Γεωφυσικής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ηλία Φίκο, μέλος Ε.ΔΙ.Π του Α.Π.Θ. και της τριμελούς επιτροπής για την άριστη συνεργασία και τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια των μαθημάτων, αλλά και τη συνεργασία μας στις υπαίθριες μετρήσεις.

Επιπλέον, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, Γραβαλά Τριαντάφυλλο, Καφετζή Ιωάννα, Κυριακίδου Ελισάβετ-Γεωργία, Παπαδόπουλο Γεώργιο, Τοκμακτσή Ελένη και Χριστοφίδη Βασίλειο για τη συνδρομή τους στη λήψη μετρήσεων αλλά και τη συνεργασία μας σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών. Ευχαριστώ επίσης τον Λούβαρη Πρόδρομο για την βοήθεια και την άριστη σχέση όλο αυτό το διάστημα.

Ένα ένθερμο ευχαριστώ χρωστάω στην Ηλιάνα για την καθημερινή ενθάρρυνση, την υπομονή της και την συμπαράσταση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια αυτού του όμορφου κύκλου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη στήριξη όλα αυτά τα χρόνια για την επαγγελματική σταδιοδρομία μου και τις επιλογές μου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας σε τομές μεγάλου μήκους. Με τον όρο "μεγάλου μήκους" αναφερόμαστε σε τομές με ηλεκτρόδια διαφοροποιημένης πυκνότητας κατά μήκος τους, πιο αραιής στις άκρες των καλωδίων και ίσης κατανομής στο κεντρικό τμήμα τους. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη χωροθέτηση των ηλεκτροδίων στις διάφορες διατάξεις είναι για την εξασφάλιση μικρότερου αριθμού ηλεκτροδίων και ελαφρύτερου εξοπλισμού στη διαδικασία των μετρήσεων.

Για την παραγωγή πρωτοκόλλων μετρήσεων κατασκευάστηκε αλγόριθμος σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, ο οποίος δημιουργεί πρωτόκολλα διαφοροποιημένης ή ισοκατανεμημένης πυκνότητας ηλεκτροδίων μικρής ή μεγάλης κλίμακας με την εισαγωγή από τον χρήστη του αριθμού ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται και του τύπου της κατανομής που ακολουθούν. Τα παραγόμενα πρωτόκολλα αναπαράγουν τις παραδοσιακές διατάξεις διπόλου – διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας, της καινούργιας διάταξης της πλήρους εύρους βαθμίδας, πλήρη πρωτόκολλα που περιλαμβάνουν το συνδυασμό μετρήσεων διπόλου – διπόλου και πλήρους εύρους βαθμίδας, αλλά και την βελτιστοποιημένη διάταξη του Ιακωβιανού πίνακα ή πίνακα ευαισθησίας.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική παράχθηκαν πρωτόκολλα 33 ηλεκτροδίων αραιωμένης διάταξης στα άκρα και 48 ηλεκτροδίων σταθερής απόστασης. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας τους, οι δύο μορφές κατανομής ηλεκτροδίων δοκιμάζονται αρχικά σε ένα πλήθος παραδειγμάτων μικρής και μεγάλης κλίμακας.

Προκύπτει λοιπόν, το ερώτημα κατά πόσο επηρεάζεται η ποιότητα της εικόνας από την απουσία ορισμένων ηλεκτροδίων στις άκρες, αλλά και ποιες από τις διατάξεις μέτρησης, είτε τις τυπικές, είτε μη συμβατικές διατάξεις που κατασκευάστηκαν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλύτερα και να δώσουν ικανοποιητικότερα αποτελέσματα από άλλες διατάξεις.

Φαίνεται πως η αραίωση των ηλεκτροδίων στις άκρες των τομών για όλες τις διατάξεις ηλεκτροδίων δεν επηρεάζει τη συνολική ποιότητα των εικόνων αντιστροφής για μικρής και μεγάλης κλίμακας πρωτόκολλα. Η μετάβαση σε μεγάλη κλίμακα απλά αλλάζει τον αριθμό των μετρήσεων που είναι εφικτά πραγματοποιήσιμες λόγω γεωμετρικού παράγοντα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως από τη σχετική σύγκριση των δύο μορφών κατανομής ηλεκτροδίων αλλά και των διαφορετικών διατάξεων εξάγονται παρόμοιες εικόνες με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό επιβεβαιώνεται με συνθετικά μοντέλα μικρής και μεγάλης κλίμακας, καθώς και με πραγματικές μετρήσεις πεδίου μικρής κλίμακας. Για τεχνικούς λόγους δεν πραγματοποιήθηκαν τομογραφίες μεγάλου μήκους, παρόλα αυτά τα συμπεράσματα παραμένουν ίδια.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Abstract

The present thesis deals with an application of the electric tomography method to very long sections. By the term “very long sections” we refer to sections along which the electrode density varies. In particular, the electrodes are more sparse on the edges of the wires and evenly distributed in their center. Such an electrode configuration ensures that fewer electrodes are used and consequently, that the equipment is lighter and easier to handle during measurements.

For the creation of measurement protocols, we constructed an algorithm in the programming environment *Matlab*, which produces protocols of varying or evenly distributed electrode configurations in short or large scales. The number of electrodes as well as type of configuration is given as an input by the user. The resulting protocols reproduce the traditional dipole-dipole and multiple gradient array configurations, as well as the new full range gradient array configuration. Additionally, the algorithm creates full protocols which reproduce a combination of the dipole-dipole and the full range gradient array configurations, as well as the optimized Jacobian matrix or sensitivity matrix configuration.

In the present thesis, we produced two kinds of protocols: a protocol applicable to a configuration of 33 sparsely distributed electrodes on the edges and another applicable to a configuration of 48 evenly distributed electrodes. As a consistency check, the two kinds of electrode configurations were initially tested on a number of small and large-scale examples.

As a result, the following two questions arise; to what extent is the image quality affected in the absence of few electrodes on the edges, and which of the array configurations, conventional or novel, can provide the most satisfactory results?

It appears that reducing the number of electrodes on the edges of a section does not influence the overall quality of the inversion images. This statement is true for both small- and large-scale array protocols. The transition to a larger scale simply changes the number of measurements which are feasible due to the geometrical factor.

Finally, it is worth mentioning that the two types of electrode configurations (sparse on the edges or evenly spaced) and the various types of array configurations (conventional or novel) yield similar images with satisfactory results. This statement is confirmed by mock-models of both small and large scale as well as by actual small-scale field measurements. Due to technical reasons we did not perform large-scale tomography, however the conclusions remain the same.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες **5**

Περίληψη **6**

Abstract **7**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° **10**

1.1 Αντικείμενο - Σκοπός της διατριβής *10*

1.2 Μεθοδολογία *11*

1.3 Δομή της διατριβής *12*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο **13**

Βασική Θεωρία της Μεθόδου της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης **13**

Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Και Γεωφυσικές Μέθοδοι **14**

2.1 Βασικές αρχές της ηλεκτρικής μεθόδου διασκόπησης *15*

2.2 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης *16*

2.2.1 Θεμελιώδης θεωρία και σχέσεις των ηλεκτρικών πεδίων 20

2.3 Διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος σε ομογενή Γη *24*

2.3.1 Ηλεκτρόδιο ρεύματος στην επιφάνεια 28

2.3.2 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού 29

2.4 Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση *32*

2.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων *33*

2.6 Μέθοδοι μέτρησης ειδικής αντίστασης *39*

2.7 Βάθος διασκόπησης *43*

2.8 Όργανο μέτρησης *44*

2.9 Σφάλματα μέτρησης ειδικής αντίστασης *45*

2.10 Ευθύ και Αντίστροφο πρόβλημα στην ηλεκτρική διασκόπηση *47*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο **54**

Αλγόριθμος παραγωγής πρωτοκόλλων μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας **54**

3.1 Εισαγωγή *55*

3.2 Δημιουργία βέλτιστων πρωτοκόλλων με τη μέθοδο του Ιακωβιανού Πίνακα (Αθανασίου 2009) *56*

3.3 Αλγόριθμος παραγωγής πρωτοκόλλων (Longlines_opt2D) *58*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο **64**

Συνθετικά μοντέλα κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης **64**

4.1 Εισαγωγή *65*

4.2 Πρόγραμμα αντιστροφής και δημιουργίας συνθετικών δεδομένων DC_2DPro (Kim, 2013) *66*

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3 Παραγωγή συνθετικών δεδομένων κατανομής αντίστασης με χρήση 33 και 48 ηλεκτροδίων μικρής κλίμακας *69*
4.3.1 Μοντέλο 1ο: 70
4.3.2 Μοντέλο 2ο: 71
4.3.3 Μοντέλο 3ο - Μοντέλο 3ο με προσθήκη θορύβου 5mv/A: 72
4.3.4 Μοντέλο 4ο: 74
4.3.5 Μοντέλο 5ο: 75
4.3.6 Μοντέλο 6ο - Μοντέλο 6ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A: 76
4.3.7 Μοντέλο 7ο: 78
4.3.8 Μοντέλο 8ο - Μοντέλο 8ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A: 79
4.3.9 Μοντέλα 9ο – 13ο: 81
4.3.10 Μοντέλο 14ο: 87

4.4 Παραγωγή συνθετικών δεδομένων κατανομής αντίστασης με χρήση 33 και 48 ηλεκτροδίων μεγάλης κλίμακας *88*
4.4.1 Μοντέλο 1ο: 89
4.4.2 Μοντέλο 2ο: 90
4.4.3 Μοντέλο 3ο - Μοντέλο 3ο με προσθήκη θορύβου 5mv/A: 91
4.4.4 Μοντέλο 4ο: 93
4.4.5 Μοντέλο 5ο: 94
4.4.6 Μοντέλο 6ο - Μοντέλο 6ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A: 95
4.4.7 Μοντέλο 7ο: 97
4.4.8 Μοντέλο 8ο - Μοντέλο 8ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A: 98
4.4.9 Μοντέλα 9ο – 13ο: 100
4.4.10 Μοντέλο 14ο: 106

4.5 Συμπεράσματα συνθετικών δεδομένων *107*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο **112**

Πραγματικές μετρήσεις πεδίου **112**

5.1 Εισαγωγή *113*

5.2 Λογισμικά Electre Pro και Prosys II της IRIS Instruments *113*
5.2.1 Electre Pro 113
5.2.2 Prosys II 115

5.3 Μετρήσεις μικρή κλίμακας *118*

5.4 Συμπεράσματα μετρήσεων *122*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο **123**

Συμπεράσματα **123**

Μελλοντική έρευνα **125**

Βιβλιογραφία **126**

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

1.1 Αντικείμενο - Σκοπός της διατριβής

Η διεξαγωγή γεωφυσικών διασκοπήσεων για την έρευνα, τον εντοπισμό και τη στρατηγική επίλυση διαφόρων προβλημάτων σε έναν ευρύ κλάδο εφαρμογών περιβάλλοντος, όπως η υδρογεωλογία, η τεχνική γεωλογία, η αρχαιολογία και η μεταλλευτική έρευνα αποτελεί αντικείμενο μελέτης για την επιστήμη της Γεωφυσικής.

Με την ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας που ανήκει στην κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης, ασχολείται η παρούσα διπλωματική. Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων ειδικής αντίστασης πραγματοποιείται με εύκολο τρόπο, καθώς ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής τάσης εισάγεται στο υπέδαφος μέσω ενός διπόλου ηλεκτροδίων ρεύματος και μετράται η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των άκρων ενός διαφορετικού διπόλου ηλεκτροδίων δυναμικού. Για την προετοιμασία του οργάνου μέτρησης και τη διεξαγωγή μετρήσεων υπαίθρου είναι απαραίτητη η δημιουργία πρωτοκόλλων μέτρησης, δηλαδή αρχείων που καθορίζουν την ακριβή θέση στο χώρο όλων των ηλεκτροδίων.

Η ραγδαία και συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας με την κατασκευή νέων οργάνων καταγραφής μεγάλου όγκου γεωηλεκτρικών δεδομένων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη σύγχρονων αλγορίθμων και λογισμικών καθιστά δυνατή την ακριβέστερη και πιο λεπτομερή χαρτογράφηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων της γης και την επιθυμία για διασκοπήσεις μεγαλύτερης χωρικής έκτασης με μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης. Η χρήση όμως μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων ίσης κατανομής σε τομές μεγάλου μήκους, αποτελεί πρόβλημα λόγω του μεγάλου βάρους του απαραίτητου εξοπλισμού.

Το πρόβλημα επιλύεται με τη δημιουργία διατάξεων με μικρότερο αριθμό ηλεκτροδίων διαφορετικής πυκνότητας στα άκρα των τομών και ίσης πυκνότητας στο κεντρικό τμήμα τους, αλλά και με τη παραγωγή βελτιστοποιημένων πρωτοκόλλων μέτρησης που κάνουν χρήση μικρότερου αριθμού μετρήσεων.

Για τις ανάγκες τις εργασίας δημιουργήθηκε αλγόριθμος παραγωγής πρωτοκόλλων αραιής κατανομής 33 ηλεκτροδίων και πυκνής κατανομής 48 ηλεκτροδίων αντίστοιχα, για ένα πλήθος παραδοσιακών και μη συμβατικών διατάξεων. Το σύνολο των πρωτοκόλλων δοκιμάστηκε σε ένα πλήθος συνθετικών μοντέλων για τον έλεγχο της απόκρισης των εικόνων αντιστροφής.

Αντικειμενικό σκοπό της εργασίας λοιπόν, αποτέλεσαν δύο πράγματα. Το πρώτο και κυριότερο ήταν, αν η αραίωση των ηλεκτροδίων στις άκρες των τομών επηρεάζει τη συνολική ποιότητα των εικόνων. Και δεύτερο, ποιες διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είτε οι κλασσικές, είτε η καινούργια διάταξη της πλήρους βαθμίδας είτε η βελτιστοποιημένη και να αποδώσουν καλύτερα αποτελέσματα για τους δύο τύπους κατανομής ηλεκτροδίων σε μικρή αλλά και μεγάλη κλίμακα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

1.2 Μεθοδολογία

Για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα:

- Μελέτη βιβλιογραφικών αναφορών που σχετίζονται με τις ηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης καθώς και διατριβών που ασχολούνται με βελτιστοποίηση γεωηλεκτρικών δεδομένων.

- Μελέτη υπάρχοντος αλγορίθμου και δημιουργία νέου σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Ο καινούργιος αλγόριθμος υποστηρίζει τη δυνατότητα διαφοροποιημένης και κανονικής πύκνωσης ηλεκτροδίων σε πέντε διατάξεις μέτρησης:
    - διάταξη διπόλου-διπόλου
    - πολλαπλής βαθμίδας
    - πλήρους εύρους βαθμίδας
    - πλήρες πρωτόκολλο
    - βέλτιστο πρωτόκολλο Ιακωβιανού πίνακα

- Δοκιμή του συνόλου των πρωτοκόλλων αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων σε πλήθος συνθετικών μοντέλων.

- Σύγκριση των αποτελεσμάτων πρωτοκόλλων διατάξεων μέτρησης με αραιά ηλεκτρόδια διαφοροποιημένης πυκνότητας με τα αποτελέσματα αντίστοιχων διατάξεων με κανονική κατανομή ηλεκτροδίων.

- Εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ποια διάταξη παράγει καλύτερα αποτελέσματα σε συγκεκριμένα θεωρητικά μοντέλα.

- Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με τη διεξαγωγή μετρήσεων υπαίθρου μικρής κλίμακας για την επιβεβαίωση της απόδοσης και της επιτυχίας των πρωτοκόλλων με τη σύγκριση των εικόνων κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

1.3 Δομή της διατριβής

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης, καταλήγοντας στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Περιγράφεται η βασική θεωρία των ηλεκτρικών πεδίων που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μέθοδο καθώς και αναφέρονται ορισμένα πεδία εφαρμογής της. Αναλύονται ο τρόπος διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος και μέτρησης της διαφοράς δυναμικού, καθώς και οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις για την υλοποίηση μετρήσεων πεδίου μαζί με την προσθήκη της διάταξης πλήρους εύρους βαθμίδας. Επίσης, το κεφάλαιο περιλαμβάνει μια σύντομη ανασκόπηση του βάθους διασκόπησης, του απαραίτητου εξοπλισμού και των σφαλμάτων που προκύπτουν κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας. Στο τελευταίο κομμάτι του κεφαλαίου αναλύεται η θεωρία της αντιστροφής στην ηλεκτρική τομογραφία, που σχετίζεται με την επίλυση του ευθέος και αντιστρόφου προβλήματος για τον καθορισμό του μοντέλου κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους.

Το **τρίτο** κεφάλαιο ξεκινάει με μια σύντομη εισαγωγή, στην οποία αναφέρεται ο λόγος δημιουργίας του καινούργιου αλγορίθμου παραγωγής πρωτοκόλλων μέτρησης. Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή της τεχνικής βελτιστοποίησης του Ιακωβιανού πίνακα ή πίνακα ευαισθησίας που προτάθηκε από την Αθανασίου (2009) και αποτελεί κομμάτι του αλγορίθμου. Έπειτα, ακολουθεί η ανάλυση του αλγορίθμου *Longlines_opt2D (S.Mavros ©, 2020)* που υποστηρίζει τη δημιουργία πρωτοκόλλων αραιωμένης και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων μικρής και μεγάλης κλίμακας, για την εξαγωγή δισδιάστατων συνθετικών δεδομένων παραδοσιακών διατάξεων, της διάταξης πλήρους εύρους βαθμίδας και της πλήρους και βελτιστοποιημένης διάταξης.

Το **τέταρτο** κεφάλαιο, αρχίζει με σύντομη περιγραφή των βημάτων μέσω του λογισμικού αντιστροφής ηλεκτρικών δεδομένων για την παραγωγή συνθετικών μοντέλων κατανομής αντίστασης, καθώς και για τη μετατροπή των φαινομένων αντιστάσεων σε δεδομένα πραγματικής αντίστασης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συνθετικών μοντέλων χωρίς ή με την προσθήκη τυχαίου θορύβου 5%, μικρής και μεγάλης κλίμακας για τις δύο κατανομές ηλεκτροδίων όλων των διατάξεων. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα των παραπάνω συνθετικών δεδομένων.

Στην αρχή του **πέμπτου** κεφαλαίου περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται σε μετρήσεις υπαίθρου, από το στάδιο παραμετροποίησης του οργάνου μέχρι και το στάδιο λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων του πεδίου για την εξαγωγή εικόνων κατανομής ειδικής αντίστασης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των εικόνων αντιστροφής από τις μετρήσεις μικρής κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν, ώστε να διαπιστωθεί αν τα πρωτόκολλα βέλτιστης διάταξης και της διάταξης πλήρους εύρους βαθμίδας αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα και σε πραγματικές μετρήσεις υπαίθρου.

Τέλος στο **έκτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που καταλήγουμε από την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και μελλοντική έρευνα που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Βασική Θεωρία της Μεθόδου της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Το κεφάλαιο αυτό ξεκινάει με μια μικρή εισαγωγή των γεωφυσικών μεθόδων διασκόπησης, καταλήγοντας στη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Περιγράφονται οι γενικές αρχές της θεωρίας των ηλεκτρικών πεδίων που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μέθοδο καθώς και ορισμένα πεδία εφαρμογής της.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στη θεωρία της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος στη γη και στον τρόπο υπολογισμού της διαφοράς δυναμικού στη περίπτωση που τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στην επιφάνεια του υπεδάφους με στόχο την εξαγωγή των δεδομένων φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Παρουσιάζονται οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις για την υλοποίηση μετρήσεων στο πεδίο μαζί με την προσθήκη μιας καινούργιας διάταξης ηλεκτροδίων, "της πλήρους εύρους βαθμίδας" (full-range gradient array). Επίσης εξετάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης, με τη παρούσα διπλωματική να επικεντρώνεται στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT).

Ακόμη, γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση στο βάθος διασκόπησης των ηλεκτρικών μεθόδων, στον απαραίτητο εξοπλισμό και στα σφάλματα που προκύπτουν κατά τη διεξαγωγή γεωφυσικών διασκοπήσεων. Τέλος, γίνεται αναφορά στη θεωρία της αντιστροφής που χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των μετρήσεων, καθώς και στη διαδικασία που ακολουθείται για την επίλυση του ευθέος και του αντίστροφου προβλήματος με τελικό σκοπό, τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Και Γεωφυσικές Μέθοδοι

Η Γεωφυσική είναι μια σύγχρονη επιστήμη που μελετά το εσωτερικό της Γης, χρησιμοποιώντας μεθόδους της Φυσικής. Η επιστήμη αυτή αναπτύχθηκε με γοργούς ρυθμούς τον τελευταίο αιώνα, αποτελώντας το βασικό εργαλείο σε πολλούς τομείς. Γνώρισε μεγάλη άνθιση εξαιτίας της τεχνολογίας της πληροφορικής που συνεχώς αναπτύσσεται και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής.

Αντικείμενο της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής και των γεωφυσικών διασκοπήσεων αποτελεί η μελέτη της δομής των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών και με την εφαρμογή θεμελιωδών φυσικών νόμων, με απώτερο σκοπό τον εντοπισμό δομών οικονομικού ή άλλου ενδιαφέροντος.

Η γεωφυσική έρευνα βασίζεται κατά κύριο λόγο στη συλλογή δεδομένων, στην επεξεργασία και ερμηνεία των γεωφυσικών παρατηρήσεων που γίνονται απ' ευθείας στη φύση με γεωφυσικά όργανα μέτρησης. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη μέτρηση διαφόρων φυσικών ποσοτήτων, καθώς και την ερμηνεία αυτών συναρτήσει των φυσικών ποσοτήτων που περιγράφουν αμεσότερα τις ιδιότητες της Γης. Οι χρόνοι διαδρομής, τα πλάτη και οι περίοδοι των σεισμικών κυμάτων, η ένταση του γήινου βαρυτικού πεδίου, η ροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης, η πυκνότητα και η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των πετρωμάτων, αποτελούν τέτοιες ποσότητες. Αντλώντας πληροφορίες μέσα από την διεξαγωγή μετρήσεων και των συνδυασμό τους, χαρτογραφείται σταδιακά η υπεδάφια εικόνα και παίρνουμε πληροφορίες που επικρατούν στο εσωτερικό της Γης.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις έχουν άρτια εφαρμογή στην απεικόνιση της υπεδάφιας δομής. Χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς όπως στην αναζήτηση και εντοπισμό κοιτασμάτων στη μεταλλευτική έρευνα, στην υδρογεωλογία, στην αρχαιομετρία και γενικότερα σε γεωτεχνικές και περιβαλλοντικές μελέτες. Δίνουν μια πλήρη και γρήγορη εικόνα και σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος και την φιλικότητα προς το περιβάλλον τις καθιστούν, ως κυρίαρχες τεχνικές.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις *ενεργητικές* και τις *παθητικές*.

Οι *ενεργητικές* ή *τεχνητές γεωφυσικές διασκοπήσεις* σχετίζονται με την εισαγωγή ενός σήματος στο εσωτερικό της Γης και τη μέτρηση της απόκρισής του. Τέτοιες μέθοδοι που χρησιμοποιούν τεχνητά παραγόμενα πεδία για τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους είναι οι *ηλεκτρικές,* οι *σεισμικές* και οι *ηλεκτρομαγνητικές.*

Αντιθέτως, οι *παθητικές* ή *φυσικές* διασκοπήσεις περιλαμβάνουν μετρήσεις φυσικών πεδίων και ιδιοτήτων της Γης. Το μαγνητικό και το βαρυτικό πεδίο της Γης είναι πεδία που συμβάλλουν στη διεξαγωγή των παραπάνω μετρήσεων. Επίσης με την βοήθεια φυσικών πεδίων μπορούν να μετρηθούν ορισμένα ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Έτσι, ο διαχωρισμός των γεωφυσικών μεθόδων στις δύο κατηγορίες γεφυρώνεται από τις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Χρονολογούνται από τον 17ο αιώνα και αντιπροσωπεύουν την μεγαλύτερη τάξη γεωφυσικών τεχνικών, κάποιες από τις οποίες καταγράφουν παθητικά τα φυσικά σήματα, ενώ άλλες χρησιμοποιούν ενεργές πηγές. Μετρήσεις της *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης*, *φυσικού δυναμικού*, *επαγόμενης πόλωσης* και *μαγνητοτελλουρικές* είναι ορισμένες από τις παραπάνω μεθόδους.

Σε γενικές γραμμές, δεν υπάρχει μοναδική μέθοδος που να παρέχει έγκυρα αποτελέσματα, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά των στόχων ενδιαφέροντος, αλλά ορισμένες μέθοδοι δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες. Πολλές φορές, μεγάλο ρόλο στην επιτυχία των μετρήσεων παίζει και το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιούνται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις γεωφυσικές έρευνες δεν είναι απαραίτητη η γνώση της πραγματικής τιμής της ιδιότητας της δομής που αποτελεί πρωταρχικό ενδιαφέρον, αλλά η διαφορά της ιδιότητάς της σε σχέση με το περιβάλλον (Tsourlos P, 1995). Συνεπώς, είναι στην κρίση του κάθε γεωφυσικού να διαλέξει την μέθοδο που νομίζει ότι αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπόψιν τον απαιτούμενο εξοπλισμό, το κόστος της έρευνας και τον χρόνο, στο εκάστοτε περιβάλλον.

Η αποτελεσματικότερη γεωφυσική έρευνα είναι αυτή, για την οποία εφαρμόζονται όσες περισσότερες μεθόδους για τη συλλογή της μέγιστης ποσότητας πληροφορίας. Πρακτικά, αυτό είναι αδύνατο, έτσι δύο (ή και σε πολλές περιπτώσεις) μία μέθοδος είναι αρκετή για να παρέχει επαρκή εικόνα του υπεδάφους (Tsourlos P, 1995).

2.1 Βασικές αρχές της ηλεκτρικής μεθόδου διασκόπησης

Με την διεξαγωγή ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται η μελέτη της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους. Πραγματοποιούνται μετρήσεις είτε πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, είτε στο εσωτερικό γεωτρήσεων.

Η κατηγορία των ηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης περιλαμβάνει τις ακόλουθες μεθόδους :

- ✓ *Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.*
- ✓ *Μέθοδος επαγόμενης πόλωσης*
- ✓ *Μέθοδος ισοδυναμικών γραμμών*
- ✓ *Μέθοδος φυσικού δυναμικού*
- ✓ *Μέθοδος τελλουρικών ρευμάτων*

Οι πρώτες τρεις βασίζονται σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών που παράγονται από ηλεκτρικά ρεύματα ή τεχνητά παραγόμενα πεδία. Αντίθετα, οι μέθοδοι φυσικού δυναμικού και τελλουρικών ρευμάτων οφείλονται στη ροή φυσικών ηλεκτρικών πεδίων στη Γη.

Με την ραγδαία ανάπτυξη της πληροφορικής και της τεχνολογίας, σε συνδυασμό και με το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, οι ηλεκτρικές μέθοδοι αποτέλεσαν μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους γεωφυσικών ερευνών.

Η παρούσα διπλωματική διαπραγματεύεται την εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

2.2 Μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, λόγω των απλών αρχών της Φυσικής στις οποίες στηρίζεται και την επάρκεια των δεδομένων που εξάγονται από τις μετρήσεις (Dahlin and Zhou, 2004). Η εφαρμογή της μεθόδου στηρίζεται στη διοχέτευση σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος (D.C), μέσω ενός διπόλου ηλεκτροδίων ρεύματος, στο υπέδαφος και την ταυτόχρονη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού με τη βοήθεια ενός δεύτερου διπόλου δυναμικού. Γνωρίζοντας τις ηλεκτρικές παραμέτρους της διαφοράς δυναμικού και της έντασης του ρεύματος, καθώς και τη χωροθετική διάταξη των ηλεκτροδίων, καθορίζεται η τιμή της *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* ***p***.

Η εισαγωγή της ηλεκτρικής μεθόδου έγινε από τον Wenner F. (1915) και βελτιώθηκε σημαντικά με την συμβολή του Schlumberger (1920).

Ο Γερμανός φυσικός George Ohm, το 1827, εξήγαγε μια εμπειρική σχέση που συνδέει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει ένα αγώγιμο σώμα και της διαφοράς δυναμικού (ηλεκτρικής τάσης) που εφαρμόζεται στα άκρα του (Σχέση 2.1).

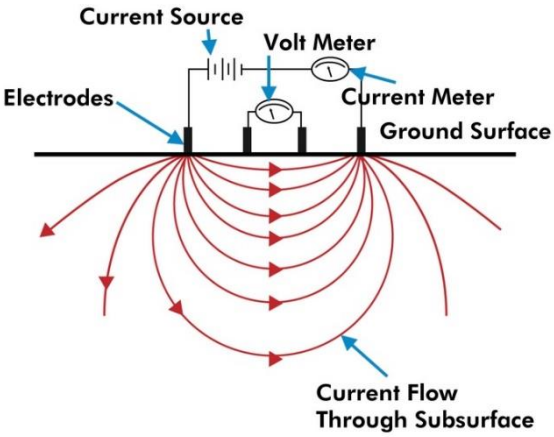
$$\boldsymbol{I = \frac{\Delta V}{R}} \quad (2.1)$$

I: Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (Ampere)

R: Ηλεκτρική Αντίσταση (Ohm)

ΔV: Διαφορά δυναμικού (ηλεκτρική τάση) (Volts)

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, η ένταση του ρεύματος είναι ποσότητα ανάλογη της ηλεκτρικής τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του αγώγιμου σώματος. Ο όρος **R**, που ονομάζεται *ηλεκτρική αντίσταση*, εκφράζει τη δυσκολία που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα να διέλθει από ένα μέσο, που στην περίπτωση αυτή είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί στο εσωτερικό της Γης. Μονάδα μέτρησης της *ωμικής αντίστασης* του υλικού είναι η *πτώση τάσης (Volts) ανά ένταση ρεύματος (Ampere), δηλαδή το Ω (ohm).*



Σχήμα 2.1*: Βασική διάταξη μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (https://edtech.engineering.utoronto.ca/files/electrical-resistivity).*

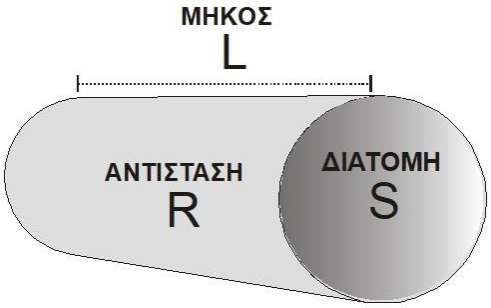
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Η αντίσταση R είναι μια ποσότητα, ανεξάρτητη από την διαφορά δυναμικού και την ένταση του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό. Η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται τόσο από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών, όσο και από τις γεωμετρικές διαστάσεις τους. Γι' αυτό χρειάζεται να προστεθεί και ο όρος της *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης,* ***p***, ο οποίος αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού κατασκευής.

$$R = p\frac{L}{S} \qquad (2.2)$$

R: ωμική αντίσταση (Ohm)
p: ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ohm · m)
L: μήκος αγώγιμου σώματος (m)
S: εμβαδόν διατομής (m^2)

$$p = R\,\frac{S}{L} \qquad (2.3)$$



Σχήμα 2.2 *: Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλινδρικού αγωγού μήκους L, διατομής S και αντίστασης R. (Παρουσιάσεις Η/Μ μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης Α.Π.Θ).*

Στο Διεθνές σύστημα μονάδων S.I, το *μήκος* μετριέται σε μέτρα (m), το *εμβαδόν διατομής* **S** σε τετραγωνικά μέτρα (m^2) και η *ειδική ηλεκτρική αντίσταση* ***p*** σε (Ohm·m).

Ένας ισοδύναμος όρος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, που περιγράφει τη συμπεριφορά των υπεδάφιων σχηματισμών στη διέλευση του ρεύματος, καλείται *ηλεκτρική αγωγιμότητα* ***σ***.

$$\sigma = \frac{1}{p} \qquad (2.4)$$

Η *ηλεκτρική αγωγιμότητα* ***σ*** μετριέται σε Siemens ανά μονάδα μήκους (S/m).
Αποτελεί την αντίστροφη σχέση (Σχέση 2.4) της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και εκφράζει την ευκολία του ηλεκτρικού ρεύματος να διέλθει από το εσωτερικό της Γης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για λόγους συντομίας, οι έννοιες της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, θα αναφέρονται ως *ειδική αντίσταση* και *αγωγιμότητα, εκτός* και αν επισημαίνεται διαφορετικά.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στηρίζεται στην εισαγωγή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος (D.C). Υπάρχουν τρείς τρόποι, σύμφωνα με τους οποίους, το ρεύμα διαδίδεται στο εσωτερικό της Γης:

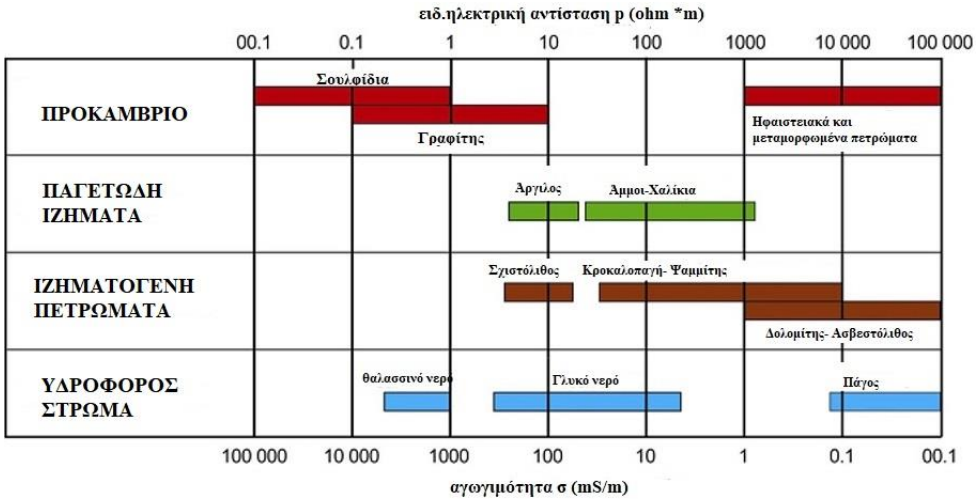
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

- *Ηλεκτρολυτική Αγωγιμότητα.* Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται διαμέσου των ιόντων αλάτων και ορυκτών που είναι διαλυμένα στο νερό που εντοπίζεται στους πόρους των γεωλογικών σχηματισμών.

- *Ηλεκτρονική Αγωγιμότητα.* Σε αυτήν την περίπτωση, η διάδοση γίνεται μέσω των ελευθέρων ηλεκτρονίων της κρυσταλλικής δομής πετρωμάτων και μεταλλικών ορυκτών.

- *Διηλεκτρική Αγωγιμότητα.* Εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί κυκλική κίνηση των ιόντων της κρυσταλλικής δομής κάποιων μονωτών, προκαλώντας έτσι τη δημιουργία δευτερεύοντος εναλλασσόμενου ρεύματος. Η επίδραση αυτού του ρεύματος είναι ελάχιστη εξαιτίας της χαμηλής συχνότητας του.

Η επίδραση της *ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας* είναι η πλέον καταλυτική, καθώς η δυσκολία που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διέλευση του από το υπέδαφος σχετίζεται άμεσα με το ποσοστό και τη χημική σύσταση του νερού μέσα στους πόρους των σχηματισμών. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας, το πορώδες των πετρωμάτων, η ύπαρξη πιθανών διαρρήξεων, η θερμοκρασία και η πίεση είναι επιπλέον σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την *ειδική ηλεκτρική αντίσταση p* (Tagg, 1964, McNeil, 1980).



***Σχήμα 2.3**: Τυπικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για διάφορα πετρώματα (Τροποποιημένο από Παρουσιάσεις Η/Μ Μεθόδων Διασκόπησης Α.Π.Θ).*

Αποτέλεσμα του πλήθους των παραγόντων, σε συνδυασμό με τη συνεχή μεταβολή ορισμένων από αυτούς, είναι το μεγάλο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης ακόμη και μεταξύ πετρωμάτων ίδιου τύπου. Το γεγονός αυτό καθιστά την ειδική αντίσταση ασταθή ποσότητα, και η γνώση της δεν παρέχει επαρκείς πληροφορίες για το υπέδαφος. Πολλές φορές, κατά την παρουσίαση ηλεκτρικών δεδομένων και αποτελεσμάτων δεν μας ενδιαφέρουν τόσο οι απόλυτες τιμές της ειδικής αντίστασης για έναν σχηματισμό, όσο οι σχετικές μεταβολές της με τους περιβάλλοντες γεωλογικούς σχηματισμούς.

Η γνώση και η μελέτη του γεωλογικού υποβάθρου τις περιοχής μελέτης είναι απαραίτητη σε κάθε γεωφυσική έρευνα, για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη λιθολογία του υπεδάφους.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Μια εμπειρική σχέση που περιλαμβάνει την εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ο **νόμος του Archie:**

$$p = p_w a \varphi^{-m} S^{-n} \qquad (2.5)$$

όπου p είναι η ειδική αντίσταση του πετρώματος

p_w: η ειδική αντίσταση ρευστού στο πορώδες του πετρώματος (συνήθως νερό)

φ: το πορώδες

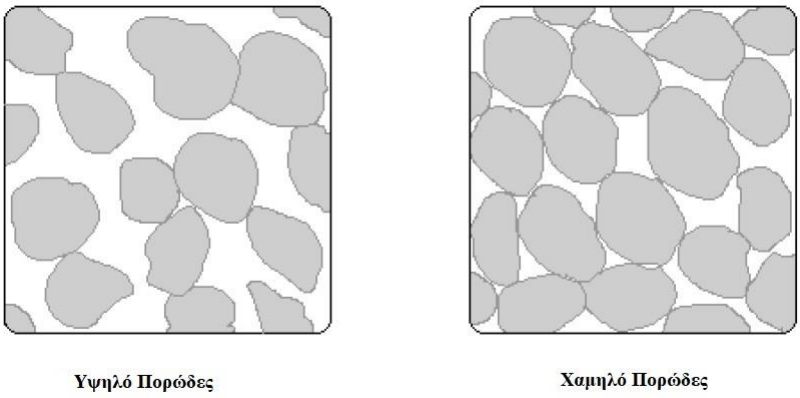
S: ο βαθμός κορεσμού σε ρευστό

a: συντελεστής λιθολογίας με τιμές να κυμαίνονται από 0.6 – 2

m: συντελεστής στερεοποίησης (cementation factor), εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πορώδους, το πόσο συμπαγές είναι και παίρνει τιμές από 1.3 – 2.2

n: συντελεστής με συνήθης τιμή →2 για τα περισσότερα πετρώματα και για βαθμούς κορεσμού 20 – 100 %

Το πορώδες (φ) είναι ένα μέτρο του ποσοστού των διακένων (κενών, ρωγμών) που παρατηρούνται σε ένα πέτρωμα ή στο έδαφος και εκφράζεται ως το πηλίκο του συνολικού όγκου των πόρων προς το συνολικό όγκο του πετρώματος / εδάφους.



Σχήμα 2.4: Παραδείγματα υλικών με υψηλή και χαμηλή τιμή πορώδους. (Τροποποιημένο από Höök, 2010, p.63).

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μία από τις παλαιότερες και τις πιο χρησιμοποιούμενες μεθόδους γεωφυσικών διασκοπήσεων (Reynolds, 2011). Έχει ευρύ εφαρμογή στους κλάδους του περιβάλλοντος και της μηχανικής (Dahlin, 2001; Chambers et al., 2006; Rucker et al., 2010), στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων (Vandenberghe, 1982; Olesen et al., 1992; Griffiths and Barker, 1993; Çaglar and Duvarci, 2001; Atzemoglou et al., 2003), στον εντοπισμό υδροφορίας (Flathe, 1955; Van Dam, 1976; Rijo et al., 1977; Aubert et al., 1984; Olayinka and Barker, 1990; Dahlin and Owen, 1998), στην ανίχνευση γεωθερμικού πεδίου (Wright et al., 1985, Thanassoulas and Tsokas, 1987), στην εύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής έργων υποδομής (Habberjam, 1975; Smith, 1986; Butler and Llopis, 1990; Dahlin et al., 1994), στον εντοπισμό μολυσμένων υπόγειων υδάτων (Rodgers and Kean, 1980; Fikos et al., 2002) και διαρροών αποβλήτων (Van et al., 1992). Πολύ σημαντική επίσης, είναι η συνεισφορά της μεθόδου για τον εντοπισμό αρχαιοτήτων (Aitken, 1974; Hesse et al., 1986;

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Roka and Tsokas, 1987; Orlando et al., 1987; Szymanski and Dittmer, 1992; Griffiths and Barker, 1994; Papadopoulos et al., 2006), στην μεταλλευτική έρευνα (Beresnev et al., 2002; Bauman, 2005; Chambers et al., 2012) και σε ποικίλες άλλες εφαρμογές (Athanasiou et al., 2007; Jones and Cassidy, 2007).

2.2.1 Θεμελιώδης θεωρία και σχέσεις των ηλεκτρικών πεδίων

Η θεμελιώδης θεωρία και οι βασικές σχέσεις που κρύβονται πίσω από τη Φυσική, σχετικά με τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος, παρουσιάζονται παρακάτω:

- Νόμος του Ohm

$$\bar{J} = \sigma\, \bar{E} \qquad (2.6)$$

$\bar{J}$: είναι η πυκνότητα του ρεύματος
σ : είναι η αγωγιμότητα του μέσου
$\bar{E}$: είναι το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (N/C)

- Δύναμη Coulomb

$$\bar{F} = K\frac{Q\cdot q}{r^2}\hat{r} \qquad (2.7)$$

F : ηλεκτρική δύναμη Coulomb
K : ηλεκτρική σταθερά $= 8.9875 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$
Q, q : είναι το φορτίο-πηγή και το δοκιμαστικό φορτίο αντίστοιχα
r: η απόσταση μεταξύ των φορτίων

- Ηλεκτρικό Πεδίο $\bar{E}$

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι μια ιδιότητα του χώρου, η ύπαρξη της οποίας οφείλεται αποκλειστικά στην παρουσία ηλεκτρικού φορτίου μέσα στο χώρο. Δεν μπορεί να υπάρξει ηλεκτρικό πεδίο χωρίς την παρουσία φορτίου. Κάθε σημειακό φορτίο δημιουργεί γύρω του το δικό του ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο αποτελεί πεδίο δράσης ηλεκτροστατικών δυνάμεων για κάθε άλλο φορτίο που εισέρχεται μέσα στο χώρο αυτόν. Η ηλεκτρική δύναμη που θα ασκηθεί στα εισερχόμενα φορτία δίνεται από την σχέση:

$$\bar{F} = |q|\bar{E} \qquad (2.8)$$

όπου $\bar{E}$, προαναφέρθηκε ως το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και q είναι το σημειακό φορτίο

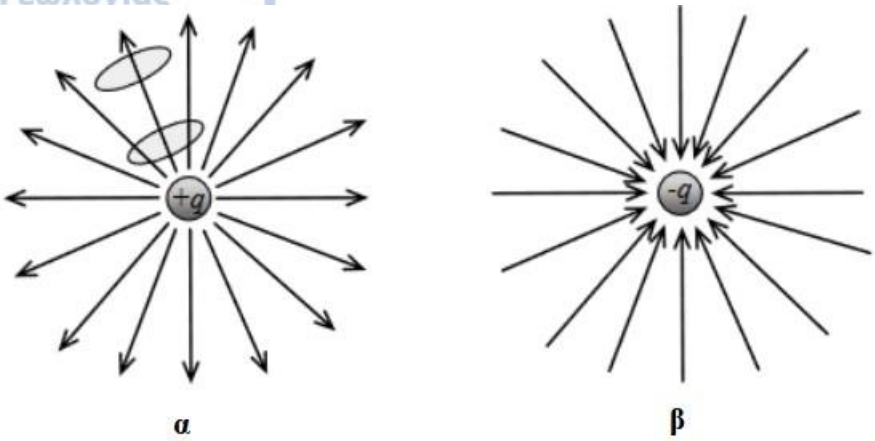
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.7) και (2.8) προκύπτει:

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q} = \frac{K\frac{Q\cdot q}{r^2}}{q}\,\hat{r} = K\frac{Q}{r^2}\,\hat{r} \qquad (2.9)$$

όπου $\hat{r}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση από την πηγή προς το σημειακό φορτίο

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Με λίγα λόγια η ένταση είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, εξαρτάται μόνο από το φορτίο-πηγή και είναι ανεξάρτητο του δοκιμαστικού φορτίου που εισάγεται μέσα στο χώρο.



Σχήμα 2.5: Δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από: α) θετικό φορτίο-πηγή και β) αρνητικό φορτίο-πηγή (Βλάχος , 2016, p.31)

- Ηλεκτρική Δυναμική Ενέργεια (U)

Είναι μονόμετρη φυσική ποσότητα που εξαρτάται από τη θέση του δοκιμαστικού φορτίου στο εσωτερικό ηλεκτρικού πεδίου φορτίου-πηγής Q

$$U = K\,\frac{Q \cdot q}{r} \qquad (2.10)$$

- Ηλεκτρικό Δυναμικό (V)

$$V = \frac{U}{q} = \frac{K\frac{Q \cdot q}{r}}{q} = K\frac{Q}{r} \qquad (2.11)$$

Το ηλεκτρικό δυναμικό (V) είναι η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια (U) ανά μονάδα φορτίου *Coulomb (q)* .

Το ηλεκτρικό πεδίο $\bar{E}$ μπορεί να οριστεί, επίσης ως η μεταβολή του δυναμικού κατά μήκος μιας κατεύθυνσης, η οποία περιγράφεται με τη σειρά της από το μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{r}$.

$$\bar{E} = -\frac{dV}{dr}\hat{r} \qquad (2.12)$$

Συνεπώς, το διάνυσμα της έντασης $\bar{E}$ μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων:

$$\bar{E} = E_{\chi}\hat{\imath} + E_{y}\hat{\jmath} + E_{z}\hat{k} \qquad (2.13)$$

Οι τρεις συνιστώσες της έντασης δίνονται από τις αντίστοιχες μεταβολές του δυναμικού στις τρεις διευθύνσεις *x, y, z*. (Serway and Jewett, 2013):

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

$$E_x = -\frac{\partial V(x,y,z)}{\partial x} \qquad (2.14\alpha)$$

$$E_y = -\frac{\partial V(x,y,z)}{\partial y} \qquad (2.14\beta)$$

$$E_z = -\frac{\partial V(x,y,z)}{\partial z} \qquad (2.14\gamma)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.14α – 2.14γ) στην (2.13), ο υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $\bar{E}$ μπορεί να γραφεί ως

$$\bar{E} = -\left(\frac{\partial V(x,y,z)}{\partial x}\hat{\imath} + \frac{\partial V(x,y,z)}{\partial y}\hat{\jmath} + \frac{\partial V(x,y,z)}{\partial z}\hat{k}\right) \qquad (2.15)$$

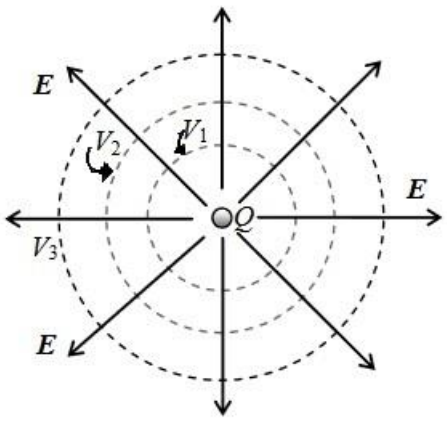
και πιο περιληπτικά ως

- $$\bar{E} = -\nabla V(x,y,z) \qquad (2.16)$$

όπου το σύμβολο ∇ είναι ο διανυσματικός τελεστής της ανάδελτα ή τελεστής κλίσης και εκφράζει τις μερικές παραγώγους μιας συνάρτησης ως προς τις τρεις διαστάσεις του χώρου

$$\left(\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{\imath} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{\jmath} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k}\right)$$

Για το ηλεκτροστατικό πεδίο φορτισμένης σημειακής πηγής, όλα τα σημεία που απέχουν ίση απόσταση από το φορτίο-πηγή, έχουν το ίδιο δυναμικό. Ο γεωμετρικός τόπος όλων αυτών είναι σφαιρική επιφάνεια με ακτίνα *r*. Σύμφωνα με τον Giancoli (2012), ισοδυναμική επιφάνεια ονομάζεται η επιφάνεια της σφαίρας, στην οποία όλα τα σημεία έχουν την ίδια τιμή δυναμικού.



Σχήμα 2.6: Ισοδυναμικές επιφάνειες (ομόκεντροι κύκλοι) ηλεκτρικού πεδίου $\bar{E}$, που δημιουργούνται από φορτίο-πηγή. (Τροποποιημένο από Βλάχος, 2016, p.70)

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Η απόκλιση της πυκνότητας του ρεύματος είναι παντού μηδέν στο υπέδαφος, καθώς δεν υπάρχουν φορτισμένες πηγές ή καταβόθρες ρεύματος (Tsourlos, 1995).

$$\nabla \cdot \bar{J} = 0 \qquad (2.17)$$

Έτσι, από τις σχέσεις (2.6), (2.16)

$$\bar{J} = -\sigma \nabla V \qquad (2.18)$$

και από τις (2.17), (2.18)

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = 0 \qquad (2.19)$$

εφαρμόζοντας τώρα, την ιδιότητα της ανάδελτα $\nabla \cdot (zF) = z\nabla F + \nabla z \cdot F$, προκύπτει ότι :

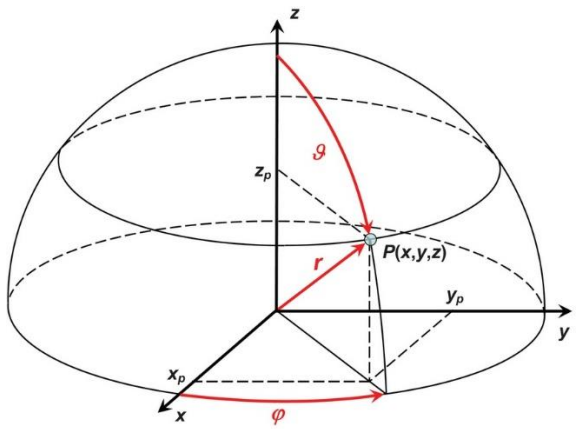
$$\nabla\sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \qquad (2.20)$$

Η σχέση (2.20) αποτελεί μια μορφή της εξίσωσης *Poisson*, απεικονίζοντας τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή Γη. Στην περίπτωση του ομογενούς και ισότροπου μέσου, το πρώτο μέλος της εξίσωσης (2.20) μηδενίζεται, καθώς η αγωγιμότητα είναι σταθερή στις τρεις διαστάσεις του χώρου, επομένως :

$$\nabla^2 V = 0 \qquad (2.21)$$

Η παραπάνω σχέση (2.21) αποτελεί την γνωστή εξίσωση Laplace, η οποία ισχύει μόνο στην περίπτωση ομογενούς μέσου. Μπορεί να εκφραστεί σε σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, φ) ως:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta \, \frac{\partial V}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 sin^2\theta}\frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} = 0 \qquad (2.22)$$



Σχήμα 2.7: Το σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων (r, ϑ, φ). (https://seos-project.eu/laser-rs/laser-rs-c03-s01-p01.html).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

- Θεωρία της απόκλισης του Gauss

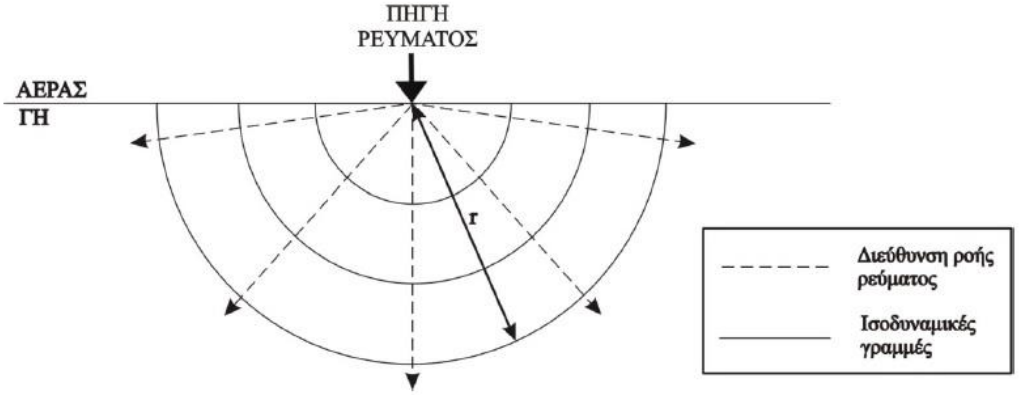
$$\iiint_V (\nabla \cdot F)dV = \oiint_S (F \cdot n)dS \qquad (2.23)$$

Σύμφωνα με την οποία, το επιφανειακό ολοκλήρωμα ενός διανυσματικού πεδίου σε μια κλειστή επιφάνεια, που αποτελεί και τη ροή του πεδίου αυτού, είναι ίσο με το ολοκλήρωμα όγκου της απόκλισης του πεδίου στην επιφάνεια αυτή.

2.3 Διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος σε ομογενή Γη

Για την περιγραφή της φύσης και των ιδιοτήτων του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα μέσο όπως είναι η γη, πρέπει να ξεφύγουμε λίγο από τις απλές έννοιες του ηλεκτρικού ρεύματος και της ηλεκτρικής τάσης στα καλώδια, καθώς τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά. Επίσης, θα δεχτούμε την υπόθεση ότι οι ιδιότητες της Γης, όπως η ειδική αντίσταση p και η αγωγιμότητα σ έχουν την ίδια τιμή στο σύνολο της μάζας του χώρου που διερευνάται. Αυτή η έννοια περιγράφει τις ιδιότητες ενός **ομογενούς** μέσου.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι τοποθετούμε μια σημειακή πηγή ρεύματος (φορτισμένο πόλο) στην επιφάνεια μιας ομογενούς Γης – ημιαπείρου χώρου αγωγιμότητας **σ** . Πρακτικά μιλώντας, η έννοια της ομοιογένειας της Γης είναι εξιδανικευμένος όρος, καθώς τα ανώτερα στρώματα του φλοιού της είναι ανομοιογενή, όμως η απλούστευση αυτή θα μας βοηθήσει στην κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος.



Σχήμα 2.8: Η ροή ρεύματος στο έδαφος και οι ισοδυναμικές γραμμές από σημειακή πηγή (τροποποιημένο από Tsourlos, 1995)

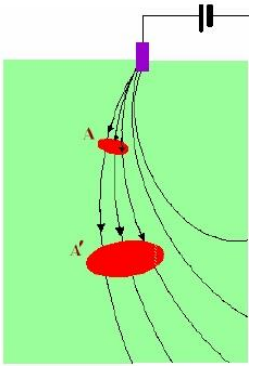
Έτσι, με την τοποθέτηση του ενός ηλεκτροδίου ρεύματος (φορτισμένη σημειακή πηγή), εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα μόνο μέσα στο υπέδαφος, εξαιτίας της πολύ υψηλής αντίστασης του αέρα, το οποίο ρέει ακτινικά διερχόμενο από την επιφάνεια ομογενούς ημιχώρου, εμβαδού $S = 2\pi r^2$, όπου r είναι η απόσταση μεταξύ της πηγής ρεύματος και της σφαιρικής επιφάνειας.

Σε μακρινή απόσταση από το θετικό ηλεκτρόδιο (Α), τοποθετείται ένα δεύτερο αρνητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος (Β) για τη δημιουργία κλειστού κυκλώματος.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Οι γραμμές ροής του ηλεκτρικού ρεύματος είναι πάντα κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες, οι οποίες έχουν σχήμα ημισφαιρίου (Σχήμα 2.7). Σε οποιοδήποτε σημείο του μέσου ως ***πυκνότητα ρεύματος J*** ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας ρεύματος που διέρχεται από μια ισοδυναμική επιφάνεια, προς το εμβαδόν της **S**. Μονάδα μέτρησής της είναι τα (A/m^2).

$$\bar{J} = \frac{I}{S} \qquad (2.24)$$



Σχήμα 2.9: Σχηματική απεικόνιση του πλήθους των γραμμών ροής που διέρχονται από μια ισοδυναμική επιφάνεια, για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρεύματος J (Λούης, 2004, p. 128).

Σύμφωνα με τη θεωρία ροής του ηλεκτρικού ρεύματος, σε οποιοδήποτε σημείο του αγώγιμου μέσου ικανοποιείται η σχέση:

$$\oiint_{\Gamma} \bar{J} \cdot dS = -I \qquad (2.25)$$

όπου το S αναφέρεται στη πλήρη ή μισή σφαιρική επιφάνεια που περιλαμβάνει το ηλεκτρόδιο, το οποίο εισάγει στη γη ηλεκτρικό ρεύμα, έντασης I και πυκνότητας $\bar{J}$.

