Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Γεωφυσικής

Αντιστροφή Βυθοσκοπήσεων Επαγόμενης Πόλωσης στο Πεδίο των Χρόνων

Time Domain Inversion of Induced Polarization Sounding Data

Κατσάρας Γεώργιος
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

2020

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ΚΑΤΣΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΦΥΣΙΚΟΣ

Αντιστροφή Βυθοσκοπήσεων Επαγόμενης Πόλωσης στο Πεδίο των Χρόνων

Υποβλήθηκε στον Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος "Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία " με ειδίκευση στην "Εφαρμοσμένη Γεωφυσική"

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 15 Δεκεμβρίου 2020.

Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Παναγιώτης Τσούρλος (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής Γεώργιος Βαργεμέζης (Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Καθηγητής Κωνσταντίνος Παπαζάχος (Μέλος Συμβουλευτικής Επιτροπής)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

© Κατσάρας Γεώργιος, 2020
All rights reserved.

Αντιστροφή Βυθοσκοπήσεων Επαγόμενης Πόλωσης στο Πεδίο των Χρόνων, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Στον Τομέα Γεωφυσικής,

που μου έδωσε τη χαρά να ασχοληθώ με την επιστήμη

μετά από 30 χρόνια.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον καθηγητή μου Παναγιώτη Τσούρλο για τη συνεχή υποστήριξή του και την καθοδήγησή του κατά τις μεταπτυχιακές μου σπουδές και κατά την εκπόνηση της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα δύο μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γεώργιο Βαργεμέζη και τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Παπαζάχο για την ενθάρρυνσή τους και τη βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των Μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το Διδακτικό Προσωπικό του Τομέα Γεωφυσικής για τη θετική τους στάση και την πρόθυμη βοήθειά τους σε οποιοδήποτε πρόβλημα αντιμετώπισα.

Και τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου στο Μεταπτυχιακό Τμήμα για την αντιμετώπισή μου ως ένας από αυτούς παρόλη τη μεγάλη διαφορά ηλικίας. Χωρίς την αποδοχή τους οι μεταπτυχιακές μου σπουδές θα ήταν πολύ λιγότερο ευχάριστες.

Ευχαριστίες αναλογούν και στα μέλη της οικογένειάς μου για την υποστήριξή τους και την ανοχή τους στις περιόδους που αναγκαστικά τους παραμέλησα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρω ότι η εργασία μου αποτέλεσε τη συνέχεια και, με κάποιο τρόπο, συνδυασμό των διατριβών της Ουρανίας Πατσιά με τίτλο «Laterally Constrained Inversion of Electrical Resistivity Tomography Data» και του Αριστείδη Νιβορλή με τίτλο «Processing and Modeling of Induced Polarization Data" και είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στην Ουρανία για τμήματα κώδικα που μου διέθεσε με μεγάλη προθυμία βοηθώντας με να πάω παραπέρα χωρίς να επαναλαμβάνω εργασία που η ίδια έκανε.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

SUMMARY

The present thesis focuses on the development of Time Domain Inversion techniques of Induced Polarization Sounding Data (1D-TDIP).

The developed algorithms are based on the use of the smoothness-constrained inversion to find the model correction. The 1D VES forward problem calculated using the digital linear filtering method.

The basic principles of the induced polarization method are introduced and the solution to the forward problem for a 1D-time domain IP sounding is solved using the Pelton equation while a new variable of IP resistance is constructed.

The perturbation technique was used to calculate the Jacobian matrix for the total system, whenever it was needed. The software was developed using MATLAB.

Two inversion techniques were tested for the 1D-TDIP data:

a) The first approach involved the distinct inversion of the VES data for each time window and the subsequent creation of chargeability curves for each layer of the inverted model from which the Cole Cole parameters are extracted using the Gauss Newton method.

b) The second approach involves the direct inversion of all TD induced polarization data including also the DC measurements. All Cole-cole and resistivity parameters of all layers are now considered to be the unknown parameter vector.

Test with the distinct inversion method, it was observed that there is a dependence of the result on the initial values of the Cole Cole parameters given to start the Gauss Newton method. For this reason, an improved empirical method was developed, based on the shape of the TD-IP curves, in which the Gauss Newton method is repeated with corrected initial values, giving a final solution which is less dependent on the initial parameter values.

The performance and effectiveness of the proposed algorithms was checked using synthetic data produced from realistic models and real field data. The evaluation shows that the method with direct inversion of all data is effective with a smaller overall error than the other inversion method but does not always achieve a more accurate reconstruction of the model.

The distinct inversion method with the improvement for non-dependence on initial variable values is effective in perfect synthetic data but has difficulty finding a solution when an error of more than 3% is added. In fact, in synthetic data where an error of 6% was added, it cannot find a solution. It also presents similar issues when applied in real data.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

The method of distinct inversion without the improvement of the intimal values can deal with synthetic data, which suffer from high-level noise, but in some cases, it cannot converge to a reliable solution.

For real data, the method of direct inversion is generally more robust, but still there is a possibility that it cannot reach to a reliable inverted model.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στην ανάπτυξη τεχνικών εξομαλυμένης αντιστροφής στο Πεδίο του Χρόνου των δεδομένων βυθοσκόπησης επαγόμενης πόλωσης (1D-TDIP).

Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιούν τη μέθοδο της εξομαλυμένης αντιστροφής για την εύρεση της διόρθωσης του μοντέλου. Η λύση του 1-D ευθέος προβλήματος για μία βυθοσκόπηση υπολογίζεται με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου των φίλτρων.

Όσον αφορά στο φαινόμενο επαγόμενης πόλωσης, αρχικά περιγράφεται το φαινόμενο και ορίζονται χαρακτηριστικά μεγέθη αυτού. Η λύση του ευθέος προβλήματος για μία βυθοσκόπηση υπολογίζεται με την εξίσωση Pelton ενώ κατασκευάζεται μία νέα μεταβλητή αυτή της αντίστασης IP.

Για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα, όποτε αυτός χρειάστηκε, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική διαταραχών (perturbation technique). Το λογισμικό αναπτύχθηκε στην ανώτερη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Οι μέθοδοι που ελέγχθηκαν για την αντιστροφή των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης μίας ηλεκτρικής βυθοσκόπησης ήταν δύο: α) η διακριτή αντιστροφή των δεδομένων της βυθοσκόπησης για κάθε χρονικό παράθυρο, η δημιουργία καμπυλών εκφόρτισης για κάθε στρώμα της μελετώμενης δομής και η εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole από κάθε καμπύλη εκφόρτισης με τη μέθοδο Gauss Newton, β) η απευθείας αντιστροφή όλων των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης συμπεριλαμβανομένων και όλων των DC δεδομένων μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τελικό εξαγόμενο τις παραμέτρους Cole Cole όλων των στρωμάτων της μελετώμενης δομής καθώς και των τιμών της DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των στρωμάτων αυτών, που είναι μια πρόταση δική μας.

Για τη μέθοδο διακριτής αντιστροφής παρατηρήθηκε ότι υπάρχει εξάρτηση του αποτελέσματος από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων Cole Cole που δίνονται για να ξεκινήσει η μέθοδος Gauss Newton. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μία μέθοδος βελτίωσης, που προέκυψε από την εμπειρική παρατήρηση, με την οποία η μέθοδος Gauss Newton επαναλαμβάνεται με διορθωμένες αρχικές τιμές δίνοντας τελική λύση ανεξάρτητη από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων.

Η επίδοση και η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων ελέγχεται χρησιμοποιώντας συνθετικά αλλά και πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πεδίο έρευνας. Με μοντελοποίηση παράχθηκαν τα συνθετικά δεδομένα για ρεαλιστικά μοντέλα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Η αξιολόγηση δείχνει ότι η μέθοδος με απευθείας αντιστροφή όλων των συνθετικών δεδομένων είναι αποτελεσματική με μικρότερο γενικά σφάλμα από την έτερη μέθοδο αντιστροφής αλλά δεν πετυχαίνει πάντα πιο ακριβή ανακατασκευή του μοντέλου. Η μέθοδος διακριτής αντιστροφής με τη βελτίωση για μη εξάρτηση από αρχικές τιμές μεταβλητών είναι αποτελεσματική σε τέλεια συνθετικά δεδομένα αλλά εμφανίζει δυσκολία εύρεσης λύσης όταν προστίθεται σφάλμα πάνω από 3%. Μάλιστα σε συνθετικά δεδομένα όπου προστέθηκε σφάλμα 6% δεν δύναται να εμφανίσει λύση. Η μέθοδος διακριτής αντιστροφής χωρίς τη βελτίωση ανταπεξέρχεται σε συνθετικά δεδομένα με μεγαλύτερο θόρυβο αλλά και εδώ μπορεί να παρουσιαστεί αδυναμία εύρεσης λύσης.

Στα πραγματικά δεδομένα μικρότερο σφάλμα παρουσιάζει γενικά η μέθοδος της απευθείας αντιστροφής όλων των δεδομένων αλλά για την ακρίβεια των παραμέτρων Cole Cole που ανακτά υπάρχουν αρκετές επιφυλάξεις λόγω της συμπεριφοράς της μεθόδου στα συνθετικά δεδομένα με προστιθέμενο θόρυβο.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων xiv

Κατάλογος Σχημάτων xv

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Κίνητρα και στόχοι αυτής της διπλωματικής εργασίας 1

1.2 Δομή αυτής της διπλωματικής εργασίας 2

2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ... 5

2.1 Διασκόπηση του εδάφους 5

2.2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης 6

2.2.1 Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων – Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση 7

2.2.2 Όργανα μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 11

2.3 Ευθύ πρόβλημα DC 12

2.4 Διαδικασία αντιστροφής 13

2.4.1 Προβλήματα στην αντιστροφή 14

2.4.2 Ιακωβιανός Πίνακας 14

2.5 Μέθοδοι αντιστροφής 16

2.5.1 Αντιστροφή περιορισμένη λόγω εξομάλυνσης (Occam) 17

2.6 Μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης (Induced Polarization -IP) 21

2.6.1 Φορτιστικότητα (Chargeability) 21

2.6.2 Μοντελοποίηση Επαγόμενης Πόλωσης (IP) 23

2.6.3 Μοντελοποίηση Επαγόμενης Πόλωσης στο Πεδίο του Χρόνου (TDIP) ... 23

2.6.4 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP 23

2.6.5 Παράμετροι Cole Cole 24

2.6.6 Εφαρμογές, Πλεονεκτήματα, Μειονεκτήματα Μεθόδου Επαγόμενης Πόλωσης 24

2.7 Επίλυση Ευθέος Προβλήματος σε 1D TDIP 25

2.8 Μέθοδοι Αντιστροφής στην Επαγόμενη Πόλωση 29

2.8.1 Αντιστροφή Δεδομένων Επαγόμενης Πόλωσης IP 29

2.8.2 Αντιστροφή Χρονομεταβλητών Δεδομένων Επαγόμενης Πόλωσης TD IP 31

2.8.3 Αντιστροφή Χρονομεταβλητών Συχνοτικών Δεδομένων Επαγόμενης Πόλωσης (Inversion of Time-domain SIP Data) 36

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΜΕΣΗΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 1D – TDIP 37
3.1 Υπάρχουσες μέθοδοι αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP) 37
3.1.1 Μέθοδοι Διακριτής αντιστροφής για κάθε χρονοπαράθυρο. 37
3.1.2 Μέθοδος ΚΙΜ Συνολικής Αντιστροφής με Περιορισμό Εξομάλυνσης Χώρου και Χρόνου 39
3.1.3 Μέθοδος Αντιστροφής Διαφοράς 41
3.1.4 Διάφορες Μέθοδοι αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης στο πεδίο του χρόνου 44
3.2 Ο Αλγόριθμος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα. 48
3.2.1 Μέθοδος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα 48
3.2.2 Μέθοδος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα και για τις DC μετρήσεις. 57
3.3 Συνθετικά δεδομένα 64
3.3.1 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α 64
3.3.2 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Δεδομένα Α με 3% προστιθέμενο θόρυβο 69
3.3.3 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% προστιθέμενο θόρυβο 73
3.3.4 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% προστιθέμενο θόρυβο 77
3.3.5 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Β 81
3.4 Πραγματικά δεδομένα 85
3.4.1 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos12_145 85
3.4.2 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155 89
3.4.3 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos23_95 93
4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ 97
4.1 Μέθοδος Διακριτής Αντιστροφής για κάθε χρονοπαράθυρο. 97
4.1.1 Αντιστροφή Occam για ειδική ηλεκτρική αντίσταση και για φορτιστικότητα σε κάθε χρονοπαράθυρο 97
4.1.2 Περιγραφή του αλγορίθμου Μεθόδου Διακριτής Αντιστροφής για δεδομένα TDIP 98
4.2 Διόρθωση Εύρεσης Παραμέτρων Cole Cole. 100
4.2.1 Αλγόριθμος *IPColeOptimum* Εξαγωγής Παραμέτρων Cole Cole με Μείωση Εξάρτησης από Αρχικές Τιμές 102
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 109
5.1 Συμπεράσματα 109
5.2 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα 110
ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 112

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α **64**
Πίνακας 3.2: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α..... **65**
Πίνακας 3.3: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α..... **68**
Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 3% θόρυβο **69**
Πίνακας 3.5: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 3% θόρυβο..... **69**
Πίνακας 3.6: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α με 3% προστιθέμενο θόρυβο **72**
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% θόρυβο **73**
Πίνακας 3.8: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% θόρυβο..... **73**
Πίνακας 3.9: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% προστιθέμενο θόρυβο **76**
Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% θόρυβο **77**
Πίνακας 3.11: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% θόρυβο..... **77**
Πίνακας 3.12: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% προστιθέμενο θόρυβο..... **80**
Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Β **81**
Πίνακας 3.14: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α Αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Β..... **81**
Πίνακας 3.15: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Β. Για την ειδική ηλεκτρική αντίσταση τα σφάλματα %RMS είναι σχετικά ενώ για τις παραμέτρους Cole Cole είναι απόλυτα..... **84**
Πίνακας 3.16 Πραγματικά δεδομένα Milos12_145..... **85**
Πίνακας 3.17 Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos12_145 ..... **85**
Πίνακας 3.18 Σφάλματα %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos12_145 ..... **85**
Πίνακας 3.19 %RMS σφάλματα για DC και IP μετρήσεις με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής **89**
Πίνακας 3.20 Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155 ..... **89**
Πίνακας 3.21 Σφάλματα %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155 ..... **89**
Πίνακας 3.22 %RMS σφάλματα για DC και IP μετρήσεις με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής **92**
Πίνακας 3.23 Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos23_95 ..... **93**
Πίνακας 3.24 Σφάλματα %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155 ..... **93**
Πίνακας 3.25 %RMS σφάλματα για DC και IP μετρήσεις με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής για πραγματικά δεδομένα Milos23_95..... **96**

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους.. ..... **7**

Σχήμα 2.2 Ευρέως χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων: α) Wenner, β) Schlumberger, γ) Διπόλου -Διπόλου, δ) Πόλου - Διπόλου, ε) Πόλου-Πόλου, στ) Multiple Gradient. Τα Α, Β είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και τα Μ, Ν τα ηλεκτρόδια μέτρησης διαφοράς δυναμικού. Ο G είναι ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης. **8**

Σχήμα 2.3 Παράδειγμα καμπύλης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κατασκευάστηκε από δεδομένα ηλεκτρικής όδευσης για ένα μέσο με ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ με ένα θαμμένο σώμα με πολύ μεγαλύτερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. **9**

Σχήμα 2.4 Παράδειγμα καμπύλης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κατασκευάστηκε από δεδομένα ηλεκτρικής βυθοσκόπησης για μοντέλο δύο στρωμάτων με αντίσταση ρ_1 για το πρώτο στρώμα και $\rho_2 = 10\ \rho_1$ για τον ημιχώρο **11**

Σχήμα 2.5 Ευθύ Πρόβλημα **13**

Σχήμα 2.6 Παράδειγμα Ιακωβιανού πίνακα για μοντέλο 1-D με 4 στρώματα (3 στρώματα και ημιχώρος) και 7 παραμέτρους. **16**

Σχήμα 2.7 Τετραγωνικός παλμός για έγχυση ρεύματος στην μέθοδο Επαγόμενης Πόλωσης **21**

Σχήμα 2.8 Τυπική IP καμπύλη δυναμικού (από το εγχειρίδιο του Syscal Pro) **22**

Σχήμα 2.9 Διερεύνηση για τον κατάλληλο αριθμό επαναλήψεων στον τύπο του Pelton. Για χαμηλές τιμές της παραμέτρου τ απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων ενώ για τιμές πάνω από 10 αρκούν οι 200 επαναλήψεις **27**

Σχήμα 2.10 Καμπύλες εκφόρτισης για διάφορες τιμές των παραμέτρων Cole Cole **28**

Σχήμα 2.11 Διάγραμμα ροής για αντιστροφή δεδομένων επαγόμενης πόλωσης IP **30**

Σχήμα 2.12 Διάγραμμα ροής για διακριτή αντιστροφή δεδομένων επαγόμενης πόλωσης IP στο πεδίο του χρόνου (TDIP) **33**

Σχήμα 2.13 Διάγραμμα ροής Α για Αλγόριθμο Αντιστροφής DC δεδομένων Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης 1D (VES – βυθοσκόπηση) **34**

Σχήμα 2.14 Διάγραμμα ροής Β για Αλγόριθμο Αντιστροφής δεδομένων Φορτιστικότητας στο πεδίο του χρόνου για εξαγωγή των Παραμέτρων Cole Cole **35**

Σχήμα 3.1 Ιακωβιανός Πίνακας JDC για την αντιστροφή δεδομένων DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης **50**

Σχήμα 3.2 Ιακωβιανός Πίνακας JacIPTotal για την ταυτόχρονη αντιστροφή όλων των δεδομένων IP, χωρίς τα δεδομένα DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης **53**

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Σχήμα 3.3 Διάγραμμα ροής για Αλγόριθμο Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής δεδομένων βυθοσκόπησης επαγόμενης πόλωσης IP στο Πεδίο του Χρόνου 1D-TDIP χωρίς τα δεδομένα DC **55**

Σχήμα 3.4 Ιακωβιανός Πίνακας JacIPTotalDC για την ταυτόχρονη αντιστροφή όλων των δεδομένων IP και των δεδομένων DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης **59**

Σχήμα 3.5 Καμπύλες φαινόμενης αντίστασης - ab/2 για μοντέλο τριων στρωμάτων με αντίσταση 1ου στρώματος 30 Ω m (μπλε συνεχής γραμμή), και με αντίσταση 40 Ω m (κόκκινη γραμμή με παύλες -τελείες) και 50 Ω m (ματζέντα γραμμή με παύλες) όταν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των δύο άλλων στρωμάτων παραμένει σταθερή όπως σταθερές παραμένουν οι τιμές των Cole Cole παραμέτρων όλων των στρωμάτων. **60**

Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής για Αλγόριθμο Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής δεδομένων βυθοσκόπησης επαγόμενης πόλωσης IP στο Πεδίο του Χρόνου 1D-TDIP **63**

Σχήμα 3.7 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Α **66**

Σχήμα 3.8 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α **67**

Σχήμα 3.9 Λεπτομέρεια από το Σχήμα 3.8β της μετρούμενης φορτιστικότητας και των φορτιστικοτήτων που υπολογίζονται με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής ως προς τα χρονοπαράθυρα ώστε να φαίνεται η προσέγγιση των δύο προς σύγκριση αλγορίθμων στις μετρούμενες τιμές. **68**

Σχήμα 3.10 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 3% **70**

Σχήμα 3.11 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 3% **71**

Σχήμα 3.12 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 6% **74**

Σχήμα 3.13 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 6% **75**

Σχήμα 3.14 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Σννθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 10% **78**

Σχήμα 3.15 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 10% (παρουσιάζεται η καμπύλη φορτιστικότητας μόνο για την πρώτη θέση μέτρησης) **79**

Σχήμα 3.16 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Σννθετικά Δεδομένα Β **82**

Σχήμα 3.17 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Β **83**

Σχήμα 3.18 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α (κόκκινη γραμμή) και β) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής (μπλε γραμμή) για πραγματικά δεδομένα Milos12_145 ..... **86**

Σχήμα 3.19 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση αβ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για πραγματικά δεδομένα Milos12_145 ..... **87**

Σχήμα 3.20 Λεπτομέρεια από το Σχήμα 3.19β της μετρούμενης φορτιστικότητας και των φορτιστικοτήτων που υπολογίζονται με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής ως προς τα χρονοπαράθυρα ώστε να φαίνεται η προσέγγιση των δύο προς σύγκριση αλγορίθμων στις μετρούμενες τιμές. **88**

Σχήμα 3.21 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α (κόκκινη γραμμή) και β) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής (μπλε γραμμή) για πραγματικά δεδομένα Milos13_155 ..... **90**

Σχήμα 3.22 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για πραγματικά δεδομένα Milos13_155 ..... **91**

Σχήμα 3.23 Λεπτομέρεια από το Σχήμα 3.22β της μετρούμενης φορτιστικότητας και των φορτιστικοτήτων που υπολογίζονται με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

αντιστροφής ως προς τα χρονοπαράθυρα ώστε να φαίνεται η προσέγγιση των δύο προς σύγκριση αλγορίθμων στις μετρούμενες τιμές. **92**

Σχήμα 3.24 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α (κόκκινη γραμμή) και β) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής (μπλε γραμμή) για πραγματικά δεδομένα Milos23_95 ..... **94**

Σχήμα 3.25 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση AB/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για πραγματικά δεδομένα Milos23_95 (παρουσιάζεται μόνο η καμπύλη φορτιστικότητας για την πρώτη μέτρηση) **95**

Σχήμα 4.1 Οι τέσσερεις περιπτώσεις που διακρίνονται για την τομή της καμπύλης φορτιστικότητας που προκύπτει από τις μετρήσεις με την καμπύλη που αντιστοιχεί στις υπολογιζόμενες τιμές των παραμέτρων Cole Cole. **101**

Σχήμα 4.2 Καμπύλη φορτιστικότητας που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα λύσης ευθέος προβλήματος που εφαρμόζει την εξίσωση Pelton για τιμές παραμέτρων Cole Cole: n0 = 0.4, tau = 5.0, c = 0.2 για 20 χρονοπαράθυρα ανά 0.2 sec..... **102**

Σχήμα 4.3 Καμπύλη φορτιστικότητας για τιμές παραμέτρων Cole Cole: n0 = 0.4, tau = 5.0, c = 0.2 για 20 χρονοπαράθυρα ανά 0.2 sec και καμπύλες που αντιστοιχούν στις λύσεις με την αντιστροφή για διαφορετικές αρχικές τιμές παραμέτρων Cole Cole **104**

Σχήμα 4.4 Καμπύλη φορτιστικότητας για τιμές παραμέτρων Cole Cole: n0 = 0.4, tau = 5.0, c = 0.2 και καμπύλη που αντιστοιχεί στη βελτιωμένη λύση **105**

Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ροής Β για Αλγόριθμο Gauss-Newton Αντιστροφής Καμπυλών Φορτιστικότητας για εξαγωγή Παραμέτρων Cole Cole με Βελτίωση Αρχικών Τιμών **106**

Σχήμα 4.6 Διάγραμμα ροής CHECK DIFFERENCES για Αλγόριθμο Gauss-Newton Αντιστροφής Καμπυλών Φορτιστικότητας για εξαγωγή Παραμέτρων Cole Cole Με Βελτίωση Αρχικών Τιμών **107**

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρα και στόχοι αυτής της διπλωματικής εργασίας

Η Ηλεκτρική Κατακόρυφη Βυθοσκόπηση – Vertical Electrical Sounding (VES) είναι μία διαδεδομένη γεωφυσική τεχνική με ευρεία περιοχή εφαρμογών. Η μέθοδος χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ειδική ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζουν τα διάφορα πετρώματα ώστε να μας δώσει μια πρόταση για τη δομή του υπεδάφους, η οποία μπορεί να επαληθευθεί με τη βοήθεια γεωτρήσεων ή και άλλων γεωφυσικών μεθόδων. Έτσι, η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί στη Γεωφυσική, στη Μηχανική, στην Αρχαιολογία και αλλού. Η δομή που εξάγεται με τη μέθοδο VES είναι μονοδιάστατη αλλά μπορούμε συνδυάζοντας περισσότερες βυθοσκοπήσεις να αποκτήσουμε και δισδιάστατη εικόνα του υπεδάφους.

Λόγω του γεγονότος ότι η γη δεν είναι ομογενής, οι μετρήσεις που λαμβάνουμε κατά την εφαρμογή της μεθόδου δε δίνουν απευθείας την ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Απαιτείται, λοιπόν, σύνθετη επεξεργασία των δεδομένων ώστε να εξαχθεί η πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση των στρωμάτων του υπεδάφους. Η επικρατούσα μέθοδος επεξεργασίας των μετρήσεων για την εξαγωγή των πραγματικών τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στη θεωρία της αντιστροφής (Inversion Theory). Μάλιστα η μέθοδος Εξομαλυμένης Αντιστροφής, η οποία δέχεται ότι τα στρώματα της γης δεν έχουν αυστηρά γεωμετρικά όρια, είναι αποδεκτό ότι δίνει ως εξαγόμενο μία δομή αρκετά κοντά στην πραγματική δομή που συναντάμε στη φύση.

Στην παρούσα εργασία ενδιαφερόμαστε για το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης. Παρατηρήθηκε ότι τα πετρώματα στα οποία έχει διοχετευτεί ηλεκτρικό ρεύμα, ώστε να υπολογιστεί η ειδική τους ηλεκτρική αντίσταση μετρώντας τη διαφορά δυναμικού σε ακροδέκτες, συνεχίζουν να εμφανίζουν τάση και μετά τη διακοπή διοχέτευσης ηλεκτρικού ρεύματος. Παρατηρήθηκε, λοιπόν, ότι τα πετρώματα εμφανίζουν ηλεκτρική πόλωση ή όπως την ονομάζουμε επαγόμενη φορτιστικότητα. Η διαφορετική φορτιστικότητα των πετρωμάτων βοηθάει στην ταυτοποίησή τους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να επιτευχθεί μία αποτελεσματική μέθοδος αντιστροφής των δεδομένων μέτρησης επαγόμενης πόλωσης που λαμβάνονται σε μία βυθοσκόπηση μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Δομή αυτής της διπλωματικής εργασίας

Οι κύριοι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

- Να παρουσιαστεί η θεωρία αντιστροφής και να γίνει μία σύνοψη των υπαρχουσών τεχνικών αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης.
- Να αναπτυχθεί μία μέθοδος που να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τις υπάρχουσες μεθόδους αντιστροφής.
- Να αναπτυχθεί λογισμικό για τη νέα μέθοδο.
- Να χρησιμοποιηθεί αυτό το λογισμικό για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου για συνθετικά και πραγματικά δεδομένα.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε αυτήν την εργασία είναι η ακόλουθη:

- Σύνοψη των βασικών αρχών της μεθόδου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, των τεχνικών που την αξιοποιούν και κυρίως της ηλεκτρικής βυθοσκόπησης (VES). Αναφορά στη μέθοδο μέτρησης της επαγόμενης πόλωσης (Induced Polarization – IP).
- Εξέταση της θεωρίας αντιστροφής και των υπαρχουσών τεχνικών αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης.
- Ανάπτυξη νέας μεθόδου αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης ηλεκτρικής βυθοσκόπησης.
- Υλοποίηση της νέας μεθόδου με λογισμικό σε γλώσσα MATLAB.
- Δοκιμή του νέου λογισμικού με συνθετικά και πραγματικά δεδομένα για να βρεθούν πιθανοί περιορισμοί στην αποτελεσματικότητά του.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τελική αξιολόγηση της ακρίβειας του αλγορίθμου.

1.2 Δομή αυτής της διπλωματικής εργασίας

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας είναι η ακόλουθη:

Κεφάλαιο 2: Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά θέματα της θεωρίας που χρειάζονται για να κατανοήσει κανείς το θέμα αυτής της διατριβής. Παρουσιάζονται η έννοια της διασκόπησης του εδάφους, οι βασικές αρχές της μεθόδου μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τη διασκόπηση του εδάφους και εξηγούνται οι τεχνικές μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Ακολούθως περιγράφονται οι διατάξεις και ο εξοπλισμός που απαιτούνται για τη λήψη των μετρήσεων και παρουσιάζεται η έννοια της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

αντίστασης. Όσον αφορά στη DC ειδική ηλεκτρική αντίσταση, γίνεται αναφορά στο λεγόμενο Ευθύ Πρόβλημα DC που είναι το πρόβλημα μοντελοποίησης των στρωμάτων του εδάφους σε σχέση με την ειδική ηλεκτρική τους αντίσταση. Ακολουθεί η παρουσίαση της έννοιας της αντιστροφής και ό,τι σχετικό με την ολοκλήρωση της διαδικασίας ενώ γίνεται ειδική αναφορά στην λεγόμενη εξομαλυμένη αντιστροφή (αντιστροφή Occam).

Τέλος περιγράφεται το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης και εξηγείται ο τρόπος μέτρησης της φορτιστικότητας των στρωμάτων του υπεδάφους και η σύνδεσή της με τις παραμέτρους Cole Cole. Και για τη φορτιστικότητα ακολουθείται όμοια η παρουσίαση του Ευθέος Προβλήματος 1D TDIP (μονοδιάστατο πρόβλημα επαγόμενης πόλωσης στο πεδίο του χρόνου) και των υπαρχόντων σχημάτων αντιστροφής.

Κεφάλαιο 3: Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να γνωρίσουμε τις υπάρχουσες μεθόδους αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης και να παρουσιαστεί ο Αλγόριθμος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα που προτείνουμε για την αντιμετώπιση προβλημάτων που παρουσιάζουν αυτές οι μέθοδοι.

Αρχικά παρουσιάζεται η μέθοδος Διακριτής Αντιστροφής, μετά η μέθοδος Συνολικής Αντιστροφής του Kim (Kim et al, 2012) και τέλος η μέθοδος Αντιστροφής Διαφοράς. Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση του Νέου Αλγορίθμου απαιτείται η διερεύνηση του Ευθέος Προβλήματος και συγκεκριμένα της εξίσωσης Pelton ώστε αυτή να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα στον Νέο Αλγόριθμο.

Στο κύριο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η πρώτη μας προσέγγιση στη λύση του προβλήματος αντιστροφής με την ταυτόχρονη αντιστροφή όλων των δεδομένων φορτιστικότητας για όλα τα χρονοπαράθυρα ενώ ακολουθεί η τελική πρόταση για την ταυτόχρονη αντιστροφή όλων των δεδομένων φορτιστικότητας για όλα τα χρονοπαράθυρα μαζί με τα DC δεδομένα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Στο υπόλοιπο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου κατά την ανάλυση δεδομένων συνθετικών καθώς και πραγματικών, που ελήφθησαν στη Μήλο σε δύο διαφορετικές διασκοπήσεις (2017, 2019) και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου Διακριτής Αντιστροφής.

Κεφάλαιο 4: Παρουσιάζεται η διαδικασία Διακριτής Αντιστροφής που παρουσιάστηκε και στο 3^{ο} κεφάλαιο αλλά με την πρόσθεση αλγορίθμου εξάλειψης της εξάρτησης από τις αρχικές τιμές που δίνονται στις παραμέτρους Cole Cole για την εφαρμογή της αντιστροφής Gauss Newton. Πρόκειται για μία εμπειρική μέθοδο που

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Δομή αυτής της διπλωματικής εργασίας

προτείνουμε η οποία, λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο τομής της καμπύλης μετρήσεων με την καμπύλη που προκύπτει από τη διαδικασία αντιστροφής, μεταβάλλει κατάλληλα τις αρχικές τιμές των παραμέτρων επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αντιστροφής. Γίνεται δοκιμή του αλγορίθμου με συνθετικά και πραγματικά δεδομένα.

Κεφάλαιο 5: Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περίληψη των συμπερασμάτων και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

Αυτό το κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγή στη θεωρία της μεθόδου ηλεκτρικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και της μεθόδου επαγόμενης πόλωσης. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των μεθόδων, η μοντελοποίηση του εδάφους για κάθε μέθοδο (Ευθύ Πρόβλημα) καθώς και οι μέθοδοι αντιστροφής των δεδομένων που υιοθετούνται κατά την κάθε μέθοδο ώστε να προκύψει το μοντέλο της γης που ταιριάζει περισσότερο στις μετρήσεις μας.

2.1 Διασκόπηση του εδάφους

Επιθυμώντας να αποκτήσουμε εικόνα του εδάφους χωρίς τη χρήση γεωτρήσεων ή άλλων επεμβατικών μεθόδων η Γεωφυσική έχει προχωρήσει στην ανάπτυξη μεθόδων που χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι διασκόπησης. Όσες απαιτούν τη δημιουργία τεχνητού πεδίου χαρακτηρίζονται ως ενεργητικές ενώ αυτές που δεν χρειάζονται τη δημιουργία τεχνητού πεδίου χαρακτηρίζονται ως παθητικές.

Οι βασικές παθητικές μέθοδοι διασκόπησης είναι:

Α) οι Βαρυτικές που εκμεταλλεύονται τοπικές ανωμαλίες του βαρυτικού πεδίου της Γης,

Β) οι Μαγνητικές που εκμεταλλεύονται τις τοπικές ανωμαλίες του μαγνητικού πεδίου της Γης,

Γ) οι παθητικές Ηλεκτρικές τεχνικές διασκόπησης στις οποίες περιλαμβάνονται οι παρακάτω μέθοδοι:

Γ1) Φυσικό Δυναμικό

Γ2) Τελλουρικά Ρεύματα

Δ) παθητικές Σεισμικές μέθοδοι με βάση το φυσικό θόρυβο.

Οι βασικές ενεργητικές μέθοδοι διασκόπησης είναι:

Α) οι μέθοδοι Ραντάρ που εκμεταλλεύονται τις τοπικές ανωμαλίες ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της Γης που δημιουργείται από τεχνητή πηγή,

Β) οι Σεισμικές μέθοδοι ανάκλασης – διάθλασης και επιφανειακών κυμάτων με τεχνητή πηγή δονήσεων,

Γ) οι ενεργητικές Ηλεκτρικές με τις οποίες επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος με

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

τη διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ζεύγους ακροδεκτών. Η εύρεση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο για την εύρεση δομών ενδιαφέροντος. Η ποσότητα που μετράμε, είναι συνήθως η ηλεκτρική τάση V.

Στις ενεργητικές Ηλεκτρικές μεθόδους περιλαμβάνονται οι παρακάτω μέθοδοι:

Γ1) Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση,

Γ2) Επαγόμενη πόλωση,

Γ3) Ισοδυναμικές γραμμές,

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα η μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και η μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης.

2.2 Μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης

Η μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές της εφαρμοσμένης γεωφυσικής.

Σε αυτή τη μέθοδο το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται τεχνητά. Ηλεκτρικό ρεύμα εισάγεται στο έδαφος και μετριέται η διαφορά δυναμικού λόγω αυτού του ρεύματος σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του εδάφους δίνοντας μια ένδειξη της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση. Η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση γεωλογικών σχηματισμών ιδιαίτερης αξίας για τον άνθρωπο μέσα στο έδαφος.

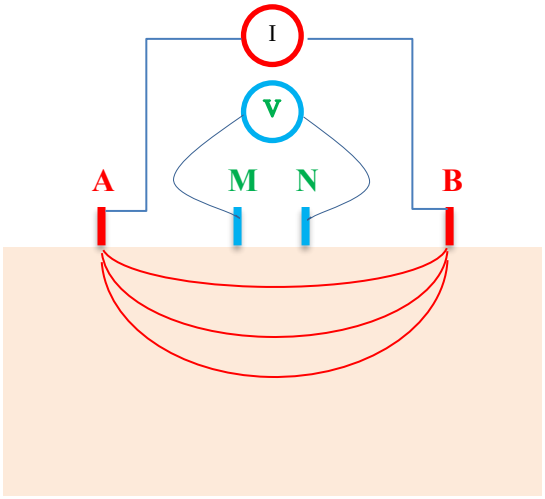
Η μέθοδος Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών, καθώς χρησιμοποιείται για γεωφυσικά, γεωλογικά, υδρολογικά, περιβαλλοντικά και μηχανικά προβλήματα, καθώς και για αρχαιολογικές έρευνες. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση κοιτασμάτων ορυκτών, για την εύρεση της κατανομής υπόγειων υδάτων, για τον εντοπισμό ζωνών ρηγμάτων κλπ.

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, η μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έχει πολλά πλεονεκτήματα. Η ταχεία απόκτηση δεδομένων και το χαμηλότερο κόστος των μέσων υλοποίησης από άλλες μεθόδους είναι δύο από τα κυριότερα οφέλη της. Επιπλέον, οι σύγχρονοι αλγόριθμοι μπορούν να παρέχουν μια εικόνα της κατανομής της αντίστασης πολύ γρήγορα, ακόμη και στο χώρο του πεδίου αμέσως μετά τη συγκέντρωση των μετρήσεων ενώ και η ερμηνεία αυτών των αποτελεσμάτων είναι εύκολη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

2.2.1 Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων – Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Για να πάρουμε την τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους χρειαζόμαστε τετράδα ηλεκτροδίων (Σχήμα 2.1). Με τα δύο ηλεκτρόδια Α και Β, δίνουμε παλμό ρεύματος έντασης I και μεταξύ των άλλων δύο, M και N, μετράμε τη διαφορά δυναμικού. Με τον νόμο του Ωμ υπολογίζεται η τιμή αντίστασης η οποία για να αποδοθεί στο έδαφος και να πάρουμε την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους πρέπει να γνωρίζουμε τη γεωμετρία της διάταξης που δίνεται από τον παράγοντα G.



Σχήμα 2.1 Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους..

Ο γεωμετρικός παράγοντας G υπολογίζεται από τις αποστάσεις μεταξύ των ακροδεκτών A, B, M, N και από την εξίσωση (2.1) υπολογίζεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ.

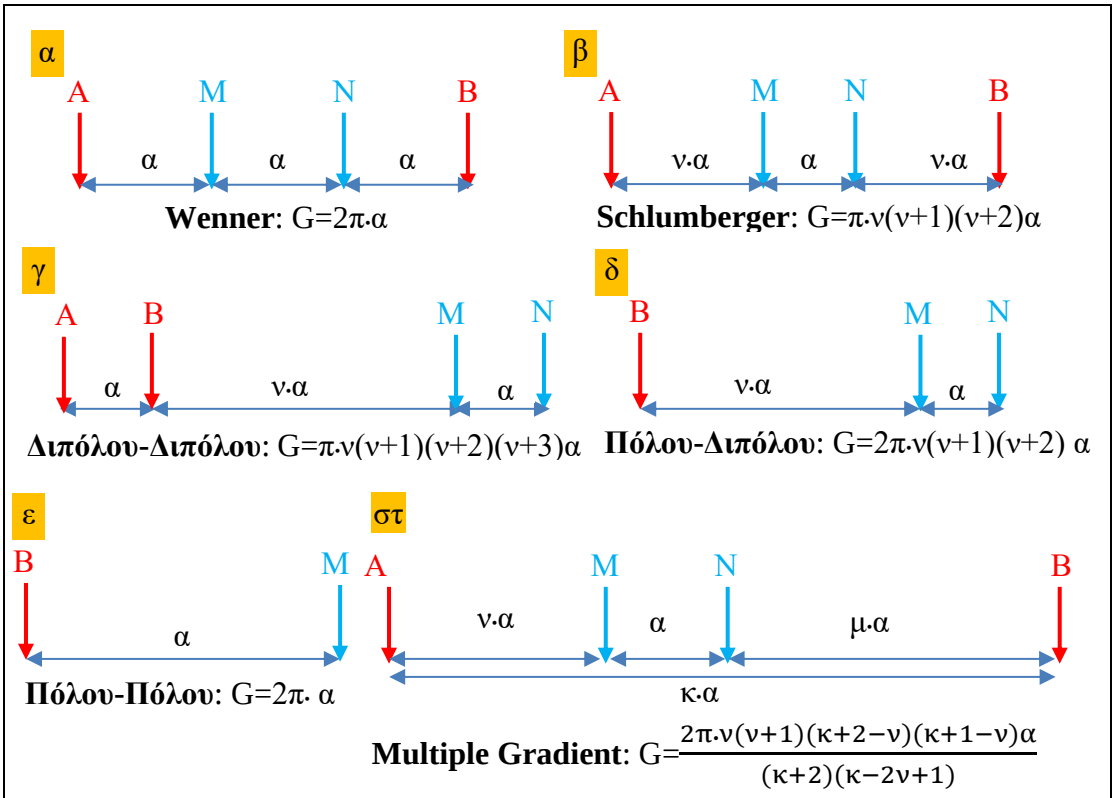
$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{1}{G} = 2\pi \frac{R}{G} \qquad (2.1)$$

Η εξίσωση (2.1) ισχύει μόνο όταν το έδαφος είναι ομογενές. Ωστόσο, στην πραγματικότητα η γη είναι μη ομογενής και έτσι, αυτή η εξίσωση δεν αποδίδει την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους, αλλά μια "φαινόμενη" τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία θα ήταν ίση με την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση εάν το έδαφος ήταν γεωηλεκτρικά ομογενές. Αυτή η τιμή ονομάζεται φαινόμενη αντίσταση και δηλώνεται με το σύμβολο $\boldsymbol{\rho_a}$ και θα μπορούσε να περιγραφεί ως σταθμισμένος μέσος όρος των πραγματικών αντιστάσεων των σχηματισμών που συνθέτουν το υπέδαφος. Παρόλο που ο ορισμός αυτός δεν είναι

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

μαθηματικά αληθής, είναι αποδεκτός όταν πρόκειται για την ερμηνεία απλών προβλημάτων. Ως εκ τούτου, αυτή η ποσότητα δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική αλλά μία παραμορφωμένη εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και επομένως η ερμηνεία δεν πρέπει να γίνει με τη χρήση των μετρήσεων της φαινόμενης αντίστασης, άμεσα. Αντ' αυτού, οι φαινομενικές μετρήσεις της αντίστασης χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση της πραγματικής κατανομής της αντίστασης. Αυτό επιτυγχάνεται με μια περίπλοκη διαδικασία που ονομάζεται αντιστροφή, η οποία περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο. Μετά την αντιστροφή, τα αποτελέσματα μπορούν να ερμηνευθούν και στη συνέχεια να αποκτηθούν πληροφορίες σχετικά με τη δομή του υπεδάφους.

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις ηλεκτρικής διασκόπησης εκ των οποίων οι πιο βασικές παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2 Ευρέως χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων: α) Wenner, β) Schlumberger, γ) Διπόλου -Διπόλου, δ) Πόλου - Διπόλου, ε) Πόλου-Πόλου, στ) Multiple Gradient. Τα Α, Β είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και τα Μ, Ν τα ηλεκτρόδια μέτρησης διαφοράς δυναμικού. Ο G είναι ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης.

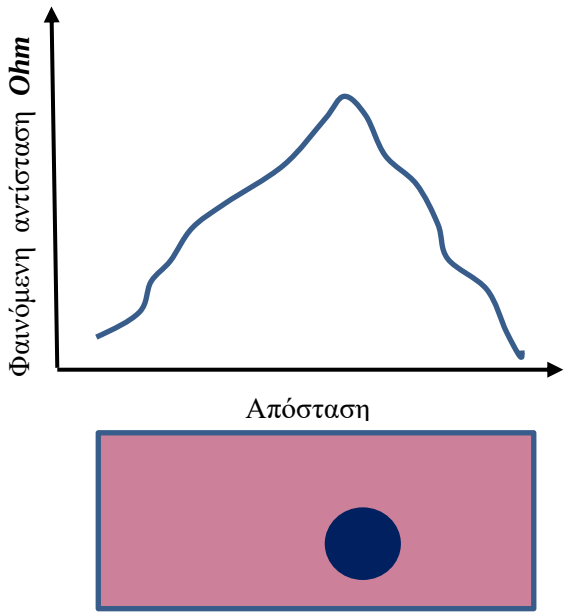
Η μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης επιτυγχάνεται μέσω των παρακάτω τριών βασικών τρόπων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

2.2.1.1 Ηλεκτρική Όδευση

Σε αυτή τη μέθοδο, λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων διατηρώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ όλων των ηλεκτροδίων και μετακινώντας ολόκληρη τη συστοιχία σε μια πλάγια κατεύθυνση. Επομένως, με το σχηματισμό προφίλ, εντοπίζονται μόνο πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σε σταθερό βάθος, καθώς η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος παραμένει σταθερή. Στη διαδικασία αυτή οι συνηθέστερες συστοιχίες είναι οι Wenner, Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου (Ward, 1990).

Ένα παράδειγμα μιας καμπύλης φαινόμενης αντίστασης που κατασκευάστηκε από δεδομένα ηλεκτρικής όδευσης για ένα ομογενές μέσο με ένα θαμμένο σώμα με ειδική ηλεκτρική αντίσταση πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του ομογενούς στρώματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Η καμπύλη ξεκινά με χαμηλές αντιστάσεις που απεικονίζουν την επίδραση του αγώγιμου μέσου. Ενώ κινούμαστε προς το σώμα με τη μεγαλύτερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση το οποίο βρίσκεται κοντά στο κέντρο της γραμμής προφίλ, οι τιμές αντίστασης αυξάνονται, δείχνοντας ότι οι μετρήσεις λαμβάνουν επίσης υπόψη την επίδραση του σώματος αυτού. Όταν απομακρυνόμαστε από αυτό το σώμα, η αντίσταση μειώνεται.



