



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Εργαστηριακή Μέτρηση της Ειδικής Αντίστασης του  
Εδάφους με τη Μέθοδο Wenner

---

Χρήστος Δαυίδης

A.M.: HN04900

Επιβλέπων: Ζαχαρίας Γ. Δάσιος, Έκτακτο Εκπαιδευτικό Προσωπικό

*(Υπογραφή)*

.....

**ΧΡΗΣΤΟΣ Ν. ΔΑΥΙΔΗΣ**

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© 2023 – All rights reserved

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή διάταξης για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη μέθοδο Wenner ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Αρχικά αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους στο πεδίο αλλά και στο εργαστήριο σε δείγματα εδάφους. Έπειτα αναλύεται η σχεδίαση και οι προδιαγραφές της διάταξης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται και περιγράφεται αναλυτικά η κατασκευή της διάταξης. Ακολουθούν οι δοκιμαστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, περιγράφεται η διαδικασία της μέτρησης και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που αποδεικνύουν ότι η διάταξη που κατασκευάστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους τόσο για ερευνητικούς όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

**Λέξεις Κλειδιά:** Δείγματα εδάφους, Έδαφος, Ειδική αγωγιμότητα του εδάφους, Ειδική αντίσταση του εδάφους, Μέθοδος Wenner

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

---

## ABSTRACT

The goal of the present thesis is the design and construction of an experimental arrangement for measuring the electrical resistivity of soil samples via the Wenner method. This arrangement is intended to be used for research and educational purposes. Initially, soil resistivity measurement methods are reviewed; these refer to field measurements and laboratory measurements on soil samples. Then, the specifications for the arrangement are set and its design is presented. The construction process of the arrangement is presented in detail. Subsequently, the first measurements with the new experimental arrangement are presented, the measurement procedure is presented in detail. Experimental results verify that the constructed arrangement is suitable for measuring the electrical resistivity of soil samples and fulfills both research and educational purposes.

**Keywords:** Electrical conductivity of soil, Electrical resistivity of soil, Soil samples, Soil, Wenner method

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

---

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα πρώτα από όλα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Ζαχαρία Δάτσιο για την εμπιστοσύνη, τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση του για την υλοποίηση αυτής της πτυχιακής. Θερμές ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Π.Ν. Μικρόπουλο, Διευθυντή του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης που παραχώρησε το όργανο μέτρησης αντίστασης γείωσης και ειδικής αντίστασης του εδάφους που ήταν απαραίτητο για τη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον θείο μου Κοντομήσιο Κωνσταντίνο για την στήριξη στις σπουδές μου.

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	i
Abstract .....	iii
Ευχαριστιες .....	v
Πίνακας Περιεχομένων .....	vii
Πίνακας Εικόνων.....	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: Ειδική Αντίσταση του Εδάφους.....	3
1.1 Ορισμός και Χρησιμότητα Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους .....	3
1.1.1 Αντίσταση .....	3
1.1.2 Ειδική Αντίσταση .....	4
1.1.3 Ειδική Αντίσταση του Εδάφους .....	4
1.1.4 Πολυπλοκότητα και Χαρακτηρισμός του Εδάφους .....	5
1.1.5 Χρησιμότητα .....	6
1.1.6 Χαρακτηριστικά .....	6
1.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ειδική Αντίσταση του Εδάφους .....	7
1.2.1 Σύσταση και Συμπεριφορά του Εδάφους .....	7
1.2.2 Φυσικοί Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ειδική Αντίσταση του Εδάφους .....	8
1.2.3 Τεχνητοί Παράγοντες που Επηρεάζουν τις Μετρήσεις Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους .....	12
1.2.4 Μέτρηση της Ειδικής Αντίστασης στο Πεδίο και στο Εργαστήριο .....	13
1.3 Μέθοδοι Μέτρησης της Ειδικής Αντίστασης στο Πεδίο.....	14
1.3.1 Εισαγωγή.....	14
1.3.2 Μέθοδος Δύο Σημείων .....	16
1.3.3 Μέθοδος Τριών Σημείων.....	17
1.3.4 Μέθοδος Τεσσάρων Σημείων.....	18
1.4 Μέθοδοι Μέτρησης της Ειδικής Αντίστασης στο Εργαστήριο.....	26
1.4.1 Εισαγωγή.....	26
1.4.2 Η Μέθοδος Δοχείου Εδάφους με Δύο Ηλεκτρόδια.....	27
1.4.3 Η Μέθοδος Δοχείου Εδάφους με Τέσσερα Ηλεκτρόδια .....	29
1.4.4 Η Μέθοδος Wenner και Schlumberger-Palmer.....	30
Κεφαλαίο 2: Σχεδίαση Διατάξης Μετρησης Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους με τη Μέθοδο Wenner .....	33
2.1 Προδιαγραφές.....	33
2.1.1 Εισαγωγή.....	33
2.1.2 Περιορισμοί.....	33
2.2 Μέθοδος μέτρησης – Όργανα .....	35
2.3 Σχεδίαση Διατάξης.....	36
Κεφαλαίο 3: Κατασκευή Διατάξης Μετρησης Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους με τη Μέθοδο Wenner .....	39
3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 Υλικά.....	39
3.2.1 Δοχείο Εδάφους.....	39
3.2.2 Ηλεκτρόδια.....	40
3.2.3 Καλώδια .....	44
3.2.4 Οδηγοί Ηλεκτροδίων.....	45
3.3 Περιγραφή κατασκευής.....	46
Κεφαλαίο 4: Μετρήσεις με την Κατασκευασμένη Διατάξη .....	51

---

4.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης, Πηγή Τάσης και Συστήματος Μέτρησης .....	51
4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων .....	59
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα .....	67
Βιβλιογραφία.....	69

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Υδραυλική αναλογία ηλεκτρικής αντίστασης [1].....	3
Εικόνα 1.2: Φωτογραφία του εδάφους με σημαντική πολυεπίπεδη δομή [2].....	5
Εικόνα 1.3: Οριζόντια και κάθετη στρωμάτωση εδάφους. (a) Οριζόντια δομή. (b) Κάθετη δομή [2]...	8
Εικόνα 1.4: Εποχιακή διακύμανση ειδικής αντίστασης του εδάφους, με δύο διαφορετικά βάθη τοποθέτησης του ηλεκτροδίου γείωσης [3].....	10
Εικόνα 1.5: Μεταβολή ειδικής αντίστασης του εδάφους. Παράγοντας: (a) άλατα, (b) υγρασία, (c) θερμοκρασία [4].....	11
Εικόνα 1.6: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου δύο ηλεκτροδίων [2].....	16
Εικόνα 1.7: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου τριών ηλεκτροδίων [2].....	17
Εικόνα 1.8: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου τεσσάρων ηλεκτροδίων. Οι αποστάσεις μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος A και τάσης C και D είναι $a_1$ , $a_2$ . Αντίστοιχα, του ηλεκτροδίου B και C και D είναι $a_3$ , $a_4$ [2].....	19
Εικόνα 1.9: Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές γραμμές με τη χρήση της μεθόδου τεσσάρων ηλεκτροδίων. Η συνεχόμενη γραμμή αντιπροσωπεύει τη ροή ρεύματος. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την ισοδυναμική επιφάνεια. (a) Τομή. (b) Κάτοψη [2].....	20
Εικόνα 1.10: Επίδραση υπόγειων στρωμάτων του εδάφους στη κατανομή ηλεκτρικού ρεύματος. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την ροή ρεύματος για ομοιογενές έδαφος. (a) Επίδραση στρωμάτων με μεγαλύτερη ειδική αντίσταση. (b) Επίδραση στρωμάτων με μικρότερη ειδική αντίσταση [2].....	21
Εικόνα 1.11: Διατάξεις για την μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων. (a) Ίση αποστάσεων ή μέθοδος Wenner. (b) Άνιση απόσταση ή μέθοδος Schlumberger-Palmer. (c) Μέθοδος Schlumberger. (d) Δίπολη διάταξη [2].....	22
Εικόνα 1.12: Μέθοδος τεσσάρων σημείων (ηλεκτροδίων): Διάταξη Wenner [4].....	23
Εικόνα 1.13: Φαινόμενη ειδική αντίσταση $\rho_a$ συναρτήσει της απόστασης $a$ και μοντέλο εδάφους με τρία διαφορετικά στρώματα[2].....	24
Εικόνα 1.14: Σχηματικό διάγραμμα γρήγορης μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη διάταξη Wenner [2].....	25
Εικόνα 1.15: Μέθοδος τεσσάρων σημείων: Διάταξη Schlumberger [4].....	25
Εικόνα 1.16: Πειραματική μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με δοχείο εδάφους [5].....	27
Εικόνα 1.17: Πειραματική μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων με δοχείο εδάφους [5].....	29
Εικόνα 3.1: Δοχεία εδάφους που επιλέχθηκαν.....	40
Εικόνα 3.2: Γαλβάνιζέ καρφιά για ηλεκτρόδια στη συσκευασία τους.....	40
Εικόνα 3.3: Καρφί με κεφαλή γωνία και καρφί με κεφαλή στρόγγυλη.....	41
Εικόνα 3.4: Χάλκινη ράβδος.....	41
Εικόνα 3.5: Χάλκινο καρφί με τετράγωνη διατομή.....	42
Εικόνα 3.6: Χάλκινο καρφί με κυκλική διατομή.....	42
Εικόνα 3.7: Ανοξείδωτο με κρίκο στη κεφαλή.....	43
Εικόνα 3.8: Ανοξείδωτο πριτσίνι.....	43
Εικόνα 3.9: Καλώδια μέτρησης για δοχείο αναφοράς.....	44
Εικόνα 3.10: Καλώδια μέτρησης για δοχεία κατασκευής.....	44
Εικόνα 3.11: Ηλεκτρολογικό κανάλι κομμένο σε τέσσερα κομμάτια (ένα για κάθε δοχείο της Εικόνας 3.1).....	45
Εικόνα 3.12: Plexiglas σε ράβδο για οδηγό.....	45
Εικόνα 3.13: Τα τέσσερα δοχεία εδάφους μαζί με τους οδηγούς της πρώτης κατηγορίας.....	46
Εικόνα 3.14: Ο οδηγός με τις οπές ανά 1cm.....	47
Εικόνα 3.15: Ο οδηγός στην τελική του μορφή.....	47
Εικόνα 3.16: Ο δεύτερος οδηγός στην τελική μορφή.....	48
Εικόνα 3.17: Το μαύρο δοχείο μαζί με οδηγό της δεύτερης κατηγορίας.....	48
Εικόνα 3.18: Το γκρι δοχείο μαζί με τέσσερις οδηγούς της δεύτερης κατηγορίας.....	49
Εικόνα 3.19: Το διαφανές δοχείο με σχέδια μαζί με τέσσερις οδηγούς της δεύτερης κατηγορίας.....	49

---

Εικόνα 4.1: Δοχείο αναφοράς πριν την μέτρηση της ειδικής αντίστασης .....	52
Εικόνα 4.2: Όργανο μέτρησης Megger DET5/2 .....	53
Εικόνα 4.3: Το δοχείο αναφοράς συνδεδεμένο με το όργανο μέτρησης.....	53
Εικόνα 4.4: Δοχείο εδάφους μετά το γέμισμα.....	54
Εικόνα 4.5: Απόσταση από το γείσο του δοχείου .....	54
Εικόνα 4.6: Δοχείο εδάφους με τον οδηγό της πρώτης κατηγορίας.....	55
Εικόνα 4.7: Δοχείο εδάφους με τους οδηγούς της δεύτερης κατηγορίας.....	55
Εικόνα 4.8: Μέτρηση με τη μέθοδο Wenner με χάλκινα ηλεκτρόδια.....	56
Εικόνα 4.9: Μια άλλη όψη της ίδιας μέτρησης με την Εικόνα 4.8 .....	56
Εικόνα 4.10: Γενική εικόνα μιας μέτρησης με το όργανο Megger DET5/2 .....	57
Εικόνα 4.11: Μέτρηση με χάλκινα ηλεκτρόδια σε απόσταση 5 cm.....	57
Εικόνα 4.12: Μέτρηση με χάλκινες ράβδους στα 3 cm μεταξύ τους.....	58
Εικόνα 4.13: Οπές μετά την μέτρηση αφού έχουν αφαιρεθεί οι οδηγοί για να συμπιεστεί το έδαφος. 58	
Εικόνα 4.14: Γράφημα ειδικής αντίστασης εδάφους που μετρήθηκε για όλα τα ηλεκτρόδια και όλες τις αποστάσεις a και όλα τα βάθη τοποθέτησης των ηλεκτροδίων b .....	64

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στην ειδική αντίσταση του εδάφους [3].....	9
Πίνακας 1.2: Επίδραση της περιεκτικότητας σε άλατα στην ειδική αντίσταση του εδάφους [3].....	10
Πίνακας 1.3: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [3].....	10
Πίνακας 1.4: Ειδικές αντιστάσεις διαφορετικών εδαφών [3] .....	12
Πίνακας 1.5: Ειδικές αντιστάσεις διαφορετικών εδαφών .....	12
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μέτρησης με το δοχείο αναφοράς .....	59
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά μικρά (2,8 mm) με βάθος 1,3 cm.....	60
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά μικρά (2,8 mm) με βάθος 1,6 cm.....	60
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μέτρησης για πριτσίνια ανοξείδωτα με μακριά κεφαλή (2,7 mm) με βάθος 0,9 cm .....	60
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα μέτρησης για πριτσίνια ανοξείδωτα με μακριά κεφαλή (2,7 mm) με βάθος 1,4 cm .....	61
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά τετράγωνα (4 mm) με βάθος 1,8 cm.....	61
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά τετράγωνα (4 mm) με βάθος 2,9 cm.....	62
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινες ράβδοι (7 mm) με βάθος 1,8 cm .....	62
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινες ράβδοι (7 mm) με βάθος 2,9 cm .....	62
Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα μέτρησης για ανοξείδωτα με κρίκο (4,2 mm) με βάθος 1,1 cm.....	63
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα μέτρησης για ανοξείδωτα με κρίκο (4,2 mm) με βάθος 2,6 cm.....	63
Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα μέτρησης για καρφιά με γωνία (3 mm) με βάθος 1,4 cm .....	63
Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα μέτρησης για καρφιά με γωνία (3 mm) με βάθος 2,4 cm .....	64

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην πτυχιακή αυτή παρουσιάζεται η σχεδίαση και η κατασκευή διάταξης για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη μέθοδο Wenner σε εργαστηριακές συνθήκες ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ορίζεται και περιγράφεται η ειδική αντίσταση, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους. Επίσης, οι μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους στο πεδίο και στο εργαστήριο.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η σχεδίαση διάταξης μέτρησης καθώς και οι προδιαγραφές της.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος κατασκευής της διάταξης και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται η διαδικασία των μετρήσεων και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που αποδεικνύουν ότι η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας.

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

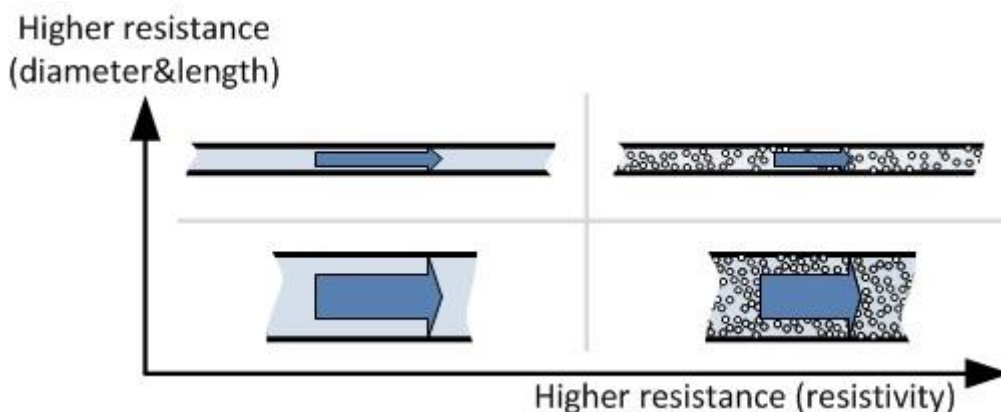


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

## 1.1 Ορισμός και Χρησιμότητα Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους

### 1.1.1 Αντίσταση

Η ηλεκτρική αντίσταση εκφράζεται σε Ohm, και δεν είναι ίδια με την ειδική αντίσταση. Ενώ η ειδική αντίσταση είναι μια ιδιότητα ενός υλικού, η ηλεκτρική αντίσταση είναι μια ιδιότητα ενός αντικειμένου συγκεκριμένων διαστάσεων. Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αντιστάτη προσδιορίζεται από το συνδυασμό του σχήματός του και της ειδικής αντίστασης του υλικού του. Για παράδειγμα, ένα καλώδιο με μακρύ, λεπτό σύρμα έχει μεγαλύτερη αντίσταση απ' ό,τι ένα σύρμα παχύ και κοντό. Ένα καλώδιο κατασκευασμένο από υλικό με υψηλή ειδική αντίσταση έχει υψηλότερη τιμή αντίστασης από ένα με χαμηλή ειδική αντίσταση. Μια αναλογία μπορεί να γίνει με ένα υδραυλικό σύστημα, όπου το νερό αντλείται μέσω ενός σωλήνα (Εικόνα 1.1). Όσο λεπτότερος και μακρύτερος είναι ο σωλήνας, τόσο υψηλότερη θα είναι η αντίσταση. Επίσης, σε έναν σωλήνα γεμάτο με άμμο, η ροή του νερού θα συναντήσει μεγαλύτερη αντίσταση από σε έναν χωρίς άμμο.



Εικόνα 1.1: Υδραυλική αναλογία ηλεκτρικής αντίστασης [1]

---

### 1.1.2 Ειδική Αντίσταση

Η ειδική αντίσταση είναι μια βασική παράμετρος ενός υλικού στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία εκφράζεται σε Ohm μέτρα ( $\Omega\text{m}$ ). Η ειδική αντίσταση συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\rho$ . Υψηλή ειδική αντίσταση σε ένα υλικό σημαίνει ότι έχει χαμηλή αγωγιμότητα το υλικό αυτό, δηλαδή παρουσιάζει δυσκολία στη διάδοση ηλεκτρικού φορτίου όταν σε αυτό εφαρμοστεί μία τάση.

Η ηλεκτρική ειδική αντίσταση ορίζεται ως η σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα υλικό και του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αυτού:

$$\rho = \frac{E}{J}. \quad (1.1)$$

Όπου  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του υλικού ( $\Omega\text{m}$ ),

$E$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο υλικό ( $\text{V/m}$ ),

$J$  είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος στο υλικό ( $\text{A/m}^2$ )

Εάν σε ένα υλικό το ηλεκτρικό πεδίο ( $E$ ) είναι πολύ μεγάλο και η ροή του ρεύματος ( $J$ ) πολύ μικρή, αυτό σημαίνει ότι το υλικό έχει υψηλή ειδική αντίσταση.

Το αντίθετο της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης είναι η ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα και είναι ένα μέτρο για το πόσο καλά μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα ένα υλικό:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{J}{E}. \quad (1.2)$$

Στη σχέση αυτή  $\sigma$  είναι η ειδική αγωγιμότητα του υλικού που εκφράζεται σε Siemens ανά μέτρο ( $\text{S/m}$ ). Στην ηλεκτρολογική μηχανική συχνά χρησιμοποιείται και το σύμβολο  $\kappa$  αντί για το  $\sigma$ .

### 1.1.3 Ειδική Αντίσταση του Εδάφους

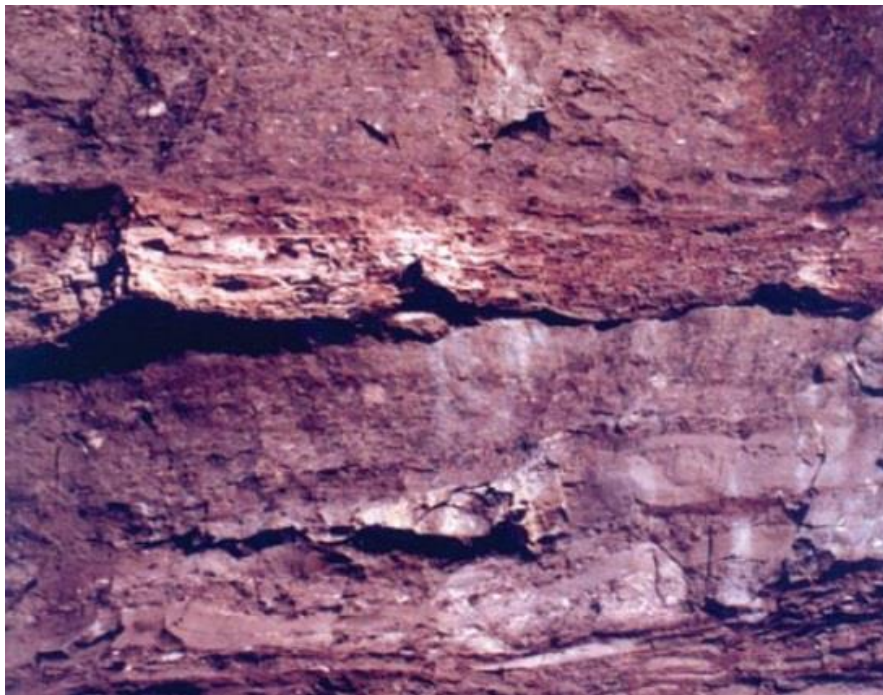
Όπως με την ειδική αντίσταση γενικά έτσι και με την ειδική αντίσταση του εδάφους ισχύουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Δηλαδή, η ειδική αντίσταση οποιουδήποτε υλικού μπορεί να οριστεί ως η αντίσταση ανάμεσα σε δύο επιφάνειες ανά μονάδα όγκου σώματος. Η μονάδα της αντίστασης είναι όπως αναφέρθηκε ήδη τα Ohm ( $\Omega$ ). Η αντίσταση είναι ανάλογη με την ειδική αντίσταση και το μήκος ενός σώματος αλλά αντιστρόφως ανάλογη με τη διατομή του σώματος. Ως βασική ιδιότητα, η ειδική αντίσταση (μονάδα  $\Omega\text{m}$ ) δεν εξαρτάται από τον όγκο του υλικού.

