



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης
εγκαταστάσεων**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Π. ΑΝΔΡΟΒΙΤΣΑΝΕΑ

Επιβλέπουσα

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ Δ. ΚΑΒΑΤΖΑ

Λέκτορας

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης
εγκαταστάσεων**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Π. ΑΝΔΡΟΒΙΤΣΑΝΕΑ

Επιβλέπουσα

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ Δ. ΚΑΒΑΤΖΑ

Λέκτορας

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Ιουλίου 2011

.....
Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς
Καθηγητής

.....
Γεώργιος Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής

.....
Σταυρούλα Δ. Καβατζά
Λέκτορας

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....
Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στην οικογένειά μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VIII
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	VIII
ABSTRACT	IX
KEY WORDS	IX
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	X
PREFACE	XIII
ACKNOWLEDGEMENTS	XV
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ	1
1.1 <i>Ο ρόλος της γείωσης</i>	1
1.2 <i>Βασικοί ορισμοί</i>	3
1.3 <i>Είδη γείωσης</i>	8
1.3.1 Γείωση λειτουργίας	8
1.3.2 Γείωση προστασίας	9
1.3.3 Γείωση ασφαλείας ή συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ)	10
1.4 <i>Μέθοδοι γείωσης</i>	11
1.5 <i>Είδη ηλεκτροδίων γείωσης</i>	14
1.5.1 Γειωτής ράβδου	18
1.5.2 Γειωτής ταινίας ή συρματοσχοινού	25
1.5.3 Γειωτής πλάκας	27
1.5.4 Ακτινικός γειωτής	28
1.5.5 Γειωτής πλέγματος	28
1.5.6 Το δίκτυο ύδρευσης ως γειωτής	29
1.5.7 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης	30
1.6 <i>Συστήματα διατάξεων ηλεκτροδίων γείωσης</i>	30
1.6.1 Πολυγωνική διάταξη γείωσης	31
1.6.2 Σύστημα γείωσης με πλάκες (γειωτές πλάκας)	34
1.6.3 Γειωτής τύπου “E”	34
1.6.4 Θεμελιακή γείωση	36
1.6.5 Περιμετρική γείωση	45
1.7 <i>Σχεδίαση συστημάτων γείωσης</i>	46
1.7.1 Καθορισμός ορίων ασφαλείας	46
1.7.2 Σκοπός και αντικείμενο των πλεγμάτων γείωσης	48
1.7.3 Γενικές αρχές στο σχεδιασμό συστημάτων γείωσης	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	53
ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	53
2.1 <i>Ειδική αντίσταση</i>	53
2.2 <i>Καθορισμός της δομής του εδάφους</i>	59
2.3 <i>Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης</i>	60
2.3.1 Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (ηλεκτροδίων)	63
2.3.2 Διάταξη με χρήση τριών ηλεκτροδίων	70
2.4 <i>Ορισμός της φαινόμενης ειδικής αντίστασης</i>	71
2.5 <i>Πειραματικές μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης</i>	73
2.6 <i>Προσδιορισμός του μοντέλου γης</i>	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	85
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ	85
3.1 <i>Εισαγωγή</i>	85
3.2 <i>Αντίσταση γείωσης και σύνθετη αντίσταση γείωσης</i>	87
3.3 <i>Υπολογισμός αντίστασης γείωσης</i>	88
3.4 <i>Απαιτήσεις και προδιαγραφές για μετρήσεις γειώσεων</i>	91

3.5	<i>Μέτρηση της αντίστασης γείωσης</i>	93
3.5.1	<i>Μέτρηση με τη χρήση βοηθητικών ηλεκτροδίων</i>	94
3.5.2	<i>Μέτρηση σημειακών γειώσεων</i>	96
3.5.3	<i>Μέτρηση εκτεταμένων γειώσεων όταν υπάρχει διαθέσιμος χώρος</i>	97
3.5.4	<i>Μέτρηση εκτεταμένων γειώσεων όταν δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος</i>	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		102
	ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΕΩΝ	102
4.1	<i>Εισαγωγή</i>	102
4.2	<i>Βιβλιογραφική ανασκόπηση</i>	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		112
	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	112
5.1	<i>Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας</i>	112
5.2	<i>Μετρήσεις – Γραφήματα</i>	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		149
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ	149
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	164

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1.1: Βηματική τάση, τάση επαφής, μεταφερόμενη τάση	7
Σχήμα 1.2: Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης.....	11
Σχήμα 1.3: Συνδυασμός συστήματος γείωσης και συστήματος αντικεραυνικής προστασίας.....	11
Σχήμα 1.4: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με ουδετέρωση.....	12
Σχήμα 1.5: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με άμεση γείωση.....	13
Σχήμα 1.6: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης, σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης.....	13
Σχήμα 1.7: Ηλεκτρόδια γείωσης σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384.....	14
Σχήμα 1.8: Διάφοροι τύποι γειωτών.....	15
Σχήμα 1.9: Μορφές γειωτών ράβδου	18
Σχήμα 1.10: Μηχανικό σφυρί και οδηγός ηλεκτροδίων αντίστοιχα.....	19
Σχήμα 1.11: Σημείο σύνδεσης Σχήμα 1.12: Ειδικό φρεάτιο γείωσης.....	19
Σχήμα 1.13: Φρεάτια γείωσης	20
Σχήμα 1.14: Γειωτές ράβδου και εξαρτήματα επιμήκυνσης.....	20
Σχήμα 1.15: Αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασσάλων στο έδαφος. Το ενεργό μήκος δίνεται από τη σχέση $l_{eff}=l-0,5m$	21
Σχήμα 1.16: Χαλύβδινος επιχαλκωμένος γειωτής ράβδου.....	21
Σχήμα 1.17: Ορειχάλκινη μούφα σύνδεσης γειωτή.....	22
Σχήμα 1.18: Χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος γειωτής ράβδου	22
Σχήμα 1.19: Ραβδοειδής κυκλικός γειωτής χαλκού	23
Σχήμα 1.20: Διάφορες μορφές γειωτών ράβδου διατομής σταυρού.....	23
Σχήμα 1.21: Εγκατάσταση χημικού ηλεκτροδίου γείωσης.....	24
Σχήμα 1.22: Χημικά ηλεκτρόδια γείωσης	24
Σχήμα 1.23: Εγκαταστημένο χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης.....	25
Σχήμα 1.24: Γειωτής πλάκας.....	27
Σχήμα 1.25: Εγκατάσταση γειωτή πλάκας.....	27
Σχήμα 1.26: Ακτινικός γειωτής	28
Σχήμα 1.27: Γειωτής πλέγματος.....	29
Σχήμα 1.28: Γειωτές πλέγματος	29
Σχήμα 1.29: Καλώδια που χρησιμοποιούνται ως αγωγοί προστασίας.....	30
Σχήμα 1.30: Διάφορες διατάξεις γειωτών.....	31
Σχήμα 1.31: Τρίγωνο γείωσης.....	32
Σχήμα 1.32: Σύστημα γείωσης με πλάκες	34
Σχήμα 1.33: Γειωτής “Ε”.....	35
Σχήμα 1.34: Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης.....	37
Σχήμα 1.35: Κατόψεις θεμελιακών γειώσεων με και χωρίς εγκάρσια και διαμήκη τμήματα	38
Σχήμα 1.36: Λεπτομέρειες θεμελιακής γείωσης.....	39
Σχήμα 1.37: Στηρίγματα θεμελιακής γείωσης.....	39
Σχήμα 1.38: Σύνδεση ηλεκτροδίου θεμελιακής γείωσης με κύριο ζυγό γείωσης.....	43
Σχήμα 1.39: Κύριες και Συμπληρωματικές Ισοδυναμικές συνδέσεις (ΚΙΣ–ΣΙΣ) εισερχόμενων μεταλλικών δικτύων σε θεμελιακή γείωση.....	43
Σχήμα 1.40: Αναμονές για σύνδεση της περιμετρικής ταινίας με τον αγωγό γείωσης.....	45
Σχήμα 1.41: Ισοδυναμικές καμπύλες ενός τυπικού πλέγματος γείωσης, με ή χωρίς ηλεκτρόδια γείωσης	47
Σχήμα 2.1: Ειδική αντίσταση εδάφους	54
Σχήμα 2.2: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα (CURVE 1), της υγρασίας (CURVE 2) και της θερμοκρασίας (CURVE 3).....	58
Σχήμα 2.3: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης.....	61
Σχήμα 2.4: Επίδραση των στρωμάτων που παρουσιάζει το έδαφος στη ροή του ρεύματος κατά τη μέτρηση α)ομοιογενούς αντίστασης, β)πολύ χαμηλής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα, γ)πολύ υψηλής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα	62
Σχήμα 2.5: Διάταξη Wenner.....	63

Σχήμα 2.6: Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων κατά Wenner και Schlumberger	64
Σχήμα 2.7: Διάταξη Schlumberger	65
Σχήμα 2.8: Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου	66
Σχήμα 2.9: Διάταξη ηλεκτροδίων για την εφαρμογή της μεθόδου Lee	68
Σχήμα 2.10: Διάταξη διπόλου–διπόλου	69
Σχήμα 2.11: Τετραγωνική διάταξη	70
Σχήμα 2.12: Διατάξεις μέτρησης της ειδικής αντίστασης	71
Σχήμα 2.13: Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων (Wenner) για τριστρωματικό μοντέλο γης	72
Σχήμα 2.14: Κατανομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων για μοντέλο με $h_1=27,1$, $h_2=12,5$, $\rho_1=116,9$, $\rho_2=85,0$	73
Σχήμα 2.15: Ομοαξονικό κυλινδρικό ηλεκτρόδιο για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης	74
Σχήμα 2.16: Σχηματικό διάγραμμα παραλλήλων πλακών ((1) και (2) ηλεκτρόδια, (3) ρυθμιστικός μοχλός, (4) δοκός, (5) λαβή)	75
Σχήμα 2.17: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης	75
Σχήμα 2.18: Η προς ολοκλήρωση συνάρτηση ταλάντωσης, με άπειρο όριο ολοκλήρωσης	79
Σχήμα 2.19: Η προς ολοκλήρωση συνάρτηση, περίπτωση χωρίς ταλάντωση	79
Σχήμα 3.1: Χοάνη δυναμικού	86
Σχήμα 3.2: Διανυσματικό διάγραμμα σύνθετης αντίστασης σε σύστημα γείωσης	87
Σχήμα 3.3: Μείωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτίνων και ειδικών αντιστάσεων	90
Σχήμα 3.4: Διάταξη μέτρησης αντίστασης γείωσης	94
Σχήμα 3.5: Μέτρηση γείωσης σημειακού γειωτή	97
Σχήμα 3.6: Μέτρηση γείωσης εκτεταμένου γειωτή	98
Σχήμα 3.7: Μέτρηση γείωσης όταν δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος	99
Σχήμα 4.1: Ειδική αντίσταση συναρτήσει του χρόνου σε δοκιμή επιταχυνόμενης απώλειας υγρασίας	109
Σχήμα 4.2: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης των υπό εξέταση ηλεκτροδίων σε συνάρτηση με το χρόνο, σε ασβεστολιθικό βραχώδες έδαφος	109
Σχήμα 5.1: Διάταξη ηλεκτροδίων του πειράματος	115
Σχήμα 5.2: Ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετημένο μέσα στο βελτιωτικό εδάφους	116
Σχήμα 5.3: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $a=2m$	122
Σχήμα 5.4: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $a=4m$	123
Σχήμα 5.5: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $a=8m$	123
Σχήμα 5.6: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $a=12m$	124
Σχήμα 5.7: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $a=16m$	124
Σχήμα 5.8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής της ρ_s με το χρόνο	125
Σχήμα 5.9: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $a=2m$	125
Σχήμα 5.10: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $a=4m$	126
Σχήμα 5.11: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $a=8m$	126
Σχήμα 5.12: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $a=12m$	127
Σχήμα 5.13: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $a=16m$	127
Σχήμα 5.14: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 2 με το χρόνο	128
Σχήμα 5.15: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 3 με το χρόνο	129
Σχήμα 5.16: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 4 με το χρόνο	129
Σχήμα 5.17: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 5 με το χρόνο	130
Σχήμα 5.18: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 6 με το χρόνο	130
Σχήμα 5.19: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών με το χρόνο	131
Σχήμα 5.20: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 με το χρόνο	131
Σχήμα 5.21: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_2 με το χρόνο	132
Σχήμα 5.22: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_3 με το χρόνο	132
Σχήμα 5.23: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_4 με το χρόνο	133
Σχήμα 5.24: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_5 με το χρόνο	133
Σχήμα 5.25: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_6 με το χρόνο	134
Σχήμα 5.26: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων του συστήματος γείωσης με το χρόνο	134
Σχήμα 5.27: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 με τη βροχόπτωση	135
Σχήμα 5.28: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_2 με τη βροχόπτωση	135
Σχήμα 5.29: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_3 με τη βροχόπτωση	136
Σχήμα 5.30: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_4 με τη βροχόπτωση	136
Σχήμα 5.31: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_5 με τη βροχόπτωση	137
Σχήμα 5.32: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_6 με τη βροχόπτωση	137

Σχήμα 5.33: Σχέση αντίστασης γείωσης - ειδικής αντίστασης εδάφους	138
Σχήμα 5.34: Λογισμικό προσομοίωσης της θερμοκρασίας υπεδάφους Trnsys 16	139
Σχήμα 5.35: Διακύμανση της θερμοκρασίας εδάφους για διάφορα βάθη	140
Σχήμα 5.36: Διάταξη ηλεκτροδίων και ακολουθία μετρήσεων σύμφωνα με τη μέθοδο της ηλεκτροτομογραφίας	143
Σχήμα 5.37: Διάταξη των μπλοκ και τιμές πραγματικής ειδικής αντίστασης σε αυτά.....	143
Σχήμα 5.38: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ηλεκτροτομογραφίας.....	144
Σχήμα 5.39: Γράφημα ηλεκτροτομογραφίας στο χώρο του πειράματος	147

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: Εγκατάσταση γειωτή τύπου “Ε”	36
Εικόνα 1.2: Εφαρμογή σε δομική κατασκευή	37
Εικόνα 1.3: Εφαρμογή θεμελιακής γείωσης ως ΣΑΠ.....	42
Εικόνα 1.4: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες θεμελιακής γείωσης	44
Εικόνα 1.5: Σύνδεση της ταινίας γείωσης με τον οπλισμό μέσω σφικτήρα οπλισμού	44
Εικόνα 1.6: Θεμελιακή γείωση πλέγματος.....	44
Εικόνα 2.1: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης.....	61
Εικόνα 2.2: Συνδεσμολογία μέτρησης της ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων	70
Εικόνα 4.1: Βραχώδες έδαφος με ειδική αντίσταση $>2000\Omega m$	103
Εικόνα 4.2: Πλέγμα γείωσης εγκαθιστημένο σε αλάτι	104
Εικόνα 5.1: Δορυφορική φωτογραφία του πεδίου δοκιμών	113
Εικόνα 5.2: Χώρος εγκατάστασης των ηλεκτροδίων γείωσης	113
Εικόνα 5.3: Διάνοιξη οπών με εκσκαφέα βαρέως τύπου.....	116
Εικόνα 5.4: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων	116
Εικόνα 5.5: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε βελτιωτικά υλικά εδάφους	117
Εικόνα 5.6: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε μπετονίτη και σκυρόδεμα.....	117
Εικόνα 5.7: Γειωσόμετρο	118
Εικόνα 5.8: Θερμο-υγρόμετρο	118
Εικόνα 5.9: Μετεωρολογικός σταθμός Ε.Μ.Π.	119
Εικόνα 5.10: Σύνδεση του γειωσόμετρου σε ηλεκτρόδιο γείωσης.....	121
Εικόνα 5.11: Διεξαγωγή μετρήσεων	121
Εικόνα 5.12: Όργανο μέτρησης για τη μέθοδο της ηλεκτροτομογραφίας.....	141
Εικόνα 5.13: Θέση πραγματοποίησης της ηλεκτροτομογραφίας	145
Εικόνα 5.14: Ηλεκτρόδια και σύνδεση πολυκάναλου καλωδίου για τη μέθοδο της τομογραφίας.....	146

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1.1: Τύποι υπολογισμού αντίστασης γειωτών.....	17
Πίνακας 1.2: Ελάχιστες διατομές γειωτών κατά ΕΛΟΤ HD 384, VDE 0100, Teil 540, και DIN 57100.....	18
Πίνακας 1.3: Διάφορα είδη γειωτών ταινίας ή συρματόσχοινου.....	26
Πίνακας 1.4: Τιμές αντίστασης γείωσης για επεκτάσεις γειωτή και διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης εδάφους	35
Πίνακας 2.1: Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους.....	55
Πίνακας 2.2: Επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία στην ειδική αντίσταση.....	56
Πίνακας 2.3: Επίδραση της περιεκτικότητας των αλάτων στην ειδική αντίσταση του εδάφους.....	57
Πίνακας 2.4: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση.....	58
Πίνακας 2.5: Παραλλαγές των διατάξεων των ηλεκτροδίων	67
Πίνακας 6.1: Ανάλυση κόστους εγκατάστασης των συστημάτων γείωσης.....	156

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς διαφόρων βελτιωτικών υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα συστήματα γειώσεων για την ελάττωση της αντίστασης γείωσης, σε συνάρτηση με το χρόνο, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους. Η χαμηλή τιμή της αντίστασης γείωσης διασφαλίζει την απρόσκοπτη ροή όλου του ρεύματος σφάλματος, μέσω του ηλεκτροδίου γείωσης, προς τη γη και έχει ως αποτέλεσμα την ασφάλεια του προσωπικού και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης.

Λέξεις κλειδιά

Σύστημα γείωσης, ηλεκτρόδιο γείωσης, αντίσταση γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, βελτιωτικά υλικά γείωσης.

Abstract

It is an aim of this post-graduate thesis to study the behavior of ground enhancing compounds, which are widely used in grounding systems, aiming to decrease grounding resistance value. All this in relation to time, environmental conditions, soil temperature and humidity. Low grounding resistance value ensures that the fault current, mainly through the grounding electrode, flows smoothly into the earth. This results in the safety of both installation personnel and power equipment involved.

Key words

Grounding system, grounding electrode, ground resistance, resistivity, ground enhancing compounds.

Πρόλογος

Η γείωση διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στους τομείς των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων ισχύος, της αντικεραυνικής προστασίας και των τηλεπικοινωνιών.

Αντικειμενικός σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να μεταφέρει και να διαχέει το ρεύμα σφάλματος στη γη, εμφανίζοντας τη μικρότερη δυνατή αντίσταση στη διέλευση του ρεύματος στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Το γεγονός αυτό ελαττώνει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας των χρηστών της ηλεκτρικής εγκατάστασης, κατά την εκδήλωση ενός σφάλματος στην εγκατάσταση, καθώς και των ατόμων που βρίσκονται κοντά σε αυτή, στην περίπτωση που πέσει κεραυνός στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Επίσης εξασφαλίζεται η ακεραιότητα και η ομαλή λειτουργία όλου του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Τέλος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών το σύστημα γείωσης παρέχει ένα δυναμικό αναφοράς για τα ηλεκτρικά σήματα.

Για να επιτευχθούν όλοι οι προαναφερόμενοι στόχοι, η αντίσταση γείωσης ενός συστήματος γείωσης θα πρέπει να έχει πολύ χαμηλή τιμή έτσι ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη ροή όλου του ρεύματος σφάλματος μέσω του ηλεκτροδίου γείωσης προς τη γη. Η πολυπλοκότητα όμως της δομής του εδάφους σε πολλές περιπτώσεις είναι τέτοια που δεν είναι εφικτές οι απαιτούμενες από τα Πρότυπα τιμές της αντίστασης γείωσης. Αντί λοιπόν της τοποθέτησης επιπρόσθετων ηλεκτροδίων γείωσης για την ελάττωση της αντίστασης γείωσης, εργασία που πολλές φορές είναι δύσκολη και αρκετά δαπανηρή, λόγω της δομής του εδάφους ή και έλλειψης χώρου, έχει αναπτυχθεί εναλλακτική μέθοδος χρήσης βελτιωτικών υλικών εδάφους.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, τοποθετήθηκαν ηλεκτρόδια γείωσης στο χώρο του Ε.Μ.Π. του Ζωγράφου, με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς διαφόρων βελτιωτικών υλικών γείωσης σε συνάρτηση με το χρόνο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα:

Στο **κεφάλαιο 1** πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην ορολογία και στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Γίνεται λεπτομερής αναφορά σε όλα τα είδη των ηλεκτροδίων γείωσης και όλες τις διατάξεις γείωσης που υπαγορεύονται από τα διεθνή Πρότυπα και την ελληνική νομοθεσία.

Στο **κεφάλαιο 2** αναφέρονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον ορισμό και την αναλυτική περιγραφή της έννοιας “ειδική αντίσταση”. Παρατίθενται ενδεικτικές τιμές της ειδικής αντίστασης διαφόρων κατηγοριών εδάφους, αναλύονται όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν και καθορίζουν την τιμή της και αναφέρονται διεξοδικά όλες οι μέθοδοι μέτρησής της *in situ* και στο εργαστήριο.

Στο **κεφάλαιο 3** αναλύεται η κατανομή των δυναμικών στο έδαφος, ορίζεται διανυσματικά η σύνθετη αντίσταση γείωσης και παρουσιάζονται εξισώσεις και μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον ακριβή υπολογισμό της σε κάθε περίπτωση. Παράλληλα παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της τιμής της αντίστασης γείωσης, καθώς επίσης και οι απαιτήσεις και προδιαγραφές για αυτές τις μετρήσεις.

Στο **κεφάλαιο 4** παρατίθεται μια αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων. Πραγματοποιείται μια εκτενής αναφορά σε μελέτες και ερευνητικές εργασίες, που έχουν παρουσιασθεί κατά καιρούς σε διάφορα διεθνή και έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.

Στο **κεφάλαιο 5** περιγράφονται ο χώρος, η διάταξη των ηλεκτροδίων, τα υλικά του συστήματος γείωσης που εγκαταστάθηκε για το σκοπό του πειράματος, ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις, οι μέθοδοι και οι μαθηματικές σχέσεις που εφαρμόστηκαν, τόσο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων όσο και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε γραφική απεικόνιση, καθώς επίσης και ορισμένα χρήσιμα γραφήματα για τη σύγκριση των πειραματικών τιμών των υπό εξέταση ηλεκτροδίων.

Στο **κεφάλαιο 6** αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των γραφημάτων, καταγράφονται διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών και γίνονται κάποιες προτάσεις για συνέχιση και επέκταση της συγκεκριμένης μελέτης στο μέλλον.

Στο **Παράρτημα** παρατίθενται όλοι οι πίνακες των μετρήσεων που διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια του πειράματος και με βάση τις οποίες σχεδιάστηκαν τα γραφήματα του κεφαλαίου 6.

Στο σημείο αυτό νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά:



Την κα. Σταυρούλα Καβατζά, Λέκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την ανάθεση του θέματος της μεταπτυχιακής εργασίας, αλλά και για τη στήριξη και συμπαράσταση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την πολύτιμη ηθική, υλική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχε, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η πραγματοποίηση του συγκεκριμένου πειράματος.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα Μηχανικό του Ε.Μ.Π., για την άψογη συνεργασία μας, την ανεκτίμητη συμβολή και βοήθειά του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθώς και για την ουσιαστική καθοδήγηση που μου παρείχε σε τεχνικά θέματα και στο σχεδιασμό του όλου εγχειρήματος.

Τον κ. Γεώργιο Αποστολόπουλο, Λέκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, για τη διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, για το ενδιαφέρον και την καθοδήγηση που μου παρείχε στη διεξαγωγή των μετρήσεων της ηλεκτροτομογραφίας.

Τέλος θα ήταν σοβαρή παράλειψη εκ μέρους μου αν δεν ευχαριστούσα θερμά όλα τα μέλη του προσωπικού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα την κα. Λέτα Ηλία και τους κ.κ. Χρήστο Ηλία και Αριστείδη Γιάννακα για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς και όλους τους ανθρώπους που με στήριζαν σε δύσκολες στιγμές κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Preface

Grounding plays a major role in the fields of electric power installations, lightning protection and communication.

The objective of the grounding system is to carry and dissipate fault current into the ground, providing the lowest impedance path for fault currents to be dispersed into the ground, in the shortest time possible. This fact ensures that any user of the power installation or any individual in the vicinity of the grounding system, is not exposed to a critical electrical shock, e.g. in the case of a lightning strike on the Lightning Protection System. Furthermore, the equipment integrity and the power supply continuity are to be maintained. In ELV and signal systems apart from safety concerns, the grounding system also provides a reference potential for electrical signals.

To achieve the goals mentioned, the grounding resistance of the grounding system must have low value enough so as to make sure the fault current is diverged mainly through the grounding electrode into the earth. Yet, the complexity of soil structure is such in many cases, that it may not reach the grounding resistance values, required by the Standards. Since it is often too difficult and expensive to achieve the desired grounding resistance by adding more grounding electrodes, due to soil structure and lack of space, an alternative solution was developed by using ground enhancing compounds.

In the context of the present post-graduate thesis, grounding electrodes were installed in NTUA Zografou Campus with the aim of studying the behavior of several ground enhancing compounds in relation to time and environmental conditions. More specifically:

Chapter 1 includes an extensive reference to the terminology and basic principles that govern the grounding systems. There is detailed reference to all kinds of grounding electrodes as well as the grounding terms which are dictated by the International Standards and the Greek legislation.

Chapter 2 comprises all the necessary evidence for the definition and an analytical description of the term “resistivity”. Suggestive rates of resistivity of various ground categories are submitted, the factors which affect and determine

its rate are analysed and all its measurement methods both in situ and in the laboratory are thoroughly examined.

Chapter 3 analyses the potential distribution of the ground, the grounding impedance is vectorially defined and there is a presentation of the equations and mathematical models which are used for an accurate calculation of the grounding impedance in any case. In parallel, the measurement methods of the grounding από τα σχήματα impedance are presented as well as their requirements and specifications.

Chapter 4 consists of an analytical bibliographical review of the ground enhancing compounds. There is an extensive reference to studies and research papers which have occasionally been presented in several internationally distinguished journals and conferences.

Chapter 5 provides a description of the space, the arrangement of the electrodes and the materials of the grounding system which was installed for the purpose of the experiment. Furthermore, there is reference to the laboratory equipment which was used for the measurements, the methods and mathematical relations which were applied both for the accomplishment of the measurements and the inference of the results. Finally, there is a graphical representation of the measurement results along with several useful graphs for the comparison of the experimental rates of the electrodes under study.

Chapter 6 analyses the measurement and graph results and also several useful conclusions are recorded concerning the behavior of the ground enhancing compounds. Several suggestions regarding the future continuation and expansion of this specific study are made.

In the **Appendix** the measurement charts which were created during the experiment upon which the graphs in chapter 6 were designed, are available.

Acknowledgements

Firstly, I would like to sincerely thank Mrs Stavroula Kavatza, Lecturer of School of Electrical and Computer Engineering, for assigning this dissertation to me but also for her kind support advice and guidance during my post-graduate course.

Secondly, I am grateful to Mr Ioannis Ath. Stathopoulos, Professor of School of Electrical and Computer Engineering, for his moral, material and economic support without which the realization of the present experiment would be impossible.

Many thanks are due to Mr Ioannis F. Gonos, Dr. Engineer of National Technical University of Athens, for our wonderful cooperation, his invaluable contribution, support and help with this assignment and his substantial guidance on technical matters and the design of the whole project.

I would also like to sincerely thank Mr. George Apostolopoulos, Lecturer of School of Mining and Metallurgical Engineering, for the disposal of the measuring equipment of Applied Geophysics Laboratory, for his interest and guidance on the application of resistivity tomography method.

Last but not least, most sincere thanks are due to the staff of High Voltage Laboratory, more specifically to Mrs Letta Ilia, Mr Christos Ilias and Mr Aristidis Giannakas for their technical support during this experiment. My final thanks are due to all those people that supported me whenever I encountered difficulties during my post-graduate studies.

Κεφάλαιο 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

Τί γάρ ὠφελήσει ἄνθρωπον ἔαν κερδήσῃ τον κόσμον ὅλον, καί ζημιωθῇ την ψυχὴν αὐτοῦ;
Μάρκ. η' 36

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην ορολογία και στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Η ερμηνεία και η επεξήγηση των όρων γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 81–1983 [1] και με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [2] το οποίο αποτελεί την αναθεωρημένη έκδοση του προτύπου IEEE Std 80-1986 [3].

1.1 Ο ρόλος της γείωσης

Είναι γνωστό ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Ωστόσο η ροή του ρεύματος προς το σημείο αυτό πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία του συστήματος και σε όλες τις περιπτώσεις την ελάχιστη πτώση δυναμικού [4]. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει τις πιθανότητες ανάπτυξης επικινδύνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς [5].

Στην περίπτωση που ένα σύστημα είναι εξ' ολοκλήρου απομονωμένο, προκειμένου να βρίσκεται σε πλήρη προστασία, η εφαρμογή συστήματος γείωσης δεν είναι αναγκαία για την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Ωστόσο, στην πράξη τα συστήματα δεν είναι απομονωμένα αλλά βρίσκονται σε επαφή με εξωτερικούς μηχανισμούς σύζευξης, επομένως στην περίπτωση εμφάνισης κεραυνού παρατηρείται αύξηση του δυναμικού και μεταβατική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ του συστήματος και του εξωτερικού χώρου, προκαλώντας σημαντικές καταστροφές και πιθανόν τραυματισμούς. Για την αποφυγή των φαινομένων που αναφέρθηκαν ανωτέρω, επιβάλλεται η δημιουργία

και η εγκατάσταση συστημάτων γείωσης για τη μεταφορά του ρεύματος που φέρει ο κεραυνός στη γη.

Συνεπώς, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα [5]:

1. Προστασία του ανθρώπου από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.
2. Προστασία της κατασκευής και του εξοπλισμού από κεραυνοπληξίες ή ρεύματα σφαλμάτων.
3. Μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και περιορισμός ηλεκτρικών και μαγνητικών ζευξέων.

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [2], όλα τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη μιας εγκατάστασης, θα πρέπει να συνδέονται προς τη γη μέσω ειδικών αγωγών προστασίας και κάτω από κατάλληλες συνθήκες, όπως αυτές επιβάλλονται από το σύστημα σύνδεσης των γειώσεων του δικτύου τροφοδοσίας. Τα διαφορετικά μεταξύ τους αγωγίμα μέρη, με τα οποία είναι δυνατό να υπάρξει ταυτόχρονη επαφή, θα πρέπει να γειώνονται μέσω του ίδιου ηλεκτροδίου γείωσης. Οι διατάξεις γείωσης μπορούν να χρησιμοποιούνται είτε συγχρόνως για την προστασία και τη λειτουργία μια ηλεκτρικής εγκατάστασης, είτε μόνο για σκοπούς προστασίας της ή λειτουργίας της εν λόγω εγκατάστασης. Σε περιπτώσεις που μια διάταξη γείωσης προορίζεται για προστατευτικό και λειτουργικό σκοπό, προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στις απαιτήσεις που αφορούν τη χρήση της για προστασία.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης και η ανάπτυξη εξειδικευμένων μοντέλων εξομοίωσής τους αποτελεί ένα καινοτόμο και αρκετά περίπλοκο θέμα, το οποίο απασχολεί μεγάλη ομάδα ερευνητών. Ιδιαίτερα σημαντικό και κρίσιμο θέμα αποτελεί η μελέτη της μεταβατικής κατάστασης των συστημάτων γείωσης, η οποία συνοδεύεται από υψηλές τάσεις και επικίνδυνα φαινόμενα. Η μη γραμμική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης στη μεταβατική κατάσταση, αποτελεί ένα δύσκολο ζήτημα εξαιτίας της εξαιρετικά σύνθετης διεργασίας. Ωστόσο γίνονται προσπάθειες προσέγγισης του

φαινομένου και ανάπτυξης κατάλληλων μοντέλων για τη μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς αυτής.

1.2 Βασικοί ορισμοί

Γείωση είναι η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιου μεγέθους, που να θεωρείται γη. Σκοπός της γείωσης είναι ο καθορισμός και η διατήρηση του δυναμικού της γης ή του αγώγιμου σώματος στους αγωγούς που συνδέονται με αυτό [2].

Διάταξη-Σύστημα γείωσης (Grounding system) που περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής. Τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης γείωσης είναι το ηλεκτρόδιο γείωσης, ο αγωγός γείωσης και ο κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης [2].

Άπειρη γη είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε “άπειρη απόσταση” από το γειωτή. Λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών. Λέμε ότι, το δυναμικό της άπειρης γης είναι μηδέν. Για πρακτικούς σκοπούς η “άπειρη απόσταση” είναι 5 έως 10 φορές η μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή.

Αντίσταση γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή $R=U/I$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι για το λόγο αυτό, μια ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [6].

Η αντίσταση γείωσης, η οποία μετράται σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Για το λόγο αυτό, το υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης είναι κατά κανόνα χαλκός επικασιτερωμένος, για την αποφυγή οξειδωσης. Η αντίσταση γείωσης R είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως R_δ .

Ρεύμα γης (Ground current) είναι το ρεύμα που ρέει από ή προς τη γη, ή το ισοδύναμο γης [2].

Ηλεκτρόδιο γείωσης (Ground electrode) ή γειωτής είναι ένα αγωγίμο σώμα ή ένα σύνολο αγωγίμων σωμάτων συνδεδεμένα μεταξύ τους, σε μια διάταξη οποιουδήποτε γεωμετρικού σχήματος, σε άμεση επαφή με τη γη. Το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων γείωσης είναι συνήθως χαλκός, χάλυβας θερμά επιψευδαργυρωμένος, χάλυβας ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένος ή ανοξείδωτος χάλυβας [2].

Αγωγός γείωσης είναι ο αγωγός που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με έναν ακροδέκτη ή ζυγό γείωσης [2].

Κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης είναι ένας ακροδέκτης ή ζυγός στον οποίο συνδέονται οι αγωγοί γείωσης, οι αγωγοί προστασίας, οι αγωγοί ισοδυναμικής σύνδεσης και οι αγωγοί της γείωσης λειτουργίας, αν υπάρχουν [2].

Αγωγός προστασίας (PE) που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μέτρων προστασίας και προορίζεται για την ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγωγίμων μερών, που περιλαμβάνονται σε μια εγκατάσταση, με σημεία όπως: τον κύριο ακροδέκτη γείωσης, ξένα αγωγίμα στοιχεία, το ηλεκτρόδιο γείωσης, το γειωμένο σημείο της πηγής τροφοδοσίας ή ένα γειωμένο τεχνητό ουδέτερο κόμβο [2].

Ουδέτερος αγωγός (N) είναι ο αγωγός που συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο ενός συστήματος τροφοδότησης (π.χ. μετασχηματιστή ή γεννήτριας) και συμμετέχει στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας [2].

Ισοδυναμική Σύνδεση (IS) είναι η ηλεκτρική σύνδεση, που διατηρεί στο ίδιο ή περίπου στο ίδιο δυναμικό, τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη και τα ξένα αγωγίμα στοιχεία. Μια ισοδυναμική σύνδεση μπορεί να θεωρείται κύρια ισοδυναμική ή συμπληρωματική σύνδεση [2].

Αγωγός ισοδυναμικής σύνδεσης είναι ο αγωγός που συνδέει τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη και τα ξένα αγωγίμα στοιχεία, ώστε να εξασφαλίζει την ισοδυναμική τους σύνδεση [2, 3].

Κύρια Ισοδυναμική Σύνδεση (KIS) είναι η ισοδυναμική σύνδεση του κύριου αγωγού προστασίας (PE), των εισερχόμενων στο κτίριο αγωγίμων δικτύων, των αγωγίμων κατασκευών και στοιχείων του κτιρίου [2].

Συμπληρωματική Ισοδυναμική Σύνδεση (ΣΙΣ) που εφαρμόζεται στην ΚΙΣ υπό ειδικές απαιτήσεις. Μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός ξένου αγωγίμου

στοιχείου μόνιμης κατασκευής του κτιρίου, το μεταλλικό σκελετό του κτιρίου ή στον τοπικό ζυγό του αγωγού προστασίας ή ζυγό γείωσης που συνδέεται άμεσα με τη γείωση [2].

Ανύψωση δυναμικού γης (Ground Potential Rise (GPR)) είναι το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που μπορεί να λάβει ένα πλέγμα γείωσης υποσταθμού σε σχέση με ένα απομακρυσμένο σημείο γείωσης, το οποίο υποτίθεται ότι έχει το δυναμικό της απομακρυσμένης γης. Αυτή η τάση, GPR, είναι ίση με το γινόμενο του μέγιστου ρεύματος που διαρρέει το πλέγμα και της αντίστασης γείωσης [2].

$$GPR = Z \cdot I \quad (1.1)$$

Όπου Z είναι η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γείωσης, όπως αυτή φαίνεται από τον αγωγό που διοχετεύει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Η σύνθετη αντίσταση Z συνίσταται από τις αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις των αγωγών που αποτελούν τη γείωση και την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περικλείει το δίκτυο γείωσης. Σε χαμηλές συχνότητες και για δίκτυα γείωσης που είναι σχετικά μικρού μεγέθους, η αντίσταση του όγκου του εδάφους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αγωγών του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση των αγωγών μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό του Z .

Συντελεστής ελάττωσης (Decrement factor) είναι ο συντελεστής προσαρμογής που χρησιμοποιείται, σε συνδυασμό με την παράμετρο ρεύματος συμμετρικού σφάλματος προς γη, σε υπολογισμούς γείωσης για τον έλεγχο της ασφάλειας. Καθορίζει το ισοδύναμο rms της κυματομορφής της ασύμμετρης έντασης για δοθείσα χρονική διάρκεια σφάλματος, t_f , λογαριάζοντας την επίδραση της αρχικής συνεχούς συνιστώσας και της απόσβεσης της τελευταίας κατά τη διάρκεια του σφάλματος [7].

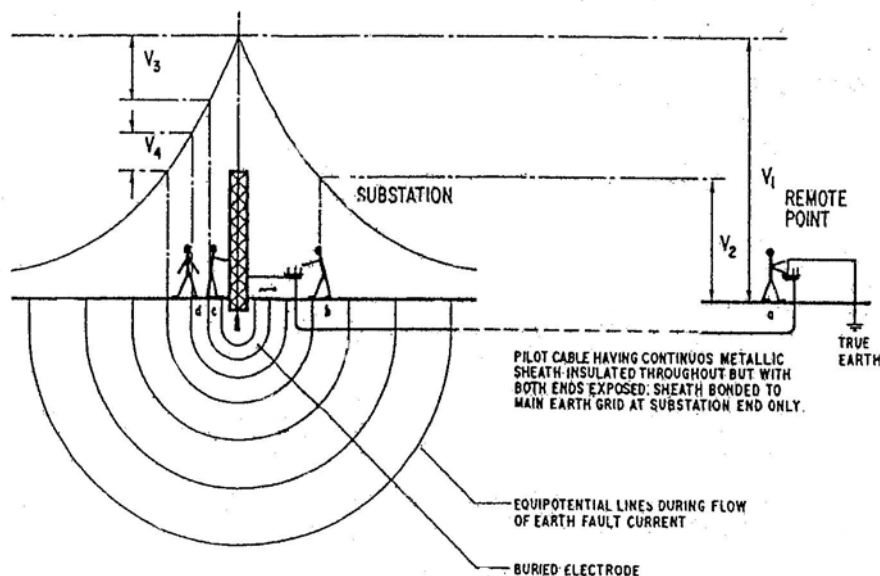
Τάση πλέγματος (Mesh voltage) είναι η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης [2, 3].

Τάση επαφής (Touch voltage) είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή. Στο Σχήμα 1.1 το άτομο b χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της τάσης επαφής. Η διαφορά δυναμικού U_2 που “βλέπει” το σώμα είναι το αποτέλεσμα επαφής ενός χεριού με τα δύο πόδια. Το υψηλότερο δυναμικό προκύπτει όταν υπάρχει μια μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού

δυναμικού και το άτομο στέκεται σε απόσταση $1m$, ακουμπώντας σε αυτήν τη δομή. Ο κίνδυνος από αυτόν τον τύπο της επαφής είναι μεγαλύτερος από τον κίνδυνο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, διότι η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος του σώματος και δύναται να επηρεάσει τους μύες της καρδιάς [2].

Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage) είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που περικλείονται στην τοποθεσία του υποσταθμού που μπορεί να γεφυρωθεί με άμεση επαφή χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι. Η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο, ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο πλέγμα γείωσης, θεωρείται ότι είναι αμελητέα σε συμβατικούς υποσταθμούς. Ωστόσο, η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο μεταλλικό πλέγμα και σε μεταλλικά αντικείμενα που υπάρχουν στην τοποθεσία του υποσταθμού, όπως ένας μονωμένος φράκτης, αλλά μη συνδεδεμένα στο πλέγμα γείωσης, μπορεί να είναι ουσιαστική. Σε έναν τυπικό υποσταθμό, η χειρότερη τάση επαφής συνήθως είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε ένα χέρι και τα πόδια ενός ατόμου, όταν αυτά απέχουν τη μέγιστη δυνατή απόσταση [2].

Βηματική τάση (Step voltage) είναι η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος $1m$, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Στο Σχήμα 1.1 το άτομο a χρησιμοποιείται για την επεξήγηση της βηματικής τάσης. Η διαφορά δυναμικού U_I που “βλέπει” το σώμα περιορίζεται από την τομή ανάμεσα στα δύο σημεία της γης που απέχουν μεταξύ τους $1m$. Εφόσον το δυναμικό στη γη είναι μεγαλύτερο στην περιοχή που γειτνιάζει με το ηλεκτρόδιο, συνεπάγεται ότι το μέγιστο βηματικό δυναμικό, υπό συνθήκες σφάλματος προς γη, θα προκύπτει όταν το άτομο έχει ένα πόδι στην περιοχή της μέγιστης δυναμικής ανύψωσης και το άλλο πόδι κατά ένα βήμα προς τη γη [2].



Σχήμα 1.1: Βηματική τάση, τάση επαφής, μεταφερόμενη τάση [2].

Μεταφερόμενη τάση (Transferred voltage) είναι μια ειδική περίπτωση της τάσης επαφής, όπου μια τάση μεταφέρεται προς ή από τον υποσταθμό ή σε ένα απόμακρο σημείο εξωτερικό της τοποθεσίας του υποσταθμού. Στο Σχήμα 1.1 το άτομο c χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του υψηλού δυναμικού που μεταφέρεται σε μια περιοχή μηδενικού δυναμικού μέσω του οπλισμού μιας κεραίας. Εφόσον ο οπλισμός είναι συνδεδεμένος στο κεντρικό πλέγμα γείωσης του υποσταθμού, η τάση U_3 θα είναι ίση με την ανύψωση του δυναμικού της γης του υποσταθμού. Στο σχήμα η U_4 παρουσιάζεται μικρότερη από τη U_3 . Αυτό συμβαίνει διότι το άτομο d βρίσκεται σε μερική απόσταση από το κύριο ηλεκτρόδιο γείωσης και συνεπώς υπόκειται στην κλίση δυναμικού γείωσης (ground potential gradient). Τα μεταφερόμενα δυναμικά θεωρείται ότι είναι τα πιο επικίνδυνα, διότι η τάση που εφαρμόζεται στο άτομο δύναται να είναι ίση με την πλήρη ανύψωση δυναμικού και όχι με κλάσμα της, όπως στην περίπτωση της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής [2].

Λόγος X/R (X/R ratio) είναι ο λόγος της αντίδρασης του συστήματος προς την αντίσταση. Είναι ενδεικτικός του ρυθμού της ελάττωσης της dc αρχικής συνιστώσας. Ένας μεγάλος λόγος X/R αντιστοιχεί σε μια μεγάλη σταθερά χρόνου και ένα χαμηλό ρυθμό ελάττωσης [2].

Υλικό επιφανείας (surface material) είναι ένα υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και αποτελείται από, αλλά δεν περιορίζεται σε, πέτρα ή χαλίκι,

άσφαλο, ή τεχνητά υλικά. Το υλικό επιφανείας, ανάλογα με την ειδική αντίστασή του, μπορεί να επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα για την τάση επαφής και τη βηματική τάση που αφορούν τα πόδια του ανθρώπου [2].

Ενεργό μήκος (effective length) είναι το μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή του δε συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η τιμή του ενεργού μήκους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού, μειώνεται δε τόσο περισσότερο, όσο μικρότερο είναι το μέτωπο της κυματομορφής. Το ενεργό μήκος ενός αγωγού δίνεται από την ακόλουθη σχέση [8]:

$$l_e = 1,4 \cdot \sqrt{(\rho \cdot T)} \quad (1.2)$$

Όπου

ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

T ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής σε μsec

Το ενεργό μήκος ενός αγωγού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης, όταν αυτό θα χρησιμοποιηθεί και για αντικεραυνική προστασία, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος γείωσης της ανεμογεννήτριας.

1.3 Είδη γείωσης

Οι γειώσεις ανάλογα με το λειτουργικό τους σκοπό σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση διακρίνονται σε τρία βασικά είδη, παρόλο που στην πράξη δύνανται να συνυπάρχουν σε ένα σύστημα γείωσης. Τα είδη αυτά είναι:

- Γείωση λειτουργίας
- Γείωση προστασίας
- Γείωση ασφαλείας

1.3.1 Γείωση λειτουργίας

Είναι η γείωση ενός τμήματος εγκατάστασης που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας, όπως είναι ο ουδέτερος κόμβος γεννητριών, μετασχηματιστών ή

άλλων στοιχείων του δικτύου συνδεδεμένων σε αστέρα. Η γείωση λειτουργίας, εκτός της αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης, μπορεί να περιλαμβάνει και πρόσθετες ωμικές, επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις όπως αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως κατά την εκδήλωση σφαλμάτων προς γη [9]. Η γείωση λειτουργίας διακρίνεται σε:

- **Άμεση**, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση, πλην της αντίστασης γείωσης.
- **Έμμεση**, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Η γείωση χαρακτηρίζεται ως ανοικτή, όταν στη γραμμή γείωσης έχουν παρεμβληθεί διάκενα σπινθηριστών ή ασφάλειες διασπάσεως. Οι ανοικτές γειώσεις δε θεωρούνται γειώσεις λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν μια διάταξη γείωσης προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα ως γείωση λειτουργίας και προστασίας, απαιτούμενη έμφαση πρέπει να δοθεί στις απαιτήσεις σχεδιασμού που αφορούν τη γείωση προστασίας. Σε αυτήν την περίπτωση η ίδια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ).

1.3.2 Γείωση προστασίας

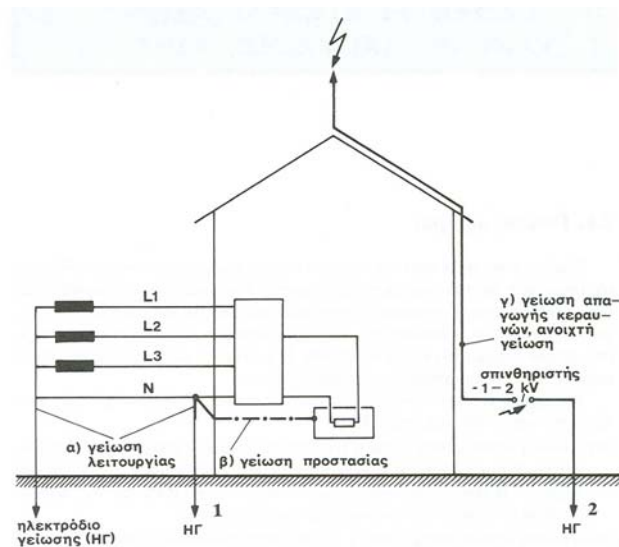
Καλείται, η χωρίς παρεμβολή άλλων αντιστάσεων (πλην της αντίστασης γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης) γείωση κάθε αγωγίμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου, που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγωγίμα μέρη μιας εγκατάστασης ή κατασκευής, τα οποία δε συμμετέχουν στη λειτουργία της (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδυνών και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ.) και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά [9].

Τέτοιου είδους γείωση εφαρμόζεται υποχρεωτικά σε κάθε εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την προστασία των ανθρώπων από την

ανάπτυξη επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών, τα οποία σε κανονική λειτουργία δεν είναι υπό τάση (Σχήμα 1.2). Τα υλικά κατασκευής της επιβάλλεται να εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια συνεχή λειτουργία της, τη διέλευση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ή διαρροών προς τη γη, την αντοχή της σε φαινόμενα διάβρωσης και σε μηχανικές καταπονήσεις. Μια διάταξη γείωσης προστασίας ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση αντικεραυνικής προστασίας (Σχήμα 1.3), όταν βέβαια πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο *ΕΛΟΤ EN 62305-3*. Η γείωση προστασίας γίνεται είτε με άμεση γείωση (απευθείας αγωγήμη σύνδεση στο σύστημα γείωσης) είτε με ουδετέρωση. Η ουδετέρωση είναι η αγωγήμη σύνδεση με ουδέτερο αγωγό.

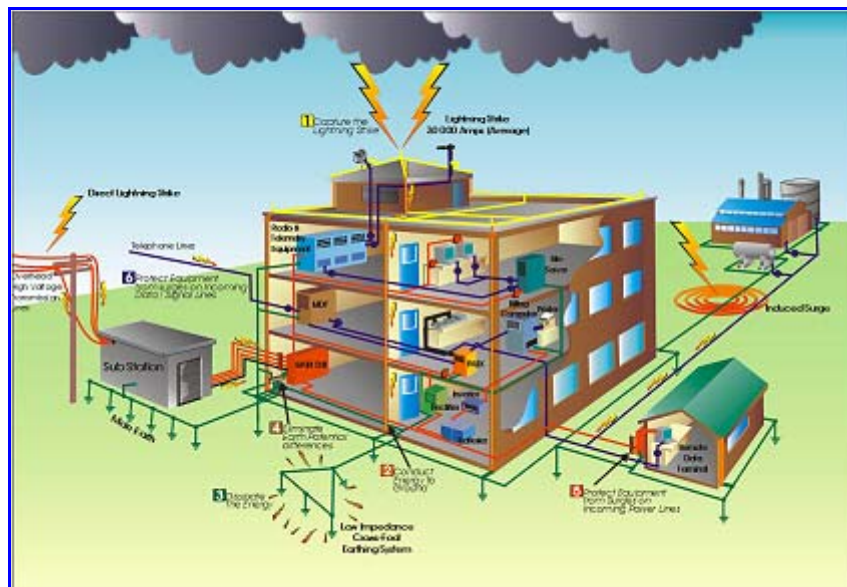
1.3.3 Γείωση ασφαλείας ή συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ)

Γείωση ασφαλείας ονομάζεται κάθε γείωση μιας εγκατάστασης που χρησιμεύει για να διοχετεύονται προς τη γη ρεύματα σφάλματος από εξωτερικά ατμοσφαιρικά αίτια όπως οι κεραυνοί (Σχήμα 1.2) και χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκομένων στον προστατευόμενο χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικεράυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοικτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη.



Σχήμα 1.2: Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης [10].

Όταν δεν πρόκειται για οικιακή εγκατάσταση, τότε οι γειώσεις προστασίας και ασφάλειας συνυπάρχουν σε μια διάταξη, η οποία είναι μέρος της συνολικής διάταξης αντικεραυνικής προστασίας [9].



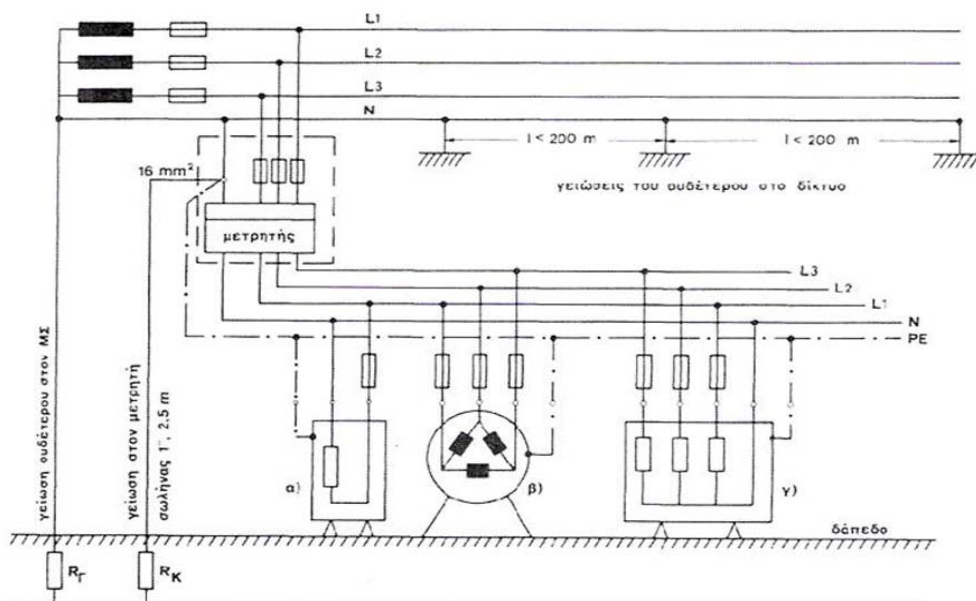
Σχήμα 1.3: Συνδυασμός συστήματος γείωσης και συστήματος αντικεραυνικής προστασίας [11].

1.4 Μέθοδοι γείωσης

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι ακόλουθες:

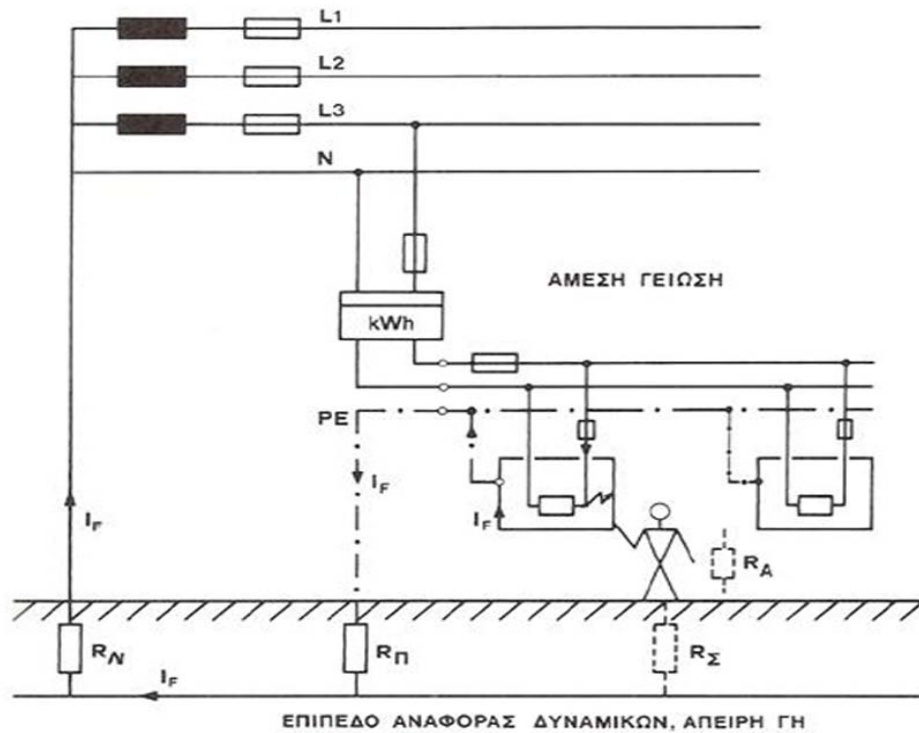
- Η ουδετέρωση, είναι η σύνδεση των μεταλλικών μερών των συσκευών με αγωγό προστασίας που συνδέεται με τον ουδέτερο στον πίνακα παροχής. Ο ουδέτερος συνδέεται και με το ηλεκτρόδιο γείωσης στο σημείο παροχέτευσης πριν από το μετρητή (Σχήμα 1.4).

Η μέθοδος αυτή είναι εξίσου αποτελεσματική, όπως και η άμεση γείωση, αλλά απαιτεί μικρότερη αντίσταση γείωσης και χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, ειδικότερα σε αστικές περιοχές.



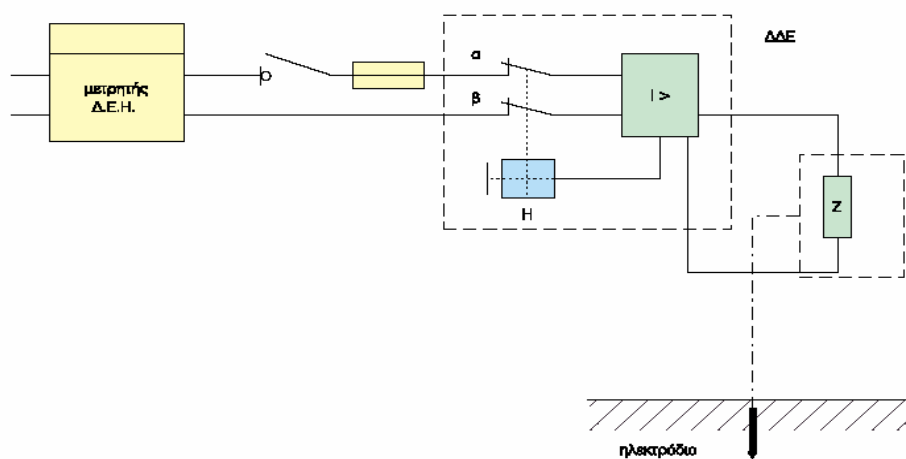
Σχήμα 1.4: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με ουδετέρωση.

- Η άμεση γείωση, δηλαδή η απευθείας αγωγίμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης του αγωγού γης, που είναι συνδεδεμένος με κάποιο αγωγίμο υλικό τοποθετημένο μέσα στη γη όπως πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο, κ.λπ. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται το σχέδιο ενός συστήματος άμεσης γείωσης.



Σχήμα 1.5: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με άμεση γείωση.

- Μέσω διακόπτη διαφυγής έντασης για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης.

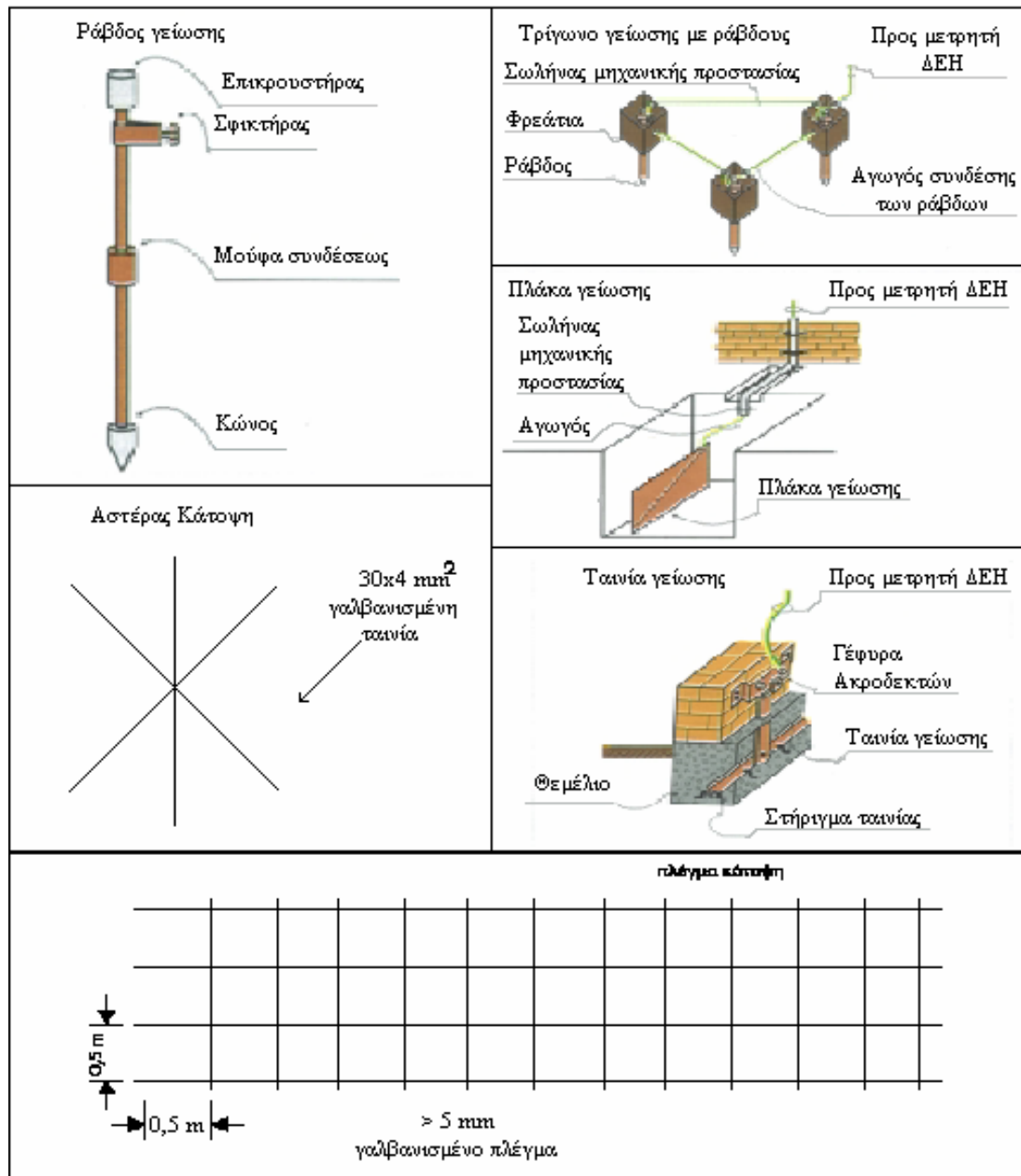


Σχήμα 1.6: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης, σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης.

