



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση βελτιωτικών υλικών εδάφους
στη χρονική μεταβολή
της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων**

Καρακίτσιος Ιωάννης

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέποντες: Ιωάννης Φ. Γκόνος, Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση βελτιωτικών υλικών εδάφους
στη χρονική μεταβολή
της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων**

Καρακίτσιος Ιωάννης

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέποντες: Ιωάννης Φ. Γκόνος, Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανάς

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής

.....
Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....

Καρακίτσιος Ιωάννης

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.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iii
Λέξεις Κλειδιά	iii
Abstract	iv
Key Words	iv
Πρόλογος	v
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	1
1.1 Ορολογία	1
1.2 Ο ρόλος της γείωσης	6
1.3 Αντίσταση γείωσης	7
1.4 Είδη γείωσης	15
1.5 Μέθοδοι γείωσης.....	18
1.6 Συστήματα σύνδεσης των γειώσεων	20
1.7 Ηλεκτρόδια γείωσης - Γειωτής ράβδου	23
1.8 Διατάξεις ηλεκτροδίων γείωσης.....	31
Κεφάλαιο 2 - Ειδική Αντίσταση εδάφους	38
2.1 Ειδική αντίσταση.....	38
2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση	39
2.3 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης.....	44
2.4 Προσδιορισμός της δομής του εδάφους.....	47
Κεφάλαιο 3 - Βελτιωτικά υλικά γειώσεων	49
3.1 Βελτιωτικά Υλικά	49
3.2 Έρευνες σχετικά με βελτιωτικά υλικά	51



Κεφάλαιο 4 - Όρια Ασφαλείας	57
4.1 Καθορισμός ορίων ασφαλείας	57
4.2 Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη διάρκεια σφάλματος	61
4.3 Επίδραση λεπτού στρώματος υλικού επιφανείας.....	66
4.4 Κριτήρια ανεκτής τάσης.....	67
4.5 Κριτήρια για τη βηματική τάση και την τάση επαφής.....	70
Κεφάλαιο 5 - Τρόποι Μέτρησης	72
5.1 Περιγραφή της εγκατάστασης.....	72
5.2 Λήψη των μετρήσεων	77
Κεφάλαιο 6 - Αποτελέσματα-Επεξεργασία τους και Σχόλια επί αυτών	82
6.1 Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	82
6.2 Χρήση του προγράμματος CYMGrd	87
6.3 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων.....	100
Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα-Η επόμενη μέρα	129
Βιβλιογραφία	137
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	142



Περίληψη

Τα βελτιωτικά υλικά γειώσεων χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για τη διατήρηση της αντίστασης γείωσης σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο η απόδοση των υλικών αυτών δεν παραμένει ίδια κατά τη διάρκεια του έτους, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας πραγματοποιήθηκαν, σε καθημερινή σχεδόν βάση, μετρήσεις της αντίστασης γείωσης 6 διαφορετικών συστημάτων γείωσης: τα πέντε από αυτά έχουν βελτιωτικά υλικά ενώ το έκτο είναι εγκατεστημένο σε φυσικό έδαφος. Έχουμε έτσι τη δυνατότητα όχι μόνο να παρακολουθήσουμε την ικανότητα των βελτιωτικών υλικών να μειώνουν την αντίσταση γείωσης αλλά και να εξετάσουμε αν η ικανότητα αυτή δικαιολογεί το, ιδιαίτερα αυξημένο σε ορισμένες περιπτώσεις, κόστος αγοράς των υλικών αυτών. Επειδή η ασφάλεια που παρέχει ένα σύστημα γείωσης δεν εξαρτάται μόνο από τη χαμηλή τιμή της αντίστασης γείωσης αλλά και από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους οι οποίες, μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα CYMGrd, δίνουν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια των μεγεθών αυτών. Δίνεται έτσι η δυνατότητα να εξετάσουμε πώς μεταβάλλονται τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής, σε σχέση με το χρόνο καθώς και με ορισμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Λέξεις Κλειδιά

Αντίσταση γείωσης, βελτιωτικά υλικά, βηματική τάση, ειδική αντίσταση εδάφους, μέγιστα επιτρεπόμενα όρια ασφαλείας, τάση επαφής.



Abstract

Ground enhancing compounds are widely used today to maintain the grounding resistance value in low levels. However the performance of these compounds does not remain the same throughout the year, because of changes in environmental factors. In this diploma thesis measurements of 6 different grounding systems (five of which surrounded by ground enhancing compounds, and one surrounded by natural soil) were carried out on an almost daily basis. Therefore not only can we observe the ability of the ground enhancing compounds to reduce the ground resistance value, but also examine whether this ability justifies the, quite high in some cases, cost of these compounds. Since the safety provided by a grounding system depends both on a low grounding resistance value and on the values of the developing touch and step voltages, measurements of the soil resistivity were carried out as well, which, after being processed with the program CYMGrd, give the maximum permissible value of these voltages. Thus we can observe how the maximum permissible values of the step and touch voltage vary over the year and under the influence of some environmental factors.

Key Words

Ground enhancing compounds, ground resistance, maximum permissible safety values, resistivity, step voltage, touch voltage.



Πρόλογος

Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να μεταφέρει και να διαχέει το ρεύμα σφάλματος στη γη, εμφανίζοντας τη μικρότερη δυνατή αντίσταση στη διέλευση του ρεύματος στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Επιτυγχάνουμε έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια κατά την εκδήλωση σφάλματος, τόσο για τους χρήστες όσο και για τον εξοπλισμό της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης, ελαττώνουμε τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας σε περίπτωση κεραυνού και παρέχουμε ένα δυναμικό αναφοράς για τα ηλεκτρικά σήματα στον τομέα των επικοινωνιών. Για να επιτύχουμε μία χαμηλή τιμή στην αντίσταση γείωσης, λόγω του τύπου ή της δομής του εδάφους, είναι ορισμένες φορές απαραίτητη η τοποθέτηση περισσότερων του ενός ηλεκτροδίων γείωσης. Η εργασία αυτή είναι συνήθως αρκετά δαπανηρή, είτε λόγω της δομής του εδάφους, είτε λόγω του μεγάλου σε έκταση χώρου που απαιτεί.

Μία εναλλακτική μέθοδος είναι η χρήση βελτιωτικών υλικών γείωσης γύρω από τα ηλεκτρόδια. Στη διπλωματική αυτή εργασία έγιναν μετρήσεις σε ηλεκτρόδια γείωσης που είχαν τοποθετηθεί 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. Ειδικότερα η διπλωματική αυτή εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1. Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται η ορολογία που αφορά στα συστήματα γείωσης και πραγματοποιείται μία εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα αυτά. Δίνεται επίσης η έννοια και ο ορισμός της αντίστασης γείωσης, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της τιμής της, καθώς επίσης και οι απαιτήσεις και προδιαγραφές για τις μεθόδους αυτές.

Κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η έννοια και ο ορισμός της ειδικής αντίστασης εδάφους και παρουσιάζονται κάποιοι από τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Εξετάζεται επίσης η διεξαγωγή μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους και γίνεται μία προσπάθεια καθορισμού της δομής του προς εξέταση εδάφους χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις αυτές.



Κεφάλαιο 3. Γίνεται μία αναφορά στα βελτιωτικά υλικά γειώσεων και επιχειρείται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών που έχουν γίνει σχετικά με την εύρεση ενός οικονομικού και ταυτόχρονα αποδοτικού βελτιωτικού.

Κεφάλαιο 4. Στο κεφάλαιο αυτό αναφερόμαστε στα όρια ασφαλείας που πρέπει να πληροί ένα σύστημα γείωσης. Τα όρια ασφαλείας έχουν να κάνουν με τάσεις επαφής και βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος ή κατά τη διάρκεια ανάπτυξης ρευμάτων σφάλματος. Θα αναφερθούμε στα όρια αντοχής σε ρεύμα του ανθρωπίνου σώματος και με βάση αυτά θα καθορίσουμε τα όρια των τάσεων που δύναται να αναπτυχθούν.

Κεφάλαιο 5. Περιγράφεται ο χώρος που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων καθώς και η θέση των ηλεκτροδίων του πειράματος. Γίνεται επίσης μία αναφορά στον τρόπο με τον οποίο λαμβάνονταν οι μετρήσεις, ενώ παράλληλα περιγράφονται και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 6. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι τιμές των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της παρούσας εργασίας και γίνεται μία προσπάθεια επεξεργασίας των τιμών αυτών παραθέτοντας κάποια χρήσιμα για την εργασία διαγράμματα. Γίνεται επίσης μία περιγραφή του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση διστρωματικού εδάφους, από την οποία ελήφθησαν η βηματική τάση και η τάση επαφής για κάθε μέτρηση.

Κεφάλαιο 7. Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζουμε τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία αυτή, και γίνονται κάποιες προτάσεις για προέκταση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.



Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, όχι μόνο για την ανάθεση της εργασίας, αλλά και για την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα Μηχανικό του Ε.Μ.Π., επειδή στάθηκε δίπλα μου σε κάθε δυσκολία που ανέδειξε η εργασία αυτή, παρέχοντας πρακτική και ηθική βοήθεια. Χωρίς τον πολύτιμο χρόνο και την ουσιαστική καθοδήγηση που μου παρείχε, η διπλωματική αυτή εργασία θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να πραγματοποιηθεί.

Τον κ. Βασίλειο Π. Ανδροβιτσανέα, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για το άριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε και για την καθοδήγηση που μου παρείχε για τη διεξαγωγή της εργασίας.

Τον κ. Αριστείδη Γιάννακα, τεχνικό στο εργαστήριο υψηλών τάσεων του Ε.Μ.Π. χωρίς την πρακτική, τεχνική και ηθική βοήθεια του οποίου, οι μετρήσεις δεν θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν σε τόσο συχνή βάση.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και κυρίως τον κ. Ιωάννη Ν. Ζτούπη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη βοήθεια που μου παρείχε στη διεξαγωγή των μετρήσεων, καθώς και τον κ. Χρήστο Ηλία για την τεχνική υποστήριξη και τη διάθεση του απαραίτητου εξοπλισμού.



Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται η ορολογία που αφορά στα συστήματα γείωσης και πραγματοποιείται μία εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα αυτά. Δίνεται επίσης η έννοια της αντίστασης γείωσης ο ορισμός της και η μαθηματική περιγραφή της, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της τιμής της αντίστασης γείωσης, καθώς επίσης και οι απαιτήσεις και προδιαγραφές για αυτές τις μετρήσεις. 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 Ορολογία

Γείωση: Η γείωση ορίζεται ως η αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος των προς γείωση τμημάτων μιας εγκατάστασης ή του ουδέτερου κόμβου μετασχηματιστών και γεννητριών και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό μέρος της κατασκευής των κτιριακών εγκαταστάσεων. Σκοπός της γείωσης είναι να κάνει εφικτή την εκφόρτιση των ηλεκτρικών ρευμάτων στη γη μέσω ενός γυμνού μεταλλικού κομματιού, του ηλεκτροδίου της γείωσης, το οποίο είναι θαμμένο μέσα στο έδαφος.

Διάταξη/Σύστημα γείωσης (Grounding system): Το σύστημα που περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής. Το ηλεκτρόδιο γείωσης, ο αγωγός γείωσης και ο κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης αποτελούν τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης γείωσης [2].

Ηλεκτρόδιο γείωσης (Ground electrode) ή γειωτής: Το τοποθετημένο μέσα στο έδαφος ηλεκτρόδιο μέσω του οποίου γίνεται συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη γη [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 και, αν υπάρχουν, οι αγωγοί της γείωσης λειτουργίας [2].

Άπειρη γη: Ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε “άπειρη απόσταση” από το γειωτή το οποίο λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών. Η τάση της άπειρης γης θεωρείται μηδενική. Για πρακτικούς λόγους η “άπειρη απόσταση” είναι 5-10 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη διάσταση του γειωτή [2].

Αντίσταση γείωσης: Για μία συγκεκριμένη εκφόρτιση ρεύματος η αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού (σε Volts), μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και της άπειρης γης, και της εκφόρτισης ρεύματος (σε Amperes), δηλαδή $R = V/I$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι επομένως μία ωμική αντίσταση στο γύρω από το ηλεκτρόδιο έδαφος και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [4].

Εξαρτάται από την ειδική αντίσταση ρ του εδάφους όπου είναι εγκατεστημένη η γείωση, την επιφάνεια A που η γείωση καταλαμβάνει καθώς και το βάθος h όπου είναι τοποθετημένη. Ένα καλό σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση με στόχο τη μείωση του μέγιστου δυναμικού γείωσης. Συνήθεις τιμές για μεγάλους υποσταθμούς είναι μικρότερες του 1Ω και για υποσταθμούς διανομής από 1 ως 5Ω

Ανύψωση δυναμικού γης (Ground Potential Rise (GPR)) ή Μέγιστο Δυναμικό Γείωσης: Το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που ένα πλέγμα γείωσης υποσταθμού μπορεί να λάβει σε σχέση με ένα απομακρυσμένο σημείο γείωσης, το οποίο υποτίθεται ότι έχει το δυναμικό της απόμακρης γης. Αυτή η τάση, GPR , είναι ίση με το γινόμενο του μέγιστου ρεύματος I που διαρρέει το πλέγμα και της αντίστασης της 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

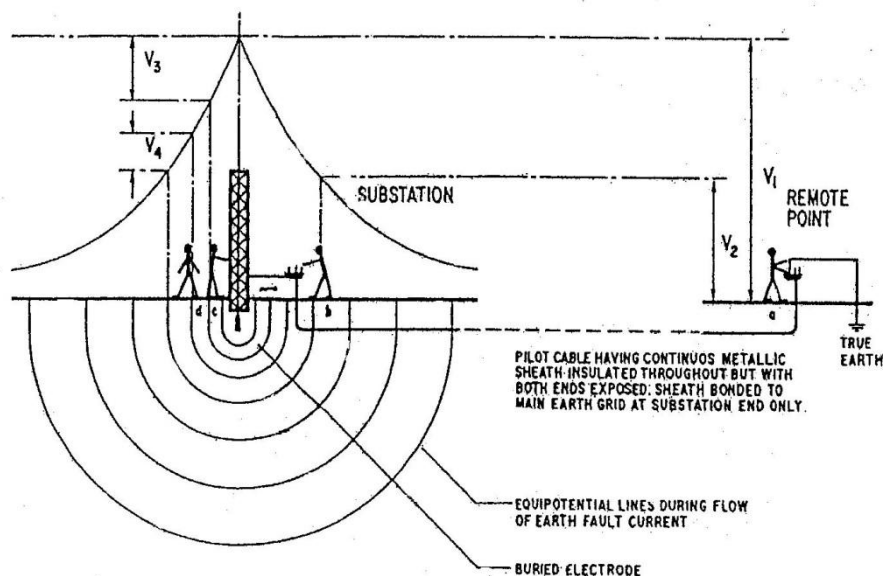


εδάφους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αγωγών του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση των αγωγών μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό του Z .

Ρεύμα γης (Ground current): Το ρεύμα που ρέει από ή προς τη γη, ή το ισοδύναμο γης.

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

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



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

Τάση επαφής (Touch voltage): 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 V_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].

Βηματική τάση (Step voltage): 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 V_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].

Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage): 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].

Μεταφερόμενη τάση (Transferred voltage): 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 V_3 θα είναι ίση με την ανύψωση του δυναμικού της γης του υποσταθμού. Στο σχήμα η V_4 παρουσιάζεται μικρότερη από τη U_3 . Αυτό συμβαίνει διότι το άτομο d βρίσκεται σε μερική απόσταση από το κύριο ηλεκτροδίο 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].

Υλικό επιφανείας (surface material): είναι ένα υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και αποτελείται από πέτρα, χαλίκι, άσφαλτο, 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): Το μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή 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 [5]:

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

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 λόγους αντικεραυνικής προστασίας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος γείωσης της ανεμογεννήτριας.



1.2 Ο ρόλος της γείωσης

Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει πάντα προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό. Βέβαια η ροή του ρεύματος προς το σημείο αυτό πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη ασφάλεια για τους ανθρώπους, εξασφαλίζοντας τόσο την αξιοπιστία του συστήματος όσο και την ελάχιστη πτώση δυναμικού. Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα κεραυνοπληξιών ή σφαλμάτων προς τη γη, μειώνοντας παράλληλα τις πιθανότητες ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς [6].

Για να είναι ένα σύστημα γείωσης ασφαλές, πρέπει να εξασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και τη συνέχεια της λειτουργίας του σε περίπτωση εμφανίσεως οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη, καθώς και να προστατεύει από ηλεκτροπληξία άτομα που, είτε δουλεύουν, είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο. Για να είναι αυτό εφικτό πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος να είναι αρκετά χαμηλή (θεωρητικά να είναι ίση με το μηδέν), ώστε το ρεύμα να οδεύει στη γη μέσω της γείωσης, διατηρώντας τις μέγιστες διαφορές δυναμικού, όπως η βηματική τάση και η τάση επαφής που αναπτύσσονται, κάτω από συγκεκριμένα όρια [2,7].

Επομένως, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα [6]:

1. Προστασία του ανθρώπου από τις βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής που ενδεχομένως αναπτύσσονται.
2. Προστασία τόσο της κατασκευής όσο 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 ζεύξεων.

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [6], 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 αγώγιμα 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 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.

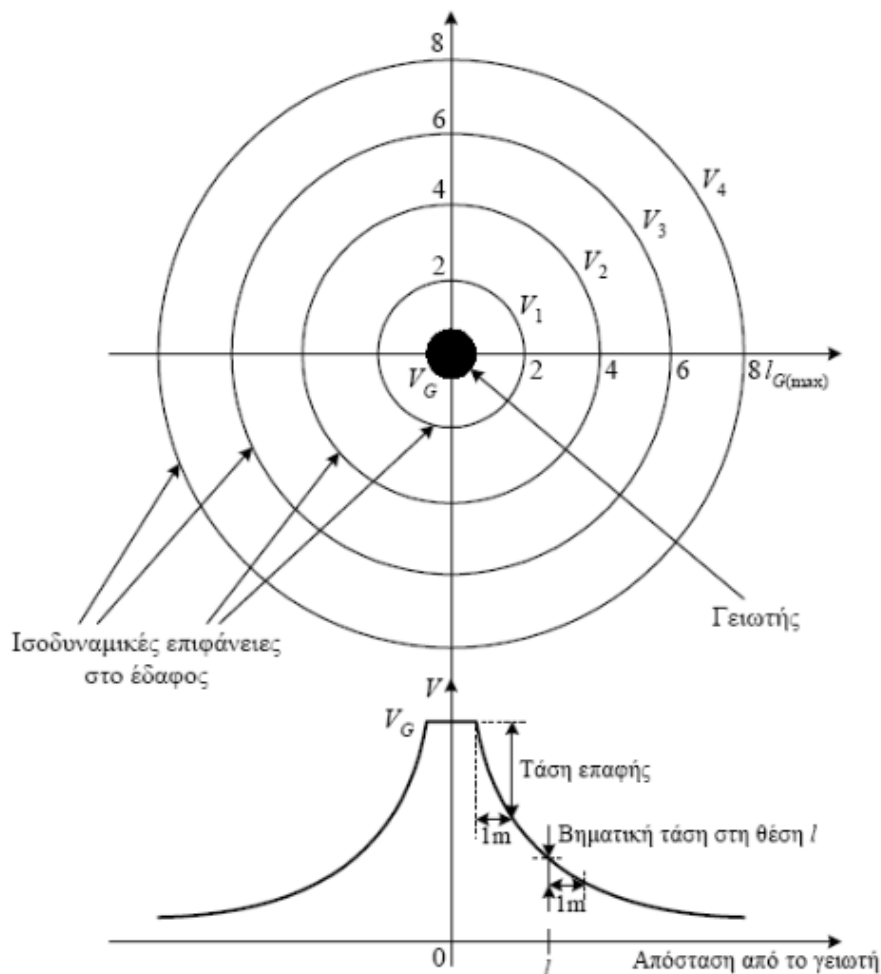
1.3 Αντίσταση γείωσης

Η αντίσταση γείωσης ορίζεται ως η αντίσταση από το γειωτή έως την άπειρη γη. Άπειρη γη θεωρείται ένα σημείο του εδάφους, σε άπειρη απόσταση από το γειωτή, το οποίο έχει δυναμικό μηδέν. Στο Σχήμα 1.2 εικονίζεται η μεταβολή του δυναμικού στο έδαφος V , όταν στο γειωτή εφαρμοστεί μια τάση V_G ως προς την άπειρη γη. Το δυναμικό μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το γειωτή και θεωρείται αμελητέο σε απόσταση 10πλάσια από τη μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή $I_{G(max)}$. Η απόσταση αυτή θεωρείται στις πρακτικές εφαρμογές ως η άπειρη γη.

Από το Σχήμα 1.2 ορίζεται η τάση επαφής, ως η πτώση τάσης κατά μήκος 1m του εδάφους δίπλα στο γειωτή, ενώ η βηματική τάση είναι η πτώση τάσης κατά μήκος 1m του εδάφους.

Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους, η οποία μεταβάλλεται με την υγρασία και τη θερμοκρασία. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την υγρασία και για το λόγο αυτό οι γειωτές πρέπει να τοποθετούνται σε βάθος μεγαλύτερο από 0,5m, όπου το έδαφος διατηρεί περίπου σταθερή την υγρασία του. Ακόμη, η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μεταβολή της θερμοκρασίας αγγίζει το $\pm 30\%$ ανάλογα με την εποχή του έτους. Βέβαια, το είδος του εδάφους (πετρώδες, ελώδες), έχει καθοριστική επίδραση στην τιμή της αντίστασης γείωσης.





Σχήμα 1.2: Δυναμικό γύρω από το γειωτή.

1.3.1 Θεωρητικός υπολογισμός αντίστασης γείωσης

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται εξισώσεις, οι οποίες δίνουν την αντίσταση γείωσης γειωτών ράβδου. Στη βιβλιογραφία [8] μπορούν να αναζητηθούν και εξισώσεις που δίνουν τη θεωρητική αντίσταση γείωσης για επιπλέον τύπους γειωτών, ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία θα περιοριστούμε σε εξισώσεις που αφορούν τους γειωτές ράβδου.

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 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 [8]. Πρέπει βέβαια να τονίσουμε ότι η ακρίβεια αυτών των εξισώσεων ποικίλλει αξιοσημείωτα, αλλά αποδεικνύεται επαρκώς καλή για την εκτίμηση της αντίστασης σε πολλές πρακτικές εφαρμογές.

Μία κάθετη ράβδος γείωσης είναι ένας απομονωμένος κύλινδρος και η ροή του ρεύματος από αυτή στο έδαφος, αλλά και διαμέσου του εδάφους, υπολογίζεται από τους ίδιους τύπους που υπολογίζεται και η ροή ενός ρευστού διηλεκτρικού από έναν απομονωμένο φορτισμένο κύλινδρο. Συνεπώς το πρόβλημα της αντίστασης γείωσης μιας τέτοιας ράβδου ανάγεται ουσιαστικά στο πρόβλημα υπολογισμού της χωρητικότητας ενός απομονωμένου κυλίνδρου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μεγάλο συγκρινόμενο με την ακτίνα του. Για την περίπτωση αυτή έχει δοθεί από τον E.Hallen η ακόλουθη εξίσωση [9]:

$$\frac{C}{L} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1,22741}{4\lambda^2} + \frac{2,17353}{8\lambda^3} + \frac{11,0360}{16\lambda^4} + \dots \quad (1.3)$$

όπου

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

$2L$ = το μήκος του μεμονωμένου κυλίνδρου (σε cm)

α = η ακτίνα του κυλίνδρου (σε cm)

C = η χωρητικότητα (σε F)

Τροποποιώντας ελαφρώς την προηγούμενη εξίσωση, προκύπτει μια έκφραση που είναι πιο βολική για πρακτικούς σκοπούς και η οποία συγκλίνει πιο γρήγορα σε ένα όριο. Η έκφραση αυτή είναι η ακόλουθη:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{L} \left(\lambda - 0,306852 - \frac{0,17753}{\lambda} - \frac{0,5519}{\lambda^2} - \dots \right) \quad (1.4)$$

Επαναληπτικές μέθοδοι που υποθέτουν ομοιόμορφη κατανομή φορτίου [10] ή χρησιμοποιούν μηχανική ολοκλήρωση [11], έχουν επαληθεύσει επιτυχώς την εξίσωση αυτή.



Η μέθοδος του μέσου δυναμικού [12] συνίσταται στην υπόθεση ομοιόμορφης πυκνότητας φορτίου πάνω στην επιφάνεια του αγωγού και στον υπολογισμό του μέσου δυναμικού. Είναι μία προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού, που χρησιμοποιείται για μεγάλο πλήθος διατάξεων ηλεκτροδίων. Ακολούθως, η κατά προσέγγιση χωρητικότητα λαμβάνεται ίση με το πηλίκο του συνολικού φορτίου προς το μέσο δυναμικό.

Η μετατροπή μιας εξίσωσης για τη χωρητικότητα σε μια εξίσωση για την αντίσταση γείωσης μπορεί να γίνει θεωρώντας την απλή περίπτωση δύο παραλλήλων πλακών, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή και το φαινόμενο των άκρων μπορεί να αμεληθεί. 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 [8]:

$$R_1 = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) \quad (1.5)$$

όπου ρ_2 είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους που περικλείει το ηλεκτρόδιο.

Για ηλεκτρόδια εγκιβωτισμένα σε μπετόν ή κάποιο βελτιωτικό υλικό γείωσης [13, 14], η αντίσταση είναι:

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) - \frac{\rho_1}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_2} - 1 \right) + \frac{\rho_2}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r_2} - 1 \right) \quad (1.6)$$

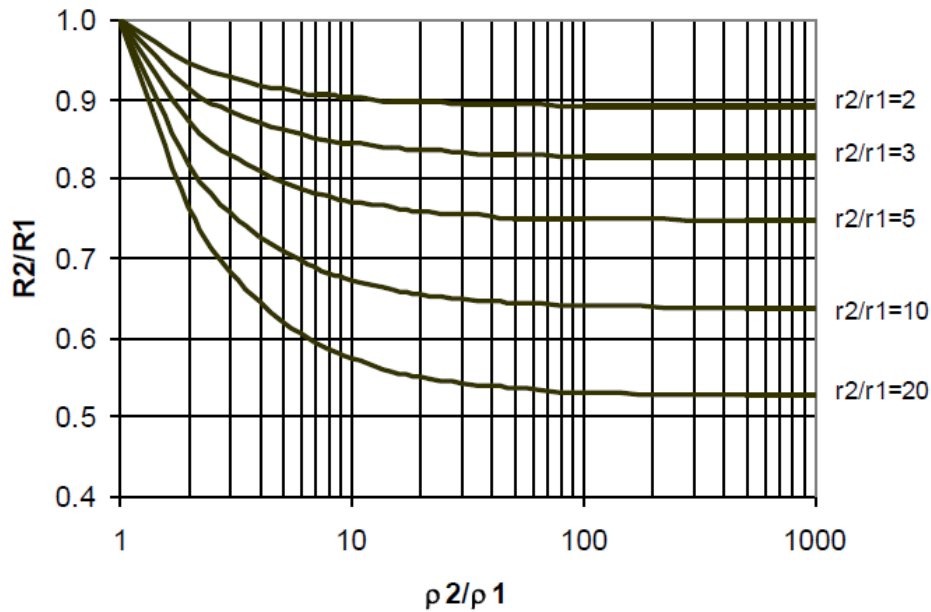
Η εξίσωση (1.6) παριστάνει το συνδυασμό δύο αντιστάσεων:

- της αντίστασης του όγκου που δημιουργείται από το βελτιωτικό υλικό ακτίνας r_2 , το οποίο είναι θαμμένο σε έδαφος ειδικής αντίστασης ρ_2 και
- της αντίστασης ενός εσωτερικού τμήματος της ακτίνας r_2 , το οποίο περιέχει ένα μεταλλικό πυρήνα ακτίνας r_1 .

Εφαρμόζοντας αλγεβρικές μεθόδους, η εξίσωση (1.6) μπορεί να γραφεί ως:

$$R_2 = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2) \quad (1.7)$$





Σχήμα 1.3: Μείωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτίνων και ειδικών αντιστάσεων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 1.3 βλέπουμε ότι είναι αξιοσημείωτη η ελάττωση της αντίστασης, τόσο όταν ο λόγος ακτίνων r_2/r_1 έχει μεγάλη τιμή, όσο και όταν ο λόγος των ειδικών αντιστάσεων ρ_2/ρ_1 δεν ξεπερνά το 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.

1.3.2 Μέτρηση της αντίστασης γείωσης

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η μέτρηση της αντίστασης γείωσης, επειδή απαιτείται η επίτευξη μίας καθορισμένης τιμής. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι η γείωση προστασίας για συστήματα TT και IT σε εγκαταστάσεις X.T. [15,16], συνδυασμός γείωσης προστασίας και γείωσης λειτουργίας σε σύστημα γείωσης σε υποσταθμούς Y.T. , σύστημα γείωσης για τη γείωση ουδετέρου σε δίκτυο διανομής M.T.

Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν τα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας όπου η μέτρηση της γείωσης θα πρέπει να γίνεται ακόμα και αν δεν θεωρείται απαραίτητη μία συγκεκριμένη τιμή [17].

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 [18] section 61.1). Όλος ο εξοπλισμός γενικότερα θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 61557-1:2007 [19]. 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” [20].
- IEC 61557-6:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring protective measures involving residual current devices” [21].
- IEC 61557-10:2007 “Combined measuring equipment” [22].

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 [17].

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.

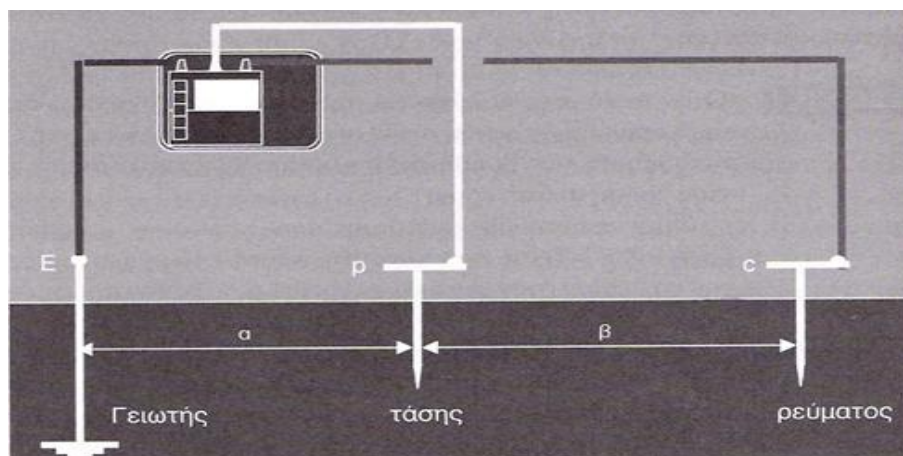
Η πορεία της μέτρησης και κάθε επιπλέον διαδικασία που τη συνοδεύει (π.χ. διακοπή κανονικών συνδέσεων ή πραγματοποίηση μη τυποποιημένων συνδέσεων), δε θα πρέπει να θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια χρηστών και εξοπλισμού ([18] section 61.1.3). Το μέγεθος της τάσης δοκιμής ή του ρεύματος δοκιμής πρέπει να 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 διαχωριστεί με τρόπο 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 [23].

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 από τους τρεις (ακροδέκτης E), συνδέεται το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο γείωσης, όπως στο Σχήμα 1.4. Στους άλλους δυο ακροδέκτες συνδέονται βοηθητικά ηλεκτρόδια.



Σχήμα 1.4: Διάταξη μέτρησης αντίστασης γείωσης.

Το γειωσόμετρο εγγέει, 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 συχνοτήτων στις εγκαταστάσεις και στα δίκτυα (50-60-400Hz). 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 ρεύματος 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 40kΩ.

Η επιτρεπόμενη τιμή αντίστασης των βοηθητικών ηλεκτροδίων τάσης και ρεύματος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του οργάνου και κυμαίνεται από 4kΩ έως 20kΩ. Οι τιμές αυτές δεν επηρεάζουν τη μέτρηση, εφόσον είναι στο εύρος που συνιστά ο κατασκευαστής. Στην περίπτωση βέβαια όπου η μετρούμενη αντίσταση 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 μετόν 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 1x1mm², 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.

Πρέπει να αποφεύγεται 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.

Επίσης δεν ενδείκνυται η παράλληλη όδευση μεταξύ των καλωδίων των βοηθητικών ηλεκτροδίων, καθώς και μεταξύ αυτών και γραμμών μεταφοράς Υ.Τ., Μ.Τ., Χ.Τ, ενώ μεγάλη προσοχή πρέπει να δίδεται στην τιμή που δείχνει το όργανο, όταν υπάρχει κοντά σε αυτό πομπός ασύρματης επικοινωνίας.

1.4 Είδη γείωσης

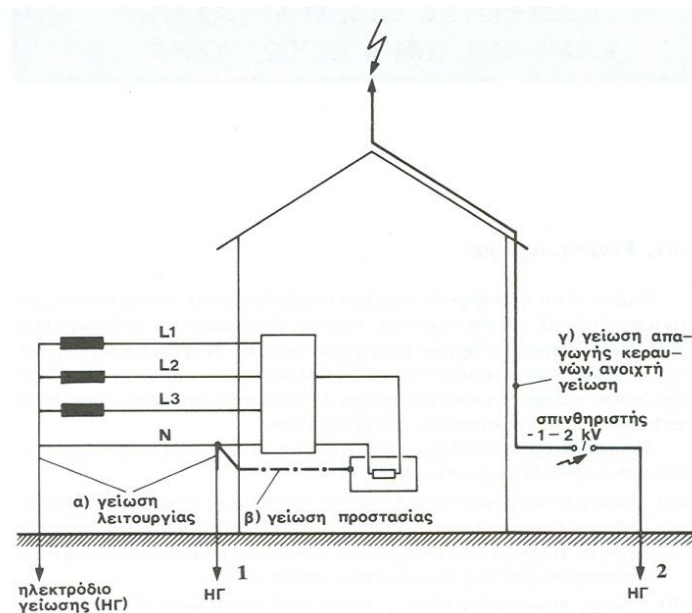
Οι γειώσεις ανάλογα με το λειτουργικό τους σκοπό σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση διακρίνονται σε τρία βασικά είδη, παρόλο που στην πράξη δύνανται να συνυπάρχουν σε ένα σύστημα γείωσης. Τα είδη αυτά είναι:

1.4.1 Γείωση προστασίας

Καλείται η 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 δεν συμμετέχουν στη λειτουργία της (πχ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδύων 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 [24].



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 1.5). 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, όταν βέβαια πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο *ΕΛΟΤ EN 62305-3*.



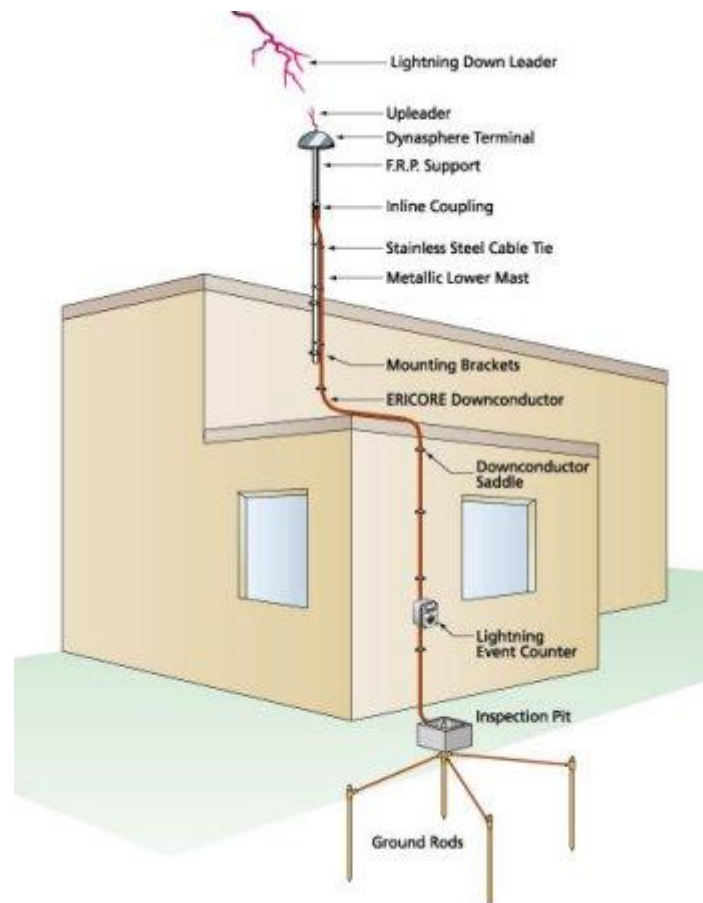
Σχήμα 1.5: Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης [24].

1.4.2 Γείωση ασφαλείας ή συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ)

Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον περιβάλλοντα χώρο, διοχετεύοντας προς τη γη ρεύματα σφάλματος από εξωτερικά ατμοσφαιρικά αίτια όπως οι κεραυνοί (Σχήμα 1.5). Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων (Σχήμα 1.6), 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.

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 [25].



Σχήμα 1.6: Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας [25].

1.4.3 Γείωση λειτουργίας

Ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους ή για την αποφυγή υπερτάσεων. Εκτός της αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης, ενδεχομένως να περιλαμβάνει και πρόσθετες ωμικές, επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις όπως αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως κατά την εκδήλωση σφαλμάτων προς γη [26].

Διακρίνεται σε:

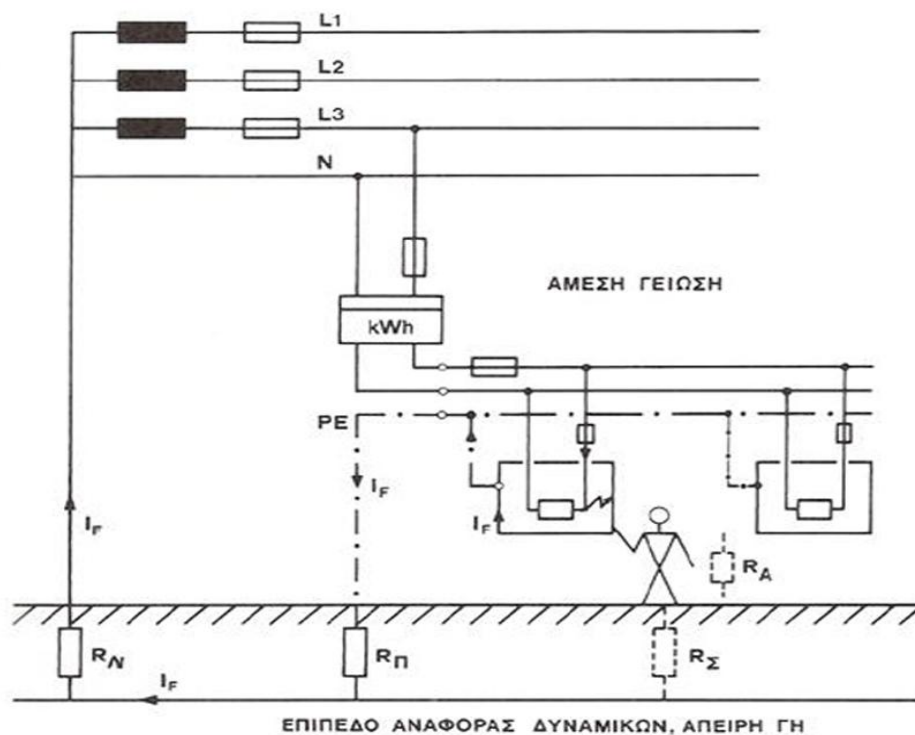
- **Άμεση**, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση, πλην της αντίστασης γείωσης.
- **Έμμεση**, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Η γείωση χαρακτηρίζεται ως ανοικτή, όταν στη γραμμή γείωσης έχουν παρεμβληθεί διάκενα σπινθηριστών ή ασφάλειες διασπάσεως. Οι ανοικτές γειώσεις δε θεωρούνται γειώσεις λειτουργίας.

1.5 Μέθοδοι γείωσης

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

- *Η άμεση γείωση*, δηλαδή η απευθείας αγωγίμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο κλπ.) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7.

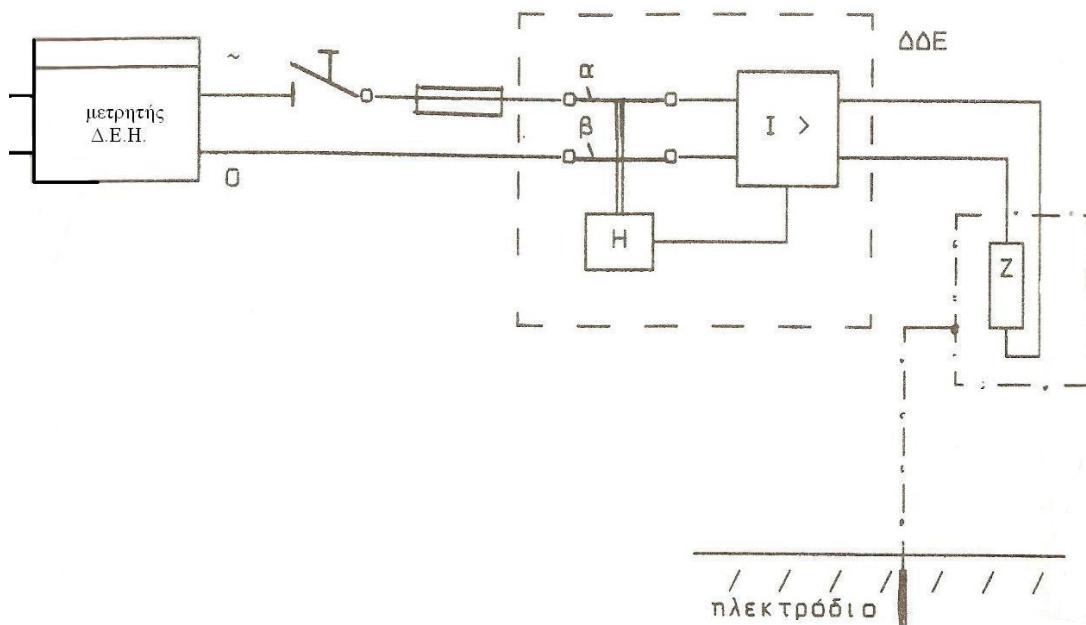


Σχήμα 1.7: Σύστημα προστασίας με άμεση γείωση.

- 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.

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.

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



Σχήμα 1.8: Σύστημα προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης, σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης.

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

1.6 Συστήματα σύνδεσης των γειώσεων

Στα συστήματα παροχής ηλεκτρισμού, τα συστήματα σύνδεσης των γειώσεων καθορίζουν το ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ των αγωγών και της αγωγίμης γήινης επιφάνειας. Η επιλογή του συστήματος έχει επιπτώσεις στην ασφάλεια και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.

Το πρότυπο *IEC 60364* [27] διακρίνει τρεις οικογένειες των συστημάτων γείωσης, χρησιμοποιώντας δύο-γράμματα: TN, TT, και IT.