---

Επομένως, η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ένα μέτρο του πόση αντίσταση ή αγωγιμότητα έχει το έδαφος στο ηλεκτρικό ρεύμα.

#### ***1.1.4 Πολυπλοκότητα και Χαρακτηρισμός του Εδάφους***

Η πολυπλοκότητα που προκαλείται από τα μη ομοιόμορφα εδάφη είναι συχνή (Εικόνα 1.2). Οι τεχνικές μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους βασίζονται ουσιαστικά στην ίδια γενική αρχή για τις περισσότερες μεθόδους μέτρησης. Πιο συχνά για τον χαρακτηρισμό του εδάφους χρησιμοποιείται η ειδική αντίσταση υπό συνεχή ή αργά μεταβαλλόμενη εναλλασσόμενη τάση λόγω της πιο απλής μέτρησης σε σχέση με μετρήσεις υψηλών συχνοτήτων. Πολλοί πίνακες στη βιβλιογραφία δείχνουν εύρη της ειδικής αντίστασης για διάφορα εδάφη, αλλά οι εκτιμήσεις αυτού του είδους αποδίδουν μόνο μια πρόχειρη προσέγγιση της ειδικής αντίστασης γιατί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Επομένως, είναι επιτακτικές οι πραγματικές μετρήσεις ειδικής αντίστασης στο κάθε είδος εδάφους και με τις συνθήκες που ενδιαφέρουν. Τέλος, μετρώντας την ειδική αντίσταση του εδάφους σε φυσική κατάσταση, δηλαδή χωρίς εκσκαφή ή διάτρηση του εδάφους, μπορούν να εκτιμηθούν οι πραγματικές τιμές με βάση τις συνθήκες που ισχύουν στο έδαφος εκείνη τη στιγμή.



**Εικόνα 1.2: Φωτογραφία του εδάφους με σημαντική πολυεπίπεδη δομή [2]**

---

### ***1.1.5 Χρησιμότητα***

Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι απαραίτητη σε διάφορες εφαρμογές του μηχανικού και της επιστήμης. Χρησιμοποιείται ευρέως για τη σχεδίαση και ανάλυση γειώσεων, μελέτες ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων, της γεωλογικής εξερεύνησης, αρχαιολογικές έρευνες, σχεδιασμό θεμελίων, μελέτες υπόγειων υδάτων και ούτω καθεξής. Για τον ηλεκτρολόγο μηχανικό πιο συγκεκριμένα, πριν σχεδιαστούν τα πλέγματα γείωσης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των υποσταθμών και γενικότερα εγκαταστάσεων υψηλής τάσης, πρέπει να είναι γνωστά περισσότερα για την τοπική ειδική αντίσταση του εδάφους και τη γεωλογική δομή, έτσι ώστε να μπορεί να σχεδιαστεί σωστά η γείωση σύμφωνα με τις πραγματικές συνθήκες της ειδικής αντίστασης και τη δομή του εδάφους. Επίσης οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι χρήσιμες για την εύρεση της καλύτερης θέσης και του βάθους για ηλεκτρόδια με χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τέλος, η ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποδείξει τον αναμενόμενο βαθμό διάβρωσης σε υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς για νερό, αέριο, καύσιμα κτλ. Γενικά, σημεία όπου οι τιμές της ειδικής αντίστασης είναι χαμηλές τείνουν να αυξάνουν τη διάβρωση των περισσότερων μετάλλων. Αυτό είναι καλός οδηγός για την εγκατάσταση καθοδικής προστασίας (ενεργής με έγχυση ρεύματος ή παθητικής με θυσιαζόμενα ηλεκτρόδια ανόδου) όταν υπάρχει τέτοιο είδος πληροφοριών. Οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους ανάλογα με την εφαρμογή γίνονται είτε επί τόπου ή στο εργαστήριο σε δείγματα που πρέπει να αντιπροσωπεύουν το έδαφος της περιοχής.

### ***1.1.6 Χαρακτηριστικά***

Οι έρευνες για την ειδική αντίσταση του εδάφους σε μια τοποθεσία είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό τόσο της γενικής σύνθεσης του εδάφους όσο και του βαθμού ομοιογένειας. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την παρουσία διαφόρων στρωμάτων και τη φύση του εδαφικού υλικού εξάγονται με συλλεγμένα δείγματα δοκιμών και άλλες γεωλογικές έρευνες. Με αυτό τον τρόπο αποκτάται μια γενική εικόνα σχετικά με το εύρος της ειδικής αντίστασης στο σημείο. Ωστόσο, μόνο με τις μετρήσεις βγαίνουν αξιόπιστα συμπεράσματα γιατί η ειδική αντίσταση εξαρτάται έντονα από την υγρασία του εδάφους και τη θερμοκρασία του. Έτσι, η ειδική αντίσταση αλλάζει κατά τη διάρκεια του

---

έτους. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται το καλοκαίρι (μετά από ξηρασία) ή τον χειμώνα (όταν το έδαφος είναι παγωμένο).

Επιπλέον, οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του όπως είναι το πορώδες, η πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε νερό, η αλατότητα και για τον εντοπισμό μεταλλεύματος. Επίσης, μέσα από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης, μπορούν να διερευνηθούν οι υπόγειες ουσίες και η υπόγεια γεωλογική δομή από αρκετά μέτρα έως μερικές χιλιάδες μέτρα, γεγονός χρήσιμο και σε εφαρμογές αντιρρύπανσης.

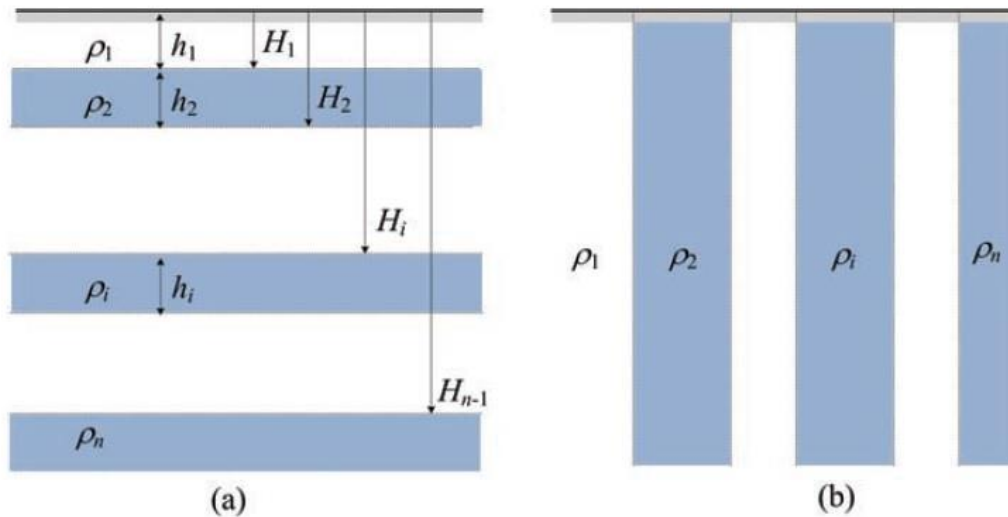
Κλείνοντας την Ενότητα 1.1 φαίνεται ότι η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είτε στο εργαστήριο είτε στο πεδίο είναι πολύ χρήσιμη για πολλές διαφορετικές εφαρμογές, επομένως παρουσιάζει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον.

## ***1.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ειδική Αντίσταση του Εδάφους***

### ***1.2.1 Σύσταση και Συμπεριφορά του Εδάφους***

Το έδαφος είναι ένα μη ενιαίο πολυφασικό κοκκώδες υλικό που αποτελείται από στερεά σωματίδια (κόκκοι) όπου ανάμεσα τους υπάρχουν κενά (οι λεγόμενοι πόροι), που καταλαμβάνονται είτε από νερό είτε από αέρα, είτε από συνδυασμό και των δύο. Στα υψηλά στρώματα του εδάφους οι πόροι περιέχουν συνήθως αέρα σε συνδυασμό με νερό ενώ, σπάνια, οι πόροι των άνω στρωμάτων δεν αποκλείεται να έχουν μόνο από αέρα. Λόγω της πολυφασικής κοκκώδους φύσης του, το έδαφος περιγράφεται στις περισσότερες εφαρμογές από την ισοδύναμη μακροσκοπική συμπεριφορά. Οι ιδιότητές του βασίζονται στη δομή και τη σύστασή του. Επίσης βασίζονται στην αλληλεπίδραση ανάμεσα στους κόκκους του και ανάμεσα στις φάσεις που το αποτελούν (στερεή, υγρή και αέρια). Επίσης, είναι σημαντικό ότι στο έδαφος οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ιόντα και όχι ηλεκτρόνια, (ιοντική αγωγή).

Το έδαφος μιας τοποθεσίας ή περιοχής δεν είναι ομοιογενές, η σύσταση και η δομή του μεταβάλλονται αξιόλογα με το βάθος από την επιφάνεια ενώ σε πολλές περιοχές διακρίνονται αισθητές μεταβολές και στην οριζοντίως (Εικόνα 1.3). Επίσης, το ίδιο αληθεύει για την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία (νερό εντός των πόρων) και περιλαμβάνει διαλυμένες ουσίες. Επομένως, δημιουργείται ένα υδατικό διάλυμα ηλεκτρολυτών γιατί το νερό διαλύει ουσίες του εδάφους. Η περιεκτικότητα σε νερό αλλάζει και εποχικά ανάλογα με τις βροχές.



**Εικόνα 1.3: Οριζόντια και κάθετη στρωμάτωση εδάφους. (α) Οριζόντια δομή. (β) Κάθετη δομή [2]**

Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται αρκετά από την αλληλεπίδραση των διαφορετικών φάσεων. Όπως ήδη είναι ευρέως γνωστό, το ξηρό έδαφος είναι μονωτής και το υγρό έδαφος είναι ημιαγώγιμο. Διότι, στο ξηρό ο αριθμός των φορέων (ιόντα) είναι μικρός και η κινητικότητά τους χαμηλή, επίσης η αγωγή γίνεται μέσω των στερεών κόκκων ή της επιφάνειάς τους. Από την άλλη στο υγρό, το νερό των πόρων διαλύει στερεές ουσίες σχηματίζοντας ηλεκτρολυτικά διαλύματα, τα οποία είναι αγωγίμα ως γνωστόν. Άρα, στο υγρό έδαφος υφίσταται μεγαλύτερος αριθμός φορέων μεγαλύτερης κινητικότητας σε συσχέτιση με το ξηρό έδαφος και μια μικρή ποσότητα υγρασίας αλλάζει την ειδική αντίσταση ραγδαία.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται για παράδειγμα ότι, εάν ένα έδαφος είναι αργιλώδες, μπορεί να αλλάξει πολύ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε σχέση με ένα αμμώδες έδαφος λόγω της διαφορετικής σύστασης. Επομένως, λόγω της πολυπλοκότητας δεν μπορεί να ειπωθεί ότι οποιοδήποτε έδαφος έχει ειδική αντίσταση τόσων ohm m μόνο με βάση το είδος του.

### **1.2.2 Φυσικοί Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ειδική Αντίσταση του Εδάφους**

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω η αγωγή του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική. Επομένως, την ειδική αντίσταση του εδάφους την επηρεάζει ριζικά η ποσότητα υγρασίας και η περιεκτικότητα σε άλατα. Ανάλογα με τον καιρό, τη φύση του εδάφους, την εποχή του χρόνου και το βάθος του μόνιμου υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια, η ποσότητα του νερού στο έδαφος ποικίλλει. Γενικά, το καθαρό νερό έχει απείρως υψηλή ειδική αντίσταση.

Ωστόσο, καθώς το νερό είναι εξαιρετικός διαλύτης, με μια περιεκτικότητα σε υγρασία μόλις της τάξεως 5% ή και μικρότερης (Πίνακας 1.1), σημειώνεται μια δραματική μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε σχέση με το ξηρό έδαφος. Την ειδική αντίσταση μειώνουν επίσης, τα φυσικά άλατα στη γη διαλυμένα σε νερό. Φτάνει μόνο μια μικρή ποσότητα αλατιού για να μειώσει αρκετά την ειδική αντίσταση του εδάφους. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να είναι χρήσιμο να παρέχει ένα καλό ηλεκτρόδιο γείωσης χαμηλής αντίστασης, στη θέση ενός ακριβού, περίπλοκου συστήματος ηλεκτροδίων. Ο Πίνακας 1.2 παρουσιάζει ένα παράδειγμα μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους με την προσθήκη άλατος.

**Πίνακας 1.1: Επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στην ειδική αντίσταση του εδάφους [3]**

Moisture Content, Percent by Weight	Resistivity (Ohm-cm)	
	Top Soil	Sandy Loam
0.0	1,000 x 10 <sup>6</sup>	1,000 x 10 <sup>6</sup>
2.5	250,000	150,000
5.0	165,000	43,000
10.0	53,000	22,000
15.0	21,000	13,000
20.0	12,000	10,000
30.0	10,000	8,000

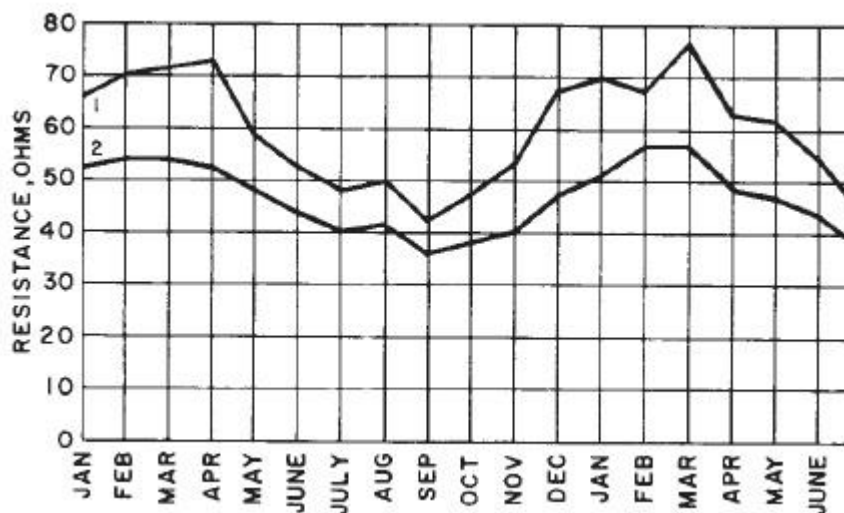
Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι η θερμοκρασία. Για την οποία δεν έχουν συλλεχθεί πολλές πληροφορίες σχετικά με τις επιπτώσεις. Με την αύξηση της θερμοκρασίας η ειδική αντίσταση του εδάφους θα μειωθεί. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από δύο γεγονότα. Πρώτον, το νερό που υπάρχει στο έδαφος καθορίζει κυρίως την ειδική αντίσταση και δεύτερον, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει σημαντικά την ειδική αντίσταση του νερού που περιέχει διαλυμένες ουσίες. Επιπλέον, η ειδική αντίσταση του εδάφους αυξάνεται αργά με μειωμένες θερμοκρασίες από 25° C σε 0° C (Πίνακας 1.3). Κάτω από 0° C, η ειδική αντίσταση αυξάνεται απότομα. Σε παγωμένο έδαφος, όπως και στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους το χειμώνα, η ειδική αντίσταση μπορεί να είναι εξαιρετική υψηλή, καθώς η κινητικότητα των φορέων είναι μικρή.

Πίνακας 1.2: Επίδραση της περιεκτικότητας σε άλατα στην ειδική αντίσταση του εδάφους [3]

Added Salt Percent by Weight of Moisture	Resistivity, (Ohm-cm)
0.0	10,700
0.1	1,800
1.0	460
5.0	190
10.0	130
20.0	100

Πίνακας 1.3: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [3]

Temperature		Resistivity (Ohm-cm)
C	F	
20	68	7,200
10	50	9,900
0	32 (water)	13,800
0	32 (ice)	30,000
-5	23	79,000
-15	14	330,000

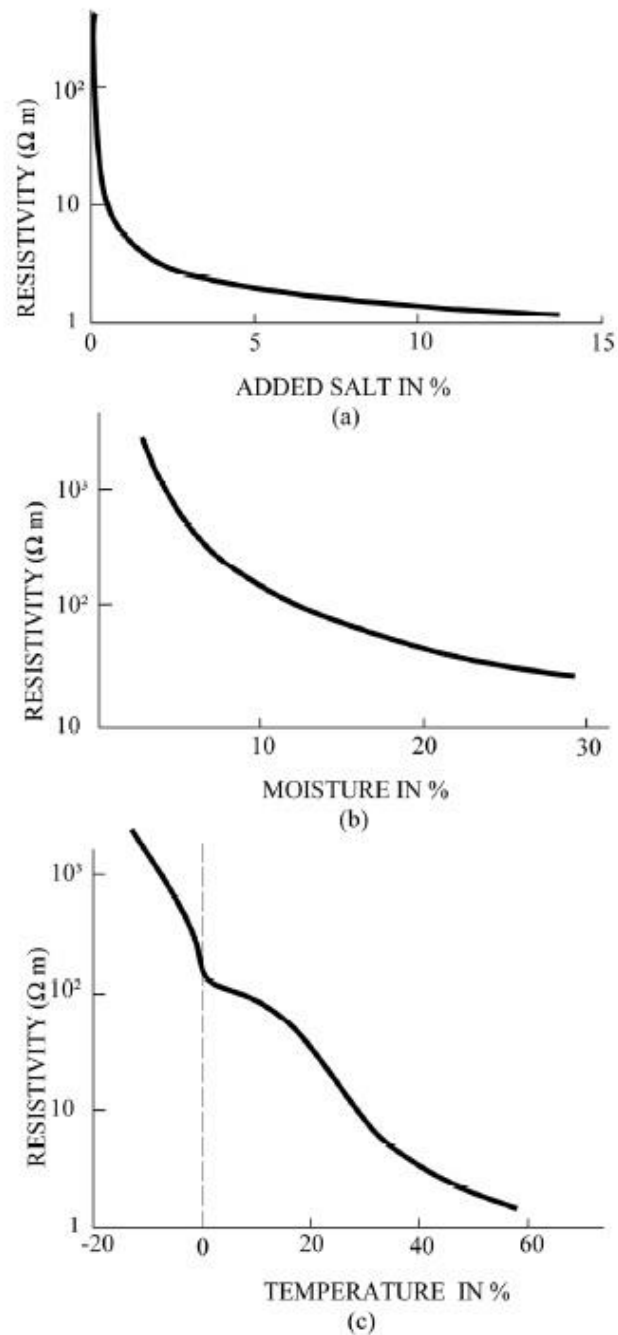


Εικόνα 1.4: Εποχιακή διακύμανση ειδικής αντίστασης του εδάφους, με δύο διαφορετικά βάθη τοποθέτησης του ηλεκτροδίου γείωσης [3]

Παραπάνω περιγράφονται τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της περιεκτικότητας σε άλατα στην ειδική αντίσταση του εδάφους (Εικόνα 1.4). Ένα επιπλέον



παράδειγμα από το διεθνές πρότυπο IEEE 81-2012 παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.5. Είναι λογικό να ειπωθεί ότι η ειδική αντίσταση στο έδαφος θα ποικίλλει σημαντικά σε διαφορετικές εποχές του έτους (Εικόνα 1.4). Αυτό ιδιαίτερα ισχύει σε τοποθεσίες με έντονες βροχοπτώσεις, ακραίες θερμοκρασίες, ξηρασία και άλλες εποχιακές αλλαγές.



**Εικόνα 1.5:** Μεταβολή ειδικής αντίστασης του εδάφους. Παράγοντας: (a) άλατα, (b) υγρασία, (c) θερμοκρασία [4]

Τέλος, σε γενικές γραμμές, οι πιο σημαντικές μικροσκοπικές παράμετροι που επηρεάζουν την μακροσκοπική ειδική αντίσταση του εδάφους είναι οι παρακάτω: το σχήμα των κόκκων και των πόρων, το μέγεθος των κόκκων, των πόρων, η ειδική επιφάνεια, η διάρθρωση και η δομή

του εδάφους, το πορώδες, η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε νερό, η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων και η χημική σύσταση του εδάφους. Με αυτό τον όγκο παραμέτρων είναι λογικό ότι, δεν είναι εφικτή η εκτίμηση της ειδικής αντίστασης βάσει του είδους του εδάφους παρόλο που στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν πίνακες με τυπικά εύρη μεταβολής της ειδικής αντίστασης για διάφορα είδη εδάφους. Γενικά, στη βιβλιογραφία υπάρχουν τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους να κυμαίνονται από λιγότερο από 1 Ωm για θαλασσίνο νερό και εδάφη πολύ κοντά στη θάλασσα έως και 10<sup>9</sup> Ωm για βράχους (Πίνακες 1.4 και 1.5).