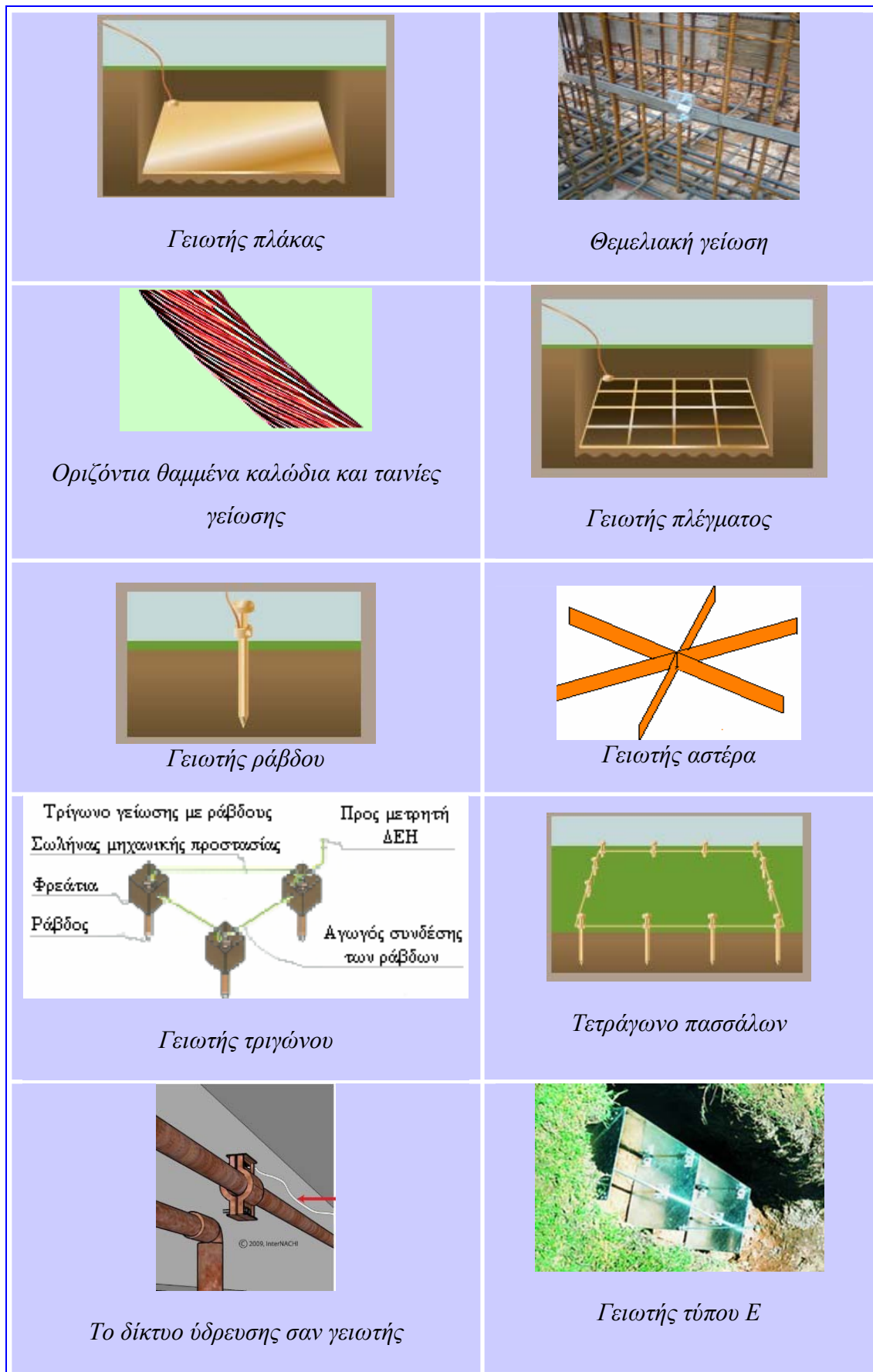
Πάντως και στις τρεις αυτές περιπτώσεις θα πρέπει να επιτυγχάνεται η απόξευση της εγκατάστασης το πολύ σε 5sec, αν η τάση κάποιου τμήματος αυτής σε σχέση με τη γη εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη των 50V.

1.5 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης

Τα ηλεκτρόδια γείωσης (γειωτές) που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το άρθρο 542.2.1 του Προτύπου ΕΛΟΤ HD 384 “Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις” [12], έχουν τις μορφές που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 1.7, Σχήμα 1.8).

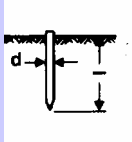
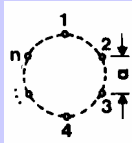
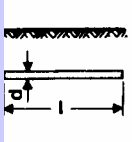
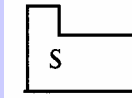
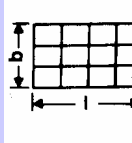
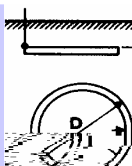
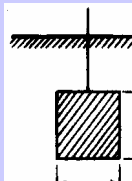


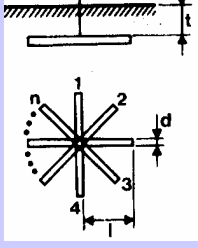
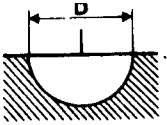
Σχήμα 1.7: Ηλεκτρόδια γείωσης σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 [9].



Σχήμα 1.8: Διάφοροι τύποι γειωτών [13, 14, 15].

Οι τύποι που δίνουν τις αντιστάσεις αυτών των γειωτών και οι ελάχιστες διατομές ηλεκτροδίων γείωσης κατά *ΕΛΟΤ HD 384*, παρατίθενται συνοπτικά στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακας 1.1, Πίνακας 1.2).

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}$	$R_A \cong \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασσάλων $\alpha \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ R_{A1} = αντίσταση ενός πασσάλου	$k = (1 \dots 1.5)$ για $n = 10 : k \approx 1.25$
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)		$R_A \approx \frac{2\rho}{l}$
 <i>S</i> εμβαδόν επιφανείας	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$		$R_A = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$
	Πλέγμα σε βάθος $0,5 - 1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$ $R_A \approx \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l_g}$ l_g συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$
	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right) \cdot \left(1 + \frac{\ln \frac{2D}{t}}{\ln \frac{8D}{d}}\right)$	$R = \frac{2\rho}{\pi D} *$
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη $S [\text{m}^2]$		$R = \frac{\rho}{4.5\alpha} **$

	$n=2$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.27td} \right)$	
	$n=3$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.25td} \right)$	
	$n=4$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.22td} \right)$	
	$n=5$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.09td} \right)$	
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D} ***$	
• D=ισοδύναμη διάμετρος. • Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος $D = 0,33U$, όπου U = μήκος αγωγού. • ** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S=επιφάνεια. • *** Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D = 1,57\sqrt[3]{V}$			

Πίνακας 1.1: Τύποι υπολογισμού αντίστασης γειωτών [9].

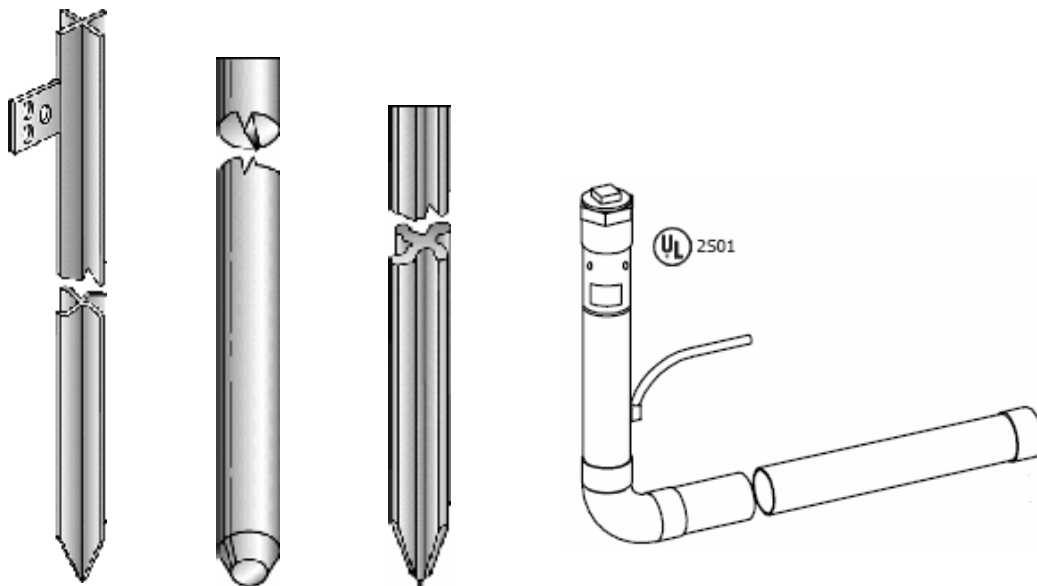
Μορφή γειωτή	Υλικό		
	Χάλυβας γαλβανισμένος (με 70μm στρώμα)	Χάλυβας επιχαλκωμένος	Χαλκός
Ταινία	100mm ² ελάχιστο πάχος 3mm	50mm ² ελάχιστο πάχος 2mm	50mm ² ελάχιστο πάχος 2mm
Ράβδος στρογγυλή	78mm ² =10 Φ	50mm ² χάλυβα 35mm ² χαλκός	35mm ²
Συρματό- σχοινο	95mm ² χονδρόκλωνο (δε χρησιμοποιείται)		35mm ² χονδρόκλωνο (ελάχιστο πάχος κλώνων 1,8mm)
Σωλήνας για πασσαλο- γειώσεις	Ονομαστική διάμετρος 1" (εσωτερική διάμετρος), ελάχιστο πάχος 2mm		Εσωτερική διάμετρος 20mm, ελάχιστο πάχος 2mm

Ράβδος L, U, T, I για πασσαλο-γειώσεις	Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, συνήθως όμως $100mm^2$, ελάχιστο πάχος $3mm$.	$50mm^2$ στρογγυλή ράβδος	Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, συνήθως όμως $35mm^2$, ελάχιστο πάχος $3mm$.
Πλάκα	Ελάχιστο πάχος $3mm$		Ελάχιστο πάχος $2mm$

Πίνακας 1.2: Ελάχιστες διατομές γειωτών κατά ΕΛΟΤ HD 384, VDE 0100, Teil 540, και DIN 57100.

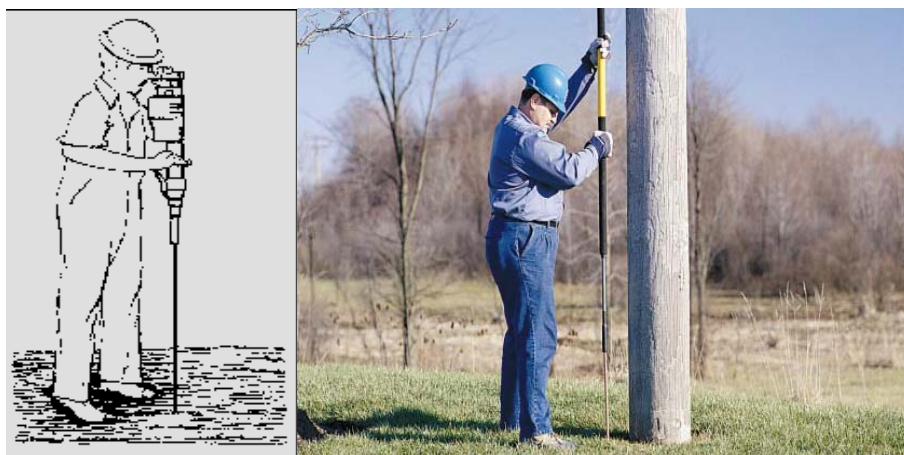
1.5.1 Γειωτής ράβδου

Είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μιας ίντσας ή μια ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, για παράδειγμα U, L, T ή I-προφίλ (Σχήμα 1.9).



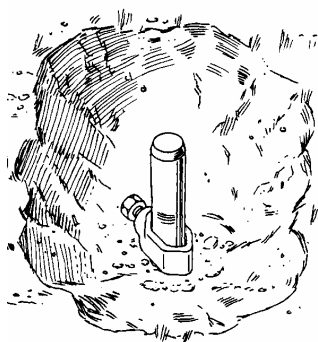
Σχήμα 1.9: Μορφές γειωτών ράβδου.

Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20°) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος, σε βάθος περίπου $2,5m$ με σφυρί χεριού, με μηχανικό σφυρί ή με κατάλληλο οδηγό ηλεκτροδίων, “Rod driver” (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10: Μηχανικό σφυρί και οδηγός ηλεκτροδίων αντίστοιχα.

Το άνω μέρος της ράβδου (περίπου 25cm) εισάγεται συνήθως σε φρεάτιο, έτσι ώστε το σημείο σύνδεσής της (Σχήμα 1.11) με τον αγωγό γείωσης να είναι επισκέψιμο (Σχήμα 1.12). Η σύνδεση του αγωγού γείωσης με το ηλεκτρόδιο γείωσης πρέπει να εκτελείται με ιδιαίτερη επιμέλεια και, αν απαιτείται, να προστατεύεται κατάλληλα, ώστε να εξασφαλίζεται από μηχανικές βλάβες και από διαβρώσεις (ΕΛΟΤ HD 384-542.3.2 [12]). Όταν χρησιμοποιείται σφιγκτήρας, αυτός πρέπει να είναι κατάλληλου τύπου, ώστε να μην προκαλείται βλάβη στο ηλεκτρόδιο ή στον αγωγό γείωσης.



Σχήμα 1.11: Σημείο σύνδεσης

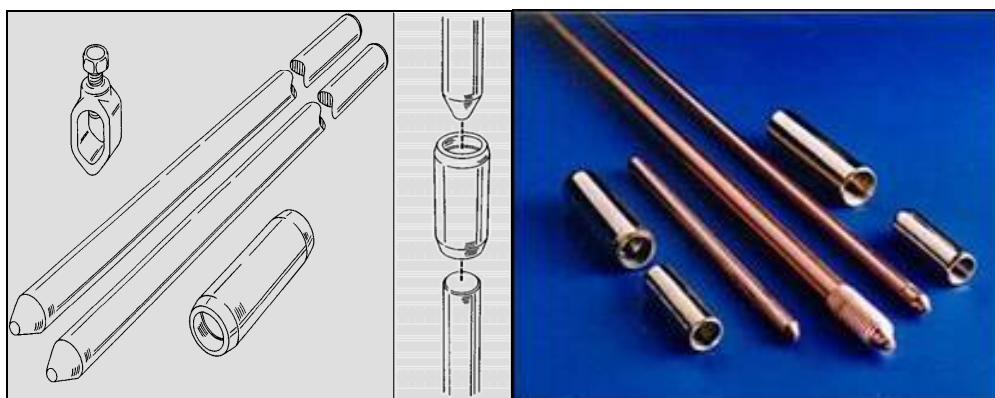


Σχήμα 1.12: Ειδικό φρεάτιο γείωσης

Συνήθως οι γειωτές αποτελούνται από δύο μικρότερου μήκους γειωτές, που συνδέονται μεταξύ τους με μούφα, η οποία φέρει σπείρωμα (Σχήμα 1.14). Το κάτω μέρος του γειωτή διαμορφώνεται σαν ακίδα, για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος.

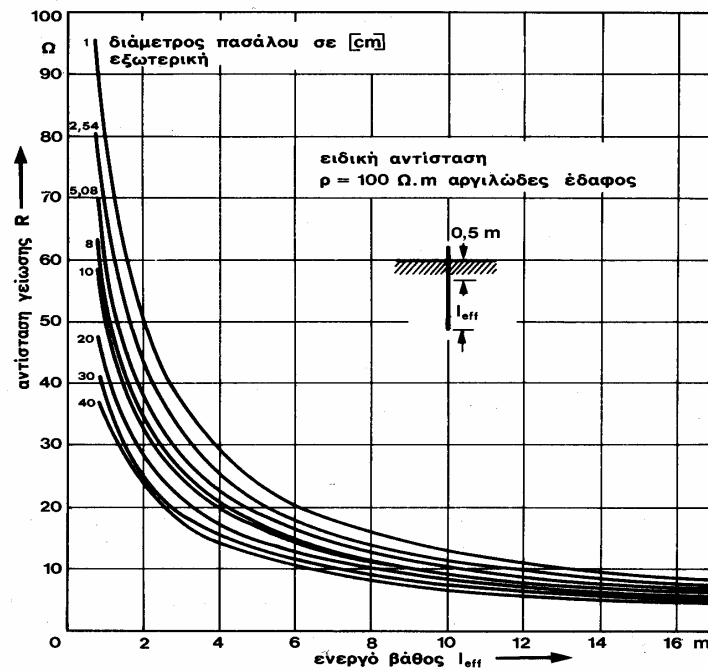


Σχήμα 1.13: Φρεάτια γείωσης



Σχήμα 1.14: Γειωτές ράβδου και εξαρτήματα επιμήκυνσης.

Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1.1 και το Σχήμα 1.15. Η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Η τιμή της αντίστασης γείωσης, που επιτυγχάνεται με τη χρήση ραβδοειδούς γειωτή, μειώνεται όσο μεγαλώνει το μήκος της ράβδου που τοποθετείται εντός του εδάφους. Ο τύπος και το βάθος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων γείωσης μέσα στο έδαφος, σύμφωνα με το άρθρο 542.2.2 του *ΕΛΟΤ HD 384* [12], πρέπει να είναι τέτοια, ώστε η αποξήρανση και το πάγωμα του εδάφους να μην αυξάνουν την αντίσταση γείωσης πέρα από την απαιτούμενη τιμή. Εφόσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, διότι αντέχουν στη διάβρωση. Η αντοχή στη διάβρωση απαιτείται από το *ΕΛΟΤ HD 384*, σύμφωνα με το άρθρο 548.5 περί προστασίας έναντι ηλεκτρολυτικής διάβρωσης.



Σχήμα 1.15: Αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασσάλων στο έδαφος. Το ενεργό μήκος δίνεται από τη σχέση $l_{eff} = l - 0,5m$.

1.5.1.1 Γειωτής ράβδου κυκλικής διατομής

Χαλύβδινος επιχαλκωμένος

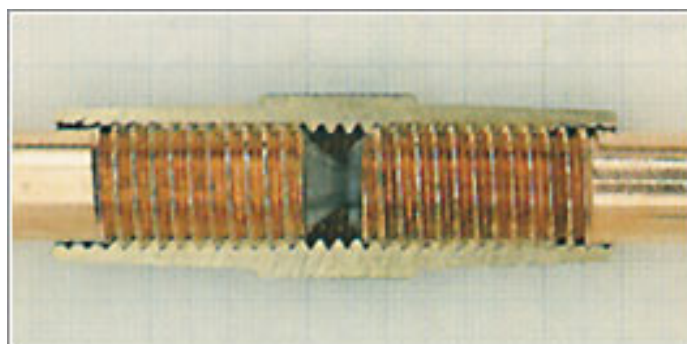
Κατασκευάζεται από χάλυβα ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένο (Σχήμα 1.16), με πάχος επιχάλκωσης τουλάχιστον $250\mu m$, όπως ορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 50164-2 [16], έτσι ώστε να εμπήγνυται και στα πιο σκληρά εδάφη χωρίς να απογυμνώνεται η χαλύβδινη ψίχα, πράγμα που θα είχε ως συνέπεια τη γρήγορη διάβρωσή της. Οι συνήθεις διαστάσεις των συγκεκριμένων γειωτών κυμαίνονται από $12mm$ σε διάμετρο και $1,2$ έως $3m$ σε μήκος.



Σχήμα 1.16: Χαλύβδινος επιχαλκωμένος γειωτής ράβδου.

Οι ράβδοι κυκλικής διατομής συνήθως φέρουν σπείρωμα στο άνω και κάτω άκρο, το οποίο πρέπει να δημιουργείται με εκτόνωση του υλικού και όχι με

κοπή, αποφεύγοντας έτσι τον κίνδυνο αποκάλυψης της χαλύβδινης ψίχας της ράβδου, με αποτέλεσμα τη διάβρωσή της. Το σπείρωμα όπως προαναφέρθηκε, επιτρέπει την επιμήκυνση των ράβδων σε βάθος με τη χρήση ορειχάλκινων συνδέσμων επιμήκυνσης, γνωστών και ως μούφες (Σχήμα 1.17). Οι σύνδεσμοι αυτοί δεν επιτρέπεται να κατασκευάζονται από άλλο υλικό όπως αλουμίνιο ή χάλυβα, έτσι ώστε να έχουν την κατάλληλη μηχανική αντοχή στη διάβρωση και πολύ μικρή αντίσταση διάβασης του ρεύματος σφάλματος αντιστοίχως.



Σχήμα 1.17: Ορειχάλκινη μούφα σύνδεσης γειωτή.

Χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος

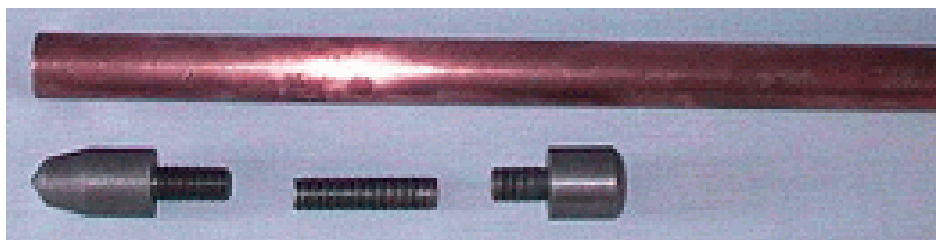
Κατασκευάζεται από θερμά επιψευδαργυρωμένο χάλυβα (Σχήμα 1.18), πάχους επιψευδαργύρωσης τουλάχιστον $50\mu m$, όπως ορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο *EN 50164-2* [16], για λόγους που αναφέρονται στους ηλεκτρολυτικούς επιχαλκωμένους γειωτές. Οι συνθήκες διαστάσεις των συγκεκριμένων γειωτών κυμαίνονται περίπου στα $20mm$ σε διάμετρο και 1 έως $2,5m$ σε μήκος.



Σχήμα 1.18: Χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος γειωτής ράβδου.

Χάλκινος

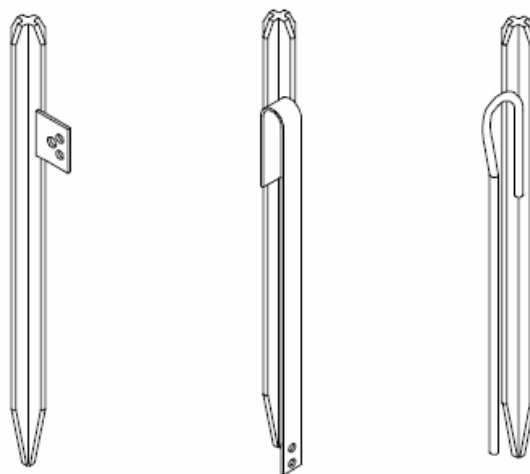
Οι ράβδοι χαλκού (Σχήμα 1.19) κατασκευάζονται από σκληρό χαλκό υψηλής αγωγιμότητας, με βάση το ευρωπαϊκό πρότυπο *EN 50164-2*. Τα ηλεκτρόδια χαλκού είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε τόπους όπου οι συνθήκες εδάφους είναι πολύ διαβρωτικές, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα.



Σχήμα 1.19: Ραβδοειδής κυκλικός γειωτής χαλκού.

1.5.1.2 Γειωτής ράβδου διατομής σταυρού

Κατασκευάζεται από χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο πάχους επιψευδαργύρωσης τουλάχιστον $50\mu m$. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος επιψευδαργύρωσης του γειωτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του στη διάβρωση. Οι διαστάσεις αυτού του γειωτή είναι $5cm$ σε διάμετρο και σε μήκη $1,5m$, $2m$ και $2,5m$. Το πάχος των ελασμάτων, τα οποία δημιουργούν τη σταυροειδή διατομή, είναι $3mm$. Ο γειωτής πρέπει να φέρει στο άνω άκρο συγκολλημένο διάτρητο έλασμα, για την προσαρμογή του αγωγού γείωσης, μέσω κατάλληλου σφιγκτήρα (Σχήμα 1.20).

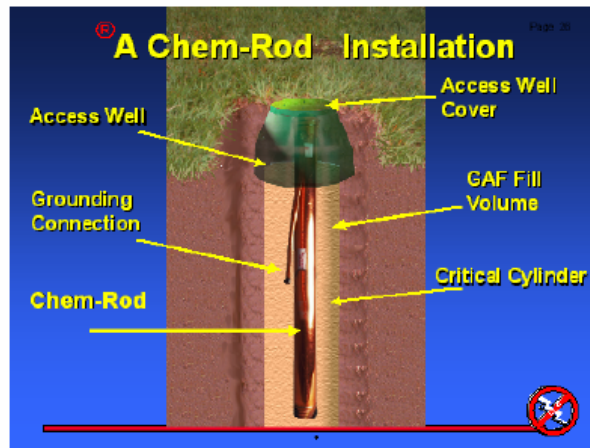


Σχήμα 1.20: Διάφορες μορφές γειωτών ράβδου διατομής σταυρού.

1.5.1.3 Ραβδοειδές χημικό ηλεκτρόδιο

Ένα ενεργό χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης (*Chemically Activated Grounding Electrode-CAGE*) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί μια αγωγή σύνδεση με τη γη (Σχήμα 1.21). Ένα χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης, επαρκώς συντηρημένο, αποτελεί μια συνεχή πηγή μεταλλικού ορυκτού

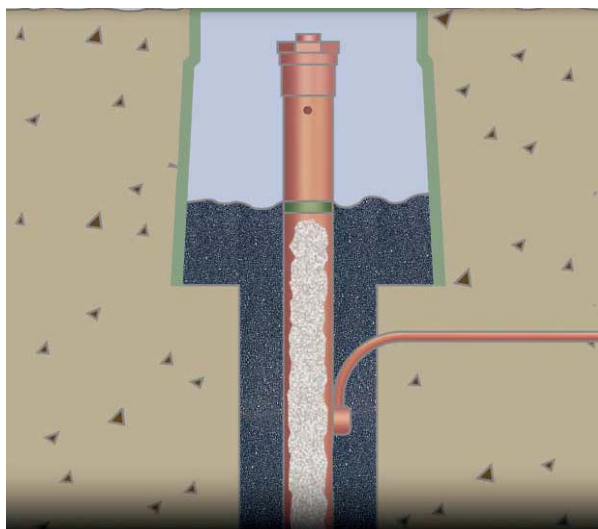
διαλύματος που διαρρέει στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο. Το ορυκτό διάλυμα προκαλεί τη μείωση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο (κυλινδρική περιοχή επιρροής), που οδηγεί σε μια σημαντικά χαμηλότερη τιμή αντίστασης γείωσης απ' ό,τι ένα συμβατικό ηλεκτρόδιο γείωσης.



Σχήμα 1.21: Εγκατάσταση χημικού ηλεκτροδίου γείωσης.



Σχήμα 1.22: Χημικά ηλεκτρόδια γείωσης.



Σχήμα 1.23: Εγκαταστημένο χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης.

Προδιαγραφές χημικού ηλεκτροδίου

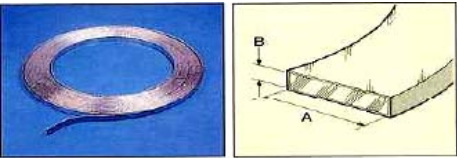
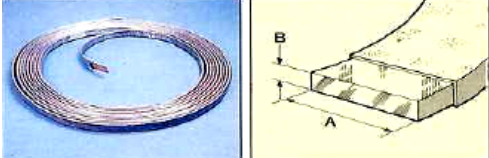
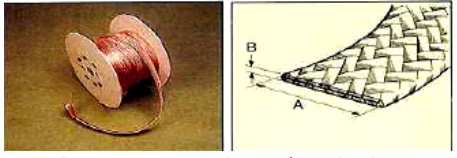
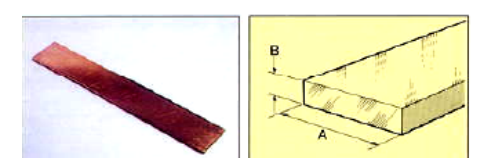
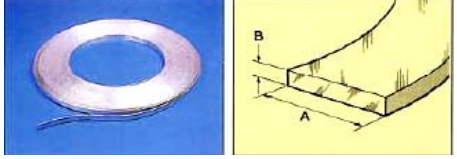
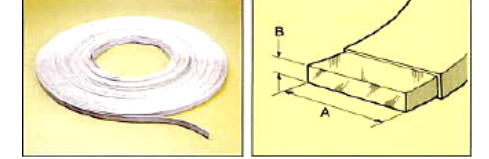
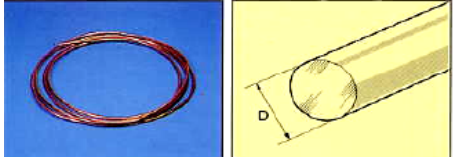
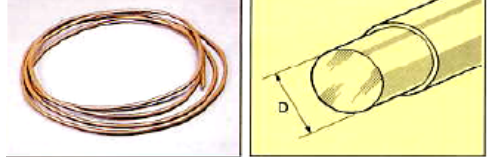
Ένα ενεργό χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης (Σχήμα 1.23):

- Κατασκευάζεται από μαλακό χαλκό υψηλής αγωγιμότητας, με ονομαστική διάμετρο $63,5\text{mm}$ και ελάχιστο μήκος $2,4\text{m}$ (Σχήμα 1.22).
- Περιέχει στο εσωτερικό του μεταλλικό ορυκτό άλας, μάζας τουλάχιστον 11kg .
- Απορροφά υγρασία τόσο από τον αέρα όσο και από το έδαφος στο οποίο είναι τοποθετημένο.
- Ξαναγεμίζεται εύκολα ξεσφίγγοντας έναν κοχλία στο άκρο που προεξέχει του εδάφους.
- Επιτρέπει τη διήθηση του ορυκτού διαλύματος στο έδαφος που το περιβάλλει, μέσω των διατρήσεων που διαθέτει.
- Μπορεί να συνδεθεί με τον αγωγό της γείωσης, είτε μέσω αλουμινοθερμικής συγκόλλησης είτε πρεσαριστά.
- Εγκαθίσταται και οριζόντια και κατακόρυφα.
- Καλύπτεται από φρεάτιο που εγγυάται επισκεψιμότητα.

1.5.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινου

Ταινία ή συρματόσχοινο που τοποθετείται σε όρυγμα βάθους τουλάχιστον $0,5\text{m}$. Το βάθος που προτιμάται είναι $0,7-1,0\text{m}$, για να υπάρχει σταθερή υγρασία

κατά τη διάρκεια του έτους. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχάλκωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμα ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η κυκλική γείωση λέγεται γειωτής βρόγχου. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Για το ίδιο μήκος ταινίας ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Δε συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης, αν και το επιτρέπει το *ΕΛΟΤ HD 384*, διότι διαβρώνεται εύκολα. Γι' αυτόν το λόγο δεν το συνιστούν και οι κανονισμοί *VDE 100*. Μια περίπτωση του γειωτή ταινίας είναι η θεμελιακή γείωση, στην οποία γίνεται εκτενής αναφορά σε επόμενη ενότητα. Διάφορα είδη γειωτή ταινίας φαίνονται ακολούθως (Πίνακας 1.3).

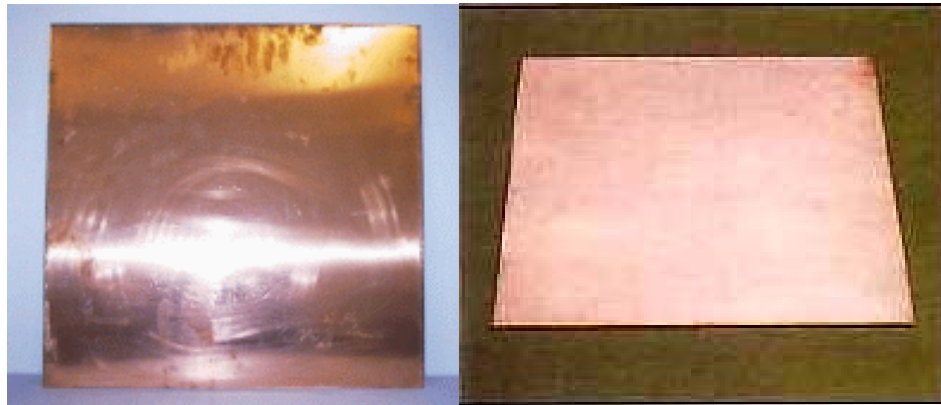
	
<i>Επικασιτερωμένη ταινία χαλκού</i>	<i>Ταινία χαλκού καλυμμένη με μόλυβδο</i>
	
<i>Εύκαμπτη ταινία χαλκού τύπου πλεξούδας</i>	<i>Ράβδος σκληρού χαλκού</i>
	
<i>Ταινία αλουμινίου</i>	<i>Ταινία αλουμινίου καλυμμένη με PVC</i>
	
<i>Κυκλικός γειωτής (συρματόσχοινο)</i>	<i>Κυκλικός γειωτής (συρματόσχοινο) με PVC</i>

Πίνακας 1.3: Διάφορα είδη γειωτών ταινίας ή συρματόσχοινο.

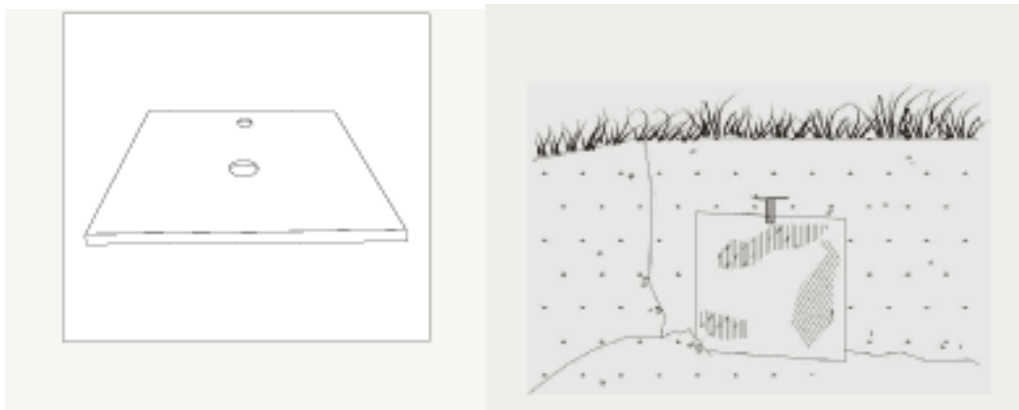
**** Το πολυμερές PVC χρησιμοποιείται για προστασία έναντι της διάβρωσης του γειωτή.

1.5.3 Γειωτής πλάκας

Πρόκειται για πλάκα μορφής παραλληλογράμμου (Σχήμα 1.24), η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνειά της κατακόρυφη (Σχήμα 1.25). Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1m. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο *EN 50164-2* [16], ο γειωτής πλάκας από χαλκό πρέπει να έχει ελάχιστο πάχος 2mm και ελάχιστες διαστάσεις 500mm×500mm, ενώ ο γειωτής πλάκας από χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο πρέπει να έχει ελάχιστο πάχος 3mm και ελάχιστες διαστάσεις 500mm×500mm. Απαιτείται δε πάχος επιψευδαργύρωσης τουλάχιστον 70μm.



Σχήμα 1.24: Γειωτής πλάκας

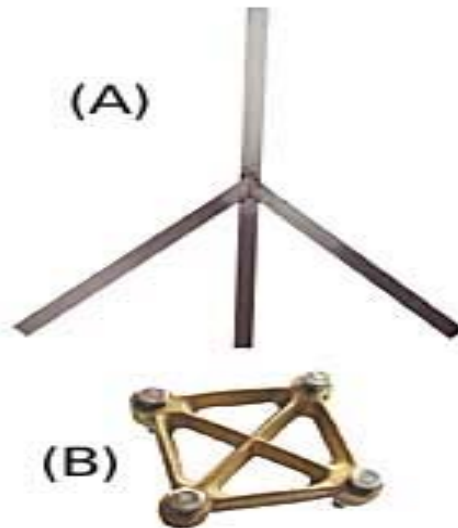


Σχήμα 1.25: Εγκατάσταση γειωτή πλάκας.

Η τιμή της αντίστασης γείωσης, που επιτυγχάνεται με τη χρήση γειωτή πλάκας, μειώνεται όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις της.

1.5.4 Ακτινικός γειωτής

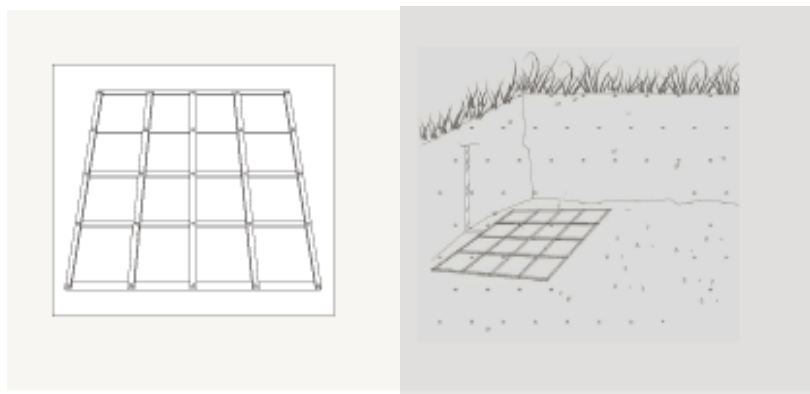
Είναι ταινίες ή ράβδοι που διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες (Σχήμα 1.26). Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, τοποθετημένος σε βάθος τουλάχιστον $0,8m$. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια, όπως στο γειωτή ταινίας.



Σχήμα 1.26: Ακτινικός γειωτής

1.5.5 Γειωτής πλέγματος

Πλέγμα από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους $0,7-2,0m$ τοποθετείται οριζόντια σε βάθος από $0,5$ έως $1,0m$ (Σχήμα 1.27 και Σχήμα 1.28). Τα ελάχιστα πάχη είναι όπως στους γειωτές ταινίας. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Επιτρέπονται προφανώς και ανοίγματα μικρότερα από $0,7m$.



Σχήμα 1.27: Γειωτής πλέγματος



Σχήμα 1.28: Γειωτές πλέγματος

1.5.6 Το δίκτυο ύδρευσης ως γειωτής

Οι μεταλλικοί σωλήνες ύδρευσης μπορούν να χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια γείωσης, σύμφωνα με το άρθρο 542.2.5 του *ΕΛΟΤ HD 384*, μόνον εφόσον υπάρχει η συγκατάθεση του φορέα που είναι αρμόδιος για την παροχή του νερού και εφόσον υπάρχει κατάλληλη διαδικασία που θα εξασφαλίζει, ότι ο χρήστης της ηλεκτρικής εγκατάστασης θα ειδοποιείται εγκαίρως για κάθε σχεδιαζόμενη αλλαγή στο σύστημα των σωληνώσεων ύδρευσης. Μεταλλικές σωληνώσεις άλλες από τις σωληνώσεις ύδρευσης (π.χ. σωληνώσεις υγρών ή αερίων καυσίμων, σωληνώσεις θέρμανσης κ.λ.π.) δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια γείωσης, σύμφωνα με το άρθρο 542.2.6 του *ΕΛΟΤ HD 384*.

Η γραμμή γείωσης συνδέεται κατά προτίμηση πριν από το μετρητή. Αν η σύνδεση γίνει μετά το μετρητή, πρέπει ο μετρητής να βραχυκυκλωθεί μονίμως με χάλκινο σύρμα *H03V-U* και διατομή τουλάχιστον 6mm^2 . Στην περίπτωση που οι σωλήνες νερού ενός κτιρίου χρησιμοποιούνται είτε ως γείωση είτε ως αγωγοί

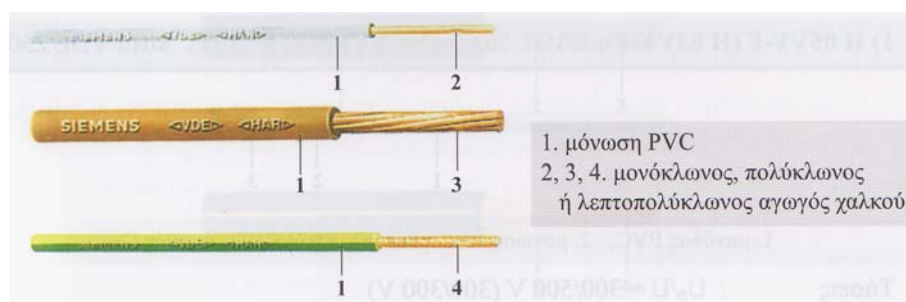
προστασίας, ο υδρομετρητής σύμφωνα με το άρθρο 547.1.3 του ΕΛΟΤ HD 384 πρέπει να γεφυρώνεται με έναν αγωγό, που η διατομή του θα είναι η κατάλληλη ανάλογα με τη χρήση του ως αγωγού προστασίας ή ως αγωγού ισοδυναμικής σύνδεσης ή ως αγωγού γείωσης λειτουργίας.

Προσοχή:

Κατά VDE 100 δεν επιτρέπεται η παράλληλη σύνδεση γειωτών από χαλκό με το δίκτυο ύδρευσης. Σχηματίζονται ηλεκτροχημικά στοιχεία με αποτέλεσμα τη διάβρωση του σιδήρου.

1.5.7 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης

Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης, που προεξέχει από το έδαφος, μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά υλικά και μάλιστα 30cm μέσα και 30cm έξω από το έδαφος. Οι συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης γίνονται σε γειώσεις ουδετέρου με χαλκό (Cu), ελάχιστης διατομής ίσης με τη διατομή του ουδετέρου, όχι όμως μικρότερη των 16mm^2 (H07V-U, Σχήμα 1.29) σύμφωνα με ΕΛΟΤ HD 384 (543.1.2), με μονόκλωνο αγωγό. Σε εγκαταστάσεις αντικεραυνικής προστασίας η ελάχιστη διατομή για χαλκό είναι 50mm^2 . Η σύνδεση του ουδετέρου του Μ/Σ με το γειωτή γίνεται με καλώδια H07-R 25mm^2 τουλάχιστον.

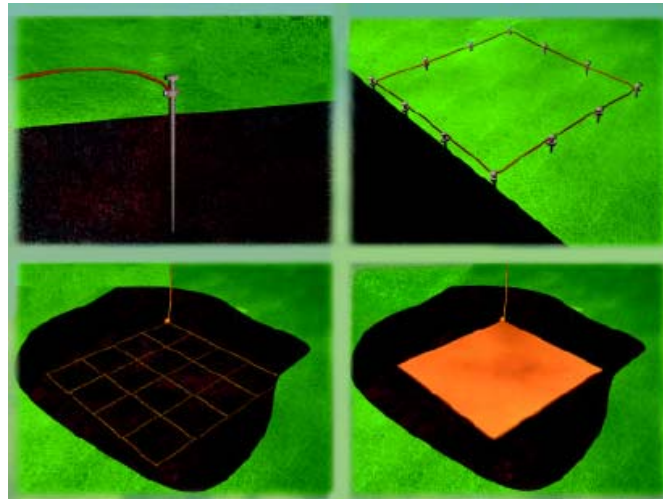


Σχήμα 1.29: Καλώδια που χρησιμοποιούνται ως αγωγοί προστασίας.

1.6 Συστήματα διατάξεων ηλεκτροδίων γείωσης

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται μια περιγραφή συστημάτων γείωσης, δηλαδή περιγραφή συστημάτων που αποτελούνται από δύο ή

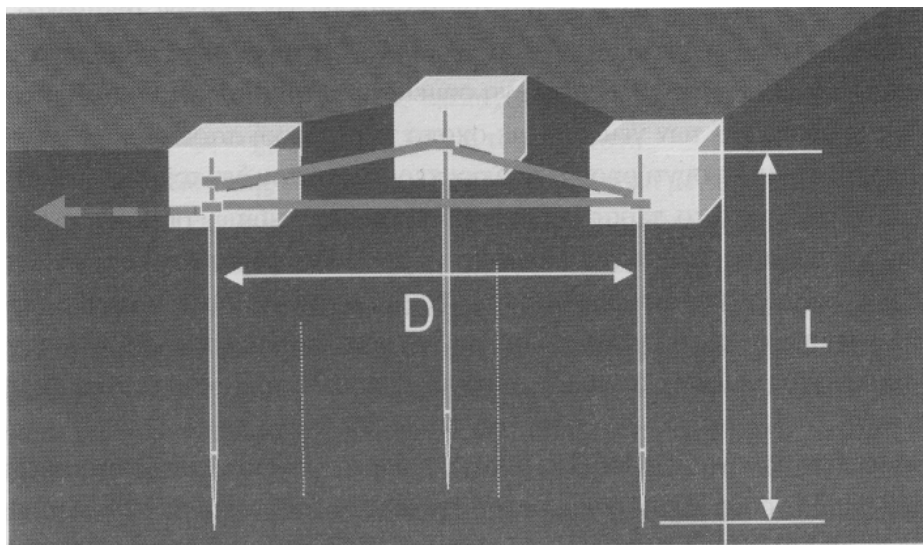
περισσότερους γειωτές (Σχήμα 1.30) διατεταγμένους και συνδεδεμένους με διαφορετικό τρόπο για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 1.30: Διάφορες διατάξεις γειωτών.

1.6.1 Πολυγωνική διάταξη γείωσης

Η πολυγωνική διάταξη γείωσης κατασκευάζεται από ραβδοειδείς γειωτές, οι οποίοι τοποθετούνται στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου συνήθως δε τριγώνου (τριγωνική γείωση). Οι ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης (Σχήμα 1.31). Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται επιχαλκωμένοι γειωτές, συνήθως συνδέονται μεταξύ τους με χάλκινο αγωγό $50mm^2$. Όταν χρησιμοποιούνται επιψευδαργυρωμένοι γειωτές, συνήθως συνδέονται με χαλύβδινο αγωγό θερμά επιψευδαργυρωμένο $\Phi 10mm$.



Σχήμα 1.31: Τρίγωνο γείωσης

Προς αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης, αφενός μεν δε θα πρέπει να συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο γειωτές από διαφορετικά υλικά και αφετέρου δε θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς από διαφορετικό υλικό. Η απόσταση μεταξύ των ραβδοειδών γειωτών πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 με 2 φορές το βάθος έμπηξής τους, έτσι ώστε η τιμή της αντίστασης γείωσης που θα επιτύχουν να είναι η ελάχιστη δυνατή.

Πολλές φορές λόγω έλλειψης χώρου ή ευκολίας, αντί της πολυγωνικής διάταξης οι ράβδοι μπορούν να τοποθετηθούν σε ευθεία διάταξη, σε “Τ” διάταξη, σε κυκλική διάταξη κ.λ.π., πάντα όμως θα πρέπει η απόσταση μεταξύ τους να είναι τουλάχιστον 1,5 με 2 φορές το βάθος έμπηξής τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταξύ τους απόσταση τόσο καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται, αν και μετά από κάποια απόσταση δε μειώνεται άλλο η τιμή της αντίστασης γείωσης λόγω του ενεργού μήκους.

Η χρήση των ραβδοειδών γειωτών συνιστάται σε εδάφη όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται κατά βάθος. Στα σημεία που θα τοποθετηθούν οι ραβδοειδείς γειωτές, πραγματοποιείται διάνοιξη σκαμμάτων για την τοποθέτηση φρεατίων επίσκεψης. Τα σκάμματα μεταξύ τους συνδέονται με ορύγματα βάθους τουλάχιστον 20cm στα οποία θα τοποθετηθεί ο αγωγός γείωσης. Εάν το έδαφος είναι βραχώδες, όπου οι ράβδοι δεν μπορούν να τοποθετηθούν με έμπηξη, στο κέντρο των σκαμμάτων φρεατίων, θα διανοιχθούν οπές (είτε με τρυπάνι, είτε με γεωτρύπανο διαμέτρου τουλάχιστον 8cm), βάθους

15cm μικρότερο από το συνολικό μήκος του γειωτή. Όμοιες ενέργειες γίνονται και στην περίπτωση έμπηξης των ράβδων με τη χρήση σφύρας.

Αφού γίνει η πλήρωση της οπής με καλό κηπευτικό χώμα, αργιλώδες ή με ειδικό βελτιωτικό γείωσης, εμπίγνυται η ράβδος γείωσης. Σε περίπτωση που κατά την έμπηξη (με τη βοήθεια σφύρας) τοποθετηθούν παραπάνω από μια (1) ράβδοι με τη χρήση συνδέσμου επιμήκυνσης (μούφα), πρέπει να χρησιμοποιηθεί επικρουστήρας για την αποφυγή καταστροφής του σπειρώματος της ράβδου ή της μούφας.

Η χρήση φρεατίου επισκέψεως πολλές φορές επιβάλλεται προκειμένου να ελέγχονται και να συντηρούνται καλύτερα τα σημεία σύνδεσης, να πραγματοποιούνται πιο εύκολα οι μετρήσεις της τιμής της αντίστασης γείωσης, καθώς και να προειδοποιεί για την ύπαρξη στον εν γένει χώρο της γείωσης (ΕΛΟΤ HD 384-542.4.2) [12].

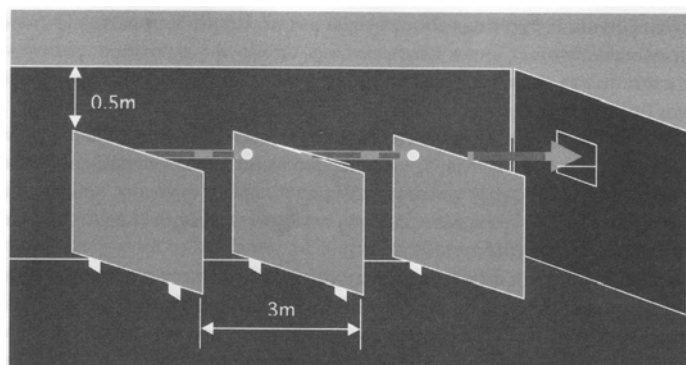
Το φρεάτιο επισκέψεως της γείωσης τοποθετείται μετά το πέρας της τοποθέτησης των ράβδων και στο κάλυμμά του θα πρέπει να υπάρχει ανάγλυφο και ανεξίτηλο το σήμα της γείωσης. Εφόσον οι γειώσεις σε ένα συγκεκριμένο έργο είναι παραπάνω της μιας, θα πρέπει να σημειώνεται στο κάλυμμα ο αύξων αριθμός της γείωσης και των γειωτών, με σκοπό την τακτική παρακολούθηση κάθε γειωτή καθώς και τη συντήρησή τους. Στην περίπτωση που δεν τοποθετηθεί φρεάτιο επισκέψεως, μετά το πέρας της τοποθέτησης των γειωτών-ράβδων, η επιφάνεια του ορύγματος μπορεί να σκεπαστεί με σκυρόδεμα ή από το ίδιο υλικό που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του περιβάλλοντος χώρου.

Για την επισήμανση της γείωσης, σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να τοποθετείται πλησίον του γειωτή ή του αγωγού γείωσης, πινακίδα σήμανσης όπου θα προσδιορίζεται η ακριβής θέση του. Βάσει των κανονισμών (ΕΛΟΤ HD 384-542.3.2), η κατάλληλη επιφάνεια επαφής στη σύνδεση μεταξύ ραβδοειδούς γειωτή και αγωγού γείωσης πρέπει να είναι η δέουσα και η σύνδεση επιβάλλεται να γίνεται με ειδικούς κοχλιωτούς σφιγκτήρες ορειχάλκινους, για την περίπτωση επιχαλκωμένης ράβδου κυκλικής διατομής και με σφιγκτήρες χαλύβδινους θερμά επιψευδαργυρωμένους, για τις ράβδους διατομής σταυρού ή με αλουμινοθερμική συγκόλληση για την αποφυγή γαλβανικού φαινομένου. Εννοείται ότι και ο αγωγός γείωσης πρέπει να είναι αντίστοιχα χάλκινος ή χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος. Στην περίπτωση όπου είναι αναπόφευκτο και θα πρέπει να συνδεθούν εντός του εδάφους γειωτές και αγωγός γείωσης από υλικά που

παρουσιάζουν διαφορά ηλεκτροχημικής τάσης (π.χ. χαλκό με χάλυβα), το σημείο σύνδεσης πρέπει να επικαλυφθεί εντελώς με ζεστή πίσσα και στη συνέχεια να τυλιχθεί με καννάβι εμβαπτισμένο στην πίσσα. Ένας άλλος τρόπος εκτέλεσης των παραπάνω συνδέσεων είναι με την αλουμινοθερμική συγκόλληση, η οποία εξασφαλίζει μηδενική αντίσταση διαβάσεων, καθώς και αποφυγή γαλβανικών φαινομένων στην περίπτωση ανομοιογενών υλικών.

1.6.2 Σύστημα γείωσης με πλάκες (γειωτές πλάκας)

Η γείωση με γειωτές υπό μορφή πλάκας, κατασκευάζεται από πλάκες οι οποίες τοποθετούνται σε τυχαία διάταξη (Σχήμα 1.32). Η απόσταση μεταξύ τους συνιστάται να είναι τουλάχιστον 3m. Η σύνδεση μεταξύ των πλακών συνήθως γίνεται με χάλκινο αγωγό διατομής 50mm^2 , ή χαλύβδινο θερμά επιψευδαργυρωμένο $\Phi 10\text{mm}$ για χάλκινες και χαλύβδινες θερμά επιψευδαργυρωμένες πλάκες αντίστοιχα.



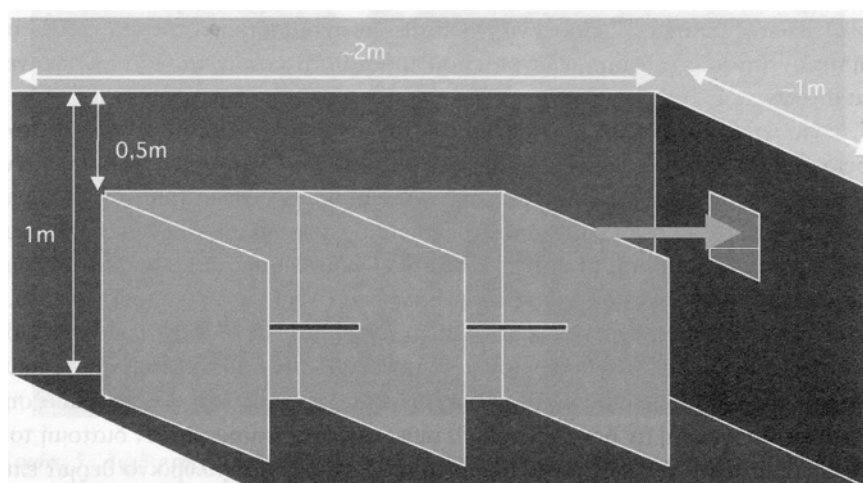
Σχήμα 1.32: Σύστημα γείωσης με πλάκες.

Προς αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης, αφενός μεν δε θα πρέπει να συνυπάρχουν στο χώρο γειωτές από διαφορετικά υλικά και αφετέρου δε θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς από διαφορετικό υλικό. Απαγορεύεται η σύνδεση των πλακών με αγωγό αλουμίνιου ή κράματος.

1.6.3 Γειωτής τύπου “Ε”

Ο γειωτής “Ε” αποτελείται ουσιαστικά από δύο στοιχεία. Το πρώτο είναι μορφής “Π” και το δεύτερο μορφής “Γ” όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.33. Τα δύο

στοιχεία συναρμολογούνται με μεταλλικές γωνίες και κοχλίες-περικόχλια M8 ανοξείδωτα τύπου A2. Κατασκευάζεται από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό ή χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο. Ο γειωτής τύπου “Ε” μπορεί να επεκταθεί με περισσότερα στοιχεία “Γ”. Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο προστίθενται στοιχεία “Γ”, (Πίνακας 1.4).



Σχήμα 1.33: Γειωτής “Ε”

Ειδική αντίσταση (Ωm)	100	200	300	400
Στοιχείο γειωτή	Αντίσταση (Ω)			
1Π	17,5	35,0	70,0	87,6
1Π+1Γ	10,4	20,8	41,6	52,0
1Π+2Γ	7,4	14,8	29,6	37,0
1Π+3Γ	5,7	11,4	22,9	28,7
1Π+4Γ	4,6	9,3	18,7	23,4
1Π+5Γ	3,9	7,9	15,8	19,8
1Π+6Γ	3,4	6,8	13,7	17,1
1Π+7Γ	3,0	6,0	12,1	15,1
1Π+8Γ	2,7	5,4	10,8	13,5

Πίνακας 1.4: Τιμές αντίστασης γείωσης για επεκτάσεις γειωτή και διάφορες τιμές ειδικής αντίστασης εδάφους.

Τοποθετείται εντός σκάμματος βάθους τουλάχιστον 1m, πλάτους τουλάχιστον 75cm και μήκους ανάλογου του αριθμού των στοιχείων “Γ” που θα τοποθετηθούν (Εικόνα 1.1). Η πλήρωση του σκάμματος της γείωσης, γίνεται με καλό χώμα (κηπευτικό, αργιλώδες κ.λ.π), σκυρόδεμα ή με κάποιο βελτιωτικό

γείωσης ή συνδυασμό των παραπάνω. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν απαιτείται μεγάλη επιφάνεια για την τοποθέτησή του.



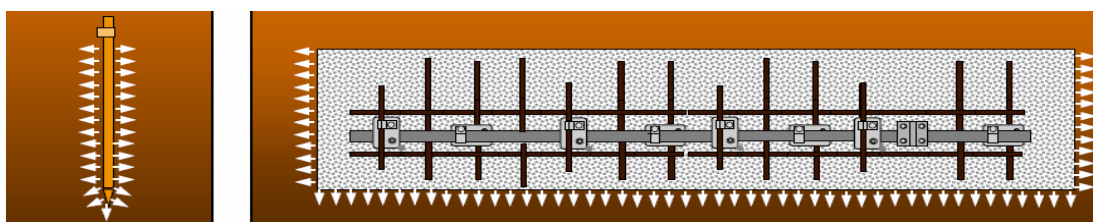
Εικόνα 1.1: Εγκατάσταση γειωτή τύπου “Ε”.

Περιτύλιξη του αγωγού γείωσης με PVC ή θερμοσυστελόμενο σωλήνα μήκους 20cm περίπου πριν την έξοδό του από το έδαφος ή το σκυρόδεμα και 20cm περίπου μετά, θεωρείται απαραίτητη καθώς και πινακίδα σημάνσεως του γειωτή αν δεν έχει τοποθετηθεί φρεάτιο επισκέψεως. Το κόστος εγκατάστασης είναι χαμηλό και μειώνεται σημαντικά όταν η εγκατάσταση γίνεται κατά τη φάση των χωματουργικών εργασιών της κατασκευής, έχοντας έτσι ως δεδομένο την παρουσία σκαπτικών μηχανημάτων τα οποία μπορούν σε ελάχιστο χρόνο να προχωρήσουν στη διάνοιξη του κατάλληλου ορύγματος.

1.6.4 Θεμελιακή γείωση

Είναι ένα αγωγίμο σώμα θαμμένο στο έδαφος κάτω από τα θεμέλια ενός κτιρίου ή εγκιβωτισμένο στο σκυρόδεμα της θεμελίωσης του κτιρίου, σε μορφή κλειστού δακτυλίου (Ορισμός 541.3.Z1 Ευρωπαϊκού Προτύπου *HD 60364-5-54*). Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης φαίνεται στο Σχήμα 1.34 και στην Εικόνα 1.2 [17].

Κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας και σπανιότερα αγωγό κυκλικής διατομής, που τοποθετείται εντός των συνδετήριων δοκαριών των πεδίων ή στα περιμετρικά τοιχία των θεμελίων του κτιρίου, σε μορφή κλειστού δακτυλίου. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι υγρό συνήθως όλο το έτος, ο θεμελιακός γειωτής έχει σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης. Η γείωση τοποθετείται στο περιμετρικό θεμέλιο του κτιρίου. Σε περιπτώσεις που υπάρχει μόνωση κατά της υγρασίας, πρέπει η ταινία γείωσης να τοποθετηθεί προς την πλευρά του εδάφους.



Σχήμα 1.34: Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης.

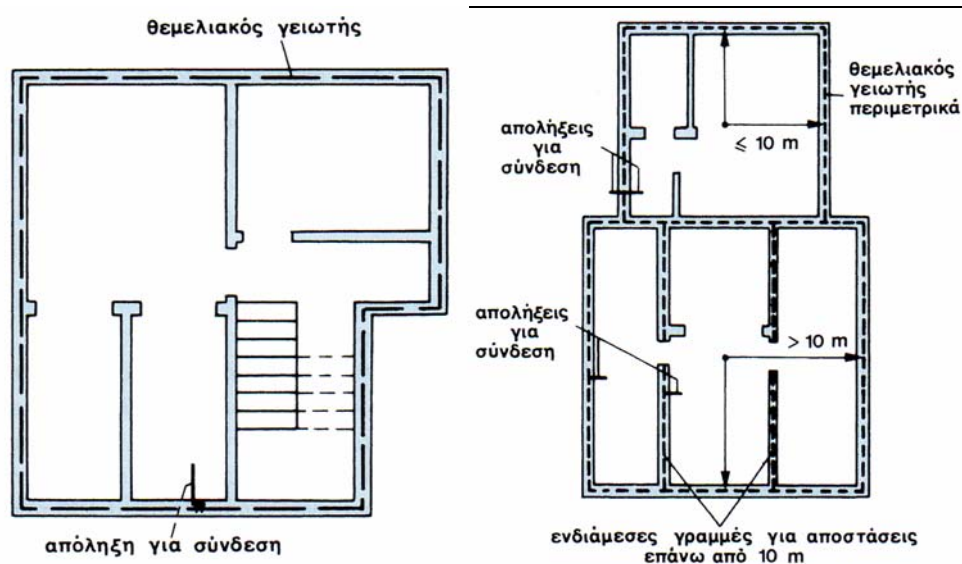


Εικόνα 1.2: Εφαρμογή σε δομική κατασκευή.