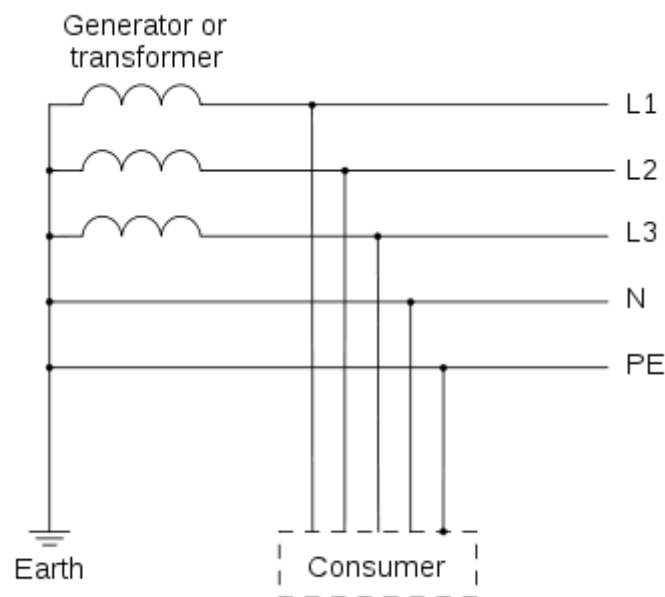
Το πρώτο γράμμα δείχνει τη σύνδεση μεταξύ της γης και της πηγής ρεύματος (γεννήτρια ή μετασχηματιστής):

- T : άμεση σύνδεση ενός σημείου με τη γη
- I : κανένα σημείο δεν συνδέεται με τη γη (απομόνωση)

Το δεύτερο γράμμα δείχνει τη σύνδεση μεταξύ της γης και της ηλεκτρικής συσκευής - καταναλωτή:

- T : άμεση σύνδεση ενός σημείου με τη γη
- N : άμεση σύνδεση στον ουδέτερο, ο οποίος συνδέεται με τη γη

1.6.1 Δίκτυα TN



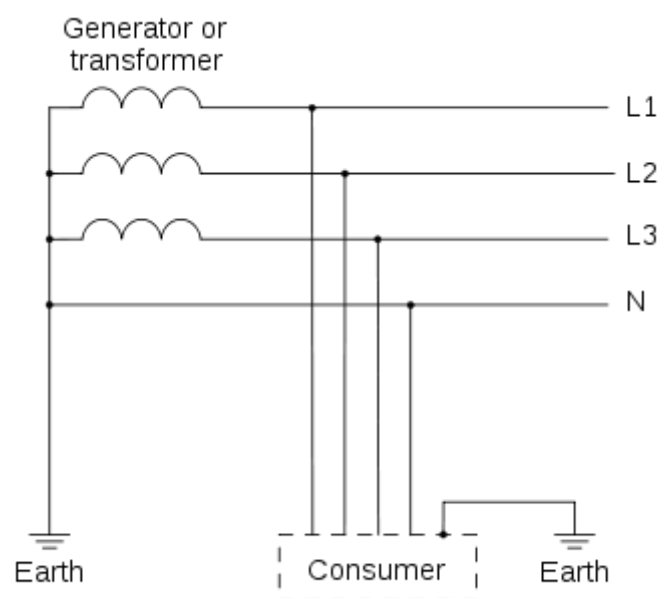
Σχήμα 1.9: Δίκτυα TN

Σε ένα σύστημα γείωσης του τύπου TN, ένα από τα σημεία της γεννήτριας ή του μετασχηματιστή συνδέεται με τη γη, συνήθως το σημείο σύνδεσης των φάσεων σε ένα τριφασικό σύστημα. Το σώμα της ηλεκτρικής συσκευής συνδέεται με τη γη μέσω αυτής της γείωσης του μετασχηματιστή. Ο αγωγός που συνδέει τα εκτεθειμένα μεταλλικά μέρη του καταναλωτή είναι η γείωση προστασίας (PE – Protective Earth).

1.6.2 Δίκτυα TT

Σε ένα σύστημα σύνδεσης των γειώσεων TT, η γείωση προστασίας του καταναλωτή παρέχεται από μια τοπική σύνδεση προς τη γη, ανεξάρτητη από οποιαδήποτε σύνδεση γείωσης της γεννήτριας ή του μετασχηματιστή.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του TT συστήματος είναι το γεγονός ότι δεν προσβάλλεται από θορύβους υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων, που προέρχονται από τον ουδέτερο αγωγό εξαιτίας του ηλεκτρικού εξοπλισμού που συνδέεται σε αυτόν. Γι' αυτό το TT είναι πάντα προτιμητέο για τις ιδιαίτερες εφαρμογές, όπως τις τηλεπικοινωνιακές.



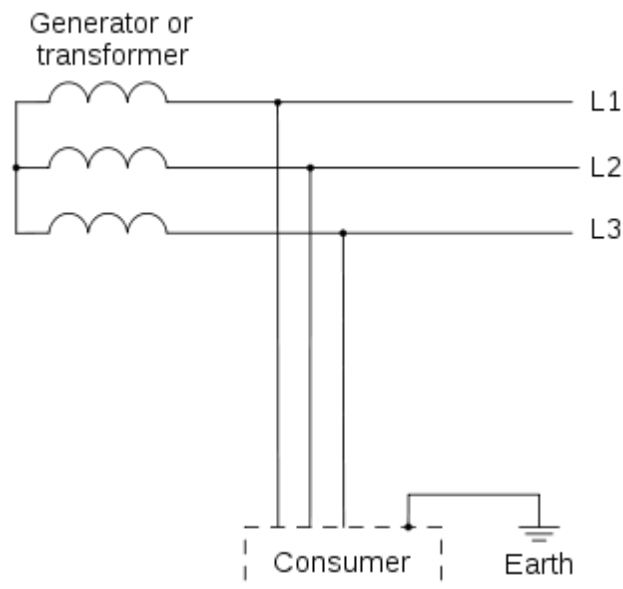
Σχήμα 1.10: Δίκτυο TT

Στις θέσεις όπου η ισχύς μεταφέρεται σε υπερυψωμένους αγωγούς και χρησιμοποιείται το σύστημα TT, οι αγωγοί γείωσης δεν βρίσκονται σε κίνδυνο εάν ένα δέντρο ή κλαδί πέσει σε οποιονδήποτε υπερυψωμένο αγωγό μεταφοράς.

Παλαιότερα, πριν δημιουργηθούν οι διατάξεις διαφυγής έντασης, το TT σύστημα δεν ήταν ελκυστικό για γενική χρήση λόγω της μειωμένης αντοχής του σε υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης (σε σύγκριση με το σύστημα TN). Αλλά δεδομένων, πλέον, των διατάξεων διαφυγής έντασης, οι οποίες μετριάζουν αυτό το μειονέκτημα, το TT σύστημα έχει γίνει ελκυστικότερο.

1.6.3 Δίκτυα IT

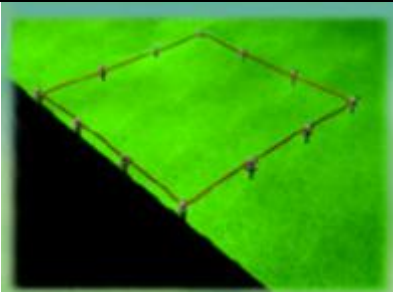
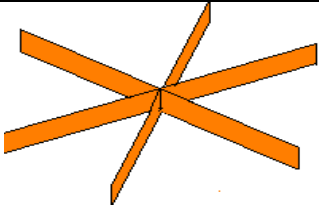


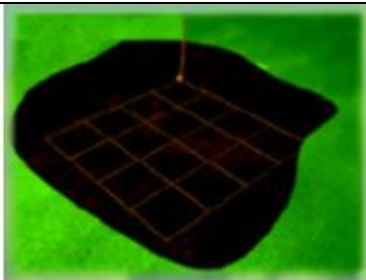
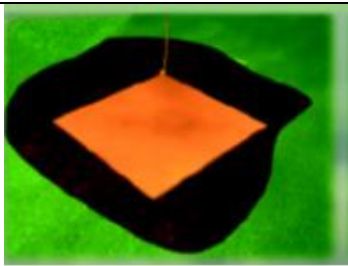

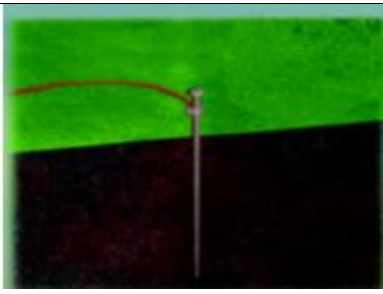
Σε ένα δίκτυο IT, το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχει καμία σύνδεση στη γη ή έχει μια σύνδεση υψηλής σύνθετης αντίστασης. Σε τέτοια συστήματα, χρησιμοποιείται συσκευή παρακολούθησης της μόνωσης για τον έλεγχο της αντίστασης.



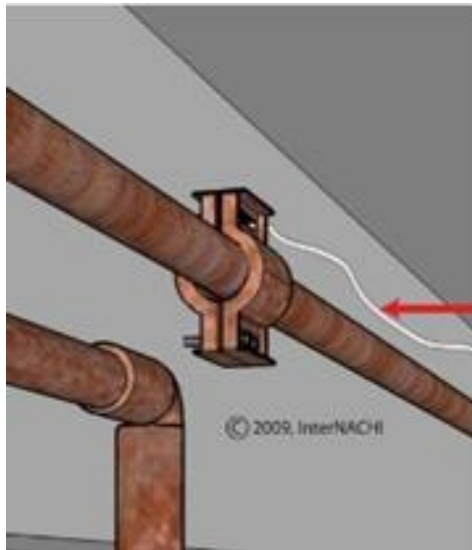
Σχήμα 1.11: Δίκτυο IT

1.7 Ηλεκτρόδια γείωσης - Γειωτής ράβδου

Τα ηλεκτρόδια γείωσης (γειωτές) που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το άρθρο 542.2.1 του Προτύπου *ΕΛΟΤ HD 384* “Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις” [28], έχουν τις μορφές που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 1.12, Σχήμα 1.13).

 <p><i>Τετράγωνο πασσάλων</i></p>	 <p><i>Γειωτής αστέρα</i></p>
 <p><i>Γειωτής τύπου E</i></p>	 <p><i>Οριζόντια θαμμένα καλώδια και ταινίες γείωσης</i></p>
 <p><i>Γειωτής πλέγματος</i></p>	 <p><i>Γειωτής πλάκας</i></p>
 <p><i>Θεμελιακή γείωση</i></p>	 <p><i>Γειωτής ράβδου</i></p>

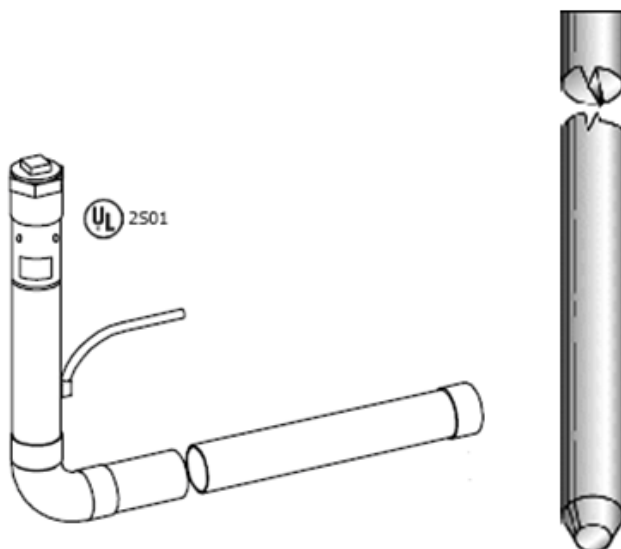
Σχήμα 1.12: Διάφοροι τύποι γειωτών [29, 30, 31].



Σχήμα 1.13: Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής

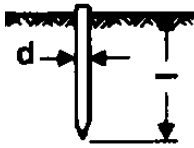
Από τα παραπάνω είδη ηλεκτροδίων γείωσης μας ενδιαφέρει κυρίως ο γειωτής ράβδου, αφού αυτός ο τύπος ηλεκτροδίου γείωσης χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Ο γειωτής αυτός είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μιας ίντσας ή μια ράβδος από γαλβανισμένο χάλυβα, στρογγυλή ή προφίλ, για παράδειγμα U, L, T ή I-προφίλ (Σχήμα 1.14).



Σχήμα 1.14: Μορφές γειωτών ράβδου.

Για ένα γειωτή, όπως αυτός του που φαίνεται στη συνέχεια, ο τύπος που δίνει την αντίστασή του είναι:



$$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right) \quad (1.8)$$

όπου $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}$

Ενώ ο αντίστοιχος προσεγγιστικός τύπος είναι:

$$R_A \cong \frac{\rho}{l_{eff}} \quad (1.9)$$

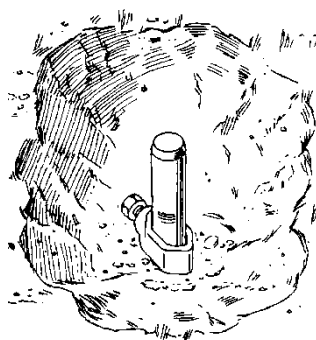
Η ελάχιστη διατομή του γειωτή ράβδου, ανάλογα με το υλικό κατασκευής του κατά ΕΛΟΤ HD 384, VDE 0100, Teil 540, και DIN 57100 δίνεται σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα:

Μορφή γειωτή	Υλικό		
	Χάλυβας γαλβανισμένος (με 70μm στρώμα)	Χάλυβας επιχαλκωμένος	Χαλκός
Ράβδος στρογγυλή	78mm ² = 10 Φ	50mm ² χάλυβα 35mm ² χαλκός	35mm ²

Οι τύποι που δίνουν την αντίσταση των υπολοίπων γειωτών καθώς και η ελάχιστη διατομή τους μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [24].

Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20⁰) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος, σε βάθος περίπου 2,5m με σφυρί χεριού, με μηχανικό σφυρί ή με κατάλληλο οδηγό ηλεκτροδίων, “Rod driver”.

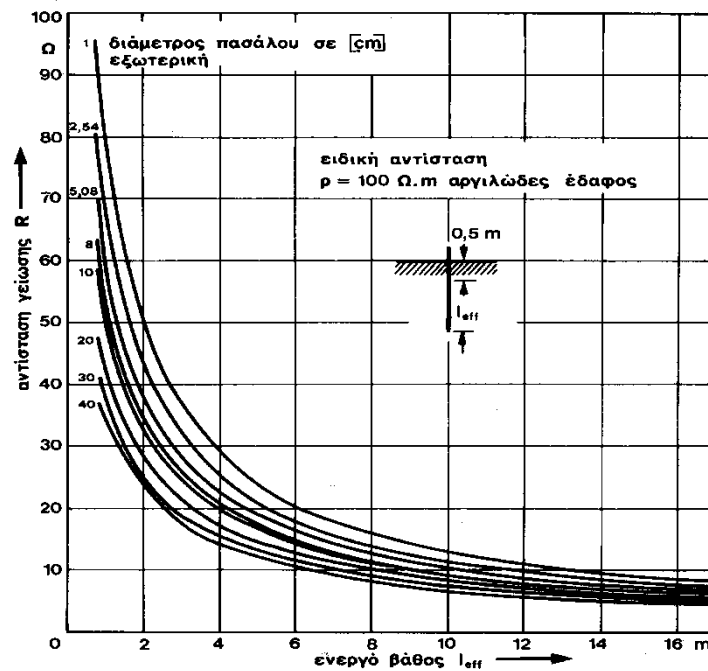
Το άνω μέρος της ράβδου (περίπου 25cm) εισάγεται συνήθως σε φρεάτιο, έτσι ώστε το σημείο σύνδεσής της (Σχήμα 1.15) με τον αγωγό γείωσης να είναι προσπελάσιμο. Η σύνδεση του αγωγού γείωσης με το ηλεκτρόδιο γείωσης πρέπει να εκτελείται με ιδιαίτερη επιμέλεια και, αν απαιτείται, να προστατεύεται κατάλληλα, ώστε να εξασφαλίζεται από μηχανικές βλάβες και από διαβρώσεις (ΕΛΟΤ HD 384-542.3.2 [32]). Όταν χρησιμοποιείται σφιγκτήρας, αυτός πρέπει να είναι κατάλληλου τύπου, ώστε να μην προκαλείται βλάβη στο ηλεκτρόδιο ή στον αγωγό γείωσης.



Σχήμα 1.15: Σημείο σύνδεσης

Στο Σχήμα 1.16 δίνεται η αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασσάλων στο έδαφος, συναρτήσεϊ του ενεργού βάθους τους I_{eff} για διάφορες διαμέτρους. Από το σχήμα αυτό αλλά και από τον τύπο (1.8) φαίνεται ότι η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους. Φαίνεται επίσης ότι 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 ανάλογα με το μήκος της ράβδου που τοποθετείται εντός του εδάφους. Ο τύπος, καθώς και το βάθος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων γείωσης μέσα στο έδαφος, σύμφωνα με το άρθρο 542.2.2 του ΕΛΟΤ HD 384 [27], 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 1.16: Αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασσάλων στο έδαφος, συναρτήσει του ενεργού βάθους l_{eff} .

1.7.1 Γειωτής ράβδου κυκλικής διατομής

Χαλύβδινος επιχαλκωμένος

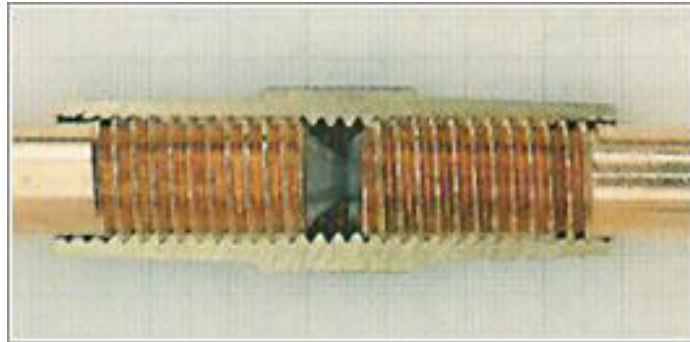


Σχήμα 1.17: Χαλύβδινος επιχαλκωμένος γειωτής ράβδου.

Κατασκευάζεται από χάλυβα ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένο, με πάχος επιχάλκωσης τουλάχιστον $250\mu\text{m}$, όπως ορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο *EN 50164-2* [33], 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.

Χαρακτηριστικό των ράβδων κυκλικής διατομής είναι το σπείρωμα που φέρουν στο άνω και κάτω άκρο. Το σπείρωμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού,

όπως προαναφέρθηκε, επιτρέπει την επιμήκυνση των ράβδων σε βάθος με τη χρήση ορειχάλκινων συνδέσμων επιμήκυνσης, γνωστών και ως μούφες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18. 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 1.18: Ορειχάλκινη μούφα σύνδεσης γειωτή.

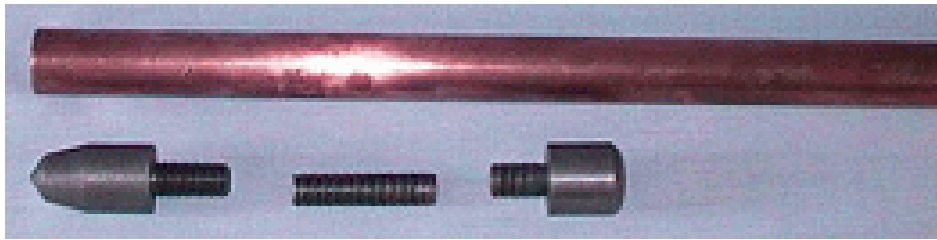
Χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος



Σχήμα 1.19: Χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος γειωτής ράβδου.

Κατασκευάζεται από θερμά ψευδαργυρωμένο χάλυβα, πάχους ψευδαργύρωσης $50\mu m$ τουλάχιστον, όπως ορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο *EN 50164-2* [33], για λόγους που αναφέρονται στους ηλεκτρολυτικά επιχαλωμένους γειωτές. Η διάμετρος των συγκεκριμένων γειωτών κυμαίνεται περίπου στα $20mm$, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται από 1 έως $2,5m$.

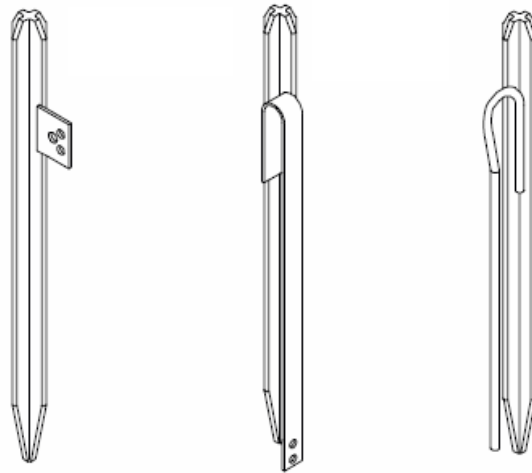
Χάλκινος



Σχήμα 1.20: Ραβδοειδής κυκλικός γειωτής χαλκού.

Οι ράβδοι αυτοί 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.

1.7.2 Γειωτής ράβδου διατομής σταυρού



Σχήμα 1.21: Διάφορες μορφές γειωτών ράβδου διατομής σταυρού.

Κατασκευάζεται από χάλυβα θερμά ψευδαργυρωμένο πάχους ψευδαργύρωσης τουλάχιστον $50\mu m$. Η αντοχή του γειωτή στη διάβρωση είναι ανάλογη με το πάχος επιψευδαργύρωσής του. Ο γειωτής αυτός έχει διάμετρο $5cm$ και 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.

1.7.3 Ραβδοειδές χημικό ηλεκτρόδιο



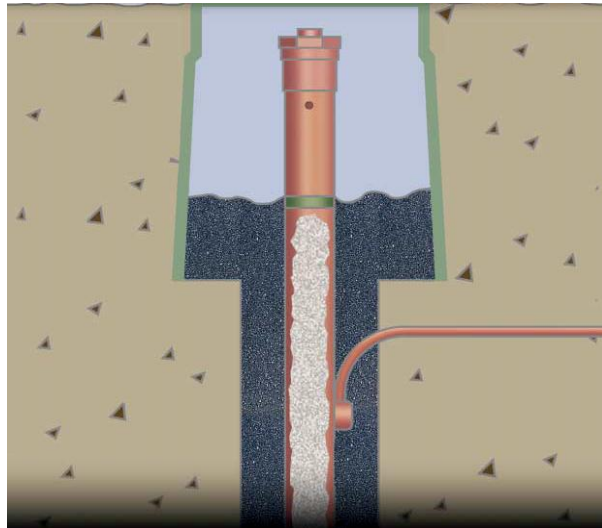
Σχήμα 1.22: Χημικό ηλεκτρόδια γείωσης.

Ένα ενεργό χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης (*Chemically Activated Grounding Electrode-CAGE*) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί μια αγωγή σύνδεση με τη γη. 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.

Ένα ενεργό χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης (Σχήμα 1.22) πρέπει να έχει ορισμένες προδιαγραφές:

- Να κατασκευάζεται από μαλακό χαλκό υψηλής αγωγιμότητας, με ονομαστική διάμετρο $63,5\text{mm}$ και ελάχιστο μήκος $2,4\text{m}$.
- Να περιέχει στο εσωτερικό του μεταλλικό ορυκτό άλας, μάζας τουλάχιστον 11kg .

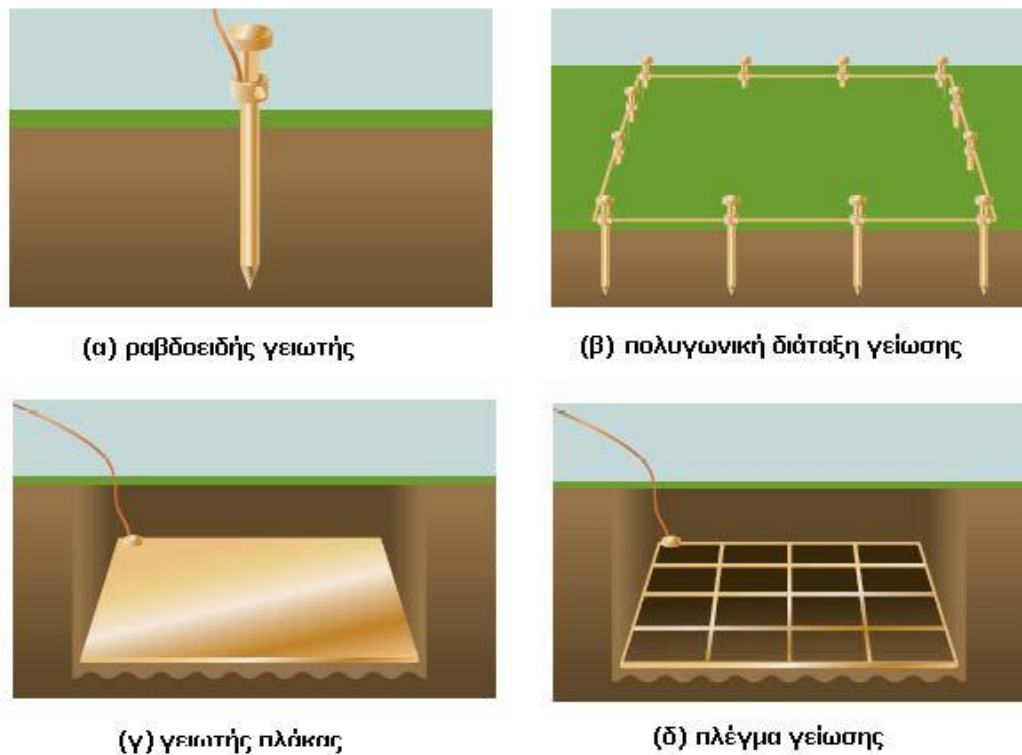
- Να απορροφά υγρασία τόσο από τον αέρα όσο και από το έδαφος στο οποίο είναι τοποθετημένο.
- Να ξαναγεμίζεται εύκολα ξεσφίγγοντας έναν κοχλία στο άκρο που προεξέχει του εδάφους.
- Να επιτρέπει τη διήθηση του ορυκτού διαλύματος στο έδαφος που το περιβάλλει, μέσω των διατρήσεων που διαθέτει.
- Να μπορεί να συνδεθεί με τον αγωγό της γείωσης, είτε μέσω αλουμινοθερμικής συγκόλλησης είτε πρεσαριστά.
- Να εγκαθίσταται είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα.
- Να καλύπτεται από φρεάτιο έτσι ώστε να είναι προσπελάσιμο.



Σχήμα 1.23: Εγκαταστημένο χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης.

1.8 Διατάξεις ηλεκτροδίων γείωσης

Τα συστήματα γείωσης είναι συστήματα που αποτελούνται από δύο ή περισσότερους γειωτές (Σχήμα 1.24) διατεταγμένους και συνδεδεμένους με διαφορετικό τρόπο για κάθε περίπτωση.

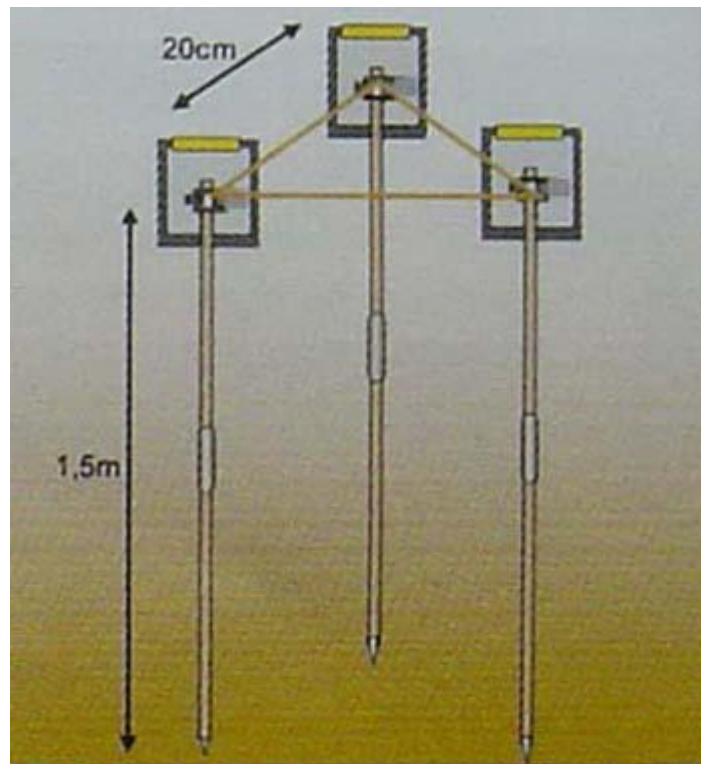


Σχήμα 1.24: Διάφορες διατάξεις γειωτών.

1.7.4 Πολυγωνική διάταξη γείωσης

Κατασκευάζεται από ραβδοειδείς γειωτές, τοποθετημένους στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου συνήθως δε τριγώνου (τριγωνική γείωση: Σχήμα 1.25). Οι ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης. 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 $\Phi 10mm$.

Η χρήση των ραβδοειδών γειωτών συνιστάται σε εδάφη όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται κατά βάθος.



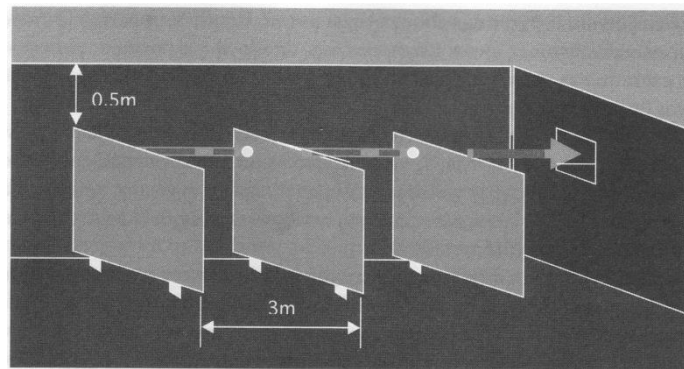
Σχήμα 1.25: Τρίγωνο γείωσης

1.7.5 Σύστημα γείωσης με πλάκες (γειωτές πλάκας)

Πλάκα διαφόρων διαστάσεων (ελάχιστο 500x500x2mm) από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό ή χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο ή μόλυβδο, με ελάχιστο πάχος 2mm. Τοποθετείται κατακόρυφα εντός του εδάφους, σε βάθος τουλάχιστον 50cm.

Κατασκευάζεται από πλάκες οι οποίες τοποθετούνται σε τυχαία διάταξη (Σχήμα 1.26). Η απόσταση μεταξύ τους συνιστάται να είναι τουλάχιστον 3m. Η σύνδεση μεταξύ των πλακών συνήθως γίνεται με χάλκινο αγωγό διατομής 50mm², ή χαλύβδινο θερμά επιψευδαργυρωμένο Φ10mm για χάλκινες και χαλύβδινες θερμά επιψευδαργυρωμένες πλάκες αντίστοιχα.

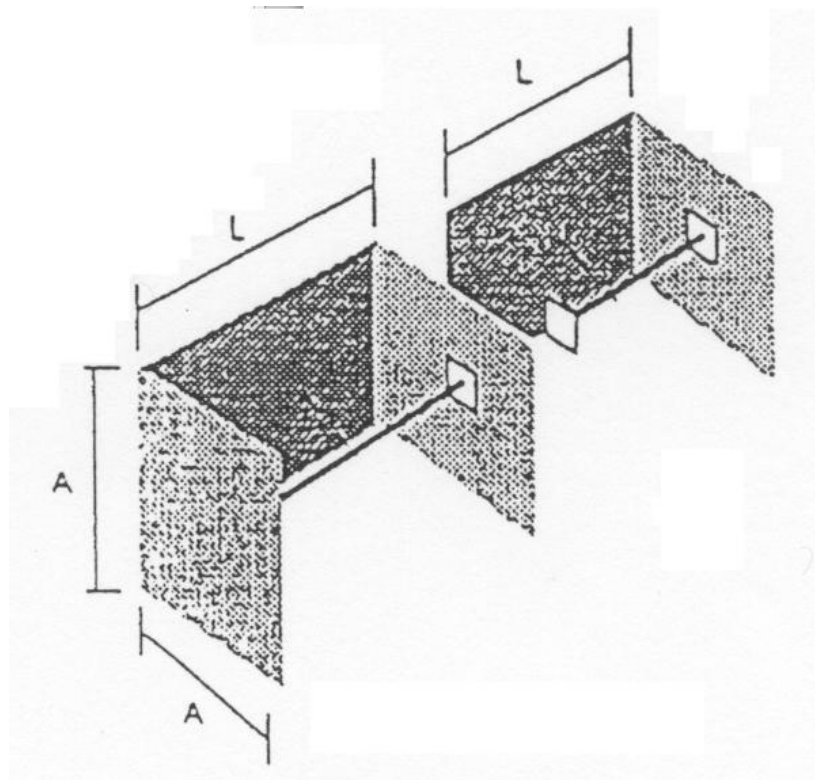
Προς αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης, δε θα πρέπει αφενός να συνυπάρχουν στο χώρο γειωτές από διαφορετικά υλικά και αφετέρου δε θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς από διαφορετικό υλικό. Απαγορεύεται η σύνδεση των πλακών με αγωγό αλουμινίου ή κράματος.



Σχήμα 1.26: Σύστημα γείωσης με πλάκες.

1.7.6 Γειωτής τύπου “Ε”

Ο γειωτής “Ε” αποτελείται ουσιαστικά από δύο στοιχεία: το πρώτο είναι μορφής “Π” και το δεύτερο μορφής “Γ” (Σχήμα 1.27). 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”.



Σχήμα 1.27: Γειωτής “Ε”

Το κόστος εγκατάστασης είναι χαμηλό και μειώνεται σημαντικά όταν η εγκατάσταση γίνεται κατά τη φάση των χωματοουργικών εργασιών της κατασκευής, έχοντας έτσι ως δεδομένο την παρουσία σκαπτικών μηχανημάτων τα οποία μπορούν σε ελάχιστο χρόνο να προχωρήσουν στη διάνοιξη του κατάλληλου ορύγματος.

1.7.7 Περιμετρική γείωση

Η περιμετρική γείωση κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας και σπανιότερα από αγωγό κυκλικής διατομής. Τοποθετείται συνήθως σε όρυγμα εντός του εδάφους, για να υπάρχει υγρασία, περιμετρικά του κτιρίου και σε απόσταση από το κτίριο περίπου $2m$, διότι τα χώματα κοντά στο κτίριο συνήθως δεν είναι αγώγιμα.

Στην περίπτωση που θέλουμε να επιτύχουμε ακόμη πιο χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης και να προστατεύσουμε την ταινία από τυχόν διάβρωση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιο βελτιωτικό γείωσης.

Η σύνδεση της περιμετρικής ταινίας με τον αγωγό γείωσης θα πρέπει να γίνεται με ειδικό σύνδεσμο-σφιγκτήρα ίδιου υλικού με τα προς σύνδεση μέρη και όχι με τη χρήση κοχλιών ή περικοχλίων.

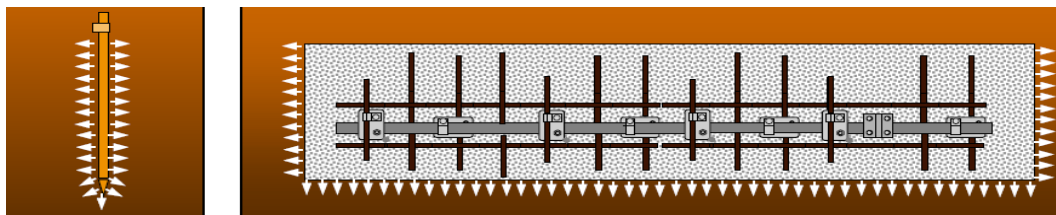
1.7.8 Θεμελιακή γείωση

Είναι ένα αγώγιμο 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 1.28 [34].

Κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας και πιο σπάνια από αγωγό κυκλικής διατομής, που τοποθετείται εντός των συνδετήριων δοκαριών των πέδινων ή στα περιμετρικά τοιχία των θεμελίων του κτιρίου, σε μορφή κλειστού δακτυλίου. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι υγρό καθ' όλη σχεδόν τη διάρκεια του έτους, 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 1.28: Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης.

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. Στην περίπτωση των θεμελιακών γειώσεων συνδέονται στη θεμελιακή γείωση και τα αλεξικέραυνα, ενδεχομένως μέσω σπινθηριστών. Θεμελιακή γείωση προτείνεται από το *ΕΛΟΤ HD 384-542.2.1* και το *ΕΛΟΤ 1424* [35] σε όλα τα νέα κτίρια.

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 [36]. Επίσης και στο Ευρωπαϊκό Ελληνικό Πρότυπο *HD 60364-5-54* αναφέρεται ρητά ότι το θεμελιακό ηλεκτρόδιο μπορεί να αποτελείται είτε από χαλύβδινες ταινίες ή χαλύβδινους αγωγούς, είτε από χάλκινους αγωγούς [37].



Κεφάλαιο 2

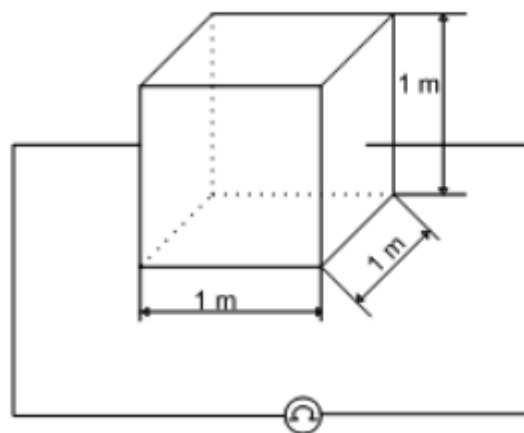
Ειδική Αντίσταση εδάφους

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στην έννοια και τον ορισμό της ειδικής αντίστασης εδάφους και θα διερευνήσουμε κάποιους από τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Θα εξετάσουμε επίσης πώς μπορούν να διεξαχθούν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους και θα επιχειρήσουμε να καθορίσουμε τη δομή του προς εξέταση εδάφους χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις αυτές.

2.1 Ειδική αντίσταση

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και κυρίως η ειδική αντίσταση (ρ) αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την τιμή της αντίστασης γείωσης. Επομένως, για να σχεδιαστεί ένα αποτελεσματικό σύστημα γείωσης, είναι απαραίτητη η μελέτη της ειδικής αντίστασης του εδάφους για την επιλογή του καταλληλότερου και οικονομικότερου εξοπλισμού εγκατάστασης.

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

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση

Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων, ή αγωγιμοτήτων. Η ειδική αντίσταση του εδάφους, μετρούμενη συνήθως σε $\Omega \cdot m$, φαίνεται να αυξάνεται ανάλογα με το πόσο ξηρό και πετρώδες είναι το έδαφος. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [7].

Ειδικότερα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους.

Ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ($CaCl_2$), θειικό χαλκό ($CuSO_4$), ή θειικό μαγνήσιο ($MgSO_4$).

Οι εποχιακές 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 [5, 38].

Οι παράγοντες λοιπόν που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι [39]:

1) Ο τύπος του εδάφους:

Ο τύπος του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ωστόσο δεν είναι δυνατό να ορισθούν καθαρά οι τύποι του εδάφους. Για παράδειγμα, με τη λέξη αργιλώδη, μπορεί να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Επιπλέον, ακόμα και για τον ίδιο γενικό τύπο εδάφους η τιμή της ειδικής αντίστασης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Ένας αριθμός ερευνητών έχει μετρήσει κατά καιρούς την



ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους, είτε παίρνοντας δείγματα στο εργαστήριο, είτε επί τόπου. Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται οι προσεγγιστικές τιμές της ειδικής αντίστασης για διάφορους τύπους εδαφών.

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

Πίνακας 2.1: Ειδικές αντιστάσεις εδαφών. Ενδεικτικές μέσες τιμές κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε [40].

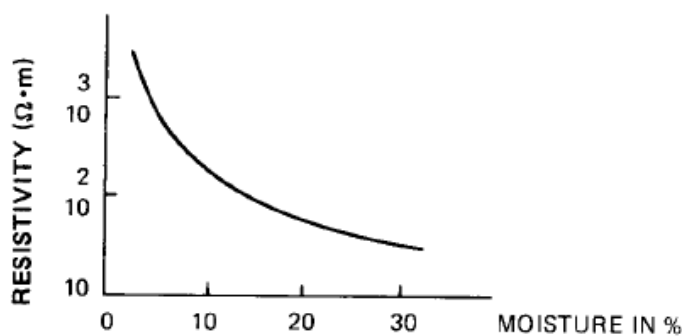
2) Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία

Η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Η αγωγιμότητα του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, γεγονός που σημαίνει ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων σε αυτό αλάτων, παίζουν μεγάλο ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Η περιεκτικότητα σε νερό 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, με εξαίρεση την άμμο της ερήμου όπου το έδαφος θεωρείται, προσεγγιστικά, ότι παρουσιάζει μεγάλο βαθμό ξηρότητας. Από την άλλη, δεν εμφανίζονται συχνά εδάφη με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη του 40%.

Στον Πίνακα 2.1 καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία, ενώ στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρ ενός εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε υγρασία.

Περιεκτικότητα σε υγρασία (% κατά βάρος)	Ειδική αντίσταση σε Ωm	
	Άνω στρώμα	Κάτω στρώμα
0.0	$10000 \cdot 10^3$	$10000 \cdot 10^3$
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 υγρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους [39].

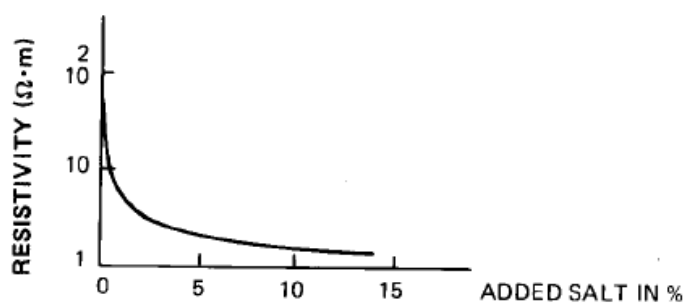


Σχήμα 2.2: Επίδραση της περιεκτικότητας της υγρασίας στην ειδική αντίσταση [1].

Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση είναι 30 φορές μεγαλύτερη από ότι στο ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%.

3) Επίδραση των διαλυμένων αλάτων στο νερό

Το νερό περιέχει διαλυμένα άλατα, τα οποία είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την ειδική αντίστασή του. Ως αποτέλεσμα επηρεάζεται και η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα στην ειδική αντίσταση. 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 είναι απιονισμένο. Διαφορετικά είδη αλάτων επιδρούν με διαφορετικό τρόπο και, πιθανώς, αυτό εξηγεί γιατί η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών από διαφορετικές περιοχές παρουσιάζει σημαντικές διαφορές



Σχήμα 2.3: Επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα στην ειδική αντίσταση [1].

4) *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 η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί πάρα πολύ. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρ 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 2.1: Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση

Οι διακυμάνσεις αυτού του είδους μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος. Έχει μετρηθεί ότι η επίδραση της υγρασίας και της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη σε μικρά βάθη (0,5–1m) παρά σε μεγάλα βάθη. Έτσι, ο γειωτής ράβδου που είναι τοποθετημένος σε μεγάλο βάθος, σε σύγκριση με έναν επιφανειακό γειωτή, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της σταθερότητας της αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους [5].

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

5) *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. Η ειδική αντίσταση μάλιστα φαίνεται να αυξάνεται αναλογικά με το μέγεθος των κόκκων.

Επίσης, το μέγεθος των κόκκων, αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος, επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία, αφού 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.

6) *Επίδραση της μορφής της τάσης*

Σε κρουστικές τάσεις, αλλά και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της αντίστασης. Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση.

7) *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, συνήθως όμως είναι της τάξης μερικών kV/cm . Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, τόξα θα δημιουργηθούν στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, τα οποία οδηγούν στη συνέχεια 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, ενώ σε όλο τον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη [2].

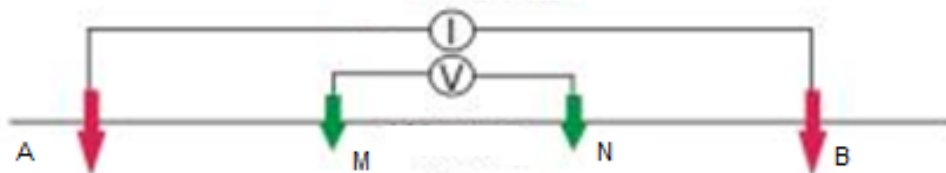
2.3 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης

Στη διεθνή βιβλιογραφία [1, 41, 42] 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).



Η μέθοδος των 4 σημείων φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.4: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης

Τα ηλεκτρόδια A και B είναι τα ηλεκτρόδια ρεύματος: ηλεκτρικό ρεύμα εισέρχεται στο υπέδαφος από το θετικό ηλεκτρόδιο A και εξέρχεται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο B. Τα ηλεκτρόδια M και N είναι τα ηλεκτρόδια δυναμικού, με τα οποία μετράται η διαφορά δυναμικού ΔU .