**Πίνακας 1.4: Ειδικές αντιστάσεις διαφορετικών εδαφών [3]**

Soil	Resistivity (Ohm-cm)		
	Avg	Min	Max
Fills: ashes, cinders, brine wastes	2,370	590	7,000
Clay: shale, gumbo, loam	4,060	340	16,300
Same: varying proportions of sand/gravel	15,800	1,020	135,000
Gravel, sand, stones with little clay/loam	94,000	59,000	458,000

**Πίνακας 1.5: Ειδικές αντιστάσεις διαφορετικών εδαφών**

Soil	Resistivity Ohm-cm (Range)
Surface soils, loam, etc.	100 - 5,000
Clay	200 - 10,000
Sand and gravel	5,000 - 100,000
Surface limestone	10,000 - 1,000,000
Shales	500 - 10,000
Sandstone	2,000 - 200,000
Granites, basalts, etc.	100,000
Decomposed gneisses	5,000 - 50,000
Slates, etc.	1,000 - 10,000

### **1.2.3 Τεχνητοί Παράγοντες που Επηρεάζουν τις Μετρήσεις Ειδικής Αντίστασης του Εδάφους**

Εκτός από τους φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους υπάρχουν επίσης και τεχνητοί παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους

---

που μετριέται από την επιφάνειά του. Θαμμένα αντικείμενα, όπως μεταλλικοί αγωγοί και ράγες, που βρίσκονται κοντά στο έδαφος δοκιμής, θα έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Όταν γίνεται μέτρηση πάνω από τα θαμμένα μεταλλικά αντικείμενα, τα δυναμικά γης παραμορφώνονται και οι κλίσεις των μεταβολών αυξάνονται.

Η αγωγή ηλεκτρισμού στο έδαφος είναι ηλεκτρολυτική και το συνεχές ρεύμα οδηγεί σε χημικές αντιδράσεις και διαφορές δυναμικού. Μεταξύ διαφόρων τύπων εδάφους και μεταξύ εδάφους και μετάλλου με γαλβανική δράση παράγονται συνεχή δυναμικά. Τα συστήματα καθοδικής προστασίας των αγωγών, γραμμών μεταφοράς DC και σιδηροδρομικών γραμμών DC είναι μερικές από τις σημαντικότερες πηγές DC ρεύματος στο έδαφος. Τις μετρήσεις συνεχούς ρεύματος μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά η πόλωση, τα γαλβανικά δυναμικά και τα παράσιτα συνεχή ρεύματα. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται περιοδικά αντίστροφο συνεχές ρεύμα ή ένα κανονικό παλμικό ρεύμα μερικές φορές για την πραγματοποίηση μετρήσεων. Εντούτοις, οι προκύπτουσες τιμές θα είναι αρκετά κοντά, αλλά ενδέχεται να μην είναι ακριβείς για εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος, όταν χρησιμοποιείται περιοδικά αντίστροφο συνεχές ρεύμα για μετρήσεις ειδικής αντίστασης.

Ένας ακόμα παράγοντας που παρουσιάζει μια επιπλοκή είναι, τα παράσιτα εναλλασσόμενα ρεύματα στη γη, στο υπό δοκιμή σύστημα γείωσης και στα ηλεκτρόδια δοκιμής. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται μια συχνότητα που δεν υπάρχει στο παράσιτο ρεύμα ή στις αρμονικές του ή χρησιμοποιείται ένα τυχαίο σήμα θορύβου. Για να ξεπεραστούν οι επιπτώσεις των παράσιτων εναλλασσόμενων ρευμάτων, συχνά απαιτείται η χρήση φίλτρων ή όργανα μέτρησης περιορισμένης ζώνης, ή και τα δύο.

Όποτε υπάρχει υποψία παρουσίας θαμμένων μεταλλικών κατασκευών στην περιοχή όπου πρέπει να γίνουν μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους και είναι γνωστή η θέση τους τότε, θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν τα ηλεκτρόδια δοκιμής σε κατεύθυνση κάθετη προς τη κατεύθυνση αυτών των κατασκευών ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση αυτών στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Γενικά, καλό θα είναι να τοποθετηθούν όσο πιο μακριά γίνεται τα ηλεκτρόδια δοκιμής από θαμμένες κατασκευές για να προκύψουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα ειδικής αντίστασης.

#### ***1.2.4 Μέτρηση της Ειδικής Αντίστασης στο Πεδίο και στο Εργαστήριο***

Από τα προηγούμενα, φαίνεται ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μια πολύ μεταβλητή ποσότητα. Οπότε, για τον προσδιορισμό της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε μια

---

δεδομένη τοποθεσία, σε μια δεδομένη περίοδο του χρόνου, ο μόνος ασφαλής τρόπος είναι να η μέτρησή της.

Σε εφαρμογές που απαιτείται η ειδική αντίσταση μεγάλου όγκου εδάφους και σε μεγάλο βάθος, η απόκτηση μιας χρήσιμης προσέγγισης της ειδικής αντίστασης του εδάφους από μετρήσεις ειδικής αντίστασης από δείγματα είναι δύσκολη και σε ορισμένες περιπτώσεις αδύνατη. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία λήψης αντιπροσωπευτικών ομοιογενών δειγμάτων εδάφους και στη δυσκολία αναπαραγωγής της περιεκτικότητας σε υγρασία στο δοχείο δοκιμής.

Ωστόσο, σε αρκετές εφαρμογές που απαιτείται η ειδική αντίσταση περιορισμένου όγκου εδάφους (π.χ. εφαρμογές που έχουν σχέση με διάβρωση υπόγειων αντικειμένων) γίνονται μετρήσεις σε δείγματα εδάφους. Επιπλέον, λόγω του πλήθους των εφαρμογών η ειδική αντίσταση του εδάφους διερευνάται μέσω εργαστηριακών πειραμάτων από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα για να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη μεταβολή της με διάφορους παράγοντες. Ωστόσο, λόγω της σύνθετης φύσης του εδάφους, οι επιδράσεις των παραμέτρων που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως ακόμα και σήμερα. Επομένως οι μετρήσεις στο εργαστήριο είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για ερευνητικούς σκοπούς, για εφαρμογές και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Ένας ακόμα λόγος που χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις στο εργαστήριο είναι για εκπαιδευτικούς σκοπούς έτσι ώστε ο εκπαιδευόμενος να εξοικειωθεί με τις τεχνικές μέτρησης σε μικρή κλίμακα πρώτα και σε ελεγχόμενες συνθήκες, πριν την εκτέλεση μετρήσεων σε συμπαγές μη διαταραγμένο έδαφος με τις μεθόδους πεδίου.

### ***1.3 Μέθοδοι Μέτρησης της Ειδικής Αντίστασης στο Πεδίο***

#### ***1.3.1 Εισαγωγή***

Οι μέθοδοι πεδίου χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους μιας περιοχής, με άλλα λόγια, μιας ισοδύναμης τιμής ειδικής αντίστασης που χαρακτηρίζει μέχρι κάποιο συγκεκριμένο βάθος όλα τα στρώματα του εδάφους, ανεξάρτητα από τις ιδιότητές τους. Αυτό συμβαίνει γιατί το πραγματικό μη διαταραγμένο έδαφος είναι μη ομοιογενές (μεταβαλλόμενη σύσταση κυριότερα με το βάθος) και εκτός αυτού μεταβάλλεται και η υγρασία του και η θερμοκρασία του με το βάθος.

Το έδαφος αναπαρίσταται με κάποιο αντιπροσωπευτικό μοντέλο που το περιγράφει με επιτυχία με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων πεδίου. Τα πιο συχνά εμφανιζόμενα μοντέλα ειδικής

---

αντίστασης του εδάφους είναι ομοιογενές μοντέλο εδάφους και το διστρωματικό μοντέλο εδάφους. Το ομοιογενές έδαφος, σε πραγματικές περιπτώσεις σπάνια υπάρχει και έτσι το αποτέλεσμα της μέτρησης συνήθως είναι ισοδύναμη ειδική αντίσταση ή φαινόμενη ειδική αντίσταση. Τα διστρωματικά μοντέλα εδάφους είναι συχνά μια καλή προσέγγιση πολλών εδαφικών δομών που υπάρχουν στο πεδίο. Τέλος, υπάρχουν τα πολυστρωματικά μοντέλα εδάφους, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πιο σύνθετες εδαφικές συνθήκες, όταν για παράδειγμα η φαινόμενη ειδική αντίσταση αυξομειώνεται έντονα με το βάθος.

Το καλύτερο μοντέλο χρήσης εξαρτάται από τον σκοπό των μετρήσεων. Συχνά, ένα μοντέλο διστρωματικό που αποτελείται από δύο στρώματα με διαφορετική ειδική αντίσταση: άνω στρώμα πεπερασμένου πάχους και κάτω στρώμα άπειρου πάχους δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα για τα περισσότερα εδάφη σχετικά με τις μελέτες που αφορούν συστήματα γειώσης. Για όλα τα μοντέλα, η ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χειροκίνητα με αναλυτικές και γραφικές τεχνικές είτε με τη χρήση τεχνικών ανάλυσης υπολογιστή που πλέον είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες σε σχέση με το παρελθόν γιατί υπάρχουν πολλά λογισμικά γειώσεων στην αγορά.

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Όλες βασίζονται στη μέτρηση της αντίστασης ενός όγκου του μη διαταραγμένου εδάφους αλλά με διαφορετικό αριθμό ηλεκτροδίων και διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης. Οι πιο γνωστές μέθοδοι είναι:

- Μέθοδος δύο σημείων
- Μέθοδος τριών σημείων
- Μέθοδος τεσσάρων σημείων

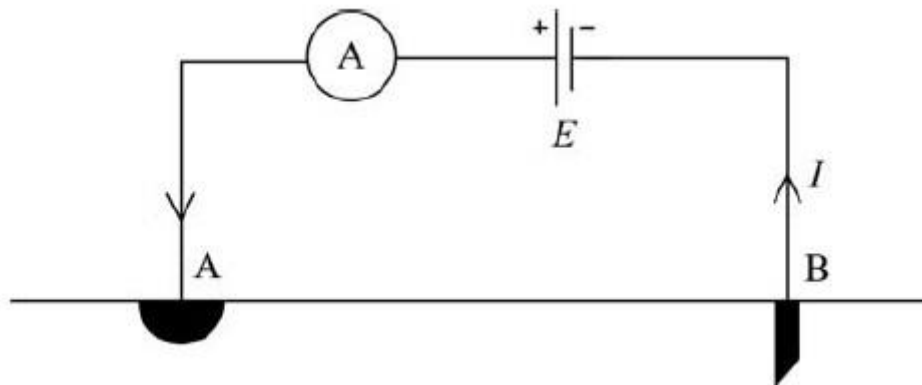
Στη μέτρηση πεδίου, εύκολη και αποτελεσματική μπορεί να κάνει τη δοκιμή η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής μέτρησης σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες. Η επιλογή της σωστής διαδρομής δοκιμής μπορεί να βοηθήσει του μηχανικούς να λάβουν αξιόπιστα δεδομένα μέσω των λιγότερων δυνατών δοκιμών. Ο τρόπος επιλογής της σωστής διαδρομής δοκιμής εξαρτάται κυρίως από την πρακτική εμπειρία του προσωποθκού και τις τοπικές συνθήκες που επικρατούν. Επίσης, θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει τμηματική γεωλογική παραλλαγή κατά μήκος της διαδρομής μέτρησης.

Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης σε μία διαδρομή, θα ήταν καλό μια επαναληπτική μέτρηση σε κατεύθυνση κάθετη προς αυτήν τη διαδρομή, στη συνέχεια τα αποτελέσματα των δύο κατευθύνσεων πρέπει να συγκριθούν. Εάν τα αποτελέσματα της ίδιας απόστασης ηλεκτροδίων είναι σχεδόν τα ίδια, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η γεωλογικά πολυεπίπεδη δομή είναι σχεδόν οριζόντια, δηλαδή δεν υπάρχει πλευρική διακύμανση (μόνο κατακόρυφη) Από

την άλλη, εάν τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη διαφορά, μπορεί να υπάρχει και οριζόντια στρωμάτωση ή μπορεί να υπάρχουν θαμμένα μεταλλικά αντικείμενα σημαντικού μεγέθους. Παρακάτω περιγράφονται κάποιες βασικές μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιούνται στο πεδίο. Οι επόμενες ενότητες βασίστηκαν σε μεγάλο βαθμό στην αναφορά [2].

### 1.3.2 Μέθοδος Δύο Σημείων

Ένα σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου δύο ηλεκτροδίων φαίνεται στην Εικόνα 1.6. Στη περιοχή που πρόκειται να μετρηθεί συνδέονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B και ένα ρεύμα εγχέεται μεταξύ τους, ενώ η πηγή είναι συνήθως μια μπαταρία. Για τη μέτρηση του ρεύματος  $I$  ένα αμπερόμετρο είναι εν σειρά συνδεδεμένο στο κύκλωμα. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου A μπορεί να εκτιμηθεί περίπου ως  $R=E/I$ , λαμβάνοντας υπόψιν το δυναμικό του ηλεκτροδίου B ως μηδέν και την τάση του ηλεκτροδίου B ως την ονομαστική τιμή τάσης  $E$  της μπαταρίας.



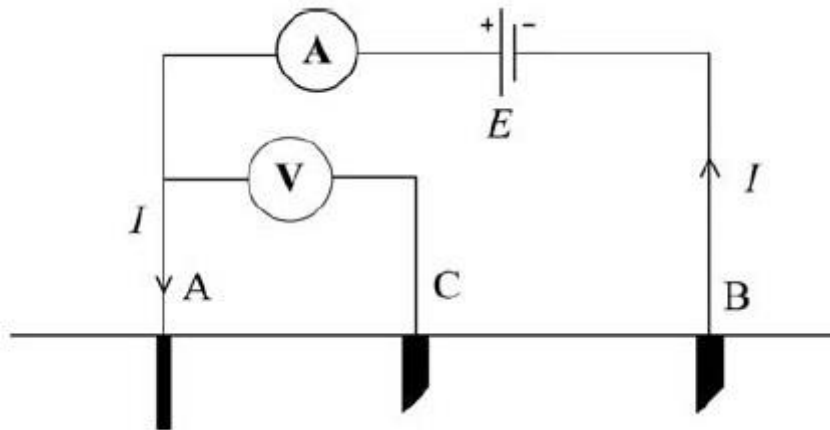
Εικόνα 1.6: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου δύο ηλεκτροδίων [2]

Εάν το ηλεκτρόδιο ρεύματος A είναι ένα τυπικό ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο με ακτίνα  $r$ , τότε μπορεί να υπολογιστεί η ειδική αντίσταση  $\rho$  της μετρούμενης περιοχής εδάφους μέσω του ακόλουθου τύπου υπολογισμού, ο οποίος προέρχεται από τον τύπο υπολογισμού της αντίστασης γείωσης ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου:

$$\rho = 2\pi rR. \quad (1.3)$$

### 1.3.3 Μέθοδος Τριών Σημείων

Ένα σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου τριών σημείων φαίνεται στη Εικόνα 1.7. Ο σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να οδηγήσει περισσότερο ρεύμα δοκιμής μέσω του βαθιού εδάφους. Η ειδική αντίσταση που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τριών ηλεκτροδίων σχετίζεται με το σχήμα και την εγκατάσταση του ηλεκτροδίου γείωσης.



Εικόνα 1.7: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου τριών ηλεκτροδίων [2]

Η μετρηθείσα τιμή αντίστασης θα αντικατοπτρίζει στη συνέχεια την φαινόμενη ειδική αντίσταση για κάθε βάθος της ράβδου. Δύο σημαντικά πλεονεκτήματα προσφέρουν οι ράβδοι εδάφους γι' αυτήν τη μέτρηση:

A) Η θεωρητική τιμή της αντίστασης στη ράβδο γείωσης είναι απλή στον υπολογισμό με επαρκή ακρίβεια.

B) Η εγκατάσταση δοκιμαστικών ράβδων γείωσης δίνει επίσης επιβεβαίωση για το πόσο βαθιά μπορούν να κινηθούν οι ράβδοι κατά την εγκατάσταση του συστήματος γείωσης αργότερα (αν φυσικά οι μετρήσεις γίνονται με στόχο τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης).

Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ράβδος μπορεί να δονείται καθώς εγκαθίσταται, με αποτέλεσμα κακή επαφή με το έδαφος κατά μήκος της, καθιστώντας έτσι δύσκολη τη μετατροπή της αντίστασης σε πραγματική φαινόμενη ειδική αντίσταση. Έτσι θα δώσει στην φαινόμενη ειδική αντίσταση κάποιες διαφορές και θα φέρει λάθη η χρήση διαφορετικών τύπων ηλεκτροδίων με διαφορετικά μεγέθη.

Η μέθοδος τριών σημείων πρέπει να μετρά την αντίσταση πολλές φορές, ενώ σε κάθε μέτρηση, θα πρέπει να αυξάνεται κατά μια δεδομένη τιμή το βάθος ενταφιασμού του ηλεκτροδίου δοκιμής, έτσι ώστε να αναγκάζει περισσότερο πειραματικό ρεύμα να ρέει σε βαθύτερο έδαφος. Καθώς αυξάνεται το βάθος η αντίσταση που μετριέται θα αντικατοπτρίζει την μεταβολή.

---

Προτιμότερο είναι η χρήση ενός λεπτού κατακόρυφου ηλεκτροδίου παρά άλλων σχημάτων ηλεκτροδίων για δύο λόγους:

A) Είναι εύκολο να υπολογιστεί θεωρητικά η αντίσταση γείωσης ενός κάθετου ηλεκτροδίου γείωσης. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να αναλυθούν εύκολα τα αποτελέσματα των δοκιμών.

B) Είναι εύκολο να τοποθετηθεί το κάθετο ηλεκτρόδιο γείωσης στο έδαφος.

Η αντίσταση γείωσης  $R$  που μετριέται είναι η αναλογία της μετρούμενης τάσης  $U$  και του ρεύματος  $I$ , που είναι η αντίσταση γείωσης του κάθετου ηλεκτροδίου γείωσης (ράβδος). Άρα, η φαινομενική ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να ληφθεί μέσω του τύπου υπολογισμού ενός κάθετου ηλεκτροδίου γείωσης ως:

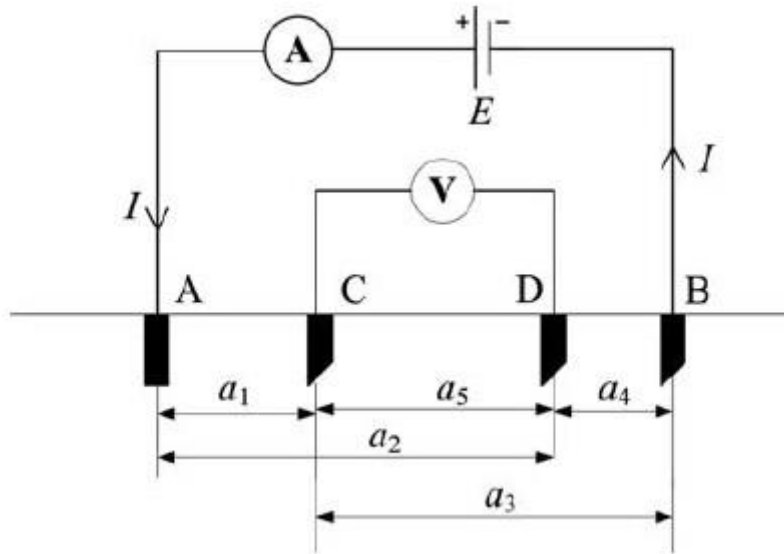
$$\rho_a = \frac{2\pi l R}{\ln \frac{8l}{d} - 1} \quad (1.4)$$

Όπου το  $d$  είναι η διάμετρος του ηλεκτροδίου, το  $l$  είναι το μήκος του κατακόρυφου ηλεκτροδίου γείωσης που οδηγείται στη γη και  $d$  είναι πολύ μικρότερο από το  $l$ .

#### **1.3.4 Μέθοδος Τεσσάρων Σημείων**

Η σχεδόν ιδανική και η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι η μέθοδος τεσσάρων σημείων. Ένα σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου τεσσάρων σημείων φαίνεται στην Εικόνα 1.8, το οποίο είναι μια εφαρμογή πεδίου του νόμου του Ohm. Στη δοκιμή, τέσσερα ηλεκτρόδια A, B, C, D, οδηγούνται στη γη, καθένα με βάθος  $c$ . Εγχέοντας ρεύμα  $I$  μέσω σταθεροποιημένης τροφοδοσίας τάσης (μπαταρία ή τροφοδοτικό) στα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια A και B. Το ρεύμα  $I$  ρέει στη γη μέσω του ηλεκτροδίου A και επιστρέφει στην πηγή μέσω του ηλεκτροδίου B. Το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια ρεύματος A και B, παράγουν δυναμικό στα δύο εσωτερικά C και D ηλεκτρόδια και η τάση μεταξύ των εσωτερικών ηλεκτροδίων μετράται από ένα όργανο μέτρησης τάσης υψηλής αντίστασης εισόδου (ώστε να μην ρέει σημαντικό ρεύμα που μπορεί να πολώσει τα ηλεκτρόδια) και το αποτέλεσμα του  $U/I$  είναι η αντίσταση  $R$ .