Σχήμα 2.3 Παράδειγμα καμπύλης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κατασκευάστηκε από δεδομένα ηλεκτρικής όδευσης για ένα μέσο με ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ με ένα θαμμένο σώμα με πολύ μεγαλύτερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

2.2.1.2 Ηλεκτρική Βυθοσκόπηση (Vertical Electrical Sounding - VES)

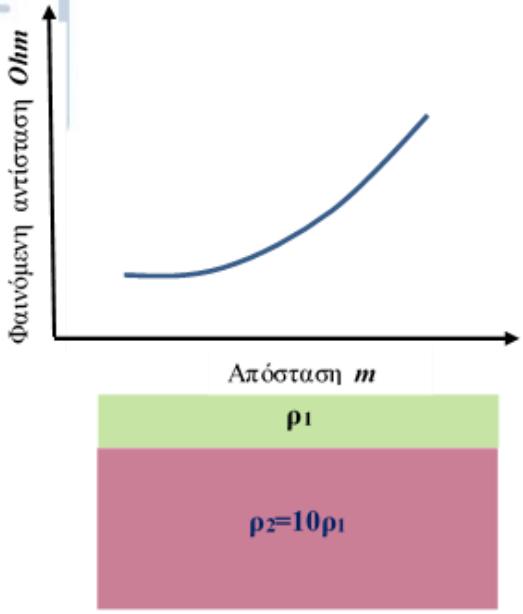
Με την τεχνική VES εντοπίζονται οι μεταβολές της αντίστασης με το βάθος, θεωρώντας ότι το έδαφος συνίσταται από οριζόντια στρώματα (έρευνα 1D). Σε αυτή την περίπτωση υποτίθεται ότι η αντίσταση αλλάζει κατακόρυφα αλλά όχι στην οριζόντια κατεύθυνση. Αυτή η μέθοδος συνίσταται στη λήψη μίας σειράς μετρήσεων διατηρώντας σταθερή την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων μέτρησης δυναμικού MN, καθώς και το κέντρο της συστοιχίας, και αυξάνοντας βαθμιαία την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος A, B ξεκινώντας από λίγα μέτρα και φτάνοντας έως εκατοντάδες μέτρα ή, ακόμα, πάνω από ένα χιλιόμετρο μέχρις ότου η τιμή του δυναμικού γίνει πολύ μικρή λόγω της αρκετά μεγάλης απόστασης AB. Ενώ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται, αυξάνεται επίσης το βάθος διείσδυσης και συνεπώς λαμβάνεται πληροφορία σχετικά με την αλλαγή της αντίστασης στα βαθύτερα τμήματα του υπεδάφους κάτω από το κεντρικό σημείο. Είναι δύσκολο να καθοριστεί μια απόλυτη τιμή για το βάθος διείσδυσης. Στην πράξη, θεωρείται ότι είναι το 1/3 - 1/4 της απόστασης AB μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος. Για αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται συστοιχίες με εσωτερική συμμετρία, με τη συστοιχία Schlumberger να είναι η συνηθέστερη. Ακολούθως, οι μετρηθείσες φαινόμενες αντιστάσεις σχεδιάζονται σε σχέση με τις αποστάσεις AB/2 και κατασκευάζεται η καμπύλη φαινόμενης αντίστασης.

Ένα παράδειγμα μιας καμπύλης φαινόμενης αντίστασης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα VES παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Αυτή η καμπύλη αντιστοιχεί σε μοντέλο ενός στρώματος και υποβάθρου. Η αντίσταση του πρώτου στρώματος είναι ρ_1 και η αντίσταση του υποβάθρου είναι $\rho_2 = 10\rho_1$. Σημειώνεται ότι αυτή η καμπύλη μπορεί να αντιστοιχεί επίσης και σε άλλα μοντέλα.

Η πιο συνηθισμένη διάταξη για βυθοσκόπηση είναι η διάταξη Schlumberger η οποία παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.2 με τον γεωμετρικό παράγοντά της.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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



Σχήμα 2.4 Παράδειγμα καμπύλης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κατασκευάστηκε από δεδομένα ηλεκτρικής βυθοσκόπησης για μοντέλο δύο στρωμάτων με αντίσταση ρ_1 για το πρώτο στρώμα και $\rho_2 = 10\ \rho_1$ για τον ημιχώρο.

2.2.1.3 ERT – Ηλεκτρική Τομογραφία

Η Ηλεκτρική Τομογραφία αποτελεί συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων κατά τον οποίο μελετάμε μία τομή του εδάφους και οριζόντια και κάθετα. Καρφώνουμε στο έδαφος ικανό αριθμό ηλεκτροδίων και με λογισμικό που καθοδηγεί το μηχάνημα μετρήσεων δίνεται ρεύμα σε δύο από τα ηλεκτρόδια και λαμβάνεται μέτρηση από σειρά ζευγών από τα υπάρχοντα ηλεκτρόδια. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται μία εικόνα χαρακτηριστική ως προς τις ηλεκτρικές ιδιότητες της τομής του εδάφους. Απομένει μετά η απόδοση άλλων φυσικών χαρακτηριστικών (πυκνότητα, πορώδες, σκληρότητα κλπ.) στην τομή αυτή του εδάφους βάσει των ηλεκτρικών ιδιοτήτων στις οποίες καταλήξαμε.

2.2.2 Όργανα μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Μετρήσεις Τομογραφίας ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ERT, συνήθως πραγματοποιούνται με τη χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτροδίων, περισσότερων από 20, τα οποία συνδέονται με ένα πολύκλωνο καλώδιο. Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της αντίστασης καλούνται μετρητές αντίστασης. Αυτά τα όργανα μετρούν την αντίσταση R, η οποία είναι ο λόγος της τάσης προς την ένταση του εισερχόμενου ρεύματος. Στη συνέχεια βρίσκεται η φαινομενική ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Οι μετρητές αντιστάσεως περιέχουν έναν εσωτερικό μικροεπεξεργαστή, ο οποίος μαζί με

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

μια μονάδα μεταγωγής (switching unit) χρησιμοποιείται για την επιλογή των τεσσάρων ηλεκτροδίων για κάθε μέτρηση. Ο τύπος της συστοιχίας, η ακολουθία μετρήσεων και άλλες παράμετροι της έρευνας μεταφέρονται μέσα στο μετρητή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από έναν υπολογιστή. Ο σχεδιασμός του συστήματος μέτρησης είναι διαφορετικός σε κάθε όργανο, ανάλογα με τον σκοπό της έρευνας. Για παράδειγμα, τα αρχαιολογικά προβλήματα απαιτούν ένα σύστημα με διαφορετικές προδιαγραφές από τις γεωλογικές εφαρμογές.

2.3 Ευθύ πρόβλημα DC

Το Ευθύ Πρόβλημα (Forward Problem -Forward Modelling) είναι η διαδικασία του υπολογισμού των μετρήσεων που αναμένουμε να πάρουμε όταν είναι γνωστό το μοντέλο της γης. Στην περίπτωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, είναι η διαδικασία της εύρεσης των διαφορών δυναμικού μεταξύ διαφόρων σημείων της επιφάνειας της γης εξαιτίας της έκχυσης ηλεκτρικού ρεύματος, για μία γνωστή κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο έδαφος. Δηλαδή είναι η λύση των εξισώσεων που εκφράζουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος για μια συγκεκριμένη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκεκριμένη πηγή ηλεκτρικού ρεύματος ώστε να βρεθεί η κατανομή του δυναμικού και εξ αυτής οι φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο μοντέλο.

Το μοντέλο είναι μία ιδανική μαθηματική αναπαράσταση των φυσικών ιδιοτήτων ενός τμήματος της γης. Αντιστοιχεί σε ένα σύνολο παραμέτρων, που είναι φυσικές ποσότητες. Για τη μέθοδο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αυτές οι παράμετροι είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και το πάχος κάθε στρώματος.

Έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι για τη λύση του ευθέος μοντέλου που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στην αναλυτική και στην αριθμητική προσέγγιση:

Αναλυτική προσέγγιση: Στην αναλυτική προσέγγιση οι εξισώσεις πεδίου λύνονται απευθείας. Η απευθείας επίλυση αυτών των εξισώσεων είναι συνήθως αδύνατη εξαιτίας της περιπλοκότητάς τους και η προσέγγιση αυτή δε χρησιμοποιείται στην πράξη. Ολοκληρωτικά αναλυτικές μέθοδοι υπάρχουν και χρησιμοποιούνται μόνο για απλές περιπτώσεις, όπως π.χ. για μία σφαίρα μέσα σε ομογενές μέσο.

Αριθμητική προσέγγιση: Για μία αυθαίρετη κατανομή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, χρησιμοποιούνται αριθμητικές προσεγγίσεις. Οι αριθμητικές μέθοδοι

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

υποδιαιρούνται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη χρησιμοποιούνται διαφορικές μέθοδοι ενώ στη δεύτερη μέθοδοι ολοκλήρωσης.

Στην περίπτωση έρευνας 1D, η μέθοδος φίλτρου (Koefoed, 1979) χρησιμοποιείται για να λυθεί το ευθύ πρόβλημα, ενώ για τις περιπτώσεις 2D και 3D χρησιμοποιούνται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένης διαφοράς.

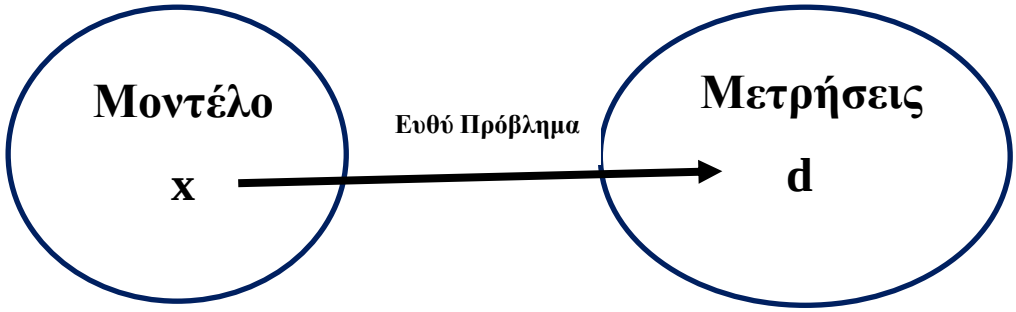
Το ευθύ πρόβλημα μπορεί να σημειωθεί ως:

$$d = T(x) \tag{2.2}$$

όπου: $d=\{d_1, d_2, \ldots, d_M\}$ είναι ένα διάνυσμα με M στοιχεία, που περιέχει τις παρατηρούμενες φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις

$x=\{x_1, x_2, \ldots, x_N\}$ είναι ένα διάνυσμα με N στοιχεία, που περιέχει τις παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή την ειδική ηλεκτρική αντίσταση και το πάχος για την περίπτωση μοντέλου ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, και

T είναι η εξίσωση μετασχηματισμού που χρησιμοποιείται για να βρεθεί η απόκριση στο μοντέλο x.



Σχήμα 2.5 Ευθύ Πρόβλημα

2.4 Διαδικασία αντιστροφής

Αφού παρουσιάστηκε το ευθύ πρόβλημα, μπορεί πλέον να οριστεί και το αντίστροφο. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται το πρόβλημα αντιστροφής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η αντιστροφή είναι ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία του ευθέος προβλήματος: να βρεθεί ένα μοντέλο που αντιστοιχεί σε δεδομένες μετρήσεις Χρησιμοποιούνται σχήματα αντιστροφής για να βρεθεί η πραγματική κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους και να εξαχθεί ακριβής ερμηνεία των δεδομένων. Συζητείται το θεωρητικό υπόβαθρο και τα βασικά στοιχεία της αντιστροφής καθώς και οι περιορισμοί της μεθόδου.

Στην περίπτωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αυτό σημαίνει ότι ζητείται να βρεθεί η πραγματική κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

όταν δίνεται το σύνολο δεδομένων με τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια μίας γεωφυσικής έρευνας. Το αντίστροφο πρόβλημα μπορεί να οριστεί ως:

$$x = T^{-1}(d) \tag{2.3}$$

όπου T^{-1} είναι η αντίστροφη συνάρτηση μετασχηματισμού.

2.4.1 Προβλήματα στην αντιστροφή

Τα προβλήματα αντιστροφής ανήκουν στην κατηγορία των μη καλά ορισμένων προβλημάτων (ill-posed problems). Σύμφωνα με τον Hadamard (1902) ένα πρόβλημα είναι καλά ορισμένο όταν:

- Έχει μία λύση
- Η λύση είναι μοναδική
- Η λύση αλλάζει αναλογικά με τις αλλαγές στις αρχικές συνθήκες.

Σύμφωνα με τις παραπάνω τρεις συνθήκες, τα σχήματα αντιστροφής πρέπει να αντιμετωπίσουν τα ακόλουθα τρία προβλήματα:

1ο. **Ύπαρξη μίας λύσης:** Είναι πιθανό να μην υπάρχει μοντέλο που να ερμηνεύει τα δεδομένα μέτρησης, δηλαδή ο ευθύς υπολογισμός δεν μπορεί να δώσει παρόμοιες τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με αυτές που μετρήθηκαν. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο θόρυβο των μετρήσεων και στο σφάλμα του μοντέλου ή στη μέθοδο που χρησιμοποιείται για να βρεθεί το μοντέλο.
2ο. **Μοναδικότητα της λύσης:** Αν υπάρχει μία λύση, μπορεί να μην είναι η μοναδική λύση. Πολλά μοντέλα θα μπορούσαν να ταιριάζουν στο ίδιο σύνολο δεδομένων μετρήσεων.
3ο. **Αστάθεια της λύσης:** Η αντιστροφή είναι μία μη καλά ορισμένη διαδικασία, που σημαίνει ότι μικρές αλλαγές στα δεδομένα μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλες αλλαγές στο μοντέλο που λαμβάνεται από τη λύση.

2.4.2 Ιακωβιανός Πίνακας

Κατά τη διαδικασία αντιστροφής είναι απαραίτητη η χρήση ενός Πίνακα με πρώτες παραγώγους. Αυτός ο Πίνακας ονομάζεται Ιακωβιανός Πίνακας J και συνδέει τις αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου με τις αλλαγές των παρατηρούμενων δεδομένων (μετρήσεων). Ονομάζεται επίσης πίνακας ευαισθησίας, καθώς απεικονίζει

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

την ευαισθησία των τιμών των φαινομένων μετρήσεων αντίστασης σε μικρές μεταβολές στις παραμέτρους του μοντέλου. Εάν το **M** είναι ο αριθμός των μετρήσεων **d** και **N** είναι ο αριθμός των παραμέτρων **x** του μοντέλου, τότε ο Ιακωβιανός Πίνακας **J** έχει διαστάσεις **M × N** και τα στοιχεία i, j δίδονται από την παρακάτω σχέση:

$$J_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial x_j} \tag{2.4}$$

Αν τα μετρούμενα δεδομένα είναι φαινόμενες αντιστάσεις, η εξίσωση (2.4) μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$J_{ij} = \frac{\partial \rho_{\alpha i}}{\partial \rho_j} \tag{2.5}$$

όπου ρ_α είναι η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση,
ρ είναι η παράμετρος του μοντέλου (ειδική ηλεκτρική αντίσταση).
Έτσι, ο Ιακωβιανός Πίνακας παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial \rho_{\alpha 1}}{\partial \rho_1} & \frac{\partial \rho_{\alpha 1}}{\partial \rho_2} & \cdots & \frac{\partial \rho_{\alpha 1}}{\partial \rho_{jN}} \\ \frac{\partial \rho_{\alpha 2}}{\partial \rho_1} & \ddots & \cdots & \frac{\partial \rho_{\alpha 2}}{\partial \rho_N} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_{\alpha M}}{\partial \rho_1} & \frac{\partial \rho_{\alpha M}}{\partial \rho_2} & \cdots & \frac{\partial \rho_{\alpha M}}{\partial \rho_N} \end{pmatrix} \tag{2.6}$$

Σε αυτή τη διατριβή για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού Πίνακα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος διαταραχής (McGillivray and Oldenburg, 1990), η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

2.4.2.1 Τεχνική διαταραχών (The Perturbation Technique)

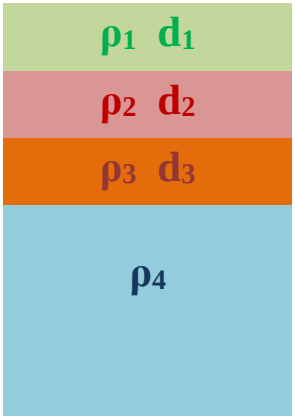
Η προσέγγιση της διαταραχής δίνει μια προσέγγιση της ευαισθησίας χρησιμοποιώντας έναν τύπο πεπερασμένης διαφοράς. Ο υπολογισμός αυτής της προσέγγισης του Ιακωβιανού είναι απλός και δίνει μια ένδειξη για τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι του μοντέλου επηρεάζουν τις μετρήσεις. Αρχικά, για να υπολογίσουμε τον Ιακωβιανό, υποθέτουμε ένα μοντέλο αντίστασης ρ και υπολογίζεται η ευθεία απόκριση για αυτό το μοντέλο $\rho_{\alpha i}$. Στη συνέχεια, μία από τις παραμέτρους του μοντέλου αλλάζει κατά μία πολύ μικρή ποσότητα Δρ, ενώ οι άλλες διατηρούνται όπως είναι, και υπολογίζεται η ευθεία απόκριση r_{ai} (ρ + Δρ) για αυτό το μοντέλο. Αυτό δείχνει το βαθμό στον οποίο οι συνθετικές μετρήσεις θα αλλάξουν λόγω των αλλαγών

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

στη συγκεκριμένη παράμετρο του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε παράμετρο, αλλάζοντας μόνο μία παράμετρο κάθε φορά, μέχρις ότου έχουν υπολογιστεί όλα τα στοιχεία του Πίνακα. Στη συνέχεια, ο Ιακωβιανός Πίνακας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση του προηγούμενου μοντέλου. Το στοιχείο ij του J δίνεται από την εξίσωση:

$$J_{ij} = \frac{\partial \rho_{\alpha i}}{\partial \rho_j} \approx \frac{\rho_{\alpha i}(\rho + \Delta\rho_j) - \rho_{\alpha i}(\rho)}{\Delta\rho_j} \qquad (2.7)$$

Το ποσό της αλλαγής Δρ επιλέγεται αυθαίρετα αλλά θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα και να πληρούνται οι όροι της πρώτης παραγώγου. Το Σχήμα 2.6 απεικονίζει το παράδειγμα ενός Ιακωβιανού Πίνακα για την περίπτωση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 1D. Το 1D μοντέλο αποτελείται από 2 στρώματα και τον ημιχώρο και επομένως οι παράμετροι του μοντέλου είναι 5, 3 αντιστάσεις και 2 πάχη, καθώς ο ημιχώρος θεωρείται ότι έχει άπειρο πάχος και επομένως δεν θεωρείται επιπλέον παράμετρος του μοντέλου.



	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	d_1	d_2	d_3
$\rho\alpha_1$	0.78	0.10	0.04	0.01	-0.06	-0.02	-0.01
$\rho\alpha_2$	0.72	0.12	0.05	0.02	-0.07	-0.02	-0.01
$\rho\alpha_3$	0.65	0.14	0.07	0.04	-0.09	-0.03	-0.01
$\rho\alpha_4$	0.59	0.21	0.08	0.06	-0.10	-0.04	-0.02
$\rho\alpha_5$	0.52	0.23	0.10	0.08	-0.11	-0.06	-0.02
$\rho\alpha_6$	0.49	0.22	0.11	0.11	-0.14	-0.07	-0.02
$\rho\alpha_7$	0.48	0.19	0.10	0.12	-0.16	-0.08	-0.03
$\rho\alpha_8$	0.45	0.17	0.09	0.12	-0.18	-0.09	-0.03
$\rho\alpha_9$	0.39	0.14	0.07	0.14	-0.22	-0.09	-0.03

Σχήμα 2.6 Παράδειγμα Ιακωβιανού πίνακα για μοντέλο 1-D με 4 στρώματα (3 στρώματα και ημιχώρος) και 7 παραμέτρους.

2.5 Μέθοδοι αντιστροφής

Διάφορα σχήματα έχουν προταθεί για την επίλυση της αντιστροφής αντίστασης. Αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις προσεγγιστικές και τις ακριβείς τεχνικές αντιστροφής: α) **Οι προσεγγιστικές μέθοδοι αντιστροφής:** Αυτές οι μέθοδοι απλοποιούν το αντίστροφο πρόβλημα υποθέτοντας ότι είναι γραμμικό. Ορισμένες από αυτές είναι η τεχνική ψευδοτομής, η μέθοδος Zhody (1975) και οι τεχνικές οπισθοπροβολής (back-projection). Επειδή αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν ξεπεραστεί από τις ακριβείς τεχνικές και επίσης λόγω των αδυναμιών τους, δεν χρησιμοποιούνται

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

πλέον. β) **Ακριβείς μέθοδοι αντιστροφής:** Τα συστήματα αυτά αντιμετωπίζουν την αντιστροφή ως ένα μη γραμμικό πρόβλημα, πράγμα που συμβαίνει στην πραγματικότητα. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι μέθοδοι μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (Lines and Treitel, 1984), η τεχνική SVD (Lanczos, 1960, Lawson and Hanson, 1974), η μέθοδος του Marquadt (Levenberg, 1944 , Marquadt, 1969) και η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων με εξομάλυνση (Occam). Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούν τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για να επιλύσουν το αντίστροφο πρόβλημα.

Σε αυτή τη διατριβή, χρησιμοποιήθηκε η αντιστροφή ελαχίστων τετραγώνων με εξομάλυνση (Occam), η οποία είναι η πιο δημοφιλής. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα.

2.5.1 Αντιστροφή περιορισμένη λόγω εξομάλυνσης (Occam)

2.5.1.1 Βασικές αρχές

Η αντιστροφή με περιορισμούς εξομάλυνσης (που καλείται Αντιστροφή Occam) προτάθηκε από τον Constable και συνεργάτες (1987), που την εφάρμοσαν σε βυθοσκόπηση 1D (1D VES) και σε μαγνητοτελλουρικά δεδομένα (MT). Η μέθοδος αυτή επιβάλει την ύπαρξη εξομάλυνσης στη λύση σαν περιορισμό στο πρόβλημα αντιστροφής.

Η χρήση αυτού του είδους του περιορισμού ανήκει σε μια κατηγορία τεχνικών που είναι γνωστές ως τεχνικές κανονικοποίησης (regularization) των μη καλά τιθέμενων προβλημάτων και πιο συγκεκριμένα ανήκει στην κανονικοποίηση του Τικονόφ (Tikhonov, 1963).

Αυτή η μέθοδος παράγει τη λύση με τη μικρότερη δυνατή τραχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι επιδιώκεται το ομαλότερο μοντέλο, το οποίο θα απομακρυνόταν από την απλούστερη περίπτωση μόνο όσο χρειάζεται για να ταιριάζει στα δεδομένα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, είναι ότι δεν εξαρτάται από την επιλογή του αρχικού μοντέλου. Η εξομαλυμένη αντιστροφή μπορεί να μην αποφέρει την καλύτερη λύση, αλλά η λύση της έχει φυσικό νόημα και έτσι αποτελεί μία λογική αναπαράσταση της γης. Επιπλέον, η εξομάλυνση εγγυάται τη σταθερότητα της λύσης και η λύση εξαρτάται από τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν.

Το μη γραμμικό πρόβλημα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να οριστεί ως:

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

$$f(x) = y \tag{2.8}$$

όπου y είναι τα παρατηρούμενα δεδομένα, δηλαδή οι φαινόμενες αντιστάσεις, το x είναι η άγνωστη κατανομή αντίστασης και το f (x) είναι το ευθύ πρόβλημα, το οποίο είναι μια γνωστή συνάρτηση του μοντέλου. Η συνάρτηση f (x) μπορεί να επεκταθεί σε σειρά Taylor και αγνοώντας τους όρους υψηλότερης τάξης, εξάγεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$f(x + dx) = f(x) + Jdx \tag{2.9}$$

όπου dx είναι η διόρθωση μοντέλου και J είναι ο Ιακωβιανός πίνακας.

Η διαδικασία κανονικοποίησης αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ των παρατηρούμενων και των συνθετικών δεδομένων. Η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων (ή αλλιώς μέθοδος Gauss-Newton) επιδιώκει να βρει τη διόρθωση αντιστάσεων dx για την οποία το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων, e, γίνεται ελάχιστο. Θεωρώντας ότι ο Πίνακας J^TJ είναι μη – ιδιάζων (non-singular), οπότε έχει έναν αντίστροφο πίνακα, η διόρθωση του μοντέλου δίνεται από την εξίσωση:

$$dx = (J^T J)^{-1} J^T dy \tag{2.10}$$

Στη μέθοδο αυτή της αντιστροφής που περιορίζεται λόγω εξομάλυνσης επιδιώκεται πέρα από την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και η ελαχιστοποίηση της τραχύτητας. Οι όροι τραχύτητας έχουν την μορφή:

$$R = \|C\ x\|^2 \tag{2.11}$$

όπου C είναι ο πίνακας εξομάλυνσης (smoothness matrix) και x είναι ο πίνακας με τις παραμέτρους ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του μοντέλου.

Περιλαμβάνοντας τον όρο τραχύτητας (roughness term) η διόρθωση του μοντέλου δίνεται από τη σχέση:

$$dx = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J^T dy \tag{2.12}$$

όπου λ είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange και dy είναι η διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογιζόμενων δεδομένων (d^{obs}-d^{calc}).

Για το λόγο αυτό το νέο μοντέλο προκύπτει προσθέτοντας τη διόρθωση κάθε επανάληψης στο προηγούμενο μοντέλο:

$$x_{k+1} = x_k + dx_k \tag{2.13}$$

όπου k είναι ο αριθμός επανάληψης.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Η εξίσωση (2.12) δίνει τη διόρθωση του μοντέλου με την εξομάλυνση να εφαρμόζεται μόνο στις μεταβολές του μοντέλου. Αυτή είναι η τυπική αντιστροφή περιορισμένη λόγω εξομάλυνσης

2.5.1.2 Πίνακας εξομάλυνσης

Η ελαχιστοποίηση της τραχύτητας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τον πίνακα εξομάλυνσης C. Αυτός ο πίνακας ορίζει τις σχέσεις μεταξύ γειτονικών παραμέτρων στο μοντέλο. Αν N είναι ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου, τότε ο πίνακας εξομάλυνσης έχει N x N διαστάσεις. Κάθε σειρά στον πίνακα εξομάλυνσης αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη παράμετρο και πώς αυτή η παράμετρος σχετίζεται με τις παράπλευρες παραμέτρους της. Για την 1D περίπτωση ο πίνακας εξομάλυνσης γίνεται:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.14}$$

Τα στοιχεία του πίνακα παίρνουν την τιμή -1 για την ίδια την παράμετρο και 1 για τις παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται, ενώ όλα τα άλλα στοιχεία είναι μηδενικά.

2.5.1.3 Πολλαπλασιαστής Lagrange

Όταν ένας περιορισμός πρέπει να επιβληθεί σε ένα πρόβλημα, χρησιμοποιείται ο πολλαπλασιαστής Lagrange λ. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του βαθμού εξομάλυνσης στη λύση. Ένα από τα προβλήματα στη διαδικασία αντιστροφής με εξομάλυνση είναι να αποφασιστεί η κατάλληλη τιμή λ για να ζυγιστεί η ελαχιστοποίηση του σφάλματος και η ποσότητα εξομάλυνσης. Μεγάλες τιμές του λ οδηγούν σε πολύ ομαλά μοντέλα, ενώ πολύ μικρές τιμές καθιστούν την επίδραση της εξομάλυνσης μικρή με αποτέλεσμα η λύση να γίνεται ασταθής.

Έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την εύρεση της τιμής του πολλαπλασιαστή Lagrange. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι να ξεκινήσει η αντιστροφή με μια σχετικά υψηλή τιμή, προκειμένου να αποφευχθεί η αστάθεια, και να μειωθεί σταδιακά σε κάθε επανάληψη καθώς συγκλίνει η λύση. Άλλες μέθοδοι είναι η καμπύλη L (Lawson and Hanson, 1974) και η ενεργός περιορισμένη εξισορρόπηση - Active Constrained Balancing - ACB - (Yi et al., 2003).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Αυτό που υιοθετήθηκε στους αλγορίθμους αντιστροφής που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή ήταν, αφού δοθεί μία αρχική τιμή στον πολλαπλασιαστή Lagrange, να ακολουθεί ο παρακάτω έλεγχος:

[Αν] (αριθμός επανάληψης) >3 [ΚΑΙ] (αριθμός επανάληψης) < 10
Lagrange = Lagrange*0.7
[Τέλος]

έτσι ώστε, αρχικά που οι διαφορές των υπολογισμένων τιμών του αρχικού μοντέλου από τις πραγματικά μετρημένες τιμές είναι μεγάλες, να μην επιτρέπονται μεγάλες μεταβολές στο αρχικό μοντέλο ενώ με την πάροδο των επαναλήψεων που οι διαφορές των υπολογισμένων τιμών του τρέχοντος αρχικού μοντέλου από τις πραγματικά μετρημένες τιμές ολοένα μικραίνουν, να επιτρέπεται μεγαλύτερη διακύμανση των μεταβολών.

2.5.1.4 Κριτήρια Περαίωσης Διαδικασίας Αντιστροφής

Για να βρεθεί πόσο πλησιάζουν οι τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίζονται με τη μέθοδο αντιστροφής στις τιμές που έχουν μετρηθεί χρησιμοποιείται το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square - RMS) που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\frac{(d_i^{obs} - d_i^{calc})^2}{(d_i^{obs})^2}} \times 100 \qquad (2.15)$$

όπου d_i^{obs} είναι οι τιμές των μετρήσεών μας, d_i^{calc} είναι οι τιμές που προκύπτουν από τη διαδικασία αντιστροφής και M είναι το πλήθος των δεδομένων. Οπότε, επαναλαμβάνεται η διαδικασία αντιστροφής μέχρι το σφάλμα RMS να πέσει κάτω από ένα όριο που θέτουμε εμείς ή εφόσον ικανοποιηθεί κάποια από τις παρακάτω συνθήκες:

α) Απόκλιση: Εφόσον το σφάλμα αντί να μικραίνει κάποια στιγμή αυξηθεί λόγω θορύβου στις μετρήσεις ή λανθασμένης επιλογής πολλαπλασιαστή Lagrange.

β) Μικρή βελτίωση: Εφόσον το σφάλμα μικραίνει με πολύ αργό ρυθμό.

γ) Αριθμός επαναλήψεων: Εφόσον ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων.

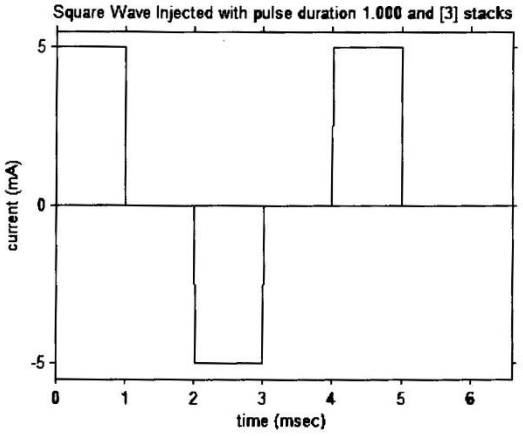
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

2.6 Μέθοδος Επαγόμενης Πόλωσης (Induced Polarization -IP)

Η μέθοδος επαγόμενης πόλωσης (Induced Polarization – IP) μπορεί να θεωρηθεί μία επέκταση της μεθόδου ηλεκτρικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αφού τα δεδομένα IP μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές και τα ίδια όργανα μέτρησης με αυτά της DC μεθόδου ERT ή VES.

2.6.1 Φορτιστικότητα (Chargeability)

Στη μέθοδο επαγόμενης πόλωσης, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης υπολογίζεται μία επιπλέον παράμετρος που καλείται φαινόμενη φορτιστικότητα και σχετίζεται με την ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει ηλεκτρικό ρεύμα με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την έκχυση ηλεκτρικού ρεύματος. Το έδαφος σε αυτήν την περίπτωση ενεργεί παρόμοια με έναν πυκνωτή.



Σχήμα 2.7 Τετραγωνικός παλμός για έγχυση ρεύματος στην μέθοδο Επαγόμενης Πόλωσης

Για να μετρηθεί η ενέργεια που αποθηκεύεται μετά από κάθε έκχυση (χρόνος on) υπάρχει μία ενδιάμεση παύση όπου δεν εκχύνεται ρεύμα (χρόνος off), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Κατά τη διάρκεια της παύσης (χρόνος off) η αποθηκευμένη ενέργεια εκλύεται από τα θαμμένα σώματα κάνοντάς τα να δρουν σαν δευτερεύουσες πηγές. Το δυναμικό αυτού του δευτερεύοντος ηλεκτρικού πεδίου μετριέται με το όργανο που συνδέεται στα ηλεκτρόδια δυναμικού σαν δευτερεύον δυναμικό, το οποίο, όταν σταματάμε να τροφοδοτούμε με ρεύμα, μειώνεται βαθμιαία πριν μηδενιστεί.

Ο λόγος μεταξύ του δευτερεύοντος δυναμικού αμέσως μετά την παύση του ρεύματος (Vs) και του αρχικού δυναμικού όσο το ρεύμα διοχετευόταν στη γη (Vm) αποτελεί τη λεγόμενη φορτιστικότητα, **η**, όπως ορίζεται από τον Siegel (1959).

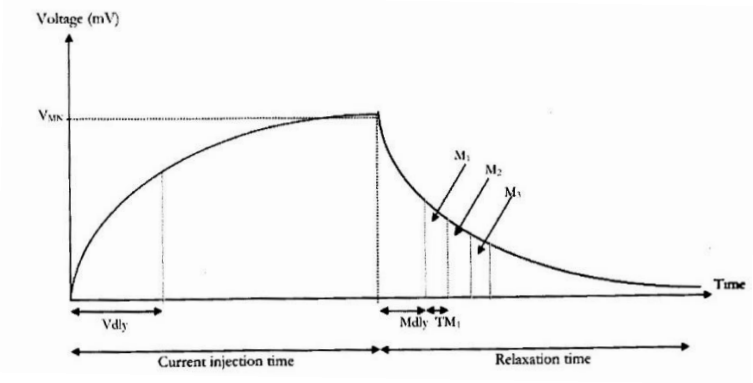
$$\eta = \frac{V_s}{V_m} \tag{2.16}$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Οι μεταβολές του δυναμικού με το χρόνο ενώ το ρεύμα ανοίγει και κλείνει παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8. Είναι προφανές ότι η φορτιστικότητα όπως περιγράφηκε παραπάνω είναι μέγεθος αδιάστατο και δεν μπορεί να υπερβεί το 1 V/V (Seigel, 1959), ωστόσο πρακτικά καταγράφουμε τις τιμές στην περιοχή ως 1000 mV/V.

Στην πραγματικότητα, το δευτερεύον δυναμικό, Vs, δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια για το λόγο ότι όταν το ρεύμα διακόπτεται εμφανίζονται ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που προσθέτουν «θόρυβο».

Για να αποφευχθεί η πόλωση των ηλεκτροδίων ρεύματος (πηγή) εξαιτίας της συγκέντρωσης ελεύθερων ανιόντων, το ρεύμα που διαχέουμε αλλάζει πολικότητα ώστε το ρεύμα που εισάγουμε στο έδαφος να έχει τη μορφή τετραγωνικού κύματος που αλλάζει πολικότητα περιοδικά (0.250 – 4 seconds). Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω φαινόμενο οι μετρήσεις παίρνονται μετά από κάποια καθυστέρηση. Μετά αυτήν την καθυστέρηση το δυναμικό μετριέται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ώστε να καταγραφεί το φθίνον δυναμικό. Το ολοκλήρωμα της καμπύλης στο Σχήμα 2.8 αποτελεί τη λεγόμενη ***φαινόμενη φορτιστικότητα*** της μέτρησης και δεν έχει συγκεκριμένη τιμή γιατί εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που επιλέγεται για τη λήψη του ολοκληρώματος της καμπύλης δυναμικού. Οι χρονικές στιγμές στις οποίες γίνονται οι μετρήσεις δυναμικού ονομάζονται χρονοπαράθυρα (time windows) ή κανάλια (channels). Στην παρούσα εργασία δε θα γίνει χρήση αυτής της ***φαινόμενης φορτιστικότητας***, που θα μπορούσαμε να τη διακρίνουμε ως ***φορτιστικότητα - IP*** αλλά με τον ίδιο όρο θα γίνεται αναφορά στη μετρούμενη φορτιστικότητα στο πεδίο του χρόνου (TDIP), ***φαινόμενη φορτιστικότητα – TDIP***, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω (παράγραφος 2.6.3).



Σχήμα 2.8 Τυπική IP καμπύλη δυναμικού (από το εγχειρίδιο του Syscal Pro)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

2.6.2 Μοντελοποίηση Επαγόμενης Πόλωσης (IP)

Πρόκειται για την εύρεση της φαινόμενης φορτιστικότητας (φορτιστικότητας – IP) που χαρακτηρίζει κάθε στρώμα του εδάφους. Στην παράγραφο 2.8.1 παρακάτω εξηγείται η διαδικασία αντιστροφής αυτών των δεδομένων, αλλά στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με το πεδίο του χρόνου.

2.6.3 Μοντελοποίηση Επαγόμενης Πόλωσης στο Πεδίο του Χρόνου (TDIP)

Κατά τη μοντελοποίηση αυτή ενδιαφέρουν οι μετρήσεις φορτιστικότητας (φορτιστικότητας – TDIP) σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά τη διακοπή έκχυσης ρεύματος στο έδαφος. Αυτό που μετριέται με τη βοήθεια του ειδικού οργάνου είναι το δυναμικό σε τετράδα ηλεκτροδίων, το οποίο μετασχηματίζεται από το όργανο σε μέτρηση φορτιστικότητας (σχέση 2.21, Siegel). Αυτή η τιμή φορτιστικότητας χαρακτηρίζεται ως φαινόμενη φορτιστικότητα κατά αναλογία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και πρόκειται για μία τιμή που αφορά στο πεδίο του χρόνου. Είναι, λοιπόν, μία τιμή ***φαινόμενης φορτιστικότητας – TDIP*** και αυτό θα εννοείται στο υπολογιστικό τμήμα της εργασίας όταν αναφέρεται η φαινόμενη φορτιστικότητα.

2.6.4 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP

Κατά την εφαρμογή μεθόδων αντιστροφής οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, $\boldsymbol{\rho_{aj}}$, που υπολογίζονται με βάση μετρήσεις δυναμικού DC σε ζεύγη ακροδεκτών $\boldsymbol{j}$ στην επιφάνεια της γης. Κατά τις μεθόδους αντιστροφής εξάγονται οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, $\boldsymbol{\rho_i}$, που χαρακτηρίζουν κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$ του μοντέλου του εδάφους που δεχόμαστε ως ισχύον. Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τις ίδιες μεθόδους αντιστροφής για την εξαγωγή των τιμών φορτιστικότητας $\boldsymbol{m_i^t}$ για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$ που θα χαρακτηρίζουν κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$ του μοντέλου του εδάφους, θα χρησιμοποιήσουμε έναν μετασχηματισμό της φορτιστικότητας που μετριέται κάποια χρονική στιγμή, $\boldsymbol{m_{aj}^t}$, σε ειδική ηλεκτρική αντίσταση, $\boldsymbol{\rho_{ajm}^t}$, που θα συνδέεται με αυτή τη χρονική στιγμή (σχέση 2.17). Προφανώς αυτή η τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεν έχει φυσικό νόημα, δεν πρόκειται δηλαδή για μία ιδιότητα του εδάφους που μεταβάλλεται με το χρόνο, αλλά είναι μία κατασκευασμένη μεταβλητή, και θα την ονομάζουμε ***ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP*** και στον δείκτη του συμβόλου της θα προστεθεί ένα $\boldsymbol{m}$.

$$\boldsymbol{\rho_{ajm}^t = \rho_{aj} \cdot \left(1 - m_{aj}^t\right)} \qquad (2.17)$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Έχοντας υπολογίσει για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων δυναμικού την τιμή της *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP*, $\boldsymbol{\rho_{ajm}^{t}}$, για μία χρονική στιγμή $\boldsymbol{t}$, μπορούμε χρησιμοποιώντας μία μέθοδο αντιστροφής DC να εξάγουμε τις τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$ του μοντέλου γης, $\boldsymbol{\rho_{im}^{t}}$. Κάνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό (σχέση 2.18) μπορούμε πλέον να έχουμε τη φορτιστικότητα $\boldsymbol{m_i^t}$ για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$ του μοντέλου γης.

$$\boldsymbol{m_i^t = \frac{\rho_i - \rho_{im}^t}{\rho_i}} \tag{2.18}$$

Επιτυγχάνεται, λοιπόν, με τη χρήση της κατασκευασμένης μεταβλητής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP και των γνωστών μεθόδων αντιστροφής DC να εξάγουμε τη φορτιστικότητα που εμφανίζει κάθε στρώμα του μοντέλου γης που δεχόμαστε ως ισχύον.

2.6.5 Παράμετροι Cole Cole

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο εξάγουμε τις τιμές φορτιστικότητας για κάθε στρώμα του μοντέλου για όλα τα χρονοπαράθυρα $\boldsymbol{t}$ και έτσι αποκτούμε για κάθε στρώμα μία φθίνουσα καμπύλη που περιγράφει την εκφόρτιση του στρώματος που προκαλείται μετά τη διακοπή έκχυσης ρεύματος σε μια μη ομοιόμορφη γη.

Βασιζόμενοι στο μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος Cole Cole (Pelton, 1978) η μορφή της φθίνουσας καμπύλης εκφόρτισης στρώματος γης χαρακτηρίζεται από τρεις παραμέτρους: την πραγματική φορτιστικότητα $\boldsymbol{\eta_0}$ (εξίσωση 2.21) και τις καλούμενες παραμέτρους Cole Cole $\boldsymbol{\tau}$ (χρόνος ηρεμίας) και $\boldsymbol{c}$ (συχνοτική εξάρτηση).

Αναπτύχθηκε μια διαδικασία για την εκτίμηση των παραμέτρων Cole Cole που χαρακτηρίζουν την καμπύλη εκφόρτισης ενός στρώματος χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο Gauss – Newton που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του RMS σφάλματος.

2.6.6 Εφαρμογές, Πλεονεκτήματα, Μειονεκτήματα Μεθόδου Επαγόμενης Πόλωσης

Στις εφαρμογές της μεθόδου της επαγόμενης πόλωσης περιλαμβάνονται η μεταλλευτική έρευνα, ο εντοπισμός Χ.Τ.Α, ο εντοπισμός υπόγειου νερού και ο υπολογισμός δυναμικού των υδροφόρων στρωμάτων.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος εφαρμογής, η ευκολία λήψης μετρήσεων και το μεγάλο εύρος εφαρμογών ενώ τα μειονεκτήματά της είναι η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη, η αρνητική επαγόμενη πόλωση, η δυσκολία ανίχνευσης πολλαπλών μεταλλοφόρων σωμάτων και ο θόρυβος λόγω επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών και ανθρωπογενών παραγόντων.

Η μέθοδος επαγόμενης πόλωσης (IP) έχει χρησιμοποιηθεί συστηματικά για την εξερεύνηση ορυκτών και η εφαρμογή της επεκτείνεται ενεργά στους υδρογεωλογικούς, περιβαλλοντικούς και τεχνικούς τομείς. Αυτή η διεύρυνση των εφαρμογών οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη φασματικών τεχνικών IP (SIP- Spectral IP) όχι μόνο στον τομέα συχνοτήτων αλλά και στον τομέα του χρόνου. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων SIP περιγράφουν πλήρως την απόκριση του εδάφους και των πετρωμάτων στην ηλεκτρική διέγερση, η οποία είναι συνάρτηση του τύπου ορυκτού ή πετρώματος και σχετίζεται με ορισμένες μικροδομές, όπως γεωμετρία διεπαφής διαστήματος πόρου, περιοχή επιφάνειας διεπαφής και ούτω καθεξής. Αυτό σημαίνει ότι η αντιστροφή και η ερμηνεία των δεδομένων SIP πρέπει να πραγματοποιηθούν έτσι ώστε να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε πλήρως αυτά τα διακριτά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα της μεθόδου SIP.

2.7 Επίλυση Ευθέος Προβλήματος σε 1D TDIP

Όπως είδαμε προηγουμένως, σύμφωνα με το μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος Cole Cole η μορφή της φθίνουσας καμπύλης επηρεάζεται από τρεις παραμέτρους: την πραγματική φορτιστικότητα $\boldsymbol{\eta_0}$ και τις παραμέτρους Cole Cole $\boldsymbol{\tau}$ (χρόνος ηρεμίας) και **c** (συχνοτική εξάρτηση).