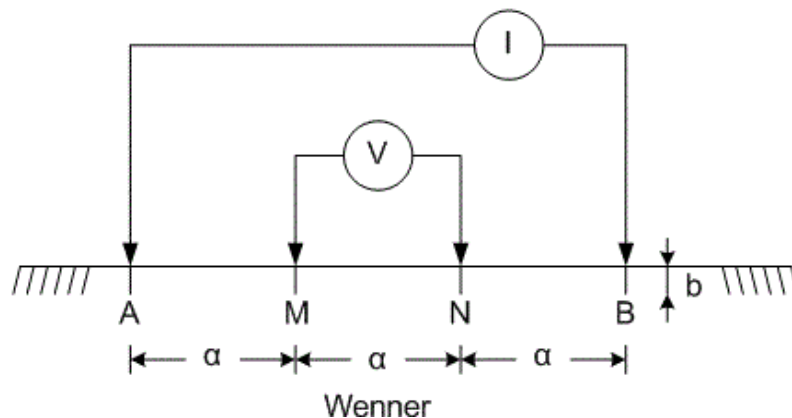
Κατά καιρούς οι ερευνητές πρότειναν διαφορετικούς τρόπους διάταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων και έτσι προέκυψαν οι εξής τεχνικές μέτρησης της ειδικής αντίστασης:

- 1) Μέθοδος Wenner
- 2) Μέθοδος Schlumberger - Palmer
- 3) Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου
- 4) Μέθοδος Lee
- 5) Μέθοδος διπόλου-διπόλου
- 6) Τετραγωνική διάταξη

Από τις παραπάνω τρόπους διάταξης θα διερευνήσουμε περαιτέρω τη μέθοδο Wenner αφού αυτή είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Μέθοδος Wenner

Χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, θαμμένα στο έδαφος σε βάθος b , σε ευθεία και σε ίση απόσταση a μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Διάταξη Wenner [6].

Η τάση μεταξύ των δύο μεσαίων ηλεκτροδίων μετριέται με βολτόμετρο και διαιρείται με το ρεύμα που διαρρέει τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια, το οποίο μετριέται με αμπερόμετρο. Το πηλίκο δίνει την αντίσταση R .

Για διαφορετικές αποστάσεις a , παίρνουμε μια δεδομένη τιμή για το ρεύμα που εισρέει στη γη. Όσο αυξάνεται το a , τόσο βαθύτερα εισρέει το ρεύμα στη γη. Εφαρμόζοντας στα άκρα των ηλεκτροδίων A και B ρεύμα σταθερής έντασης, η τάση που μετράται στα άκρα του εσωτερικού ζευγαριού ηλεκτροδίων πρέπει να μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση a . Επομένως οι τιμές V/I ποικίλλουν για τις διάφορες αποστάσεις a .

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 ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [2,5,42]:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

όπου R είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου), a η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων και b το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια.

Όταν $a \gg b$ τότε η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στην ακόλουθη:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (2.2)$$

2.4 Προσδιορισμός 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.

Αποδεικνύεται ότι εάν η γη είναι ομοιογενής, η ακριβής τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι ανεξάρτητη του α , και σχεδόν ισούται με την πραγματική ειδική αντίσταση της γης.

Κατόπιν πληθώρας μετρήσεων προέκυψε ότι το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Επομένως, είναι απαραίτητη μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους (ειδική αντίσταση και βάθος του κάθε στρώματος του εδάφους). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων για διστρωματική και τριστρωματική δομή του εδάφους χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους [5,1,43].

Θα αναλύσουμε στη συνέχεια τον υπολογισμό των παραμέτρων για διστρωματικό έδαφος, αφού αυτόν τον τύπο εδάφους επιλέγουμε σε κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης, όπως θα δούμε αργότερα, ως ανάλυση του εδάφους στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Για την περίπτωση διστρωματικού εδάφους ο υπολογισμός των παραμέτρων του είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Για τον υπολογισμό των τριών παραμέτρων (ρ_1 η ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος του εδάφους, ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους και h_1 το βάθος του πάνω στρώματος) είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_g :

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (2.3)$$

όπου ρ_{ai}^m είναι η i -οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a , ενώ ρ_{ai}^c είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a που αντιστοιχεί στο i -οστό ζεύγος μετρήσεων.

Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.4-2.6)

$$\rho_a^c = \rho_1 \cdot \left(1 + 4 \cdot \sum_n K^n \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right) \quad (2.4)$$

Όπου

$$n = 1 \dots \infty$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.5)$$

$$A = 1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_1}{a} \right)^2 \quad (2.6)$$

$$B = A + 3 \quad (2.7)$$



Κεφάλαιο 3

Βελτιωτικά υλικά γειώσεων

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στην ιδιαίτερη σημασία που έχουν τα βελτιωτικά υλικά σε ένα σύστημα γείωσης. Θα επιχειρήσουμε επίσης μία βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών που έχουν γίνει σχετικά με την εύρεση ενός οικονομικού και ταυτόχρονα αποδοτικού βελτιωτικού.

3.1 Βελτιωτικά Υλικά

Για να είναι ένα σύστημα γείωσης αποτελεσματικό θα πρέπει η αντίσταση γείωσης που παρέχει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό, αφού κάποιες φορές ο χώρος της εγκατάστασης δεν επαρκεί ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα γείωσης, ενώ ακόμη και αν είναι διαθέσιμος ο απαραίτητος χώρος μπορεί το κόστος για τη κατασκευή του συγκεκριμένου συστήματος να είναι απαγορευτικά υψηλό. Ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζει και ο τύπος του εδάφους στο οποίο θα εγκατασταθεί το σύστημα γείωσης, αφού μπορεί να παρουσιάζει είτε πολύ μεγάλη ειδική αντίσταση, είτε να είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και η τοποθεσία εγκατάστασης, αφού οι πιθανές ασταθείς καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην τοποθεσία αυτή μπορεί να είναι ικανές να αυξομειώνουν την ειδική αντίσταση του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την αποτελεσματική μείωση της αντίστασης γείωσης ενός ηλεκτροδίου, ιδιαίτερα μάλιστα στην Ελλάδα όπου πολλά εδάφη παρουσιάζουν υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης, έχοντας ως κύριο συστατικό συμπαγείς βράχους. Για παράδειγμα στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται μία περίπτωση όπου το έδαφος ήταν βραχώδες και τα χωματουργικά έξοδα για τη δημιουργία ορύγματος ώστε να κατασκευαστεί ένα περιμετρικό ηλεκτρόδιο γείωσης από αγωγό ορθογωνικής διατομής (π.χ. αγωγός ταινίας) ήταν πολλά. Για το λόγο αυτό το ηλεκτρόδιο σκεπάστηκε με καλό αγωγίμο χώμα [44]. Ωστόσο μία τέτοια μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική αφού παρατηρήθηκε ότι



με τις πρώτες βροχές το αγώγιμο χώμα υποχωρεί και είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του ηλεκτροδίου στον αέρα.



Εικόνα 3.1: Περιμετρικό ηλεκτρόδιο γείωσης σκεπασμένο με χώμα.

Μία ιδιαίτερα αποτελεσματική και ταυτόχρονα οικονομική λύση στο πρόβλημα της βελτίωσης της αντίστασης γείωσης είναι αυτή της διαμόρφωσης του εδάφους γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης με βελτιωτικά υλικά. Η χρήση βελτιωτικών ειδικής αντίστασης του εδάφους συνιστάται ειδικά σε βραχώδεις περιοχές, που αποτελούν κύριο χαρακτηριστικό της ελληνικής επικράτειας.

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, και πλησίον του ηλεκτροδίου γείωσης, την ειδική αντίσταση του εδάφους, που έχει τελικά ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης γείωσης. Η σύσταση όμως των βελτιωτικών πρέπει να εξετάζεται, διότι μπορεί να αποβεί μοιραία.

Το αλάτι και μάλιστα σε περιβάλλον υγρασίας παρουσιάζει ιδιαίτερα αγώγιμη συμπεριφορά [44]. Για παράδειγμα το θαλασσινό νερό παρουσιάζει ειδική αντίσταση μόλις $1\Omega m$ ενώ το καθαρό βρόχινο νερό παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από $1000\Omega m$. Η χρήση $NaCl$, ωστόσο διαβρώνει το ηλεκτρόδιο μεγαλώνοντας την αντίσταση διάχυσης, δηλαδή την δυσκολία με την οποία διαχέεται το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Οι περισσότερες χημικές ουσίες διαλύονται επίσης στο νερό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με την πάροδο του

χρόνου λόγω των βροχών, οι ουσίες αυτές όπως και το αλάτι να παρασύρονται από το νερό, έχοντας ως αποτέλεσμα το έδαφος να επιστρέφει στην αρχική του μορφή.

Για τους ίδιους λόγους δεν προτείνεται και η λύση γαιάνθρακα. Η χρήση δερνισμάτων σιδήρου, λόγω της οξειδωσης που προκαλούν, επιφέρει με την πάροδο του χρόνου αρνητικά αποτελέσματα [45].

Όπως είναι φανερό η χρήση βελτιωτικών υλικών γειώσεων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Όπως θα δούμε και στην επόμενη ενότητα έρευνες έχουν διεξαχθεί και συνεχίζουν να διεξάγονται σχετικά με τα υλικά αυτά

3.2 Έρευνες σχετικά με βελτιωτικά υλικά

Ένα από τα πρώτα βελτιωτικά υλικά γείωσης που εξετάστηκαν ήταν ο μπετονίτης. Το 1967 Οι Kutter and Lange [46] και ο Mc Gowan [47] 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 [48] πρότεινε μια μέθοδο εγκατάστασης ηλεκτροδίου ράβδου, χρησιμοποιώντας ράβδο σε μπετονίτη. Στο συγκεκριμένο πείραμα δοκιμάστηκαν στο ύπαιθρο ράβδοι εγκατεστημένοι σε μπετονίτη, σε σύγκριση με ράβδους γείωσης στο φυσικό έδαφος, σε τρεις διαφορετικής εδαφικής σύστασης τοποθεσίες (πολύ πυκνή και σκληρή λάσπη, αργιλώδες χώμα με κροκάλες και χαλίκι, μείγμα χώματος αποτελούμενο από άμμο, ένα στρώμα λάσπης κάτω από την άμμο και ψαμμόλιθο). Σε κάθε τοποθεσία εγκαταστάθηκαν τρεις ράβδοι σε 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.

Προς την ίδια κατεύθυνση, χρησιμοποιώντας όμως περισσότερα του ενός βελτιωτικά υλικά, κινήθηκαν το 1999 και οι Kostic et al [49], αναδεικνύοντας τα αποτελέσματα της βελτίωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των βρόχων γείωσης, χρησιμοποιώντας χαλίκια μπετονίτη, πούδρα μπετονίτη και λάσπη εκσκαφής. Τα ηλεκτρόδια γείωσης τύπου δοκιμάστηκαν σε δύο 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 βελτιωτικά υλικά. Επιπλέον, η χρήση πούδρας μπετονίτη είχε πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τα χαλίκια μπετονίτη.

Επειδή σε αρκετές χώρες ο μπετονίτης εισάγεται, το κόστος για τη μείωση της αντίστασης γείωσης χρησιμοποιώντας αυτό το βελτιωτικό υλικό αυξάνεται δραματικά. Άλλωστε σε μία μελέτη για το καθορισμό της πιο αποδοτικής μεθόδου για την εγκατάσταση ράβδων γείωσης με χαμηλή αντίσταση που διεξήχθη από τους Martin et al., οι περισσότερες από τις τυποποιημένες μεθόδους απορρίφθηκαν για λόγους κόστους [50]. Επομένως για να μειωθεί το κόστος είναι απαραίτητο να βρεθούν τοπικά υλικά που είναι φθηνότερα ως κοντινά υποκατάστατα του μπετονίτη.

Για τους λόγους αυτούς το 2008 ο Nuwan [51] από το τμήμα Μετεωρολογίας της Σρι Λάνκα πρότεινε ένα χαμηλού κόστους σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χωριό της χώρας του. 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.

Οι Eduful and Cole [52] 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. Στην έρευνα αυτή ηλεκτρόδιο γείωσης 1 μέτρου εισάγεται σε έδαφος ειδικής αντίστασης $300\ \Omega$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είχε σημειωθεί μια μέση βελτίωση της αντίστασης γείωσης γύρω στο 50% σε διάστημα τριών ετών. Η έρευνα συνεχίστηκε για έξι συνολικά χρόνια και φάνηκε ότι το PKOC διατηρούσε την αντίσταση γείωσης σε χαμηλά επίπεδα, χωρίς να χάνεται ή να διαλύεται με τις βροχές.

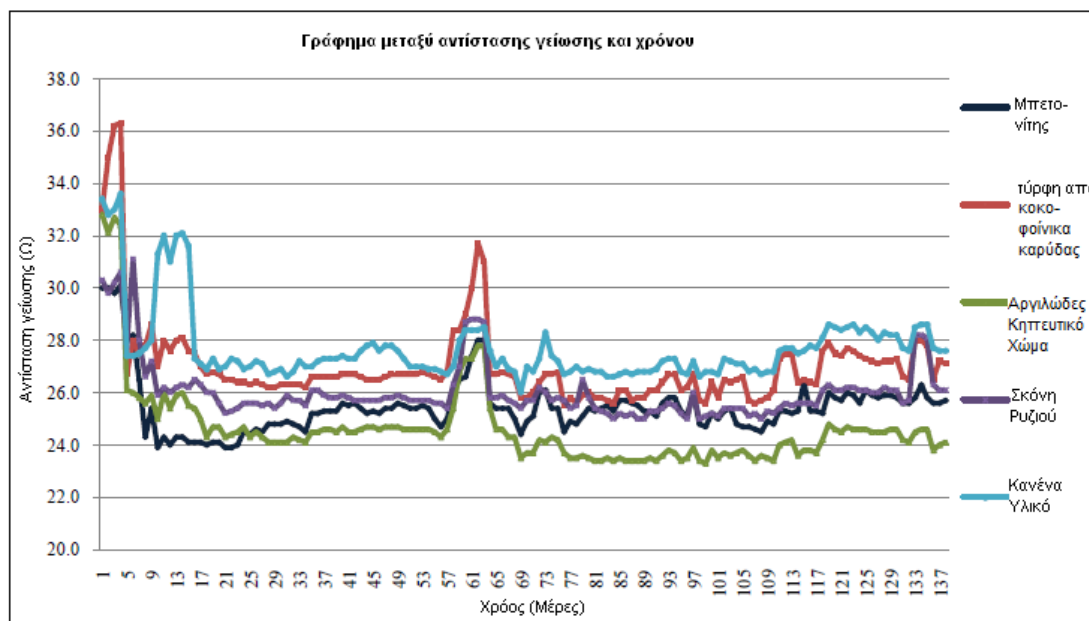
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι μελέτες σχετικά με βελτιωτικά υλικά γειώσεων που παρουσιάστηκαν στο διεθνές συνέδριο αντικεραυνικής προστασίας (30th International Conference on Lightning Protection - ICLP) το Σεπτέμβριο του 2010. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από τις μελέτες αυτές:



Οι J. Jasni et al [53] μελέτησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες φυσικών βελτιωτικών εδάφους. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν μπετονίτης, τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, κηπευτικό αργιλώδες χώμα και σκόνη ρυζιού. Εγκαταστάθηκαν 4 ηλεκτρόδια σε κάθε ένα από αυτά τα βελτιωτικά και ένα ηλεκτρόδιο εγκαταστάθηκε σε απλό χώμα χωρίς κάποιο βελτιωτικό. Επίσης για κάθε μέτρηση κατέγραφαν την κατάσταση του εδάφους ως υγρό ή όχι, ώστε να δουν αν αυτή σχετίζεται με την αντίσταση γείωσης.

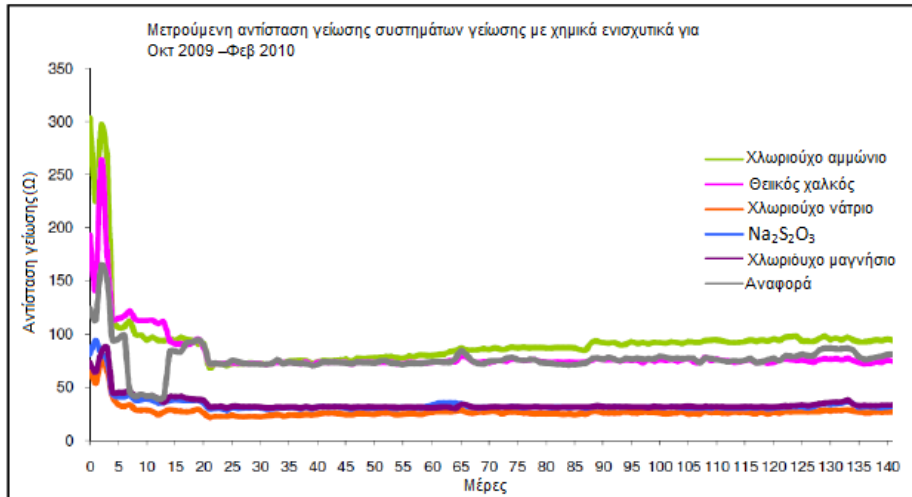
Τα αποτελέσματα από 138 μέρες μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης βελτιωτικών γείωσης, όπως έδειξε η μελέτη και όπως φαίνεται και από το σχήμα, είναι ότι οι τιμές της αντίστασης γείωσης της ράβδου με βελτιωτικό υλικό θέλουν λιγότερο χρονικό διάστημα για να σταθεροποιηθούν, συγκρινόμενες πάντα με αυτές χωρίς βελτιωτικό γείωσης. Επίσης η αιχμή που παρουσιάζεται στο διάγραμμα την 60^η περίπου μέρα σχετίστηκε με την κατάσταση του εδάφους: ήταν ξηρό για κάποιο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια υγρό, γεγονός που δείχνει την άμεση εξάρτηση της αντίστασης γείωσης από την υγρασία του εδάφους και ενδεχομένως από τη βροχόπτωση.

Η συγκεκριμένη έρευνα έδειξε ότι τα υλικά καταφέρνουν να διατηρούν με μεγάλη επιτυχία την υγρασία του εδάφους σε υψηλά επίπεδα 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.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα μεταξύ αντίστασης γείωσης και χρόνου [53]

Στο ίδιο συνέδριο οι W. F. Wan Ahmad et al [54] παρουσίασαν μελέτη στην οποία εξέτασαν 6 συστήματα γείωσης: το ένα θεωρήθηκε ως σύστημα αναφοράς χωρίς ενισχυτικό υλικό και συγκρίθηκε με τα υπόλοιπα πέντε που το καθένα είχε διαφορετικό χημικό βελτιωτικό εδάφους. Τα χημικά βελτιωτικά εδάφους ήταν χλωριούχο νάτριο (NaCl), υπεροξειδίο του θεικού νατρίου ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), χλωριούχο μαγνήσιο (MgCl_2), θειικός 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, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2 και 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 προτείνεται από την ομάδα των ερευνητών για χρήση σε συστήματα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας.



Σχήμα 3.2: Μετρούμενη αντίσταση γείωσης συστημάτων γείωσης με χημικά ενισχυτικά για Οκτ 2009 –Φεβ 2010 [54]

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.

Άλλωστε από αποτελέσματα μελέτης του Chandima Gomes [55] που παρουσιάστηκε στο ίδιο συνέδριο το Χλωριούχο Νάτριο, όπως και μίγματα αυτού, είναι γνωστό για τις διαβρωτικές του ιδιότητες. Πέρα από το πρόβλημα διάβρωσης, η αφαίρεση του αλατιού από το γειτονικό χώρο του ηλεκτροδίου (λόγω του ότι διαλύεται στο νερό της βροχής) μπορεί επίσης να προκαλέσει απροσδόκητες αυξήσεις στην αντίσταση γείωσης, ειδικά κατά την περίοδο ξηρασίας. Αυτό μπορεί να γίνει επικίνδυνος παράγοντας για την ασφάλεια σε συστήματα γείωσης ισχύος όπου τα σφάλματα ως προς γη μπορεί να εμφανιστούν κάτω από εξαιρετικά ξηρές συνθήκες.

Ο τελευταίος ερευνητής στην ίδια μελέτη επέλεξε τη σκόνη μεταλλικών οξειδίων (ένα απόβλητο της βιομηχανίας χάλυβα), τη σκόνη γρανίτη, τη σκόνη ασβέστη και κοκ σκυρόδεμα ως βελτιωτικά υλικά προς σύγκριση με υπόλοιπα εμπορικά διαθέσιμα βελτιωτικά γείωσης. Οι παρατηρήσεις έδειξαν ότι τα βιομηχανικά αυτά απόβλητα φτάνουν το επίπεδο απόδοσης εμπορικά διαθέσιμων βελτιωτικών υλικών μετά από μερικούς μήνες. Βρέθηκε επίσης ότι το επίπεδο διάβρωσης από τη σκόνη μεταλλικών οξειδίων είναι μικρότερο από 1% μετά από δύο χρόνια επαφής. Το

σκυρόδεμα από ασβέστη και κοκ επίσης έδειξε καλή απόδοση όσον αφορά τη διάβρωση.

Ωστόσο, η μεγάλη περίοδος που απαιτείται για τα περισσότερα από αυτά τα υλικά, ώστε να επιτύχουν χαμηλή και σταθερή αντίσταση γείωσης, είναι σημαντικό μειονέκτημά τους, ιδιαίτερα μάλιστα αν συγκριθούν με άλλα εμπορικά διαθέσιμα βελτιωτικά όπως ο μπετονίτης.



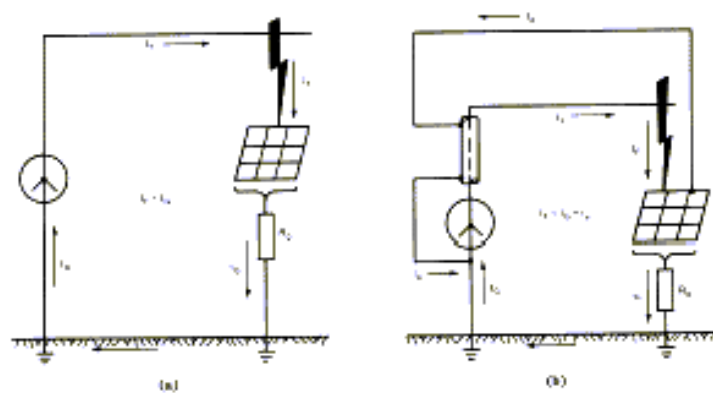
Κεφάλαιο 4

Όρια Ασφαλείας

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στα όρια ασφαλείας που πρέπει να πληροί ένα σύστημα γείωσης. Τα όρια ασφαλείας έχουν να κάνουν με επικίνδυνες τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος ή κατά τη διάρκεια ανάπτυξης ρευμάτων σφάλματος. Θα αναφερθούμε στα όρια αντοχής που παρουσιάζει το ανθρώπινο σώμα όταν διαρρέεται από ρεύμα και, με βάση τα όρια αυτά, θα καθορίσουμε τα όρια των τάσεων που δύναται να αναπτυχθούν.

4.1 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 Σχήμα 4.1 δείχνει την παραπάνω περίπτωση για έναν υποσταθμό με απλό ορθογώνιο πλέγμα γείωσης σε ομοιογενές έδαφος. Εάν δεν 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.



Σχήμα 4.1: 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:

- Σχετικά μεγάλο ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με την περιοχή του συστήματος γείωσης και την αντίστασή του ως προς απόμακρη γη.
- Η ειδική αντίσταση του εδάφους και η κατανομή των ρευμάτων γης, που προκαλούν υψηλές κλίσεις δυναμικού σε σημεία στην επιφάνεια του εδάφους.
- Η παρουσία ατόμου σε τέτοιο σημείο, στιγμή και στάση ώστε το σώμα του γεφυρώνει δυο σημεία μεγάλης διαφοράς δυναμικού.
- 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 i έως iii.
- Η διάρκεια του σφάλματος και της επαφής με το σώμα, και συνεπώς της ροής του ρεύματος μέσα στο σώμα, για επαρκή χρόνο ώστε να προκαλέσει τραυματισμό του ατόμου, για τη συγκεκριμένη ένταση ρεύματος.

Βέβαια η πιθανότητα ταυτόχρονης εμφάνισης όλων των παραπάνω συνθηκών είναι πολύ μικρή γι' αυτό και τέτοια ατυχήματα δεν συμβαίνουν συχνά.

Τα όρια ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιεί ένα σύστημα γείωσης μιας εγκατάστασης, καθορίζονται από το συνδυασμό τιμών των διαφόρων παραμέτρων που προκαλούν τραυματισμό στο άτομο. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- 1) Επίδραση της συχνότητας: Η επίδραση του ρεύματος στον άνθρωπο είναι σημαντική σε συχνότητες 50Hz ή 60Hz. Στις συγκεκριμένες συχνότητες, ρεύματα έντασης περίπου 0.1A μπορεί να προκαλέσουν τον θάνατο. Σε ορισμένες περιπτώσεις το ανθρώπινο σώμα μπορεί να αντέξει πολύ μεγάλα ρεύματα που οφείλονται σε κεραυνική τάση.
- 2) Επίδραση της έντασης και της διάρκειας: Ρεύμα έντασης 1mA θεωρείται το κατώτατο όριο που γίνεται αντιληπτό. Ρεύματα έντασης 1-6mA, που συχνά αναφέρονται ως διαφεύγοντα ρεύματα, αν και είναι δυσάρεστα στην αίσθηση που προκαλούν, δεν επηρεάζουν την ικανότητα του ατόμου που κρατά ένα αντικείμενο να ελέγξει τους μύες του και να αφήσει το αντικείμενο. Ρεύματα έντασης 9-25mA μπορούν να είναι επώδυνα, και να



προκαλέσουν δυσκολία ή αδυναμία στον έλεγχο αντικειμένου που κρατά το άτομο. Ρεύματα ακόμη μεγαλύτερης έντασης προκαλούν μυϊκές συσπάσεις, που με τη σειρά τους μπορούν να επιφέρουν δυσκολία στην αναπνοή. Αυτές όμως οι επιδράσεις δεν είναι μόνιμες και παύουν όταν διακοπεί η ροή του ρεύματος μέσα στο άτομο, εκτός εάν η σύσπαση είναι πολύ σοβαρή και η αναπνοή έχει διακοπεί για λεπτά της ώρας. Ρεύματα έντασης 60-100mA προκαλούν κοιλιακό ινιδισμό, καρδιακή ανακοπή, δυσκολία στην αναπνοή και μπορούν να επιφέρουν τραυματισμό ή θάνατο. Στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης δίνεται σημασία στο κατώφλι κοιλιακού ινιδισμού, δηλαδή επιδιώκεται τα ρεύματά σφάλματος να είναι έντασης μικρότερης από 60mA.

Τα ρεύματα έντασης I_B , μικρότερης του κατωφλίου κοιλιακού ινιδισμού, και με διάρκεια 0.03-3.0sec σχετίζονται με την ενέργεια που απορροφάται από το σώμα του ατόμου σύμφωνα με την εξίσωση [2]:

$$S_B = I_B^2 \cdot t_s \quad (4.1)$$

Όπου

I_B η rms τιμή του ρεύματος που διαρρέει το σώμα, σε A

t_s η διάρκεια έκθεσης στο ρεύμα, σε sec

S_B η εμπειρική σταθερά που σχετίζεται με την ενέργεια που αντέχει ορισμένο ποσοστό του πληθυσμού.

- 3) Χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία του χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος, όπως διαφαίνεται στην εξίσωση (4.1), συμπεραίνεται ότι επιδιώκεται όσο το δυνατόν ταχύτερη εκκαθάριση του σφάλματος, για τους παρακάτω λόγους:

- Η πιθανότητα έκθεσης σε ηλεκτρικό σοκ μειώνεται δραματικά εάν ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρός.
- Δοκιμές και η εμπειρία από το παρελθόν έχουν δείξει ότι η πιθανότητα σοβαρού τραυματισμού ή θανάτου μειώνεται σημαντικά εάν η χρονική διάρκεια της ροής του ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα είναι σύντομη.



Συνεπώς, στον καθορισμό της ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής για το ρεύμα που διαρρέει το σώμα λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος των συσκευών προστασίας, ή της ασφάλειας *backup*. Για πιο συντηρητικά όρια, χρησιμοποιείται στη σχέση (4.1) ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος της ασφάλειας *backup*.

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, ο σχεδιασμός συστήματος γείωσης πρέπει να εξασφαλίζει ότι η διάρκεια και η ένταση του ρεύματος συχνότητας 50Hz ή 60Hz που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα δεν θα υπερβαίνει το κατώφλι πέρα από το οποίο προκαλείται κοιλιακός ινιδισμός. Από τη σχέση (4.1) είναι εμφανής η σχέση του χρονικού διαστήματος που είναι ανεκτή η ροή του ρεύματος στο σώμα και της έντασης του ρεύματος, θεωρώντας πάντα συχνότητα 50Hz ή 60Hz. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.1) προκύπτει [2]:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (4.2)$$

Όπου

$$k = \sqrt{S_B} \quad (4.3)$$

Πειράματα απέδειξαν ότι το 99.5% των ατόμων που ζυγίζουν περίπου 50kg έχουν ως ανώτατο όριο απορροφούμενης ενέργειας από ρεύμα $S_B = 0.0135$. Τότε $k_B = 0.116$ και η σχέση για τον υπολογισμό του ανώτατου ορίου για την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σώμα γίνεται [2]:

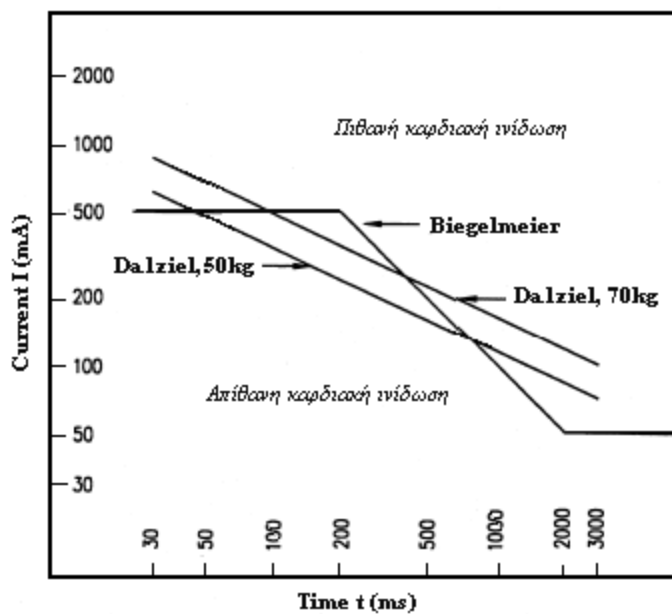
$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.4)$$

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η σχέση (3.4) δίνει $I_B = 116\text{mA}$ για $t_s = 1\text{sec}$ και $I_B = 367\text{mA}$ για $t_s = 0.1\text{sec}$. Αντίστοιχα πειράματα για άτομα σωματικού βάρους 70kg αντιστοιχούν σε $S_B = 0.0246$ και $k = 0.157$, οπότε [2]

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.5)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (4.4) και (4.5) συμπεραίνεται ότι επιτρέπονται ρεύματα αρκετά μεγαλύτερης έντασης για άτομα σωματικού βάρους 70kg. Στα πλαίσια όμως της επίτευξης μεγαλύτερης ασφάλειας, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πιο συντηρητικό όριο, δηλαδή το όριο για άτομα 50kg.

Τα παραπάνω συμπεράσματα αποδίδονται και γραφικά στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Ρεύμα που ρέει στο ανθρώπινο σώμα, συναρτήσεως του χρόνου[2].

4.2 Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη διάρκεια σφάλματος

Το ανθρώπινο σώμα προσεγγίζεται με μια αντίσταση, για συνεχή και εναλλασσόμενα ρεύματα, συχνότητας 50Hz ή 60Hz. Στη μελέτη ασφαλείας από ρεύματα σφάλματος θεωρείται ότι το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα ακολουθεί τη διαδρομή από ένα χέρι προς τα δυο πόδια, δηλαδή την χειρότερη περίπτωση, διότι όλο το σώμα διαρρέεται από το ρεύμα, και μάλιστα οι σημαντικότεροι μύες του ανθρώπινου σώματος. Η εσωτερική αντίσταση του σώματος είναι περίπου 300Ω , ενώ οι τιμές για την αντίσταση του σώματος συμπεριλαμβανομένου του δέρματος κυμαίνονται από 500Ω έως 3000Ω . Η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μειώνεται όταν το δέρμα τρυπηθεί στο σημείο επαφής. Θεωρώντας μηδενικές τις αντιστάσεις επαφής του χεριού και του ποδιού καθώς επίσης και τις αντιστάσεις για γάντια και για παπούτσια, είθισται

να λαβάνεται ως τιμή για την αντίσταση του ανθρώπινου σώματος από χέρι σε πόδι ή από χέρι σε χέρι τα 1000Ω [2]:

$$R_B = 1000\Omega \quad (4.6)$$

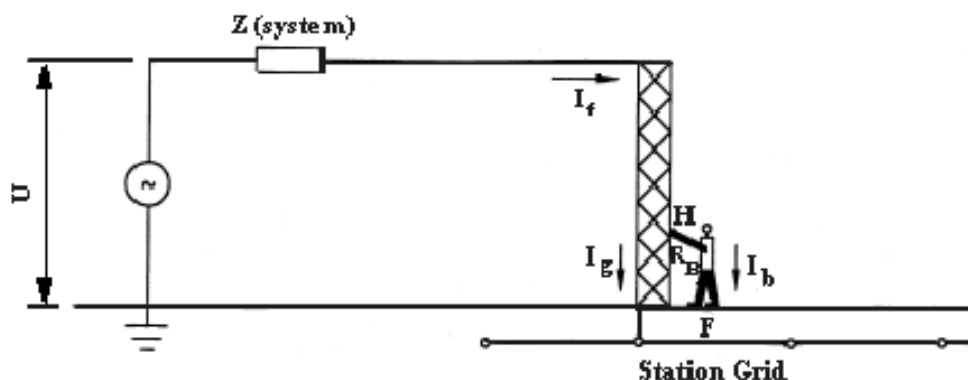
Στα πλαίσια μελέτης της λιγότερο επικίνδυνης περίπτωσης για τον άνθρωπο, όπως είναι η περίπτωση ροής του ρεύματος από πόδι σε πόδι, είναι δυνατή η θεώρηση μεγαλύτερης αντίστασης για το ανθρώπινο σώμα, όμως προτιμάται η διεξαγωγή της μελέτης από την ασφαλή πλευρά.

Για ροή ρεύματος από το ένα πόδι στο άλλο, παρόλο που η αντίσταση θεωρείται υψηλότερη κι επομένως η ένταση του ρεύματος και συγχρόνως ο κίνδυνος θανάτου μειώνεται, υπάρχει μια περίπτωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης:

Τάση μεταξύ των ποδιών επιφέρει πόνο και μπορεί να προκαλέσει πτώση του ατόμου, που έρχεται σε επαφή, στο έδαφος. Άμεσα ο κίνδυνος αυξάνεται καθώς προκαλείται ροή ρεύματος στην περιοχή των ζωτικών οργάνων. Καθώς έχουν καταγραφεί θάνατοι αυτής της αιτίας, θεωρείται απαραίτητος ο έλεγχος και της τάσης μεταξύ των ποδιών (βηματική τάση) εκτός της τάσης μεταξύ ποδιού και χεριού σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο (τάση επαφής).

4.2.1 Τάση επαφής

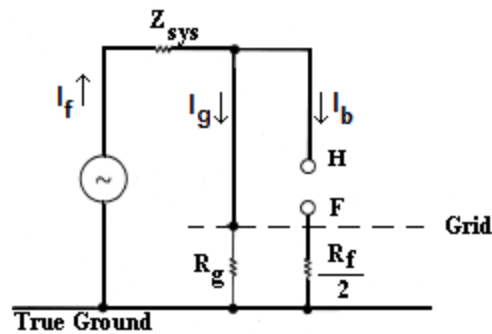
Η τάση επαφής αναπτύσσεται μεταξύ χεριού που έρχεται σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο και ποδιού στη γη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Τάση Επαφής

Η συνολική εγκατάσταση ισοδυναμεί με μία σύνθετη αντίσταση Z και το ρεύμα σφάλματος I_f διαχωρίζεται στο ρεύμα που ρέει προς τη γη I_g και το ρεύμα I_b που διαρρέει τον άνθρωπο αντίστασης R_B . Το άτομο αγγίζει το σύστημα στο σημείο H και ακουμπά στη γη στο σημείο F .

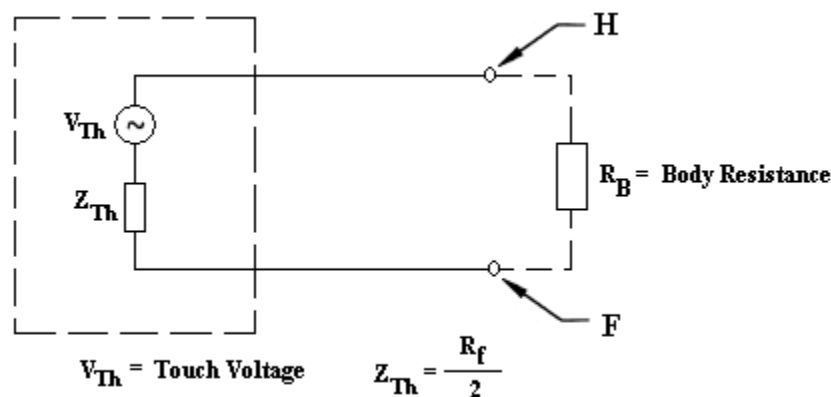
Στο σχήμα 4.4 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα. Η αντίσταση R_g είναι η αντίσταση γείωσης και η R_f είναι η αντίσταση του ποδιού σε σχέση με τη γη.



Σχήμα 4.4: Ισοδύναμο κύκλωμα για τάση επαφής

Σύμφωνα με το Θεώρημα Thevenin, η τάση Thevenin, V_{th} , είναι η τάση μεταξύ των σημείων H και F όπου το άτομο εφάπτεται (Σχήμα 4.5). Η αντίσταση Thevenin, Z_{th} , είναι η αντίσταση του συστήματος όπως φαίνεται από τα σημεία H και F με βραχυκυκλωμένες τις πηγές τάσης. Το ρεύμα I_b που διαρρέει το άτομο σε επαφή δίνεται από τη σχέση:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (4.7)$$



Σχήμα 4.5: Ισοδύναμο Thevenin – Τάση Επαφής

Λόγω της παραλληλίας των αντιστάσεων των ποδιών η αντίσταση Thevenin υπολογίζεται ίση με:

$$Z_{Th} = R_f / 2 \quad (4.8)$$

Όπου R_f είναι η αντίσταση του ενός ποδιού, ως προς το έδαφος, αγνοώντας το σύστημα γείωσης, σε Ω .

Ως κυκλωματικό ισοδύναμο για το πόδι του ανθρώπου, θεωρείται ένας αγωγίμος μεταλλικός δίσκος. Η αντίσταση επαφής των υποδημάτων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αγνοείται. Η αντίσταση ως προς το έδαφος ενός μεταλλικού δίσκου ακτίνας b [m] στην επιφάνεια ομοιογενούς εδάφους ειδικής αντίστασης ρ [Ωm] δίνεται από τη σχέση [2]:

$$R_f = \rho / 4 \cdot b \quad (4.9)$$

Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται, για την αναπαράσταση του ποδιού, μεταλλικός δίσκος ακτίνας 0.08m, οπότε η σχέση (4.8) γίνεται:

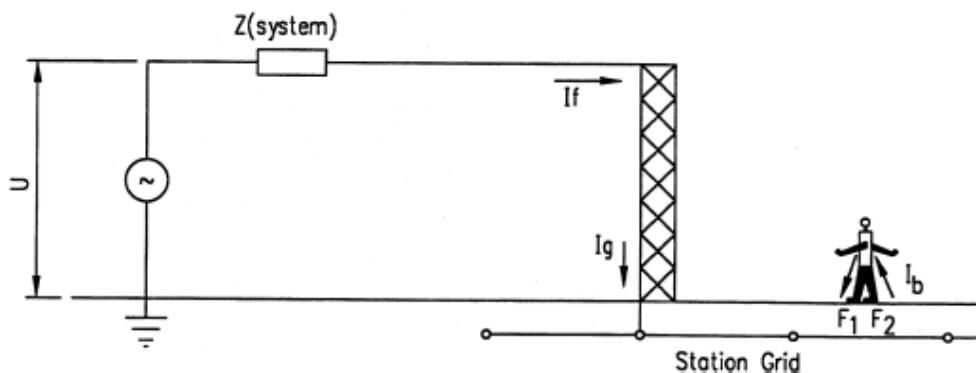
$$Z_{Th} = 1.5 \cdot \rho \quad (4.10)$$

Για ρεύμα I_b ίσο με το ανεκτό I_B καταλήγουμε στη σχέση για το επιτρεπόμενο όριο τάσης επαφής:

$$E_{touch} = I_B \cdot (R_B + 1.5 \cdot \rho) \quad (4.11)$$

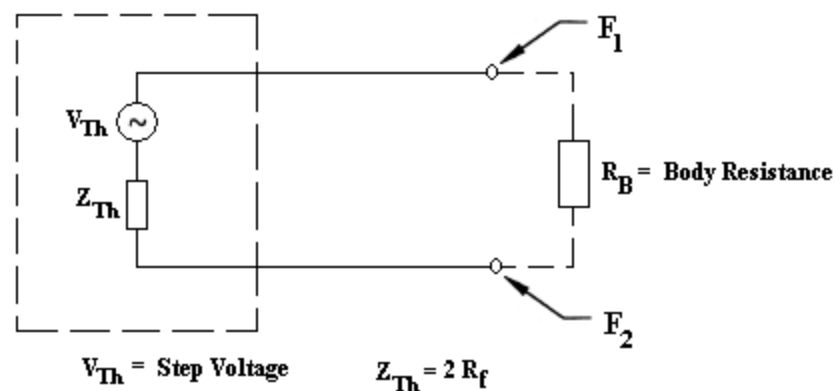
4.2.1 Βηματική Τάση

Η βηματική τάση αναπτύσσεται μεταξύ των δύο ποδιών ανθρώπου που στέκεται στην επιφάνεια της γης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Βηματική Τάση

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δίνεται στο σχήμα 4.7. Όπως και προηγουμένως, η τάση V_{Th} είναι η τάση στα άκρα που ακουμπά ο άνθρωπος, F_1 και F_2 , όταν αυτά είναι ανοικτοκυκλωμένα. Το άτομο αγγίζει το σύστημα στο σημείο H και ακουμπά στη γη στο σημείο F .



Σχήμα 4.7: Ισοδύναμο Thevenin – Βηματική Τάση

Η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin είναι η αντίσταση του συστήματος, όπως αυτή φαίνεται από τα σημεία F_1 και F_2 . Το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα είναι και σε αυτή την περίπτωση:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B}$$

Η αντίσταση Thevenin υπολογίζεται ίση με:

$$Z_{Th} = 2 \cdot R_f \quad (4.12)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.9) και για $b=0,08\text{m}$ καταλήγουμε:

$$Z_{Th} = 6.0 \cdot \rho \quad (4.13)$$

Από τα παραπάνω και για ρεύμα I_b ίσο με το ανεκτό I_B καταλήγουμε στη σχέση για το επιτρεπόμενο όριο βηματικής τάσης:

$$E_{step} = I_B \cdot (R_B + 6.0 \cdot \rho) \quad (4.14)$$



4.3 Επίδραση λεπτού στρώματος υλικού επιφανείας

Η παραπάνω θεώρηση έγινε υποθέτοντας ότι το έδαφος είναι ομοιογενές με συγκεκριμένη ειδική αντίσταση. Ωστόσο, στην επιφάνεια της γης που βρίσκεται πάνω από το θαμμένο πλέγμα γείωσης, είθισται να τοποθετείται ένα στρώμα πάχους 0.08m-0.15m υλικού μεγάλης ειδικής αντίστασης, όπως χαλίκι. Με αυτό τον τρόπο, αυξάνεται η αντίσταση ανάμεσα στο έδαφος και στα πόδια του ανθρώπου, που ακουμπούν σε αυτό. Το σχετικά μικρό βάθος του υλικού επιφανείας είναι συγκρίσιμο με την ακτίνα του μεταλλικού δίσκου που μοντελοποιεί το ανθρώπινο πόδι, οπότε η υπόθεση της ομοιόμορφης ειδικής αντίστασης εδάφους κατά τον κατακόρυφο άξονα δεν ισχύει πλέον. Κατά την οριζόντια διεύθυνση, για ένα άτομο που βρίσκεται στην περιοχή του υποσταθμού, το υλικό επιφανείας θεωρείται ότι εκτείνεται ως το άπειρο. Εάν το έδαφος κάτω από το υλικό επιφανείας έχει μικρότερη ειδική αντίσταση από το υλικό επιφανείας, τότε κλάσμα του ρεύματος που διαρρέει το πλέγμα γείωσης θα ανέβει στο στρώμα του υλικού, και η τάση στην επιφάνεια ελάχιστα θα διαφέρει από αυτή στην περίπτωση χωρίς το υλικό επιφανείας. Ωστόσο, το ρεύμα που θα εισέλθει στο ανθρώπινο σώμα θα μειωθεί αρκετά, διότι θα υπάρχει μεγαλύτερη αντίσταση επαφής των ποδιών του ανθρώπου με τη γη. Η περίπτωση που το στρώμα επιφανείας είναι αρκετά μεγάλου πάχους ώστε να θεωρηθεί ομοιογενούς ειδικής αντίστασης προς κάθε διεύθυνση, δύναται να είναι αρκετά ευνοϊκότερη.

