

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Προσομοίωση και Αντιστροφή Γεωφυσικών

Δεδομένων από τον Αρχαιολογικό Χώρο της Πιστύρου (Ν.Δ. Καβάλας)

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Στυλιανού Θρασύβουλος

Επιβλέπων Τσόκας Γρηγόριος, Καθηγητής

Θεσσαλονίκη 2016

12/05/2016 Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Προσομοίωση και Αντιστροφή Γεωφυσικών

Δεδομένων από τον Αρχαιολογικό Χώρο της Πιστύρου

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στυλιανού Θρασύβουλος

Κάτοχος Πτυχίου Γεωλογίας

Επιβλέπων: Τσόκας Γρηγόριος, Καθηγητής

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Τσόκας Γρηγόριος, Καθηγητής Τσούρλος Παναγιώτης, Καθηγητής Βαργεμέζης Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεσσαλονίκη 2016

Πνευματικά δικαιώματα

•

Copyright ©Στυλιανού Θρασύβουλος, [2016]

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία περιγράφονται οι γεωφυσικές έρευνες που έλαβαν χώρα πλησίον των αρχαιολογικών δόμων οι οποίες εντοπίστηκαν στον αρχαιολογικό χώρο της Πιστύρου του Νομού Καβάλας το Μάρτιο του 2015. Στόχος της γεωφυσικής έρευνας είναι η ανίχνευση των θαμμένων αρχαιοτήτων και η κατά δυνατόν χαρτογράφηση τους. Επίσης κατασκευάστηκαν μοντέλα κατανομής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Ε.Η.Α) με σκόπο τη μελέτη της απόκρισής τους.

Για την διεξαγωγή της έρευνας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής χαρτογράφησης και η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται κάποιες γενικές πληροφορίες της περιοχής, όπως η γεωλογία και η αρχαιολογική της αξία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η ηλεκτρική μέθοδος που εφαρμόστηκε και οι τρόποι λήψης μετρήσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι ερμηνείας των δεδομένων που λήφθηκαν με την μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται η επεξεργασία που έγινε στα δεδομένα της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης και η ερμηνεία της.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η ερμηνεία των δεδομένων που λήφθησαν με την μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετήσαμε την απόκριση που παρουσιάζουν ορισμένα προσομοιώματα.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαίο αναφέρονται τα συμπεράσματα από την απόκριση των προσομοιωμάτων.

Abstract

This thesis describes the geophysical surveys that took place at Pistiros arcaelogical site, prefecture of Kavala in March 2015. The aim of the geophysical survey is the detection and mapping of buried antiquities. Also were constructed resistivity distribution models in order to study their response.

The methods used for conducting the research were geoelectrical mapping and Electrical Resistivity Tomography (ERT) method.

First chapter provides some general information of the area, such as its geology and archaeological value.

Second chapter describes the electrical method and data collection methods.

Third chapter describes the methods used in the interpretation of the ERT data.

Fourth chapter refers to the processing of the geoelectrical mapping data and their interpretation.

Fifth chapter presents the interpretation of ERT data.

In the sixth chapter we studied the response of some simulators.

Finally, the seventh chapter refers to the overall conclusions of models response study.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Γρηγόρη Τσόκα που ανέλαβε να επιβλέψει την πτυχιακή εργασία, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και για τη βοήθεια του.

Οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους Καθηγητές μου, Παναγιώτη Τσούρλο και Γιώργο Βαργεμέζη για τη συνεχή βοήθειά τους, όσον αφορά τη περάτωση της πτυχιακής εργασίας, αλλά και για την γενικότερη προσφορά τους σε όλο του κύκλο του ΜΠΣ.

Νιώθω επίσης την ηθική υποχρέωση να ευχαριστήσω τον Ηλία Φίκο, μέλος του ερευνητικού προσωπικού του εργαστηρίου, για την βοήθεια του, όποτε αυτή χρειαζόταν ήταν πάντα πρόθυμος.

Ευχαριστώ επίσης ολους τους καθηγητές του εργαστηρίου γεωφυσικής που συνέβαλαν στη διεκπεραίωση αυτού του μεταπτυχιακού.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Ευτυχία, Κώστα, Φλώρα για τη βοήθεια τους στη λήψη των μετρήσεων αλλά κυρίως για την την όμορφη χρονία που περάσαμε και για την ωραία ομάδα που δημιουργήσαμε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τα όσα έχει κάνει για μένα όλα αυτά τα χρόνια και τους καρδιακούς μου φίλους για τη στήριξη και τη συμπαράσταση τους.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή και Περιοχή Μελέτης1
1.1 Ιστορία και Αρχαιολογική Αξία της περιοχής2
1.2 Γεωτεκτονική εξέλιξη της περιοχής3
1.3 Γεωλογία της περιοχής4
2. Ηλεκτρική Μέθοδος6
2.1 Η μέθοδος της Ειδικής αντίστασης7
2.2 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση8
2.2.1 Διατάξεις Ηλεκτροδίων8
2.3 Μειονεκτήματα κα Πλεονεκτήματα των Διατάξεων και Προτάσεις Εφαρμογής τους13
2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την Ε.Η.Α ενός πετρώματος
2.5 Είδη Διασκοπήσεων18
2.5.1 Η Γεωηλεκτρική Χαρτογράφηση ή Οριζοντιογραφία
2.5.2 Γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση19
2.5.3 Μέθοδος της Ηλεκτρικής Τομογραφίας-Δισδιάστατη Διασκόπηση22
2.5.4 Τρισδιάστατη Διασκόπηση23
3. Μέθοδοι Ερμηνείας Δεδομένων Ηλεκτρικής Τομογραφίας25
3.1 Καθορισμός βάθους διείσδυσης27
3.2 Ευθύ και Αντίστροφο πρόβλημα29
3.2.1 Ιακωβιανός Πίνακας30
3.2.2 Αντίστροφο Πρόβλημα31
3.2.3 Ευθύ πρόβλημα33
4. Γεωηλεκτρική Χαρτογράφηση στην Πίστυρο35
4.1 Επεξεργασία Δεδομένων Γεωηλεκτρικής Χαρτογράφησης
4.1.1 Εισαγωγή των πλεγμάτων στο λογισμικό Geoplot
4.1.2 Απομάκρυνση των ασυνεχειών μεταξύ των πλεγμάτων(Edge Match)40
4.1.3 Εφαρμογή Φίλτρου Διέλευσης Υψηλών Κυμματαρίθμων(High Pass Filter)
4.1.4 Παρεμβολή (Interpolation)41
4.2 Ερμηνεία Δεδομένων Γεωηλεκτριής Χαρτογράφησης42
5. ΗλεκτρικέςΤομογραφίες στην Πίστυρο44

5.1 Επιλογή παραμέτρων μέτρησης45
5.2 Ερμηνεία Τομογραφιών48
5.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση48
5.3.1 Ερμηνεία Τρισδιάστατης Αντιστροφής49
6. Προσομοιώματα-Επίλυση του Ευθέως Προβλήματος50
6.1 Απόκριση Προσομοιωμάτων55
6.3 Σύνθετα Προσομοιώματα68
6.3.1 Προσομοιώματα Χαλικια 1 και Χαλίκια 270
6.3.2 Προσομοίωμα Επιφανειακής Δομής76
6.4 Προσομοιώματα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια (MwRmEl)78
6.4.1 Μοντέλα για Απομακρυσμένα Ηλεκρόδια, Βάθος Ά
6.4.2 Προσομοιώματα για Απομκρυσμένα Ηλεκτρόδια, Βάθος Β΄
6.4.3 Σύγκριση Προσομοιωμάτων και Συμπεράσματα
6.4.4 Σταθμισμένα Προσομοιώματα Για το βάθος Α΄95
6.4.4 Σταθμισμένα Προσομοιώματα Για το βάθος Β΄
7 .Γενικά Συμπεράσματα της Εργασίας106
Παράρτημα1

1. Εισαγωγή και Περιοχή Μελέτης

Το Μάιο του 2015 έλαβε χώρα γεωφυσική έρευνα και μελέτη στον αρχαιολογικό χώρο της Πιστύρου στη περιοχή της Νέας Καρβάλης του Νομού Καβάλας. Σκοπός των μετρήσεων ήταν ο προσδιορισμός της θέσης των αρχαιολογικών δομών και το βάθος εντοπισμού τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης και ποιο συγκριμένα η γεωηλεκτρική χαρτογράφηση και στη συνέχεια η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας (HT).

Κατά τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση χρησιμοποιήσαμε τη διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου ενώ στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησημοποιήθηκε η διάταξη διπόλου-διπόλου. Η δεύτερη έγινε με σκοπό τη λεπτομερέστερη απεικόνιση του χώρου όπου προηγουμένως προσδιορίστηκε ως πιθανός για εντοπισμό αρχαιολογικών δομών κατά τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση.

Για τη γεωηλεκτιρκή χαρτογράφηση χρησιμοποιήθηκε το όργανο RM-15 της εταιρείας Geoscan Research ενώ η λήψη των μετρήσεων κατά την ηλεκτρική τομογραφία έγινε με το όργανο Syscal Pro της εταιρείας IRIS INTRUMENTS. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων ήταν το DC_2Dpro (Jumg-Ho Kim. DC_2DPro Geoelectric Imaging Laboratory Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2007) για την δισδιάστατη αντιστροφή των τομογραφιών. Το DC3_Dpro (Jumg-Ho Kim. Geoelectric Imaging Laboratory Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2007) για την δισδιάστατη αντιστροφή των τομογραφιών. Το DC3_Dpro (Jumg-Ho Kim. Geoelectric Imaging Laboratory Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2007) για την κατασκευή τρισδιάστατων προσομοιωμάτων και το πρόγραμμα RES3DINV (Geotomo Software, Malaysia, 1995-2002) για την τρισδιάστατη αντιστροφή. Για την επεξεργασία των δεδομένων που λήφθησαν με το όργανο RM-15 χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Geoplot.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η περιοχή όπου έλαβαν χώρα οι διασκοπήσεις.



Σχήμα 1.1 : Η περιοχή έρευνας. Διακρίνεται η περιοχη μελέτης με κόκκινο πλάισιο, πλησίον του οικισμού Ποντολίβαδο, πάνω στην Εθνική Οδό Καβάλας-Ξάνθης.

1.1 Ιστορία και Αρχαιολογική Αξία της περιοχής

Η Πίστυρος ήταν μια αρχαία ελληνική αποικία στη βόρεια ακτή του Αιγαίου, 20 περίπου Km ανατολικά της σημερινής Καβάλας κοντά στο σημερινό Ποντολίβαδο. Ήταν από τις σημαντικές πόλεις της Ηδωνίδας χώρας και αποτελούσε εμπορικό σταθμο, σταυροδρόμι του Ευραπαικού και Ασιατικού χώρου.

Η Πίστυρος ανασκάφηκε για πρώτη φορά το 1972 στο σημερινό οικισμό Ποντολίβαδο από την Εφορεία Καβάλας. Η πρώτη στρώση του οικισμού χρονολογείται στα τέλη του 6ου αιώνα π. Χ. (russland.today/wiki/Pistyros)

Το εμπορειο της Πιστυρου ιδρύθηκε από έλληνες και κατοικούταν από ανάμειτκο πληθυσμό ελλήνων και θρακών (Εκγυκλοπαίδεια Μείζονος Ελληνισμού ,blacksea.ehw.gr/Forms/fLemmaBody.aspx?lemmaid=11282). Επιγραφές που βρέθηκαν στην Πίστυρο και σε άλλες περιοχές καταδεικνύουν ότι η επίσημη γλώσσα της θρακικής αριστοκρατίας αποτελούσε η ελληνική. Η παρακμή του οικισμού εκτιμάτε ότι έγινε στο δεύτερο μισό του 5ου αιώνα.

Μια πιθανή ανασκαφή και εντοπισμός αρχαιολογικών μνημείων στη περιοχή της Πιστύρου και γεννικότερα στη ευρύτερη περιοχή της Θράκης, θα ήταν καθοριστικής σημασίας καθώς οι αρχαιολογικές ανασκαφές στα βορειότερα τμήματα του ελλαδικού χώρου, ξεκίνησαν πολύ αργότερα σε σχέση με τις ανασκαφές στα πίο νότια τμήματα, αφού τα πρώτα, απελευθερώθηκαν ένα περίπου αιώνα αργότερα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά κενά για την ιστορία της περιοχής σε διάφορες περιόδους.

Σελ 2 από 107

Έτσι τα κενά των γραπτών πήγών, που είναι πολύ μεγαλύτερα στη Θράκη και Μακεδονία σε σχέση με τα με τα αντίστοιχα των άλλων περιοχών, συμπληρώνονται, προσθέτωντας πολύτιμες ψηφίδες που λείπουν από το μωσαικό της ιστορίας και του πολιτισμού των κατοίκων του βόρειου ελλαδικού χώρου.

1.2 Γεωτεκτονική εξέλιξη της περιοχής

Ο ελληνικός χώρος αποτελείται από 12 γεωτεκτονικές ζώνες ανάλογα με την τετκονική εξέλειξη της περιοχή (σχήμα 1.2.1). Η περιοχή εργασίας μας υπάγεται στη γεωτεκτονική ζώνη Ροδόπης.



Σχήμα1.2.1 : Οι 12 γεωτεκτονικές ζώνες στις οποίες υποδιαιρείται ο ελλαδικός χώρος.(Mountrakis et al 1983)

Η γεωτεκτονική ζώνη της Ροδόπης αποτελείται αποκλειστικά από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα και κατά τόπους διεισδύσεις πυριγενών στρωμάτων έλλειψη ιζηματογενών. Η ζώνη αυτή θαλάσευσε μόνο μερικώς (επίκλιση της θάλασσας) κατά το Μεσοζωικό, με το μεγαλύτερο μέρος να παραμένει πάντα χέρσος.

Εκτείνεται κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων καλύπτοντας μεγάλες εκτάσεις και από τις δύο χώρες. Στον ελλαδικό χώρο η μάζα της Ροδόπης

Σελ 3 από 107

οριοθετείται στα δυτικά από τη Σερβομακεδονική μάζα με τη γραμμή του Στρυμόνα και στα ανατολικά από την Περιοδική με την επώθηση του Νέστου.

Το δυτικό όριο της μάζας της Ροδόπης αποτελεί μια τεκτονική γραμμή κατά μήκος της οποίας παρατηρείται εφίππευση της Σερβομακεδονικής πάνω στη Ροδόπη. Παρόλα αυτά, δεν έχει διευκρινιστεί ο μηχανισμός γένεσης της τεκτονικής αυτής γραμμής. Αν δηλαδή είναι προϊόν συμπιεστικής ή εφελκύστικής τεκτονικής. Ακόμη υπάρχουν μελέτες που στηρίζουν ότι η γραμμή αυτή αποτελεί ρήγμα οριζόντιας συστροφικής μετατόπισης(Καρυστιναίος 1984). Επικρατέστερη πάντως είναι η άποψή που θεωρεί τη γραμμή του Στρυμόνα προϊόν εφελκύστηκής τεκτονικής (Dinter & Royden 1983, Dinter 1998, Kilias & Mountrakis 1998, Kilias et al. 1999).

Ο μη καθορισμός της φύσης της τεκτονικής γραμμής του Στρυμόνα οφείλεται στο γεγονός ότι καλύπτεται από τα ιζήματα μεγάλου πάχους (περίπου 2Km ενώ άλλες πηγές κάνουν εκτίμηση μέχρι τα 3Km) της ομώνυμης λεκάνη, πρόκειται για ιζήματα του Νεογενούς-Τεταρτογενούς. Ως αποτέλεσμα η γραμμή καλύπτεται σε όλο της το μήκος και παρουσιάζεται μόνο σε δύο θέσεις. Και στις δύο αυτές θέσεις διαπιστώθηκε εφίππευση της Σερβομακεδονικής Μάζας πάνω στη Ροδόπη.

1.3 Γεωλογία της περιοχής

Η γεωτεκτονική ζώνη της Ροδόπης υποδιαιρείται σε δύο τεκτονικές ενότητες. Την ενότητα του Σιδηρονέρου και την ενότητα του Παγγαίου οι οποίες βρίσκονται σε τεκτονική επαφή (σχήμα 1.3.1), με την παλαιότερη ζώνη Σιδηρονέρου να εφιππέυει την ζώνη του Παγγαίου (Papanikolaou & Panagopoulos 1981)

Η ενότητα Παγγαίου καταλαμβάνει τη νοτιοδυτική Ροδόπη και αποτελείται από τρείς ορίζοντες πετρωμάτων.

-Τον κατώτερο ορίζοντα με ορθογνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες

-Τον ενδιάμεσο ορίζοντα που αποτελείται από μάρμαρα μεγάλου πάχους.

-Και τον ανώτερο ορίζοντα με εναλλαγές με εναλλαγές μαρμάρων και σχιστόλιθων. Αυτή αποτελεί και το νεότερο ορίζοντα πετρωμάτων.

Η ανώτερη, τεκτονικά, ενότητα Σιδηρονέρου εκτείνεται κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων και αποτελείται από υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα, που υποδηλώνουν ότι είναι παλαιότερα από τα πετρώματα της ενότητας Παγγαίου. Αυτά είναι ορθογνέυσιοι, αμφιβολίτες, μαρμαρυγιακοι σχιστόλιθοι, λεπτές ενστρώσεις μαρμάρων και μιγματίτες.

Με βάση νεότερες μελέτες, τμήμα της ανώτερης ενότητας Σιδηρονέρου, αποκολλήθηκε και μετατοπίστηκε προς δυσμάς, από ένα ρήγμα αποκόλλησης

Σελ 4 από 107

(detachment) το τμήμα αυτό αποτελεί τη Σερβομακεδονική μάζα. Λόγω αυτής της μετατόπισης σήμερα βλέπουμε την κατώτερη τεκτονική ενότητα του Παγγαίου.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της μάζας της Ροδόπης αποτελεί η ύπαρξη πολλών ιζηματογενών λεκανών οι όποιες από δυτικά προς ανατολικά, κατά μήκος της ανάπτυξής της, είναι : Η λεκάνη Στρυμόνα, που όπως αναφέραμε καλύπτει το δυτικό όριο με τη Σερβομακεδονική, η λεκάνη των Φιλίππων, η λεκάνη του Πρίνου, του Νέστου, Ξάνθης-Κομοτηνής, Κίρκης-Άσημης και Ορεστιάδας.

Το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Ροδόπης διατρυπιέται κατά θέσεις από πυριγενή, ηφαιστειακά και πλουτωνικά πετρώματα. Οι πλουτωνίτες συνδέονται με την εφελκυστική τεκτονική του Τριτογενούς κατά την υποβύθιση της Νεοτηθύος κάτω από την Ελληνική ενδοχώρα, οι πλείστοι είναι γρανίτες. Τέτοιοι πλουτωνίτες είναι γρανίτης της Ελατίας της Βροντούς, Συμβόλου-Καβάλας, Ξανθης, Παρανεστίου, Πανοράματος, Λεπτοκαρύας κ.α. Ενώ οι ηφαίστειες και ηφαιστειοκλαστικά πετρώματα παρουσιάζονται στις ιζηματογενείς λεκάνες.



Σχήμα 1.3.1 : Η μάζα της Ροδόπης . Διακρίνονται οι δύο τεκτονικές ενότητες Παγγαίου και Σιδηρονέρου με την παλαιότερη ενότητα Σιδηρονέρου να εφιππέυει την αντίστοιχη του Παγγαίου. (Mountrakis et al)

2. Ηλεκτρική Μέθοδος

Η γεωφυσική μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε και γενικά χρησιμοποιείται ευρύτατα στον εντοπισμό "ρηχών δομών" είναι η ηλεκτρική μέθοδος γεωφυσικής διακοπήσης. Σκοπός της μεθόδου αυτής αποτελεί ο καθορισμός της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή αυτό που καλούμε γεωηλεκτρική δομή, πραγματοποιώντας μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης. Τη μέθοδο αυτή εφαρμόσαμε και εμείς στη παρούσα έρευνα

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης εμφανίστηκαν στις αρχές του εικοστού αιώνα. Πρωτοπόροι στην ανάπτυηξη των ηλεκτρικών μεθόδων υπήρξαν οι Wenner και Schlumberger. Η ευρεία όμως εφαρμογή τους άρχισε από τη δεκαετία 1970. Τη δεκαετία του 1990 και έπειτα, υπήρξε η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών γεγονός που συνέβαλε δραστικά στη μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη λήψη και την επεξεργασία των μετρήσεων. Με αποτέλεσμα το πλήθος των μετρήσεων, και συνακόλουθα η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων να αυξάνεται. Επίσης δημηουργήθηκαν λογισμικά που ερμήνευαν τα δεδομένα με περισσότερη ακρίβεια και σε λιγότερο χρόνο.

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές εκτίναξαν την επιστήμη της γεωφυσικής όπως και κάθε επιστήμη και συνέβαλαν στην απογείωση και την ευρεία εφαρμογή της.

Κατηγορίες Ηλεκτρικής Μεθόδου

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτές όπου το ηλεκτρικό ρεύμα παράγεται με φυσικούς τρόπους και σε αυτές που το ρεύμα εισαγάγετε στη Γή με τεχνικό τρόπο. Έτσι έχουμε.

Μετρήσεις φυσικών ηλεκτρικών πεδίων :

-Μέθοδος Φυσικού Δυναμικού

-Μέθοδος Τελλουρίων Ρευμάτων

Μετρήσεις που εξαρτώνται από παραγόμενα ηλεκτρικά πεδία :

-Μέθοδος Ειδικής Αντίστασης

-Μέθοδος ισοδυναμικών Γραμμών

-Μέθοδος επαγόμενη πολικότητας

Πίο κάτω θα αναπτύξουμε τη μέθοδο της ειδικής αντίστασης καθώς είναι αυτή χρησιμοποιήθηκε και είναι η πλέον διαδεδομένη.

Σελ 6 από 107

2.1 Η μέθοδος της Ειδικής αντίστασης

Λόγω της απλότητας της και του χαμηλού κόστους της, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο από τις υπόλοιπες.

Η μέθοδος της ειδικής αντίστασης βασίζεται σε τεχνητά παραγόμενο ρεύμα που διαβιβάζεται στη γη με δυο ηλεκτρόδια στα σημεία Α-Β, (σχήμα 2.1.1) τα οποία καλούμε ηλεκτρόδια ρεύματος. Μετρούμε το δυναμικό με δύο αλλά ηλεκτρόδια στα σημεία (M-N), και στη συνέχεια καταγράφεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο σημείων. Ακολούθως, χρησιμοποιώντας το νόμο του Ωμ που δίνεται από τη σχέση 2.1 είναι εύκολο να προσδιορίσουμε την αντίσταση R στην όποια αντιστοιχεί.



Σχήμα 2.1.1 : Διάταξη ηλεκτροδίων κατά την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \tag{2.1}$$

Ι, η ένταση του ρεύματος που διαβιβάσαμε στη Γή.