Για κτίρια μεγάλης περιμέτρου συνιστάται η τοποθέτηση εγκαρσίων ή διαμήκων τμημάτων ταινίας (πάντα εντός σκυροδέματος θεμελίων), έτσι ώστε κανένα σημείο του υπογείου να μην απέχει περισσότερο από 10m από το γειωτή (Σχήμα 1.35). Η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνει το μήκος της ταινίας, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση της περιμετρικής γείωσης με ταινία. Σύμφωνα με το άρθρο 27 του *ΕΛΟΤ HD 384*, η διατομή της ταινίας πρέπει να είναι τουλάχιστον 100mm² με ελάχιστο πάχος 3mm.

Όπως αναφέρεται στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο *ΕΛΟΤ EN 62305-3*, ως θεμελιακό ηλεκτρόδιο μπορεί να εγκατασταθεί μέσα στο σκυρόδεμα γαλβανισμένη χαλύβδινη ταινία και να συνδεθεί άμεσα με τις χαλύβδινες ράβδους του

οπλισμού. Ο χαλκός και ο ανοξείδωτος χάλυβας στο σκυρόδεμα είναι επίσης αποδεκτά και μπορούν να συνδέονται άμεσα με το χαλύβδινο οπλισμό [18]. Επίσης και στο Ευρωπαϊκό Ελληνικό Πρότυπο *HD 60364-5-54* αναφέρεται ρητά ότι το θεμελιακό ηλεκτρόδιο μπορεί να αποτελείται από χαλύβδινες ταινίες ή από χαλύβδινους αγωγούς ή από χάλκινους αγωγούς [19].

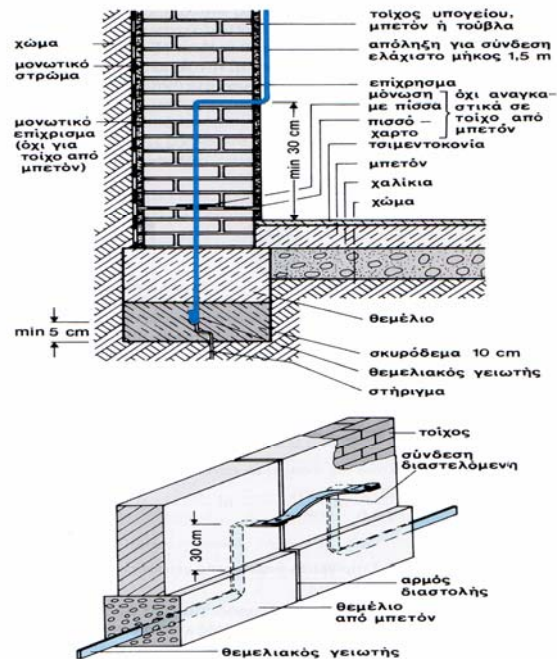


Σχήμα 1.35: Κατόψεις θεμελιακών γειώσεων με και χωρίς εγκάρσια και διαμήκη τμήματα.

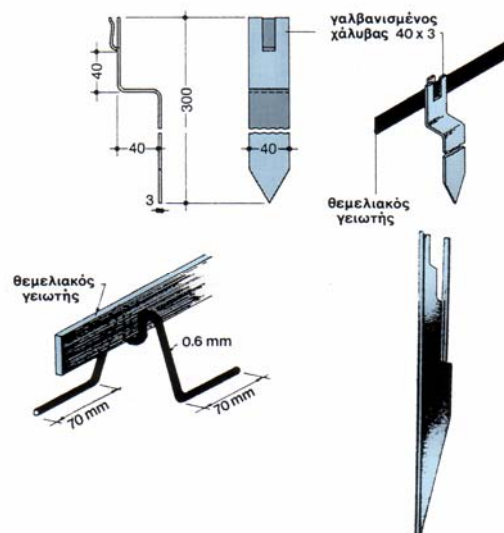
Ο γειωτής πρέπει να περιβάλλεται παντού από δομημένο σκυρόδεμα και να τοποθετείται σε ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 5 cm (συνήθως $6\text{--}10\text{ cm}$), διότι αλλιώς διαβρώνεται. Μετά από την εκσκαφή των θεμελίων κατασκευάζεται μια στρώση από σκυρόδεμα πάχους $6\text{--}10\text{ cm}$ (Σχήμα 1.36) και εκεί μέσα τοποθετείται μια ταινία με τη μεγάλη της επιφάνεια κάθετη.

Το Σχήμα 1.37 δείχνει διάφορες διατάξεις για να κρατηθεί η ταινία στη θέση της. Ακολούθως τοποθετείται ο οπλισμός των θεμελίων και χύνεται όλο το θεμέλιο. Η όρθια τοποθέτηση της ταινίας εξασφαλίζει άνεση στην τοποθέτηση και μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με το σκυρόδεμα. Η τοποθέτηση του γειωτή μέσα στο σκυρόδεμα, στη βάση των θεμελίων, εξασφαλίζει αντοχή στη διάβρωση και στις μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, ο γειωτής είναι σε υγρό έδαφος όπου η αγωγιμότητα είναι μεγάλη. Συνιστάται να συνδέεται στο γειωτή ο οπλισμός του σκυροδέματος του κτιρίου. Οι απολήξεις του γειωτή έχουν την ίδια διατομή με το ηλεκτρόδιο του γειωτή. Το μήκος τους είναι $1,5\text{ m}$ και τοποθετούνται στον τοίχο του κτιρίου εσωτερικά. Η απόληξη απέχει στο κάτω

μέρος της, στην έξοδό της από τον τοίχο, 30cm από το έδαφος. Η σύνδεση με τη λοιπή εγκατάσταση γίνεται με χάλκινο αγωγό διατομής 16mm^2 τουλάχιστον ή καλύτερα 25mm^2 . Στην περίπτωση των θεμελιακών γειώσεων συνδέονται στη θεμελιακή γείωση και τα αλεξικέραυνα, ενδεχομένως μέσω σπινθηριστών.



Σχήμα 1.36: Λεπτομέρειες θεμελιακής γείωσης.



Σχήμα 1.37: Στηρίγματα θεμελιακής γείωσης.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης του θεμελιακού γειωτή χρησιμοποιείται ο τύπος του γειωτή ταινίας ή προσεγγιστικά ο τύπος του θεμελιακού γειωτή

(Πίνακας 1.1). Αυτός παίρνει το γειωτή σαν κυκλικό γειωτή διαμέτρου D , επιφάνειας ίσης με το εμβαδόν κάτοψης των θεμελίων. Σαν αντίσταση εδάφους θα ληφθεί, κατά *VDE 0141* ή *DIN 57141*, η ειδική αντίσταση όχι του σκυροδέματος, αλλά του περιβάλλοντος εδάφους. Θεμελιακή γείωση προτείνεται από το *ΕΛΟΤ HD 384-542.2.1* και το *ΕΛΟΤ 1424* [20] σε όλα τα νέα κτίρια.

1.6.4.1 Πλεονεκτήματα της θεμελιακής γείωσης

Η εφαρμογή και η συνεχής λειτουργία της θεμελιακής γείωσης σε μια εγκατάσταση παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

i. Χαμηλή αντίσταση γείωσης

Η θεμελιακή γείωση έχει σχεδόν πάντοτε χαμηλή τιμή αντίστασης, μικρότερη έναντι οποιουδήποτε άλλου τύπου γείωσης, γιατί καθώς συνδέεται αγωγίμα με τον οπλισμό των συνδετήριων δοκών, των πεδύλων ή τοιχίων, προστίθεται σε όλο το μήκος του οπλισμού, αυξάνοντας έτσι τη συνολική επιφάνεια που περικλείει ο γειωτής, η οποία έρχεται σε επαφή με τον περιβάλλοντα χώρο. Επίσης εγκαθίσταται σε σχετικά μεγάλο βάθος όπου η συγκέντρωση της υγρασίας στο υπέδαφος είναι μεγαλύτερη, αποκτώντας έτσι όλες τις ιδιότητες μιας ιδανικής γείωσης.

ii. Σταθερή τιμή αντίστασης

Η θεμελιακή γείωση παρουσιάζει σταθερή τιμή αντίστασης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, διότι λόγω του βάθους που εγκαθίσταται, η σύσταση του υπεδάφους στις διάφορες εποχές του έτους είναι σχεδόν σταθερή.

iii. Μηχανική προστασία-Αντοχή από διάβρωση

Η ύπαρξή της μέσα στο σκυρόδεμα της θεμελίωσης παρέχει πλήρη μηχανική προστασία και μακροχρόνια αντοχή σε διάβρωση. Η διάρκεια ζωής της θεμελιακής γείωσης είναι όση και του κτιρίου, αρκεί να έχει εγκατασταθεί όλο το μήκος του γειωτή εντός της θεμελίωσης και να περιβάλλεται με πάχος σκυροδέματος τουλάχιστον 5cm , προστατευόμενος έτσι από κάθε μηχανική καταπόνηση, όπως εκσκαφές συνεργείων, κηπουρικές εργασίες και από κάθε ηλεκτροχημική διάβρωση.

iv. Εξάλειψη βηματικών τάσεων

Η θεμελιακή γείωση, εξαιτίας της μικρής αντίστασης που έχει και λόγω του βάθους που βρίσκεται, οι τυχόν βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου είναι συνήθως μικρότερες από τις μέγιστες αποδεκτές, χωρίς την ανάγκη λήψης πρόσθετων μέτρων που απαιτούν οι άλλες μορφές γειώσεων.

v. Ισοδυναμικές συνδέσεις

Η διασύνδεση του οπλισμού με τη θεμελιακή γείωση και η έκτασή της περιμετρικά του κτιρίου, καθιστούν την προστασία από τάσεις επαφής πολύ εύκολη, καθώς οι ισοδυναμικές επιφάνειες που δημιουργούνται δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη επικίνδυνων τάσεων σε μηχανήματα και μεταλλικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται στους χώρους αυτών. Επίσης, όπου απαιτούνται πρόσθετες ισοδυναμικές συνδέσεις, όπως π.χ. είσοδοι κοινωφελών δικτύων, μηχανοστασίων, ειδικών νοσοκομειακών χώρων κ.λ.π., είναι εύκολη η πρόβλεψη αναμονών σε οποιαδήποτε θέση του κτιρίου.

vi. Ευελιξία για εγκατάσταση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)

Έναντι άλλων μορφών γειώσεων, η θεμελιακή γείωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα και για γείωση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ), μειώνοντας σημαντικά το κόστος σε μια εγκατάσταση (Εικόνα 1.3). Για μια όμως ολοκληρωμένη προστασία, λόγω συνύπαρξης γείωσης προστασίας και γείωσης ΣΑΠ στο θεμελιακό ή οποιοδήποτε άλλο γειωτή, πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και η προστασία του ηλεκτρολογικού-ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση απαγωγών κρουστικών υπερτάσεων, τοποθετούμενοι σε κατάλληλα σημεία της ηλεκτρικής εγκατάστασης.



Εικόνα 1.3: Εφαρμογή θεμελιακής γείωσης ως ΣΑΠ.

vii. Χαμηλό κόστος

Το απαιτούμενο κόστος της θεμελιακής γείωσης είναι σημαντικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο των άλλων μορφών γειώσεων, που παρέχουν το ίδιο με τη θεμελιακή γείωση αποτέλεσμα, χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν τόσο η παράμετρος της αντοχής και της διαχρονικότητας, όσο και των ανωτέρω πλεονεκτημάτων της θεμελιακής γείωσης. Για την εγκατάστασή της δεν απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλος χώρος, ούτε επιπλέον χωματουργικές εργασίες, όπως στις άλλες μορφές γειώσεων.

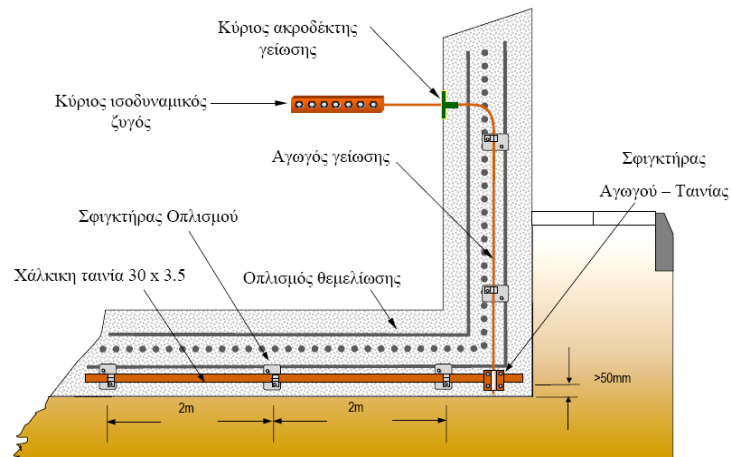
1.6.4.2 Σχεδιασμός θεμελιακής γείωσης

Οι οδηγίες για το σχεδιασμό της θεμελιακής γείωσης αφορούν τη θεμελίωση κτιρίου σε άμεση επαφή με το έδαφος και για εφαρμογή της ως γείωση [21]:

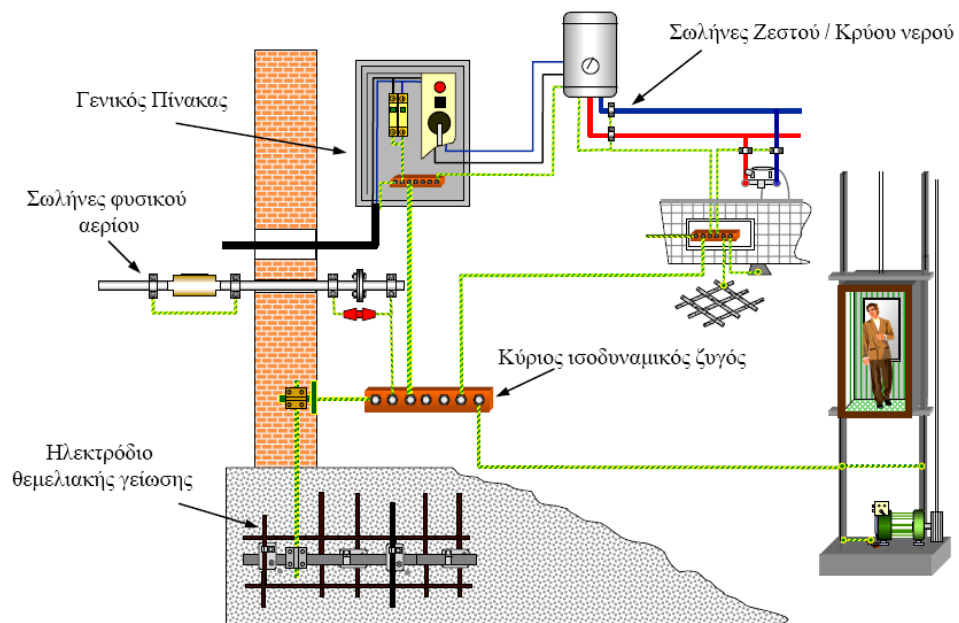
- ηλεκτρικής εγκατάστασης, που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Προτύπου *ΕΛΟΤ HD 384*.
- ισοδυναμικών συνδέσεων, που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του Προτύπου *ΕΛΟΤ HD 384*.
- εγκατάστασης ΣΑΠ, που ικανοποιεί τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα *ΕΛΟΤ HD 384*, *ΕΛΟΤ EN 62305* και τα Διεθνή *IEC 62305*.

Για το σχεδιασμό συστημάτων θεμελιακής γείωσης επιβάλλεται να πληρούνται όλες οι προδιαγραφές, όπως αυτές καθορίζονται από τα εν λόγω

Πρότυπα. Σχηματικές απεικονίσεις εφαρμογών θεμελιακής γείωσης και χρήσης Κύριων και Συμπληρωματικών Ισοδυναμικών συνδέσεων σε θεμελιακή γείωση φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 1.38 και Σχήμα 1.39) αντίστοιχα, ενώ απεικόνιση θεμελιακής γείωσης σε πρακτική εφαρμογή φαίνεται στην Εικόνα 1.4 και στην Εικόνα 1.6.



Σχήμα 1.38: Σύνδεση ηλεκτροδίου θεμελιακής γείωσης με κύριο ζυγό γείωσης [21].



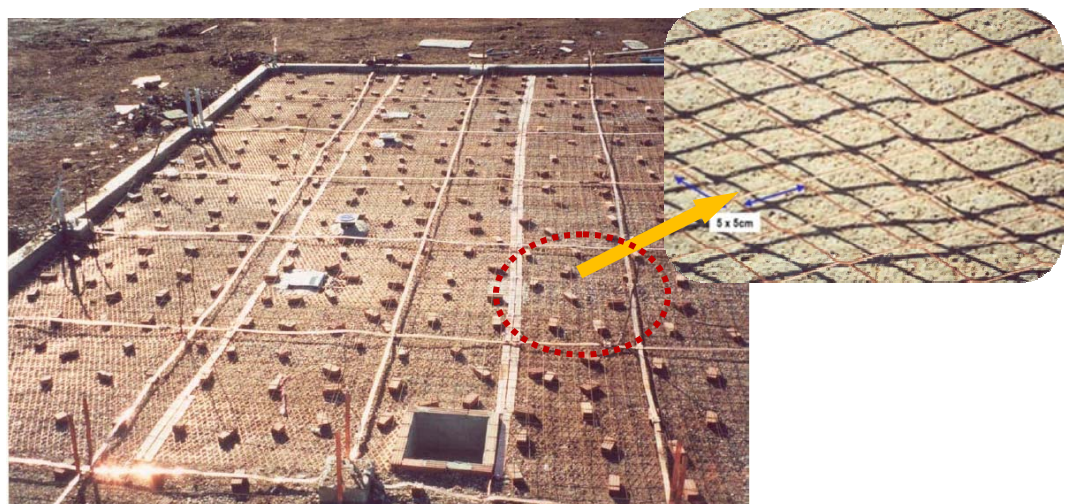
Σχήμα 1.39: Κύριες και Συμπληρωματικές Ισοδυναμικές συνδέσεις (ΚΙΣ–ΣΙΣ) εισερχόμενων μεταλλικών δικτύων σε θεμελιακή γείωση [21].



Εικόνα 1.4: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες θεμελιακής γείωσης.



Εικόνα 1.5: Σύνδεση της ταινίας γείωσης με τον οπλισμό μέσω σφιγκτήρα οπλισμού [22].



Εικόνα 1.6: Θεμελιακή γείωση πλέγματος.

Η επιμήκυνση της ταινίας του περιμετρικού γειωτή, καθώς και η σύνδεση της αρχής και του τέλους της, δεν πρέπει να γίνεται με κοχλίες και περικόχλια διανοίγοντας οπές, αλλά με ειδικό χάλκινο σύνδεσμο-σφιγκτήρα για ταινία από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό, ή χαλύβδινο θερμά επιψευδαργυρωμένο για ταινία χαλύβδινη θερμά επιψευδαργυρωμένη.

Ομοίως η σύνδεση της περιμετρικής ταινίας με τον αγωγό γείωσης (Σχήμα 1.40) θα πρέπει να γίνεται με ειδικό σύνδεσμο-σφιγκτήρα ίδιου υλικού με τα προς σύνδεση μέρη και όχι με τη χρήση κοχλίων ή περικοχλίων. Λόγω της μορφής της περιμετρικής γείωσης είναι εφικτό να αφεθούν αναμονές σε πολλαπλά σημεία αυτής, πράγμα που την καθιστά ιδανική για μελλοντική χρήση, γείωσης προστασίας, αντικεραυνικής γείωσης, ισοδυναμικής προστασίας, κ.λ.π.

1.7 Σχεδίαση συστημάτων γείωσης

1.7.1 Καθορισμός ορίων ασφαλείας

Κατά τη διάρκεια ενός τυπικού σφάλματος προς γη, η ροή του ρεύματος προς τη γη θα παράγει ανυψώσεις δυναμικού μέσα στον υποσταθμό και γύρω από αυτόν. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την παραπάνω περίπτωση για έναν υποσταθμό με απλό ορθογώνιο πλέγμα γείωσης σε ομοιογενές έδαφος. Εάν δε ληφθούν προφυλάξεις στο σχεδιασμό της γείωσης, οι μέγιστες κλίσεις δυναμικού στην επιφάνεια της γης μπορεί να έχουν αρκετά μεγάλη τιμή κατά τη διάρκεια σφάλματος προς γη, ώστε να τεθεί σε κίνδυνο άτομο που βρίσκεται στην περιοχή. Επιπλέον, επικίνδυνες τάσεις μπορεί να αναπτυχθούν ανάμεσα σε γειωμένες κατασκευές ή περιβλήματα εξοπλισμών και της κοντινής γης [7].

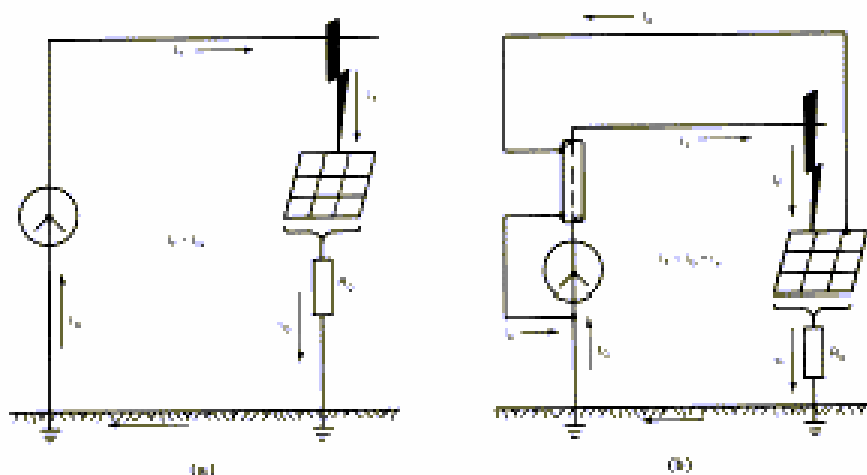


Figure 2 – Equipotential contours of a typical grounding grid with and without ground rods

Σχήμα 1.41: Ισοδυναμικές καμπύλες ενός τυπικού πλέγματος γείωσης, με ή χωρίς ηλεκτρόδια γείωσης [2].

Οι συνθήκες, υπό τις οποίες είναι πιθανό ένα ατύχημα ηλεκτροπληξίας, είναι οι εξής:

1. Σχετικά μεγάλο ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με την περιοχή του συστήματος γείωσης και την αντίστασή του ως προς την “άπειρη γη”.
2. Η ειδική αντίσταση του εδάφους και η κατανομή των ρευμάτων γης, που προκαλούν υψηλές κλίσεις δυναμικού σε σημεία στην επιφάνεια της γης.
3. Η παρουσία ατόμου σε τέτοιο σημείο, στιγμή και στάση ώστε το σώμα του γεφυρώνει δύο σημεία μεγάλης διαφοράς δυναμικού.
4. Η απουσία επαρκούς αντίστασης επαφής ή άλλης αντίστασης σε σειρά, για να περιορίσει το ρεύμα που διαρρέει το σώμα σε μια ασφαλή τιμή, όταν πληρούνται οι συνθήκες 1 έως 3.
5. Η διάρκεια του σφάλματος και της επαφής με το σώμα, συνεπώς και της ροής του ρεύματος μέσα στο σώμα για επαρκή χρόνο, ώστε να προκαλέσει τραυματισμό του ατόμου, για τη συγκεκριμένη ένταση ρεύματος.

Η μικρή συχνότητα ατυχημάτων οφείλεται κυρίως στη μικρή πιθανότητα ταυτόχρονης εμφάνισης όλων των παραπάνω συνθηκών.

Τα όρια ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιεί ένα σύστημα γείωσης μιας εγκατάστασης, καθορίζονται από το συνδυασμό τιμών των διαφόρων παραμέτρων (π.χ. χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος, συχνότητα, ένταση, μοντέλο εδάφους) που προκαλούν τραυματισμό στο άτομο.

1.7.2 Σκοπός και αντικείμενο των πλεγμάτων γείωσης

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή πλέγματος γείωσης για μια εγκατάσταση ή έναν υποσταθμό στοχεύει στην ασφαλή γείωση της εγκατάστασης. Η γείωση πρέπει να παρέχει το μέσο μεταφοράς ηλεκτρικών ρευμάτων στη γη υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες σφάλματος, χωρίς να παραβιάζεται κανένα από τα όρια λειτουργίας του εξοπλισμού και χωρίς να επηρεάζεται η συνέχεια της παροχής. Πρέπει ακόμη να εξασφαλίζεται ότι ένα άτομο, που βρίσκεται κοντά στις γειωμένες εγκαταστάσεις, δεν εκτίθεται στον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας [7].

Στη μελέτη της γείωσης δεν πρέπει να αμελείται η αλληλεπίδραση του συστήματος γείωσης προς σχεδιασμό και της “τυχαίας” (accidental) γείωσης, που πρόσκαιρα εγκαθίσταται όταν ένα άτομο εκτίθεται σε ένα δυναμικό κλίσης στο εσωτερικό μιας γειωμένης εγκατάστασης. Μια χαμηλή αντίσταση του υποσταθμού ως προς τη γη δεν παρέχει την απαιτούμενη ασφάλεια. Δεν υπάρχει απλή σχέση ανάμεσα στην αντίσταση του συστήματος γείωσης ως σύνολο και του μέγιστου ρεύματος στο οποίο ένα άτομο δύναται να εκτεθεί. Συνεπώς, ένας υποσταθμός σχετικά χαμηλής αντίστασης μπορεί να είναι επικίνδυνος, ενώ ένας άλλος υποσταθμός με υψηλή αντίσταση μπορεί να είναι ασφαλής ή να καταστεί ασφαλής με προσεκτικό σχεδιασμό.

Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος προς γη, η ροή του ρεύματος προς γη θα παράγει κλίσεις δυναμικού μέσα στον υποσταθμό και γύρω από αυτόν. Η ασφάλεια του προσωπικού καθορίζεται από τις τιμές της τάσης επαφής, της βηματικής τάσης και του μεταφερόμενου δυναμικού. Επιπλέον, η γείωση μιας εγκατάστασης πρέπει να προστατεύει την ίδια την εγκατάσταση από καταπόνηση και την καταστροφή των συσκευών που αυτή περιλαμβάνει. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ανύψωσης του δυναμικού γης (rise of earth potential, ισοδύναμα ground potential rise), ώστε να μην καταστραφούν οι μονώσεις της εγκατάστασης. Πάντως το σύστημα γείωσης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε, αρκετό

ρεύμα σφάλματος να ρέει, για να λειτουργήσουν οι συσκευές ασφαλείας της εγκατάστασης και να απομονωθεί το σφάλμα. Το σύστημα γείωσης πρέπει να περιλαμβάνει ηλεκτρόδια γείωσης, για να επιτρέπει το ρεύμα να ρέει προς τη γη και επίσης ένα δίκτυο αγωγών για να επιτρέπει το ρεύμα σφάλματος να ρέει μέσα σε ολόκληρο το πλέγμα γείωσης, δηλαδή να διαχέεται.

Ειδικότερα στην περίπτωση αιολικού πάρκου, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν στο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης η αντικεραυνική προστασία. Ο κίνδυνος από κεραυνό για μια τοποθεσία είναι συνάρτηση του ύψους της κατασκευής, της τοπογραφίας και την πιθανότητα εκδήλωσης κεραυνού στην ευρύτερη περιοχή, σύμφωνα με ισοκεραυνικούς χάρτες. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το ύψος κάθε ανεμογεννήτριας και το γεγονός ότι τα αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε κορυφές βουνών χωρίς βλάστηση, είναι εμφανής η ανάγκη μελέτης της αντικεραυνικής προστασίας, σε συνδυασμό με το σύστημα γείωσης του αιολικού πάρκου.

1.7.3 Γενικές αρχές στο σχεδιασμό συστημάτων γείωσης

Ένα σύστημα γείωσης σχεδιάζεται και εγκαθίσταται με σκοπό τον περιορισμό των κλίσεων δυναμικού γης σε τέτοια επίπεδα τάσης και ρεύματος ώστε, υπό συνθήκες σφάλματος, να μην κινδυνεύουν άτομα ούτε όμως ο εξοπλισμός. Επίσης πρέπει να είναι δυνατή η αδιάλειπτη παροχή υπηρεσίας.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης λαμβάνει υπ' όψιν τα ασφαλή όρια για τη βηματική τάση και την τάση επαφής, σύμφωνα με την τιμή του ρεύματος σφάλματος και το συνολικό χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος.

Στη συντριπτική πλειοψηφία των συστημάτων γείωσης που χρησιμοποιούνται, το σχήμα του πλέγματος γείωσης δίνεται από ένα συνδυασμό οριζόντιων αγωγών με κατακόρυφες ράβδους, που ξεκινούν από το πλέγμα και εκτείνονται προς μεγαλύτερο βάθος στη γη.

Μερικοί από τους λόγους, που χρησιμοποιούνται κατακόρυφοι ράβδοι σε συνδυασμό με οριζόντιους αγωγούς, δίνονται παρακάτω:

- i. Στους υποσταθμούς ένα ηλεκτρόδιο είναι, από μόνο του, ανεπαρκές για να παρέχει ένα ασφαλές σύστημα γείωσης. Από την άλλη πλευρά, όταν

αρκετά ηλεκτρόδια, όπως οι ράβδοι γείωσης, συνδεθούν μεταξύ τους και με όλους τους ουδέτερους και τα μεταλλικά πλαίσια του εξοπλισμού και τις κατασκευές που πρέπει να γειωθούν, το αποτέλεσμα είναι μια διάταξη πλέγματος από ηλεκτρόδια γείωσης, ανεξάρτητα από τον αρχικό σκοπό. Εάν επιπλέον το έδαφος όπου τοποθετείται το πλέγμα έχει χαμηλή ειδική αντίσταση, τότε αυτό το δίκτυο μπορεί να αποτελέσει άριστο σύστημα γείωσης.

- ii. Εάν το μέγεθος του ρεύματος που διαχέεται στη γη είναι μεγάλο, τότε πρέπει να εγκατασταθεί πλέγμα με αντίσταση τόσο χαμηλή, ώστε το *GPR* να μην προκαλεί μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια της γης επικίνδυνες για τον άνθρωπο. Ένα σύστημα που συνδυάζει ένα οριζόντιο πλέγμα και έναν αριθμό κατακόρυφων ράβδων έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Το οριζόντιο πλέγμα είναι αποτελεσματικό στον περιορισμό των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων στην επιφάνεια της γης, εφόσον αυτό είναι σε μικρό βάθος, συνήθως 0,3–0,5m. Εντούτοις, μεγάλου μήκους κατακόρυφες ράβδοι σταθεροποιούν την απόδοση αυτού του συστήματος. Σε πολλές εγκαταστάσεις η σταθερότητα είναι σημαντική, διότι η ειδική αντίσταση των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (υγρασία, βροχή, θερμοκρασία), ενώ η ειδική αντίσταση των κατώτερων στρωμάτων του εδάφους παραμένει σχεδόν σταθερή.
- Οι ράβδοι που διαπερνούν το έδαφος χαμηλής ειδικής αντίστασης είναι πολύ πιο αποτελεσματικές στη διάχυση του ρεύματος σφάλματος, στην περίπτωση διστρωματικού ή πολυστρωματικού εδάφους, του οποίου το ανώτερο στρώμα έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από τα κατώτερα στρώματα.

Εάν οι ράβδοι εγκατασταθούν κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος σε έδαφος με ομοιόμορφη ειδική αντίσταση ή ελαττούμενη όσο αυξάνεται το βάθος, τότε θα μειωθούν σημαντικά οι απότομες κλίσεις του δυναμικού επιφανείας κοντά στην περιφέρεια του πλέγματος.

Βιβλιογραφία

- [1] IEEE Std 81-1983, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system”, 11 March 1983.
- [2] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80–2000 (Revision of IEEE Std 80–1986), 2000.
- [3] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80-1986, 1986.
- [4] www.erico.com
- [5] Φανή Η. Ασημακοπούλου, “Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους”, Ενδιάμεση κρίση, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
- [6] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Αθήνα 1997.
- [7] Δάφνη Α. Κουτσορόδη, «Υπολογιστική προσομοίωση συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
- [8] Ιωάννης Φ. Γκόνος, “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης”, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [9] Π. Ντοκόπουλος “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384”, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2005.
- [10] <http://faraday.ee.auth.gr/kosmanis/files/grounding.ppt>
- [11] <http://www.pontins.co.za>
- [12] Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384, “Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, Έκδοση 2^η, 04/03/2004.
- [13] <http://us.fluke.com>
- [14] <http://www.nachi.org>
- [15] <http://www.techteam.gr>
- [16] EN 50164-2
- [17] Ν. Παναγιωτόπουλος: “Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων”, Σεμινάριο.
- [18] Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 62305-3, “Protection against lightning Part 3: Physical damage to structure and life hazard”, Annex E, §E.5.6.2.2.2., pp. 275, “Metals in concrete”, February 2006.

-
- [19] Πρότυπο HD 60364-5-54, “Low voltage installations — Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements, protective conductors and protective bonding conductors”, February 2007.
- [20] Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ 1424, “Απαιτήσεις για θεμελιακή γείωση”, 03/11/2006.
- [21] Δ. Κόκκινος “Θεμελιακή Γείωση”, 4^η έκδοση, Εκδόσεις ΕΛΕΜΚΟ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008.
- [22] www.pittas.gr

Κεφάλαιο 2

ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Όλες οι ακριβείς επιστήμες κυριαρχούνται από την ιδέα της προσέγγισης.

Bertrand Russell

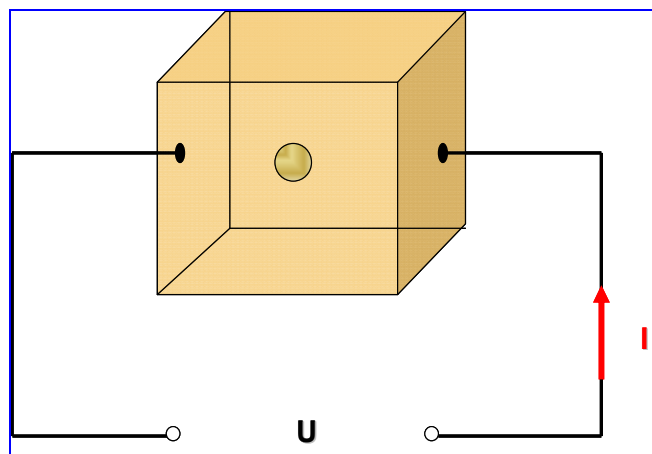
Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον ορισμό και την αναλυτική περιγραφή της έννοιας “ειδική αντίσταση”. Παρατίθενται ενδεικτικές τιμές της ειδικής αντίστασης διαφόρων κατηγοριών εδάφους, αναλύονται όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν και καθορίζουν την τιμή της και αναφέρονται διεξοδικά όλες οι μέθοδοι μέτρησής της *in situ* και στο εργαστήριο. Τέλος γίνεται μια εισαγωγή στο πρόβλημα της πολυστρωματικότητας του εδάφους και στις μαθηματικές σχέσεις και στους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του μοντέλου γης.

2.1 Ειδική αντίσταση

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και, συνεπώς, ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων, ή αγωγιμοτήτων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του (ρ), η οποία μετράται συνήθως σε Ωm . Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από την ποσότητα του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, καθώς και από την ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Με άλλα λόγια η αγωγιμότητα του εδάφους γίνεται αγωγιμότητα μέσω του νερού που κατακρατείται στο έδαφος και έτσι η αγωγιμότητα είναι ηλεκτρολυτική. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [1].

Ειδικότερα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (% κ.β.) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο αν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά, για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη, θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2), θειικό χαλκό (CuSO_4), ή θειικό μαγνήσιο (MgSO_4), είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Οι διακυμάνσεις αυτού του είδους μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος [2, 3].

Η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) ορίζεται ως η αντίσταση, από το υλικό του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Ειδική αντίσταση εδάφους.

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των παραγόντων που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση [4]:

ι. Ο τύπος του εδάφους

Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Δυστυχώς δεν έχουν ορισθεί καθαρά οι τύποι του εδάφους, για παράδειγμα, με τη λέξη άργιλος μπορεί να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Ένας αριθμός ερευνητών έχει μετρήσει κατά καιρούς την ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους, είτε παίρνοντας δείγματα και μετρώντας τα σε ειδικές συσκευές, είτε μετρώντας την ειδική αντίσταση *in situ*. Ακολουθεί ο Πίνακας 2.1, στον οποίο παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

Έδαφος	Ειδική αντίσταση (Ωm)
Επιφάνεια εδάφους, παχύ χώμα κ.τ.λ.	1-50
Λάσπη, πηλός, χώμα	2-100
Άμμος και χαλίκι	50-1000
Επιφάνεια ασβεστόλιθου	100-10000
Σχιστόλιθος	5-100
Αμμόπετρα με χαλαζία και άμμο	20-2000
Γρανίτης, βασάλτης, κ.τ.λ.	1000
Διαλυόμενος γνευσίτης (ορυκτό)	50-500
Πλακόστρωτα κ.τ.λ.	10-100

Πίνακας 2.1: Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους [5].

ii. Επίδραση μεγέθους κόκκων

Το μέγεθος των κόκκων, αλλά και η παρουσία κόκκων διαφορετικών μεγεθών, διαδραματίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης τους εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης. Επίσης, το μέγεθος των κόκκων, αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος, επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία. Στην περίπτωση κόκκων μεγάλου μεγέθους η υγρασία κατακρατείται λόγω της επιφανειακής τάσης. Στην περίπτωση που το μέγεθος των

κόκκων ποικίλλει, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγάλων σε μέγεθος κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους κόκκους και έτσι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται.

iii. Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

Δεδομένου ότι η αγωγιμότητα είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, συνεπάγεται ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων αλάτων, θα παίξουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Η ακριβής περιεκτικότητα σε νερό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και είναι μεταβλητή ποσότητα. Μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Σπάνια το έδαφος είναι πολύ ξηρό, παρόλα αυτά είναι πιθανό η άμμος της ερήμου να είναι η πιο κοντινή προσέγγιση σε αυτό. Από την άλλη, δεν εμφανίζονται συχνά εδάφη με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη του 40%. Στον Πίνακα 2.2 καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία.

Περιεκτικότητα σε υγρασία Επί τις εκατό κατά βάρος	Ειδική αντίσταση (Ωm)	
	Top soil	Sandy loam
0.0	1.000×10^4	1.000×10^4
2.5	2500	1500
5.0	1650	430
10.0	530	220
15.0	210	130
20.0	120	100
30.0	100	80

Πίνακας 2.2: Επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία στην ειδική αντίσταση [5].

iv. Επίδραση των διαλυμένων αλάτων στο νερό

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Το νερό, όμως, περιέχει και

διαλυμένα σε αυτό άλατα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης. Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση σε σχέση με την τιμή που αυτή έχει όταν το νερό, που έχει προστεθεί στο χώμα, είναι απιονισμένο. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι διαφορετικά άλατα έχουν διαφορετικές επιδράσεις και πιθανώς αυτή είναι η εξήγηση γιατί η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών από διαφορετικές περιοχές παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις η τεχνητή προσθήκη διαλυμάτων αλάτων στο χώμα, όπως χλωριούχου νατρίου (αλάτι), χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2), θεικού χαλκού (CuSO_4) ή θεικού μαγνησίου (MgSO_4) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει τις τιμές της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα.

Προστιθέμενα άλατα Επί τις εκατό δια βάρος υγρασίας	Ειδική αντίσταση (Ωm)
0,0	107
0,1	18
1,0	4,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1

Πίνακας 2.3: Επίδραση της περιεκτικότητας των αλάτων στην ειδική αντίσταση του εδάφους [5].

ν. Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης

Εφόσον η ειδική αντίσταση του εδάφους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία του νερού και είναι γνωστό ότι η ειδική αντίσταση του νερού έχει μεγάλο θερμοκρασιακό συντελεστή, είναι αναμενόμενο ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί καθώς η θερμοκρασία θα μειώνεται. Σε περίπτωση μάλιστα, που η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 0°C τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί πάρα πολύ. Ο

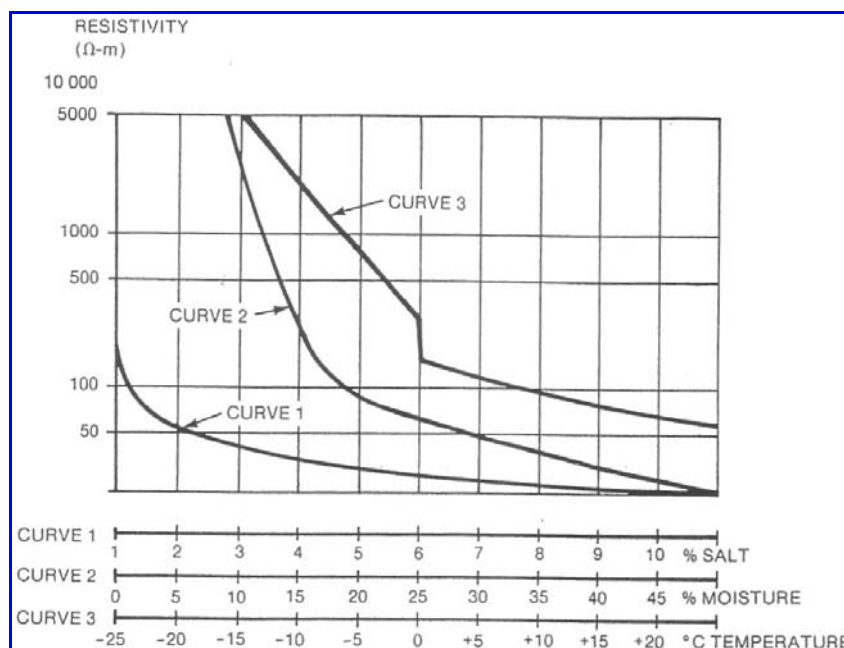
Πίνακας 2.4 παρουσιάζει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Ειδική αντίσταση (Ωm)
20	72
10	99
0 (νερό)	138
0 (πάγος)	300
-5	790
-15	3300

Πίνακας 2.4: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση.

Όσον αφορά την επίδραση της πίεσης, έχει παρατηρηθεί ότι υψηλότερες πιέσεις, που οφείλονται σε πιο συμπαγείς δομές του εδάφους, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης.

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει, της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.2: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα (CURVE 1), της υγρασίας (CURVE 2) και της θερμοκρασίας (CURVE 3) [6].

vi. Επίδραση της έντασης του πεδίου (voltage gradient)

Η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζεται από την ένταση, εκτός εάν η τελευταία υπερβαίνει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με το είδος του εδάφους, αλλά συνήθως είναι της τάξης μερικών kV/cm . Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, θα δημιουργηθούν τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, τα οποία οδηγούν σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα τόξα θα εκδηλώνονται σε εκείνη την περιοχή όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θα ξεπερνά την κρίσιμη τιμή. Σε όλο τον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη [7].

vii. Επίδραση της μορφής της τάσης

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από $10m$, έχει παρατηρηθεί αύξηση της τιμής της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις $0,3/30\mu s$, η μεταβατική αντίσταση θεμελιακού γειωτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 3Ω και 26Ω . Η αύξηση της τιμής της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο της τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση.

2.2 Καθορισμός της δομής του εδάφους

Βασική παράμετρος στη μελέτη του συστήματος γείωσης μιας εγκατάστασης, π.χ. στο σχεδιασμό του πλέγματος γείωσης υποσταθμού, είναι η δομή του εδάφους ακριβώς κάτω από αυτήν. Συνήθως η δομή του εδάφους είναι πολύπλοκη, διότι η ειδική αντίσταση του δεν έχει μια σταθερή τιμή, αλλά διαφέρει ανάλογα με το βάθος το οποίο εξετάζεται, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την υγρασία και άλλες συνθήκες.

Στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης συνηθίζεται να μοντελοποιείται το έδαφος, του οποίου η ειδική του αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος, ακολουθώντας μια μαθηματική σχέση, όπως την εκθετική μείωση ή αύξηση, ή συνηθέστερα το διαχωρισμό της γης σε στρώματα, με σταθερή ειδική αντίσταση το καθένα. Η μορφή των στρωμάτων αυτών δύναται να είναι οριζόντια—που είναι η περίπτωση που συναντάται συχνότερα—κατακόρυφη, σφαιρική, κτλ. Χρησιμοποιώντας μια σειρά μετρήσεων που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια

της γης, μπορεί να καθοριστεί ένα πολυστρωματικό μοντέλο, βασισμένο στη λύση του προβλήματος του ανάστροφου ηλεκτρικού πεδίου.

Μέθοδοι για τον καθορισμό πολυστρωματικών μοντέλων έχουν προταθεί, τόσο για διστρωματικό, όσο και για τριστρωματικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους [2, 8, 9].

Σε επόμενη παράγραφο θα παρουσιασθεί μια αποτελεσματική μέθοδος για τον προσδιορισμό τριστρωματικού μοντέλου, που είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης πέντε μεταβλητών. Από το προηγούμενο μπορούμε πολύ εύκολα να οδηγηθούμε σε πρόβλημα τριών μεταβλητών, όπως είναι αυτό του διστρωματικού μοντέλου.

2.3 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι απαραίτητη η ροή ρεύματος μέσω αυτού. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο τοποθετώντας ηλεκτρόδια μέσα στη γη, τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύμα. Συγκεκριμένα, ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται στο υπέδαφος από το θετικό ηλεκτρόδιο Α και εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο Β (ηλεκτρόδια ρεύματος), με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί ηλεκτρικό πεδίο εξαρτώμενο από τη δομή του υπεδάφους. Με τη βοήθεια δύο άλλων ηλεκτροδίων Μ, Ν (ηλεκτρόδια δυναμικού) μετράται η διαφορά δυναμικού ΔU (Σχήμα 2.3, Εικόνα 2.1).

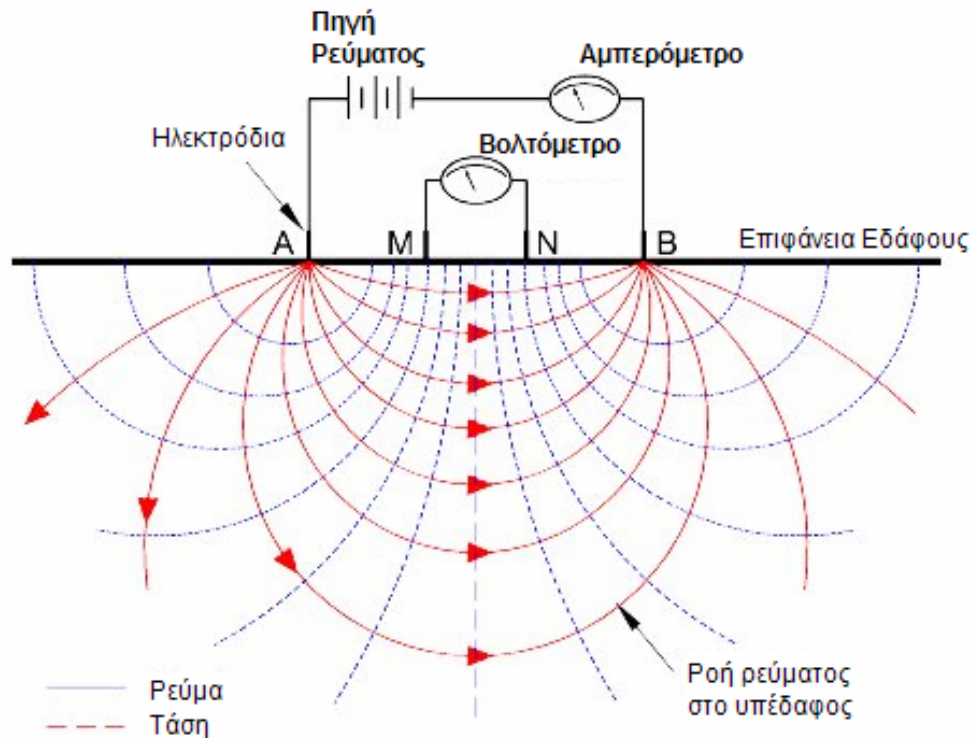
Αναλυτικότερα η τάση σε οποιοδήποτε σημείο υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$U = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (2.1)$$

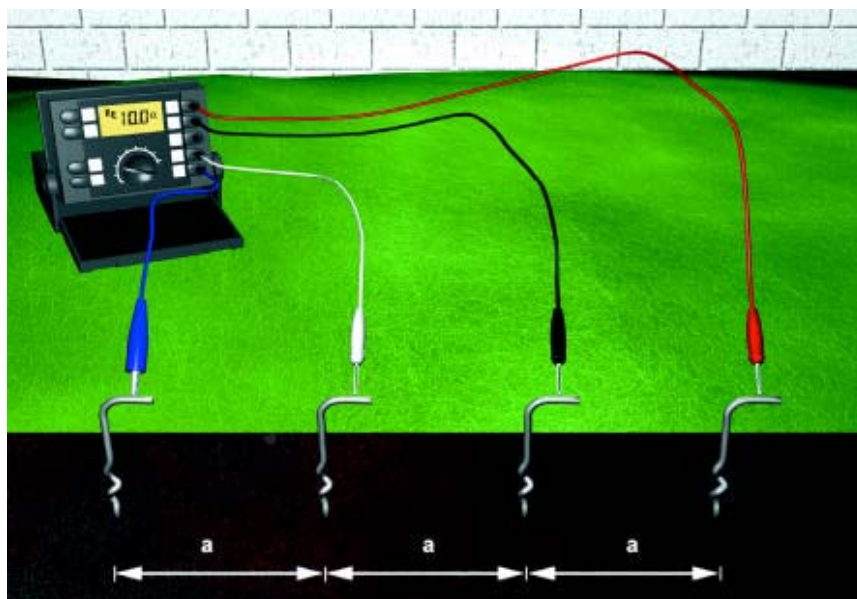
όπου r_A και r_B είναι η απόσταση του υπ' όψιν σημείου από τα Α και Β. Τότε η διαφορά δυναμικού U_{MN} δίδεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$U_{MN} = U_M - U_N = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (2.2)$$

όπου U_M και U_N είναι το δυναμικό στα σημεία Μ και Ν αντίστοιχα, ΑΜ, ΒΜ, ΑΝ, ΒΝ είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων Α και Μ, Β και Μ, Α και Ν, Β και Ν, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης [1].

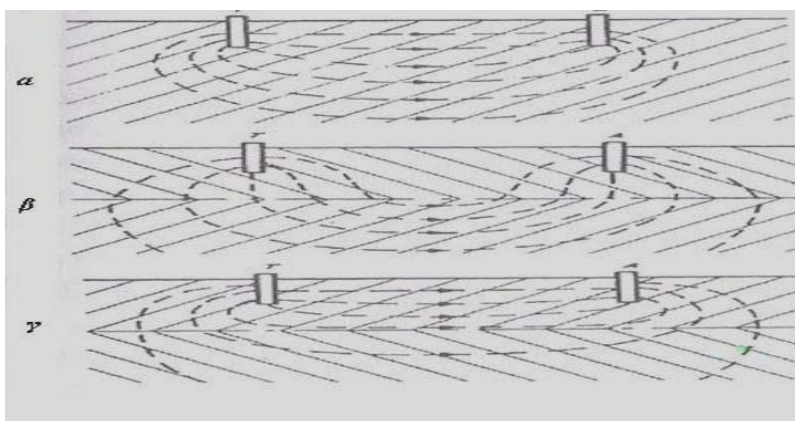


Εικόνα 2.1: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης [10].

Από τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού υπολογίζουμε τη φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, η οποία εξαρτάται όχι μόνο από την ειδική αντίσταση των πετρωμάτων αλλά και από τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Από την επεξεργασία της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προκύπτει η κατανομή της

πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, δηλαδή η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους.

Σε θέσεις όπου υπάρχει περίπτωση η ειδική αντίσταση του εδάφους να μεταβάλλεται με το βάθος, οι μετρήσεις πιθανόν να μην είναι επαρκείς σε μια μόνο κατεύθυνση αλλά να απαιτηθεί να γίνουν και σε διαφορετικές κατευθύνσεις (άξονες) ή να απαιτηθεί μεταβολή των αποστάσεων των ηλεκτροδίων ράβδων από το σημείο M προκειμένου να ερευνηθεί η μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε οριζόντια επίπεδα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε το επιλεγόμενο σημείο M να βρίσκεται όσο το δυνατόν μακρύτερα από θαμμένα αντικείμενα, κυρίως μεταλλικά. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται η επίδραση των στρωμάτων του εδάφους στη ροή του ρεύματος.



Σχήμα 2.4: Επίδραση των στρωμάτων που παρουσιάζει το έδαφος στη ροή του ρεύματος κατά τη μέτρηση α)ομοιογενούς αντίστασης, β)πολύ χαμηλής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα, γ)πολύ υψηλής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία [4, 7, 8, 11, 12 και 13] αναλύονται διάφορες μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι κυριότερες είναι:

- Μέθοδος των 4 σημείων (Four point method)
- Μέθοδος των 3 σημείων (Three point method ή Variation of Depth Method)
- Μέθοδος των 2 σημείων (Two Point Method).

Κατά καιρούς οι ερευνητές πρότειναν διαφορετικούς τρόπους διάταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων και έτσι προέκυψαν οι εξής τεχνικές μέτρησης της ειδικής αντίστασης:

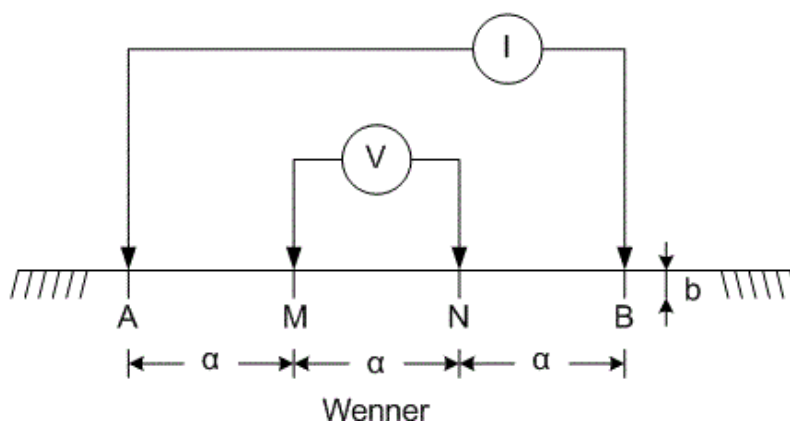
- i. Μέθοδος Wenner
- ii. Μέθοδος Schlumberger - Palmer
- iii. Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου
- iv. Μέθοδος Lee
- v. Μέθοδος διπόλου-διπόλου
- vi. Τετραγωνική διάταξη

Ακολουθώς αναλύονται οι βασικές μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης.

2.3.1 Η μέθοδος των τεσσάρων σημείων (ηλεκτροδίων)

2.3.1.1 Διάταξη Wenner

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται τέσσερα μικρού μήκους ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντια απόσταση a μεταξύ τους και σε βάθος b (όχι μεγαλύτερο από $0,1a$) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5. Η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια C1 (A) και C2 (B), ενώ η τάση μετράται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια P1 (M) και P2 (N).



Σχήμα 2.5: Διάταξη Wenner [1].

Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (2.3) [4].

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2 + 4b^2)}} - \frac{2a}{\sqrt{(4a^2 + 4b^2)}}} = \frac{4\pi a R}{n} \quad (2.3)$$

όπου R είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου) και το n εξαρτάται από το λόγο b/a και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.

Στην περίπτωση που $a \ll b$ τότε:

$$\rho = 4\pi a R \quad (2.4)$$

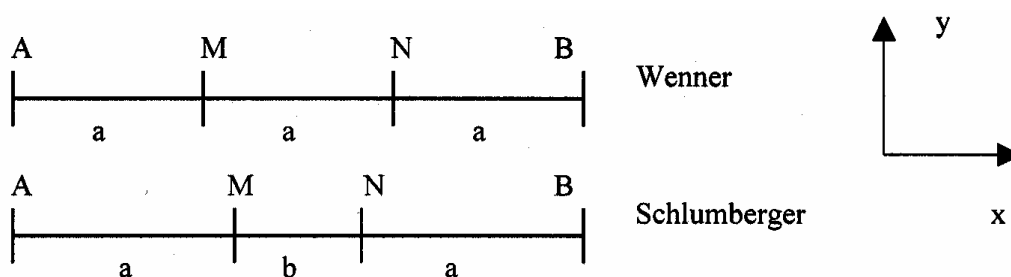
ενώ αν $b \ll a$ τότε η εξίσωση (2.3) απλοποιείται στην:

$$\rho = 2\pi a R \quad (2.5)$$

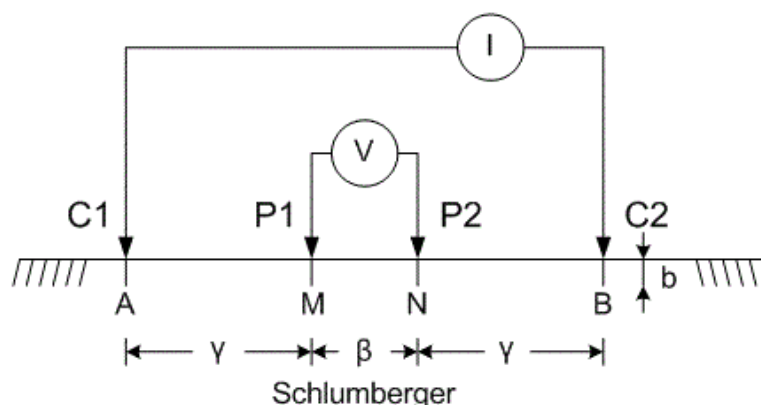
η οποία δίνει τη φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους σε βάθος a . Έτσι, σε περίπτωση, που θέλουμε να μελετήσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους, αρκεί να μεταβάλλουμε τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, διατηρούμενης της συμμετρίας τους ως προς το κέντρο της διάταξης.

2.3.1.2 Διάταξη Schlumberger – Palmer

Στη διάταξη Wenner τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, ωστόσο αρκετοί επιστήμονες διατύπωσαν την άποψη ότι αν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού αυξηθεί, η τιμή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης θα αυξηθεί, κάνοντας τη μέτρηση ευκολότερη (Σχήμα 2.6). Μια προτεινόμενη διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.6: Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων κατά Wenner και Schlumberger [2].



Σχήμα 2.7: Διάταξη Schlumberger [1].

Σε αυτήν τη διάταξη τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού είναι τοποθετημένα στην ίδια ευθεία και συμμετρικά ως προς το μέσο της απόστασης των ηλεκτροδίων δυναμικού (κέντρο διάταξης), αλλά η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού P1(M) και P2(N) είναι πολύ μικρότερη της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος C1(A) και C2(B) [8]. Μια εμπειρική συνθήκη στη διάταξη Schlumberger είναι ότι η απόσταση MN πρέπει να παραμένει μικρότερη του 40% της απόστασης AB/2.

Ορίζουμε $a=MN/2$ και $b=AB/2$. Το δυναμικό στο σημείο M ορίζεται ως:

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{b-a} - \frac{1}{b+a} \right] \quad (2.6)$$

Λόγω της συμμετρίας, η διαφορά δυναμικού μεταξύ του M και του N θα είναι δύο φορές αυτό το δυναμικό. Ως εκ τούτου, η μετρούμενη διαφορά δυναμικού είναι:

$$U_{MN} = \frac{2\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{b-a} - \frac{1}{b+a} \right] = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{4a}{b^2 - a^2} \right] \quad (2.7)$$

Η μετρούμενη αντίσταση είναι $R=U/I$ και, έτσι, προκύπτει η σχέση:

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left[\frac{4}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1} \right] \quad (2.8)$$

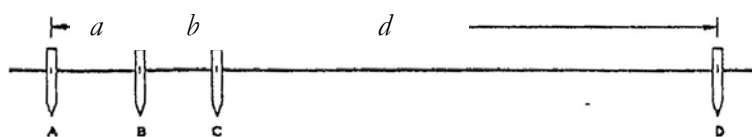
Αν ορίσουμε $b/a=A$, τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = 2\pi a R \left[\frac{A^2 - 1}{4} \right] \quad (2.9)$$

Σε περίπτωση που επιθυμούμε να μελετήσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος, τα ηλεκτρόδια δυναμικού παραμένουν σταθερά, ενώ η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται μετακινώντας τα συμμετρικώς ως προς το κέντρο της διάταξης.

2.3.1.3 Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου

Όταν το σύστημα τεσσάρων (4) ηλεκτροδίων του Wenner χρησιμοποιείται και ζητηθεί να αλλαχθεί η απόσταση των ηλεκτροδίων ή η θέση της δοκιμής, τότε και τα τέσσερα ηλεκτρόδια, καθώς και η σύνδεση των καλωδίων τους, πρέπει να αλλαχθούν [4]. Σε ανώμαλα εδάφη αυτή η διαδικασία είναι πολύ επίπονη. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτείνεται η διάταξη, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Σε αυτήν απαιτείται η μετακίνηση μόνο δύο (2) ηλεκτροδίων (του 2^{ου} και 4^{ου} της διάταξης, δηλαδή των ηλεκτροδίων B και D, εν προκειμένω) αντί και των τεσσάρων.



Σχήμα 2.8: Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου [4].

