



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Γεωφυσικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

‘Μελέτη υπεδάφους σε περιοχή κατασκευής
οικοδομικού συγκροτήματος με τη μέθοδο της
ηλεκτρικής τομογραφίας’

Μουρατίδης Χαράλαμπος

Μαυροκεφαλίδης Ιωάννης

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Βαργεμέζης Γεώργιος, Επίκ. Καθηγητής ΑΠΘ

Τσούρλος Παναγιώτης, Αναπλ. Καθηγητής ΑΠΘ

Θεσσαλονίκη 2012

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	3
2. Θέση της περιοχής έρευνας	4
3. Γεωγραφία της περιοχής	5
4. Γεωλογία της περιοχής	6
5. Ιστορικά κτίσματα ευρύτερης περιοχής.....	13
6. Γεωφυσική έρευνα.....	15
6.1 Γενικά στοιχεία για την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης	15
6.2 Μέθοδοι έρευνας	18
6.3 Μέθοδος Ηλεκτρικής Τομογραφίας	19
6.4 Μέθοδοι μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους	20
6.4.1 Εισαγωγή	20
6.4.2 Ιστορικά στοιχεία	20
6.4.3 Μέθοδος Wenner.....	20
6.4.4 Μέθοδος Schlumberger	22
6.4.5 Μέθοδος Τριών Σημείων	24
6.4.6 Μέθοδος διπόλου-διπόλου	25
6.4.7 Μέθοδος πόλου-πόλου	27
6.4.8 Μέθοδος πόλου-διπόλου	28
6.4.9 Σύγκριση – αξιολόγηση μεθόδων μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους	29
6.4.10 Επιλογή μεθόδου	31
6.5 Επεξεργασία δεδομένων (αντιστροφή).....	31
7. Εφαρμογή της μεθόδου.....	35
8. Συμπεράσματα	43
Φωτογραφίες.....	44
Βιβλιογραφία	45

1.Εισαγωγή

Η παρακάτω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τους φοιτητές του Γεωλογικού τμήματος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Μουρατίδη Χαράλαμπο και Μαυροκεφαλίδη Ιωάννη υπό την επιμέλεια του επίκουρου καθηγητή του τομέα Γεωφυσικής κ.Βαργεμέζη Γεώργιου και με τη βοήθεια του αναπληρωτή καθηγητή κ.Τσούρλου Παναγιώτη.

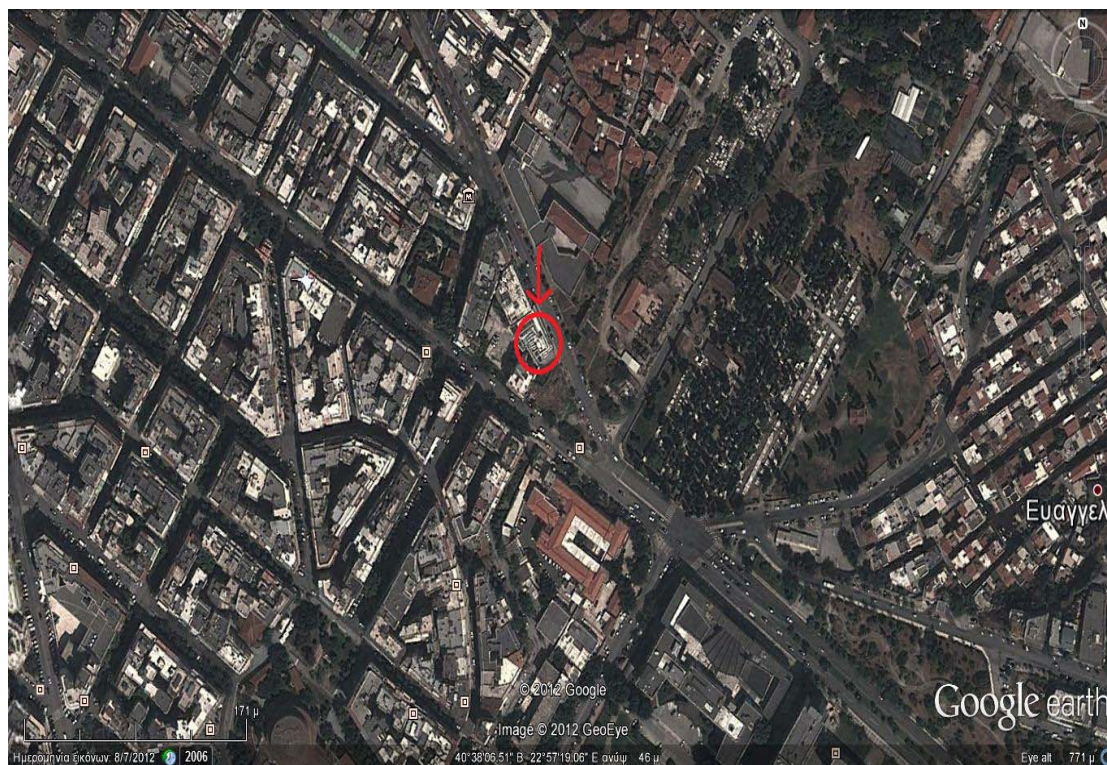
Διεξήχθη σε οικόπεδο επί της οδού Ολυμπιάδος, κοντά στην περιοχή του αρχαίου τείχους της πόλης, στην θέση της οποίας θα ανεγερθεί πυροσβεστικός σταθμός, γεωφυσική έρευνα με αντικείμενο την γεωλογική μελέτη τις περιοχής, για τον καθορισμό της δομής του υποβάθρου με την χρήση Ηλεκτρικών Μεθόδων Γεωφυσικής Διασκόπησης.

Η πιθανή ύπαρξη της συνέχειας του αρχαίου τείχους καθώς και του περιορισμένου χώρου έρευνας είχαν σαν αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί γεωηλεκτρική τομογραφία σύμφωνα με την διάταξη ηλεκτροδίων (πόλου-διπόλου). Η μέθοδος αυτή δίνει δυσδιάστατες πληροφορίες στην περιοχή των μετρήσεων.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας, η οποία δίνει την δυνατότητα λήψης μετρήσεων σε δύο διαστάσεις και κατασκευής δυσδιάστατων γεωηλεκτρικών μοντέλων σε μία περιοχή. Τα δεδομένα αναλύονται με τη χρήση του ειδικού λογισμικού DC_2DPro Version 1.01 από όπου παράχθηκαν δυσδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα με την τεχνική της αντιστροφής για εξαγωγή εικόνων που αντιπροσωπεύουν την πραγματική γεωλογική δομή του υπεδάφους.

2. Θέση της περιοχής έρευνας

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο κέντρο της Θεσσαλονίκης στην οδό Ολυμπιάδος δίπλα από το κτίριο του ΟΤΕ με συντεταγμένες $40^{\circ} 38' 07.70'' \text{ N } 22^{\circ} 57' 18.77'' \text{ E}$ (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Δορυφορική εικόνα της περιοχής της Θεσσαλονίκης και των τριγύρω περιοχών. Ο κόκκινος κύκλος δείχνει την περιοχή μελέτης της έρευνας. (Google Earth 2012)

Στη ευρύτερη περιοχή της έρευνας συναντάμε το αρχαίο τείχος της Θεσσαλονίκης γεγονός που μας προκαλεί ερωτηματικά για το αν το τείχος συνεχίζεται και κάτω από την εξεταζόμενη περιοχή.

3.Γεωγραφία της περιοχής

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο κέντρο της Θεσσαλονίκης πολύ κοντά στο Θερμαϊκό κόλπο και περιβάλλεται στα βόρεια από το δάσος του Σείχ Σου και στα Βορειοανατολικά της πόλης υψώνεται το όρος Χορτιάτης (Εικόνα 2).

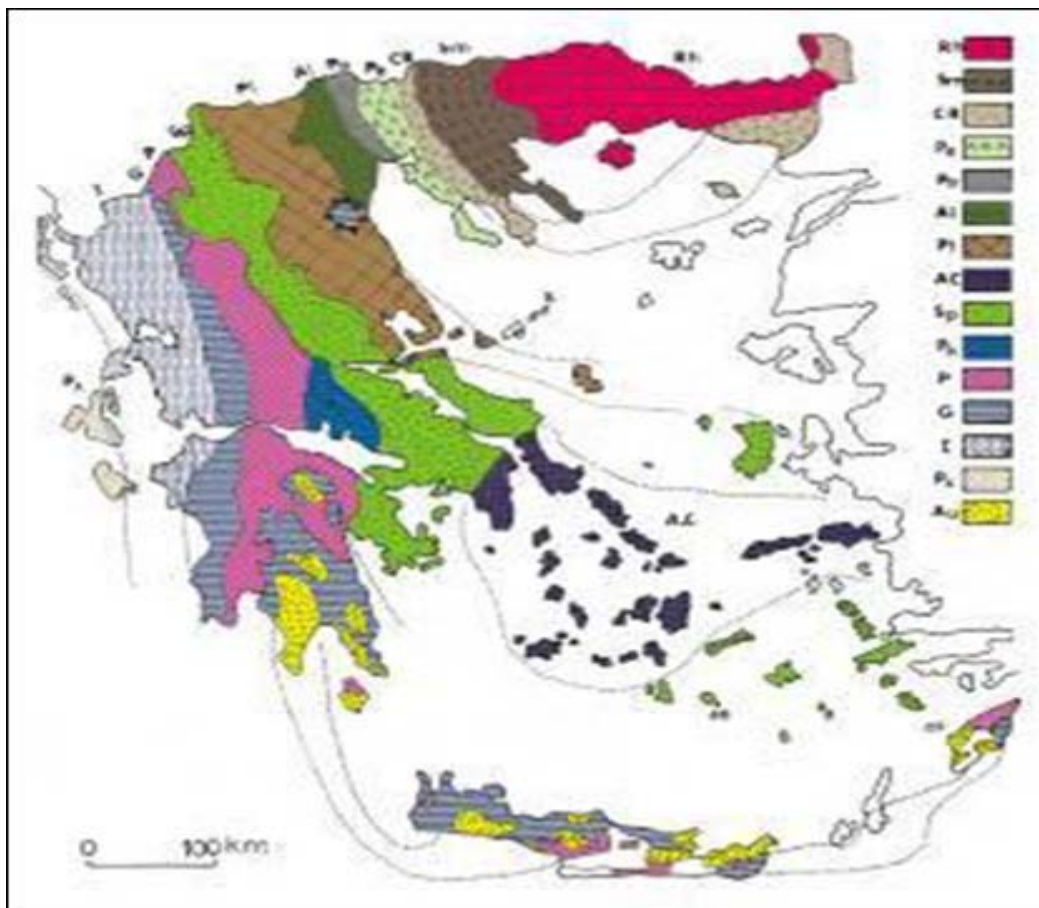
Το υψόμετρο της εξεταζόμενης περιοχής είναι 50m καθώς πρόκειται για περιοχή ημιπεδινή, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στη θάλασσα του κόλπου της Θεσσαλονίκης και τριγύρω υπάρχει λοφώδης τοπογραφία με πολύ μικρές κλίσεις.



Εικόνα 2. Δορυφορική εικόνα σε οικόπεδο επί της οδού Ολυμπιάδος, κοντά στην περιοχή του αρχαίου τείχους της πόλης. Με κόκκινο βελάκι φαίνεται η εξεταζόμενη περιοχή. (Google Earth 2012)

4.Γεωλογία της περιοχής

Γεωλογικά η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης εντάσσεται στη γεωτεκτονική ζώνη της Περιροδοπικής. Σημαντικές όμως, είναι και οι εμφανίσεις ομάδων πετρωμάτων που εντάσσονται στην ενότητα της Παιονίας της γεωτεκτονικής ζώνης του Αξιού. Σημειώνεται ότι η διάκριση του ορίου μεταξύ της Περιροδοπικής και της ενότητας της Παιονίας είναι δύσκολη και είναι πιθανό ότι Παιονία και Περιροδοπική αποτελούν ουσιαστικά την ίδια ζώνη και γι αυτό δεν μπορεί να βρεθεί όριο στα πετρώματα της Μουντράκης Δ., (1985) (Εικόνα 3).



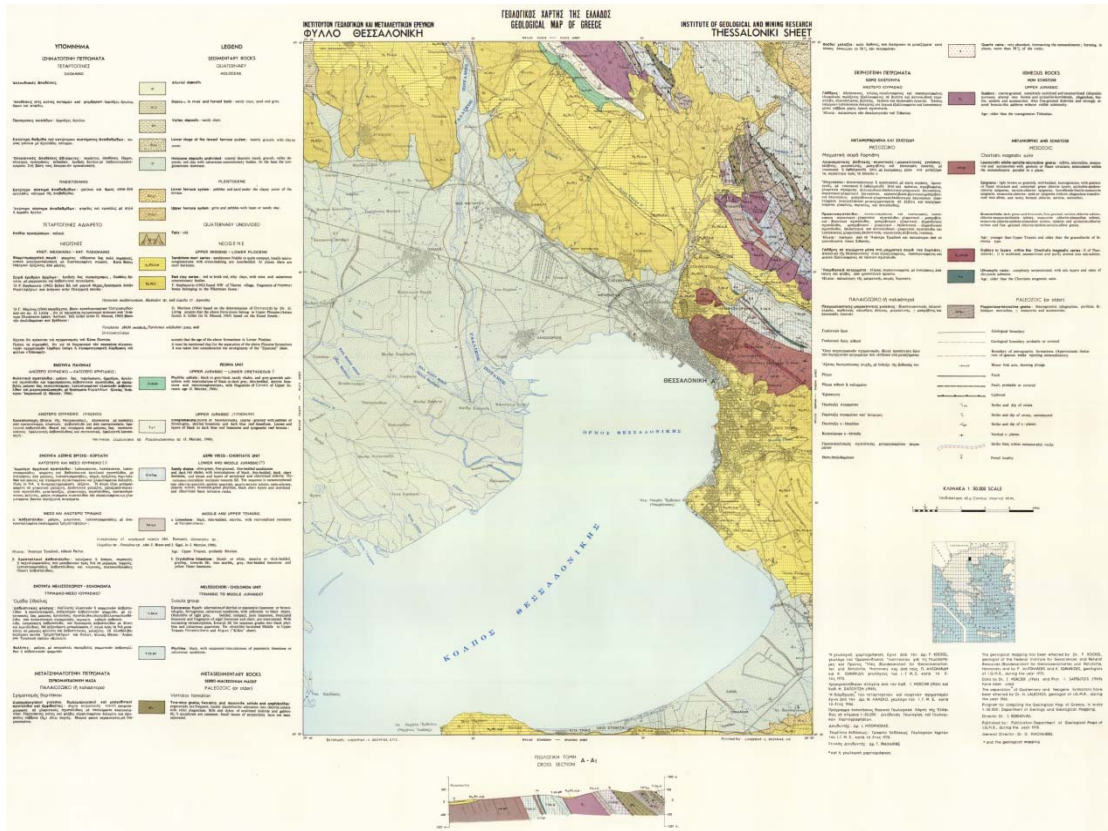
Εικόνα 3: Γεωτεκτονικές ζώνες του ελλαδικού χώρου (Δημοσθένης Μ. Μουντράκης)

