

2012

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕ ΤΙΤΛΟΣ : << Συμβολή στη μελέτη της γεωλογικής δομής της λεκάνης Μυγδονίας με τη μέθοδο της γεωηλεκτρικής τομογραφίας >>

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΠΘ : ΤΣΟΥΡΛΟΣ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ: ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ
ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ ΑΕΜ 3826



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	
2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ.....	5
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ.....	6
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	9
3.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	10
3.3 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	11
3.4 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΓΗΣ	12
3.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	14
3.6 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΩΔΙΩΝ.....	15
3.7 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΩΔΙΩΝ.....	20
4. ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΥΠΑΙΘΡΟ	
4.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	23
4.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΠΑΙΘΡΟ....	26
4.3 ΣΚΟΠΟΣ ΑΛΛΗΛΟΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	26
4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	28
5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
5.1 ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ERT 1	32
5.2 ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ERT 2	33
5.3 ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ERT 3	35
5.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ERT.....	36
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	37
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	40

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ



ΣΧΗΜΑ 1: Λεκάνη Μυγδονίας (κόκκινη διάστικτη γραμμή)

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει στόχο να συμβάλει μέσω της μεθόδου ηλεκτρικής διασκόπησης στην μελέτη της γεωλογικής και τεκτονικής δομής της λεκάνης Μυγδονίας. Με την εφαρμογή της ηλεκτρικής διασκόπησης έχουμε την δυνατότητα μέσω του ρεύματος που διοχετεύουμε στο υπέδαφος να μετρούμε την διαφορά δυναμικού που προκαλείται και είναι αντίστοιχη της δυσκολίας που συναντά το ρεύμα στη διάδοσή του, μέσα από τους σχηματισμούς του υπεδάφους (ηλεκτρική αντίσταση). Έτσι οι διαφορετικές αντιστάσεις που υπολογίζονται από τις μετρήσεις αντιστοιχούν σε διαφορετικούς σχηματισμούς. Στην συνέχεια θα αναπτυχτεί η μέθοδος που εφαρμόστηκε, η διαδικασία, η μεθοδολογία και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην υπαίθρια εργασία για την καλύτερη και ακριβέστερη καταγραφή των μετρήσεων, με στόχο την πληρέστερη ερμηνεία για την αποφυγή σφαλμάτων. Τέλος θα παρατεθούν τα συμπεράσματα για την γεωλογική και τεκτονική δομή της εξεταζόμενης περιοχής (Τρεις Τούμπες, φύλλο Ζαγκλιβέρι λεκάνη Μυγδονίας).

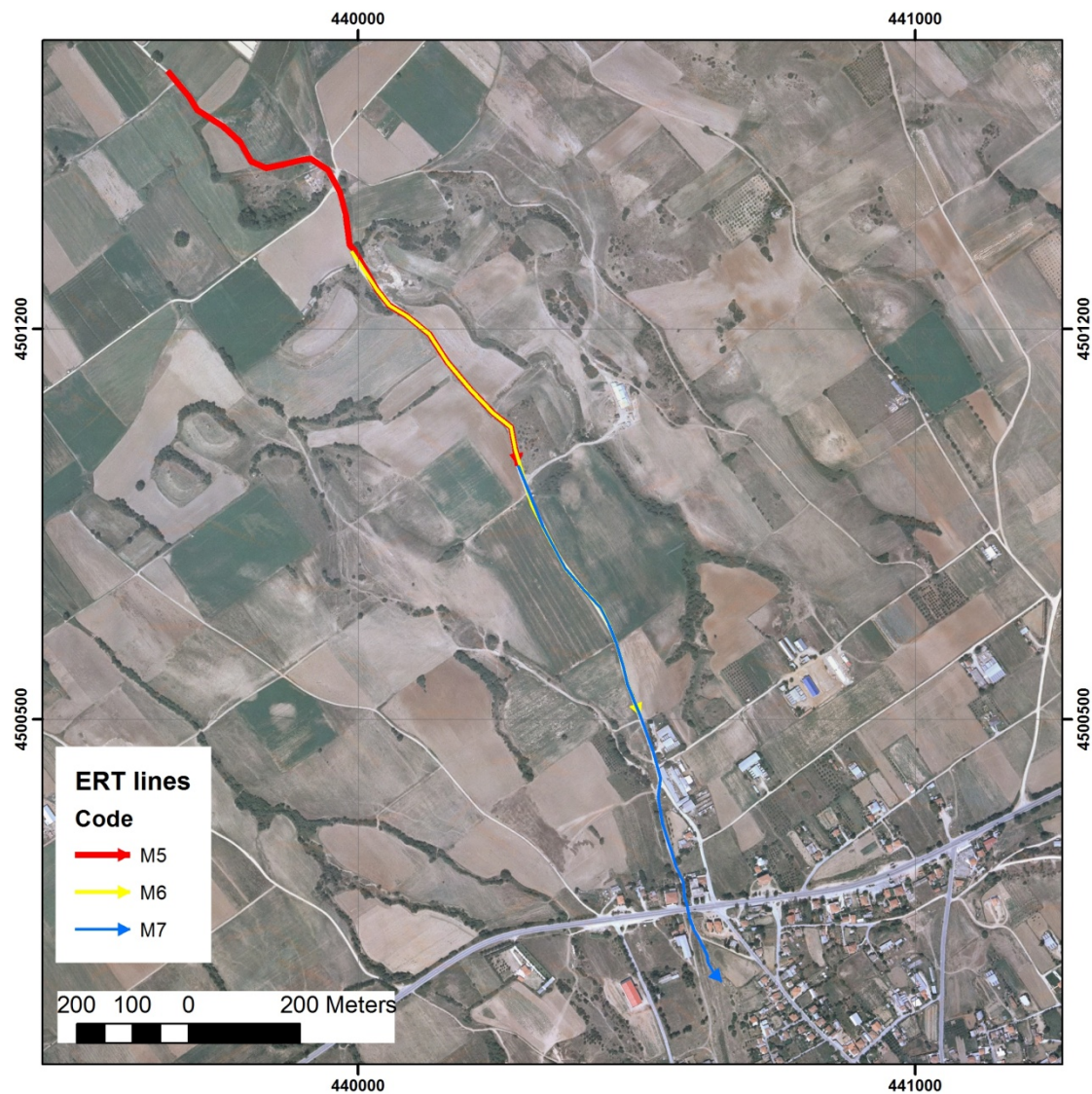
ABSTRACT



The aim of this thesis is to contribute through the process of electrical prospecting to the geological and tectonic structure of the Mygdonia basin. Upon application of electrical prospecting we have the ability through the electrical current injected into the subsoil to measure the potential which corresponds to the difficulty to the propagation of the electrical current through the formations of the subsoil (electrical resistance). Different calculated resistivity values correspond to different formations. The method mentioned above and its disadvantages are described. The entire process, the methodology and the equipment used in the fieldwork for a better and more accurate recording of measurements which aim to a more rational explanation in order to avoid errors, will also be developed. Finally our conclusions about the geological and tectonic structure of the region (“Treis Toumbes”, sheet Zagliveri, Mygdonia basin) will be presented.

2 .ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ



ΣΧΗΜΑ 2: Περιοχή μετρήσεων (χωριό Στίβος)

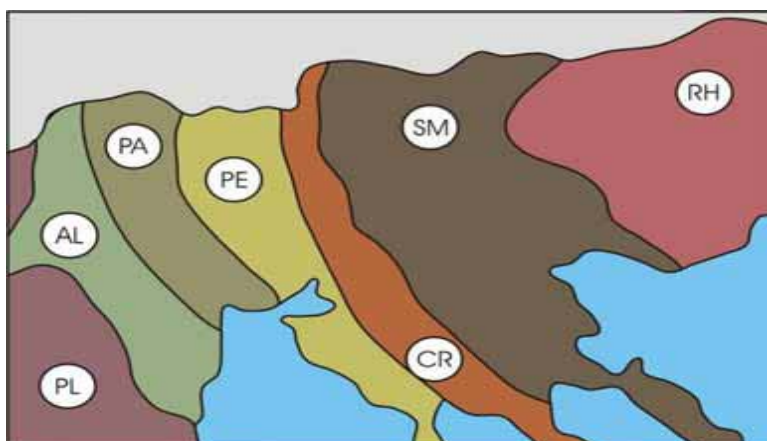
Η περιοχή που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ονομάζεται Τρεις Τούμπες, βρίσκεται ανάμεσα στο χωριό Προφήτης και Στίβος του δήμου Απολλώνιας .Απέχει 45,6 km βορειοανατολικά από το κέντρο της Θεσσαλονίκης και έχει συντεταγμένες $40,7^{\circ}$ N και $23,11^{\circ}$ E. Το μορφολογικό

ανάγλυφο είναι ήπιο με υψόμετρο 55m έως 120m και αποτελεί τμήμα της Μυγδονίας λεκάνης .

Η Μυγδονία λεκάνη συγκροτείται από δύο τμήματα: ένα ανατολικό, το οποίο συνιστά την υπολεκάνη της Βόλβης και ένα δυτικό, το οποίο αποτελεί την υπολεκάνη του Λαγκαδά. Το όριο μεταξύ των δύο αυτών υπολεκανών δεν είναι σαφές, ορίζεται όμως από τον άξονα Στίβου – Σχολαρίου, με ένα σύστημα ραχών, λόφων και αναβαθμίδων, διαμέσου των οποίων διέρχεται ο ποταμός Δερβένι, στην κεντρική περιοχή της Μυγδονίας. Εντός των υπολεκανών βρίσκονται οι λίμνες Λαγκαδά (ή Κορώνεια ή Αγίου Βασιλείου) και Βόλβης αντίστοιχα, οι οποίες αποτελούν υπολειμματικές μορφές της μεγάλης πλειστοκαινικής Μυγδονίας λίμνης (βάθους 110 m) και ανήκουν στους ελληνικούς υδροβιότοπους, που προστατεύονται από τη διεθνή συνθήκη RAMSAR. Η υπολεκάνη του Λαγκαδά, εκτεινόμενη μεταξύ του ορεινού όγκου της Καμήλας και των ραχών Στίβου-Σχολαρίου, αποτελεί το δυτικό τμήμα της λεκάνης Μυγδονίας .(Ψιλοβίκος1979)

2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ

Η περιοχή που μελετάται ανήκει στις εσωτερικές ελληνίδες ζώνες και συγκεκριμένα στην σερβομακεδονική μάζα.



ΣΧΗΜΑ 3: Σκαρίφημα της γεωτεκτονικής δομής της κεντρικής Μακεδονίας.

PL:Πελαγονική ζώνη, AL: υποζώνη Αλμωπίας, PA: υποζώνη Πάικου, PE: υποζώνη Παιονίας (οιAL, PA και PE συνιστούν τη ζώνη Αξιού). CR: Περιροδοπική ζώνη, SM: Σερβομακεδονική

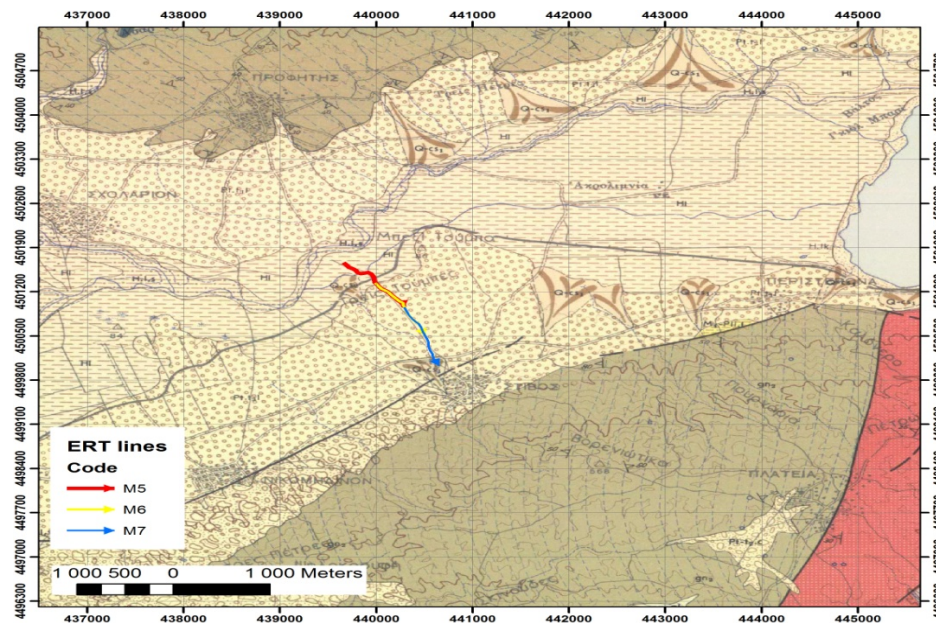
Η σερβομακεδονική αποτελεί μια ενιαία μάζα με τη Ροδόπη και ο διαχωρισμός τους είναι πολύ νέος, έγινε δηλαδή με την εφελκυστική τεκτονική του τριτογενούς, κυρίως το μειόκαινο. Η Σερβομακεδονική θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει ηπειρωτικό φλοιό, ενδεχομένως τμήμα της Ευρασίας, θεωρείται επίσης πολύ πιθανόν να αντιπροσωπεύουν μαζί με την πελαγονική ζώνη, τμήματα του παλιού ηπειρωτικού φλοιού της κιμμερικής ηπείρου. Το κρυσταλλοσχιστώδες της σερβομακεδονικής διαιρείται σε δυο μεγάλες ενότητες πετρωμάτων: την κατώτερη και αρχαιότερη των Κερδυλλίων και την ανώτερη ενότητα του Βερτίσκου.

Τα πετρώματα της ενότητας των Κερδυλλίων είναι: μιγματικοί βιοτιτικοί γνεύσιοι, γρανατούχοι διμαρμαρυγιακοί γνεύσιοι, αμφιβολίτες, αμβιβολιτιωμένοι εκλογίτες, μάρμαρα.

Τα πετρώματα της ενότητας Βερτίσκου συνίσταται από μια ακολουθία μιγματιτικών, οφθαλμοειδών ορθογνεύσιων, μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων και λεπτών στρωμάτων μαρμάρων, ενώ στους ανώτερους ορίζοντες συμμετέχουν μεταγάβροι –μεταδιαβάσεις και ορθοαμφιβολίτες που προήλθαν από μεταμόρφωση βασικών πυριγενών και βρίσκονται ως ενδιαστρώσεις και με φακοειδή σώματα μέσα στους γνεύσιους. Συχνά επίσης παρεμβάλλονται με τεκτονικές επαφές μέσα στα αλλά πετρώματα και σερπεντινικά σώματα. Επίσης κατά περιοχές πάνω στο κρυσταλλοσχιστώδες τοποθετούνται μεταλλικά ιζήματα. Τα κυριότερα από αυτά βρίσκονται βόρεια της λίμνης Λαγκαδά και είναι μολλασσικού τύπου ηλικίας Ηώκαινου-Πλειστόκαινου, στη μυγδονία λεκάνη λιμναία και χερσαία και θαλάσσια ιζήματα Μειόκαινου-Πλειστόκαινου (Kockel & Walther, 1965-68).

Η πολυπλοκότητα που παρουσιάζει η τεκτονική δομή της Σερβομακεδονικής Μάζας, συμπεριλαμβανομένης της λεκάνης της Μυγδονίας είναι αποτέλεσμα των επανειλημμένων τεκτονικών επιδράσεων που έχει υποστεί μέσα στο γεωλογικό χρόνο, από τις οποίες τα πετρώματα μεταμορφώθηκαν και πτυχώθηκαν. Τα τεκτονικά γεγονότα που προκάλεσαν το σχηματισμό της λεκάνης της Μυγδονίας έγιναν κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς. Συγκεκριμένα, τάσεις εφελκυσμού δημιούργησαν νέα ρήγματα διαφόρων διευθύνσεων με αποτέλεσμα τη βύθιση της περιοχής και τη δημιουργία της τεκτονικής τάφρου. Με

γεωφυσικές διασκοπήσεις στη λεκάνη Μυγδονίας διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων, με διευθύνσεις ΒΔ-ΝΑ και ΝΔ - ΒΑ, αντίστοιχα. (Θανασούλας 1983)



ΣΧΗΜΑ 4: γεωλογικός χάρτης της περιοχής

Ποιο συγκεκριμένα στην περιοχή που μελετάται εμφανίζονται πετρώματα μόνο από την ενότητα του βερτίσκου τα όποια είναι:

Τεταρτογενές : Προσχώσεις κοιλάδων (αμμούδες άργιλοι)

: Ριπίδια προσχώσεως ($Q.cs_1$) και ($Q.cs_2$)

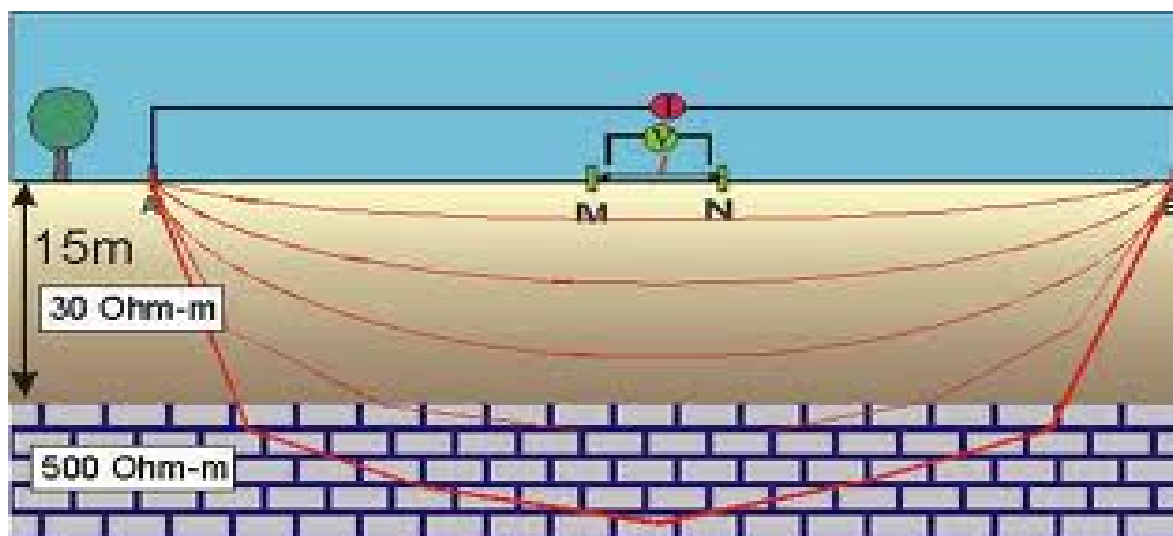
Πλειστόκαινο : Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων {χαλίκια και άμμοι

κάτω από αργιλώδες κάλυμμα (Pt, t_3, l) ή χωρίς αργιλώδες κάλυμμα (Pt, t_3, c)

Παλαιοζωικό : Διμαρμαργιακός γνεύσιος (σκοτεινότεφος ή καστανός, λεπτός έως μεσόκκοκος και παρεμβάλλονται από γρανατούχους, διμαρμαργιακούς γνεύσιους .

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

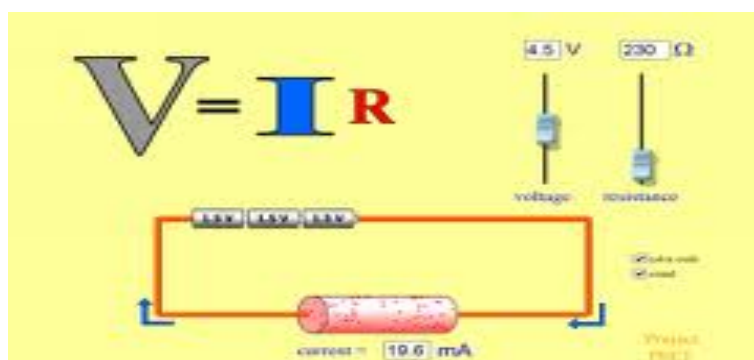
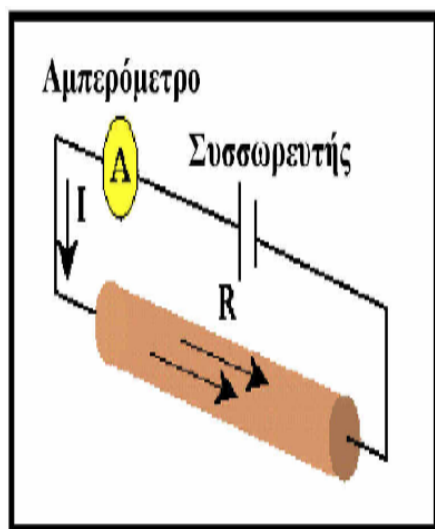


ΣΧΗΜΑ 5: ηλεκτρική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Τα μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν είναι η ροή του ρεύματος, το ηλεκτρικό δυναμικό, ειδική ηλεκτρική αντίσταση και ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι ταξινομούνται σε δυο κατηγορίες: τις ενεργητικές (ειδική αντίσταση συνεχούς ρεύματος, επαγόμενη πολικότητα, ηλεκτρομαγνητισμός) και τις παθητικές (φυσικό δυναμικό, μαγνητοτελλουρική). Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται στην τεχνική γεωλογία, υδρογεωλογία καθώς και στην αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων και μεταλλευμάτων. Η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται μόνο με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όπου χρησιμοποιείται κατά την διαδικασία της μελέτης της περιοχής που εξετάζεται. Πρόκειται για ενεργητική μέθοδο η οποία χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό σχετιζόμενο με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς, ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας.

3.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Ο νομός Ohm που διατυπώθηκε το 1828, πρότεινε μια εμπειρική σχέση που συνδέει την διαφορά δυναμικού V , που πρέπει να ασκηθεί σε ρεύμα έντασης I , ώστε αυτό να διέλθει από υλικό με ηλεκτρική αντίσταση R .



ΣΧΗΜΑ 6: νομός του ohm

Ο νόμος του Ohm υποστηρίζει ότι το ρεύμα το οποίο διαρρέει μια αντίσταση είναι ανάλογο της τάσης στα άκρα της και αντιστρόφως ανάλογο της τιμής της αντίστασης. Αυτό μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής:

$$I = \frac{V}{R}$$

όπου

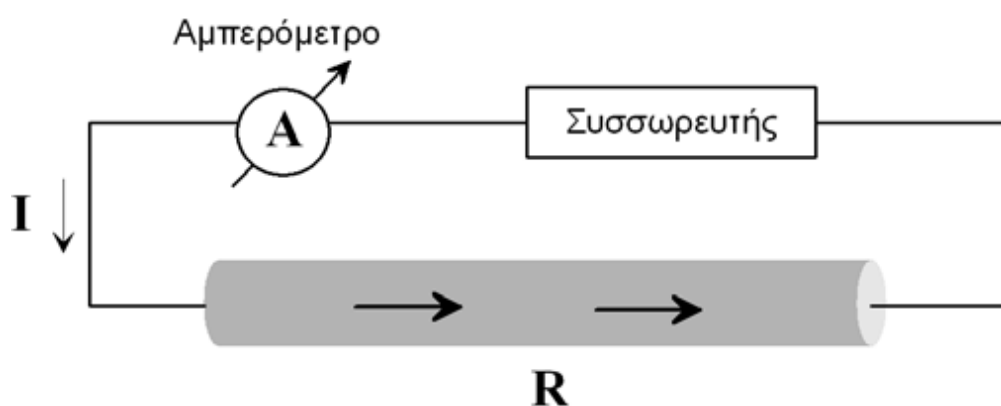
R είναι η τιμή της αντίστασης σε μονάδες ohm (Ω).

V είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης, σε μονάδες volt (V).

I είναι το ρεύμα το οποίο διαρρέει την αντίσταση μετρημένο σε ampere (A).

3.3 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η ωμική αντίσταση παρουσιάζει πρόβλημα, επειδή αυτή δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το μέσο στο οποίο διαδίδεται το ρεύμα αλλά εξαρτάται και από την γεωμετρία του μέσου. Έτσι ορίζουμε την ηλεκτρική ειδική αντίσταση που είναι ανεξάρτητη των γεωμετρικών παραγόντων και εκφράζεται μαθηματικά: ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ είναι ανάλογη της ωμικής αντίστασης R επί της επιφάνειας διατομής S του μέσου δια το μήκος του L



ΣΧΗΜΑ 7: ειδική αντίσταση

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση: $\rho = \frac{RS}{L}$

Όπου: R η ηλεκτρική αντίσταση ενός ομοιόμορφου δείγματος του υλικού (μετρείται σε Ωm)

: S η διατομή του δείγματος (σε m^2)

: L το μήκος του δείγματος (σε m)

Η ειδική αντίσταση είναι μια θεμελιώδης παράμετρος που χαρακτηρίζει το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το μέσο και περιγράφει πόσο εύκολα μπορεί να διαβιβαστεί ηλεκτρικό ρεύμα. Υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης υποδηλώνουν ότι το υλικό είναι πολύ ανθεκτικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, αντίθετα χαμηλές τιμές ότι το υλικό μεταδίδει το ηλεκτρικό ρεύμα πολύ εύκολα.

3.4 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΓΗΣ

Επειδή τα περισσότερα πετρογενετικά ορυκτά, εκτός του γραφίτη και των αμιγώς μεταλλικών ορυκτών, είναι μονωτές, η διάδοση του ρεύματος εξαρτάται τόσο από την παρουσία της ρευστής φάσης όσο και από την θερμοκρασία που επικρατεί στους σχηματισμούς του υπεδάφους. Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τιμών ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης όχι μόνο μεταξύ διαφορετικών πετρωμάτων και ορυκτών αλλά και μεταξύ πετρωμάτων του ίδιου τύπου. Το εύρος αυτό εξαρτάται πρωταρχικά από το περιεχόμενο ρευστό.

Άρα η παρουσία της ρευστής φάσης (νερό) εξαρτάται τόσο από το πορώδες όσο και από τον δείκτη GSI.

Η αγωγιμότητα ενός πορώδους πετρώματος ποικίλλει ανάλογα με τον όγκο και την διάταξη των διακενών και την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, που εξαρτάται από την ποσότητα των διαλυμένων χλωριόντων, θειούχων και άλλων ορυκτών στο νερό. (Archie)

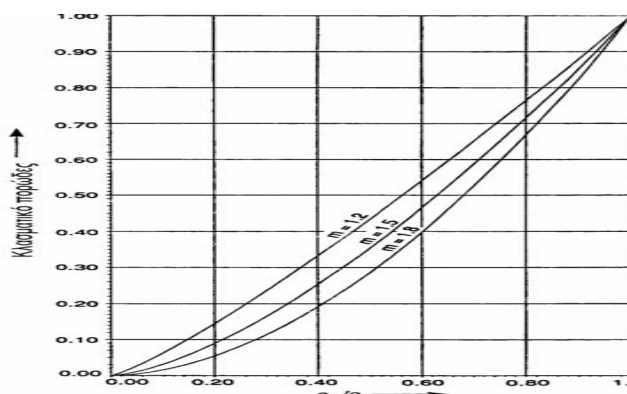
$$\rho = \alpha \rho_v \phi^{-m}$$

όπου: ρ = ειδική αντίσταση νερού των πόρων

ϕ = πορώδες

α, m = σταθερές (τυπικά $\alpha=1$ και $m=2$)

Στην συνέχεια ο νομός του Archie μας δείχνει ότι ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.



ΣΧΗΜΑ 8 : Μεταβολή της ειδικής αντίστασης ρ σε συνάρτηση με το πορώδες αντίσταση πορικού νερού, ρ_w . Το m είναι 1.2 για σφαιρικούς κόκκους και περίπου 1.8 για φυλλώδεις ή πλακώδεις κόκκους.

ΠΙΝΑΚΑΣ

Υλικό	Ειδική Αντίσταση (Ohm-meter)
Αέρας	∞
Σιδηροπυρίτης	3×10^{-1}
Γαληνίτης	2×10^{-3}
Χαλαζία	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
Ασβεστίτης	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
Ορυκτό Άλας	$30 - 1 \times 10^{13}$
Μαρμαρυγία	$9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}$
Γρανίτης	$100 - 1 \times 10^6$
Γάββρος	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Βασάλτης	$10 - 1 \times 10^7$
Ασβεστόλιθοι	$50 - 1 \times 10^7$
Ψαμμίτες	$1 - 1 \times 10^8$
Σχιστόλιθοι	$20 - 2 \times 10^3$
Δολομίτης	$100 - 10,000$
Άμμος	$1 - 1,000$
Άργιλος	$1 - 100$
Εδαφικό Νερό	$0.5 - 300$
Θαλασσινό Νερό	0.2

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ρ ($\Omega \cdot m$)
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

Ο δείκτης GSI εκφράζει την μόνιμη μηχανική καταπόνηση των σχηματισμών εξαιτίας της τεκτονικής δραστηριότητας του παρελθόντος και του μηχανισμού αποσάθρωσης. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερος είναι τόσο πιο προσβάσιμη θα είναι η κίνηση των ρευστών στην τάξη τους με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ένας ακόμα παράγοντας που μεταβάλλει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι η θερμοκρασία, διότι επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη(νερού) που βρίσκεται μέσα στα πετρώματα. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ελάττωση του ιζώδους του νερού με συνέπεια την ελάττωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και εκφράζεται από τον τύπο:

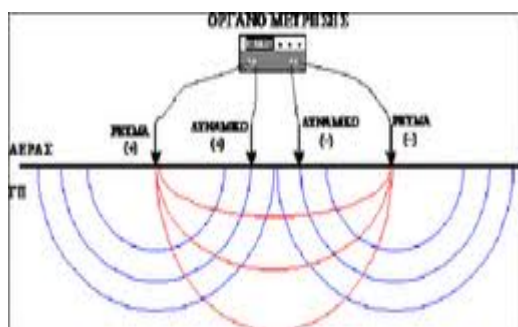
$$\rho_{\theta} = \rho_{18} / 1 + \alpha_{\theta}(\theta - 18^{\circ})$$

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

ρ_{18} : η ειδική ηλεκτρική αντίσταση σε θερμοκρασία $18^{\circ}C$

α_{θ} : ο θερμικός συντελεστής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (για τους περισσότερους ηλεκτρολύτες $0,025 / C^{\circ}$) (Παπαζάχος 2005)

3.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ



ΣΧΗΜΑ 9: φαινόμενη ειδική αντίσταση

Επειδή στην πραγματικότητα η γη δεν είναι ομογενής, δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Για αυτό

το λόγο απαιτείται η εφαρμογή πιο σύνθετων μεθόδων. Άρα μέσω των σύνθετων μεθόδων εισάγεται η έννοια της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που εκφράζει στην πράξη ένα είδος «μέσου όρου» των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Δηλαδή δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια «παραμορφωμένη» εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, η οποία εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων και θα μεταβάλλεται κάθε φορά που θα μεταβάλλονται οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη ερμηνεία - επεξεργασία. Για αυτόν τον λόγο η απευθείας χρήση των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης για την εξαγωγή συμπερασμάτων ελοχεύει κινδύνους. Και εκφράζεται μαθηματικά:

$$\rho_a = \frac{2\pi V k}{i}$$

όπου k = γεωμετρικός παράγοντας που εκφράζει την διάταξη των ηλεκτροδίων.

V = διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων

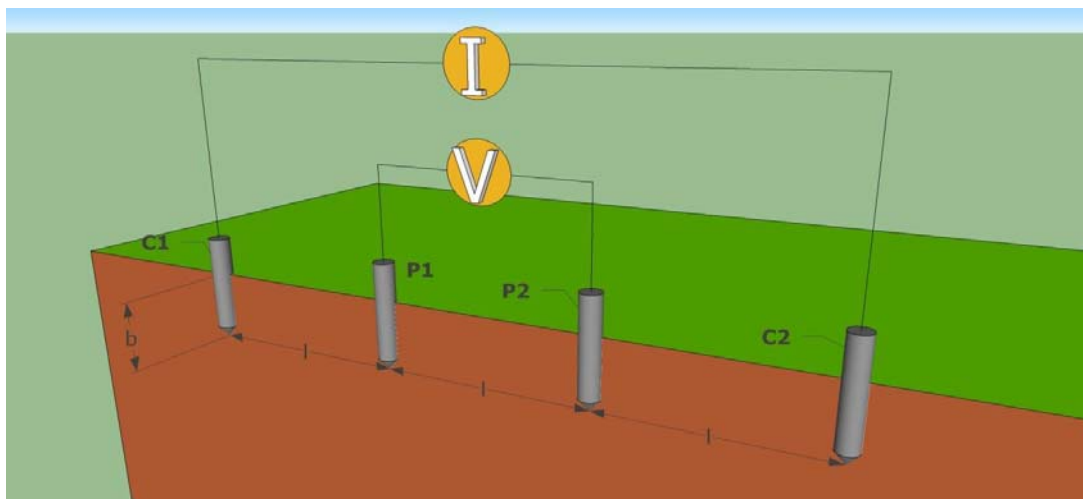
I = ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος

3.6 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Οι πιο γνωστές διατάξεις που έχουν περισσότερο χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα είναι οι διατάξεις Schlumberger, Wenner, Lee, Dipole-Dipole, Τετραγωνική.

α) Η φαινόμενη ειδική αντίσταση στη διάταξη Wenner δίδεται από τη σχέση:

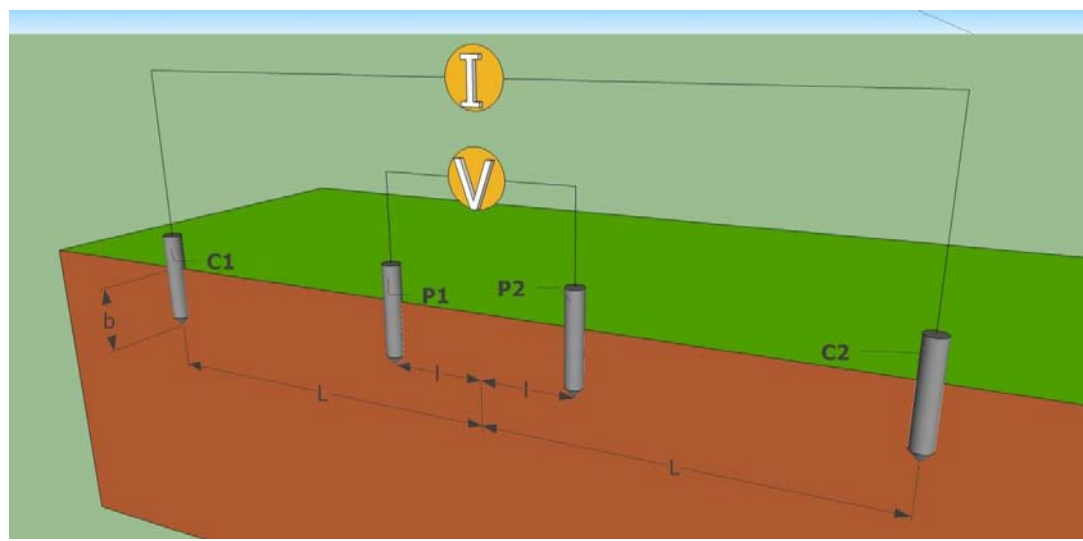
$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I}$$



ΣΧΗΜΑ 10: διάταξη Wenner

β) Η φαινόμενη ειδική αντίσταση για τη διάταξη Schlumberger δίδεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \pi \frac{L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I}$$

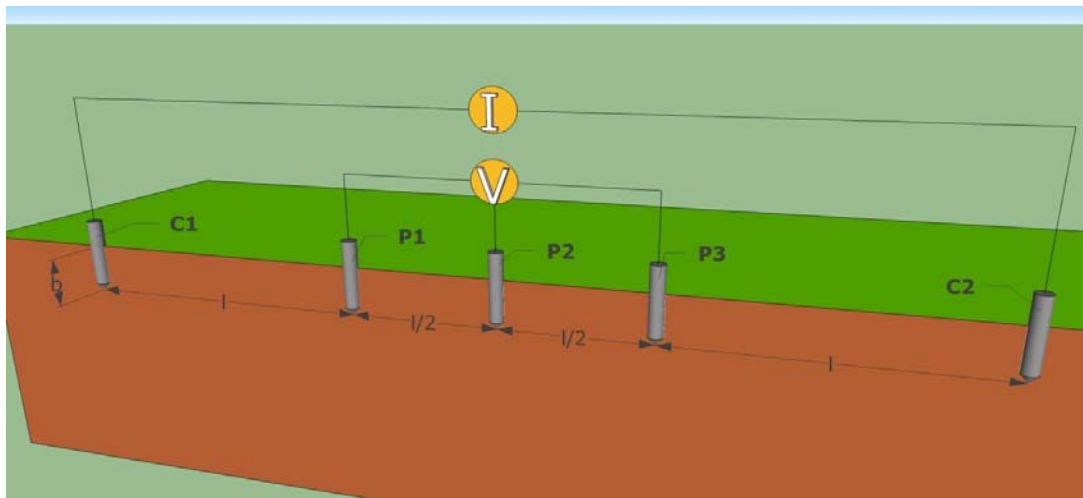


ΣΧΗΜΑ 11: διάταξη Schlumberger

γ) Διάταξη Lee. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει κοινά στοιχεία με την Wenner με τη διαφορά ότι υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού στη θέση του κέντρου της διάταξης. Αυτό επιτρέπει να γίνουν δύο μετρήσεις, μια για το αριστερό και μια για το δεξιό ήμισυ του αναπτύγματος, χωρίς την ανάγκη μετακίνησης των ηλεκτροδίων ρεύματος. Η Φ.Ε.Α δίδεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 4\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

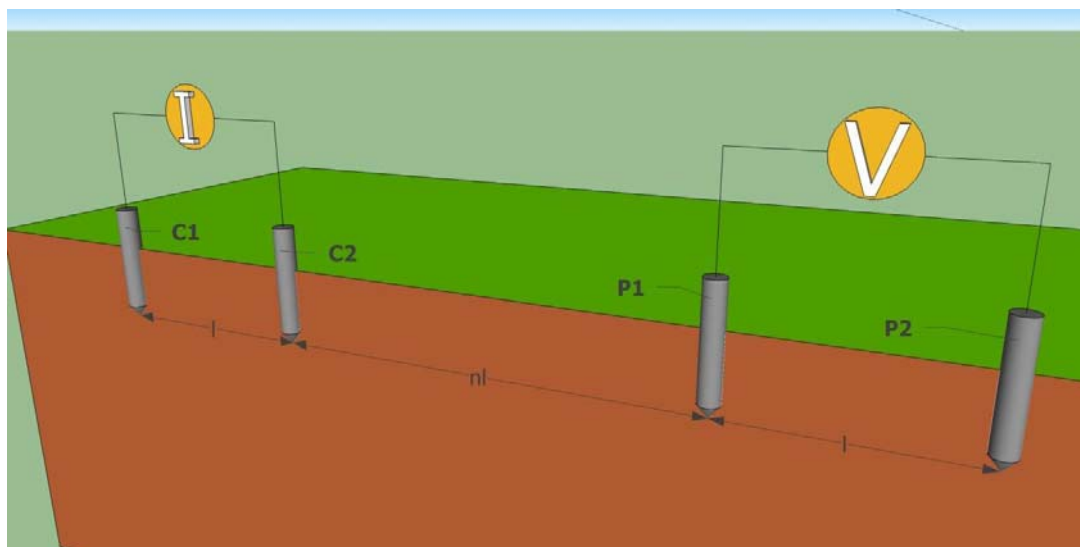
όπου, ΔV είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του κεντρικού και ενός εξωτερικού ηλεκτροδίου δυναμικού. Εάν οι μετρηθείσες τιμές του V είναι ίδιες, τότε το μέσον θεωρείται πλευρικά ομογενές, όπως βέβαια θεωρείται και στην ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων.



ΣΧΗΜΑ 12: διάταξη Lee

δ) Διάταξη Dipole-Dipole. Η διάταξη αυτή αποτελείται από δύο ζεύγη ηλεκτροδίων ίσου μήκους, ενός ζεύγους ηλεκτροδίων ρεύματος και ενός ζεύγους ηλεκτροδίων δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των ζευγών αυτών είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη εκείνης των ατομικών. Διάφορες γεωμετρικές διατάξεις μπορούν να σχεδιασθούν βασισμένες στο σχετικό προσανατολισμό των ζευγών. Η απλούστερη διάταξη που χρησιμοποιείται είναι η αξονική ανάπτυξη κατά μήκος της γραμμής ανάπτυξης του τύπου CCPP και η Φ.Ε.Α δίδεται από τη σχέση :

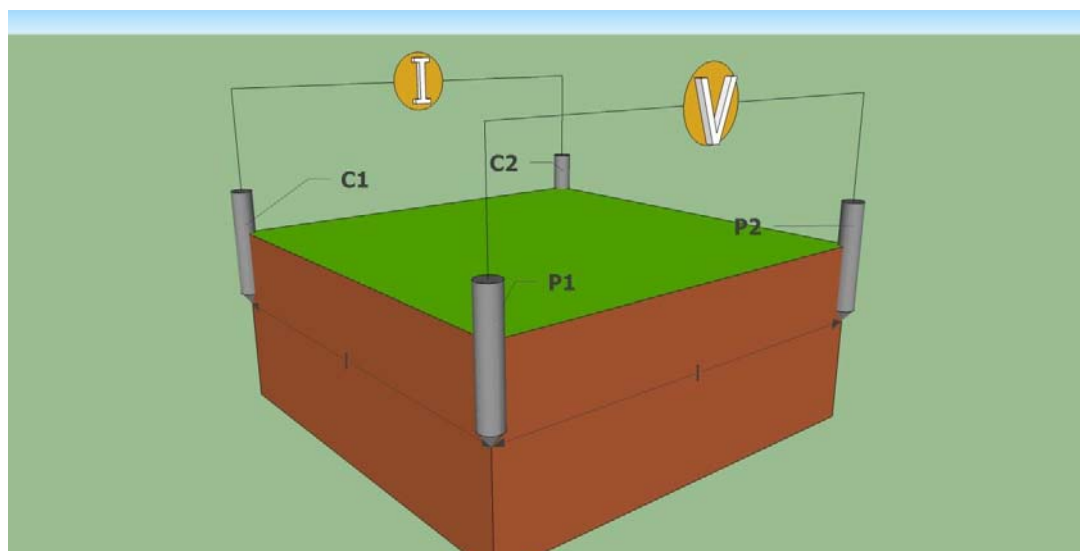
$$\rho_a = \pi \frac{\Delta V}{I} n (n+1) (n+2) a$$



ΣΧΗΜΑ 13: Διάταξη Dipole-Dipole

ε) Τετραγωνική διάταξη: Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις κορυφές ενός τετραγώνου και δίνουν τη δυνατότητα της εξομάλυνσης των τιμών από αξιμουθιακές μεταβολές της ειδικής αντίστασης, που παρατηρούνται πάνω από επαφές ή απότομων κεκλιμένων στρωμάτων. Η Φ.Ε.Α δίδεται από τη σχέση:

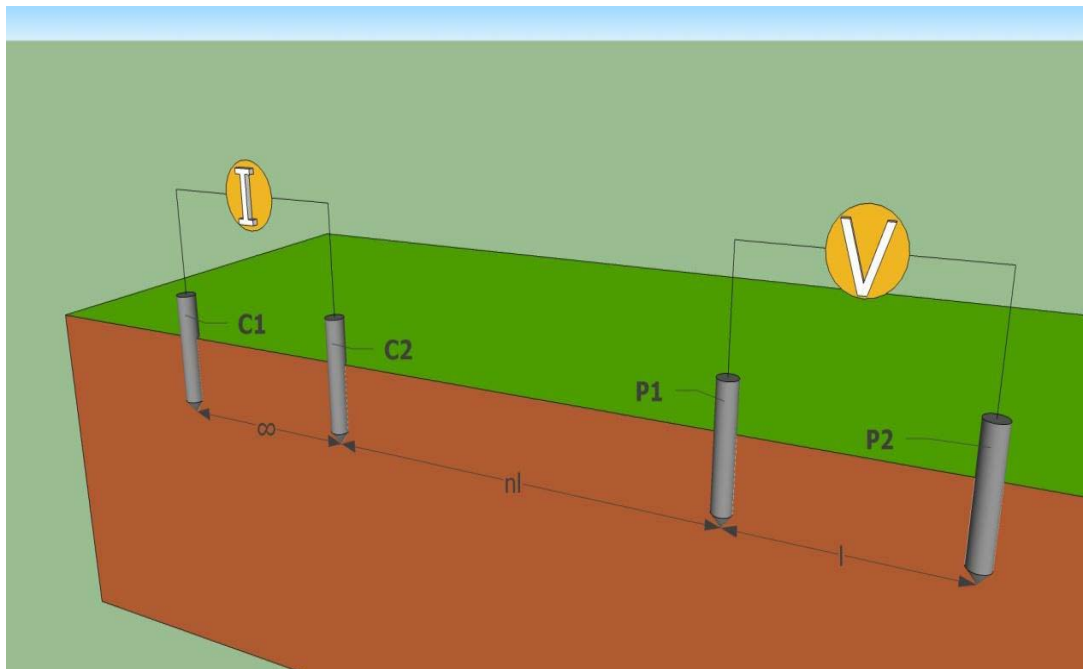
$$\rho_a = \frac{2\pi \Delta V a}{I \cdot 2^{-1/2}}$$



ΣΧΗΜΑ 14: Τετραγωνική διάταξη

ε) διάταξη πόλου - διπόλου. Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, αυτή η μέθοδος δεν έχει συμμετρική διάταξη. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων P1, P2 είναι ίση με l , η απόσταση μεταξύ C2, P1 είναι nl και το ηλεκτρόδιο C1 απέχει αρκετά μεγάλη απόσταση από το C2. Όπως και στη μέθοδο πόλου-πόλου, το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο C1 πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μεγαλύτερη από $5nl$ για να επηρεάζει όσο το δυνατόν λιγότερο τις μετρήσεις ($<5\%$ σφάλμα)

$$\rho = \frac{2\pi l n(n+1) \Delta V}{I}$$

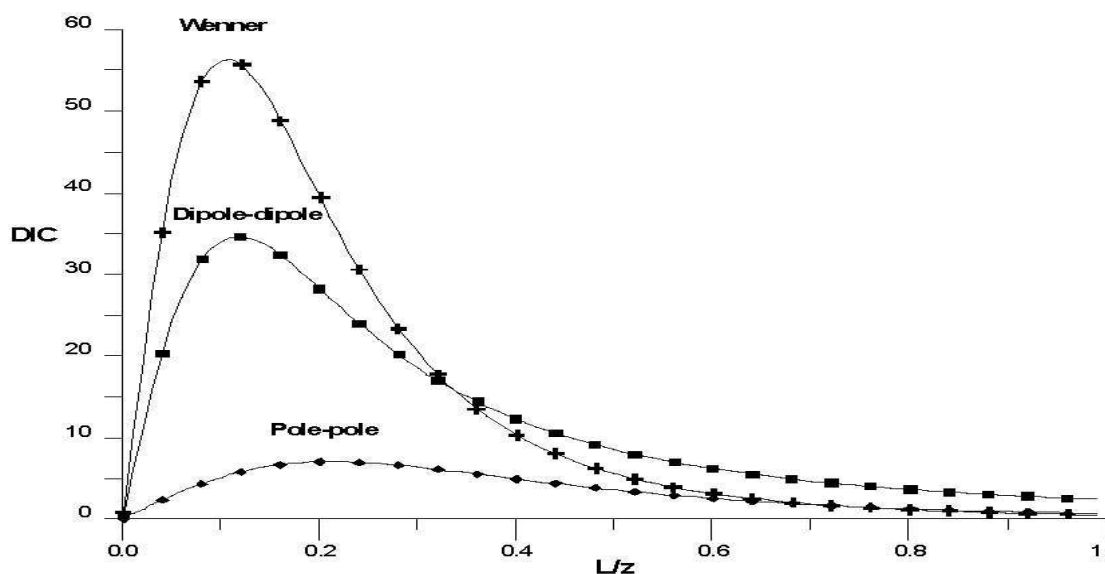


ΣΧΗΜΑ 15: διάταξη πόλου-διπόλου

3.7 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΩΔΙΩΝ

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που προκύπτουν στον προσδιορισμό του βάθους είναι το γεγονός ότι η θεωρητική προσέγγιση βασίζεται στην υπόθεση της ομογενούς γης, πράγμα το οποίο δεν ισχύει στην πραγματικότητα και στο ότι οι τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που μετρώνται στην επιφάνεια, δεν οφείλονται αποκλειστικά σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος.

Οι Roy και Apparao (1971) έδειξαν πως η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος μόνο, δεν είναι ενδεικτική για την εύρεση του βάθους διείσδυσης κατά τη χρήση μιας συγκεκριμένης διάταξης ηλεκτροδίων. Αυτό αποδεικνύεται ως εξής: αν σε ένα σύστημα ηλεκτροδίων τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια δυναμικού στις θέσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και αντίθετα, παρατηρείται ότι τα βάθη διείσδυσης είναι ίδια ενώ η κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τελείως διαφορετική. Αντιστρόφως, δύο συστήματα ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να έχουν παρόμοια κατανομή των γραμμών του ρεύματος αλλά τελείως διαφορετικά βάθη διείσδυσης. Ενώ δηλαδή η διείσδυση και η κατανομή του ρεύματος έχει άμεση σχέση μόνο με τη θέση των ηλεκτροδίων του ρεύματος, το βάθος διείσδυσης χρησιμοποιώντας κάποια διάταξη ηλεκτροδίων, εξαρτάται και από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού.



ΣΧΗΜΑ 16: Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Roy and Apparao 1971, Roy 1971).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΒΑΘΟΣ

<i>Wenner</i>	<i>0.11 L</i>
<i>Schlumberger</i>	<i>0.125 L</i>
<i>Διπόλου-διπόλου</i>	<i>0.195 L</i>
<i>Πόλου-πόλου</i>	<i>0.35 L</i>

L: συνολικό μήκος διάταξης

Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Roy and Apparao 1971, Roy 1971).

Για αυτό το λόγο οι παραπάνω ερευνητές, λαμβάνοντας υπ όψιν τη συνεισφορά κάθε απειροστού όγκου στο συνολικό σήμα, δηλαδή στη συνολική διαφορά δυναμικού που μετράται στην επιφάνεια του εδάφους, υπολόγισαν για τις διάφορες διατάξεις, καμπύλες οι οποίες απεικονίζουν την απόκριση ενός λεπτού οριζόντιου στρώματος με μεταβαλλόμενο βάθος. Η καμπύλη (DIC - Depth of Investigation Characteristic) έχει την παρακάτω μορφή για διάφορα βάθη, για μια γενικευμένη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων και για ένα μοντέλο ομογενούς γης, (Roy and Apparao 1971)

Τα βάθη που υπολόγισαν οι Roy και Apparao (1971), συγκρινόμενα με εμπειρικές τιμές (Zhody 1989) αποδείχτηκαν πως είναι υποτιμημένα. Ο Edwards (1977) πρότεινε ότι το μέγιστο βάθος διείσδυσης μιας διάταξης, δεν είναι αυτό στο οποίο η καμπύλη DIC γίνεται μέγιστη (σχήμα 11), αλλά το βάθος στο οποίο η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη DIC, χωρίζεται σε δύο μέρη ίσου εμβαδού, γεγονός το οποίο υποστηρίχθηκε και από τον Barker (1989).

Το βάθος, το οποίο ονομάστηκε μέσο βάθος διείσδυσης και που προτάθηκε από τον Edwards (1977) είναι η λύση της παρακάτω εξίσωσης

$$\int_{z=0}^{z_{med}} NDIC = 1/2$$

όπου, είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη που έγινε με βάση τους γεωμετρικούς παράγοντες, από τους Roy και Apparao. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές του βάθους διείσδυσης για τις διάφορες διατάξεις σε συνάρτηση με το συνολικό μήκος της διάταξης L , όπως υπολογίστηκαν από τον Edwards (1977).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΒΑΘΟΣ

<i>Wenner</i>	<i>0.17 L</i>
<i>Schlumberger</i>	<i>0.195 L</i>
<i>Διπόλου-διπόλου</i>	<i>0.25 L</i>
<i>Διδύμου ηλεκτροδίου</i>	<i>0.77 L</i>
<i>Πόλου-διπόλου</i>	<i>0.52 L</i>

Βάθος διείσδυσης διάφορων διατάξεων (Edwards 1977).

Στον πίνακα (Edwards 1977), παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου βάθους διείσδυσης z_{med} διάφορων διατάξεων, για διάφορες τιμές του n και σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων a και το συνολικό μήκος της διάταξης L . Ουσιαστικά, αν και το βάθος διείσδυσης σχετίζεται με την στρωματογραφία του εδάφους, για παράδειγμα ένα χαμηλής αντίστασης στρώμα μειώνει το βάθος διείσδυσης, οι υπολογισμοί που έχουν γίνει θεωρούν ένα μοντέλο ομογενούς ημιχώρου μιας και η δομή της γης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι άγνωστη. Τα βάθη αυτά έχει αποδειχτεί από διάφορες εφαρμογές πως δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και στην πραγματικότητα.

4. ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΗΝ ΥΠΑΙΘΡΟ

4.1 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ



ΣΧΗΜΑ 17: όργανα μετρήσεων

α) SYSCAL PRO : Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος. Το συγκεκριμένο όργανο έχει μέγιστη τάση πηγής 800V και επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που τυπικά φτάνει τα 1000 mA, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπει και σημαντικά μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος (έως 2500 mA). Το όργανο μέτρησης χρησιμοποιεί τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές μπαταρίες και παρουσιάζεται στο Σχήμα 17. Το όργανο μέτρησης έχει εσωτερικό πολυπλέκτη 48 ηλεκτροδίων ενώ έχει τη δυνατότητα της σύγχρονης μέτρησης μέχρι και 10 ταυτόχρονων διαφορών δυναμικού.

β) Καλώδια: Κατά την διαδικασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δυο καλώδια μήκους 500 m το καθένα και συνολικού μήκους 1000 m .Η επιλογή τους θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφύγουμε την μετατροπή μέρους της ενέργειας της πηγής σε άλλες μορφές ενέργειας (θερμότητα) ,έτσι θεωρούμε την ειδική ηλεκτρική αντίσταση τους αμελητέα. Επιπλέον θα πρέπει να παρέχουν υψηλή μόνωση εξασφαλίζοντας κατ' αυτό το τρόπο αξιοπιστία των μετρήσεων δυναμικού στο κύκλωμα .Για να εξασφαλίσουμε την ακρίβεια των μετρήσεων και την αποφυγή των προαναφερόμενων προβλημάτων τα καλώδια πρέπει να έχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές

1) Η ωμική αντίσταση των καλωδίων να είναι χαμηλή, ιδιαίτερα για τα μεγάλα αναπτύγματα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση πολύκλωνων καλωδίων .

2) Η μηχανική αντοχή τους στις έλξεις να είναι μεγάλη.

3) Ισχυρή μόνωση.

γ) Καρούλια : Χρησιμοποιούνται για την εύκολη μεταφορά λόγω του αυξημένου βάρους των πολύκλωνων καλωδίων και του μεγάλου τους μήκους

δ) Μπαταρία 12v

ε) Ηλεκτρόδια : Για την μέθοδο ειδικής αντίστασης, τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι από ράβδους αλουμινίου, χαλκού ή ατσάλινες μήκους περίπου 60cm. Οι ράβδοι αυτοί καρφώνονται στο έδαφος και συνδέονται με καλώδια με το όργανο μέτρησης ,το πλήθος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 21 ηλεκτρόδια αν 50 m.

4.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΠΑΙΘΡΟ

Η σύζευξη μεταξύ των κυκλωμάτων ρεύματος και δυναμικού είναι η πιο σοβαρή αιτία σφαλμάτων στις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Με τον όρο σύζευξη εννοούμε την επαγωγή του ρεύματος στα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της τάσης. Για καλύτερα αποτελέσματα τα αντίστοιχα καλωδιακά κυκλώματα θα πρέπει να είναι διαχωρισμένα τόσο από φυσική όσο και από ηλεκτρική άποψη. Η μόνη σύζευξη που επιτρέπεται πρέπει να γίνεται απευθείας από τη γη μέσω των ηλεκτροδίων. Τα δύο κυριότερα είδη σύζευξης που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και η διαρροή.

1) Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή παρατηρείται μεταξύ του κυκλώματος ρεύματος και δυναμικού. Εξαρτάται από τη γεωμετρία των δύο κυκλωμάτων και εν γένει μειώνεται καθώς η απόσταση μεταξύ των δύο κυκλωμάτων αυξάνει. Επίσης τα καλώδια του κυκλώματος τάσης κατά τη χρήση τους δεν πρέπει να παραμένουν τυλιγμένα στα καρούλια μεταφοράς τους.

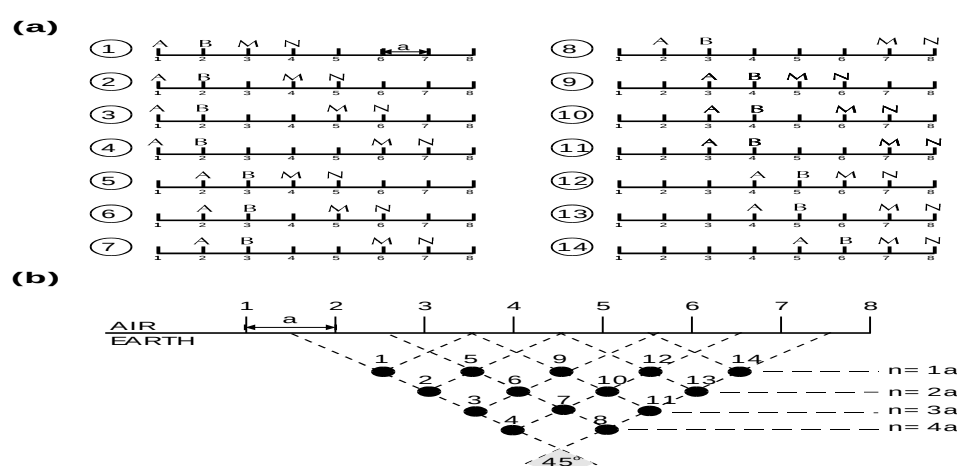
2) Διαρροή

Κάθε διαρροή του κυκλώματος ρεύματος στο κύκλωμα τάσης προκαλεί εσφαλμένες αναγνώσεις. Η διαρροή είναι αναμφίβολα η πιο σημαντική μοναδική αιτία για χαμηλής ποιότητας αποτελέσματα και θα πρέπει να εντοπίζεται πάντοτε. Διαρροή μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε κύκλωμα, κυρίως όμως συμβαίνει στα καλώδια του κυκλώματος ρεύματος στα οποία παρατηρούνται εκδορές λόγω της κακομεταχείρισης τους κυρίως κατά την έλξη τους. Η διαρροή μπορεί να δημιουργήσει απότομες πτυχές στις γεωηλεκτρικές καμπύλες των μετρήσεων ή γενικά παραμορφώσεις αυτών ανάλογα με την θέση που συμβαίνει η διαρροή κατά μήκος της γραμμής. Ακόμα και μια ελάχιστη διαρροή είναι ικανή να επηρεάσει τις αναγνώσεις του δυναμικού, όταν αυτή εντοπίζεται πλησίον των ηλεκτροδίων τάσης. Για να αποφύγουμε τις διαρροές, οι πηγές (συσσωρευτές, γεννήτριες κλπ.) καθώς και τα καρούλια των καλωδίων ρεύματος θα πρέπει να απομονώνονται από το έδαφος με παρεμβολή μεταξύ αυτών και του εδάφους κάποιου μονωτικού υλικού.

Ευνοϊκές εδαφικές συνθήκες για την δημιουργία διαρροών είναι οι υψηλές τιμές των αντιστάσεων επαφής στα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού που συνήθως παρατηρούνται στα στεγνά και ξηρά εδάφη. Στη περίπτωση αυτή, επειδή το ρεύμα δυσκολεύεται να εισέλθει στο έδαφος από τη θέση του ηλεκτροδίου, λόγω της υψηλής αντίστασης επαφής, όλα τα φθαρμένα σημεία του καλωδίου από τη πηγή μέχρι το ηλεκτρόδιο αποτελούν ευνοϊκές συνθήκες διαρροής ρεύματος. Η περίπτωση υγρών εδαφών κυρίως μετά από πρόσφατη βροχόπτωση ή όταν τα καλώδια παραμένουν απλωμένα σε πεδίο με υγρασία είναι επίσης ευνοϊκές συνθήκες για διαρροή.

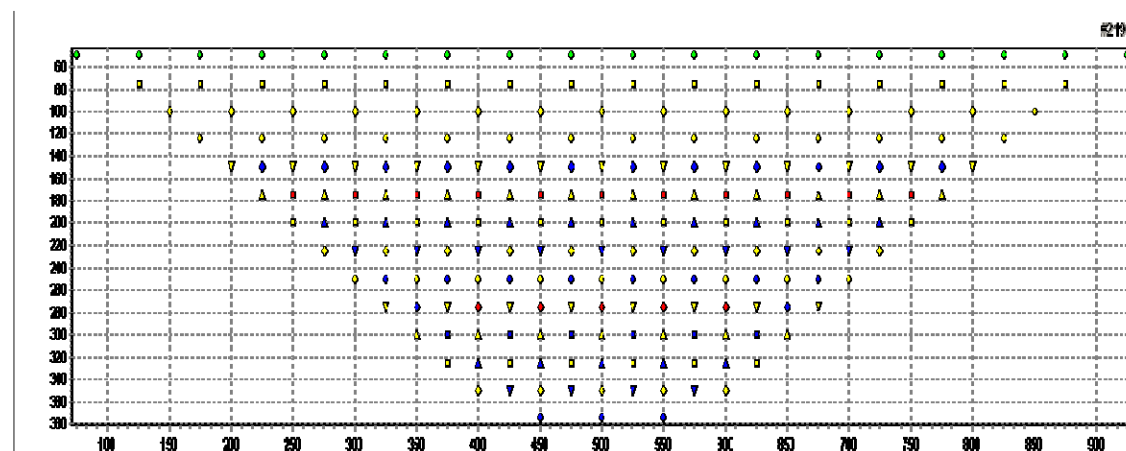
4.3 ΣΚΟΠΟΣ ΑΛΛΗΛΟΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ανάλογα με τον με τον σχεδιασμό που επιλέγεται κατά την διαδικασία των μετρήσεων έχει σαν αποτέλεσμα να λαμβάνεται μια χαρακτηριστική ψευδοτομή που αποτελεί την θεωρητική κατανομή των μετρήσεων. Αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των δίπολων ρεύματος και δυναμικού, η τιμή της διαφοράς δυναμικού που μετράται, επηρεάζεται από βαθύτερα στρώματα. Έτσι, στην περίπτωση της διάταξης δίπολου-δίπολου κάθε μέτρηση της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποδίδεται, κατά προσέγγιση, στο σημείο τομής των δύο ευθειών που ξεκινάνε με γωνία 45° από το μέσο της απόστασης AB και το μέσο της απόστασης MN



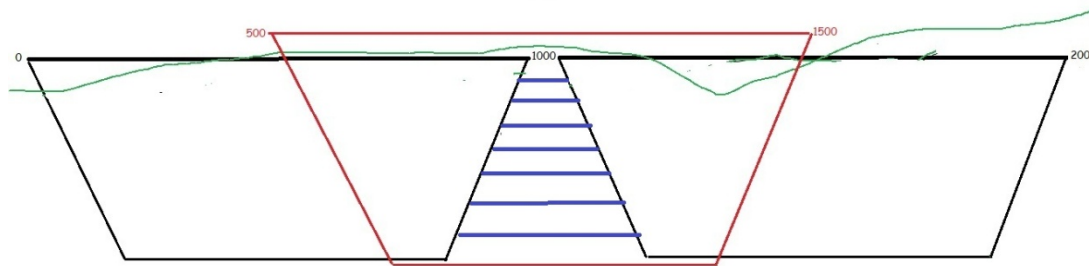
ΣΧΗΜΑ 18: αριθμός και θέση των μετρήσεων στο υπέδαφος με βάση την πειραματική διάταξη δίπολου-δίπολου

Στην περίπτωση που εξετάζεται, κατά την διαδικασία των μετρήσεων επιλέχθηκε η διάταξη δίπολου-δίπολου με 21 ηλεκτρόδια όπου απέχει το ένα από το άλλο 50 m και οι αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος – δίπολων μέτρησης δυναμικού ποίκιλαν σε $(n \cdot a)$ $(2n \cdot a)$ και $(3n \cdot a)$ με τη μέγιστη τιμή του ίση με 8. Με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού βάθους των 200 m. Έτσι λήφθηκε μια χαρακτηριστική τομή τραπεζοειδούς μορφής με επιφανειακό μήκος 1000 m και βάθος 200 m που αποτελεί την θεωρητική κατανομή της διάταξης, με άθροισμα μετρήσεων 220, όπου κάθε μια αντιστοιχεί σε ένα σημείο του υπεδάφους με συγκεκριμένη φαινόμενη ειδική αντίσταση.



ΣΧΗΜΑ 19: Θεωρητική κατανομή των μετρήσεων βάσει του σχεδιασμού που επιλέχθηκε.

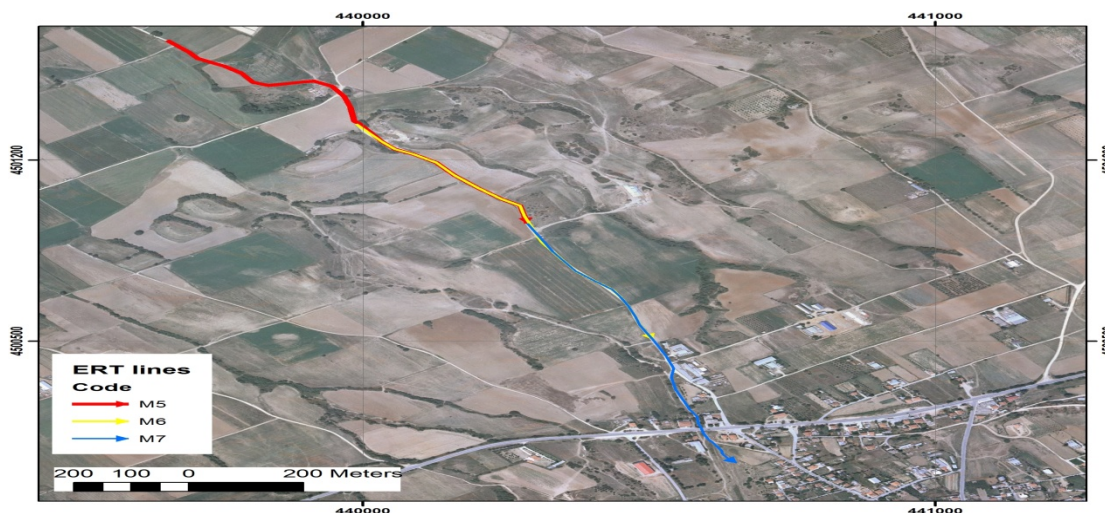
Παρόλο που επιτεύχθηκε το επιθυμητό βάθος βάσει της διάταξης που επιλέχθηκε παρατηρείται ένας κενός χώρος σε δυο διαδοχικές μετρήσεις που αναπτύσσεται μεταξύ των δυο τραπεζοειδών, με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται μετρήσεις από τα συγκεκριμένα σημεία του υπεδάφους. Συνεπώς δημιουργείται μια ελλιπής συνολική τομή της περιοχής που μελετάται. Για αυτό τον λόγο απαιτείται η υλοποίηση μιας πρακτικής μεθόδου αλληλοεπικάλυψης των μετρήσεων με σκοπό να καλυφθεί αυτή η περιοχή που αναπτύσσεται ανάμεσα στα δυο χαρακτηριστικά τραπεζοειδή.



ΣΧΗΜΑ 20: διαδικασία της αλληλοεπικάλυψης

Αρχικά εκτελείται η μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για τα πρώτα 1000 m και σχηματίζεται το αριστερό μαύρο τραπέζιο. Στην συνέχεια εκτελείται η μέθοδος από την μέση της πρώτης (από 500 m μέχρι τα 1500 m) και δημιουργείται το κόκκινο τραπέζιο. Τέλος εκτελείται για τρίτη φορά από τα μέσα της δεύτερης 1000 m έως τα 2000 m. Με αυτήν την διαδικασία επιτυγχάνεται η εκτέλεση της μεθόδου για μια περιοχή 2000 m, συμπεριλαμβάνοντας και τις μετρήσεις του γραμμοσκιασμένου τριγώνου που αντιστοιχεί στον κενό χώρο που δημιουργείται από την πειραματική διάταξη που επιλέχτηκε ανάμεσα στα δυο τραπεζοειδή. Άρα στην περίπτωση που εκτελούνταν μόνο δυο διαδοχικές μετρήσεις θα αποτελούσε χώρο μη μετρήσιμο. Με αυτή την διαδικασία το πλήθος των μετρήσεων εκτείνεται σε όλο το μήκος του υπεδάφους, ώστε δημιουργείται μια ακριβέστερη εικόνα για την φαινόμενη ειδική αντίσταση της εξεταζόμενης περιοχής.

4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

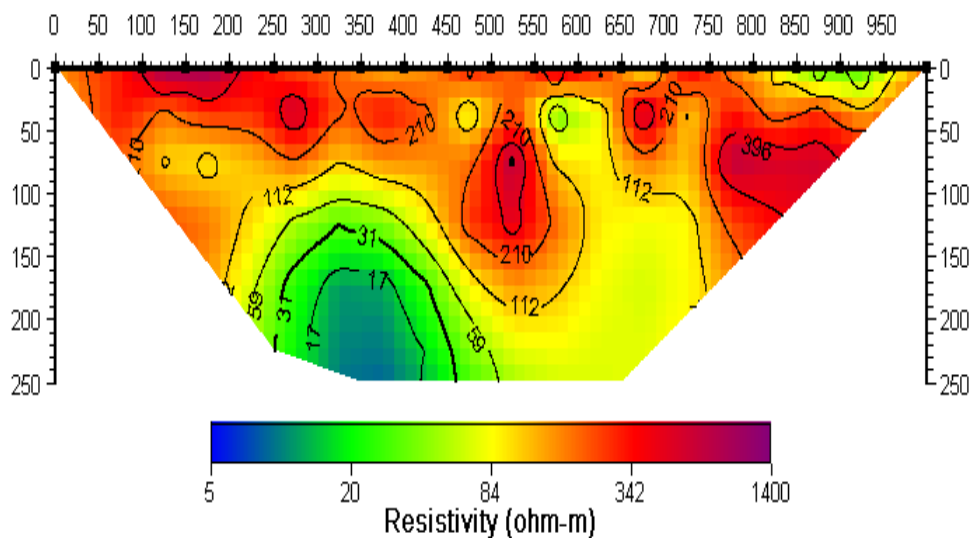


ΣΧΗΜΑ 21: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πριν από κάθε γεωφυσική έρευνα, γίνεται ένας αρχικός σχεδιασμός για τον τρόπο που θα διεξαχθεί, στον οποίο λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά των πιθανών στόχων (βάθος, σχήμα, ιδιότητες), η μορφολογία του εδάφους, η επιθυμητή ανάλυση των αποτελεσμάτων και ο χρόνος που θα χρειαστεί. Την επιμέλεια ανέλαβαν ο κ. Τσούρλος Παναγιώτης αναπλ. Καθηγητής, ο κ. Βαργεμέζης Γεώργιος επικ. καθηγητής και ο κ. Στομπολίδης Αλέξανδρος (Δρ) και υλοποιήθηκε τόσο με την πολύτιμη βοήθειά τους όσο και με την συνεισφορά μου. Την Παρασκευή 11 Μαΐου μεταβήκαμε οδικώς στην περιοχή Στίβος του δήμου Απολλωνίας. Αρχικά εναποθέσαμε τον εξοπλισμό στο πεδίο μελέτης και στην συνέχεια χωριστήκαμε σε δυο ομάδες με σκοπό να πραγματοποιηθούν σε μικρότερο χρονικό διάστημα οι μετρήσεις διότι αποτελούν μια χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία. Έπειτα ξεκινήσαμε την υλοποίηση του πρώτου σκέλους της έρευνας για τα πρώτα 1000 m (κόκκινη γραμμή επάνω στο σχήμα 21), όπου απλώσαμε το καλώδιο 500 m με την βοήθεια του καρουλιού. Στην πορεία καρφώθηκαν τα ηλεκτρόδια στο έδαφος ανά 50m και συνδέθηκαν με το πολυκάναλο καλώδιο. Ομοίως εργάστηκε και η δεύτερη ομάδα. Μετέπειτα συνδέθηκαν τα δυο καλώδια (συνολικού μήκους 1000 m) με το όργανο καταγραφής που είναι συνδεδεμένο με μπαταρία συνεχούς ρεύματος 12 V και αντληθήκαν οι πρώτες μετρήσεις (συνολικού αριθμού 220) με βάση την διάταξη των ηλεκτροδίων που επιλέχθηκαν. Στο δεύτερο σκέλος (κίτρινη

γραμμή επάνω στο σχήμα 21) σύρθηκαν τα καλώδια με στόχο να πραγματοποιηθεί η πρακτική διαδικασία της αλληλοεπικάλυψης των μετρήσεων για 500 m έως 1500 m και στην συνέχεια έγινε όμοια με την πρώτη διαδικασία για την συλλογή των δεδομένων . Στο τρίτο και τελευταίο μέρος (μπλε γραμμή επάνω στο σχήμα 21) της έρευνας μεταφέρθηκαν τα καλώδια στα 1000 m έως 2000 m και εκτελέστηκε η ίδια με την παραπάνω διαδικασία λαμβάνοντας τις τελευταίες μετρήσεις .Μετά το τέλος της έρευνας ακολουθήθηκε η περισυλλογή των καλωδίων, το φόρτωμα του εξοπλισμού στο αυτοκίνητο και η επιστροφή μας στην Θεσσαλονίκη.

5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ



ΣΧΗΜΑ 22: ERT (μοντέλο ηλεκτρικής τομογραφίας)

Ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (HT) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο “παραδοσιακών” τεχνικών μέτρησης: της όδευσης και της βυθοσκοπησης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί 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. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη “εικόνα” του υπεδάφους. Πρόδρομος της HT είναι η μέθοδος της “ψευδοτομής” που έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards 1977) αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές (π.χ. υδρογεωλογικές, Griffiths et al. 1990). Στην διαδικασία της “ψευδοτομής” μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου). Η HT όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της HT είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων (άρα και χρήσιμης πληροφορίας). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου.

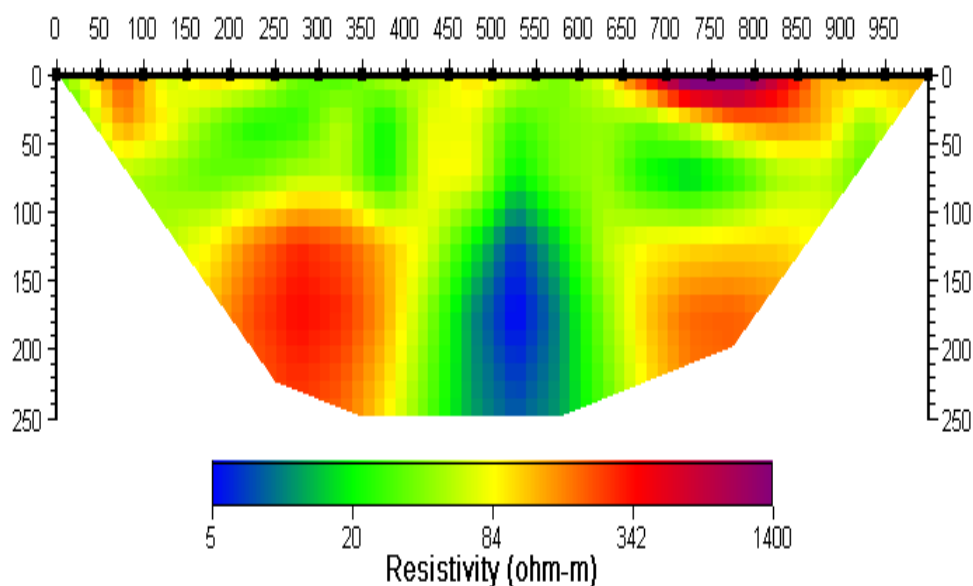
Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων, και γι’ αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών.

Το επόμενο στάδιο των εργασιών ήταν ο υπολογισμός των τιμών της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης που είναι παραμορφωμένες.

Ο προσδιορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού πακέτου RES2DINV (version 3.55). Το λογισμικό αυτό πρόγραμμα χωρίζει το υπέδαφος σε ένα πλήθος παραλληλογράμμων, ενώ για κάθε ένα από αυτά θεωρεί σταθερή την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Στη συνέχεια θέτοντας ορισμένη τιμή για την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση συνθέτει ένα αρχικό μοντέλο για το οποίο υπολογίζει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και τις συγκρίνει με τις τιμές της που μετρήθηκαν στην ύπαιθρο. Ακολουθούν διαδοχικές επαναλήψεις της διαδικασίας με διαφορετικές τιμές της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και συγκρίνει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που υπολογίζονται από το λογισμικό με αυτές που μετρήθηκαν. Με την διαδικασία αυτή

το σφάλμα των τιμών που υπολογίζει το λογισμικό σε σχέση με τις τιμές που μετρήθηκαν μειώνεται συνεχώς. Όταν η επαναληπτική αυτή διαδικασία παρουσιάσει σύγκλιση, δηλαδή επόμενες επαναλήψεις, δεν μειώνουν σημαντικά το σφάλμα, τότε επιλέγεται το μοντέλο αυτό με το μικρότερο σφάλμα. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των δεδομένων είναι η σύνθεση 3 εικόνων στις οποίες αποδίδεται σε τομή η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με χρωματική κλίμακα. Η πρώτη εικόνα έχει δημιουργηθεί από τις τιμές της μετρούμενης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην ύπαιθρο, η δεύτερη από τις τιμές της που υπολογίστηκαν από το λογισμικό, ενώ η τελευταία παρουσιάζει την κατανομή της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, δηλαδή την γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.

5.1 ERT 1



ΣΧΗΜΑ 23: EPT 1. Στο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (στην κλίμακα χρωμάτων/ειδικής αντίστασης που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σχήματος).

Η ERT 1 είναι το γεωηλεκτρικό μοντέλο της ηλεκτρικής τομογραφίας που αποδίδει γραφικά την πραγματική ειδική αντίσταση μετά από επεξεργασία

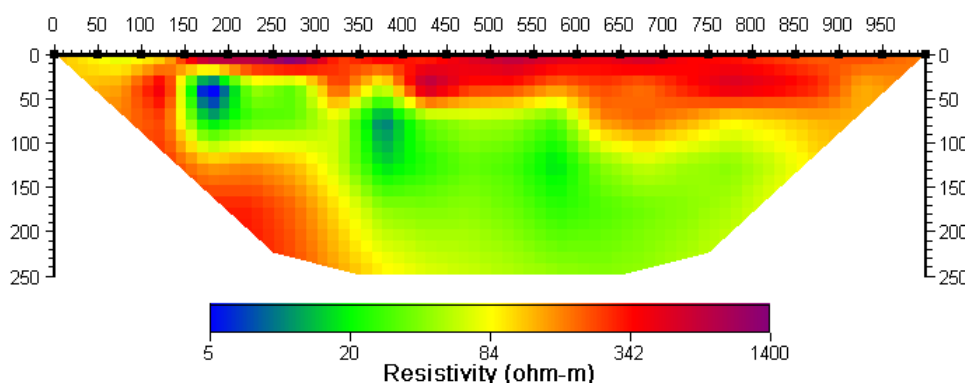
της φαινόμενης αντίστασης των υπαίθριων μετρήσεων της εξεταζόμενης περιοχής για τα πρώτα 1000 m.

Όπου η πραγματική ειδική αντίσταση ερμηνεύεται όσο αφορά το μετρώ της από τον χρωματισμένο βαθμολογημένο άξονα που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σχήματος. Δηλαδή κάθε πέτρωμα ή και το ίδιο πέτρωμα κάτω από διαφορετικές φυσικοχημικές συνθήκες έχει διαφορετικό χρώμα που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή ειδικής αντίστασης του βαθμολογημένου άξονα.

Το εύρος της πραγματικής ειδικής αντίστασης της ERT 1 στον χρωματισμένο βαθμολογημένο άξονα κυμαίνεται μεταξύ 5(ohm-m) έως 342(ohm-m) που εκφράζει τόσο τους διαφορετικούς σχηματισμούς που συγκροτούν την εξεταζόμενη περιοχή όσο και τις τεκτονικές, νεοτεκτονικές και φυσικοχημικές διεργασίες που έδρασαν και δρουν επάνω στους σχηματισμούς.

- Παρατηρούνται ότι οι μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης 85(ohm-m) έως 342 (ohm-m) συναντούνται στον βραχώδες σχηματισμό όπου συνθέτει το υπόβαθρο της περιοχής τον διμαρμαργιακό γνεύσιο που αποτελεί συμπαγές και αδιαπέραστο μέσο για το ηλεκτρικό ρεύμα και εντοπίζεται επιφανειακά στην οριζόντια απόσταση των 1000 m που επιλέχτηκε ως πρώτο σκέλος της έρευνας στα (150m έως 450 m) και (700 m έως 950 m) και σε βάθος κάτω τον 100 m.
- Στην συνέχεια οι μικρότερες τιμές παρατηρήθηκαν μεταξύ του διμαρμαργιακού γνεύσιου που είναι πιθανόν να οφείλεται στην τεκτονική δραστηριότητα που αποτυπώνεται μέσω ενός ρήγματος και την άνοδο θερμών υδάτων μέσω της ρηξιγενούς ζώνης και εντοπίζεται επιφανειακά από 450 m έως τα 600 m.
- Ακόμα παρατηρούνται σχηματισμοί με ενδιάμεσες τιμές από 20-80(ohm-m) που αποτελούν τα μεταλλικά ιζήματα που αποτέθηκαν επάνω στο υπόβαθρο και μέσα στην ρηξιγενή ζώνη και αποτελούν τα προϊόντα της αποσάθρωσης των πετρωμάτων της γύρω περιοχής και τις συναντούνται σε όλο το μήκος των 1000 m.
- Τέλος παρατηρείται στο επάνω μέρος και ανάμεσα στις μεταλλικές αποθέσεις, σημεία με μεγάλη ειδική αντίσταση 84-342 (ohm-m) και εντοπίζονται σε βάθος από 0-50 m. Είναι πιθανόν να οφείλεται σε μεγάλες κροκάλες και βραχώδες υλικό των γειτονικών πετρωμάτων όπου μέσω της μεγάλης πλημμυρικής παροχής μεταφερθήκαν μαζί με τα ιζήματα όπου σκεπάστηκαν στην συνέχεια από νεότερα ιζήματα ώστε να μην παρατηρούνται στην υπαίθρια μελέτη.

5.2 ERT 2



ΣΧΗΜΑ 24 : EPT 2. Στο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (στην κλίμακα χρωμάτων/ειδικής αντίστασης που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σχήματος).

Η EPT 2 αποτελεί το δεύτερο σκέλος της έρευνας και υλοποιήθηκε προς την ίδια κατεύθυνση με την ERT 1. Ο στόχος της περά από το να καταγράψει τις μετρήσεις μέσω της διαδικασίας αλληλοεπικάλυψης είναι επίσης να διαπιστωθούν, επαληθευόσουν για τα κοινά σημεία τους πιθανόν ομοιότητες και διαφορές που θα μπορούσαν να προκύψουν, όπου στην συνέχεια θα συγκριθούν, θα μελετηθούν ώστε να βγάλουμε ακριβείς συμπεράσματα τόσο για την αξιοπιστία των μετρήσεων όσο και για την φυσικοχημική συμπεριφορά των σχηματισμών.

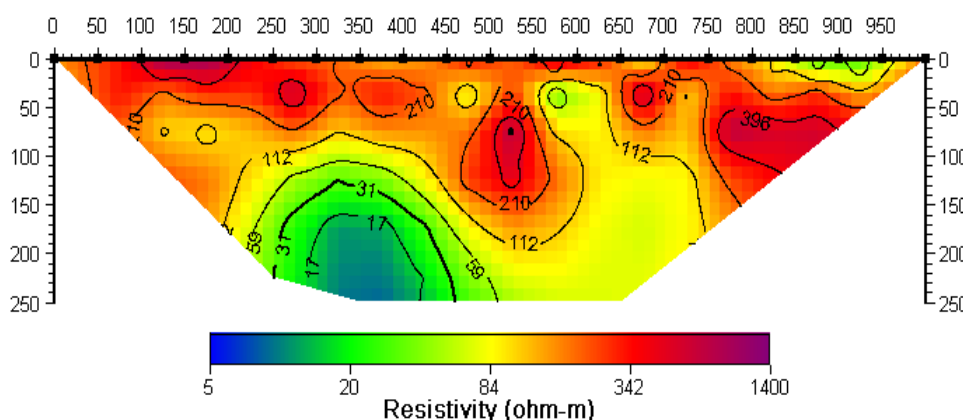
Από την ERT 2 (σχήμα 24) και ERT 1 (σχήμα 23) διαπιστώνεται ότι υπάρχουν σημεία όπου οι μετρήσεις ταυτίζονται και σε άλλα παρουσιάζονται μικρές ή και μεγάλες διαφορές.

- Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται μεταξύ 0-150 m κατά μήκος και σε βάθος από 0-100 m όπου στη ERT1 είναι 20-80(ohm-m) σε αντίθεση με την ERT 2 που είναι 84-342 (ohm-m)*

Στην συνέχεια και για τα υπόλοιπα μέτρα της ERT 2 παρατηρούνται περιοχές με μικρές και μεγάλες τιμές ειδική αντίστασης.

- Οι μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης εντοπίζονται κατά μήκος από 200-1000 m και βάθος 0-150 m που είναι πιθανόν οι σχηματισμοί να αποτελούνται από υπερκείμενα συμπαγή λεπτά στρώματα μεταλλικών ιζημάτων και τον υποκείμενο σχηματισμό του υπόβαθρου είτε να εμφανίζονται καθαρά μόνο τον σχηματισμό του υπόβαθρου(διμαρμαργιακού γνεύσιου).
- Οι μικρότερες τιμές παρατηρούνται κατά μήκος από τα 200-850 m και σε βάθος 120-250 όπου συναντάται ο σχηματισμός του υποβάθρου και οφείλονται στην άνοδο θερμών υδάτων μέσω των ασυνεχειών.

5.3 ERT 3



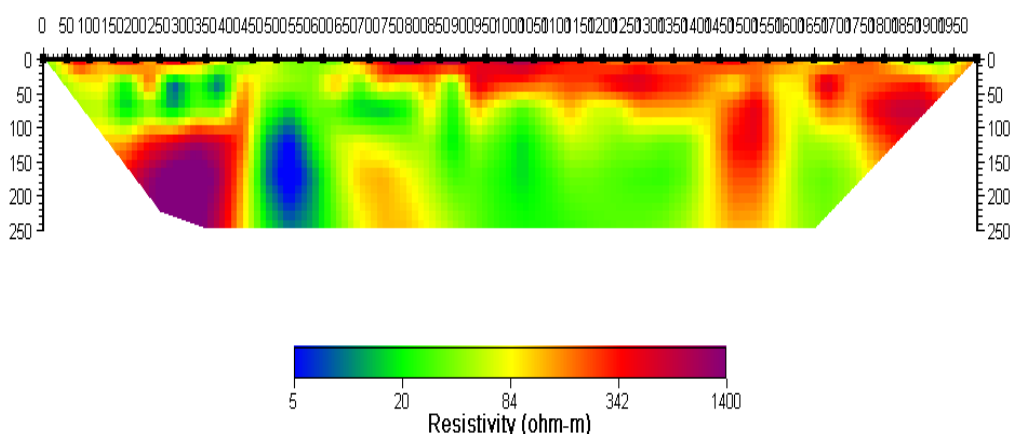
ΣΧΗΜΑ 25: ERT 3. Στο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (στην κλίμακα χρωμάτων/ειδικής αντίστασης που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σχήματος).

Η ERT 3 αποτελεί το τρίτο και τελευταίο σκέλος της ερευνάς και υλοποιήθηκε κατά την ίδια κατεύθυνση με τις δυο προηγούμενες και έχει μήκος 1000. Από το σχήμα 25 παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή της ειδικής αντίστασης που διαπιστώνεται από την πληθώρα των διαφορετικών χρωμάτων. Έτσι παρατηρούνται σημεία του υπεδάφους με μικρές –ενδιάμεσες και μεγάλες τιμές.

- Οι μικρότερες τιμές 17-54(ohm-m) παρατηρούνται κατά μήκος 200-450 m και σε βάθος 100-250 m και εντοπίζονται στον σχηματισμό του υπόβαθρου τον γνευσιακό σχιστόλιθο .
- Ενδιάμεσες τιμές 84-210 (ohm-m) παρατηρούνται σε όλο το μήκος των 1000 m και σε βάθος 50-250 m και εντοπίζονται στον σχηματισμό του υπόβαθρου αλλά είναι πιθανόν να εντοπίζονται και στις υπερκείμενες μεταλλικές αποθέσεις .
- Οι μεγαλύτερες τιμές 210-396 (ohm-m) συναντούνται τοπικά κατά μήκος 100-200 m , 500-550 m , 750-900 m και στα αντίστοιχα βάθη 0-30 m , 50-150 m και 50-150 m και εντοπίζονται και στον υποκείμενο σχηματισμό του υπόβαθρου αλλά και στις υπερκείμενες μεταλλικές αποθέσεις .

Τέλος για τα κοινά σημεία του υπεδάφους που αποτελούν μέρη της διαδικασίας της αλληλοεπικάλυψης διαπιστώνεται ότι οι μετρήσεις ταυτίζονται στο μεγαλύτερο φάσμα τους, εκτός από τα σημεία που εμφανίζουν στην ERT 3 την μικρότερη αντίσταση .

5.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ERT



ΣΧΗΜΑ 26 :Συγκεντρωτική ERT Στο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (στην κλίμακα χρωμάτων/ειδικής αντίστασης που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σχήματος).

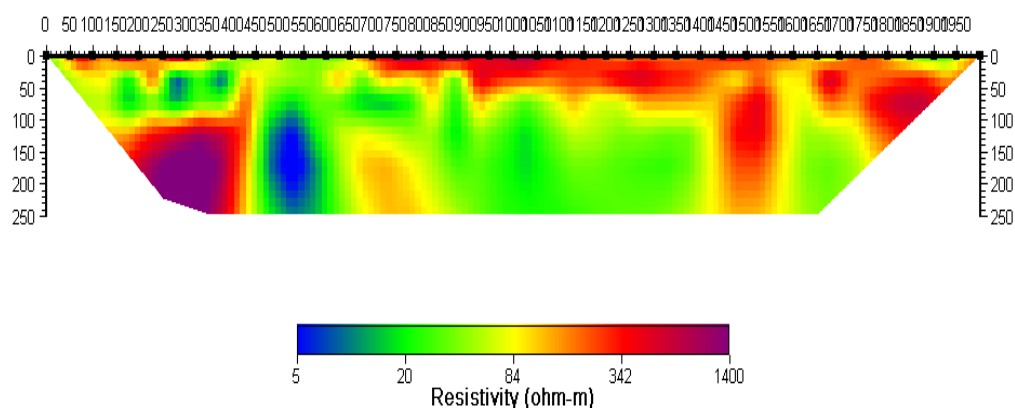
Η συγκεντρωτική ERT αποτελεί το γεωηλεκτρικό μοντέλο ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που δημιουργήθηκε από την σύνθεση των τριών επιμέρους γεωηλεκτρικών μοντέλων ERT 1, ERT 2, ERT 3 ,μέσω των οποίων παρέχεται μια ολοκληρωμένη εικόνα της εξεταζόμενης περιοχής αποβάλλοντας τα σφάλματα που δημιουργούνται από την ευαισθησία της διάταξης τόσο στις περιοχές αλληλοεπικάλυψης όσο και έξω από αυτές.

Από το σχήμα 26 δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες μεταβολές μεταξύ της συγκεντρωτικής ERT και των τριών επιμέρους γεωηλεκτρικών μοντέλων .Εξαίρεση αποτελούν μονάχα τα σημεία των πλευρικών ορίων του χαρακτηριστικού τραπεζιού που δημιουργείται από την πειραματική διάταξη που επιλέχτηκε.

- Οι μεγαλύτερες μεταβολές παρατηρούνται κατά μήκος (500-600) m, (1300-1400) m και (1000-1100) m σε βάθος από (50-250) m και εντοπίζονται τόσο στο σχηματισμό του υπόβαθρου (τον γνευσιακό σχιστόλιθο) όσο και μέσα στα μεταλικά πετρώματα .

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ				
m	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ERT (OHM-M)	ERT 1 (OHM-M)	ERT2 (OHM-M)	ERT3 (OHM-M)
600-700	84-100	100-250	100-250	
1300-1400	20-84		0-20	0-20
1600-1700	20-84			84-100

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



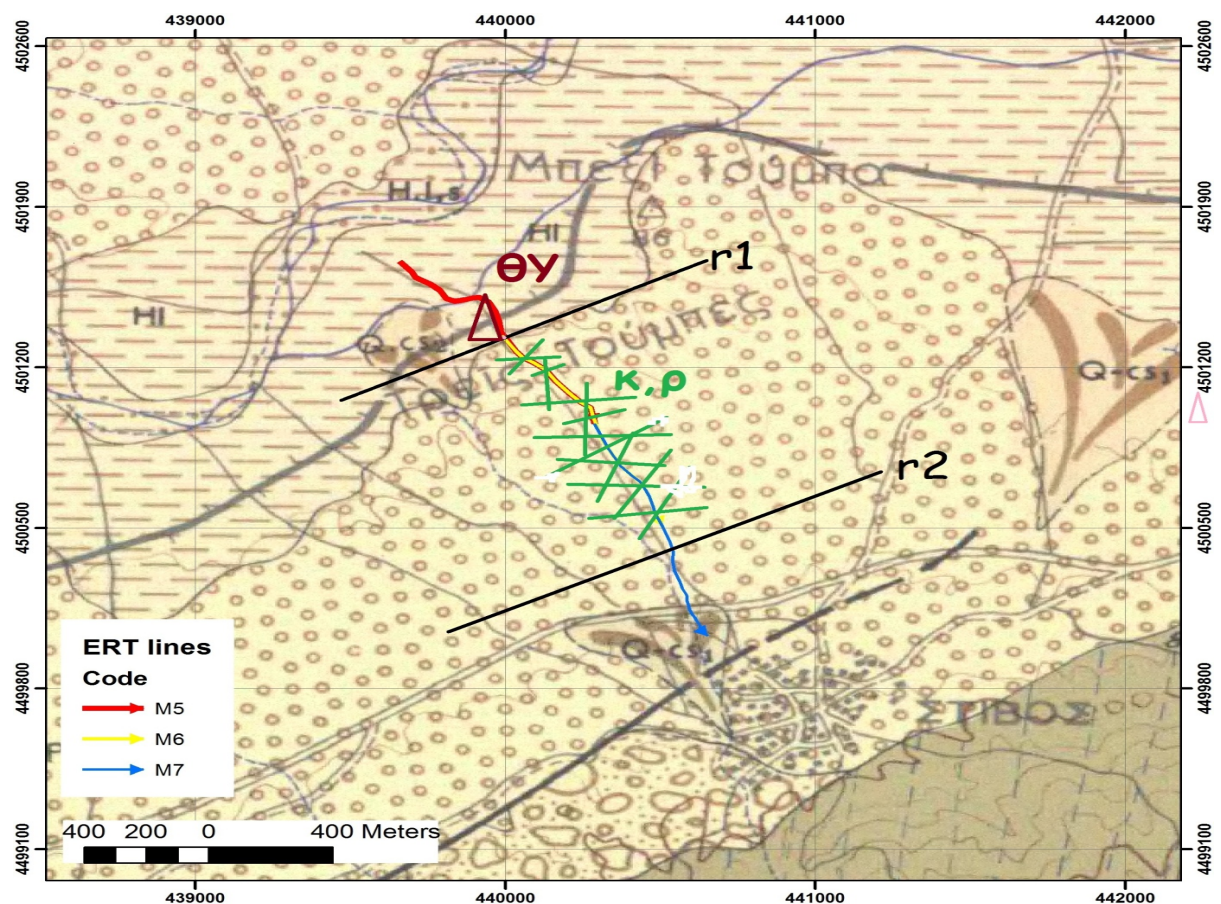
ΣΧΗΜΑ 27: Συγκεντρωτική ERT Στο σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (στην κλίμακα χρωμάτων/ειδικής αντίστασης που βρίσκεται στο κάτω μέρος του σχήματος).

Από την εξέταση και ερμηνεία των δεδομένων της συγκεντρωτικής ERT ανάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Στην περιοχή εντοπίζονται κατατμήσεις ,μικρές και μεγάλες ρωγμώσεις που αποτελούν τα αποτελέσματα της τεκτονικής δραστηριότητας .*
 - Οι μεγάλες ρωγμώσεις εκφράζονται μέσω δυο μεγάλων κανονικών ρηγμάτων $r1$ και $r2$ μεγάλης γωνίας κλίσης και εντοπίζονται κατά μήκος της εξεταζόμενης περιοχής των 2000 m αντίστοιχα στα (500-600) m, (1500-1650) m .Επίσης εντός της ρηξιγενούς ζώνης αναπτύσσεται ο μανδύας αποσαθρώσεως .*
 - Οι κατατμήσεις και οι μικρές ρωγμώσεις (κ,ρ) εντοπίζονται στον σχηματισμό του υπόβαθρου (γενευσιακό σχιστόλιθο) εντός των δυο κανονικών ρηγμάτων και είναι αποτέλεσμα είτε του ιδίου γεγονότος που δημιούργησε τα δυο κανονικά ρήγματα είτε της γενικής νεοτεκτονικής δραστηριότητας της περιοχής και παρατηρείται μεταξύ (600-1500) m .*

2) Επίσης στην περιοχή του ρήγματος $r1$ διαπιστώνεται αισθητή μείωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του υπεδάφους, που έχουν δεχτεί την τεκτονική δραστηριότητα. Συνεπώς είναι πιθανόν αυτή η αισθητή μείωση να οφείλεται, είτε στην άνοδο θερμών υδάτων (ΘΥ) μέσω της ρηξιγενούς ζώνης, είτε στην παρουσία υψηλής αλατότητας των υπόγειων υδάτων.

3) Όσο αφορά τους υπερκείμενους σχηματισμούς των μεταπλικών ιζημάτων, ενδεχομένως η μικρή ειδική ηλεκτρική αντίσταση να οφείλεται, είτε στην εμμόνη των ασυνεχειών προς το μέρος τους και την άνοδο θερμών νερών, είτε στο μετεωρικό νερό που συγκρατούν στην τάξη τους τα επιφανειακά στρώματα (υγροσκοπικό, υμενώδες, τριχοειδές νερό).



ΣΧΗΜΑ 28 : απεικόνιση τεκτονικών δομών της εξεταζόμενης περιοχής και της θέσης ανόδου Θερμών υδάτων .

7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Zhody, A. (1989). *A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves*. *Geophysics*, 54, 245-253.
- Roy, A. and Apparao, A. (1971). *Depth of investigation in direct current methods*. *Geophysics*, 36, 943-959.
- Edwards, L.S. (1977). *A modified pseudosection for resistivity and IP*. *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.
- Tsourlos P.(1995). *Modeling interpretation and inversion of multielectrode earth resistivity data-sets*. D.Phil. Thesis. University of York.
- Tsourlos P., and Szymanski J. (1995). *Self-correcting approaches to the inversion of resistive tomography field survey data*. Poster presented at the *Archaeological Prospection Conference*, University of Bradford, U.K., 12-13 September, 1995.
- Ψιλοβίκος Α. (1977) : *Παλαιογεωγραφική εξέλιξης της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας (Λαγκαδά-Βόλβης)*.
Διδ. διατρ. Φ.Μ.Σ. Α.Π.Θ. Θανασούλα, Κ (1983), *Γεωφυσική μελέτη Μυγδονίας Λεκάνης*. Διδακτορική Διατριβή.