Ο τύπος που υπολογίζει την φθίνουσα καμπύλη IP στο πεδίο του χρόνου, με βάση το μοντέλο Cole Cole, δόθηκε από τον Pelton (1978):

$$m(t) = \eta_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^{nc}}{\Gamma(1+nc)} \qquad (2.19)$$

όπου $\boldsymbol{\eta_0}$: η αρχική φορτιστικότητα της γης,

$\boldsymbol{\tau}$ και $\boldsymbol{c}$: οι παράμετροι Cole Cole,

$\boldsymbol{m(t)}$: η υπολογιζόμενη φορτιστικότητα τη δεδομένη στιγμή t.

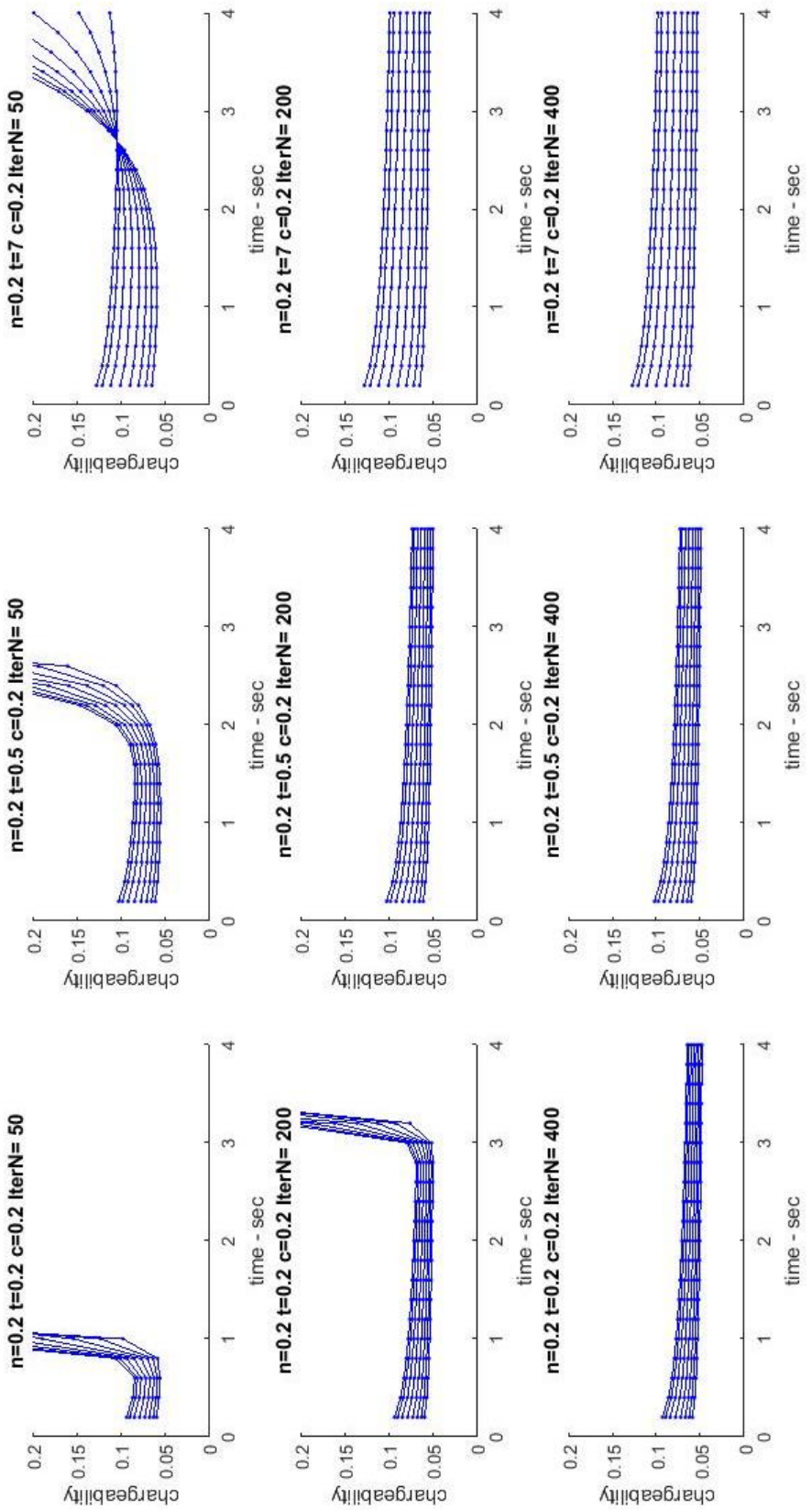
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πρόκειται για εκθετική μείωση της τάσης, όταν διακοπεί απότομα το συνεχές ρεύμα που διαβιβάζεται μέσα στην γη που συμβαίνει όταν το έδαφος πολώνεται ηλεκτρικά εξαιτίας της ύπαρξης κόκκων μεταλλικών ορυκτών σε πορώδη πετρώματα.

Επειδή δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τους άπειρους όρους του αθροίσματος και πρέπει να προσεγγίσουμε την τιμή της φορτιστικότητας m(t) με όσο το δυνατό μικρότερο αριθμό όρων για χάρη της ταχύτητας των υπολογισμών, έγινε διερεύνηση για τον κατάλληλο αριθμό των όρων του αθροίσματος **n** στον τύπο του Pelton για τον υπολογισμό της παραμέτρου $\boldsymbol{\eta_0}$ (Σχήμα 2.9). Για χαμηλές τιμές της παραμέτρου **τ** απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων ενώ για τιμές της παραμέτρου πάνω από 10 αρκούν οι 200 επαναλήψεις.

Αυτό που υιοθετήθηκε κατά το υπολογιστικό μέρος της εργασίας για να αποφευχθούν εμφανισθέντα περίεργα αποτελέσματα, που τελικά αποδόθηκαν στον μη σωστά ορισμένο αριθμό των επαναλήψεων στον τύπο του Pelton, ήταν να ορισθεί μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ίσος με 800 αλλά με έλεγχο για το πότε η συνεισφορά των τελευταίων όρων ήταν μικρότερη από 10^{-10} ώστε να μη χρειάζεται να υπολογίζονται οι όροι από ένα σημείο και μετά. Με τον τρόπο αυτό αποφεύχθηκε η εμφάνιση «περίεργων» καμπυλών φορτιστικότητας επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα να μην επιβαρυνθεί ιδιαίτερα ο χρόνος εκτέλεσης των προγραμμάτων αντιστροφής.

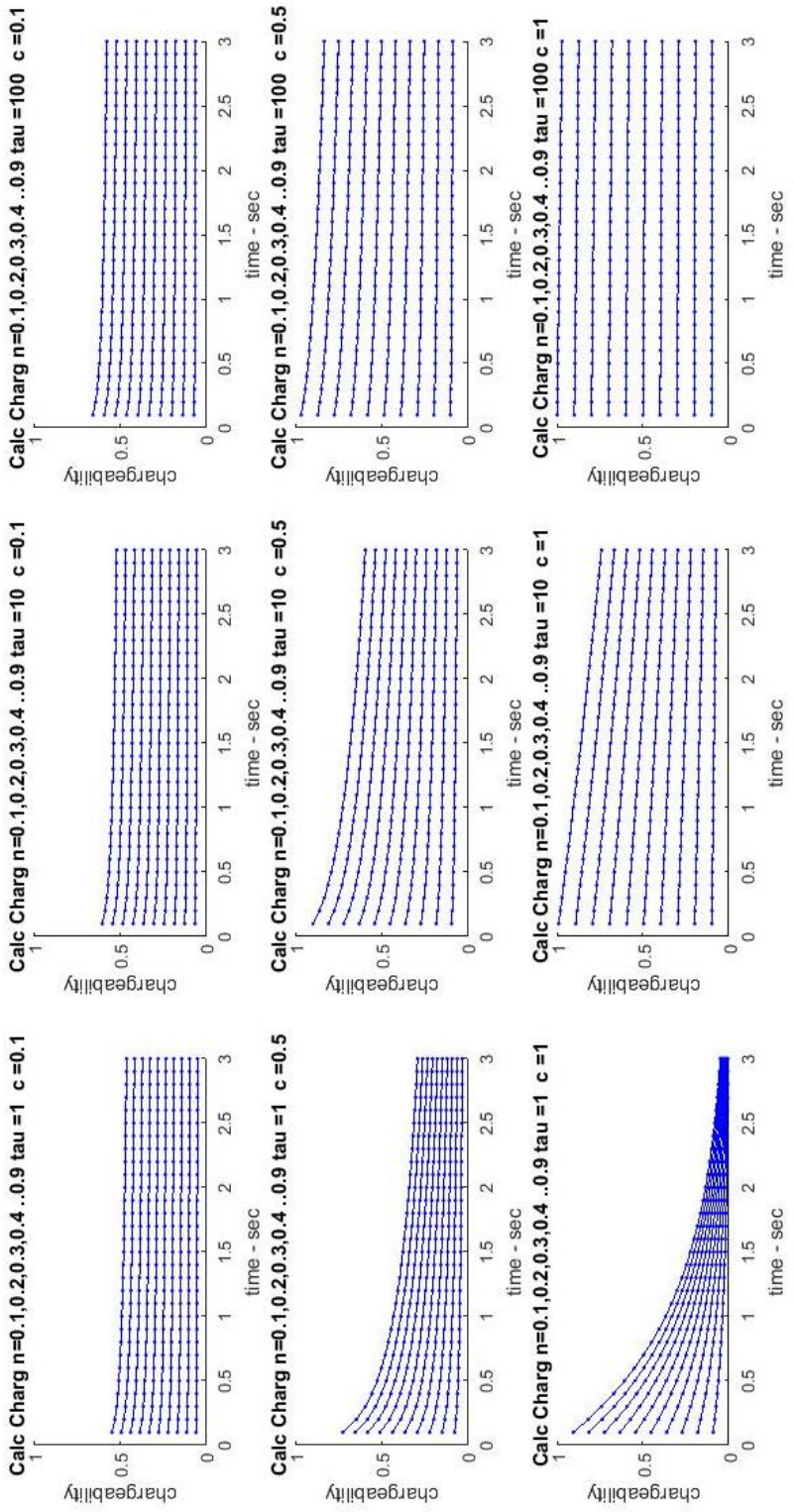
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 2.9 Διερεύνηση για τον κατάλληλο αριθμό επαναλήψεων στον τύπο του Pelton. Για χαμηλές τιμές της παραμέτρου τ απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων ενώ για τιμές πάνω από 10 αρκούν οι 200 επαναλήψεις

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζονται καμπύλες εκφόρτισης όπως προκύπτουν από τον τύπο του Pelton για διάφορες τιμές των παραμέτρων Cole Cole ώστε να αποκτήσουμε μία εποπτική εικόνα του τρόπου που κάθε παράμετρος επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης.



Σχήμα 2.10 Καμπύλες εκφόρτισης για διάφορες τιμές των παραμέτρων Cole Cole

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

2.8 Μέθοδοι Αντιστροφής στην Επαγόμενη Πόλωση

Το φαινόμενο επαγόμενης πόλωσης, αν και σημαντικό για την ανίχνευση δομών του υπεδάφους με ενδιαφέρον (μεταλλεύματα, νερό κ. λ. π), δεν υποστηρίχθηκε από ιδιαίτερα αποτελεσματικές μεθόδους αντιστροφής δεδομένων, τουλάχιστον τα προηγούμενα χρόνια.

Σήμερα η κατάσταση στις μεθόδους αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης έχει ως ακολούθως:

2.8.1 Αντιστροφή Δεδομένων Επαγόμενης Πόλωσης IP

Σε αυτό το σημείο αναφερόμαστε στα δεδομένα επαγόμενης πόλωσης που αφορούν στη *φαινόμενη φορτιστικότητα ή φορτιστικότητα IP* που προκύπτουν από την ολοκλήρωση της καμπύλης φορτιστικότητας από μία χρονική στιγμή μετά τη διακοπή έκχυσης ρεύματος στη γη και μετά. Εδώ, λοιπόν, δε χρειάζεται να ενεργήσουμε για τα διαφορετικά χρονοπαράθυρα ξεχωριστά αλλά για κάθε στρώμα χρειάζεται να καταλήξουμε σε μία μόνο τιμή φορτιστικότητας. Δεν μας ενδιαφέρει η μορφή της φθίνουσας καμπύλης φορτιστικότητας.

Η μέθοδος αντιστροφής επεξεργάζεται τα δεδομένα από τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $\boldsymbol{\rho_{\alpha j}}$, και της φαινόμενης φορτιστικότητας (IP) $\boldsymbol{m_{\alpha j}}$ για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων j.

Με τη μέθοδο αντιστροφής DC υπολογίζεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση $\boldsymbol{\rho_i}$ για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$.

Ακολούθως κατασκευάζεται η μεταβλητή "ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP" $\boldsymbol{\rho_{\alpha m}}$, με τη βοήθεια της εξίσωσης μετασχηματισμού

$$\boldsymbol{\rho_{\alpha jm} = \rho_{\alpha j} \cdot \left(1 - m_{\alpha j}\right)} \tag{2.20}$$

και υπολογίζεται η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP $\boldsymbol{\rho_{\alpha jm}}$για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων $\boldsymbol{j}$.

Με τη μέθοδο αντιστροφής DC υπολογίζεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP $\boldsymbol{\rho_{im}}$ για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$.

Τέλος με τη βοήθεια της αντίστροφης εξίσωσης μετασχηματισμού

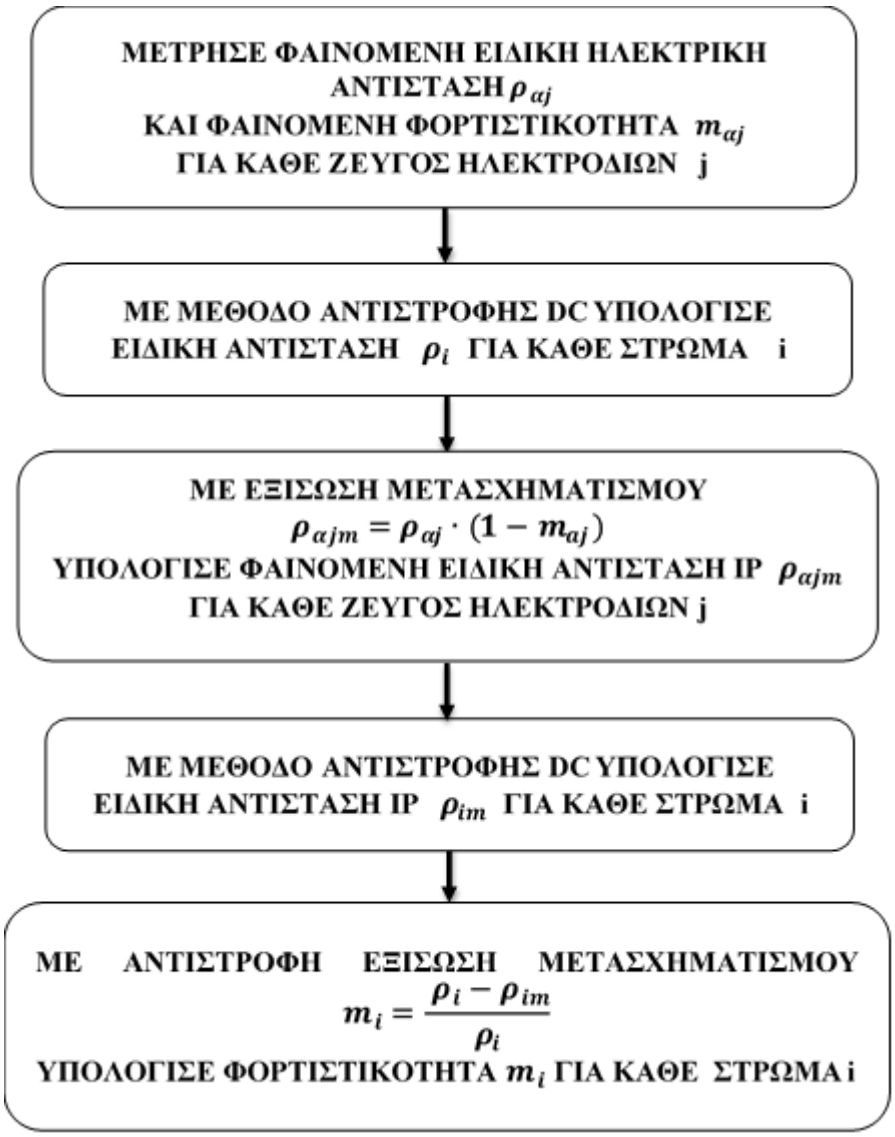
$$\boldsymbol{m_i = \frac{\rho_i - \rho_{im}}{\rho_i}} \tag{2.21}$$

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

υπολογίζεται η ζητούμενη φορτιστικότητα $\boldsymbol{m_i}$ για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$. Η περιγραφείσα παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται με σχηματική μορφή αλγορίθμου (διάγραμμα ροής στο παρακάτω Σχήμα 2.11.

Στην παρούσα εργασία, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, δεν έγινε χρήση αυτής της μεθόδου αλλά περιοριστήκαμε στα δεδομένα TDIP.



Σχήμα 2.11 Διάγραμμα ροής για αντιστροφή δεδομένων επαγόμενης πόλωσης IP

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

2.8.2 Αντιστροφή Χρονομεταβλητών Δεδομένων Επαγόμενης Πόλωσης TD IP

Στην αντιστροφή χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης η καθιερωμένη μέθοδος είναι η διακριτή αντιστροφή των δεδομένων για κάθε χρονοπαράθυρο που απεικονίζεται στο διάγραμμα του Σχήμα 2.8. Σε αυτήν τη μέθοδο για κάθε χρονοπαράθυρο γίνεται αντιστροφή των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο 2.8.1. Ακολουθεί ο σχηματισμός καμπυλών φορτιστικότητας για κάθε στρώμα του μοντέλου του εδάφους και καταλήγουμε στην εξαγωγή των τριών παραμέτρων Cole Cole από κάθε καμπύλη φορτιστικότητας ώστε να χαρακτηρίζεται το κάθε στρώμα από αυτήν την τριάδα παραμέτρων.

Τα δεδομένα μας είναι η Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση $\boldsymbol{\rho_{aj}}$ για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων $\boldsymbol{j}$ και η Φαινόμενη Φορτιστικότητα $\boldsymbol{m_{aj}^{t}}$ για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων $\boldsymbol{j}$ για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$.

Με τη μέθοδο αντιστροφής DC (αλγόριθμος Α, διάγραμμα ροής στο Σχήμα 2.13) υπολογίζουμε την Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση $\boldsymbol{\rho_i}$ για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$.

Για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων $\boldsymbol{j}$, χρησιμοποιώντας την εξίσωση μετασχηματισμού

$$\boldsymbol{\rho_{ajm}^{t} = \rho_{aj} \cdot \left(1 - m_{aj}^{t}\right)} \tag{2.22}$$

υπολογίζουμε τη Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση IP $\boldsymbol{\rho_{ajm}^{t}}$ για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$.

Για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$ λαμβάνουμε τις τιμές $\boldsymbol{\rho_{ajm}^{t}}$ για όλες τις θέσεις μέτρησης j κατασκευάζοντας μία βυθοσκόπηση που αντιστοιχεί σε αυτό το χρονοπαράθυρο. Να τονίσουμε και εδώ ότι αυτές οι βυθοσκοπήσεις δεν έχουν άμεσο φυσικό νόημα αλλά δίνουν έμμεσα την «κατανομή της φορτιστικότητας» στις θέσεις μέτρησης για ένα χρονοπαράθυρο η κάθε μία.

Χρησιμοποιώντας εκ νέου τη μέθοδο αντιστροφής DC (αλγόριθμος Α, διάγραμμα ροής στο Σχήμα 2.13) για κάθε βυθοσκόπηση που δημιουργήσαμε για κάθε χρονοπαράθυρο υπολογίζουμε την Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση IP $\boldsymbol{\rho_{im}^{t}}$ για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$ για όλα τα χρονοπαράθυρα $\boldsymbol{t}$.

Τέλος με την εξίσωση αντίστροφου μετασχηματισμού

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

$$\boldsymbol{m_i^t = \frac{\rho_i - \rho_{im}^t}{\rho_i}} \quad (2.23)$$

υπολογίζεται η φορτιστικότητα $\boldsymbol{m_i^t}$ για κάθε στρώμα ***i*** για κάθε χρονοπαράθυρο ***t***.

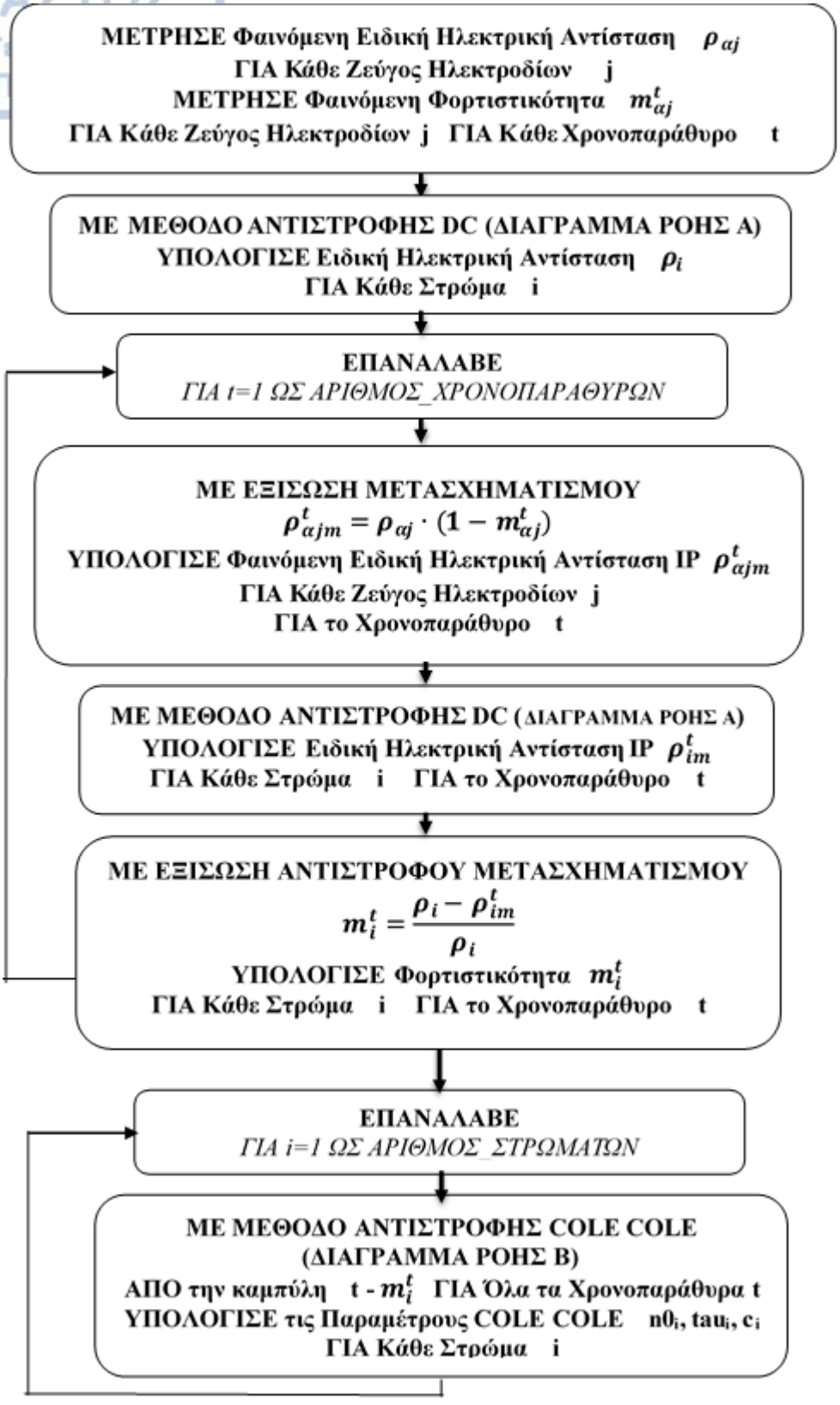
Μετά την κατασκευή των φθινουσών καμπύλων φορτιστικότητας t - $\boldsymbol{m_i^t}$ για κάθε στρώμα i υπολογίζονται οι παράμετροι Cole Cole, n_0(i), tau(i), c(i), με τη μέθοδο αντιστροφής Gauss Newton (Αλγόριθμος Β, διάγραμμα στο Σχήμα 2.14).

Η συνολική διαδικασία διακριτής αντιστροφής των Χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TD IP) δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής στο Σχήμα 2.12.

Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική αλλά βασίζεται, όπως είδαμε, σε τόσες ανεξάρτητες διαδικασίες αντιστροφής όσες είναι τα χρονοπαράθυρα. Σε κάθε μία από αυτές τις αντιστροφές δε λαμβάνεται υπόψη τι συμβαίνει στις υπόλοιπες. Η παρουσία θορύβου μπορεί να δώσει αποτελέσματα αρκετά διαφορετικά σε μία διαδικασία σε σχέση με αυτές των προηγούμενων ή επόμενων χρονοπαραθύρων ώστε όταν περνάμε στο επόμενο βήμα της μεθόδου όπου για κάθε τετράδα ακροδεκτών σχηματίζουμε τις καμπύλες ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP και από αυτές τις καμπύλες φορτιστικότητας να παρατηρείται μορφή καμπύλης όχι τέλεια εκθετικά φθίνουσα. Μάλιστα, είναι συχνό το φαινόμενο να έχουμε καμπύλη με τιμή φορτιστικότητας σε ένα χρονοπαράθυρο μεγαλύτερη από αυτήν του προηγούμενου.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να τίθεται η μέθοδος σε αμφισβήτηση ως προς την ακρίβειά της όταν έχουμε δεδομένα από το πεδίο με αρκετό θόρυβο. Και αυτό είναι που οδήγησε την επιστημονική κοινότητα να αναζητάει την ανάπτυξη μεθόδων όπου να λαμβάνονται κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων που μετρούνται σε ένα χρονοπαράθυρο υπόψη τα δεδομένα μέτρησης κατά τα άλλα χρονοπαράθυρα.

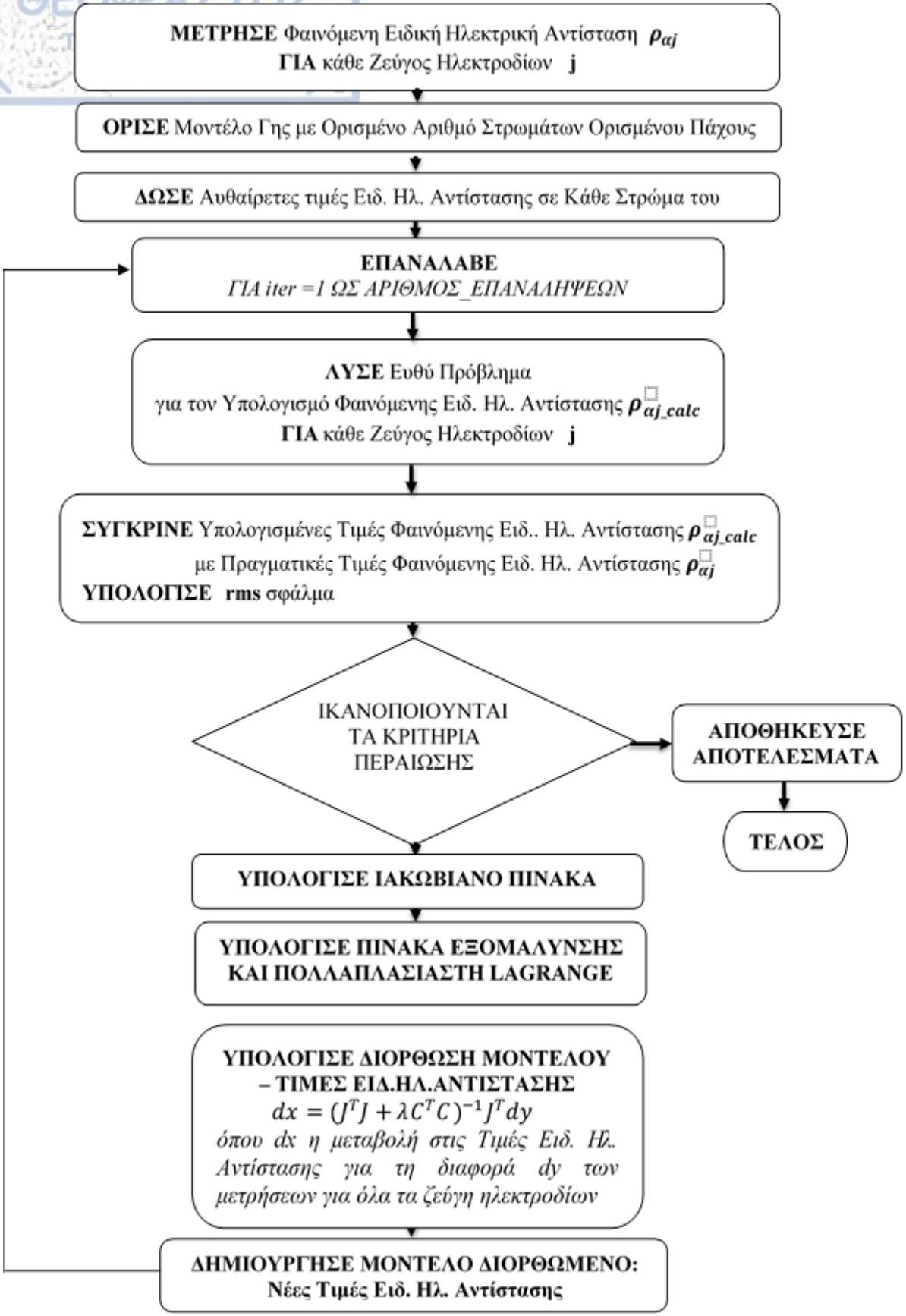
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 2.12 Διάγραμμα ροής για διακριτή αντιστροφή δεδομένων επαγόμενης πόλωσης IP στο πεδίο του χρόνου (TDIP)

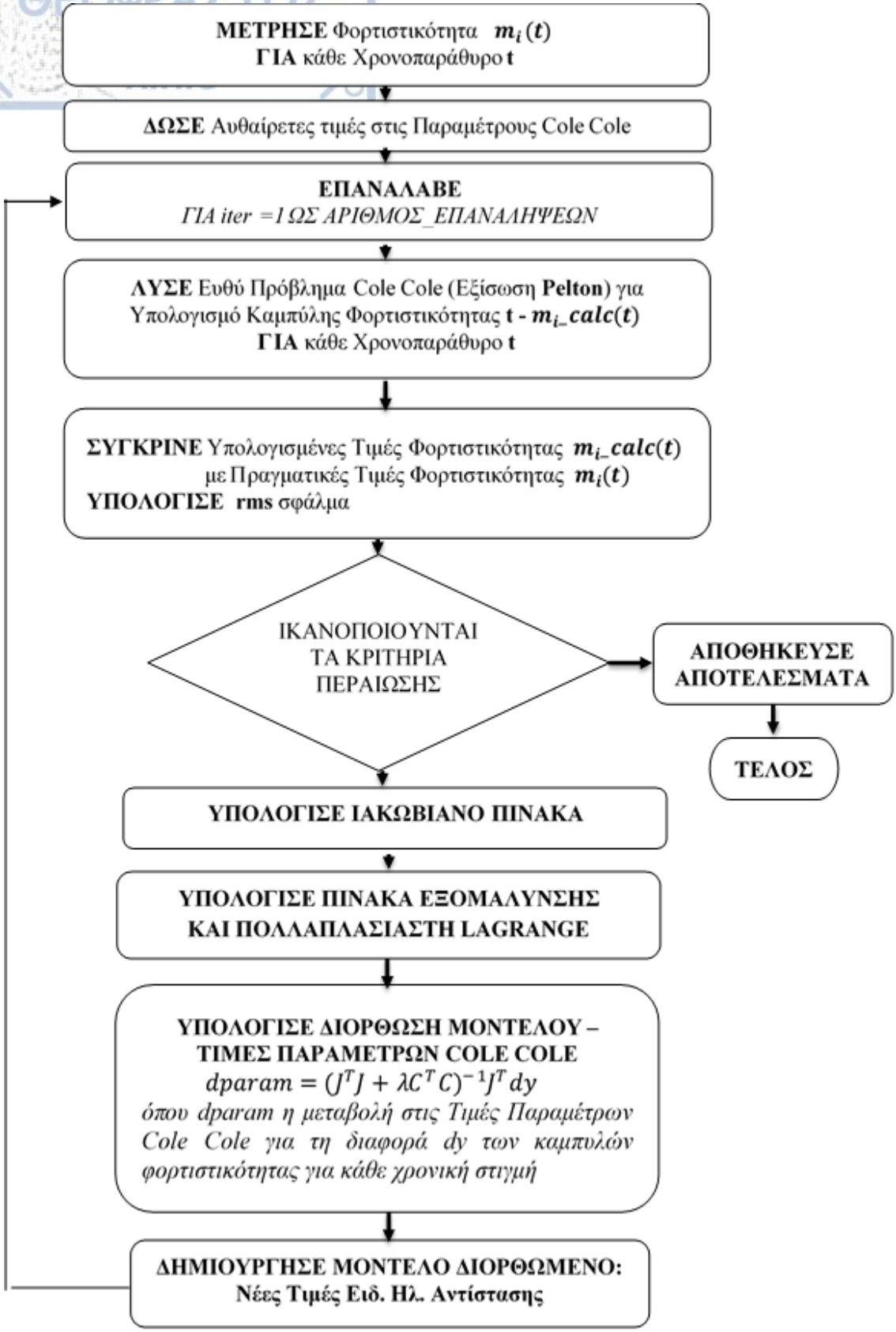
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα ροής Α για Αλγόριθμο Αντιστροφής DC δεδομένων Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης 1D (VES – βυθοσκόπηση)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 2.14 Διάγραμμα ροής Β για Αλγόριθμο Αντιστροφής δεδομένων Φορτιστικότητας στο πεδίο του χρόνου για εξαγωγή των Παραμέτρων Cole Cole

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

2.8.3 Αντιστροφή Χρονομεταβλητών Συχνοτικών Δεδομένων Επαγόμενης Πόλωσης (Inversion of Time-domain SIP Data)

Μέχρι τώρα έχουμε αναφερθεί στην επαγόμενη πόλωση - IP όπου το ρεύμα που διοχετεύεται στη γη είναι συνεχές (DC). Συστηματική, όμως πλέον, είναι η πρακτική διοχέτευσης εναλλασσόμενου ρεύματος ώστε η ειδική ηλεκτρική αντίσταση που μετριέται είναι μιγαδική και εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος. Τα δεδομένα που προκύπτουν ονομάζονται δεδομένα Φασματικής Επαγόμενης Πόλωσης και η μέθοδος αυτή ονομάζεται Φασματική Επαγόμενη Πόλωση (Spectral Induced Polarization – SIP) και συνεισφέρει σημαντικά στην εξερεύνηση ορυκτών και σε εφαρμογές στον υδρογεωλογικό, περιβαλλοντικό και τεχνικό τομέα. Αυτή η διεύρυνση των εφαρμογών οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη φασματικών τεχνικών IP (SIP) όχι μόνο στον τομέα συχνοτήτων αλλά και στον τομέα του χρόνου.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων SIP περιγράφουν πλήρως την απόκριση του εδάφους και των πετρωμάτων στην ηλεκτρική διέγερση, η οποία είναι συνάρτηση του τύπου ορυκτού ή πετρώματος και σχετίζεται με ορισμένες μικροδομές, όπως γεωμετρία διεπαφής διαστήματος πόρου ή περιοχή επιφάνειας διεπαφής. Αυτό σημαίνει ότι η αντιστροφή και η ερμηνεία των δεδομένων SIP πρέπει να πραγματοποιηθούν έτσι ώστε να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε πλήρως αυτά τα διακριτά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα της μεθόδου SIP. Έχουν προταθεί πολλοί αλγόριθμοι αντιστροφής των δεδομένων IP πολλών καναλιών στο πεδίο του χρόνου τις τελευταίες δύο δεκαετίες (π.χ. Yuval and Oldenburg, 1997, Johnson et al., 2010). Σχεδόν όλοι τους επεξεργάστηκαν τα δεδομένα SIP με ανεξάρτητο τρόπο, όπου τα δεδομένα IP για κάθε χρονικό κανάλι αντιστρέφονται ξεχωριστά.

Στην παρούσα εργασία το ρεύμα είναι συνεχές οπότε αναφερόμαστε σε δεδομένα αμιγώς IP και όχι σε SIP.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΜΕΣΗΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 1D – TDIP

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται το πρόβλημα αντιστροφής των χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης και οι μέθοδοι που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Επίσης προτείνεται ένας Αλγόριθμος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα για την αντιστροφή των δεδομένων 1D -TDIP με τον οποίο εξάγονται απευθείας οι παράμετροι Cole Cole χωρίς να μεσολαβεί το στάδιο της δημιουργίας των καμπυλών φορτιστικότητας κάθε στρώματος που υπάρχει στη μέθοδο της διακριτής αντιστροφής.

3.1 Υπάρχουσες μέθοδοι αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP)

3.1.1 Μέθοδοι Διακριτής αντιστροφής για κάθε χρονοπαράθυρο.

Έχουν προταθεί πολλοί αλγόριθμοι αντιστροφής των δεδομένων IP πολλαπλών καναλιών – χρονοπαραθύρων στο πεδίο του χρόνου κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες (π.χ., Yuval and Oldenburg, 1997, Johnson et al., 2010). Σχεδόν όλοι επεξεργάστηκαν τα δεδομένα IP (ή SIP) με ανεξάρτητο τρόπο, όπου τα δεδομένα IP για κάθε χρονικό κανάλι αντιστρέφονται ξεχωριστά.

Η διαδικασία για την εκτίμηση των παραμέτρων Cole Cole από τις έρευνες πόλωσης που διενεργούνται στο πεδίο του χρόνου σε μια μη ομοιόμορφη γη, σε γενικές γραμμές, είναι η ακόλουθη:

Κατ’ αρχάς λαμβάνονται οι μετρήσεις DC δυναμικού στο σύνολο των ακροδεκτών της διάταξης. Μετατρέπονται οι μετρήσεις DC δυναμικού σε τιμές φαινόμενης αντίστασης (παράγραφος **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**) και ακολουθεί η διαδικασία της αντιστροφής από την οποία προκύπτουν οι τιμές της πραγματικής αντίστασης κάθε στρώματος του μοντέλου γης που θεωρούμε ότι ισχύει. Ακολουθεί η λήψη των μετρήσεων επαγόμενης πόλωσης που αφορά στις τιμές της φορτιστικότητας για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων και για κάθε χρονοπαράθυρο (time window ή channel). Για κάθε χρονοπαράθυρο, αρχικά μετατρέπουμε τις τιμές φορτιστικότητας TDIP σε τιμές *φαινόμενης αντίστασης IP*.

Τα δεδομένα φαινόμενης φορτιστικότητας που μετρούνται σε στιγμές t μετά την παύση του ρεύματος εισόδου υπόκεινται στη διαδικασία αντιστροφής χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο 1D αντιστροφής για την ανάκτηση της πραγματικής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Υπάρχουσες μέθοδοι αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP)

φορτιστικότητας της δομής του εδάφους για όλα τα χρονοπαράθυρα (κανάλια) κατά τα οποία ελήφθησαν μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης.

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο εξάγουμε τις τιμές φορτιστικότητας για κάθε στρώμα του μοντέλου για όλα τα χρονοπαράθυρα $\boldsymbol{t}$ και έτσι αποκτούμε για κάθε στρώμα μία φθίνουσα καμπύλη που περιγράφει την εκφόρτιση του στρώματος που προκαλείται μετά τη διακοπή έκχυσης ρεύματος σε μια μη ομοιόμορφη γη.

Αναπτύχθηκε μια διαδικασία για την εκτίμηση των παραμέτρων Cole Cole που χαρακτηρίζουν την καμπύλη εκφόρτισης ενός στρώματος χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο Gauss – Newton που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του RMS σφάλματος όσον αφορά στις τιμές φορτιστικότητας. Η όλη παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής στο Σχήμα 2.12

Λόγω της προσέγγισης της ανεξάρτητης αντιστροφής, οι καμπύλες φορτιστικότητας που κατασκευάζονται από πολλά μοντέλα ανεστραμμένης φορτιστικότητας είναι ακανόνιστες και δεν πληρούν τα βασικά χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτιστικότητας. Γίνεται αντιστροφή για τις τιμές DC καθώς και για κάθε χρονοπαράθυρο (time window) χωριστά ώστε να προκύψουν τιμές φορτιστικότητας που να είναι διαφορετικές σε κάθε στρώμα για κάθε διαφορετική χρονική στιγμή. Έτσι σχηματίζουμε για κάθε στρώμα του υπεδάφους μια καμπύλη εκφόρτισης που κανονικά πρέπει να έχει μορφή εκθετικά φθίνουσας καμπύλης.

Για την εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole μπορούν να χρησιμοποιηθούν random τεχνικές όπως η Monte Carlo ή κάποια άλλη πιο ειδική μη γραμμική μέθοδος (πχ Particle Swarm Optimization, Nivorlis, 2017). Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η μέθοδος Gauss – Newton και διαπιστώνεται ότι, όπως αναφέρει και η βιβλιογραφία, οι λύσεις που προκύπτουν για τις παραμέτρους Cole Cole για τα στρώματα του μοντέλου του υπεδάφους που μελετούμε εξαρτώνται ισχυρά από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων που θέτουμε κατά την εφαρμογή της μεθόδου Gauss – Newton για την εξαγωγή των παραμέτρων.

Για να ξεπεραστεί το παραπάνω αναφερόμενο πρόβλημα προτείνεται σε αυτή την εργασία (κεφάλαιο 4) μία εμπειρική μέθοδος για την απεξάρτηση της τελικής υπολογιζόμενης τιμής των παραμέτρων Cole Cole από τις αρχικές τιμές τους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

3.1.2 Μέθοδος KIM Συνολικής Αντιστροφής με Περιορισμό Εξομάλυνσης Χώρου και Χρόνου

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο οι περισσότεροι αλγόριθμοι αντιστροφής των δεδομένων IP πολλών καναλιών στο πεδίο του χρόνου τις τελευταίες δύο δεκαετίες επεξεργάστηκαν τα δεδομένα IP με ανεξάρτητο τρόπο, όπου τα δεδομένα IP για κάθε χρονικό κανάλι αντιστρέφονται ξεχωριστά. Εξαιτίας αυτής της προσέγγισης ανεξάρτητων αντιστροφών, οι καμπύλες εκφόρτισης που κατασκευάζονται από πολλά μοντέλα της αντεστραμμένης φορτιστικότητας είναι συχνά ακανόνιστες και δεν πληρούν τα βασικά χαρακτηριστικά της καμπύλης εκφόρτισης (Kim et al, 2012).

Η ανάγκη για μία πιο ολοκληρωτική προσέγγιση της αντιστροφής είχε σαν αποτέλεσμα να αναπτυχθούν μία σειρά αλγορίθμων που αντιμετωπίζουν τα δεδομένα όλων των χρονοπαραθύρων σαν ένα σύνολο δεδομένων και όχι σαν ξεχωριστά σύνολα.

Κατά την ενιαία αντιστροφή του Kim (Kim et al, 2012) για να προκύψουν οι τιμές φορτιστικότητας για κάθε στρώμα του μοντέλου γης για κάθε χρονοπαράθυρο λαμβάνονται υπόψη οι τιμές φορτιστικότητας σε προηγούμενα και επόμενα κανάλια - χρονοπαράθυρα με εξομάλυνση τόσο στο πεδίο του χώρου όσο και στο πεδίο του χρόνου.

Αναπτύχθηκε, κατά αυτόν τον τρόπο, ένας νέος αλγόριθμος αντιστροφής δεδομένων SIP στο πεδίο του χρόνου, κατά τον οποίο όλα τα δεδομένα πολλών χρονο-καναλιών αντιστρέφονται ταυτόχρονα. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, οι αριθμοί καναλιών ενσωματώνονται ως μία νέα διάσταση. Ορίζονται τα σύνολα δεδομένων πολλαπλών καναλιών των δεδομένων φορτιστικότητας ως ένα ενιαίο διάνυσμα δεδομένων στα πεδία χώρου και καναλιών και, ομοίως, πολλές κατανομές φορτιστικότητας ως ένα ενιαίο μοντέλο φορτιστικότητας η οποία εκτείνεται στο πεδίο του χωρο-χρόνου (χωρο-καναλιού). Αυτοί οι ορισμοί επιτρέπουν να εισαχθούν κανονικοποιήσεις στο αντίστροφο μοντέλο όχι μόνο στο πεδίο του χώρου αλλά και στο πεδίο του χρόνου (καναλιού). Παρουσιάστηκε η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου μέσω συνθετικών δεδομένων καθώς και κατά την εφαρμογή πραγματικών δεδομένων. Η νέα προσέγγιση αντιστροφής μπορεί να δημιουργήσει ένα λογικό μοντέλο φορτιστικότητας στον πεδίο του χωρο-χρόνου (χωρο-καναλιού) στο οποίο οι καμπύλες της φορτιστικότητας που προκύπτουν από τη διαδικασία αντιστροφής φθίνουν ομαλά και μονότονα. Αυτή η απόδοση του προτεινόμενου αλγόριθμου

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Υπάρχουσες μέθοδοι αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP)

επιτρέπει να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα της μεθόδου SIP.