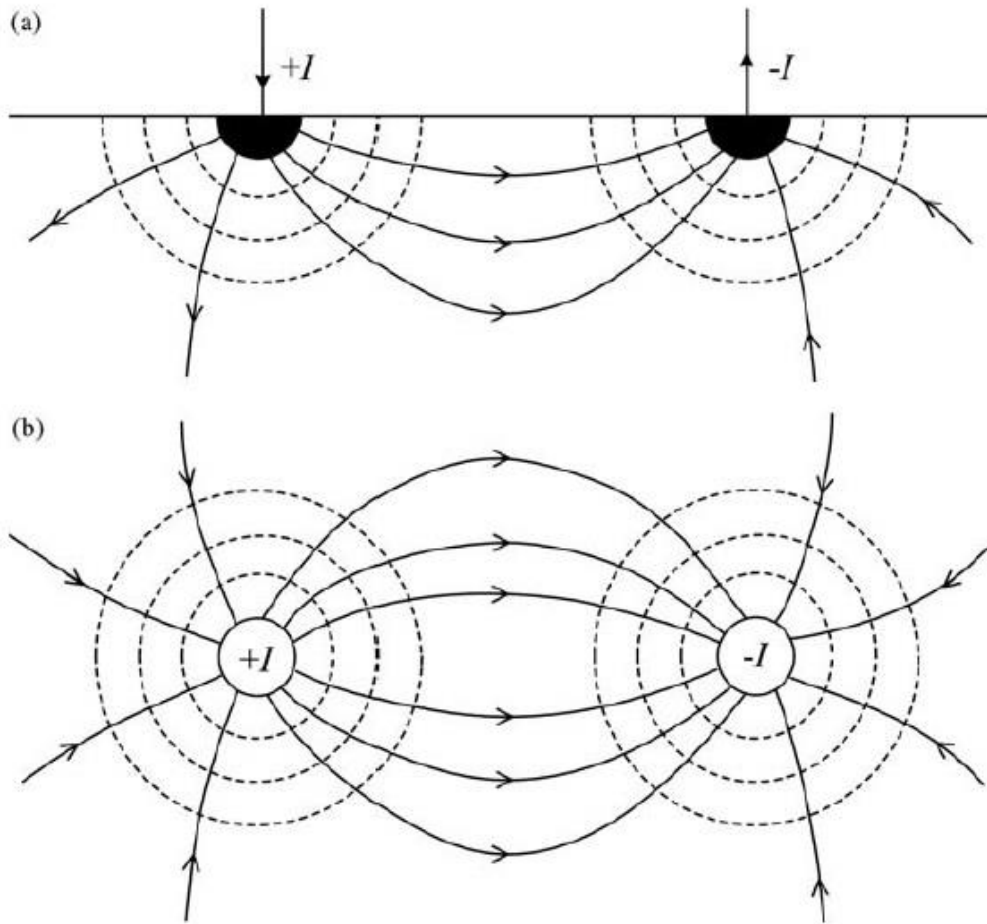




**Εικόνα 1.8:** Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου τεσσάρων ηλεκτροδίων. Οι αποστάσεις μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος A και τάσης C και D είναι  $a_1, a_2$ . Αντίστοιχα, του ηλεκτροδίου B και C και D είναι  $a_3, a_4$  [2]

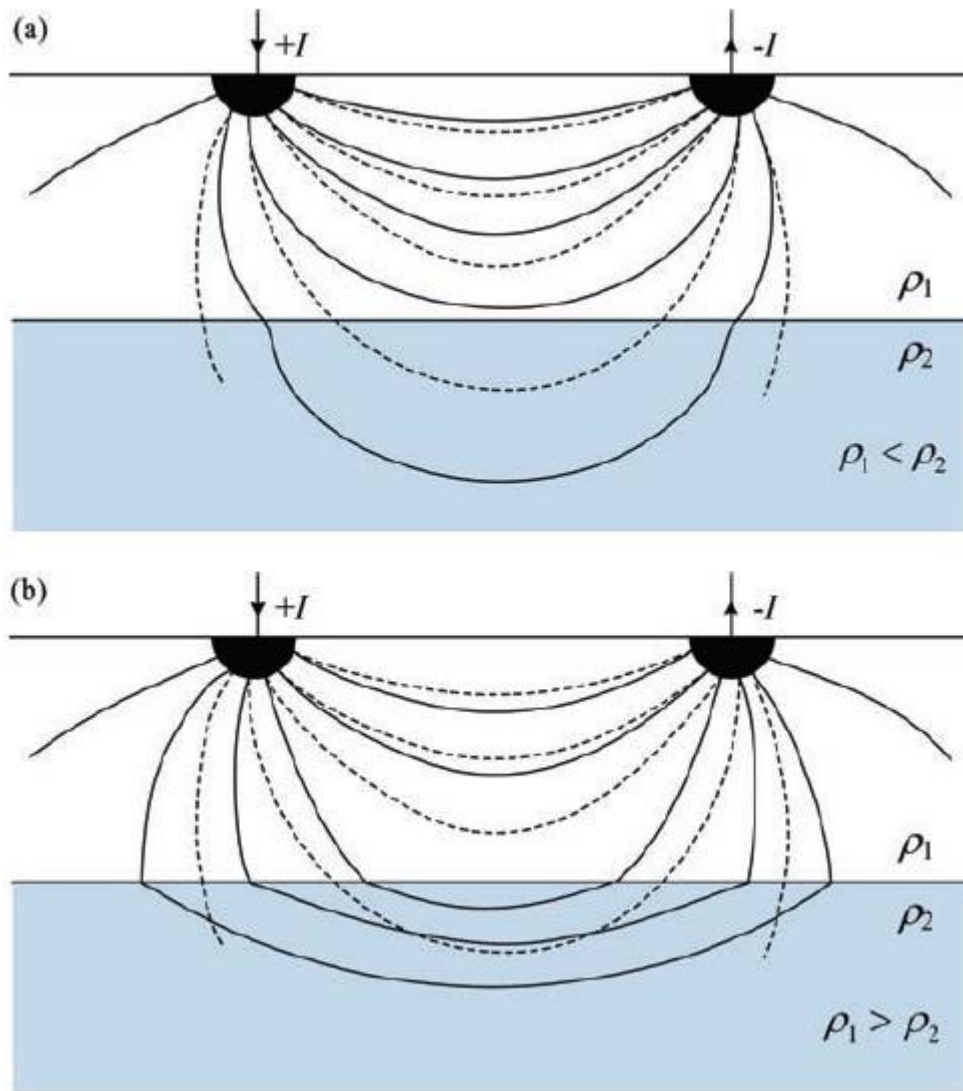
Για τον προσδιορισμό της γεωλογικής δομής καθώς και της ειδικής αντίστασης και του βάθους κάθε στρώσης εδάφους μπορεί να κατασκευαστεί μια καμπύλη για τη μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση σε διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων δοκιμής.

Η Εικόνα 1.9 δείχνει το γράφημα της ισοδυναμικής επιφάνειας και κατανομής ρεύματος που δημιουργείται από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος, όταν η μέθοδος τεσσάρων σημείων χρησιμοποιείται σε δοκιμές ειδικής αντίστασης. Το εύρος εδάφους του ρεύματος που διέρχεται τόσο σε οριζόντιες όσο και σε κατακόρυφες κατευθύνσεις θα γίνει μεγαλύτερο όταν η απόσταση των ηλεκτροδίων γίνει μεγαλύτερη και στη συνέχεια το βαθύτερο έδαφος θα επηρεάσει τη φαινόμενη ειδική αντίσταση που μετρείται.



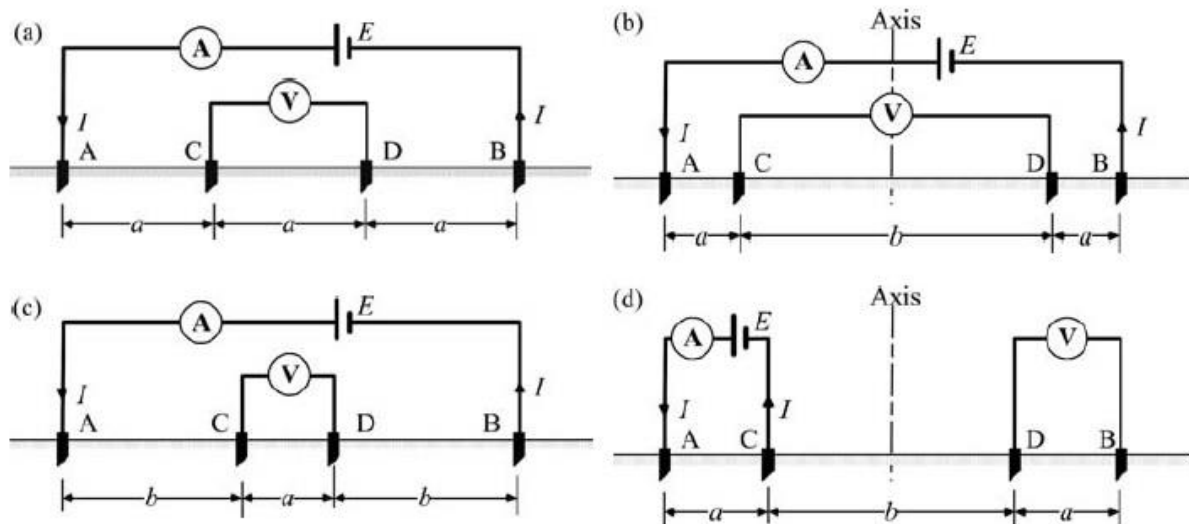
**Εικόνα 1.9:** Ροή ρεύματος και ισοδυναμικές γραμμές με τη χρήση της μεθόδου τεσσάρων ηλεκτροδίων. Η συνεχόμενη γραμμή αντιπροσωπεύει τη ροή ρεύματος. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την ισοδυναμική επιφάνεια. (a) Τομή. (b) Κάτοψη [2]

Συνεπώς, εάν το βαθύτερο έδαφος έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση, η κατεύθυνση ρεύματος θα έχει κλίση προς τα πάνω και η πυκνότητα ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους θα αυξηθεί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.10a. Από την άλλη, εάν το βαθύτερο έδαφος έχει χαμηλότερη ειδική αντίσταση, η κατεύθυνση ρεύματος θα έχει κλίση προς τα κάτω και η πυκνότητα ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους θα μειωθεί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.10b.



**Εικόνα 1.10:** Επίδραση υπόγειων στρωμάτων του εδάφους στη κατανομή ηλεκτρικού ρεύματος. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την ροή ρεύματος για ομοιογενές έδαφος. (α) Επίδραση στρωμάτων με μεγαλύτερη ειδική αντίσταση. (β) Επίδραση στρωμάτων με μικρότερη ειδική αντίσταση [2]

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διατάξεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και τάσης όταν εφαρμόζεται η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων. Η Εικόνα 1.11 δείχνει τις τέσσερις πιο χρησιμοποιούμενες διατάξεις στη μηχανική. Συνήθως, τα τέσσερα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι τοποθετημένα κατά μήκος μιας γραμμής για την εύκολη εξαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου εδάφους αν και οι παράμετροι μπορούν να εξαχθούν και σε πιο περίπλοκες γεωμετρίες. Παρακάτω θα αναλυθούν οι διατάξεις (α) και (ε), δηλαδή οι διατάξεις Wenner και Schlumberger, καθώς είναι οι πιο διαδεδομένες σήμερα.



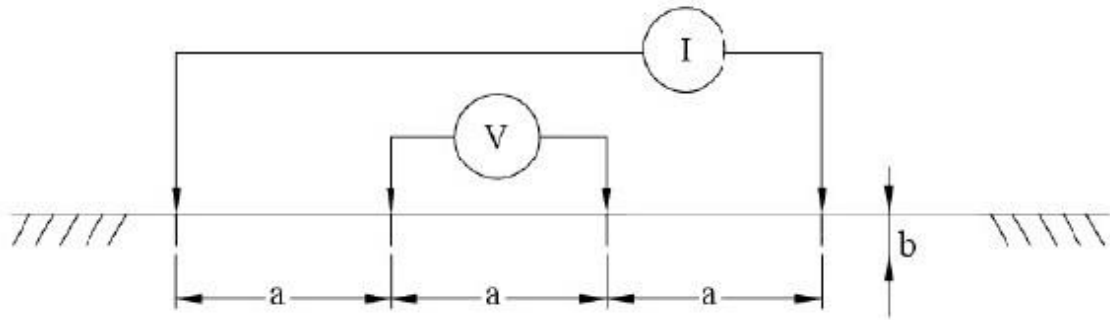
Εικόνα 1.11: Διατάξεις για την μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων. (α) Ίση αποστάσεων ή μέθοδος Wenner. (β) Άιση αποστάση ή μέθοδος Schlumberger-Palmer. (γ) Μέθοδος Schlumberger. (δ) Δίπολη διάταξη [2]

### Διάταξη Wenner

Η πιο διαδιδόμενη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι η μέθοδος Wenner. Προτάθηκε από τον Frank Wenner του U.S. Bureau of Standards το 1915. Σύμφωνα με τη μέθοδο Wenner, χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια μικρού μεγέθους που οδηγούνται στο ίδιο βάθος  $b$  και ίσες αποστάσεις  $a$  σε ευθεία γραμμή. Μεταξύ των δύο εξωτερικών ηλεκτροδίων διέρχεται ένα ρεύμα δοκιμής  $I$  και το δυναμικό  $V$  μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων μετριέται με ένα όργανο υψηλής αντίστασης εισόδου. Έτσι, η αναλογία  $V/I$  δίνει την αντίσταση  $R$  σε Ohms. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση  $\rho$  δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (1.5)$$

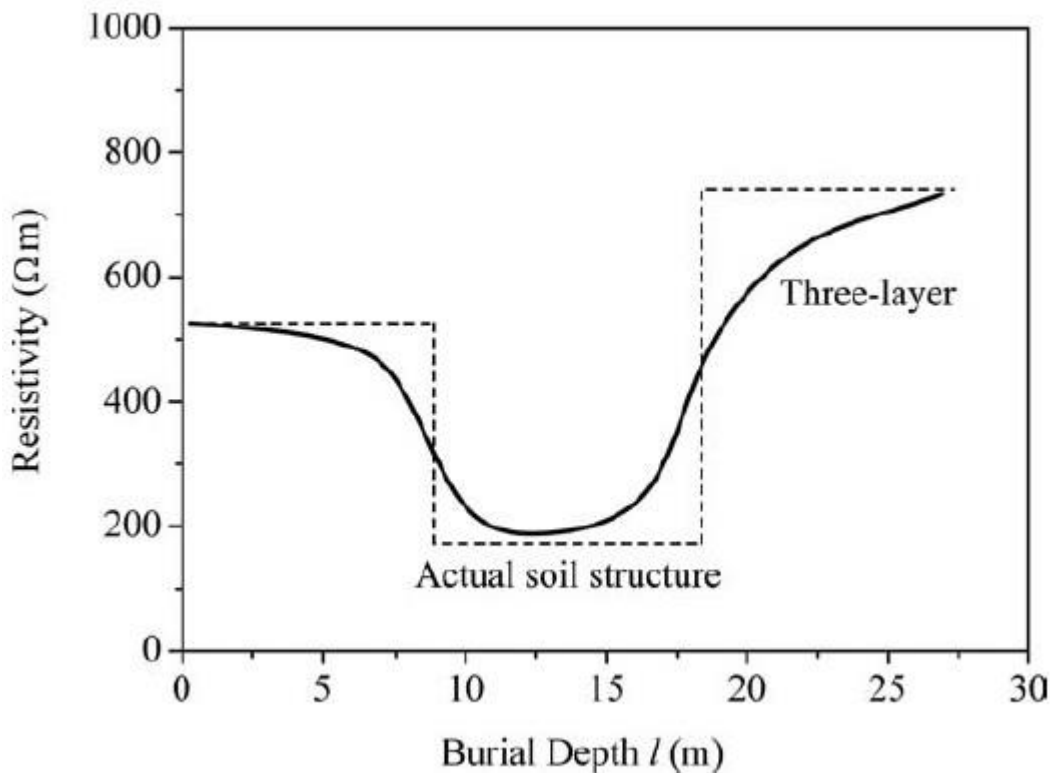
Ένα σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου Wenner φαίνεται στην Εικόνα 1.12.



**Εικόνα 1.12: Μέθοδος τεσσάρων σημείων (ηλεκτροδίων): Διάταξη Wenner [4]**

Θεωρητικά, τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι ημισφαιρικά ηλεκτρόδια ακτίνας  $b$ . Στην πράξη όμως, τέσσερις ράβδοι τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή σε διαστήματα  $a$ , σε βάθος που δεν υπερβαίνει το  $0,1 \cdot a$ . Στη συνέχεια, μπορεί να θεωρηθεί  $b = 0$  m και η εξίσωση γίνεται  $\rho = 2\pi aR$  και δίνει την κατά προσέγγιση φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους στο βάθος  $a$  (αυτό έχει αποδειχθεί μέσω μετρήσεων στο πεδίο). Η χρήση ράβδων γίνεται λόγω κόστους των ημισφαιρίων και δυσκολίας εγκατάστασής τους για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

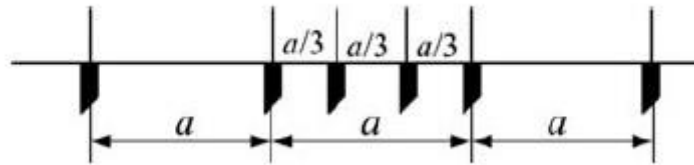
Για τη δημιουργία ενός αντιπροσωπευτικού μοντέλου εδάφους απαιτείται ένα σύνολο μετρήσεων με διάφορες αποστάσεις  $a$  ηλεκτροδίων, που όταν σχεδιάζονται συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων  $a$  φαίνεται εάν υπάρχουν ξεχωριστά στρώματα διαφορετικού εδάφους (διαφορετικής ειδικής αντίστασης) και δίνει μια ιδέα για τις αντίστοιχες ειδικές αντιστάσεις και βάθος τους (Εικόνα 1.13), όπως και για τον αριθμό των απαιτούμενων στρωμάτων του μοντέλου.



**Εικόνα 1.13:** Φαινόμενη ειδική αντίσταση  $\rho_a$  συναρτήσει της απόστασης  $a$  και μοντέλο εδάφους με τρία διαφορετικά στρώματα [2]

Εξειδικευμένα ψηφιακά όργανα χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους, επίσης υπάρχουν και πολυόργανα τα οποία μπορούν να πραγματοποιήσουν απευθείας μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης  $\rho_a$ . Παλαιότερα τα όργανα ήταν όλα αναλογικά. Η τάση εξόδου των οργάνων έχει συνήθως τη μορφή θετικών και αρνητικών παλμών που εναλλάσσονται με συχνότητα  $\eta$  οποία είναι διαφορετική από τη θεμελιώδη και τις αρμονικές της βιομηχανικής συχνότητας (50 ή 60 Hz) ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες υποενότητες.

Στη διαμόρφωση Wenner τεσσάρων σημείων, είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη διαδικασία, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο απαιτούμενος χρόνος για τη μετακίνηση των θέσεων των ηλεκτροδίων. Πρώτα, τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια στη μέγιστη απόσταση  $a$  για να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση, και στη συνέχεια τοποθετούνται σε μικρή απόσταση  $a/3$ , έπειτα σε ακόμη μικρότερη απόσταση  $a/9$  και ούτω καθεξής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.14. Αυτή η μέθοδος ακολουθίας ονομάζεται «leapfrog». Γενικά, σε μια κανονική περίπτωση, απαιτούνται τέσσερις ή πέντε μετρήσεις για να καλυφθεί το εύρος της απαιτούμενης απόστασης των ηλεκτροδίων. Βέβαια αυτό εξαρτάται και από τις τιμές που μετριοούνται

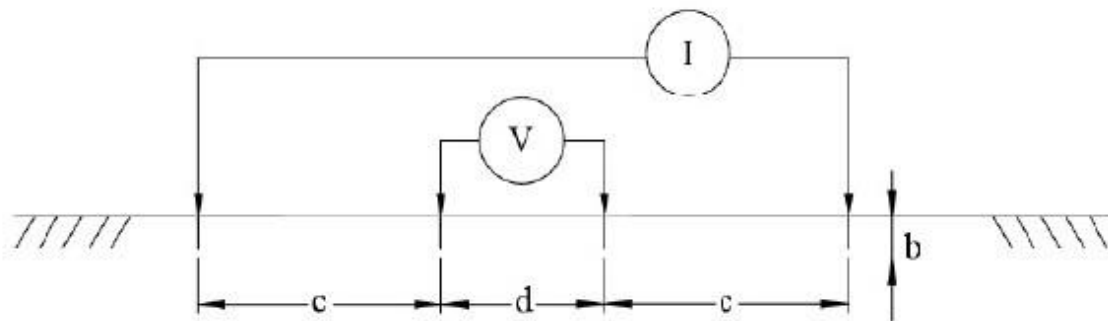


**Εικόνα 1.14:** Σχηματικό διάγραμμα γρήγορης μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τη διάταξη Wenner [2]

### Διάταξη Schlumberger

Το 1912, ο Schlumberger στη Γαλλία έθεσε σε εφαρμογή τη μέθοδο των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης για γεωλογικές εφαρμογές και συγκεκριμένα την ανίχνευση κοιτασμάτων. Εδώ και πολύ καιρό έχει αποδειχθεί ότι αυτή η μέθοδος είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για γεωλογικές έρευνες κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Όπως και με τις άλλες μεθόδους, μπορεί να εγχυθεί ρεύμα στη γη για να μετρηθεί η ειδική αντίσταση σε διαφορετικά βάθη κατά τη διάρκεια της επιτόπιας μέτρησης.

Με τη μέθοδο Schlumberger, σε αντίθεση με τη μέθοδο Wenner, τα εσωτερικά ηλεκτρόδια τοποθετούνται πιο κοντά μεταξύ τους και τα εξωτερικά ηλεκτρόδια τοποθετούνται μακρύτερα. Για επακόλουθες μετρήσεις με τη μέθοδο Schlumberger απαιτείται μόνο τα εξωτερικά ηλεκτρόδια να επανατοποθετηθούν. Συνεπώς, η μέθοδος Schlumberger είναι μια ταχύτερη επιλογή για δοκιμή σε διαφορετικά βάθη, μειώνοντας τον αριθμό των ηλεκτροδίων που θα επανατοποθετηθούν για κάθε δοκιμή.



**Εικόνα 1.15:** Μέθοδος τεσσάρων σημείων: Διάταξη Schlumberger [4]

Η εξίσωση που χρησιμοποιείτε σε αυτήν την περίπτωση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί σύμφωνα με τον Palmer. Εάν το βάθος της εγκατάστασης των ηλεκτροδίων  $b$  είναι μικρό σε σύγκριση με τον διαχωρισμό τους  $d$  και  $c$ , και  $c > 2 \cdot d$ , τότε η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

---

$$\rho = \frac{\pi c(c + d)R}{d} \quad (1.6)$$

Η ειδική αντίσταση που υπολογίζεται με την εξίσωση (1.6) είναι η φαινόμενη ειδική αντίσταση στο κατά προσέγγιση βάθος  $[2c + d] / 2$ , που είναι η απόσταση από το κέντρο της δοκιμής έως τα εξωτερικά ηλεκτρόδια ρεύματος (Εικόνα 1.15).

## **1.4 Μέθοδοι Μέτρησης της Ειδικής Αντίστασης στο Εργαστήριο**

### **1.4.1 Εισαγωγή**

Οι εργαστηριακές μέθοδοι καθορίζουν την πραγματική τιμή της ειδικής αντίστασης του υπό δοκιμή εδάφους (και όχι τη φαινόμενη όπως οι μέθοδοι πεδίου), είναι παρόμοιες με τις μεθόδους μέτρησης του πεδίου και μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορα δείγματα εδάφους. Και αυτές βασίζονται στη μέτρηση αντίστασης και τη μετατροπή με κατάλληλες εξισώσεις σε ειδική αντίσταση του εδάφους.

Η αρχή της δειγματοληπτικής ανάλυσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι η απόκτηση των ειδικών αντιστάσεων του εδάφους με ανάλυση των δειγμάτων εδάφους. Άρα είναι δυνατή η λήψη δειγμάτων εδάφους σε διαφορετικά βάθη για να προσδιοριστεί η ειδική αντίσταση του εδάφους σε διαφορετικά βάθη.

Οι πιο συνηθισμένες εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι [5]:

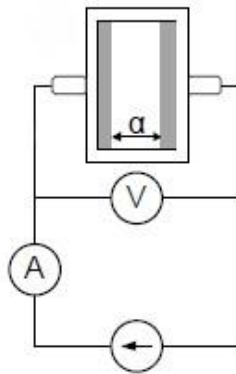
- Η μέθοδος δοχείου εδάφους με δύο ηλεκτρόδια
- Η μέθοδος δοχείου εδάφους με τέσσερα ηλεκτρόδια
- Η μέθοδος Wenner
- Η μέθοδος Schlumberger-Palmer.

Επιπλέον, παρά τη διαφορετική διάταξη των ηλεκτροδίων τους, όλες οι μέθοδοι βασίζονται στη μέτρηση της αντίστασης ενός δείγματος εδάφους το οποίο τοποθετείται σε ένα μονωτικό δοχείο. Το δοχείο αυτό ονομάζεται δοχείο εδάφους. Η ανάλυση των μεθόδων παρακάτω βασίζεται στην αναφορά [5].



#### 1.4.2 Η Μέθοδος Δοχείου Εδάφους με Δύο Ηλεκτρόδια

Το δοχείο εδάφους (Εικόνα 1.16) είναι κατασκευασμένο από κάποιο στιβαρό μονωτικό υλικό, όπως είναι για παράδειγμα το Plexiglas που είναι διαφανές και επιτρέπει τον έλεγχο για σωστή τοποθέτηση του δείγματος. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα, ορείχαλκο ή χαλκό. Η διατομή του δοχείου μπορεί να είναι ορθογωνική, τετραγωνική ή κυκλική. Επίσης, οι διαστάσεις του δοχείου εδάφους και των ηλεκτροδίων όπως και οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων πρέπει να επιλέγονται βάσει των προδιαγραφών του κυκλώματος τροφοδοσίας και των οργάνων μέτρησης τάσης και ρεύματος, δηλαδή με βάση το εύρος αντιστάσεων που μπορεί να μετρηθεί με την αναγκαία ακρίβεια. Τα ηλεκτρόδια είναι δύο μεταλλικές πλάκες τοποθετημένες σε δύο απέναντι πλευρές του δείγματος εδάφους (Εικόνα 1.16). Επίσης, αυτά τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την έγχυση του ρεύματος και για τη μέτρηση της αναπτυσσόμενης τάσης στο δείγμα. Για να είναι αντιπροσωπευτική η ειδική αντίσταση του εδάφους που μετριέται θα πρέπει οι διαστάσεις του δείγματος να είναι τουλάχιστον 3-5 φορές μεγαλύτερες από το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου και η ποσότητα του δείγματος να είναι αρκετά μικρή ώστε να είναι εύκολη η προετοιμασία του και να διασφαλιστεί η ομοιογένειά του.



Εικόνα 1.16: Πειραματική μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με δοχείο εδάφους [5]

Από τις τιμές του ρεύματος και της τάσης εύκολα μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση του δείγματος εδάφους,  $R$ , η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοχείου εδάφους και από το ίδιο το έδαφος. Η ειδική αντίσταση του εδάφους για τη μέθοδο δοχείου εδάφους με δύο ηλεκτρόδια μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση [6]:

$$\rho = R \frac{A}{\alpha} \quad (1.7)$$

---

Στη σχέση (1.7)  $A$  ( $m^2$ ) είναι η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής στη ροή του ρεύματος και  $a$  ( $m$ ) είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο λόγος  $A/a$  ονομάζεται συντελεστής δοχείου εδάφους. Επειδή, το δοχείο εδάφους έχει κατασκευαστικές ατέλειες ή/και παραμορφώσεις και έτσι ο απλός γεωμετρικός υπολογισμός του λόγου  $A/a$  να οδηγήσει σε σφάλματα στα αποτελέσματα των μετρήσεων, θα πρέπει να προσδιοριστεί η τιμή του πειραματικά χρησιμοποιώντας κάποιο υλικό γνωστής ειδικής αντίστασης, όπως για παράδειγμα κάποιον πρότυπο ηλεκτρολύτη.

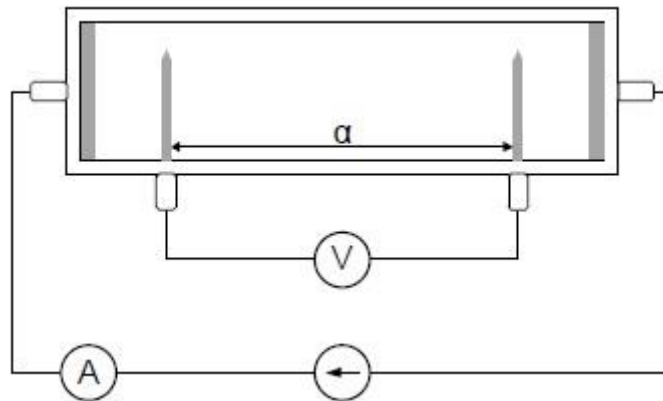
Η αντίσταση που μετριέται μέσω της μεθόδου δύο ηλεκτροδίων (Εικόνα 1.16) περιλαμβάνει την αντίσταση επαφής μεταξύ του δείγματος εδάφους και των ηλεκτροδίων. Η αντίσταση επαφής είναι συνδεδεμένη σε σειρά με την αντίσταση του δείγματος οπότε εισάγει σφάλμα στην ειδική αντίσταση. Επίσης, ένα ακόμη σφάλμα στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων να εισάγεται επειδή οι φορείς του ρεύματος στο έδαφος είναι ιόντα (όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα) ενώ στα μεταλλικά ηλεκτρόδια είναι ηλεκτρόνια, η διεπαφή ηλεκτροδίων-δείγματος εδάφους πολώνεται. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως πόλωση ηλεκτροδίων (συγκέντρωση φορέων διαφορετικού είδους στις διεπαφές). Η πόλωση των ηλεκτροδίων εισάγει μια επιπλέον αντίσταση σε σειρά με την αντίσταση του δείγματος. Άρα, γενικά λόγω των παραπάνω η ειδική αντίσταση του εδάφους που μετριέται με τη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων είναι μεγαλύτερη από την πραγματική. Όμως, αυτό εξαρτάται και από τις ιδιότητες του κάθε δείγματος εδάφους. Σε κάποια δείγματα ενδέχεται να είναι σημαντική η επιπλέον πλασματική αντίσταση και σε κάποια άλλα ασήμαντη.

Στις εργαστηριακές μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους εισάγονται επίσης σφάλματα από το ρεύμα που ρέει στην επιφάνεια των δειγμάτων τα οποία είναι σημαντικά σε εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης. Αυτά τα σφάλματα στη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων μπορούν να εξαλειφθούν με ένα ηλεκτρόδιο θωράκισης το οποίο οδηγεί το επιφανειακό ρεύμα στη γη του κυκλώματος τροφοδοσίας (ή οργάνου μέτρησης). Με αυτό τον τρόπο μετριέται μόνο το ρεύμα που ρέει διαμέσου του δείγματος. Το ηλεκτρόδιο θωράκισης μπορεί να σχεδιαστεί βάσει του διεθνούς προτύπου ASTM D257 [7], το οποίο αφορά γενικά μετρήσεις σε μονωτικά υλικά.

Για εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης λόγω των πολύ μικρών ρευμάτων που διαρρέουν το δείγμα χρησιμοποιείται η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια μεγάλης επιφάνειας σε σχέση με τη μεταξύ τους απόσταση ώστε να μειωθεί η αντίσταση του δείγματος και να αυξηθεί το ρεύμα. Έτσι το ρεύμα θα μετρηθεί πιο εύκολα και με ακρίβεια. Επίσης, τα σφάλματα που εισάγονται εξαιτίας της πόλωσης των ηλεκτροδίων δεν είναι σημαντικά για τα εδάφη αυτά γιατί περιέχουν λιγότερα ιόντα, άρα η πόλωση δεν είναι έντονη.

### 1.4.3 Η Μέθοδος Δοχείου Εδάφους με Τέσσερα Ηλεκτρόδια

Το δοχείο εδάφους τεσσάρων ηλεκτροδίων (Εικόνα 1.17) έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με των δύο ηλεκτροδίων που αναλύθηκε προηγουμένως, το ίδιο και τα ηλεκτρόδια του. Η διαφορά είναι ότι οι πλάκες χρησιμοποιούνται μόνο για την έγχυση του ρεύματος. Με δύο ακίδες ή δύο ηλεκτρόδια με τη μορφή πλέγματος μετριέται η τάση που αναπτύσσεται σε ένα τμήμα του δείγματος από το ρεύμα που το διαρρέει.



Εικόνα 1.17: Πειραματική μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων με δοχείο εδάφους [5]

Αυτά τα ηλεκτρόδια μέτρησης της τάσης θα πρέπει να είναι τοποθετημένα κάθετα στη διεύθυνση ροής του ρεύματος. Συνεπώς, από τις τιμές του ρεύματος και της τάσης μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση του δείγματος εδάφους,  $R$ , η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοχείου εδάφους και από το ίδιο το έδαφος. Όπως αναφέρθηκε και με τη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων η ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να υπολογιστεί και πάλι με τη σχέση (1.7).

Στη σχέση (1.7) όπως και με τη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων  $A$  ( $\text{m}^2$ ) είναι η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής στη διεύθυνση ροής του ρεύματος ενώ  $\alpha$  (m) είναι η απόσταση μεταξύ των εσωτερικών πλευρών των ηλεκτροδίων μέτρησης τάσης. Για να αποφευχθεί η επίδραση φαινομένων πόλωσης ηλεκτροδίων στα πειραματικά αποτελέσματα η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και τάσης θα πρέπει να είναι σίγουρα μεγαλύτερη από 1 cm. Οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων τάσης, όπως το μήκος και η διάμετρος των ακίδων ή διαστάσεις των ανοιγμάτων του πλέγματος δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Στη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων (Εικόνα 1.17) επειδή η τάση μετριέται διαμέσου των ηλεκτροδίων τάσης με όργανο μεγάλης αντίστασης εισόδου δεν επηρεάζεται από την αντίσταση επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και του δείγματος εδάφους. Επίσης, δεν

---

επηρεάζεται από την πόλωση των ηλεκτροδίων, μόνο όταν το όργανο μέτρησης τάσης έχει ικανοποιητικά μεγάλη αντίσταση εισόδου έτσι ώστε να μην υπάρχει σημαντική ροή ρεύματος μεταξύ του δείγματος και των ηλεκτροδίων τάσης. Άρα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων μπορεί να προσδιοριστεί η πραγματική τιμή της ειδικής αντίστασης για όλα σχεδόν τα είδη εδάφους σε αντίθεση με τη μέθοδο των δύο ηλεκτροδίων, η οποία εισάγει σφάλματα.

Για την επίδραση των επιφανειακών ρευμάτων στη μέθοδο δοχείου εδάφους τεσσάρων ηλεκτροδίων, μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας μεταλλικούς δακτυλίους θωράκισης, αν αυτό είναι κάπως περίπλοκο. Αυτοί οι μεταλλικοί δακτύλιοι θα πρέπει να τοποθετούνται ανάμεσα ή πριν τα ηλεκτρόδια μέτρησης τάσης. Επίσης, οι δακτύλιοι θωράκισης πρέπει να τροφοδοτούνται με τάση ώστε να έχουν το ίδιο δυναμικό με τα ηλεκτρόδια αυτά. Επιπλέον, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων για εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης λόγω των πολύ μικρών ρευμάτων που διαρρέουν το δείγμα. Τα ρεύματα αυτά είναι δύσκολο να μετρηθούν. Το ίδιο και οι τάσεις στα ηλεκτρόδια τάσης. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης για τα εδάφη αυτά.

#### ***1.4.4 Η Μέθοδος Wenner και Schlumberger-Palmer***

Για τις μεθόδους Wenner και Schlumberger-Palmer καθώς χρησιμοποιούν τέσσερα ηλεκτρόδια ισχύουν τα ίδια με τη προηγούμενη μέθοδο με τη διαφορά ότι είναι τοποθετημένα σε μια ευθεία γραμμή στην επιφάνεια του δείγματος [8] και όχι στα πλάγια όπως οι πλάκες στις μεθόδους δύο και τεσσάρων ηλεκτροδίων. Η μεθοδολογία στο εργαστήριο είναι ίδια με αυτή του μη διαταραγμένου εδάφους στο πεδίο αλλά σε μικρότερη κλίμακα χωρικά. Παρ' όλα αυτά, στις μεθόδους αυτές απαιτείται σχετικά μεγάλων διαστάσεων δείγμα εδάφους για να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από την ύπαρξη μονωτικού δοχείου λόγω της συνεισφοράς του δοχείου ως επιπλέον μονωτικής στρώσης πολύ μεγάλης ειδικής αντίστασης κάτω από το δείγμα εδάφους.

Σφάλματα στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης εισάγονται αν το μέγεθος του δείγματος δεν είναι επαρκές σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των τεσσάρων ηλεκτροδίων και το βάθος τοποθέτησής τους. Έτσι, η προετοιμασία του δείγματος για τις μεθόδους αυτές είναι αρκετά δυσκολότερη σε σύγκριση με τη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων λόγω του μεγαλύτερου όγκου εδάφους που απαιτείται.

---

Οι μέθοδοι μέτρησης Wenner και Schlumberger παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Η σχεδίαση μίας κατάλληλης διάταξης μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους στο εργαστήριο σε αντιπροσωπευτικά δείγματα με τη μέθοδο Wenner αποτελεί το θέμα της πτυχιακής εργασίας. Η σχεδίαση της διάταξης παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. Κατόπιν ακολουθεί αναλυτικά η κατασκευή της και κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις και σύγκρισή τους με άλλες διατάξεις (με διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων που υπήρχε ήδη).

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

---

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ WENNER**

### ***2.1 Προδιαγραφές***

#### ***2.1.1 Εισαγωγή***

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό που είναι επιθυμητό είναι να αναπαρασταθεί σε μικρή κλίμακα, τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο Wenner για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Ωστε, να μπορούν να γίνουν διερευνήσεις των παραγόντων επίδρασης στην ειδική αντίσταση του εδάφους (ερευνητικοί σκοποί) αλλά και να μπορούν εκπαιδευόμενοι να εξοικειωθούν με τη μέθοδο Wenner πριν την εκτέλεση μετρήσεων στο πεδίο. Δηλαδή, σε συμπαγές μη διαταραγμένο έδαφος που έχουν μεγαλύτερη δυσκολία.

Ο σχεδιασμός της διάταξης και ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης των δειγμάτων του εδάφους στο εργαστήριο, είναι πανομοιότυπος με τη μέτρηση στο πεδίο. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια σε ευθεία γραμμή και ίσες αποστάσεις. Από τα εξωτερικά ηλεκτρόδια εγχέεται ρεύμα δοκιμής και η τάση μετρίεται μεταξύ των δύο εσωτερικών ηλεκτροδίων. Συνεπώς, για τη φαινόμενη ειδική αντίσταση  $\rho$  ισχύουν οι ίδιοι τύποι με αυτούς του πεδίου. Τέλος, για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης του υπό δοκιμή εδάφους θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω.

#### ***2.1.2 Περιορισμοί***

Το δείγμα εδάφους θα πρέπει να τοποθετείται σε ένα μονωτικό δοχείο, το οποίο να είναι κατασκευασμένο από κάποιο άκαμπτο μονωτικό υλικό (στιβαρό) με επαρκή μηχανική αντοχή, όπως είναι το Plexiglas ή και άλλο. Οι διαστάσεις του δοχείου πρέπει να επιλέγονται βάσει των προδιαγραφών του κυκλώματος τροφοδοσίας και των οργάνων μέτρησης, δηλαδή με βάση το

---

εύρος αντιστάσεων που μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια. Επίσης καλό είναι η ειδική αντίσταση να διαβάζεται απευθείας χωρίς περαιτέρω υπολογισμό, δηλαδή με χρήση κάποιου οργάνου κατάλληλου για μετρήσεις σε γειώσεις. Η διατομή του δοχείου μπορεί να είναι τετραγωνική, ορθογωνική ή κυκλική (αν και η τελευταία δεν είναι πολύ πρακτική από άποψη στήριξης. Αυτό το μονωτικό δοχείο ονομάζεται δοχείο εδάφους. Τέλος, το δοχείο εδάφους θα πρέπει να καθαρίζεται εύκολα ώστε να αποφεύγεται η επιμόλυνση του δείγματος εδάφους που μετριέται από προηγούμενα δείγματα.

Τα ηλεκτρόδια θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από χαλκό, ορείχαλκο, μαλακό χάλυβα ή ανοξείδωτο χάλυβα. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων όπως και οι διαστάσεις και εδώ θα πρέπει να επιλέγονται βάσει των προδιαγραφών των οργάνων (δυνατοτήτων μέτρησης αντίστασης με ακρίβεια). Σημαντικό είναι, για να αποφευχθεί η επίδραση φαινομένων πόλωσης ηλεκτροδίων στα αποτελέσματα θα πρέπει, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων τάσης και ρεύματος να είναι μεγαλύτερη από 1 cm. Σε μερικές περιπτώσεις πριν από την εισαγωγή των ηλεκτροδίων, τα κάτω άκρα θα πρέπει να υγραίνονται ώστε να παρέχεται καλή επαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων και του εδάφους. Αυτό, δεν επηρεάζει σε καμία περίπτωση τη μέτρηση καθώς χρησιμοποιείται μόνο μια ελάχιστη ποσότητα νερού.

Για να διασφαλιστεί ότι γίνεται επαφή χαμηλής αντίστασης στα ηλεκτρόδια και στο όργανο μέτρησης, το καλώδιο καλό είναι να είναι χαλκού και οι ακροδέκτες καλής ποιότητας. Το δείγμα εδάφους θα πρέπει να είναι σχετικά μεγάλων διαστάσεων ώστε οι μετρήσεις να μην επηρεάζονται από το μονωτικό δοχείο. Ο χειρισμός μονωτικών επιφανειών θα πρέπει να γίνεται φορώντας γάντια αν το δείγμα αναμένεται να έχει μεγάλη ειδική αντίσταση. Επίσης, οι επιφάνειες του δοχείου θα πρέπει να καθαρίζονται πριν από κάθε προετοιμασία και να ξεπλένονται με απιονισμένο νερό.

Σε γενικές γραμμές ο χρόνος ηλεκτροδότησης για κάθε μέτρηση είναι το 1 λεπτό. Αυτό ορίζεται διότι η αντίσταση που μετριέται αυξάνεται ή μειώνεται με τον χρόνο λόγω διάφορων διηλεκτρικών φαινομένων. Έτσι ορίζεται μία τιμή χρόνου για να είναι συγκρίσιμες οι μετρήσεις. Επιπλέον, το δείγμα δοκιμής θα πρέπει να εκφορτίζεται πλήρως πριν από κάθε μέτρηση. Ο χρόνος εκφόρτισης πρέπει να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές μεγαλύτερος από τον χρόνο φόρτισης. Επίσης, για να αποφευχθεί η συσσώρευση φορτίου από το περιβάλλον μέχρι να γίνει η μέτρηση, τα ηλεκτρόδια πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους, αν και αυτό συνήθως δεν είναι τόσο σημαντικό στις περισσότερες περιπτώσεις. Τέλος, η θερμοκρασία του εργαστηρίου θα πρέπει να είναι σταθερή, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε διακύμανση της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης λόγω των επιδράσεων της θερμοκρασίας.