ΔV , η διαφορά δυναμικού που μετρήσαμε.

R, η υπολογιζόμενη ηλεκτρική αντίσταση.

Όμως δεν μας ενδιαφέρει τόσο η αντίσταση (R) ενός υλικού, αλλά μία ποσότητα που καλείται ειδική αντίσταση(ρ) και δίνεται από τον πιο κάτω τύπο .

$$\rho = \frac{RS}{L} \tag{2.2}$$

L, Μήκος του αγωγού (m)

S, Εμβαδό εγκάρσιας διατομής (m^2)

Οι μονάδες μέτρησης της της ειδικής αντίστασης (ρ) είναι το Ohm·m ή το ohm cm. Η ειδική αγωγιμότητα σ είναι το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης(σ= 1/ρ).

Σελ 7 από 107

2.2 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Παρόλα αυτά η πραγματική αντίσταση (R) και κατεπέκατση η ειδική αντίσταση (ρ) μπορούν να υπολογιστούν **αν και μόνο αν** το υλικό βρίσκεται μέσα σε ένα ομογενές και ισότροπο μέσο, τότε και μόνον τότε. Όμως, επειδή η Γή <u>δεν</u> αποτελεί ένα τέτοιο μέσο, η ποσότητα που μετράμε δεν οφείλεται μόνο στο υλικό αλλά και στην ανισορροπία του χώρου, για αυτό **καλείται φαινόμενη ειδική αντίσταση (Φ.Ε.Α)** και συμβολίζεται με ρα.

Ακριβώς λόγο της ανισορροπίας, κάθε φορά που αλλάζουμε τη θέση των ηλεκτροδίων οι μετρήσεις διαφέρουν, ενώ σε περίπτωση ομογενούς και ισότροπης Γής, αυτό δεν θα συνέβαινε.

Έτσι υπάρχει συσχέτιση της μετρούμενης Φ.Ε.Α. από τη διάταξη των ηλεκτροδίων και δίνεται από τη σχέση 2.3

$$\rho_{\alpha} = K \times \left(\frac{\Delta V}{i}\right) \tag{2.3}$$

όπου Κ ο γεωμετρικός παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από τη διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων.

Ο γεωμετρικός παράγοντας κάθε διάταξης προκύπτει ως εξής

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$
(2.4)

ΑΜ και ΑΝ : Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού από το θετικό πόλο του ρεύματος

BM και BN : Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού από τον αρνητικό πόλο του ρεύματος.

Από την Φ.Ε.Α. προσπαθούμε με διάφορες τεχνικές να προσδιορίσουμε την πραγματική αντίσταση του υλικού (ρ).

2.2.1 Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Επειδή η τιμή του γεωμετρικού παράγοντα Κ εξαρτάται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων πάνω στη Γη και σε κάθε διάταξη ο γεωμετρικός παράγοντας και συνακολούθως η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται με διαφορετική σχέση κρίνεται σκόπιμο να πούμε μερικά λόγια για κάθε διάταξη.

Διάταξη Wenner. Κατά τη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται συμμετρικά ως προς ορισμένη γραμμή. Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ίσες, δηλαδή AM=MN=NB=α . Στην εφαρμογή της διάταξης Wenner για

Σελ 8 από 107

ηλεκτρική βυθοσκόπηση τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται ως προς ορισμένο κέντρο με την απόσταση **α** να αυξάνεται κάθε φορά. Στην εφαρμογή της διάταξης Wenner για ηλεκτρική χαρτογράφηση η απόσταση **α** παραμένει σταθερή με τα ηλεκτρόδια να κινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής. Στο σχήμα 2.2.1 απεικονίζεται ο τρόπος λήψης μετρήσεων με τη διάταξη Wenner.



Σχήμα 2.2.1 :Διάταξη Wenner

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση :

$$\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{i} \tag{2.5}$$

$$K = 2\pi\alpha$$

α : η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

i : η ένταση του ρεύματος.

ΔV : η διαφορά δυναμικού που μετριέται με τα ηλεκτρόδια του δυναμικού σε δύο σημεία.

Διάταξη Schlumberger. Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια αναπτύσσονται συμμετρικά ως προς ορισμένο κέντρο με την απόσταση (2l) μεταξύ των ηλεκτροδίων του δυναμικού να είναι σημαντικά μικρότερη της απόστασης (2L) μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος.

Κατά την εφαρμογή της διάταξης Schlumberger (σχήμα 2.2.2) στην γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση τα ηλεκτρόδια του δυναμικού παραμένουν σταθερά ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων του ρεύματος αυξάνεται συμμετρικά και σταθερά.

Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που η διάταξη αυτή εφαρμόζεται περισσότερο από τις υπόλοιπες, αφού χρειάζεται η μετατόπιση μόνο των δύο ηλεκτροδίων του ρεύματος. Κατά την εφαρμογή της διάταξης αυτής στην οριζόντια διασκόπιση, η απόσταση μεταξύ των τεσσάρων ηλεκτροδίων, όπως και στη περίπτωση της διάταξης Wenner, παραμένει σταθερή και τα τέσσερα ηλεκτρόδια μετακινούνται κατά μήκος ορισμένης τομής.



Σχήμα 2.2.2 : Διάταξη Schlumberger

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από τη σχέση :

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2 x}{2l} * \frac{\Delta V}{i}$$
(2.6)

$$K=\frac{\pi L^2 x}{2l}$$

L : η μισή απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος Α-Β

Ι : η μισή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού

Στο σχήμα 2.2.3 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος στις τρέις διαστάσεις.

Σελ 10 από 107



Σχήμα 2.2.3: Κατανομή του ρεύματος κατά τη μέθοδο Sclhumberger. Διακρίνονται οι γραμμές ρεύματος και οι ισοδυναμίκες γραμμές. Βλέπουμε ότι η κατανομή του ρεύματος, δεν περιορίζεται σε μια «φέτα» στις δύο διαστάσεις, αλλά κατανέμετε και στις τρείς.

Διάταξη διπόλου-διπόλου. Κατά τη λήψη των μετρήσεων η απόσταση **α** μεταξύ του διπόλου του δυναμικού MN αλλά και μεταξύ του διπόλου του ρεύματος AB, παραμένει σταθερή, αυξάνοντας κάθε φορά την απόσταση **n*****α** μεταξύ του δίπολου του ρεύματος AB και του ηλεκτροδίου M (σχήμα 2.2.4).

Η διάταξη αυτή πλεονεκτεί σε σχέση με τις υπόλοιπες επειδή η απόσταση **n*a** μεταξύ του διπόλου του ρεύματος και του διπόλου του δυναμικού, μπορεί να αυξηθεί σημαντικά χωρίς να χρειάζονται μεγάλα μήκη καλωδίων, όπως γίνεται με τις μεθόδους Wenner και Schlumberger. Η μέγιστη απόσταση **n*a** εξαρτάται από τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δώσει η πηγή μας και τη γεωλογία της περιοχής σε συνάρτηση με το επιθυμητό βάθος έρευνας.

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση για τη διάταξη διπόλου-διπόλου δίνεται από τη σχέση :

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

$$K = \pi \alpha * n * (n+1) * (n+2)$$
(2.7)

α: η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του δυναμικού n: πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η απόσταση των δύο διπόλων από την απόσταση (α)

Σελ 11 από 107



Σχήμα2.2.4: Διάταξη διπόλου-διπόλου. C1, C2 είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος και P1 , P2 τα ηλεκτρόδια δυναμικού.

Διάταξη πόλου-πόλου. Η διάταξη αυτή έχει παρόμοια γεωμετρία με την διπόλουδιπόλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.5. Τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος είναι διαδοχικά και μετά ακολουθούν και πάλι διαδοχικά τα ηλεκτρόδια δυναμικού με διαφορά, ότι τα ηλεκτρόδιο C2 απέχει απόσταση Ι από το ηλεκτρόδιο P1 και η απόσταση του C1 από το C2 αλλά και η απόσταση του P1 από το P2 είναι πολύ μεγάλη, τουλάχιστον 20Ι ώστε αυτά να επηρεάζουν ελάχιστα τις μετρήσεις.



Σχήμα 2.2.5: Διάταξη μεθόδου πόλου-πόλου.

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση στη διάταξη πόλου-πόλου υπολογίζεται από τη σχέση 2.8

$$\rho_{\alpha} = 2\pi l \frac{\Delta V}{i} \tag{2.8}$$

$$K=2\pi l$$

Σελ 12 από 107

Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρική Μέθοδος

Διάταξη πόλου-διπόλου. Η σειρά των ηλεκτροδίων στη διάταξη αυτή είναι η ίδια με τη σειρά των ηλεκτροδίων στην διάταξη πόλου-πόλου. Όμως τα ηλεκτρόδια δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση Ι. Η απόσταση των δύο ζευγών είναι n*l Ενώ η απόσταση του ηλεκτροδίου C1 από το ηλεκτρόδιο C2 είναι μεγαλύτερη από 5nl ώστε να επηρεάζει ελάχιστα τις μετρήσεις. Η διάταξη των ηλεκτροδίων με τη μέθοδο πόλου-διπόλου φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα2.2.6: Διάταξη μεθόδου πόλου-διπόλου

Ο υπολογισμός της Φ.Ε.Α για τη διάταξη αυτή υπολογίζεται από την πιο κάτω σχέση.

$$\rho \alpha = 2\pi \ln(n+1) \frac{\Delta V}{i}$$

$$K = 2\pi \ln(n+1)$$
(2.9)

2.3 Μειονεκτήματα κα Πλεονεκτήματα των Διατάξεων και Προτάσεις Εφαρμογής τους

Κάθε διάταξη έχει μειονέκτημα και πλεονεκτήματα, κάποιες έχουν ισχυρό σήμα, οπότε και μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης ενώ και κάποιες άλλες όχι, μερικές παρουσιάζουν καλή οριζόντια διακριτική ικανότητα ενώ άλλες καλύτερη κατακόρυφη. Έτσι συνοψίσαμε τα βασικά προτερήματα και ελαττώματα των βασικών διατάξεων και προτείνουμε τις ιδανικότερες μεθόδους σε διάφορες περιπτώσεις.

Σελ 13 από 107

Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρική Μέθοδος

Wenner

Η Wenner παρουσιάζει πολύ δυνατό σήμα γεγονός που την καθιστά την πλέον κατάλληλη σε περιπτώσεις που έχουμε ψηλό θόρυβο, όπως τα διαταραγμένα εδάφη, οργωμένα χωράφια, παρουσία άλλων πηγών ρεύματος καλώδια κτλ

Παρόλα αυτά όταν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων αυξηθεί πολύ τότε παρατηρείται μεγάλη πτώση στη μετρούμενη τάση.

Επίσης κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων με τη διάταξη αυτή απαιτείται μετακίνηση και των τεσσάρων ηλεκτροδίων.

Schlumberger

Κατά την εφαρμογή της διάταξης αυτής, για τη μελέτη της κατακόρυφης κατανομής της Ε.Η.Α, τα ηλεκτρόδια δυναμικού μένουν σταθερά για πολλές μετακινήσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος. Όπερ σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η μετακίνηση μόνο των δύο ηλεκτροδίων. Αυτό μεταφράζεται σε εξοικονόμηση χρόνου και εργατικού δυναμικού. Επιπρόσθετα, οδηγεί και στην μείωση των σφαλμάτων(καλή αντίσταση επαφής κτλ), αφού δεν απαιτούνται συχνές μετατοπίσεις των ηλεκτροδίων.

Η Schlumberger έχει μεν μικρότερο σήμα από τη Wenner, δηλαδή καταγράφουμε μικρότερες τιμές τάσης, και αυτό είναι πρόβλημα σε περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε διασκόπιση σε μεγάλα βάθη και έχουμε εξοπλισμό περιορισμένων δυνατοτήτων (δηλαδή ένα εξοπλισμό που δεν μπορεί να τροφοδοτήσει με περισσότερη ενταση), παρόλα αυτά παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία για μεγαλύτερες αποστάσεις ηλεκτροδίων σε σχέση με την Wenner.

Ακόμη η Schlumberger είναι λίγο καλύτερη στις οριζόντιες μεταβολές της αντίστασης.

Διπόλου-διπόλου

Η διάταξη αυτή χαρακτηρίζεται από καλή ευαισθησία στις πλευρικές αλλαγές μικρότερη όμως στις κατακόρυφες. Χρησιμοποιείται πολύ συχνά στις γεωτεχνικές εφαρμογές.

Λόγω της γεωμετρίας της διάταξης, δεν απαιτούνται μεγάλα μήκη καλωδίων, αφού δεν απαιτείται σύνδεση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού-ρεύματος.

Στα αρνητικά της καταγράφεται ότι έχει αδύνατο σήμα για μεγάλο n. Ακόμη, για να πάρουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα από τη διάταξη αυτή, το όργανο που

Σελ 14 από 107

Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρική Μέθοδος

χρησιμοποιούμε πρέπει να έχει μεγάλη ικανότητα απόρριψης θορύβου.

Πόλου-πόλου (Pole-pole)

Η διάταξη αυτή είναι σχετικά χρονοβόρα. Παρόλα αυτά χαρακτηρίζεται από ισχυρό σήμα, για αυτό έχει και τη μεγαλύτερη οριζόντια κάλυψη και το μεγαλύτερο βάθος έρευνας. Εντούτοις, η ποιότητα των μετρήσεων φθίνει με το άνοιγμα των ηλεκτροδίων. Μερικές φορές εφαρμόζεται σε αρχαιολογικού τύπου έρευνες όπου απαιτείται μικρή απόσταση ηλεκτροδίων.

Διδύμου ηλεκτροδίου(Twin Probe)

Είναι η πιο απλή μέθοδος στην εφαρμογή, ευκολότερη ακόμη και από την πόλουπόλου, αφού τα ηλεκτρόδια είναι κοντά μεταξύ τους. Χρησιμοποιείται κυρίως για γεωηλεκτρική χαρτογράφηση και ιδιαίτερα στην αρχαιομετρία.

Πόλου-Διπόλου(Pole-Dipole)

Η διάταξη αυτή χαρακτρίζεται από ισχυρό σήμα, ισχυρότερο από την διπόλουδιπόλου, ελαφρώς ασθενέστερο όμως από τις διατάξεις Wenner και Schlumberger. Παρουσιάζει καλή οριζόντια διακριτική ικανότητα και χαμηλό σχετικά θόρυβο.

Σύνοψη

Αν κάνουμε έρευνα σε μια περιοχή με ψηλές αναλογίες θόρυβου προς σήματος και θέλουμε καλή διακριτική ικανότητα σε βάθος έχοντας περιορισμένο χρόνο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο Wenner (ισχυρό σήμα).

Αν έχει μεγάλη σημασία η καλή οριζόντια κάλυψη, ο εξοπλισμός μας είναι αρκετά ευαίσθητος και υπάρχει καλή επαφή με το έδαφος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο διπόλου-διπόλου.

Σε περίπτωση που θέλουμε ικανοποιητική οριζόντια και κατακόρυφη διακριτική ικανότητα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο Schlumberger.

Αν έχουμε σύστημα με περιορισμένο αριθμό ηλεκτροδίων, η μέθοδος πόλουδιπόλου θα είναι ίσως η ιδανικότερη. Σε έρευνα με μικρά διαστήματα ηλεκτροδίων και καλή οριζόντια κάλυψη η μέθοδος πόλου-πόλου θα συστηνόταν.

2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την Ε.Η.Α ενός πετρώματος

Τα διάφορα πετρώματα της ανώτερης λιθόσφαιρας παρουσιάζουν διάφορες αγωγιμότητες. Γενικά υψηλές αγωγιμότητες παρουσιάζουν τα κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα ενώ χαμηλότερες τα ιζηματογενή και κυρίως οι άργιλοι, λιγνίτες και εν μέρη οι άμμοι.

Παρόλα αυτά ίδιου τύπου πετρώματα παρουσιάζουν ποικίλες τιμές Ε.Η.Α. ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες βρίσκονται, την φύση και την κατάσταση τους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4.1. Παραδείγματος χάριν, ένας καρστικοποιημένος ασβεστόλιθος παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικές τιμές Ε.Η.Α. από ένα υγιές ασβεστόλιθο. Ένας έντονα διακλασμένος σχιστόλιθος διαφέρει σημαντικά από ένα μετρίως διακλασμένο.



Σχήμα 2.4.1 : Το εύρος των ειδικών αντιστάσεων για διάφορα είδη πετρωμάτων. (Keller and Frischknecht 1966)

Σελ 16 από 107

Η ειδική αντίσταση ενός πετρώματος εξαρτάται κυρίως από τους εξής τρείς παράγοντες

-Πορώδες

-Γεωλογική Ηλικία

-Θερμοκρασία

Όσον αφορά την εξάρτηση της Ε.Η.Α. από το πορώδες ισχύει η ακόλουθη εμπειρική σχέση

$$\rho = \alpha * \rho_v * \varphi^{-\mu} \tag{2.10}$$

ρ: Η Ε.Η.Α , Η «πραγματική» αντίσταση

ρυ: Η Ε.Η.Α. του νερού που περιέχεται στους πόρους. φ: είναι ο λόγος του όγκου των πόρων προς το συνολικό όγκο του πετρώματος. α και m : σταθερές , α=1 και μ=2

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως ο **νόμος του Archie** και δείχνει ότι η Ε.Η.Α. ενός πετρώματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του πορώδους. Δηλαδή όσο μειώνεται το πορώδες τόσο αυξάνεται η τιμή της Ε.Η.Α και αυτό είναι φυσικώς αναμενόμενο αφού το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσα στους σχηματισμούς κατά κύριο λόγω μέσω της **ηλεκτρολυτικής αγωγιμότητας,** δηλαδή μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό των πόρων.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω η Ε.Η.Α σχετίζεται με την ηλικία, μάλιστα είναι ευθέως ανάλογη με αυτήν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι με το πέρας του γεωλογικού χρόνου το ίζημα οδηγείται βαθύτερα μέσα στη Γή, σε συνθήκες μεγαλύτερης πίεσης, αφού το έχουν καλύψει νέα ιζήματα, με αποτέλεσμα να γίνεται πιο συνεκτικό, το πορώδες να μειώνεται, ταυτόχρονα μειώνεται και η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Βλέπουμε δηλαδή ότι και πάλι το πορώδες είναι αυτό που ρυθμίζει την αγωγιμότητα. Εξαίρεση σε αυτή τη περίπτωση αποτελούν τα τριτογενή ιζήματα του ελληνικού χώρου αφού αυτά σχηματίστηκαν σε περιβάλλον γλυκού νερού με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές Ε.Η.Α.

Στα μεταμορφωμένα πετρώματα η διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδες, αφού το πρωτογενές είναι ελάχιστο έως και πρακτικά ανύπαρκτο.

Η εξάρτηση της Ε.Η.Α. από τη θερμοκρασία, οφείλεται στο ότι η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ελάττωση του ιξώδους του νερού (άρα και οι δεσμοί

Σελ 17 από 107

χαλαρώνουν και τα ιόντα κινούνται πιο γρήγορα), με αποτέλεσμα την ελάττωση της Ε.Η.Α. Η σχέση 2.11 δίνει τη συσχέτιση μεταξύ θερμοκρασίας και Ε.Η.Α.

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha_{\theta}(\theta - 18)}$$
 2.11

όπου ρθ είναι η ειδική αντίσταση για θερμοκρασία θ, ενώ ρ18 είναι η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία 18 °C. Με αθ συμβολίζεται ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης και έχει τιμή 0.025/°C για τους περισσότερος ηλεκτρολύτες.

Όμως πρέπει να τονιστεί ότι η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων τα οποία φιλοξενούν νερό στους πόρους τους επηρεάζεται έντονα μόνο στη περίπτωση μεγάλων μεταβολών της θερμοκρασίας και ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή ώστε το νερό των πόρων να εξατμίζεται του ή πολύ χαμηλή με αποτέλεσμα το νερό να παγώνει.

Σε περίπτωση που το νερό παγώσει, τότε οι αντιστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες καθώς ο πάγος είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού.

Στην εξάρτηση αυτή της ειδικής αντίστασης από τη θερμοκρασία βασίζεται και η χρήση των ηλεκτρικών μεθόδων στην ανίχνευση γεωθερμικών πεδίων, αφού οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται από αυτά προκαλούν έντονη εξάτμιση του νερού και συνακόλουθα οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν αρκετά υψηλότερες τιμές Ε.Η.Α. σε σχέση με το περιβάλλον τους (Παπαζάχος Β. 1996, σ. 240).

2.5 Είδη Διασκοπήσεων

Ανάλογα με το ποιες μεταβολές τις Ε.Η.Α. θέλουμε να παρακολουθήσουμε τα ηλεκτρόδια διατάσσονται με τον κατάλληλο τρόπο και εφαρμόζουμε την αντίστοιχη μέθοδο. Αν θέλουμε να παρακολουθήσουμε τις οριζόντιες μεταβολές τις Ε.Η.Α. εφαρμόζουμε την μέθοδο της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης, αν μας ενδιαφέρουν οι κατακόρυφες εφαρμόζουμε τη μέθοδο της βυθοσκόπησης, αν πάλι θέλουμε να παρακολουθήσουμε τις μεταβολές και στις δύο διαστάσεις εφαρμόζουμε τη μέθοδο της ΗΤ. Τέλος αν μας ενδιαφέρει η κατανομή της ειδικής αντίστασης και στις τρεις διαστάσεις εφαρμόζουμε μια τρισδιάστατη διασκόπηση που μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, τους οποίους και αναπτύσσουμε πιο κάτω.

2.5.1 Η Γεωηλεκτρική Χαρτογράφηση ή Οριζοντιογραφία

Η Γεωηλεκτρική χαρτογράφηση χρησιμοποιείται για το καθορισμό της οριζόντιας κατανομής της Ε.Η.Α, δηλαδή τον εντοπισμό των πλευρικών μεταβολών. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στη έρευνα και χαρτογράφηση μεταλλευμάτων και

Σελ 18 από 107

αποτελεί την κύρια μεθοδολογία για την στην χαρτογράφηση αρχαιολογικών δομών.

Οι μεγαλύτερες τιμές Φ.Ε.Α καταγράφονται εγκάρσια των γεωλογικών δομών ή των αρχαιοτήτων ή του εκάστοτε κάθε φορά στόχου. Εδώ καλό είναι να αναφέρουμε ότι προτιμότερο κατά τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση να χρησιμοποιούνται δύο αποστάσεις ηλεκτροδίων ώστε να ξεχωρίζουν οι ρηχές από τις βαθύτερες ανωμαλίες.