Η αντικειμενική λειτουργία της ταυτόχρονης αντιστροφής των φασματικών δεδομένων (Spectral Induced Polarization – SIP) στο πεδίο του χρόνου εκφράζεται με τρεις όρους ποινής:

$$\boldsymbol{\Phi = \Xi + \lambda\Psi + \alpha\Gamma} \tag{3.1}$$

όπου $\boldsymbol{\Xi}$ ένα μέτρο της αποτυχίας προσαρμογής δεδομένων, $\boldsymbol{\Psi}$ ένα μέτρο της μη εξομάλυνσης του μοντέλου στο πεδίο του χώρου, και $\boldsymbol{\Gamma}$ ένα μέτρο της μη εξομάλυνσης του μοντέλου στο πεδίο της φορτιστικότητας. Οι **λ** και **α** είναι σταθερές που συνήθως ονομάζονται *Lagrangian* πολλαπλασιαστές και πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα. Ο τρίτος όρος, **Γ**, εισάγεται για να προσθέσει την κατανομή φορτιστικότητας πολλαπλών καναλιών που φθίνει μονότονα κατά μήκος του άξονα φορτιστικότητας (αριθμός καναλιού SIP).

Η φορτιστικότητα σε ένα ομοιογενές μέσο πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση με μηδέν και μικρότερη ή ίση με τη μονάδα: $0 \leq m \leq 1$. Για να ενσωματωθούν αυτά τα εγγενή χαρακτηριστικά της πραγματικής φορτιστικότητας και για να σταθεροποιηθεί περαιτέρω η διαδικασία αντιστροφής, ο περιορισμός ανισότητας που προτείνεται από Kim et al. (1999) εφαρμόζεται στην παράμετρο αντιστροφής:

$$x = log(\frac{m-m_{min}}{m_{max}-m}), \text{ οπότε } x = log(\frac{m}{1-m}) \tag{3.2}$$

όπου το x είναι η μετασχηματισμένη φορτιστικότητα. Η φαινόμενη φορτιστικότητα που μετράται σε ένα ανομοιογενές μέσο, από την άλλη πλευρά, πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του -1 και μικρότερη ή ίση του +1: $-1 \leq m_a \leq +1$. Όταν η 2D κατανομή φορτιστικότητας ικανοποιεί την συνθήκη, $0 \leq m \leq 1$, τότε η φαινόμενη φορτιστικότητα ικανοποιεί αυτόματα τη συνθήκη, $-1 \leq m_a \leq +1$.

Συμπερασματικά αναπτύχθηκε ένας Αλγόριθμος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για την ταυτόχρονη αντιστροφή των δεδομένων SIP πολλών καναλιών στο πεδίο του χρόνου, στο οποίο τόσο το DC μοντέλο του υπεδάφους όσο και τα δεδομένα των χρονοπαραθύρων ορίζονται σε χωρο-χρονικό πεδίο (space-channel domain). Ενσωματώνεται στον αλγόριθμο ένας περιορισμός ανισότητας έτσι ώστε η φορτιστικότητα που προκύπτει από τη διαδικασία της αντιστροφής να βρίσκεται εντός ορίων με φυσική σημασία.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Μία σημαντική συμβολή της μελέτης αυτής είναι η εισαγωγή ενός περιορισμού κατά μήκος του χρονικού άξονα του καναλιού SIP έτσι ώστε να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά SIP που να έχουν φυσική σημασία σε όλο το αντίστροφο μοντέλο. Τα αριθμητικά πειράματα κατέδειξαν ότι η νέα προσέγγιση αντιστροφής μπορεί να δημιουργήσει ένα σύνολο εύλογων κατανομών φορτιστικότητας. Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτουν καμπύλες φορτιστικότητας ομαλές και γνησίως φθίνουσες.

Μια σημαντική πτυχή που εξηγείται από την εφαρμογή δεδομένων πεδίου είναι ότι τα στρώματα γης μπορούν να ταξινομηθούν βάσει των χαρακτηριστικών των καμπυλών φορτιστικότητας που προκύπτουν από τη διαδικασία αντιστροφής· ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε είναι ικανός να κάνει αυτό το πλεονέκτημα της μεθόδου SIP πρακτικά πραγματοποιήσιμο.

3.1.3 Μέθοδος Αντιστροφής Διαφοράς

Η Μέθοδος Αντιστροφής Διαφοράς (LaBrecque et al, 2001) αποτελεί μία ενδιάμεση μέθοδο μεταξύ της διακριτής αντιστροφής κάθε χρονοπαράθυρου ξεχωριστά και της συνολικής αντιστροφής του Kim.

Ένας αλγόριθμος αντιστροφής τρισδιάστατου (3D) Occam για την τομογραφία ηλεκτρικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τροποποιείται ώστε να επιτρέπει την αντιστροφή των διαφορών μεταξύ των DC μετρήσεων και των επόμενων συνόλων δεδομένων που λαμβάνονται κατά τα διαδοχικά χρονοπαράθυρα.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποιείται για επιτόπιες εφαρμογές παρακολούθησης. Η αντίσταση που προκύπτει από την αντιστροφή των δεδομένων των DC μετρήσεων χρησιμεύει ως το a priori μοντέλο στην αντιστροφή διαφορών. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα σε αυτή τη μέθοδο. Πρώτον, η σύγκλιση είναι γρήγορη αφού η ρουτίνα αντιστροφής χρειάζεται μόνο να βρει μικρές διαταραχές γύρω από μια καλή αρχική πρόβλεψη. Δεύτερον, συστηματικά σφάλματα όπως αυτά που οφείλονται σε σφάλματα στη διευθέτηση των συστημάτων μέτρησης στο πεδίο τείνουν να ακυρώνονται. Το αποτέλεσμα είναι ότι μπορούμε να προσαρμόσουμε τα δεδομένα διαφοράς πολύ πιο καλά από τα μεμονωμένα δυναμικά. Καλύτερη προσαρμογή δεδομένων ισοδυναμεί με καλύτερη ανάλυση με λιγότερα τεχνουργήματα (artifacts) κατά τη διαδικασία αντιστροφής. Η τεχνική της αντιστροφής διαφοράς εφαρμόστηκε στην επιτόπια παρακολούθηση της αποκατάστασης του περιβάλλοντος με διοχέτευση ατμού στο Portsmouth, Ohio, και στην παρακολούθηση της ροής ρευστών σε ρήγματα στη θέση Canyon Box κοντά στο Idaho στο Εθνικό Εργαστήριο Μηχανικών. Με τη μέθοδο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Υπάρχουσες μέθοδοι αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP)

αντιστροφής διαφοράς επιλύθηκαν καλύτερα οι μικρές αλλαγές αγωγιμότητας. Η αντιστροφή διαφοράς παρήγαγε εικόνες υψηλής ποιότητας με λιγότερα σφάλματα, και στην περίπτωση του Box Canyon χρειάστηκε μόνο 25% έως 50% του χρόνου εκτέλεσης της τυπικής αντιστροφής Occam (LaBrecque et al, 2001).

3.1.3.1 Αλγόριθμος αντιστροφής διαφοράς

Για συστήματα όπου κυριαρχούν άσχετα σφάλματα, η διακύμανση του συνόλου δεδομένων των διαφορών θα ήταν μεγαλύτερη από αυτή των μεμονωμένων συστημάτων και η αντιστροφή διαφοράς θα είχε ελάχιστο ή μηδενικό όφελος. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα δεδομένα στις θέσεις που παρουσιάζονται στη δημοσίευση LaBrecque et al, (2001) ήταν επαναλαμβανόμενα εντός του 1% και η πλειονότητα των δεδομένων ήταν επαναλαμβανόμενα εντός του 0.1%.

Η επαναληψιμότητα δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας και τις αντίστροφες (reciprocal) μετρήσεις και τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των δεδομένων του υπεδάφους. Ωστόσο, η παραδοσιακή αντιστροφή, έδωσε δεδομένα με προσαρμογή από 5 έως 10%. Αυτό από μόνο του δεν αποτελεί καθοριστική ένδειξη συστηματικών λαθών καθώς φτωχή προσαρμογή δεδομένων μπορεί να προκύψει για διάφορους λόγους. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες γνωστές πηγές σφάλματος αυτού του μεγέθους όπως σφάλματα εντός της προκαθορισμένης διαφοροποίησης μοντέλου, σφάλματα στην προσέγγιση των ηλεκτροδίων πεπερασμένου μεγέθους ως σημειακές πηγές καθώς και λόγω απόκλισης κάποιων γεωτρήσεων από την κατακόρυφο.

Στην παρακάτω εξίσωση (3.3) di^{obs} ,d_0^{obs} είναι διανύσματα δεδομένων, $g(m_0)$, $g(m_i)$ είναι οι υπολογιζόμενες τιμές για απόλυτες παραμέτρους m_0 και m_i και ε_i, ε_0 τα αντίστοιχα σφάλματα.

$$di^{obs} - [d_0^{obs} - g(m_0)] = g(m_i) + \varepsilon_i - \varepsilon_0 \qquad (3.3)$$

Αν και τα συστηματικά σφάλματα φαίνεται να καταργούνται, αυτό είναι παραπλανητικό. Το πρόβλημα στην εξίσωση (3.3) είναι ότι κρύβει το γεγονός ότι δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε την αντιστροφή διαφοράς για να μειώσουμε το συνολικό σφάλμα στις απόλυτες παραμέτρους **m**. Μπορούμε μόνο να αφαιρέσουμε την επίδραση συστηματικών σφαλμάτων στη διαφορά μεταξύ δύο λύσεων, σε αυτή την περίπτωση $\mathbf{m_0}$ και $\mathbf{m_i}$ **.**

Ο αλγόριθμος αντιστροφής διαφοράς είναι μια τροποποιημένη έκδοση του Occam (LaBrecque et al, 1995), στην οποία αντιστρέφεται η διαφορά των δεδομένων

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

από την άποψη της διαφοράς στις παραμέτρους χρησιμοποιώντας ένα σύστημα της μορφής:

$$\Delta D = (d_{obs} - d_{obs}^0) - [g(m) - g(m^0)] \quad (3.4)$$

d_{obs} είναι το διάνυσμα των παρατηρηθέντων δεδομένων

d_{obs}^0 είναι ένα προηγούμενο «αρχικό» διάνυσμα δεδομένων

m^0 είναι ένα μοντέλο που εξήχθη με αντιστροφή Occam από τα αρχικά δεδομένα

m είναι ένα μοντέλο που προκύπτει από την αντιστροφή των δεδομένων υποβάθρου με τη μέθοδο αντιστροφής Occam.

Να σημειωθεί ότι ο περιορισμός στις παραμέτρους μοντέλου στην αντικειμενική λειτουργία παραμένει ο ίδιος με την αντιστροφή Occam (LaBrecque et al, 1995) εκτός από την εισαγωγή ενός a priori μοντέλου.

Αυτή η δημοσίευση δείχνει ότι η χρήση της αντιστροφής διαφοράς έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Πρώτον, η σύγκλιση είναι γρήγορη αφού η αντίστροφη ρουτίνα χρειάζεται μόνο να βρει μικρές διαταραχές για μια καλή αρχική εικασία. Δεύτερον, συστηματικά σφάλματα, όπως αυτά που οφείλονται σε σφάλματα στη διαμόρφωση πεδίων και τείνουν να ακυρώνονται τα σφάλματα διακριτοποίησης στον αλγόριθμο πρότυπης μοντελοποίησης,. Το αποτέλεσμα είναι ότι μπορούν να προσαρμοστούν τα δεδομένα διαφοράς πολύ περισσότερο από τα μεμονωμένα δυναμικά. Τα καλύτερα δεδομένα συνήθως ισοδυναμούν σε καλύτερη ανάλυση με λιγότερα τεχνουργήματα εξαιτίας της διαδικασίας αντιστροφής. Τα αποτελέσματα από το Box Canyon Site δείχνουν την περίπτωση όπου παρακολουθούνται οι μικρές, λεπτές αλλαγές στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε περιόδους χρόνου. Η χρήση της αντιστροφής διαφοράς εκμεταλλεύεται την ικανότητα της ERT να παρέχει πολύ καλή ακρίβεια δεδομένων (επαναληψιμότητα). Στο Portsmouth οι αλλαγές στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση ήταν μεγάλες, γεγονός που οφείλεται εν μέρει στον βιομηχανικό και πολιτιστικό θόρυβο. Οι πηγές θορύβου περιλαμβάνουν τόσο μεγάλο όγκο ηλεκτρικού θορύβου υποβάθρου από την παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και τον πολιτισμικό θόρυβο με τη μορφή πολυάριθμων σωληνωτών περιβλημάτων και μεταλλικών δοχείων που βρίσκονται στην επιφάνεια. Η περιοχή είχε επίσης πολλά στρώματα με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η αντιστροφή της διαφοράς κρίθηκε απαραίτητη σε αυτή την τοποθεσία για την ακριβή παρακολούθηση της θέσης των ζωνών που θερμάνθηκαν με έγχυση ατμού (LaBrecque et al, 2001).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Υπάρχουσες μέθοδοι αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP)

3.1.4 Διάφορες Μέθοδοι αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης στο πεδίο του χρόνου

3.1.4.1 Μέθοδος Honig and Tezkan (2007)

Μια νέα μέθοδος (Honig and Tezkan, 2007) έχει αναπτυχθεί για την 2D αντιστροφή των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (IP) στο πεδίο του χρόνου. Οι συνολικές μεταβατικές παράμετροι IP παρατηρήθηκαν και αντιστράφηκαν σε μοντέλα 2D Cole Cole, συμπεριλαμβανομένης της αντίστασης, της φορτιστικότητας, του χρόνου ηρεμίας και της σταθεράς συχνότητας. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ένας τροποποιημένος ηλεκτρομαγνητικός αλγόριθμος 1D στο πεδίο του χρόνου για τον υπολογισμό της απόκρισης ενός εδάφους αποτελούμενου από οριζόντια στρώματα που δύνανται να εμφανίσουν πόλωση. Τα μεταβατικά σήματα (φθίνουσες καμπύλες φορτιστικότητας) στη συνέχεια αντιστράφηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Marquadt για την εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole του κάθε στρώματος. Ωστόσο, οι υπολογισμοί μοντέλων έδειξαν ότι τα ΕΜ αποτελέσματα θα μπορούσαν να αγνοηθούν για το χρονικό εύρος (> 1 ms) και για τις αποστάσεις πομπού-δέκτη (<50 m) που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη. Επομένως, τα επαγωγικά αποτελέσματα δεν εξετάστηκαν για τη λύση του 2D αντίστροφου προβλήματος και εφαρμόστηκε λύση DC. Εισάχθηκε ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος ευθέος προβλήματος προκειμένου να υπολογιστούν οι IP μεταβάσεις απευθείας στο πεδίο του χρόνου και για να επιταχυνθεί η αντίστροφη διαδικασία. Η προσέγγιση είναι πολύ ακριβής, και αυτό αποδεικνύεται με τη σύγκριση των προσεγγίσεων με τις ακριβείς λύσεις τους έως και το 3D. Ο αντίστροφος αλγόριθμος που παρουσιάζεται αποτελείται από δύο βήματα. Τα δυναμικά μετάβασης ενός συνόλου δεδομένων πίνακα αντιστράφηκαν χωριστά σε ένα μοντέλο αντίστασης δύο διαστάσεων για κάθε κανάλι χρόνου. Η χρονικά εξαρτώμενη αντίσταση κάθε κελιού στη συνέχεια ερμηνεύτηκε ως η απόκριση ενός ομοιογενούς μισού χώρου. Στον αλγόριθμο 2D αντιστροφής χρησιμοποιήθηκε ένας τρισδιάστατος DC αλγόριθμος ως ευθύς τελεστής. Η μέθοδος απαιτεί μόνο μία τυπική 2D DC αντιστροφή και ομοιογενή αντιστροφή Cole Cole ημιχώρου. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε συνθετικά σύνολα δεδομένων και σε ένα σύνολο δεδομένων πεδίου που λαμβάνεται από ένα χώρο αποβλήτων που βρίσκεται κοντά στο Duren στη Γερμανία (Honig and Tezkan, 2007).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

3.1.4.2 Μέθοδος των Fiandaca et al (2017)

Το φαινόμενο επαγόμενης πόλωσης, τόσο στην περιοχή χρόνου όσο και στην περιοχή συχνοτήτων, συχνά παραμετροποιείται χρησιμοποιώντας το εμπειρικό μοντέλο Cole Cole.

Για να βελτιωθεί η ανάλυση των παραμέτρων του μοντέλου και να μειωθούν οι συσχετισμοί των παραμέτρων στη διαδικασία αντιστροφής των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης, προτείνονται εδώ τρεις επαναπαραμετροποιήσεις του μοντέλου Cole Cole, δηλαδή το μοντέλο Cole Cole μέγιστης γωνίας φάσης, το μοντέλο Cole Cole μέγιστης φανταστικής αγωγιμότητας και το μοντέλο Cole Cole ελάχιστης φανταστικής αντίστασης. Το μοντέλο Cole Cole μέγιστης γωνίας φάσης χρησιμοποιεί τη μέγιστη φάση ϕ_{max} και το αντίστροφο της συχνότητας κορυφής φάσης, τ_ϕ, αντί της εγγενούς φορτιστικότητας m_0 και της σταθεράς χρόνου ηρεμίας που υιοθετήθηκε στο κλασικό μοντέλο Cole Cole. Το μοντέλο Cole Cole μέγιστης φανταστικής αγωγιμότητας χρησιμοποιεί τη μέγιστη φανταστική αγωγιμότητα σ_{max} αντί του m_0 και της χρονικής σταθεράς τ_σ του μοντέλου Cole Cole στη μορφή αγωγιμότητάς του. Το μοντέλο Cole Cole ελάχιστης φανταστικής αντίστασης χρησιμοποιεί την ελάχιστη φανταστική αντίσταση ρ_{min} αντί του m_0 και της σταθεράς χρόνου τ_ρ του μοντέλου Cole Cole στη μορφή αντίστασής του. Οι επιδράσεις των τριών επαναπαραμετροποιήσεων έχουν δοκιμαστεί σε συνθετικά δεδομένα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο συχνοτήτων χρησιμοποιώντας αντιστροφή Monte Carlo αλυσίδας Markov (Madsen et al, 2017). Σε σύγκριση με το κλασικό μοντέλο Cole Cole, διαπιστώθηκε ότι και για τις τρεις νέες παραμετροποιήσεις, οι παράμετροι του μοντέλου είναι λιγότερο συσχετισμένες μεταξύ τους και κατά συνέπεια επιλύονται καλύτερα για δεδομένα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων. Η αύξηση της ανάλυσης μοντέλου είναι ιδιαίτερα σημαντική για μοντέλα που δεν επιλύονται επαρκώς χρησιμοποιώντας την κλασική παραμετροποίηση Cole Cole, για παράδειγμα, για χαμηλές τιμές του εκθέτη συχνότητας ή με χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο. Γενικά, αυτό οδηγεί σε ένα πολύ μεγαλύτερο βάθος έρευνας για τις παραμέτρους ϕ_{max}, σ_{max}, and ρ_{min}, σε σύγκριση με την κλασική παράμετρο m_0, η οποία παρουσιάζεται με ένα παράδειγμα πεδίου. Πιστεύεται ότι η χρήση επαναπαραμετροποιήσεων για αντιστροφή δεδομένων πεδίου θα συμβάλει στη μείωση του χάσματος μεταξύ της θεωρίας της επαγόμενης πόλωσης, των εργαστηριακών ευρημάτων και των εφαρμογών πεδίου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Υπάρχουσες μέθοδοι αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP)

3.1.4.3 Fiandaca et al, 2012

Αναπτύχθηκε ένας νέος κώδικας ευθέος προβλήματος και ένας αλγόριθμος αντιστροφής χρησιμοποιώντας την πλήρη φθίνουσα καμπύλη εκφόρτισης μαζί με μια ακριβή περιγραφή της κυματομορφής του πομπού και της συνάρτησης μεταφοράς του δέκτη για την ανακατασκευή της κατανομής των παραμέτρων Cole Cole της γης. Η ακριβής μοντελοποίηση της κυματομορφής του πομπού είχε ισχυρή επίδραση στην απόκριση ευθέος προβλήματος και δείχτηκε ότι η διαφορά μεταξύ μιας λύσης που χρησιμοποιεί μια βηματική απόκριση και μια λύση που χρησιμοποιεί την ακριβή μοντελοποίηση συχνά είναι πάνω από 100%. Περαιτέρω, η παρουσία χαμηλοπερατών φίλτρων σε όργανα μέτρησης χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης επηρεάζει τους πρώτους χρόνους των φθινουσών καμπυλών (συνήθως μέχρι 100 ms) και πρέπει να μοντελοποιείται στην ευθεία απόκριση για να αποφευχθεί σημαντική απώλεια της ανάλυσης. Ο ανεπτυγμένος κώδικας ευθέος προβλήματος έχει εφαρμοστεί σε έναν 1D πλευρικά περιορισμένο αλγόριθμο αντιστροφής που εξάγει το φασματικό περιεχόμενο του φαινομένου επαγόμενης πόλωσης από την άποψη των παραμέτρων Cole Cole. Τα συνθετικά παραδείγματα και τα παραδείγματα πεδίου από τη Δανία έδειξαν σημαντική βελτίωση στην ανάλυση των παραμέτρων που ελέγχουν την προκαλούμενη απόκριση πόλωσης σε σύγκριση με την παραδοσιακή αντιστροφή ολοκληρώματος της καμπύλης φορτιστικότητας. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων αντιστροφής έχει αξιολογηθεί με πλήρη ανάλυση αβεβαιότητας των παραμέτρων του μοντέλου. Επί πλέον, οι πληροφορίες γεωτρήσεων επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των ερμηνειών πεδίου. Με αυτόν τον νέο ακριβή κώδικα που μπορεί να εκτελεστεί επί τόπου στο πεδίο έρευνας, οι μετρήσεις πόλωσης στο πεδίο του χρόνου παρέχουν πρόσβαση σε νέες εφαρμογές σε περιβαλλοντικές και υδρογεωφυσικές έρευνες, π.χ. ακριβής οριοθέτηση χώρου υγειονομικής ταφής ή σχετικά με τη σύνδεση μεταξύ Cole Cole και υδραυλικών παραμέτρων.

Η 1D ευθεία απόκριση που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιείται άμεσα στην αντιστροφή και συνεπώς οι παράμετροι του μοντέλου λαμβάνονται ταυτόχρονα σε μια μοναδική διαδικασία αντιστροφής όπου η σχέση μεταξύ των παραμέτρων διατηρείται ανά πάσα στιγμή.

3.1.4.4 Μέθοδος των Seidel and Tezkan (2017)

Οι επιδράσεις της επαγόμενης πόλωσης (IP) μπορούν να έχουν αντίκτυπο στις ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις πεδίου (TEM) και μπορεί να οδηγήσουν σε αντιστροφές

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

πρόσημου στις καταγεγραμμένες μεταβατικές συνθήκες. Για να μελετηθούν αυτές οι επιπτώσεις IP στα δεδομένα TEM, αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος αντιστροφής 1D τόσο για τις διαμορφώσεις TEM κεντρικού βρόχου όσο και για του ξεχωριστού βρόχου χρησιμοποιώντας το μοντέλο ηρεμίας Cole Cole. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί 1D ευθέος προβλήματος για έναν ομοιογενή ημιχώρο με στόχο την ανάλυση των επιπτώσεων των παραμέτρων Cole Cole στις μεταβατικές συνθήκες TEM σε σχέση με πιθανές αντιστροφές πρόσημου. Οι μοντελοποιήσεις ευθέος προβλήματος έδειξαν ότι η μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων έχει συγκρίσιμες επιδράσεις στις μεταβατικές συνθήκες TEM. Αυτό οδηγεί σε έναν αυξανόμενο αριθμό ισοδύναμων μοντέλων ως αποτέλεσμα των υπολογισμών αντιστροφής.

Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν 1D αντιστροφές συνθετικών δεδομένων για να μελετηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του αλγορίθμου σχετικά με την επίλυση των παραμέτρων Cole Cole. Προκειμένου να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα αντιστροφής, ήταν ουσιώδες να ζυγιστούν ως προς τη συνεισφορά τους στο σφάλμα τα σημεία δεδομένων που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με τις αντιστροφές πρόσημων. Τα ευρήματα που ελήφθησαν τελικά υιοθετήθηκαν στην αντιστροφή των πραγματικών δεδομένων πεδίου τα οποία περιείχαν σημαντικά χαρακτηριστικά IP όπως αντιστροφές πρόσημων. Ένα σύνολο δεδομένων πεδίου καταγράφηκε στο πεδίο Nakyn Kimberlite στη Δυτική Yakutiya, Ρωσία, με τη διαμόρφωση κεντρικού βρόχου. Ένα άλλο σύνολο δεδομένων πεδίου προέρχεται από ένα χώρο αποβλήτων στην Κολωνία της Γερμανίας και μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση χωριστού βρόχου.

3.1.4.5 Μέθοδος των Tezkan and Adrian (2017)

Παρουσιάζεται η εφαρμογή ενός 2D αλγόριθμου αντιστροφής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για πηγή συνεχούς ρεύματος (DC) και επαγόμενης πόλωσης στο πεδίο του χρόνου (TDIP) σε συνθετικά και σε δεδομένα πεδίου.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζει τοπικούς περιορισμούς ομαλότητας και στάθμιση σφαλμάτων. Η αντιστροφή πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

Πρώτα λαμβάνεται ένα αποτελεσματικό μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από την αντιστροφή των μετρήσεων φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μία μη γραμμική αντιστροφή IP με αποτέλεσμα να προκύψει ένα μοντέλο φορτιστικοτήτων. Για το ευθύ πρόβλημα χρησιμοποιείται η μέθοδος Πεπερασμένου Στοιχείου (Finite Element - FE) με μη δομημένα τριγωνικά

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

πλέγματα για όλους τους ευθείς και αντίστροφους υπολογισμούς που επιτρέπουν την ενσωμάτωση σύνθετης τοπογραφίας επιφάνειας στο πλέγμα αντιστροφής.

Μια μελέτη μοντελοποίησης με συνθετικά δεδομένα δείχνει ότι ο αλγόριθμος είναι ικανός να επιλύει ανωμαλίες στη φορτιστικότητα ανεξάρτητες από τις αντίστοιχες ανωμαλίες στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Αυτό είναι σημαντικό για τις διασκορπισμένες αποθέσεις μεταλλευμάτων, όπως του χρυσού, δεδομένου ότι η διαφορά στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση του λεπτού κατανεμημένου υλικού μπορεί να είναι ασήμαντη ενώ η διαφορά στη φορτιστικότητα των μεταλλευμάτων, και ιδιαίτερα των σουλφιδίων, μπορεί να είναι σημαντική.

3.2 Ο Αλγόριθμος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα

3.2.1 Μέθοδος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα

Στην προσπάθεια να επιτευχθεί αντιστροφή των δεδομένων ταυτόχρονα για όλα τα χρονοπαράθυρα υπήρξε η αρχική σκέψη να απλοποιηθούν οι δύο κύριες μέθοδοι που εφαρμόζονται στις δύο διαστάσεις ώστε να εφαρμοστούν στη μία διάσταση, δηλαδή στη βυθοσκόπηση. Πρόκειται για τη μέθοδο αντιστροφής διαφοράς (LaBrecque et al, 2001) και τη μέθοδο KIM με τους παράγοντες διόρθωσης (Kim et al, 2012) .

Κατά την προσπάθεια αυτή, πολύ νωρίς, εμφανίστηκε η ιδέα της ταυτόχρονης αντιστροφής όλων των δεδομένων για όλα τα ζεύγη ακροδεκτών, για όλα τα χρονοπαράθυρα με τελικό ζητούμενο την απευθείας εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole όλων των στρωμάτων του μοντέλου γης που δεχόμαστε ως ισχύον.

Για την υλοποίηση αυτής της μεθόδου χρειάζεται να δημιουργηθεί ένας Ιακωβιανός Πίνακας (IPTotal) που προκύπτει με τη μέθοδο των διαταραχών (perturbation method) όπου για μία μικρή μεταβολή σε μία παράμετρο Cole Cole ενός στρώματος υπολογίζουμε τη μεταβολή στις μετρήσεις σε όλα τα ζεύγη ακροδεκτών για όλα τα χρονοπαράθυρα.

3.2.1.1 Περιγραφή του αλγορίθμου Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για δεδομένα TDIP

Αρχικά πρέπει να δούμε ποιοι είναι οι γνωστοί και ποιοι οι άγνωστοι στο πρόβλημά μας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΜΕΣΗΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 1D – TDIP

Τα δεδομένα που έχουμε είναι η Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση $\boldsymbol{\rho_{\alpha j}}$ για όλα τα ζεύγη ακροδεκτών μέτρησης δυναμικού AB καθώς και η Φαινόμενη Φορτιστικότητα $\boldsymbol{m^t_{\alpha j}}$ για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων μέτρησης δυναμικού $\boldsymbol{j}$ για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$. Επίσης ορίζουμε το μοντέλο γης που δεχόμαστε ως ισχύον με ορισμένο αριθμό στρωμάτων ορισμένου πάχους (συνήθως 6 στρώματα πάχους 5 m).

Η διαδικασία αντιστροφής γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο αντιστρέφονται τα δεδομένα DC ηλεκτρικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για να προκύψει η ειδική ηλεκτρική αντίσταση για κάθε ένα από τα στρώματα ορισμένου πάχους του μοντέλου γης.

Στο δεύτερο αντιστρέφονται ταυτόχρονα όλα τα IP δεδομένα, δηλαδή όλες οι μετρήσεις φορτιστικότητας για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων AB για κάθε χρονοπαράθυρο που πήραμε μετρήσεις.

Οι μέθοδοι αντιστροφής που χρησιμοποιούμε βασίζονται στην μέθοδο Gauss Newton όπου χρειάζεται να ορίσουμε αρχικές τιμές στις ζητούμενες παραμέτρους και με διαδοχικές επαναλήψεις προσπαθούμε να πλησιάσουμε την τελική λύση επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση του RMS σφάλματος. Οι λύσεις που λαμβάνονται από τη μέθοδο Gauss Newton εξαρτώνται ισχυρά από τις αρχικές τιμές που δίνουμε στις ζητούμενες παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, με σκοπό να μη δώσουμε εντελώς τυχαίες αρχικές τιμές, αποφασίστηκε να δίνουμε στο πρώτο στρώμα τις τιμές των παραμέτρων του πιο κοντινού στο σημείο της βυθοσκόπησης ζεύγους ηλεκτροδίων, στο τελευταίο στρώμα να δίνουμε τις τιμές των παραμέτρων του πιο μακρινού στρώματος και στα ενδιάμεσα στρώματα τις τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο μέσο όρο των τιμών των ενδιάμεσων ζευγών ηλεκτροδίων.

Για να δοθούν οι αρχικές τιμές στις παραμέτρους Cole Cole όλων των στρωμάτων χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο αντιστροφής Cole Cole (Διάγραμμα Ροής B, Σχήμα 2.14) για τις καμπύλες φαινόμενης φορτιστικότητας.

Για τα δεδομένα DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ισχύει η παρακάτω σχέση αντιστροφής:

$$dx = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J^T dy \qquad (3.6)$$

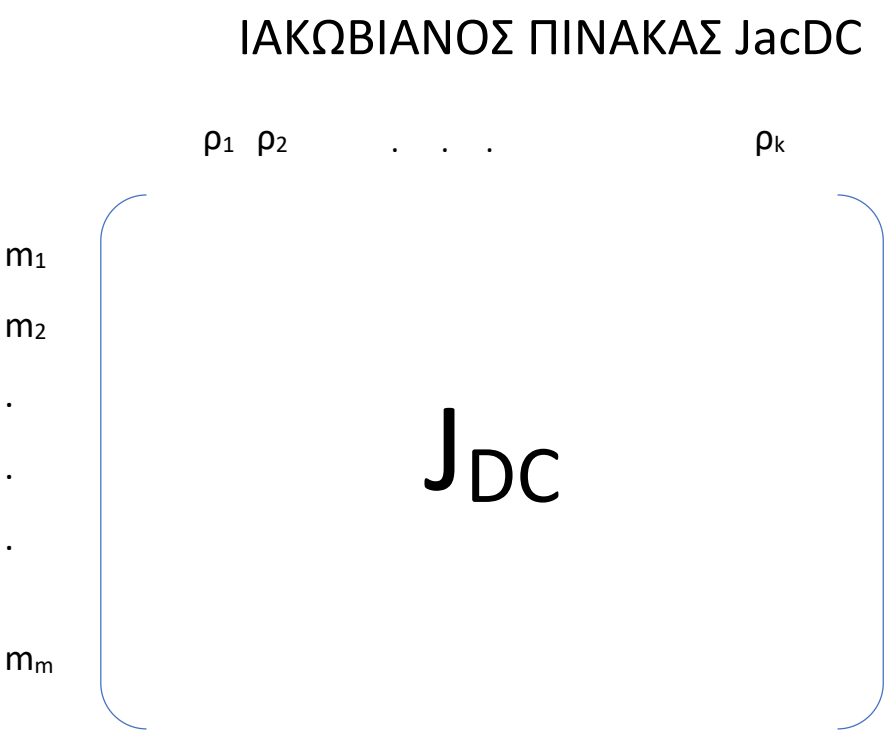
όπου dx είναι η διόρθωση των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε στρώμα του μοντέλου, λ ο συντελεστής Lagrange για τον οποίο έγινε λόγος στην παράγραφο 2.5.1.3, dy είναι η διαφορά μεταξύ των δεδομένων μετρήσεων και των τιμών ειδικής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ηλεκτρικής αντίστασης που έχουμε υπολογίσει με την τελευταία επανάληψη της διαδικασίας και ο Ιακωβιανός Πίνακας J_{DC} για τον οποίο μιλήσαμε στην παράγραφο 2.4.2 φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Το διάγραμμα ροής για την αντιστροφή αυτή είναι το διάγραμμα ροής Α που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13.

Η αντιστροφή των IP δεδομένων, δηλαδή της φορτιστικότητας σε όλα τα ζεύγη ακροδεκτών μέτρησης δυναμικού για όλα τα χρονοπαράθυρα γίνεται με παρόμοιο τρόπο. Για να είναι δυνατό αυτό πρέπει η φορτιστικότητα να μετατραπεί σε ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Αυτήν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση την ονομάζουμε *ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP* και είναι μία κατασκευασμένη μεταβλητή, χωρίς φυσικό νόημα (αφού στην πραγματικότητα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός στρώματος είναι σταθερή και δε μεταβάλλεται με το χρόνο), που μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο αντιστροφής DC και για τις μετρήσεις στα διάφορα χρονοπαράθυρα.



Σχήμα 3.1 Ιακωβιανός Πίνακας JDC για την αντιστροφή δεδομένων DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

$m_{1...m}$: μέτρηση αντίστασης 1 … m

$\rho_{1...k}$: αντίσταση στρώματος 1 … k

Αριθμός μετρήσεων: m (num_meas)

Αριθμός στρωμάτων: k (num_layers)

Διαστάσεις Ιακωβιανού Πίνακα JacDC: m x k (num_meas x num_layers)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Για τη μετατροπή της φορτιστικότητας σε *ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP* χρησιμοποιείται η εξίσωση μετασχηματισμού (2.22, σελίδα 31).

$$\boldsymbol{\rho}_{\boldsymbol{ajm}}^{\boldsymbol{t}} = \boldsymbol{\rho}_{\boldsymbol{aj}} \cdot \left(\mathbf{1} - \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{aj}}^{\boldsymbol{t}}\right) \quad (2.22)$$

Η ειδοποιός διαφορά με τη μέθοδο διακριτής αντιστροφής βρίσκεται στο σχηματισμό του Ιακωβιανού Πίνακα, ο οποίος δεν περιορίζεται σε έναν Πίνακα num_meas X num_layers αλλά επεκτείνεται σε έναν Πίνακα (num_meas x num_windows) X (num_layers x 3). Δηλαδή με τη μέθοδο των διαταραχών (perturbation) βρίσκουμε τον τρόπο με τον οποίο η μεταβολή κάθε μίας παραμέτρου Cole Cole κάθε στρώματος του μοντέλου μας επηρεάζει κάθε μέτρηση όχι μόνο τοπικά αλλά και χρονικά. Δηλαδή πώς επηρεάζει τη μέτρηση σε κάθε μία τετράδα ηλεκτροδίων όχι μόνο για μία χρονική στιγμή αλλά και για κάθε χρονοπαράθυρο.

Ο νέος εκτεταμένος Ιακωβιανός ***JacIPTotal*** παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Η εξίσωση αντιστροφής είναι πλέον η εξίσωση (3.7)

$$dparam = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J^T dy \quad (3.7)$$

όπου dparam η μεταβολή στην τιμή μίας παραμέτρου Cole Cole που οφείλεται στη διαφορά dy των μετρούμενων τιμών *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP* (όπως προκύπτουν από τις μετρούμενες τιμές φορτιστικότητας με την εξίσωση μετασχηματισμού 2.32) από τις υπολογισμένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP που υπολογίστηκαν κατά την τελευταία επανάληψη της διαδικασίας.

Τελικό εξαγόμενο είναι οι τριάδες παραμέτρων Cole Cole για όλα τα στρώματα.

Συνοψίζοντας: Υπάρχει ο βασικός Ιακωβιανός που δείχνει την ευαισθησία των μετρήσεων στα ζεύγη ακροδεκτών στις αλλαγές των αντιστάσεων των στρωμάτων. Αυτόν τον ονομάζουμε Ιακωβιανό DC γιατί αφορά στις μετρήσεις αντιστάσεων όσο δίνεται ρεύμα στο ζευγάρι ακροδεκτών AB. Αυτός ο Ιακωβιανός χρησιμοποιείται και κατά την αντιστροφή στο πεδίο των χρόνων όταν η μέθοδος της αντιστροφής εφαρμόζεται για κάθε χρονοπαράθυρο ανεξάρτητα από τα άλλα χρονοπαράθυρα.

Πρόκειται για έναν Πίνακα διαστάσεων:

(num_meas) X (num_layers)ή **(αριθμός μετρήσεων) X (αριθμός στρωμάτων).**

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος της αντιστροφής στο πεδίο των χρόνων συνολικά για όλα τα χρονοπαράθυρα χρειάζεται ένας νέος Ιακωβιανός που τον ονομάζουμε Ιακωβιανό IPTotal. Αυτός δείχνει την ευαισθησία των μετρήσεων στα ζεύγη των ακροδεκτών για κάθε ένα χρονοπαράθυρο στις αλλαγές των τριών παραμέτρων Cole Cole όλων των στρωμάτων του μοντέλου στο οποίο γίνεται η βυθοσκόπηση.