Στην αντίθετη περίπτωση που το έδαφος έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από το υλικό επιφανείας, ένα σημαντικό μέρος του ρεύματος που διαρρέει το πλέγμα γείωσης θα ανέβει στο στρώμα του υλικού. Τα δυναμικά επιφανείας τώρα θα είναι διαφορετικά, εξαιτίας της συγκέντρωσης ρεύματος κοντά στην επιφάνεια. Συνεπώς, η τοποθέτηση, ή μη, υλικού επιφανείας επηρεάζει το ρεύμα που διαρρέει το άτομο ή τα δυναμικά επιφανείας, ανάλογα με τη σχέση της ειδικής του αντίστασης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Βασική παράμετρος που καθορίζει το βαθμό που επηρεάζει το υλικό επιφανείας είναι το πάχος του στρώματος αυτού του υλικού.



Οι παρακάτω εξισώσεις δίνουν την αντίσταση προς γη του ποδιού, πάνω στο υλικό επιφανείας [2]:

$$R_f = \left(\rho_s / 4 \cdot b \right) \cdot C_s \quad (4.15)$$

$$C_s = 1 + \left(16 \cdot b / \rho_s \right) \cdot \sum k^n \cdot R_{m(2n \cdot h_s)} \quad (4.16)$$

$$k = \rho - \rho_s / \rho + \rho_s \quad (4.17)$$

όπου

C_s ο συντελεστής μείωσης του στρώματος επιφανείας

k ο συντελεστής ανάκλασης ανάμεσα σε υλικά διαφορετικών ειδικών αγωγιμοτήτων

ρ_s η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας σε Ωm

ρ η ειδική αντίσταση της γης υπό το υλικό επιφανείας σε Ωm

h_s το πάχος του υλικού επιφανείας σε m

b η ακτίνα του κυκλικού μεταλλικού δίσκου που μοντελοποιεί το πόδι σε m

$R_{m(2nhs)}$ η αμοιβαία αντίσταση γείωσης ανάμεσα σε δυο παρόμοιες, παράλληλες, ομοαξονικές πλάκες, που απέχουν απόσταση $2nh_s$, μέσα σε ένα μέσο απείρων διαστάσεων, ειδικής αντίστασης ρ_s , σε Ωm .

Ο παρακάτω εμπειρικός τύπος δίνει την τιμή του C_s , με απόκλιση 5% από την εξίσωση που προκύπτει από την αναλυτική επίλυση [2]

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \rho / \rho_s \right)}{2 \cdot h_s + 0.09} \quad (4.18)$$

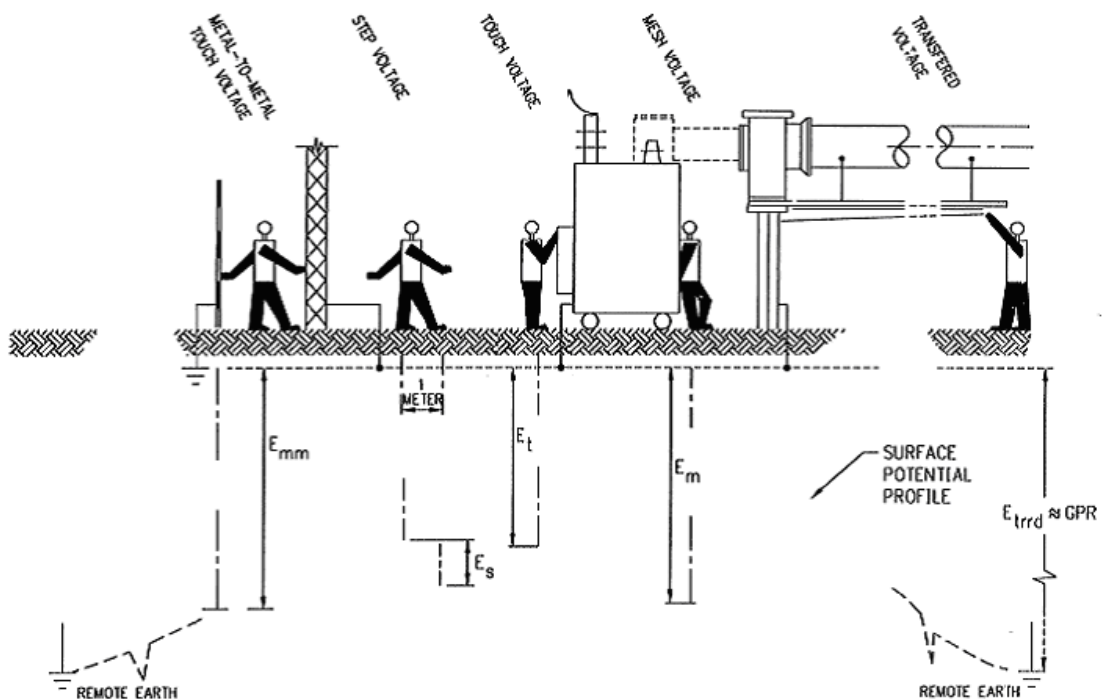
4.4 Κριτήρια ανεκτής τάσης

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται πέντε βασικές περιπτώσεις που αφορούν ένα άτομο και γειωμένες εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος. Για επαφή πόδι με πόδι, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι αυτό του σχήματος 4.7, και η τάση είναι ίση με E_s (βηματική τάση). Για τα τρία παραδείγματα επαφής χέρι με πόδια που



δίνονται στο σχήμα 4.8, η τάση U ισούται με E_t (τάση επαφής), E_m (τάση mesh) ή E_{trrd} (μεταφερόμενη τάση).

Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, η γη άγει τα ρεύματα που προέρχονται από το πλέγμα και άλλα μόνιμα ηλεκτρόδια γείωσης που είναι θαμμένα κάτω από την επιφάνειά της. Οι προκαλούμενες κλίσεις δυναμικού έχουν ουσιαστική επίδραση στην τιμή του U .



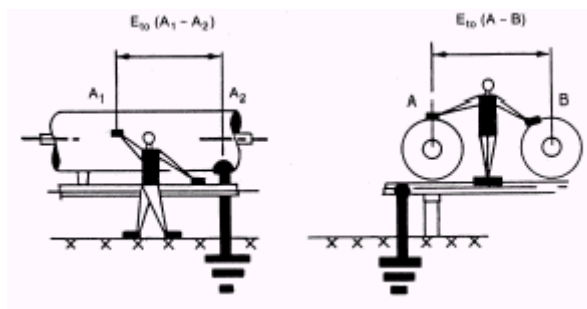
Σχήμα 4.8: Τάσεις επαφής, βηματική, βρόχου, επαφής, μεταξύ μετάλλων και από μεταφορά

Το κύκλωμα που αφορά την επαφή μέταλλο με μέταλλο, είτε χέρι με χέρι, είτε χέρι με πόδια, δίνεται στο σχήμα 4.9 όπου η U είναι ίση με τη μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής, E_{mm} .

Στην περίπτωση των συμβατικών υποσταθμών, η τυπική περίπτωση της μέταλλο με μέταλλο τάσης επαφής προκύπτει όταν μεταλλικά αντικείμενα ή κατασκευές μέσα στην περιοχή του υποσταθμού δεν είναι συνδεδεμένα με το πλέγμα γείωσης. Αντικείμενα όπως σωλήνες, rails, φράκτες που εντοπίζονται μέσα ή κοντά στην περιοχή όπου είναι θαμμένο το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού, και που δεν είναι συνδεδεμένα με το πλέγμα γείωσης, ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη. Η μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής θα αποκτήσει τότε μεγάλη τιμή, επικίνδυνη για ένα

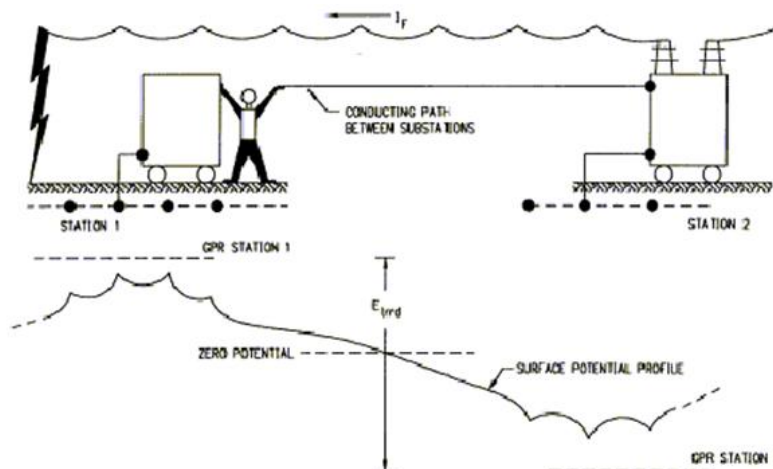


άτομο που στέκεται πάνω ή ακουμπά σε ένα γειωμένο αντικείμενο ή κατασκευή και που έρχεται σε επαφή με μεταλλικό αντικείμενο ή κατασκευή που δεν είναι γειωμένο. Στην πράξη, για να αποφευχθεί ο κίνδυνος από τη μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής, συνδέονται τα δυνητικά επικίνδυνα σημεία με το πλέγμα του υποσταθμού.



Σχήμα 4.9: Τυπικές περιπτώσεις επαφής μέταλλο με μέταλλο σε υποσταθμό GIS

Η περίπτωση της μεταφερόμενης τάσης (Σχήμα 4.10) προκύπτει όταν ένα άτομο που στέκεται μέσα στην περιοχή του υποσταθμού, ακουμπήσει έναν αγωγό γειωμένο σε απόμακρο σημείο, ή όταν ένα άτομο που στέκεται σε απόμακρο σημείο ακουμπήσει αγωγό που συνδέεται με το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού. Κατά την εκδήλωση σφάλματος, το προκαλούμενο δυναμικό στη γη μπορεί να είναι ίσο ή και μεγαλύτερο από το GPR ενός πλέγματος γείωσης που αποφορτίζει το ρεύμα σφάλματος. Ο κίνδυνος από τις εξωτερικές μεταφερόμενες τάσεις (επαγόμενες από κυκλώματα επικοινωνιών, σωλήνες, κτλ) αποφεύγεται χρησιμοποιώντας συσκευές απομόνωσης ή ουδετέρωσης και θεωρώντας τα εν λόγω κυκλώματα, σωλήνες, κτλ, ισοδύναμα με ενεργοποιημένες γραμμές.



Σχήμα 4.10: Τυπική περίπτωση εκτεταμένου μεταφερόμενου δυναμικού.

4.5 Κριτήρια για τη βηματική τάση και την τάση επαφής

Η ασφάλεια ενός ατόμου έγκειται στην αποφυγή απορρόφησης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας μεγαλύτερης από ένα συγκεκριμένο όριο, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

Για τη **βηματική τάση** το όριο είναι σύμφωνα με τη σχέση (4.14):

$$E_{step} = (R_B + 2 \cdot R_f) \cdot I_B$$

Για σωματικό βάρος **50kg**:

$$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (4.19)$$

Και για σωματικό βάρος **70kg**:

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (4.20)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (4.11) το όριο για την **τάση επαφής** είναι:

$$E_{touch} = \frac{R_B + R_f}{2} \cdot I_B$$

Για σωματικό βάρος **50kg**:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (4.21)$$

Και για σωματικό βάρος **70kg**:

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (4.22)$$

Όπου

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0.09}$$

E_{step} η βηματική τάση σε V

E_{touch} η τάση επαφής σε V

ρ_s η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας σε Ωm

t_s η διάρκεια που διαρρέει το ρεύμα το ανθρώπινο σώμα, σε sec.

Εάν δεν χρησιμοποιείται υλικό επιφανείας, τότε $C_s=1$ και $\rho_s=\rho$



Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις $\rho_s=0$ προκύπτουν τα όρια για τη μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής:

Για σωματικό βάρος **50kg**:

$$E_{mm-touch50} = 116 / \sqrt{t_s} \quad (4.23)$$

Και για σωματικό βάρος **70kg**:

$$E_{mm-touch70} = 157 / \sqrt{t_s} \quad (4.24)$$

Όπου

E_{mm} η μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής σε V.

Κεφάλαιο 5

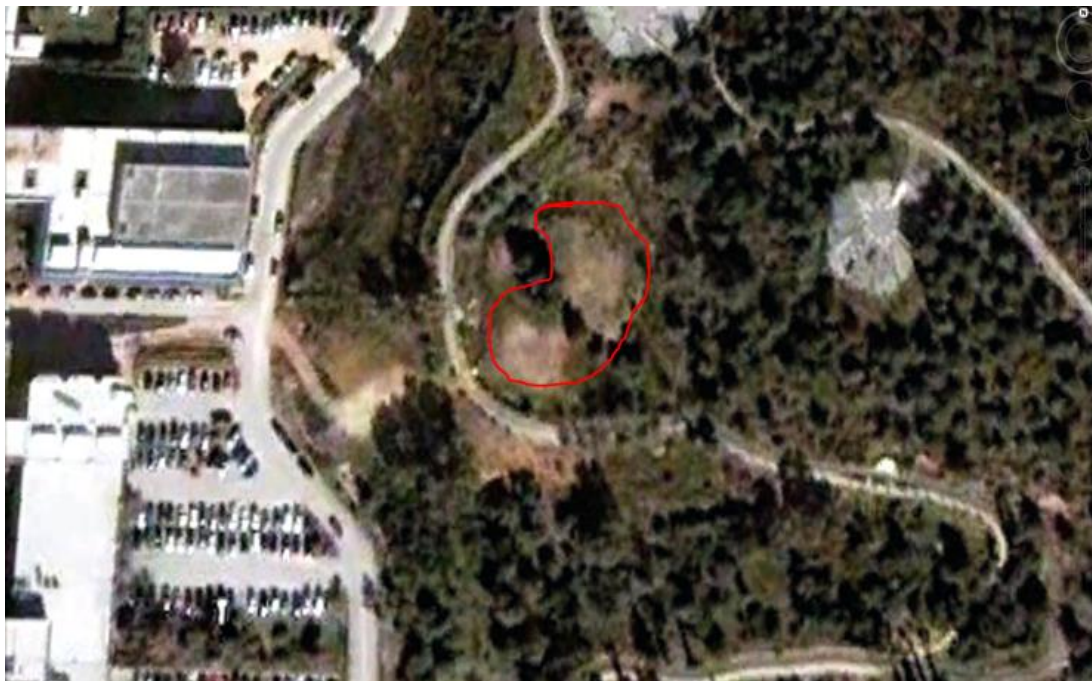
Τρόποι Μέτρησης

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στο χώρο που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων καθώς και στη θέση των ηλεκτροδίων του πειράματος. Θα δούμε επίσης τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνονταν οι μετρήσεις, ενώ θα γίνει και μία περιγραφή των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν.

5.1 Περιγραφή της εγκατάστασης

Η λήψη των μετρήσεων έγινε σε χώρο όπου ήδη είχαν εγκατασταθεί ηλεκτρόδια από τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Π. Ανδροβιτσανέα [56].

5.1.1 Τοποθεσία λήψης των μετρήσεων



Εικόνα 5.1: Δορυφορική φωτογραφία του πεδίου δοκιμών [56]

Η τοποθεσία εγκατάστασης βρίσκεται στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, στην κορυφή του λοφίσκου που βρίσκεται δίπλα από τα κτίρια των Χημικών Μηχανικών, των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και το υπαίθριο parking (Εικόνα 5.1).

Ο χώρος στον οποίο εγκαταστάθηκαν τα ηλεκτρόδια είναι ιδανικός για συχνή λήψη μετρήσεων αφού:

- είναι ελεύθερος και δε χρησιμοποιείται από κάποια σχολή ή υπηρεσία
- είναι φυσική απόληξη στους πρόποδες του Υμηττού και δεν έχει γίνει καμιά τεχνική παρέμβαση στο έδαφος και το περιβάλλον
- η περιοχή του λόφου που τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια είναι εντελώς επίπεδη, επιτρέποντας την εύκολη λήψη των μετρήσεων (συχνά μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους ή της αντίστασης γείωσης πρέπει να πραγματοποιηθούν σε περιοχές με απότομες πλαγιές, δυσκολία η οποία αποφεύγεται εδώ)
- 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.

Το έδαφος της περιοχής χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκη άμμος με χαλίκια και κροκάλες. Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη των Φραγκογιάννη, Παπαθεοδώρου και Σταματάκη [57] έγινε δειγματοληψία χώματος 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%
- άργιλο σε ποσοστό 5,74%.

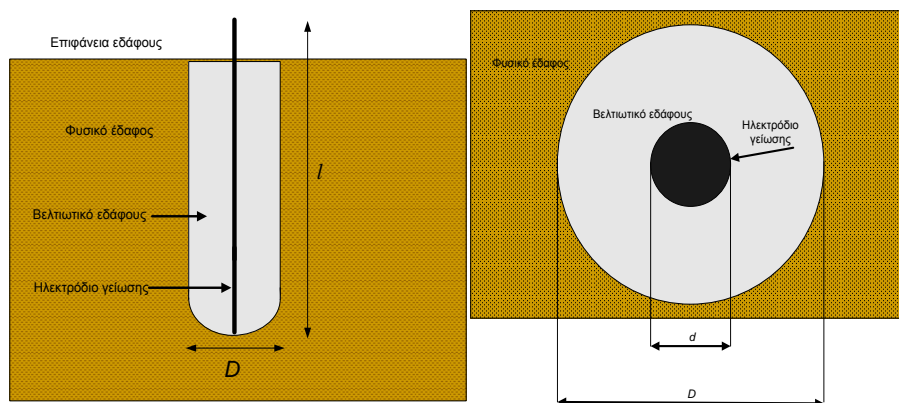
Το σύστημα κατηγοριοποίησης του εδάφους που εφαρμόστηκε ήταν κατά *AASTHO* [58]. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος χώματος μετρήθηκε και βρέθηκε ότι είναι υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το νερό αποστραγγίζεται πολύ γρήγορα από το έδαφος.



5.1.2 Θέσεις των ηλεκτροδίων

Στην τοποθεσία είχαν ήδη τοποθετηθεί έξι 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 μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης (Σχήμα 5.1) και το ένα απευθείας στο φυσικό έδαφος, ως εξής:

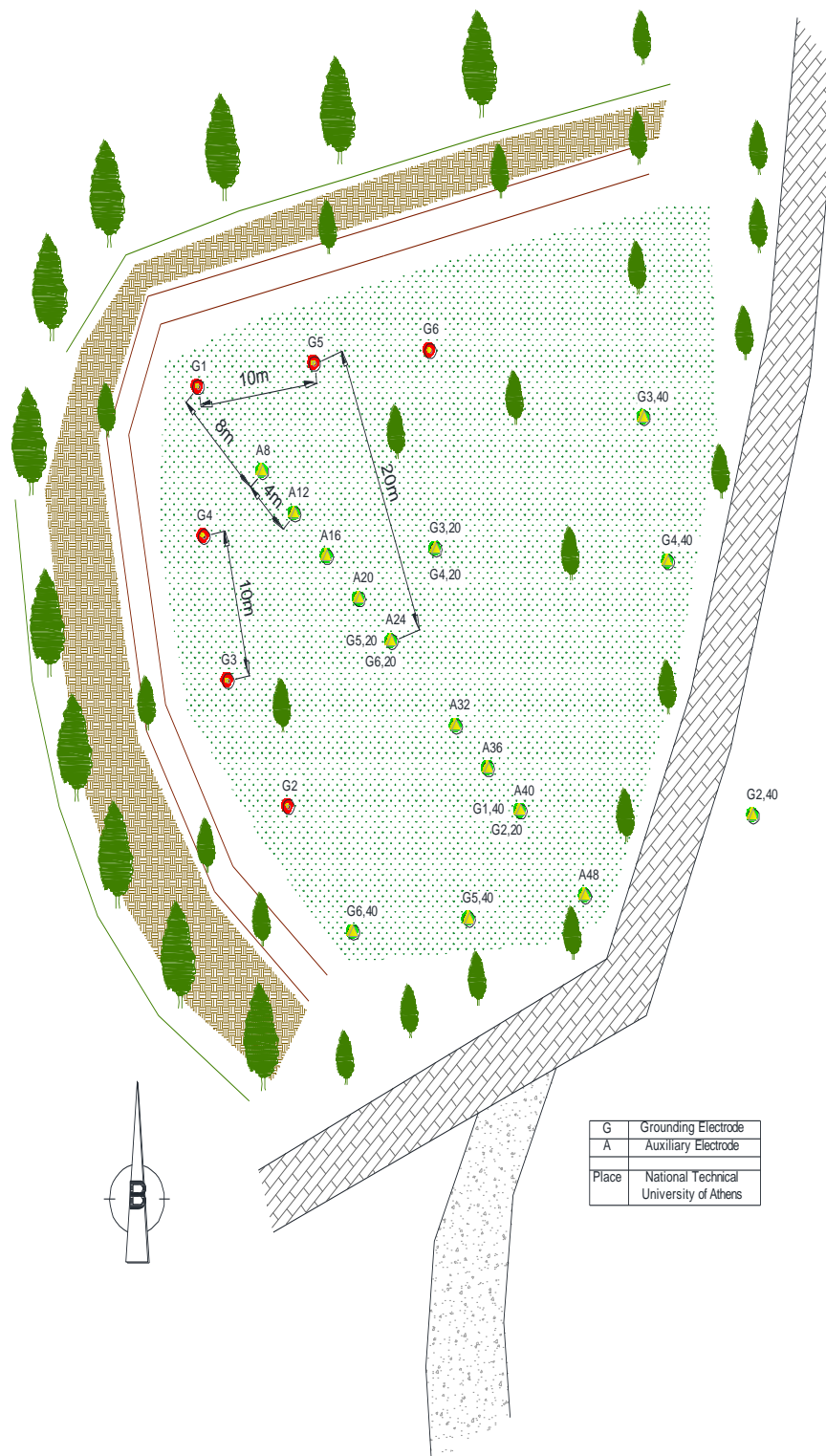
- Ηλεκτρόδιο G_1 : Φυσικό έδαφος
- Ηλεκτρόδιο G_2 : Σκυρόδεμα
- Ηλεκτρόδιο G_3 : Μπετονίτης
- Ηλεκτρόδιο G_4 : Χημικό υλικό A
- Ηλεκτρόδιο G_5 : Χημικό υλικό B
- Ηλεκτρόδιο G_6 : Χημικό υλικό C



Σχήμα 5.1: Ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετημένο μέσα στο βελτιωτικό έδαφος [56]

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 διάταξη που περιγράφεται παραπάνω φαίνεται στο Σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2: Διάταξη ηλεκτροδίων του πειράματος [56]

Τα ηλεκτρόδια με τα βελτιωτικά υλικά στις αρχικές μέρες του πειράματος φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες.





Εικόνα 5.2: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε βελτιωτικά υλικά εδάφους



Εικόνα 5.3: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε μπετονίτη και σκυρόδεμα

Οι παραπάνω φωτογραφίες ελήφθησαν την ημέρα εγκατάστασης των ηλεκτροδίων. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, η εικόνα ορισμένων βελτιωτικών στο τέλος της εργασίας απέχει πολύ από την παραπάνω.

5.2 Λήψη των μετρήσεων

5.2.1 Όργανα λήψης μετρήσεων

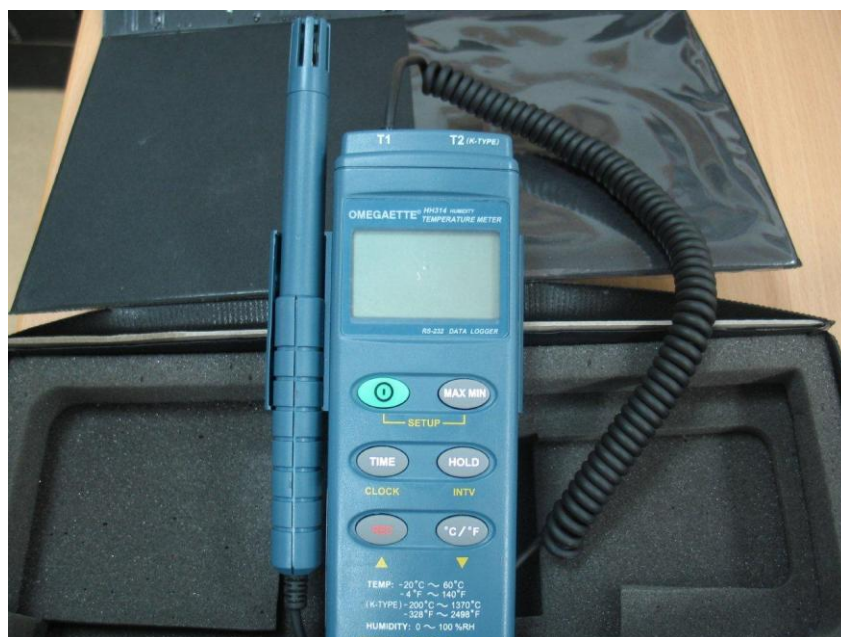
Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι το MEGGER DET2/2 (Εικόνα 5.4), το οποίο είναι διακριβωμένο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων (ΚΔΕΠ/ΔΕΗ). Η συχνότητα λειτουργίας του γειωσόμετρου καθορίζεται στα 128Hz.



Εικόνα 5.4: Γειωσόμετρο

Παράλληλα γίνονται μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, *in situ*, με το θερμο-υγρόμετρο OMEGAETTE HH314 Humidity-Temperature Meter (Εικόνα 5.5), που είναι επίσης διακριβωμένο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων (ΔΕΚΑ ΑΕΒΕ).

Τέλος για τον υπολογισμό των αποστάσεων χρησιμοποιήθηκε μετροταινία ESLON μήκους 100m, διακριβωμένη από το διαπιστευμένο εργαστήριο της ALGOSYSTEMS (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.5: Θερμο-υγρόμετρο



Εικόνα 5.6: Μετροταινία ESLON μήκους 100m

5.2.2 Υγρασία εδάφους και ύψος βροχόπτωσης



Εικόνα 5.7: Μετεωρολογικός σταθμός Ε.Μ.Π

Επειδή για τη μέτρηση της υγρασίας εδάφους δεν ήταν διαθέσιμο κάποιο όργανο μέτρησης οι τιμές του μεγέθους αυτού, καθώς και του ύψους βροχοπτώσεως λαμβάνονται on line από τα όργανα καταγραφής του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου (Εικόνα 5.7), 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.

5.2.3 Τρόπος λήψης των μετρήσεων

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εφαρμόστηκε η μέθοδος των 4 ηλεκτροδίων και συγκεκριμένα η μέθοδος Wenner όπως αυτή περιγράφεται στην ενότητα 2.3. Χρησιμοποιήθηκαν δέκα ηλεκτρόδια, (εννέα βοηθητικά ηλεκτρόδια και το κύριο ηλεκτρόδιο G_1), διατεταγμένα όλα σε έναν άξονα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2. 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 $a=16m$.

Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των κυρίων ηλεκτροδίων εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 1.3.3. Τα βοηθητικά ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις $20m$ και $40m$ από το εκάστοτε προς μέτρηση ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2

Οι μετρήσεις έγιναν το χρονικό διάστημα 17/2/2011-16/9/2011 και πραγματοποιούνταν σχεδόν σε καθημερινή βάση. Η συνεχής εναλλαγή στις συνδέσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα τις συχνές διαδρομές που πρέπει να διανύει ο χειριστής που εκτελεί τις μετρήσεις, καθώς και τα πολλά και συνεχόμενα τυλίγματα και απλώματα των καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του οργάνου στα ηλεκτρόδια, απαιτούσε διάρκεια περίπου 1,5 ώρας για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Επίσης, λόγω της διεξαγωγής των μετρήσεων σε ανοιχτό χώρο και όχι σε χώρο εργαστηρίου, οι καιρικές συνθήκες έκαναν συχνά δύσκολες τις συνθήκες μέτρησης. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι μετρήσεις ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν μόνο τις ώρες της ημέρας που απουσίαζε η βροχόπτωση, ενώ οι ξαφνικές βροχές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων απαιτούσαν την άμεση συλλογή όλου του εξοπλισμού, αφού δεν υπήρχε η δυνατότητα προστασίας του από τη βροχή. Ιδιαίτερα δύσκολη ήταν και η πραγματοποίηση των μετρήσεων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, λόγω των ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι κάποιες φορές οι μετρήσεις παρουσίαζαν σημαντική απόκλιση από τις αντίστοιχες των προηγούμενων ημερών, λόγω κάποιων τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάζονταν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Τέτοια προβλήματα συνήθως ήταν:

- Αναπτυσσόμενη σκουριά στο ηλεκτρόδιο που έπρεπε να καθαριστεί με ειδική συρμάτινη βούρτσα.



- Διακοπή του καλωδίου μέτρησης σε κάποιο σημείο, οπότε και έπρεπε να επισκευασθεί.
- Μη σωστή επαφή του καλωδίου μέτρησης με κάποιο ηλεκτρόδιο λόγω της μη καλής εφαρμογής του. Αυτή ήταν και η πιο συνηθισμένη αλλά και πιο απλή περίπτωση, αφού διορθωνόταν με την επανατοποθέτηση του καλωδίου στο ηλεκτρόδιο.

Είναι κατανοητό ότι με την παρουσίαση κάποιου από τα παραπάνω προβλήματα η διαδικασία μέτρησης σταματούσε και έπρεπε να συνεχισθεί μετά την αποκατάστασή του.

Όλα τα παραπάνω προβλήματα και οι δυσκολίες που εμφανίζονται κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την πραγματοποίηση τέτοιων μελετών. Για αυτό το λόγο δεν πραγματοποιούνται τέτοιες έρευνες σε μεγάλη κλίμακα: εκτός από το παρόν πείραμα γίνονται πειράματα αυτήν την περίοδο στο Μεξικό [59], ενώ έχουν γίνει ή συνεχίζονται να γίνονται παρόμοιες έρευνες στη Μαλαισία [53], όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα-Επεξεργασία και Αξιολόγησή τους

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι τιμές των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της παρούσας εργασίας και γίνεται μία προσπάθεια επεξεργασίας των τιμών αυτών παραθέτοντας κάποια χρήσιμα για την εργασία διαγράμματα. Γίνεται επίσης μία περιγραφή του προγράμματος CYMGrd με το οποίο όπως θα δούμε μπορούμε να εξάγουμε κάποια πολύ χρήσιμα αποτελέσματα.

6.1 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 17/2/2011 μέχρι και 16/9/2011, με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο, παρατίθενται στους επόμενους πίνακες:

Ημερομηνία	P_2 (Ω m)	P_4 (Ω m)	P_8 (Ω m)	P_{12} (Ω m)	P_{16} (Ω m)	Ύψος βροχόπτωσης (mm)
17/2/2011	14,11	5,55	2,43	1,876	1,622	0,00
18/2/2011	13,97	5,52	2,43	1,876	1,616	0,00
21/2/2011	13,58	5,37	2,40	1,874	1,604	0,20
22/2/2011	13,32	5,32	2,40	1,872	1,600	0,20
28/2/2011	13,14	5,15	2,33	1,834	1,564	0,00
1/3/2011	13,30	5,19	2,33	1,830	1,564	0,00
3/3/2011	13,16	5,14	2,32	1,820	1,554	0,00
4/3/2011	13,15	5,15	2,32	1,820	1,556	0,00
8/3/2011	13,43	5,18	2,35	1,816	1,546	0,20
10/3/2011	13,64	5,11	2,29	1,814	1,554	0,00
11/3/2011	13,54	5,16	2,30	1,808	1,552	0,00
13/3/2011	13,49	5,67	2,31	1,808	1,554	0,00
15/3/2011	13,29	5,17	2,31	1,810	1,554	0,00
17/3/2011	13,30	5,17	2,30	1,808	1,556	0,20
18/3/2011	13,32	5,16	2,30	1,810	1,556	0,00
21/3/2011	13,54	5,16	2,30	1,816	1,572	0,00
22/3/2011	13,79	5,20	2,30	1,814	1,578	0,00
23/3/2011	14,02	5,23	2,30	1,816	1,582	0,00
24/3/2011	14,11	5,26	2,26	1,788	1,584	0,00



28/3/2011	14,01	5,29	2,30	1,822	1,598	0,20
29/3/2011	13,92	5,28	2,31	1,822	1,602	0,00
30/3/2011	13,96	5,13	2,30	1,822	1,606	0,00
1/4/2011	13,54	5,70	2,29	1,594	1,574	0,20
4/4/2011	13,57	5,13	2,26	1,788	1,586	0,00
5/4/2011	13,53	5,14	2,28	1,816	1,588	0,20
6/4/2011	13,42	5,28	2,28	1,816	1,688	0,00
7/4/2011	13,55	5,16	2,27	1,818	1,596	0,00
8/4/2011	13,64	5,17	2,27	1,818	1,600	0,00
13/4/2011	13,73	5,21	2,27	1,826	1,632	0,00
14/4/2011	13,64	5,21	2,27	1,826	1,638	0,00
15/4/2011	13,77	5,24	2,27	1,830	1,646	0,00
18/4/2011	14,08	5,28	2,27	1,820	1,630	0,20
19/4/2011	14,22	5,31	2,27	1,820	1,630	0,00
20/4/2011	14,31	5,33	2,27	1,820	1,631	0,00
29/4/2011	13,08	5,13	2,25	1,818	1,614	0,00
2/5/2011	13,12	5,09	2,24	1,824	1,620	0,00
3/5/2011	12,88	5,08	2,23	1,812	1,624	0,20
4/5/2011	13,00	5,06	2,24	1,828	1,632	0,00
6/5/2011	13,18	5,06	2,25	1,832	1,638	0,20
9/5/2011	13,36	5,10	2,24	1,832	1,666	0,00
10/5/2011	13,37	5,17	2,24	1,834	1,676	0,00
11/5/2011	13,47	5,19	2,24	1,828	1,688	0,00
12/5/2011	13,54	5,21	2,24	1,836	1,692	0,00
13/5/2011	13,75	5,23	2,24	1,838	1,704	0,00
16/5/2011	13,87	5,25	2,24	1,842	1,731	0,00
17/5/2011	13,57	5,27	2,24	1,846	1,742	0,00
18/5/2011	13,40	5,28	2,31	1,890	1,780	0,20
19/5/2011	13,59	5,27	2,28	1,870	1,790	0,20
20/5/2011	13,81	5,32	2,32	1,880	1,860	0,00
23/5/2011	13,81	5,37	2,32	1,880	1,890	0,00
24/5/2011	13,73	5,41	2,34	1,890	1,930	0,00
25/5/2011	13,75	5,40	2,33	1,890	1,940	0,00
27/5/2011	13,85	5,43	2,31	1,868	1,770	0,2
30/5/2011	14,12	5,48	2,28	1,864	1,786	0,00
31/5/2011	14,13	5,48	2,28	1,866	1,798	0,00
1/6/2011	14,17	5,49	2,28	1,868	1,802	0,20
2/6/2011	14,08	5,55	2,29	1,866	1,808	0,00
3/6/2011	14,19	5,55	2,28	1,864	1,816	0,00
6/6/2011	13,34	5,61	2,28	1,872	1,842	0,00
7/6/2011	14,34	5,62	2,28	1,872	1,838	0,00
8/6/2011	14,36	5,63	2,27	1,876	1,850	0,00
9/6/2011	14,36	5,64	2,27	1,879	1,851	0,00
15/6/2011	14,02	5,37	2,25	1,846	1,708	0,20



16/6/2011	14,05	5,41	2,24	1,848	1,718	0,00
17/6/2011	14,07	5,44	2,25	1,852	1,720	0,00
20/6/2011	14,22	5,48	2,25	1,863	1,781	0,00
21/6/2011	14,25	5,50	2,24	1,868	1,786	0,00
22/6/2011	14,30	5,53	2,25	1,871	1,792	0,00
23/6/2011	14,36	5,57	2,26	1,876	1,826	0,00
24/6/2011	14,38	5,59	2,26	1,880	1,832	0,00
27/6/2011	14,71	5,69	2,27	1,892	1,872	0,00
30/6/2011	15,21	5,78	2,27	1,898	1,892	0,00
1/7/2011	15,24	5,80	2,27	1,903	1,898	0,00
4/7/2011	15,37	5,88	2,28	1,910	1,920	0,00
5/7/2011	15,54	5,92	2,28	1,914	1,926	0,00
8/7/2011	15,83	6,02	2,29	1,920	1,928	0,00
11/7/2011	16,05	6,12	2,31	1,928	1,980	0,00
12/7/2011	16,17	6,16	2,31	1,926	1,968	0,00
15/7/2011	16,55	6,29	2,32	1,934	1,966	0,00
19/7/2011	16,94	6,40	2,33	1,940	1,998	0,00
20/7/2011	17,02	6,44	2,33	1,934	1,970	0,00
22/7/2011	17,28	6,53	2,33	1,936	1,980	0,00
25/7/2011	17,46	6,59	2,34	1,939	2,020	0,00
26/7/2011	17,67	6,63	2,34	1,942	2,000	0,00
29/7/2011	18,28	6,72	2,34	1,946	2,040	0,00
1/8/2011	18,29	6,75	2,35	1,945	2,042	0,00
3/8/2011	18,31	6,79	2,35	1,946	2,044	0,00
5/8/2011	18,72	6,84	2,35	1,944	2,042	0,00
8/8/2011	19,12	6,97	2,35	1,943	2,038	0,00
10/8/2011	19,46	7,26	2,37	1,947	2,032	0,00
12/8/2011	19,66	7,42	2,37	1,946	2,025	0,00
17/8/2011	21,28	7,56	2,37	1,938	2,010	0,00
19/8/2011	21,40	7,61	2,38	1,930	2,080	0,00
22/8/2011	21,54	7,68	2,38	1,920	2,010	0,00
24/8/2011	21,60	7,69	2,39	1,918	1,956	0,00
26/8/2011	21,77	7,71	2,39	1,912	1,842	0,00
29/8/2011	21,90	7,72	2,39	1,898	1,708	0,00
2/9/2011	22,00	5,53	2,38	1,890	1,686	0,00
5/9/2011	23,00	7,90	2,38	1,900	1,682	0,00
7/9/2011	23,10	7,97	2,39	1,888	1,674	0,00
9/9/2011	23,40	8,08	2,40	1,898	1,702	0,00
14/9/2011	24,10	8,24	2,40	1,878	1,660	0,00
16/9/2011	24,40	8,30	2,40	1,894	1,668	0,00

Πίνακας 6.1: Τιμές μέτρησης της ειδικής αντίστασης για $\rho_a=2,4,8,12,16$, καθώς και της βροχόπτωσης.



Ημερομηνία	R ₁ (Ω)	R ₂ (Ω)	R ₃ (Ω)	R ₄ (Ω)	R ₅ (Ω)	R ₆ (Ω)
17/2/2011	178,2	40,1	39,1	64,6	37,3	75,0
18/2/2011	176,0	39,3	39,1	64,1	36,5	62,3
21/2/2011	156,6	36,9	36,4	59,8	34,7	58,3
22/2/2011	154,3	35,4	36,0	58,4	34,2	57,1
28/2/2011	134,7	34,2	31,7	56,6	33,1	54,7
1/3/2011	135,4	34,7	31,9	57,2	33,4	55,6
3/3/2011	131,3	34,0	31,4	55,7	33,3	55,4
4/3/2011	132,0	34,1	31,6	56,3	33,3	54,2
8/3/2011	130,4	35,0	31,3	55,8	33,4	53,9
10/3/2011	136,3	36,3	31,7	57,6	34,5	55,8
11/3/2011	135,9	36,1	31,9	57,5	34,6	56,5
13/3/2011	138,6	36,3	32,1	57,6	35,1	57,5
15/3/2011	136,9	35,8	31,8	57,5	34,7	57,0
17/3/2011	137,0	36,1	31,9	57,5	34,8	57,1
18/3/2011	137,4	36,1	32,0	57,6	34,7	56,9
21/3/2011	138,7	37,5	32,2	57,3	33,5	58,1
22/3/2011	141,9	38,2	32,6	57,9	35,2	58,3
23/3/2011	142,3	38,5	32,7	58,6	35,6	58,9
24/3/2011	142,4	38,6	32,8	58,8	35,7	59,2
28/3/2011	146,6	38,6	33,4	57,8	35,9	60,1
29/3/2011	143,5	38,4	33,3	57,4	35,6	60,0
30/3/2011	144,3	38,5	33,2	57,6	35,7	60,0
1/4/2011	109,6	34,0	32,0	51,2	33,2	57,3
4/4/2011	119,5	36,2	31,2	53,4	33,5	57,0
5/4/2011	121,9	36,7	31,4	54,1	34,0	58,2
6/4/2011	121,7	36,7	31,6	53,9	33,7	57,9
7/4/2011	125,2	37,3	32,0	54,4	33,7	57,6
8/4/2011	128,1	37,6	32,0	54,8	34,0	57,8
13/4/2011	132,5	38,5	32,1	54,1	37,5	58,6
14/4/2011	134,10	38,7	32,4	53,6	33,8	58,6
15/4/2011	133,0	38,7	32,1	54,0	33,7	59,0
18/4/2011	109,2	37,9	30,9	51,3	32,6	58,5
19/4/2011	92,4	38,1	30,9	51,3	32,7	58,5
20/4/2011	93,6	38,1	31,1	51,4	32,7	58,6
29/4/2011	106,5	36,8	29,1	51,9	31,1	55,9
2/5/2011	112,5	38,2	29,9	51,8	31,2	55,6
3/5/2011	112,3	37,5	29,7	51,0	30,1	55,0
4/5/2011	109,5	38,1	30,0	51,4	31,0	54,9
6/5/2011	110,5	38,6	30,3	50,7	34,5	55,3
9/5/2011	114,9	42,4	29,8	51,8	31,3	56,6
10/5/2011	115,4	40,6	30,0	51,9	31,1	56,3
11/5/2011	115,9	40,0	30,2	52,2	31,2	56,2



12/5/2011	118,00	40,5	30,2	52,6	31,3	56,4
13/5/2011	120,0	41,4	30,6	53,0	31,6	57,1
16/5/2011	121,4	41,8	30,8	52,1	31,3	58,1
17/5/2011	122,3	42,0	30,8	52,3	31,4	58,4
18/5/2011	117,8	42,1	30,4	51,5	30,9	57,7
19/5/2011	120,1	41,9	30,6	51,4	31,1	58,0
20/5/2011	121,1	43,8	30,7	52,4	31,4	58,9
23/5/2011	121,6	44,9	32,0	52,4	31,1	59,6
24/5/2011	121,4	46,7	32,1	51,9	31,0	59,8
25/5/2011	122,2	45,3	32,3	52,1	30,9	60,0
27/5/2011	101,6	41,3	32,0	48,8	29,7	60,6
30/5/2011	106,4	43,0	32,6	49,6	30,3	62,4
31/5/2011	110,2	43,7	32,8	50,5	30,5	63,2
1/6/2011	115,4	44,3	32,6	51,1	30,6	63,9
2/6/2011	113,5	45,0	32,8	51,7	30,5	64,4
3/6/2011	115,3	45,6	33,0	52,1	30,7	64,9
6/6/2011	118,50	47,8	34,2	52,6	30,7	66,4
7/6/2011	119,3	48,3	34,4	53,1	30,7	67,0
8/6/2011	120,5	49,0	34,6	53,3	30,6	67,6
9/6/2011	120,9	49,2	34,7	53,5	30,6	67,8
15/6/2011	94,3	40,8	29,2	46,5	25,9	66,7
16/6/2011	96,7	41,3	29,8	46,9	26,2	67,5
17/6/2011	98,3	41,6	30,2	47,3	26,5	67,8
20/6/2011	102,2	43,1	32,2	51,2	26,8	70,4
21/6/2011	104,6	43,6	32,4	51,7	26,9	70,9
22/6/2011	106,0	45,1	32,6	52,2	27,1	71,6
23/6/2011	107,4	47,2	33,2	52,9	27,4	72,3
24/6/2011	109,2	48,4	34,0	52,2	27,5	73,8
27/6/2011	112,3	51,7	36,4	56,8	27,7	76,5
30/6/2011	118,5	55,8	37,9	64,1	28,6	81,3
1/7/2011	119,8	56,0	38,8	66,2	28,8	82,2
4/7/2011	123,7	61,0	41,9	71,9	29,1	84,9
5/7/2011	125,3	62,1	42,6	74,5	29,0	86,2
8/7/2011	130,1	66,3	45,6	81,7	29,2	90,3
11/7/2011	138,6	70,5	48,8	87,3	29,4	95,2
12/7/2011	141,4	71,9	49,8	89,6	29,5	97,8
15/7/2011	148,3	76,5	53,6	96,0	29,8	108,7
19/7/2011	157,7	82,1	57,8	102,4	30,3	126,7
20/7/2011	160,7	83,2	58,6	104,1	30,4	136,1
22/7/2011	169,1	85,6	61,3	106,5	30,9	171,2
25/7/2011	177,2	88,5	64,9	109,6	31,7	210,0
26/7/2011	183,7	89,8	66,6	111,0	31,7	233,0
29/7/2011	195,6	93,2	70,4	114,7	32,0	288,0
1/8/2011	206,3	95,4	76,1	117,3	33,1	312,0



3/8/2011	214,2	97,1	80,4	119,8	34,3	326,1
5/8/2011	223,6	97,6	85,0	121,6	34,9	340,0
8/8/2011	247,4	98,3	92,3	123,2	36,2	372,4
10/8/2011	263,9	98,9	97,6	124,9	37,0	388,0
12/8/2011	275,1	99,8	101,8	126,4	38,8	396,5
17/8/2011	317,2	111,6	118,4	130,7	45,6	441,0
19/8/2011	326,8	112,2	121,3	131,3	46,2	449,4
22/8/2011	332,0	112,7	125,5	133,1	46,9	458,0
24/8/2011	337,3	112,7	127,2	133,6	47,3	463,8
26/8/2011	339,5	112,8	127,9	133,9	47,7	471,2
29/8/2011	343,0	113,0	129,4	134,6	48,1	477,0
2/9/2011	355,0	117,1	140,5	138,6	55,2	496,0
5/9/2011	360,0	118,2	148,6	140,0	63,5	498,0
7/9/2011	372,0	118,7	153,6	140,8	68,6	486,0
9/9/2011	379,0	120,3	157,4	142,2	61,1	510,0
14/9/2011	384,0	123,4	173,7	144,8	101,0	508,0
16/9/2011	390,0	124,5	187,1	146,4	112,8	514,0

Πίνακας 6.2: Τιμές μέτρησης της αντίστασης των ηλεκτροδίων G₁-G₆.

6.2 Χρήση του προγράμματος CYMGrd

Από τις τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι δυνατή η προσομοίωση ενός διστρωματικού μοντέλου με μέθοδο περίπου όμοια με αυτή που περιγράφεται στην ενότητα 2.4.

Αντί να χρησιμοποιούμε κάθε φορά τις εξισώσεις (2.4-2.7) για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης ρ_1 του πάνω στρώματος, της ειδικής αντίστασης ρ_2 του κάτω στρώματος, καθώς και την απόσταση h μεταξύ των στρωμάτων, το CYMGrd υπολογίζει για κάθε μέτρηση τα μεγέθη αυτά. Το CYMGrd δίνει επίσης τη δυνατότητα υπολογισμού της μέγιστης επιτρεπόμενης βηματικής τάσης και τάσης επαφής. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για να υπολογίσουμε τις τιμές των μεγεθών αυτών θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις (4.19 - 4.22) που παρουσιάζονται στην ενότητα 4.5.

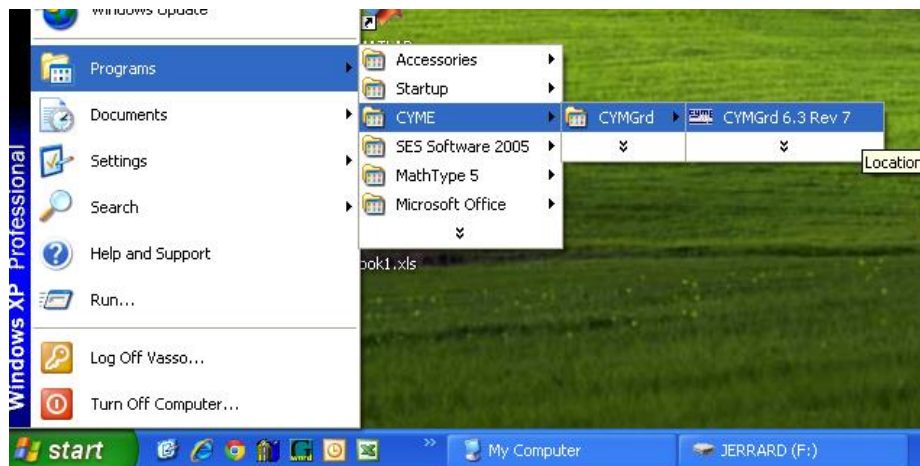
Επομένως μπορούμε εύκολα και γρήγορα να υπολογίσουμε τις τιμές της ειδικής αντίστασης, για το άνω και κάτω στρώμα του εδάφους, το βάθος μεταξύ των στρωμάτων και τα επιτρεπόμενα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής. Αυτό όπως θα δούμε είναι ιδιαίτερα εύκολο να γίνει για κάθε μέτρηση, άρα



μπορούμε να έχουμε τη μεταβολή των παραπάνω μεγεθών τόσο με το χρόνο όσο και με άλλους παράγοντες που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

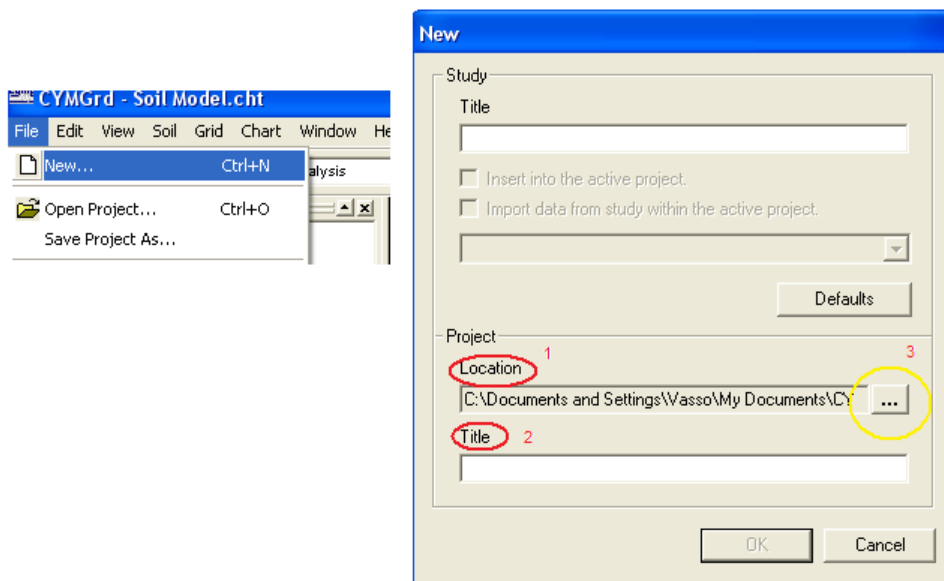
Ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος περιγράφεται παρακάτω:

- Ανοίγουμε το πρόγραμμα CYMGrd ακολουθώντας τη διαδρομή:
Start – Programs – CYME – CYMGrd (Εικόνα 6.1)



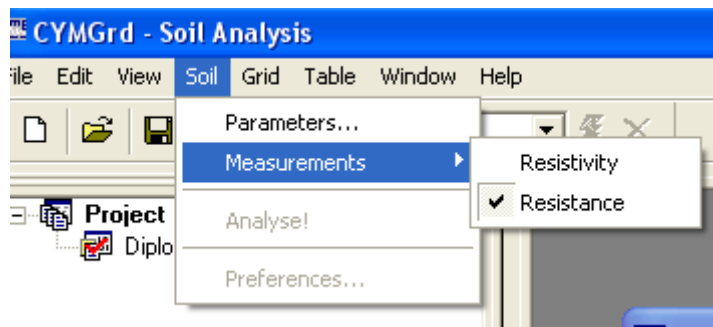
Εικόνα 6.1 Άνοιγμα του προγράμματος

- Για να ξεκινήσουμε μία νέα εργασία επιλέγουμε File→ New και στη συνέχεια επιλέγουμε την τοποθεσία που θέλουμε να αποθηκεύσουμε τη νέα εργασία (1) με το ανάλογο πλήκτρο (3) και δίνουμε έναν τίτλο στην εργασία (2).



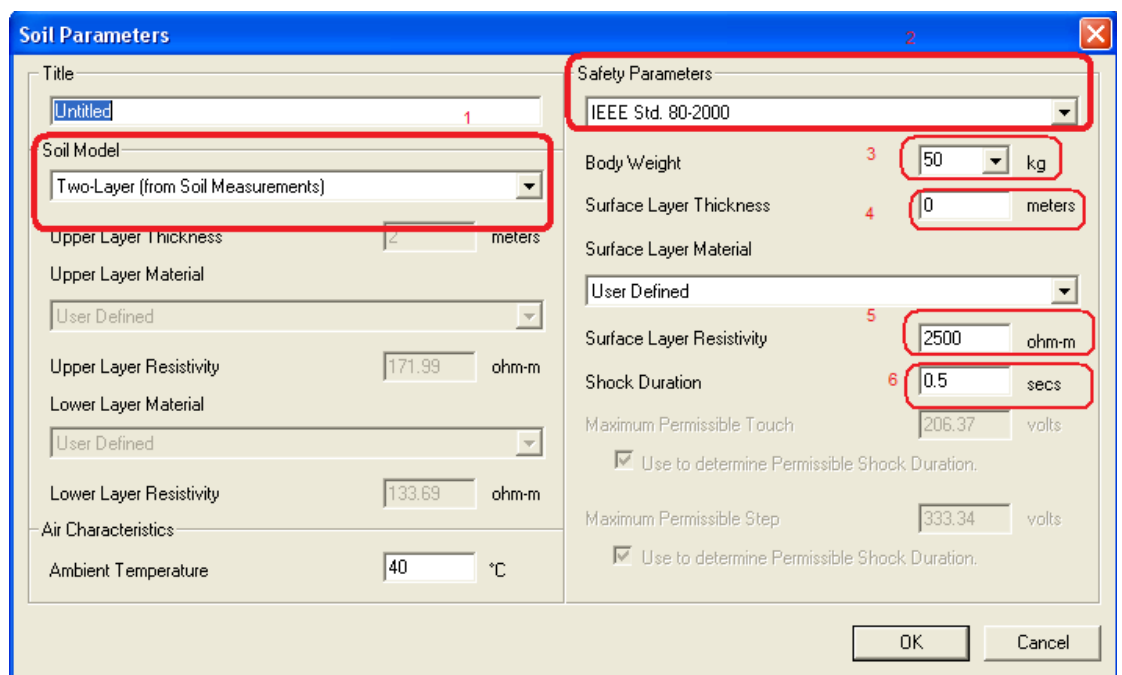
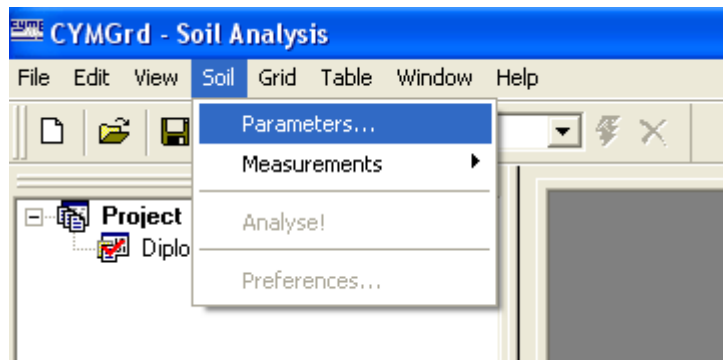
Εικόνα 6.2: Έναρξη νέας εργασίας

- Στην επιλογή Soil→Measurements κάνουμε κλικ στην επιλογή Resistance (Εικόνα 6.3), αφού με τη μέθοδο Wenner μετράμε την αντίσταση και όχι την ειδική αντίσταση του εδάφους.



Εικόνα 6.3

- Στο μενού επιλογών ακολουθούμε τη διαδρομή Soil→Parameters και ανοίγουμε έτσι το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 6.4 για την εισαγωγή των παραμέτρων.



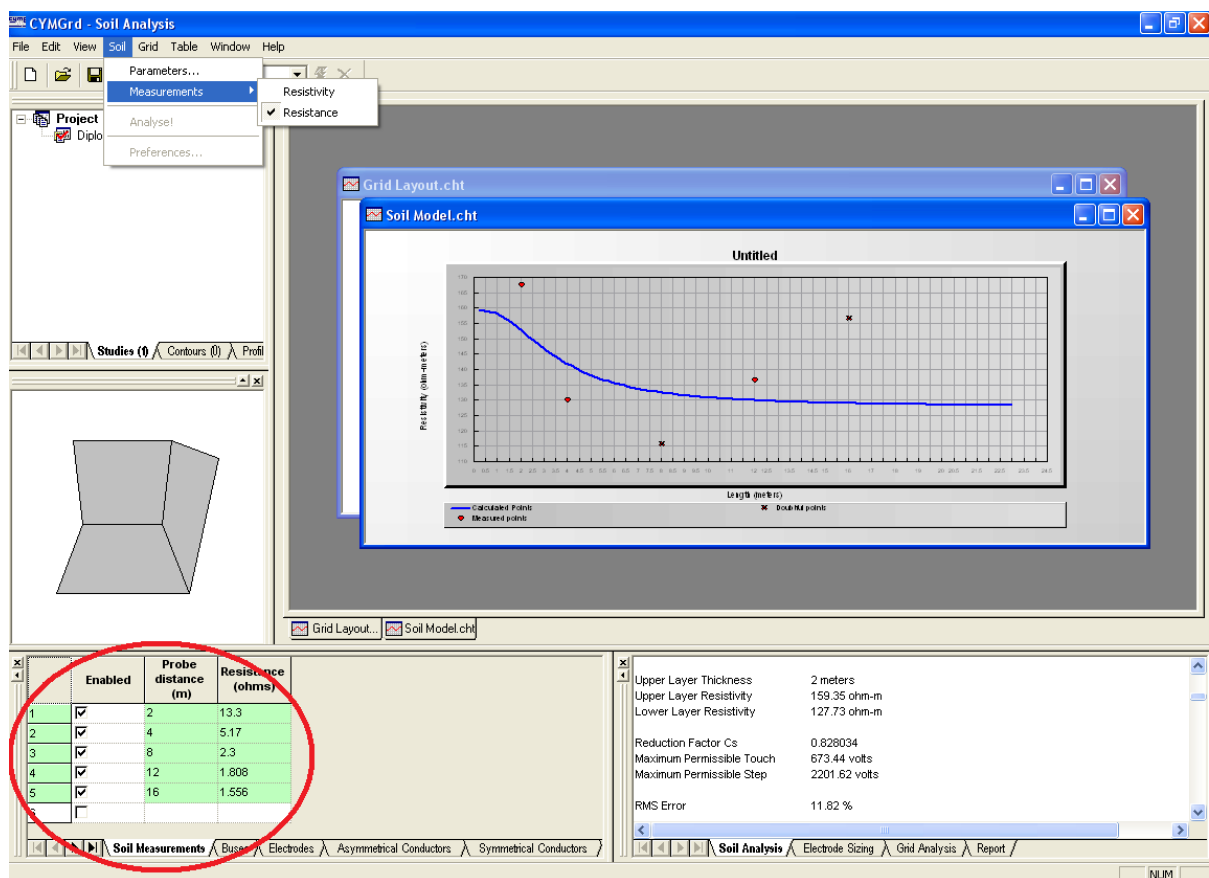
Εικόνα 6.4: Εισαγωγή παραμέτρων

Στην Εικόνα 6.4 φαίνονται οι παράμετροι που εισάγουμε στο πρόγραμμα:

1. Ο τύπος του εδάφους. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγουμε διστρωματικό (Two-Layer) έδαφος
2. Το πρότυπο με βάση το οποίο υπολογίζονται τα επιτρεπόμενα όρια για την τάση επαφής και τη βηματική τάση. Το πρότυπο στην περίπτωση αυτή είναι το IEEE Std. 80-2000 [2] με βάση το οποίο στην ενότητα 4.5 υπολογιστήκαν τα επιτρεπόμενα όρια τάσης.

3. Το σωματικό βάρος του ατόμου. Όπως αναφέραμε και στην ενότητα 4.1 στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πιο συντηρητικό όριο, δηλαδή το όριο για άτομα 50kg
 4. Το πάχος του στρώματος που καταλαμβάνει το υλικό επιφανείας. Στην εργασία αυτή θα δούμε την επίδραση που έχει υλικό επιφανείας με χαρακτηριστικά χαλκιού πάχους 0,2m
 5. Η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας. Εδώ επιλέγουμε 2500Ωm.
 6. Η διάρκεια έκθεσης στο ρεύμα t_s . Εδώ επιλέγουμε $t_s=0,5s$.
- Κάτω δεξιά (Εικόνα 6.5) εισάγουμε τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης από τον Πίνακα 6.1. Π.χ. για την ημερομηνία 17/3/2011, βλέπουμε, από τον πίνακα αυτόν, ότι για την αντίσταση εδάφους έχουμε τις παρακάτω τιμές:

P_2	P_4	P_8	P_{12}	P_{16}
13,30	5,17	2,30	1,808	1,556

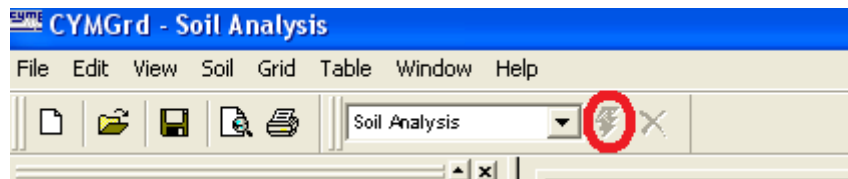


Εικόνα 6.5: Εισαγωγή των τιμών μέτρησης

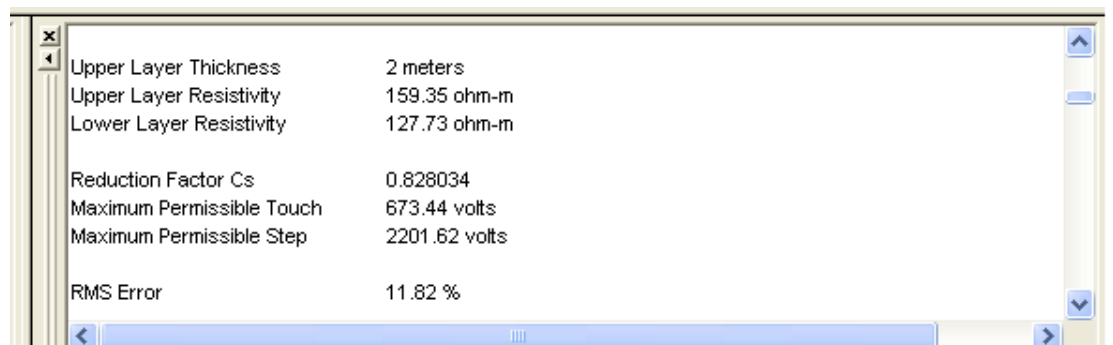
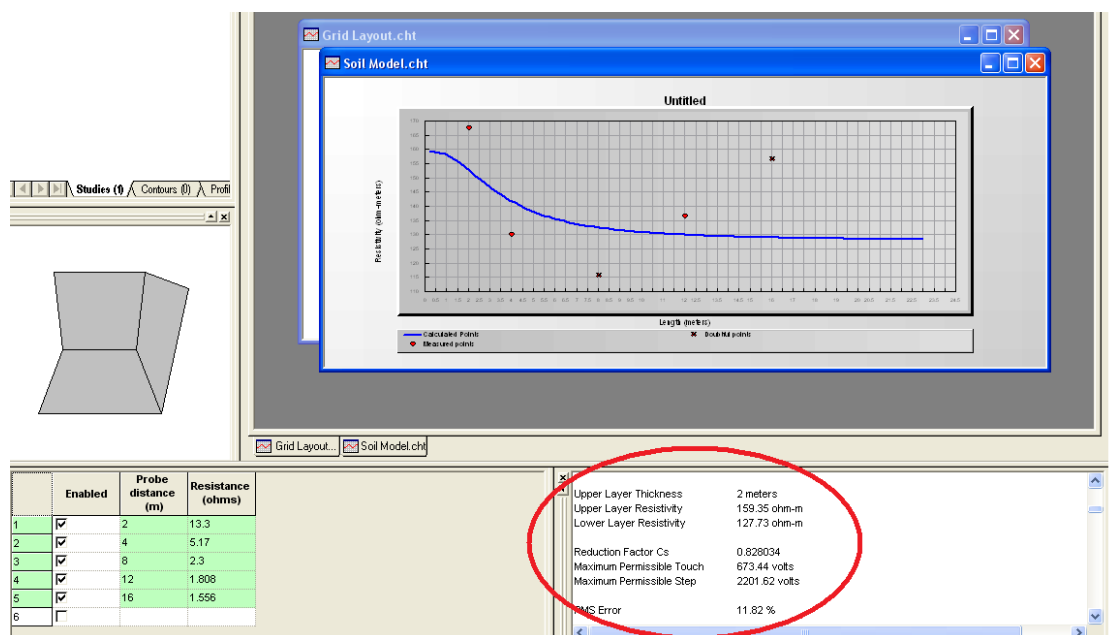


Επομένως εισάγουμε αυτές τις τιμές στις θέσεις 1-5 (έχοντας ήδη εισάγει τις παραμέτρους που αναφέραμε προηγουμένως και για υλικό επιφανείας με πάχος στρώματος 0,2m).

- Τέλος πατάμε το εικονίδιο που φαίνεται στην Εικόνα 6.6 για να μας δώσει το πρόγραμμα τις ειδικές αντιστάσεις του διστρωματικού εδάφους και τα επιτρεπόμενα όρια τάσης (Εικόνα 6.7)



Εικόνα 6.6



Εικόνα 6.7

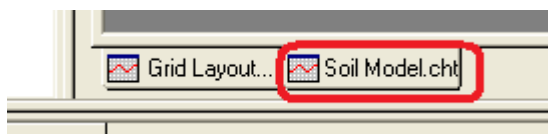
Στην Εικόνα 6.7:

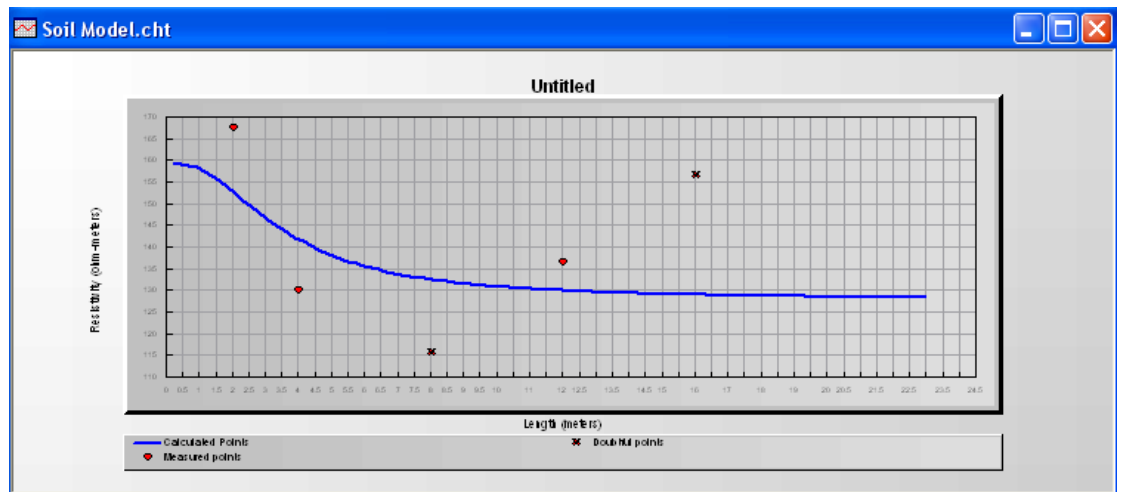
- Upper Layer Thickness είναι το βάθος h μεταξύ των στρωμάτων
- Upper Layer Resistivity είναι η ειδική αντίσταση ρ_1 του πάνω στρώματος
- Lower Layer Resistivity είναι η ειδική αντίσταση ρ_2 του κάτω στρώματος
- Maximum Permissible Touch το όριο για τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση επαφής E_{touch} .
- Maximum Permissible Step το επιτρεπόμενο όριο για τη μέγιστη βηματική τάση E_{step} .
- RMS error το RMS σφάλμα μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών.

Για το συγκεκριμένο δηλαδή παράδειγμα, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 6.7, παίρνουμε τις τιμές:

Upper Layer Thickness	Upper Layer Resistivity	Lower Layer Resistivity	Maximum Permissible Touch	Maximum Permissible Step	RMS error
2m	159,35Ωm	127,73Ωm	673,44V	2201,62V	11,82%

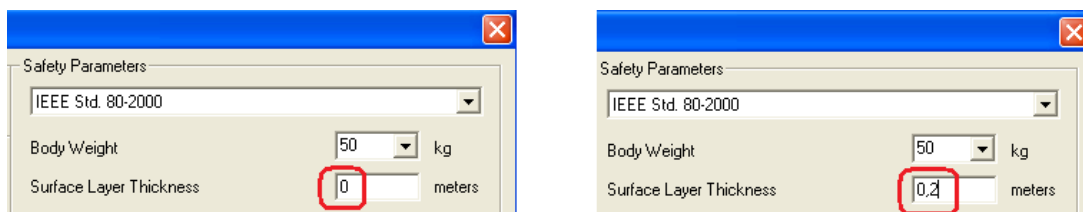
Το πρόγραμμα δίνει επίσης για τις συγκεκριμένες τιμές, κάνοντας κλικ στην επιλογή 'Soil Model.cht', ένα διάγραμμα κατανομής της αντίστασης του εδάφους:





Εικόνα 6.8

Όλη η παραπάνω διαδικασία διεξάγεται για κάθε μέτρηση μία φορά χωρίς υλικό επιφανείας και μία με υλικό επιφανείας με χαρακτηριστικά από χαλίκι πάχους $h_s=0,2\text{m}$ και $\rho_s=2500\Omega\text{m}$ (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.9

Τα αποτελέσματα φαίνονται στους επόμενους πίνακες:

Ημερομηνία	h(m)	P1($\Omega\text{-m}$)	P2($\Omega\text{-m}$)	RMS error (%)	Υγρασία εδάφους (%)
17/2/2011	2	172	133,7	11,16	18,85
18/2/2011	2	169,9	133,77	11,02	18,53
21/2/2011	2	163,06	133,06	11,27	22,75
22/2/2011	2	159,25	133,36	11,10	23,82
28/2/2011	2	156,08	129,69	11,60	22,35
1/3/2011	2	158,77	129,35	11,61	21,90
3/3/2011	2	156,7	128,78	11,56	24,38
4/3/2011	2	156,76	128,86	11,54	23,29
8/3/2011	2	160,45	128,9	11,21	26,48



10/3/2011	2	161,84	126,82	12,49	23,46
11/3/2011	2	161,9	127,19	12,03	22,64
13/3/2011	2	170,76	128,58	10,73	21,40
15/3/2011	2	159,12	128,05	11,67	20,88
17/3/2011	2	159,35	127,73	11,82	20,38
18/3/2011	2	159,32	127,73	11,88	20,46
21/3/2011	2	161,33	127,79	12,38	19,45
22/3/2011	2	164,9	127,47	12,57	19,04
23/3/2011	2	167,99	127,25	12,76	18,71
24/3/2011	2	170,88	125,31	13,15	18,41
28/3/2011	2	168,78	127,82	12,82	17,36
29/3/2011	2	167,34	128,33	12,71	17,22
30/3/2011	2	164,43	127,74	13,45	17,03
1/4/2011	2	177,03	122,06	11,43	25,79
4/4/2011	2	163,03	125,85	13,19	21,08
5/4/2011	2	160,75	127,48	12,92	20,19
6/4/2011	2	162,09	129,37	14,03	19,56
7/4/2011	2	161,35	127,37	13,13	18,74
8/4/2011	2	162,5	127,3	13,24	18,02
13/4/2011	2	163,64	127,95	13,72	15,66
14/4/2011	2	162,54	128,21	13,73	15,35
15/4/2011	2	164,42	128,26	13,89	14,99
18/4/2011	2	169,27	127,26	13,77	19,62
19/4/2011	2	171,51	127,08	13,80	18,60
20/4/2011	2	172,95	126,98	13,83	17,96
29/4/2011	2	155,43	127,93	13,31	21,31
2/5/2011	2	154,94	127,72	13,71	18,27
3/5/2011	2	152,39	127,63	13,65	17,56
4/5/2011	2	152,69	128,21	13,88	16,94
6/5/2011	2	154,34	128,37	14,03	16,49
9/5/2011	2	156,9	128,2	14,61	15,72
10/5/2011	2	158,33	128,5	14,58	15,27
11/5/2011	2	159,84	128,36	14,76	14,89
12/5/2011	2	160,81	128,52	14,86	14,63
13/5/2011	2	163,37	128,37	15,16	14,31
16/5/2011	2	164,69	128,63	15,60	13,51
17/5/2011	2	161,49	129,5	15,48	13,25
18/5/2011	2	157,15	133,95	15,09	13,11
19/5/2011	2	159,88	132,09	15,73	12,84
20/5/2011	2	161,7	134,19	16,26	12,69
23/5/2011	2	162,41	134,61	16,54	12,49
24/5/2011	2	161,35	136,25	16,70	12,51
25/5/2011	2	161,44	135,93	16,98	12,28
27/5/2011	2	165,99	132,53	14,90	20,32



30/5/2011	2	170,51	131,18	15,60	18,88
31/5/2011	2	170,43	131,36	15,77	17,86
1/6/2011	2	171	131,4	15,84	17,15
2/6/2011	2	170,96	132,04	15,62	16,59
3/6/2011	2	172,38	131,52	15,93	16,03
6/6/2011	2	162,77	133,86	15,70	14,82
7/6/2011	2	175,1	131,81	16,23	14,52
8/6/2011	2	175,49	131,67	16,53	14,19
9/6/2011	2	175,6	131,77	16,54	13,91
15/6/2011	2	169,03	128,7	14,99	24,39
16/6/2011	2	170,2	128,57	15,21	22,85
17/6/2011	2	170,76	129,05	15,07	21,71
20/6/2011	2	178,69	130,33	16,07	19,13
21/6/2011	2	179,07	130,27	16,27	18,56
22/6/2011	2	179,7	130,78	16,21	17,97
23/6/2011	2	174,74	130,96	16,44	17,64
24/6/2011	2	175,21	131,12	16,52	17,16
27/6/2011	2	180,24	131,76	16,99	16,47
30/6/2011	2	187,69	131,38	17,42	15,60
1/7/2011	2	188,28	131,54	17,50	15,56
4/7/2011	2	190,88	132,19	17,63	15,22
5/7/2011	2	193,59	132,13	17,76	14,98
8/7/2011	2	198,93	132,34	17,69	14,55
11/7/2011	2	202,36	133,54	18,08	14,21
12/7/2011	2	204,8	133,29	17,94	13,74
15/7/2011	2	211,69	133,49	17,84	13,55
19/7/2011	2	218,09	133,87	18,18	13,12
20/7/2011	2	220,29	133,48	17,82	13,03
22/7/2011	2	225,21	133,41	17,98	12,76
25/7/2011	2	228,02	133,98	18,36	12,45
26/7/2011	2	231,58	133,71	18,17	12,33
29/7/2011	2	240,75	133,44	18,80	12,02
1/8/2011	2	241,24	133,48	18,67	11,97
3/8/2011	2	242,24	133,92	18,68	11,60
5/8/2011	2	248,6	133,45	18,74	11,54
8/8/2011	2	256,43	133,17	18,74	11,38
10/8/2011	2	265,91	134,07	18,40	11,33
12/8/2011	2	271,58	134,05	18,34	10,90
17/8/2011	2	296,53	132,39	18,43	10,77
19/8/2011	2	298,55	132,92	19,10	10,70
22/8/2011	2	302,66	132,28	18,27	10,50
24/8/2011	2	303,97	132,19	17,48	10,33
26/8/2011	2	308,14	131,02	16,00	10,22
29/8/2011	2	312,52	129,21	14,08	9,97



2/9/2011	2	310,83	128,09	13,95	9,69
5/9/2011	2	331,66	128,07	14,03	9,48
7/9/2011	2	334,7	128,05	13,72	9,50
9/9/2011	2	339,96	128,86	14,07	9,40
14/9/2011	2	354,15	127,66	13,47	9,24
16/9/2011	2	358,85	127,99	13,70	9,10

Πίνακας 6.3: Ειδική αντίσταση άνω και κάτω στρώματος, βάθος μεταξύ των στρωμάτων, RMS error και υγρασία του εδάφους.

Ημερομηνία	Με υλικό επιφανείας		Χωρίς υλικό επιφανείας		Ύψος βροχόπτωσης (mm)
	Etouch(V)	Estep(V)	Etouch(V)	Estep(V)	
17/2/2011	674,00	2203,90	206,37	333,34	0,00
18/2/2011	673,92	2203,53	205,86	331,28	0,00
21/2/2011	673,61	2202,29	204,17	324,55	0,20
22/2/2011	673,44	2201,60	203,24	320,80	0,20
28/2/2011	673,29	2201,03	202,46	317,68	0,00
1/3/2011	673,41	2201,51	203,12	320,32	0,00
3/3/2011	673,32	2201,14	202,61	318,29	0,00
4/3/2011	673,32	2201,15	202,62	318,35	0,00
8/3/2011	673,49	2201,82	203,53	321,98	0,20
10/3/2011	673,55	2202,07	203,87	323,35	0,00
11/3/2011	673,56	2202,08	203,89	323,41	0,00
13/3/2011	673,96	2203,68	206,07	332,13	0,00
15/3/2011	673,43	2201,58	203,20	320,67	0,00
17/3/2011	673,44	2201,62	203,26	320,90	0,20
18/3/2011	673,44	2201,61	203,25	320,87	0,00
21/3/2011	673,53	2201,98	203,75	322,84	0,00
22/3/2011	673,69	2202,62	204,63	326,36	0,00
23/3/2011	673,83	2203,18	205,39	329,40	0,00
24/3/2011	673,96	2203,70	206,10	332,24	0,00
28/3/2011	673,87	2203,32	205,58	330,18	0,20
29/3/2011	673,80	2203,06	205,23	328,76	0,00
30/3/2011	673,67	2202,54	204,51	325,90	0,00
1/4/2011	673,64	2203,10	207,61	338,30	0,20
4/4/2011	673,61	2202,28	203,90	323,44	0,00
5/4/2011	673,50	2201,87	203,61	322,27	0,20
6/4/2011	673,56	2202,11	203,62	322,35	0,00
7/4/2011	673,53	2201,98	203,75	322,86	0,00
8/4/2011	673,58	2202,19	204,04	324,00	0,00
13/4/2011	673,63	2202,39	204,32	325,12	0,00
14/4/2011	673,59	2202,19	204,05	324,04	0,00



15/4/2011	673,67	2202,53	204,51	325,89	0,00
18/4/2011	673,89	2203,41	205,70	330,66	0,20
19/4/2011	673,99	2203,82	206,25	332,86	0,00
20/4/2011	674,06	2204,08	206,61	334,28	0,00
29/4/2011	673,26	2200,91	202,30	317,04	0,00
2/5/2011	673,24	2200,82	202,18	316,56	0,00
3/5/2011	673,13	2200,36	201,55	314,05	0,20
4/5/2011	673,14	2200,41	201,62	314,34	0,00
6/5/2011	673,21	2200,71	202,03	315,96	0,20
9/5/2011	673,33	2201,17	202,66	318,48	0,00
10/5/2011	673,39	2201,43	203,01	319,89	0,00
11/5/2011	673,46	2201,71	203,38	321,38	0,00
12/5/2011	673,51	2201,88	203,62	322,33	0,00
13/5/2011	673,62	2202,34	204,25	324,85	0,00
16/5/2011	673,68	2202,58	204,57	326,15	0,00
17/5/2011	673,54	2202,00	203,79	323,00	0,00
18/5/2011	673,34	2201,22	202,72	318,73	0,20
19/5/2011	673,47	2201,71	203,39	321,42	0,20
20/5/2011	673,55	2202,04	203,84	323,21	0,00
23/5/2011	673,58	2202,17	204,01	323,91	0,00
24/5/2011	673,53	2201,96	203,75	322,86	0,00
25/5/2011	673,54	2202,00	203,77	322,95	0,00
27/5/2011	673,74	2202,84	204,89	327,43	0,2
30/5/2011	673,95	2203,64	206,01	331,88	0,00
31/5/2011	673,94	2203,62	205,99	331,80	0,00
1/6/2011	673,97	2203,72	206,13	332,36	0,20
2/6/2011	673,97	2203,72	206,12	332,32	0,00
3/6/2011	674,03	2203,97	206,47	333,72	0,00
6/6/2011	673,60	2202,24	204,10	324,26	0,00
7/6/2011	674,15	2204,47	207,14	336,40	0,00
8/6/2011	674,17	2204,54	207,23	336,78	0,00
9/6/2011	674,18	2204,56	207,26	336,89	0,00
15/6/2011	673,88	2203,37	205,64	330,42	0,20
16/6/2011	673,93	2203,58	205,93	331,58	0,00
17/6/2011	673,96	2203,68	206,07	332,13	0,00
20/6/2011	674,32	2205,11	208,02	339,93	0,00
21/6/2011	674,33	2205,18	208,11	340,31	0,00
22/6/2011	674,36	2205,30	208,27	340,93	0,00
23/6/2011	674,14	2204,40	207,05	336,04	0,00
24/6/2011	674,16	2204,49	207,16	336,51	0,00
27/6/2011	674,39	2205,39	208,40	341,46	0,00
30/6/2011	674,72	2206,74	210,23	348,79	0,00
1/7/2011	674,75	2206,85	210,38	349,37	0,00
4/7/2011	674,87	2207,32	211,02	351,93	0,00



5/7/2011	674,99	2207,81	211,69	354,60	0,00
8/7/2011	675,23	2208,77	213,00	359,85	0,00
11/7/2011	675,38	2209,39	213,84	363,23	0,00
12/7/2011	675,50	2209,83	214,44	365,63	0,00
15/7/2011	675,81	2211,08	216,14	372,41	0,00
19/7/2011	676,10	2212,24	217,71	378,71	0,00
20/7/2011	676,20	2212,64	218,26	380,88	0,00
22/7/2011	676,42	385,72	219,47	2213,52	0,00
25/7/2011	676,54	388,49	220,16	2214,03	0,00
26/7/2011	676,71	391,99	221,03	2214,68	0,00
29/7/2011	677,12	401,02	223,29	2216,33	0,00
1/8/2011	677,12	401,50	223,41	2216,42	0,00
3/8/2011	677,19	402,48	223,66	2216,6	0,00
5/8/2011	677,47	408,74	225,22	2217,75	0,00
8/8/2011	677,63	416,45	227,15	2219,17	0,00
10/8/2011	678,26	425,78	229,48	2220,88	0,00
12/8/2011	678,51	431,36	230,88	2221,91	0,00
17/8/2011	679,64	455,92	237,02	2226,42	0,00
19/8/2011	679,73	457,91	237,51	2226,78	0,00
22/8/2011	679,92	461,95	238,53	2227,53	0,00
24/8/2011	679,98	463,24	238,85	2227,76	0,00
26/8/2011	680,17	467,35	239,87	2228,52	0,00
29/8/2011	680,36	471,66	240,95	2229,31	0,00
2/9/2011	680,29	470,00	240,54	2229	0,00
5/9/2011	681,23	490,50	245,66	2232,77	0,00
7/9/2011	681,37	493,49	246,41	2233,32	0,00
9/9/2011	681,6	498,67	247,70	2234,27	0,00
14/9/2011	682,25	512,64	251,20	2236,84	0,00
16/9/2011	682,46	517,26	252,35	2237,69	0,00

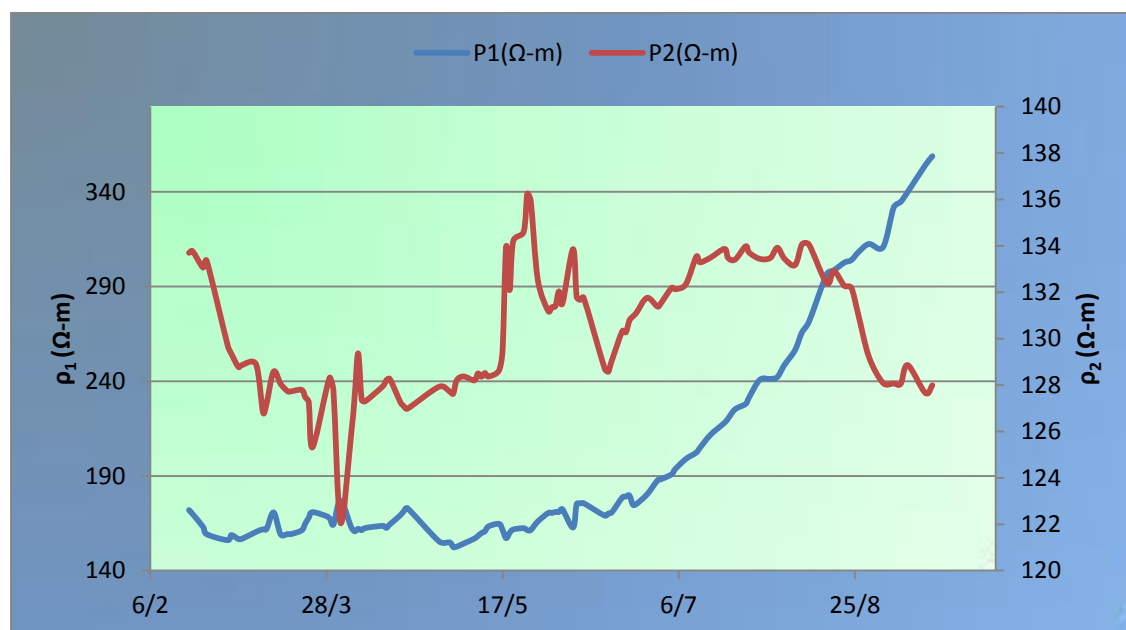
Πίνακας 6.4: Όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής, με και χωρίς προσθήκη υλικού επιφανείας, και τιμές βροχόπτωσης.



6.3 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

6.3.1 Επιτρεπόμενα όρια τάσης και ειδική αντίσταση διστρωματικού εδάφους

Από τους πίνακες 6.3 και 6.4 μπορούμε να εξάγουμε κάποια ιδιαίτερα ενδιαφέροντα διαγράμματα σχετικά με τη μεταβολή των επιτρεπόμενων ορίων τάσης σε σχέση με το χρόνο. Έχουμε επίσης καταγράψει για το διάστημα μετρήσεων τόσο το ύψος βροχόπτωσης όσο και την υγρασία του εδάφους.

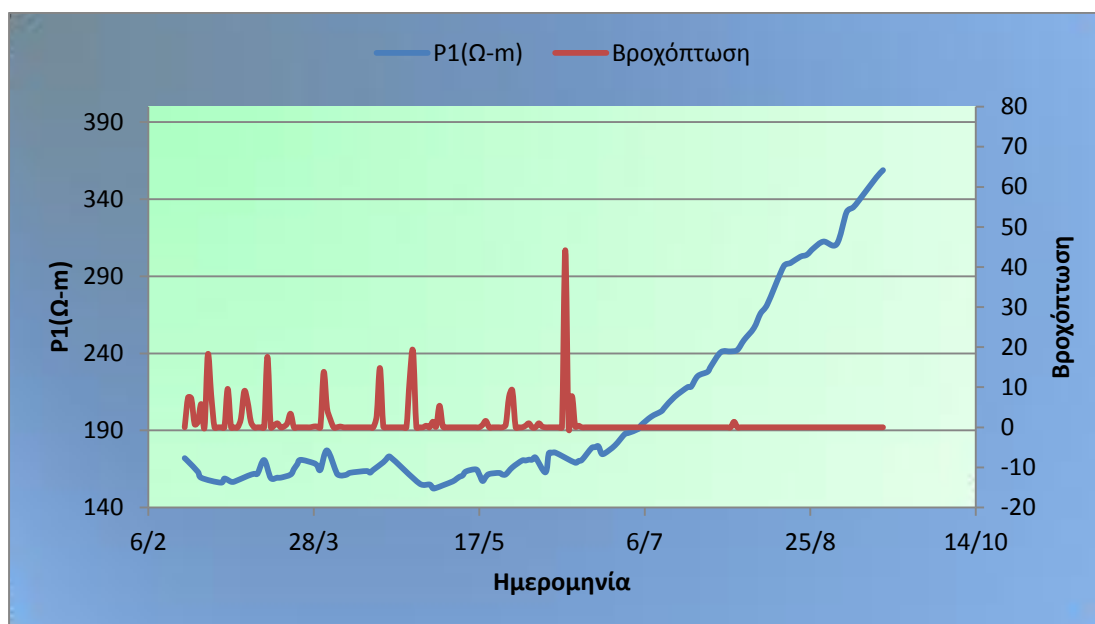


Διάγραμμα 6.1: Μεταβολή της ρ_1 και της ρ_2 συναρτήσει του χρόνου

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα 6.1, η ειδική αντίσταση του άνω στρώματος μεταβάλλεται πολύ περισσότερο από την ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος.