---

Η ποσότητα του δείγματος για να είναι εύκολη η προετοιμασία του και να διασφαλιστεί η ομοιογένειά του, πρέπει να είναι αρκετά μικρή. Επιπλέον, για να είναι αντιπροσωπευτική η ειδική αντίσταση του εδάφους που μετριέται θα πρέπει οι διαστάσεις του δείγματος να είναι τουλάχιστον 3-5 φορές μεγαλύτερες από το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου. Αυτό αναφέρεται και στο δείγμα που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων της μεθόδου Wenner. Σημαντικό είναι το μέγεθος του δείγματος να είναι επαρκές σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των τεσσάρων ηλεκτροδίων και το βάθος τοποθέτησής του ώστε να μην εισάγονται σφάλματα στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης εξ αιτίας του μονωτικού δοχείου εδάφους.

Όσον αφορά την επιφάνεια του δείγματος, η αντίσταση της επιφάνειας δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια, μόνο κατά προσέγγιση. Ένας λόγος είναι, επειδή σε κάποιο βαθμό εμπλέκεται πάντα στη μέτρηση η αντίσταση του όγκου. Ένας άλλος λόγος είναι, η επιμόλυνση της με υγρασία και ουσίες από το περιβάλλον και ο ρυθμός συσσώρευσης, όπως της ηλεκτροστατικής φόρτισης, της επιφανειακής τάσης και από το ρεύμα που ρέει στην επιφάνεια των δειγμάτων. Οπότε, στις εργαστηριακές μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους εισάγονται σφάλματα, τα οποία είναι σημαντικά σε εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης. Τέλος, σε εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης πρέπει να τονιστεί ότι σε γενικές γραμμές είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί και η μέθοδος Wenner λόγω των πολύ μικρών ρευμάτων που διαρρέουν το δείγμα. Αυτά δεν είναι εύκολο να μετρηθούν με κοινά όργανα.

Στην επόμενη ενότητα θα αναλυθεί η μέθοδος μέτρησης και τα πιθανά όργανα που απαιτούνται.

## ***2.2 Μέθοδος μέτρησης – Όργανα***

Για τη μέθοδο Wenner η ακριβής μέτρηση της απόστασης  $a$  μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μεγάλης σημασίας για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Το ίδιο ισχύει και για το βάθος εγκατάστασης των ηλεκτροδίων στο δείγμα. Επίσης πρέπει να εισέρχονται τελείως κάθετα αν αυτό είναι δυνατό.

Σε κάθε δείγμα καλό θα είναι να γίνονται δύο μετρήσεις με αντιστροφή της πολικότητας εάν η πηγή τροφοδοσίας είναι DC και να υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Επίσης, για να αποφευχθούν φαινόμενα πόλωσης των ηλεκτροδίων, ηλεκτρόλυσης και μετακίνησης της υγρασίας καλό είναι, οι μετρήσεις να γίνονται κατευθείαν μετά την τροφοδότηση ή σε συγκεκριμένο μικρό χρόνο όπως το 1 min που αναφέρθηκε παραπάνω.

---

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για μετρήσεις ειδικής αντίστασης αποτελείται από μια πηγή ρεύματος, ένα βολτόμετρο, ένα αμπερόμετρο ή ένα όργανο άμεσης μέτρησης αντίστασης που να έχει τέσσερις ακροδέκτες. Στα πειράματα θα πρέπει να ελέγχετε περιοδικά η ακρίβεια των οργάνων. Τα σφάλματά τους δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 5% στο εύρος μέτρησης των οργάνων, αν και στο εργαστήριο είναι εφικτά και πολύ μικρότερα σφάλματα. Οπότε, είναι σημαντικό να σημειωθεί η τελευταία ημερομηνία διακρίβωσης του οργάνου με την κάθε μέτρηση.

Αναλυτικά, καλό είναι να προτιμάται μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς η χρήση συνεχούς ρεύματος θα προκαλέσει πόλωση των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα σφάλμα. Για να αποφευχθούν τα φαινόμενα πόλωσης, το βολτόμετρο δεν θα πρέπει να αντλεί αισθητό ρεύμα από το κύκλωμα. Συνεπώς, πρέπει η σύνθετη αντίσταση εισόδου του βολτομέτρου να είναι τουλάχιστον 10 MΩ, μεγαλύτερες τιμές είναι επιθυμητές. Όσο για το αμπερόμετρο δεν χρειάζονται κάποιες άλλες ιδιαίτερες προϋποθέσεις. Τέλος, για την εύρεση της ειδικής αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ένα όργανο άμεσης μέτρησης αντίστασης (π.χ. όργανο μετρήσεων σε συστήματα γείωσης) αντί για μια πηγή ρεύματος, βολτόμετρο και αμπερόμετρο. Τα όργανα αυτά υποδεικνύουν την αντίσταση ή την ειδική αντίσταση απευθείας, με προσδιορισμό της αναλογίας τάσης και ρεύματος, δηλαδή μπορεί να μην απαιτούνται πράξεις για την επεξεργασία των μετρήσεων. Επίσης, είναι φορητά, αυτόνομα και περιλαμβάνουν τέσσερις ακροδέκτες και τροφοδοτικό. Η ακρίβεια εξαρτάται από τον τύπο του οργάνου και το εύρος των αντιστάσεων που καλύπτουν. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό αυτών των οργάνων είναι ότι προσφέρουν απλότητα και ευκολία.

Η τελική σχεδίαση της πειραματικής διάταξης θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

### **2.3 Σχεδίαση Διάταξης**

Η διάταξη που θα κατασκευαστεί θα αποτελείται από ένα δοχείο εδάφους, τέσσερα ηλεκτρόδια, οδηγό για τοποθέτηση των ηλεκτροδίων με ακρίβεια και κάθετα στις διάφορες επιθυμητές αποστάσεις, τέσσερα καλώδια με ακροδέκτες κροκοδειλάκια για τη σύνδεση των οργάνων με τα ηλεκτρόδια μέτρησης και ένα όργανο μέτρησης αντίστασης γείωσης και ειδικής αντίστασης του εδάφους. Βέβαια οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν και απλώς με ένα DC ή AC τροφοδοτικό σε συνδυασμό με δύο πολύμετρα. Τέλος, για αναφορά θα χρησιμοποιηθεί ένα δοχείο από

---

Plexiglas το οποίο έχει εξακριβωθεί ότι μετράει σωστά με τη χρήση ηλεκτρολυτικών διαλυμάτων [5].

Το δοχείο θα είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο (ή θα προσεγγίζει αυτό) με ελεύθερη την επάνω επιφάνεια. Τα ηλεκτρόδια θα είναι ράβδοι. Η κατάληξή τους μπορεί να είναι αποκεκομμένη, ημισφαιρική ή και σε μορφή αιχμής.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθεί το κάθε υλικό ξεχωριστά καθώς και θα περιγραφεί η τελική κατασκευή. Καθώς η διάταξη θα χρησιμοποιηθεί και για ερευνητικούς σκοπούς επιλέχθηκαν διάφορα δοχεία εδάφους με διαφορετικό μέγεθος και από διαφορετικά υλικά. Το ίδιο έγινε και με τα ηλεκτρόδια μέτρησης. Έτσι δίνεται η δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης του δοχείου και των ηλεκτροδίων στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

---

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ WENNER**

## ***3.1 Εισαγωγή***

Η διάταξη μέτρησης της ειδικής αντίστασης δειγμάτων εδάφους με τη μέθοδο Wenner θα χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς. Έτσι επιλέχθηκαν διάφορα δοχεία εδάφους με διαφορετικό μέγεθος και από διαφορετικά υλικά. Το ίδιο έγινε και με τα ηλεκτρόδια μέτρησης. Έτσι δίνεται η δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης του δοχείου και των ηλεκτροδίων στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Παρακάτω θα αναλυθούν τα υλικά και θα γίνει η περιγραφή της κατασκευής.

## ***3.2 Υλικά***

### ***3.2.1 Δοχείο Εδάφους***

Για δοχείο εδάφους θα χρησιμοποιηθούν τέσσερα διαφορετικά δοχεία διαφορετικών διαστάσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Βασική τους εφαρμογή είναι είτε αποθήκευση τροφίμων ή αντικειμένων. Όλα τα δοχεία είναι μονωτικά και άκαμπτα όπως προϋποθέτουν οι προδιαγραφές. Αναλυτικά:

- Το μαύρο δοχείο έχει διαστάσεις 28 cm μήκος, 18,5 cm πλάτος, 13,5 cm ύψος
- Το γκρι δοχείο έχει διαστάσεις 35,5 cm μήκος, 25,5 cm πλάτος, 13,5 cm ύψος
- Το διαφανές δοχείο έχει διαστάσεις 35 cm μήκος, 25 cm πλάτος, 12 cm ύψος
- Το διαφανές δοχείο με σχέδιο έχει διαστάσεις 40 cm μήκος, 34 cm πλάτος, 17 cm ύψος



**Εικόνα 3.1:** Δοχεία εδάφους που επιλέχθηκαν

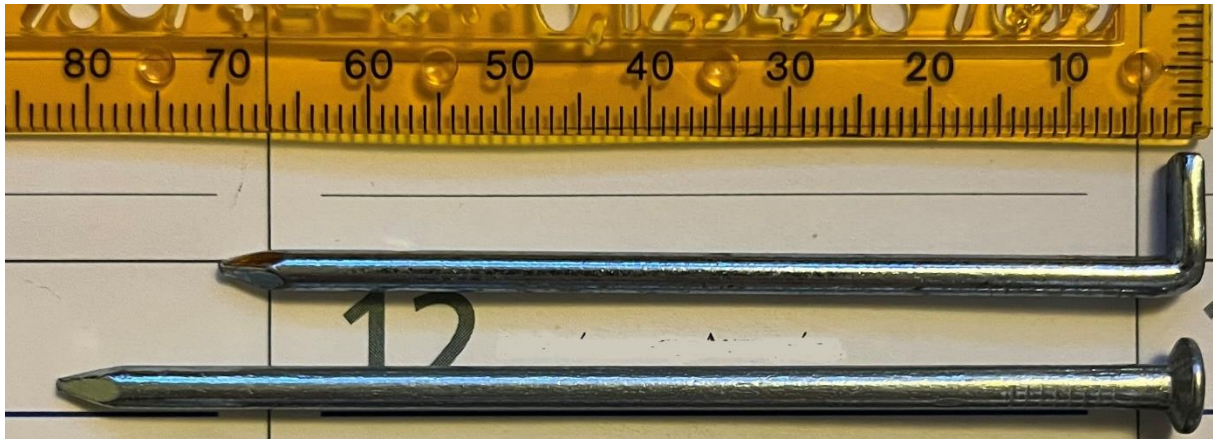
### **3.2.2 Ηλεκτρόδια**

Για τα ηλεκτρόδια προμηθεύτηκαν δέκα διαφορετικά είδη. Τα οποία είναι διαφορετικών διαστάσεων και διαφορετικής κατασκευής:

- Δύο γαλβανιζέ ηλεκτρόδια, ένα με 70 mm μήκος και 3 mm διάμετρο με κεφαλή γωνία και ένα με 80 mm μήκος και 3,1 mm διάμετρο με στρόγγυλη κεφαλή (Εικόνα 3.2 και Εικόνα 3.3).



**Εικόνα 3.2:** Γαλβανιζέ καρφιά για ηλεκτρόδια στη συσκευασία τους

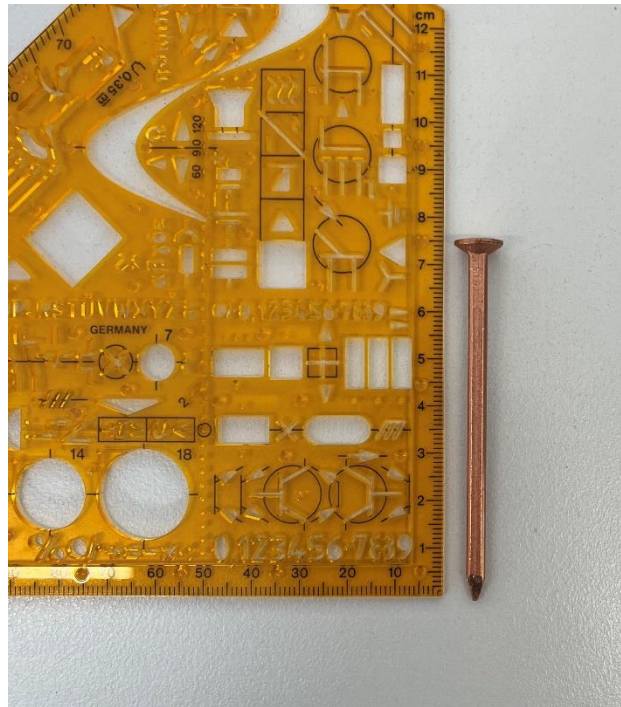


**Εικόνα 3.3: Καρφί με κεφαλή γωνία και καρφί με κεφαλή στρόγγυλη**

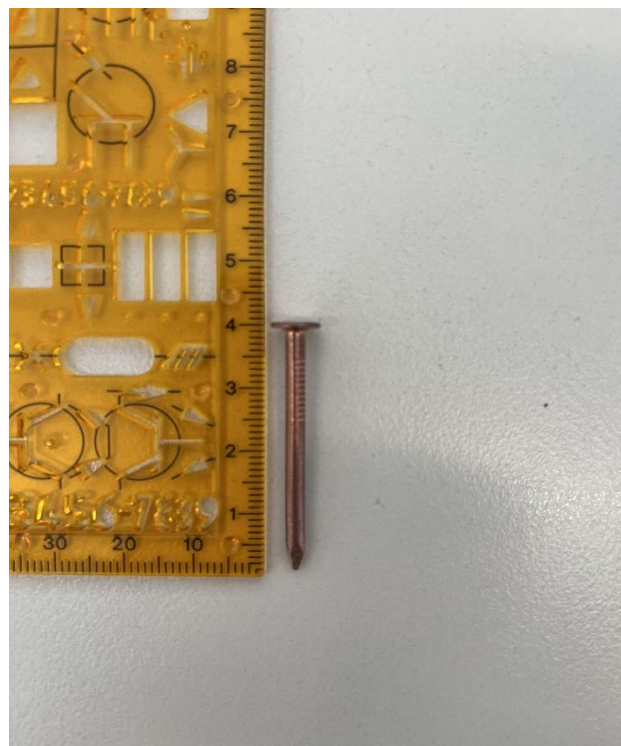
- Τρία χάλκινα ηλεκτρόδια, ένα με 200 mm μήκος και 8 mm διάμετρο (Εικόνα 3.4), ένα με 70 mm μήκος και 4 mm διάμετρο (Εικόνα 3.5) και ένα με 40 mm μήκος και 2,8 mm διάμετρο (Εικόνα 3.6).



**Εικόνα 3.4: Χάλκινη ράβδος**



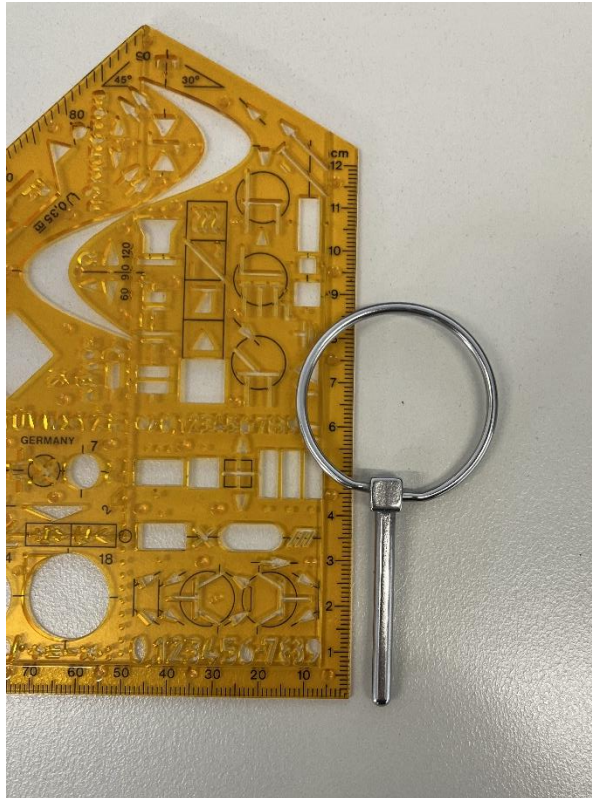
**Εικόνα 3.5: Χάλκινο καρφί με τετράγωνη διατομή**



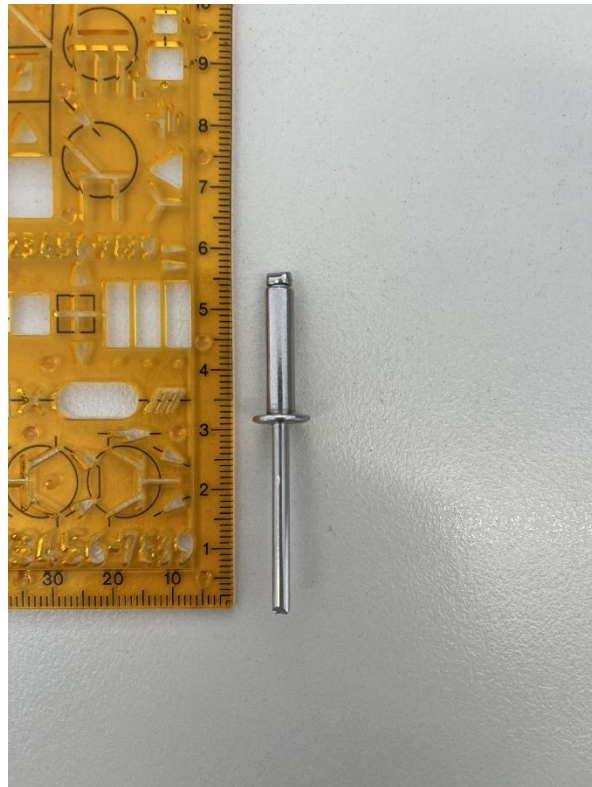
**Εικόνα 3.6: Χάλκινο καρφί με κυκλική διατομή**

- Πέντε ανοξείδωτα ηλεκτρόδια, ένα με 42 mm μήκος και 4,2 mm διάμετρο με κρίκο για κεφαλή (Εικόνα 3.7) και τέσσερα διαφορετικά πριτσίνια με διάφορες διαστάσεις, αναφορικά ένα από αυτά φαίνεται στην Εικόνα 3.8.





**Εικόνα 3.7: Ανοξείδωτο με κρίκο στη κεφαλή**



**Εικόνα 3.8: Ανοξείδωτο πριτσίνι**

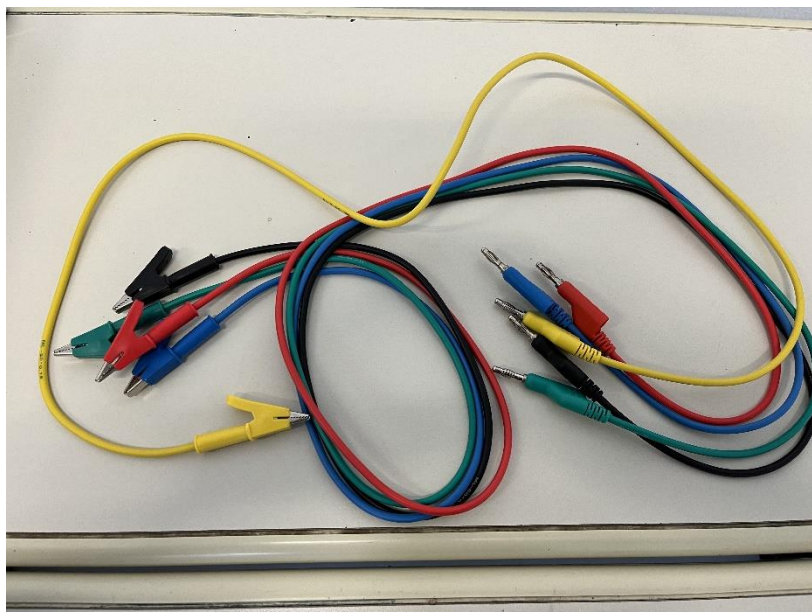
---

### 3.2.3 Καλώδια

Για καλώδια μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη, ένα για τη μέτρηση του δοχείου αναφοράς (Εικόνα 3.9) και ένα για τη μέτρηση στα υπόλοιπα δοχεία (Εικόνα 3.10). Τα καλώδια δεν αναμένεται να επηρεάζουν τις μετρήσεις εφόσον οι συνδέσεις γίνουν στιβαρά χωρίς να εισάγονται αντιστάσεις.



Εικόνα 3.9: Καλώδια μέτρησης για δοχείο αναφοράς



Εικόνα 3.10: Καλώδια μέτρησης για δοχεία κατασκευής

---

### 3.2.4 Οδηγοί Ηλεκτροδίων

Για οδηγούς ηλεκτροδίων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές κατασκευές. Αρχικά οδηγοί κατασκευάστηκαν από ηλεκτρολογικό κανάλι διανομής (Εικόνα 3.11, ένας για κάθε δοχείο της Εικόνας 3.1). Στη συνέχεια για τη διασφάλιση καλύτερης στήριξης των ηλεκτροδίων κατασκευάστηκαν οδηγοί από Plexiglas (Εικόνα 3.12).