Πρόκειται για έναν Πίνακα διαστάσεων:

(num_meas X num_windows) X (num_layers X 3) ή

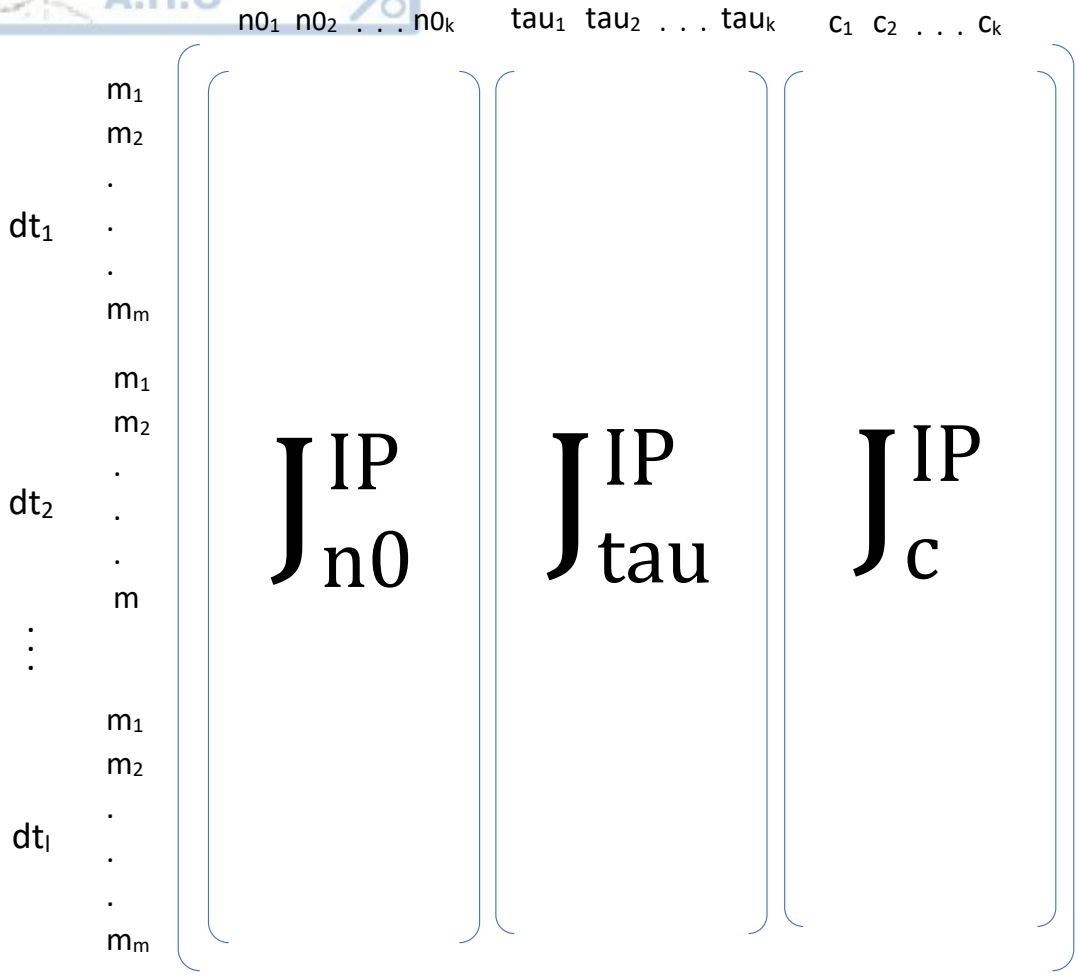
(αριθμός μετρήσεων X αριθμός χρονοπαραθύρων) X (αριθμός στρωμάτων X 3)

Ο αλγόριθμος της μεθόδου συνολικής αντιστροφής όλων των δεδομένων IP παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήμα 3.3. Το διάγραμμα ροής συμπληρώνεται από δύο ακόμη διαγράμματα ροής το Α (Σχήμα 2.13) και το Β (Σχήμα 2.14).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ JacIPTotal



Σχήμα 3.2 Ιακωβιανός Πίνακας JacIPTotal για την ταυτόχρονη αντιστροφή όλων των δεδομένων IP, χωρίς τα δεδομένα DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

$m_{1\ldots m}$: μέτρηση αντίστασης 1 … m (για dt πρόκειται για την κατασκευασμένη αντίσταση IP που προκύπτει από τη μέτρηση της φορτιστικότητας)

$\rho_{1\ldots k}$: αντίσταση στρώματος 1 … k

$n_{01\ldots k}$: Cole Cole παράμετρος n_0 αρχικής φορτιστικότητας στρώματος 1 … k

$tau_{1\ldots k}$: Cole Cole παράμετρος tau χρονικής υστέρησης στρώματος 1 … k

$c_{1\ldots k}$: Cole Cole παράμετρος c καμπυλότητας στρώματος 1 … k

$dt_{1\ldots l}$: χρονοπαράθυρο 1 … l

Αριθμός μετρήσεων: m (num_meas)

Αριθμός στρωμάτων: k (num_layers)

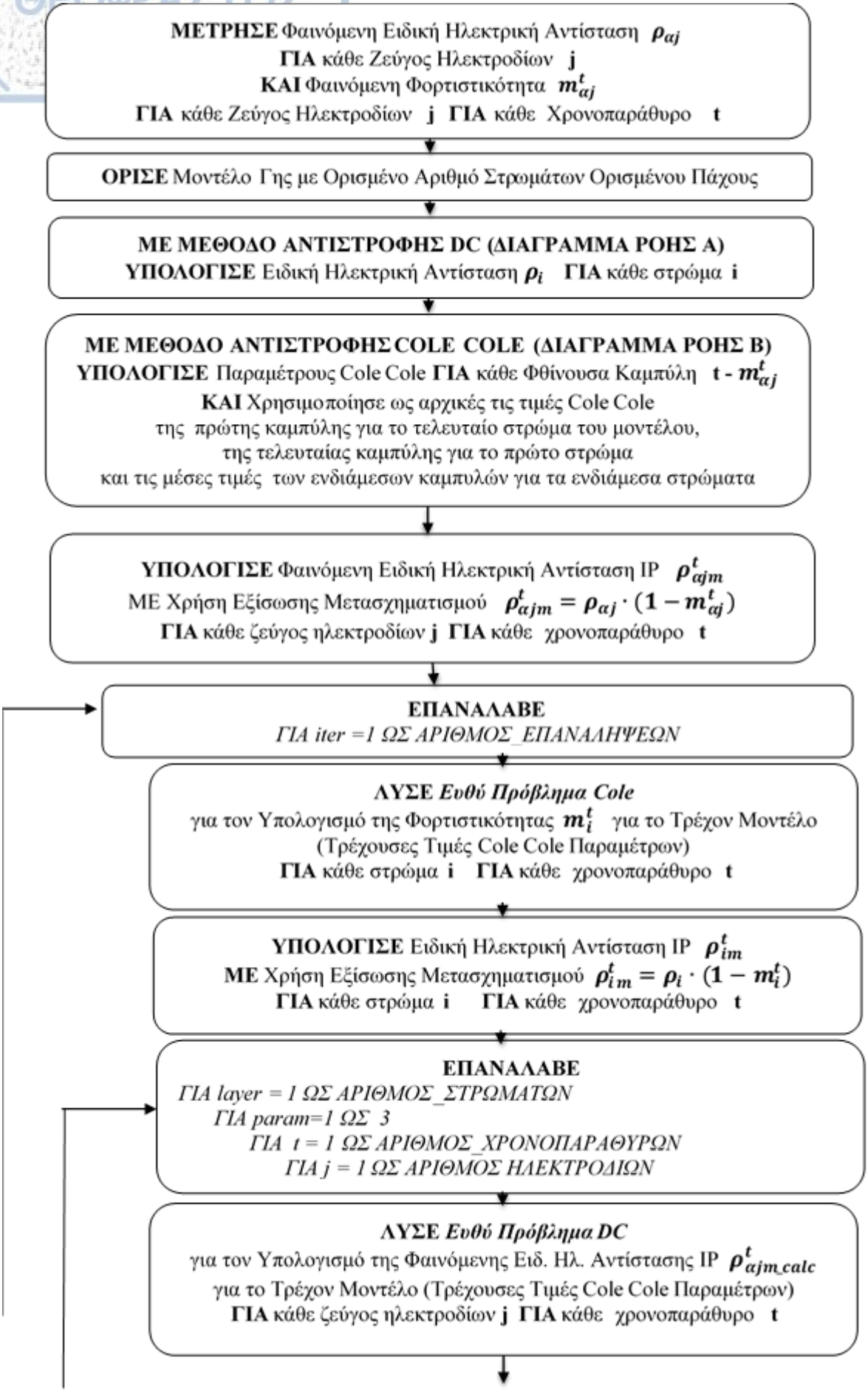
Αριθμός χρονοπαραθύρων: l (num_windows)

Διαστάσεις Ιακωβιανού Πίνακα JacIPTotal: (l x m) x (3 x k)

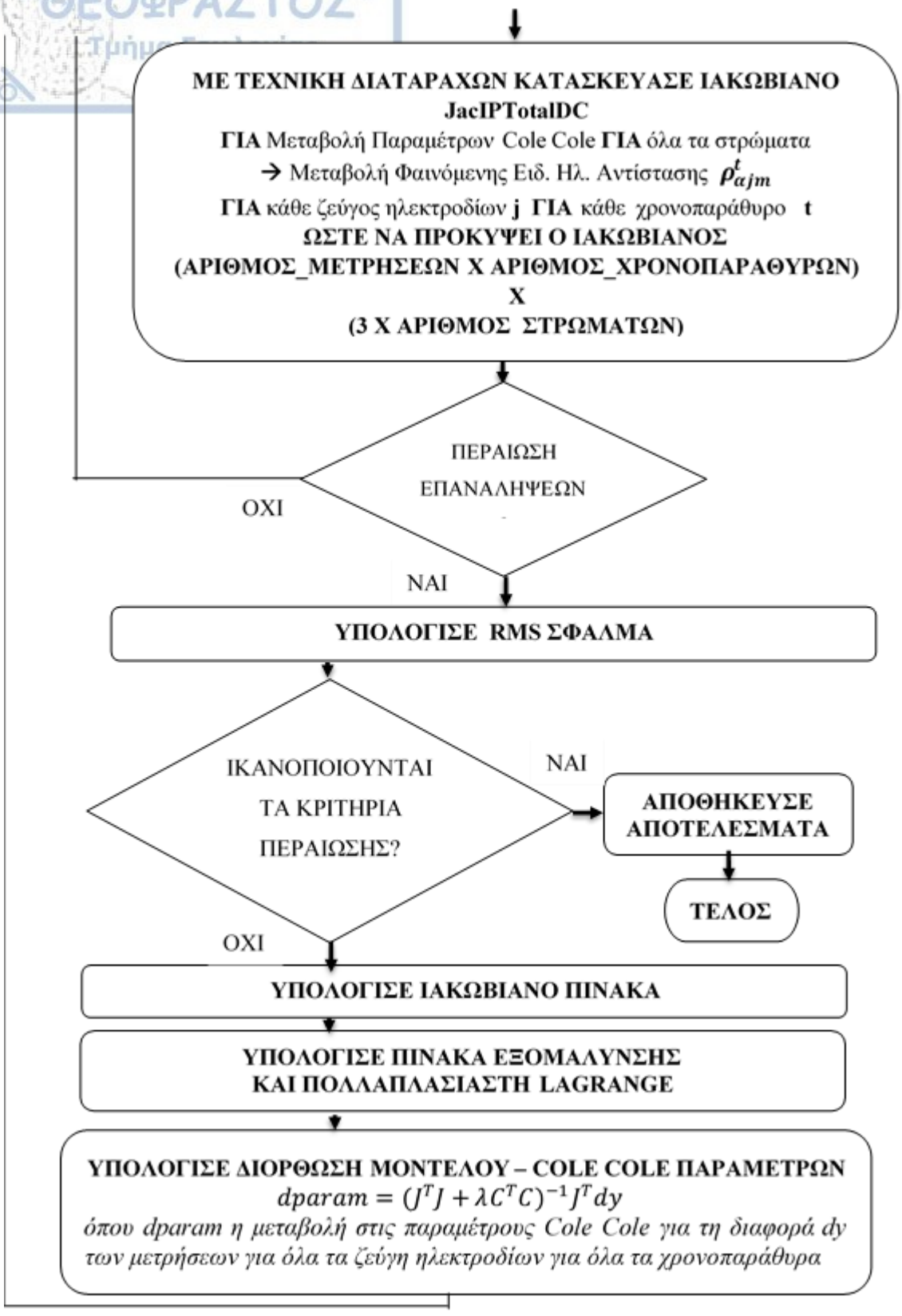
(num_windows x num_meas) x (3 x num_layers)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα ροής για Αλγόριθμο Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής δεδομένων βυθοσκόπησης επαγόμενης πόλωσης IP στο Πεδίο του Χρόνου 1D-TDIP χωρίς τα δεδομένα DC

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές μας θα είναι ***3 X num_layers*** (όπου num_layers είναι ο αριθμός στρωμάτων του μοντέλου γης που δεχόμαστε ως ισχύον) γιατί για κάθε στρώμα έχουμε 3 παραμέτρους Cole Cole, ενώ οι εξαρτώμενες θα είναι ***num_meas X num_windows***, όπου ***num_meas*** είναι ο αριθμός των ζευγών των ακροδεκτών όπου μετριέται το δυναμικό στην επιφάνεια της γης, δηλαδή ο αριθμός των μετρήσεων που παίρνουμε για μία χρονική στιγμή (δηλαδή για ένα κανάλι ή χρονοπαράθυρο) και ***num_windows*** είναι ο αριθμός των χρονικών καναλιών ή χρονοπαραθύρων.

Αυτή η διαδικασία αντιστροφής δίνει κατευθείαν τις ζητούμενες παραμέτρους Cole Cole για όλα τα στρώματα της δομής και παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα:

1) Μειώνει τα βήματα της διαδικασίας αφού δεν χρειάζεται να προκύψουν πρώτα οι καμπύλες φορτιστικότητας και μετά να εξαχθούν οι παράμετροι Cole Cole από κάθε καμπύλη.
2) Δε δημιουργείται θέμα εξομάλυνσης των καμπυλών φορτιστικότητας αφού οι τιμές που μετρούμε μπαίνουν στη διαδικασία αντιστροφής χωρίς να μας απασχολεί αν ακολουθούν την εκθετική μορφή της φθίνουσας φορτιστικότητας. Βέβαια αν θέλουμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα δεν μπορούμε να παραβλέψουμε μετρήσεις που δεν έχουν φυσικές τιμές (δεν μπορεί η τάση σε μία τετράδα ηλεκτροδίων να μετριέται αυξανόμενη σε κάποια χρονική στιγμή ενώ έχουμε σταματήσει να παρέχουμε ηλεκτρικό ρεύμα). Το αποτέλεσμα που παίρνουμε, πάντως, είναι οι παράμετροι Cole Cole για κάθε στρώμα του εδάφους, δηλαδή τέλειες εκθετικά φθίνουσες καμπύλες φορτιστικότητας.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

3.2.2 Μέθοδος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής για όλα τα χρονοπαράθυρα και για τις DC μετρήσεις.

Κατά την εφαρμογή της προηγούμενης μεθόδου στα συνθετικά δεδομένα διαπιστώθηκε ότι υπήρξε το ακόλουθο πρόβλημα εξαιτίας των δύο διαδικασιών αντιστροφής που πραγματοποιούνταν χωριστά.

Στα συνθετικά δεδομένα ορίζαμε την ειδική ηλεκτρική αντίσταση για κάθε ένα από τα στρώματα του μοντέλου γης $\boldsymbol{\rho_i}$ και τις παραμέτρους Cole Cole για κάθε στρώμα από τις οποίες με την εξίσωση Pelton (3.5, σελίδα 48) προκύπτουν οι τιμές φορτιστικότητας για κάθε στρώμα για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{m_i^t}$. Με βάση τις παραπάνω τιμές $\boldsymbol{\rho_i}$και $\boldsymbol{m_i^t}$ με την επίλυση του ευθέος προβλήματος δημιουργείται ένα αρχείο συνθετικών δεδομένων που αντιπροσωπεύει τις ιδανικές μετρήσεις $\boldsymbol{\rho_{ai}}$ και $\boldsymbol{m_{ai}^t}$ που θα μας έδιναν τα όργανα μέτρησης για το συγκεκριμένο μοντέλο. Για τον υπολογισμό των τιμών $\boldsymbol{m_{ai}^t}$ χρειάζεται ενδιάμεσα να υπολογιστούν οι τιμές της κατασκευασμένης μεταβλητής «*ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP* - $\boldsymbol{\rho_{im}^t}$» (παράγραφος 2.6.4) των στρωμάτων του εδάφους για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$ όπου οι τιμές $\boldsymbol{\rho_{im}^t}$ συνδέονται με τις τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $\boldsymbol{\rho_i}$ μέσω της εξίσωσης μετασχηματισμού (3.6)

$$\boldsymbol{\rho_{im}^t = \rho_i \cdot (1 - m_i^t)} \qquad (3.6)$$

Κατά τη διαδικασία αντιστροφής ζητείται να καταλήξουμε στις ορισμένες από εμάς τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φορτιστικότητας $\boldsymbol{\rho_i}$και $\boldsymbol{m_i^t}$.

Το πρόβλημα, λοιπόν, είναι ότι κατά την πρώτη αντιστροφή που αφορά στις τιμές της (DC) ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $\boldsymbol{\rho_i}$ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Occam για χωρική εξομάλυνση (smoothing) οπότε πήραμε τιμές $\boldsymbol{\rho'_i}$ γενικά διαφορετικές από τις αρχικά ορισμένες $\boldsymbol{\rho_i}$, και όταν περάσαμε στη δεύτερη αντιστροφή όπου χρειάστηκε να υπολογιστούν οι τιμές $\boldsymbol{\rho_{im}'^t}$ πάλι με τη χρήση της εξίσωσης μετασχηματισμού (3.6) δεν είχαμε στη διάθεση μας τις αρχικές τιμές $\boldsymbol{\rho_i}$ αλλά τις «εξομαλυμένες» $\boldsymbol{\rho'_i}$ που προέκυψαν από την Occam αντιστροφή, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα η δεύτερη συνολική αντιστροφή των IP δεδομένων να δίνει αρκετές φορές ακραίες τιμές παραμέτρων Cole Cole σε κάποια στρώματα.

Προέκυψε, με αφορμή τα παραπάνω, η ιδέα να γίνεται μία συνολική αντιστροφή όλων των δεδομένων μαζί, και των DC μετρήσεων και των IP μετρήσεων, ενσωματώνοντας σε έναν νέο Ιακωβιανό Πίνακα (IPTotalDC) τους δύο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

προηγούμενους Ιακωβιανούς (DC και IPTotal) και δημιουργήθηκε ο αλγόριθμος Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής IP Δεδομένων μαζί με τα DC δεδομένα ο οποίος στο υπόλοιπο της διατριβής θα εμφανίζεται ως αλγόριθμος Α.Τ.Α για χάρη συντομίας.

3.2.2.1 Περιγραφή του αλγορίθμου Α.Τ.Α

Εδώ οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι οι τρεις Cole Cole παράμετροι όλων των στρωμάτων καθώς και οι τιμές DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όλων των στρωμάτων (4 X num_layers), ενώ εξαρτημένες όλες οι τιμές μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τόσο οι DC όσο και οι τιμές της κατασκευασμένης μεταβλητής «ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP» που υπολογίζεται από τις μετρήσεις της φορτιστικότητας (σχέση μετασχηματισμού 3.6) για όλα τα χρονοπαράθυρα [(num_windows + 1) X (num_meas)].

Θέλοντας, λοιπόν, να εντάξουμε στη διαδικασία της συνολικής αντιστροφής και την ευαισθησία στην αλλαγή των αντιστάσεων των στρωμάτων του μοντέλου δημιουργούμε έναν πιο σύνθετο Ιακωβιανό πίνακα, τον Ιακωβιανό JacIPTotalDC (Σχήμα 3.4), ο οποίος περιλαμβάνει αυτούσιους τους δύο προηγούμενους, δηλαδή τον Ιακωβιανό JacIPTotal και τον Ιακωβιανό JacDC καθώς και νέες στήλες που αφορούν στην μεταβολή των μετρήσεων για όλα τα χρονοπαράθυρα εξαιτίας της μεταβολής της DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κάθε στρώματος του μοντέλου και οι οποίες προκύπτουν επίσης με τη μέθοδο διαταραχών.

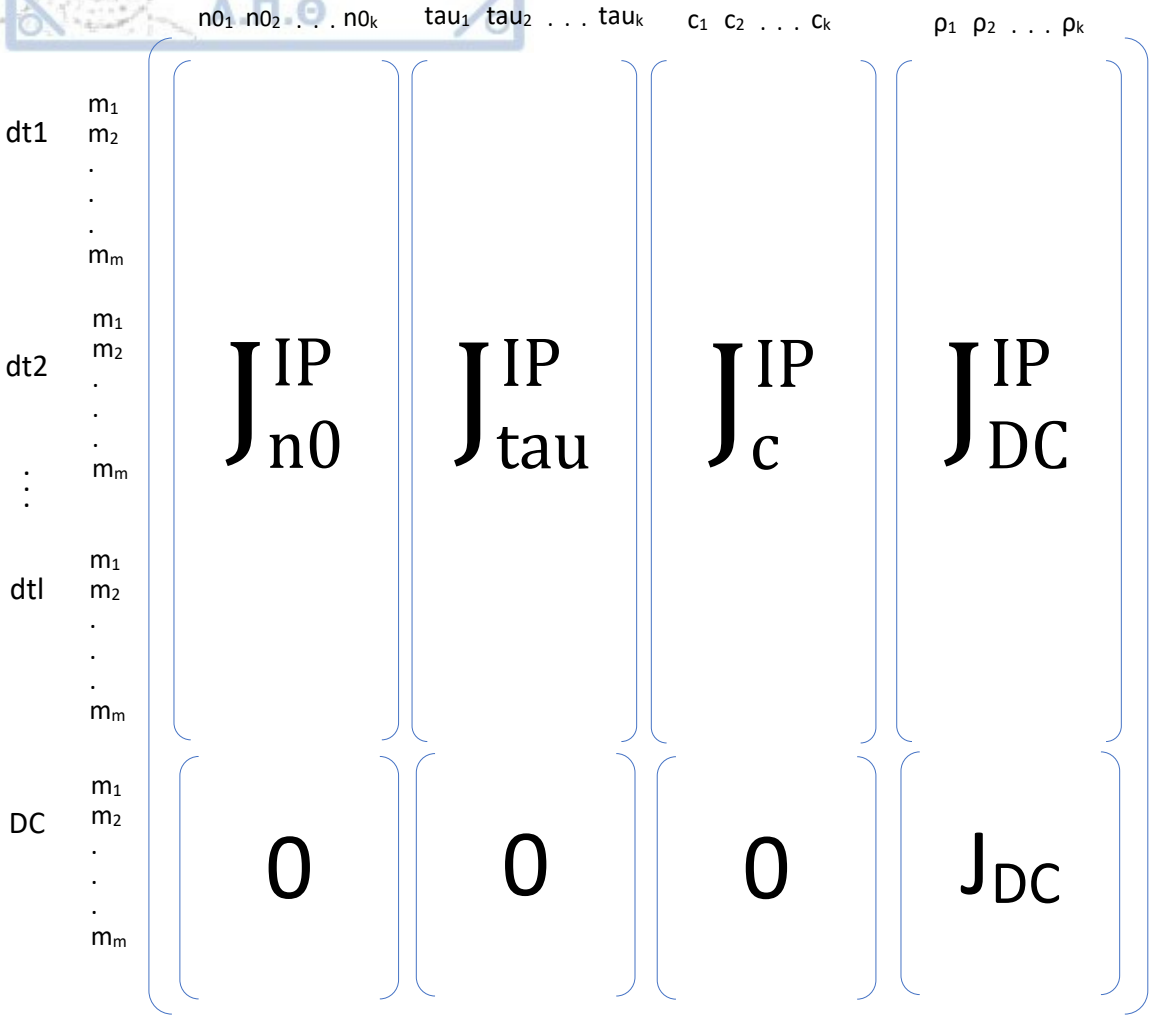
Οι διαστάσεις αυτού του τελικού Ιακωβιανού Πίνακα είναι:

[(αριθμός μετρήσεων) X (αριθμός χρονοπαραθύρων+1)] X (αριθμός στρωμάτων X 4))

Το Σχήμα 3.5 επεξηγεί πώς η αλλαγή στην αντίσταση ενός στρώματος, όταν οι υπόλοιπες αντιστάσεις και όλες οι Cole Cole παράμετροι όλων των στρωμάτων παραμένουν ίδιες, προκαλεί αλλαγή στις μετρήσεις ενός χρονοπαράθυρου.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ JacIPTotalDC



Σχήμα 3.4 Ιακωβιανός Πίνακας JacIPTotalDC για την ταυτόχρονη αντιστροφή όλων των δεδομένων IP και των δεδομένων DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

$m_{1...m}$: μέτρηση αντίστασης 1 … m (για dt πρόκειται για την κατασκευασμένη αντίσταση IP που προκύπτει από τη μέτρηση της φορτιστικότητας)

$\rho_{1...k}$: αντίσταση στρώματος 1 … k

$n_{01...k}$: Cole Cole παράμετρος n_0 αρχικής φορτιστικότητας στρώματος 1 … k

$tau_{1...k}$: Cole Cole παράμετρος tau χρονικής υστέρησης στρώματος 1 … k

$c_{1...k}$: Cole Cole παράμετρος c καμπυλότητας στρώματος 1 … k

$dt_{1...l}$: χρονοπαράθυρο 1 … l (el)

Αριθμός μετρήσεων: m (num_meas)

Αριθμός στρωμάτων: k (num_layers)

Αριθμός χρονοπαραθύρων: l (num_windows)

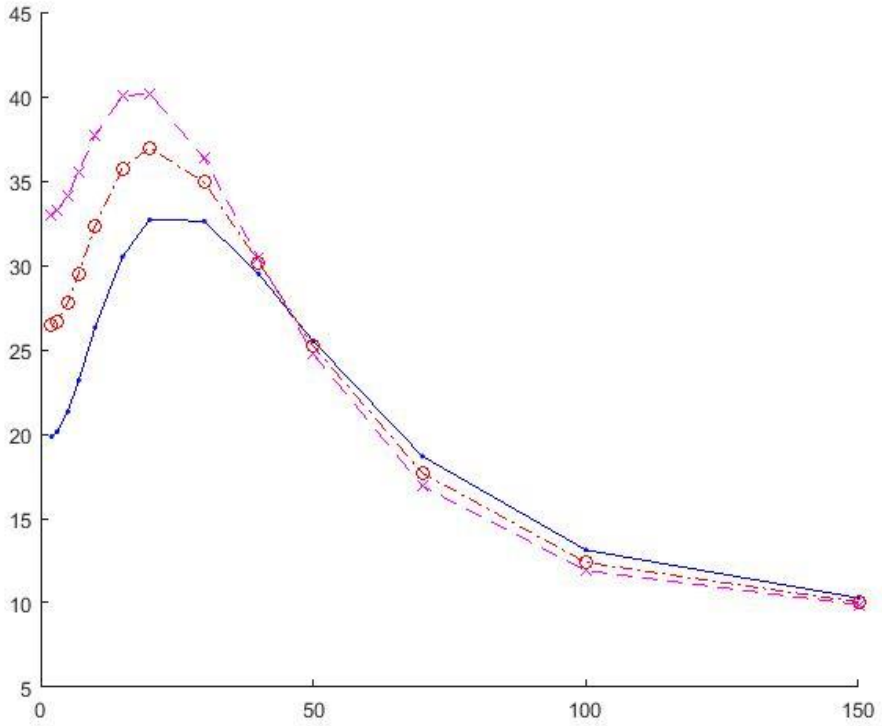
Διαστάσεις Ιακωβιανού Πίνακα JacDC: m x k (num_meas x num_layers)

Διαστάσεις Ιακωβιανού Πίνακα JacIPTotal: (l x m) x (3 x k)
(num_windows x num_meas) x (3 x num_layers)

Διαστάσεις Ιακωβιανού Πίνακα JacIPTotalDC: [(l+1) x m] x (4 x k)
[(num_windows+1) x num_meas] x (4 x num_layers)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμ



Σχήμα 3.5 Καμπύλες φαινόμενης αντίστασης - ab/2 για μοντέλο τριων στρωμάτων με αντίσταση 1ου στρώματος 30 Ω m (μπλε συνεχής γραμμή), και με αντίσταση 40 Ω m (κόκκινη γραμμή με παύλες -τελείες) και 50 Ω m (ματζέντα γραμμή με παύλες) όταν η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των δύο άλλων στρωμάτων παραμένει σταθερή όπως σταθερές παραμένουν οι τιμές των Cole Cole παραμέτρων όλων των στρωμάτων.

Η τελική μορφή του νέου Αλγορίθμου έχει τις παρακάτω διαφορές σε σχέση με αυτόν που δεν περιλάμβανε στα δεδομένα της αντιστροφής τις DC τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης:

- Δημιουργείται πλέον ο νέος Ιακωβιανός που έχει επιπλέον στήλες όσες ο αριθμός των στρωμάτων του μοντέλου για να συμπεριλάβει και την DC ειδική ηλεκτρική αντίσταση των στρωμάτων, και επιπλέον γραμμές όσες ο αριθμός των ζευγών ακροδεκτών για να συμπεριλάβει και την DC φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που μετριέται κατά την έκχυση ηλεκτρικού ρεύματος. Τα επιπλέον κελιά του μεγαλύτερου αυτού Πίνακα συμπληρώνονται με «μηδενικά» και τον JacDC όσον αφορά τις τελευταίες γραμμές του ενώ οι τελευταίες στήλες συμπληρώνονται με τη βοήθεια της μεθόδου διαταραχών.
- Οι τιμές DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, που υπολογίζονται και σε αυτόν τον αλγόριθμο σαν πρώτο στάδιο του αλγορίθμου, δεν θεωρούνται

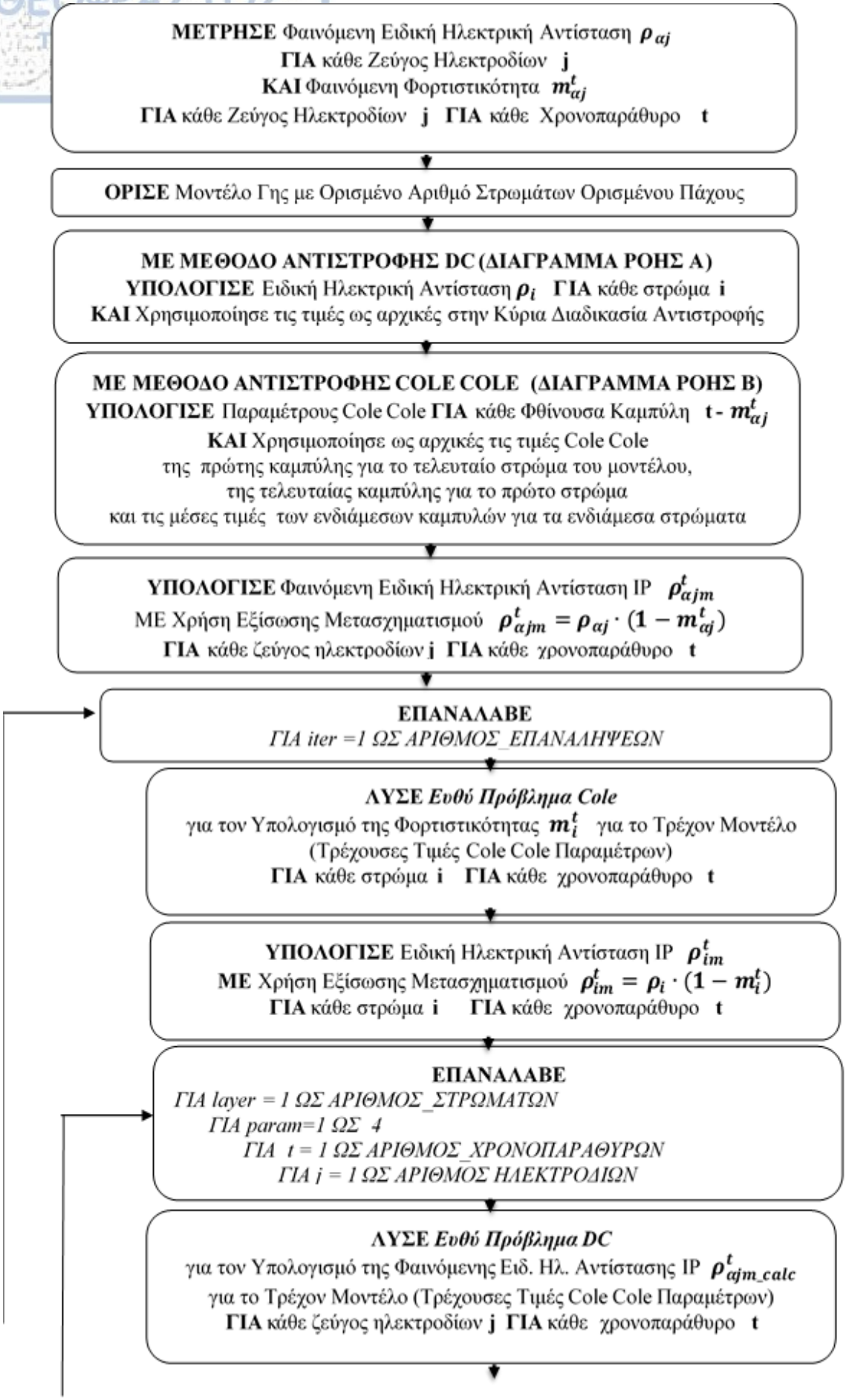
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

δεδομένες αλλά χρησιμοποιούνται σαν αρχικές τιμές στο κύριο στάδιο της συνολικής αντιστροφής. Εδώ δηλαδή επιτρέπουμε στις τιμές που υπολογίστηκαν από την αντιστροφή των DC δεδομένων να αλλάξουν εφόσον έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη σύμπτωση όλων των δεδομένων συνολικά, τόσο των IP όσο και των DC, εξετάζοντας το συνολικό RMS σφάλμα.

Ο αλγόριθμος της μεθόδου συνολικής αντιστροφής όλων των δεδομένων IP και DC παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήμα 3.6. Το διάγραμμα ροής συμπληρώνεται από δύο ακόμη διαγράμματα ροής το Α (Σχήμα 2.13) και το Β (Σχήμα 2.14).

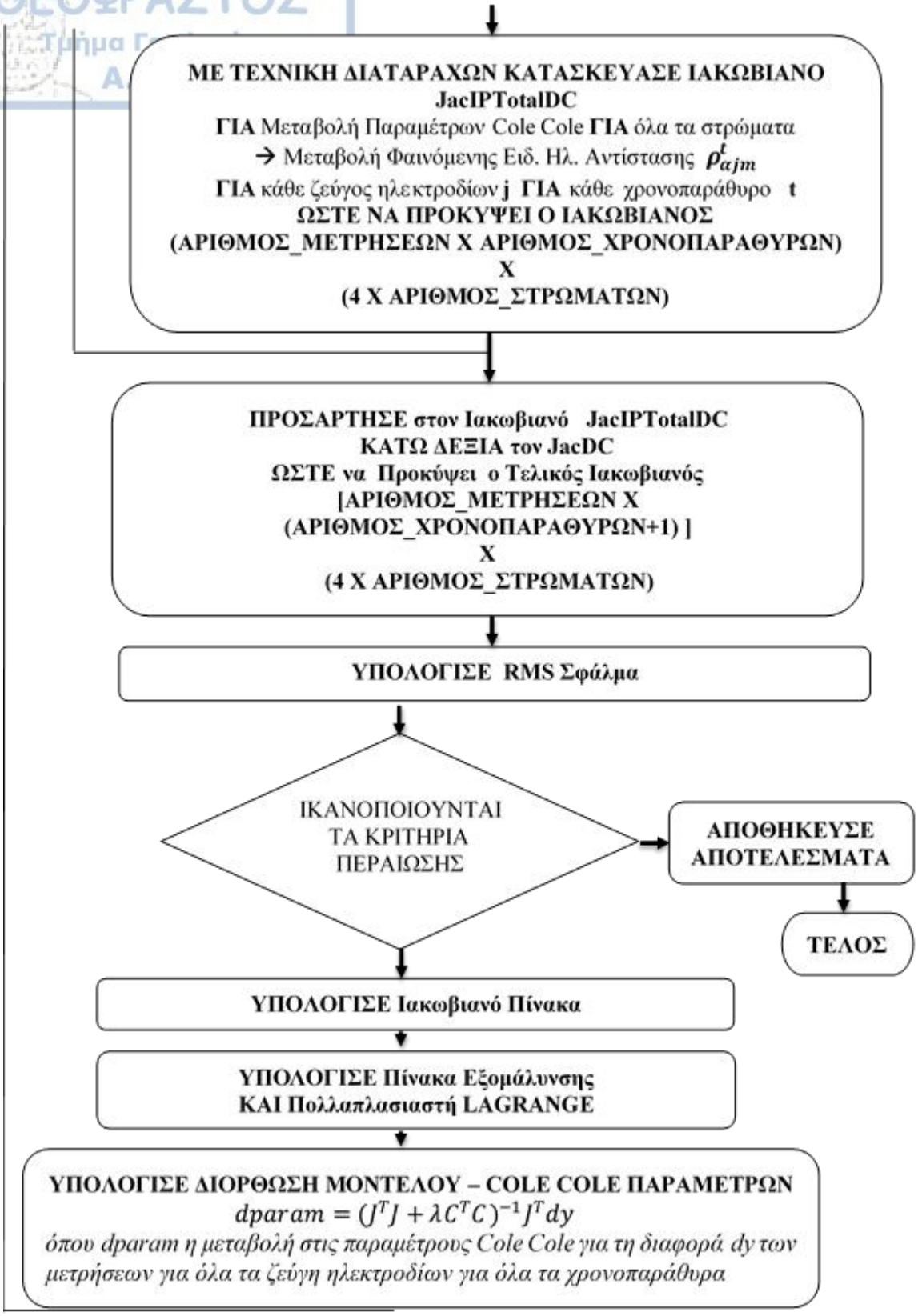
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Γεωλογίας Α



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής για Αλγόριθμο Άμεσης Ταυτόχρονης Αντιστροφής δεδομένων βυθοσκόπησης επαγόμενης πόλωσης IP στο Πεδίο του Χρόνου 1D-TDIP

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

3.3 Συνθετικά δεδομένα

Ένας ασφαλής τρόπος ελέγχου του αλγόριθμου που προτείνουμε στην παρούσα διατριβή είναι να ορίσουμε μοντέλο γης με συγκεκριμένο αριθμό στρωμάτων συγκεκριμένου πάχους, συγκεκριμένης τιμής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκεκριμένων τιμών των παραμέτρων Cole Cole, να λύσουμε το Ευθύ TDIP-1D πρόβλημα ώστε να υπολογίσουμε τις μετρήσεις που θα λαμβάναμε σε διάταξη ηλεκτροδίων Schlumberger. Αυτές οι μετρήσεις που χαρακτηρίζονται ως συνθετικά δεδομένα δίδονται για επεξεργασία στον αλγόριθμο αντιστροφής και αναμένεται να λάβουμε ως αποτέλεσμα το μοντέλο γης που αντιστοιχεί σε αυτές. Η σύγκριση των δύο μοντέλων, δηλαδή, του αρχικού και αυτού στο οποίο καταλήξαμε μας προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για την αξιοπιστία και την ακρίβεια του αλγορίθμου καθώς και αδυναμίες αλλά και δυνατά σημεία σε σχέση με υπάρχοντες αλγορίθμους.

Με την παραπάνω διαδικασία είναι πολύ χρήσιμο να ορίσουμε μοντέλα γης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να προσομοιάζουν σε συχνά συναντώμενες στο πεδίο περιπτώσεις μοντέλων γης για να γνωρίζουμε πού μπορεί ο αλγόριθμός μας να χρησιμοποιηθεί με περισσότερη ασφάλεια και πού με επιφύλαξη.

3.3.1 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α

Τα Συνθετικά Δεδομένα Α αφορούν σε ένα μοντέλο γης 3 στρωμάτων Αγώγιμο - Μη αγώγιμο – Αγώγιμο όπως φαίνεται στον Πίνακας 3.1, όπου παρουσιάζονται οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αρχικής φορτιστικότητας (n_0), σταθεράς ηρεμίας (tau) και σταθεράς καμπυλότητας (c). Τα αποτελέσματα αντιστροφής με το Νέο Αλγόριθμο παρουσιάζονται στο δεξιό ήμισυ του Πίνακας 3.1.

Αρχικό Μοντέλο				***Αποτελέσματα αντιστροφής***			
n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)	n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)
0.40	5	0.60	30	0.40	5.0	0.60	30
0.70	15	0.20	100	0.69	14.0	0.20	99
0.70	15	0.20	100	0.76	14.9	0.18	107
0.70	15	0.20	100	0.58	12.9	0.21	86
0.50	8	0.40	15	0.74	11.4	0.31	20
0.50	8	0.40	15	0.50	8.2	0.40	15

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΜΕΣΗΣ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 1D – TDIP

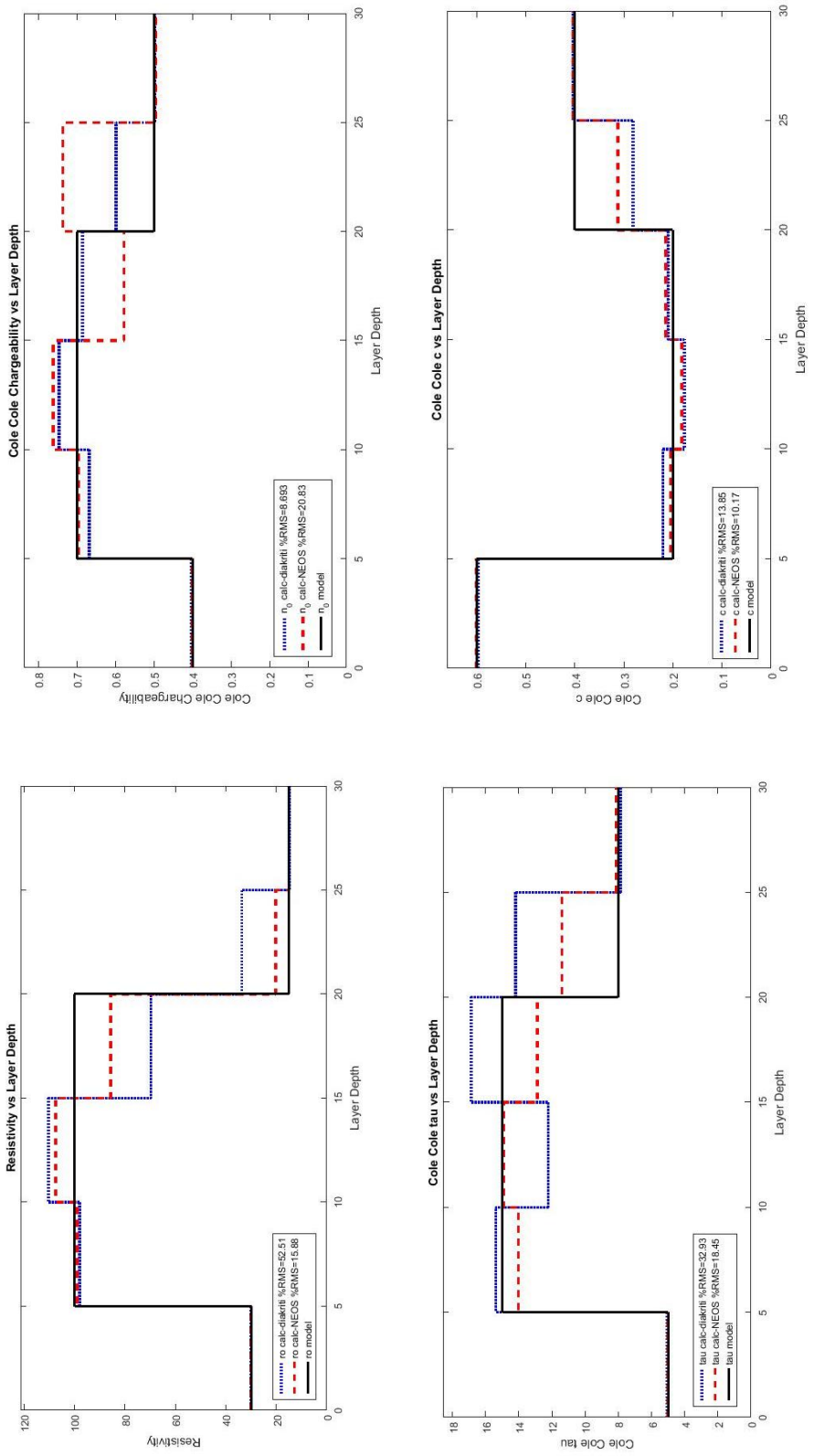
1η	2η	3η	4η	5η	6η	7η	8η	9η	10η	11η	12η	13η
150 m	100 m	70 m	50 m	40 m	30 m	20 m	15 m	10 m	7m	5 m	3 m	2m
0.013	0.023	0.003	0.016	0.011	0.008	0.018	0.006	0.012	0.011	0.004	0.005	0.008

Πίνακας 3.2: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α

(Ολικό %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α = 0.012 – Ολικό %RMS Διακριτής Αντιστροφής = 0.170)

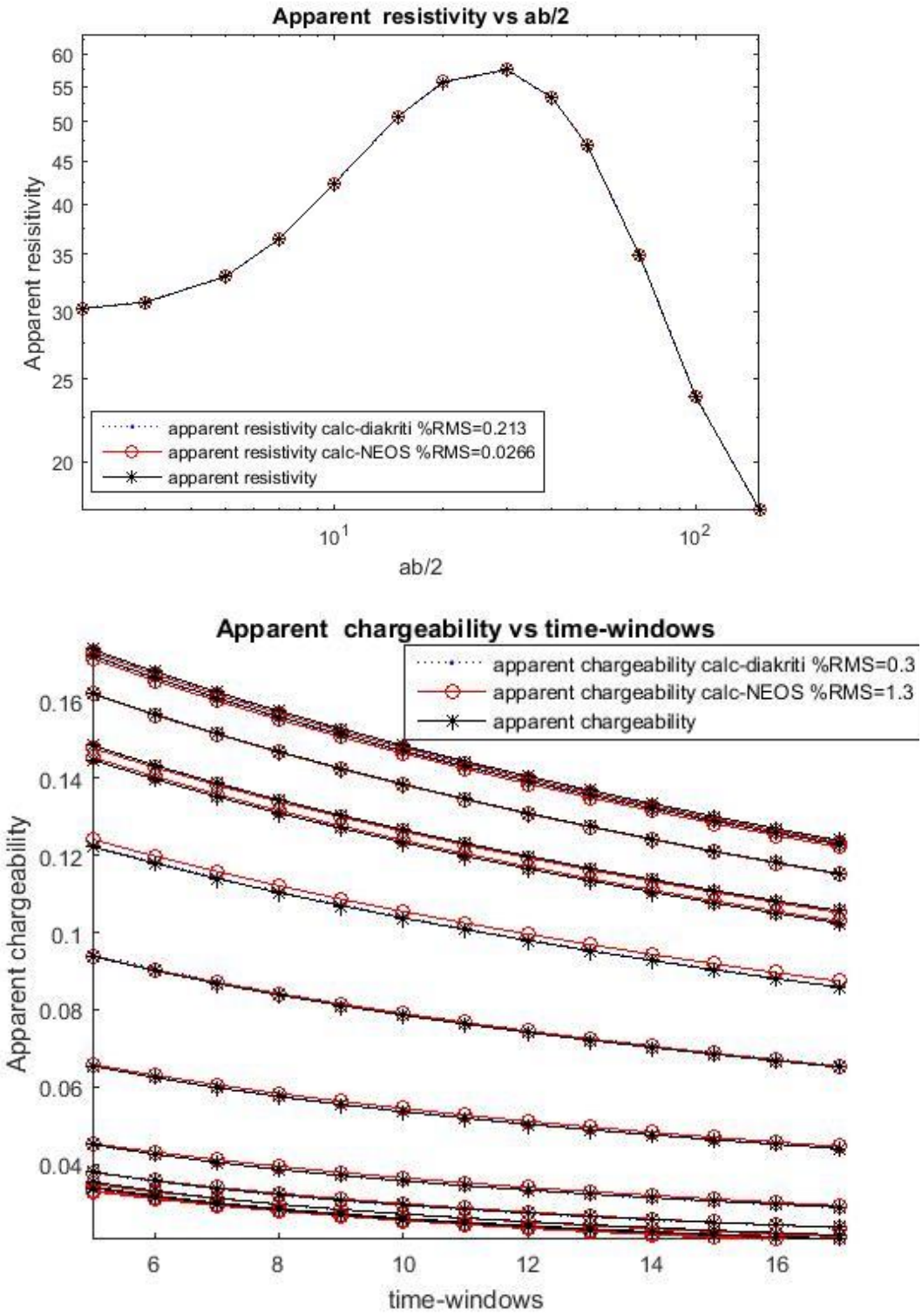
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" ΤΜ



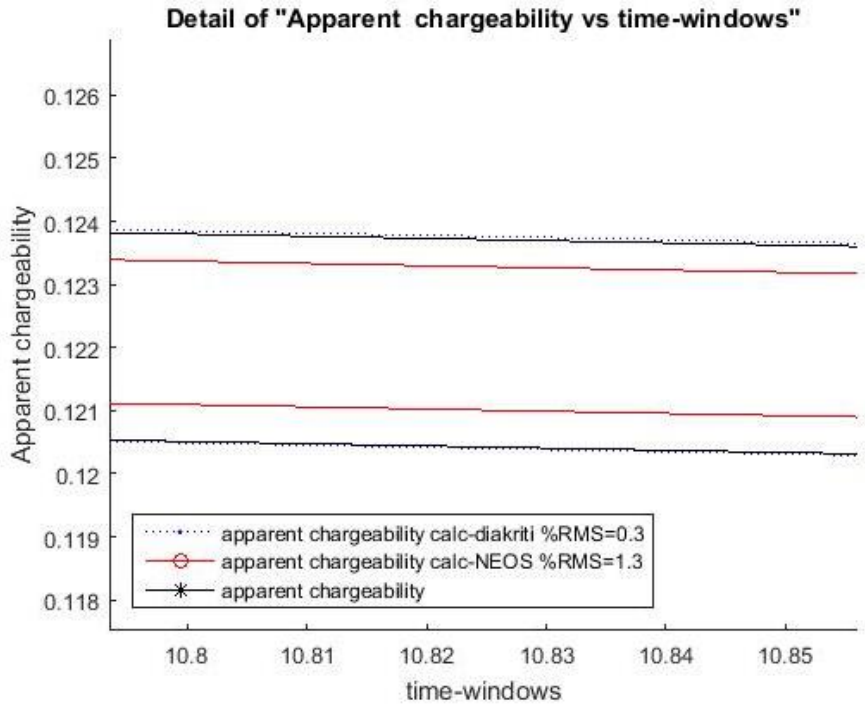
Σχήμα 3.7 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Α

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.8 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.9 Λεπτομέρεια από το Σχήμα 3.8β της μετρούμενης φορτιστικότητας και των φορτιστικοτήτων που υπολογίζονται με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής ως προς τα χρονοπαράθυρα ώστε να φαίνεται η προσέγγιση των δύο προς σύγκριση αλγορίθμων στις μετρούμενες τιμές.