Ένας από τους παράγοντες από τους οποίους φαίνεται κυρίως να εξαρτάται η αντίσταση εδάφους είναι το ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης, από το οποίο βέβαια εξαρτάται άμεσα και η υγρασία του εδάφους. Οι υπόλοιποι παράγοντες που καταγράφουμε δε φαίνεται να επηρεάζουν τόσο την ειδική αντίσταση.

Για το λόγο αυτό εξετάζουμε από το Διάγραμμα 6.2 τη μεταβολή της ρ_1 συναρτήσει της ημερήσιας βροχόπτωσης η οποία δίνεται στο Παράρτημα, στον Πίνακα Π.1, στο τέλος της εργασίας (η στιγμιαία τιμή της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δε φαίνεται να επηρεάζει τη ρ_1).



Διάγραμμα 6.2: Μεταβολή της ρ_1 με το ύψος βροχόπτωσης

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι η επίδραση της βροχόπτωσης στη μεταβολή της ειδικής αντίστασης ρ_1 είναι άμεση. Παρατηρούμε ότι η ρ_1 διατηρεί μία χαμηλή τιμή σε περίοδο με βροχοπτώσεις: την περίοδο 17/2/2011 μέχρι και 17/6/2011, όπου και παρατηρούνται βροχοπτώσεις κατά διαστήματα, η ρ_1 διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα με μία μέση τιμή 164Ωm. Ωστόσο αυτή την περίοδο βλέπουμε ότι η αντίσταση παρουσιάζει μία έντονη μεταβολή. Βέβαια η μεταβολή αυτή εξαρτάται από το ύψος βροχόπτωσης και πιο συγκεκριμένα:

Από 17/2 μέχρι και 28/2 παρουσιάζεται μία διαρκής μείωση στην τιμή της ειδικής αντίστασης, περίπου ίση με 9,25%, που οφείλεται στις έντονες βροχοπτώσεις αυτού του χρονικού διαστήματος. Το διάστημα 29/2 μέχρι και 13/3 παρουσιάζονται κάποιες σποραδικές βροχοπτώσεις οι οποίες δεν είναι ικανές να διατηρήσουν την τιμή της ειδικής αντίστασης στα ήδη χαμηλά επίπεδα. Αν και παρουσιάζεται μία διαρκής αύξηση της ρ_1 κατά 8,92% παρατηρούμε ότι η βροχόπτωση στις 2/3 ήταν αρκετά έντονη ώστε να μειώσει (όχι όμως και να διατηρήσει σε χαμηλά επίπεδα) τη ρ_1 κατά 1,3%. Η έντονη βροχόπτωση στις 14/3 μειώνει την ειδική αντίσταση κατά 6,82%. Βέβαια η ρ_1 αυξάνεται στο χρονικό διάστημα 14/3-27/3, ωστόσο η αύξηση αυτή γίνεται στην ήδη μειωμένη τιμή, με αποτέλεσμα η ειδική αντίσταση να παραμένει γενικά σε χαμηλά επίπεδα.



Μία “περίεργη” συμπεριφορά παρουσιάζεται την περίοδο 28/3 μέχρι και 1/4. Την περίοδο αυτή η αντίσταση μειώνεται τις τρεις πρώτες μέρες χωρίς να υπάρχει αξιοσημείωτη βροχόπτωση, ενώ αυξάνεται αρκετά την 4^η μέρα, αφού έχει προηγηθεί η έντονη βροχόπτωση στις 31/3. Η μείωση της αντίστασης τις τρεις πρώτες μέρες πιθανώς να οφείλεται στη βροχή που έπεσε το πρωί στις 28/3 με αποτέλεσμα τη διατήρηση της υγρασίας στο μέρος του εδάφους που έγινε η μέτρηση και την αύξηση της ειδικής αντίστασης. Η βροχόπτωση που παρουσιάστηκε στη συνέχεια (στις 31/3), αν και ήταν έντονη, συνέβη αρκετή ώρα πριν τη μέτρηση της αντίστασης, η οποία έγινε στη 1/4, με αποτέλεσμα το έδαφος να μην μπορέσει να διατηρήσει την υγρασία και η αντίσταση να είναι σχετικά υψηλή. Βέβαια οι βροχοπτώσεις που ακολούθησαν τη συγκεκριμένη μέτρηση κατάφεραν να επαναφέρουν την τιμή της ρ_1 σε χαμηλά επίπεδα.

Με τις ομαλές αυξομειώσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως φαίνεται να μεταβάλλεται η αντίσταση μέχρι και τις 17/6: Η αντίσταση αυξάνεται σε περιόδους χωρίς βροχή, διατηρείται σε σχετικά σταθερή τιμή σε περιόδους με μικρά επίπεδα βροχόπτωσης, και μειώνεται αξιοπρόσεκτα όταν παρατηρείται μία έντονη βροχόπτωση (οι βροχοπτώσεις στις 17/4 και 27/4 μειώνουν την ειδική αντίσταση κατά 10% σε διάστημα 10 ημερών).

Από το Διάγραμμα 6.2, για το διάστημα 18/6 μέχρι και το τέλος της εργασίας, βλέπουμε ότι μία παρατεταμένη περίοδος χωρίς ή με ελάχιστες βροχοπτώσεις οδηγεί σε μία ολοένα αυξανόμενη τιμή της ρ_1 . Οι βροχοπτώσεις το διάστημα 12/6-16/6, αν και ήταν έντονες, επιφέρουν μία μείωση της ειδικής αντίστασης μόλις κατά 3,7%. Η μείωση αυτή ωστόσο δεν διατηρείται στη συνέχεια, αφού, μέχρι το τέλος της εργασίας, η ειδική αντίσταση αυξάνεται κατά 110,15%.

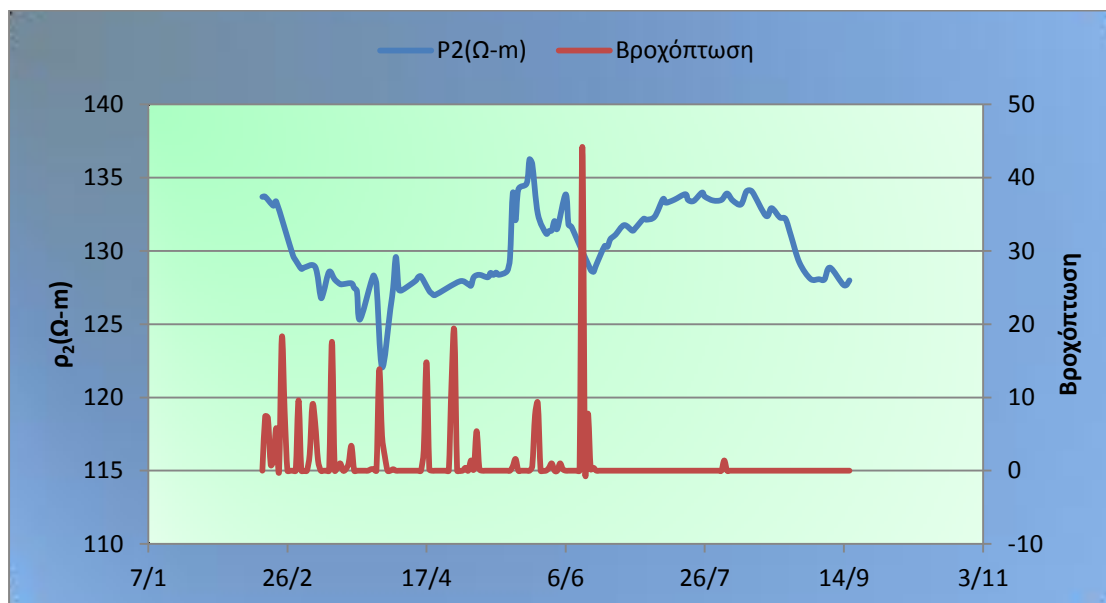
Πιο ομαλά μεταβάλλεται η τιμή της ρ_2 , όπως βλέπουμε στο Διάγραμμα 6.3, καθ’ όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων. Μία αξιοσημείωτη μείωση 4,45% παρουσιάζεται στις 31/3, οπότε σημειώνεται και έντονη βροχόπτωση, ενώ η μεγαλύτερη αύξηση παρουσιάζεται το διάστημα 10/5 μέχρι 24/5, μία περίοδος με ελάχιστες έως καθόλου βροχοπτώσεις οπότε και σημειώνεται αύξηση 5,2%.

Την περίοδο 8/7 μέχρι και 26/8 παρατηρούμε μία σταθερότητα στην τιμή της ρ_2 γύρω από την τιμή των 133 περίπου Ωm , ενώ από την περίοδο 29/8 μέχρι και το τέλος διεξαγωγής της εργασίας παρατηρούμε μία πτώση της ειδικής



αντίστασης κατά 2,3%. Το διάστημα αυτό εγκαταστάθηκε σύστημα τεχνητού ποτισμού σε κάποια σημεία του χώρου όπου είχαν εγκατασταθεί τα ηλεκτρόδια. Βέβαια μόνο το ηλεκτρόδιο A_{48} του Σχήματος 5.2 περιβάλλεται τώρα με νερό, αλλά οι αντίστοιχες μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για $a=16\text{m}$, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.2 αρχίζουν να μειώνονται. Πιθανώς αυτή η μεταβολή στη μετρούμενη ειδική αντίσταση επιφέρει και αντίστοιχη μεταβολή της ρ_2 .

Η γενικά πιο ομαλή μεταβολή της ρ_2 σε σχέση με τη ρ_1 πιθανώς να οφείλεται στο ότι η ρ_2 είναι η ειδική αντίσταση στο κάτω στρώμα του εδάφους, όπου η υγρασία δεν επιφέρει μεγάλες μεταβολές. Για το λόγο αυτό, ακόμα και όταν το ηλεκτρόδιο μέτρησης A_{48} βρίσκεται σε υγρό έδαφος, δεν παρουσιάζεται μεγάλη πτώση της ρ_2 .

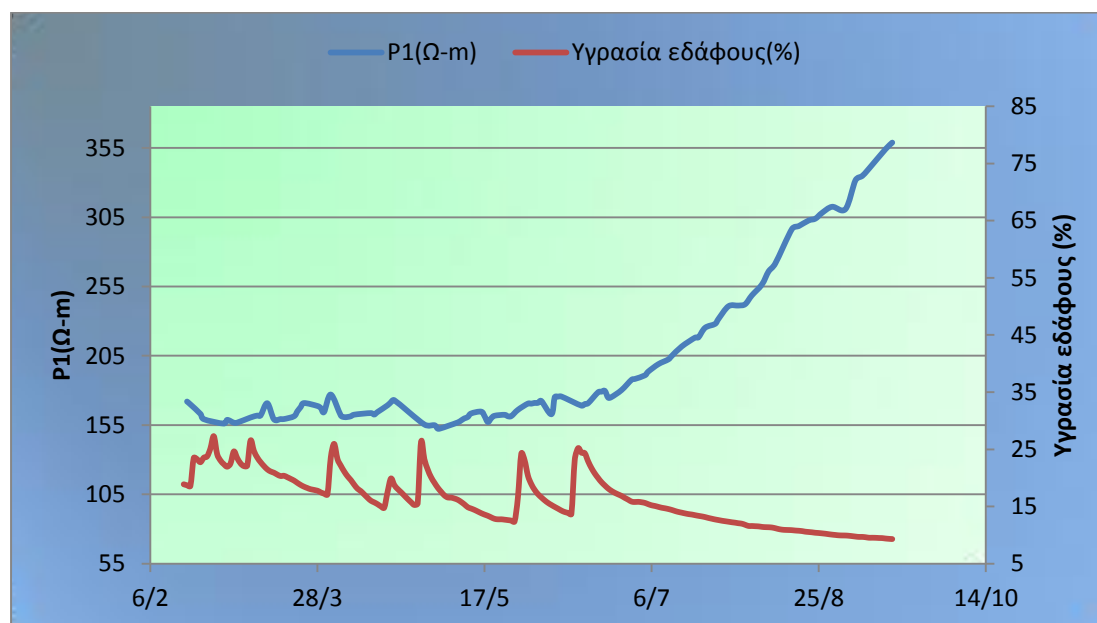


Διάγραμμα 6.3: Μεταβολή της ρ_2 με το ύψος βροχόπτωσης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεταβολή των ρ_1 και ρ_2 , καθώς και των υπόλοιπων μεγεθών, με την υγρασία του εδάφους. Ωστόσο η μέτρηση της υγρασίας του εδάφους δε γίνεται *in situ*, δηλαδή στο χώρο όπου είναι εγκατεστημένα τα συστήματα των ηλεκτροδίων, αλλά χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις από το μετεωρολογικό σταθμό του Ε.Μ.Π., ο οποίος είναι εγκατεστημένος μερικές δεκάδες μέτρα από το πεδίο των δοκιμών. Για το λόγο αυτό δεν έχουμε τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στην τιμή του συγκεκριμένου μεγέθους. Ενδεικτικά δίνεται στο Διάγραμμα 6.4 η μεταβολή της ρ_1 σε σχέση με

την υγρασία του εδάφους. Ως υγρασία εδάφους παίρνουμε τη μέση υγρασία κατά τη διάρκεια της μέρας. Επίσης οι τιμές της υγρασίας του εδάφους καλύπτουν όλο το χρονικό διάστημα των μετρήσεων και δεν περιορίζονται μόνο στις μέρες των μετρήσεων (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Πίνακας Π.2).

Παρατηρούμε ότι η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης ρ_1 είναι σε όλο σχεδόν το διάστημα αντιστρόφως ανάλογη με την υγρασία του εδάφους, γεγονός που γίνεται κυρίως αντιληπτό την περίοδο 29/4-18/5 καθώς και την περίοδο 15/6-15/7. Στις δύο παραπάνω περιόδους μία μείωση της υγρασίας του εδάφους οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση της τιμής της ρ_1 : Την περίοδο 29/4-18/5 μία μείωση της υγρασίας του εδάφους κατά 42,6% οδηγεί σε αύξηση της ρ_1 κατά 6%, ενώ και την περίοδο 15/6-15/7 παρατηρείται μία αύξηση της ρ_1 κατά 25%, αφού έχει προηγηθεί μία μείωση της υγρασίας κατά 43%. Επίσης απότομες αυξήσεις της υγρασίας του εδάφους οδηγούν σε αξιοσημείωτη μείωση της ειδικής αντίστασης. Οι απότομες αυτές αυξήσεις στην υγρασία του εδάφους οφείλονται στις βροχοπτώσεις και επηρεάζουν τη ρ_1 με τον τρόπο που περιγράφηκε προηγουμένως.

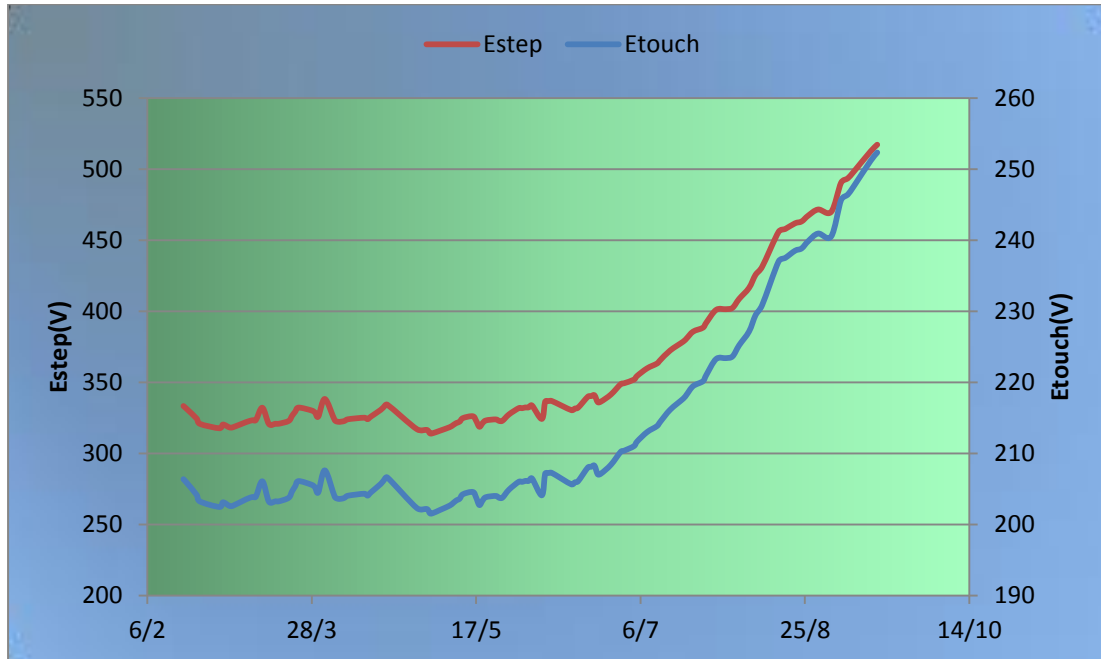


Διάγραμμα 6.4: Μεταβολή της ρ_1 με την υγρασία εδάφους

Πέρα από τη μεταβολή της ρ_1 και της ρ_2 με το χρόνο και την υγρασία, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής της τάσης επαφής E_{touch} και της βηματικής τάσης E_{step} .



Αρχικά παραθέτουμε στο Διάγραμμα 6.5 τη μεταβολή με το χρόνο της E_{touch} και της E_{step} , χωρίς την προσθήκη υλικού επιφανείας.



Διάγραμμα 6.5: Μεταβολή της E_{touch} και της E_{step} με το χρόνο χωρίς υλικό επιφανείας

Παρατηρούμε ότι το επιτρεπόμενο όριο για τη βηματική τάση παρουσιάζει μία έντονη μεταβολή, κάτι που επισημαίνει την ιδιαίτερη επικινδυνότητα ενός συστήματος χωρίς υλικό επιφανείας: Ένα σύστημα που φαίνεται να είναι επαρκώς ασφαλές το καλοκαίρι δεν παρέχει το ίδιο επίπεδο ασφάλειας το χειμώνα.

Συγκεκριμένα η βηματική τάση παρουσιάζει μία πτώση 4,7% τις πρώτες μέρες διεξαγωγής των μετρήσεων, μία πτώση 5% το διάστημα 18/4-3/5 και μία αξιοσημείωτη αύξηση 56,5% από 15/6 μέχρι και το τέλος της εργασίας.

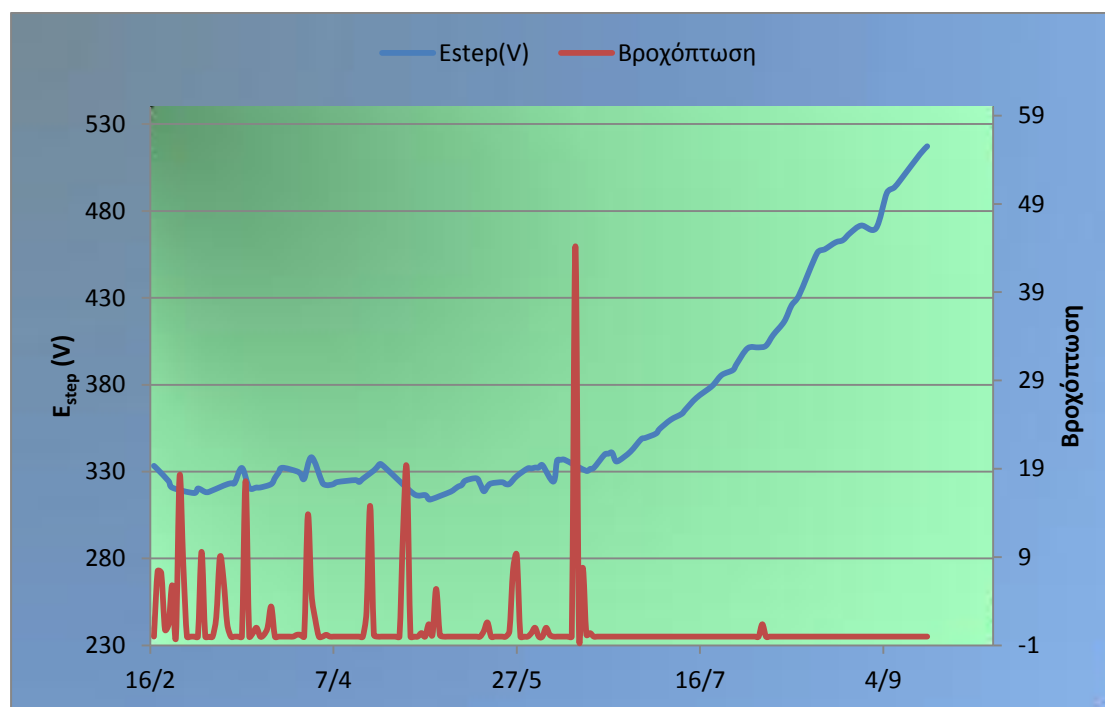
Από τη σχέση 4.19:

$$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} \Rightarrow E_{step50} = (1000 + 6 \cdot \rho_1) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{step50} = (6 \cdot \rho_1) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} + 116 / \sqrt{t_s} \quad (6.1)$$

βλέπουμε ότι η E_{step} εξαρτάται άμεσα από τη ρ_1 και μάλιστα για σταθερό t_s είναι ανάλογη της ρ_1 .

Αφού η E_{step} εξαρτάται από τη ρ_1 θα εξαρτάται άμεσα και από τη βροχόπτωση (Διάγραμμα 6.6).



Διάγραμμα 6.6: Μεταβολή της E_{step} με τη βροχόπτωση χωρίς υλικό επιφανείας

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, τις πρώτες μέρες διεξαγωγής των μετρήσεων και συγκεκριμένα το διάστημα 17/2-28/2 η βηματική τάση μειώνεται κατά 4,7%, γεγονός που οφείλεται στις έντονες και παρατεταμένες βροχοπτώσεις που παρουσιάζονται το διάστημα αυτό. Αντίστοιχη μείωση (6,8%) παρατηρείται και με την έντονη βροχόπτωση στις 14/3, ενώ οι βροχοπτώσεις το διάστημα 17/4-5/5 μειώνουν τη βηματική τάση κατά 5%.

Όπως βλέπουμε από το διάγραμμα οι βροχοπτώσεις από την αρχή των μετρήσεων μέχρι και τις 16/6 είναι ικανές να διατηρήσουν τη βηματική τάση σε χαμηλά επίπεδα. Αντίθετα μία περίοδος χωρίς βροχοπτώσεις ανεβάζει σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές την E_{step} , αφού από 17/6 και μέχρι το τέλος διεξαγωγής των μετρήσεων η βηματική τάση αυξάνεται κατά 55,7%.

Γενικά παρατηρούμε μία επίδραση της βροχόπτωσης στην E_{step} ανάλογη με αυτή στη ρ_1 , γεγονός απόλυτο φυσιολογικό αν αναλογιστούμε τη σχέση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη.

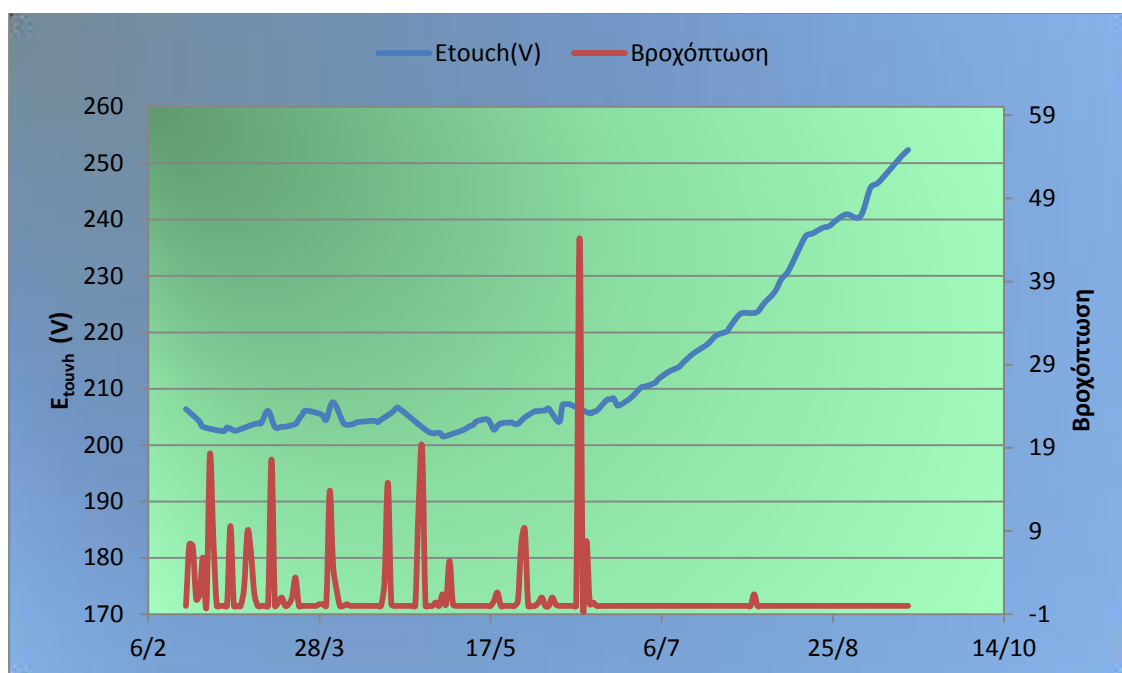
Η τάση επαφής αντίθετα δε μεταβάλλεται τόσο έντονα. Η E_{touch} εξαρτάται και αυτή άμεσα από τη ρ_1 όπως φαίνεται από τη σχέση (4.21):

$$E_{touch50} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116}{\sqrt{t_s}} \Rightarrow E_{touch50} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot \rho_1) \cdot 0.116}{\sqrt{t_s}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{touch50} = \frac{(1.5 \cdot \rho_1) \cdot 0.116}{\sqrt{t_s}} + 116 / \sqrt{t_s} \quad (6.2)$$

Από τις σχέσεις (6.1) και (6.2) φαίνεται ο λόγος για τον οποίο η βηματική τάση μεταβάλλεται περισσότερο. Και οι δύο εξισώσεις αποτελούνται από έναν σταθερό όρο: $116 / \sqrt{t_s}$ και από έναν όρο αποκλειστικά εξαρτώμενο από τη ρ_1 . Ωστόσο ο όρος αυτός είναι 4 φορές μεγαλύτερος για τη βηματική τάση.

Βέβαια η εξάρτηση της τάσης επαφής από τη ρ_1 δεν είναι αμελητέα και για το λόγο αυτό οι τιμές της φαίνεται να επηρεάζονται από το ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.7



Διάγραμμα 6.7: Μεταβολή της E_{touch} με τη βροχόπτωση με υλικό επιφανείας

Αν και η βροχόπτωση επηρεάζει την τάση επαφής με τρόπο ανάλογο όπως και τη βηματική τάση, οι μεταβολές αυτές δεν είναι αξιοσημείωτες. Για παράδειγμα το διάστημα 17/4-5/5 η τάση επαφής μειώνεται μόλις κατά 2%, ενώ το μεγαλύτερο διάστημα χωρίς βροχοπτώσεις (17/6-16/9) η E_{touch} αυξάνεται κατά

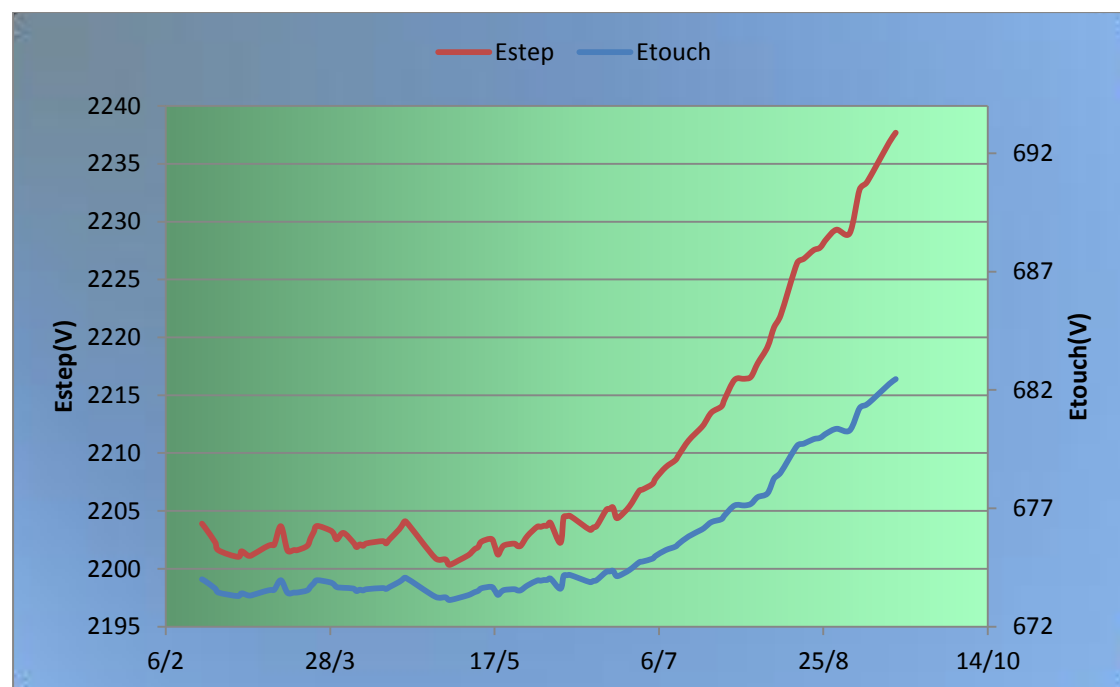


22,46%, τη στιγμή που η αντίστοιχη μείωση της τάσης επαφής είναι σχεδόν διπλάσια.

Προσθήκη υλικού επιφανείας

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν τα συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε με την προσθήκη υλικού επιφανείας πάνω στο έδαφος των μετρήσεων. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως προσομοιώνουμε τη διαδικασία αυτή με το πρόγραμμα CYMGrd, προσθέτοντας ουσιαστικά υλικό πάχους 20cm, με ιδιότητες από χαλίκι ($p_s=2500\Omega m$).

Τώρα οι E_{touch} και E_{step} μεταβάλλονται με το χρόνο σύμφωνα με το Διάγραμμα 6.8.



Διάγραμμα 6.8: Μεταβολή της E_{touch} και της E_{step} με το χρόνο με υλικό επιφανείας

Όπως βλέπουμε τόσο η βηματική τάση όσο και τάση η τάση επαφής παραμένουν σχεδόν σταθερές. Αυτό προφανώς οφείλεται στο ότι τα επιτρεπόμενα όρια τάσης δίνονται και πάλι από τους τύπους (4.19) και (4.21) όμως τώρα, λόγω του υλικού επιφανείας:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0.09} \Rightarrow C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{2500}\right)}{0.49} \Rightarrow$$

$$C_s = 0.816 + \frac{(0.184 \cdot \rho_1)}{2500}$$

Δηλαδή τώρα σύμφωνα με την (4.19):

$$E_{step50} = \frac{(1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116}{\sqrt{t_s}} \Rightarrow$$

$$E_{step50} = 116 / 0.707 + \frac{(6 \cdot C_s \cdot 2500) \cdot 0.116}{\sqrt{0.5}} \Rightarrow$$

$$E_{step50} = 164,045 + 6 \cdot 410,122 \cdot C_s \Rightarrow$$

$$E_{step50} = 164,045 + 6 \cdot 410,122 \cdot \left(0.816 + \frac{(0.184 \cdot \rho_1)}{2500}\right) \Rightarrow$$

$$E_{step50} = 164,045 + 6 \cdot 335 + 6 \cdot 0,03 \cdot \rho_1 \quad (6.3)$$

η βηματική τάση θα είναι ίση με έναν σταθερό όρο, ίσο με 2174,045V, συν ένα όρο που θα εξαρτάται από τη ρ_1 και θα είναι ίσος με $0.181 \times \rho_1$. Γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι η εξάρτηση της βηματικής τάσης από τη ρ_1 είναι σχεδόν αμελητέα.

Επίσης σχετικά με την τάση επαφής, από τη σχέση (4.21):

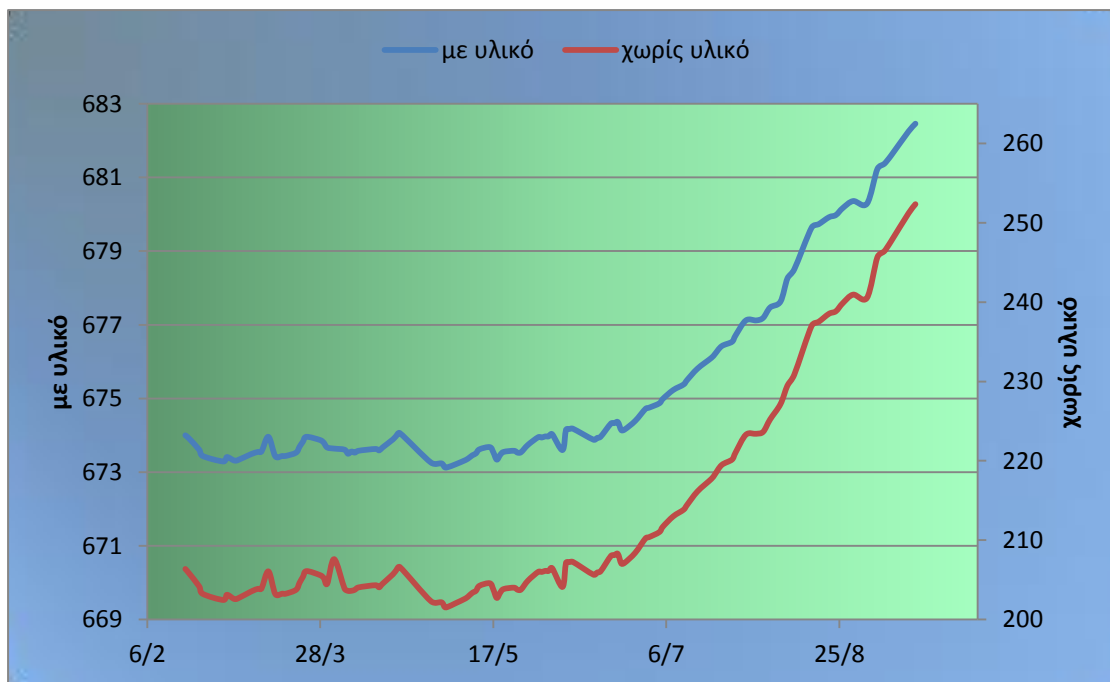
$$E_{touch50} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116}{\sqrt{t_s}} \Rightarrow$$

$$E_{touch50} = 164,045 + 1,5 \cdot 335 + 1,5 \cdot 0,03 \cdot \rho_1 \quad (6.4)$$

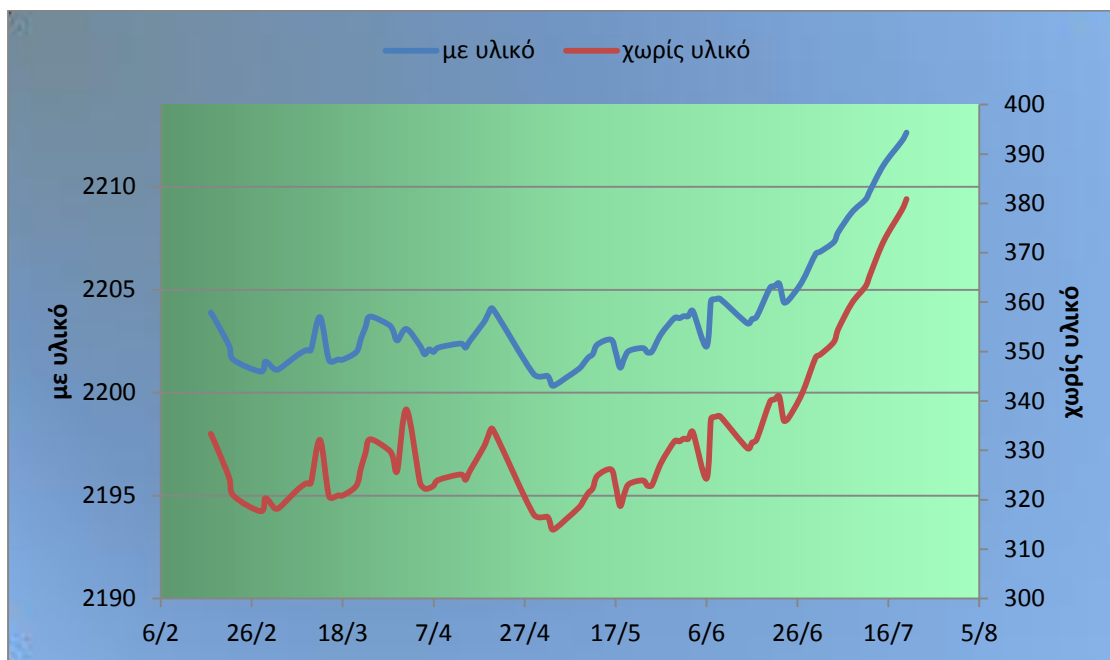
η τάση επαφής θα είναι ίση με έναν σταθερό όρο, ίσο με 666,545V, συν ένα όρο που θα εξαρτάται από τη ρ_1 και θα είναι ίσος με $0,045 \times \rho_1$. Επομένως και η τάση επαφής θα εξαρτάται σε ελάχιστο βαθμό από τη ρ_1 .

Καταφέρνουμε δηλαδή με την προσθήκη υλικού επιφανείας να έχουμε όρια τα οποία όχι μόνο δε μεταβάλλονται με το χρόνο αλλά, όπως φαίνεται και από τα Διαγράμματα 6.9 και 6.10, είναι κατά πολύ υψηλότερα από τα αντίστοιχα χωρίς υλικό επιφανείας.



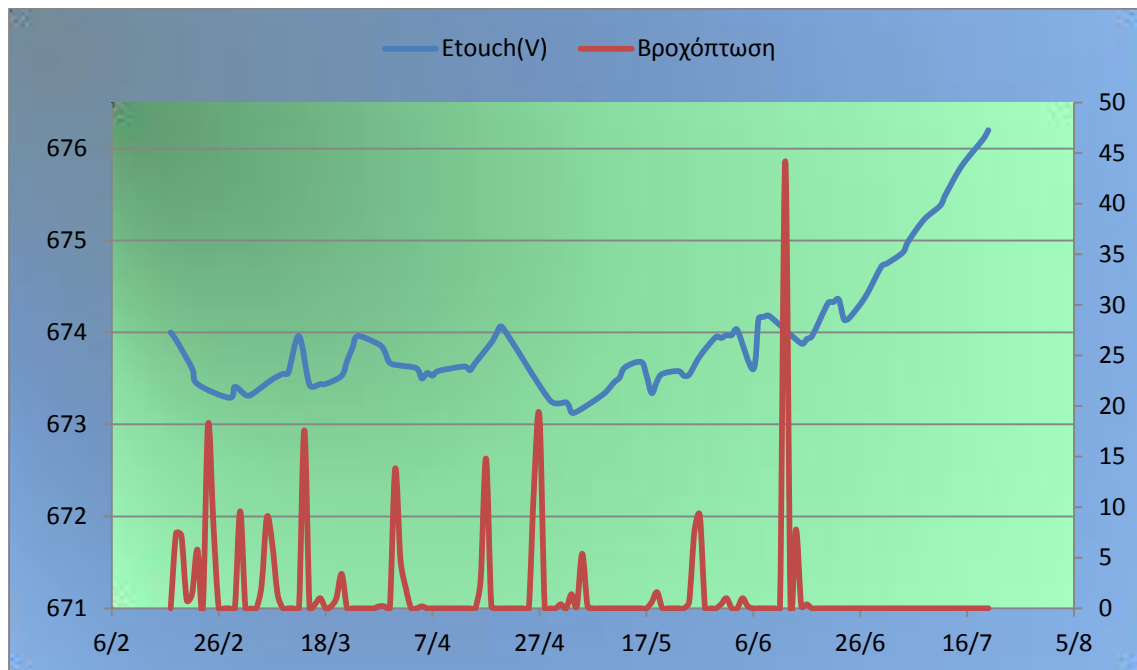


Διάγραμμα 6.9: Τάση επαφής με και χωρίς υλικό επιφανείας

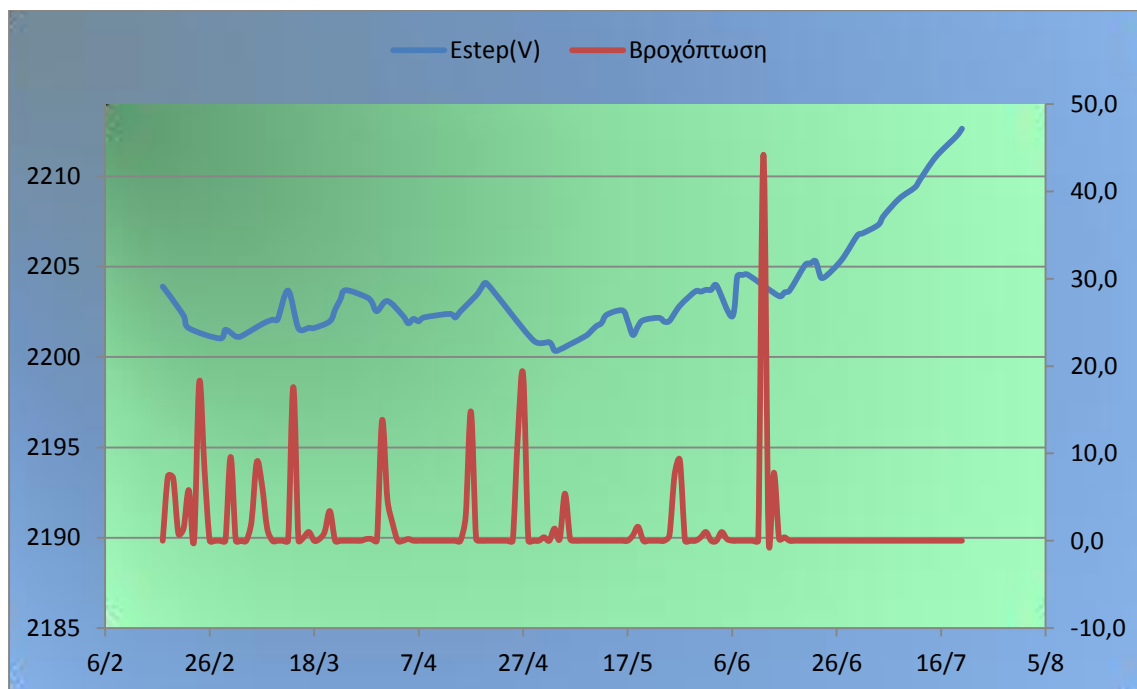


Διάγραμμα 6.10: Βηματική Τάση με και χωρίς υλικό επιφανείας

Αν και η μεταβολή τόσο της βηματικής όσο και της τάσης επαφής με τη ρ_1 είναι ιδιαίτερα μικρή, το γεγονός ότι τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση εδάφους υποδεικνύει ότι θα εξαρτώνται και από τη βροχόπτωση. Τα Διαγράμματα 6.11 και 6.12 δείχνουν την εξάρτηση αυτή.



Διάγραμμα 6.11: Μεταβολή της E_{step} με τη βροχόπτωση, με υλικό επιφανείας



Διάγραμμα 6.12: Μεταβολή της E_{touch} με τη βροχόπτωση, με υλικό επιφανείας



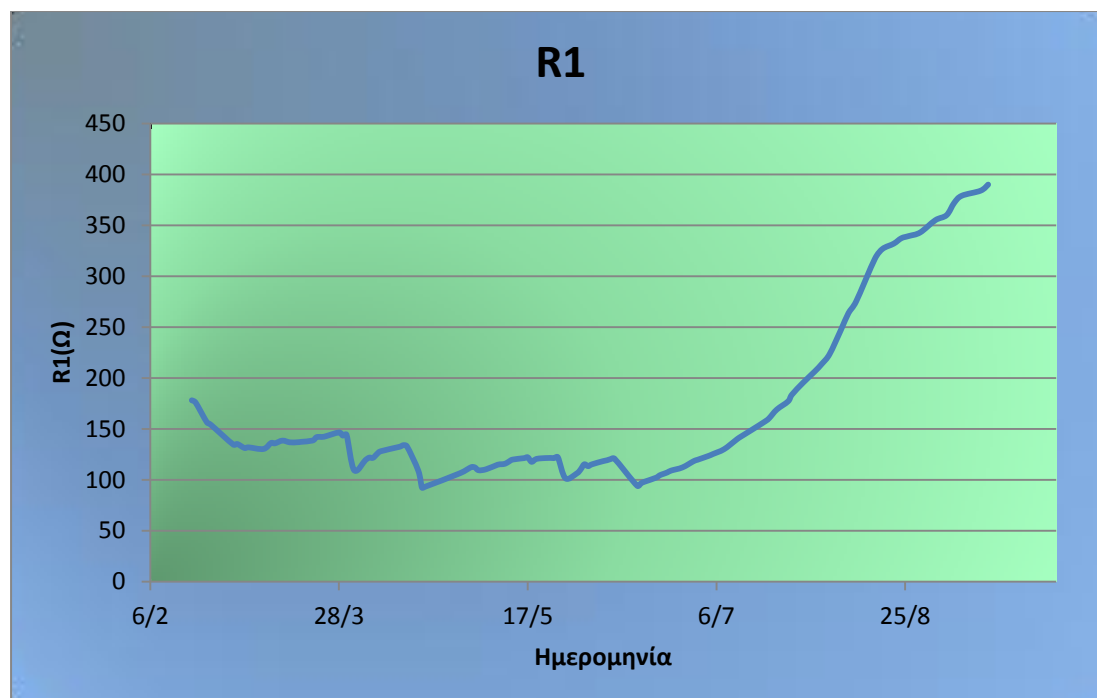
Από τα διαγράμματα 6.11 και 6.12 βλέπουμε ότι η μεταβολή των τιμών των E_{step} και E_{touch} παρουσιάζει κάποια εξάρτηση από την υγρασία. Σε περιόδους βροχοπτώσεων τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για τις τάσεις διατηρούνται σε σταθερές σχεδόν τιμές. Ωστόσο η μεταβολή των ορίων των τάσεων αυτών είναι τόσο μικρή που ακόμα και σε περιόδους με έλλειψη βροχής η αύξηση των τιμών τους είναι σχεδόν αμελητέα: Την περίοδο 17/6-16/9 η E_{step} μεταβάλλεται μόνο κατά 1,54%, ενώ η E_{touch} κατά μόλις 1,26%

Από τα παραπάνω κατανοούμε πόσο σημαντική είναι η χρήση υλικού επιφανείας, έτσι ώστε τα επιτρεπόμενα όρια των τάσεων να μη μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά και να αγγίζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές.

6.3.2 Αντίσταση γείωσης με βελτιωτικά υλικά

Πέρα από την ειδική αντίσταση του εδάφους στην εργασία αυτή εξετάζεται και η συμπεριφορά ορισμένων βελτιωτικών σχετικά με την ικανότητά τους να μειώνουν την αντίσταση γείωσης.

Στο Διάγραμμα 6.13 δίνεται ενδεικτικά η μεταβολή της αντίστασης γείωσης με το χρόνο για το ηλεκτρόδιο αναφοράς (το ηλεκτρόδιο που έχει τοποθετηθεί στο φυσικό έδαφος).



Διάγραμμα 6.13. Μεταβολή της R_1 με το χρόνο

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ότι η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου δεν παραμένει σχεδόν ποτέ σταθερή αλλά μεταβάλλεται διαρκώς με συνεχείς αυξομειώσεις.

Όπως θα δούμε στη συνέχεια οι μεταβολές αυτές σχετίζονται άμεσα με την υγρασία.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι το ζήτημα του ορισμού της απόδοσης ενός βελτιωτικού υλικού. Επειδή η διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία έχουμε αποτελέσματα που αφορούν τη βελτίωση της αντίστασης γείωσης μόνο στην τοποθεσία αυτή. Σε κάποια άλλη τοποθεσία τα υλικά αυτά μπορεί να είχαν άλλη επίδραση στο περιβάλλον έδαφος, με αποτέλεσμα να έδιναν τιμές για την αντίσταση γείωσης κάθε ηλεκτροδίου εντελώς διαφορετικές από αυτές του Πίνακα 6.2. Επομένως θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να ορίσουμε μία κοινή αναφορά για όλες τις μετρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.2, εκτός από την αντίσταση γείωσης ηλεκτροδίων εμποτισμένα σε βελτιωτικά υλικά, μετρήθηκε και η αντίσταση γείωσης ηλεκτροδίου που είχε τοποθετηθεί απ' ευθείας στο φυσικό έδαφος. Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ηλεκτρόδιο αυτό ως ηλεκτρόδιο αναφοράς και να παρατηρούμε κάθε φορά την ικανότητα των ηλεκτροδίων να μειώνουν την αντίσταση γείωσής του.

Το ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης που επιτυγχάνει ένα ηλεκτρόδιο σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς θα είναι R_x/R_1 . Επομένως ορίζουμε την απόδοση του κάθε βελτιωτικού ως:

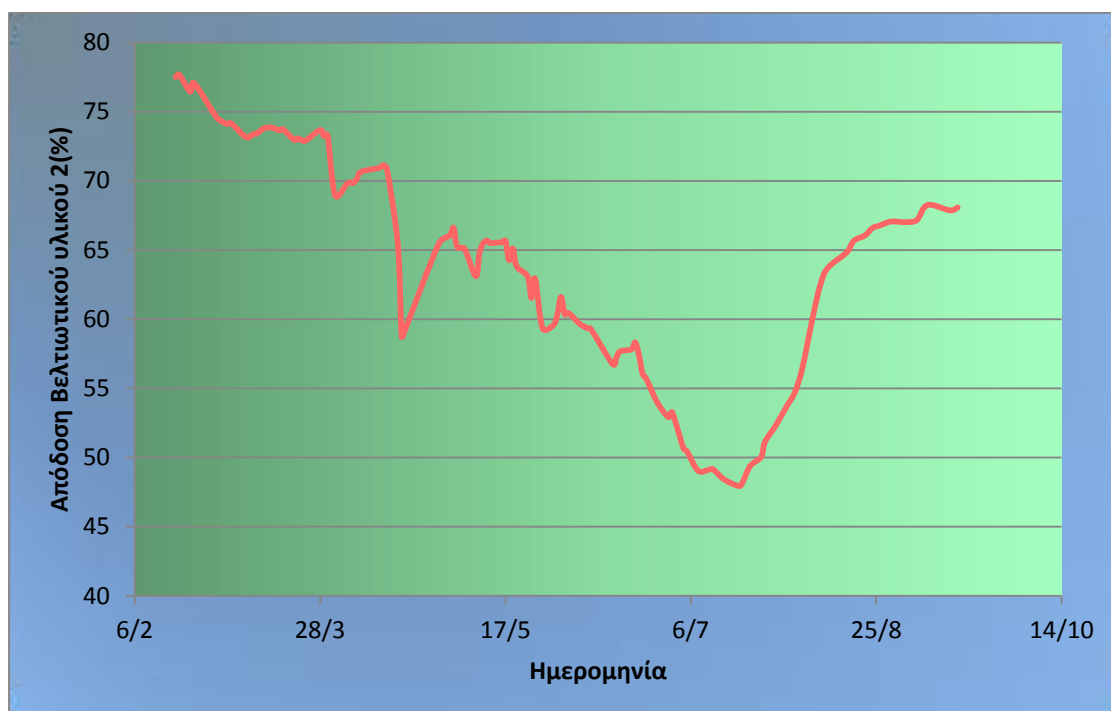
$$\text{Απόδοση}_x(\%) = \left(1 - \left(\frac{R_x}{R_1}\right)\right) * 100 \quad (6.5)$$

Ουσιαστικά δηλαδή έχουμε το επί τοις εκατό ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης του φυσικού εδάφους που επιτυγχάνει το κάθε βελτιωτικό υλικό σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Είναι κατανοητό ότι η απόδοση του κάθε βελτιωτικού θα μεταβάλλεται με το χρόνο. Στο Διάγραμμα 6.14 παρουσιάζουμε την απόδοση του βελτιωτικού υλικού με το οποίο είναι εμποτισμένο το 2^ο ηλεκτρόδιο.

Το 2^ο ηλεκτρόδιο είναι εμποτισμένο σε σκυρόδεμα (μπετόν). Παρατηρούμε ότι η απόδοσή του βελτιωτικού αυτού είναι ιδιαίτερα καλή, αφού σε όλο το διάστημα μειώνει την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου από 47,94 μέχρι και 77,67%.





Διάγραμμα 6.14: Απόδοση του 2^{ου} βελτιωτικού υλικού συναρτήσει του χρόνου.

Από το Διάγραμμα 6.14 βλέπουμε ότι απότομες μεταβολές στην απόδοση του βελτιωτικού έχουμε τις περιόδους 28/3-1/4 και 13/4-19/4. Βέβαια τις περιόδους αυτές, όπως βλέπουμε από το Διάγραμμα 6.18, η τιμή της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου αναφοράς παρουσιάζει μία απότομη μείωση 25,24% και 30,26% αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι, παρ' όλη τη μεταβολή που παρουσιάζει το βελτιωτικό υλικό στην ικανότητα μείωσης της αντίστασης γείωσης του φυσικού εδάφους, καταφέρνει να διατηρεί την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου που είναι εμποτισμένο σε αυτό σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Πράγματι από τον Πίνακα 6.2 βλέπουμε ότι στην πρώτη περίπτωση η μεταβολή της αντίστασης γείωσής του είναι 11,92% ενώ στη δεύτερη η μεταβολή είναι μόλις 1,04%.

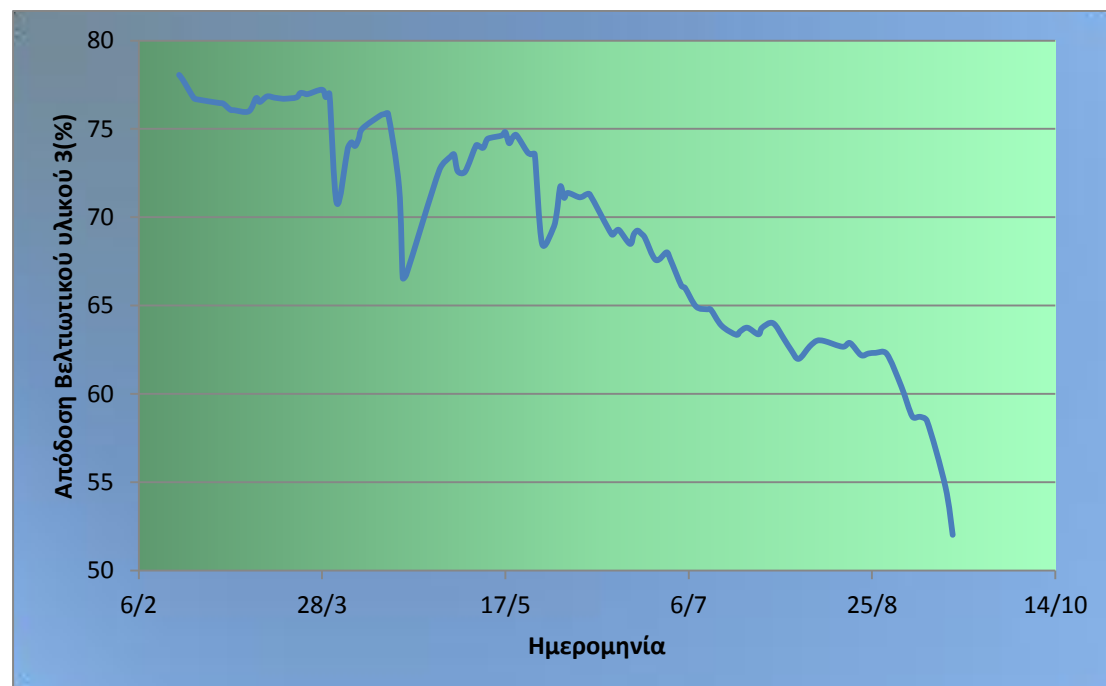
Βλέπουμε ωστόσο ότι το σκυρόδεμα παρουσιάζει μία σημαντική μείωση της απόδοσής του το διάστημα 30/5- 18/7, περίοδος που η R_1 αρχίζει να αγγίζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου 2, γεγονός που αποδεικνύει ότι το σκυρόδεμα δεν είναι συνεχώς αποτελεσματικό. Σε επόμενο σημείο της εργασίας θα εξετάσουμε υπό ποιες συνθήκες συμβαίνει κάτι τέτοιο.

Βέβαια το διάστημα 19/7-16/9 βλέπουμε ότι, ενώ η αντίσταση R_1 του φυσικού εδάφους αρχίζει και αυξάνεται σε ολοένα και μεγαλύτερα επίπεδα, το σκυρόδεμα

είναι ικανό να αυξήσει την απόδοσή του, ώστε η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου που είναι εμποτισμένο σε αυτό να μη φτάσει σε πολύ μεγάλες τιμές. Μάλιστα, κατά τις τελευταίες μέρες διεξαγωγής της εργασίας, το σκυρόδεμα αυξάνει ιδιαίτερα την απόδοσή του οι τιμές της οποίας κυμαίνονται γύρω από το 68% (τιμές που πλησιάζουν την αρχική απόδοση).

Από τα παραπάνω κατανοούμε ότι το σκυρόδεμα, με εξαίρεση κάποια χρονικά διαστήματα, όχι μόνο μειώνει την αντίσταση γείωσης σε ικανοποιητικά επίπεδα, αλλά τη διατηρεί επίσης σε σχετικά σταθερές τιμές.

Το 3^ο ηλεκτρόδιο είναι εμποτισμένο σε μπετονίτη, ένα επίσης ευρέως χρησιμοποιούμενο βελτιωτικό υλικό. Από το Διάγραμμα 6.15 βλέπουμε ότι, αν και η απόδοση του μπετονίτη είναι καλύτερη από αυτή του σκυροδέματος στις πρώτες μέρες του πειράματος (μέχρι τις 30/6 η απόδοση δεν πέφτει κάτω από 66,5%, ενώ ξεκινάει από 78,06%), στη συνέχεια η απόδοση του βελτιωτικού αυτού αρχίζει και μειώνεται σημαντικά.



Διάγραμμα 6.15: Απόδοση του 3^{ου} βελτιωτικού υλικού συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι και ο μπετονίτης μειώνει απότομα την απόδοσή του τα χρονικά διαστήματα 28/3-1/4 και 13/4-19/4, καταφέρνοντας έτσι να διατηρήσει την τιμή της αντίστασης του ηλεκτροδίου 3 σχετικά σταθερή. Επιτυγχάνει

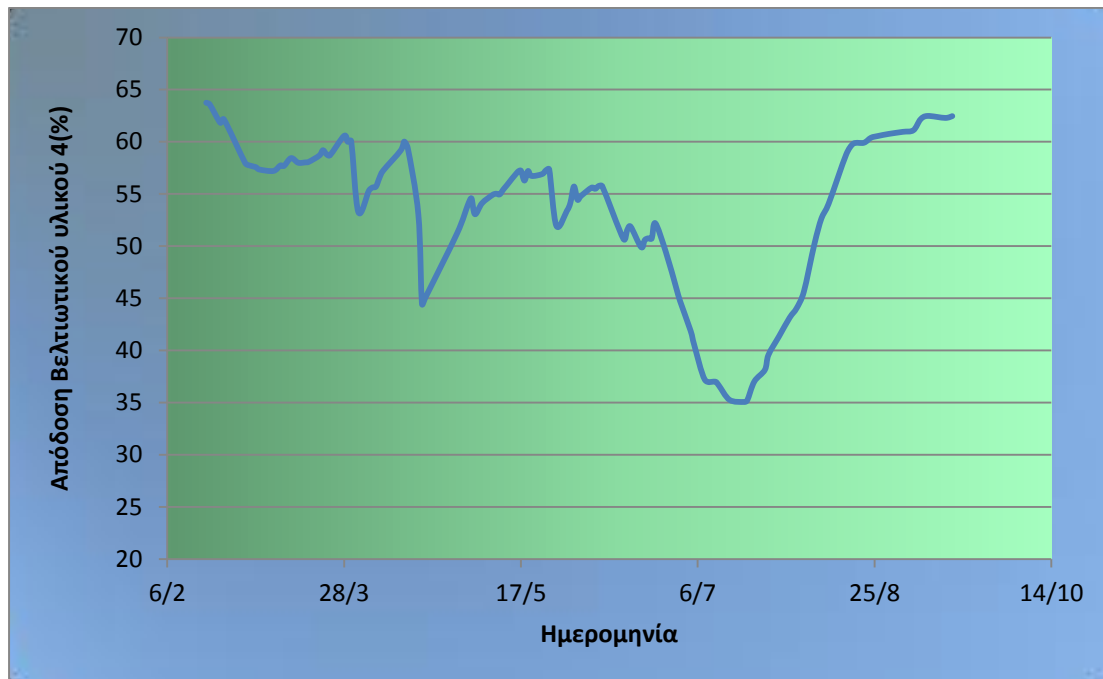
μάλιστα να διατηρήσει την αντίσταση γείωσής του σε πιο σταθερά επίπεδα, αφού από τον Πίνακα 6.2 βλέπουμε ότι τα αντίστοιχα διαστήματα η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου 3 παρουσιάζει μία πτώση περίπου 4,2%.

Επίσης βλέπουμε ότι ο μπετονίτης παρουσιάζει μία πτώση στην απόδοσή του το διάστημα 23/5-27/5. Κοιτώντας το Διάγραμμα 6.13 παρατηρούμε ότι το διάστημα αυτό μειώνεται και η αντίσταση γείωση του ηλεκτροδίου αναφοράς, άρα η μείωση αυτή στην απόδοση έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της αντίστασης γείωσης σε σταθερά επίπεδα, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τον Πίνακα 6.2.



Εικόνα 6.10: Απορρόφηση του μπετονίτη από το περιβάλλον έδαφος.

Βέβαια ο μπετονίτης, όπως και το σκυρόδεμα, μειώνει την απόδοσή του το διάστημα 30/5-18/7. Την περίοδο 20/7-26/8 η απόδοση του μπετονίτη, αν και μειώνεται, διατηρείται σε υψηλά σχετικά επίπεδα (ποτέ δεν πέφτει κάτω από 62%). Μία σημαντική μείωση της απόδοσης του βελτιωτικού αυτού υλικού παρουσιάζεται από 26/8 μέχρι και το τέλος της εργασίας που πιθανώς οφείλεται στην απορρόφηση του βελτιωτικού από το περιβάλλον έδαφος, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 6.10. Το γεγονός αυτό προκαλεί τη μείωση της απόδοσης στο 52,03%.



Διάγραμμα 6.16: Απόδοση του 4^{ου} βελτιωτικού υλικού συναρτήσει του χρόνου.

Εκτός από τον μπετονίτη και το σκυρόδεμα, μετρήσεις έγιναν και σε τρία χημικά εμπορικά βελτιωτικά υλικά γειώσεων, που χρησιμοποιούνται σε αρκετές περιπτώσεις και θεωρούνται ως ιδιαίτερα αποδοτικά.

Η απόδοση του 1^{ου} από αυτά (βελτιωτικό υλικό 4) δίνεται στο Διάγραμμα 6.16. Παρατηρούμε ότι η απόδοσή του κυμαίνεται μεταξύ 35,07 και 63,75%. Η απόδοση αυτή δεν πλησιάζει σε καμία περίπτωση την απόδοση του σκυροδέματος, αν και παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με αυτό: Μειώνει την απόδοσή του τις χρονικές περιόδους 23/5-27/5, 28/3-1/4 και 13/4-19/4 σε μία προσπάθεια να διατηρήσει σταθερή την αντίσταση γείωσής του ηλεκτροδίου 4, όμως η απόδοσή του το διάστημα 30/5-18/7 αγγίζει απαγορευτικά χαμηλές τιμές. Βέβαια το υλικό αυτό αρχίζει και αυξάνει την απόδοσή του στη συνέχεια, όπως και το σκυρόδεμα, σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές αγγίζοντας προς το τέλος της εργασίας τιμές κοντά στο 62%.

Παρόμοια και ακόμα χειρότερη συμπεριφορά παρουσιάζει το βελτιωτικό υλικό 6, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6.17.



Διάγραμμα 6.17: Απόδοση του 6^{ου} βελτιωτικού υλικού συναρτήσει του χρόνου.

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η αντίσταση του βελτιωτικού είναι διαρκώς κάτω από 64,6%, ενώ από 11/7 μέχρι και λίγες μέρες πριν το τέλος της εργασίας η αντίσταση του ηλεκτροδίου αυξάνεται κατακόρυφα όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.2. Το γεγονός αυτό, που προφανώς οφείλεται στην ολοένα και μεγαλύτερη απορρόφηση του βελτιωτικού από το περιβάλλον έδαφος (Εικόνα 6.11), έχει ως συνέπεια η απόδοση του βελτιωτικού να μειώνεται συνεχώς. Φτάνουμε δε στις 22/7 η αντίσταση του ηλεκτροδίου 6 να είναι μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτροδίου που βρίσκεται στο φυσικό έδαφος (ηλεκτρόδιο 1), που πρακτικά σημαίνει ότι το βελτιωτικό υλικό 6 όχι μόνο δε βελτιώνει την αντίσταση γείωσης του φυσικού εδάφους αλλά την κάνει ακόμα χειρότερη.



Εικόνα 6.11: Απορρόφηση του βελτιωτικού υλικού 6 από το έδαφος στις 11/7.

Βέβαια για να διορθωθεί το πρόβλημα αυτό θα έπρεπε να γεμίσουμε το “άνοιγμα” που δημιουργήθηκε γύρω από το ηλεκτρόδιο με επιπλέον βελτιωτικό, όμως το ιδιαίτερο υψηλό κόστος του βελτιωτικού αυτού, καθιστά το συγκεκριμένο εγχείρημα ανέφικτο οικονομικά.

Για το λόγο αυτό τις τελευταίες μέρες τις εργασίας, γεμίσαμε το κενό που περιέβαλλε το ηλεκτρόδιο 6 (Εικόνα 6.12) με χώμα από την τοποθεσία εγκατάστασης ηλεκτροδίων. Η αντίσταση του ηλεκτροδίου 6 μετρήθηκε πριν τη συμπλήρωση με χώμα και βρέθηκε ίση με 515Ω , ενώ μετά την προσθήκη χώματος (Εικόνα 6.13) η μετρούμενη αντίσταση ήταν 491Ω . Βέβαια και πάλι η τιμή της αντίστασης αυτής ήταν μεγαλύτερη από 393Ω , η οποία ήταν η μετρούμενη αντίσταση του ηλεκτροδίου 1 (ηλεκτρόδιο αναφοράς εγκατεστημένο σε φυσικό έδαφος). Ωστόσο η αντίσταση του ηλεκτροδίου αυτού αναμένεται να μειωθεί, όπως συνέβη και στο 1^ο ηλεκτρόδιο κατά την αρχή πραγματοποίησης της εργασίας: Στον Πίνακα 6.2 βλέπουμε ότι το ηλεκτρόδιο 1 χρειάζεται ένα διάστημα 2 περίπου μηνών για να μειώσει την αντίστασή του. Μετά το πέρας αρκετού χρόνου η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου 6 αναμένεται να μειωθεί και να φτάσει τα επίπεδα της αντίστασης γείωσης του 1^{ου} ηλεκτροδίου και, αν έχει απομείνει κάποιο ίχνος από το βελτιωτικό 6 γύρω από το ηλεκτρόδιο, ίσως να αγγίξει επίπεδα μικρότερα αυτής.



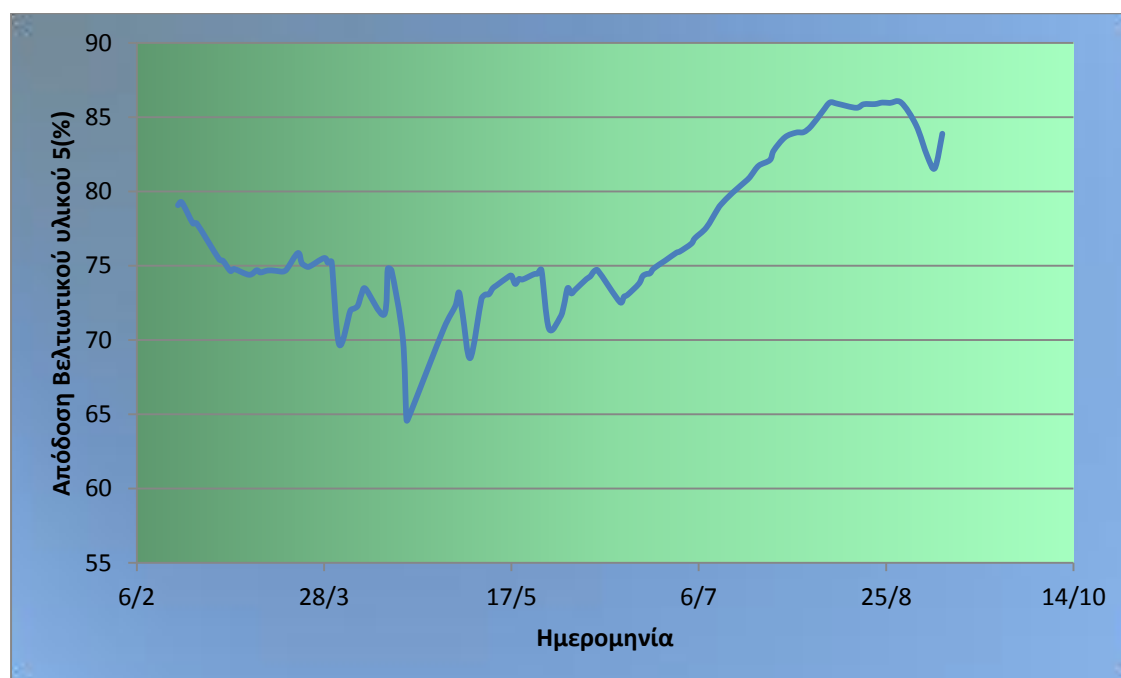
Εικόνα 6.12: Το ηλεκτρόδιο 6 πριν την πλήρωση με χώμα.



Εικόνα 6.13: Το ηλεκτρόδιο 6 μετά την πλήρωση με χώμα.

Εκτός από τα βελτιωτικά υλικά 4 και 6, που παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαμηλή απόδοση, εξετάσαμε επίσης και το βελτιωτικό υλικό 5. Το βελτιωτικό υλικό αυτό παρουσιάζει αξιοσημείωτα υψηλή απόδοση (Διάγραμμα 6.18). Η απόδοσή του είναι πάντα υψηλότερη από 64,61% και φτάνει τη μέγιστη τιμή 85,98%. Και αυτό συμβαίνει ενώ το έδαφος και εδώ έχει απορροφήσει μεγάλο μέρος του βελτιωτικού, και μάλιστα το έδαφος από τις 15/6 κατέρρευσε (Εικόνα 6.14) γύρω από το βελτιωτικό.

Ιδιαίτερα μάλιστα την περίοδο 19/7-29/7 το βελτιωτικό αυξάνει τόσο πολύ την απόδοσή του με αποτέλεσμα, παρά την αύξηση των τιμών της αντίστασης γείωσης R_1 , η αντίσταση του ηλεκτροδίου 5 να παραμένει σχεδόν σταθερή, όπως βλέπουμε και από τον Πίνακα 6.2.



Διάγραμμα 6.18: Απόδοση του 5^{ου} βελτιωτικού υλικού συναρτήσει του χρόνου.



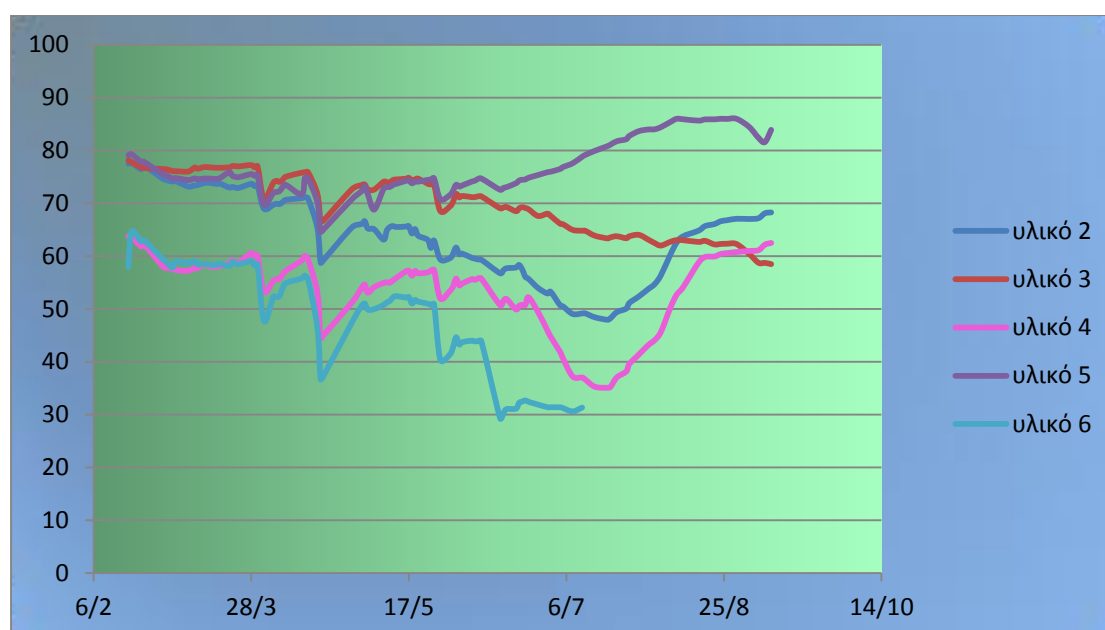
Εικόνα 6.14: Απορρόφηση του βελτιωτικού και κατάρρευση του εδάφους γύρω από το 5^ο ηλεκτρόδιο.

Βέβαια η απόδοση του ηλεκτροδίου την περίοδο 8/8 – 26/8 διατηρείται σχεδόν σταθερή (περίπου 85,5%), με αποτέλεσμα η αντίσταση του αντίστοιχου ηλεκτροδίου να αγγίζει υψηλές τιμές, λόγω της απότομης αύξησης της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου αναφοράς, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6.13. Οι τιμές αυτές βέβαια είναι κατά πολύ μικρότερες από την αντίσταση του ηλεκτροδίου που έχει εγκατασταθεί στο φυσικό έδαφος, λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του υλικού.

Στο Διάγραμμα 6.19 δίνεται συγκεντρωτικά η μεταβολή της απόδοσης όλων των βελτιωτικών υλικών. Για το βελτιωτικό 6 στο διάγραμμα δίνονται οι μετρήσεις μέχρι και 11/7, αφού όπως αναφέραμε τις επόμενες μέρες η απόδοση του ηλεκτροδίου φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές (ακόμη και αρνητικές από το διάστημα 22/7 μέχρι και το τέλος της εργασίας).

Από το διάγραμμα αυτό είναι φανερό ότι το βελτιωτικό υλικό 5 έχει την καλύτερη απόδοση από τα υπόλοιπα καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων. Σχετικά με τα υπόλοιπα υλικά παρατηρούμε ορισμένες εντυπωσιακές μεταβολές να

συμβαίνουν κατά τη διάρκεια εξέλιξης της εργασίας: Μέχρι και 20/7 τη 2^η καλύτερη απόδοση παρουσιάζει ο μπετονίτης και στη συνέχεια ακολουθεί το σκυροδέμα, ενώ τα βελτιωτικά 4 και 6 παρουσιάζουν τη χειρότερη απόδοση. Από 22/7 και έπειτα η απόδοση του σκυροδέματος αυξάνεται εντυπωσιακά, ενώ από 8/8 και μετά ξεπερνάει την απόδοση του μπετονίτη. Αντίθετα η απόδοση του μπετονίτη αρχίζει και μειώνεται σημαντικά, γεγονός που όπως αναφέραμε πιθανώς συμβαίνει λόγω της απορρόφησης του βελτιωτικού από το περιβάλλον έδαφος. Το σκυροδέμα δεν παρουσιάζει μείωση στην απόδοσή του αφού είναι από τα μοναδικά βελτιωτικά που δεν απορροφήθηκαν όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.15, η οποία δείχνει την κατάσταση του σκυροδέματος στο τέλος της εργασίας.



Διάγραμμα 6.19: Μεταβολή της απόδοσης των βελτιωτικών υλικών με την πάροδο του χρόνου

Τέλος και το βελτιωτικό 4 δεν απορροφάται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.16, με αποτέλεσμα η απόδοσή του να ακολουθεί αυτή του σκυροδέματος. Ωστόσο τόσο οι χαμηλές τιμές που αγγίζει η απόδοσή του για μεγάλο μέρος της εργασίας, καθώς και οι τεράστιες μεταβολές που παρουσιάζει η απόδοση του υλικού αυτού, καθιστούν απαγορευτική τη χρήση του.

Φαίνεται επομένως η σημασία διεξαγωγής των μετρήσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα, αφού μία εκτίμηση της απόδοσης στα αρχικά στάδια της εργασίας απέχει κατά πολύ από την πραγματική απόδοση στο τέλος αυτής.



Εικόνα 6.15: Το σκυρόδεμα γύρω από το ηλεκτρόδιο 2 δεν έχει απορροφηθεί από το περιβάλλον έδαφος.



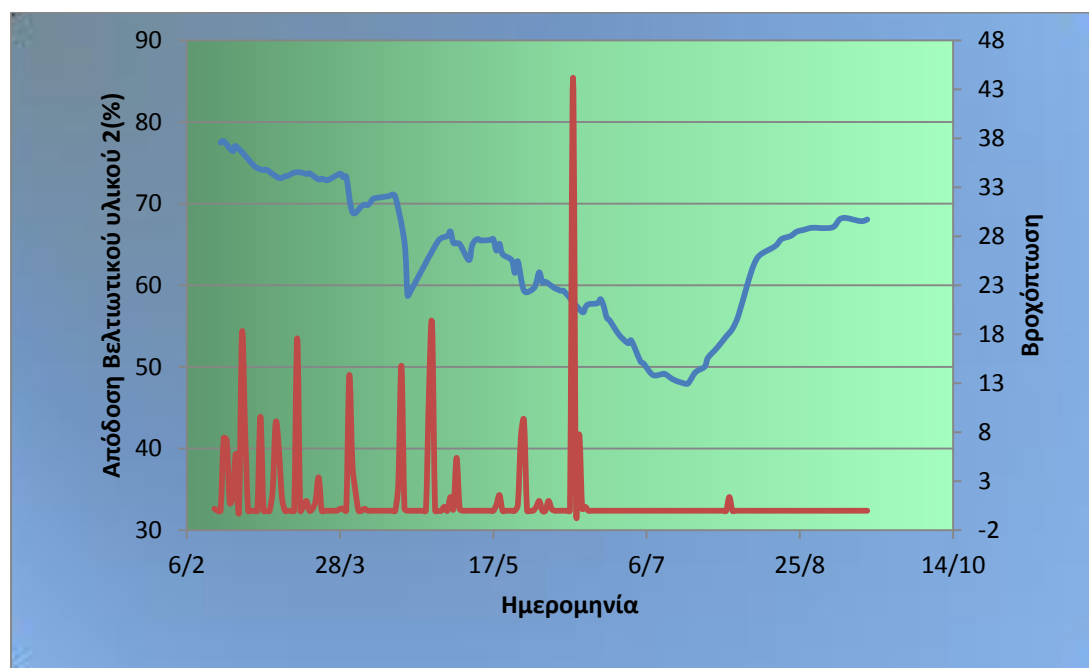
Εικόνα 6.16: Το βελτιωτικό υλικό 4 δεν έχει απορροφηθεί μέχρι το τέλος της εργασίας.

Επίδραση της υγρασίας και της βροχόπτωσης

Αξίζει να σημειώσουμε ότι μέχρι τις 19/4 το βελτιωτικό 5 έχει περίπου την ίδια απόδοση τόσο με το μπετονίτη όσο και με το σκυρόδεμα. Η απόδοση του σκυροδέματος αρχίζει να μειώνεται όμως μέχρι και τις 23/5, ενώ η απόδοση του μπετονίτη συνεχίζει να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτή του βελτιωτικού 5.

Είναι φανερό ότι τόσο στις 19/4 όσο και στις 23/5 κάποιο γεγονός συμβάλει στη διαφοροποίηση αυτή της απόδοσης. Το γεγονός που συμβαίνει κοντά σε αυτές τις ημερομηνίες είναι η διαφοροποίηση στο ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης.

Κοιτάζοντας τα Διαγράμματα 6.20-6.24 παρατηρούμε ότι, πέρα από τον μπετονίτη, το σκυρόδεμα και το βελτιωτικό 5, εξάρτηση από τη βροχόπτωση φαίνεται να έχει και η απόδοση των υπολοίπων βελτιωτικών που εξετάζουμε.

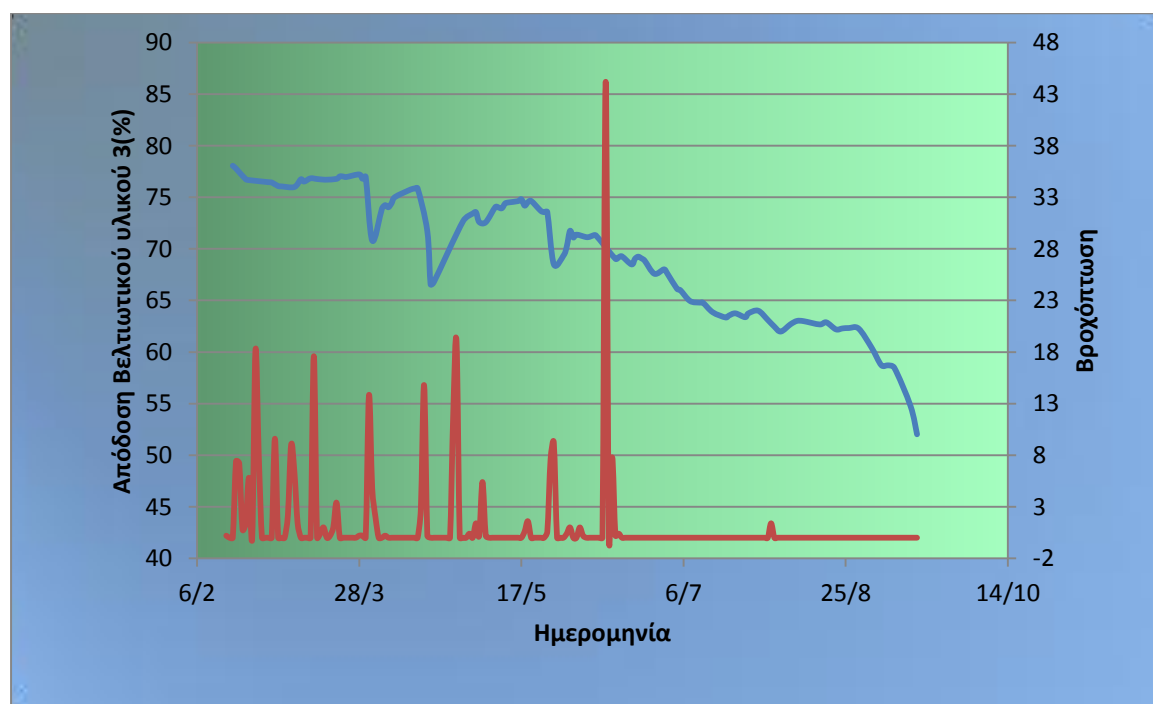


Διάγραμμα 6.20: Μεταβολή της απόδοσης του βελτιωτικού υλικού 2 με τη βροχόπτωση

Από το Διάγραμμα 6.20 βλέπουμε ότι η απόδοση του σκυροδέματος ξεκινά από μία υψηλή τιμή και μειώνεται σταδιακά. Σε περιόδους βροχοπτώσεων, όπως είναι οι πρώτοι μήνες διεξαγωγής των μετρήσεων, η απόδοση του βελτιωτικού αυτού δε μειώνεται αρκετά, αλλά διατηρείται σε σχετικά υψηλές τιμές. Επίσης τις περιόδους βροχοπτώσεων παρατηρούμε κάποιες απότομες μειώσεις στην απόδοση οι οποίες διορθώνονται αρκετά σύντομα στη συνέχεια: π.χ. τα χρονικά διαστήματα 28/3-2/4 και

13/4-19/4 η απόδοση πέφτει αρκετά, αλλά μέσα σε διάστημα 10 ημερών σχεδόν επαναφέρεται σε επίπεδα παρόμοια με αυτά που είχε πριν μειωθεί. Αυτή η μείωση της απόδοσης, υποδεικνύει όπως είπαμε και πριν την ‘προσπάθεια’ του βελτιωτικού να διατηρήσει σχεδόν σταθερή την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου του, και εξαρτάται όπως βλέπουμε από την υγρασία, αφού τέτοιες απότομες μειώσεις συνοδεύονται από έντονες βροχοπτώσεις.

Τέλος η απόδοση του σκυροδέματος σε περιόδους με έλλειψη βροχοπτώσεων μειώνει αρκετά την απόδοσή του, όμως το μειονέκτημά του αυτό αρχίζει και διορθώνεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα: από τις 19/7 η απόδοση αρχίζει και πάλι να αυξάνεται, για να φτάσει στις τελευταίες μέρες μία απόδοση που ξεπερνά το 68%!