(Μουντράκης Δ. (1985): Γεωλογία Της Ελλάδας , University Studio Press, Θεσσαλονίκη)

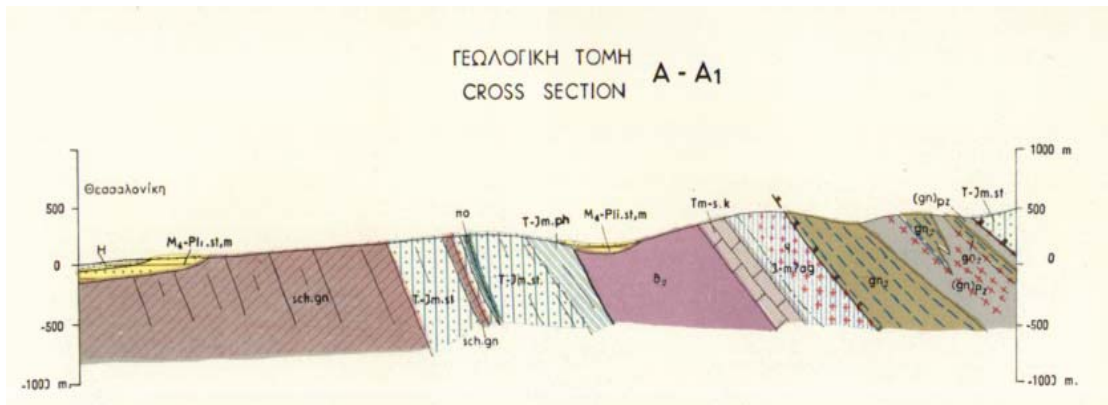
Η κύρια παλαιογεωγραφική και γεωτεκτονική σημασία της Περιροδοπικής ζώνης είναι ότι αποτελούσε στη διάρκεια του Ιουρασικού την ηπειρωτική κατωφέρεια της ηπειρωτικής ενδοχώρας και κυρίως της Σερβομακεδονικής μάζας, η οποία κατέληγε σε μια βαθιά αύλακα περιφερειακή της ηπειρωτικής μάζας. Αυτή η βαθιά αύλακα ήταν η θέση βύθισης, subduction, της ωκεάνιας περιοχής της ζώνης του Αξιού κάτω από την Ευρωπαϊκή ηπειρωτική πλάκα το περιθώριο της οποίας αποτελούσαν οι μάζες της Ροδόπης και της Σερβομακεδονικής. Η ζώνη της Παιονίας αντιπροσωπεύει τμήμα της παλιάς ωκεάνιας περιοχής της Τηθύος. Οι δύο ζώνες αναδύθηκαν οριστικά κατά την τελική ορογενετική διεργασία των Ελληνίδων που τοποθετείται στο τέλος Κρητιδικού αρχές Παλαιοκαίνου.

Το γεγονός ότι η περιοχή βρίσκεται μεταξύ των ζωνών Παιονίας και Περιροδοπικής δικαιολογεί την εμφάνιση πετρωμάτων διαφορετικής προέλευσης. Συγκεκριμένα εντοπίζονται ιζηματογενή και μεταιζηματογενή πετρώματα των τριών ενοτήτων της Περιροδοπικής ζώνης καθώς και της υποζώνης της Παιονίας, τμήματα από το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής ζώνης και Τριτογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις. Βάσει της επιτόπιας παρατήρησης, καθώς και των δεδομένων του γεωλογικού χάρτη (Έκδοση ΙΓΜΕ, φύλλο ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 1:50.000) (Εικόνες 4,5) στην περιοχή έρευνας συναντάται ο σχηματισμός των ολόκαινων παράκτιων αποθέσεων Μουντράκης Δ., (1985).

Το βραχώδες υπόβαθρο της πόλης το οποίο αποτελούν οι πρασινοσχιστόλιθοι Θεσσαλονίκης της Περιροδοπικής ζώνης (Μουντράκης 1985), εκτείνεται με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και κυμαίνεται από την επιφάνεια του εδάφους βορειότερα της οδού Αγ. Δημητρίου, μέχρι τα 40 μέτρα στην Εγνατία και Αγ. Σοφίας (στοιχεία από γεωτρήσεις Μετρό Θεσσαλονίκης), 55m στην Ροτόντα, 90m στην Θεολογική Σχολή Α.Π.Θ., 70m στο Νοσοκομείο Λοιμωδών (στοιχεία από υδρογεωτρήσεις του Δήμου Θεσσαλονίκης) έως και βαθύτερα από 500m από την επιφάνεια του εδάφους στην περιοχή της Καλαμαριάς ["Νεοτεκτονικά Ρήγματα Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης" (Άννα Ζερβοπούλου, Σπύρος Παυλίδης)].




Εικόνα 4. Γεωλογικός χάρτης, φύλλο ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ (Ι.Γ.Μ.Ε. 1978)



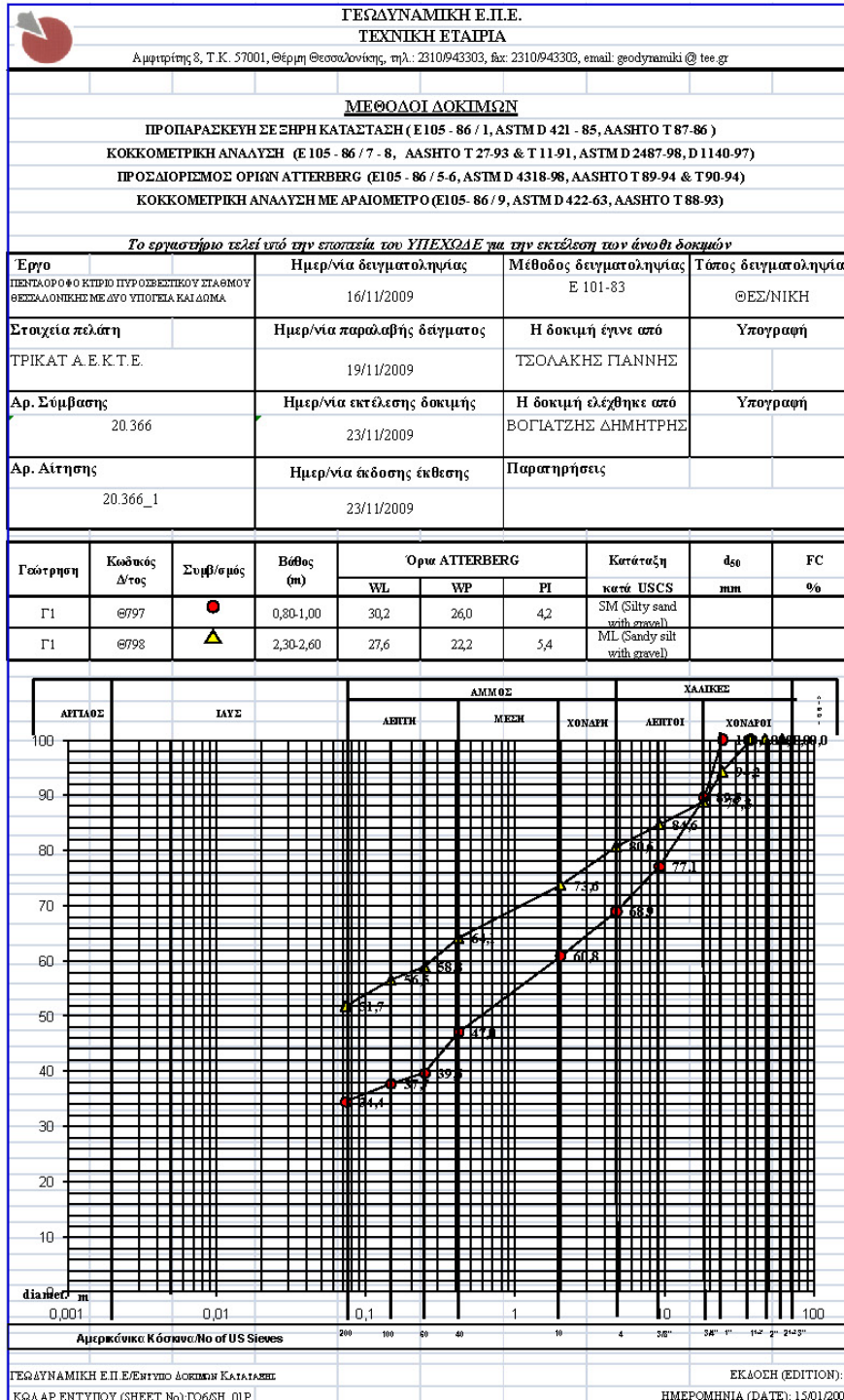
Εικόνα 5. Γεωλογική τομή χάρτη και διάταξη γεωλογικών σχηματισμών φύλλο ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ (Ι.Γ.Μ.Ε. 1978)

Στο συγκεκριμένο οικόπεδο η τεχνική εταιρία ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ Ε.Π.Ε. ήταν η ανάδοχος εταιρία του έργου με τίτλο 'Πενταόροφο κτίριο πυροσβεστικού σταθμού Θεσσαλονίκης με δύο υπόγεια και δώμα' και έκανε μελέτες στην περιοχή πραγματοποιώντας δύο γεωτρήσεις. Οι μετρήσεις από τις γεωτρήσεις φαίνονται παρακάτω :

Γεώτρηση Γ1


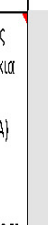




ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ Ε.Π.Ε.																															
ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΙΑ Αμνικίας 8, Τ.Κ. 57001, Θέρμη Θεσσαλονίκης, τηλ.: 2310943303, fax: 2310943303, email: geodynamiki@tee.gr																															
ΕΡΓΟ				ΠΕΝΤΑΟΡΟΦΟ ΚΤΙΡΙΟ ΠΥΡΟΣΒΕΣΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΙ ΔΩΜΑ		ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΜΒΑΣΗΣ		20.366		ΑΡ. ΑΠΗΘΕΣ		20.366_1		ΥΑΡΟΦΟΡΟΣ		m															
ΓΕΩΤΡΗΣΗ Γ1																															
ΒΑΘΟΣ m	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ	ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗ								ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ																			
				Ποιότητα πυρήνα RQD (%)			ΔΟΚΙΜΗ LIQUEON			ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΛΕΤΗ ΘΛΙΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΠΙΘΕΤΗ ΘΛΙΨΗ	ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΡΙΘΜΩΣΗ			ΟΡΙΑ ATTERBERG		ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ USCS	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΛΕΤΗ ΘΛΙΨΗ	ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΗΜΗ	ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΟΣ									
				20-40	40-60	60-80	Δοκιμια τμήμα	P _u Kj/cm ²	K (m/mec)	σ _c (MPa)	c %	ω (%)	%	36	4	10	40		200	W _L	W _P	IP	q _u (kPa)	e %	C (kPa)	φ°	Cc	φ _v	E _i (kPa)		
				0-20	20-40	40-60																									
1		Τεφρή, λυώδης ΑΜΜΟΣ με χαλίκια και κεραμικά (ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ) 2,30	0-5%								89,5	88,9	80,8	47	34,4	30,2	26,0	4,2	SM (Silty sand with gravel)												
2																															
3		Καστανή, αμμώδης ΙΛΥΣ με χαλίκια (ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ) 4,30										88,8	80,6	73,6	64,1	51,7	27,6	22,2		5,4	ML (Sandy silt with gravel)										
4																															
5				Κεραμισμένος ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ 6,00																											
6																															
7																															
8																															

Εικόνα 6. Γεωλογική τομή, γεωλογική περιγραφή, κοκκομετρικές αναλύσεις και προσδιορισμός των ορίων atterberg των γεωλογικών σχηματισμών της γεώτρησης Γ1

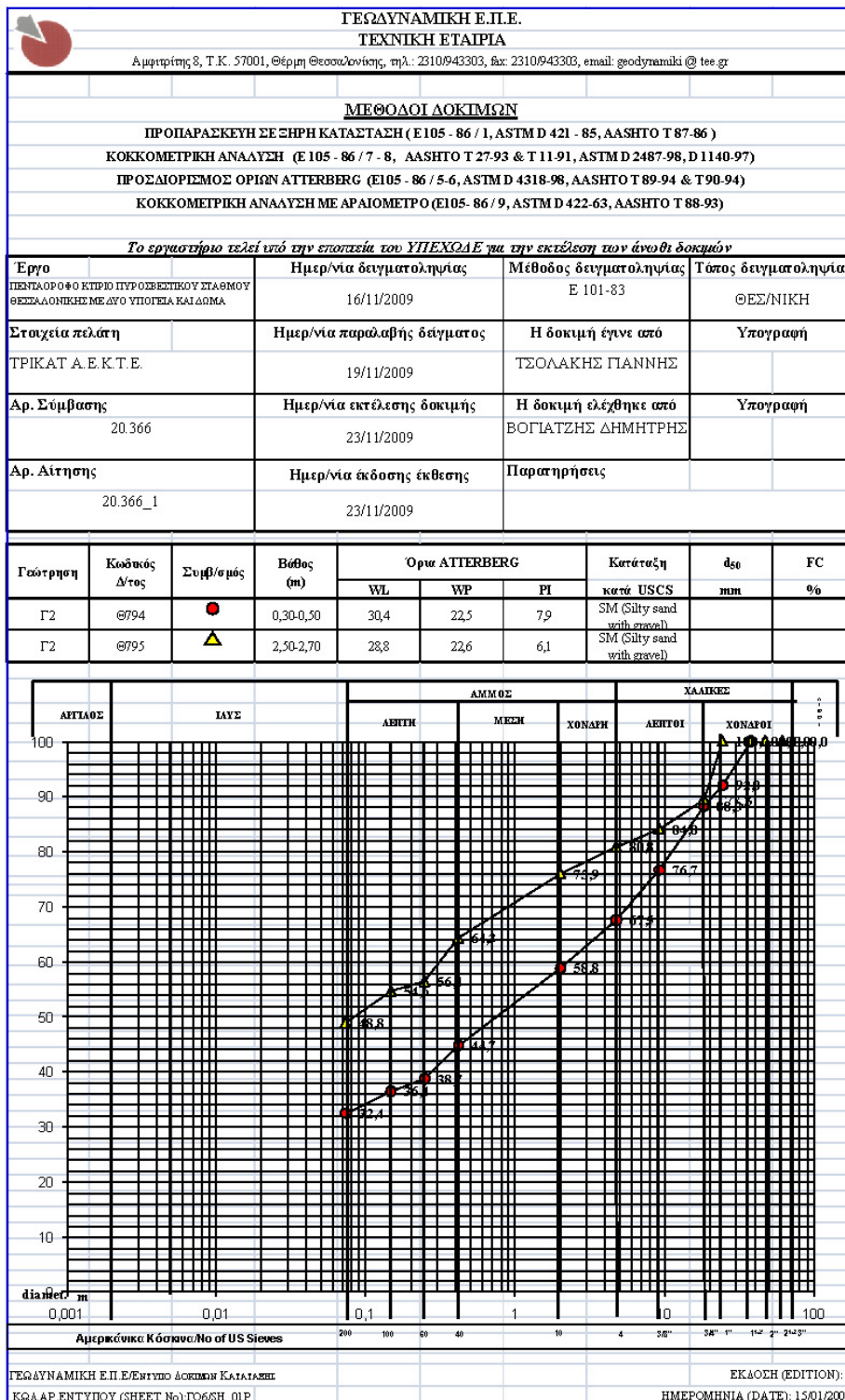


Εικόνα 7. Κοκκομετρικές αναλύσεις και προσδιορισμός των ορίων atterberg των γεωλογικών σχηματισμών της γεώτρησης Γ1