**Εικόνα 3.11:** Ηλεκτρολογικό κανάλι κομμένο σε τέσσερα κομμάτια (ένα για κάθε δοχείο της Εικόνας 3.1)



**Εικόνα 3.12:** Plexiglas σε ράβδο για οδηγό

---

Παρακάτω θα ακολουθήσει η περιγραφή της κατασκευής και η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

### **3.3 Περιγραφή κατασκευής**

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων των ηλεκτροδίων για την κατασκευή αυτής της εργασίας, θα χρειαστούν κάποιοι οδηγοί για την στήριξη των ηλεκτροδίων. Χωρίς τους οδηγούς δεν είναι εφικτό να παραμείνουν τα ηλεκτρόδια κατακόρυφα μέσα στο δείγμα εδάφους εξ αιτίας των δυνάμεων που τους ασκούν στα καλώδια που τα συνδέουν με τα όργανα μέτρησης. Στο πεδίο αυτό δεν είναι πρόβλημα γιατί το έδαφος είναι πιο συμπαγές και τα ηλεκτρόδια εγκαθίστανται σε μεγαλύτερα βάθη αναλογικά. Για να γίνει αυτό στο εργαστήριο θα απαιτούνταν πολύ μεγάλο δείγμα εδάφους σε διαστάσεις ώστε το βάθος  $b$  να είναι σχετικά μικρό σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων  $a$ .

Οι οδηγοί που κατασκευάστηκαν είναι δύο ειδών, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω. Ο πρώτος οδηγός, δηλαδή το ηλεκτρολογικό κανάλι, κόπηκε με τροχό ώστε να προσαρμόζεται σε κάθε δοχείο και να είναι σταθερό, για να μην υπάρχει μετακίνηση των ηλεκτροδίων κατά την μέτρηση από τη δύναμη που ασκούν τα καλώδια σύνδεσης (Εικόνα 3.13). Έπειτα δημιουργήθηκαν τρύπες σε δύο σειρές με τρυπάνι 3 mm και 7 mm αντίστοιχα, με 1 cm απόσταση κάθε οπή στην επόμενη (Εικόνα 3.14 και Εικόνα 3.15).



**Εικόνα 3.13:** Τα τέσσερα δοχεία εδάφους μαζί με τους οδηγούς της πρώτης κατηγορίας



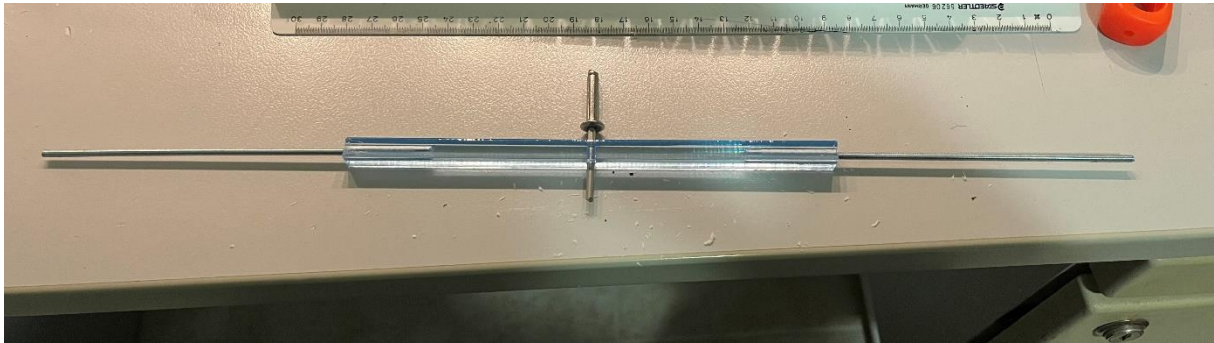
**Εικόνα 3.14:** Ο οδηγός με τις σπές ανά 1cm



**Εικόνα 3.15:** Ο οδηγός στην τελική του μορφή

Ο δεύτερος οδηγός κατασκευάστηκε από Plexiglas για μεγαλύτερη σταθερότητα των ηλεκτροδίων και είναι μια ράβδος για κάθε ηλεκτρόδιο ξεχωριστά με μια τρύπα στη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Επίσης, από τα πλάγια έχει δύο σπές 3 mm ώστε να εισέρχεται ντίζα για να προσαρμόζεται ο ίδιος οδηγός σε όλα τα δοχεία εδάφους. Ένας οδηγός μαζί με ένα ενδεικτικό

ηλεκτρόδιο και τα στηρίγματα του φαίνεται στην Εικόνα 3.16. Αυτός τοποθετείται εγκάρσια στο δοχείο, δηλαδή στην αντίθετη διεύθυνση σε σχέση με τους οδηγούς της πρώτης κατηγορίας

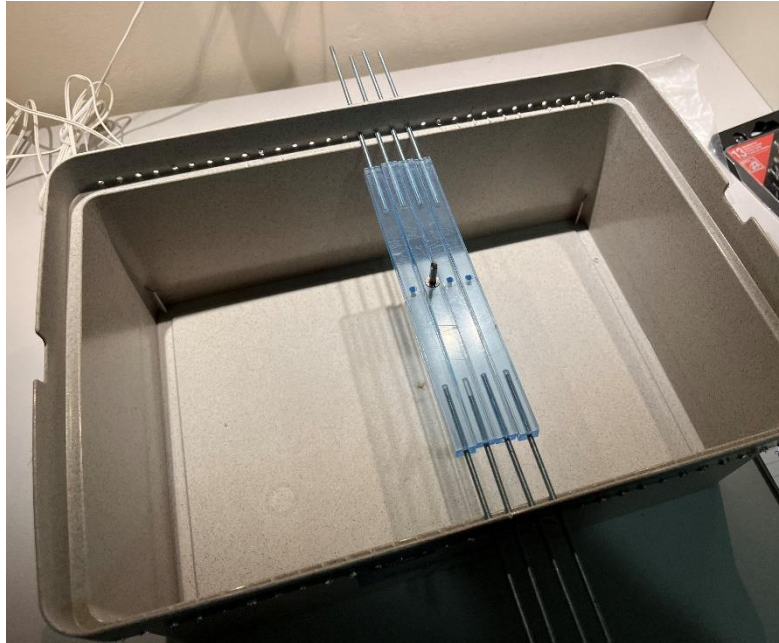


**Εικόνα 3.16: Ο δεύτερος οδηγός στην τελική μορφή**

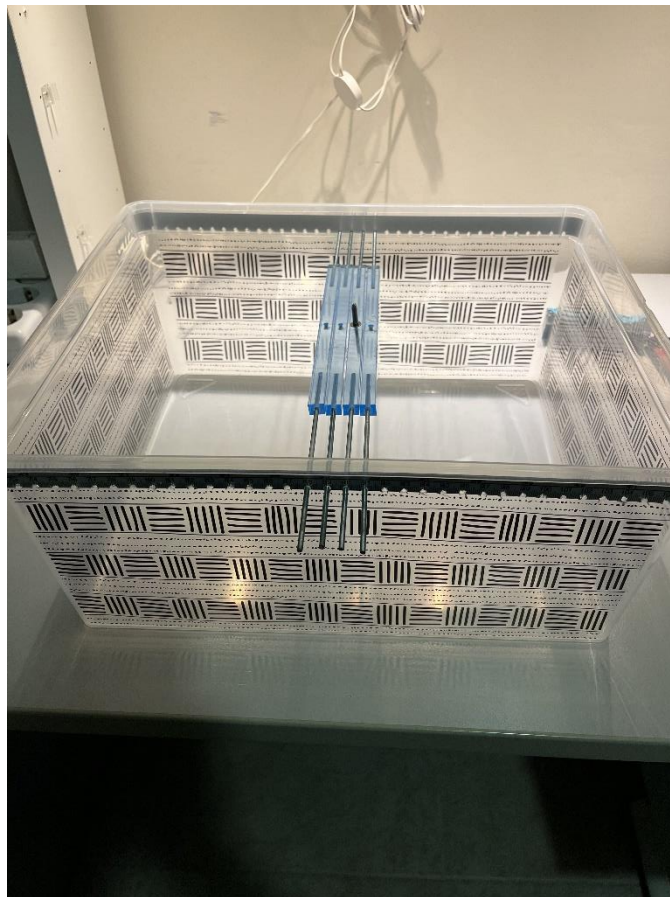
Τέλος, για να στηρίζονται οι οδηγοί της δεύτερης κατηγορίας στα δοχεία εδάφους, σε κάθε δοχείο δημιουργήθηκαν τρύπες σε απόσταση 1 cm με τρυπάνι 3 mm. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στις Εικόνες 3.17, 3.18 και 3.19.



**Εικόνα 3.17: Το μαύρο δοχείο μαζί με οδηγό της δεύτερης κατηγορίας**



**Εικόνα 3.18:** Το γκρι δοχείο μαζί με τέσσερις οδηγούς της δεύτερης κατηγορίας



**Εικόνα 3.19:** Το διαφανές δοχείο με σχέδια μαζί με τέσσερις οδηγούς της δεύτερης κατηγορίας

---

Σημειώνεται ότι στην πρώτη κατηγορία οδηγών, ο οδηγός μένει σταθερός και μετακινούνται τα ηλεκτρόδια από θέση σε θέση για την αλλαγή της απόστασης  $a$ . Στη δεύτερη κατηγορία μετακινούνται οι οδηγοί από θέση σε θέση μαζί τα ηλεκτρόδια.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα περιγραφεί η πειραματική διάταξη και διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

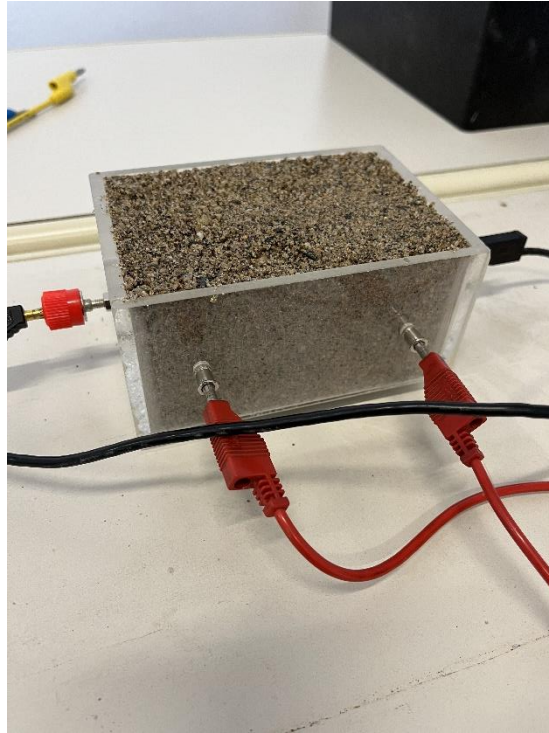


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

### *4.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης, Πηγή Τάσης και Συστήματος Μέτρησης*

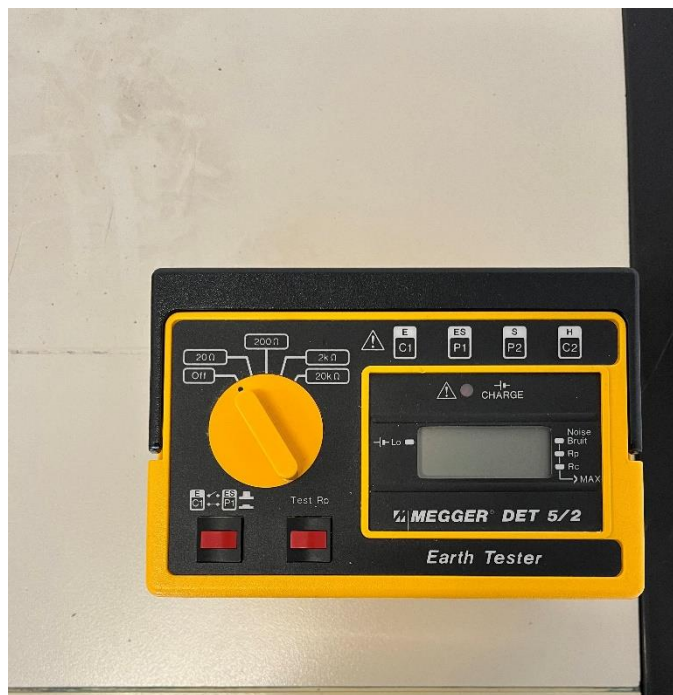
Στην πειραματική διερεύνηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που πραγματοποιήθηκε για να ελεγχθεί η ορθότητα της κατασκευής και η πρακτικότητα των διατάξεων που κατασκευάστηκαν, χρησιμοποιήθηκε τυχαίο δείγμα αμμώδους εδάφους από μάντρα οικοδομικών υλικών. Επίσης, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Η υγρασία του δείγματος δεν μετρήθηκε καθώς δεν επηρεάζει τους στόχους των συγκεκριμένων μετρήσεων. Με οπτική παρατήρηση και σε σύγκριση με αντίστοιχη εικόνα ανάλογων εδαφών με γνωστή ειδική αντίσταση η υγρασία δεν πρέπει να ξεπερνούσε το 10%.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε γέμισμα στο δοχείο αναφοράς [5] έως το χείλος του δοχείου. Το δοχείο αναφοράς όπως έχει αναφερθεί έχει κατασκευαστεί από Plexiglas και είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο υδατοστεγές. Τα ηλεκτρόδια του δοχείου είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα. Για να είναι εύκολος ο καθαρισμός του μετά από τις μετρήσεις τα ηλεκτρόδια είναι αποσπώμενα. Για την έγχυση του ρεύματος χρησιμοποιούνται δύο πλάκες και για την μέτρηση της τάσης δύο ακίδες. Για να είναι η ειδική αντίσταση που μετρείται αντιπροσωπευτική του εδάφους και εύκολη η προετοιμασία επιλέχθηκαν οι διαστάσεις του. Το γέμισμα του δοχείου αναφοράς πραγματοποιήθηκε ρίχνοντάς με σταθερό ρυθμό και συμπεριζόταν προσεκτικά κατά τη διαδικασία του γεμίσματος. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιήθηκε και στη μέθοδο Wenner με τις διατάξεις που κατασκευάστηκαν σε αυτή την πτυχιακή εργασία. Για την αποφυγή δημιουργίας κενών μέσα στο δείγμα και για να επιτευχθεί καλή επαφή μεταξύ του δείγματος και των ηλεκτροδίων καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε παρόμοια πυκνότητα αλλά και διάρθρωση του εδάφους (Εικόνα 4.1). [5]



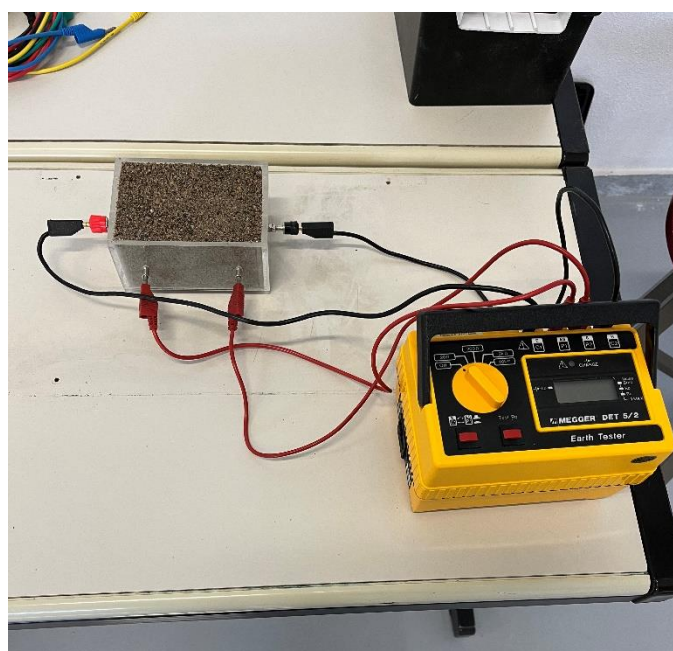
**Εικόνα 4.1:** Δοχείο αναφοράς πριν την μέτρηση της ειδικής αντίστασης

Για όλες τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το όργανο Megger DET5/2 Digital Earth Tester (Εικόνα 4.2). Αυτό το όργανο κατατάσσεται στα όργανα μέτρησης αντιστάσεων γείωσης. Έχει τέσσερις ακροδέκτες, δύο για την έγχυση του ρεύματος (E, C1 και H, C2) και δύο για τη μέτρηση της τάσης (ES, P1 και S, P2). Η τάση εξόδου του οργάνου έχει τη μορφή τετραγωνικών παλμών (εύρος: 50 V, συχνότητα 128 Hz, πολικότητα: θετική και αρνητική). Η κυματομορφή αυτή, μαζί με τη μεγάλη αντίσταση εισόδου του κυκλώματος μέτρησης της τάσης, μειώνει την πόλωση των ηλεκτροδίων. Τέλος, η μέγιστη δυνατή μετρούμενη αντίσταση είναι τα 19.99 k $\Omega$  [5] ή x2 αν ληφθεί υπόψιν η μία πολικότητα των παραγόμενων παλμών τάσης εξόδου.



**Εικόνα 4.2:** Όργανο μέτρησης Megger DET5/2

Οι μετρήσεις της αντίστασης του κάθε δείγματος,  $R$ , γίνονται κατευθείαν μετά την τροφοδότηση ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα πόλωσης των ηλεκτροδίων, μετακίνησης της υγρασίας και ηλεκτρόλυσης. Πραγματοποιήθηκαν τρία γεμίσματα και για κάθε γέμισμα τρεις διαδοχικές μετρήσεις με διαφορά 1 min η μία από την άλλη (Εικόνα 4.3).



**Εικόνα 4.3:** Το δοχείο αναφοράς συνδεδεμένο με το όργανο μέτρησης

---

Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκε το γέμισμα και η μέτρηση σε δοχείο εδάφους της κατασκευής (Εικόνα 4.4). Με τη διαφορά ότι, το δοχείο δεν καλύφθηκε με το δείγμα μέχρι πάνω αλλά ως κάποια χιλιοστά από το γείσο του δοχείου (Εικόνα 4.5), ώστε να μην έρχονται σε επαφή οι οδηγοί με το δείγμα.



**Εικόνα 4.4:** Δοχείο εδάφους μετά το γέμισμα



**Εικόνα 4.5:** Απόσταση από το γείσο του δοχείου

---

Πρώτες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το με το ηλεκτρολογικό κανάλι για οδηγό (Εικόνα 4.6) και οι δεύτερες με τους οδηγούς από Plexiglas (Εικόνα 4.7).



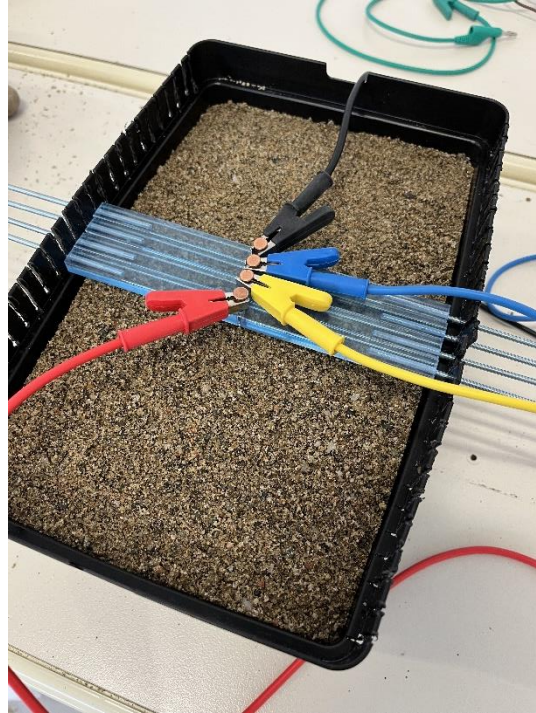
**Εικόνα 4.6:** Δοχείο εδάφους με τον οδηγό της πρώτης κατηγορίας



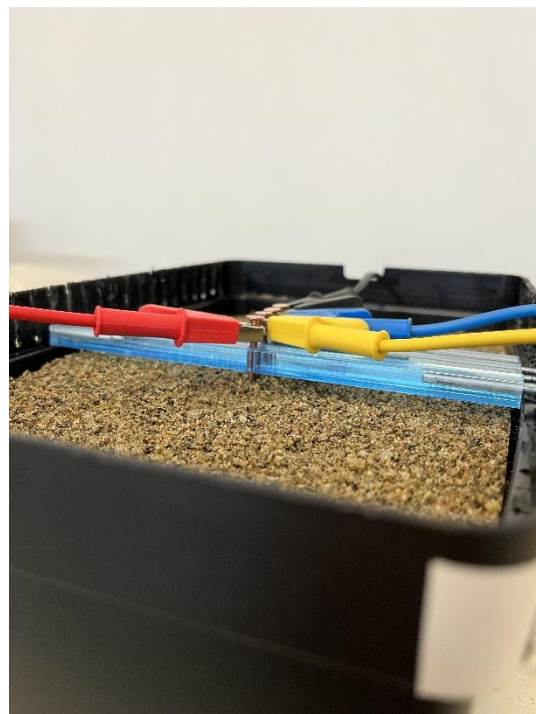
**Εικόνα 4.7:** Δοχείο εδάφους με τους οδηγούς της δεύτερης κατηγορίας

---

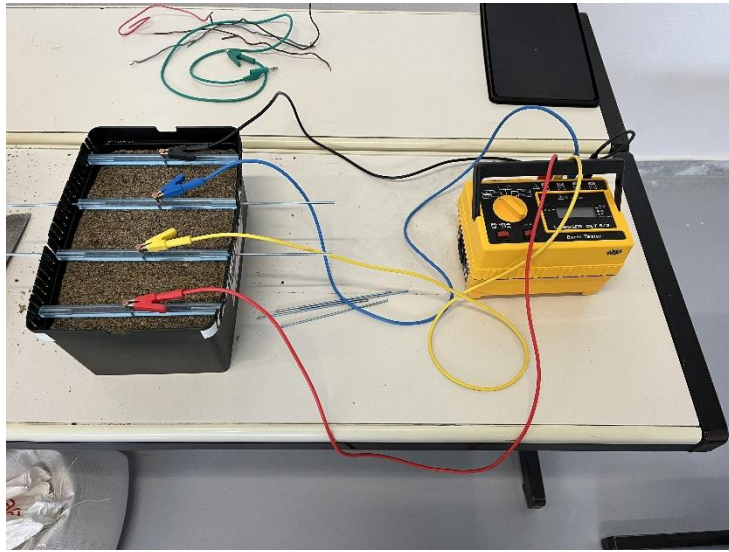
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με διάφορα ηλεκτρόδια από αυτά που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, σε διάφορες αποστάσεις (1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm) σύμφωνα με τη μέθοδο Wenner και σε διάφορα βάθη  $b$ . Παρακάτω ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές φωτογραφίες από τις μετρήσεις (Εικόνες 4.8-4.12).



**Εικόνα 4.8: Μέτρηση με τη μέθοδο Wenner με χάλκινα ηλεκτρόδια**



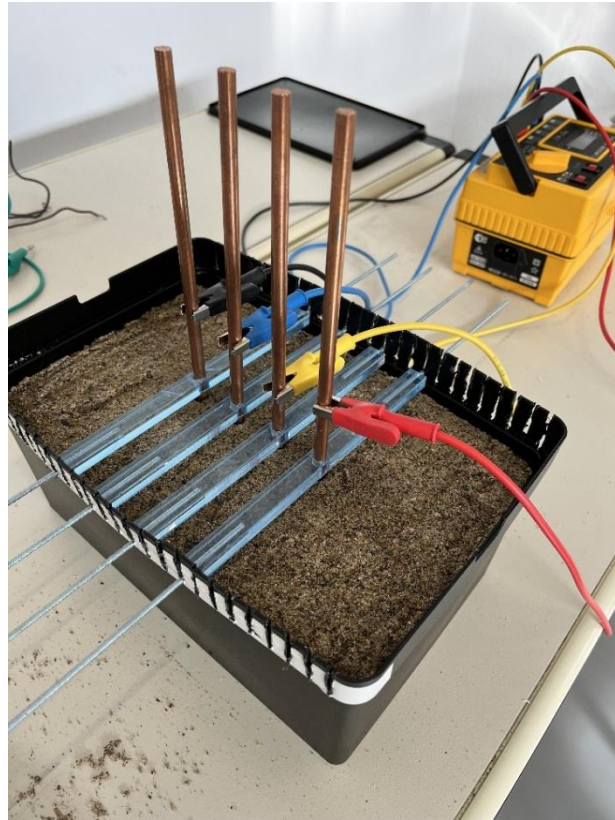
**Εικόνα 4.9: Μια άλλη όψη της ίδιας μέτρησης με την Εικόνα 4.8**



**Εικόνα 4.10: Γενική εικόνα μιας μέτρησης με το όργανο Megger DET5/2**



**Εικόνα 4.11: Μέτρηση με χάλκινα ηλεκτρόδια σε απόσταση 5 cm**



**Εικόνα 4.12: Μέτρηση με χάλκινες ράβδους στα 3 cm μεταξύ τους**

Μετά από κάθε μέτρηση, πριν την αλλαγή της απόστασης των ηλεκτροδίων αφαιρούνταν οι οδηγοί και το υλικό συμπιεζόταν ξανά ώστε να κλείσουν τα κενά που άφηνε η αφαίρεση των ηλεκτροδίων (Εικόνα 4.13).



**Εικόνα 4.13: Οπές μετά την μέτρηση αφού έχουν αφαιρεθεί οι οδηγοί για να συμπιεστεί το έδαφος**



Στη επόμενη ενότητα θα αναλυθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

#### 4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

Όπως ήδη είναι γνωστό από τα προηγούμενα κεφάλαια και από την αναφορά [5] ο συντελεστής δοχείου αναφοράς  $A/a$  είναι 6.761. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.7) και αφού έχει γίνει η μέτρηση με το όργανο, μπορεί να υπολογιστεί η ειδική αντίσταση του εδάφους. Παρακάτω στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις τρεις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο δοχείο αναφοράς σε ένα γέμισμα.

**Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μέτρησης με το δοχείο αναφοράς**

	1 <sup>η</sup> Μέτρηση	2 <sup>η</sup> Μέτρηση	3 <sup>η</sup> Μέτρηση
<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	29,40 kΩ	32,20 kΩ	30,86 kΩ
<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>	1,988 kΩm	2,177 kΩm	2,086 kΩm

Από τις τρεις μετρήσεις υπολογίστηκε η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης, η οποία βρέθηκε: 2,048 kΩm.

Έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στο δοχείο εδάφους της κατασκευής της εργασίας αυτής. Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος από την σχέση (1.5). Καθώς θα χρειαζόνταν να είναι γνωστό το βάθος  $b$ , αυτό μετριόταν πριν από την κάθε μέτρηση. Για να γίνει η μέτρηση του  $b$ , αρχικά μετρήθηκε όλο το μήκος του κάθε ηλεκτροδίου, έπειτα αφαιρέθηκε η απόσταση πάνω απέμενε στη μέτρηση από τον οδηγό, το πάχος του οδηγού και τέλος, την απόσταση από το γείσο έως την επιφάνεια του δείγματος εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο ήταν εφικτό να υπολογιστεί το βάθος  $b$ . Για την απόσταση  $a$  είχαν χαραχθεί εσοχές στο δοχείο εδάφους ανά εκατοστό ώστε να είναι γνωστό σε τι απόσταση πραγματοποιείται η μέτρηση. Άρα, γνωρίζοντας όλα αυτά έγινε εφικτός ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης για κάθε ηλεκτρόδιο, μετρώντας την αντίσταση του εδάφους με το όργανο. Τέλος, για κάθε είδος ηλεκτροδίου πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις με διαφορετικό βάθος  $b$  και ίδιο  $a$ . Κάθε μία μέτρηση επαληθευόταν από τρεις φορές.

Πρώτα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα μικρά χάλκινα καρφιά με μήκος 4 cm και διάμετρο 2,8 mm. Στους Πίνακες 4.2 και 4.3 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα για κάθε μέτρηση της  $R$  και τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης ανάλογα με την απόσταση  $a$  και το βάθος  $b$ .

**Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά μικρά (2,8 mm) με βάθος 1,3 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
1,3	1	19,56	221,79	2,22
1,3	3	9,64	228,02	2,28
1,3	5	6,70	233,02	2,33
1,3	7	6,46	300,40	3,00

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 2,46 kΩm.

**Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά μικρά (2,8 mm) με βάθος 1,6 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
1,6	1	11,40	134,32	1,34
1,6	3	10,78	273,57	2,74
1,6	5	6,34	229,98	2,30
1,6	7	6,50	310,06	3,10

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 2,37 kΩm.

Δεύτερα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ανοξειδωτα πριτσίνια με μακριά κεφαλή, με μήκος 4,8 cm και διάμετρο 2,7 mm. Εξίσου, στους Πίνακες 4.4 και 4.5 φαίνονται τα αποτελέσματα.

**Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μέτρησης για πριτσίνια ανοξειδωτα με μακριά κεφαλή (2,7 mm) με βάθος 0,9 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
0,9	1	8,10	82,89	0,83
0,9	3	6,00	128,73	1,29
0,9	5	5,06	167,54	1,68
0,9	7	5,46	246,91	2,47

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 1,57 kΩm.

**Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα μέτρησης για πριτσίνια ανοξείδωτα με μακριά κεφαλή (2,7 mm) με βάθος 1,4 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
1,4	1	6,94	79,90	0,80
1,4	3	4,02	97,40	0,97
1,4	5	4,64	163,60	1,64
1,4	7	4,24	198,77	1,99

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 1,35 kΩm.

Τρίτα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα τετράγωνα χάλκινα καρφιά με μήκος 7 cm και διάμετρο 4 mm όπως αναγράφεται στην συσκευασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 4.6 και 4.7.

**Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά τετράγωνα (4 mm) με βάθος 1,8 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
1,8	3	6,60	174,87	1,75
1,8	5	7,40	276,40	2,76
1,8	7	7,24	351,84	3,52

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 2,68 kΩm.

**Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινα καρφιά τετράγωνα (4 mm) με βάθος 2,9 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
2,9	3	6,20	194,80	1,95
2,9	5	6,88	300,02	3,00
2,9	7	8,28	450,66	4,51

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 3,15 kΩm.

Τέταρτα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χάλκινες ράβδοι με μήκος 20 cm και διάμετρο 7 mm. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 4.8 και 4.9.

**Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινες ράβδοι (7 mm) με βάθος 1,8 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
1,8	3	6,66	176,46	1,76
1,8	5	5,20	194,23	1,94
1,8	7	6,84	332,40	3,32

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 2,34 kΩm.

**Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα μέτρησης για χάλκινες ράβδοι (7 mm) με βάθος 2,9 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
2,9	3	7,90	248,22	2,48
2,9	5	5,60	244,20	2,44
2,9	7	8,02	436,51	4,37

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 3,10 kΩm.

Πέμπτα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ανοξείδωτα με κρίκο με μήκος 4 cm (χωρίς τον κρίκο) και διάμετρο 4,2 mm. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 4.10 και 4.11.

**Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα μέτρησης για ανοξείδωτα με κρίκο (4,2 mm) με βάθος 1,1 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
1,1	3	8,54	192,33	1,92
1,1	5	5,44	184,36	1,84
1,1	7	6,34	290,45	2,90

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 2,22 kΩm.

**Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα μέτρησης για ανοξείδωτα με κρίκο (4,2 mm) με βάθος 2,6 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
2,6	3	8,12	246,12	2,46
2,6	5	6,70	280,84	2,81
2,6	7	7,46	393,40	3,93

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 3,07 kΩm.

Έκτα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα γαλβανιζέ καρφιά με γωνία κεφαλή με μήκος 7 cm και διάμετρο 3 mm. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 4.12 και 4.13.

**Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα μέτρησης για καρφιά με γωνία (3 mm) με βάθος 1,4 cm**

<b>Βάθος b (cm)</b>	<b>Απόσταση a (cm)</b>	<b>Αντίσταση R (kΩ)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)</b>	<b>Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)</b>
1,4	1	11,3	130,10	1,30
1,4	3	6,56	158,94	1,59
1,4	5	5,46	192,51	1,93
1,4	7	5,78	270,97	2,71

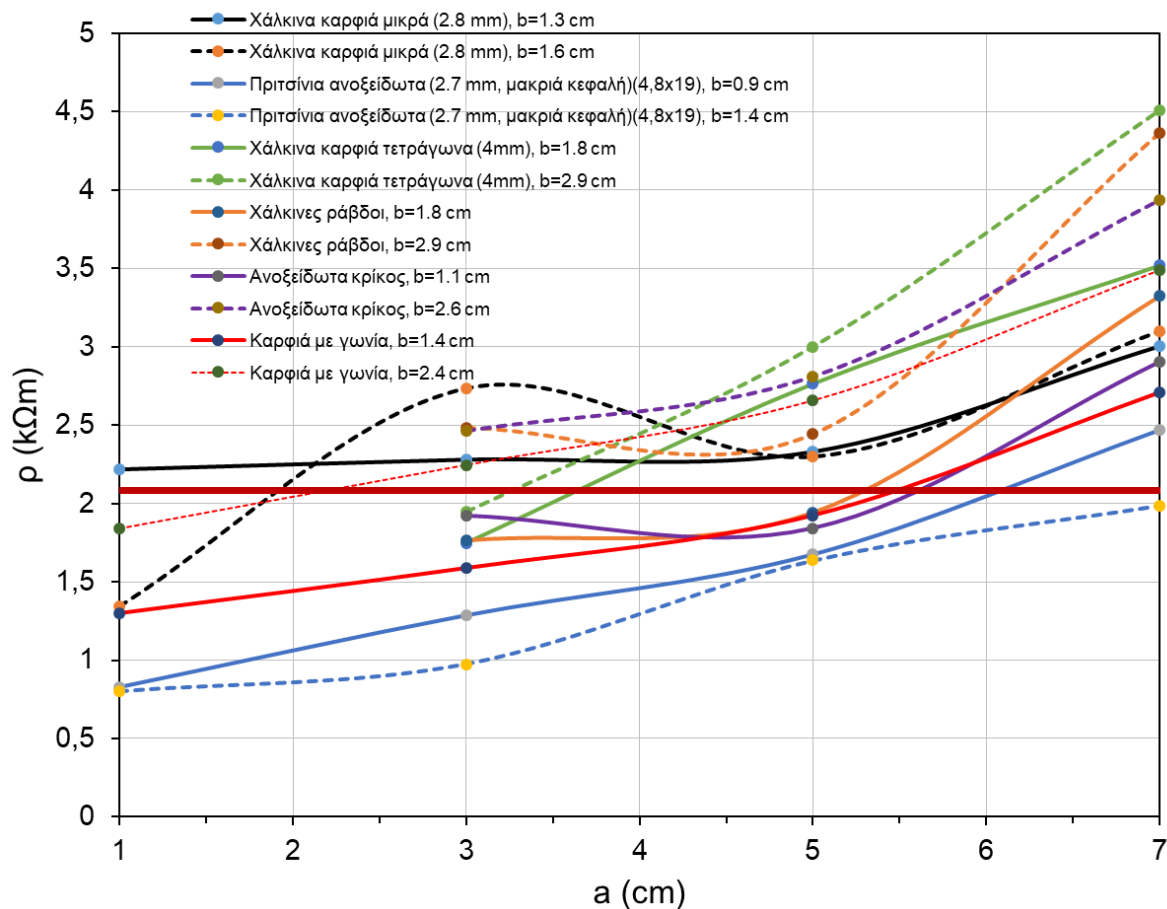
Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 1,88 kΩm.

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα μέτρησης για καρφιά με γωνία (3 mm) με βάθος 2,4 cm

Βάθος b (cm)	Απόσταση a (cm)	Αντίσταση R (kΩ)	Ειδική Αντίσταση ρ (kΩcm)	Ειδική Αντίσταση ρ (kΩm)
2,4	1	14,98	183,96	1,84
2,4	3	7,62	224,58	2,25
2,4	5	6,52	265,80	2,66
2,4	7	6,76	349,07	3,49

Η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους βρέθηκε: 2,56 kΩm.

Τέλος, ένα αναλυτικό γράφημα με συγκεντρωμένες όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με όλα τα ηλεκτρόδια παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.14, από την οποία μπορούν να βγουν διάφορα συμπεράσματα.



Εικόνα 4.14: Γράφημα ειδικής αντίστασης εδάφους που μετρήθηκε για όλα τα ηλεκτρόδια και όλες τις αποστάσεις a και όλα τα βάθη τοποθέτησης των ηλεκτροδίων b

---

Στο παραπάνω γράφημα η κόκκινη γραμμή παράλληλη στο άξονα των  $x$  (στα 2.084  $k\Omega m$ ) δείχνει την ειδική αντίσταση του δείγματος που μετρήθηκε με το δοχείο αναφοράς. Επομένως η ορθή τιμή της ειδικής αντίστασης του δείγματος εδάφους που μελετήθηκε είναι αυτή καθώς το δοχείο αναφοράς είναι διακριβωμένο. Γενικά, είναι εμφανές ότι οι μετρήσεις με τη μέθοδο Wenner και την κατασκευασμένη σε αυτή την εργασία διάταξη διαφέρουν από την πραγματική τιμή σε πολλές περιπτώσεις. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ακαταλληλότητα του μετάλλου των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν, σε ακαταλληλότητα της απόστασης  $a$  μεταξύ των ηλεκτροδίων (σε συνδυασμό με το βάθος  $b$ ).

Η αυξητική τάση που παρατηρείται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις πιθανόν να οφείλεται στην επίδραση του μονωτικού δοχείου στις μετρήσεις καθώς αυτό παραμορφώνει τη ροή του ρεύματος στο δείγμα. Η επίδραση αυτή αναμένεται να είναι μεγαλύτερη στις μεγαλύτερες αποστάσεις καθώς το ρεύμα διαδίδεται βαθύτερα και σε μεγαλύτερες πλάγιες αποστάσεις προς τα τοιχώματα του δοχείου εδάφους. Στις πολύ μικρές αποστάσεις ενδέχεται το δείγμα ανάμεσα στα ηλεκτρόδια να μην αντιπροσωπεύει το έδαφος αυτό καθώς οι διαστάσεις είναι μικρές και η ύπαρξη των ηλεκτροδίων αλλάζει τις ιδιότητές του.

Συγκρίσιμες τιμές με την πραγματική ειδική αντίσταση του δείγματος εδάφους επετεύχθησαν στις περιπτώσεις που έχουν σημειωθεί στους πίνακες των αποτελεσμάτων που παρατίθενται παραπάνω με γκρι χρώμα στα αντίστοιχα κελιά. Από τα αποτελέσματα αυτά τα χάλκινα ηλεκτρόδια επιδεικνύουν μία καλύτερη συμπεριφορά σε γενικές γραμμές. Ωστόσο, είναι φανερό ότι απαιτείται διεξοδική διερεύνηση και μετρήσεις σε δείγματα με διαφορετικές ιδιότητες, πιθανόν και με διαφορετικά όργανα, για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Αυτά θα μπορούσαν να είναι αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά την εργαστηριακή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με την μέθοδο Wenner. Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν διατάξεις για ερευνητική και εκπαιδευτική χρήση. Η επιλογή τεσσάρων διαφορετικών δοχείων εδάφους και των πολλών διαφορετικών ηλεκτροδίων από διαφορετικό υλικό και με διαφορετικές διαστάσεις δίνει ευελιξία στις διατάξεις αυτές για ερευνητική χρήση. Στο εκπαιδευτικό κομμάτι, ο εκπαιδευόμενος να μπορεί να χειριστεί τη μέθοδο Wenner αλλά και άλλες μεθόδους με 4 ηλεκτρόδια σε μικρότερη κλίμακα σε σχέση με το πεδίο. Επομένως, η διάταξη αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εργαστηριακές ασκήσεις μαθημάτων Υψηλών Τάσεων. Οι διατάξεις που κατασκευάστηκαν περιγράφηκαν αναλυτικά.

Κατόπιν έγιναν κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις σε ένα τυχαίο έδαφος για να ελεγχθεί η καταλληλότητα των διατάξεων και από πρακτικής σκοπιάς. Η διαδικασία των μετρήσεων (γέμισμα δοχείου εδάφους και χειρισμός κάθε μέτρησης) θα πρέπει ως το δυνατόν να είναι πανομοιότυπη καθώς με τη παραμικρή διαφοροποίηση επηρεάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ειδικής αντίστασης του δείγματος εδάφους. Τα ηλεκτρόδια θα πρέπει να είναι σταθερά για να υπάρχει καλή διεπαφή με το έδαφος. Βρέθηκε ότι για να μετρηθεί σωστά η ειδική αντίσταση του δείγματος απαιτείται κατάλληλος συνδυασμός ηλεκτροδίων (υλικού), βάθους τοποθέτησης  $b$  και απόστασης μεταξύ διαδοχικών ηλεκτροδίων  $a$  σε συνδυασμό με το δοχείο εδάφους. Πιθανόν και το δείγμα εδάφους να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Είναι σημαντικό ότι για να βρεθούν οι επιδράσεις αυτές απαιτούνται διεξοδικές μετρήσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να γίνουν στα πλαίσια μελλοντικής εργασίας με χρήση των διατάξεων που κατασκευάστηκαν στην εργασία αυτή. Επιπλέον, οι διατάξεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μελλοντική έρευνα ώστε να μελετηθούν οι παράγοντες που επιδρούν στην ειδική αντίσταση του εδάφους.

Εν κατακλείδι, από τις μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας αποδείχθηκε ότι οι διατάξεις που κατασκευάστηκαν πληρούν τις προϋποθέσεις για τη χρήση τους σε μετρήσεις ειδικής αντίστασης δειγμάτων εδάφους στο εργαστήριο.

---

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Electrical Resistivity, Resistor Fundamentals, Resistor Guide, διαθέσιμο από: [Σύνδεσμος](#) (Τελευταία πρόσβαση: Ιανουάριος 2023).
- [2] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Methodology and Technology for Power System Grounding*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., China, 2013.
- [3] Megger, *Getting Down To Earth*, Dallas, USA, 2005.
- [4] IEEE Std 81-2012, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, 2012.
- [5] Ζ. Γ. Δάτσιος, Διερεύνηση του Φαινομένου ιονισμού του Εδάφους Γύρω από Συγκεντρωμένα Συστήματα Γείωσης: Επίδραση στην Κεραυνική Συμπεριφορά Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2017.
- [6] ASTM G57-20 (Reapproved 2012), Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method, 2020.
- [7] ASTM D257-21, Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials, 2021.
- [8] F. A. Kuranchie, S. K. Shukla, D. Habibi, X. Zhao, and M. Kazi, “Studies on electrical resistivity of Perth sand,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 449-457, 2014.