Η ερμηνεία των δεδομένων της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης είναι καταρχάς ποιοτική. Δηλαδή κύριος σκοπός της αποτελεί ο προσδιορισμός των θέσεων των στόχων και όχι τόσο ο προσδιορισμός της Ε.Η.Α της δομής τους. Για το λόγο αυτό στη συγκεκριμένη έρευνα έγινε πρώτα η γεωηλεκτρική χαρτογράφηση της περιοχής και στις πιθανές θέσεις στόχων εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας που αναπτύσσεται πιο κάτω.

Κατά την γεωηλεκτρική χαρτογράφηση ή απόσταση (α) μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού παραμένει σταθερή και τα τέσσερα ηλεκτρόδια κινούνται κατά μήκος της τομής. Έτσι το βάθος διακοπήσης είναι σταθερό και βλέπουμε τις πλευρικές διαφορές για το βάθος αυτό.

2.5.2 Γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση

Το πρόβλημα της κατανομής της Ε.Η.Α έχει μονοσήμαντη λύση, δηλαδή υπάρχει μόνο μια ερμηνεία, μόνο στη περίπτωση που η Ε.Η.Α. παραμένει σταθερή κατά την οριζόντια διεύθυνση και μεταβάλλεται μόνο με το βάθος, ήτοι όταν έχουμε οριζόντιες πλάκες απείρων διαστάσεων διαφορετικής Ε.Η.Α.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής καθορίζεται η κατανομή της Ε.Η.Α. μόνο στη κατακόρυφη έννοια, κάνοντας την παραδοχή ότι το υπέδαφος αποτελείται από τελείως οριζόντια στρώματα το καθένα το οποίο είναι ομογενές.

Κατά την εφαρμογή της γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης η απόσταση ΑΒ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται συνεχώς συμμετρικά ως προς συγκεκριμένο κέντρο ώστε το ηλεκτρικό ρεύμα να διαδίδεται βαθύτερα. Έτσι καταγράφουμε για την ίδια θέση τις ηλεκτρικές αντιστάσεις για βαθύτερους ορίζοντες. Η διεύθυνση AB της διάταξης, θα πρέπει να είναι κατά το δυνατό κάθετη με την παράταξη των γεωλογικών σχηματισμών. Στο σχήμα 2.5.1 απεικονίζεται η λήψη μετρήσεων με την διάταξη Schlumberger για γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, αυξάνοντας κάθε φορά την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος.

Κάτι που πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα κατά τη λήψη των μετρήσεων βυθοσκόπησης, είναι όταν παρατηρούμε απότομες μειώσεις της Φ.Ε.Α., σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο είναι πιθανόν να υπάρχουν αγωγοί που επηρεάζουν τη μέτρηση.

Σελ 19 από 107

Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να περιστρέψουμε τη διάταξη των ηλεκτροδίων κατά 90° και να κάνουμε νέα λήψη μετρήσεων.

Η προσδιοριζόμενη μεταβολή της φαινόμενης αντίστασης (ρα) αντικατοπτρίζει τη μεταβολή της πραγματικής κατανομής της ειδικής αντίστασης (ρ) με το βάθος, αφού με κάθε αύξηση της απόστασης ΑΒ, διαδοχικά βαθύτεροι ορίζοντες επιδρούν στη διαμόρφωση της αντίστοιχης τιμής της φαινόμενης αντίστασης.



Σχήμα 2.5.1: Απεικόνιση της βυθοσκόπησης για τη διάταξη Schlumberger.

Ο γραφικός τρόπος προσέγγισης της Ε.Η.Α, δηλαδή της «πραγματικής» αντίστασης, των ομογενών στρωμάτων κατά τη βυθοσκόπηση, γίνεται με τη χρήση καμπυλών σε διαφανές διλογαριθμικό χαρτί. Οι μετρήσεις Φ.Ε.Α. που κάνουμε τοποθετούνται στο κάθετο άξονα, ενώ η μίση απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος (AB/2=L) τοποθετείται στον οριζόντιο άξονα, όπως φαίνεται στα σχήματα 2.5.2 και 2.5.3. Το σχήματα είναι ειδικά κατασκευασμένα για τη διάταξη Schlumberger.

Σε ένα τέτοιο διάφανες, διπλό λογαριθμικό, χαρτί χαρτογραφούμε τις μετρήσεις Φ.Ε.Α. που έχουμε κάνει σε σχέση με τη μισή απόσταση των ηλεκτροδίων (AB/2). Επίσης χρησιμοποιούμε ένα άλλο φύλλο, ίδιων διαστάσεων, στο όποιο είναι χαραγμένες οι θεωρητικές καμπύλες.

Ακολούθως κινούμε το διαφανές χαρτί ούτως ώστε η καμπύλη που χαράξαμε να συμπέσει με μία θεωρητική καμπύλη, με τρόπο όμως ώστε οι άξονες των δύο φύλλων να παραμένουν παράλληλοι. Αφού καταλήξουμε στην θεωρητική καμπύλη που ταιριάζουν τα δεδομένα μας και χωρίς να μετακινήσουμε το διαφανές χαρτί παρατηρούμε το σημείο που είναι η αρχή των αξόνων των θεωρητικών καμπύλων και το σημειώνουμε πάνω στο διαφανές χαρτί. Εν συνεχεία από το σημείο αυτό

Σελ 20 από 107

φέρνουμε κάθετες στους άξονες του διαφανούς χαρτιού για να καθορίσουμε τις συντεταγμένες (L', ρα') του σημείου αυτού.

Σύμφωνα με την ιδιότητα της αρχής των αξόνων, το πάχος του πρώτου στρώματος είναι z=L', ρ1=ρα' και ρ2=μρ1. Ο συντελεστής μ, χαρακτηρίζει τη συγκεκκριμένη καμπύλη που ερμηνεύει το μοντέλο μας. Κάθε καμπύλη έχει διαφορετικό συντελεστή μ.

Εδώ να τονίσουμε ότι οι θεωρητικές καμπύλες που είναι πάνω από την ευθεία ρ2/ρ1=1 ισχύουν για τη περίπτωση που ρ2<ρ1 ενώ οι καμπύλες που είναι κάτω από την ευθεία αυτή ισχύουν στη περίπτωση που ρ2>ρ1.

Στη περίπτωση που το μοντέλο μας αποτελείται από περισσότερα των δύο στρώματων (ένας ημιχώρος και υπόβαθρο) τότε για τον προσδιορισμό της Ε.Η.Α (ρ) και του πάχους (z) αυτών, απαιτείται η χρήση πρότυπων καμπυλών περισσότερων στρωμάτων.

Σήμερα υπάρχουν προγράμματα που προσδιορίζουν την τιμή της Ε.Η.Α των στρωμάτων και βασίζονται στην ίδια αρχή με τις καμπύλες. Στο σχήμα 2.6.3 φαίνεται ο προσδιορισμός των τιμών της Ε.Η.Α., που έγινε με το πρόγραμμα IPI2win, διαφόρων στρωμάτων για μετρήσεις που έγιναν με τη μέθοδο της βυθοσκόπησης.



Σχήμα 2.5.2 : Παρατηρούμε τις θεωρητικές καμπύλες που έχουν κατασκευαστεί πάνω σε διπλό λογαριθμικό χαρτί. Οι καμπύλες αυτές κατασκευάστηκαν για διάφορους λόγους Ε.Η.Α. και αναφέρονται σε στρώμα που υπέρκειται ημιχώρου.Πάνω από την ευθεία γραμμή, που αντιστοιχεί σε τιμή του λόγου ρ2/ρ1=1, οι καμπύλες ισχύουν για τη περίπτωση που ρ2>ρ1ενώ οι καμπύλες που βρίσκονται κάτω από τη γραμμή αυτή ισχύουν για τη περίπτωση που ρ2<ρ1.

Σελ 21 από 107



Σχήμα2.5.3 : Απεικόνιση των μετρήσεων Φ.Ε.Α. που λήφθησαν με τη μέθοδο της βυθοσκόπησης. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν έξι στρώματα, καθώς υπάρχουν έξι μεταβολές στη κλίση των χαρτογραφούμενων τιμών της Φ.Ε.Α. Κάθε μία αποτελεί ξεχωριστή καμπύλη και ξεχωριστό Προσομοίωμα. Κάτω βλέπουμε και την εκτιμώμενη τιμή της Ε.Η.Α. κάθε στρώματος καθώς και τα πάχη τους.(Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το πρόγραμμα ipi2win)

2.5.3 Μέθοδος της Ηλεκτρικής Τομογραφίας-Δισδιάστατη Διασκόπηση

Η ηλεκτρική τομογραφία (ΗΤ) μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός όδευσης και βυθοσκόπησης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να αποδοθεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων (Βαργεμέζης και συνεργάτες 2014). Έτσι έχουμε μια **δισδιάστατη διασκόπηση**, τόσο με το βάθος όσο και στη μία οριζόντια διεύθυνση, δηλαδή μελετώνται τόσο οι πλευρικές όσο και οι κατακόρυφες μεταβολές της Ε.Η.Α.

Σελ 22 από 107

Στη διαδικασία της τομογραφίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων όπως διπόλου-διπόλου, Wenner, Schlumberger. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και ένα από τα προτερήματα της σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους γεωφυσικής διακοπήσης, είναι ότι μπορεί να ληφθεί εύκολα, γρήγορα και αυτόματα μεγάλος αριθμός μετρήσεων της Φ.Ε.Α. αφού έχουν επινοηθεί νέα όργανα που επιτρέπουν την απλοποιημένη λήψη μετρήσεων και εξελιγμένες τεχνικές ερμηνείας που επιτρέπουν την ακριβή απεικόνιση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Ταυτόχρονα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων, έτσι είναι απαραίτητη η χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων πολυπλεκτών.

Ακόμη, η ΗΤ δεν έχει το περιορισμό της οριζόντιας στρωματογραφίας που παρουσίαζε η ηλεκτρική βυθοσκόπηση.

2.5.4 Τρισδιάστατη Διασκόπηση

Πιο πάνω είδαμε πως πραγματοποιείται η μονοδιάστατη διασκόπηση (οριζοντιογραφία και βυθοσκόπηση) πως πραγματοποιείται η δισδιάστατη διασκόπηση (HT). Ωστόσο μας ενδιαφέρει και η κατανομή της Ε.Η.Α. στο χώρο, δηλαδή τι γίνεται και στην τρίτη διάσταση.

Η καταγραφή της κατανομής της αντίστασης στο χώρο μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Μπορούμε είτε να κάνουμε τρισδιάστατες μετρήσεις είτε να κάνουμε δισδιάστατες μετρήσεις με τη μέθοδο της ΗΤ και με τη διαδικασία της παρεμβολής να υπολογίσουμε τις τιμές της Ε.Η.Α στους χώρους μεταξύ δύο τομογραφιών είτε να τα δεδομένα των δισδιάστατων τομογραφιών, είτε να εισαχθούν σε ένα πρόγραμμα τρισσδιάστατης αντιστροφής (όπως το DC_3Dpro και το Res3Dinv). Στη συγκεκριμένη εργασία εφαρμόσαμε τη τρίτη διαδικασία, αλλά για βιβλιογραφικούς σκοπούς κρίνουμε σκόπιμο να αναφέρουμε μερικά λόγια και για τη δεύτερη διαδικασία καθώς είναι λίγο περίπλοκη.

Οι τρισδιάστατες μετρήσεις γίνονται χρησιμοποιώντας πολυκάναλα καλώδια, όμως τα **ηλεκτρόδια δεν είναι όλα επί μιας ευθείας όπως γινόταν στη δισδιάστατη** διασκόπηση, αλλά τοποθετούνται σε περισσότερες της μιας μικρότερες τομογραφίες. Τα ηλεκτρόδια που διαβιβάζουν ρεύμα ή μετρούν δυναμικό δεν είναι κατ' ανάγκη να επί της ίδιας κατεύθυνσης αλλά μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.4

Ωστόσο αυτός ο τρόπος μετρήσεων αντιμετωπίζει δύο σημαντικά προβλήματα :

Σελ 23 από 107

Αφενός απαιτούνται πολυκάναλα καλώδια, καθώς η χρησιμοποίηση μονοκάναλων καλωδίων είναι απαγορευτική λόγω του πολύ μεγάλου χρόνου που θα χρειαζόταν αφού απαιτούνται παρά πολλές μετακινήσεις καλωδίων.

Αφετέρου τα δεδομένα από μια τέτοια διαδικασία είναι πολλά με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολύπλοκοι αλγόριθμοι, μεγάλες υπολογιστικές ικανότητες και πολύς χρόνος για την επεξεργασία των δεδομένων.



Σχήμα 2.5.4 : Απεικόνιση τρισδιάστατης τομογραφίας. Σε μια έκταση 3.50 X 2.50 τετραγωνικών μέτρων τοποθέτηκαν ηλεκτρόδια ανά μισό μέτρο. Χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια. Οι θέσεις των ηλεκτροδίων συμβολίζονται με μαύρες κουκίδες. Με κόκκινες κουκίδες συμβολίσαμε τα ηλεκτρόδια ρεύματος C1 και C2 ενώ με κίτρινο χρώμα τα ηλεκτρόδια καταμέτρησης δυναμικού P1 και P2 για μια τυχαία μέτρηση χρησιμοποιώντας τη διάταξη διπόλου-διπόλου. Παρατηρούμε ότι τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για τη συγκεκριμένη μέτρηση δεν είναι επί της ίδιας ευθείας.

Παρά όμως τη δημιουργία νέων γρήγορων πολυκάναλων μηχανημάτων (Stummer, 2003) και βελτίωσης των υπολογιστικών δυνατοτήτων, προτιμάται ο δεύτερος τρόπος, κατά τον οποίον για λαμβάνονται παράλληλες δισδιάστατες τομογραφίες και με τη διαδικασία της παρεμβολής υπολογίζεται η κατανομή της Ε.Η.Α στο χώρο. Ο τρόπος αυτός προτιμάται γιατί είναι πολύ πιο γρήγορος και τα αποτελέσματα του, έχουν πολύ μικρή απόκλιση από τον πρώτο τρόπο.

Σελ 24 από 107

3. Μέθοδοι Ερμηνείας Δεδομένων Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Για την ερμηνεία των δεδομένων της ΗΤ χρησιμοποιείται η μέθοδος της αντιστροφής. Το όνομα αντιστροφή οφείλεται στο ότι η λύση του προβλήματος αποτελεί η εύρεση του αντίστροφου πίνακα T^{-1} της σχέσης 3.1 που δίνεται πιο κάτω.

Με τη διαδικασία της αντιστροφής γίνεται προσπάθεια να παραχθεί ένα Προσομοίωμα κατανομής αντίστασης που θα είναι όσο πιο κοντά γίνεται στην πραγματική κατανομή αντίστασης. Η διαδικασία είναι επαναληπτική και αυτοδιορθωτική. Μετά από κάθε επανάληψη το σφάλμα προσέγγισης της «πραγματικής» αντίστασης μειώνεται.

Εν ολίγοις η διαδικασία της αντιστροφής μπορεί να θεωρηθεί ότι καταλήγει να δώσει την «πραγματική» εικόνα της Ε.Η.Α

Προϋπόθεση για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος, δηλαδή την εύρεση του αντίστροφου μετασχηματισμού T^{-1} , αποτελεί η ύπαρξη λύσης του ευθέως προβλήματος, το οποίο και θα αναλύσουμε σε μεταγενέστερο στάδιο.

Στην εργασία αυτή, για την επίλυση του ευθέως προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων επίλυσης διαφορικών εξισώσεων **που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη Γή.**

Για να επιλύσουμε όμως το αντίστροφο πρόβλημα απαιτείται η διακριτοποιήση του εδάφους σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (ή ορθογώνια τρίγωνα, ανάλογα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Κάθε ορθογώνιο από τώρα και στο εξής θα το καλούμε παράμετρο. Περαιτέρω όμως, για το πως επιλύεται το αντίστροφο προβλήμα και την ευρεση της κατανομής της ειδικής αντίστασης στο χώρο θα αναπτύξουμε σε επόμενο υποκεφάλαιο.



Σχήμα 3.1 : Διακριτοποίηση του υπεδάφους σε παραμέτρους για την εύρεση της λύσης του αντίστροφου προβλήματος. (*Tsourlos*,2015)

Σελ 25 από 107
Παρατηρούμε ότι τρόπος ερμηνείας των μετρήσεων της Φ.Ε.Α από την Η.Τ. και τη βυθοσκόπηση, δεν έχουν καμία σχέση, όπως επίσης παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει μέθοδος προσέγγισης της Ε.Η.Α από τις τιμές της Φ.Ε.Α κατά την οριζοντιογραφία. Δεν υπάρχει και λόγος, αφού όπως αναφέραμε πιο πάνω, η ερμηνεία των δεδομένων της οριζοντιογραφίας είναι καταρχάς ποιοτική και κατά δεύτερο λόγο ποσοτική.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι πρόδρομος της διαδικασίας της αντιστροφής, για τη μελέτη της κατανομής της Ε.Η.Α στις δύο διαστάσεις, ήταν η μέθοδος της ψευδοτομής. Κατά τη διαδικασία της ψευδοτομής λαμβάνονταν οι μετρήσεις και υπολογιζόταν το κέντρο μετρήσεων. Επιπρόσθετα ανάλογα και με το άνοιγμα των ηλεκτροδίων υπολογιζόταν το βάθος στο οποίο «ανταποκρινόταν» κάθε μέτρηση. Στο σημείο αυτό χαρτογραφούταν η μέτρηση που κάναμε κάθε φορά όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Γίνεται φανερό ότι η διαδικασία αυτή δεν παρείχε σημαντική ακρίβεια και σε πολύπλοκη γεωλογική δομή δεν μπορούσε να εφαρμοστεί.



Σχήμα 3.2 Απεικόνιση του υπεδάφους κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου. Βλέπουμε την κατανομή του ρεύματος αλλά και των ισοδυναμικών γραμμών στο υπέδαφος. Παρατηρούμε και το σημείο όπου θα χαρτογραφούταν η μέτρηση με τη μέθοδο της ψευδοτομή, πράγμα όμως που δεν ισχύει απόλυτα.

Επίσης στη διαδικασία της ψευδοτομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο συμβατικές διατάξεις που αναφέραμε προηγουμένως (Wenner, Schlumberger, πόλου-διπόλου κλπ) ενώ με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας μπορούν να

Σελ 26 από 107

υλοποιηθούν και μετρήσεις χωρίς συμβατικές διατάξεις όπως οι μετρήσεις σε γεωτρήσεις (borehole, cross hole)

3.1 Καθορισμός βάθους διείσδυσης

Η δυσκολία στο να καθοριστεί το βάθος διείσδυσης οφείλεται σε δύο λόγους. Καταρχάς η υπολογιζόμενη ανωμαλία, οι τιμές δηλαδή της Φ.Ε.Α, δεν αναφέρεται σε συγκεριμένο βάθος. Και κατά δεύτερο λόγο στο ότι οι υπολογίσμοι του βάθους διείσδυσης θεωρούν ομογενή Γη, αφού δεν γνωρίζουμε την ηλεκτρική δομή της, πράγμα όμως που προφανώς δεν ισχύει.

Έτσι οι Roy και Apparao (1971) έδειξαν ότι η κατανομή του ρεύματος, από μόνη της δεν μπορεί να καθορίσει το βάθος διείσδυσης. Αυτό απόδικνύεται αν σε μια διάταξη ηλεκτροδίων, ανταλλάξουμε τις θέσεις των ηλεκτροδίων του ρεύματος με τα ηλεκτρόδια του δυναμικού. Σε μία τέτοια περίπτωση τα βάθη διείσδυσης θα είναι μεν τα ίδια, αλλά η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος στο χώρο θα είναι διαφορετική *(Helmholtz's reciprocity theorem)*. Βασισμένοι σε θεωρητικούς υπολογισμούς που είχαν κάνει κατασκέυασαν τις καμπύλες DIC(Depth of Investigation Characteristic), οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 3.1.1. Με τις καμπύλες αυτές καθίσταται δυνατός **ο καθορισμός του βάθους διείσδυσης για συγκεκριμένο άνοιγμα ηλεκτροδίων και συγκεκριμένη διάταξη.** Οι Roy και Apparao υποστήριξαν ότι το βάθος διείσδυσης είναι αυτό που αντιστοιχεί στο μέγτιστο των καμπύλων DIC για κάθε διάταξη.



Σχήμα 3.1.1 Οι καμπύλες DIC για τις διατάξεις Wenner, Διπόλου-Διπόλου και πόλου-πόλου. Όπου L είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρευματος και η απόσταση των δύο διπόλων όταν πρόκειται για τη διάταξη διπόλου-διπόλου, ενώ z είναι το βάθος διείσδυσης.(Tsourlos 1995)

Ο Edwards το 1977, διορθώνοντας το Προσομοίωμα που πρότειναν οι Roy και Apparao, πρότεινε ότι το βάθος διείσδυσης, δηλαδή το βάθος που συμβάλει περισσότερο σε μια μέτρηση, είναι αυτό οπου ο λογος ανοιγματος ηλεκτροδιων προς το βάθος διασκόπησης (L/z) χωρίζει τις καμπύλες DIC σε δύο ισεμβαδικά τμήματα. Ετσι από το διαγραμμα αυτό μπορούμε να βρούμε το βάθος διείσδυσης που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο άνοιγμα ηλεκτροδίων ή πιο σωστά, ανάλογα με το επιθυμητό βάθος διασκόπησης να υπολογίσουμε πιο είναι το ιδανικότερο άνοιγμα των ηλεκτροδίων.

Δηλαδή, αν λόγου χάρη για τη διαταξη Wenner, η καμπύλη του πιο πάνω σχήματος μας δείχνει ότι ο λόγος που χωρίζει τη καμπύλη σε δύο ισεμβαδικά τμήματα, είναι 0.2, τότε το βάθος που αντιστοιχει στο 1/5 του ανοίγματος των ηλεκτροδίων είναι το βάθος που συνεισφέρει περισσότερο στη μέτρηση.

Αν το θέσουμε και αντίστροφα, οι καμπύλες DIC μας δείχνουν το βαθμό στον οποίο επηρεάζεται κάθε μέτρηση με τη μεταβολή της αντίστασης με το βάθος (1-D). Δηλαδή πως θα επηρεαστεί μια συγκεκριμένη μέτρηση (σταθερές θέσεις ηλεκτροδίων) αν αλλάξουμε το βάθος της αντιστατικής δομής και τη τοποθετήσουμε βαθύτερα.

Σελ 28 από 107

Κεφάλαιο 3 Μέθοδοι Ερμηνείας Δεδομένων Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Από το πίνακα 3.Ι φαίνεται το βάθος διείσδυσης για τις πέντε βασικές διατάξεις, όπως το πρότεινε ο Edwards. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν γίνει θεωρώντας ομογενή ΗΜΙΧΩΡΟ, αφού η δομή της Γής τις περισσότερες φορές είναι άγνωστη. Το βάθος διείσδυσης δεν είναι συνάρτηση μόνο του ανοίγματος των ηλεκτροδίων αλλά πολλών άλλων παραμέτρων όπως λόγου χάρη ένα στρώμα χαμηλής αντίστασης (ψηλής αγωγιμότητας) μειώνει το βάθος διείσδυσης.

Παρόλα αυτά τα βάθη που υπολογίστηκαν από το Προσομοίωμα αυτό δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε πραγματικές συνθήκες.

Διάταξη	Βάθος Διείσδυσης
Wenner	0.17L
Schlumberger	0.195L
Διπόλου-Διπόλου	0.25L
Πόλου-Διπόλου	0.52L
Διδύμου Ηλεκτροδίου	0.77L

L : Το συνολικό μήκος της διάταξης

Πίνακας 3.I : Το βάθος διασκόπησης όπως προτάθηκε από τον Edwards για τις πέντε βασικές διατάξεις. (Edwards 1977).

3.2 Ευθύ και Αντίστροφο πρόβλημα

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για το καθορισμό της κατανομής πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους, όπως αναφέραμε, είναι η μέθοδος της αντιστροφής.

Στο αντίστροφο πρόβλημα για δεδομένες μετρήσεις Φ.Ε.Α. προσπαθούμε να υπολογίσουμε την κατανομή της «πραγματικής» αντίστασης στο χώρο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται λογισμικά που βασίζονται στην επίλυση διαφορικών εξισώσεων.

Προϋπόθεση όμως για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος αποτελεί η εύρεση λύσης στο ευθύ πρόβλημα.

Ευθύ πρόβλημα ονομάζεται το πρόβλημα κατά το όποιο για γνώστη κατανομή της αντίστασης στο χώρο προσπαθούμε να βρούμε τις μετρήσεις διαφοράς δυναμικού ή Φ.Ε.Α που θα έπρεπε να κάνουμε εάν πραγματοποιούσαμε μια τομογραφία με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά πάνω από τον εν λόγω χώρο.

Ας δούμε τώρα πως προκύπτει η λύση στο ευθύ και αντίστροφο πρόβλημα. Έστω ότι με Χ συμβολίζουμε το, άγνωστο κατά το αντίστροφο πρόβλημα και γνωστό κατά το ευθύ, διάνυσμα που περιέχει την τρισδιάστατη κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, δηλαδή την τιμή της Ε.Η.Α σε κάθε παράμετρο. Ενώ με Υ συμβολίζεται, το γνωστό κατά το αντίστροφο πρόβλημα και άγνωστο κατά το ευθύ, διάνυσμα που περιέχει τις μετρήσεις της διαφοράς δυναμικού ή της Φ.Ε.Α.

Η παρακάτω εξίσωση (Φικος 2010, σελ 44) δίνει τη λύση του ευθέως προβλήματος και συνδέει τη γνωστή κατανομή της γεωηλεκτρικής αντίστασης(Χ) με τις άγνωστες μετρήσεις (Υ)

$$Y = T(X) \tag{3.1}$$

Ενώ η λύση του αντίστροφου προβλήματος, συνδέει το γνωστό διάνυσμα (πίνακα) των μετρήσεων Φ.Ε.Α με το άγνωστο διάνυσμα της κατανομής της ειδικής αντίστασης και δίνεται από τη σχέση.

$$X = T^{-1}(Y)$$
 (3.2)

Το διάνυσμα X αποτελείται από N στοιχεία που περιγράφουν την τρισδιάστατη κατανομή αντίστασης του εδάφους. Ενώ το διάνυσμα Y αποτελείται από M παραμέτρους που είναι οι μετρήσεις της Φ.Ε.Α.

3.2.1 Ιακωβιανός Πίνακας

Πιο πάνω αναφερθήκαμε στις καμπύλες DIC τονίζοντας ότι μας δείχνουν το πως επηρεάζεται (ευαισθησία) μία μέτρηση (Φ.Ε.Α) με τη μεταβολή της Ε.Η.Α. συναρτήση του βάθους. Ομως μας ενδιαφέρει και το πώς επηρεάζονται οι μετρήσεις όταν η αντιστατική δομή μεταβάλεται και στις δύο διαστάσεις, τόσο κατακόρυφα όσο και κατά μήκος της μιας οριζόντιας συνιστώσας.

Για το λόγο αυτό κατασκευάζεται ένας πίνακας που ονομάζεται Πίνακας Ευαισθησίας ή Ιακωβιανός Πίνακας ο οποίος περιέχει τις πληροφορίες για το πώς επηρεάζεται η κάθε μέτρηση από τη μεταβολή της θέσης ενός αντιστατικού σώματος ή στρώματος τόσο με το βάθος όσο και στη οριζόντια διεύθυνση.

Όπως είδαμε, κατά το αντίστροφο πρόβλημα, διακριτοποιούμε το χώρο σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδα τα οποία είναι ομογενή και ισότροπα, έτσι κάθε ένα στο εσωτερικό του παρουσιάζει σταθερή τιμή Ε.Η.Α.

Οι μετρήσεις που κάναμε στο ύπαιθρο αντιστοιχούν σε αυτά τα ορθογώνια, τα οποία όπως αναφέραμε τα καλούμε παραμέτρους.

Σελ 30 από 107

Κεφάλαιο 3 Μέθοδοι Ερμηνείας Δεδομένων Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Το πλήθος των γραμμών του Ιακωβιανού πίνακα είναι ίσο με το πλήθος των μετρήσεων, ενώ το πλήθος των στηλών του είναι ίσο με το πλήθος των παραμέτρων που διακριτοποιήσαμε το χώρο. Αν συμβολίσουμε το πλήθος των παραμέτρων με Ν και το πλήθος των μετρήσεων με Μ, τότε ο Ιακωβιανός πίνακας έχει διαστάσεις MXN.

Η κάθε μέτρηση επηρεάζει έστω και στο ελάχιστο την κάθε παράμετρο. Η αξιολόγηση του πόσο επηρεάζει η κάθε μέτρηση την κάθε παράμετρο, γίνεται στον Ιακωβιανό πίνακα.

Οι τιμές που λαμβάνουν τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα είναι από 0 έως 1, όσο πιο κοντά είναι μια τιμή στη μονάδα, τόσο πιο αξιόπιστη είναι η τιμή της Φ.Ε.Α στην οποία αντιστοιχεί. Τέλος, από τη διαδικασία της αντιστροφής, με τη βοήθεια του Ιακωβιανού πίνακα και του διανύσματος των μετρήσων (Υ) θα προκύψει η τιμή Ε.Η.Α. που αντιστοιχεί σε κάθε παράμετρο.

Οι μεγαλύτερες θετικές τιμές του πινάκα ευαισθησίας δείχνουν ότι οι μετρήσεις της διάταξης είναι πιο ευαίσθητες στα σημεία αυτά.

Οι θέσεις στις οποίες ο πινάκας ευαισθησίας έχει υψηλότερες τιμές, συναντούνται στις θέσεις που βρίσκονται τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος. Άρα αν αλλάξουμε την αντίσταση (Ε.Η.Α.), στο **ευθύ πρόβλημα**, στην τριγύρω των ηλεκτροδίων περιοχή οι μετρήσεις (Φ.Ε.Α.) θα μεταβληθούν πολύ, κάτι που εφαρμόσαμε στα πειράματα που κάναμε. Αυτό είναι το φαινόμενο της αστάθειας που παρουσιάζουν τα αντίστροφα προβλήματα και θα το αναπτύξουμε σε μεταγενέστερο στάδιο.

Επομένως, κατά το **αντίστροφο πρόβλημα**, οι περιοχές τριγύρω των ηλεκτροδίων είναι οι πιο αξιόπιστες.

Τέλος κάτι που πρέπει να επισημάνουμε, είναι ότι η κατανομή των τιμών του Ιακωβιανού πίνακα δείχνει τη μορφή της ανωμαλίας που προκύπτει χρησιμοποιώντας διαφορετικές διατάξεις.

3.2.2 Αντίστροφο Πρόβλημα

Η εύρεση του πίνακα Τ, κατά το ευθύ πρόβλημα, που συνδέει τη γνωστή κατανομή της γεωηλεκτρικής αντίστασης (Χ) με τις άγνωστες μετρήσεις (Υ), είναι δύσκολη. Όμως το ουσιαστικό πρόβλημα προκύπτει στην επίλυση του αντίστροφου προβλήματος, αφού είναι **αδύνατη** η εύρεση του αντίστροφου ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ πίνακα, T^{-1} , που συνδέει την άγνωστη κατανομή Ε.Η.Α. με τις γνωστές μετρήσεις Φ.Ε.Α. Για το σκοπό αυτό το αντίστροφο πρόβλημα λύνεται διακριτοποιώντας το σε μικρότερα, επιμέρους γραμμικά προβλήματα. Με αυτό τρόπο το μη-γραμμικό αντίστροφο πρόβλημα μετατρέπεται σε πολλά γραμμικά προβλήματα, επιτρέποντας έτσι τη λύση του **με προσεγγιστικό βέβαια τρόπο**. Η λύση είναι Σελ 31 από 107 επαναληπτική βελτιώνοντας κάθε φορά τη λύση κάθε γραμμικού προβλήματος, προσεγγίζοντας σε κάθε επανάληψη καλύτερα την πραγματική κατανομή της αντίστασης.

Ο λόγος που το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή η εξίσωση 3.3, λύνεται επαναληπτικά είναι ακριβώς επειδή η εξίσωση είναι προσεγγιστική, ήτοι έχουν παραληφθεί οι όροι ανώτερης τάξης, με αποτέλεσμα κάθε επανάληψη να βελτιώνει τα αποτέλεσμα της προηγούμενης.

$$T(Xo + dx) = T(Xo) + Jdx \Leftrightarrow y = T(Xo) + Jdx \Leftrightarrow Jdx = y - T(X) = dy$$
(3.3)

Χο : η αρχική κατανομή αντίστασης (αρχικό μοντέλο). Χο+dx : Πραγματικό μοντέλο κατανομής αντίστασης. Τ(Xo+dx) : Η απόκριση του νέου μοντέλου. dy : Η διαφορά των πραγματικών μετρήσεων από τις «μετρήσεις» που υπολογίστηκαν από την επίλυση του ευθέως προβλήματος για το αρχικό μοντέλο, Χο.

Οι διαδικασίες αντιστροφής παρουσιάζουν κάποια χαρακτηριστικά προβλήματα. Σε αυτά οφείλεται και η δυσκολία στην επίλυση τους, δηλαδή, στην εύρεση του αντίστροφου πίνακα T^{-1} που περιγράφει την κατανομή της αντίστασης στο χώρο. Οι ιδιότητες αυτές είναι :

- Μη ύπαρξη λύσης: Είναι πιθανό να μην υπάρχει κανένα Προσομοίωμα κατανομής της αντίστασης που να ερμηνεύει πλήρως τα δεδομένα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο, σε σφάλματα κατά τη λήψη των μετρήσεων, στο ότι η λύση του προβλήματος είναι προσεγγιστική, ακόμη μπορεί να οφείλεται στο σφάλμα του προσομοιώματος δηλαδή ενώ στη πραγματικότητα το σώμα που προκαλεί την ανωμαλία έχει ακανόνιστο σχήμα, εμείς το προσεγγίζουμε με ένα σφαιρικό σχήμα ή ένα στρώμα με ακανόνιστη την πάνω επιφάνεια το προσεγγίζουμε με ένα πλήρως επιπεδοποιήμένο στρώμα.
- Μοναδικότητα: Είναι πιθανόν να υπάρχουν πολλές λύσεις που επαληθεύουν τα δεδομένα. Το αντίθετο δηλαδή της πιο πάνω ιδιότητας.
- Αστάθεια: Είναι το φαινόμενο που εμφανίζεται όταν μια μικρή αλλαγή στις μετρήσεις (Φ.Ε.Α) ,όπως π.χ. είναι ο θόρυβος, μπορεί να προκαλέσει πολύ μεγάλες αλλαγές εκτιμώμενο Προσομοίωμα(Ε.Η.Α). Αυτό οφείλεται στην διαδικασία επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που είναι εξαιρετικά ασταθής, δηλαδή για μικρή μεταβολή μιας παραμέτρου το αποτέλεσμα να μεταβάλλεται δραματικά.

Σελ 32 από 107

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που αντιμετωπίζουν αυτά τα προβλήματα. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί τη μέθοδο εξομαλυμένης αντιστροφής. Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, συγκριτικά με τις άλλες τεχνικές, είναι η τελική ανεξαρτησία του αποτελέσματος από το αρχικό Προσομοίωμα. Ενώ στα αρνητικά της καταγράφεται ότι δεν φτάνει στην καλύτερη δυνατή (μαθηματική) λύση παρόλα αυτά ή τελική λύση θα είναι η απλούστερη που ικανοποιεί ρεαλιστικά τα δεδομένα.

Κατά τη διαδικασία της αντιστροφής αυτό που γίνεται αρχικά ένα υπολογισμος των μετρήσεων (Υ') που θα κάναμε για ένα απλό μοντέλο κατανομής Ε.Η.Α. (συνήθως είναι μοντέλο ομογενής Γής). Δηλαδή σε πρώτο στάδιο έχουμε επίλυση του ευθέως προβλήματος.Στη συνέχεια υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας (J) και γίνεται σύγκριση των μετρήσεων Φ.Ε.Α. που κάναμε στο ύπαιθρο και των «μετρήσεων» που υπολογίστηκαν από την επίλυση του ευθέως προβλήματος και υπολογίζεται η σύγκλιση τους (dy). Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της κατανομής της Ε.Η.Α. για τις βελτιωμένες μετρήσεις (dy), δηλαδή γίνεται η λύση του αντίστροφου προβλήματος. Όμως το σφάλμα προσέγγισης των μετήρσεων (Y) ,είναι ακόμα μεγάλο, οπότε η διαδικασία σύγκλισης επαναλμβάνεται μέχρι το σφάλμα προσέγγισης να φτάσει ένα αποδεχτό όριο. Κάθε φορά που το σφάλμα μειώνεται υπολογίεται ένα νέο μοντέλο κατανομής Ε.Η.Α. (dx)

3.2.3 Ευθύ πρόβλημα

Απαραίτητη προϋπόθεση επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος είναι η λύση του ευθέως. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμο να αναπτύξουμε μερικά λόγια για το ευθύ πρόβλημα.

Έστω ότι εισάγουμε ρεύμα έντασης, Ι, σε σημείο στο χώρο με συντεταγμένες Xs, Ys, Zs. Το ευθύ πρόβλημα είναι η επίλυση της ακόλουθης εξίσωσης. (Φικος 2010, σελ 34)

$$\nabla(\sigma(x, y, z)\nabla V(x, y, z)) = I\delta(\chi - \chi s)\delta(z - z s)$$
(3.4)

Η εξίσωση αυτή καθορίζει την κίνηση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα ανομοιογενές υλικό, για μια συγκεκριμένη κατανομή υπεδάφιων αντιστάσεων και διάταξη ηλεκτροδίων, **έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των διαφορών δυναμικού**. Εφόσον επιτευχθεί ο υπολογισμός των τιμών του δυναμικού, κατόπιν είναι εύκολος ο υπολογισμός των φαινόμενων αντιστάσεων πολλαπλασιάζοντας με τους αντίστοιχους γεωμετρικούς παράγοντες.

σ: Η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Είναι ένας τανυστής 2^{ης} τάξης που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ανισοτροπία της φυσικής αυτής ποσότητας.

Σελ 33 από 107

ΔV: Η διαφορά δυναμικού στα δύο σημεία. δ : η συνάρτηση Dirac, καθορίζει τη θέση της σημειακής πηγής έντασης Ι. xs,ys,zs : Οι συντεταγμένες του σημείου της πηγής στο χώρο.

Η επίλυση του ευθέως προβλήματος μπρορεί να γίνει είτε με αναλυτικό τρόπο είτε με αριθμητικό τρόπο.

Ο αναλυτικός τρόπος δίνει λύση για απλά μοντέλα όπως δύο κατακόρυφα ή οριζόντια στρώματα, ή μια σφαιρική δομή θαμμένη στο υπέδαφος. Με τον αριθμητικό τρόπο επιλύονται διαφορικές εξισώσεις, όπως η εξίσωση 3.4, οι οποίες καθορίζουν την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στην ανομοιογενή Γή. Με τον τρόπο αυτό προσεγγίζονται πολύπλοκα μοντέλα δομής του υπεδάφους, για να γίνει όμως αυτό απαιτείται διακριτοποίηση του προβλήματος ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του δυναμικού σε κάθε θέση του χώρου.

Σελ 34 από 107

4. Γεωηλεκτρική Χαρτογράφηση στην Πίστυρο

Κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων κατά τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση υλοποιείται στο έδαφος ένα κελί 20X20 τετραγωνικών μέτρων. Η δειγματοληψία των μετρήσεων γίνεται σε κάναβο, εντός του κελίου με βήμα 0.5m ή 1m ανάλογα με την επιθυμητή οριζόντια διακριτική ικανότητα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η δειγματοληψία ήταν ανά 1m. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων ήταν το RM-15 της εταιρείας Geoscan Reasearch (σχήμα 4.2).

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου. Η διάταξη αυτή προτιμάται λόγω της γρήγορης κάλυψης του χώρου, της εύκολης ερμηνείας των δεδομένων και της σχετικά καλής χωρικής διακριτικής ικανότητας. Για κάθε μέτρηση, όπως γίνεται και στις πλείστες διατάξεις, συμμετέχουν 4 ηλεκτρόδια. Το ένα ζέυγος ηλεκτροδίων καλούνται «σταθερά» ηλεκτρόδια και το άλλο «κινητά» ηλεκτρόδια. Το κάθε ζεύγος δεν αποτελείται από ομόλογα ηλεκτρόδια, όπως συμβαίνει στη διάταξη διπόλου-διπόλου, αλλά από ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού. Δηλαδή το σταθερό ζεύγος αποτελειται, συνήθως, από ένα θετικό πόλο ρέυματος και ένα θετικό πόλο δυναμικόυ. Αντίθετα το κινούμενο ζεύγος αποτελείται από ένα αρνητικό πόλο ρεύματος και ένα αρνητικό πόλο δυναμικού και απέχουν απόσταση (α). Τα σταθερά ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε μία θέση μακριά από το κάναβο η οποία πρακτικά θεωρείται άπειρη (>15α). Τα κινητά ηλεκτρόδια βρίσκονται επί του πλαισίου έχοντας μεταξύ τους απόσταση 0.5 μετρό και κινούνται βουστροφηδόν κατά μήκος οδεύσεων, συμφώνα με το βήμα δειγματοληψίας (0.5 ή 1m) και με διεύθυνση από βορά προς νότο και από νότο προς βορρά όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

Αφού τελειώσουμε τις μετρήσεις από το ένα κελί πάμε στο παρακείμενο, εφόσον το μήκος του καλωδίου το επιτρέπει. Αν όχι, τότε συνεχίζουμε αφού πρώτα ρυθμίσουμε τη στάθμη των μετρήσεων μεταξύ των δύο κελίων. Έτσι σε μια τυχαία θέση του συνολικού κανάβου, συνήθως στη θέση της πρώτης μέτρησης στο πρώτο κελί, σημειώνουμε την ένδειξη του οργάνου. Κρατώντας το όργανο στην ίδια θέση και μετακινώντας τα σταθερά, ώστε να φτάνει το όργανο στο νέο κελί, παρατηρούμε και πάλι την ένδειξη του οργάνου. Αν είναι μεγαλύτερη από τη προηγούμενη τότε κλείνουμε την απόσταση μεταξύ των σταθερών, αν είναι μικρότερη τότε την ανοίγουμε μέχρις ότου να φτάσει στην ίδια τιμή. Με αυτό τον τρόπο ρυθμίζουμε τη στάθμη. Αυτό γίνεται γιατί η κάθε μέτρηση εξαρτάται πολύ (είναι πολύ ευαίσθητη) από την αντίσταση στην τριγύρω των ηλεκτροδίων περιοχή. Ειδικά στην διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου, οι μετρήσεις εξαρτόνται πολύ από τη αντίσταση κοντά στα σταθερά ηλεκτόδια, αφού αυτά συμμετέχουν σε κάθε μέτρηση.

Οι παράμετροι μέτρησης που επιλέξαμε για τη γεωηλεκτρική χαρτογράφηση ήταν

απόσταση των ηλεκτροδίων (α) στο κινούμενο ζεύγος : 0.5m απόσταση των δύο ζευγών: > 15α βήμα δειγματοληψίας: 1m



Σχήμα : 4.1 : Λήψη μετρήσεων κατά την γεωφσική διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων. Ο χειριστής του οργάνου κινείται βουστροφηδόν κατά μήκος οδεύσεων, συμφώνα με το βήμα δειγματοληψίας και με διεύθυνση από βορρά προς νότο και από νότο προς βορρα (Tsokas et al. 2006).

Η χωρική διακριτική ικανότητα της διάταξης διδύμου ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα είναι 1α, όπου α η απόσταση των κινητών ηλεκτροδίων που βρίσκονται επί πλαισίου. Δηλαδή δομές που είναι μικρότερες ή που απέχουν περισσότερο από 1α δεν μπορούν να διακριθούν, ενώ το βάθος διασκόπησης της διάταξης είναι 1α-2α. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 10 mA και η συχνότητα του 137 Hz (http://www.geoscanresearch.co.uk/page15.html).



Σχήμα 4.2 : Το οργανο λήψης μετρήσεων RM-15 της εταιρείας Geoscan Research που χρησημοποιήθηκε.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης.

Σελ 37 από 107



Σχήμα 4.2 : Λήψη μετρήσεων με τη μέθοδο της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης παρακείμενα ανασκαφής που προηγήθηκε.

Σελ 38 από 107

4.1 Επεξεργασία Δεδομένων Γεωηλεκτρικής Χαρτογράφησης

Η επεξεργασία των δεδομένων της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης έγινε με το λογισμικό Geoplot της εταιρείας Geoscan Reserarch που σχεδιάστηκε αποκλειστικά για την ερμηνεία δεδομένων γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης. Το λογισμικό αυτό μας επιτρέπει να κάνουμε την επεξεργασία των δεδομένων σε διάφορα επίπεδα. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω η ερμηνεία των δεδομένων της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης είναι κατά κύριο λόγο ποιοτική και κατά δεύτερον ποσοτική. Δηλαδή δεν μας ενδιαφέρει τόσο να προσεγγίσουμε την ακριβή τιμή της Ε.Η.Α των δομών, αλλά να προσδιορίσουμε με όση περισσότερη ακρίβεια γίνεται τη θέση τους.

Τα βήματα επεξεργασίας που έγιναν είναι τα ακόλουθα

α) Εισαγωγή των δεδομένων που συλλέχθηκαν σε διάφορα κελία.

β) Απομάκρυνση των ασυνεχειών μεταξύ των κελίων (Edge Match).

γ) Εφαρμογή Φίλτρου Διέλευσης Υψηλών Κυμματαρίθμων (High Pass Filter).

δ) Παρεμβολή (Interpolation).

4.1.1 Εισαγωγή των πλεγμάτων στο λογισμικό Geoplot

Αρχικά εισάγουμε τα μεμονωμένα κελία (grids) ώστε να φτιάξουμε το ενιαίο πλέγμα(Master Grid). Η αντίστοιχη οθόνη του προγράμματος φαίνεται στο σχήμα 4.1.1

B . N	🗣 Master Grid File Names 🕘 c:\geoplot\mesh\archeo\MstGrd.plm							×		
	1	2	3	4	5	6	7	8		New
2	G34	G35								Open
4									-	Save As
6									-	Print
8 9										
10			_		_					<u>L</u> ancel
		+							2	
U	Save Master Grid in a directory with a common prefix or suffix. Use the Show Bias command button to add a bias to each grid and then reshow the grid names. Use the Create Composite command button to combine the grids into one file.							Save Master Grid in a directory with a name that matches the directory in which the grids are stored.		
	Quick Entry Show Bigs Create Composite X Add Bias									

Σχήμα 4.1.1 : Εισαγωγή των μεμονωμένων πλεγμάτων για την κατασκευή του ενιαίου πλέγματος (Master Grid).

Σελ 39 από 107

4.1.2 Απομάκρυνση των ασυνεχειών μεταξύ των πλεγμάτων(Edge Match)

Η διαδικασία αυτή, απομακρύνει τις ασυνέχειες μεταξύ δύο παρακειμένων πλεγμάτων. Οι ασυνέχειες αυτές μπορεί να οφείλονται στο γεγονός ότι τα κελία μετρήθηκαν διαφορετικές μέρες, οπότε αν οι μετρήσεις μερικών από αυτά λήφθηκαν σε μια μέρα με σχετικά υψηλότερη υγρασία εδάφους, από τη μέρα που λήφθησαν τα υπόλοιπα κελία, τα εδάφη των κελίων αυτών θα παρουσιάζουν μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση σε σχέση με τους διπλανά. Έτσι, με τη διαδικασία του Edge Match γίνεται ισοστάθμιση των κελίων.

Η διαδικασία αυτή στην ουσία, υπολογίζει τη μέση τιμή μεταξύ των δύο κελίων και την αφαιρεί από το ένα πλέγμα ώστε να επιτευχθεί μια ομαλότερη εικόνα (Geoplot Instruction Manual).

Στο σχήμα 4.1.2 απεικονίζεται η εισαγωγή των καταχωρήσεων κατά την εφαρμογής της διαδικασίας του Edge Match.

Edge Match	×					
Parameters <u>G</u> rid Number: Grid <u>E</u> dge:	4 Left					
<u>Reshow dialog box after process</u>						
<u>0</u> K	<u>C</u> ancel					

Σχήμα 4.1.2: Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων για τη διαδικασία Ισοστάθμισης. Προσαρμόζουμε το κελί που βρίσκεται αριστερά του κελιού που έχει το κωδικό όνομα «4» πάνω στις μετρήσεις του κελιού « 4^{ου} » κελιού. Το κελί «4» παραμένει σταθερό.

4.1.3 Εφαρμογή Φίλτρου Διέλευσης Υψηλών Κυμματαρίθμων(High Pass Filter)

Στην συνέχεια εφαρμόστηκε το φίλτρο διέλευσης υψηλών κυμματαριθμων. (High Pass Filter)

Το φίλτρο χρησημοποιείται για να απομακρύνει τις μεγάλης κλίμακας χωρικές πληροφορίες. Το High Pass Filter σαρώνει και πολλαπλασιάζει τα δεδομένα με ένα παραθυρικό (τεραγωνικό ή ορθογώνιο βάρος) που έιναι είτε γκαουσιανο (τυχαίο) είτε ομοιόμορφο και υπολογίζει το μέσο όρο των σταθμισμένων μετρήσεων (των μετρήσεων που έχουν πολλαπλασιαστεί μετο βάρος) εντός του παραθύρου και αφαιρεί αυτόν από τη κεντρική τιμή του παράθυρου και όλες οι άλλες τιμές παραμένουν αμετάβλητες. Η διαδικασία αυτή απαιτεί τρεις καταχωρήσεις τις ακτίνες X και Y του φίλτρου καθώς και το είδος του βάρος του φίλτρου, δηλαδή αν θα είναι γκαουσιανό ή ομοιόμορφο.

Εμείς χρησημοποιήσαμε ομοιόμορφο παραθυρικό φίλτρο 10Χ10.

4.1.4 Παρεμβολή (Interpolation)

Τέλος εφαρμόσαμε τη διαδικασία της παρεμβολής, η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για αυξήσει των αριθμών των δεδομένων. Αυξάνοντας τον αριθμό των δεδομένων, παίρνουμε μια ομαλότερη εικόνα της κατανομής της αντίστασης. Η διαδικασία παρεμβολής χρειάζεται τρείς καταχωρήσεις. Τη διεύθυνση (Direction) όπου θα λάβει χώρα η παρεμβολή, συνήθως κάνουμε αρχικά στην Χ διεύθυνση και μετέπειτα στην Υ. Τέλος επιλέγουμε τη μέθοδο με την όποια θα γίνει η παρεμβολή, δηλαδή αν θα χρησημοποιηθεί γραμμική ή ημιτονοειδής συνάρτηση(σχήμα 4.1.3).

Interpolation	×
Parameters <u>D</u> irection: <u>M</u> ethod: Mo <u>d</u> e:	Y SinX/X ▼ Expand ▼
<u>K</u>	Cancel

Σχήμα 4.1.3: Εισαγωγή των παραμέτρων για τη διαδικασία της παρεμβολής.

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι κάθε φορά που κάνουμε παρεμβολή διπλασιάζονται οι μετρήσεις σε κάθε κατέυθηνση. Δηλαδή αν έχουμε ένα κάναβο 20X20 m² με βήμα δειγματοληψίας m θα εχουμε 400 μετρήσεις. Αν τώρα εκτελέσουμε τη διαδικασία της παρεμβολης μια φορά σε κάθε κατέυθηνση τότε οι μετρήσεις θα γίνουν 40X40, δηλαδή οι «μετρήσεις» όλου του κανάβου είναι 1600! Πρέπει να προσέξουμε ότι, διπλασιάζονται οι μετρήσεις σε κάθε διεύθηνση και όχι οι μετρήσεις του κανάβου. Αυτό είναι σημαντικό, γιατί σε αρκετές διαδικασίες απαιτείται να καταχωρήσουμε τις συντεταγμένες κάθε πλέγματος και οι συντεταγμένες αυτές αναφέρονται στις μετρήσεις και όχι στις διαστάσεις του κανάβου.

Απότοκο των πιο πάνω διαδικασιών είναι η εικόνα του σχήματος 4.1.4 την οποία πρέπει να ερμηνεύσουμε.



Σχήμα 4.1.4 : Απεικόνιση των δεδομένων της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης.

Για την παρουσίαση των δεδομένων υπολογίζεται αρχικα η τυπική απόκλιση (Standard Deviation, SD). Η χρωματική κλίμακα έχει εύρος από λευκό ως μαύρο χρώμα. Όσες μετρήσεις είναι <u>μικρότερες</u> από τη μέση τιμή των μετρήσεων <u>κατά 3SD</u> <u>ή περισσότερο</u> απεικονίζονται με λευκό χρώμα. Όσες μετρήσεις είναι <u>μεγαλύτερες</u> <u>από το μέσο όρο κατά 3SD ή περισσότερο</u> απεικονίζονται με λευκό χρώμα. Όσες μετρήσεις είναι μεγαλύτερες <u>από το μέσο όρο κατά 3SD ή περισσότερο</u> απεικονίζονται με λευκό χρώμα. Όσες μετρήσεις είναι μεγαλύτερες <u>από το μέσο όρο κατά 3SD ή περισσότερο</u> απεικονίζονται με τολιάμεσες τιμές, δηλαδή με τιμές από (-3SD έως +3SD απεικονίζονται με τόνους του τεφρού χρώματος, σκουρότερες όσο μεταβαίνουμε σε ψηλότερες τιμές.

4.2 Ερμηνεία Δεδομένων Γεωηλεκτρικής Χαρτογράφησης

Κατά την αρχαιομετρία πιθανοί στόχοι αποτελούν αρχιτεκτονικές δομές όπως τοίχοι και θεμέλια των σπιτιών, δάπεδα ή άλλες συμπιεσμένες δομές που μπορεί είτε να παρουσιάζουν χαμηλό πορώδες είτε το πορώδες τους να φιλοξενεί υγρασία, με αποτέλεσμα να ανταποκρίνονται με ισχυρό ή αδύνατο σήμα αντίστοιχα.

Επίσης στόχοι μπορούν να αποτελέσουν τάφοι πληρωμένοι με εδαφικό ή οργανικό υλικό με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ισχυρό ή αδύνατο σήμα αντίστοιχα.

Σελ 42 από 107



Σχήμα 4.1.5: Τοποθέτηση του πλεγματος των κανάβων πάνω στα δεδομένα της γεωηλέκτρικής χαρτγογράφησης.

Στο κελί 6-2, παρατηρούμε μια στρογγυλή δομή, λόγω της κανονικότητας του σχήματος υποθέτουμε ότι είναι μια ανθρωπογενής δομή, στην περιοχή δεν υπάρχουν αγωγοί ή δομές αστικού δικτύου οπότε παρουσιάζει ισχυρή πιθανότητα να πρόκειται για μια αρχαιολογική δομή. Επίσης πιο κάτω παρουσιάζονται διαγώνιες γραμμώσεις με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ που και αυτές παρουσιάζουν μια κανονικότητα. Οι γραμμώσεις αυτές παρουσιάζονται με θετικές ανωμαλίες Φ.Ε.Α.

Τόσο η στρογγυλή δομή όσο και οι διαγώνιες γραμμώσεις είναι ανωμαλίες που αντανακλούν πιθανά σε λείψανα αρχαιοτήτων. Από το σχήμα τους, που έχει καθαρά γεωμετρικό χαρακτήρα, συνάγεται ότι πρόκειται μάλλον για τις θεμελειώσεις των κτισμάτων του αρχαίου εμπορείου.

5. Ηλεκτρικές Τομογραφίες στην Πίστυρο

Στις θέσεις, όπου με τη μέθοδο της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης παρουσίασαν θετικές ανωμαλίες και θεωρήσαμε ως πιθανές αρχαιολογικών δομές, έγινε μεταγενέστερα για λεπτομερέστερη ανάλυση, έρευνα με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η μέθοδος της ΗΤ εφαρμόστηκε επίσης για να προσδώσει και την ποσοτική οπτική των ανωμαλιών, δηλαδή να αναδείξει την πραγματική Ε.Η.Α. που αυτές παρουσιάζουν. Πιο συγκεκριμένα έλαβαν χώρα 32 τομογραφίες στη περιοχή των κελίων 7-3 και 8-3, της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης, με διέυθηνση Β-Ν όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Το όργανο που χρησημοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων ήταν το SYSCAL-PRO της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS (σχήμα5.1.1).



Σχήμα 5.1 : Οι 32 Τομογραφίες που έγιναν για λεπτομερέστερη ανάλυση της θέσης όπου πιαθνόν να υπάρχουν αρχαιότητες.

Σελ 44 από 107

5.1 Επιλογή παραμέτρων μέτρησης

Η επιλογή των παραμέτρων μέτρησης σε μια **τομογραφία** καθορίζεται από τη γεωμορφολογία, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών, το επιθυμητό βάθος έρευνας και την οριζόντια διακριτική ικανότητα. Στη περίπτωση μας η περιοχή δομείται από αργιλοαμμώδη ιζήματα και το επιθυμητό βάθος διασκόπισης ήταν 5 m. Επιπρόσθετα μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα οι πλευρικές μεταβολές της αντίστασης.

Στον πίνακα 5.ΙΙ φαίνεται η αξιολόγηση που έκανε ο Ward (1990) για τις διατάξεις Wenner, Schlumberger, Διπόλου-Διπόλου και Πόλου-Διπόλου, όσον αφορά τα δύο κυριότερα χαρακτηριστικά των διατάξεων, το βάθος διείσδυσης το οποίο εξαρτάται από το λόγο σήματος προς θόρυβο και την ακρίβεια ως προς τις πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές της αντίστασης (Κρουσταλλάκη, 2009).

Διάταξη	Λόγος S/N	Πλευρικές αλλαγές	Κατακόρυφες αλλαγές
Wenner	1	5	1
Shclumberger	2	4	1
Διπόλου-Διπόλου	5	2	2
Πόλου Διπόλου	4	3	2
	1: Πολύ Καλή	5: πολύ κακή	

Πίνακας 5.II : Η αξιολόγηση των τεσσάρων βασικότερων διατάξεων όσον αφορά το λόγο σήματος προς θόρυβο και τις διακριτική ικανότητα στις πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές. (Ward 1990)

Βλέπουμε ότι η διάταξη διπόλου-διπόλου παρουσιάζει την καλύτερη οριζόντια διακριτική ικανότητα και αρκετά καλή κατακόρυφη, ενώ ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι φτωχός. Παρόλα αυτά δεδομένου ότι οι αρχαιολογικές δομές είναι σε σχετικά μικρό βάθος, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι με χρήση κατάλληλων παραμέτρων διάταξης (απόσταση ηλεκτροδίων, ένταση ρεύματος) το βάθος διακοπησης μπορεί να αυξηθεί ώστε η διάταξη αυτή να μας δώσει πολύ καλά αποτελέσματα. Έτσι επιλέχθηκε η διάταξη αυτή για τη λήψη μετρήσεων. Με τις εξής παραμέτρους:

Σελ 45 από 107

Κεφάλαιο 5 Ηλεκτρικές Τομογραφίες στην Πίστυρο

- Απόσταση ηλεκτροδίων (α): 1m
- Αποστάσεις διπόλου ρεύματος-διπόλου δυναμικού (n*α), (n*2α) με μέγιστο n= 8.



Σχήμα 5.1.1 Το γεωηλεκτρικό όργανο SYSCAL-PRO της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων με τη μέθοδο ΗΤ.

Αφού λήφθηκαν οι μετρήσεις ακολούθησε η επεξεργασία και η αντιστροφή των δεδομένων, με τη χρήση του αλγόριθμου DC_2Dpro (Jumg-Ho Kim. DC_2DPro Geoelectric Imaging Laboratory Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2007). Πιο κάτω παρουσιάζονται οι πρώτες δύο τομογραφίες που πρόκυψαν από τη διαδικασία της αντιστροφής. Οι υπόλοιπες τομογραφίες παρουσιάζονται στο παράρτημα στο τέλος του βιβλίου.

1^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία



2^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία



Σχήμα 5.1.2 : Οι πρώτες δύο τομογραφίες που λήφθηκαν στο κελί 7.3, για λεπτομερέστερη ανάλυση και προσδιορισμό της Ε.Η.Α. των ανωμαλίων που θεωρήθηκαν ως πιθανές αρχαιολογίκες δομές κατά την γεωηλεκτρική χαρτογράφηση.

5.2 Ερμηνεία Τομογραφιών

Σε όλες τις τομογραφίες, με εξαιρεση τις τομογραφίες από τη 11^η -15^η, βλέπουμε ότι σε ένα πάχος με οροφή λίγο πριν το 1m βάθος και βάση μέχρι τα 2m περίπου, να εμφανίζονται υψηλές αντιστάσεις σε διάφορες θέσεις. Επίσης υψηλές αντιστάσεις εμφανίζονται από τα 4m έως τα 5m βάθος. Επιφανειακά καταγράφονται χαμηλές τιμες Ε.Η.Α. Δεδομένου ότι οι αρχαιολογικές δομές που αναμένουμε, στη περιοχή έρευνας (λείψανα οικοδομημάτων και θεμελειώσεων) παράγουν θετικές ανωμαλίες, ενδέχεται οι πιο πάνω θέσεις υψηλών αντιστάσεων να είναι απόκριση αυτών

Από τη 11^η μεχρι τη 15^η τομογραφια, οι υψηλες αντιστάσεις παρουσιάζονται επιφανειακά ενώ η ζώνωση στα 1-2m βάθος πλεον δεν υπάρχει, ομώς παρουσιάζονται διασκορπισμένες ανωμαλίες υψηλών αντιστάσεων, στο βάθος αυτό.

Στη 16^η τομογραφία και μετέπειτα η ζώνωση ψηλών αντιστάσεων, στα 1-2 μετρα βάθος, επανεμφανιζεται ενώ η επιφανειακα η εκταση των ψηλων αντιστασέων που είχε παρατηρηθει στις τομογραφιές 11 - 15 μειωνεται.

Στην 24ⁿ τομογρφια, οι υψηλές αντιστασείς μετατοπίζονται και παλι ρηχοτερα, αλλα αυτή τη φορά όχι επιφανειακά αλλα στα βάθη 0.5 με 1m βάθος, ενώ αρχίζει να σχηματίζεται μια στρωμάτωση με ψηλές και χαμηλές τιμες Ε.Η.Α

Από την 25^η Τομογραφια και εντονότερα στη 28^η, παραηρειται μια σαφης διαστρωμάτωση με σχετικά υψηλές αντιστάσεις προς τα πάνω (1-2m), μικρότερες στο ενδιάμεσο και ξανά υψηλές αντιστάσεις στα 4-5m βάθος.

Σαφέστερα όμως συμπεράσματα θα προκύψουν από την τρισδιάστατη αντιστροφή καθώς θα δουμε τη συνέχεια των Ε.Η.Α στο χώρο.

5.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση

Μετα την αντιστροφή των τομογαφιών και την απεικόνιση της δισδυάστατης κατανομής της Ε.Η.Α ακολούθησε η τρισδιάστατη αντιστροφή και απεικόνιση της Ε.Η.Α. στο χώρο. Η διαδικασία αυτή **δεν** έγινε με παρεμβολή των δεδομένων των τομογραφιών, αλλα με πλήρη τρισδιάστατη αντιστροφή βασισμένη στην μεθοδο ελαχίστων τετραγώνων σε αντιθεση με τη δισδιάστατη αντιστροφή που έγινε με μέθοδο εξομαλυμένης αντιστροφής. Το λογισιμικό πορυ χρησημοποιήθηκε για την τρισδιάστατη αντιστροφή δ. *Θ*

Τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης αντιστροφής απεικονιστηκαν με τη χρήση του προγραμμάτος Surfer 11 (Golden Software, Colorado, 1993-2012) και φαίνονται στο σχήμα 5.3.1.

Σελ 48 από 107



Σχήμα 5.3.1 : Η απεικόνιση των δεδομένων της τρισδιάστατης αντιστροφής σε οριζοντιογραφίες, για τα βάθη των 0.2m, 0.5m, 1.0m 1.5m και 2m. (Tsourlos 2016)

5.3.1 Ερμηνεία Τρισδιάστατης Αντιστροφής

Οι αρχαιολογικές δομές που ενδέχεται να βρούμε στον αρχαιολογικό χώρο της Πιστύρου αναμένεται να παράξουν θετικές ανωμαλίες, δηλαδή ψηλές τιμες Φ.Ε.Α. Ετσι το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται σε ψηλές τιμές Ε.Η.Α. που συνεχίζονται με το βάθος.

Στη περίπτωση μας, τέτοιες δομές, παρατηρούνται κατά μήκος περίπου της 14^{ης} με 15^{ης} τομογραφίας (13m-14m). Οι ψηλές αυτές αντιστάσεις φιανονται να συνεχίζουν μέχρι το βάθος του 1m.

Άλλη μια παρατήρηση είναι ότι στις πρώτες 10 τομογραφίες(Χ-άξονας), στα πρώτα 1-2 μετρα (Υ-άξονας), δηλαδή στη κάτω αριστερή γωνία των οριζοντιογρφιών, στα βάθη 0.5m–2m παρατηρούνται υψηλές αντιστάσεις που διευρίνονται με το βάθος.

Σελ 49 από 107

Ξεκινώντας από μερικά εκατοστά εκταση στο βάθος των 0.5m, φθάνοντας τα 2.5m στο βάθος των 2m. Μεχρι τα 2m βάθος παρουσιάζονται εντονότερα πράμα που σημαίνει ότι η δομή, που προκαλέι αυτές τις ανωμαλίες, ίσως να είναι και λίγο βαθύτερα.

Η κυρίως ομώς ανωμαλία παρατηρείται καταμήκος της 18ⁿ – 30^{nς} τομογραφίας (17-29m καταμήκος του Χ-άξονα). Παρατηρείται στις οριζοντιογραφίες βάθους 0.2-1m ενώ αχνοφαίνεται και στην οριζοντιογραφία των 1.5m. Εντονότερα παρουσιάζονται την τομογραφία των 0.5m. Αρα η πιθανή δομη θα ξεκινά λιγο πριν ή λιγο μετά το βάθος του 0.5m και θα συνεχίζεται μέχρι λίγο μετά το 1m.

Σελ 50 από 107

6. Προσομοιώματα-Επίλυση του Ευθέως Προβλήματος

Για να δούμε την απόκριση που θα πέρναμε σε διάφορες συνθήκες κατασκευάσαμε διάφορα προσομοιώματα κατανομής αντίστασης και με την επίλυσης του ευθέως προβλήματος, προσπαθήσαμε (για δεδομένη κατανομή αντίστασης) να υπολογίσουμε τις μετρήσεις που θα κάναμε για συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων.

Έτσι κατασκευάσουμε τα ακόλουθα προσομοιώματα κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στο χώρο με τη χρήση του προγράμματος DC3_dpro. Κατόπιν με τη βοήθεια του αλγόριθμου DC3_dinv2 υπολογίσαμε τις μετρήσεις που θα κάναμε χρησιμοποιώντας τη διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου.(Επίλυση ευθέως προβλήματος)

Έτσι κατασκευάστηκαν τα προσομοιώματα 1 έως 9 όπως φαίνονται στο σχήμα 6.1 Το προσομοίωμα 1 απεικονίζει δύο κολώνες που έπεσαν οριζόντια και κατόπιν θάφτηκαν. Το προσομοίωμα 3 απεικονίζει τα λείψανα των τοίχων ενός οικοδομήματος, το προσομοίωμα 4 ένα αλώνι, ενώ στο προσομοίωμα 5 απεικονίζονται οι τοίχοι δυο οικοδομημάτων που είναι σε επαφή.

Στα προσομοιώματα 6, 7 και 8 υπάρχουν λέιψανα διαφορετικών περιόδων με αποτέλεσμα αυτά να βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα. Πιο συγκεκριμμένα. Στο προσομοίωμα 6 υπάρχουν δύο κολώνες, παρόμοια με το προσομοίωμα 1, όμως σε αυτό υπάρχει και μια τρίτη κολώνα παλαιότερης περιόδου, τοποθετημένης κάθετα στις άλλες δύο. Στο προσομοίωμα 7 περιέχει και αυτό δυο αρχαία λείψανα διαφορετικών περιόδων. Πρόκειται για δύο πανομοιότυπες στέγες ή δάπεδα σπιτιών που βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη. Στο προσομοίωμα 8 απεικονίζονται δύο τοίχοι σπιτιών επίσης διαφορετικής περιόδου. Στο προσομοίωμα 9 παρουσιάζονται δύο αρχαιολογικές δομές. Η πρώτη μορφής (T) και η δέυτερη μορφής τρίαινας.

Κεφάλαιο 6 Προσομοιώματα-Επίλυση Ευθέως Προβλήματος



Σχήμα 6.1: Απεικόνιση των δομών για τα προσομοιώματα 1-9.

Σελ 51 από 107

Στα Προσομοιώματα 1-9 το ένα δίπολο της διάταξης θεωρείται ότι βρίσκεται σταθερά στις θέσεις 0,0. Τα ηλεκτρόδια αυτά, όπως αναφέραμε πιο πάνω καλούνται σταθερά ηλεκτρόδια ενώ το άλλο δίπολο κινείται κατά μήκος των οδεύσεων και καλούνται κινητά ηλεκτρόδια. Κάθε ένα Προσομοίωμα από τα πιο πάνω χωρίζεται σε δύο ανάλογα με το βάθος που είναι θαμμένες οι δομές. Δηλαδή για κάθε Προσομοίωμα, φτίαξαμε ακόμη ένα πανομοιότυπο "κατεβάζοντας" τώρα τις δομές 0.25m βαθύτερα. Οπότε έχουμε το «Προσομοίωμα 1 βάθος Α'» και το «Προσομοίωμα 1 βάθος Β'».

Στα προσομοιώματα 1,2,3,4 και 5 υπάρχει μόνο μια δομή και αν μπορούσαμε να τα δούμε σαν στωματογραφική στήλη, δηλαδή στο επίπεδο X-Z ή Y-Z θα ήταν, σκαριφηματικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2 για «Βάθος Α΄» και στο σχήμα 6.3 για «Βάθος Β΄".

Και στις δύο περιπτώσεις(«Βαθος Α΄» και «Βάθος Β΄») το πάχος της δομής είναι το ίδιο και είναι ίσο με 0.5m. Όσον αφορά τα προσομοιώματα αυτά, στο «**Βάθος Α΄»** οι δομές είναι θαμμένες από τα 0.25m μέχρι τα 0.75m ενώ στο **«βάθος Β΄»** οι δομές είναι θαμμένες από τα 0.5m μέχρι τα 1.0m. Οι κάναβοι είναι διαστάσεων 10Χ10 τετραγωνικών μέτρων και το βήμα δειγματοληψίας είναι ανά 0.5m



Σχήμα 6.2.: Μια δομή για την περίπτωση «βάθος Α΄» (Προσομοιώματα 1,2,3,4 και 5 για βάθος Α΄).

Στα προσομοιώματα 6,7 και 8 υπάρχουν δύο δομές, σε διαφορετικά βάθη **όπως** φαίνεται στο σχήμα 6.4. Στα προσομοιώματα αυτά <u>οι βαθύτερες δομές</u> βρίσκονται σε βάθος 0.75m με 1.25m όταν αναφερόμαστε στο «Βάθος Α΄» και σε βάθος 1m έως 1.5m όταν αναφερόμαστε στο «Βάθος Β΄», όπως φαίνονται στα σχήματα 6.4 και 6.5. Οι ρηχότερες δομές βρίσκονται κανονικά, όπως ίσχυε και στα προηγούμενα

Σελ 52 από 107

ρροσομοιώματα, σε βάθη 0.25-0.75m και 0.5-1m για τα βάθος Α΄και βάθος Β΄αντίστοιχα.



Σχήμα 6.3 : Μια δομή για την περίπτωση «βάθος Β'» (Προσομοιώματα 1,2,3,4 και 5 για βάθος Β').



Σχήμα 6.4: Δύο δομές για τη περίπτωση βάθος Α΄ (Προσομοιώματα 6,7,8 «βάθος Α΄»).

Κεφάλαιο 6 Προσομοιώματα-Επίλυση Ευθέως Προβλήματος



Σχήμα 6.5.: Δύο δομές για βάθος Β΄ (Προσομοιώματα 6,7,8 βάθος Β΄).

Σε όλα τα πιο πάνω εξαίρεση αποτελεί το Προσομοίωμα 9 στο οποίο οι δύο δομές έχουν πάχος 0.25m αντί 0.5m και εκττείνονται από 0.25m-0.5m και 0.5-0.75 στο "Βάθος Α΄" και από 0.5m-0.75m και 0.75-1.0m στο "Βάθος Β΄", λεπτομερέστερα όμως για το Προσομοίωμα αυτό θα αναφερθούμε σε επόμενο στάδιο.

Έτσι για δοθείση κατανομή αντίστασης και συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων, επιχειρήθηκε με το πρόγραμμα DC_3Dpro, να βρεθούν οι μετρήσεις που θα κάναμε σε κάθε περίπτωση.

Στα σχήματα 6.1.1 εως 6.1.9 βλέπουμε τις εικόνες που πρόκυψαν από τη διαδικασία της επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων (παρόμοιες με την εξίσωση 3.4.) για τα Προσομοιώματα 1-9. Η Ε.Η.Α. του ημιχώρου είναι 30hm.m ενώ η Ε.Η.Α. των δομών είναι 500 Ohm·m

6.1 Απόκριση Προσομοιωμάτων Προσομοίωμα 1



Σχήμα 6.1.1 : Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το προσομοίωμα 1. **Αριστερά για βάθος** δομών 0.25-0.75m και δεξιά για βάθος δομών 0.5-1.0m. Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 55 από 107



Σχήμα 6.1.2: Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το προσομοίωμα 2. **Αριστερά για βάθος** δομών 0.25-0.75m και δεξιά για βάθος δομών 0.5-1.0m. Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 56 από 107



Σχήμα 6.1.3 : Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το προσομοίωμα 3. **Αριστερά για βάθος δομών 0.25-0.75m και δεξιά για βάθος δομών 0.5-1.0m.** Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 57 από 107



Σχήμα 6.1.4 : Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το προσομοίωμα 4. **Αριστερά για βάθος** δομών 0.25-0.75m και δεξιά για βάθος δομών 0.5-1.0m. Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 58 από 107



Σχήμα 6.1.5 : Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το Προσομοίωμα 5. **Αριστερά για βάθος** δομών 0.25-0.75m και δεξιά για βάθος δομών 0.5-1.0m. Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 59 από 107



Σχήμα 6.1.6 : Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το προσομοίωμα 6. Στο Προσομοίωμα αυτό οι δομές βρίσκονται σε δύο επίπεδα. Στο <u>Προσομοίωμα 6 Βάθος Α΄</u> (αριστερή στήλη) δύο κολώνες βρίσκονται σε βάθος 0.25-0.75m ενώ μια τρίτη βρίσκεται κάθετα σε αυτές σε βάθος 0.75-1.25m.Ενώ στο <u>Προσομοίωμα 6 Βάθος Β΄ (δ</u>εξιά στήλη) δυο κολώνες βρίσκονται σε βάθος 0.5-1.0m και η κάθετη σε αυτές σε βάθος 1.0-1.5m. Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων, Ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 60 από 107
Προσομοίωμα 7



Σχήμα 6.1.7: Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το Προσομοίωμα 7. Στο Προσομοίωμα αυτό οι δομές βρίσκονται σε δύο επίπεδα. Στο <u>Προσομοίωμα 7 Βάθος Α΄</u> (αριστερή στήλη) ένα δάπεδο βρίσκεται σε βάθος 0.25-0.75m ενώ ένα δεύτερο δάπεδο βρίσκεται σε βάθος 0.75-1.25m παρακείμενα στο πρώτο. Στο <u>Προσομοίωμα 7 Βάθος Β΄</u>(δεξιά στήλη) τα δύο δάπεδα βρίσκονταισε βάθος 0.5-1.0m και 1.0-1.5m. Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 61 από 107

Προσομοίωμα 8



Σχήμα 6.1.8: Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το Προσομοίωμα 8. Στο Προσομοίωμα αυτό οι δομές βρίσκονται σε δύο επίπεδα. Στο <u>Προσομοίωμα 8 Βάθος Α΄</u> (αριστερή στήλη) παρουσιάζονται τα περιτοιχίσματα δύο σπιτιίων διαφορετικών περιόδων. Το πρώτο βρίσκεται σε βάθος 0.25-0.75m ενώ ένα δεύτερο σε βάθος 0.75-1.25m. Στο <u>Προσομοίωμα 8</u> <u>Βάθος Β΄</u>(δεξιά στήλη) τα δύο περιτοιχίσματα βρίσκονταισε βάθος 0.5-1.0m και 1.0-1.5m. Στο σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των

Σελ 62 από 107

δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.)

Προσομοίωμα 9

Το προσομοίωμα 9 δομείται και αυτό από δύο σώματα. Πρόκειται για δύο δομές πάχους 0.25m έκαστη εν αντιθέση με τα προηγούμενα προσομοιώματα όπου το πάχος των δομών ήταν 0.5m. Η πρώτη δομή είναι μορφής τρίαινας και βρίσκεται 0.25m ρηχότερα από τη δεύτερη δομή μορφής (T).

Στη πρώτη περίπτωση, δηλαδή **στο "Βάθος Α' "** η δομή (Τ) εκτείνεται από τα 0.25m μέχρι τα 0.5m, ενώ η δομή τρίαινας από τα 0.5 έως το 0.75m

Στο "Βάθος Β΄ "η δομή (Τ) εκτείνεται από τα μέχρι 0.5 έως 0.75m, ενώ η δομή τρίαινας βρίσκεται ένα στρώμα πιο κάτω δηλαδή από τα 0.75 έως 1 m.

Πιο κάτω φαίνονται οι εικόνες από την διαδικασία επίλυσης του ευθέως προβλήματος όπως προκύψαν από τον αλγόριθμο DC_3Dinv2. Αριστερά απεικονίζεται το "βάθος Α΄", ενώ δεξιά το "βάθος Β΄". Κάτω τα αντίστοιχα δεδομένα με τη πρσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Στο μονέλο αυτό εφαρμόσαμε κάτι που δεν κάναμε στα προηγούμενα Προσομοιώματα. Ανάγαμε τα δύο Προσομοιώματα (Βάθος Α΄ και Βάθος Β΄) στην ίδια ανώτερη τιμή, αφαιρώντας τους τη στάθμη, τη χαμηλότερη δηλαδή τιμη Φ.Ε.Α (30 Ohm·m), όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.10. Αυτό, σκοπό είχε να τονιστούν οι διαφορές για τα δύο βάθη και να δούμε ποιο δίνει πιο ευδιάκριτα αποτελέσματα.



Προσομοίωμα 9

Σχήμα 6.1.9 : Στο πίο πάνω σχήμα διακρίνεται το Προσομοίωμα 9. Στο Προσομοίωμα αυτό οι δομές βρίσκονται σε δύο επίπεδα. Στο <u>Προσομοίωμα 9 Βάθος Α΄</u> (αριστερή στήλη) η δομή μορφής (Τ) βρίσκεται σε βάθος 0.25-0.5m ενώ η δομή μορφής τρίαινας βρίσκεται σε βάθος 0.75-1.0m. Στο <u>Προσομοίωμα 9 Βάθος Β΄</u>[δεξιά στήλη)) η δομή μορφής (Τ) βρίσκεται σε βάθος 0.5-0.75m ενώ η δομή μορφής τρίαινας βρίσκεται σε 0.75-1.0m. Στα σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 64 από 107



Σταθμισμένο Προσομοίωμα 9

Σχήμα 6.1.10 : Για τα πιο πάνω Προσομοιώματα φέραμε και τη στάθμη, δηλαδή αφαιρέσαμε τη χαμηλότερη τιμή Ε.Η.Α. και τα ανάγαμε όλα σε μια ανώτερη τιμή. Έτσι τώρα μπορούμε να δούμε καλύτερα ποιο από όλα τα Προσομοιώματα φαίνεται καλύτερα. Παρατηρούμε ότι στο πρώτο Προσομοίωμα φαίνονται καλύτερα αφού βρίσκεται και πιο ρηχά. Στα σχήματα (α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου 3%.

Σελ 65 από 107

Κεφάλαιο 6 Προσομοιώματα-Επίλυση Ευθέως Προβλήματος

Στο πιο κάτω πίνακα γίνεται σύγκριση των προσομοιωμάτων για τα δύο βάθη καταγράφοντας την ανώτερη και κατώτερη τιμή τους καθώς και τη διαφορά τους (εύρος).

Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
1	Α	30	48	18
	В	30	37	7
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
2	Α	30	69	39
	В	30	46	16
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
3	Α	30	39.7	9.7
	В	30	33.8	3.8
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
4	Α	30	66.5	36.5
	В	30	44	14
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
5	Α	30	69.7	39.7
	В	30	50	20

Σελ 66 από 107

Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
6	A	30	50.5	20.5
	В	30	38.8	8.8
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
7	A	30	41.5	11.5
	В	30	34.5	4.5
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
8	A	30	40.5	10.5
	В	30	34	4
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Έυρος
9	A'	30	46.7	16.7
	Β'	30	38	8

Πίνακας 6.Ι : Σύγκριση των προσομοιωμάτων για τα βάθη Α΄ και Β΄. Καταγράφεται η στάθμη η ανώτερη τιμή καθως και το εύρος κάθε προσομοιώματος.

Παρατηρούμε, ότι η στάθμη (χαμηλότερη τιμή) και για τα δύο βάθη παραμένει πρακτικά σταθερή και ίση με 30 Ohm·m αυτό που μεταβάλλεται είναι η ανώτερη τιμή και παίζει καταλύτικό ρόλο στο εύρος των Φ.Ε.Α. που καταγράφονται. Παρατηρούμε ότι για όλα τα Προσομοιώματα στο "βάθος Β΄"υπάρχεί μείωση της ανώτερης τιμής Φ.Ε.Α. (και κατεπέκταση ανάλογη μείωση του εύρους) και αυτό είναι αναμενόμενο αφού όσο πιο βάθια βρίσκεται μια δομή τόσο αχνότερα Σελ 67 από 107 «φαίνεται. Συνοψίζοντας, μπορουμε να πούμε ότι παρατηρείται μια μείωση του δυναμικού εύρους των Φ.Ε.Α που οφείλεται αποκλειστικά στη μέιωση της ανώτερης μετρώμενης τιμής αφού, η στάθμη παραμένει ουσιαστικά σταθερή.

Άξιο προσοχής είναι το ότι στο Προσομοίωμα 9 αν και η δομή (Τ) βρίσκεται ρηχότερα από την δομή μορφής τρίαινας, εντούτοις φαίνεται αχνότερα. Από εδώ εξάγεται το συμπέρασμά ή καλύτερα η επαλήθευση, ότι για το πόσο έντονα ή αχνότερα φαίνεται μια δομή, καταλυτικό ρόλο, δεν έχει μόνο το βάθος της αλλά και ο όγκος της.

6.3 Σύνθετα Προσομοιώματα

Με σκοπό να μελετήσουμε την απόκριση που θα υπάρξει στις μετρήσεις αν πάνω από τις δομές ενδιαφέροντος μας υπάρχει ένα αντιστατικό σώμα μικρού πάχους κατασεκευάστηκαν άλλα τρία προσομοιώματα, πρόκειται για τα Προσομοιώματα Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 καθώς και το Προσομοίωμα Επιφανειακής Δομής. Στα προσομοιώματα αυτά τα σταθερά ηλεκτρόδια θεωρείται ότι βρίσκονται στη θέση 0,0 όπως και στα προηγούμενα προσομοιώματα.

Στο Προσομοίωμα Χαλίκια 1 σε βάθος 0.1m εώς 0.2m υπάρχουν χαλίκια, που καλύπτουν όλο το μήκος της τομή, Ε.Η.Α. 500 Ohm·m. Αμέσως πιο κάτω βρίσκεται μια αρχαιολογική δομή ίδιας Ε.Η.Α και εκτείνεται σε βάθος 0.2m εώς 0.7m (σχήμα 6.3.1).



Σχήμα 6.3.1: Η διατομή του Προσομιώματος Χαλίκια 1 για το «βάθος Α' ». Σε πάχος 0.1m-0.2 υπάρχουν χαλίκια αντίστασης 500 Ohm·m και πίο κάτω σε βάθος 0.2-0.7m βρίσκονται οι αρχαιολογικές δομές αντίστασης 500 Ohm·m επίσης.

Ενώ στο Προσομοίωμα Χαλίκια 2 σε βάθος 0.1m εώς 0.3m (μεγαλύτερο πάχος κατα 0.1m σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο) υπάρχουν χαλίκια, που καλύπτουν όλο το μήκος της τομής, Ε.Η.Α. 500 Ohm·m. Αμέσως πιο κάτω βρίσκεται μια αρχαιολογική δομή ίδιας Ε.Η.Α και εκτείνεται σε βάθος 0.3m εώς 0.8m (σχήμα 6.3.2).

Κεφάλαιο 6 Προσομοιώματα-Επίλυση Ευθέως Προβλήματος



Σχήμα 6.3.2: Η διατομή του Προσομιώματος Χαλίκια 2 για το «βάθος Α΄». Σε πάχος 0.1m-0.3 υπάρχουν χαλίκια αντίστασης 500 Ohm·m και πίο κάτω σε βάθος 0.3-0.8m βρίσκονται οι αρχαιολογικές δομές αντίστασης 500 Ohm·m επίσης.

Τα δύο αυτά προσομοιώματα όπως και όλα τα προηγούμενα υποδιαιρούνται σε δύο αλλά για «βάθος Α΄» και «βάθος Β΄».

Στο προσομοίωμα Χαλίκια 1 για <u>«βάθος Β΄»</u> οι αρχαιολογικές δομές είναι θαμένες σε βάθος 0.5m εώς 1.0m, ενώ τα χαλίκια όπως και πριν βρίσκονται σε βάθος 0.1m-0.2m (σχήμα 6.3.3).



Σχήμα 6.3.3: Η διατομή του Προσομιώματος Χαλίκια 1 για το «βάθος Β΄». Σε πάχος 0.1m-0.2 υπάρχουν χαλίκια αντίστασης 500 Ohm·m και πίο κάτω σε βάθος 0.5-1.0m βρίσκονται οι αρχαιολογικές δομές αντίστασης 500 Ohm·m επίσης.

Στο προσομοίωμα Χαλίκια 2 για <u>«βάθος Β΄»</u> οι αρχαιολογικές δομές είναι θαμένες σε βάθος 0.6 m εώς 1.1m, ενώ τα χαλίκια όπως το αντίστοιχο προσομοίωμα για «βάθος Α» εκτείνονται από το βάθος των 0.1m μέχρι το βάθος των 0.3m (σχήμα 6.3.4).



Σχήμα 6.3.4 : Η διατομή του Προσομιώματος Χαλίκια 2 για το «βάθος Β΄». Σε πάχος 0.1m-0.3 υπάρχουν χαλίκια αντίστασης 500 Ohm·m και πίο κάτω σε βάθος 0.6-1.1m βρίσκονται οι αρχαιολογικές δομές αντίστασης 500 Ohm·m επίσης.

Σελ 69 από 107

6.3.1 Προσομοιώματα Χαλικια 1 και Χαλίκια 2

Στις εικόνες 6.3.1.1 και 6.3.1.2 παρουσιάζονται οι εικόνες που πρόκυψαν από την επίλυση τουευ θεώς προβλήματος για τα Προσομοιώματα Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 για το «βάθος Α' » και «βάθος Β'» αντίστοιχα.



Προσομοίωμα Χαλίκια 1 και Προσομοίωμα Χαλίκια 2 για το βάθος Α΄

Σχήμα 6.3.1.1: Οι εικόνες που προκύψαν από την επιλύση των διαφορικών εξισώσεων του ευθέως προβλήματος του αλγόριθμου DC_3DPro. Και στα δύο Προσομοιώματα οι δομές έχουν παχος 0.5m. Στο πρώτο εκτείνονται από 0.2-0.7m ενώ στο δεύτερο από 0.3-0.8m. **Η** κύρια διαφορά όμως έγκειται στο ότι το πάχος των χαλικίων στο Προσομοίωμα Χαλίκια 1 είναι 0.1m (0.1-0.2m) ενώ στο Προσομοίωμα Χαλίκια 2 είναι 0.2m (0.1-0.3m). Στα σχήματα Σελ 70 από 107

(α) και (β) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στα σχήματα (γ) και (δ) η διατομή τους κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (ε) έως (θ) παρουσιάζουν την απόκριση των δύο προσομοιωμάτων. Πάνω (σχήματα (ε) και(στ)) είναι τα τέλεια συνθετικά δεδομένα των δύο προσομοιωμάτων, ενώ κάτω (σχήματα (η) και (θ)) τα συνθετικά δεδομένα με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%.**



Προσομοίωμα Χαλίκια 1 και Προσομοίωμα Χαλίκια 2 για το βάθος Β΄

Σχήμα 6.3.1.2 : Πιο πάνω απεικονίζονται τα Προσομοιώματα Χαλίκια 1 και Προσομοιώματα Χαλίκια 2 για <u>«βάθος Β΄»</u> Οι δομές και στα δύο Προσομοιώματα έχουν παχος 0.5m. Στο <u>Προσομοίωμα Χαλίκια 1</u> οι δομές εκτείνονται από 0.5-1.0m ενώ στο <u>Προσομοίωμα Χαλίκια</u> Σελ 71 από 107

<u>2</u> από 0.6-1.1m. Το πάχος των χαλικίων όπως αναφέραμε στο Προσομοίωμα Χαλίκια 1 είναι 0.1m (0.1-0.2m) ενώ στο Προσομοίωμα Χαλίκια 2 είναι 0.2m (0.1-0.3m).

Σύγκριση των Προσομοιωμάτων Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 για το κάθε βάθος Για βάθος Α΄

Προσομοίωμα	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
Χαλίκια 1	69 Ohm∙m	83 Ohm∙m	14 Ohm∙m
Χαλίκια 2	93 Ohm·m (Άνοδος24 Ohm·m)	102 Ohm·m (Άνοδος 19 Ohm·m)	9 Ohm·m (Μείωση 5 Ohm·m)

Για βάθος Β΄

Προσομοίωμα	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
Χαλίκια 1	69 Ohm∙m	72 Ohm∙m	3 Ohm∙m
Χαλίκια 2	93 Ohm·m (Άνοδος 24 Ohm·m)	95 Ohm∙m (Άνοδος 23 Ohm∙m)	2 Ohm·m (Μείωση 1 Ohm·m)

Πίνακας 6.ΙΙ : Σύγκριση των προσομοιωμάτων Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 για τα βάθη Α΄και Β΄.

Συγρκίνοντας τα δύο Προσομοιώματα, Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2, για το ίδιο βάθος (είτε για το "βάθος Α΄" είτε για το "βάθος Β΄") οδηγούμαστε στο συμπέρασμα, ότι μια μικρή αύξηση του πάχους σε μια **ρηχή** ισχυρά αντιστατική δομή, μπορεί να προκαλέσει μια <u>αισθητή άνοδο στη τιμή των μετρήσεων</u>. Αφού όπως βλέπουμε, για το "βάθος Α΄" έχουμε μια άνοδο της στάθμης κατά 24 Ohm·m και άνοδο της ανώτερης τιμής κατά 19 Ohm·m. Ενώ για το "βάθος Β΄" έχουμε άνοδο της στάθμης κατά 24 Ohm·m και της ανώτερης τιμής κατά 23 Ohm·m.

Επίσης παρατηρούμε και μια μείωση στο εύρος του προσομοιώματος Χαλίκια 2 σε σχέση με το Προσομοίωμα Χαλίκια 1. Η μέιωση του αυτή οφείλεται στην αυξηση του βάθους ταφής της δομής ενδιαφέροντος κατά 0.1m(από 0.1-0.2m σε 0.2-0.3m για "βάθος Α΄" και από 0.5-0.7 σε 0.6-0.7 για "βάθος Β΄").

Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
Χαλίκια 1	A'	69 Ohm∙m	83 Ohm∙m	14 Ohm∙m
	B'	69 Ohm∙m(Σταϑερή)	72 Ohm·m (Μείωση 11 Ohm·m)	3 Ohm·m (Μείωση 11 Ohm·m)
Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη Τιμή	Εύρος
Χαλίκια 2	A'	93 Ohm∙m	102 Ohm∙m	9 Ohm∙m
	B'	93 Ohm∙m (Σταϑερή)	95 Ohm·m (Μείωση 7 Ohm·m)	2 Ohm·m (Μείωση 7 Ohm·m)

Κεφάλαιο 6 Προσομοιώματα-Επίλυση Ευθέως Προβλήματος

Σύγκριση των ίδιων προσομοιωμάτων για διαφορετικό βάθος

Πίνακας 6.ΙΙΙ : Πάνω η σύγκριση του προσομοιωμάτων Χαλίκια 1 για τα βάθη Α΄ και Β΄. Κάτω η σύγκριση του προσομοιώματος Χαλίκια 2 για τα δύο βάθη.

Επίσης αν συγρκίνουμε το εύρος για τα δύο βάθη, παρατηρούμε ότι η μετατόπιση των δομών ελαφρώς βαθύτερα μπορεί να προκαλέσει μεγάλη εώς πολύ μεγάλη μείωση στο εύρος των Φ.Ε.Α. που οφείλεται αποκλειστικά στη μείωση της ανώτερης τιμής, αφού η στάθμη για τα δύο βάθη παραμένει σταθερή.

Όπως στο Προσομοίωμα 9, έτσι και στα Προσομοιώματα Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2, σταθμήσαμε τα δύο προσομοιώματα για να δούμε πιο δίνει πιο ευδιάκρτια αποτελέσματα, αν αναχθούν όλα στην ίδια ανώτερη τιμή και αφαιρεθεί η κατώτερη τιμή (στάθμη). Οι εικόνες για τα σταθμισμένα Προσομοιώματα Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 παρουσιάζονται στα σχήματα 6.3.1.3 και 6.3.1.4 για το «βάθος Α' » και «βάθος Β' » αντίστοιχα.

Σταθμισμένα Προσομοιώματα

Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 για <u>βάθος Α΄</u>



Σχήμα 6.3.1.3 : Τα σταθμισένα Προσομοιώματα Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 για βάθος Α΄. Αριστερά Προσομοίωμα Χαλίκια 1 και και δεξιά το Προσομοίωμα Χαλίκια 2.

Σελ 74 από 107

Σταθμισμένα Προσομοιώματα

Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 για <u>βάθος Β΄</u>



Σχήμα 6.1.3.4 : Τα σταθμισένα Προσομοιώματα Χαλίκια 1 και Χαλίκια 2 για «βάθος Β'» Αριστερά Προσομοίωμα Χαλίκια 1 και και δεξιά το Προσομοίωμα Χαλίκια 2.

Σελ 75 από 107

6.3.2 Προσομοίωμα Επιφανειακής Δομής

Με σκοπό να παρακολουθήσουμε την ανωμαλία που προκαλείται όταν μια κυκλική δομή υψηλής αντίστασης(300 Ohm·m) περικλείει μια δομή χαμηλής αντίστασης (10 Ohm·m)και στο εσωτερικό υπάρχει μια ακόμη δομη υψηλής αντίστασης, (300 Ohm·m)κατασκευάσαμε ακόμη ένα Προσομοίωμα. Καθώς όμως το λογισμικό που χρησημοποιύμε, χρησημοποιεί ως πεπερασμένα στοιχεία τετράγωνα (κύβοι, στη τρίτη διάσταση) αντί για κυκλικές δομές κατασκευάσαμε τρείς ρόμβους με το ίδιο κέντρο όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3.2.1.

Οι δομές αυτές βρίσκονται στο 2° στρώμα με <u>πάχος 0.1m και εκτείνοται από τα 0.1</u> <u>εώς 0.2m</u> . (Η διαστρωμάτωση είναι όπως το Προσομοίωμα Χαλίκια 1)

Σελ 76 από 107



Μοντέλο Κυκλικής Δομής

Σχήμα 6.3.2.1: Προσομοίωμα Κυκλική Δομής(αλώνι). Στο σχήμα α) απεικονίζεται η κάτοψη του προσομοιώματος (Με κόκκινο χρώμα είναι η δομή Ε.Η.Α 10 Ohm·m ενώ με γκρί, οι δομές αντίστασης 300 Ohm·m) ενώ στο σχήμα β) η διατομή του κατά τον Χ-Ζ άξονα. Στα σχήματα γ) και δ) παρουσιάζεται η απόκριση των. Αριστερά για τέλεια συνθετικά δεδομένα και δεξιά με τη προσθήκη θορυβου 1.5%

Το Προσομοίωμα αυτό θα μπορούσαμε να το συγκρίνουμε με το Προσομοίωμα 4, στο οποίο παρουσιάζεται μια παρόμοιας γεωμετρίας δομή, με την σημαντική διαφορά ότι σε αυτό υπήρχε μονο μια δομή υψηλής αντίστασης (500 Ohm·m). Παρόλα αυτά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι εικόνες που προκύπτουν από την επίλυση του ευθέως προβλήματος για τα δύο Προσομοιώματα μοιάζουν καθώς δεν διακρίνεται η ζώνωση χαμηλής αντίστασης (10 Ohm·m) στο νέο Προσομοίωμα. Οι πολύ χαμηλές τιμές Φ.Ε.Α. που απεικονίζονται με γαλάζιο χρωμα, έξω από το περίγραμμα της δομής, παρατηρούνται και στο Προσομοίωμα 4.

6.4 Προσομοιώματα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια (MwRmEl)

Παρόμοια με το Προσομοίωμα 5 κατασκευάστηκαν και πέντε παραλλαγές του. Πρόκειται για τα Προσομοιώματα Απομακρυσμένων Ηλεκτρόδιων (MwRmEl). Τα Προσομοιώματα αυτά έγιναν με σκοπό παρακολουθήσουμε τις διαφορές που θα υπήρχαν στις μετρήσεις Φ.Ε.Α αν στη θέση των σταθερών ηλεκτροδίων ή στον ενδιάμεσο χώρο στεθερών ηλεκτροδίων-περιοχής έρευνας υπήρχαν ισχυρα αντιστατικές ή αγώγιμα δομές.

Η κύρια διαφορά των προσομοιωμάτων MwRmEl από το Προσομοίωμα 5 είναι ότι τα ηλεκτρόδια του σταθερού ζεύγους τοποθετούνται στις θέσεις με συντεταγμένες 20, 4.5 και 20, 5.5, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4.1 ενώ στο Προσομοίωμα 5 τα σταθερά ηλεκτρόδια βρίσκονταν στη θέση 0,0. Έτσι τα σταθερά ηλεκτρόδια πρακτικά θεωρούνται ότι βρίσκονται στο άπειρο αφού η απόσταση αυτή είναι αρκετά μεγάλη ώστε η επίδραση τους στις μετρήσεις να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, αυτό ισχύει όταν τα σταθερά ηλεκτρόδια βρίσκονται σε περιβάλλον αντίστασης όμοιο με το περιβάλλον των κινητών ηλεκτροδίων, καθώς όπως θα δούμε πιο κάτω, σε αντίθετη περίπτωση η επίδραση τους μόνο αμελητέα δεν είναι. Τέλος θα συγκρίνουμε τα Προσομοιώματα MwRmEl μεταξύ τους.



Σχήμα 6.4.1 : Τα ηλεκτρόδια κατά τη διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου(Προσομοιώματα MwRmEl) Με κόκκινες κουκίδες αντιπροσωπεύονται τα σταθερά ηλεκτρόδια, ενώ με μαύρες οι θέσεις που λαμβάνουν τα κινητά ηλεκτρόδια. Με κόκκινο περίγραμμα είναι η περιοχή μελέτης μέσα στην οποία ο χειρίστης του οργάνου λαμβάνει μετρήσεις καταμήκος οδεύσεων κινούμενος βουστροφηδόν με κατεύθυνση B-N και N-B.

Πρότυπο Προσομοίωμα (MwRmEl-SM)

Η μόνη διαφορά του κυρίως προσομοιώματος MwRmEl-SM από το Προσομοίωμα 5, έγκειται στο γεγονός ότι τα σταθερά ηλεκτρόδια βρίσκονται μακριά από την περιοχή μελέτης, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.4.1 και 6.4.2



Σχήμα 6.4.2 : Προσομοίωμα MwRmEl-SM. Τα σταθερά ηλεκτρόδια βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από 15α. Μεταξύ των σταθερών ηλεκτροδίων και της περιοχής έρευνας δεν μεσολαβεί κάποια δομή διαφορετικής Ε.Η.Α. από του ημχιώρου.



Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 1 (MwRmEl 1)

Στο Προσομοίωμα MwRmEl 1 όχι μόνο τα σταθερά ηλεκτρόδια βρίσκονται μακριά από την περιοχή έρευνας, αλλά βρίσκονται επιπλέον σε διαφορετικό περιβάλλον. Βρίσκονται επί αντιστατικής δομής 1000 Ohm·m. Όπως θα δούμε παρακάτω αυτό αλλάζει δραματικά τις αναμενόμενες μετρήσεις. Η απεικόνιση της διάταξης φαίνεται στο σχήμα 6.4.3.

Σελ 79 από 107

Σχήμα 6.4.3 : Προσομοίωμα MwRmEl 1 βάθος 0.25m-0.75m

Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 2 (MwRmEl 2)

Το Προσομοίωμα MwRmEl 2 είναι το ίδιο με το MwRmEl 1 με τη διαφορά ότι στη θέση των σταθερών ηλεκτροδίων δεν έχουμε αντιστατικό, αλλά ένα αγώγιμο σώμα αντίστασης 1 Ohm·m



Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 3 (MwRmEl 3)

Σχήμα 6.4.4: Προσομοίωμα MwRmEl 3 βάθος 0.25-0.75 m

Στο Προσομοίωμα αυτό, όπως μπορεί να διακριθεί και από το σχήμα 6.4.4 ,υπάρχει ένα αντιστατικό σώμα 1000 Ohm·m στο ενδιάμεσο μεταξύ της θέσης των σταθερών ηλεκτροδίων και του μετρούμενου κανάβου. Στη θέση των σταθερών ηλεκτροδίων δεν υπάρχει αντιστατική δομή όπως υπήρχε στο προηγούμενο Προσομοίωμα.

Όπως θα δούμε πιο κάτω αυτό δεν αλλάζει σημαντικά τις αναμενόμενες μετρήσεις σε σχέση με το Προσομοίωμα MwRmEl-SM, πράγμα που σημαίνει ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται ελαφρώς αν στο ενδιάμεσο (διαδρομή του ρεύματος) παρεμβάλλονται αγώγιμα και αντιστατικά σώματα. Αλλά επηρεάζονται πολύ από τη θέση που είναι καρφωμένα τα τέσσερα ηλεκτρόδια.

Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 4 (MwRmEl 4)

Το Προσομοίωμα MwRmEl 4 είναι πανομοιότυπο με το προηγούμενο Προσομοίωμα με μόνη διαφορά ότι αντί για αντιστατικό σώμα, υπάρχει αγώγιμο σώμα 1 Ohm·m ιδίων διαστάσεων στην ίδια θέση.

Στα σχήματα 6.4.1.1 εώς 6.4.1.5 απεικονίζονται τα δεδομένα, όπως προκύψαν από την επίλυση του ευθέως προβλήματος, για τα Προσομοιώματα MwRmEl SM-MwRmEl 4 για «βάθος Α΄», ενώ στα σχήματα 6.4.2.1 εώς 6.4.2.5 απεικονίζονται τα δεδομένα που προκύψαν από την επίλυσης του ευθεώς προβλήματος για τα αντίστοιχα προσομοιώματα για «βάθος Β΄» (δομές σε βάθος 0.5 έως 1.0m).

Σελ 80 από 107

Κεφάλαιο 6 Προσομοιώματα-Επίλυση Ευθέως Προβλήματος

6.4.1 Μοντέλα για Απομακρυσμένα Ηλεκρόδια, Βάθος Ά

Σε όλα τα πιο κάτω Προσομοιώματα οι δομές είναι θαμμένες σε βάθος 0.25m έως 0.75m



MwRmEI-SM για <u>βάθος Α΄</u>(Πρότυπο Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτόδια)

Σχήμα 6.4.1.1 : Το πρότυπο Προσομοίωμα MwRmEI-SM για βάθος Α΄ είναι όμοιο με το Προσομοίωμα 5 με μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή τα σταθερά ηλεκτρόδια βρίσκονται μακριά από την περιοχή έρευνας, σε απόσταση >15α που πρακτικά θεωρείται άπειρη. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του Σελ 81 από 107

προσομοιώματος, για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).



MwRmEl 1 για <u>βάθος Α΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 1)

Σχήμα 6.4.1.2 : Το Προσομοίωμα MwRmEl 4 . Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος, για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).

Σελ 82 από 107



MwRmEl 2 για <u>βάθος Α΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 2)

Σχήμα 6.4.1.3: Το Προσομοίωμα MwRmEl 2. Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήματα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος, για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).

Σελ 83 από 107



MwRmEl 3 για <u>βάθος Α΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 3)

Σχήμα 6.4.1.4: Το Προσομοίωμα MwRmEl 3. Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος, για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).

Σελ 84 από 107



MwRmEl 4 για <u>βάθος Α΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 4)

Σχήμα 6.4.1.5: Το Προσομοίωμα MwRmEl 4. Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος, για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).

Σελ 85 από 107

6.4.2 Προσομοιώματα για Απομκρυσμένα Ηλεκτρόδια, Βάθος Β΄



MwRmEI-SM για <u>βάθος Β΄</u>(Πρότυπο Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια)

Σχήμα 6.4.2.1 : Το πρότυπο Προσομοίωμα MwRmEI-SM για βάθος Β΄. Οι δομές είναι θαμμένες σε βάθος 0.5m έως 1m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος, για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).

Σελ 86 από 107



MwRmEl 1 για <u>βάθος Β΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 1)

Σχήμα 6.4.2.2 : Το Μοντέλο MwRmEl 1 για βάθος Β΄. Οι δομές είναι θαμμένες σε βάθος 0.5m έως 1m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος, για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).



MwRmEl 2 για <u>βάθος Β΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 2)

Σχήμα 6.4.2.3 Το Μοντέλο MwRmEl 2 για «βάθος Β'» Οι δομές είναι θαμμένες σε βάθος 0.5m έως 1m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).



MwRmEl 3 για <u>βάθος Β΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 3)

Σχήμα 6.4.2.4 : Το Μοντέλο MwRmEl 3 για βάθος Β΄. Οι δομές είναι θαμμένες σε βάθος 0.5m έως 1m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).

Σελ 89 από 107



MwRmEl 4 για <u>βάθος Β΄</u> (Προσομοίωμα με Απομακρυσμένα Ηλεκτρόδια 4)

Σχήμα 6.4.2.5: Το Πρσομοίωμα MwRmEl 4 για βάθος Β΄. Οι δομές είναι θαμμένες σε βάθος 0.5m έως 1m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Τα σχήματα (γ) και (δ) παρουσιάζουν την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα (γ) και με προσθήκη τυχαίου θορύβου **1.5%** (δ).

Σελ 90 από 107

6.4.3 Σύγκριση Προσομοιωμάτων και Συμπεράσματα

Η σύγκριση των διάφορων προσομοιωμάτων με το πρότυπο Προσομοίωμα MwRmEl-SM ,για το ίδιο βάθος, δίνεται στους δυο πίο κάτω πίνακες

Πίνακας 6.IV: Σύγκριση προσομοιωμάτων MwRmEl 1, MwRmEl 2 , MwRmEl 3 και MwRmEl 4 με το πρότυπο Προσομοίωμα για **Βάθος Α΄**

Προσομοίωμα	Στάθμη	Ανώτερη τιμή	Εύρος
Προσομοίωμα MwRmEl-SM	30	38	8
Προσομοίωμα MwRmEl 1	147 (Άνοδος 117 Ohm·m)	157 (Άνοδος 119 Ohm·m)	10 (Άνοδος 2 Ohm·m)
Προσομοίωμα MwRmEl 2	25 (Πτώση 5 Ohm∙m)	33.5 (Πτώση 4.5 Ohm·m)	8.5 (Άνοδος 0.5 Ohm∙m)
Προσομοίωμα MwRmEl 3	30.5 (Άνοδος 0.5 Ohm·m)	40 (Άνοδος 2 Ohm·m)	9.5 (Άνοδος 1.5 Ohm∙m)
Προσομοίωμα MwRmEl 4	25 (Πτώση 5 Ohm∙m)	38 Σταθερή	13 (Άνοδος 5 Ohm∙m)

Πίνακας 6.V :Σύγκριση προσομοιωμάτων MwRmEl 1, MwRmEl 2 , MwRmEl 3 και MwRmEl 4 με το πρότυπο Προσομοίωμα για **Βάθος Β΄**

Προσομοίωμα	Στάθμη	Ανώτερη τιμή	Εύρος
Προσομοίωμα MwRmEl-SM	30	33	3
Προσομοίωμα MwRmEl 1	147 (Άνοδός 117 Ohm·m)	153 (Άνοδος 120 Oh.m)	6 (Άνοδος 3 Ohm∙m)
Προσομοίωμα MwRmEl 2	25.8 (Πτώση 4.2 Ohm·m)	29 (Πτώση 4 Ohm·m)	3.2 (Σταθερό)
Προσομοίωμα MwRmEl 3	30.5 (Άνοδος 0.5 Ohm·m)	38.5 (Άνοδος 5.5 Ohm·m)	8 (Άνοδος 5 Ohm·m)
Προσομοίωμα MwRmEl 4	25 (Πτώση 5 Ohm.m)	33 (Σταθερή)	8 (Άνοδος 5 Ohm∙m)

Σελ 91 από 107

Συμπεράσματα προσομοιωμάτων MwRmEl

Παρατηρούμε ότι στο Προσομοίωμα MwRmEl 1 οπου στη θέση των σταθερών ηλεκτροδίων υπάρχει ισχυρά αντιστατική δομή έχουμε μια <u>ραγδαία αύξηση των</u> <u>τιμων της Φ.Ε.Α.,σε σχέση με το πρότυπο Προσομοίωμα MwRmEl-SM</u>, με το έυρος των μετρήσεων να αυξάνεται λίγο.

Όταν δεν προσθέσουμε θόρυβο στα δεδομένα οι δομές είναι ευδιάκριτες. Όταν όμως προσθέσουμε θόρυβο σε αυτά, τότε η εικόνα που περνούμε επηρεάζεται πολύ. Παρόλα αυτά μπορούμε να διακρίνουμε τη δομή.

Όταν στη θέση των σταθερών ηλεκτρόδίων η αντιστατική δομή είναι αγώγιμη (μικρότερης Ε.Η.Α. από το περιβάλλον) όπως συμβαίνει στο Προσομοίωμα MwRmEl 2 <u>παρατηρείται πτώση της ανώτερης τιμής και ανάλογη πτώση της στάθμης</u> με αποτέλεσμα το εύρος να παραμένει πρακτικά σταθερό σε σχέση με το πρότυπο προσομοίωμα. Αυτό παρατηρείται τόσο στα Προσομοιώματα για "βάθος Β'" Η εικόνα που προκύπτει είναι πολύ καθαρή. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαφορά αντίστασης μεταξύ σταθερών και κινητών ηλεκτροδίων δεν είναι πολύ μεγάλη, 29 Ohm·m(30-1) ενώ στο προηγούμενο Προσομοίωμα η διαφορά ήταν εξαιρετικά μεγάλη, 970 Ohm·m (1000-30). <u>Μάλιστα βλέπουμε ότι, όταν η διαφορά της Ε.Η.Α. μεταξύ σταθερών και κινητών ηλεκτροδίων είναι μεγάλη, τότε και οι μετρήσεις επηρεάζονται πάρα πολύ.</u>

Δηλαδή, όταν στη θέση των σταθερών ηλεκτροδίων υπάρχει ισχυρά αντιστατική δομη οι μετρήσεις Φ.Ε.Α παρουσιάζουν μεγάλη άνοδο, ενώ όταν υπάρχει αγώγιμο σώμα οι μετρήσεις Φ.Ε.Α. μειώνονται (όχι στην ίδια τάξη μεγέθους) και το εύρος παραμένει σταθερό.

Όταν στη διαδρομή του ρεύματος υπάρχει ισχυρά αντιστατική δομή (1000 Ohm·m) όπως συμβαίνει στο Προσομοίωμα MwRmEl 3 τότε παρατηρείται <u>μικρή άνοδος της</u> <u>στάθμης και μεγαλύτερη άνοδος της ανώτερης τιμή</u>, με το εύρος να αυξάνεται.

Ενώ στη περίπτωση που η δομή στο ενδιαμεσο της περιοχής έρευνας-σταθερών ηλεκτροδίων είναι αγώγιμη (1 Ohm·m) τότε παρατηρείται <u>αξιοσημείωτη πτώση στη</u> <u>στάθμη με την ανώτερη τιμή να παραμένει σταθερή</u> με αποτέλεσμα το εύρος να αυξάνεται όσο μειώνεται η στάθμη.

Σνοψίζοντας, παρατηρούμε ότι όταν υπάρχει αγώγιμη δομή, είτε στη θέση των σταθερών ηλεκτροδίων είτε στο ενδιάμεσο της περιοχής σταθερων ηλεκτροδιώνπεριοχής έρευνας, τότε παρατηρείται πτώση της τάσης (ή Φ.Ε.Α.) είτε στη στάθμη είτε στην ανώτερη τιμή.

Ενώ όταν υπάρχει ισχυρά αντιστατική δομή, είτε στη θέση των ηλεκτροδίων είτε στο της περιοχής σταθερων ηλεκτροδιών-περιοχής έρευνας, τότε παρτατηρείται άνοδος

Σελ 92 από 107

της τάσης (ή της Φ.Ε.Α.) τόσο στη στάθμη όσο και στην ανώτερη τιμή, στη περίπτωση όμως που η αντιστατική δομη είναι στη θέση των ηλεκτροδίων τότε η άνοδος των τιμών της Φ.Ε.Α. είναι πολύ μεγάλη.

Το βασικότερο συμπέρασμα από την ερμηνεία των προσομοιωμάτων είναι ότι η τιμή της μετρώμενης Φ.Ε.Α., εξαρτάται πολύ από την αντίσταση στην τριγύρω των ηλεκτροδίων περιοχή και όχι τόσο από τις δομές που υπάρχουν στη διαδρομή του ρεύματος από το ένα δίπολό στο άλλο. Αυτό προκύπτει συγρκίνοντας τα Προσομοιώματα MwRmEl 4 και MwRmEl 3. Με άλλα λόγια, μια μέτρηση είναι πολύ ευαίσθητη στην τριγύρω των ηλεκτροδίων περιοχή, και ειδικά στη περίπτωση της διάταξης διδύμου ηλεκτροδίου όπου το ένα ζεύγος ηλεκτροδίων είναι σταθερό και η δομή τριγύρω του επηρεάζει όλες τις μετρήσεις.

Παρατηρούμε επίσης ότι τα Προσομοιώματα στο "βάθος Α΄" παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος από τα αντίστοιχα για "βάθος Β΄" καθιστώντας έτσι το μονέλα για "βάθος Β΄" πιο επιρεπή στην ύπαρξη θορύβου. Πραγμα φυσικά αναμενόενο αφου πρόκειται για βαθύτερες δομές.

Η σχέση των αντόιστοιχων προσομοιωμάτων για τα δύο βάθη φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Προσομοίωμα	Βάθος	Στάθμη	Ανώτερη τιμή
Προσομοίωμα MwRmEl -SM	Α'	30	38
	Β'	30 (Σταθερή)	33 (Πτώση 5 Ohm·m)
Προσομοίωμα MwRmEl 1	Α'	147	157
	B'	147 (Σταθερή)	153 (Πτώση 4 Ohm∙m)
Προσομοίωμα MwRmEl 2	A'	25	33.5
	B'	25.8 (Άνοδος 1 Ohm∙m)	29 (Πτώση 4.5 Ohm·m)

Κεφάλαιο 6 Προσομοιώματα-Επίλυση Ευθέως Προβλήματος

Προσομοίωμα MwRm El 3	A'	30.5	40
	B'	30.5 (Σταθερή)	38.5 (Πτώση 1.5 Ohm·m)
Προσομοίωμα MwRM El 4	A'	25	38
	В	25 Σταθερή	33 (Πτώση 5 Ohm·m)

Πίνακας 6. VI : Σύγκριση Προσομοιωμάτων για τα δύο βάθη.

Παρατηρούμε, όπως και στα Προσομοιώματα Χαλίκια1 και Χαλίκια 2, ότι η στάθμη των μοντέτλων για τα δύο βάθη είναι σταθερή, ενώ μεταβάλεται μόνον η ανώτερη τιμή. Αυτό φαίνεται από το πίνακα 9.

Δηλαδή, διακρίνουμε πτώση της ανώτερης τιμής σε όλα τα Προσομοιώματα σε σχέση με τα αντίστοιχα για το "Βάθος Α΄".

Για να δούμε πιο Προσομοίωμα δίνει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα και πιο φαίνεται καλύτερα αφαιρέσαμε τη χαμηλότερη τιμή επιπρόσθετα τα ανάγαμε όλα σε μία μέγιστη τιμή. Έτσι με κώδικα που κάναμε στο μαθηματικό πακέτο Matlab αφαιρέσαμε τη στάθμη και με τη βοήθεια του προγράμματος Surfer 11, απεικονίσαμε τις τιμές αυτές όπως φαίνονται στα σχήματα 6.4.3.1-6.4.3.5 για το «βάθος Α'» και 6.4.4.1- 6.4.4.5 για το «βάθος Β'»

6.4.4 Σταθμισμένα Προσομοιώματα Για το βάθος Α΄



Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl-SM <u>Βάθος Α΄</u>

Σχήμα 6.4.3.1 : Το σταθμισμένο πρότυπο Προσομοίωμα MwRmEI-SM. Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 13 Ohm.m.



Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl 1 για <u>βάθος Α΄</u>

Σχήμα 6.4.3.2 : Τα σταθμισμένο Προσομοιώμα MwRmEl 1. Το βάθός των δομών είναι 0.25m-0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 13 Ohm.m.


Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl 2 για <u>βάθος Α΄</u>

Σχήμα 6.4.3.3 : Το σταθμισμένο προσομοίωμα MwRmEl 2. Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 13 Ohm.m.



Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl 3 για βάθος Α΄

Σχήμα 6.4.3.4 : Το σταθμισμένο προσομοίωμα MwRmEl 3. Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 13 Ohm.m. Παρατηρούμε ότι στη περιοχή πλησίον του αντιστατικού σώματος παρουσιάζονται υψηλές αντιστασεις. Είναι το φαινόμενο του "Slight Masking" και οφείλτεαι στο ισχυρά αντιστατικό σώμα που είναι δίπλα. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται εντονότερα στις σταθμισμένες εικόνες.



Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl 4 για βάθος Α΄

Σχήμα 6.4.3.5 : Το σταθμισμένο μοντέΙο MwRmEl 4. Το βάθος των δομών είναι 0.25m με 0.75m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 13 Ohm.m. Παρατηρούμε ότι στη περιοχή πλησίον του αντιστατικού σώματος παρουσιάζονται χαμηλές αντιστασεις. Είναι το φαινόμενο του "Affection" και οφείλτεαι στο αγώγιμο σώμα που είναι δίπλα. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται εντονότερα στις σταθμισμένες εικόνες.

6.4.4 Σταθμισμένα Προσομοιώματα Για το βάθος Β΄ **Στάθμη**

Προσομοίωμα MwRmEl-SM <u>Βάθος Β΄</u>



Σχήμα 6.4.4.1 : Το σταθμισμένο πρότυπο Προσομοίωμα MwRmEI-SM. Το βάθος των δομών είναι 0.5m με 1.0m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 8 Ohm.m.

Σελ 100 από 107



Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl 1 <u>βάθος Β΄</u>

Σχήμα 6.4.4.2 : Το σταθμισμένο Προσομοίωμα MwRmEl 1 για «βάθος Β΄». Το βάθος των δομών είναι 0.5m με 1.0m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 8 Ohm.m.

Σελ 101 από 107



Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl 2 <u>βάθος Β΄</u>

Σχήμα 6.4.4.3. : Το σταθμισμένο Προσομοίωμα MwRmEl 2 για «βάθος Β΄». Το βάθος των δομών είναι 0.5m με 1.0m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 8 Ohm.m.



Στάθμη για Προσομοίωμα MwRmEl 3 για <u>Βάθος Β΄</u>

Σχήμα 6.4.4.4. : Το σταθμισμένο Προσομοιώματα MwRmEl 3 για «βάθος Β΄». Το βάθος των δομών είναι 0.5m με 1.0m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 8 Ohm.m. Παρατηρούμε ότι στη περιοχή πλησίον του αντιστατικού σώματος παρουσιάζονται υψηλές αντιστασεις. Είναι το φαινόμενο του "Slight Masking" και οφείλτεαι στο ισχυρά αντιστατικό σώμα που είναι δίπλα. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται εντονότερα στις σταθμισμένες εικόνες.



Στάθμη Προσομοίωμα MwRmEl 4 <u>βάθος Β΄</u>

Σχήμα 6.4.4.5. : Το σταθμισμένο Προσομοίωμα MwRmEl 4. για «βάθος Β΄». Το βάθος των δομών είναι 0.5m με 1.0m. Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η κάτοψη των δομών ενώ στο σχήμα (β) η διατομή του κατά το X-Z άξονα. Το σχήμα (γ) παρουσιάζει την απόκριση του προσομοιώματος για τέλεια συνθετικά δεδομένα με εύρος Φ.Ε.Α από 0 εώς 8 Ohm.m. Παρατηρούμε ότι στη περιοχή πλησίον του αντιστατικού σώματος παρουσιάζονται χαμηλές αντιστασεις. Είναι το φαινόμενο του "Affection" και οφείλτεαι στο αγώγιμο σώμα που είναι δίπλα. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται εντονότερα στις σταθμισμένες εικόνες. Παρατηρούμε ότι στα σταθμισμένα μοντέλα παρουσιάζονται πιο ευδιάκρτα οι δομές. Μάλιστα διακρίνονται τα φαινόμενα του «Slight Masking» (Προσομοιώματα MwRm El 3 βάθος Α΄ και Β΄) και του «Affection» (Προσομοιώματα MwRmEl 4 βάθος Α΄ και Β΄) που παρατηρούνται και στα μη σταθμισμένα μοντέλα, αλλά εδώ παρουσιάζονται εντονότερα. Το φαινόμενο του "Slight Masking" (παρουσιά υψηλών αντιστάσεων στη περιοχή πλησίον του αντιστατικού σώματος) οφείλτεαι στο ισχυρά αντιστατικό σώμα που είναι δίπλα, ενώ το φαινόμενο του "Affection" (παρουσιά χαμηλών αντιστάσεων. στη περιοχή πλησίον του αγώγιμου σώματος) προκαλείται απο αγώγιμο σώμα που είναι παρακείμενα.

Η διαφορά των σταθμισμένων προσομοιωμάτων για τα δύο βάθη είναι ότι στα Προσομοιώματα για «βάθος Β΄» αν και οι δομές τους είναι ευδιάκριτες, εντούτοις δεν φαίνονται τόσο έντονα όσο για τα αντίστοιχα για το «βάθος Α΄» λόγω της μείωσης του δυναμικού εύρους.

Σελ 105 από 107

7 .Γενικά Συμπεράσματα της Εργασίας

Από τα πίο πάνω προσομοιώματα συνοψίσαμε και παρουσιάζουμε τα βασικότερα συμπεράσματα.

1) Το βασικότερο συμπέρασμα από την ερμηνεία των προσομοιωμάτων είναι ότι η τιμή της μετρώμενης Φ.Ε.Α. εξαρτάται πολύ από το περιβάλλον Ε.Η.Α γύρω από τα ηλεκτρόδια και όχι τόσο από τις δομές που υπάρχουν στη διαδρομή του ρεύματος από το ένα δίπολό στο άλλο. Δηλαδή όταν η διαφορά αντιστασης μεταξυ σταθερών και κινητων ηλεκτροδίων είναι πολύ μεγάλη τότε επηρεάζονται πολύ και οι μετρήσεις. Και έχουμε δύο υποπεριπτώσεις.

- Η πρώτη παρουσιάζεται όταν η Ε.Η.Α στην περιοχή γύρω από τα στα σταθερά ηλεκτρόδια είναι πολύ μεγάλύτερη σε σχέση με την Ε.Η.Α γύρω από τα κινητά. Σε μια τέτοια περίπτωση, παρατηρείται πολύ μεγάλη άνοδος των μετρώμενων τιμών Φ.Ε.Α (Προσομοίωμα MwRmEl1). Αυτό βέβαια ισχύει για όλες τις διατάξεις, ειδικότερα όμως στη διάταξη διδύμου ηλεκτρόδίου επηρεάζει όλες τις μετρήσεις αφού το ένα δίπολο είναι σταθερό και συμμετέχει σε όλες τις μετρήσεις,

-Στη περίπτωση τώρα που στη θέση των σταθερών ηλεκτροδίων η Ε.Η.Α είναι ένα αγωγιμο σώμα, τότε παρατηρείται πτώση της μετρώμενης τάσης.

2) Όταν στην ενδιάμεση περιοχή μεταξύ πεδίου έρευνας και της θέσης σταθερών ηλεκτροδίων υπάρχει αγώγιμη ή αντιστατική δομή, τότε οι μετρήσεις Φ.Ε.Α. μεταβάλλονται <u>ελαφρώς</u> προς τα κάτω ή προς τα πάνω αντίστοιχα. Όπως είδαμε και από τα Προσομοιώματα MwRmEl 3 και MwRmEl 4.

3)Παρατηρούμε επίσης ότι τα προσομοιώματα στα οποία οι δομές βρίσκονταί ρηχότερα, παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος (διαφορά της ανώτερης από τη χαμηλότερη τιμή Φ.Ε.Α.) σε σχέση με τα προσομοιώματα οπου οι αντιστοιχές δομές ήταν θαμμένες βαθύτερα, αυτό είναι απότοκο του γεγονότος ότι η στάθμη παραμένει σταθέρη και μειώνεται η ανώτερη τιμή. Όταν το εύρος ενός προσομοιώματος είναι μικρό, τότε αυτό είναι ευαίσθητο στο θόρυβο. Έτσι συνδέοντας τα πιο πάνω με παραγωγικό συλλογισμμό, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι <u>όσο πιο βαθιά βρίσκεται μια δομή τοσό περισσοτερο θα την επηρεάζει αρνητικά η ύπαρξη θορύβου, αφού θα έχει μικρότερο εύρος απεικόνισης.</u>

4) Όταν στην ίδια περιοχή (έκταση) υπάρχουν δομές, σε δύο ή περισσότερα επίπεδα, που αλληλεπικαλήπτονται μερικώς, τότε <u>οι βαθύτερες δομές δεν φαίνονται τόσο καθαρά</u>. Αυτό το είδαμε στα στα Προσομοιώματα 6,7 και 8, όπου οι βαθύτερες δομές δεν είχαν σαφές περίγραμμα και έιχαν ακανόνιστο σχήμα.

5) Το πόσο έντονα ή αχνά φαίνεται μία δομή δεν εξαρτάται μόνο από το πόσο ρηχά είναι θαμμένη. Καταλύτικό ρόλο έχει και ο όγκος της. Στο Προσομοίωμα 9 είδαμε πως αν και η δομή (Τ) βρίσκόταν ρηχότερα από τη δομή μορήφης τρίαινας, η δέυτερη φαινόταν εντονότερα, λόγω του μεγαλύτερου όγκου της.

6) Όταν πλησίον των δομών ενδιαφέροντος, υπάρχουν ισχυρά αντιστατικές ή αγώγιμες δομές, τότε παρατηρούνται τα φαινόμενα του "Slight Masking" και του "Affection" αντίστοιχα. Αυτό παρατηρήθηκε στα μοντέλα MwRmEl 3 και 4. Όταν αυτά σταθμίστηκαν τα φαινόμενα αυτά διακρήθηκαν εντονότερα.

Σελ 107 από 107

Οι 32 τομογραφίες που διεξήχθησαν στο κέντρο του αρχαιολογικού χώρου της Πιστύρου παρουσιάζονται πιο κάτω.

1^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία















6^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία













9^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία









12^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία



Σελ 6 από 19

13^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία



14^η Γεωηλεκτρική Τομογραφια



Η 15^η τομογραφία διαγράφηκε λόγω ελλειπών δεδομένων

Σελ 7 από 19











18^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία





20^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία



21^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία



Σελ 10 από 19

22^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία









24^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία







26^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία

27^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία



Σελ 13 από 19



29^η Γεωηλεκτρική Τομογραφία





31^η Γεωηλεκτρικη Τομογραφιά









Σελ 16 από 19

Ο κώδικας που χρησημοποιήθηκε για τη κατασκεύη του πρωτοκόλου για τη διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου.

```
clc
clear
fid=fopen('Prwtocollo.rtf','w');
fprintf(fid,'%4s\n', '1100');
fprintf(fid,'%50s\n',
'C:\metaptyxiako\Bexamhno\Ptyxiaki\Prwtokolo\prwtocollo.r
tf');
fprintf(fid,'%s\n', '0');
fprintf(fid,'%3s\n', '441');
k=1
for i=0:0.5:10
    for j=0:0.5:10
          A=[k,j,i,0,0]
   k=k+1
         %Ka8e space p afhnw afhnei ena parapanw sto .dat
        fprintf(fid,'%5d
                             %5.2f
                                     %5.2f
                                                %5.2f
%d \n',A(1,1),A(1,2),A(1,3),A(1,4),A(1,5) );
         %fprintf(fid, '\n');
      end
    end
    k=1
1=2
B=[1 0 2 0]
fprintf(fid,'%ls\n', '0');
fprintf(fid,'%3s\n', '420');
fprintf(fid,'%s\n', '2');
    for counter=1:420
    fprintf(fid, '%6q %4q %4q %4q
                                         10
3.18\n ',B )
```

Σελ 17 από 19

```
k=k+1 ;
l=l+1 ;
R = rem(k,21)
    if (R==0)
        k=k+1
        l=l+1
        end
B= [k 0 1 0] ;
end
```

[m,n]=size(B)
disp (B)
fclose(fid)

Ο κώδικας που δίνει τις συντεγαγμένες των μετρήσεων και παίρνει από τα αρχείο .THD (πρόκυψε από τον αλγόριθμο επίλυσης τους ευθέως προβλήματος DC3_dinv2)τις τιμές των μετρήσεων Φ.Ε.Α που υπολογίστηκαν για κάθε θέση. Κατόπιν εξάγει ένα αρχείο στο οποίο περιέχονται στη 1ⁿ στήλη Η χ-τετμημένη κάθε μέτρησης. Στη 2ή στήλη τη Υ-τεταγμένη του σημείου μέτρησης. Στη Τρίτη στήλη καταγράφεται η τιμή Φ.Ε.Α. που υπολογίστηκε για το σημείο αυτό. Στη τέταρτή στήλη καταγράφεται η υπολογιζόμενη τιμή Φ.Ε.Α με σφάλμα 1.5% ή 3%, ανάλογα. Τέλος στην 5ⁿ και 6ⁿ τσή καταγράφονται οι σταθμισέμνες τιμες Φ.Ε.Α για τέλεια συνθετικά δεδομένα και με τη προσθήκη θοορυωου αντίστοιχα.

```
clc
clear
fid=fopen('messauresPoints.dat','w');
k=1
for y=0:0.5:10
for x=0.25:0.5:9.75
    C=[x,y]
    fprintf(fid,' %5.2f %5.2f \n',C(1,1),C(1,2));,
    k=k+1
end
end
fid2=fopen('model1.txt');
A=fscanf(fid2,'%g %g %g %g %g %g %g ',[6 inf])'
fclose(fid2)
```

Σελ 18 από 19

```
[M1,N1]=size(C)
[M2,N2]=size(A)
D=[A(:,5)]
[M3,N3]=size(D)
fclose(fid)
fid4=fopen('messauresPoints.dat');
C=fscanf(fid4,'%g %g',[2 inf])'
fclose(fid4)
E=cat(2,C,D)
Q=textread('model1.txt')
res=Q(:,5)
for k =1:420
    resest_with_noise(k)=res(k) +0.03*res(k) .*
randn(1,1);
end
```

```
m]=size( res)
E=cat(2,E,resest_with_noise')
fid3=fopen('model1.dat','w');
for j=1:420
    fprintf(fid3,'%5.2f %5.2f %g
%g\n',E(j,1),E(j,2),E(j,3),E(j,4));
end
```

```
Q=textread('model1.txt')
res=Q(:,5)
E=textread('model1.dat')
minimum=res(1)
for i= 1:420
    if res(i) < minimum
        minimum=res(i)
        K=i
    end
end
mimimum noise=min(E(:,4))
disp (minimum)
disp(K)
fid3=fopen('model1.dat','w');
for j=1:420
        E(j, 5) = E(j, 3) - minimum
        E(j, 6) = E(j, 4) - mimimum noise
        fprintf(fid3,'%5.2f %5.2f %g %g %g
%g\n',E(j,1),E(j,2),E(j,3),E(j,4) ,E(j,5) ,E(j,6));
end
```

Βιβλιογραφία

- Βαργεμέζης Γεώργιος et al (2014). Κέντρο Διάδοσης Τεχνολογίας στο Ο.Τ. 2 της ΖΕΠ Κοζάνης,ΕΚΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ, ΑΠΘ
- 2. Edwards L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP.
- (Εκγυκλοπαίδεια Μείζονος Ελληνισμού (blacksea.ehw.gr/Forms/fLemmaBody.aspx?lemmaid=11282)
- Φίκος Η. (2010) Αντιστροφή Γεωηλεκτρικών Τομογραφικών Δεδομένων στην
 Λεκάνη του Ανθεμούντα. Διατριβή Ειδίκευσης, ΑΠΘ
- 5. Geoplot Instruction Manual
- 6. Jumg-Ho Kim. DC_2DPro V. 0.99 User's Guide (2007). Geoelectric Imaging Laboratory Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)
- 7. Jumg-Ho Kim. DC_3DPro V. 0.99 User's Guide (2007). Geoelectric Imaging Laboratory Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)
- 8. Keller and Frischknecht (1966). Electrical methods in geophysical prospecting
- 9. Lines, L.R. and Treitel, S. (1984). Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*
- Μουντράκης Δ.(2010).Γεωλογίας και Γεωτετκοτνική Εξέλειξη της Ελλάδας.
 Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονικη.
- 11. Τσούρλος Π. (2015). Παρουσιάσεις του μαθήματος «Θεωρία Αντιστροφης», του μετατπτυχιακού κύκλου σπουδών «Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής»
- Παπαζάχος Β (1996). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Εκδόσεις Ζητη, Θεσσαλονίκη
- 13. Res2dinv Ver. 3.54 , Rabbit Resestivity and IP inversion using the least squares method. (1995-2004) Geotomo Software, Malaysia.
- 14. Res3dinv Ver. 2.13, Rabbit Resestivity and IP inversion using the least squares method. (1995-2002) Geotomo Software, Malaysia.

- 15. Roy A. and Apparao A. (1971). Depth of investigation in direct current methods.
- 16. Τσόκας Γ. (2012) Γεωφυσική Διασκόπηση στα Ακτοβιτικα Καλαμάτας, ΑΠΘ
- 17. Tsourlos P.I. (1995) Modeling, Interperetation and Inversion Multielectrode Resestivity Survey Data. *Ph.D. Thesis, Department of Electronics, University of York*
- Τσόκας Γ.Ν., Βαργεμέζης Γ., Τσούρλος Π.Ι, Δρούγου Σ. και Σαατσόγλου-Παλιαδέλη, Χρ. Αρχαιολογία και Γεωφυσική: Εξερευνώντας τον Αρχαιολογικό χώρο της Βεργίνας (1984-2004). University Studio Press, σ. 107, 2006.
- 19. Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I. and Papadopoulos, N. Electrical resistivity tomography: a flexible technique in solving problems of archaeological research. Paper presented in the XV International School.
- Τσουρουλά Ι.-Μάρκος Α. (2008)Επεξεργασία και Ερμηνεία των Γεωφυσικών
 Δεδομένων από την Έρευνα στον Αρχαιολογικό χώρο του Ιερού του
 Ποσειδώνα στην Καλάυρεια. Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης