



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Χρονική μεταβολή ηλεκτρικών παραμέτρων εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Διάφας
Γεώργιος Ι. Δογραματζάκης

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Αθήνα, Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

199

Χρονική μεταβολή ηλεκτρικών παραμέτρων εδάφους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Διάφας
Γεώργιος Ι. Δογραματζάκης

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Μαρτίου 2018.

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

.....

Γεώργιος Π. Διάφας

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

.....

Γεώργιος Ι. Δογματζάκης

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

Copyright © Γεώργιος Π. Διάφας, Γεώργιος Ι. Δογματζάκης, 2018

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 τους συγγραφείς.

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

Στις οικογένειές μας

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς διαφόρων βελτιωτικών υλικών γείωσης, που χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα γείωσης, για τη διατήρηση της τιμής της αντίστασης γείωσης σε χαμηλά επίπεδα, καθώς και η μελέτη της χρονικής μεταβολής διαφόρων ηλεκτρικών παραμέτρων του εδάφους. Η απόδοσή τους εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και τον χρόνο, ενώ η χαμηλή τιμή της αντίστασης γείωσης που επιτυγχάνουν έχει ως αποτέλεσμα την ασφάλεια του προσωπικού και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού της εγκατάστασης. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του φυσικού εδάφους και της αντίστασης γείωσης πέντε κατακόρυφων ηλεκτροδίων τύπου ράβδου, από τα οποία, το ένα ήταν εγκατεστημένο απευθείας στο έδαφος (ηλεκτρόδιο αναφοράς) και τα υπόλοιπα τέσσερα εντός βελτιωτικών υλικών. Επιπρόσθετα, με χρήση του συνόλου των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, οι οποίες υλοποιήθηκαν, τόσο κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και κατά την εκπόνηση προηγούμενων ερευνητικών εργασιών, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του εδάφους της πειραματικής διάταξης με σκοπό την ανάπτυξη ισοδύναμων πολυστρωματικών μοντέλων (μονοστρωματικό, διστρωματικό και τριστρωματικό μοντέλο), μέσω του ειδικού λογισμικού πακέτου CDEGS, και στη συνέχεια έγινε αξιολόγηση αυτών και σύγκριση μεταξύ τους. Τέλος, υπολογίστηκαν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια (όρια ασφαλείας) των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια εκδήλωσης σφάλματος προς τη γη, για διστρωματικό και τριστρωματικό μοντέλο εδάφους και μελετήθηκε η μεταβολή τους συναρτήσει των εποχικών μεταβολών και της βροχόπτωσης.

Λέξεις κλειδιά

Σύστημα γείωσης, αντίσταση γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, βελτιωτικά υλικά γείωσης, βηματική τάση, τάση επαφής.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to study the behavior of ground enhancing compounds, which are widely used in grounding systems, in order to maintain the grounding resistance value in low levels as well as, to study the variation of various electrical parameters of the soil in relation to time. Their performance depends on the environmental conditions and time, and the low grounding resistance value they achieve, results in the safety of the facility personnel and the power equipment involved. In this diploma thesis, measurements of soil resistivity and grounding resistance of five vertical ground rods were conducted. One of these electrodes was straight to the ground (reference electrode), whereas the other four were surrounded by various enhancing compounds. Furthermore, using all the measurements of the soil resistivity, that have been carried out during the implementation of both this diploma thesis and previous research studies, simulation of the soil was performed for the purpose of development of equivalent multilayer, horizontal, models (uniform, two-layer, three-layer model), through the specialized CDEGS software package, and an evaluation and comparison between these three soil models was subsequently carried out. Finally, the maximum permissible values (safety limits) of the developing step and touch voltages, in case of fault current occurrence, were calculated for the two-layer and the three-layer models and their variation was studied in relation to seasonal changes and rainfall.

Key words

Grounding system, ground resistance, resistivity, ground enhancing compounds, step voltage, touch voltage.

Πρόλογος

Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να μεταφέρει και να διαχέει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη, εμφανίζοντας τη μικρότερη δυνατή αντίσταση στη διέλευση του ρεύματος, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ασφάλεια για τους χρήστες και τον εξοπλισμό της ηλεκτρικής εγκατάστασης κατά την εκδήλωση σφάλματος, ελαττώνεται ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας και παρέχεται ένα δυναμικό αναφοράς για τα ηλεκτρικά σήματα στον τομέα των επικοινωνιών. Μία από τις μεθόδους που εφαρμόζονται για την επίτευξη χαμηλής τιμής αντίστασης γείωσης είναι η χρήση βελτιωτικών υλικών γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντίστασης γείωσης σε ηλεκτρόδια γείωσης που είχαν τοποθετηθεί στον χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου στο παρελθόν, με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς διαφόρων βελτιωτικών υλικών γείωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, με τη χρήση αυτών των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση του εδάφους με το λογισμικό πακέτο SES CDEGS, ενώ με το ίδιο λογισμικό υπολογίστηκαν και τα όρια ασφαλείας της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής για τα μοντέλα που προέκυψαν.

Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, των οποίων το περιεχόμενο, εν συντομία, έχει ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** πραγματοποιείται μία εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί και μελετώνται εκτενώς τα είδη και οι διατάξεις των ηλεκτροδίων γείωσης. Επίσης, αναλύεται η έννοια της ειδικής αντίστασης εδάφους και παρουσιάζονται οι τρόποι μέτρησής της.

Στο **Κεφάλαιο 2** εισάγεται η έννοια της αντίστασης γείωσης, δίνεται ο ορισμός του μεγέθους της, παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον θεωρητικό υπολογισμό της και αναλύονται οι τρεις βασικές μέθοδοι πειραματικής μέτρησής της. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα βελτιωτικά υλικά γείωσης, η οποία εστιάζει κυρίως σε μελέτες και έρευνες της τελευταίας δεκαετίας.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται διεξοδικά ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται βήμα προς βήμα τα στάδια υλοποίησής της, ενώ παρατίθεται και ένας αναλυτικός οδηγός για το λογισμικό SES CDEGS και τους επιλύτες που χρησιμοποιήθηκαν (RESAP και MALZ) για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων στο πλαίσιο της εργασίας.

Το **Κεφάλαιο 4** περιλαμβάνει τα πειραματικά αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, περιγράφεται η τοποθεσία διεξαγωγής του πειράματος, η διάταξη των ηλεκτροδίων, τα όργανα μέτρησης, οι συνθήκες πραγματοποίησης των μετρήσεων, καθώς και οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν, τόσο στις υπαίθριες

μετρήσεις, όσο και στις εργαστηριακές. Στη συνέχεια, αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών μέσω των προσομοιώσεων. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σε μορφή διαγραμμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα μοντέλα εδάφους (μονοστρωματικό, διστρωματικό, τριστρωματικό) και για τα όρια ασφαλείας (Βηματική Τάση, Τάση Επαφής) και πραγματοποιείται ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα αποτελέσματα που εξάγονται τόσο από τις πειραματικές μετρήσεις, όσο και από τη διαδικασία των προσομοιώσεων. Επίσης, διατυπώνονται ορισμένα γενικότερα συμπεράσματα για την επίτευξη των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας και, καταλήγοντας, καταγράφονται κάποιες προτάσεις για συνέχιση και επέκτασή της στο μέλλον.

Στο σημείο αυτό, νιώθουμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε θερμά όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, αλλά και την αμέριστη συμπαράστασή του.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., για τις χρήσιμες συμβουλές του και την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Βασίλειο Π. Ανδροβιτσάνεα, Διδάκτορα Μηχανικό της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για τη συνεχή καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράσταση που μας παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας, καθώς και για το άριστο κλίμα συνεργασίας που διατήρησε.

Τον κ. Αριστείδη Γιάννακα, τεχνικό του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς και την κα. Βασιλική Κονταργύρη για την πολύτιμη βοήθειά της αναφορικά με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για τη βοήθεια, τη στήριξη, τις πολύτιμες συμβουλές τους και τη συμβολή τους στη δημιουργία ενός ευχάριστου και παραγωγικού εργασιακού περιβάλλοντος.

Τέλος, θα ήταν σημαντική παράλειψη, εκ μέρους μας, αν δεν ευχαριστούσαμε τις οικογένειές μας και τους φίλους μας για τη συμπαράστασή τους στην εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ & ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	1
1.1 <i>Συστήματα Γείωσης.....</i>	1
1.1.1 Ο ρόλος της γείωσης.....	1
1.1.2 Ορισμοί.....	2
1.1.3 Είδη γείωσης.....	6
1.1.4 Μέθοδοι γείωσης.....	9
1.1.5 Συστήματα σύνδεσης γειώσεων	11
1.1.6 Ηλεκτρόδια γείωσης.....	14
1.1.7 Διατάξεις ηλεκτροδίων γείωσης	21
1.1.8 Όρια ασφαλείας.....	26
1.2 <i>Ειδική Αντίσταση Εδάφους.....</i>	37
1.2.1 Ορισμός	37
1.2.2 Καθορισμός της δομής του εδάφους.....	43
1.2.3 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ & ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΗΣ	49
2.1 <i>Αντίσταση Γείωσης.....</i>	49
2.1.1 Ορισμός	49
2.1.2 Αντίσταση γείωσης και σύνθετη αντίσταση γείωσης	50
2.1.3 Θεωρητικός υπολογισμός αντίστασης γείωσης	52
2.1.4 Πειραματικός προσδιορισμός αντίστασης γείωσης	53
2.2 <i>Βελτιωτικά Υλικά Γείωσης.....</i>	57
2.2.1 Εισαγωγή	57
2.2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΟΔΗΓΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	68
3.1 <i>Σκοπός</i>	68
3.2 <i>Οδηγός Προσομοιώσεων</i>	69
3.2.1 Προσομοιώσεις μονοστρωματικών, διστρωματικών και τριστρωματικών μοντέλων εδάφους.....	70

3.2.2	Προσομοιώσεις προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης	75
3.2.3	Προσομοιώσεις βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....		86
4.1	<i>Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης.....</i>	86
4.1.1	Υπαίθριες διατάξεις μετρήσεων	86
4.1.2	Εργαστηριακές διατάξεις μετρήσεων	93
4.2	<i>Μετρήσεις Ειδικής Αντίστασης Εδάφους και Αντίστασης Γείωσης</i>	96
4.2.1	Αποτελέσματα ειδικής αντίστασης εδάφους	97
4.2.2	Αποτελέσματα αντίστασης γείωσης βελτιωτικών υλικών.....	98
4.2.3	Αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών	100
4.3	<i>Ανάλυση Μεθόδου Θεωρητικού Προσδιορισμού της Ειδικής Αντίστασης των Βελτιωτικών Υλικών Γείωσης</i>	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ		105
5.1	<i>Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Μοντέλων Εδάφους</i>	105
5.2	<i>Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής.....</i>	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ.....		117
6.1	<i>Συμπεράσματα Πειραματικών Μετρήσεων</i>	117
6.1.1	Μεταβολή της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους	117
6.1.2	Μεταβολή της τιμής της αντίστασης γείωσης.....	119
6.2	<i>Συμπεράσματα Προσομοιώσεων.....</i>	123
6.2.1	Μοντέλα εδάφους	123
6.2.2	Συμπεράσματα για τα όρια ασφαλείας.....	128
6.3	<i>Η Επόμενη Μέρα</i>	131

Κεφάλαιο 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ & ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί και μελετώνται εκτενώς τα είδη και οι διατάξεις των ηλεκτροδίων γείωσης. Επίσης, αναλύεται η έννοια της ειδικής αντίστασης εδάφους και παρουσιάζονται οι τρόποι μέτρησής της.

1.1 Συστήματα Γείωσης

1.1.1 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 [1]. Η λειτουργία του συστήματος γείωσης κρίνεται απαραίτητη και σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η απόζευξη του ηλεκτρικού συστήματος, ή η αποφόρτιση του στατικού ηλεκτρισμού που συσσωρεύεται συχνά στα μεταλλικά μη ενεργά μέρη της εγκατάστασης, όπως τα περιβλήματα των ηλεκτρικών συσκευών [2].

Για να είναι ασφαλές ένα σύστημα γείωσης, πρέπει να εξασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και τη συνέχεια της λειτουργίας του σε περίπτωση εμφάνισης οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας ασφαλή διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη, προστατεύοντας μ' αυτόν τον τρόπο τα άτομα που, είτε δουλεύουν, είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο, από ηλεκτροπληξία. 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 [3, 4].



Επομένως, ο ρόλος ενός συστήματος γείωσης μπορεί να συνοψισθεί στα ακόλουθα [2, 5]:

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.
4. Καθορισμός επιπέδου αναφοράς της τάσης για το σύστημα που προστατεύει.

Όλα τα εκτεθειμένα αγώγιμα 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 [3].

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 μιας 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 [6].

1.1.2 Ορισμοί

Γείωση είναι η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιου μεγέθους, που να θεωρείται γη. Σκοπός της γείωσης είναι ο καθορισμός και η διατήρηση του δυναμικού της γης ή του αγώγιμου σώματος στους αγωγούς που συνδέονται με αυτό [3].

Διάταξη/Σύστημα γείωσης (Grounding System) ορίζεται το σύστημα που περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεδεμένες διατάξεις γείωσης σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος γείωσης είναι το ηλεκτρόδιο γείωσης, ο αγωγός γείωσης, και ο ζυγός γείωσης ή κύριος ακροδέκτης [3].

Άπειρη Γη είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε άπειρη απόσταση από τον γειωτή. Λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών, θεωρείται, δε,

ότι το δυναμικό της άπειρης γης είναι μηδέν (0). Για πρακτικούς λόγους, η «άπειρη απόσταση» θεωρείται 5–10 φορές η μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή [7].

Αντίσταση Γείωσης ορίζεται ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την ένταση του ρεύματος, δηλαδή $R=U/I$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι, για τον λόγο αυτόν, μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου, εκφράζει δε την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου προς το έδαφος που το περιβάλλει. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ως η συνισταμένη των εν σειρά, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως $R_δ$. Η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος [7].

Ρεύμα Γης είναι το ρεύμα που ρέει από ή προς τη γη, ή το ισοδύναμο γης [3].

Ηλεκτρόδιο Γείωσης/Γειωτής είναι το ηλεκτρόδιο που τοποθετείται μέσα στη γη μέσω του οποίου γίνεται συγκέντρωση και διάχυση των ρευμάτων σφάλματος σε αυτήν [3].

Αγωγός Γείωσης ονομάζεται ο αγωγός που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με έναν ακροδέκτη ή ζυγό γείωσης [3].

Κύριος Ακροδέκτης/Ζυγός Γείωσης είναι ο ακροδέκτης ή ζυγός πάνω στον οποίον συνδέονται οι αγωγοί γείωσης, προστασίας και, εφόσον υπάρχουν, οι αγωγοί της γείωσης λειτουργίας [3].

Ανύψωση Δυναμικού Γης (Ground Potential Rise - GPR) / Μέγιστο Δυναμικό Γείωσης ορίζεται ως το μέγιστο δυναμικό που μπορεί να λάβει ένα πλέγμα γείωσης υποσταθμού σε σχέση μ' ένα απομακρυσμένο σημείο στην επιφάνεια του εδάφους, που έχει υποθετικά το δυναμικό της άπειρης γης. Αυτή η τάση, GPR, ισούται με το γινόμενο της σύνθετης αντίστασης γείωσης Z με το μέγιστο ρεύμα I που διαρρέει το πλέγμα [3].

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

Η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γείωσης Z , όπως αυτή φαίνεται από τον αγωγό που διοχετεύει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη, συνίσταται από τις επαγωγικές αντιδράσεις των αγωγών που αποτελούν τη γείωση και την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περικλείει το σύστημα γείωσης. Για μικρά δίκτυα γείωσης σε χαμηλές συχνότητες, η αντίσταση του όγκου του εδάφους είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των αγωγών του δικτύου και, γι' αυτό σε τέτοιες περιπτώσεις, η σύνθετη

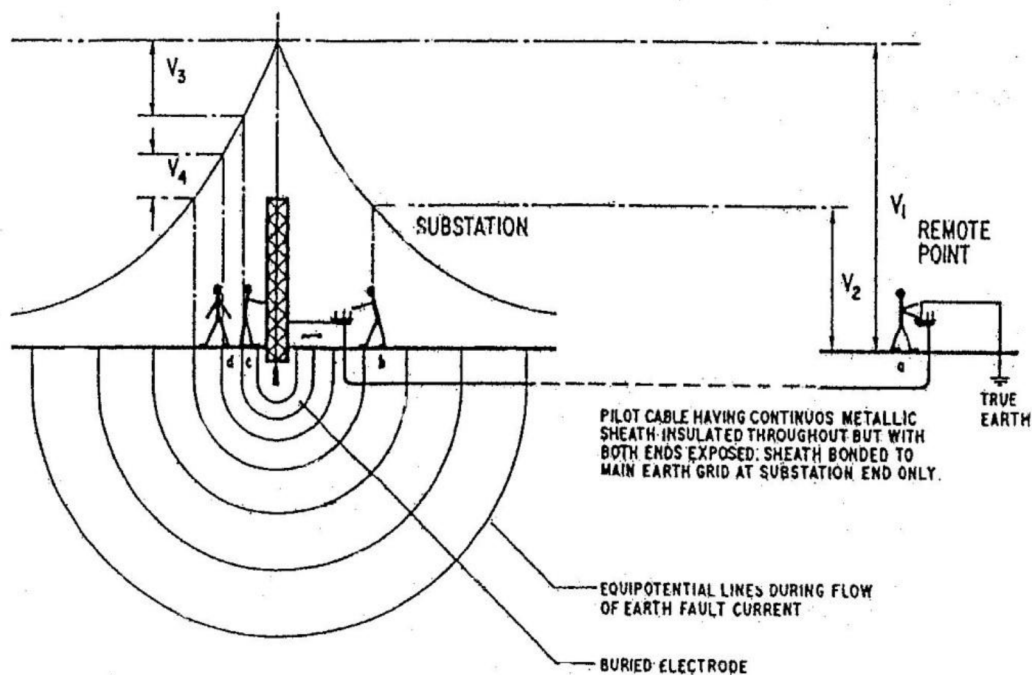
αντίσταση των αγωγών μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό της συνολικής σύνθετης αντίστασης γείωσης Z.

Αγωγός Προστασίας (PE) είναι ο αγωγός που προορίζεται για την ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγώγιμων μερών μιας εγκατάστασης όπως: τον κύριο ακροδέκτη γείωσης, το ηλεκτρόδιο γείωσης, ξένα αγώγιμα στοιχεία, το γειωμένο σημείο της πηγής τροφοδοσίας ή ένα γειωμένο τεχνητό ουδέτερο κόμβο. Είναι απαραίτητος για την εφαρμογή μέτρων προστασίας σε μία εγκατάσταση [3].

Τάση Πλέγματος είναι η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης [3].

Τάση Επαφής (Touch Voltage) ορίζεται ως η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου στέκεται ένα άτομο με ένα χέρι σε επαφή με γειωμένη μεταλλική δομή και στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR). Στο Σχήμα 1.1, η τάση επαφής φαίνεται με τη χρήση του ατόμου b. Η διαφορά δυναμικού V_2 , που "βλέπει" το σώμα, είναι το αποτέλεσμα επαφής του ενός χεριού με τα δύο πόδια. Υψηλότερο δυναμικό προκύπτει, όταν υπάρχει μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού δυναμικού και το άτομο στέκεται σε απόσταση 1 μέτρου, ακουμπώντας σε αυτήν τη δομή. Ο κίνδυνος από αυτόν τον τύπο 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 [3].

Βηματική Τάση (Step Voltage) είναι η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος 1 μέτρου, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Στο Σχήμα 1.1, το άτομο a χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της βηματικής τάσης. Η διαφορά δυναμικού V_1 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 [3].



Σχήμα 1.1: Τάση επαφής, βηματική τάση, μεταφερόμενη τάση [2].

Τάση Επαφής Μετάλλου προς Μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage) είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που περικλείονται στην τοποθεσία του υποσταθμού που μπορεί να γεφυρωθεί με άμεση επαφή χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι. Η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο, ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο πλέγμα γείωσης, θεωρείται ότι είναι αμελητέα σε συμβατικούς υποσταθμούς. Ωστόσο, η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο μεταλλικό πλέγμα και σε μεταλλικά αντικείμενα που υπάρχουν στην τοποθεσία του υποσταθμού, όπως ένας μονωμένος φράκτης, αλλά μη συνδεδεμένα στο πλέγμα γείωσης, μπορεί να είναι ουσιαστική. Σ' 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 [3].

Μεταφερόμενη Τάση (Transferred Voltage) είναι μία ειδική περίπτωση της τάσης επαφής, όπου μια τάση μεταφέρεται προς ή από τον υποσταθμό ή σ' 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 σπλισμού μιας κεραίας. Εφόσον ο σπλισμός είναι συνδεδεμένος στο κεντρικό πλέγμα γείωσης του υποσταθμού, η τάση V_3 θα είναι ίση με την ανύψωση του δυναμικού γης του υποσταθμού. Στο σχήμα η V_4 παρουσιάζεται μικρότερη από τη V_3 . Αυτό συμβαίνει

διότι το άτομο d βρίσκεται σε μερική απόσταση από το κύριο ηλεκτρόδιο γείωσης και συνεπώς υπόκειται στην κλίση δυναμικού γης (ground potential gradient). Τα μεταφερόμενα δυναμικά θεωρούνται ότι είναι τα πιο επικίνδυνα, διότι η τάση που εφαρμόζεται στο άτομο δύναται να γίνει ίση με την πλήρη ανύψωση δυναμικού και όχι με κλάσμα της, όπως στην περίπτωση της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής [3].

Υλικό Επιφανείας (Surface Material) είναι ένα υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και αποτελείται από, αλλά δεν περιορίζεται σε, 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 [3].

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

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

Όπου

ρ : η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

T : ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής σε μs

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.

1.1.3 Είδη γείωσης

Ανάλογα με το λειτουργικό τους σκοπό σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση, οι γειώσεις διακρίνονται σε τρία βασικά είδη:

- Γείωση Λειτουργίας
- Γείωση Προστασίας
- Γείωση Ασφαλείας

Στην πράξη τα τρία αυτά βασικά είδη γείωσης δύναται να συνυπάρχουν σε ένα σύστημα γείωσης.



Γείωση Λειτουργίας

Γείωση λειτουργίας είναι η γείωση ενός τμήματος εγκατάστασης που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας, όπως είναι ο ουδέτερος κόμβος γεννητριών, μετασχηματιστών ή άλλων στοιχείων του δικτύου συνδεδεμένων σε αστέρα. Η γείωση λειτουργίας, εκτός της αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης, μπορεί να περιλαμβάνει και πρόσθετες ωμικές, επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις (π.χ. αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά τα σφάλματα με επαφή γης) [9].

Διακρίνουμε τις γειώσεις λειτουργίας σε δυο κατηγορίες:

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

Όταν στη γραμμή γείωσης παρεμβάλλονται διάκενα σπινθηριστών ή ασφάλειες διασπάσεως, τότε η γείωση χαρακτηρίζεται ως ανοιχτή. Οι ανοιχτές γειώσεις θεωρούνται γειώσεις λειτουργίας. Σε περίπτωση που η διάταξη γείωσης προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα ως γείωση λειτουργίας και προστασίας, πρέπει να δοθεί η απαιτούμενη προσοχή στις απαιτήσεις σχεδιασμού που αφορούν τις γειώσεις προστασίας. Σε αυτήν την περίπτωση, η ίδια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ).

Γείωση Προστασίας

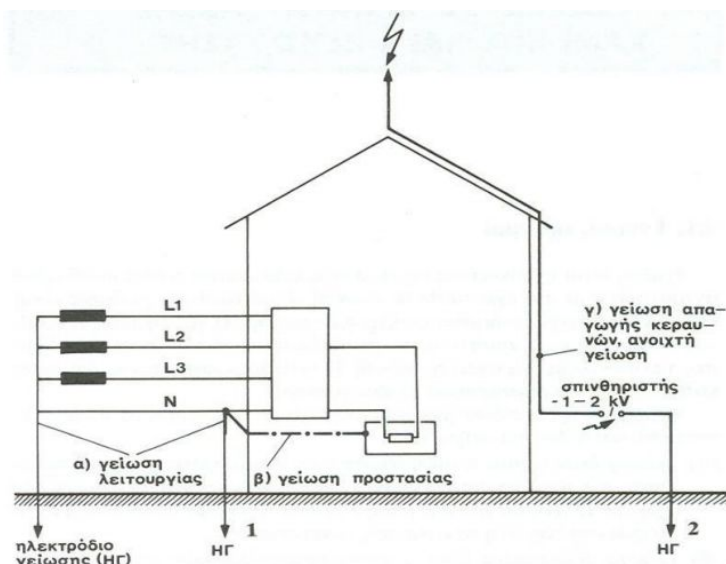
Καλείται η γείωση κάθε αγώγιμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγώγιμα μέρη μιας εγκατάστασης ή κατασκευής τα οποία δεν συμμετέχουν στη λειτουργία της (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, 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 [9].

Η γείωση αυτή είναι υποχρεωτική για κάθε εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς ο σκοπός της είναι η προστασία των ανθρώπων από την ανάπτυξη επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών, τα οποία σε κανονική λειτουργία δεν είναι υπό τάση (Σχήμα 1.2). Τα υλικά κατασκευής της πρέπει 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. Η διάταξη γείωσης προστασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν γείωση αντικεραυνικής προστασίας, εάν βέβαια πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 62305-3 [10].

Γείωση Ασφαλείας ή Συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ)

Ως γείωση ασφαλείας ορίζουμε κάθε γείωση εγκατάστασης η οποία διοχετεύει τα ρεύματα σφάλματος, που δημιουργούνται από εξωτερικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα, όπως οι κεραυνοί, προς τη γη και εξασφαλίζει την ασφάλεια των παρευρισκομένων στον προστατευόμενο χώρο. Τέτοιες γειώσεις, ενδεικτικά, είναι οι γειώσεις των αλεξικεραύνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοιχτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη [9].



Σχήμα 1.2: Γείωση ασφαλείας ή Συστημάτων Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) [5].

Συνήθως, αυτά τα τρία είδη γειώσεων συνυπάρχουν στις εγκαταστάσεις. Δύνανται τα δίκτυα γειώσεων που χρησιμοποιούνται να είναι ταυτόσημα, δηλαδή κοινά και για τις τρεις γειώσεις. Προτείνεται, να γίνεται προσπάθεια οι τρεις γειώσεις να καταλήγουν στο ίδιο ηλεκτρόδιο ή στην ίδια εγκατάσταση γείωσης σε ένα κτίριο (όχι υποσταθμό).

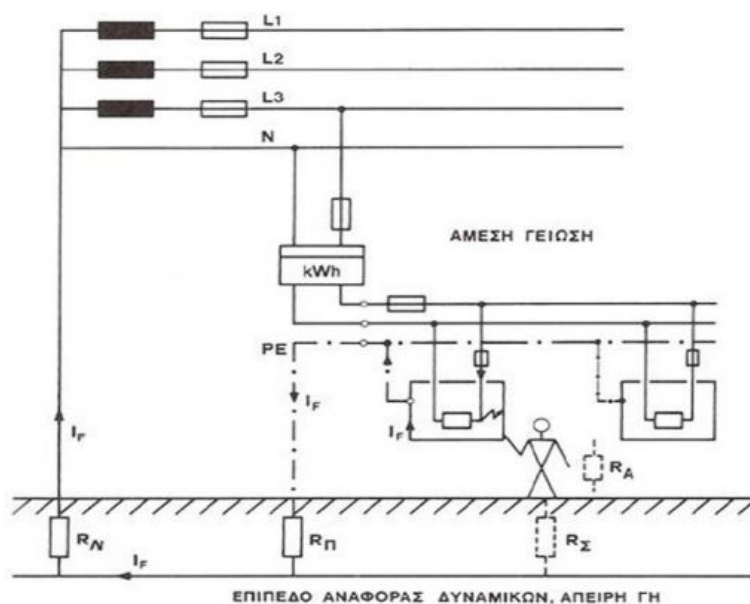
Όσον αφορά τους γειωτές και τους αγωγούς γείωσης, όπως ορίζει το Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 [11], δεν προδιαγράφονται υλικά και τρόποι εγκατάστασης, παρά μόνο απαιτήσεις και σημεία τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Ορισμένα από αυτά τα βασικά θέματα είναι τα εξής:

- Το βάθος έδρασης του γειωτή πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0,5m ώστε να έχουμε υγρό αγωγίμο έδαφος και να αποφεύγεται το πάγωμα του εδάφους που οδηγεί σε μεγάλη αντίσταση.
- Απαιτείται μηχανική στιβαρότητα.
- Ο συνδυασμός του εδάφους, του μετάλλου και των παρακείμενων θαμμένων αγωγών παίζει ρόλο, καθώς ηλεκτροχημικές δράσεις και διάβρωση οδηγούν σε καταστροφή του γειωτή.
- Να λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία και η υγρασία επειδή μειώνουν την αντίσταση γείωσης.
- Η αντίσταση γείωσης για τους παραπάνω λόγους μπορεί να αλλάξει με τον χρόνο.
- Επιτρέπεται η χρήση των σωλήνων ύδρευσης, όχι όμως σωλήνων άλλων μέσων (καυσίμων κ.λ.π.) ως γειωτών.
- Η ειδική αντίσταση του μετάλλου του γειωτή δεν παίζει ρόλο στην αντίσταση γείωσης, δηλαδή η αντίσταση αυτή δεν εξαρτάται από το υλικό του γειωτή [12].

1.1.4 Μέθοδοι γείωσης

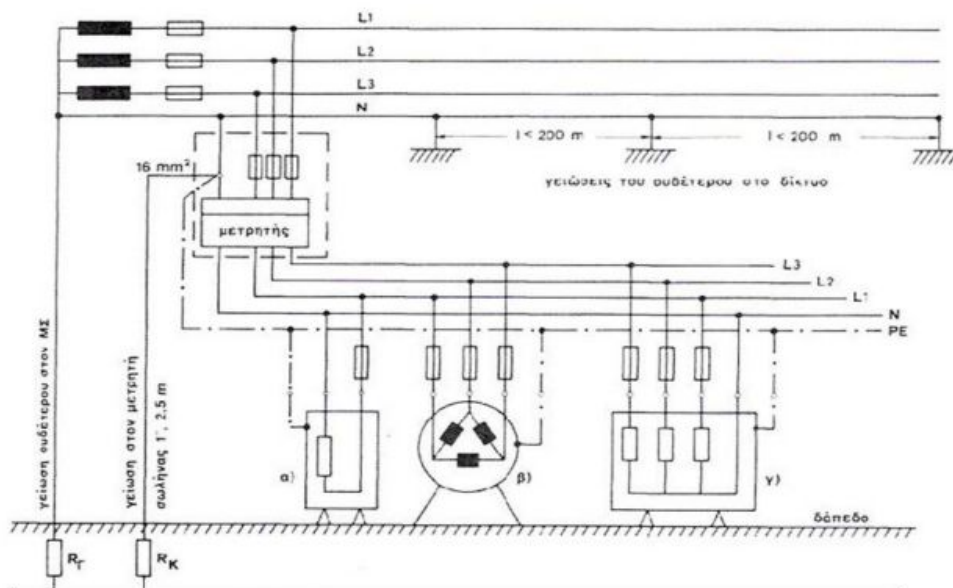
Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι εξής:

- Η **άμεση γείωση**, δηλαδή η απευθείας αγωγίμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο κ.λ.π.), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



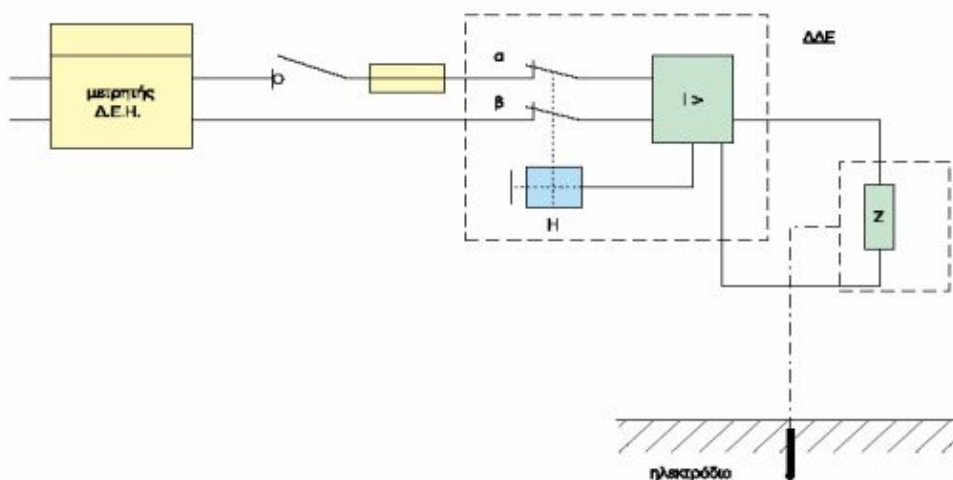
Σχήμα 1.3: Σύστημα προστασίας με άμεση γείωση [5].

- Η **ουδετέρωση**, που είναι η σύνδεση των μεταλλικών μερών των συσκευών με αγωγό προστασίας, ο οποίος συνδέεται με τον ουδέτερο αγωγό στον πίνακα παροχής. Ο ουδέτερος συνδέεται και με το ηλεκτρόδιο γείωσης στο σημείο παροχέτευσης πριν από τον μετρητή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Η μέθοδος της ουδετέρωσης, όπως και η άμεση γείωση, είναι εξίσου αποτελεσματικές. Η μέθοδος ουδετέρωσης, όμως, απαιτεί μικρότερη αντίσταση γείωσης και χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, ειδικότερα σε αστικές περιοχές.



Σχήμα 1.4: Σύστημα προστασίας με ουδετερωση [5].

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



Σχήμα 1.5: Σύστημα προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης, σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης [5].

Η απόζευξη της εγκατάστασης, αν η τάση κάποιου τμήματος αυτής σε σχέση με τη γη εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη των 50 Volt, θα πρέπει να επιτυγχάνεται το πολύ σε 5 δευτερόλεπτα και στις τρεις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

1.1.5 Συστήματα σύνδεσης γειώσεων

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

Το πρότυπο *IEC 60364-1* [13] 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 δε συνδέεται με τη γη (απομόνωση).

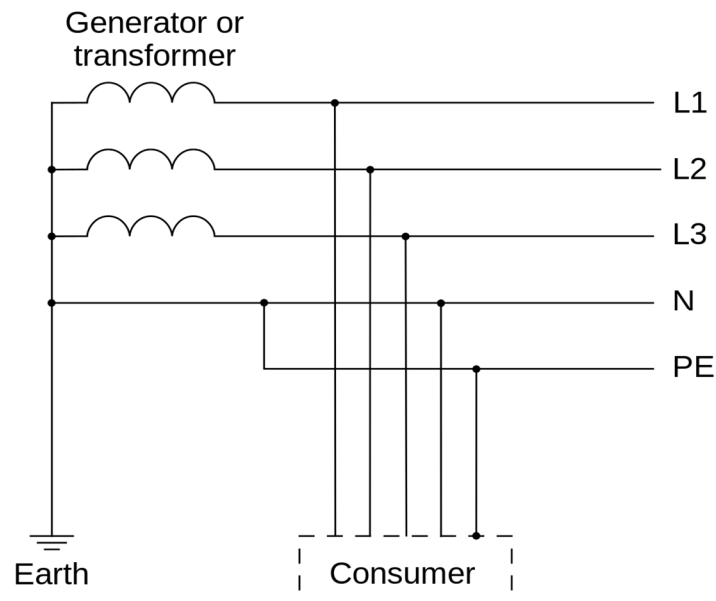
Το δεύτερο γράμμα δείχνει τη σύνδεση μεταξύ της γης και της ηλεκτρικής συσκευής - καταναλωτή:

T: άμεση σύνδεση ενός σημείου με τη γη

N: άμεση σύνδεση στον ουδέτερο, ο οποίος συνδέεται με τη γη.

Δίκτυα TN

Σε ένα σύστημα γείωσης του τύπου TN, ένα σημείο της γεννήτριας ή του μετασχηματιστή συνδέεται με τη γη, το οποίο συνήθως είναι το σημείο σύνδεσης των φάσεων σε 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) [6].

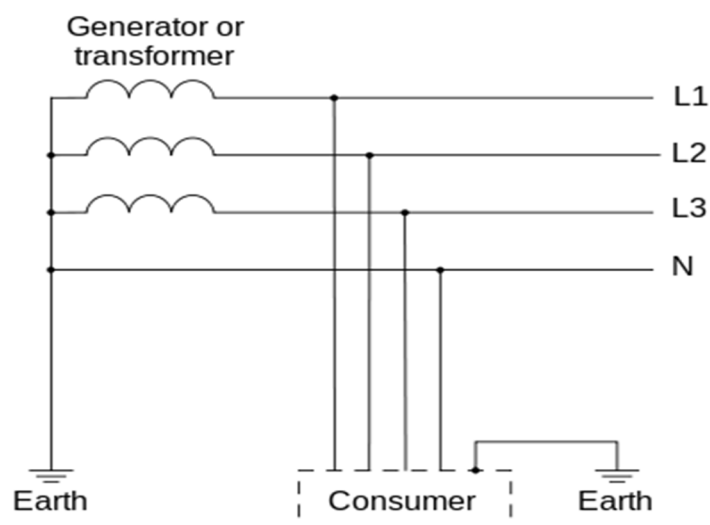


Σχήμα 1.6: Δίκτυο TN [6].

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 [6].



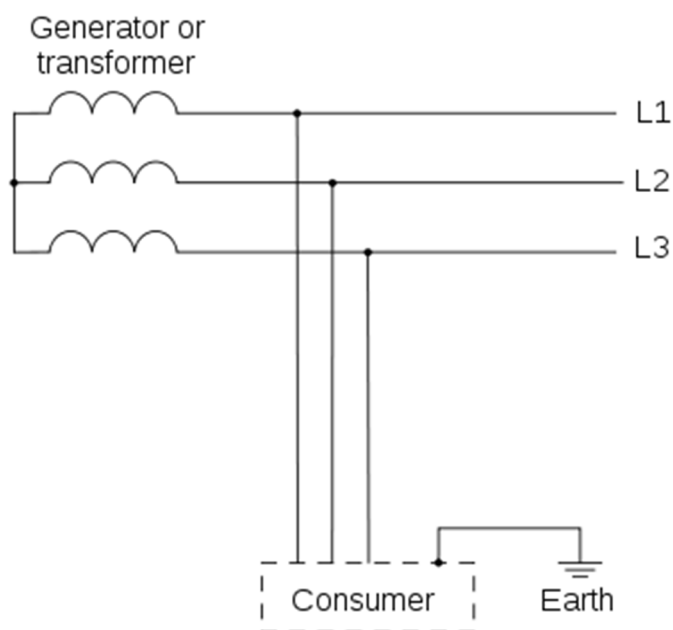
Σχήμα 1.7: Δίκτυο TT [6].

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

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 [6].

Δίκτυα IT

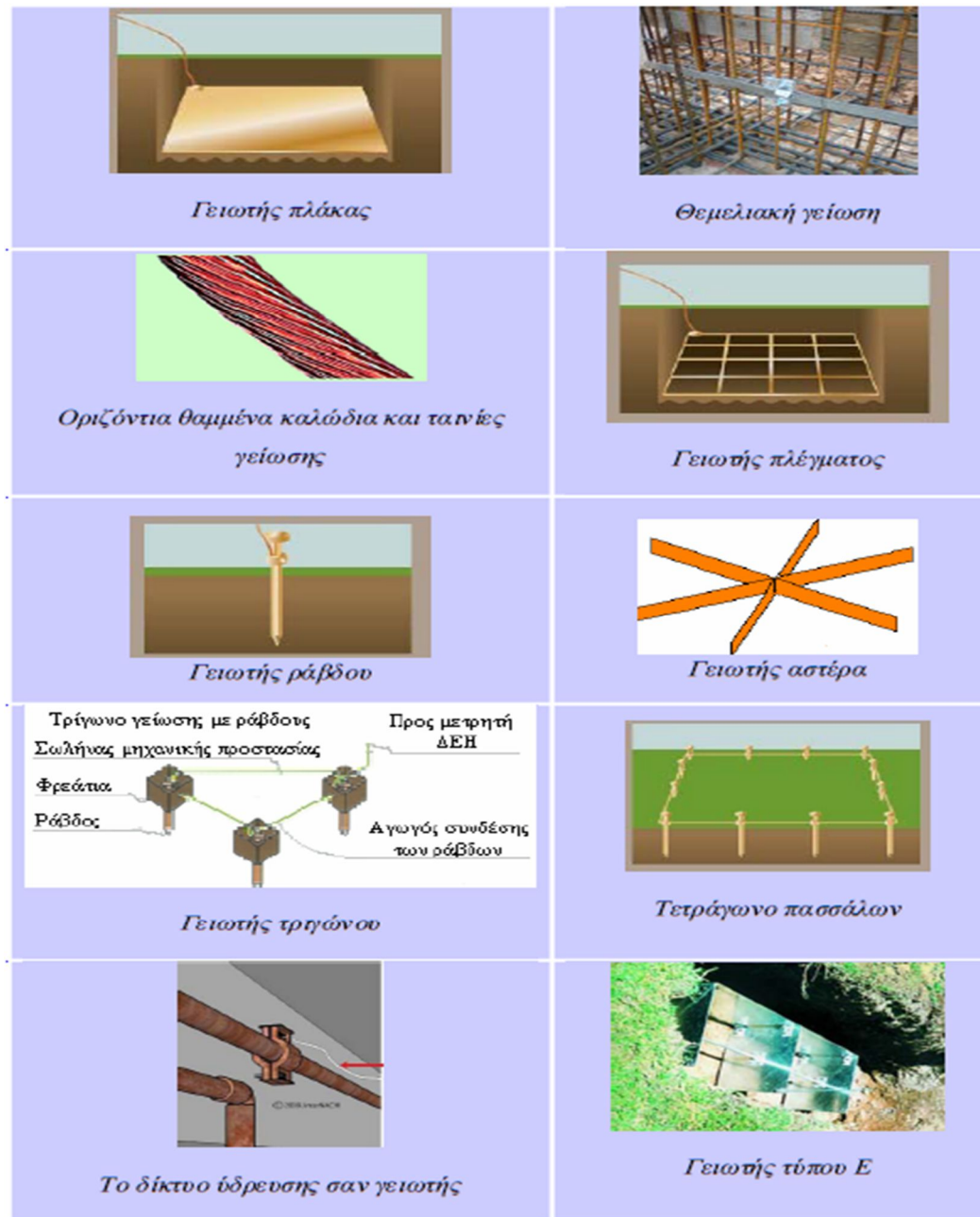
Σε ένα δίκτυο IT, το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είτε δεν έχει καμία σύνδεση προς τη γη, είτε έχει μέσω υψηλής σύνθετης αντίστασης. Σε τέτοια συστήματα, χρησιμοποιείται συσκευή παρακολούθησης της μόνωσης για τον έλεγχο της αντίστασης [6].



Σχήμα 1.8: Δίκτυο IT [6].

1.1.6 Ηλεκτρόδια γείωσης

Τα ηλεκτρόδια γείωσης (γειωτές) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις [11], έχουν τις μορφές που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:

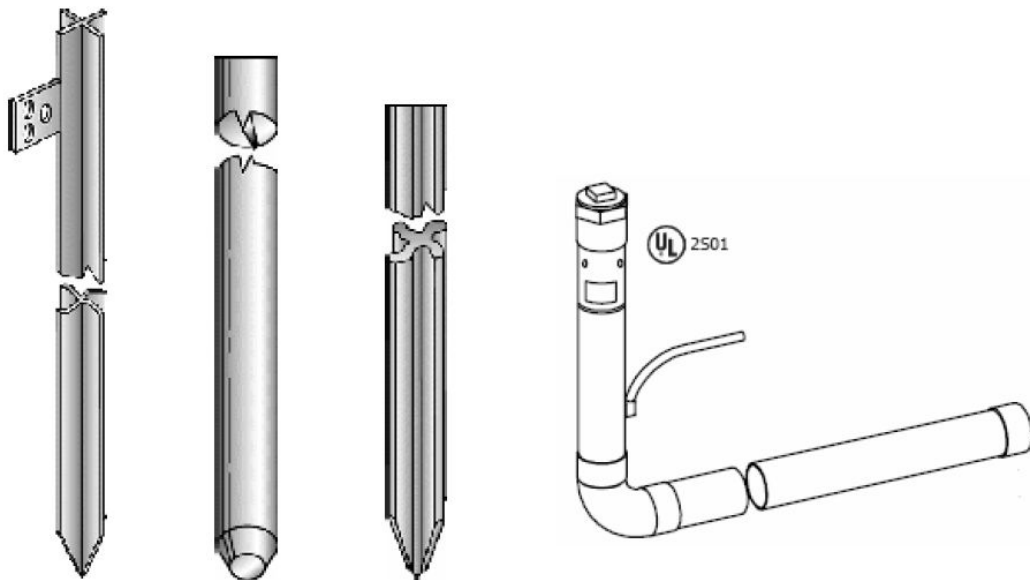


Σχήμα 1.9: Διάφοροι τύποι γειωτών [5].

Από τους προαναφερθέντες τύπους ηλεκτροδίων γείωσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο γειωτής ράβδου, καθώς αυτός ο τύπος ηλεκτροδίου γείωσης χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Γειωτής Ράβδου

Ο γειωτής αυτός είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μιας ίντσας ή ράβδος από γαλβανισμένο χάλυβα, στρογγυλή ή προφίλ, για παράδειγμα U, L, T ή I-προφίλ (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10: Τύποι γειωτών ράβδου [5].