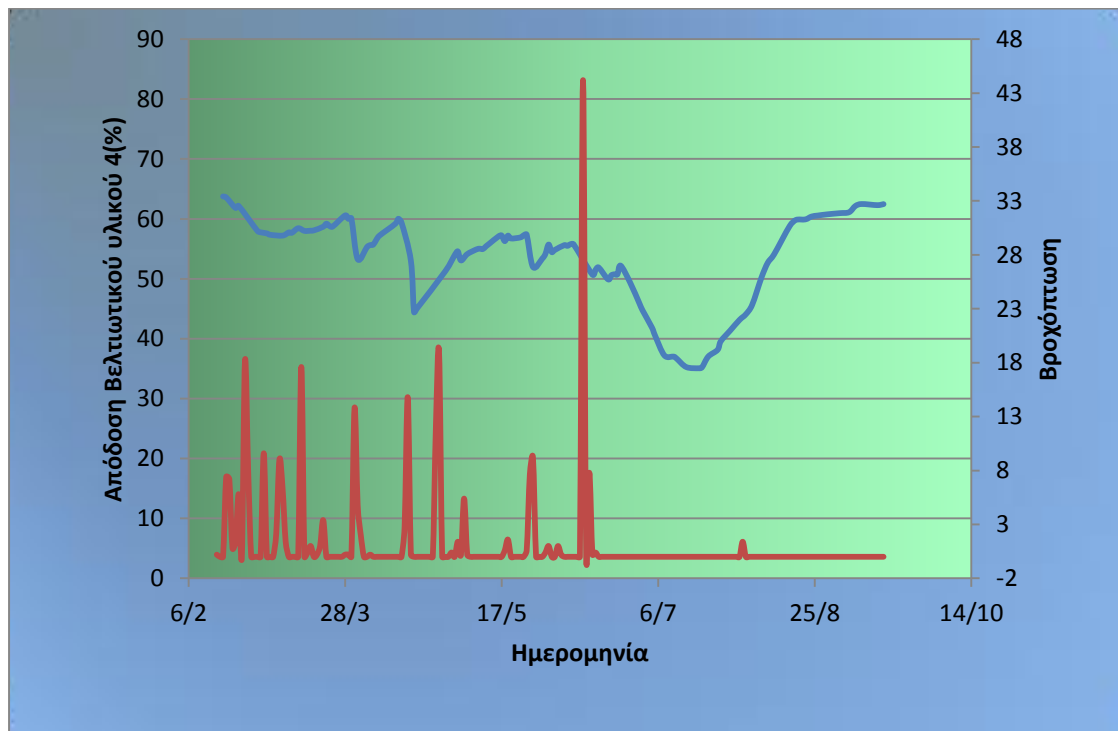


Διάγραμμα 6.21: Μεταβολή της απόδοσης του βελτιωτικού υλικού 3 με τη βροχόπτωση

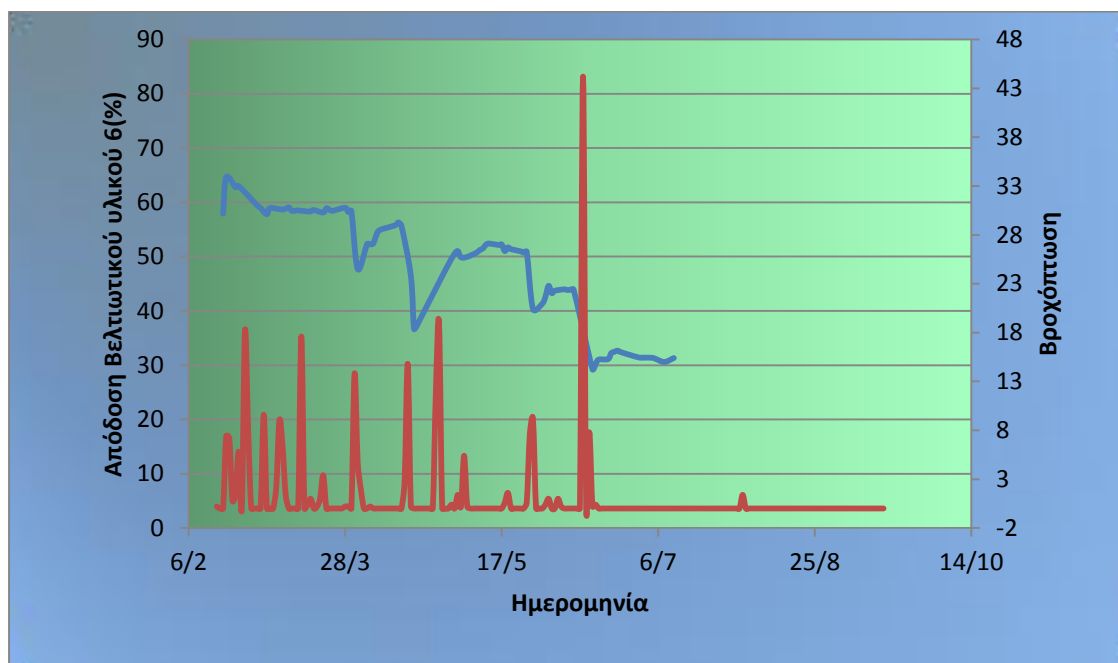
Παρόμοια συμπεριφορά, αν και με καλύτερες τιμές απόδοσης στα αρχικά στάδια της εργασίας, παρουσιάζει και ο μετονίτης: Μειώνει απότομα την απόδοσή του σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων και την επαναφέρει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα σε υψηλότερες τιμές, ώστε να διατηρηθεί η αντίσταση γείωσης σχετικά σταθερή, ενώ και αυτός μειώνει την απόδοσή του όταν μειώνονται οι βροχοπτώσεις. Ωστόσο ο μετονίτης δεν έχει την ικανότητα να αυξήσει την απόδοσή του σε περιόδους παρατεταμένης έλλειψης βροχοπτώσεων αφού όπως φαίνεται από το



διάγραμμα την περίοδο 17/6 μέχρι και το τέλος της εργασίας η απόδοση του μπετονίτη μειώνεται κατά ένα ποσοστό 25 περίπου τοις εκατό.



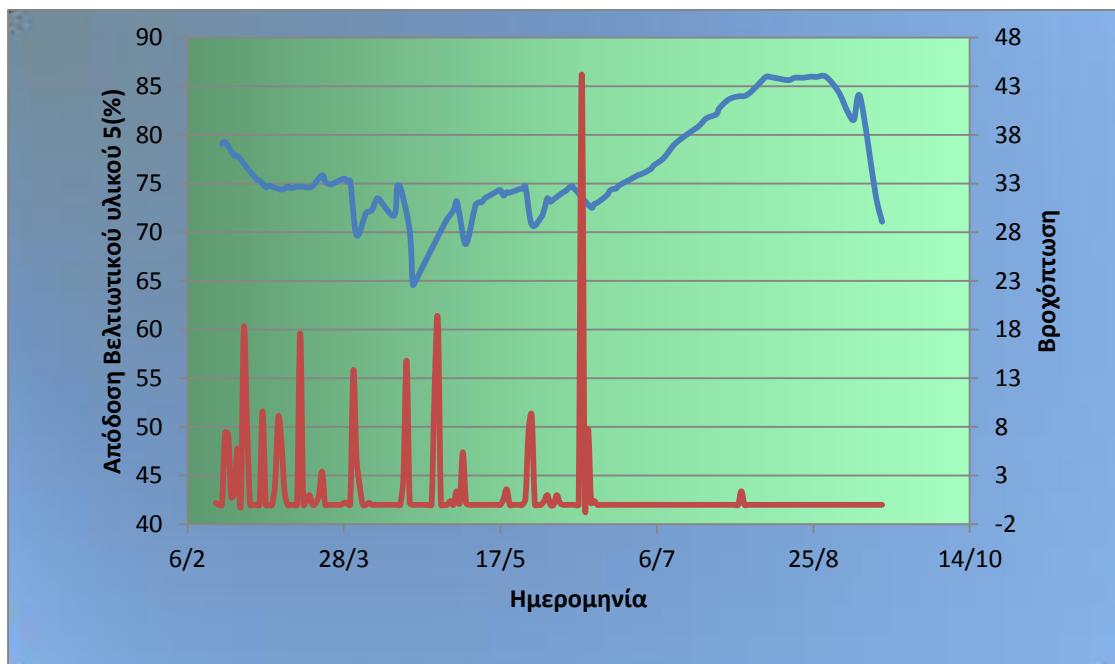
Διάγραμμα 6.22: Μεταβολή της απόδοσης του βελτιωτικού υλικού 4 με τη βροχόπτωση



Διάγραμμα 6.23: Μεταβολή της απόδοσης του βελτιωτικού υλικού 6 με τη βροχόπτωση

Τα βελτιωτικά 4 και 6 (Διαγράμματα 6.22 και 6.23) συμπεριφέρονται όπως και ο μπετονίτης με το σκυρόδεμα, ωστόσο η απόδοσή τους ξεκινά από χαμηλότερα επίπεδα, και μειώνεται διαρκώς, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να πλησιάσουν σε καμία περίπτωση την απόδοση των προηγούμενων βελτιωτικών.

Το βελτιωτικό 5, που όπως είπαμε παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά από τα υπόλοιπα, καταφέρνοντας την περίοδο βροχοπτώσεων να διατηρεί μία μέση απόδοση 73,5%, η οποία, αν και ακολουθεί τις ίδιες αυξομειώσεις με τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά, δεν αγγίζει ποτέ ιδιαίτερα χαμηλές τιμές. Παρατηρούμε επίσης ότι σε περιόδους έλλειψης βροχοπτώσεων το βελτιωτικό υλικό 5 όχι μόνο δε μειώνει την απόδοσή του αλλά αντίθετα την αυξάνει, ώστε να διατηρήσει σταθερή και σε χαμηλές τιμές την αντίσταση του ηλεκτροδίου που περιβάλλει.



Διάγραμμα 6.24: Μεταβολή της απόδοσης του βελτιωτικού υλικού 5 με τη βροχόπτωση

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα-Η επόμενη μέρα

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να συνοψίσουμε τα πλαίσια στα οποία κινήθηκε η διπλωματική αυτή εργασία. Κατανοώντας τον ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο της γείωσης προσπαθήσαμε να προσδιορίσουμε την απόδοση βελτιωτικών υλικών που είναι ευρέως διαθέσιμα σήμερα. Επίσης, γνωρίζοντας το ρόλο που διαδραματίζει η ασφάλεια, η οποία σχετίζεται με τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής, σε ένα σύστημα γείωσης, κάναμε μία απόπειρα να παρακολουθήσουμε τη μεταβολή των μεγεθών αυτών.

Έγιναν μετρήσεις σε διάρκεια 212 ημερών, στις οποίες καταγράφονταν σχεδόν καθημερινά η αντίσταση του εδάφους με τη μέθοδο Wenner για $a=2,4,8,12$ και 16m. Με τη χρήση του προγράμματος CYMGrd και τις μετρήσεις αυτές μπορέσαμε να μοντελοποιήσουμε το έδαφος ως διστρωματικό και να υπολογίσουμε για κάθε μία μέτρηση τόσο την ειδική αντίσταση του άνω και κάτω στρώματος (ρ_1 και ρ_2 αντίστοιχα), καθώς και τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής.

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε ότι η ρ_1 δεν παραμένει σταθερή στη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων, αλλά μεταβάλλεται σημαντικά και μάλιστα παρουσιάζει αξιοσημείωτη εξάρτηση από το ύψος βροχόπτωσης. Η μεταβολή αυτή της ρ_1 προκαλεί μεγάλες μεταβολές και στα επιτρεπόμενα όρια της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής. Όταν δεν υπάρχει υλικό επιφανείας το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο της βηματικής κυρίως τάσης δεν παρουσιάζει σταθερή τιμή με την πάροδο του χρόνου, αλλά αγγίζει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές σε περιόδους ισχυρών βροχοπτώσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο, αφού ενώ το καλοκαίρι μία βηματική τάση 370V δε θα προκαλέσει καμία επιπλοκή σε άτομο που υποβάλλεται σε αυτή, η ίδια τάση το χειμώνα είναι κατά 50 περίπου Volts παραπάνω από το επιτρεπόμενο όριο, και θα έχει ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις.

Γενικά δηλαδή επιδιώκουμε όχι μόνο υψηλά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής, αλλά και μία σταθερότητα των ορίων αυτών κατά τη διάρκεια του έτους. Τόσο η σταθερότητα, αλλά και τα υψηλά όρια τάσεων, επιτυγχάνονται με τη χρήση υλικού επιφανείας. Αν προσθέσουμε χαλίκι πάχους 20 εκατοστών σε ένα χώρο στον



οποίο δύναται να αναπτυχθούν βηματικές τάσεις ή τάσεις επαφής, επιτυγχάνουμε αύξηση του ορίου για τη βηματική τάση κατά 565% περίπου, ενώ η αντίστοιχη αύξηση για την τάση επαφής είναι 227%. Επίσης η μεταβολή που παρουσιάζουν τώρα τα όρια είναι ελάχιστη. Παρατηρούμε επομένως ότι με την προσθήκη μίας στρώσης από χαλίκι σε μία εγκατάσταση επιτυγχάνουμε ιδιαίτερα μεγάλη ασφάλεια.

Βέβαια για να είναι μία εγκατάσταση ασφαλής δεν αρκεί μόνο μία επίστρωση με υλικό επιφανείας, αφού έτσι αυξάνουμε τα όρια των επιτρεπόμενων τάσεων, δεν είμαστε όμως σίγουροι για το αν θα καταφέρουμε να τηρήσουμε τα όρια αυτά. Για να το επιτύχουμε αυτό πρέπει να έχουμε και ένα σύστημα γείωσης, η χαμηλή αντίσταση του οποίου θα διασφαλίζει ότι τόσο η τάση επαφής όσο και η βηματική τάση θα έχουν τιμές χαμηλότερες από τα όρια αυτά.

Μία τακτική για επίτευξη χαμηλής αντίστασης γείωσης είναι όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3 η χρήση βελτιωτικών υλικών. Για το λόγο αυτό μετρήθηκε παράλληλα με την αντίσταση του εδάφους και η αντίσταση γείωσης ηλεκτροδίων που περιβάλλονταν από βελτιωτικά υλικά γειώσεων.

Εξετάσαμε έτσι την απόδοση των βελτιωτικών αυτών υλικών σε σχέση με το χρόνο και το ύψος βροχόπτωσης, ορίζοντας την απόδοση ως την ικανότητα των υλικών αυτών να μειώνουν την αντίσταση γείωσης του φυσικού εδάφους. Παρατηρήσαμε τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν ευρέως χρησιμοποιούμενα βελτιωτικά υλικά γειώσεων, όπως ο μπετονίτης και το σκυρόδεμα, καθώς και εμπορικώς διαθέσιμα: χημικά υλικά 4,5 και 6.

Από τα Διαγράμματα 6.24-6.28 παρατηρούμε ότι όλα τα βελτιωτικά ξεκινάνε έχοντας μία απόδοση ιδιαίτερα μεγάλη, η οποία όμως με την πάροδο του χρόνου αρχίζει να μειώνεται. Για το λόγο αυτό υπερέχουν τα βελτιωτικά που έχουν εξ' αρχής μία καλή απόδοση, όπως ο μπετονίτης, το σκυρόδεμα και κυρίως το βελτιωτικό υλικό 5. Η μείωση αυτή στην απόδοση πιθανώς σχετίζεται με την απορρόφηση των υλικών από το περιβάλλον έδαφος, που άλλοτε είναι περισσότερο (υλικό 6) και άλλοτε λιγότερο (μπετονίτης) έντονη.

Οι συχνές βροχοπτώσεις είναι ικανές να διατηρήσουν την αρχική απόδοση σε υψηλά σχετικά επίπεδα (ποτέ όμως στα αρχικά), ενώ ξαφνικές και έντονες βροχοπτώσεις μειώνουν την απόδοση, επαναφέροντάς τη μετά από μικρό χρονικό διάστημα στα πριν τη βροχόπτωση επίπεδα, με αποτέλεσμα τη διατήρηση της αντίστασης γείωσης σε σταθερές σχετικά τιμές. Βέβαια για να επιστρέψει η απόδοση



στα υψηλά πριν τη βροχόπτωση επίπεδα θα πρέπει να βρισκόμαστε σε περίοδο βροχών, οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να είναι έντονες, αρκεί να έχουν διάρκεια αρκετών ημερών.

Αντίθετα μία μεγάλη περίοδος με έλλειψη βροχών, επιφέρει σε κάποια υλικά μία ιδιαίτερα υψηλή πτώση στην απόδοση. Η περίοδος αυτή μπορεί να μη σχετίζεται με παντελή έλλειψη βροχοπτώσεων, αφού όπως βλέπουμε το διάστημα 12/6-16/6 παρουσιάζονται βροχοπτώσεις και μάλιστα ιδιαίτερα έντονες (η ημερήσια βροχόπτωση στις 12/6 είναι η μεγαλύτερη στη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων). Ωστόσο εάν η περίοδος αυτή των βροχοπτώσεων δεν είναι αρκετά μεγάλη η πτώση της απόδοσης συνεχίζεται. Κάποια από τα βελτιωτικά έχουν την ικανότητα να “προσαρμόζονται” στις συνθήκες αυτές αυξάνοντας την απόδοσή τους είτε αμέσως (βελτιωτικό υλικό 5), είτε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (σκυρόδεμα).

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, αλλά και τα διαγράμματα που παρατίθενται στο κεφάλαιο 5, το βελτιωτικό υλικό 5 είναι το πιο αποδοτικό από τα υπόλοιπα ακολουθούμενο από το σκυρόδεμα.

Είναι, βέβαια, ιδιαίτερα σημαντικό να καταλάβουμε ότι η απόδοση των υλικών δεν έχει να κάνει μόνο με την ικανότητά τους να μειώνουν την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου που περιβάλλουν, αλλά και με την ικανότητά τους να μην απορροφούνται από το περιβάλλον έδαφος. Είναι η ιδιότητα αυτή του σκυροδέματος που το αναδεικνύει σε ένα ιδιαίτερα αποδοτικό υλικό, κάτι το οποίο φαίνεται μόνο όταν αρχίσει να γίνεται αισθητή η απορρόφηση των υπολοίπων βελτιωτικών.

Φυσικά, παράλληλα με την απόδοση των βελτιωτικών υλικών, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέτασή τους από πλευράς κόστους. Στον πίνακα 7.1 παρατίθεται το κόστος προμήθειας των βελτιωτικών υλικών και εγκατάστασης των συστημάτων γείωσης.

	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 7.1: Ανάλυση κόστους εγκατάστασης των συστημάτων γείωσης.



Από τον πίνακα αυτόν βλέπουμε ότι το βελτιωτικό 4 έχει το μικρότερο κόστος, ωστόσο, όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 6, το βελτιωτικό αυτό παρουσιάζει πολύ χαμηλή απόδοση. Μάλιστα το βελτιωτικό 4 παρουσίασε τη δεύτερη χειρότερη απόδοση μετά το βελτιωτικό 6. Το βελτιωτικό 6, αν και έχει το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με όλα τα βελτιωτικά που εξετάσαμε, παρουσιάζει τόσο μεγάλη απορρόφηση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα να εκτίθεται στον αέρα το ηλεκτρόδιο που αρχικά περιέβαλλε και να αυξάνεται θεαματικά η αντίσταση γείωσής του. Βέβαια για να διορθωθεί αυτή η απορρόφηση, κάθε φορά που αυτή συνέβαινε, θα έπρεπε να προστίθεται επιπλέον ποσότητα βελτιωτικού υλικού. Με δεδομένο όμως την αύξηση του κόστους του συστήματος γείωσης με τη συχνή προσθήκη βελτιωτικού υλικού, γίνεται κατανοητό ότι μία τέτοια ενέργεια θα ήταν εντελώς ασύμφορη. Γίνεται κατανοητό επομένως ότι το βελτιωτικό υλικό 6 έχει ένα κόστος το οποίο είναι δυσανάλογο με την απόδοσή του.

Ο μπετονίτης, αν και δεν έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος, παρουσιάζει μία διαρκή μείωση της απόδοσής του που πιθανώς οφείλεται στην απορρόφησή του από το έδαφος. Βέβαια και αυτός προτιμάται από τη χρήση των βελτιωτικών υλικών 4 και 6, αφού, και φθηνότερος από αυτά είναι, και καλύτερη απόδοση παρουσιάζει, τουλάχιστον για το μεγαλύτερο μέρος διεξαγωγής της εργασίας.

Το βελτιωτικό που παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση, αλλά και πολύ χαμηλό κόστος, είναι το σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα όπως είδαμε δεν απορροφάται από το περιβάλλον έδαφος, με αποτέλεσμα να διατηρεί σε όλη τη διάρκεια της εργασίας την απόδοσή του σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα.

Βέβαια το σκυρόδεμα δε φτάνει σε καμία περίπτωση την απόδοση του βελτιωτικού 5. Το βελτιωτικό αυτό έχει μία εξαιρετική απόδοση, έχει όμως και ένα εξίσου μεγάλο κόστος. Η διαφορά αυτή φαίνεται μικρή στην παρούσα εργασία: είχαμε μόνο ένα ηλεκτρόδιο γείωσης σε κάθε περίπτωση, με αποτέλεσμα η διαφορά να ανέρχεται μόνο στα 184,88€. Βέβαια το κόστος του βελτιωτικού υλικού 5 είναι 121,15% μεγαλύτερο από αυτό του σκυροδέματος.

Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις θα πρέπει να εγκαταστήσουμε περισσότερα από ένα ηλεκτρόδια ή ενδεχομένως να εγκαταστήσουμε και μία διαφορετική διάταξη ηλεκτροδίων, όπως αναφέρεται στην ενότητα 1.8, ώστε να επιτύχουμε ικανοποιητική τιμή για την αντίσταση γείωσης. Για ένα μεγαλύτερο σε έκταση σύστημα γείωσης θα απαιτούνταν και μεγαλύτερη ποσότητα βελτιωτικού, με αποτέλεσμα ανάλογη αύξηση



και του κόστους. Επομένως, κάθε φορά πρέπει να εξετάζεται η απόδοση που έχει ένα βελτιωτικό υλικό, αλλά και παράλληλα να εκτιμάται αν το όφελος αυτό στην απόδοση αντισταθμίζεται από το κόστος του συγκεκριμένου υλικού.

Σε βιομηχανικές μάλιστα εγκαταστάσεις (π.χ. υποσταθμοί υψηλής τάσης), όταν το κόστος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, ενδείκνυται η χρήση του σκυροδέματος, το οποίο έχει μικρό κόστος αλλά ιδιαίτερα καλή απόδοση, σε συνδυασμό με ένα υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης, που θα καλύψει κάποιο μέρος της εγκατάστασης. Μπορεί να έχουμε έτσι κάποιες αυξημένες τιμές για την αναπτυσσόμενη βηματική τάση και τάση επαφής, ωστόσο αυτές οι τιμές θα είναι ανεκτές λόγω των ιδιαίτερα αυξημένων επιτρεπόμενων ορίων ασφαλείας, που θα εξασφαλίζει το υλικό επιφανείας.

Η επόμενη μέρα

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι τα παραπάνω συμπεράσματα για τα βελτιωτικά εξάγονται για μία περίοδο μετρήσεων 7 περίπου μηνών. Βέβαια σε αυτούς τους μήνες είδαμε τη συμπεριφορά των υλικών τόσο σε περιόδους με βροχόπτωση όσο και σε περιόδους με διαρκή έλλειψη βροχών. Είναι, ωστόσο, κατανοητό ότι οι μετρήσεις αυτές πρέπει να συνεχιστούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, πιθανώς και για περισσότερο από 2-3 χρόνια, ώστε να δούμε πώς μεταβάλλεται η απόδοση των βελτιωτικών όχι μόνο στη διάρκεια ενός έτους, αλλά και με την επίδραση διαφορετικών, σε επίπεδο έτους, περιβαλλοντικών συνθηκών. Θα υπάρξει έτσι η δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς των υλικών σε βάθος χρόνου. Το βελτιωτικό υλικό 6 παρουσίασε έντονη απορρόφηση από το περιβάλλον έδαφος, σημειώνοντας εκπληκτικά χαμηλή απόδοση μετά από κάποιους μήνες μετρήσεων, ενώ και το υλικό 5 άρχισε να απορροφάται από το έδαφος, κάτι που δεν είχε όμως επίπτωση στην απόδοσή του. Βέβαια δεν ξέρουμε πώς θα επιδράσει η απορρόφηση αυτή, στο περιβάλλον του ηλεκτροδίου έδαφος, σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα (η απορρόφηση του μπετονίτη έγινε αισθητή μόνο κατά τον τελευταίο μήνα μετρήσεων), γεγονός που καθιστά απαραίτητη την περαιτέρω συνέχιση της εξέτασης της απόδοσης των βελτιωτικών.

Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων του προηγούμενου κεφαλαίου διαφαίνεται η συνάρτηση της απόδοσης των υλικών με το βαθμό



απορρόφησής τους από το περιβάλλον έδαφος. Για το λόγο αυτό, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των βελτιωτικών υλικών που θα πρέπει να ερευνηθεί είναι ο βαθμός απορρόφησής τους, ο οποίος βέβαια αναμένεται να είναι και διαφορετικός για κάθε τύπο εδάφους. Γίνεται κατανοητό ότι ο παράγοντας αυτός είναι υψίστης σημασίας για την απόδοση των υλικών και για την παραπέρα χρήση τους στις τεχνικές εφαρμογές των εγκαταστάσεων.

Ενδιαφέρουσα προέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα αποτελούσε η *in situ* μέτρηση της υγρασίας του εδάφους. Όπως είδαμε παραπάνω τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής, καθώς και η απόδοση των βελτιωτικών υλικών παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μεταβολές με το ύψος βροχόπτωσης. Ωστόσο δεν είναι τόσο το ύψος βροχόπτωσης που επηρεάζει τα μεγέθη αυτά, όσο η υγρασία του εδάφους. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενες ενότητες η έλλειψη κατάλληλου οργάνου για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους δε μας επιτρέπει τη μέτρηση της υγρασίας *in situ*, ενώ η λήψη των μετρήσεων από μετεωρολογικό σταθμό, που δίνει την υγρασία του εδάφους σε έδαφος διαφορετικό από αυτό που γίνονται οι μετρήσεις, δε μας οδηγεί σε ξεκάθαρα συμπεράσματα.

Πέρα από την υγρασία, ενδιαφέρουσα θα ήταν και η μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους. Λόγω έλλειψης κατάλληλου αισθητήρα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους *in situ*, ένας τρόπος προσδιορισμού του μεγέθους αυτού είναι η προσομοίωση του μοντέλου εδάφους του πειράματος με κατάλληλο λογισμικό. Δίνεται έτσι η δυνατότητα προσδιορισμού πιθανών τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους σε συγκεκριμένα βάθη και για όλες τις ημέρες του έτους. Γνωρίζοντας τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα με παράλληλη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης *Trnsys 16* και της εξίσωσης του *Kusuda* [60] είναι δυνατός ο θεωρητικός υπολογισμός της θερμοκρασίας εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος και το χρόνο. Ωστόσο η εφαρμογή αυτή συναντά πολλά προβλήματα στην εφαρμογή της, αφού βασίζεται σε αρκετές παραδοχές (η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει σταθερή με το βάθος, η θερμοκρασία του εδάφους σταθεροποιείται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος) οι οποίες δεν ισχύουν για το συγκεκριμένο τύπο εδάφους. Επίσης η εφαρμογή αυτή απαιτεί μετεωρολογικά δεδομένα για όλο το έτος, που προφανώς δεν είναι ακόμα διαθέσιμα. Λόγω όλων αυτών των παραγόντων δεν είναι δυνατή η ακριβής γνώση της θερμοκρασίας του εδάφους όπου γίνονται οι



μετρήσεις, αλλά μία εκτίμηση αυτής, η οποία, αν χρησιμοποιηθεί, θα δώσει εσφαλμένα συμπεράσματα

Προέκταση της διπλωματικής αυτής εργασίας θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει και η εξέταση των βελτιωτικών αυτών υλικών σε μία διαφορετική τοποθεσία, ώστε να δούμε πώς μεταβάλλεται η απόδοσή τους σε έναν διαφορετικό τύπο εδάφους. Μία τέτοια προσπάθεια γίνεται όπως αναφέραμε στο Μεξικό[58] όπου έχουν εγκατασταθεί δύο 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. Έτσι, αποκτάται μια πληρέστερη και πιο τεκμηριωμένη εικόνα για την αξιολόγηση της απόδοσης και συμπεριφοράς των βελτιωτικών, με αποτέλεσμα να εφαρμόζονται πιο σίγουρες και αξιόπιστες λύσεις στις κατασκευές.

Τα βελτιωτικά της εργασίας αυτής θα μπορούσαν να τοποθετηθούν επομένως και σε συστήματα γείωσης εγκατεστημένα σε βραχώδες έδαφος, όπου η απορρόφηση πιθανώς να ήταν μικρότερη από τον τύπο εδάφους που εξετάζουμε. Αν η απορρόφηση των υλικών αυτών συμβεί σε μικρότερο βαθμό, ενδεχομένως τα αποτελέσματα να είναι εντελώς διαφορετικά.

Ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται και η εξέταση βελτιωτικών υλικών που έχουν ως βάση φυτικές πρώτες ύλες που είναι ευρέως διαθέσιμες στην Ελλάδα. Στη Μαλαισία [51] όπως είδαμε γίνεται μία προσπάθεια μέτρησης της απόδοσης βελτιωτικών όπως τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας ή σκόνη ρυζιού. Στην Ελλάδα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν παράγωγα που εξάγονται από την επεξεργασία της ελιάς για την παραγωγή ελαιόλαδου. Τα υλικά αυτά όχι μόνο είναι φθηνότερα από ορισμένα βελτιωτικά υλικά, όπως ο μπετονίτης, αλλά δε μολύνουν και το περιβάλλον, όπως χημικά υλικά που έχουν ως βάση το $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, το MgCl_2 , το CuSO_4 ή το NH_4Cl , των οποίων η χρήση απαγορεύεται στην Ευρώπη. Βέβαια χημικά υλικά που δεν περιέχουν τα παραπάνω καλό θα ήταν να δοκιμαστούν, αφού όπως είδαμε ορισμένες φορές (βελτιωτικό υλικό 5) έχουν θεαματικά αποτελέσματα.

Τέλος, δεδομένου του εξοπλισμού που διαθέτει το εργαστήριο υψηλών τάσεων του Ε.Μ.Π. κρίνεται σκόπιμη και η υποβολή των υλικών αυτών σε κρουστικές τάσεις. Θα δούμε έτσι αν τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα γειώσεων αντικεραυνικής προστασίας, εξετάζοντας αν θα διατηρήσουν την απόδοσή



τους ή αν θα παρουσιάσουν μεταβολή των φυσικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, λόγω των πολύ ισχυρών κεραυνικών ρευμάτων.



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] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Αθήνα 1997.
- [5] Ιωάννης Φ. Γκόνοσ, “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης”, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [6] Φανή Η. Ασημακοπούλου, “Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους”, Ενδιάμεση κρίση, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
- [7] Δάφνη Α. Κουτσορόδη, «Υπολογιστική προσομοίωση συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
- [8] Dwight H. B., “Calculation of Resistances to Ground”, Transactions of AIEE, vol. 55, pp. 1319–1328, 1936.
- [9] Hallén E., “Lösung zweier potentialprobleme der elektrostatik”, Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, vol. 21A, no. 22, Stochholm, 1929.
- [10] Dwight H. B., “Calculation of Resistances to Ground and of Capacitance”, Journal of Mathematics and Physics, vol. 10, no 1, pp.50, 1931.
- [11] 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.
- [12] Howe G. W. O., “Capacity of Radio-Telegraph Antennae”, The Electrician, vol. 73, pp. 829, 859 and 906, 1914.
- [13] 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.



-
- [14] 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.
- [15] 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”, :sections 411.5 και 411.6.
- [16] Hering E., “Schutzerder des TT-Systems”, Elektropraktiker, pp. 370–373, Berlin 59 (2005) 5.
- [17] Hering E., “Measuring earth resistance”, Dresden, Germany.
- [18] IEC 60364-6:2006-02 “Low-voltage electrical installations — Part 6: Verification”.
- [19] IEC 61557-1:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 1: General requirements”.
- [20] IEC 61557-5:2007 “Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 5: Resistance to earth”.
- [21] 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”.
- [22] 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”.
- [23] Hering E., “Problem emit einemder Erdungsmeßverfahren beim TN-System”, Elektropraktiker, pp. 820–822, Berlin 53 (1999) 9.
- [24] <http://faraday.ee.auth.gr/kosmanis/files/grounding.ppt>
- [25] <http://www.iceglp.com/lightning.php>
- [26] Π. Ντοκόπουλος “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384”, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2005.
- [27] Πρότυπο IEC 60364-1: “Electrical installations of buildings - Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions.” International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [28] Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384, “Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, Έκδοση 2^η, 04/03/2004.
- [29] <http://us.fluke.com>



-
- [30] <http://www.nachi.org>
- [31] <http://www.techteam.gr>
- [32] Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384, “Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις”, Έκδοση 2^η, 04/03/2004.
- [33] EN 50164-2
- [34] Ν. Παναγιωτόπουλος: “Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων”, Σεμινάριο.
- [35] Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ 1424, “Απαιτήσεις για θεμελιακή γείωση”, 03/11/2006.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Β. Κ. Παπαδιάς, “Εισαγωγή στην τεχνική των γειώσεων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων”.
- [39] G.F. Tagg, ‘Earth resistances’, George Newnes Limited, London, 1964
- [40] Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980.
- [41] Sunde E. D., “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, Dover Publications, New York, 1968.
- [42] “IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems”, IEEE Std 142–1991, June 1992.
- [43] I.F. Gonos, I. Stathopoulos, “Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Power Engineering Society – 2004 General Meeting, Denver, USA, June 6-10, 2004.
- [44] <http://www.elemko.gr/articles/article4.html>
- [45] <http://users.sch.gr/imarinakis/graound.htm>
- [46] Kutter H. and Lange W., “Grounding improvement by using bentonite”, *Elektrie*, 21, (11), pp.421–424, 1967.



-
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Martin D. Conroy and Paul G. Richard, “Deep earth grounding vs shallow earth grounding”, The Power Quality Conference, 1993
- [51] Kumarasinghe Nuwan, “A low cost lightning protection system and its effectiveness”, 20th International Lightning detection Conference, Tucson, Arizona, USA, 2008.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Chandima Gomes, Chamath Lalitha and Chamalee Priyadarshanee, “Improvement of earthing systems with backfill materials”, 30th International Conference on Lightning Protection-ICLP, Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010.
- [56] Βασιλείος Π. Ανδροβιτσάνεας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.



-
- [57] 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.
- [58] American Association of State Highway and Transportation Officials
- [59] 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.
- [60] 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).



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Δίνεται το ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης, καθώς και η μέση ημερήσια υγρασία εδάφους, για το χρονικό διάστημα των μετρήσεων, που προέκυψε από τις ανά δεκάλεπτο τιμές που δίνει ο μετεωρολογικός σταθμός του ΕΜΠ:

Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης(mm)	Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης(mm)	Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης(mm)
15/2/2011	0,2	18/3/2011	0,0	18/4/2011	0,2
16/2/2011	0,0	19/3/2011	0,2	19/4/2011	0,0
17/2/2011	0,0	20/3/2011	1,0	20/4/2011	0,0
18/2/2011	7,4	21/3/2011	3,4	21/4/2011	0,0
19/2/2011	7,2	22/3/2011	0,0	22/4/2011	0,0
20/2/2011	0,8	23/3/2011	0,0	23/4/2011	0,0
21/2/2011	1,4	24/3/2011	0,0	24/4/2011	0,0
22/2/2011	5,8	25/3/2011	0,0	25/4/2011	0,0
23/2/2011	0,0	26/3/2011	0,0	26/4/2011	12,2
24/2/2011	18,2	27/3/2011	0,0	27/4/2011	19,0
25/2/2011	8,2	28/3/2011	0,2	28/4/2011	0,0
26/2/2011	0,0	29/3/2011	0,2	29/4/2011	0,0
27/2/2011	0,0	30/3/2011	0,0	30/4/2011	0,0
28/2/2011	0,0	31/3/2011	13,8	1/5/2011	0,4
1/3/2011	0,0	1/4/2011	4,8	2/5/2011	0,0
2/3/2011	9,6	2/4/2011	2,0	3/5/2011	1,4
3/3/2011	0,0	3/4/2011	0,0	4/5/2011	0,2
4/3/2011	0,0	4/4/2011	0,0	5/5/2011	5,4
5/3/2011	0,0	5/4/2011	0,2	6/5/2011	0,2
6/3/2011	2,2	6/4/2011	0,0	7/5/2011	0,0
7/3/2011	9,0	7/4/2011	0,0	8/5/2011	0,0
8/3/2011	6,4	8/4/2011	0,0	9/5/2011	0,0
9/3/2011	1,4	9/4/2011	0,0	10/5/2011	0,0
10/3/2011	0,0	10/4/2011	0,0	11/5/2011	0,0
11/3/2011	0,0	11/4/2011	0,0	12/5/2011	0,0
12/3/2011	0,0	12/4/2011	0,0	13/5/2011	0,0
13/3/2011	0,0	13/4/2011	0,0	14/5/2011	0,0
14/3/2011	17,6	14/4/2011	0,0	15/5/2011	0,0
15/3/2011	0,0	15/4/2011	0,0	16/5/2011	0,0
16/3/2011	0,4	16/4/2011	2,8	17/5/2011	0,0
17/3/2011	1,0	17/4/2011	14,8	18/5/2011	0,6



Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχό-πτωσης(mm)	Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχό-πτωσης(mm)	Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχό-πτωσης(mm)
19/5/2011	1,6	19/6/2011	0,0	20/7/2011	0,0
20/5/2011	0,0	20/6/2011	0,0	21/7/2011	0,0
21/5/2011	0,0	21/6/2011	0,0	22/7/2011	0,0
22/5/2011	0,0	22/6/2011	0,0	23/7/2011	0,0
23/5/2011	0,0	23/6/2011	0,0	24/7/2011	0,0
24/5/2011	0,0	24/6/2011	0,0	25/7/2011	0,0
25/5/2011	0,6	25/6/2011	0,0	26/7/2011	0,0
26/5/2011	7,6	26/6/2011	0,0	27/7/2011	0,0
27/5/2011	9,2	27/6/2011	0,0	28/7/2011	0,0
28/5/2011	0,0	28/6/2011	0,0	29/7/2011	0,0
29/5/2011	0,0	29/6/2011	0,0	30/7/2011	0,0
30/5/2011	0,0	30/6/2011	0,0	31/7/2011	0,0
31/5/2011	0,4	1/7/2011	0,0	1/8/2011	0,0
1/6/2011	1,0	2/7/2011	0,0	2/8/2011	1,4
2/6/2011	0,0	3/7/2011	0,0	3/8/2011	0,0
3/6/2011	0,0	4/7/2011	0,0	4/8/2011	0,0
4/6/2011	1,0	5/7/2011	0,0	5/8/2011	0,0
5/6/2011	0,2	6/7/2011	0,0	6/8/2011	0,0
6/6/2011	0,0	7/7/2011	0,0	7/8/2011	0,0
7/6/2011	0,0	8/7/2011	0,0	8/8/2011	0,0
8/6/2011	0,0	9/7/2011	0,0	9/8/2011	0,0
9/6/2011	0,0	10/7/2011	0,0	10/8/2011	0,0
10/6/2011	0,0	11/7/2011	0,0	11/8/2011	0,0
11/6/2011	0,0	12/7/2011	0,0	12/8/2011	0,0
12/6/2011	44,2	13/7/2011	0,0	13/8/2011	0,0
13/6/2011	0,0	14/7/2011	0,0	14/8/2011	0,0
14/6/2011	7,8	15/7/2011	0,0	15/8/2011	0,0
15/6/2011	0,2	16/7/2011	0,0	16/8/2011	0,0
16/6/2011	0,4	17/7/2011	0,0	17/8/2011	0,0
17/6/2011	0,0	18/7/2011	0,0	18/8/2011	0,0
18/6/2011	0,0	19/7/2011	0,0	19/8/2011	0,0



Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης(mm)	Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης(mm)	Ημερομηνία	Ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης(mm)
20/8/2011	0,00	30/8/2011	0,00	9/9/2011	0,00
21/8/2011	0,00	31/8/2011	0,00	10/9/2011	0,00
22/8/2011	0,00	1/9/2011	0,00	11/9/2011	0,00
23/8/2011	0,00	2/9/2011	0,00	12/9/2011	0,00
24/8/2011	0,00	3/9/2011	0,00	13/9/2011	0,00
25/8/2011	0,00	4/9/2011	0,00	14/9/2011	0,00
26/8/2011	0,00	5/9/2011	0,00	15/9/2011	0,00
27/8/2011	0,00	6/9/2011	0,00	16/9/2011	0,00
28/8/2011	0,00	7/9/2011	0,00		
29/8/2011	0,00	8/9/2011	0,00		

Πίνακας Π.1: Ημερήσιο ύψος βροχόπτωσης για το χρονικό διάστημα 15/2-16/9.

Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)	Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)	Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)
16/2/2011	18,88	1/3/2011	21,96	14/3/2011	21,12
17/2/2011	18,71	2/3/2011	22,51	15/3/2011	20,91
18/2/2011	18,59	3/3/2011	24,63	16/3/2011	20,57
19/2/2011	23,48	4/3/2011	23,47	17/3/2011	20,33
20/2/2011	23,28	5/3/2011	22,54	18/3/2011	20,37
21/2/2011	22,74	6/3/2011	22,06	19/3/2011	20,12
22/2/2011	23,54	7/3/2011	22,15	20/3/2011	19,83
23/2/2011	23,76	8/3/2011	26,54	21/3/2011	19,53
24/2/2011	25,16	9/3/2011	24,72	22/3/2011	19,13
25/2/2011	27,30	10/3/2011	23,56	23/3/2011	18,76
26/2/2011	24,17	11/3/2011	22,76	24/3/2011	18,46
27/2/2011	23,04	12/3/2011	22,08	25/3/2011	18,23
28/2/2011	22,40	13/3/2011	21,50	26/3/2011	18,01



Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)	Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)	Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)
28/3/2011	17,77	28/4/2011	26,24	29/5/2011	23,08
29/3/2011	17,46	29/4/2011	23,28	30/5/2011	20,38
30/3/2011	17,25	30/4/2011	21,47	31/5/2011	18,91
31/3/2011	17,11	1/5/2011	20,13	1/6/2011	17,90
1/4/2011	23,54	2/5/2011	19,17	2/6/2011	17,15
2/4/2011	25,96	3/5/2011	18,29	3/6/2011	16,59
3/4/2011	23,31	4/5/2011	17,58	4/6/2011	16,08
4/4/2011	22,14	5/5/2011	16,93	5/6/2011	15,63
5/4/2011	21,14	6/5/2011	16,57	6/6/2011	15,26
6/4/2011	20,29	7/5/2011	16,55	7/6/2011	14,93
7/4/2011	19,63	8/5/2011	16,39	8/6/2011	14,61
8/4/2011	18,82	9/5/2011	16,17	9/6/2011	14,28
9/4/2011	18,11	10/5/2011	15,80	10/6/2011	14,03
10/4/2011	17,68	11/5/2011	15,36	11/6/2011	13,88
11/4/2011	17,11	12/5/2011	14,86	12/6/2011	13,69
12/4/2011	16,53	13/5/2011	14,64	13/6/2011	23,17
13/4/2011	16,01	14/5/2011	14,40	14/6/2011	25,20
14/4/2011	15,72	15/5/2011	14,11	15/6/2011	24,40
15/4/2011	15,40	16/5/2011	13,83	16/6/2011	24,33
16/4/2011	15,01	17/5/2011	13,58	17/6/2011	22,90
17/4/2011	14,80	18/5/2011	13,37	18/6/2011	21,72
18/4/2011	17,56	19/5/2011	13,09	19/6/2011	20,77
19/4/2011	19,89	20/5/2011	12,84	20/6/2011	19,97
20/4/2011	18,75	21/5/2011	12,75	21/6/2011	19,25
21/4/2011	18,06	22/5/2011	12,75	22/6/2011	18,67
22/4/2011	17,51	23/5/2011	12,69	23/6/2011	18,14
23/4/2011	16,91	24/5/2011	12,62	24/6/2011	17,72
24/4/2011	16,31	25/5/2011	12,53	25/6/2011	17,39
25/4/2011	15,76	26/5/2011	12,38	26/6/2011	17,11
26/4/2011	15,26	27/5/2011	16,64	27/6/2011	16,84
27/4/2011	15,53	28/5/2011	24,23	28/6/2011	16,50



Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)	Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)	Ημερομηνία	Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους (%)
29/6/2011	16,18	27/7/2011	12,51	24/8/2011	10,40
30/6/2011	15,85	28/7/2011	12,42	25/8/2011	10,36
1/7/2011	15,78	29/7/2011	12,33	26/8/2011	10,30
2/7/2011	15,81	30/7/2011	12,24	27/8/2011	10,23
3/7/2011	15,74	31/7/2011	12,16	28/8/2011	10,15
4/7/2011	15,62	1/8/2011	12,07	29/8/2011	10,07
5/7/2011	15,40	2/8/2011	11,99	30/8/2011	10,01
6/7/2011	15,20	3/8/2011	11,79	31/8/2011	9,95
7/7/2011	15,09	4/8/2011	11,59	1/9/2011	9,93
8/7/2011	14,93	5/8/2011	11,58	2/9/2011	9,92
9/7/2011	14,78	6/8/2011	11,55	3/9/2011	9,88
10/7/2011	14,68	7/8/2011	11,51	4/9/2011	9,81
11/7/2011	14,55	8/8/2011	11,43	5/9/2011	9,74
12/7/2011	14,40	9/8/2011	11,38	6/9/2011	9,67
13/7/2011	14,21	10/8/2011	11,36	7/9/2011	9,68
14/7/2011	14,04	11/8/2011	11,32	8/9/2011	9,62
15/7/2011	13,92	12/8/2011	11,20	9/9/2011	9,53
16/7/2011	13,79	13/8/2011	11,05	10/9/2011	9,53
17/7/2011	13,67	14/8/2011	10,95	11/9/2011	9,52
18/7/2011	13,59	15/8/2011	10,90	12/9/2011	9,48
19/7/2011	13,48	16/8/2011	10,88	13/9/2011	9,46
20/7/2011	13,36	17/8/2011	10,85	14/9/2011	9,39
21/7/2011	13,26	18/8/2011	10,79	15/9/2011	9,34
22/7/2011	13,14	19/8/2011	10,75	16/9/2011	9,30
23/7/2011	12,99	20/8/2011	10,69		
24/7/2011	12,86	21/8/2011	10,59		
25/7/2011	12,73	22/8/2011	10,53		
26/7/2011	12,62	23/8/2011	10,48		

Πίνακας Π.2: Μέση ημερήσια υγρασία εδάφους για το χρονικό διάστημα 16/2-16/9.