Τα ηλεκτρόδια A και D είναι πάλι τα ηλεκτρόδια έγχυσης του ρεύματος. Το ηλεκτρόδιο D είναι τοποθετημένο αρκετά μακριά ($d > 10a$) έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων B και C, που οφείλεται στο ρεύμα I που αναχωρεί από το D, να μπορεί να αμεληθεί. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των B και C που οφείλεται στο ρεύμα που αναχωρεί από το ηλεκτρόδιο A είναι:

$$U_{AB} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{a+b} \right] = IR \quad (2.10)$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς ρ , προκύπτει ο τύπος (2.11) για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης

$$\rho = \frac{2\pi a(a+b)R}{b} \quad (2.11)$$

Για να εξασφαλίσουμε σταθερή ροή ρεύματος μακριά από το ηλεκτρόδιο A, συχνά το ηλεκτρόδιο D παίρνει το σχήμα ενός κύκλου αποτελούμενου από

ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και έχουν το Α ως κέντρο, σχηματίζοντας έτσι το ηλεκτρόδιο επιστροφής.

Η δυσκολία αυτής της μεθόδου είναι η έκταση του χώρου που απαιτείται για το σύστημα των ηλεκτροδίων, συγκρινόμενη με τη διάταξη Wenner.

2.3.1.4 Εναλλακτικές διατάξεις ηλεκτροδίων

Στη διάταξη Wenner η συνηθισμένη διευθέτηση των ηλεκτροδίων είναι C–P–P–C, όπου το C αποτελεί το ηλεκτρόδιο ρεύματος και το P το ηλεκτρόδιο δυναμικού. Τα ηλεκτρόδια C και P μπορούν να εναλλαχθούν χωρίς να μεταβληθεί η τιμή της μετρούμενης αντίστασης.

Ο Carpenter είχε εκτιμήσει ότι με τέσσερα (4) ηλεκτρόδια μπορούν να γίνουν τρεις (3) πιθανές μετρήσεις, βάσει των οποίων υπολογίζεται η τιμή της ειδικής αντίστασης. Σε ομοιογενή εδάφη αυτές οι τρεις τιμές είναι ίδιες, αλλά σε ανομοιογενή εδάφη οι τιμές της ειδικής αντίστασης, που προκύπτουν από την εφαρμογή των τριών τρόπων, είναι διαφορετικές. Μάλιστα από τις διαφορές τους προκύπτουν πορίσματα σχετικά με την ανομοιογένεια του εδάφους. Οι πιθανές διευθετήσεις των ηλεκτροδίων παρατίθενται ακολούθως (Πίνακας 2.5).

Διάταξη ηλεκτροδίων				Τύπος ειδικής αντίστασης
<i>C</i>	P	P	C	$\rho_1 = 2\pi\alpha R_1$
<i>P</i>	C	C	P	
<i>C</i>	C	P	P	$\rho_2 = 2\pi\alpha R_2$
<i>P</i>	P	C	C	
<i>C</i>	P	C	P	$\rho_3 = 2\pi\alpha R_3$
<i>P</i>	C	P	C	

Πίνακας 2.5: Παραλλαγές των διατάξεων των ηλεκτροδίων [4].

Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι τύποι για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης από τις μετρηθείσες τιμές της αντίστασης του εδάφους (R_1 , R_2 και R_3 είναι οι αντιστάσεις γείωσης, όπως μετρήθηκαν για καθεμιά από τις διατάξεις

ηλεκτροδίων, που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.5). Μπορεί ναδειχθεί ότι για τις τιμές της ειδικής αντίστασης για ομοιογενή εδάφη ισχύει:

$$3\rho_1 = \rho_2 + 2\rho_3 \quad (2.12)$$

και

$$R_1 = R_2 + R_3 \quad (2.13)$$

2.3.1.5 Μέθοδος Lee

Ο Lee [4] πρότεινε αυτό που ονόμασε μέθοδο διαχωρισμού (Σχήμα 2.9). Σε αυτήν τη μέθοδο έχουμε πέντε (5) ηλεκτρόδια, όμως μόνο τέσσερα (4) χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε μέτρηση. Τα εξωτερικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την έγχυση του ρεύματος, ενώ τα ηλεκτρόδια A, B, C είναι τα ηλεκτρόδια στα οποία μετράται το δυναμικό. Παίρνουμε δύο (2) μετρήσεις του δυναμικού, στην πρώτη χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια A και B και στη δεύτερη τα ηλεκτρόδια B και C. Λόγω συμμετρίας, το δυναμικό του ηλεκτροδίου B θα είναι μηδέν. Το δυναμικό του ηλεκτροδίου A είναι:

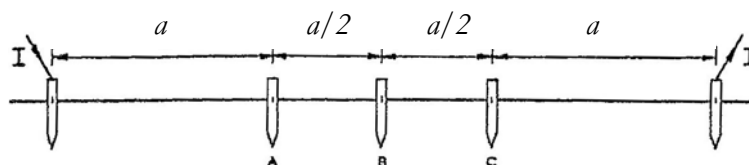
$$U_A = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) = U_{AB} \quad (2.14)$$

Αν η μετρούμενη αντίσταση μεταξύ των A και B (R_{AB}) είναι ίση με U_{AB}/I , τότε η ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = 4\pi a R_{AB} \quad (2.15)$$

Ομοίως αν R_{BC} είναι η αντίσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων B και C, τότε:

$$\rho = 4\pi a R_{BC} \quad (2.16)$$



Σχήμα 2.9: Διάταξη ηλεκτροδίων για την εφαρμογή της μεθόδου Lee [4].

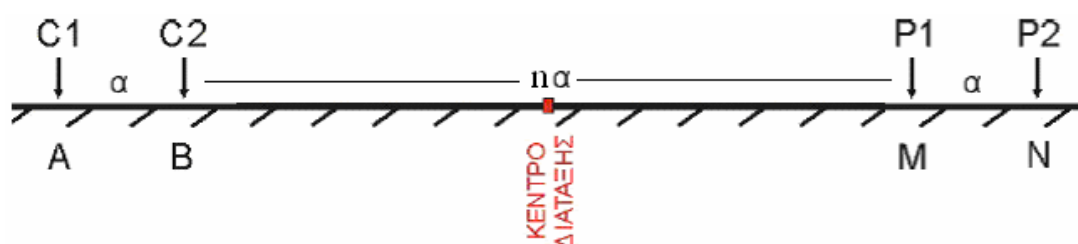
Έχει παρατηρηθεί ότι δύο (2) μετρήσεις μπορούν να γίνουν χωρίς να μετακινηθούν τα ηλεκτρόδια και αν οι τιμές της ειδικής αντίστασης που θα ληφθούν από αυτούς τους δύο τύπους διαφέρουν, τότε το έδαφος δεν είναι ομοιογενές. Με τη βοήθεια επιπλέον μετρήσεων, που μπορούν να ληφθούν μετά

από αλλαγή της απόστασης a ή μετακίνηση της θέσης του συστήματος ηλεκτροδίων, προκύπτουν συμπεράσματα για την ανομοιογένεια του εδάφους.

2.3.1.6 Η μέθοδος διπόλου – διπόλου

Η αντίστοιχη διάταξη αποτελείται από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος A, B τοποθετημένα σε απόσταση a και ένα ζεύγος ηλεκτροδίων δυναμικού M, N επίσης σε απόσταση a (Σχήμα 2.10) [14]. Η απόσταση μεταξύ των ζευγών ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού είναι κατά κανόνα ακέραιο πολλαπλάσιο εκείνης των επιμέρους ζευγών (A, B) και (M, N), δηλαδή είναι $n \cdot a$. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση στη διάταξη διπόλου-διπόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = \pi a \frac{\Delta U}{I} n(n+1)(n+2) \quad (2.17)$$



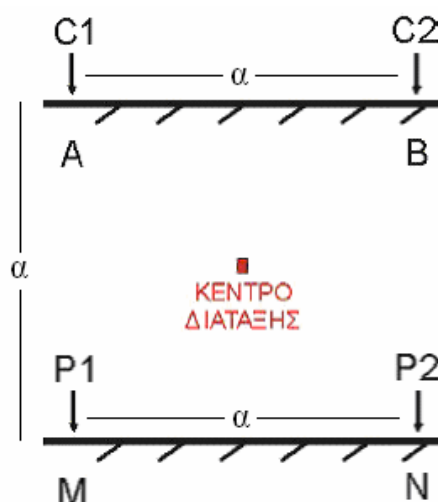
Σχήμα 2.10: Διάταξη διπόλου-διπόλου.

2.3.1.7 Η τετραγωνική διάταξη

Στη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις κορυφές ενός τετραγώνου και δίνουν τη δυνατότητα της εξομάλυνσης των τιμών από αζιμουθιακές μεταβολές της ειδικής αντίστασης (Σχήμα 2.11) [14]. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi \frac{\Delta U}{I} \frac{a}{2 - \sqrt{2}} \quad (2.18)$$

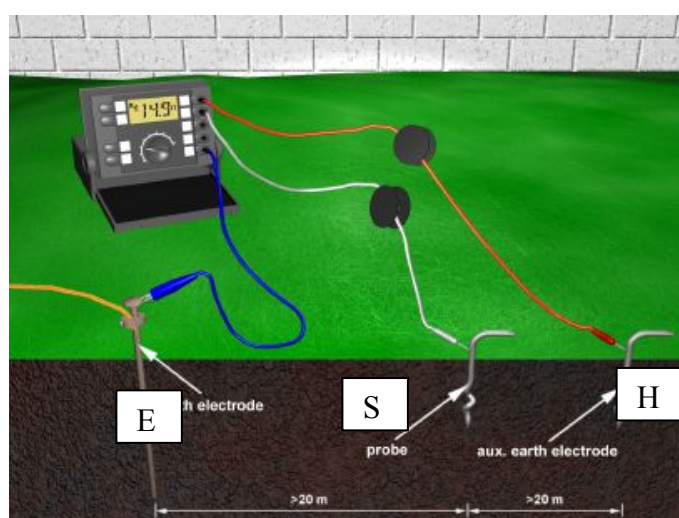
όπου a είναι το μήκος της πλευράς του τετραγώνου.



Σχήμα 2.11: Τετραγωνική διάταξη.

2.3.2 Διάταξη με χρήση τριών ηλεκτροδίων

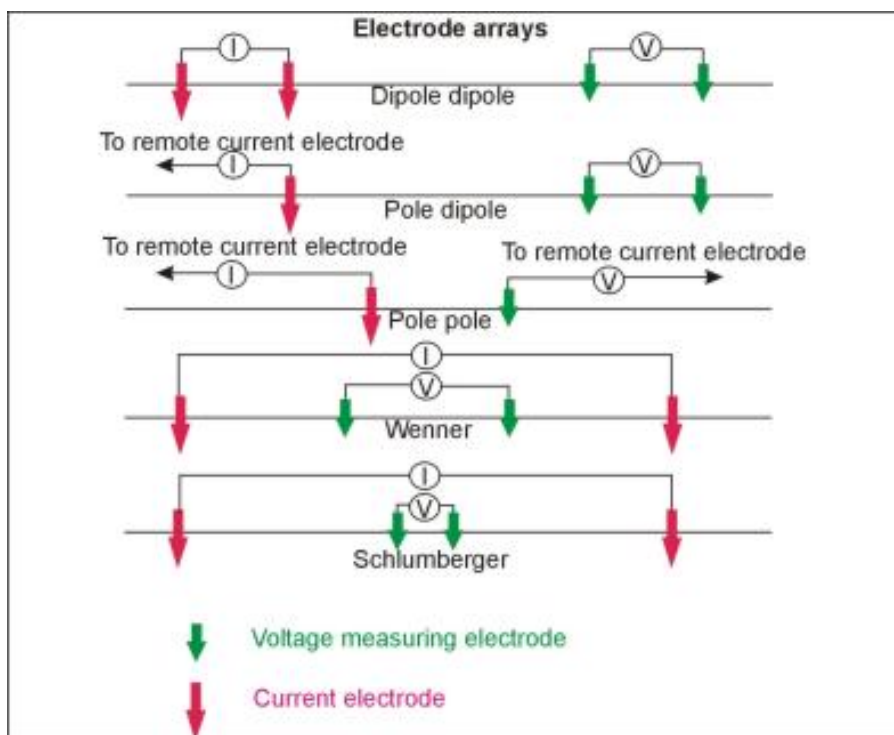
Στη μέθοδο αυτή [10], που ονομάζεται και μέθοδος της πτώσης δυναμικού, γίνεται ουσιαστικά μέτρηση της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου. Η διάταξη μέτρησης, όπως και η σύνδεση του οργάνου μέτρησης της αντίστασης γείωσης (γειωσόμετρο), φαίνονται στην Εικόνα 2.2. Η διαφορά δυναμικού (U) μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης E και του ηλεκτροδίου S μετράται με ένα βολτόμετρο, ενώ με ένα αμπερόμετρο μετράται το ρεύμα (I) στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο H . Αυτές οι λειτουργίες γίνονται εσωτερικά από τη συσκευή που χρησιμοποιούμε.



Εικόνα 2.2: Συνδεσμολογία μέτρησης της ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων [10].

Με χρήση του νόμου του Ohm υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης $R = \frac{U}{I}$ και επομένως μπορεί να υπολογιστεί το ρ . Είναι προφανές ότι η μέτρηση αυτή μπορεί να έχει μεγάλο σφάλμα, ειδικά στην περίπτωση του ανομοιογενούς εδάφους.

Οι παραπάνω περιγραφόμενες διατάξεις συνοψίζονται στο Σχήμα 2.12:



Σχήμα 2.12: Διατάξεις μέτρησης της ειδικής αντίστασης.

2.4 Ορισμός της φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Εγχύοντας ρεύμα σταθερής έντασης I , η τάση U πρέπει να μειώνεται με την αύξηση της απόστασης a , ακόμη και στην περίπτωση που το μοντέλο γης είναι ομοιογενές· για παράδειγμα οι τιμές U/I ποικίλλουν για όποιες αλλαγές του a . Για να υπερκεραστεί αυτή η ατέλεια, ορίζεται μια φαινόμενη ειδική αντίσταση, η οποία περιγράφει τη σχέση της τάσης, της έντασης του ρεύματος και της απόστασης των ηλεκτροδίων a όπως φαίνεται ακολούθως [15]:

$$\rho'_a = 2\pi a U / I \quad (2.19)$$

Αποδεικνύεται ότι, αν το έδαφος είναι ομοιογενές, η ακριβής τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι ανεξάρτητη του a και η τιμή είναι σχεδόν

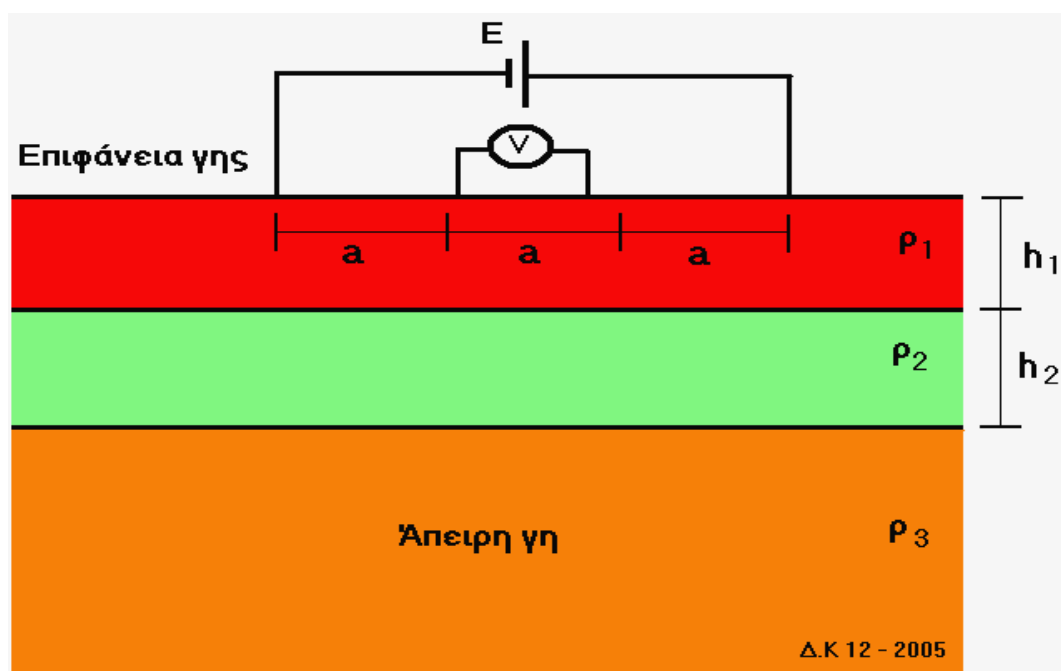
ίδια με την πραγματική ειδική αντίσταση του εδάφους. Χρησιμοποιώντας τη λύση του δυναμικού, που παράχθηκε από σημειακές πηγές ρεύματος ή από ημισφαιρικά ηλεκτρόδια σε επαφή με τριστρωματικό μέσο, προκύπτει ότι η θεωρητική έκφραση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι [16]:

$$\rho_a^c = \rho_1 \{1 + 4\alpha \int_0^\infty f(\lambda) [J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)] d\lambda\} \quad (2.20)$$

όπου J_0 είναι ο συντελεστής *Bessel* πρώτου είδους της μηδενικής τάξης:

$$f(\lambda) = \frac{k_1 e^{-2h_1\lambda} + k_2 e^{-2(h_1+h_2)\lambda}}{1 + k_1 k_2 e^{-2h_1\lambda} - k_1 e^{-2h_1\lambda} - k_2 e^{-2(h_1+h_2)\lambda}} \quad (2.21)$$

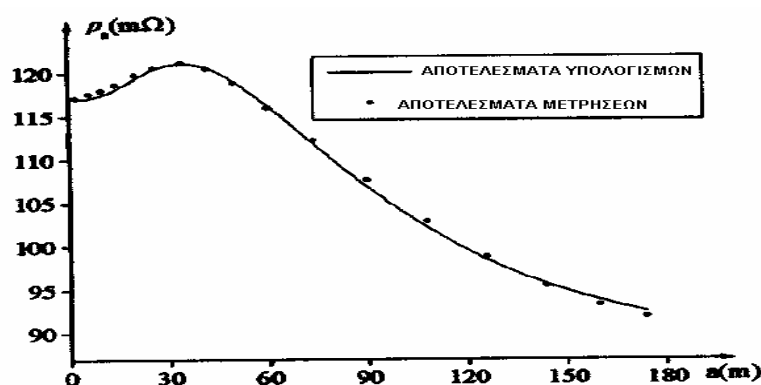
$k_1 = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$, $k_2 = (\rho_3 - \rho_2) / (\rho_3 + \rho_2)$, h_i και ρ_i είναι αντίστοιχα το πάχος στρώματος και η ειδική αντίσταση του στρώματος i , όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων (Wenner) για τριστρωματικό μοντέλο γης.

Από τη σχέση (2.20) συνεπάγεται ότι, όταν η απόσταση a των ηλεκτροδίων τείνει στο μηδέν, η φαινόμενη ειδική αντίσταση τείνει στην ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος και μπορεί να αποδειχθεί ότι, όταν το a τείνει σε μια σχετικά μεγάλη τιμή, η φαινόμενη ειδική αντίσταση τείνει στην ειδική αντίσταση του κατώτερου στρώματος του εδάφους. Από το τριστρωματικό παράδειγμα στο Σχήμα 2.14 βλέπουμε αυτήν την ιδιότητα η οποία ονομάζεται

διπλή τελική οριακή ιδιότητα, όπου για μικρό και μεγάλο a υπάρχουν δύο (2) όρια. Η διπλή οριακή ιδιότητα μπορεί να αποτελέσει τον οδηγό επιλογής της μεγαλύτερης και μικρότερης τιμής της απόστασης a στη δοκιμή με τα τέσσερα (4) ηλεκτρόδια· για παράδειγμα το επιλεγμένο a πρέπει να είναι αρκετά μικρό και αρκετά μεγάλο, ώστε να εξασφαλίσει σχεδόν αμετάβλητη φαινόμενη ειδική αντίσταση με επιπλέον αλλαγές του a .



Σχήμα 2.14: Κατανομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων για μοντέλο με $h_1=27,1$, $h_2=12,5$, $\rho_1=116,9$, $\rho_2=85,0$ [15].

2.5 Πειραματικές μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης

Οι μέθοδοι, που αναλύθηκαν στην παράγραφο 2.3, αφορούσαν τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους *in situ*. Κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων με δείγματα χώματος στο εργαστήριο, δεν είναι γνωστή η ειδική αντίστασή τους και είναι απαραίτητο να γίνει υπολογισμός της ειδικής αντίστασης. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται ανασκόπηση κάποιων τεχνικών, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς στη βιβλιογραφία.

Οι Loboda [17], Gonos [18], Lima [19] και Chen [20] χρησιμοποίησαν δύο (2) κυλινδρικά ομοαξονικά ηλεκτρόδια. Στο μεταξύ τους διάκενο τοποθετήθηκε το δείγμα χώματος. Γνωρίζοντας την επιβαλλόμενη τάση στο εσωτερικό ηλεκτρόδιο και μετρώντας την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει τη διάταξη, είναι δυνατός ο υπολογισμός της αντίστασης R . Ακολούθως, με τη βοήθεια του τύπου (2.22) υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του δείγματος:

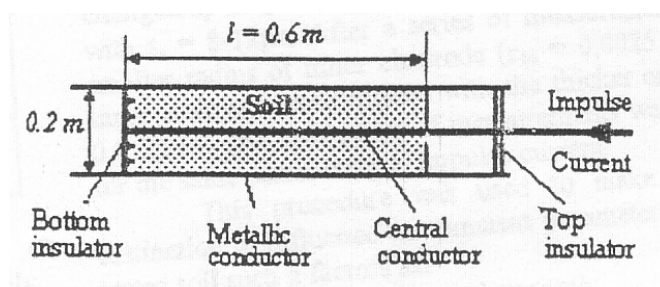
$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (2.22)$$

όπου l είναι το μήκος του κυλίνδρου

r_e είναι η ακτίνα του εξωτερικού κυλίνδρου

r_i είναι η ακτίνα του εσωτερικού ηλεκτροδίου

Στο Σχήμα 2.15 που ακολουθεί παρουσιάζεται η διάταξη για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης.



Σχήμα 2.15: Ομοαξονικό κυλινδρικό ηλεκτρόδιο για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης [17].

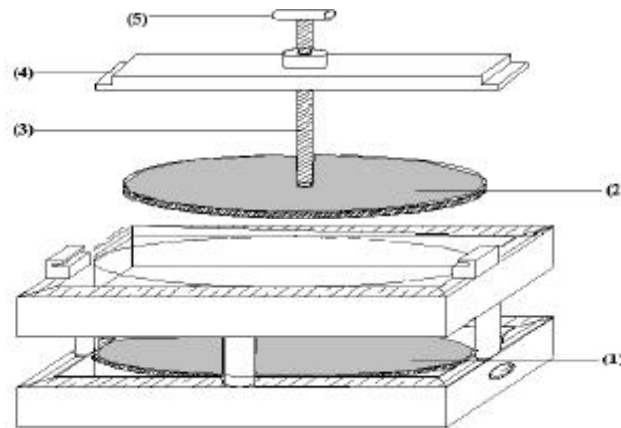
Οι Y. Liu et al [21] στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν ημισφαιρική διάταξη. Σε αυτήν την περίπτωση η ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{2\pi R}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e}} \quad (2.23)$$

όπου r_e είναι η ακτίνα της εξωτερικής σφαίρας

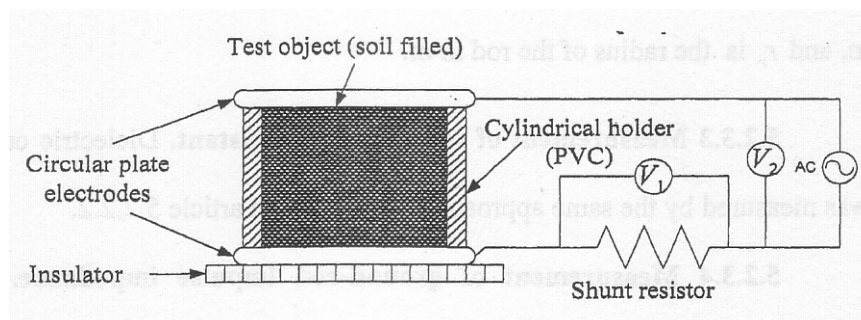
και r_i είναι η ακτίνα της εσωτερικής

Οι M. Nor et al. [22] μέτρησαν την ειδική αντίσταση δείγματος χρησιμοποιώντας διάταξη παραλλήλων πλακών, που παράγει ομογενές πεδίο, σύμφωνα με το πρότυπο BS 1377 [23]. Η διάταξή τους παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Σχηματικό διάγραμμα παραλλήλων πλακών ((1) και (2) ηλεκτρόδια, (3) ρυθμιστικός μοχλός, (4) δοκός, (5) λαβή) [22].

Τέλος, οι Manna & Chowdhuri [24] χρησιμοποίησαν τη διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17 και η οποία παράγει ομογενές πεδίο για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης των δειγμάτων χώματος.



Σχήμα 2.17: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης [24].

Η διάταξη αυτή αποτελείται από έναν κυλινδρικό σωλήνα από PVC διαμέτρου 10cm και ύψους 5cm και δύο ατσάλινες πλάκες διαμέτρου 13cm . Χρησιμοποιώντας μια γέφυρα, μετρήθηκε η αντίσταση και με τη βοήθεια του τύπου (2.24) υπολογίστηκε η ειδική αντίσταση των δειγμάτων.

$$\rho = \frac{2\pi l R}{S} \quad (2.24)$$

όπου S είναι η επιφάνεια των πλακών

l είναι η απόσταση μεταξύ των πλακών

2.6 Προσδιορισμός του μοντέλου γης

Η λύση του ανάστροφου προβλήματος διευθετεί τις παραμέτρους στη σχέση (2.21), οι οποίες δηλώνονται με $x = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2)$, προκειμένου η θεωρητική φαινόμενη αντίσταση να φαίνεται στη σχέση (2.20), όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτήν που βρέθηκε με χρήση των αποτελεσμάτων στη σχέση (2.19), από m ζεύγη μετρήσεων με διαφορετικές αποστάσεις, ώστε να κάνει:

$$\rho_{ai}^c - \rho_{ai}^t = \min, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2.25)$$

ή

$$\sum_{i=1}^m |(\rho_{ai}^c - \rho_{ai}^t)| / \rho_{ai}^t = \min \quad (2.26)$$

Ο προσδιορισμός του μοντέλου του τριστρωματικού εδάφους είναι ένα γραμμικό βελτιστοποιημένο πρόβλημα πέντε μεταβλητών, το οποίο μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων. Η λύση του προκύπτει από τη σχέση (2.25) ως ακολούθως [15]:

$$g_i(x) = \rho_{ai}^c(x) - \rho_{ai}^t = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2.27)$$

όπου διαφορετικό i αντιστοιχεί σε διαφορετικό a .

A. Λύση του μη γραμμικού συστήματος των εξισώσεων

Το σύστημα (2.27) των μη γραμμικών εξισώσεων μπορεί να επιλυθεί με γενίκευση της μεθόδου των Newton-Kantorovich [25].

Η κύρια διαδικασία είναι:

1. Επιλέγει μια αρχική τιμή του x , δηλώνοντας την με $x^{(0)}$.
2. Υπολογίζει τον Ιακωβιανό πίνακα:

$$A(x^{(0)}) = \begin{bmatrix} \partial g_1 / \partial \rho_1 & \partial g_1 / \partial \rho_2 & \partial g_1 / \partial \rho_3 & \partial g_1 / \partial h_1 & \partial g_1 / \partial h_2 \\ \partial g_2 / \partial \rho_1 & \partial g_2 / \partial \rho_2 & \partial g_2 / \partial \rho_3 & \partial g_2 / \partial h_1 & \partial g_2 / \partial h_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial g_m / \partial \rho_1 & \partial g_m / \partial \rho_2 & \partial g_m / \partial \rho_3 & \partial g_m / \partial h_1 & \partial g_m / \partial h_2 \end{bmatrix}_{[x=x^{(0)}]}$$

3. Υπολογίζει το $z(0)$, με την λύση του γραμμικού συστήματος των εξισώσεων που ακολουθούν:

$$A(x^{(0)})z^{(0)} + g(x^{(0)}) = 0 \quad (2.28)$$

$$\text{όπου } g(x^{(0)}) = [g_1(x^{(0)}), g_2(x^{(0)}), \dots, g_2(x^{(0)})]^T$$

Από τη στιγμή που ο αριθμός των εξισώσεων m είναι συνήθως μεγαλύτερος από τον αριθμό των αγνώστων, που εδώ είναι πέντε, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος του ελάχιστου τετραγώνου ώστε να επιλυθεί το σύστημα, το οποίο είναι η γενίκευση της μεθόδου των Newton-Kantorovich.

4. Αποδίδει $x^{(1)} = x^{(0)} + z^{(0)}$. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προσεγγίσουμε το όριο σφάλματος. Στη διαδικασία απαιτούνται οι παράγωγοι του $g_i(\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2)$ σε αναφορά των $\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2$, για να συμπληρωθεί ο Ιακωβιανός πίνακας. Από τη σχέση (2.20) φαίνεται ότι για να υπολογισθούν οι παράγωγοι της g_i πρέπει να υπολογισθούν οι παράγωγοι της f που δίνονται από τη σχέση (2.21), οι οποίες είναι [15]:

$$\begin{aligned} df/d\lambda &= (-2 \cdot k_1 \cdot h_1 \cdot B + D \cdot A \cdot k_2) / E - (k_1 \cdot B + A \cdot k_2) \cdot G \\ df/dh_1 &= F / E + (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot F \\ df/dh_2 &= -2 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot A / E - (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot (-2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot C + 2 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot A) \\ df/d\rho_1 &= -2 \cdot \rho_2 / (\rho_2 + \rho_1)^2 \cdot dFdK_1, \\ df/d\rho_2 &= dFdK_1 \cdot 2 \cdot \rho_1 / (\rho_2 + \rho_1)^2 + dFdK_2 \\ df/d\rho_3 &= 2 \cdot \rho_2 / (\rho_3 + \rho_2)^2 \cdot dFdK_2 \\ A &= \exp((-2 \cdot h_1 - 2h_2) \cdot \lambda), \quad B = \exp(-2 \cdot h_1 \cdot \lambda), \\ C &= \exp(-2 \cdot h_2 \cdot \lambda), \quad D = (-2 \cdot h_1 \cdot -2 \cdot h_2), \\ E &= 1 + k_1 \cdot k_2 \cdot C - k_1 \cdot B - k_2 \cdot A, \quad E_2 = E \cdot E, \\ F &= -2 \cdot k_1 \cdot \lambda \cdot B - 2 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot A, \\ G &= (-2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot h_2 \cdot C + 2 \cdot k_1 \cdot h_1 \cdot B - D \cdot A \cdot k_2) / (E \cdot E), \\ dFdK_1 &= B / E - (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot (k_2 \cdot C - B), \\ dFdK_2 &= A / E - (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot (k_1 \cdot C - A). \end{aligned}$$

B. Λύση του ολοκληρώματος με όριο στο άπειρο

Σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας της γενικευμένης μεθόδου Newton-Kantorovich, θα πρέπει να υπολογισθούν η θεωρητική φαινόμενη ειδική αντίσταση για κάθε απόσταση a των ηλεκτροδίων και οι παράγωγοι από τη φαινόμενη ειδική αντίσταση, η οποία περιλαμβάνει τον υπολογισμό από τα

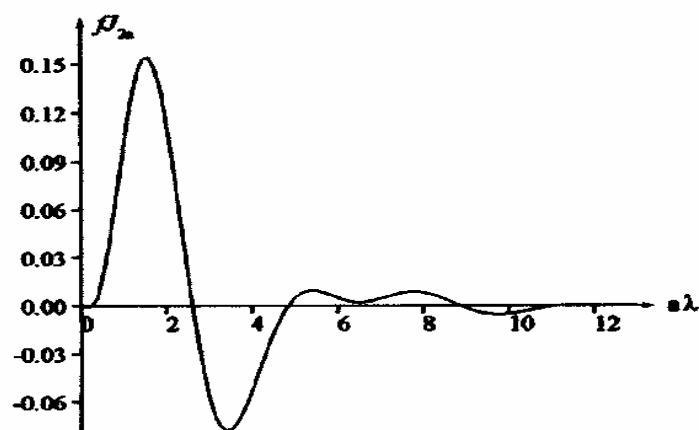
ολοκληρώματα με όρια $0 \rightarrow \infty$ που σχετίζονται με τις σχέσεις (2.20), (2.21) και τον πίνακα με τους τύπους. Είναι αδύνατον να βρούμε τη θεωρητική λύση των ολοκληρωμάτων, οπότε πρέπει να υιοθετηθεί η αριθμητική ολοκλήρωση που να προσεγγίζει τη λύση. Στην αριθμητική προσέγγιση, το όριο του απείρου πρέπει να αντικατασταθεί με μια μεγάλη τιμή, δηλωμένη ως λ_{max} . Προφανώς, ο ορισμός του λ_{max} επηρεάζει ταυτόχρονα και την ακρίβεια της εκτίμησης και το χρόνο υπολογισμού. Μεγαλύτερο λ_{max} προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά απαιτεί περισσότερες αριθμητικές ολοκληρώσεις θέσεων και μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμού. Για να δημιουργηθεί ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα, πρέπει να κατασκευαστεί μια μέθοδος για τον προσδιορισμό του λ_{max} [15].

1. Χαρακτηριστικά των ολοκληρωτικών παραστάσεων:

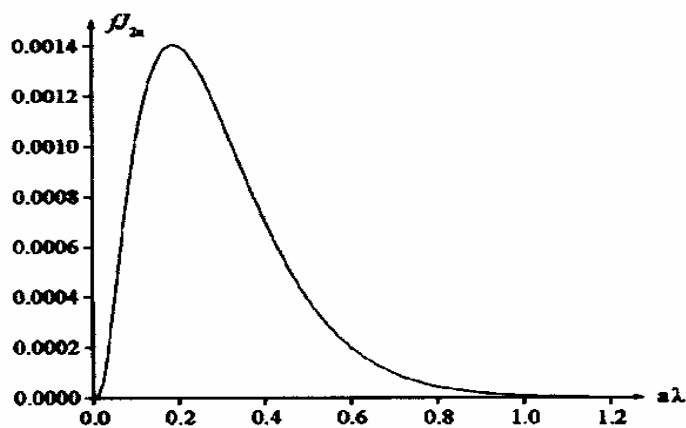
Οι ολοκληρωτικές παραστάσεις σχετίζονται με τους συντελεστές Bessel $[J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)]$, όπως φαίνονται στη σχέση (2.20). Ως εκ τούτου, οι συναρτήσεις ολοκλήρωσης πρέπει να είναι μια συνάρτηση ταλάντωσης σε σχέση με το λ . Το Σχήμα 2.14 είναι το γράφημα της $f(\lambda)[J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)]$, όπου σχεδιάζεται με $f_{J2\alpha}$, για $\rho_1=100$, $\rho_2=200$, $\rho_3=70$, $h_1=5$, $h_2=20$, $\alpha=30$. Οποσδήποτε, εάν ο συντελεστής συνάρτησης της $J_{2\alpha}=[J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)]$, ο οποίος μπορεί να είναι η f ή η παράγωγός της, ελαττώνεται γρήγορα, η $f_{J2\alpha}$ μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνάρτηση χωρίς ταλάντωση. Στο Σχήμα 2.18 εικονίζεται το γράφημα της $f_{J2\alpha}$ για $\rho_1=100$, $\rho_2=200$, $\rho_3=70$, $h_1=5$, $h_2=20$, $\alpha=1$. Στη συνέχεια θεωρείται μόνο η $f_{J2\alpha}$, εφόσον είναι το ίδιο να ορισθεί το λ_{max} για εκτίμηση των ολοκληρωμάτων, θεωρώντας τις παραγώγους της f στον Ιακωβιανό πίνακα.

2. Ο ορισμός του λ_{max} με αντικατάσταση του απείρου ορίου:

Για τις περιπτώσεις συνάρτησης ταλάντωσης ή συνάρτησης χωρίς ταλάντωση των συναρτήσεων ολοκλήρωσης, πρέπει να θεωρηθούν διαφορετικές προσεγγίσεις για να καθοριστεί το λ_{max} .



Σχήμα 2.18: Η προς ολοκλήρωση συνάρτηση ταλάντωσης, με άπειρο όριο ολοκλήρωσης [15].



Σχήμα 2.19: Η προς ολοκλήρωση συνάρτηση, περίπτωση χωρίς ταλάντωση [15].

Το κύριο χαρακτηριστικό της $f(\lambda)$ είναι ότι όταν το λ τείνει στο άπειρο το όριό της είναι μηδέν. Γι' αυτό, μια μέγιστη τιμή του λ (που συμβολίζεται με λ_{fmax}) μπορεί να βρεθεί για να κάνει την τιμή της $f(\lambda)$ αρκετά μικρή, σε σχέση με μια μέγιστη τιμή της $f(\lambda)$. Μια προσέγγιση μπορεί να υιοθετηθεί όταν η τιμή της $f(\lambda)$ είναι μηδέν για λ μεγαλύτερο από λ_{fmax} . Το λ_{fmax} μπορεί να βρεθεί με μια διερεύνηση κατά μήκος του άξονα λ . Οι περιπτώσεις συναρτήσεων ταλάντωσης και μη ταλάντωσης των ολοκληρωτικών παραστάσεων μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το λ_{fmax} . Αν το γινόμενο του λ_{fmax} επί α είναι μικρότερο του 2,61, το οποίο είναι το πρώτο σημείο μηδενισμού της $J_{2\alpha}$, το ολοκλήρωμα πρέπει να είναι στην περίπτωση της συνάρτησης μη ταλάντωσης. Για την περίπτωση συνάρτησης ταλάντωσης, το ολοκλήρωμα μπορεί να εκτιμηθεί χωρίζοντάς το σε μικρά διαστήματα ως ακολούθως:

$$\int_0^{\infty} f J_{2\alpha} d\lambda = \sum_{i=0}^n \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} f J_{2\alpha} d\lambda \quad (2.29)$$

όπου λ_i επί α είναι τα σημεία μηδενισμού του $J_{2\alpha}$, το n καθορίζεται με έλεγχο εάν η απόλυτη τιμή του ολοκληρώματος με όριο από λ_n έως λ_{n+1} είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το άθροισμα των τιμών που ελήφθησαν στο προηγούμενο διάστημα. Εδώ το λ_{n+1} είναι σχεδόν το λ_{fmax} που ζητείται να ορισθεί, αφού, στην περίπτωση της συνάρτησης ταλάντωσης ο ορισμός του λ_{max} προκύπτει απλά στην εκτίμηση του διαστήματος ολοκλήρωσης.

Για την περίπτωση της συνάρτησης χωρίς ταλάντωση, η βασική ιδέα της επιλογής του λ_{max} κάνει το $fJ_{2\alpha}(\lambda_{max})$ να προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή $fJ_{2\alpha}(\lambda)$ τη στιγμή ενός οριακού σφάλματος ε , με $\varepsilon=0,005$, αφού το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει είναι να υπολογισθεί με εκτίμηση η μέγιστη τιμή της $fJ_{2\alpha}(\lambda)$, η οποία δηλώνεται ως $fJ_{max}(\lambda_{fmax})$. Κατόπιν θα βρεθεί το fJ_{max} ώστε να αποκτηθεί κατευθείαν η παράγωγος της $fj(\lambda)$ και να επιλυθεί η εξίσωση $dfj/d\lambda=0$ για να προκύψει το λ_{fmax} . Δυστυχώς, είναι αρκετά δύσκολη η επίλυση, γι' αυτό προκειμένου να βρεθεί το fj_{max} πρέπει να υιοθετηθεί μια μέθοδος υπολογισμού κατά μήκος του άξονα λ , στην οποία οι τιμές της f και της $j_{2\alpha}$ πρέπει να υπολογισθούν πολλές φορές και ο υπολογισμός της συνάρτησης Bessel είναι χρονοβόρος. Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του προγράμματος, είναι απαραίτητο να βρεθεί ένας εύκολος τρόπος υπολογισμού της $J_{2\alpha}=[J_0(\alpha\lambda)-J_0(2\alpha\lambda)]$.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθεί η ακριβής μέγιστη τιμή της $fJ(\lambda)$ με αυτήν τη διαδικασία υπολογισμού. Στην πραγματικότητα, δεν είναι απαραίτητο να βρεθεί η ακριβής τιμή, αφού η fJ_{max} χρησιμοποιείται μόνο σαν βάση για να προσδιορισθεί το λ_{max} , μαζί με ένα όριο σφάλματος ε . Η τιμή του λ_{max} θα επηρεασθεί από την τιμή των ε και fJ_{max} . Όσο το λ_{max} είναι αρκετά μεγάλο, η αλλαγή του σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών σχεδόν δεν επηρεάζει την ακρίβεια της ολοκλήρωσης, αφού το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης εξαρτάται κυρίως από την τιμή της συνάρτησης ολοκλήρωσης γύρω από το λfJ_{max} , αλλά όχι γύρω από το λ_{max} . Γι' αυτό η κατά προσέγγιση εκτίμηση της $J_{1\alpha}$ είναι αποδεκτή στον υπολογισμό των fJ_{max} και λ_{max} . Η συνάρτηση $J_{2\alpha}$ στο διάστημα του λ από 0 έως 2,61 μπορεί κατά προσέγγιση να δοθεί από την ακόλουθη έκφραση:

$$J_{2\alpha}(\lambda) \approx \tilde{J}_{2\alpha}(\lambda) = \begin{cases} e^{0.558\lambda^2} - 1 & \lambda < 0.7 \\ 0.776 \sin[1.42(l - 0.406)] & \lambda \geq 0.7 \end{cases} \quad (2.30)$$

Με αυτήν την προσέγγιση μπορεί να βρεθεί μια προσεγγιστική fJ_{max} , μέσω μιας διαδικασίας ανεύρεσης βασισμένης στην $\tilde{fJ}_{2\alpha}$, σε ένα πολύ μικρό υπολογιστικό χρόνο. Αμέσως μετά η λ_{max} μπορεί να υπολογισθεί από την ίδια διαδικασία.

Γ. Καθορισμός αρχικών τιμών

Για να επιταχυνθεί η σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου, οι αρχικές τιμές πρέπει να καθοριστούν ξεκάθαρα. Γι' αυτόν το λόγο θα εξετασθούν κάποιες άλλες ιδιότητες της καμπύλης της φαινόμενης αντίστασης εκτός από την ιδιότητα των δύο οριακών σημείων. Για μοντέλα ενός στρώματος η κατανομή της ειδικής αντίστασης ρ κατά μήκος με διαφορετικό α είναι μια ευθεία γραμμή. Για μοντέλα με δύο (2) στρώματα είναι μια καμπύλη χωρίς καμία ακραία τιμή. Για τρία (3) στρώματα είναι μια καμπύλη χωρίς ή με μια ακραία τιμή όπως τα αποτελέσματα που βρίσκονται στο Σχήμα 2.18. Αν η ρ_2 είναι μεγαλύτερη από τις ρ_1 και ρ_3 μαζί, η καμπύλη έχει συνήθως ένα μέγιστο και αν το ρ_2 είναι μικρότερο από το άθροισμά τους τότε έχει συνήθως ένα ελάχιστο. Σε κάθε άλλη περίπτωση δεν υπάρχει κανένα ακρότατο.

Με βάση την υπολογιστική εμπειρία και την αρχή της δοκιμής των τεσσάρων (4) ηλεκτροδίων, η μέθοδος για τον καθορισμό των αρχικών τιμών είναι η ακόλουθη [15]:

1. Η αρχική τιμή του h_I συμβολίζεται με h_{lin} , τίθεται στην τιμή της απόστασης του ηλεκτροδίου α , στην οποία το γόνατο της καμπύλης της φαινόμενης ειδικής αντίστασης αρχίζει να μεταβάλλεται ταχύτερα π.χ. το τέταρτο σημείο με $\alpha=14$ στο Σχήμα 2.14.
2. Για την καμπύλη με ένα τοπικό ακρότατο h_{2in} , τίθεται $\alpha_s - h_{lin}$, όπου α_s είναι η τιμή του α στην οποία το γόνατο της καμπύλης αλλάζει ταχύτερα, κοιτώντας στα σημεία από το μέγιστο α προς τα μικρότερα α .
3. Ο καθορισμός των αρχικών τιμών για ρ_1 και ρ_3 , που δόθηκε πιο πάνω, βασίζεται στην ιδιότητα των δύο οριακών τιμών π.χ. οι αρχικές τιμές για ρ_1 και ρ_3 είναι 117,2 και 94,1 αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.18.

4. Αν η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δεν έχει τοπικό ακρότατο, η αρχική τιμή ρ_{2in} μπορεί απλώς να τεθεί ίση με $(\rho_{1in} + \rho_{2in})/2$. Αν η καμπύλη έχει τοπικό ακρότατο, τότε αυτό μπορεί προσεγγιστικά να δοθεί από τη σχέση

$$\rho_{2in} = \rho_{\max} + (\rho_{\max} - \rho_{1in})h_1 / h_2 \quad (2.31)$$

η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα της εν σειρά σύνδεσης δύο αντιστάσεων, όσον αφορά το ανώτερο και το μεσαίο στρώμα του εδαφικού μοντέλου.

Από την (2.31) μπορούμε να πάρουμε την (2.32):

$$\rho_{2in} = \rho_{\max} + (\rho_{\max} - \rho_{1in})h_1 / h_2 \quad (2.32)$$

Στη σχέση (2.32) η τιμή του ρ_{2in} είναι 119,0 για το παράδειγμα στο Σχήμα 2.18, όταν το ρ_2 είναι μικρότερο από τα ρ_1 και ρ_3 , το ρ_{2in} που υπολογίζεται από τη σχέση (2.32) μπορεί να είναι αρνητικό σε ορισμένες περιπτώσεις. Αν συμβεί αυτό, η ρ_{2in} μπορεί απλώς να τεθεί ίση με $\rho_{\max}/2$.

Με βάση την ιδιότητα των δύο οριακών τιμών, οι παράμετροι ρ_1 και ρ_3 μπορούν να προσδιοριστούν προσεγγιστικά. Αυτές οι προσεγγιστικές τιμές μπορούν να θεωρηθούν ως πραγματικές τιμές, ώστε το πρόβλημα των πέντε (5) μεταβλητών να απλουστευθεί σε ένα αντίστοιχο τριών (3) μεταβλητών. Φυσικά το πρόβλημα με τις πέντε μεταβλητές απαιτεί έναν πιο αποδοτικό επαναληπτικό αλγόριθμο από τον αντίστοιχο των 3 μεταβλητών, για να επιτευχθεί σωστή και γρήγορη σύγκλιση.

Βιβλιογραφία

- [1] Φανή Η. Ασημακοπούλου, “Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους”, Ενδιάμεση κριση, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
- [2] Ιωάννης Φ. Γκόνο, “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης”, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [3] Β. Κ. Παπαδιάς, “Εισαγωγή στην τεχνική των γειώσεων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων”.
- [4] Tagg G.F., «Earth Resistances», George Newnes Limited, London, 1964.
- [5] Megger, «Getting down to earth», A practical guide to earth resistance.

-
- [6] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80-1986, 1986.
 - [7] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80–2000 (Revision of IEEE Std 80–1986), 2000.
 - [8] “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system”, IEEE Std 81–1983, 11 March 1983.
 - [9] I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, “Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Power Engineering Society–2004 General Meeting, Denver USA, June 6–10, 2004.
 - [10] Electrical Grounding Techniques from LEM.
 - [11] Sunde E. D., “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, Dover Publications, New York, 1968.
 - [12] “IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems”, IEEE Std 81.2–1991, June 1992.
 - [13] “IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems”, IEEE Std 142–1991, June 1992.
 - [14] US Army Corps of Engineers titled Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Report number EM 1110–1–1802, 1995.
 - [15] Yang H., Yuan J. and Zong W., “Determination of Three-Layer earth Model from Wenner Four-Probe Test Data”, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 37, no. 5, September 2001.
 - [16] Takahashi T. and Kawase T., “Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, no. 2, 1990.
 - [17] Loboda M. and Scuka V., “On the Transient Characteristics of Electrical Discharges and Ionization Processes on soil”, ICLP, Firenze, pp. 539-544, 1996.
 - [18] Gonos I. F. and Stathopoulos I.A., “Soil Ionization under Lightning Impulse Voltages”, IEE Proc.-Sci. Meas. Technology, Vol. 151, No. 4, September. 2004, pp. 343-346.
 - [19] Lima J.L.C., “Avaliacao experimental sobre o efeito de ionizacao do solo devido a injecao de correntes impulsivas”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αύγουστος, 2008.

-
- [20] Chen Y. and Chowdhuri P., “Correlation between laboratory and field tests on the impulse impedance of the rod-type ground electrodes”, IEE Proc. Generation Transmission Distribution, Vol. 150, No.4, July 2003, pp. 420-426.
 - [21] Liu Y., Theethayi N., Gonzalez R. M., Thottappillil R., “The Residual Resistivity in Soil Ionization Region around Grounding System for Different Experimental Results”, IEEE International Symposium on EMC, Boston, paper no. TH-PM-2-4, August 18th- 22nd , 2003, pp. 794-799.
 - [22] Nor N.M., Haddad A., Griffiths H., “Factors affecting soil characteristics under fast transients”, International Conference on Power Systems Transients (IPST), New Orleans, 2003.
 - [23] Soil for Civil Engineering Purposes: ‘Classification Tests’. BS 1377, Part 2, 1990, British Standard Code of Practice.
 - [24] Manna T.K. and Chowdhuri P., “Generalised equation of soil critical electric field E_c based on the impulse tests and measured soil electrical parameters”, Vol. 1, No. 5, September 2007, pp. 811-817.
 - [25] Bronshtein I. N. and Semendyayev K. A., “Handbook of Mathematics”, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.

Κεφάλαιο 3

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ

Όπου τα στοιχεία είναι λίγα, οι ειδικοί είναι πολλοί.

Donald R. Gannon

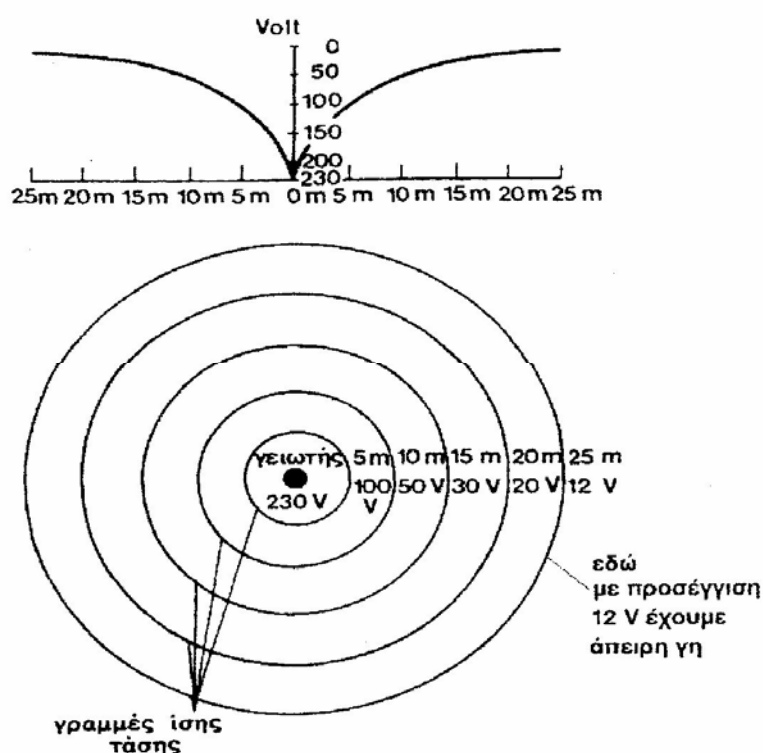
Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στην έννοια της αντίστασης γείωσης, στον ορισμό της και τη μαθηματική περιγραφή της. Αναλύεται η κατανομή των δυναμικών στο έδαφος, ορίζεται διανυσματικά η σύνθετη αντίσταση γείωσης και παρουσιάζονται εξισώσεις και μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον ακριβή υπολογισμό της σε κάθε περίπτωση. Παράλληλα παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της τιμής της αντίστασης γείωσης, καθώς επίσης και οι απαιτήσεις και προδιαγραφές για αυτές τις μετρήσεις.

3.1 Εισαγωγή

Αντίσταση γείωσης είναι η αντίσταση που εμφανίζεται από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Ως άπειρη γη θεωρείται ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους, σε άπειρη απόσταση από το γειωτή. Λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών, θεωρείται δε ότι το δυναμικό της άπειρης γης είναι μηδέν (0). Για πρακτικούς λόγους η “άπειρη απόσταση” θεωρείται 5–10 φορές η μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή. Για γειωτές ράβδου με μήκος $3m$, η απόσταση της άπειρης γης είναι $20m$.

Σε αυτήν την απόσταση το δυναμικό αποτελεί το 2% του δυναμικού της ράβδου. Αν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση U (=100%) ως προς την άπειρη γη, δημιουργείται ένα πεδίο ροής και δυναμικού γύρω από το γειωτή. Όσο μεγαλώνει η απόσταση από το γειωτή, τόσο μειώνεται το δυναμικό. Το διάγραμμα δυναμικού-απόστασης ονομάζεται χοάνη δυναμικού του γειωτή (Σχήμα 3.1). Από τη χοάνη του δυναμικού μπορεί κανείς να εκτιμήσει τις τάσεις επαφής και τη βηματική τάση. Η χοάνη δυναμικού δίνει επίσης την περιοχή επίδρασης του γειωτή ή την απόσταση της άπειρης γης.

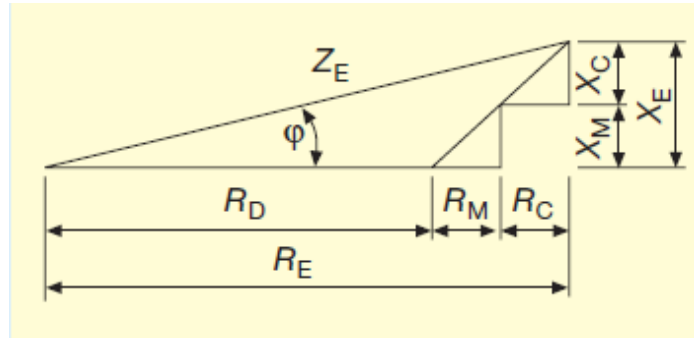
Έστω π.χ., γειωτής Φ60 και μήκους 3m. Αν θεωρηθεί σαν αμελητέα τιμή δυναμικού το 5% του δυναμικού του γειωτή τότε, όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.1, αυτό το δυναμικό αντιστοιχεί σε απόσταση 25m από το βάθος του γειωτή. Δηλαδή, η άπειρη γη είναι σε απόσταση τουλάχιστον 25m από το γειωτή ή αλλιώς το πεδίο ροής του γειωτή είναι κύκλος με ακτίνα 25m. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η χοάνη δυναμικού δεν εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους, εφόσον φυσικά το έδαφος είναι ομοιογενές. Η χοάνη δυναμικού χρησιμοποιείται επίσης για να γίνει μια εκτίμηση του σφάλματος στη μέτρηση της αντίστασης γείωσης. Π.χ. αν μετρηθεί η αντίσταση γείωσης του παραπάνω γειωτή από το ηλεκτρόδιο μέχρι και 25m μακριά, τότε η μετρούμενη αντίσταση θα είναι το 95% της πραγματικής.



Σχήμα 3.1: Χοάνη δυναμικού.

3.2 Αντίσταση γείωσης και σύνθετη αντίσταση γείωσης

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος γείωσης καθορίζεται κυρίως από τη σύνθετη αντίστασή του Z_E . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2, η σύνθετη αντίσταση γείωσης μπορεί να εκφρασθεί από την εξίσωση (3.1) [1].



Σχήμα 3.2: Διανυσματικό διάγραμμα σύνθετης αντίστασης σε σύστημα γείωσης.

$$Z_E = \sqrt{R_E^2 + X_E^2} \quad (3.1)$$

$$R_E = R_D + R_M + R_C \quad (3.2)$$

Από την εξίσωση (3.2) φαίνεται ότι η αντίσταση γείωσης R_E είναι το άθροισμα της αντίστασης διαχύσεως R_D , της αντίστασης του μεταλλικού αγωγού που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο γείωσης R_M και της αντίστασης του αγωγού γείωσης R_C που συνδέει τον κύριο ζυγό γείωσης της εγκατάστασης με το ηλεκτρόδιο γείωσης. Η αντίσταση διαχύσεως R_D είναι η αντίσταση που εμφανίζεται μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και του περιβάλλοντος εδάφους.

Η αντίδραση X_E του συστήματος γείωσης εκφράζεται από τη σχέση:

$$X_E = X_M + X_C \quad (3.3)$$

Για παροχή AC, η αντίδραση του αγωγού γείωσης είναι σημαντική μόνο στην περίπτωση εκτεταμένων ταινιών γείωσης ή στην περίπτωση ράβδων γείωσης μεγάλου μήκους. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η διαφορά μεταξύ της σύνθετης αντίστασης γείωσης και της αντίστασης γείωσης είναι τόσο μικρή, ώστε συχνά να μη γίνεται καμιά διάκριση μεταξύ αυτών των δύο ποσοτήτων. Τα σχετικά βιομηχανικά πρότυπα χρησιμοποιούν αυτές τις ποσότητες σαν να είναι πανομοιότυπες.

Στις μετρήσεις της αντίστασης γείωσης που διεξάγονται με παροχή AC, η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι εκείνη που στην πραγματικότητα μετράται [1].

Αν η συχνότητα της μέτρησης είναι μεγαλύτερη από 50Hz, τότε εμφανίζεται μια ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή της σύνθετης αντίστασης γείωσης. Παρόλα αυτά, δεν αποτελεί πρόβλημα η υπερτίμηση της σύνθετης αντίστασης γείωσης, καθώς αυτό είναι υπέρ της ασφάλειας.

3.3 Υπολογισμός αντίστασης γείωσης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται εξισώσεις, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης γειωτών διαφόρων μορφών. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά σε εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν την αντίσταση γείωσης ηλεκτροδίων ράβδου σε διάφορες διατάξεις εντός του εδάφους και οι οποίες έχουν δημοσιευθεί και επαληθευθεί κατά καιρούς σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη των γειωτών ράβδου, αφού αυτού του είδους τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Η ακρίβεια βέβαια αυτών των εξισώσεων ποικίλλει αξιοσημείωτα, αλλά αποδεικνύεται επαρκώς καλή για την εκτίμηση της αντίστασης σε πολλές πρακτικές εφαρμογές.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, μια ηλεκτρική σύνδεση με τη γη απαιτεί το συμβιβασμό της χαμηλής αντίστασης γείωσης με το μικρότερο δυνατό κόστος. Αυτό το πρόβλημα εστιάζεται στην ανάγκη ύπαρξης εξισώσεων, για να καθίσταται δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών διατάξεων των ηλεκτροδίων γείωσης. Προκειμένου να συγκριθούν δύο (2) διατάξεις γειωτών, συχνά γίνεται η υπόθεση ότι οι διατάξεις είναι τοποθετημένες σε εδάφη της ίδιας ομοιογενούς αγωγιμότητας. Είναι ευρέως γνωστό ότι συνήθως εμφανίζεται αξιοσημείωτη μεταβολή της αγωγιμότητας του εδάφους στην περιοχή γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης, αλλά η επίδραση αυτής της μεταβολής αποτελεί εντελώς ξεχωριστό πρόβλημα, που απαιτεί διαφορετικού είδους προσεγγίσεις [2].

Ηλεκτρόδια ράβδου

Ένας πολύ συνηθισμένος τύπος συνδέσμου γείωσης είναι αυτός της κατακόρυφης ράβδου γείωσης. Μια τέτοια ράβδος είναι ένας μεμονωμένος κύλινδρος και η ροή του ρεύματος από αυτήν προς το έδαφος και διαμέσου του

εδάφους, υπολογίζεται από τις ίδιες σχέσεις που υπολογίζεται και η ροή ενός ρευστού διηλεκτρικού από ένα μεμονωμένο φορτισμένο κύλινδρο. Επομένως, το πρόβλημα της αντίστασης γείωσης μιας ράβδου γείωσης είναι ουσιαστικά το ίδιο με το πρόβλημα της χωρητικότητας ενός μεμονωμένου κυλίνδρου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μεγάλο, εν συγκρίσει με την ακτίνα του. Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει την τελευταία περίπτωση [3]:

$$\frac{C}{L} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1,22741}{4\lambda^2} + \frac{2,17353}{8\lambda^3} + \frac{11,0360}{16\lambda^4} + \dots \quad (3.4)$$

όπου

$$\lambda = \ln(2L/\alpha)$$

$2L$ = το μήκος του μεμονωμένου κυλίνδρου σε εκατοστά

α = η ακτίνα του κυλίνδρου σε εκατοστά

C = η χωρητικότητα σε απόλυτες ηλεκτροστατικές μονάδες, ή αλλιώς *Farad*

Διαιρώντας τη μονάδα με την προηγούμενη σειρά προκύπτει μια έκφραση που είναι πιο βολική για πρακτικούς σκοπούς και η οποία συγκλίνει πιο γρήγορα, σε ένα μικρό όριο. Η έκφραση αυτή είναι η ακόλουθη:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{L} \left(\lambda - 0,306852 - \frac{0,17753}{\lambda} - \frac{0,5519}{\lambda^2} - \dots \right) \quad (3.5)$$

Αυτή η εξίσωση έχει επαληθευθεί με μεγάλη σύγκλιση, από έναν επαναληπτικό προσεγγιστικό υπολογισμό, κατά τον οποίο αρχικά υπετέθη η ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου και κατόπιν προστέθηκαν διαδοχικά άλλες κατανομές φορτίου, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρηθεί το δυναμικό του κυλίνδρου ίδιο σε όλο το μήκος του [4]. Η παραπάνω εξίσωση έχει επίσης επαληθευθεί από μια επαναληπτική προσεγγιστική μέθοδο, χρησιμοποιώντας μηχανική ολοκλήρωση [5].