Ο τύπος που δίνει την αντίσταση ενός γειωτή ράβδου, είναι:

$$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right) \quad (1.3)$$

όπου:

ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους,

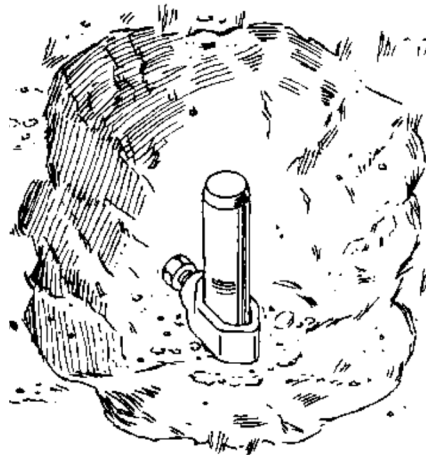
l_{eff} είναι το ενεργό βάθος της ράβδου, $l_{eff} \approx l - 0,5 \text{ m}$,

l είναι το συνολικό μήκος της ράβδου και

d είναι η διατομή της ράβδου.

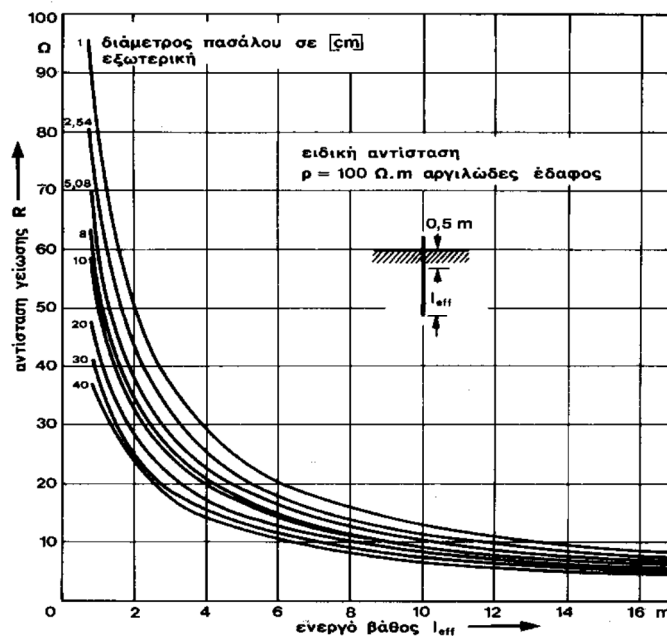
Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20°) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος, σε βάθος περίπου $2,5 \text{ m}$ με σφυρί χεριού, με μηχανικό σφυρί ή με κατάλληλο οδηγό ηλεκτροδίων, "Rod driver". Το άνω μέρος της ράβδου (περίπου 25 cm) εισάγεται συνήθως σε φρεάτιο, έτσι ώστε το σημείο σύνδεσής της (Σχήμα 1.11) 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 [11]. Όταν χρησιμοποιείται σφιγκτήρας, αυτός πρέπει

να είναι κατάλληλου τύπου, ώστε να μην προκαλείται βλάβη στο ηλεκτρόδιο ή στον αγωγό γείωσης [5].



Σχήμα 1.11: Σημείο σύνδεσης ράβδου με αγωγό γείωσης [5].

Στο Σχήμα 1.12 δίνεται η αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασσάλων στο έδαφος, συναρτήσει του ενεργού βάθους τους l_{eff} για διάφορες διαμέτρους. Από το σχήμα αυτό αλλά και από τον τύπο (1.3) φαίνεται η σχέση αντίστροφης αναλογίας της αντίστασης με το βάθος. Συμπεραίνεται, επίσης, ότι η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου.



Σχήμα 1.12: Αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασσάλων στο έδαφος, συναρτήσει του ενεργού βάθους l_{eff} [5].

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 πρέπει να είναι τέτοια, ώστε η αποξήρανση και το πάγωμα του εδάφους να μην αυξάνουν την αντίσταση γείωσης πέρα από την απαιτούμενη τιμή [5]. Εφόσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, διότι αντέχουν στη διάβρωση, όπως αυτό απαιτείται από το σχετικό πρότυπο [11] περί προστασίας έναντι ηλεκτρολυτικής διάβρωσης.

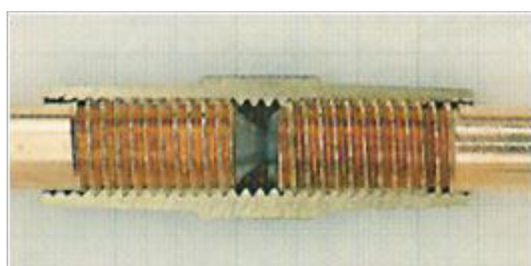
Γειωτής Ράβδου Κυκλικής Διατομής

- Χαλύβδινος επιχαλκωμένος



Σχήμα 1.13: Χαλύβδινος επιχαλκωμένος γειωτής ράβδου [5].

Κατασκευάζεται από χάλυβα ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένο, με πάχος επιχάλκωσης τουλάχιστον $250\mu m$, όπως ορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο *BS EN 62561-2* [14], 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 γύρω στα $12mm$ σε διάμετρο και από $1,2m$ 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 επέκταση του μήκους των ράβδων με τη χρήση ορειχάλκινων συνδέσμων επιμήκυνσης, γνωστών και ως μούφες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.14. 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 [5].



Σχήμα 1.14: Ορειχάλκινη μούφα σύνδεσης γειωτή [5].

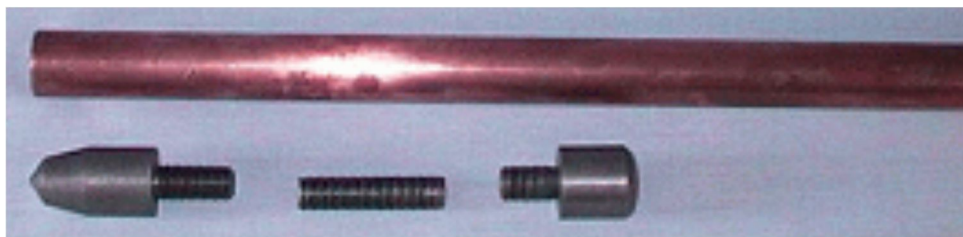
- **Χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος**



Σχήμα 1.15: Χαλύβδινος θερμά επιψευδαργυρωμένος γειωτής ράβδου [5].

Κατασκευάζεται από θερμά ψευδαργυρωμένο χάλυβα, πάχους επί ψευδαργύρωσης $50\mu m$ τουλάχιστον, όπως ορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο *BS EN 62561-2* [14], για λόγους όμοιους όπως αναφέρονται στους ηλεκτρολυτικά επιχάλκωμένους γειωτές. Η διάμετρος των συγκεκριμένων γειωτών κυμαίνεται περίπου στα $20mm$, ενώ το μήκος τους κυμαίνεται από $1m$ έως $2,5m$ [5].

- **Χάλκινος**

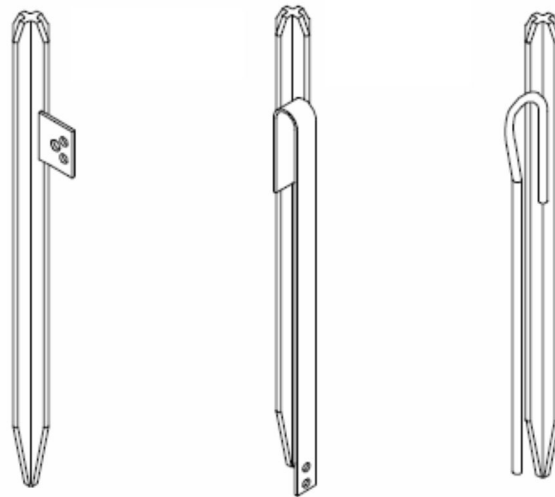


Σχήμα 1.16: Ραβδοειδής κυκλικός γειωτής χαλκού [5].

Οι ράβδοι αυτοί κατασκευάζονται από σκληρό χαλκό υψηλής αγωγιμότητας [14]. Τα ηλεκτρόδια χαλκού είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε τόπους όπου οι συνθήκες εδάφους είναι πολύ διαβρωτικές, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα.

Γειωτής Ράβδου Διατομής Σταυρού

Κατασκευάζεται από χάλυβα θερμά ψευδαργυρωμένο πάχους επί 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 [5].



Σχήμα 1.17: Διάφορες μορφές γειωτών ράβδου διατομής σταυρού [5].

Ραβδοειδές Χημικό Ηλεκτρόδιο



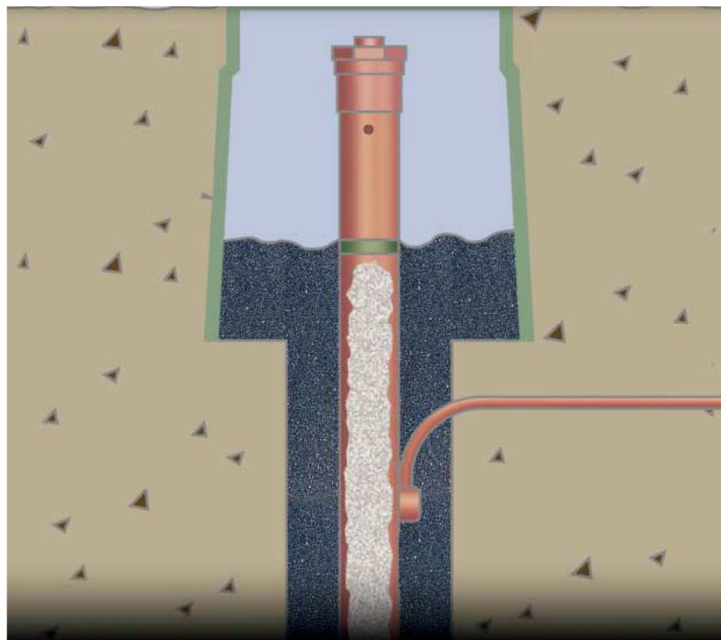
Σχήμα 1.18: Χημικά ηλεκτρόδια γείωσης [5].

Ένα ενεργό χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης (*Chemically Activated Grounding Electrode-CAGE*) είναι μια διάταξη που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί μια αγώγιμη 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' ότι ένα συμβατικό ηλεκτρόδιο γείωσης [5].

Ένα ενεργό χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης (Σχήμα 1.18) πρέπει να έχει ορισμένες προδιαγραφές [5]:

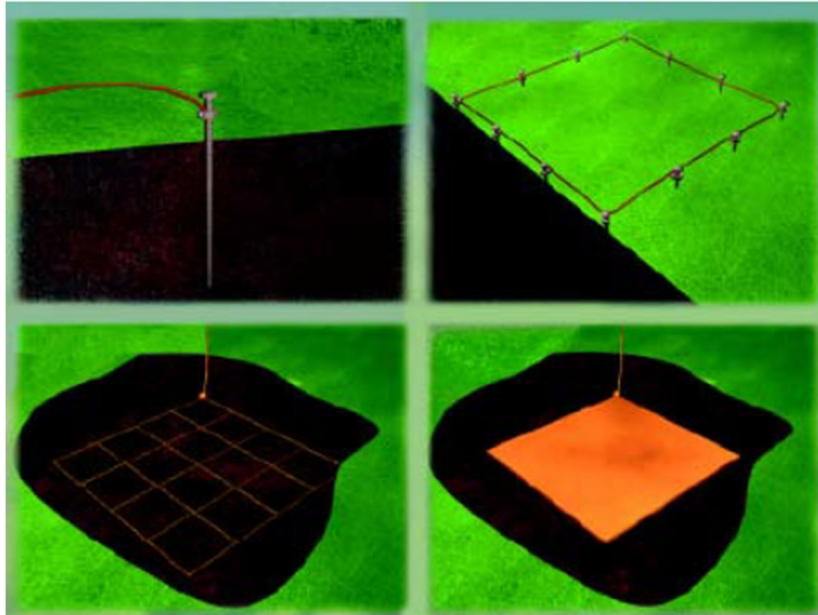
- Να κατασκευάζεται από μαλακό χαλκό υψηλής αγωγιμότητας, με ονομαστική διάμετρο $63,5mm$ και ελάχιστο μήκος $2,4m$.
- Να περιέχει στο εσωτερικό του μεταλλικό ορυκτό άλας, μάζας τουλάχιστον $11kg$.
- Να απορροφά υγρασία τόσο από τον αέρα όσο και από το έδαφος στο οποίο είναι τοποθετημένο.
- Να επαναπληρώνεται εύκολα μέσω ενός κοχλίου στο άκρο που προεξέχει του εδάφους.
- Να επιτρέπει τη διήθηση του ορυκτού διαλύματος στο έδαφος που το περιβάλλει, μέσω των πλευρικών οπών 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 1.19: Εγκαταστημένο χημικό ηλεκτρόδιο γείωσης [5].

1.1.7 Διατάξεις ηλεκτροδίων γείωσης

Ως σύστημα γείωσης ορίζεται ένα σύστημα που αποτελείται από δύο ή περισσότερους γειωτές διατεταγμένους και συνδεδεμένους με διαφορετικό τρόπο ανά περίπτωση. Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή των συνηθέστερων συστημάτων γείωσης.

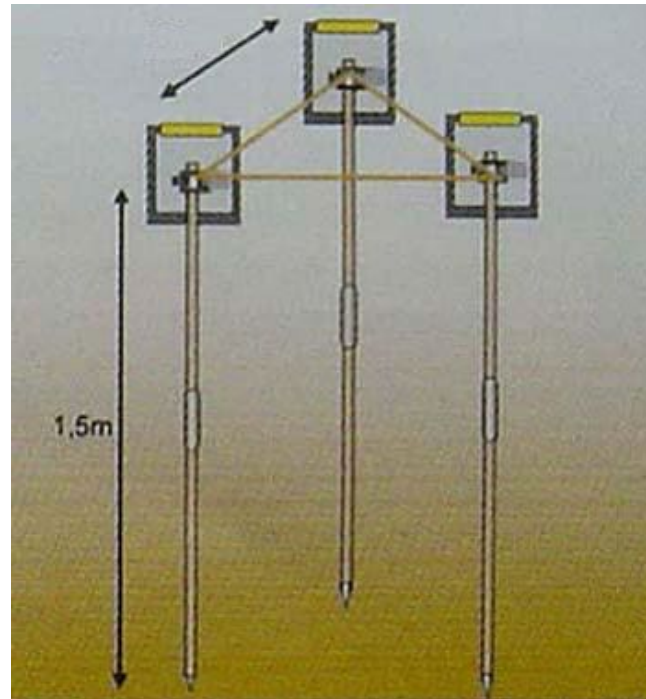


Σχήμα 1.20: Διατάξεις γειωτών [5].

Πολυγωνική Διάταξη Γείωσης

Κατασκευάζεται από ραβδοειδείς γειωτές, τοποθετημένους στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου συνήθως δε τριγώνου (τριγωνική γείωση: Σχήμα 1.21). Οι ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται επιχαλκωμένοι γειωτές, συνήθως συνδέονται μεταξύ τους με χάλκινο αγωγό διατομής 50mm^2 . Όταν χρησιμοποιούνται επιψευδαργυρωμένοι γειωτές, συνήθως συνδέονται με χαλύβδινο αγωγό θερμά επιψευδαργυρωμένο $\Phi 10\text{mm}$.

Η χρήση των ραβδοειδών γειωτών συνιστάται σε εδάφη όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται κατά βάθος [6].

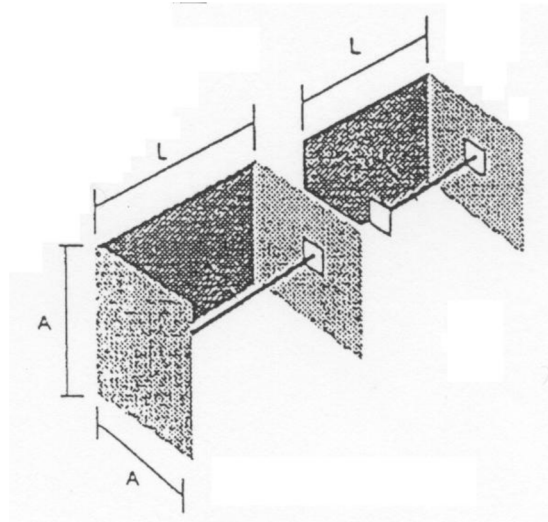


Σχήμα 1.21: Τρίγωνο γείωσης [6].

Γειωτής Τύπου "Ε"

Ο γειωτής "Ε" αποτελείται ουσιαστικά από δύο στοιχεία: το πρώτο είναι μορφής "Π" και το δεύτερο μορφής "Γ" (Σχήμα 1.22). 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", οπότε και η τιμή της αντίστασης γείωσης μειώνεται με την προσθήκη τέτοιων στοιχείων.

Το κόστος εγκατάστασης είναι χαμηλό και μειώνεται σημαντικά όταν η εγκατάσταση γίνεται κατά τη φάση των χωματουργικών εργασιών της κατασκευής, έχοντας έτσι ως δεδομένο την παρουσία σκαπτικών μηχανημάτων, τα οποία μπορούν σε ελάχιστο χρόνο να προχωρήσουν στη διάνοιξη του κατάλληλου ορύγματος [5].



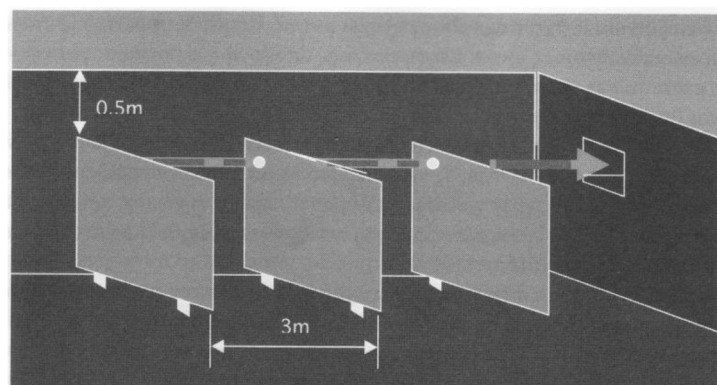
Σχήμα 1.22: Γειωτής τύπου E [6].

Σύστημα γείωσης με πλάκες (γειωτής πλάκας)

Πλάκα διαφόρων διαστάσεων (ελάχιστο 500x500x2 mm) 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 1.23). Η απόσταση μεταξύ τους συνιστάται να είναι τουλάχιστον 3m. Η σύνδεση μεταξύ των πλακών συνήθως γίνεται με χάλκινο αγωγό διατομής 50mm^2 , ή χαλύβδινο θερμά επιψευδαργυρωμένο $\Phi 10\text{mm}$ για χάλκινες και χαλύβδινες θερμά επιψευδαργυρωμένες πλάκες αντίστοιχα.

Προς αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης, θα πρέπει, αφενός να μη συνυπάρχουν στον χώρο γειωτές από διαφορετικά υλικά και αφετέρου να μη συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς από διαφορετικό υλικό. Απαγορεύεται η σύνδεση των πλακών με αγωγό αλουμίνιου ή κράματος [6].



Σχήμα 1.23: Γειωτής πλάκας [5].

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 το έδαφος κοντά στο κτίριο συνήθως δεν είναι αγώγιμο.

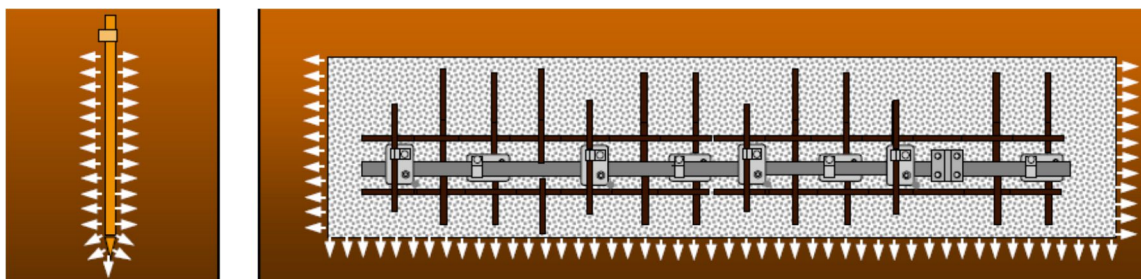
Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή μια ακόμη χαμηλότερη τιμή αντίστασης γείωσης, καθώς και προστασίας της ταινίας από τυχόν διάβρωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο βελτιωτικό υλικό γείωσης.

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 [6].

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 [15]. Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης φαίνεται στο Σχήμα 1.24.

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 [5].



Σχήμα 1.24: Θεμελιακή γείωση [16].

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 περιβάλλον, όπου η αγωγιμότητα είναι μεγάλη. Συνιστάται, δε, να συνδέεται ο γειωτής στον οπλισμό του σκυροδέματος του κτιρίου. Στην περίπτωση των θεμελιακών γειώσεων, στη θεμελιακή γείωση συνδέονται και τα αλεξικέραυνα, ενδεχομένως μέσω σπινθηριστών [5]. Η θεμελιακή γείωση προτείνεται σε όλα τα νέα κτίρια [11, 17].

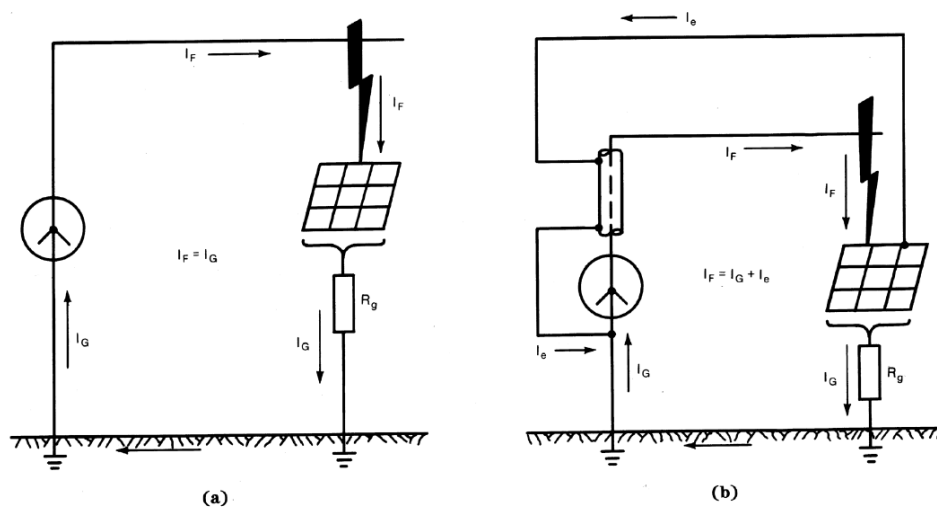
Όπως αναφέρεται στο Πρότυπο *ΕΛΟΤ EN 62305-3* [10], ως θεμελιακό ηλεκτρόδιο μπορεί να εγκατασταθεί μέσα στο σκυρόδεμα γαλβανισμένη χαλύβδινη ταινία και να συνδεθεί άμεσα με τις χαλύβδινες ράβδους του οπλισμού. Ο χαλκός και ο ανοξειδωτός χάλυβας στο σκυρόδεμα είναι επίσης αποδεκτά υλικά και

μπορούν να συνδέονται άμεσα με το χαλύβδινο οπλισμό [20]. Επίσης και στο Πρότυπο *HD 60364-5-54* [15] αναφέρεται ρητά ότι το θεμελιακό ηλεκτρόδιο μπορεί να αποτελείται είτε από χαλύβδινες ταινίες ή χαλύβδινους αγωγούς, είτε από χάλκινους αγωγούς.

1.1.8 Όρια ασφαλείας

Καθορισμός ορίων ασφαλείας

Κατά τη διάρκεια ενός τυπικού σφάλματος προς γη, η ροή του ρεύματος προς τη γη θα παράγει ανυψώσεις δυναμικού πάνω και γύρω από το σύστημα γείωσης. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την εν λόγω περίπτωση για ένα απλό ορθογώνιο πλέγμα γείωσης σε ομοιογενές έδαφος. Εάν δε ληφθούν προφυλάξεις στον σχεδιασμό της γείωσης, οι μέγιστες κλίσεις δυναμικού στην επιφάνεια της γης μπορεί να έχουν αρκετά μεγάλη τιμή, κατά τη διάρκεια σφάλματος προς τη 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 άπειρης γης [4].



Σχήμα 1.25: Υποσταθμός, σε κατάσταση σφάλματος, με και χωρίς πολλαπλές γειώσεις [3].

Οι συνθήκες, υπό τις οποίες είναι πιθανό ένα συμβάν ηλεκτροπληξίας, είναι οι εξής [5]:

1. Σχετικά μεγάλο ρεύμα σφάλματος προς τη γη σε σχέση με την περιοχή του συστήματος γείωσης και την αντίσταση γείωσης.
2. Η ειδική αντίσταση του εδάφους και η κατανομή των ρευμάτων γης, που προκαλούν υψηλές κλίσεις δυναμικού σε σημεία της επιφάνειας του εδάφους.

3. Η παρουσία ατόμου σε τέτοιο σημείο, στιγμή και στάση, ώστε το σώμα του να γεφυρώνει δύο σημεία μεγάλης διαφοράς δυναμικού.
4. Η απουσία επαρκούς αντίστασης επαφής ή άλλης αντίστασης σε σειρά, για να περιορίσει το ρεύμα που διαρρέει το σώμα σε μια ασφαλή τιμή, όταν πληρούνται οι συνθήκες 1 έως 3.
5. Η διάρκεια του σφάλματος και της επαφής με το ανθρώπινο σώμα, συνεπώς και της ροής του ρεύματος μέσα στο σώμα για επαρκή χρόνο, ώστε να προκαλέσει τραυματισμό του ατόμου, για τη συγκεκριμένη ένταση ρεύματος.

Η μικρή πιθανότητα ταυτόχρονης εμφάνισης όλων των παραπάνω συνθηκών μειώνει και τη συχνότητα συμβάντων ηλεκτροπληξίας.

Τα όρια ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιεί το σύστημα γείωσης μιας εγκατάστασης, καθορίζονται από τον συνδυασμό τιμών των διαφόρων παραμέτρων (π.χ. χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος, συχνότητα, ένταση, μοντέλο εδάφους) που προκαλούν τραυματισμό στο άτομο. Οι παράμετροι αυτές είναι [6]:

- 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 κεραυνικό πλήγμα.
- Επίδραση της έντασης και της διάρκειας του ρεύματος: Ρεύμα έντασης $b=A$ 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 μυικές 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 σώμα, 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. Στον σχεδιασμό συστήματος γείωσης δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο κατώφλι κοιλιακού ινιδισμού, δηλαδή επιδιώκεται τα ρεύματα σφάλματος να είναι έντασης μικρότερης από 60mA.

Τα ρεύματα έντασης I_B , μικρότερης του κατώφλιου κοιλιακού ινιδισμού, διάρκειας 0,03 – 3,0s, σχετίζονται με την ενέργεια που απορροφάται από το σώμα του ατόμου σύμφωνα με την εξίσωση [2]:

$$S_B = I_B^2 * t_s \quad (1.4)$$

Όπου

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

t_s , η διάρκεια έκθεσης στο ρεύμα, σε s και

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

- Χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος: Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία του χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος, όπως διαφαίνεται από την εξίσωση (1.4), προκύπτει η απαίτηση της, κατά το δυνατόν, ταχύτερης εκκαθάρισης 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 (1.4) ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος της ασφάλειας *backup*.

Η ασφάλεια *backup* (εφεδρική προστασία) παρέχεται ως προληπτικό μέτρο, επιπρόσθετα στην κύρια προστασία, και προορίζεται να λειτουργήσει σε περίπτωση που ένα σφάλμα του συστήματος δεν εκκαθαριστεί από την κύρια προστασία. Η εφεδρική προστασία είναι βραδύτερη από την κύρια προστασία.

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 δε θα υπερβίνει το κατώφλι πέρα από το οποίο προκαλείται κοιλιακός ινιδισμός. Από τη σχέση (1.4) 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 (1.4) προκύπτει [3]:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (1.5)$$

Όπου

$$k = \sqrt{S_B} \quad (1.6)$$

Πειράματα απέδειξαν ότι το 99,5% των ατόμων που ζυγίζουν περίπου 50kg έχουν ως ανώτατο όριο απορροφούμενης ενέργειας $S_B = 0,0135$. Τότε $k = 0,116$ και η σχέση για τον υπολογισμό του ανώτατου ορίου για την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σώμα γίνεται [3]:

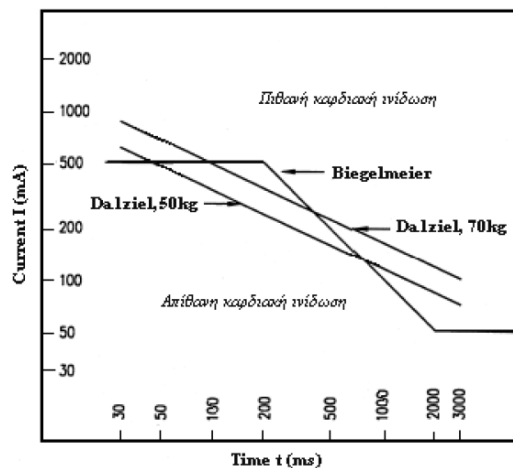
$$I_B = 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (1.7)$$

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η σχέση (1.7) δίνει $I_B = 116\text{mA}$ για $t_s = 1\text{s}$ και $I_B = 367\text{mA}$ για $t_s = 0,1\text{s}$. Αντίστοιχα πειράματα για άτομα σωματικού βάρους 70kg αντιστοιχούν σε $S_B = 0,0246$ και $k = 0,157$, οπότε [3]:

$$I_B = 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (1.8)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (1.7) και (1.8) συμπεραίνεται ότι επιτρέπονται ρεύματα αρκετά μεγαλύτερης έντασης για άτομα σωματικού βάρους 70kg. Στο πλαίσιο 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 1.26.



Σχήμα 1.26: Ρεύμα που ρέει στο ανθρώπινο σώμα, συνάρτησι του χρόνου [3].

Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη διάρκεια σφάλματος

Η συμπεριφορά του ανθρωπίνου σώματος έναντι του ηλεκτρικού ρεύματος 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 δύο 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 λαμβάνεται ως τιμή για την αντίσταση του ανθρώπινου σώματος από χέρι σε πόδι ή από χέρι σε χέρι τα 1000Ω [3]:

$$R_B = 1000 \Omega \quad (1.9)$$

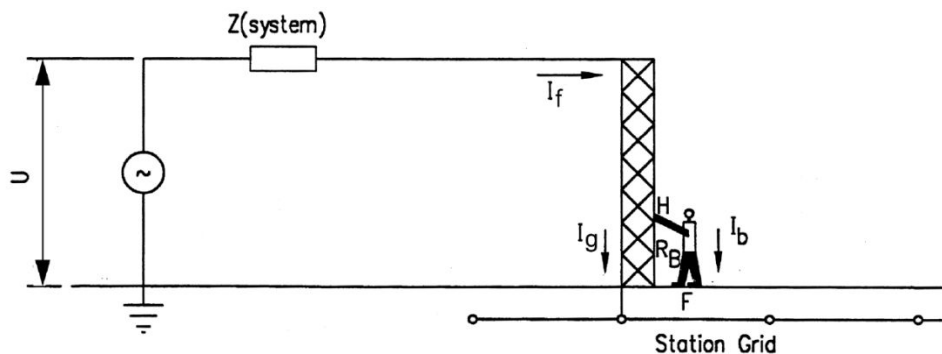
Στο πλαίσιο μελέτης της λιγότερο επικίνδυνης περίπτωσης για τον άνθρωπο, όπως είναι η περίπτωση ροής του ρεύματος από πόδι σε πόδι, είναι δυνατή η θεώρηση μεγαλύτερης αντίστασης για το ανθρώπινο σώμα, όμως προτιμάται η διεξαγωγή της μελέτης από την ασφαλή πλευρά.

Για ροή ρεύματος από το ένα πόδι στο άλλο, παρόλο που η αντίσταση θεωρείται υψηλότερη, επομένως, η ένταση του ρεύματος και συγχρόνως ο κίνδυνος θανάτου μειώνεται, υπάρχει μια περίπτωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον 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 λόγω αυτής της αιτίας, εκτός της τάσης μεταξύ ποδιού και χεριού σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο (τάση επαφής), θεωρείται απαραίτητος ο έλεγχος και της τάσης μεταξύ των ποδιών (βηματική τάση).

▪ Τάση επαφής

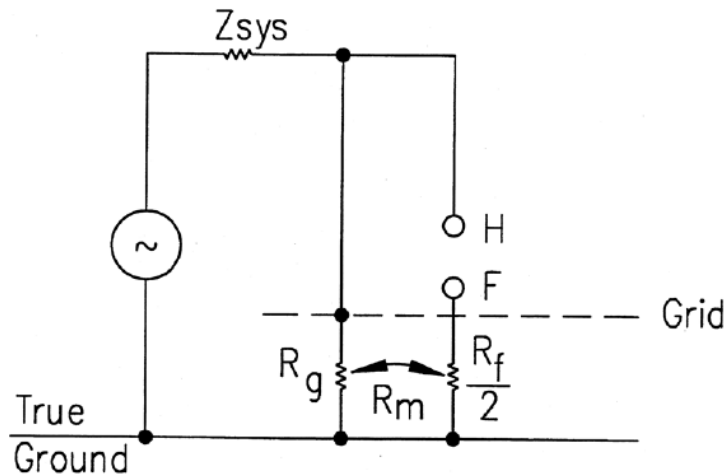
Η τάση επαφής αναπτύσσεται μεταξύ χεριού που έρχεται σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο και ποδιού στη γη [3], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.27.



Σχήμα 1.27: Τάση Επαφής [3].

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 .

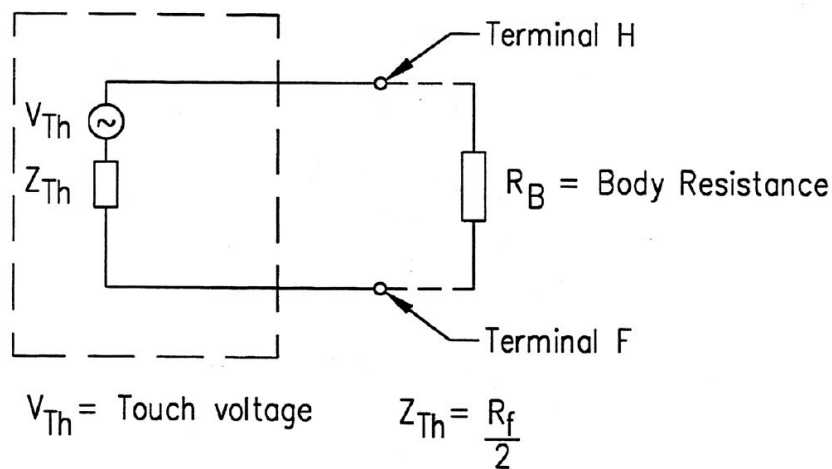
Στο σχήμα 1.28 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα. Η αντίσταση R_g είναι η αντίσταση γείωσης και η R_f είναι η αντίσταση του ποδιού σε σχέση με τη γη.



Σχήμα 1.28: Ισοδύναμο κύκλωμα για τάση επαφής [3].

Σύμφωνα με το Θεώρημα Thevenin, η τάση Thevenin, V_{th} , είναι η τάση μεταξύ των σημείων H και F όπου το άτομο εφάπτεται (Σχήμα 1.29). 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:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \tag{1.10}$$



Σχήμα 1.29: Ισοδύναμο Thevenin – Τάση Επαφής [3].

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

$$Z_{Th} = R_f / 2 \quad (1.11)$$

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 [3]:

$$R_f = \rho / 4 \cdot b \quad (1.12)$$

Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται, για την αναπαράσταση του ποδιού, μεταλλικός δίσκος ακτίνας 0.08m, οπότε η σχέση (1.11) γίνεται:

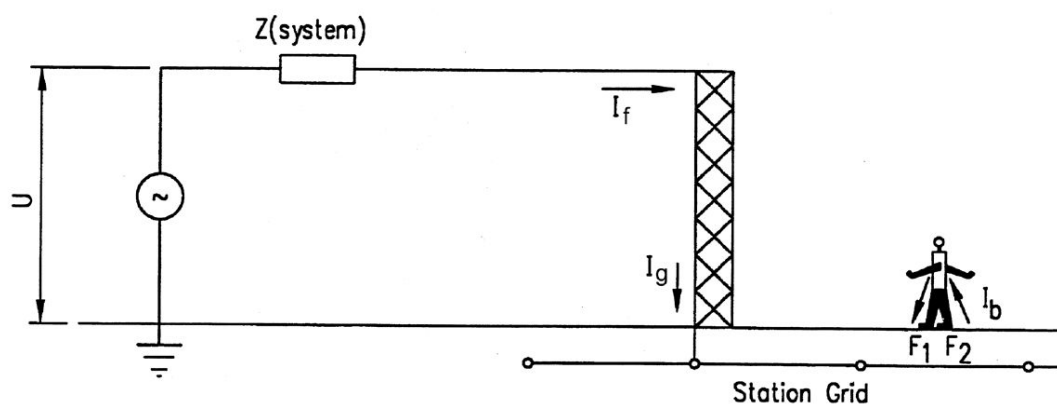
$$Z_{Th} = 1,5 \cdot \rho \quad (1.13)$$

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

$$E_{touch} = I_B \cdot (R_B + 1,5 \cdot \rho) \quad (1.14)$$

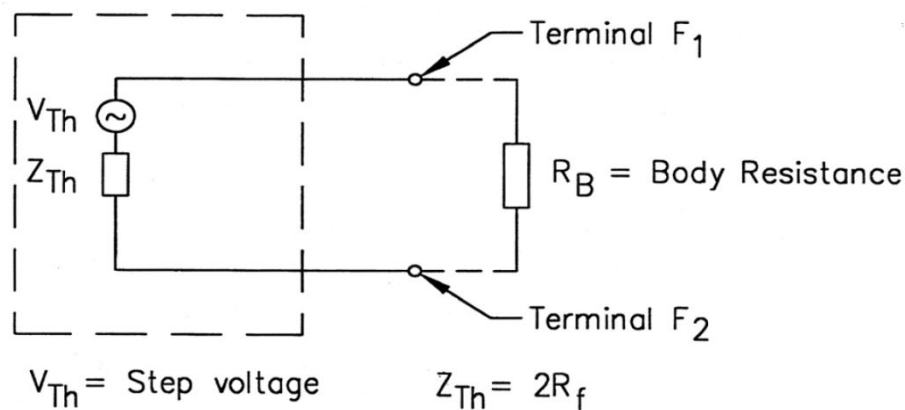
▪ Βηματική Τάση

Η βηματική τάση αναπτύσσεται μεταξύ των δύο ποδιών ανθρώπου που στέκεται στην επιφάνεια της γης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.30.



Σχήμα 1.30: Βηματική Τάση [3].

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δίνεται στο Σχήμα 1.31. 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 πατά στην επιφάνεια του εδάφους όπου έχει τοποθετηθεί το σύστημα γείωσης.



Σχήμα 1.31: Ισοδύναμο Thevenin – Βηματική Τάση [3].

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:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (1.15)$$

Η αντίσταση Thevenin υπολογίζεται ίση με:

$$Z_{Th} = 2 \cdot R_f \quad (1.16)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.12) και για $b=0,08\text{m}$ καταλήγουμε:

$$Z_{Th} = 6,0 \cdot \rho \quad (1.17)$$

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

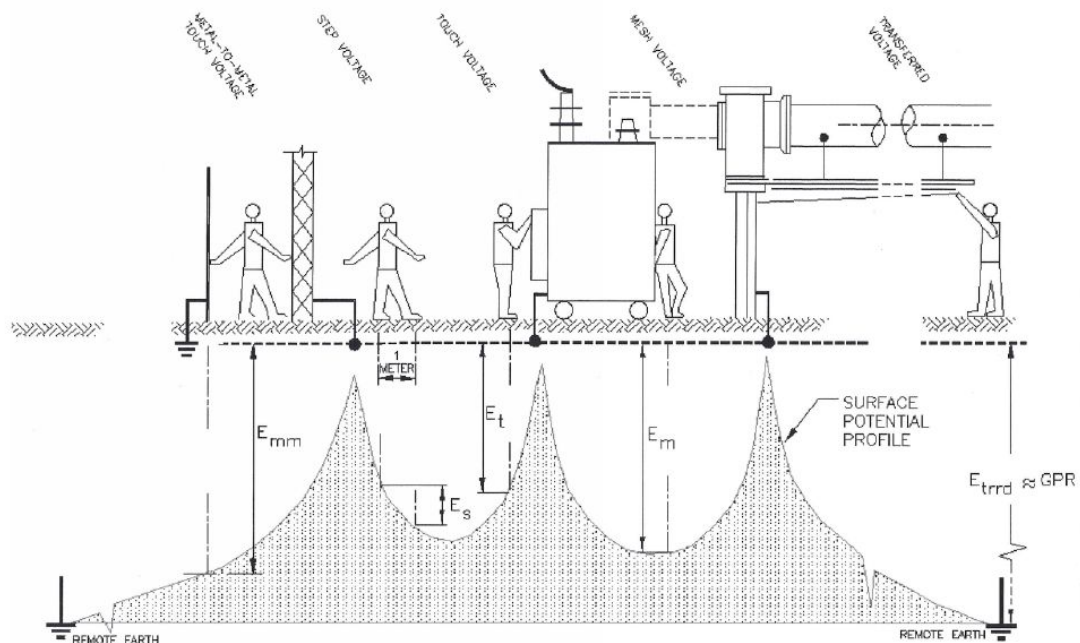
$$E_{step} = I_B \cdot (R_B + 6,0 \cdot \rho) \quad (1.18)$$

Κριτήρια ανεκτής τάσης

Στο Σχήμα 1.32 παρουσιάζονται πέντε βασικές περιπτώσεις ατόμου και γειωμένων εγκαταστάσεων κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος. Για επαφή πόδι με πόδι, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι αυτό του Σχήματος 1.31, και η τάση είναι ίση με E_s (βηματική τάση). Για τα τρία παραδείγματα επαφής χέρι με πόδια που δίνονται

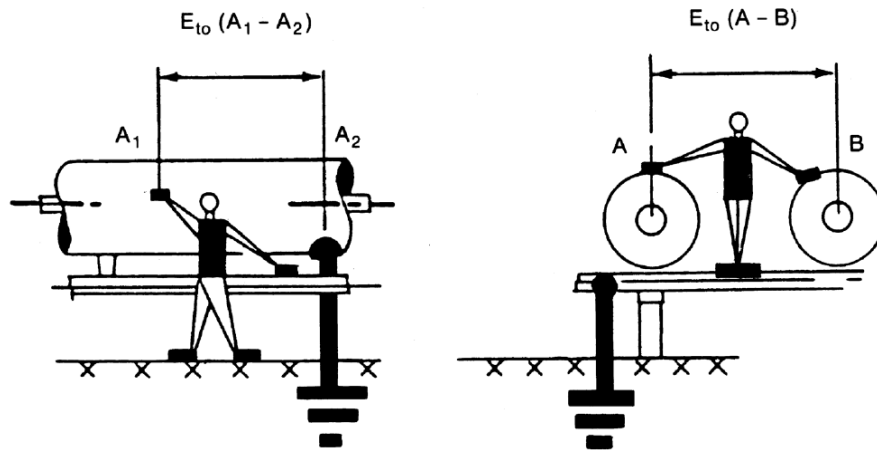
στο Σχήμα 1.32, η τάση U ισούται με E_t (τάση επαφής), E_m (τάση βρόχου) ή E_{trrd} (μεταφερόμενη τάση).

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 των αναπτυσσόμενων τάσεων.



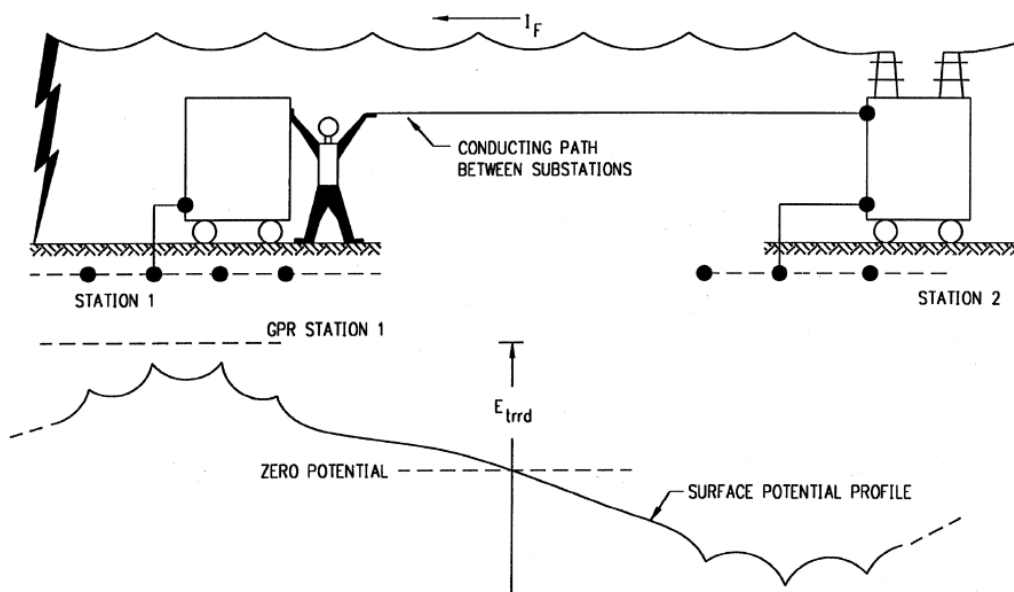
Σχήμα 1.32: Τάσεις επαφής, βηματική, βρόχου, επαφής, μεταξύ μετάλλων και από μεταφορά [3].

Το κύκλωμα που αφορά την επαφή μέταλλο με μέταλλο, είτε χέρι με χέρι, είτε χέρι με πόδια, δίνεται στο Σχήμα 1.33, 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, ράγες, φράκτες που εντοπίζονται μέσα ή κοντά στην περιοχή όπου είναι θαμμένο το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού, και τα οποία δεν είναι συνδεδεμένα με το πλέγμα γείωσης, ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη. Η τάση μεταξύ μεταλλικών μερών ή μετάλλων θα αποκτήσει τότε μεγάλη τιμή, που γίνεται επικίνδυνη για ένα άτομο που στέκεται πάνω ή ακουμπά σε ένα γειωμένο αντικείμενο (ή γειωμένη κατασκευή) και το οποίο άτομο έρχεται ταυτόχρονα σε επαφή με μη γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο (ή μεταλλική κατασκευή). 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 1.33: Τυπικές περιπτώσεις επαφής μέταλλο με μέταλλο σε υποσταθμό GIS [3].

Η περίπτωση της μεταφερόμενης τάσης (Σχήμα 1.34) 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 ενδέχεται να γίνει ίσο με 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 1.34: Τυπική περίπτωση εκτεταμένου μεταφερόμενου δυναμικού [3].

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 (1.18) [3]:

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

Για σωματικό βάρος **50kg**:

$$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (1.19)$$

Και για σωματικό βάρος **70kg**:

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (1.20)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (1.14) το όριο για την **τάση επαφής** είναι [3]:

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

Για σωματικό βάρος **50kg**:

$$E_{touch50} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,116 / \sqrt{t_s} \quad (1.21)$$

Και για σωματικό βάρος **70kg**:

$$E_{touch70} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0,157 / \sqrt{t_s} \quad (1.22)$$

Όπου

$$C_s = 1 - \left(\frac{0,09 \cdot (1 - \rho / \rho_s)}{2 \cdot h_s + 0,09} \right)$$

C_s , ο παράγοντας μείωσης του επιφανειακού στρώματος (προτυπο IEEE 80-2013),

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 ροής του ρεύματος μέσω του ανθρωπίνου σώματος, σε s.

Εάν δε 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** [3]:

Για σωματικό βάρος **50kg**:

$$E_{mm-touch50} = 116 / \sqrt{t_s} \quad (1.23)$$

Και για σωματικό βάρος **70kg**:

$$E_{mm-touch70} = 157 / \sqrt{t_s} \quad (1.24)$$

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

1.2 Ειδική Αντίσταση Εδάφους

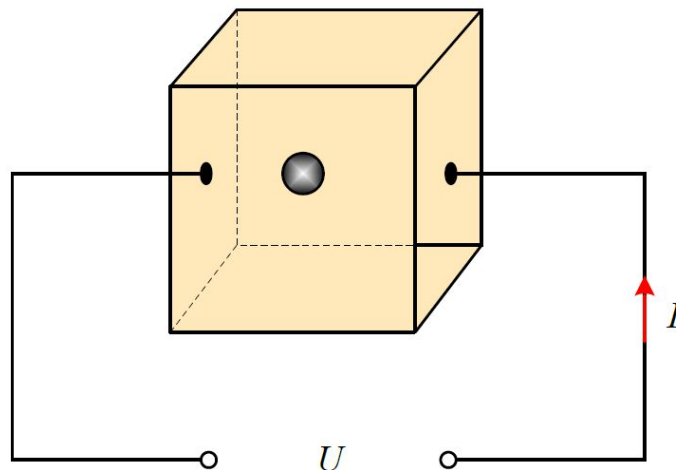
1.2.1 Ορισμός

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού είναι ένα μέτρο του πόσο ισχυρά αντιστέκεται το υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικό με χαμηλή τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης επιτρέπει την εύκολη διέλευση του ρεύματος (καλός αγωγός). Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το ohm-meter [$\Omega \cdot m$]. Στην περίπτωση του αγωγού, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (1.25)$$

όπου R είναι η αντίσταση του αγωγού (σε Ω), A η επιφάνεια διατομής του αγωγού (σε m^2) και L το μήκος του αγωγού (σε m) [2].

Το έδαφος όμως δε θεωρείται αγωγός αλλά ημιαγωγός. Στην περίπτωση αυτήν ο ορισμός της ειδικής αντίστασης που αυτό εμφανίζει είναι διαφορετικός. Ειδικότερα, η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) ορίζεται ως η αντίσταση, από το υλικό του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 m$), όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.35 [18].



Σχήμα 1.35: Ορισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους [7].

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και τη σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και, συνεπώς, ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων, ή αγωγιμοτήτων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του (ρ). Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από την ποσότητα του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, καθώς και από την ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Με άλλα λόγια η αγωγιμότητα του εδάφους γίνεται αγωγιμότητα μέσω του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, οπότε και η αγωγιμότητα αυτή είναι ηλεκτρολυτική [5, 7]. Η υγρασία του εδάφους, λοιπόν, επηρεάζει σημαντικά την ειδική αντίσταση του εδάφους, αλλά δεν αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα. Υπάρχει μία σειρά παραγόντων, οι οποίοι ασκούν άμεση επίδραση στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Πρώτος και κύριος παράγοντας είναι ο τύπος του εδάφους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους κυμαίνεται από $1 \Omega m$ μέχρι και μερικές δεκάδες χιλιάδες Ωm . Η υγρασία είναι και αυτή με τη σειρά της ένας σημαντικός παράγοντας, καθώς εδάφη με μικρό ποσοστό υγρασίας εμφανίζουν μεγάλη ειδική αντίσταση. Για παράδειγμα, αν η υγρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη από 15% κατά βάρος, τότε η ειδική αντίσταση παραμένει χαμηλή και περίπου σταθερή, ενώ για μικρότερο ποσοστό υγρασίας η ειδική αντίσταση αυξάνεται απότομα. Η περιεκτικότητα αλάτων, μεταλλικών και χημικών στοιχείων δεν πρέπει να αμελείται, αφού για περιεκτικότητα αλάτων κατά 1% κατά βάρος η ειδική αντίσταση παραμένει χαμηλή και δε μεταβάλλεται σημαντικά, ενώ για μικρότερο ποσοστό αυξάνεται σημαντικά. Τέλος, παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η πυκνότητα του εδάφους επηρεάζουν την ειδική αντίσταση. Για χαμηλότερες

Θερμοκρασίες η αντίσταση του εδάφους αυξάνεται, οπότε εύκολα γίνεται αντιληπτό, πως κατά τη διάρκεια του έτους, που οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται αισθητά, η ειδική αντίσταση δεν παραμένει σταθερή. Με το πέρασμα του χρόνου καθίσταται εύλογο ότι οι παράγοντες αυτοί δε διατηρούνται σταθεροί, συνεπώς και η αντίσταση γείωσης μεταβάλλεται αισθητά [19]. Στη συνέχεια αναλύονται όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους.

1) Τύπος εδάφους

Ο σημαντικότερος παράγοντας στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι ο τύπος του. Ωστόσο δεν έχουν ορισθεί ακόμα καθαρά οι τύποι του εδάφους. Για παράδειγμα, με τον όρο αργιλώδες, 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. Ένα πλήθος ερευνητών έχει μετρήσει κατά καιρούς την ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους, είτε παίρνοντας δείγματα στο εργαστήριο, είτε στο ύπαιθρο [5]. Στον Πίνακα 1.1 παρατίθενται οι προσεγγιστικές τιμές της ειδικής αντίστασης για διάφορους τύπους εδαφών.

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

Πίνακας 1.1: Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδαφών [1].

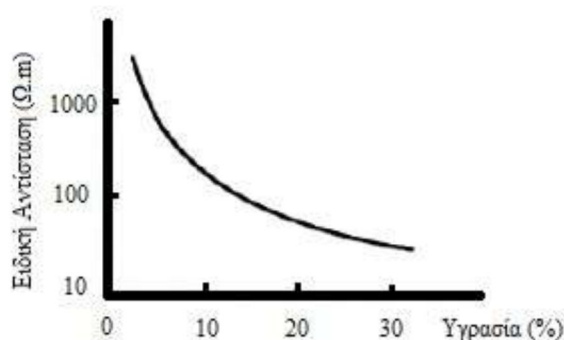
2) Περιεκτικότητα εδάφους σε υγρασία

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η αγωγιμότητα του ρεύματος στο έδαφος είναι κατά βάση ηλεκτρολυτική, συνεπώς η υγρασία του εδάφους έχει μεγάλη επίδραση στη διαμόρφωση της ειδικής αντίστασής του. Το ποσοστό της υγρασίας του εδάφους είναι μεταβλητή ποσότητα και εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, η εποχή του χρόνου, η φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Απόλυτα ξηρό έδαφος

σπάνια συναντάται στη φύση, με κοντινότερη προσέγγιση το έδαφος της ερήμου, ενώ εξίσου δύσκολα συναντάται έδαφος με περιεκτικότητα υγρασίας άνω του 40% [5]. Στον πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία.

Περιεκτικότητα σε υγρασία (% κατά βάρος)	Ειδική αντίσταση σε Ωm	
	Top Soil	Sandy Loam
0	100×10^5	100×10^5
2,5	2500	1500
5	1650	430
10	530	220
15	210	130
20	120	100
30	100	80

Πίνακας 1.2: Επίδραση της περιεκτικότητας της υγρασίας του εδάφους στην ειδική αντίσταση [5].



Σχήμα 1.36: Γραφική απεικόνιση της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την υγρασία εδάφους [20].

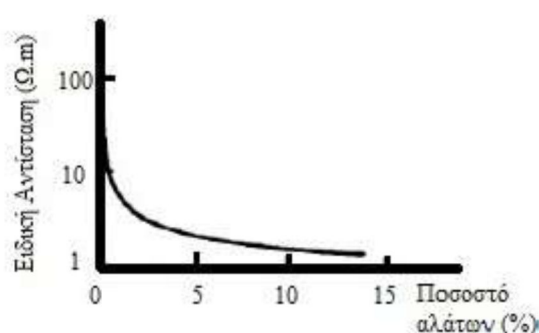
3) Επίδραση μεγέθους κόκκων

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 κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους κόκκους και έτσι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται [5].

4) 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 1.37 παρουσιάζεται η επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα στην ειδική αντίσταση. Μια αρκετά μικρή ποσότητα διαλυμένων αλάτων είναι ικανή 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 τον λόγο που η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών από διαφορετικές περιοχές παρουσιάζει σημαντικές διαφορές [5].



Σχήμα 1.37: Γραφική απεικόνιση της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα αλάτων [20].

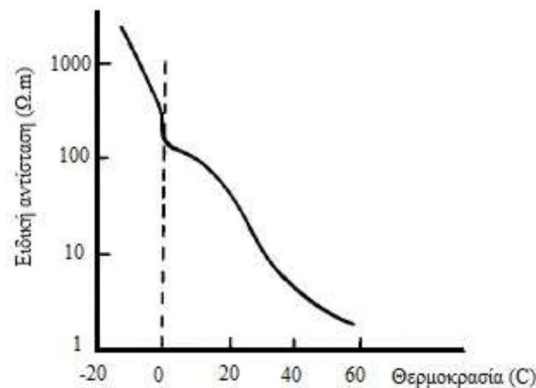
Σε ορισμένες, μάλιστα, περιπτώσεις, η τεχνητή προσθήκη διαλυμάτων αλάτων στο χώμα, όπως χλωριούχου νατρίου (αλάτι), χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2), θεικού χαλκού (CuSO_4) θεικού μαγνησίου (MgSO_4) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους [5]. Στον Πίνακα 1.3 παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης ανάλογα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε άλατα.

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

Πίνακας 1.3: Επίδραση της περιεκτικότητας αλάτων στην ειδική αντίσταση εδάφους [5].

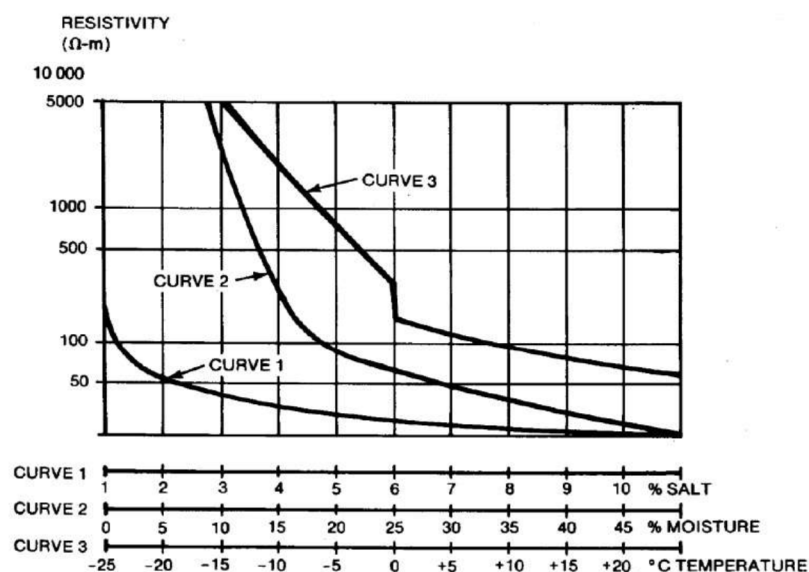
5) Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης

Η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους από την περιεκτικότητα σε νερό έχει ως επακόλουθο την εξάρτηση της ειδικής αντίστασης και από τη θερμοκρασία. Στο Σχήμα 1.38 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για διάφορες θερμοκρασίες. Εξετάζοντας τις τιμές αυτές παρατηρείται, ότι η αντίσταση μεταβάλλεται σε μικρό βαθμό για θερμοκρασίες μεγαλύτερες του μηδενός, ενώ η μεταβολή είναι απότομη για αρνητικές θερμοκρασίες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω [5].



Σχήμα 1.38: Γραφική απεικόνιση της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την θερμοκρασία [20].

Αναφορικά με την πίεση, καθίσταται φανερό, ότι για υψηλές τιμές της πίεσης το έδαφος είναι συμπαγές. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ειδική αντίσταση είναι χαμηλή. Ακολούθως παρατίθεται ένα γράφημα, στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας [5].



Σχήμα 1.39: Ειδική αντίσταση εδάφους συναρτήσει περιεκτικότητας (Curve 1) αλάτων, (Curve 2) υγρασίας και (Curve 3) θερμοκρασίας [20].

6) Επίδραση της έντασης πεδίου (voltage gradient)

Η ειδική αντίσταση σε γενικές γραμμές δεν επηρεάζεται από την ένταση του πεδίου. Η επίδραση αυτή λαμβάνει χώρα στην περίπτωση, και μόνο, όπου η τιμή του πεδίου υπερβεί μία οριακή τιμή, η οποία εξαρτάται από το είδος του εδάφους. Αυτό που έχει παρατηρηθεί ωστόσο, είναι ότι η τιμή αυτή είναι της τάξεως των μερικών kV/cm , η οποία όταν ξεπεραστεί, εκδηλώνονται τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, μειώνοντας έτσι την ειδική αντίσταση στην περιοχή αυτή [5].

7) 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 της τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση [5].

1.2.2 Καθορισμός της δομής του εδάφους

Βασική παράμετρος στη μελέτη του συστήματος γείωσης μιας εγκατάστασης, π.χ. στον σχεδιασμό του πλέγματος γείωσης υποσταθμού, είναι η δομή του εδάφους ακριβώς κάτω από αυτήν. Συνήθως η δομή του εδάφους είναι πολύπλοκη, διότι η ειδική αντίστασή του δεν έχει μια σταθερή τιμή, αλλά διαφέρει ανάλογα με το βάθος το οποίο εξετάζεται, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την υγρασία και άλλες συνθήκες. Στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης συνηθίζεται να μοντελοποιείται το έδαφος, του οποίου η ειδική του αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος, ακολουθώντας μια μαθηματική σχέση, όπως την εκθετική μείωση ή αύξηση, ή συνηθέστερα το διαχωρισμό της γης σε στρώματα, με σταθερή τιμή ειδικής αντίστασης το καθένα. Η μορφή των στρωμάτων αυτών δύναται να είναι οριζόντια—περίπτωση η οποία συναντάται συχνότερα—κατακόρυφη, σφαιρική, κτλ. Χρησιμοποιώντας μια σειρά μετρήσεων που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια της γης, μπορεί να καθοριστεί ένα πολυστρωματικό μοντέλο, βασισμένο στη λύση του προβλήματος του ανάστροφου ηλεκτρικού πεδίου. Μέθοδοι για τον καθορισμό πολυστρωματικών μοντέλων έχουν προταθεί, τόσο για διστρωματικό, όσο και για τριστρωματικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους [8,20,21].

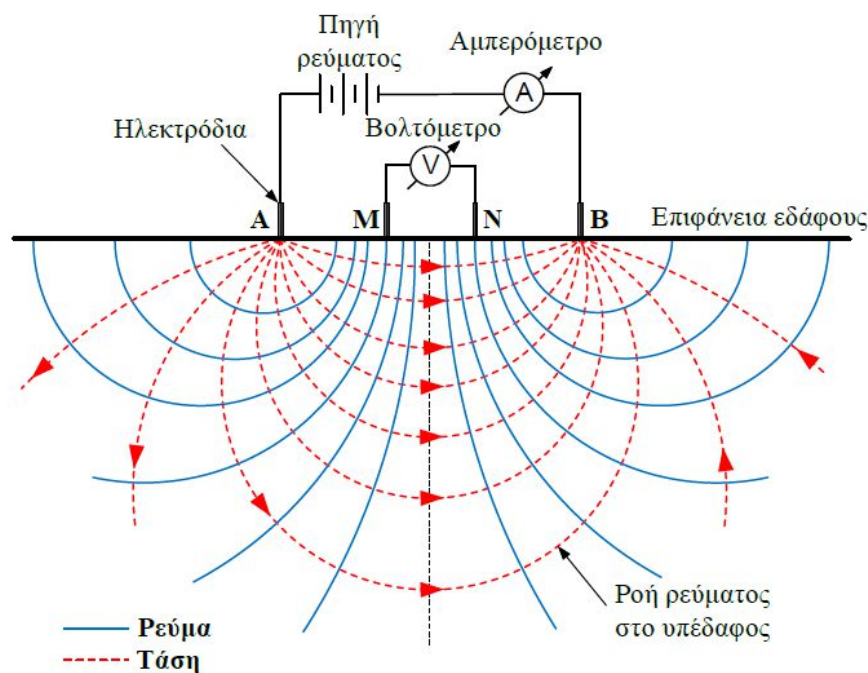
1.2.3 Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τη μέτρηση 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 ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι αυτή των τεσσάρων σημείων, η οποία εφαρμόζεται με αρκετές παραλλαγές ως προς τη διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων μέτρησης [20]. Η λογική αυτής της μεθόδου είναι η εξής:



Σχήμα 1.40: Μέτρησης ειδικής αντίστασης με τη μέθοδο των 4 σημείων [7].

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, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί ηλεκτρικό πεδίο εξαρτώμενο από τη δομή του υπεδάφους. Τα ηλεκτρόδια M και N είναι τα ηλεκτρόδια δυναμικού, με τα οποία μετράται η διαφορά δυναμικού ΔU .

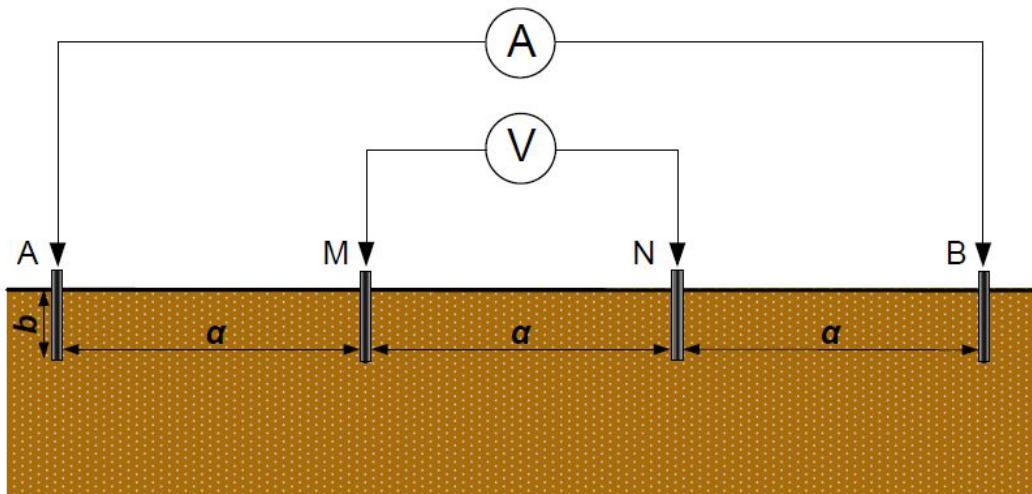
Οι κυρίαρχες τεχνικές μέτρησης της ειδικής αντίστασης για τη μέθοδο των τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι οι εξής:

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

Από τους παραπάνω τρόπους διάταξης θα εξετασθεί αναλυτικά η μέθοδος Wenner, αφού αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Μέθοδος Wenner

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται τέσσερα μικρού μήκους ηλεκτρόδια, τα οποία τοποθετούνται σε οριζόντια διάταξη και σε ίση απόσταση a μεταξύ τους, εμπηγμένα σε βάθος b (όχι μεγαλύτερο από $0,1a$), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.41. Η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια A και B, ενώ η τάση μετριέται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια M και N.



Σχήμα 1.41: Διάταξη Wenner [7].

Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς την ένταση του ρεύματος έγχυσης ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (1.26) [22].

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{(a^2 + 4b^2)}} - \frac{2a}{\sqrt{(4a^2 + 4b^2)}}} = \frac{4\pi a R}{n} \quad (1.26)$$

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

Στην περίπτωση που $a \ll b$ τότε:

$$\rho = 4\pi\alpha R \quad (1.27)$$

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

$$\rho = 2\pi\alpha R \quad (1.28)$$

η οποία δίνει τη φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους σε βάθος $\alpha/2$. Έτσι, σε περίπτωση, που θέλουμε να μελετήσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους, αρκεί να μεταβάλλουμε τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, διατηρούμενης της συμμετρίας τους ως προς το κέντρο της διάταξης.

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάστηκαν τα συστήματα γείωσης, οι βασικές αρχές που τα χαρακτηρίζουν καθώς και τα είδη και οι γεωμετρίες γειωτών που χρησιμοποιούνται ευρέως στις κατασκευές. Για τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης είναι, επίσης, απολύτως απαραίτητη η γνώση της δομής και των ιδιοτήτων του εδάφους στον χώρο εγκατάστασης του συστήματος. Για το λόγο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στην έννοια της ειδικής αντίστασης του εδάφους, αναλύονται οι παράγοντες που την επηρεάζουν και αναφέρονται οι επικρατέστερες μέθοδοι μέτρησής της.

Για λόγους πληρότητας της ανάλυσης των συστημάτων γείωσης δε θα μπορούσε να μη γίνει αναφορά στο μέγεθος της αντίστασης γείωσης, ένα κρίσιμο μέγεθος για τη συμπεριφορά του συστήματος και τη εν γένει απόκρισή του σε συνθήκες σφάλματος, αλλά και στις τεχνικές μείωσης (βελτίωσης) της τιμής της, για τα οποία γίνεται εκτενής ανάλυση σε επόμενο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφία

- [1] Φανή Η. Ασημακοπούλου, «Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [2] Αυγερινός-Βασίλειος Σακελλαρίου, «Επίδραση του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014.
- [3] ANSI/IEEE Std 80-2013, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 2013.
- [4] Δάφνη Α. Κουτσορόδη, «Υπολογιστική προσομοίωση συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
- [5] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [6] Ι. Καρακίτσιος, «Επίδραση βελτιωτικών υλικών εδάφους στη χρονική μεταβολή της αντίστασης γείωσης κατακόρυφων ηλεκτροδίων», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [7] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.
- [8] Ιωάννης Φ. Γκόνος, «Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [9] Π. Ντοκόπουλος, «Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384», Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα, 2005.
- [10] 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.
- [11] ΕΛΟΤ HD 384, «Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις», Έκδοση 2η, 2004.



-
- [12] Ε. Βενετίου, «Προσομοίωση μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης», Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2012.
- [13] IEC 60364-1, “Low-voltage electrical installations - Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions.”, Fifth edition, International Electrotechnical Commission, 2005.
- [14] BS EN 62561-2, “Lightning Protection System Components (LPSC). Requirements for conductors and earth electrodes”, 2012.
- [15] 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.
- [16] Ν. Παναγιωτόπουλος: «Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων», Σεμινάριο.
- [17] ΕΛΟΤ 1424, «Απαιτήσεις για θεμελιακή γείωση», 2006.
- [18] Χαριτωμένη Γ. Μαρκαντωνάκη, «Κυκλωματική προσέγγιση του ιονισμού του εδάφους», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010.
- [19] Ε. R. Sverko, "Ground measuring techniques: Electrode resistance to remote earth & soil resistivity", U.S.A.: ERICO, Inc. facility electrical protection, 1999.
- [20] ANSI/IEEE Std 81-2012, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a grounding system”, 2012.
- [21] Ι. F. Gonos, Ι. Α. Stathopoulos, “Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Power Engineering Society–2004 General Meeting, Denver USA, June 6–10, 2004.
- [22] Dwight H. B., “Calculation of Resistances to Ground and of Capacitance”, Journal of Mathematics and Physics, vol. 10, no 1, pp.50, 1931.

Κεφάλαιο 2

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΕΙΩΣΗΣ & ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

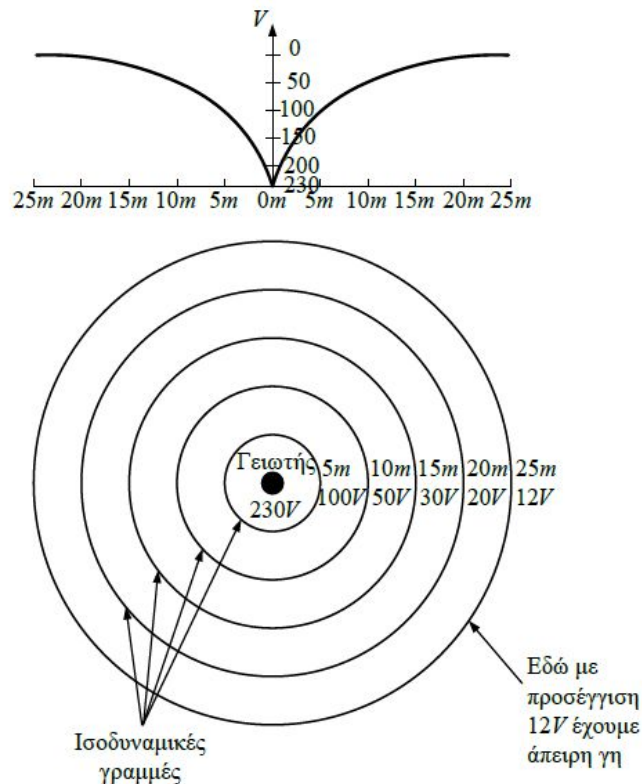
Στο παρόν κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της αντίστασης γείωσης, δίνεται ο ορισμός του μεγέθους της, παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον θεωρητικό υπολογισμό της και αναλύονται οι τρεις βασικές μέθοδοι πειραματικής μέτρησής της. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα βελτιωτικά υλικά γείωσης, η οποία εστιάζει κυρίως σε μελέτες και έρευνες της τελευταίας δεκαετίας.

2.1 Αντίσταση Γείωσης

2.1.1 Ορισμός

Ως αντίσταση γείωσης ορίζεται η αντίσταση που εμφανίζεται από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Άπειρη γη θεωρείται ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους, το οποίο βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από το γειωτή. Το σημείο αυτό λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών και θεωρείται ότι το δυναμικό του είναι μηδέν (0). Πρακτικά, η «άπειρη απόσταση» είναι ίση με 5–10 φορές τη μεγαλύτερη διάσταση του ηλεκτροδίου γείωσης. Για παράδειγμα, η απόσταση της άπειρης γης, για γειωτές ράβδου με μήκος 3m, είναι 20m [1].

Αν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση V ως προς την άπειρη γη, δημιουργείται ένα πεδίο ροής και δυναμικού γύρω από τον γειωτή. Όσο αυξάνεται η απόσταση από τον γειωτή, τόσο μειώνεται η τάση. Το διάγραμμα με συνιστώσες την τάση και την απόσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης ονομάζεται χαάνη δυναμικού του γειωτή (Σχήμα 2.1) [1].

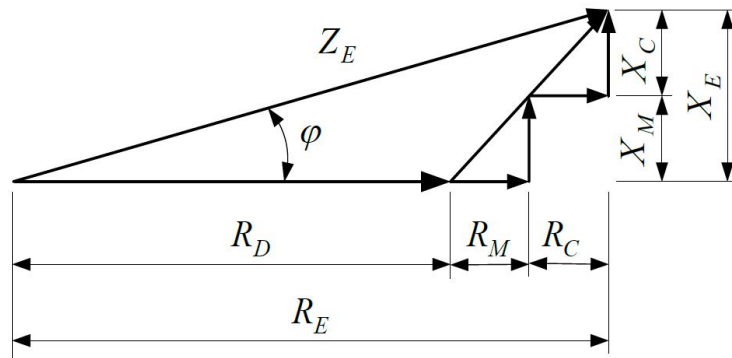


Σχήμα 2.1: Χαάνη δυναμικού [1].

Από τη χαάνη δυναμικού μπορούν να εκτιμηθούν η τάση επαφής και η βηματική τάση. Η τάση επαφής είναι ίση με την πτώση τάσης σε απόσταση στο έδαφος μήκους $1m$ από τον γειωτή. Η βηματική τάση είναι η μέγιστη πτώση τάσης σε μήκος $1m$ κατά μήκος του πεδίου ροής του ρεύματος στην περιοχή του εδάφους που μας ενδιαφέρει. Επιπρόσθετα, από τη χαάνη δυναμικού μπορεί να προσδιοριστεί η περιοχή επίδρασης του γειωτή, ή αλλιώς η απόσταση της άπειρης γης, καθώς και να εκτιμηθεί το σφάλμα στη μέτρηση της αντίστασης γείωσης [2].

2.1.2 Αντίσταση γείωσης και σύνθετη αντίσταση γείωσης

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος γείωσης καθορίζεται κυρίως από τη σύνθετη αντίστασή του Z_E . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, η σύνθετη αντίσταση γείωσης μπορεί να εκφρασθεί από την εξίσωση (2.1) [1].



Σχήμα 2.2: Διανυσματικό διάγραμμα σύνθετης αντίστασης σε σύστημα γείωσης[1].

$$Z_E = \sqrt{R_E^2 + X_E^2} \quad (2.1)$$

$$R_E = R_D + R_M + R_C \quad (2.2)$$

Από την εξίσωση 2.2 φαίνεται ότι η αντίσταση γείωσης R_E είναι το άθροισμα της αντίστασης διαχύσεως R_D , της αντίστασης του μεταλλικού αγωγού που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο γείωσης R_M και της αντίστασης του αγωγού γείωσης R_C που συνδέει τον κύριο ζυγό γείωσης της εγκατάστασης με το ηλεκτρόδιο γείωσης. Η αντίσταση διαχύσεως R_D είναι η αντίσταση που εμφανίζεται μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και του περιβάλλοντος εδάφους.

Η αντίδραση X_E του συστήματος γείωσης εκφράζεται από τη σχέση [1]:

$$X_E = X_M + X_C \quad (2.3)$$

Για παροχή AC, η αντίδραση του αγωγού γείωσης είναι σημαντική μόνο στην περίπτωση εκτεταμένων ταινιών γείωσης ή στην περίπτωση ράβδων γείωσης μεγάλου μήκους. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η διαφορά μεταξύ της σύνθετης αντίστασης γείωσης και της αντίστασης γείωσης είναι τόσο μικρή, ώστε συχνά να μη γίνεται καμιά διάκριση μεταξύ αυτών των δύο ποσοτήτων. Τα σχετικά βιομηχανικά πρότυπα χρησιμοποιούν αυτές τις ποσότητες σαν να είναι ταυτόσημες [1].

Στις μετρήσεις της αντίστασης γείωσης που διεξάγονται με παροχή AC, η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι εκείνη που στην πραγματικότητα μετρείται. Αν η συχνότητα της μέτρησης είναι μεγαλύτερη από 50Hz, τότε εμφανίζεται μια ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή της σύνθετης αντίστασης γείωσης. Παρόλα αυτά, δεν αποτελεί πρόβλημα η υπερτίμηση της σύνθετης αντίστασης γείωσης, καθώς αυτό είναι υπέρ της ασφάλειας [3].

2.1.3 Θεωρητικός υπολογισμός αντίστασης γείωσης

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 γνωστό ότι συνήθως εμφανίζεται αξιοσημείωτη μεταβολή της αγωγιμότητας του εδάφους στην περιοχή γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης, αλλά η επίδραση αυτής της μεταβολής είναι ένα ξεχωριστό θέμα, το οποίο απαιτεί διαφορετικού είδους προσεγγίσεις [4].

Στη βιβλιογραφία [4] μπορούν να αναζητηθούν εξισώσεις που δίνουν τη θεωρητική αντίσταση γείωσης για διάφορους τύπους γειωτών, ωστόσο στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστούν οι εξισώσεις που αφορούν τους γειωτές ράβδου.

Μία κατακόρυφη ράβδος γείωσης είναι ένας μεμονωμένος κύλινδρος και η ροή του ρεύματος από αυτήν προς το έδαφος και διαμέσου του εδάφους, υπολογίζεται από τις ίδιες σχέσεις που υπολογίζεται και η ροή ενός ρευστού διηλεκτρικού από ένα μεμονωμένο φορτισμένο κύλινδρο. Επομένως, το πρόβλημα της αντίστασης γείωσης μιας ράβδου γείωσης είναι ουσιαστικά το ίδιο με το πρόβλημα της χωρητικότητας ενός μεμονωμένου κυλίνδρου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μεγάλο, εν συγκρίσει με την ακτίνα του.

Μετά τη μετατροπή της εξίσωσης για τη χωρητικότητα σε εξίσωση για την αντίσταση γείωσης, προκύπτει για την αντίσταση ενός κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου ο ακόλουθος τύπος [4]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (2.4)$$

όπου:

R είναι η αντίσταση γείωσης (σε Ω),

ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους που περικλείει το ηλεκτρόδιο (σε Ω·m),

L είναι το μήκος του κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου (σε m) και

r είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου (σε m).

Για ηλεκτρόδια εγκιβωτισμένα σε βελτιωτικό υλικό, η αντίσταση γείωσης δίνεται από τον τύπο [5, 6, 7]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi L} (\ln r_2 - \ln r_1) + \frac{\rho_2}{2\pi L} (\ln 4L - 1 - \ln r_2) \quad (2.5)$$



Όπου:

R είναι η αντίσταση γείωσης (σε Ω),

ρ_2 είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (σε $\Omega \cdot m$),

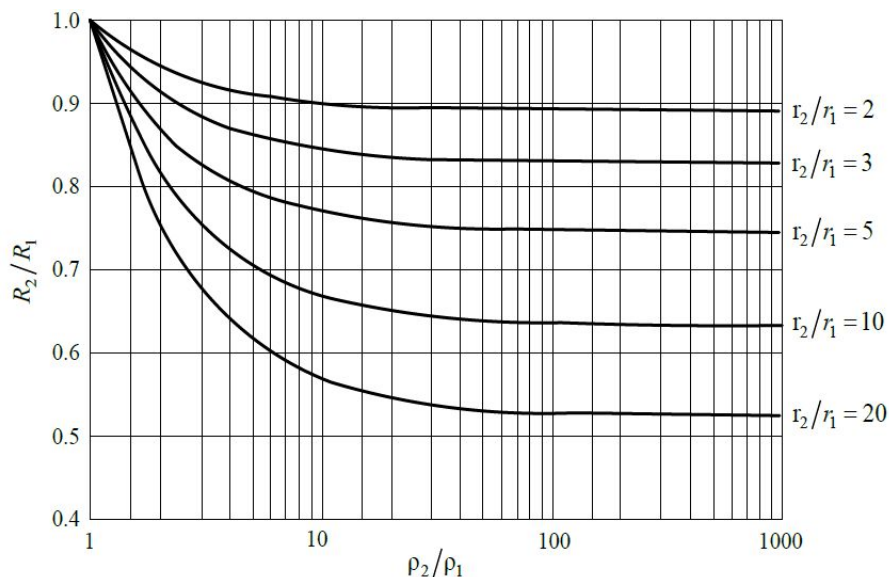
ρ_1 είναι η ειδική αντίσταση του βελτιωτικού υλικού (σε $\Omega \cdot m$),

L είναι το μήκος του κατακόρυφου κυλινδρικού ηλεκτροδίου (σε m) και

r_2 είναι η ακτίνα του όγκου του βελτιωτικού υλικού (σε m) και

r_1 είναι η ακτίνα του μεταλλικού πυρήνα που βρίσκεται στο εσωτερικό τμήμα της ακτίνας r_2 (σε m).

Παρατηρώντας το παρακάτω Σχήμα 2.3 προκύπτει η αξιοσημείωτη 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 [4].



Σχήμα 2.3: Ελάττωση της αντίστασης για διάφορες σχέσεις ακτίνων και ειδικών αντιστάσεων [1].

2.1.4 Πειραματικός προσδιορισμός αντίστασης γείωσης

Παρακάτω αναλύονται οι τρεις βασικές μέθοδοι πειραματικής μέτρησης της αντίστασης γείωσης.

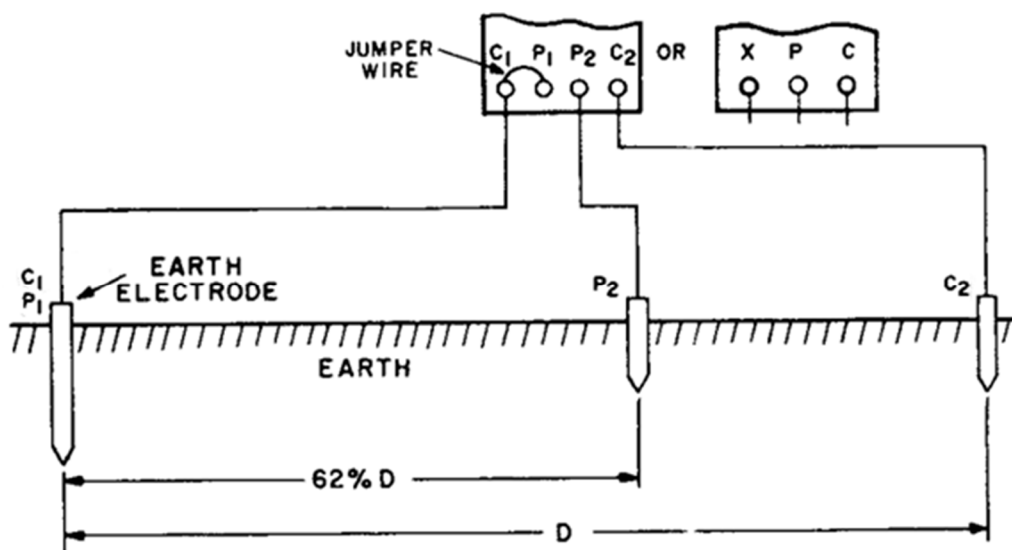
1. Μέθοδος πτώσης δυναμικού (*fall of potential method*):

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη για όλους τους τύπους των εφαρμογών, είτε αυτούσια όπως παρατίθεται εδώ, είτε με ορισμένες παραλλαγές της, κυρίως σε ό,τι αφορά στις τελικές θέσεις των βοηθητικών ηλεκτροδίων. Η μέθοδος αυτή μαζί με τις παραλλαγές της, προτείνεται από το

πρότυπο IEEE 81-2012 [8]. Καλείται και μέθοδος των τριών σημείων (*3 Point Method*), ακριβώς γιατί απαιτεί εκτός από τη χρήση του ηλεκτροδίου γείωσης, άλλα δύο βοηθητικά ηλεκτρόδια [9]. Η διάταξη μέτρησης εικονίζεται στο Σχήμα 2.4, όπου C1P1 είναι το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο γείωσης. Η μέτρηση της τάσης γίνεται με βολτόμετρο μεταξύ του ηλεκτροδίου C1P1, και του βοηθητικού P2, το οποίο βρίσκεται μεταξύ του ηλεκτροδίου C1P1 και του τρίτου ηλεκτροδίου που καλείται C2. Η μέτρηση του ρεύματος γίνεται με αμπερόμετρο τοποθετημένο μεταξύ των ηλεκτροδίων C1P1 και C2. Με απλή εφαρμογή του νόμου του Ohm, υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης. Συγκεκριμένα:

$$R = V/I \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.6)$$

όπου V είναι η ένδειξη του βολτομέτρου και I η ένδειξη του αμπερομέτρου του Σχήματος 2.4. Ο παραπάνω τύπος (2.6), βεβαίως, ισχύει αγνοώντας την αντίσταση του βολτομετρικού στοιχείου μέτρησης της τάσης, κάτι το οποίο συμβαίνει όταν αυτό έχει μεγάλη εσωτερική αντίσταση, περίπου δεκαπλάσια της αντίστασης των βοηθητικών ηλεκτροδίων τάσης. Θεωρείται ικανοποιητική η τιμή των 40kΩ [3].



Σχήμα 2.4: Μέθοδος πτώσης δυναμικού για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης [10].

Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση των βοηθητικών ηλεκτροδίων και ιδιαιτέρως του P2, ώστε να μην υπάρχει αλληλοκάλυψη (*overlap*) και συνεπώς αλληλεπίδραση των περιοχών γύρω από τα ηλεκτρόδια στις οποίες θα διασκορπιστεί το ρεύμα έγχυσης. Ως γνωστόν, το ρεύμα που οδεύει προς τη γη μέσω των ηλεκτροδίων διαχέεται σε όλη την περιοχή γύρω από αυτά και όχι μόνο προς ένα σημείο ή προς μία μόνο κατεύθυνση [11]. Συνεπώς πρέπει να παίρνει κανείς πολλές μετρήσεις κατά μήκος του άξονα C1P1-C2, μετακινώντας το ηλεκτρόδιο P2, μέχρις ότου βρεθεί αυτό στο τμήμα που μεταβάλλεται ελάχιστα το

δυναμικό, ως ποσοστό της συνολικής απόστασης C1P1-C2. Στην περιοχή αυτή, η οποία καλείται και περιοχή του 62% οι τιμές της αντίστασης γείωσης μεταβάλλονται πολύ λίγο, για αντίστοιχα μικρή μετακίνηση του ηλεκτροδίου P2 (Σχήμα 2.4). Σήμερα, η μέτρηση της αντίστασης γείωσης με αυτήν τη μέθοδο, γίνεται με τη βοήθεια ειδικού οργάνου, το οποίο ονομάζεται γειωσόμετρο.

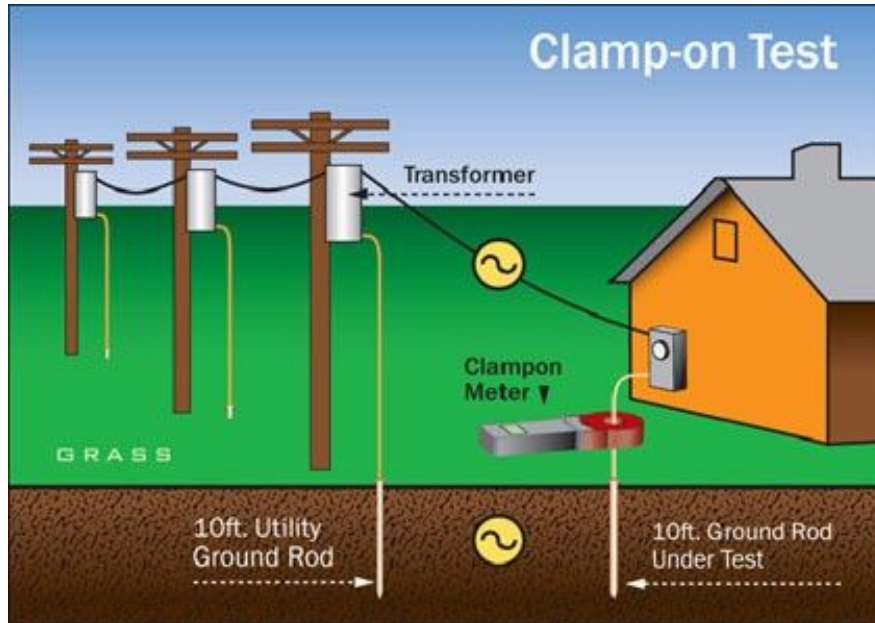
Προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου, καθώς η συχνότητα της πηγής θα πρέπει να είναι διαφορετική από τα 50Hz, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση από τα γειτονικά γειωμένα δίκτυα. Συνηθίζεται να επιλέγονται συχνότητες στην περιοχή των 70–140Hz [11].

2. Μέθοδος δύο σημείων (two point method)

Ονομάζεται αλλιώς και μέθοδος νεκρής γης (dead earth method) [10]. Δεν είναι ιδιαίτερως αξιόπιστη καθώς πραγματοποιείται με πολλές παραδοχές. Είναι η τελευταία επιλογή εάν η μέθοδος πτώσης δυναμικού δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί λόγω έλλειψης χώρου. Προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ήδη πολύ καλού συστήματος γείωσης, για παράδειγμα αγωγών ύδρευσης, με τέτοια έκταση ώστε η τιμή της αντίστασης γείωσης να είναι μικρότερη από 1Ω. Εφόσον χρησιμοποιείται γειωσόμετρο με τέσσερις ακροδέκτες, αυτοί πρέπει να βραχυκυκλωθούν ανά δύο μεταξύ τους και στη συνέχεια το ένα ζευγάρι να συνδεθεί με το σύστημα γείωσης, ενώ το άλλο με το προς μέτρηση ηλεκτρόδιο γείωσης. Με αυτόν τον τρόπο, μετρίεται μια συνολική αντίσταση γείωσης, η οποία είναι η εν σειρά αντίσταση των δύο συστημάτων, και αφού η αντίσταση του ενός θεωρείται μικρότερη της μονάδας, η τιμή που εμφανίζει το γειωσόμετρο αποτελεί ουσιαστικά και την αντίσταση γείωσης του εξεταζόμενου ηλεκτροδίου [11].

3. Clamp-on method (induced frequency)

Είναι μία νέα μέθοδος μέτρησης της αντίστασης γείωσης η οποία, σε αντίθεση με τη μέθοδο της πτώσης δυναμικού, απαιτεί το σύστημα γείωσης να είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο ηλεκτρισμού, συνήθως μέσω του ουδέτερου αγωγού [11]. Χρησιμοποιεί ως πηγή, έναν ειδικό μετασχηματιστή για να προκαλέσει ταλαντευόμενη τάση (συχνότητας συχνά 1,7 kHz) στο προς εξέταση σύστημα γείωσης.



Σχήμα 2.5: Μέθοδος clamp-on [12].



Εικόνα 2.1: Εφαρμογή της clamp-on μεθόδου στην πράξη [11].