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε συνθετικό μοντέλο ΑΓΩΓΙΜΟ – ΜΗ ΑΓΩΓΙΜΟ – ΑΓΩΓΙΜΟ έχει καλύτερα αποτελέσματα από τον Αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής. Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων, της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μαζί με της φαινόμενης φορτιστικότητας, υπολογίζεται αφού πρώτα μετατραπούν οι τιμές φορτιστικότητας σε τιμές της κατασκευασμένης μεταβλητής «αντίσταση IP» και είναι **0.012** για το Αλγόριθμο Α.Τ.Α έναντι του **0.170** του αλγορίθμου διακριτής αντιστροφής. Τα επιμέρους %RMS σφάλματα για τον υπολογισμό των παραμέτρων Cole Cole και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για όλα τα στρώματα του μοντέλου γης που δεχόμαστε ως ισχύον είναι γενικά μικρότερα για τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α εκτός του σφάλματος για τον υπολογισμό της n_0, και έχουν όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 3.3.

Παράμετρος	Αλγόριθμος Α.Τ.Α	Αλγόριθμος Διακριτής αντιστροφής
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση **ro**	15.88	52.51
Cole Cole αρχική φορτιστικότητα	20.83	8.69
Cole Cole χρόνος ηρεμίας **tau**	18.45	32.93
Cole Cole σταθ. συχνοτ. εξάρτησης	10.17	13.85

Πίνακας 3.3: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ

3.3.2 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Δεδομένα Α με 3% προστιθέμενο θόρυβο

Τα Συνθετικά Δεδομένα Α αφορούν το μοντέλο γης της προηγούμενης παραγράφου, 3 στρωμάτων Αγώγιμο - Μη αγώγιμο – Αγώγιμο όπως φαίνεται στον Πίνακας 3.4, όπου παρουσιάζονται οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αρχικής φορτιστικότητας, σταθεράς ηρεμίας (tau) και σταθεράς καμπυλότητας (c). Στις τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φαινόμενης φορτιστικότητας προστέθηκε ομογενές σφάλμα 3%, μέσω της MATLAB, δηλαδή από -3% έως +3% σε κάθε τιμή. Τα αποτελέσματα αντιστροφής με το Νέο Αλγόριθμο παρουσιάζονται στο δεξιό ήμισυ του Πίνακας 3.4. Να σημειωθεί ότι ο θόρυβος προστέθηκε τυχαία οπότε σε νέα προσπάθεια πρόσθεσης θορύβου τα αποτελέσματα προφανώς θα είναι διαφορετικά.

Αρχικό Μοντέλο με 3% θόρυβο				***Αποτελέσματα αντιστροφής***			
n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)	n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)
0.40	5	0.60	30	0.48	2.9	0.51	30
0.70	15	0.20	100	0.65	27.5	0.25	96
0.70	15	0.20	100	0.62	31.0	0.19	126
0.70	15	0.20	100	0.83	24.1	0.22	48
0.50	8	0.40	15	0.51	12.4	0.27	48
0.50	8	0.40	15	0.56	4.9	0.35	14

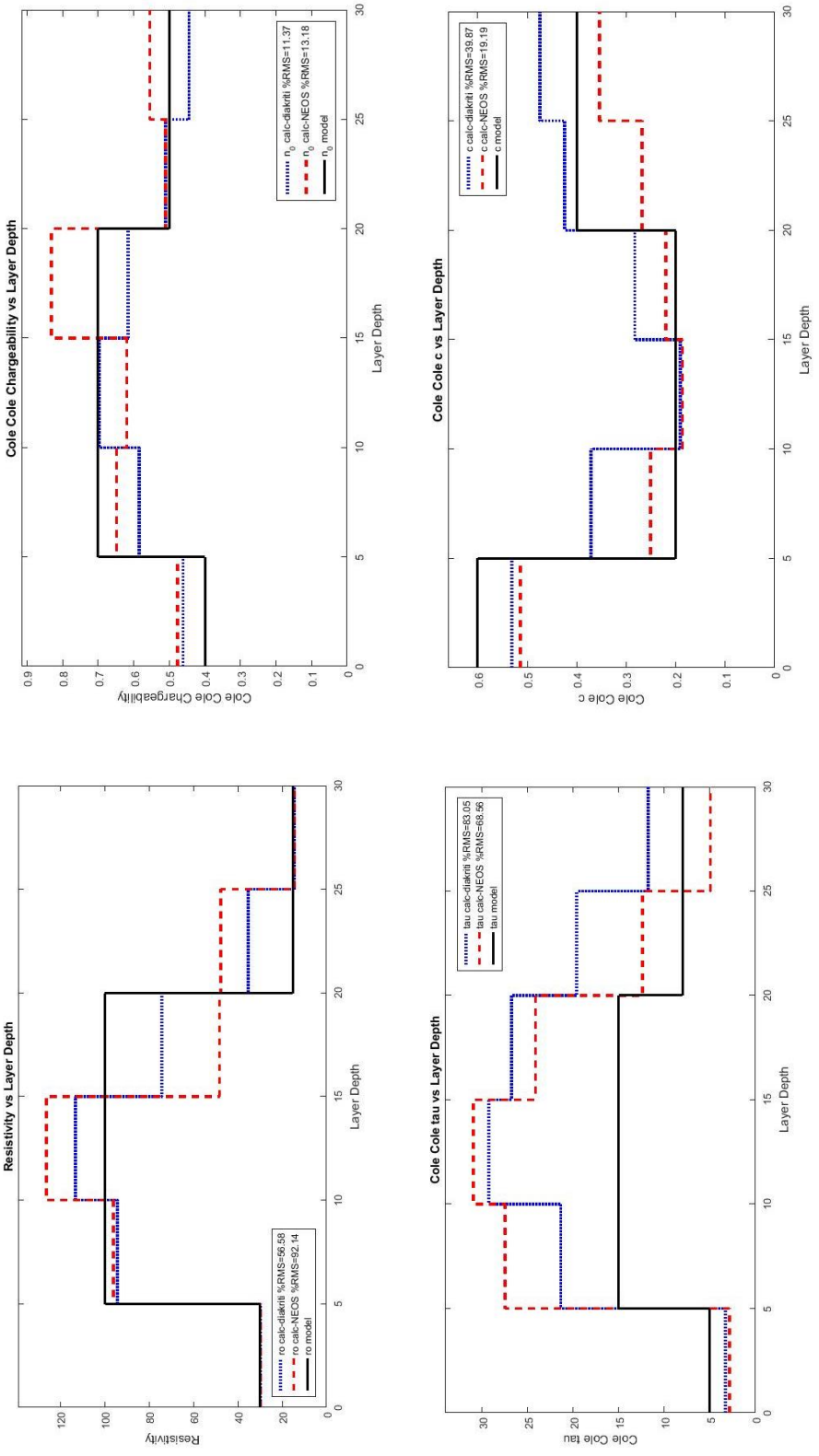
Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 3% θόρυβο

1η	2η	3η	4η	5η	6η	7η	8η	9η	10η	11η	12η	13η
150 m	100 m	70 m	50 m	40 m	30 m	20 m	15 m	10 m	7m	5 m	3 m	2m
0.801	0.838	1.471	1.520	0.893	2.641	1.395	1.838	1.485	0.762	1.192	3.312	1.794

Πίνακας 3.5: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 3% θόρυβο

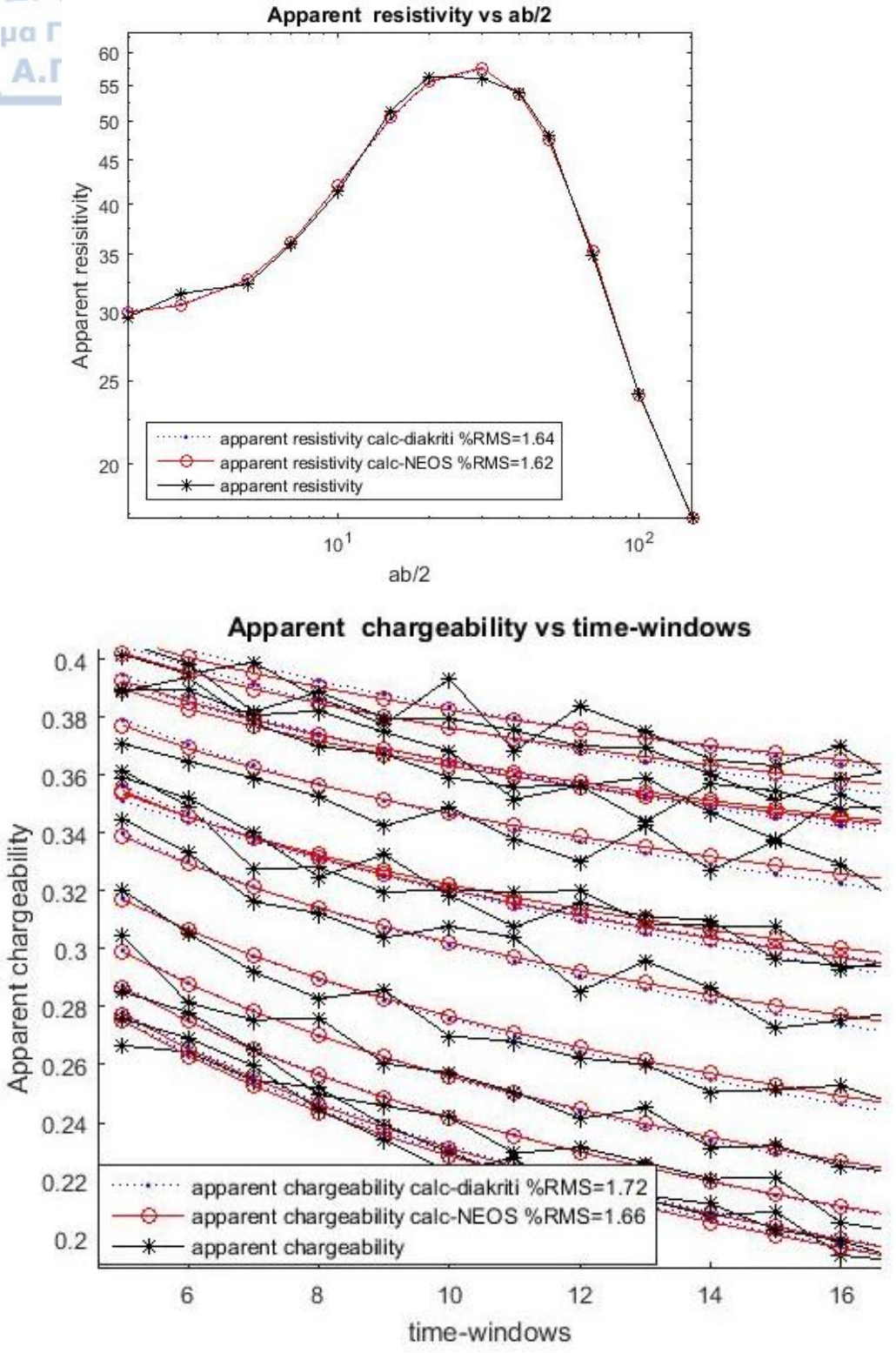
(Ολικό %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α = 1.69 – Ολικό %RMS Διακριτής Αντιστροφής = 1.73)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.10 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 3%

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.11 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση AB/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 3%

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Συνθετικά δεδομένα

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε συνθετικό μοντέλο ΑΓΩΓΙΜΟ – ΜΗ ΑΓΩΓΙΜΟ – ΑΓΩΓΙΜΟ με προστιθέμενο θόρυβο 3% έχει γενικά καλύτερα αποτελέσματα. Η σύγκριση εξαρτάται όμως από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων Cole Cole που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος Διακριτής Αντιστροφής. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε και σε αυτή τη μέθοδο τις ίδιες αρχικές τιμές που χρησιμοποιήσαμε και για τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α, που προέκυψαν από τις καμπύλες μέτρησης της φορτιστικότητας. Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων είναι λίγο μικρότερο στον Αλγόριθμο Α.Τ.Α (**1.69**) από ότι στον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής (**1.73**), αν και σε σύγκριση στον υπολογισμό των παραμέτρων Cole Cole αλλού υπερτερεί η μία και αλλού η άλλη. Η διαφορά στο συνολικό σφάλμα %RMS μπορεί να είναι μικρή αλλά το ενδιαφέρον είναι ότι πάντα είναι υπέρ του Αλγορίθμου Α.Τ.Α.

Παράμετρος	Αλγόριθμος Α.Τ.Α	Αλγόριθμος Διακριτής αντιστροφής
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ro	92.14	56.58
Cole Cole αρχική φορτιστικότητα n0	13.17	11.37
Cole Cole χρόνος ηρεμίας tau	68.56	83.04
Cole Cole σταθ. συχνοτ. εξάρτησης c	19.19	39.87

Πίνακας 3.6: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α με 3% προστιθέμενο θόρυβο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

3.3.3 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% προστιθέμενο θόρυβο

Τα Συνθετικά Δεδομένα Α αφορούν το μοντέλο γης της προηγούμενης παραγράφου, 3 στρωμάτων Αγώγιμο - Μη αγώγιμο – Αγώγιμο όπως φαίνεται στον Πίνακας 3.7, όπου παρουσιάζονται οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αρχικής φορτιστικότητας, σταθεράς ηρεμίας (tau) και σταθεράς καμπυλότητας (c). Στις τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φαινόμενης φορτιστικότητας προστέθηκε ομογενές σφάλμα 6%, μέσω της MATLAB, δηλαδή από -6% έως +6% σε κάθε τιμή. Τα αποτελέσματα αντιστροφής με το Νέο Αλγόριθμο παρουσιάζονται στο δεξιό ήμισυ του Πίνακας 3.7. Να σημειωθεί ότι ο θόρυβος προστέθηκε τυχαία οπότε σε νέα προσπάθεια πρόσθεσης θορύβου τα αποτελέσματα προφανώς θα είναι διαφορετικά.

Αρχικό Μοντέλο με 6% θόρυβο				***Αποτελέσματα αντιστροφής***			
n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)	n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)
0.40	5	0.60	30	0.35	7.4	0.61	30
0.70	15	0.20	100	0.62	23.7	0.51	87
0.70	15	0.20	100	0.36	29.7	0.77	211
0.70	15	0.20	100	0.48	25.5	**1.41**	24
0.50	8	0.40	15	0.53	15.8	**2.04**	5
0.50	8	0.40	15	0.32	4.3	**1.82**	16

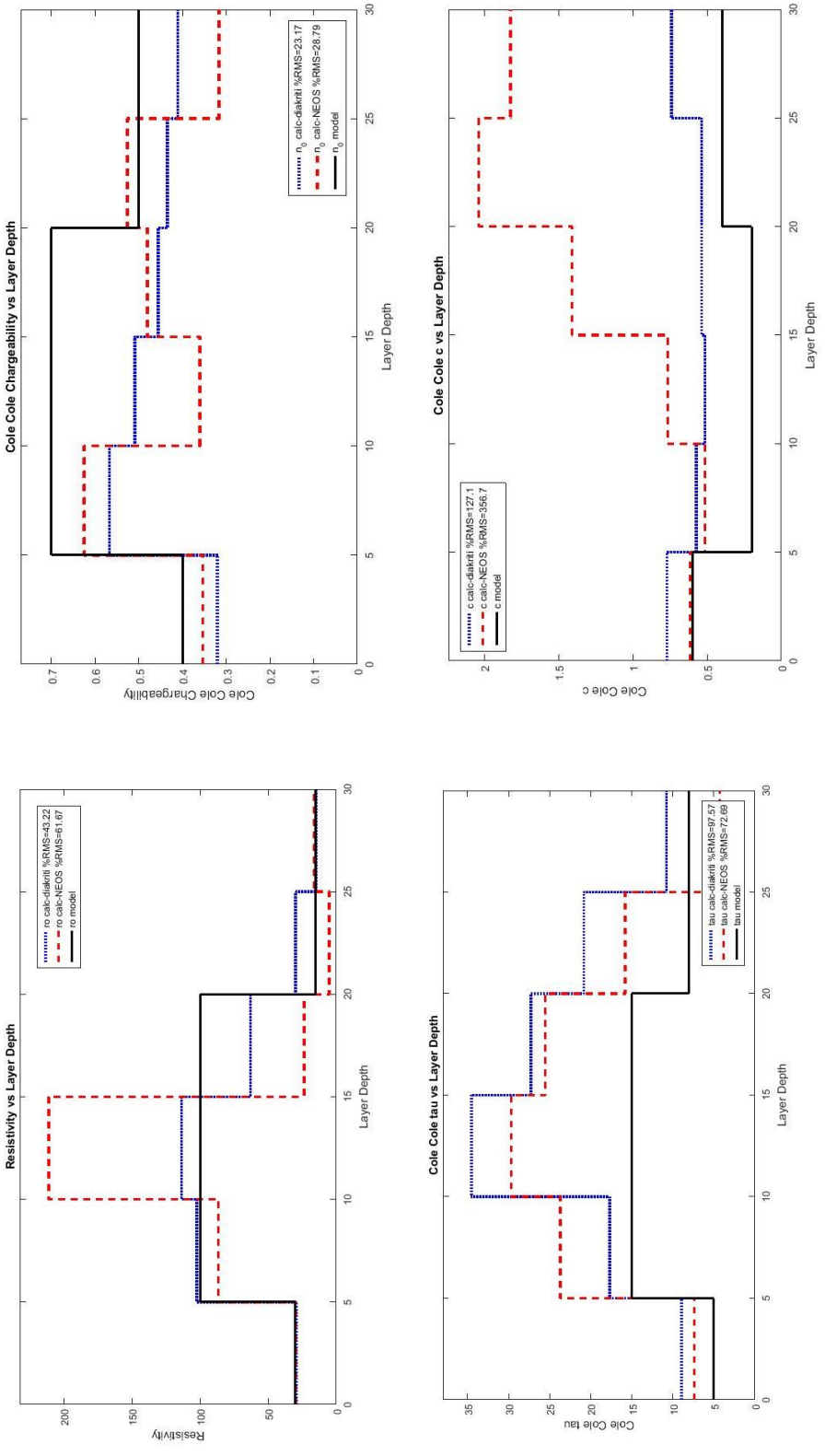
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% θόρυβο

1η	2η	3η	4η	5η	6η	7η	8η	9η	10η	11η	12η	13η
150 m	100 m	70 m	50 m	40 m	30 m	20 m	15 m	10 m	7m	5 m	3 m	2m
1.122	1.781	2.100	1.806	2.495	3.032	2.652	1.403	3.338	3.755	1.972	0.834	0.801

Πίνακας 3.8: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% θόρυβο

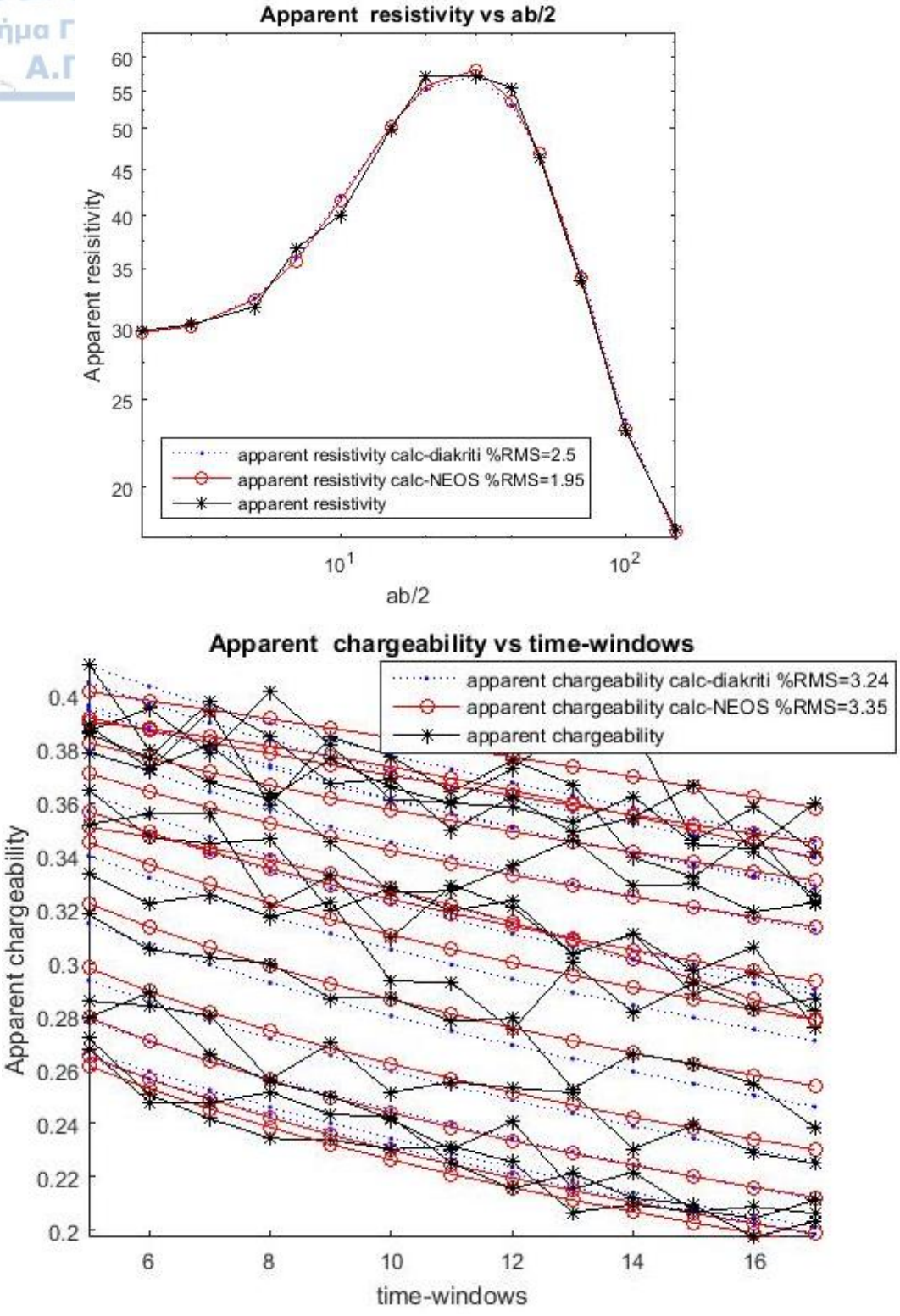
(Ολικό %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α = 2.27 – Ολικό %RMS Διακριτής Αντιστροφής = 2.90)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.12 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 6%

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.13 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση AB/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 6%

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Συνθετικά δεδομένα

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε συνθετικό μοντέλο ΑΓΩΓΙΜΟ – ΜΗ ΑΓΩΓΙΜΟ – ΑΓΩΓΙΜΟ με προστιθέμενο θόρυβο 6% έχει γενικά καλύτερα αποτελέσματα. Η σύγκριση εξαρτάται όμως από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων Cole Cole που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος Διακριτής Αντιστροφής. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε και σε αυτή τη μέθοδο τις ίδιες αρχικές τιμές που χρησιμοποιήσαμε και για τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α, που προέκυψαν από τις καμπύλες μέτρησης της φορτιστικότητας Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων είναι μικρότερο στον Αλγόριθμο Α.Τ.Α (**2.27**) από ότι στον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής (**2.90**), αν και σε σύγκριση στον υπολογισμό των παραμέτρων Cole Cole αλλού υπερτερεί η μία και αλλού η άλλη.

Παράμετρος	Αλγόριθμος Α.Τ.Α	Αλγόριθμος Διακριτής αντιστροφής
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση **ro**	61.67	**43.21**
Cole Cole αρχική φορτιστικότητα $\mathbf{n_0}$	28.79	**23.17**
Cole Cole χρόνος ηρεμίας **tau**	**72.69**	97.57
Cole Cole σταθ. συχνοτ. εξάρτησης **c**	356.65	**127.11**

Πίνακας 3.9: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α με 6% προστιθέμενο θόρυβο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

3.3.4 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% προστιθέμενο θόρυβο

Τα Συνθετικά Δεδομένα Α αφορούν το μοντέλο γης της προηγούμενης παραγράφου, 3 στρωμάτων Αγώγιμο - Μη αγώγιμο – Αγώγιμο όπως φαίνεται στον Πίνακας 3.10, όπου παρουσιάζονται οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αρχικής φορτιστικότητας, σταθεράς ηρεμίας (tau) και σταθεράς καμπυλότητας (c). Στις τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και φαινόμενης φορτιστικότητας προστέθηκε ομογενές σφάλμα 10%, μέσω της MATLAB, δηλαδή από -10% έως +10% σε κάθε τιμή. Τα αποτελέσματα αντιστροφής με το Νέο Αλγόριθμο παρουσιάζονται στο δεξιό ήμισυ του Πίνακας 3.10. Να σημειωθεί ότι ο θόρυβος προστέθηκε τυχαία οπότε σε νέα προσπάθεια πρόσθεσης θορύβου τα αποτελέσματα προφανώς θα είναι διαφορετικά.

Αρχικό Μοντέλο με 10% θόρυβο				***Αποτελέσματα αντιστροφής***			
n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)	n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)
0.40	5	0.60	30	0.39	6.0	0.61	29
0.70	15	0.20	100	0.41	42.7	0.69	159
0.70	15	0.20	100	0.60	44.2	0.83	63
0.70	15	0.20	100	0.37	30.2	0.72	67
0.50	8	0.40	15	0.39	20.9	0.72	30
0.50	8	0.40	15	0.42	12.8	0.65	14

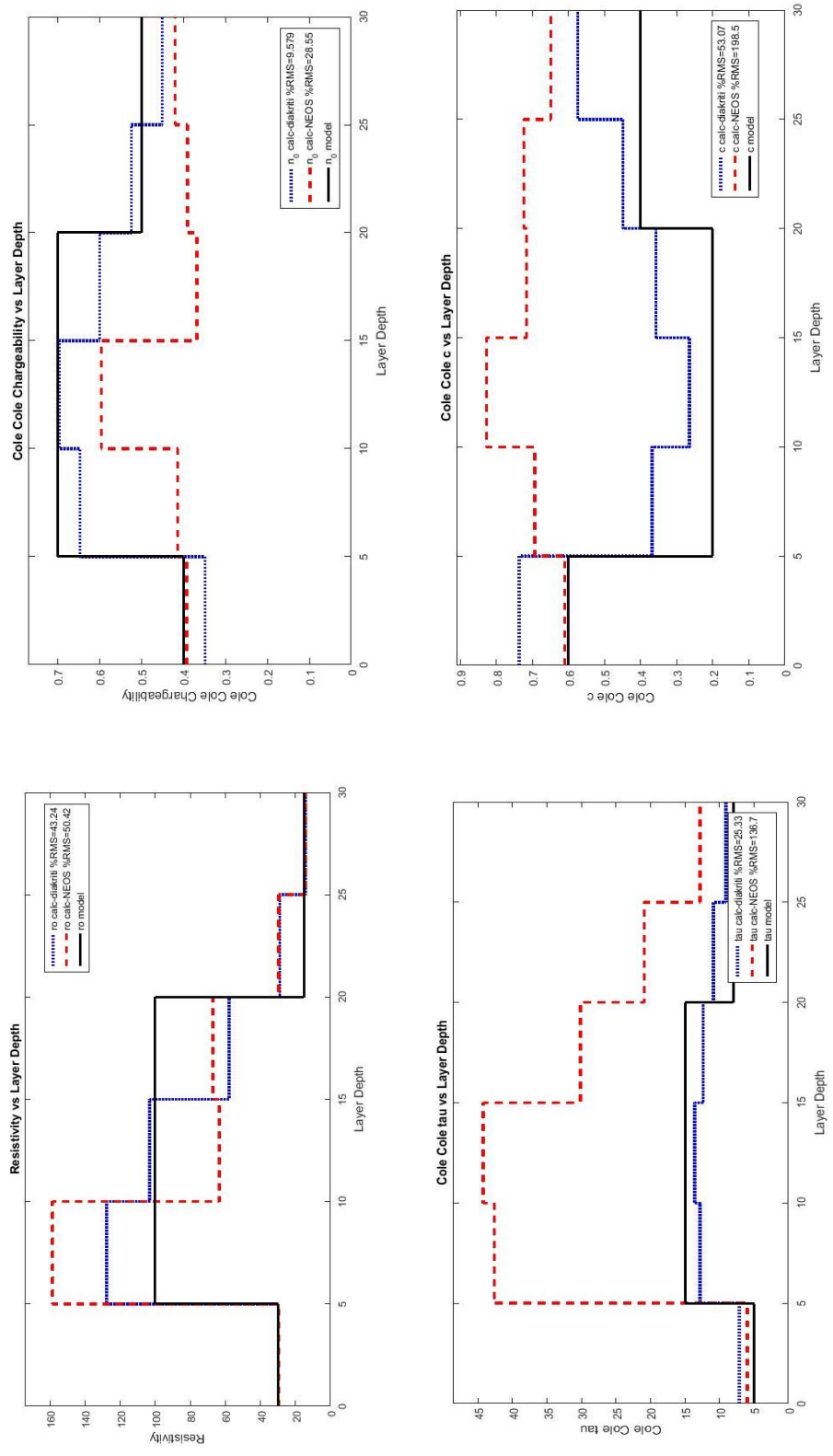
Πίνακας 3.10: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% θόρυβο

$1^η$	$2^η$	$3^η$	$4^η$	$5^η$	$6^η$	$7^η$	$8^η$	$9^η$	$10^η$	$11^η$	$12^η$	$13^η$
150 m	100 m	70 m	50 m	40 m	30 m	20 m	15 m	10 m	7m	5 m	3 m	2m
3.82	9.65	9.68	11.47	7.45	3.32	4.04	4.48	4.92	6.04	3.71	3.36	1.82

Πίνακας 3.11: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% θόρυβο

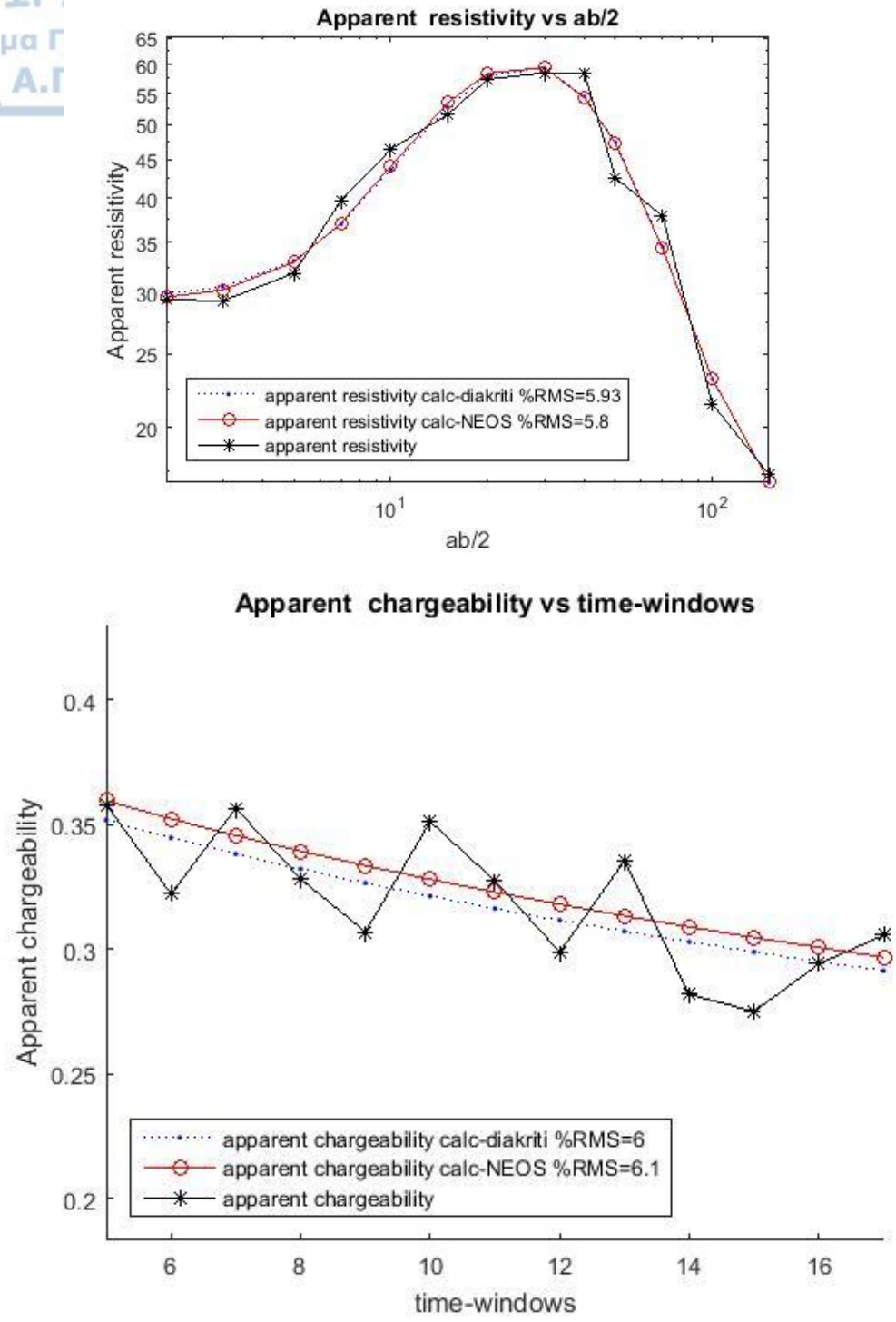
(Ολικό %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α = 6.35 – Ολικό %RMS Διακριτής Αντιστροφής = 6.53)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.14 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 10%

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.15 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση AB/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Α με προστιθέμενο θόρυβο 10% (παρουσιάζεται η καμπύλη φορτιστικότητας μόνο για την πρώτη θέση μέτρησης)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Συνθετικά δεδομένα

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε συνθετικό μοντέλο ΑΓΩΓΙΜΟ – ΜΗ ΑΓΩΓΙΜΟ – ΑΓΩΓΙΜΟ με προστιθέμενο θόρυβο 10% έχει μικρότερο %RMS σφάλμα για ίδιες αρχικές τιμές παραμέτρων Cole Cole που προέκυψαν από τις καμπύλες μέτρησης της φορτιστικότητας Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων είναι μικρότερο στον Αλγόριθμο Α.Τ.Α (6.35) από ότι στον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής (6.54), αν και σε σύγκριση στον υπολογισμό των παραμέτρων Cole Cole η Διακριτή αντιστροφή υπερτερεί του αλγορίθμου Α.Τ.Α.

Παράμετρος	*Αλγόριθμος Α.Τ.Α*	*Αλγόριθμος Διακριτής αντιστροφής*
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ro	*50.42*	*43.24*
Cole Cole αρχική φορτιστικότητα n0	28.55	20.01
Cole Cole χρόνος ηρεμίας tau	136.70	85.01
Cole Cole σταθ. συχνοτ. εξάρτησης c	198.49	180.94

Πίνακας 3.12: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Α με 10% προστιθέμενο θόρυβο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

3.3.5 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Β

Τα Συνθετικά Δεδομένα Β αφορούν σε ένα μοντέλο γης 3 στρωμάτων Μη Αγώγιμο – Αγώγιμο – Μη Αγώγιμο όπως φαίνεται στον Πίνακας 3.13, όπου παρουσιάζονται οι τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, αρχικής φορτιστικότητας, σταθεράς ηρεμίας (tau) και σταθεράς καμπυλότητας (c). Τα αποτελέσματα αντιστροφής με τον αλγόριθμο Α.Τ.Α παρουσιάζονται στο δεξιό ήμισυ του Πίνακας 3.13.

Αρχικό Μοντέλο				*Αποτελέσματα αντιστροφής*			
n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)	n_0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)
0.1	0.5	0.5	50	0.06	2.3	0.64	50
0.1	0.5	0.5	50	0.07	2.9	0.59	51
0.3	8.0	0.8	10	0.28	7.0	0.78	9
0.3	8.0	0.8	10	0.34	9.1	0.83	13
0.01	0.2	0.2	100	0.09	5.3	0.56	51
0.01	0.2	0.2	100	0.02	3.6	0.39	101

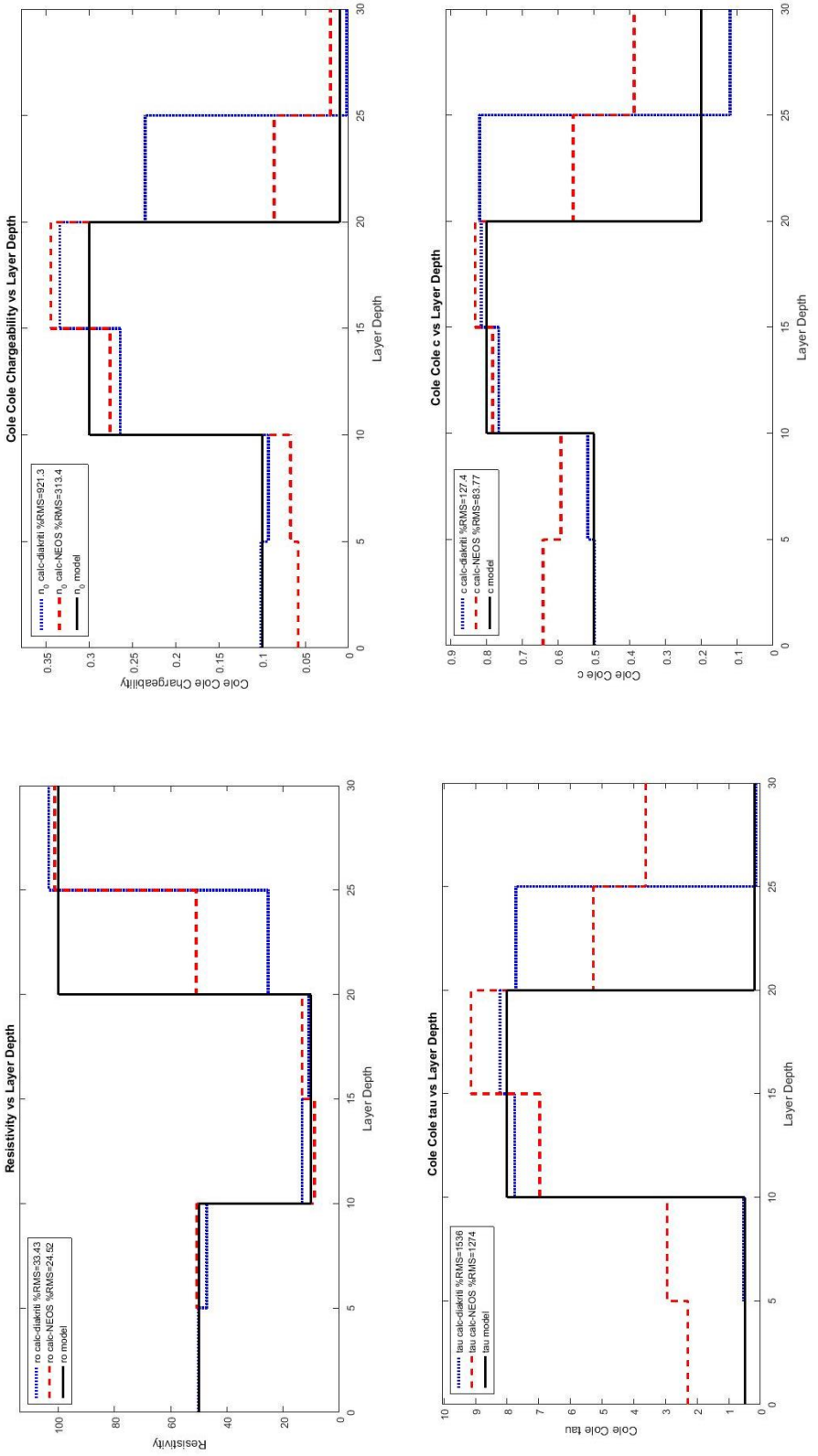
Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Συνθετικά Δεδομένα Β

$1^η$	$2^η$	$3^η$	$4^η$	$5^η$	$6^η$	$7^η$	$8^η$	$9^η$	$10^η$	$11^η$	$12^η$	$13^η$
150 m	100 m	70 m	50 m	40 m	30 m	20 m	15 m	10 m	7m	5 m	3 m	2m
0.060	0.041	0.044	0.023	0.048	0.017	0.043	0.024	0.039	0.028	0.018	0.025	0.029

Πίνακας 3.14: %RMS σφάλμα ανά μέτρηση Αλγόριθμου Α.Τ.Α Αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Β

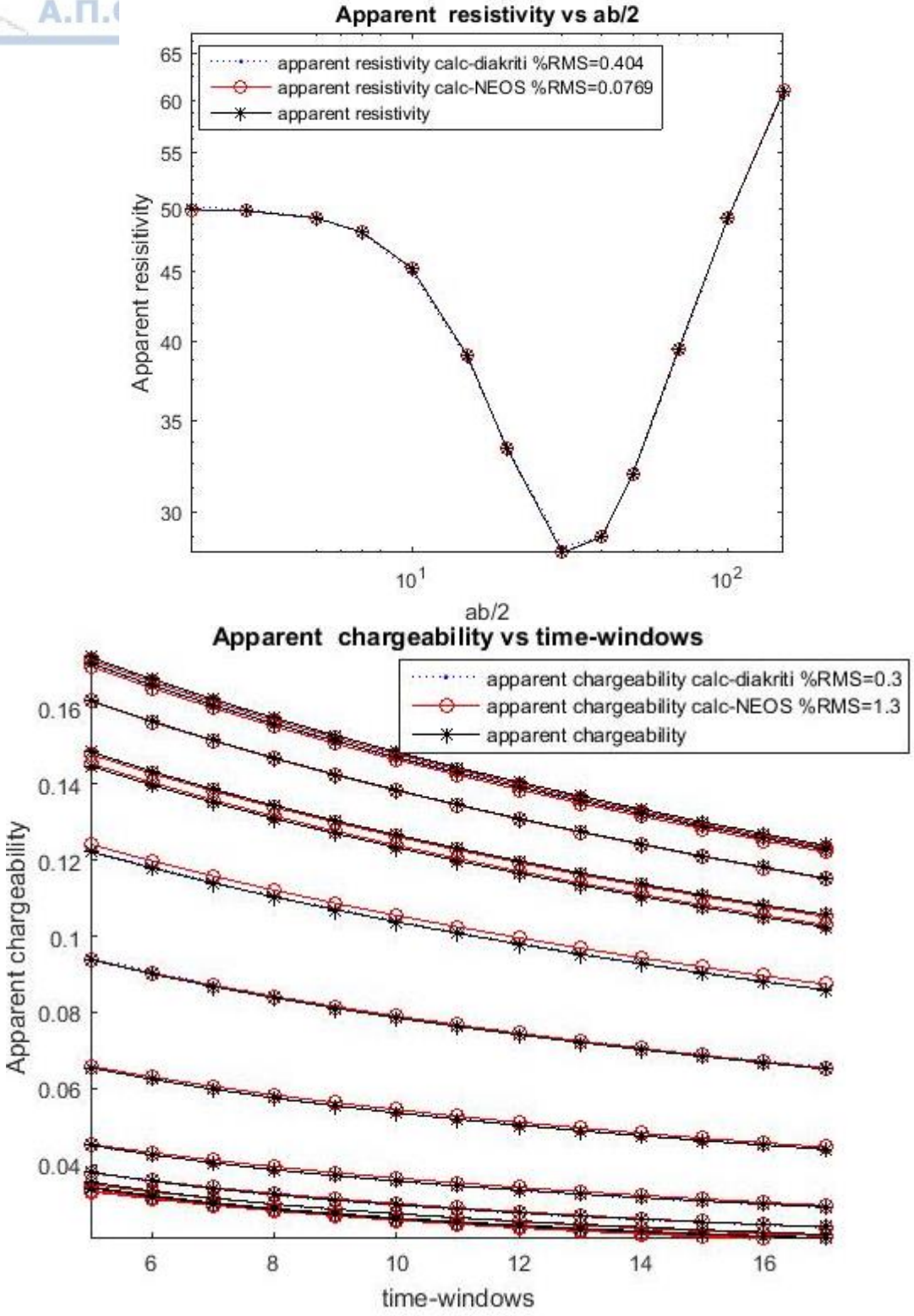
(Ολικό %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α = 0.036 – Ολικό %RMS Διακριτής Αντιστροφής = 0.397)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.16 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) για το μοντέλο, β) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α και γ) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής για Συνθετικά Δεδομένα Β

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.17 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση AB/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για Συνθετικά Δεδομένα Β

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Συνθετικά δεδομένα

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε συνθετικό μοντέλο Μη Αγώγιμο – Αγώγιμο – Μη Αγώγιμο έχει καλύτερα αποτελέσματα. Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων, της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μαζί με της φαινόμενης φορτιστικότητας, υπολογίζεται αφού πρώτα μετατραπούν οι τιμές φορτιστικότητας σε τιμές της κατασκευασμένης μεταβλητής «αντίσταση IP» και είναι **0.036** για το Αλγόριθμο Α.Τ.Α έναντι του **0.397** του αλγορίθμου διακριτής αντιστροφής. Τα επιμέρους %RMS σφάλματα για τον υπολογισμό των παραμέτρων Cole Cole και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για όλα τα στρώματα του μοντέλου γης που δεχόμαστε ως ισχύον είναι γενικά μικρότερα για τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και έχουν ως εξής:

Παράμετρος	Αλγόριθμος Α.Τ.Α	Αλγόριθμος Διακριτής αντιστροφής
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση **ro**	24.5	33.4
Cole Cole αρχική φορτιστικότητα $\mathbf{n_0}$	***4.3***	***9.4***
Cole Cole χρόνος ηρεμίας **tau**	***285.9***	***307.5***
Cole Cole σταθ. συχνοτ. εξάρτησης **c**	***25.5***	***17.9***

Πίνακας 3.15: %RMS Σφάλμα υπολογισμού παραμέτρων VES IP για Συνθετικά Δεδομένα Β. Για την ειδική ηλεκτρική αντίσταση τα σφάλματα %RMS είναι σχετικά ενώ για τις παραμέτρους Cole Cole είναι απόλυτα.

Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα σφάλματα είναι μεγάλα γιατί αφορούν τιμές κοντά στο 0, οπότε συγκρινόμενες με αυτές εύκολα ξεφεύγουν σε τιμές κατά μία τάξη μεγέθους. Για το λόγο αυτό για τις παραμέτρους Cole Cole παραθέτουμε τα απόλυτα %RMS σφάλματα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

3.4 Πραγματικά δεδομένα

3.4.1 Αλγόριθμος A.T.A για Πραγματικά Δεδομένα Milos12_145

Τα πραγματικά δεδομένα Milos12_145 αφορούν σε μετρήσεις που ελήφθησαν στη Μήλο το 2019 (Τεχνική Έκθεση: Τσούρλος και Βαργεμέζης, 2019) και παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.16.

Η ποιότητά τους όσον αφορά την επαγόμενη πόλωση δεν είναι ικανοποιητική. Το θετικό είναι ότι υπάρχει σε όλες τους συμμετρία και δεν αναγκαστήκαμε να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις με ζεύγη ακροδεκτών A,B που να έχουν διαφορετική απόσταση από το σημείο της βυθοσκόπησης. Οι μετρήσεις για A=14 και B=17 είναι προφανώς λανθασμένες και απορρίπτονται, οπότε μας μένουν 6 σειρές μετρήσεων IP.

ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ	num_meas	M	N	A	B	DC	IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	IP7	IP8	IP9	IP10	IP11	IP12
12	7	15	16	14	17	**17.26**	2.92260	2.92260	2.92260	2.92260	2.92260	2.92260	2.92260	2.9226012	2.92260	2.92260	2.92260	2.92260
12		15	16	13	18	**14.75**	6.21316	5.54178	5.00851	4.52420	4.13259	3.86333	3.56785	3.2863713	2.94017	2.77933	2.60098	2.36495
12		15	16	12	19	**13.15**	7.78941	6.85986	6.21662	5.73810	5.31449	4.90268	4.66342	4.2123763	3.62014	3.59267	3.32203	3.13772
12		15	16	11	20	**11.28**	9.40314	8.42013	7.49807	6.45420	6.01222	6.11886	5.34918	4.7853414	4.30530	4.48815	4.04620	3.60428
12		15	16	10	21	**10.10**	10.26795	8.85208	8.44390	7.23219	7.11737	6.67080	5.48457	5.1529815	4.29839	4.74494	4.56631	3.77546
12		15	16	9	22	**8.82**	10.93141	10.22703	9.26528	8.27644	7.47724	7.16569	6.42068	6.2174905	4.97128	4.76810	4.78164	4.72746
12		15	16	8	23	**7.84**	10.44051	9.03609	8.71035	7.08209	7.46892	6.51260	5.51540	6.1258705	5.27106	5.33209	4.96582	4.13154

Πίνακας 3.16 Πραγματικά δεδομένα Milos12_145

Αποτελέσματα αντιστροφής			
n0	***τ (tau)***	***c***	***R (Ωμ m)***
0.008	0.36	0.799	10
0.017	0.29	0.787	39
0.018	0.29	0.805	4
0.020	0.30	0.822	10
0.021	0.32	0.817	38
0.043	0.06	0.612	3

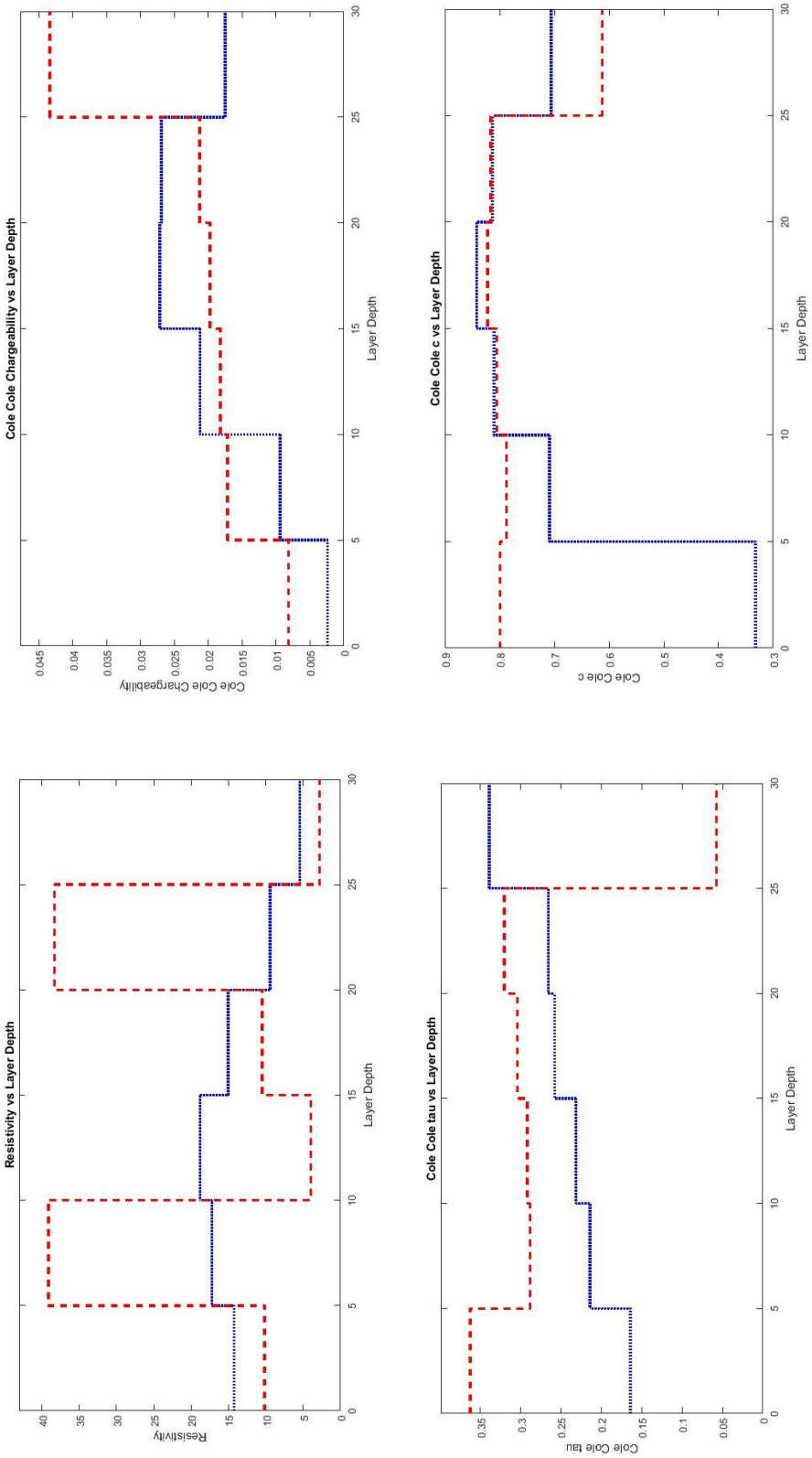
Πίνακας 3.17 Αποτελέσματα Αλγόριθμου A.T.A για Πραγματικά Δεδομένα Milos12_145

%RMS ανά μέτρηση					
1η	2η	3η	4η	5η	6η
75 m	65 m	55 m	45 m	35 m	25 m
0.112	0.332	0.861	1.123	0.567	0.140
%RMS total =	0.641	(%RMS Διακριτής Αντιστροφής = 0.963)			

Πίνακας 3.18 Σφάλματα %RMS Αλγόριθμου A.T.A για Πραγματικά Δεδομένα Milos12_145

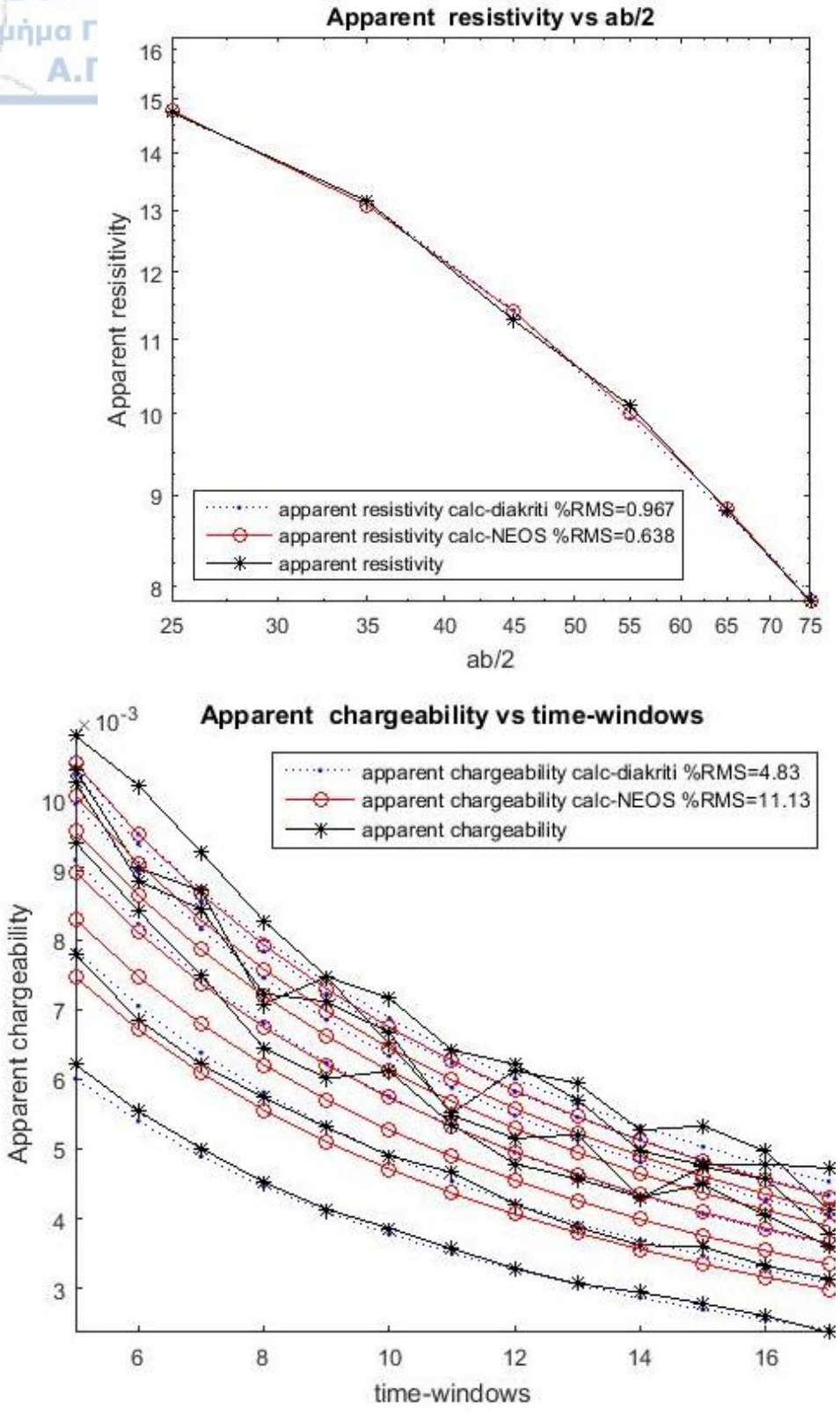
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμ



Σχήμα 3.18 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α (κόκκινη γραμμή) και β) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής (μπλε γραμμή) για πραγματικά δεδομένα Milos12_145

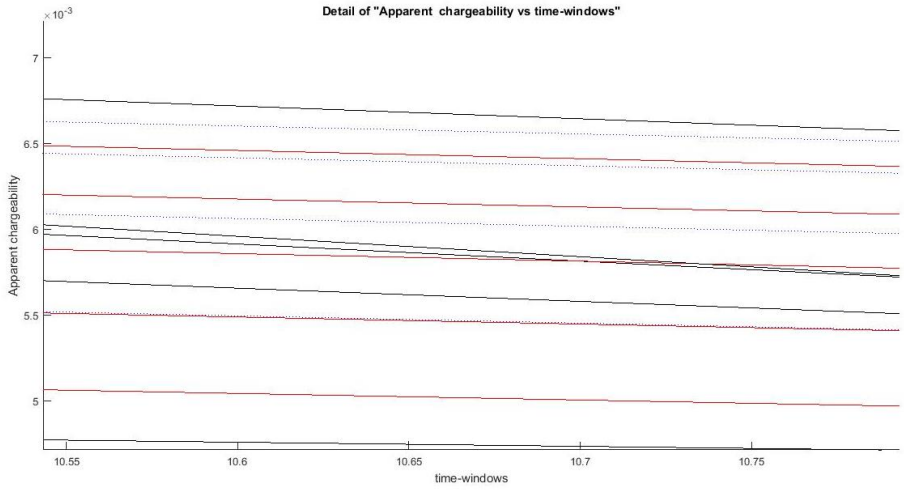
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.19 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση αβ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για πραγματικά δεδομένα Milos12_145

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας



Σχήμα 3.20 Λεπτομέρεια από το Σχήμα 3.19β της μετρούμενης φορτιστικότητας και των φορτιστικοτήτων που υπολογίζονται με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής ως προς τα χρονοπαράθυρα ώστε να φαίνεται η προσέγγιση των δύο προς σύγκριση αλγορίθμων στις μετρούμενες τιμές.

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε πραγματικά δεδομένα έχει καλύτερα αποτελέσματα. Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων, της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μαζί με της φαινόμενης φορτιστικότητας, υπολογίζεται αφού πρώτα μετατραπούν οι τιμές φορτιστικότητας σε τιμές της κατασκευασμένης μεταβλητής «αντίσταση IP» και είναι **0.641** για το Αλγόριθμο Α.Τ.Α έναντι του **0.963** του αλγορίθμου διακριτής αντιστροφής. Τα επιμέρους %RMS σφάλματα για τον υπολογισμό των DC μετρήσεων είναι **0.638** έναντι **0.967** για τη διακριτή αντιστροφή ενώ για τις IP μετρήσεις φορτιστικότητας είναι **11.13** έναντι **4.83** γεγονός που προβληματίζει ιδιαίτερα και χρήζει αναζήτησης εξηγήσεων.

Ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α έχοντας ενιαίο Ιακωβιανό Πίνακα μπορεί να μειώνει το ολικό %RMS σφάλμα έστω και κατά μικρό ποσοστό σε σχέση με τον Αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής χωρίς να έχει περιορισμούς στις τιμές που δίνει στις παραμέτρους Cole Cole όλων των στρωμάτων. Γνωρίζοντας ότι διαφορετικές τριάδες παραμέτρων Cole Cole μπορούν να δώσουν παρόμοιες καμπύλες φορτιστικότητας, αντιλαμβανόμαστε ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α έχει μεγαλύτερη τάση στο να μεταβάλει τις τιμές των παραμέτρων. Η εξομάλυνση, μάλιστα, που εισάγουμε στο μοντέλο αντιστροφής για τις λύσεις των διαδοχικών στρωμάτων μπορεί εύκολα να προκαλέσει ανεπιθύμητες αλλαγές στις εξαγόμενες λύσεις για τις παραμέτρους Cole Cole.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Μετρήσεις	Αλγόριθμος Α.Τ.Α	Αλγόριθμος Διακριτής αντιστροφής
DC Ειδική ηλεκτρική αντίσταση **ro**	0.638	0.967
IP μετρήσεις φορτιστικότητας	11.13	4.83

Πίνακας 3.19 %RMS σφάλματα για DC και IP μετρήσεις με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής

3.4.2 Αλγόριθμος Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155

Τα πραγματικά δεδομένα Milos13_155 αφορούν σε μετρήσεις που ελήφθησαν στη Μήλο το 2019 (Τεχνική Έκθεση: Τσούρλος και Βαργεμέζης, 2019). Η ποιότητά τους όσον αφορά την επαγόμενη πόλωση δεν είναι ικανοποιητική. Το θετικό είναι ότι υπάρχει σε όλες τους συμμετρία και δεν αναγκαστήκαμε να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις με ζεύγη ακροδεκτών Α,Β που να έχουν διαφορετική απόσταση από το σημείο της βυθοσκόπησης.

Αποτελέσματα αντιστροφής			
n0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)
0.014	0.19	0.75	15
0.015	0.26	0.77	43
0.017	0.28	0.77	4
0.019	0.31	0.81	27
0.022	0.34	0.85	63
0.034	0.27	0.82	1

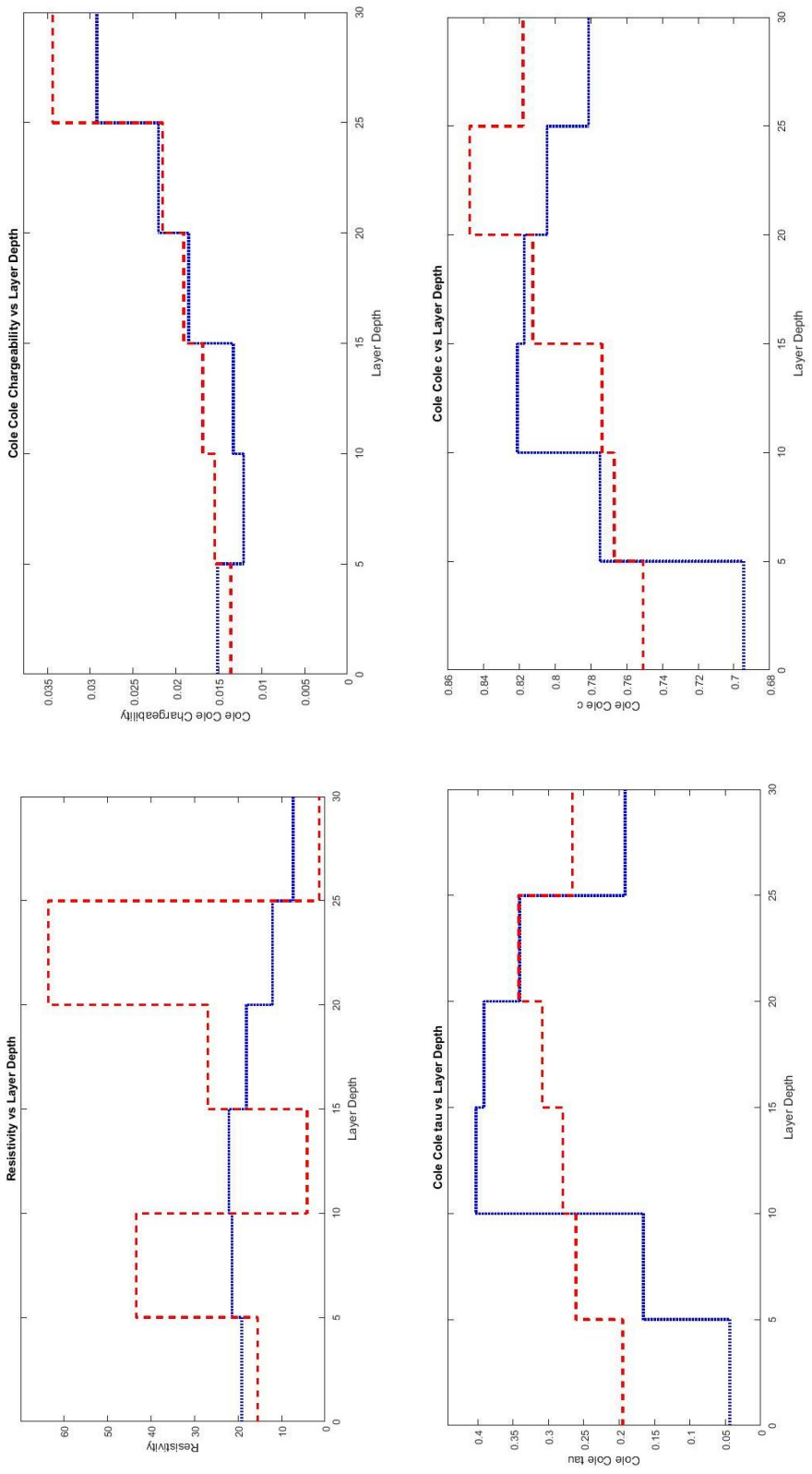
Πίνακας 3.20 Αποτελέσματα Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155

%RMS ανά μέτρηση					
1η	2η	3η	4η	5η	6η
75 m	65 m	55 m	45	35	25 m
0.47	1.12	1.64	1.00	0.36	0.05
%RMS total = 0.94 (%RMS Διακριτής Αντιστροφής = 1.65)					

Πίνακας 3.21 Σφάλματα %RMS Αλγόριθμου Α.Τ.Α για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155

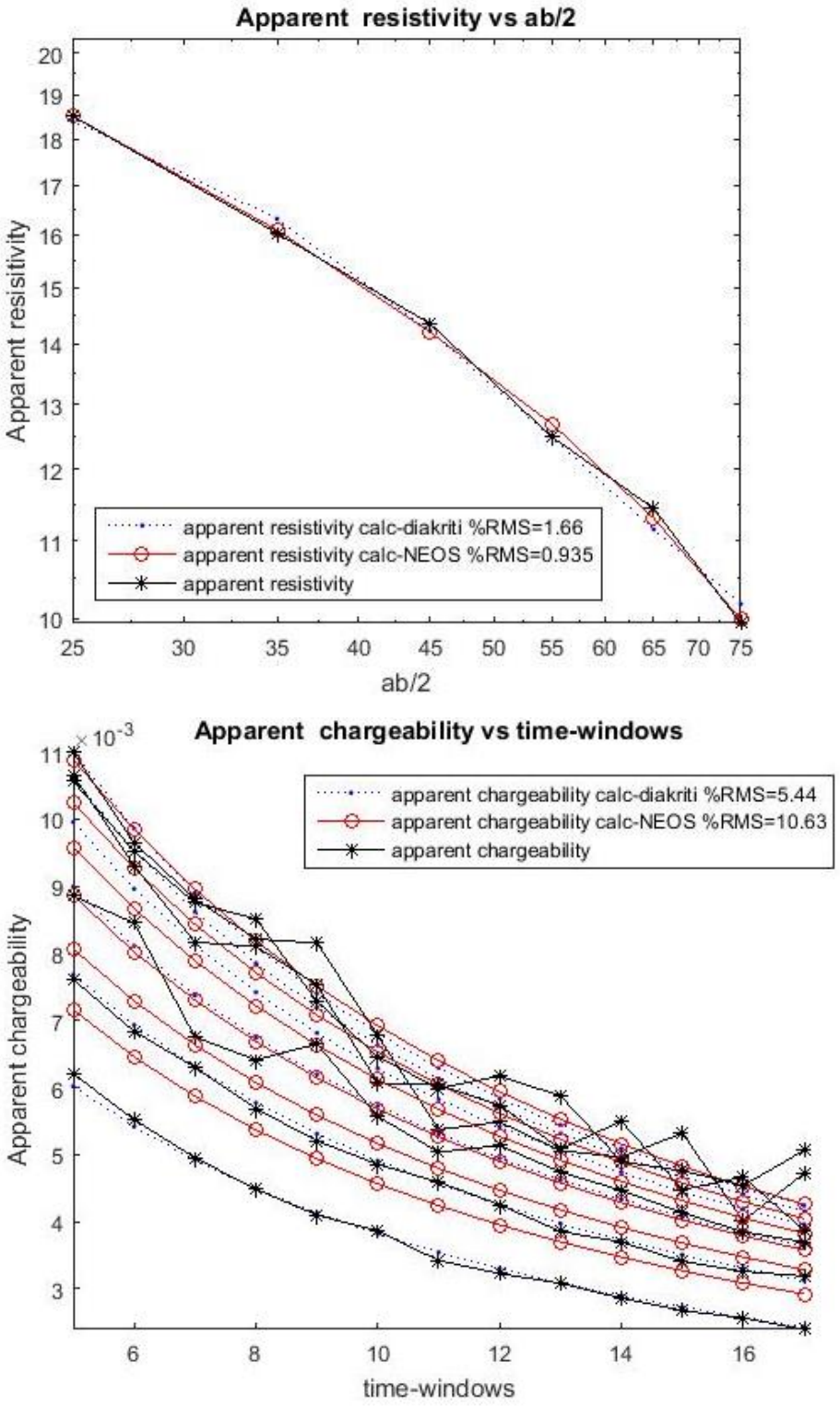
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 3.21 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) με το Αλγόριθμο A.T.A (κόκκινη γραμμή) και β) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής (μπλε γραμμή) για πραγματικά δεδομένα Milos13_155

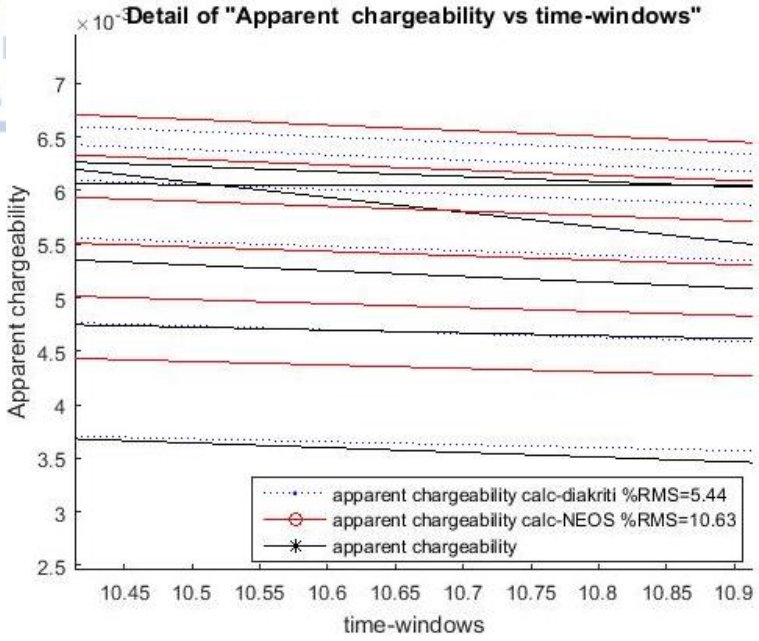
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 3.22 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση AB/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για πραγματικά δεδομένα Milos13_155

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ" Τμήμα Α.



Σχήμα 3.23 Λεπτομέρεια από το Σχήμα 3.22β της μετρούμενης φορτιστικότητας και των φορτιστικοτήτων που υπολογίζονται με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής ως προς τα χρονοπαράθυρα ώστε να φαίνεται η προσέγγιση των δύο προς σύγκριση αλγορίθμων στις μετρούμενες τιμές.

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε πραγματικά δεδομένα έχει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στον υπολογισμό της DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενώ στον υπολογισμό των καμπύλων φορτιστικότητας παρουσιάζει σημαντική υστέρηση σε σχέση με τη Διακριτή αντιστροφή. Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων, της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μαζί με της φαινόμενης φορτιστικότητας, υπολογίζεται αφού πρώτα μετατραπούν οι τιμές φορτιστικότητας σε τιμές της κατασκευασμένης μεταβλητής «αντίσταση IP» και είναι **0.94** για το Αλγόριθμο Α.Τ.Α έναντι του **1.65** του αλγορίθμου διακριτής αντιστροφής. Τα επιμέρους %RMS σφάλματα για τον υπολογισμό των DC μετρήσεων είναι **0.638** έναντι **0.967** για τη διακριτή αντιστροφή ενώ για τις IP μετρήσεις φορτιστικότητας είναι **10.63** έναντι **5.44** γεγονός που προσπαθήσαμε να εξηγήσουμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Μετρήσεις	Αλγόριθμος Α.Τ.Α	Αλγόριθμος Διακριτής αντιστροφής
DC Ειδική ηλεκτρική αντίσταση **ro**	0.94	1.66
IP μετρήσεις φορτιστικότητας	10.63	5.44

Πίνακας 3.22 %RMS σφάλματα για DC και IP μετρήσεις με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

3.4.3 Αλγόριθμος A.T.A για Πραγματικά Δεδομένα Milos23_95

Τα πραγματικά δεδομένα Milos23_95 αφορούν σε μετρήσεις που ελήφθησαν στη Μήλο το 2017 (Τεχνική Έκθεση: Τσούρλος και Βαργεμέζης, 2017). Η ποιότητά τους όσον αφορά την επαγόμενη πόλωση δεν είναι ικανοποιητική.

Αποτελέσματα αντιστροφής			
n0	τ (tau)	c	R (Ωμ m)
0.040	0.09	0.47	5
0.059	0.21	0.55	50
0.061	0.22	0.53	15
0.064	0.23	0.51	2
0.065	0.24	0.50	1
0.015	4.96	0.15	6

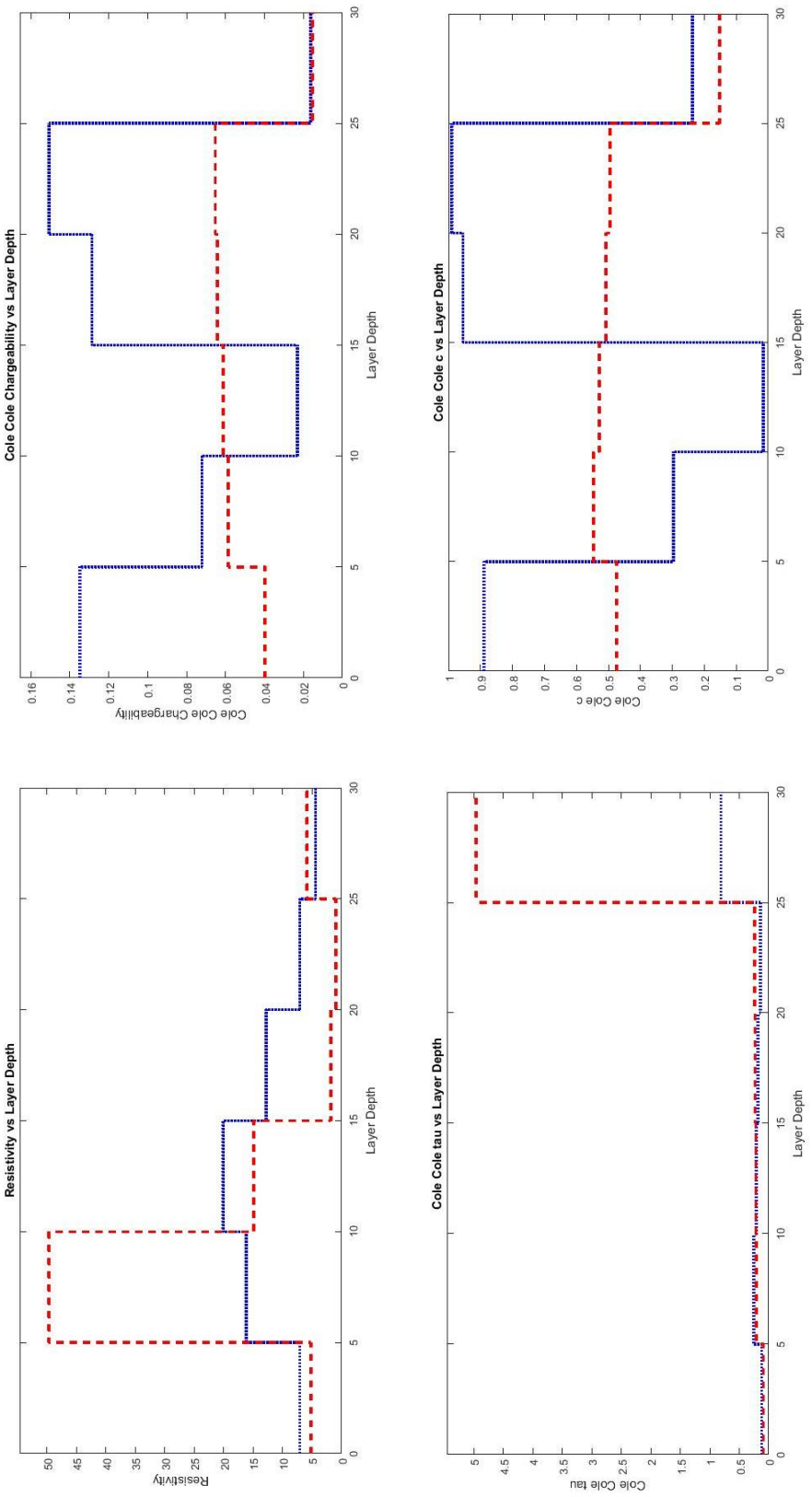
Πίνακας 3.23 Αποτελέσματα Αλγόριθμου A.T.A για Πραγματικά Δεδομένα Milos23_95

%RMS ανά μέτρηση						
1η 105 m	2η 90 m	3η 75 m	4η 60 m	5η 45 m	6η 30 m	7η 15 m
6.99	2.77	5.21	11.39	18.08	27.30	18.14
%RMS total = 15.14 (%RMS Διακριτής Αντιστροφής = 15.85)						

Πίνακας 3.24 Σφάλματα %RMS Αλγόριθμου A.T.A για Πραγματικά Δεδομένα Milos13_155

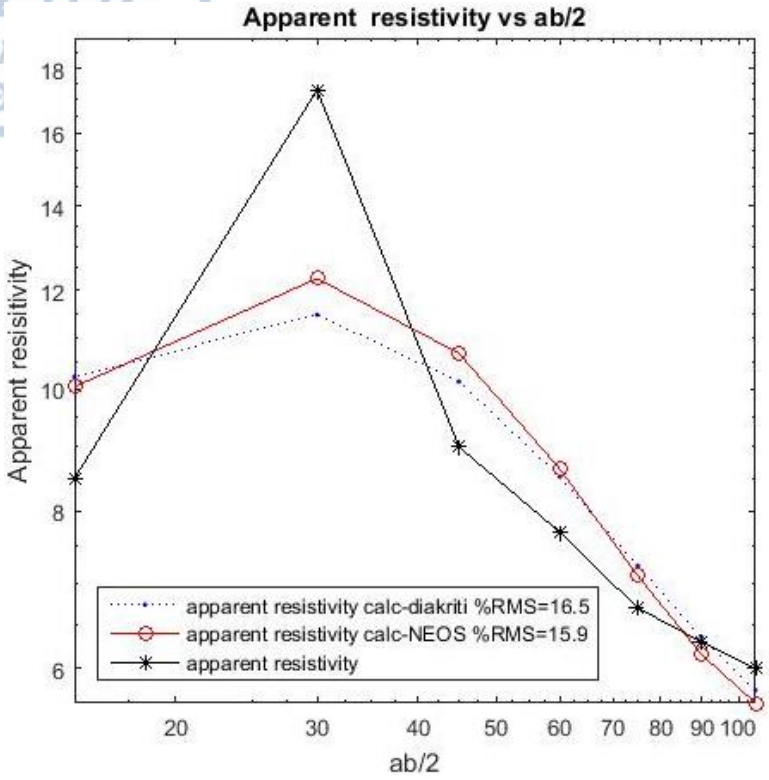
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

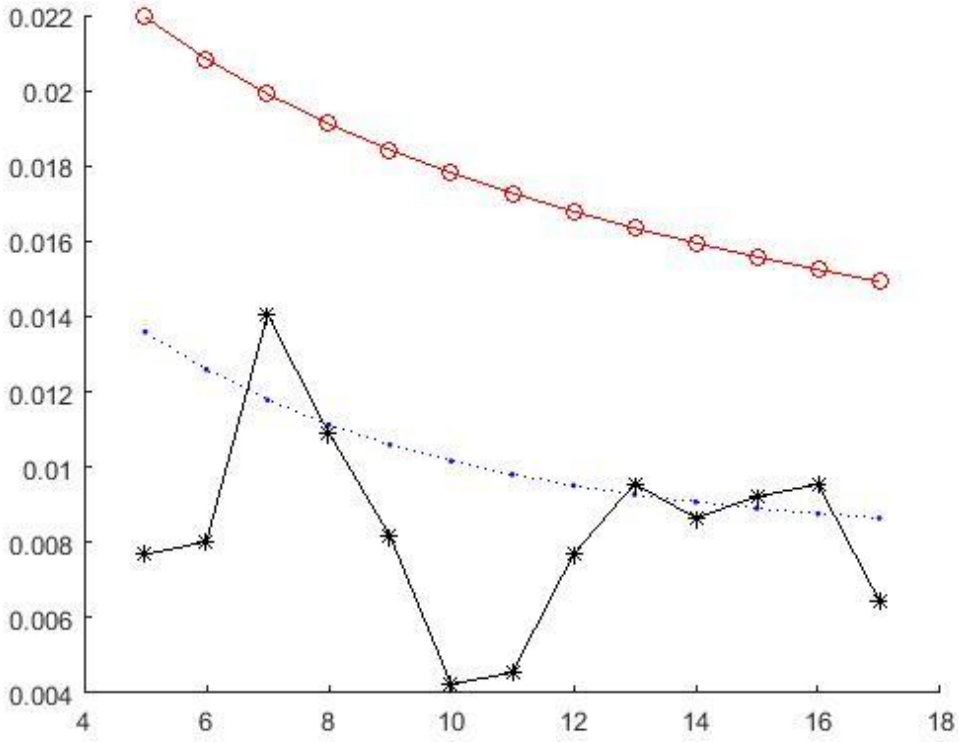
Ψηφιακή συλλογή Βιβλιοθήκη "ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Σχήμα 3.24 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση και παράμετροι Cole Cole ως προς το βάθος των στρωμάτων α) με το Αλγόριθμο Α.Τ.Α (κόκκινη γραμμή) και β) με αλγόριθμο ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ αντιστροφής (μπλε γραμμή) για πραγματικά δεδομένα Milos23_95

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης





Σχήμα 3.25 Μετρήσεις και υπολογισμένες τιμές με Αλγόριθμο Α.Τ.Α και με αλγόριθμο Διακριτής αντιστροφής για α) ειδική ηλεκτρική αντίσταση ως προς απόσταση ΑΒ/2 και β) φορτιστικότητα ως προς χρονοπαράθυρα για πραγματικά δεδομένα Milos23_95 (παρουσιάζεται μόνο η καμπύλη φορτιστικότητας για την πρώτη μέτρηση)

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Πραγματικά δεδομένα

Η εκτίμηση των μετρήσεων δείχνει ότι ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α σε πραγματικά δεδομένα έχει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στον υπολογισμό της DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ενώ στον υπολογισμό των καμπύλων φορτιστικότητας παρουσιάζει σημαντική υστέρηση σε σχέση με τη Διακριτή αντιστροφή. Το συνολικό σφάλμα %RMS όλων των μετρήσεων, της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μαζί με της φαινόμενης φορτιστικότητας, υπολογίζεται αφού πρώτα μετατραπούν οι τιμές φορτιστικότητας σε τιμές της κατασκευασμένης μεταβλητής «αντίσταση IP» και είναι **15.14** για το Αλγόριθμο Α.Τ.Α έναντι του **15.85** του αλγορίθμου διακριτής αντιστροφής. Τα επιμέρους %RMS σφάλματα για τον υπολογισμό των DC μετρήσεων είναι **15.89** έναντι **16.53** για τη διακριτή αντιστροφή ενώ για τις IP μετρήσεις φορτιστικότητας είναι **86.5** έναντι 4**5.3**.

Μετρήσεις	Αλγόριθμος Α.Τ.Α	Αλγόριθμος Διακριτής
DC Ειδική ηλεκτρική αντίσταση **ro**	15.88	16.53
IP μετρήσεις φορτιστικότητας	86.5	45.3

Πίνακας 3.25 %RMS σφάλματα για DC και IP μετρήσεις με τον Αλγόριθμο Α.Τ.Α και τον αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής για πραγματικά δεδομένα Milos23_95

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

Όλες οι μέθοδοι διακριτής αντιστροφής καταλήγουν σε φθίνουσες καμπύλες φορτιστικότητας από τις οποίες εξάγονται οι παράμετροι Cole Cole με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων Gauss Newton είτε με στοχαστική μέθοδο Monte Carlo (Particle Swarm) η οποία γενικά χρειάζεται μεγαλύτερο χρόνο εύρεσης λύσης (Nivorlis, 2017)

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου Gauss Newton παρατηρείται πρόβλημα ευαισθησίας στην αρχική τιμή. Δηλαδή, ο ορισμός αρχικών τιμών στις παραμέτρους Cole Cole, ώστε να αρχίσει η διαδικασία διόρθωσής των με διαδοχικές επαναλήψεις, επηρεάζει ισχυρά τις τελικές τιμές των παραμέτρων που υπολογίζει η μέθοδος.

Κατά τη διάρκεια της εργασίας αυτής αναπτύχθηκε μία εμπειρική μεθοδολογία με σκοπό να επαναλαμβάνεται η συγκεκριμένη διαδικασία με αρχικές τιμές παραμέτρων που διορθώνονται κάθε φορά ώστε μετά από έναν ικανό αριθμό επαναλήψεων να έχουμε τελικές τιμές παραμέτρων πολύ κοντά στις πραγματικές. Η τελευταία διαπίστωση, φυσικά, γίνεται με τη χρήση συνθετικών δεδομένων για τα οποία έχουμε δώσει εμείς τις τιμές των παραμέτρων Cole Cole για κάθε στρώμα του μοντέλου.

4.1 Μέθοδος Διακριτής Αντιστροφής για κάθε χρονοπαράθυρο.

4.1.1 Αντιστροφή Occam για ειδική ηλεκτρική αντίσταση και για φορτιστικότητα σε κάθε χρονοπαράθυρο

Η αντιστροφή Occam που εφαρμόζουμε στην παρούσα εργασία δέχεται συγκεκριμένο πάχος για συγκεκριμένο αριθμό στρωμάτων ώστε αυτό που επιζητείται να είναι μόνο η αντίσταση που εμφανίζει κάθε στρώμα, όπως έχουμε αναφέρει με λεπτομέρεια στην παράγραφο 2.5.1. Για να εφαρμοστεί η ίδια μέθοδος Occam και για τα δεδομένα IP δηλαδή για τις τιμές φορτιστικότητας που μετράμε σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μετά την παύση έκχυσης ρεύματος στο έδαφος (χρονοπαράθυρα) χρειάζεται ο μετασχηματισμός της φαινόμενης φορτιστικότητας TDIP στην φαινόμενη κατασκευασμένη ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP σύμφωνα με τη σχέση (3.6, σελ.57).

Εδώ, χρησιμοποιείται για τα δεδομένα IP για ένα χρονοπαράθυρο ο ***JacDC*** και στο τέλος, οργανώνοντας τα αποτελέσματα όλων των διακριτών – αυτοτελών αντιστροφών σχηματίζουμε τις καμπύλες φορτιστικότητας για κάθε στρώμα του

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Μέθοδος Διακριτής Αντιστροφής για κάθε χρονοπαράθυρο.

μοντέλου μας. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάστηκε το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου διακριτής αντιστροφής που περιγράφεται και σχολιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

4.1.2 Περιγραφή του αλγορίθμου Μεθόδου Διακριτής Αντιστροφής για δεδομένα TDIP

Αρχικά πρέπει να δούμε ποιοι είναι οι γνωστοί και ποιοι οι άγνωστοι στο πρόβλημά μας.

Τα δεδομένα που έχουμε είναι η Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση $\boldsymbol{\rho_{\alpha j}}$ για όλα τα ζεύγη ακροδεκτών μέτρησης δυναμικού AB καθώς και η Φαινόμενη Φορτιστικότητα $\boldsymbol{m_{\alpha j}^{t}}$ για κάθε τετράδα ηλεκτροδίων μέτρησης δυναμικού $\boldsymbol{j}$ ΓΙΑ κάθε Χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$. Επίσης ορίζουμε το μοντέλο γης που δεχόμαστε ως ισχύον με ορισμένο αριθμό στρωμάτων ορισμένου πάχους (συνήθως 6 στρώματα πάχους 5 m το καθένα).

Η διαδικασία αντιστροφής περιλαμβάνει τρία στάδια:

Πρώτο στάδιο: αντιστρέφονται τα δεδομένα DC ηλεκτρικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για να προκύψει η ειδική ηλεκτρική αντίσταση για κάθε ένα από τα στρώματα ορισμένου πάχους του μοντέλου γης.

Η μέθοδος αντιστροφής που χρησιμοποιείται βασίζεται στην μέθοδο Gauss Newton όπου χρειάζεται να ορίσουμε αρχικές τιμές στις ζητούμενες παραμέτρους και με διαδοχικές επαναλήψεις προσπαθούμε να πλησιάσουμε την τελική λύση επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση του RMS σφάλματος. Οι λύσεις που λαμβάνονται από τη μέθοδο Gauss Newton εξαρτώνται ισχυρά από τις αρχικές τιμές που δίνουμε στις ζητούμενες παραμέτρους. Για το λόγο αυτό, με σκοπό να μη δώσουμε εντελώς τυχαίες αρχικές τιμές, αποφασίστηκε να δίνουμε στο πρώτο στρώμα τις τιμές των παραμέτρων του πιο κοντινού στο σημείο της βυθοσκόπησης ζεύγους ηλεκτροδίων, στο τελευταίο στρώμα να δίνουμε τις τιμές των παραμέτρων του πιο μακρινού στρώματος και στα ενδιάμεσα στρώματα τις τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο μέσο όρο των τιμών των ενδιάμεσων ζευγών ηλεκτροδίων.