Επίσης, μια προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού, η οποία χρησιμοποιείται για μεγάλο πλήθος σχημάτων και διατάξεων ηλεκτροδίων, είναι η *μέθοδος του μέσου δυναμικού* [6]. Αυτή η μέθοδος συνίσταται στην υπόθεση της ομοιόμορφης πυκνότητας φορτίου πάνω στην επιφάνεια του αγωγού και στον υπολογισμό του μέσου δυναμικού. Ακολουθώντας, η κατά προσέγγιση χωρητικότητα λαμβάνεται ίση με το πηλίκο του συνολικού φορτίου προς το μέσο δυναμικό.

Η μέθοδος αλλαγής μιας εξίσωσης για τη χωρητικότητα σε μια εξίσωση για την αντίσταση γείωσης μπορεί να προκύψει θεωρώντας την απλή περίπτωση δύο

(2) παραλλήλων πλακών, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή και το φαινόμενο των άκρων μπορεί να αμεληθεί. Τελικά, μετά τον υπολογισμό των αναπτυγμάτων των προηγούμενων εξισώσεων, προκύπτει για την αντίσταση ενός κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου, για το οποίο θεωρείται ότι $L/r_1 > 10$, όπου L το μήκος και r_1 η ακτίνα του, ο ακόλουθος τύπος [2]:

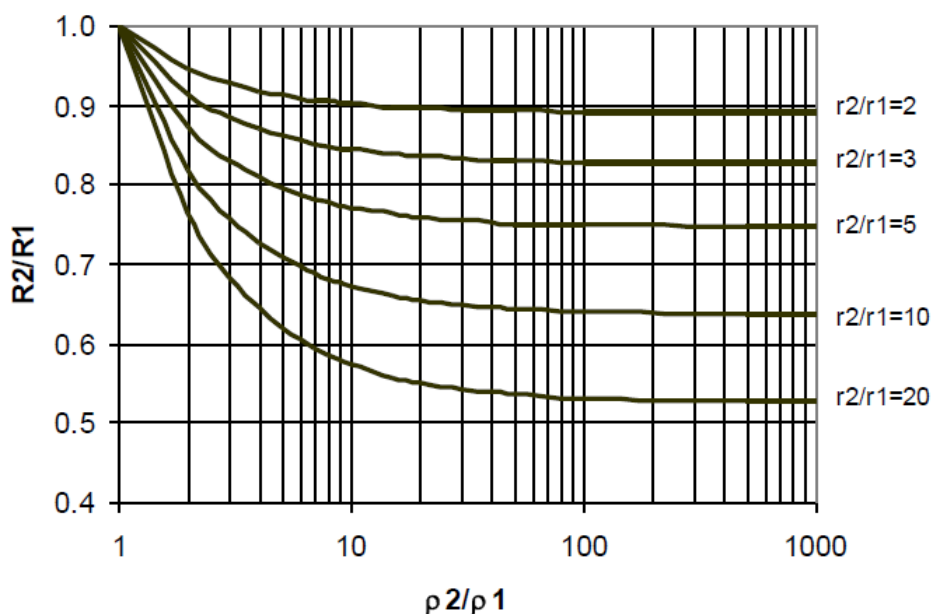
$$R_1 = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) \quad (3.6)$$

όπου ρ_2 είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους που περικλείει το ηλεκτρόδιο. Για ηλεκτρόδια εγκαθιστούμενα σε μπετόν ή κάποιο βελτιωτικό υλικό γείωσης [7, 8], η αντίσταση είναι:

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) - \frac{\rho_1}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_2} - 1 \right) + \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_2} - 1 \right) \quad (3.7)$$

Η εξίσωση (3.7) παριστάνει το συνδυασμό δύο (2) αντιστάσεων: α) της αντίστασης του όγκου που δημιουργείται από το βελτιωτικό υλικό ακτίνας r_2 , το οποίο είναι θαμμένο σε έδαφος ειδικής αντίστασης ρ_2 και β) της αντίστασης ενός εσωτερικού τμήματος της ακτίνας r_2 , το οποίο περιέχει ένα μεταλλικό πυρήνα ακτίνας r_1 . Εφαρμόζοντας αλγεβρικές μεθόδους, η εξίσωση (3.7) μπορεί να γραφεί ως:

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2) \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.3: Μείωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτίνων και ειδικών αντιστάσεων.

Στο Σχήμα 3.3 μπορούν να γίνουν κάποια σχόλια. Καταρχήν, παρατηρείται αξιοσημείωτη ελάττωση της αντίστασης και στην περίπτωση που εξετάζεται ως συνάρτηση του λόγου ακτίνων r_2/r_1 , ειδικά όταν ο λόγος έχει μεγάλη τιμή και στην περίπτωση που εξετάζεται ως συνάρτηση του λόγου των ειδικών αντιστάσεων ρ_2/ρ_1 , όταν ο λόγος παίρνει τιμές έως εκατό (100). Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι αυτή η ελάττωση γίνεται πολύ μικρή έως οριακή, όταν ο λόγος r_2/r_1 λαμβάνει χαμηλές τιμές ή όταν ο λόγος ρ_2/ρ_1 είναι υψηλότερος από 100.

Μέχρι την έναρξη εφαρμογής του Προτύπου *ΕΛΟΤ HD 384*, τα ηλεκτρόδια ράβδου χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στις γειώσεις των κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, διότι μπορούν να τοποθετηθούν στο έδαφος με μικρή ή και καθόλου εκσκαφή και επίσης λόγω της μεγάλης πιθανότητας να φθάσουν σε στρώματα μόνιμης υγρασίας και καλής αγωγιμότητας.

3.4 Απαιτήσεις και προδιαγραφές για μετρήσεις γειώσεων

Οι μετρήσεις της αντίστασης γείωσης καθίστανται αναγκαίες, όταν απαιτείται συμμόρφωση με μια συγκεκριμένη τιμή αντίστασης ή συγκεκριμένη τιμή σύνθετης αντίστασης, όπως είναι οι ακόλουθες περιπτώσεις συστημάτων γείωσης:

- Γείωση προστασίας για συστήματα TT και IT σε εγκαταστάσεις X.T. [9] (sections 411.5 και 411.6), [10].
- Συνδυασμός γείωσης προστασίας και γείωσης λειτουργίας σε σύστημα γείωσης σε υποσταθμούς Y.T.
- Σύστημα γείωσης για τη γείωση ουδετέρου σε δίκτυο διανομής M.T.

Στην περίπτωση των συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας, οι μετρήσεις των γειώσεων θα πρέπει να γίνονται ακόμα και όταν δεν υπάρχει κάποια απαίτηση για συμμόρφωση με συγκεκριμένες τιμές. Τα αποτελέσματα των επαναλαμβανόμενων δοκιμών θα πρέπει να συγκρίνονται με αντίστοιχα παλαιότερων μετρήσεων [1].

Τα Πρότυπα περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις που θα πρέπει να τηρούν οι κατασκευαστές του μετρητικού εξοπλισμού, ενώ για τους χρήστες εξυπηρετούν μόνο πληροφοριακούς σκοπούς. Στα συστήματα χαμηλής τάσης, οι μετρήσεις

των γειώσεων θα πρέπει να γίνονται με χρήση εξοπλισμού ο οποίος θα συμμορφώνεται με τα Πρότυπα *VDE 0413* (βλέπε [11] section 61.1). Όλος ο εξοπλισμός γενικότερα θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 61557-1:2007 [12]. Επιπροσθέτως, ο εξοπλισμός θα πρέπει να συμμορφώνεται με τα ακόλουθα Πρότυπα, ανάλογα με τον τύπο της συσκευής ή της μεθόδου μέτρησης στην οποία χρησιμοποιείται:

- IEC 61557-5:2007 “Equipment for measuring resistance to earth” [13].
- IEC 61557-6:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring protective measures involving residual current devices” [14].
- IEC 61557-10:2007 “Combined measuring equipment” [15].

Βεβαίως, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι, εξοπλισμός που έχει κατασκευασθεί συμμορφούμενος με παλαιότερες εκδόσεις της σειράς Προτύπων *VDE 0413*, μπορεί επίσης να χρησιμοποιείται σε μετρήσεις [1].

Αξίζει να τονιστεί ότι, δεν είναι αρκετό για τους χρήστες που πραγματοποιούν μια μέτρηση να ακολουθούν απλά τις (συχνά ασαφείς) οδηγίες του κατασκευαστή, αλλά να γνωρίζουν καλά και να αντιλαμβάνονται τη μέθοδο μέτρησης που θέλουν να εφαρμόσουν. Τα όργανα μέτρησης, για τα οποία δε διασαφηνίζεται ποια μέθοδο εφαρμόζουν, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Πριν την αγορά εξοπλισμού, οι χρήστες θα πρέπει να ζητούν τεχνική περιγραφή των συσκευών και οργάνων του ενδιαφέροντός τους, καθώς επίσης και πληροφορίες για την απόδοσή τους και, αν είναι δυνατό, εγχειρίδια χρήσης, έτσι ώστε να αξιολογήσουν τον εξοπλισμό με βάση αυτά τα έγγραφα.

Η πορεία της μέτρησης και κάθε επιπλέον διαδικασία που τη συνοδεύει (π.χ. διακοπή κανονικών συνδέσεων ή πραγματοποίηση μη τυποποιημένων συνδέσεων), δε θα πρέπει να θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια χρηστών και εξοπλισμού, [11] section 61.1.3. Το μέγεθος της τάσης δοκιμής ή του ρεύματος δοκιμής πρέπει να είναι περιορισμένο (sections 3.1 και 4.1). Πριν τη διακοπή μιας σύνδεσης, η οποία απαιτείται για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας, ολόκληρη η εγκατάσταση ισχύος θα πρέπει να αποσυνδέεται από την παροχή και να ασφαρίζεται για την αποφυγή επανασύνδεσής της.

Οποιαδήποτε μέτρηση, που περιλαμβάνει διακοπές κυκλώματος (π.χ. άνοιγμα του φρέατος επιθεώρησης ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας), δεν

πρέπει να πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια καταιγίδας ή όποτε αναμένεται καταιγίδα. Μη συμμόρφωση, μπορεί να καταστεί ιδιαίτερα επικίνδυνη για το προσωπικό που εκτελεί τη μέτρηση. Μετά το πέρας της μέτρησης, κάθε συνδεσμολογία που είχε διακοπεί, θα πρέπει να αποκατασταθεί κανονικά.

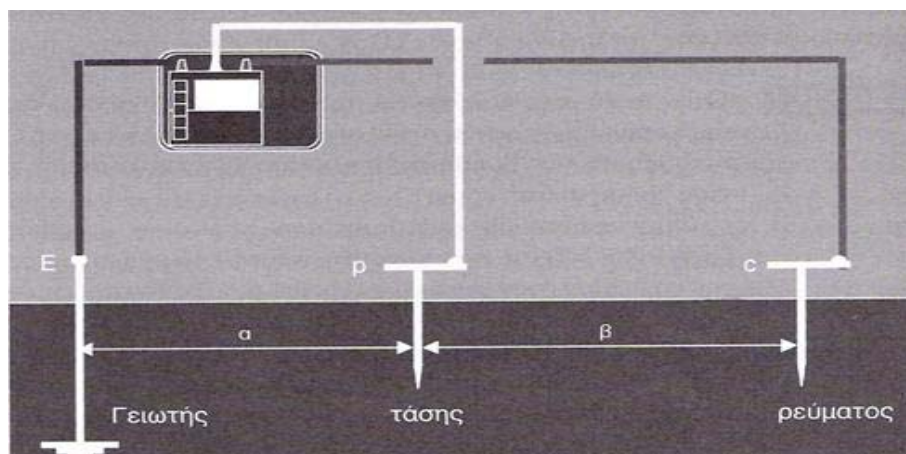
Αν το ρεύμα δοκιμής διαχωρισθεί εις τρόπον ώστε, μέρος αυτού να ρέει παράλληλα με το ηλεκτρόδιο γείωσης που μετράται, η αντίσταση γείωσης που θα δείξει το όργανο θα είναι πολύ μικρή. Το άτομο, ως εκ τούτου, που διεξάγει τη μέτρηση θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτικό ως προς οτιδήποτε συνδέεται στο υπό μέτρηση ηλεκτρόδιο γείωσης [16].

3.5 Μέτρηση της αντίστασης γείωσης

Ως αντίσταση γείωσης ενός ηλεκτροδίου, ορίζεται μια ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου, η οποία είναι ίση με το λόγο της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή $R=U/I$.

Στον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης γείωσης οι παράμετροι οι οποίες υπεισέρχονται είναι τόσες πολλές, που προκειμένου να γνωρίζουμε ακριβώς την τιμή της, επιβάλλεται η μέτρησή της με κατάλληλο όργανο (γειωσόμετρο). Πολλές φορές επίσης η άγνοια του σωστού τρόπου τοποθέτησης του γειωτή, επιφέρει μεγάλη απόκλιση μεταξύ της υπολογιζόμενης και της μετρούμενης τιμής της, έχοντας έτσι σαν αποτέλεσμα και την οικονομική αστοχία.

Το γειωσόμετρο φέρει 3 ακροδέκτες. Σε έναν εκ των τριών (ακροδέκτης E), συνδέεται το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο γείωσης, όπως στο Σχήμα 3.4. Στους άλλους δυο ακροδέκτες συνδέονται βοηθητικά ηλεκτρόδια.



Σχήμα 3.4: Διάταξη μέτρησης αντίστασης γείωσης.

3.5.1 Μέτρηση με τη χρήση βοηθητικών ηλεκτροδίων

Το γειωσόμετρο εγχύει, από τον έναν εκ των δύο υπολοίπων ακροδεκτών (ακροδέκτης C), εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής εντάσεως και συχνότητας της επιλογής του χρήστη, π.χ. 128Hz . Η συχνότητα αυτή δεν πρέπει να είναι πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο των χρησιμοποιούμενων στις εγκαταστάσεις και στα δίκτυα ($50\text{-}60\text{-}400\text{Hz}$). Συνεχές (DC) ρεύμα δε χρησιμοποιείται, για την αποφυγή των ηλεκτρολυτικών φαινομένων στα σημεία επαφής με τα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Τέλος, η τιμή του ρεύματος θα πρέπει να είναι ένα μικρό ποσοστό του αναμενόμενου σφάλματος, προς αποφυγή δημιουργίας επικίνδυνων τάσεων και βηματικών τάσεων κατά τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης.

Στον τρίτο ακροδέκτη (P) συνδέεται το βοηθητικό ηλεκτρόδιο, μέσω του οποίου γίνεται η μέτρηση της τάσης που έχει εμφανισθεί στο έδαφος, μεταξύ της προς μέτρηση γείωσης και του βοηθητικού ηλεκτροδίου ρεύματος.

Το βολτομετρικό στοιχείο μέτρησης της τάσης πρέπει να έχει μεγάλη εσωτερική αντίσταση, περίπου δεκαπλάσια της αντίστασης των βοηθητικών ηλεκτροδίων τάσης. Θεωρείται ικανοποιητική η τιμή των $40\text{k}\Omega$.

Η επιτρεπόμενη τιμή αντίστασης γείωσης των βοηθητικών ηλεκτροδίων τάσης και ρεύματος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του οργάνου και κυμαίνεται από $4\text{k}\Omega$ έως $20\text{k}\Omega$. Οι τιμές αυτές δεν επηρεάζουν τη μέτρηση, εφόσον είναι στο εύρος που συνιστά ο κατασκευαστής. Στην περίπτωση βέβαια όπου η μετρούμενη είναι μικρότερη του 1Ω , η αντίσταση των βοηθητικών ηλεκτροδίων θα πρέπει να είναι μικρότερη των 500Ω . Γι' αυτόν το λόγο, σε ημιβραχώδη εδάφη συνιστάται η ύγρανση των βοηθητικών ηλεκτροδίων με

αλατόνερο. Για τις περιπτώσεις αυτές, το έδαφος καλύπτεται με μπετόν ή, αν είναι βραχώδες, συνιστάται η τοποθέτηση των βοηθητικών ηλεκτροδίων στην επιφάνεια και η κάλυψή τους με στουπί εμβαπτισμένο σε αλατόνερο.

Όταν το έδαφος καλύπτεται από μονωτικό υλικό, π.χ. άσφαλτο, θα γίνεται διάνοιξη οπών (εφόσον αυτό είναι εφικτό) και η τοποθέτηση των βοηθητικών ηλεκτροδίων εντός αυτών κάνοντας χρήση αλατόνερου.

Στην περίπτωση επέκτασης των καλωδίων μέτρησης, θα πρέπει να δίδεται προσοχή στη σωστή επιλογή της διατομής του καλωδίου, όταν αυτό θα συνδεθεί μεταξύ του προς μέτρηση γειωτή και του γειωσόμετρου. Για παράδειγμα, καλώδιο μήκους περίπου $100m$ NYA $1 \times 1mm^2$, παρουσιάζει μια αντίσταση της τάξεως των $1,8\Omega$. Συνεπώς, όταν η προς μέτρηση τιμή της αντίστασης γείωσης είναι συγκρίσιμη με την αντίσταση του καλωδίου, το σφάλμα που θα υπεισέλθει θα είναι πολύ μεγάλο. Όταν η σύνδεση της επέκτασης γίνει είτε μεταξύ του βοηθητικού ηλεκτροδίου έντασης είτε της τάσης και του γειωσόμετρου, δεν προστίθεται η αντίσταση του καλωδίου στην αντίσταση που μετρά το γειωσόμετρο.

Γενικότερα θα πρέπει να αποφεύγονται τα παρακάτω:

- Η τοποθέτηση των βοηθητικών ηλεκτροδίων σε εδάφη όπου υπάρχουν υπόγειες μεταλλικές κατασκευές (σωληνώσεις, δεξαμενές, γείωση δικτύων μεταφοράς Μ.Τ ή Χ.Τ.). Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων.
- Η παράλληλη όδευση μεταξύ των καλωδίων των βοηθητικών ηλεκτροδίων, καθώς και μεταξύ αυτών και γραμμών μεταφοράς Υ.Τ., Μ.Τ., Χ.Τ.
- Προσοχή πρέπει να δίδεται στην τιμή που δείχνει το όργανο, όταν υπάρχει κοντά σε αυτό πομπός ασύρματης επικοινωνίας.

Υπάρχουν δύο είδη γειώσεων, οι σημειακές όπως ο γειωτής ράβδου και η ταινία $L=10m$ και οι εκτεταμένες γειώσεις όπως η πολυγωνική, η περιμετρική, η θεμελιακή κ.ο.κ.

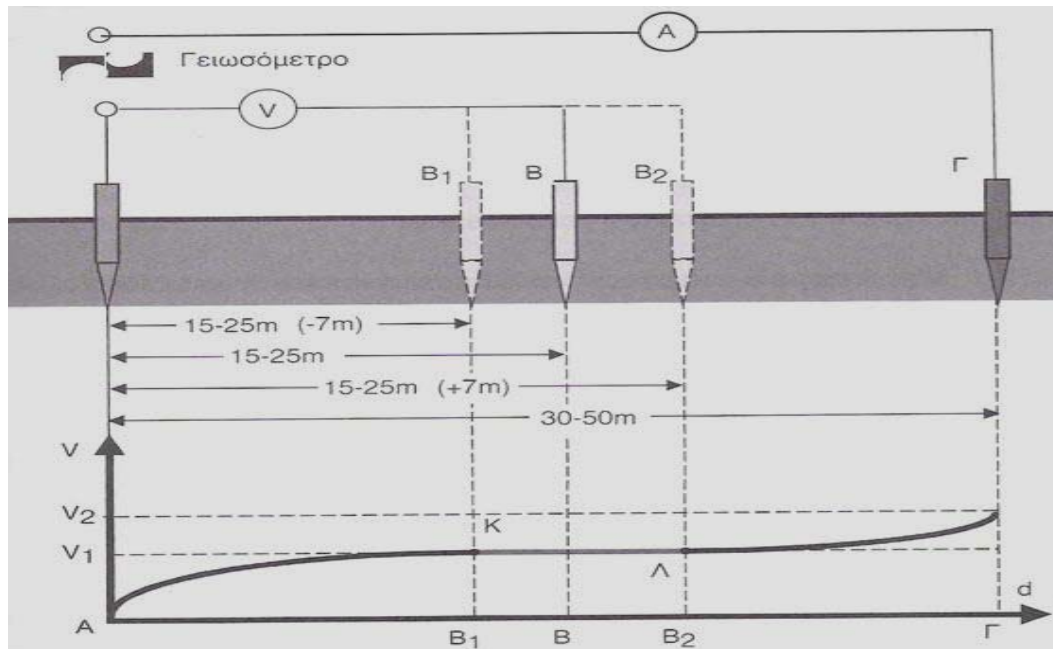
3.5.2 Μέτρηση σημειακών γειώσεων

Για τη μέτρηση των σημειακών γειώσεων χρησιμοποιούνται δύο (2) βοηθητικά ηλεκτρόδια του γειωσόμετρου. Η συνδεσμολογία που ακολουθείται φαίνεται στο Σχήμα 3.5, όπου Α το προς μέτρηση σύστημα γείωσης, Β και Γ τα βοηθητικά ηλεκτρόδια μέτρησης του δυναμικού και της παροχής του ρεύματος αντίστοιχα. Το ηλεκτρόδιο Γ τοποθετείται σε απόσταση 30 έως 50m από το σημείο Α, ενώ το Β σε απόσταση $\frac{ΑΓ}{2}$.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τρία σημεία Α, Β, Γ ορίζουν μια ευθεία. Λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση με αυτές τις αποστάσεις και κατόπιν επαναλαμβάνεται η μέτρηση δύο (2) έως έξι (6) φορές, μετακινώντας το Β έως 7m προς το Γ και 7m προς το Α (Β₂, Β₁), με βήμα περίπου 2m.

Αν η διαφορά των μετρήσεων είναι πολύ μικρή (ικανοποιεί δηλαδή την απαιτούμενη ακρίβεια), τότε γίνεται αποδεκτή σαν αντίσταση του γειωτή Α ο μέσος όρος των πραγματοποιηθεισών μετρήσεων. Στην αντίθετη περίπτωση, αυξάνεται η ΑΓ και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις όπως πριν, μετακινώντας τώρα το Β προς το Γ και Α σε απόσταση μεγαλύτερη των 7m. Λαμβάνονται πάλι μετρήσεις με ανάλογο τρόπο, όπως περιγράφηκε παραπάνω, μέχρι που οι τιμές μέτρησης να διαφέρουν μεταξύ τους μέσα σε όρια που είναι αποδεκτά. Στην πράξη έχει εκτιμηθεί ότι, παίρνοντας μια μέτρηση στην απόσταση ΑΒ ίση με το μισό της απόστασης ΑΓ, είναι αρκετή ώστε να είναι ακριβής η τιμή της αντίστασης του γειωτή που μετρήσαμε.

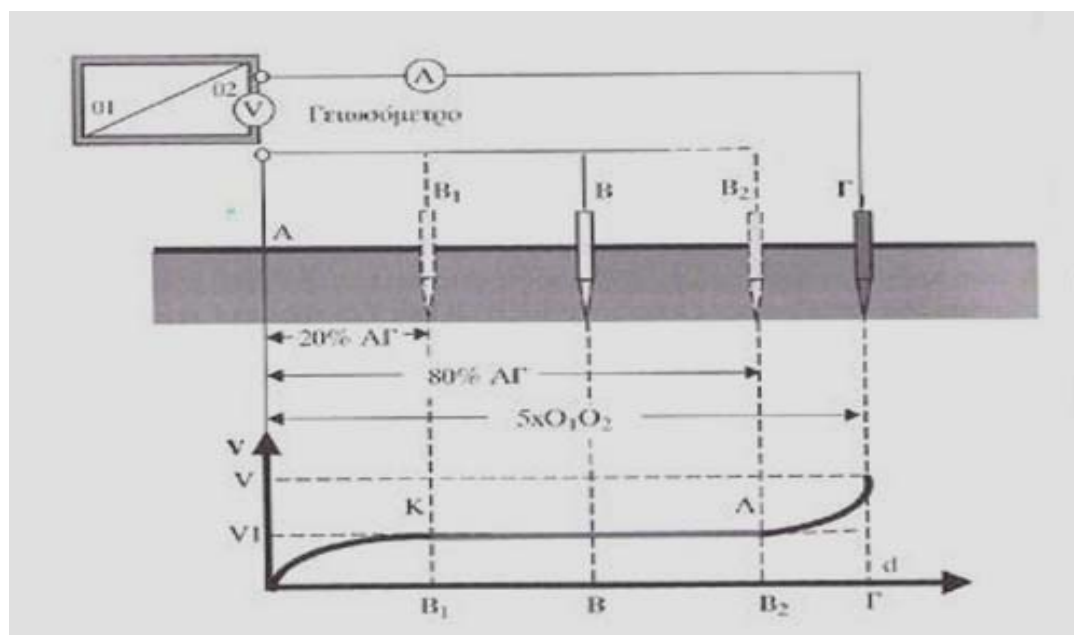
Στο γράφημα του Σχήμα 3.5 δυναμικό-απόσταση (*U-d*) απεικονίζεται η μεταβολή του δυναμικού στο έδαφος μεταξύ του γειωτή Α και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ. Στην περιοχή όπου αυτό λαμβάνει μια σταθερή τιμή (*U_I*), τα ηλεκτρικά πεδία του γειωτή Α και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ δεν αλληλοεπηρεάζονται. Η μετρούμενη λοιπόν τιμή της αντίστασης γείωσης στο τμήμα ΚΛ είναι η πραγματική.



Σχήμα 3.5: Μέτρηση γείωσης σημειακού γειωτή.

3.5.3 Μέτρηση εκτεταμένων γειώσεων όταν υπάρχει διαθέσιμος χώρος

Όπως στις σημειακές γειώσεις έτσι και στις εκτεταμένες, Σχήμα 3.6, επιζητείται η περιοχή ΚΛ. Λόγω όμως της εκτεταμένης γείωσης, ο επηρεασμός μεταξύ των τμημάτων του γειωτή καθιστά πιο δύσκολη την εύρεση της περιοχής αυτής, έτσι ώστε να μην αρκεί το πλήθος των μετρήσεων της προηγούμενης περίπτωσης (παρ. 3.5.2). Η απόσταση τώρα ΑΓ πρέπει να είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα, οι δε μετρήσεις να γίνονται από το 80% της ΑΓ προς το 20% της ΑΓ με βήμα το 1/25 της ΑΓ περίπου. Στην πράξη έχει εκτιμηθεί ότι, λαμβάνοντας σαν απόσταση ΑΓ το τριπλάσιο έως πενταπλάσιο μήκος περίπου της διαγωνίου του σχηματιζόμενου νοητού πολυγώνου που δημιουργεί ο εκτεταμένος γειωτής (πέντε (5) φορές τη μέση διατομή της επιφάνειας της εγκατεστημένης γείωσης), είναι αρκετή απόσταση ώστε να είναι ακριβής η τιμή της αντίστασης του γειωτή που μετρήσαμε. Βέβαια όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση ΑΓ, τόσο πιο εύκολα προσδιορίζεται η περιοχή ΚΛ και η απόκλιση της μετρούμενης τιμής της αντίστασης του γειωτή από την πραγματική τείνει στο μηδέν.



Σχήμα 3.6: Μέτρηση γείωσης εκτεταμένου γειωτή.

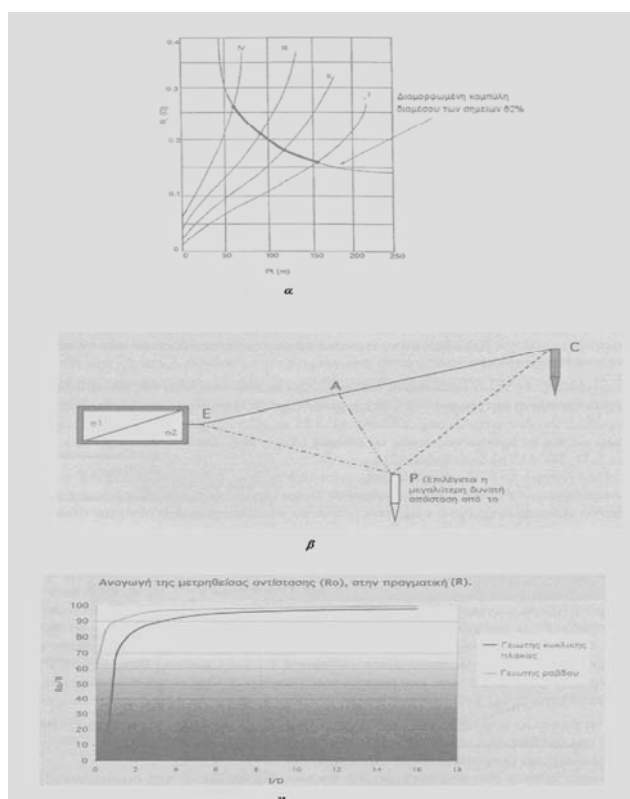
3.5.4 Μέτρηση εκτεταμένων γειώσεων όταν δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος

Στην περίπτωση που δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε τόσο μεγάλη απόσταση, λόγω χώρου ή λόγω του γεγονότος ότι η σταθεροποίηση των τιμών από τη μέτρηση της αντίστασης (περιοχή ΚΛ) δεν είναι αρκετά εμφανής, εφαρμόζεται μια εκ των μεθόδων που ακολουθούν:

- Ξεκινώντας από μια απόσταση ΑΓ π.χ. $220m$ και ενεργώντας όπως προαναφέρθηκε, καταγράφονται οι μετρούμενες τιμές. Επαναλαμβάνεται ακριβώς το ίδιο για ΑΓ π.χ. $170m$, ΑΓ $125m$ κ.ο.κ. καταρτίζοντας έναν πίνακα με τις μετρούμενες τιμές, οι οποίες στο τέλος απεικονίζονται ως καμπύλες I, II, III, IV (Σχήμα 3.7γ). Λαμβάνεται το 62% της τιμής της αντίστασης για κάθε απόσταση ΑΓ και χαράσσεται το έντονα σκιαγραφημένο τμήμα της καμπύλης. Τα δύο άκρα του έντονα σκιαγραφημένου τμήματος είναι το μέγιστο και ελάχιστο όριο διακύμανσης της τιμής της αντίστασης γείωσης.
- Τοποθετείται το βοηθητικό ηλεκτρόδιο του ρεύματος (C) σε απόσταση από την προς μέτρηση γείωση, όσο το επιτρέπει ο διαθέσιμος χώρος. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο της τάσης θα τοποθετηθεί στο σημείο P, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7β επί του ευθυγράμμου τμήματος AP κάθετο στην CE. Το σημείο P πρέπει να απέχει όσο το δυνατόν περισσότερο από το

ευθύγραμμο σχήμα CE. Οι μετρήσεις, με το βοηθητικό ηλεκτρόδιο της τάσης, λαμβάνονται κατ' αντίστοιχο τρόπο επί των τμημάτων CP και αντίστοιχα εκεί που η τιμή της αντίστασης σταθεροποιηθεί είναι η μετρούμενη τιμή της γείωσης.

- Με τη βοήθεια του Σχήματος 3.7γ καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικής τιμής της αντίστασης γείωσης, αφού προσδιορισθεί το σφάλμα μέτρησης για δεδομένη απόσταση των βοηθητικών ηλεκτροδίων.



Σχήμα 3.7: Μέτρηση γείωσης όταν δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος.

Ανάλογοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για γειωτές όπως ράβδοι, ταινίες κ.λ.π. (για περισσότερες πληροφορίες βλέπε οδηγία Νο 25 της ΔΕΗ). Γνωρίζοντας την ισοδύναμη διάμετρο D του εμβαδού που καταλαμβάνει ο γειωτής και την απόσταση l μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων (τάσης και ρεύματος), υπολογίζεται η σχέση μεταξύ αυτών, δηλαδή $\frac{l}{D} = a$. Από το Σχήμα 3.7γ και έχοντας υπολογίσει τον παραπάνω λόγο, δηλαδή το a , προσδιορίζεται ο

λόγος $\frac{R_0}{R}$. Η πραγματική τιμή της αντίστασης γείωσης K , προκύπτει από το γινόμενο της μετρηθείσας τιμής R_0 επί το συντελεστή διόρθωσης $\frac{1}{a}$.

Βιβλιογραφία

- [1] Hering E., “Measuring earth resistance”, Dresden, Germany.
- [2] Dwight H. B., “Calculation of Resistances to Ground”, Transactions of AIEE, vol. 55, pp. 1319–1328, 1936.
- [3] Hallén E., “Lösung zweier potentialprobleme der elektrostatik”, Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, vol. 21A, no. 22, Stochholm, 1929.
- [4] Dwight H. B., “Calculation of Resistances to Ground and of Capacitance”, Journal of Mathematics and Physics, vol. 10, no 1, pp.50, 1931.
- [5] Grover F. W., “Methods, formulas and tables for the calculation of antenna capacity”, Scientific Paper of the Bureau of Standards, no. 568, pp. 569, Washington D. C., 1928.
- [6] Howe G. W. O., “Capacity of Radio-Telegraph Antennae”, The Electrician, vol. 73, pp. 829, 859 and 906, 1914.
- [7] Fagan E. G., Lee R.H., “The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes”, IEEE Transactions on Industry and general applications, vol. IGA-6, no. 4, pp. 337–348, July/Ago 1970.
- [8] Report of the substation committee working group 78.1, “Safe substation grounding—Part II”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 10, pp. 4006–4023, October 1982.
- [9] IEC 60364-4-41:205 “Erection of power installations with nominal voltages up to 1000V — Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock”.
- [10] Hering E., “Schutzerder des TT-Systems”, Elektropraktiker, pp. 370–373, Berlin 59 (2005) 5.
- [11] IEC 60364-6:2006-02 “Low-voltage electrical installations — Part 6: Verification”.
- [12] IEC 61557-1:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 1: General requirements”.

-
- [13] IEC 61557-5:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 5: Resistance to earth”.
 - [14] IEC 61557-6:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 6: Effectiveness of residual current devices (RCD) in TT, TN and IT systems”.
 - [15] IEC 61557-10:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 10: Combined measuring equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures”.
 - [16] Hering E., “Problem mit einem der Erdungsmeßverfahren beim TN-System”, *Elektropraktiker*, pp. 820–822, Berlin 53 (1999) 9.

Κεφάλαιο 4

ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΕΩΝ

Η επιστήμη δεν είναι τίποτε παραπάνω από αντίληψη.

Πλάτων

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων, τα οποία αποτελούν και το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Επειδή τα βελτιωτικά υλικά αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας από τις αρχές της δεκαετίας του '80 και μάλιστα στο εξωτερικό, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια εκτενής αναφορά σε μελέτες και ερευνητικές εργασίες, που έχουν παρουσιασθεί κατά καιρούς σε διάφορα διεθνή και έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.

4.1 Εισαγωγή

Ο κυριότερος ρόλος ενός συστήματος γείωσης είναι να μεταφέρει και να διαχέει τα ρεύματα σφάλματος στη γη, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο και με την ελάχιστη δυνατή αντίσταση στη ροή του ρεύματος. Το γεγονός αυτό διασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού των εγκαταστάσεων και την ασφάλεια του προσωπικού και οποιουδήποτε κινείται στο γύρω χώρο, λόγω των κλίσεων δυναμικού που εμφανίζονται στο έδαφος από τη ροή των ρευμάτων σφάλματος. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τον ορισμό του ηλεκτροδίου γείωσης, ως αγωγού ενσωματωμένου στη γη και χρησιμοποιούμενου για τη διατήρηση του δυναμικού γης στους αγωγούς που συνδέονται σε αυτόν, ο οποίος δίνεται στα Πρότυπα *AIEE No 81* [1] και *ANSI C63.14-1998* [2].

Η πολυπλοκότητα της δομής του εδάφους είναι σε πολλές περιπτώσεις τέτοια, ώστε να μη γίνονται εφικτές οι απαιτούμενες κατά περίπτωση τιμές της αντίστασης γείωσης. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τη μείωση της αντίστασης γείωσης. Επειδή αρκετές φορές, είτε είναι πολύ ακριβή η επέκταση ενός υφιστάμενου συστήματος γείωσης με την τοποθέτηση περισσότερων ηλεκτροδίων, είτε είναι αδύνατη αυτή η τοποθέτηση λόγω

έλλειψης χώρου ή δομής του εδάφους, έχει αναπτυχθεί μια εναλλακτική λύση, αυτή της διαμόρφωσης του εδάφους γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης με βελτιωτικά υλικά γείωσης.

Είναι γνωστό ότι πολλά εδάφη στην Ελλάδα παρουσιάζουν υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, έχοντας ως κύριο συστατικό συμπαγείς βράχους όμοιους με αυτούς της Εικόνας 4.1. Εύλογο λοιπόν το ερώτημα πώς μπορεί να κατασκευαστεί ένα σωστό ηλεκτρόδιο γείωσης σε τέτοια εδάφη, το οποίο να παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση γείωσης [3].



Εικόνα 4.1: Βραχώδες έδαφος με ειδική αντίσταση $>2000\Omega\text{m}$.

Η χρήση βελτιωτικών ειδικής αντίστασης του εδάφους πολλές φορές συνιστάται ειδικά σε εδάφη όπως αυτό της Εικόνας 4.1. Το βελτιωτικό της ειδικής αντίστασης του εδάφους τοποθετείται εντός του ορύγματος όπου θα εγκατασταθεί το ηλεκτρόδιο της γείωσης και αναμιγνύεται με το φυσικό έδαφος, μειώνοντας τοπικά πλησίον του ηλεκτροδίου γείωσης την ειδική αντίσταση του εδάφους, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης της γείωσης. Η σύσταση όμως των βελτιωτικών πρέπει να εξετάζεται, διότι μπορεί να αποβεί μοιραία.

Παλαιότερα (δεκαετία 1940) υπήρχε η άποψη ότι με τη χρήση χημικών (τεχνητών αλλά και φυσικών) ουσιών υπάρχει η δυνατότητα μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η πιο οικονομική φυσική χημική ουσία είναι το NaCl γνωστό ως αλάτι. Το αλάτι και μάλιστα σε περιβάλλον υγρασίας παρουσιάζει

ιδιαίτερα αγωγή συμπεριφορά. Για παράδειγμα το θαλασσινό νερό παρουσιάζει ειδική αντίσταση μόλις $1\Omega m$ ενώ το καθαρό βρόχινο νερό παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από $1000\Omega m$. Οι περισσότερες χημικές ουσίες όμως διαλύονται στο νερό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με την πάροδο του χρόνου λόγω των βροχών, οι ουσίες αυτές όπως και το αλάτι να διαλύονται ή να παρασύρονται από το νερό, έχοντας ως αποτέλεσμα το έδαφος να επιστρέφει στην αρχική του μορφή [3].

Η Εικόνα 4.2 περιγράφει μια πρόσφατη περίπτωση όπου ως βελτιωτικό ειδικής αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το αλάτι. Θα μπορούσε λοιπόν κάποιος να υποθέσει ότι η χρήση αλατιού βελτιώνει την αγωγιμότητα του εδάφους. Όμως το αλάτι ως γνωστό έχει και μια ακόμα ιδιότητα, να διαβρώνει. Είναι λοιπόν άμεσα αντιληπτό τι θα συμβεί στο ηλεκτρόδιο της Εικόνας 3, το οποίο είναι στην κυριολεξία “παστωμένο” στο αλάτι.



Εικόνα 4.2: Πλέγμα γείωσης εγκιβωτισμένο σε αλάτι.

Επίσης, ακόμα και σήμερα, επικρατεί η λανθασμένη εντύπωση ότι σκόνη άνθρακα (καρβουνόσκονη) χρησιμοποιείται ως βελτιωτικό ειδικής αντίστασης του εδάφους. Πράγματι η ειδική αντίσταση του εδάφους θα μειωθεί, όμως η καρβουνόσκονη μπορεί να περιέχει οξείδια του άνθρακα, τιτάνιο, νάτριο, μαγνήσιο, άνθρακα και άλλα στοιχεία τα οποία αναπόφευκτα αντιδρούν και με το χαλκό και με το χάλυβα, με αποτέλεσμα τη σίγουρη αλλά και επιταχυνόμενη διάβρωση των ηλεκτροδίων.

4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το πρόβλημα της βελτίωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είχε αρχίσει να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, σε ερευνητικό επίπεδο, από τη δεκαετία κιάλας του 1960. Οι Kutter and Lange [4] και ο Mc Gowan [5] μελέτησαν τις ιδιότητες του μπετονίτη ως βελτιωτικό εδάφους, συγκρίνοντας την ειδική αντίσταση που επιτυγχανόταν με τη χρήση αυτού του υλικού σε διάφορα εδάφη, κάτω από πύργους του Συστήματος Μεταφοράς, με την ειδική αντίσταση του φυσικού εδάφους.

Στις αρχές της δεκαετίας του '80, ο Warren R. Jones [6] πρότεινε μια μέθοδο εγκατάστασης ηλεκτροδίου ράβδου, χρησιμοποιώντας ράβδο μπετονίτη. Στο συγκεκριμένο πείραμα δοκιμάστηκαν στο ύπαιθρο, σε τρεις (3) τοποθεσίες, ράβδοι μπετονίτη παράλληλα με κανονικές ράβδους γείωσης. Η σύσταση του εδάφους στην πρώτη τοποθεσία ήταν πολύ πυκνή και σκληρή λάσπη, στη δεύτερη ήταν αργιλώδες χώμα με κροκάλες και χαλίκι και στην τρίτη ήταν ένα μείγμα χώματος αποτελούμενο από άμμο, ένα στρώμα λάσπης κάτω από την άμμο και ψαμμόλιθο. Σε κάθε τοποθεσία εγκατέστησε τρεις (3) ράβδους μπετονίτη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι σημειώθηκε σημαντική μείωση της αντίστασης έως 36%, σε σύγκριση με την αντίστοιχη των ράβδων γείωσης στο φυσικό έδαφος. Το αποτέλεσμα ήταν σταθερό καθ' όλο το έτος.

Το 1999 ο Kostic et al [7] παρουσίασε τα αποτελέσματα της βελτίωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των βρόχων γείωσης, χρησιμοποιώντας χαλίκια μπετονίτη, πούδρα μπετονίτη και λάσπη εκσκαφής ως βελτιωτικά εδάφους. Τα ηλεκτρόδια γείωσης τύπου δοκιμάστηκαν σε δύο (2) τοποθεσίες στο ύπαιθρο, στις οποίες η ειδική αντίσταση έφθανε τα $675\Omega m$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σημειώνονταν μικρότερες διακυμάνσεις στην τιμή της αντίστασης γείωσης στους βρόχους που ήταν καλυμμένοι με τα βελτιωτικά υλικά. Επιπλέον, η χρήση πούδρας μπετονίτη είχε πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τα χαλίκια μπετονίτη.

Το 2008 ο Kumarasinghe [8] από το τμήμα Μετεωρολογίας της Σρι Λάνκα πρότεινε ένα χαμηλού κόστους σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χωριό στη Σρι Λάνκα. Διεξήγαγε ένα πείραμα στο οποίο χρησιμοποίησε ως βελτιωτικά υλικά εδάφους φυσικά υλικά, όπως τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας και σκόνη ρυζιού. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα από τη χρήση

μπετονίτη. Τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν έδειξαν ότι αυτά τα φυσικά βελτιωτικά εδάφους ήταν εξίσου καλά με τον μπετονίτη για τη βελτίωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Το 2009 οι Eduful and Cole [9] μελέτησαν το υπόλειμμα από πυρηνέλαιο φοίνικα (Palm Kernel Oil Cake-PKOC), το οποίο είναι ένα παράγωγο από τον πυρήνα του καρπού του φοίνικα, αφότου επεξεργασθεί και παραχθεί από αυτόν ένα είδος λαδιού, ως ένας παράγοντας μείωσης της αντίστασης γείωσης. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε τρεις (3) διαφορετικές τοποθεσίες, όχι μακριά η μια από την άλλη. Μετά από περίοδο έξι (6) ετών, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είχε σημειωθεί μια μέση βελτίωση της αντίστασης γείωσης γύρω στο 50% και το PKOC μπορούσε ουσιαστικά να διατηρεί μόνιμα αυτήν την ικανότητα μείωσης της αντίστασης γείωσης, χωρίς να χάνεται ή να διαλύεται με τις βροχές.

Το 2010 ο J. Jasni et al [10] μελέτησε τις ηλεκτρικές ιδιότητες φυσικών βελτιωτικών εδάφους, ως εναλλακτικές λύσεις έναντι του μπετονίτη. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν μπετονίτης, τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, κηπευτικό αργιλώδες χώμα και σκόνη ρυζιού. Εγκαταστάθηκαν για το σκοπό αυτό πέντε (5) ηλεκτρόδια και εφαρμόστηκε ο κανόνας του 61,8% της μεθόδου πτώσεως δυναμικού. Τα αποτελέσματα μετά από 138 ημέρες μετρήσεων έδειξαν ότι η απόδοση των ηλεκτροδίων με βελτιωτικά εδάφους ήταν σημαντικά διαφορετική από την αντίστοιχη των ηλεκτροδίων που είχαν εγκατασταθεί απευθείας στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, αυτά τα υλικά καταφέρνουν να διατηρούν με μεγάλη επιτυχία την υγρασία του εδάφους και να μειώνουν αποτελεσματικά την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πολύ καλύτερη διάχυση του ρεύματος μέσα στο έδαφος. Ειδικότερα, το αργιλώδες κηπευτικό χώμα παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές από τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά σε βάθος χρόνου και εμφάνισε την καλύτερη ικανότητα διατήρησης της υγρασίας εδάφους, αναδεικνύοντάς το ως το πιο αποτελεσματικό βελτιωτικό σε σύγκριση με τα άλλα που μελετήθηκαν.

Σε άλλη μελέτη το 2010 η W. F. Wan Ahmad et al [11] εξέτασε διάφορα χημικά βελτιωτικά εδάφους όπως χλωριούχο νάτριο (NaCl), υπεροξείδιο του θεικού νατρίου ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), χλωριούχο μαγνήσιο (MgCl_2), θεικός χαλκός (CuSO_4), και χλωριούχο αμμώνιο (NH_4Cl), ως προς την ικανότητά τους να μειώνουν την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων, τα οποία εμβαπτίζονται σε αυτά τα υλικά. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων 141 ημερών, έδειξαν ότι η

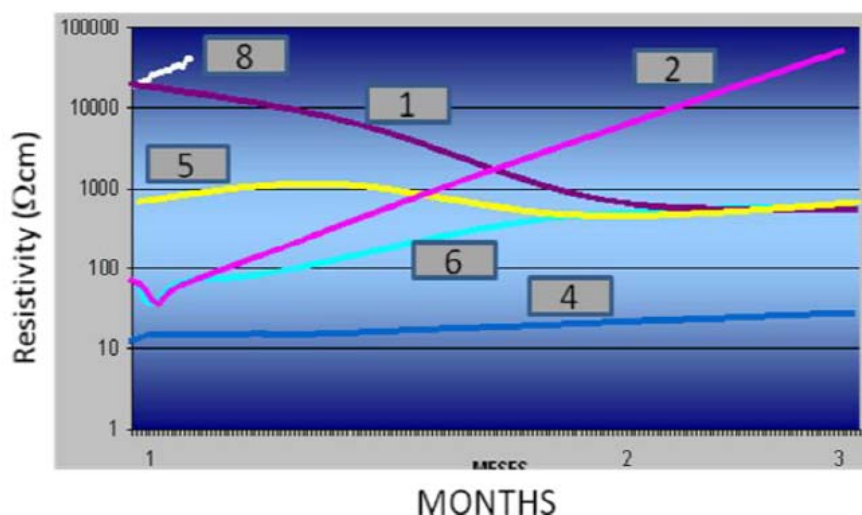
αντίσταση γείωσης των υπό εξέταση ηλεκτροδίων μειώθηκε αναλογικά με το χρόνο και ειδικότερα, το NaCl παρουσίασε μείωση κατά 67%, το $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ κατά 59,58%, το MgCl_2 κατά 58,74%, το CuSO_4 κατά 7,88% ενώ τέλος το NH_4Cl εμφάνισε αύξηση της αντίστασης γείωσης κατά 15,64%. Ως εκ τούτου, το NaCl αποδείχθηκε το χημικό βελτιωτικό με την καλύτερη απόδοση ανάμεσα σε αυτά που μελετήθηκαν και η συγγραφέας το προτείνει για χρήση σε συστήματα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας.

Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 4.1, στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση τέτοιων υλικών ως βελτιωτικών εδάφους δεν επιτρέπεται ούτε στην Ελλάδα ούτε σε άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αφενός μεν για το λόγο διάβρωσης των ηλεκτροδίων γείωσης (περίπτωση NaCl και MgCl_2), αφετέρου δε για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος, ειδικότερα του φυσικού εδάφους, της χλωρίδας και πανίδας.

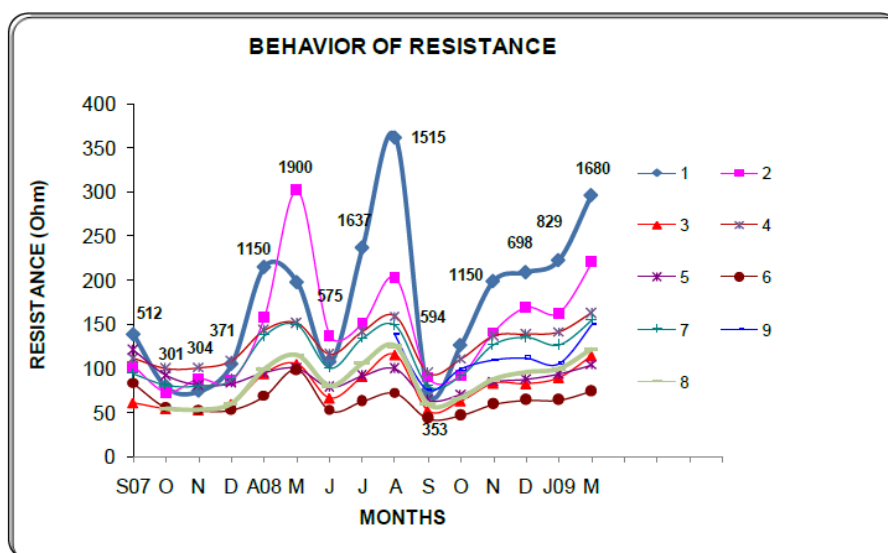
Στο ίδιο συνέδριο (ICLP 2010) ο A. Galván et al [12] παρουσίασε αποτελέσματα από πειράματα που έκανε στο Μεξικό σε δύο περιοχές με διαφορετική σύσταση εδάφους, όπως ασβεστολιθικό βραχώδες έδαφος και ηφαιστειογενές βραχώδες έδαφος. Οι δύο περιοχές στις οποίες εγκαταστάθηκαν τα ηλεκτρόδια γείωσης ήταν κάτω από πύργους του Συστήματος Μεταφοράς και τα βελτιωτικά υλικά που μελετήθηκαν ήταν μπετονίτης, αγωγίμο τσιμέντο και τα υπόλοιπα χημικής σύστασης. Έγιναν μετρήσεις τόσο της αντίστασης γείωσης, όσο και της ειδικής αντίστασης του φυσικού εδάφους και της κάθε περιοχής του εδάφους, στην οποία είχε προστεθεί το καθένα βελτιωτικό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα σκληρότερα υλικά παρουσίασαν μια αξιοσημείωτη σταθερότητα της ειδικής αντίστασής τους ως προς το χρόνο, ενώ τα μαλακότερα υλικά εμφάνιζαν κατά καιρούς μεγάλες διακυμάνσεις και μάλιστα πολύ υψηλές αυξήσεις της ειδικής αντίστασης, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει σημαντικό μειονέκτημα κατά τη χρήση τους σε πραγματικές εγκαταστάσεις γειώσεων, λόγω πιθανής σημαντικής αύξησης και της αντίστασης γείωσης. Επίσης η έρευνα έδειξε ότι, η συμπεριφορά αυτών των βελτιωτικών υλικών ήταν σε εξάρτηση και από τον τύπο του εδάφους στο οποίο αυτά τοποθετούνταν, κυρίως σε εδάφη με υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης (άνω των $1500\Omega m$), όπου άλλα παρουσίαζαν πολύ καλή συμπεριφορά ως προς την αγωγιμότητα και άλλα το ακριβώς αντίθετο.

Σε προηγούμενες μελέτες του ίδιου ερευνητή [13, 14], διερευνήθηκε η σκοπιμότητα χρήσης βελτιωτικών υλικών, καθώς και το πόσο μεγάλο ή μικρό είναι τελικά το όφελος χρήσης τους σε διάφορου τύπους εδαφών. Πιο συγκεκριμένα η έρευνα έδειξε ότι, σε ασβεστολιθικά εδάφη το όφελος χρήσης βελτιωτικών σε έδαφος με ρ έως τα $200\Omega m$ είναι πολύ μικρό, σε έδαφος με ρ από $200\Omega m$ έως $500\Omega m$ παρουσιάζεται μια μέση μείωση της αντίστασης γείωσης της τάξεως του 30% και σε έδαφος με ρ από $500\Omega m$ έως $1000\Omega m$ μια μέση μείωση της τάξεως του 50%. Αντίστοιχα σε βραχώδη εδάφη, με ρ έως τα $500\Omega m$ το όφελος είναι μια μέση μείωση της τάξεως του 25%, με ρ από $500\Omega m$ έως $1000\Omega m$ μείωση της τάξεως του 40% και με ρ πάνω από $1000\Omega m$ μείωση της τάξεως του 65%. Παράλληλα με τις μετρήσεις *in situ*, διεξήχθησαν και εργαστηριακές δοκιμές, στις οποίες ερευνήθηκαν οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες αυτών των υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Τα υλικά θερμαίνονταν σε διάφορες θερμοκρασίες μέσα σε ηλεκτρικό κλίβανο μέχρι τους $40^\circ C$ και γίνονταν μετρήσεις της απώλειας υγρασίας του υλικού, καθώς και της μεταβολής της ειδικής αντίστασής του σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και την υγρασία, σε συνθήκες περιβάλλοντος και σε θερμοκρασία $40^\circ C$ σταθερά, για μικρά χρονικά διαστήματα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα υλικά με τη χαμηλότερη ειδική αντίσταση, ανάλογα με το ποσό υγρασίας που είχαν στην αρχική ρευστή τους κατάσταση, παρουσίαζαν μεγάλες διακυμάνσεις όταν εκτίθεντο σε αρκετά μεγάλη απώλεια της υγρασίας τους. Επιπρόσθετα, παρουσίαζαν μεγάλη ευαισθησία σε ρωγμές και σπασίματα κατά τη διαδικασία της αφύγρανσης, γεγονός που αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα για τις πραγματικές κατασκευές.

Ενδεικτικά παρατίθενται ακολούθως κάποια γραφήματα από τις έρευνες που προαναφέρθηκαν:



Σχήμα 4.1: Ειδική αντίσταση συναρτήσει του χρόνου σε δοκιμή επιταχυνόμενης απώλειας υγρασίας [14].



Σχήμα 4.2: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης των υπό εξέταση ηλεκτροδίων σε συνάρτηση με το χρόνο, σε ασβεστολιθικό βραχώδες έδαφος [13].

Βιβλιογραφία

- [1] Dick W. K. and Holliday H. R., "Impulse and Alternating Current Tests on Grounding Electrodes in Soil Environments", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 1, pp. 102–108, Jan/Feb 1978.
- [2] American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP) and Electrostatic Discharge (ESD) (Dictionary of EMC/EMP/ESD Terms and Definitions),

-
- ANSI C63.14-1998 (Revision of ANSI C63.14-1992), approved on 28 October 1998.
- [3] www.elemko.gr
- [4] Kutter H. and Lange W., “Grounding improvement by using bentonite”, *Elektrie*, 21, (11), pp.421–424, 1967.
- [5] Mc Gowan K. L., “Use of conductive backfills in reducing transmission tower surge impedance and footing resistance”, IEEE PES Summer Meeting, Paper A 75, pp. 484–486, San Francisco, California, USA, 1975.
- [6] Jones Warren R., “Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, (4), pp. 1343–1346, 1980.
- [7] Kostic M. B., Radakovic Z.R., Radovanovic N. S., and Tomasevic-Canovic M. R., “Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud”, *IEE Proc.-Generation Transmission Distribution*, vol. 146, (1), 1999.
- [8] Kumarasinghe Nuwan, “A low cost lightning protection system and its effectiveness”, 20th International Lightning detection Conference, Tucson, Arizona, USA, 2008.
- [9] Eduful George and Cole Joseph Ekow, “Palm kernel oil cake as an alternative to earth resistance resistance-reducing agent”, F.M. Tettech, Soil Research Institute, Ghana, 2009.
- [10] Jasni J., Siow L. K., Ab Kadir M. Z. A. and Wan Ahmad W. F., “Natural materials as grounding filler for lightning protection system”, 30th International Conference on Lightning Protection-ICLP, Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010.
- [11] Wan Ahmad W. F., Rahman Abdul M. S., Jasni J., Ab Kadir M. Z. A. and Hizam H., “Chemical enhancement materials for grounding purposes”, 30th International Conference on Lightning Protection-ICLP, Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010.
- [12] Galván Arturo D., Pretelin Gilberto G., Gaona Enrique E., “Practical evaluation of ground enhancing compounds for high soil resistivities”, 30th International Conference on Lightning Protection-ICLP, Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010.

-
- [13] Galván Arturo D., Gaona Enrique E, Pretelin Gilberto G., “Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods”, X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009.
- [14] Galván Arturo D., Soto Diana M., Malo G José M., “Evaluation under controlled conditions of ground enhancing compounds used in grounding rods”, X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009.

Κεφάλαιο 5

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ἐτεῖν δὲ οὐδέ ν' ἴδμεν· ἐν βυθῷ γὰρ ἡ ἀλήθεια.

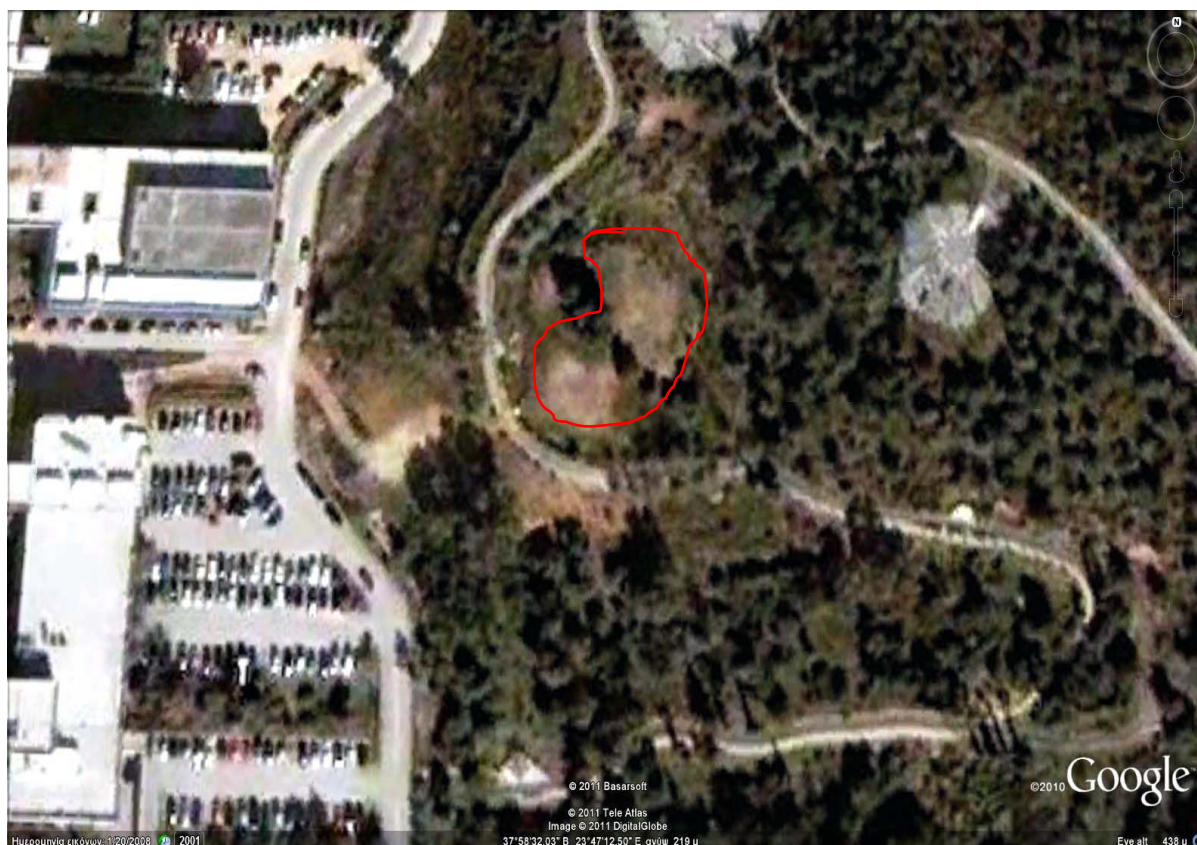
Δημόκριτος

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται ο χώρος, η διάταξη των ηλεκτροδίων και οι συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος, τα υλικά των συστημάτων γείωσης που εγκαταστάθηκαν για το σκοπό του πειράματος, ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις, οι μέθοδοι και οι μαθηματικές σχέσεις που εφαρμόστηκαν, τόσο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων όσο και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε γραφική απεικόνιση, καθώς επίσης και ορισμένα χρήσιμα γραφήματα για τη σύγκριση των πειραματικών τιμών των υπό εξέταση ηλεκτροδίων.

5.1 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Για τις ανάγκες του πειράματος εγκαταστάθηκε σύστημα ηλεκτροδίων γείωσης στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου και πιο συγκεκριμένα στην κορυφή του λοφίσκου που βρίσκεται δίπλα από τα κτίρια των Χημικών Μηχανικών, των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και από το υπαίθριο parking. Ο χώρος εκείνος επιλέχθηκε διότι: α) είναι ελεύθερος και δε χρησιμοποιείται από κάποια σχολή ή υπηρεσία, β) είναι φυσική απόληξη στους πρόποδες του Υμηττού και δεν έχει γίνει καμιά τεχνική παρέμβαση στο έδαφος και το περιβάλλον, γ) η περιοχή του λόφου που τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια είναι εντελώς επίπεδη και δ) η περιοχή είναι τέτοιας έκτασης, που να επιτρέπει την τοποθέτηση πολλών ηλεκτροδίων και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, γεγονός που συμβάλλει στην εγκυρότητα και ακρίβεια των μετρήσεων.

Η περιοχή στην οποία τοποθετήθηκαν και αποτέλεσε το πεδίο των μετρήσεων, αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.1 του Google Map και στην Εικόνα 5.2:



Εικόνα 5.1: Αεροφωτογραφία του πεδίου δοκιμών.



Εικόνα 5.2: Χώρος εγκατάστασης των ηλεκτροδίων γείωσης.

Το έδαφος της περιοχής χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκη άμμος με χαλίκια και κροκάλες. Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη των Φραγκογιάννη, Παπαθεοδώρου και Σταματάκη [1] έγινε δειγματοληψία χρώματος από την εν λόγω περιοχή και τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης έδειξαν ότι, το συγκεκριμένο έδαφος αποτελείται από χαλίκι και κροκάλες σε ποσοστό 54,78%,

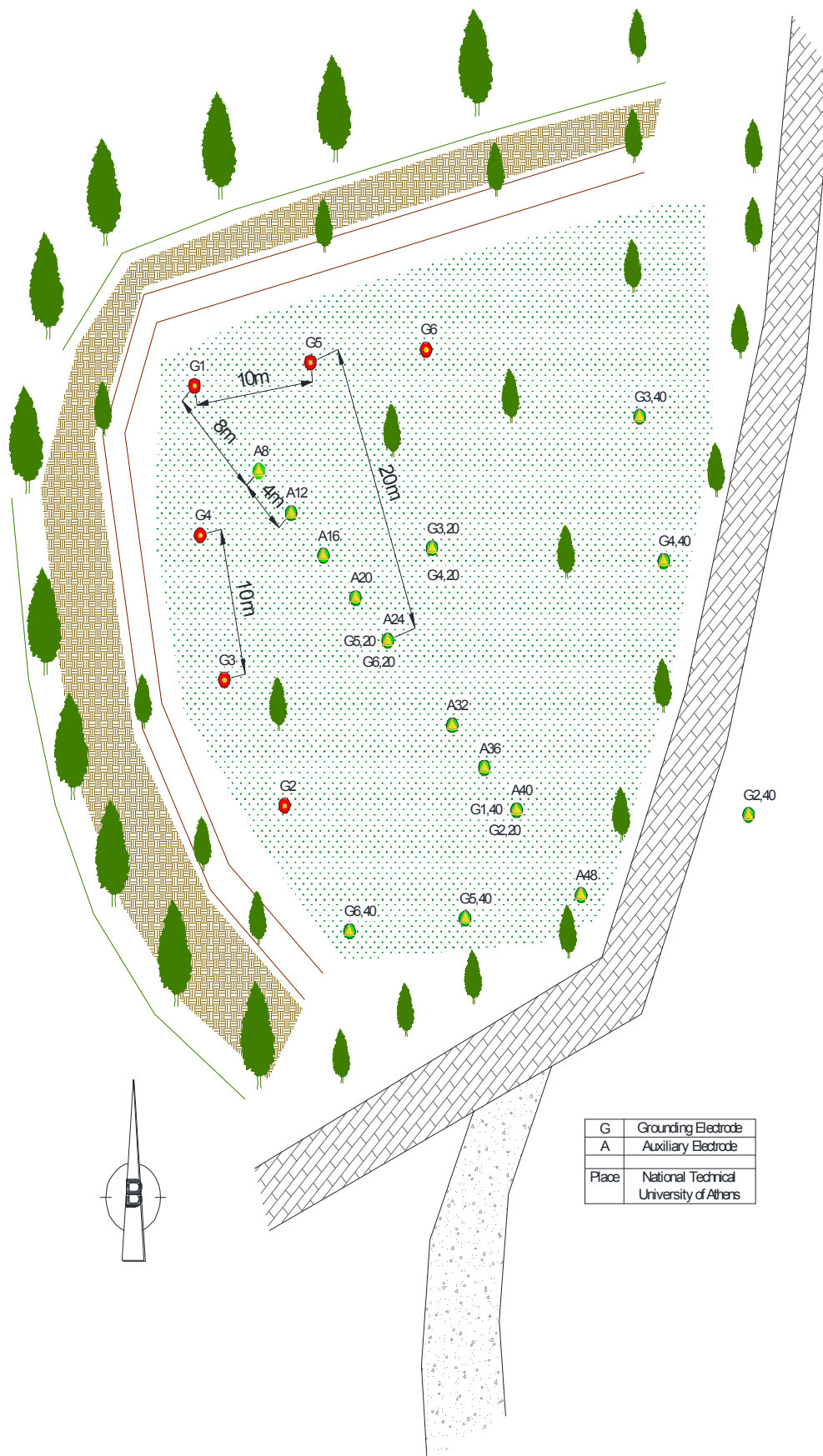
άμμο σε ποσοστό 39,47% και άργιλο σε ποσοστό 5,74%. Το σύστημα κατηγοριοποίησης του εδάφους που εφαρμόστηκε ήταν κατά *AASTHO* [2]. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος χώματος μετρήθηκε και βρέθηκε ότι είναι υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το νερό αποστραγγίζεται πολύ γρήγορα από το έδαφος.

Τοποθετήθηκαν έξι (6) κύρια ηλεκτρόδια ράβδου *St/e-Cu* τύπου *A* διαστάσεων $17 \times 1500 \text{ mm}$, με πάχος επιχάλκωσης $254 \mu\text{m}$, σε απόσταση 10 m το ένα από το άλλο, εκ των οποίων τα πέντε (5) μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης και το ένα απευθείας στο φυσικό έδαφος, σε διάταξη όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, ως εξής:

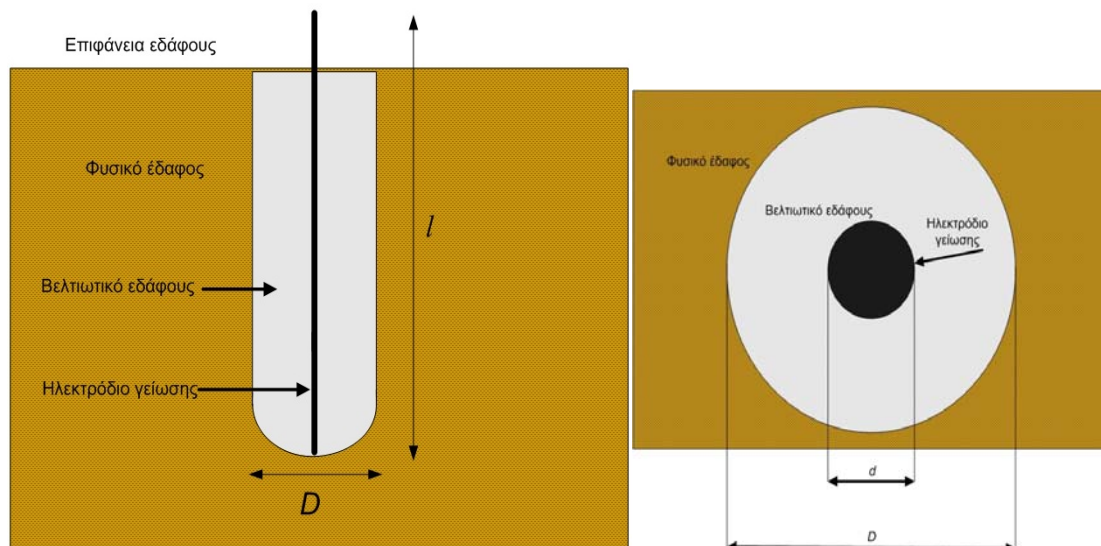
- Ηλεκτρόδιο G_1 : Φυσικό έδαφος
- Ηλεκτρόδιο G_2 : Σκυρόδεμα
- Ηλεκτρόδιο G_3 : Μπετονίτης
- Ηλεκτρόδιο G_4 : Χημικό υλικό Α
- Ηλεκτρόδιο G_5 : Χημικό υλικό Β
- Ηλεκτρόδιο G_6 : Χημικό υλικό C

Για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων έγινε διάνοιξη οπών διαμέτρου $0,25 \text{ m}$ και βάθους $1,6\text{--}1,65 \text{ m}$ (Σχήμα 5.2), με εκσκαφέα βαρέως τύπου (Εικόνα 5.3, Εικόνα 5.4), κατόπιν έγινε πλήρωση των οπών με τα βελτιωτικά υλικά και τέλος τοποθετήθηκαν εντός αυτών τα ηλεκτρόδια (Εικόνα 5.5, Εικόνα 5.6). Πρέπει να διευκρινισθεί ότι οι οπές για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων θα μπορούσαν να γίνουν και με γεωτρύπανο, όμως το κόστος της εγκατάστασης θα ήταν πολλαπλάσιο αυτού που τελικά επιτεύχθηκε.

Επίσης, τοποθετήθηκαν μόνιμα στο έδαφος σε διάφορες θέσεις δεκαπέντε (15) βοηθητικά ηλεκτρόδια, του ίδιου τύπου με τα κύρια, αλλά μήκους $0,5 \text{ m}$, για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης ρ και της αντίστασης γείωσης R . Η όλη διαδικασία διήρκεσε 3 ημέρες και αφού είχε γίνει μια προεργασία του χώρου τις προηγούμενες ημέρες, όπως εξομάλυνση του δρόμου που οδηγεί στο χώρο του πειράματος, ώστε να είναι δυνατή η ανάβαση του μηχανήματος στο λόφο και ο καθαρισμός του χώρου από την πυκνή και χαμηλή βλάστηση.



Σχήμα 5.1: Διάταξη ηλεκτροδίων του πειράματος.



Σχήμα 5.2: Ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετημένο μέσα στο βελτιωτικό έδαφος.



Εικόνα 5.3: Διάνοιξη οπών με εκσκαφέα βαρέως τύπου.



Εικόνα 5.4: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων.



Εικόνα 5.5: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε βελτιωτικά υλικά εδάφους.



Εικόνα 5.6: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε μπετονίτη και σκυρόδεμα.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι το MEGGER DET2/2 (Εικόνα 5.7), το οποίο είναι διακριβωμένο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων (ΚΔΕΠ/ΔΕΗ).



Εικόνα 5.7: Γειωσόμετρο

Οι μετρήσεις της R και της ρ πραγματοποιούνται σε καθημερινή βάση και παράλληλα με αυτές γίνονται μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, *in situ*, με το θερμο-υγρόμετρο OMEGAETTE HH314 Humidity-Temperature Meter (Εικόνα 5.8), που είναι επίσης διακριβωμένο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων (ΔΕΚΑ ΑΕΒΕ).



Εικόνα 5.8: Θερμο-υγρόμετρο

Οι τιμές της υγρασίας εδάφους και του ύψους βροχοπτώσεως λαμβάνονται on line από τα όργανα καταγραφής του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου (Εικόνα 5.9), ο οποίος λειτουργεί υπό την εποπτεία του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Αποτελεί μέρος του παλαιότερου Meteonet, το οποίο πλέον έχει εξελιχθεί στο Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθήνας (HOA). Το όργανο μέτρησης της υγρασίας εδάφους είναι το CS616-L Water Content Reflectometer της Campbell Scientific Inc και του ύψους βροχοπτώσεως είναι το ARG-100 της Campbell Scientific Inc.



Εικόνα 5.9: Μετεωρολογικός σταθμός Ε.Μ.Π.

5.2 Μετρήσεις – Γραφήματα

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εφαρμόσθηκε η μέθοδος Wenner (ή μέθοδος των 4 ηλεκτροδίων). Χρησιμοποιήθηκαν δέκα (10) ηλεκτρόδια, (εννέα (9) βοηθητικά ηλεκτρόδια και το κύριο ηλεκτρόδιο G_1), διατεταγμένα όλα σε έναν άξονα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1. Με αυτήν τη διάταξη των ηλεκτροδίων λαμβάνονται μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για διάφορες τιμές της απόστασης a και πιο συγκεκριμένα για $a=2m$, $a=4m$, $a=8m$, $a=12m$ και $a=16m$. Κατ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται τιμές της ρ για βάθος ίσο με $a/2$, οπότε με αυτές τις αποστάσεις, μπορεί να μετρηθεί η ρ σε βάθος έως και $8m$. Για τον υπολογισμό της ρ του εδάφους, από τις ενδείξεις του γειωσόμετρου, χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.5) Για τον υπολογισμό της ρ του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο, όταν τοποθετείται και βελτιωτικό υλικό, χρησιμοποιήθηκε η σχέση (3.6), η οποία επιλυόμενη ως προς ρ δίνει την τιμή μιας σύνθετης ειδικής αντίστασης του χώματος και του βελτιωτικού υλικού μαζί, τα οποία περιβάλλουν το ηλεκτρόδιο. Η μεταβλητή R είναι η μετρούμενη αντίσταση γείωσης του εκάστοτε ηλεκτροδίου.

Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των κυρίων ηλεκτροδίων εφαρμόσθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται αναλυτικά στις παραγράφους 3.5.1 και 3.5.2. Τα βοηθητικά ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις $20m$ και $40m$ από το εκάστοτε προς μέτρηση ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1. Η συχνότητα λειτουργίας του γειωσόμετρου καθορίζεται στα $128Hz$.

Οι μετρήσεις που παρατίθενται στο Παράρτημα έγιναν το χρονικό διάστημα από 17/02/2011 έως και 09/06/2011. Πραγματοποιούνταν σχεδόν σε καθημερινή βάση, συνήθως ώρες μεσημεριού, λόγω δε του μεγάλου πλήθους των ηλεκτροδίων και των σχετικά μεγάλων αποστάσεων, η διαδικασία των μετρήσεων διαρκούσε από 1 έως 1,5 ώρα. Η δυσκολία έγκειται στη συνεχή εναλλαγή στις συνδέσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, ως εκ τούτου στις συχνές διαδρομές που πρέπει να διανύει ο χειριστής που εκτελεί τις μετρήσεις καθώς και στα πολλά και συνεχόμενα τυλίγματα και απλώματα των καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του οργάνου στα ηλεκτρόδια. (Εικόνα 5.10, Εικόνα 5.11).

Οι δε συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεων πολλές φορές ήταν πολύ αντίξοες λόγω, είτε των ξαφνικών βροχών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οπότε και το

έδαφος γινόταν ιδιαίτερα λασπώδες, είτε λόγω του ψύχους που επικρατούσε κάποιες ημέρες, ειδικά όταν είχε χιονόπτωση, είτε σε περιόδους μεγάλης ηλιοφάνειας. Άλλωστε το πείραμα διεξάγεται στο ύπαιθρο και όχι στο χώρο του εργαστηρίου, όπου ο χειριστής είναι προστατευμένος από τις καιρικές συνθήκες.



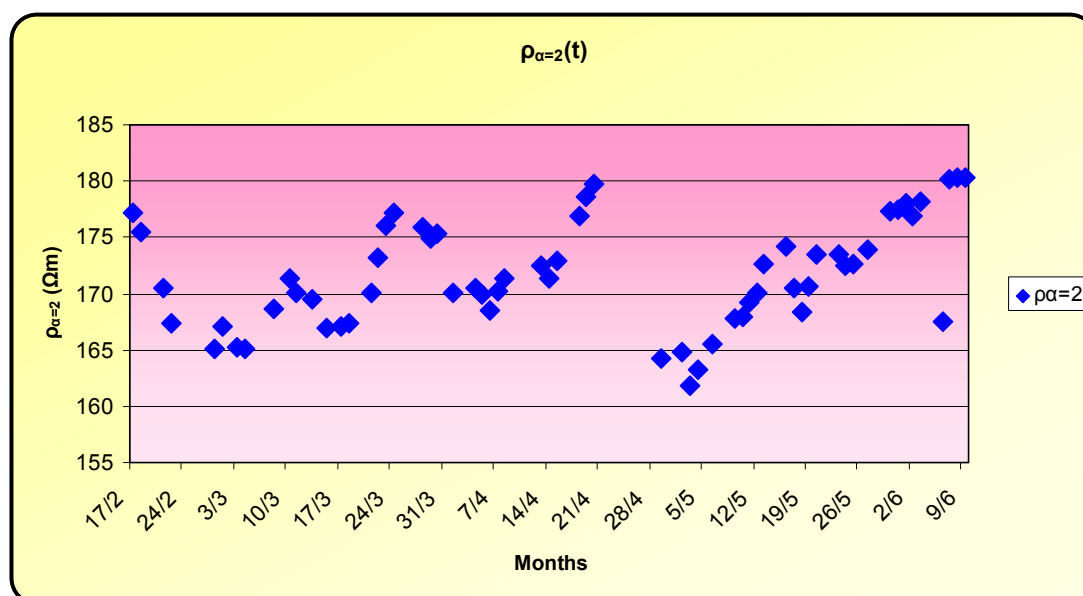
Εικόνα 5.10: Σύνδεση του γειωσόμετρου σε ηλεκτρόδιο γείωσης.



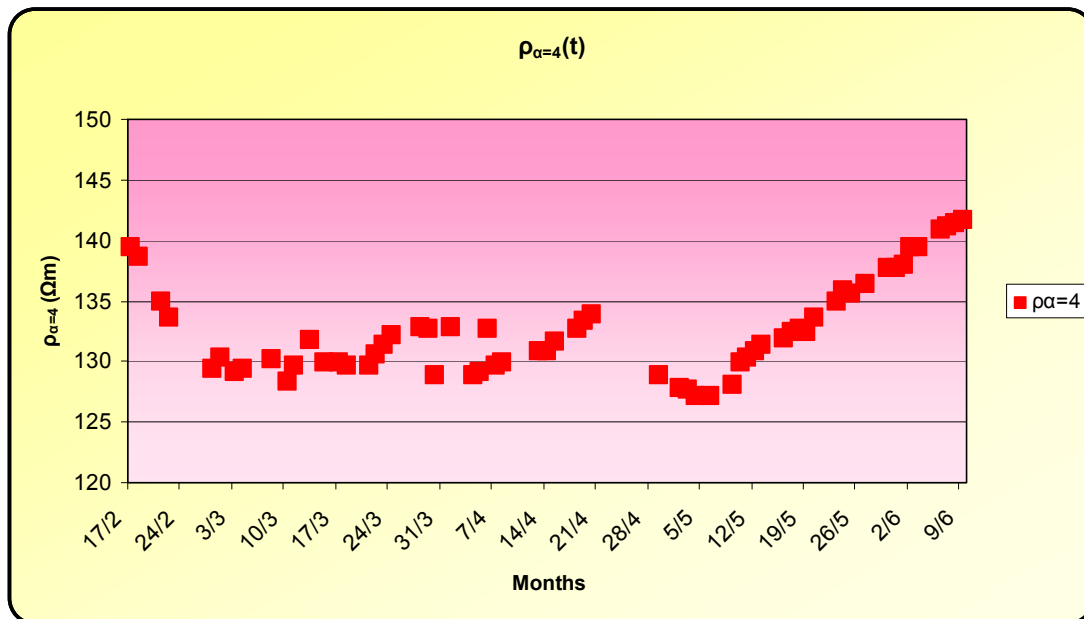
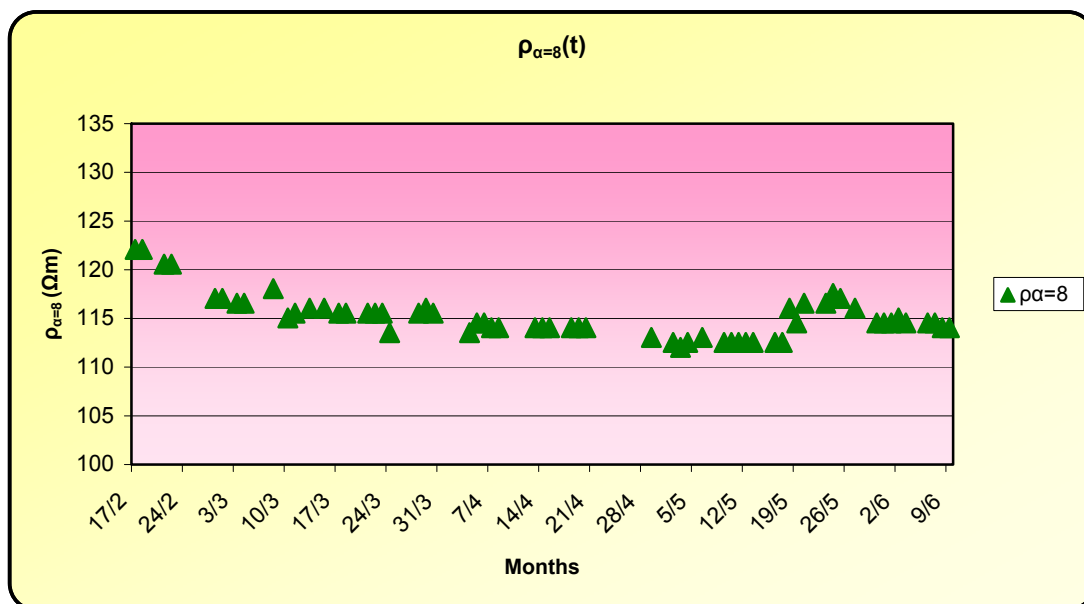
Εικόνα 5.11: Διεξαγωγή μετρήσεων

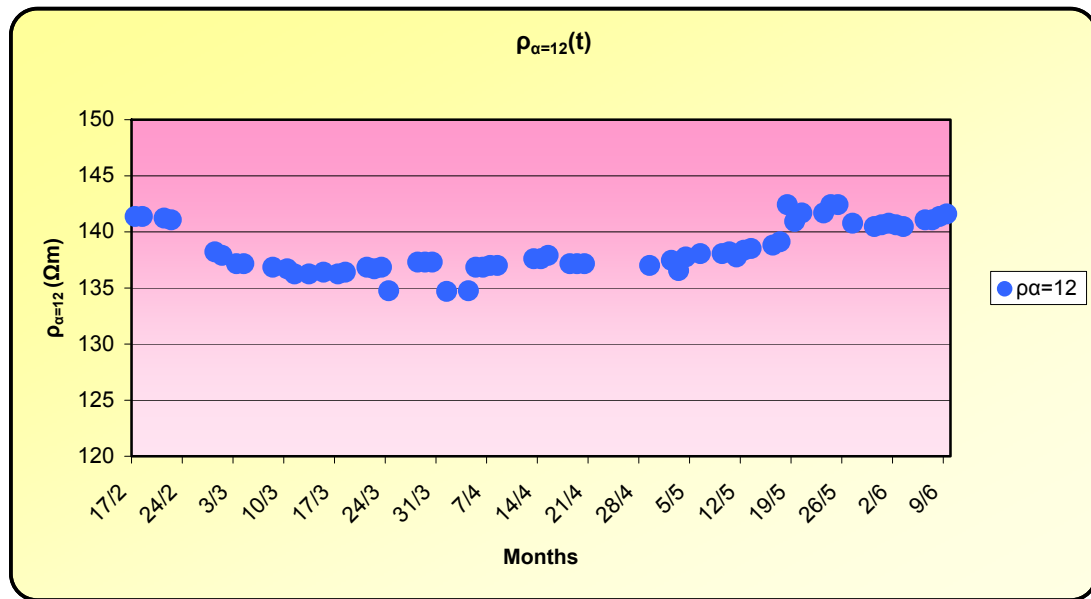
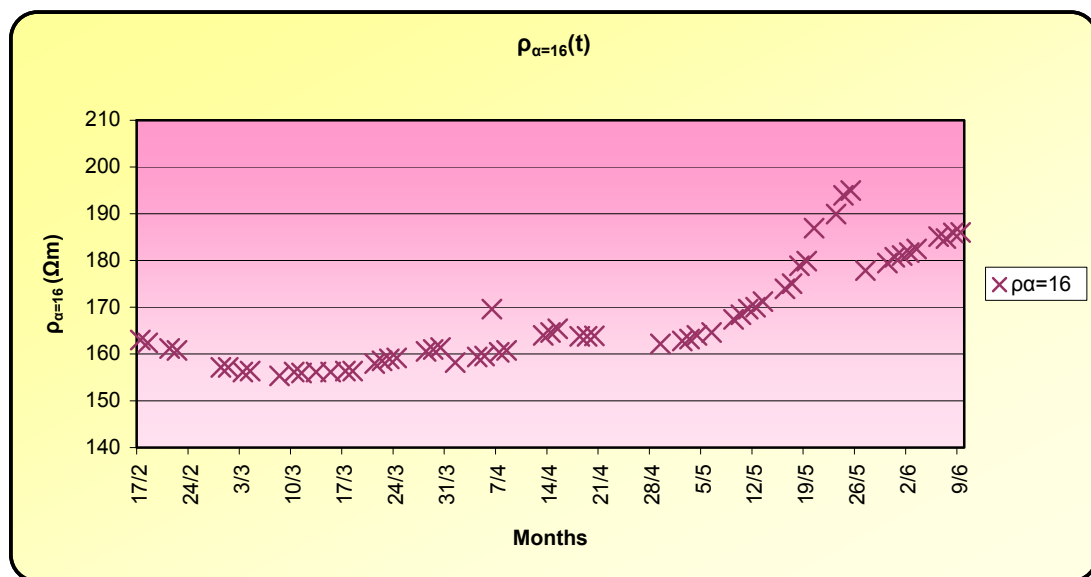
Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις (όργανα, καλώδια, κ.α.), μεταφερόταν καθημερινά στο χώρο του πειράματος με τα χέρια και όχι με κάποιο όχημα, γεγονός που έκανε την ανάβαση στο λόφο ιδιαίτερα επίπονη και κοπιαστική. Όταν δε, παρατηρούνταν κάποιες ασυνήθιστες αποκλίσεις των τιμών ή κάποιες ανωμαλίες στις μετρήσεις, λόγω αστάθμητων παραγόντων, η όλη διαδικασία επαναλαμβανόταν ξανά, με σκοπό τη διατήρηση των ίδιων συνθηκών κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Ίσως λοιπόν, γι' αυτούς τους λόγους, δεν πραγματοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα τέτοια πειράματα, που έχουν παρόμοια έκταση και με λήψη μετρήσεων σε καθημερινή βάση, με μόνη εξαίρεση κάποια πειράματα που εκτελούνται αυτήν την περίοδο στο Μεξικό [3].

Αρχικά παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής της ειδικής αντίστασης του φυσικού εδάφους ρ_s σε συνάρτηση με το χρόνο, για διάφορα βάθη ανάλογα με την τιμή της απόστασης α των βοηθητικών ηλεκτροδίων. Από αυτά τα διαγράμματα είναι δυνατόν κανείς να εξάγει συμπεράσματα σχετικά, με τη φυσική δομή του εδάφους στο οποίο λαμβάνει χώρα το πείραμα, με την υδραυλική αγωγιμότητά του και τη συμπεριφορά του ως προς την κατακράτηση υγρασίας, με τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε διάφορα βάθη τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς την απορροφούμενη υγρασία με τις βροχοπτώσεις.

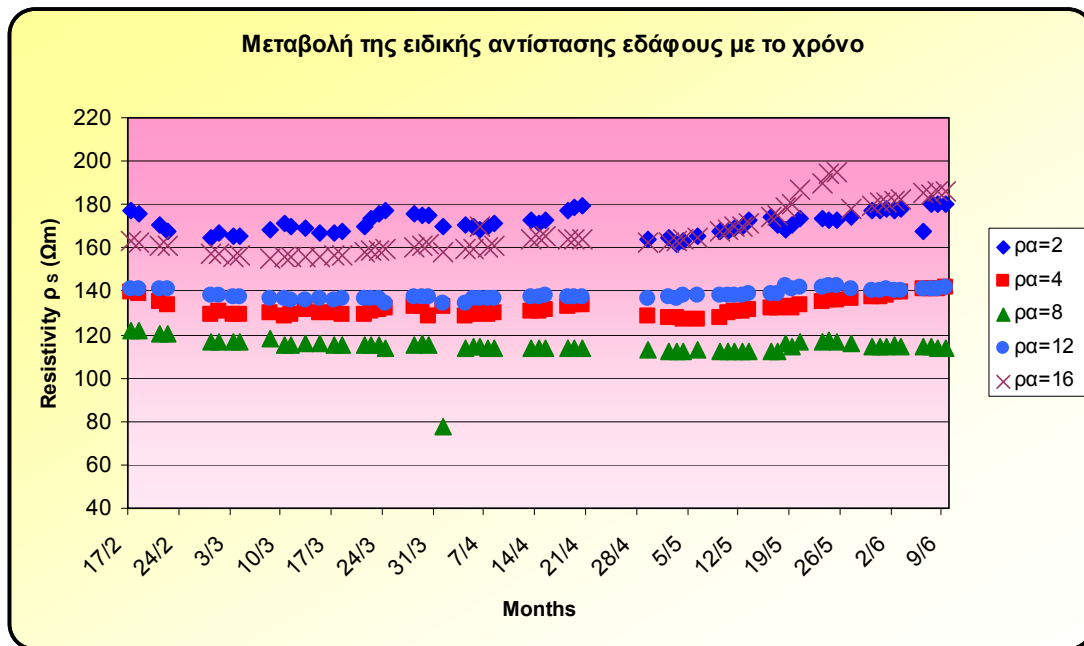


Σχήμα 5.3: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $\alpha=2m$.

Σχήμα 5.4: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $\alpha=4m$.Σχήμα 5.5: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $\alpha=8m$.

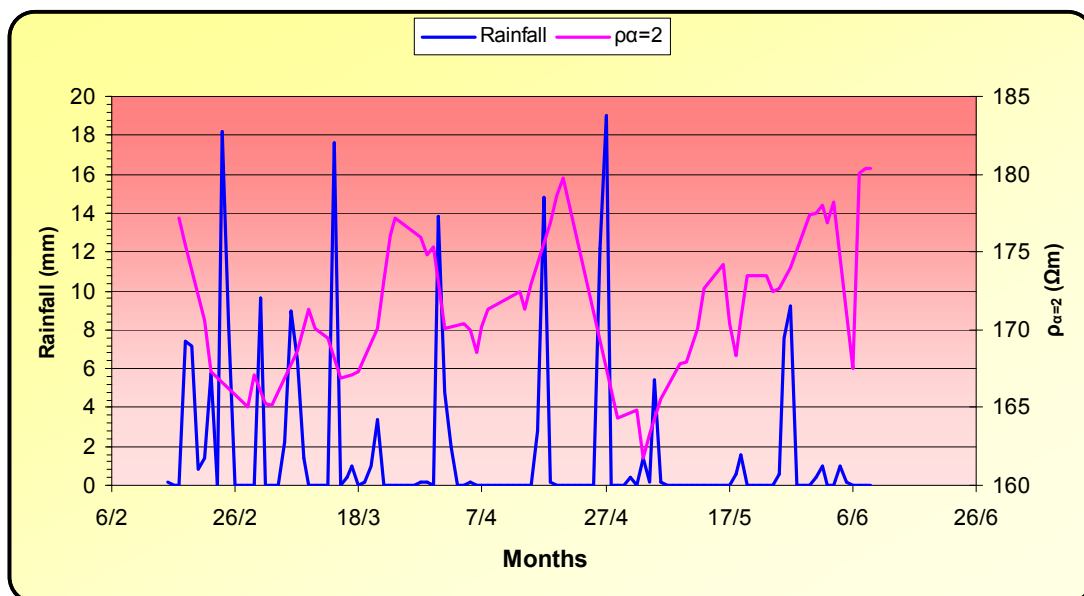
Σχήμα 5.6: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $\alpha=12m$.Σχήμα 5.7: Μεταβολή της ρ_s με το χρόνο για $\alpha=16m$.

Για καλύτερη σύγκριση των μεταβολών της ρ_s στα διάφορα βάθη, παρατίθεται και ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των παραπάνω γραφημάτων:

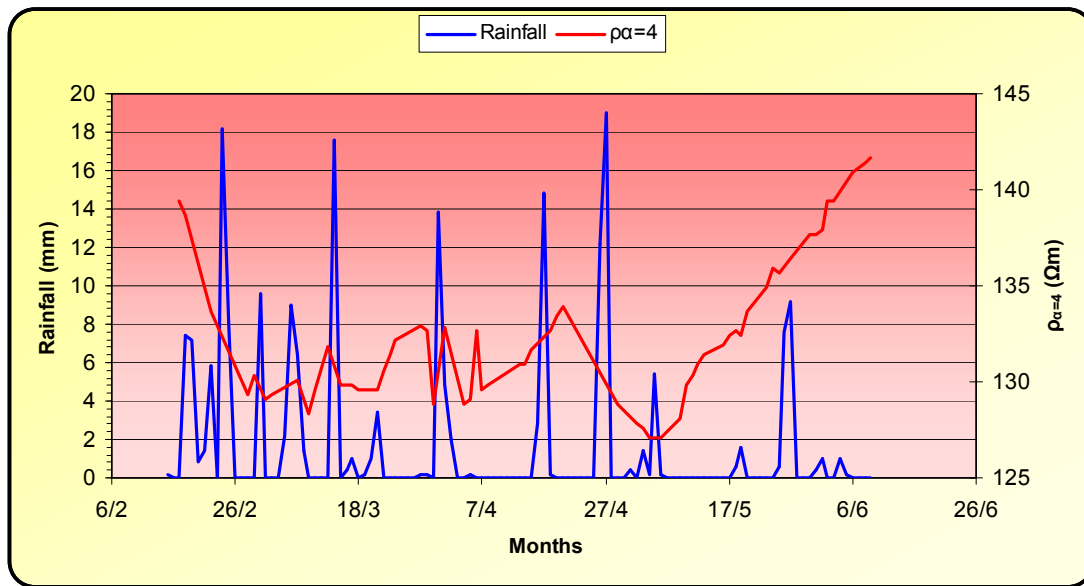


Σχήμα 5.8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής της ρ_s με το χρόνο.

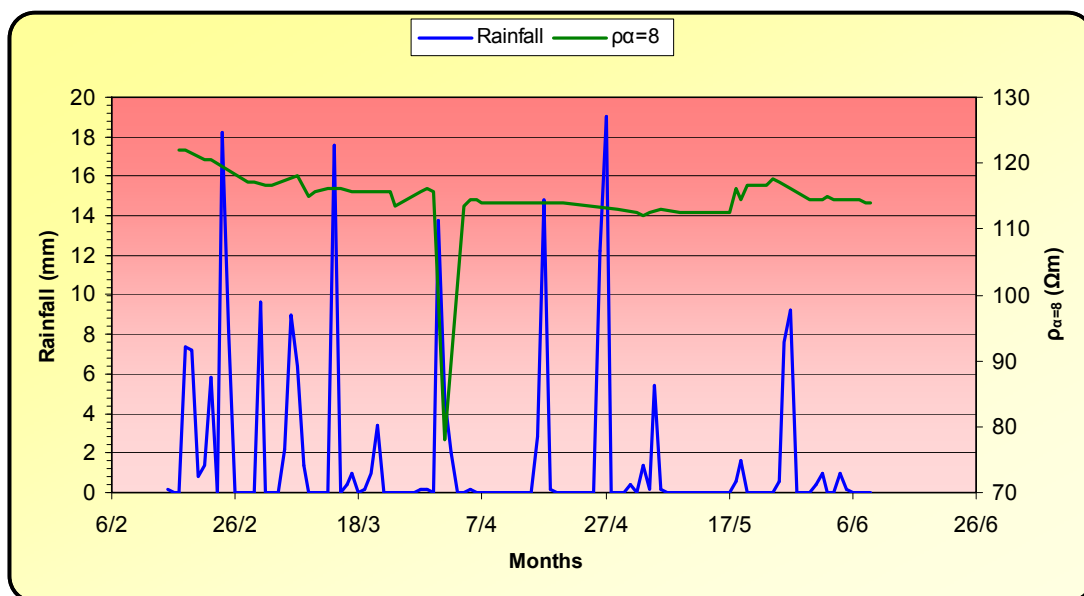
Μια άλλη ενδιαφέρουσα μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που μελετάται στην παρούσα εργασία, είναι σε συνάρτηση με τη βροχόπτωση (ύψος βροχής). Τα διαγράμματα μεταβολής της ρ_s που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:



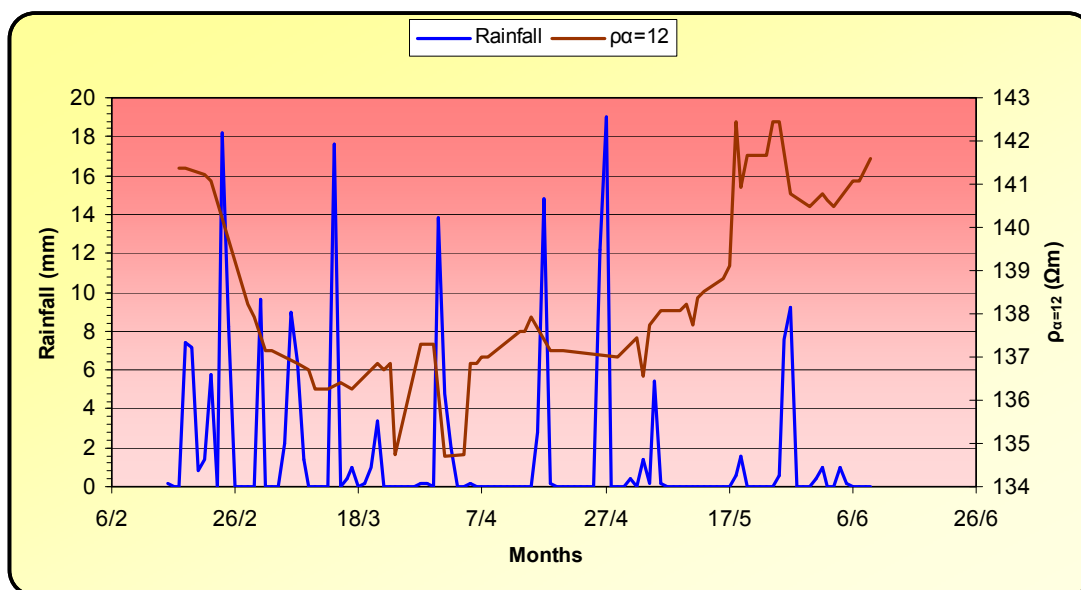
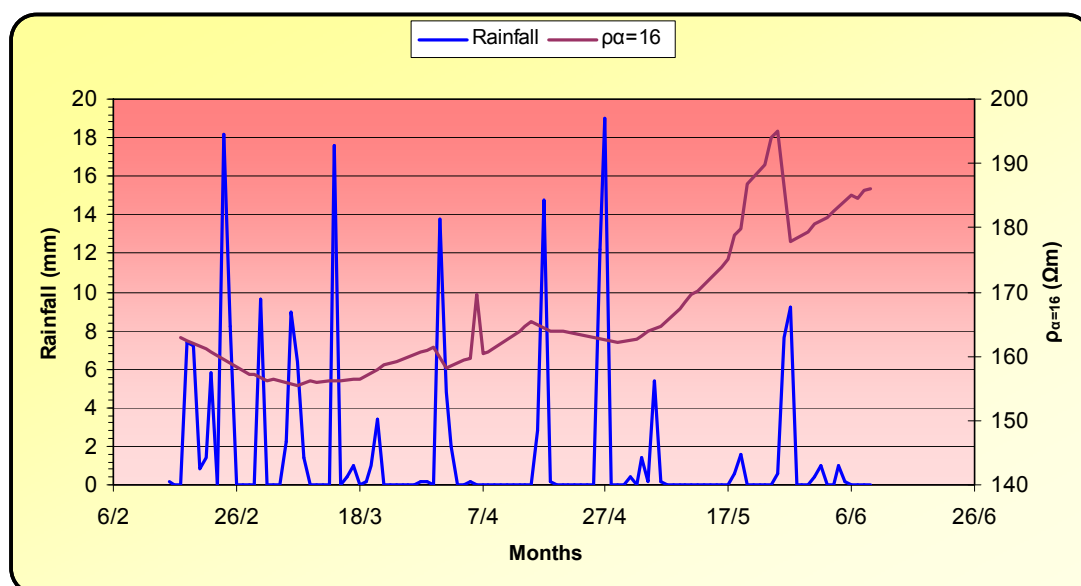
Σχήμα 5.9: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $\alpha=2m$.



Σχήμα 5.10: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $\alpha=4m$.



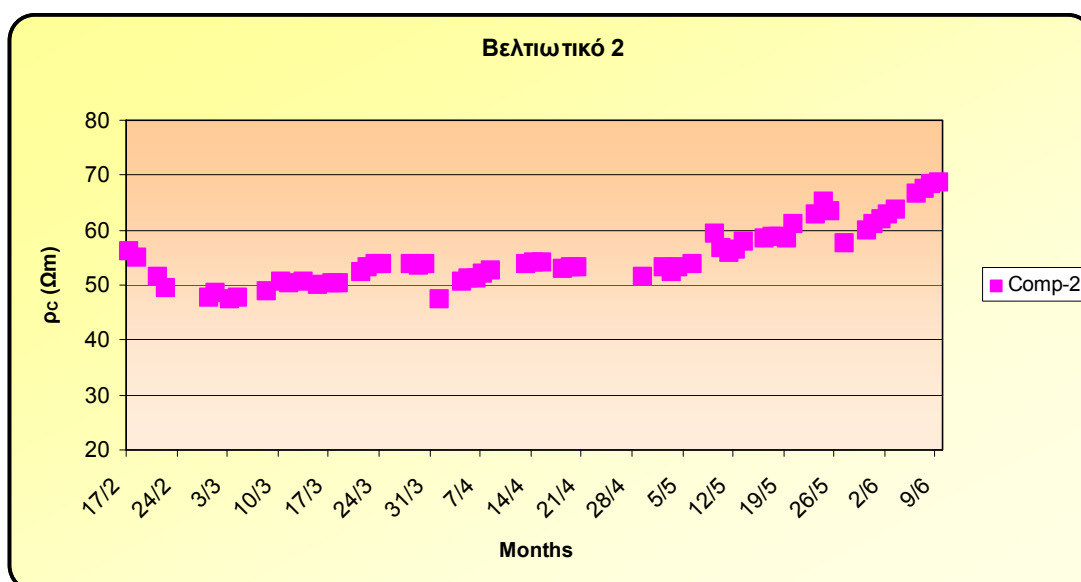
Σχήμα 5.11: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $\alpha=8m$.

Σχήμα 5.12: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $\alpha=12m$.Σχήμα 5.13: Μεταβολή της ρ_s με τη βροχόπτωση για $\alpha=16m$.

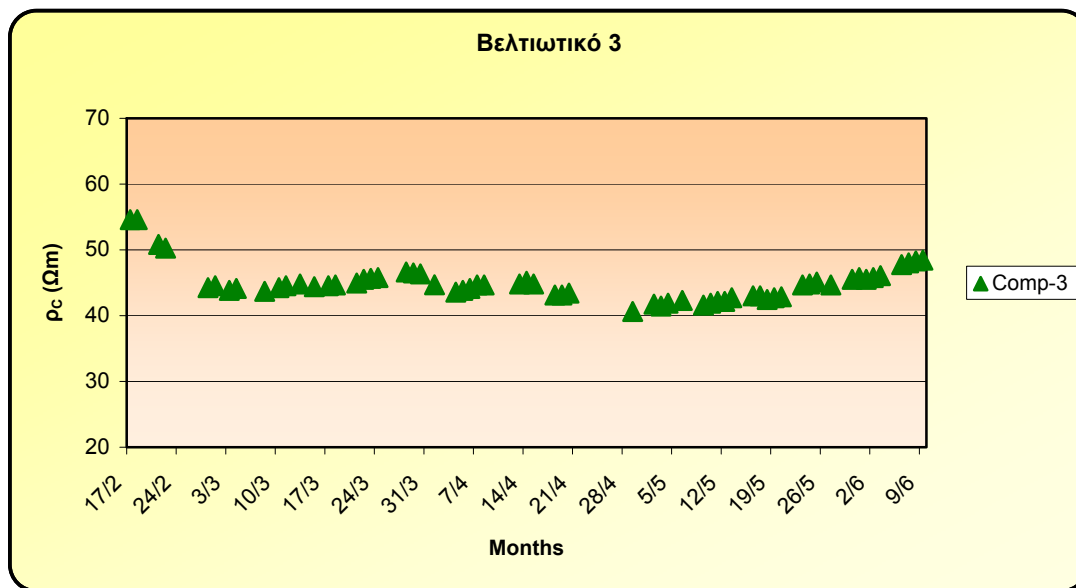
Στη συνέχεια, ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής της σύνθετης ειδικής αντίστασης του φυσικού εδάφους με καθένα από τα πέντε (5) βελτιωτικά που χρησιμοποιούνται στο πείραμα. Από τα διαγράμματα αυτά επιχειρείται μια έρευνα, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών αυτών των υλικών, της μεταβολής που επιφέρουν στο φυσικό έδαφος με το οποίο αναμιγνύονται καθώς και του τελικώς διαμορφούμενου περιβάλλοντος που δημιουργείται γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης, της μείωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της

αντίστασης γείωσης του συστήματος που επιφέρει η τοποθέτηση αυτών των υλικών.

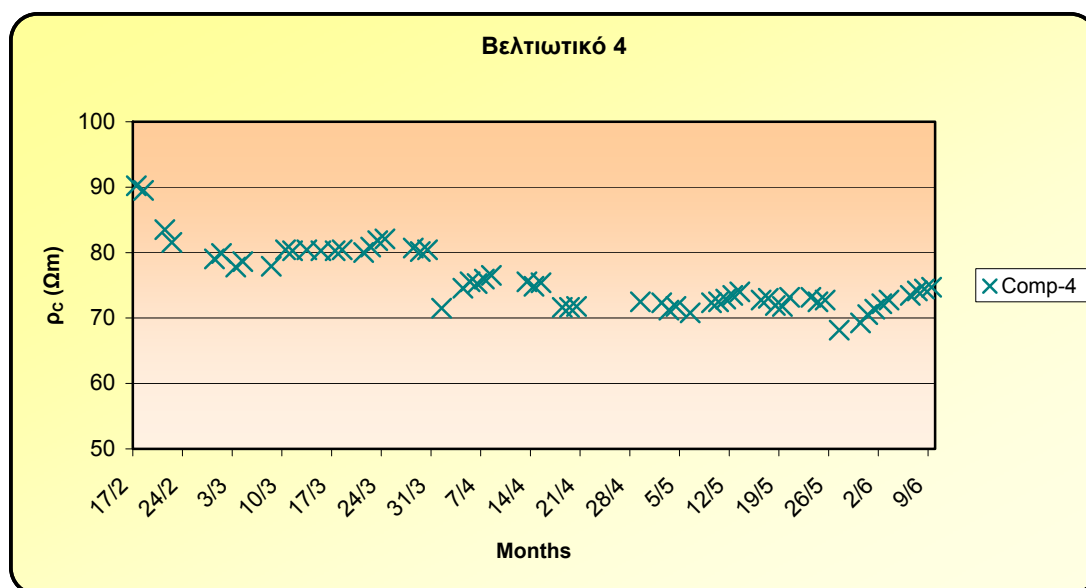
Επίσης ερευνάται, η συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών ως προς το χρόνο, η ικανότητα συγκράτησης της υγρασίας του εδάφους, που είναι και ο κύριος ρόλος τους, η ταχύτητα και το είδος μεταβολής της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση με την ποσότητα του νερού που προσλαμβάνεται από το έδαφος, στοιχείο που χαρακτηρίζει το κάθε υλικό κατά πόσο υδρόφιλο είναι. Τέλος, μελετάται η αναγκαιότητα χρήσης αυτών των υλικών με βάση την ποσοστιαία μείωση της ειδικής αντίστασης που επιτυγχάνει το καθένα από αυτά.



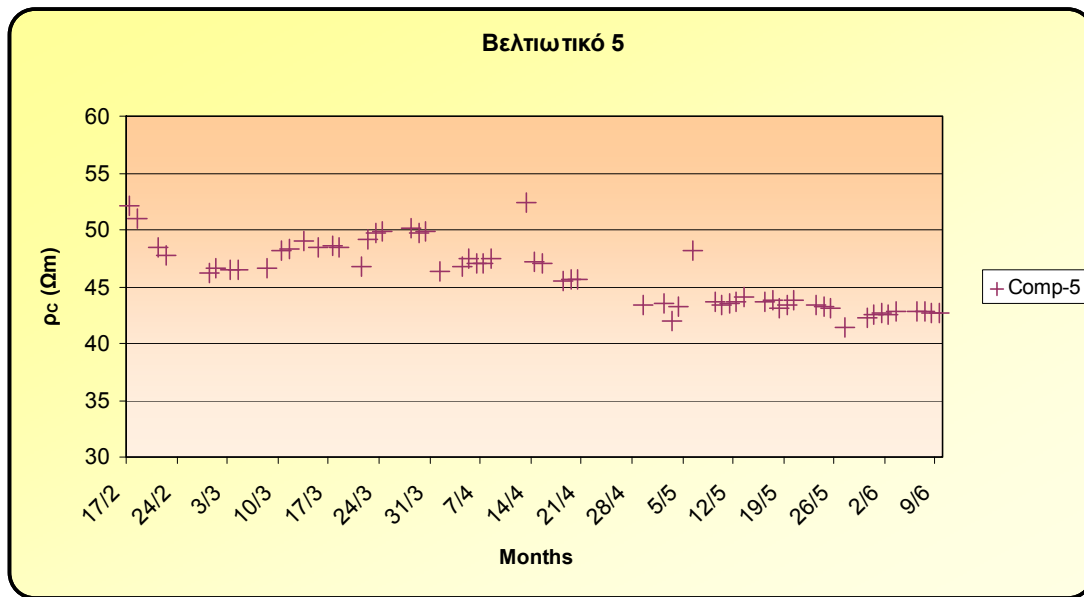
Σχήμα 5.14: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 2 με το χρόνο.



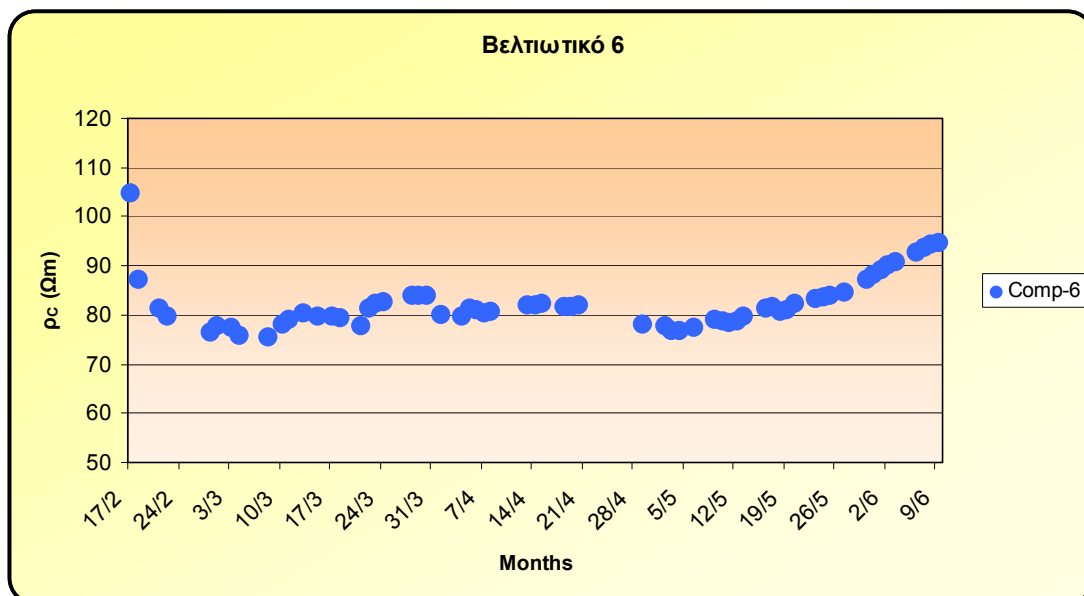
Σχήμα 5.15: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 3 με το χρόνο.



Σχήμα 5.16: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 4 με το χρόνο.

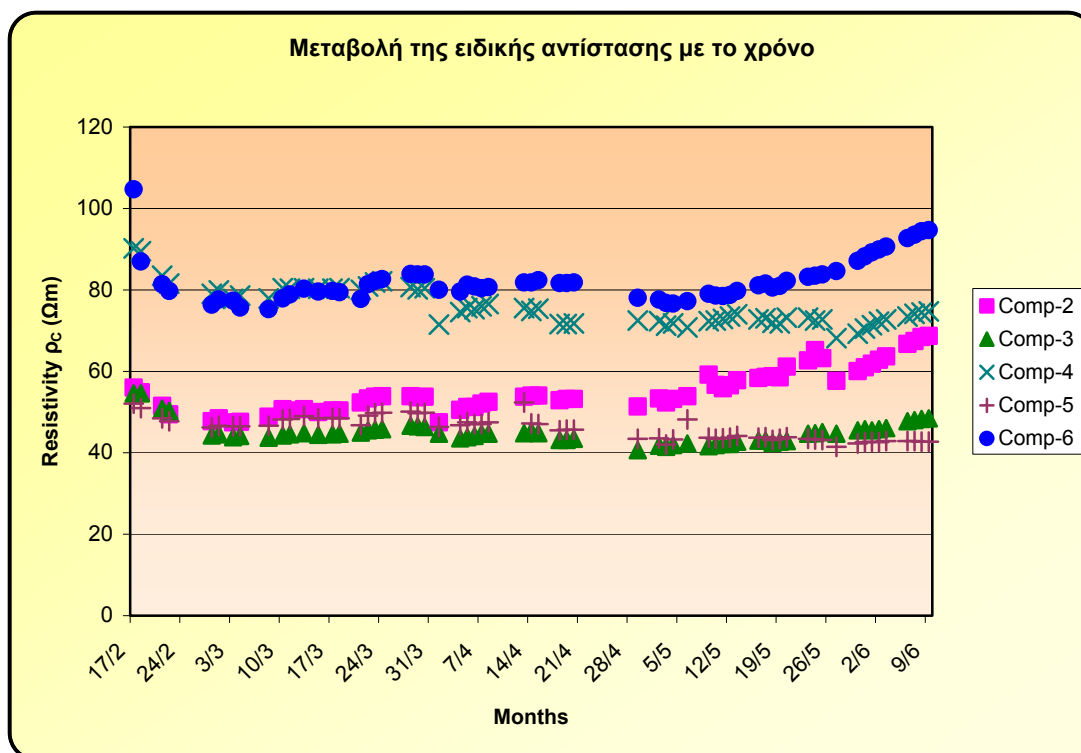


Σχήμα 5.17: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 5 με το χρόνο.



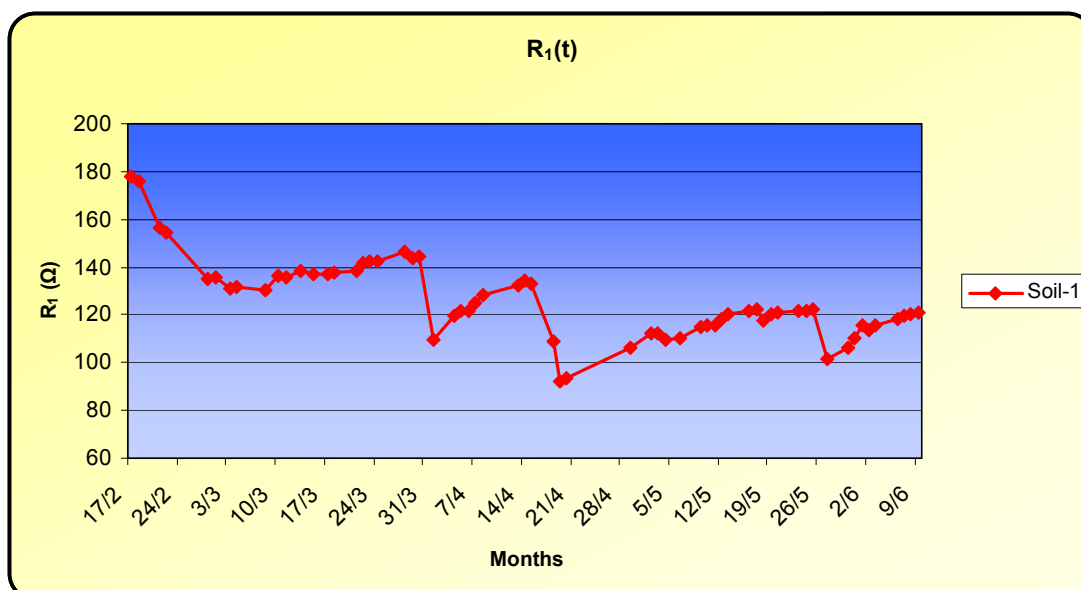
Σχήμα 5.18: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης του βελτιωτικού 6 με το χρόνο.

Το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών σε συνάρτηση με το χρόνο έχει ως εξής:

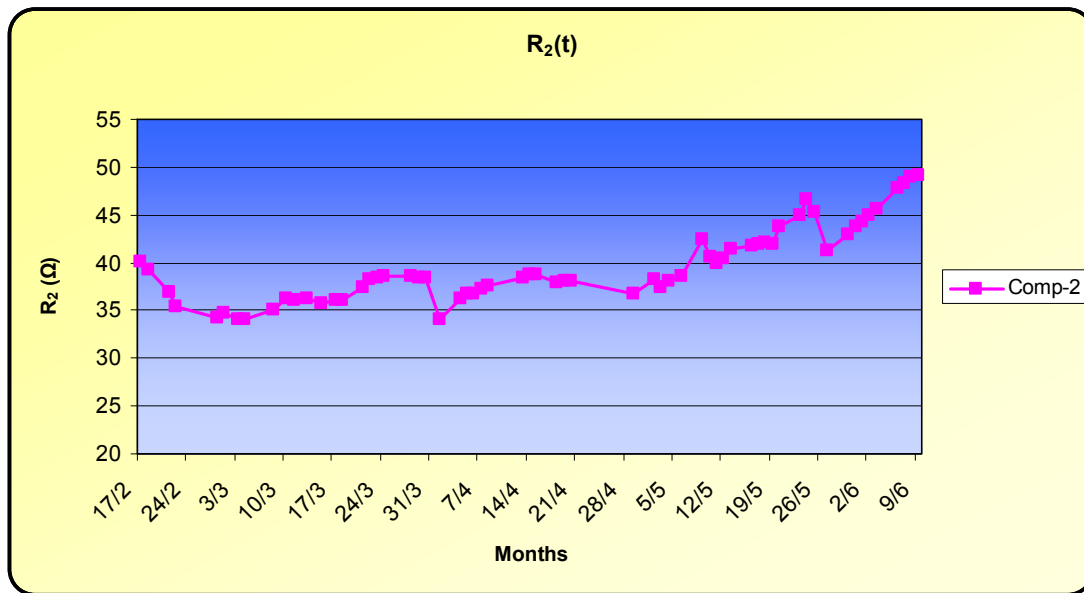


Σχήμα 5.19: Μεταβολή της σύνθετης ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών με το χρόνο.

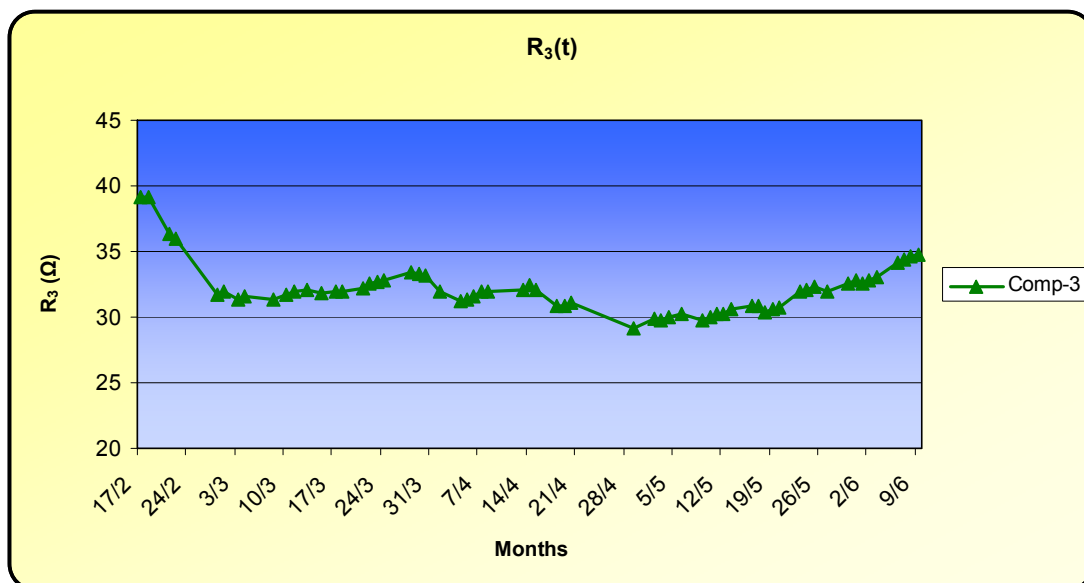
Ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων G_1 , G_2 , G_3 , G_4 , G_5 και G_6 , τα οποία αποτελούν το εγκατεστημένο σύστημα γείωσης, σε συνάρτηση με το χρόνο και τη βροχόπτωση.