Παρόμοια έκφραση που συνδέει την ένταση και την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, αποτελεί και ο νόμος του Ohm:

$$\bar{J} = \sigma \cdot \bar{E} \qquad (2.26)$$

χρησιμοποιώντας και τη σχέση (2.16), η σχέση (2.26) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\bar{J} = -\sigma \nabla V \qquad (2.27)$$

και γνωρίζοντας από τις ιδιότητες της συνάρτησης δέλτα (Dirac) ότι:

$$\iiint_V \delta(\bar{\boldsymbol{r}} - \bar{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{s}})\, dV = 1 \qquad (2.28)$$

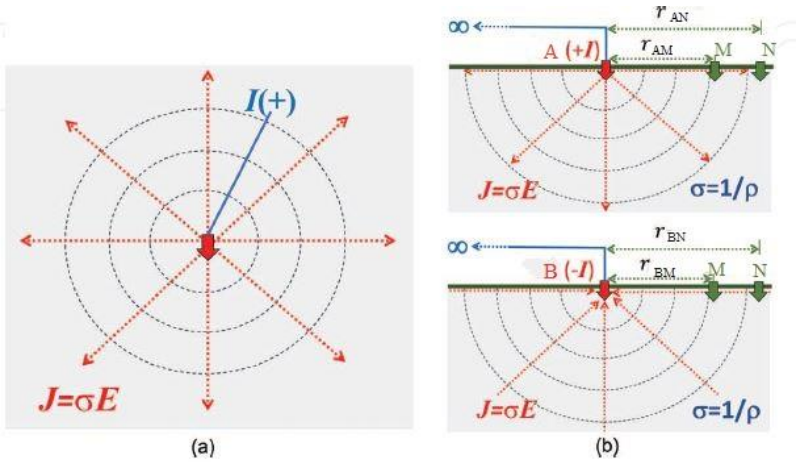
έτσι,

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

$$-\oiint_{\Gamma} \sigma \nabla V \cdot dS = -I \iiint_{\Omega} \delta(\bar{\boldsymbol{r}} - \bar{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{s}}) d\Omega \qquad (2.29)$$

Από την επιστημονική αναφορά του Zhou (2018), και χρησιμοποιώντας τη θεωρία της απόκλισης του Gauss $\iiint_V (\nabla \cdot F) dV = \oiint_S (F \cdot n) dS$ (σχέση 2.23) , προκύπτει ότι:

$$\iiint_{\Omega} [\nabla \cdot (\sigma \nabla V) + I\delta(\bar{\boldsymbol{r}} - \bar{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{s}})] = 0 \qquad (2.30)$$



Σχήμα 2.10: α) Η πυκνότητα ρεύματος J θετικού ηλεκτροδίου-πηγής σε ολόκληρο χώρο και β) η πυκνότητα ρεύματος θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου σε ημιχώρο. (Τροποποιημένο από Zhou, 2018)

όπου $\boldsymbol{r_s}$, είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες του ηλεκτροδίου-πηγής $\boldsymbol{r_s}$= (x_s ,y_s, z_s)

σ, είναι η αγωγιμότητα του μέσου διάδοσης

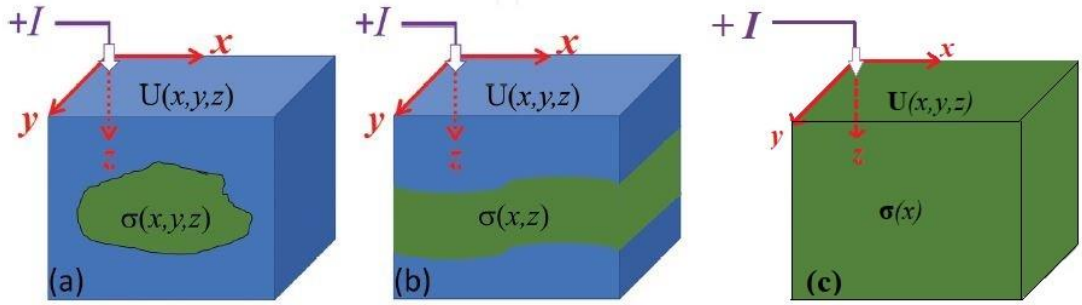
V, είναι το ηλεκτρικό δυναμικό

Ω, ο όγκος της σφαιρικής επιφάνειας Γ

Στην πραγματικότητα, όλες οι παραπάνω ποσότητες πρέπει να εκφραστούν και στις τρεις διαστάσεις ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, έτσι η σχέση (2.30) μετασχηματίζεται ως:

$$\nabla\left(\sigma_{(x,y,z)} \nabla V_{(x,y,z)}\right) = -I\, \delta(x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s) \qquad (2.31)$$

και εκφράζει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ανομοιογενές και ισότροπο μέσο, μεταβλητής αγωγιμότητας σ(x,y,z) σε κάθε συνιστώσα, για οποιοδήποτε σημείο του χώρου διάδοσης.



Σχήμα 2.11: Σχηματική απεικόνιση ενός α)3D, b) 2D, c) ομογενούς γεωλογικού μοντέλου αγωγιμότητας σ(x,y,z), σταθερής y-συνιστώσας (σ(x,z)) και σ(x) αντίστοιχα. (Τροποποιημένο από Zhou, 2018)

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Στην περίπτωση ομογενούς μέσου διάδοσης ηλεκτρικής αντίστασης p, το ηλεκτρικό δυναμικό που προκαλείται από σημειακή πηγή-πόλο, υπολογίζεται με εύκολο τρόπο χρησιμοποιώντας την εξίσωση Laplace (2.22) σε σφαιρικές συντεταγμένες.

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial V}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\ \frac{\partial V}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{r^2 sin^2\theta}\frac{\partial^2 V}{\partial\varphi^2}=0$$

Εξαιτίας της συμμετρίας στο χώρο της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος, οι παράγωγοι των σφαιρικών συνιστωσών του πεδίου ως προς θ και φ, μπορούν να καταργηθούν, επομένως απλοποιείται σε πιο απλή μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial V}{\partial r}\right)=0 \qquad (2.32)$$

Ολοκληρώνοντας μια φορά την σχέση (2.32) ως προς r, παίρνουμε:

$$r^2\frac{\partial V}{\partial r}=C \qquad \text{ή} \qquad \frac{\partial V}{\partial r}=\frac{C}{r^2} \qquad (2.33)$$

και με επιπλέον ολοκλήρωση, η σχέση διαμορφώνεται ως:

$$V=\int\frac{dV}{dr}dr=\int\frac{C}{r^2}\ dr=-\frac{C}{r}+D \qquad (2.34)$$

όπου οι C και D είναι σταθερές, οι τιμές των οποίων υπολογίζονται από τις οριακές συνθήκες του δυναμικού, όταν $r\to\infty$, $V\to 0$, συνεπώς, $D=0$.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις του νόμου του Ohm (σχέση 2.6), της βαθμίδας του ηλεκτρικού πεδίου (σχέση 2.12) και της πυκνότητας ρεύματος J (σχέση 2.24),

$$\bar{J}=\sigma\cdot E=\frac{I}{S}$$

- Για πλήρη σφαιρική επιφάνεια, $S=4\pi r^2$
- Για επιφάνεια ημισφαιρίου, $S=2\pi r^2$

και δεδομένου της $E=-\frac{\partial V}{\partial r}$ και $S=2\pi r^2$,

$$-\frac{\partial V}{\partial r}=\frac{I}{2\pi\sigma r^2} \qquad (2.35)$$

Από τις 2.35 και 2.33, η τιμή της σταθεράς C, υπολογίζεται:

$$C=\frac{I}{2\pi\sigma} \qquad \text{ή} \qquad C=\frac{I\,p}{2\pi} \qquad (2.36)$$

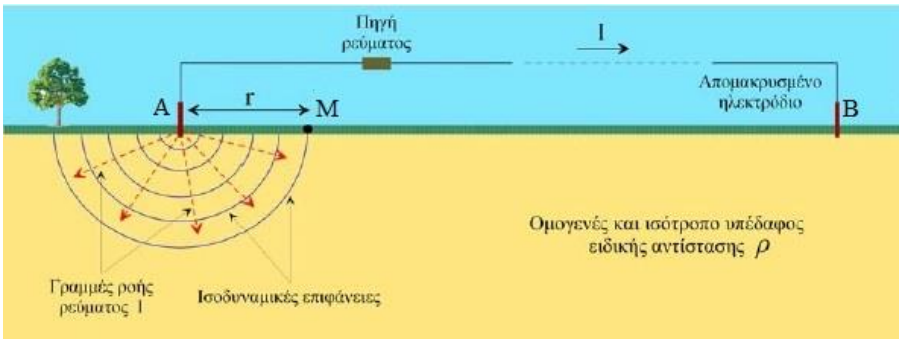
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

και αντικαθιστώντας την στη σχέση 2.34, το ηλεκτρικό δυναμικό σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας ημισφαιρίου του μέσου δίνεται από τη σχέση:

$$V = \frac{I\,p}{2\pi r} \qquad (2.37)$$

2.3.1 Ηλεκτρόδιο ρεύματος στην επιφάνεια

Στην απλή περίπτωση που η σημειακή πηγή βρίσκεται στην επιφάνεια ομογενούς ημιχώρου, εισάγουμε ηλεκτρικό ρεύμα στη Γη, με την τοποθέτηση ενός ηλεκτροδίου ρεύματος Α(θετική σημειακή πηγή).



Σχήμα 2.12: Σχηματική απεικόνιση ροής ηλεκτρικού ρεύματος από σημειακή πηγή στην επιφάνεια ομογενούς ημιχώρου αγωγιμότητας σ (τροποποιημένο από Λούης, 2004, p. 129).

Η δημιουργία κλειστού ηλεκτρικού κυκλώματος συντελείται με την τοποθέτηση ενός ακόμη ηλεκτροδίου Β (αρνητικός πόλος) σε πολύ μεγάλη απόσταση από το αρχικό ηλεκτρόδιο για τη μικρότερη δυνατή επίδραση στο δυναμικό του θετικού πόλου.

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει το υπέδαφος με τη μορφή γραμμών, που τέμνουν κάθετα τις ομόκεντρες ημισφαιρικές επιφάνειες (ισοδυναμικές επιφάνειες), εμβαδού $S = 2\pi r^2$. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η κατεύθυνση των γραμμών θετικά φορτισμένου πόλου.

Θεωρώντας λοιπόν, ως μέσο διάδοσης, το απλούστερο γεωλογικό μοντέλο της ομογενούς Γης, η εξίσωση Laplace (2.22), με τη βοήθεια του νόμου Ohm (2.6), της πυκνότητας ρεύματος J (2.24) και της βαθμίδας του ηλεκτρικού πεδίου (2.12), υπολογίζεται ως:

$$\frac{dV}{dr} = -\frac{p \cdot I}{2\pi r^2}$$

και μετά από πράξεις,

$$V = -\frac{p \cdot I}{2\,\pi} \int \frac{1}{r^2} dr \Rightarrow V = \frac{p \cdot I}{2\,\pi\, r} \qquad (2.38)$$

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Συνεπώς, το δυναμικό που προκαλεί η σημειακή πηγή (θετικός πόλος) στην επιφάνεια ομογενούς ημιαπείρου χώρου, σε απόσταση *r*, δίνεται ως:

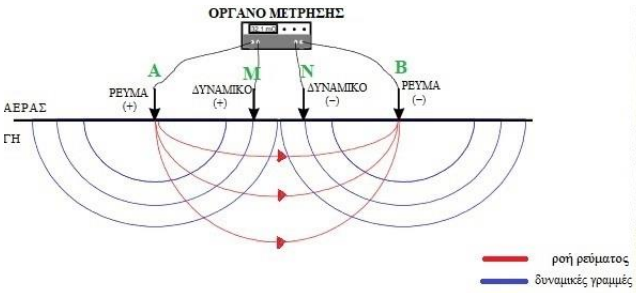
$$V = \frac{I}{2\pi\sigma r} = \frac{p\,I}{2\pi r}$$

όπου *r* είναι η απόσταση του σημείου από το ηλεκτρόδιο ρεύματος Α.

2.3.2 Ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού

Για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους, απαραίτητη είναι η διοχέτευση ρεύματος στο υπέδαφος μέσω ενός κλειστού ηλεκτρικού κυκλώματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ακόμη ενός αρνητικά φορτισμένου πόλου (ηλεκτρόδιο ρεύματος Β) στην επιφάνεια.

Στο σχήμα 2.10b απεικονίζονται οι γραμμές ρεύματος πυκνότητας J, για αρνητικό πόλο ρεύματος (-*I*). Είναι και αυτές κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες, με τη διαφορά ότι κατευθύνονται προς το ηλεκτρόδιο Β.



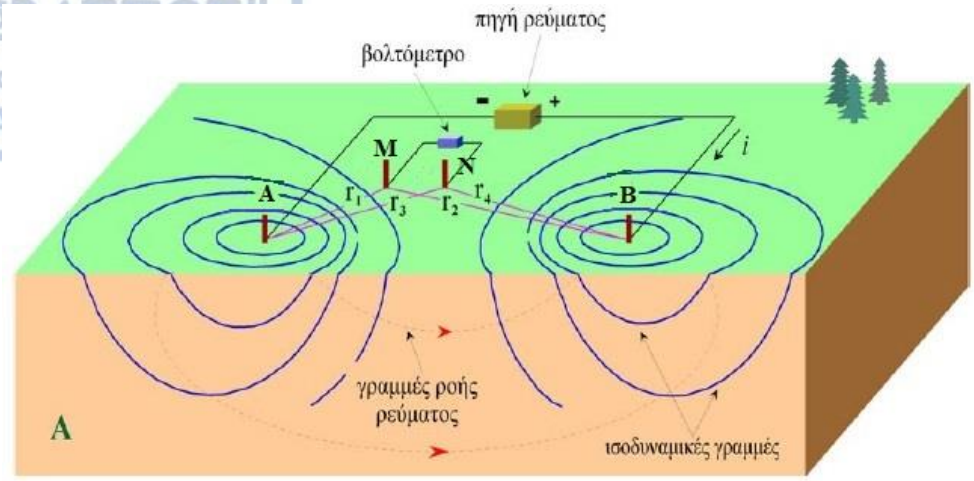
Σχήμα 2.13: Διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων της μεθόδου ηλεκτρικής αντίστασης (ERT), αριστερά και τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια, δεξιά.

Το δυναμικό που προκύπτει από αρνητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος υπολογίζεται με την ίδια διαδικασία όπως και στο θετικό πόλο, με μοναδική διαφοροποίηση στη κατεύθυνση της πυκνότητας ρεύματος J, και σε απόσταση *r* από αυτόν δίνεται ως:

$$V = -\frac{p\,I}{2\pi\,r} \qquad (2.39)$$

Πρακτικά, με την τοποθέτηση του δεύτερου ηλεκτροδίου Β σε μικρή απόσταση από το Α, οι γραμμές των ισοδυναμικών επιφανειών παραμορφώνονται και η ροή του ρεύματος γίνεται πιο πολύπλοκη, ακολουθώντας καμπύλες διαδρομές που ενώνουν τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (Α και Β). Το ηλεκτρόδιο Α (θετικό) στέλνει το ρεύμα (+I) στο εσωτερικό του ημιχώρου, ενώ ταυτοχρόνως το ηλεκτρόδιο Β δέχεται ρεύμα έντασης (-*I*),

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα



Σχήμα 2.14: Τρισδιάστατη απεικόνιση της βασικής διάταξης και των καμπυλών ρεύματος και δυναμικού (Λούης, 2004, p.130)

Το δυναμικό που μετράται σε ένα οποιοδήποτε σημείο του μέσου π.χ. στο σημείο Μ, θα υπολογίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών που προκύπτουν και από τις δύο πηγές, λόγω της αρχής της επαλληλίας ή υπέρθεσης.

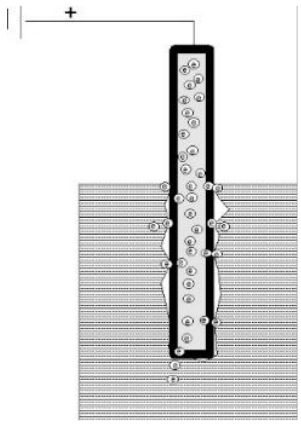
Έτσι,

$$V_M = V_{AM} + V_{BM} = \frac{p\,I}{2\pi\,r_1} + \frac{-p\,I}{2\pi\,r_2} \quad \text{ή} \quad V_M = \frac{p\,I}{2\pi}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \qquad (2.40)$$

Σκοπός της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης όπως αναφέραμε, είναι η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού, με τη βοήθεια μεταλλικών ηλεκτροδίων. Κατά την εισαγωγή τους όμως στο υπέδαφος, εμφανίζονται μικρά κενά αέρα στο χώρο ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το έδαφος. Η αντίσταση που συναντά το ρεύμα ώστε να εισέλθει στο έδαφος, ονομάζεται ***αντίσταση επαφής*** $\boldsymbol{R_c}$ και δεν πρέπει να συγχέεται με τις αντιστάσεις των γεωλογικών σχηματισμών κατά τη διεξαγωγή ηλεκτρικών μετρήσεων.

Η αντίσταση επαφής R_c σχετίζεται με την ένταση του ρεύματος στα ηλεκτρόδια Α,Β και τη μέγιστη τάση του οργάνου μέτρησης V_π.

$$R_c = \frac{V_\pi}{I_{AB}} \qquad (2.41)$$



Σχήμα 2.15: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροδίου στο έδαφος (Η/Μ Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης Α.Π.Θ).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

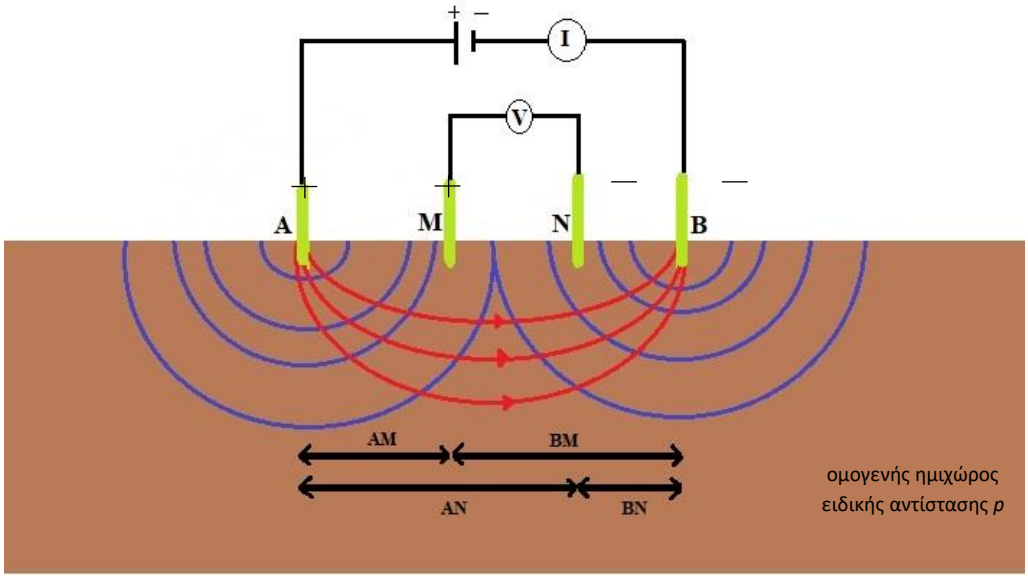
Τα ηλεκτρόδια ρεύματος Α και Β μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού ενός σημείου, εξαιτίας όμως των υψηλών αντιστάσεων επαφής μεταξύ ηλεκτροδίου ρεύματος και εδάφους, χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό ζεύγος ηλεκτροδίων δυναμικού (Μ, Ν) για τη μέτρησή της.

Με την ίδια λογική, το συνολικό δυναμικό σε ένα δεύτερο σημείο Ν του σχήματος 2.14, υπολογίζεται ως:

$$V_N = V_{AN} + V_{BN} = \frac{p\,I}{2\pi\,r_3} + \frac{-p\,I}{2\pi\,r_4} \quad \text{ή} \quad V_N = \frac{p\,I}{2\pi}\left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right) \qquad (2.42)$$

r_1 ⟶ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων Α, Μ
r_2 ⟶ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων Β, Μ
r_3 ⟶ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων Α, Ν
r_4 ⟶ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων Β, Ν

Συνεπώς, στη μέθοδο της ειδικής αντίστασης γίνεται χρήση τεσσάρων ηλεκτροδίων. Δύο ηλεκτρόδια χρησιμεύουν για την είσοδο και κυκλοφορία του ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόδια Α και Β), ενώ με τη βοήθεια των άλλων μετριέται η διαφορά δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία (ηλεκτρόδια Μ και Ν).



Σχήμα 2.16: Βασική διάταξη της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μαζί με τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων.

Επομένως η πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) μεταξύ των σημείων Μ,Ν θα είναι:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{pI}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \frac{pI}{2\pi}\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right) \Rightarrow$$

$$\Delta V_{MN} = \frac{pI}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right) \qquad (2.43)$$

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ο παράγοντας της σχέσης 2.43, $G = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}-\frac{1}{BM}-\frac{1}{AN}+\frac{1}{BN}\right)}$ ονομάζεται γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από τη γεωμετρική διάταξη των ηλεκτροδίων μέτρησης στο πεδίο έρευνας, έτσι η σχέση μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\Delta V_{MN} = \frac{pI}{G} \qquad (2.44)$$

και αναδιατάσσοντας τους όρους της εξίσωσης, προκύπτει ότι η ειδική αντίσταση p του ημιχώρου:

$$p = \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}\, G \qquad \text{ή} \qquad p = R\, G \qquad (2.45)$$

2.4 Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Όλα τα παραπάνω έχουν ισχύ σε περιπτώσεις ομογενούς και ισοτρόπου ημιχώρου. Στην πραγματικότητα, όταν γίνεται λόγος για μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης αναφερόμαστε στις ηλεκτρικές ιδιότητες των ανώτερων στρωμάτων της Γης που εξ' ορισμού είναι ανομοιογενή.

Εξαιτίας της ανομοιογένειας, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση της χωροθετικής διάταξης των ηλεκτροδίων (A, B, M, N). Για αυτό το λόγο, εισάγεται ο όρος της *φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* p_a, η οποία δεν αντιπροσωπεύει πλήρως την πραγματική εικόνα των αντιστάσεων του υπεδάφους, αλλά αποτελεί ένα μέσο όρο αυτών. Η τιμή της εξαρτάται άμεσα από τη διαφορά δυναμικού που παρατηρείται λόγω της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και από τον γεωμετρικό παράγοντα για κάθε διάταξη ηλεκτροδίων.

$$p_a = \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}\, G = R \cdot G$$

μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση

γεωμετρικός παράγοντας

Τα δεδομένα των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης στο πεδίο έρευνας αναπαριστούν μια "εσφαλμένη" εικόνα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του πεδίου, είναι απαραίτητο λοιπόν, να υποστούν μια πολύπλοκη μαθηματική διεργασία, την διεργασία της *αντιστροφής* ώστε να επεξεργαστούν και να μετατραπούν με τη λύση του αντίστροφου προβλήματος, σε πραγματικές τιμές αντιστάσεων, προκειμένου να γίνει η ερμηνεία τους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

2.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων ειδικής αντίστασης στο πεδίο, αναφέραμε ότι γίνεται χρήση τεσσάρων (4) ηλεκτροδίων, ενός ζεύγους ηλεκτροδίων ρεύματος (A, B) και ενός ζεύγους ηλεκτροδίων δυναμικού (M, N). Ο τρόπος με τον οποίο χωροθετούνται τα ηλεκτρόδια στο υπέδαφος καλείται *ηλεκτρική διάταξη*.

Πρακτικά, υπάρχουν πολλές διαφορετικές διατάξεις, για την επιλογή της καταλληλότερης διάταξης όμως, πρέπει να συνυπολογιστούν ποικίλοι παράγοντες, όπως οι ανάγκες της έρευνας, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στόχου ενδιαφέροντος και το επιδιωκόμενο βάθος διασκόπησης. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι κυριότερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων μαζί με τους γεωμετρικούς παράγοντές τους.

<u>Διάταξη Wenner</u>. Είναι η απλούστερη διάταξη, κατά την οποία τα ηλεκτρόδια δυναμικού M, N τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων A, B και διατάσσονται όλα μαζί κατά μήκος μιας ευθείας, ισαπέχοντας μεταξύ τους απόσταση α. Αντικαθιστώντας στη σχέση 2.45 τις αποστάσεις, προκύπτει ότι:

$$G = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\alpha}-\frac{1}{2\alpha}-\frac{1}{2\alpha}+\frac{1}{\alpha}\right)} = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha}} = 2\pi\alpha \qquad (2.46)$$

επομένως η φαινόμενη αντίσταση για τη Wenner διάταξη δίνεται ως:

$$p_a = 2\pi\alpha\ \frac{\Delta V}{I} \qquad (2.47)$$

Η διάταξη αυτή παρουσιάζει πολύ καλό λόγο σήματος προς θόρυβο ακόμα και σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο. Έχει καλή ευαισθησία σε σχέση με το βάθος (για την ανίχνευση οριζόντιων δομών), σημαντικό μειονέκτημά της αποτελεί η χαμηλότερη ευαισθησία στις πλευρικές μεταβολές της αντίστασης.

<u>Διάταξη Schlumberger</u>. Η διάταξη Schlumberger μοιάζει πάρα πολύ με τη διάταξη Wenner, μόνο που τα ηλεκτρόδια ρεύματος απέχουν αρκετά μεγάλη απόσταση από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Έστω ότι 2L είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων A, B και 2x είναι η απόσταση μεταξύ των M, N ($L \gg x$, στην πράξη L> 5x). Το μέσο της απόστασης των ηλεκτροδίων M, N αποτελεί το κέντρο συμμετρίας της διάταξης. Έτσι, ο γεωμετρικός παράγοντας θα προκύπτει ως:

$$G = \frac{2\pi}{\frac{1}{(L-x)}-\frac{1}{(L+x)}-\frac{1}{(L+x)}+\frac{1}{(L-x)}} = \frac{2\pi}{\frac{2}{(L-x)}-\frac{2}{(L+x)}} = \frac{2\pi}{\frac{4x}{L^2-x^2}} = \frac{\pi(L^2-x^2)}{2x} \qquad (2.48)$$

και η φαινόμενη αντίσταση συναρτήσει του γεωμετρικού παράγοντα γράφεται ως:

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

$$p_a = \frac{\pi(L^2 - x^2)}{2x} \frac{\Delta V}{I} \qquad (2.49)$$

Η διάταξη Schlumberger έχει λίγο χειρότερο λόγο σήματος/θορύβου σε αντίθεση της Wenner αλλά καλύτερο σήμα σε αντίθεση με τις υπόλοιπες διατάξεις που θα αναφερθούν. Παρουσιάζει λίγο πιο ικανοποιητική ευαισθησία στις πλευρικές μεταβολές από τη Wenner και πολύ καλή ευαισθησία στις κατακόρυφες μεταβολές της φαινόμενης αντίστασης με το βάθος.

Διάταξη διπόλου-διπόλου. Εδώ το ζεύγος των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι απομακρυσμένο από το ζεύγος των ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των διπόλων είναι σταθερή και ίση με α (AB = MN = α), ενώ η απόσταση των κοντινότερων ηλεκτροδίων A και M αποτελεί πολλαπλάσιο της απόστασης α (nα, n=2,3,..). Η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται ως:

$$p_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \qquad (2.50)$$

Παρουσιάζει πολύ καλή ευαισθησία και ανάλυση στην ανίχνευση των πλευρικών και κατακόρυφων μεταβολών, την στιγμή που υστερεί αρκετά στο λόγο σήματος – θορύβου.

Διάταξη πόλου-διπόλου. Τα ηλεκτρόδια M, N διατάσσονται στην ενδιάμεση απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος A, B. Προσομοιάζει τη διάταξη διπόλου – διπόλου, με τη διαφορά ότι ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος π.χ. το B, τοποθετείται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από τα υπόλοιπα, ώστε το όργανο μέτρησης να μην αντιλαμβάνεται την επίδραση του.

Αν η απόσταση μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων δυναμικού είναι ίση με *α*, η απόσταση AN είναι *nα*, πρακτικά οι αποστάσεις BM και BN θεωρούνται άπειρες και ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης πόλου – διπόλου θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} = \frac{2\pi}{\frac{1}{n\alpha} - \frac{1}{n\alpha+\alpha}} = \frac{2\pi}{\frac{1}{n\alpha} - \frac{1}{(n+1)a}} = 2\pi n(n+1)a \qquad (2.51)$$

και αντικαθιστώντας στη σχέση της φαινόμενης αντίστασης το γεωμετρικό παράγοντα προκύπτει:

$$p_\alpha = 2\pi n(n+1)a \frac{\Delta V}{I} \qquad (2.52)$$

Η διάταξη αυτή παρουσιάζει σχετικά καλή ευαισθησία τόσο σε πλευρικές, όσο και σε κατακόρυφες μεταβολές της αντίστασης, έχει υψηλότερο λόγο σήματος/θορύβου από την διπόλου-διπόλου. Μεγάλο μειονέκτημα της διάταξης αποτελεί το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο σε μεγάλη απόσταση, το οποίο ευνοεί το θόρυβο λόγω τελλουρικών ρευμάτων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

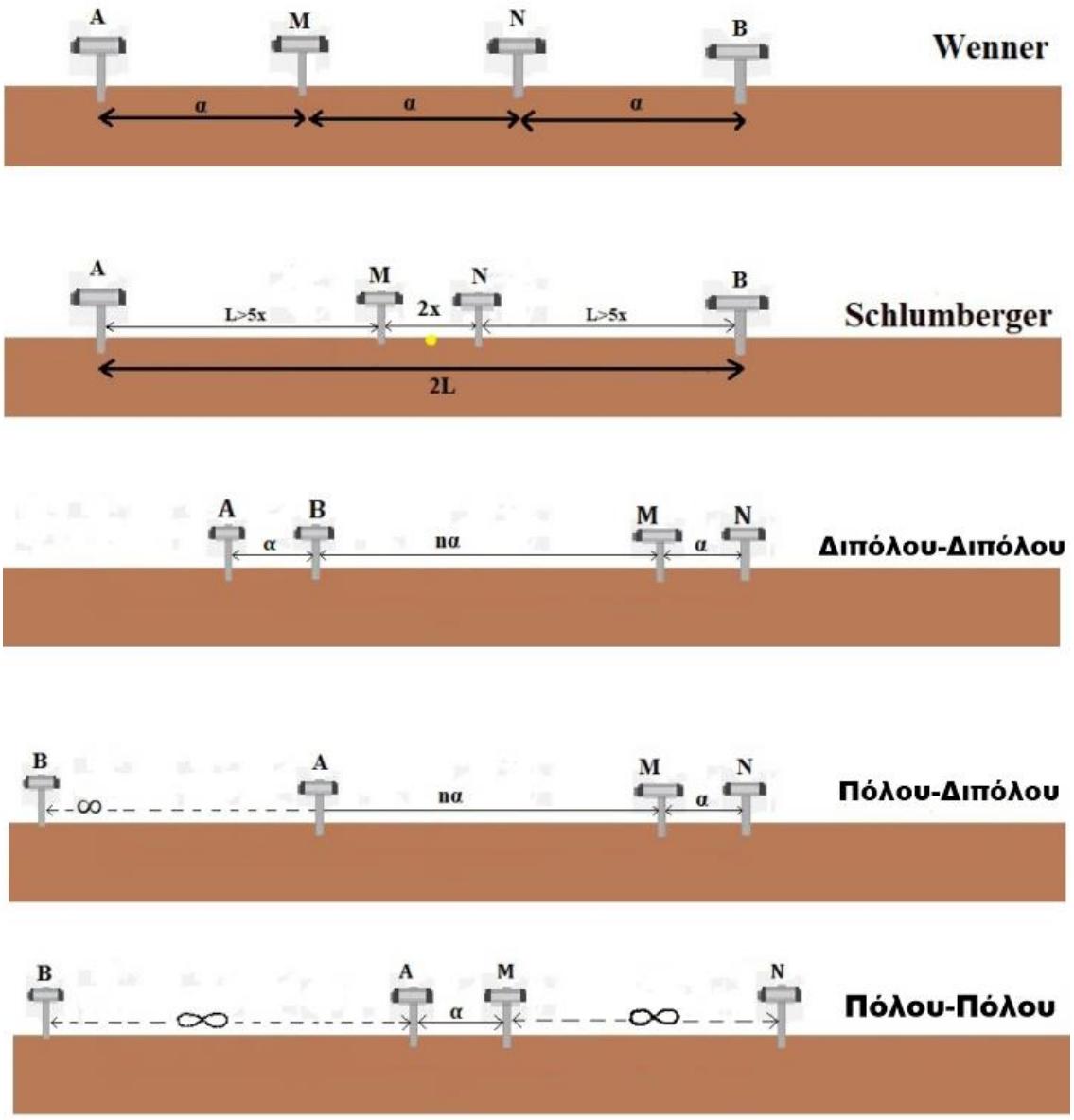
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

<u>Διάταξη πόλου-πόλου</u>. Είναι ουσιαστικά η διάταξη της πόλου-διπόλου, με τη διαφοροποίηση στη τοποθέτηση του ηλεκτροδίου δυναμικού π.χ. του N σε άπειρη απόσταση από τα υπόλοιπα δύο ηλεκτρόδια. Με άλλα λόγια, σε αυτή τη διάταξη δύο ηλεκτρόδια B και N βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τα A και M αντίστοιχα, τα οποία τους χωρίζει απόσταση ίση με *α*. Συνεπώς, οι αποστάσεις AN, BM, BN θεωρούνται άπειρες και η φαινόμενη αντίσταση της διάταξης πόλου-πόλου θα υπολογίζεται ως:

$$p_\alpha = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha}} \frac{\Delta V}{I} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{I} \qquad (2.53)$$

όμοια δηλαδή της φαινόμενης αντίστασης της διάταξης Wenner.

Η πόλου-πόλου διάταξη κατέχει την ευρύτερη οριζόντια κάλυψη και το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης από όλες τις διατάξεις εξαιτίας της μεγάλης απόστασης των ηλεκτροδίων (δύο εξ 'αποστάσεως ηλεκτρόδια). Παρ' όλα αυτά, έχει κακή ανάλυση εξαιτίας του κακού λόγου σήματος – θορύβου.

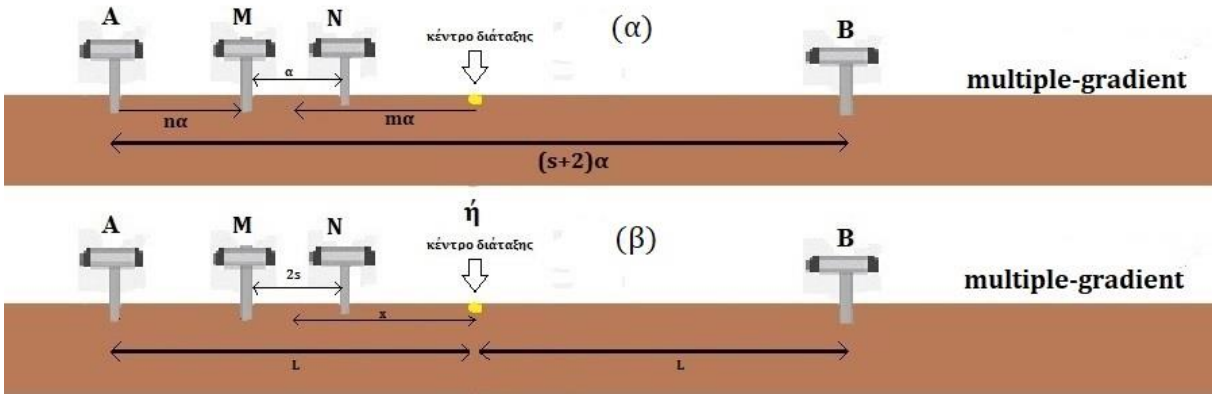


Σχήμα 2.17: Οι πιο βασικές διατάξεις ηλεκτροδίων για τη διεξαγωγή ηλεκτρικών μετρήσεων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Δύο επίσης πολύ σημαντικές διατάξεις που διεξάγονται στο πεδίο για την πολυκάναλη απόκτηση δεδομένων είναι η διάταξη της πολλαπλής βαθμίδας (multiple-gradient) και η νέα διάταξη της πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient). Σκοπός των διατάξεων αυτών είναι η συλλογή πολλών δεδομένων σε σχετικά μικρό χρόνο και με μεγάλη πυκνότητα.

Διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multiple-gradient) : Η διάταξη αυτή πραγματοποιείται διοχετεύοντας ρεύμα στο υπέδαφος από τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B τα οποία απέχουν μεταξύ τους απόσταση f(s+2)α. Με την εισαγωγή ρεύματος μετακινούνται τα ηλεκτρόδια δυναμικού σε όλες τις δυνατές θέσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων A, B για τη καταγραφή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ τους.



Σχήμα 2.18: Η διάταξη της πολλαπλής βαθμίδας (multiple-gradient).

Από το σχήμα 2.18α, το s: είναι ο μέγιστος αριθμός μετρήσεων δυναμικού που μπορούν να πραγματοποιηθούν

n: είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ του διπόλου δυναμικού και του κοντινότερου ηλεκτροδίου ρεύματος

m: είναι ο παράγοντας που καθορίζει την απόσταση του κέντρου της διάταξης και του μέσου MN

Σύμφωνα με τους Dahlin και Zhou (2006), ο παράγοντας m εκφράζει τη σχετική θέση του διπόλου δυναμικού MN ως προς το κέντρο συμμετρίας (κέντρο της διάταξης), και μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$m = \frac{\frac{(\chi_M+\chi_N)}{2} - \frac{(\chi_A+\chi_B)}{2}}{(\chi_N-\chi_M)} = \frac{\chi_{MN}-\chi_{AB}}{\alpha} \qquad (2.54)$$

όπου χ_A, χ_B, χ_M, χ_N είναι οι θέσεις των ηλεκτροδίων ($\chi_B > \chi_A$ και $\chi_N > \chi_M$) και χ_{AB}, χ_{MN} είναι οι θέσεις των μέσων των αντίστοιχων διπόλων (AB και MN).

Θετική τιμή m σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη μέτρηση το δίπολο δυναμικού βρίσκεται τοποθετημένο δεξιά του κέντρου της διάταξης, ενώ αρνητική τιμή υπάρχει στη

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

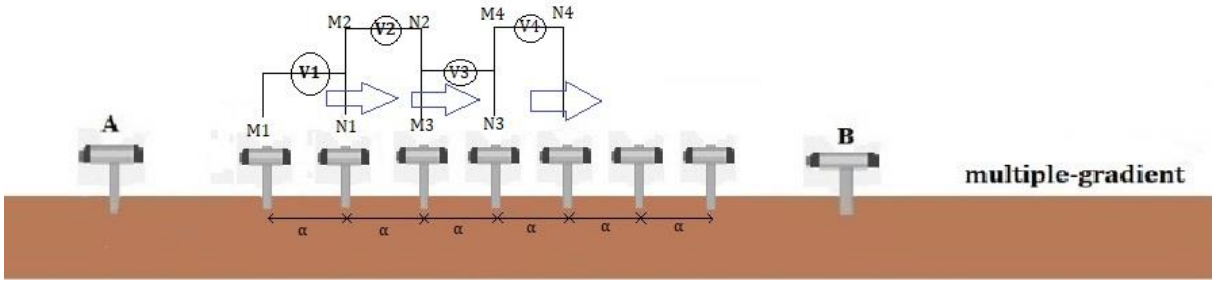
περίπτωση που το δίπολο MN είναι αριστερά του κέντρου της διάταξης. Έτσι για δεδομένη τιμή *s,n* η σχέση 2.54 μπορεί να αναλυθεί ως :

$$m = n - \frac{s+1}{2} \longrightarrow \chi_{MN} \leq \chi_{AB} \text{ (m : αρνητική τιμή)}$$

ενώ

$$m = n + \frac{s+1}{2} \longrightarrow \chi_{MN} > \chi_{AB} \text{ (m : θετική τιμή)}$$

Γενικότερα, όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική θέση των ηλεκτροδίων ρεύματος από το δίπολο δυναμικού, τόσο μεγαλώνει το βάθος διασκόπησης. Στην πράξη όμως, δεν μας ενδιαφέρει μόνο το βάθος αλλά και παράγοντες όπως η ευαισθησία της διάταξης στο θόρυβο, η πλευρική και η κατακόρυφη ανάλυση. Μικρές τιμές *α* και *n*, προσφέρουν μια σχετικά καλή οριζόντια διακριτική ικανότητα για ρηχά στρώματα εδάφους.



Σχήμα 2.19: Ο τρόπος μέτρησης της πολλαπλής βαθμίδας με τη σειριακή μετακίνηση των ηλεκτροδίων Μ, Ν σε όλες τις ενδιάμεσες θέσεις.

Για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης της διάταξης της πολλαπλής βαθμίδας είναι απαραίτητο να υπολογιστεί αρχικά ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης, όπου οι αντίστοιχες αποστάσεις απεικονίζονται στο σχήμα 2.18β. Έτσι, ύστερα από αναλυτικές πράξεις:

$$G = \frac{2\pi}{\frac{1}{L-x-s} - \frac{1}{L+x+x} - \frac{1}{L-x+s} + \frac{1}{L+x-s}} = \frac{\pi}{2s} \frac{(L^2-x^2)^2}{L^2-x^2} \tag{2.55}$$

και η φαινόμενη αντίσταση της συγκεκριμένης διάταξης προκύπτει ως:

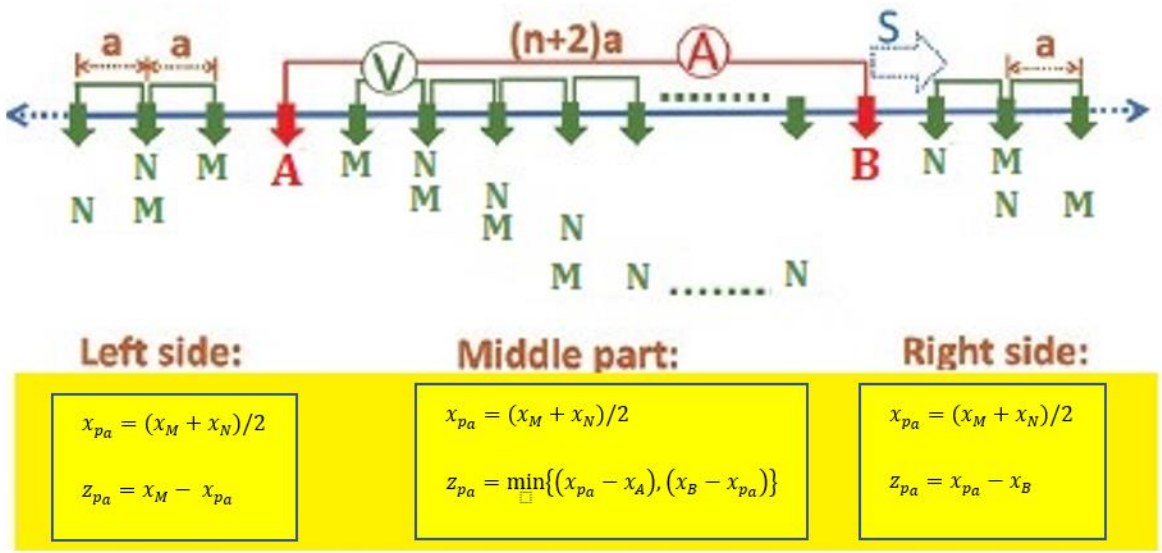
$$p_\alpha = \frac{\pi}{2s} \frac{(L^2-x^2)^2}{L^2-x^2} \frac{\Delta V}{I} \tag{2.56}$$

<u>Διάταξη πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient)</u>: Είναι μια καινούργια διάταξη ηλεκτρικής διασκόπησης και δημιουργήθηκε εξαιτίας της έλλειψης μετρήσεων δυναμικού στο χώρο έξω από τα ηλεκτρόδια ρεύματος της διάταξης πολλαπλής βαθμίδας. Λειτουργεί με την ίδια λογική της πολλαπλής βαθμίδας, μετρώντας διαφορές δυναμικού όχι μόνο στην ενδιάμεση απόσταση των ηλεκτροδίων Α, Β αλλά πραγματοποιεί και εξωτερικές μετρήσεις δυναμικού πέρα των ηλεκτροδίων ρεύματος για κάθε θέση.

Έτσι, διεξάγονται περισσότερες μετρήσεις για την καλύτερη κάλυψη δεδομένων, με στόχο την απόκτηση πληρότητας των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη



Σχήμα 2.20: Η διάταξη full-range gradient με τα M,N να τοποθετούνται μέσα και έξω από τα ηλεκτρόδια ρεύματος (τροποποιημένο από Zhou, 2018).

Κάθε τιμή της φαινόμενης αντίστασης θεωρείται ότι τοποθετείται στο σημείο τομής δύο ευθειών που έχουν αρχή το κέντρο των διπόλων AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο. Στα ορθογώνια πλαίσια του σχήματος 2.20 παρουσιάζονται οι σχέσεις υπολογισμού των θέσεων μέτρησης φαινόμενων αντιστάσεων του υπεδάφους.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των Dahlin και Zhou (2004), αναφέρεται ότι οι διατάξεις βαθμίδας (multiple-gradient και full-range gradient) συγκαταλέγονται μέσα στις καλύτερες διατάξεις για την ανάλυση πλευρικών διαφορών στις υπεδάφιες εικόνες φαινόμενης αντίστασης αλλά και τον ικανοποιητικό λόγο σήματος/θορύβου. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η απόκτηση πυκνών πολυκάναλων δεδομένων, γεγονός το οποίο σε περίπτωση απώλειας κάποιων ηλεκτροδίων δεν θα υποστεί κάποια αξιοσημείωτη επίδραση στις φαινόμενες αντιστάσεις.

Συμπερασματικά, η ακρίβεια στην ανάλυση και ποιότητα της πληροφορίας διαφοροποιείται από διάταξη σε διάταξη και η επιλογή της καταλληλότερης εξαρτάται από τις συνθήκες του προβλήματος που παρουσιάζεται στο πεδίο έρευνας. Έτσι, διαφορετικές διατάξεις μπορούν να διακρίνουν καλύτερα διάφορους στόχους, παρουσιάζουν διαφορετικό βάθος διασκόπησης, διαφέρουν ως προς την ευαισθησία σε οριζόντιες ή κατακόρυφες μεταβολές. Επιπροσθέτως, παρουσιάζουν ποικιλία στο λόγο σήματος/θόρυβο, ιδιότητα που συνδέεται άμεσα με τον γεωμετρικό παράγοντα, καθώς οι τιμές του G φανερώνουν και το εύρος των διαφορών δυναμικού που μπορούν να μετρηθούν με μια συγκεκριμένη διάταξη. Υψηλές τιμές G οδηγούν σε καταγραφή μικρών μεταβολών δυναμικού και αντίστροφα.

Ο Ward (1990) παρουσίασε μια αναδρομή για την αξιολόγηση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων ηλεκτρικών διατάξεων, βάση δεκατεσσάρων κριτηρίων, τα σημαντικότερα από τα οποία απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

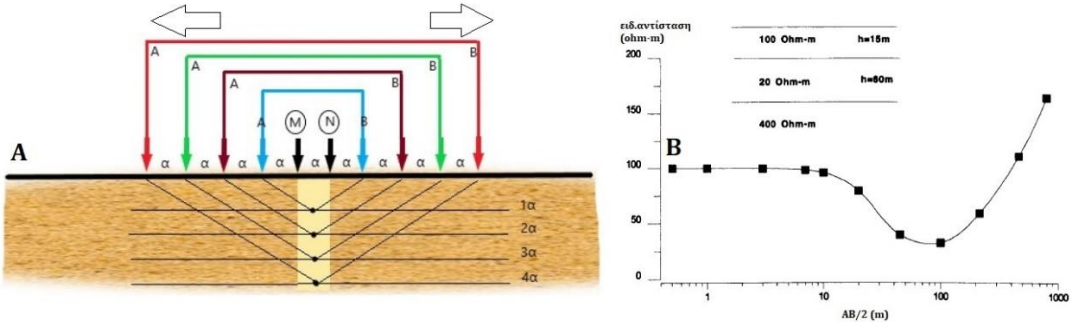
Διάταξη	Λόγος σήματος/θορύβου	Πλευρική Ανάλυση (οριζόντιες μεταβολές)	Κατακόρυφη ανάλυση (εις βάθος)
Wenner	**1**	**5**	**1**
Schlumberger	**2**	**4**	**1**
Διπόλου-διπόλου	**5**	**2**	**2**
Πόλου-διπόλου	**4**	**3**	**2**
Βαθμίδας (gradient)	**3**	**1**	**5**

Πίνακας 2.1: Αξιολόγηση διατάξεων ηλεκτρικής τομογραφίας(1: βέλτιστη, 5: χείριστη) (Ward, 1990).

2.6 Μέθοδοι μέτρησης ειδικής αντίστασης

Προηγουμένως παρουσιάστηκαν οι διαφορετικοί τρόποι διάταξης των τεσσάρων (4) ηλεκτροδίων στο έδαφος. Σε μια γεωφυσική έρευνα, τα ηλεκτρόδια δεν παραμένουν σταθερά αλλά κινούνται, με στόχο τη συλλογή δεδομένων και την καταγραφή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Τρεις είναι οι βασικές τεχνικές που εφαρμόζονται για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης, *η βυθοσκόπηση (VES), η οριζόντια χαρτογράφηση (Profiling)* και *η ηλεκτρική τομογραφία (ERT).*

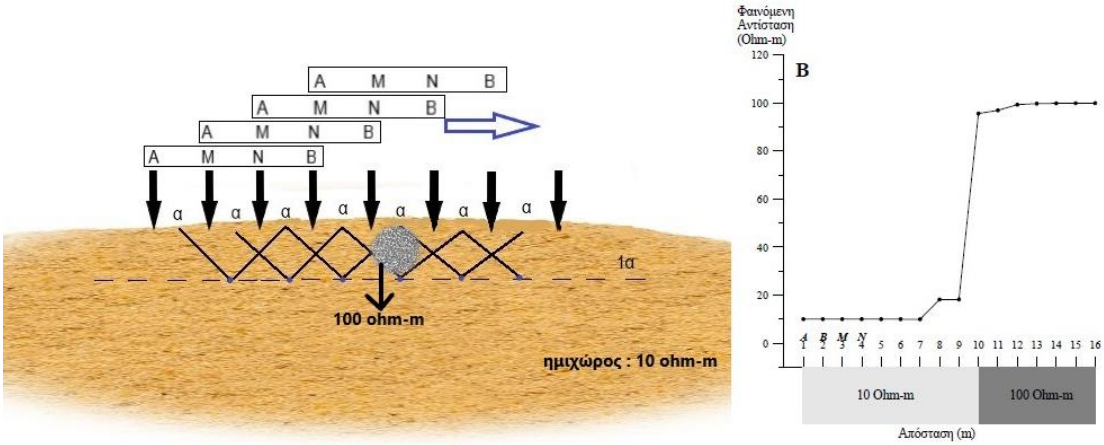
<u>Γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση (VES)</u>: Σκοπός της μεθόδου της βυθοσκόπησης αποτελεί η μελέτη της κατανομής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού που βρίσκονται στο κέντρο της διάταξης παραμένουν σταθερά, ενώ συνεχώς αυξάνονται οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος από το κέντρο της διάταξης, με στόχο την αύξηση του βάθους διείσδυσης του ρεύματος και τη καταγραφή της αντίστασης σε μια κατακόρυφη στήλη κάτω από τα ηλεκτρόδια δυναμικού M, N. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για βυθοσκοπήσεις είναι η Wenner και η Schlumberger, με τη δεύτερη να εφαρμόζεται ευρέως. Η ερμηνεία των βυθοσκοπήσεων στηρίζεται στη θεώρηση ύπαρξης οριζόντιων στρωμάτων για αυτό και κλασσικό παράδειγμα εφαρμογής της είναι η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών σε ιζηματογενείς λεκάνες.



Σχήμα 2.21: Α) Μονοδιάστατη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση. Β) Καμπύλη δεδομένων VES δύο οριζόντιων στρωμάτων πάνω από ημιχώρο αντίστασης 400 ohm-m (Koefoed, 1991).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

<u>Οριζόντια χαρτογράφηση (Profiling)</u>: Η οριζόντια χαρτογράφηση χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος. Σε αντίθεση με τη βυθοσκόπηση, οι ενδιάμεσες αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και ακολουθεί μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως σύνολο με σταθερό βήμα (όδευση). Με αυτό τον τρόπο γίνεται μονοδιάστατη(1-D) χαρτογράφηση των πλευρικών εναλλαγών της αντίστασης κατά μήκος της όδευσης και εντοπίζονται δομές διαφορετικής αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλον τους. Στην πράξη, όλες οι διατάξεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα μπορούν να εφαρμοστούν με ευκολία για τον εντοπισμό ρηξιγενών ζωνών, ενώ κλασσικό πεδίο εφαρμογής της οριζόντιας χαρτογράφησης είναι ο εντοπισμός θαμμένων αρχαιοτήτων.



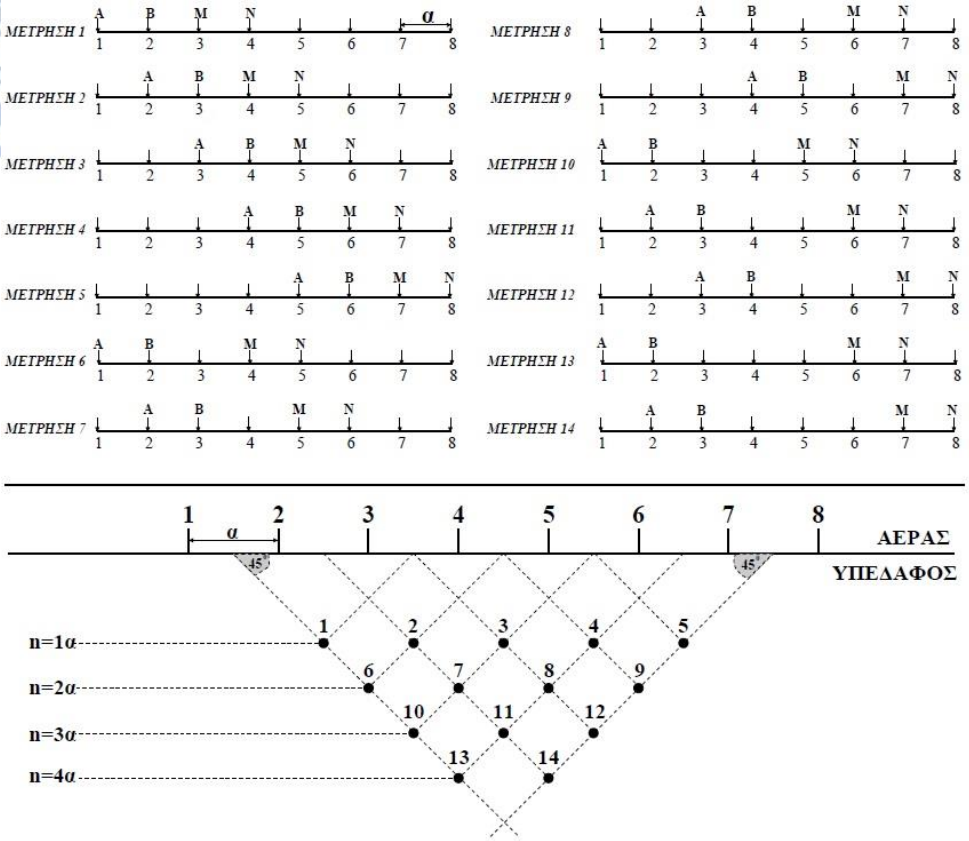
Σχήμα 2.22: Μονοδιάστατη οριζόντια χαρτογράφηση με τη μετακίνηση της διάταξης σταθερού βήματος α.

<u>Ηλεκτρική τομογραφία (ERT)</u>: Ο συνδυασμός των μεθόδων της βυθοσκόπησης και της οριζόντιας χαρτογράφησης συνθέτει την τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η μέθοδος αυτή παρέχει πληροφορίες τόσο για την πλευρική κατανομή της αντίστασης όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της ως συνάρτηση του βάθους. Η διαδικασία των μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας μπορεί να περιγραφεί ως μια σειρά οριζόντιων χαρτογραφήσεων σε μια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων ή ως μια σειρά βυθοσκοπήσεων κατά μήκος της γραμμής έρευνας (Tsourlos, 1995). Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η λήψη μεγάλου όγκου δεδομένων σε δύο διαστάσεις (2D) αυξημένης διακριτικής ικανότητας και χωρικής ανάλυσης σε αντίθεση με τις μονοδιάστατες βυθοσκοπήσεις και οριζόντιες χαρτογραφήσεις.