2.2 Βελτιωτικά Υλικά Γείωσης

2.2.1 Εισαγωγή

Η κύρια χρησιμότητα ενός συστήματος γείωσης είναι η μεταφορά και διάχυση, στη γη, των ρευμάτων σφάλματος στον ελάχιστο δυνατό χρόνο και με την ελάχιστη δυνατή αντίσταση στη ροή του ρεύματος. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται αφενός η ομαλή λειτουργία και ακεραιότητα του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων και αφετέρου η ασφάλεια του προσωπικού και οποιουδήποτε κινείται στο γύρω χώρο, λόγω των κλίσεων δυναμικού που εμφανίζονται στο έδαφος από τη ροή των ρευμάτων σφάλματος. Αυτός ακριβώς ο ρόλος τονίζεται και στον ορισμό του ηλεκτροδίου γείωσης, ως αγωγού ενσωματωμένου στη γη και χρησιμοποιούμενου για τη διατήρηση του δυναμικού γης στους αγωγούς που συνδέονται σε αυτόν, ο οποίος δίνεται στα Πρότυπα *AIEE No 81* [13] και *ANSIC 63.14-1998* [14].

Σε πολλές όμως περιπτώσεις, το έδαφος παρουσιάζει πολύ υψηλή ειδική αντίσταση και παράλληλα ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση του συστήματος γείωσης είναι πολύ περιορισμένος. Επίσης, το κόστος επέκτασης της γειωτικής διάταξης με εγκατάσταση επιπλέον ηλεκτροδίων σε τέτοιες περιπτώσεις είναι αρκετά υψηλό οπότε αναπτύχθηκε η εναλλακτική της διαμόρφωσης του εδάφους γύρω απ' τα ηλεκτρόδια γείωσης με βελτιωτικά υλικά γείωσης. Με τον όρο βελτιωτικό υλικό γείωσης, τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα [15] αναφέρονται σε ένα αγώγιμο υλικό που επιφέρει μείωση στην αντίσταση γείωσης ενός συστήματος γείωσης. Πρωταρχική, λοιπόν, προϋπόθεση που πρέπει να πληροί ένα υλικό, πριν επιλεγεί ως βελτιωτικό, είναι να έχει πολύ υψηλή αγωγιμότητα, δηλαδή να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή αντίστασης. Όμως, η αγωγιμότητα ενός υλικού δεν αρκεί για να χαρακτηριστεί ως αποτελεσματικό βελτιωτικό υλικό γειώσεων.

Επιγραμματικά αναφέρονται τα κριτήρια με βάση τα οποία πρέπει να γίνεται η αξιολόγηση και ο τελικός χαρακτηρισμός ενός υλικού ως αποτελεσματικού ή μη βελτιωτικού γειώσεων [15], [16], [17]:

1. Αγωγιμότητα
2. Να είναι ασφαλές στη χρήση του και γενικότερα φιλικό προς το περιβάλλον
3. Να είναι μόνιμο και να διατηρεί τις ιδιότητές του
4. Να μην είναι είναι διαβρωτικό για το ηλεκτρόδιο γείωσης
5. Εύκολο και απλό στην επεξεργασία.



Από το 2011 και μετά, ένα νέο βελτιωτικό υλικό, προκειμένου να συμμορφώνεται με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα [15], θα πρέπει να υποβάλλεται σε συγκεκριμένους ελέγχους ώστε να αποδειχτεί στην πράξη η ικανοποίηση ή μη των κριτηρίων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή η αποτελεσματική δράση του. Ο πρώτος από αυτούς τους ελέγχους είναι η δοκιμή διαρροής (ή απόπλυσης – leaching test) και κρίνεται επιτυχής εφόσον τα αποτελέσματα ικανοποιούν τους εθνικούς ή διεθνείς κανονισμούς. Δεύτερος έλεγχος είναι ο προσδιορισμός του θείου στο υπό εξέταση υλικό (sulphur determination) κατά ISO 4689-3 ή ISO 14869-1. Θεωρείται ότι το υλικό περνά επιτυχώς αυτόν τον έλεγχο όταν όλες οι μετρούμενες τιμές είναι μικρότερες από 2%. Ακολουθεί ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης του υλικού με τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων, όπως αυτή περιγράφεται στο ASTM G 57-06. Η μετρούμενη τιμή θα πρέπει να είναι χαμηλότερη, ή το πολύ ίση, με αυτήν που δίνει ο κατασκευαστής. Τέλος, το υπό εξέταση βελτιωτικό υλικό θα πρέπει να υπόκειται σε δοκιμή διάβρωσης. Ο ρυθμός διάβρωσης προσδιορίζεται με τη χρήση ποτενσιοδυναμικών μεθόδων αντίστασης πόλωσης, όπως περιγράφεται στις προδιαγραφές ASTM G 59-97 και ASTM G 102-89. Για να περάσει επιτυχώς τον παραπάνω έλεγχο το υλικό θα πρέπει, για ηλεκτρόδια γείωσης από κράμα χαλκού, η αντίσταση πόλωσης να είναι μεγαλύτερη από $4\Omega\cdot\text{m}^2$ για μη επιθετικά περιβάλλοντα και από $8\Omega\cdot\text{m}^2$ για επιθετικά περιβάλλοντα, ενώ για γαλβανισμένα ηλεκτρόδια γείωσης, οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης πόλωσης πρέπει να είναι $3\Omega\cdot\text{m}^2$ και $7,6\Omega\cdot\text{m}^2$ [1].

Το ιδανικό βελτιωτικό υλικό θα πρέπει να πληροί όλα τα παραπάνω και ταυτόχρονα το κόστος επεξεργασίας, μεταφοράς και εγκατάστασης του να είναι πολύ χαμηλό. Σημειώνεται ακόμα ότι τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα [15] δεν προτείνουν τη χρήση συγκεκριμένων βελτιωτικών υλικών γειώσεων, αλλά αναφέρουν ότι η επιλογή του υλικού εξαρτάται από την ικανότητά του να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Η σημασία των παραπάνω, εμπειρικών κυρίως «κανόνων», έγινε φανερή σταδιακά μετά από μελέτες που διεξήχθησαν για ερευνητικούς σκοπούς τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά συχνά και στην πράξη, σε συστήματα γείωσης όπου είχαν χρησιμοποιηθεί βελτιωτικά υλικά κατά το σχεδιασμό τους. Για παράδειγμα, ως γνωστόν η αγωγιμότητα είναι κυρίως ηλεκτρολυτική, συνεπώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υγρασία και τα άλατα που βρίσκονται στο έδαφος. Ενδεικτικά σημειώνεται ότι το θαλασσινό νερό παρουσιάζει ειδική αντίσταση μόλις $1\Omega\cdot\text{m}$ ενώ το καθαρό βρόχινο νερό παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από $1000\Omega\cdot\text{m}$, οπότε γρήγορα αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στην πράξη η ιδέα της χρήσης ως βελτιωτικών υλικών, διαφόρων τύπων αλάτων, είτε μόνα τους είτε σε συνδυασμό με νερό και αναμειγμένα στο χώμα περιμετρικά του ηλεκτροδίου γείωσης. Βραχυπρόθεσμα, λοιπόν, λόγω της χαμηλής ειδικής αντίστασης του μείγματος,

αναμένεται μεγάλη μείωση της αντίστασης γείωσης. Οι περισσότερες χημικές ουσίες, όμως, διαλύονται στο νερό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με την πάροδο του χρόνου λόγω των βροχών, οι ουσίες αυτές όπως και το αλάτι να διαλύονται ή να παρασύρονται από το νερό, με αποτέλεσμα οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους να επιστρέφουν στις αρχικές τους τιμές. Συχνά, λοιπόν επιλέγεται το κοινό αλάτι (NaCl) ως βελτιωτικό υλικό, όμως εκτός της μη μονιμότητας όπως ανακαλύφθηκε, παρουσιάζει και μία ακόμη ιδιότητα, να διαβρώνει τα μέταλλα με τα οποία έρχεται σε επαφή [1]. Συμπερασματικά, μακροπρόθεσμα η χρήση τέτοιου υλικού θα επιφέρει εντελώς αντίθετα αποτελέσματα από αυτά που αναμένονταν, δηλαδή θα καταστεί το σύστημα γείωσης μη αποτελεσματικό. Παρόμοια περίπτωση αποτελεί και η σκόνη άνθρακα (καρβουνόσκονη) η οποία, μπορεί μεν να μειώνει την ειδική αντίσταση του εδάφους, αλλά περιέχει οξείδια άνθρακα, τιτανίου, νατρίου και μαγνησίου τα οποία αντιδρούν με τον χαλκό και τον χάλυβα διαβρώνοντας έτσι με γρήγορο ρυθμό τα ηλεκτρόδια.

2.2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το πρόβλημα της βελτίωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είχε αρχίσει να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, σε ερευνητικό επίπεδο, από τη δεκαετία κιάλας του 1960 [9]. Στα χρόνια που ακολούθησαν, δοκιμάστηκαν ποικίλα βελτιωτικά υλικά γείωσης, καθώς και αρκετές τεχνικές προς την κατεύθυνση αυτή. Οι Kutter and Lange [18] τη δεκαετία του 1960 (1967) και ο Mc Gowan [19] τη δεκαετία του 1970 (1975) μελέτησαν τις ιδιότητες του μπεντονίτη ως βελτιωτικό εδάφους, συγκρίνοντας την ειδική αντίσταση που επιτυγχανόταν με τη χρήση αυτού του υλικού σε διάφορα εδάφη με την ειδική αντίσταση του φυσικού εδάφους. Έπειτα, στις αρχές της δεκαετίας του '80, ο Warren R. Jones [20] πρότεινε μία μέθοδο εγκατάστασης ηλεκτροδίου ράβδου, χρησιμοποιώντας ράβδο μπεντονίτη, ενώ οι Hiroshi Yamane, Tsuyoshi Ideguchi και Masamitsu Tokuda, σε μελέτη που δημοσιεύτηκε το 1993 [21], πρότειναν τη χρήση πολυμερών που συγκρατούν το νερό για τη μείωση της αντίστασης γείωσης, ιδέα που προέκυψε χάρη στις υδρόφιλες ιδιότητές τους, στις ιδιότητες διόγκωσης και στην καταπληκτική κατακράτηση νερού που εμφανίζουν. Επίσης, το 1999 οι Kostic et al. [22] παρουσίασαν τα αποτελέσματα της βελτίωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των βροχών γείωσης, χρησιμοποιώντας μπεντονίτη και ιλύ γεωτρήσεων πετρελαίου ως βελτιωτικά εδάφους και λίγα χρόνια αργότερα (το 2004) οι Li-Hsiung Chen, Jiann-Fuh Chen, Tsorng-Juu Liang, και Wen-I Wang [23], σε έρευνα που διεξήγαγαν, μελέτησαν τη συμπεριφορά ενός νέου βελτιωτικού υλικού βασισμένου στην κοκκώδη σκωρία υψικαμίνων που παράγεται κατά την κατεργασία του σιδήρου ή του χάλυβα σε μεγάλες ποσότητες και μέχρι σήμερα αντιμετωπίζεται ως απόβλητο. Το ίδιο έτος (2004) οι Hugo E. Martínez et al. [24] διερεύνησαν την



αποτελεσματικότητα μιας νέας τεχνητής διαμόρφωσης του εδάφους με στόχο τη μείωση της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου. Η νέα μέθοδος αφορούσε τη χρήση, ως βελτιωτικού υλικού γείωσης, ενός μείγματος από ανόργανα άλατα, όπως για παράδειγμα χλωριούχο νάτριο, στηβενσίτη ($\text{Ca}_{0.2}\text{Mg}_{2.9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), αγκερίτη ($\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$), μοντμοριλονίτη ($\text{Na}_{0.33}(\text{Al},\text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), κ.ά.. Δύο χρόνια αργότερα, το 2006 οι Shin-Der Chen, Li-Hsiung Chen, Chih-Kun Cheng και Jiann-Fuh Chen [16] παρουσίασαν τη μελέτη τους πάνω στην πιθανή χρήση ως βελτιωτικό υλικό γείωσης ενός υποπροϊόντος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, της ιπτάμενης τέφρας.

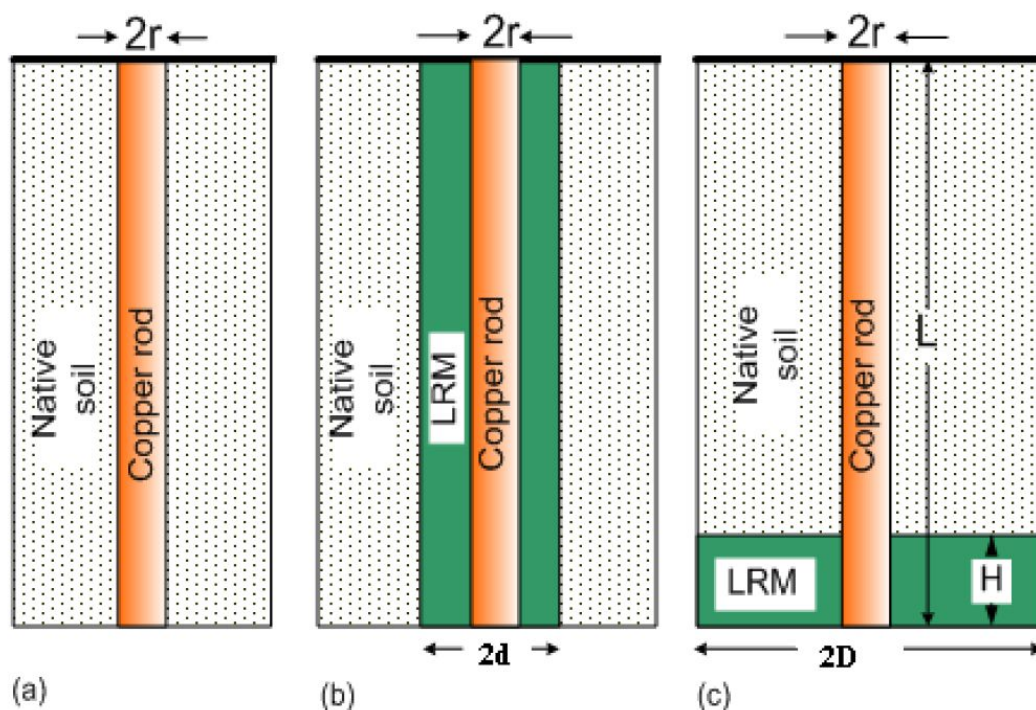
Τα τελευταία δέκα περίπου χρόνια, οι έρευνες για τη βελτίωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους συνεχίζονται με την επέκταση των υπάρχοντων αποτελεσμάτων, αλλά και με τη χρησιμοποίηση νέων βελτιωτικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, το 2008 ο Kumarasinghe [25] από το τμήμα Μετεωρολογίας της Σρι Λάνκα πρότεινε ένα χαμηλού κόστους σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χωριό στη Σρι Λάνκα. Διεξήγαγε ένα πείραμα στο οποίο χρησιμοποίησε ως βελτιωτικά υλικά εδάφους φυσικά υλικά, όπως τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας και σκόνη ρυζιού. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα από τη χρήση μπεντονίτη. Τα πειραματικά αποτελέσματα λοιπόν έδειξαν ότι αυτά τα φυσικά βελτιωτικά εδάφους ήταν εξίσου καλά με τον μπεντονίτη για τη βελτίωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους [11].

Το 2010 οι J. Jasni et al. [26] μελέτησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες φυσικών βελτιωτικών εδάφους, ως εναλλακτικές λύσεις έναντι του μπεντονίτη. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν μπεντονίτης, τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, κηπευτικό αργιλώδες χώμα και σκόνη ρυζιού. Εγκαταστάθηκαν για το σκοπό αυτό πέντε ηλεκτρόδια και εφαρμόστηκε ο κανόνας του 61,8% της μεθόδου πτώσεως δυναμικού. Τα αποτελέσματα μετά από 138 ημέρες μετρήσεων έδειξαν ότι η απόδοση των ηλεκτροδίων με βελτιωτικά εδάφους ήταν σημαντικά διαφορετική από την αντίστοιχη των ηλεκτροδίων που είχαν εγκατασταθεί απευθείας στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, αυτά τα υλικά καταφέρνουν να διατηρούν με μεγάλη επιτυχία την υγρασία του εδάφους και να μειώνουν αποτελεσματικά την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πολύ καλύτερη διάχυση του ρεύματος μέσα στο έδαφος. Ειδικότερα, το αργιλώδες κηπευτικό χώμα παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές από τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά σε βάθος χρόνου και εμφάνισε την καλύτερη ικανότητα διατήρησης της υγρασίας εδάφους, αναδεικνύοντάς το ως το πιο αποτελεσματικό βελτιωτικό σε σύγκριση με τα άλλα που μελετήθηκαν [3].

Σε άλλη μελέτη το 2010 οι W. F. Wan Ahmad et al. [27] εξέτασαν διάφορα χημικά βελτιωτικά εδάφους όπως χλωριούχο νάτριο (NaCl), θειοθειικό νάτριο

($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), 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, έδειξαν ότι η αντίσταση γείωσης των υπό εξέταση ηλεκτροδίων μειώθηκε αναλογικά με το χρόνο και ειδικότερα, το NaCl παρουσίασε μείωση κατά 67%, το $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ κατά 59,58%, το MgCl_2 κατά 58,74%, το CuSO_4 κατά 7,88% ενώ τέλος το NH_4Cl εμφάνισε αύξηση της αντίστασης γείωσης κατά 15,64%. Ως εκ τούτου, το NaCl αποδείχθηκε το χημικό βελτιωτικό με την καλύτερη απόδοση ανάμεσα σε αυτά που μελετήθηκαν και η συγγραφέας το προτείνει για χρήση σε συστήματα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας [3].

Το 2011 στη μελέτη των A.A. Al-Arainy, N.H. Malik, M.I. Qureshi και Y. Khan [28] επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός της βέλτιστης σχεδίασης συστήματος γείωσης, συμπεριλαμβανομένου βελτιωτικού υλικού, σε περιοχές με πολύ ξηρό έδαφος (έρημος) που παρουσιάζει πολύ υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν οι γειωτικές διατάξεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.6.

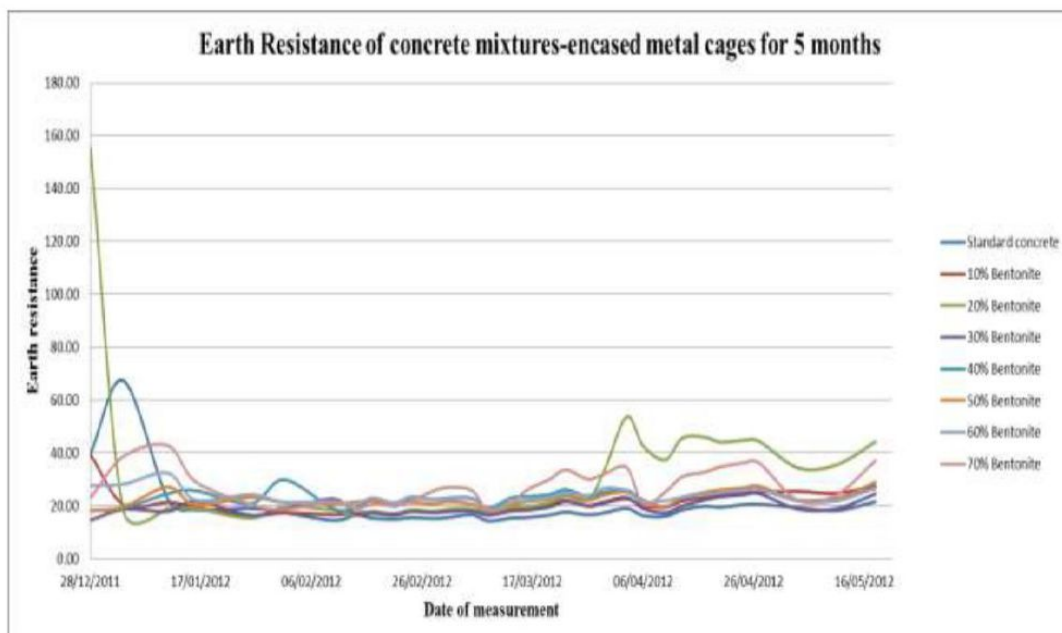


Σχήμα 2.6: Γειωτικές διατάξεις α) Ράβδος σε φυσικό έδαφος, b) Ράβδος πλήρως εγκιβωτισμένη σε βελτιωτικό υλικό, c) Ράβδος εμπηγμένη μερικώς σε βελτιωτικό υλικό [28].

Εξετάζοντας τις διαφορετικές παραμέτρους που επηρεάζουν την αντίσταση γείωσης κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα βελτιωτικά υλικά γείωσης είναι ιδιαίτερα αποδοτικά, ακόμα και στο ξηρό έδαφος, όπου απουσιάζει η υγρασία. Γενικά, όσο μεγαλύτερη ήταν η αύξηση του όγκου του βελτιωτικού που χρησιμοποίησαν, τόσο μεγαλύτερη ήταν η μείωση της αντίστασης γείωσης του

εδάφους. Παρόλα αυτά, όπως προσδιορίστηκε για τη διάταξη (c), για σταθερά D και L, η χρησιμοποίηση μεγαλύτερου όγκου βελτιωτικού (αύξηση του H), δεν επιφέρει την αναμενόμενη μείωση στην αντίσταση γείωσης.

Το 2012 οι Siow Chun Lim et al. [29] παρουσίασαν στο Διεθνές Συνέδριο Αντικεραυνικής Προστασίας (ICLP) που διεξήχθη στη Βιέννη, τα αποτελέσματα της έρευνάς τους σχετικά με τη συμπεριφορά μείγματος μπεντονίτη και σκυροδέματος ως βελτιωτικό υλικό γείωσης. Η διάταξη του συστήματος γείωσης αποτελείτο από μεταλλικούς κλωβούς χάλυβα θαμμένους σε τοποθεσία με σχετικά ομοιογενή επιφανειακή ειδική αντίσταση εδάφους $100\Omega\cdot m$. Σε αυτούς έγινε προσθήκη του νέου μείγματος από μπεντονίτη και σκυρόδεμα σε αναλογίες μπεντονίτη στο μείγμα 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% και 70%, ενώ το υπόλοιπο ήταν τσιμέντο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης γείωσης, αρχικά έδειξαν ότι στην περίπτωση μείγματος με ποσοστό μπεντονίτη 20% υπήρξε μείωση της αντίστασης γείωσης σε σύγκριση με την τιμή που παρουσίασε ο κλωβός με μόνο σκυρόδεμα γύρω του, ο οποίος είναι και ο κλωβός αναφοράς. Σε βάθος χρόνου πέντε μηνών κατέστη προφανές (Σχήμα 2.7), ότι όλα τα μείγματα με μπεντονίτη στη σύστασή τους είχαν χειρότερη επίδοση από το απλό σκυρόδεμα, όμως πρέπει να σημειωθεί ότι παρουσίαζαν μεγαλύτερη σταθερότητα. Συνεπώς, αποδείχτηκε στην έρευνα αυτή ότι η χρήση μείγματος μπεντονίτη με σκυρόδεμα δε βελτιώνει τη μετρούμενη αντίσταση γείωσης του συστήματος και ότι η συμπεριφορά του σκυροδέματος ως βελτιωτικό υλικό γείωσης είναι εξαιρετική.



Σχήμα 2.7: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης για διαφορετικές αναλογίες μπεντονίτη - σκυροδέματος στο βελτιωτικό [29].

Η ίδια ομάδα επιστημόνων (Siow Chun Lim, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Chandima Gomes, Norhafiz Azis) [30] παρουσίασε στο Διεθνές Συνέδριο Αντικεραυνικής Προστασίας (ICLP), που διεξήχθη στη Σανγκάη το 2014, τη συνέχεια της παραπάνω έρευνας και τα αποτελέσματα αυτής για σημαντικά διευρυμένο χρονικό διάστημα μετρήσεων. Μετά από τις διάφορες εκδοχές που δοκίμασαν, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μίγμα σκυροδέματος – μπεντονίτη με την καλύτερη συμπεριφορά, τόσο ως προς τις χαμηλές τιμές της αντίστασης γείωσης, όσο και ως προς τη διακύμανση αυτών, αποτελείται από 30% μπεντονίτη και 70% σκυρόδεμα. Τέλος, τόνισαν ότι η μείωση της μηχανικής αντοχής του συγκεκριμένου μίγματος σε σχέση με το σκέτο σκυρόδεμα είναι πολύ μικρή, ωστόσο επεσήμαναν την ανάγκη να διερευνηθούν περισσότερο παράγοντες όπως η υγρασία, το είδος του νερού που χρησιμοποιήθηκε στο μίγμα, κ.ά..

Στη μελέτη των C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir, Chamath. L. Kottachchi και S. C. Lim [31], που δημοσιεύτηκε το 2014, εξετάστηκαν διάφορα είδη βιομηχανικών αποβλήτων, αλλά και υλικά με πολύ χαμηλό κόστος, ως βελτιωτικά υλικά γείωσης, σε μια περίοδο 2-3 ετών. Από αυτά, την καλύτερη απόδοση είχε η πούδρα από οξειδία μετάλλων, τα οποία μάλιστα φτάνουν την απόδοση των εμπορικά διαθέσιμων βελτιωτικών υλικών, μετά από μερικούς μήνες, ενώ η διάβρωση που προκαλεί η πούδρα στα ηλεκτρόδια γείωσης είναι μικρότερη από 1%. Πολύ καλή απόδοση ως προς τη διάβρωση παρουσίασαν, επίσης, ο ασβέστης και ο οπτάνθρακας και την καλύτερη συνολικά απόδοση είχε ο μπεντονίτης. Αντιθέτως, το χλωριούχο νάτριο, που χρησιμοποιείται ευρέως, επέδειξε μεγάλη διακύμανση στις τιμές της αντίστασης γείωσης καθώς και πολύ υψηλή διάβρωση των αντίστοιχων ηλεκτροδίων.

Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό ότι κατά τη διάχυση του ρεύματος σφάλματος προς τη γη, επιδιώκεται η εμφάνιση της μικρότερης δυνατής αντίστασης (αντίσταση γείωσης) στη διέλευση του ρεύματος. Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία η ανάπτυξη διαφόρων τεχνικών, καθώς και η χρησιμοποίηση βελτιωτικών υλικών, για τη μείωση της αντίστασης γείωσης και τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων. Με την ανάλυση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, των ειδών και της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων γείωσης, καθώς και με τον ορισμό των όρων βηματικής τάσης και τάσης επαφής, που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπως επίσης και με την εκτενή αναφορά στο μέγεθος της αντίστασης γείωσης και στις τεχνικές βελτίωσης της τιμής της, που έγινε στο παρόν κεφάλαιο, ολοκληρώνεται η θεωρητική μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται ανάλυση των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας και παρατίθεται ένας οδηγός για την εκτέλεση των προσομοιώσεων σε αυτήν με το λογισμικό πακέτο SES CDEGS.



Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.
- [2] Ε. Μαδούρογλου - Ν. Φωτίου, «Συμβολή των νευρωνικών δικτύων στη μελέτη της χρονικής μεταβολής της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2013.
- [3] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [4] Dwight H. B., “Calculation of Resistances to Ground”, Transactions of AIEE, vol. 55, pp. 1319–1328, 1936.
- [5] ANSI/IEEE Std 80-2013, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 2013.
- [6] E. J. Fagan and R. H. Lee, “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/August 1970.
- [7] 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.
- [8] ANSI/IEEE Std 81-2012, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a grounding system”, 2012.
- [9] AEMC Instruments, “Understanding Ground Resistance Testing”.
- [10] Megger Group Limited, “Getting Down To Earth: A practical guide to earth resistance testing”, MEG-456/MIL/5M/11.2005.
- [11] Αυγερινός Β. Σακελλαρίου, «Επίδραση του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014.

-
- [12] <http://www.esgroundingsolutions.com/how-to-do-electrical-grounding-system-testing>
- [13] Dick W. K. and Holliday H. R., "Impulse and Alternating Current Tests on Grounding Electrodes in Soil Environments", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 1, pp. 102–108, Jan/Feb 1978.
- [14] American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP) and Electrostatic Discharge (ESD) (Dictionary of EMC/EMP/ESD Terms and Definitions), ANSI C63.14-1998 (Revision of ANSI C63.14-1992), approved on 28 October 1998.
- [15] BS EN 62561-7, "Lightning Protection System Components (LPSC) - Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds", 2012.
- [16] Shin-Der Chen, Li-Hsiung Chen, Chih-Kun Cheng, Jiann-Fuh Chen, "An Experimental Study on the Electrical Properties of Fly Ash in the Grounding System", International Journal of Emerging Electric Power Systems Volume 7, Issue 2, 2006.
- [17] Qingbo Meng, Jin liang He, F. P. Dawalibi, J. Ma, "A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.
- [18] Kutter H. and Lange W., "Grounding improvement by using bentonite", *Elektrie*, 21, (11), pp.421–424, 1967.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Hiroshi Yamane, Tsuyoshi Ideguchi, and Masamitsu Tokuda, "New Ground Resistance-Reducing Material Based on Water-Absorbent Polymer", *Electronics and Communications in Japan*, Part 1, Vol. 77, No. 5, 1994.
-



-
- [22] Z.R. Radakovic and M.B. Kostic, "Behaviour of grounding loop with bentonite during a ground fault at an overhead line tower", IEE Proc.-Gener. Transin. Distrib. Vol. 148, No. 4, July 2001.
- [23] Li-Hsiung Chen, Jiann-Fuh Chen, Tsorng-Juu Liang, and Wen-I Wang, "A Study of Grounding Resistance Reduction Agent Using Granulated Blast Furnace Slag", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004.
- [24] Hugo E. Martínez, Edward L. Fuentealba, Luis A. Cisternas, Hector R. Galleguillos, Jorge F. Kasaneva, and Osvaldo A. de la Fuente, "A New Artificial Treatment for the Reduction of Resistance in Ground Electrode", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, April 2004.
- [25] Kumarasinghe Nuwan, "A low cost lightning protection system and its effectiveness", 20th International Lightning detection Conference, Tucson, Arizona, USA, 2008.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] A.A. Al-Arainy, N.H. Malik, M.I. Qureshi, Y. Khan. " Grounding pit optimization using low resistivity materials for applications in high resistivity soils", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 12, No. 1, art.3, 2011, pp. 1-18, 2011.
- [29] Siow Chun Lim, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Chandima Gomes και Sani Dahiru Buba, "Preliminary Results of the Performance of Grounding Electrodes Encased in Bentonite-Mixed Concrete", International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012.

-
- [30] Siow Chun Lim, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir, Chandima Gomes, Norhafiz Azis. "Steady state performance of improvised Ufer grounding practice", 32nd International Conference on Lightning Protection-ICLP 2014, Shanghai, China, October 11th-18th, 2014, pp. 572-580.
- [31] C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir, Chamath. L. Kottachchi, S. C. Lim, "Industrial wastes and natural substances for improving electrical earthing systems", International Journal of Electrical Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 39-47, 2014.



Κεφάλαιο 3

ΟΔΗΓΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται διεξοδικά ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται βήμα προς βήμα τα στάδια υλοποίησής της, ενώ παρατίθεται και ένας αναλυτικός οδηγός για το λογισμικό SES CDEGS και τους επιλύτες που χρησιμοποιήθηκαν (RESAP και MALZ) για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων στο πλαίσιο της εργασίας.

3.1 Σκοπός

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν τόσο η μελέτη της συμπεριφοράς της ειδικής αντίστασης του εδάφους όσο και της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο και τη μεταβολή των καιρικών συνθηκών (βροχόπτωση). Για τον σκοπό αυτόν ελήφθησαν μετρήσεις σε ειδικά διαμορφωμένη διάταξη στον χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, η οποία είχε εγκατασταθεί σε παρελθόντα χρόνο για τις ανάγκες ερευνητικής εργασίας [1]. Εν συνεχεία, διενεργήθηκαν προσομοιώσεις στο εξειδικευμένο πρόγραμμα CDEGS με τελικό στόχο τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο κομμάτι των προσομοιώσεων περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους. Αρχικά έπρεπε να υπολογιστεί η ειδική αντίσταση του εδάφους για κάθε ημέρα διεξαγωγής μετρήσεων. Με την εισαγωγή των πειραματικών μετρήσεων της αντίστασης του εδάφους στο πρόγραμμα CDEGS, οι οποίες ελήφθησαν με τη μέθοδο Wenner για ακτίνες 2, 4, 8, 12 και 16 μέτρων, υπολογίζονταν η ειδική αντίσταση του εδάφους κάθε ημέρας για μονωστρωματικό, διστρωματικό και τριστρωματικό θεωρητικό μοντέλο εδάφους. Όπως έχει προσδιοριστεί σε προηγούμενη ερευνητική εργασία [1], κατά την εκπόνηση των πρώτων μετρήσεων στη συγκεκριμένη διάταξη, είχε πραγματοποιηθεί ηλεκτροτομογραφία του εδάφους στον πειραματικό χώρο, αποτέλεσμα της οποίας ήταν η ανάπτυξη ενός ισοδύναμου τριστρωματικού μοντέλου. Με βάση τα αποτελέσματα της ηλεκτροτομογραφίας σε πρώτη φάση, υπολογίστηκαν μέσω του CDEGS τα τριστρωματικά μοντέλα εδάφους, για κάθε ημέρα διεξαγωγής μετρήσεων.

Στη συνέχεια, με χρήση των υπολογισμένων τριστρωματικών μοντέλων επιχειρήθηκε θεωρητικός υπολογισμός, μέσω του ιδίου προγράμματος, της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης. Ωστόσο, η εκτέλεση αυτών των προσομοιώσεων δεν κατέστη δυνατή, λόγω αδυναμίας του προγράμματος να προσομοιώσει ηλεκτρόδια γείωσης τα οποία εκτείνονται σε παραπάνω του ενός στρώματα του μοντέλου εδάφους. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού επιχειρήθηκε η διενέργεια των ίδιων προσομοιώσεων εντός μονοστρωματικού, όμως, μοντέλου. Κατόπιν αρκετών δοκιμών, εξήχθη το συμπέρασμα πως η παραδοχή για προσομοίωση της συγκεκριμένης δομής εδάφους με μονοστρωματικό μοντέλο δεν ήταν ικανοποιητική, καθώς παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη απόκλιση από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων. Οι προαναφερθείσες δυσχέρειες στην εκτέλεση των προσομοιώσεων περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

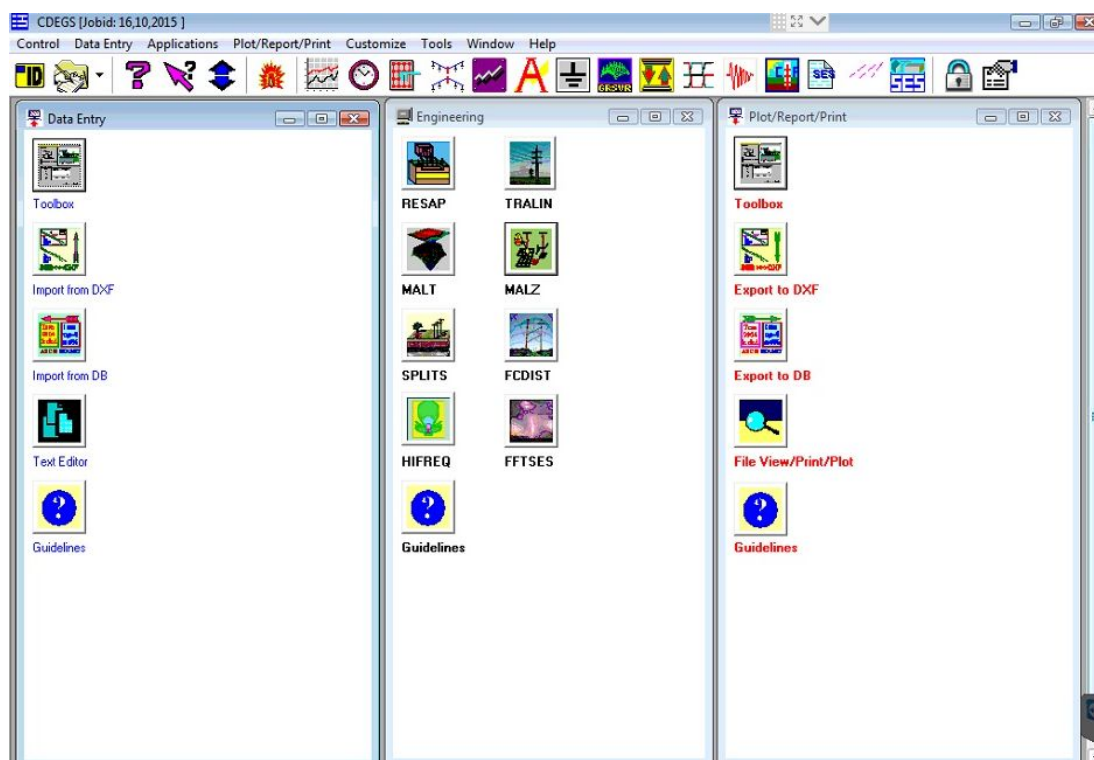
Για την περάτωση της διπλωματικής εργασίας και σε συνεννόηση με τον επιβλέποντα, αναθεωρήθηκε ένας εκ των αρχικών στόχων, που ήταν η μελέτη της *in situ* χρονικής μεταβολής της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών, και για την επιστημονική αρτιότητα της εργασίας κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της χρονικής μεταβολής των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής υπό συνθήκες σφάλματος στο εν λόγω έδαφος, σε διστρωματικό και τριστρωματικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, κατασκευάστηκαν δοχεία δοκιμών με βάση τις προδιαγραφές των προτύπων BS EN 62561-7 [2] και ASTM G57-06 [3], τα οποία περιείχαν καινούρια μίγματα των προς μελέτη βελτιωτικών υλικών γείωσης και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ειδικής αντίστασής τους σε εργαστηριακές συνθήκες.

3.2 Οδηγός Προσομοιώσεων

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, όλες οι προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας διενεργήθηκαν στο εξειδικευμένο λογισμικό CDEGS της εταιρείας Safe Engineering Services & Technologies Ltd (SES).

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κύρια οθόνη εργασίας του CDEGS.





Εικόνα 3.1: Αρχική Οθόνη.

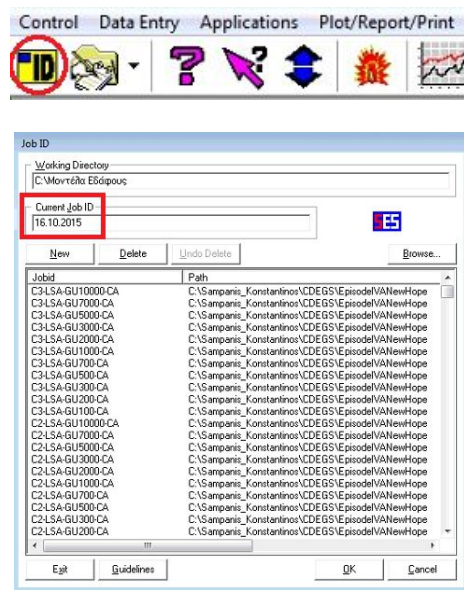
Στο αριστερό τμήμα του αρχικού παραθύρου βρίσκεται η πλατφόρμα εισαγωγής δεδομένων, στο κεντρικό πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων μέσω των διαφόρων επιλυτών και στο δεξιό βρίσκεται η πλατφόρμα εξαγωγής των αποτελεσμάτων.

Ακολουθεί ένας οδηγός για τις επιμέρους εργασίες που εκτελέστηκαν στο πρόγραμμα.

3.2.1 Προσομοιώσεις μονοστρωματικών, διστρωματικών και τριστρωματικών μοντέλων εδάφους

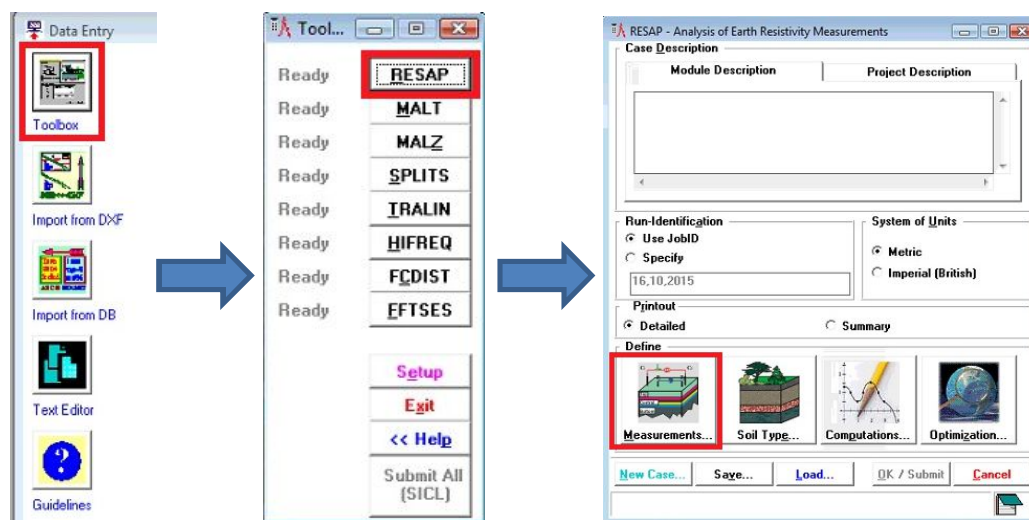
Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αναφορικά με τα μοντέλα εδάφους χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης RESAP. Σ' αυτόν εισήχθησαν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης εδάφους ρ που ελήφθησαν από την υπαίθρια πειραματική διάταξη για αποστάσεις $\alpha=2\text{m}$, $\alpha=4\text{m}$, $\alpha=8\text{m}$, $\alpha=12\text{m}$ και $\alpha=16\text{m}$ μεταξύ των ηλεκτροδίων κατά την περίοδο 17/2/2011 έως 18/1/2016 [1]. Ακολούθως υπολογίστηκαν οι τιμές της ειδικής αντίστασης καθώς και τα πάχη των στρωμάτων για μονοστρωματικό, διστρωματικό και τριστρωματικό μοντέλο.

☞ Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα αρχείο (Job ID) για κάθε ημέρα μετρήσεων



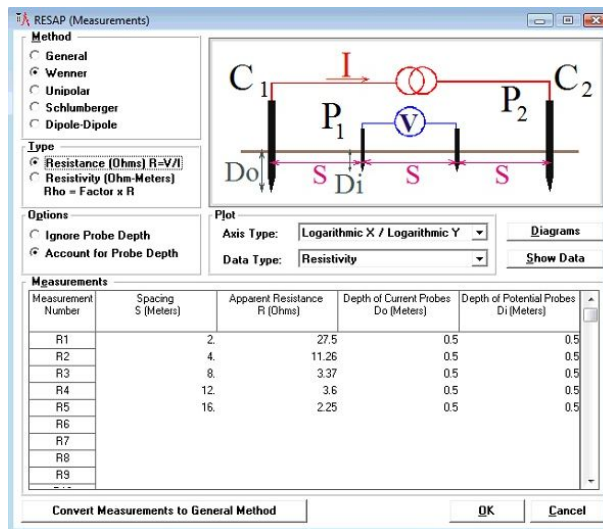
Εικόνα 3.2: Δημιουργία Job ID.

☞ Για να εισαχθούν τα δεδομένα σε ένα νέο Job ID, επιλέγεται το Toolbox από το Data Entry και στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγεται ο επιλύτης RESAP. Στο επόμενο παράθυρο επιλέγεται το κουμπί Measurements για την εισαγωγή των δεδομένων.



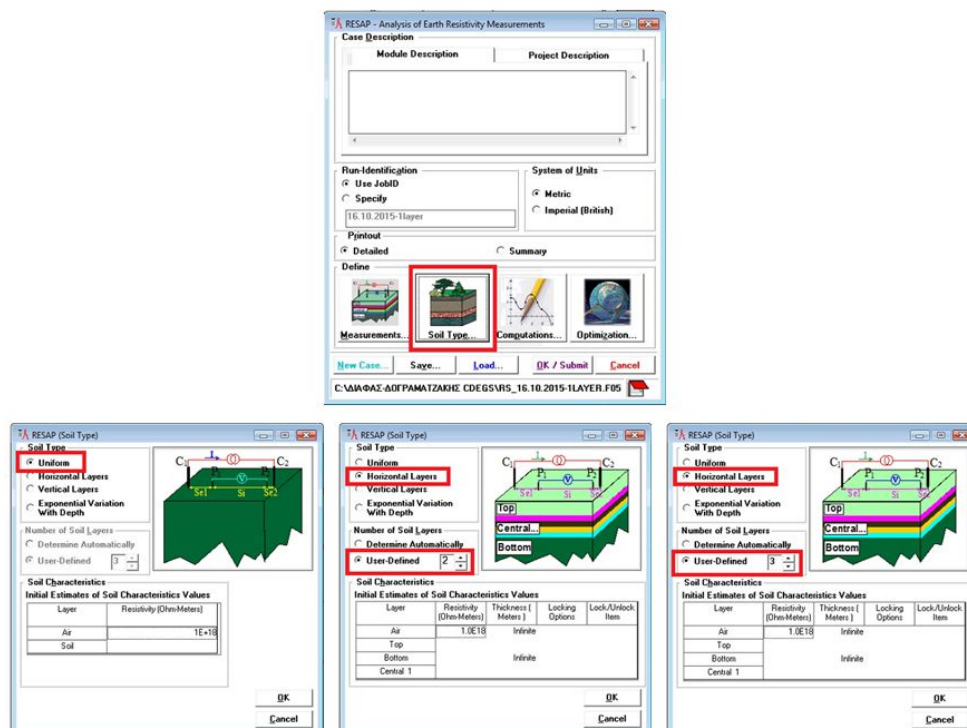
Εικόνα 3.3: Διαδρομή για την εισαγωγή των δεδομένων.

☞ Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται στο παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 3.4 και έπειτα επιλέγεται OK.