Γεώτρηση Γ2

ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ Ε.Π.Ε. ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΙΑ Αμπεράκης 8, Τ.Κ. 57001, Θέρμη Θεσσαλονίκης, τηλ.: 2310943303, fax: 2310943303, email: geodynami@tee.gr																													
ΕΡΓΟ	ΠΕΝΤΑΟΡΟΦΟ ΚΤΙΡΙΟ ΠΥΡΟΣΒΕΣΤΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΥΠΟΓΕΙΑ ΚΑΙ ΔΩΜΑ							ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΜΒΑΣΗΣ	20.366	ΑΡ. ΑΠΗΣΗΣ	20.366_1	ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ	m																
ΓΕΩΤΡΗΣΗ Γ2																													
ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗ																													
ΒΑΘΟΣ m	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ Η ΤΟΜΗ	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ	Ποσότητα πυρήνα ROD (%) 20 40 60 80	ΔΟΚΙΜΗ LUCCON			ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΕΤΗ ΘΥΡΗ		ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΟΡΕΥΣΗ		ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΥΡΟΜΕΤΡΙΚΗ				ΟΡΙΑ ATTERBERG			ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ USCS	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΕΤΗ ΘΥΡΗ		ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΗΞΗ		ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ		ΜΕΤΡΟ ΕΜΒΕΤΙΣΤΟΤΗΤΑΣ			
					Δοκιμή τύπος	P_u (Kg/cm ²)	X (mm/sec)	α_c (MPa)	ϵ %	q_{lim}	%	30	4	10	40	200	WL	WP		IP	q_u (kPa)	ϵ %	C (kPa)	ϕ^o	Cc		ϕ	E_s (kPa)	
1		Τεφρή, λυώδης ΑΜΜΟΣ με χαλίκια και κεραμικά (ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ)		0-5%																									
2																													
3																													
4		ΤΕΙΜΑΧΗ τοιχίου (ΤΕΧΝΗΤΑ ΥΛΙΚΑ)		0-5%																									
5																													
6		Καρμπασιμένος ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΣ		0-5%																									
7																													
8																													
9																													
10																													
11																													
12																													
13																													

Εικόνα 8. Γεωλογική τομή, γεωλογική περιγραφή, κοκκομετρικές αναλύσεις και προσδιορισμός των ορίων atterberg των γεωλογικών σχηματισμών της γεώτρησης Γ2



Εικόνα 9. Κοκκομετρικές αναλύσεις και προσδιορισμός των ορίων atterberg των γεωλογικών σχηματισμών της γεώτρησης Γ2

5. Ιστορικά κτίσματα ευρύτερης περιοχής

Στη συγκεκριμένη περιοχή δεσπόζει το αρχαίο τείχος της Θεσσαλονίκης το οποίο κατασκευάστηκε από το Θεοδοσίο το Μεγάλο, τον 4ο αιώνα και το οποίο είναι συνέχεια της Ακρόπολης και του Επταπυργίου τα οποία βρίσκονται βορειότερα.



Εικόνα 10. Πανοραμική φωτογραφία του αρχαίου τείχους από την περιοχή της Άνω Πόλης (www.greekscape.gr)

Σήμερα σώζεται σχεδόν ανέπαφο το βόρειο τμήμα του τείχους, καθώς επίσης και το Επταπύργιο Φρούριο, με μικρές απώλειες. Από το ανατολικό τμήμα σώζεται ένα αρκετά μεγάλο τμήμα του τείχους, από τον Πύργο της Αλύσεως, που αντικατέστησε τον Πύργο του Τριγωνίου, μέχρι τον Πύργο του Όρμισδα. Από εκεί και κάτω το τείχος έχει καταστραφεί, ωστόσο σώζονται διάσπαρτα μικρά τμήματα του τείχους. Το πρώτο βρίσκεται εκεί που ήταν άλλοτε η Νέα Χρυσή Πύλη, στη σημερινή οδό Αγίου Δημητρίου και το δεύτερο τμήμα βρίσκεται εκεί που ήταν κάποτε η Κασσανδρεώτικη Πύλη, στη σημερινή Εγνατία Οδό ("Τα τείχη της Θεσσαλονίκης", της Ι. Αρβανιτίδου).



Εικόνα 11. Κομμάτι του αρχαίου τείχους της Θεσσαλονίκης επί της οδού Εθνικής Αμύνης απέναντι από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης στο κέντρο της πόλης ([www. archaiologia.gr](http://www.archaiologia.gr))

6.Γεωφυσική έρευνα

6.1 Γενικά στοιχεία για την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί μία από τις γεωφυσικές τεχνικές που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην διασκόπηση και στον εντοπισμό “ρηχών δομών”. Η μέθοδος αυτή είναι επίσης γνωστή και ως “μέθοδος συνεχούς ρεύματος”. Σκοπός της μεθόδου αποτελεί ο καθορισμός της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, δηλαδή της γεωηλεκτρικής δομής αυτού, πραγματοποιώντας μετρήσεις είτε στην επιφάνεια της Γης είτε μέσα σε αυτή, σε γεωτρήσεις.

Βασίζεται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια ή σε γεωτρήσεις και χρησιμοποιούνται με σκοπό το διαχωρισμό στόχων με διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση (Nishimura 2001). Στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις, οι «ανωμαλίες» ορίζονται ως οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου ή της πυκνότητας του ρεύματος, οι οποίες οφείλονται σε διαταραχές εξαιτίας στόχων με διαφορετική αντίσταση (ή αγωγιμότητα) από το περιβάλλον έδαφος (Σαρρής 2008, Sarris 1992). Συνεπώς, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι για τις γεωηλεκτρικές αρχαιολογικές διασκοπήσεις πιθανοί στόχοι αποτελούν τόσο οι αρχιτεκτονικές δομές (π.χ. τείχοι, τάφοι πληρωμένοι με αέρα, θεμέλια οικιών, κ.α.), όσο και τάφοι πληρωμένοι με εδαφικό υλικό, τα οποία παρουσιάζουν ισχυρό σήμα και εγγράφονται ως ισχυρές αντιστάσεις. Τάφοι, επίσης με συσσωρεύσεις οργανικού υλικού και αγωγή εδάφη, παρουσιάζουν συχνά ασθενές σήμα και εγγράφονται ως ασθενείς αντιστάσεις (Clark 1990). Επιπλέον, δάπεδα οικιών ή άλλες συμπιεσμένες δομές είναι ανιχνεύσιμες εξαιτίας είτε του μειωμένου πορώδους είτε της υγρασίας, που έχει συσσωρευτεί στην επιφάνειά τους.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση, ρ , ενός κυλινδρικού σχήματος που έχει μήκος L , αντίσταση R και εμβαδόν διατομής S δίνεται από την σχέση:

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

Όπου R είναι σε Ohms, L σε μέτρα και S σε τετραγωνικά μέτρα. Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το Ohm-m. Μία άλλη φυσική ποσότητα που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υπεδάφους κατά την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η αγωγιμότητα, η οποία ορίζεται ως το αντίστροφο της ειδικής

ηλεκτρικής αντίστασης ($\sigma=1/\rho$). Η αγωγιμότητα δείχνει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέεται στο έδαφος και μονάδα μέτρησης αυτής είναι το Siemens ανά μέτρο (S/m).

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων οι οποίοι είναι εύκολα μεταβαλλόμενοι. Εξαρτάται από τις υδρολογικές – υδρογεωλογικές συνθήκες μιας περιοχής, τη χημική σύσταση του νερού, τα ιόντα που είναι διαλυμένα σε αυτό, το πορώδες των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις και διακλάσεις, τη θερμοκρασία και την πίεση, καθώς και από τις τοπογραφικές μεταβολές.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έχει μία αρκετά μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Γεωλογία για γεωλογική χαρτογράφηση, στην Υδρογεωλογία για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων, στην Τεχνική Γεωλογία για την εύρεση του μητρικού πετρώματος και εγκοίλων, στον καθορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους κ.λ.π., για περιβαλλοντικούς σκοπούς στον προσδιορισμό της ζώνης μόλυνσης σε υδροφόρα στρώματα και της εύρεσης περιοχών υπεδάφιας μόλυνσης, στην αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων και μεταλλευμάτων και στην διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων.

Για την μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους εισάγεται μέσα σε αυτό ηλεκτρικό ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων Α και Β. Το Α ηλεκτρόδιο είναι ένας θετικός ηλεκτρικός πόλος ενώ το Β ένας αρνητικός. Λόγω των αντιστάσεων επαφής που παρουσιάζονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και του εδάφους, η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από το εισερχόμενο στο υπεδάφος ρεύμα μετριέται σε δύο άλλα ηλεκτρόδια (ηλεκτρόδια δυναμικού Μ, Ν). Έτσι κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής μεθόδου χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια.

Θεωρώντας ότι οι μετρήσεις της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης έγιναν με την χρήση των τεσσάρων ηλεκτροδίων, τότε η σχέση που δίνει την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \frac{1}{K} = 2\pi R \frac{1}{K}$$

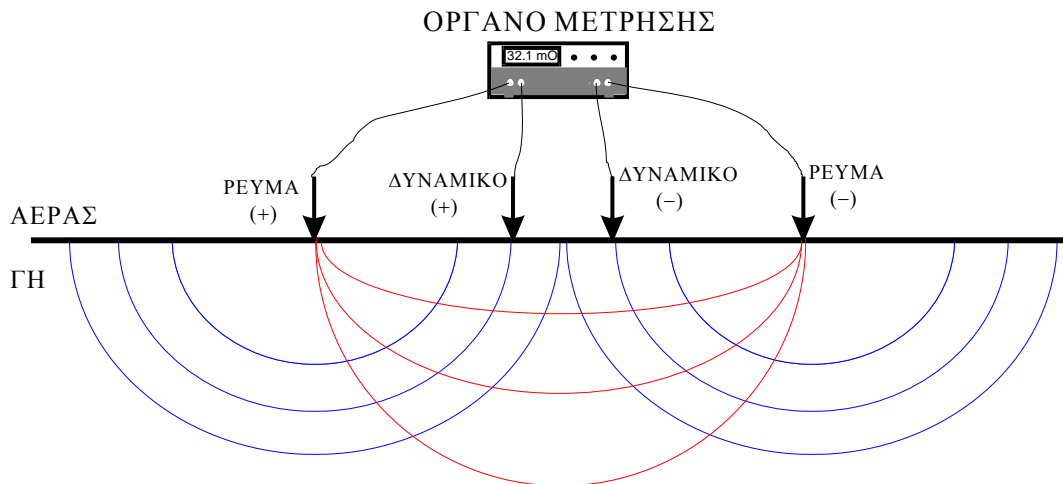
Όπου:

- ρ = η ειδική αντίσταση ομογενούς γης
- I = ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διοχετεύεται στην γη
- ΔV = μετρούμενη διαφορά δυναμικού
- K = γεωμετρικός παράγοντας
- R = μετρούμενη αντίσταση

Ο γεωμετρικός παράγοντας K εξαρτάται αποκλειστικά από την διάταξη των ηλεκτροδίων και τις αποστάσεις μεταξύ τους και ισούται με:

$$K = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]$$

Στην περίπτωση που η γη είναι ομογενής, τότε για οποιαδήποτε πιθανή διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων η εφαρμογή του γεωμετρικού παράγοντα στην μετρούμενη αντίσταση (R) θα δώσει την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Στην πραγματικότητα όμως η γη είναι ανομοιογενής. Οπότε για να περιγραφεί αυτή η ανομοιογένεια εισάγεται ένας νέος όρος για την περιγραφή της αντίστασης που λέγεται “φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση”. Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση αντιπροσωπεύει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που θα είχε το υπέδαφος αν ήταν πράγματι ομογενές και γενικά αποτελεί έναν σταθμισμένο μέσο όρο της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους.



Εικόνα 12. Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων (Βαργεμέζης Γεώργιος 2008)

Θεωρητικά υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι για να διαταχθούν τα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του εδάφους, αλλά μόνο λίγες από αυτές τις διατάξεις χρησιμοποιούνται ευρύτητα. Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί κάποιες διατάξεις θεωρητικά να υπερτερούν έναντι κάποιων άλλων αλλά δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν πρακτικά και θα τις αναλύσουμε λεπτομερέστερα παρακάτω (Παπαζάχος Κ.Β. (1986) : Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, 1986, Εκδόσεις Ζήτη Θεσσαλονίκη).

6.2 Μέθοδοι έρευνας

Βυθοσκοπήσεις: Με την εφαρμογή των βυθοσκοπήσεων γίνεται προσπάθεια να μετρηθεί η κατανομή της ειδικής αντίστασης με το βάθος. Η όλη διαδικασία στηρίζεται στο γεγονός ότι το υπέδαφος θεωρείται ότι έχει οριζόντια στρωματογραφία, δηλαδή αποτελείται από διακριτά, οριζόντια, ομογενή και ισότροπα στρώματα. Στην περίπτωση των βυθοσκοπήσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η μέθοδος Schlumberger αλλά και η μέθοδος Wenner. Κλασσικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων. Κατά την διάρκεια των βυθοσκοπήσεων λαμβάνονται μία σειρά μετρήσεων με συνεχώς αυξανόμενες τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος (τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά). Με την συνεχή αύξηση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό μετριέται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής αντίστασης σε μία στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης.

Οριζοντιογραφίες (Χαρτογράφιση): Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό πλευρικών μεταβολών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αντίθετα με τις βυθοσκοπήσεις, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και οι μετρήσεις λαμβάνονται μετακινώντας πλευρικά την διάταξη των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα. Με τον τρόπο αυτό χαρτογραφούνται μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σταθερό βάθος. Κυρίως χρησιμοποιούνται οι διατάξεις Wenner, Διπόλου - Διπόλου και Πόλου - Διπόλου. Οι οριζοντιογραφίες αποτελούν κλασσικές μεθόδους χαρτογράφησης των αρχαιολογικών θέσεων.

Τομογραφίες (Δυσδιάστατη διασκόπηση): Η δυσδιάστατη διάταξη μέτρησης επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων τα οποία εμπεριέχουν πληροφορίες τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης. Οι τομογραφίες μπορούν να θεωρηθούν ως την συλλογή μιας σειράς τομών σε μία συγκεκριμένη περιοχή με συνεχώς αυξανόμενη απόσταση ηλεκτροδίων ή μία σειρά διαδοχικών βυθοσκοπήσεων πάνω σε μία γραμμή. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των τομογραφιών αποτελεί ο μεγαλύτερος αριθμός δεδομένων που συλλέγονται σε σχέση με τις βυθοσκοπήσεις και τις οριζοντιογραφίες. Για να είναι δυνατή η συλλογή τέτοιων δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης τα οποία έχουν πλήρως αυτοματοποιήσει την διαδικασία.

6.3 Μέθοδος Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες συνήθως πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων (23 και πάνω) τα οποία τοποθετούνται πάνω σε μία γραμμή στο έδαφος και συνδέονται με ένα πολύκλωνο καλώδιο το οποίο συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης. Τα σύγχρονα όργανα μέτρησης της αντίστασης περιέχουν ηλεκτρονικά συστήματα με τα οποία είναι δυνατή η αυτόματη επιλογή των τεσσάρων ηλεκτροδίων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για κάθε μέτρηση. Αυτό είναι πάρα πολύ σημαντικό στην γεωηλεκτρική διασκόπηση καθώς μειώνεται αισθητά ο χρόνος συλλογής των δεδομένων.

Για την αποθήκευση των μετρήσεων που θα συλλεχθούν χρησιμοποιείται ένας φορητός υπολογιστής που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης. Συνήθως, τα όργανα αυτά κατασκευάζονται έτσι ώστε να έχουν αυτονομία και μπορούν να αποθηκεύσουν στην μνήμη τους αρκετά δεδομένα παρατήρησης. Αυτό αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αν πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε περιοχές με πολύ απότομο ανάγλυφο, όπου η χρήση φορητού υπολογιστή θα δυσχέραινε την λήψη των μετρήσεων. Εν συνεχεία, μέσω ειδικών καλωδίων τα δεδομένα μεταφέρονται σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περαιτέρω επεξεργασία. Παράλληλα είναι δυνατός ο προγραμματισμός του οργάνου, χρησιμοποιώντας ειδικά αρχεία τα οποία και εισάγονται σε αυτό, έτσι ώστε να διεξαχθεί οποιαδήποτε γνωστή διάταξη ηλεκτροδίων αυτοματοποιημένα.



Εικόνα 13. Φορητός υπολογιστής που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης

6.4 Μέθοδοι μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους

6.4.1 Εισαγωγή

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης εδάφους γίνεται με κάποια από τις μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω. Όλες οι μέθοδοι βασίζονται στην ίδια περίπου βασική λογική: Εφαρμόζουμε μία τάση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων τοποθετημένων στη γη. Έτσι δημιουργείται ροή ρεύματος διαμέσου της γης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Μέσω δύο άλλων ηλεκτροδίων μετράμε την τάση που αναπτύσσεται σε αυτά. Συνήθως λαμβάνουμε αρκετές μετρήσεις μεταβάλλοντας τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, κάτι που οδηγεί στην βαθύτερη ροή του ρεύματος μέσα στην γη. Κατόπιν, με τους ανάλογους τύπους και τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του εδάφους. Συνήθως τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια είναι ράβδοι. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται ώστε η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων να μη συμπέσει στην ίδια ευθεία με υπόγειους μεταλλικούς σωλήνες ή καλώδια, καθώς οι εγκαταστάσεις αυτές θα επηρεάσουν τη μέτρηση και θα δώσουν λάθος αποτέλεσμα.

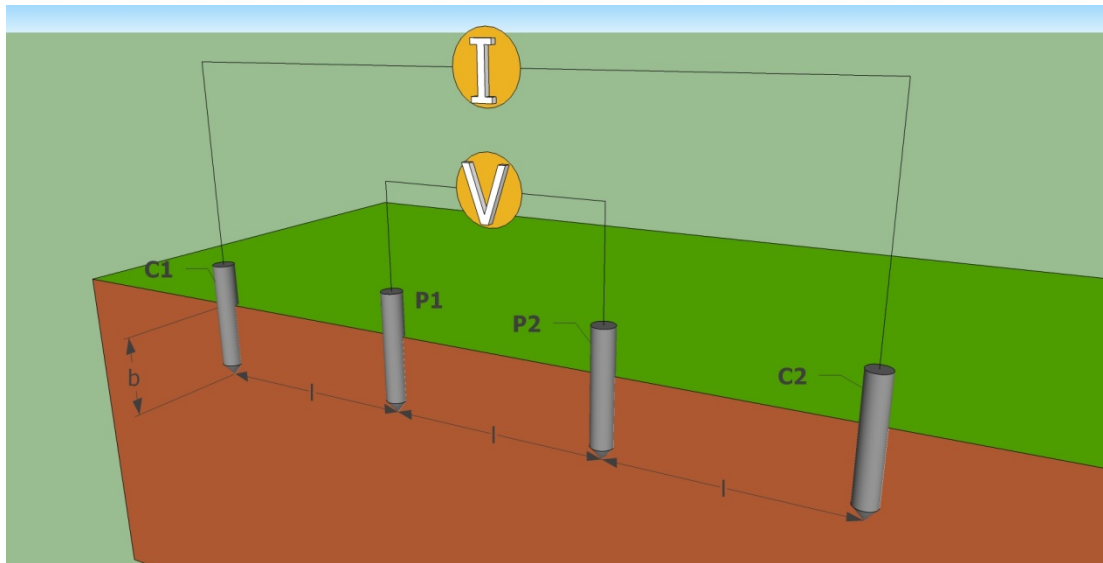
6.4.2 Ιστορικά στοιχεία

Ο Wenner (1915), βασισμένος στη δουλειά του Schlumberger, πρότεινε ότι μία ευθεία διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, θα ελαχιστοποιούσε τα προβλήματα επαφής εδάφους-ηλεκτροδίων, αν τα ηλεκτρόδια τάσης και τα ηλεκτρόδια ρεύματος ήταν διαχωρισμένα μεταξύ τους. Από τότε όλες οι μέθοδοι μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους στην ηλεκτρολογία, στην γεωφυσική και σε άλλα πεδία, είναι βασισμένες στη βασική αρχή των τεσσάρων ηλεκτροδίων.

6.4.3 Μέθοδος Wenner

Η μέθοδος Wenner αναπτύχθηκε από τον Dr. Frank Wenner το 1915 στις Η.Π.Α.. Ανήκει, μαζί με την μέθοδο Schlumberger που αναπτύσσεται παρακάτω, στην κατηγορία Four-Point Method. Είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους και θεωρείται η πιο ακριβής. Αυτή η μέθοδος έχει ως εξής:

Χρησιμοποιούνται τέσσερα μικρά ηλεκτρόδια, δύο ρεύματος C_1 , C_2 και δύο τάσης P_1 και P_2 τα οποία τοποθετούνται σε βάθος b . Τα ηλεκτρόδια P_1 και P_2 περικλείονται από τα C_1, C_2 και τα σημεία τοποθέτησης τους στο έδαφος συμπίπτουν σε ευθεία και απέχουν μεταξύ τους απόσταση l . Το ρεύμα I που εκχύεται στο έδαφος μέσω των ηλεκτροδίων C_1 και C_2 μετρείται με αμπερόμετρο και η τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των P_1 P_2 με βολτόμετρο (Εικόνα 14).



Εικόνα 14. Διάταξη μεθόδου Wenner

Η ειδική αντίσταση εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_s = \frac{4\pi I R}{1 + \frac{2I}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{I}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε $\Omega \cdot m$

I , η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων σε m

b , το βάθος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων σε m

R , η υπολογιζόμενη αντίσταση από το ρεύμα και την τάση των ενδείξεων των οργάνων ($R=V/I$) σε Ω

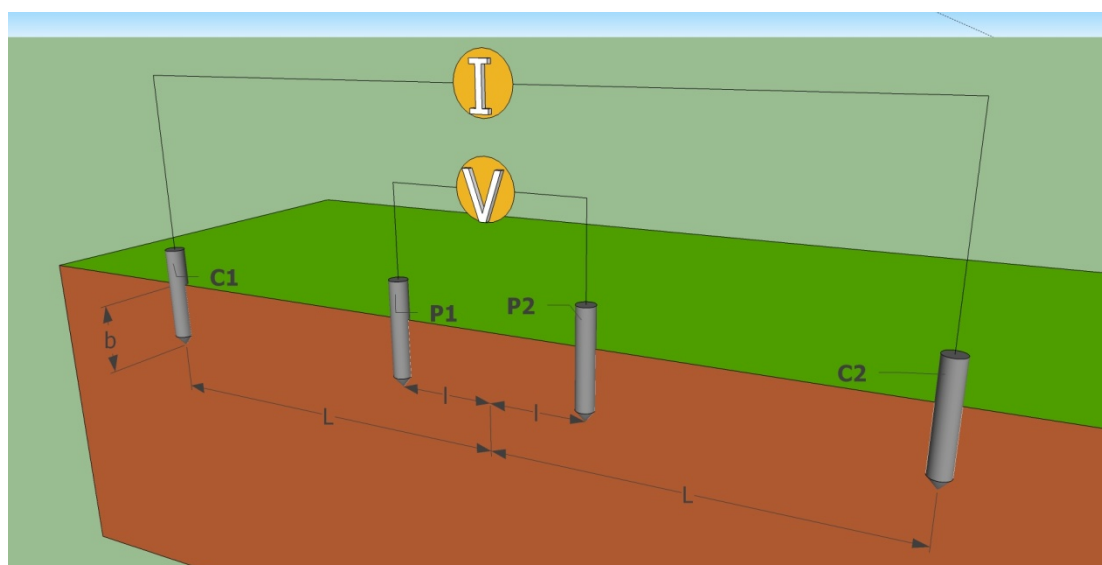
Στην πράξη τα τέσσερα ηλεκτρόδια πρέπει να τοποθετούνται σε βάθος $b < 0.1I$, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η παραδοχή $b=0$, οπότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται στην:

$$\rho = 2\pi I R$$

(IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983.)

6.4.4 Μέθοδος Schlumberger

Οι πρώτες μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους πραγματοποιήθηκαν από τον Conrad Schlumberger το 1912 στην Νορμανδία. Η μέθοδος Schlumberger ανήκει στην κατηγορία Four-Point Method μαζί με την μέθοδο Wenner όπως προαναφέρθηκε. Προτάθηκε από τους αδερφούς Conrad και Marcel Schlumberger και εφαρμόζεται ήδη από το 1920, βασιζόμενη στη διάταξη Wenner. Διαφέρει από την μέθοδο Wenner στο ότι η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων P_1 και P_2 δεν πρέπει να είναι υποχρεωτικά ίση με την απόσταση l που απαιτούνταν στην μέθοδο Wenner, καθώς και στο ότι η διάταξη των σημείων τοποθέτησης των ηλεκτροδίων είναι δυνατό να μην είναι σε ευθεία. Η διάταξη της μέτρησης φαίνεται στην Εικόνα 15 (IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983).



Εικόνα 15. Διάταξη μεθόδου Schlumberger

Η ειδική αντίσταση εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \pi \left(\frac{L^2}{2l} - \frac{l}{2} \right)$$

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

l , η απόσταση των εσωτερικών ηλεκτροδίων από το κέντρο σε m

L , η απόσταση των εξωτερικών ηλεκτροδίων από το κέντρο σε m

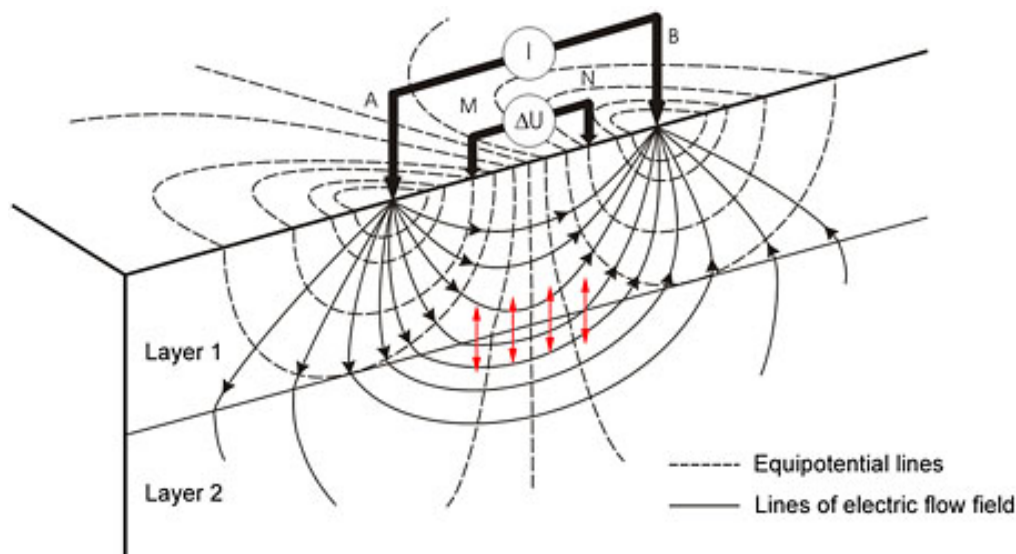
R , η μετρούμενη αντίσταση σε Ω

Συνήθως, στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται, μεταβάλλουμε την απόσταση L , διατηρώντας την απόσταση I σταθερή. Με αυτό το τρόπο έχουμε μια γρήγορη μείωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων δυναμικού $P1$, $P2$, όπου από κάποια στιγμή και μετά ο θόρυβος γίνεται μεγαλύτερος του μετρούμενου σήματος στα άκρα $P1$, $P2$ και η μέτρηση καθίσταται αδύνατη. Η απόσταση I ρυθμίζεται όποτε χρειάζεται, αν παρατηρηθεί μείωση της ευαισθησίας.

Θα πρέπει να ισχύει $2I < 0,4L$ για να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον παραπάνω τύπο με ακρίβεια (Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Engineer Manual, U.S Army Corps of Engineers, 31 August 1995).

Στην Εικόνα 16 φαίνεται η κατανομή του ρεύματος κατά τη μέθοδο Schlumberger.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται πιο σπάνια από την Wenner, αλλά όμως είναι ο μοναδικός τρόπος μέτρησης όταν δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση των βοηθητικών ηλεκτροδίων ευθύγραμμα και σε ίσες αποστάσεις, λόγω εμποδίων που μπορεί να υπάρχουν στις θέσεις που πρέπει να μπηχτούν τα βοηθητικά ηλεκτρόδια, όπως για παράδειγμα παρεμβολή στο χώρο των μετρήσεων δρόμων, επιφάνειες καλυμμένες με άσφαλτο, σκυρόδεμα κ.α.



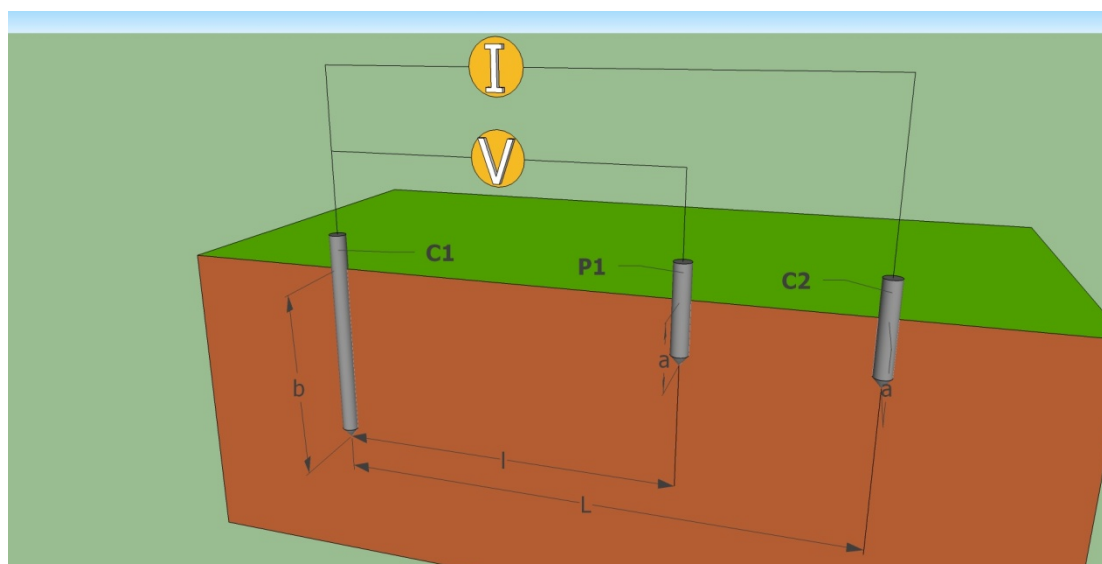
Εικόνα 16. Κατανομή του ρεύματος κατά τη μέθοδο Schlumberger (www.arctic-geophysics.com)

Σημαντική εξοικονόμηση χρόνου μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το θεώρημα της αμοιβαιότητας για την διάταξη Schlumberger όταν η αντίσταση επαφής είναι ένα πρόβλημα. Δεδομένου ότι η αντίσταση επαφής αφορά κυρίως τα ηλεκτρόδια ρεύματος περισσότερο από τα ηλεκτρόδια τάσης, το εσωτερικό ζεύγος ηλεκτροδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρόδια ρεύματος. Η διάταξη αυτή ονομάζεται «Αντίστροφη Διάταξη Schlumberger». Η χρήση

της αυξάνει την ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού όταν τροφοδοτείται μεγάλο ρεύμα. Η ελάχιστη απόσταση των εξωτερικών ηλεκτροδίων είναι της τάξης των 10m (για εσωτερική απόσταση 0,5m), ως εκ τούτου, απαιτείται η χρήση της διάταξης Wenner για τις μικρότερες αποστάσεις (“Electrical and Magnetic Methods in Archaeological Prospection”, Armin Schmidt, 2009).

6.4.5 Μέθοδος Τριών Σημείων

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τρία ηλεκτρόδια, εκ των οποίων το ένα είναι θαμμένο σε βάθος b , μεταβαλλόμενο. Τα δύο άλλα ηλεκτρόδια, γνωστά ως ηλεκτρόδια αναφοράς, θάβονται σε μικρό βάθος a , κατακόρυφα. Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 17 (“Electrical and Magnetic Methods in Archaeological Prospection”, Armin Schmidt, 2009).



Εικόνα 17. Διάταξη μεθόδου πτώσης δυναμικού τριών ηλεκτροδίων

Ο σκοπός της μεταβολής του βάθους b είναι να εκχυθεί το ρεύμα βαθύτερα στο έδαφος. Έτσι θα υπάρξει μια εποπτικότερη εικόνα της μεταβολής της ειδικής αντίστασης εδάφους με το αυξανόμενο βάθος. Συνήθως το υπό έλεγχο ηλεκτρόδιο C1 είναι ράβδος (IEEE Std 81-1983, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system”, 11 March 1983).

Η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{2\pi bR}{\ln\left(\frac{8b}{D}\right) - 1}$$

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

b , το βάθος του ηλεκτροδίου C1 σε m

D , η διάμετρος του ηλεκτροδίου C1 σε m

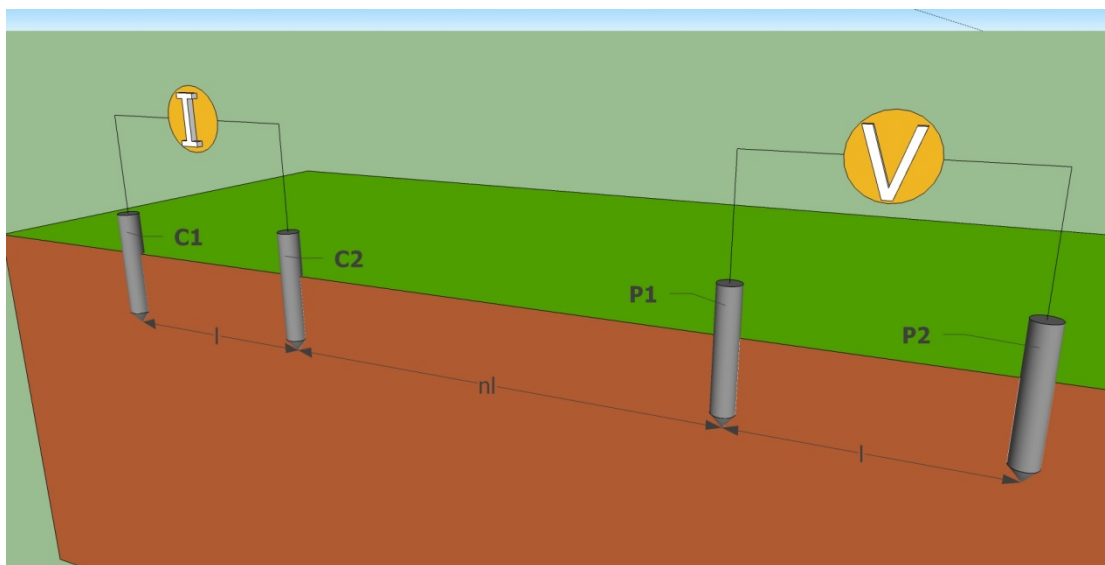
R , η μετρούμενη μέσω των οργάνων αντίσταση σε Ω

Η σχέση αυτή δίνει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος.

Η μέθοδος Τριών Σημείων δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την ειδική αντίσταση εδάφους κοντά στο υπό έλεγχο ηλεκτρόδιο C1 (σε απόσταση 5-10 φορές το μήκος του ηλεκτροδίου ράβδου).

6.4.6 Μέθοδος διπόλου-διπόλου

Η μέθοδος διπόλου-διπόλου (Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Engineer Manual, U.S Army Corps of Engineers, 31 August 1995) είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος, ειδικά σε γεωλογικές μελέτες. Άρχισε να γίνεται δημοφιλής τη δεκαετία του 1950 και κυρίως στη Ρωσία, όπου και πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Al'pin (1950) (Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Chapter D1 Application of Surface Geophysics to Ground-Water Investigations, A.A.R. Zohdy, G.P. Eaton and D.R. Mabey, USGS Publications), ως μία παραλλαγή των μεθόδων Wenner και Schlumberger, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερο βάθος έρευνας χωρίς να απαιτείται μεγάλο μήκος καλωδίων. Αναθεωρήθηκε από τον G.V. Keller (1975) (Keller, G.V., Ferguson, R., Lee, C. Y., Harthill, N.- Jacobson, J.J.: The dipole mapping method. Geophysics, 1975). Η διάταξη της φαίνεται στην Εικόνα 18:



Εικόνα 18. Διάταξη μεθόδου διπόλου-διπόλου

Χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρόδια για τη μέτρηση του ρεύματος και δύο ηλεκτρόδια για τη μέτρηση της τάσης. Η απόσταση μεταξύ του ζεύγους των ηλεκτροδίων C1,C2 και των ηλεκτροδίων P1,P2 είναι ίδια και ίση με l . Η ενδιάμεση απόσταση είναι ίση με την απόσταση l πολλαπλασιασμένη με έναν ακέραιο n .

Η ειδική αντίσταση εδάφους δίνεται από τον τύπο:

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

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

l , η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος ή τάσης σε m

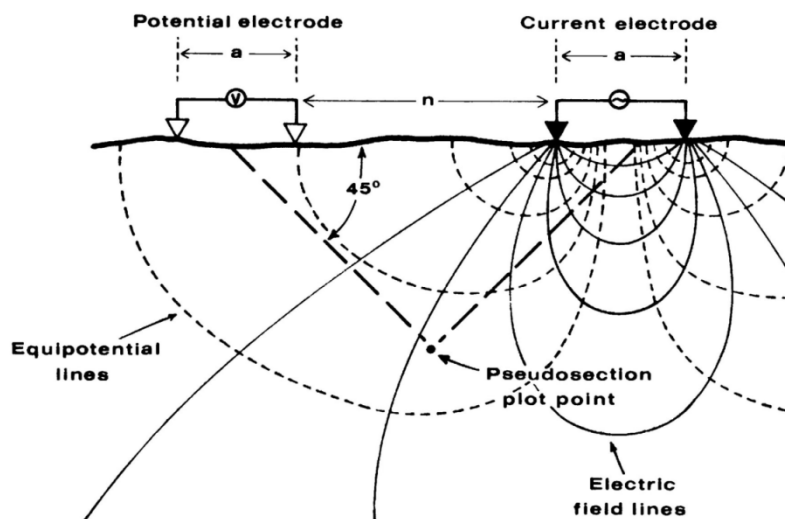
n , ένας θετικός ακέραιος

V, I , οι μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος που λαμβάνουμε σε A, V

Συνήθως, η απόσταση l διατηρείται σταθερή και μεταβάλλεται το n μέχρι περίπου το 6, για να αυξήσουμε το βάθος της μέτρησης.

Για να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά αυτή η μέθοδος πρέπει να διαθέτουμε ένα όργανο μέτρησης με υψηλή ευαισθησία και μεγάλη ικανότητα απόρριψης θορύβου.

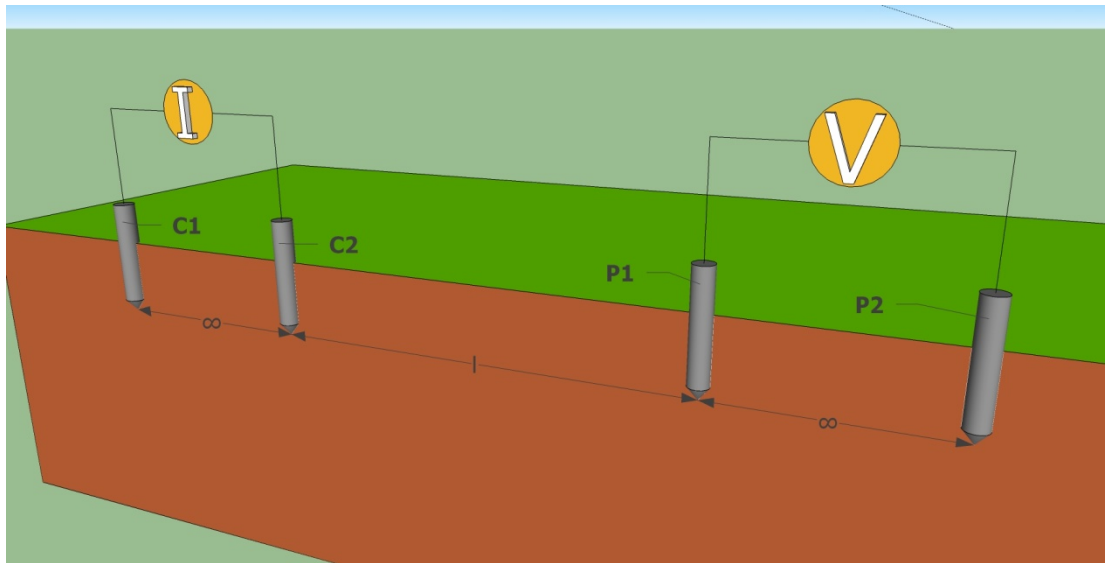
Στην Εικόνα 19 παρατίθεται μια απεικόνιση του υπεδάφους κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου.



Εικόνα 19. Απεικόνιση του υπεδάφους κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου (www.microgeo.com)

6.4.7 Μέθοδος πόλου-πόλου

Η διάταξη της μεθόδου αυτής φαίνεται στην Εικόνα 20:



Εικόνα 20. Διάταξη μεθόδου πόλου-πόλου

Τα ηλεκτρόδια C2, P1 βρίσκονται σε μια απόσταση l μεταξύ τους, ενώ τα C1, P2 απέχουν αρκετά μεγάλη απόσταση από τα C2, P1 αντίστοιχα. Η απόσταση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $20l$, έτσι ώστε τα C1, P2 να επηρεάζουν όσο το δυνατόν λιγότερο ($<5\%$ σφάλμα) τις μετρήσεις (“Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies”, Dr. M.H.Loke).

Η ειδική αντίσταση εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = 2\pi l \frac{V}{I}$$

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

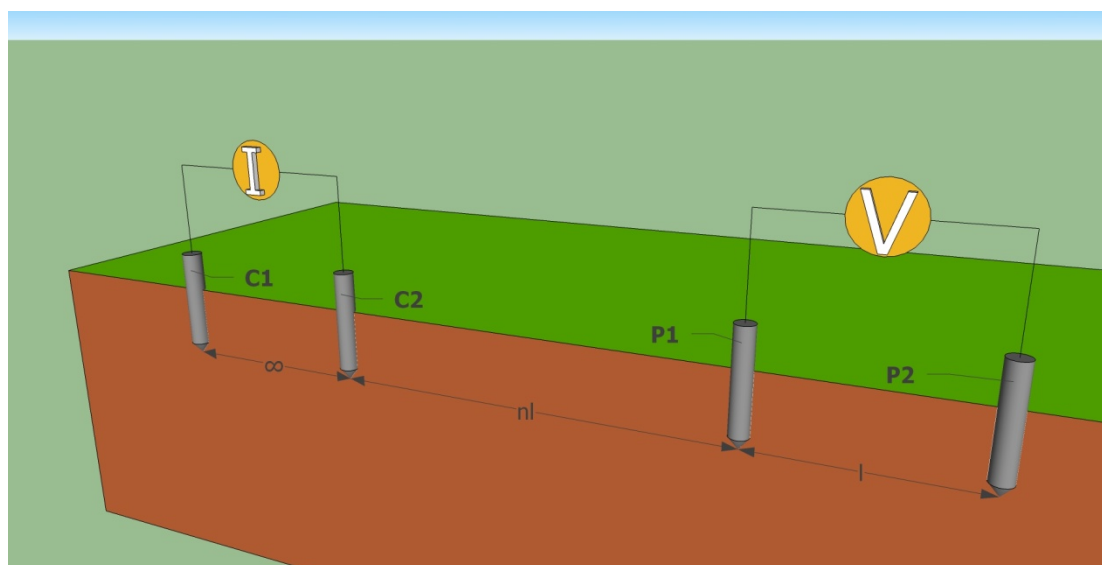
l , η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων C2,P1 σε m

V, I , οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε V,A αντίστοιχα

Η μέθοδος πόλου-πόλου χρησιμοποιείται κυρίως όταν η περιοχή που πρέπει να ερευνηθεί είναι μικρή και άρα απαιτεί μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων C2, P1.

6.4.8 Μέθοδος πόλου-διπόλου

Η διάταξη αυτής της μεθόδου φαίνεται στην Εικόνα 21:



Εικόνα 21. Διάταξη μεθόδου 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).