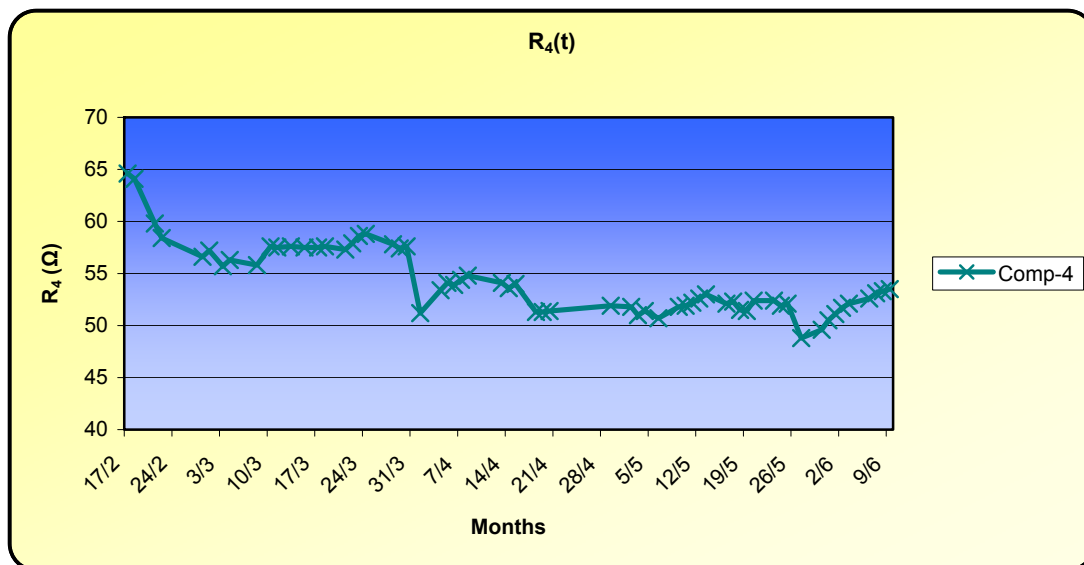
Σχήμα 5.20: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 με το χρόνο.



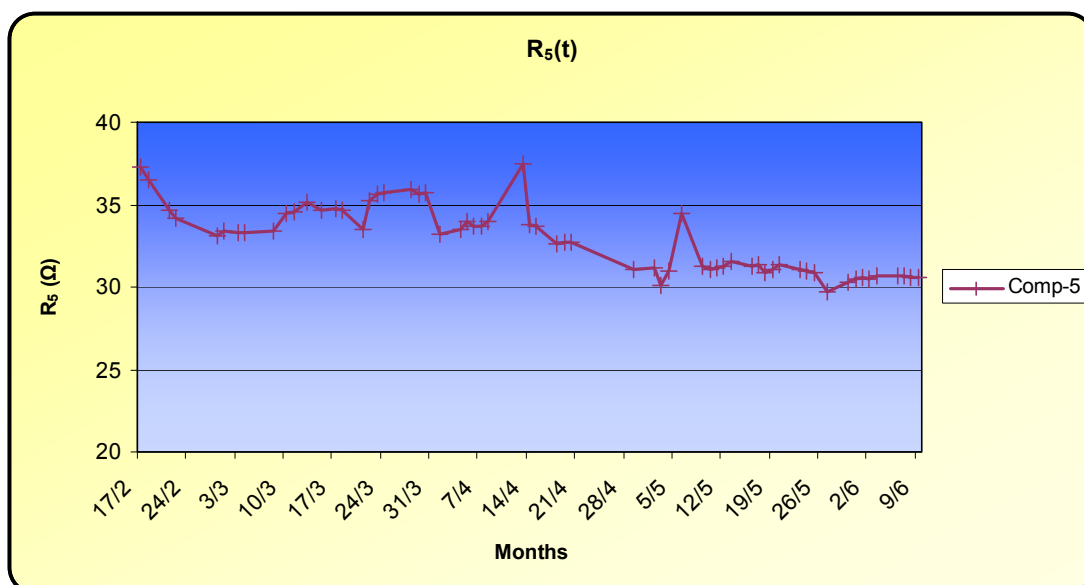
Σχήμα 5.21: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_2 με το χρόνο.



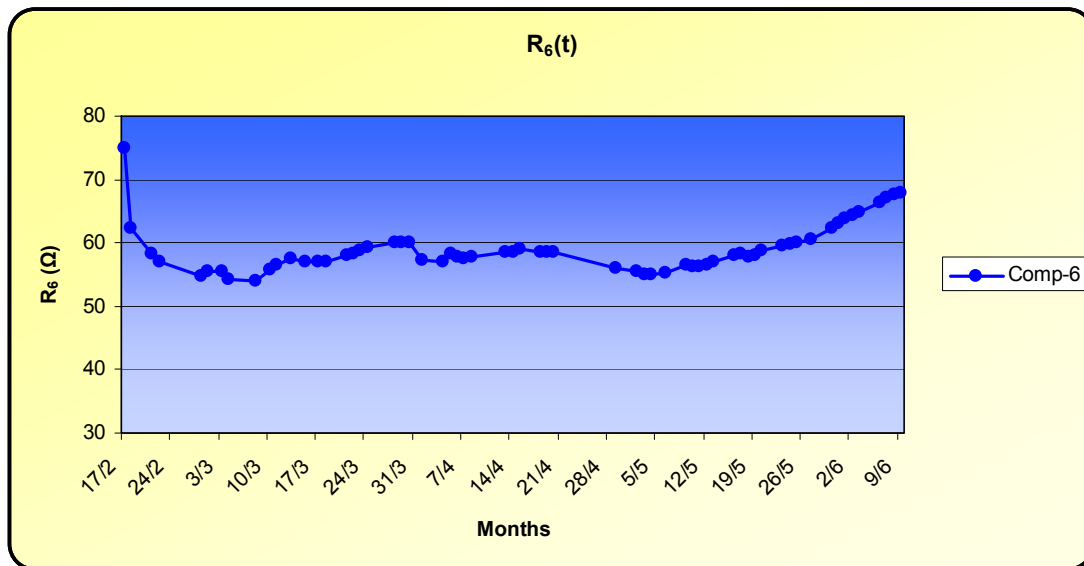
Σχήμα 5.22: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_3 με το χρόνο.



Σχήμα 5.23: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_4 με το χρόνο.

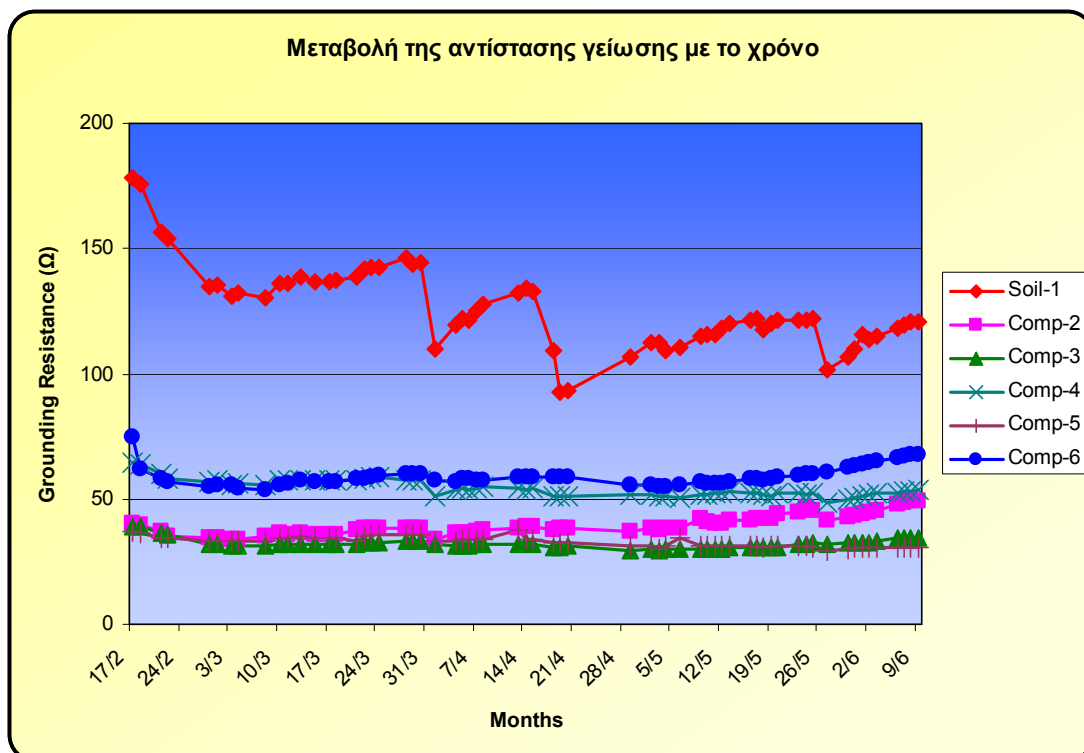


Σχήμα 5.24: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_5 με το χρόνο.



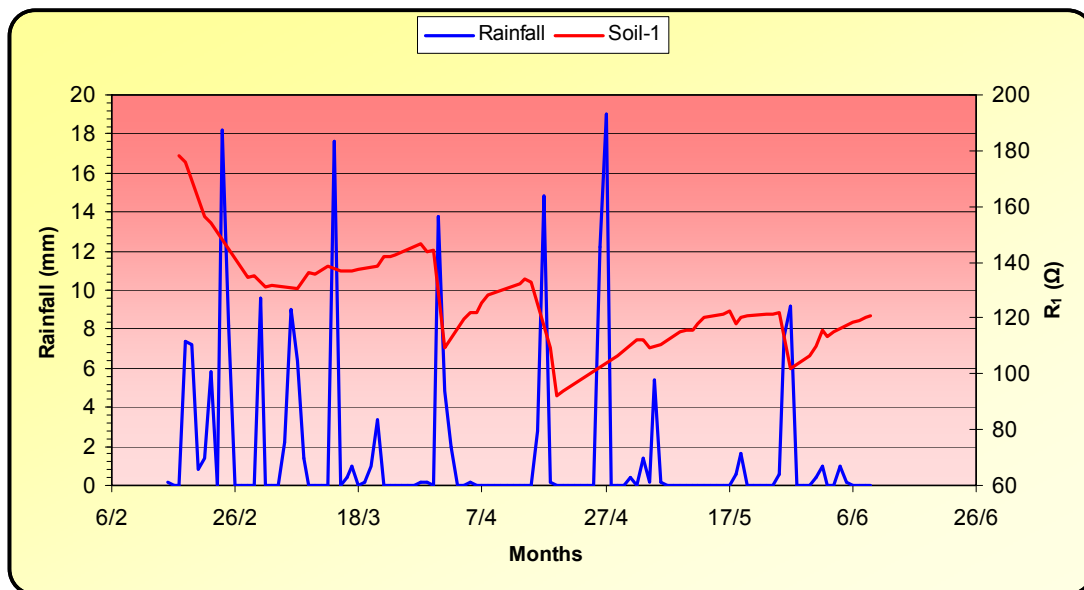
Σχήμα 5.25: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_6 με το χρόνο.

Το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης γείωσης των έξι (6) ηλεκτροδίων είναι το ακόλουθο:

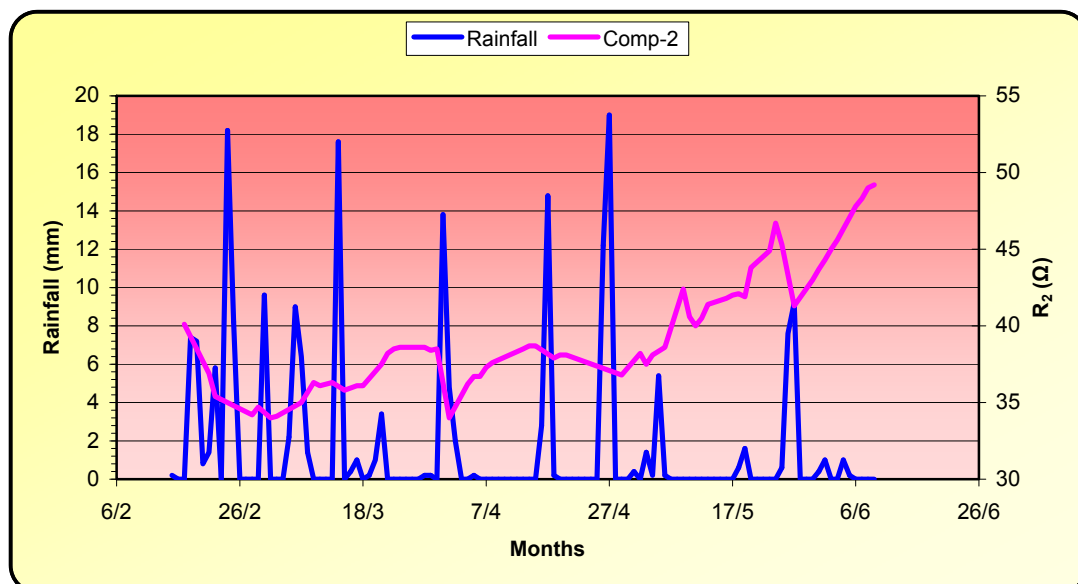


Σχήμα 5.26: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων του συστήματος γείωσης με το χρόνο.

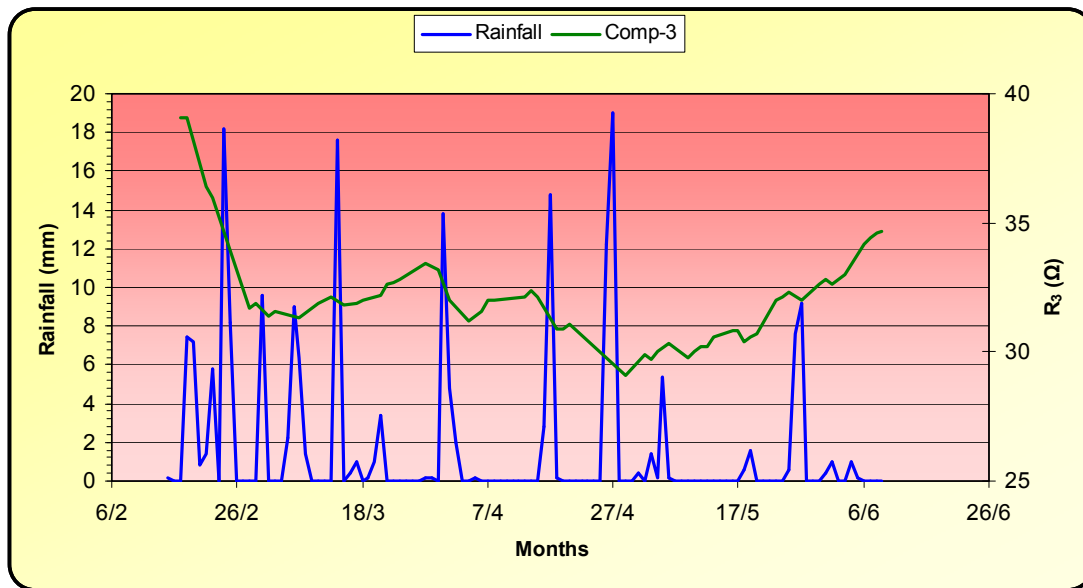
Στη συνέχεια αποτυπώνονται τα διαγράμματα μεταβολής της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων του συστήματος σε συνάρτηση με τη βροχόπτωση:



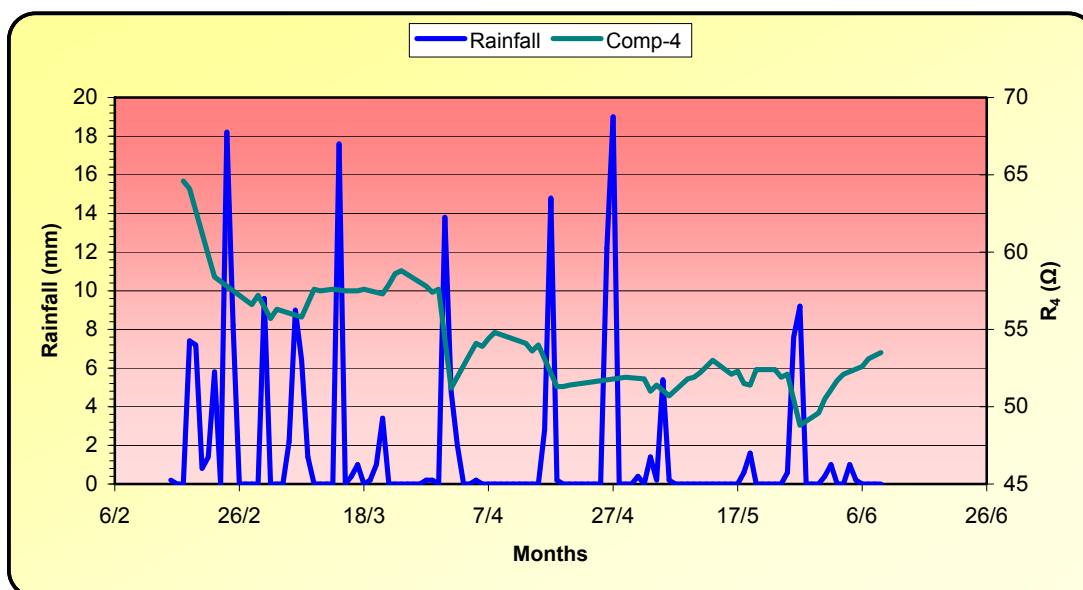
Σχήμα 5.27: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 με τη βροχόπτωση.



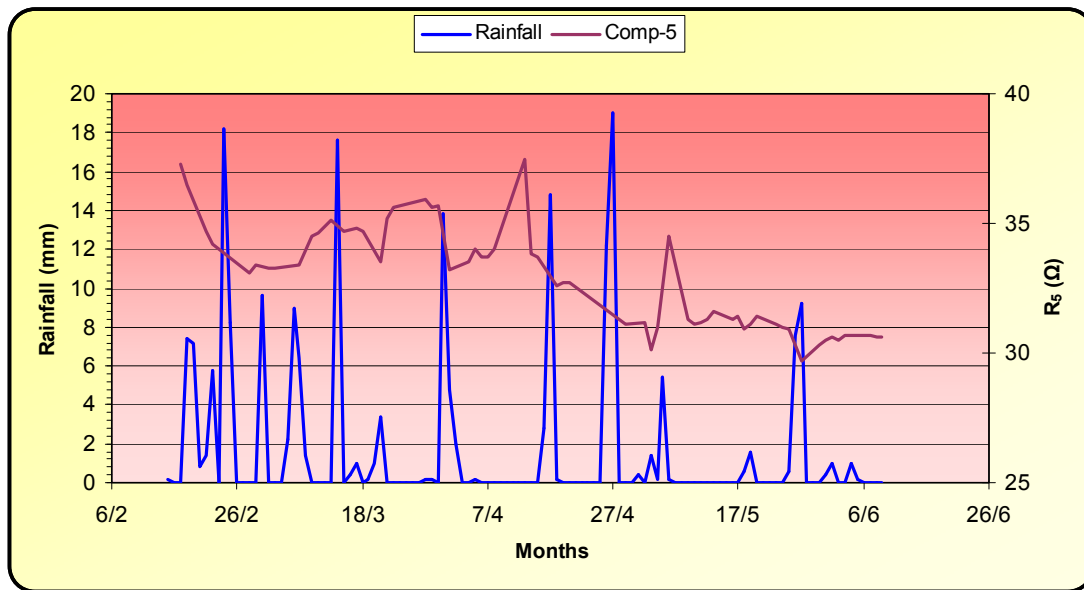
Σχήμα 5.28: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_2 με τη βροχόπτωση.



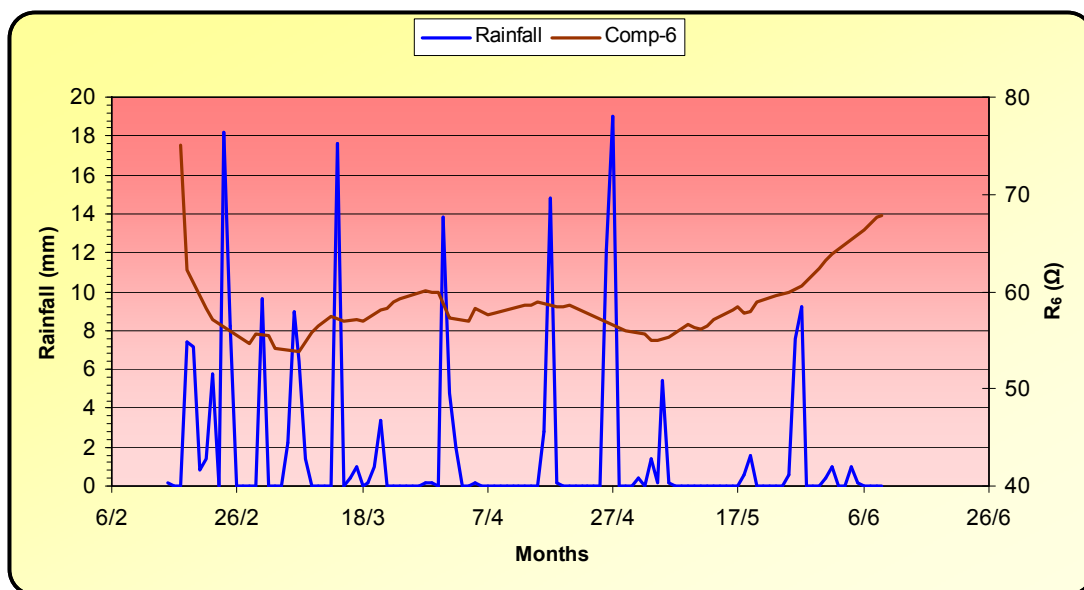
Σχήμα 5.29: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G₃ με τη βροχόπτωση.



Σχήμα 5.30: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G₄ με τη βροχόπτωση.

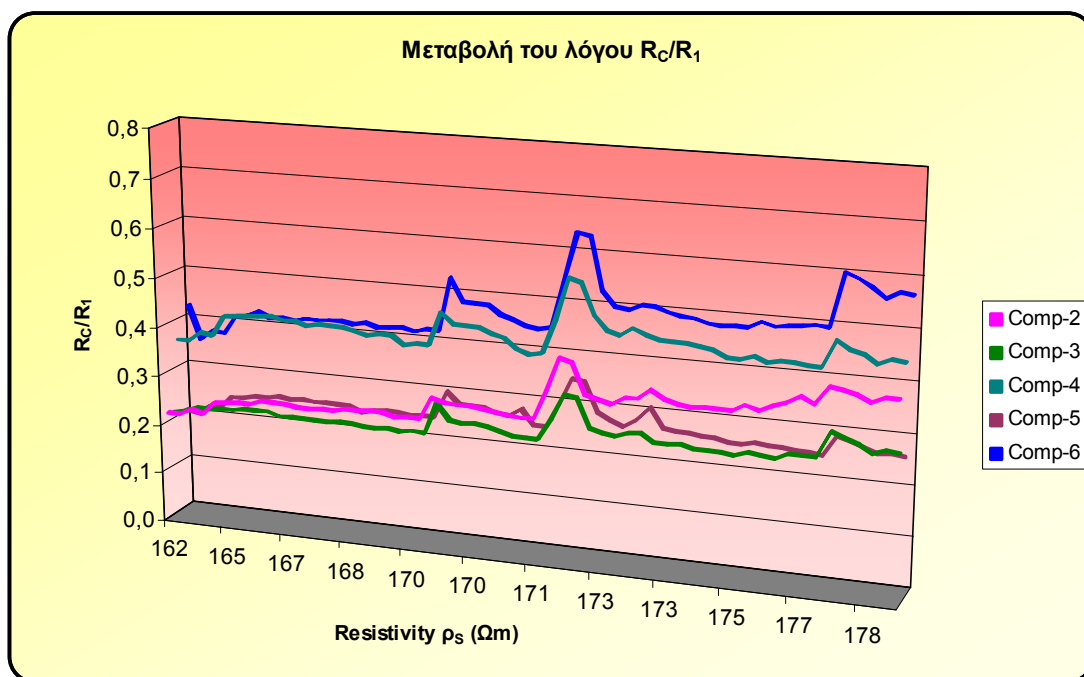


Σχήμα 5.31: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_5 με τη βροχόπτωση.



Σχήμα 5.32: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου G_6 με τη βροχόπτωση.

Τέλος, παρατίθεται το διάγραμμα $R_C/R_I=f(\rho_S)$, όπου R_C η αντίσταση γείωσης του εκάστοτε ηλεκτροδίου τοποθετημένου σε βελτιωτικό υλικό, R_I η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου που είναι τοποθετημένο απευθείας στο φυσικό έδαφος και ρ_S η ειδική αντίσταση του εδάφους για $a=2m$.



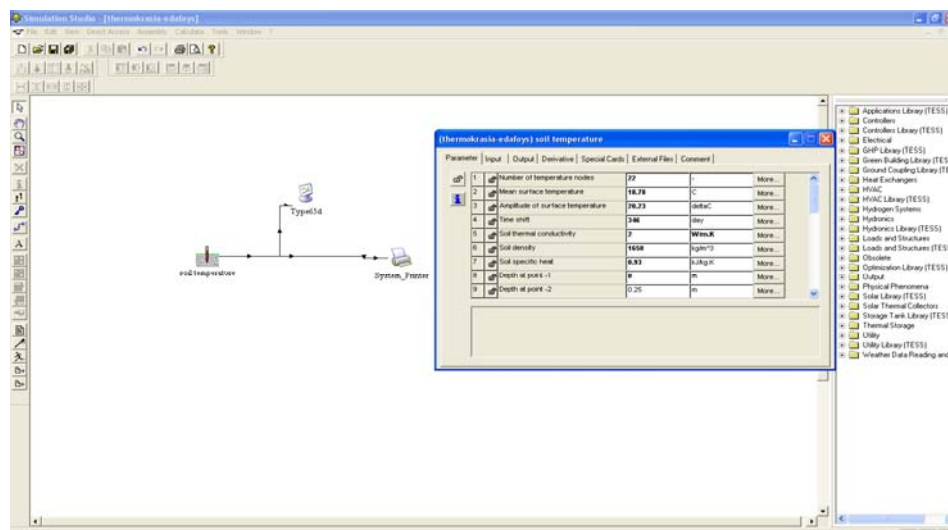
Σχήμα 5.33: Σχέση αντίστασης γείωσης - ειδικής αντίστασης εδάφους.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι έγινε προσπάθεια διερεύνησης της μεταβολής της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση και με τη θερμοκρασία εδάφους. Ωστόσο, λόγω έλλειψης κατάλληλου αισθητήρα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους *in situ*, επιχειρήθηκε η προσομοίωση του συγκεκριμένου μοντέλου εδάφους του πειράματος με κατάλληλο λογισμικό, με σκοπό τον προσδιορισμό πιθανών τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους σε συγκεκριμένα βάθη και για όλες τις ημέρες του έτους. Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το Trnsys 16 (Σχήμα 5.34) και η εξίσωση, με βάση την οποία γίνεται ο θεωρητικός υπολογισμός της θερμοκρασίας εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος και το χρόνο, είναι η εξίσωση του Kusuda [4]:

$$T(z,t) = T_{mean} - T_{amp} \cdot e^{-z \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{365} \right)^{0.5}} \cdot \cos \left[\left(\frac{2\pi}{365} \right) \cdot \left(t_{now} - t_{shift} - \frac{z}{2} \cdot \left(\frac{365\alpha}{\pi} \right)^{0.5} \right) \right] \quad (5.1)$$

Όπου, T: η θερμοκρασία του υπεδάφους, T_{mean} : η μέση ετήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, T_{amp} : το εύρος της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας στη διάρκεια του έτους), z: το βάθος κάτω από την επιφάνεια, α: η θερμική διαχυτότητα του εδαφικού σχηματισμού, t: ο χρόνος και t_{shift} : η χρονική στιγμή του έτους με την ελάχιστη ατμοσφαιρική θερμοκρασία.

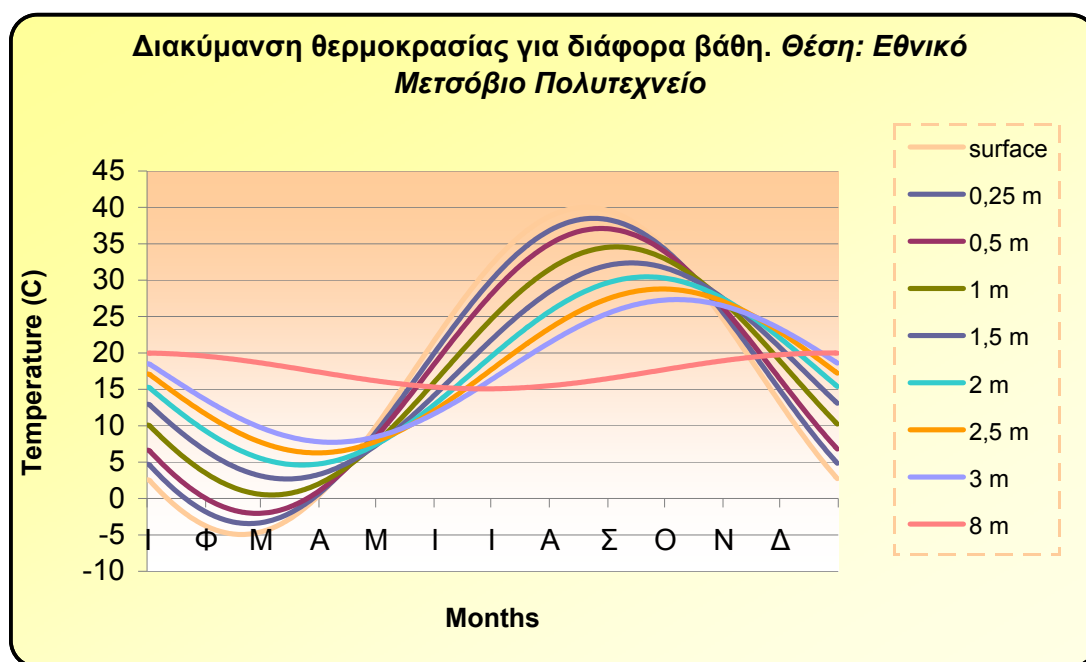
Η εφαρμογή της εξίσωσης Kusuda, προϋποθέτει τη γνώση των μετεωρολογικών στοιχείων της περιοχής (μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία ατμόσφαιρας και ακριβή χρόνο (ημέρα εμφάνισης των τιμών αυτών), καθώς και τη γνώση της θερμικής διαχυτότητας του υπεδάφους α ($\alpha = k/\rho_d \cdot c$), όπου k η θερμική αγωγιμότητα [$W/m \cdot K$] ρ_d η ξηρή πυκνότητα [kg/m^3] και c η ειδική θερμότητα του υπεδάφους [$kJ/kg \cdot K$].



Σχήμα 5.34: Λογισμικό προσομοίωσης της θερμοκρασίας υπεδάφους Trnsys 16.

Η εξίσωση Kusuda όμως, στηρίζεται στη θεώρηση ότι η θερμική διαχυτότητα (και άρα η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους), παραμένει σταθερή με το βάθος, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας σταθεροποιείται στη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη φύση, οι υπεδαφικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν χωρικά μεταβαλλόμενες τιμές θερμικών ιδιοτήτων, λόγω μεταβολών στην υγρασία, την πυκνότητα, την ορυκτολογική σύσταση κ.α. Αυτές οι μεταβολές οδηγούν και σε διαφορετικές κατανομές της θερμοκρασίας τόσο στο βάθος όσο και στην οριζόντια εξάπλωση ενός στρώματος υπεδάφους. Επιπλέον η θερμοκρασία του εδάφους, δε σταθεροποιείται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αλλά πέραν ενός βάθους, αυξάνει σταθερά σύμφωνα με τη γεωθερμική βαθμίδα της περιοχής. Το γεγονός λοιπόν αυτό, σε συνδυασμό και με την έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων καθ' όλο το 2011, οπότε και χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το 2008, που ήταν παρόμοιο μετεωρολογικά με το 2011, οδήγησε σε εκτιμήσεις της εδαφικής θερμοκρασίας με σημαντικά σφάλματα στην κατανομή των θερμοκρασιών κατά βάθος.

Ωστόσο, για λόγους πληρότητας, παρατίθενται ακολούθως τα διαγράμματα των θερμοκρασιών που προέκυψαν από την προσομοίωση, των οποίων δυστυχώς οι τιμές δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης. Μελλοντικές μετρήσεις της εδαφικής θερμοκρασίας, *in situ*, με κατάλληλους αισθητήρες μπορούν να δώσουν λύση στα προβλήματα που εμφανίστηκαν στο παρόν εγχείρημα.



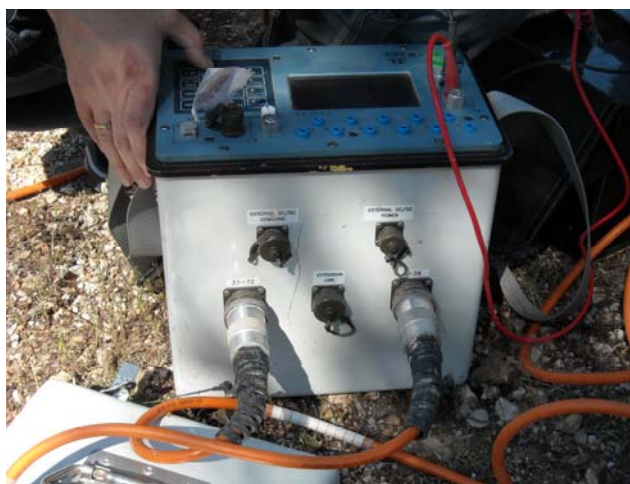
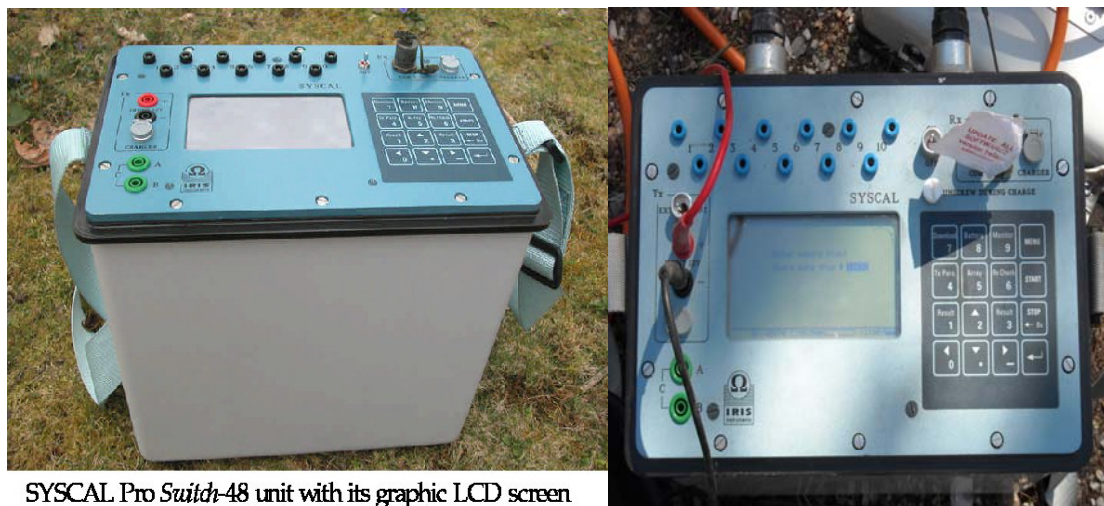
Σχήμα 5.35: Διακύμανση της θερμοκρασίας εδάφους για διάφορα βάθη.

Μέθοδος της ηλεκτροτομογραφίας

Τελευταίο πειραματικό κομμάτι της παρούσας εργασίας, αποτελεί η εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροτομογραφίας, στο χώρο εγκατάστασης των ηλεκτροδίων, με την οποία επιχειρείται μια λεπτομερής σάρωση του υπεδάφους, από τα αποτελέσματα της οποίας θα προκύψει μια αναλυτική εικόνα για την κατανομή των τιμών της ειδικής αντίστασης ανά στρώμα και βάθος. Είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο Wenner, από την οποία μόνο μια γενική εικόνα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης μπορεί να αποκομιστεί και μάλιστα σε μικρά βάθη.

Αυξάνοντας την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, η σάρωση πραγματοποιείται σε ολοένα και μεγαλύτερα βάθη και μετακινώντας όλη τη

διάταξη των βοηθητικών ηλεκτροδίων, κατά μήκος ενός άξονα, είναι δυνατή και μια πλευρική σάρωση. Περίπλοκα όργανα μέτρησης, όπως αυτό της Εικόνας 5.12, μπορούν να προγραμματιστούν με σκοπό να διεξάγουν πολλαπλές μετρήσεις, με τη βοήθεια πολυπολικών καλωδίων, τα οποία με τη σειρά τους καταλήγουν σε ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε ίσες και σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους.

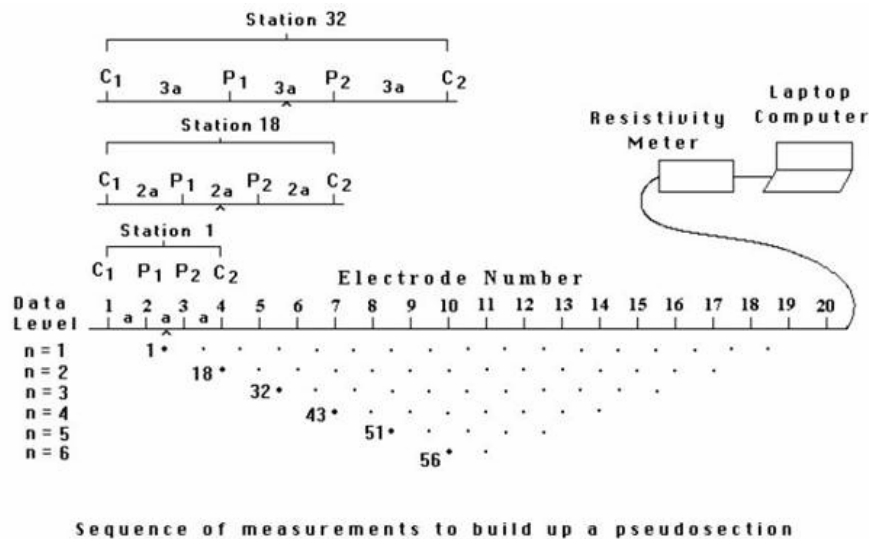


Το αποτέλεσμα είναι, εκατοντάδες μετρήσεις σαρώνουν εξονυχιστικά το έδαφος, κάθετα και πλάγια (Σχήμα 5.36). Το υπέδαφος παρουσιάζεται ως ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο με μπλοκ, εκ των οποίων το καθένα έχει μια ορισμένη τιμή ειδικής αντίστασης (Σχήμα 5.37). Οι μετρήσεις και η ερμηνεία αυτών, δίνουν το τελικό γεωηλεκτρικό μοντέλο, το οποίο αποτυπώνει το υπέδαφος με τις τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασής του και όχι της φαινόμενης ειδικής

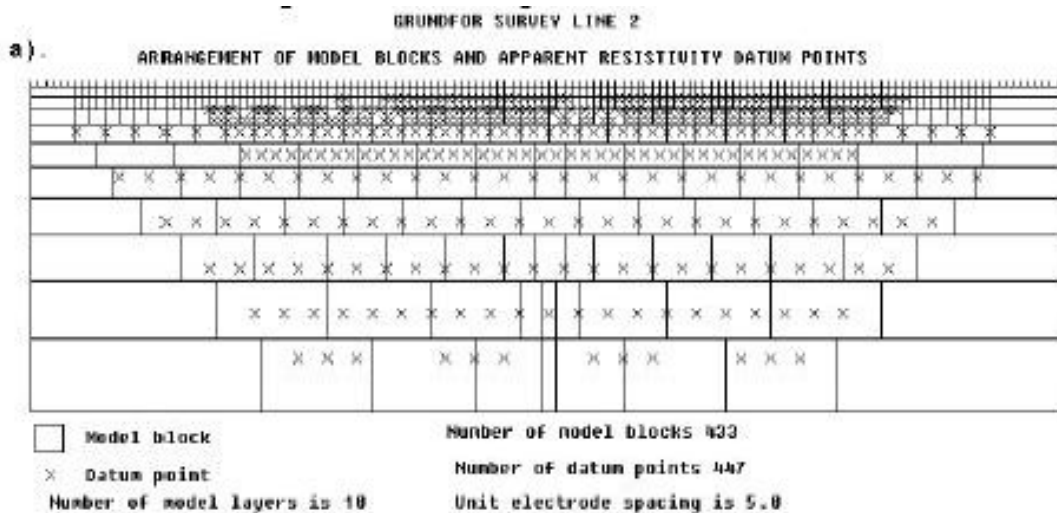
αντίστασης, που δίνει η μέθοδος Wenner, μάλιστα δε με πολύ μεγάλη ακρίβεια (Σχήμα 5.38).

Ειδικότερα, στην πρώτη από τις τρεις γραφικές απεικονίσεις (Σχήμα 5.38), δίνεται μια αίσθηση της κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης κατά βάθος, όπως ακριβώς λαμβάνονται οι τιμές από το όργανο μέτρησης. Κατόπιν χρησιμοποιείται το μοντέλο εδάφους (Σχήμα 5.37), στο οποίο το υπέδαφος χωρίζεται σε μπλοκ. Αυτά τα μπλοκ είναι διαφορετικού πάχους ανά στρώμα, καθώς η διακριτική ικανότητα γίνεται μεγαλύτερη κατά βάθος, έτσι ώστε αυτά να είναι ισοδύναμα στη μέθοδο αντιστροφής. Στη συνέχεια, σε κάθε μπλοκ αποδίδεται αρχικά μια τιμή πραγματικής ειδικής αντίστασης, η οποία υπολογίζεται από το λογισμικό πακέτο. Με βάση αυτές τις τιμές της πραγματικής ρ , φτιάχνονται τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης με κάποιο αλγόριθμο του λογισμικού, η οποία φαινόμενη ρ αποτυπώνεται στη δεύτερη γραφική απεικόνιση στο Σχήμα 5.38. Κατόπιν, συγκρίνονται τα δύο γραφήματα της μετρηθείσας φαινόμενης ρ και της υπολογισθείσας φαινόμενης ρ , τα οποία θα πρέπει σχεδόν να ταυτίζονται. Αν διαφέρουν, τότε επανασχεδιάζεται το μοντέλο εδάφους στο Σχήμα 5.37, κατά τέτοιο τρόπο ώστε, το μοντέλο της φαινόμενης ρ που θα ξανασχεδιαστεί να μοιάζει αρκετά με το αντίστοιχο της μετρηθείσας. Ο βαθμός σύγκλισης της επαναληπτικής μεθόδου είναι ίσος με το “rms error”, το οποίο είναι συνήθως γύρω στο 5%.

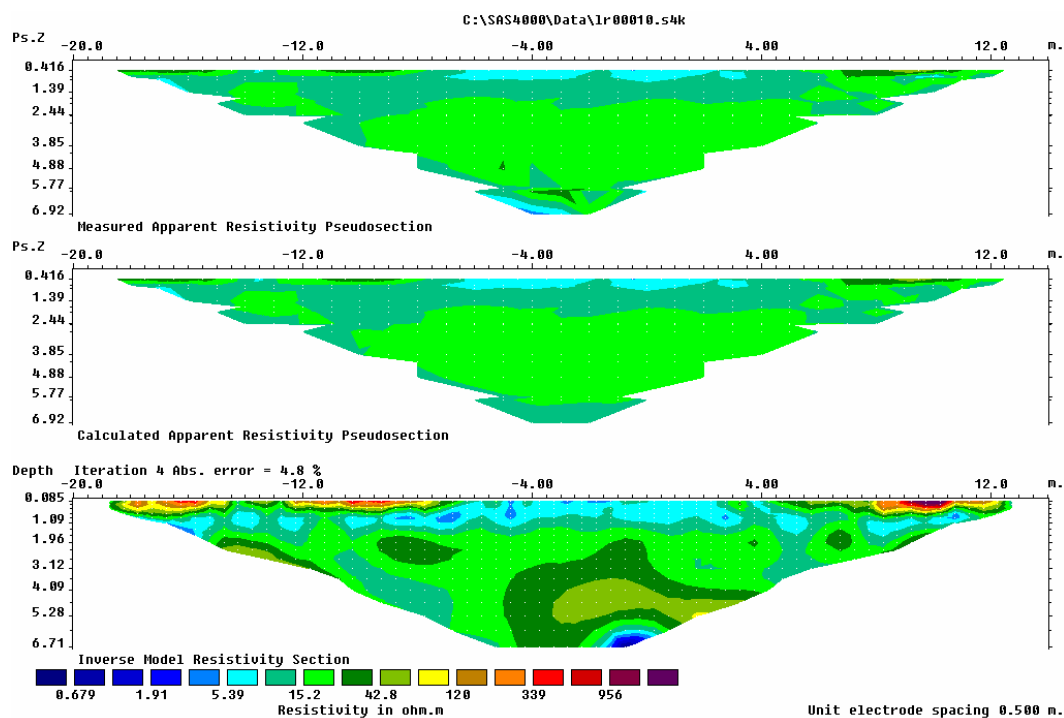
Αν λοιπόν οι δύο γραφικές απεικονίσεις μοιάζουν αρκετά στη μορφή και τις τιμές, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις, τότε πια αποτυπώνεται η κατανομή της πραγματικής ειδικής αντίστασης στο χώρο του υπεδάφους όπου γίνεται η μέτρηση (Σχήμα 5.38, τρίτο γράφημα).



Σχήμα 5.36: Διάταξη ηλεκτροδίων και ακολουθία μετρήσεων σύμφωνα με τη μέθοδο της ηλεκτροτομογραφίας.



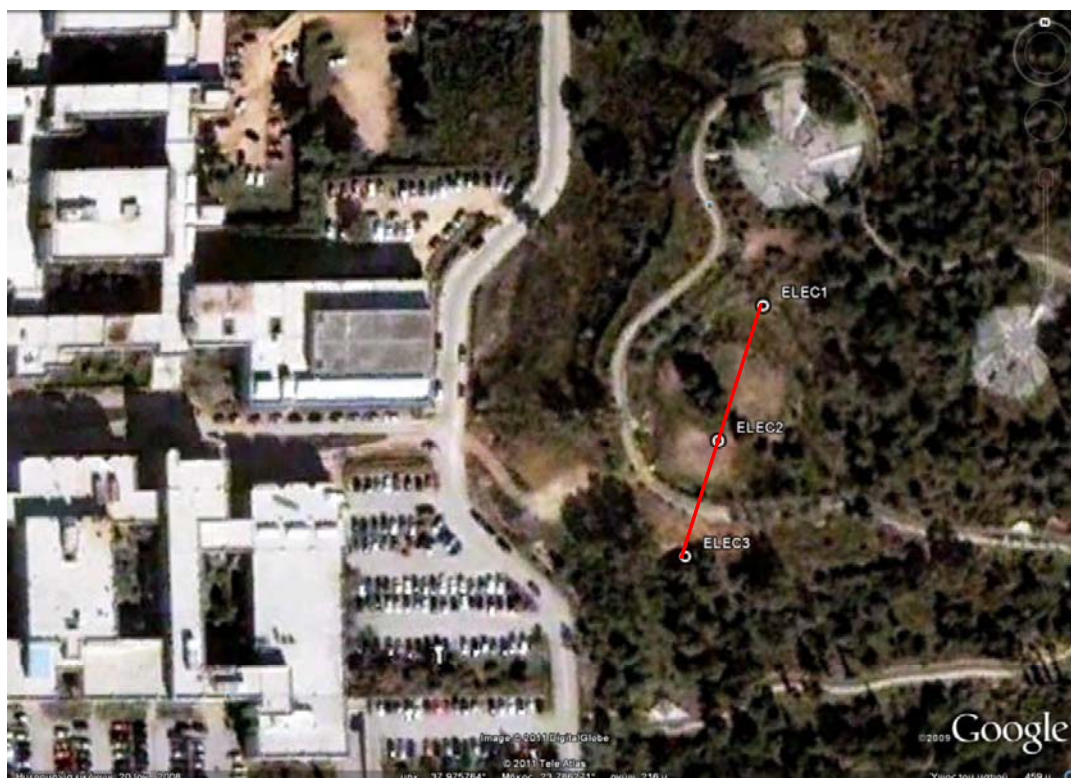
Σχήμα 5.37: Διάταξη των μπλοκ και τιμές πραγματικής ειδικής αντίστασης σε αυτά.



Σχήμα 5.38: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ηλεκτροτομογραφίας.

Στο συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε τομογραφία, σε συνεργασία με το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, με σκοπό τον αναλυτικό προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου με αντίστοιχα της κλασικής μεθόδου Wenner.

Η διάταξη των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Schlumberger-Wenner. Τοποθετήθηκαν 72 ηλεκτρόδια μήκους 0,5m το καθένα, σε απόσταση 1m το ένα από το άλλο, κατά μήκος του ίδιου άξονα, στον οποίο ήδη γίνονται μετρήσεις της ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο Wenner. Γίνεται κατανοητό ότι, η διεξαγωγή της μέτρησης σε ένα μόνο άξονα οδηγεί σε μια ψευδο-τρισδιάστατη απεικόνιση του υπεδάφους μόνο κατά έναν άξονα και κατά βάθος. Για την πραγματική τρισδιάστατη απεικόνιση θα πρέπει να ληφθούν μετρήσεις, σε τουλάχιστον 2-3 κάθετους προς τον αρχικό άξονες. Η θέση της ηλεκτροτομογραφίας φαίνεται στην Εικόνα 5.13 του Google Map. Έγινε χρήση του οργάνου Syscal Pro-Switch 48 (Εικόνα 5.12) σε συνδυασμό με πολυπολικό καλώδιο, για τη λήψη ταυτόχρονων πολλαπλών μετρήσεων σε διάφορους συνδυασμούς.



Εικόνα 5.13: Θέση πραγματοποίησης της ηλεκτροτομογραφίας.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα (4) καλώδια, που περιελάμβαναν 18 εξόδους το καθένα και τα οποία συνδέθηκαν ανά δύο με κατάλληλες μούφες. Στη συνέχεια, τα δύο (2) καλώδια που προέκυψαν από τη σύνδεση, τοποθετήθηκαν σε αντιδιαμετρικές θέσεις ως προς το κέντρο της περιοχής που επρόκειτο να μετρηθεί, οπότε συνολικά 72 επιμέρους καλώδια μέτρησης τα οποία συνδέονται στα 72 εγκατεστημένα ηλεκτρόδια και καταλήγουν στο όργανο, σε 36 pins από τη μια πλευρά και 36 από την άλλη (Εικόνα 5.12). Κάθε φορά χρησιμοποιείται ένα δίπολο έγχυσης ρεύματος, με σταθερή ένταση που φθάνει τα $2,5A$. Αυτό που επιλέγεται και ρυθμίζεται στο όργανο είναι η τάση, της οποίας η τιμή μπορεί να φθάσει και τα $1000V$. Σημειώνεται ότι η ισχύς της συσκευής είναι $250W$. Με την έγχυση του ρεύματος λαμβάνονται μετρήσεις της τάσης U , από τα ηλεκτρόδια τάσης.

Όλος ο εξοπλισμός μεταφέρθηκε στο χώρο του πειράματος με βαν, λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους του. Η εγκατάσταση των ηλεκτροδίων διήρκεσε περίπου 45', ενώ οι μετρήσεις περίπου 2 ώρες. Στο χρόνο αυτό θα πρέπει επίσης να προστεθεί ένας προέλεγχος, τον οποίο κάνει το ίδιο το όργανο μέτρησης για να ελέγξει την ορθότητα και τη συνέχεια των συνδέσεων στα ηλεκτρόδια, από

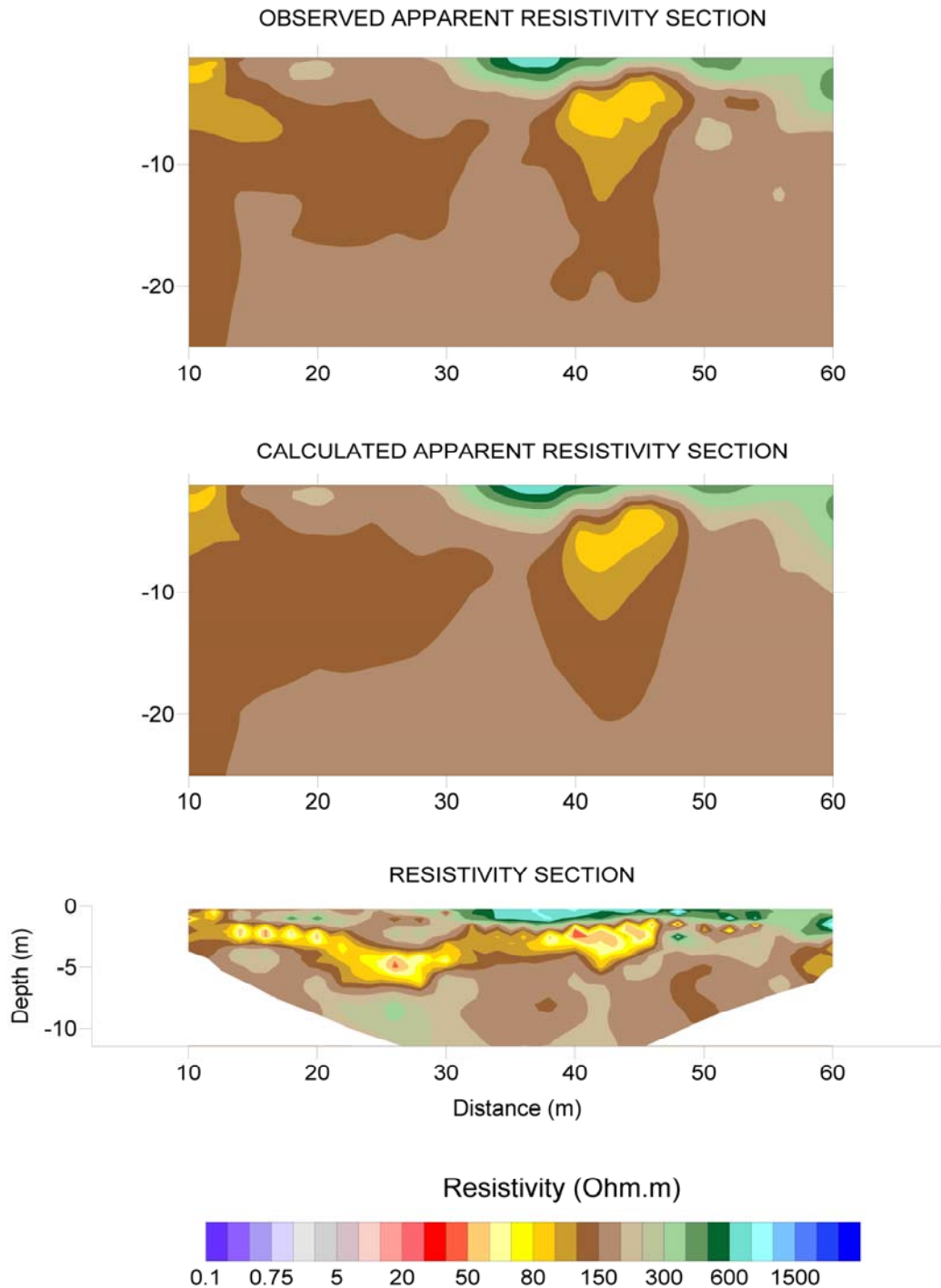
τον οποίο προέκυψαν κάποια σφάλματα και δαπανήθηκε επιπλέον μισή ώρα για την αποκατάστασή τους.

Η διάταξη των ηλεκτροδίων και το πολυπολικό καλώδιο φαίνονται στην Εικόνα 5.14.



Εικόνα 5.14: Ηλεκτρόδια και σύνδεση πολυκάναλου καλωδίου για τη μέθοδο της τομογραφίας.

Ελήφθησαν συνολικά 1224 μετρήσεις, εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν τελικά οι 922 για τη σχεδίαση των γραφικών αποτυπώσεων, αφού κάποιες τιμές παρουσίαζαν τεράστια και αδικαιολόγητη απόκλιση από όλο το υπόλοιπο πλήθος. Η γραφική απεικόνιση της ηλεκτροτομογραφίας, η οποία διεξήχθη στο χώρο του πειράματος στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, παρατίθεται στο Σχήμα 5.39:



Σχήμα 5.39: Γράφημα ηλεκτροτομογραφίας στο χώρο του πειράματος.

Από τα αποτελέσματα του τρίτου γραφήματος στο Σχήμα 5.39 φαίνεται ότι υπάρχει ένα επιφανειακό στρώμα το οποίο, από το μέσο του προφίλ και προς νότια κατεύθυνση, εμφανίζει πολύ υψηλή ειδική αντίσταση, πιθανόν διότι συνίσταται από πυκνή κροκαλοπαγή δομή. Αντίθετα, προς την άλλη πλευρά (προς βόρεια) το εν λόγω στρώμα εμφανίζει μια πιο χαλαρή συμπεριφορά. Στο διάστημα μεταξύ 10m και 47m και σε βάθος 1–6m από την επιφάνεια,

ανιχνεύεται αργιλικό στρώμα με κάπως στρογγυλεμένες πέτρες, μέσου πάχους 2m και ειδικής αντίστασης γύρω στα 80Ωm. Το τελευταίο σε βάθος στρώμα είναι ένα συνεκτικά κροκαλολατιποπαγές στρώμα υπεδάφους, που περιλαμβάνει καστανόχρωμες χερσαίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις, δηλαδή συνεκτικούς αργιλοπηλούς με διάσπαρτες κροκάλες και λατίπες. Η δε ειδική αντίσταση που παρουσιάζει το εν λόγω στρώμα, είναι της τάξης των 150Ωm.

Βιβλιογραφία

- [1] Fragogiannis Georgios, Papatheodorou Nikolaos and Prof. Stamataki Sofia, “Evaluation of Thermal Performance of Ground - Source Energy Systems. A Geophysics Supported Approach”, World Renewable Energy Congress (WRECX), 2008.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials
- [3] Galván Arturo D., Gaona Enrique E, Pretelin Gilberto G., “Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods”, X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009.
- [4] Kusuda T. and Achenbach P. R., "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States", ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part I, No. 1914, pp. 61-74 (1965).

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ

Imagination is more important than knowledge.

Albert Einstein

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να συνοψισθεί η διαδικασία προσέγγισης των υλικών και συστημάτων γείωσης που μελετήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, καθώς και να επισημανθούν τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Η εργασία αυτή κινήθηκε κυρίως σε πειραματικό επίπεδο, με σκοπό τη λήψη πραγματικών μετρήσεων *in situ* και την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των συνθηκών που επικρατούν στις πραγματικές κατασκευές των συστημάτων γείωσης. Στόχος είναι να διερευνηθούν, οι ιδιότητες του εδάφους ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η επίδραση την οποία έχουν αυτά τα μεγέθη στη διαμορφούμενη αντίσταση γείωσης σε συστήματα γείωσης που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα, καθώς και η μεταβολή της συμπεριφοράς του εδάφους με το πέρασμα του χρόνου και την αυξομείωση της περιεχόμενης σε αυτό υγρασίας. Επίσης, παράλληλα με τη μελέτη του συγκεκριμένου τύπου εδάφους, διερευνώνται κάποιοι τύποι χημικών βελτιωτικών υλικών γείωσης, οι οποίοι εφαρμόζονται ευρύτατα στις κατασκευές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και υποσταθμών Υ.Τ., μελετάται η συμπεριφορά τους ως προς το χρόνο και τη βροχόπτωση, όταν συνδυάζονται με το συγκεκριμένο τύπο εδάφους και επιχειρείται τελικά μια εκτίμηση της σκοπιμότητας χρήσης αυτών των υλικών στα συστήματα γείωσης.

Επίσης, η ειδική αντίσταση, σε συνδυασμό με τον τρόπο σχεδίασης και εγκατάστασης του συστήματος γείωσης, καθορίζει την τιμή της αντίστασης γείωσης, η οποία με τη σειρά της καθορίζει τις τιμές των κλίσεων δυναμικού που αναπτύσσονται υπό συνθήκες σφάλματος. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συστήματος γείωσης μιας εγκατάστασης στοχεύει στην ασφαλή λειτουργία της, δηλαδή τον περιορισμό των κλίσεων δυναμικού γης σε τέτοια

επίπεδα τάσης, ώστε, υπό συνθήκες σφάλματος, να μην κινδυνεύουν ούτε τα άτομα που βρίσκονται στην περιοχή, ούτε ο εξοπλισμός.

Η σκοπιμότητα αυτής της έρευνας ενισχύεται και από το γεγονός ότι, η ειδική αντίσταση του εδάφους αποτελεί σημαντικότερο και μη ελαστικό παράγοντα που καθορίζει τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής. Επομένως, είναι κρίσιμος παράγοντας για το αν οι τάσεις είναι επικίνδυνες ή όχι για το προσωπικό και τον εξοπλισμό των εγκαταστάσεων [1].

Έτσι, με τις τιμές της ειδικής αντίστασης, που μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση των βελτιωτικών υλικών, είναι δυνατόν να προκύψουν υψηλά ανώτατα όρια ασφαλείας για τις βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, οπότε και να μη χρειάζεται η κάλυψη της επιφάνειας γύρω από την εγκατάσταση με “υλικό επιφανείας”. Το υλικό επιφανείας είναι υλικό με υψηλότερη ειδική αντίσταση από το πάνω στρώμα του χώματος, σε στρώμα πάχους 0,08–0,15m, με σκοπό την αύξηση της αντίστασης επαφής και τον περιορισμό του ρεύματος σφάλματος που θα κινηθεί προς τα επάνω και θα διαρρέει το άτομο.