Για τα δεδομένα DC ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ισχύει η παρακάτω σχέση αντιστροφής:

$$dx = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J^T dy \qquad (3.6)$$

όπου dx είναι η διόρθωση των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε στρώμα του μοντέλου, λ ο συντελεστής Lagrange για τον οποίο έγινε λόγος στην παράγραφο 2.5.1.3, dy είναι η διαφορά μεταξύ των δεδομένων μετρήσεων και των τιμών ειδικής

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ηλεκτρικής αντίστασης που έχουμε υπολογίσει με την τελευταία επανάληψη της διαδικασίας και ο Ιακωβιανός Πίνακας J_{DC} για τον οποίο μιλήσαμε στην παράγραφο 2.4.2 φαίνεται στο Σχήμα 3.1.Το διάγραμμα ροής για την αντιστροφή αυτή είναι το διάγραμμα ροής Α που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13.

Δεύτερο στάδιο: Αντιστρέφονται χωριστά τα IP δεδομένα ανά χρονοπαράθυρο λήψης μετρήσεων, δηλαδή για κάθε χρονοπαράθυρο που πήραμε μετρήσεις χρησιμοποιούμε όλες τις μετρήσεις φορτιστικότητας.

Η αντιστροφή των IP δεδομένων, δηλαδή της φορτιστικότητας σε όλα τα ζεύγη ακροδεκτών μέτρησης δυναμικού για όλα τα χρονοπαράθυρα γίνεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν του πρώτου σταδίου. Για να είναι δυνατό αυτό πρέπει η φορτιστικότητα να μετατραπεί σε ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Αυτήν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση την ονομάζουμε *ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP* και είναι μία κατασκευασμένη μεταβλητή, χωρίς φυσικό νόημα (αφού στην πραγματικότητα η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός στρώματος είναι σταθερή και δε μεταβάλλεται με το χρόνο), που μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο αντιστροφής DC και για τις μετρήσεις στα διάφορα χρονοπαράθυρα.

Για τη μετατροπή της φορτιστικότητας σε ειδική ηλεκτρική αντίσταση IP χρησιμοποιείται η εξίσωση μετασχηματισμού (2.32, σελίδα 31).

$$\boldsymbol{\rho_{ajm}^{t} = \rho_{aj} \cdot \left(1 - m_{aj}^{t}\right)} \tag{2.31}$$

Για κάθε χρονοπαράθυρο έχουμε τιμές ***φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP*** οπότε η διαδικασία της αντιστροφής είναι πανομοιότυπη με το Πρώτο Στάδιο και προκύπτουν για κάθε χρονοπαράθυρο τιμές ***ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης IP*** για κάθε στρώμα του μοντέλου γης.

Τέλος με την εξίσωση αντίστροφου μετασχηματισμού

$$\boldsymbol{m_i^t = \frac{\rho_i - \rho_{im}^t}{\rho_i}} \tag{2.32}$$

υπολογίζεται η φορτιστικότητα $\boldsymbol{m_i^t}$ για κάθε στρώμα $\boldsymbol{i}$ για κάθε χρονοπαράθυρο $\boldsymbol{t}$, οπότε προκύπτουν τόσες καμπύλες φθίνουσας φορτιστικότητας όσα τα στρώματα γης του μοντέλου μας.

Τρίτο στάδιο: Από αυτές τις καμπύλες πάλι με τη μέθοδο αντιστροφής Gauss – Newton εξάγονται οι τριάδες παραμέτρων Cole Cole οι οποίες χαρακτηρίζουν το κάθε στρώμα υπεδάφους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, λόγω της προσέγγισης με τις πολλές ανεξάρτητες διαδικασίες αντιστροφής, οι καμπύλες φορτιστικότητας που κατασκευάζονται από ξεχωριστή αντιστροφή δεδομένων σε διάφορες χρονικές στιγμές είναι γενικά ακανόνιστες και δεν πληρούν τα βασικά χαρακτηριστικά της καμπύλης φορτιστικότητας, που κανονικά πρέπει να έχει μορφή εκθετικά φθίνουσας καμπύλης. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε δυσκολία έως και αδυναμία εύρεσης λύσης σε περιπτώσεις διασκοπήσεων με πολύ θόρυβο στις μετρήσεις.

Εκτός των παραπάνω διαπιστώνεται ότι, όπως αναφέρει και η βιβλιογραφία, οι λύσεις που προκύπτουν για τις παραμέτρους Cole Cole για τα στρώματα του μοντέλου του υπεδάφους που μελετούμε εξαρτώνται ισχυρά από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων που θέτουμε κατά την εφαρμογή της μεθόδου Gauss – Newton για την εξαγωγή των παραμέτρων.

Για να ξεπεραστεί το παραπάνω αναφερόμενο πρόβλημα προτείνεται σε αυτή την εργασία (παράγραφος 4.2) μία μέθοδος εμπειρική για την απεξάρτηση της τελικής υπολογιζόμενης τιμής των παραμέτρων Cole Cole από τις αρχικές τιμές τους.

4.2 Διόρθωση Εύρεσης Παραμέτρων Cole Cole.

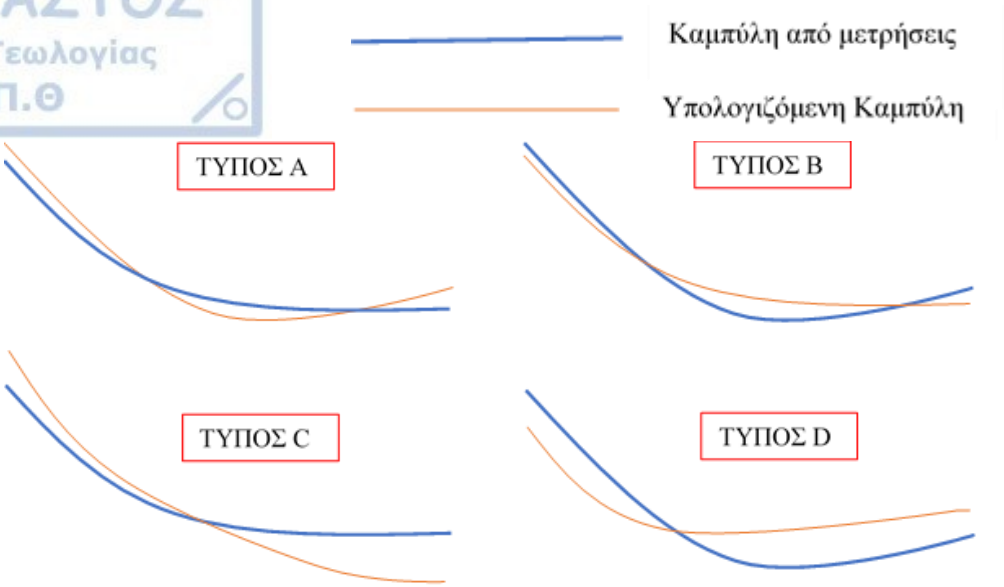
Ένα πρόβλημα που παρατηρήθηκε στην εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο είναι ότι παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο ξεκίνημα της μεθόδου.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας έγινε προσπάθεια να βρεθεί τρόπος ώστε το τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου να είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές ανεξαρτήτως αρχικών τιμών.

Δημιουργήθηκε έτσι ένας αλγόριθμος κατά τον οποίο, αφού ξεκινήσει η εκτέλεση της ρουτίνας εύρεσης των παραμέτρων Cole Cole με κάποιες αυθαίρετες αρχικές τιμές, γίνεται έλεγχος με ποιον τρόπο η καμπύλη που προκύπτει από τις υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων Cole Cole τέμνει την αρχική προς μελέτη καμπύλη. Υπάρχουν τέσσερεις περιπτώσεις τομής, δύο με δύο σημεία τομής (ΤΥΠΟΣ Α και ΤΥΠΟΣ Β) και δύο με ένα σημείο τομής (ΤΥΠΟΣ C και ΤΥΠΟΣ D) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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



Σχήμα 4.1 Οι τέσσερεις περιπτώσεις που διακρίνονται για την τομή της καμπύλης φορτιστικότητας που προκύπτει από τις μετρήσεις με την καμπύλη που αντιστοιχεί στις υπολογιζόμενες τιμές των παραμέτρων Cole Cole.

Όπως προέκυψε από προσεκτική παρατήρηση των τομών των καμπυλών όταν εμφανίζεται ο Τύπος Α χρειάζεται αύξηση της παραμέτρου ηρεμίας Cole Cole (τ ή tau), όταν εμφανίζεται ο Τύπος Β χρειάζεται μείωση της παραμέτρου ηρεμίας Cole Cole (τ ή tau), όταν εμφανίζεται ο Τύπος C χρειάζεται μείωση της παραμέτρου συχνοτικής εξάρτησης (**c**) ενώ στον Τύπο D χρειάζεται αύξηση της παραμέτρου συχνοτικής εξάρτησης Cole Cole (**c**) όπως φαίνεται παρακάτω:

ΤΥΠΟΣ Α: αύξηση tau

ΤΥΠΟΣ Β: μείωση tau

ΤΥΠΟΣ C: μείωση c

ΤΥΠΟΣ D: αύξηση c

Ανάλογα, λοιπόν, με τον τύπο τομής που διαπιστώνεται, δίνεται εντολή να επαναληφθεί η διαδικασία αντιστροφής αλλά με μεταβολή των αρχικών τιμών των παραμέτρων με τον τρόπο που υποδεικνύει ο τρόπος τομής της καμπύλης φορτιστικότητας που προκύπτει από τις μετρήσεις με την καμπύλη που σχηματίζεται για τις υπολογιζόμενες τιμές των παραμέτρων Cole Cole. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να μειωθεί το RMS σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων κάτω από ένα ζητούμενο όριο ή μέχρι να φανεί ότι δεν υπάρχει περιθώριο περαιτέρω βελτίωσης.

Η μεταβολή των αρχικών τιμών αφορά μόνο στις παραμέτρους Cole Cole τ (ή tau) και c, γιατί αυτές είναι που επηρεάζουν τη μορφή της καμπύλης: Η μεν tau όσο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

αυξάνει τόσο κάνει την καμπύλη να φθίνει πιο αργά ενώ η c όσο αυξάνει κάνει την κυρτότητα της καμπύλης να μειώνεται.

Έτσι όταν διαπιστωθεί ότι η τομή ανήκει στον τύπο Α δίνεται η εντολή να επαναληφθεί η διαδικασία αντιστροφής αφού πολλαπλασιαστεί η αρχική τιμή της παραμέτρου tau κατά έναν παράγοντα μεγαλύτερο της μονάδας. Αυτός ο παράγοντας στις πρώτες επαναλήψεις είναι μεγαλύτερος ενώ όσο συνεχίζονται οι επαναλήψεις μικραίνει. Ομοίως για τον τύπο Β μειώνεται η τιμή του tau με ανάλογο τρόπο, για τον τύπο C μειώνεται η τιμή της παραμέτρου c και για τον τύπο D αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου c.

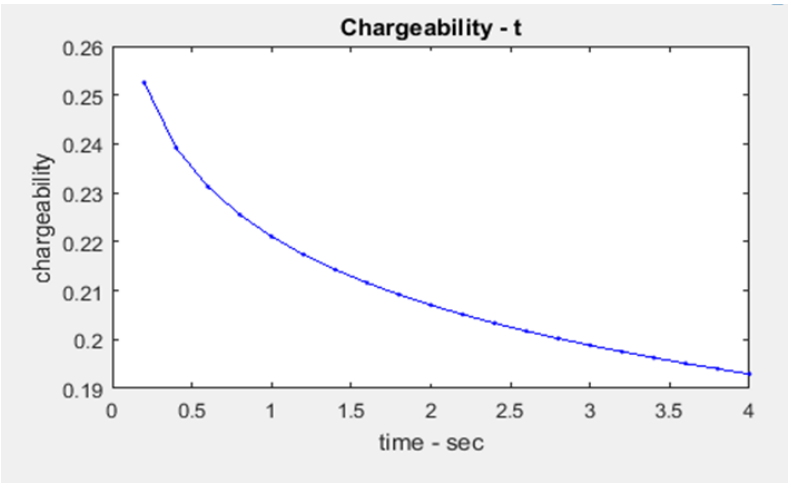
4.2.1 Αλγόριθμος *IPColeOptimum* Εξαγωγής Παραμέτρων Cole Cole με Μείωση Εξάρτησης από Αρχικές Τιμές

Ο αλγόριθμος αυτός βελτιστοποιεί τη διαδικασία εξαγωγής των παραμέτρων Cole Cole από μια φθίνουσα καμπύλη φορτιστικότητας.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα συνθετικής καμπύλης που αντιστοιχεί σε μία τριάδα παραμέτρων Cole Cole και τα αποτελέσματα της διαδικασίας διακριτής αντιστροφής για διαφορετικές αρχικές τιμές παραμέτρων καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προτεινόμενης διαδικασίας βελτίωσης.

Στο παράδειγμά μας έχουμε μία καμπύλη φορτιστικότητας που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα λύσης ευθέος προβλήματος που εφαρμόζει την εξίσωση Pelton για τιμές παραμέτρων Cole Cole: ***n0 = 0.4, tau = 5.0, c = 0.2 για 20 χρονοπαράθυρα***.

Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε αυτές τις τιμές παραμέτρων φαίνεται στο Σχήμα 4.2



Σχήμα 4.2 Καμπύλη φορτιστικότητας που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα λύσης ευθέος προβλήματος που εφαρμόζει την εξίσωση Pelton για τιμές παραμέτρων Cole Cole: n0 = 0.4, tau = 5.0, c = 0.2 για 20 χρονοπαράθυρα ανά 0.2 sec

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

Με εφαρμογή της μεθόδου Gauss Newton δίνοντας διαφορετικές αρχικές τιμές των παραμέτρων Cole Cole παίρνουμε διαφορετικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ως αρχικές τιμές τις : η_0***=0.8, tau= 1.1, c= 0.1*** με τη μέθοδο Gauss Newton από την καμπύλη φορτιστικότητας λαμβάνουμε τελικά αποτελέσματα:

$$\eta_0 = 0.430,\ tau = 2.383,\ c = 0.186\ \mu\varepsilon\ rms = 0.010$$

Η καμπύλη που αντιστοιχεί στις τιμές των παραμέτρων που πήραμε σαν αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 4.3α με κόκκινο χρώμα ενώ η αρχική καμπύλη φαίνεται με γαλάζιο χρώμα.

Χρησιμοποιώντας ως αρχικές τιμές τις : $\eta_0 = 0.5,\ tau = 50,\ c = 0.5$ με μέθοδο Gauss Newton από την καμπύλη φορτιστικότητας λαμβάνουμε τελικά αποτελέσματα:

$$\eta_0 = 0.272,\ tau = 51.4,\ c = 0.411\ \mu\varepsilon\ rms = 0.168$$

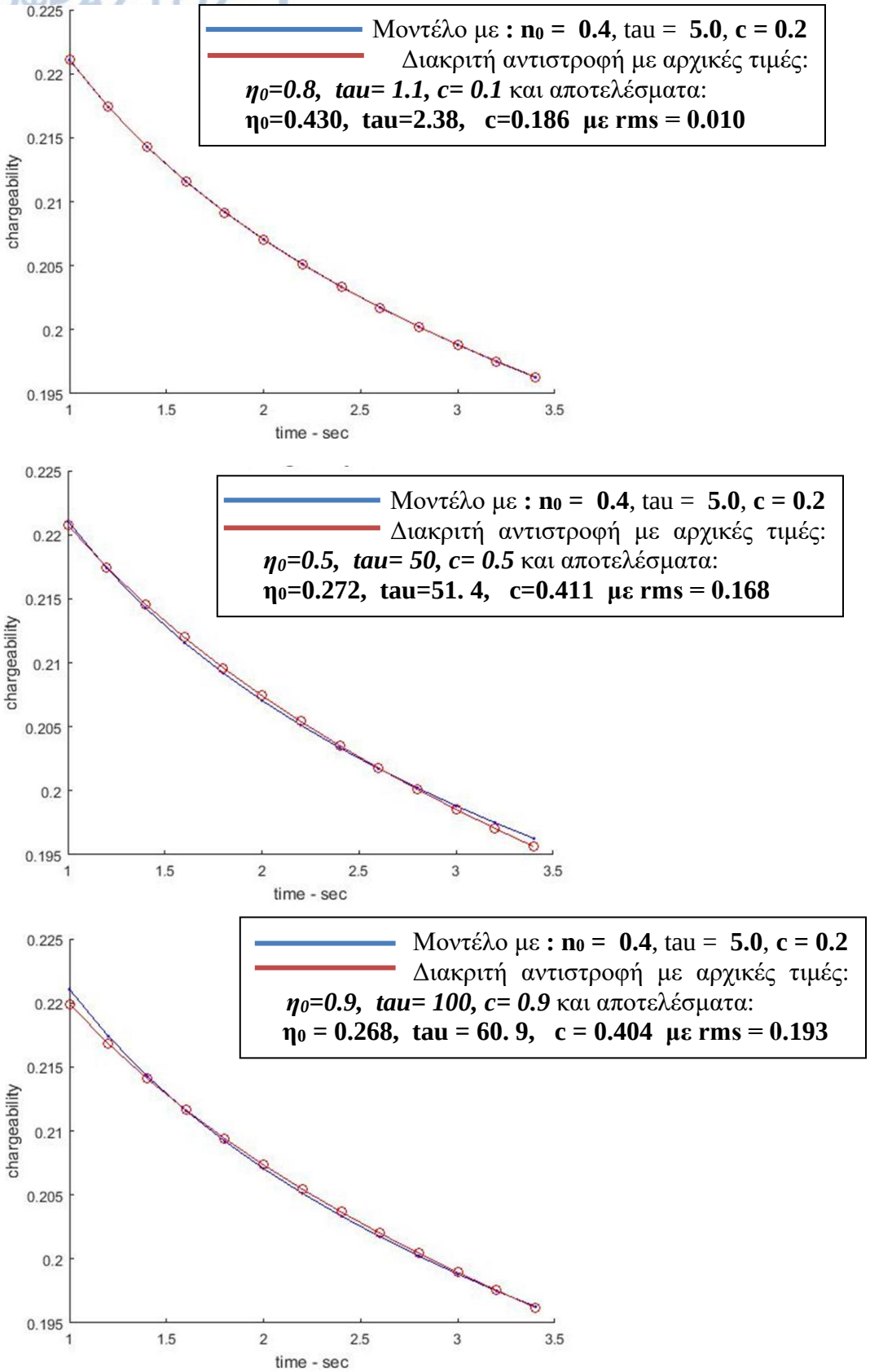
Η καμπύλη που αντιστοιχεί στις τιμές των παραμέτρων που πήραμε σαν αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 4.3β με κόκκινο χρώμα ενώ η αρχική καμπύλη φαίνεται με γαλάζιο χρώμα.

Χρησιμοποιώντας ως αρχικές τιμές τις : $\eta_0 = 0.9,\ tau = 100,\ c = 0.9$ με μέθοδο Gauss Newton από την καμπύλη φορτιστικότητας λαμβάνουμε τελικά αποτελέσματα:

$$\eta_0 = 0.268,\ tau = 60.86,\ c = 0.404\ \mu\varepsilon\ rms = 0.193$$

Η καμπύλη που αντιστοιχεί στις τιμές των παραμέτρων που πήραμε σαν αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 4.3γ με κόκκινο χρώμα ενώ η αρχική καμπύλη φαίνεται με γαλάζιο χρώμα.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 4.3 Καμπύλη φορτιστικότητας για τιμές παραμέτρων Cole Cole: n0 = 0.4, tau = 5.0, c = 0.2 για 20 χρονοπαράθυρα ανά 0.2 sec και καμπύλες που αντιστοιχούν στις λύσεις με την αντιστροφή για διαφορετικές αρχικές τιμές παραμέτρων Cole Cole

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

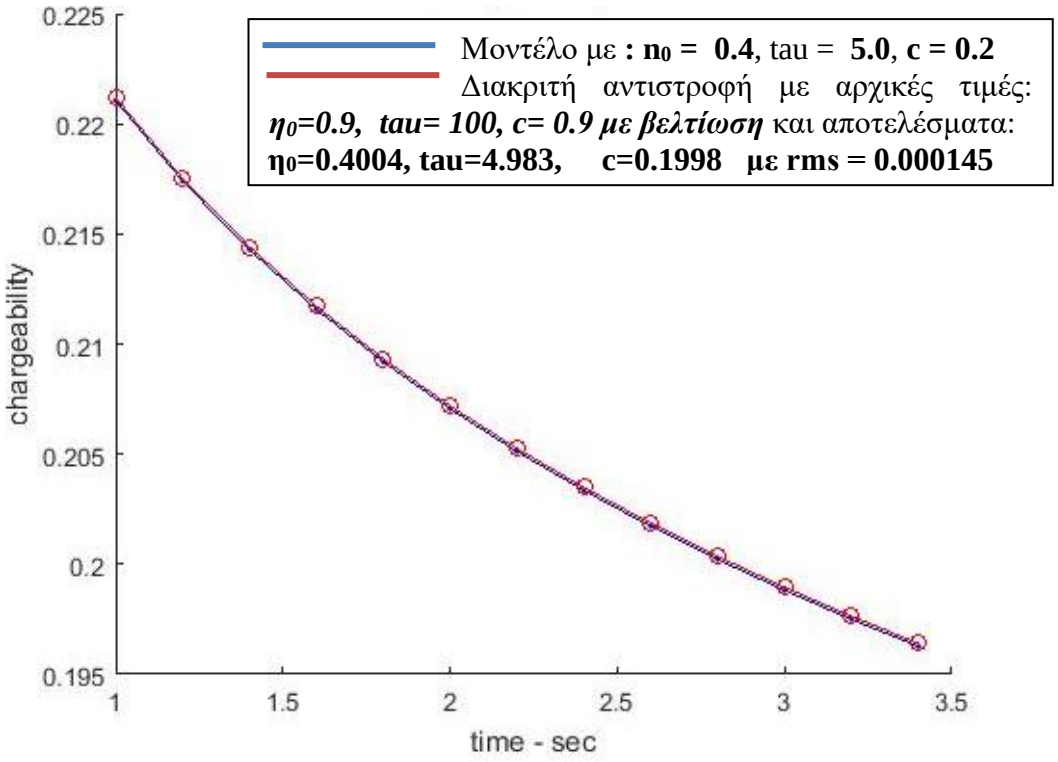
ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

Με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε σε αυτήν την εργασία, η οποία βασίστηκε στην παρατήρηση για τη μορφή των καμπυλών και την εξάρτηση αυτής από τις τιμές των παραμέτρων tau και c, που είναι δηλαδή εμπειρική, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα για την ίδια καμπύλη φορτιστικότητας (**n0 = 0.4, tau = 5.0 , c = 0.2 για 20 χρονοπαράθυρα)**.

Εύρεση παραμέτρων Cole Cole με μέθοδο Gauss Newton από τις καμπύλες φορτιστικότητας με μέθοδο για μη εξάρτηση από αρχικές τιμές (ρουτίνα checkdifferences) δίνοντας αρχικές τιμές η_0***=0.9, tau=100.0, c=0.9***

Λαμβάνουμε (Σχήμα 4.4):

η0=0.4004, tau=4.983, c=0.1998 με rms = 0.000145

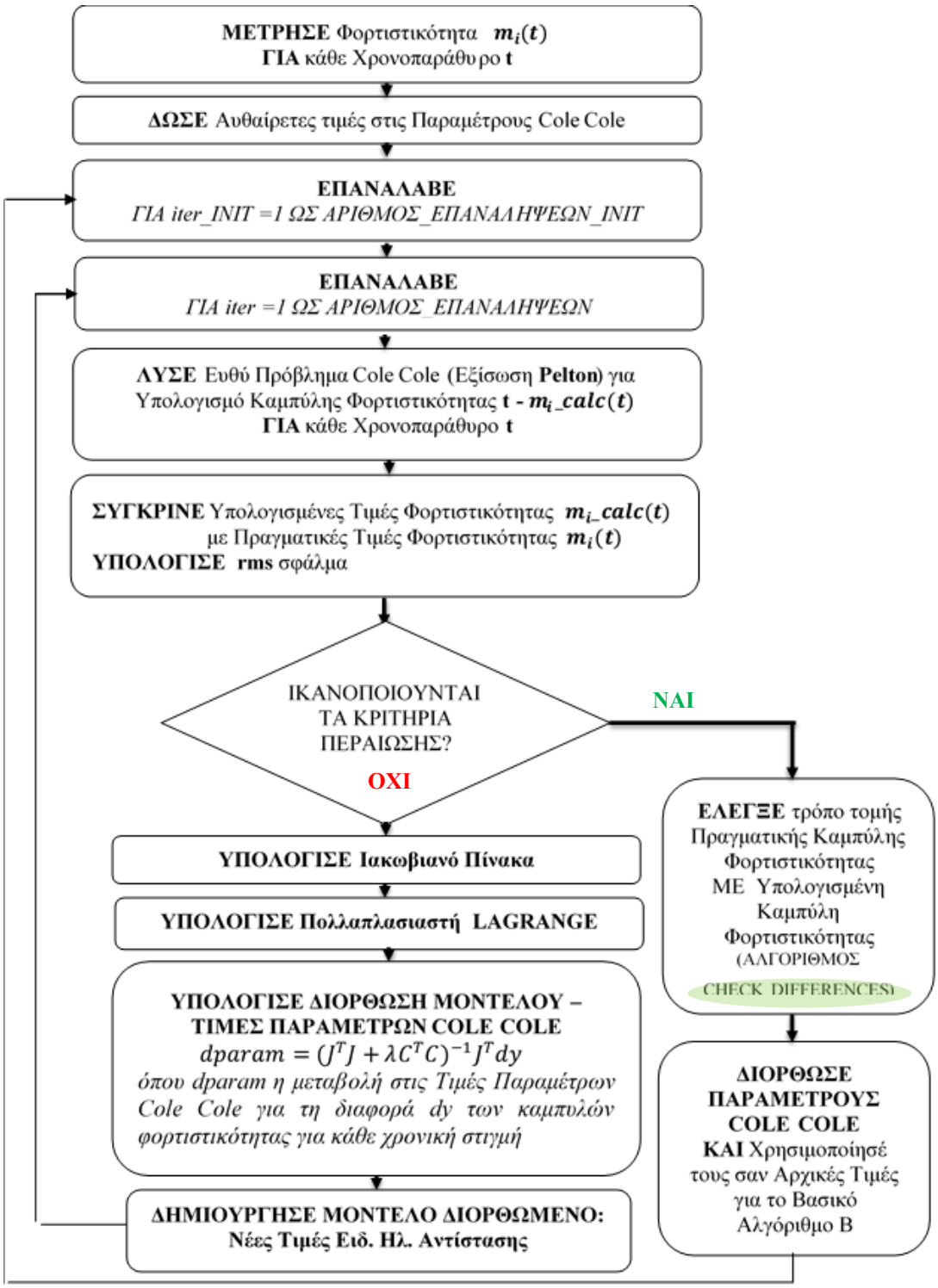


Σχήμα 4.4 Καμπύλη φορτιστικότητας για τιμές παραμέτρων Cole Cole: n0 = 0.4, tau = 5.0, c = 0.2 για 20 χρονοπαράθυρα ανά 0.2 sec και καμπύλη που αντιστοιχεί στη βελτιωμένη λύση

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου αντιστροφής για την εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole από την καμπύλη φορτιστικότητας. Στο τέλος μιας σειράς επαναλήψεων, εφόσον τηρούνται τα κριτήρια περαίωσης της διαδικασίας γίνεται έλεγχος Τύπου τομής της καμπύλης φορτιστικότητας από τις μετρήσεις με την καμπύλη που προκύπτει από τη διαδικασία αντιστροφής και ανάλογα γίνεται μεταβολή των αρχικών τιμών των παραμέτρων Cole Cole για να επαναληφθεί

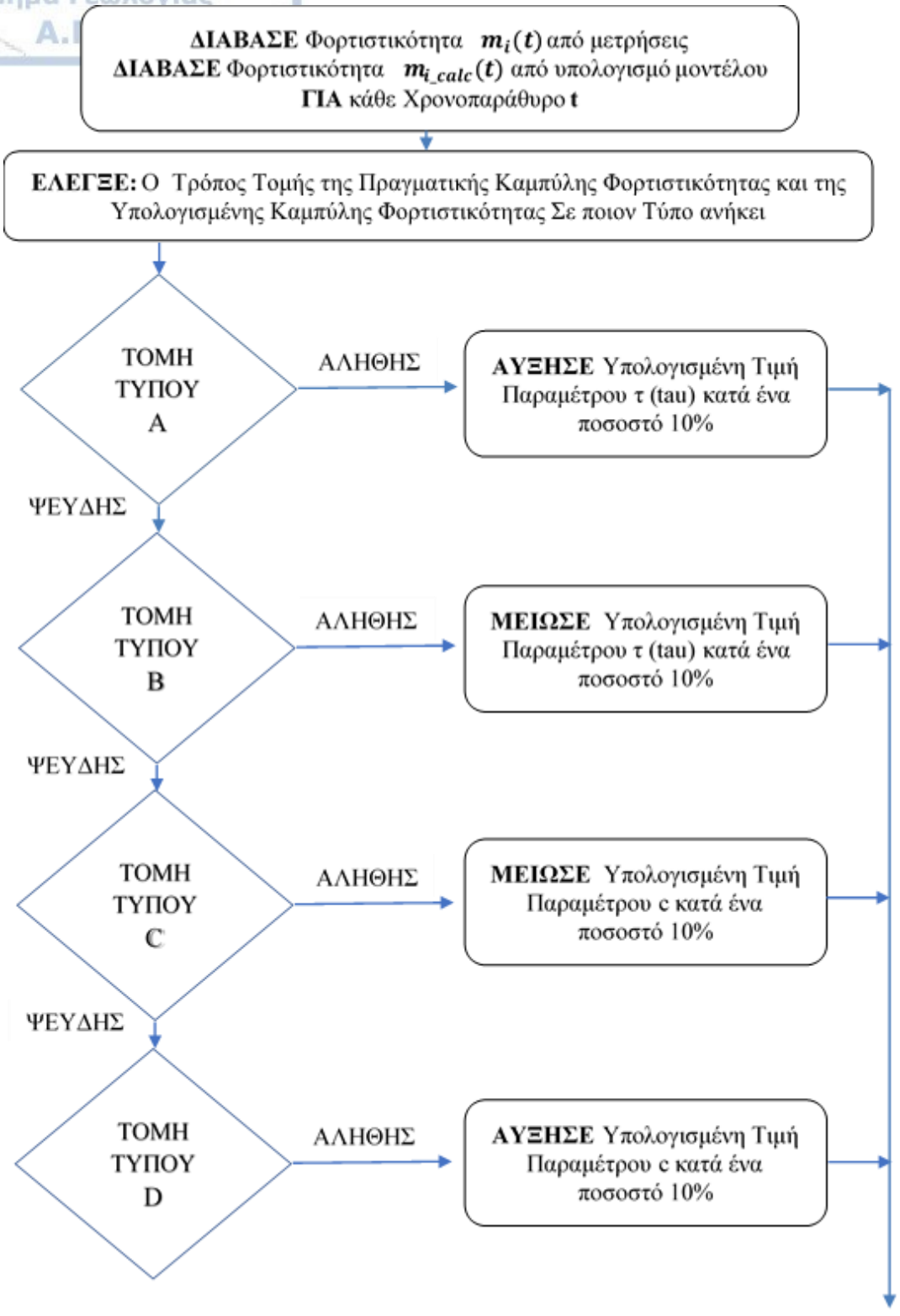
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

από την αρχή η διαδικασία αντιστροφής μέχρι να μην υπάρχει πλέον σημαντική βελτίωση. Ο αλγόριθμος ελέγχου Τύπου τομής και αλλαγής παραμέτρων ονομάζεται CHECK_DIFFERENCES και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ροής Β για Αλγόριθμο Gauss-Newton Αντιστροφής Καμπυλών Φορτιστικότητας για εξαγωγή Παραμέτρων Cole Cole με Βελτίωση Αρχικών Τιμών

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα ροής CHECK DIFFERENCES για Αλγόριθμο Gauss-Newton Αντιστροφής Καμπυλών Φορτιστικότητας για εξαγωγή Παραμέτρων Cole Cole Με Βελτίωση Αρχικών Τιμών

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα ΑΠΘ

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Συμπεράσματα

Ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας ήταν να αναπτυχθούν τεχνικές για την αντιστροφή δεδομένων μέτρησης επαγόμενης πόλωσης στο πεδίο του χρόνου (TDIP) σε ηλεκτρική βυθοσκόπηση (VES). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μέθοδοι αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (IP) σε ηλεκτρική τομογραφία (ERT). Η σκέψη ήταν, διαχωρίζοντας τα δεδομένα μίας τομογραφίας σε διαδοχικές βυθοσκοπήσεις, να είμαστε σε θέση να αποκτούμε εικόνα του τρόπου εκφόρτισης του υπεδάφους σε πολύ πιο σύντομο χρόνο. Οι μέθοδοι που σκοπεύαμε να χρησιμοποιήσουμε ήταν τρεις:

α) Διακριτή αντιστροφή των δεδομένων για κάθε χρονοπαράθυρο. Δημιουργία καμπυλών εκφόρτισης για κάθε στρώμα του μοντέλου του υπεδάφους. Εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole για κάθε στρώμα. β) Αντιστροφή διαφορών μεταξύ διαδοχικών χρονοπαραθύρων ώστε να εξασφαλιστεί εξομάλυνση στις καμπύλες εκφόρτισης που δεν ήταν ασφαλής σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο. γ) Αντιστροφή σύμφωνα με τον (Kim et al, 2012) όπου υπεισέρχονται παράμετροι διόρθωσης χρόνου και τόπου ώστε να επιτευχθεί η εξομάλυνση στις καμπύλες εκφόρτισης.

Τελικά, εφαρμόστηκε μόνο η πρώτη μέθοδος ενώ κατά την προσπάθεια εφαρμογής των δύο τελευταίων προέκυψε η ιδέα για αντιστροφή με ολοκληρωμένο τρόπο κατά την οποία από τα αρχικά δεδομένα δε χρειάζεται να σχηματίσουμε τις καμπύλες εκφόρτισης και από εκεί να εξαχθούν οι παράμετροι Cole Cole. Κατά τη μέθοδο που προτείνεται, η αντιστροφή των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης οδηγεί κατευθείαν στις παραμέτρους Cole Cole για κάθε στρώμα του μοντέλου εδάφους.

Τα αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από αυτήν τη μελέτη, είναι τα παρακάτω:

- Η διακριτή αντιστροφή για κάθε χρονοπαράθυρο για συνθετικά δεδομένα είχε επιτυχία. Όμως παρατηρήθηκε ότι κατά την εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole για κάθε καμπύλη με τη μέθοδο Gauss Newton το αποτέλεσμα εξαρτιόταν σημαντικά από τις αρχικές τιμές των παραμέτρων Cole Cole που ορίζαμε. Μάλιστα, στο πλαίσιο της εργασίας, αναπτύχθηκε μία εμπειρική τεχνική ώστε να εξάγονται οι παράμετροι Cole Cole ξεπερνώντας την εξάρτηση από τις αρχικές τιμές τους. Ωστόσο κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικά δεδομένα οι καμπύλες που προκύπταν κατά την

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

αντιστροφή των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης δεν παρουσίαζαν γενικά κανονικότητα και η εξαγωγή των παραμέτρων ήταν προβληματική.

- Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αντιστροφής με ολοκληρωμένο τρόπο (Αλγόριθμος Α.Τ.Α για όλα τα χρονοπαράθυρα) είχαμε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στα συνθετικά δεδομένα, με το σφάλμα να μειώνεται ως και μία τάξη μεγέθους. Το πρόβλημα με τα πραγματικά δεδομένα όμως παρέμεινε και μάλιστα παρατηρήθηκε ότι, ενώ το συνολικό σφάλμα υπολογιζόταν μικρότερο από τη μέθοδο διακριτής αντιστροφής, το σφάλμα στον υπολογισμό των παραμέτρων Cole Cole μερικές φορές γίνεται αρκετά μεγαλύτερο σε δεδομένα με μεγάλο θόρυβο. Η εξήγηση για αυτό έχει σχέση με την παρατήρηση που έγινε για την εξάρτηση των τελικών τιμών των παραμέτρων από τις αρχικές τιμές που θέτουμε για να εκκινήσει η διαδικασία αντιστροφής. Δηλαδή μπορούμε να έχουμε μικρό τελικό γενικό σφάλμα για τριάδες παραμέτρων Cole Cole κατά πολύ διαφορετικές μεταξύ τους. Ο Αλγόριθμος Α.Τ.Α μπορεί να μειώσει το συνολικό σφάλμα ίσως και χωρίς να προσεγγίζει ιδιαίτερα τις τιμές των παραμέτρων Cole Cole γεγονός που αποτελεί ακόμη μία ένδειξη της μη μοναδικότητας λύσης της αντιστροφής.
- Χρησιμοποιήθηκε μοντέλο γης με στρώματα σταθερού πάχους και με εξομάλυνση, γεγονός που οδήγησε σε μη ακριβή ανάκτηση του πραγματικού μοντέλου με την αντιστροφή αφού κατά τη διαδικασία αντιστροφής δεν αναζητήθηκε το πλάτος των στρωμάτων τα οποία θεωρήθηκαν ισοπαχή.

5.2 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία προτείνει μία νέα μέθοδο αντιστροφής χρονομεταβλητών δεδομένων επαγόμενης πόλωσης (TDIP). Ο έλεγχος της αξιοπιστίας της μεθόδου περιορίστηκε σε συνθετικά δεδομένα και σε έναν αριθμό βυθοσκοπήσεων από την έρευνα στη Μήλο (Τσούρλος και Βαργεμέζης, 2017 και 2019). Υπάρχει ανάγκη περισσότερου ελέγχου.

Υπάρχει ανοικτό πεδίο έρευνας για τη βελτίωση της μεθόδου ώστε να προσεγγίζονται περισσότερο οι παράμετροι Cole Cole και για περιπτώσεις μεγάλου θορύβου που είναι και οι περιπτώσεις με δεδομένα από το πεδίο. Ο αλγόριθμος Α.Τ.Α κάνει έλεγχο του σχετικού %RMS για το σύνολο των μετρήσεων DC και IP. Θα μπορούσε να μελετηθεί τρόπος ώστε να υπάρχει καλύτερη στάθμιση μεταξύ αυτών των δύο ειδών μετρήσεων και μάλιστα να δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στις μετρήσεις φορτιστικότητας ώστε να μην παρατηρείται το φαινόμενο ο αλγόριθμος Α.Τ.Α να

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

επιτυγχάνει μικρότερο συνολικό %RMS από τον αλγόριθμο Διακριτής Αντιστροφής αλλά να υστερεί στην ακρίβεια ανάκτησης των παραμέτρων Cole Cole.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ιδέα της συγκέντρωσης δεδομένων γειτονικών βυθοσκοπήσεων με την νέα μέθοδο ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα της με τα αποτελέσματα που δίνει η μέθοδος της αντιστροφής διαφορών και η μέθοδος ΚΙΜ.

Όσον αφορά στον αλγόριθμο βελτίωσης της αντιστροφής για την εξαγωγή των παραμέτρων Cole Cole από την καμπύλη φορτιστικότητας ενδιαφέρον παρουσιάζει η εύρεση αλγορίθμου ώστε να εξομαλυνθεί κατάλληλα η καμπύλη φορτιστικότητας για να της αποδοθούν οι παράμετροι Cole Cole. Αυτό προτείνεται γιατί η μέθοδος βελτίωσης δίνει πολύ καλά αποτελέσματα αλλά ιδίως σε καμπύλες τέλεια εκθετικά φθίνουσες ενώ σε καμπύλες με ατέλειες αν αντιστοιχούν σε θόρυβο 3% και πάνω μπορεί να μην καταλήξουν σε λύση.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Α.Π.Θ

ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Dahlin, T. and Zhou, B. (2006). Gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging, Near Surface Geophysics, 4, 113-123.

Dahlin, T. and Loke, M.H. (2015). Negative apparent chargeability in time-domain induced polarization data. Geophysics, 123, 322-332.

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

Fiandaca, G., Auken, E., Christiansen, V., A., Gazoty, A. (2012). Time-domain-induced polarization: Full-decay forward modeling and 1D laterally constrained inversion of Cole Cole parameters. Geophysics, Vol. 77, no. 3 (May-June 2012)

Fiandaca, G., Madsen, M., L., and Maurya, K., P. (2017). Re-parameterizations of the Cole–Cole model for improved spectral inversion of induced polarization data. Near Surface Geophysics, 2018, 16, 385–399

Ghosh, D.P. (1971a). The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. Geophysical Prospecting 19, 176–180.

Ghosh, D.P. (1971b). Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. Geophysical Prospecting 19, 769–775.

Honig, M., Tezkan, B. (2007). 1D and 2D Cole Cole-inversion of time-domain induced-polarization data. Geophysical Prospecting, 2007, 55, 117–133

Johnson, T.C., Versteeg1, R.J., Ward, A., Day-Lewis, F.D. and Revil, A. (2010). Improved hydrogeophysical characterization and monitoring through parallel modeling and inversion of time-domain resistivity and induced-polarization data. Geophysics, 75, WA27-WA41.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV. pp. 1942–1948

Kim J.H. (2010). DC2DPro – User's Manual, KIGAM, KOREA

Kim, J.H., Song, Y. and Lee, K. H. (1999). Inequality constraint in least-squares inversion of geophysical data. Earth Planets Space, 51, 255–259, 1999

Kim, J.H., Yi, M.J., Son, J.S. (2012). Simultaneous Inversion of Time-domain SIP data. Proceedings of Near Surface Geoscience 2012, B34, Paris, 3-5 Sep.

Koefoed, O. (1970). A fast method for determining the layer distribution from the raised kernel function: Geophys. Prosp., 18, 564 570.

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

LaBrecque, J.D., Yang, X., (2001). Difference Inversion of ERT Data: a Fast Inversion Method for 3-D In Situ Monitoring. Journal of Environmental & Engineering Geophysics 6(2) · June 2001

LaBrecque, D.J., Miletto, M., Daily, W., Ramirez, A. and Owen, E. (1996). The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data, Geophysics, 61, 538-548.

Lanczos C. (1960). Linear differential operators. D. Van Nostrad Company Ltd.

Lawson C. and Hanson R. (1974). Solving least squares problems. Pentice-Hall.

Levenberg, K. (1944). A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. The Quarterly of Applied Mathematics, 2. 164-168.

Lines L.R. and Treitel S. (1984). Tutorial : A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. Geophysical Prospecting, 32, 159-186.

Madsen, M. L., Fiandaca, G., Auken, E., and Christiansen, A. V. (2017). Time-domain induced polarization – an analysis of Cole–Cole parameter resolution and correlation using Markov Chain Monte Carlo inversion. Geophys. J. Int. (2017) 211, 1341–1353

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Marquardt, D.W. (1963) An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11, 431-441

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

Menke, W. (1984). Geophysical data analysis : Discrete inverse theory. Academic Press Inc.

Nivorlis, A. (2017). Processing and Modeling of Induced Polarization Data, Ph.D. Thesis, Department of Geophysics, Aristotle University of Thessaloniki.

Nivorlis, A., Tsourlos, P. , Vargemezis, G., Tsokas,G., Kim, J.H. (2017). Processing and Modeling of Time Domain Induced Polarization Data. We 23 B13. Near Surface Geoscience, 3-7 September 2017, Malmö, Sweden

Oldenburg, D.W., Li, Y., 1999. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. Geophysics 64, 403–416.

Pelton, W., Ward S., Halloff,, P., Sill, W., and Nelson, P. (1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency induced polarization. Geophysics, 43, 588-609.

Roy, G. I. (1999). An efficient non-linear least-squares 1D inversion scheme for resistivity and IP sounding data. Geophysical Prospecting, 1999, 47, 527–550

Seidel, M., Tezkan, B., 2017. 1D Cole Cole inversion of TEM transients influenced by induced polarization. Journal of Applied Geophysics 138, January 2017

Seigel, H.O. (1959). Mathematical formulation and type curves for induced polarization. Geophysics 24, 547-565.

Summer, J. (1976). Principles of induced polarization for Geophysical Exploration

Tezkan, B., Adrian J., (2017). A Newly Developed 2D DC and Time-domain IP Inversion Algorithm -Application on Data Acquired on an Ore Deposit in Turkey. Mo 23 B08 Geophysical Journal International

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

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

Tikhonov A.N. (1963). Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method. Soviet Mathematics, 4, 1035-1038.

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

Tsourlos, P., Ogilvy, D. R. (1999). An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarization data: Preliminary results, JOURNAL OF THE BALKAN GEOPHYSICAL SOCIETY, Vol. 2, No 2, May 1999, p. 30-45, 10 figs.

Tsourlos, Szymanski, Tsokas (1998). A smoothness constrained algorithm for the fast 2-D inversion of DC resistivity and induced polarization data. Journal of the Balkan geophysical society, Vol. 1, No 1

Vedanti, N., Srivastava, R., Sagode, J., Dimri, V.P. (2005). An efficient 1D Occam's inversion algorithm using analytically computed first- and second-order derivatives for DC resistivity soundings. Computers & Geosciences 31, 319–328

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.

Yi M.J., Kim J.H., Chung S.H. (2003): Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing. Geophysics, 68, No.3: 931-941.

Yuval and Oldenburg, D.W. (1997). Computation of Cole Cole parameters from IP data. Geophysics, 62, 436-448.

Zhody, A. (1989). A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics, 54, 245-253.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης