



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



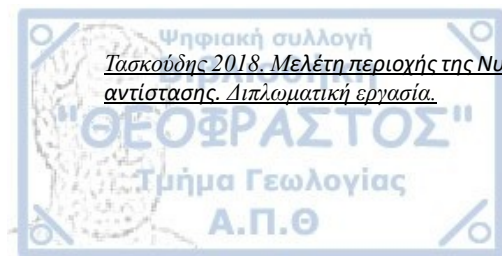
ΤΑΣΚΟΥΔΗΣ Ε. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΝΥΜΦΟΠΕΤΡΑΣ (ΜΥΓΔΟΝΙΑ ΛΕΚΑΝΗ) ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

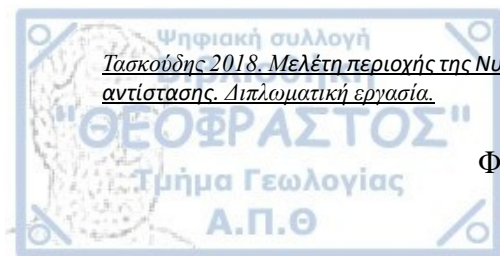
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018



Τασκούδης 2018. Μελέτη περιοχής της Νυμφόπετρας (Μυγδονία λεκάνη) με εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Διπλωματική εργασία.



Τασκούδης 2018. Μελέτη περιοχής της Νυμφόπετρας (Μυγδονία λεκάνη) με εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Διπλωματική εργασία.

Τασκούδης Ε. Δημήτριος
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας
ΑΕΜ: 5186

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΝΥΜΦΟΠΕΤΡΑΣ (ΜΥΓΔΟΝΙΑ ΛΕΚΑΝΗ) ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Γεωφυσικής
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέπων Καθηγητής
Βαργεμέζης Γεώργιος, Αναπληρωτής καθηγητής

© Τασκούδης Δημήτριος, Τμήμα γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΝΥΜΦΟΠΕΤΡΑΣ (ΜΥΓΔΟΝΙΑ ΛΕΚΑΝΗ) ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ-

Διπλωματική εργασία

© Taskoudis Dimitrios, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2018

All rights reserved.

INVESTIGATION IN NYMFOPETRA (MYGDONIA BASIN) AREA BY THE USE OF
ELECTRICAL RESISTIVITY METHOD - Diploma thesis

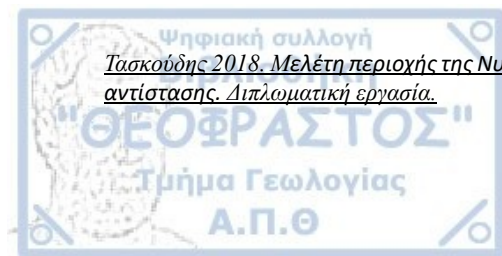
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται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

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

Εικόνα εξωφύλλου: Εικόνα 1. Υδρόγειος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

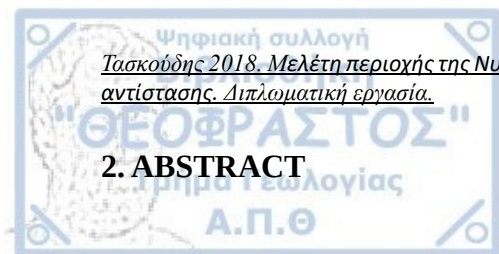
1. Περίληψη.....	7
2. Abstract.....	8
3. Περιοχή έρευνας.....	9
3.1. Γεωγραφική θέση και γεωλογική δομή.....	9
3.2. Γεωλογία περιοχής.....	10
3.3. Τεκτονική εξέλιξη.....	11
4. Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	12
4.1. Εισαγωγή.....	12
4.2. Είδη αγωγιμότητας.....	13
4.3. Ειδική ηλεκτρική αντίσταση υλικών της γης και μεταβολές της.....	13
4.4. Δυναμικό σε ομογενή Γη.....	16
4.5. Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	18
4.6. Διάταξη ηλεκτροδίων.....	19
4.7. Τρόποι μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	20
5. Μελέτη και λήψη μετρήσεων στην ύπαιθρο.....	24
5.1. Εξοπλισμός.....	24
5.2. Πιθανές αστοχίες.....	26
5.3. Διαδικασία μετρήσεων.....	26
6. Επεξεργασία δεδομένων.....	27
6.1. Εισαγωγή.....	27
6.2. Τομογραφία K1.....	28
6.3. Τομογραφία K2.....	29
6.4. Τομογραφία K3.....	30
7. Συμπεράσματα.....	32
8. Βιβλιογραφία.....	33



Τασκούδης 2018. Μελέτη περιοχής της Νυμφόπετρας (Μυγδονία λεκάνη) με εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Διπλωματική εργασία.

1. Περίληψη

Η παρακάτω διπλωματική εργασία έχει σκοπό να συμβάλει στη μελέτη του γεωθερμικού πεδίου της Μυγδονίας λεκάνης, και συγκεκριμένα στον εντοπισμό του σε περιοχή της Νυμφόπετρας. Για τη πραγματοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρική μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Κατά την μέθοδο αυτή εισάγεται ηλεκτρικό ρεύμα στο εσωτερικό του εδάφους και στην συνέχεια με τον απαραίτητο εξοπλισμό γίνεται μέτρηση της διαφοράς δυναμικού και της αντίστασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Βάσει των τιμών αυτών των δύο παραμέτρων, υπολογίζεται η κατανομή των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και διαμορφώνεται η δομή του υπεδάφους της περιοχής. Αρχικά στην εργασία παρατίθενται στοιχεία για την γεωγραφική θέση και την γεωλογική δομή της περιοχής με έμφαση στην τεκτονική της περιοχής, η δράση της οποία σχημάτισε τη Μυγδονία λεκάνη και τις λίμνες Κορώνεια και Βόλβη με την μορφή που έχουν σήμερα. Εν συνεχεία γίνεται αναφορά στους μεθόδους ηλεκτρικής αντίστασης αλλά και στην μεταβολή της ειδικής αντίστασης της Γης στα διάφορα πετρώματα. Περιγράφονται οι νόμοι του Ohm και του Archie για να περιγράψουν την διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος και την σχέση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το υπόγειο νερό. Αναλύονται βασικοί τύποι διατάξεων των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης και απεικονίζονται σχηματικά με βάση τους μαθηματικούς τύπους που τους εκφράζουν. Περιγράφονται οι τρόποι μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης, της όδευσης όπου μελετάται η πλευρική μεταβολή της αντίστασης, της βυθοσκόπησης που εξετάζει την κατακόρυφη αντίστοιχη μεταβολή και της δισδιάσταστης τομογραφίας η οποία αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων μεθόδων. Έπειτα αναφέρεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την διαδικασία των μετρήσεων στην ύπαιθρο όπως είναι το όργανο λήψης μετρήσεων SYSCAL PRO, και ο βοηθητικός εξοπλισμός. Στο επόμενο μέρος της διπλωματικής παρουσιάζονται σχηματικά και αναλύονται με βάση τις αντιστάσεις τα πετρώματα του υπεδάφους και τα δεδομένα που μετρήθηκαν στις τρεις τομογραφίες της περιοχής της έρευνας. Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από τις τρεις τομογραφίες της έρευνας όπου εμφανίζεται η ύπαρξη ρηξιγενούς ζώνης στην περιοχή, ιδιαίτερα αγωγίμης λόγω της παρουσίας των γεωθερμικών ρευστών.



Τασκούδης 2018. Μελέτη περιοχής της Νυμφόπετρας (Μυγδονία λεκάνη) με εφαρμογή της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Διπλωματική εργασία.

2. ABSTRACT

The following diploma thesis is intended to contribute to the study of the geothermal field of Mygdonia basin and more specifically to locate it in the region of Nymfopetra. To accomplish the above, the electrical resistivity method was applied. In this method, electrical current is injected into the earth by two current electrodes and the voltage difference between a second pair of potential electrodes is measured. Processing of this data set leads to the estimation of the beginning of the thesis, the geological position and structure of the area are listed, emphasizing in tectonics, the action of which formed the Mygdonian basin and the lakes Koronia and Volvi. Also, the resistivity the methods and the change of the electrical resistivity in the rocks of Earth are mentioned. The laws of Ohm and Archie are highlighted to describe the electrical resistivity and its relation to the water content of the aquifers. The basic types of electrode arrays used in the resistivity method are schematically presented based on the corresponding mathematical formulas for the calculation of the geometric factor. Vertical variation is a vertical sounding, which calculates the vertical change and finally the tomography, which is a two dimensional method providing geometrical images in both directions. In the next chapters, the equipment used will be described, as well as the processing of the data. The conclusions of the geophysical survey reveal the existence of a conductive fault zone in the area due to the existence of geothermal fluids.

3. Περιοχή έρευνας

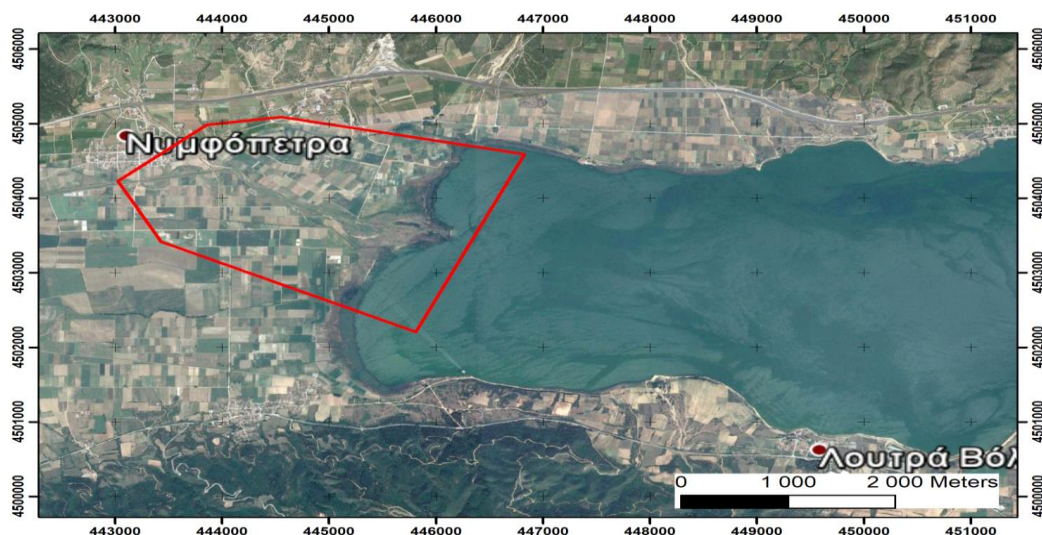
3.1. Γεωγραφική θέση και γεωλογική δομή

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της Νυμφόπετρας η οποία αποτελεί τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης. Αναλυτικότερα, η λεκάνη αυτή αποτελεί ένα τεκτονικό βύθισμα το οποίο ορίζεται από τα βουνά Καμήλα και Ρεντίνα. Σε αυτήν ανήκουν επίσης και οι λίμνες Κορώνεια και Βόλβη. Η συνολική έκτασή της είναι 2026 km² και χωρίζεται σε δύο υπολεκάνες με όρια τα χωριά Σχολάρι και Στίβος.



Εικόνα 3.1 Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης (από GOOGLE EARTH). Η γραμμοσκιασμένη περιοχή περικλείει την λεκάνη της Μυγδονίας και τις λίμνες Κορώνεια και Βόλβη.

Η υπολεκάνη της Βόλβης έχει έκταση 1278 km και διεύθυνση Α-Δ ενώ η υπολεκάνη της Κορώνειας 746 km και διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Τέλος, η λεκάνη της Μυγδονίας παρουσιάζει και υδρολογικό ενδιαφέρον καθώς επικοινωνεί με την θάλασσα μέσω ποταμών και καναλιών της Ρεντίνας (Ψιλοβίκος, 1977).

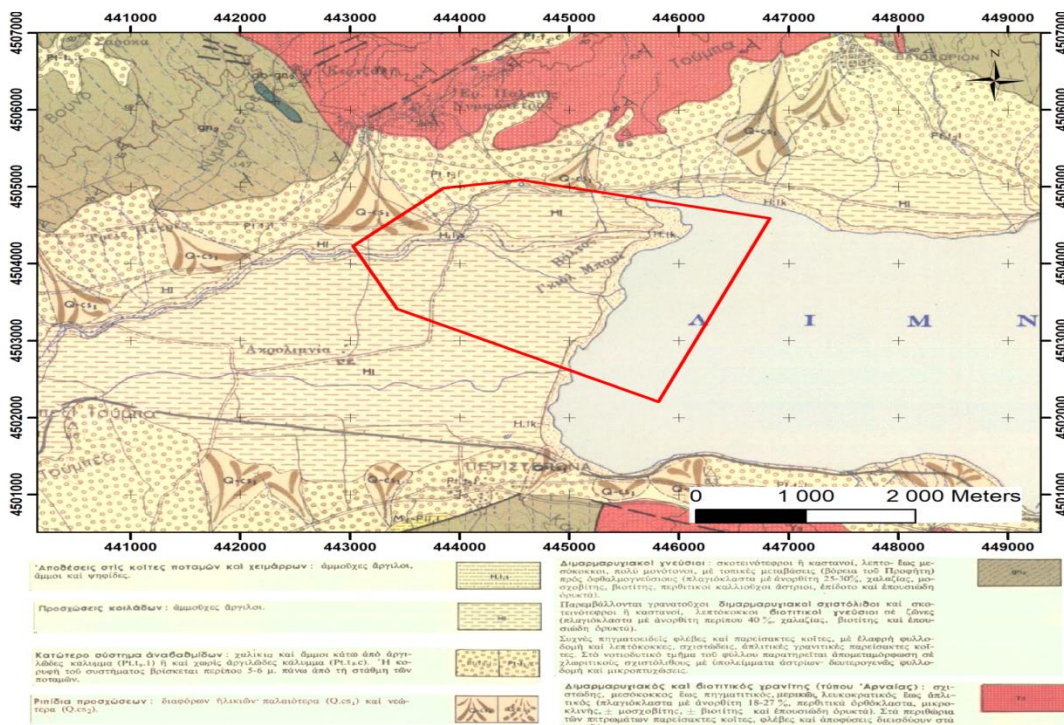


Εικόνα 3.2 Χάρτης της περιοχής μελέτης. Εντός του πλαισίου βρίσκεται η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

3.2 Γεωλογία περιοχής

Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Η λεκάνη της Μυγδονίας ανήκει στις ζώνες της Περιοδοπικής και της Σερβομακεδονικής. Μόνο το ΒΑ τμήμα Σερβομακεδονικής βρίσκεται στην λεκάνη αυτή. Αποτελείται από κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα και χωρίζεται σε δύο υποενότητες, την κατώτερη στρωματογραφικά που ονομάζεται Κερδύλλια και την ανώτερη που ονομάζεται Βερτίσκος. Τα Κερδύλλια περιλαμβάνουν μιγματιτικούς βιοτιτικούς γνεύσιους, γρανατούχους διμαρμαρυγικούς γνεύσιους, αμφιβολίτες, εκλογίτες και μάρμαρα. Αντιθέτως η ενότητα του Βερτίσκου περιλαμβάνει μιγματιτικούς ορθογνεύσιους, διμαρμαρυγικούς γνεύσιους, διμαρμαρυγικούς-βιοτιτικούς γρανίτες, μαρμαρυγικούς σχιστόλιθους και λεπτά στρώματα μαρμάρων. Ανάμεσα στις δύο ενότητες υπάρχουν μεταγάββροι και μεταοφειόλιθοι. Στην λεκάνη εμφανίζεται μόνο ο Βερτίσκος. Η Περιοδοπική διακρίνεται σε τρεις υποενότητες. Η πρώτη ονομάζεται Ντεβέ Κοράν-Δουμπιά, όπου περιλαμβάνει μεταψαμμίτες χαλαζίτες και σχιστόλιθους Περιοτριάδικου. Η δεύτερη Μελισσοχώρι-Χολωμόντας, η οποία έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Η τρίτη ονομάζεται Άσπρη βρύση-Χορτιάτης, περιλαμβάνει χαλαλίτες, ψαμμίτες, φυλλίτες Ιουρασικού και έχει διεύθυνση ΝΔ. Από αυτές τις τρεις ενότητες εμφανίζονται μόνο οι 2 πρώτες στην λεκάνη. Τέλος πάνω από τα πετρώματα αυτά η Μυγδονία λεκάνη έχει πληρωθεί με χερσαία-λιμναία Νεογενή-Τεταρτογενή ιζήματα τα οποία περιλαμβάνουν κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργιλοψαμμίτες, ερυθροστρώματα, κροκάλες, άμμο και άργιλο (Ψιλοβίκος, 1977).



Εικόνα 3.3 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (ΙΓΜΕ, Φύλλο Ζαγκλιβέρι).

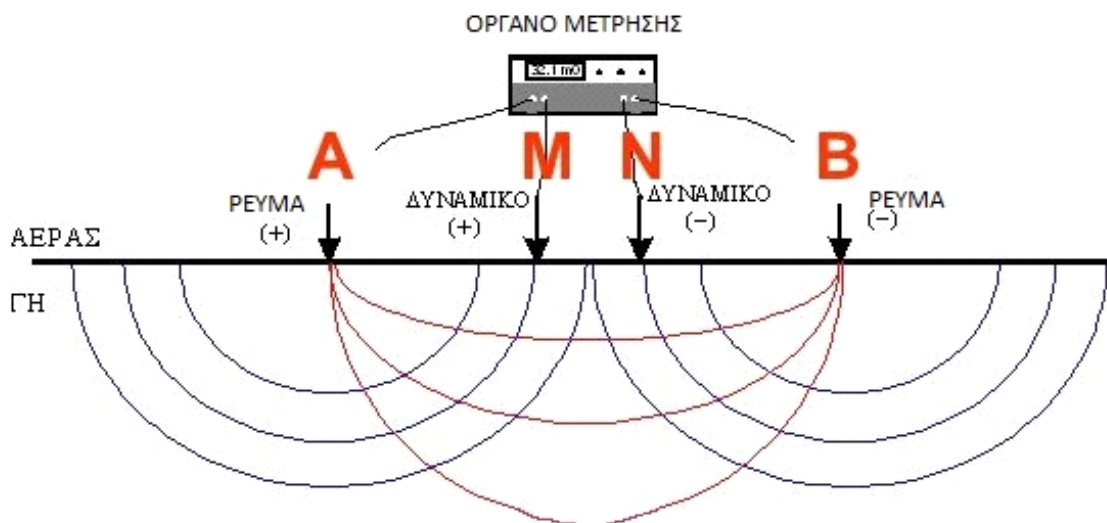
3.3 Τεκτονική εξέλιξη

Η τεκτονική της περιοχής συνδέεται με εφελκυστική δράση και κανονικά ρήγματα. Η δράση αυτή, η οποία ξεκίνησε από το Μειόκαινο και συνεχίζει ως σήμερα είναι έντονη. Πρωτοεφανίστηκε το Παλαιοζωικό με περιοχή δράσης την ζώνη της Σερβομακεδονικής. Ακολούθησαν δύο φάσεις πτυχώσεων στην ζώνη της Περιοδοπικής. Την περίοδο Άνω Ιουρασικό-Κάτω Κρητιδικό σχηματίζονται ισοκλινείς πτυχές και στο Τριτογενές λόγω ορογενέσης σχηματίζονται ανοιχτές, knick πτυχές, λεπιώσεις και επωθήσεις. Λόγω των σχηματισμών αυτών η Σερβομακεδονική βρίσκεται στρωματογραφικά πάνω από την Περιοδοπική. Επίσης, στο Μέσο Παλαιοζωικό διαμορφώνεται η Προμυγδονιακή λεκάνη η οποία γέμισε με νερό και σχημάτισε μια λίμνη. Κατά το Μειόκαινο-Πλειστόκαινο αποτίθονται ιζήματα στην περιοχή αυτή και στο Κάτω Πλειστόκαινο λόγω τεκτονικής διάρρηξης πραγματοποιείται βύθιση της Προμυγδονιακής λεκάνης και σχηματισμός της Μυδγονίας. Στην συνέχεια παρατηρείται διακοπή επικοινωνίας με τον Στριμωνικό. Ο συνδυασμός πτώσης στάθμης του νερού με την βύθιση της λεκάνης δημιούργησε τις δύο σημερινές λίμνες με ονόματα Βόλβη και Κορώνεια (Τρανός, 1998).

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι αποτελούν τμήμα των γεωφυσικών διασκοπήσεων και μέσω αυτών καθορίζονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων του επιφανειακού στρώματος του φλοιού της Γης. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με την μέτρηση των ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Σκοπός των μετρήσεων είναι η εύρεση της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την μέτρηση της τάσης που εμφανίζεται. Επίσης οι ηλεκτρικές μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: η πρώτη κατηγορία αφορά τις μετρήσεις φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων (παθητικές) όπως είναι το φυσικό δυναμικό και τα τελλουρικά ρεύματα ενώ στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μετρήσεις τεχνητών ηλεκτρικών ρευμάτων (ενεργές) όπως είναι για παράδειγμα οι μέθοδοι ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι ισοδυναμικές γραμμές και η επαγόμενη πόλωση. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων της Μυγδονίας λεκάνης χρησιμοποιήθηκε εξ ολοκλήρου η μέθοδος μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η διαδικασία αυτή υπάγεται στις ενεργές μεθόδους και σύμφωνα με αυτήν γίνεται μέτρηση της τάσης του ρεύματος μέσω του δυναμικού που εφαρμόζεται.



Εικόνα 4.1 Απεικόνιση της βασικής διάταξης των ηλεκτροδίων.

4.2 Είδη αγωγιμότητας

Κατά την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης εισάγεται στο εσωτερικό της Γης ηλεκτρικό ρεύμα με την βοήθεια ενός ζεύγους ηλεκτρονίων και στην συνέχεια γίνονται μετρήσεις του δυναμικού και της έντασης του ρεύματος σε διάφορες θέσεις της επιφάνειας της Γης. Η διάδοση του ρεύματος που εισαγάγαμε μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους: ο πρώτος συνδέεται με την ύπαρξη ιόντων αλάτων και ορυκτών μέσα στο νερό το οποίο βρίσκεται στους πόρους των πετρωμάτων (ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα), ο δεύτερος αφορά το ρεύμα που διαδίδεται μέσω ηλεκτρονίων διάσπαρτα κατανεμημένων στους γεωλογικούς σχηματισμούς που μελετάμε (ηλεκτρονική αγωγιμότητα) και τέλος ο τρίτος τρόπος αναφέρεται στις κυκλικές κινήσεις των ιόντων κρυσταλλικής δομής μονωτών τις οποίες δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα (διηλεκτρική αγωγιμότητα).

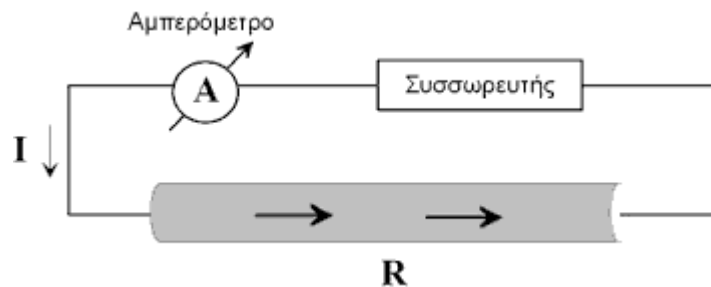
Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος: ο νόμος του Ohm συνδέει την διαφορά δυναμικού V , την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος I , και την ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού R . Η μαθηματική έκφραση του νόμου είναι η εξής:

$$V=I \cdot R$$

V = διαφορά δυναμικού σε μονάδες Volt (V)

I = ένταση του ρεύματος σε μονάδες Ampere (A)

R = τιμή της αντίστασης σε μονάδες Ohm (Ω)



Εικόνα 4.2 Σχηματική απεικόνιση του νόμου του Ohm.

4.3 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση υλικών της Γης και μεταβολές της

Λόγω του ότι η ποσότητα R του νόμου Ohm δεν εξαρτάται από τις διαστάσεις του υλικού στο οποίο έχει εισαχθεί το ρεύμα I , αναφέρθηκε ο όρος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ . Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ ενός στερεού κυλινδρικού σώματος ισούται με το γινόμενο της ηλεκτρικής αντίστασης R με την επιφάνεια διατομής του σώματος S προς το μήκος L του σώματος και εκφράζεται:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}$$

ρ = ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε μονάδες Ohm*m

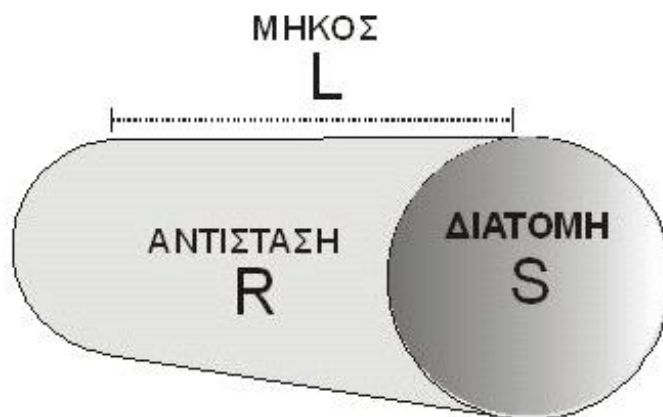
R = ηλεκτρική αντίσταση σε μονάδες Ohm

S = διατομή σώματος σε μονάδες m^2

L = μήκος σώματος σε μονάδες m

Επίσης η αντίστροφη ποσότητα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, συμβολίζεται με το σ και μετριέται σε μονάδες Siemens ανά μέτρο (S/m).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ εκφράζει την ευκολία με την οποία περνάει το ρεύμα μέσα από το μέσο το οποίο χαρακτηρίζει, και εξαρτάται από την θερμοκρασία, την πίεση, την παρουσία νερού καθώς και την χημική του σύσταση, το μέγεθος των πόρων των σχηματισμών και την ορυκτολογική σύσταση. Επομένως, χαμηλές τιμές της ειδικής αντίστασης σε έναν σχηματισμό δείχνουν ότι το ρεύμα ρέει με ευκολία μέσα από αυτόν σε αντίθεση με την περίπτωση που έχουμε υψηλές τιμές της παραμέτρου όπου το ρεύμα ρέει με μεγαλύτερη δυσκολία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα σχηματισμών με χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποτελούν τα ιζηματογενή πετρώματα ενώ τα μεταμορφωμένα και τα πυριγενή παρουσιάζουν συνήθως υψηλές τιμές αντίστασης.



Εικόνα 4.3 Αναπαράσταση της έκφρασης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι μια μεταβλητή παράμετρος η οποία παρουσιάζει διαφορετικές τιμές στα διάφορα πετρώματα και πολλές φορές ακόμα και στον ίδιο σχηματισμό. Η αιτία της διακύμανσης των τιμών οφείλεται στην παρουσία νερού μέσα στους σχηματισμούς το οποίο εξαρτάται από το πορώδες και από τον δείκτη GSI. Το πορώδες εκφράζει τον αριθμό των διακένων σε ένα πέτρωμα ενώ ο δείκτης GSI αποτελεί μια παράμετρο η οποία συνδέεται με την ταξινόμηση βραχομάζας.

Η σχέση που συνδέει το πορώδες ενός σχηματισμού με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση προέρχεται από τον νόμο του ARCHIE και η μαθηματική της έκφραση είναι η εξής (Archie, 1942):

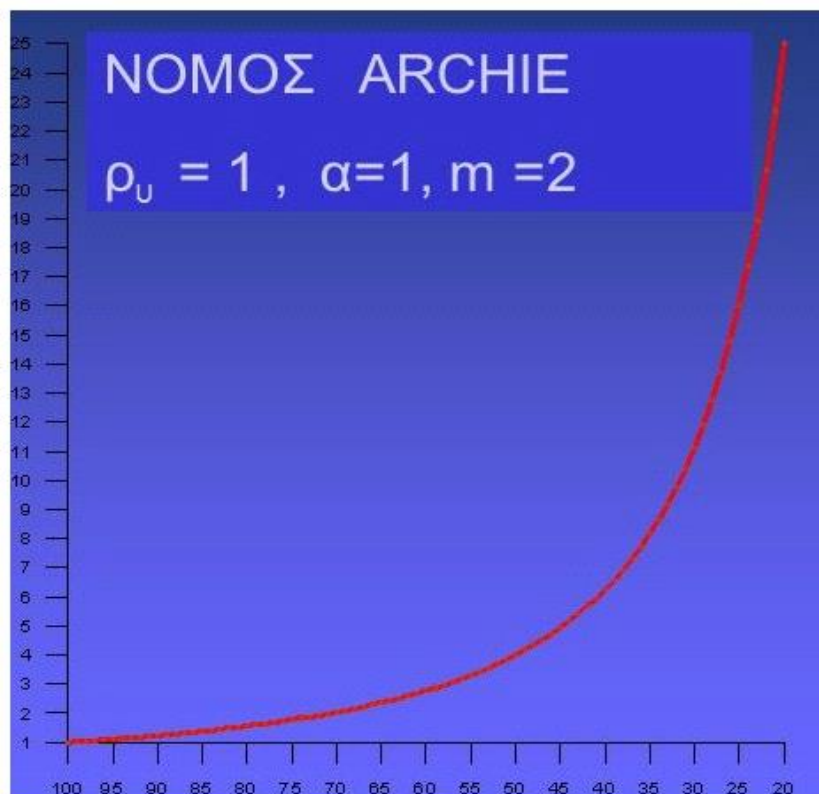
$$\rho = \alpha \rho_v \varphi^{-m}$$

ρ = αντίσταση του νερού των πόρων

φ = πορώδες

α, m = σταθερές

ειδική αντίσταση ρ (ohm-m)



Εικόνα 4.4 Μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ σύμφωνα με τον νόμο του Archie.

Το τελικό νούμερο του δείκτη GSI από ένα σύστημα ταξινόμησης εκφράζει τον βαθμό αποσάθρωσης που έχει το πέτρωμα και το σύστημα διακλάσεων που περιλαμβάνει. Με τον τρόπο αυτό καταλαβαίνουμε ότι όταν έχουμε μεγάλο δείκτη GSI σε έναν σχηματισμό αυξάνεται η είσοδος του νερού μέσα από τις υπάρχουσες διακλάσεις και με την ύπαρξη του ρευστού μειώνεται η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Marinos, 2004).

Τύπος εδάφους	Ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ (Ohm-m)
Έλη	30
Άργιλος-πηλός	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος	1000

Τέλος μια ακόμη παράμετρος που μεταβάλλει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι η θερμοκρασία καθώς με την αύξομείωσή της επηρεάζει το νερό στο εσωτερικό του εδάφους. Στην περίπτωση που έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται μείωση του ιζώδους του νερού με αποτέλεσμα την ελάττωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η σχέση που συνδέει την θερμοκρασία και την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι η εξής (Παπαζάχος, 2005):

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

όπου

ρ_{θ} = η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$

ρ_{18} = η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία 18°C

α_{θ} = ο θερμικός συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

4.4 Δυναμικό σε ομογενή γη

Πριν πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις του δυναμικού στην επιφάνεια της γης απαραίτητη ανάγκη είναι να εξετάσουμε την μεταβλητή από μια πηγή έχοντας σαν δεδομένο ότι η γη είναι ισότροπη και ομογενής. Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm ισχύει ότι:

$$E = J \rho$$

όπου

E = ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

J = πυκνότητα του ρεύματος

ρ = ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Όμως επειδή η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ακτινωτής συμμετρίας η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό εξαρτώνται από την ακτινική απόσταση και ισχύει:

$$E = \frac{-dv}{dr}$$

Επομένως από τις δυο προηγούμενες σχέσεις προκύπτει ότι:

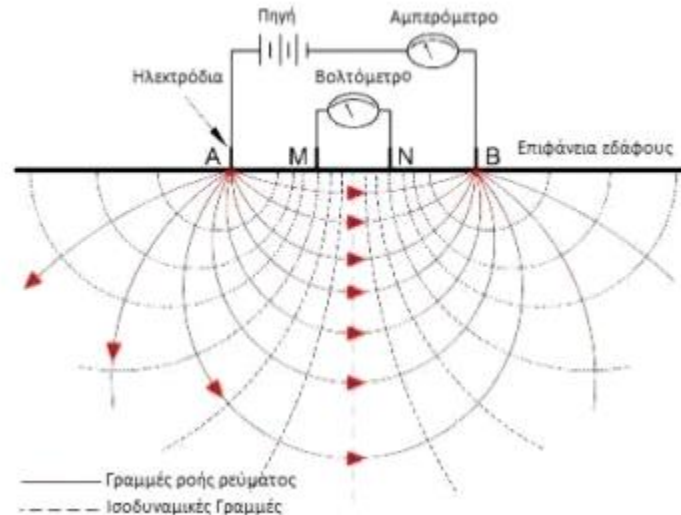
$$J = \frac{-1}{\rho} \frac{dv}{dr}$$

Επίσης η ένταση του ρεύματος σε μια επιφάνεια S με ακτίνα r έχει τιμή:

$$I = \int j ds \leq J = \frac{i}{2\pi r^2}$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει ότι το δυναμικό σε ομογενή και ισότροπη γη με θετικό πόλο έχει τιμή:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r}$$



Εικόνα 4.5 Σχηματική αναπαράσταση ισοδυναμικών επιφανειών και γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος. (Τσούρλος, 1995)

Στην περίπτωση που ο πόλος είναι αρνητικός έχουμε:

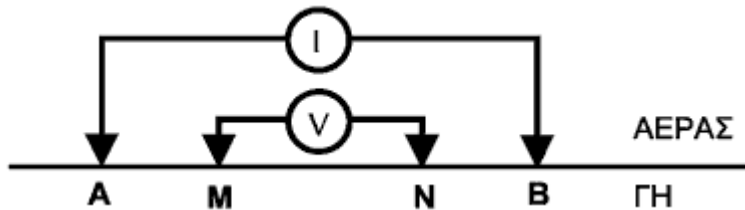
$$V = -\frac{\rho \cdot I}{2\pi r}$$

Και τέλος όταν ο πόλος βρίσκεται μέσα στο έδαφος η σχέση γίνεται:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{4\pi r}$$

Κατά την διάρκεια μετρήσεων σε ένα τμήμα της γης συνήθως χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια από τα οποία με τα δύο μετρείται το ρεύμα που εισάγεται και με τα υπόλοιπα δύο το δυναμικό και την μεταβολή της τάσης που συμβαίνει. Σύμφωνα με το σχήμα και την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

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



Εικόνα 4.6 Διάταξη ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού.

4.5 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Επειδή η Γη στην πραγματικότητα δεν είναι ένα ομογενές και ισότροπο μέσο αποτελεί ανάγκη η αναφορά της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η αντίσταση αυτή δεν είναι η πραγματική αλλά είναι η τιμή που θα είχε το έδαφος αν η γη λειτουργούσε σαν ομογενές και ισότροπο μέσο. Αποτελεί ένα μέσο όρο των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους, εξαρτάται από τις διατάξεις των ηλεκτροδίων και μεταβάλλεται με την αλλαγή αυτών. Η πραγματική αντίσταση υπολογίζεται από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιούνται.

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται μαθηματικά έχοντας υπόψη την προηγούμενη σχέση ως εξής:

$$\rho_a = \frac{2\pi R}{K}$$

ρ_a = φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

R = ηλεκτρική αντίσταση

K = γεωμετρικός παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από την διάταξη ηλεκτροδίων

4.6 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Η διάταξη των ηλεκτροδίων δυναμικού και ρεύματος στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους, αλλά υπάρχουν 5 οι οποίοι χρησιμοποιούνται περισσότερο από όλες τις άλλες μεθόδους. Οι διατάξεις αυτές είναι οι: Wenner, , Shlumberger, πόλου-πόλου, πόλου-διπόλου, διπόλου-διπόλου (Τσούρλος, 1995).

■ Διάταξη Wenner: όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7 τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος A,B και η απόσταση μεταξύ τους είναι ίδια. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση εκφράζεται από την σχέση:

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

■ Διάταξη Schlumberger: η διάταξη αυτή παρουσιάζει ομοιότητα με την πρώτη, διαφέρει όμως ως προς την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού μεταξύ τους, καθώς βρίσκονται πολύ κοντά στο κέντρο σε αντίθεση με τα ηλεκτρόδια ρεύματος τα οποία είναι τοποθετημένα σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτό. Στην περίπτωση αυτή η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$P_a = \frac{\pi \Delta V L^2}{2Li}$$

■ Διάταξη πόλου-πόλου: στην διάταξη πόλου-πόλου τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκονται αριστερά από τα ηλεκτρόδια δυναμικού και παρατηρείται μεταβολή της απόστασης του ενός από τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού. Αν η απόσταση AM είναι ίση με α τότε η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τον ίδιο τύπο στην διάταξη Wenner, δηλαδή:

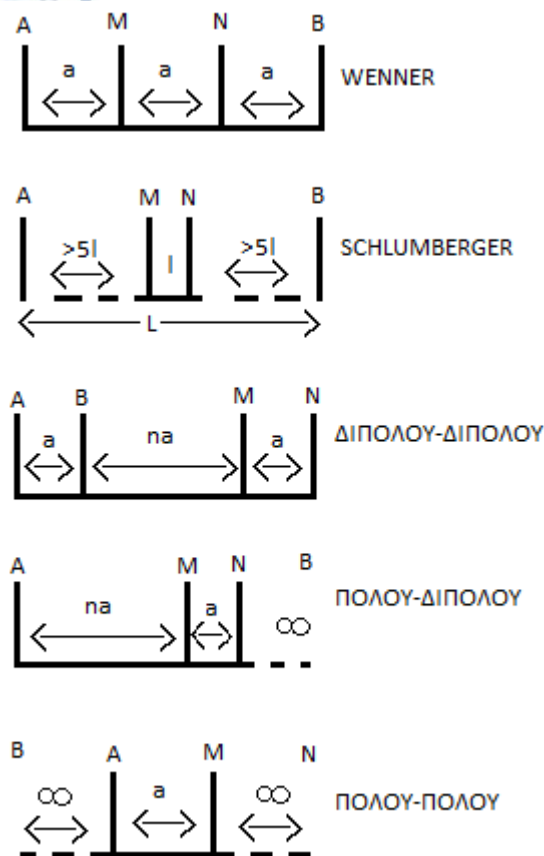
$$P_a = \frac{2\pi a \Delta V}{I}$$

■ Διάταξη πόλου-διπόλου: από το σχήμα παρατηρείται ότι τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι τοποθετημένα εσωτερικά των ηλεκτροδίων ρεύματος και επειδή η απόσταση του B σε σχέση με τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια είναι πολύ μεγάλη, οι τιμές του γεωμετρικού παράγοντα για τις αποστάσεις του B από το M και N ηλεκτρόδιο είναι μηδέν. Τέλος αν η απόσταση AM είναι ίση με na και η MN ίση με α, η φαινόμενη ειδική αντίσταση εκφράζεται ως εξής:

$$P_a = \frac{2\pi n(n+1)a\Delta V}{i}$$

■ Διάταξη διπόλου-διπόλου: τα ηλεκτρόδια ρεύματος στην διάταξη διπόλου-διπόλου αριστερά και σε μεγάλη απόσταση από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Τα δίπολα έχουν απόσταση ίση με α και η απόσταση μεταξύ τους είναι ίση με na. Επομένως η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από την σχέση:

$$P_a = \frac{-\pi n(N+1)(n+2)a\Delta V}{i}$$



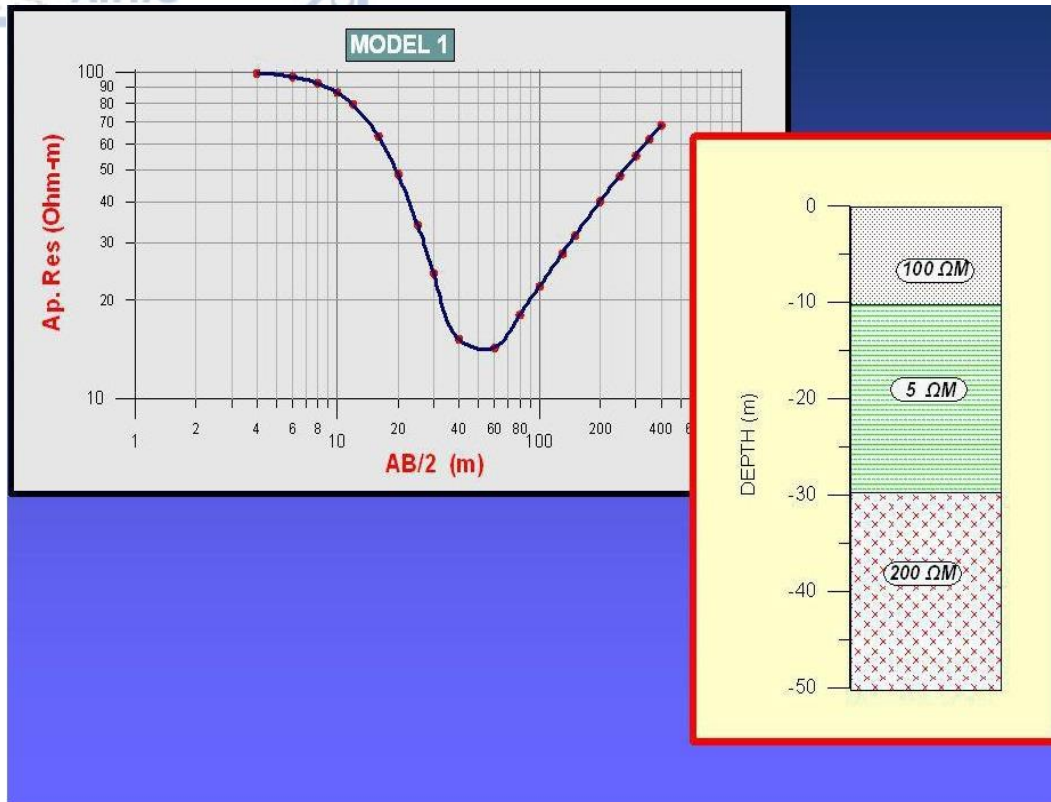
Εικόνα 4.7 Απεικόνιση πέντε βασικών διατάξεων των ηλεκτροδίων στην διαδικασία μέτρησης δυναμικού και ρεύματος.

4.7 Τρόποι μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους, ανάλογα με την μελέτη του εδάφους που επιθυμούμε. Ο πρώτος ονομάζεται βυθοσκόπηση και αφορά την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης, ο δεύτερος καλείται όδευση όπου χρησιμοποιείται για την πλευρική μεταβολή της αντίστασης και τέλος, ο τρίτος τρόπος ονομάζεται δισδιάσταση διασκόπηση η οποία σχετίζεται με τον συνδυασμό των μεταβολών της αντίστασης.

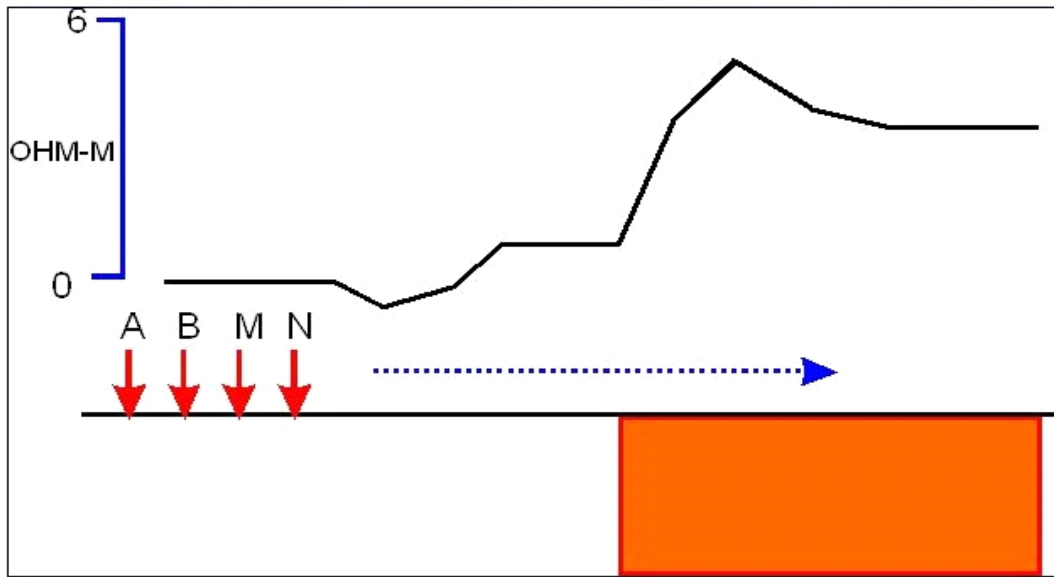
- Βυθοσκόπηση: κατά την διαδικασία αυτή μετριέται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στηριζόμενη στην απομάκρυνση των ηλεκτροδίων ρεύματος μεταξύ τους με αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους διείσδυσης. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί κατά την διάρκεια των μετρήσεων η ύπαρξη ενός σταθερού κέντρου εκατέρωθεν του οποίου θα απομακρύνονται τα ηλεκτρόδια. Το βάθος διείσδυσης όμως μεταβάλλεται σε σχέση με τις διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων. Για τον λόγο αυτό στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι αντιστοιχίες των τιμών του συνολικού μήκους L με το βάθος διείσδυσης για τις τέσσερις διατάξεις ηλεκτροδίων. Επίσης η βυθοσκόπηση εφαρμόζεται συνήθως σε ιζηματογενείς λεκάνες όπου απαιτείται η έρευνα σε βάθος και η διάταξη που χρησιμοποιείται περισσότερο

για την μέθοδος της βυθοσκόπησης είναι η Schlumberger λόγω της καλής συμμετρίας των ηλεκτροδίων.



Εικόνα 4.8 Παράδειγμα Βυθοσκόπησης

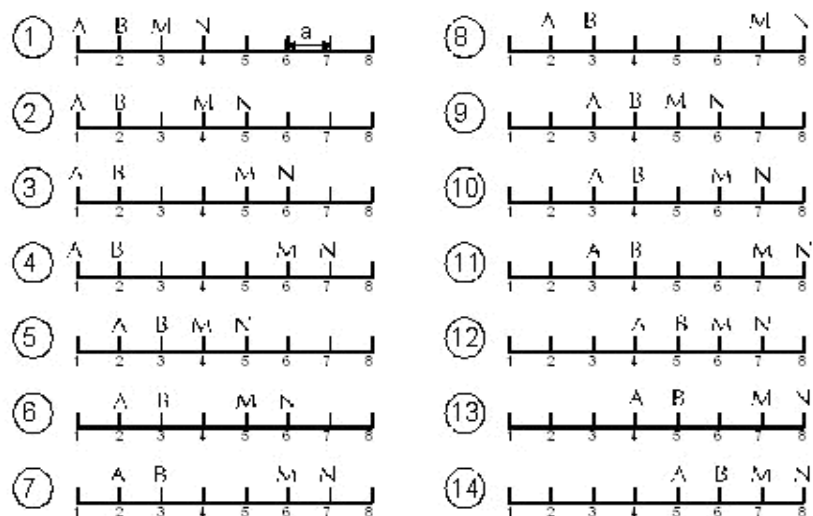
- Όδευση: η μέθοδος της όδευσης χρησιμοποιείται για την εύρεση πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Κατά την διαδικασία των μετρήσεων τα ηλεκτρόδια μετακινούνται πλευρικά, έχοντας σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους, με σταθερό βήμα και το βάθος παραμένει ίδιο. Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως στην αρχαιομετρία αλλά και στον εντοπισμό ρηγμάτων ή φακών άμμου.



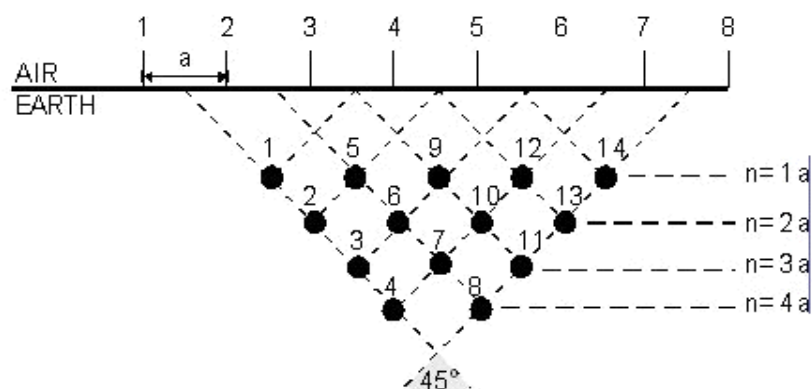
Εικόνα 4.9 Όδευση στον εντοπισμό ρήγματος.

- Δισδιάσταση διασκόπηση: ο τρόπος αυτός μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αφορά τον συνδυασμό των δύο προηγούμενων μεθόδων, της όδευσης και της βυθοσκόπησης. Κατά την διαδικασία πραγματοποιούνται είτε βυθοσκοπήσεις κατά μήκος μιας γραμμής έρευνας είτε οδεύσεις με σταδιακή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων. Σε πρώτο στάδιο σχηματίζεται μια ψευδοτομή η οποία αποτελείται από έναν χάρτη φαινομενικών αντιστάσεων. Στην συνέχεια υλοποιείται η ηλεκτρική τομογραφία έχοντας σαν χαρακτηριστικά την αυτοματοποιημένη λήψη μετρήσεων και τεχνικές ερμηνείας που επιτρέπουν την απεικόνιση των ιδιοτήτων του υπεδάφους. Τέλος το αποτέλεσμα της μελέτης που παράγεται είναι ένα δισδιάστατο μοντέλο της περιοχής το οποίο αντικατοπτρίζει την μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

(a)



(b)



Εικόνα 4.10 Συνδυασμός Βυθοσκόπησης και Όδευσης. (Τσούρλος, 1995)

5. Μελέτη και λήψεις μετρήσεων στην ύπαιθρο

5.1 Εξοπλισμός

Ο απαραίτητος εξοπλισμός που απαιτείται για την διαδικασία των μετρήσεων στην περιοχή της μελέτης αποτελείται από τέσσερα αντικείμενα: το SYSCAL PRO, την μπαταρία, τα καλώδια και τα ηλεκτρόδια

- SYSCAL PRO: το όργανο αυτό αποτελεί ένα πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και χρησιμοποιείται για έρευνα με συνεχή παροχή ρεύματος. Επιτρέπει την εκτίμηση μετρήσεων υψηλής ακρίβειας λόγω του αυτοματοποιημένου αντισταθμιστή του δυναμικού, του ενισχυμένου σήματος και της ένδειξης του σφάλματος που συμβαίνει. Η μέγιστη τάση πηγής του οργάνου είναι τα 800V και πραγματοποιεί την δημιουργία ρεύματος με ένταση της τάξεως των 1000A. Σε σπάνιες περιπτώσεις οι τιμές του ρεύματος ενδέχεται να έχουν πολύ υψηλότερες τιμές. Το όργανο έχει την ικανότητα να χρησιμοποιεί εξωτερικές και εσωτερικές μπαταρίες όπως επίσης περιλαμβάνει και εσωτερικό πολυπλέκτη 48 θέσεων με τον οποίο μπορούν να ολοκληρωθούν πολυάριθμες μετρήσεις δυναμικού ταυτόχρονα.



Εικόνα 5.1 Όργανο λήψης μετρήσεων SYSCAL PRO.

- Μπαταρία: η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε παρήγαγε 12 V τάση
- Καλώδια: τα καλώδια που εφαρμόστηκαν στις μετρήσεις της περιοχής αποτελούνται από χαλκό και είναι πολυκαναλικά. Το μήκος τους συνολικά φτάνει τα 1000 μέτρα και η πολύ καλή μόνωση των καλωδίων αποτελεί αναγκαιότητα για την ορθή διαδικασία των μετρήσεων δυναμικού.



Εικόνα 5.2 SYSCAL PRO, καλώδια και πολυπλέκτης.

- Ηλεκτρόδια: τα ηλεκτρόδια των μετρήσεων έχουν δημιουργηθεί από χαλκό ή από ατσάλι. Έχουν το σχήμα μιας ράβδου και συνδέονται με τα υπόλοιπα όργανα μετρήσεων. Το μήκος τους φτάνει τα 60 εκατοστά και ο αριθμός των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 21.

5.2 Πιθανές αστοχίες

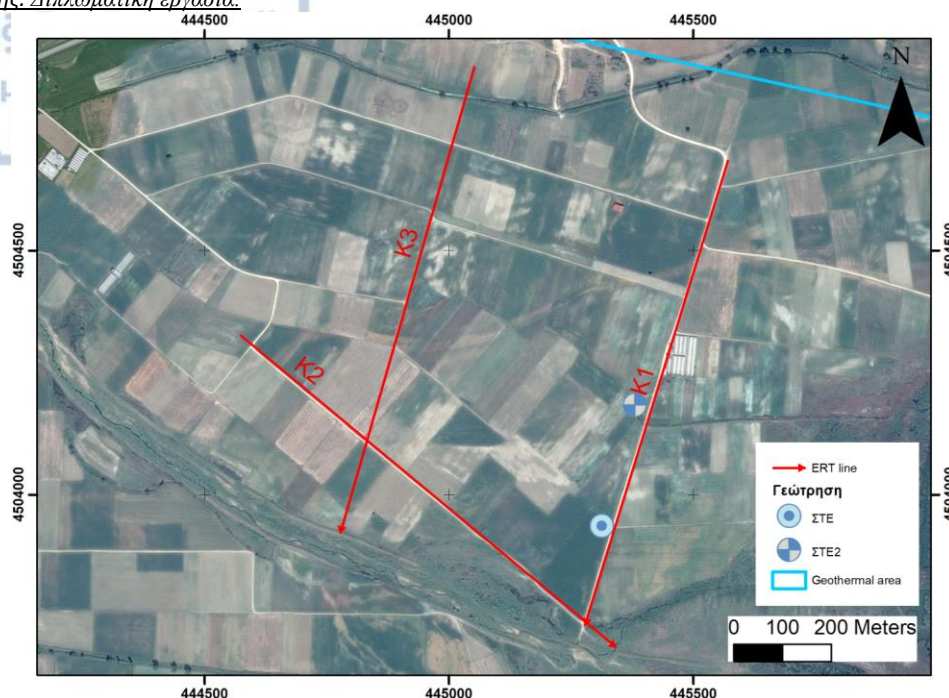
Οι κυριότερες αστοχίες που μπορούν να εμφανιστούν στην διαδικασία μετρήσεων μιας περιοχής και να διαφοροποιήσουν τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι δύο, η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και η διαρροή. Οι αστοχίες αυτές πηγάζουν από το φαινόμενο της σύζευξης που δημιουργείται μεταξύ των κυκλωμάτων δυναμικού και ρεύματος. Η σύζευξη όταν εμφανίζεται αλλοιώνει την τιμή του ρεύματος με συνέπεια τα αποτελέσματα των τάσεων κατά την διάρκεια των μετρήσεων να είναι λανθασμένα.

- Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή: η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή εμφανίζεται στα κυκλώματα δυναμικού και ρεύματος. Επίσης είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης των κυκλωμάτων αυτών, δηλαδή μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ τους. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων είναι απαραίτητο να ξετυλίγεται ολόκληρα τα καλώδια κυκλώματος της τάσης για την αποφυγή τέτοιου είδους αστοχιών
- Διαρροή: η διαρροή είναι η σημαντικότερη αστοχία κατά την διάρκεια των μετρήσεων και πραγματοποιείται συνήθως στα κυκλώματα ρεύματος σε ένα κύκλωμα τάσης. Στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων μετά την διαδικασία των μετρήσεων εμφανίζει απότομες αλλαγές της κλίσης στις γεωηλεκτρικές καμπύλες ή και αλλοιώνει τις καμπύλες αυτές. Επίσης είναι πιθανό η διαρροή σε ένα κύκλωμα ρεύματος να έχει αρνητική επίδραση ακόμα και σε ένα γειτονικό κύκλωμα δυναμικού. Για την αντιμετώπιση της αστοχίας αυτής απαιτείται να διαχωρίζονται τα καλώδια ρεύματος και οι πηγές από το έδαφος με κάποιο μονωτικό υλικό.

5.3 Διαδικασία μετρήσεων

Η διαδικασία των μετρήσεων ακολουθεί τον σχεδιασμό σύμφωνα με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί. Κατά τον σχεδιασμό μελετάται ο χώρος της έρευνας, η μορφολογία του εδάφους, η γεωλογία της περιοχής, παλαιότερες σχετικές εργασίες, το επιθυμητό βάθος, η διάταξη των ηλεκτροδίων, προετοιμάζεται ο απαραίτητος εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί και τέλος υπολογίζεται ο χρόνος που θα χρειαστεί για την έρευνα. Στην συνέχεια μετά τον απαραίτητο σχεδιασμό ξεκίνησε η διαδικασία των μετρήσεων στην ύπαιθρο. Με την βοήθεια των καθηγητών αλλά και των μεταπτυχιακών φοιτητών του τμήματος οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ευκολία. Σε πρώτο στάδιο ολοκληρώθηκε η μεταφορά των παραπάνω κοντά στο χωριό Νυμφόπετρα και στο σημείο της μελέτης. Στην συνέχεια μεταφέρθηκε ο εξοπλισμός στο σημείο όπου ξεκίνησαν οι μετρήσεις έχοντας χωρισθεί σε δύο ομάδες για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία το συντομότερο δυνατόν. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε 3 τομογραφίες (δύο παράλληλες μεταξύ τους και μία κάθετη στις υπόλοιπες).

Η ανάπτυξη της συστοιχίας ηλεκτροδίων έγινε με την χρήση δύο πολυκάναλων καλωδίων μήκους 500 μέτρων τα οποία αναπτύσσονται εκατέρωθεν του κέντρου της τομογραφίας όπου βρίσκεται και το όργανο καταγραφής. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θέσεις των τομογραφιών που μετρήθηκαν.



Εικόνα 5.3 Θέσεις των τριών τομογραφιών στην περιοχή μελέτης.

6. Επεξεργασία δεδομένων

6.1 Εισαγωγή

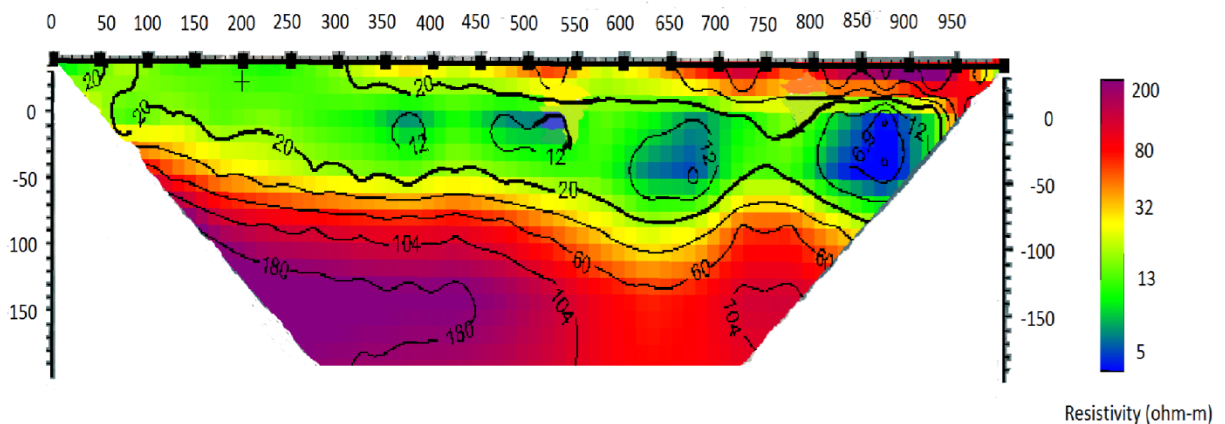
Η ηλεκτρική τομογραφία όπως και η μέθοδος διδιάστατης διασκόπησης χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Αποτελεί τον συνδυασμό της όδευσης και της βυθοσκόπησης σύμφωνα με τις οποίες πραγματοποιούνται μετρήσεις οριζόντια και κάθετα στο έδαφος αντίστοιχα. Οι μετρήσεις της μεθόδου αφορούν τόσο το μήκος σε μια περιοχή έρευνας όσο και το βάθος αυτής. Επίσης τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι πληρέστερα σε αναλογία με τα αντίστοιχα από άλλες μεθόδους αλλά και οι πληροφορίες που εξασφαλίζονται είναι πληθέστερες όσον αφορά το υπεδάφος. Πριν από την διαδικασία των μετρήσεων σύμφωνα με την μέθοδο της διδιάστατης διασκόπησης σχηματίζεται μια ψευδοτομή η οποία αποτελεί την κατανομή των φαινομενικών αντιστάσεων της περιοχής. Κατά την δημιουργία της ψευδοτομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων. Στην συνέχεια της διαδικασίας πραγματοποιείται υπολογισμός της πραγματικών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων μέσω της ψευδοτομής όπου παρουσιάζει τις φαινόμενες αντιστάσεις οι οποίες αποτελούν τις αλλοιωμένες τιμές των πρώτων. Κατόπιν της εύρεσης των τιμών αυτών με αυτοματοποιημένα συστήματα λήψεις μετρήσεων λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζει η χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων για μεγάλο πλήθος δεδομένων, πραγματοποιείται η δημιουργία των ηλεκτρικών τομογραφιών της περιοχής. Τα δεδομένα και οι ιδιότητες από τις τομογραφίες που σχηματίστηκαν είναι απαραίτητο να ελεγχθούν όσον αφορά τον βαθμό του σφάλματος που περιέχουν. Ο έλεγχος αυτός εκτελείται με το πρόγραμμα αντιστροφής RES2DINV. Κατά την λειτουργία του προγράμματος γίνεται διαχωρισμός του υπεδάφους σε παραλληλόγραμμα και θεωρείται σε κάθε ένα από αυτά σταθερή η πραγματική ειδική αντίσταση. Στην συνέχεια ορίζοντας μια τιμή για την πραγματική αντίσταση

δημιουργείται ένα αρχικό μοντέλο υπολογισμού της φαινομενικής αντίστασης και γίνεται σύγκριση των τιμών αυτών με τις ανάλογες που έχουν εξαχθεί από την ύπαιθρο. Με τον τρόπο αυτό δίνοντας διαφορετικές τιμές της πραγματικής αντίστασης το πρόγραμμα υπολογίζει φαινόμενες αντιστάσεις και τις συγκρίνει με τις αντίστοιχες που μετρήθηκαν και η διαδικασία συνεχίζεται υπολογίζοντας τα σφάλματα μεταξύ της διαφοράς των τιμών των φαινόμενων αντιστάσεων που υπάρχει. Τέλος όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί επιλέγεται το μοντέλο με το μικρότερο δυνατό σφάλμα και παρουσιάζεται η τελική γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ερμηνείας των μετρήσεων σε κάθε τομογραφία.

6.2 Τομογραφία K1

Στην τομογραφία K1 του παρακάτω σχήματος απεικονίζεται η μεταβολή της πραγματικής ειδικής αντίστασης σε μήκος 1000 μέτρων και βάθος περίπου 250 μέτρων. Η μεταβολή αυτή της αντίστασης αντιπροσωπεύεται από διάφορα χρώματα όπως φαίνεται στο δεξί μέρος του σχήματος. Κάθε πέτρωμα ή και κάθε τμήμα πετρώματος ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτό παρουσιάζει διαφορετική αντίσταση και επομένως διαφορετικό χρώμα στο γεωηλεκτρικό μοντέλο.



Εικόνα 6.1 Τομογραφία K1.

Η κατανομή των μεταβολών της αντίστασης στην τομογραφία K1 είναι η εξής:

- Οι μικρότερες τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 6-12 Ohmm παρατηρούνται σε βάθη έως 60 μέτρα από τα 350 έως τα 930 μέτρα. Οι μικρές αυτές τιμές σχετίζονται πιθανά με παρουσία γεωθερμικών ρευστών αλλά μπορεί να δηλώνουν επίσης και παρουσία αργιλικών υλικών.
- Στο διάστημα από τα 650 έως το τέλος της τομογραφίας και από την επιφάνεια παρατηρούνται υψηλές τιμές της αντίστασης σε μικρά βάθη της τάξεως των 50 μέτρων. Τα πετρώματα στο σημείο αυτό αποτελούν αδρομερείς αποθέσεις χωρίς να αποκλείεται και η παρουσία τραβερτινοειδών αποθέσεων λόγω της γεωθερμικής δράσης στην περιοχή.
- Ενδιάμεσες τιμές της αντίστασης 20-80 ohm-m παρατηρούνται σε όλη την έκταση της επιφάνειας των μετρήσεων και σε βάθη τα 80 μέτρα. Στα σημεία

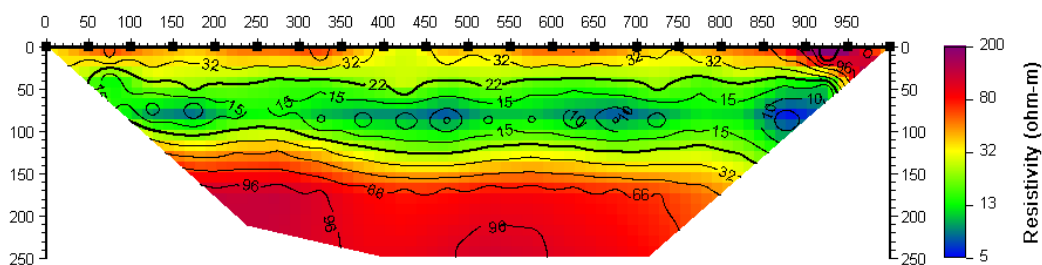
αυτά βρίσκονται μεταλλικά ιζήματα τα οποία αποτελούν αποσθρωμένα υλικά της περιοχής και έχουν αποθεθεί υπερκείμενα του υποβάθρου.

- Οι μεγαλύτερες τιμές της αντίστασης 80-180 ohm-m εμφανίζονται σε βάθη μεγαλύτερα των 80 μέτρων και αντιστοιχούν στο υπόβαθρο της περιοχής το οποίο περιλαμβάνει τον διμαρμαρυγικό γνεύσιο ο οποίος αποτελεί ένα υλικό το οποίο δεν μπορεί να διαπεράσει εύκολα το ηλεκτρικό ρεύμα.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σημειώνεται στην περιοχή από τα 550 έως τα 700 μέτρα της τομογραφίας όπου παρατηρείται μία ασυνέχεια στις τιμές των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η ασυνέχεια αυτή πιστεύεται ότι συνδέεται με ρηξιγενή ζώνη από την οποία και πραγματοποιείται άνοδος των γεωθερμικών ρευστών.

6.3 Τομογραφία K2

Η ηλεκτρική τομογραφία K2 αποτελεί το δεύτερο σκέλος των μετρήσεων και περιλαμβάνει το μοντέλο της αντίστασης του υπεδάφους για ακόμα 1000 μέτρα. Επίσης είναι σημαντικό να επισημανθούν οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων που έχουν σχηματισθεί για τα ασφαλέστερα συμπεράσματα της έρευνας, επομένως παρακάτω αναφέρονται οι διαφορές αυτές.

- Η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπόβαθρο στην τομογραφία K2 εμφανίζεται με μικρότερες τιμές στα ίδια βάθη και επιφανειακά σημεία σε αναλογία με την τομογραφία K1.
- Επίσης οι τιμές της αντίστασης στην K2 από τα 100 έως τα 200 μέτρα στην επιφάνεια των μετρήσεων και σε βάθη 50 έως 100 μέτρα είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές στην K1 τομογραφία



Εικόνα 6.2 Τομογραφία K2.

Η μεταβολή των αντιστάσεων στην τομογραφία K2 έχει την εξής ανάλυση:

- Οι μικρότερες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 10-22 ohm-m παρατηρούνται σε βάθη 50-100 μέτρα και σε όλη την επιφανειακή έκταση της τομογραφίας. Στα σημεία αυτά εμφανίζονται ιζήματα όπως άμμος και άργιλος στα οποία πιθανόν να υπάρχουν και γεωθερμικά ρευστά

- Ενδιάμεσες τιμές αντίστασης 32 ohm-m εμφανίζονται σε όλη την έκταση της επιφάνειας της τομογραφίας και σε πολύ μικρά βάθη. Οι θέσεις αυτές περιλαμβάνουν επίσης ιζήματα.
- Οι μεγαλύτερες τιμές του μοντέλου της τομογραφίας K2 εντοπίζονται σε βάθη που κυμαίνονται μεταξύ 150 και 250 μέτρων. Επιφανειακά βρίσκονται σε όλη την έκταση της τομογραφίας και στις περιοχές αυτές υπάρχει το υπόβαθρο της περιοχής (διμαρμαρυγικός γενεύσιος). Όπως και στην πρώτη τομογραφία παρατηρούνται πλευρικές διαφοροποιήσεις στις τιμές της αντίστασης που πιθανά οφείλονται σε επιλεκτικές διόδους ανόδου γεωθερμικών ρευστών μέσω ρηξιγενών ζωνών.

6.4 Τομογραφία K3

Η τομογραφία K3 αποτελεί το τελευταίο μοντέλο της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή και η επιφανειακή του έκταση όπως και οι υπόλοιπες τομογραφίες είναι 1000 μέτρα.

Είναι παράλληλη και βρίσκεται σε απόσταση 500 μέτρων δυτικά της K1.

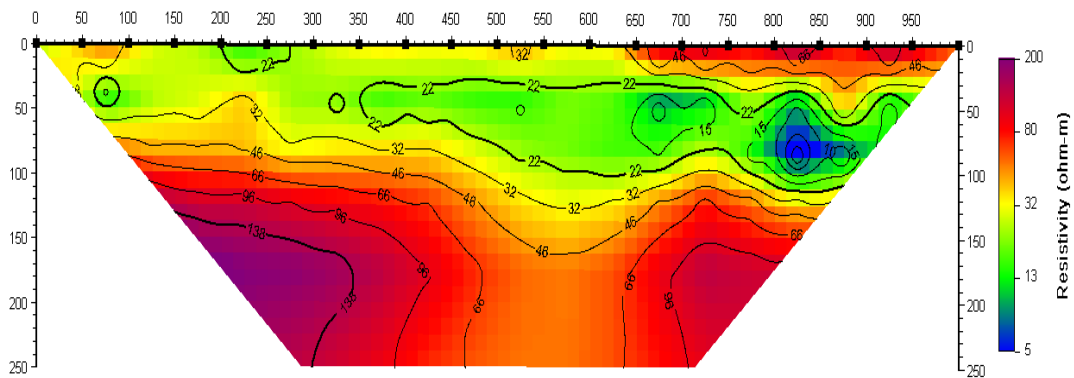
Η γεωηλεκτρική δομή παρουσιάζει πάρα πολλές ομοιότητες με την K1 τόσο στις ιζηματογενείς αποθέσεις όσο και στην ρηξιγενή ζώνη που εντοπίζεται στον σχηματισμός του υπόβαθρου.

Οι διαφορές με την τομογραφία K1 παρουσιάζονται παρακάτω:

- Στην επιφανειακή έκταση από την αρχή της τομογραφίας έως τα 800 μέτρα και σε βάθος έως 50 μέτρα η αντιστάσεις της τομογραφίας K3 παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές σε αναλογία με τις αντίστοιχες της τομογραφίας K1
- Οι τιμές των αντιστάσεων σε βάθη από 70 έως 150 μέτρα στα πρώτα 350 μέτρα της επιφάνειας της τομογραφίας K3 είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές αντιστάσεων της K1 τομογραφίας

Οι διαφορές μεταξύ των τομογραφιών K2 και K3 είναι οι εξής:

- Η τομογραφία K2 σε όλη της έκτασή της και σε βάθη από 50 έως 100 μέτρα εμφανίζει μικρότερες αντιστάσεις σε αντίθεση με την K3 τομογραφίας που στις ίδιες θέσεις παρουσιάζει εμφανώς μεγαλύτερες.
- Η τομογραφία K3 σε βάθη από 70 έως και σε βαθύτερα σημεία των 150 μέτρων και στα πρώτα 370 μέτρα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων σε αναλογία με τις αντιστάσεις ίδιων σημείων στην τομογραφία K2.



Εικόνα 6.3 Τομογραφία K3.

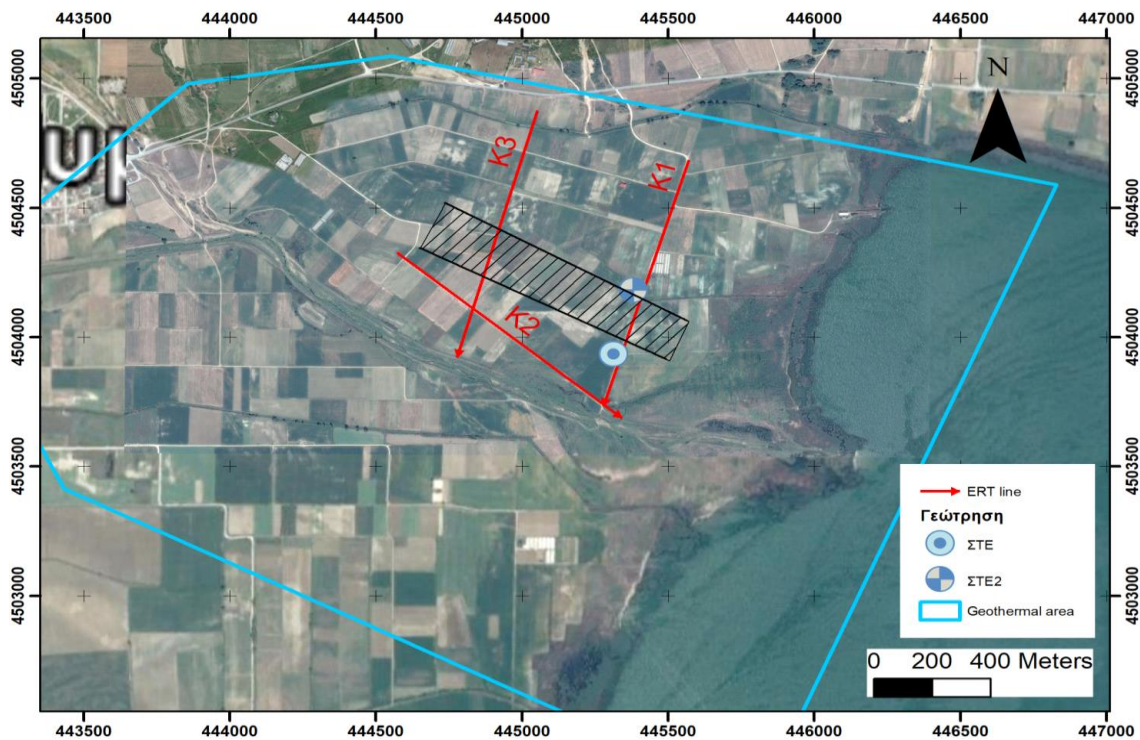
Η κατανομή των πραγματικών αντιστάσεων της τομογραφίας K3 είναι η εξής:

- Οι μικρότερες τιμές αντιστάσεων 5-15 ohm-m εμφανίζονται σε βάθος από 50 έως 100 μέτρα και σε επιφανειακή έκταση τομογραφίας από τα 800 έως τα 900 μέτρα. Στα σημεία αυτά υπάρχουν ιζήματα με χαμηλές αντιστάσεις όπως είναι η άμμος και η άργιλος και για τον λόγο αυτό οι τιμές των αντιστάσεων είναι χαμηλές.
- Οι ενδιάμεσες τιμές αντιστάσεων 15-22 ohm-m βρίσκονται σε όλη την έκταση της τομογραφίας σε βάθη από 20 έως 120 μέτρα. Στα βάθη αυτά εμφανίζονται ιζήματα τα οποία επιτρέπουν την ροή ρεύματος έως έναν βαθμό και με τον τρόπο αυτό παρουσιάζουν αντιστάσεις μικρές.
- Οι μεγαλύτερες αντιστάσεις στην τομογραφία K3 έχουν τιμές από 66 έως 138 ohm-m, εντοπίζονται σε βάθη από 100 έως 250 μέτρα και βρίσκονται σε όλη την έκτασή της επιφανειακά. Στις περιοχές αυτές εμφανίζεται το υπόβαθρο της περιοχής το οποίο εμποδίζει σε μεγάλο βαθμό της ροή του ρεύματος μέσα από αυτό.

7. Συμπεράσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν έπειτα από τις μετρήσεις που καταγράφηκαν στο ύπαιθρο, παίρνοντας πάντα υπόψη τις μελέτες που έχουν προηγηθεί στην περιοχή, για καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα,

- * Στην περιοχή παρατηρείται ρηξιγενής ζώνη η οποία ορίζεται στις περιοχές μικρών τιμών των αντιστάσεων στον σχηματισμό του υποβάθρου που εντοπίζεται σε βάθη μεγαλύτερα των 90 μέτρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα θερμά ύδατα να ακολουθούν ανοδική πορεία στα επιμέρους στρώματα.
- * Ένα πιθανό σενάριο για τις μικρές αντιστάσεις των σχηματισμών στις τομογραφίες είναι η υψηλή αλατότητα που μπορεί να παρουσιάζουν τα γεωθερμικά ρευστά.
- * Μεγαλύτερη παρουσία γεωθερμικών ρευστών στις ιζηματογενείς αποθέσεις αναμένεται στο ανατολικό και νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας.



Εικόνα 7.1 Θέση της ρηξιγενούς ζώνης που εντοπίστηκε στη περιοχή έρευνας.

8. Βιβλιογραφία

- Archie, G. E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, 146, 54–67, 1942
- Edwards, L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Geophysics, 42, 1020-1036.
- G. Tsokas, P. Soupios, P. Tsourlos, G. Vargemezis, A. Savvaidis, C. Paliadeli-Saatsoglou, S. Drougou, 1999, Geophysical investigations in the area between Eukleia's temple and the theater in ancient Aegae (Verghina) using various methods, Physics in Culture, Ed. K. Paraskevopoulos, An Aristotle University Publication ISBN 960-243-573-9.
- Harinarayana, T. and Zlotnicki, J. (2006). Journal of applied geophysics 58 (2006) 263-264
- Savvaidis, a.s., Pedersen, L.B., Tsokas, G.N. and Dawes, G.J. (2000). Structure of the Mygdonia basin (N.Greece) inferred from MT and gravity data, Tectonophysics 317 (2000) 171-186
- Thanasoulas, C., Tselsntis, G-A. and Traganos G. (1987) A preliminary resistivity investigation (ves) of the Langada hot springs area in Northern Greece.
- Widodo. (2012). Multidimensional interpretation of near surface Electromagnetic data Measured in Volvi Basin, Northern Greece. Doctoral thesis
- Zhody, A. (1989). A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics, 54, 245-253.

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

- Θανατούλας, Κ. (1983). Γεωφυσική διασκόπηση της Μυγδονίας λεκάνης και της ευρύτερης περιοχής. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μουντράκης, Δ. (2010) Γεωλογία της Ελλάδας. Η γεωλογική δομή η κινηματική της παραμόρφωσης και η γεωτεκτονική εξέλιξη των ορεινών όγκων Πάικου και Τζένας. Univ. Stud. Press, Θεσσαλονίκη
- Παπαζάχος Β.Κ. (2013). Εισαγωγή στη γεωφυσική, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- Σπυρίδης, Α., Κουτάλου, Β., Ο.Ε.-“Υετός”, Πετλέρος, Β., Λιόνης, Μ., Λεβογιάννης, Μ., (2015). Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπόγειων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας-Θράκης και Θεσσαλίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων
- Τσούρλος, Π., Βαργεμέζης, Γ. Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Γεωφυσικής Διασκόπησης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Φ.Μ.Σ. Α.Π.Θ. Θανατούλα, Κ. (1983). Γεωφυσική μελέτη Μυγδονίας Λεκάνης. Διδακτορική Διατριβή.
- Ψιλοβίκος Α. (1977) : Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας (Λαγκαδά-Βόλβης).