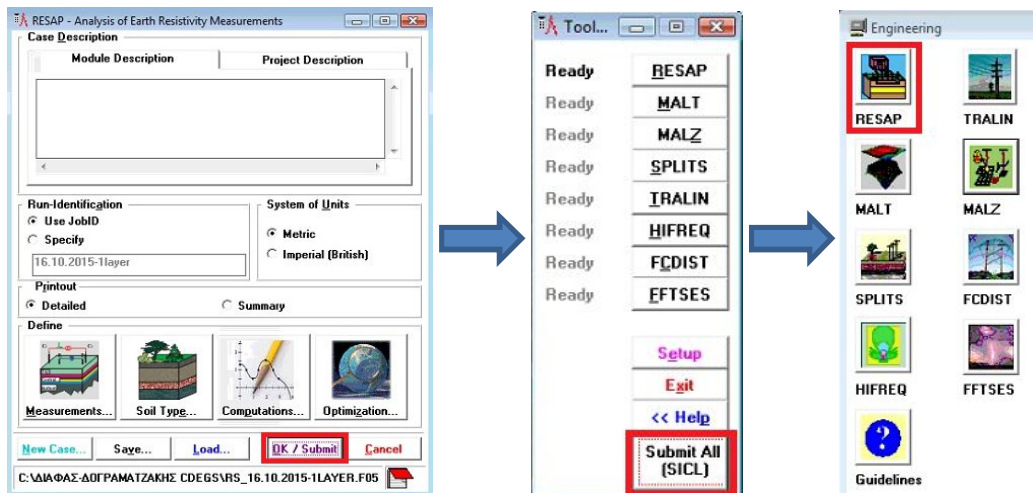
Εικόνα 3.4: Εισαγωγή δεδομένων.

☞ Ακολούθως επιλέγεται το κουμπί Soil Type, στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγεται το επιθυμητό μοντέλο εδάφους (μονοστρωματικό,διστρωματικό ή τριστρωματικό) και επιλέγεται OK.



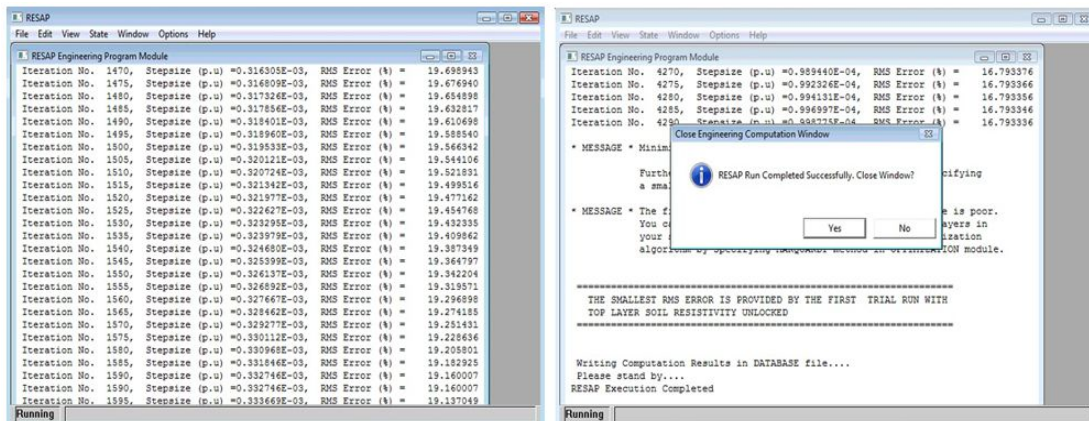
Εικόνα 3.5: Επιλογή μοντέλου εδάφους.

Αφού εισαχθούν τα δεδομένα και ο επιθυμητός τύπος του μοντέλου εδάφους με διαδοχικά OK/Submit και Submit All, εκκινείται ο επιλύτης RESAP (Εικόνα 3.6).



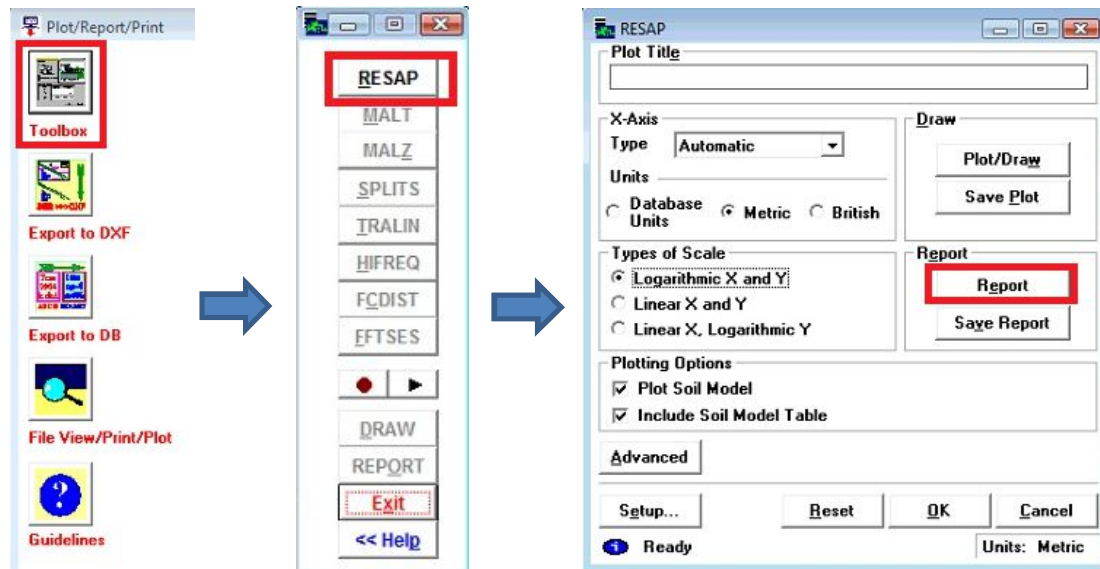
Εικόνα 3.6: Εκκίνηση επιλύτη RESAP.

Ακολουθεί η εκτέλεση του επιλύτη RESAP



Εικόνα 3.7: Εκτέλεση επιλύτη RESAP.

☞ Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων επιλέγεται το Toolbox από το Plot/Report/Print, στο επόμενο παράθυρο επιλέγεται το RESAP και στο τελευταίο παράθυρο επιλέγεται το Report.



Εικόνα 3.8: Εξαγωγή αποτελεσμάτων.

☞ Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παράθυρο που αναδύεται και έχει τη μορφή της εικόνας 3.9 (για τριστρωματικό μοντέλο εδάφους).

```

Report #1:

===== < R E S I S T I V I T Y ( SYSTEM INFORMATION SUMMARY ) > =====

Run ID.....: 16.10.2015-11ayer
System of Units .....: Meters
Soil Type Selected.....: Multi-Layer Horizontal
RMS error between measured and calculated...: 16.7560 in percent
resistivities (Note RMS=SQRT(average(Di**2))).

<--- LAYER CHARACTERISTICS --->
Layer Resistivity Thickness Reflection Resistivity
Number (ohm-m) (Meters) Coefficient Contrast
-----
1 Infinite Infinite 0.0 1.0
2 199.7003 0.3344729 -1.0000 0.19970E-17
3 1447.943 0.3157015 0.75759 7.2506
4 202.9716 Infinite -0.75411 0.14018

**WARNING** MORE THAN ONE SOIL MODEL CAN PRODUCE SIMILAR APPARENT RESISTIVITY
MEASUREMENT CURVES. IF YOU USE THE DEFAULT STEEPEST-DESCENT METHOD,
THEN YOU WILL MOST OFTEN OBTAIN DECENT AGREEMENT BETWEEN MEASURED
VALUES AND THE COMPUTED CURVE, WITH A REALISTIC SOIL MODEL; HOWEVER,
THE FIT MAY OCCASIONALLY BE SUB-OPTIMAL. IN SUCH CASES, THE MARQUARDT
METHOD WILL USUALLY YIELD AN EXCELLENT FIT, BUT MAY SOMETIMES SUGGEST
EXTREME RESISTIVITY VALUES. NOTE THAT DIFFERENT SOIL MODELS WILL USUALLY
YIELD SIMILAR RESULTS FOR YOUR GROUNDING SYSTEM MODELS (I.E., GPR, TOUCH &
STEP VOLTAGES), PROVIDED THAT THE GROUNDING SYSTEM IS LOCATED CLOSE TO
THE EARTH SURFACE. IF IN DOUBT, CHECK YOUR RESULTS WITH BOTH SOIL MODELS.

End of Report #1

```

Εικόνα 3.9: Εξαγωγή αποτελεσμάτων.

3.2.2 Προσομοιώσεις προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης

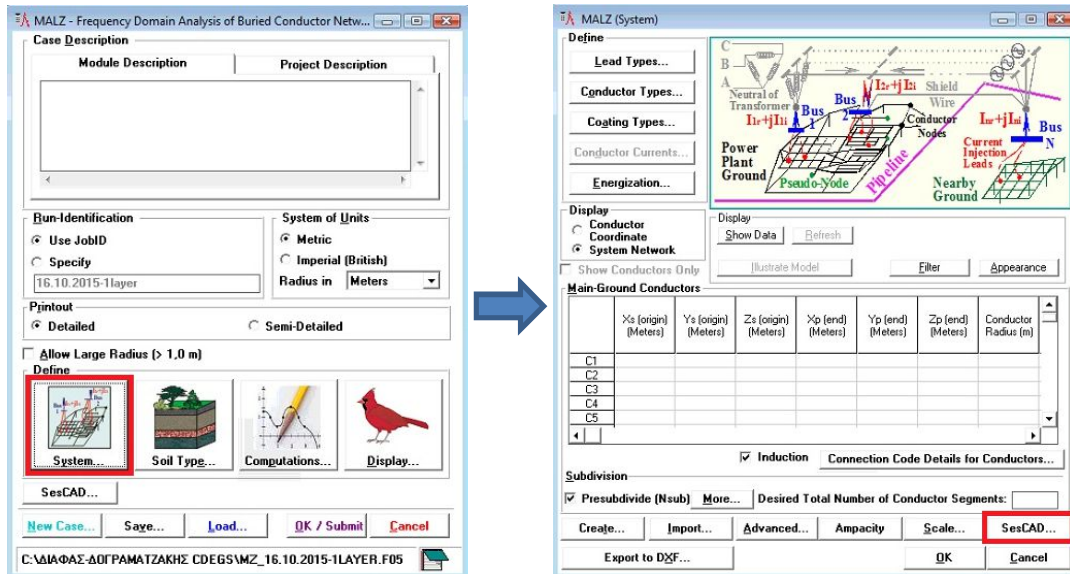
Για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης MALZ. Σ' αυτόν εισήχθησαν τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων της αντίστασης γείωσης των 5 εγκατεστημένων ηλεκτροδίων, τα οποία είναι εγκιβωτισμένα σε διαφορετικά βελτιωτικά υλικά, κατά την περίοδο 17/2/2011 έως 18/1/2016.

☞ Αρχικά, επιλέγεται από το Toolbox του Data Entry ο επιλύτης MALZ



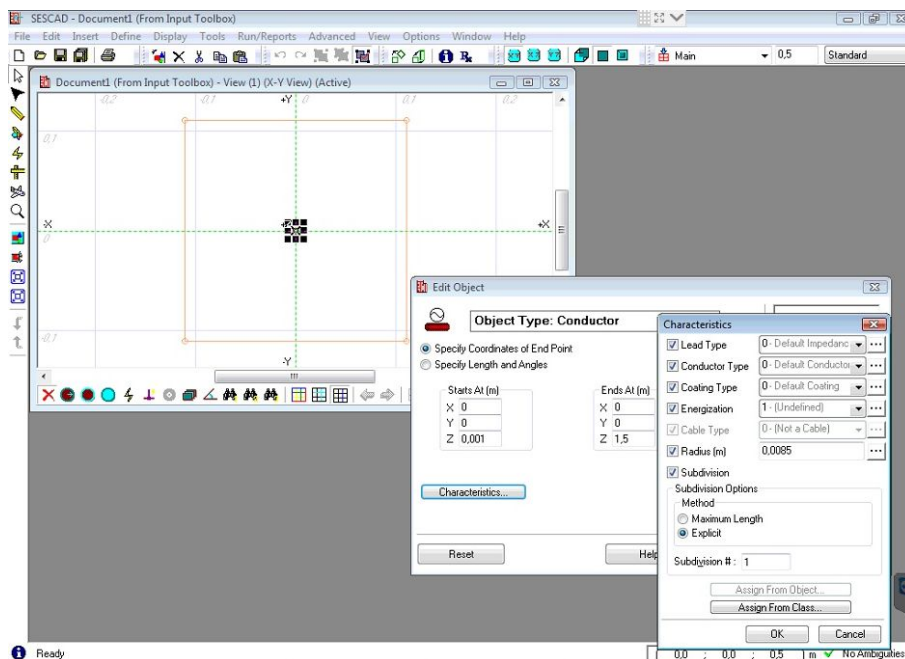
Εικόνα 3.10: Επιλογή επιλύτη MALZ.

☞ Ύστερα, για την εισαγωγή του όγκου της γεωμετρίας επιλέγεται το πεδίο System και ακολούθως το πεδίο SesCAD, από το οποίο ανοίγει η πλατφόρμα σχεδίασης της εμφωλευμένης στο έδαφος διάταξης.



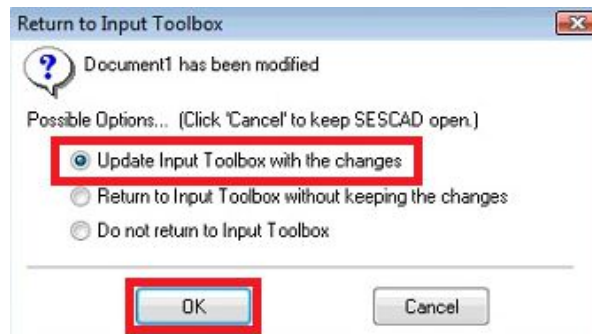
Εικόνα 3.11: Διαδρομή για την εισαγωγή του όγκου της γεωμετρίας.

Ακολουθεί η σχεδίαση του ηλεκτροδίου γείωσης, καθώς και του περιβάλλοντος χώρου μεταβλητής ειδικής αντίστασης, με τις παραμέτρους που φαίνονται στην Εικόνα 3.12



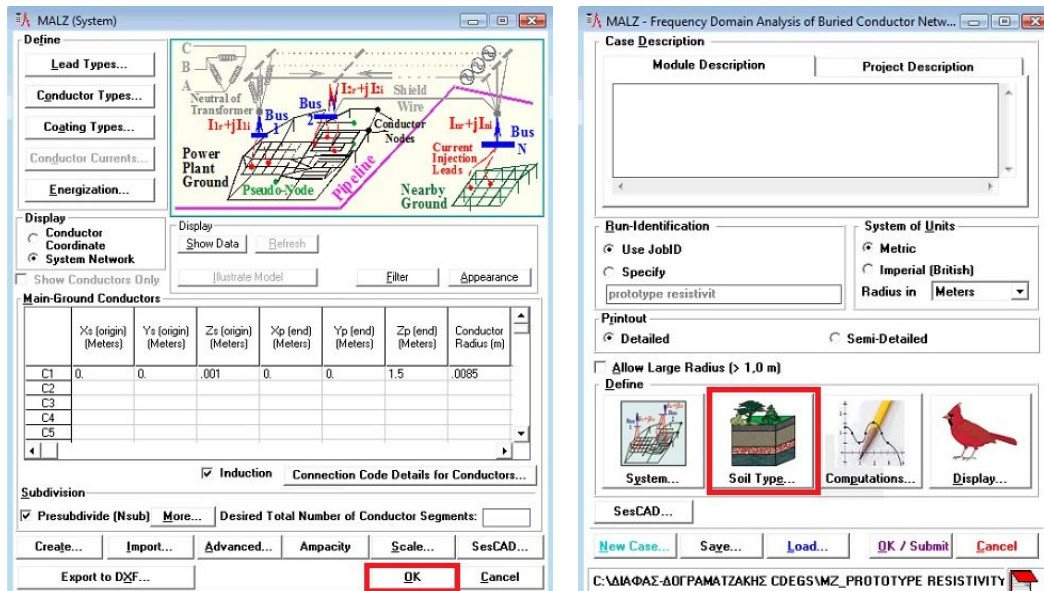
Εικόνα 3.12: Σχεδίαση ηλεκτροδίου γείωσης.

☞ Εν συνεχεία ενημερώνεται το Toolbox για τις ανωτέρω αλλαγές



Εικόνα 3.13: Ενημέρωση Toolbox.

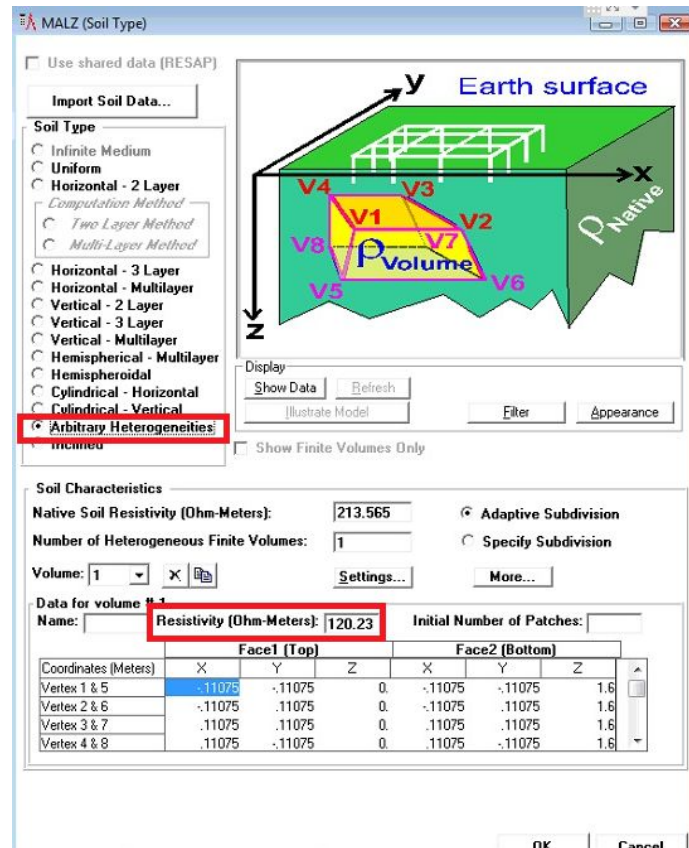
☞ Αφού πραγματοποιηθεί η εισαγωγή του γειωτή, επιλέγεται το πεδίο Soil Type για την παραμετροποίηση του τύπου και της ειδικής αντίστασης του εδάφους περιμετρικά του γειωτή.



Εικόνα 3.14: Επιλογή πεδίου Soil Type.

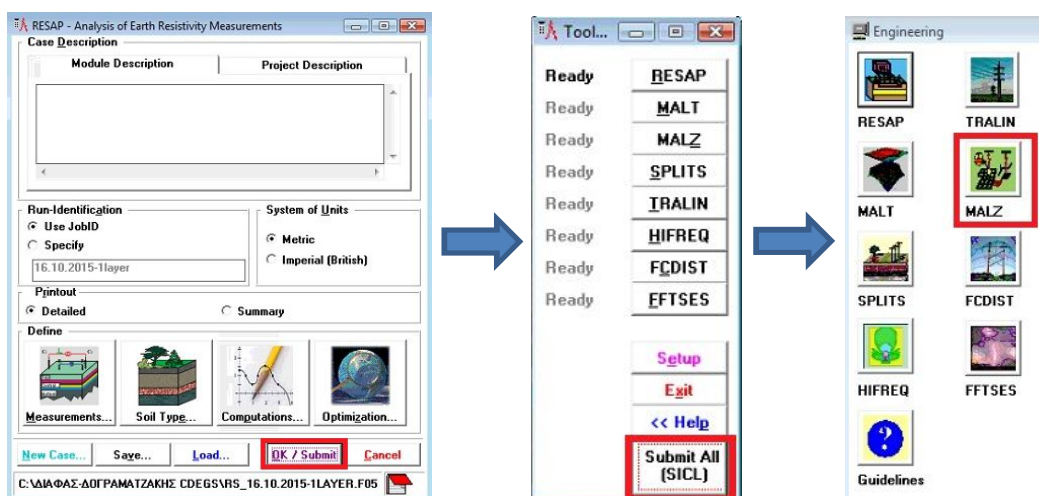
☞ Επιλέγεται ο ετερογενής τύπος εδάφους (Arbitrary Heterogeneities). Επιπλέον, επιχειρείται ο προσδιορισμός της τιμής της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών με επαναληπτική διαδικασία, αντιπαραβάλλοντας τις πειραματικές μετρήσεις της αντίστασης γείωσης με τα αποτελέσματα προσομοίωσης για την αντίσταση γείωσης μέσω του MALZ (οι 2 τιμές πρέπει να είναι ίσες). Πιο συγκεκριμένα, καταχωρούνται, διαδοχικά, προσεγγιστικές τιμές της ειδικής αντίστασης ρ (στο πεδίο Resistivity, που επισημαίνεται στην Εικόνα 3.15) για κάθε βελτιωτικό υλικό, ώσπου να εξαχθεί από τον επιλύτη μία τιμή της αντίστασης γείωσης R που να είναι περίπου ίση με την πειραματική τιμή της αντίστασης

γείωσης R. Από τις προσεγγιστικές τιμές που δοκιμάζονται, η ζητούμενη τιμή της ειδικής αντίστασης ρ του βελτιωτικού υλικού είναι αυτή για την οποία είναι περίπου ίσες η αντίσταση γείωσης R που εξάγεται από τον επιλύτη και η αντίσταση γείωσης R που προέκυψε πειραματικά.



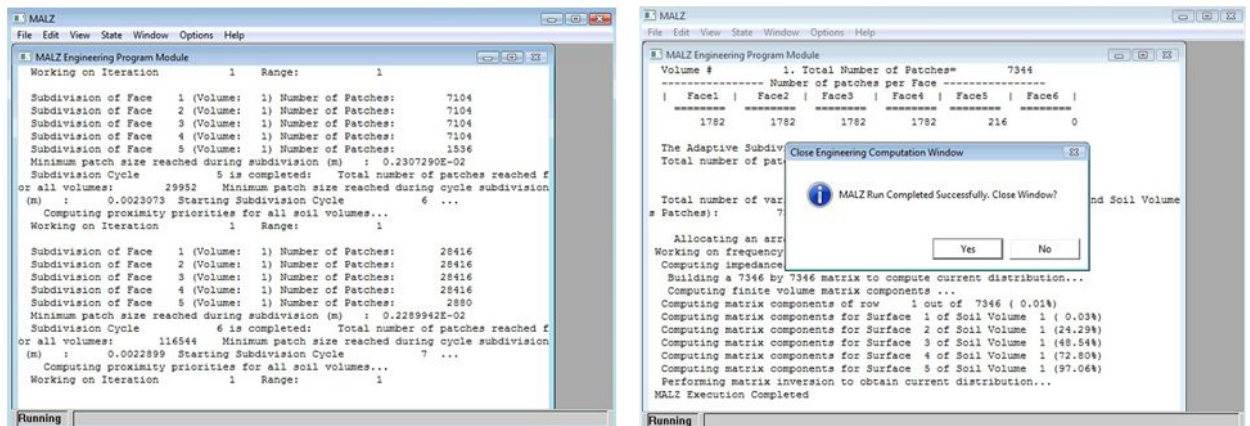
Εικόνα 3.15: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών.

Αφού εισαχθούν όλα τα παραπάνω δεδομένα, καταχωρούνται με διαδοχικά OK/Submit και Submit All, και εκκινείται ο επιλύτης MALZ.



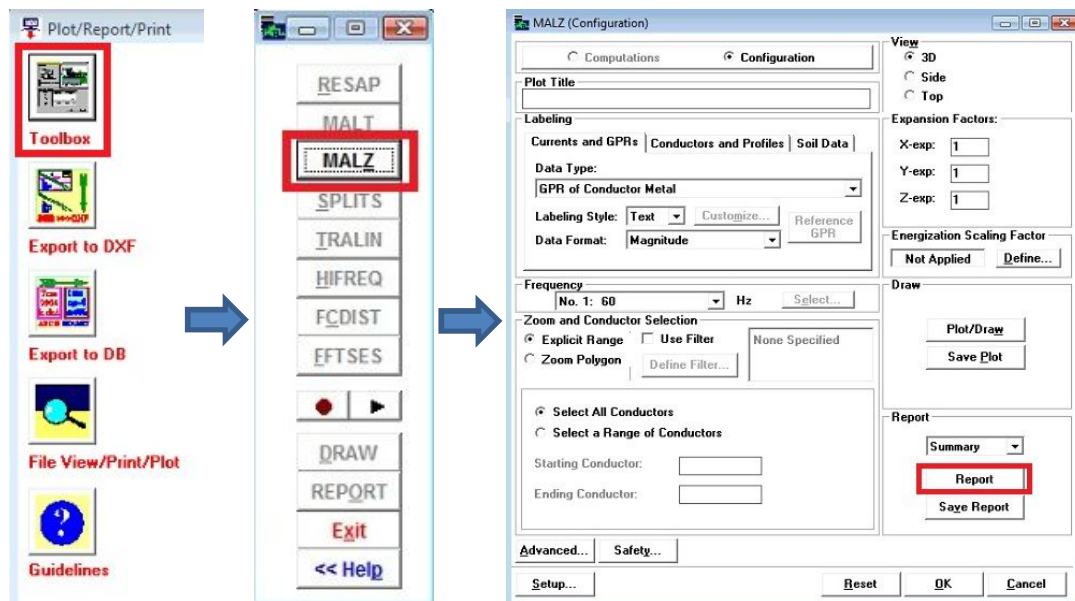
Εικόνα 3.16: Εκκίνηση επιλύτη MALZ.

☞ Ακολουθεί η εκτέλεση του MALZ



Εικόνα 3.17: Εκτέλεση επιλύτη MALZ.

☞ Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων επιλέγεται το **Τοίβιο** από το **Plot/Report/Print**, στο επόμενο παράθυρο επιλέγεται το **MALZ** και στο τελευταίο παράθυρο επιλέγεται το **Report**.



Εικόνα 3.18: Εξαγωγή αποτελεσμάτων.

☞ Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παράθυρο που αναδύεται και έχει τη μορφή της εικόνας 3.19.

```

Number of Original Conductors ..... 1
Number of Frequency Values to be Analyzed... 1
Power Source Frequency..... 60.000 Hertz
Impedance Values are Based On..... 60.000 Hertz
Total Length of Conductor Network..... 1.4990 meters
1
CHARACTERISTICS OF MEDIA SURROUNDING NETWORK
=====
AIR LAYER : Resistivity..... 0.100000E+13 ohm-meters
           Relative Permittivity.. 1.00000
           Relative Permeability.. 1.00000

SOIL TYPE : Arbitrary Heterogeneities ( Finite-volume(s) )

Number of Finite Soil Volumes: 1
PARAMETERS OF NATIVE SOIL:
           Resistivity..... 213.565 ohm-meters
           Relative Permittivity.. 1.00000
           Relative Permeability.. 1.00000

1 VOLUME:
SOIL PARAMETERS:
           Resistivity..... 120.230 ohm-meters
NUMBER OF SPECIFIED SURFACE ELEMENTS: 0
1
Case Number..... 1
Frequency for This Case..... 60.000 Hertz
GPR of Reference Source Bus (# 1)...Magn.. 102748.7 Volts
           Angle.. 0.000000 degrees

Impedance of Grounding System.....Magn.. 102.7487 Ohms
           Angle.. 0.000000 degrees

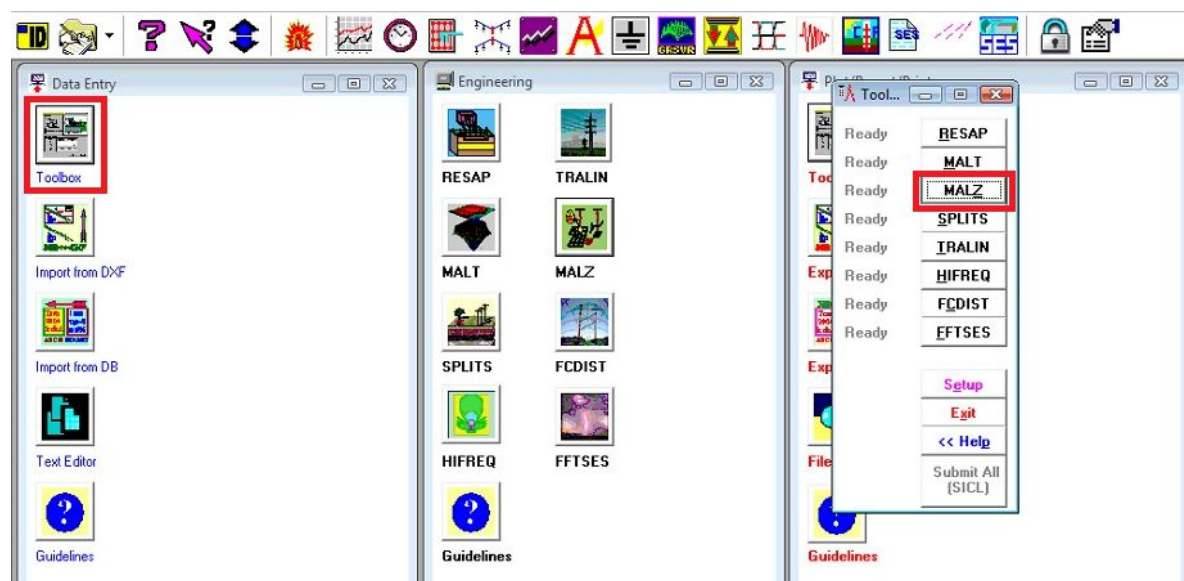
End of Report #1
    
```

Εικόνα 3.19: Εξαγωγή αποτελεσμάτων.

3.2.3 Προσομοιώσεις βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής

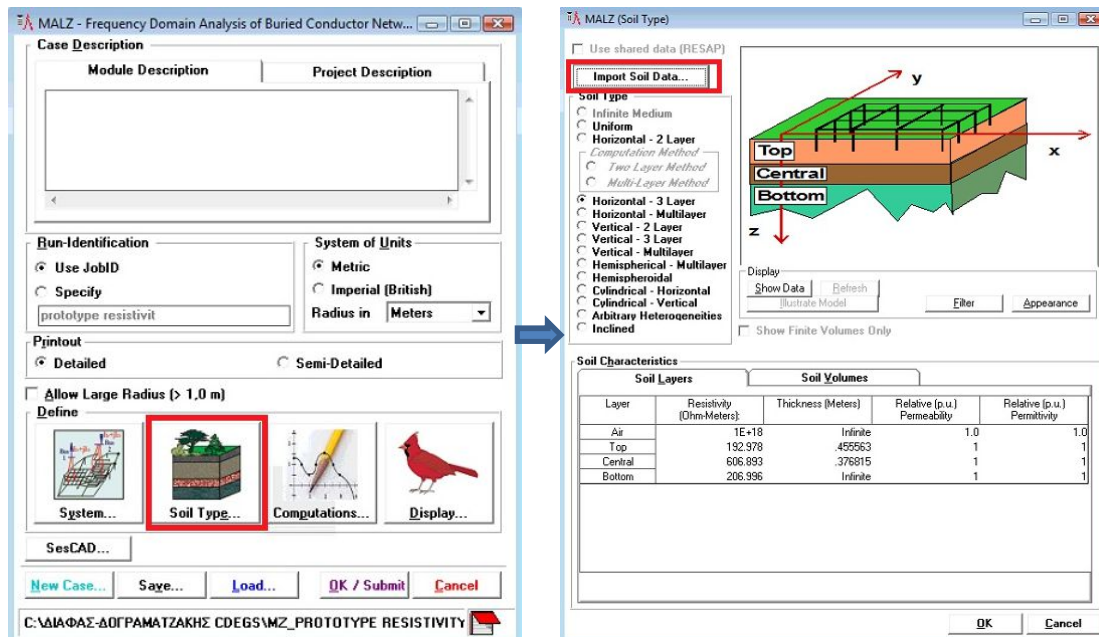
Για τον προσδιορισμό των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης MALZ. Σ' αυτόν εισήχθησαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των τριστρωματικών μοντέλων εδάφους, όπως προέκυψαν από τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.1.

☞ Αρχικά, επιλέγεται από το Toolbox του Data Entry ο επιλύτης MALZ.



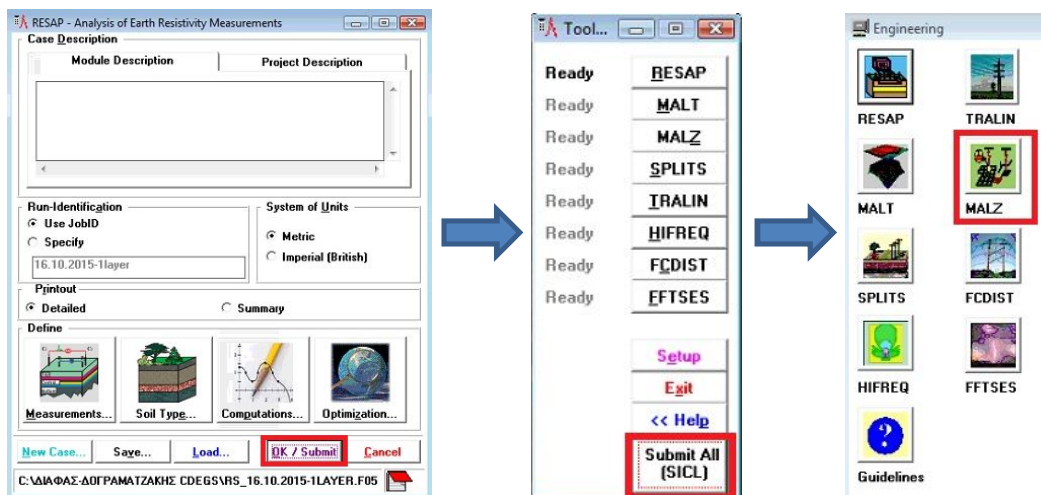
Εικόνα 3.20: Επιλογή επιλύτη MALZ.

☞ Στη συνέχεια εισάγεται στο Soil Type το τριστρωματικό μοντέλο εδάφους για την εκάστοτε ημέρα προσομοίωσης.



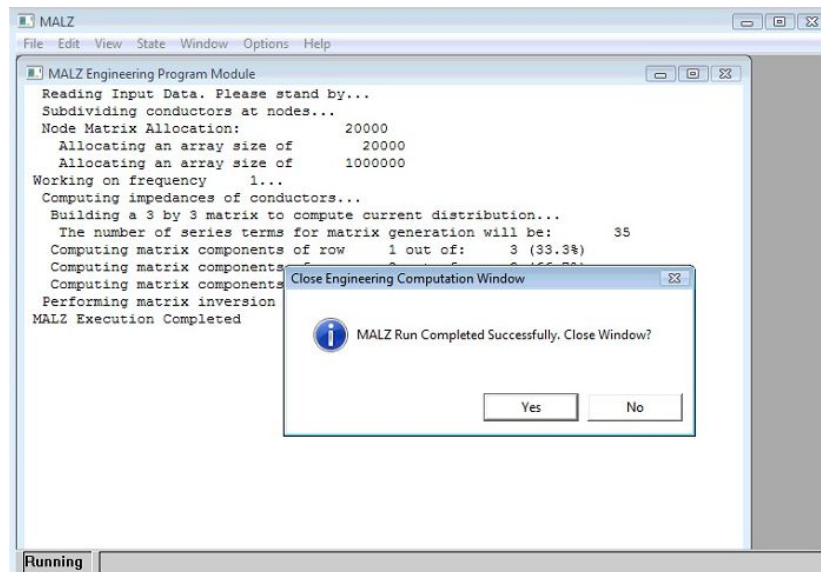
Εικόνα 3.21: Εισαγωγή τριστρωματικού μοντέλου εδάφους.

☞ Αφού εισαχθούν όλα τα παραπάνω δεδομένα με διαδοχικά OK/Submit και Submit All, εκκινείται ο επιλύτης MALZ.



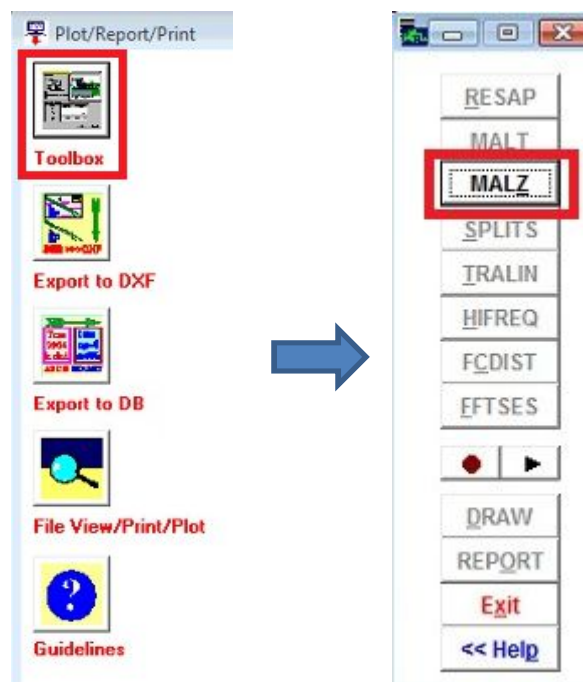
Εικόνα 3.22: Εκκίνηση επιλύτη MALZ.

☞ Ακολουθεί η εκτέλεση του MALZ



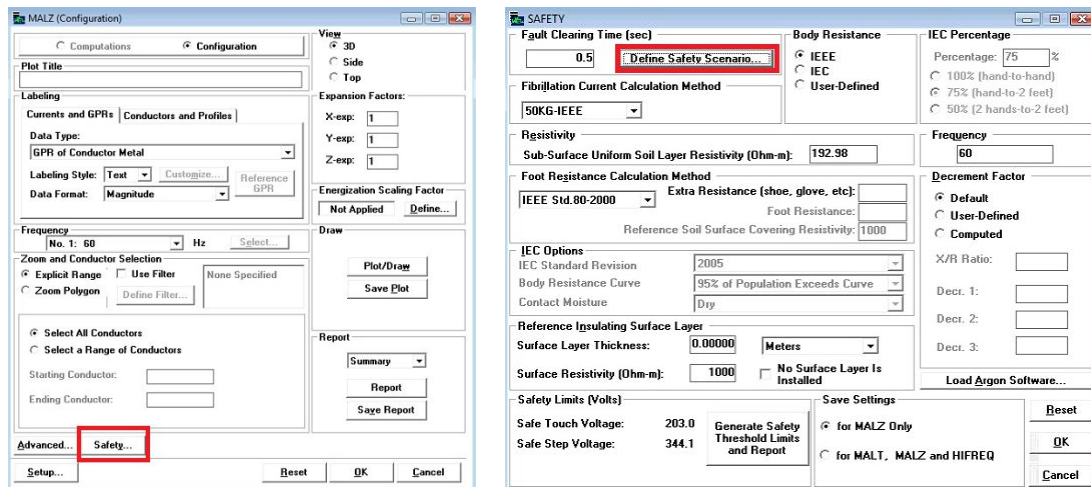
Εικόνα 3.23: Εκτέλεση επιλύτη MALZ.

☞ Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων επιλέγεται το Toolbox από το Plot/Report/Print, στο επόμενο παράθυρο επιλέγεται το MALZ.



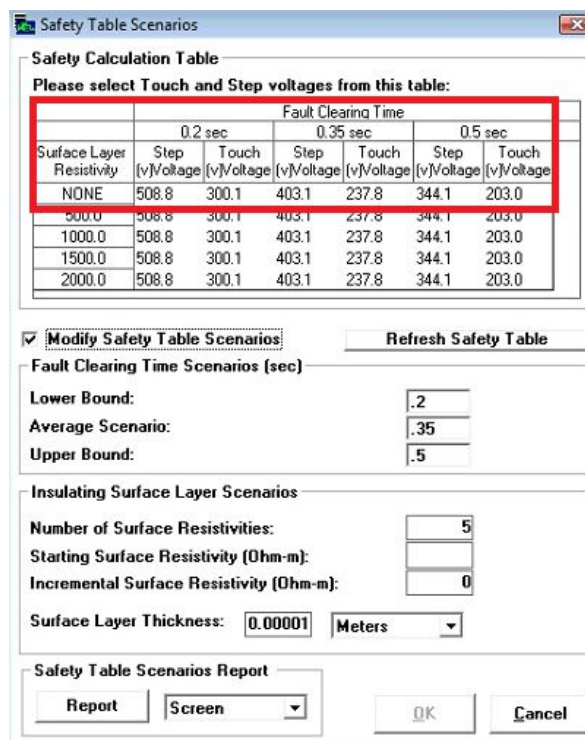
Εικόνα 3.24: Εξαγωγή αποτελεσμάτων (1).

☞ Στη συνέχεια επιλέγονται τα πεδία Safety → Define Safety Scenario.



Εικόνα 3.25: Εξαγωγή αποτελεσμάτων (2).

☞ Τέλος, αφού εισαχθούν οι επιθυμητές τιμές των παραμέτρων που επηρεάζουν τις βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, παρουσιάζονται τα ζητούμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 3.26: Τελικά Αποτελέσματα (Step & Touch Voltages).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στάδια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και ο αρχικός της στόχος, ο οποίος στην πορεία αναπροσαρμόστηκε. Επιπρόσθετα, παρατίθεται ένας αναλυτικός οδηγός χρήσης του λογισμικού πακέτου SES CDEGS για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων, μέσω των επιλυτών RESAP και MALZ.

Στο επόμενο κεφάλαιο, περιγράφεται διεξοδικά η πειραματική διαδικασία (τοποθεσία και συνθήκες μετρήσεων, εξοπλισμός, διατάξεις κλπ.) και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων από τις οποίες προκύπτουν και τα πρώτα συμπεράσματα, τόσο για τη δομή και τη συμπεριφορά του εδάφους, στο χώρο του πειράματος, όσο και για τη συμπεριφορά των εξεταζομένων βελτιωτικών υλικών.

Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.
- [2] BS EN 62561-7, “Lightning Protection System Components (LPSC) - Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds”, 2012.
- [3] ASTM G57-06, “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method”, 2012.

Κεφάλαιο 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, περιγράφεται η τοποθεσία διεξαγωγής του πειράματος, η διάταξη των ηλεκτροδίων, τα όργανα μέτρησης, οι συνθήκες πραγματοποίησης των μετρήσεων, καθώς και οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν, τόσο στις υπαίθριες μετρήσεις, όσο και στις εργαστηριακές. Στη συνέχεια, αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών μέσω των προσομοιώσεων. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σε μορφή διαγραμμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

4.1 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

4.1.1 Υπαίθριες διατάξεις μετρήσεων

Περιγραφή Εγκατάστασης

Η λήψη μετρήσεων στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε σε χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, στον οποίο είχαν ήδη εγκατασταθεί ηλεκτρόδια για τις ανάγκες προηγούμενων ερευνητικών εργασιών [1, 2]. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα των κατακόρυφων ηλεκτροδίων είναι εγκατεστημένο στην κορυφή του λοφίσκου που βρίσκεται δίπλα από τα κτίρια των Χημικών Μηχανικών, των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και το υπαίθριο parking. Ο συγκεκριμένος χώρος κρίνεται ιδανικός για συχνή λήψη μετρήσεων αφού:

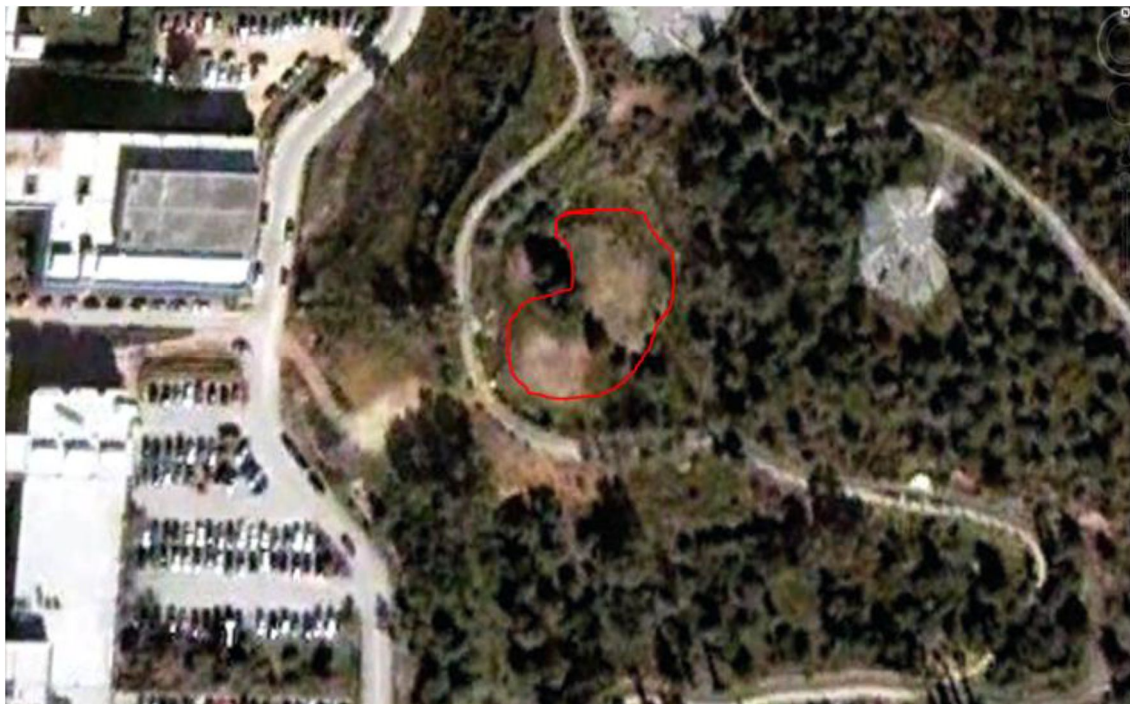
- 1) Είναι ελεύθερος και δε χρησιμοποιείται από κάποια σχολή ή υπηρεσία.
- 2) Είναι φυσική απόληξη στους πρόποδες του Υμηττού και δεν έχει γίνει καμιά τεχνική παρέμβαση στο έδαφος και το περιβάλλον.
- 3) Η περιοχή του λόφου που τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια είναι εντελώς επίπεδη, επιτρέποντας την εύκολη 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).

- 4) 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.

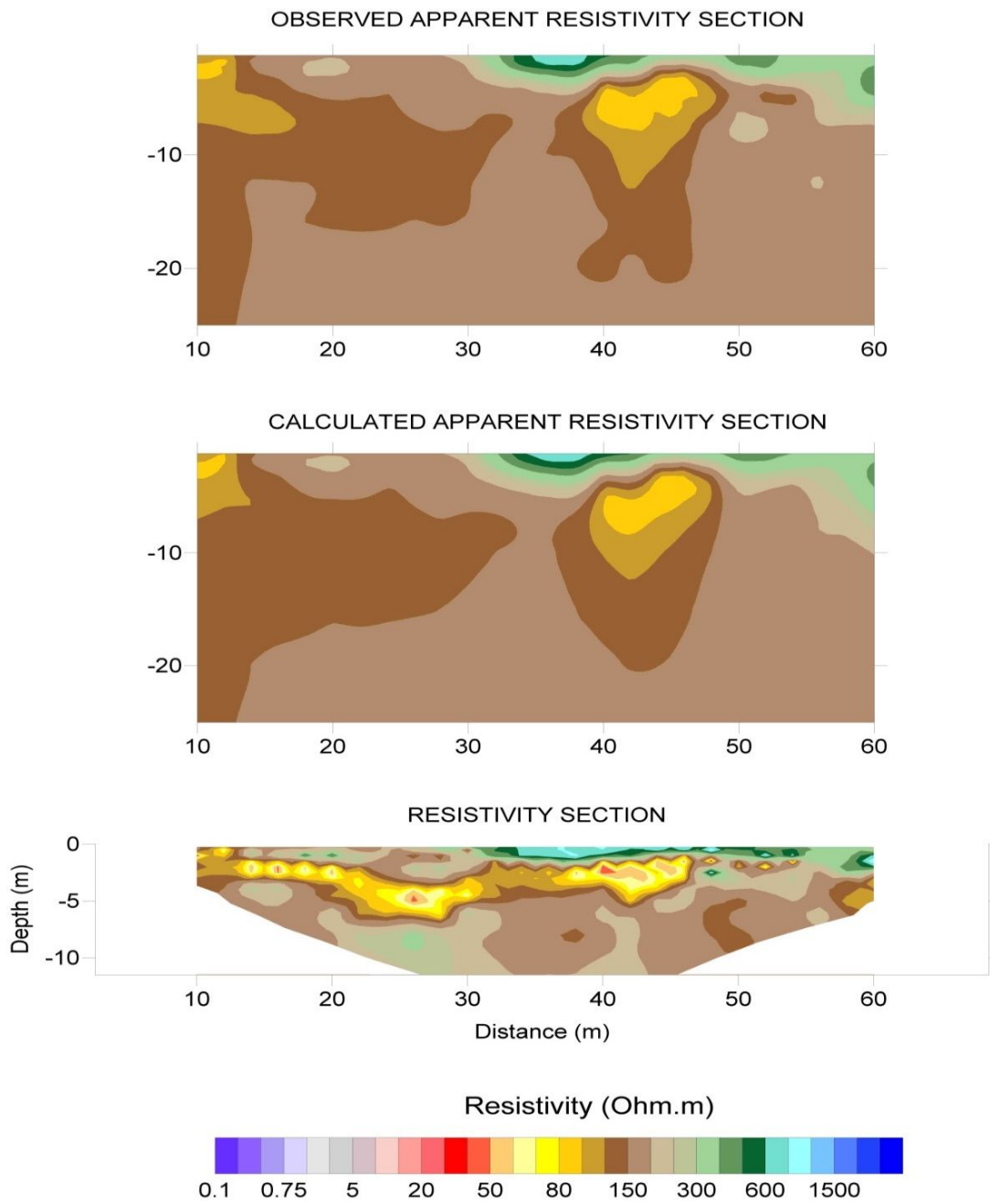
Το πεδίο των μετρήσεων απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1, που ελήφθη από τους χάρτες Google Maps:



Εικόνα 4.1: Φωτογραφία πεδίου δοκιμών από το Google Maps[3].

Το έδαφος της περιοχής χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκη άμμος με χαλίκια και κροκάλες. Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη των Φραγκογιάννη, Παπαθεοδώρου και Σταματάκη [4] 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% και άργιλο σε ποσοστό 5,74%. Το σύστημα κατηγοριοποίησης του εδάφους που εφαρμόστηκε ήταν κατά AASTHO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). 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. Τέλος, για τον ακριβή προσδιορισμό της κατανομής των τιμών της ειδικής αντίστασης ανά στρώμα και βάθος του συγκεκριμένου εδάφους, πραγματοποιήθηκε ηλεκτροτομογραφία στο

πλαίσιο μεταπτυχιακής εργασίας, τα αποτελέσματα της οποίας συνοψίζονται παρακάτω, στην Εικόνα 4.2.



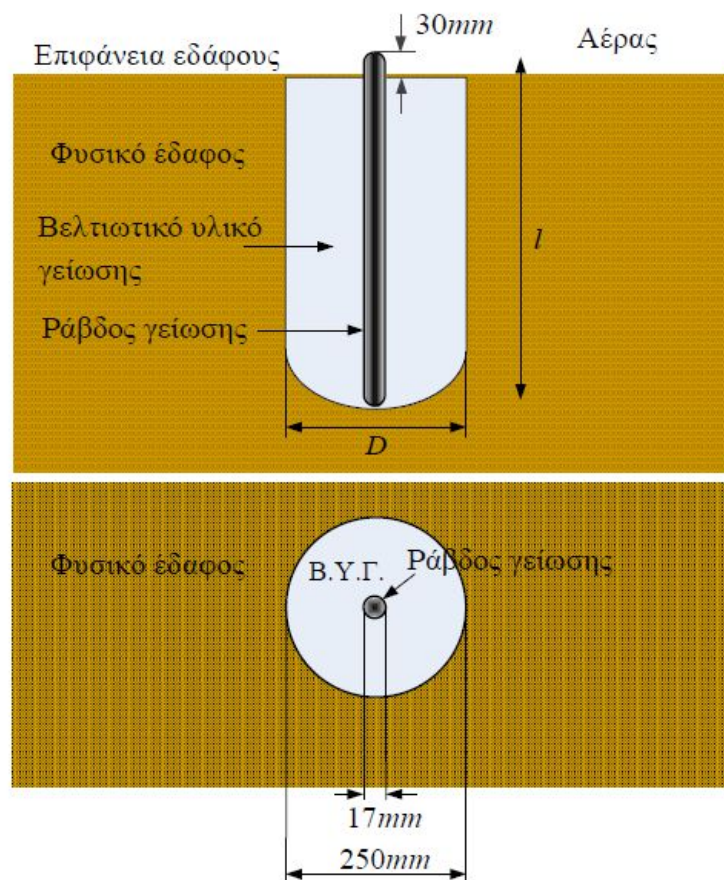
Εικόνα 4.2: Γράφημα ηλεκροτομογραφίας εδάφους της πειραματικής διάταξης [1].

Διάταξη των Ηλεκτροδίων

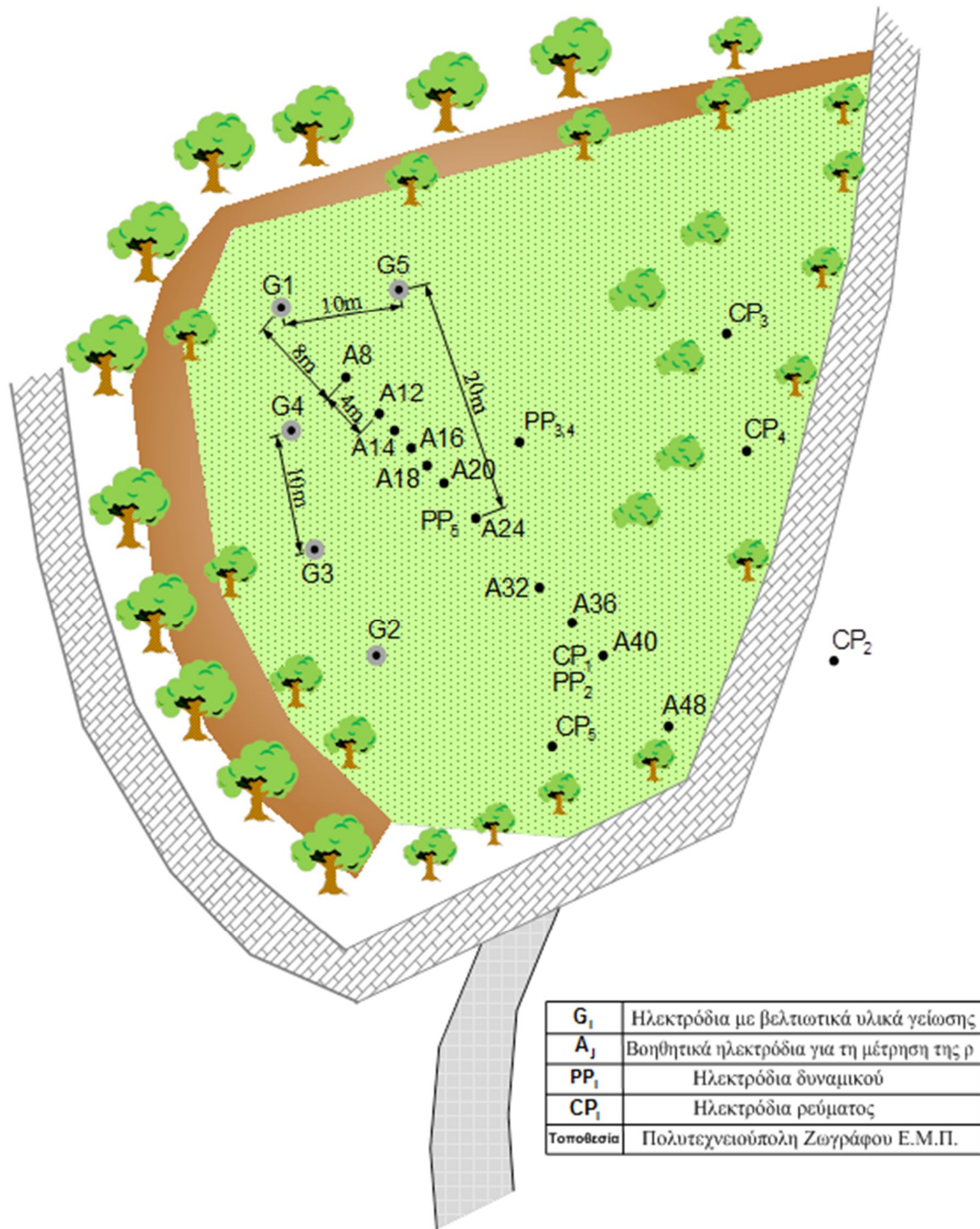
Στην περιοχή έχουν τοποθετηθεί πέντε κύρια ηλεκτρόδια ράβδου *St/e-Cu* τύπου *A* διαστάσεων $17 \times 1500 \text{ mm}$, με πάχος επιχάλκωσης $254 \mu\text{m}$, σε απόσταση 10 m το ένα από το άλλο, εκ των οποίων, τα πέντε μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης (Σχήμα 4.1) και το ένα απευθείας στο φυσικό έδαφος, ως εξής:

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

Επίσης, τοποθετήθηκαν μόνιμα στο έδαφος σε διάφορες θέσεις δεκαέξι (16) 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 συνολική διάταξη απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1: Γειωτής ράβδου εντός βελτιωτικού υλικού εδάφους [2].



Σχήμα 4.2: Διάταξη ηλεκτροδίων [2].

Στις παρακάτω φωτογραφίες, απεικονίζονται τα ηλεκτρόδια με τα βελτιωτικά υλικά στις αρχικές μέρες του πειράματος.



Εικόνα 4.3: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων[1].



Εικόνα 4.4: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης [2].



Εικόνα 4.5: Ηλεκτρόδια γείωσης εμβαπτισμένα σε μπεντονίτη και σκυρόδεμα [2].

Όργανα και διατάξεις μέτρησης

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι το MEGGERDET2/2 (Εικόνα 4.6), το οποίο είναι διακριβωμένο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακριβώσεων (ΚΔΕΠ/ΔΕΗ). Η συχνότητα λειτουργίας του γειωσόμετρου καθορίζεται στα 128Hz.



Εικόνα 4.6: Γειωσόμετρο [1].

Οι τιμές του ύψους βροχόπτωσης ελήφθησαν από το online σύστημα του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου (Εικόνα 4.7), 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[1].



Εικόνα 4.7: Μετεωρολογικός Σταθμός Ε.Μ.Π. [1].

4.1.2 Εργαστηριακές διατάξεις μετρήσεων

Εργαστηριακές δοκιμές στα βελτιωτικά υλικά γείωσης

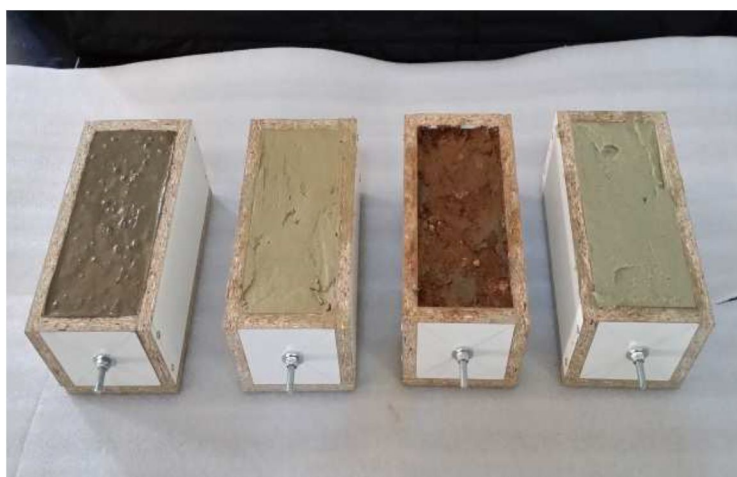
Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διενεργήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης κάθε βελτιωτικού υλικού σε συνθήκες εργαστηρίου. Η διαδικασία αυτή έχει ως στόχο τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν στα συστήματα γείωσης του πειράματος, πριν την έγχυσή τους γύρω από τα ηλεκτρόδια (εργοστασιακές τιμές). Σημειώνεται, δε, ότι αυτές οι δοκιμές έχουν προτυποποιηθεί σε διεθνές επίπεδο [5] για όλα τα βελτιωτικά υλικά γείωσης, πριν την εμπορική διάθεσή τους. Η πειραματική διάταξη καθώς και ο εξοπλισμός μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για

τις παραπάνω μετρήσεις, συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές των σχετικών προτύπων IEC/EN 62561-7 [5] και ASTM G57-06 [6].

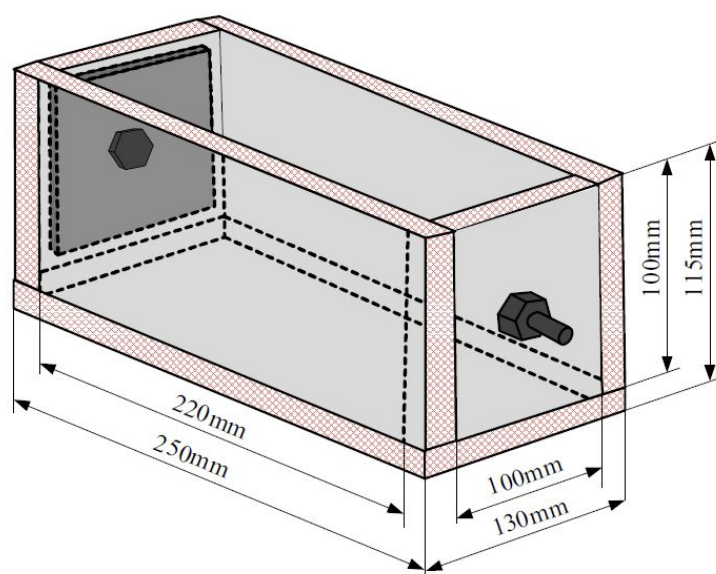
Η προετοιμασία των υλικών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες των προμηθευτών (όπως ανάμιξη υλικού με χρώμα από το χώρο εγκατάστασης του συστήματος γείωσης, προσθήκη κατάλληλων ποσοτήτων απιονισμένου νερού κ.ά.), ώστε να επιτευχθούν μίγματα ίδιας σύστασης και ιδιοτήτων με αυτά που τοποθετήθηκαν περιμετρικά των ηλεκτροδίων γείωσης.

Ακολούθως τα υλικά τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα, για τη δοκιμή, δοχεία ορθογώνιας διατομής (Σχήμα 4.3) [2], τα οποία είναι εφοδιασμένα με τέσσερα ηλεκτρόδια, για την έγχυση του ρεύματος και τη μέτρηση της πτώσης δυναμικού.

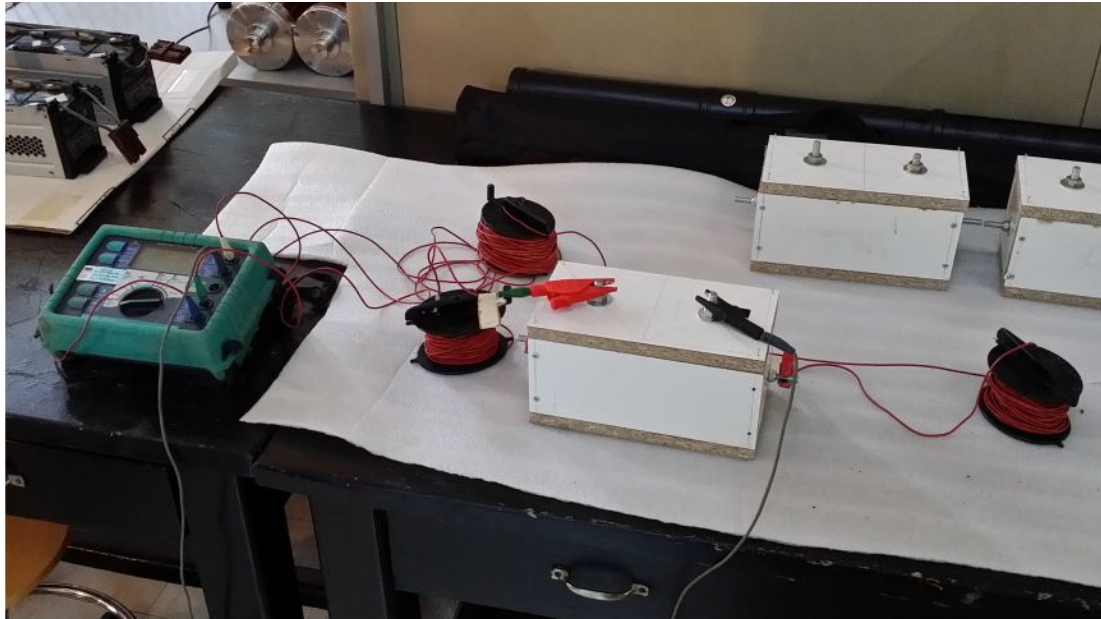
Για κάθε υλικό πραγματοποιήθηκαν 10 διαδοχικές μετρήσεις ειδικής αντίστασης ανά ημέρα για 3 ημέρες και άλλες 10 μετρήσεις μετά από 5 ημέρες.



Εικόνα 4.8: Βελτιωτικά υλικά γείωσης εντός των δοχείων δοκιμής [2].



Σχήμα 4.3: Δοχείο εργαστηριακών μετρήσεων ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών [2].

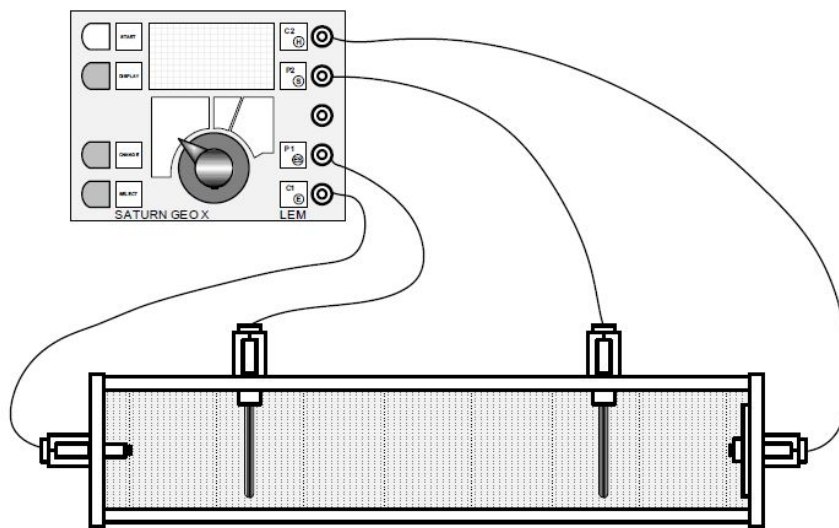


Εικόνα 4.9: Πειραματική διάταξη προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης [2].

Το όργανο με το οποίο μετρήθηκε η ειδική αντίσταση των υλικών είναι το LEM SATURN GEO-X Earth Tester (Εικόνα 4.10). Το όργανο αυτό διακρίβώνεται κάθε χρόνο από διαπιστευμένο εργαστήριο διακρίβωσης. Στο Σχήμα 4.4, φαίνεται η συνδεσμολογία του κυκλώματος μέτρησης κατά ASTM G57-06 [6].



Εικόνα 4.10: Το όργανο μέτρησης LEM SATURN GEO-X Earth Tester.



Σχήμα 4.4: Συνδεσμολογία του κυκλώματος μέτρησης [2].

4.2 Μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους και αντίστασης γείωσης

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εφαρμόσθηκε η μέθοδος Wenner (μέθοδος των 4 ηλεκτροδίων) όπως περιγράφεται στην ενότητα 1.2.3. Χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα (12) ηλεκτρόδια (ένδεκα (11) βοηθητικά ηλεκτρόδια και το κύριο ηλεκτρόδιο G_1), διατεταγμένα όλα σε έναν άξονα, όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 4.1. Με αυτήν τη διάταξη των ηλεκτροδίων λαμβάνονται μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για απόσταση των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με $2m$, $4m$, $8m$, $12m$ και $16m$. Κατ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται τιμές της ρ για βάθος ίσο με $a/2$, οπότε με αυτές τις αποστάσεις μπορεί να μετρηθεί η ρ σε βάθος έως $8m$.

Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των κυρίων ηλεκτροδίων εφαρμόσθηκε η μέθοδος πτώσης δυναμικού. Τα βοηθητικά ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις $20m$ και $40m$ από το εκάστοτε προς μέτρηση ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Η συχνότητα λειτουργίας του γειωσόμετρου καθορίζεται στα $128Hz$.

Οι μετρήσεις έγιναν το χρονικό διάστημα 17/2/2011 μέχρι και 18/1/2016 και πραγματοποιούνταν σχεδόν καθημερινά. Η διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων ήταν περίπου 90 λεπτά, καθότι οι χειριστές που εκτελούν τις μετρήσεις πρέπει να διανύουν μεγάλες αποστάσεις για την εναλλαγή στις συνδέσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, όπως και πολλά και συνεχόμενα τυλίγματα και απλώματα των καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του οργάνου στα ηλεκτρόδια.

Σημαντικό γεγονός αποτελεί το ότι η διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σε ανοιχτό χώρο και όχι σε χώρο εργαστηρίου. Έτσι, οι καιρικές συνθήκες επηρέασαν αισθητά τη διαδικασία, εφόσον ούτε ο χειριστής, αλλά ούτε και ο εξοπλισμός είναι προστατευμένοι από αυτές. Η θερμοκρασία δυσχέραινε τις λήψεις, όντας εξαιρετικά υψηλή το καλοκαίρι, ή πολύ χαμηλή τον χειμώνα. Η βροχόπτωση είτε καθιστούσε αδύνατη τη διεξαγωγή μετρήσεων λόγω της έντασής της, είτε πρόσθετε δυσκολίες την επόμενη μέρα στους χειρισμούς αφήνοντας το έδαφος ιδιαίτερα λασπώδες. Αντίστοιχα, η παρατεταμένη ξηρασία είχε αντίκτυπο στη μορφολογία του εδάφους, επηρεάζοντας τη συμπεριφορά των βελτιωτικών.

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί, ότι με αυτόν τον τρόπο οι παράγοντες που επηρεάζουν τα εξεταζόμενα υλικά επέδρασαν στην πειραματική διάταξη με καθόλα φυσική διαδικασία και όχι με τεχνητές μεθόδους, όπως στον χώρο ενός εργαστηρίου. Έτσι, διασφαλίστηκαν ποικίλοι συνδυασμοί των καιρικών συνθηκών, ανά εποχή, κάτι που θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί με τεχνικά μέσα στον εργαστηριακό χώρο.

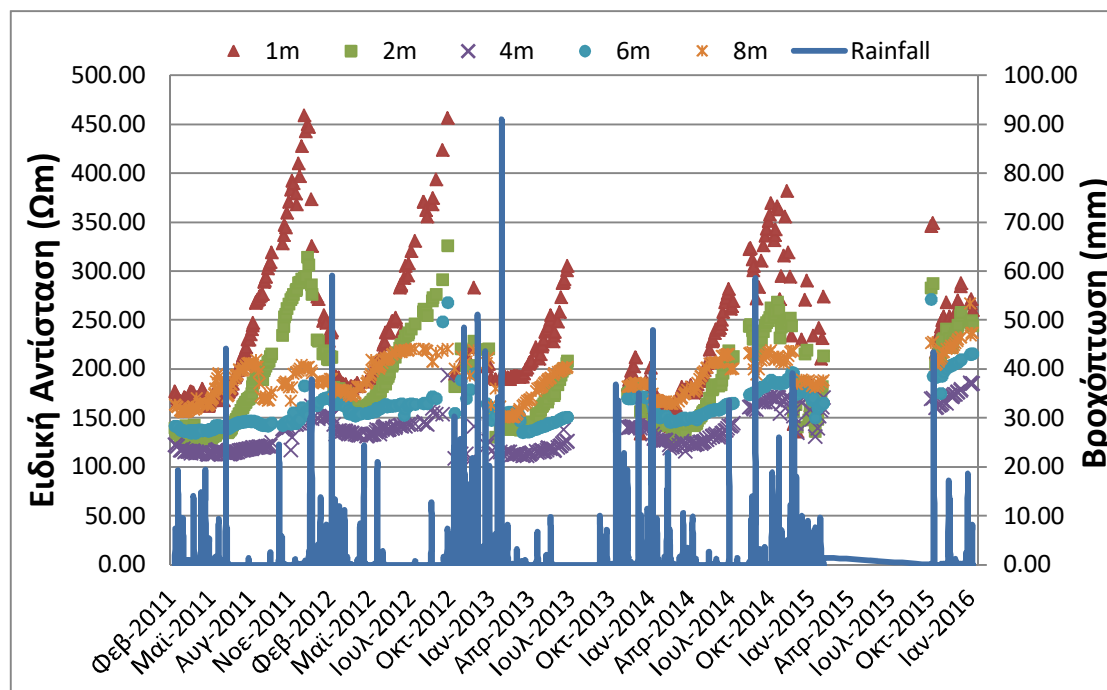
Κάποιες φορές οι μετρήσεις παρουσίαζαν σημαντική απόκλιση από τις αντίστοιχες τιμές των προηγούμενων ημερών λόγω τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάζονταν κατά τη διαδικασία λήψης. Η πιο συνήθης τέτοια περίπτωση ήταν η μη σωστή επαφή του καλωδίου μέτρησης με κάποιο ηλεκτρόδιο, κάτι που διορθωνόταν με τη σωστή επανατοποθέτηση του καλωδίου στο ηλεκτρόδιο. Πιο χρονοβόρα, ως προς την αντιμετώπιση, προβλήματα, ήταν η αναπτυσσόμενη σκουριά στα ηλεκτρόδια που έπρεπε να καθαριστεί με ειδική συρμάτινη βούρτσα, ή τυχόν διακοπή ενός καλωδίου μέτρησης σε κάποιο σημείο, οπότε και έπρεπε να επισκευασθεί. Σε κάθε περίπτωση, η παρουσίαση κάποιου από τα παραπάνω προβλήματα σήμαινε πως η διαδικασία μέτρησης σταματούσε και συνεχιζόταν μετά την αποκατάστασή του προβλήματος.

Τα παραπάνω προβλήματα και δυσκολίες στη διεξαγωγή των μετρήσεων αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την πραγματοποίηση τέτοιων μελετών, με συνέπεια να μην πραγματοποιούνται τέτοιες έρευνες σε μεγάλη κλίμακα.

4.2.1 Αποτελέσματα ειδικής αντίστασης εδάφους

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προκύπτει το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής της ειδικής αντίστασης ρ του φυσικού εδάφους συναρτήσει του χρόνου και του ύψους βροχόπτωσης, σε διάφορα βάθη (1m, 2m, 4m, 6m και 8m), όπως αυτό εικονίζεται στο Σχήμα 4.5. Με βάση αυτό το διάγραμμα είναι δυνατόν κανείς να εξαγει συμπεράσματα σχετικά με τη φυσική δομή του εδάφους, στο οποίο

λαμβάνει χώρα το πείραμα, την υδραυλική αγωγιμότητά του και τη συμπεριφορά του ως προς την κατακράτηση υγρασίας, αλλά και τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης σε διάφορα βάθη, τόσο ως προς το χρόνο, όσο και ως προς την απορροφούμενη υγρασία με τις βροχοπτώσεις.



Σχήμα 4.5: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους με τον χρόνο και τη βροχόπτωση.

Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται έντονη διακύμανση της ειδικής αντίστασης με τον χρόνο, η οποία οφείλεται στις διακυμάνσεις της βροχόπτωσης. Γενικά, με την αύξηση του βάθους στο έδαφος, ελαττώνεται το εύρος των μεταβολών, οι οποίες είναι εντονότερες στο άνω επίπεδο του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερη διακύμανση παρατηρείται έως περίπου τα 2 μέτρα, όπου εμφανίζεται απότομη και ραγδαία μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, ύστερα από περιόδους με έντονη βροχόπτωση. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τις χαμηλές τιμές της ειδικής αντίστασης στα κατώτερα στρώματα του εδάφους, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι προτιμότερη η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων γείωσης σε μεγαλύτερα βάθη, για την αποτελεσματικότερη διάχυση των ρευμάτων σφάλματος προς τη γη.

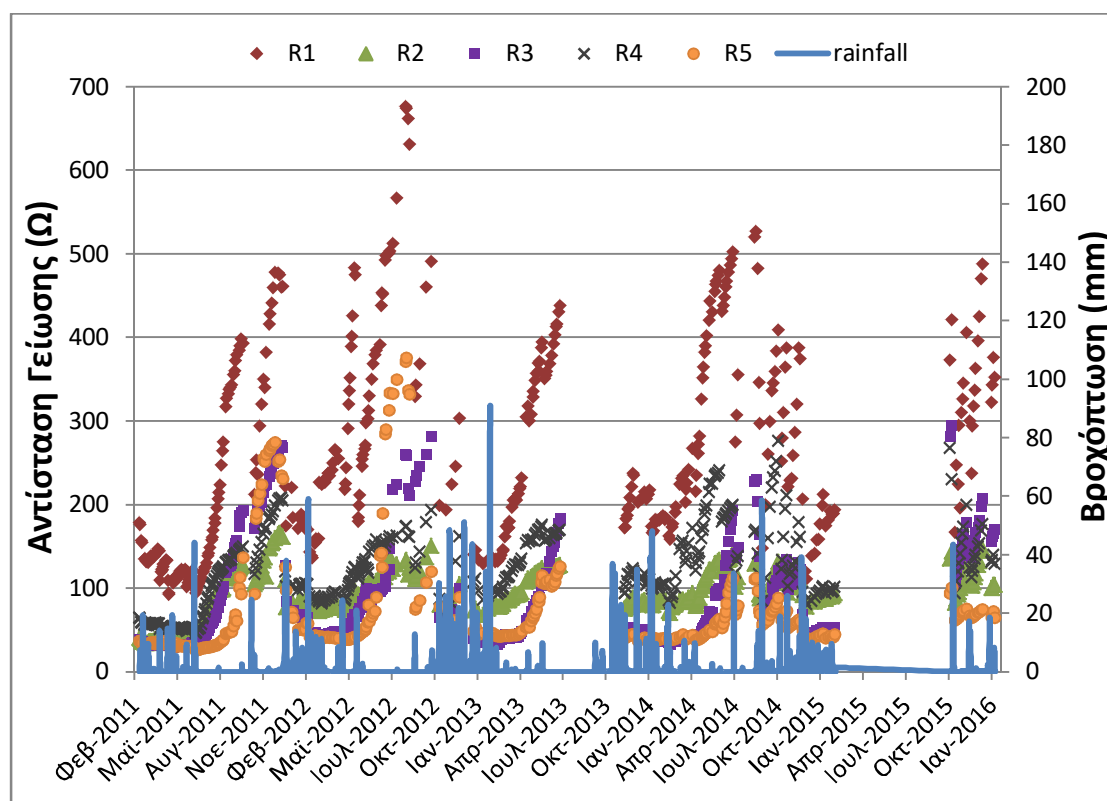
4.2.2 Αποτελέσματα αντίστασης γείωσης βελτιωτικών υλικών

Ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων G_1 (έδαφος), G_2 (σκυρόδεμα), G_3 (μπεντονίτης), G_4 (χημικό υλικό Α) και G_5 (χημικό υλικό Β) με βάση τις πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν κατά την

περίοδο 17/2/2011 – 18/1/2016 στην πειραματική διάταξη που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1.1. Η αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων, ειδικά στα άνω στρώματα του εδάφους, εξετάζεται σε συνάρτηση με τον χρόνο και τη βροχόπτωση.

Από το Σχήμα 4.6 προκύπτουν ενδιαφέροντα στοιχεία για τη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών συναρτήσει του χρόνου, καθώς και για την ταχύτητα και το είδος μεταβολής της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση με την ποσότητα του νερού που προσλαμβάνεται από το έδαφος, όπως αυτό έχει διαμορφωθεί από τα βελτιωτικά υλικά. Τέλος, εξετάζεται η αναγκαιότητα χρήσης αυτών των υλικών με βάση την ποσοστιαία μείωση της αντίστασης γείωσης που επιτυγχάνει το καθένα από αυτά.

Επιπλέον, επιχειρείται μια έρευνα, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών αυτών των υλικών και της αλληλεπίδρασης που έχουν με το φυσικό έδαφος με το οποίο αναμιγνύονται, της μείωσης της αντίστασης γείωσης του συστήματος που επιφέρει η τοποθέτηση αυτών των υλικών και ο προσδιορισμός των καταλληλότερων υλικών.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων του συστήματος γείωσης με τον χρόνο και τη βροχόπτωση.

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα βελτιωτικά υλικά ελαττώνουν αισθητά την αντίσταση γείωσης σε σχέση με το ηλεκτρόδιο αναφοράς G_1 (φυσικό έδαφος). Άλλα από αυτά επιφέρουν μεγαλύτερη μείωση και παρουσιάζουν μικρότερη διακύμανση

και άλλα είναι λιγότερο αποτελεσματικά. Σε όλες, όμως, τις περιπτώσεις, η διακύμανση της αντίστασης γείωσης βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με την υγρασία εδάφους. Επιπλέον, οι έντονες μεταβολές που παρουσιάζει η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 φανερώνουν τη μεγάλη ευαισθησία του φυσικού εδάφους στις καιρικές μεταβολές, και πιο συγκεκριμένα στη βροχόπτωση. Τέλος, οι χαμηλές τιμές αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων G_2 , G_3 , G_4 και G_5 , σε συνδυασμό με τη μικρή διακύμανσή τους, καταδεικνύουν τη σπουδαιότητα χρήσης βελτιωτικών υλικών σε συστήματα γείωσης και τα πολλαπλά οφέλη που μπορούν να προσφέρουν.

4.2.3 Αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών

Ακολουθεί ο Πίνακας 4.1 στον οποίο φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης.

		Σκυρόδεμα	Μπεντονίτης	Υλικό Α (LDT)	Υλικό Β (Terrafil)
1η ημέρα	Μέση Τιμή $\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	689,3	276,4	365,79	1354,04
	Τυπική Απόκλιση s	8,66	0,28	0	0,85
2η ημέρα	Μέση Τιμή $\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	625,35	270,18	357,28	1310,53
	Τυπική Απόκλιση s	0,28	0	0,42	0,58
3η ημέρα	Μέση Τιμή $\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	848,68	266,67	354,74	1298,07
	Τυπική Απόκλιση s	0,46	0	0,45	0,37
4η ημέρα	Μέση Τιμή $\bar{\rho}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	942,8	272	365,5	1463,4
	Τυπική Απόκλιση s	0,37	0,28	0,72	0,42

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα μετρήσεων ειδικής αντίστασης.

Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, βέλτιστη λύση είναι ο μπεντονίτης, εξαιτίας της ιδιαίτερα χαμηλής τιμής της ειδικής αντίστασής του. Ακολουθούν, κατά σειρά, το υλικό Α(LDT) και το σκυρόδεμα, ενώ στην τελευταία θέση είναι το υλικό Β (Terrafil).

Ο μπεντονίτης, το υλικό A και το υλικό B επιδεικνύουν αξιοσημείωτη σταθερότητα ως προς την ειδική αντίσταση, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα που μεταβάλλει την τιμή της. Επίσης, η τυπική απόκλιση για τις μετρήσεις που διεξήχθησαν στο εργαστήριο είναι σχεδόν μηδενική, γεγονός που αποδεικνύει ότι η συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών δεν είναι τυχαία.

4.3 Ανάλυση μεθόδου θεωρητικού προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης

Σ' αυτήν την ενότητα αναλύεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον θεωρητικό υπολογισμό της ειδικής αντίστασης των προς μελέτη βελτιωτικών υλικών, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους δεν κατέστη εφικτή η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων για τη μοντελοποίηση του εδάφους, εμφανίστηκε και το πρώτο μεγάλο εμπόδιο στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Επιχειρώντας, στο επόμενο στάδιο, την εισαγωγή, στο πρόγραμμα, της κυλινδρικής γεωμετρίας, μέσα στην οποία περιέχεται το βελτιωτικό υλικό γείωσης, διαπιστώθηκε ότι το πρόγραμμα δεν είχε τη δυνατότητα και τα απαραίτητα εργαλεία για την ανάλυση μιας τόσο σύνθετης διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, δεν είναι δυνατή η εισαγωγή ηλεκτροδίου, το οποίο να εκτείνεται σε παραπάνω από ένα στρώματα του εδάφους, πράγμα το οποίο εμπόδιζε την εκτέλεση οποιασδήποτε προσομοίωσης, μιας και στην πειραματική διάταξη το ηλεκτρόδιο γείωσης και η περιβάλλουσα γεωμετρία του βελτιωτικού υλικού διαπερνούν και τα τρία στρώματα του τριστρωματικού μοντέλου. Στη συνέχεια, έγινε παραδοχή προσομοίωσης της κυλινδρικής γεωμετρίας μέσα σε μονωστρωματικό έδαφος αντί για τριστρωματικό που υφίσταται στην πραγματικότητα. Για να γίνει αυτό χρειαζόταν εκ νέου υπολογισμός, για κάθε ημέρα διεξαγωγής μετρήσεων, της ειδικής αντίστασης του εδάφους με βάσει τις μετρήσεις, αλλά αυτή τη φορά σε μονοστρωματικό μοντέλο.

Χρησιμοποιώντας σαν βάση τις προσομοιώσεις για τα μονοστρωματικά μοντέλα εδάφους, καταχωρήθηκε στο πρόγραμμα μια ορθογώνια παραλληλεπίπεδη γεωμετρία, ίσου όγκου με αυτή του κυλινδρικού όγκου των βελτιωτικών υλικών γείωσης, που εμπεριείχε ηλεκτρόδιο στο κέντρο ακριβώς όπως στην πειραματική διάταξη. Ο όγκος γύρω από το ηλεκτρόδιο περιείχε «υλικό» μεταβαλλόμενης ειδικής αντίστασης, με αποτέλεσμα το πρόγραμμα CDEGS τελικά να υπολογίζει την αντίσταση γείωσης του υλικού μέσα στο μονωστρωματικό έδαφος στο οποίο ήταν τοποθετημένο. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της ειδικής αντίστασης του κάθε

βελτιωτικού υλικού ακολουθήθηκε μια διαδικασία δοκιμών. Από τις μετρήσεις στο πεδίο ήταν γνωστή η αντίσταση γείωσης, το οποίο ήταν και το αποτέλεσμα που έδινε το πρόγραμμα στο πέρας της προσομοίωσης. Μεταβάλλοντας την τιμή της ειδικής αντίστασης στην είσοδο (Input) του προγράμματος, επιχειρήθηκε, με συνεχείς δοκιμές, να προσεγγιστεί η πειραματικά μετρούμενη τιμή της αντίστασης γείωσης (Output), με ακρίβεια τουλάχιστον ενός δεκαδικού. Μετά από αρκετές δοκιμές με την παραπάνω μέθοδο, εξήχθη το συμπέρασμα πως η παραδοχή για προσομοίωση του εδάφους με μονοστρωματικό μοντέλο δεν ήταν ικανοποιητική ως προς τα αποτελέσματα, καθώς παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη απόκλιση από τις τιμές μέτρησης, αλλά και σε πολλές περιπτώσεις το πρόγραμμα το ίδιο λόγω των περιορισμών του μοντέλου δεν μπορούσε να εξάγει οποιοδήποτε αποτέλεσμα.

Ακολούθως, παρατίθενται δύο πίνακες, στους οποίους φαίνονται οι δύο κυριότερες περιπτώσεις σφαλμάτων στα αποτελέσματα της παραπάνω μεθόδου.

Ημερομηνία	Τιμές CDEGS		Πειραματικές Τιμές	
	CDEGS Input ($\Omega \cdot m$)	CDEGS Output (Ω)	R_3 (Ω)	R_5 (Ω)
29/4/2011	0,0000001	31,4	29,1	31,1
03/5/2011	0,0000001	31,2	29,7	30,1
16/5/2011	0,0000001	32,4	30,8	31,3
17/5/2011	0,0000001	32,3	30,8	31,4
18/5/2011	0,0000001	32,8	30,4	30,9
23/5/2011	0,0000001	33,5	32	31,1
24/5/2011	0,0000001	33,7	32,1	31
25/5/2011	0,0000001	33,75	32,3	30,9
30/5/2011	0,0000001	33,2	32,6	30,3
01/6/2011	0,0000001	33,3	32,6	30,6

Πίνακας 4.2: Ενδεικτικές Τιμές Σφαλμάτων (1).

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών περιλαμβάνει την εισαγωγή δοκιμαστικών τιμών ειδικής αντίστασης στο Input μέχρι την ταύτιση του Output (αντίσταση γείωσης) με την πειραματική τιμή της αντίστασης γείωσης για κάθε βελτιωτικό. Έτσι εξάγεται η θεωρητική τιμή της ειδικής αντίστασης κάθε υλικού.

Στην προσπάθεια προσδιορισμού των ζητούμενων τιμών ορισμένων βελτιωτικών υλικών, δοκιμάστηκαν αρκετές τιμές εισόδου (Input) που ξεκινούσαν από υψηλά επίπεδα και συνεχώς μειώνονταν. Σ' αυτό το σημείο παρατηρήθηκε ότι όσο χαμηλές κι αν είναι οι τιμές εισόδου (ακόμη και σχεδόν μηδενικές, $0,0000001\Omega \cdot m$), οι τιμές εξόδου (Output) εμφανίζουν ένα κάτω φράγμα, το οποίο

όμως είναι υψηλότερο από τις πειραματικά μετρούμενες τιμές. Με άλλα λόγια, όσο χαμηλή και αν ήταν η υποθετική τιμή της ειδικής αντίστασης σαν είσοδος του επιλύτη, η αντίσταση γείωσης στην έξοδο του επιλύτη δεν μπορούσε να προσεγγίσει με καλή ακρίβεια την πειραματική της τιμή (αληθής τιμή). Συνεπώς, ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών δεν ήταν εφικτός. Επίσης, από φυσικής πλευράς, η σχεδόν μηδενική ειδική αντίσταση ενός τέτοιου υλικού δεν υφίσταται στην πραγματικότητα.

Ημερομηνία	ρ Εδάφους ($\Omega \cdot m$)	ρ_2 ($\Omega \cdot m$)	ρ_4 ($\Omega \cdot m$)
2/9/2011	173,7879	205,5	265,5
5/9/2011	177,1326	206,7	267
7/9/2011	177,3541	207,9	269,2
9/9/2011	179,2318	210,65	272
14/9/2011	179,7164	219,2	278,6
16/9/2011	180,9034	221,6	282,5
19/9/2011	183,7155	224,2	283,5
22/9/2011	187,1142	227,1	289

Πίνακας 4.3: Ενδεικτικές Τιμές Σφαλμάτων (2).

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανής ο δεύτερος τύπος σφάλματος που αντιμετωπίστηκε. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι κάποια βελτιωτικά υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή ειδικής αντίστασης από το έδαφος, μετά την έγχυσή τους σ' αυτό, πράγμα που αντιτίθεται στη λογική της χρήσης τους.

Σε συνέχεια της περιγραφής της πειραματικής διαδικασίας και της παράθεσης των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων, που πραγματοποιούνται στο παρόν κεφάλαιο, ακολουθεί στο κεφάλαιο 5 η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [2] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.
- [3] <https://www.google.gr/maps/>.
- [4] 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.
- [5] BS EN 62561-7, “Lightning Protection System Components (LPSC) - Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds”, 2012.
- [6] ASTM G57-06, “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method”, 2012.

Κεφάλαιο 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε γραφική απεικόνιση για τα μοντέλα εδάφους (μονοστρωματικό, διστρωματικό, τριστρωματικό) και για τα όρια ασφαλείας (Βηματική Τάση, Τάση Επαφής), και πραγματοποιείται σχολιασμός επί των γραφημάτων.

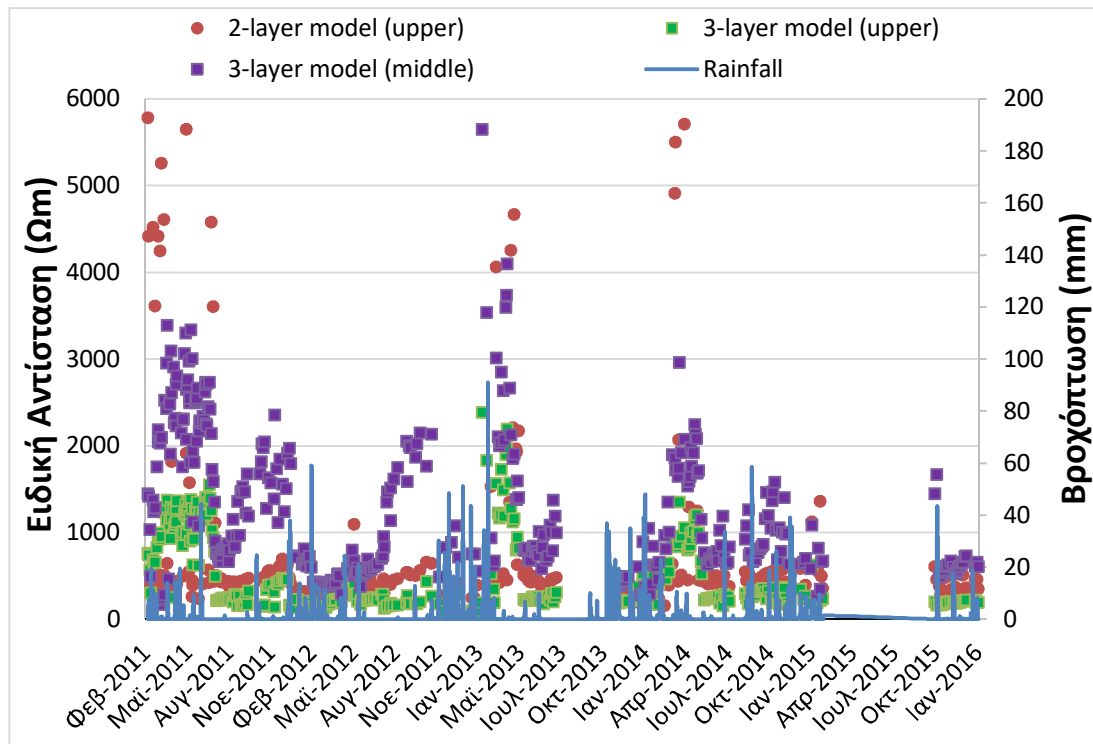
Σ' αυτό το σημείο, κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι για την ευκρινέστερη ανάγνωση των γραφημάτων και την καλύτερη εστίαση στις περιοχές ενδιαφέροντος περιορίστηκε ελαφρώς το εύρος τιμών του κάθετου άξονα, που αναπαριστά κατά περιπτώσεις την ειδική αντίσταση εδάφους, τη βηματική τάση και την τάση επαφής.

5.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Μοντέλων Εδάφους

Σύγκριση Διστρωματικού – Τριστρωματικού Μοντέλου

Στο σχήμα 5.1 παρατίθεται το διάγραμμα που παρουσιάζει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος του διστρωματικού μοντέλου, του άνω στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου και του μεσαίου στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στο CDEGS.

Η επιλογή των συγκεκριμένων τριών στρωμάτων για σύγκριση έγινε επειδή είναι τα μόνα στρώματα που έχουν πεπερασμένο βάθος, κι επομένως είναι πιθανό να παρουσιάσουν παρόμοια συμπεριφορά και να εξευρεθούν σημεία σύγκλισης μεταξύ τους.

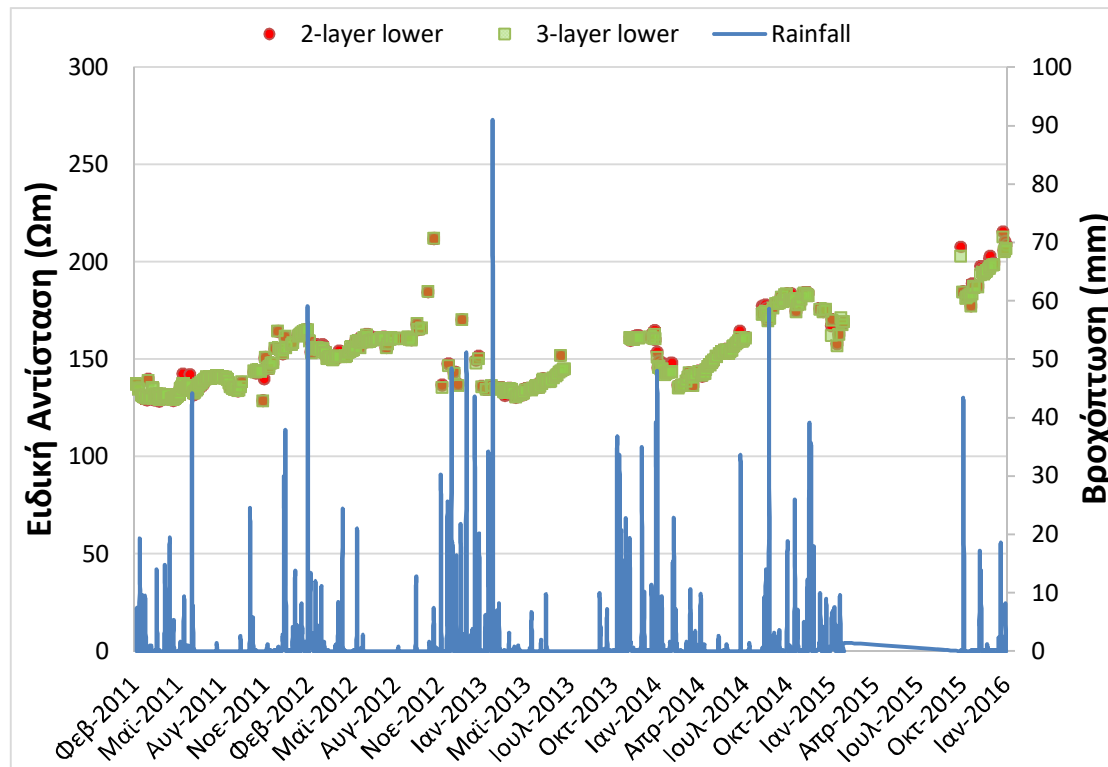


Σχήμα 5.1: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει χρόνου και βροχόπτωσης για το άνω στρώμα του διστρωματικού, το άνω και το μεσαίο στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται αξιοσημείωτη διακύμανση της ειδικής αντίστασης με τον χρόνο και για τα δύο μοντέλα εδάφους. Η διακύμανση αυτή οφείλεται στη μεταβολή της υγρασίας του εδάφους που εξαρτάται από τη βροχόπτωση. Επίσης, παρατηρείται ότι στο μεγαλύτερο τμήμα της χρονικής περιόδου, που εξετάζεται, οι τιμές της ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος του διστρωματικού μοντέλου βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές της ειδικής αντίστασης του άνω και του μεσαίου στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου.

Η διακύμανση της ειδικής αντίστασης κάθε στρώματος δε μοιάζει με καμία άλλη, δηλαδή ακολουθεί η καθεμία το δικό της μοτίβο. Η διαφορετική κλίμακα μεταβολής που εμφανίζουν τα τρία στρώματα οφείλεται στη διαφορετική σύσταση και δομή των στρωμάτων, αλλά και στις διαφορετικές ποσότητες νερού που συγκρατούνται στα διάφορα βάθη.

Ακολούθως, στο Σχήμα 5.2 παρατίθεται το διάγραμμα που παρουσιάζει τη διακύμανση της ειδικής αντίστασης για τα κατώτερα στρώματα του διστρωματικού και του τριστρωματικού μοντέλου εδάφους με τον χρόνο και τη βροχόπτωση.



Σχήμα 5.2: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει χρόνου και βροχόπτωσης για το κάτω στρώμα του διστρωματικού και το κατώτερο στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου.

Παρατηρείται ότι η διακύμανση της ειδικής αντίστασης για τα δύο στρώματα είναι μικρή, και αισθητά μικρότερη από αυτήν των ανώτερων στρωμάτων του διστρωματικού και του τριστρωματικού μοντέλου. Σε ό,τι αφορά τα κατώτερα στρώματα των δύο πολυστρωματικών μοντέλων, είναι εμφανής η ταύτισή τους καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ιδιότητα των κατωτέρων στρωμάτων να συγκρατούν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες υγρασίας, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα στις τιμές της ειδικής αντίστασης τους, αφού το θεωρητικά μεγάλο βάθος στο οποίο εκτείνονται εξαλείφει τις όποιες διαφορές υπάρχουν μεταξύ τους.

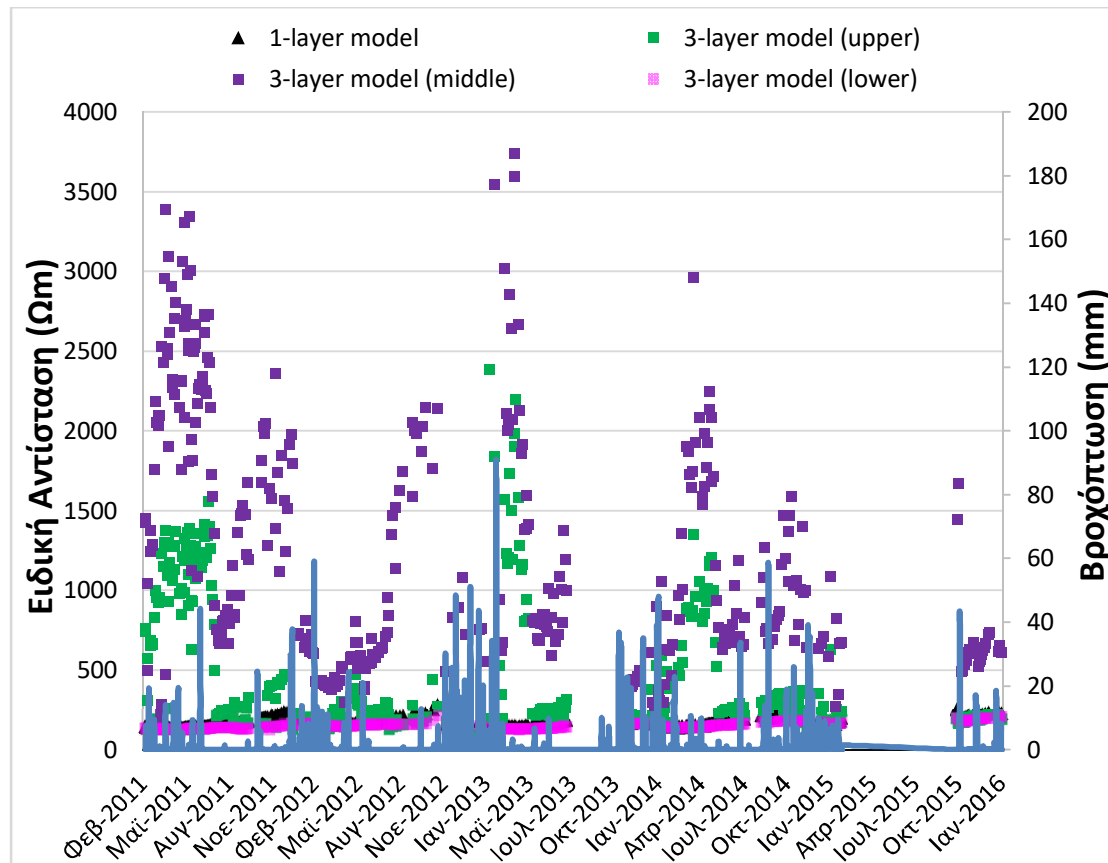
Η σύγκριση μεταξύ των κατωτέρων στρωμάτων των δύο πολυστρωματικών μοντέλων πραγματοποιήθηκε για τον ίδιο λόγο που συγκρίθηκαν και τα ανώτερα στρώματα των ίδιων μοντέλων, αφού έχουν κοινά χαρακτηριστικά, όπως μεγάλο βάθος (θεωρητικά άπειρο με βάση το μοντέλο), και είναι ευκολότερος ο συσχετισμός τους.

Στην προκειμένη περίπτωση, μετά από αυτές τις δύο συγκρίσεις, διαπιστώνεται ότι το διστρωματικό μοντέλο μπορεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια να προσομοιώσει το έδαφος της πειραματικής διάταξης, που, σύμφωνα με την ανάλυση της ηλεκτροτομογραφίας, έχει χαρακτηριστεί ως τριστρωματικό.

Σύγκριση Μονοστρωματικού – Τριστρωματικού Μοντέλου

Η σύγκριση αυτή έχει ως σκοπό την εύρεση πιθανών σημείων σύγκλισης του μονοστρωματικού μοντέλου με κάποιο ή κάποια από τα στρώματα του τριστρωματικού μοντέλου.

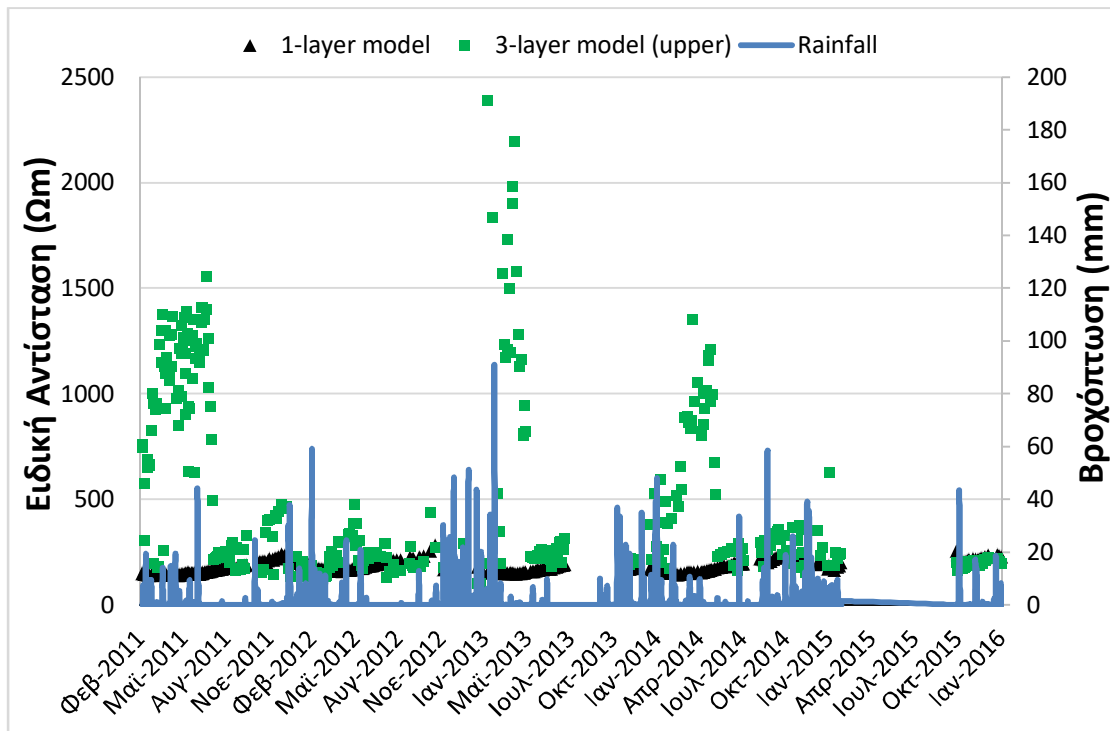
Ακολουθεί το διάγραμμα που παρουσιάζει τη διακύμανση της ειδικής αντίστασης για το μονοστρωματικό μοντέλο και τα τρία στρώματα του τριστρωματικού μοντέλου εδάφους με τον χρόνο και τη βροχόπτωση.



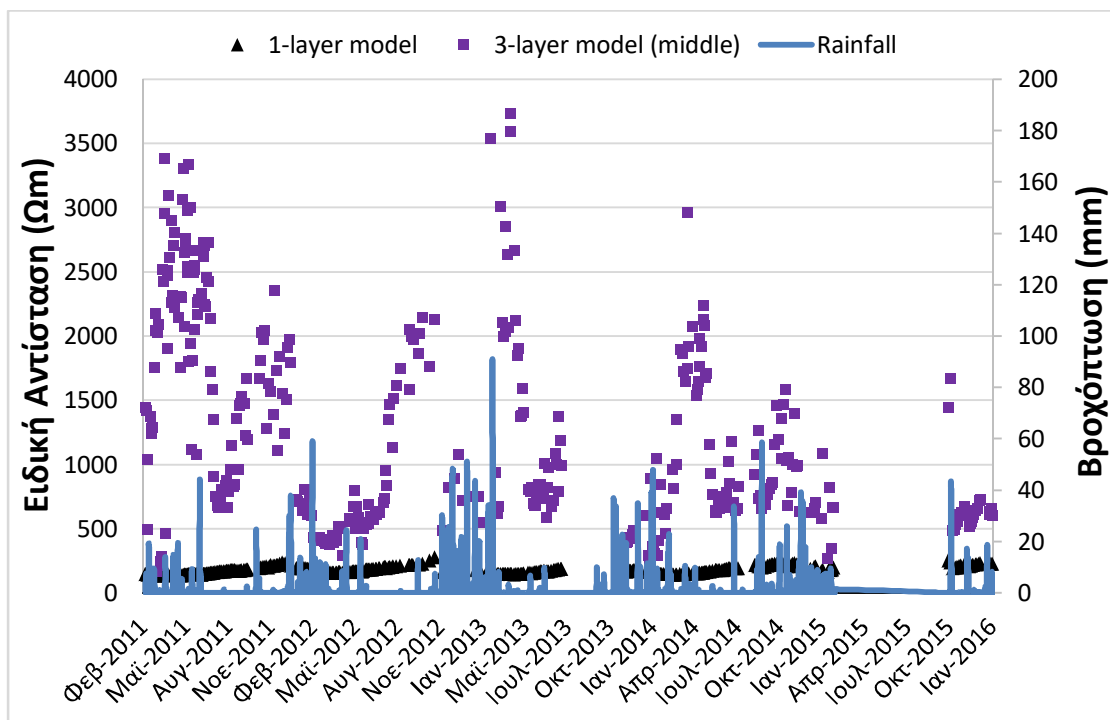
Σχήμα 5.3: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει χρόνου και βροχόπτωσης για το μονοστρωματικό μοντέλο, και το άνω, το μεσαίο και το κάτω στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου.

Παρατηρείται ότι η ειδική αντίσταση του μονοστρωματικού μοντέλου διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη του κάτω στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου, ενώ διαφοροποιείται αισθητά από τις τιμές του άνω και του μεσαίου στρώματος του τριστρωματικού.

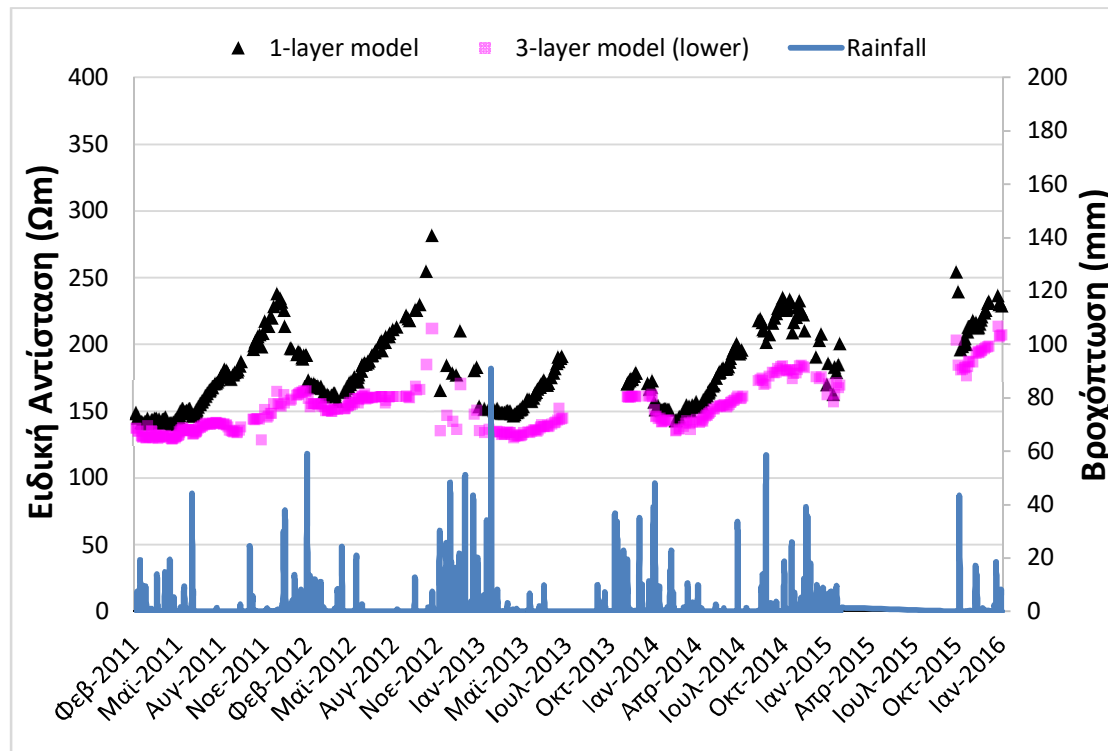
Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα για τη λεπτομερέστερη σύγκριση της ειδικής αντίστασης του μονοστρωματικού μοντέλου με την ειδική αντίσταση καθενός από τα τρία στρώματα του τριστρωματικού μοντέλου.



Σχήμα 5.4: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει χρόνου και βροχόπτωσης για το μονοστρωματικό μοντέλο και το άνω στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου.



Σχήμα 5.5: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει χρόνου και βροχόπτωσης για το μονοστρωματικό μοντέλο και το μεσαίο στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου.

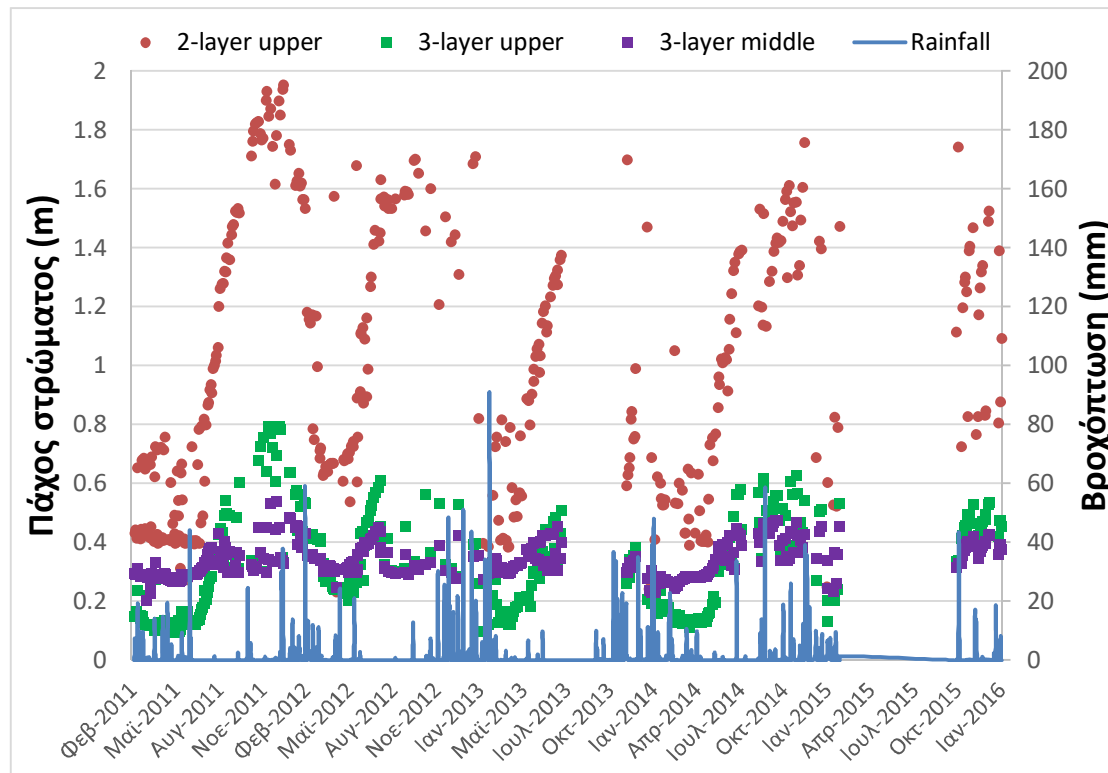


Σχήμα 5.6: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους συναρτήσει χρόνου και βροχόπτωσης για το μονοστρωματικό μοντέλο και το μεσαίο στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου.

Μετά την παρατήρηση των Σχημάτων 5.4, 5.5, 5.6 συμπεραίνεται ότι το μονοστρωματικό μοντέλο αδυνατεί να προσομοιώσει το τριστρωματικό μοντέλο με ακρίβεια, αλλά μπορεί να αποδώσει με μεγάλη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του κατώτερου στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου.

Σύγκριση Βαθών

Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα που παρουσιάζει τη μεταβολή του βάθους για το άνω στρώμα του διστρωματικού μοντέλου και τα δύο πάνω στρώματα του τριστρωματικού μοντέλου με τον χρόνο και τη βροχόπτωση, όπως τα υπολογίζει το λογισμικό προσομοίωσης.

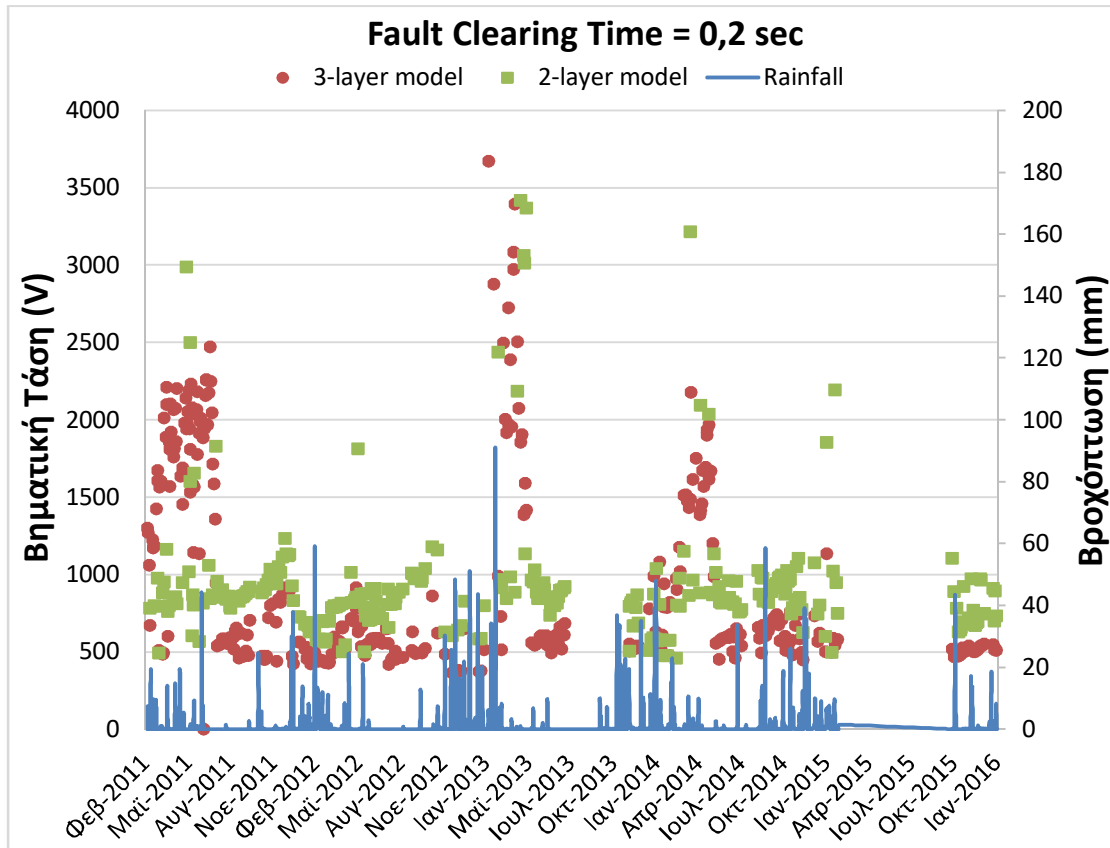


Σχήμα 5.7: Μεταβολή του βάθους του άνω στρώματος του διστρωματικού και του βάθους του άνω και του μεσαίου στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου συναρτήσει χρόνου και βροχόπτωσης.

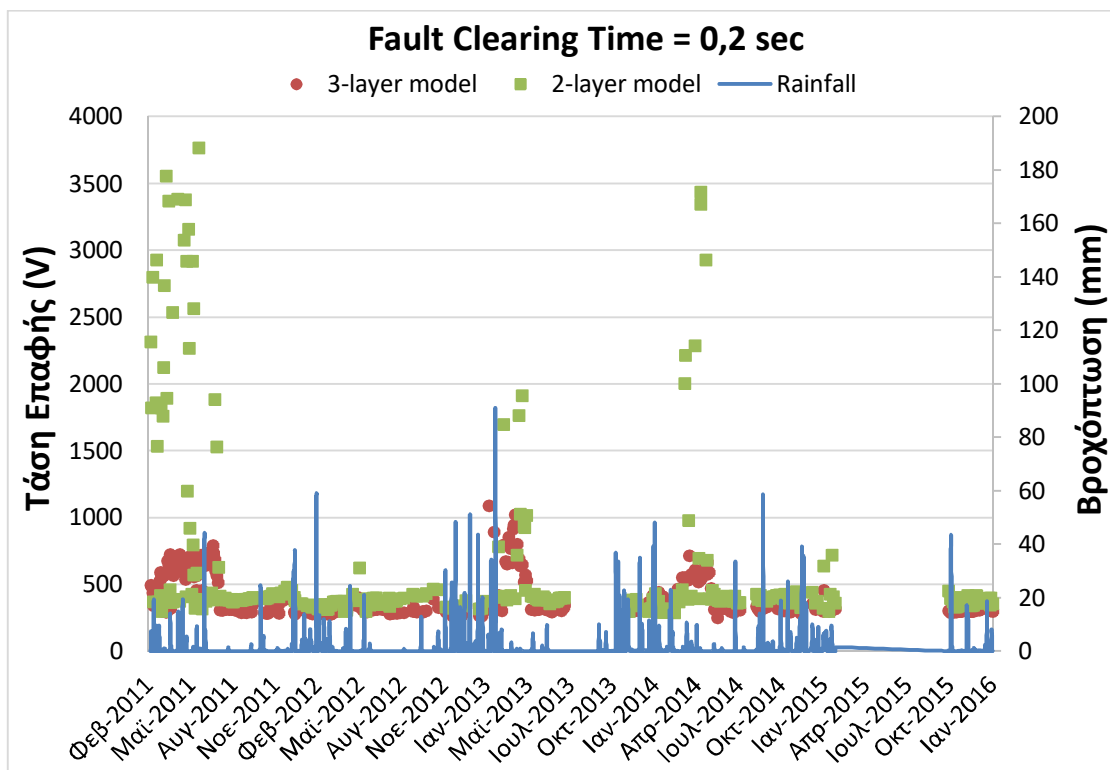
Όπως είναι φανερό, το βάθος για κάθε στρώμα μεταβάλλεται σημαντικά συναρτήσει του χρόνου επηρεαζόμενο από τη βροχόπτωση, με τρόπο παρόμοιο με την ειδική αντίσταση του εδάφους (Σχήμα 5.1). Πιο συγκεκριμένα, στα άνω στρώματα των μοντέλων παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση τιμών απ' ό,τι στο μεσαίο στρώμα του τριστρωματικού, αφού αυτά τα στρώματα είναι πολύ περισσότερο επιρρεπή στη μεταβολή του ύψους βροχόπτωσης

5.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Βηματικών Τάσεων και Τάσεων Επαφής

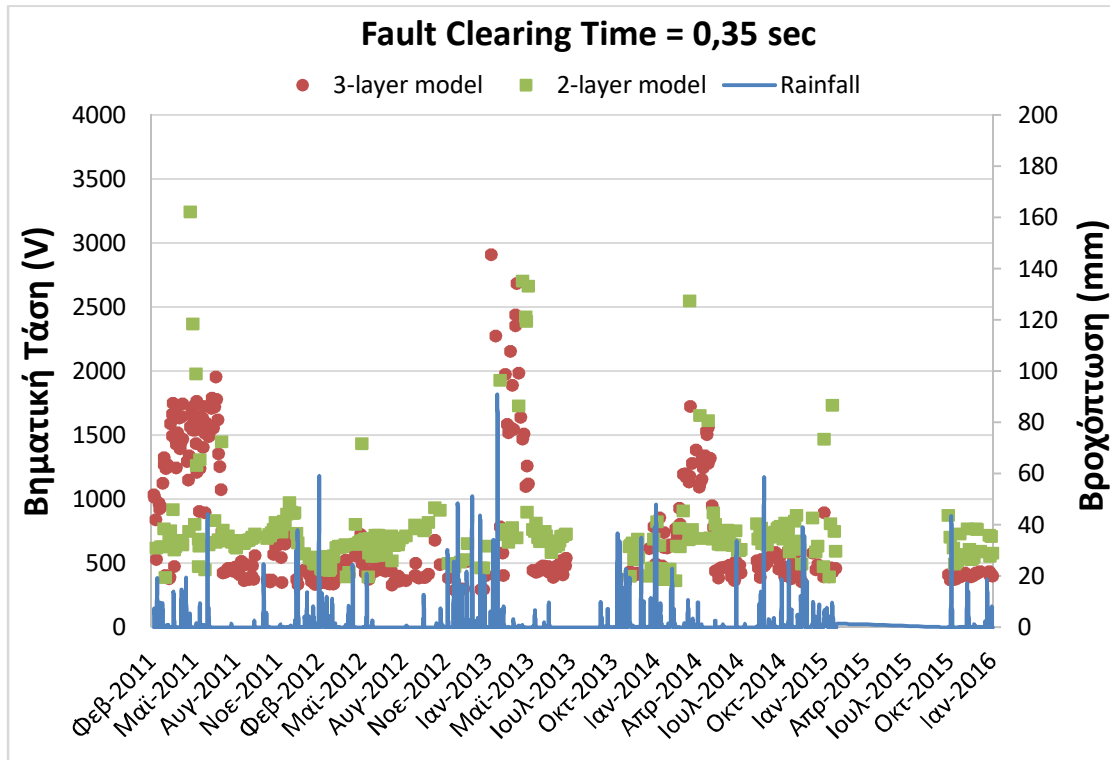
Στην ενότητα αυτήν παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή των Βηματικών Τάσεων και των Τάσεων Επαφής, για τρεις διαφορετικούς χρόνους εκκαθάρισης (Fault Clearing Time), σε συνάρτηση με τον χρόνο και το ύψος βροχόπτωσης. Τα διαγράμματα αυτά είναι αποτέλεσμα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος CDEGS για το διστρωματικό και το τριστρωματικό μοντέλο εδάφους.



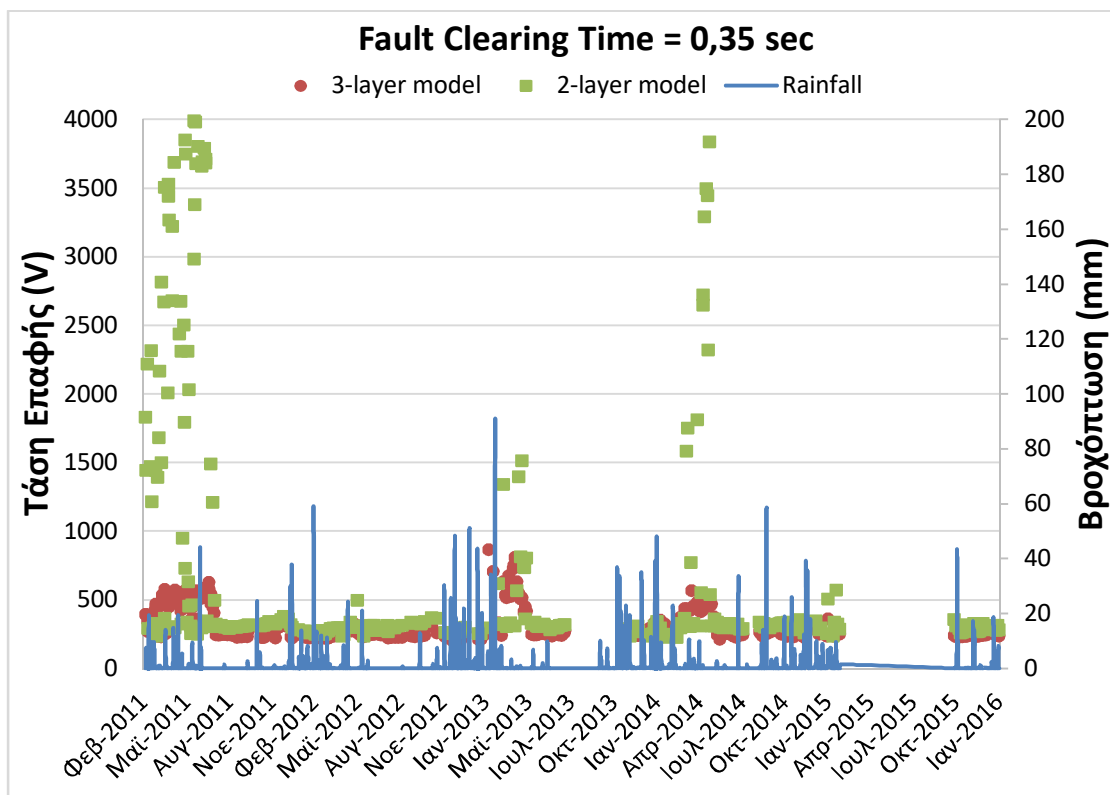
Σχήμα 5.8: Βηματική Τάση - Βροχόπτωση (Fault Clearing Time=0,2 sec).



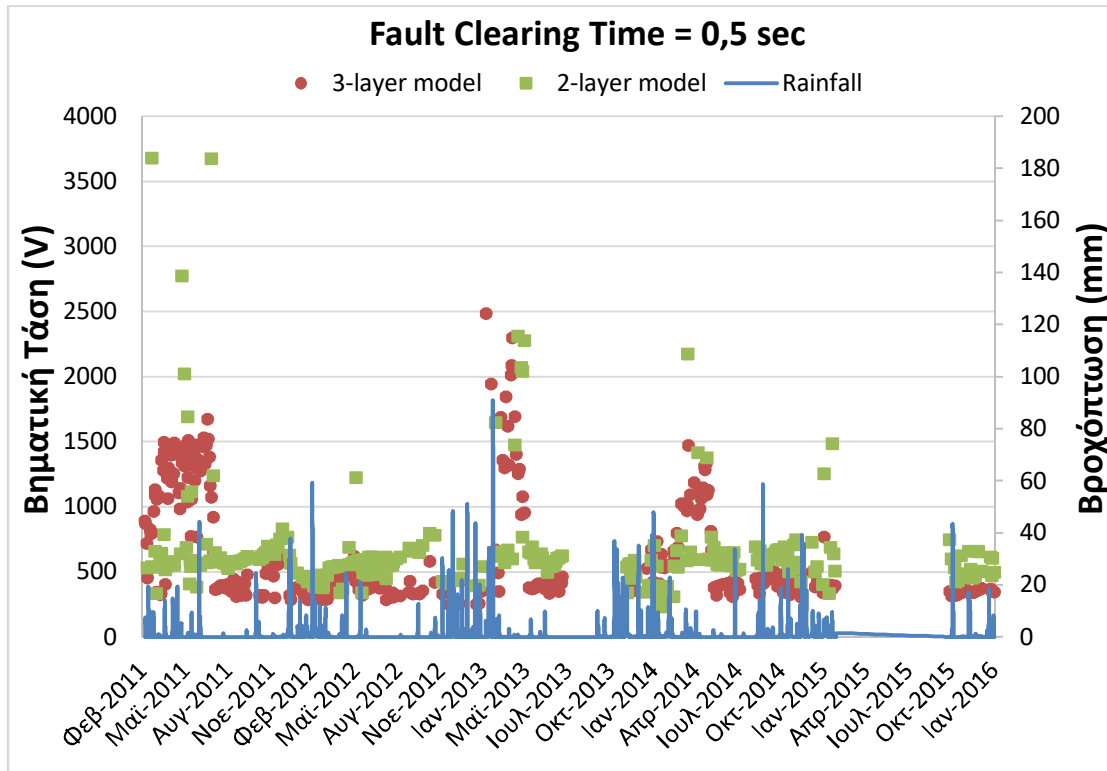
Σχήμα 5.9: Τάση Επαφής - Βροχόπτωση (Fault Clearing Time=0,2 sec).



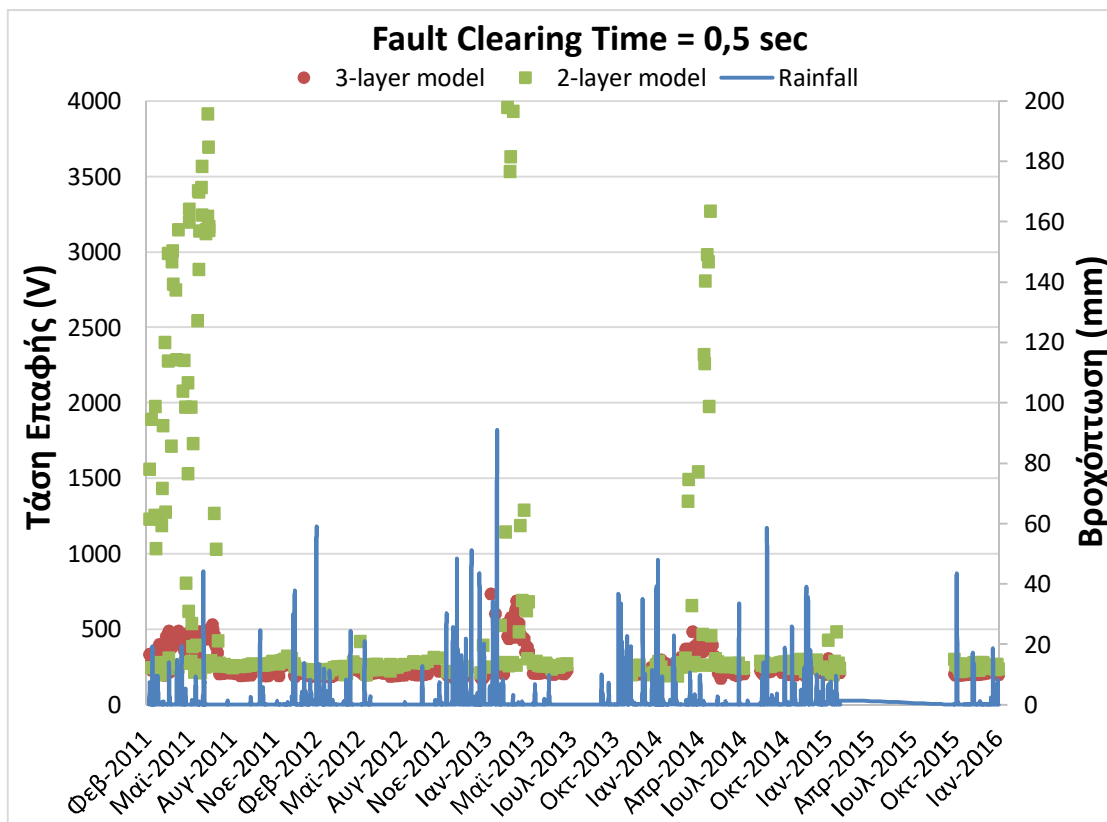
Σχήμα 5.10: Βηματική Τάση - Βροχόπτωση (Fault Clearing Time=0,35 sec).



Σχήμα 5.11: Τάση Επαφής - Βροχόπτωση (Fault Clearing Time=0,35 sec).



Σχήμα 5.12:Βηματική Τάση - Βροχόπτωση(Fault Clearing Time=0,5 sec).



Σχήμα 5.13:Τάση Επαφής - Βροχόπτωση (Fault Clearing Time=0,5 sec).

Παρατηρώντας συνολικά τα παραπάνω διαγράμματα, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τόσο η βηματική τάση όσο και η τάση επαφής επηρεάζονται σημαντικά από τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους, οι οποίες είναι σε άμεση συνάρτηση με το ύψος βροχόπτωσης. Οι πολύ υψηλές τιμές των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής που παρατηρούνται για ορισμένες ημέρες μετρήσεων, οφείλονται σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας, οι οποίες διαμορφώνουν ακραίες συνθήκες στο έδαφος της πειραματικής διάταξης. Συγκεκριμένα, με την έλλειψη των βροχοπτώσεων, το έδαφος γίνεται πολύ ξηρό, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά στην εσωτερική δομή του και να μην έρχεται σε πλήρη επαφή με τα ηλεκτρόδια μέτρησης της ειδικής αντίστασης, αφού αυτά είναι μόνιμα τοποθετημένα στις συγκεκριμένες θέσεις του πειραματικού πεδίου και, ως εκ τούτου, υφίστανται τις καθημερινές μεταβολές της δομής του εδάφους. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, οι οποίες καθορίζουν τα μοντέλα εδάφους που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την εξαγωγή των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

Κατά κύριο λόγο, οι τιμές της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής που αναπτύσσονται κατά την εκδήλωση σφάλματος είναι χαμηλότερες για την περίπτωση του τριστρωματικού μοντέλου σε σχέση με την περίπτωση του διστρωματικού μοντέλου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις χαμηλότερες τιμές της ειδικής αντίστασης που συναντώνται στο άνω στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου συγκριτικά με τις τιμές της ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος του διστρωματικού μοντέλου, όπως φάνηκε από τη γραφική απεικόνιση των προσομοιώσεων στο Σχήμα 5.1.

Επίσης, οι τιμές της βηματικής τάσης και τάσης επαφής παρουσιάζουν έντονη μεταβολή κατά διαστήματα, γεγονός που υποδεικνύει την απρόβλεπτη φύση του εδάφους και αναδεικνύει την ανάγκη σχεδιασμού του κατάλληλου συστήματος γείωσης για την προστασία ανθρώπων και εγκαταστάσεων. Μία πολύ καλή λύση στο πρόβλημα εμφάνισης υψηλών τιμών βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής (άνω των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων) αποτελεί η επικάλυψη με χαλίκι, ασφαλτο ή άλλο υλικό μεγάλης ειδικής αντίστασης, στις περιοχές του εδάφους στις οποίες, από τις προσομοιώσεις, προκύπτουν υψηλές τιμές βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

Επιπλέον, σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 1 και πιο συγκεκριμένα τις σχέσεις 1.19 και 1.21, η Βηματική Τάση και η Τάση Επαφής είναι ανάλογες της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογες του χρόνου εκκαθάρισης του ρεύματος σφάλματος (Fault Clearing Time).



Αυξάνοντας, λοιπόν, τον χρόνο εκκαθάρισης, παρατηρείται ελάττωση των τιμών των ορίων ασφαλείας.

Η παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι ο μέσος όρος των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής ελαττώνεται με την αύξηση του χρόνου εκκαθάρισης, τόσο για το διστρωματικό μοντέλο, όσο και για το τριστρωματικό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1.

		Fault Clearing Time		
		0,2 sec	0,35 sec	0,5 sec
2-layer model	Average Step Voltage (V)	3494,27	2768,58	2363,25
	Average Touch Voltage (V)	1046,52	829,18	708,32
3-layer model	Average Step Voltage (V)	947,71	753,06	642,87
	Average Touch Voltage (V)	410,43	325,24	277,65

Πίνακας 5.1: Μέσος όρος των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, για διαφορετικούς χρόνους εκκαθάρισης του ρεύματος σφάλματος.

Η ανάλυση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων (κεφάλαιο 5), αλλά και των πειραματικών μετρήσεων (κεφάλαιο 4) πραγματοποιείται στο 6^ο κεφάλαιο, όπου διατυπώνονται και γενικότερα συμπεράσματα όσον αφορά την επίτευξη των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα συμπεράσματα που εξάγονται τόσο από τις πειραματικές μετρήσεις, όσο και από τη διαδικασία των προσομοιώσεων. Καταλήγοντας, καταγράφονται κάποιες προτάσεις για συνέχιση και επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο μέλλον.

6.1 Συμπεράσματα Πειραματικών Μετρήσεων

6.1.1 Μεταβολή της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Στην ενότητα αυτή γίνεται εκτενής σχολιασμός των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας τα τελευταία πέντε χρόνια, δηλαδή από το Φεβρουάριο του 2011 έως τον Ιανουάριο του 2016. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Από τη λεπτομερή μελέτη και ανάλυση των διαγραμμάτων της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ και της αντίστασης γείωσης R των ηλεκτροδίων των εγκατεστημένων συστημάτων γείωσης, συναρτήσει διαφόρων μεταβλητών, όπως ο χρόνος και το ύψος βροχόπτωσης, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται αξιολόγηση των τεσσάρων βελτιωτικών υλικών γείωσης ως προς την ικανότητά τους να επιφέρουν αποτελεσματική μείωση της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων, σε σύγκριση με την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου αναφοράς, τόσο σε βάθος χρόνου, όσο και σε συνάρτηση με το ύψος βροχόπτωσης που σημειώνεται στην περιοχή εγκατάστασής τους.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι πειραματικές μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων, όπως και όλες οι προηγούμενες [1], διεξήχθησαν σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης εγκατεστημένα σε υπαίθρια τοποθεσία εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Σκοπός των μετρήσεων αυτών υπήρξε η, κατά το δυνατόν, καλύτερη προσέγγιση των συνθηκών που επικρατούν στα συστήματα γείωσης και συνεπώς η ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης



των βελτιωτικών υλικών γείωσης σε εργαστηριακές συνθήκες, πριν αυτά εγχυθούν περιμετρικά των ηλεκτροδίων γείωσης.

Αρχικά, εξετάζεται η συμπεριφορά του φυσικού εδάφους συναρτήσει του χρόνου και της βροχόπτωσης, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης του μικροεδάφους και των εποχικών μεταβολών στη συμπεριφορά των κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης εντός του φυσικού εδάφους (G_1) και των βελτιωτικών υλικών γείωσης (G_2, G_3, G_4, G_5).

Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ (Σχήμα 4.5), παρατηρείται αξιοσημείωτη διακύμανσή της με τον χρόνο για όλα τα βάθη μέτρησης (1m, 2m, 4m, 6m, 8m). Επίσης, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενισχύουν τις ενδείξεις για την ανομοιογένεια του φυσικού εδάφους και την πολυστρωματική δομή του, γεγονός που συνάδει απόλυτα με το αποτέλεσμα της ηλεκτροτομογραφίας.

Παρατηρείται ότι η διακύμανση της τιμής της ειδικής αντίστασης ρ του εδάφους με την πάροδο του χρόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μεταβολή του ύψους βροχόπτωσης στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Σημειώνεται ότι το ύψος βροχόπτωσης επηρεάζει την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία (κατά βάρος) και, όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της βροχής (εκφράζεται σε mm), τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της ειδικής αντίστασης ρ που εμφανίζει το έδαφος. Το παραπάνω φαινόμενο είναι πιο έντονο στην επιφάνεια και στα ανώτερα στρώματα του εδάφους (βάθη 1m και 2m), όπου οι υψηλές ημερήσιες συγκεντρώσεις βροχόπτωσης, συνεπώς και οι υψηλές συγκεντρώσεις υγρασίας, επιφέρουν απότομη και ραγδαία μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα ανώτερα στρώματα του εδάφους είναι αυτά με τα οποία έρχονται σε άμεση επαφή τα ηλεκτρόδια γείωσης αφού αυτά είναι θαμμένα σε βάθος 1,5m, επομένως αξίζει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη τους.

Η γενικότερη ανοδική ή καθοδική πορεία της καμπύλης της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για τα διάφορα βάθη συμπίπτει με την έλλειψη ή τον μεγάλο όγκο βροχοπτώσεων για κάποιο χρονικό διάστημα. Ενδεικτικά, εξετάζοντας την περίοδο 22/12/2011 – 15/5/2012, παρατηρούνται χαμηλές τιμές της ρ , καθώς και μικρή διακύμανση. Πιο συγκεκριμένα, η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώθηκε κατά 24% για βάθος 1m και 10% για βάθος 2m, ενώ αυξήθηκε κατά 15% για βάθος 4m και 10% για βάθος 6m. Για βάθος 8m η ειδική αντίσταση εδάφους αυξήθηκε μόλις 1%. Αντιθέτως, στο αμέσως επόμενο διάστημα, 21/5/2012 – 22/10/2012, όπου εμφανίζεται η υψηλότερη τιμή της ειδικής αντίστασης για όλα τα βάθη, καταγράφονται ελάχιστες βροχοπτώσεις. Αναλυτικότερα, η ειδική αντίσταση του εδάφους αυξήθηκε κατά 148% για βάθος 1m και 85% για βάθος 2m, κατά 41%

για βάθος 4m και 67% για βάθος 6m. Για βάθος 8m η ειδική αντίσταση εδάφους αυξήθηκε 10%.

Συμπερασματικά, η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε όλα τα στρώματα μεταβάλλεται με το ύψος της βροχόπτωσης, με διαφορετικές, όμως, διακυμάνσεις για κάθε στρώμα (ή βάθος), εξαιτίας της διαφορετικής σύστασής τους. Στα ανώτερα στρώματα (βάθη 1m και 2m) σημειώνονται μεγάλες μεταβολές, αφού αυτά επηρεάζονται περισσότερο από τη βροχόπτωση. Στα στρώματα με βάθη 4m και 6m η διακύμανση της ειδικής αντίστασης είναι μικρότερη από τα άνω στρώματα, ενώ τέλος στο χαμηλότερο επίπεδο (8m) οι τιμές μεταβάλλονται ελάχιστα.

6.1.2 Μεταβολή της τιμής της αντίστασης γείωσης

Εν συνεχεία, μελετάται το Σχήμα 4.6, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης και των πέντε ηλεκτροδίων G_1 , G_2 , G_3 , G_4 και G_5 σε συνάρτηση με τον χρόνο (συγκεντρωτικά και για τα πέντε έτη διεξαγωγής του πειράματος) και τη βροχόπτωση. Από την ανάλυσή του προκύπτει άμεσα ότι η αντίσταση γείωσης όλων των ηλεκτροδίων μεταβάλλεται με τον χρόνο, πράγμα που οφείλεται κυρίως στην περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία εξαιτίας των βροχοπτώσεων. Οι διακυμάνσεις των τιμών της αντίστασης γείωσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, με το ηλεκτρόδιο G_1 (φυσικό έδαφος) να είναι αυτό με τις μεγαλύτερες μεταβολές.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται η συμπεριφορά του ηλεκτροδίου G_1 , το οποίο αποτελεί και το σημείο αναφοράς για την ικανοποιητική ή μη απόδοση των βελτιωτικών υλικών γείωσης, καθώς είναι εγκατεστημένο απευθείας στο φυσικό έδαφος, χωρίς τη χρήση βελτιωτικών υλικών. Στο συγκεκριμένο σχήμα, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης του G_1 συναρτήσει του χρόνου και του ύψους βροχόπτωσης, παρατηρείται συνεχής και έντονη διακύμανση της R_1 κατά το χρονικό διάστημα που εξετάζεται. Η συμπεριφορά αυτή είναι απόρροια της άμεσης εξάρτησης της R_1 από το ύψος βροχόπτωσης. Ενδεικτικά, εξετάζεται η συμπεριφορά του ηλεκτροδίου G_1 στο ίδιο χρονικό διάστημα που εξετάστηκε και η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην προηγούμενη παράγραφο. Στο διάστημα μεταξύ 22/12/2011 και 15/5/2012, η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 μεταβάλλεται κατά 173%, ποσοστό εντυπωσιακό για τη συγκεκριμένη περίοδο, αν αναλογιστεί κανείς τη μεγάλη συχνότητα και τον όγκο των βροχοπτώσεων. Ο συγκεκριμένος τύπος εδάφους παρουσιάζει, επομένως, μεγάλη ευαισθησία στις καιρικές μεταβολές, καθώς ακόμη και η παραμικρή μεταβολή στο ύψος βροχόπτωσης ανά ημέρα επιφέρει μεγάλη μεταβολή στην

αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 . Στο διάστημα αυτό, η μέγιστη τιμή της αντίστασης γείωσης είναι 483 Ω. Στην αμέσως επόμενη εξεταζόμενη περίοδο, 21/5/2012 – 22/10/2012, η μεταβολή (αύξηση) της αντίστασης γείωσης φτάνει το 173%, πράγμα αναμενόμενο, αφού στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπήρξαν ελάχιστες βροχοπτώσεις λόγω της θερινής περιόδου. Η μέγιστη τιμή της αντίστασης γείωσης του G_1 για το ίδιο διάστημα ανέρχεται στα 676 Ω. Συνολικά, η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου G_1 είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητη, ενώ οι μέγιστες τιμές της διατηρούνται σε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο.

Έπειτα, μελετάται η συμπεριφορά των ηλεκτροδίων G_2 , G_3 , G_4 και G_5 , που είναι εγκιβωτισμένα στα βελτιωτικά υλικά, για τις χρονικές περιόδους που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.1.1. Συγκεκριμένα, στο διάστημα από 22/12/2011 έως 15/5/2012, η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου G_2 μεταβάλλεται κατά 25%, του G_3 κατά 19% , του G_4 κατά 23% και του G_5 κατά 57%. Τα ποσοστά αυτά είναι πολύ μικρότερα από το αντίστοιχο ποσοστό μεταβολής του ηλεκτροδίου G_1 στο φυσικό έδαφος για το διάστημα αυτό. Οι μέγιστες τιμές αντίστασης γείωσης που καταγράφονται για αυτές τις ημερομηνίες είναι 96,4 Ω για το G_2 , 84 Ω για το G_3 , 125,7 Ω για το G_4 και 98 Ω για το G_5 . Για την περίοδο 21/5/2012 με 22/10/2012, τα ποσοστά μεταβολής (αύξησης) της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων G_2 , G_3 , G_4 και G_5 είναι αντίστοιχα 63%, 330%, 74% και 175%, ενώ οι μέγιστες τιμές αντίστασης γείωσης είναι 151 Ω (G_2), 281 Ω (G_3), 193,4 Ω (G_4) και 376 Ω (G_5).

Για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων παρατίθενται ακολούθως τρεις πίνακες με χρήσιμα αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση τιμή της αντίστασης γείωσης για όλες τις μετρήσεις (από 17/2/2011 μέχρι 18/1/2016), όπως και η τυπική απόκλιση τους. Τα παραπάνω μεγέθη αφορούν καθένα από τα 5 ηλεκτρόδια G_1 , G_2 , G_3 , G_4 και G_5 .

Ηλεκτρόδιο Γείωσης	Ελάχιστη τιμή αντίστασης γείωσης, R_{\min} (Ω)	Μέγιστη τιμή αντίστασης γείωσης, R_{\max} (Ω)	Μέση τιμή αντίστασης γείωσης, \bar{R} (Ω)	Τυπική απόκλιση αντίστασης γείωσης, s
G_1	92,4	676	259,1	123
G_2	34	166,3	89,8	30,3
G_3	29,1	295	85,5	62,1
G_4	46,5	276,6	119,6	47,2
G_5	25,9	376	67,9	61,9

Πίνακας 6.1: Χρήσιμες τιμές της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων γείωσης.

Στον Πίνακα 6.2 υπολογίζεται η μέση ποσοστιαία μείωση της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων G_2 , G_3 , G_4 και G_5 , που είναι εγκιβωτισμένα στα βελτιωτικά υλικά γείωσης, συγκριτικά με τη μέση τιμή που εμφανίζει το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Ηλεκτρόδιο Γείωσης	Ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης κάθε βελτιωτικού υλικού (%)
G_2 (σκυρόδεμα)	62,75
G_3 (Μπεντονίτης)	68,42
G_4 (Χημικό Υλικό Α)	51,36
G_5 (Χημικό Υλικό Β)	74,41

Πίνακας 6.2: Ποσοστό βελτίωσης της αντίστασης γείωσης για κάθε βελτιωτικό υλικό σε σχέση με το φυσικό έδαφος.

Στον Πίνακα 6.3 Παρατίθενται αναλυτικά τα κόστη των συστημάτων που εγκαταστάθηκαν.

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

Πίνακας 6.3: Ανάλυση κόστους εγκατάστασης των συστημάτων γείωσης [2].

Η σύγκριση που επιχειρείται στην παρούσα διπλωματική εργασία για τα τέσσερα βελτιωτικά υλικά γείωσης βασίζεται σε τρεις κύριους άξονες: τη σταθερότητα της συμπεριφοράς τους με την πάροδο του χρόνου, το ποσοστό βελτίωσης της αντίστασης γείωσης σε σχέση με το φυσικό έδαφος και τελικά το κόστος προμήθειας και εγκατάστασής τους.

Το κριτήριο της σταθερότητας αξιολογήθηκε με βάση την τυπική απόκλιση των μετρήσεων της αντίστασης γείωσης κατά την πενταετή διάρκεια του πειράματος. Τη μικρότερη τυπική απόκλιση εμφανίζει το ηλεκτρόδιο G_2 , που είναι εμβαπτισμένο σε σκυρόδεμα και ακολουθεί το ηλεκτρόδιο G_4 , που βρίσκεται εντός του χημικού υλικού Α. Έπονται τα ηλεκτρόδια G_5 (Χημικό Υλικό Β) και G_3 (Μπεντονίτης) με πολύ κοντινές μεταξύ τους τιμές.

Αναφορικά με τη βελτίωση της αντίστασης γείωσης του εδάφους, που είναι ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας, την καλύτερη απόδοση παρουσιάζει το G₅ (Χημικό Υλικό Β) με ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης 74,41%. Ακολουθούν τα G₃ (Μπεντονίτης) και G₂ (Σκυρόδεμα) με παρόμοια απόδοση (68,42% και 62,75% αντίστοιχα), ενώ το λιγότερο αποδοτικό υλικό αποδείχτηκε το Χημικό Υλικό Α στο ηλεκτρόδιο G₄ με ποσοστό 51,36%.

Τέλος, όσον αφορά στο κόστος προμήθειας και εγκατάστασης των βελτιωτικών υλικών, την πιο συμφέρουσα επιλογή αποτελεί το Χημικό Υλικό Α ακολουθούμενο με μικρή διαφορά από το σκυρόδεμα και τον μπεντονίτη, ενώ η λιγότερο οικονομική επιλογή με διαφορά είναι το Χημικό Υλικό Β.

Συμπερασματικά, από τη σύγκριση των βελτιωτικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, προκύπτει ότι το σκυρόδεμα, που είναι το βασικότερο δομικό υλικό στον τομέα των κατασκευών και, δη, στην κατασκευή των θεμελίων των κτιρίων, αποτελεί την βέλτιστη επιλογή, καθώς συνολικά συγκεντρώνει τα καλύτερα χαρακτηριστικά. Αναλυτικότερα, εμφανίζει τη μεγαλύτερη σταθερότητα στη διακύμανση της αντίστασης γείωσης αλλά και την τρίτη καλύτερη απόδοση και συμπεριφορά (με μικρή απόσταση από τη δεύτερη) ως βελτιωτικό υλικό γείωσης. Επιπρόσθετα, η τοποθέτησή του στην πρώτη θέση στη σειρά προτίμησης μεταξύ των βελτιωτικών οφείλεται στο μικρό κόστος (δεύτερο μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά που δοκιμάστηκαν), ενώ ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων αποτελεί η εύκολη προμήθεια των πρώτων υλών για παρασκευή σκυροδέματος και η άμεση διάθεσή τους.

Στη δεύτερη θέση των προτιμήσεων και με μικρή διαφορά από την πρώτη έρχεται ο μπεντονίτης. Η χρησιμοποίησή του σε πολλές εγκαταστάσεις συστημάτων γείωσης, καθώς και η συμμετοχή και αξιολόγησή του σχεδόν σε όλες τις ερευνητικές εργασίες που ασχολούνται με βελτιωτικά υλικά γείωσης καταδεικνύουν τη σημασία του μπεντονίτη στην εφαρμογή του σε συστήματα γείωσης. Η απόδοσή του στη μείωση της αντίστασης γείωσης είναι καλύτερη από του σκυροδέματος (2^η στη σχετική κατάταξη), ωστόσο συνδυάζεται με σχετική αστάθεια στη διακύμανση των τιμών του (μεγαλύτερη διακύμανση μεταξύ των τεσσάρων βελτιωτικών). Επίσης, η τιμή της αντίστασης γείωσης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, λίγο παραπάνω από το σκυρόδεμα και το Χημικό Υλικό Α.

Ακολούθως, το Χημικό Υλικό Α που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο G₄ δεν αποτελεί αξιόλογη επιλογή καθώς, παρά το γεγονός ότι εμφανίζει το μικρότερο κόστος σε σχέση με τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά, έχει το μικρότερο ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης.

Κλείνοντας, μπορεί το Χημικό Υλικό Β να παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση απ' όλα ως προς τις επιτευχθείσες τιμές της αντίστασης γείωσης, αλλά το πολύ υψηλό κόστος του (περίπου 54,78% ακριβότερο από το σκυρόδεμα) και η αστάθεια που παρουσιάζει καθιστούν αναγκαία την εξέταση άλλων λύσεων.

6.2 Συμπεράσματα Προσομοιώσεων

6.2.1 Μοντέλα εδάφους

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση ενός πολυστρωματικού εδάφους με μονοστρωματικό, διστρωματικό και τριστρωματικό μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, το έδαφος που μελετήθηκε βρίσκεται στον χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, στον οποίο είναι εγκατεστημένα τα ηλεκτρόδια γείωσης της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων στα βελτιωτικά υλικά. Υπενθυμίζεται ότι, στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής [1], έχει πραγματοποιηθεί ηλεκτροτομογραφία στον συγκεκριμένο χώρο, τα αποτελέσματα της οποίας αποδεικνύουν την πολυστρωματική δομή του εδάφους. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά εκτιμήθηκε ότι το βέλτιστο μοντέλο προσομοίωσης του εδάφους αποτελεί το τριστρωματικό μοντέλο. Επομένως, το συγκεκριμένο έδαφος μοντελοποιήθηκε αρχικά με τριστρωματικό μοντέλο και στη συνέχεια διστρωματικό και μονοστρωματικό για λόγους απλοποίησης του προβλήματος προσδιορισμού της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών. Τελικά, επιχειρείται σύγκριση των τριών αυτών μοντέλων, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ακρίβεια της απόδοσης του τριστρωματικού μοντέλου από μονοστρωματικό και διστρωματικό.

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι για τη διενέργεια των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν όλες οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους που ελήφθησαν κατά την περίοδο 17/2/2011 – 18/1/2016. Οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν στο πρόγραμμα CDEGS, λόγω μεγαλύτερης αξιοπιστίας σε σχέση με άλλα λογισμικά που δοκιμάστηκαν, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.

Μελετώντας το Σχήμα 5.1 φαίνεται ότι η διακύμανση της ειδικής αντίστασης για τα δύο άνω στρώματα του τριστρωματικού και το άνω στρώμα του διστρωματικού μοντέλου είναι σημαντική και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις βροχοπτώσεις. Από την παρατήρηση του διαγράμματος, προκύπτει ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος του διστρωματικού μοντέλου βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές της ειδικής αντίστασης του άνω και του μεσαίου στρώματος του

τριστρωματικού μοντέλου, για το μεγαλύτερο μέρος της εξεταζόμενης περιόδου. Ειδικότερα, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνεται ότι η τιμή της ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος του διστρωματικού εντοπίζεται πλησίον της μέσης τιμής των τιμών των δύο ανωτέρων στρωμάτων του τριστρωματικού.

Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικές περιόδους, κατά τις οποίες επιβεβαιώνεται ο παραπάνω ισχυρισμός. Οι περίοδοι αυτές καλύπτουν κάθε εποχή, αλλά και ολόκληρο το χρονικό διάστημα διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων από το Φεβρουάριο του 2011 έως τον Ιανουάριο του 2016.

Ημερομηνία	2-layer model		3-layer model	
	upper layer	upper layer	middle layer	
	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)	
15/12/2011	625,8292	462,9819	1913,385	
20/12/2011	485,6152	169,1601	1976,847	
22/12/2011	419,099	134,5211	1794,719	
3/1/2012	347,0865	230,8759	731,7394	
5/1/2012	344,0874	231,1779	716,1152	
16/1/2012	312,751	199,4818	641,8184	
19/1/2012	321,684	207,3782	659,2482	
20/1/2012	317,8507	157,4725	814,0592	
23/1/2012	305,3487	189,2916	644,0266	
26/1/2012	281,2534	166,0894	617,4124	
28/1/2012	276,7605	134,2132	696,6549	
31/1/2012	296,7975	149,7937	724,1564	
3/2/2012	294,5007	182,1738	605,9099	
5/2/2012	299,0805	186,136	604,8417	
9/2/2012	244,0657	150,7536	432,016	

Πίνακας 6.4: Ειδική αντίσταση ανώτερων στρωμάτων πολυστρωματικών μοντέλων για την περίοδο 15/12/2011 – 9/2/2012.

Ημερομηνία	2-layer model		3-layer model	
	upper layer	upper layer	middle layer	
	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)	
15/3/2012	387,2108	230,9266	417,6153	
19/3/2012	395,6948	255,1747	455,3492	
20/3/2012	392,1191	188,444	425,0954	

22/3/2012	388,9966	217,0832	399,0926
27/3/2012	394,3611	219,5128	412,1698
29/3/2012	397,9159	235,0524	434,196
2/4/2012	407,8423	298,2092	517,0713
3/4/2012	405,0726	301,5854	524,4322
10/4/2012	220,1783	200,3549	292,7139
23/4/2012	544,8791	334,411	577,8184
24/4/2012	410,4236	339,0782	583,8865
26/4/2012	410,4259	325,5268	564,8736
30/4/2012	418,9271	328,4571	572,5753
2/5/2012	420,9201	324,1236	568,7727
3/5/2012	425,1194	384,3	677,6729

Πίνακας 6.5: Ειδική αντίσταση ανώτερων στρωμάτων πολυστρωματικών μοντέλων για την περίοδο 15/3/2012 – 3/5/2012.

Ημερομηνία	2-layer model	3-layer model	
	upper layer	upper layer	middle layer
	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)
4/6/2013	497,8119	248,6577	786,9777
6/6/2013	466,487	252,039	775,7512
10/6/2013	434,248	258,9317	742,019
12/6/2013	430,101	218,6178	1011,433
17/6/2013	351,9645	235,9127	590,0722
19/6/2013	399,7111	215,71	829,9572
21/6/2013	401,5772	181,9391	976,6024
27/6/2013	394,7195	257,2411	680,8265
2/7/2013	406,1096	267,125	725,3785
5/7/2013	434,1226	222,3296	1089,921
8/7/2013	464,0157	296,3631	1006,816
11/7/2013	461,4787	299,1175	795,5985
12/7/2013	466,1129	199,6789	1376,665
17/7/2013	474,5247	263,8334	1194,096
19/7/2013	480,9599	316,0242	1000,05

Πίνακας 6.6: Ειδική αντίσταση ανώτερων στρωμάτων πολυστρωματικών μοντέλων για την περίοδο 4/6/2013 – 19/7/2013.

Ημερομηνία	2-layer model	3-layer model	
	upper layer	upper layer	middle layer
	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)	resistivity ($\Omega \cdot m$)
16/10/2015	608,0605	199,7003	1447,943
20/10/2015	457,8366	164,9653	1668,522
26/10/2015	384,7158	170,3158	489,9012
29/10/2015	277,3065	169,356	497,3892
2/11/2015	286,9443	174,7987	534,7899
4/11/2015	298,6649	183,2646	559,5969
6/11/2015	322,0695	204,866	574,306
9/11/2015	482,8384	192,2057	611,5617
11/11/2015	314,2851	189,3734	617,1708
13/11/2015	318,9255	192,6594	629,5828
20/11/2015	340,2108	213,1286	677,7902
26/11/2015	515,2005	197,5876	602,5242
30/11/2015	374,6714	189,7464	524,2084
2/12/2015	308,7093	193,0741	551,4687
4/12/2015	306,5182	188,4036	564,7468

Πίνακας 6.7: Ειδική αντίσταση ανώτερων στρωμάτων πολυστρωματικών μοντέλων για την περίοδο 16/10/2015 – 4/12/2015.

Από το Σχήμα 5.2 συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της ειδικής αντίστασης των δύο κάτω στρωμάτων του διστρωματικού και του τριστρωματικού μοντέλου γίνεται ομαλά και με μεγαλύτερη διάρκεια σταθερότητας. Σε σύγκριση, μάλιστα, με τα ανώτερα στρώματα των δύο αυτών μοντέλων, η διακύμανση της ρ είναι σχεδόν ανεπαίσθητη. Εύκολα παρατηρεί κανείς την ιδιαίτερα μικρή απόκλιση των τιμών της ειδικής αντίστασης του ενός στρώματος από το άλλο.

Συνοψίζοντας, το εξαγόμενο συμπέρασμα για τα πολυστρωματικά μοντέλα εδάφους είναι ότι συνολικά έχουν παρόμοια συμπεριφορά και χαρακτηριστικά. Αφ' ενός, από τη σύγκριση των ανωτέρων στρωμάτων προκύπτει ότι η ειδική αντίσταση του άνω στρώματος του διστρωματικού μοντέλου λαμβάνει ενδιάμεσες τιμές μεταξύ των τιμών του άνω και μεσαίου στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου εδάφους, αφ' ετέρου, τα κατώτερα στρώματα των δύο πολυστρωματικών μοντέλων συγκλίνουν σε σημείο ταύτισης μεταξύ τους.

Έπειτα, πραγματοποιείται σύγκριση ανάμεσα στο μονοστρωματικό και το τριστρωματικό μοντέλο. Για τον σκοπό αυτόν σχεδιάστηκε το Σχήμα 5.3, από το οποίο, διαπιστώνεται ότι η διακύμανση της ειδικής αντίστασης του

μονοστρωματικού μοντέλου σε συνάρτηση με τη βροχόπτωση είναι πολύ μικρή, ειδικά σε σύγκριση με τη διακύμανση των δύο ανώτερων στρωμάτων του τριστρωματικού μοντέλου. Είναι εμφανές ότι το μονοστρωματικό μοντέλο προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό το κατώτερο στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου, τόσο σε τιμές της ειδικής αντίστασης, όσο και σε συμπεριφορά.

Προκειμένου να εξευρεθούν πιθανά σημεία σύγκλισης του μονοστρωματικού μοντέλου με κάποιο ή κάποια από τα στρώματα του τριστρωματικού μοντέλου, πραγματοποιείται, στη συνέχεια, σύγκριση μεταξύ τους και εξάγονται συμπεράσματα για τον συσχετισμό των δύο μοντέλων.

Αναλυτικότερα, αντιπαραβάλλοντας το άνω στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου με το μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους, στο Σχήμα 5.4, γίνεται εμφανές ότι το εύρος των τιμών του μονοστρωματικού είναι ιδιαιτέρως μικρό σε αντίθεση με το μεγάλο εύρος των τιμών του ανώτερου στρώματος του τριστρωματικού. Επιπρόσθετα, η απόκλιση της ειδικής αντίστασης του μονοστρωματικού από το άνω στρώμα του τριστρωματικού εμφανίζει μια μέση τιμή της τάξεως του 219,72%.

Έπειτα, σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό αποκλίνει το μονοστρωματικό από το μεσαίο στρώμα του τριστρωματικού, τόσο στη μεταβολή ως προς τη βροχόπτωση όσο και στις τιμές κατά μέτρο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.5. Οι τιμές της ειδικής αντίστασης του μονοστρωματικού διαφέρουν από αυτές του μεσαίου στρώματος του τριστρωματικού με απόκλιση κατά μέσο όρο 646,09%.

Τέλος, το κατώτερο στρώμα του τριστρωματικού μοντέλου παρουσιάζει μικρή διακύμανση στις τιμές της ειδικής αντίστασης, όπως και το μονοστρωματικό μοντέλο, σύμφωνα με το Σχήμα 5.6. Η διαφορά των τιμών τους είναι αρκετά μικρή, με την μεγαλύτερη απόκλιση να είναι 34,95% και τη μέση απόκλιση να είναι 13,66%.

Εν κατακλείδι, με βάση την παραπάνω ανάλυση, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συσχέτιση των δύο μοντέλων. Ένα έδαφος, όπως αυτό της πειραματικής διάταξης, που έχει χαρακτηριστεί ως τριστρωματικό από την ανάλυση της ηλεκτροτομογραφίας, δεν μπορεί να προσομοιωθεί με ακρίβεια από μονοστρωματικό μοντέλο. Αυτό συμβαίνει διότι το μονοστρωματικό μοντέλο δεν αποτυπώνει ορθά την ειδική αντίσταση του εδάφους στα ανώτερα στρώματά του, τα οποία είναι και τα πιο σημαντικά, αφού σε αυτά εγκαθίστανται τα συστήματα γείωσης. Το μονοστρωματικό μοντέλο θα μπορούσε, ενδεχομένως, να υποκαταστήσει το τριστρωματικό, σε μεγαλύτερα βάθη (π.χ. άνω των 2m), χάνοντας, όμως, σε ακρίβεια στα πάνω στρώματα.

Αντιθέτως, το διστρωματικό μοντέλο εδάφους, θα μπορούσε να αποδώσει καλύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του τριστρωματικού εδάφους, παρουσιάζοντας πολύ μικρότερη απόκλιση στις τιμές της ειδικής αντίστασης, τόσο στα ανώτερα όσο και στα κατώτερα στρώματα του εδάφους.

Βάθος στρωμάτων στα μοντέλα εδάφους

Όσον αφορά στη μοντελοποίηση του εδάφους, αξίζει να σχολιαστεί και η μεταβολή που επιφέρει η βροχόπτωση στον υπολογισμό του βάθους των στρωμάτων των πολυστρωματικών μοντέλων από το λογισμικό προσομοίωσης. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.7, το βάθος των στρωμάτων αυξομειώνεται με ανάλογο τρόπο με την ειδική αντίσταση του εδάφους των αντίστοιχων στρωμάτων. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα δύο ανώτερα στρώματα (διστρωματικού και τριστρωματικού μοντέλου), που αντιδρούν άμεσα στις εναλλαγές των συγκεντρώσεων υγρασίας, παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση από το μεσαίο στρώμα (του τριστρωματικού).

6.2.2 Συμπεράσματα για τα όρια ασφαλείας

Στο τελευταίο σκέλος της παρούσας διπλωματικής διερευνάται η μεταβολή των ορίων ασφαλείας για τις βηματικές τάσεις (Step Voltage) και τις τάσεις επαφής (Touch Voltage) συναρτήσει του χρόνου και της υγρασίας του εδάφους, ενώ πραγματοποιείται και μια αντιπαραβολή των ορίων αυτών για διστρωματικό και τριστρωματικό μοντέλο εδάφους. Για την υλοποίηση των παραπάνω, διενεργήθηκαν προσομοιώσεις στο λογισμικό CDEGS, στο οποίο εισήχθησαν ως δεδομένα τα μοντέλα εδάφους, όπως αυτά είχαν προσδιοριστεί για κάθε ημέρα διεξαγωγής μετρήσεων.

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων της παραγράφου 5.2 είναι εμφανής η επιρροή της βροχόπτωσης στις βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής που μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Οι έντονες μεταβολές που παρουσιάζονται στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής σε διάφορες χρονικές περιόδους καθιστούν αναγκαίο τον προσεκτικό σχεδιασμό ενός κατάλληλου συστήματος γείωσης, που θα είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις απρόβλεπτες αυτές μεταβολές και θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την ανθρώπινη ασφάλεια.

Ειδικότερα, εξετάζοντας τις σχέσεις 1.19 και 1.21, για μοναδιαίο συντελεστή μείωσης C_s του στρώματος επιφανείας (αφού δεν υπάρχει υλικό επιφανείας), διαπιστώνεται η άμεση εξάρτησή τους από την ειδική αντίσταση του εδάφους ρ (αφού $\rho_s = \rho$ όταν δεν υπάρχει υλικό επιφανείας) και τον χρόνο εκκαθάρισης

σφάλματος t_s (Fault Clearing Time). Αφ' ενός μεν η αυξομείωση της ρ μεταβάλλει με τρόπο ανάλογο τις τάσεις για σταθερό t_s , πράγμα που δικαιολογεί την ομοιότητα στη μεταβολή τους με αυτή της ειδικής αντίστασης, αφ' ετέρου δε οι τάσεις είναι αντιστρόφως ανάλογες με το χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος t_s , καθώς, για ορισμένη μέρα, άρα και ορισμένη ειδική αντίσταση εδάφους, η αύξηση του t_s επιφέρει ελάττωση των τιμών των ορίων ασφαλείας.

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους επηρεάζει εκτός από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, όπως αυτές προκύπτουν μέσω των προσομοιώσεων, και τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια των τάσεων αυτών. Από τις σχέσεις 1.19 και 1.21 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 την ειδική αντίσταση του άνω στρώματος του εδάφους ρ_1 . Ωστόσο, ο όρος αυτός είναι 4 φορές μεγαλύτερος για τη βηματική τάση.

Επίσης, γίνεται προσπάθεια εξέτασης του σφάλματος προσδιορισμού των ορίων ασφαλείας ενός πολυστρωματικού εδάφους τόσο με τριστρωματικό μοντέλο (που το προσεγγίζει περισσότερο) όσο και με διστρωματικό. Για τον λόγο αυτόν παρατίθενται οι επόμενοι πίνακες:

	Ποσοστιαία απόκλιση τάσεων διστρωματικού από τρিসτρωματικό
Step Voltage (V) - 0,2 sec	+60%
Touch Voltage (V) - 0,2 sec	+26%
Step Voltage (V) - 0,35 sec	+60%
Touch Voltage (V) - 0,35 sec	+26%
Step Voltage (V) - 0,5 sec	+60%
Touch Voltage (V) - 0,5 sec	+26%

Πίνακας 6.8: Ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των Βηματικών Τάσεων και των Τάσεων Επαφής στο διστρωματικό και το τριστρωματικό μοντέλο εδάφους.

	Τυπική απόκλιση s τριστρωματικού	Τυπική απόκλιση s διστρωματικού
Step Voltage (V) - 0,2 sec	631,37	6366,4
Touch Voltage (V) - 0,2 sec	158,24	1591,6
Step Voltage (V) - 0,35 sec	501,23	5044,22
Touch Voltage (V) - 0,35 sec	125,34	1261,05
Step Voltage (V) - 0,5 sec	427,92	4306,29
Touch Voltage (V) - 0,5 sec	107,02	1076,37

Πίνακας 6.9: Τυπική απόκλιση μεταξύ των Βηματικών Τάσεων και των Τάσεων Επαφής στο διστρωματικό και το τριστρωματικό μοντέλο εδάφους.

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.8 και 6.9 οδηγούν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Αρχικά, διαπιστώνονται σημαντικά μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τάσεων των δύο μοντέλων εδάφους, που κυμαίνονται στο 60% για τις βηματικές τάσεις και στο 26% για τις τάσεις επαφής. Επιπλέον, το διστρωματικό μοντέλο παρουσιάζει περίπου δεκαπλάσια τυπική απόκλιση από το τριστρωματικό, δηλαδή σημειώνει πολύ μεγαλύτερη διακύμανση τιμών, που δυσχεραίνει τον προσδιορισμό των πραγματικών ορίων ασφαλείας με ακρίβεια. Τέλος, επιβεβαιώνεται η παρατήρηση που έγινε παραπάνω για την εντονότερη μεταβολή της βηματικής τάσης σε σχέση με την τάση επαφής, ανάλογα με τη διακύμανση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Καταλήγοντας, το διστρωματικό μοντέλο εδάφους παρουσιάζει σχεδόν πάντα μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης, αλλά και μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών αυτών σε σύγκριση με το τριστρωματικό μοντέλο. Επομένως, είναι πολύ πιθανόν, η υιοθέτηση διστρωματικού μοντέλου για την αναπαράσταση πολυστρωματικής δομής εδάφους, να οδηγήσει σε υποεκτίμηση των τιμών ασφαλείας και κατ'επέκταση σε εσφαλμένο σχεδιασμό και διαστασιολόγηση του συστήματος γείωσης αντίστοιχα, οπότε και στον ελλιπή περιορισμό των αναπτυσσομένων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα ευρήματα της παρούσας εργασίας, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή από τους μηχανικούς, που εκπονούν τη μελέτη και τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης, στην ορθή επιλογή μεταξύ διστρωματικού και τριστρωματικού μοντέλου, έτσι ώστε να έχουν την καλύτερη δυνατή μοντελοποίηση και με τα ακριβέστερα αποτελέσματα της εκάστοτε πολυστρωματικής δομής εδάφους που θα έχουν να αντιμετωπίσουν. Αυτό με τη σειρά του θα οδηγεί και στον ακριβέστερο προσδιορισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων ασφαλείας για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής.

6.3 Η Επόμενη Μέρα

Σ' αυτό το σημείο, οι συγγραφείς καταθέτουν τις προτάσεις τους για την επέκταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την περαιτέρω διερεύνηση του αντικειμένου που πραγματεύεται. Όσον αφορά στη μελέτη της συμπεριφοράς των βελτιωτικών υλικών γείωσης, κρίνεται απαραίτητη η συνέχιση των μετρήσεων της αντίστασης γείωσης στην εγκατεστημένη υπαίθρια πειραματική διάταξη, καθώς, παρά το σημαντικό χρονικό διάστημα διεξαγωγής των μετρήσεων μέχρι στιγμής (πέντε χρόνια), τα βελτιωτικά υλικά αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε γειώσεις εγκαταστάσεων με πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα 5 χρόνια και καθίσταται αναγκαία η αξιολόγησή τους σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου. Κατ' επέκταση, είναι απαραίτητη η μελέτη του βαθμού απορρόφησης κάθε βελτιωτικού από το έδαφος συναρτήσει του χρόνου, καθώς όπως προαναφέρθηκε, προορίζονται να αποτελέσουν αναπόσπαστο μέρος του συστήματος γείωσης. Επιπρόσθετα, σε συνέχεια της διερεύνησης των παραγόντων που καθορίζουν τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης ενός απλού ηλεκτροδίου ράβδου, τοποθετημένου κάθετα στο έδαφος και εγκιβωτισμένου σε βελτιωτικό υλικό, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη της μεταβολής της αντίστασης γείωσης για μια πιο σύνθετη διάταξη ηλεκτροδίων με παράλληλη χρήση βελτιωτικών υλικών.

Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας διαπιστώνεται η άμεση επίδραση που έχει η βροχόπτωση σε αυτά, και κατ' επέκταση το μέγεθος της υγρασίας του εδάφους. Ενδιαφέρουσα προέκταση, λοιπόν, της εργασίας αυτής θα αποτελούσε η *in situ* μέτρηση της υγρασίας του εδάφους στον χώρο των ηλεκτροδίων γείωσης με κατάλληλο όργανο μέτρησης. Συμπληρωματικά, προτείνεται η προμήθεια και χρήση ενός κατάλληλου αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας εδάφους, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση και αυτής της παραμέτρου στη συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών, αλλά και στη διαμόρφωση των τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Όπως έχει διαπιστωθεί κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής, η αντίσταση γείωσης που επιτυγχάνεται με τη χρήση βελτιωτικών υλικών, εξαρτάται άμεσα από την ειδική αντίσταση του εδάφους, η οποία είναι διαφορετική για διαφορετικούς τύπους εδάφους. Επομένως, θεωρείται μεγάλης σημασίας η διεξαγωγή αντίστοιχων πειραμάτων σε άλλες τοποθεσίες, με διαφορετικούς τύπους εδάφους, όπως για παράδειγμα σε ασβεστολιθικά, ημιβραχώδη και βραχώδη εδάφη, ώστε να εξεταστεί η συνολική συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών γείωσης σε ποικίλα περιβάλλοντα εδάφη.

Για την επέκταση της μελέτης, που διενεργήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι αναγκαία η μελέτη και άλλων τύπων βελτιωτικών υλικών γείωσης με

την ίδια μέθοδο. Ιδιαίτερο βάρος πρέπει να δοθεί σε τύπους βελτιωτικών που παρασκευάζονται με βάση φυτικές πρώτες ύλες και προϊόντα αυτών, όπως τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, σκόνη ρυζιού κ.ά. τα οποία δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον σε αντίθεση με χημικά βελτιωτικά που έχουν ως βάση το $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, το MgCl_2 , το CuSO_4 ή το NH_4Cl , τα οποία είναι εξαιρετικά βλαβερά και γι' αυτό έχει απαγορευθεί η χρήση τους εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Πέραν της μελέτης των υλικών σε εξωτερικές συνθήκες, προτείνεται η πραγματοποίηση μίας εις βάθος εργαστηριακής μελέτης των βελτιωτικών υλικών γείωσης. Σε ειδικά διαμορφωμένες εργαστηριακές συνθήκες (ελεγχόμενη θερμοκρασία και υγρασία σε ειδικό θάλαμο ελεγχόμενων κλιματικών συνθηκών) τα υλικά μπορούν να υποβληθούν σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας, επιτρέποντας έτσι τον προσδιορισμό του εύρους μεταβολής των ιδιοτήτων τους. Ιδιαίτερα σημαντική περίπτωση αποτελεί η συμπεριφορά των βελτιωτικών υλικών, όταν αυτά υποβάλλονται σε κρουστική καταπόνηση, για τη βαθύτερη μελέτη των μεταβολών των ηλεκτρικών και φυσικών τους ιδιοτήτων σε περίπτωση χρήσης τους σε συστήματα γειώσεων αντικεραυνικής προστασίας, όπου δέχονται πολύ ισχυρά κεραυνικά ρεύματα.

Στο κομμάτι της εργασίας που αφορά στη διεξαγωγή προσομοιώσεων για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των μελετουμένων μεγεθών, υπάρχουν περαιτέρω περιθώρια βελτίωσης τόσο σε επίπεδο ανάλυσης όσο και σε επίπεδο λογισμικών. Προτείνεται για αρχή η μοντελοποίηση του εδάφους με πολυστρωματικά μοντέλα με μεγαλύτερο πλήθος στρωμάτων (από αυτά που εξετάστηκαν), καθώς με βάση την ηλεκτροτομογραφία του εξεταζόμενου εδάφους, παρατηρούμε εύκολα την πληθώρα μεταβολών της ειδικής του αντίστασης που ίσως δεν αποτυπώνονται με ακρίβεια σε ένα διστρωματικό ή ακόμα και τριστρωματικό μοντέλο εδάφους. Εν συνεχεία, αποτελεί επιτακτική ανάγκη, η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού, είτε μέσω συγγραφής κώδικα σε κατάλληλη προγραμματιστική πλατφόρμα, είτε μέσω επέκτασης ήδη υπάρχοντων προγραμμάτων όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, το οποίο να είναι ικανό να προσομοιώσει τη συμπεριφορά κατακόρυφου ηλεκτροδίου με βελτιωτικό υλικό εντός πολυστρωματικού εδάφους, όταν αυτό εκτείνεται σε περισσότερα του ενός στρώματα του μοντέλου εδάφους. Αυτή η αδυναμία σε επίπεδο λογισμικού αποτέλεσε τροχοπέδη στην εκτέλεση των προσομοιώσεων, καθώς δεν ήταν δυνατός ο θεωρητικός προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης των βελτιωτικών υλικών γείωσης, όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια.

Τέλος, είναι απαραίτητη η προσομοίωση των ορίων ασφαλείας (Βηματικές Τάσεις και Τάσεις Επαφής) και για διαφορετικά είδη και διατάξεις ηλεκτροδίων



γείωσης, με σκοπό την αποτελεσματικότερη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων, με γνώμονα την ανθρώπινη ασφάλεια. Μια τέτοια μελέτη μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με τα μέσα που διατίθενται στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και μπορεί να αποτελέσει, όπως και οι προηγούμενες προτάσεις, αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

Παρά τις δυσχέρειες που εμφανίστηκαν κατά την εκπόνησή της εργασίας και την αδυναμία επίτευξης του θεωρητικού υπολογισμού της ειδικής αντίστασης διαφόρων βελτιωτικών υλικών γείωσης μέσω ειδικού λογισμικού πακέτου, που ήταν και ο αρχικός στόχος που είχε τεθεί, μπορεί να ειπωθεί ότι επετεύχθησαν οι αναθεωρημένοι στόχοι και εξήχθησαν ιδιαίτερος αξιόλογα συμπεράσματα. Η διεξοδική εξέταση, τόσο της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όσο και των αναπτυσσομένων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής υπό συνθήκες σφάλματος, συνεισέφερε σημαντικά στην εις βάθος κατανόηση της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, ενώ, παράλληλα, δόθηκαν ερεθίσματα για επέκταση της έρευνας γύρω από τα συστήματα γείωσης και αναζήτηση ακόμη πιο αποδοτικών λύσεων για τη διατήρηση της τιμής της αντίστασης γείωσης σε χαμηλά επίπεδα.

Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016.
- [2] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.