Το κύριο μέρος του πειράματος περιλαμβάνει τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων ράβδου τοποθετημένων στο έδαφος και σε βελτιωτικά υλικά. Για το σκοπό αυτό, τοποθετήθηκαν πέντε (5) ηλεκτρόδια, σε διαφορετικό βελτιωτικό υλικό το καθένα και ένα (1) ηλεκτρόδιο απευθείας στο χώμα, σε σχήμα Γ και τοποθετήθηκαν επιπλέον βοηθητικά ηλεκτρόδια σε διάφορους άξονες, για τη μέτρηση των προαναφερθέντων μεγεθών. Οι μετρήσεις διεξάγονταν σχεδόν σε καθημερινή βάση και τα πρώτα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τις μετρήσεις 120 ημερών και τη γραφική απεικόνισή τους έχουν ως εξής:

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του φυσικού εδάφους στο χρόνο, μελετώντας τα Σχήματα 5.3–5.13, παρατηρείται μια αξιοσημείωτη διακύμανση της ειδικής αντίστασης με το χρόνο, η οποία βεβαίως οφείλεται στις διακυμάνσεις της βροχόπτωσης και κατ’ επέκταση της εδαφικής υγρασίας, όπως προκύπτει και από τα Σχήματα 5.9–5.13. Η διακύμανση αυτή της ειδικής αντίστασης γίνεται εντονότερη στο άνω στρωματικό επίπεδο του εδάφους και πιο συγκεκριμένα έως περίπου τα 2m (Σχήμα 5.3, Σχήμα 5.9), όπου οι υψηλές ημερήσιες

συγκεντρώσεις βροχόπτωσης, συνεπώς και οι υψηλές συγκεντρώσεις υγρασίας, επιφέρουν απότομη και ραγδαία μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Ειδικότερα, στο δεύτερο δεκαπενθήμερο του Φεβρουαρίου, όπου το ύψος βροχής φθάνει και τα 18mm , καταγράφεται μια μείωση της ρ της τάξης του 6,8% σε διάστημα μόλις ένδεκα (11) ημερών. Παρόμοια εικόνα εμφανίζεται στο τελευταίο δεκαήμερο του Απριλίου, όπου λόγω των μεγάλων βροχοπτώσεων και των υψηλών συγκεντρώσεων νερού, καταγράφεται σε διάστημα μόλις δώδεκα (12) ημερών (21/04–03/05) μείωση της τάξης του 10%. Παράλληλα όμως με τη μείωση, παρατηρείται και ταχύτατη άνοδος των τιμών της ειδικής αντίστασης με την ελάττωση ή και την παύση των βροχοπτώσεων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίοδος 15/03–24/03, όπου η ελάττωση των βροχών έχει άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της ρ κατά 6,2% μέσα σε μόλις δέκα (10) ημέρες, καθώς και η περίοδος 03/05–03/06, όπου σημειώνεται πιο αργή και σταθερή αύξηση της ρ κατά 10,2%, με μικρές βέβαια ενδιάμεσες διακυμάνσεις. Ιδιαίτερης αναφοράς χρήζει η απότομη μείωση της ρ , που σημειώνεται την περίοδο 01/06–06/06 (5,8%), η οποία συμβαίνει μετά την πάροδο 5 ημερών από τη μεγάλη βροχόπτωση της 27^{ης} Μαΐου. Πάντως, αξίζει να σημειωθεί ότι οι διακυμάνσεις της ρ , που καταγράφονται στο άνω στρώμα του εδάφους, ακολουθούν γενικά τα ίδια ποσοστά αυξομείωσης, γεγονός που φανερώνει ότι το ανώτερο στρώμα του συγκεκριμένου τύπου χώματος αντιδρά άμεσα στις εναλλαγές των συγκεντρώσεων υγρασίας και μάλιστα με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για το συγκεκριμένο πείραμα, μιας και τα κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης έχουν τοποθετηθεί σε βάθος περίπου $1,5\text{m}$ από την επιφάνεια του εδάφους και μπορεί να γίνει εκτενής διερεύνηση στη μεταβολή της συμπεριφοράς των βελτιωτικών υλικών γείωσης με τις έντονες διακυμάνσεις της υγρασίας.

Σε μεγαλύτερα βάθη, άνω των 2m , οι διακυμάνσεις αυτές γίνονται πιο ομαλές και με μεγαλύτερη διάρκεια σταθερότητας. Στο Σχήμα 5.10 σημειώνεται απότομη μείωση της ρ μέσα σε διάστημα είκοσι (20) ημερών μέσα στο Φεβρουάριο και έως 10/03 (περίπου 8%), ταυτόχρονα με την εκδήλωση μεγάλων βροχοπτώσεων. Στη συνέχεια, σχεδόν σταθεροποιείται η τιμή της για μεγάλο χρονικό διάστημα (10/03–20/04), παρά την παρατεταμένη διάρκεια των ισχυρών βροχοπτώσεων και ακολουθεί μια πτώση της τάξης του 5% στα τέλη Απριλίου

όπου, λόγω των υψηλότερων τιμών βροχόπτωσης (14,8mm στις 17/04 και 19mm στις 27/04) σημειώνονται μεγάλες συγκεντρώσεις υγρασίας στα συγκεκριμένα στρώματα. Τέλος, καταγράφεται συνεχής άνοδος της τιμής της, με την ελάττωση των βροχών και της υγρασίας, που φθάνει και το 12%, μέχρι την ημέρα της τελευταίας μέτρησης (09/06) για την παρούσα εργασία.

Πιο ομαλά εξελίσσονται τα πράγματα σε βάθος περίπου 4m (Σχήμα 5.5, Σχήμα 5.11), όπου η μείωση της τιμής της ρ πραγματοποιείται με πολύ βραδείς ρυθμούς, σχεδόν ανεπαίσθητα, με εξαίρεση ένα απότομο βύθισμα (μείωση σε ποσοστό 32,5%), που σημειώνεται στα τέλη Μαρτίου και πιο συγκεκριμένα 30/03–01/04. Από το αρχείο καταγραφής της βροχόπτωσης διαπιστώνεται ότι, ο κύριος όγκος βροχής σημειώθηκε τις πρώτες πρωινές ώρες της 1^{ης} Απριλίου, με ώρα παύσης γύρω στις 07.30π.μ. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε περίπου στις 11.30π.μ., οπότε αυτή η απότομη μείωση στην τιμή της ρ πιθανότατα οφείλεται: α) στο γεγονός ότι στα σημεία που ήταν τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια τάσης το χώμα είχε γίνει σκέτη λάσπη με πολύ νερό, οπότε γινόταν ένα είδος επιφανειακού βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα τη μέτρηση πολύ μικρής τιμής της U είτε, β) στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο βάθος την ώρα της μέτρησης είχε συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα νερού και δεν είχε προλάβει να αποστραγγιστεί, με αποτέλεσμα τη μέτρηση μεγάλης τιμής της I . Αν η μέτρηση γινόταν λίγες ώρες αργότερα, ενδεχομένως να μην καταγραφόταν τέτοια χαμηλή μέτρηση της R . Γενικότερα, πάντως, σε αυτό το βάθος είναι αξιοσημείωτη η σταθερότητα που παρουσιάζει στην τιμή της η ειδική αντίσταση, σε συνάρτηση πάντα με την περιεκτικότητα της υγρασίας.

Σε βάθος 6m η εικόνα είναι περίπου ίδια με τα 2m, με τη διαφορά ότι η μείωση της τιμής της ρ συντελείται με μεγαλύτερο ρυθμό, αλλά σε περίπου ίδιο ποσοστό 5% (Σχήμα 5.12). Με την ελάττωση των βροχοπτώσεων η ρ ακολουθεί ανοδικές τάσεις, με ιδιαίτερα μεγάλο ρυθμό στο πρώτο δεκαπενθήμερο του Μαΐου, σημειώνοντας άνοδο 4,3% μέσα στις πρώτες δέκα (10) ημέρες.

Τέλος στο μεγαλύτερο βάθος των 8m (Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.13), παρατηρείται μια ελάχιστη έως αμελητέα διακύμανση στις τιμές της ρ την περίοδο των έντονων και συχνών βροχών. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει, ότι το συγκεκριμένο στρώμα του υπεδάφους έχει τέτοια σύνθεση, που χαρακτηρίζεται από την ικανότητα συνεχούς συγκράτησης μεγάλων συγκεντρώσεων υγρασίας, παρά το γεγονός ότι το εν λόγω στρώμα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης

από τα υπόλοιπα (περίπου της τάξης του 30% – 40%). Οι μεγαλύτερες τιμές της ειδικής αντίστασης επιβεβαιώνουν και τα αποτελέσματα της ηλεκτροτομογραφίας τα οποία κατέδειξαν ένα συνεκτικά κροκαλολατιποπαγές υπόστρωμα. Στη συνέχεια, με την ελάττωση των βροχών σημειώνει άνοδο, που φθάνει και το 20%, στην περίοδο 02/05–25/05, φθάνοντας έτσι στις υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης που παρουσιάζει συνολικά το υπό μελέτη υπέδαφος.

Η διαφορά που εμφανίζεται στις τιμές της ειδικής αντίστασης στα διάφορα βάθη υποδηλώνει τη σαφή πολυστρωματικότητα του εδάφους, λόγω της ανομοιογένειας στη σύσταση και τα μεγέθη που παρουσιάζουν τα διάφορα στρώματα. Βεβαίως, η τελευταία περίπτωση των 8m, χρήζει και πρακτικού ενδιαφέροντος, αφού τα συστήματα γείωσης των μεγάλων ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων εγκαθίστανται σε τέτοια ή και μεγαλύτερα βάθη.

Μελετώντας τα Σχήματα 5.14–5.19, παρατηρείται μια ομοιότητα στη διακύμανση της σύνθετης ειδικής αντίστασης βελτιωτικού υλικού-εδάφους και ως προς τη μορφή και ως προς τις τιμές. Ειδικότερα, τα βελτιωτικά υλικά 2,3 και 5 εμφανίζουν περίπου τις ίδιες τιμές σύνθετης ειδικής αντίστασης, μετά την τοποθέτησή τους στο έδαφος, και την ίδια μορφή διακύμανσης. Εντοπίζεται μόνο μια μικρή διαφορά στη μέση τιμή της ρ που παρουσιάζει το βελτιωτικό 2 (περίπου 55Ωm) (Σχήμα 5.14), από τα βελτιωτικά 3 και 5 (περίπου 45Ωm) (Σχήμα 5.15, Σχήμα 5.17) και αντίστοιχα στην ανοδική τάση λόγω της ελάττωσης των βροχών, όπου το 2 εμφανίζει μια αύξηση της ρ κατά περίπου 29%, στην περίοδο 20/04–09/06, ενώ το 3 μόλις 7,5% στην ίδια περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι το βελτιωτικό 2 εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην παρουσία ή μη υγρασίας. Τα υλικά 4 και 6 παρουσιάζουν εμφανώς υψηλότερες τιμές της σύνθετης ειδικής αντίστασης από τα υπόλοιπα υλικά, 75–80Ωm το 4 (Σχήμα 5.16) και 85–90Ωm το 6 (Σχήμα 5.18), με παρόμοια όμως μορφή διακύμανσης των τιμών της ρ .

Η προσθήκη των βελτιωτικών υλικών έχει σαν σκοπό τη βελτίωση του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο, επιφέροντας μείωση της ειδικής αντίστασης. Παρατηρώντας λοιπόν, τις τιμές της ειδικής αντίστασης του φυσικού εδάφους σε βάθος 1–1,5m και παράλληλα τις τιμές της σύνθετης ειδικής αντίστασης που επιτυγχάνονται με την προσθήκη των βελτιωτικών υλικών, μπορεί να ειπωθεί

ότι, σημειώνεται μια μείωση της τάξης του 70% περίπου στην τιμή της ρ , στην περίπτωση των υλικών 2, 3 και 5, μια μείωση της τάξης του 58% στην περίπτωση του υλικού 4 και μια μείωση της τάξης του 53% στην περίπτωση του υλικού 6. Αυτό που αξίζει να τονιστεί, είναι η σημαντική σταθεροποίηση των τιμών της ρ με τη χρήση αυτών των υλικών, καθ' όλη την περίοδο των 120 ημερών και παρά την παρατεταμένη διάρκεια των βροχών, όπως προκύπτει από τα Σχήματα 5.14–5.19, σε αντιδιαστολή με την έντονη διακύμανση των αντίστοιχων τιμών στο επιφανειακό στρώμα του φυσικού εδάφους χωρίς υλικό και σε βάθος έως 1–1,5m.

Ανάλογα συμπεράσματα εξάγονται και από τη μελέτη των Σχημάτων 5.20–5.32, τα οποία αποτυπώνουν τις μεταβολές των αντιστάσεων γείωσης των κυρίων ηλεκτροδίων ως προς το χρόνο και τη βροχόπτωση. Πιο συγκεκριμένα, από τα Σχήματα 5.27–5.32 διαφαίνεται η έντονη επίδραση της εδαφικής υγρασίας, μέσω της βροχόπτωσης, στην τιμή της αντίστασης γείωσης.

Στην περίπτωση του ηλεκτροδίου χωρίς βελτιωτικό υλικό, σημειώνεται ταχεία μείωση της R με τα αυξημένα ποσά υγρασίας έως και 48%. Στην περίπτωση του ηλεκτροδίου 2 (Σχήμα 5.28) η διακύμανση με την υγρασία είναι σαφώς πιο μικρή, σε ποσοστό 15%, παραμένει σχεδόν σταθερή κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου των 120 ημερών και εμφανίζει μια άνοδο της τάξης του 23% της αρχικής τιμής από το τέλος των έντονων βροχοπτώσεων έως και την τελευταία μέτρηση. Παρόμοια συμπεριφορά με το ηλεκτρόδιο 2 ως προς τη διακύμανση, παρουσιάζουν τα ηλεκτρόδια 3 και 6, εμφανίζοντας μια μορφή διακύμανσης σχήματος U. Το ηλεκτρόδιο 3 (Σχήμα 5.29) παρουσιάζει μια μείωση της αντίστασης γείωσής του έως και 25,5%, με ανοδική τάση λόγω της σταδιακής μείωσης των βροχοπτώσεων και το ηλεκτρόδιο 6 (Σχήμα 5.32) με τη σειρά του εμφανίζει μια πολύ απότομη μείωση της αντίστασής του, έως και 28%, τις πρώτες ημέρες, ελαφρά μείωση στη συνέχεια λόγω των αυξημένων τιμών εδαφικής υγρασίας και τέλος άνοδο με την ελάττωση των βροχών. Τα ηλεκτρόδια με τα υλικά 4 και 5 παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά της αντίστασής τους με το ηλεκτρόδιο 1 (φυσικό έδαφος) και ειδικότερα, το ηλεκτρόδιο 4 (Σχήμα 5.30) εμφανίζει σταδιακή μείωση της αντίστασής του έως και 24,5%, ενώ το ηλεκτρόδιο 5 (Σχήμα 5.31) έως και 20,4%, με μεγαλύτερη

διακύμανση όμως της τιμής της αντίστασής του συναρτήσει της συγκέντρωσης υγρασίας.

Εξετάζοντας τα Σχήματα 5.20–5.26, είναι δυνατόν να γίνει μια αρχική εκτίμηση της μείωσης στην τιμή της αντίστασης γείωσης, που επιφέρει το κάθε βελτιωτικό υλικό ως προς την αντίστοιχη τιμή του ηλεκτροδίου στο φυσικό έδαφος. Στην περίπτωση του υλικού 2, παρατηρείται μια μέση μείωση της τάξης του 68,5%, στην περίπτωση του υλικού 3 της τάξης του 74,5%, στην περίπτωση του υλικού 4 το ποσοστό αγγίζει το 57%, στο υλικό 5 η μείωση φθάνει έως και 74% και τέλος για το υλικό 6 η μείωση ανέρχεται στο 52%.

Παρατηρώντας τα γραφήματα στο Σχήμα 5.26, γίνεται αντιληπτό ότι τα βελτιωτικά 3 (μπετονίτης) και 5 εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές αντίστασης γείωσης από τα υπόλοιπα υλικά, δηλαδή επιφέρουν τη μεγαλύτερη μείωση ως προς την τιμή του ηλεκτροδίου αναφοράς και μάλιστα αυτή η εικόνα παραμένει η ίδια καθ' όλη την περίοδο των 120 ημερών του πειράματος. Το βελτιωτικό 2 (μπετόν), ακολουθεί στα ίδια επίπεδα τιμών τα υλικά 3 και 5 μέχρι τα τέλη Απριλίου (72 ημέρες), αλλά μετά παρουσιάζει μια μικρή άνοδο της τιμής της R , λόγω ελάττωσης της εδαφικής υγρασίας στην οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο, όπως προαναφέρθηκε. Τα βελτιωτικά 4 και 6, εμφανίζουν τα ίδια επίπεδα τιμών έως και την 31^η Μαρτίου (42 ημέρες), με το βελτιωτικό 4 να έχει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες του 6, στη συνέχεια δε με την υψηλή και παρατεταμένη περίοδο βροχόπτωσης, η τιμή της R στο 5 συνεχώς μειώνεται ενώ η αντίστοιχη του 6 ακολουθεί τη μορφή U , που προαναφέρθηκε, με αποτέλεσμα το 6 να εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές από τα πέντε (5) βελτιωτικά.

Σε ανάλογα συμπεράσματα οδηγείται κανείς, μελετώντας και το γράφημα στο Σχήμα 5.33, το οποίο δίνει μια πιο ποσοτική και εποπτική εικόνα για το όφελος που αποκομίζεται από τη χρήση του κάθε υλικού. Από τα γραφήματα του λόγου R_C/R_1 διαπιστώνεται ότι, η χρήση του μπετονίτη (βελτιωτικό 3) δίνει το μεγαλύτερο όφελος στη μείωση της αντίστασης γείωσης από όλα τα υπόλοιπα βελτιωτικά, με το βελτιωτικό 5 να ακολουθεί από πολύ κοντά στις τιμές και ακολούθως το μπετόν (βελτιωτικό 2), να εμφανίζει ελαφρώς μικρότερο όφελος. Το βελτιωτικό 6 παρουσιάζει, με διαφορά από τα άλλα, μικρότερο όφελος και μάλιστα το όφελος αυτό γίνεται ακόμα μικρότερο όσο αυξάνει η ειδική αντίσταση του εδάφους στο οποίο προστίθεται.

Στο σημείο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν και κάποια στοιχεία για το κόστος των υλικών και της εγκατάστασης του κάθε συστήματος γείωσης, που εγκαταστάθηκε για τις ανάγκες του πειράματος, αφού το κόστος διαδραματίζει σημαίνοντα ρόλο στην επιλογή ενός βελτιωτικού υλικού. Άλλωστε, η αξιολόγηση ενός προϊόντος με βάση τη σχέση κόστος-απόδοση, οδηγεί πάντοτε σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη σκοπιμότητα επιλογής και αγοράς του και ταυτόχρονα αποτελεί και ένα σημαντικό εργαλείο σύγκρισης με άλλα προϊόντα. Ακολουθώς (Πίνακας 6.1), παρατίθενται αναλυτικά όλα τα μεγέθη κόστους των συστημάτων που εγκαταστάθηκαν.

	Σύστημα γείωσης 1	Σύστημα γείωσης 2	Σύστημα γείωσης 3	Σύστημα γείωσης 4	Σύστημα γείωσης 5	Σύστημα γείωσης 6
Κόστος ηλεκτροδίου	€13,48	€13,48	€13,48	€13,48	€13,48	€13,48
Κόστος εργασίας/εγκατ	€20	€120	€115	€115	€100	€100
Κόστος βελτιωτικού	-	€19,12	€42,75	€14,54	€224,0	€325,20
Σύνολο	€33,48	€152,60	€171,23	€143,02	€337,48	€438,68

Πίνακας 6.1: Ανάλυση κόστους εγκατάστασης των συστημάτων γείωσης.

Από τα στοιχεία του προηγούμενου πίνακα προκύπτουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Φαίνεται ότι το μπετόν (σύστημα γείωσης 2), που είναι το βασικότερο δομικό υλικό στον τομέα των κατασκευών και χρησιμοποιείται πλέον για την κατασκευή όλων των θεμελιακών γειώσεων, παρουσιάζει το δεύτερο μικρότερο κόστος σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα βελτιωτικά που δοκιμάστηκαν. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το υλικό αυτό έχει παρουσιάσει την τρίτη καλύτερη απόδοση και συμπεριφορά ως βελτιωτικό γείωσης, το τοποθετεί πρώτο στη σειρά προτίμησης μεταξύ των βελτιωτικών υλικών. Η πολύ εύκολη προμήθεια των πρώτων υλών για παρασκευή σκυροδέματος — σημειωτέον ότι στο παρόν πείραμα παρασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατασκευής και όχι σκέτο τσιμέντο — και η άμεση διάθεσή τους είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων.

Με μικρή διαφορά ακολουθεί ο μπετονίτης (σύστημα γείωσης 3), ο οποίος χρησιμοποιείται σε πολλές εγκαταστάσεις συστημάτων γείωσης και ο οποίος, από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα του πειράματος έχει εμφανίσει εξίσου καλή απόδοση με το σκυρόδεμα. Μπορεί λοιπόν να αποτελέσει μια εναλλακτική και εξίσου φθηνή λύση με το σκυρόδεμα. Άλλωστε, δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι όλες οι ερευνητικές εργασίες που ασχολούνται με βελτιωτικά γείωσης, έχουν ως κύριο στόχο τη σύγκριση άλλων υλικών με το μπετονίτη και χρήση τους ως εναλλακτική λύση.

Το βελτιωτικό στο ηλεκτρόδιο 4, από τη μια εμφανίζει το μικρότερο κόστος σαν σύστημα γείωσης, από την άλλη όμως η προμήθειά του από μια και μοναδική εταιρία του συγκεκριμένου κλάδου, καθώς και η μέση απόδοση που εμφανίζει, κάνουν επιτακτική την ανάγκη περαιτέρω εξέτασης της επιλογής του. Τα βελτιωτικά 5 και 6 είναι με διαφορά τα ακριβότερα. Το μεν 5 είναι περίπου 54,8% ακριβότερο από το σκυρόδεμα. Εμφανίζει αρκετά καλή απόδοση, όμοια με αυτή του σκυροδέματος και του μπετονίτη ως προς τις επιτευχθείσες τιμές της αντίστασης γείωσης, το κόστος του όμως είναι αρκετά υψηλό. Το δε 6 είναι περίπου 65% ακριβότερο από το σκυρόδεμα και σε συνδυασμό με τη χειρότερη απόδοση όλων που εμφανίζει, χρήζει μεγάλης εξέτασης και έρευνας για τη σκοπιμότητα χρήσης του.

Συνοψίζοντας, από τα παραπάνω στοιχεία (Πίνακας 6.1) επιβεβαιώνεται η ρήση “το ακριβότερο δεν είναι πάντα και το καλύτερο”. Βέβαια αξίζει να παρατηρήσει κανείς ότι το σκυρόδεμα έχει μεγαλύτερο κόστος εργασίας / εγκατάστασης, αλλά φθηνότερο κόστος υλικών. Άρα ένα σημείο που χρήζει περαιτέρω έρευνας, είναι η ανάπτυξη τεχνολογιών που θα μείωναν το κόστος παρασκευής, μεταφοράς και διάθεσης των συγκεκριμένων υλικών, κάτι που έχει να κάνει βέβαια και με την αποκλειστικότητα εισαγωγής κάποιων εταιριών. Κάτι τέτοιο θα μείωνε δραστικά το κόστος προμήθειας, οπότε η επιλογή αυτών των υλικών θα κρινόταν εξίσου συμφέρουσα για κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα συμπεραίνει κανείς, το μεγάλο κόστος που προκύπτει αν το πείραμα επεκταθεί με εγκατάσταση συστημάτων γείωσης και σε άλλες περιοχές με διαφορετικούς τύπους εδάφους. Αυτό λοιπόν αποτελεί έναν ιδιαίτερα ανασταλτικό παράγοντα για τη διεξαγωγή τέτοιων πειραμάτων ανά τον κόσμο, όταν μάλιστα οι οικονομικοί πόροι για έρευνα είναι πολύ περιορισμένοι.

Θα μπορούσε να πει κανείς ότι το μπετόν και ο μπετονίτης, τα οποία είναι τα φθηνότερα και ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά, εξακολουθούν και αποτελούν μια σίγουρη, αξιόπιστη και φθηνή λύση στο πρόβλημα των υψηλών τιμών της αντίστασης γείωσης, που εμφανίζεται σε εδάφη με υψηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης. Ωστόσο, θα μπορούν να διατυπωθούν πιο έγκυρα και αξιόπιστα συμπεράσματα μετά την πάροδο ικανού χρονικού διαστήματος, που θα καλύπτει όλες τις εποχές του έτους, όλες τις μετεωρολογικές μεταβολές και ενδεχομένως σε βάθος μερικών ετών.

Ένα δευτερεύον μέρος του πειράματος, αλλά εξίσου ήσσονος σημασίας και το οποίο μάλιστα αποφασίστηκε να διεξαχθεί τις τελευταίες ημέρες που γραφόταν η παρούσα εργασία, είναι η εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροτομογραφίας στο χώρο του πειράματος. Η διεξαγωγή των συγκεκριμένων μετρήσεων έχει σκοπό, την αναλυτικότερη απεικόνιση της κατανομής των τιμών της ειδικής αντίστασης στο χώρο και τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της μεθόδου Wenner.

Εξετάζοντας το Σχήμα 5.36 μπορεί να πει κανείς ότι, η συγκεκριμένη μέθοδος, λόγω των πολλών συνδυασμών που εφαρμόζει μεταξύ των ηλεκτροδίων, καθώς και του μεγάλου πλήθους των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιεί, μπορεί να λαμβάνει μετρήσεις σε άξονα σχεδόν κατακόρυφο κατά βάθος, σε αντίθεση με τη Wenner, όπου αυτός ο άξονας εμφανίζει έντονα τεθλασμένη μορφή λόγω των συγκεκριμένων αποστάσεων στις οποίες γίνεται η μέτρηση ($2m$, $4m$, $8m$, $12m$ και $16m$). Επίσης, η μέθοδος της ηλεκτροτομογραφίας εξάγει τις τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασης, με βάση τις οποίες σχεδιάζει και τη γραφική απεικόνιση του χώρου, σε αντίθεση με τη Wenner η οποία δίνει τις τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Από τα γραφήματα στο Σχήμα 5.39 εξάγεται το συμπέρασμα ότι η μέθοδος της ηλεκτροτομογραφίας δίνει αποτελέσματα με πολύ καλύτερη ακρίβεια και μεγαλύτερη ανάλυση, καθώς παρέχει και πιο εποπτικό τρόπο για την κατανομή των τιμών της ειδικής αντίστασης, ώστε να έχει κανείς μια συνεχή και ομοιόμορφη εικόνα για όλο το χώρο που εξετάζει. Η συνέχεια των τιμών της ειδικής αντίστασης σε όλα τα σημεία του εξεταζόμενου χώρου και η ακριβής εικόνα των διαμορφώσεων του υπεδάφους, που δίνει αυτή η μέθοδος, αποτελούν ισχυρά εργαλεία για την επιλογή της πιο κατάλληλης θέσης, με τη μικρότερη

τιμή ειδικής αντίστασης, για την εγκατάσταση του συστήματος γείωσης. Από την άλλη μεριά, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και το γεγονός ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων, ο χώρος στον οποίο θα κατασκευαστεί το έργο είναι αυστηρά οριοθετημένος και έχει προαποφασισθεί το σημείο στο οποίο θα γίνει η ηλεκτρική εγκατάσταση, συνεπώς και το σύστημα γείωσης.

Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι, στο συγκεκριμένο πείραμα τα αποτελέσματα της εν λόγω μεθόδου δε διαφέρουν σημαντικά από τα αντίστοιχα της μεθόδου Wenner.

Επιπλέον, για να αποδοθεί μια τρισδιάστατη απεικόνιση των τιμών της ρ , θα πρέπει να διεξαχθούν οι μετρήσεις και σε τουλάχιστον 2-3 κάθετους άξονες, με εγκατάσταση επίσης 72 ηλεκτροδίων για καθένα από αυτούς, γεγονός που κάνει την εφαρμογή της μεθόδου αρκετά επίπονη και χρονοβόρα. Επίσης η μεταφορά του εξοπλισμού γίνεται με όχημα, λόγω όγκου και βάρους, οπότε σε τοποθεσίες απότομες και δύσβατες, όπως είναι συνήθως στα βουνά που γίνονται εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων, η μεταφορά καθίσταται ιδιαίτερα δυσχερής. Αντίθετα η Wenner, λόγω του μικρού όγκου του εξοπλισμού και του μικρού πλήθους των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιεί, καθίσταται εφαρμόσιμη παντού και διαρκεί σύντομο χρονικό διάστημα συγκριτικά με την ηλεκτροτομογραφία.

Σε κάθε υποψήφια θέση, μετράται η ρ με τη μέθοδο Wenner σε διάφορους άξονες όπως π.χ. στις πλευρές και στη μια διαγώνιο. Σε κάθε άξονα λαμβάνονται μετρήσεις σε αποστάσεις $2m$, $4m$, $8m$, $12m$ και $16m$. Αν υπάρχει μεγάλη μεταβολή των μετρούμενων τιμών, λαμβάνονται μετρήσεις επιπλέον στα $20m$ και $24m$. Για κάθε απόσταση μέτρησης ως τιμή λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων της ρ για όλους τους άξονες, στους οποίους υπάρχουν μετρήσεις. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι, από τη στιγμή που δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις τιμών μεταξύ των δύο μεθόδων, οι οποίες να οδηγούν σε σημαντικά σφάλματα στο σχεδιασμό και επειδή στις μικρής και μέσης κλίμακας κατασκευές ο χρόνος είναι πολύ περιορισμένος και δεν υπάρχει η διάθεση ή η δυνατότητα χρηματοδότησης από τον κατασκευαστή του έργου, η μέθοδος Wenner παρουσιάζει αρκετά και σημαντικά πλεονεκτήματα.

Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και το γεγονός ότι τα λογισμικά πακέτα που υπάρχουν στην αγορά, για τον υπολογισμό των παραμέτρων του εδάφους (πλήθος/ειδική αντίσταση/πάχος στρωμάτων) και για το σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης, είναι σχεδιασμένα να χρησιμοποιούν τις μέσες τιμές της ρ

σε κάθε απόσταση που λαμβάνονται μετρήσεις από τη μέθοδο Wenner. Έτσι, η μορφή στην οποία δίνεται η πληροφορία από τη μέθοδο της ηλεκτροτομογραφίας, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα συγκεκριμένα πακέτα λογισμικού, με αποτέλεσμα να μην κρίνεται σκόπιμη και η εφαρμογή της.

Για το λόγο αυτό, στις περιπτώσεις κατασκευής των υποσταθμών υψηλής τάσης της ΔΕΗ, των υποσταθμών υψηλής τάσης των ηλεκτροκίνητων τραίνων του ΟΣΕ, μεγάλων βιομηχανικών μονάδων, μεγάλων αιολικών πάρκων και πλήθους άλλων κατασκευών, στις οποίες η ασφάλεια των ατόμων καθώς και η ομαλή και απρόσκοπτη λειτουργία του εξοπλισμού τίθενται υπό σοβαρό κίνδυνο, σε περίπτωση σφάλματος, αυτά τα λογισμικά επιβάλλεται μελλοντικά να επανασχεδιασθούν, ώστε τα αποτελέσματα μιας ηλεκτροτομογραφίας να χρησιμοποιούνται ως παράμετροι εισόδου σε αυτά. Η ακρίβεια, η πληρότητα και οι δυνατότητες υπολογισμού και σχεδιασμού των συστημάτων γείωσης, που θα προκύψουν με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, σε συνδυασμό με πανίσχυρα υπολογιστικά μοντέλα θα είναι πραγματικά εντυπωσιακές.

Η επόμενη μέρα

Υπάρχουν πολλά πράγματα που μπορούν να γίνουν σε συνέχεια αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, είτε σε επίπεδο διπλωματικών εργασιών είτε ακόμα και σε επίπεδο μιας διδακτορικής διατριβής. Μόλις τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται συστηματική έρευνα πάνω στα βελτιωτικά υλικά γείωσης, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας τους και της ανάγκης για φθηνές και αξιόπιστες λύσεις στο πρόβλημα των υψηλών τιμών της αντίστασης γείωσης. Το πεδίο έρευνας σε αυτόν τον τομέα για μια τέτοια διατριβή είναι πολύ μεγάλο, με δεδομένο ότι σε άλλες χώρες, όπως στο Μεξικό και στη Μαλαισία, γίνονται αυτό το διάστημα παρόμοια πειράματα στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων, στα οποία συμμετέχουν πανεπιστήμια, ερευνητικά ιδρύματα και εταιρίες ηλεκτρισμού.

Αποτελεί πλέον κοινή παραδοχή σε όλο τον επιστημονικό και τεχνικό κόσμο ότι τα συστήματα γείωσης αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο στην ασφάλεια ανθρώπων και εγκαταστάσεων και στην ομαλή, απρόσκοπτη και αδιάλειπτη λειτουργία του ηλεκτρολογικού και μη εξοπλισμού των εγκαταστάσεων. Με



αυτά τα δεδομένα λοιπόν, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη συνέχισης και επέκτασης των μετρήσεων του συγκεκριμένου πειράματος για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, ενδεχομένως 3–5 ετών, με σκοπό την κάλυψη όλων των εποχών του έτους και τη μελέτη της συμπεριφοράς των συγκεκριμένων χημικών υλικών ως βελτιωτικά γείωσης. Το γεγονός αυτό θα επιτρέψει την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης όλων των μετεωρολογικών συνθηκών, καθώς και του χρόνου, στη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης γείωσης με τη χρήση αυτών των υλικών.

Αυτό γίνεται ακόμα πιο κατανοητό, αν ληφθεί υπ' όψιν το γεγονός ότι μέχρι και τα τέλη Μαΐου σημειώνονταν αξιόλογες βροχές, με αποτέλεσμα η υγρασία του εδάφους να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και να μη γίνονται ιδιαίτερα αισθητές και μετρήσιμες οι μεταβολές της ειδικής αντίστασης σε μεγαλύτερα βάθη. Επιβάλλεται λοιπόν η συνέχιση της διεξαγωγής των μετρήσεων όλο το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, όπου η θερμοκρασία του υπεδάφους θα αρχίσει να ανεβαίνει και τα υποστρώματά του θα ξεραίνονται ολοένα και περισσότερο, καθώς επίσης και στα επόμενα χρόνια ώστε να θεωρηθεί ως παράμετρος μεταβολής και η διαφοροποίηση μεταξύ των μετεωρολογικών ετών. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούν να διατυπωθούν πιο σίγουρα και ακλόνητα συμπεράσματα, έτσι ώστε η σύγκριση μεταξύ αυτών των υλικών να είναι πιο ακριβής και αξιόπιστη.

Επιπροσθέτως, μια πρόταση είναι να γίνει μελλοντική προμήθεια και χρήση ενός κατάλληλου αισθητήρα μέτρησης της εδαφικής θερμοκρασίας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μέτρησή της *in situ* στο χώρο του πειράματος και να διερευνηθεί η επίδραση και αυτής της παραμέτρου στη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών, αλλά και στη διαμόρφωση των τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Έχοντας λοιπόν πραγματικές μετρήσεις της εδαφικής θερμοκρασίας, θα είναι εφικτή και η αντιπαραβολή των τιμών με τις αντίστοιχες του λογισμικού προσομοίωσης που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5, με ταυτόχρονη παράκαμψη των δυσκολιών που εμφανίστηκαν στην παρούσα εργασία.

Επίσης, θεωρείται μεγάλης σημασίας και ίσως πρώτης προτεραιότητας η εγκατάσταση ηλεκτροδίων με βελτιωτικά υλικά γείωσης και σε άλλες τοποθεσίες, με διαφορετικούς τύπους εδάφους από αυτόν που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, καθώς κρίνεται απαραίτητη η μελέτη της συμπεριφοράς αυτών των υλικών, όταν έρχονται σε επαφή με ασβεστολιθικά, ημιβραχώδη και

βραχώδη εδάφη. Η αντίσταση γείωσης που διαμορφώνουν αυτά τα υλικά, έχει άμεση εξάρτηση από την ειδική αντίσταση του εδάφους στο οποίο τοποθετούνται. Σε αυτό το κομμάτι θα μπορούσε να συμμετάσχει και η ΔΕΗ, με εγκατάσταση τέτοιων πειραματικών συστημάτων γείωσης πολύ κοντά στα Κέντρα Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ), καθώς και κάτω από γραμμές μεταφοράς 150kV και 400kV. Εξειδικευμένο προσωπικό της θα έχει την ευθύνη διεξαγωγής και επεξεργασίας των μετρήσεων, καθώς και την ευθύνη φύλαξης και συντήρησης αυτών των συστημάτων γείωσης.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, στο Μεξικό έχουν εγκατασταθεί δύο (2) τέτοια συστήματα ηλεκτροδίων, σε διαφορετικά μέρη της χώρας, ένα σε βραχώδες ασβεστολιθικό υπέδαφος και ένα σε ηφαιστειογενές υπέδαφος. Οι μετρήσεις σε αυτά τα συστήματα διεξάγονται από το 2007 και τα αποτελέσματα συνεχώς συγκρίνονται μεταξύ τους με στόχο να καταλήξουν σε κάποια ασφαλή συμπεράσματα [2]. Έτσι, αποκτάται μια πληρέστερη και πιο τεκμηριωμένη εικόνα για την αξιολόγηση της απόδοσης και συμπεριφοράς των βελτιωτικών, με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται και πιο σίγουρες και αξιόπιστες λύσεις στις κατασκευές. Το παράδειγμα αυτό ενισχύει την άποψη για συνέχιση και υποστήριξη, οικονομική, υλική και ηθική, αυτού του κοπιώδους και δύσκολου εγχειρήματος που έχει ξεκινήσει από το Φεβρουάριο στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Η παρούσα έρευνα μπορεί να επεκταθεί και σε άλλους τύπους βελτιωτικών υλικών, όπως είναι τα βελτιωτικά που έχουν σαν βάση φυτικές πρώτες ύλες και προϊόντα αυτών, όπως τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, σκόνη ρυζιού κ.α., τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις χώρες της Ασίας. Βεβαίως για χημικά βελτιωτικά υλικά που έχουν ως βάση το $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, ή το MgCl_2 , ή το CuSO_4 ή το NH_4Cl δε γίνεται λόγος, μιας και στην Ευρώπη απαγορεύεται αυστηρά η χρήση τους για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος.

Μια άλλη πρόταση, που θα μπορούσε να υλοποιηθεί στο απώτερο μέλλον, είναι η εργαστηριακή μελέτη αυτών των βελτιωτικών υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, σε κατάλληλο γι' αυτήν τη δοκιμή κλίβανο. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να δοκιμαστεί το εκάστοτε υλικό σε ακραίες συνθήκες, με σκοπό τη μελέτη της δομής του υλικού και της μεταβολής των ιδιοτήτων του, υπό αυτές τις συνθήκες. Παράλληλα κρίνεται σκόπιμη και η υποβολή των υλικών αυτών σε κρουστική καταπόνηση, με στόχο τη διερεύνηση

της αντοχής τους και την ενδεχόμενη μεταβολή των φυσικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, όταν αυτά χρησιμοποιούνται σε συστήματα γειώσεων αντικεραυνικής προστασίας, όπου δέχονται πολύ ισχυρά κεραυνικά ρεύματα.

Τέλος, ως επέκταση και περαιτέρω εξέλιξη του παρόντος εγχειρήματος, προτείνεται η ανάπτυξη τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, που ήδη διεξάγονται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο νευρωνικό δίκτυο, με σκοπό την πρόβλεψη των τιμών της αντίστασης γείωσης κατά τη διάρκεια του έτους. Οι παράμετροι που είναι διαθέσιμες ως είσοδοι είναι οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων, η ειδική αντίσταση του εδάφους, η θερμοκρασία, η υγρασία εδάφους και η βροχόπτωση. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος αποκτά ιδιαίτερη σημασία, από τη στιγμή που οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης και της αντίστασης γείωσης είναι χρονοβόρες και υψηλού κόστους. Το εν λόγω νευρωνικό δίκτυο θα εκπαιδευτεί με πληθώρα μετρήσεων από τα διάφορα συστήματα γείωσης, που είναι τοποθετημένα σε βελτιωτικά υλικά, σε συνδυασμό με όλα τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα, έτσι ώστε να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο στην πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης κάθε νέου συστήματος που πρόκειται να εγκατασταθεί και καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Βιβλιογραφία

- [1] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80–2000 (Revision of IEEE Std 80–1986), 2000.
- [2] Galván Arturo D., Gaona Enrique E., Pretelin Gilberto G., “Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods”, X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των 120 ημερών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	17/2/2011	18/2/2011	21/2/2011	22/2/2011	28/2/2011	1/3/2011	3/3/2011	4/3/2011
R (Ω)	14-16-18-20	14,11	13,97	13,58	13,32	13,14	13,30	13,16	13,15
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	177,2	175,5	170,6	167,3	165,0	167,0	165,3	165,2
R (Ω)	12-16-20-24	5,55	5,52	5,37	5,32	5,15	5,19	5,14	5,15
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	139,4	138,7	134,9	133,6	129,4	130,4	129,1	129,4
R (Ω)	8-16-24-32	2,43	2,43	2,40	2,40	2,33	2,33	2,32	2,32
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	122,1	122,1	120,6	120,6	117,1	117,1	116,6	116,6
R (Ω)	0-12-24-36	1,876	1,876	1,874	1,872	1,834	1,830	1,820	1,820
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	141,4	141,4	141,2	141,1	138,2	137,9	137,2	137,2
R (Ω)	0-16-32-48	1,622	1,616	1,604	1,600	1,564	1,564	1,554	1,556
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	163,0	162,4	161,2	160,8	157,2	157,2	156,1	156,3
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	178,2	176,0	156,6	154,3	134,7	135,4	131,3	132,0
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	40,1	39,3	36,9	35,4	34,2	34,7	34,0	34,1
ρ_2 (Ωm)		56,0	54,9	51,5	49,4	47,8	48,5	47,5	47,6
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	39,1	39,1	36,4	36,0	31,7	31,9	31,4	31,6
ρ_3 (Ωm)		54,6	54,6	50,8	50,3	44,3	44,5	43,8	44,1
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	64,6	64,1	59,8	58,4	56,6	57,2	55,7	56,3
ρ_4 (Ωm)		90,2	89,5	83,5	81,5	79,0	79,9	77,8	78,6
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	37,3	36,5	34,7	34,2	33,1	33,4	33,3	33,3
ρ_5 (Ωm)		52,1	51,0	48,5	47,8	46,2	46,6	46,5	46,5
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	75,0	62,3	58,3	57,1	54,7	55,6	55,4	54,2
ρ_6 (Ωm)		104,7	87,0	81,4	79,7	76,4	77,6	77,4	75,7
Ωρα		16:00	16:50	16:15	15:45	14:00	15:45	16:45	15:50
Θερμοκρασία αέρα (°C)			17,0	15,2	14,6	10,1	9,0	12,8	11,1
Υγρασία αέρα (%)			68,2	65,8	63,7	60,7	65,5	66,5	60,8
Υγρασία εδάφους (%)		18,85	18,53	22,75	23,82	22,35	21,90	24,38	23,29
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,00	0,00	0,20	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
L(m)	1,2								
r ₁ (m)	0,008								
r ₂ (m)	0,125								

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	8/3/2011	10/3/2011	11/3/2011	13/3/2011	15/3/2011	17/3/2011	18/3/2011
R (Ω)	14-16-18-20	13,43	13,64	13,54	13,49	13,29	13,30	13,32
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	168,7	171,3	170,1	169,4	166,9	167,0	167,3
R (Ω)	12-16-20-24	5,18	5,11	5,16	5,67	5,17	5,17	5,16
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	130,1	128,4	129,6	142,4	129,9	129,9	129,6
R (Ω)	8-16-24-32	2,35	2,29	2,30	2,31	2,31	2,30	2,30
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	118,1	115,0	115,6	116,1	116,1	115,6	115,6
R (Ω)	0-12-24-36	1,816	1,814	1,808	1,808	1,810	1,808	1,810
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	136,9	136,7	136,3	136,3	136,4	136,3	136,4
R (Ω)	0-16-32-48	1,546	1,554	1,552	1,554	1,554	1,556	1,556
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	155,3	156,1	155,9	156,1	156,1	156,3	156,3
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	130,4	136,3	135,9	138,6	136,9	137,0	137,4
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	35,0	36,3	36,1	36,3	35,8	36,1	36,1
ρ_2 (Ωm)		48,9	50,7	50,4	50,7	50,0	50,4	50,4
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	31,3	31,7	31,9	32,1	31,8	31,9	32,0
ρ_3 (Ωm)		43,7	44,3	44,5	44,8	44,4	44,5	44,7
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	55,8	57,6	57,5	57,6	57,5	57,5	57,6
ρ_4 (Ωm)		77,9	80,4	80,3	80,4	80,3	80,3	80,4
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	33,4	34,5	34,6	35,1	34,7	34,8	34,7
ρ_5 (Ωm)		46,6	48,2	48,3	49,0	48,5	48,6	48,5
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	53,9	55,8	56,5	57,5	57,0	57,1	56,9
ρ_6 (Ωm)		75,3	77,9	78,9	80,3	79,6	79,7	79,5
Ωρα		15:50	11:00	14:00	14:30	16:00	16:15	18:00
Θερμοκρασία αέρα (°C)		2,5	11,2	19,0	21,8	20,7	13,6	16,5
Υγρασία αέρα (%)		19,0	27,9	25,5	29,6	55,0	85,4	77,8
Υγρασία εδάφους (%)		26,48	23,46	22,64	21,40	20,88	20,38	20,46
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
L(m)	1,2							
r ₁ (m)	0,008							
r ₂ (m)	0,125							

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	21/3/2011	22/3/2011	23/3/2011	24/3/2011	28/3/2011	29/3/2011	30/3/2011	1/4/2011
R (Ω)	14-16-18-20	13,54	13,79	14,02	14,11	14,01	13,92	13,96	13,54
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	170,1	173,2	176,1	177,2	176,0	174,8	175,3	170,1
R (Ω)	12-16-20-24	5,16	5,20	5,23	5,26	5,29	5,28	5,13	5,70
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	129,6	130,6	131,4	132,1	132,9	132,6	128,9	143,2
R (Ω)	8-16-24-32	2,30	2,30	2,30	2,26	2,30	2,31	2,30	1,55
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	115,6	115,6	115,6	113,5	115,6	116,1	115,6	78,0
R (Ω)	0-12-24-36	1,816	1,814	1,816	1,788	1,822	1,822	1,822	1,594
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	136,9	136,7	136,9	134,7	137,3	137,3	137,3	120,1
R (Ω)	0-16-32-48	1,572	1,578	1,582	1,584	1,598	1,602	1,606	1,574
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	158,0	158,6	159,0	159,2	160,6	161,0	161,4	158,2
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	138,7	141,9	142,3	142,4	146,6	143,5	144,3	109,6
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	37,5	38,2	38,5	38,6	38,6	38,4	38,5	34,0
ρ_2 (Ωm)		52,4	53,3	53,8	53,9	53,9	53,6	53,8	47,5
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	32,2	32,6	32,7	32,8	33,4	33,3	33,2	32,0
ρ_3 (Ωm)		45,0	45,5	45,7	45,8	46,6	46,5	46,4	44,7
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	57,3	57,9	58,6	58,8	57,8	57,4	57,6	51,2
ρ_4 (Ωm)		80,0	80,8	81,8	82,1	80,7	80,2	80,4	71,5
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	33,5	35,2	35,6	35,7	35,9	35,6	35,7	33,2
ρ_5 (Ωm)		46,8	49,2	49,7	49,8	50,1	49,7	49,8	46,4
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	58,1	58,3	58,9	59,2	60,1	60,0	60,0	57,3
ρ_6 (Ωm)		81,1	81,4	82,2	82,7	83,9	83,8	83,8	80,0
Ωρα		17:15	12:10	11:45	13:00	12:15	12:40	12:00	11:25
Θερμοκρασία αέρα (°C)		9,1	11,8	13,4	17,2	19,3	19,1	21,5	17,7
Υγρασία αέρα (%)		71,8	43,4	40,8	47,2	53,8	61,7	53,0	72,2
Υγρασία εδάφους (%)		19,45	19,04	18,71	18,41	17,36	17,22	17,03	25,79
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,20
L(m)	1,2								
r ₁ (m)	0,008								
r ₂ (m)	0,125								

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	4/4/2011	5/4/2011	6/4/2011	7/4/2011	8/4/2011	13/4/2011	14/4/2011	15/4/2011
R (Ω)	14-16-18-20	13,57	13,53	13,42	13,55	13,64	13,73	13,64	13,77
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	170,4	169,9	168,6	170,2	171,3	172,4	171,3	173,0
R (Ω)	12-16-20-24	5,13	5,14	5,28	5,16	5,17	5,21	5,21	5,24
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	128,9	129,1	132,6	129,6	129,9	130,9	130,9	131,6
R (Ω)	8-16-24-32	2,26	2,28	2,28	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	113,5	114,5	114,5	114,0	114,0	114,0	114,0	114,0
R (Ω)	0-12-24-36	1,788	1,816	1,816	1,818	1,818	1,826	1,826	1,830
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	134,7	136,9	136,9	137,0	137,0	137,6	137,6	137,9
R (Ω)	0-16-32-48	1,586	1,588	1,688	1,596	1,600	1,632	1,638	1,646
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	159,4	159,6	169,6	160,4	160,8	164,0	164,6	165,4
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	119,5	121,9	121,7	125,2	128,1	132,5	134,10	133,0
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	36,2	36,7	36,7	37,3	37,6	38,5	38,7	38,7
ρ_2 (Ωm)		50,5	51,2	51,2	52,1	52,5	53,8	54,0	54,0
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	31,2	31,4	31,6	32,0	32,0	32,1	32,4	32,1
ρ_3 (Ωm)		43,6	43,8	44,1	44,7	44,7	44,8	45,2	44,8
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	53,4	54,1	53,9	54,4	54,8	54,1	53,6	54,0
ρ_4 (Ωm)		74,6	75,5	75,3	76,0	76,5	75,5	74,8	75,4
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	33,5	34,0	33,7	33,7	34,0	37,5	33,8	33,7
ρ_5 (Ωm)		46,8	47,5	47,1	47,1	47,5	52,4	47,2	47,1
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	57,0	58,2	57,9	57,6	57,8	58,6	58,6	59,0
ρ_6 (Ωm)		79,6	81,3	80,8	80,4	80,7	81,8	81,8	82,4
Ωρα		12:35	12:30	13:30	12:25	11:40	11:30	12:45	12:20
Θερμοκρασία αέρα (°C)		18,3	20,2	18,3	15,2	19,8	21,2	19,3	16,3
Υγρασία αέρα (%)		45,5	55,7	67,2	58,5	47,6	52,8	48,3	56,6
Υγρασία εδάφους (%)		21,08	20,19	19,56	18,74	18,02	15,66	15,35	14,99
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L(m)	1,2								
r ₁ (m)	0,008								
r ₂ (m)	0,125								

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	18/4/2011	19/4/2011	20/4/2011	29/4/2011	2/5/2011	3/5/2011	4/5/2011	6/5/2011
R (Ω)	14-16-18-20	14,08	14,22	14,31	13,08	13,12	12,88	13,00	13,18
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	176,8	178,6	179,7	164,3	164,8	161,8	163,3	165,5
R (Ω)	12-16-20-24	5,28	5,31	5,33	5,13	5,09	5,08	5,06	5,06
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	132,6	133,4	133,9	128,9	127,9	127,6	127,1	127,1
R (Ω)	8-16-24-32	2,27	2,27	2,27	2,25	2,24	2,23	2,24	2,25
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	114,0	114,0	114,0	113,0	112,5	112,0	112,5	113,0
R (Ω)	0-12-24-36	1,820	1,820	1,820	1,818	1,824	1,812	1,828	1,832
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	137,2	137,2	137,2	137,0	137,5	136,6	137,8	138,1
R (Ω)	0-16-32-48	1,630	1,630	1,631	1,614	1,620	1,624	1,632	1,638
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	163,8	163,8	163,9	162,2	162,8	163,2	164,0	164,6
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	109,2	92,4	93,6	106,5	112,5	112,3	109,5	110,5
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	37,9	38,1	38,1	36,8	38,2	37,5	38,1	38,6
ρ_2 (Ωm)		52,9	53,2	53,2	51,4	53,3	52,4	53,2	53,9
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	30,9	30,9	31,1	29,1	29,9	29,7	30,0	30,3
ρ_3 (Ωm)		43,1	43,1	43,4	40,6	41,8	41,5	41,9	42,3
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	51,3	51,3	51,4	51,9	51,8	51,0	51,4	50,7
ρ_4 (Ωm)		71,6	71,6	71,8	72,5	72,3	71,2	71,8	70,8
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	32,6	32,7	32,7	31,1	31,2	30,1	31,0	34,5
ρ_5 (Ωm)		45,5	45,7	45,7	43,4	43,6	42,0	43,3	48,2
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	58,5	58,5	58,6	55,9	55,6	55,0	54,9	55,3
ρ_6 (Ωm)		81,7	81,7	81,8	78,1	77,6	76,8	76,7	77,2
Ωρα		16:15	16:45	17:00	13:45	11:15	13:10	11:15	10:45
Θερμοκρασία αέρα (°C)		12,8	12,4	14,4	19,8	21,7	24,6	20,5	14,3
Υγρασία αέρα (%)		62,2	58,3	52,4	44,1	60,2	49,1	61,8	67,5
Υγρασία εδάφους (%)		19,62	18,60	17,96	21,31	18,27	17,56	16,94	16,49
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,20
L(m)	1,2								
r ₁ (m)	0,008								
r ₂ (m)	0,125								

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	9/5/2011	10/5/2011	11/5/2011	12/5/2011	13/5/2011	16/5/2011	17/5/2011	18/5/2011
R (Ω)	14-16-18-20	13,36	13,37	13,47	13,54	13,75	13,87	13,57	13,40
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	167,8	167,9	169,2	170,1	172,7	174,2	170,4	168,3
R (Ω)	12-16-20-24	5,10	5,17	5,19	5,21	5,23	5,25	5,27	5,28
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	128,1	129,9	130,4	130,9	131,4	131,9	132,4	132,6
R (Ω)	8-16-24-32	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,31
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	112,5	116,1
R (Ω)	0-12-24-36	1,832	1,834	1,828	1,836	1,838	1,842	1,846	1,890
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	138,1	138,2	137,8	138,4	138,5	138,8	139,1	142,4
R (Ω)	0-16-32-48	1,666	1,676	1,688	1,692	1,704	1,731	1,742	1,780
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	167,4	168,4	169,6	170,0	171,2	173,9	175,0	178,9
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	114,9	115,4	115,9	118,00	120,0	121,4	122,3	117,8
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	42,4	40,6	40,0	40,5	41,4	41,8	42,0	42,1
ρ_2 (Ωm)		59,2	56,7	55,9	56,6	57,8	58,4	58,6	58,8
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	29,8	30,0	30,2	30,2	30,6	30,8	30,8	30,4
ρ_3 (Ωm)		41,6	41,9	42,2	42,2	42,7	43,0	43,0	42,4
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	51,8	51,9	52,2	52,6	53,0	52,1	52,3	51,5
ρ_4 (Ωm)		72,3	72,5	72,9	73,4	74,0	72,7	73,0	71,9
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	31,3	31,1	31,2	31,3	31,6	31,3	31,4	30,9
ρ_5 (Ωm)		43,7	43,4	43,6	43,7	44,1	43,7	43,8	43,1
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	56,6	56,3	56,2	56,4	57,1	58,1	58,4	57,7
ρ_6 (Ωm)		79,0	78,6	78,5	78,8	79,7	81,1	81,5	80,6
Ωρα		11:10	12:00	12:15	12:20	11:10	12:30	11:20	2:00
Θερμοκρασία αέρα (°C)		19,2	19,3	19,2	17,4	21,3	25,4	23,0	23,9
Υγρασία αέρα (%)		51,3	49,1	34,4	58,2	51,2	41,6	60,1	73,1
Υγρασία εδάφους (%)		15,72	15,27	14,89	14,63	14,31	13,51	13,25	13,11
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
L(m)	1,2								
r ₁ (m)	0,008								
r ₂ (m)	0,125								

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	19/5/2011	20/5/2011	23/5/2011	24/5/2011	25/5/2011	27/5/2011	30/5/2011	31/5/2011
R (Ω)	14-16-18-20	13,59	13,81	13,81	13,73	13,75	13,85	14,12	14,13
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	170,7	173,5	173,5	172,4	172,7	174,0	177,3	177,5
R (Ω)	12-16-20-24	5,27	5,32	5,37	5,41	5,40	5,43	5,48	5,48
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	132,4	133,6	134,9	135,9	135,6	136,4	137,7	137,7
R (Ω)	8-16-24-32	2,28	2,32	2,32	2,34	2,33	2,31	2,28	2,28
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	114,5	116,6	116,6	117,6	117,1	116,1	114,5	114,5
R (Ω)	0-12-24-36	1,870	1,880	1,880	1,890	1,890	1,868	1,864	1,866
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	140,9	141,7	141,7	142,4	142,4	140,8	140,5	140,6
R (Ω)	0-16-32-48	1,790	1,860	1,890	1,930	1,940	1,770	1,786	1,798
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	179,9	186,9	189,9	193,9	194,9	177,8	179,5	180,7
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	120,1	121,1	121,6	121,4	122,2	101,6	106,4	110,2
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	41,9	43,8	44,9	46,7	45,3	41,3	43,0	43,7
ρ_2 (Ωm)		58,5	61,2	62,7	65,2	63,3	57,7	60,0	61,0
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	30,6	30,7	32,0	32,1	32,3	32,0	32,6	32,8
ρ_3 (Ωm)		42,7	42,9	44,7	44,8	45,1	44,7	45,5	45,8
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	51,4	52,4	52,4	51,9	52,1	48,8	49,6	50,5
ρ_4 (Ωm)		71,8	73,2	73,2	72,5	72,7	68,1	69,3	70,5
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	31,1	31,4	31,1	31,0	30,9	29,7	30,3	30,5
ρ_5 (Ωm)		43,4	43,8	43,4	43,3	43,1	41,5	42,3	42,6
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	58,0	58,9	59,6	59,8	60,0	60,6	62,4	63,2
ρ_6 (Ωm)		81,0	82,2	83,2	83,5	83,8	84,6	87,1	88,2
Ωρα		12:00	12:10	11:10	13:30	11:10	13:40	12:20	11:55
Θερμοκρασία αέρα (°C)		19,1	21,2	26,0	29,2	26,4	24,7	25,3	24,6
Υγρασία αέρα (%)		63,1	61,3	44,0	39,0	54,3	60,5	56,1	55,1
Υγρασία εδάφους (%)		12,84	12,69	12,49	12,51	12,28	20,32	18,88	17,86
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,2	0,00	0,00
L(m)	1,2								
r ₁ (m)	0,008								
r ₂ (m)	0,125								

		Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία	Ημερομηνία
	Θέσεις	1/6/2011	2/6/2011	3/6/2011	6/6/2011	7/6/2011	8/6/2011	9/6/2011
R (Ω)	14-16-18-20	14,17	14,08	14,19	13,34	14,34	14,36	14,36
$\rho_{\alpha=2}$ (Ωm)	2	178,0	176,8	178,2	167,6	180,1	180,4	180,4
R (Ω)	12-16-20-24	5,49	5,55	5,55	5,61	5,62	5,63	5,64
$\rho_{\alpha=4}$ (Ωm)	4	137,9	139,4	139,4	140,9	141,2	141,4	141,7
R (Ω)	8-16-24-32	2,28	2,29	2,28	2,28	2,28	2,27	2,27
$\rho_{\alpha=8}$ (Ωm)	8	114,5	115,0	114,5	114,5	114,5	114,0	114,0
R (Ω)	0-12-24-36	1,868	1,866	1,864	1,872	1,872	1,876	1,879
$\rho_{\alpha=12}$ (Ωm)	12	140,8	140,6	140,5	141,1	141,1	141,4	141,6
R (Ω)	0-16-32-48	1,802	1,808	1,816	1,842	1,838	1,850	1,851
$\rho_{\alpha=16}$ (Ωm)	16	181,1	181,7	182,5	185,1	184,7	185,9	186,0
R ₁ (Ω)	R _{1_20} -R _{1_40}	115,4	113,5	115,3	118,50	119,3	120,5	120,9
R ₂ (Ω)	R _{2_20} -R _{2_40}	44,3	45,0	45,6	47,8	48,3	49,0	49,2
ρ_2 (Ωm)		61,9	62,8	63,7	66,7	67,4	68,4	68,7
R ₃ (Ω)	R _{3_20} -R _{3_40}	32,6	32,8	33,0	34,2	34,4	34,6	34,7
ρ_3 (Ωm)		45,5	45,8	46,1	47,8	48,0	48,3	48,5
R ₄ (Ω)	R _{4_20} -R _{4_40}	51,1	51,7	52,1	52,6	53,1	53,3	53,5
ρ_4 (Ωm)		71,4	72,2	72,7	73,4	74,1	74,4	74,7
R ₅ (Ω)	R _{5_20} -R _{5_40}	30,6	30,5	30,7	30,7	30,7	30,6	30,6
ρ_5 (Ωm)		42,7	42,6	42,9	42,9	42,9	42,7	42,7
R ₆ (Ω)	R _{6_20} -R _{6_40}	63,9	64,4	64,9	66,4	67,0	67,6	67,8
ρ_6 (Ωm)		89,2	89,9	90,6	92,7	93,6	94,4	94,7
Ωρα		13:30	15:35	12:10	11:15	12:40	11:20	13:00
Θερμοκρασία αέρα (°C)		27,9	27,4	28,2	27,2	28,3	27,1	29,2
Υγρασία αέρα (%)		55,3	55,2	59,7	48,7	47,6	51,8	49,1
Υγρασία εδάφους (%)		17,15	16,59	16,03	14,82	14,52	14,19	13,91
Ύψος βροχόπτωσης (mm)		0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L(m)	1,2							
r ₁ (m)	0,008							
r ₂ (m)	0,125							