Η ειδική αντίσταση εδάφους δίνεται από τον τύπο:

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

όπου:

ρ , η ειδική αντίσταση εδάφους σε Ωm

l , η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τάσης

n , ένας θετικός ακέραιος

V, I , οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε V, A αντίστοιχα

Για μετρήσεις με $n > 8$ θα πρέπει να αυξάνεται η απόσταση l λόγω σημαντικής πτώσης του μετρούμενου δυναμικού V (“Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies”, Dr. M.H.Loke).

6.4.9 Σύγκριση – αξιολόγηση μεθόδων μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους

Γενικά, στην εφαρμογή μεθόδου μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους πρέπει να καταγράφονται εκτός από τις μετρήσεις, η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη οποιαδήποτε αγώγιμα αντικείμενα είναι θαμμένα στην περιοχή της μέτρησης, καθώς αυτά επηρεάζουν τη μετρούμενη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος.

Η διάταξη *Wenner* και η *Schlumberger* είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες και οι πλέον ακριβείς. Η *Wenner* δίνει τιμές της ειδικής αντίστασης εδάφους σε μεγάλα βάθη χωρίς την οδήγηση ηλεκτροδίων σε τέτοιο βάθος. Είναι σχετικά χρονοβόρα αφού απαιτείται η μετακίνηση και των τεσσάρων ηλεκτροδίων. Στη μέθοδο αυτή δεν χρειάζεται η χρήση ογκώδους εξοπλισμού. Η διάταξη *Wenner* έχει πολύ δυνατό σήμα κάτι που είναι χρήσιμο όταν έχουμε υψηλό θόρυβο. Είναι ευαίσθητη στις κάθετες αλλαγές της αντίστασης εδάφους αλλά λιγότερο ευαίσθητη στις οριζόντιες. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου *Wenner* είναι ότι όταν η απόσταση l αυξηθεί αρκετά, παρατηρείται μια ραγδαία μείωση στην μετρούμενη τιμή του δυναμικού. Επίσης με τη μέθοδο *Wenner* δεν έχουμε μεγάλη πτώση στη μετρούμενη τάση οπότε μπορούμε να διοχετεύσουμε μικρότερη ένταση ρεύματος.

Η διάταξη *Schlumberger* είναι πιο απλή στην εφαρμογή της από την διάταξη *Wenner*. Μπορεί να εφαρμοστεί σε δυσκολότερες συνθήκες και εδάφη από ότι η *Wenner* αφού υπάρχει μεγαλύτερη ελευθερία στην κίνηση και τοποθέτηση των ηλεκτροδίων. Η μέθοδος *Schlumberger* δίνει μεγαλύτερη ευαισθησία για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στη διάταξη *Schlumberger* κινούνται κυρίως τα εξωτερικά ηλεκτρόδια. Για αυτό μπορούμε να έχουμε οικονομία ανθρώπινου δυναμικού, καθώς τα εξωτερικά ηλεκτρόδια μετακινούνται τέσσερις ή πέντε φορές για κάθε μετακίνηση των εσωτερικών ηλεκτροδίων. Η μείωση του αριθμού των μετακινήσεων των ηλεκτροδίων επίσης μειώνει τα σφάλματα των μετρήσεων. Επίσης λαμβάνουμε μικρότερες τιμές τάσης από την *Wenner*. Αυτό είναι πρόβλημα όταν θέλουμε να μετρήσουμε μεγάλα βάθη και έχουμε εξοπλισμό περιορισμένων δυνατοτήτων. Η μέθοδος *Schlumberger* έχει μέτρια ευαισθησία και στις κάθετες και στις οριζόντιες μεταβολές της αντίστασης εδάφους. Είναι λίγο καλύτερη στις οριζόντιες μεταβολές από την *Wenner*. Επίσης, αυτή η μέθοδος αντιμετωπίζει καλύτερα το πρόβλημα που αναφέρθηκε στην μέθοδο *Wenner*, δηλαδή τη ραγδαία μείωση στην μετρούμενη τιμή του δυναμικού, όταν η απόσταση l αυξηθεί αρκετά.

Η μέθοδος *τριών σημείων* είναι αξιόπιστη αλλά χρονοβόρα. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου της πτώσης δυναμικού είναι ο προσδιορισμός του βάθους που μπορεί να οδηγηθεί το ηλεκτρόδιο. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου των τριών ηλεκτροδίων είναι ότι για να τοποθετήσουμε το μεγάλο ηλεκτρόδιο βαθιά στο έδαφος δημιουργείται μεγαλύτερη διάμετρος και έτσι δεν υπάρχει πολύ καλή επαφή, κάτι που οδηγεί σε

μεγαλύτερες τιμές αντίστασης. Έτσι, σε μεγάλα βάθη διεξόδου του ηλεκτροδίου παρουσιάζει σφάλμα. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε βραχώδη εδάφη. Η μέθοδος πώσης δυναμικού είναι επιθυμητή σε δύσκολα εδάφη εξαιτίας της αρκετά επικεντρωμένης περιοχής έρευνας. Σε περίπτωση που επιδιώκεται η μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους σε μεγάλο όγκο εδάφους είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος Τεσσάρων Σημείων.

Η μέθοδος *διπόλου-διπόλου* είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Είναι χρήσιμη όταν έχουμε να μετρήσουμε πλευρικές αλλαγές της ειδικής αντίστασης εδάφους. Χρησιμοποιείται πολύ στις γεωτεχνικές εφαρμογές. Η μέθοδος *διπόλου-διπόλου* είναι ευαίσθητη στις οριζόντιες αλλαγές της αντίστασης εδάφους και λιγότερο ευαίσθητη στις κάθετες. Έχει όμως πολύ αδύναμο σήμα για μεγάλο "n". Για να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά αυτή η μέθοδος πρέπει να διαθέτουμε ένα όργανο μέτρησης με υψηλή ευαισθησία και μεγάλη ικανότητα απόρριψης θορύβου.

Η διάταξη *πόλου-πόλου* είναι σχετικά χρονοβόρα (ενώ η *πόλου-διπόλου* είναι πιο γρήγορη και χρησιμοποιείται πιο συχνά). Δίνει ισχυρό σήμα. Η ποιότητα των μετρήσεων μειώνεται αν αυξηθεί πολύ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, λόγω της αύξησης του θορύβου. Δεν χρησιμοποιείται συχνά. Κυρίως σε αρχαιολογικού ενδιαφέροντος έρευνες όπου απαιτείται μικρή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Έχει την μεγαλύτερη οριζόντια κάλυψη και το μεγαλύτερο βάθος έρευνας.

Η διάταξη *πόλου-διπόλου* δίνει ισχυρό σήμα (ισχυρότερο από την *διπόλου-διπόλου*, αλλά ελαφρώς μικρότερο από τις *Wenner - Schlumberger*). Έχει σχετικά καλή οριζόντια κάλυψη και χαμηλό σχετικά θόρυβο.

Συνοπτικά:

- Αν κάνουμε έρευνα σε θορυβώδη περιοχή και θέλουμε καλή κάθετη κάλυψη και έχουμε περιορισμένο χρόνο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο *Wenner*.
- Αν έχει μεγάλη σημασία η καλή οριζόντια κάλυψη και ο εξοπλισμός μας είναι αρκετά ευαίσθητος και υπάρχει καλή επαφή με το έδαφος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο *διπόλου-διπόλου*.
- Αν δεν είμαστε σίγουροι ή θέλουμε ικανοποιητική οριζόντια και κάθετη κάλυψη, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο *Schlumberger*.
- Αν έχουμε σύστημα με περιορισμένο αριθμό ηλεκτροδίων, η μέθοδος *πόλου-διπόλου* είναι μια καλή επιλογή.
- Σε έρευνα με μικρά διαστήματα ηλεκτροδίων και καλή οριζόντια κάλυψη η μέθοδος *πόλου-πόλου* είναι μια καλή επιλογή.

6.4.10 Επιλογή μεθόδου

Ο στόχος της έρευνας που κάναμε στην συγκεκριμένη περιοχή ήταν διπλός. Αφενός για να προσδιορίσουμε τη γεωλογική δομή του υπεδάφους από γεωτεχνικής πλευράς και αφετέρου για να ανακαλύψουμε την ύπαρξη ή μη αρχαιοτήτων.

Για το σκοπό αυτό επιλέξαμε η έρευνα μας να πραγματοποιηθεί με ηλεκτρικές μεθόδους οι οποίες είναι πιο ασφαλείς, πιο γρήγορες και πιο οικονομικές από τις σεισμικές μεθόδους οι οποίες ως επί τον πλείστον χρησιμοποιούνται για γεωτεχνικές μελέτες και όχι για αρχαιολογικού ενδιαφέροντος ευρήματα. Η έρευνα με γεώτρηση απορρίφθηκε λόγω του πολύ μεγάλου κόστους της.

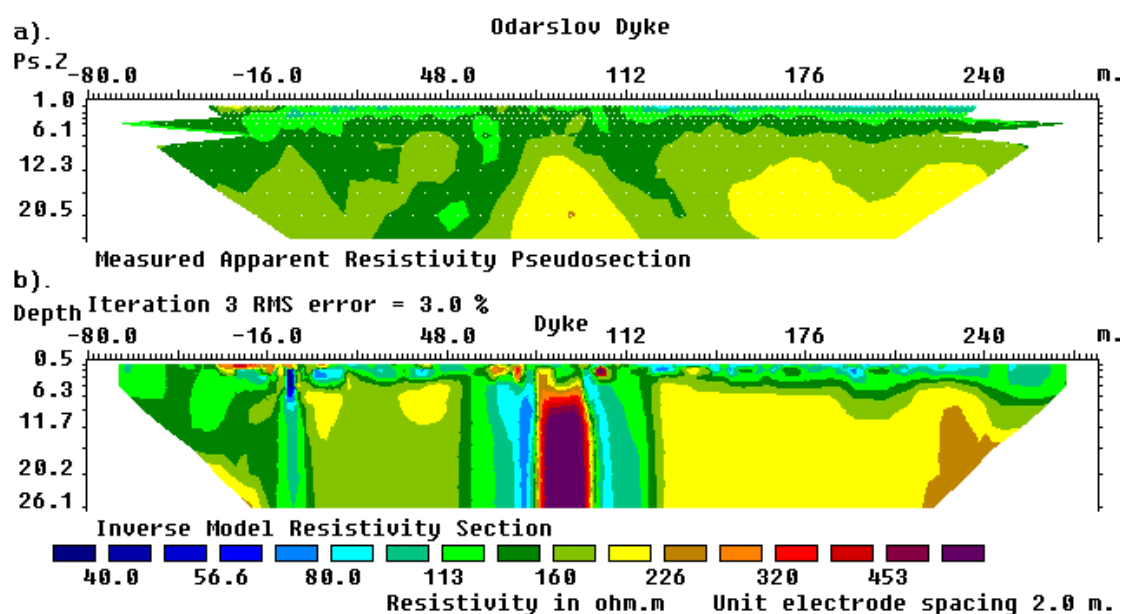
Για την συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρική τομογραφία με διάταξη πόλου-διπόλου καθώς είναι οικονομικότερη από τις υπόλοιπες, πιο εύκολη στο σχεδιασμό, ιδανική για αρχαιολογικού ενδιαφέροντος έρευνες και δεν απαιτεί πολύ χρόνο εργασίας.

6.5 Επεξεργασία δεδομένων (αντιστροφή)

Η επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφία έγινε με πολύπλοκες τεχνικές βασιζόμενες στην μέθοδο της αντιστροφής. Η εφαρμογή της θεωρίας της αντιστροφής στην γεωηλεκτρική διασκόπηση προσπαθεί να βρει ένα βέλτιστο ηλεκτρικό μοντέλο της γης του οποίου η απόκριση θα είναι παρόμοια ή σχεδόν ίδια με τις μετρούμενες (παρατηρούμενες) τιμές της ειδικής φαινόμενης αντίστασης. Το μοντέλο αυτό είναι ουσιαστικά μία ιδανική μαθηματική αναπαράσταση της γης. Αποτελείται από παραμέτρους, οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύουν την κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης του υπεδάφους. Η απόκριση του μοντέλου δίνει τις υπολογιζόμενες (συνθετικές) ειδικές φαινόμενες αντιστάσεις οι οποίες υπολογίζονται με βάση πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις.

Επειδή όμως το γεωηλεκτρικό πρόβλημα είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα, η παραπάνω διαδικασία πρέπει να είναι επαναληπτική. Δηλαδή η διαδικασία της αντιστροφής ξεκινάει με ένα αρχικό ηλεκτρικό μοντέλο γης (συνήθως ομογενή γη) και σε κάθε επανάληψη βρίσκεται μία διόρθωση του μοντέλου, η οποία διόρθωση προστίθεται στο προηγούμενο μοντέλο. Έτσι λοιπόν στο τέλος κάθε αντιστροφής λαμβάνεται ένα αναβαθμισμένο μοντέλο γης και τελικά η διαδικασία θα σταματήσει όταν θα ανακατασκευαστεί ένα τέτοιο μοντέλο του οποίου η απόκριση, δηλαδή οι υπολογιζόμενες συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις θα διαφέρουν ελάχιστα από τις πραγματικές φαινόμενες αντιστάσεις.

Για την επεξεργασία των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RES2DINV, το οποίο μπορεί αυτόματα να καθορίσει ένα δισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο της γης, με βάση τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν κατά τις υπαίθριες εργασίες και μπορεί να αντιστρέψει ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων. Η γη θεωρείται ότι αποτελείται από ορθογώνια τμήματα (παράμετροι), τα οποία μπορούν να μεταβάλουν την αντίστασή τους ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Η κατανομή και το μέγεθος των τμημάτων αυτών δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό και το βάθος κάθε σειράς αυτών των τμημάτων θεωρείται περίπου ίσο με το “μέσο βάθος διείσδυσης” (Edwards, 1977). Η επεξεργασία κάθε γεωηλεκτρικής τομογραφίας ξεχωριστά είχε ως βασικούς σκοπούς να αξιολογηθεί η ποιότητα των δεδομένων αλλά και να ληφθεί μία πρώτη εικόνα για την κατανομή της υπεδάφιας αντίστασης.



Εικόνα 22. Δολεριτική φλέβα στο Odarslov της Σουηδίας. (Dr. M.H.Loke. Copyright (1997, 1999)). Η αναστροφή έγινε με το πρόγραμμα DC_2DPro επεξεργασίας δεδομένων στην επιλογή RES2DINV

Για την επεξεργασία όλων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε ένας ενιαίος τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Στο αρχικό στάδιο έγινε ένα φιλτράρισμα των δεδομένων εξαλείφοντας αυτά που παρουσίαζαν μεγάλα σφάλματα (λόγω επαφής, οργάνου, κ.α.). Εν συνεχεία πολύ υψηλές και χαμηλές ακραίες τιμές, που οφείλονται σε εξωγενείς πηγές ή θόρυβο (π.χ. κακή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος), απομακρύνθηκαν από τα δεδομένα. Οι παράμετροι του

προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ταυτόσημοι για όλες τις τομογραφίες.

Για την ανακατασκευή της αντίστασης του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκε ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εξομαλυμένης αντιστροφής. Όταν το σχετικό σφάλμα μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων κατά την διάρκεια της αντιστροφής ήταν μικρότερο του 3%, τότε η διαδικασία αυτόματα σταματούσε, το οποίο σήμαινε ότι το ηλεκτρικό μοντέλο δεν επιδεχόταν επιπλέον βελτίωση. Επίσης κατά την επεξεργασία των μετρήσεων λήφθηκε επίσης υπόψη και η τοπική τοπογραφική μεταβολή του αναγλύφου.

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCALPRO της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS. Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος. Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, η ψηφιακή υπέρθεση για την ενίσχυση του σήματος και η προβολή του σφάλματος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων που προσφέρονται από το συγκεκριμένο όργανο που εξασφαλίζουν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας.

Το συγκεκριμένο όργανο έχει μέγιστη τάση πηγής 800V και επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που τυπικά φτάνει τα 1000mA, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπει και σημαντικά μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος (έως 2500mA). Το όργανο μέτρησης χρησιμοποιεί τόσο εσωτερικές όσο και εξωτερικές μπαταρίες και παρουσιάζεται στην Εικόνα 23. Το όργανο μέτρησης έχει εσωτερικό πολυπλέκτη 48 ηλεκτροδίων ενώ έχει τη δυνατότητα της σύγχρονης μέτρησης μέχρι και 10 ταυτόχρονων διαφορών δυναμικού γεγονός που επέτρεψε τη λήψη του σημαντικού αριθμού μετρήσεων σε κάθε τομογραφία.

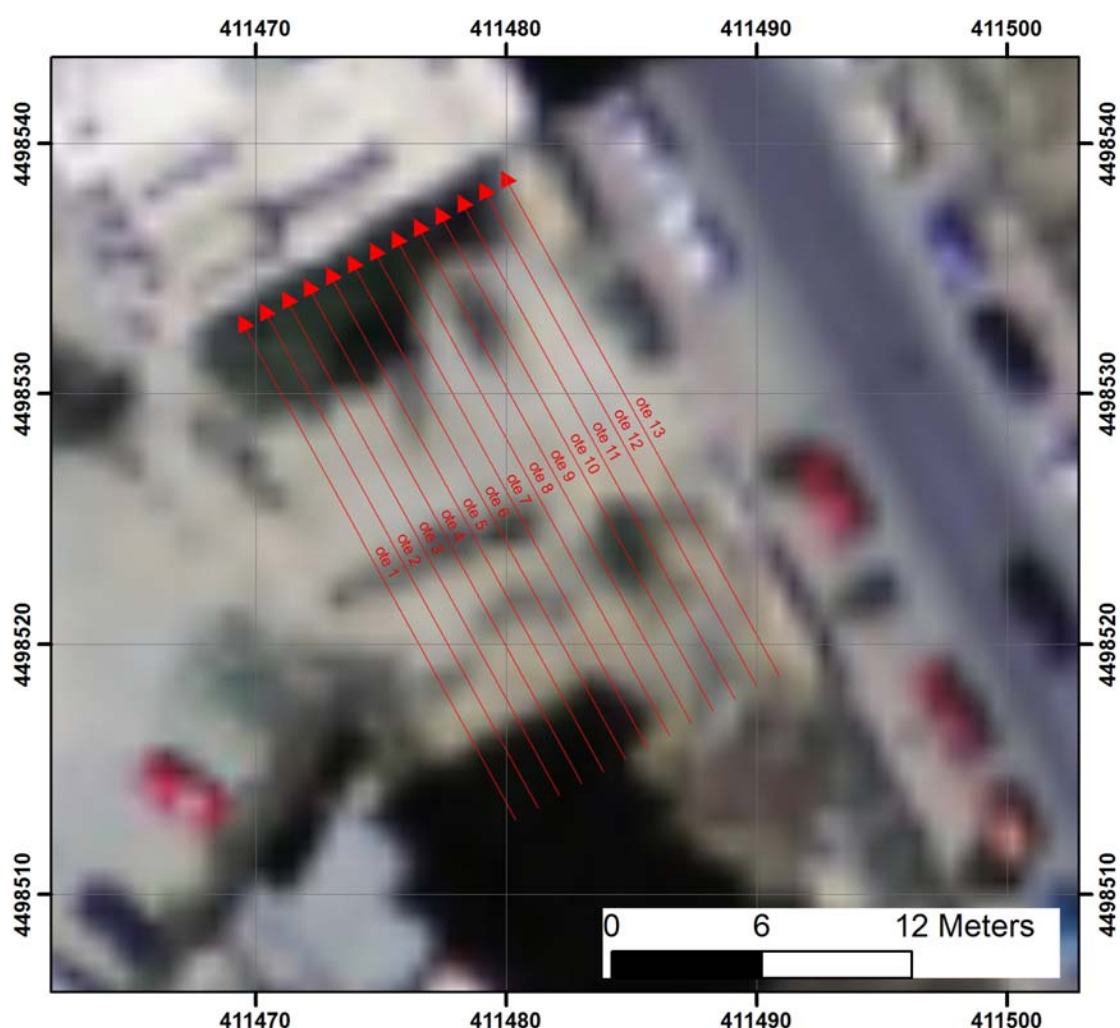


Εικόνα 23. Όργανο λήψης ηλεκτρικών μετρήσεων SYSCAL-PRO της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS μαζί με τον πρόσθετο εξοπλισμό και τη συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα πολύ-καναλικά καλώδια καθώς και ειδικά ηλεκτρόδια ατσαλιού (υψηλής μηχανικής αντοχής και υψηλής αγωγιμότητας).

7.Εφαρμογή της μεθόδου

Στην περιοχή έρευνας πραγματοποιήθηκαν 13 γεωηλεκτρικές τομογραφίες διεύθυνσεως ΒΒΔ-ΝΝΑ μήκους 23m η καθεμία (Εικόνες 24,25). Σε κάθε τομογραφία χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια τα οποία απείχαν μεταξύ τους 1 μέτρο (Εικόνα 26). Έτσι έγινε δυνατή η επίτευξη της έρευνας στο βάθος των 6 μέτρων. Οι τομογραφίες σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να είναι παράλληλες μεταξύ τους και σε απόσταση 1 μέτρο η καθεμία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία των μετρήσεων υπαίθρου, τα αποτελέσματα της ερμηνείας και τέλος τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τις τομογραφίες. Οι τομογραφίες μετρήθηκαν σύμφωνα με την διάταξη πόλου-διπόλου.



Εικόνα 24. Θέσεις τομογραφιών σε υπόβαθρο δορυφορικού χάρτη (από Κτηματολόγιο).



Εικόνα 24. Άποψη οικοπέδου έρευνας διευθύνσεως ΒΒΔ-ΝΝΑ . Διακρίνονται το αρχαίο τείχος στα αριστερά της φωτογραφίας και το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης στα δεξιά

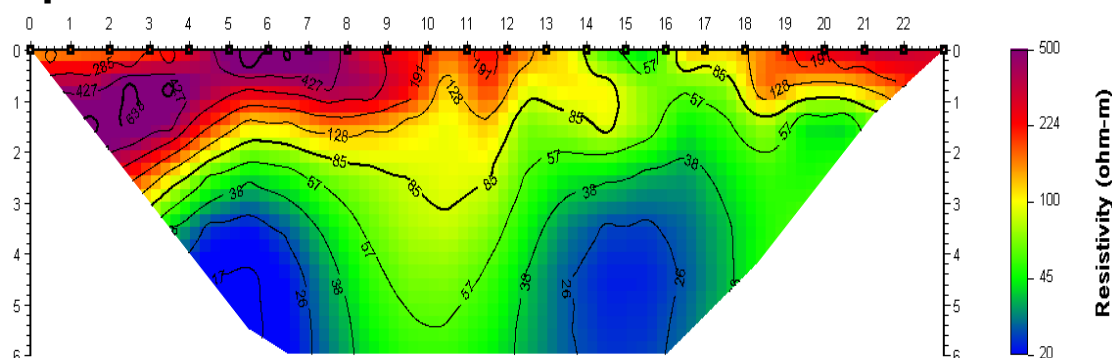


Εικόνα 25. Άποψη οικοπέδου έρευνας διευθύνσεως ΝΝΑ-ΒΒΔ . Διακρίνονται το κτίριο του ΟΤΕ στα αριστερά και δημόσιο σχολείο στα δεξιά



Εικόνα 26. Τομογραφία με την διάταξη πόλου-διπόλου με 24 ηλεκτρόδια τα οποία απέχουν μεταξύ τους 1 μέτρο

Κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα των τομογραφιών παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 27. Αποτέλεσμα αντιστροφής της τομογραφίας OTE01. Στην κλίμακα χρωμάτων/ειδικής αντίστασης στα πλάγια παρουσιάζεται η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

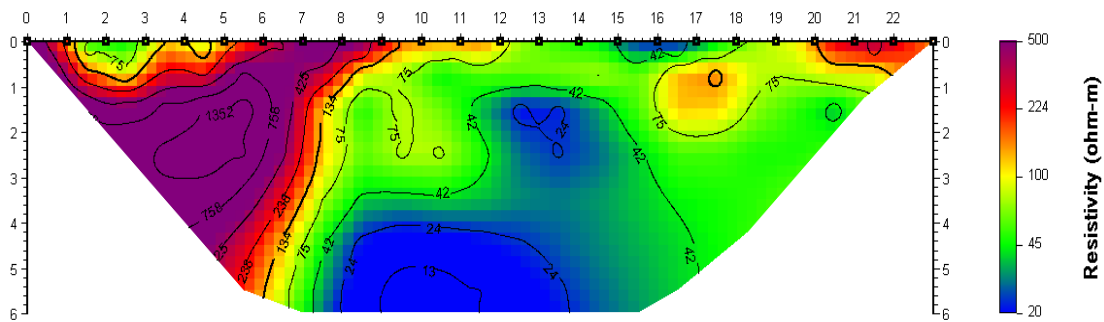
Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται το γεωηλεκτρικό μοντέλο που προκύπτει στην τομογραφία OTE01 (Εικόνα 27). Τονίζεται ότι το βόρειο τμήμα της τομογραφίας (23 μέτρο της τομογραφίας) βρίσκεται προς το κτίριο του ΟΤΕ ενώ το νότιο (0 μέτρο της τομογραφίας) προς την περιοχή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης παράλληλα με την οδό Ολυμπιάδος.

Η χρωματική κλίμακα αποδίδει τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με μικρότερες τις μπλε (περίπου 20 Ohm-m) και μεγαλύτερες τις ιώδεις (πάνω από 500 Ohm-m).

Παρατηρούμε ότι στην εξεταζόμενη περιοχή συναντώνται σχηματισμοί με αντιστάσεις που κυμαίνονται από 20 μέχρι 60 Ohm-m (μπλε έως πράσινο χρώμα) από την επιφάνεια μέχρι και το μεγαλύτερο βάθος της τομογραφίας που φτάνει τα 6 μέτρα. Πρόκειται για ιζηματογενείς αποθέσεις που αντιπροσωπεύουν την ιλύ και την άργιλο (μπλε χρώμα) οι οποίες σχηματίζουν δύο πόλους (ένα στο νότιο και ένα προς το βόρειο τμήμα) και άμμους με χαλίκια (πράσινο χρώμα).

Επίσης παρατηρούμε ότι από την επιφάνεια και σε μικρό βάθος έως 1 μέτρο και στο νότιο τμήμα έως και τα 3 μέτρα εμφανίζονται σχηματισμοί με αντιστάσεις από 60 μέχρι 200 Ohm-m (κίτρινο έως κόκκινο χρώμα). Πρόκειται για τεχνητά υλικά (μπάζα) και κεραμικά τα οποία υπάρχουν στην περιοχή και τα οποία βρέθηκαν εκεί από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Αυτό που ίσως μας κάνει μεγάλη εντύπωση είναι οι πολύ μεγάλες αντιστάσεις της τάξης των 650 Ohm-m (ιώδες χρώμα) οι οποίες παρατηρούνται στο νότιο τμήμα της τομογραφίας και σε βάθος μέχρι 2 μέτρα. Οι αντιστάσεις αυτές πιθανόν να προέρχονται από τεμάχια του αρχαίου τείχους της Θεσσαλονίκης που βρίσκεται πολύ κοντά στο εν λόγω οικοπέδο μελέτης και το οποίο πιθανόν να συνεχίζεται και κάτω από αυτό.



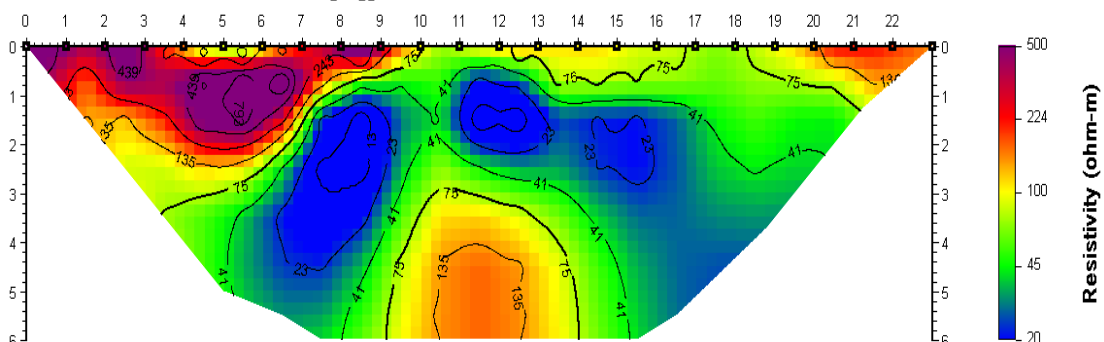
Εικόνα 28. Αποτέλεσμα αντιστροφής της τομογραφίας ΟΤΕ10

Η τομογραφία ΟΤΕ10 (Εικόνα 28) πραγματοποιήθηκε σε διεύθυνση παράλληλη με την ΟΤΕ01 και σε απόσταση 9 μέτρων από την πρώτη. Σ' αυτή την τομογραφία παρατηρούμε ότι η ιλύς και η άργιλος (μπλε χρώμα) συναντώνται σε βάθη από 1,5 έως και 6 μέτρα σχηματίζοντας δύο πόλους και με μία μικρή εμφάνιση στο 15^ο μέχρι το 17^ο μέτρο της τομογραφίας επιφανειακά.

Οι άμμοι και τα χαλίκια (πράσινο χρώμα) εμφανίζονται σχεδόν σε ολόκληρη την υπόλοιπη εξεταζόμενη περιοχή πλην του νοτίου τμήματος και σε πολύ μεγάλο εύρος, υπερκείμενες της αργίλου και της ιλύος. Επίσης υπάρχει και μία μικρή εμφάνιση τους από το 1^ο έως το 3^ο μέτρο της τομογραφίας.

Τα τεχνητά και τα κεραμικά υλικά (κίτρινο έως κόκκινο χρώμα) συναντώνται και σ' αυτή την τομογραφία στο νότιο τμήμα αυτής και σε μικρή εμφάνιση στο βόριο επιφανειακά.

Στο νότιο τμήμα από την επιφάνεια μέχρι και τα 5 μέτρα, παρατηρούμε αντιστάσεις που φτάνουν τα 1350 Ohm-m (ιώδες χρώμα) οι οποίες είναι μεγαλύτερες από αυτές της όδευσης ΟΤΕ01 και με μεγαλύτερο πάχος. Οι αντιστάσεις αυτές δεν προέρχονται από κάποιο σχηματισμό αλλά όπως αναφέραμε και πιο πάνω είναι τεμάχη του αρχαίου τείχους το οποίο εκτείνεται υπόγεια του εξεταζόμενου οικοπέδου στο νότιο τμήμα αυτού.



Εικόνα 29. Αποτέλεσμα αντιστροφής της τομογραφίας ΟΤΕ 13

Η τομογραφία ΟΤΕ13 (Εικόνα 29) πραγματοποιήθηκε σε διεύθυνση παράλληλη με την ΟΤΕ01 και σε απόσταση 12 μέτρων από την πρώτη.

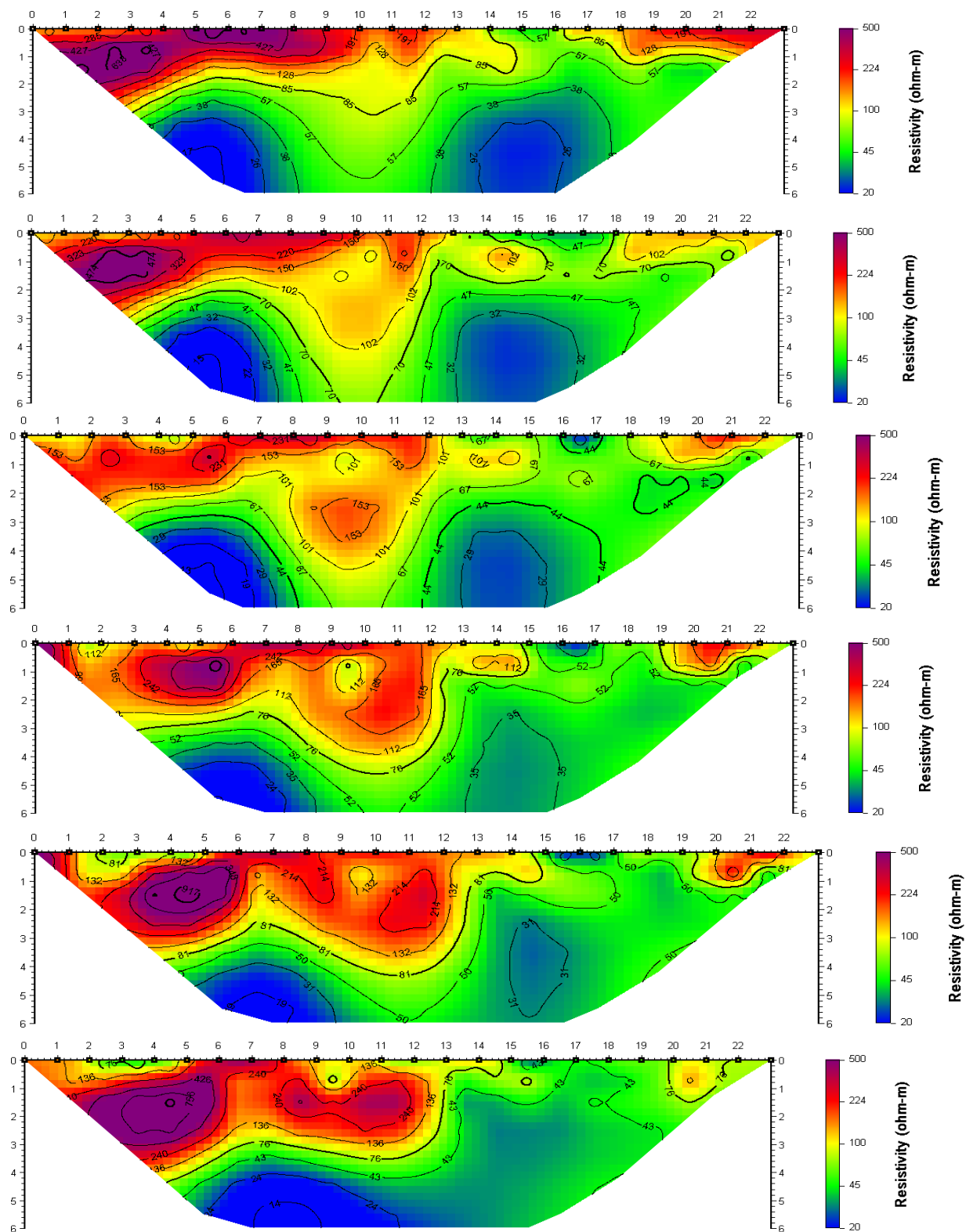
Παρατηρούμε όπως και στις δύο προηγούμενες οδεύσεις ότι το τέμαχος του αρχαίου τείχους εμφανίζεται στο νότιο τμήμα της τομογραφίας (ιώδες χρώμα) με αντιστάσεις κοντά στα 800 Ohm-m και σε βάθος μέχρι τα 2 μέτρα.

Τα τεχνητά υλικά και τα κεραμικά της τομογραφίας (κίτρινο έως κόκκινο χρώμα) εμφανίζονται στο νότιο τμήμα σε βάθος μέχρι 2 μέτρα και στο βόρειο τμήμα έως το 1 μέτρο.

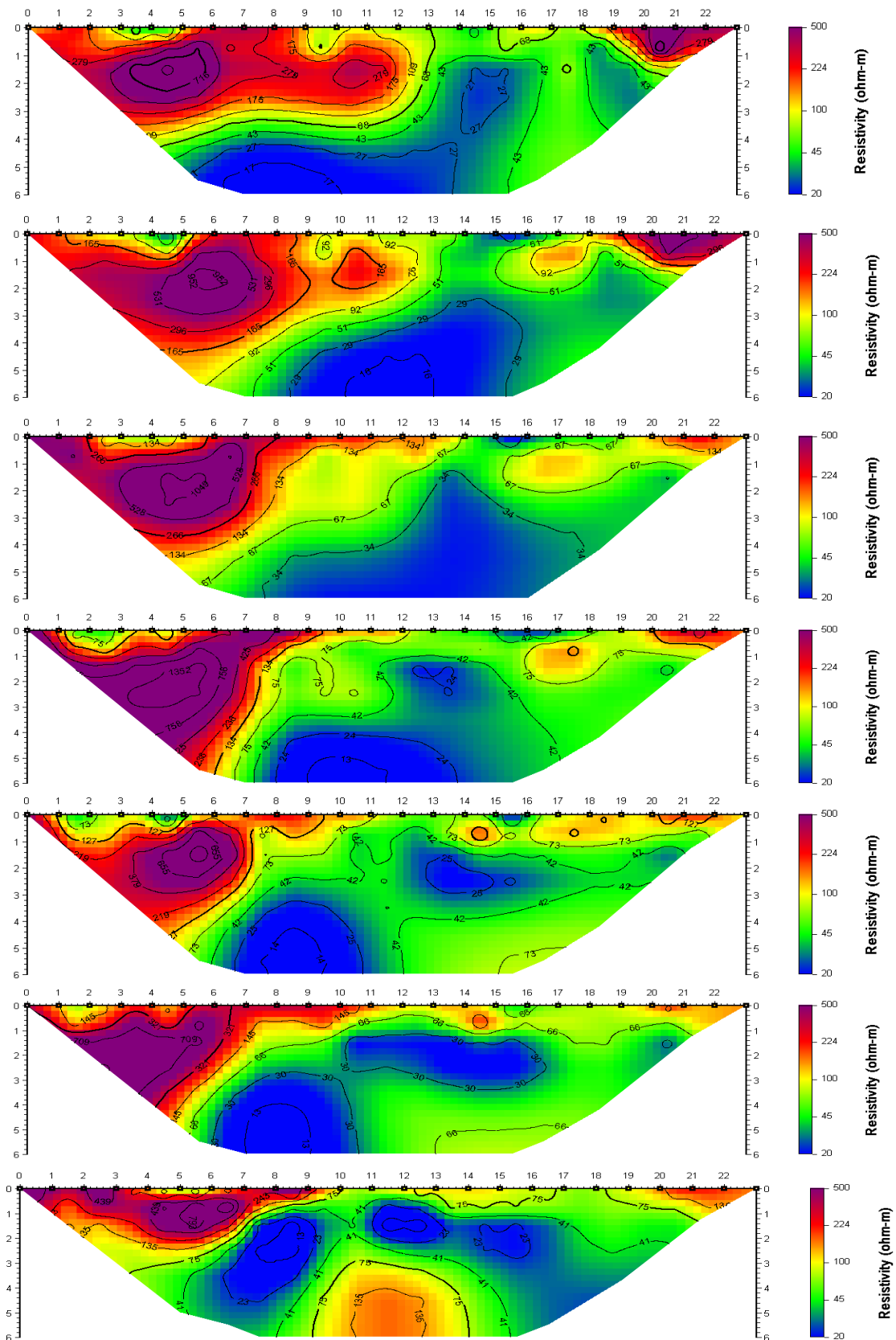
Οι άμμοι και τα χαλίκια (πράσινο χρώμα) εμφανίζονται σε μεγάλο εύρος μέσα στην εξεταζόμενη περιοχή από την επιφάνεια έως τα 6 μέτρα βάθος και από το νότιο μέχρι το βόρειο τμήμα όπου ανάμεσα τους συναντάμε τους δύο πόλους της αργίλου και της ιλύος (μπλε χρώμα).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ύπαρξη ενός άλλου σχηματισμού πέραν των προηγούμενων ο οποίος εμφανίζεται σε βάθος από 4 μέχρι 6 μέτρα και έχει αντιστάσεις της τάξης των 135 Ohm-m. Πρόκειται για κερματισμένο σχιστόλιθο ο οποίος είναι υποκείμενος των παραπάνω σχηματισμών σύμφωνα με την μελέτη που έκανε η τεχνική εταιρία ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ Ε.Π.Ε. στο συγκεκριμένο οικόπεδο και τα αποτελέσματα της οποίας είδαμε στις προηγούμενες σελίδες.

Παρακάτω απεικονίζονται και οι 13 οδεύσεις που πραγματοποιήσαμε στην περιοχή με προσανατολισμό ΔΒΔ-ΑΒΑ (Εικόνες 30,31).



Εικόνα 30. Αποτέλεσμα αντιστροφής στις τομογραφίες ΟΤΕ 01- ΟΤΕ 06



Εικόνα 31. Αποτέλεσμα αντιστροφής στις τομογραφίες ΟΤΕ 07- ΟΤΕ 13

8. Συμπεράσματα

Με στόχο την μελέτη της γεωλογικής δομής του υπεδάφους από γεωτεχνικής πλευράς και την ανακάλυψη ή μη της ύπαρξης αρχαιοτήτων, πραγματοποιήθηκαν σε οικόπεδο επί της οδού Ολυμπιάδος κοντά στην περιοχή του αρχαίου τείχους της πόλης, 13 γεωηλεκτρικές τομογραφίες διευθύνσεως ΒΒΔ-ΝΝΑ μήκους 23m η καθεμία, σύμφωνα με τη διάταξη πόλου-διπόλου. Οι 13 τομογραφίες έγιναν παράλληλα με στόχο την πληρέστερη μελέτη της στρωματογραφικής δομής της περιοχής.

Από τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας και από τις μελέτες που πραγματοποίησε η ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ Ε.Π.Ε. με γεωτρήσεις στο συγκεκριμένο οικόπεδο για την κατασκευή πυροσβεστικού σταθμού, προκύπτει ότι στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, προς το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, συναντάμε περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος και στις 13 οδεύσεις τις οποίες πραγματοποιήσαμε. Πρόκειται πιθανά για το αρχαίο τείχος της Θεσσαλονίκης το οποίο ίσως συνεχίζεται και κάτω από την συγκεκριμένη περιοχή την οποία μελετήσαμε, αλλά εμφανίζεται μόνο στο νότιο τμήμα και όχι στο βόρειο τμήμα που είναι προς το κτίριο του ΟΤΕ. Δεν αποκλείεται να πρόκειται βέβαια και για νεότερα οικοδομικά λείψανα που καλύφθηκαν από σύγχρονες αποθέσεις.

Στην περιοχή επίσης υπάρχουν πολλές εμφανίσεις τεχνητών υλικών και κεραμικών (μπάζα), τα οποία τα συναντάμε κυρίως επιφανειακά στο νότιο και με μικρές εμφανίσεις στο βόριο τμήμα των τομογραφιών.

Η υπόλοιπη περιοχή καλύπτεται από λεπτόκοκκα (ιλύς, άργιλος) και ανδρόκοκκα (άμμοι, χαλίκια) ιζήματα σε εναλλαγές, με τα λεπτόκοκκα ιζήματα να συναντώνται κυρίως σε μεγαλύτερο βάθος και με μικρές εμφανίσεις επιφανειακά.

Τέλος παρατηρούμε ότι από το βάθος των 4 μέτρων εμφανίζεται ο κερματισμένος σχιστόλιθος ο οποίος είναι υποκείμενος όλων των παραπάνω σχηματισμών.

Φωτογραφίες



Εικόνα 32. Τοποθέτηση ηλεκτροδίων υπό τη καθοδήγηση του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Τσούρλου Παναγιώτη



Εικόνα 33. Ομάδα έρευνας της περιοχής

Βιβλιογραφία

- Παπαζάχος Κ.Β. (1986) : Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, 1986, Εκδόσεις Ζήτη Θεσσαλονίκη
 - Μουντράκης Δ. (1985): Γεωλογία Της Ελλάδας , University Studio Press, Θεσσαλονίκη
 - "Τα τείχη της Θεσσαλονίκης", της Ι. Αρβανιτίδου
 - "Νεοτεκτονικά Ρήγματα Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης" Neotectonic faults in the urban site of Thessaloniki (Αννα ΖΕΡΒΟΠΟΥΛΟΥ, Σπύρος ΠΑΥΛΙΔΗΣ)
 - Μουντράκης Δ., (1988): Συνοπτική Γεωτεκτονική Εξέλιξη του Ευρύτερου Ελληνικού Χώρου, Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ.
 - Μελέτη 'Πεντάροφο κτίριο πυροσβεστικού σταθμού Θεσσαλονίκης με δύο υπόγεια και δώμα' από την τεχνική εταιρία ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗ Ε.Π.Ε.
 - IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983.
 - Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Engineer Manual, U.S Army Corps of Engineers, 31 August 1995
 - "Electrical and Magnetic Methods in Archaeological Prospection", Armin Schmidt, 2009
 - Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Chapter D1 Application of Surface Geophysics to Ground-Water Investigations, A.A.R. Zohdy, G.P. Eaton and D.R. Mabey, USGS Publications
 - Keller, G.V., Ferguson, R., Lee, C. Y., Harthill, N.- Jacobson, J.J.: The dipole mapping method. Geophysics, 1975
 - "Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies", Dr. M.H.Loke
-
- maps.google.com
 - Wikipedia.com
 - <http://ngonaus.org> (Σύλλογος Διαδόσεως Του Ελληνικού Πολιτισμού)
 - www.arctic-geophysics.com
 - www.microgeo.com