Η εμφάνιση πλήρως αυτοματοποιημένων οργάνων μέτρησης με χρήση πολυκάναλων ηλεκτροδίων (multi-channel electrodes) σε συνδυασμό με την εκρηκτική εξέλιξη και ανάπτυξη εξειδικευμένων λογισμικών και αλγορίθμων επιτρέπει τη συλλογή και απεικόνιση αξιόπιστων δεδομένων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους (Barker, 1981; Auken et al., 2006).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα



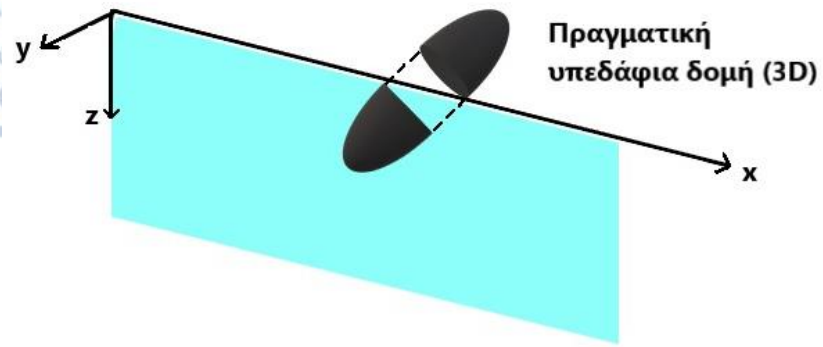
Σχήμα 2.23: Παράδειγμα τρόπου μέτρησης 2D ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου 8 ηλεκτροδίων και μέγιστη απόσταση μεταξύ διπόλου ρεύματος και δυναμικού n=4 (Tsourlos, 1995).

Στο σχήμα (2.23) απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία διεξαγωγής μιας δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας οχτώ ηλεκτροδίων χρησιμοποιώντας τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Οι αύξοντες αριθμοί (1-14) που βρίσκονται πάνω στα σημεία τομής δύο ευθειών που έχουν ως αρχή τα κέντρα των διπόλων και σχηματίζουν γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο, απεικονίζουν τις θέσεις των μετρούμενων φαινόμενων αντιστάσεων της συγκεκριμένης περιοχής.

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων ξεκινάει με την ενδιάμεση απόσταση των ηλεκτροδίων να ισούται με *α*. Για την πρώτη μέτρηση χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια 1-4, με τη σταδιακή μετακίνηση κατά απόσταση *α* της διάταξης μέχρι τα ηλεκτρόδια να τοποθετηθούν στις θέσεις 5, 6, 7, 8 που είναι και το τέλος των πρώτου επιπέδου μετρήσεων απόστασης α (n=1α). Στη συνέχεια, η απόσταση των ηλεκτροδίων B-M διπλασιάζεται (n = 2*α*), ενώ η απόσταση μεταξύ των διπόλων ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) παραμένει σταθερή και ίση με 1*α* και συνεχίζει όλη η διαδικασία με την ίδια λογική μετακίνησης (τέσσερις μετρήσεις 6-9) κ.ά.

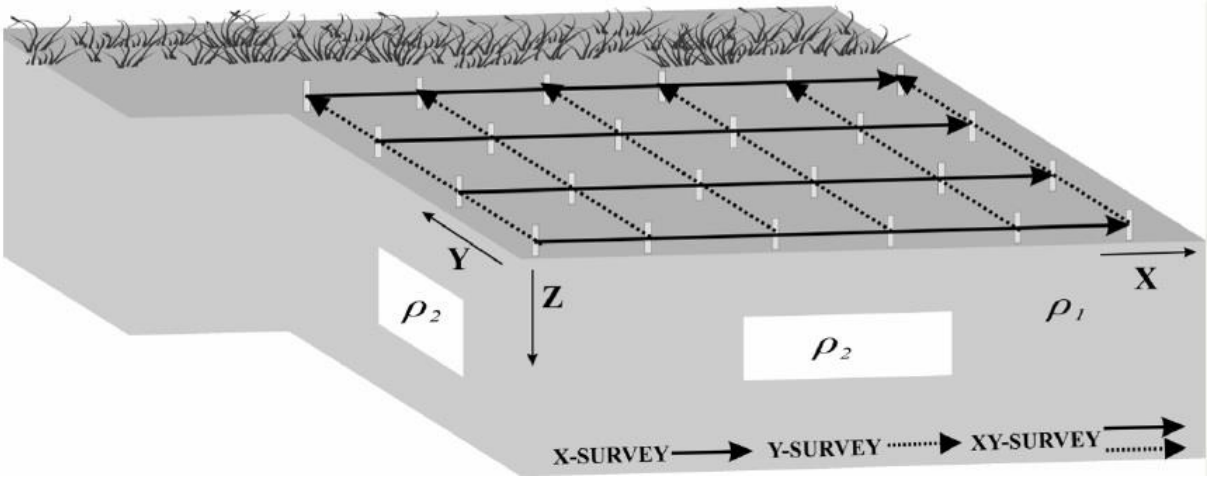
Η μέθοδος της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας εξάγει αξιόπιστα αποτελέσματα στην περίπτωση που η ειδική αντίσταση του υπεδάφους μεταβάλλεται συναρτήσει της οριζόντιας και κατακόρυφης (εις βάθος) συνιστώσας. Στην πραγματικότητα (σχήμα 2.24), όλες οι δομές του υπεδάφους απεικονίζονται σε τρεις διαστάσεις, επομένως η θεώρηση των δισδιάστατων εικόνων της ηλεκτρικής τομογραφίας απέχει λίγο από την πραγματικότητα.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑ
Τμήμα Γεω
Α.Π.Θ.



Σχήμα 2.24: Απεικόνιση σε τρεις διαστάσεις πραγματικής υπεδάφιας δομής.

<u>Τρισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία</u>: Το μειονέκτημα της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας στη προσέγγιση της τρισδιάστατης φύσης υπεδάφιων δομών αντιμετωπίζεται με τη πραγματοποίηση τρισδιάστατων ηλεκτρικών τομογραφιών. Ο Tsourlos (2004) και ο Παπαδόπουλος (2007, p. 39) εξηγούν ότι η πιο κοινή τεχνική για τη καταγραφή των μεταβολών της φαινόμενης αντίστασης του υπεδάφους σε τρεις διαστάσεις γίνεται με τη διεξαγωγή πυκνών, παράλληλων δισδιάστατων οδεύσεων ενδιάμεσης απόστασης μεταξύ τους, ίσης της βασικής απόστασης των ηλεκτροδίων της όδευσης. Οδεύσεις μπορούν να γίνουν είτε κατά μήκος μιας διεύθυνσης (ως προς X, X-διασκόπηση, ως προς Y, Y-διασκόπηση) είτε ως προς και τις δύο διευθύνσεις X,Y μαζί, (XY-διασκόπηση).



Σχήμα 2.25: Τρισδιάστατη γεωφυσική διασκόπηση με τη πραγματοποίηση δισδιάστατων (2D) τομογραφιών κατά μήκος είτε του Χ-άξονα, είτε του Υ-άξονα είτε και προς τις δύο διευθύνσεις (Παπαδόπουλος, 2007).

Τα δεδομένα των μετρήσεων που συλλέχθηκαν στις διαφορετικές διευθύνσεις αποτελούν ένα δείγμα των φαινόμενων αντιστάσεων σε δύο διαστάσεις (2D), τα οποία χρήζουν επεξεργασίας μέσω προγραμμάτων αντιστροφής για τη μετατροπή τους σε τιμές πραγματικών ειδικών αντιστάσεων του υπεδάφους. Τα αποτελέσματα από κάθε τομογραφία ενώνονται όλα μαζί στο τελικό στάδιο δημιουργώντας ορθογώνια πλέγματα (grids), στα οποία απεικονίζονται οι τρισδιάστατες (3D) πλέον εικόνες των αντιστάσεων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

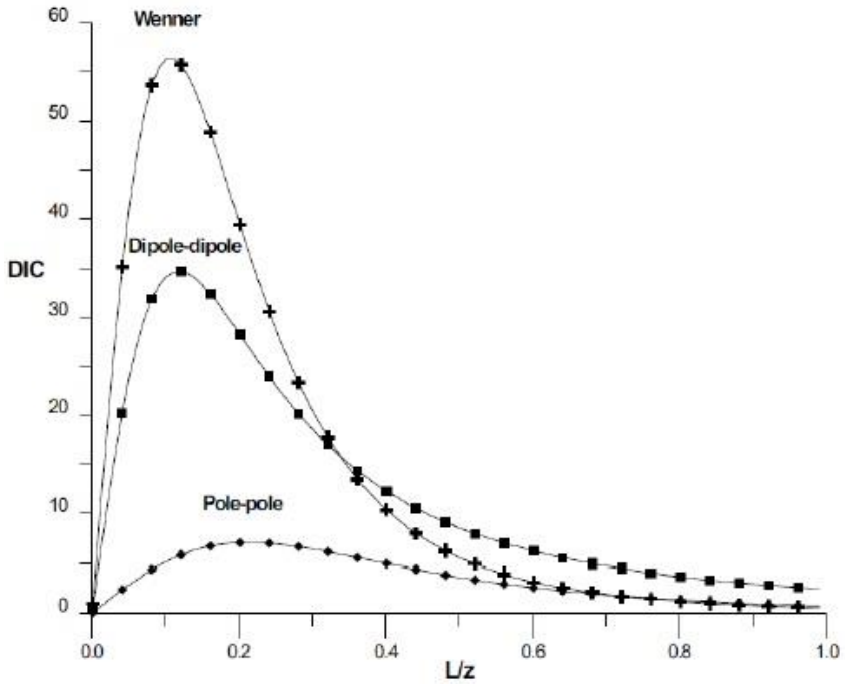
2.7 Βάθος διασκόπησης

Ένα από τα βασικότερα κριτήρια επιλογής της διάταξης ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε έρευνα αποτελεί και το βάθος διασκόπησης , με άλλα λόγια το μέγιστο βάθος στο οποίο μπορεί κάθε διάταξη να εντοπίσει μια δομή και τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι αξιόπιστα. Στην πράξη, είναι αρκετά δύσκολο να δοθεί η ακριβής τιμή του βάθους διασκόπησης για δύο λόγους (Tsourlos, 1995):

α) Η μετρούμενη ποσότητα ειδικής αντίστασης προέρχεται από τη συνεισφορά σημάτων από διαφορετικά βάθη, έτσι δεν υπάρχει συγκεκριμένο βάθος με αποκλειστική συνεισφορά στο μετρούμενο σήμα.

β) Οι τιμές των αντιστάσεων έχουν υπολογιστεί σχετικά με τη θεώρηση ότι η Γη αποτελεί έναν ομογενή ημιχώρο, στην πράξη όμως το πραγματικό βάθος διασκόπησης εξαρτάται από τις άγνωστες ιδιότητες των υπεδάφιων σωμάτων (ανομοιογένειες).

Οι Evgen (1938), Roy & Apparao (1971) και Roy(1972) ήταν οι πρωτοπόροι που έδωσαν μια θεωρητική προσέγγιση του βάθους διασκόπησης, το οποίο δεν εξαρτάται μόνο από την ενδιάμεση απόσταση των ηλεκτροδίων αλλά και από τη θέση τους στο χώρο. Εξέταζαν τη συνεισφορά κάθε στοιχειώδους όγκου του εδάφους στο σήμα της αντίστασης (ΔV/I) στην επιφάνεια του ως ένα πολύ λεπτό ισότροπο οριζόντιο στρώμα τοποθετούμενο σε διαφορετικά βάθη σε ομογενές μέσο, το λεγόμενο "χαρακτηριστικό βάθος έρευνας" (*Depth of Investigation Characteristic, DIC).* Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού του βάθους διασκόπησης, στις περισσότερες από αυτές γίνεται λόγος για την απεικόνιση του βάθους με την μορφή καμπυλών σε σχέση με το λόγο L/z (Σχήμα 2.26). Το σημείο όπου η καμπύλη DIC αποκτάει τη μεγαλύτερη τιμή της, αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος διασκόπησης.



Σχήμα 2.26: Καμπύλες DIC για τις διατάξεις Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου, L είναι μέγιστη απόσταση των ηλεκτροδίων και z είναι το βάθος διείσδυσης του ρεύματος (Tsourlos, 1995).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Λίγο αργότερα ο Edward (1977) πρότεινε τη θεωρία ότι το μέγιστο βάθος διασκόπησης μιας διάταξης είναι στο σημείο που η κεντρική τιμή της καμπύλης *DIC*, δηλαδή το βάθος στο οποίο η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη, χωρίζεται σε δύο ισοεμβαδικές επιφάνειες, θεώρηση την οποία υποστήριξε και ο Barker (1989).

Διάταξη ηλεκτροδίων	Βάθος διασκόπησης		
	Roy & Apparao (1971), Roy (1972)	Edwards (1977)	Διακριτική Ικανότητα
Wenner	0.11 L	0.17 L	1/ 2.25
Schlumberger	0.125 L	0.195 L	1/ 2.45
Διπόλου-διπόλου	0.195 L	0.25 L	1/ 3.1
Πόλου-διπόλου	-	0.52 L	-
Πόλου-πόλου	0.35 L	0.77 L	1/ 8.4

Πίνακας 2.2: Βάθος διασκόπησης και διακριτική ικανότητα για διάφορες διατάξεις (κατά Roy and Apparao, 1971 & Roy, 1972 και κατά Edwards, 1977), με L συμβολίζεται το συνολικό μήκος της διάταξης.

2.8 Όργανο μέτρησης

Για τη πραγματοποίηση των ηλεκτρικών γεωφυσικών διασκοπήσεων ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης **SYSCAL PRO** της εταιρείας *IRIS Instruments*. Το Syscal είναι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο πολυκάναλο όργανο καταγραφής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συνεχούς ρεύματος, καθώς και μετρήσεων φυσικού δυναμικού και επαγόμενης πόλωσης.

Σχήμα 2.27: Το SYSCAL Pro της εταιρείας IRIS Instruments.

Το ρεύμα εξόδου προσαρμόζεται αυτόματα για την λήψη της βέλτιστης ποιότητας μέτρησης. Ο τρόπος διεξαγωγής των μετρήσεων καθορίζεται από τον ίδιο το χρήστη με τη εισαγωγή αρχείων, συγκεκριμένου τρόπου γραφής και απλής δομής, στο όργανο. Στην αρχή κάθε αρχείου αναφέρεται το όνομα της μέτρησης και έπειτα κάποιες απαραίτητες τιμές παραμέτρων για τη σωστή λειτουργία του οργάνου (τις αρχικές θέσεις και το

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

συνολικό αριθμό των ηλεκτροδίων, το σύνολο των μετρήσεων και τη χωροθέτηση κάθε ηλεκτροδίου A, B, M, N σε κάθε μέτρηση).

Με το πρόσθετο λογισμικό *Electre Pro* της ίδιας εταιρείας, γίνεται η επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών που θα εφαρμοστούν σε κάθε μέτρηση όπως, η επιλογή της διάταξης ηλεκτροδίων, ο χρόνος του παλμού ρεύματος, ο παράγοντας ποιότητας Q καθώς και η μέγιστη τιμή δυναμικού. Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν περαιτέρω τα βήματα επεξεργασίας του προγράμματος για τη δημιουργία των πρωτοκόλλων μέτρησης.

Το όργανο διαθέτει τη δυνατότητα 10 καναλιών μέτρησης διαφοράς δυναμικού ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του χρόνου διεξαγωγής των μετρήσεων σε σχέση με τα μονοκάναλα όργανα που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα.

Συγκεντρωτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του *Syscal Pro* απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.3):

Πομπός		
	Δυναμικό	0 – 2000 Vpp
	Ηλεκτρικό Ρεύμα	0 – 2.5 A
	Ισχύς	Εσωτερική πηγή 250W , εξωτερική πηγή 1200W
	Μπαταρία	Εσωτερική (Internal) ή εξωτερική (External) 12Volts
Δέκτης		
	Διάρκεια παλμού	250ms, 500ms, 1s, 2s, 4s, 8s
	Κανάλια	10 κανάλια με δυνατότητα χρήσης ως 48 ηλεκτροδίων (48 switchs)
	Εμπέδηση	100MOhms
	Ακρίβεια, ευαισθησία	0.2 % ακρίβεια μέτρησης δυναμικού και διακριτική ικανότητα 1μV
	Καταγραφή	Ειδική αντίσταση, φυσικό δυναμικό, φορτιστικότητα
	Αποθήκευση	Μέχρι 21000 δεδομένα

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά του οργάνου μέτρησης ειδικής αντίστασης Syscal Pro(IRIS Instruments, n.d)

2.9 Σφάλματα μέτρησης ειδικής αντίστασης

Η ανάλυση και η ποιότητα των δεδομένων της ειδικής αντίστασης εξαρτάται από την αξιοπιστία της συσκευής μέτρησης. Πέραν του οργάνου όμως, υπάρχουν πολλοί άλλοι παράγοντες που προσθέτουν "θόρυβο" με τη μορφή σφαλμάτων στα δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης του πεδίου (Tsourlos, 1995). Κάποιοι από αυτούς θα αναλυθούν παρακάτω:

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Σφάλματα στην χωροθέτηση των ηλεκτροδίων: Η λανθασμένη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων εξαιτίας εσφαλμένης μέτρησης της απόστασης ή απροσεξίας των ερευνητών οδηγεί σε υπολογιστικά λάθη του γεωμετρικού παράγοντα και εν συνεχεία στις τιμές των φαινόμενων αντιστάσεων του υπεδάφους. Απαιτείται προσοχή στο στάδιο προετοιμασίας των μετρήσεων για την αποφυγή τους.

Σφάλματα στη μέτρηση διαφορών δυναμικού: Υψηλές αντιστάσεις επαφής στα ηλεκτρόδια εξαιτίας μη σωστής τοποθέτησής τους στην επιφάνεια, προβλήματα στα πολύπλεκτα καλώδια και περιβαλλοντικός θόρυβος λόγω τελλουρικών ρευμάτων ή ηλεκτροφόρων πυλώνων έχουν ως αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία του οργάνου και κατ' επέκταση σφάλματα στις μετρήσεις δυναμικού.

Ηλεκτρομαγνητική σύζευξη: Την στιγμή αλλαγής του ρεύματος εκπομπής, εμφανίζεται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης μεταξύ των καλωδίων εκπομπής και λήψης του σήματος (Ward, 1989). Δημιουργείται όταν καλώδια μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα και δημιουργούν γύρω τους μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι ικανό να προκαλέσει την επαγωγή τάσεων και ρευμάτων σε γειτονικές αγώγιμες δομές στο υπέδαφος. Η σύζευξη αυξάνεται με τη συχνότητα, το μήκος των καλωδίων, την αγωγιμότητα του εδάφους καθώς και τη διάταξη ηλεκτροδίων που εφαρμόζεται.

Επίδραση τοπογραφίας: Οι έντονες μεταβολές της τοπογραφίας μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα υπαίθριων μετρήσεων ειδικής αντίστασης. Οι κοιλάδες συγκεντρώνουν τη ροή των γραμμών ρεύματος, σε αντίθεση με τους λόφους που τις διασκορπίζουν οδηγώντας στη δημιουργία τεχνητών περιοχών υψηλής και χαμηλής φαινόμενης αντίστασης αντίστοιχα. Η επίδραση της τοπογραφίας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα εφικτό βαθμό και να ληφθεί υπ'όψιν στο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων (Fox et al., 1980; Holcombe and Jiracek, 1984; Tsourlos et al., 1999; Loke, 2000; Shahbi et al., 2003).

Επίδραση της πόλωσης των ηλεκτροδίων: Ανώμαλες μετρήσεις δυναμικών υπάρχει περίπτωση να καταγραφούν εξαιτίας της πόλωσης των ηλεκτροδίων ρεύματος, όταν τα ίδια ηλεκτρόδια χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια δυναμικού αμέσως μετά. Ο θόρυβος από την πόλωση είναι αρκετά υψηλότερος από το σήμα που μπορεί να μετρηθεί, γεγονός που αλλοιώνει τις εικόνες των αντιστάσεων. Για την αποφυγή τέτοιων σφαλμάτων κατά τη χρήση αυτοματοποιημένων οργάνων, στην ακολουθία των μετρήσεων θα πρέπει να αποφεύγεται να μετριέται δυναμικό σε ηλεκτρόδια τα οποία προηγουμένως είχαν χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή ρεύματος και αντίστροφα (Dahlin, 2000).

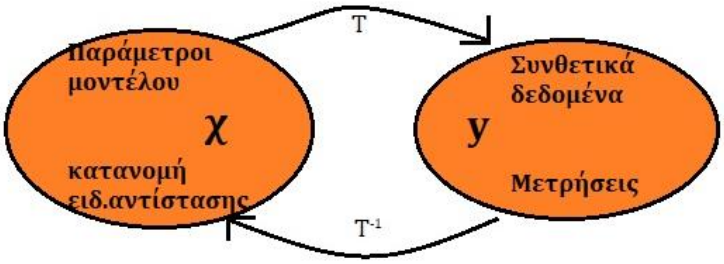
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

2.10 Ευθύ και Αντίστροφο πρόβλημα στην ηλεκτρική διασκόπηση

Τα δεδομένα των μετρήσεων ειδικής αντίστασης στο πεδίο απεικονίζουν, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 2.4, μια "παραμορφωμένη" εικόνα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους, τις λεγόμενες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις. Η δημοφιλέστερη τεχνική για τη μετατροπή τους σε πραγματικές τιμές ειδικής αντίστασης είναι η τεχνική της **αντιστροφής.**

Σκοπός της αντιστροφής είναι η εύρεση ενός βέλτιστου ηλεκτρικού μοντέλου που θα παρουσιάζει όμοια απόκριση με τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (πραγματικές μετρήσεις). Το μοντέλο αυτό, με άλλα λόγια, αποτελεί μια ιδανική μαθηματική θεώρηση της Γης, αποτελούμενο από παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν την κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης. Η απόκριση του μοντέλου δίνει τις ειδικές φαινόμενες αντιστάσεις (συνθετικά δεδομένα), οι οποίες υπολογίζονται βάση πολύπλοκων μαθηματικών σχέσεων.



Σχήμα 2.28: Ευθύ και αντίστροφο πρόβλημα στην ηλεκτρική διασκόπηση.

Έστω η υπόθεση ότι η μεταβλητή χ αναφέρεται στις παραμέτρους του μοντέλου στο υπέδαφος (κατανομή της αντίστασης) και η μεταβλητή y συμβολίζει τις πραγματικές μετρήσεις στο πεδίο. Με λίγα λόγια για την επίλυση του ευθέος προβλήματος, απαιτείται να βρεθεί ο μετασχηματισμός $\boldsymbol{T}$ *(γραμμικός ή μη γραμμικός)* που συνδέει τη γνωστή κατανομή της αντίστασης με τα συνθετικά δεδομένα-μετρήσεις.

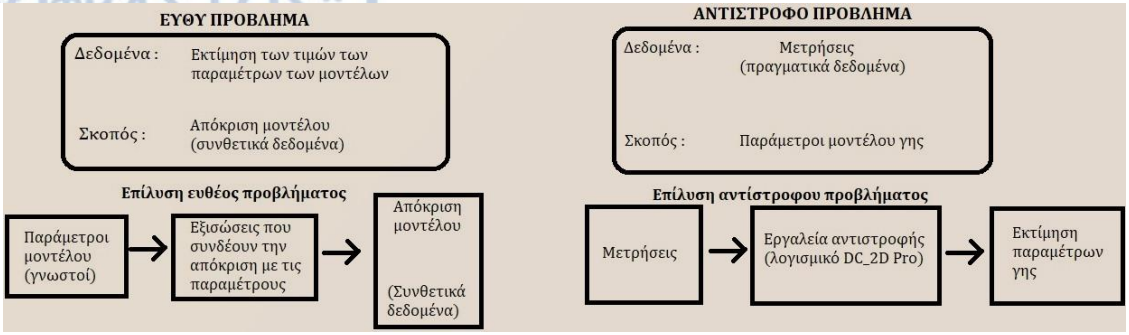
$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{T}(\boldsymbol{\chi}) \qquad (2.57)$$

Αντιθέτως, η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος βασίζεται στην εύρεση του αντίστροφου μετασχηματισμού $\boldsymbol{T^{-1}}$ που συνδέει τις γνωστές μετρήσεις (y) που πήραμε στο πεδίο με την άγνωστη κατανομή της αντίστασης (χ) με τη σχέση:

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{T^{-1}}(\boldsymbol{y}) \qquad (2.58)$$

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται σχηματικά οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την επίλυση του ευθέος, αλλά και του αντίστροφου προβλήματος στη ηλεκτρική διασκόπηση.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 2.29: Σχηματική απεικόνιση ευθέος και αντίστροφου προβλήματος (τροποποιημένο από Papadopoulos, 2007).

<u>Ευθύ γεωηλεκτρικό πρόβλημα</u>.

Η διαδικασία υπολογισμού της απόκρισης ενός γεωηλεκτρικού μοντέλου, δηλαδή των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων (συνθετικά δεδομένα) που θα προκαλέσει μια γνωστή κατανομή αντιστάσεων, είναι γνωστή με τον όρο *Ευθύ γεωηλεκτρικό πρόβλημα*. Η τεχνική της επίλυσης του ευθέος προβλήματος αναζητά μια λύση της διαφορικής εξίσωσης *Poisson* (σχέση 2.20).

Με την παρουσία ηλεκτρικών πηγών, η σχέση αυτή μετατρέπεται στη μορφή

$$\nabla\left(-\sigma_{x,y,z}\,\nabla V_{x,y,z}\right) = \nabla\bar{J} \qquad (2.59)$$

που είναι ισοδύναμη της σχέσης 2.31

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

όπου σ είναι η αγωγιμότητα σε τρεις διαστάσεις , ∇ είναι η ανάδελτα ή τελεστής κλίσης μιας συνάρτησης, V είναι το δυναμικό εκφρασμένο στις τρεις διαστάσεις. Τέλος, ο όρος $\nabla\bar{J}$ της σχέσης 2.59, που περιγράφει την εισαγωγή ρεύματος από πηγές ρεύματος πεπερασμένων διαστάσεων, αντικαθίσταται από τη συνάρτηση Dirac (δ) και σημειακή πηγή ρεύματος I.

Η επίλυση του *ευθέος προβλήματος* μπορεί να προσεγγιστεί από δύο κατηγορίες μεθόδων, ανάλογα της πολυπλοκότητας των δομών ενδιαφέροντος, τις **αναλυτικές** και τις **αριθμητικές μεθόδους**.

- <u>Αναλυτικές μέθοδοι</u>. Σχετίζονται με την επίλυση εξισώσεων που περιγράφουν το πεδίο. Πρακτικά, έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τις αριθμητικές, αλλά προσεγγίζουν μόνο απλές γεωμετρικές δομές, όπως σφαιρικές ή κυλινδρικές (Cook and Van Nostrand, 1954). Δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, απλά είναι χρήσιμες για την επαλήθευση άλλων τεχνικών.

- <u>Αριθμητικές μέθοδοι</u>. Βασίζονται σε μαθηματικές διεργασίες και υπολογισμούς που πραγματοποιούνται μόνο με τη βοήθεια υπολογιστή. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση του ευθέος προβλήματος σε ανομοιογενή γη, καθώς ενσωματώνουν οποιοδήποτε μοντέλο κατανομής αντιστάσεων προσεγγίζοντας τις πραγματικές υπεδάφιες συνθήκες.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Η επίλυση του ευθέος προβλήματος με αναλυτικές μεθόδους πρακτικά σημαίνει την άμεση επίλυση της σχέσης Poisson, ώστε να βρεθεί το δυναμικό και στη συνέχεια να υπολογιστούν οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις του υπεδάφους Δυστυχώς όμως, η επίλυση με αυτόν τον τρόπο προϋποθέτει την ύπαρξη απλών γεωμετρικών μοντέλων. Η έντονη ανομοιογένεια της Γης και οι σύνθετες υπεδάφιες δομές προσεγγίζονται καλύτερα με τις αριθμητικές μεθόδους.

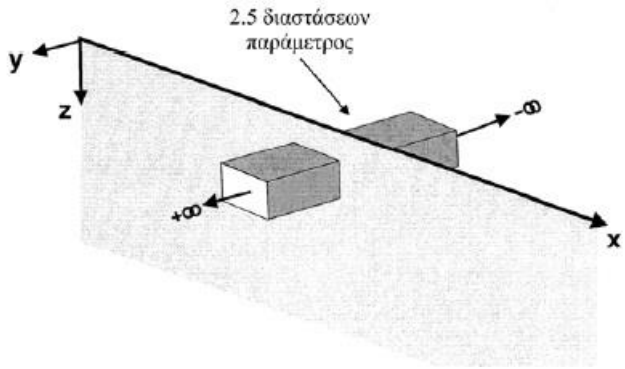
Στη συνέχεια, οι αριθμητικές μέθοδοι διακρίνονται και αυτές με τη σειρά τους σε δύο κατηγορίες:

- Μέθοδοι ολοκληρωτικών εξισώσεων. Η λύση εντοπίζεται στην επιφάνεια των αγώγιμων ασυνεχειών και υπολογίζεται χάριν των συναρτήσεων της θεωρίας του Green. Έτσι αναφέρεται, ότι η ύπαρξη μιας δομής με διαφορετική αντίσταση από το περιβάλλον, ισοδυναμεί με μια κατανομή στοιχειωδών ηλεκτροστατικών πηγών στην επιφάνειά της (Tsourlos, 1995).

- Διαφορικές μέθοδοι. Με τις διαφορικές μεθόδους, η υπεδάφια περιοχή διακριτοποιείται σε ορθογώνια κελιά, τις παραμέτρους όπως ονομάζονται, διαφορετικής ειδικής αντίστασης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να απεικονιστεί οποιαδήποτε κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητά της.

Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές επίλυσης των διαφορικών μεθόδων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Mufti, 1976; Dey & Morrison, 1979a,b; Hohmann, 1988) και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Coggon, 1971; Rücker et al., 2006). Στη συγκεκριμένη διατριβή έγινε χρήση λογισμικών αντιστροφής, στα οποία για την επίλυση του ευθέος προβλήματος, εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με τις μεθόδους αυτές το έδαφος χωρίζεται σε έναν επιθυμητό αριθμό ορθογωνίων κελιών διαφορετικής αντίστασης, όμως σε κάθε κελί η αντίσταση δεν μεταβάλλεται.

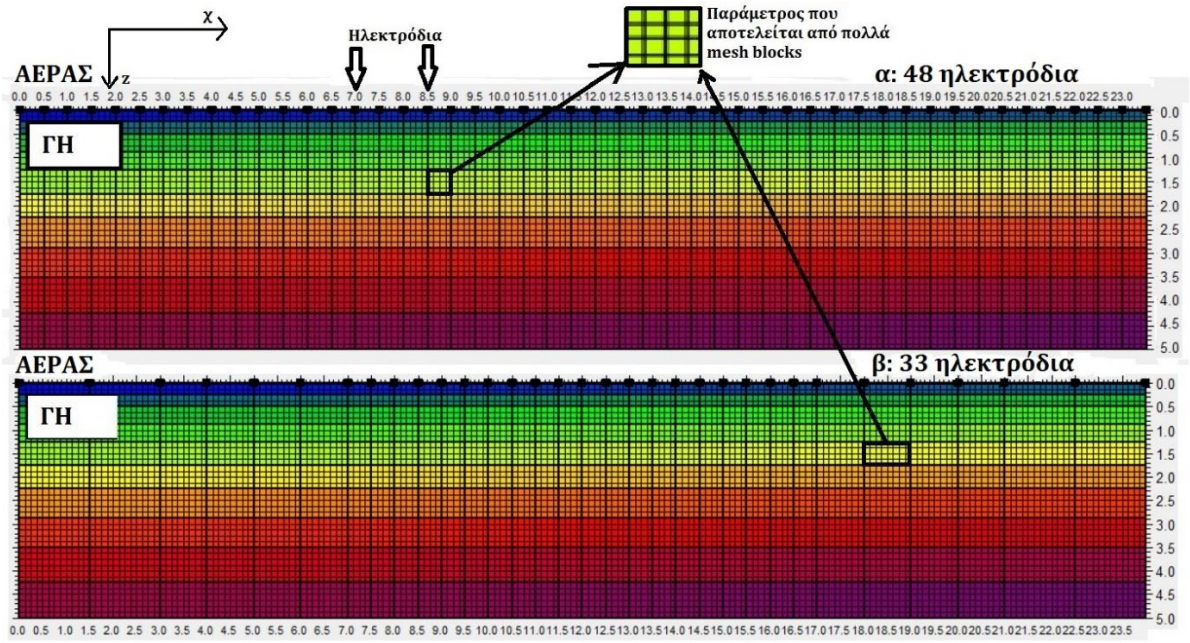
Η μοντελοποίηση του εδάφους σε παραμέτρους ακολουθεί το μοντέλο των 2.5D (δύο και μισό διαστάσεων) σύμφωνα με το οποίο, η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται στις τρεις διαστάσεις x,y,z ενώ οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης πραγματοποιούνται μόνο στις δύο διαστάσεις x,z με την αντίσταση να παραμένει σταθερή ως προς την διεύθυνση της τρίτης διάστασης y (Σχήμα 2.30).



Σχήμα 2.30: Το μοντέλο του εδάφους σε παραμέτρους 2.5 διαστάσεων (Tsourlos, 1995).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο μορφές μοντελοποίησης (2.5D) των υπεδάφιων παραμέτρων μέσω του προγράμματος αντιστροφής DC_2DPro του Kim που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του ευθέος προβλήματος στη συγκεκριμένη διατριβή.



Σχήμα 2.31: Διακριτοποίηση του υπεδάφιου χώρου σε κελιά διαφορετικής αντίστασης (παράμετροι), κάνοντας χρήση Α)48 ηλεκτροδίων σταθερής βασικής απόστασης 0.5 m και Β) 33 ηλεκτροδίων αραιωμένης "απλωμένης" διάταξης που χρησιμοποιήθηκαν.

Το σύνολο των παραμέτρων (κελιών) διαφορετικής αντίστασης αποτελεί ένα πλέγμα (Σχήμα 2.31). Εφαρμόζοντας το κριτήριο Galerkin για τα πεπερασμένα στοιχεία του πλέγματος η ανομοιογένεια της Γης που αποτελούσε μη-γραμμικό σύστημα εξισώσεων μετασχηματίζεται σε ισοδύναμο γραμμικό σύστημα που θα έχει τη μορφή:

$$K \cdot A = F \qquad (2.60)$$

όπου K: είναι ο πίνακας των όρων δυσκαμψίας των στοιχείων
A: είναι το διάνυσμα με τα άγνωστα δυναμικά των κόμβων
F: είναι πίνακας που περιλαμβάνει τις πηγές ρεύματος και του όρους των ορίων.

Έτσι με την επίλυση του γραμμικών εξισώσεων, θα βρεθούν οι τιμές των δυναμικών και στη συνέχεια θα υπολογιστούν οι φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις (συνθετικά δεδομένα).

<u>Αντίστροφο γεωηλεκτρικό πρόβλημα.</u>

Είναι η αντίστροφη διεργασία του ευθέος προβλήματος, κατά την οποία οι φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις (πραγματικές μετρήσεις) που συλλέχθηκαν από μια γεωφυσική έρευνα μετατρέπονται σε πραγματικές τιμές αντίστασης. Στόχος της αντιστροφής είναι να δημιουργηθεί ένα μοντέλο γης που να απεικονίζει την κατανομή των πραγματικών αντιστάσεων του υπεδάφους, με την ελάχιστη δυνατή απόκλιση από τις υπολογιζόμενες (συνθετικές τιμές) αντιστάσεις που προκύπτουν από την επίλυση του ευθέος προβλήματος.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Σε γραμμικά προβλήματα, η λύση του αντίστροφου προβλήματος είναι εύκολη μέσω του υπολογισμού του αντίστροφου μετασχηματισμού T^{-1}.

Λόγω της μη γραμμικότητας όμως του γεωηλεκτρικού προβλήματος, η λύση του αντίστροφου προβλήματος δεν μπορεί να βρεθεί απευθείας από την αντιστροφή του μετασχηματισμού T από τη σχέση 2.58, $\boldsymbol{\chi} = \boldsymbol{T}^{-1}(\boldsymbol{y})$. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση του είναι αρχικά η λύση του ευθέος προβλήματος και στη συνέχεια η γραμμικοποίηση του χρησιμοποιώντας συναρτήσεις Taylor.

Έστω ότι $\chi \in R^N$ είναι το διάνυσμα που περιέχει τις N παραμέτρους του μοντέλου, $y \in R^M$ περιλαμβάνει τις M μετρήσεις φαινόμενης αντίστασης και η $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{T}(\boldsymbol{\chi})$ (σχέση 2.57) είναι η σχέση που συνδέει τις παραμέτρους με τις φαινόμενες αντιστάσεις. Για την εύρεση του διανύσματος χ, που αποτελεί και το σκοπό της αντιστροφής, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης επιμέρους μικρότερων γραμμικών προβλημάτων για τη σταδιακή βελτίωση της λύσης του μη-γραμμικού προβλήματος. Αν ο μετασχηματισμός T αναπτυχθεί ως συνάρτηση Taylor πρώτου βαθμού, εξαιτίας μιας μικρής μεταβολής της αντίστασης dx προκύπτει ότι:

$$T(x + dx) = T(x) + \frac{\partial T(x)}{\partial x} dx + \cdots \approx T(x) + \boldsymbol{J}\, dx \qquad (2.61)$$

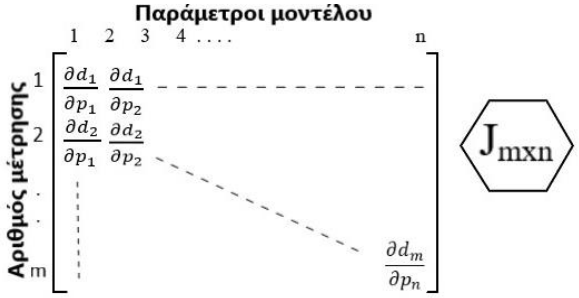
Με άλλα λόγια, αν θεωρήσουμε την διαφορά T(x+dx) -T(x) ίση με τα πειραματικά δεδομένα y. Τότε η σχέση 2.61 ανάγεται στη μορφή:

$$dy = J \cdot dx \qquad (2.62)$$

όπου dy είναι διάνυσμα που περιέχει τις διαφορές μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και συνθετικών δεδομένων, dx είναι η ελάχιστη διόρθωση των παραμέτρων του μοντέλου και ο όρος J καλείται πίνακας ευαισθησίας ή Ιακωβιανός πίνακα.

Ο Ιακωβιανός πίνακας εκφράζει το ποσό της μεταβολής στην τιμή μιας μέτρησης φαινόμενης αντίστασης, αν μεταβληθεί ελάχιστα η αντίσταση μιας παραμέτρου του μοντέλου (Loke and Barker, 1995). Έστω n είναι ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου (κατανομή αντίστασης) και m είναι ο αριθμός των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης. Κάθε στοιχείο του δίνεται από την σχέση:

$$J_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial p_j} \qquad (2.63)$$



Σχήμα 2.32: Ο Ιακωβιανός Πίνακας m αριθμού μετρήσεων και n παραμέτρων μοντέλου.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές που εφαρμόζονται για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Η μέθοδος των ιδιαζουσών τιμών (Lanczos, 1960; Golub και Reinsh, 1970; Lawson και Hanson, 1974; Strang, 1998), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Lines και Treitel, 1984), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης (Levenberg, 1944; Marquadt, 1963; Franklin, 1970) και τέλος η μέθοδος της εξομαλυμένης αντιστροφής Occam (Tikhonov, 1963; Tikhonov και Glasko, 1965; Constable et al., 1987; deGroot-Hedlin και Constable, 1990).

Στη συγκεκριμένη διατριβή για την επίλυση των αντίστροφων προβλημάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DC_2DPro (Kim, 2010), το οποίο βασίζεται στην εξομαλυμένη αντιστροφή Occam. Η μέθοδος της εξομάλυνσης βασίζεται στην εξίσωση:

$$(\boldsymbol{J}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{J} + \lambda\boldsymbol{F})\Delta q_{\boldsymbol{k}} = \boldsymbol{J}^{\boldsymbol{T}}\, g - \lambda\boldsymbol{F}\, q_{k-1} \tag{2.64}$$

όπου: $\boldsymbol{F} = a_x q \boldsymbol{C}_x^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{C}_x + \quad a_z q \boldsymbol{C}_z^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{C}_x \longrightarrow$ $\boldsymbol{C}_x$, $\boldsymbol{C}_z$: είναι οι πίνακες εξομάλυνσης οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας αντίστοιχα.

J ⟶ είναι ο mxn Ιακωβιανός πίνακας
J^T ⟶ είναι ο αντίστροφος του Ιακωβιανού
q ⟶ το διάνυσμα του μοντέλου
λ ⟶ ο συντελεστής απόσβεσης Lagranian
Δ_q ⟶ το διάνυσμα βελτίωσης του μοντέλου (q_k-q_{k-1})
q ⟶ q_k είναι το βελτιωμένο μοντέλο και q_{k-1} είναι το αρχικό μοντέλο
g ⟶ η διαφορά μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δεδομένων αντίστασης

Μέσω μιας επαναληπτικής διεργασίας επιτελείται η διαδικασία της αντιστροφής. Ξεκινώντας από ένα αρχικό μοντέλο παραμέτρων (κελιών), σε κάθε επανάληψη βρίσκεται μια διόρθωση (Δq), η οποία προστίθεται στο προηγούμενο μοντέλο. Σκοπός κάθε επανάληψης είναι η μείωση των διαφορών μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και συνθετικών φαινόμενων αντιστάσεων (g). Η διαδικασία τερματίζεται όταν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) σταματήσει να ελαχιστοποιείται δραστικά ή ολοκληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων. Με τη λήξη της διαδικασίας παρουσιάζεται το τελικό μοντέλο κατανομής αντίστασης, το οποίο δεν θα είναι απαραίτητα η καλύτερη δυνατή λύση, αλλά θα αποτελεί μια απλοποιημένη αναπαράσταση της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους (Tsourlos, 1995).

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) αποτελεί και ένα κριτήριο για τον έλεγχο της ποιότητας των υπεδάφιων εικόνων της αντιστροφής. Η σχέση υπολογισμού του δίνεται ως:

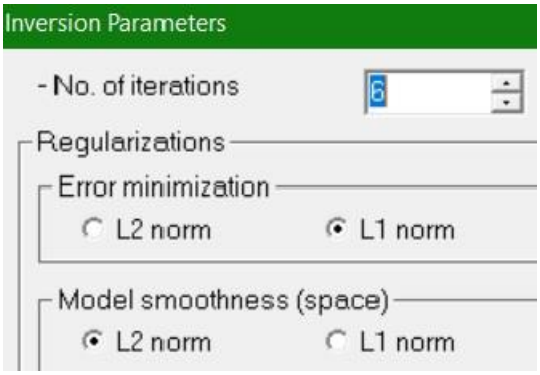
$$\%RMS\ Error = \sqrt{\left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{\left(d_i^{obs}-d_i^{calc}\right)^2}{\left(d_i^{calc}\right)^2}\right]} \tag{2.65}$$

όπου m είναι ο αριθμός των μετρήσεων, d_i^{obs} και d_i^{calc} είναι οι πραγματικές και οι φαινόμενες αντιστάσεις του ευθέος προβλήματος αντίστοιχα.

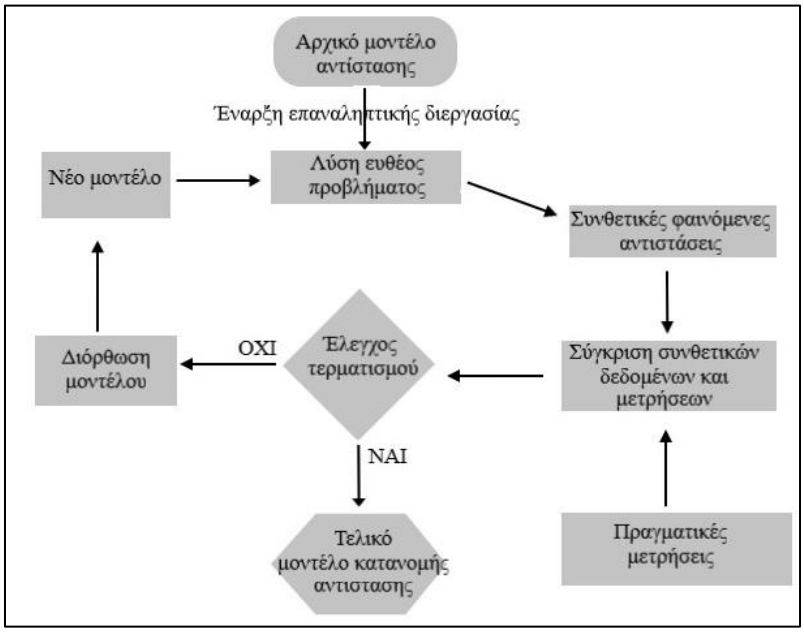
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Το συγκεκριμένο λογισμικό (DC_2DPro) πραγματοποιεί αντιστροφή με δύο διαφορετικούς παράγοντες εξομάλυνσης (L1-norm και L2-norm). Για την καλύτερη δυνατή εξομάλυνση της τραχύτητας του μοντέλου χρησιμοποιείται ο παράγοντας **L2**, ο οποίος ελαχιστοποιεί το τετράγωνο των μεταβολών στις παραμέτρους της αντίστασης. Αντιθέτως, για την ελαχιστοποίηση των διαφορών στις απόλυτες τιμές μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και συνθετικών φαινόμενων αντιστάσεων καθώς και για τη μείωση της επίδρασης των ακραίων τιμών (outliers) γίνεται χρήση του παράγοντα **L1** "*robust*" (Ellis και Oldenburg, 1994; Loke and Dahlin, 2003).



Σχήμα 2.33: Επιλογή παραμέτρων εξομάλυνσης αντιστροφής στο λογισμικό DC_2DPro.



Σχήμα 2.34: Απλοποιημένο διάγραμμα της διαδικασίας Αντιστροφής.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

Αλγόριθμος παραγωγής πρωτοκόλλων μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας

Το κεφάλαιο που ακολουθεί ξεκινάει με μια σύντομη εισαγωγή, στην οποία αναφέρεται ο λόγος δημιουργίας του αλγορίθμου παραγωγής πρωτοκόλλων μετρήσεων.

Στη συνέχεια, ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση της τεχνικής εύρεσης βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης με τη χρήση του Ιακωβιανού πίνακα της Αθανασίου (2009), που αποτελεί κομμάτι του καινούργιου αλγορίθμου.

Τέλος, γίνεται περιγραφή σε στάδια της λειτουργίας του αλγορίθμου Longlines_opt2D, *από τον οποίο εξάγονται πρωτόκολλα για ένα πλήθος συμβατικών και μη διατάξεων, αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων, σε κατάλληλη μορφή που θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία συνθετικών μοντέλων και μετρήσεων υπαίθρου.*

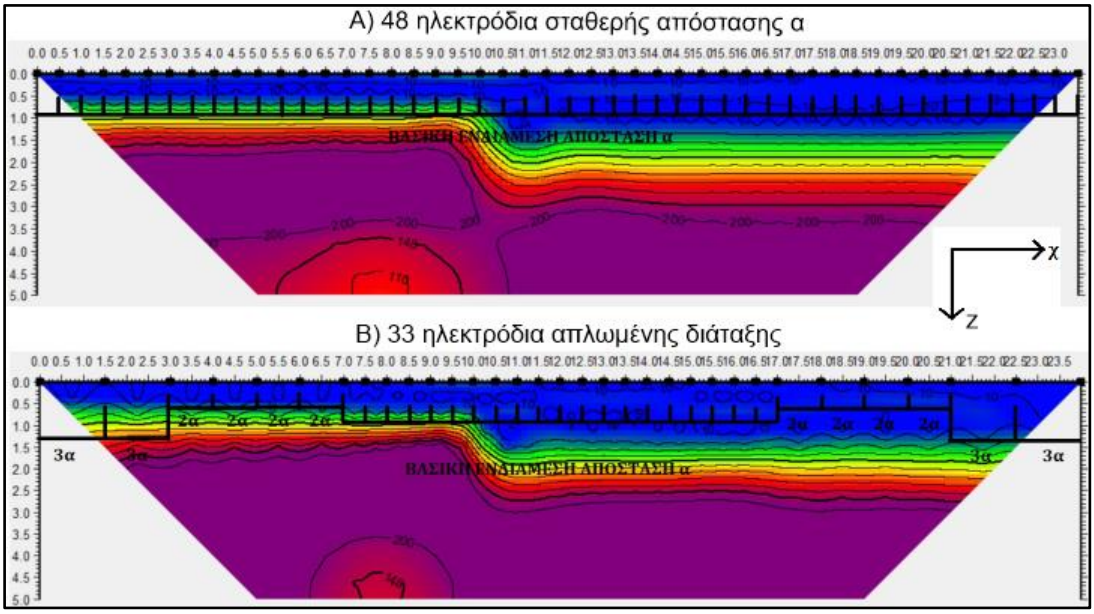
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

3.1 Εισαγωγή

Στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για τη μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους γίνεται χρήση συγκεκριμένων διατάξεων ηλεκτροδίων. Το σύνολο των διατάξεων που απεικονίζουν τις ακριβείς θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού κάθε μέτρησης ονομάζεται " Πρωτόκολλο μέτρησης ".

Κάθε πρωτόκολλο μπορεί να αποτελείται από μετρήσεις μιας συγκεκριμένης διάταξης όπως π.χ. διάταξης διπόλου-διπόλου ή να περιλαμβάνει έναν συνδυασμό πολλών διατάξεων μαζί για την δημιουργία ενός πλήρους πρωτοκόλλου. Για την ανάγκη κατασκευής των πρωτοκόλλων δημιουργήθηκε ένας καινούργιος αλγόριθμος (Longlines_opt2D, Mavros © 2020) σε περιβάλλον Matlab, ο οποίος δημιουργεί πρωτόκολλα αραιωμένης ή πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων μικρής και μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις:

- διπόλου – διπόλου
- πολλαπλής βαθμίδας
- καινούργιας διάταξης πλήρους εύρους βαθμίδας
- πλήρες πρωτόκολλο (διπόλου-διπόλου και πλήρους εύρους βαθμίδας
- βέλτιστο πρωτόκολλο Ιακωβιανού πίνακα



Σχήμα 3.1: Οι δύο τύποι κατανομής των ηλεκτροδίων. Α) πυκνή κατανομή σταθερής βασικής απόστασης, Β) αραιωμένη κατανομή στις άκρες.

Σύμφωνα με τους Noel και Xu (1991) και Xu και Noel (1993) ο συνολικός αριθμός των πιθανών συνδυασμών ηλεκτροδίων (αριθμού n) δίνεται από τη σχέση:

$$n \cdot (n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3)/8 \qquad (3.1)$$

όπου ας υποθέσουμε ότι σε μια γεωφυσική έρευνα χρησιμοποιούνται n=33 ηλεκτρόδια. Ο αριθμός των μετρήσεων είναι τεράστιος, πράγμα απίθανο ακόμα και με τη χρήση οργάνων με δυνατότητα λήψης πολυκάναλων μετρήσεων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Επομένως, μία από τις κυριότερες λειτουργίες του αλγορίθμου εκτός της εξαγωγής πρωτοκόλλων μέτρησης συμβατικών διατάξεων είναι και η δημιουργία πρωτοκόλλων ελαχιστοποιημένου αριθμού μετρήσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με αραίωση της πυκνότητας των ηλεκτροδίων στις άκρες των τομών αλλά και με τη διαδικασία της βελτιστοποίησης των πρωτοκόλλων μέτρησης με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα ευαισθησίας.

Η Αθανασίου (2009) πρότεινε μια νέα τεχνική βελτιστοποίησης, η οποία χρησιμοποιεί αποκλειστικά τον Ιακωβιανό πίνακα ή πίνακα ευαισθησίας. Στη μέθοδο αυτή υπολογίζεται μόνο ο Ιακωβιανός πίνακας χωρίς την επίλυση του αντιστρόφου του J^{-1} για τον υπολογισμό του πίνακα διακριτικής ικανότητας R που πραγματεύονται άλλες μέθοδοι δημιουργίας βέλτιστων πρωτοκόλλων. Έτσι δεν απαιτείται σε κάθε επανάληψη η εύρεση του αντιστρόφου πίνακα, διαδικασία έντονα χρονοβόρα, ειδικά σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος ηλεκτροδίων.

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής λοιπόν, δεν αποτελεί μόνο η σύγκριση των διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων που εξάγονται από τον αλγόριθμο, αλλά και η σύγκριση των πρωτοκόλλων μέτρησης πυκνής και αραιής κατανομής ηλεκτροδίων στα άκρα των διατάξεων.

3.2 Δημιουργία βέλτιστων πρωτοκόλλων με τη μέθοδο του Ιακωβιανού Πίνακα (Αθανασίου 2009)

Στην εισαγωγή του κεφαλαίου αναφέρθηκε πως για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των μετρήσεων, εκτός της αραίωσης των ηλεκτροδίων στις άκρες, εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης των πρωτοκόλλων. Στην παρούσα διατριβή για την εύρεση βέλτιστων πρωτοκόλλων μέτρησης χρησιμοποιείται η μέθοδος του Ιακωβιανού πίνακα, η οποία αποτελεί κομμάτι του αλγορίθμου που κατασκευάστηκε.

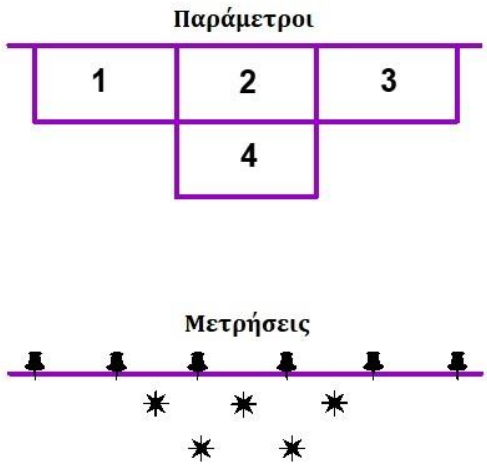
Η μέθοδος του Ιακωβιανού Πίνακα ή πίνακα ευαισθησίας προτάθηκε από την Αθανασίου (2009) και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δισδιάστατου (2D) βελτιστοποιημένου πρωτοκόλλου μέτρησης. Κάθε στοιχείο του Ιακωβιανού πίνακα εκφράζει το ποσοστό μεταβολής των τιμών της φαινόμενης αντίστασης μιας μέτρησης, αν μεταβληθεί ελάχιστα η πραγματική αντίσταση μιας παραμέτρου του μοντέλου. Σε αντίθεση με τους αλγορίθμους των Stummer et al. (2004) και των Wilkinson et al. (2006) που ακολουθούν μια πιο χρονοβόρα επαναληπτική διαδικασία, στην οποία υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη ο αντίστροφος πίνακας του Ιακωβιανού και εν συνεχεία ο πίνακας διακριτικής ικανότητας *R*, εδώ λαμβάνεται υπόψιν μόνο ο πίνακας ευαισθησίας.

- Στην αρχή της διαδικασίας δημιουργείται από το χρήστη το πλήρες "σετ" δεδομένων, το οποίο αποτελείται από τις διατάξεις **διπόλου-διπόλου** και "**πλήρους εύρους βαθμίδας**" (full-range gradient). Γίνεται φιλτράρισμα των δεδομένων από υψηλές τιμές γεωμετρικού παράγοντα π.χ. GF=5000.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

- Στη συνέχεια υπολογίζεται ο πίνακας ευαισθησίας, μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία του φιλτραρισμένου συνόλου δεδομένων.

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου, ας υποθέσουμε την ύπαρξη ενός απλοποιημένου μοντέλου τεσσάρων (4) παραμέτρων, το οποίο εξάγεται από την πραγματοποίηση πέντε (5) μετρήσεων. Ο Ιακωβιανός πίνακα ($m \times n$) θα αποτελείται από πέντε γραμμές και τέσσερεις στήλες, ίδιος με τον αριθμό των μετρήσεων και των παραμέτρων αντίστοιχα.



Ιακωβιανός Πίνακας

	Π1	Π2	Π3	Π4
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

5 μετρήσεις
4 παράμετροι μοντέλου

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

Σχήμα 3.2: Παράδειγμα μοντέλου 4 παραμέτρων με 5 μετρήσεις στην επιφάνεια (αριστερά) και ο Ιακωβιανός πίνακας (δεξιά) (τροποποιημένο από Αθανασίου, 2009).

- Έπειτα για κάθε παράμετρο, επιλέγεται η μέτρηση που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας (σε απόλυτη τιμή), μόνο στην περίπτωση που δεν έχει επιλεγεί σε προηγούμενη παράμετρο η συγκεκριμένη μέτρηση.

Έτσι, στην περίπτωση του μοντέλου του σχήματος 3.2, για την παράμετρο Π1, την καλύτερη ευαισθησία παρουσιάζει η διάταξη της τέταρτης μέτρησης (M4). Για τη δεύτερη παράμετρο (Π2) επιλέγεται η πέμπτη μέτρηση (M5), για την τρίτη παράμετρο (Π3), η τρίτη μέτρηση (M3) κ.ο.κ. Για την τελευταία παράμετρο του μοντέλου (Π4), η μέτρηση που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία είναι η M3, η οποία αναιρείται καθώς έχει επιλεγεί η μέτρηση αυτή από προηγούμενη παράμετρο (Π3). Η διαδικασία συνεχίζει με την επόμενη μεγαλύτερη τιμή (M5) που και αυτή έχει επιλεγεί από άλλη παράμετρο, επομένως η παράμετρος (Π4) καταλήγει να χρησιμοποιήσει τον συνδυασμό των ηλεκτροδίων της μέτρησης M1.

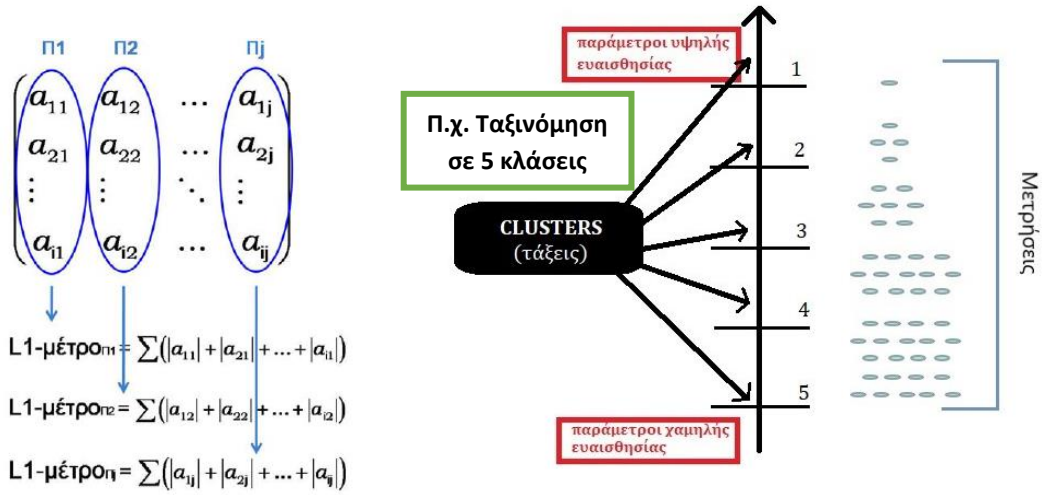
Συνεπώς, με το τέλος της επαναληπτικής διεργασίας έχει δημιουργηθεί το βελτιστοποιημένο σύνολο των δεδομένων που αποτελείται από μετρήσεις ίδιου αριθμού με τις παραμέτρους του μοντέλου.

Στη συνέχεια, για την αύξηση της ευαισθησίας των μετρήσεων που είναι λιγότερο "φωτισμένες" για κάποιες παραμέτρους εφαρμόζεται ένα επιπλέον βήμα στην επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης. Υπολογίζονται τα αθροίσματα των απολύτων τιμών όλων των βέλτιστων μετρήσεων του Ιακωβιανού πίνακα για κάθε παράμετρο (L1-

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

μέτρα). Κατόπιν, ταξινομούνται οι μέσες εκτιμήσεις των L1-μέτρων των παραμέτρων από τις μικρότερες προς τις μεγαλύτερες τιμές, με την προϋπόθεση της λήψης περισσότερων μετρήσεων για παραμέτρους που είναι λιγότερο ευαίσθητες σε μεταβολές της πραγματικής αντίστασης του μοντέλου και λιγότερες μετρήσεις για παραμέτρους καλύτερης ευαισθησίας.



Σχήμα 3.3: Υπολογισμός των L1-μέτρων του Ιακωβιανού πίνακα (αριστερά), και ταξινόμηση των παραμέτρων σε clusters(κλάσεις), λαμβάνοντας μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων για παραμέτρους χαμηλότερης ευαισθησίας (τροποποιημένο από Αθανασίου, 2009).

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, οι παράμετροι που έχουν ταξινομηθεί προηγουμένως χωρίζονται σε τάξεις (clusters), ανάλογα με τις τιμές των L1-μέτρων τους. Η επιλογή της κατάλληλης μέτρησης για κάθε παράμετρο, θα γίνει μόνο αν η κλάση στην οποία έχει ταξινομηθεί η συγκεκριμένη παράμετρος ισούται με τον αριθμό της τρέχουσας επανάληψης βελτιστοποίησης.

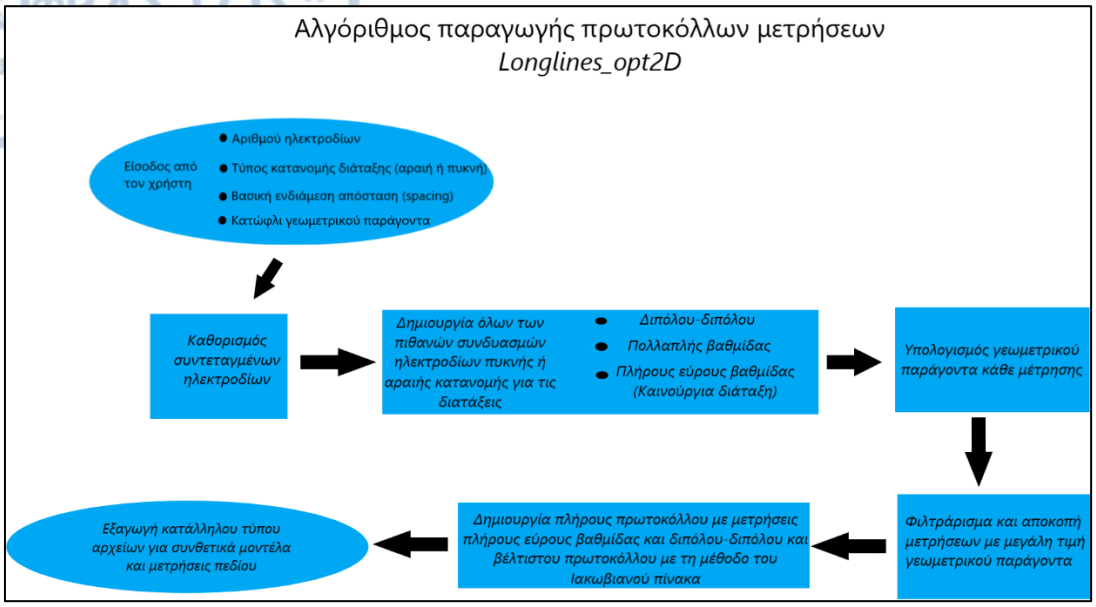
Αξίζει να σημειωθεί πως η μέθοδος βελτιστοποίησης με τη χρήση του Ιακωβιανού Πίνακα απαιτεί μόνο την επίλυση του ευθέος προβλήματος και δεν απαιτείται η είσοδος του αλγορίθμου σε διεργασία αντιστροφής για τον υπολογισμό του πίνακα διακριτικής ικανότητας που υπολογίζουν οι μέθοδοι των ερευνητών που αναφέρθηκαν αρχικά. Από τα βασικότερα προτερήματα των βελτιστοποιημένων πρωτοκόλλων που παράγονται είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των μετρήσεων, επομένως και του χρόνου που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας γεωφυσικής διασκόπησης, αλλά και η παραγωγή εικόνων αντιστροφής παρόμοιας ποιότητας συγκριτικά με τις εικόνες των πρωτοκόλλων ολικού συνόλου δεδομένων.

3.3 Αλγόριθμος παραγωγής πρωτοκόλλων (Longlines_opt2D)

Για τη δημιουργία των πρωτοκόλλων μέτρησης αραιωμένης και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων, μικρής και μεγάλης κλίμακας και την εξαγωγή συνθετικών δεδομένων αναπτύχθηκε ένας καινούργιος αλγόριθμος (Longlines_opt2D, Mavros © 2020) σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 3.4: Τυπικό διάγραμμα ροής του αλγορίθμου παραγωγής πρωτοκόλλων μετρήσεων.

Η εκκίνηση του αλγορίθμου απαιτεί από το χρήστη την εισαγωγή ορισμένων παραμέτρων όπως, τον συνολικό αριθμό των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν, τη μορφή της κατανομής των ηλεκτροδίων (αραιή ή πυκνή), τη βασική ενδιάμεση απόσταση (spacing) των ηλεκτροδίων αλλά και το κατώφλι του γεωμετρικού παράγοντα για το φιλτράρισμα των δεδομένων.

Η χωροθέτηση των ηλεκτροδίων είναι προσαρμόσιμη καθώς υπάρχει επιλογή η διάταξη να είναι είτε πυκνή με σταθερή ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, είτε "απλωμένη" με μεγαλύτερες δηλαδή αποστάσεις στα άκρα των τομών και ίση με τη βασική στο κεντρικό τμήμα της διάταξης για πυκνότερες μετρήσεις.

A

```
elec_coord(1,1)=0; %orizw tis syntetagmenes twn hlektrodiwn
elec_coord(1,2)=0;
elec_coord(1,3)=0;
elec_code(1)=1;
elec_br(1)=1;

for i=2:1:e
    if (i<=3 || i>=(e-1))

     elec_coord(i,1)=elec_coord(i-1,1)+3*e_dist;
    elseif (i<=7 || i>=(e-5))

    elec_coord(i,1)=elec_coord(i-1,1)+ 2*e_dist;
    else

        elec_coord(i,1)=elec_coord(i-1,1)+ e_dist;
    end
     elec_coord(i,2)=0;
     elec_coord(i,3)=0;
     elec_code(i)=i;
     elec_br(i)=1;
end
```

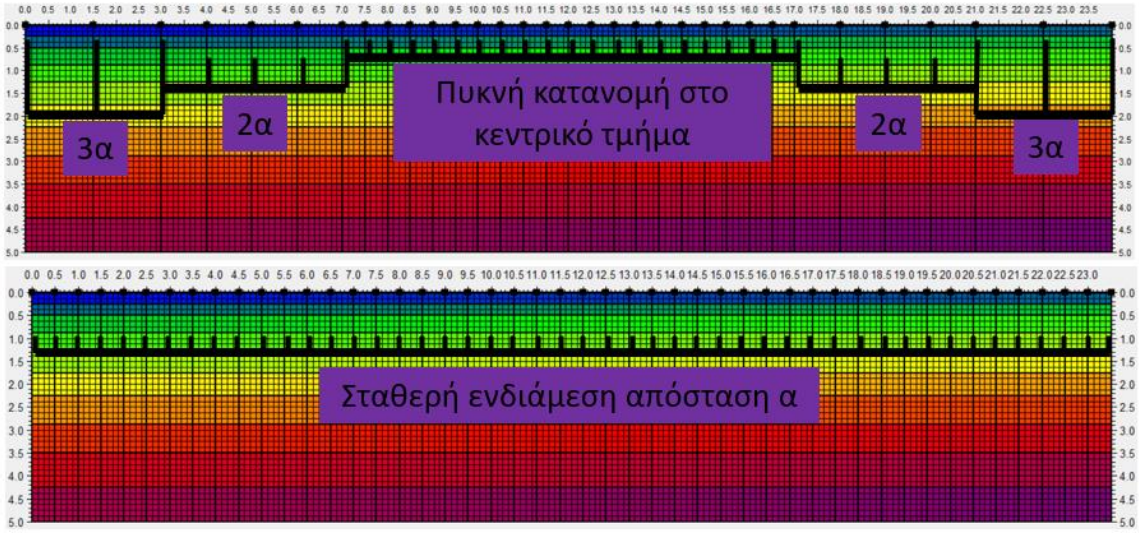
B

```
for i=1:1:e
    elec_coord(i,1)=(i-1)*e_dist;
    elec_coord(i,2)=0;
    elec_coord(i,3)=0;
    elec_code(i)=i;
    elec_br(i)=1;
end
```

Σχήμα 3.5: Οι δύο μορφές κατανομής των ηλεκτροδίων Α)αραιωμένης διάταξης και Β)πυκνής διάταξης του αλγορίθμου.

Ο αλγόριθμος, όπως αναφέρθηκε, υποστηρίζει οποιοδήποτε αριθμό ηλεκτροδίων. Ο διαθέσιμος εξοπλισμός του Εργαστηρίου Εφ. Γεωφυσικής του ΑΠΘ για τις μετρήσεις υπαίθρου επιτρέπει τη χρησιμοποίηση 33 ηλεκτροδίων αραιωμένης κατανομής και 48 ηλεκτροδίων πυκνής κατανομής. Η μορφολογία των χρησιμοποιούμενων ηλεκτροδίων των δύο τύπων κατανομής απεικονίζεται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 3.6: Οι δύο μορφές κατανομής Α) 48 ηλεκτροδίων ενδιάμεσης απόστασης α, Β) 33 ηλεκτρόδια "απλωμένης" διάταξης.

Ο αλγόριθμος συνεχίζεται με τη διαδικασία παραγωγής πρωτοκόλλων για τους τύπους των διατάξεων: διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient) και της πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient) και υπολογίζονται για κάθε μέτρηση η τιμή του γεωμετρικού παράγοντα. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται τμήμα του αλγορίθμου στο οποίο υπολογίζονται οι πιθανοί συνδυασμοί των ηλεκτροδίων επιφάνειας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας.

```
% ****** DIPOLE DIPOLE ARRAY  BA - MN
% BA-MN
if dd_flag==1
    dd_num=0;
  for i=1:1:(e-3)

    for n=1:1:nmax*mnsep

        if (n<=nmax)
            if (i+1+n+1<=e)
                k=k+1;
                dd_num=dd_num+1;
                m(k,1)=i+1;
                m(k,2)=i;
                m(k,3)=i+1+n;
                m(k,4)=m(k,3)+1;
                m(k,6)=2;
            end
        end

        if (n>nmax && n<nmax*2)
            if (i+n+4<=e)
                k=k+1;
                dd_num=dd_num+1;
                m(k,1)=i+2;
                m(k,2)=i;
                m(k,3)=i+2+n;
                m(k,4)=m(k,3)+2;
                m(k,6)=2;
            end
        end

        if (n>nmax*2 && n<nmax*3)
            if (i+n+6<=e)
                k=k+1;
                dd_num=dd_num+1;
                m(k,1)=i+3;
                m(k,2)=i;
                m(k,3)=i+3+n;
                m(k,4)=m(k,3)+3;
                m(k,6)=2;
            end
        end
    end
  end
  display(dd_num);
end
```

```
% ************* Generate multiple Gradient************
if mg_flag==1
    mg_num=0;
ee=floor(e*1/grparts)-1;

for ii=1:1:grparts

        for i=1:e-ii*ee
            jj=1;
            if ii*ee>14
                jj=2;
            end
            if ii*ee>28
                jj=3;
            end


            for j=i+1:e
            if (jj+j+1<=i+ii*ee)
                k=k+1;
                mg_num=mg_num+1;
                m(k,1)=i;
                m(k,2)=i+ii*ee;
                m(k,3)=j;
                m(k,4)=jj+j;

                m(k,6)=3;

            end
        end
        end
end
display(mg_num);
end
```

Σχήμα 3.7: Τμήμα του αλγορίθμου Longlines_opt2D για τη δημιουργία των διατάξεων διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας.

Το κυριότερο κομμάτι του αλγορίθμου βελτιστοποίησης αποτελεί η δημιουργία ενός συνολικού "σετ" φιλτραρισμένων δεδομένων. Η παραγωγή του πλήρους πρωτοκόλλου στηρίζεται στις διατάξεις διπόλου-διπόλου και πλήρους εύρους βαθμίδας, η οποία εμπεριέχει ουσιαστικά και τους συνδυασμούς της διάταξης πολλαπλής βαθμίδας. Αφού γίνει ο υπολογισμός του γεωμετρικού παράγοντα κάθε μέτρησης, οι τιμές φιλτράρονται αφαιρώντας μετρήσεις μεγάλου γεωμετρικού παράγοντα που θεωρητικά είναι αδύνατο να ληφθούν λόγω χαμηλού σήματος/θορύβου.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Το βελτιστοποιημένο σύνολο δεδομένων παράγεται με τη χρήση του πίνακα ευαισθησίας (Ιακωβιανός πίνακας) με τη μέθοδο της Αθανασίου (2009) όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2. Συνεπώς, υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας για το φιλτραρισμένο σύνολο δεδομένων και στη συνέχεια οι απόλυτες τιμές των μετρήσεων (L1-norm) για κάθε παράγοντα ταξινομούνται σε τρεις τάξεις (clusters) στην παρούσα διατριβή.

```
% ****************************************************
%***********  O P T I M I Z A T I O N *****************
% ****************************************************
 disp(' Optimized Array Calculation ....')
 % rank cumulative Jacobian

 clust_length=floor(num_par/clusters);
 scumjac=sort(cumjac); %ta3inomhsh tou cumjac

 % decide cluster values
 thj_min(1)=0;
 thj_max(1)=scumjac(clust_length);

for i=2:clusters

        thj_min(i)=scumjac(clust_length*(i-1));
        thj_max(i)=scumjac(clust_length*i);
 end
  thj_max(clusters)=scumjac(length(scumjac));

    % assign number of measurements to parameters according to clusters
  for i=1:num_par
        for j=1:clusters

          if( cumjac(i)>thj_min(j) && cumjac(i)<=thj_max(j))
```

```
                % linear
                if (cl_flag==1)
                cumjac_flag(i)=j;
                end

                % quasi linear
                if (cl_flag==2)

                 if (j<=2)
                 cumjac_flag(i)=j;
                 end
                 if(j>2)
                 cumjac_flag(i)=j+j-2;
                 end

               end
            end
        end
    end
```

Σχήμα 3.8: Τμήμα του αλγορίθμου από το κομμάτι βελτιστοποίησης Ιακωβιανού πίνακα.

Το τελευταίο τμήμα του αλγορίθμου περιλαμβάνει την εξαγωγή και αποθήκευση των πρωτοκόλλων σε συγκεκριμένη μορφή (file format) που δημιουργήθηκαν για τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων των διατάξεων:

- διπόλου – διπόλου
- πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient)
- πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient)
- πλήρες πρωτόκολλο (δεδομένα διπόλου-διπόλου + πλήρους εύρους βαθμίδας)
- βελτιστοποιημένο πλήρες πρωτόκολλο (optimized)

Τα αρχεία εξαγωγής είναι τύπου ASCII (.txt και .a2d) και περιέχουν πληροφορίες όπως τις συντεταγμένες των ηλεκτροδίων, το συνολικό αριθμό μετρήσεων και τον αριθμό (i.d) κάθε μέτρησης. Παρακάτω στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τμήματα του αλγορίθμου για την εξαγωγή των αρχείων σε κατάλληλη μορφή καθώς και η τελική μορφή τους.

```
% ************ Save full array protocol ************************
%filename1=input('Give Cumulative Jacobian output filename: ','s');
%filename1-fopen(filename1,'w');
str1=strcat(str0,'_full_meas.txt');
str2=strcat(str0,'_full_meas.org');
file2=fopen(str2,'w');
file1=fopen(str1,'w');
fprintf(file2,'12 B/H Tomography \n');
fprintf(file2,'2X%d parallel Pole tripole full (meas=%d)\n',e,nums);

fprintf(file1,'# X Y Z\n');
for i=1:e_num2

    fprintf(file1,'%d %.3f %.3f %.3f\n',i,elec_coord(i,1),elec_coord(i,2),elec_coord(i,3)
 end

    fprintf(file1,'# A B M N\n');
```

```
% ************ Save optimized array .a2d file ************************

str1=strcat(str0,'_opt_meas.a2d');
file1=fopen(str1,'w');

fprintf(file1,'1000\n');
fprintf(file1,'%s \n',str0);
fprintf(file1,'0\n');


fprintf(file1,'%d\n',e_num);

for i=1:e_num2

    fprintf(file1,'%d %.3f %.3f %d\n',i,elec_coord(i,1),elec_coord(i,3),0);


 end



 fprintf(file1,'0\n');
  fprintf(file1,'%d 0\n',nopt);
for i=1:nums2

     if meas_flag(i) ==1


    fprintf(file1,'%d %d %d %d 10.0\n',AA(i,1),AA(i,2),AA(i,3),AA(i,4));
     end

 end

 fclose(file1);
```

Σχήμα 3.9: Τμήμα του αλγορίθμου από την εξαγωγή κάθε πρωτοκόλλου μέτρησης.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογ
Α.Π.Θ

Intst_dd_meas - Notepad

File Edit Format View Help

```
1000
lntst
0
33
1 0.000 0.000 0
2 150.000 0.000 0
3 300.000 0.000 0
4 400.000 0.000 0
5 500.000 0.000 0
6 600.000 0.000 0
7 700.000 0.000 0
8 750.000 0.000 0
9 800.000 0.000 0
10 850.000 0.000 0
11 900.000 0.000 0
12 950.000 0.000 0
13 1000.000 0.000 0
14 1050.000 0.000 0
15 1100.000 0.000 0
16 1150.000 0.000 0
17 1200.000 0.000 0
18 1250.000 0.000 0
19 1300.000 0.000 0
20 1350.000 0.000 0
21 1400.000 0.000 0
22 1450.000 0.000 0
23 1500.000 0.000 0
24 1550.000 0.000 0
25 1600.000 0.000 0
26 1650.000 0.000 0
27 1700.000 0.000 0
28 1800.000 0.000 0
29 1900.000 0.000 0
30 2000.000 0.000 0
31 2100.000 0.000 0
32 2250.000 0.000 0
33 2400.000 0.000 0
0
150 0
2 1 3 4 10.0
2 1 4 5 10.0
2 1 5 6 10.0
2 1 6 7 10.0
3 2 4 5 10.0
3 2 5 6 10.0
3 2 6 7 10.0
3 2 7 8 10.0
4 3 5 6 10.0
4 3 6 7 10.0
4 3 7 8 10.0
4 3 8 9 10.0
```

.a2d αρχείο

Intst_dd_meas - Notepad

File Edit Format View Help

```
# X Y Z
1 0.000 0.000 0.000
2 150.000 0.000 0.000
3 300.000 0.000 0.000
4 400.000 0.000 0.000
5 500.000 0.000 0.000
6 600.000 0.000 0.000
7 700.000 0.000 0.000
8 750.000 0.000 0.000
9 800.000 0.000 0.000
10 850.000 0.000 0.000
11 900.000 0.000 0.000
12 950.000 0.000 0.000
13 1000.000 0.000 0.000
14 1050.000 0.000 0.000
15 1100.000 0.000 0.000
16 1150.000 0.000 0.000
17 1200.000 0.000 0.000
18 1250.000 0.000 0.000
19 1300.000 0.000 0.000
20 1350.000 0.000 0.000
21 1400.000 0.000 0.000
22 1450.000 0.000 0.000
23 1500.000 0.000 0.000
24 1550.000 0.000 0.000
25 1600.000 0.000 0.000
26 1650.000 0.000 0.000
27 1700.000 0.000 0.000
28 1800.000 0.000 0.000
29 1900.000 0.000 0.000
30 2000.000 0.000 0.000
31 2100.000 0.000 0.000
32 2250.000 0.000 0.000
33 2400.000 0.000 0.000
# A B M N
1 2 1 3 4
2 2 1 4 5
3 2 1 5 6
4 2 1 6 7
5 3 1 12 14
6 3 2 4 5
7 3 2 5 6
8 3 2 6 7
9 3 2 7 8
10 4 2 13 15
11 4 3 5 6
12 4 3 6 7
13 4 3 7 8
14 4 3 8 9
15 5 3 14 16
16 5 3 15 17
```

.txt αρχείο

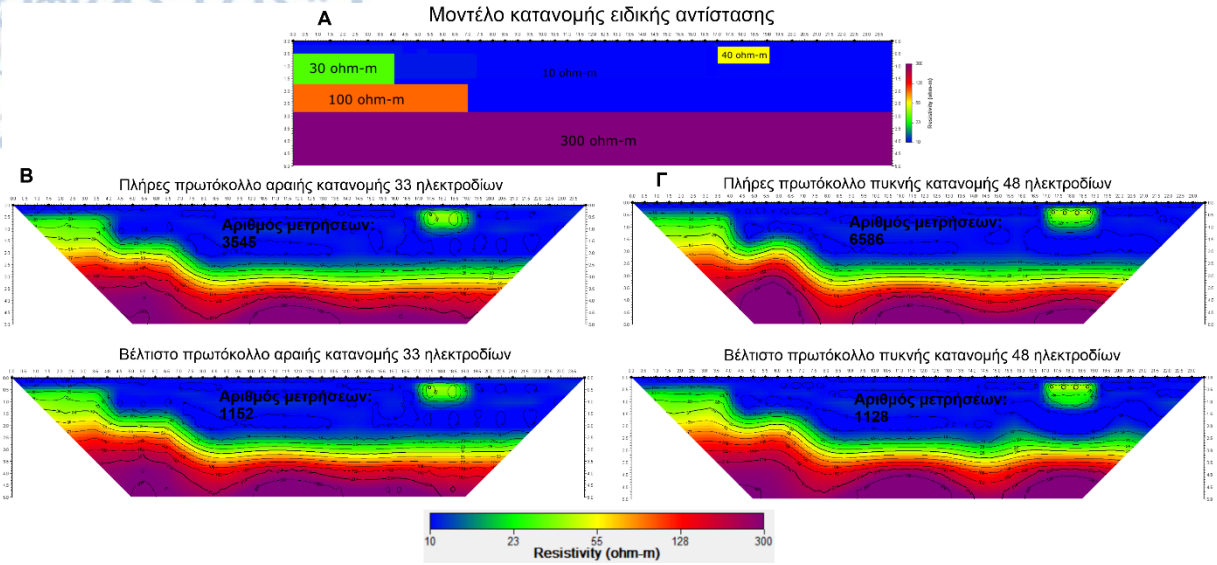
Σχήμα 3.10: Οι δύο τύποι αρχείων που εξάγονται από τον αλγόριθμο Longlines_opt2D.

- *txt αρχεία*: Θα χρησιμοποιηθούν για τη μετατροπή τους σε μορφή .sqz μέσω του λογισμικού Electre Pro για την εισαγωγή τους στο όργανο μέτρησης και τη λήψη μετρήσεων.
- *a2d αρχεία*: Η μορφή τους είναι παρόμοια με τα txt αρχεία, μόνο που αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο λογισμικό DC_2DPro (Kim, 2013) για την επίλυση του ευθέος προβλήματος και τη δημιουργία συνθετικών μοντέλων του υπεδάφους.

Σκοπός της δημιουργίας του αλγορίθμου αποτελεί η δημιουργία πρωτοκόλλων διαφοροποιημένης κατανομής ηλεκτροδίων για ένα πλήθος διατάξεων μέτρησης αλλά και εύρεση του βέλτιστου πρωτοκόλλου.

Ένα απλό παράδειγμα μοντέλου τριών στρωμάτων μικρής κλίμακας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11. Παρατηρείται ότι οι εικόνες κατανομής της αντίστασης αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων είναι παρόμοιες τόσο για το πλήρες όσο και για το βέλτιστο πρωτόκολλο του Ιακωβιανού πίνακα.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 3.11: Επίλυση ευθέος προβλήματος για ένα μοντέλο υπεδάφους: α) μοντέλο κατανομής ειδ.αντίστασης, β) πλήρες και βέλτιστο πρωτόκολλο αραιής κατανομής ηλεκτροδίων, γ) πλήρες και βέλτιστο πρωτόκολλο πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

Συνθετικά μοντέλα κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Το παρόν κεφάλαιο αρχίζει με μια σύντομη περιγραφή των βημάτων μέσω του λογισμικού αντιστροφής DC_2DPro (Kim, 2013). Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή συνθετικών μοντέλων κατανομής αντίστασης, καθώς και για τη μετατροπή των δεδομένων φαινόμενης αντίστασης σε δεδομένα πραγματικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα πλήθος συνθετικών μοντέλων χωρίς ή με προσθήκη τυχαίου θορύβου, μικρής και μεγάλης κλίμακας, με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων αραιής κατανομής και 48 ηλεκτροδίων πυκνής-κανονικής κατανομής για συμβατικές και μη συμβατικές διατάξεις ηλεκτροδίων μέτρησης. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα από την απόκριση των εικόνων αντιστροφής των παραπάνω μοντέλων για όλες τις χρησιμοποιούμενες διατάξεις αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε περιγραφή του καινούργιου αλγορίθμου για την παραγωγή πρωτοκόλλων μέτρησης αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων για ένα πλήθος διατάξεων μέτρησης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι δοκιμές των πρωτοκόλλων διαφορετικής κατανομής ηλεκτροδίων που παράγονται από τον αλγόριθμο σε ένα πλήθος συνθετικών μοντέλων τόσο χωρίς θόρυβο αλλά και με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) σε ορισμένα από αυτά.

Με βάση τον διαθέσιμο εξοπλισμό εξετάστηκαν πρωτόκολλα μικρής και μεγάλης κλίμακας με χρήση 33 και 48 ηλεκτροδίων. Στις διατάξεις αραιής κατανομής ηλεκτροδίων γίνεται χρήση 33 ηλεκτροδίων ενώ στις διατάξεις πυκνής κατανομής χρησιμοποιούνται 48 ηλεκτρόδια αντίστοιχα. Τα πρωτόκολλα μικρής κλίμακας δοκιμάστηκαν και σε πραγματικές μετρήσεις πεδίου.

Μετρήσεις μεγάλης κλίμακας δεν πραγματοποιήθηκαν, παρόλα αυτά, από τα συνθετικά δεδομένα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι παρόλο που τα μοντέλα είναι ίδια αναλογικά, οι εικόνες αντιστροφής μεγάλης κλίμακας είναι λίγο διαφορετικές από τις αντίστοιχες εικόνες μικρής κλίμακας. Αυτό συμβαίνει διότι μετρήσεις που είναι εφικτές σε μικρή κλίμακα, απορρίπτονται σε μεγάλης κλίμακας διατάξεις εξαιτίας γεωμετρικού παράγοντα. Ουσιαστικά όμως, τα αποτελέσματα των συνθετικών μοντέλων μικρής και μεγάλης κλίμακας είναι λίγο πολύ τα ίδια χωρίς σημαντικές εξαιρέσεις.

Στη συνέχεια, αφού γίνει μια σύντομη περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται μέσω κατάλληλου λογισμικού (DC_2DPro) για την παραγωγή συνθετικών δεδομένων φαινόμενης αντίστασης, παρουσιάζονται οι εικόνες αντιστροφής των πρωτοκόλλων μικρής και μεγάλης κλίμακας για τους δύο τύπους κατανομής 33 και 48 ηλεκτροδίων.

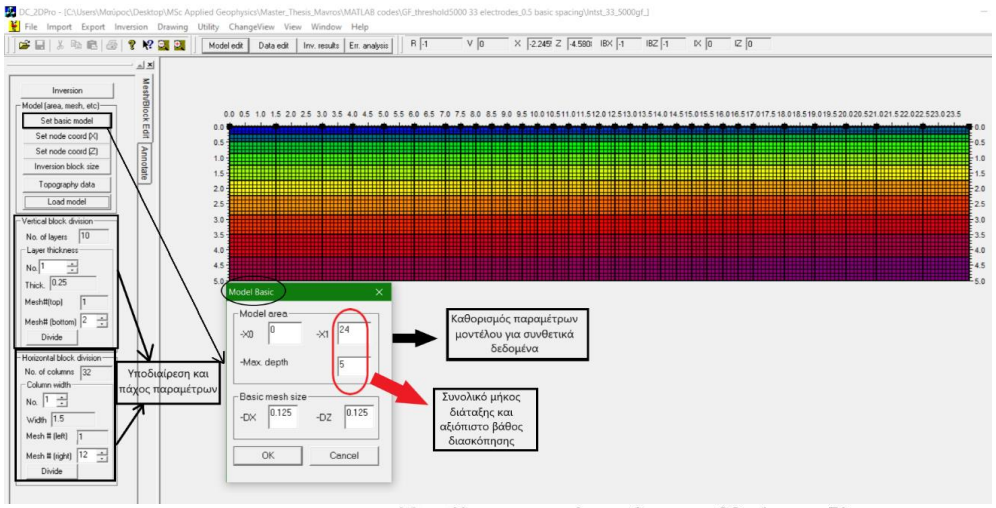
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

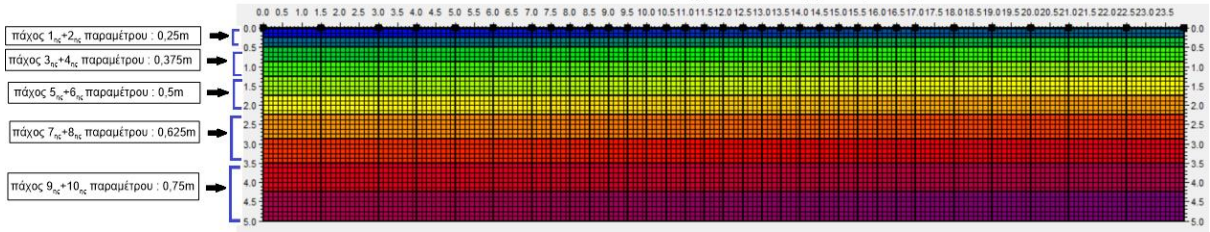
4.2 Πρόγραμμα αντιστροφής και δημιουργίας συνθετικών δεδομένων DC_2DPro (Kim, 2013)

Στην παρούσα διατριβή το DC_2DPro είναι το λογισμικό αντιστροφής (Σχήμα 4.1) που χρησιμοποιήθηκε για την αντιστροφή των δεδομένων φαινόμενης ειδικής αντίστασης, αλλά και για την παραγωγή συνθετικών μοντέλων κατανομής αντίστασης του υπεδάφους. Η διαδικασία που ακολουθείται μέσω του προγράμματος περιγράφεται παρακάτω.

Βήμα 1ο: Αφού γίνει η φόρτωση στο λογισμικό των απαραίτητων πρωτοκόλλων αρχίζει η διαδικασία παραγωγής μοντέλων. Γίνεται ο καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου όπως το συνολικό μήκος της τομής, το μέγιστο βάθος μοντέλου αλλά και των διαστάσεων των κελιών (blocks).



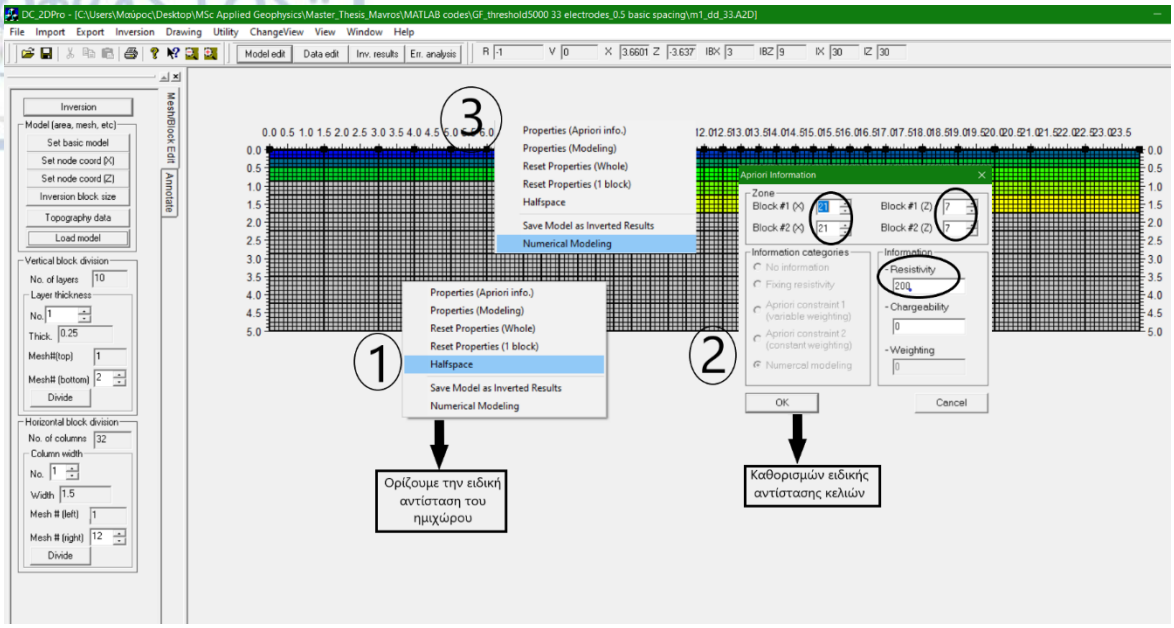
Μοντέλο κατανομής αντίστασης 33 ηλεκτροδίων



Σχήμα 4.1: Καθορισμός των παραμέτρων ενός μοντέλου στο λογισμικό DC_2DPro για 33 ηλεκτρόδια συνολικού μήκους τομής 24 μέτρων.

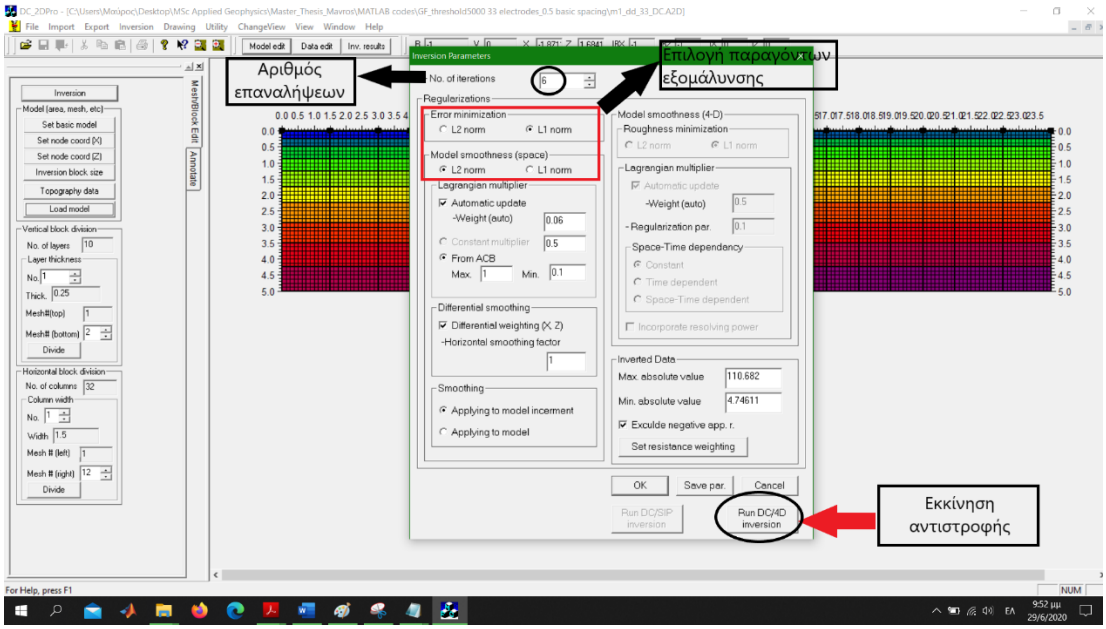
Βήμα 2ο: Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τον καθορισμό της ειδικής αντίστασης του ημιχώρου και στη συνέχεια την εισαγωγή της ειδικής αντίστασης στα κελιά των παραμέτρων για τη δημιουργία διαφορετικών μοντέλων υπεδάφους. Για την ολοκλήρωση του βήματος απαιτείται η αριθμητική ανάλυση (numerical analysis), πρακτικά σχετίζεται με την επίλυση του ευθέος προβλήματος για την εξαγωγή των φαινόμενων αντιστάσεων για το συγκεκριμένο μοντέλο. Από τη λύση του ευθέος προβλήματος εξάγεται αρχείο μορφής ASCII (.a2d αρχείο) παρόμοιο του σχήματος 3.10.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



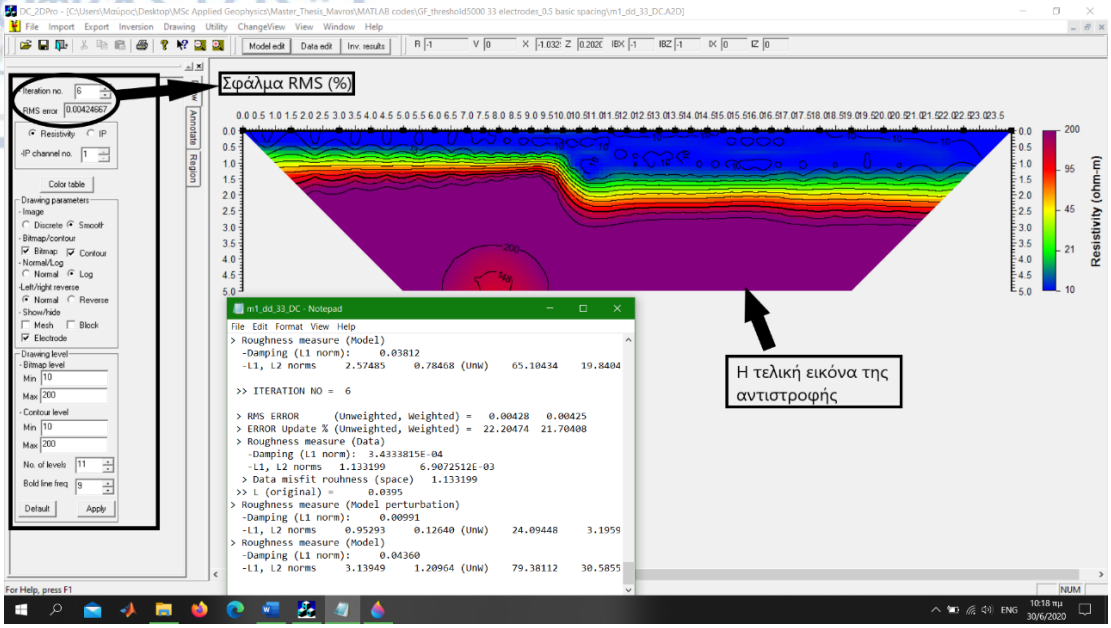
Σχήμα 4.2: Διαδικασία καθορισμού παραμέτρων ειδικής αντίστασης για τη δημιουργία συνθετικών μοντέλων στο λογισμικό DC_2DPro.

Βήμα 3ο: Είναι το βήμα της αντιστροφής για τη μετατροπή των συνθετικών φαινόμενων αντιστάσεων σε δεδομένα κατανομής της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους. Με την εισαγωγή του αρχείου του δεύτερου βήματος, ο χρήστης καθορίζει τις παραμέτρους της αντιστροφής (Σχήμα 4.3). Με την ολοκλήρωση του αριθμού των επαναλήψεων παράγεται η εικόνα της πραγματικής κατανομής της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.



Σχήμα 4.3: Επιλογή των παραμέτρων για την εκτέλεση της αντιστροφής και τη εύρεση της πραγματικής κατανομής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 4.4: Η τελική εικόνα της αντιστροφής που απεικονίζει την κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

4.3 Παραγωγή συνθετικών δεδομένων κατανομής αντίστασης με χρήση 33 και 48 ηλεκτροδίων μικρής κλίμακας

Το απαραίτητο εργαλείο για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των διατάξεων μέτρησης αποτελεί η δημιουργία συνθετικών μοντέλων κατανομής της ειδικής αντίστασης. Τα συνθετικά δεδομένα και οι αντιστροφές πραγματοποιούνται μέσω του λογισμικού DC_2DPro, διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως, χρησιμοποιώντας κάθε φορά το κατάλληλο πρωτόκολλο μέτρησης (αρχεία a2d).

Παρακάτω για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο συγκρίνονται τα αποτελέσματα των συνθετικών δεδομένων αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας, πλήρους εύρους βαθμίδας, καθώς και τα αποτελέσματα των πλήρων και βέλτιστων πρωτοκόλλων για 33 και 48 χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια.

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε πως η παραγωγή όλων των πρωτοκόλλων από τον αλγόριθμο Longlines_opt2D έγινε σε πρώτο στάδιο χρησιμοποιώντας τριάντα τρία (**33**) ηλεκτρόδια αραιής διάταξης, με <u>βασική απόσταση 0.5 μέτρα</u> και κατώφλι γεωμετρικού παράγοντα $\underline{GF}_{threshold}$ =5000 για το φιλτράρισμα των μετρήσεων. Το <u>συνολικό μήκος</u> της διάταξης είναι 24 μέτρα με <u>βάθος διασκόπησης</u> ίσο με 5 μέτρα. Ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε ένα από τα πρωτόκολλα δίνεται παρακάτω:

- αριθμός μετρήσεων διπόλου-διπόλου: 380
- αριθμός μετρήσεων πολλαπλής βαθμίδας: 1049
- αριθμός μετρήσεων πλήρους εύρους βαθμίδας: 3165
- αριθμός μετρήσεων πλήρους πρωτοκόλλου: 3545
- αριθμός μετρήσεων βέλτιστου πρωτοκόλλου: 1152

33 ηλεκτρόδια

Σε δεύτερο στάδιο δημιουργήθηκαν πρωτόκολλα πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων για τις πέντε διατάξεις με τη χρήση **48** ηλεκτροδίων <u>βασικής απόστασης 0.5 μέτρα</u> με <u>συνολικό μήκος</u> τομής 23.5 μέτρα. Το κατώφλι του γεωμετρικού παράγοντα ορίστηκε ως $\underline{GF}_{threshold}$ =5000 με βάθος διασκόπησης ίσο με 5 μέτρα. Ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε πρωτόκολλο αναγράφεται παρακάτω:

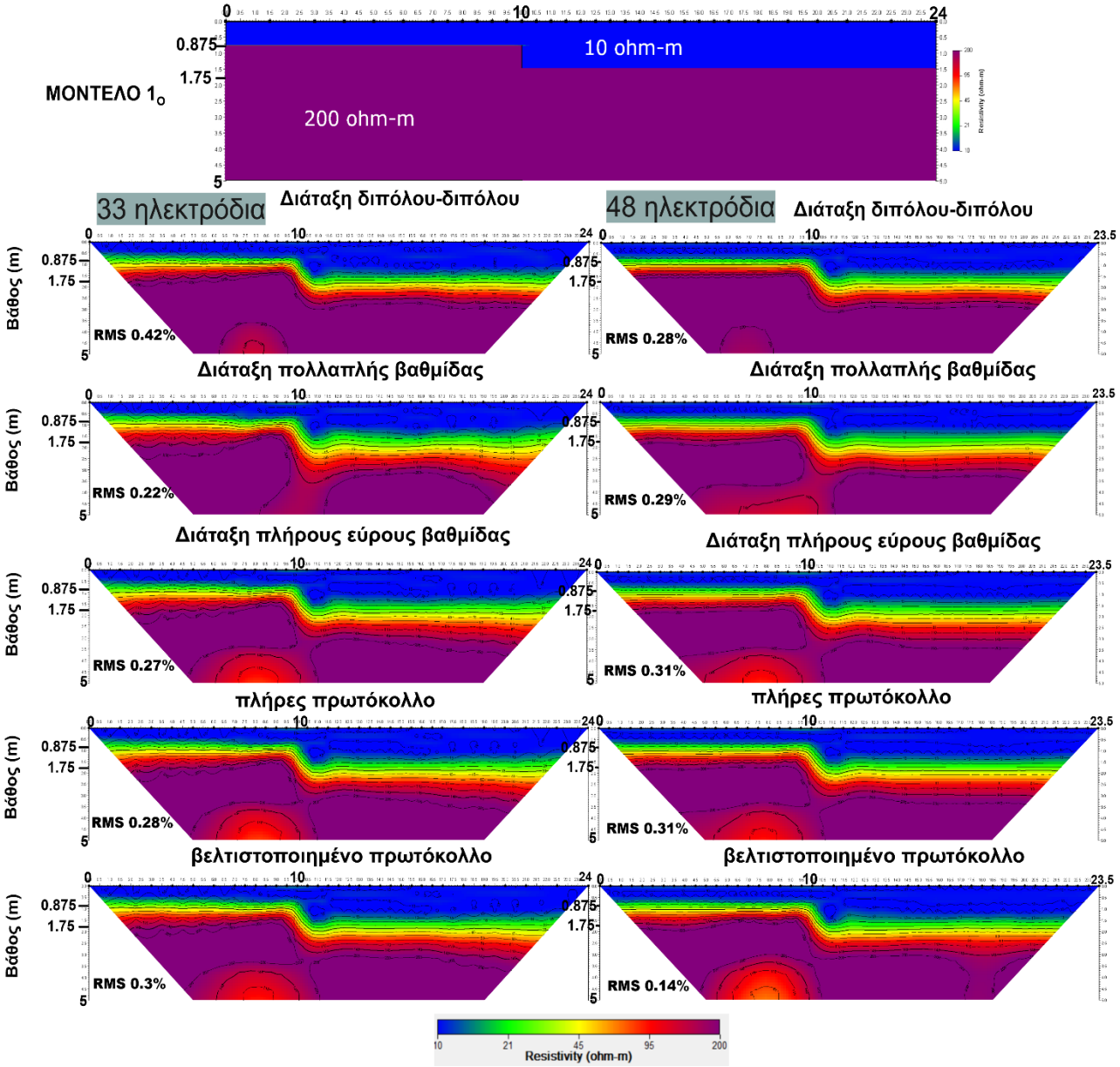
- αριθμός μετρήσεων διπόλου-διπόλου: 710
- αριθμός μετρήσεων πολλαπλής βαθμίδας: 2230
- αριθμός μετρήσεων πλήρους εύρους βαθμίδας: 5876
- αριθμός μετρήσεων πλήρους πρωτοκόλλου: 6586
- αριθμός μετρήσεων βέλτιστου πρωτοκόλλου: 1128

48 ηλεκτρόδια

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.1 Μοντέλο 1ο:

Ομογενές οριζόντιο στρώμα αντίστασης 10 Ω·m και πάχους 0.875 m στην αρχή της τομής βυθίζεται σε απόσταση 10m σε βάθος 1.75m. Το στρώμα αυτό υπέρκειται ομογενούς υποβάθρου ειδικής αντίστασης 200 Ω·m. Όπως θα παρατηρήσουμε και από τις εικόνες αντίστροφής που προέκυψαν με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων αραιής και 48 ηλεκτροδίων πυκνής διάταξης, τα αποτελέσματα όλων των διατάξεων είναι ικανοποιητικά. Στη θέση $\chi = 10m$ της τομής, η μετάβαση από το επιφανειακό στρώμα στο υπόβαθρο και σε βάθος από 0.875m μέχρι 1.75m απεικονίζεται υπό γωνία και όχι κατακόρυφα όπως ορίστηκε στο πραγματικό μοντέλο.

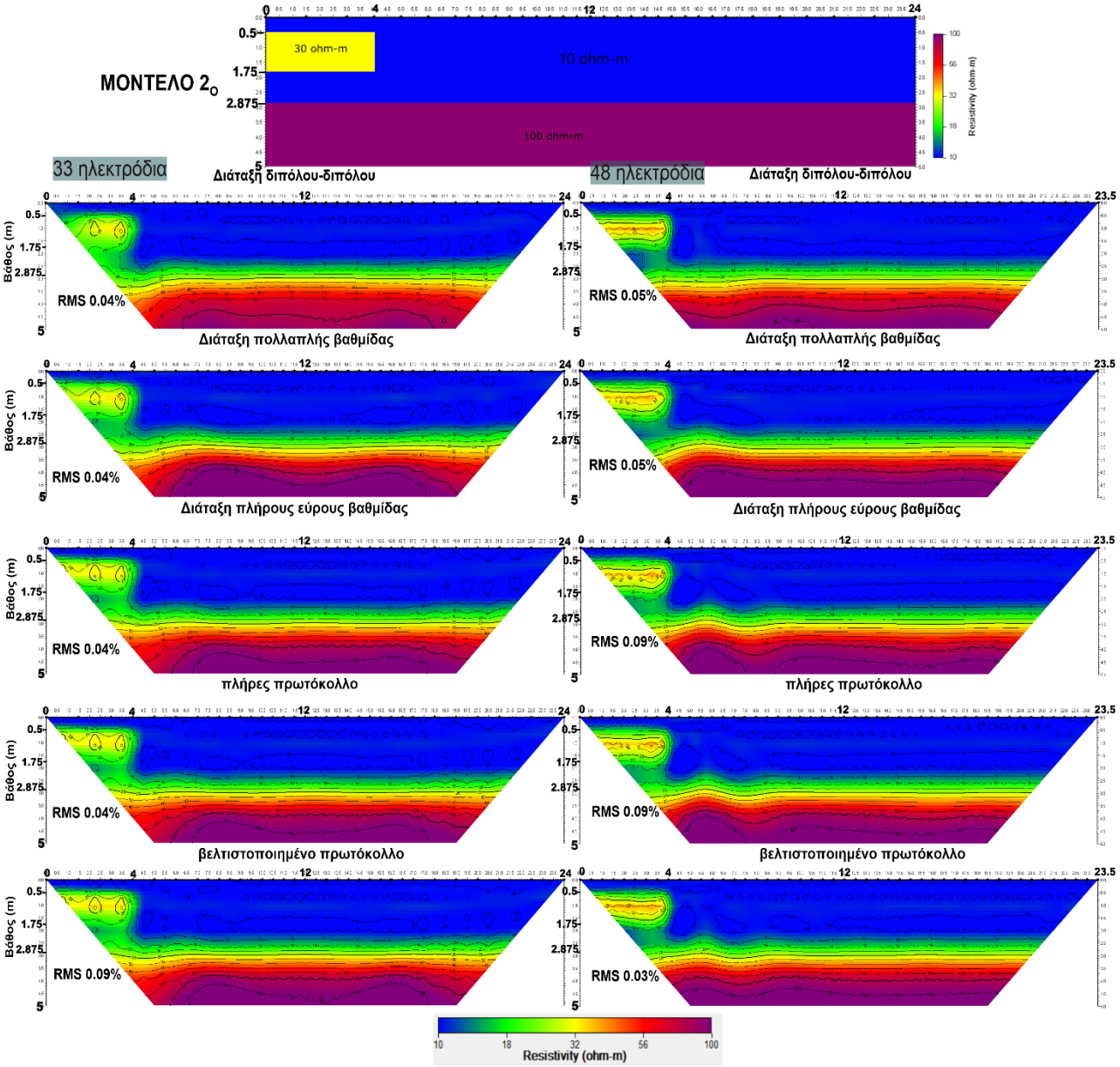


Σχήμα 4.5: Απεικόνιση του $1_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.2 Μοντέλο 2ο:

Επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 10 Ω·m και πάχους 2.875m υπέρκειται ενός πιο αντιστατικού οριζόντιου στρώματος 100 Ω·m, το οποίο αντιστοιχεί στο υπόβαθρο. Στο επιφανειακό στρώμα από τη θέση $\chi = 0m$ μέχρι $\chi = 4m$ και σε βάθος από $z = 0.5m - 1.75m$ εντοπίζεται ένας φακοειδής σχηματισμός αντίστασης 30 Ω·m. Εξαιρετική απόκριση του μοντέλου παρουσιάζουν όλες οι διατάξεις ηλεκτροδίων αραιής και πυκνής κατανομής.

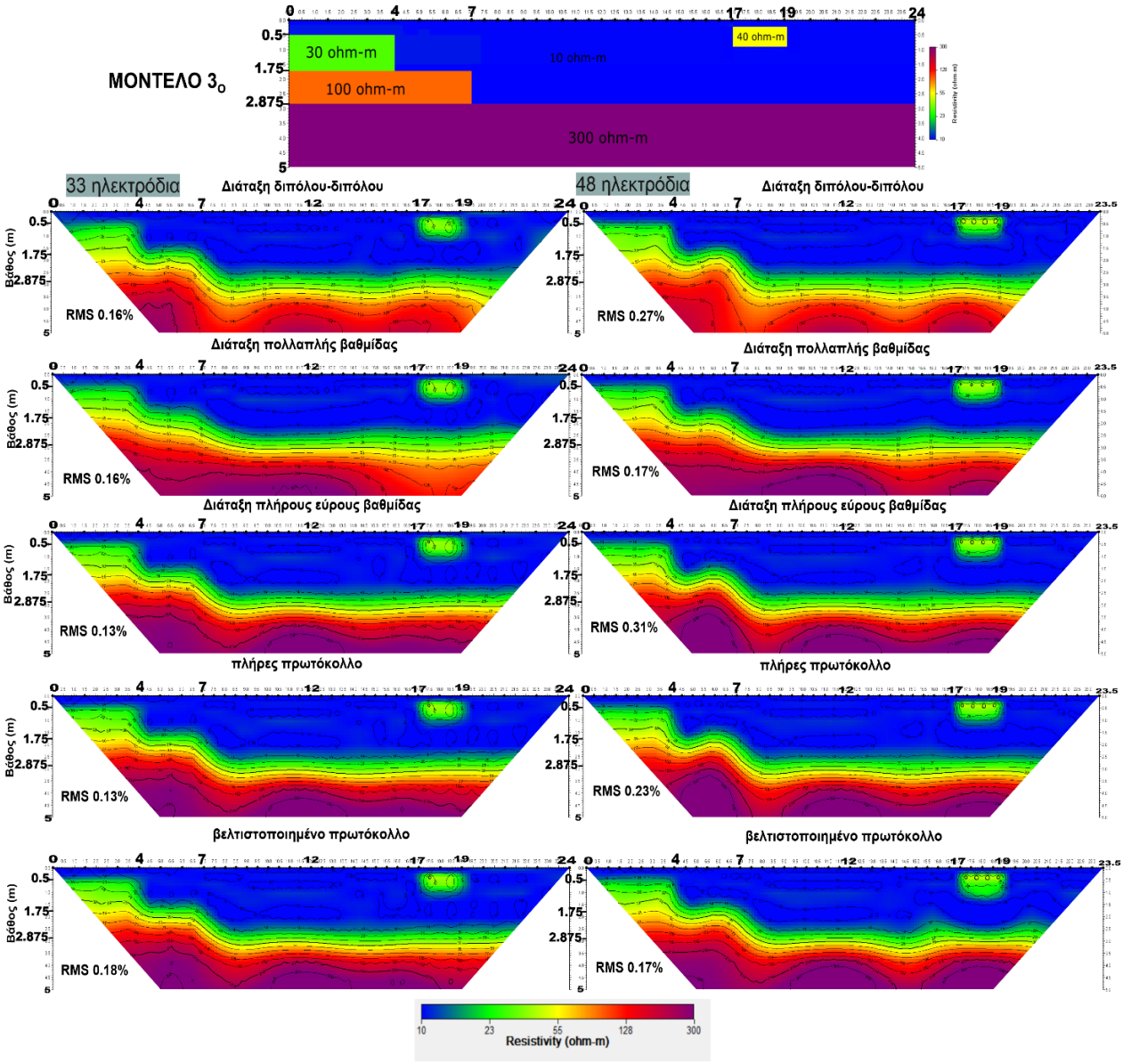


Σχήμα 4.6: Απεικόνιση του $2_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.3 Μοντέλο 3ο - Μοντέλο 3ο με προσθήκη θορύβου 5mv/A:

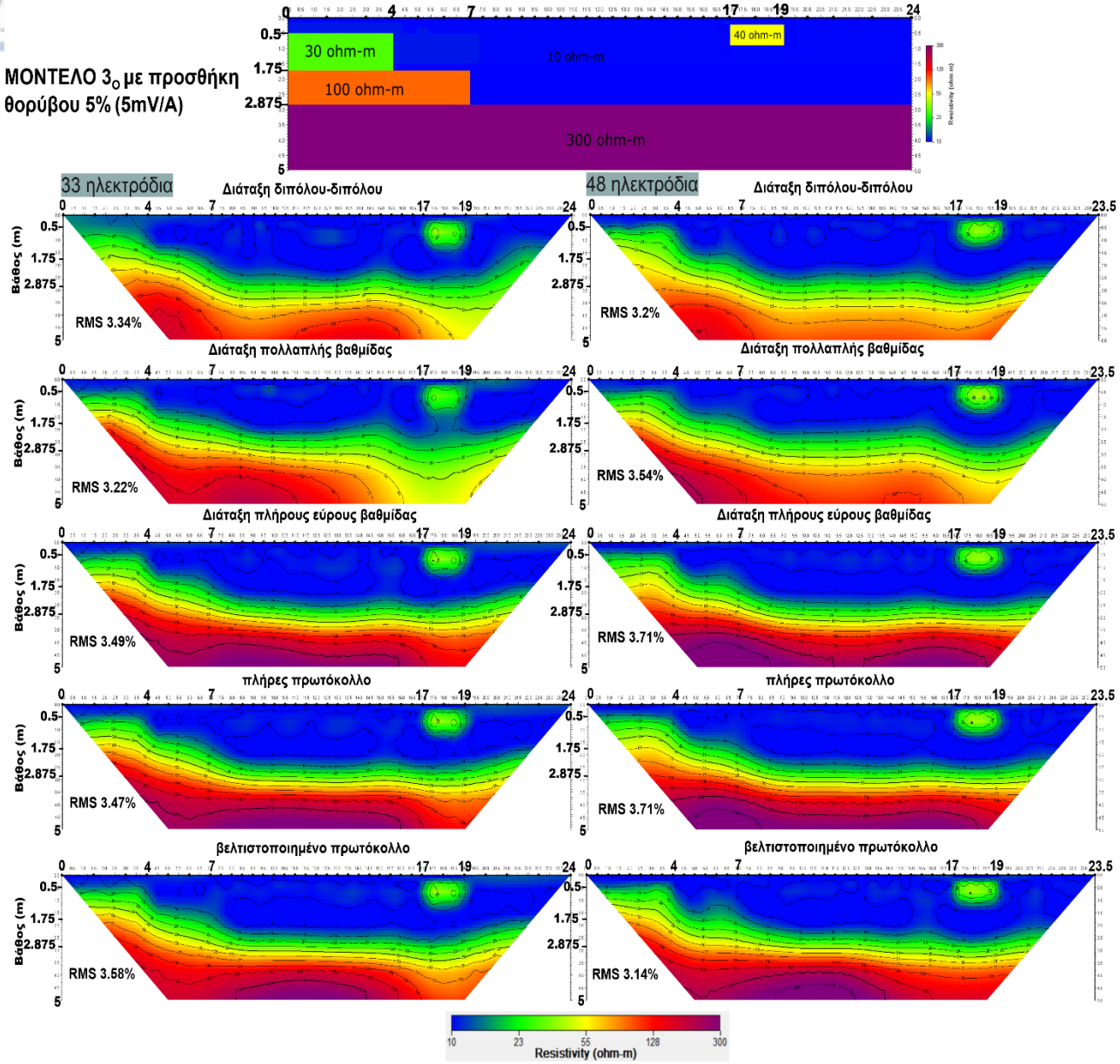
Οριζόντιο επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 10 Ω·m και πάχους 0.5m στην αρχή της τομής βυθίζεται σε βάθος 1.75m στη θέση $\chi = 4m$ και στη συνέχεια σε μεγαλύτερο βάθος $z = 2.875m$ στη θέση $\chi = 7m$. Το στρώμα αυτό υπέρκειται τριών στρωμάτων. Το πρώτο εντοπίζεται στη θέση $\chi = 0 - 4m$ με πάχος 1.25m και αντίστασης 30 Ω·m, το δεύτερο στρώμα ειδ.αντίστασης 100 Ω·m εντοπίζεται στη θέση $\chi = 0 - 7m$ με πάχος 1.125m και το τρίτο στρώμα πάχους 2.125m και εκτείνεται σε όλο το μήκος της τομής αντιστοιχεί στο υπόβαθρο αντίστασης 300 Ω·m. Στο επιφανειακό στρώμα στη θέση $\chi = 17 - 19m$ εντοπίζεται σχηματισμός πάχους 0.625m αντίστασης 40 Ω·m. Οι εικόνες της αντιστροφής φαίνεται πως δείχνουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα με εξαίρεση της περίπτωσης του μοντέλου με θόρυβο, καθώς το στρώμα του υποβάθρου στη θέση ακριβώς κάτω από το σώμα αντίστασης 40 Ω·m να παρουσιάζει μια μικρή εναλλαγή στο βάθος. Και εδώ η μετάβαση των 3 στρωμάτων εμφανίζεται υπό κλίση και όχι κατακόρυφα όπως απεικονίζεται στο θεωρητικό μοντέλο.



Σχήμα 4.7: Απεικόνιση του $3_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Μοντέλο 3ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:

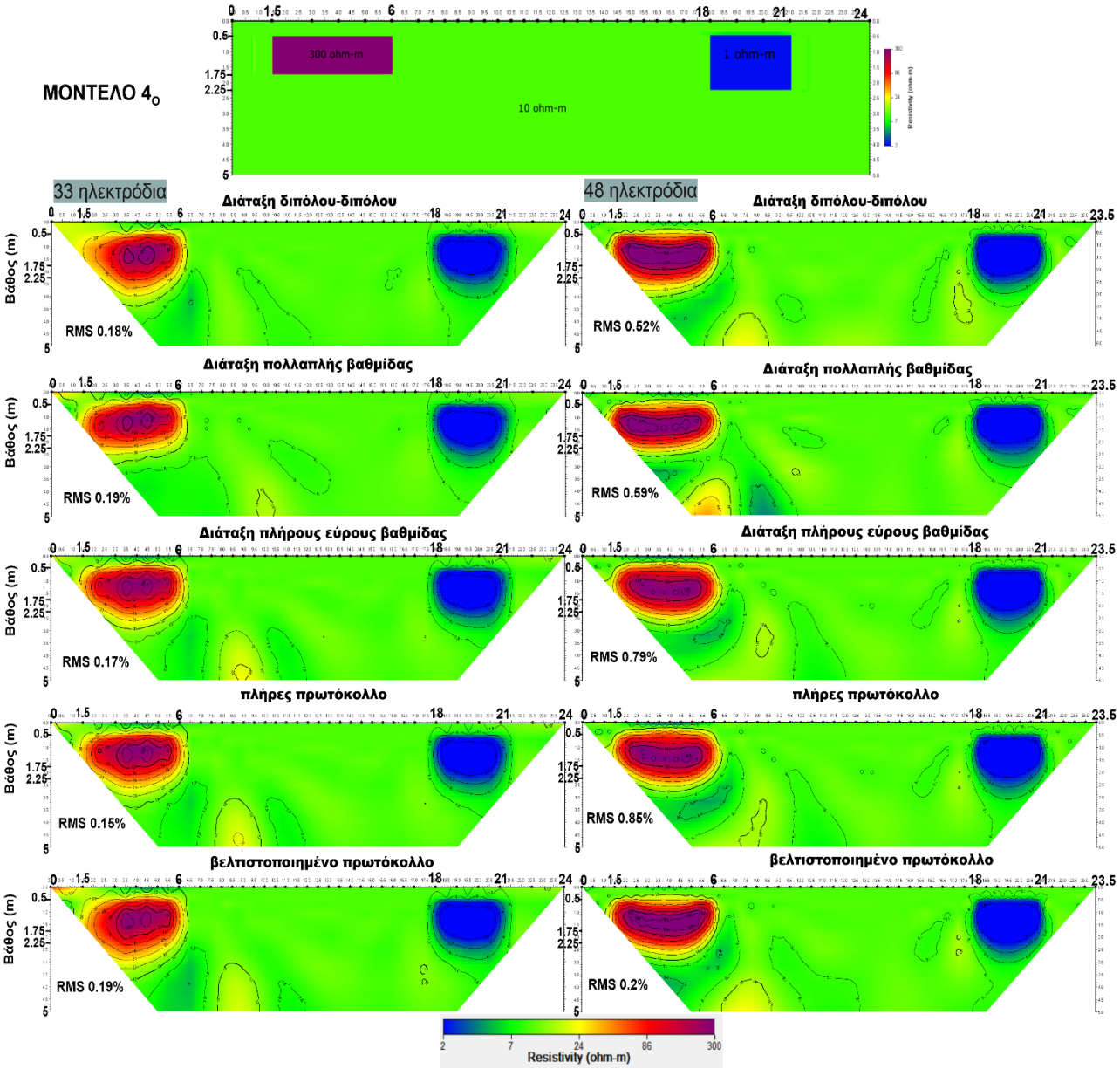


Σχήμα 4.8: Απεικόνιση του 3ου γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.4 Μοντέλο 4ο:

Δύο σώματα διαστάσεων 4.5x1.25m και 3x1.75m ειδικής αντίστασης 300 Ω·m και 1 Ω·m αντίστοιχα, βρίσκονται βυθισμένα σε βάθος $z = 0.5m$ σε ημιχώρο αντίστασης 10 Ω·m. Τα σώματα είναι τοποθετημένα στη θέση $\chi = 1.5 - 6m$ και $\chi = 18 - 21m$ από την αρχική θέση ($\chi = 0m$) που θεωρείται η αρχή της τομής. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής πυκνής και αραιής κατανομής ηλεκτροδίων είναι εξαιρετικά για όλες τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, εκτός από ορισμένες ψευδείς δομές που εμφανίζονται δεξιά από το πρώτο σώμα και σε μεγάλο βάθος.



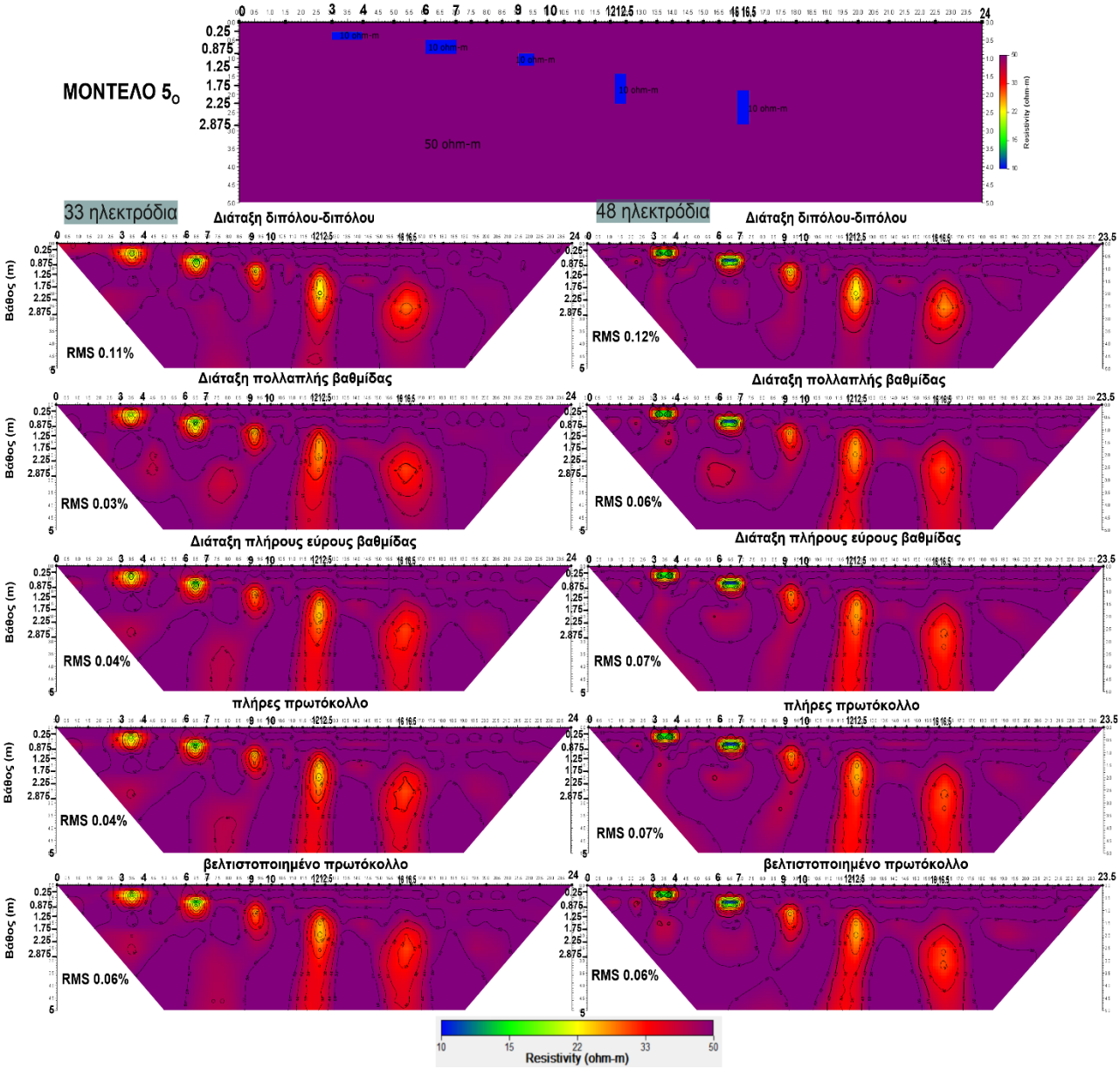
Σχήμα 4.9: Απεικόνιση του $4_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.5 Μοντέλο 5ο:

Πέντε σώματα διαφορετικών διαστάσεων ίδιας ειδικής αντίστασης 10 Ω·m, τοποθετούνται σε διαφορετικά βάθη σε ομογενή ημιχώρο αντίστασης 50 Ω·m. Οι διαστάσεις, το βάθος αλλά και η ακριβή θέση τους στην οποία είναι τοποθετημένα παρουσιάζονται παρακάτω:

1. 1x0.25m στη θέση $\chi = 3 - 4m$ και βάθος $z = 0.25 - 0.5m$
2. 1x0.375m στη θέση $\chi = 6 - 7m$ και βάθος $z = 0.5 - 0.875m$
3. 0.5x0.375m στη θέση $\chi = 9 - 9.5m$ και βάθος $z = 0.875 - 1.25m$
4. 0.5x1m στη θέση $\chi = 12 - 12.5m$ και βάθος $z = 1.25 - 2.25m$
5. 0.5x1.15m στη θέση $\chi = 16 - 16.5m$ και βάθος $z = 1.75 - 2.875m$



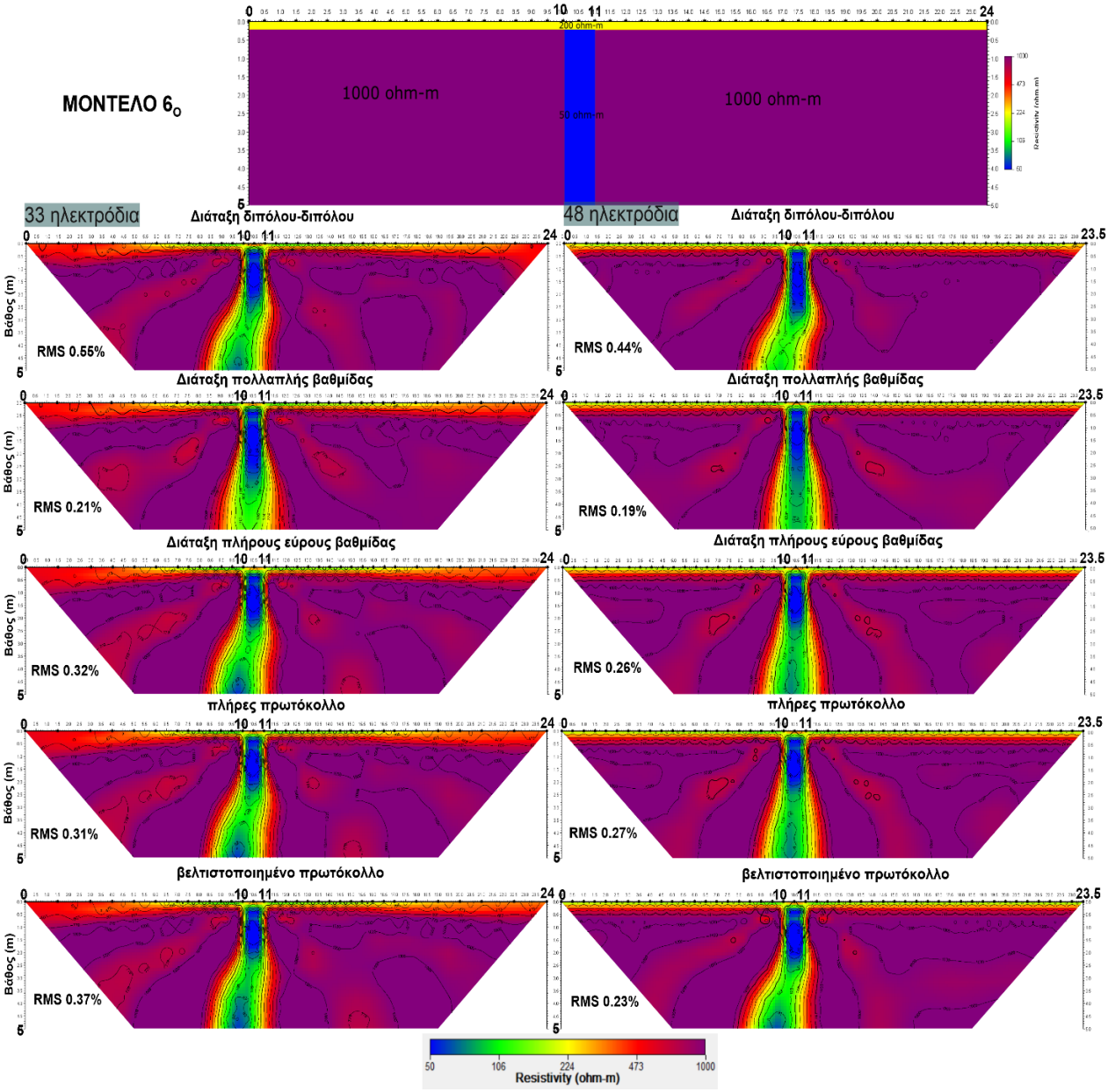
Σχήμα 4.10: Απεικόνιση του $5_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Τα τρία πρώτα σώματα απεικονίζονται με εξαιρετική ανάλυση. Όλες σχεδόν οι διατάξεις αποτυγχάνουν να δώσουν ακριβείς εικόνες σχετικά με το βάθος και τις διαστάσεις των δύο τελευταίων σωμάτων. Εξαίρεση αποτελεί η διάταξη διπόλου-διπόλου αραιής και πυκνής κατανομής που δίνει εικόνες εξαιρετικής κατακόρυφης ανάλυσης των σωμάτων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.6 Μοντέλο 6ο - Μοντέλο 6ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:

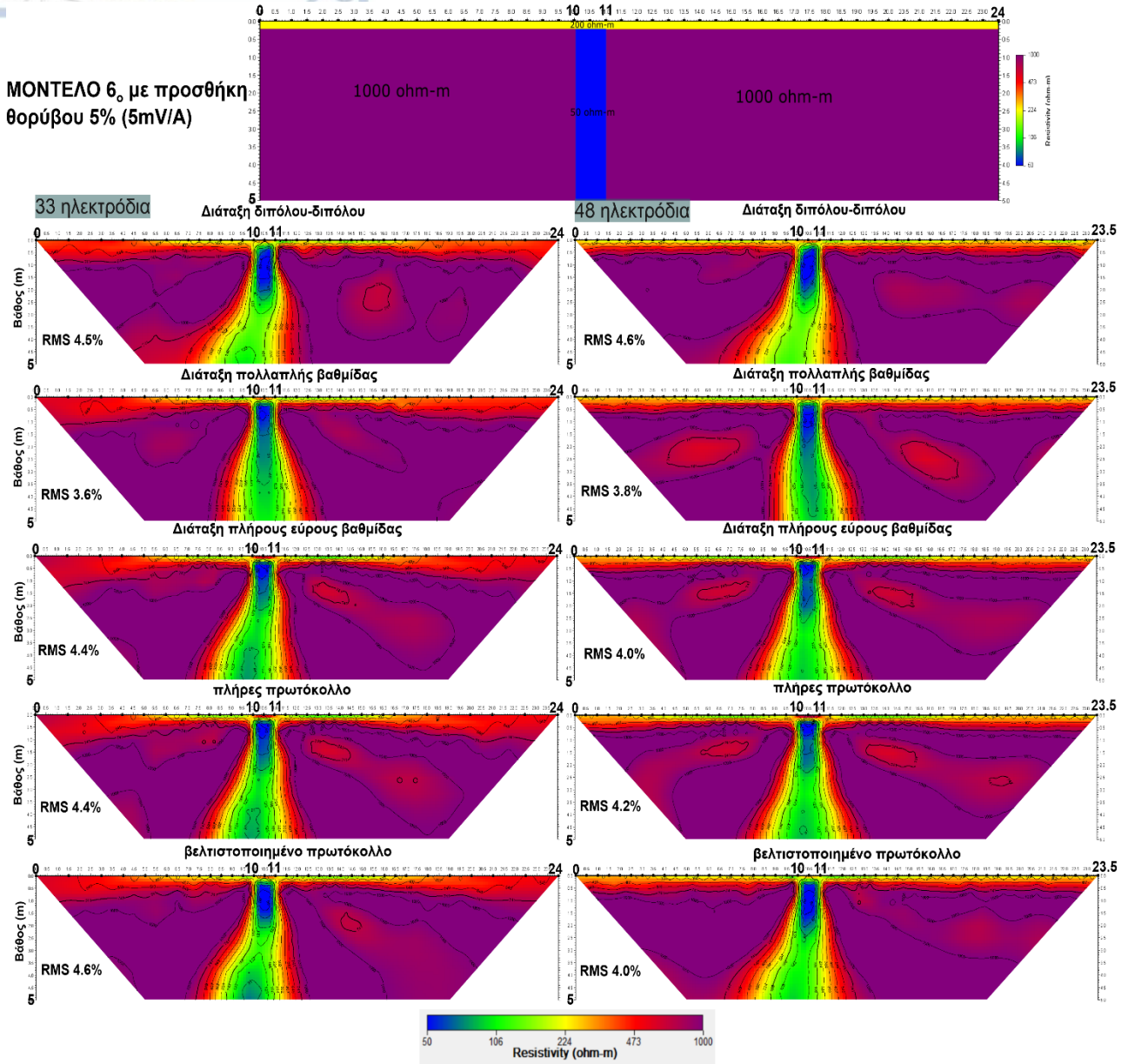
Επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 200 Ω·m και πάχους 0.25m υπέρκειται ημιχώρου πολύ υψηλότερης αντίστασης 1000 Ω·m. Στο κεντρικό περίπου τμήμα της τομής και πιο συγκεκριμένα στη θέση $\chi = 10 - 11m$, μια κατακόρυφη ζώνη ρηγμάτωσης χαμηλότερης αντίστασης 50 Ω·m διακόπτει το στρώμα του ημιχώρου. Παρακάτω στα σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζονται οι εικόνες αντιστροφής του ίδιου μοντέλου χωρίς και με την εφαρμογή τυχαίου θορύβου 5% (5mV/A) στα δεδομένα για την προσομοίωση πραγματικών συνθηκών πεδίου. Οι γεωηλεκτρικές εικόνες αντιστροφής απεικονίζουν ικανοποιητικά την ζώνη ρηγμάτωσης για όλες τις διατάξεις εκτός από το εύρος της ζώνης αυτής σε λίγο μεγαλύτερα βάθη, όπου φαίνεται να απλώνει ειδικότερα στην περίπτωση του μοντέλου με θόρυβο που απεικονίζεται με τη μορφή βεντάλιας. Επίσης, το επιφανειακό στρώμα των 200 Ω·m φαίνεται να διαχωρίζεται από τον ημιχώρο στις διατάξεις πυκνής κατανομής 48 ηλεκτροδίων, σε αντίθεση με της αραιής που γίνεται κομμάτι του ημιχώρου.



Σχήμα 4.11: Απεικόνιση του $6_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Μοντέλο 6ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:

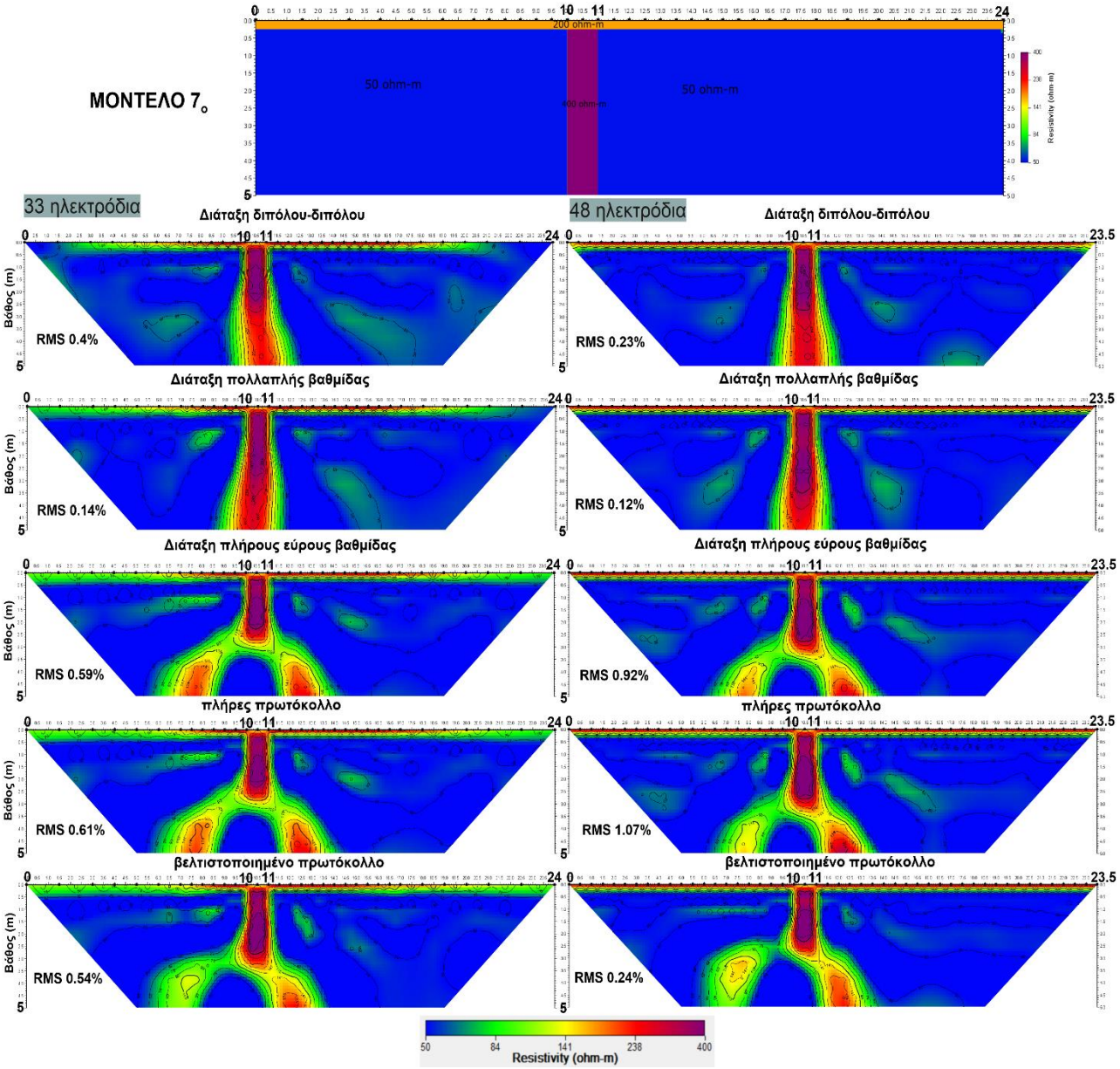


Σχήμα 4.12: Απεικόνιση του 6ου γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.7 Μοντέλο 7ο:

Επιφανειακό οριζόντιο στρώμα αντίστασης 200 Ω·m με πάχος 0.25m υπέρκειται ομογενούς ημιχώρου αντίστασης 50 Ω·m. Στο κεντρικό περίπου τμήμα της τομής και σε απόσταση $\chi = 10 - 11m$ από την αρχή της, εντοπίζεται κατακόρυφη ζώνη ρηγμάτωσης αντίστασης 400 Ω·m τέμνοντας τον ημιχώρο. Οι εικόνες αντιστροφής του σχήματος 4.13 απεικονίζουν με μεγάλη αξιοπιστία τα όρια της ζώνης στα μικρότερα βάθη, ενώ σε μεγαλύτερα, τα δεδομένα των διατάξεων της πλήρους βαθμίδας, καθώς και του συνολικού και βελτιστοποιημένου συνόλου αστοχούν καθώς η ζώνη φαίνεται διαχωρισμένη σε δύο τμήματα. Επίσης, το επιφανειακό στρώμα στις διατάξεις της αραιής κατανομής στα άκρα των τομών φαίνεται να μην διαχωρίζεται από τον ημιχώρο, γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει στις διατάξεις των 48 ηλεκτροδίων.

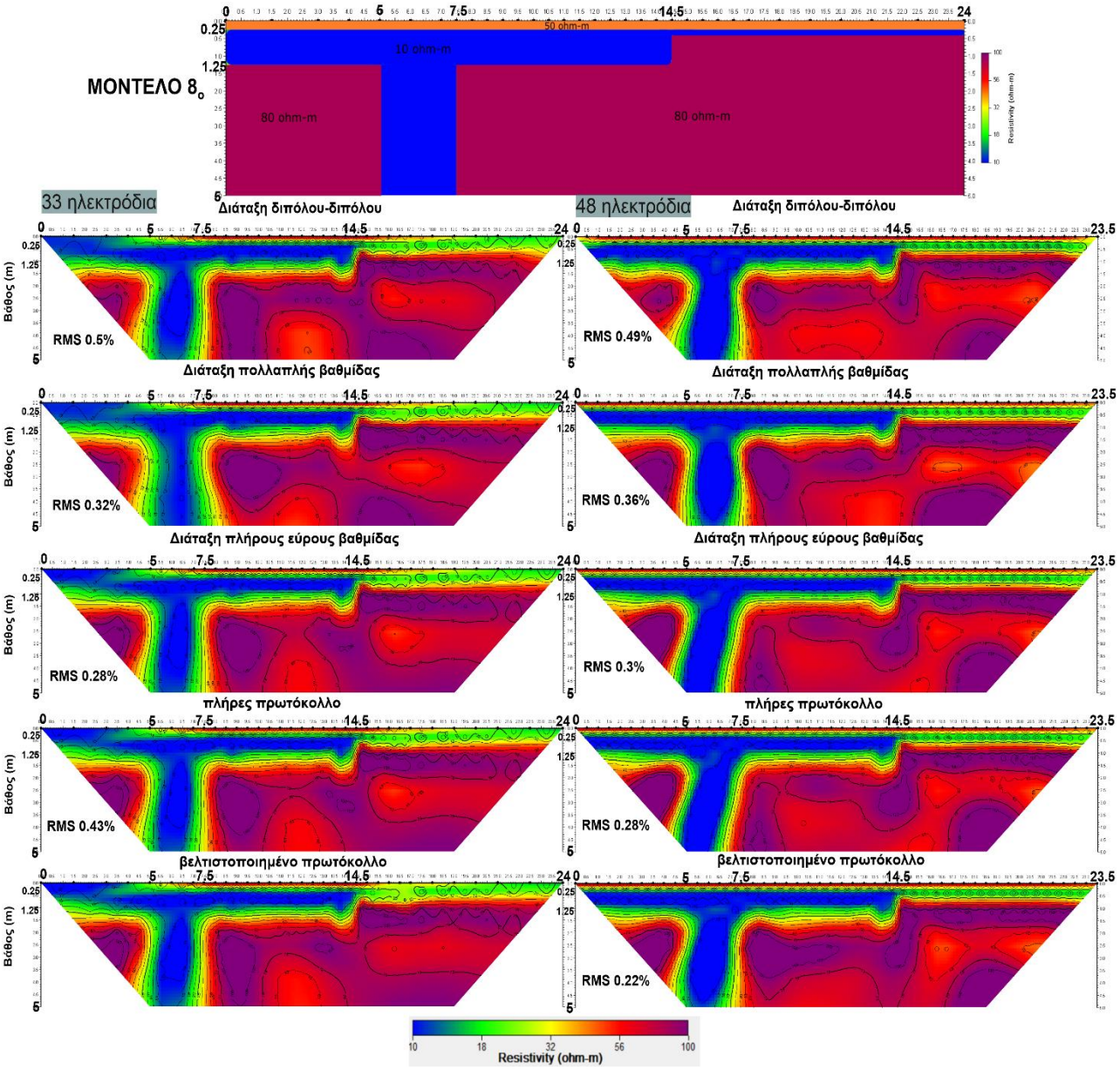


Σχήμα 4.13: Απεικόνιση του $7_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.8 Μοντέλο 8ο - Μοντέλο 8ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:

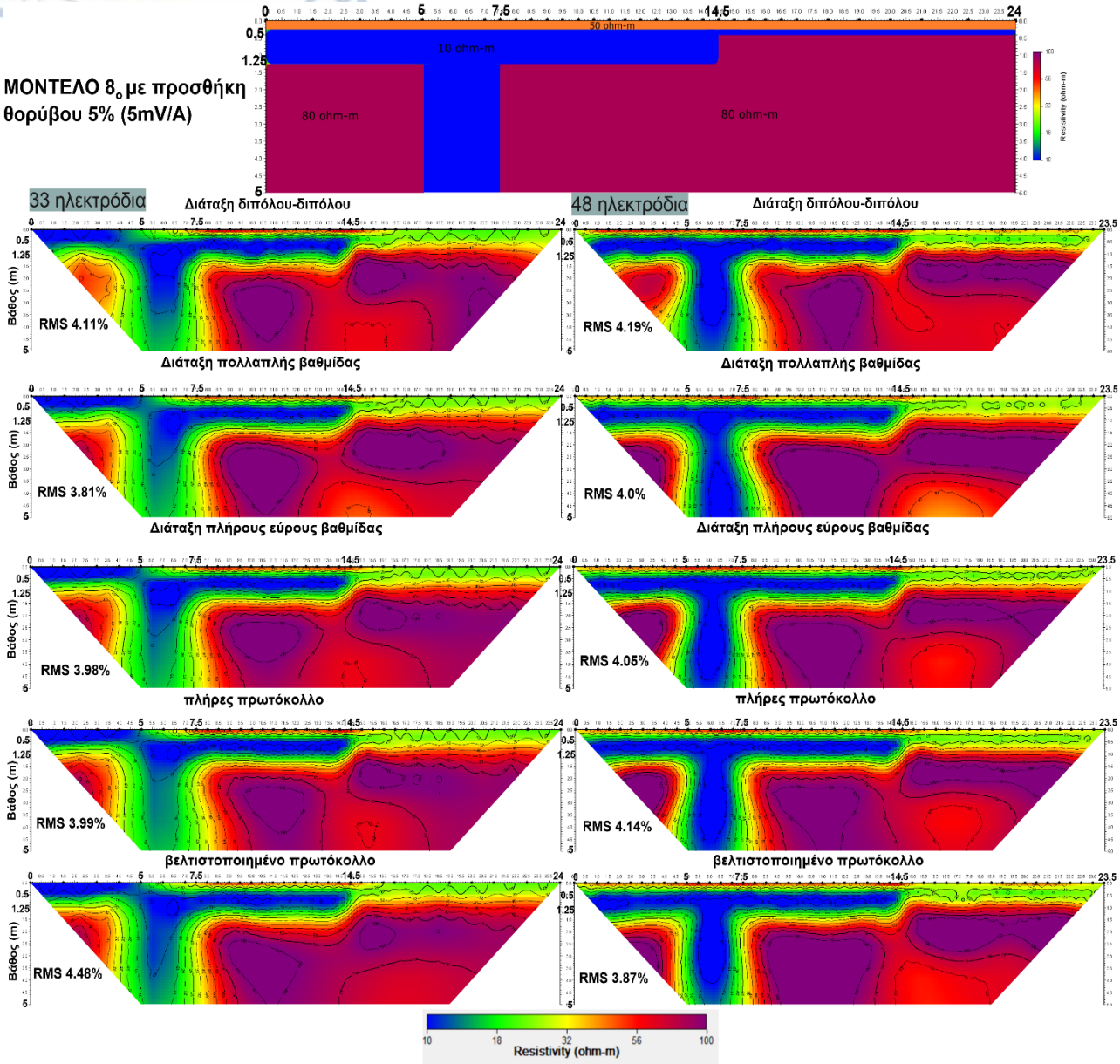
Επιφανειακό στρώμα πάχους 0.25m και αντίστασης 50 Ω·m υπέρκειται στρώματος 10 Ω·m που εντοπίζεται σε βάθος μέχρι 1.25m στην αρχή της τομής μέχρι τη θέση $\chi = 5m$, στη συνέχεια βυθίζεται στο μέγιστο βάθος ($z = 5m$) μέχρι τη θέση $\chi = 7.5m$ και επανέρχεται στο αρχικό βάθος μέχρι τη θέση $\chi = 14.5m$ όπου ανεβαίνει σε μικρότερο βάθος. Στρώμα 80 Ω·m που αντιστοιχεί στο υπόβαθρο υπόκειται του προηγούμενου. Οι εικόνες αντιστροφής (Σχήματα 4.14, 4.15) παρουσιάζουν αξιόπιστα αποτελέσματα για όλες τις διατάξεις, πέραν από την απόκριση του μοντέλου 33 ηλεκτροδίων αραιής κατανομής σχετικά με το επιφανειακό στρώμα (50 Ω·m) που φαίνεται να μην υπάρχει σωστός διαχωρισμός με το στρώμα αντίστασης 10 Ω·m. Η ζώνη ρηγμάτωσης (10 Ω·m) σε ορισμένες εικόνες εμφανίζεται υπό κλίση, όμως το εύρος της παραμένει σε συμφωνία με το αρχικό μοντέλο κατανομής αντίστασης. Η εναλλαγή του βάθους στο σημείο $\chi = 14.5m$ εμφανίζεται σε όλες τις διατάξεις με μια μικρή κλίση.



Σχήμα 4.14: Απεικόνιση του $8_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Μοντέλο 8ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:

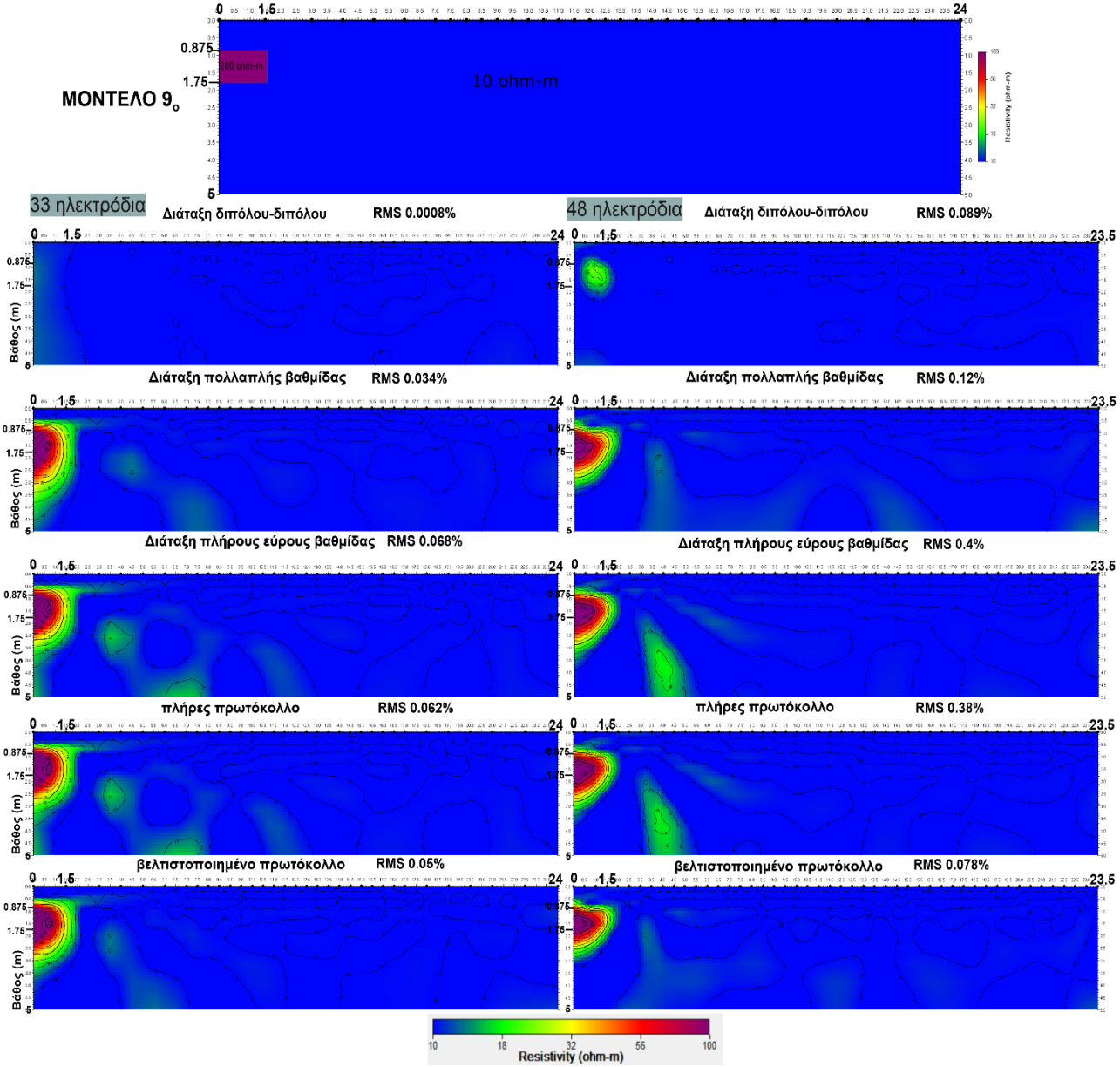


Σχήμα 4.15: Απεικόνιση του $8_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.9 Μοντέλα 9ο – 13ο:

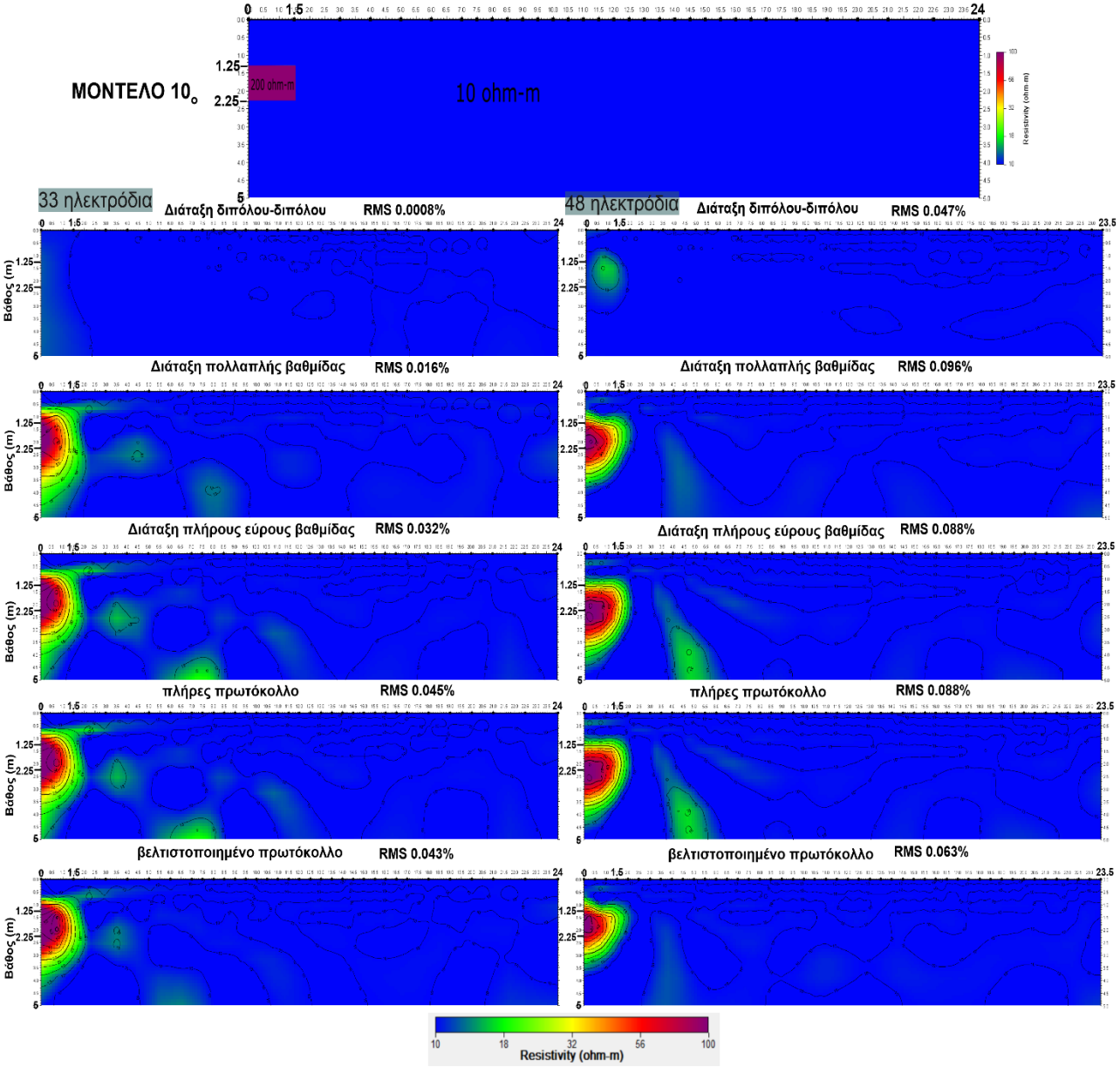
Στα γεωηλεκτρικά μοντέλα 9-13 απεικονίζεται σώμα μικρών διαστάσεων, ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 200 Ω·m και μεταβλητού πάχους στην αρχή της τομής των μετρήσεων, το οποίο βυθίζεται σε ημιχώρο αντίστασης 10 Ω·m. Τα σχήματα 4.16 - 4.21 παρουσιάζουν τις εικόνες αντιστροφής και την απόκριση κάθε διάταξης αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων, καθώς το σώμα μετατοπίζεται κατακόρυφα εις βάθος. Οι διατάξεις των δύο κατανομών δοκιμάζονται στα όριά τους. Βέβαια, οι περιοχές στα άκρα των τομών αποτελούν περιοχές περιορισμένης ευαισθησίας και απαιτείται προσοχή στην ερμηνεία των εικόνων αντιστροφής. Δεν απεικονίζεται το σχήμα του τραπεζίου καθώς, στόχος ήταν ο έλεγχος της απόκρισης των διατάξεων στα άκρα της περιοχής αραίωσης ηλεκτροδίων καθώς το σώμα βυθίζεται σε μεγαλύτερο βάθος.



Σχήμα 4.16: Απεικόνιση του $9_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

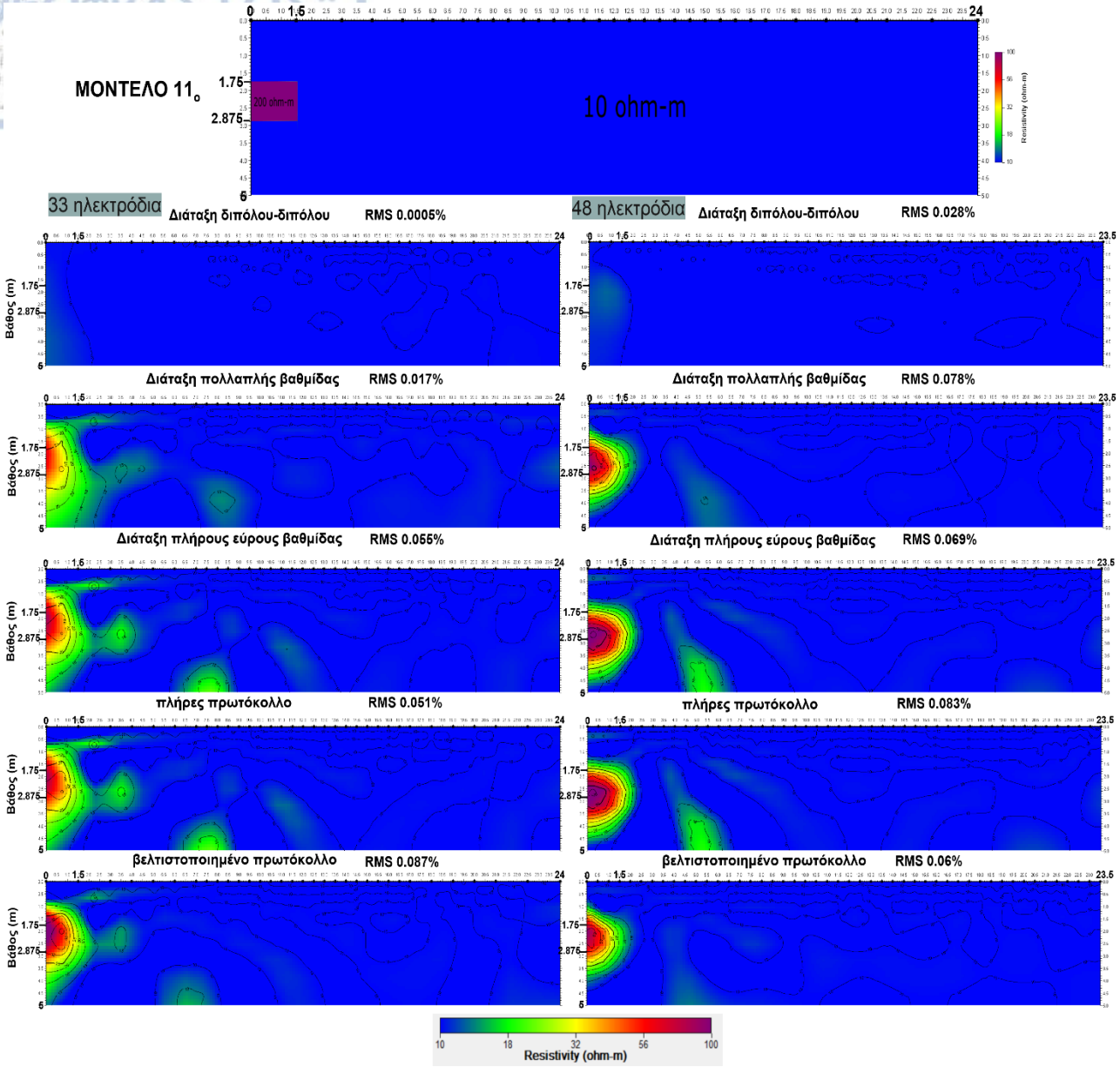
Η διάταξη διπόλου-διπόλου αστοχεί στην απεικόνιση του σώματος, καθώς είτε το σώμα εξαφανίζεται (διπόλου-διπόλου διάταξη 33 ηλεκτροδίων) είτε δεν είναι σαφής ο διαχωρισμός του από τον ημιχώρο (διπόλου-διπόλου διάταξη 48 ηλεκτροδίων). Στις υπόλοιπες διατάξεις το σώμα απεικονίζεται με μεγάλη ευκρίνεια, παρόλα αυτά μπορούν να αποτυγχάνουν σε κάποιο βαθμό στην κατακόρυφη συνιστώσα. Επίσης εμφανίζονται κάποιες ψευδείς δομές στα δεξιά του σώματος και σε λίγο μεγαλύτερα βάθη.



Σχήμα 4.17: Απεικόνιση του $10_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ακριβώς ίδια περίπτωση του μοντέλου 9 παρουσιάζουν και οι εικόνες αντιστροφής του μοντέλου 10 και για τους δύο τύπους κατανομής των ηλεκτροδίων.

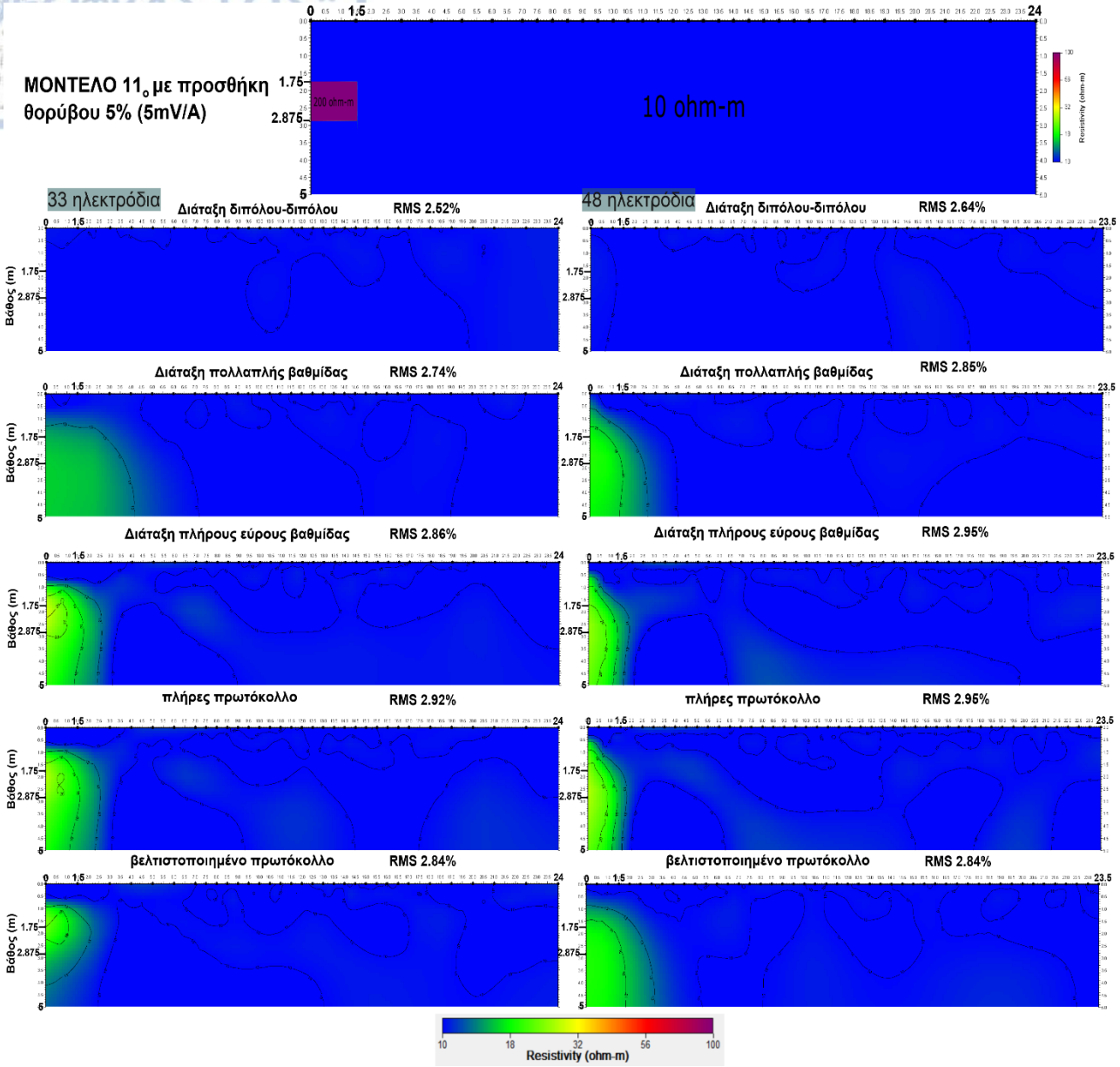
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 4.18: Απεικόνιση του 11$_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Στο μοντέλο 11 η διάταξη διπόλου-διπόλου δεν μπορεί να απεικονίσει το αντιστατικό σώμα καθόλου. Η χρήση 48 ηλεκτροδίων φαίνεται πως παρουσιάζει καλύτερη διακριτική ικανότητα στην κατακόρυφη συνιστώσα του βάθους σε σχέση με τα μοντέλα που κάνουν χρήση 33 ηλεκτροδίων, όπου το σώμα απεικονίζεται με μεγαλύτερη έκταση.

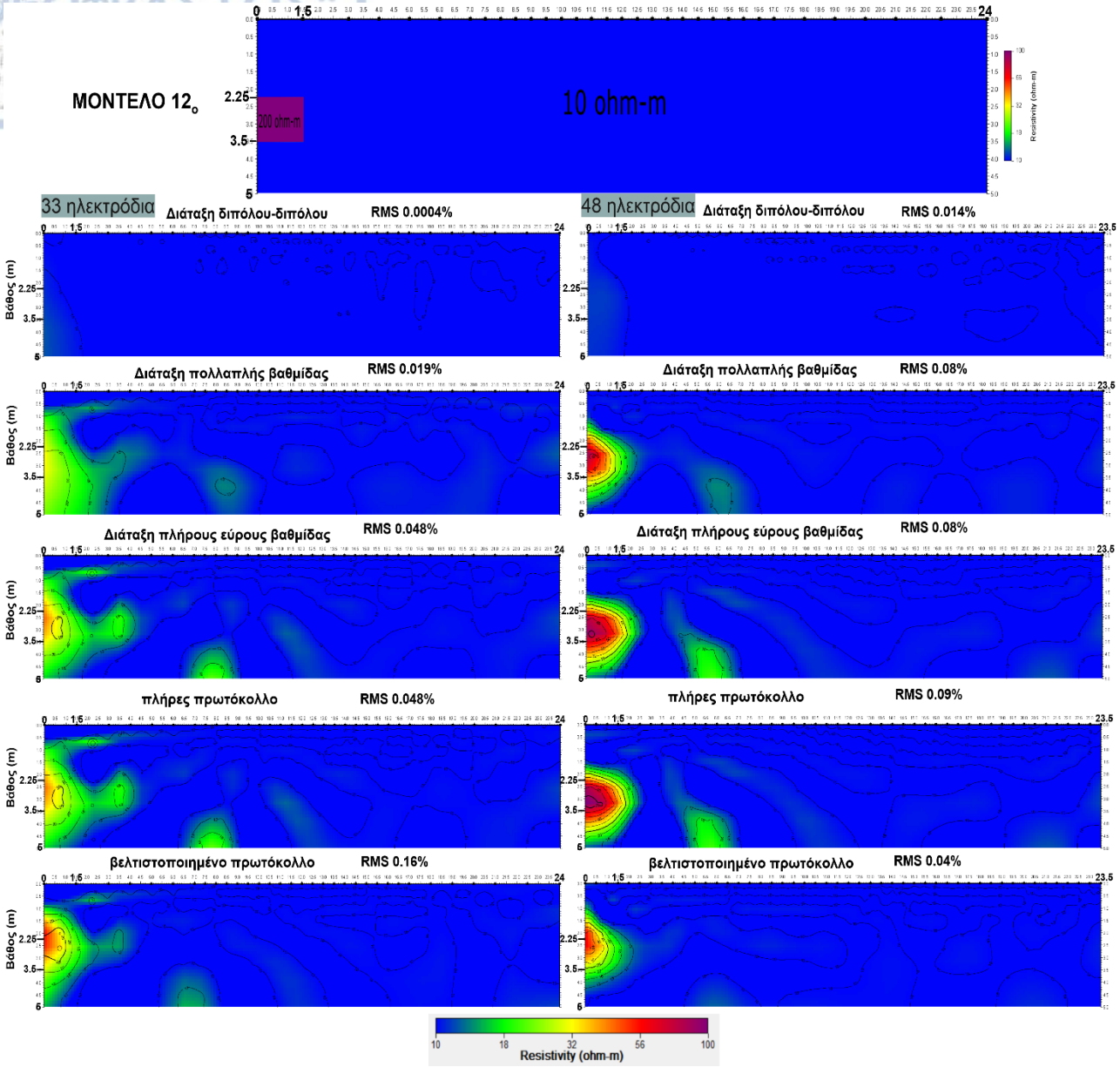
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 4.19: Απεικόνιση του $11_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Σε πραγματικές συνθήκες πεδίου με τη προσθήκη τυχαίου θορύβου 5mV/A η ευκρίνεια των διατάξεων μειώνεται αισθητά με το σώμα να απεικονίζεται αμιγώς σε όλες τις εικόνες αντιστροφής, εκτός της διπόλου-διπόλου που το σώμα παραμένει εξαφανισμένο.

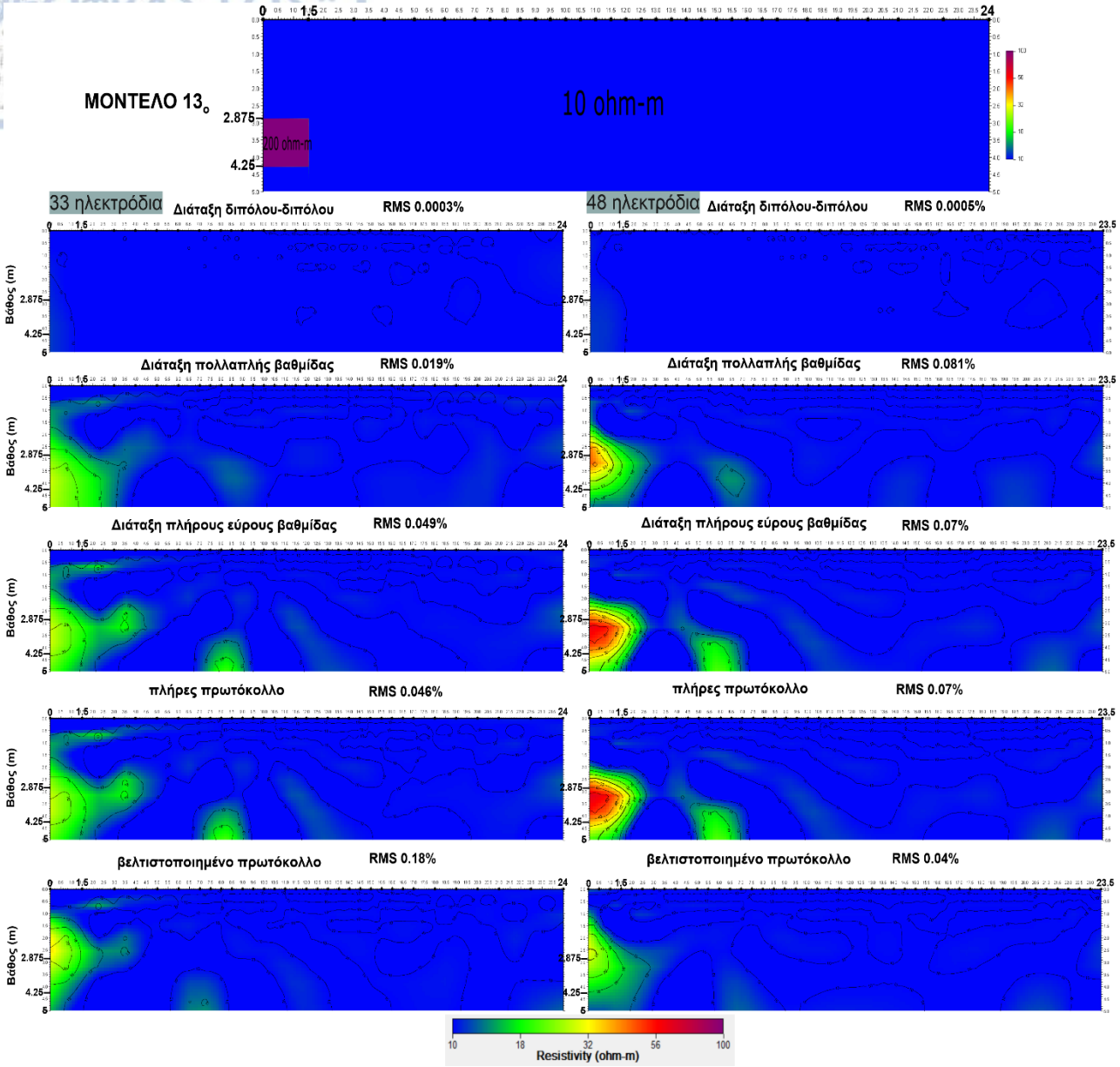
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 4.20: Απεικόνιση του $12_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Στα μοντέλα 12 και 13 ισχύουν τα συμπεράσματα των εικόνων του μοντέλου 11 (Σχήμα 4.18). Η χρήση 48 ηλεκτροδίων φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα στην απόκριση του μοντέλου σε σχέση με τις εικόνες αραιής κατανομής ηλεκτροδίων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

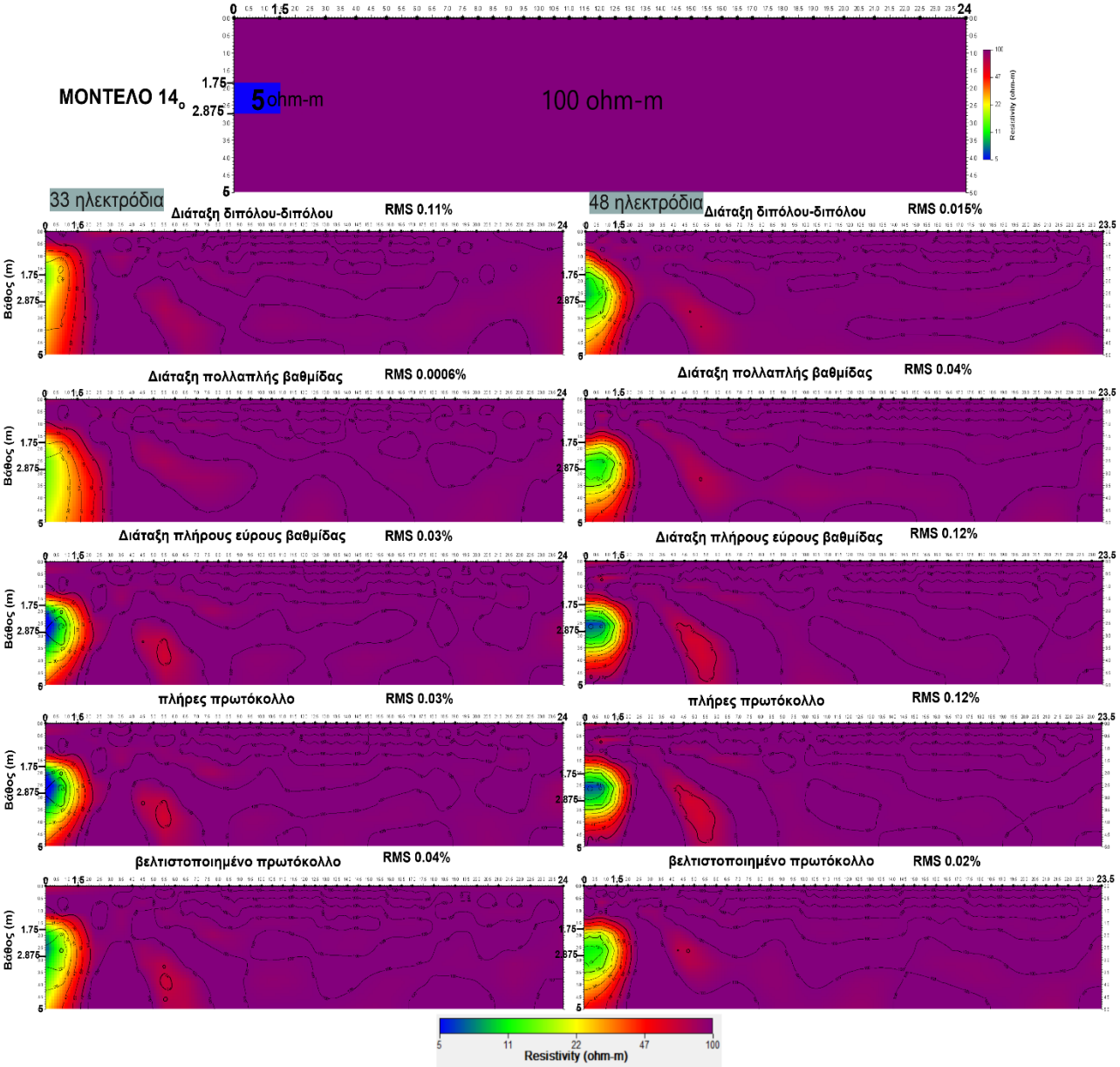


Σχήμα 4.21: Απεικόνιση του $13_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.3.10 Μοντέλο 14ο:

Τέλος, το μοντέλο 14 του σχήματος 4.22 είναι όμοιο του μοντέλου 11 (Σχήμα 4.18) με την αντίθεση ότι το σώμα είναι αγώγιμο αντίστασης 5 Ω·m και ο ημιχώρος αντιστατικός (100 Ω·m).



Σχήμα 4.22: Απεικόνιση του $14_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Εδώ παρατηρείται ότι όλες οι εικόνες αντιστροφής από τις διάφορες διατάξεις απεικονίζουν το σώμα, ακόμη και η διάταξη διπόλου-διπόλου που στην περίπτωση του μοντέλου 11 (Σχήμα 4.18) το αντιστατικό σώμα ήταν εξαφανισμένο. Καλύτερη ευαισθησία παρουσιάζουν οι διατάξεις πλήρους εύρους βαθμίδας και του πλήρους πρωτοκόλλου πυκνής κατανομής. Οι δύο αυτές διατάξεις στην περίπτωση της αραιής κατανομής χάνουν λίγο στις διαστάσεις του σώματος.

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

4.4 Παραγωγή συνθετικών δεδομένων κατανομής αντίστασης με χρήση 33 και 48 ηλεκτροδίων μεγάλης κλίμακας

Με την ολοκλήρωση των πρωτοκόλλων μικρής κλίμακας, η εργασία συνεχίζεται με το στάδιο παραγωγής πρωτοκόλλων διατάξεων μεγάλου μήκους. Η διαδικασία που ακολουθείται από τον αλγόριθμο Longlines_opt2D είναι παρόμοια των πρωτοκόλλων μικρής κλίμακας με τη διαφορά στις αποστάσεις των ηλεκτροδίων, που στη συγκεκριμένη περίπτωση μεγαλώνει.

Ο αριθμός των μετρήσεων είναι διαφορετικός, καθώς μετρήσεις που είναι εφικτές σε μικρής κλίμακας διατάξεις εδώ απορρίπτονται λόγω γεωμετρικού παράγοντα. Η επιλογή του γεωμετρικού παράγοντα του οργάνου για τα μοντέλα μεγάλης κλίμακας δεν έγινε τυχαία. Για γεωλογικούς σχηματισμούς με μέση ειδική αντίσταση $p_\alpha \geq 25\,\Omega \cdot m$, ελάχιστη τάση οργάνου $V_{instru_min} > 0.5mV$ και ρεύμα εισόδου $I >= 1A$, επιλέχθηκε GFthreshold =50.000. Τα πρωτογενή μοντέλα αναλογικά ενώ παραμένουν ίδια, οι εικόνες παρουσιάζουν λίγες διαφορές.

Σε όλα τα συνθετικά παραδείγματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω, σε πρώτο στάδιο έγινε χρήση τριάντα τριών (**33**) ηλεκτροδίων αραιής διάταξης, με βασική απόσταση 50 μέτρα και κατώφλι γεωμετρικού παράγοντα $GF_{threshold}$ =50.000. Το συνολικό μήκος της διάταξης είναι 2.400 μέτρα, με βάθος διασκόπησης ίσο με 500 μέτρα. Ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε ένα από τα πρωτόκολλα δίνεται παρακάτω:

- αριθμός μετρήσεων διπόλου-διπόλου: 150
- αριθμός μετρήσεων πολλαπλής βαθμίδας: 1049
- αριθμός μετρήσεων πλήρους εύρους βαθμίδας: 2692
- αριθμός μετρήσεων πλήρους πρωτοκόλλου: 2842
- αριθμός μετρήσεων βέλτιστου πρωτοκόλλου: 1152

33 ηλεκτρόδια

Σε δεύτερο στάδιο δημιουργήθηκαν πρωτόκολλα πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων για τις πέντε διατάξεις, με τη χρήση **48** ηλεκτροδίων βασικής απόστασης 50 μέτρων με συνολικό μήκος τομής 2.350 μέτρα. Το κατώφλι του γεωμετρικού παράγοντα ορίστηκε ως $GF_{threshold}$ =50.000 με βάθος διασκόπησης ίσο με 500 μέτρα. Ο αριθμός των μετρήσεων για κάθε πρωτόκολλο αναγράφεται παρακάτω:

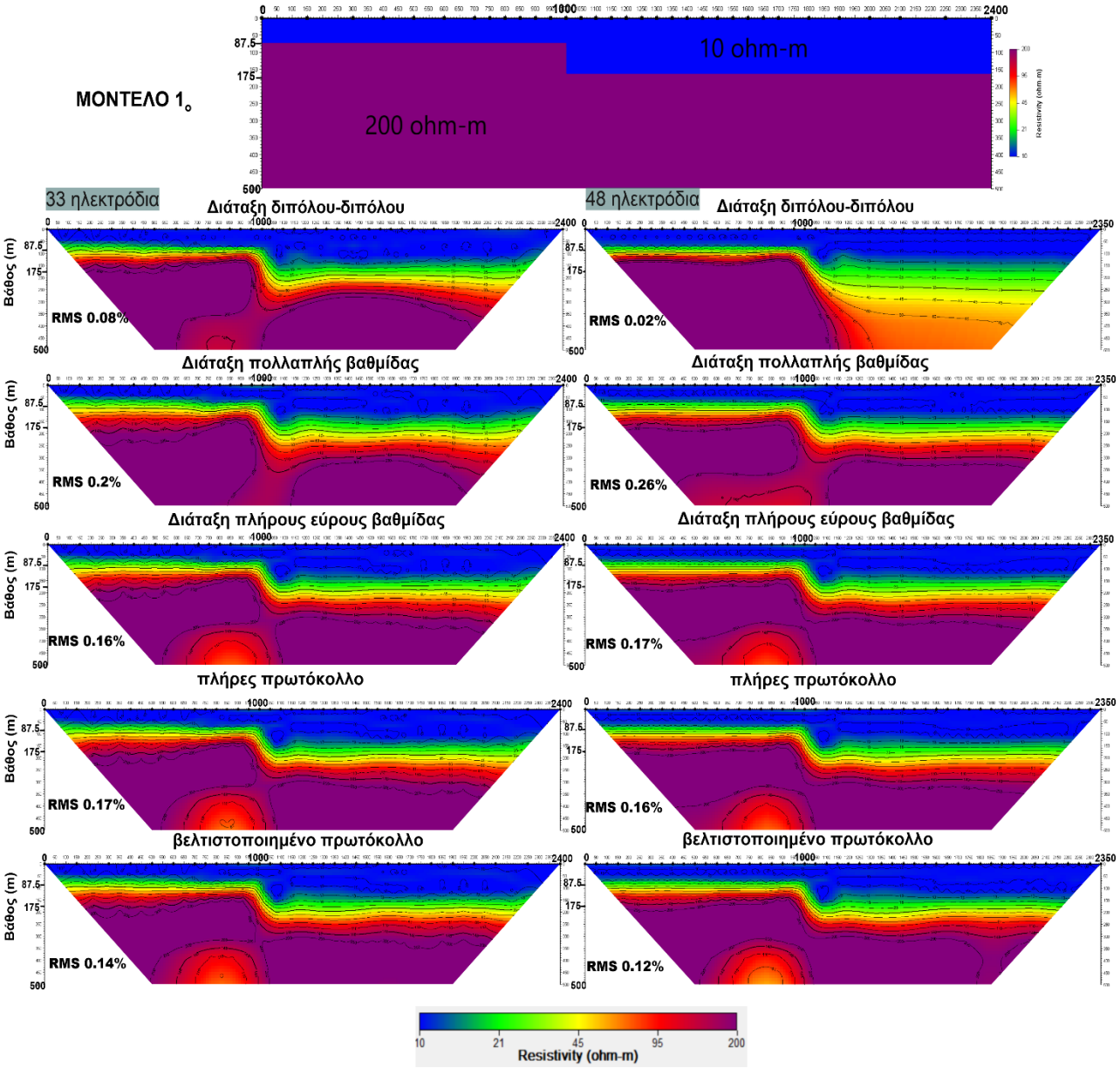
- αριθμός μετρήσεων διπόλου-διπόλου: 215
- αριθμός μετρήσεων πολλαπλής βαθμίδας: 2230
- αριθμός μετρήσεων πλήρους εύρους βαθμίδας: 4602
- αριθμός μετρήσεων πλήρους πρωτοκόλλου: 4817
- αριθμός μετρήσεων βέλτιστου πρωτοκόλλου: 1128

48 ηλεκτρόδια

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.1 Μοντέλο 1ο:

Ομογενές οριζόντιο στρώμα αντίστασης 10 Ω·m και πάχους 87.5m στην αρχή της τομής βυθίζεται σε απόσταση 1000m σε βάθος 175m. Το στρώμα αυτό υπέρκειται ομογενούς υποβάθρου ειδικής αντίστασης 200 Ω·m. Όπως θα παρατηρήσουμε, τα αποτελέσματα όλων των διατάξεων είναι ικανοποιητικά από τις εικόνες αντιστροφής αραιής και πυκνής κατανομής 33 και 48 ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Στη θέση $\chi = 1.000m$ της τομής, η μετάβαση από το επιφανειακό στρώμα στο υπόβαθρο και σε βάθος από 87.5m μέχρι 175m απεικονίζεται υπό γωνία και όχι κατακόρυφα όπως ορίστηκε στο θεωρητικό μοντέλο. Το στρώμα του υποβάθρου της πυκνής διάταξης διπόλου-διπόλου στο τμήμα που βρίσκεται δεξιά του τμήματος μετάβασης εμφανίζεται με χαμηλότερη αντίσταση σε σχέση με το θεωρητικό μοντέλο.

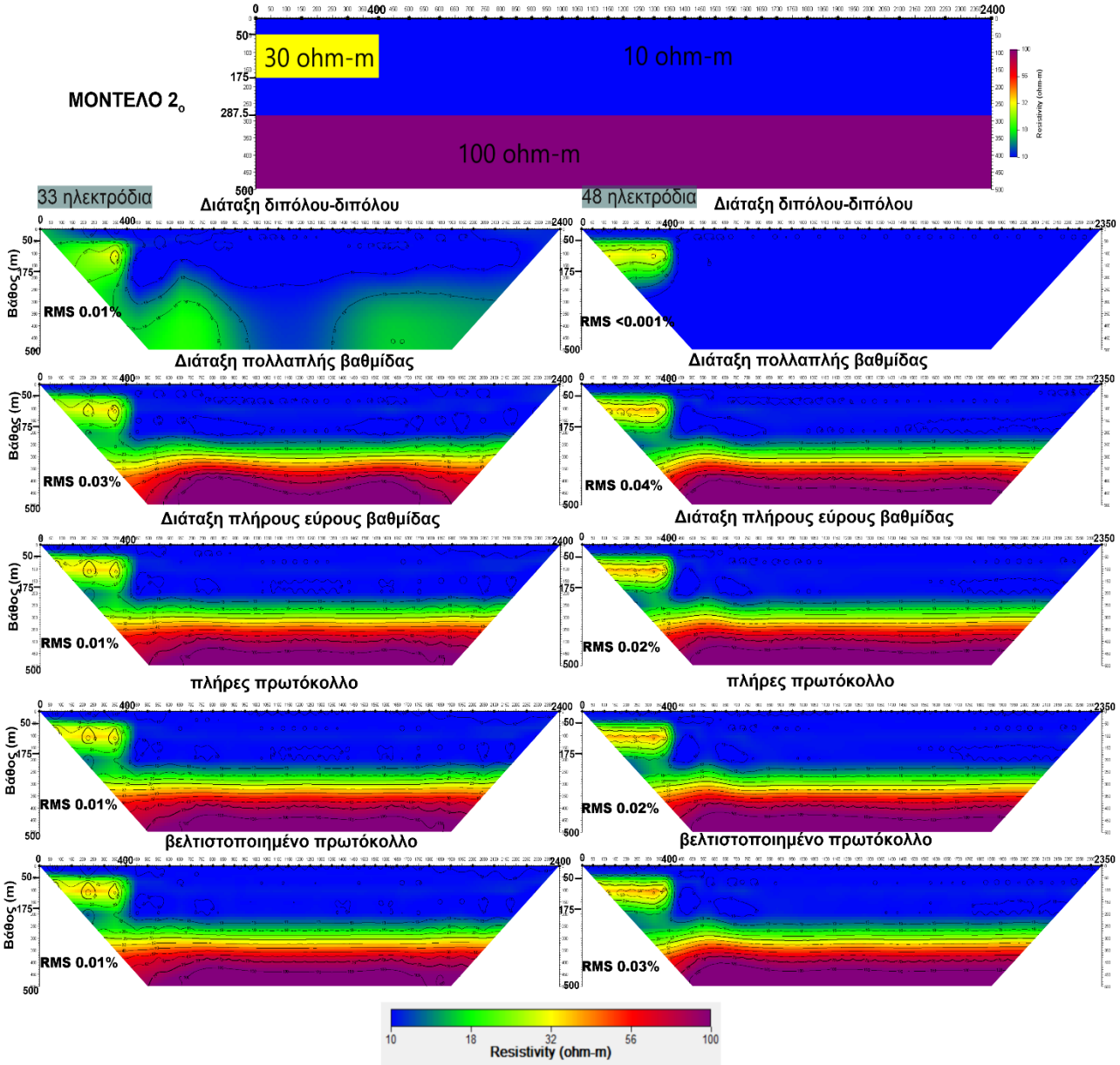


Σχήμα 4.23: Απεικόνιση του $1_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.2 Μοντέλο 2ο:

Επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 10 Ω·m και πάχους 287.5m υπέρκειται ενός πιο αντιστατικού οριζόντιου στρώματος 100 Ω·m, το οποίο αντιστοιχεί στο υπόβαθρο. Στο επιφανειακό στρώμα από τη θέση $\chi = 0m$ μέχρι $\chi = 400m$ και σε βάθος από $z = 50m - 175m$ εντοπίζεται ένας φακοειδής σχηματισμός αντίστασης 30 Ω·m. Εξαιρετική απόκριση του μοντέλου παρουσιάζουν όλες οι διατάξεις ηλεκτροδίων, πλην της διάταξης διπόλου-διπόλου, η οποία δεν μπορεί να προσεγγίσει καθόλου το στρώμα του υποβάθρου τόσο σε αραιά, όσο και σε πυκνά ηλεκτρόδια.

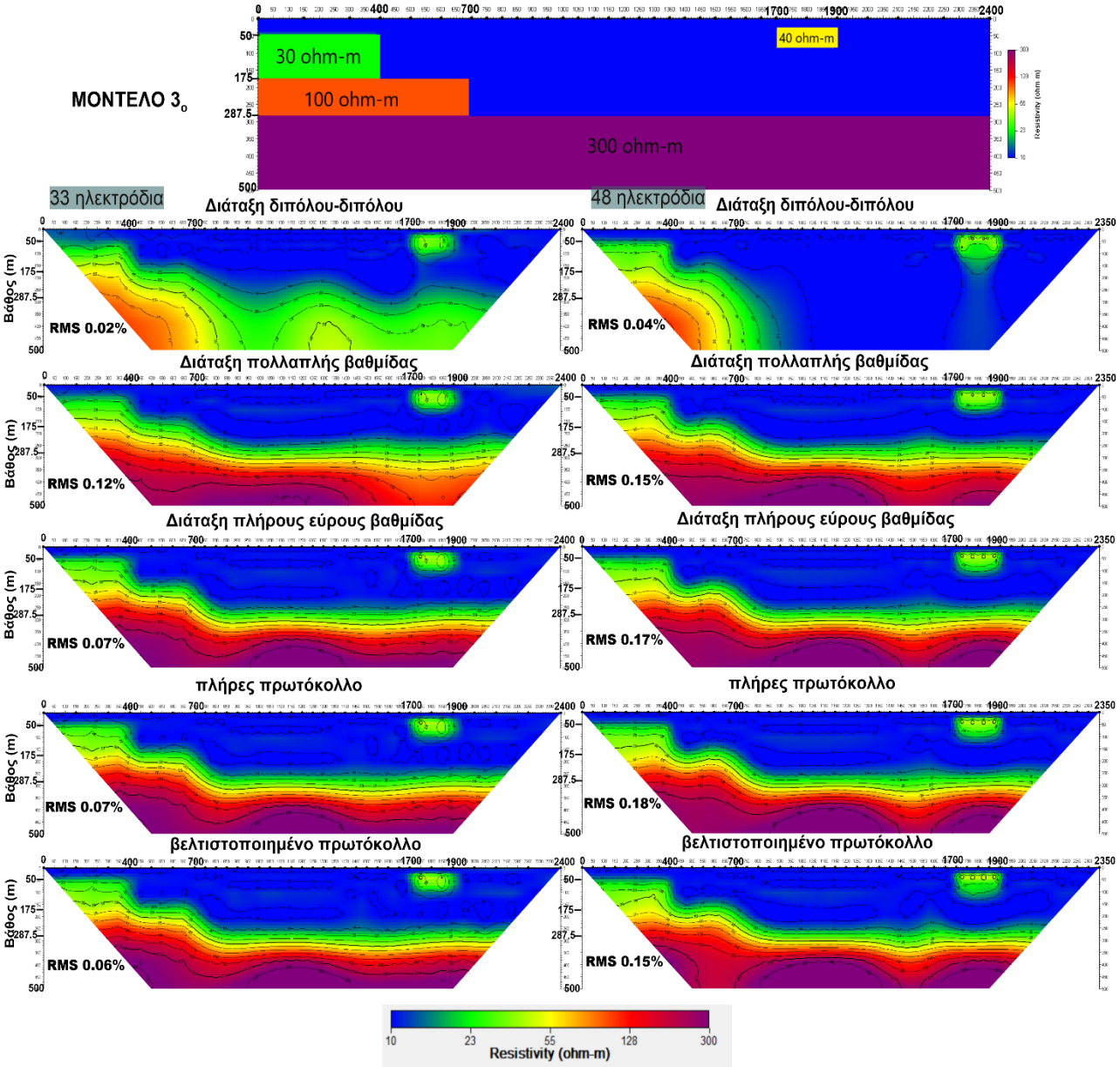


Σχήμα 4.24: Απεικόνιση του $2_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.3 Μοντέλο 3ο - Μοντέλο 3ο με προσθήκη θορύβου 5mv/A:

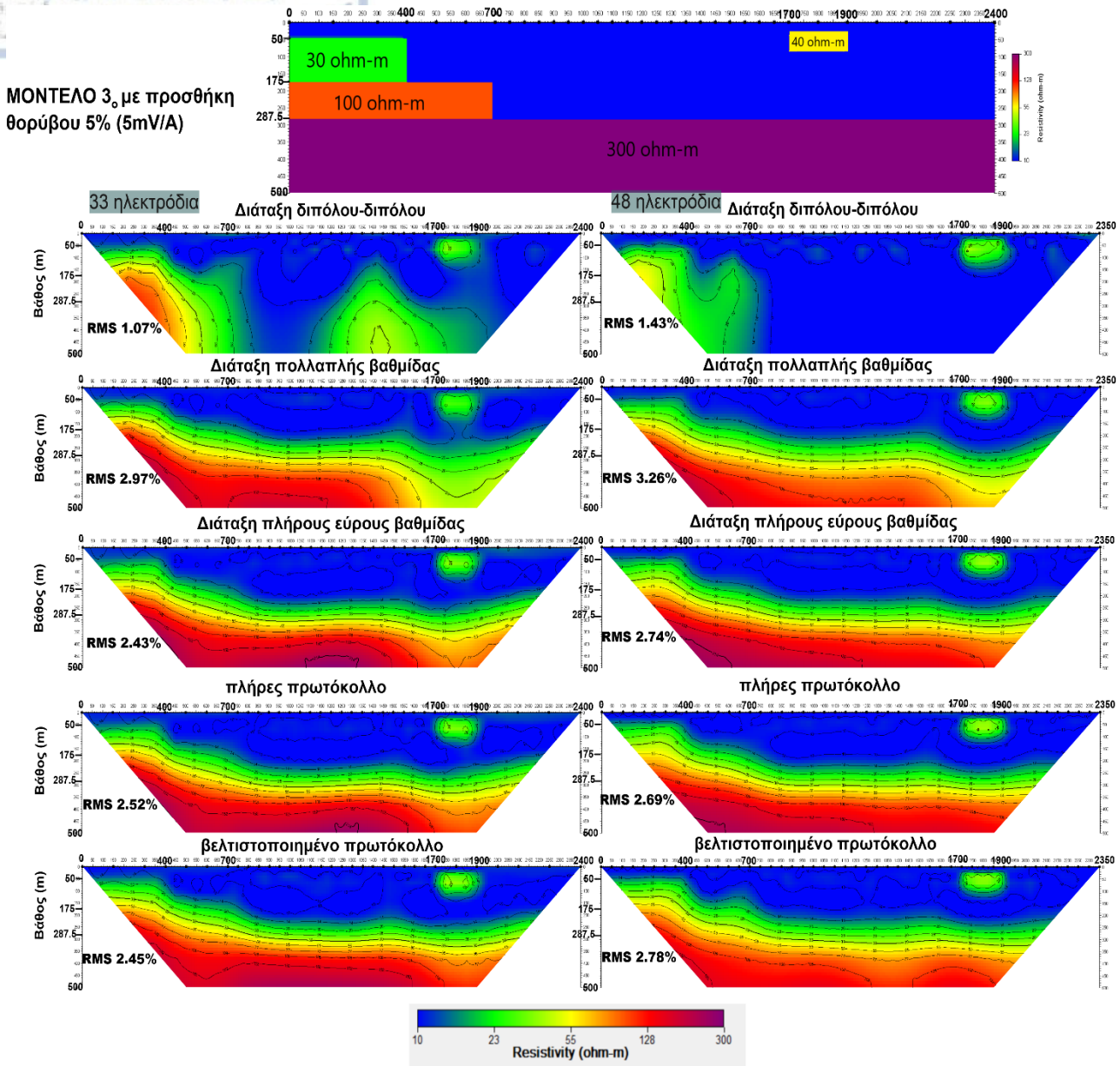
Οριζόντιο επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 10 Ω·m και πάχους 50m στην αρχή της τομής βυθίζεται σε βάθος 175m στη θέση $\chi = 400m$ και στη συνέχεια σε μεγαλύτερο βάθος $z = 287.5m$ στη θέση $\chi = 700m$. Το στρώμα αυτό υπέρκειται τριών στρωμάτων. Το πρώτο εντοπίζεται στη θέση $\chi = 0 - 400m$ με πάχος 125m και αντίστασης 30 Ω·m, το δεύτερο στρώμα ειδ.αντίστασης 100 Ω·m εντοπίζεται στη θέση $\chi = 0 - 700m$ με πάχος 112.5m και το τρίτο στρώμα πάχους 212.5m και εκτείνεται σε όλο το μήκος της τομής αντιστοιχεί στο υπόβαθρο αντίστασης 300 Ω·m. Στο επιφανειακό στρώμα στη θέση $\chi = 1.700 - 1.900m$ εντοπίζεται σχηματισμός πάχους 62.5m αντίστασης 40 Ω·m.



Σχήμα 4.25: Απεικόνιση του $3_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Μοντέλο 3ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:



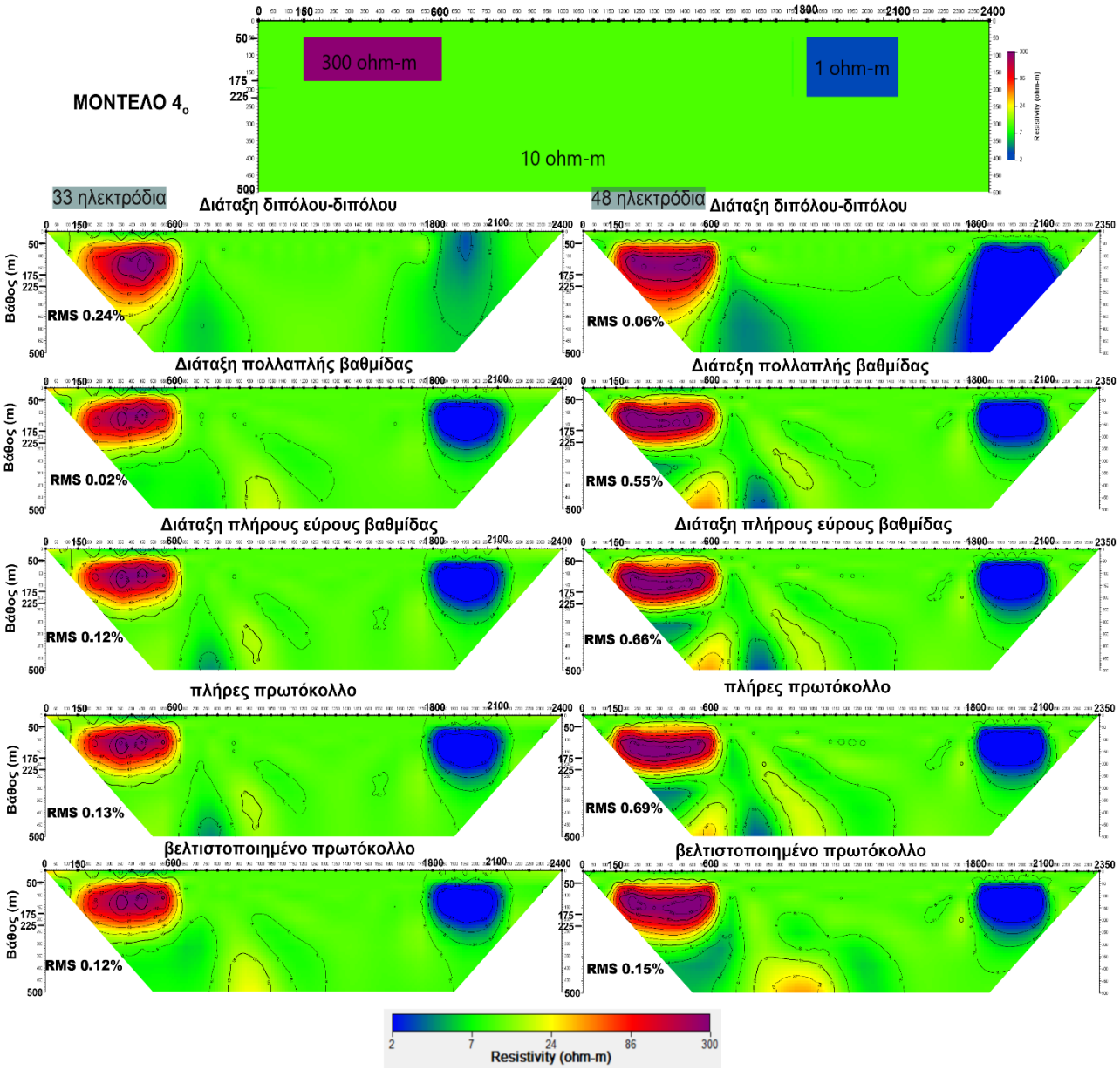
Σχήμα 4.26: Απεικόνιση του $3_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Οι εικόνες της αντιστροφής φαίνεται πως δείχνουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα με εξαίρεση την διάταξη διπόλου-διπόλου που αποτυγχάνει τόσο στο απλό μοντέλο, όσο και στην περίπτωση προσθήκης θορύβου και για τις δύο κατανομές ηλεκτροδίων. Οι εναλλαγές του βάθους του στρώματος 10 Ω·m στη θέση $\chi = 400m$ και $\chi = 700m$ εμφανίζονται πάλι υπό γωνία σε σχέση με το θεωρητικό μοντέλο. Το στρώμα του υποβάθρου (Σχήμα 4.26) παρουσιάζει μια εναλλαγή της κλίσης στο δεξί άκρο της τομής ακριβώς κάτω από το σώμα των 40 Ω·m, που στην περίπτωση της πολλαπλής βαθμίδας αραιής κατανομής φαίνεται πως το σώμα είναι κομμάτι του υποβάθρου.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.4 Μοντέλο 4ο:

Δύο σώματα διαστάσεων 450x125 m και 300x175m ειδικής αντίστασης 300 Ω·m και 1 Ω·m αντίστοιχα, βρίσκονται βυθισμένα σε βάθος $z = 50m$ σε ημιχώρο αντίστασης 10 Ω·m. Τα σώματα είναι τοποθετημένα στη θέση $\chi = 150 - 600m$ και $\chi = 1.800 - 2.100m$ από την αρχική θέση ($\chi = 0m$) που θεωρείται η αρχή της τομής. Τα αποτελέσματα της αντιστροφής πυκνής και αραιής κατανομής ηλεκτροδίων είναι εξαιρετικά για όλες τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν εκτός της διάταξης διπόλου-διπόλου που φαίνεται να χάνει το αγώγιμο σώμα σε αραιή διάταξη και να παρουσιάζει κακή οριζόντια και κατακόρυφη ευαισθησία στην πυκνή διάταξη. Η ύπαρξη ψευδών δομών όπως στο αντίστοιχο μοντέλο μικρής κλίμακας, απεικονίζεται και εδώ δεξιά από το αντιστατικό σώμα και σε μεγάλο βάθος.



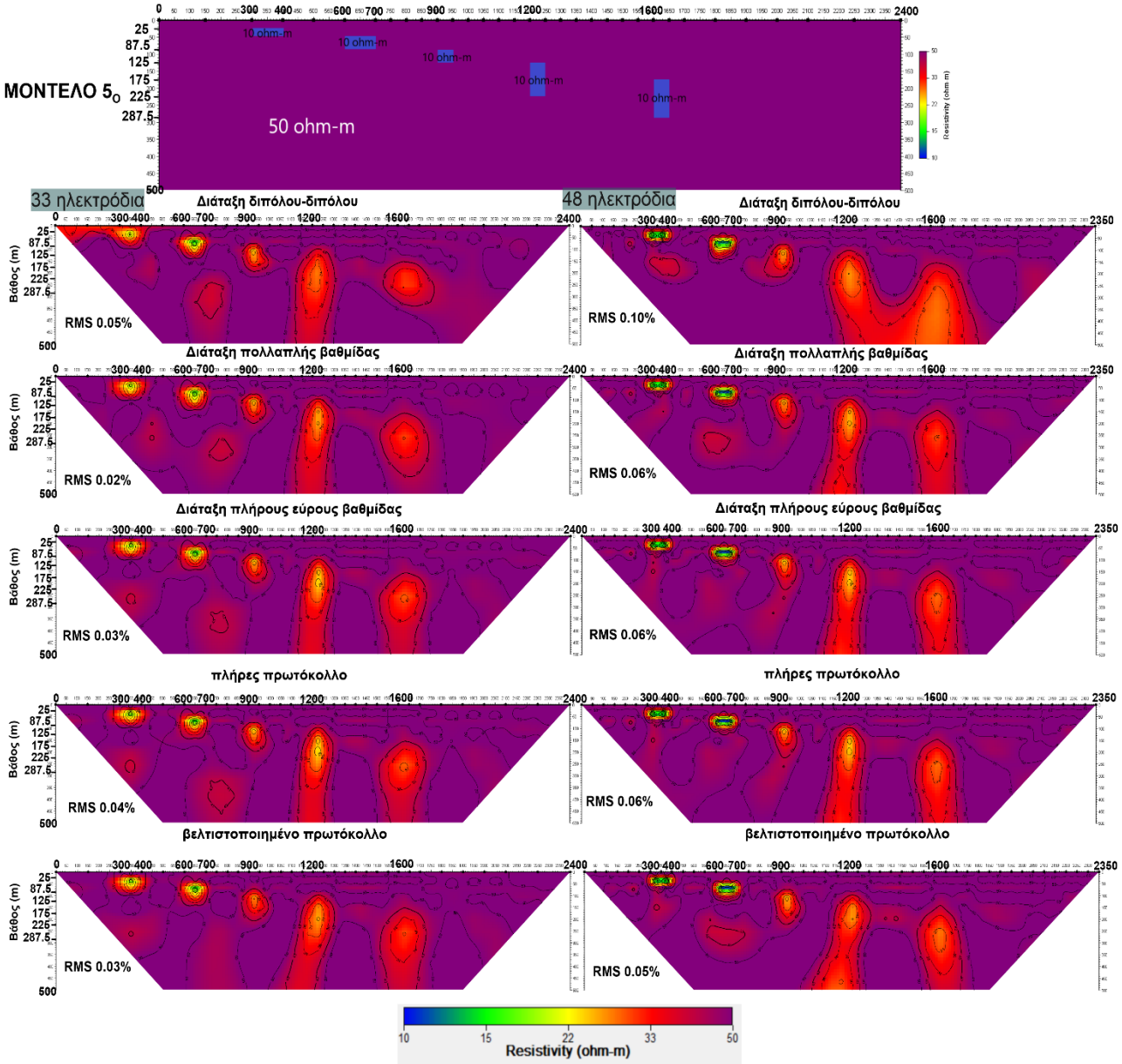
Σχήμα 4.27: Απεικόνιση του $4_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά)..

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.5 Μοντέλο 5ο:

Πέντε σώματα διαφορετικών διαστάσεων ίδιας ειδικής αντίστασης 10 Ω·m, τοποθετούνται σε διαφορετικά βάθη σε ομογενή ημιχώρο αντίστασης 50 Ω·m. Οι διαστάσεις, το βάθος αλλά και η ακριβή θέση τους στην οποία είναι τοποθετημένα παρουσιάζονται παρακάτω:

1. 100x25m στη θέση $\chi = 300 - 400m$ και βάθος $z = 25 - 50m$
2. 100x37.5m στη θέση $\chi = 600 - 700m$ και βάθος $z = 50 - 87.5m$
3. 50x37.5m στη θέση $\chi = 900 - 950m$ και βάθος $z = 87.5 - 125m$
4. 50x100m στη θέση $\chi = 1200 - 1250m$ και βάθος $z = 125 - 225m$
5. 500x112.5m στη θέση $\chi = 1600 - 1650m$ και βάθος $z = 175 - 287.5m$



Σχήμα 4.28: Απεικόνιση του $5_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

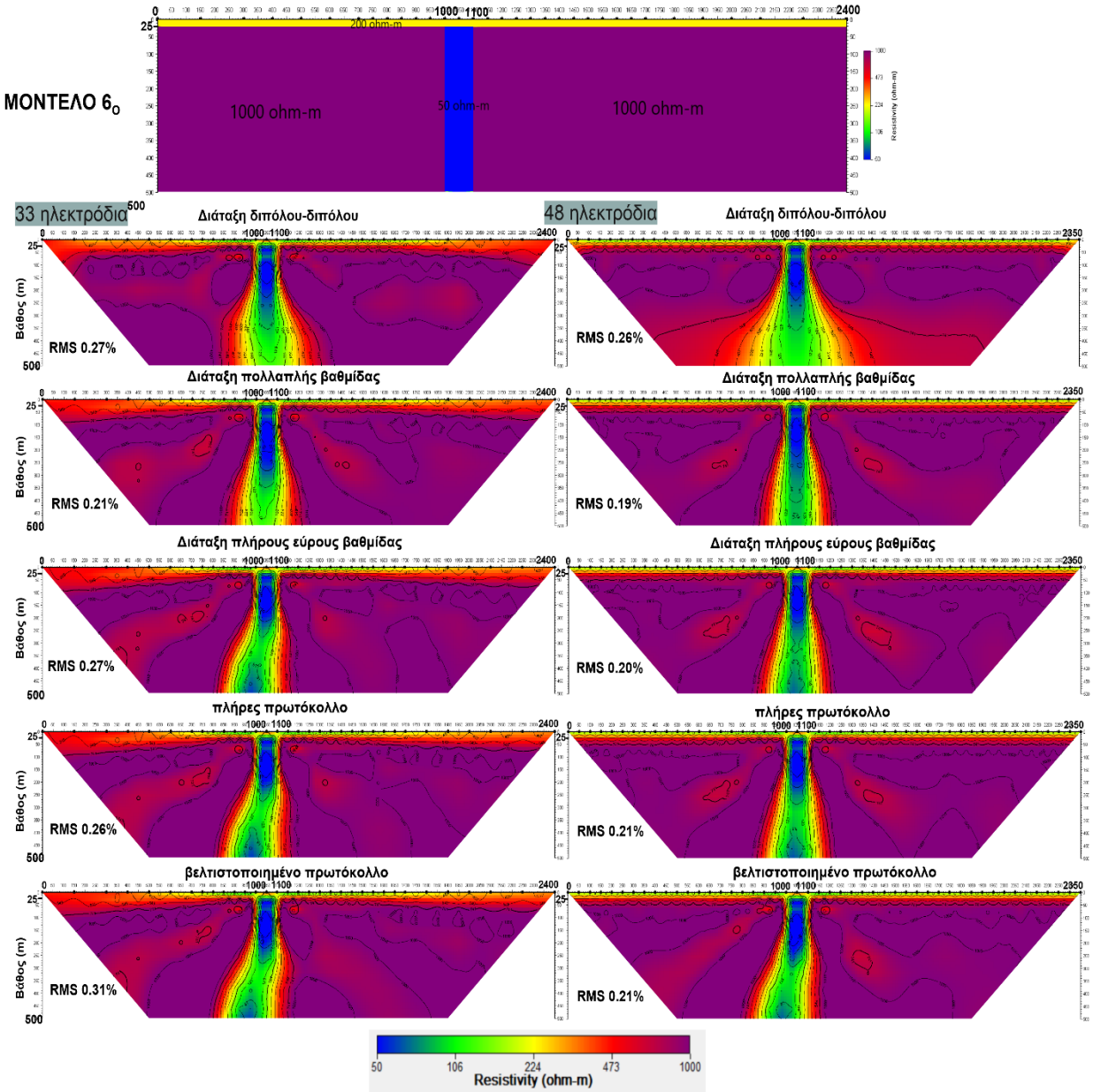
Τα τρία πρώτα σώματα απεικονίζονται με εξαιρετική ανάλυση, εκτός από ορισμένα ψευδή σώματα που εμφανίζονται σε μεγαλύτερο βάθος αριστερά των τομών. Όλες σχεδόν οι διατάξεις αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων αποτυγχάνουν να δώσουν ακριβείς

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

εικόνες σχετικά με τις διαστάσεις των δύο τελευταίων σωμάτων, ειδικότερα στη διπόλου-διπόλου διάταξη 48 ηλεκτροδίων δεν είναι σαφής ο διαχωρισμός τους.

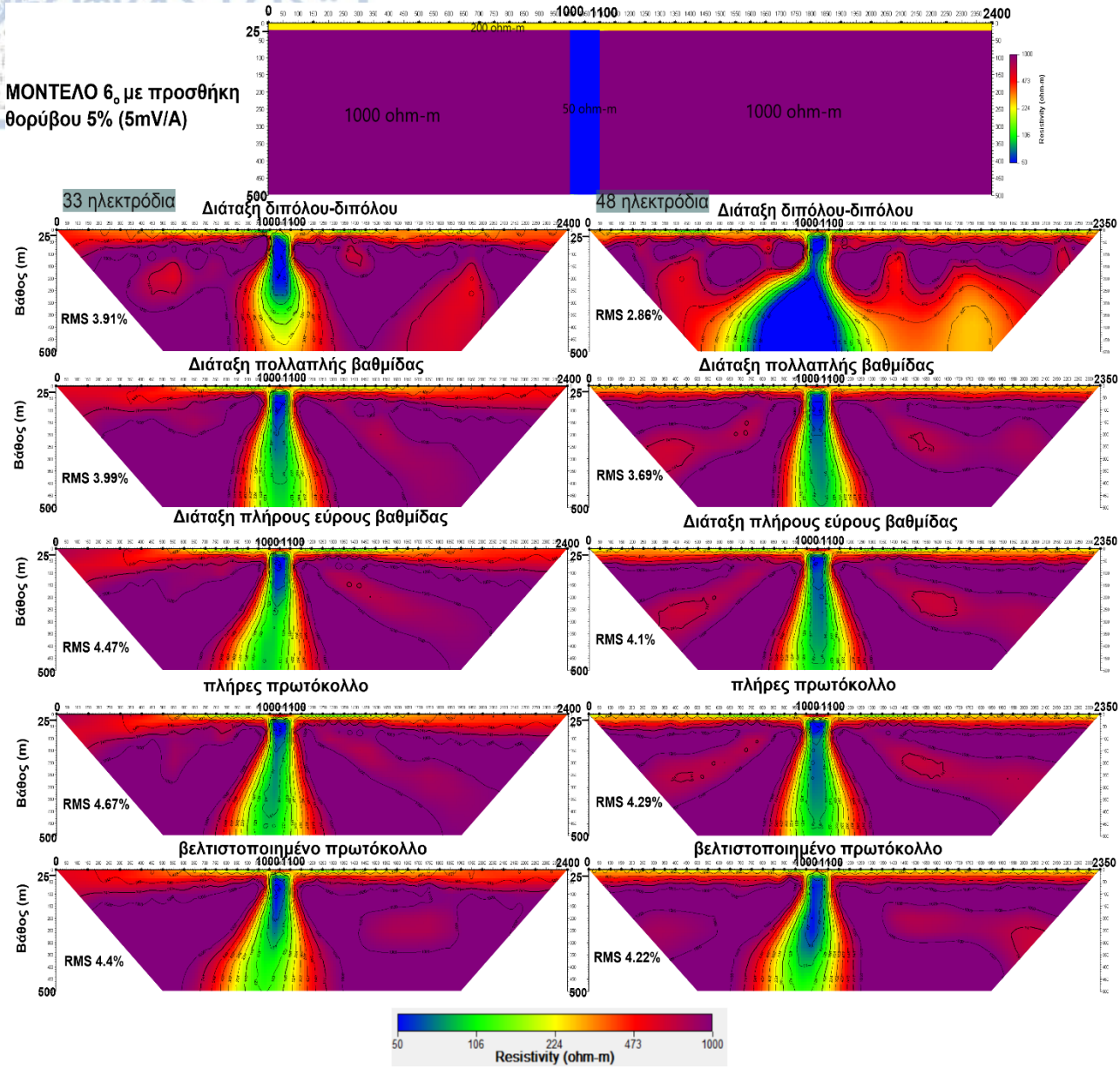
4.4.6 Μοντέλο 6ο - Μοντέλο 6ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:

Επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 200 Ω·m και πάχους 25m υπέρκειται ημιχώρου πολύ υψηλότερης αντίστασης 1000 Ω·m. Στο κεντρικό περίπου τμήμα της τομής και πιο συγκεκριμένα στη θέση $\chi = 1000 - 1100m$, μια κατακόρυφη ζώνη ρηγμάτωσης χαμηλής αντίστασης 50 Ω·m διακόπτει το στρώμα του ημιχώρου. Παρακάτω στα σχήματα 4.29 και 4.30 παρουσιάζονται οι εικόνες αντιστροφής του ίδιου μοντέλου χωρίς και με την εφαρμογή τυχαίου θορύβου 5% (5mV/A) στα δεδομένα για την προσομοίωση πραγματικών συνθηκών πεδίου.



Σχήμα 4.29: Απεικόνιση του $6_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



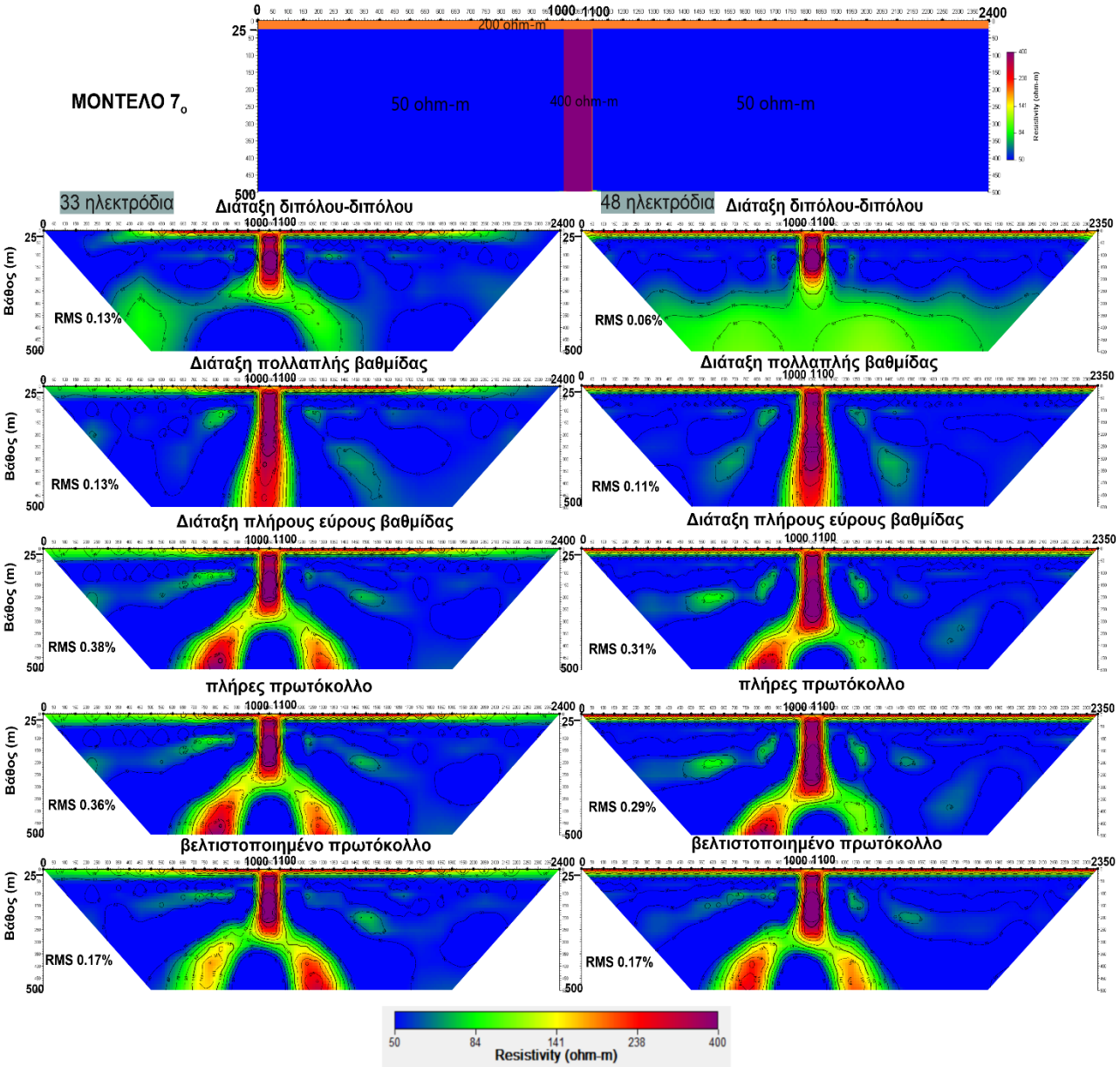
Σχήμα 4.30: Απεικόνιση του $6_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Οι γεωηλεκτρικές εικόνες αντιστροφής απεικονίζουν ικανοποιητικά τα όρια της ζώνης ρηγμάτωσης σε χαμηλότερα βάθη, ενώ αυτή φαίνεται να απλώνει σε λίγο μεγαλύτερα βάθη. Η αραίωση των ηλεκτροδίων φαίνεται πως επηρεάζει το επιφανειακό στρώμα των 200 Ω·m, καθώς αυτό φαίνεται να μην διαχωρίζεται από τον ημιχώρο 1000 Ω·m. Στην περίπτωση εφαρμογής τυχαίου θορύβου, η ζώνη ρηγμάτωσης απλώνει πλευρικά στο μέσο της τομής, παρόλα αυτά στη πυκνή διάταξη διπόλου-διπόλου, η ζώνη ρηγμάτωσης εμφανίζεται με πολύ μεγάλες διαστάσεις, πλήρη αποτυχία σχετικά με το θεωρητικό μοντέλο.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.7 Μοντέλο 7ο:

Επιφανειακό οριζόντιο στρώμα αντίστασης 200 Ω·m με πάχος 25m υπέρκειται ομογενούς ημιχώρου αντίστασης 50 Ω·m. Στο κεντρικό περίπου τμήμα της τομής και σε απόσταση $\chi = 1000 - 1100m$ από την αρχή της, εντοπίζεται κατακόρυφη ζώνη ρηγμάτωσης αντίστασης 400 Ω·m τέμνοντας τον ημιχώρο. Οι εικόνες αντιστροφής του σχήματος 4.31 απεικονίζουν με μεγάλη αξιοπιστία τα όρια της ζώνης στα μικρότερα βάθη, ενώ σε μεγαλύτερα, τα δεδομένα των διατάξεων της πλήρους βαθμίδας, καθώς και του συνολικού και βελτιστοποιημένου συνόλου αστοχούν καθώς η ζώνη φαίνεται διαχωρισμένη σε δύο τμήματα. Η διάταξη διπόλου-διπόλου αραιής και πυκνής κατανομής αποκρίνεται στο θεωρητικό μοντέλο μέχρι το βάθος 200m, και αποτυγχάνει σε μεγαλύτερο βάθος. Επίσης, το επιφανειακό στρώμα στις διατάξεις της αραιής κατανομής στα άκρα των τομών φαίνεται να μην διαχωρίζεται από τον ημιχώρο, γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει στις διατάξεις των 48 ηλεκτροδίων αφού απεικονίζεται με μεγάλη ευκρίνεια.

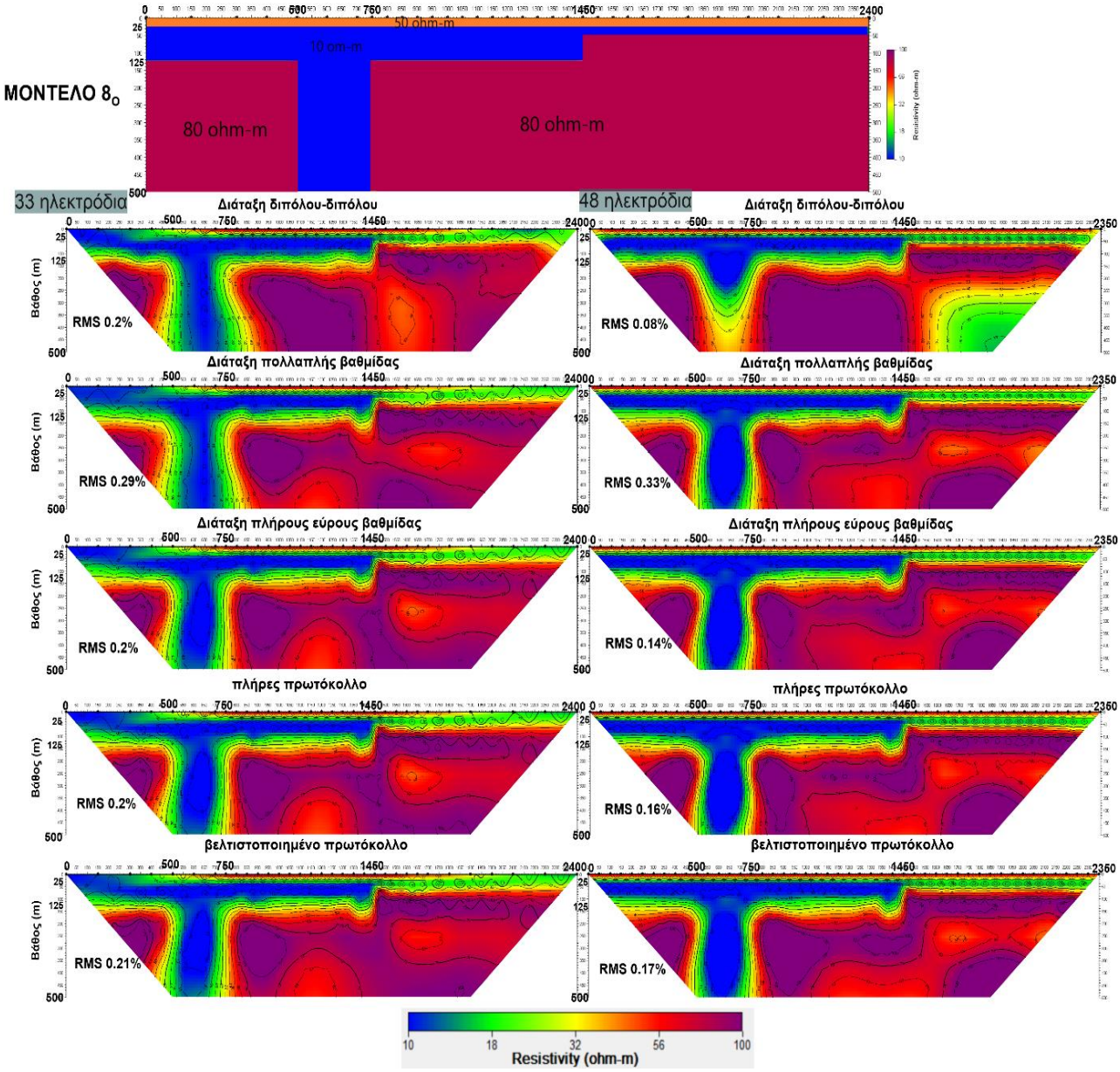


Σχήμα 4.31: Απεικόνιση του $7_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

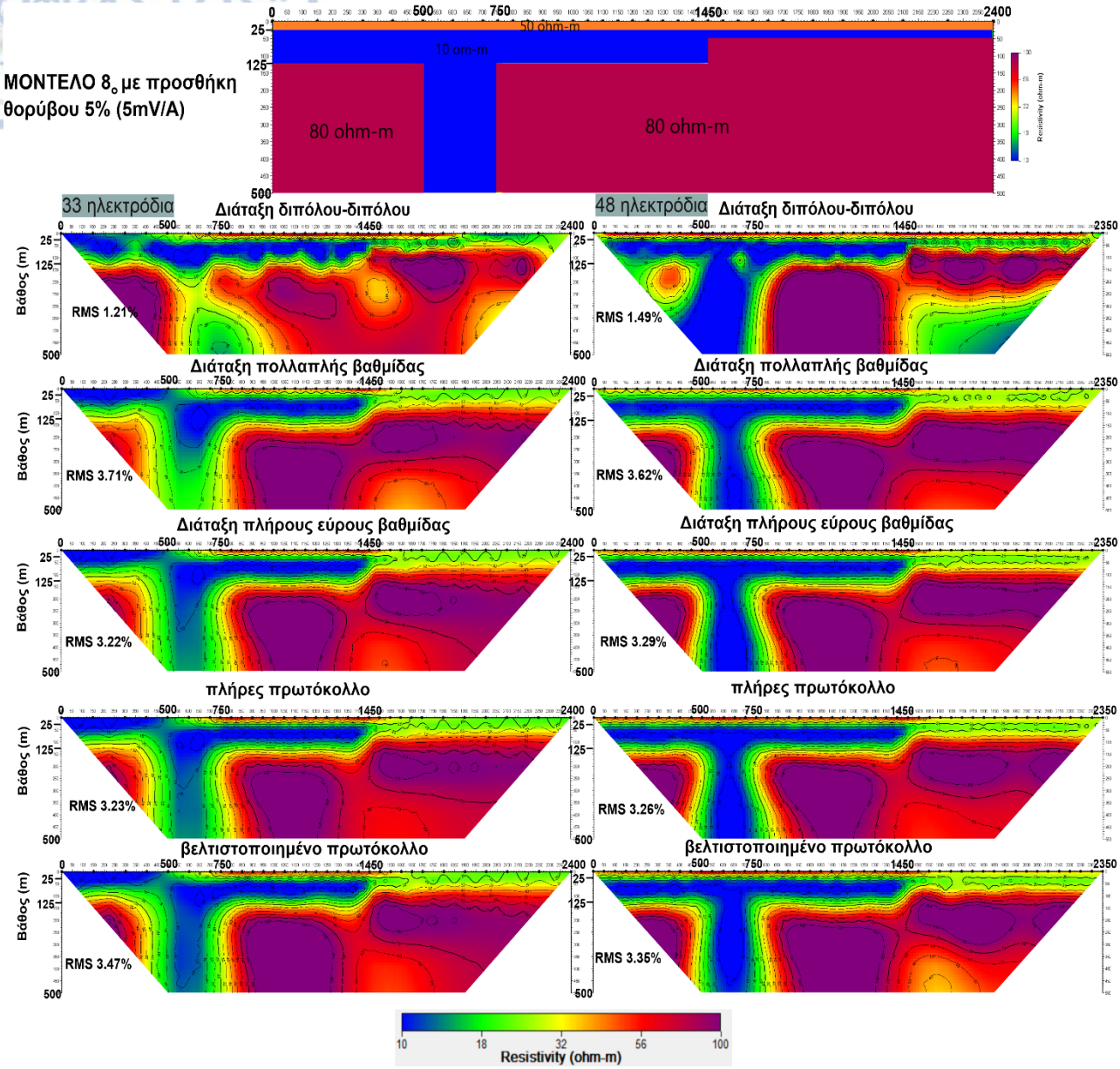
4.4.8 Μοντέλο 8ο - Μοντέλο 8ο με προσθήκη θορύβου 5mV/A:

Επιφανειακό στρώμα πάχους 25m και αντίστασης 50 Ω·m υπέρκειται στρώματος 10 Ω·m που εντοπίζεται σε βάθος μέχρι 125m στην αρχή της τομής μέχρι τη θέση $\chi = 500m$, στη συνέχεια βυθίζεται στο μέγιστο βάθος ($z = 500m$) μέχρι τη θέση $\chi = 750m$ και επανέρχεται στο αρχικό βάθος μέχρι τη θέση $\chi = 1.450m$ όπου ανεβαίνει σε μικρότερο βάθος στη συνέχεια. Στρώμα 80 Ω·m που αντιστοιχεί στο υπόβαθρο υπόκειται του προηγούμενου. Οι εικόνες αντιστροφής από όλες τις διατάξεις χωρίς την προσθήκη τυχαίου θορύβου (Σχήμα 4.32) παρουσιάζουν αξιόπιστα αποτελέσματα, πέραν από την απόκριση του μοντέλου αραιής κατανομής 33 ηλεκτροδίων για το επιφανειακό στρώμα 50 Ω·m που φαίνεται να μην διαχωρίζεται από το στρώμα 10 Ω·m. Η ζώνη ρηγμάτωσης της διπόλου-διπόλου πυκνής διάταξης δεν αντιστοιχεί σε βάθος με τις υπόλοιπες διατάξεις.



Σχήμα 4.32: Απεικόνιση του $8_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



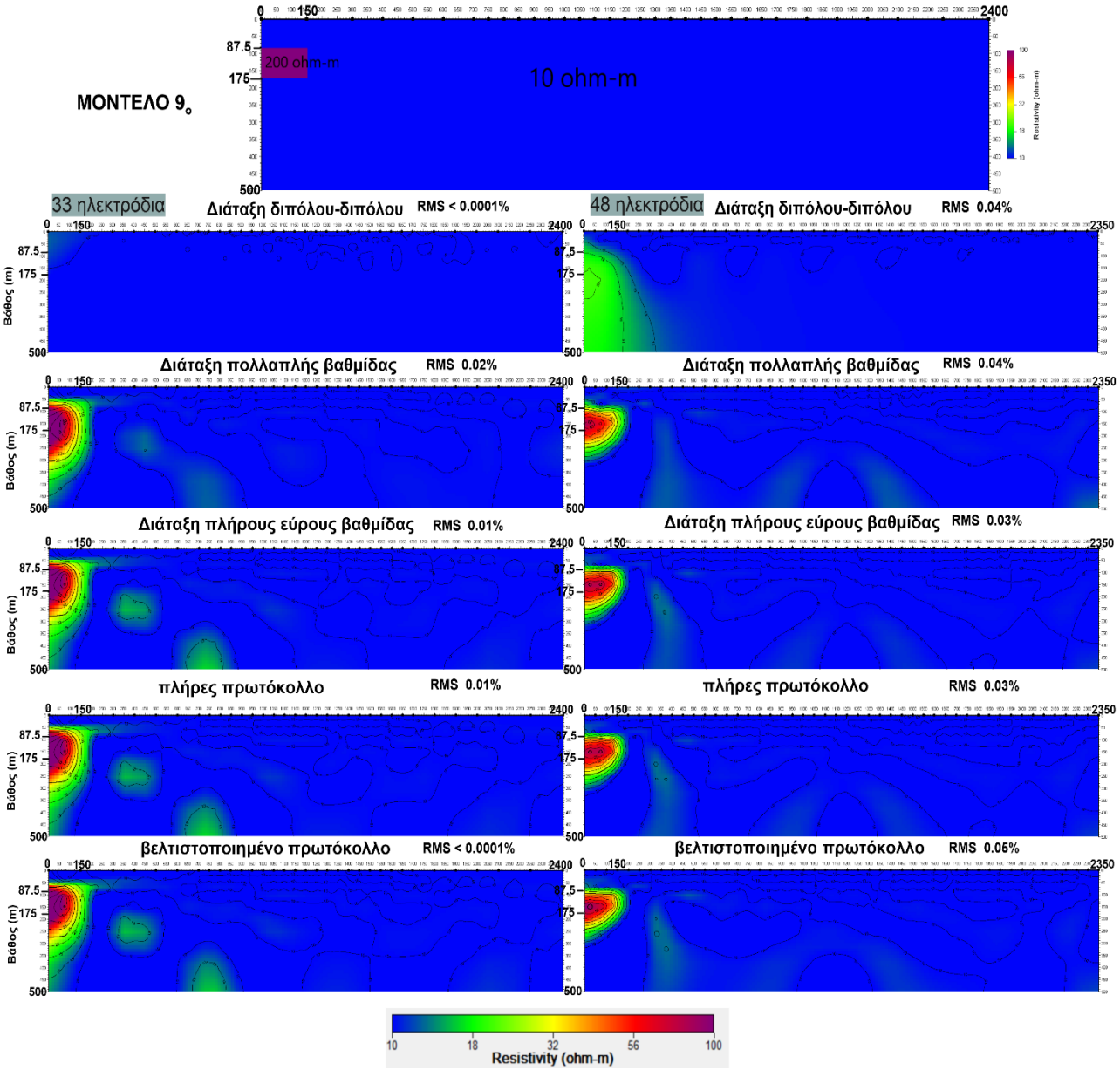
Σχήμα 4.33: Απεικόνιση του $8_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Στην περίπτωση εφαρμογής τυχαίου θορύβου στα δεδομένα (Σχήμα 4.33) ισχύουν και εδώ τα ίδια συμπεράσματα που προέκυψαν προηγουμένως χωρίς την εφαρμογή θορύβου. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως η διάταξη διπόλου-διπόλου εδώ αποτυγχάνει τόσο στην πυκνή, όσο και στην αραιή κατανομή ηλεκτροδίων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.9 Μοντέλα 9ο – 13ο:

Στα γεωηλεκτρικά μοντέλα 9-13 απεικονίζεται σώμα μεγάλων διαστάσεων, ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 200 Ω·m και μεταβλητού πάχους στην αρχή της τομής των μετρήσεων, το οποίο βυθίζεται σε ημιχώρο αντίστασης 10 Ω·m. Τα σχήματα 4.34 - 4.39 παρουσιάζουν τις εικόνες αντιστροφής και την απόκριση κάθε διάταξης οποιασδήποτε κατανομής ηλεκτροδίων καθώς το σώμα μετατοπίζεται κατακόρυφα εις βάθος.

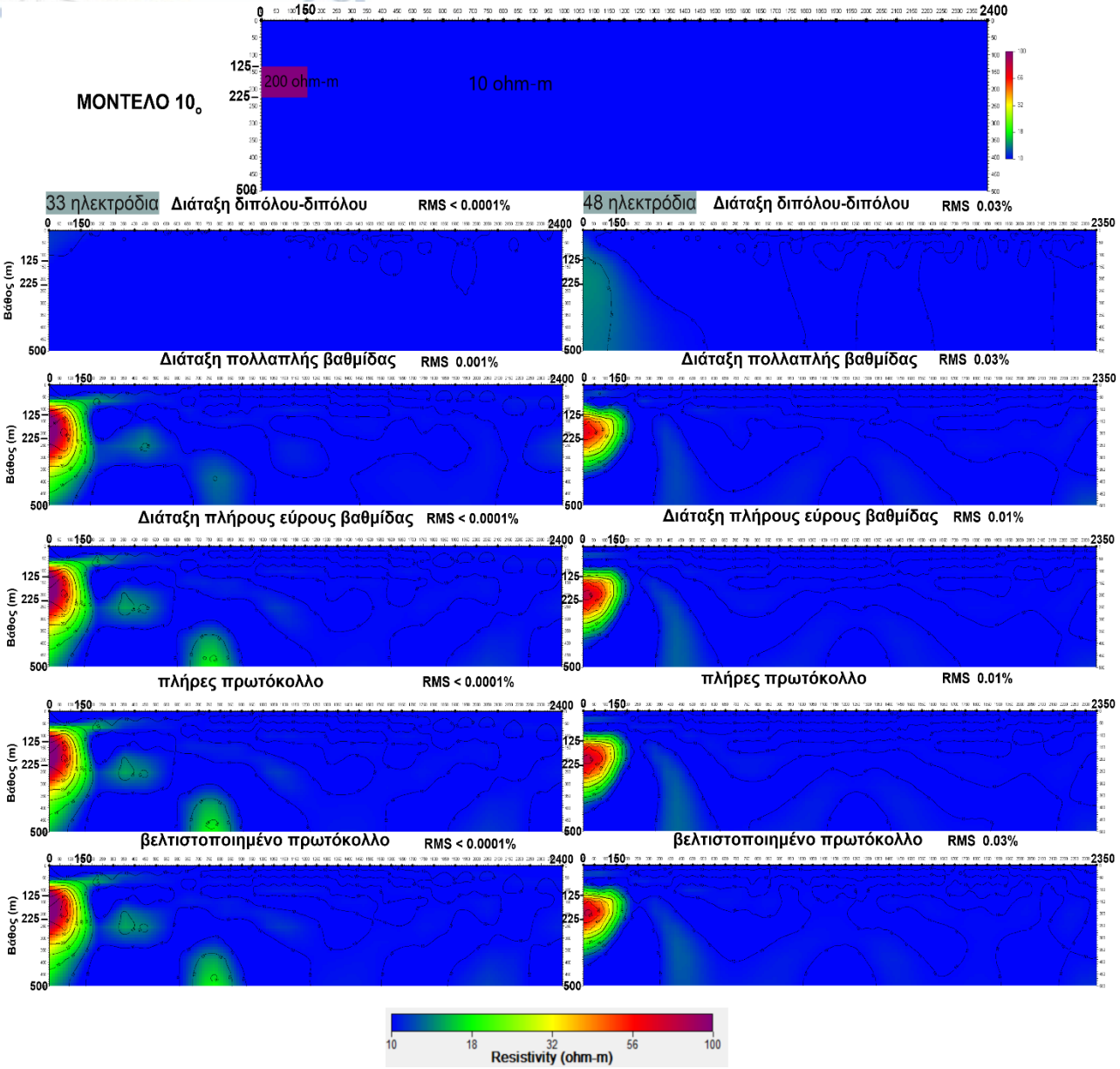


Σχήμα 4.34: Απεικόνιση του $9_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Η διάταξη διπόλου-διπόλου, όπως απεικονίζεται και στα πρωτόκολλα μικρής κλίμακας (Σχήμα 4.16) αστοχεί στην απεικόνιση του σώματος, καθώς το σώμα εξαφανίζεται (αραιή κατανομή) ή δεν είναι σαφής ο διαχωρισμός του από τον ημιχώρο (πυκνή κατανομή). Στις υπόλοιπες διατάξεις το σώμα απεικονίζεται με μεγάλη ευκρίνεια, παρόλα αυτά, τα πρωτόκολλα αραιής κατανομής μπορεί να αποτυγχάνουν σε κάποιο βαθμό στα όρια της κατακόρυφης συνιστώσας. Επίσης εμφανίζονται κάποιες ψευδείς δομές στα δεξιά του

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

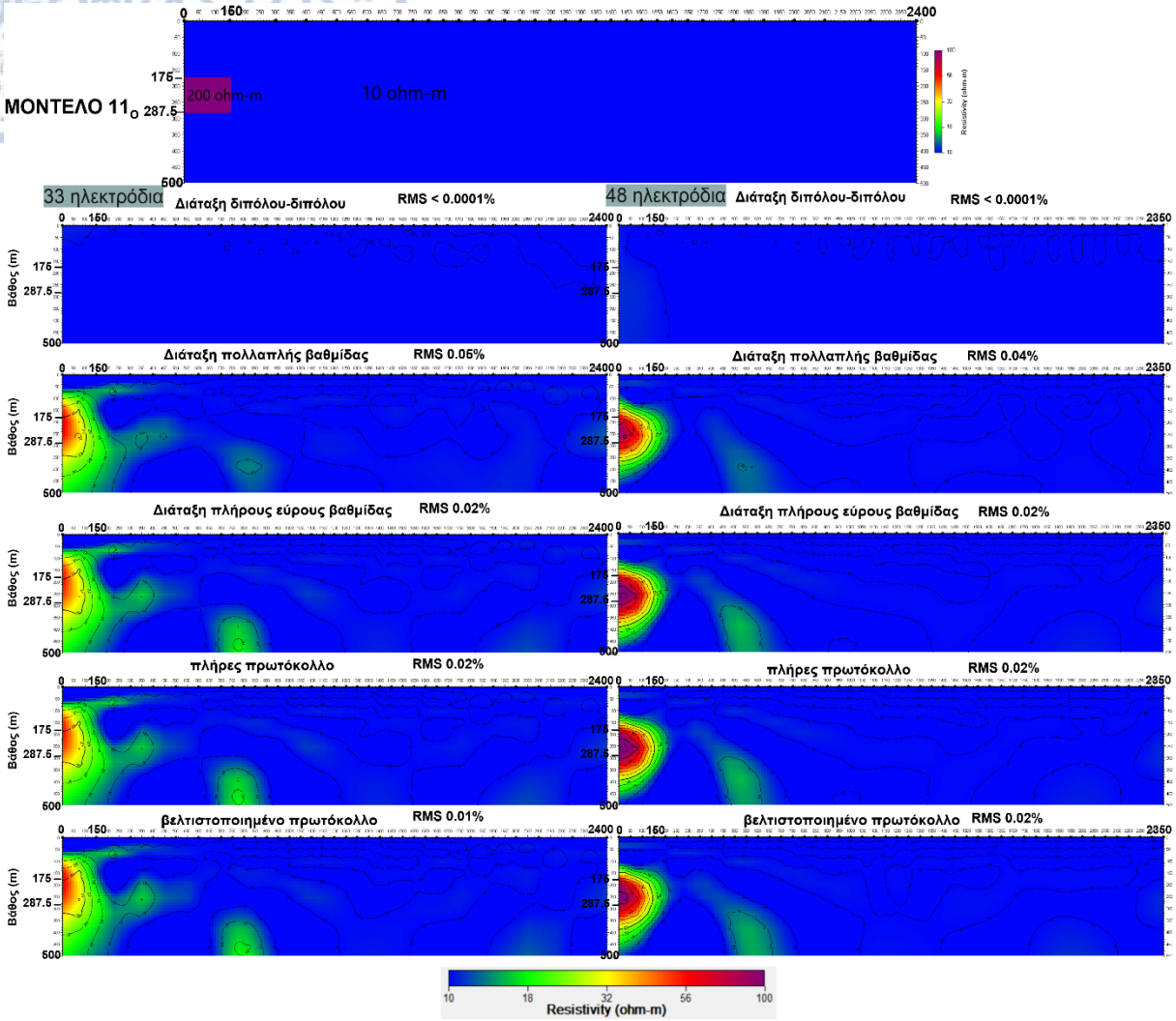
σώματος και σε λίγο μεγαλύτερα βάθη ειδικότερα στην περίπτωση της αραιής κατανομής των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 4.35: Απεικόνιση του 10_{ou} γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ακριβώς ίδια περίπτωση του μοντέλου 9 παρουσιάζουν και οι εικόνες αντιστροφής του μοντέλου 10.

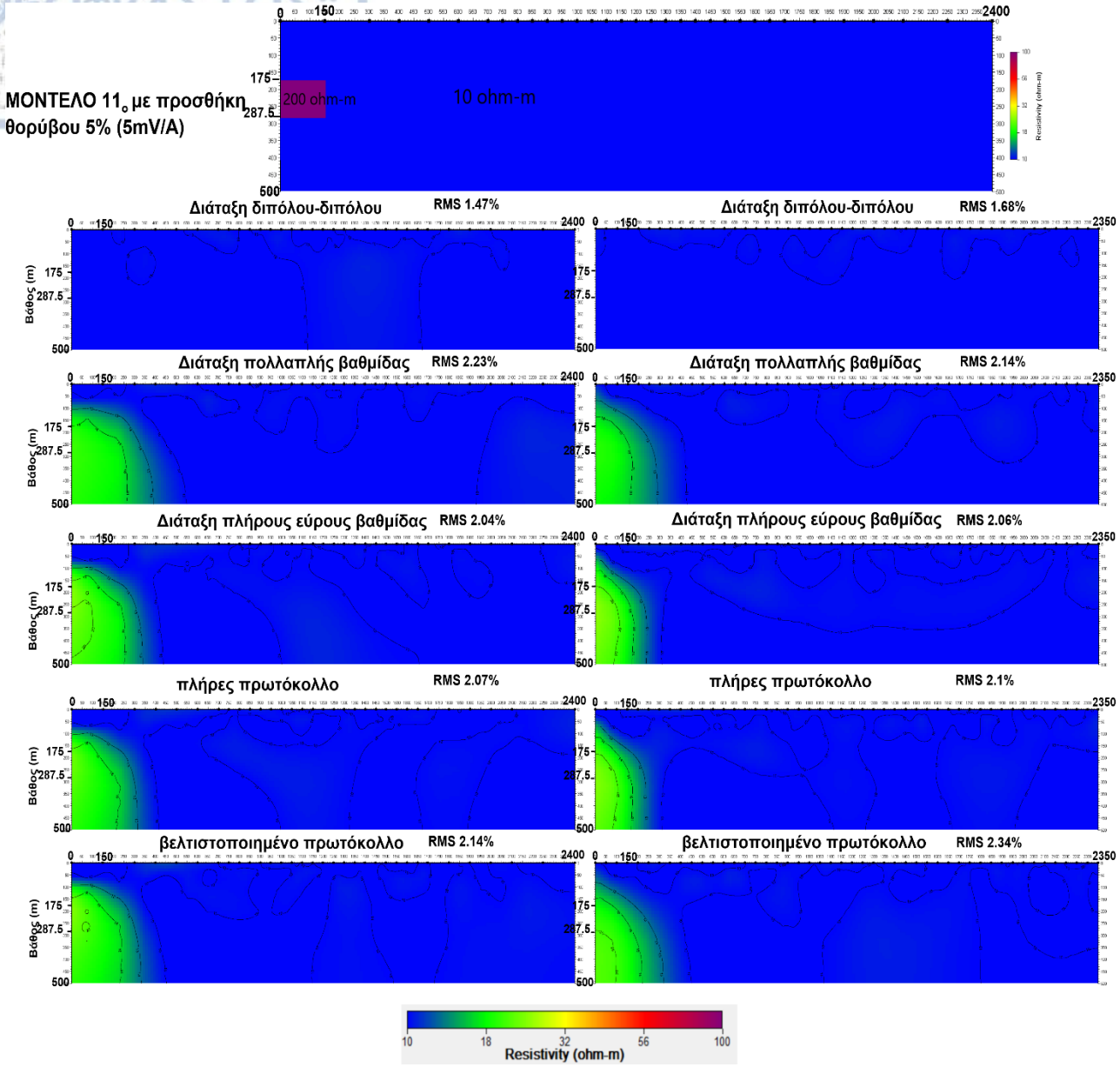
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 4.36: Απεικόνιση του $11_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Στο μοντέλο 11 η διάταξη διπόλου-διπόλου δεν μπορεί να απεικονίσει το αντιστατικό σώμα καθόλου. Η χρήση 48 ηλεκτροδίων φαίνεται πως παρουσιάζει καλύτερη διακριτική ικανότητα στην κατακόρυφη συνιστώσα του βάθους σε σχέση με τα μοντέλα που κάνουν χρήση 33 ηλεκτροδίων, όπου το σώμα απεικονίζεται με μεγαλύτερη έκταση.

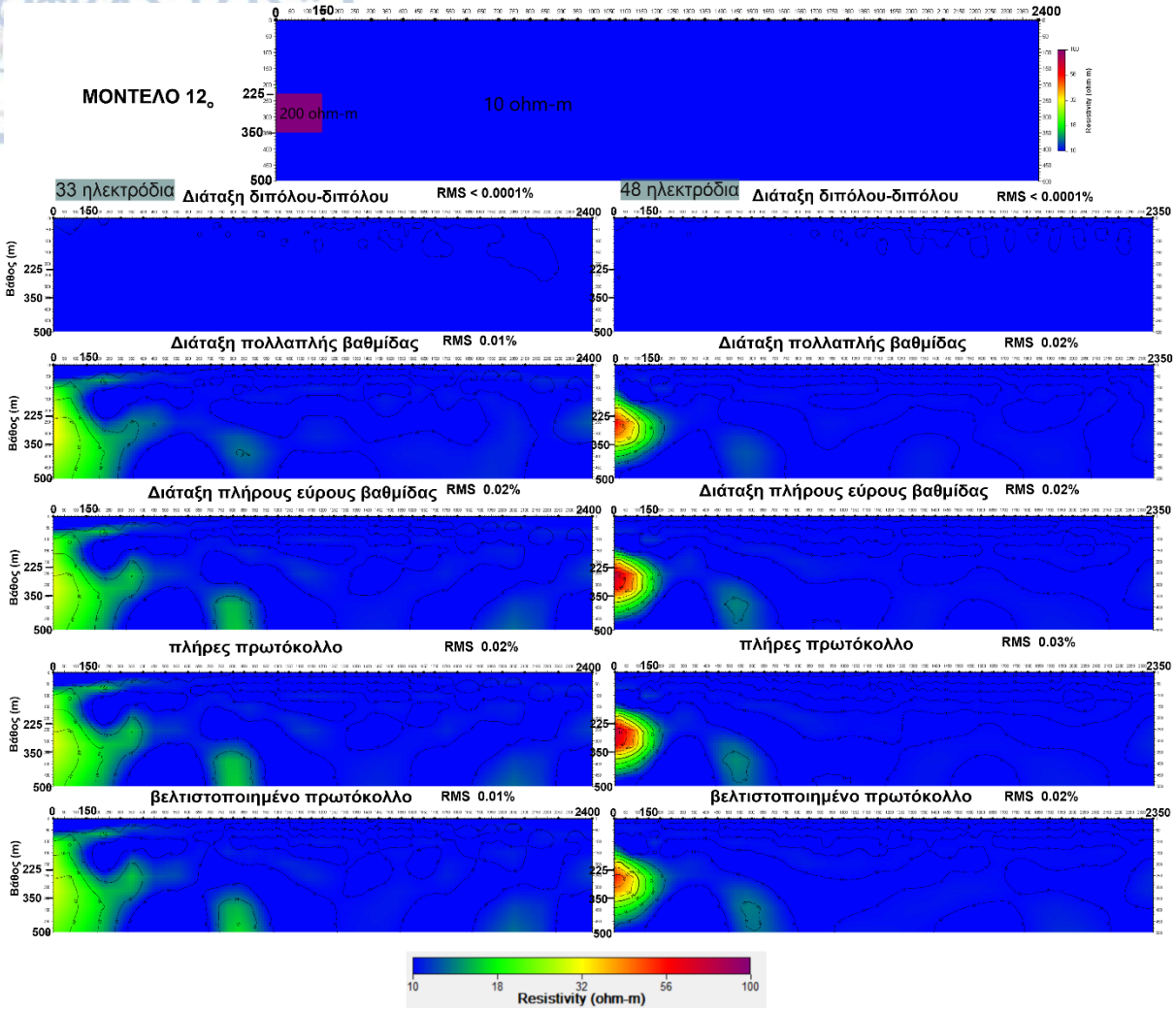
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 4.37: Απεικόνιση του $11_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου με την προσθήκη θορύβου 5% (5mV/A) και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Σε πραγματικές συνθήκες πεδίου με τη προσθήκη τυχαίου θορύβου 5mV/A η ευκρίνεια των διατάξεων μειώνεται αισθητά με το σώμα να απεικονίζεται αμιγώς και με μη πεπερασμένες διαστάσεις σε όλες τις εικόνες αντιστροφής

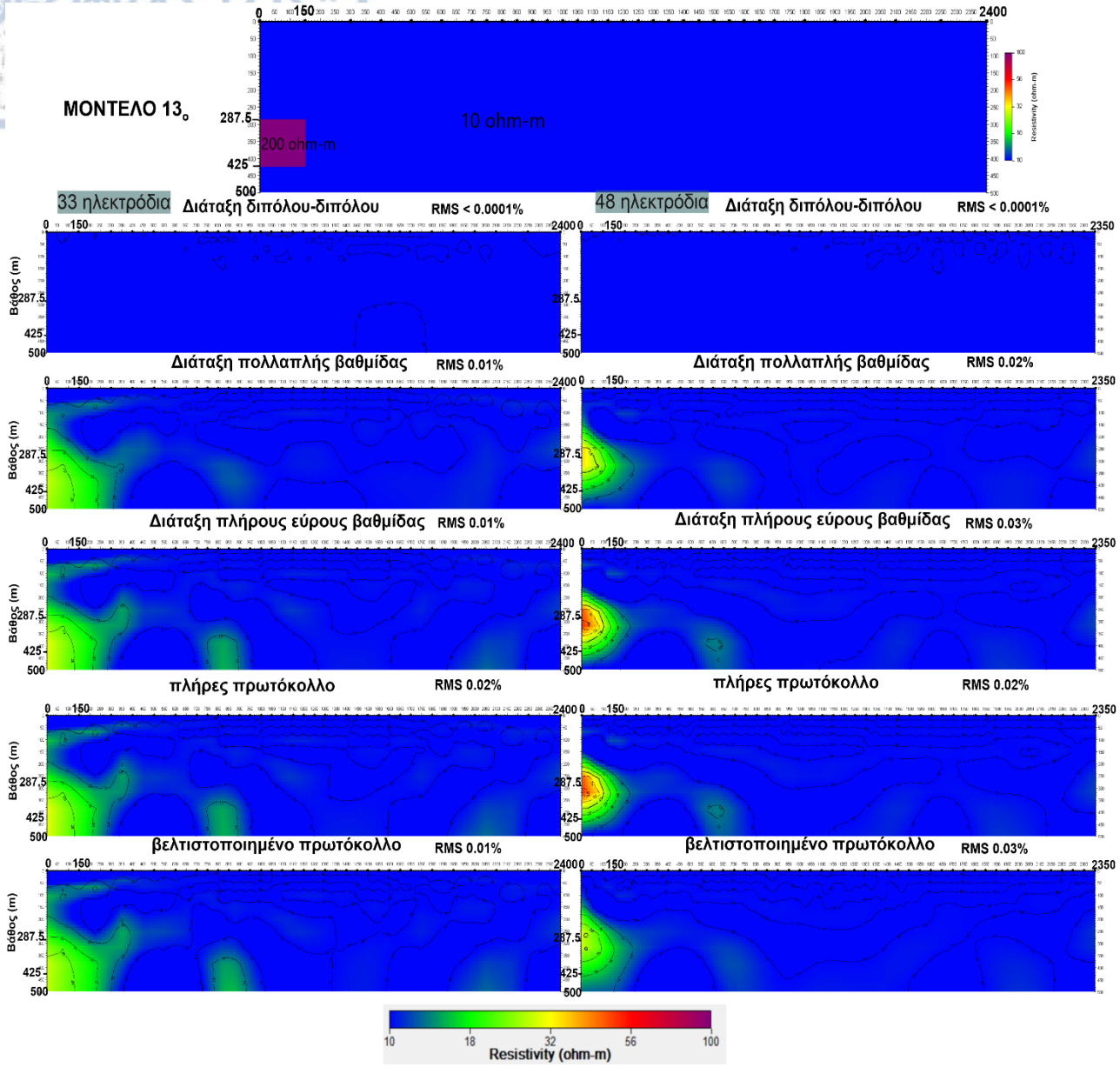
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 4.38: Απεικόνιση του $12_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Στα μοντέλα 12 και 13 (σχήμα 4.38, 4.39) παρατηρούμε πλέον ότι το σώμα τείνει να εξαφανιστεί καθώς μεγαλώνει το βάθος στις διατάξεις αραιής κατανομής ηλεκτροδίων. Με τη χρήση πυκνής κατανομής, οι διατάξεις παρουσιάζουν καλύτερες εικόνες, απεικονίζοντας πολύ καλά τις διαστάσεις του σώματος.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

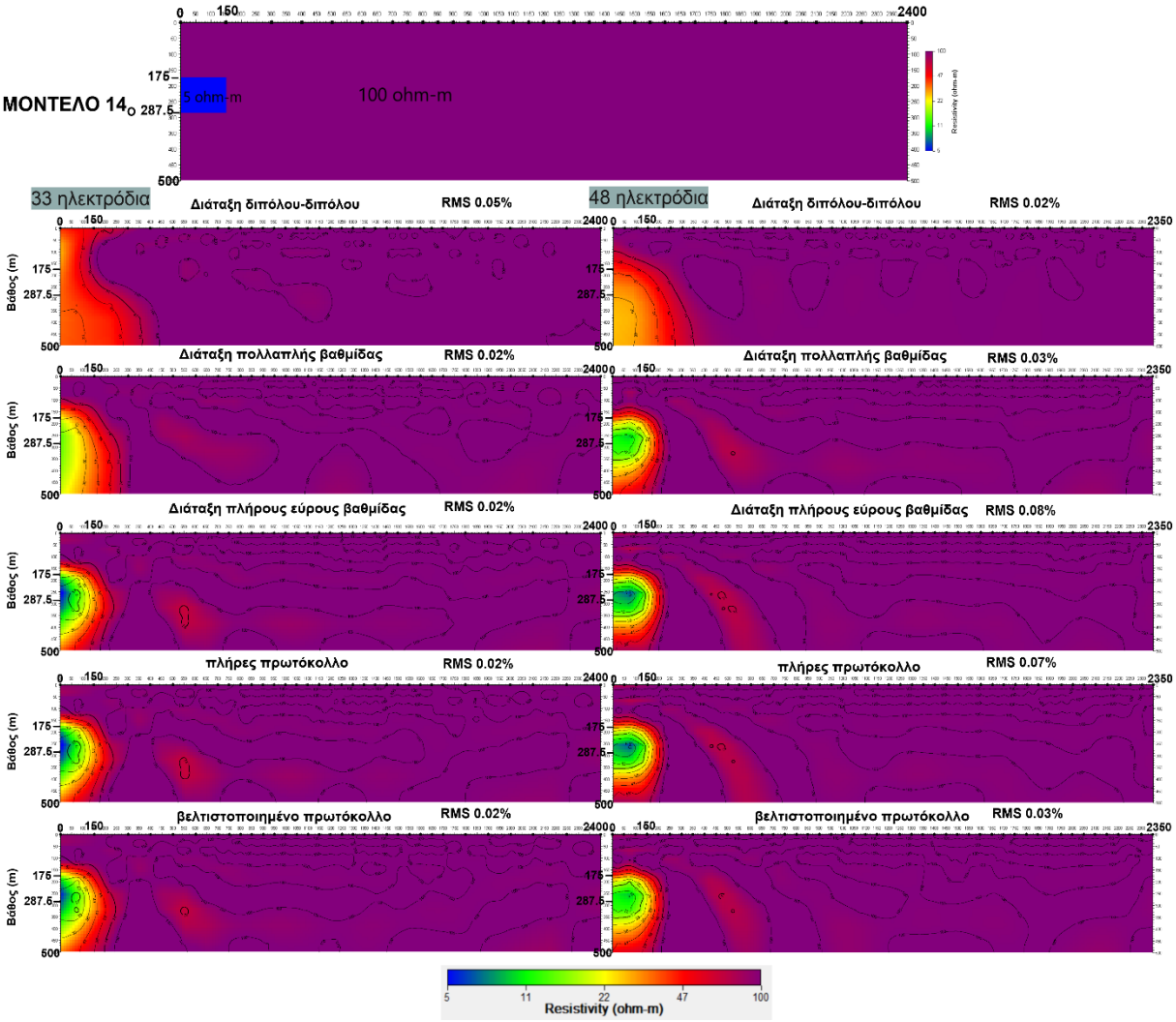


Σχήμα 4.39: Απεικόνιση του 13ου γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

4.4.10 Μοντέλο 14ο:

Τέλος, το μοντέλο 14 του σχήματος 4.40 είναι όμοιο του μοντέλου 11 (Σχήμα 4.36) με την αντίθεση ότι το σώμα είναι αγώγιμο αντίστασης 5 Ω·m και ο ημιχώρος αντιστατικός (100 Ω·m).



Σχήμα 4.40: Απεικόνιση του $14_{ου}$ γεωηλεκτρικού μοντέλου και των εικόνων αντιστροφής μεγάλης κλίμακας για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου, πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient), πλήρους εύρους βαθμίδας (full-range gradient), πλήρους και βέλτιστου σετ δεδομένων με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων (αριστερά) και 48 ηλεκτροδίων (δεξιά).

Σχεδόν όλες οι εικόνες αντιστροφής απεικονίζουν ευδιάκριτα το αγώγιμο σώμα, εκτός της διάταξης διπόλου-διπόλου και της πολλαπλής βαθμίδας 33 ηλεκτροδίων, στις οποίες δεν είναι σαφής ο καθορισμός των διαστάσεων του σώματος, σε αντίθεση με την διπόλου-διπόλου διάταξη αραιής και πυκνής κατανομής των πρωτοκόλλων μικρής κλίμακας, στα οποία το σώμα είναι εντελώς εξαφανισμένο.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

4.5 Συμπεράσματα συνθετικών δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα αντιστροφής των συνθετικών δεδομένων μικρής και μεγάλης κλίμακας για δύο παραδοσιακές διατάξεις μέτρησης ειδικής αντίστασης διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας, μιας καινούργιας διάταξης, της " πλήρους εύρους βαθμίδας" (full-range gradient) καθώς και οι εικόνες αντιστροφής που προέκυψαν από το πλήρες σύνολο δεδομένων και το βελτιστοποιημένο με τη χρήση του Ιακωβιανού Πίνακα της Αθανασίου(2009).

Όλες οι διατάξεις έκαναν χρήση δύο διαφορετικών κατανομών ηλεκτροδίων, 33 ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν με αραιή κατανομή στις άκρες των τομών και πυκνή στο κέντρο και 48 ηλεκτρόδια με πυκνή κατανομή σταθερής ενδιάμεσης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων σε όλο το μήκος της τομής.

Από την αραίωση ή μείωση των ηλεκτροδίων στα συνθετικά δεδομένα μικρής και μεγάλης κλίμακας προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Στα μοντέλα που γίνεται απεικόνιση στρωματογραφίας, οι διατάξεις αραιής κατανομής ηλεκτροδίων λειτουργούν μια χαρά ακόμα και όταν η εναλλαγή των στρωμάτων βρίσκεται στις άκρες. Παράδειγμα το μοντέλο 3 ακόμη και με την εφαρμογή θορύβου.
- Σε μοντέλο με ρηχούς στόχους αριστερά και δεξιά των τομών η αραίωση των ηλεκτροδίων λειτουργεί επίσης άψογα όπως αποδεικνύεται από το μοντέλο 4.
- Σε μοντέλο με βυθιζόμενα σώματα η διαφοροποίηση της κατανομής των ηλεκτροδίων λειτουργεί ικανοποιητικά χωρίς να επηρεάζονται οι εικόνες αντιστροφής της αραιής κατανομής.
- Σε μοντέλα που περιλαμβάνουν ρηξιγενή ζώνη με επιφανειακό στρώμα, η αραίωση των ηλεκτροδίων επηρεάζει μόνο την απεικόνιση του επιφανειακού στρώματος, καθώς φαίνεται να μην διαχωρίζεται από το υποκείμενο στρώμα. Αντιθέτως στις διατάξεις πυκνής κατανομής 48 ηλεκτροδίων, το επιφανειακό στρώμα διαχωρίζεται καθαρά από τα περιβάλλοντα στρώματα. Τέτοιο παράδειγμα αναπαράγεται στο μοντέλο 6 και 7.
- Σε μοντέλο που περιλαμβάνει στρωματογραφία, ρηξιγενή ζώνη και επιφανειακό στρώμα, η αραίωση αδυνατεί πάλι να απεικονίσει μόνο το διαχωρισμό του επιφανειακού στρώματος ακόμη και στη περίπτωση εφαρμογής θορύβου. (Μοντέλο 8)
- Τέλος, σε μοντέλο που το σώμα τοποθετείται στο άκρο της τομής και βυθίζεται σταδιακά, παρατηρείται ότι η μείωση των ηλεκτροδίων παρόλο που απεικονίζει το σώμα, χάνει σε κατακόρυφη ευαισθησία σε σχέση με τα πυκνά ηλεκτρόδια. (Μοντέλα 9 – 14).

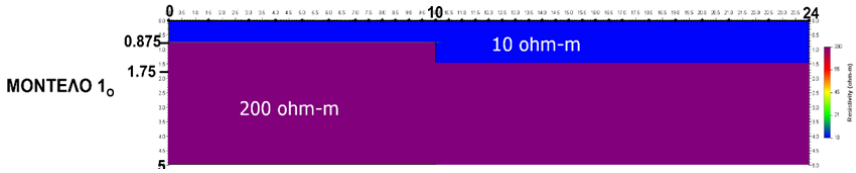
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Από τις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα για κάθε θεωρητικό μοντέλο μικρής και μεγάλης κλίμακας ξεχωριστά.

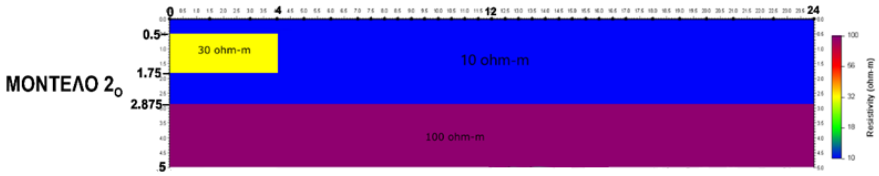
Μοντέλο 1 :

Ικανοποιητικές εικόνες παρουσιάζουν όλες οι διατάξεις μικρής κλίμακας. Η μετάβαση του στρώματος σε μεγαλύτερο βάθος εμφανίζεται υπό κλίση. Το ίδιο ισχύει και στις διατάξεις μεγάλης κλίμακας, μόνο που εδώ το στρώμα του υποβάθρου της πυκνής διάταξης διπόλου-διπόλου εμφανίζεται με χαμηλότερη αντίσταση σε σχέση με το θεωρητικό μοντέλο.



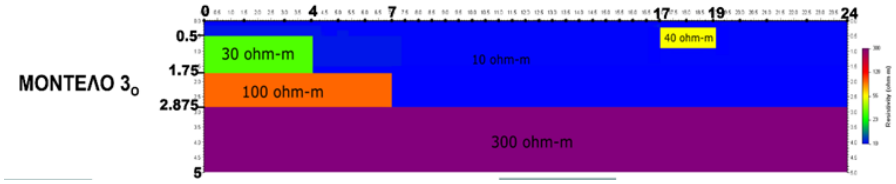
Μοντέλο 2 :

Εξαιρετική απόκριση του μοντέλου παρουσιάζουν όλες οι διατάξεις αραιής και πυκνής κατανομής μικρής και μεγάλης κλίμακας. Εξαίρεση αποτελεί η διπόλου-διπόλου μεγάλης κλίμακας που αδυνατεί να προσεγγίσει το στρώμα του υποβάθρου.



Μοντέλο 3 :

Όλες οι διατάξεις δείχνουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο μικρής όσο με μεγάλης κλίμακας χωρίς θόρυβο. Στα μοντέλα με την προσθήκη θορύβου, το στρώμα του υποβάθρου φαίνεται να παρουσιάζει εναλλαγή στο βάθος ακριβώς κάτω από το σώμα 40 Ω·m. Το ίδιο το σώμα απεικονίζεται ευδιάκριτα σε όλες τις διατάξεις. Η μετάβαση των στρωμάτων σε διαφορετικό βάθος παρουσιάζεται με κλίση. Στις διατάξεις μεγάλης κλίμακας τώρα, η διπόλου-διπόλου αποτυγχάνει και στις δύο κατανομές ηλεκτροδίων ακόμη και στην περίπτωση θορύβου, καθώς δεν απεικονίζει καθόλου το στρώμα του υποβάθρου.

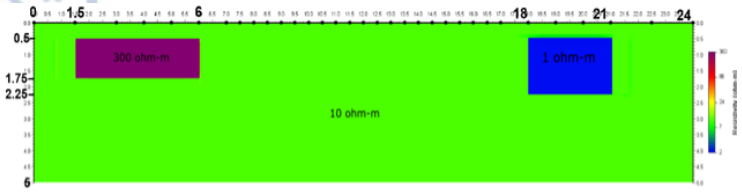


Μοντέλο 4 :

Στο θεωρητικό μοντέλο μικρής κλίμακας όλες οι διατάξεις δουλεύουν μια χαρά εκτός από την εμφάνιση ορισμένων ψευδών δομών. Όλες οι διατάξεις μεγάλης κλίμακας δίνουν επίσης καλά αποτελέσματα, εκτός βέβαια της διπόλου-διπόλου αραιής κατανομής που δεν απεικονίζει το αγώγιμο σώμα ενώ στην πυκνή κατανομή το σώμα απεικονίζεται με πολύ κακή πλευρική και κατακόρυφη ευαισθησία. Το αντιστατικό σώμα 300 Ω·m εμφανίζεται με διαφορετικές διαστάσεις στην διάταξη διπόλου-διπόλου.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γ
Α.Π.Θ.

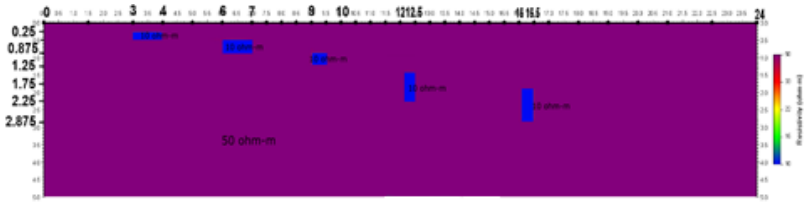
ΜΟΝΤΕΛΟ 4_o



<u>Μοντέλο 5</u> :

Οι δύο κατανομές ηλεκτροδίων της διάταξης διπόλου-διπόλου δίνουν εικόνες καλής κατακόρυφης ανάλυσης. Όλες οι υπόλοιπες διατάξεις απεικονίζουν ορθά τα τρία πρώτα στρώματα αλλά αποτυγχάνουν να δώσουν ακρίβεια στις διαστάσεις των δύο τελευταίων στρωμάτων. Σε μεγάλη κλίμακα τώρα, όλες οι διατάξεις αποτυγχάνουν να δώσουν και αυτές ακριβείς εικόνες, με την πυκνή διάταξη διπόλου-διπόλου να μην γίνεται σαφής ο διαχωρισμός των δύο τελευταίων σωμάτων.

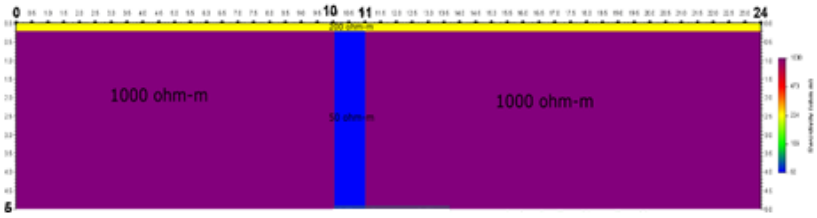
ΜΟΝΤΕΛΟ 5_o



<u>Μοντέλο 6</u> :

Η αγώγιμη ζώνη ρηγμάτωσης απεικονίζεται ικανοποιητικά σε όλες τις διατάξεις μικρής κλίμακας εκτός από το εύρος της σε λίγο μεγαλύτερα βάθη όπου απλώνει. Μεγαλύτερο εύρος παρουσιάζεται στο αντίστοιχο μοντέλο με θόρυβο. Ίδιες απεικονίσεις παρουσιάζουν και οι εικόνες μεγάλης κλίμακας όλων των διατάξεων. Πλήρη αποτυχία σχετικά με το θεωρητικό μοντέλο με την προσθήκη θορύβου εμφανίζει μόνο η πυκνή διάταξη διπόλου-διπόλου που το εύρος της ζώνης αποκτά μεγάλες διαστάσεις.

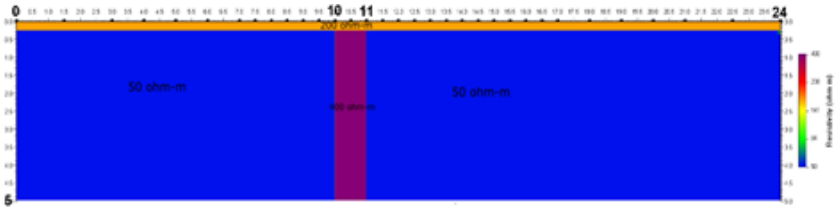
ΜΟΝΤΕΛΟ 6_o



<u>Μοντέλο 7</u>:

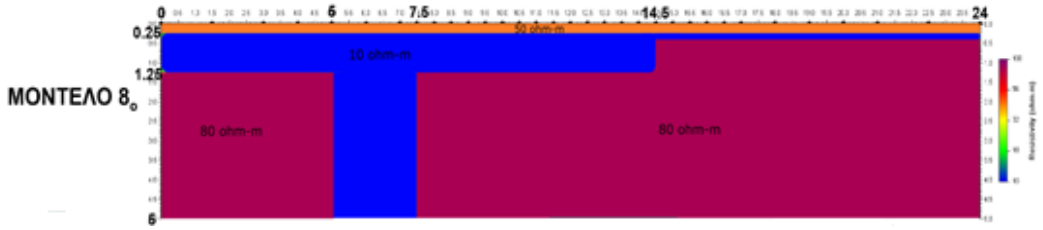
Όλες οι διατάξεις μικρής κλίμακας απεικονίζουν με μεγάλη αξιοπιστία τα όρια της αντιστατικής ζώνης ρηγμάτωσης σε μικρότερα βάθη. Σε μεγαλύτερα βάθη, οι διατάξεις πλήρους βαθμίδας, πλήρους και του βέλτιστου πρωτοκόλλου αστοχούν καθώς η ζώνη φαίνεται να διαχωρίζεται σε δύο τμήματα. Στις διατάξεις αραιής κατανομής λείπει πάλι ο διαχωρισμός του επιφανειακού στρώματος από τον ημιχώρο. Στο μοντέλο μεγάλης κλίμακας ικανοποιητικές εικόνες δίνει <u>μόνο</u> η διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, ενώ για τις υπόλοιπες ισχύει ότι αναφέρθηκε στην μικρή κλίμακα.

ΜΟΝΤΕΛΟ 7_o

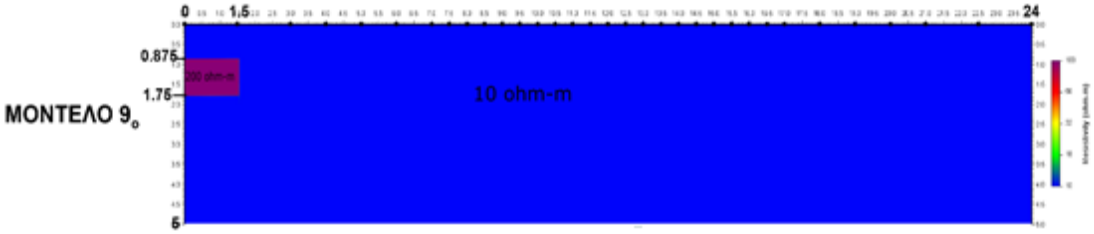


Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Μοντέλο 8:
Στο μοντέλο μικρής κλίμακας, όλες οι διατάξεις παράγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, εκτός την απόκριση του επιφανειακού στρώματος της αραιής διάταξης ηλεκτροδίων. Στην πυκνή κατανομή, η πλήρους εύρους βαθμίδα καθώς και το πλήρες και βέλτιστο πρωτόκολλο παρουσιάζουν τη ζώνη με μια μικρή κλίση. Στο μοντέλο μεγάλης κλίμακας χωρίς την προσθήκη θορύβου, όλες οι διατάξεις παρουσιάζουν ίδια αποτελέσματα με της μικρής κλίμακας. Στην πυκνή διάταξη διπόλου-διπόλου, η ζώνη δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό βάθος με το θεωρητικό μοντέλο. Με την εφαρμογή θορύβου τα συμπεράσματα δεν αλλάζουν, παρά μόνο η διάταξη διπόλου-διπόλου αποτυγχάνει τόσο σε πυκνή, όσο και σε αραιή κατανομή ηλεκτροδίων.



Μοντέλα 9 - 14: Όταν το σώμα βρίσκεται ρηχά, η διάταξη διπόλου-διπόλου αστοχεί καθώς είτε το σώμα εξαφανίζεται (αραιή κατανομή), είτε δεν είναι σαφής ο διαχωρισμός του από τον ημιχώρο (πυκνή κατανομή). Όσο βυθίζεται το σώμα, (στα υπόλοιπα μοντέλα) όλες οι υπόλοιπες διατάξεις απεικονίζουν το σώμα απλά οι πυκνές διατάξεις παρουσιάζουν καλύτερη ευαισθησία στη συνιστώσα του βάθους. Στην περίπτωση προσθήκης θορύβου, οι εικόνες απεικονίζουν αμιγώς το σώμα. Η πλήρης εύρους βαθμίδα φαίνεται πως λειτουργεί εξαιρετικά στην απεικόνιση σωμάτων στα άκρα των τομών ακόμη και σε περιπτώσεις που αυτά τοποθετούνται σε μεγάλο βάθος (Μοντέλα 13 και 14). Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και στις διατάξεις μεγάλης κλίμακας.



Συμπερασματικά, από όλα τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν μπορούν να προκύψουν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα.

- Δεν υπάρχει διάταξη που φαίνεται να δουλεύει καλύτερα. Όλες δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, εκτός της διάταξης διπόλου-διπόλου η οποία αποτυγχάνει σε πλευρική ανάλυση εξαιτίας ίσως του μικρού αριθμού μετρήσεων που πραγματοποιεί.
- Όλες οι υπόλοιπες διατάξεις φαίνεται πως δουλεύουν σωστά. Ακόμη και το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο του Ιακωβιανού πίνακα εξάγει πολύ ικανοποιητικά δεδομένα με πολύ μικρότερο αριθμό μετρήσεων, σημαντικό όταν δεν υπάρχει η ευχέρεια του χρόνου.
- Η εισαγωγή της διάταξης της πλήρους εύρους βαθμίδας (*full-range gradient array*) αυξάνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής στόχων στα άκρα των

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

τομογραφιών. Γενικότερα όμως γνωρίζουμε ότι στόχοι στις άκρες και σε βάθος στις τομογραφίες είναι περιοχές μειωμένης ευαισθησίας και η περιοχή εκεί θεωρείται παρακινδυνευμένη για την ερμηνεία των εικόνων αντιστροφής.

- Και τέλος, η αραίωση ή μείωση των ηλεκτροδίων στις άκρες φαίνεται να παράγει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα με τα πρωτόκολλα της πυκνής κατανομής των ηλεκτροδίων. Στρωματογραφία, στόχοι σε ρηχά στρώματα και σε βάθος απεικονίζονται ικανοποιητικά με τις διατάξεις αραιωμένων ηλεκτροδίων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Πραγματικές μετρήσεις πεδίου

Για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων μέτρησης ειδικής αντίστασης που δημιουργήθηκαν μέσω του αλγορίθμου Longlines_opt2D, Mavros © 2020 και δοκιμάστηκαν σε ένα πλήθος συνθετικών παραδειγμάτων και μοντέλων, απαιτείται η διεξαγωγή πραγματικών μετρήσεων πεδίου.

Το παρόν κεφάλαιο ξεκινάει με την περιγραφή σε βήματα της διαδικασίας που ακολουθείται μέσω βοηθητικών λογισμικών τόσο για την παραμετροποίηση του οργάνου μέτρησης, όσο και για τη λήψη και επεξεργασία των ηλεκτρικών δεδομένων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων μικρής κλίμακας που λήφθηκαν στην περιοχή του Μετεωροσκοπείου Α.Π.Θ, καθώς και κάποια γενικά συμπεράσματα της συγκεκριμένης έρευνας.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο κατασκευάστηκαν πρωτόκολλα μέτρησης διαφορετικής κατανομής ηλεκτροδίων, αραιωμένης και πυκνής κατανομής, για πέντε (5) διαφορετικούς τύπους διατάξεων ηλεκτροδίων. Το σύνολο των πρωτοκόλλων δοκιμάστηκε σε πλήθος συνθετικών μοντέλων για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων. Παρατηρήθηκε γενικά, ότι τόσο οι διατάξεις αραιωμένης κατανομής ηλεκτροδίων, όσο και οι διατάξεις σταθερής ενδιάμεσης απόστασης (πυκνής κατανομής) παρουσιάζουν συνολικά ικανοποιητικές εικόνες αντιστροφής. Ειδικότερα, σχετικά με τον τύπο της διάταξης, τα πρωτόκολλα της *πλήρους εύρους βαθμίδας*, αλλά και της *βέλτιστης διάταξης* παράγουν επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα απεικόνισης της υπεδάφιας κατανομής της ειδικής αντίστασης σε σχέση με τις παραδοσιακές διατάξεις *διπόλου-διπόλου* και *πολλαπλής βαθμίδας* που εφαρμόστηκαν.

Για την ολοκλήρωση μιας γεωφυσικής μελέτης λοιπόν, είναι αναγκαία η διεξαγωγή μετρήσεων υπαίθρου. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται αρχικά, τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθείται στα κατάλληλα λογισμικά για την εισαγωγή των πρωτοκόλλων στο όργανο μέτρησης και την αποθήκευση των δεδομένων με την ολοκλήρωση της έρευνας. Στη συνέχεια, απεικονίζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την πραγματοποίηση μετρήσεων ειδικής αντίστασης μικρής κλίμακας στο χώρο του Μετεωροσκοπείου Α.Π.Θ.

5.2 Λογισμικά Electre Pro και Prosys II της IRIS Instruments

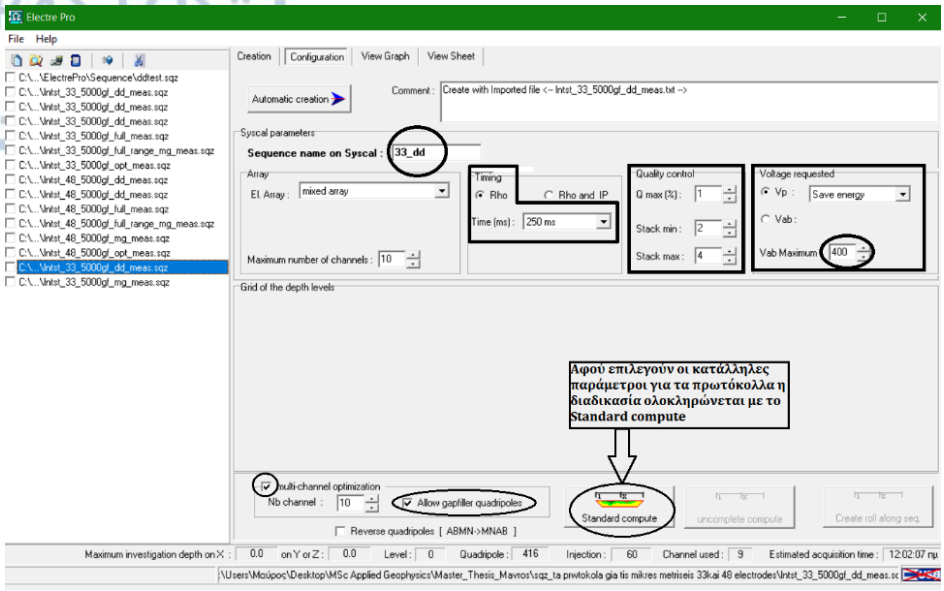
5.2.1 Electre Pro

Το λογισμικό *Electre Pro* της εταιρείας *IRIS Instruments* επιτρέπει τη δημιουργία αλληλουχιών 2D/3D μετρήσεων ειδικής αντίστασης για την εισαγωγή τους στο *SYSCAL Pro*, όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις υπαίθρου.

Τα αρχεία τύπου κειμένου (txt αρχεία) που εξάγονται από τον αλγόριθμο *Longlines_opt2D* (Σχήμα 3.6) χρησιμοποιούνται ώστε να μετατραπούν σε αρχεία κατάλληλα για την εισαγωγή τους στο όργανο μέτρησης και τη διεξαγωγή μετρήσεων ειδικής αντίστασης. Τα βήματα της διαδικασίας επιλογής παραμέτρων στο λογισμικό *Electre Pro* παρουσιάζονται ακολούθως.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γ



Σχήμα 5.1: Διαδικασία επιλογής κατάλληλων παραμέτρων στο λογισμικό Electre Pro της IRIS Instruments.

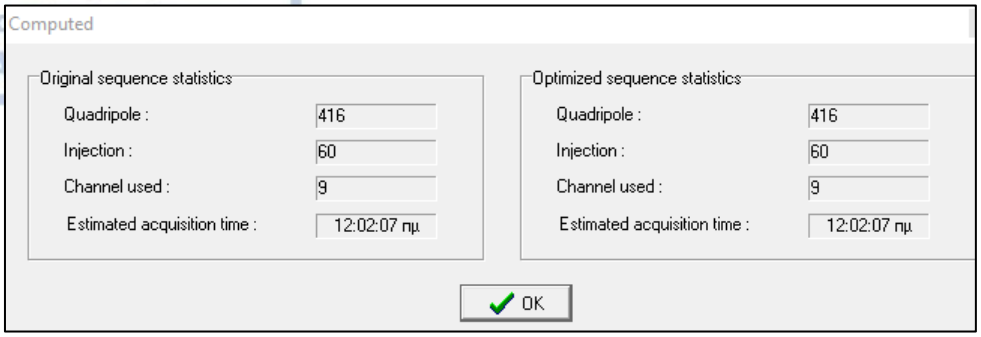
- <u>Sequence name on Syscal</u>: Εδώ καθορίζεται το όνομα κάθε πρωτοκόλλου μέτρησης.
- <u>Electrode Array</u>: Επιλέγεται το mixed array καθώς οι θέσεις των ηλεκτροδίων εισάγονται από αρχείο που έχει ήδη δημιουργηθεί.
- <u>Timing</u>: Επιλέγεται ο τύπος της μέτρησης (φαινόμενη αντίσταση Rho) και ο χρόνος διοχέτευσης ρεύματος κάθε παλμού (Time(ms): 250ms).
- <u>Quality control</u>:
  - Q max (%) ⟶ 1. Είναι ο παράγοντας ποιότητας της μέτρησης.

  Εάν ο παράγοντας Q κατά τη διάρκεια της μέτρησης είναι μικρότερος της καθορισμένης τιμής, η μέτρηση επαναλαμβάνεται μέχρι να συμπληρωθεί ο ελάχιστος αριθμός μετρήσεων (Stack min), αλλιώς η τιμή του παράγοντα μικραίνει έως ότου συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων μέτρησης (Stack max).
  - Stack min (2)
    Stack max (4) ⟶ Είναι ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων της μέτρησης.
- <u>Voltage requested</u>: Επιλέγεται μια σταθερή τιμή τάσης (Vab Maximum= 400 mV).

Το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα για πολυκάναλη βελτιστοποίηση (multi-channel optimization) και περαιτέρω βελτιστοποίηση σε μεγαλύτερο βαθμό προσθέτοντας τετράδες ηλεκτροδίων (gapfiller quadripoles) για την μείωση του χρόνου μέτρησης, οι οποίες αργότερα θα αφαιρεθούν με τη βοήθεια του *Prosys II* που παρέχεται από την ίδια εταιρεία.

Αφού γίνει η επιλογή των παραμέτρων κάθε πρωτοκόλλου για το Syscal Pro, η διαδικασία ολοκληρώνεται με την επιλογή <u>Standard compute</u> όπου εμφανίζεται και ο αριθμός των τετράδων ηλεκτροδίων, των διοχετεύσεων ρεύματος (injections) και των καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν (Σχήμα 5.2).

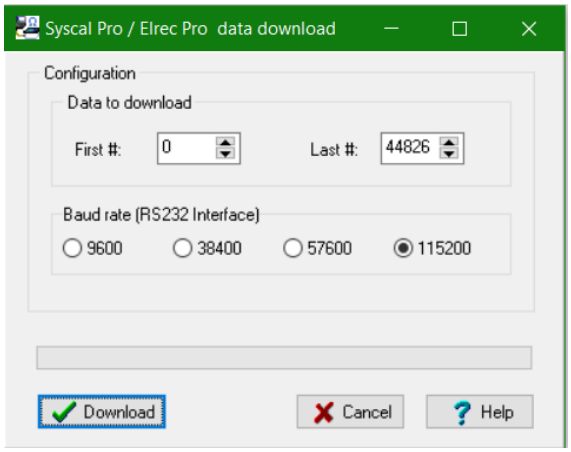
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα



Σχήμα 5.2: Ο αριθμός των συνδυασμών ηλεκτροδίων και των injections του προγράμματος Electre Pro.

5.2.2 Prosys II

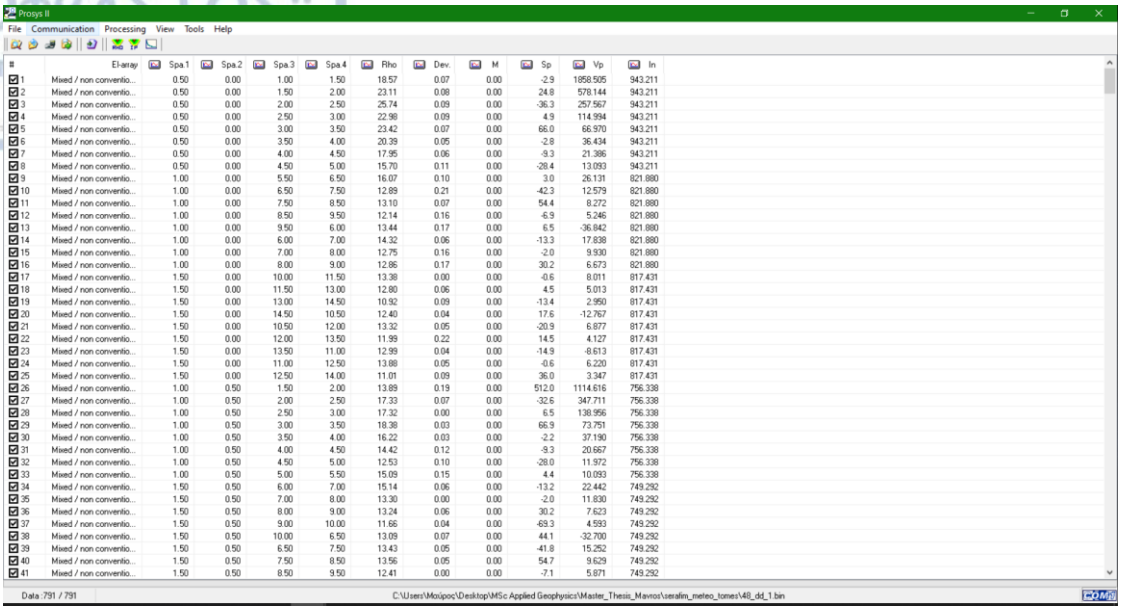
Το λογισμικό *Prosys II* παρέχεται από την εταιρεία *IRIS Instruments* και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των δεδομένων φαινόμενης αντίστασης που λήφθηκαν από το όργανο μέτρησης Syscal Pro.



Σχήμα 5.3: Λήψη δεδομένων από το όργανο μέσω του λογισμικού Prosys II.

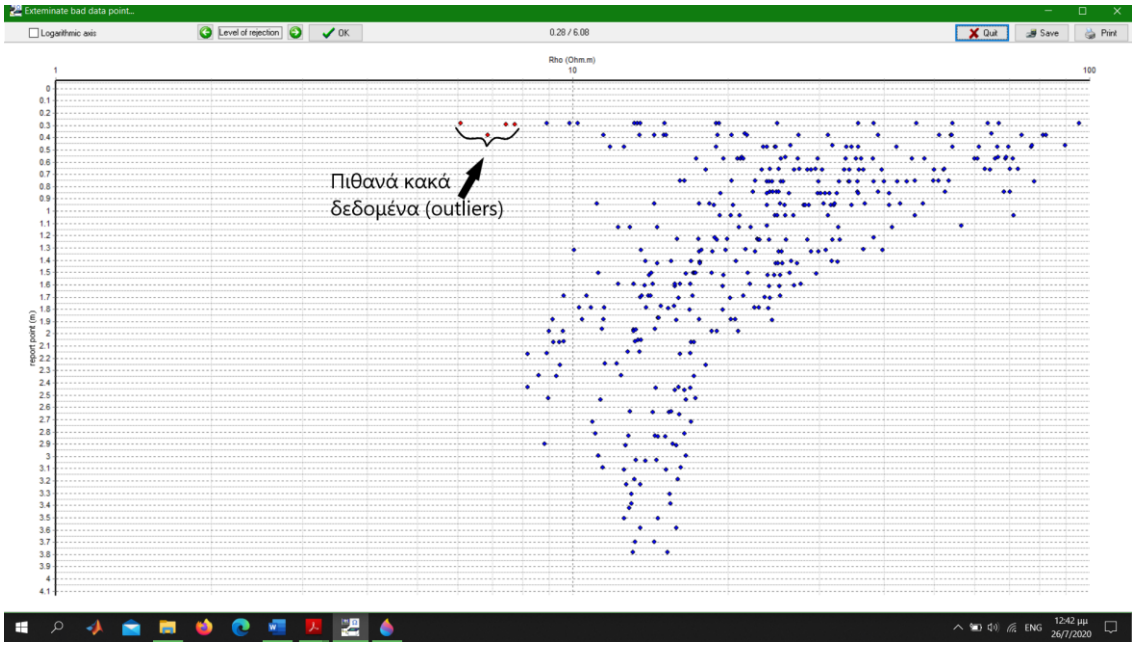
Με τη λήψη των δεδομένων, το πρόγραμμα παρέχει δυνατότητες οπτικοποίησης και επεξεργασίας των δεδομένων φαινόμενης αντίστασης. Η αποθήκευση των αρχείων γίνεται σε δυαδική μορφή (binary), στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία τους και το φιλτράρισμα.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμ



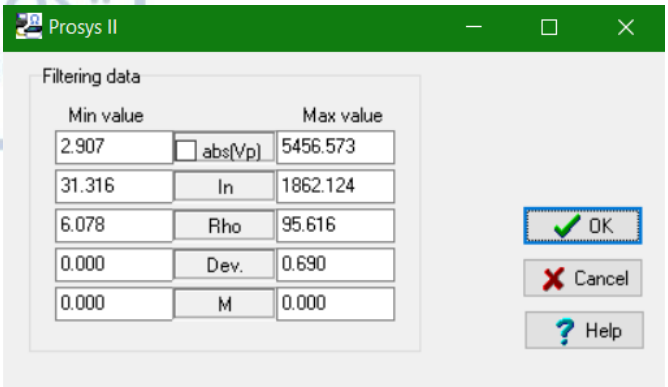
Σχήμα 5.4: Τα δεδομένα των μετρήσεων του Prosys II.

Αρχικά, οι τετράδες ηλεκτροδίων (gap fillers quadripoles) που εισήχθησαν αυτόματα στα πρωτόκολλα μέτρησης για τη μείωση του αριθμού των διεισδύσεων του ρεύματος μέσω του λογισμικού *Electre Pro* θα αφαιρεθούν μέσω του *Processing* → *Reject gapfiller*, όπως και κάποια πιθανά εξωτερικά δεδομένα (outliers) που επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων (Σχήμα 5.5). Επιπλέον φιλτράρισμα μπορεί να εφαρμοστεί στα δεδομένα, καθορίζοντας το εύρος των τιμών παραμέτρων όπως της φαινόμενης αντίστασης, του ρεύματος κ.ά. (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.5: Κατανομή των δεδομένων φαινόμενης αντίστασης και πιθανά κακά δεδομένα (outliers).

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογί
Α.Π.Θ



Σχήμα 5.6: Φιλτράρισμα των δεδομένων μέσω του Prosys II.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την εξαγωγή των δεδομένων των μετρήσεων σε μορφή που υποστηρίζεται από το λογισμικό αντιστροφής DC_2DPro για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος και την μετατροπή των φαινόμενων αντιστάσεων σε πραγματικές τιμές ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

5.3 Μετρήσεις μικρή κλίμακας

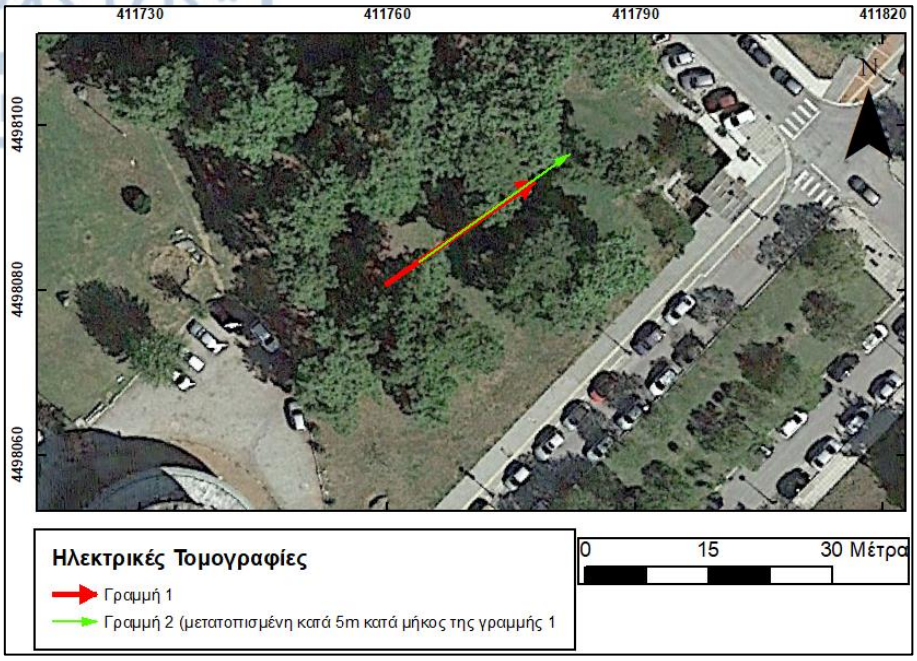
Οι αρχικές μετρήσεις πεδίου μικρής κλίμακας πραγματοποιήθηκαν στο χώρο εντός της πανεπιστημιούπολης του Α.Π.Θ. Πραγματοποιήθηκαν δύο τομές, η **Line-01** και η **Line-02** της οποίας η αρχή, είναι 5 μέτρα μετατοπισμένη από την άκρη της πρώτης τομής. Η μετακίνηση της διάταξης έγινε με στόχο τον έλεγχο της πλευρικής ευαισθησίας των δύο τύπων κατανομών των ηλεκτροδίων για τον εντοπισμό δομών στην περιοχή αραίωσης των ηλεκτροδίων.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι κατανομής ηλεκτροδίων για κάθε διαφορετικό τύπο διάταξης ηλεκτροδίων μέτρησης. Έτσι δημιουργήθηκαν πρωτόκολλα αραιωμένης κατανομής με χρήση 33 ηλεκτροδίων συνολικού μήκους 24 μέτρων και πυκνής κατανομής βασικής απόστασης 0.5 μέτρων με χρήση 48 ηλεκτροδίων συνολικού μήκους 23.5 μέτρων.

Σχήμα 5.7: Φωτογραφίες από τις μετρήσεις του Μετεωροσκοπείου Α.Π.Θ.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γ
Α.



Σχήμα 5.8: Η περιοχή έρευνα του Μετεωροσκοπίου Α.Π.Θ και οι δύο γραμμές έρευνας.

Σχήμα 5.9: Οι δύο τομές ηλεκτρικής τομογραφίας Line-01 και η μετατοπισμένη κατά 5 μέτρα Line-02.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή έρευνας απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1):

	αραιωμένη διάταξη 33 ηλεκτροδίων μήκους 24m					πυκνή διάταξη 48 ηλεκτροδίων μήκους 23.5m				
Είδος διάταξης	dip-dip	multi-grad	full-range grad	full meas	opt meas	dip-dip	multi-grad	full-range grad	full meas	opt meas
LINE-01	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
LINE-02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Σύνολο μετρήσεων	380	1049	3165	3545	1152	710	2230	5876	6586	1128

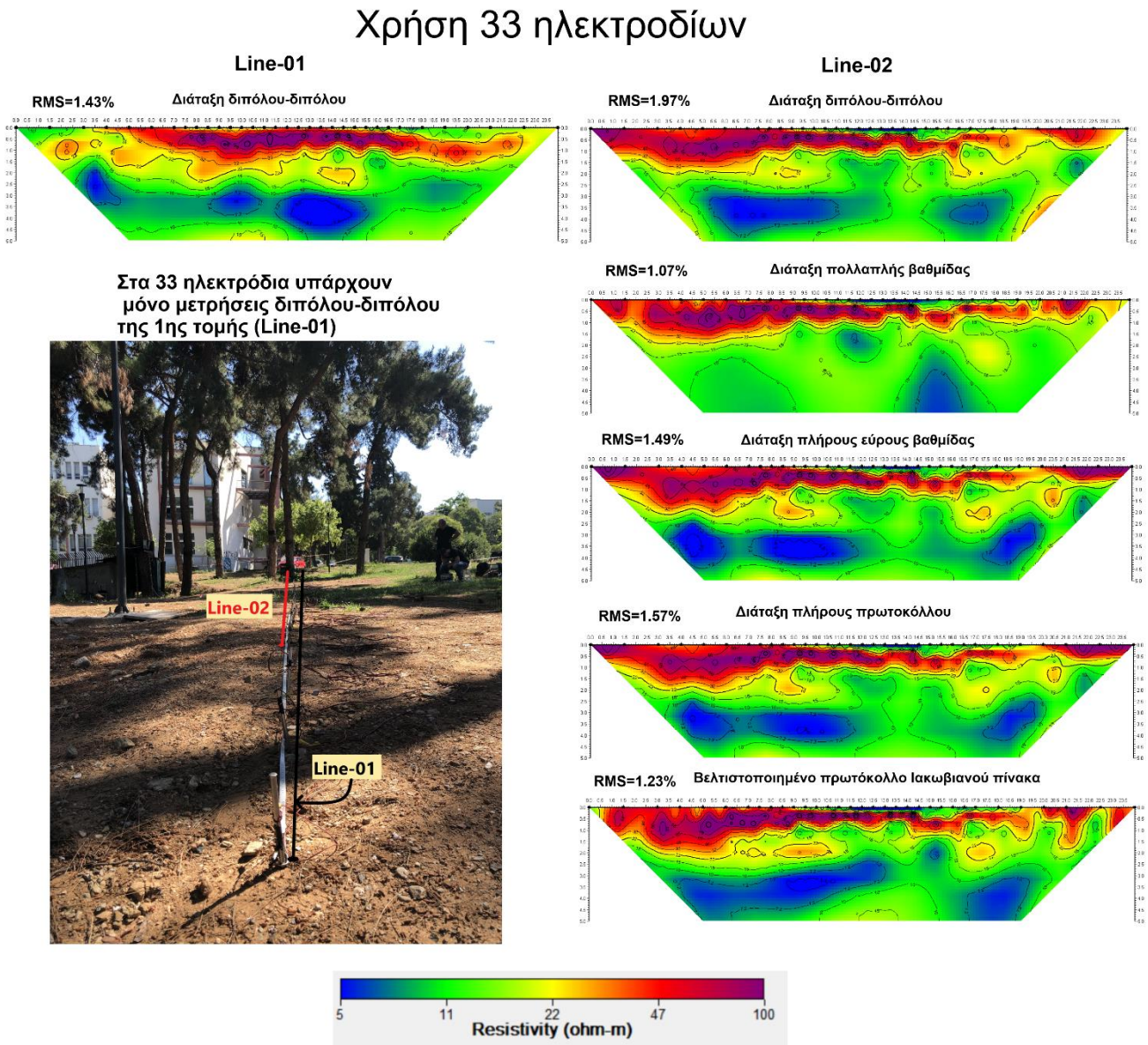
Πίνακας 5.1: Συνολικές μετρήσεις πεδίου μικρής κλίμακας.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 16 μετρήσεις που περιλαμβάνουν τις πέντε (5) διατάξεις ηλεκτροδίων μέτρησης τόσο με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων "απλωμένης"

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

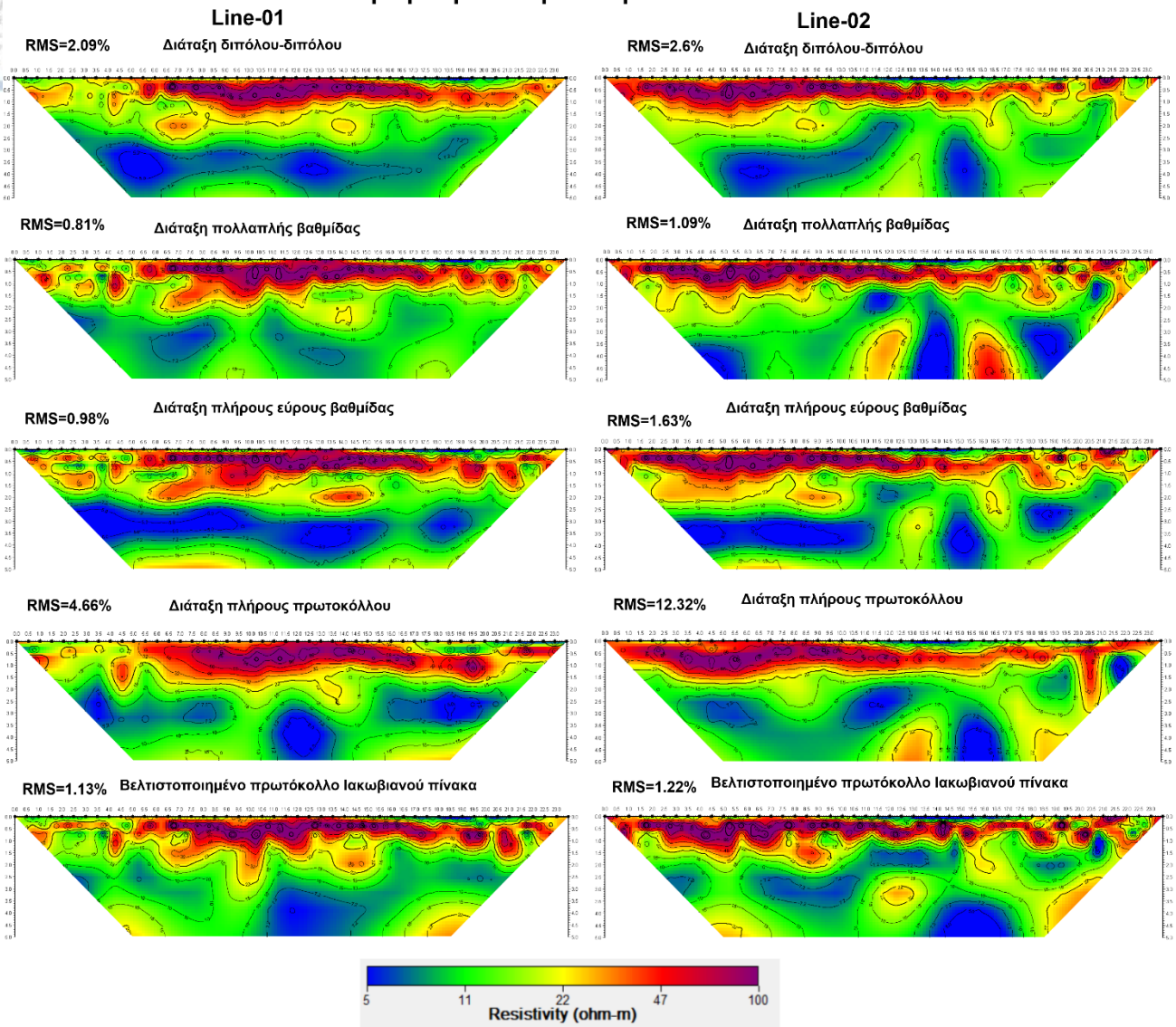
διάταξης όσο και 48 ηλεκτροδίων πυκνής κατανομής, σταθερής ενδιάμεσης απόστασης 0.5 μέτρων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων για τις δύο τομές που πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή.



Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα εικόνων αντιστροφής των δύο τομών (Line-01 και Line-02) μέσω του λογισμικού DC_2DPro με τη χρήση 33 ηλεκτροδίων αραιωμένης διάταξης.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Χρήση 48 ηλεκτροδίων



Σχήμα 5.11: Αποτελέσματα εικόνων αντιστροφής των δύο τομών (Line-01 και Line-02) μέσω του λογισμικού DC_2DPro με τη χρήση 48 ηλεκτροδίων πυκνής κατανομής .

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

5.4 Συμπεράσματα μετρήσεων

Γενικότερα, σε όλες τις εικόνες αντιστροφής παρουσιάζεται μια έντονη στρωματογραφία, καθώς σε μικρά βάθη εντοπίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί υψηλής ειδικής αντίστασης (κόκκινου χρώματος), οι οποίοι υπέρκεινται ενός πολύ αγώγιμου στρώματος (μπλε χρώματος) που εντοπίζεται σε λίγο μεγαλύτερα βάθη (μεγαλύτερα των 2 μέτρων). Παρατηρείται επίσης, μια επιφανειακή αγώγιμη ζώνη, η οποία εκτείνεται από τη θέση $\chi = +14m$ έως και τη θέση $\chi = +23m$ (Line-01). Η ζώνη αυτή εμφανίζεται ευκρινώς και στη δεύτερη τομή (Line-02) φυσικά μετατοπισμένη. Όλες οι αντιστροφές εμφανίζουν χαμηλό σφάλμα RMS.

Δεν παρατηρείται κάποια μεγάλη διαφορά των εικόνων σχετικά με τον τύπο της κατανομής των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε. Στην περίπτωση της πυκνής κατανομής 48 ηλεκτροδίων έχουμε απλώς περισσότερες και πυκνότερες μετρήσεις στις άκρες των ηλεκτρικών τομογραφιών σε σχέση με την αραιωμένη κατανομή 33 ηλεκτροδίων.

Συμπερασματικά, σχετικά με τις διαφορετικές διατάξεις μέτρησης μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το βέλτιστο πρωτόκολλο με βάση τον πίνακα ευαισθησίας (Ιακωβιανός πίνακας), μπορεί να προσεγγίσει σε μεγάλο βαθμό τις εικόνες κατανομής ειδικής αντίστασης των παραδοσιακών διατάξεων μέτρησης. Παρόμοια αποτελέσματα εξάγονται και από το πρωτόκολλο της διάταξης της πλήρους εύρους βαθμίδας (*full-range gradient*) που δημιουργήθηκε για την κάλυψη των περιοχών του υπεδάφιου χώρου στις οποίες αδυνατεί η διάταξη της πολλαπλής βαθμίδας να συγκεντρώσει μετρήσεις. Τέτοιες περιοχές αποτελούν τα άκρα των τομογραφιών.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας σε τομές μεγάλου μήκους. Μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κομμάτια ενδιαφέροντος. Το πρώτο κομμάτι περιλαμβάνει την παραγωγή πρωτοκόλλων μετρήσεων μικρής και μεγάλης κλίμακας, κάνοντας χρήση 33 και 48 ηλεκτροδίων, αραιής και πυκνής κατανομής αντίστοιχα. Το δεύτερο κομμάτι περιλαμβάνει πραγματικές μετρήσεις πεδίου μικρής κλίμακας για τον έλεγχο λειτουργίας των πρωτοκόλλων.

Έτσι, για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκε αλγόριθμος αναπαραγωγής πρωτοκόλλων αραιής και πυκνής κατανομής ηλεκτροδίων για τις διατάξεις

- διπόλου – διπόλου
- πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient)
- πλήρους εύρους βαθμίδας (Zhou 2018)
- πλήρες πρωτόκολλο, αποτελούμενο από διατάξεις διπόλου-διπόλου και πλήρους εύρους βαθμίδας
- βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο με τη μέθοδο του Ιακωβιανού πίνακα (Αθανασίου 2009)

Από την <u>αραίωση ή μείωση των ηλεκτροδίων</u> στα συνθετικά δεδομένα μικρής και μεγάλης κλίμακας προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Στα μοντέλα που γίνεται απεικόνιση στρωματογραφίας, οι διατάξεις αραιής κατανομής ηλεκτροδίων λειτουργούν μια χαρά ακόμα και όταν η εναλλαγή των στρωμάτων βρίσκεται στις άκρες. Παράδειγμα το <u>μοντέλο 3</u> ακόμη και με την εφαρμογή θορύβου.
- Σε μοντέλο με ρηχούς στόχους αριστερά και δεξιά των τομών η αραίωση των ηλεκτροδίων λειτουργεί επίσης άψογα όπως αποδεικνύεται από το <u>μοντέλο 4</u>.
- Σε μοντέλο με βυθιζόμενα σώματα η διαφοροποίηση της κατανομής των ηλεκτροδίων λειτουργεί ικανοποιητικά χωρίς να επηρεάζονται οι εικόνες αντιστροφής της αραιής κατανομής.
- Σε μοντέλα που περιλαμβάνουν ρηξιγενή ζώνη με επιφανειακό στρώμα, η αραίωση των ηλεκτροδίων επηρεάζει μόνο την απεικόνιση του επιφανειακού στρώματος, καθώς φαίνεται να μην διαχωρίζεται από το υποκείμενο στρώμα. Αντιθέτως στις διατάξεις πυκνής κατανομής 48 ηλεκτροδίων, το επιφανειακό στρώμα διαχωρίζεται καθαρά από τα περιβάλλοντα στρώματα. Τέτοιο παράδειγμα αναπαράγεται στο <u>μοντέλο 6 και 7</u>.
- Μοντέλο που περιλαμβάνει στρωματογραφία, ρηξιγενή ζώνη και επιφανειακό στρώμα, η αραίωση αδυνατεί πάλι να απεικονίσει <u>μόνο</u> το διαχωρισμό του επιφανειακού στρώματος ακόμη και στη περίπτωση εφαρμογής θορύβου. <u>(Μοντέλο 8)</u>

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

- Τέλος, σε μοντέλο που το σώμα τοποθετείται στο άκρο της τομής και βυθίζεται σταδιακά, παρατηρείται ότι η μείωση των ηλεκτροδίων παρόλο που απεικονίζει το σώμα, χάνει σε κατακόρυφη ευαισθησία σε σχέση με τα πυκνά ηλεκτρόδια. (Μοντέλα 9 – 14).

Από τις διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτουν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα μικρής και μεγάλης κλίμακας.

- Δεν υπάρχει διάταξη που φαίνεται να δουλεύει καλύτερα. Όλες δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, εκτός της διάταξης διπόλου-διπόλου η οποία αποτυγχάνει σε πλευρική ανάλυση εξαιτίας ίσως του μικρού αριθμού μετρήσεων που πραγματοποιεί.
- Όλες οι υπόλοιπες διατάξεις φαίνεται πως δουλεύουν σωστά. Ακόμη και το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο του Ιακωβιανού πίνακα εξάγει πολύ ικανοποιητικά δεδομένα με πολύ μικρότερο αριθμό μετρήσεων, σημαντικό όταν δεν υπάρχει η ευχέρεια του χρόνου.
- Η εισαγωγή της διάταξης της πλήρους εύρους βαθμίδας (*full-range gradient array*) αυξάνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής στόχων στα άκρα των τομογραφιών. Γενικότερα όμως γνωρίζουμε ότι στόχοι στις άκρες και σε βάθος στις τομογραφίες είναι περιοχές μειωμένης ευαισθησίας και η περιοχή εκεί θεωρείται παρακινδυνευμένη για τις εικόνες αντιστροφής.
- Η αραίωση ή μείωση των ηλεκτροδίων στις άκρες φαίνεται να παράγει εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα με τα πρωτόκολλα της πυκνής κατανομής των ηλεκτροδίων. Στρωματογραφία, στόχοι σε ρηχά στρώματα και σε βάθος απεικονίζονται ικανοποιητικά με τις διατάξεις αραιωμένων ηλεκτροδίων.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Μελλοντική έρευνα

Με τη διεκπεραίωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας και από τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που προέκυψαν, δημιουργήθηκαν νέες ιδέες για μελλοντική έρευνα πάνω στην μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Πρωταρχικό μέλημα αποτελεί η διεξαγωγή ηλεκτρικών τομογραφιών μεγάλου μήκους χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα μεγάλης κλίμακας που έχουν δημιουργηθεί. Οι προγραμματισμένες μετρήσεις ακυρώθηκαν λόγω προβλημάτων εξοπλισμού και θεμάτων μετακίνησης.

Πολύ σημαντική εξέλιξη θα μπορούσε να είναι η δημιουργία τρισδιάστατης χαρτογράφησης με τη διεξαγωγή πολλών παράλληλων δισδιάστατων ηλεκτρικών τομογραφιών για τον έλεγχο της διαφοροποίησης των δισδιάστατων (2D) εικόνων αντιστροφής στην ύπαρξη τρισδιάστατων (3D) δομών.

Τέλος, για τον πλήρη έλεγχο των πρωτοκόλλων θα ήταν καλό να δοκιμαστούν σε πληθώρα εφαρμογών πεδίου για την καλύτερη και συνεχή αξιολόγηση της απόδοσής τους, ανακαλύπτοντας πιθανά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Βιβλιογραφία

Aitken, M. (1974). Physics and archaeology. Clarendon Press, Oxford.

Athanasiou, E.N., Tsourlos, P.I. and Vargemezis G.N. (2007c). Optimizing electrical resistivity array configurations for hydrogeological studies. In Proceedings, TIAC'07 International Conference on Technology of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers, Almeria, Spain, 16-19 October 2007.

Atzemoglou, A., Tsourlos, P. and Pavlides, S. (2003). Investigation of the Tectonic Structure of the NW Part of the Amynteon Basin (NW Greece) by means of a Vertical Electrical Sounding (VES) survey. *Journal of the Balkan Geophysical Society, vol. 6 (4), 188-202.*

Aubert, M., Camus, G., and Fournier, C. (1984). Resistivity and magnetic surveys in groundwater prospecting in volcanic areas - case history Maar of Beanit, Puy de Dome, France. Geophysical prospecting, 32, 554-563.

Auken, E., Pellerin, L., Christensen, N. B., & Sørensen, K. (2006). A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. *Geophysics*, *71*(5), G249-G260.

Barker, R. D. (1981). The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. *Geophysical prospecting*, 29(1), 128-143.

Barker, R. D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, *54*(8), 1031-1037.

Bauman, P. (2005). 2-D resistivity surveying for hydrocarbons—a primer. *CSEG Recorder*, *30*(4), 25-33.

Beresnev, I. A., Hruby, C. E., & Davis, C. A. (2002). The use of multi-electrode resistivity imaging in gravel prospecting. *Journal of Applied Geophysics*, *49*(4), 245-254.

Butler, D. K., & Llopis, J. L. (1990). Assessment of anomalous seepage conditions. *Investigations in geophysics*, (5), 153-73.

Çağlar, İ., & Duvarci, E. (2001). Geoelectric structure of inland area of the Gökova rift, southwest Anatolia and its tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, *31*(1), 33-48.

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Chambers, J. E., Kuras, O., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., & Hollands, J. (2006). Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, *71*(6), B231-B239.

Chambers, J. E., Wilkinson, P. B., Wardrop, D., Hameed, A., Hill, I., Jeffrey, C., ... & Gunn, D. A. (2012). Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, *177*, 17-25.

Coggon, J.H. (1971). Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method: Geophysics, 36, 132-155.

Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, *52*(3), 289-300.

Cook, K. L., & Van Nostrand, R. G. (1954). Interpretation of resistivity data over filled sinks. *Geophysics*, *19*(4), 761-790.

Dahlin, T., Johansson, S., & Landin, O. (1994, March). Resistivity surveying for planning of Infrastructure. In *7th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems* (pp. cp-208). European Association of Geoscientists & Engineers.

Dahlin, T., & Owen, R. (1998, September). Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe. In *4th EEGS Meeting* (pp. cp-43). European Association of Geoscientists & Engineers.

Dahlin, T. (2001). Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, *48*(1), 181-187.

Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, *27*(9), 1019-1029.

Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, *52*(5), 379-398.

Dahlin, T., & Zhou, B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, *4*(2), 113-123.

deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, *55*(12), 1613-1624.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμ. Γεωλ.
Α.Π.Θ

Dey, A., & Morrison, H. F. (1979). Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, *27*(1), 106-136.

Dey, A., & Morrison, H. F. (1979). Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, *44*(4), 753-780.

Edwards, L. S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, *42*(5), 1020-1036.

Ellis, R. G., & Oldenburg, D. W. (1994). Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International*, *116*(1), 5-11.

Evjen, H. M. (1938). Depth factors and resolving power of electrical measurements. *Geophysics*, *3*(2), 78-95.

Fikos, I., Vargemezis, G., Tsokas, G. N., Hatzidimitriu, P., & Dimopoulos, G. (2002). Diachronic study of free aquifers using the method of electric tomography: a case study in northern Greece. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, *7*, 185-193.

Flathe, H. (1955). Possibilities and limitations in applying geoelectrical methods to hydrogeological problems in the coastal areas of North West Germany. *Geophysical prospecting*, *3*(2), 95-109.

Fox, R. C., Hohmann, G. W., Killpack, T. J., & Rijo, L. (1980). Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys. *Geophysics*, *45*(1), 75-93.

Franklin, J. N. (1970). Well-posed stochastic extensions of ill-posed linear problems. *Journal of mathematical analysis and applications*, *31*(3), 682-716.

Giancoli, D. (2012). Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς. 4η Έκδοση Copyright© 2012, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ. ISBN: 978-960-418-376-0 (τόμος Β').

Golub, G. H., & Reinsch, C. (1971). Singular value decomposition and least squares solutions. In *Linear Algebra* (pp. 134-151). Springer, Berlin, Heidelberg.

Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, *29*(3-4), 211-226.

Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1994). Electrical imaging in archaeology. *Journal of Archaeological science*, *21*(2), 153-158.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμ. Γεωλ.
Α.Π.Θ

Habberjam, G. M. (1975). Apparent resistivity, anisotropy and strike measurements. *Geophysical prospecting*, *23*(2), 211-247.

Hesse, A., Jolivet, A., & Tabbagh, A. (1986). New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *Geophysics*, *51*(3), 585-594.

Hohmann, G. W. (1988). Numerical modeling for electromagnetic methods of geophysics. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, *1*, 313-363.

Holcombe, H. T., & Jiracek, G. R. (1984). Three-dimensional terrain corrections in resistivity surveys. *Geophysics*, *49*(4), 439-452.

Höök, M. (2010). *Coal and oil: The dark monarchs of global energy: understanding supply and extraction patterns and their importance for future production* (Doctoral dissertation, Acta Acta Universitatis Upsaliensis).

IRIS Instruments. (n.d.) Syscal Pro Characteristics (http://www.iris-instruments.com/syscal-prosw.html).

Jones, G. M., & Cassidy, N. J. (2007, September). Imaging the ROOT Cause of Subsidence Using Electrical Resistivity Tomography. In *Near Surface 2007-13th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (pp. cp-30). European Association of Geoscientists & Engineers.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons.

Kim, J.H., (2013). DC2DPro – User's Manual, KIGAM, KOREA.

Koefoed, O. (1979) Geosounding Principles 1: Resistivity Sounding Measurements. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Lanczos, C. (1996). *Linear differential operators*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Lawson, C. L., & Hanson, R. J. (1995). *Solving least squares problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, *2*(2), 164-168.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Lines, L. R., & Treitel, S. (1984). A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical prospecting*, *32*(2), 159-186.

Loke, M. H., & Barker, R. D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, *60*(6), 1682-1690.

Loke, M.H. (2000). Topographic modelling in resistivity imaging inversion. Proceedings *on the 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.*

Loke, M. H., Acworth, I., & Dahlin, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Exploration geophysics*, *34*(3), 182-187.

Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, *11*(2), 431-441.

McNeill, J.D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. *Techical Note TN-6. Geonics Ltd., 1745, Canada.*

Mufti, I. R. (1976). Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysics*, *41*(1), 62-78.

Müller, K., Vanderborght, J., Englert, A., Kemna, A., Huisman, J. A., Rings, J., & Vereecken, H. (2010). Imaging and characterization of solute transport during two tracer tests in a shallow aquifer using electrical resistivity tomography and multilevel groundwater samplers. *Water Resources Research*, *46*(3).

Noel, M., & Xu, B. (1991). Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, *107*(1), 95-102.

Ogilvy, R. D., Meldrum, P. I., Kuras, O., Wilkinson, P. B., Chambers, J. E., Sen, M., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., Jorreto, S., Frances, I. & Tsourlos, P. (2009). Automated monitoring of coastal aquifers with electrical resistivity tomography. *Near Surface Geophysics*, *7*(5-6), 367-376.

Olayinka, A., & Barker, R. (1990). Borehole Siting in Crystalline Basement Areas of Nigeria with a Microprocessor-Controlled Resistivity Traversing System. *Groundwater*, *28*(2), 178-183.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Olesen, O., Henkel, H., Lile, O. B., Mauring, E., & Rønning, J. S. (1992). Geophysical investigations of the Stuoragurra postglacial fault, Finnmark, northern Norway. *Journal of Applied Geophysics*, *29*(2), 95-118.

Orlando, L., Piro, S., & Versino, L. (1987). Location of sub-surface geoelectric anomalies for archaeological work: a comparison between experimental arrays and interpretation using numerical methods. *Geoexploration*, *24*(3), 227-237.

Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N., & Sarris, A. (2006). Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, *13*(3), 163-181.

Papadopoulos N. (2007). Algorithm development for the 3-D inversion of geoelectrical data coming from archaeological areas. *Ph.D. Thesis, Aristotle University of Thessaloniki.*

Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

Rijo, L., Pelton, W. H., Feitosa, E. C., & Ward, S. H. (1977). Interpretation of apparent resistivity data from Apodi valley, Rio Grande do Norte, Brazil. *Geophysics*, *42*(4), 811-822.

Rodgers R.B. and Kean W.F. (1980). Monitoring ground-water contamination at a y ash deposit site using surface electrical resistivity methods. *Ground Water, 18, (5), 472-478.*

Roy, A., & Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, *36*(5), 943-959.

Roy, A. (1972). Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, *20*(2), 329-340.

Rücker, C., Günther, T., & Spitzer, K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography—I. Modelling. *Geophysical Journal International*, *166*(2), 495-505.

Rucker, D. F., Loke, M. H., Levitt, M. T., & Noonan, G. E. (2010). Electrical-resistivity characterization of an industrial site using long electrodes. *Geophysics*, *75*(4), WA95-WA104.

Sahbi, H., Jongmans, D., & Charlier, R. (2003). Theoretical study of slope effects in resistivity surveys and applications. *Geophysical prospecting*, *45*(5), 795-808.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Serway, P. A., & Jewett, J. W. (2013). Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς-Ηλεκτρισμός και Μαγνητισμός, Φως και Οπτική, Σύγχρονη Φυσική. Ελληνική Έκδοση, Copyright© 2013, Εκδόσεις Κλειδάριθμος. ISBN: 978-960-461-509-4.

Smith, D. L. (1986). Application of the pole-dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways. *Geophysics*, *51*(3), 833-837.

Strang, G., Strang, G., Strang, G., & Strang, G. (1993). *Introduction to linear algebra* (Vol. 3). Wellesley, MA: Wellesley-Cambridge Press.

Stummer, P., Maurer, H., & Green, A. G. (2004). Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, *69*(1), 120-139.

Szymanski J. and Dittmer J. (1992) Inversion of archaeological magnetic survey data using the maximum entropy method: Preliminary Results. *Monograph on Geophysical Data Inversion in Archaeological Site Investigation, Vieweg Verlag.*

Tagg, C.F. (1964). Earth Resistances. Pitman Publishing Company, New York.

Thanassoulas, C., Tsokas, G. N., & Kolios, N. (1987). Geophysical investigations in the geothermal field in the Delta of the Nestos river (northern Greece). *Geothermics*, *16*(1), 17-26.

Tikhonov A.N. (1963). Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. *Soviet Mathematics, 4, 1035-1038.*

Tikhonov A.N. and Glasko V.B. (1965). Application of a regularization method to nonlinear problems. *J.Comp. Math. and Math. Physics, 5, no. 3.*

Tsokas, G. N., & Rocca, A. C. (1987). Field investigation of a Macedonian tumulus by resistivity soundings. *Geoexploration*, *24*(2), 99-108.

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

Tsourlos P., Szymanski J. and Tsokas G. (1999). The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics, 64, 1357-1363.*

Tsourlos, P. (2004). Inversion of Electrical Resistivity Tomography Data Deriving from 3D Structures. Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVI, Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Van, G. P., Park, S. K., & Hamilton, P. (1992, April). Use of resistivity monitoring systems to detect leaks from storage ponds. In *5th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems* (pp. cp-210). European Association of Geoscientists & Engineers.

Van Dam, J. C. (1976). Possibilities and limitations of the resistivity method of geoelectrical prospecting in the solution of geo-hydrological problems. *Geoexploration*, *14*(3-4), 179-193.

Vandenberghe J. (1982). Geoelectric investigations of a fault system in quartenary deposits. *Geophysical Prospecting, 42, 977-991.*

Ward, S. (1989). Resistivity and Induced Polarization Methods: in Investigations in Geophysics. No 5, Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. I, ed. S. Ward, SEG, Tusla, 147-189.

Wilkinson, P. B., Chambers, J. E., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., & Caunt, S. (2006). Optimization of array configurations and panel combinations for the detection and imaging of abandoned mineshafts using 3D cross-hole electrical resistivity tomography. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, *11*(3), 213-221.

Wright P.M., Ward S.H., Ross H.P. and West R.C. (1985). State-of-the-art geophysical exploration for geothermal resources. *Geophysics, 50, 2666-2699.*

Xu, B., & Noel, M. (1993). On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophysical Prospecting*, *41*(6), 791-801.

Zhou, B. (2018). Electrical Resistivity Tomography: A Subsurface-Imaging Technique. In *Applied geophysics with case studies on environmental, exploration and engineering geophysics*. IntechOpen.

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

Βλάχος, Δ., 2015. *Βασικά στοιχεία ηλεκτρομαγνητισμού*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: http://hdl.handle.net/11419/5039

Λούης, Ι. (2004). Εισαγωγικά Μαθήματα στην Διερευνητική Γεωφυσική. *Σημειώσεις μαθήματος.* Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστημίου Αθήνας.

Παρουσιάσεις μαθήματος Η/Μ μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, Α.Π.Θ.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης