



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Συμβολή στη μελέτη συστημάτων γείωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξοπούλου Α. Αριστέα

Επίκουρος Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπουσα: Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Συμβολή στη μελέτη συστημάτων γείωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλεξοπούλου Α. Αριστέα

Επίκουρος Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπουσα: Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Νοεμβρίου 2016.

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

.....
Ιωάννης Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

.....
Αλεξοπούλου Α. Αριστέα

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

Copyright © Αλεξοπούλου Α. Αριστέα, 2016

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 τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Σε όλες τις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ισχύος και κυρίως στους υποσταθμούς υψηλών τάσεων, ως κυρίαρχο μέλημα τίθεται η ασφάλεια των ατόμων που βρίσκονται, κινούνται ή εργάζονται σε αυτούς τους χώρους.

Το σύστημα γείωσης ενός υποσταθμού πρέπει να εξασφαλίζει την προστασία και την ασφάλεια των ατόμων που βρίσκονται σε αυτό καθώς επίσης και του εξοπλισμού, τόσο κατά την διάρκεια ομαλής λειτουργίας όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων, όπως βραχυκυκλωμάτων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της συμβολή των δύο πιο αναγνωρισμένων και παγκοσμίως αποδεκτών Προτύπων, του IEEE Std 80-2013 και του IEC 60479-1 στη μελέτη της ασφάλειας των συστημάτων γείωσης υποσταθμών υψηλής τάσης και η εκτενής παρουσίαση και σύγκρισή τους.

Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται μελέτη και ανάλυση της ασφάλειας των συστημάτων γείωσης με κριτήριο την τήρηση των επιτρεπών ορίων ασφαλείας των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων, όπως υπολογίζονται με βάση τα Πρότυπα ANSI/IEEE Std 80:2013 και IEC 60479-1. Επίσης, εξετάζονται και συγκρίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις (επαφής και βηματική) καθώς επίσης και τα όρια ασφαλείας σε ένα τυπικό σύστημα γείωσης σύμφωνα με τα Πρότυπα, με τη βοήθεια του πακέτου λογισμικού CDEGS.

Λέξεις κλειδιά:

Σύστημα γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, μοντέλο εδάφους, κριτήρια ασφαλείας, βηματικές τάσεις, τάσεις επαφής, Πρότυπο, IEEE 80-2013, IEC 60-479, CDEGS.

Abstract

In every electrical and power plants and mainly in high voltage substations, main concern is the safety of all people who are working and bestir themselves in there.

Grounding system of a substation must ensure the protection and safety of all people who work in it as well as the equipment itself, both during normal operation and during faulty operation (e.g. shortcut).

This diploma thesis has as objective to highlight as well as to extensively compare the contribution of two of the most recognised and admissible Standards, IEEE Std 80-2013 and IEC 60479-1, in order to study the safety of grounding systems of high voltage substations.

Furthermore, in this thesis, a study is being carried out and an analysis of the safety of the grounding systems based on compliance with acceptable safety limitations of the developing touch voltages and step voltages which are all calculated based on the two above mentioned Standards.

Finally, touch voltages, step voltages as well as safety limitations are being investigated and compared in a local grounding system in accordance with the Standards using the CDEGS software.

Key words:

Earthing system, soil resistivity, soil model, safety criteria, step voltages, touch voltages, Standard, IEEE 80-2013, IEC 60-479, CDEGS.

Πρόλογος

Στο 1^ο κεφάλαιο παρατίθενται μία αναφορά στην σχετική με της γειώσεις ορολογία και στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Επίσης, υπάρχει μία αναφορά στη μέθοδο των γειώσεων, στα είδη των ηλεκτροδίων γείωσης που χρησιμοποιούνται και τις διατάξεις που υπάρχουν. Ακόμα, δίνεται ο ορισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της αντίστασης γείωσης και του τρόπου υπολογισμού της.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η επίδραση του ρεύματος και των παραμέτρων αυτού στην ανθρώπινη ανοχή, αναφέρεται μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αριθμούνται οι βασικές αρχές σχεδιασμού των συστημάτων γείωσης.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα Πρότυπα ANSI/IEEE Std 80:2013 και IEC 60479-1, απαριθμούνται και αναλύονται τα βασικά κριτήρια ασφαλείας και τα επιτρεπτά όρια τάσεων επαφής και βηματικής, σύμφωνα με το καθένα από αυτά. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η συλλογιστική πορεία και οι μαθηματικές εξισώσεις μέσω των οποίων εξάγονται τα επιτρεπτά όρια για το κάθε Πρότυπο, αναλύονται τα βασικά κριτήρια ασφαλείας αυτών και εντοπίζονται οι ομοιότητες και οι διαφορές τους.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία προσομοίωσης των συστημάτων γείωσης με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου CDEGS, όπως χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό CDEGS.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα, όπως αυτά προέκυψαν από τις προσομοιώσεις κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται τρόποι αντιμετώπισης και περιορισμού των επικίνδυνων τάσεων.

Ευχαριστίες

Με την παρούσα Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στην σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στο Ε.Μ.Π. Θα ήθελα λοιπόν, με αφορμή το γεγονός αυτό, να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν, με την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη, την οποία μου πρόσφεραν απλόχερα, κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Α. Σταθόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία της οποίας το θέμα με ενδιέφερε σε μεγάλο βαθμό.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π, ο οποίος στάθηκε σημαντικός αρωγός στην προσπάθειά μου, με υποστήριξε και με καθοδήγησε σε κάθε φάση της διεκπεραίωσης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Κατερίνα Δ. Δαμιανάκη για την καθοριστική βοήθεια της, η οποία με κάθε δυνατό τρόπο με καθοδήγησε και με στήριξε στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη (ΕΔΙΠ στο εργαστήριο υψηλών τάσεων στο ΕΜΠ) για την πολύτιμη βοήθεια και την παροχή όλων των απαραίτητων δεδομένων για την μελέτη των συστημάτων γείωσης και τον συνάδελφο Δημήτρη Σ. Γαλανή (υπάλληλο του Α.Δ.Μ.Η.Ε) για τις φωτογραφίες που μου έδωσε για να εμπλουτίσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους φίλους και συνάδελφούς μου, Βάσια, Ανδρέα, Μαρία, Αγγέλα, Ζαννή, Γιάννη, Ορέστη, Θοδωρή, Ρομανό, Ρανώ με τους οποίους πέρασα μεγάλο κομμάτι της φοιτητικής μου ζωής, και οι οποίοι πίστεψαν σε μένα και με ενθάρρυναν σε κάθε στάδιο των σπουδών μου. Εύχομαι σε όλους τα καλύτερα σε κάθε επίπεδο της ζωής τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, τα αδέρφια μου Γιώργο και Χρύσανθο, τον πατέρα μου και ιδιαίτερα την μητέρα μου στην οποία και αφιερώνω την διπλωματική λέγοντας της ένα τεράστιο «Ευχαριστώ» για την τεράστια υπομονή, στήριξη και προσπάθεια που κατέβαλε όλα αυτά τα χρόνια, ώστε να καταφέρω να διεκπεραιώσω τις σπουδές μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	12
Περί Γείωσης	12
1.1 Εισαγωγή	12
1.2 Ορισμός της γείωσης.....	12
1.3 Ορολογία ^[1]	13
1.4 Ταξινόμηση γειώσεων.....	17
1.5 Μέθοδοι γειώσεων	19
1.6 Ηλεκτρόδια γείωσης: τύποι και μορφές	20
1.7 Συστήματα γείωσης.....	28
1.8 Αντίσταση γείωσης.....	31
1.9 Ειδική αντίσταση του εδάφους.....	34
Κεφάλαιο 2	40
Βασικές αρχές σχεδιασμού συστημάτων γείωσης	40
2.1 Γενικές αρχές	40
2.2 Εύρος ανοχής στο ρεύμα.....	43
2.3 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους.....	44
2.4 Σχεδίαση συστημάτων γείωσης υποσταθμών	47
2.5 Βασικές αρχές σχεδιασμού πλέγματος.....	53
2.6 Βασικές αρχές σχεδιασμού πλέγματος σε δύσκολες περιπτώσεις	55
Κεφάλαιο 3	56
Κριτήρια Ασφαλείας.....	56
3.1 Εισαγωγή	56
3.2 Πρότυπο IEEE Std 80-2013 ^[1]	60
3.3 Πρότυπο IEC 60479 ^[39]	69
3.4 Σύγκριση και αντιπαράθεση Προτύπων IEC 60479 [39] και IEEE Std 80-2013 [1]	77
Κεφάλαιο 4	80
Πακέτο Λογισμικού SES CDEGS	80
4.1 Εισαγωγή	80

4.2	MALT.....	81
4.3	SESCAD	84
4.4	Προσομοίωση.....	90
4.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	90
	Κεφάλαιο 5.....	94
	Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης Υποσταθμών.....	94
5.1	Εισαγωγή.....	94
5.2	Καθορισμός μοντέλου εδάφους	94
5.3	Μοντέλο εδάφους «Μονοστρωματικό Α».....	95
5.4	Μοντέλο εδάφους «Μονοστρωματικό Β».....	104
5.5	Μοντέλο εδάφους «Διστρωματικό»	123
5.6	Βηματικές τάσεις.....	133
	Κεφάλαιο 6.....	134
	Συμπεράσματα	134
	Βιβλιογραφία	140

Κεφάλαιο 1

Περί Γείωσης

1.1 Εισαγωγή

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των βασικών εννοιών περί γειώσεων, η επεξήγηση του ρόλου ύπαρξης των συστημάτων γείωσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και η περιγραφή των κύριων τύπων συστημάτων γείωσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σήμερα. Επιπρόσθετα, παρατίθενται ορισμοί στοιχείων όπως η αντίσταση γείωσης, η ειδική αντίσταση του εδάφους καθώς επίσης και ανάλυση παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

1.2 Ορισμός της γείωσης

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 [1]. Το δυναμικό της άπειρης όπως ονομάζεται γης θεωρείται μηδέν συνεπώς η γείωση καθορίζει ένα δυναμικό αναφοράς.

Πιο συγκεκριμένα ως γείωση ορίζεται η αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος των προς γείωση τμημάτων μιας εγκατάστασης (μη ρευματοφόρων μεταλλικών μερών) ή του ουδέτερου κόμβου μετασχηματιστών και γεννητριών.

Σκοπός της γείωσης είναι η εξασφάλιση τόσο της ακεραιότητας του εξοπλισμού όσο και της αξιοπιστίας και της συνέχειας της λειτουργίας του, σε περίπτωση εμφάνισης οποιουδήποτε σφάλματος ή κεραυνοπληξίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή ασφαλούς διαδρομής για την απαγωγή του ρεύματος σφάλματος και την εκτόνωσή του στη γη. Επιπρόσθετα στοχεύει στην προστασία από κεραυνοπληξία του ανθρώπινου δυναμικού που είτε δουλεύει, είτε κινείται στον περιβάλλοντα χώρο. Η σύνθετη αντίσταση του συστήματος πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή (θεωρητικά ίση με το μηδέν), ώστε το ρεύμα να οδεύει στη γη μέσω της γείωσης. Με αυτό τον τρόπο οι μέγιστες διαφορές δυναμικού που δημιουργούνται τόσο στην **βηματική** όσο και στην **τάση επαφής**, διατηρούνται εντός επιτρεπτών ορίων. Τέλος η γείωση συμβάλει στην μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, στην εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και στον περιορισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων [2].

Η μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες [3]:

1. Τις διαστάσεις και το σχήμα του συστήματος γείωσης
2. Την ειδική αντίσταση του εδάφους στο οποίο είναι τοποθετημένο το πλέγμα γείωσης.
3. Την ανάπτυξη ή όχι ιονισμού του εδάφους
4. Την κυματομορφή του εγγεόμενου ρεύματος
5. Το σημείο έγχυσης του ρεύματος.

1.3 Ορολογία ^[1]

Βηματική τάση (Step voltage): Ορίζεται η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κατά σύμβαση, κάνει βήμα ανοίγματος $1m$, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Το μέγιστο βηματικό δυναμικό, υπό συνθήκες σφάλματος γης, προκύπτει όταν το άτομο έχει ένα πόδι στην περιοχή της μέγιστης δυναμικής ανύψωσης και το άλλο πόδι κατά ένα βήμα προς τη γη. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το δυναμικό στη γη είναι μεγαλύτερο στην περιοχή που γειτνιάζει με το ηλεκτρόδιο [1].

Τάση επαφής (Touch voltage): Είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή. Το υψηλότερο δυναμικό προκύπτει όταν υπάρχει μια μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού δυναμικού και το άτομο στέκεται σε απόσταση $1m$, ακουμπώντας σε αυτήν τη δομή. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας από την τάση επαφής είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, καθώς η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος του σώματος και δύναται να επηρεάσει τους μύες της καρδιάς προκαλώντας καρδιακή μαρμαρυγή [1,4].

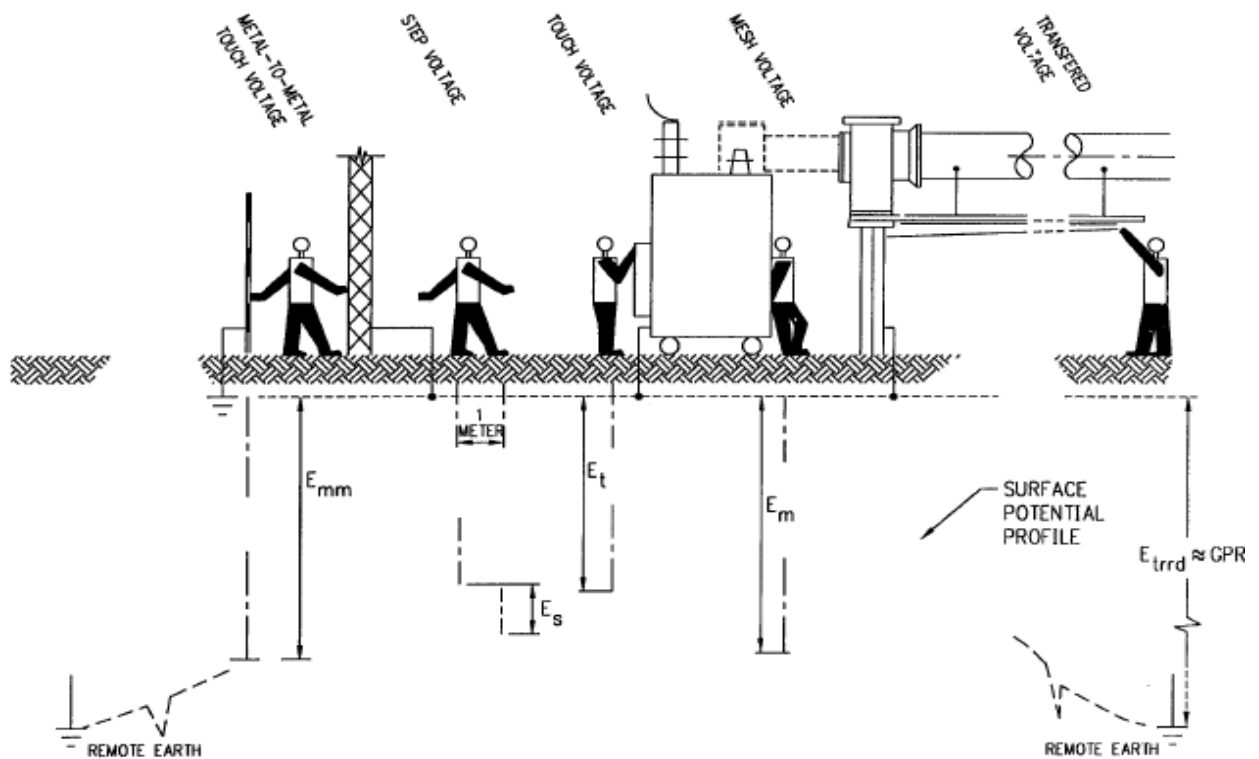
Μέγιστο Δυναμικό Γείωσης (Ground Potential Rise, GPR): Το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που αποκτά το σύστημα γείωσης σε σχέση με ένα απομακρυσμένο σημείο, θεωρούμενο ως άπειρη γη. Το δυναμικό αυτό ισούται με το γινόμενο του μέγιστου ρεύματος γείωσης (I_G) επί την αντίσταση γείωσης (R_G). Κατά σύμβαση, το δυναμικό του συστήματος γείωσης σε κανονικές συνθήκες θεωρείται ίσο με το μηδέν. Όταν ένα σφάλμα προς την γη εμφανιστεί και κατά τη διάρκεια αυτού, το ρεύμα σφάλματος μέσω του συστήματος γείωσης άγεται στο έδαφος, προκαλώντας με αυτό το τρόπο την αύξηση του εν λόγω δυναμικού [1].

Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage): Ο όρος αυτός αναφέρεται στην διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα μεταλλικά αντικείμενα ή στις δομές που βρίσκονται μέσα στην τοποθεσία του υποσταθμού και υπάρχει η δυνατότητα γεφύρωσης με άμεση επαφή χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι. Η τάση αυτή, σε συμβατικούς

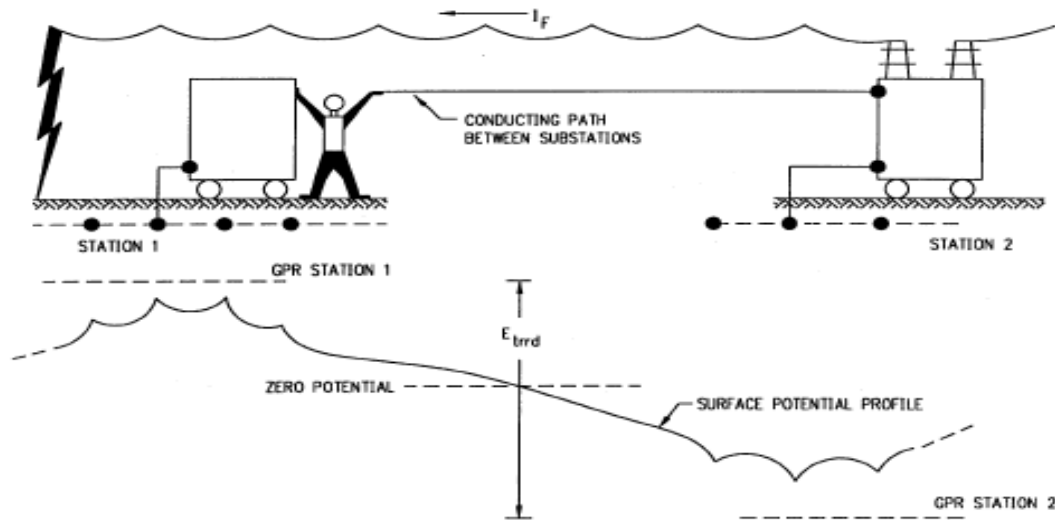
υποσταθμούς και με την προϋπόθεση εμφάνισης μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων ή δομών συνδεδεμένων στο πλέγμα γείωσης, θεωρείται αμελητέα. Αντιθέτως, η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων ή δομών συνδεδεμένων στο μεταλλικό πλέγμα και μεταλλικών αντικειμένων που υπάρχουν στην τοποθεσία του υποσταθμού, αλλά μη συνδεδεμένων στο πλέγμα γείωσης (π.χ. μονωμένος φράκτης), μπορεί να είναι ουσιαστική. Η χειρότερη τάση επαφής η οποία μπορεί να εμφανιστεί σε έναν τυπικό υποσταθμό είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα πόδια και το χέρι ενός ατόμου, όταν απέχουν τη μέγιστη δυνατή απόσταση [1].

Μεταφερόμενη τάση (Transferred voltage): Αποτελεί ειδική περίπτωση της τάσης επαφής, σύμφωνα με την οποία, μια τάση μεταφέρεται προς ή από τον υποσταθμό, σε ένα σημείο εξωτερικό της τοποθεσίας του υποσταθμού. Η μεταφερόμενη τάση είναι άκρως επικίνδυνη για την ακεραιότητα του ανθρώπινου δυναμικού, καθώς η τάση που εφαρμόζεται στο άτομο δύναται να φτάσει την τάση της πλήρους ανύψωσης δυναμικού και κλάσματος αυτής όπως συμβαίνει τόσο στην βηματική όσο και στην τάση επαφής [1].

Τάση πλέγματος (Mesh voltage): Η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης.



Εικόνα 1.3.1 Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο, βηματική τάση, τάση επαφής, τάση πλέγματος, μεταφερόμενη τάση [1]



Εικόνα 1.3.2 Μεταφερόμενη τάση [1]

Ηλεκτρόδιο γείωσης ή γειωτής: είναι ένα αγωγίμο σώμα ή ένα σύνολο αγωγίμων σωμάτων συνδεδεμένων μεταξύ τους, τα οποία σχηματίζουν οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, τοποθετημένα μέσα στο έδαφος, στοχεύοντας στην εξασφάλιση της καλύτερης δυνατής επαφής με την γη για την επίτευξη της αποτελεσματικότερης συλλογής και διάχυσης του ρεύματος σφάλματος σε αυτή.

Άπειρη γη: Είναι το σημείο το οποίο θεωρείται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών. Βρίσκεται στην επιφάνεια της γης και σε άπειρη απόσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης. Ως «άπειρη απόσταση» λαμβάνεται η απόσταση η οποία είναι 5–10πλάσια του μήκους της μεγαλύτερης διάστασης του ηλεκτροδίου γείωσης. Το δυναμικό του σημείου αυτού είναι μηδενικό.

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

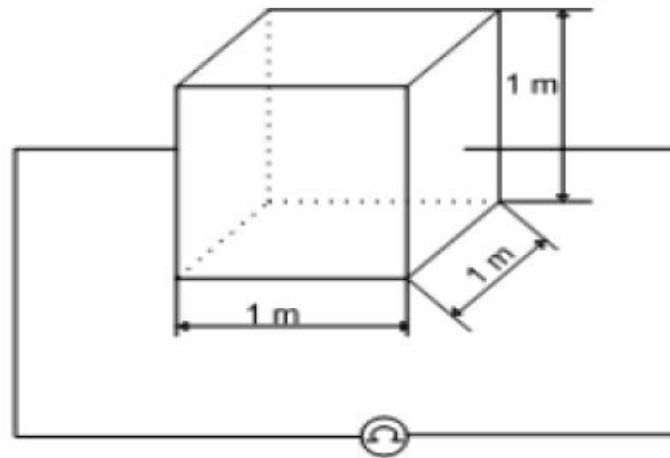
Αποτελεσματική γείωση: Ονομάζεται η γείωση η οποία δεν επιτρέπει την εμφάνιση, στην περιοχή που αυτή καλύπτει, επικίνδυνων βηματικών ή τάσεων επαφής.

Τάση ηλεκτροδίου γείωσης: Ο όρος αυτός αναφέρεται στην διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται, μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και της άπειρης γης, όταν ρεύμα ρέει δια μέσου του ηλεκτροδίου.

Αντίσταση γείωσης: Ορίζεται ως η αντίσταση του ηλεκτροδίου ή του συστήματος γείωσης ως προς την άπειρη γη.

Ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ): Είναι η αντίσταση ενός μοναδιαίου κύβου ($1 \times 1 \times 1 m^3$) υλικού του εδάφους, όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου. Η τιμή της δίδεται συνήθως Ωm (Εικόνα 1.3.3). Από φυσικής ερμηνείας, εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το έδαφος στη διέλευση του ηλεκτρικού

ρεύματος μέσα από αυτό. Η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν και επηρεάζουν την αντίσταση γείωσης που ενός οποιουδήποτε τύπου συστήματος γείωσης.



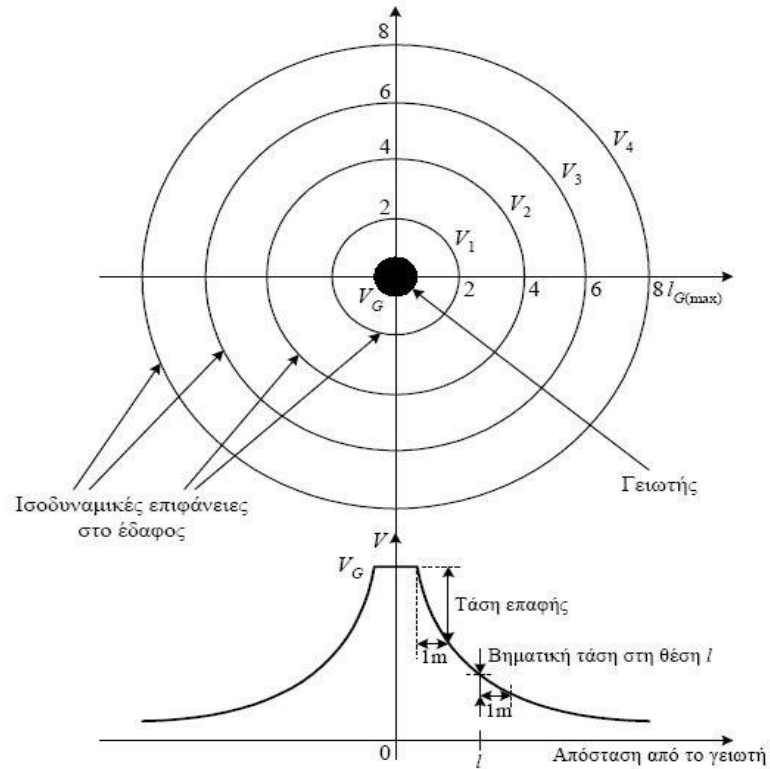
Εικόνα 1.3.3: Ορισμός ειδικής αντίστασης του εδάφους [4].

Πλέγμα Γείωσης: Αναφέρεται σε ένα σύστημα οριζόντιων ηλεκτροδίων τοποθετημένο συνήθως σε ένα συγκεκριμένο χώρο, που αποτελείται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων, γυμνών αγωγών θαμμένων στη γη, παρέχοντας μια κοινή γείωση για τις ηλεκτρικές συσκευές ή τις μεταλλικές κατασκευές.

Υλικό επιφανείας (surface material): Είναι ένα στρώμα το οποίο αποτελείται από πέτρα, χαλίκι, άσφαλτο ή από τεχνητά υλικά και τοποθετείται πάνω από το έδαφος. 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.

Σύστημα γείωσης αποτελείται από την σύνδεση ενός αγωγού γείωσης με ένα σύνολο ομοειδών η μη γειωτών, όπως επίσης και από το σύνολο των εξαρτημάτων τα οποία απαιτούνται τόσο για τη σύνδεση όσο και για την στήριξη αυτών. Το σύστημα γείωσης αποτελεί αναπόσπαστο και καίριας σημασίας τμήμα του συστήματος προστασίας κάθε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. υποσταθμών, σταθμών παραγωγής, γραμμών μεταφοράς κτιρίων τηλεπικοινωνιακών πύργων, κτλ.).

Χοάνη δυναμικού: Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στο διάγραμμα τάσης-απόστασης του γειωτή, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του σφάλματος μέτρησης της αντίστασης των γειωτών και στο οποίο δείχνεται η περιοχή επίδρασης του γειωτή ή η απόσταση της άπειρης γης (Σχήμα 1.3). Επεξηγηματικά, όταν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση U ως προς την άπειρη γη, δημιουργείται ένα πεδίο ροής και πεδίο δυναμικού γύρω από τον γειωτή. Όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από τον γειωτή, τόσο μειώνεται η τάση.



Εικόνα 1.3.4: Διάγραμμα δυναμικού γύρω από το γειωτή [4].

1.4 Ταξινόμηση γειώσεων

Στις συνήθεις κτιριακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους, διακρίνει κανείς τρία είδη γειώσεων, τα οποία αξίζει να σημειωθεί, δύναται και να συνυπάρχουν σε ένα σύστημα [4,5]:

1.4.1 Γείωση λειτουργίας

Ονομάζεται η γείωση που αποσκοπεί στην ομαλή και ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης και στην αποφυγή υπερτάσεων. Αναφέρεται στην γείωση σημείου ενός ενεργού κυκλώματος (π.χ. η γείωση του ουδέτερου ενός Μ/Σ, η γείωση του ουδέτερου αγωγού του συστήματος και γενικότερα η γείωση άλλων στοιχείων του κυκλώματος συνδεδεμένων σε αστέρα) και διακρίνεται σε:

- **Άμεση:** η μόνη αντίσταση που περιλαμβάνεται είναι η αντίσταση γείωσης
- **Έμμεση:** περιλαμβάνει ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις συν της αντίστασης γείωσης.

1.4.2 Γείωση προστασίας (ή γείωση μεταλλικών)

Καλείται η αγωγίμη σύνδεση των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης με την γη, τα οποία δεν ανήκουν στο ενεργό κύκλωμα (κύκλωμα λειτουργίας). Σε αυτή τη

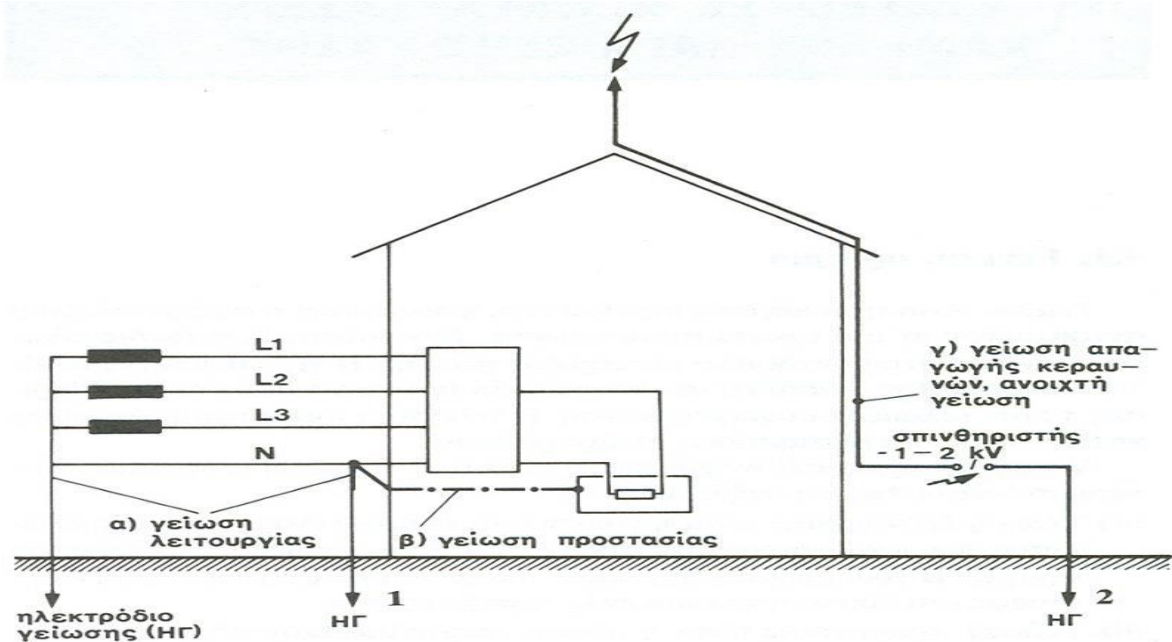
κατηγορία γείωσης χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδύων και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών κλπ. Η γείωση προστασίας εφαρμόζεται υποχρεωτικά σε κάθε εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την εξασφάλιση της προστασίας των ανθρώπων από εμφάνιση επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών, τα οποία σε κανονική λειτουργία δεν είναι υπό τάση.

1.4.3 Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας

Σε αυτό το είδος γείωσης ανήκει κάθε γείωση μιας εγκατάστασης η οποία στοχεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον προστατευόμενο χώρο, από στατικά ηλεκτρικά φορτία τα οποία δημιουργούνται από εξωτερικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα, όπως οι κερανοί. Αυτό επιτυγχάνεται με την διοχέτευση των ρευμάτων σφάλματος προς την γη. Ενδεικτικά παραδείγματα γειώσεων ασφαλείας είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.

Αξίζει να αναφερθεί η ύπαρξη μίας ιδιαίτερης γείωσης σε περιπτώσεις εφεδρικής ηλεκτροδότησης μέσω ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, όπως επίσης και σε περιπτώσεις γείωσης που δεν σχετίζονται με τη γείωση μεταλλικών της ηλεκτρικής εγκατάστασης (π.χ. γείωση ηλεκτρονόμου διαφυγής έντασης κλπ.) [6].

Συνίσταται τα προαναφερθέντα είδη γειώσεων όταν συναντώνται σε ένα κτήριο να απολήγουν στο ίδιο ηλεκτρόδιο ή στην ίδια εγκατάσταση γείωσης. Αυτό δεν ισχύει σε περίπτωση υποσταθμού. Αυτό εξάλλου επιβάλλουν και οι κανονισμοί άλλων χωρών.



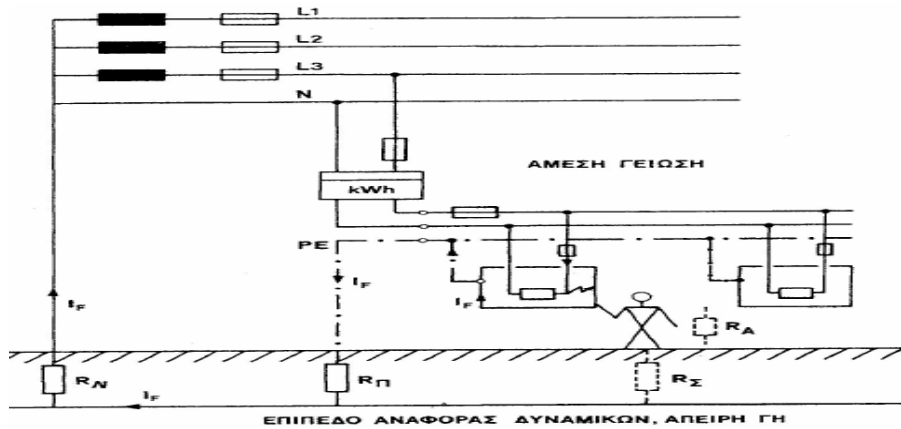
Εικόνα 1.4.1 Γειώσεις οικιακής εγκατάστασης [7].

1.5 Μέθοδοι γειώσεων

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι παρακάτω [5]:

1.5.1 Άμεση γείωση

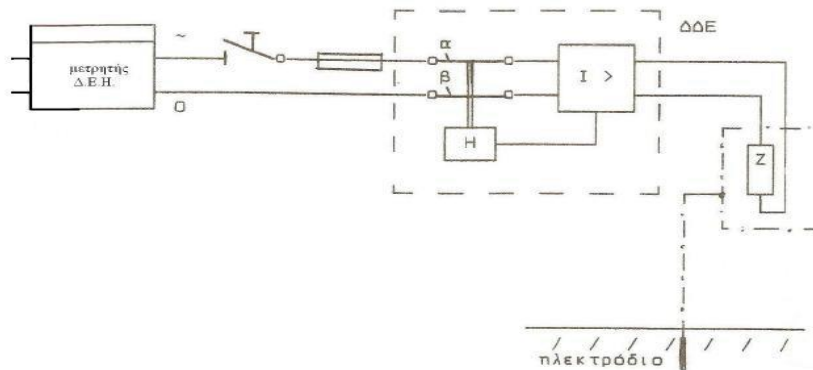
Είναι η απ' ευθείας αγωγή σύνδεση του συστήματος γείωσης με τον αγωγό γης, ο οποίος συνδέεται με κάποιο αγώγιμο υλικό που έχει τοποθετηθεί μέσα στη γη. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι το ηλεκτρόδιο, η πλάκα γείωσης και το τρίγωνο γείωσης.



Εικόνα 1.5.1 Προστασία με άμεση γείωση [7].

1.5.2 Μέσω διακόπτη διαφυγής έντασης ή τάσης:

Στοχεύει στην αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης όταν το ρεύμα ή η τάση αντίστοιχα ξεπεράσει κάποιο προκαθορισμένο όριο (ρελέ διαρροής). Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση αποζεύκτη διαφυγής έντασης ή τάσης, ανάλογα το σφάλμα. Η γείωση αυτού του είδους αποτελεί μια γενική μέθοδο γείωσης προστασίας, όταν είναι αδύνατη η εφαρμογή άλλης μεθόδου.



Εικόνα 1.5.2 Σύστημα προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης, εγκατάσταση με ηλεκτρόδιο γείωσης [7].

Η αντίσταση ενός ηλεκτροδίου γείωσης αποτελεί άθροισμα τριών επιμέρους παραγόντων οι οποίοι αναλύονται ακολούθως:

1. Η αντίσταση του ίδιου του ηλεκτροδίου γείωσης όσο και των συνδέσεων σε αυτό.

Τα ηλεκτρόδια γείωσης κατασκευάζονται από υλικά υψηλής αγωγιμότητας και έχουν συνήθως πολύ μικρή αντίσταση. Η επιλογή του μεγέθους ή της διατομής τους γίνεται με γνώμονα την όσο τον δυνατόν χαμηλή αντίσταση, ώστε αυτή να αποτελεί αμελητέο μέρος της συνολικής αντίστασης του συστήματος.

2. Η αντίσταση επαφής μεταξύ του ηλεκτροδίου και του εδάφους που το περιβάλλει.

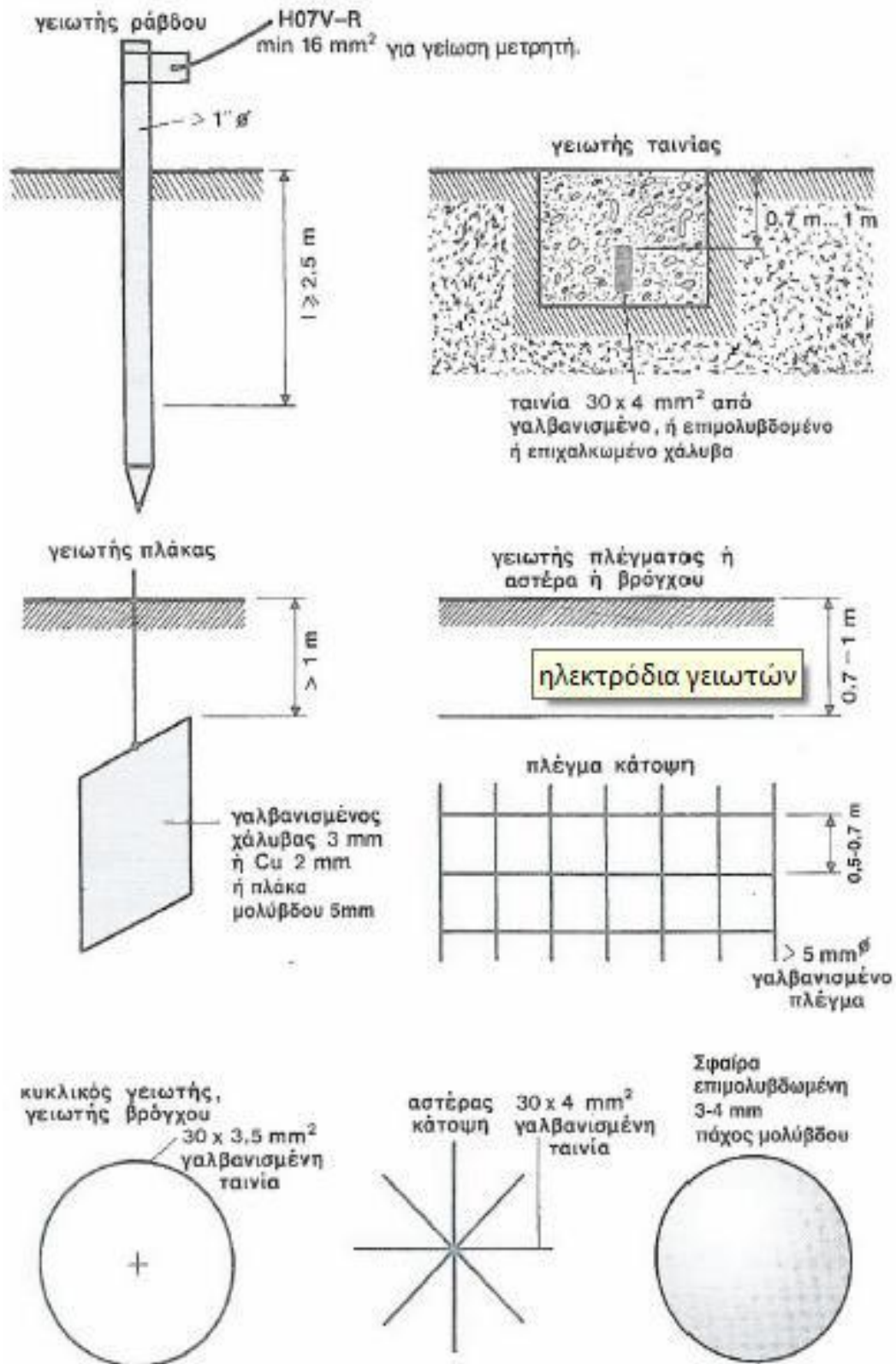
Υπό κανονικές συνθήκες, και με την προϋπόθεση ότι η γη εφάπτεται πολύ σταθερά στο ηλεκτρόδιο η αντίσταση επαφής είναι αμελητέα έκτος και αν το ηλεκτρόδιο έχει μπογιά, γράσο κτλ.

3. Η αντίσταση της περιβάλλουσας γύρω από το ηλεκτρόδιο γης.

Η αντίσταση της περιβάλλουσας γης εξαρτάται από το υλικό του εδάφους, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Έχει την μεγαλύτερη τιμή μεταξύ των τριών που αποτελούν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και κυμαίνεται γενικά από 500 έως 50.000 Ωcm^3 .

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τύπος και το βάθος έμπηξης ή τοποθέτησης των ηλεκτροδίων 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. Επίσης, τα χρησιμοποιούμενα υλικά και η κατασκευή των ηλεκτροδίων γείωσης πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να αντέχουν σε μηχανικές βλάβες εξαιτίας της διάβρωσης. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των διατάξεων γείωσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της διάβρωσης στην αύξηση της αντίστασης γείωσης.

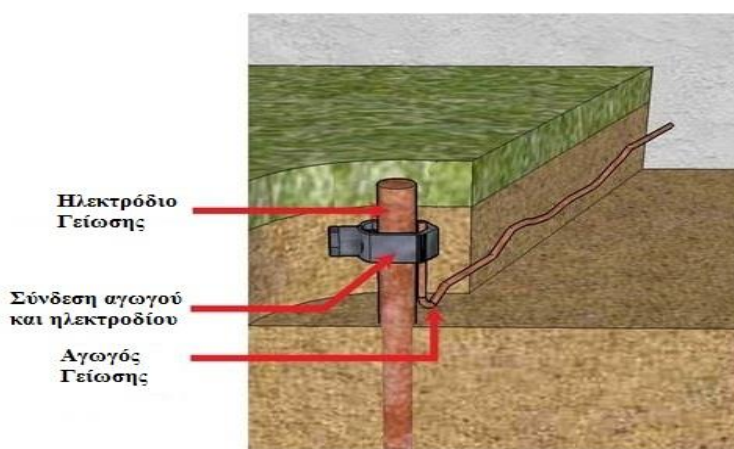
Τα κυριότερα είδη γειωτών παρουσιάζονται παρακάτω και περιγράφονται ακολούθως:



Εικόνα 1.6.2: Ηλεκτρόδια γείωσης σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384 [9].

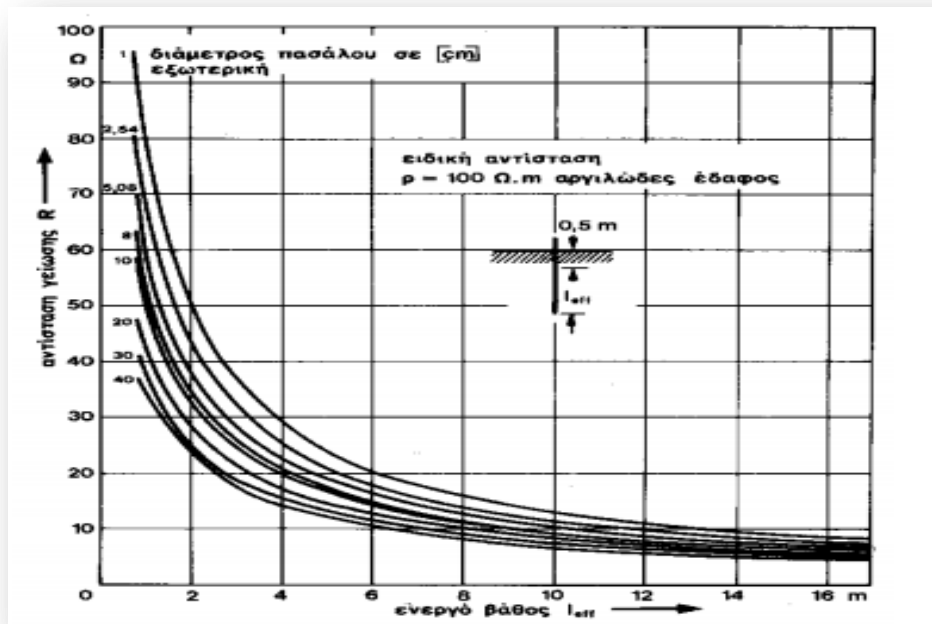
❖ Γειωτής Ράβδου

Αποτελεί την απλούστερη μορφή γειωτή, σχήματος ράβδου, κυκλικής διατομής ή διατομής σταυρού και συναντάται σε διάφορα μεγέθη. Απαρτίζεται από τρία μέρη: τον αγωγό γείωσης, το ηλεκτρόδιο και την σύνδεση μεταξύ τους. Τοποθετείται κατακόρυφα στο έδαφος ή λοξά (π.χ. με κλίση 20° ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος) και σε βάθος, περίπου 2,5 m με σφυρί χεριού ή με μηχανικό σφυρί. Προτείνεται η χρήση ηλεκτροδίων χαλκού, επιχαλκωμένου η επιμολυβδωμένου χάλυβα, καθώς εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στην διάβρωση με την προϋπόθεση ότι το επιτρέπει η μηχανική αντοχή. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα ώστε να καρφώνεται καλύτερα στο έδαφος. Το άνω μέρος συνήθως είναι τοποθετημένο σε φρεάτιο δίνοντας έτσι την δυνατότητα της επισκεψιμότητας του σημείου σύνδεσης της με τον αγωγό γείωσης.



Εικόνα 1.6.3: Στοιχεία ραβδοειδούς γειωτή [10].

Η αντίσταση του γειωτή εξαρτάται από την αντίσταση του ηλεκτροδίου και των συνδέσεων, την αντίσταση επαφής του ηλεκτροδίου με τη γη και την αντίσταση γης (μειώνεται όταν το έδαφος έχει μεγάλη αγωγιμότητα). Επίσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του βάθους διείσδυσης και του μήκους της ράβδου, ενώ δεν εξαρτάται σημαντικά από την διάμετρο και το πάχος της ράβδου. Χρησιμοποιώντας περισσότερα ηλεκτρόδια ή άλλους τύπους και με σωστό σχεδιασμό του συστήματος γείωσης επιτυγχάνεται μείωση της αντίστασης [10]. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την σχέση μεταξύ της αντίστασης γείωσης και του ενεργού βάθους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ενεργό μήκος ισούται με το πραγματικό μήκος της ράβδου μείον μισό μέτρο.



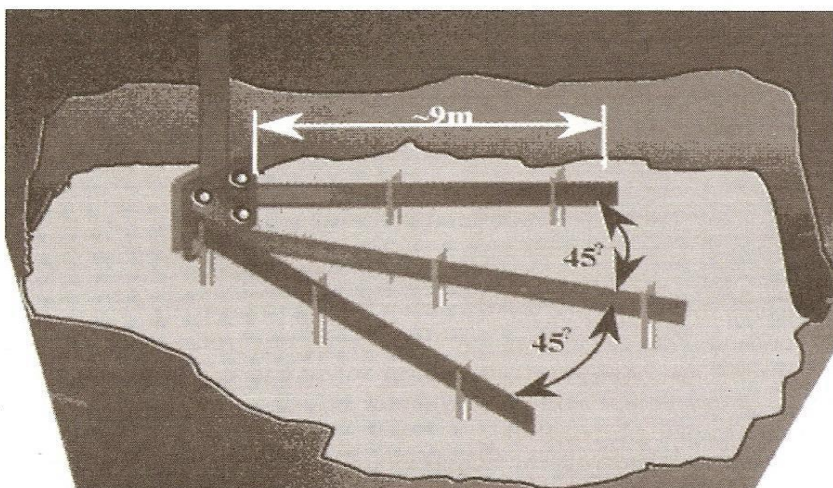
Εικόνα 1.6.4 Αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασσάλων στο έδαφος [8].

❖ Γειωτής Ταινία

Ο γειωτής τύπου ταινία αποτελείται από συρματόσχοινο ή ταινία, η οποία μπορεί να είναι από χαλκό ή θερμά επιψευδαργυρωμένο χάλυβα. Τοποθετείται ευθύγραμμα ή κυκλικά (γειωτής βρόγχου) γύρω από την εγκατάσταση, σε χαντάκι βάθους 0,7-1,0 m έτσι ώστε το έδαφος να είναι υγρό. Αξίζει να σημειωθεί ότι προτιμάται η ταινία σαν ηλεκτρόδιο γείωσης (κανονισμοί VDE 100) καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στην διάβρωση σε σχέση με το συρματόσχοινο. Η τιμή της αντίστασης της γείωσης είναι αντιστρόφος ανάλογη με το μήκος της ταινίας η οποία βρίσκεται εντός εδάφους. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι ο ευθύγραμμος γειωτής παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό, για το ίδιο μήκος ταινίας, καθώς η επιφάνεια επαφής με το έδαφος είναι σχεδόν η μισή. Η θεμελιακή γείωση αποτελεί μία περίπτωση γειωτή ταινίας. Χάλκινα η επιχαλκωμένα ηλεκτρόδια γενικά αποφεύγονται όπου στην περιοχή υπάρχουν χαλύβδινοι σωλήνες διότι προκαλούνται διαβρώσεις.

Ταινία χαλκού: Κατασκευάζεται από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό και οι διαστάσεις τις είναι συνήθως 30x2mm, 30x3mm και 40x3mm.

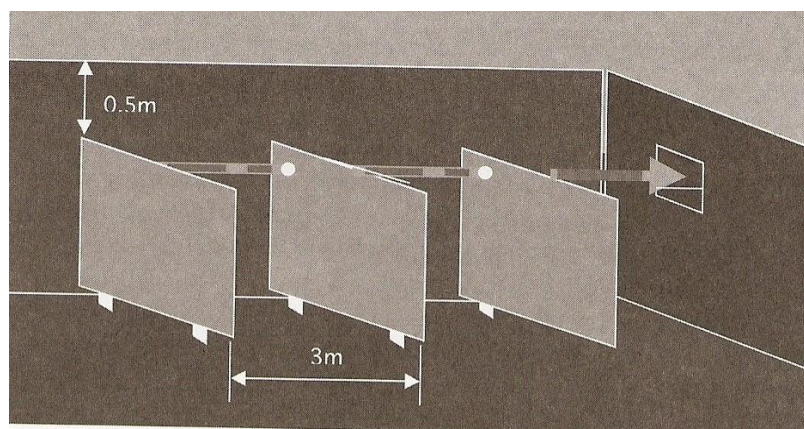
Ταινία χαλύβδινη θερμά επιψευδαργυρωμένη: Οι συνήθεις διαστάσεις της είναι 30x3mm, 30x3,5mm και 40x4mm.



Εικόνα 1.6.5: Γείωση με ταινία [11].

❖ Γειωτής Πλάκας

Είναι πλάκα μορφής παραλληλογράμμου η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος, έχοντας την επιφάνεια της κατακόρυφη, σε βάθος τουλάχιστον 50cm. Αποτελείται από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό ή χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο ή μόλυβδο με ελάχιστο πάχος 2mm και συναντάται σε διάφορες διαστάσεις με ελάχιστα δυνατές 500x500x2mm. Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1,0m. Η τιμή της αντίστασης της γείωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη τόσο των διαστάσεων της πλάκας όσο και του βάθους τοποθέτησης της στο έδαφος.

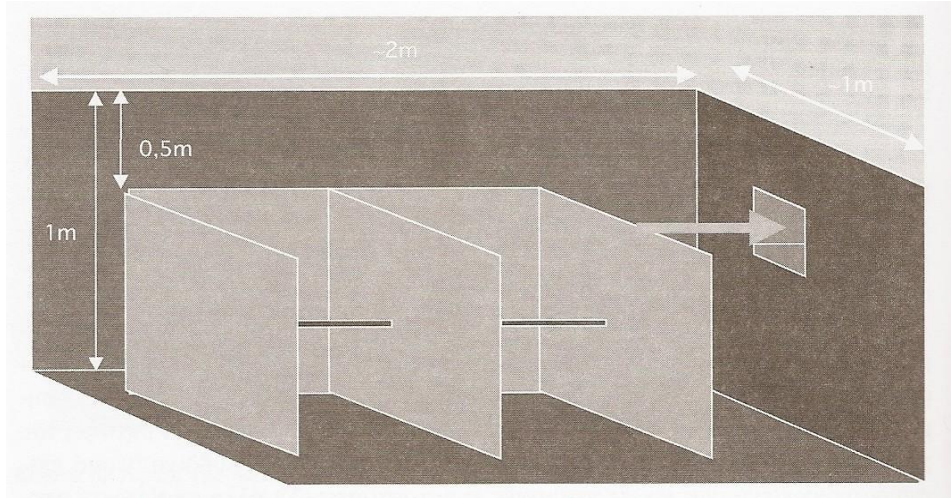


Εικόνα 1.6.6: Γείωση με πλάκες [11].

❖ Γειωτής Τύπου «E»

Τον γειωτή τύπου «E» κατασκευάζεται από καθαρό ηλεκτρολυτικό χαλκό ή χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο (πάχος επιψευδαργύρωσης 50μm). Απαρτίζεται ουσιαστικά δύο στοιχεία καθένα από τα οποία αποτελείται από πλάκες, οι οποίες μετά από κατάλληλη συναρμολόγηση παίρνουν τη μορφή «Π» και τη μορφή «Γ» αντίστοιχα. Η συναρμολόγηση των δύο στοιχείων γίνεται με τη χρήση μεταλλικών γωνιών, κοχλίων

και περικόχλιων M8 ανοξείδωτα τύπου A2. Τα χαρακτηριστικά της αντίστασης γείωσης, ύστερα από μετρήσεις και δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι είναι ανάλογα με αυτά 5 πλακών ίδιων διαστάσεων, σε απόσταση τουλάχιστον 3m η μία από την άλλη, ή 6 ράβδων μήκους 1,5m σε απόσταση 4m η μία από την άλλη. Ο γειωτής τύπου «E» μπορεί να επεκταθεί χρησιμοποιώντας περισσότερα στοιχεία «Γ» επιτυγχάνοντας έτσι τη μείωση της τιμής της αντίστασης γείωσης. Το συνηθέστερο παράδειγμα είναι αυτό της περιμετρικής γείωσης η οποία συντάσσεται με ράβδους γείωσης κατά μήκος αυτής.



Εικόνα 1.6.7: Γειωτής τύπου «E» [11].

❖ Γειωτής Ακτινικός

Αποτελείται από ταινίες ή ράβδους οι οποίοι διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες. Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0,8m. Τέλος χρησιμοποιούνται υλικά όμοια με αυτά του γειωτή ταινίας.

❖ Γειωτής Πλέγματος

Η συνηθέστερη υλοποίηση γίνεται με τη μορφή πλέγματος από ταινίες ή με την χρήση αγωγού κυκλικής ή άλλης διατομής, ο οποίος έχει τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 0,7-2,0m και τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0,5-1,0m. Τα ελάχιστα πάχη ταυτίζονται με αυτά των γειωτών ταινίας. Το σημαντικό πλεονέκτημα του γειωτή πλέγματος είναι ότι, οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερα είναι τα ανοίγματα τόσο μεγαλύτερες τιμές βηματικών τάσεων εμφανίζονται.

❖ Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής

Με την προϋπόθεση της συγκατάθεσης του αρμόδιου φορέα παροχής νερού και την ύπαρξη διαδικασίας η οποία θα εξασφαλίζει την έγκαιρη ενημέρωση του χρήστη για

κάθε σχεδιαζόμενη αλλαγή στο σύστημα των σωληνώσεων ύδρευσης, οι μεταλλικοί σωλήνες ύδρευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρόδια. (σύμφωνα με το άρθρο 542.2.5 του ΕΛΟΤ HD 384 [4]). Επιπρόσθετα, σύμφωνα με το άρθρο 542.2.6 του ΕΛΟΤ HD 384 [4], δεν επιτρέπεται η χρησιμοποίηση ως ηλεκτροδίων γείωσης, μεταλλικών σωληνώσεων διαφορετικών από αυτών των σωληνώσεων ύδρευσης (π.χ. σωληνώσεις υγρών ή αερίων καυσίμων, σωληνώσεις θέρμανσης κλπ.). Προτιμάται η σύνδεση της γραμμής γείωσης πριν από το μετρητή. Σε αντίθετη περίπτωση πρέπει να βραχυκυκλωθεί μονίμως ο μετρητής, με χάλκινο σύρμα H03V-U διατομής τουλάχιστον 6 mm².

Προσοχή: Κατά VDE 100 δεν επιτρέπεται η παράλληλη σύνδεση γειωτών από χαλκό με το δίκτυο ύδρευσης καθώς ενοείται ο σχηματισμός ηλεκτροχημικών στοιχείων με αποτέλεσμα τη διάβρωση του σιδήρου. Επίσης, λόγω της μεγάλης έκτασης του δικτύου ύδρευσης, με τη χρήση αυτής της μορφής γειωτή, εξασφαλίζεται η χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τα τελευταία χρόνια, όμως, η συνέχεια του διακόπτεται λόγω χρήσης πλαστικών σωλήνων, γι' αυτό και είναι αναποτελεσματικό σαν μέθοδος προστασίας.

Μορφή γειωτή	Υλικό		
	Χάλυβας γαλβανισμένος (με 70 μm στρώμα)	Χάλυβας επιχαλκωμένος	Χαλκός
Ταινία	100 mm ² ελάχιστο πάχος 3 mm	50 mm ² ελάχιστο πάχος 2 mm	50 mm ² ελάχιστο πάχος 2 mm
Ράβδος στρογγυλή	78 mm ² = 10 φ	50 mm ² χάλυβας 35 mm ² χαλκός	35 mm ²
Συρματόσχοινο	95 mm ² χονδρόκλωνο (δε χρησιμοποιείται)		35 mm ² χονδρόκλωνο (ελάχιστο πάχος κλώνων 1,8 mm)
Σωλήνας για πασσάλο-γειώσεις	Ονομαστική διάμετρος 1" (εσωτερική διάμετρος), ελάχιστο πάχος 2 mm		Εσωτερική διάμετρος 20mm, ελάχιστο πάχος 2 mm
Ράβδος L, U, T, I για πασσαλογειώσεις	Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, 100 mm ² , ελάχιστο πάχος 3 mm	50 mm ² στρογγυλή ράβδος	Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, 35 mm ² , ελάχιστο πάχος 3 mm
Πλάκα	Ελάχιστο πάχος 3 mm		Ελάχιστο πάχος 2 mm

Πίνακας 1.6.1: Ελάχιστες διατομές και πάχη γειωτών, κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε. [12]

1.7 Συστήματα γείωσης

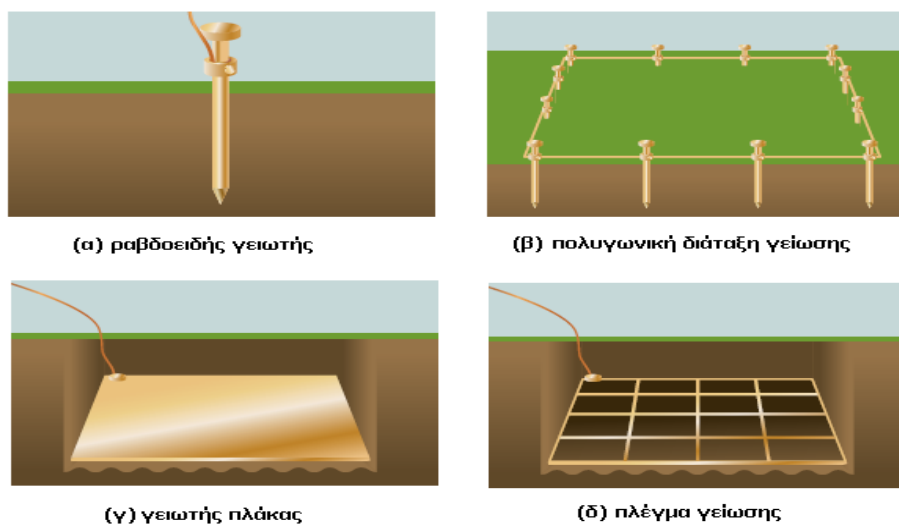
Τα συστήματα γείωσης είναι συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερους γειωτές, διατεταγμένους και συνδεδεμένους με διαφορετικό τρόπο ανάλογα την περίπτωση. Η επιλογή του είδους του συστήματος γείωσης που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το είδος του έδαφος (βραχώδες, αμμώδες, κλπ.), τον χώρο που έχουμε στην διάθεσή μας, τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν, το κόστος κλπ. Τα πιο γνωστά είναι: πολυγωνική (τριγωνική κλπ.) διάταξη, σύστημα γείωσης με πλάκες, περιμετρική γείωση, θεμελιακή γείωση, γείωση τύπου "Ε" ή και συνδυασμός ορισμένων από αυτά.

❖ Πολυγωνική διάταξη

Αποτελείται από ραβδοειδείς γειωτές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου (Σχήμα 1.7.1 β), συνήθως δε τριγώνου (τρίγωνο γείωσης). Η σύνδεση μεταξύ των ράβδων επιτυγχάνεται με αγωγό γείωσης διατομής ανάλογης των απαιτήσεων της εγκατάστασης (συνήθως $50\text{mm}^2 \text{Cu}$). Σε περιπτώσεις έλλειψης χώρου, οι ράβδοι δύναται να τοποθετηθούν σε διαφορετικές διατάξεις, όπως ευθεία διάταξη, διάταξη "Τ", κυκλική διάταξη κτλ. Για την αποτελεσματική μείωση της αντίστασης γείωσης χρησιμοποιούνται περισσότερα ηλεκτρόδια. Πρακτικά πρέπει η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων να είναι τουλάχιστον 1.5 φορά το βάθος τοποθέτησής τους ώστε να μην εμπλέκονται οι περιοχές επιρροής τους.

❖ Γείωση με πλάκες

Η διάταξη αποτελείται από πλάκες τοποθετημένες σε τυχαία διάταξη με την προϋπόθεση ότι η απόσταση μεταξύ τους να ξεπερνά τα 3m (Σχήμα 1.7.1γ). Οι πλάκες συνδέονται με αγωγό γείωσης διατομής εξαρτώμενης από τις απαιτήσεις της εγκατάστασης (συνήθως $50\text{mm}^2 \text{Cu}$).



Εικόνα 1.7.1: Συστήματα γείωσης [13].

❖ Περιμετρική γείωση

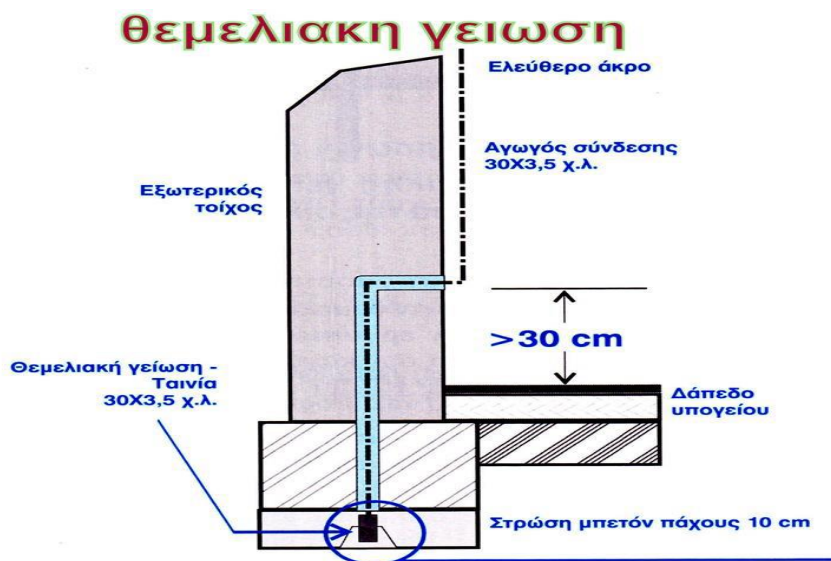
Κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας ο οποίος τοποθετείται σε όρυγμα βάθους 50cm έως 70cm συνήθως για να υπάρχει υγρό έδαφος περιμετρικά του κτηρίου, και σε απόσταση από το κτήριο περίπου 2m διότι το έδαφος κοντά στο κτήριο συνήθως δεν είναι αγώγιμο (μπάζα).

❖ Πλέγμα γείωσης

Πλέγμα αποτελούμενο από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 0.7 έως 2 m το οποίο τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 50 έως 70cm. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες (Σχήμα 1.7.1 δ).

❖ Θεμελιακή γείωση

Αποτελείται από γειωτή ταινίας και σπανιότερα από αγωγό κυκλικής διατομής, ο οποίος τοποθετείται εντός των συνδετήριων δοκαριών των πέδινων ή στα περιμετρικά τοιχεία των θεμελίων του κτηρίου, υπό την μορφή κλειστού δακτυλίου (Σχήμα 1.7.2 και 1.7.3).



Εικόνα 1.7.2: Πλάγια όψη θεμελιακής γείωσης [14].

Η αντίστασης γείωσης έχει τιμή αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της ταινίας, όπως συμβαίνει και στην περιμετρική γείωση με ταινία. Η θεμελιακή γείωση έχει όλες τις ιδιότητες μιας ιδανικής γείωσης καθώς συνδέεται ηλεκτρικά με τον οπλισμό του κτιρίου αποκτώντας έτσι τιμή αντίστασης σχεδόν πάντοτε μικρότερη από την τιμή οποιουδήποτε άλλου τύπου γείωσης. Επιπρόσθετα, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους συμβατικούς τύπους γείωσης, σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι: η σταθερή τιμή αντίστασης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, (η συγκέντρωση υγρασίας του υπεδάφους στις διάφορες εποχές του έτους είναι σχεδόν σταθερή), η αντοχή στο χρόνο, η μηχανική προστασία, και η εξάλειψη βηματικών

1.8 Αντίσταση γείωσης

Με τον όρο αντίσταση γείωσης, αναφερόμαστε στην αντίσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος [1]. Η εξίσωση που ακολουθεί αποτελεί την εξίσωση υπολογισμού της τιμής της αντίστασης γείωσης:

$$R_g = V/I$$

Αναλυτικότερα, η αντίσταση γείωσης ενός ηλεκτροδίου ή συστήματος γείωσης, ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός πιο μακρινού σημείου της γης και του ρεύματος εκφόρτισης. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι παρότι στην πραγματικότητα η γη ανήκει στους κακούς αγωγούς του ηλεκτρισμού, αν δημιουργηθεί μονοπάτι ρεύματος αρκετά μεγάλο, ώστε η αντίσταση παίρνει αρκετά μικρή οπότε η γη μπορεί να θεωρηθεί καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.

Η αντίσταση γείωσης (R_g) είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως. Για το λόγο αυτό είναι μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου και εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. [16].

Επιπρόσθετα, η αντίσταση γείωσης για κάθε σύστημα ηλεκτροδίων, μπορεί να υπολογιστεί από μαθηματικές σχέσεις η οποίες βασίζονται στη γενική σχέση υπολογισμού της αντίστασης:

$$R_g = \rho \times \frac{L}{A}, \text{ Όπου:}$$

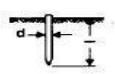
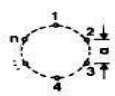

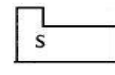
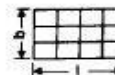
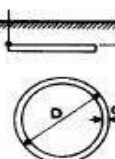
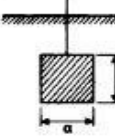
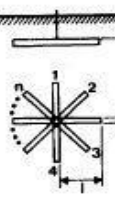
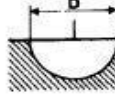
ρ : η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

L : το μήκος του αγώγιμου μονοπατιού σε m

A : το εμβαδόν της αγώγιμης διαδρομής σε m^2

Από τα παραπάνω καταλήγουμε εύκολα στο συμπέρασμα πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη τόσο της ειδικής αντίστασης του εδάφους όσο και του μήκους του αγώγιμου μονοπατιού και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Αυτό εξηγεί και το γεγονός πως το κύριο υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης είναι ο επικασσιτερωμένος χαλκός, ο οποίος διασφαλίζει την αποφυγή οξειδωσης.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι κυριότεροι τύποι γειωτών όπως επίσης και οι τύποι βάσει των οποίων υπολογίζεται η αντίσταση γείωσής καθενός από αυτούς.

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}$	$R_A \approx \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασσάλων $\alpha \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{\alpha}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1.2$ R_{A1} = αντίσταση ενός πασσάλου	$K=(1 \dots 1.5)$ για $n = 10 : k \approx 1.2$
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h=0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right)$	$R_A \approx \frac{2\rho}{l}$
	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$		$R_4 = \frac{2 \rho}{\pi D}$
	Πλέγμα σε βάθος $0,5 - 1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2d} + \frac{\rho}{lg}$ $l \cdot g$ = συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$
	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{8D}{d}$ $\left(1 + \frac{\ln \frac{2D}{t}}{\ln \frac{8D}{d}} \right)$	$R = \frac{2\rho}{\pi D} *$
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη $S [\text{m}^2]$		$R = \frac{\rho}{4.5\alpha} **$
	$n=2$ $n=3$ $n=4$ $n=5$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{l^2}{0.27td}\right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{l^2}{0.25td}\right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{l^2}{0.22td}\right)$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{l^2}{0.09td}\right)$	
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D} ***$	

Πίνακας 1.8: Μαθηματικοί τύποι υπολογισμού αντίστασης ηλεκτροδίου γείωσης [8]

στον αφορά τον πίνακα 1.8 αξίζει να επισημανθούν τα ακόλουθα:

- Όπου εμφανίζεται το πάχος του αγωγού d , αυτό είναι το ισοδύναμο πάχος

$$d = \sqrt{4 \frac{A}{\pi}}, \text{ όπου } A \text{ η διατομή του αγωγού.}$$

- Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος

$$D = 0,33 \cdot U, \text{ όπου } U \text{ το μήκος αγωγού.}$$

- Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνα θέτουμε: $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S η επιφάνεια.
- Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $1,57^3 \sqrt{V}$

Συνοψίζοντας, η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από τις εξής τρεις συνιστώσες:

1. Την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και των συνδέσεων σ' αυτό.
2. Την αντίσταση επαφής μεταξύ ηλεκτροδίου και του παρακείμενου εδάφους.
3. Την ειδική αντίσταση του εδάφους που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο.

Καθώς η αντίσταση του ηλεκτροδίου και των συνδέσεών του μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, ο σημαντικότερος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη στα στάδια σχεδίασης και ανάλυσης κάθε συστήματος γείωσης είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους. Τελειώνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι το είδος και το μέγεθος του συστήματος γείωσης αποτελούν ακόμα έναν σημαντικό παράγοντα που επιδρά στην τιμή της αντίστασης γείωσης.

Ένα αρκετά συχνό φαινόμενο το οποίο συναντάται κατά την κατασκευή ενός συστήματος γείωσης ή κατά τη λειτουργία είναι η ανάγκη μείωσης της τιμής της αντίστασής του και το οποίο οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

- Μεγάλη ειδική αντίσταση του εδάφους
- Περιορισμένος χώρος εγκατάστασης
- Ιδιαίτερα διαβρωτικό έδαφος
- Ασταθείς καιρικές συνθήκες με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους
- Μείωση κόστους

Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχουν πρακτικές και άμεσες λύσεις οι οποίες αναφέρονται επιγραμματικά:

1. Αύξηση μήκους του ηλεκτροδίου γείωσης.
2. Χρήση πολλαπλών ηλεκτροδίων γείωσης.
3. Χημική επεξεργασία εδάφους που περιβάλλει το σύστημα γείωσης

1.9 Ειδική αντίσταση του εδάφους

Όπως έχει τονισθεί και παραπάνω, η ειδική αντίσταση (ρ) αλλά και γενικά οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους, αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την τιμή της αντίστασης γείωσης. Επομένως, για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης, (επιλογή καταλληλότερου και οικονομικότερου εξοπλισμού εγκατάστασης), η σωστή μελέτη της ειδικής αντίστασης του εδάφους κρίνεται αναγκαία. Η ειδική αντίσταση του εδάφους, διαμορφώνεται από ποικίλους παράγοντες που μπορούν να συνοψισθούν στους εξής :

- ❖ **Το είδος του εδάφους.** Το έδαφος δεν είναι ένα ομοιογενές υλικό καθώς τόσο η σύσταση όσο και η δομή του δύναται να διαφέρουν γεωγραφικά αλλά ακόμα και σε μικρές αποστάσεις μεταξύ δύο σημείων του ίδιου χώρου, ή σε διαφορετικά βάθη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους να διαφέρει από σημείο σε σημείο, ανάλογα με το είδος του εδάφους το οποίο μπορεί να είναι αργιλώδες, αμμώδες, βραχώδες, υγρό, ξηρό, ανομοιογενές κ.ά. Επίσης, η ειδική αντίσταση σε ανισότροπα εδάφη διαφέρει γύρω από το ηλεκτρόδιο γείωσης και είναι μη-γραμμική. Ωστόσο, συνηθίζεται, κατά τη μοντελοποίηση των συστημάτων γείωσης, το έδαφος να θεωρείται ότι έχει σε όλα τα σημεία την ίδια ειδική αντίσταση. Στον Πίνακα 1.9.1 παρατίθενται ενδεικτικές τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

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

Πίνακας 1.9.1: Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους [17].

- ❖ **Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία.** Η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία είναι ένας επίσης παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση, καθώς μόνο υπό την προϋπόθεση ότι περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά, ώστε να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη, επιφέρει σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αγωγιμότητα του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, συνεπώς η μεγάλη ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων σε αυτό αλάτων, επηρεάζουν σημαντικά τον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Οι διακυμάνσεις στην περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό

οφείλονται κατά κύριο λόγο στις καιρικές συνθήκες και μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού. Αναφέρεται ενδεικτικά ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος), η ειδική αντίσταση δύναται να βρεθεί 30 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με την περίπτωση όπου το περιεχόμενο του ίδιου εδάφους σε υγρασία ήταν 20%. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί, ότι ενώ το έδαφος ξηραίνεται επιφανειακά, σε βάθος κάτω του μισού μέτρου (0,5 m) διατηρείται συνήθως υγρό, ανεξαρτήτως εποχής. Στον πίνακα 1.9.2, που ακολουθεί, καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της αντίστασης του εδάφους ανάλογα την περιεκτικότητα υγρασίας.

Περιεκτικότητα σε υγρασία (% κατά βάρος)	Ειδική αντίσταση (Ωm) Άνω στρώμα	Ειδική αντίσταση (Ωm) Κάτω στρώμα
0,0	$10.000 \cdot 10^3$	$10.000 \cdot 10^3$
2,5	2500	1500
5,0	1650	430
10,0	530	220
15,0	210	130
20,0	120	100
30,0	100	80

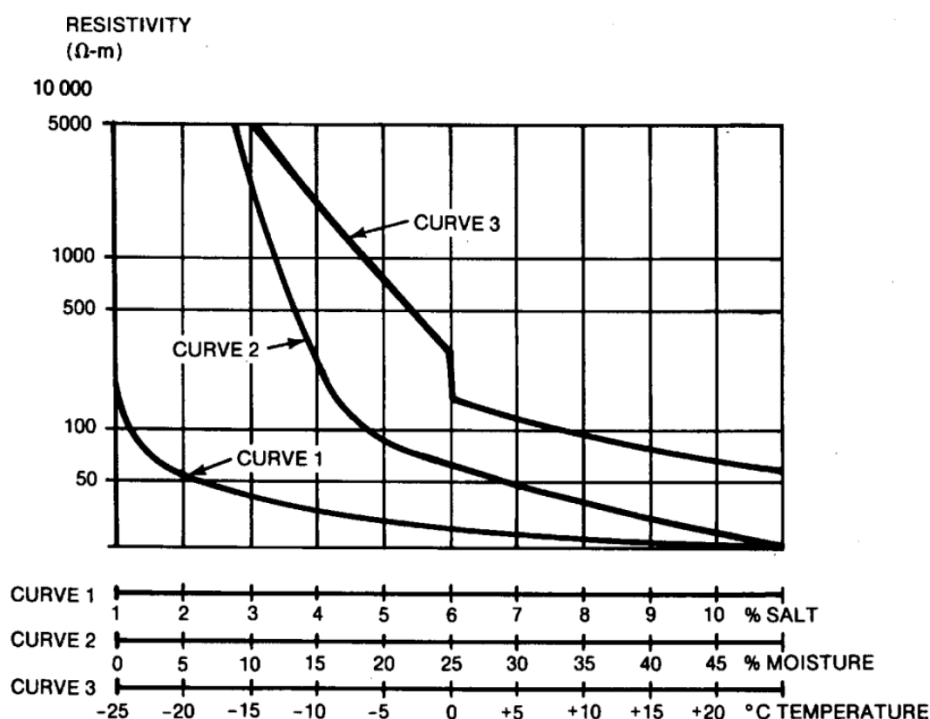
Πίνακας 1.9.2: Επίδραση της υγρασίας στην ειδική αντίσταση εδάφους [18].

- ❖ **Περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα στο νερό.** Η υγρασία του εδάφους, εμπλουτισμένη με διάφορα φυσικά συστατικά, μπορεί να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη και να συμβάλει έτσι σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Τα συστατικά αυτά μπορεί να είναι χλωριούχο νάτριο (NaCl), θεικό μαγνήσιο (MgSO_4), θεικός χαλκός (CuSO_4), ή χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2). Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση σε σχέση με την τιμή που αυτή έχει όταν το νερό είναι απιονισμένο. Έχει παρατηρηθεί ότι η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών αλλά προερχόμενων από διαφορετικές περιοχές, διαφέρει σημαντικά. Αυτό μας φανερώνει, ότι διαφορετικά είδη αλάτων εμφανίζουν διαφορετική επίδραση στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Ωστόσο, ο γενικός κανόνας που ισχύει είναι ότι η ειδική αντίσταση μειώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το περιεχόμενο σε άλατα.

Προστιθέμενα άλατα % (δια το βάρος υγρασίας)	Ειδική αντίσταση εδάφους (Ωm)
0,0	107
0,1	18
1,0	4,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Πίνακας 1.9.3: Επίδραση διαλυμένων αλάτων, στην ειδική αντίσταση εδάφους [19].

❖ **Θερμοκρασία.** Ακόμα ένας παράγοντας που προκαλεί διακύμανση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, είναι οι εποχιακές θερμοκρασιακές μεταβολές και κυριότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό επιδρά στην τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Συνεπώς, δεδομένου του μεγάλου θερμοκρασιακού συντελεστή της ειδικής αντίστασης του νερού, η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει την ειδική αντίσταση του. Σημειώνεται ότι παρατηρείται μείωση της ειδικής αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αναλυτικότερα, η ειδική αντίσταση του εδάφους, για εύρος θερμοκρασίας αυτού από 25°C έως και 0°C, αυξάνεται κλιμακωτά με την μείωση της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση πτώσης της θερμοκρασία του εδάφους κάτω από τους 0°C τότε συνεπάγεται ταχεία αύξηση στην ειδική αντίσταση του εδάφους, γεγονός το οποίο εξηγεί την πολύ υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης του παγωμένου εδάφους. Για την αντιμετώπιση αυτού του ανεπιθύμητου γεγονότος, τα ηλεκτρόδια γείωση συνηθίζεται να θάβονται σε μεγάλο βάθος, ούτως ώστε η επίδραση των παραπάνω διακυμάνσεων στην αποτελεσματικότητα της γείωσης να ελαχιστοποιείται.



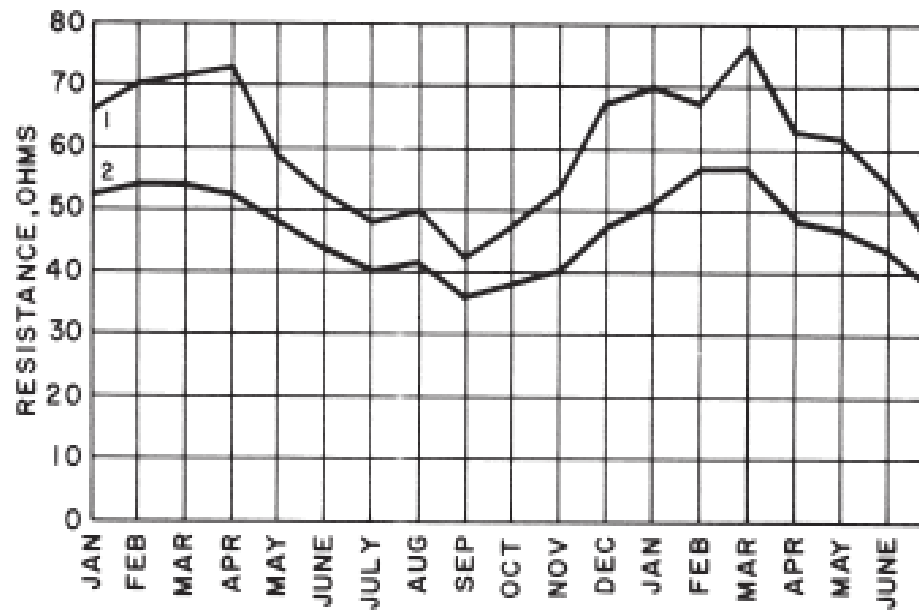
Εικόνα 1.9.1: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα (CURVE 1), της υγρασίας (CURVE 2) και της θερμοκρασίας (CURVE 3) [1]

Στο Σχήμα 1.9.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει των προαναφερθέντων παραγόντων: περιεκτικότητα εδάφους σε άλατα, υγρασίας και θερμοκρασίας.

Θερμοκρασία (°C)	Ειδική αντίσταση εδάφους (ρ) (Ωm)
20	72
10	99
0 «νερό»	138
0 «πάγος»	300
-5	790
-15	3300

Πίνακας 1.9.4: Επίδραση θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση εδάφους [20].

- ❖ **Μέγεθος κόκκων.** Τόσο το μέγεθος των κόκκων, όσο και η ύπαρξη κόκκων διαφορετικών μεγεθών, επιδρά σημαντικά στην διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης τους εδάφους. Συγκεκριμένα, η αύξηση της ειδικής αντίστασης είναι ανάλογη με το μέγεθος των κόκκων. Επίσης, το μέγεθος των κόκκων, 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 [16]. Στην περίπτωση που το μέγεθος των κόκκων ποικίλει, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγάλων σε μέγεθος κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους κόκκους και έτσι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται. Έχει επίσης αποδειχθεί, ότι η τιμή της ειδικής αντίστασης μεταβάλλεται από τον βαθμός συμπίεσης του εδάφους, δηλαδή πιο συμπαγείς δομές εδάφους παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης.
- ❖ **Ένταση ηλεκτρικού πεδίου.** Τέλος, η αναπτυσσόμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου η οποία δημιουργείται από το ηλεκτρόδιο γείωσης όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα, επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η τιμή αυτή είναι συνήθως της τάξης των μερικών εκατοντάδων kV/m αν και διαφέρει ανάλογα με το είδος του εδάφους,. Σε περίπτωση που σε μια περιοχή του εδάφους η τιμή αυτή ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο, τότε εκδηλώνονται ηλεκτρικά τόξα με αποτέλεσμα τη μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα τόξα αναπτύσσονται μέσα στη γη, αυξάνουν το ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου και εκτείνονται μέχρι το σημείο στο οποίο η πεδιακή ένταση μειώνεται σε τιμές τις οποίες το υλικό του εδάφους μπορεί να αντέξει. Στον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους παραμένει αμετάβλητη. Αξίζει επίσης, να σημειωθεί ότι υπάρχει ένα όριο πυκνότητας ρεύματος, περίπου 200A/m² το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπεραστεί. Η υπέρβαση του ορίου της τιμής, τόσο της έντασης όσο και της διάρκειας του ρεύματος, θα προκαλέσει ξήρανση του εδάφους και ως άμεση συνέπεια θα επιφέρει αύξηση της αντίστασης του.



Εικόνα 1.9.2: Ενδεικτική μεταβολή της αντίστασης γείωσης κατά τη διάρκεια του έτους, ενός ηλεκτροδίου σε πετρώδες έδαφος αργίλου. Το ηλεκτρόδιο της καμπύλης 1 είναι σε βάθος μικρότερο από ότι το ηλεκτρόδιο της καμπύλης 2 [21].

Κεφάλαιο 2

Βασικές αρχές σχεδιασμού συστημάτων γείωσης

2.1 Γενικές αρχές

Σκοπός της σχεδίασης ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης είναι η διασφάλιση της ακεραιότητας του προσωπικού που βρίσκεται εντός του υποσταθμού και γύρω από αυτόν καθώς επίσης και η προστασία του εξοπλισμού του προς γείωση χώρου, τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες σφάλματος.

Όταν ένα σφάλμα λαμβάνει χώρα η ροή του ρεύματος προς τη γη αυξάνεται, δημιουργώντας ανυψώσεις δυναμικού στην επιφάνεια της γης, ικανές να προκαλέσουν κίνδυνο ηλεκτροπληξίας σε άτομο που βρίσκεται στην περιοχή. Ωστόσο επικίνδυνες τάσεις που κρύβουν κινδύνους, δύναται να αναπτυχθούν ανάμεσα σε γειωμένες κατασκευές ή περιβλήματα εξοπλισμών και της κοντινής γης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μία σωστή σχεδίαση γείωσης πρέπει να πληροί δύο αντικειμενικές προϋποθέσεις [1]:

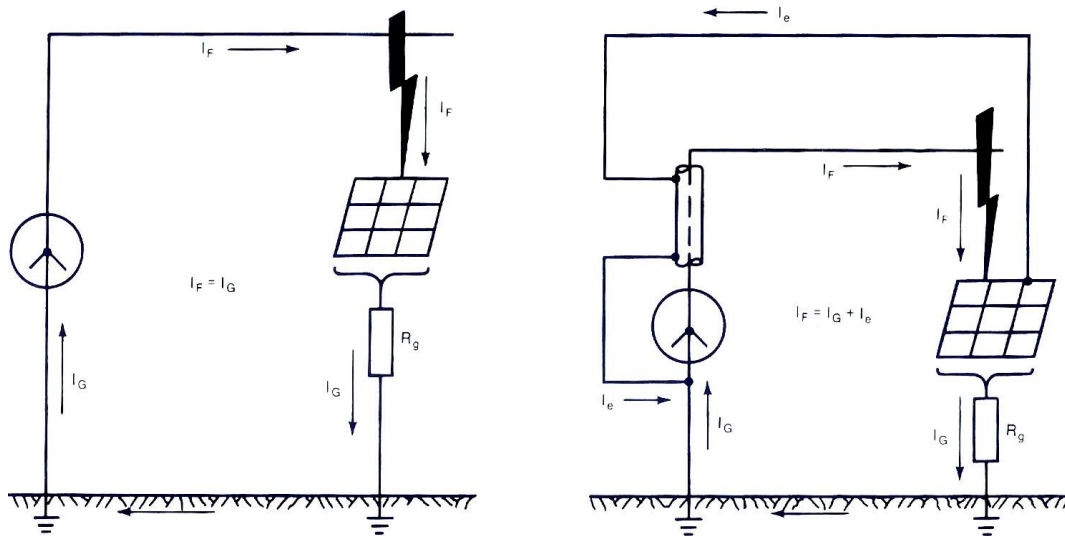
1. Προσφορά των απαραίτητων μέσων ώστε να διασφαλίζει την μεταφορά των ρευμάτων στην γη, τόσο κάτω από φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας όσο και υπό συνθήκες σφάλματος, χωρίς να δημιουργούνται υπερβάσεις στα λειτουργικά όρια του εξοπλισμού και επίδραση στην συνέχεια της λειτουργίας της.
2. Διασφάλιση της μη έκθεσης σε κίνδυνο από θανατηφόρο ηλεκτροσόκ, ενός ατόμου που βρίσκεται σε εγγύτητα με τις εγκαταστάσεις γείωσης.

Μια πρακτική προσέγγιση για ασφαλή γείωση, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και προσπαθεί να ελέγξει την αλληλεπίδραση δύο συστημάτων γείωσης :

1. Την κατασκευασμένη γείωση (σκόπιμη), αποτελούμενη από ηλεκτρόδια γείωσης, θαμμένα σε κάποιο βάθος, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.
2. Την τυχαία γείωση, η οποία δημιουργείται όταν ένα άτομο εκτίθεται σε ένα βαθμιαίο δυναμικό πέριξ των εγκαταστάσεων γείωσης.

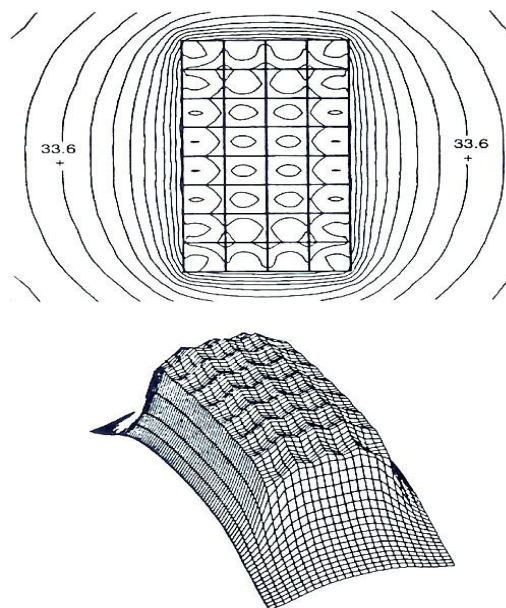
Συνεπώς, με την σωστή και αποτελεσματική σχεδίαση και εγκατάσταση του, επιτυγχάνεται η παροχή διόδου στο ηλεκτρικό ρεύμα προς τη γη, τόσο σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας (κανονικές και σφάλματος) χωρίς να προκαλείται υπέρβαση των ορίων λειτουργίας του εξοπλισμού του υποσταθμού και προστατεύοντας την ανθρώπινη ζωή από τον κίνδυνο έκθεσης σε ηλεκτροπληξία. Η προστασία του εξοπλισμού επιτυγχάνεται με την απομόνωση του ρεύματος σφάλματος, το οποίο εξασφαλίζεται από

την σωστή λειτουργία των συσκευών ασφάλειας της εγκατάστασης, οι οποίες ελέγχουν τις ανυψώσεις δυναμικού και εξαρτώνται από την επιλογή κατάλληλου πλέγματος γείωσης.



Εικόνα 2.1.1: Ισοδύναμο περίγραμμα ενός τυπικού πλέγματος γείωσης με ή χωρίς ράβδους γείωσης [1].

Κατά την διάρκεια ενός σφάλματος εμφανίζεται ροή ρεύματος προς την γη, η οποία είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη δυναμικών μέσα και γύρω από τον υποσταθμό. Στην Εικόνα 2.2.1 παρουσιάζονται τα δυναμικά που αναπτύσσονται υπό συνθήκες ενός τυπικού σφάλματος σε ένα απλό, ορθογώνιο πλέγμα γείωσης, τοποθετημένο σε έναν υποσταθμό με ομοιογενοποιημένο έδαφος.



Εικόνα 2.1.2: Αναπτυσσόμενα δυναμικά σε συνθήκες σφάλματος σε ορθογώνιο πλέγμα γείωσης [22].

Ακολούθως απαριθμούνται οι συνθήκες στις οποίες αν τεθεί ένα άτομο είναι ικανό να υποστεί ηλεκτροπληξία:

1. Μεγάλο ρεύμα σφάλματος ως προς τη γη, συγκριτικά με την περιοχή που καλύπτει το σύστημα γείωσης και την αντίσταση του ως προς την άπειρη γη.
2. Υψηλές κλίσεις δυναμικού στην επιφάνεια, οι οποίες επιτρέπονται από την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους και την κατανομή των ρευμάτων γης.
3. Στάση του ανθρώπινου σώματος τέτοια που επιτρέπει την γεφύρωση σημείων με μεγάλη διαφορά δυναμικού.
4. Απουσία αντίστασης επαφής ή άλλης αντίστασης σε σειρά με το ανθρώπινο σώμα, ικανής να περιορίσει το ρεύμα που διαρρέει το σώμα σε μία ασφαλή τιμή, παρουσία των συνθηκών 1. και 2.
5. Διάρκεια σφάλματος και ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ανθρώπινου σώματος, χρόνο ικανό να προκαλέσει σοβαρό τραυματισμό ή ακόμα και θάνατο.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω διαπιστώνεται πόσο καίριας σημασίας είναι ο σωστός σχεδιασμός και κατ' επέκταση η κατασκευή του πλέγματος γείωσης μίας εγκατάστασης ή ενός υποσταθμού, καθώς με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η σωστή γείωση της εγκατάστασης. Ως απόρροια αυτού παρέχεται η ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού και του εξοπλισμού καθώς επίσης και καθίσταται δυνατή η συνέχιση της παροχής υπηρεσιών.

Το σύστημα γείωσης πρέπει να συνδυάζει όλα τα είδη γειώσεων προστασίας και λειτουργίας, ώστε να εξασφαλίζει πλήρη προστασία έναντι των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής που μπορεί να αναπτυχθούν σε περίπτωση σφάλματος, αλλά και χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης για την ασφαλή διοχέτευση προς τη γη των ρευμάτων σφάλματος.

Για την σωστή υλοποίηση ενός συστήματος γείωσης οι κάτωθι παράμετροι πρέπει να πληρούνται:

1. Τα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να είναι ισοκατανεμημένα σε όλο το πλέγμα γείωσης ώστε να επιτυγχάνεται ο έλεγχος των αναπτυσσόμενων βηματικών δυναμικών και δυναμικών επαφής.
2. Όλα τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη του υποσταθμού θα πρέπει να είναι συνδεδεμένα με την γη.
3. Ύπαρξη μίας διαδρομής για την διέλευση του ρεύματος σφάλματος, το οποίο δεν θα προκαλεί καμία θερμική ή μηχανική βλάβη στον συνδεδεμένο εξοπλισμό και θα προστατεύει τη συνέχεια της λειτουργίας αυτού.
4. Ύπαρξης σύνδεσης των ουδέτερων των μετασχηματιστών, μέσω μίας σύνθετης αντίστασης με στόχο τον περιορισμό του μεγέθους του ρεύματος σφάλματος.
5. Ελαχιστοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών μεταξύ των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων συστημάτων, όπως καλώδια ελέγχου και επικοινωνίας ή αγωγών.

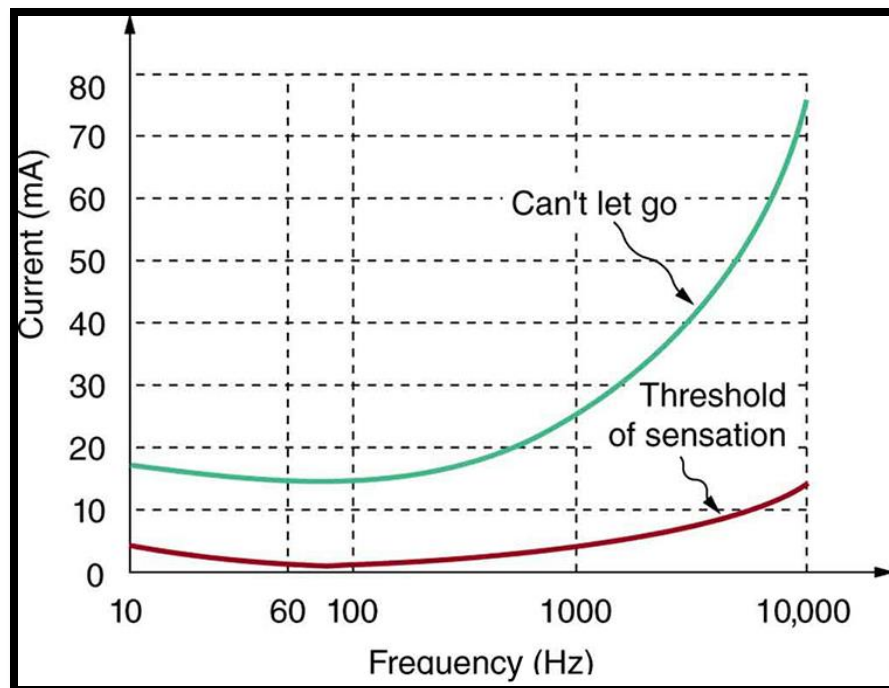
Το κεφάλαιο είναι μια επισκόπηση του θέματος, που ασχολούνται κυρίως με τα όρια του σχεδιασμού και τη γενική διαδικασία που ακολουθείται για να σχεδιάσει ένα σύστημα ηλεκτροδίων.

2.2 Εύρος ανοχής στο ρεύμα

Οι επιδράσεις του ηλεκτρικού ρεύματος όταν αυτό χτυπά ένα άτομο και διαπερνά τα ζωτικά όργανα ενός ανθρώπινου σώματος εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες, με κυριότερους την διάρκεια, το μέγεθος και την συχνότητα του ρεύματος σφάλματος. Η πιο επικίνδυνη περίπτωση μια τέτοιας έκθεσης είναι μια καρδιακή συνθήκη η οποία είναι γνωστή ως κοιλιακή μαρμαρυγή και έχει ως αποτέλεσμα την άμεση διακοπή της κυκλοφορίας του αίματος. Ακολουθώς αναλύονται συνοπτικά οι παραπάνω επιπτώσεις.

2.2.1 Επίδραση της συχνότητας ρεύματος σφάλματος

Επικίνδυνα ρεύματα για την σωματική ακεραιότητα του ανθρώπου, τα οποία μπορούν να αποβούν θανάσιμα αποτελούν αυτά που έχουν συχνότητες 50 Hz ή 60Hz και τιμή περίπου 0,1 A. Σύμφωνα με έρευνες έχει αποδειχθεί ότι το ανθρώπινο σώμα, μπορεί να ανεχτεί συχνότητες γύρω από τα 25 Hz και 5 φορές υψηλότερα άμεσα ρεύματα. Σε μεγαλύτερα εύρη συχνοτήτων, 3000Hz έως 10.000 Hz, το ανεκτό όριο έντασης ρεύματος ανεβαίνει σημαντικά [23].



Εικόνα 2.2.1: Διάγραμμα συχνοτήτων και έντασης ρεύματος σφάλματος [24].

2.2.2 Επίδραση της διάρκειας και της έντασης του ρεύματος σφάλματος

Όταν ένα ρεύμα τάξης 1 mA διαπερνά ένα άτομο, μπορεί να προκαλέσει σε αυτό, ένα ελαφρύ μυρμήγκιασμα στα χέρια ή στα δάχτυλα του. Επίσης, ρεύματα τάξεως 1 – 6 mA, ενώ προκαλούν δυσφορία και δυσάρεστη αίσθηση, όταν διαπερνούν το ανθρώπινο σώμα, δεν μειώνουν την ικανότητα του ατόμου να ελέγξει τις κινήσεις του [24].

Ρεύματα εύρους μεγέθους 9 – 25 mA, είναι επώδυνα για τον άνθρωπο και μπορεί να είναι δύσκολο ή και αδύνατο για το άτομο να ελέγξει τις κινήσεις του. Μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων, προκαλούν μυϊκές συσπάσεις οι οποίες δύναται να καταστήσουν ακόμα και την αναπνοή δύσκολη. Αυτές οι επιδράσεις δεν είναι μόνιμες και χάνονται όταν το ρεύμα διακόπτεται. Ωστόσο υπάρχουν και περιπτώσεις όπου οι προκληθείσες συσπάσεις είναι πολύ σοβαρές και η αναπνοή έχει σταματήσει για λεπτά αντί για δευτερόλεπτα.

Όταν ρεύματα τάξεως 60 – 100 mA χτυπήσουν ένα άτομο, προκαλούν κοιλιακής μαρμαρυγή, παύση δηλαδή του καρδιακού ρυθμού, ή και πιθανή αναστολή του αναπνευστικού συστήματος και πρόκληση σοβαρού τραυματισμού ή ακόμα και θανάτου [25].

Με τον σωστό και προσεκτικό σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης το οποίο μπορεί να περιορίσει τα ρεύματα σφάλματος (ηλεκτροπληξία) κάτω από αυτή την τιμή, ο τραυματισμός ή ο θάνατος των ατόμων που εκτίθενται σε αυτά, μπορεί να αποφευχθούν.

2.2.3 Επίδραση της ταχύτητας καθαρισμού του ρεύματος σφάλματος

Η ταχύτητα καθαρισμού του σφάλματος είναι καίριας σημασίας για δύο λόγους.

- Η πιθανότητα έκθεσης σε ηλεκτρικό σοκ μειώνεται θεαματικά όταν λαμβάνει χώρα ένα γρήγορο από άποψη χρόνου καθαρισμού, σφάλμα σε αντίθεση με περιπτώσεις στις οποίες τα ρεύματα σφάλματος παραμένουν για αρκετά λεπτά ή πιθανόν και ώρες.
- Μετά από πολυάριθμες δοκιμές έχει αποδειχθεί ότι η πιθανότητα ενός σοβαρού τραυματισμού ή ακόμα και θανάτου μειώνεται θεαματικά σε περιπτώσεις όπου η διάρκεια της ροής ρεύματος διαμέσου του ανθρώπινου σώματος είναι αρκετά σύντομη.

2.3 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους

Για το σωστό σχεδιασμό και την κατασκευή ενός συστήματος γείωσης μίας εγκατάστασης είναι απαραίτητη η γνώση της δομής του εδάφους στο οποίο πρόκειται να χωροθετηθεί η υπό προστασία εγκατάσταση. Με τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της δομής του εδάφους, όπως την απαρίθμηση του πλήθους των στρωμάτων στα οποία μπορεί να διαχωριστεί το έδαφος καθώς, το βάθος και την ειδική

αντίσταση καθενός από αυτά, όπως επίσης και του μεγέθους του ρεύματος σφάλματος (kA) επιτυγχάνεται η σχεδίαση ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης με το ελάχιστο κόστος κατασκευής.

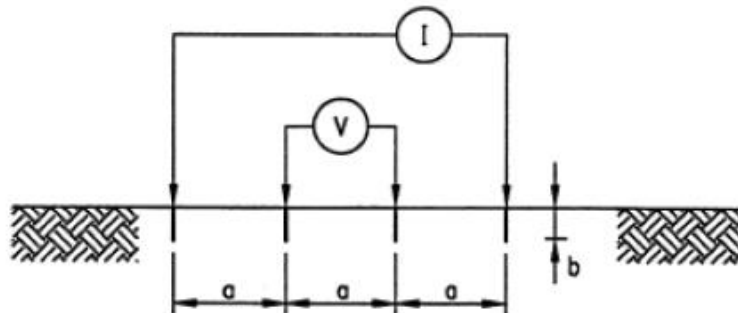
Τα δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα εδάφους είναι το ομοιογενές, το οποίο χρησιμοποιείται για εδάφη με ομοιόμορφη ειδική αντίσταση ή για τιμές που απέχουν μεταξύ τους ελάχιστα και το διστρωματικό με τη χρήση του οποίου επιτυγχάνεται η καλύτερη προσέγγιση του εδάφους. Το διστρωματικό μοντέλο χωρίζει το έδαφος σε δύο περιοχές διαφορετικής ειδικής αντίστασης, όπου το επιφανειακό επίπεδο είναι ορισμένου πάχους και το κατώτερο επίπεδο θεωρείται άπειρου πάχους [26]. Επίσης, υπάρχει και το πολυστρωματικό μοντέλο το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους συναρτήσει του βάθους παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα [27].

Σύμφωνα με διάφορες μετρήσεις, οι οποίες έχουν διεξαχθεί σε διάφορες περιοχές της χώρας και στοχεύουν στον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους, έχει εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη μία μεθοδολογία ώστε να υπολογιστούν τόσο η ειδική αντίσταση όσο και το βάθος κάθε στρώματος του εδάφους.

Η συνεισφορά της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην διαμόρφωση της τελικής τιμής της αντίστασης γείωσης είναι σημαντικότερη. Για τον υπολογισμό της έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, οι οποίες θα αναφερθούν ονομαστικά, με κυριότερη τη μέθοδο Wenner, η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά:

2.3.1 Μέθοδος Wenner

Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο στην ερευνητική κοινότητα καθώς επηρεάζεται λιγότερο από φαινόμενα αλλοίωσης του σήματος (θόρυβος). Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται χρήση τεσσάρων (4) ηλεκτροδίων τα οποία συνδέονται όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.1.



Εικόνα 2.3.1: Συνδεσμολογία μέτρησης της ειδικής αντίστασης σύμφωνα με την μέθοδο Wenner [1].

Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε ευθεία γραμμή και το ένα ισαπέχει από το άλλο κατά απόσταση a . Τα ηλεκτρόδια εφυτεύονται με το κάτω μέρος τους μερικώς στο έδαφος κατά βάθος b , ενώ το άλλο άκρο συνδέεται στο γειωσόμετρο (μετρητικό όργανο). Ως ένδειξη του οργάνου, δίνεται η φαινόμενη αντίσταση R , η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η διαδικασία που ακολουθείται για την εξαγωγή της τιμής της αντίστασης R παρουσιάζεται στα ακόλουθα βήματα [1]:

1. Μέτρηση του ρεύματος που διαρρέει τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια. Η μέτρηση μπορεί να γίνει και με την χρήση ενός αμπερομέτρου.
2. Μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που εντοπίζεται ανάμεσα στα δύο εσωτερικά ηλεκτρόδια, η οποία μπορεί να γίνει και με την χρήση βολτόμετρου.
3. Ο λόγο της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα δίνει την τιμή της φαινόμενης αντίστασης R .

Με την παραπάνω τιμή και με τον τύπο που δίνεται ακολούθως υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του εδάφους [1]:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.3.1)$$

Όπου :

ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

R η μετρούμενη από την μέθοδο Wenner φαινόμενη αντίσταση σε Ω

a η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά ηλεκτρόδια σε m

b το βάθος στο οποίο φτάνει το θαμμένο άκρο του ηλεκτροδίου σε m

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν $a \gg b$ η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται και η αντίσταση δίνεται από τον προσεγγιστικό τύπο $\rho \cong 2\pi R a$

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

Στις κυριότερες τεχνικές υπολογισμού της ειδικής αντίστασης του εδάφους, εκτός από την μέθοδο Wenner συμπεριλαμβάνονται: η μέθοδος Schlumberger, η μέθοδος των δίπολων, η μέθοδος Lee, ο εναλλασσόμενος σχηματισμός, η τετραγωνική διάταξη και η μέθοδος της αντίστασης γείωσης.

Μία σωστή σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης, απαιτεί την ύπαρξη ως δεδομένο εισόδου, της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αυτό προϋποθέτει κατάλληλη επιλογή για [28]:

1. Τους άξονες μέτρησης, στους οποίους περιλαμβάνονται το πλήθος των μετρήσεων, οι θέσεις και οι αποστάσεις των σημείων.
2. Την επιλογή του έτους κατά το οποίο θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Λόγω των επιδράσεων που έχουν οι καιρικές συνθήκες στην τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους και οι οποίες έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενη παράγραφο, τονίζεται η ανάγκη της διεξαγωγής των μετρήσεων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, οπότε και παίρνει την μέγιστη τιμή της.
3. Τον έλεγχο της αξιοπιστίας του φορέα, που πραγματοποιεί τις μετρήσεις, η οποία αποδεικνύεται με την χρήση των υπηρεσιών διαπιστευμένου εργαστηρίου, διαθέτοντας έμπειρο προσωπικό και χρησιμοποιούντος κατάλληλο διακριβωμένο εξοπλισμό.

2.4 Σχεδίαση συστημάτων γείωσης υποσταθμών

Στοχεύοντας στον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση του συστήματος γείωσης ενός υποσταθμού είναι απαραίτητος ο καθορισμός του προτύπου, σύμφωνα με το οποίο θα γίνει η σχεδίαση και θα προσδιοριστούν τα απαιτούμενα για την προσομοίωση στοιχεία (είδος εδάφους και μορφολογία εδάφους, η συχνότητα των σφαλμάτων, το βάρος του ανθρώπου είτε η κατάσταση της υγείας του, ο προϋπολογισμός που διατίθεται για την σχεδίαση-κατασκευή).

Η διαδικασία που ακολουθείται για τον σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης αποτελείται από τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω [28]:

i. Επιλογή των υποψηφίων θέσεων εγκατάστασης.

Τα κριτήρια τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται για την επιλογή της θέσης του υποσταθμού είναι:

- Μικρή απόσταση (κάτω αν είναι δυνατόν) από την υφιστάμενη γραμμή υψηλής τάσης, έτσι ώστε να μην απαιτείται περιβαλλοντική μελέτη,
- Σωστή χωροθέτηση του έργου η οποία συνεπάγεται επιλογή χώρου κατάλληλου από πλευράς επικινδυνότητας για τους κατοίκους και ταυτόχρονα απομακρυσμένο από αρχαιολογικούς χώρους και τοπία φυσικού κάλλους και ενδιαφέροντος,
- Κατάλληλη τοποτέχνηση του χώρου αποφεύγοντας αντιδράσεις κατοίκων των γύρω περιοχών λόγω οπτικής ρύπανσης,
- Οικόπεδο με ικανή έκταση ώστε να αναπτυχθεί ο υποσταθμός, χαμηλή ειδική αντίσταση και μικρές απαιτήσεις σε χωματουργικές εργασίες.

ii. Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με κατάλληλη μέθοδο, συνήθως προτιμάτε η μέθοδος Wenner για κάθε υποψήφια θέση εγκατάστασης.

Για κάθε μία από τις επιλεγμένες θέσεις εγκατάστασης, με τη χρήση της μεθόδου Wenner, μετράται η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για όλους τους άξονες.

Σύμφωνα με την προδιαγραφή της Δ.Ε.Η [29] για τον σχεδιασμό γειώσεων υποσταθμών υψηλής τάσης, απαιτούνται τρεις έως πέντε άξονες ανάλογα με τις μετρούμενες τιμές της ειδικής αντίστασης ενώ η επιλογή των αξόνων μπορεί να γίνεται 1) στις πλευρές, 2) στις διαγώνιους και 3) με «τυχαίο» τρόπο, ώστε να υπολογίζονται όλες οι αλλαγές του εδάφους στο μετρούμενο οικόπεδο. Επίσης, πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους με την μέθοδο Wenner, σε κάθε άξονα και σε αποστάσεις 2, 4, 6, 12 και 16 cm ενώ αν στις μετρήσεις παρατηρούνται μεγάλες αυξομειώσεις και διαφορές προβλέπεται η λήψη μετρήσεων επιπλέον στα 20 και τα 24cm.

iii. Υπολογισμός του μοντέλου εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί.

Σύμφωνα με τα δεδομένα τα οποία αποκτήθηκαν από τις μετρήσεις που έγιναν στο προηγούμενο βήμα (τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για όλες τις θέσεις) εξάγεται το συμπέρασμα για το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί. Αναλυτικότερα, για κάθε απόσταση μέτρησης υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που πάρθηκαν για όλους τους άξονες και αυτός λαμβάνεται ως τιμή. Το έδαφος προσημειώνεται στις περισσότερες περιπτώσεις, ως μονοστρωματικό ή διστρωματικό χωρίς να αποκλείεται και η ύπαρξη περισσότερων στρωμάτων. Βασικό κριτήριο στην επιλογή του μοντέλου του εδάφους που θα επιλεγεί, είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς των μετρούμενων τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αυτών που μας δίνει το μοντέλο προσημείωσης. Ο υπολογισμός των παραμέτρων του εδάφους (πλήθος/ ειδική αντίσταση/ πάχος στρωμάτων) μπορεί να γίνει με την χρήση μεθοδολογίας η οποία έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. [31] και στηρίζεται στην χρήση γενετικών αλγορίθμων. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας για τον υπολογισμό της δομής του εδάφους, οι τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους εισάγονται στον επιλύτη RESAP του προγράμματος CDEGS, η παρουσίαση του οποίου θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

iv. Υπολογισμός των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων ασφαλούς βηματικής τάσης και τάσης επαφής.

Για τα δεδομένα που εμφανίζονται στον ελλαδικό χώρο, επιλέγονται οι ακόλουθες τιμές παραμέτρων οι οποίες κατόπιν πολλαπλών μετρήσεων αναπαριστούν τις περισσότερες περιπτώσεις σφαλμάτων [29]:

✚ Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος	0,5 sec
✚ Συχνότητα σφάλματος	50 Hz

Ωστόσο, ανάλογα με το πρότυπο σύμφωνα με το οποίο θέλουμε να εξάγουμε τα ασφαλή επιτρεπτά όρια, επιλέγουμε το σωματικό βάρος ή την πιθανότητα της κοιλιακής μαρμαρυγής. Με αυτές τις παραμέτρους υπολογίζουμε τα ασφαλή επιτρεπτά όρια τόσο βηματικής όσο και τάσεως επαφής για το έδαφος του υποσταθμού. Επίσης, για τα ίδια

δεδομένα υπολογίζεται και τα ασφαλή όρια των τάσεων στην περίπτωση προσθήκης υλικού επιφάνειας (π.χ. χαλίκι ή ασφαλτος) κατάλληλου πάχους (π.χ. 15 ή 10 cm).

v. Καθορισμός της μέγιστης τιμής ρεύματος σφάλματος.

Η προδιαγραφή της Δ.Ε.Η. για τους υποσταθμούς [29] που ανήκουν στο διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας 150kV, υποδεικνύει ότι η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος είναι ίση με 30 kA. Για υποσταθμούς με μία ή περισσότερες πύλες συνυπολογίζεται ο συντελεστής διαίρεσης ρεύματος Sf ο οποίος παίρνει τιμές 0,9 για μία πύλη, 0,8 για δύο πύλες και 0,7 για περισσότερες [29].

vi. Σχεδιασμός τυπικού πλέγματος γείωσης.

Ανάλογα με τις διαστάσεις του οικοπέδου εντός του οποίου θα δημιουργηθεί ο υποσταθμός και το μέγεθος αυτού, σχεδιάζεται ένα τυπικό πλέγμα. Η εξωτερικές διαστάσεις του πλέγματος καθορίζουν κατά κύριο λόγο την τιμή της ειδικής αντίστασης γείωσης. Το τυπικό πλέγμα είναι συνήθως ορθογώνιο διαστάσεων (π.χ. 50m x 100m, 75x100, 75m x 125m). Το πόσο πυκνό ή αραιό θα είναι ένα πλέγμα γείωσης ορίζεται από τον παράγοντα «μάτι» ο οποίος μπορεί να πάρει τιμές 10m, 5m, 3m και ο οποίος καθορίζει την τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων.

vii. Υπολογισμός της αντίστασης γείωσης.

Με την βοήθεια του προγράμματος, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το MALZ του CDEGS, υπολογίζουμε το βέλτιστο μοντέλο του εδάφους που αντιστοιχεί στις μετρήσεις μας, την τιμή της αντίστασης γείωσης του πλέγματος.

viii. Υπολογισμός των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής σε κάθε σημείο στην επιφάνεια του εδάφους στο χώρο που καλύπτει το πλέγμα γείωσης.

Με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το MALZ του CDEGS, υπολογίζουμε τις αναπτυσσόμενες τάσεις, σε όλη την έκταση του υποσταθμού καθώς επίσης και ορισμένο από τον χρήστη χώρο εκτός του υποσταθμού, για το βέλτιστο μοντέλο του εδάφους που αντιστοιχεί στις μετρήσεις μας.

ix. Έλεγχος των τιμών των εξήχθησαν μεγεθών.

Εφόσον σχεδιασθεί το πλέγμα γείωσης, οριστούν οι παράμετροι των δεδομένων εισόδου και εξαχθούν τα δυναμικά και οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε όλη την έκταση του προς γείωση, ακολουθεί ο έλεγχος των αποτελεσμάτων. Για να είναι σωστή και επιτρεπτή η σχεδίαση του συστήματος γείωσης πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

- ✚ Η αντίσταση γείωσης να είναι μικρότερη από 1Ω,

- ✚ Οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής να μην ξεπερνούν τα όρια ασφαλείας, όπως αυτά ορίζονται από το εκάστοτε προς εξέταση Πρότυπο [1].

Σε αυτό το σημείο η ροή των βημάτων διαφέρει ανάλογα με το αν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του βήματος ix. Στην περίπτωση που οι προϋποθέσεις του προηγούμενου βήματος πληρούνται, η σχεδίαση έχει ολοκληρωθεί και προχωράμε στην κατασκευή του συστήματος γείωσης η οποία περιγράφεται από το βήμα xi. Σε αντίθετη περίπτωση, ακολουθούν βελτιωτικές αλλαγές οι οποίες περιλαμβάνουν:

- x. Βελτιώσεις συστήματος γείωσης.
 1. Αύξηση της επιφάνειας του συστήματος γείωσης.
 2. Πύκνωση του πλέγματος γείωσης με την μείωση του «ματιού».
 3. Προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων,
 4. Προσθήκη χώματος με χαμηλή ειδική αντίσταση ή βελτιωτικών εδάφους.
 5. Χρήση κατάλληλου υλικού επιφανείας το οποίο τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από το σύστημα γείωσης. Συνήθως, χρησιμοποιείται χαλίκι και ως στόχο έχει την αλλαγή στα όρια ασφαλείας.
 6. Αλλαγή στην περιφραξη (γείωση ή υλικό κατασκευής).

Εφόσον το σύστημα γείωσης χρήζει βελτιωτικών αλλαγών απαιτείται η επανάληψη των σχεδιαστικών βημάτων από το xii και έπειτα.

- xi. Κατασκευή του συστήματος γείωσης.

Κατασκευάζεται το σύστημα γείωσης του υποσταθμού σε πλήρη συμφωνία με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα βήματα προσομοίωσης και ελέγχου αυτού. Σε αυτό το σημείο περιλαμβάνεται και η πραγματοποίηση επιπλέον βελτιώσεων όπου αυτές κριθούν τεχνικά αναγκαίες και εφικτές.

- xii. Μέτρηση της αντίστασης γείωσης και των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

Αυτό το βήμα αποτελεί το τελευταίο στάδιο στην σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης (Εικόνα 2.4.1) και στο οποίο γίνεται ο έλεγχος κάποιων κρίσιμων παραμέτρων, οι οποίες πρέπει να πληρούνται [31].

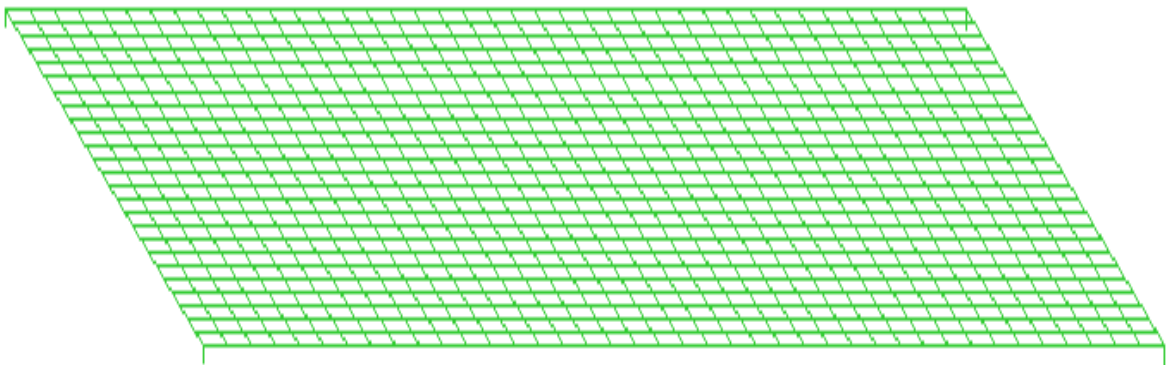
Αναλυτικότερα, η ελάχιστη τιμή του εγγεόμενου ρεύματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 50 A. Επιπρόσθετα, η απόσταση από την έγχυση του ρεύματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 6,5 φορές η μέγιστη διάσταση του συστήματος γείωσης. Με την κατάλληλη χρήση των στηλών της μέσης τάσης μπορούμε να φτάσουμε σε απόσταση της τάξεως των αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Ένα ακόμα σημαντικό γεγονός που πρέπει να επιτευχθεί, είναι η χαμηλή αντίσταση του σημείου όπου θα γίνει η έγχυση ρεύματος, το οποίο εξασφαλίζεται είτε με την χρήση αρκετών κατακόρυφων ηλεκτροδίων, είτε με την χρήση μεταλλικών πλακών. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί, ότι η μείωση της

αντίστασης επιτυγχάνεται και με την προσθήκη νερού. Αυτό όμως προϋποθέτει την διαρκεί και παράλληλη προσθήκη νερού, καθ' όλη την διάρκεια έγχυσης ρεύματος, ειδάλως λόγω θέρμανσης, θα μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης και κατά συνέπεια και η τιμή του εγγεόμενου ρεύματος.

Επίσης, κρίσιμης σημασίας και απαραίτητη προϋπόθεση για το σωστό σχεδιασμό είναι οι βηματικές τάσεις, οι τάσεις επαφής και οι τάσεις μέταλλο με μέταλλο να είναι μικρότερες από τα ανώτερα ασφαλή όρια, όπως αυτά προσδιορίζονται από το εκάστοτε Πρότυπο.

Τελειώνοντας, αξίζει να αναφερθεί ότι πρέπει να αποδεικνύεται η αξιοπιστία των μετρήσεων. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί από την εμπειρία του εργαστηρίου π.χ. ΔΕΗ, από διαπιστεύσεις που διαθέτει το εργαστήριο ή από προηγούμενη συμμετοχή σε ανάλογες εργαστηριακές ή συγκριτικές μελέτες.

Ο πίνακας που ακολουθεί (Πίνακας 2.4.1) αποτελεί μία συνοπτική παρουσίαση των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου και τα αποτελέσματα εξόδου τα οποία προκύπτουν από τους υπολογισμούς ενός συστήματος γείωσης υποσταθμού.



Εικόνα 2.4.1: Πλέγμα γείωσης [CDEGS].

Δεδομένα εισόδου

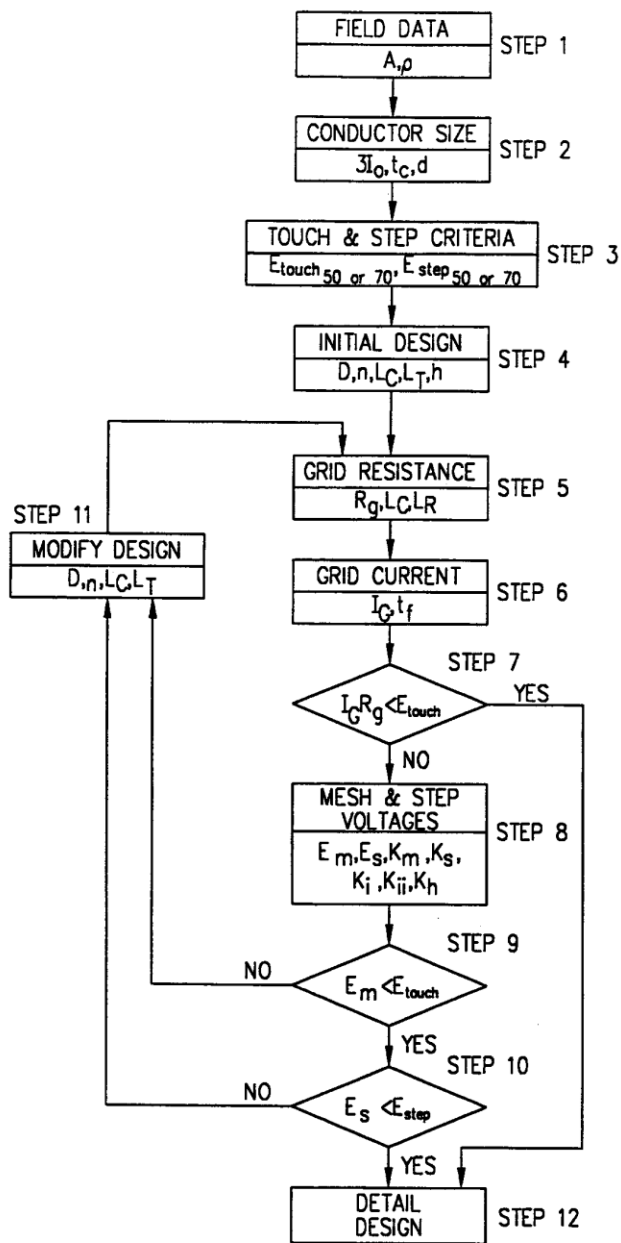
Μήκος πλέγματος (m)
Πλάτος πλέγματος (m)
Βάθος πλέγματος γείωσης (m)
Ένταση ρεύματος σφάλματος (A)
Μέγιστη διάρκεια σφάλματος (τυπικά 1s)
Μέση διάρκεια σφάλματος (τυπικά 0,2s)
Ειδική αντίσταση εδάφους (Ωm)
Ειδική αντίσταση επιπρόσθετου στρώματος, συνήθως χαλίκι (Ωm)
Βάθος επιπρόσθετου στρώματος (m)
Αντίσταση γείωσης, αν αυτή είναι γνωστή
Αριθμός παράλληλων αγωγών γείωσης
Αριθμός κάθετων αγωγών γείωσης
Μήκος κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης

Αποτελέσματα υπολογισμών

Όρια επιτρεπτών τάσεων, επαφής και βηματική (V)
Όρια επιτρεπτών τάσεων, επαφής και βηματική με την προσθήκη επιφανειακού στρώματος- χαλίκι (V)
Μέγιστη τάση πλέγματος γείωσης (V)

Πίνακας 2.4.1: Δεδομένα εισόδου- εξόδου [1].

Τελειώνοντας αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις μικρών οικοπέδων υποσταθμών, των οποίων η προσπέλαση- πρόσβαση καθίσταται αδύνατη για την εγκατάσταση συστημάτων γείωσης εύλογου μεγέθους, η επίτευξη μίας ικανοποιητικής γείωσης μπορεί συχνά να πραγματοποιηθεί με την εγκατάσταση ταινίας χαλκού στο έδαφος γύρω από την περιφέρεια του υποσταθμού.



Εικόνα 2.4.2: Διάγραμμα ροής για τον σχεδιασμό συστήματος γείωσης [1].

2.5 Βασικές αρχές σχεδιασμού πλέγματος

Το πρώτο βήμα για την θεμελιώδη ανάλυση ενός συστήματος γείωσης με πλέγμα είναι η επιθεώρηση της εγκατάστασης του υποσταθμού, η οποία πραγματοποιείται με τον έλεγχο του σχεδίου της διάταξης του υποσταθμού, μέσα στο οποίο αναφέρονται και απαριθμούνται όλος ο κύριος εξοπλισμός (συσκευές) και οι βασικές δομές [1].

Τα παρακάτω σημεία αποτελούν τα βασικά βήματα στον σχεδιασμό του πλέγματος γείωσης και λειτουργούν ως οδηγοί για την εκκίνηση του σχεδιασμού:

1. Η περίμετρος του υποσταθμού πρέπει να περικλείεται από έναν συνεχόμενο αγωγίμο βρόγχο, ο οποίος θα καλύπτει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια στη περιοχή του υποσταθμού. Αυτό επιφέρει ως φυσικό επακόλουθο, την αποφυγή της συγκέντρωσης υψηλών ρευμάτων και συνεπώς την δημιουργία υψηλών κλίσεων δυναμικού τόσο στην περιοχή του πλέγματος όσο και στις άκρες των προεξεχόντων αγωγών. Με την αύξηση της περιμέτρου που περικλείεται εντός του πλέγματος, μειώνεται η τιμή της σύνθετης αντίστασης αυτού μέχρι μία ορισμένη τιμή για την επιφάνεια.
2. Εντός του βρόχου, οι αγωγοί γείωσης είναι τοποθετημένοι παράλληλα και όπου είναι πρακτικό, κατά μήκος των δομών ή σε σειρά με των εξοπλισμό, ώστε να προσφέρουν μικρού μήκους συνδέσεις γείωσης με στόχο την καλύτερη αντιμετώπιση των σφαλμάτων.
3. Σε ένα τυπικό πλέγμα γείωσης υποσταθμού περιλαμβάνονται αγωγοί γυμνού χαλκού θαμμένοι σε βάθος 0.3 έως 0.5m από την επιφάνεια και σε απόσταση 3m έως 7m μεταξύ τους. Οι διασταυρούμενες συνδέσεις μεταξύ των αγωγών στους κόμβους του πλέγματος πρέπει να είναι σταθερές. Οι ράβδοι γείωσης τοποθετούνται στις γωνίες του πλέγματος και στους κόμβους κατά μήκος της περιμέτρου του και σε βάθος τέτοιο ώστε να εισχωρούν στο στρώμα του εδάφους με τη μικρότερη ειδική αντίσταση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο περιορισμός των απότομων αυξήσεων της τάσης κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος γείωσης. Σε περιπτώσεις όπου έχει επιλεγθεί διστρωματικό, πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους, εδάφη υψηλής ειδικής αντίστασης είναι αναγκαία η τοποθέτηση ράβδων μεγαλύτερου μήκους ή τοποθέτηση αυτών σε περισσότερα σημεία.
4. Το πλέγμα γείωσης θα πρέπει να περιλαμβάνει όλη την έκταση του υποσταθμού και συχνά είναι αναγκαίο να επεκτείνεται και εκτός του περιμετρικού φράχτη του υποσταθμού. Επίσης, απαιτείται η χρήση, πολλαπλών αγωγών γείωσης ή αγωγών μεγαλύτερων διαστάσεων στα σημεία εκείνα όπου παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ρευμάτων, όπως σε σημεία συνδέσεων ουδέτερου-γης γεννητριών ή μετασχηματιστών και σε συστοιχίες πυκνωτών.
5. Ο λόγος των διαστάσεων των πλευρών του ορθογώνιου πλέγματος γείωσης κυμαίνεται συνήθως από 1:1 έως 1:3 εκτός αν με την χρήση μίας ακριβούς υπολογιστικής ανάλυσης προκύπτουν διαφορετικές τιμές λόγων. Η πυκνότητα του πλέγματος δεν εμφανίζει ιδιαίτερη επίδραση στην μείωση της αντίστασης του πλέγματος. Ο κυρίως ρόλος των κάθετων και οριζόντιων αγωγών είναι η επίτευξη ενός ικανοποιητικού ελέγχου των αναπτυσσόμενων δυναμικών επιφανείας. Οι συνδέσεις διασταύρωσης εξασφαλίζουν πολλαπλές διαδρομές στα ρεύματα σφάλματος και συνεπώς ελαχιστοποιούν την πτώση τάσης επάνω στο πλέγμα, και προσφέρουν πλεονασμό γείωσης σε περίπτωση που ένας αγωγός αστοχήσει.

2.6 Βασικές αρχές σχεδιασμού πλέγματος σε δύσκολες περιπτώσεις

Σε περιοχές όπου η αντίσταση του εδάφους είναι πολύ μεγάλη ή ο διαθέσιμος χώρος στον υποσταθμό που διατίθεται για την εγκατάσταση του πλέγματος γείωσης είναι αρκετά περιορισμένος, η επίτευξη ενός συστήματος γείωσης χαμηλής αντίστασης με τη διασπορά των ηλεκτροδίων του πλέγματος σε μεγάλη περιοχή, όπως περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, καθίσταται μη εφικτή. Τέτοιες περιπτώσεις μπορούμε να συναντήσουμε σε βιομηχανικούς υποσταθμούς όπου αυτοί καταλαμβάνουν μόνο ένα τμήμα της περιοχής που θα καταλάμβαναν σε κανονικές συνθήκες. Ο έλεγχος των δυναμικών της επιφάνειας, υπό αυτές τις συνθήκες είναι ιδιαίτερα δύσκολη υπόθεση. Μερικές από τις λύσεις που προτείνονται και εφαρμόζονται είναι οι ακόλουθες [1]:

1. Σύνδεση ή συνδέσεις με απομακρυσμένα πλέγματα γείωσης και κοντινές γειωμένες κατασκευές, ένα συνδυαστικό σύστημα το οποίο να συμπεριλαμβάνει ξεχωριστές εγκαταστάσεις σε κτίρια, υπόγειους θαλάμους, κλπ. Η χρήση απομακρυσμένων ηλεκτροδίων γείωσης απαιτεί προσεκτική μελέτη των μεταφερόμενων δυναμικών, όλων των κρίσιμων σημείων. Μια σημαντική πτώση τάσης μπορεί να δημιουργηθεί ανάμεσα στις τοπικές και απομακρυσμένες εγκαταστάσεις γείωσης, ειδικά όταν πρόκειται για υπερτάσεις υψηλής συχνότητας (κεραυνοί).
2. Χρήση πηγαδιών γείωσης ή ηλεκτροδίων γείωσης θαμμένων σε μεγάλο βάθος.
3. Χρήση διάφορων επιπρόσθετων βελτιωτικών εδάφους καθώς και εφαρμογή κατάλληλων χειρισμών του εδάφους σε συνδυασμό με τους αγωγούς γείωσης και άλλους διασυνδεδεμένους αγωγούς.
4. Χρήση στρωμάτων γείωσης με αγωγούς. Συνίσταται ο συνδυασμός του επιπρόσθετου υλικού επιφάνειας με κατασκευασμένα στρώματα τα οποία θα αποτελούνται από σύρματα σε συνδυασμό με το πλέγμα γείωσης, στοχεύοντας στην εξισορρόπηση του πεδίου του δυναμικού κοντά στην επιφάνεια.
5. Ελεγχόμενη χρήση άλλων διαθέσιμων μεθόδων, όπου δύναται, με στόχο την μείωση της ολικής αντίστασης του συστήματος γείωσης, όπως η σύνδεση στατικών αγωγών και ουδετέρων στο έδαφος. Συνήθως χρησιμοποιούνται μεταλλικά αντικείμενα στην περιοχή του υποσταθμού τα οποία είναι πιστοποιημένα και μπορούν να λειτουργήσουν σαν εφεδρικά ηλεκτρόδια γείωσης, ή ως συνδέσεις με άλλα συστήματα γείωσης.
6. Όπου καθίσταται δυνατή, προτείνεται η τοποθέτηση υλικού χαμηλής αντίστασης σε επαρκή όγκο, σε κοντινή απόσταση με την εγκατάσταση, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα επιπλέον περιφερειακό πλέγμα. Με την σωστή διασύνδεση του περιφερειακού πλέγματος με το κυρίως πλέγμα, επιτυγχάνεται η μείωση της ολικής αντίστασης, καθώς και της ανύψωσης του δυναμικού του πλέγματος γείωσης. Το κοντινό σημείο μπορεί να είναι τοποθεσία απόθεσης υλικού χαμηλής αντίστασης, ή μπορεί να είναι μέρος μια μεγάλης κατασκευής, όπως η μάζα μετόν ενός υδροηλεκτρικού φράγματος.

Κεφάλαιο 3

Κριτήρια Ασφαλείας

3.1 Εισαγωγή

Από τις απαρχές της βιομηχανίας της ηλεκτρικής ενέργειας, η ασφάλεια του προσωπικού μέσα και γύρω από τις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ένα κρίσιμο ζήτημα. Ένας μηχανισμός, που επηρεάζεται την ασφάλεια του προσωπικού, είναι η αύξηση των δυναμικών των γειωμένων δομών κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος ρεύματος και ως εκ τούτου η πιθανότητα τα άτομα να έρθουν σε επαφή με αυτές τις δομές, θέτοντας τον εαυτό τους σε τάσεις.

Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα συχνότητας 50 ή 60 Hz, διέρχεται μέσω του ανθρώπινου σώματος, ως αποτέλεσμα της τυχαίας συμπεριφοράς μίας γειωμένης δομής κάτω από αντίξοες συνθήκες, πρέπει να είναι μεγέθους και διάρκειας κάτω από τις τιμές εκείνες που προκαλούν κοιλιακή μαρμαρυγή.

Τα πλέγματα γείωσης των υποσταθμών έχουν κατασκευαστεί με στόχο την διασφάλιση της μη ύπαρξης επικίνδυνων ηλεκτρικών τάσεων εντός ή εκτός της περιμέτρου ενός υποσταθμού τόσο κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας όσο και κατά την διάρκεια ενός σφάλματος. Είναι σημαντικό να υπάρχει ένα αποτελεσματικό πλέγμα γείωσης, ώστε τα ρεύματα σφάλματος να διοχετεύονται αποτελεσματικά στην γη.

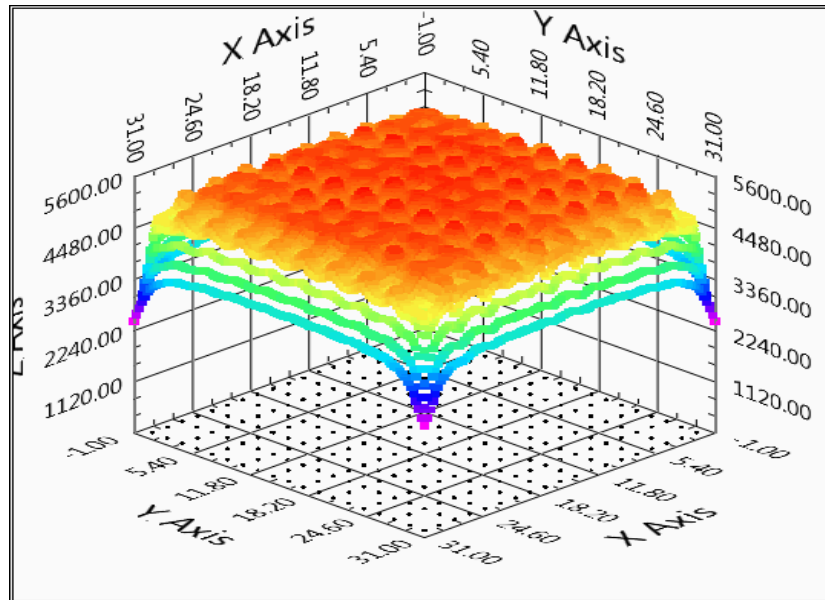
Ένας ασφαλές σχεδιασμένο πλέγμα γείωσης σε έναν υποσταθμό, έχει τη δυνατότητα να παρέχει δρόμο διαφυγής προς τη γη, σε ρεύματα σφάλματος χωρίς να υπερβαίνει οποιοδήποτε όριο λειτουργίας του εξοπλισμού. Επίσης, έχει την ικανότητα να παρέχει σε κάθε άνθρωπο που βρίσκεται πλησίον της γειωμένης περιοχής, πλήρη προστασία από επικίνδυνα ρεύματα ικανά να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία, τόσο κάτω από κανονικές συνθήκες όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων.

Με την πάροδο των χρόνων και μετά από πολυάριθμες έρευνες σχετικά με τις επιπτώσεις του ηλεκτρικού ρεύματος στον άνθρωπο, έχουν συσταθεί όρια ασφαλείας και έχουν αναπτυχθεί πρότυπα τα οποία παρέχουν τις ανώτερες επιτρεπόμενες τιμές των ρευμάτων που μπορούν να διαπεράσουν το ανθρώπινο σώμα για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας. Δύο τέτοια πρότυπα είναι IEEE Std 80-2013 [1] και το IEC 479-1 [39].

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι κίνδυνοι για την ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια ενός σφάλματος, θα δοθούν οι κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό ασφαλών συστημάτων γείωσης με χρήση μαθηματικών μοντέλων, θα αναλυθούν, και θα συγκριθούν τα κριτήρια ασφαλείας

αναφορικά με τα ανεκτά όρια τάσης όπως αυτά παρουσιάζονται από το IEEE [1] και το IEC [39] Πρότυπο, αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος γείωσης, το ρεύμα που ρέει στη γη προκαλεί αύξηση δυναμικού μέσα και γύρω από τον υποσταθμό. Η σχεδίαση ενός σωστού πλέγματος γείωσης πρέπει να διασφαλίζει ότι οι μέγιστες αυξήσεις δυναμικού και οι αναπτυσσόμενες τάσεις μεταξύ των γειωμένων δομών δεν θα ελλοχεύουν κινδύνους. Στην εικόνα 2.1.1 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα μίας προσομοίωσης σε υπολογιστή στην οποία δείχνεται η επιφανειακή αύξηση δυναμικού ενός πλέγματος γείωσης, διαστάσεων 30x30 m που αποτελείται από 4 στρώματα.



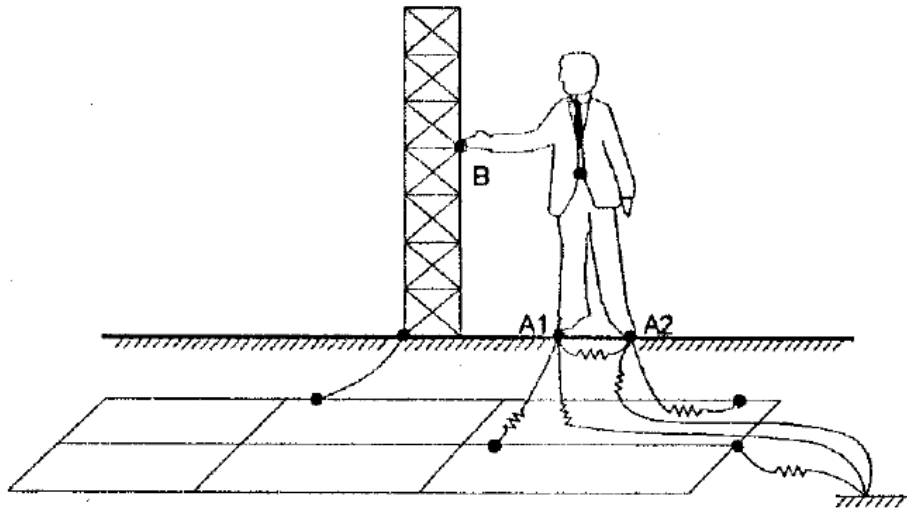
Εικόνα 3.1.1: Δυναμικό επιφάνειας (z-άξονας). Βάθος ταφής 0,5 m, Αντίσταση άνω στρώματος $\rho_1=1000 \Omega\text{m}$, Αντίσταση κάτω στρώματος εδάφους $\rho_2=100 \Omega\text{m}$, Ρεύμα σφάλματος = 1kA [32].

Ηλεκτροπληξία μπορεί να προκληθεί σε περιπτώσεις που ένα άτομο είτε αγγίζει μία γειωμένη δομή (τάση επαφής) κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, είτε βρίσκεται και κινείται στην περιοχή που καλύπτει ένα σύστημα γείωσης (βηματική τάση), είτε αγγίζει ταυτόχρονα δύο ξεχωριστές γειωμένες δομές (τάση μέταλλο με μέταλλο) κλπ.

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο που αναπαριστά έναν άνθρωπο να στέκεται εσωτερικά ενός υποσταθμού, είναι ένα κύκλωμα που καθορίζει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Το ανθρώπινο σώμα δύναται να έρθει σε επαφή με το έδαφος μέσα από τρία σημεία (χέρι και δύο πόδια).

Το ισοδύναμο μοντέλο ηλεκτροπληξίας είναι το κύκλωμα που καθορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2 (α). Συγκεκριμένα, απεικονίζει έναν άνθρωπο να στέκεται κοντά στο μέσο σημείο του πλέγματος γείωσης ενώ υποβάλλεται σε τάση επαφής. Το ανθρώπινο σώμα μπορεί να έρθει σε επαφή με το έδαφος ή το επιφανειακό στρώμα του εδάφους σε τρία σημεία (το

χέρι και τα δύο πόδια) Εικόνα 3.2. Το σύστημα γείωσης αντιπροσωπεύονται από ένα ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin στα σημεία επαφής.



Εικόνα 3.1.2: Ορισμός του μοντέλο ηλεκτροπληξίας [1].

Όταν εμφανίζεται ένα σφάλμα, αναπτύσσονται τάσεις μεταξύ οποιοδήποτε δυνατού ζεύγους των δυνατών σημείων επαφής. Το ισοδύναμο Thevenin σε αυτή τη περίπτωση είναι ένα κύκλωμα με 3 ακροδέκτες A1, A2, B (Εικόνα 3.2) που μπορεί να υπολογιστεί με κατάλληλη μέθοδο ανάλυσης [33]. Συνεπώς, τα ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin για τάση επαφής και βηματική τάση απεικονίζονται στην Εικόνα 3.3.

Στα πλαίσια μίας τυπικής απλοποίησης στον υπολογισμό της τάσης επαφής, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι τάσεις στα σημεία επαφής πόδια-έδαφος είναι ίδιες, οπότε το ισοδύναμο Thevenin μπορεί να απλοποιηθεί σε αυτό που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3 (b). Η ισοδύναμη κατά Thevenin πηγή τάσης V_{eq} , ισοδυναμεί με την τάση ανοιχτού κυκλώματος, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση την τάση στα σημεία επαφής, όταν ο άνθρωπος δεν αγγίζει κάποια δομή.

Η ισοδύναμη εσωτερική αντίσταση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3 (b) μεταξύ των σημείων επαφής μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια με τη χρήση αριθμητικών τεχνικών [23]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιγραφή του μοντέλου ηλεκτροπληξίας και στα δύο Πρότυπα είναι εγγενής. Ωστόσο, τα δύο έγγραφα διαφέρουν ως προς την εφαρμογή. Για το μοντέλο ηλεκτροπληξίας της Εικόνας 3.3 (b) και (c), ισχύουν οι ακόλουθοι ορισμοί:

1. Τάση επαφής (ισοδύναμη τάση Thevenin)

Η διαφορά δυναμικού ανοιχτού κυκλώματος ανάμεσα σε μία γειωμένη δομή (σημείο B) και του δυναμικού επιφάνειας στο σημείο όπου στέκεται ένα άτομο (Σημεία A₁ και A₂).

2. Τάση σώματος

Η τάση στα άκρα του ανθρώπινου σώματος, όταν το κύκλωμα ηλεκτροπληξίας είναι κλειστό.

3. Αντίσταση σώματος

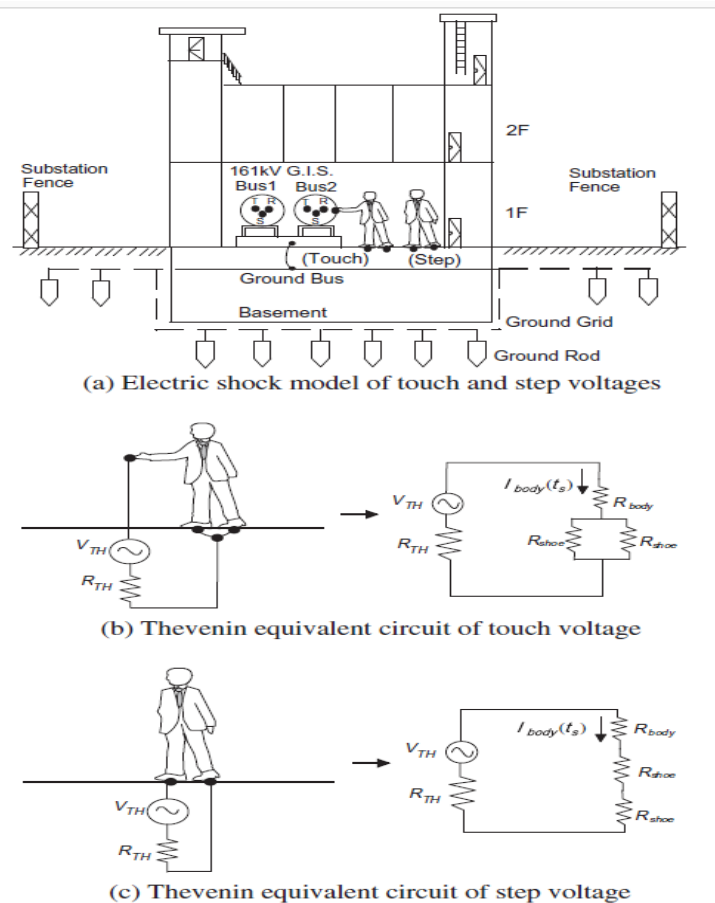
Η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μεταξύ του σημείου επαφής, στην περίπτωση της Εικόνας 3.3 (b), μεταξύ του σημείου B και των σημείων A₁ και A₂ (χέρι και δύο πόδια). Η τιμή της αντίστασης σώματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος, η κατάσταση του δέρματος, η πίεση που ασκείται στο σημείο επαφής κ.α.

4. Αντίσταση επαφής (ισοδύναμη αντίσταση Thevenin)

Η αντίσταση του εδάφους μεταξύ των σημείων επαφής του ανθρώπινου σώματος με το έδαφος (σημεία A1 και A2) και του συστήματος γείωσης.

5. Ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα

Το ποσό του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μέσω του ανθρώπινου σώματος.



Εικόνα 3.1.3: Μοντέλο ηλεκτροπληξίας και ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για την τάση επαφής (b) και την βηματική τάση (c) εντός ενός υποσταθμού [1].

Η επίδραση που έχει το ρεύμα όταν αυτό διαπερνά το ανθρώπινο σώμα εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες με κυριότερους το μέγεθος (πλάτος), την διάρκεια καθώς επίσης και την συχνότητα του ρεύματος σφάλματος. Η διαδικασία εξαγωγής των ελάχιστων κριτηρίων ασφαλείας, έχει βασιστεί σε θεμελιώδεις γνώσεις σχετικά με τα εν λόγω αποτελέσματα και έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες επιστημονικές μελέτες, οι οποίες ανέλαβαν να καθορίσουν τα όρια ασφαλείας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η επίδραση της συχνότητας καθιστά το 0,1A ρεύμα, ικανό να αποφέρει τον θάνατο για τιμές 50 ή 60 Hz, ενώ για συχνότητες 0-25 Hz και 3000-10000 Hz παρατηρείται σημαντική αύξηση στην ανεκτή τιμή έντασης ρεύματος. Σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα των επιστημονικών ερευνών έχουν αναπτυχθεί Πρότυπα, τα οποία προβλέπουν τα επιτρεπτά επίπεδα ρεύματος, το οποίο μπορεί να διαπεράσει το ανθρώπινο σώμα ώστε να αποφευχθεί ο θάνατος των ατόμων που εκτίθενται στο ηλεκτροσόκ.

Το πιο δεσμευτικό φυσιολογικό κατώτερο όριο είναι αυτό που προκαλεί την καρδιακή μαρμαρυγή. Συγκεκριμένα, η τιμή της έντασης του ρεύματος το οποίο ρέει μέσω του ανθρώπινου σώματος πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή εκείνη η οποία είναι ικανή να προκαλέσει καρδιακή κνίδωση, ανεξαρτήτως του μεγέθους του ρεύματος και της διάρκειας έκθεσης σε αυτό. Σε πολυάριθμες μελέτες γίνεται αναφορά σε δύο όρια έντασης ρεύματος, με το πρώτο να αναφέρεται σε διάρκεια έκθεσης μικρότερη της διάρκειας του καρδιακού παλμού και το δεύτερο σε διάρκεια έκθεσης μεγαλύτερη αυτού.

Τα πρότυπα γείωσης μετατρέπουν τα ανεκτά ρεύματα σε όρια αναπτυσσόμενων δυναμικών (τάση επαφής και βηματική τάση), επειδή οι υπολογισμοί και οι μετρήσεις των τάσεων ευκολότεροι στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Τα κριτήρια ασφαλείας τα οποία έχουν αναπτυχθεί στα Πρότυπα, καθορίζουν την μέγιστη συνολική, ανεκτή, ενεργό τάση για μία μέγιστη, ανεκτή τιμή ρεύματος που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα (σε ένα ορισμένο βαθμό στατιστικής βεβαιότητας).

Τα δύο κύρια Πρότυπα είναι το **IEEE Std 80-2013** [1] και το **IEC 60479-2005** [39].

3.2 Πρότυπο IEEE Std 80-2013 ^[1]

Η διασφάλιση της ανθρώπινης ακεραιότητας συνίσταται στο γεγονός ότι η διάρκεια ενός ρεύματος ηλεκτροπληξίας συχνότητας 50Hz ή 60Hz σε συνδυασμό με το μέγεθος του δεν ξεπερνούν το ανώτερο ανεκτό όριο το οποίο είναι δυνατόν να προκαλέσει κοιλιακή μαρμαρυγή, και δίνεται από την ακόλουθη σχέση (1), σύμφωνα με το πρότυπο αυτό.

Με βάση τα αποτελέσματα των μελετών που έγιναν από τον Dalziel [34], θεωρείται ότι το 99,5% όλων των ανθρώπων μπορεί να αντέξει με ασφάλεια, χωρίς να προκληθεί κοιλιακή μαρμαρυγή, την διέλευση μέσα από αυτούς ρεύματος μεγέθους και διάρκειας που καθορίζεται από την σχέση (1).

$$I_B = k / \sqrt{t_s} \quad (3.2.1)$$

$$k = \sqrt{S_B} \quad (3.2.2)$$

$$S_B = (I_{body})^2 \times t_s \quad (3.2.3)$$

Όπου:

t_s : η διάρκεια διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσω του ανθρώπινου σώματος και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

S_B : σταθερά η οποία σχετίζεται με την ανεκτή ενέργεια για την αποφυγή ηλεκτροπληξίας, εμπειρικά προσδιορισμένη για χρόνο έκθεσης στο σφάλμα από 0,03s έως 3,0s (δεν ισχύει για χρόνους εκτός αυτού του διαστήματος)

I_{body} : η ενεργή τιμή ρεύματος που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα

Ο Dalziel διαπίστωσε ότι η τιμή του ρεύματος ηλεκτροπληξίας το οποίο μπορεί να δεχτεί ένα άτομο και να επιβιώσει είναι συνάρτηση του βάρους του σώματός του [34].

Συγκεκριμένα, απέδειξε ότι το ρεύμα ηλεκτροπληξίας από το οποίο δύναται να επιζήσει το 99,5% του πληθυσμού των ατόμων που ζυγίζουν 50 kg οδηγεί σε τιμή σταθεράς S_B ίση με 0,0135 και συνεπώς k_{50} ίσο με 0,116. Αντιστοίχως για άτομα που ζυγίζουν γύρω στα 70 κιλά ισχύει ότι $S_B = 0,0246$ και $k_{70} = 0,157$. Βάση όλων των παραπάνω τα επιτρεπτά όρια ρεύματος ηλεκτροπληξίας δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$I_{body} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}, \text{ για } 50 \text{ kg βάρους σώματος} \quad (3.2.4)$$

$$I_{body} = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}}, \text{ για } 70 \text{ kg βάρους σώματος} \quad (3.2.5)$$

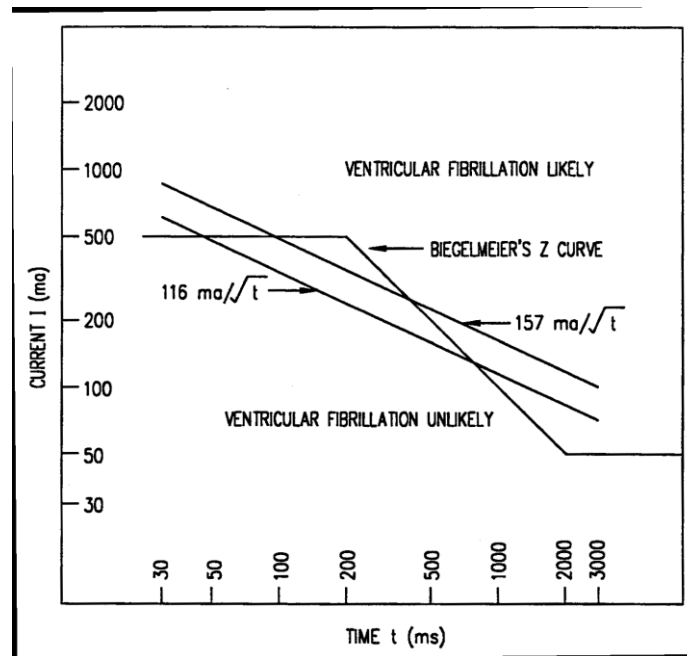
Αξίζει να τονισθεί ότι οι παραπάνω υπολογισμοί ισχύουν για διάρκεια σφάλματος t_s από 0,03s και 3,0s και δεν ισχύουν για ρεύματα ηλεκτροπληξίας πολύ μεγάλης ή πολύ μικρής διάρκειας.

Η ενέργεια, η οποία μπορεί να περάσει μέσω του ανθρώπινου σώματος, ώστε να παραμείνει ζωντανός ένας άνθρωπος (να αποφύγει την κοιλιακή μαρμαρυγή) πρέπει να περιοριστεί σε ένα ασφαλές όριο ανάλογα με το είδος επαφής. Αναλυτικότερα, παρατίθενται οι τύποι σύμφωνα με τους οποίους προκύπτουν τα όρια ασφαλείας, συνυπολογίζοντας και το βάρος.

Σε αυτό το Πρότυπο δεν έχουν ληφθεί υπόψιν οι μη γραμμικές επιδράσεις που σχετίζονται με την εφαρμοσμένη τάση και η διαδρομή του ρεύματος σε αυτό. Η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος τόσο για συνεχές ρεύμα όσο και για εναλλασσόμενο βιομηχανικής συχνότητας 50Hz ή 60Hz, μπορεί να προσεγγιστεί από μία σταθερή ωμική

αντίσταση και ίση με 1000Ω, με αναφερόμενη διαδρομή ρεύματος από το ένα χέρι και στα δύο πόδια ή από το ένα πόδι στο άλλο.

Ωστόσο, η εσωτερική αντίσταση του σώματος είναι περίπου 300 Ω, ενώ οι τιμές της αντίστασης του σώματος συμπεριλαμβανομένου του εύρους του δέρματος κυμαίνονται από 500 Ω έως 3000 Ω.



Εικόνα 3.2.1: Επιτρεπόμενη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο σφάλμα [34].

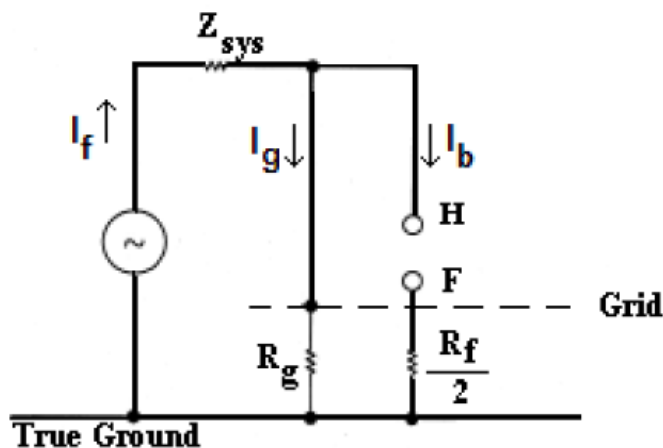
Αξίζει να αναφερθεί ότι η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μειώνεται από βλάβη ή παρακέντηση του δέρματος στο σημείο της επαφής.

Έτσι, για όλους τους υπολογισμούς με βάση αυτό το πρότυπο, οι ακόλουθες αντιστάσεις, σε σειρά με την αντίσταση του σώματος, θεωρούνται ως ακολούθως:

- α) Η αντίσταση επαφής των χεριών και των ποδιών θεωρείται ίση με το μηδέν.
- β) Οι αντιστάσεις των γαντιών και των υποδημάτων είναι ίσες με το μηδέν.

Όριο τάσης επαφής:

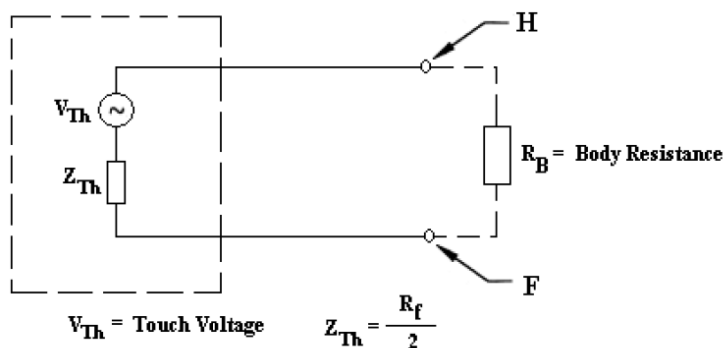
Η τάση επαφής όπως έχει αναλυθεί παραπάνω αναπτύσσεται όταν το χέρι έρχεται σε επαφή με ένα γειωμένο αντικείμενο και το πόδι ακουμπάει στη γη. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της τάσης επαφής απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 3.2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα τάσης επαφής. (R_g η αντίσταση γείωσης και R_f η αντίσταση του ποδιού σε σχέση με τη γη) [1].

Με περαιτέρω ανάλυση καταλήγουμε στο ισοδύναμο Thevenin όπου η αντίσταση Thevenin λόγω της παραλληλίας των αντιστάσεων των ποδιών έχει την τιμή $R_F/2$ και το ανεκτό ρεύμα που μπορεί να διαρρέει το άτομο που εκτίθεται σε αυτή την τάση δίνεται από τον τύπο

$$I_{body} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + R_B} \quad (3.2.6)$$



Εικόνα 3.2.3: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για την τάση επαφής [1].

Από την εφαρμογή των παραπάνω και με κατάλληλες αντικαταστάσεις καταλήγουμε στην σχέση η οποία δίνει το όριο της τάσης επαφής.

$$E_{touch} = (R_{body} + R_{TH}) \times I_{body(ts)} \quad (3.2.7)$$

Για βάρος σώματος 50kg :

$$E_{\text{touch}_{50}} = (1000 + 1,5 \times C_S \times \rho_s) \times \frac{0,116}{\sqrt{ts}} \quad (3.2.8)$$

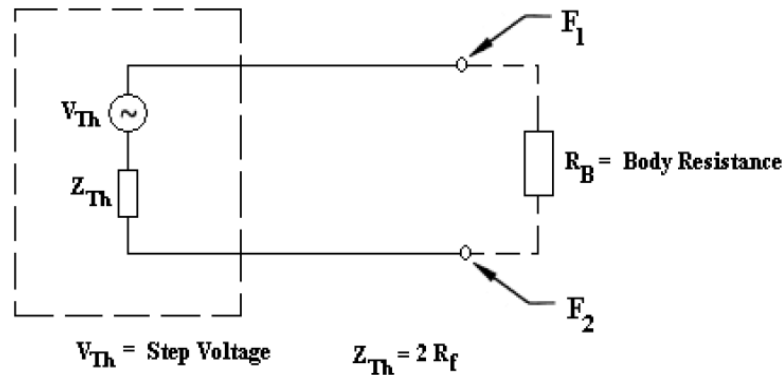
Για βάρος σώματος 70kg :

$$E_{\text{touch}_{70}} = (1000 + 1,5 \times C_S \times \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{ts}} \quad (3.2.9)$$

Όριο βηματικής τάσης:

Η βηματική τάση αναφέρεται στην τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου το οποίο στέκεται στην επιφάνεια της γης.

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin σε αυτή την περίπτωση, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.4 όπου η αντίσταση Thevenin λόγω της εν σειρά σύνδεσης των αντιστάσεων των ποδιών έχει την τιμή $2R_F$, το ανεκτό ρεύμα που μπορεί να διαρρέει το άτομο που εκτίθεται σε αυτή την τάση δίνεται από την σχέση (4) και η τάση Thevenin αναπτύσσεται ανάμεσα σημεία F_1 και F_2 τα οποία αναπαριστούν τα σημεία επαφής του ατόμου με το έδαφος (πόδια).



Εικόνα 3.2.4: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για την βηματική τάση [1].

Από την εφαρμογή των παραπάνω και με κατάλληλες αντικαταστάσεις καταλήγουμε στην σχέση η οποία δίνει το όριο της τάσης επαφής.

$$E_{\text{step}} = (R_{\text{body}} + 2 \times R_{\text{TH}}) \times I_{\text{body}(ts)} \quad (3.2.10)$$

Για βάρος σώματος 50kg :

$$E_{\text{step}_{50}} = (1000 + 6 \times C_S \times \rho_s) \times \frac{0,116}{\sqrt{ts}} \quad (3.2.11)$$

Για βάρος σώματος 70kg :

$$E_{\text{step}_70} = (1000 + 6 \times C_S \times \rho_s) \times \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.2.12)$$

Όπου:

I_{body}	επιτρεπτό ρεύμα σώματος (A)
R_{body}	αντίσταση σώματος (Ω)
R_{TH}	ισοδύναμη αντίσταση Thevenin (Ω)
ρ_s	η ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους μετρούμενη σε (Ωm)
C_S	ο συντελεστής προσαύξησης εξαιτίας της παρουσίας του προστατευτικού επιφανειακού εδάφους.

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις (5)-(12), οι επιτρεπτές τιμές τόσο στην τάση επαφής όσο και στην βηματική τάση είναι ανάλογες της ειδικής αντίστασης του επιφανειακού στρώματος του εδάφους ρ_s και αντίστροφος ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της διάρκειας του ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι η ανεκτές τάσεις (επαφής και βηματική) θα αυξηθούν αν αυξηθεί το ρ_s ή μειωθεί ο χρόνος t_s . Εν αντιθέσει αυτών, η αναλογικότητα φαίνεται να μην ισχύει ακόμα και αν αγνοηθεί η σύνθετη αντίσταση σώματος, καθώς ο παράγοντας C_S είναι συνάρτηση της επιφανειακής αντίστασης σε αυτή την περίπτωση, εκτός της περίπτωσης που το ποσοστό αύξησης των αναφερόμενων τάσεων είναι το ίδιο με αυτό της επιφανειακής αντίστασης του εδάφους.

Σε περιπτώσεις απουσίας προστατευτικού επιφανειακού στρώματος εδάφους τότε $C_S = 1$ και $\rho_s = \rho$.

Εναλλακτικά η τιμή του συντελεστή προσαύξησης δίνεται από τον εμπειρικό τύπο

$$C_S = 1 - \frac{0,09 \times (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (3.2.13)$$

Όπου:

ρ	ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm)
ρ_s	η ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους μετρούμενη σε (Ωm)
h_s	το πάχος του υλικού επιφάνειας (m)

Εν συντομία των παραπάνω, με την επίστρωση ενός λεπτού στρώματος, από υλικό υψηλής ειδικής αντίστασης (συνήθως 8-15cm μεγάλου πάχους σπασμένες πέτρες), σε όλη την επιφάνεια του υποσταθμού, επιτυγχάνεται η αύξηση των επιτρεπτών δυναμικών

τόσο της βηματικής όσο και της τάσης επαφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα επιφανειακό στρώμα εδάφους υψηλής ειδικής αντίστασης, παρέχει μία επιπρόσθετη αντίσταση σε σειρά με το ανθρώπινο σώμα, μειώνοντας έτσι το ρεύμα που σε μία κατάσταση βλάβης, θα διαπεράσει αυτό.

Η ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο πενταπλάσια από την αντίστοιχη του επιφανειακού στρώματος του εδάφους ώστε να υπάρχει ουσιαστικό όφελος [35]. Τα αποτελέσματα της τοποθέτησης του επιφανειακού στρώματος στα επιτρεπτά δυναμικά (βηματικής και τάσης επαφής) λαμβάνονται υπόψιν με την προσθήκη του συντελεστή C_s , στον υπολογισμό της αντίστασης του ποδιού (R_F).

Η επιτρεπτή τιμή του ρεύματος σώματος έχει εξαχθεί από στατιστικά στοιχεία και αντιπροσωπεύει μία πιθανότητα πρόκλησης κοιλιακής μαρμαρυγής ίση με 0,5%. Ο προσεγγιστικός τύπος για την ισοδύναμη αντίσταση Thevenin σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, προήλθε από την εξής διαδικασία.

Για ένα ανομοιόμορφο έδαφος, το πόδι μοντελοποιείται ως μία αγώγιμη κυκλική πλάκα η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με τη γη. Η αντίσταση του υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \quad (3.2.14)$$

Όπου :

b η ακτίνα της πλάκας σε m

ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

Με την προσθήκη ενός επιφανειακού στρώματος ειδικής αντίστασης ρ_s ο παραπάνω τύπος παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$R_F = \frac{\rho}{4b} \times C_s \quad (3.2.15)$$

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί, το γεγονός ότι το ανθρώπινο πόδι σίγουρα δεν είναι μια κυκλική πλάκα. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι με τη χρήση μοντέλων κλίμακας και κατόπιν αριθμητικών μελετών η περιοχή του ποδιού η οποία έρχεται σε επαφή με τη γη είναι η πιο σημαντική μεταβλητή. Για το λόγο αυτό, η μεταβλητή b

μπορεί να προσεγγιστεί από τον ακόλουθο τύπο: $b = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ (3.2.16)

Όπου :

A είναι η περιοχή του ποδιού που έρχεται σε επαφή με το έδαφος.

Για έναν ενήλικα, η περιοχή A που έρχεται σε επαφή με το έδαφος είναι περίπου 200cm^2 . Με την χρήση της τιμής αυτής και της εξίσωσης (14) η ακτίνα προκύπτει ίση με ($b=$) $0,08\text{m}$ και η αντίσταση του ενός ποδιού όταν αυτό αγγίζει τη γη υπολογίζεται:

$$R = \frac{\rho}{(4) \cdot (0,08)} \cong 3\rho \Omega \quad (3.2.17)$$

Επιπροσθέτως θεωρείται ότι η αμοιβαία αντίσταση μεταξύ των δύο ποδιών ενός ατόμου έχει αμελητέα επίδραση. Για την εξαγωγή των ορίων της τάσης επαφής, η ισοδύναμη αντίσταση υπολογίζεται ως ο παράλληλος συνδυασμός των αντιστάσεων των ποδιών που έρχονται σε επαφή με το έδαφος:

$$r_{eq} = \frac{(3\rho) \cdot (3\rho)}{3\rho + 3\rho} = 1,5\rho \quad (3.2.18)$$

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης r_{eq} στην Εικόνα 3.1.3 (b), θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντίσταση του συστήματος γείωσης. Ωστόσο, για τα ευρέως εγκατεστημένα συστήματα γείωσης, η αντίσταση αυτή είναι συνήθως μικρή σε σύγκριση με το $1,5\rho$ που είναι η αντίσταση των ποδιών και έτσι παραλείπεται. Η παραπάνω εξίσωση για τον υπολογισμό της r_{eq} εφαρμόζεται στην περίπτωση της θεώρησης ομοιόμορφου μοντέλου εδάφους και παραμελεί την επίδραση της επαφής με το σύστημα γείωσης ή της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ των ποδιών. Για ανομοιόμορφο έδαφος ή για έδαφος με ένα στρώμα κάλυψης υψηλής αντίστασης, το Πρότυπο IEEE Std 80 [1] συμψηφίζει στον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης έναν παράγοντα διόρθωσης C_s (h_s, k). Συγκεκριμένα, η ισοδύναμη αντίσταση r_{eq} δίνεται από τους ακόλουθους τύπους:

Για βηματική τάση :

$$r_{eq} = 6,0 \cdot C_s \cdot (h_s \cdot k) \cdot \rho_s \quad (3.2.19)$$

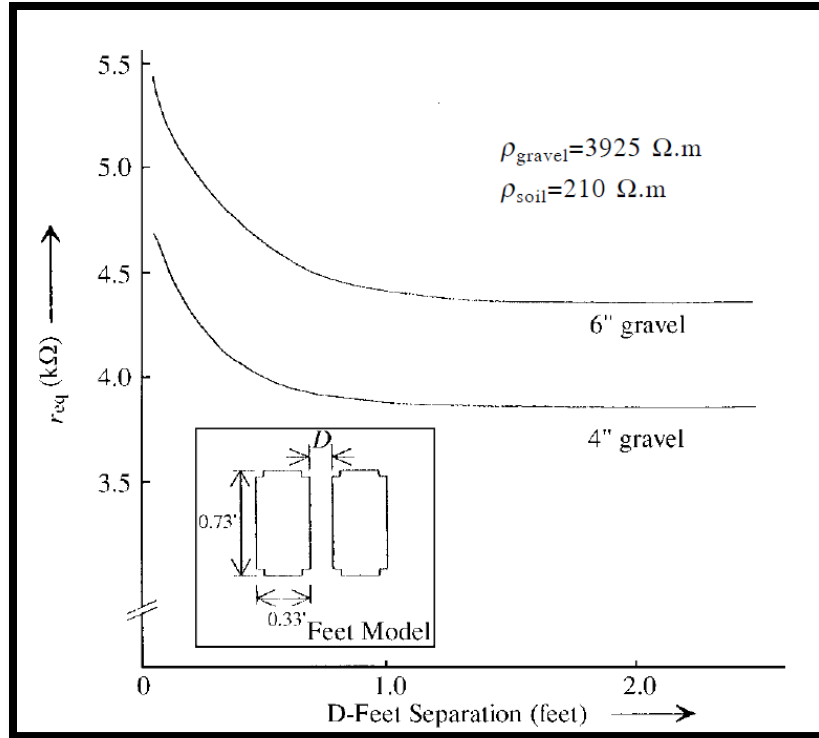
Για τάση επαφής:

$$r_{eq} = 1,5 \cdot C_s \cdot (h_s \cdot k) \cdot \rho_s \quad (3.2.20)$$

$$\text{με} \quad k = \frac{(\rho - \rho_s)}{(\rho + \rho_s)} \quad (3.2.21)$$

Όπου:

ρ	ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm)
ρ_s	η ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος του εδάφους μετρούμενη σε (Ωm)
h_s	το πάχος του υλικού επιφάνειας (m)
C_s	ο συντελεστής μείωσης για υποβιβασμό της ονομαστικής αξίας της αντίστασης επιφανειακού στρώματος



Εικόνα 3.2.5: Αντιστάσεις ποδιών με αντιστάσεις εδάφους ως συνάρτηση του διαχωρισμού των ποδιών και του πάχους του χαλικιού [36].

Συνοψίζοντας, για τον υπολογισμό του παράγοντα Cs έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι, με προσφάτως αποδεκτή ως πιο ακριβή, και χρησιμοποιούμενη από το Πρότυπο IEEE80-2013 [1], αυτή η οποία είναι στηριγμένη στις μελέτες και την δουλειά του Thaper et al [36].

Όριο τάσης μεταξύ μετάλλων:

Για τον υπολογισμό του επιτρεπτού ορίου για την τάση μεταξύ μετάλλων χρησιμοποιείται το ισοδύναμο μοντέλο Thevenin με ισοδύναμη αντίσταση Thevenin Z_{TH} ίση με την αντίσταση του σώματος το οποίο συνεπάγεται με ρ_s ίσο με το μηδέν.

Για βάρος σώματος 50kg :

$$E_{mm_touch_50} = \frac{116}{\sqrt{ts}} \quad (3.2.22)$$

Για βάρος σώματος 70kg :

$$E_{mm_touch_70} = \frac{157}{\sqrt{ts}} \quad (3.2.23)$$

Για την ολοκλήρωση των υπολογισμών, γίνεται χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή, ο οποίος καθορίζει την ισοδύναμη μέση-τετραγωνική-ρίζα ενός ασύμμετρου

κύματος ρεύματος, για μία συγκεκριμένης διάρκειας βλάβη, αντιπροσωπεύοντας την επίδραση της αρχικής DC offset και της εξασθένησης της κατά τη διάρκεια της βλάβης.

Ο συντελεστής μείωσης ορίζεται ως ακολούθως [28]:

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{X}{\omega Et} * (1 - s * \left\{ \frac{2\omega Bt}{X} \right\})} \quad (3.2.24)$$

Όπου :

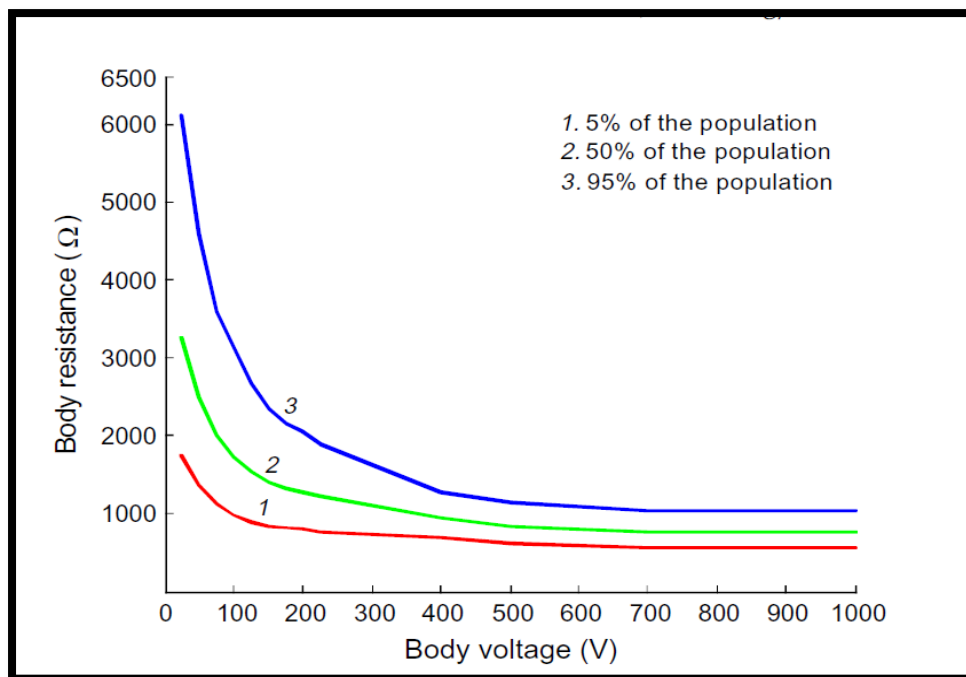
ω η συχνότητα σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο (ισοδύναμο με 2πf)

t ο καθαρός χρόνος διάρκειας του σφάλματος σε δευτερόλεπτα

3.3 Πρότυπο IEC 60479^[39]

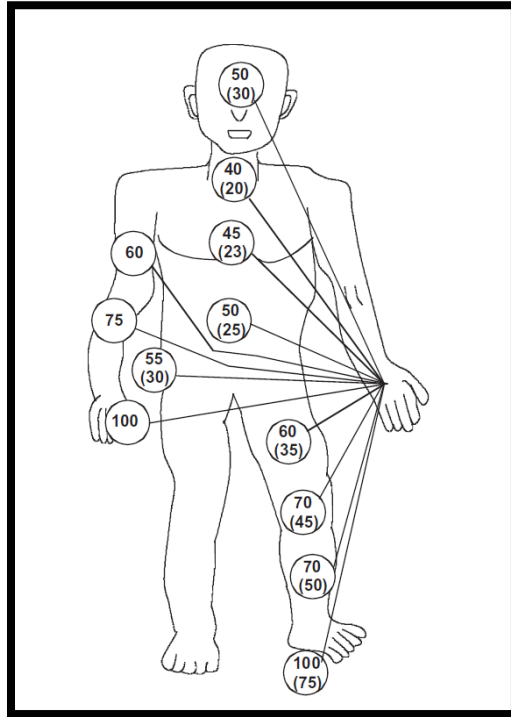
Το Πρότυπο IEC 60479 είναι η τεχνική προδιαγραφή η οποία περιγράφει τις επιδράσεις του ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα. Τα κύρια τμήματα του Προτύπου τα οποία είναι χρήσιμα για την εξαγωγή των κριτηρίων ασφαλείας είναι δύο (η επιτρεπτή τάση δυναμικού επαφής και η επιτρεπτή βηματική τάση) και παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Μέρος 1^ο: Γενικά θέματα, Τεχνικές Προδιαγραφές IEC /TS 60479-1, 4^η έκδοση, (δημοσιεύθηκε 2005)
2. Μέρος 5^ο: Κατώτερες τιμές τάσης επαφής για φυσιολογικές επιδράσεις, Τεχνική έκθεση IEC/ TR 60479-5, 1^η έκδοση (δημοσιεύθηκε 2007)



Εικόνα 3.3.1: Διάγραμμα της σύνθετης αντίστασης σώματος ως συνάρτηση την τάσης σώματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60479 [37].

Το Πρότυπο, παρέχει δεδομένα για την σύνθετη αντίσταση του ανθρώπινου σώματος, ως συνάρτηση της τάσης σώματος σύμφωνα με τον νόμο του Ohm (Εικόνα 3.3.1) καθώς επίσης και ως συνάρτηση της διαδρομής που θα ακολουθήσει το ρεύμα κατά την διαδρομή του μέσα από το σώμα (Εικόνα 3.3.2).



Εικόνα 3.3.2: Εσωτερική αντίσταση του ανθρώπινου σώματος ως συνάρτηση της τρέχουσας διαδρομής σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60479 [38].

Οι τιμές της αντίστασης του σώματος που παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα, ισχύουν για ανθρώπους κάτω από μία συγκεκριμένη διαδρομή (χέρι με χέρι) για μία επιφάνεια επαφής περίπου ίση με 10.000 mm^2 , σε ξηρές συνθήκες

Το πρότυπο παρέχει δεδομένα για τον υπολογισμό της αντίστασης του σώματος ως συνάρτηση της τάσης του σώματος μέσα από τις καμπύλες οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 3.3.1 και δεδομένα για την αντίσταση του σώματος ως συνάρτηση της διαδρομής που ακολουθεί το ρεύμα μέσα στο σώμα τα οποία απεικονίζονται στην Εικόνα 3.3.2. Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 3.3.1), η καμπύλη 5% υποδεικνύει τιμές αντίστασης σώμα όπου δεν έγινε υπέρβαση κατά 5% του πληθυσμού, η καμπύλη 50% υποδεικνύει τιμές αντίστασης σώμα το οποίο δεν έγινε υπέρβαση κατά 50% του πληθυσμού, κλπ.

Το συγκεκριμένο Πρότυπο παρέχει επίσης δεδομένα για επιτρεπτές τιμές ρεύματος σώματος σε σχέση με την διάρκεια του ρεύματος σφάλματος. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3.3 η καμπύλη C1 αντιπροσωπεύει πιθανότητα 0,14% πρόκλησης κοιλιακής μαρμαρυγής, τα σημεία επί της καμπύλης C2 αντιπροσωπεύουν πιθανότητα 5% κοιλιακής μαρμαρυγής και τα σημεία στην καμπύλη C3 αντιπροσωπεύουν πιθανότητα

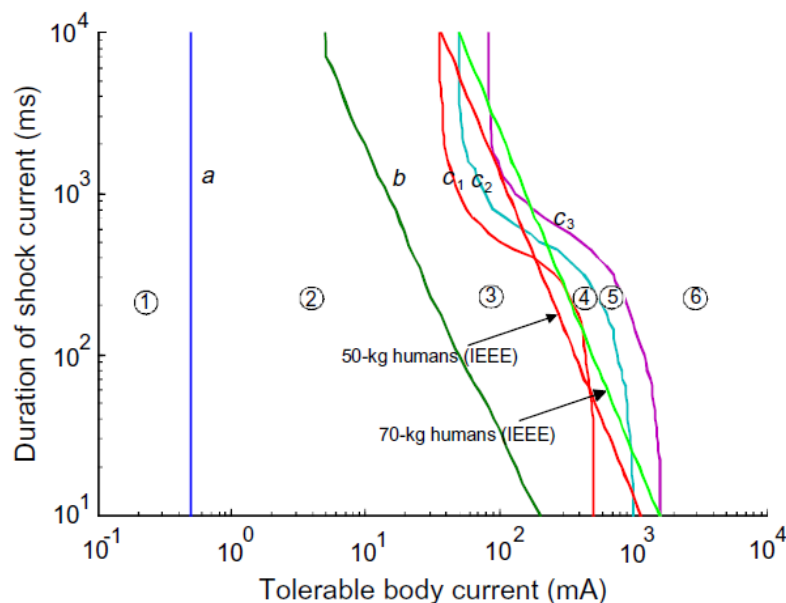
50% κοιλιακή μαρμαρυγή. Αυτές οι καμπύλες διαχωρίζει το επίπεδο που δημιουργείται από τις γραφικές του τρέχοντος σώματος και της διάρκειας της ηλεκτροπληξίας, σε ζώνες.

Στην εικόνα που ακολουθεί, οι αριθμοί χωρίς παρενθέσεις αναφέρονται στις διαδρομές του ρεύματος από το ένα χέρι στο συγκεκριμένο σημείο του σώματος. Επιπρόσθετα, οι αριθμοί εκτός παρενθέσεων αναφέρονται σε μονοπάτια ρεύματος μεταξύ των δύο χεριών και του αντίστοιχου τμήματος του σώματος.

Η σύνθετη αντίσταση του σώματος δίνεται για το 5°, το 50° και το 95° εκατοστημόριο του πληθυσμού τόσο για στεγνές όσο και υγρές συνθήκες.

Οι καμπύλες για το 5%, 50% και 95% αναφέρονται σε τιμές αντίστασης σώματος οι οποίες δεν υπερβαίνονται από το 5%, 50% και 95% του πληθυσμού, αντίστοιχα. Η σύνθετη αντίσταση η οποία απευθύνεται στο 5° εκατοστημόριο και αναπαριστά ποσοστό του πληθυσμού μεγαλύτερο από το 95%, είναι πιο συντηρητική από την άποψη της ασφάλειας, αφού οδηγεί σε μεγαλύτερο ποσό ρεύματος που ρέει διαμέσου του σώματος.

Επιπλέον, η διάρκεια της ρεύμα ηλεκτροπληξίας, ως συνάρτηση του ανεκτού ρεύματος σώματος στο IEEE Std. 80 [1] και IEC 60479-1 [39] παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3.4. Τα σημεία στις καμπύλες C1, C2 και C3 αντιπροσωπεύουν την κατά 0,14%, 5% και 50% πιθανότητα κοιλιακής μαρμαρυγής, αντίστοιχα.

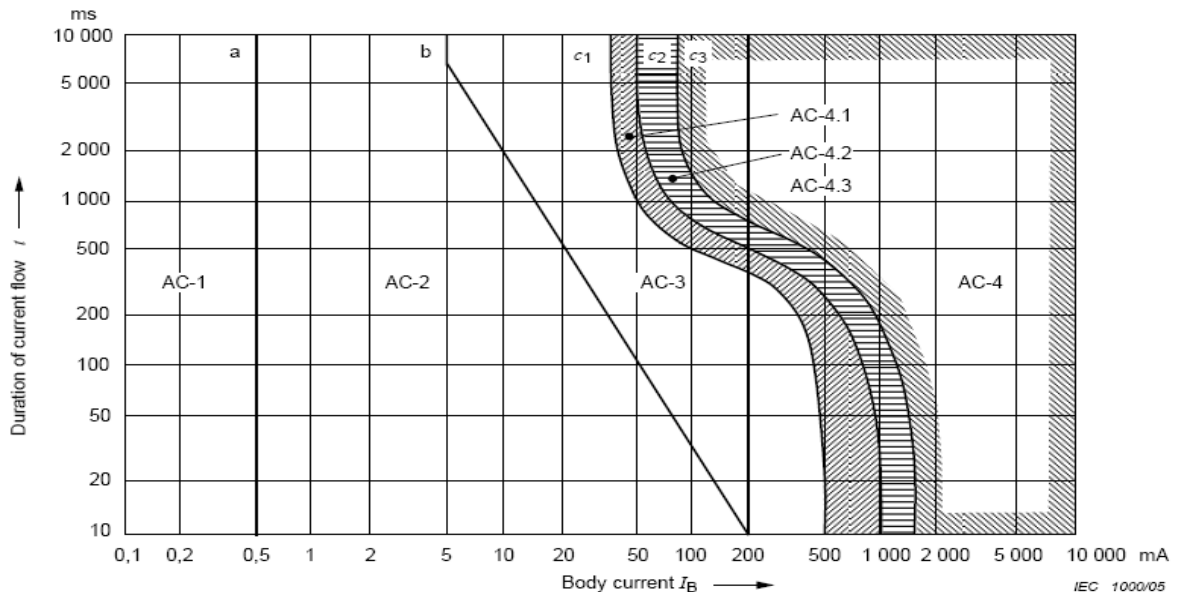


Εικόνα 3.3.3 Διάγραμμα της διάρκειας του ρεύματος ηλεκτροπληξίας ως συνάρτηση του επιτρεπτού ρεύματος σώματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60479 και IEEE 80 [33].

Επεξηματικά, αναφέρεται ότι, η Ζώνη 1 περιλαμβάνει την περιοχή στην οποία δεν υπάρχει καμία επίπτωση στον άνθρωπο, η Ζώνη 2 την περιοχή όπου φυσιολογικά δεν

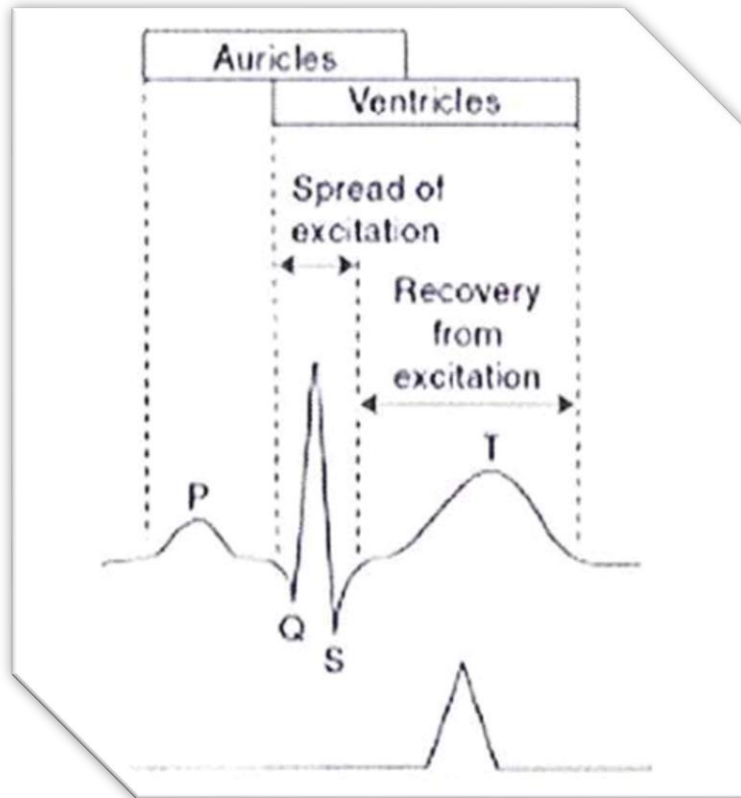
υπάρχουν επικίνδυνες παθολογικές επιπτώσεις και η Ζώνη 3 την περιοχή όπου δεν προκαλούνται οργανικά προβλήματα. Στην Ζώνη 4 υπάρχει η πιθανότητα πρόκλησης κοιλιακής μαρμαρυγής σε ποσοστό μικρότερο από 5%, ενώ στην Ζώνη 5 η πιθανότητα λαμβάνει ποσοστά εντός του διαστήματος του 5% και 50%. Τέλος, η Ζώνη 6 αντιπροσωπεύει όλους τους συνδυασμούς έντασης και διάρκειας του ρεύματος σφάλματος οι οποίοι θα οδηγήσουν στην πρόκληση κοιλιακής μαρμαρυγής με πιθανότητα μεγαλύτερη από 50%.

Το όριο ρεύματος το οποίο είναι ικανό να προκαλέσει κοιλιακή μαρμαρυγή, για μία διαδρομή από το χέρι στο πόδι μέσα στο σώμα, δίνεται στην Εικόνα 3.3.4. Οι ζώνες ενδιαφέροντας είναι η AC-4 για τα όρια c1, c2 και c3. Σε διάρκεια περίπου ίση με 400 ms, παρατηρούμε μία δραματική μείωση στο ανεκτό ρεύμα οποία (σημείο καμψής στο γράφημα). Αυτό οφείλεται στην πιθανή ύπαρξη ροής ρεύματος σφάλματος κατά την ευάλωτη περίοδο της T -φάσης του καρδιακού κύκλου, (400 ms περίπου) και η οποία είναι πιο πιθανό να προκαλέσει κοιλιακή μαρμαρυγή.



Εικόνα 3.3.4: Ανεκτό ρεύμα που μπορεί να διαρρέει το ανθρώπινο σώμα συνάρτηση της καμπύλης διάρκειας του. [38]

Η ευάλωτη περίοδος αναπαρίσταται στην Εικόνα 3.3.5 και καταλαμβάνει μόνο περίπου το 10% έως 20% του συνολικού καρδιακού κύκλου. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τιμές των επιτρεπτών τάσεων είναι εκπληκτικά υψηλές στο σύντομο χρονικό διάστημα της εκκαθάρισης. Ωστόσο, ακόμα και αν ένα άτομο εκτεθεί σε υψηλή τάση, τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, θα υποστεί ένα σημαντικό ηλεκτρικό σοκ, στόχος είναι να μειωθεί η πιθανότητα το σοκ αυτό να προκαλέσει κοιλιακή μαρμαρυγή.



Εικόνα 3.3.5: Ευάλωτη περίοδος του καρδιακού κύκλου, εμφάνιση κοιλιών κατά τη διάρκεια της T-φάσης αυτού [39].

Ακόμα μία σημαντική διαφορά είναι ότι τα όρια των επιτρεπών τάσεων καθορίζονται από την διαδρομή που ακολουθεί το ρεύμα καθώς ρέει μέσα στο σώμα και όχι από τις πιθανές αναπτυσσόμενες τάσεις δυναμικών όπως στην περίπτωση του Αμερικάνικου Προτύπου.

Τα δεδομένα του συγκεκριμένου Προτύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν με 2 τρόπους:

- [1] Επιτρεπτά όρια βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής μπορούν να υπολογιστούν για ένα συγκεκριμένο σύστημα,
- [2] Οι πραγματικές τιμές του ρεύματος σφάλματος που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα μπορούν να υπολογιστούν όταν ένα άτομο εκτίθεται σε βηματική τάση ή τάση επαφής σε ένα συγκεκριμένο σύστημα και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

3.3.1 Επιτρεπτές τάσεις (επαφής και βηματική) κατά IEC 479

Οι σχέσεις υπολογισμού των επιτρεπτών τάσεων (βηματική και επαφής), στηριζόμενες σε αυτό το πρότυπο, προτάθηκαν από τους Lee και Melioroulos και είναι [33]

Για την τάση επαφής:

$$V_{touch} = (R_{body}^{touch} \cdot I_{body(ts)} + r_{eq,T}) \times I_{body(ts)} \quad (3.3.1)$$

Για την βηματική τάση:

$$V_{step} = (R_{body}^{step} \cdot I_{body(ts)} + r_{eq,S}) \times I_{body(ts)} \quad (3.3.2)$$

Όπου :

- $I_{body(ts)}$ η επιτρεπτή τιμή ρεύματος που ρέει μέσω του ανθρώπινου σώματος κατά της διάρκεια έκθεσης του σε ένα σφάλμα διάρκειας
- t_s Το ρεύμα αυτό μπορεί να υπολογιστεί από την Εικόνα 3.3.3
- R_{body}^{touch} η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος που καθορίζεται από την διαδρομή που ακολουθεί το ρεύμα σφάλματος μέσα στο σώμα όταν ένα άτομο εκτίθεται σε τάση επαφής. Τυπικά η διαδρομή θεωρείται πως είναι από το χέρι στα δύο πόδια. Η τιμή μπορεί να εξαχθεί από τις Εικόνες 3.3.1 και 3.3.2.
- R_{body}^{step} η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος που καθορίζεται από την διαδρομή που ακολουθεί το ρεύμα σφάλματος μέσα στο σώμα όταν ένα άτομο εκτίθεται σε βηματική τάση. Η διαδρομή είναι από το ένα πόδι στο άλλο. Η τιμή μπορεί να εξαχθεί από τις Εικόνες 3.3.3 και 3.3.4.
- $r_{eq,T}$ η ισοδύναμη αντίσταση από το πόδι στο έδαφος όταν ένα άτομο εκτίθεται σε βηματική τάση. Οι αντιστάσεις των δύο ποδιών με το έδαφος θεωρούνται παράλληλης συνδεσμολογίας.
- $r_{eq,S}$ η ισοδύναμη αντίσταση από το πόδι στο έδαφος όταν ένα άτομο εκτίθεται σε τάση επαφής. Οι αντιστάσεις των δύο ποδιών με το έδαφος θεωρούνται εν σειρά.

Αξίζει να τονισθεί, ότι σε πλήρη συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, το γεγονός ότι τόσο η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος τόσο στην περίπτωση της τάσης επαφής όσο και στην βηματική τάση είναι συναρτήσεις της τιμής του επιτρεπτού ρεύματος σώματος. Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (3.3.1) και (3.3.2) η ισοδύναμη

αντίσταση Thevenin χρησιμοποιεί δεδομένα από το IEEE 80 [1] καθώς δεν παρέχει δεδομένα για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης $r_{eq,T}$ και $r_{eq,S}$.

Το IEC 60479 [39] για τον υπολογισμό των ορίων ακολουθεί διακριτά βήματα με αυστηρή σειρά τα οποία είναι:

1. Σύμφωνα με την καμπύλη που εικονίζεται στο Σχήμα 3.3.4, για μία ορισμένη καθαρή διάρκεια σφάλματος και μια θεωρούμενη πιθανότητα κοιλιακής μαρμαρυγής, υπολογίζεται το ποσοστό του ρεύματος που μπορεί να ανεχτεί το ανθρώπινο σώμα $I_{body}(t_s)$.
2. Για το ρεύμα που έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο βήμα και σύμφωνα με τις Εικόνες 3.3.1 και 3.3.2, προσδιορίζεται η ζητούμενη αντίσταση σώματος, R_{body}^{touch} και R_{body}^{step} . Για την τάση αφής, υποθέτουμε ότι η διαδρομή θα είναι, από το ένα χέρι στα δύο πόδια (75% της αντίστασης του σώματος δίνεται στην Εικόνα 3.3.2), καθώς και για την τάση βήμα ότι η διαδρομή είναι από το ένα πόδι στο άλλο (100% του σωματικού αντίσταση δίνεται στην Εικόνα 3.3.3)
3. Με τρόπο όμοιο με αυτόν που περιγράφεται στο Πρότυπο IEEE Std 80-2013 υπολογίζεται η αντίσταση του ποδιού.
4. Υπολογίζονται τα επιτρεπτά δυναμικά (βηματική και επαφής) με την χρήση των εξισώσεων 3.3.1 και 3.3.2.

Επίσης, για την δυνατότητα σύγκρισης των δύο εξεταζόμενων Προτύπων το επιτρεπτό ρεύμα υπολογίζεται για ποσοστό πρόκλησης κοιλιακής μαρμαρυγής ίσο με 0,5% και υπολογίζεται με σωστή παρεμβολή μεταξύ των καμπυλών C_1 και C_2 της Εικόνας 3.3.3.

3.3.2 Υπολογισμός πραγματικών τιμών ρεύματος που διαρρέουν το ανθρώπινο σώμα.

Για μία δεδομένη βηματική τάση ή τάση επαφής, ο υπολογισμός του ρεύματος που διαπερνά το ανθρώπινο σώμα, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του IEC [39], απαιτεί την επίλυση μιας σειράς μη γραμμικών εξισώσεων. Η λύση αυτή μπορεί να ληφθεί επαναληπτικά ή χρησιμοποιώντας μια γραφική μέθοδο που περιγράφεται παρακάτω:

Βήμα 1^ο : Υπολογισμός της ισοδύναμης αντίστασης Thevenin του κυκλώματος ηλεκτροπληξίας ανάλογα με την τάση έκθεσης, r_{eq} .

Βήμα 2^ο : Για μία δεδομένη ή υπολογισμένη τιμή τάσης (επαφής ή βηματικής) και την αντίστοιχη ισοδύναμη αντίσταση Thevenin του βήματος 1, υπολογίζεται το πραγματικό ρεύμα που διαπερνά το ανθρώπινο σώμα χρησιμοποιώντας την γραφική μέθοδο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3.5. Συγκεκριμένα, το πραγματικό ρεύμα σώματος προσδιορίζεται από την ταυτόχρονη λύση των ακόλουθων δύο εξισώσεων:

$$V_{\text{touch}} = V_b + r_{\text{eq}} \cdot I_{\text{body}} \quad (3.3.3)$$

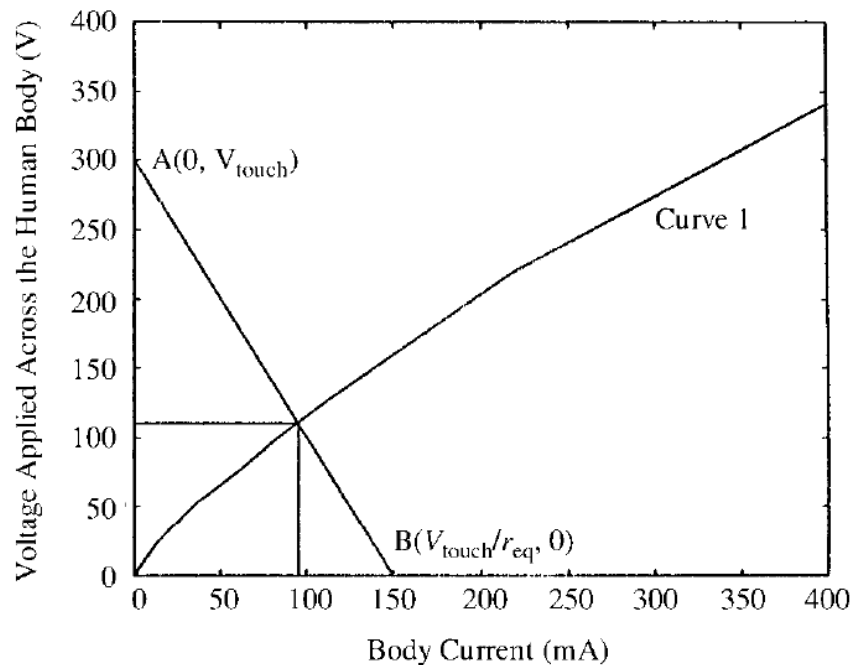
$$I_{\text{body}} = V_b / r_b = V_b / f(V_b) \quad (3.3.4)$$

Όπου η συνάρτηση $r_b = f(V_b)$ αντιπροσωπεύει τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της αντίστασης σώματος ως συνάρτηση της τάσης σώματος. Προσδιορίζονται με βάση τα δεδομένα που φαίνονται στην Εικόνα 3.3.1. Σημειώνεται ότι η εξίσωση (3.3.4) αντιπροσωπεύει μία μη γραμμική εξίσωση η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 3.3.6 ως καμπύλη 1 (curve 1).

Η εξίσωση (3.3.4) είναι μία ευθεία γραμμή στο επίπεδο που ορίζεται από τις συντεταγμένες V_b και I_{body} . Για την δημιουργία της γραμμής αυτής ορίζονται τα σημεία τα οποία προσδιορίζονται ως ακολούθως:

Για μία δεδομένη τάση αφής V_{touch} η γραμμή θα περάσει από το σημείο $(V_{\text{touch}}, 0)$. Το σημείο αυτό εμφανίζεται ως σημείο A στην Εικόνα 3.3.6. Επίσης η γραμμή θα περάσει από το σημείο $(V_{\text{touch}}/r_{\text{eq}}, 0)$, σημείο B στην ίδια εικόνα.

Η γραφική κατασκευή αποτελείται από την δημιουργία μιας ευθείας γραμμής που διέρχεται από τα σημεία A και B. Η τομή της γραμμής αυτής με την καμπύλη 1 προσδιορίζει την πραγματική τιμή ρεύματος σώματος για την καθορισμένη τάση αφής, όπως φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 3.3.6.



Εικόνα 3.3.6: Γραφική μέθοδος προσδιορισμού του πραγματικού ρεύματος σώματος [39].

3.4 Σύγκριση και αντιπαράθεση Προτύπων IEC 60479 [39] και IEEE Std 80-2013 [1]

Τα συνεχώς αυξανόμενα επίπεδα στα ρεύματα που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια σφαλμάτων στα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας του σήμερα, οδηγούν στην ανάγκη για μεγαλύτερη έμφαση στην ασφάλεια. Από την άλλη πλευρά, η παγκοσμιοποίηση των εθνικών οικονομιών έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον στην εναρμόνιση των προτύπων. Το πρώτο βήμα σε αυτή την προσπάθεια είναι η τεχνική σύγκριση των διαφόρων προτύπων που πραγματεύονται το ίδιο πρόβλημα. Η παρούσα διπλωματική παρέχει μια τεχνική σύγκριση των δύο προτύπων που αφορούν την ασφάλεια των υποσταθμών υψηλής τάσης.

Βασικός στόχος και των δύο Προτύπων είναι η διαμόρφωση ασφαλών (επιτρεπτών) τιμών ρευμάτων που διαρρέουν μέσα από το ανθρώπινο σώμα. Βασική υπόθεση είναι ότι οι σχεδιαστές των συστημάτων γείωσης δύναται να εγγυηθούν για την μη ύπαρξη υπέρβασης των τιμών αυτών, σε περιπτώσεις τυχαίας επαφής του ανθρώπου με τις γειωμένες δομές, κάτω από συνθήκες λάθους.

Η φιλοσοφική διαφορά μεταξύ των δύο Προτύπων έγκειται στο γεγονός ότι ενώ το Πρότυπο IEC 479-1 [1] δεν αντιμετωπίζει όλα τα σχετικά υπολογιστικά θέματα, τα οποία μπορεί να είναι αναγκαία στη διαδικασία σχεδιασμού (π.χ. αντίσταση ποδιών/αντίσταση εδάφους, κλπ.), το IEEE Std 80-2013 [1] αναλύει τα πιο υπολογιστικά θέματα και παρέχει διαδικασίες και κατευθύνσεις για την αξιολόγηση της ασφάλειας ενός συστήματος γείωσης.

	IEEE Std 80	IEC 479-1
Body Resistance	1000 ohms	Voltage Dependent and Path Dependent (Figs. 4 and 5)
Thevenin Equivalent Resistance	1.5c _s ρ _s for touch voltage 6.0c _s ρ _s for step voltage	no guidance
Thevenin Equivalent Voltage	Simplified Equations k _i k _r L I or use of computer models is suggested	no guidance
Permissible Body Current	0.116A/√t for 50 kg person 0.157A/√t for 70 kg person	S-curves independent of human size (Fig. 6)

Εικόνα 3.4.1: Διαφορές του κυκλώματος ηλεκτροπληξίας ανάμεσα στα Πρότυπα IEEE Std 80 και IEC 479-1 [39].

Αναφορικά με το περιγραφόμενο μοντέλο ηλεκτροπληξίας, φαίνεται ότι αυτό είναι εγγενής και στα δύο Πρότυπα. Ωστόσο, τα εξεταζόμενα Πρότυπα διαφέρουν ως προς την εφαρμογή του μοντέλο ηλεκτροπληξίας. Η Εικόνα 3.4.1 παρέχει μια επισκόπηση των διαφορών μεταξύ των δύο Προτύπων όσον αφορά το μοντέλο ηλεκτροπληξίας.

Μια κοινή βάση σύγκρισης έχει αναπτυχθεί από την άποψη της επιτρεπόμενης τάσης αφής και βηματικής τάσης. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες το IEEE Std είναι πιο συντηρητικό από το IEC 479 και το αντίστροφο. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό των κριτηρίων ασφαλείας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 479 είναι πιο πολύπλοκη από την αντίστοιχη που προτείνεται και ακολουθείται σύμφωνα με το IEEE Std, η οποία είναι εμφανώς πιο απλοποιημένη.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα κριτήρια ασφαλείας περιλαμβάνουν άνετα περιθώρια ασφαλείας, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η απλότητα του IEEE Std 80 δεν θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια που παρέχει ένα σύστημα γείωσης σχεδιασμένο με βάση το Πρότυπο αυτό.

Μια άλλη σημαντική διαφορά είναι ότι το πρότυπο IEC 479 - 1 δεν αντιμετωπίζει όλα τα απαραίτητα υπολογιστικά θέματα ενώ το IEEE Std 80 παρέχει κατά προσέγγιση εξισώσεις και τύπους για όλα τα θέματα που είναι χρήσιμα σε έναν σχεδιαστή. Εν κατακλείδι, IEEE Std 80 παρέχει χρήσιμες διαδικασίες για την αξιολόγηση της ασφαλείας του συστήματος γείωσης.

Συνοψίζοντας, το IEEE 80 καθορίζει τα κριτήρια ασφαλείας για δεδομένο βάρος σώματος, χρησιμοποιώντας μία σταθερή τιμή αντίστασης σώματος ίση με 1000 Ω, ενώ το IEC 479 έχει αποδειχθεί το γεγονός ότι η αντίσταση του σώματος δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την μάζα σώματος. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι, σωματικά μεγάλοι άνθρωποι έχουν χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση σώματος λόγω της μεγάλης περιοχής που περιέχει η εγκάρδια διατομή τους ενώ σωματικά μικροί άνθρωποι έχουν γενικά υψηλότερη αντίσταση του σώματος.

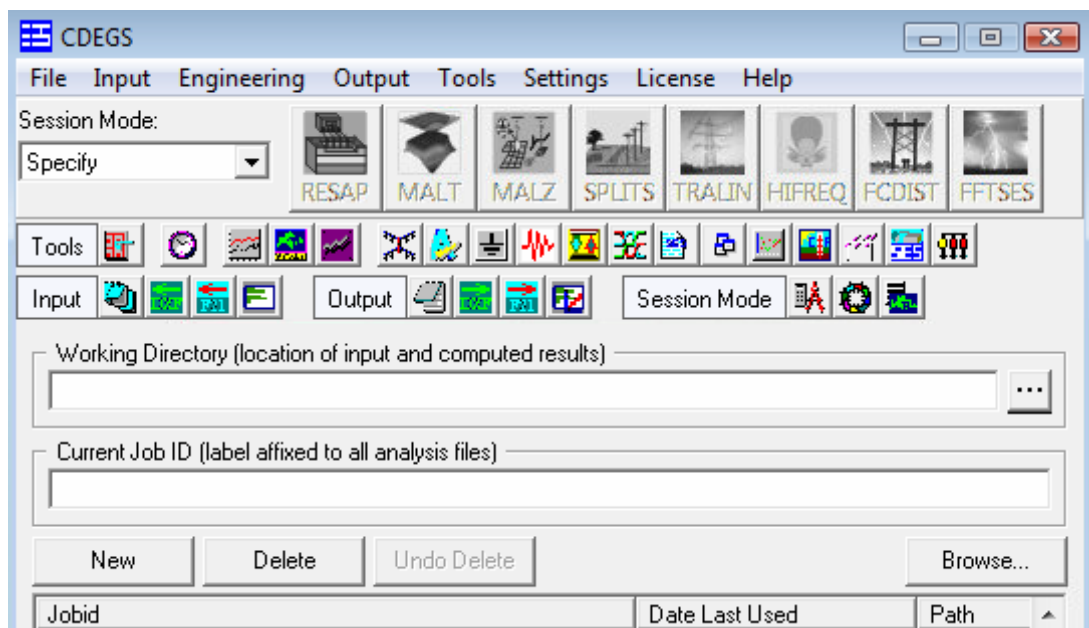
Κεφάλαιο 4

Πακέτο Λογισμικού SES CDEGS

Το πακέτο λογισμικού CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis, Version 14.3.95) της εταιρείας SES χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συστήματος γείωσης. Η διαδικασία που ακολουθείται διακρίνεται σε τρία μέρη, την καταχώρηση δεδομένων, όπου γίνεται ο ορισμός των παραμέτρων του εδάφους και του συστήματος γείωσης, την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος υπό τις συνθήκες που ορίσαμε στο πρώτο μέρος και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, αριθμητικά και με τη μορφή γραφημάτων.

4.1 Εισαγωγή

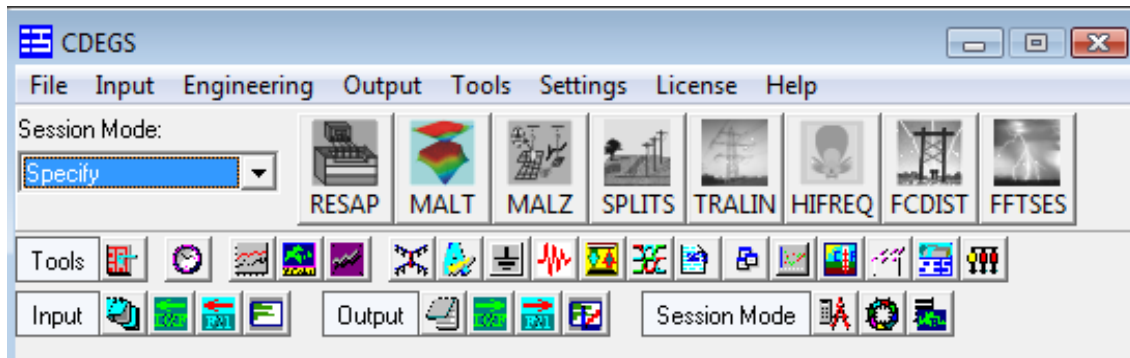
Εκτελούμε το πρόγραμμα CDEGS.exe. Στο πρώτο βήμα μας ζητάει να επιλέξουμε ένα Working Directory και ένα Current Job ID (Εικόνα 5.1). Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε το σημείο (φάκελο) στο οποίο θέλουμε να αποθηκεύονται τα αρχεία, καθώς επίσης και τα διακριτά ονόματα αρχείων εισόδου και εξόδου, ένα για κάθε διαφορετικό αρχείο που θα επεξεργαστούμε, ώστε να είναι εύκολα αναγνωρίσιμο από τον χρήστη.



Εικόνα 4.1.1: Αρχική εικόνα του προγράμματος CDEGS.

Εφόσον επιλέξουμε το κατάλληλο σημείο αποθήκευσης και όνομα του αρχείου και πριν προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα το οποίο περιλαμβάνει την επιλογή της

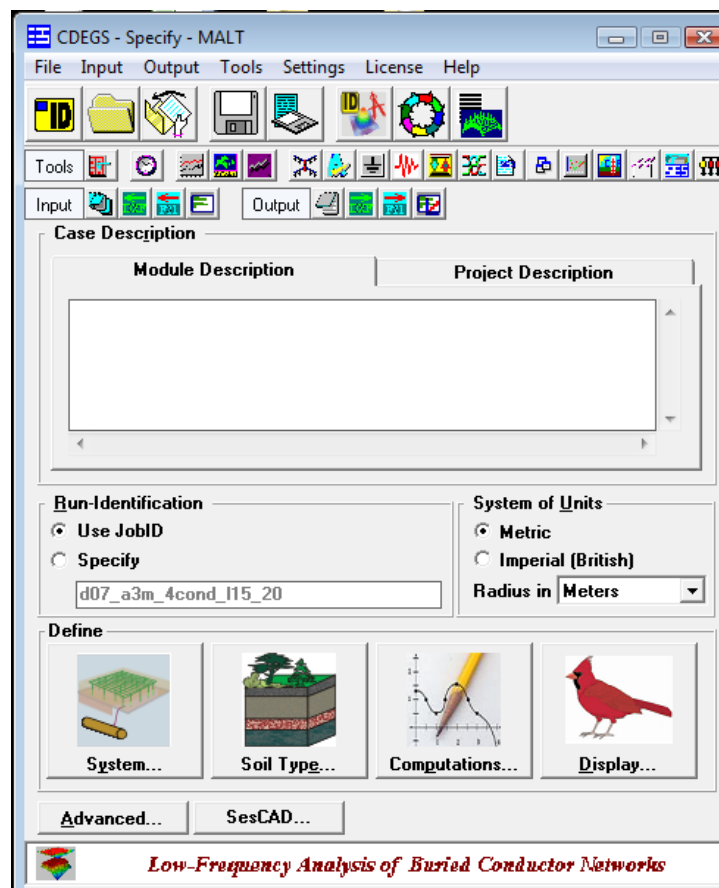
εφαρμογής του προγράμματος που μας ενδιαφέρει. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιούμε την εφαρμογή MALZ.



Εικόνα 4.1.2: Διάφορες εφαρμογές του προγράμματος CDEGS.

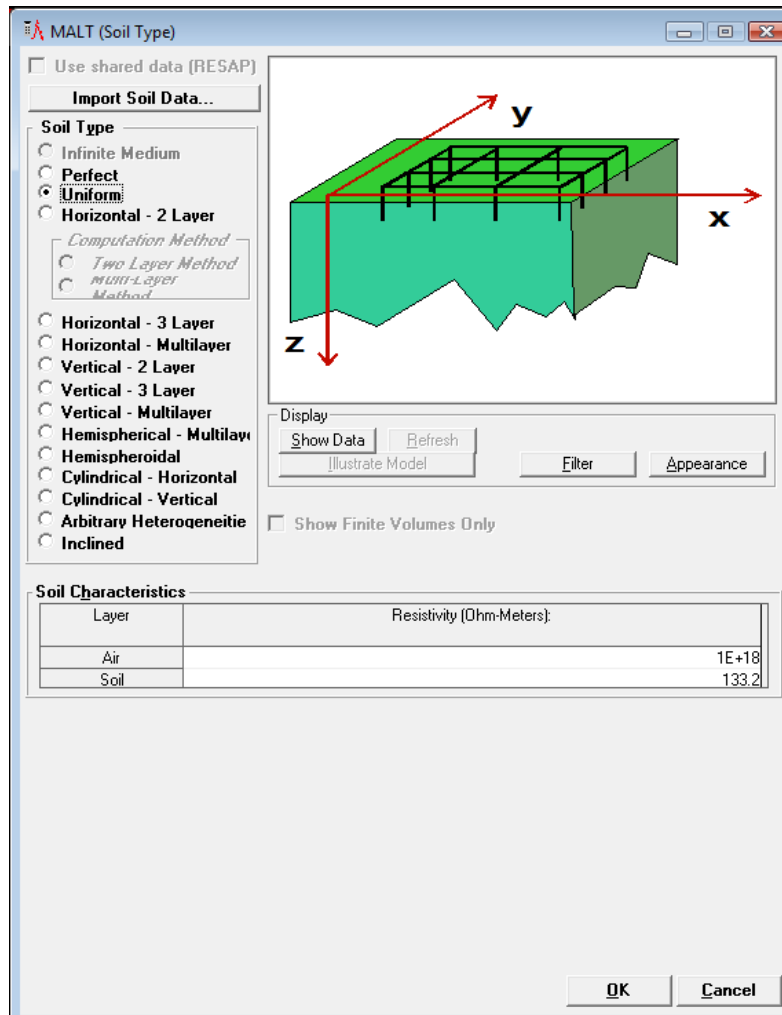
Στη συνέχεια εφόσον έχουμε επιλέξει την εφαρμογή MALT και την διαδικασία Specify εμφανίζεται η ακόλουθη οθόνη όπου επιλέγουμε το USE JobID ώστε να επεξεργαζόμαστε αποκλειστικά το αρχείο που έχουμε επιλέξει.

4.2 MALT



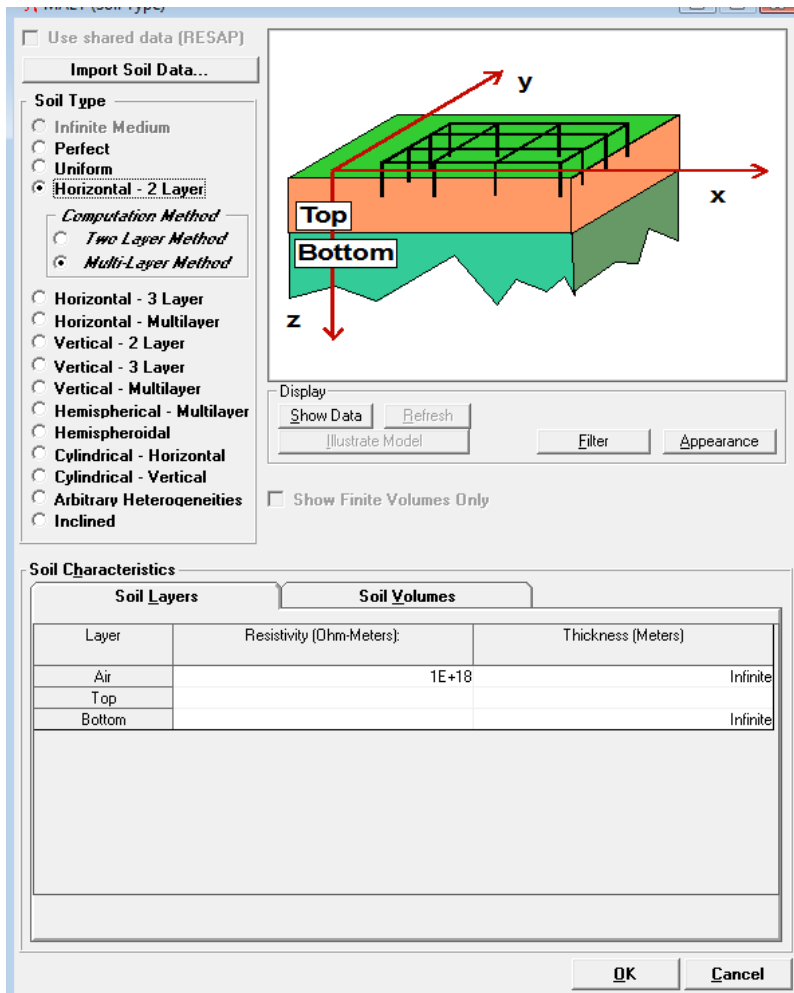
Εικόνα 4.2.1: Αρχική οθόνη στο MALT.

Επιλέγοντας την εφαρμογή Soil Type επιλέγουμε το μοντέλο εδάφους που προσεγγίζει το έδαφος στο οποίο θα τοποθετηθεί το πλέγμα γείωσης. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής έχουν εξεταστεί διάφορα σενάρια, τα οποία περιλαμβάνουν δύο μονοστρωματικά μοντέλα εδάφους διαφορετικής ειδικής αντίστασης και ένα οριζόντια πολυστρωματικό.



Εικόνα 4.2.2: Εισαγωγή της δομής του εδάφους, μονοστρωματική στο MALT.

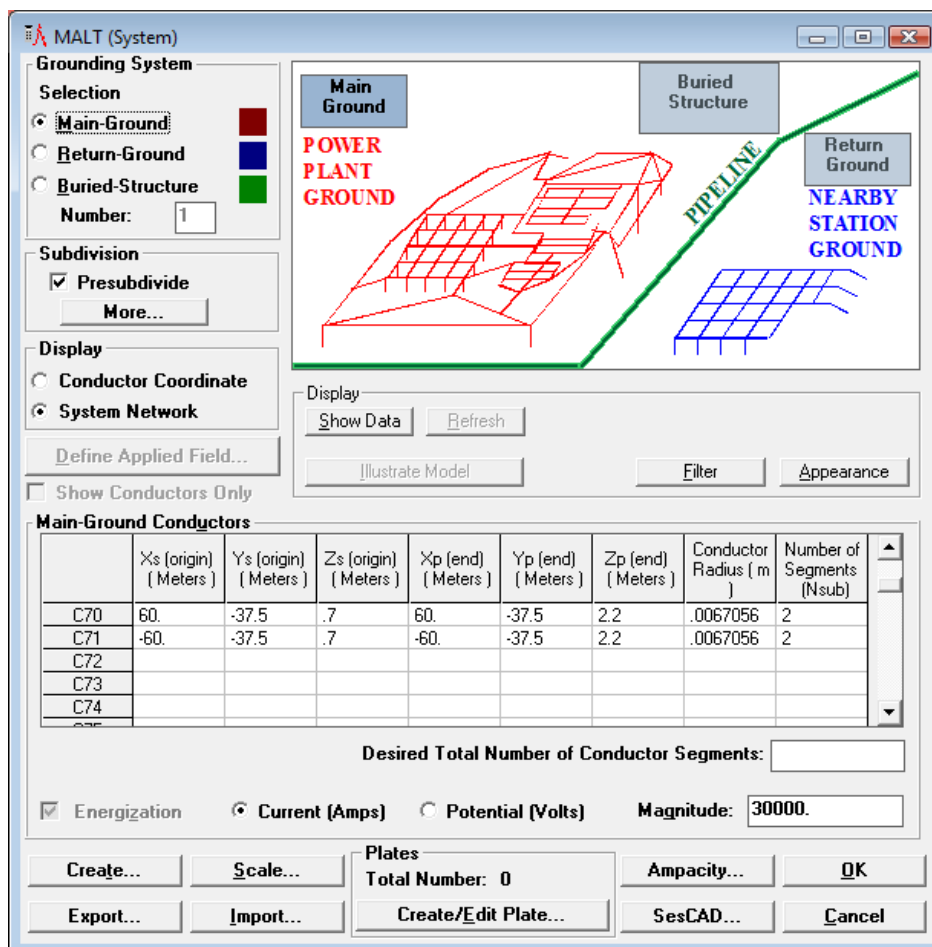
Όσον αφορά τα σενάρια που εξετάστηκαν για μοντέλο εδάφους μονοστρωματικό, περιλαμβάνουν δοκιμές για έδαφος με ειδική αντίσταση $\rho=133,20 \Omega\text{m}$ και $\rho= 266,39 \Omega\text{m}$.



Εικόνα 4.2.3: Εισαγωγή της δομής του εδάφους, πολυστρωματική στο MALT.

Στις περιπτώσεις θεώρησης πολυστρωματικού μοντέλου εδάφους εισάγουμε δεδομένα τόσο για την ειδική αντίσταση όσο και για το πάχος κάθε στρώματος. Το τελευταίο στρώμα θεωρείται ότι έχει άπειρο βάθος.

Μετά την επιλογή του κατάλληλου κάθε φορά μοντέλου εδάφους προχωράμε στην δημιουργία του συστήματος γείωσης μέσω της επιλογής System. Ο καθορισμός του συστήματος γείωσης μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Αρχικά παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής πληροφοριών όπως οι διαστάσεις των αγωγών ή του πλέγματος, η διάταξη τους, το υλικό τους καθώς και το μέγεθος του ρεύματος ενεργοποίησης (ρεύμα σφάλματος που διαρρέει το σύστημα γείωσης), όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 4.2.3.



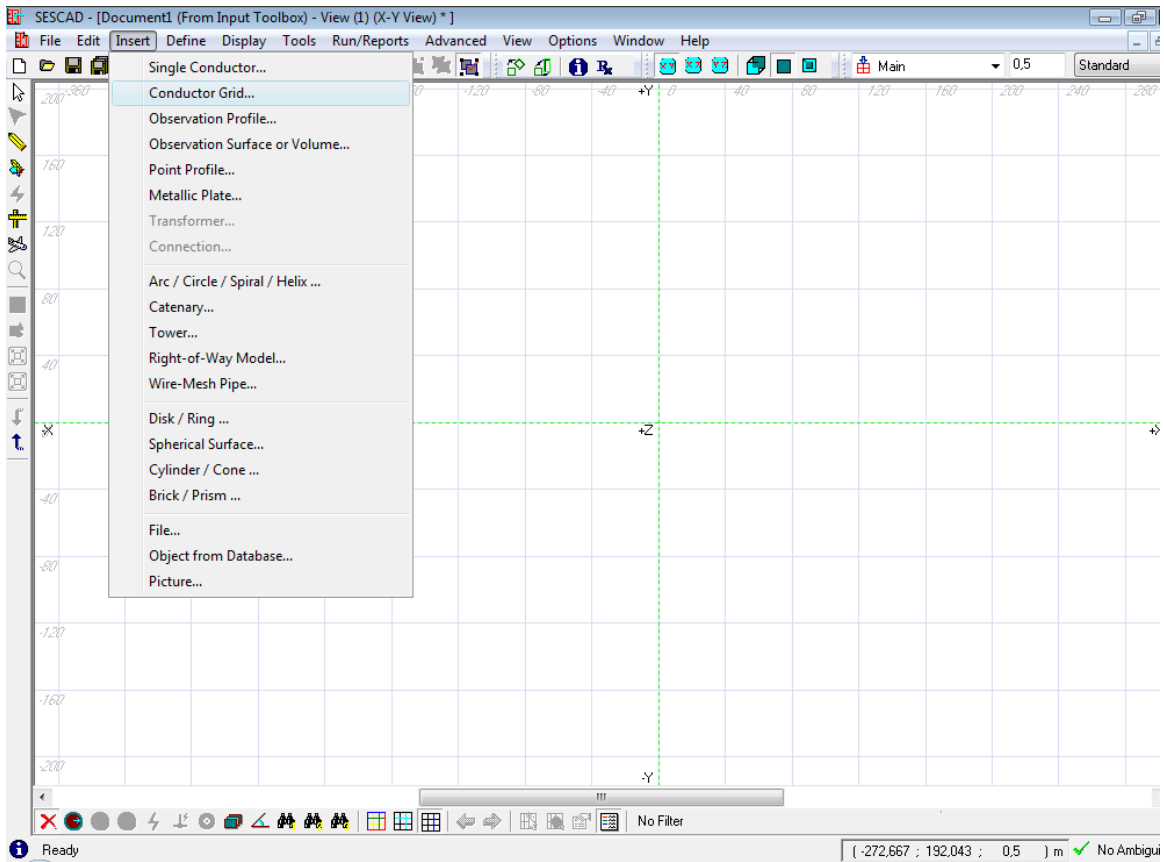
Εικόνα 4.2.4: Οθόνη εισαγωγής δεδομένων του συστήματος γείωσης στο MALT.

4.3 SESCAD

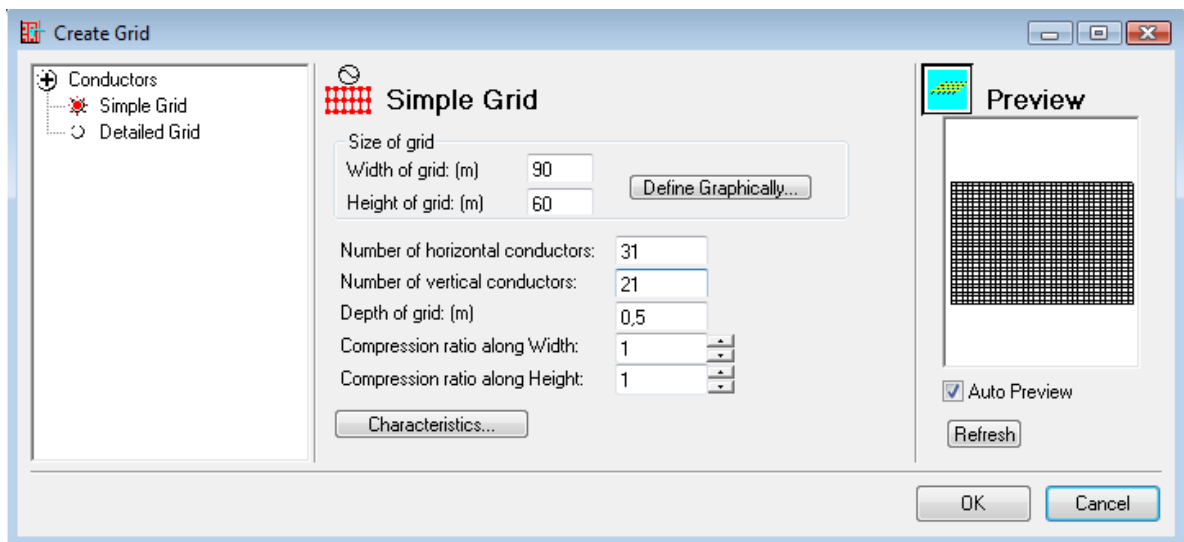
Η διαδικασία σχεδιασμού του πλέγματος γείωσης μπορεί να γίνει με χειροκίνητο τρόπο, σχεδιάζοντας το πλέγμα γείωσης με γραφικό τρόπο μέσα από την επιλογή SESCAD.

Με αυτό τον τρόπο η σωστή εισαγωγή των δεδομένων γίνεται με μία διαδικασία που αποτελείται από τα ακόλουθα διακριτά βήματα:

Αρχικά από την μπάρα εργαλείων και με την επιλογή Insert → Conductor Grid (Εικόνα 4.3.1) εμφανίζεται το παράθυρο Create Grid μέσα από το οποίο ορίζουμε τις διαστάσεις που θα έχει το πλέγμα γείωσης, την ακριβή θέση αυτού, καθώς επίσης τον αριθμό των οριζόντιων και κάθετων αγωγών και το βάθος τοποθέτησης του πλέγματος (Εικόνα 4.3.2).

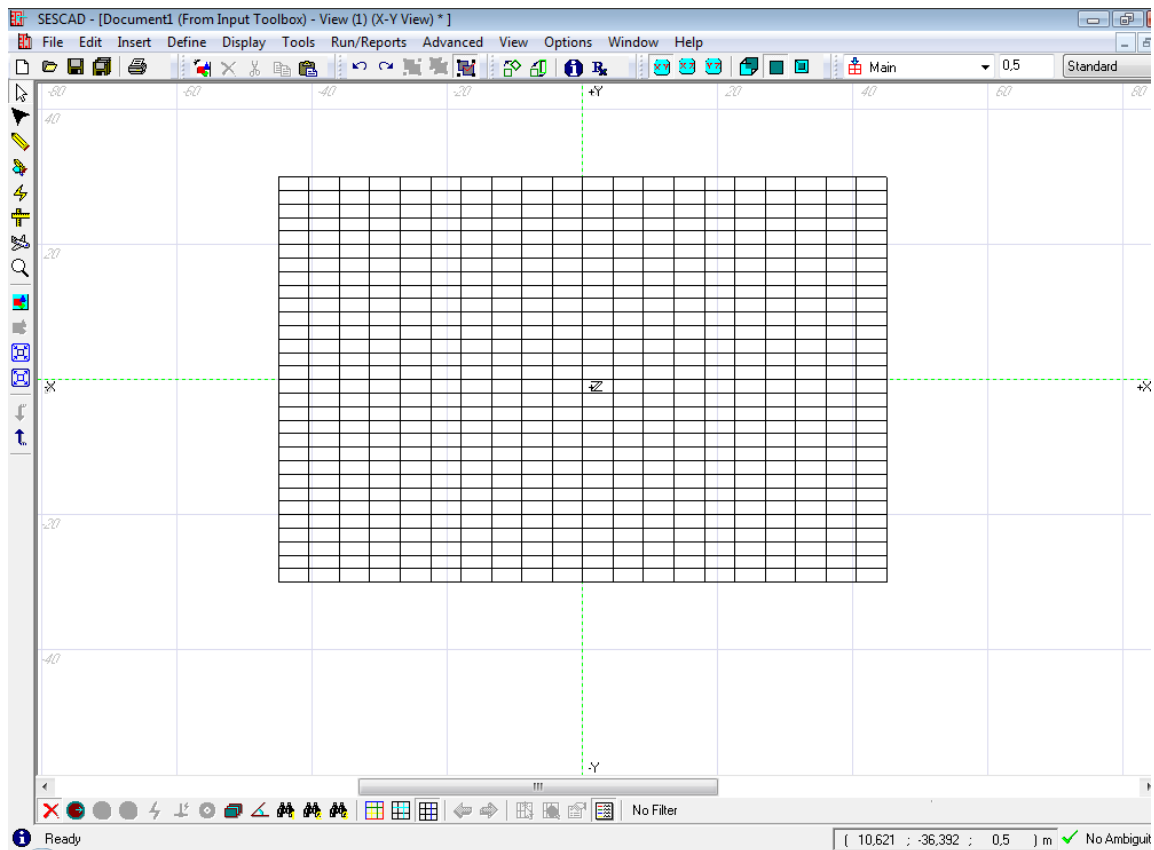


Εικόνα 4.3.1: Οθόνη επιλογής δεδομένων εισαγωγικής για τον γραφικό καθορισμό του συστήματος γείωσης στο SESCAD



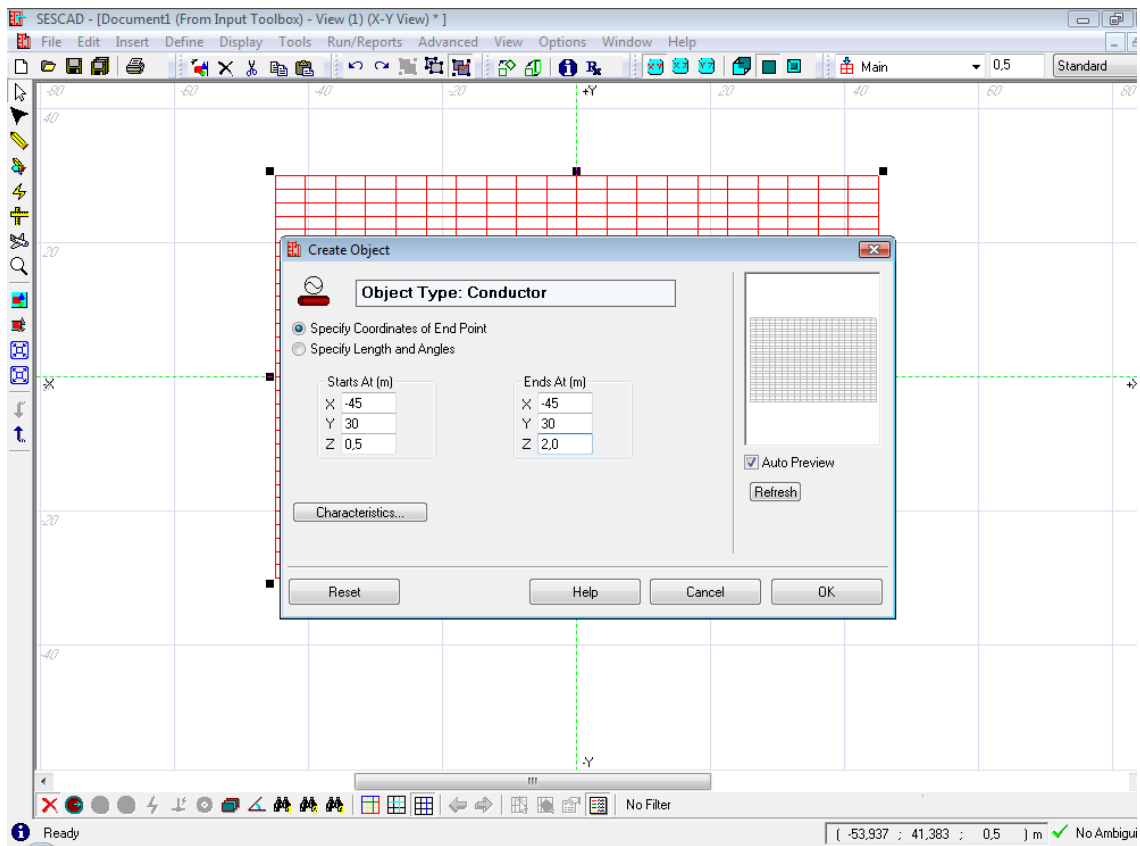
Εικόνα 4.3.2: Επιλογή χαρακτηριστικών του συστήματος γείωσης στο SESCAD

Στο ακόλουθη Εικόνα 4.3.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης το οποίο αποτελείται από ένα παραλληλόγραμμο πλέγμα γείωσης με διαστάσεις 90m \times 60m, τοποθετημένο σε βάθος 0,5m, αποτελούμενο από 31 οριζόντιους αγωγούς και 21 κάθετους το οποίο μεταφράζεται σε «μάτι» πλέγματος ίσο με 3m.



Εικόνα 4.3.3: Γραφικός τρόπος εισαγωγής του συστήματος γείωσης με χρήση της επιλογής SESCAD

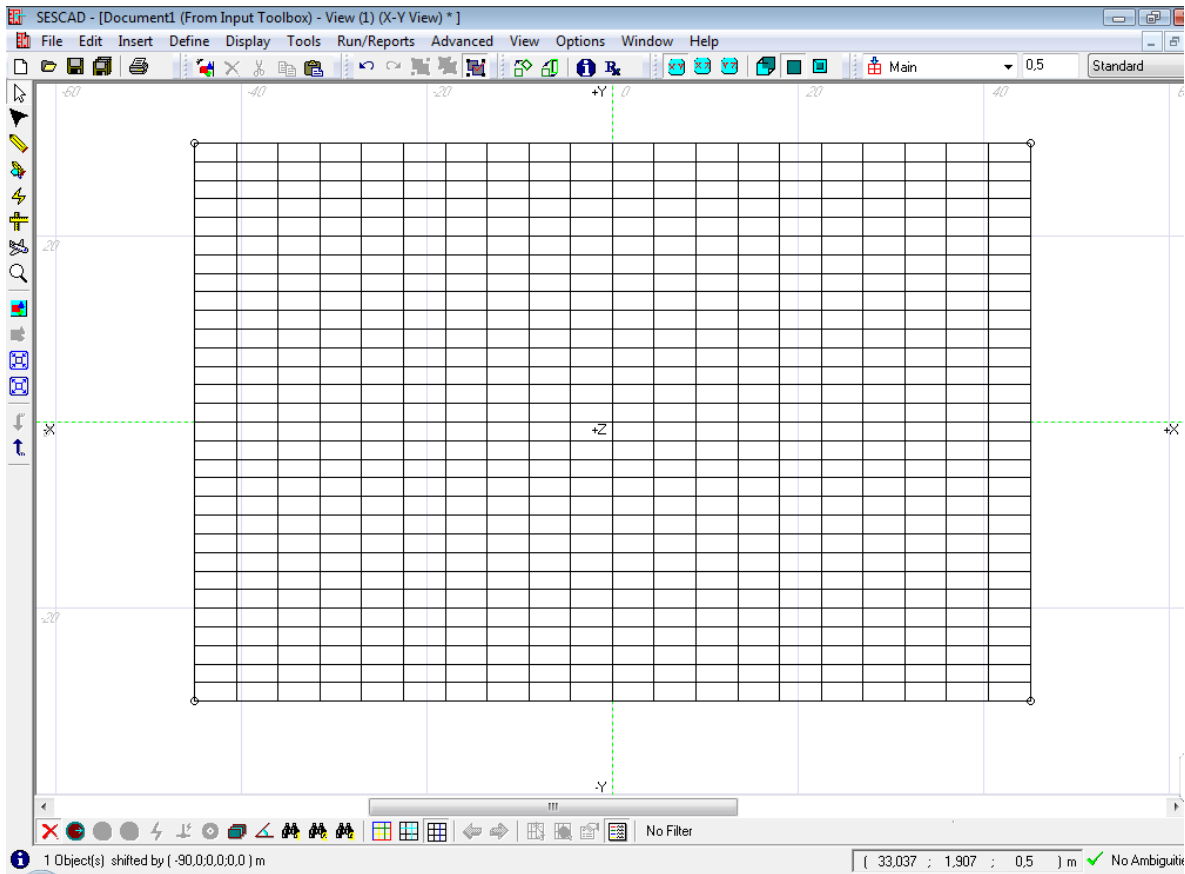
Στην συνέχεια μέσα από την γραμμή εργαλείων και με χρήση της επιλογής Insert αλλά με χρήση της επιλογής Single Conductor ορίζουμε την εισαγωγή και την θέση κάθετου ηλεκτροδίου γείωσης όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά αυτού π.χ. μήκος αυτών και βάθος τοποθέτησης (Εικόνα 4.3.4). Μέσα από επανάληψη της κίνησης αυτής μπορούμε να εισάγουμε στο πλέγμα όσα κάθετα ηλεκτρόδια θέλουμε. Επίσης το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα copy-paste και μέσα από την επιλογή Tools και της εντολής Shift να αντιγράψουμε αγωγούς και να τους μετακινούμε μέσα στην οθόνη.



Εικόνα 4.3.4: Εισαγωγής κάθετων ηλεκτροδίων στο πλέγμα γείωσης.

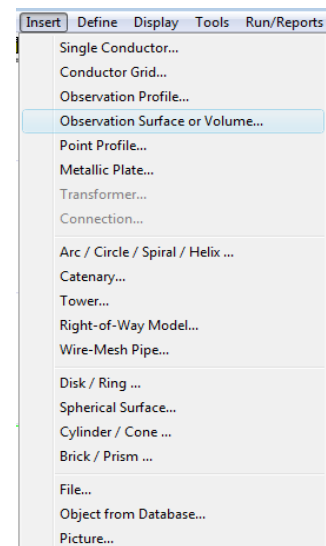
Στην παραπάνω Εικόνα δείχνεται η εισαγωγή ενός κάθετου ηλεκτροδίου γείωσης στο πλέγμα στην θέση (45,30) και μήκους 1,5m.

Η Εικόνα 4.3.5 παρουσιάζει ένα σύστημα γείωσης αποτελούμενο από ένα πλέγμα διαστάσεων 90m,60m, με «μάτι» πλέγματος $a=3\text{m}$, βάθους τοποθέτησης $\text{depth}=0,5\text{m}$ και από 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης στις γωνίες του πλέγματος, μήκους $l=1,5\text{m}$.



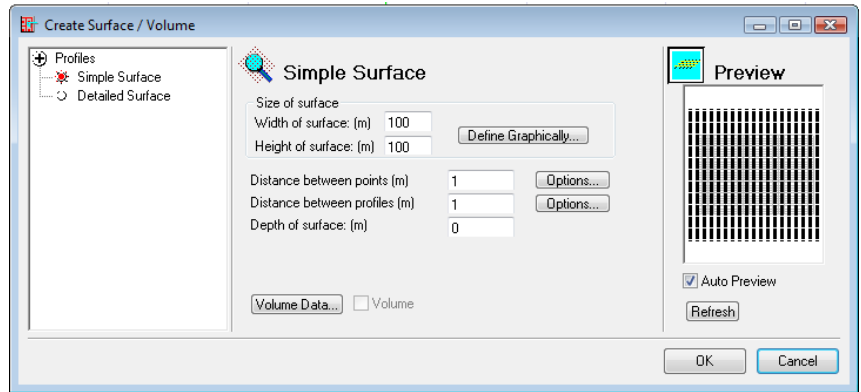
Εικόνα 4.3.5: Ολοκληρωμένο σύστημα γείωσης αποτελούμενο από ένα πλέγμα και 4 κάθετα ηλεκτρόδια.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός Observation Profile μέσα από την επιλογή Insert όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.6. Το Profile ορίζει «σημεία παρατήρησης» για τον υπολογισμό των τάσεων βηματικής και επαφής, και είναι αναγκαίο να επεκτείνεται και πέρα από τα όρια του προς μελέτη υποσταθμού. Προτείνεται ότι η σωστή απόσταση είναι επιπλέον 3m περιμετρικά του πλέγματος. Στην Εικόνα 4.3.7 βλέπουμε τις επιλογές που παρέχονται από το πρόγραμμα για την δημιουργία του Profile και περιλαμβάνουν την εισαγωγή των δεδομένων (μήκους-πλάτους) της προς έλεγχο περιοχής, καθώς επίσης και την δυνατότητα γραφικού καθορισμού αυτής.

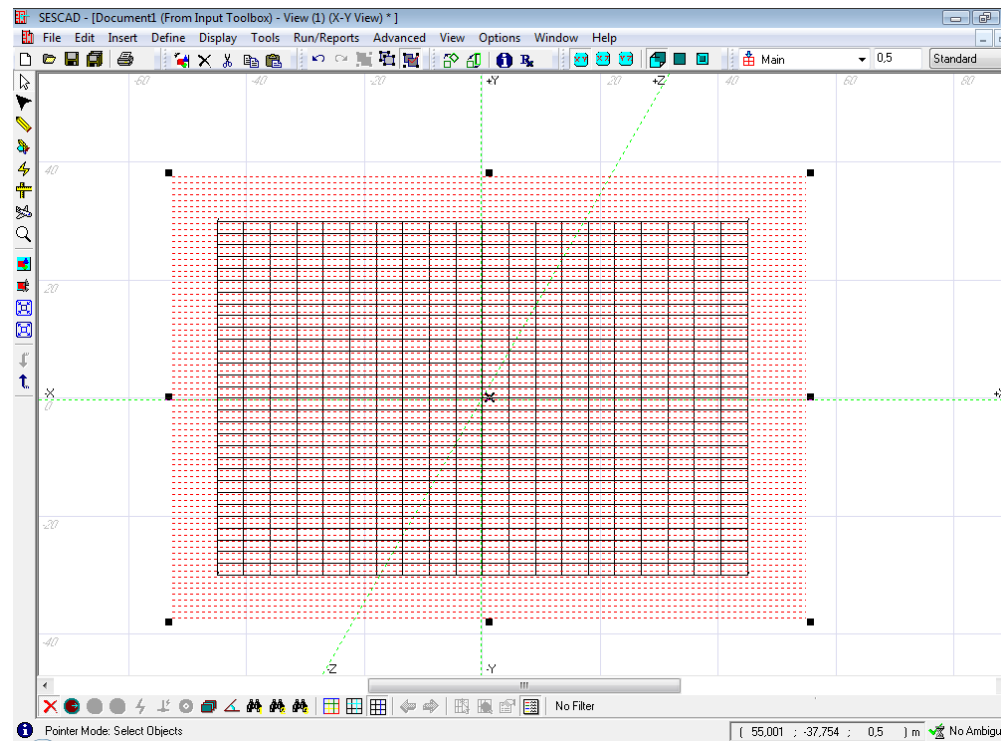


Εικόνα 4.3.6: Εισαγωγή Profile παρατήρησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από τον καθορισμό των σημείων παρατήρησης ορίζεται επίσης και η απόσταση μεταξύ των σημείων αυτών στους 2 άξονες (Dx, Dy) ενώ στο επίπεδο του Z επιλέγουμε να εξετάζετε η επιφάνεια του εδάφους, όπου σε αυτή είναι δυνατό ένας άνθρωπος να εκτεθεί σε κάποια από αυτές τις τάσεις. Μετά τον προσδιορισμό των παραμέτρων η προς έλεγχο περιοχή παρουσιάζεται με ένα κόκκινο πλέγμα πάνω από το πλέγμα γείωσης (Εικόνα 4.3.8).



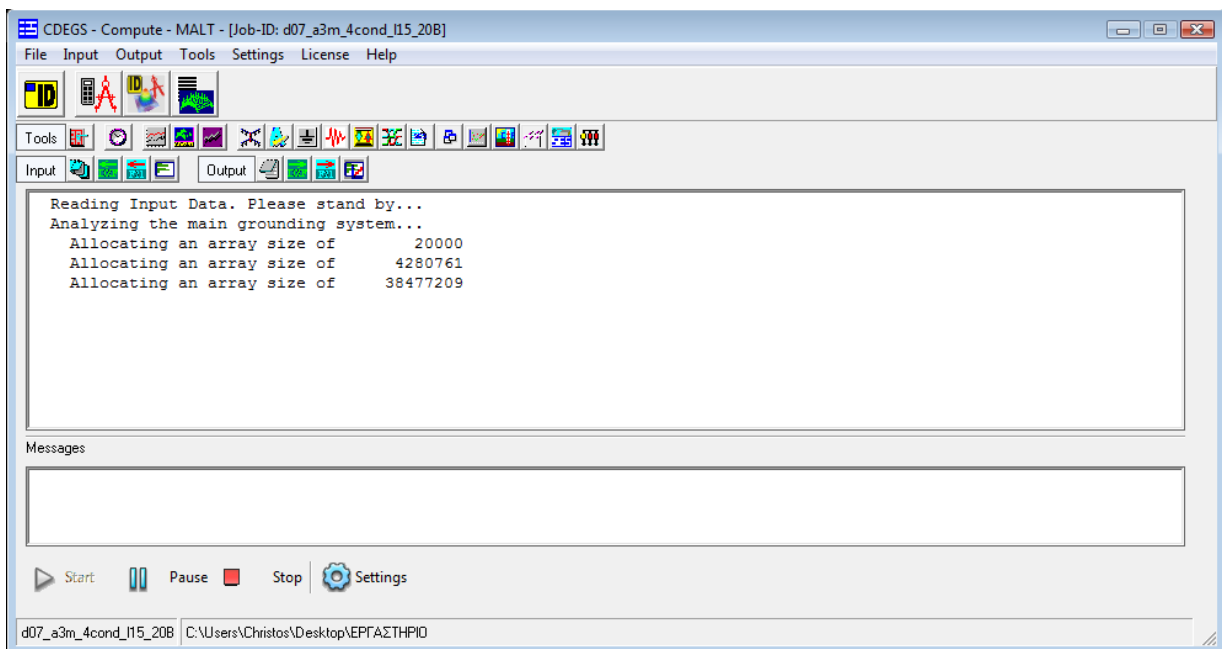
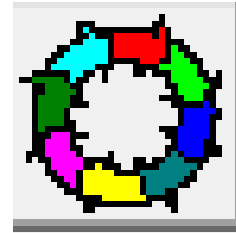
Εικόνα 4.3.7: Ορισμός σημείων παρατήρησης.



Εικόνα 4.3.8: Απεικόνιση Profil παρατήρησης.

4.4 Προσομοίωση

Επιλέγοντας από την αρχική οθόνη εισόδου του MALT (Εικόνα 4.4) το διπλανό σύμβολο, πραγματοποιείται η προσομοίωση του συστήματος γείωσης με τις παραμέτρους και τις συνθήκες που του ορίσαμε κατά την διάρκεια σχεδιασμού του. Η οθόνη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσομοίωσης παρουσιάζεται στην ακόλουθη Εικόνα 4.14, όπου στο πάνω μέρος γίνεται εμφανές ότι έχουμε μεταφερθεί στην επιλογή **Compute** του MATL. Ως αποτέλεσμα η προσομοίωση δίνει τα αναπτυσσόμενα δυναμικά στην επιφάνεια του εδάφους (βηματική τάση, τάση επαφής), τα ανεκτά όρια τάσεων για τον άνθρωπο, το GPR κοκ.

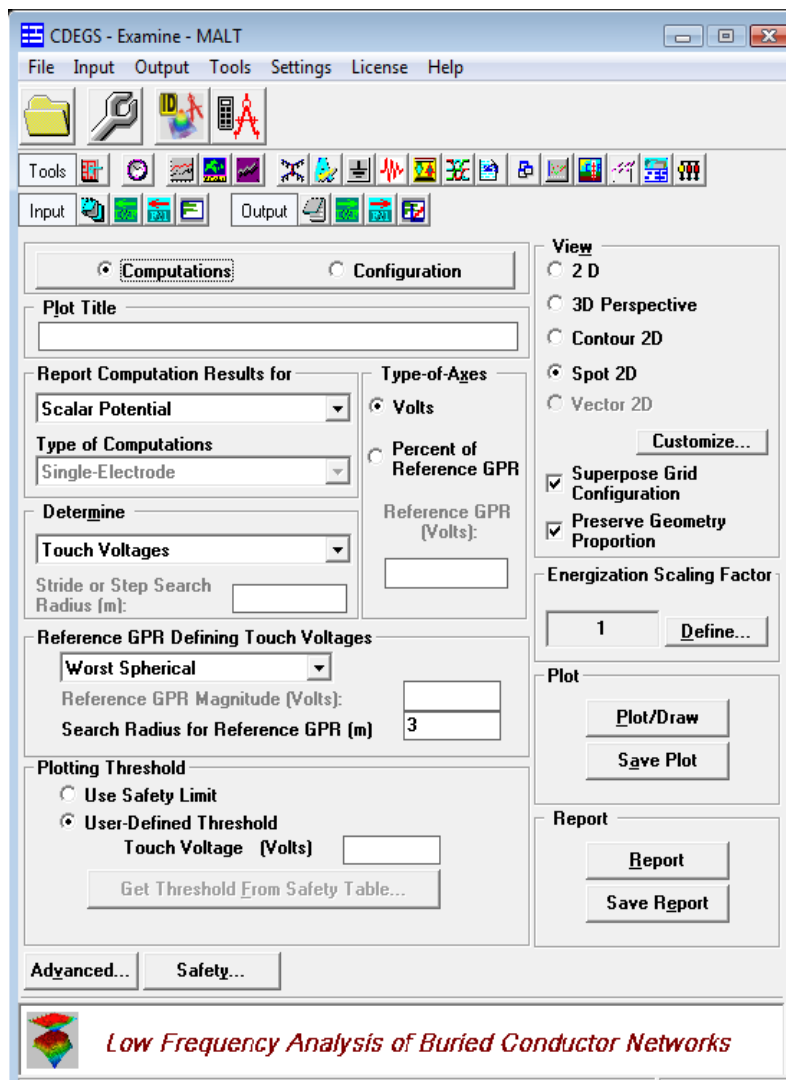


Εικόνα 4.4.1: Οθόνη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσομοίωσης, επεξεργασία όλων των σημείων παρατήρησης.

4.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Με το πέρας της διαδικασίας προσομοίωσης το πρόγραμμα μας εμφανίζει την οθόνη της Εικόνας 4.5.1, όπου γίνεται εμφανές ότι έχουμε μεταφερθεί στην ενότητα **Examine** του MALT.

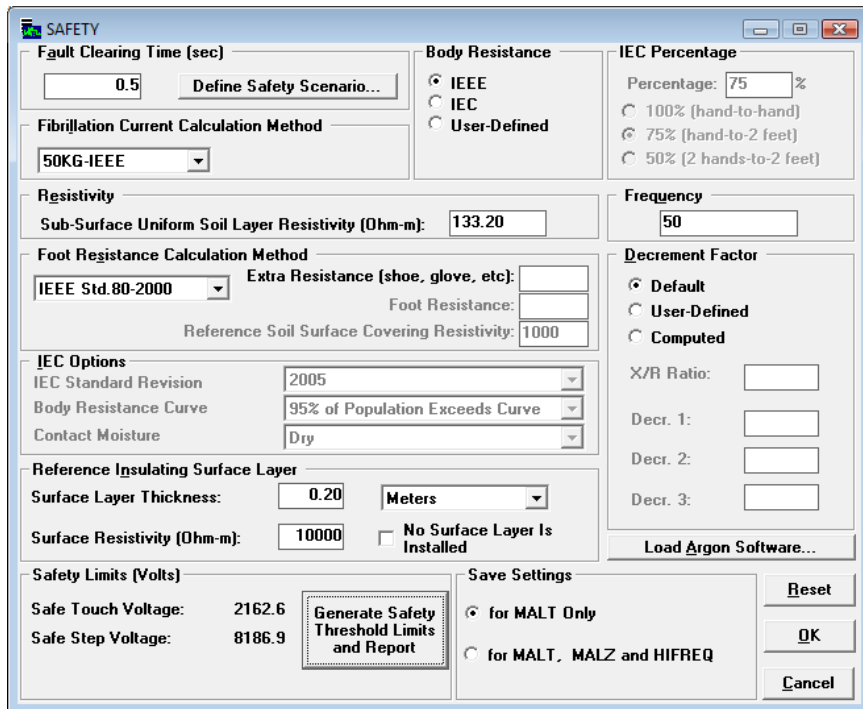
Σε αυτό το σημείο ορίζουμε σύμφωνα με πιο Πρότυπο να υπολογιστούν και αναπαρασταθούν γραφικά οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Εφόσον, επιλέξουμε την δυνατότητα **Computation** στο πάνω κεντρικό κομμάτι της Εικόνας 4.5.1 μεταφερόμαστε στην Εικόνα 4.16 και στην ενότητα **SAFETY**.



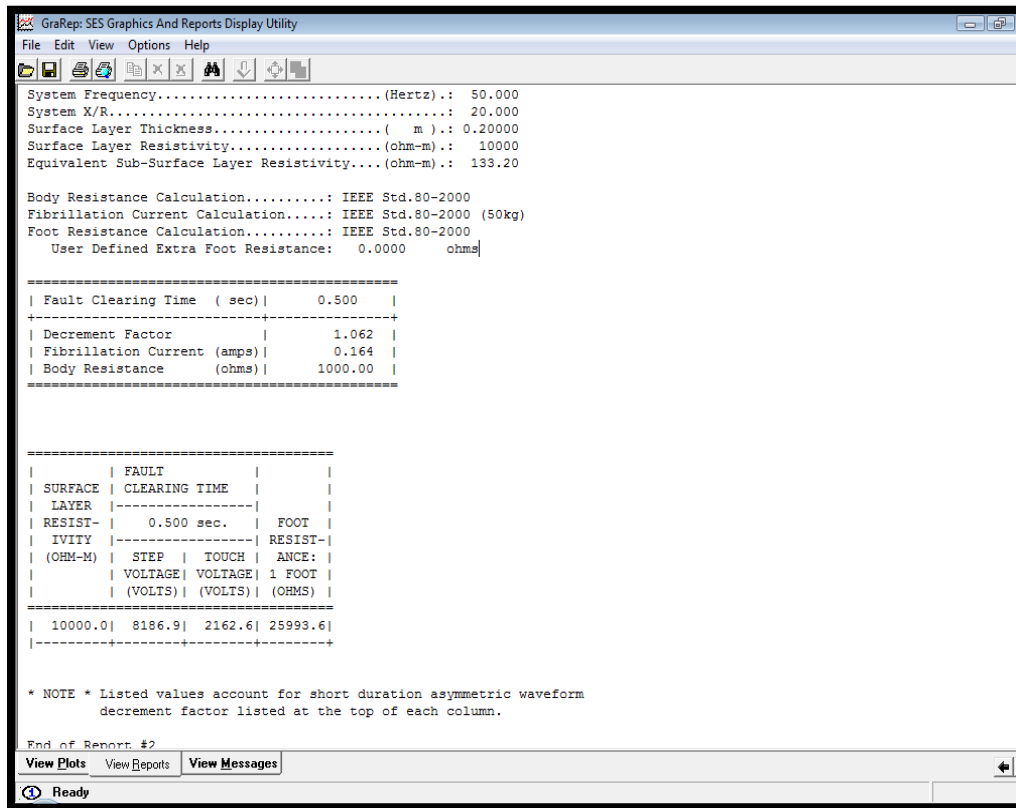
Εικόνα 4.5.1: Οθόνη μετά το πέρας της διαδικασίας προσομοίωσης.

Σε αυτό το σημείο ορίζουμε την συχνότητα και την διάρκεια εκκαθάρισης του ρεύματος σφάλματος καθώς επίσης και το Πρότυπο σύμφωνα με το οποίο θα εξαχθούν τα γραφήματα. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα προσθήκη ενός επιφανειακού στρώματος με υλικό μεγάλης ειδικής αντίστασης για την αύξηση των ορίων των επιτρεπτών τάσεων.

Στην Εικόνα 4.5.2 έχει επιλεγθεί ένα επιπρόσθετο επιφανειακό στρώμα από χαλίκι ειδικής αντίστασης $\rho=10.000\Omega\text{m}$ και ύψους 20cm. Η συχνότητα ορίζεται ίση με 50Hz καθώς στον ελλαδικό χώρο αυτές είναι οι συχνότητες σφάλματος. Επίσης, στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει οριστεί η διάρκεια εκκαθάρισης σφάλματος να είναι ίση με 0,5 sec και τα αποτελέσματα να εξαχθούν με βάση το πρότυπο IEEE.



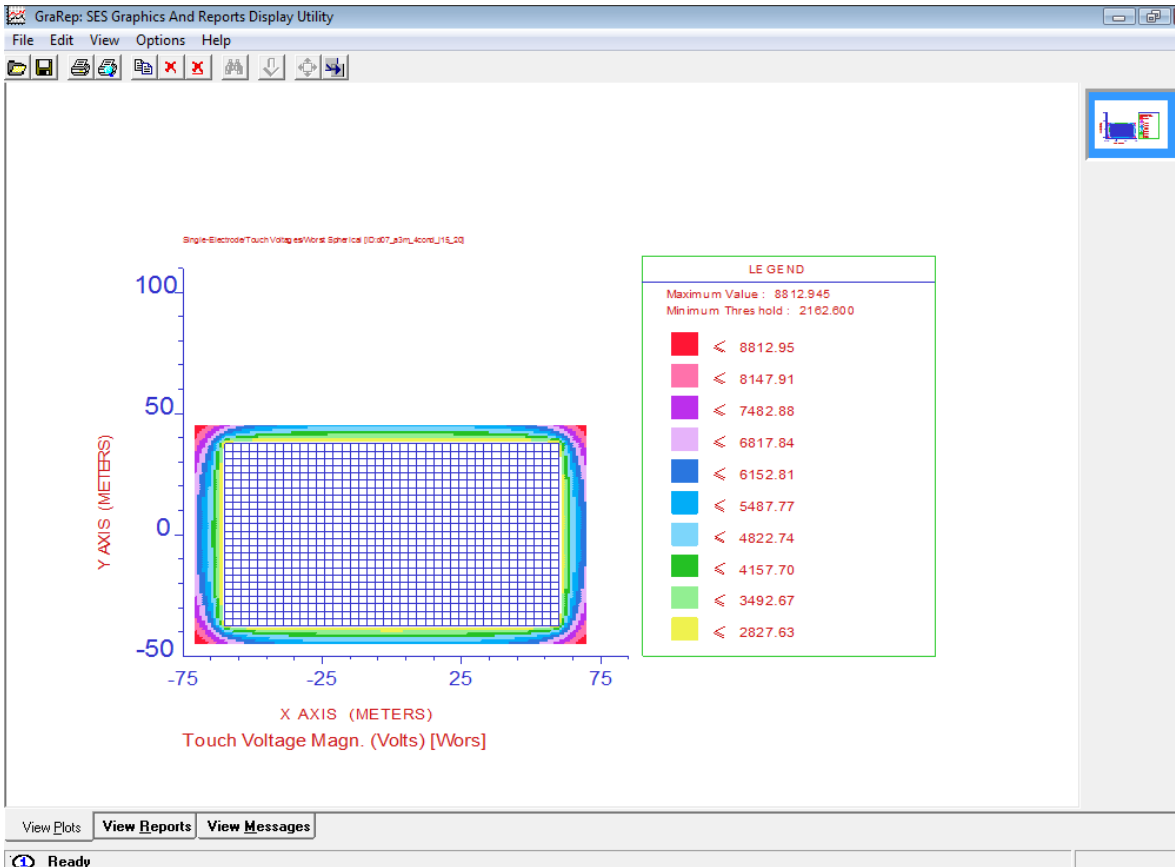
Εικόνα 4.5.2: Καθορισμός κριτηρίων ασφαλείας.



Εικόνα 4.5.3: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε μορφή κειμένου.

Ακολούθως με την επιλογή του «***Generate Safety Threshold Limits and Report***» εμφανίζεται μία οθόνη η οποία αποτελεί μία έκθεση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (Εικόνα 4.5.3) στα οποία περιλαμβάνονται η αντίσταση του ποδιού, η τιμή του ρεύματος που δύναται να προκαλέσει καρδιακή μαρμαρυγή, η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος, καθώς και τα όρια επιτρεπτών τάσεων, βηματικής και τάσης επαφής.

Τέλος, με την χρήση από την ενότητα ***Examine*** του MALT Εικόνα (4.5.1), της εντολής Plot/Draw εμφανίζεται στην οθόνη η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων εξόδου από την προσομοίωση. Στον επεξηγηματικό πίνακα που βρίσκεται στο δεξί μέρος της Εικόνας 4.5.4 εμφανίζονται τα δυναμικά που απεικονίζει κάθε χρώμα ενώ στο πάνω μέρος αυτού τα ανεκτά όρια τάσης. Στην γραφική απεικόνιση δείχνονται τα δυναμικά που επικρατούν σε κάθε σημείο τόσο του υποσταθμού όσο και της περιοχής γύρω από αυτόν όπως έχει επιλεγεί στην διαστασιολόγηση του ***Odserveation Profile***.



Εικόνα 4.5.4: Γραφική παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 5

Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης Υποσταθμών

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εντοπίζεται η διαφορετικότητα στα όρια των επιτρεπτών αναπτυσσόμενων δυναμικών σε ένα υποσταθμό δεδομένων διαστάσεων, μέσω των προσομοιώσεων που έγιναν. Επίσης, δείχνεται πως μικρές αλλαγές σε καίριας σημασίας παραμέτρους της σχεδίασης των πλεγμάτων γείωσης, επιδρούν στον καθορισμό των ορίων και κατά συνέπεια στον προσδιορισμό των ορίων ασφαλείας σύμφωνα με τα πρότυπα IEEE 80-2013 [1] και IEC-479 [39]. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με το πακέτο λογισμικού CDEGS το οποίο παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2 Καθορισμός μοντέλου εδάφους

Το έδαφος στο οποίο έχουμε θεωρήσει ότι θα εγκατασταθεί ο υποσταθμός και κατά συνέπεια θα τοποθετηθεί το πλέγμα γείωσης, στο πλαίσιο των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προσομοιώνεται είτε ως μονοστρωματικό (με δύο διακριτές τιμές ειδικής αντίστασης εδάφους), είτε ως διστρωματικό. Οι ακριβείς τιμές των ειδικών αντιστάσεων εδάφους που θεωρήθηκαν στα πειράματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι στην περίπτωση του μονοστρωματικού εδάφους το ύψος (h) του εδάφους θεωρείται άπειρο για αυτό και δεν δίνεται τιμή στην τέταρτη στήλη του πίνακα. Στην περίπτωση του διστρωματικού εδάφους το ύψος αναφέρεται στο επιφανειακό στρώμα, ενώ το ύψος του δεύτερου στρώματος θεωρείται επίσης άπειρο.

Μοντέλο Εδάφους	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	h (m)
Μονοστρωματικό A	266,39	-	-
Μονοστρωματικό B	133,20	-	-
Διστρωματικό	453,43	58,51	9,71

Πίνακας 5.1: Παρουσίαση μοντέλων εδάφους και ειδικής αντίστασης αυτών [28].

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις επαφής, σύμφωνα με τα δύο Πρότυπα, τόσο στις περιπτώσεις των μονοστρωματικών μοντέλων όσο και σε αυτή του διστρωματικού παρουσιάζονται ακολούθως.

Σε όλες τις προσομοιώσεις έχει θεωρηθεί ότι η ένταση του σφάλματος είναι ίση με 30kA, η διάρκεια αυτού είναι 0,5 sec και η συχνότητα είναι 50 Hz.

Επίσης, το οικόπεδο που έχει χρησιμοποιηθεί, προσομοιωθεί και εξετασθεί είναι σταθερών διαστάσεων 120x75 m, ενώ έχει θεωρηθεί παντού βάθος τοποθέτησης πλέγματος ίσο με 0,7 m.

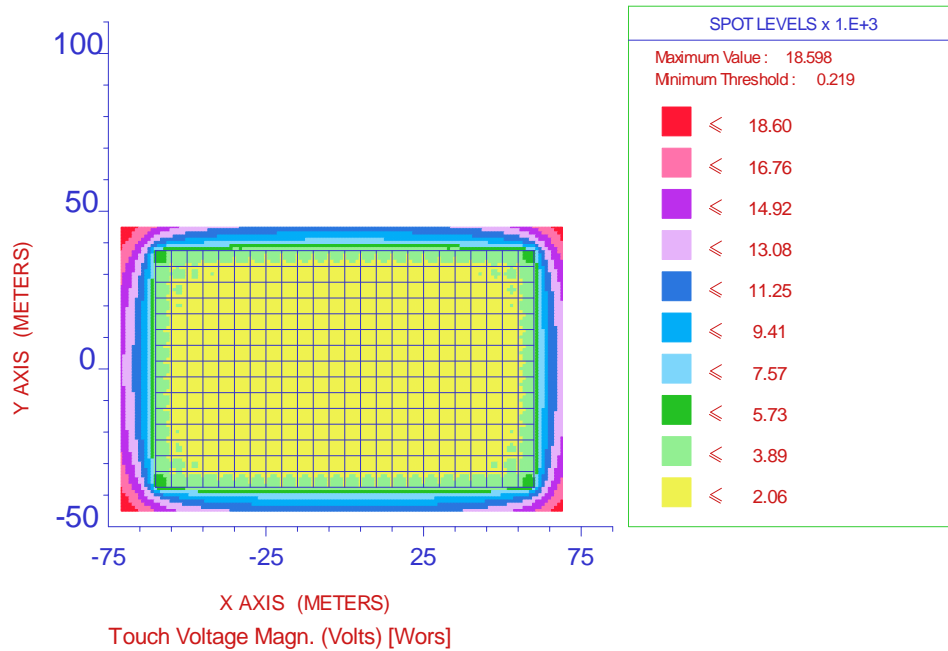
5.3 Μοντέλο εδάφους «Μονοστρωματικό Α»

5.3.1 Βασικό Πλέγμα

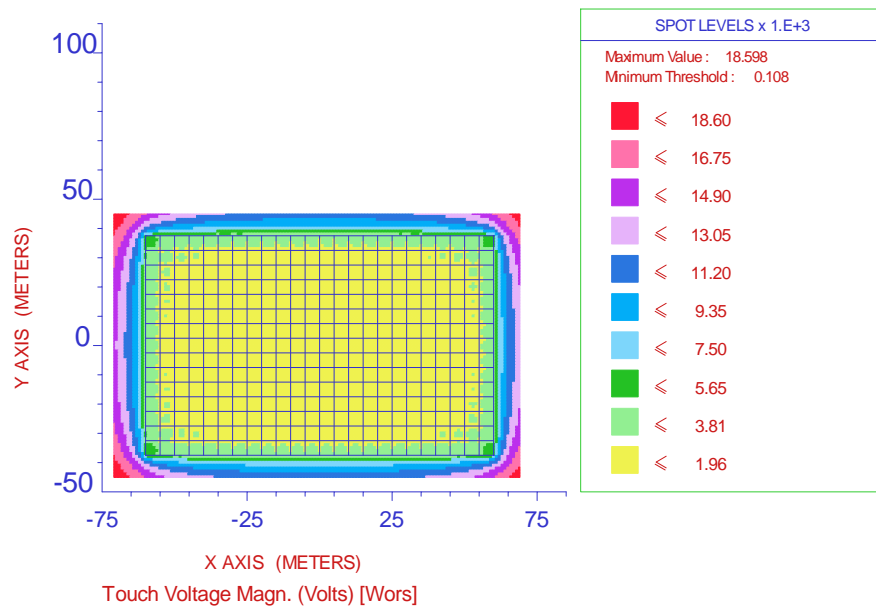
Στις ακόλουθες προσομοιώσεις έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 5 μέτρα ($\alpha=5\text{m}$), ενώ έχουν τοποθετηθεί κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους 1,5m στις 4 γωνίες του πλέγματος. Επίσης, διερευνήθηκε η ασφάλεια και η καταλληλότητα της σχεδίασης αυτής σε περιπτώσεις μη ύπαρξης υλικού επιφανείας, επίστρωσης του εδάφους με υλικό επιφανείας πάχους 10cm, ειδικής αντίστασης 10.000 Ωm και επίστρωσης με το ίδιο υλικό αλλά με πάχος 20cm. Τα μέγιστα όρια ασφάλειας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, ενώ στην συνέχεια παρατίθενται και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

	<u>Χωρίς Επιφανειακό Στρώμα</u>			<u>Με επιφανειακό στρώμα 10cm</u>			<u>Με επιφανειακό στρώμα 20cm</u>		
	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$
ΠΠΕ 80-2013 50Kg	832,5	218,8	411,8	21.674,1	1.828,9	6.852,1	26.093,8	2.170,3	8.217,9
ΠΠΕ 80-2013 70Kg	832,5	296,2	557,3	21.674,1	2.475,3	9.274,0	26.093,8	2.937,4	11.122,4
ΙΕC καμπύλη C1	832,5	107,9	223,8	21.674,1	1.075,4	4.093,9	26.093,8	1.280,6	4.914,5

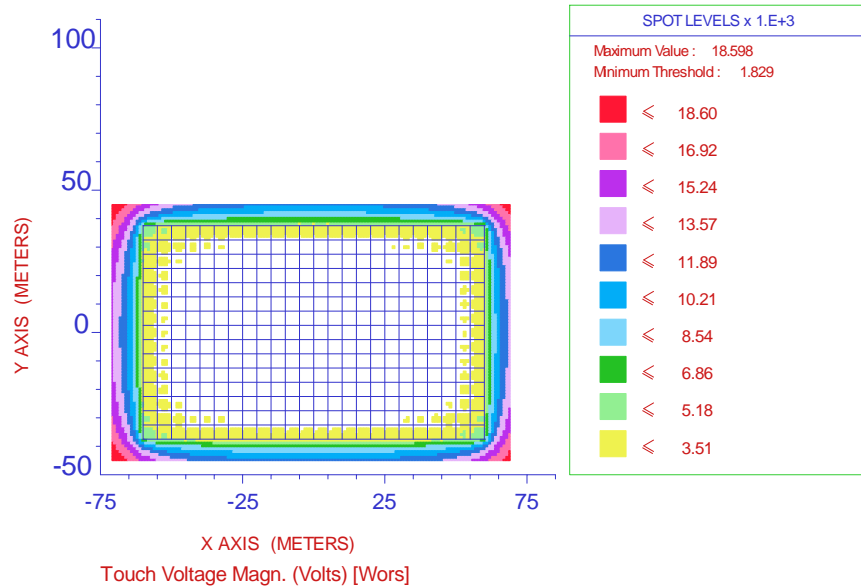
Πίνακας 5.3.1: Παρουσίαση μέγιστων επιτρεπόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής για μοντέλο εδάφους Α με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$.



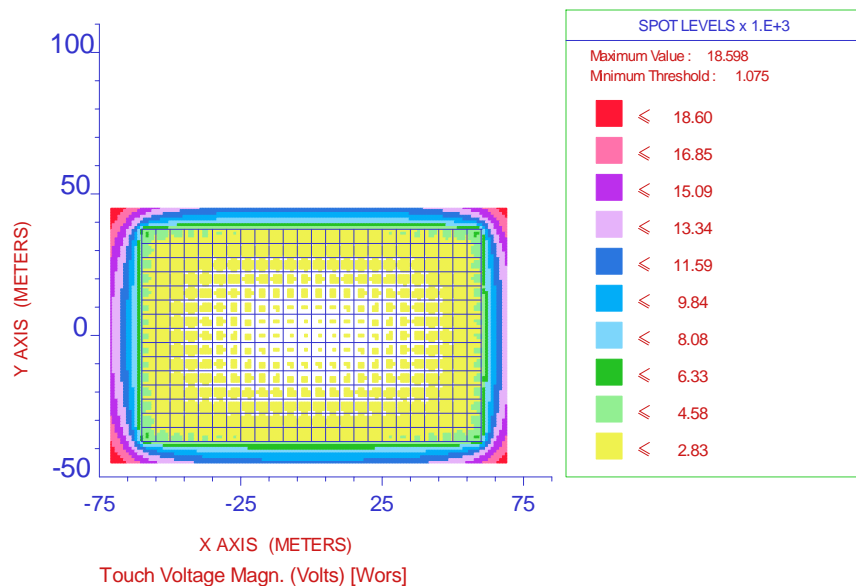
Εικόνα 5.3.1: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $a=5m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$, χωρίς την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



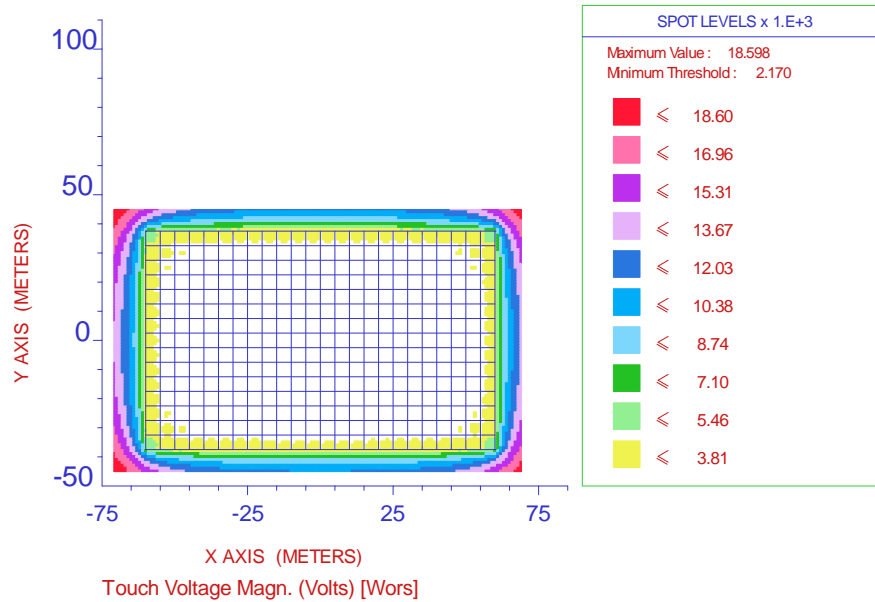
Εικόνα 5.3.2: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $a=5m$, 4 μήκους $l=1,5m$, χωρίς την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



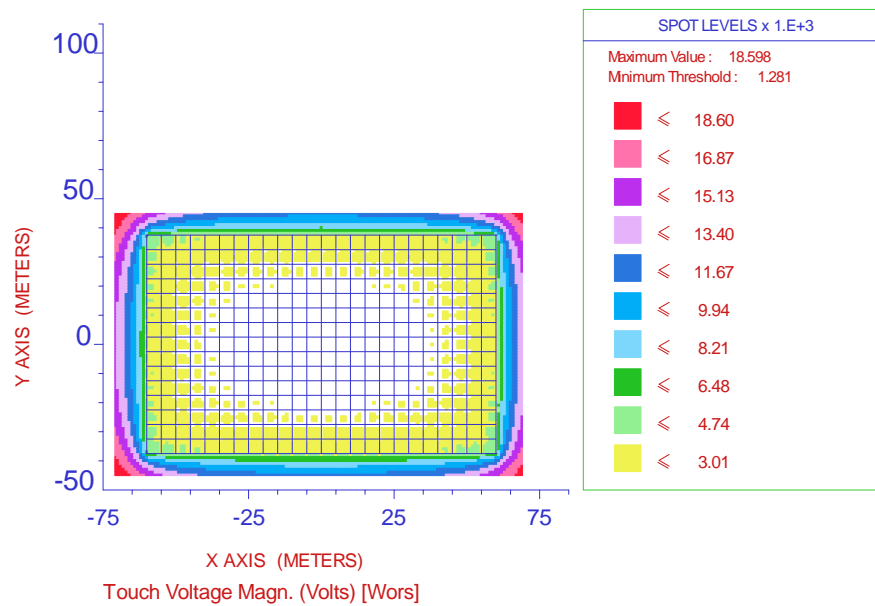
Εικόνα 5.3.3: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg .



Εικόνα 5.3.4: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.3.5: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC 80-2000 για άτομο $50\ \text{Kg}$.



Εικόνα 5.3.6: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

Στις παραπάνω προσομοιώσεις παρατηρείται ότι και στις 3 διακριτές περιπτώσεις (χωρίς επιφανειακό στρώμα-με επιφανειακό στρώμα 10 cm- με επιφανειακό στρώμα 20 cm), λαμβάνοντας υπόψιν και τα δύο πρότυπα, οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής είναι άνω των επιτρεπόμενων ορίων ακόμα και στην περιοχή που καλύπτει η εγκατάσταση του υποσταθμού. Συνεπώς, η συγκριμένη περίπτωση πλέγματος και μοντέλου εδάφους οδηγεί στην κατασκευή ενός μη ασφαλούς συστήματος γείωσης.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι με την σταδιακή προσθήκη του υλικού επιφάνειας, αρχικά 0,10 cm και στη συνέχεια 0,20 cm, το ποσοστό της επιφάνεια την οποία καλύπτουν οι επικίνδυνες-εκτός ορίων τάσεις μειώνεται, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο την ασφάλεια του συστήματος γείωσης, χωρίς όμως να προσεγγίσει ένα ικανοποιητικό επίπεδο.

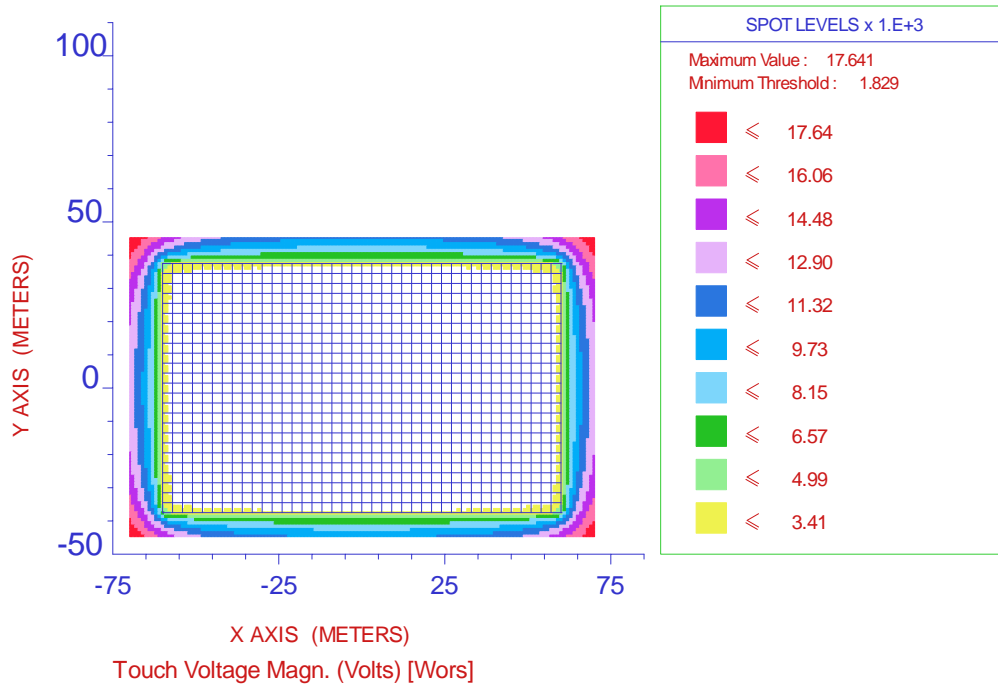
Επίσης, παρατηρείται ότι η θετική επίδραση που έχει το επιφανειακό στρώμα στις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής, σύμφωνα με το Πρότυπο της IEEE, είναι καλύτερη σε σχέση με το Πρότυπο IEC.

5.3.2 Μείωση «ματιού» πλέγματος γείωσης

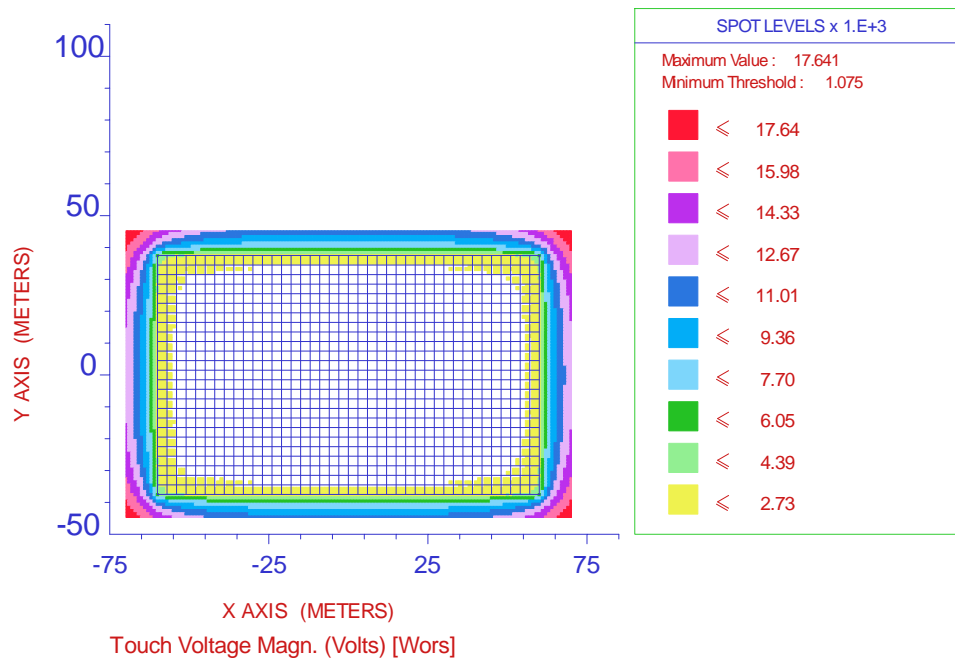
Λόγω της αυξημένης ειδικής αντίστασης του συγκεκριμένου μοντέλου εδάφους, δοκιμάστηκαν και εξετάστηκαν οι επιδράσεις της πυκνώσης του παραπάνω πλέγματος γείωσης.

Συγκεκριμένα, στις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 3 μέτρα ($a=3m$), ενώ παραμένουν 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης τοποθετημένοι στις γωνίες του πλέγματος με μήκος 1,5 m.

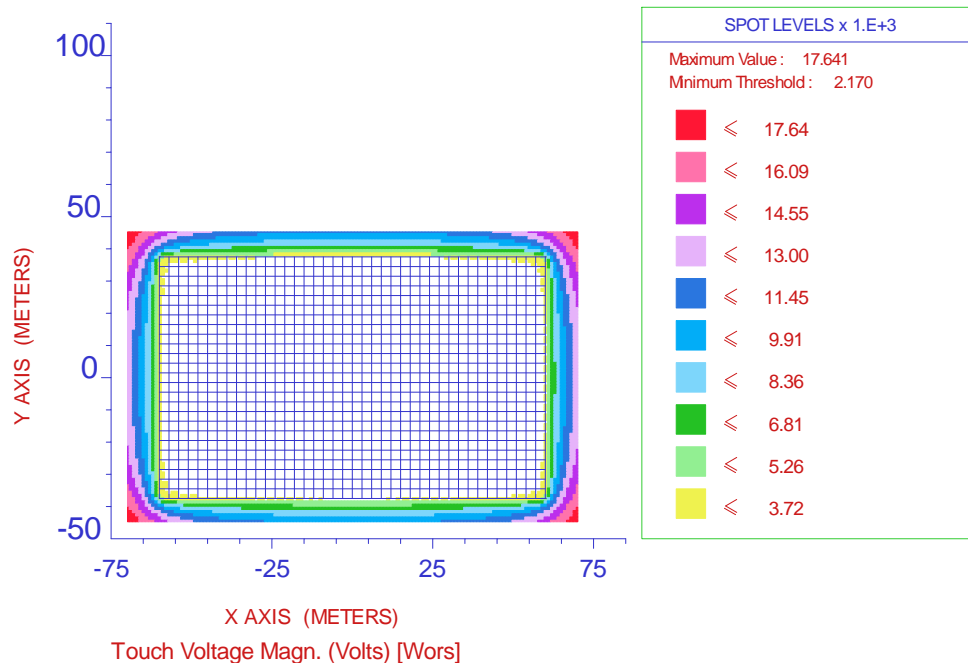
Εστιάζοντας στην προσπάθεια επίτευξης ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης με αυτό το μοντέλο εδάφους, στηριζόμενοι στα όρια ασφαλείας και των δύο Προτύπων, θα παρουσιαστούν οι προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν την χρήση επιπρόσθετου επιφανειακού υλικού, καθώς αυτές προσεγγίζουν την επίτευξη αναπτυσσόμενων δυναμικών κάτω από τα ανώτερα όρια ασφαλείας. Το σύστημα γείωσης χωρίς την προσθήκη υλικού επιφάνειας εξακολουθεί να κρίνεται ακατάλληλο.



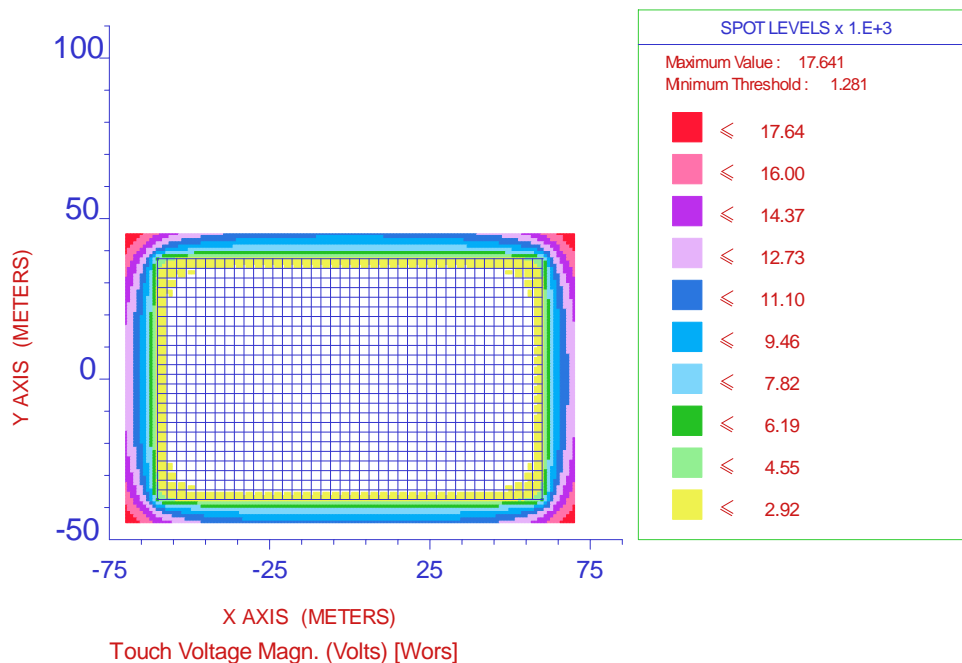
Εικόνα 5.3.7: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο $50\ \text{Kg}$.



Εικόνα 5.3.8: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους A με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.3.9: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους Α με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg .



Εικόνα 5.3.10: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους Α με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

Όπως παρατηρούμε από τις παραπάνω γραφικές η πύκνωση του πλέγματος γείωσης, είχε σημαντική επίδραση στην διατήρηση των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής κάτω των επιτρεπόμενων ορίων στο μεγαλύτερο ποσοστό της περιοχής που καλύπτει η εγκατάσταση του υποσταθμού.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE στην περίπτωση της προσθήκης 10cm ασφάλτου (επιφανειακού υλικού), το σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται οριακά ακατάλληλο, καθώς έχουμε την παρουσία μη επιτρεπτών τιμών τάσεων επαφής σε απόσταση περίπου 3m εντός της περιοχής του υποσταθμού. Το γεγονός αυτό εξαιρείται με την αύξηση του πάχους του υλικού (20cm άσφαλτος), όπου το σύστημα είναι ασφαλές σε όλη την έκταση του υποσταθμού.

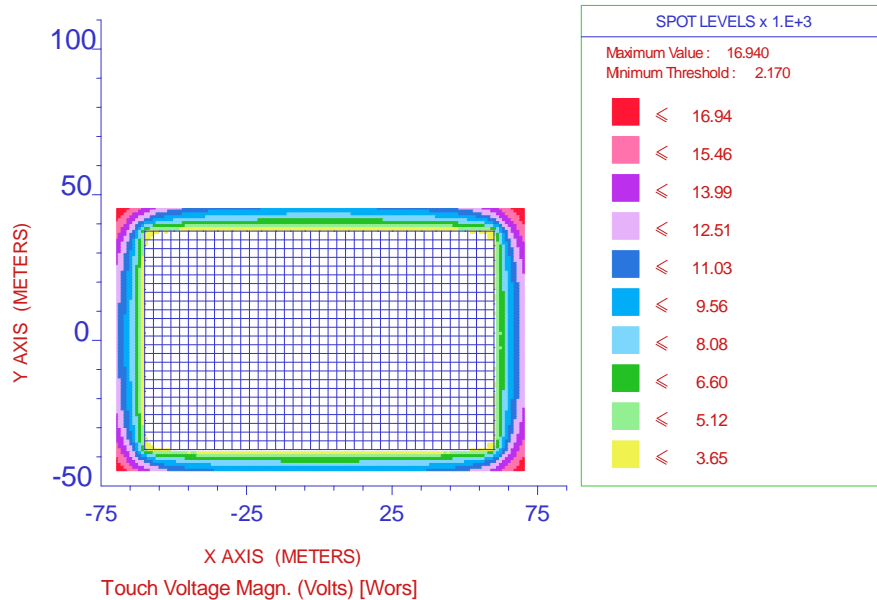
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρότυπο IEC, στην πρώτη περίπτωση (10cm άσφαλτος) καθιστούν το σύστημα γείωσης μη λειτουργικό και τον υποσταθμό επικίνδυνο, ενώ με την προσθήκη 20 cm ασφάλτου οι εκτός ορίων ασφαλείας τάσεις επαφής, καλύπτουν την επιφάνεια του υποσταθμού σε έκταση περίπου 3m-6m εσωτερικά των ορίων του.

5.3.3 Αύξηση αριθμού κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης και μήκους αυτών

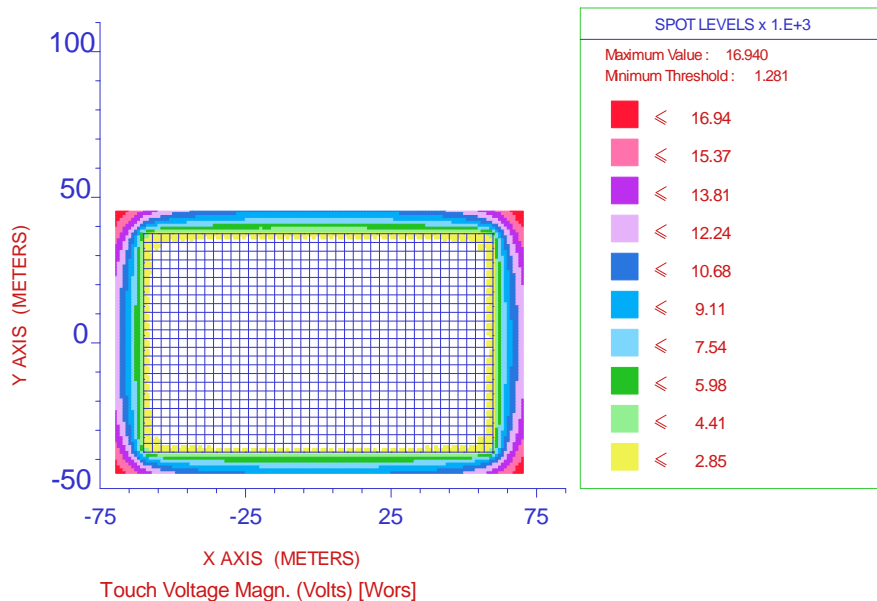
Εξαιτίας της οριακής επίτευξης ασφαλών τιμών αναπτυσσόμενων δυναμικών με τους προαναφερθείς τρόπους, ακολούθως εξετάζονται τα αποτελέσματα τα οποία θα επιφέρει στην ασφάλεια του υποσταθμού, μία σημαντική αύξηση στον αριθμό των κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης τα οποία συνδέονται με το πλέγμα γείωσης.

Συγκεκριμένα, στις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 3 μέτρα ($a=3m$), έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος των οριζόντιων και κάθετων πλευρών του πλέγματος γείωσης ανά 5m κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3m$.

Οι αλλαγές που παρατηρούνται είναι μικρές, για αυτό το λόγο αξίζει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που επιφέρει η αλλαγή αυτή, στην περίπτωση την προσθήκης 20cm ασφάλτου, καθώς με αυτό τον τρόπο το σύστημα ασφαλείας σύμφωνα και με το πρότυπο IEC, μπορεί να θεωρηθεί με μία μικρή προσθήκη, ασφαλές. Αυτό επιτυγχάνεται, με την χρήση μονωτικής περίφραξης (από πολυκαρμπονικό υλικό, ξύλο ή χτιστή) 1m εσωτερικά των ορίων του πλέγματος γείωσης [40].



Εικόνα 5.3.11: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους Α με $\alpha=3\text{m}$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m περιμετρικά του συστήματος γείωσης, μήκος ηλεκτροδίων $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.3.12: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους Α με $\alpha=3\text{m}$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m περιμετρικά του συστήματος γείωσης, μήκος ηλεκτροδίων $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

5.4 Μοντέλο εδάφους «Μονοστρωματικό Β»

5.4.1 Βασικό Πλέγμα

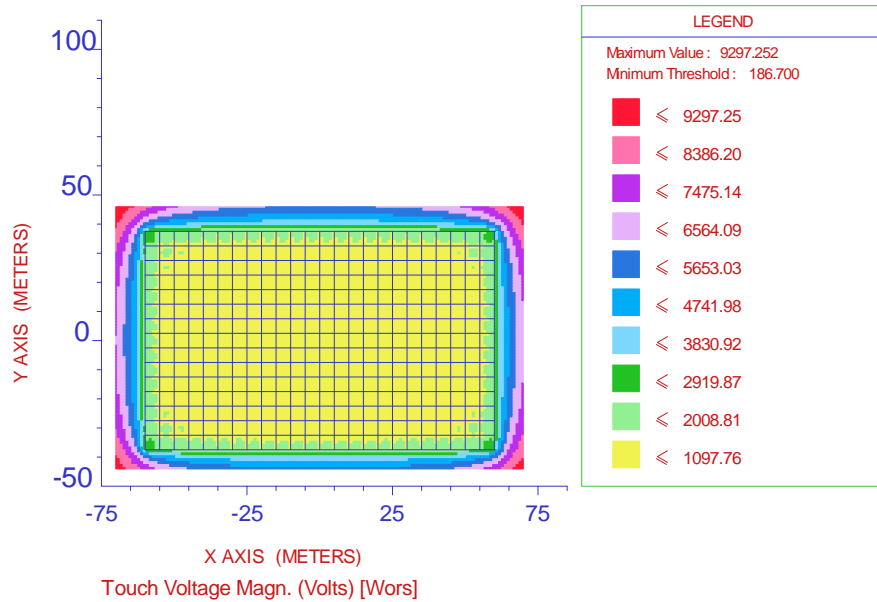
Το μονοστρωματικό μοντέλο Β διαφέρει με το αντίστοιχο μοντέλο Α, στην τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους η οποία μειώνεται στο μισό. Λόγω αυτής της μείωσης, αναμένεται να παρατηρηθούν σημαντικές αλλαγές στις αναπτυσσόμενες τάσεις και τα αντίστοιχα όρια αυτών.

Στο ακόλουθο σετ προσομοιώσεων έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 5 μέτρα ($\alpha=5\text{m}$) και έχουν τοποθετηθεί κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους 1,5m στις 4 γωνίες του πλέγματος. Επίσης, έχουν εξετασθεί σενάρια περιπτώσεων μη ύπαρξης υλικού επιφανείας, επίστρωσης του εδάφους με υλικό επιφανείας πάχους 10cm, ειδικής αντίστασης 10.000 Ωm και επίστρωσης με το ίδιο υλικό αλλά με πάχος 20cm.

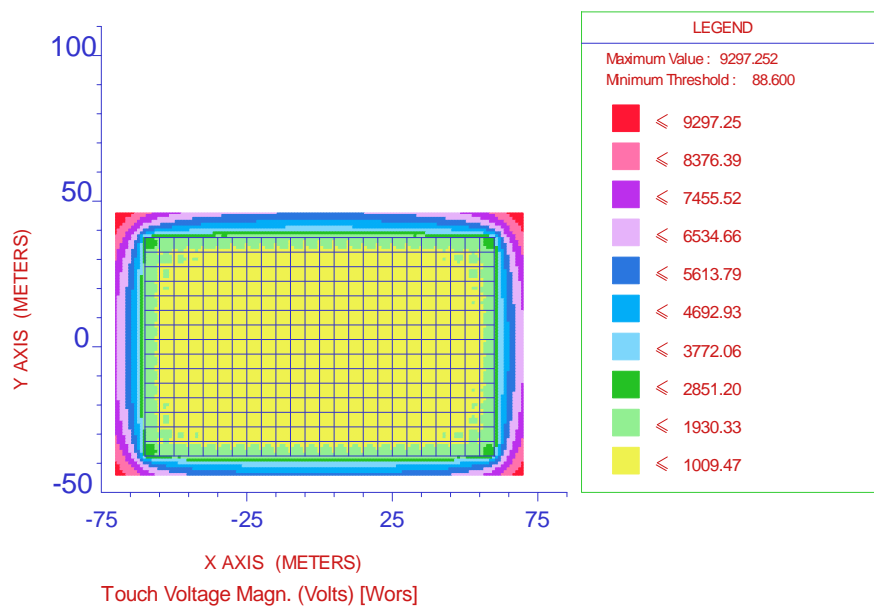
Τα μέγιστα όρια ασφάλειας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, ενώ στην συνέχεια παρατίθενται και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

	<u>Χωρίς Επιφανειακό Στρώμα</u>			<u>Με επιφανειακό στρώμα 10cm</u>			<u>Με επιφανειακό στρώμα 20cm</u>		
	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$
ΠΕ 80-2013 50Kg	416,2	186,7	283,1	21.491,6	1.760,7	6.795,6	25.993,6	2.162,6	8.186,9
ΠΕ 80-2013 70Kg	416,2	252,6	383,2	21.491,6	2.456,2	9.197,6	25.993,6	2.927,0	11.080,5
IEC καμπύλη C1	416,2	88,6	146,5	21.491,6	1.066,9	4.060,0	25.993,6	1.275,9	4.895,9

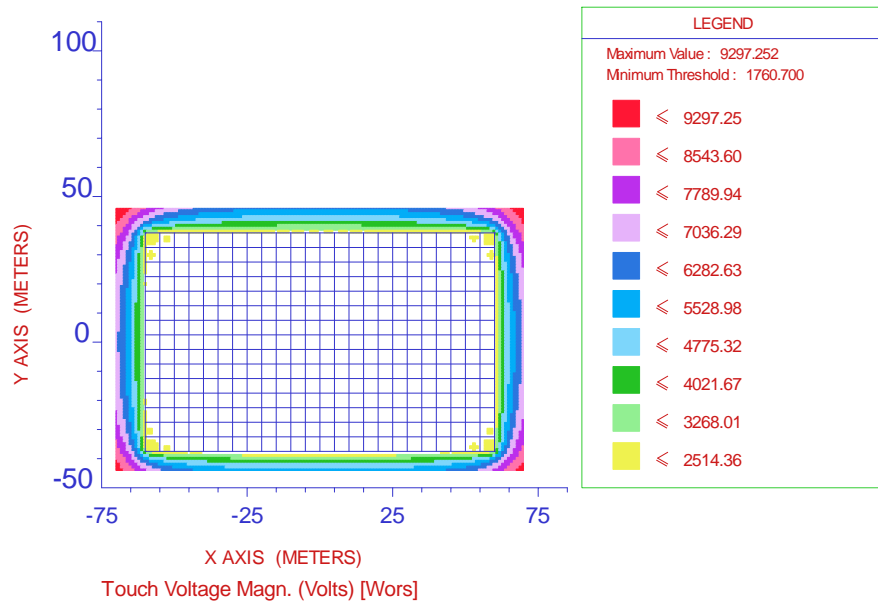
Πίνακας 5.3.1: Παρουσίαση μέγιστων επιτρεπόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής για μοντέλο εδάφους Β με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$.



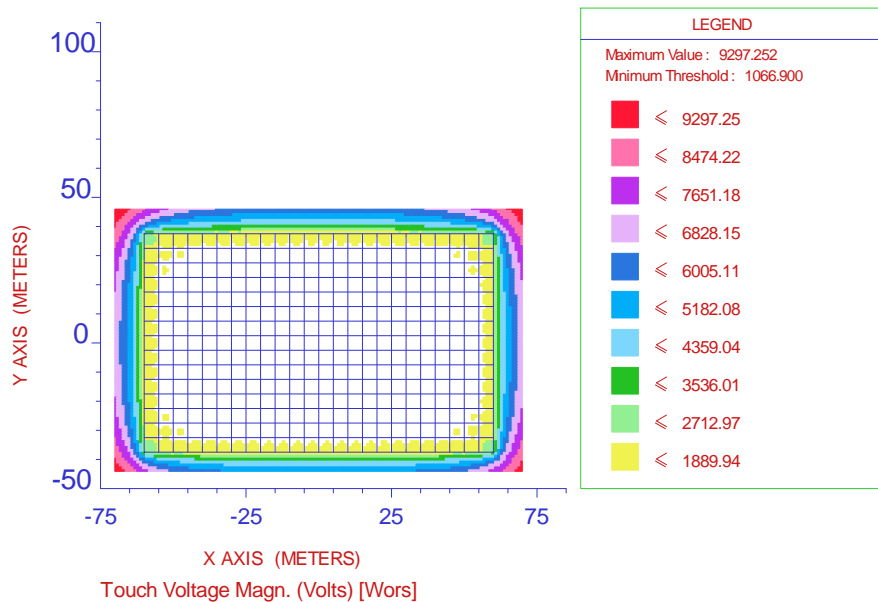
Εικόνα 5.4.1: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$, χωρίς την παρουσία επιφανειακού στρώματος, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



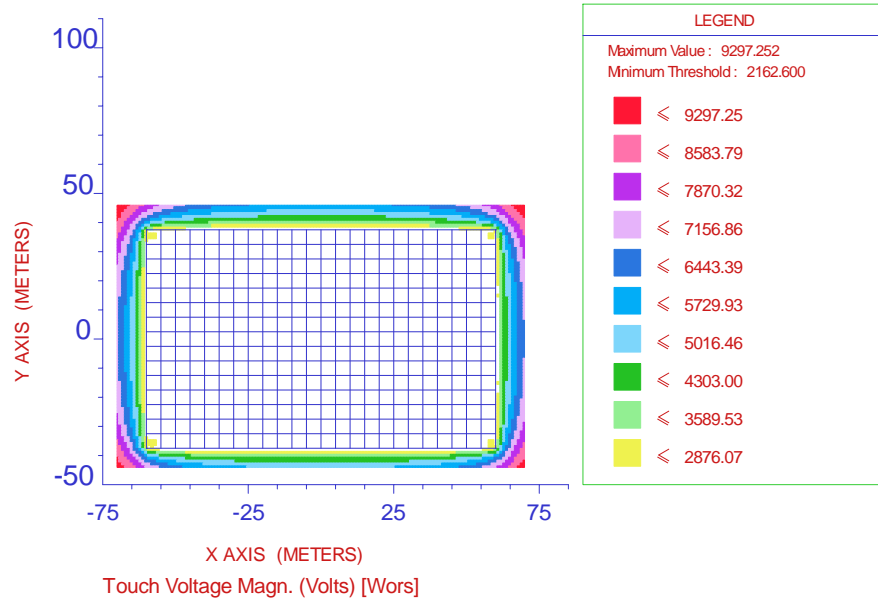
Εικόνα 5.4.2: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$, χωρίς την παρουσία επιφανειακού στρώματος, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



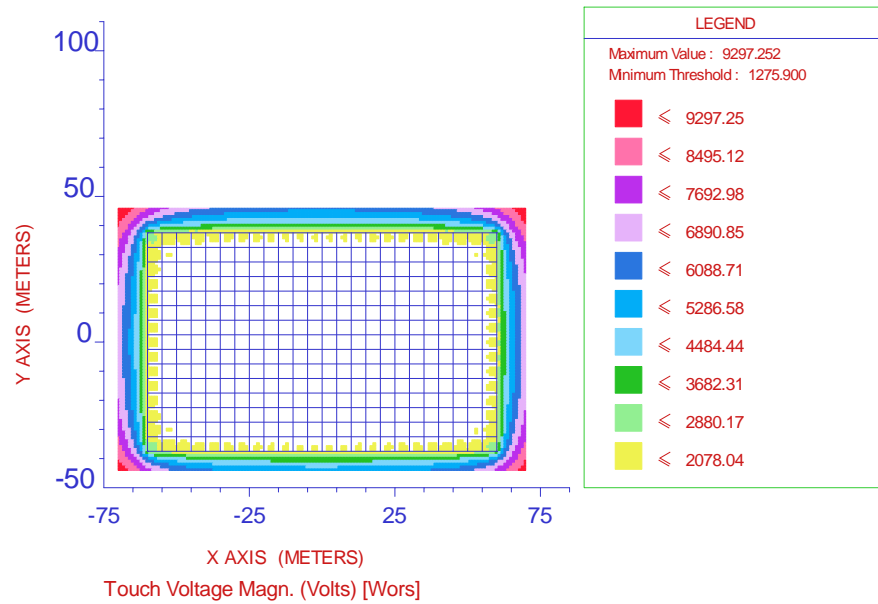
Εικόνα 5.4.3: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg .



Εικόνα 5.4.4: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.4.5: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg .



Εικόνα 5.4.6: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

Συγκρίνοντας τις παραπάνω προσομοιώσεις με τις αντίστοιχες της παραγράφου 5.3, παρατηρείται ότι στην περίπτωση απουσίας επιφανειακού στρώματος εδάφους τόσο στο μονοστρωματικό μοντέλο Α όσο και στο Β το πλέγμα γείωσης κρίνεται ακατάλληλο καθώς αναπτύσσονται τάσεις άνω των επιτρεπόμενων ορίων, σύμφωνα και με τα δύο Πρότυπα.

Ωστόσο, στην περίπτωση του μονοστρωματικού μοντέλου Β, με την χρήση επιφανειακού στρώματος τόσο 0,10 cm όσο και 0,20 cm, παρατηρούμαι ότι οι αναπτυσσόμενες επικίνδυνες τάσεις περιορίζονται αισθητά, καθιστώντας το σύστημα γείωσης πιο ασφαλές.



Εικόνα 5.4.7: Επιπρόσθετο επιφανειακό στρώμα από χαλίκι, τοποθετημένο σε υποσταθμό υψηλής τάσης [40].

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση χρήσης 10cm επιφανειακού στρώματος, σύμφωνα με το Πρότυπο ΙΕΕΕ, βλέπουμε ότι επικίνδυνες και εκτός ορίων ασφαλείας τάσεις επαφής, αναπτύσσονται μόνο στα άκρα του υποσταθμού και σε απόσταση 1m από αυτά. Αντίστοιχα στην περίπτωση της τοποθέτησης 20cm υλικού επιφάνειας, οι εκτός ορίων ασφαλείας τάσεις περιορίζονται εκτός επιφάνειας υποσταθμού, καθιστώντας το πλέγμα γείωσης ασφαλές.

Εν αντιθέσει, οι αναπτυσσόμενες τάσεις σύμφωνα με το πρότυπο IEC, εξακολουθούν να είναι πάνω από τα όρια των επιτρεπόμενων τιμών, όμως και αυτές περιορίζονται στην εσωτερική περιοχή του υποσταθμού, γύρω από τα εξωτερικά όρια του και σε απόσταση περίπου 5-13 m ανάλογα με το πάχος του υλικού επιφάνειας. Με την προσθήκη μίας μονωτικής περίφραξης (από πολυκαρμπονικό υλικό, ξύλο ή χτιστή) 1m εσωτερικά των ορίων του πλέγματος γείωσης. και τον αποκλεισμό της πρόσβασης ανθρώπινου δυναμικού σε αυτή, ο υποσταθμός και σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να κριθεί ασφαλής.

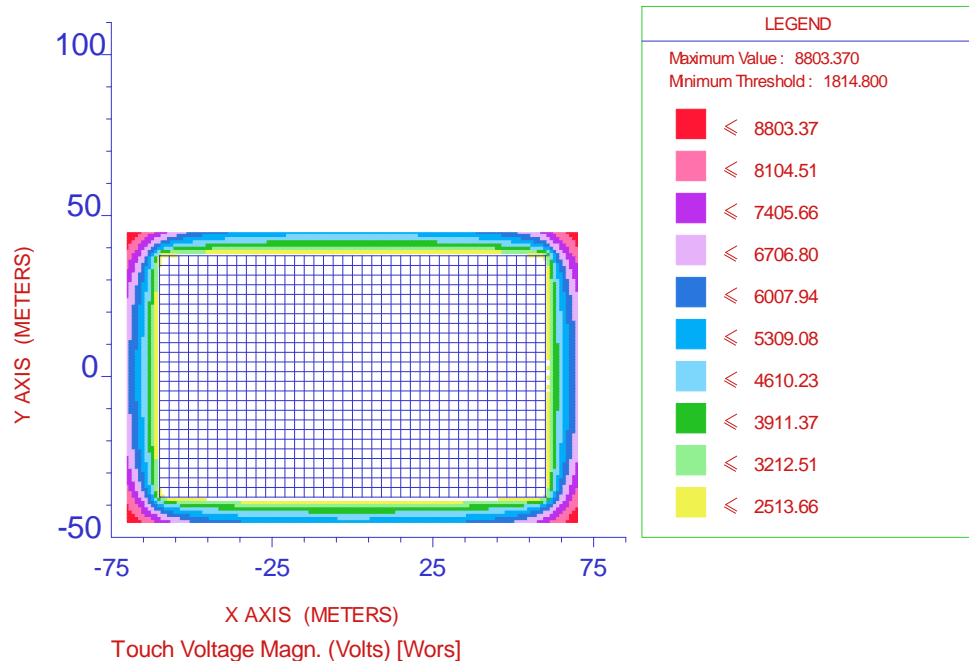


Εικόνα 5.4.8: Μονωτική χτιστή περίφραξη εσωτερικά των ορίων του πλέγματος γείωσης. [40].

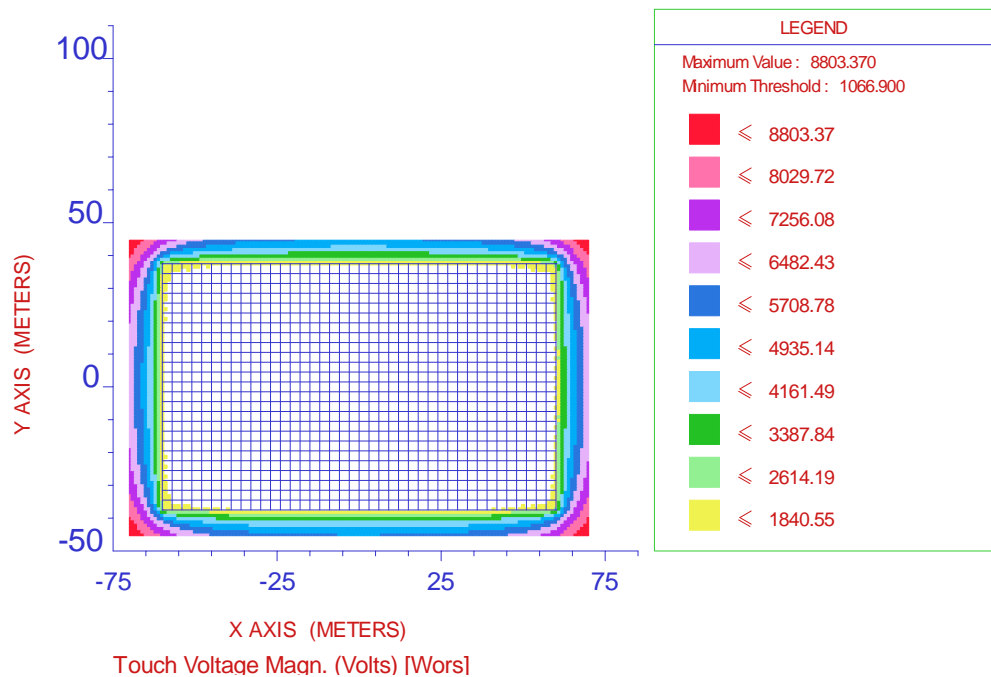
5.4.2 Μείωση «ματιού» πλέγματος γείωσης

Σε αυτό ο σημείο, λόγω της μειωμένης ειδικής αντίστασης του συγκεκριμένου μοντέλου εδάφους, γεγονός το οποίο συνεπάγεται την ευκολότερη επίτευξη ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης, δοκιμάστηκαν περισσότερες διακριτές σχεδιαστικές αλλαγές, στοχεύοντας στην εξέταση και τον προσδιορισμό των επιδράσεων που έχουν διάφοροι παράγοντες στην μείωση των αναπτυσσόμενων δυναμικών.

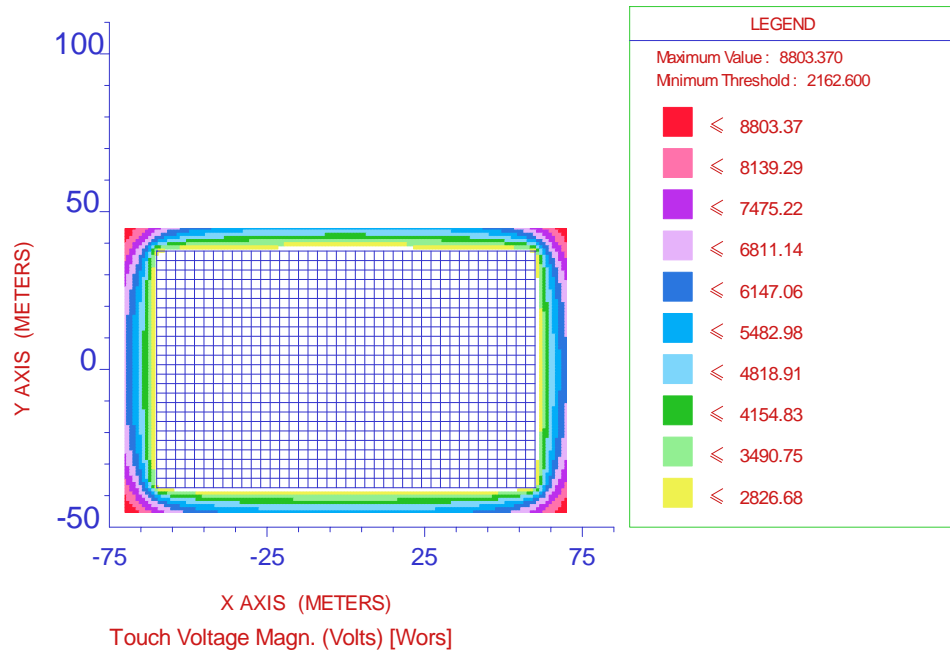
Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει επιλεγεί ένα πυκνότερο πλέγμα με «μάτι» ίσο με 3 μέτρα ($a=3m$), ενώ διατηρήθηκαν τα 4 κατακόρυφων αγωγών 1.5m. Έχουμε αγωγούς μήκους 1,5 m τοποθετημένους στις 4 γωνίες του πλέγματος.



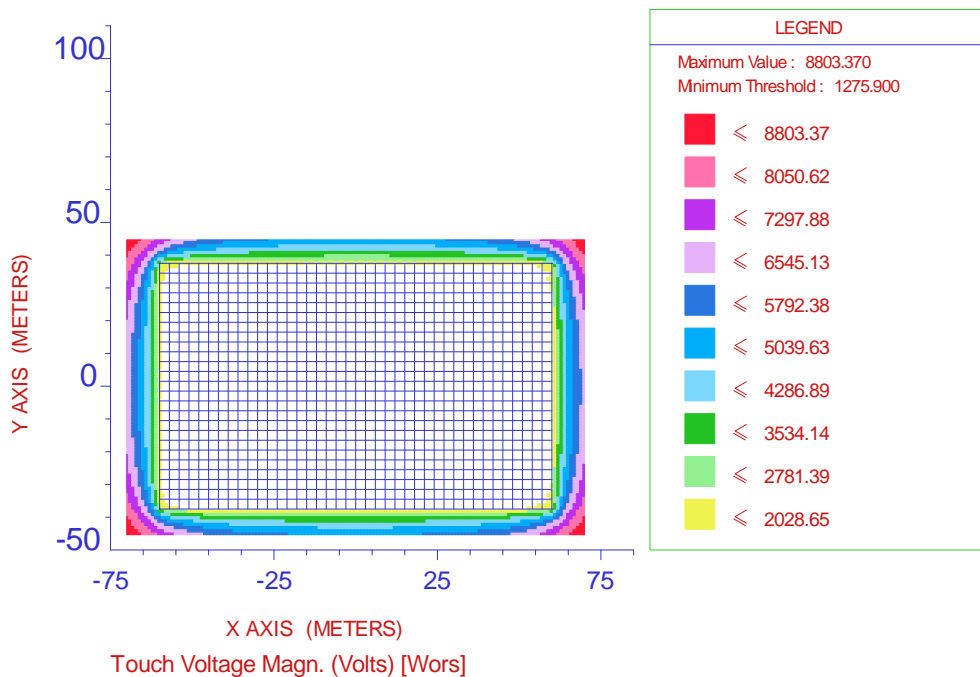
Εικόνα 5.4.9: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $10cm$, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο $50 Kg$.



Εικόνα 5.4.10: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $10cm$, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.4.11: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg .



Εικόνα 5.4.12: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

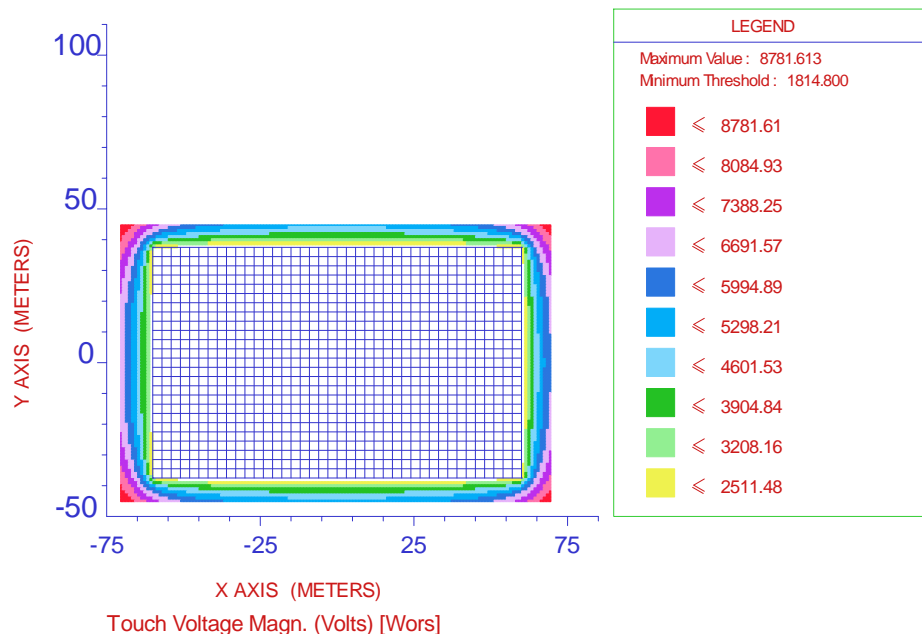
Όπως φανερώνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα το «μάτι» του πλέγματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό και καθοριστικό παράγοντα, για τον περιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων.

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις σύμφωνα με το Πρότυπο IEEE [1], τόσο στην περίπτωση της επίστρωσης με 10cm άσφαλτο όσο και με 20cm, είναι κάτω των επιτρεπόμενων ορίων στην περιοχή που καλύπτει η εγκατάσταση του υποσταθμού.

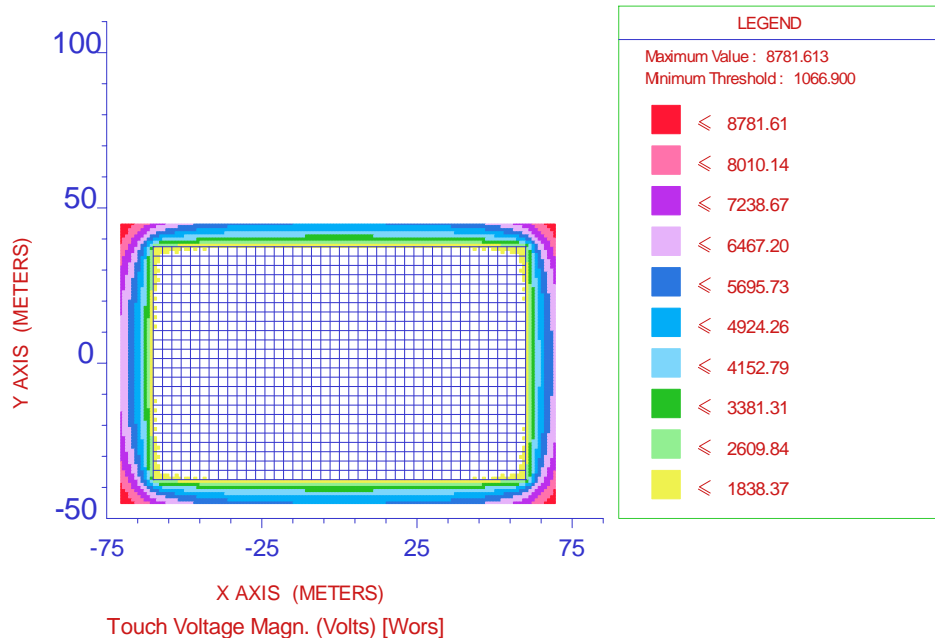
Η κύρια διαφορά παρατηρείται στις τάσεις και τα όρια ασφάλειας σύμφωνα με το πρότυπο IEC [39]. Τα συστήματα γείωσης στις Εικόνες 5.4.4 και 5.4.6 είναι μη ασφαλή εφόσον οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια σε μεγάλη έκταση του υποσταθμού. Εν αντιθέσει, στην Εικόνα 5.4.10 το σύστημα μπορεί να κριθεί οριακά ασφαλές με την προσθήκη απαγορευτικού στην επιφάνεια κοντά στα άκρα του υποσταθμού και με την προσθήκη 20cm υλικού επιφανείας το σύστημα γείωσης είναι απολύτως ασφαλές.

5.4.3 Αύξηση μήκους κάθετων αγωγών

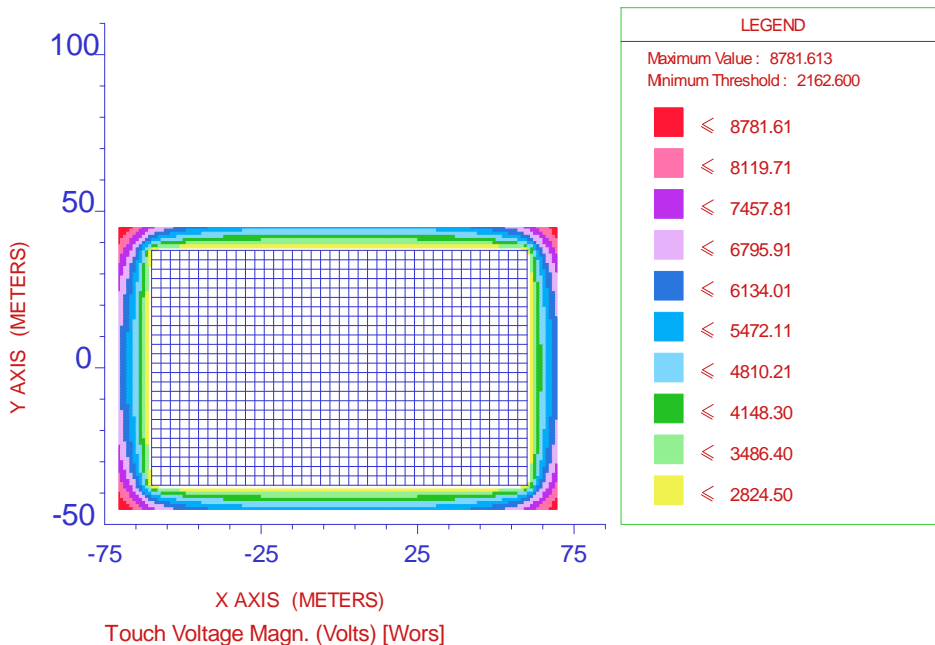
Στόχος σε αυτό το σημείο είναι ο προσδιορισμός της συνεισφοράς του παράγοντα αυτού στον περιορισμό των αναπτυσσόμενων δυναμικών επιφανείας. Στις ακόλουθες προσομοιώσεις έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 3 μέτρα ($\alpha=3\text{m}$), ενώ έχουν τοποθετηθεί τέσσερις (4) κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους 3m, ένας σε κάθε γωνία του πλέγματος γείωσης.



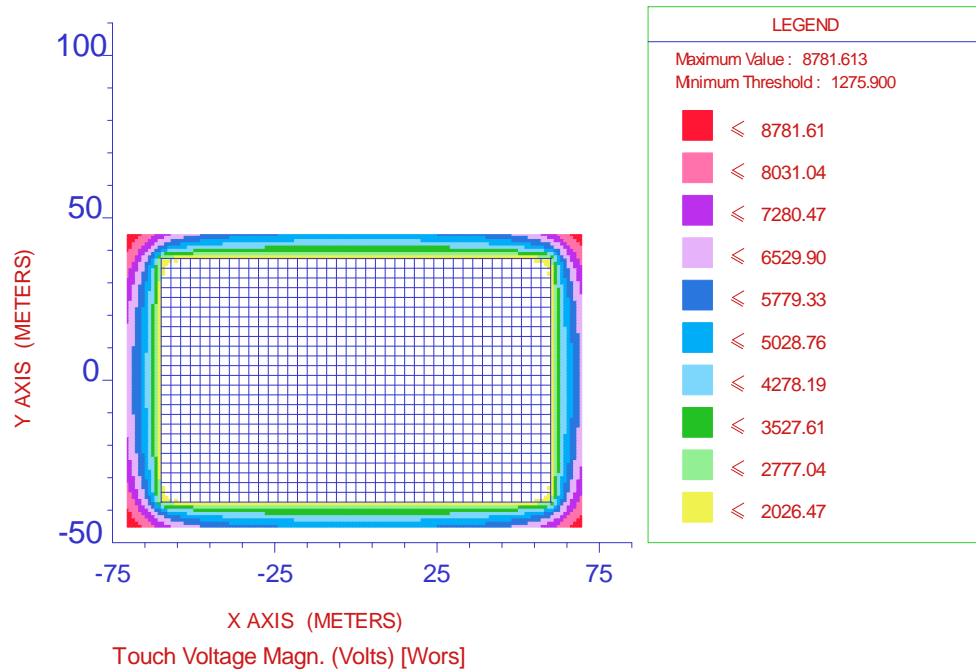
Εικόνα 5.4.13: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.4.14: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.4.15: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg .

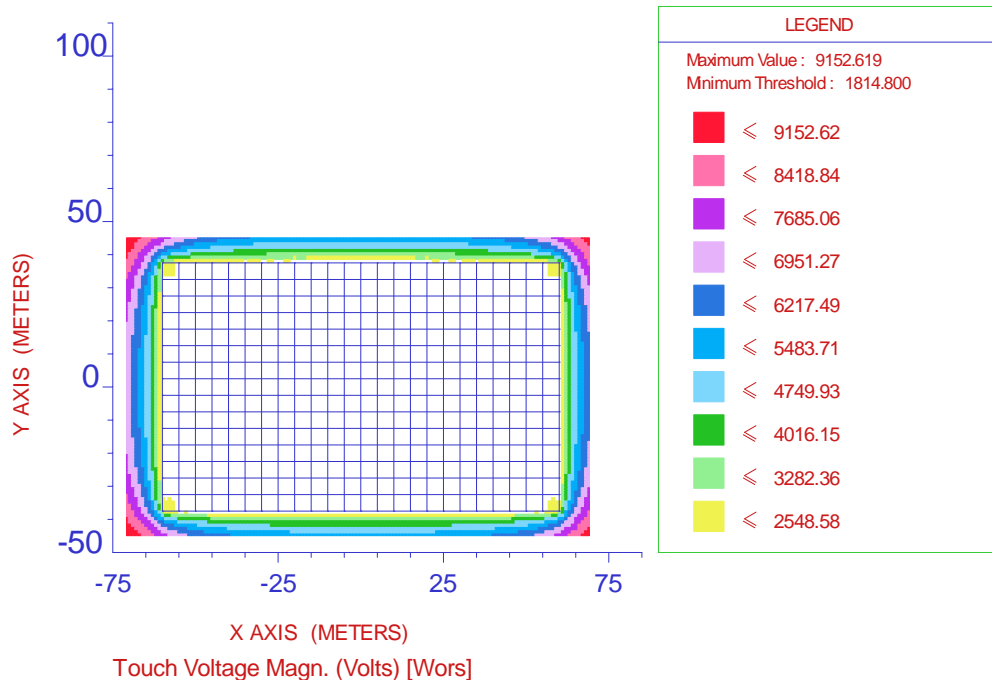


Εικόνα 5.4.16: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $a=3m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $20cm$, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

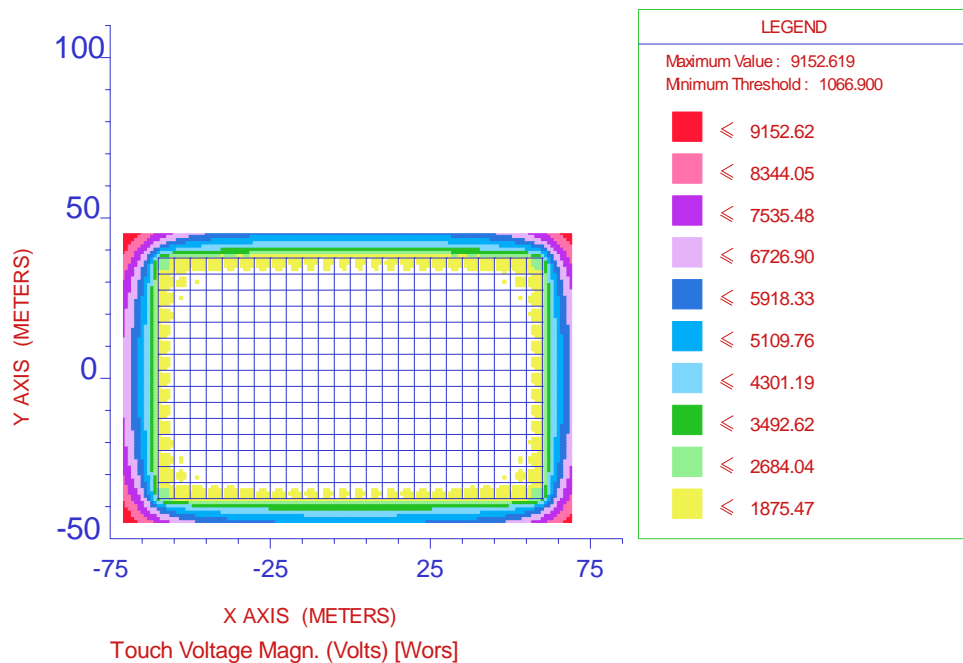
5.4.4 Αύξηση αριθμού κάθετων αγωγών

Εν συνεχεία, επιλέγοντας μήκος κάθετων αγωγών ίσο με $1,5m$ το «μάτι» ορίζεται ίσο με $5m$ και η κατανομή των κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης πληθαίνει, με την τοποθέτηση αγωγών ανά $5m$ κατά μήκος των οριζόντιων και κάθετων πλευρών του πλέγματος γείωσης.

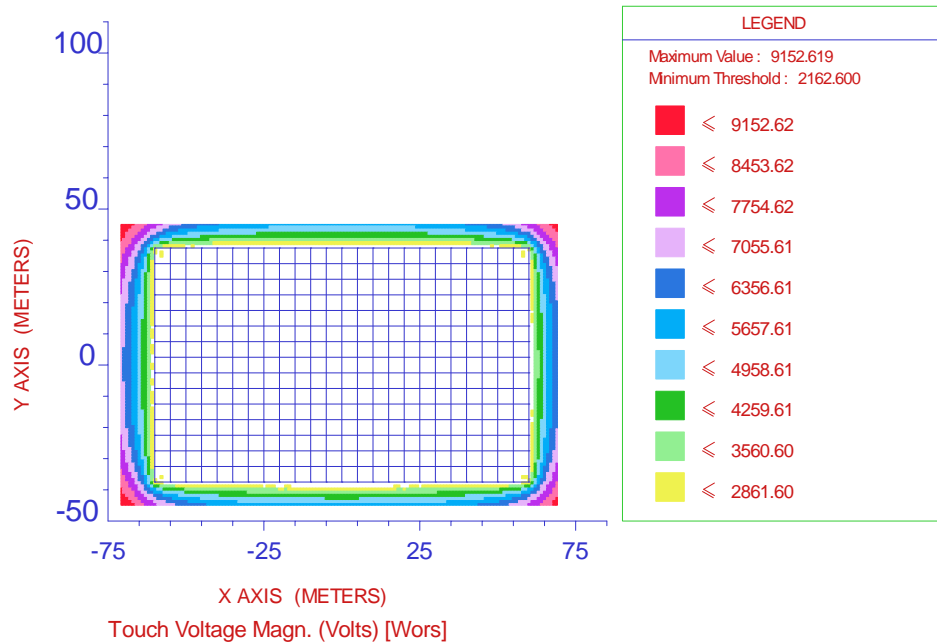
Σε αυτή την υποενότητα εξετάζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σύμφωνα με τα δύο πρότυπα, σε περιπτώσεις πιο αραιού πλέγματος αλλά με περισσότερα κάθετα ηλεκτρόδια γείωσης.



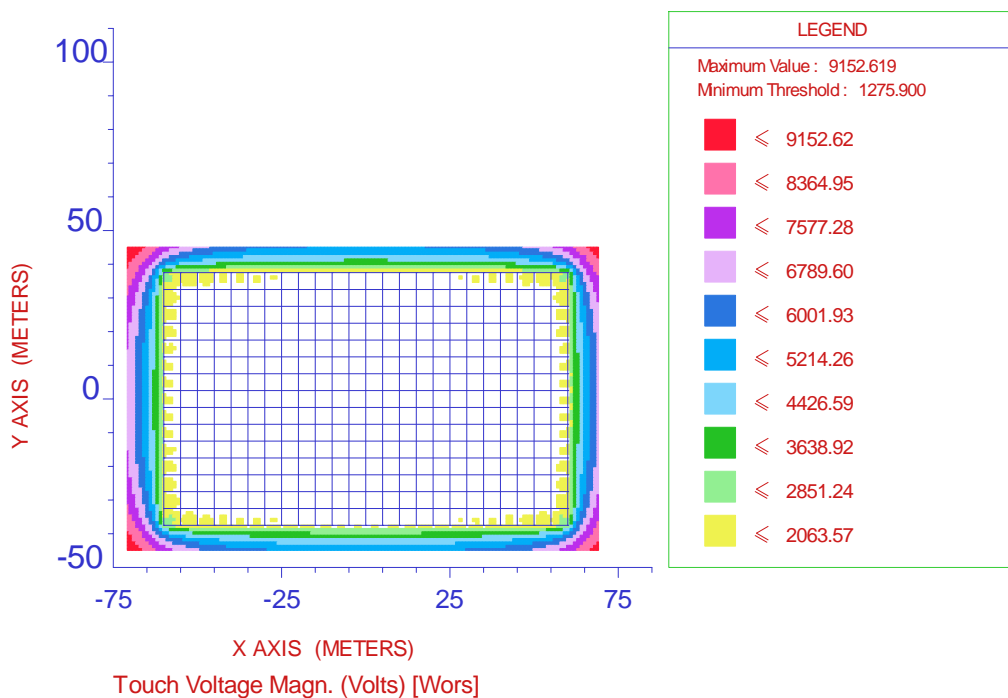
Εικόνα 5.4.17: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=1,5m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.4.18: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=1,5m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.4.19: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5\text{m}$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.4.20: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5\text{m}$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση των παραπάνω γραφικών παραστάσεων με τις αντίστοιχες της υποενότητας 5.4.2, η μείωση του ματιού του πλέγματος γείωσης έχει μεγαλύτερη επίδραση στον περιορισμό των επικίνδυνων αναπτυσσόμενων τάσεων, από ότι η αύξηση των κάθετων ηλεκτροδίων.

Όπως γίνεται αντιληπτό στην Εικόνα 5.4.12 το σύστημα γείωσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασφαλές ενώ αυτό τις Εικόνας 5.4.20 ως μη ασφαλές. Σύμφωνα με το Πρότυπο IEEE, το σύστημα γείωσης και στις 4 περιπτώσεις (Εικόνα 5.4.7, Εικόνα 5.4.11, Εικόνα 5.4.17 και Εικόνα 5.4.19) είναι ασφαλές καθώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής εντός του υποσταθμού διατηρούνται κάτω από τα ανώτερα επιτρεπόμενα όρια.

Αντίθετα, στις Εικόνες 5.4.18 και 5.4.20 το σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται ως ανασφαλές καθώς έχουμε τιμές τάσεων επαφής πάνω των επιτρεπτών ορίων εντός της επιφάνειας έκτασης του υποσταθμού γεγονός το οποίο στις προσομοιώσεις με θεώρηση πυκνότερου πλέγματος γείωσης (Εικόνα 5.4.10 και Εικόνα 5.4.12) περιορίζεται σημαντικά στα περιμετρικά όρια του υποσταθμού. Το πλέγμα γείωσης σε αυτές τις περιπτώσεις, με χρήση κατάλληλων προστατευτικών μέσων (Εικόνα 5.4.8) μπορεί να θεωρηθεί ως ασφαλές.

5.4.5 Αύξηση αριθμού κάθετων αγωγών και μήκους αυτών

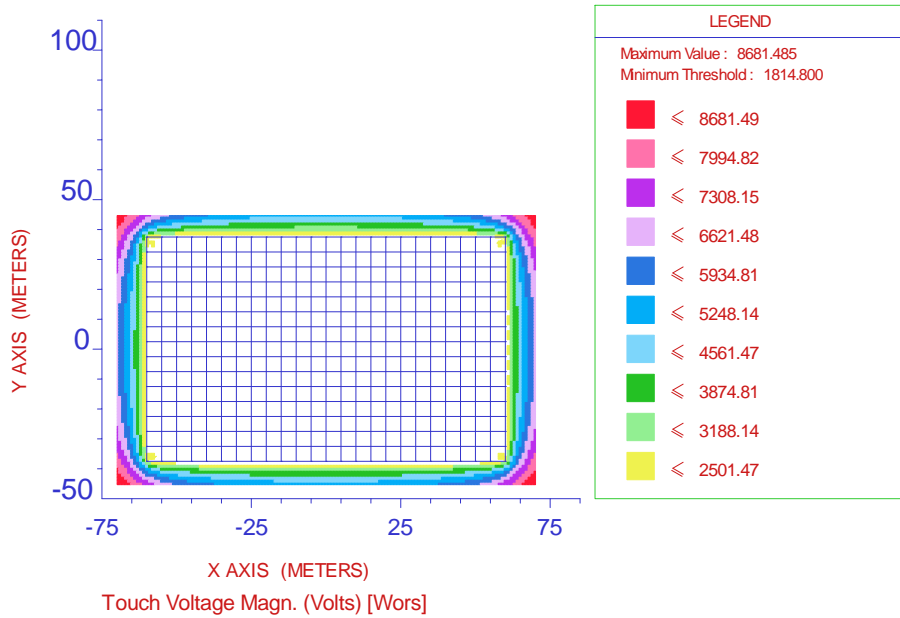
Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 5 μέτρα ($\alpha=5\text{m}$). Παράλληλα, έχουν τοποθετηθεί κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3\text{m}$, κατά μήκος των οριζόντιων και κάθετων πλευρών του πλέγματος γείωσης σε απόσταση 5m μεταξύ τους.

Οι αλλαγές που παρατηρούνται σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση, είναι μικρές. Ωστόσο, ο συνδυασμός της αύξησης των κάθετων αγωγών που τοποθετούνται στο πλέγμα γείωσης σε συνδυασμό με την αύξηση του μήκους αυτών, επιφέρει αποτελέσματα τα οποία πλησιάζουν αυτά της μείωσης του «ματιού» πλέγματος γείωσης (Παράγραφος 5.4.2).

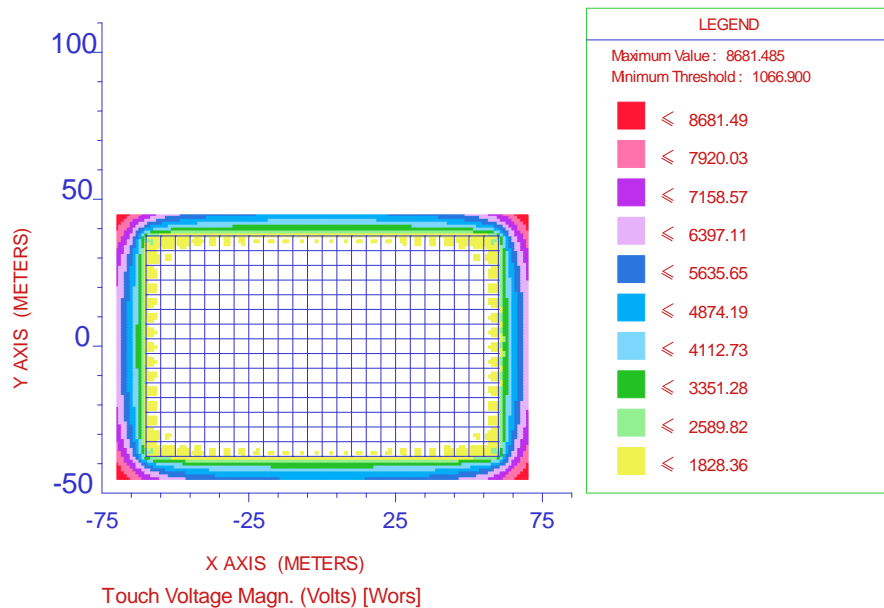
Όπως παρατηρούμε από τις ακόλουθες Εικόνες 5.4.21 και 5.4.23, τα αποτελέσματα που προέκυψαν σύμφωνα με το πρότυπο IEEE δείχνουν ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις διατηρούνται κάτω από τα όρια των επιτρεπόμενων τάσεων τόσο με την προσθήκη 10cm ασφάλτου όσο και με 20cm αντίστοιχα, καθιστώντας το σύστημα γείωσης ασφαλές.

Σύμφωνα όμως με το πρότυπο IEC, στην περίπτωση της προσθήκης 10cm ασφάλτου (Εικόνα 5.4.22) το σύστημα δεν ασφαλές καθώς αναπτύσσονται τάσεις πάνω των ορίων ασφαλείας σε έκταση περίπου 5-8m εσωτερικά της περιμέτρου του υποσταθμού. Στην περίπτωση όμως της προσθήκης 20cm ασφάλτου (Εικόνα 5.4.24), το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές με μία μικρή προσθήκη μονωτικής περίφραξης (από πολυκαρμπονικό υλικό, ξύλο ή χτιστή) 1m εσωτερικά των ορίων του πλέγματος

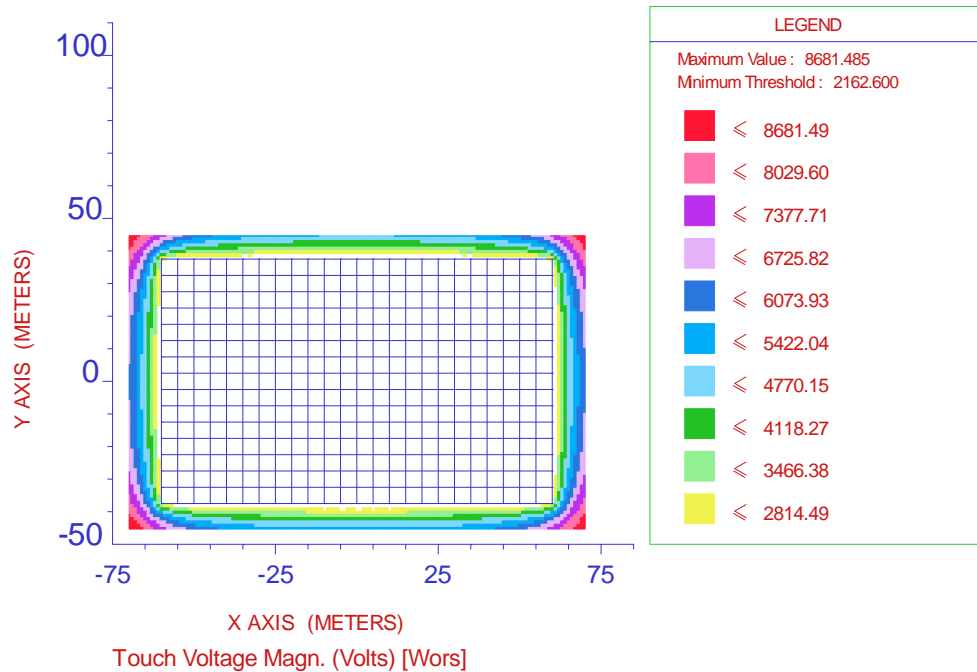
γείωσης, η οποία θα αποκλείει περίπου 3-5m εσωτερικά των γωνιών του οικοπέδου του υποσταθμού.



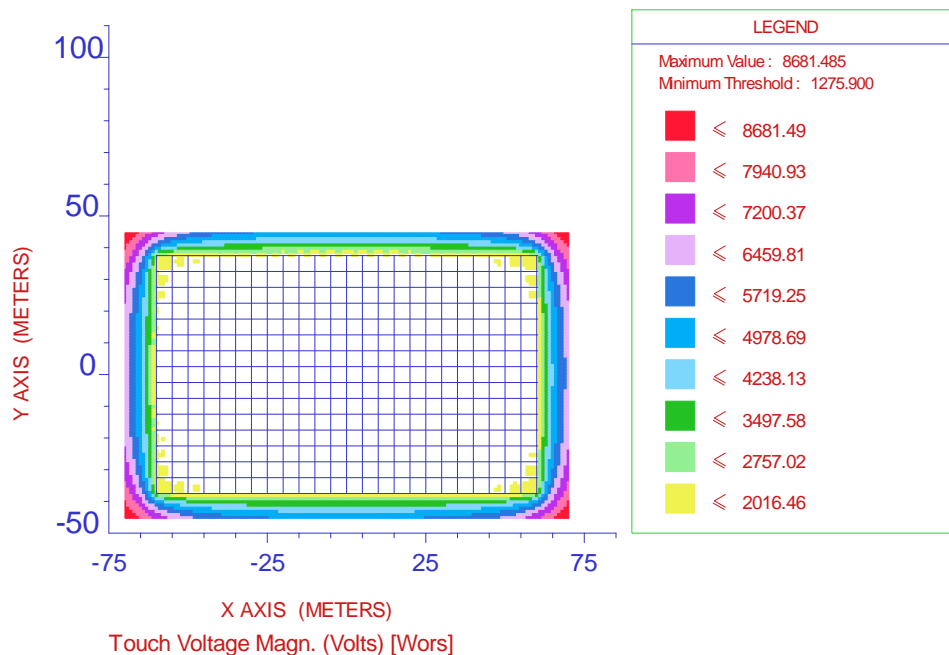
Εικόνα 5.4.21: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.4.22: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=5m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



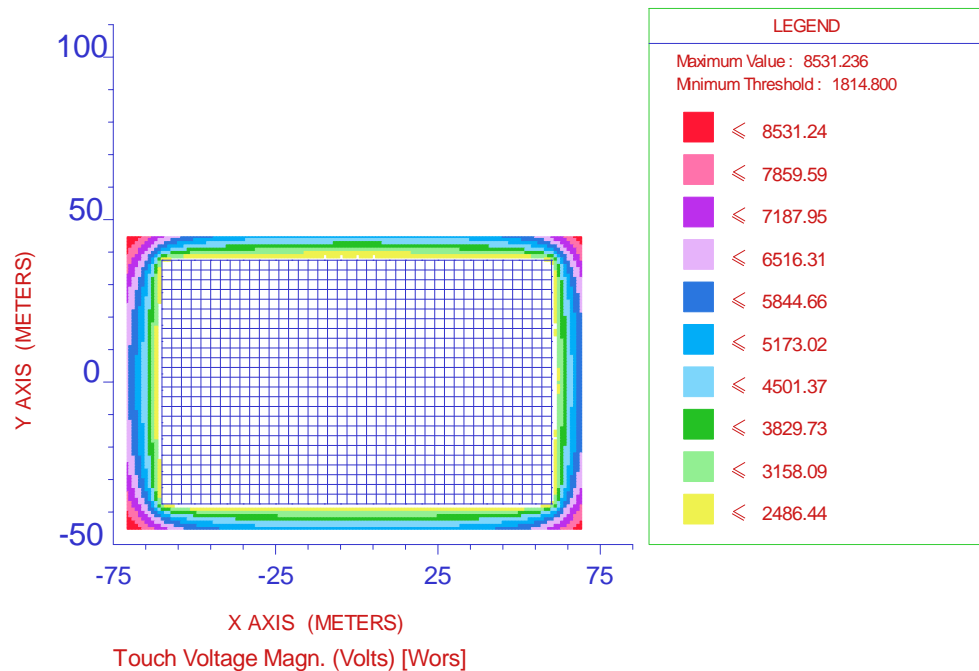
Εικόνα 5.4.23: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $a=5m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



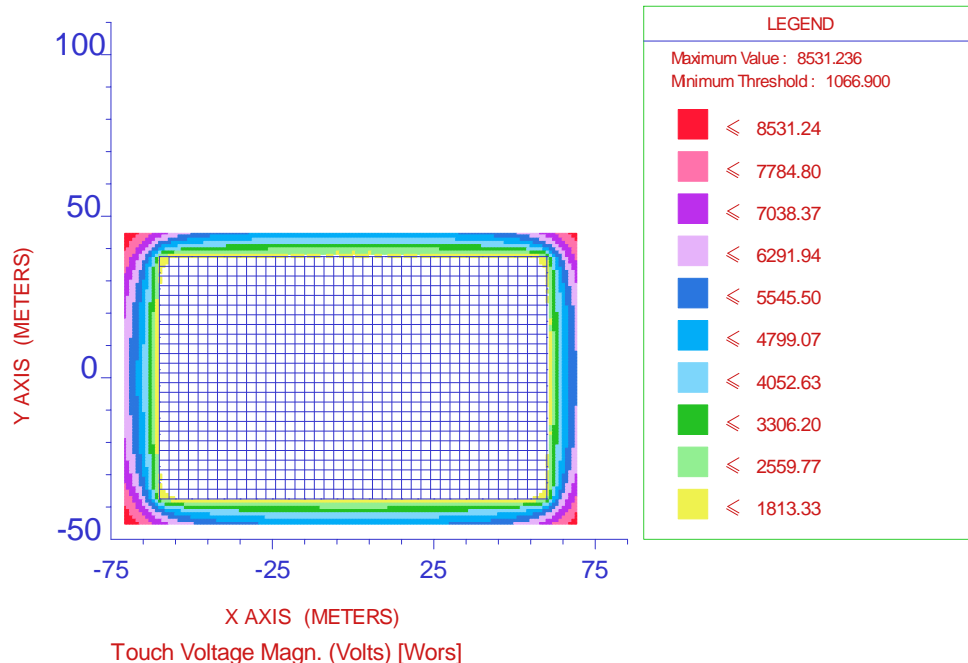
Εικόνα 5.4.24: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $a=5m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

5.4.6 Μείωση «ματιού» πλέγματος γείωσης

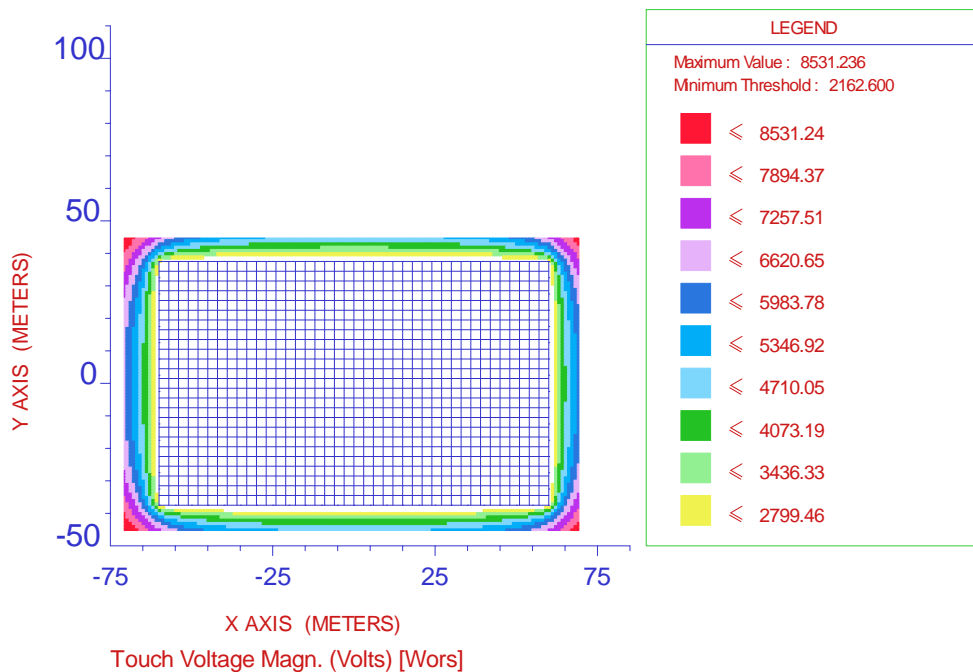
Στοχεύοντας στην επίτευξη μίας σχεδίασης ενός συστήματος γείωσης το οποίο θα είναι ασφαλές σε συμφωνία και με τα δύο πρότυπα, στις ακόλουθες προσομοιώσεις έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 3 μέτρα ($\alpha=3\text{m}$). Παράλληλα, για να μειώσουμε τα επικίνδυνα αναπτυσσόμενα δυναμικά, έχουν τοποθετηθεί περισσότεροι κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους 3m, ανά 5m κατά μήκος των πλευρών του πλέγματος γείωσης.



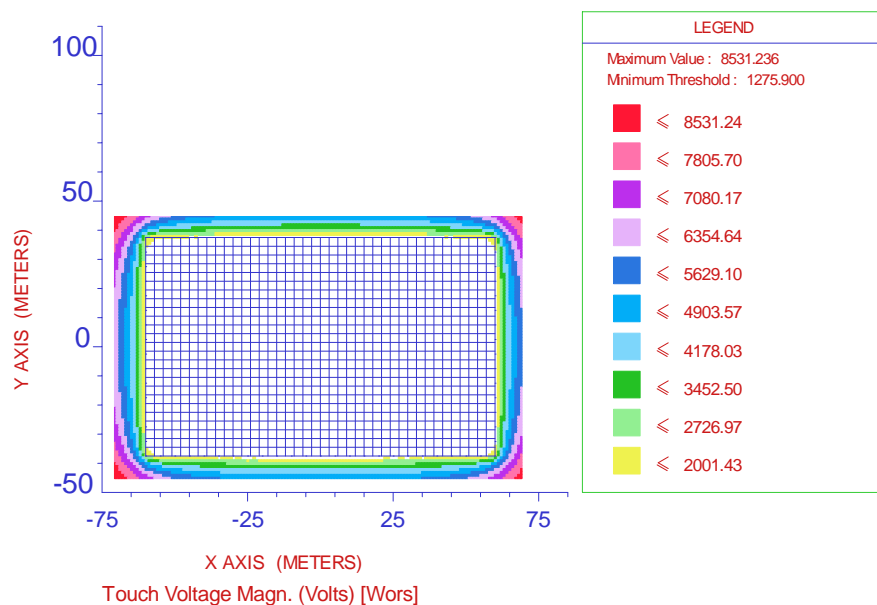
Εικόνα 5.4.25: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3\text{m}$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.4.26: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.4.27: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους B με $\alpha=3m$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.4.28: Τάσεις επαφής για μονοστρωματικό μοντέλο εδάφους Β με $\alpha=3\text{m}$, κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης ανά 5m κατά μήκος των εξωτερικών πλευρών του πλέγματος γείωσης, μήκος αγωγών $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε, από τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται σε αυτή τη παράγραφο, με τον συνδυασμό παραγόντων που χρησιμοποιήθηκε κατά τη σχεδίαση του συστήματος γείωσης (αριθμός και μήκος αγωγών, μάτι πλέγματος), επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης σύμφωνα και με τα δύο πρότυπα τόσο στις περιπτώσεις 10cm όσο και στην περίπτωση των 20cm ασφάλτου.

Η αλλαγή εντοπίζεται στην περίπτωση του προτύπου IEC και της προσθήκης 10cm ασφάλτου (Εικόνα 4.5.24), όπου εμφανίζονται τάσεις πάνω των ορίων πολύ κοντά στις γωνίες του οικοπέδου που θα εγκατασταθεί ο υποσταθμός, οι οποίες όμως εξαλείφονται στην περίπτωση με την προσθήκη 20cm ασφάλτου καθιστώντας το σύστημα γείωσης πλήρως ασφαλές.

5.5 Μοντέλο εδάφους «Διστρωματικό»

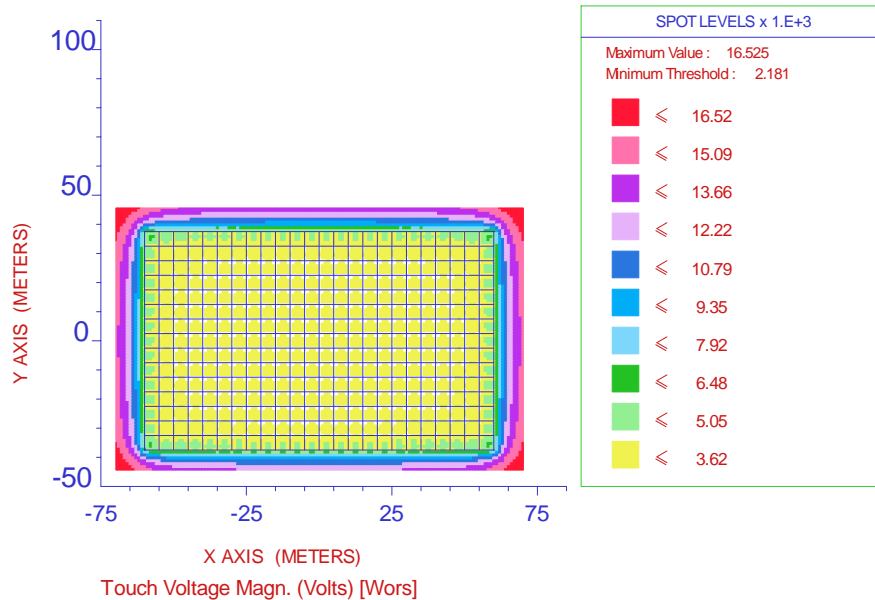
5.5.1 Βασικό Πλέγμα

Στις ακόλουθες προσομοιώσεις έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 5 μέτρα ($a=5m$), ενώ έχουν τοποθετηθεί κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους 1,5m στις 4 γωνίες του πλέγματος. Επίσης, διερευνήθηκε η ασφάλεια και η καταλληλότητα της σχεδίασης αυτής σε περιπτώσεις μη ύπαρξης υλικού επιφανείας, επίστρωσης του εδάφους με υλικό επιφανείας πάχους 10cm, ειδικής αντίστασης 10.000 Ωm και επίστρωσης με το ίδιο υλικό αλλά με πάχος 20cm. Τα μέγιστα όρια ασφάλειας για τις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, ενώ στην συνέχεια παρατίθενται και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

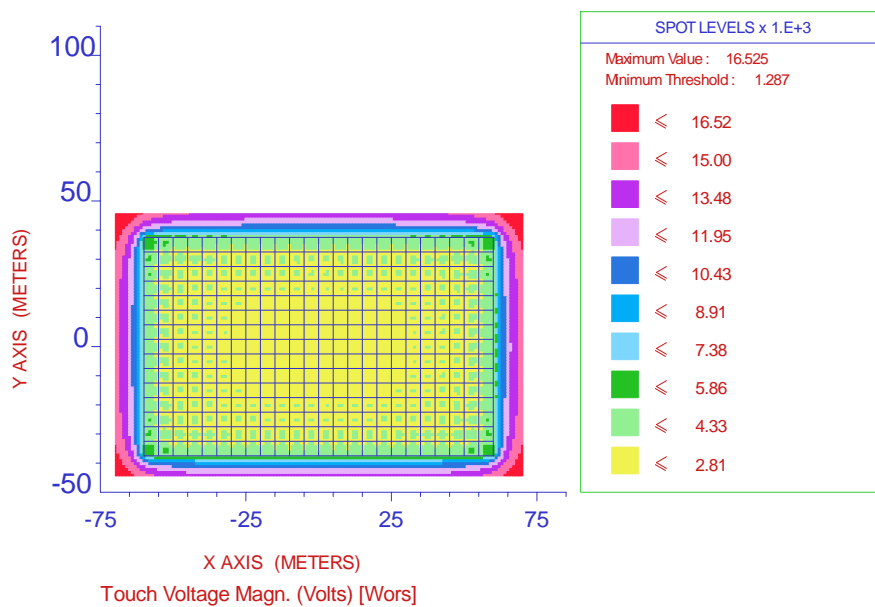
	<u>Χωρίς Επιφανειακό Στρώμα</u>			<u>Με επιφανειακό στρώμα 10cm</u>			<u>Με επιφανειακό στρώμα 20cm</u>		
	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$	$R_{foot}(\Omega)$	$E_{touch}(V)$	$E_{step}(V)$
ΠΠΕ 80-2013 50Kg	416,2	186,7	283,1	21.926,9	1.848,4	6.930,2	26.232,4	2.181,1	8.260,7
ΠΠΕ 80-2013 70Kg	416,2	252,6	383,2	21.926,9	2.501,8	9.379,7	26.232,4	2.951,9	11.180,4
ΙΕC καμπύλη C1	416,2	88,6	146,5	21.926,9	1.087,1	4.140,0	26.232,4	1.287,0	4.940,3

Πίνακας 5.5.1: Παρουσίαση μέγιστων επιτρεπόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $a=5m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$.

Λόγω της αυξημένης ειδικής αντίστασης του ανώτερου στρώματος του διστρωματικού μοντέλου εδάφους, όλες οι δοκιμές έθεταν το σύστημα γείωσης εκτός ορίων ασφαλείας. Ακολουθώς, παρατίθενται οι προσομοιώσεις των δοκιμών με προσθήκη υλικού επιφανείας πάχους 20cm.



Εικόνα 5.5.1: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=5m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $20cm$, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο $50 Kg$.



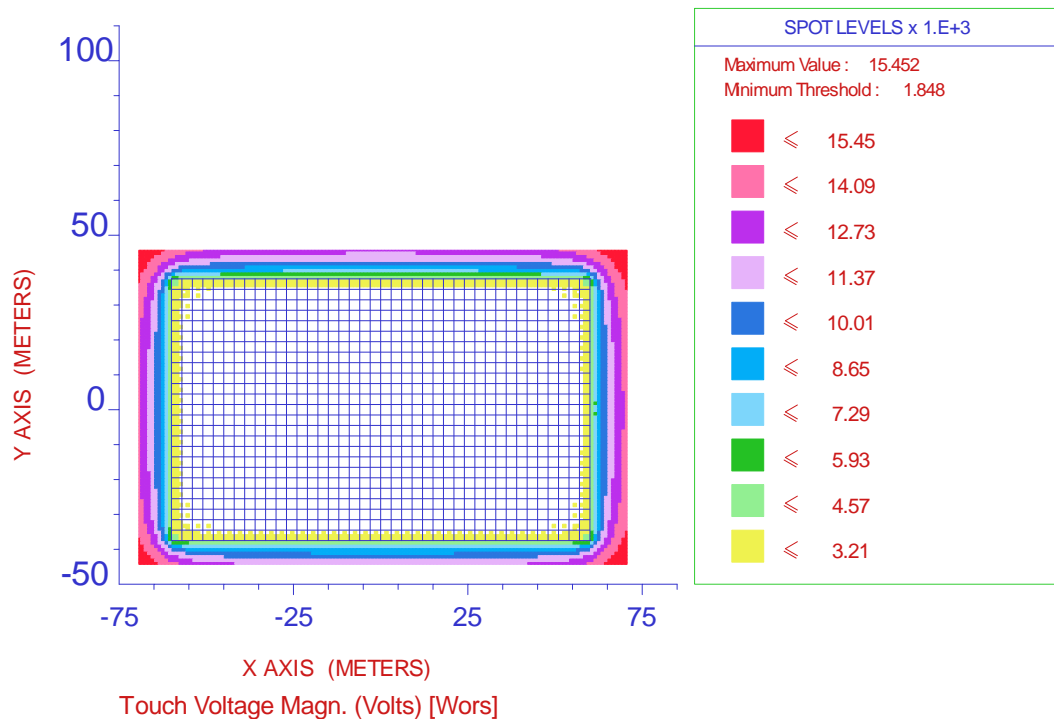
Εικόνα 5.5.2: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=5m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $20cm$, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

5.5.2 Μείωση «ματιού» πλέγματος γείωσης

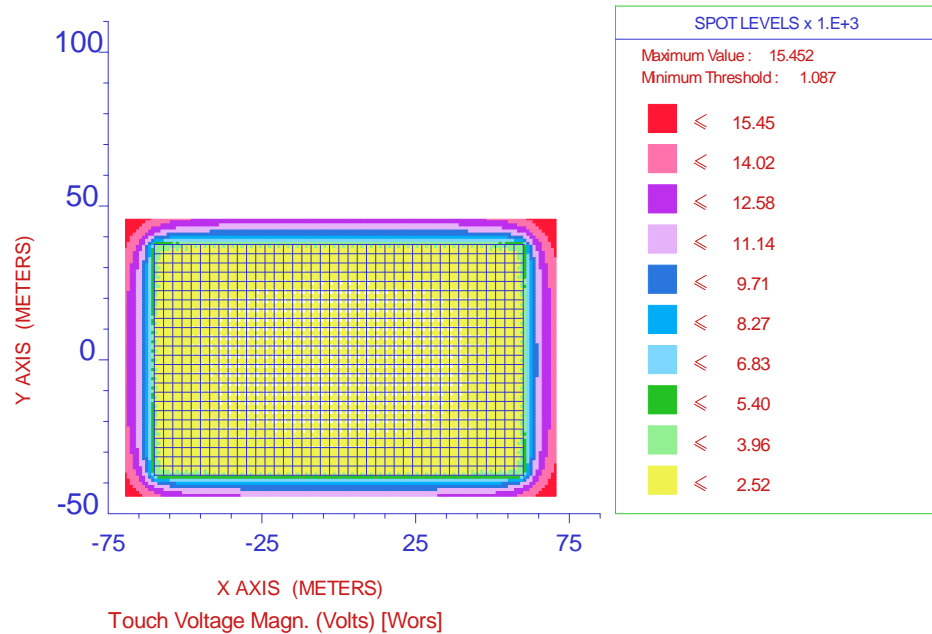
Σε αυτό το σετ προσομοιώσεων η τιμή της ειδικής αντίστασης του ανώτερου στρώματος του διστρωματικού μοντέλου εδάφους, είναι πολύ υψηλή και κατά συνέπεια πολύ μεγαλύτερη από τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των μονοστρωματικών εδαφών που εξετάστηκαν.

Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ύπαρξη μεγάλου βαθμού δυσκολίας στην επίτευξη ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης. Με στόχο την επίτευξη αυτού, δοκιμάστηκαν διακριτές σχεδιαστικές αλλαγές κατά κόρον στις περιπτώσεις επίστρωσης με επιφανειακό υλικό πάχους 10cm και 20cm.

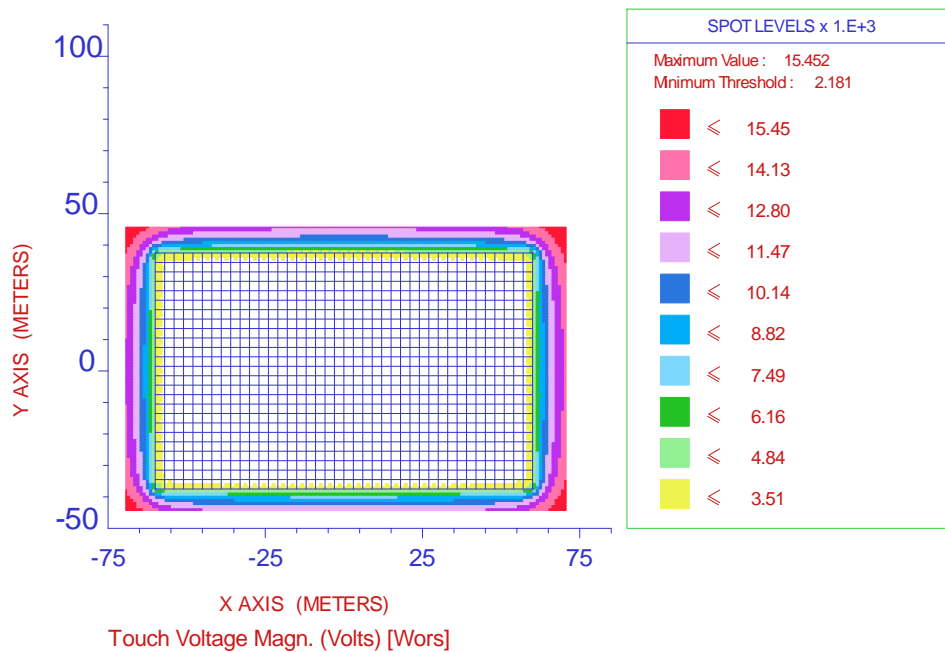
Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει επιλεγεί ένα πυκνότερο πλέγμα με «μάτι» ίσο με 3 μέτρα ($\alpha=3\text{m}$), ενώ οι ύπαρξη των κάθετων αγωγών διατηρήθηκε ίδια. Έχουμε αγωγούς μήκους 1,5 m τοποθετημένους στις 4 γωνίες του πλέγματος.



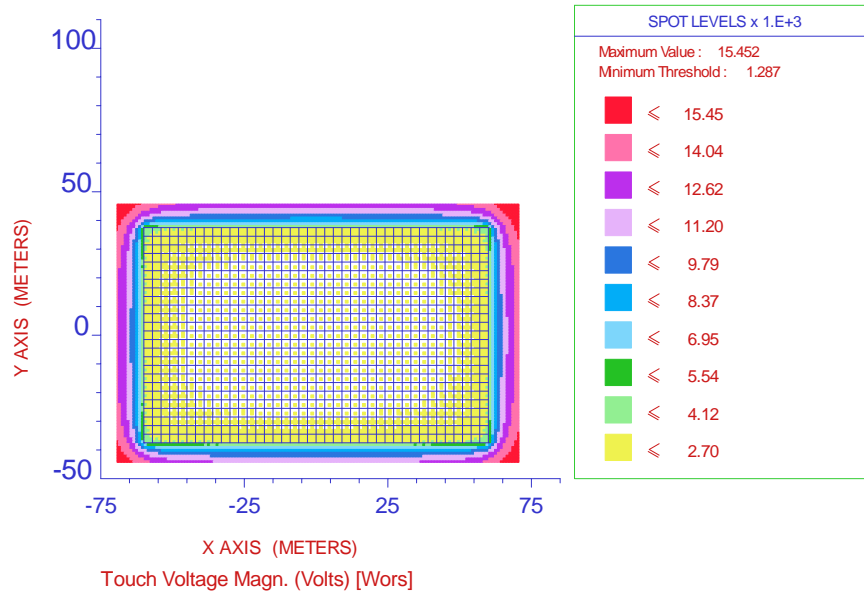
Εικόνα 5.5.3: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



Εικόνα 5.5.4: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 10cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.5.5: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50Kg .



Εικόνα 5.5.6: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $a=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=1,5\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.

Από τις παραπάνω γραφικές συμπεραίνουμε ότι με την χρήση βελτιωτικών κινήσεων (προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων, με ή χωρίς βελτιωτικό υλικό, πχ μπετονίτης) και επιπρόσθετων προστατευτικών μέτρων (επίστρωση με υλικό επιφανείας ή ύπαρξη μη μεταλλικής περίφραξης) στις κρίσιμες γωνίες του οικοπέδου του προς εγκατάσταση υποσταθμού (Εικόνα 5.5.7), το σύστημα γείωσης με βάση το κριτήριο IEEE θα μπορούσε να θεωρηθεί ασφαλές ή να προσεγγίσει την επίτευξη τάσεων επαφής κάτω από τα όρια ασφαλείας στο μεγαλύτερο μέρος της έκτασης του.



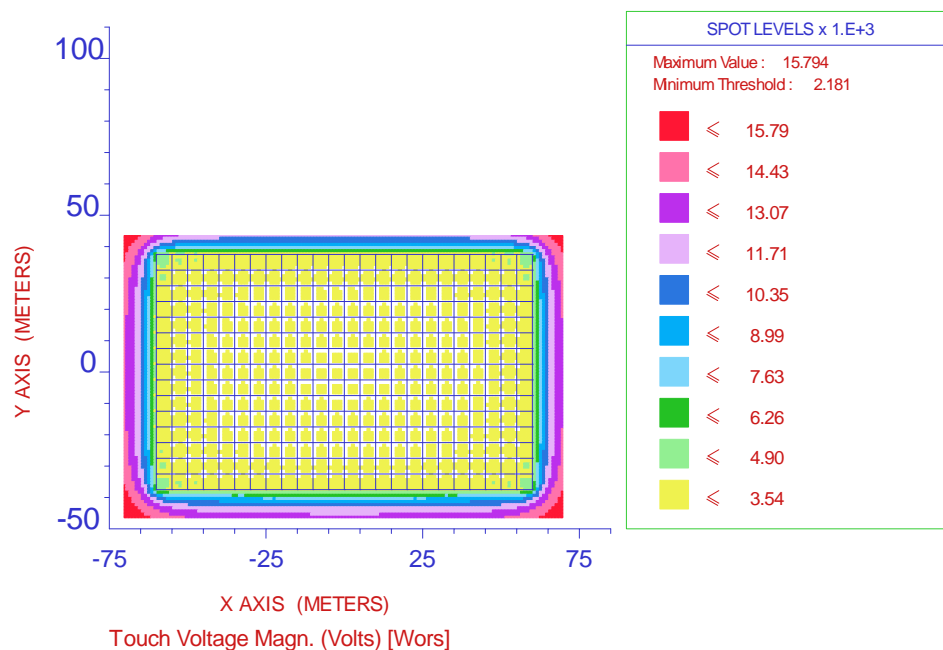
Εικόνα 5.5.7: Τοποθέτηση ράβδων γείωσης στις γωνίες της περίφραξης του υποσταθμού, με στόχο τον περιορισμό των επικίνδυνων αναπτυσσόμενων τάσεων [40].

Ωστόσο, σύμφωνα με το πρότυπο IEC το σύστημα γείωσης κρίνεται μη ασφαλές καθώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια σε όλη την έκταση του οικοπέδου του υποσταθμού.

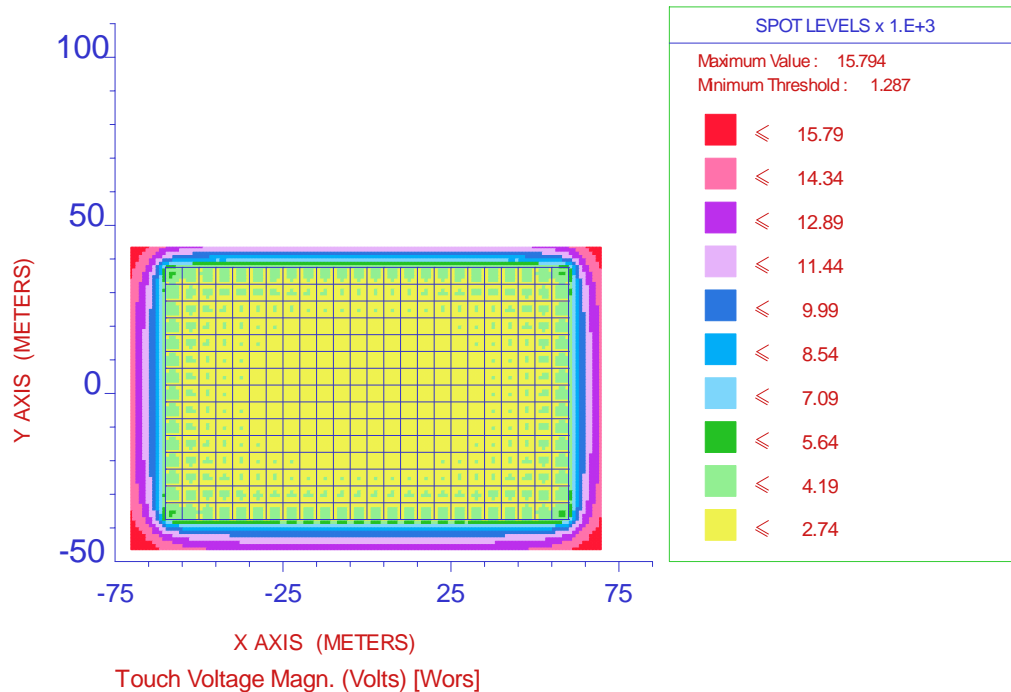
5.5.3 Αύξηση αριθμού κάθετων αγωγών και μήκους αυτών

Σε επόμενο στάδιο δοκιμάστηκε η επίδραση που θα είχε στις αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής οι αύξηση του αριθμού των κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης.

Συγκεκριμένα, στις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 5 μέτρα ($a=5m$), έχουν τοποθετηθεί κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους 3m, ανά 5m σε κάθε μία από τις πλευρές του πλέγματος γείωσης. Η επίστρωση του εδάφους έχει γίνει με υλικό επιφανείας πάχους 20cm ειδικής αντίστασης 10.000 Ωm . Ωστόσο, και τα δύο πρότυπα δίνουν τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων πάνω από τα ανώτερα όρια επιτρεπτών τάσεων, καθιστώντας το σύστημα γείωσης μη ασφαλή.



Εικόνα 5.5.8: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $a=5m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους 10.000 Ωm και πάχους 20cm, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg.



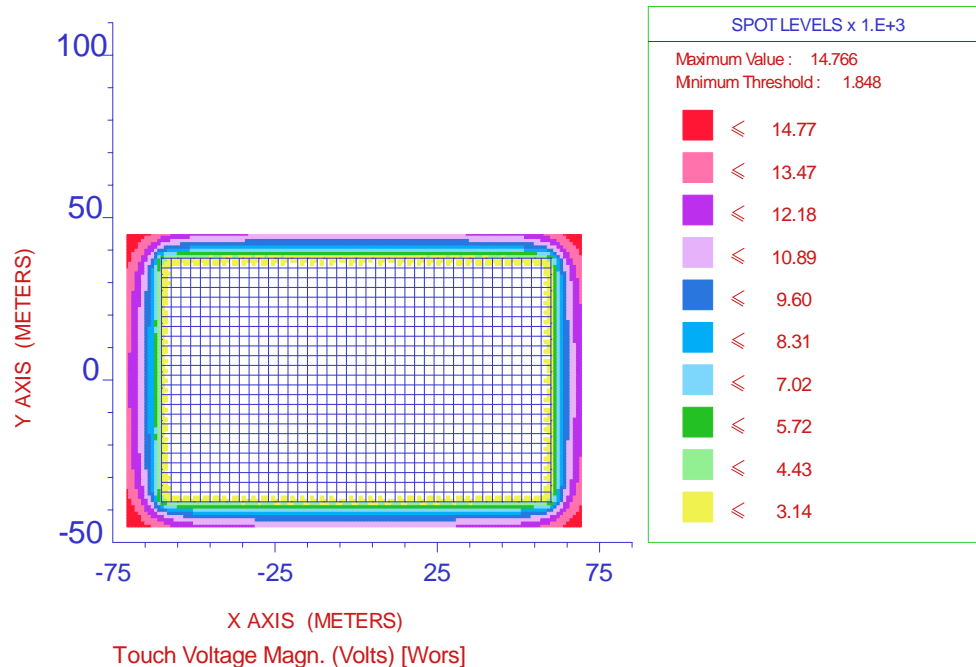
Εικόνα 5.5.9: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=5\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000\ \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1

5.5.4 Μείωση στο «μάτι» του πλέγματος

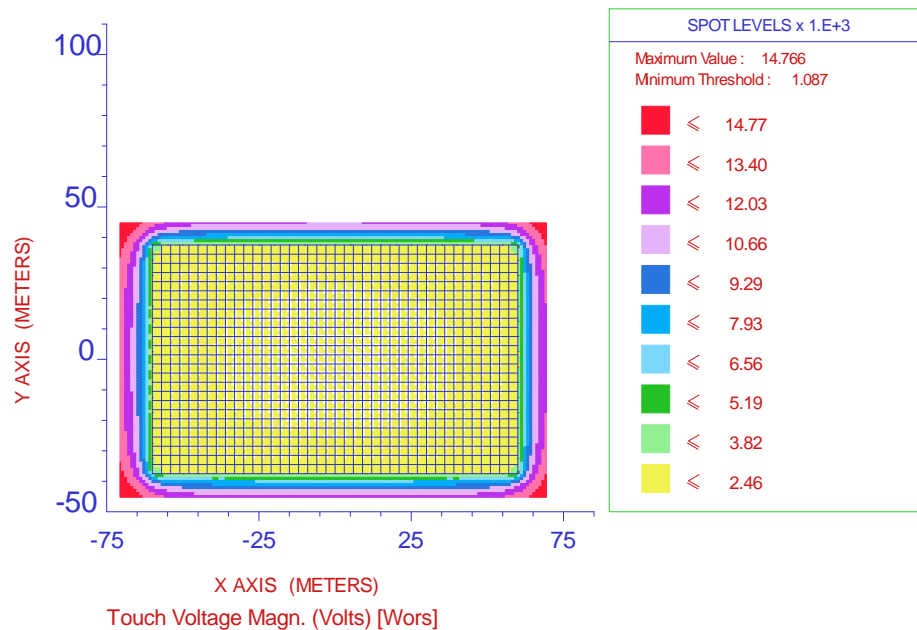
Σε αυτό το στάδιο δοκιμάστηκε μείωση στο «μάτι» του πλέγματος, στην προσπάθεια να περιοριστούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις κάτω των μέγιστων ορίων ασφαλείας.

Συγκεκριμένα, στις προσομοιώσεις που ακολουθούν έχει επιλεγεί «μάτι» ίσο με 3 μέτρα ($\alpha=3\text{m}$), έχουν τοποθετηθεί κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους 3m , ανά 5m σε κάθε μία από τις πλευρές του πλέγματος γείωσης. Η επίστρωση του εδάφους έχει γίνει με υλικό επιφανείας πάχους τόσο 10cm όσο και 20cm , ειδικής αντίστασης $10.000\ \Omega\text{m}$.

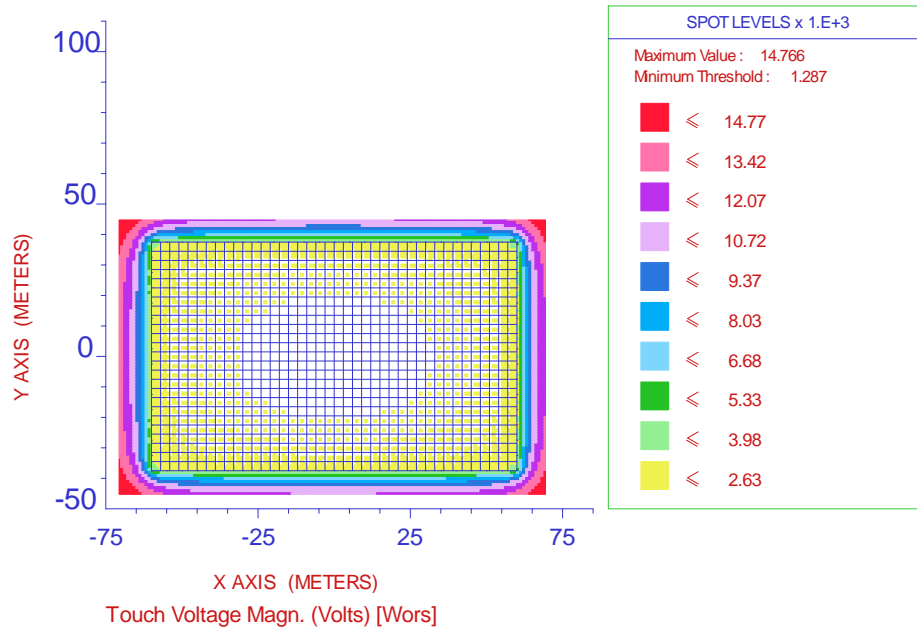
Επιπροσθέτως, για την πληρότητα των προσομοιώσεων σε αυτό το σημείο και στις προσομοιώσεις με θεώρηση επίστρωσης από 20cm επιφανειακό στρώμα ασφάλτου, παρατίθενται και τα αναπτυσσόμενα δυναμικά σύμφωνα με το Πρότυπο IEEE Std 80-2013 για άτομο σωματικού βάρους $70\ \text{kg}$.



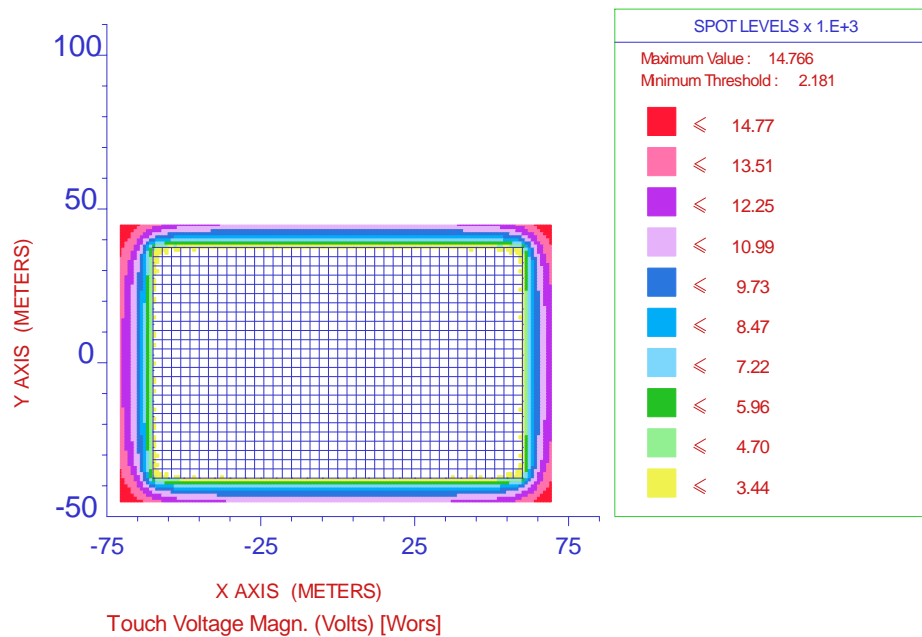
Εικόνα 5.5.10: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $10cm$, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο $50 Kg$.



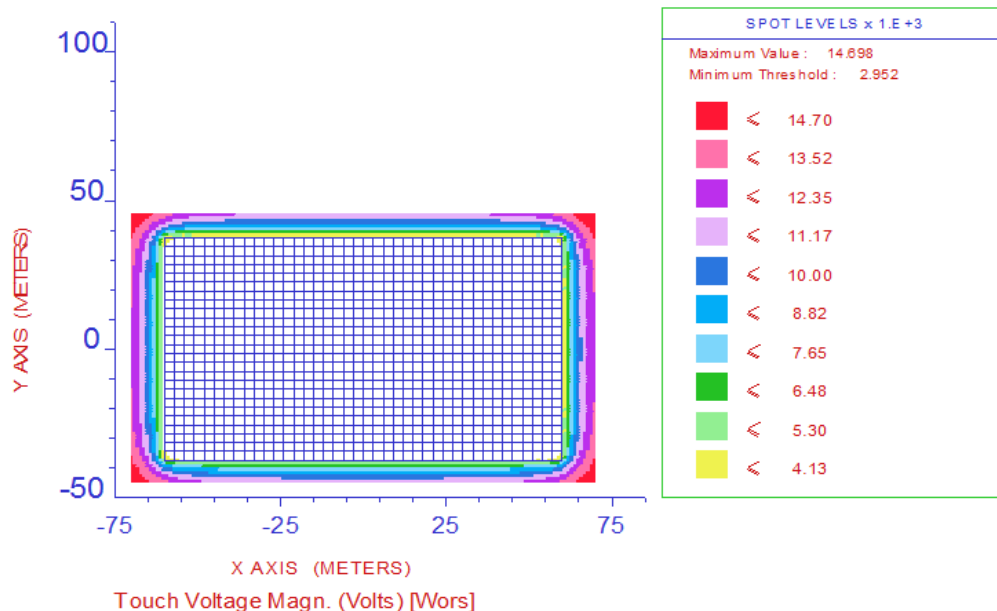
Εικόνα 5.5.11: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $10cm$, σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1



Εικόνα 5.5.12: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEC και την καμπύλη C1.



Εικόνα 5.5.13: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3\text{m}$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3\text{m}$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega\text{m}$ και πάχους 20cm , σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο 50 Kg .



Εικόνα 5.5.14: Τάσεις επαφής για διστρωματικό μοντέλο εδάφους με $\alpha=3m$, 4 κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μήκους $l=3m$, με την παρουσία επιφανειακού στρώματος εδάφους $10.000 \Omega m$ και πάχους $20cm$, σύμφωνα με το IEEE 80-2000 για άτομο $70 Kg$.

Από τις γραφικές που παρατίθενται σε αυτή την παράγραφο, συμπεραίνουμε ότι με την επίστρωση ασφάλτου πάχους $20cm$ (Εικόνα 5.5.13) και την χρήση προστατευτικών μέσων (με την χρήση μονωτικής περίφραξης) και ράβδων γείωσης στις κρίσιμες γωνίες του οικοπέδου, του προς εγκατάσταση υποσταθμού και σε απόσταση λιγότερη από $3m$ εσωτερικά αυτού, το σύστημα γείωσης με βάση το κριτήριο IEEE μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές καθώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής διατηρούνται κάτω από τα όρια ασφαλείας σε όλο το υπόλοιπο μέρος της έκτασης του.

Ωστόσο, σύμφωνα με το πρότυπο IEC, το οποίο αποδεικνύεται πιο αυστηρό, το σύστημα γείωσης κρίνεται μη ασφαλές καθώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις (Εικόνα 5.5.12) είναι πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια σε όλη την έκταση του οικοπέδου του υποσταθμού κάτω από οποιαδήποτε βελτιωτική κίνηση έχουμε δοκιμάσει.

Επίσης, είναι εμφανής και η ουσιαστική αύξηση στα ανεκτά όρια της τάσης επαφής (Εικόνα 5.5.14) με την χρήση του μοντέλου για ανθρώπινο σώμα $70kg$. Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι στην προδιαγραφή της Δ.Ε.Η για των σχεδιασμό συστημάτων γείωσης υποσταθμών υψηλής τάσης, έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο αυτό, λόγω της μεγαλύτερης ανεκτικότητας που προσφέρει στα όρια ασφαλείας.

Τελειώνοντας, όπως παρατηρήθηκε και από τις προσομοιώσεις μία αποτελεσματική λύση για την υλοποίηση ασφαλών συστημάτων γείωσης είναι η επίστρωση της επιφάνειας του εδάφους του υποσταθμού με υλικό επιφάνειας μεγάλης ειδικής αντίστασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης του επιφανειακού υλικού (χαλίκι $2.5000\Omega\text{m}$, άσφαλτος $10.000\Omega\text{m}$) και το πάχος επίστρωσης αυτού (10cm, 20cm) τόσο καλύτερα αποτελέσματα επιφέρει στον περιορισμό των επικίνδυνων βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, κάτω από τα νέα ανώτερων ορίων ασφαλείας, τα οποία είναι ασφαλώς αυξημένα

Συνήθως σε όλους τους υποσταθμούς υπάρχει επίστρωση από χαλίκι λόγω της συνεισφοράς του στην αύξηση των επιτρεπτών ορίων τάσεων, ωστόσο σε δύσκολες παρατηρείται ταυτόχρονη παρουσία και χαλικιού και ασφάλτου (Εικόνα 5.5.15).



Εικόνα 5.5.15: Επίστρωση Υποσταθμού με χαλίκι κατάλληλης διαμέτρου και με άσφαλτο με στόχο τον περιορισμό κάτω των ορίων ασφαλείας των επικίνδυνων αναπτυσσόμενων τάσεων [40].

5.6 Βηματικές τάσεις

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η εξασφάλιση βηματικών τάσεων κάτω από τις ανώτερες επιτρεπτές τιμές είναι πιο εύκολα επιλύσιμο πρόβλημα από το αντίστοιχο των τάσεων επαφής. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες με κυριότερο το γεγονός ότι τα επιτρεπτά όρια των βηματικών τάσεων είναι υψηλότερα σε σχέση με αυτά των τάσεων επαφής οπότε η εξάλειψη των επικίνδυνων τάσεων επαφής συνεπάγεται την εξάλειψη των επικίνδυνων βηματικών τάσεων.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάδειξη της συμβολή των Προτύπων, του IEEE Std 80-2013 [1] και του IEC 60479-1 [39] στην μελέτη των συστημάτων γείωσης. Χωρίζεται σε δυο διακριτά μέρη, όπου το πρώτο αποτελείται από την ανάλυση και σύγκριση των προτύπων [1] και [39] και το δεύτερο από τη μελέτη των συστημάτων γείωσης και τις προσομοιώσεις.

Σε πρώτο τμήμα, μελετήθηκαν τα δύο Πρότυπα ασφαλείας, το IEEE Std 80-2013 [1] και το IEC 60479-1 [39], παρουσιάστηκαν τα κριτήρια ασφαλείας όπως αυτά προκύπτουν με βάση καθένα από αυτά και αναφέρθηκαν οι βασικοί κανόνες σύμφωνα με τους οποίους γίνεται ο σχεδιασμός των συστημάτων γείωσης.

Πιο συγκεκριμένα, απαριθμούνται και αναλύονται τα βασικά κριτήρια ασφαλείας τα οποία πρέπει να πληροί κάθε σύστημα γείωσης ώστε να χαρακτηριστεί ως ασφαλές. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρουσίαση της συλλογιστικής πορείας και των μαθηματικών εξισώσεων μέσω των οποίων γίνεται η εξαγωγή των επιτρεπτών ορίων των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, σύμφωνα με το κάθε Πρότυπο.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι ενώ και τα δύο Πρότυπα έχουν βασικό στόχο την διασφάλιση της ακεραιότητας του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της διαμόρφωσης ασφαλών επιτρεπτών τιμών (ορίων ασφαλείας) αναπτυσσόμενων τάσεων, διαφέρουν ως προς την υπολογιστική πορεία που ακολουθούν, με το Πρότυπο IEC 60479-1 να ακολουθεί μία πιο περίπλοκη διαδικασία για την εξαγωγή των κριτηρίων ασφαλείας ενώ παράλληλα δεν περιλαμβάνει όλα τα σχετικά υπολογιστικά θέματα.

Ο κύριος ρόλος της ύπαρξης ενός συστήματος γείωσης σε έναν υποσταθμό είναι η προστασία των ατόμων που βρίσκονται σε αυτόν και του εξοπλισμού, τόσο κατά τη διάρκεια της σωστής λειτουργίας του υποσταθμού όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων λειτουργίας.

Σε δεύτερο και κυριότερο στάδιο, πραγματοποιήθηκε μελέτη και προσομοίωση της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης Y/Σ υψηλής τάσης σε μεταβολές κρίσιμων παραμέτρων αυτών, και τα αποτελέσματα που επέφεραν αυτές στα αναπτυσσόμενα δυναμικά (τάση επαφής, βηματική τάση) σύμφωνα με τα δύο εξεταζόμενα Πρότυπα IEEE Std 80-2013 [1] και IEC 60479-1 [39], αντίστοιχα.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, εξετάστηκε η ασφάλεια των συστημάτων γείωσης, μέσω της εξαγωγής των τιμών των αναπτυσσόμενων τάσεων στον χώρο του υποσταθμού και τον έλεγχο της τήρηση των επιτρεπτών ορίων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφή σύμφωνα με κάθε Πρότυπο. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με

την χρήση του λογισμικού CDEGS, για διάφορα συστήματα γείωσης αποτελούμενα από πλέγματα ίδιων διαστάσεων (120m \times 75m), βάθους τοποθέτησης 0,7m, διαφορετική πυκνότητας (3m και 5m), [βλέπε μάτι Εικόνας 6.1] με διαφορετικό αριθμό κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης και μήκος αυτών, σε περίπτωση σφάλματος τιμής κορυφής 30 kA και χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος 0,5sec. Τα σενάρια που εξετάστηκαν διαφέρουν επίσης, ως προς το μοντέλο εδάφους, την ύπαρξη ή όχι επίστρωσης υλικού επιφανείας και πάχους αυτού και για τα δύο Πρότυπα.



Εικόνα 6.1: Χωματοουργικές εργασίες για την τοποθέτηση πλέγμα γείωσης σε βάθος 0.70 m [40]

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις εδάφους [28], μία μονοστρωματική με χαμηλή ειδική αντίσταση εδάφους (A), μία μονοστρωματική με διπλάσια τιμή ειδικής αντίστασης εδάφους (B) και μία με θεώρηση διστρωματικού μοντέλου εδάφους με πολύ υψηλή τιμή ειδικής αντίστασης ανώτερου στρώματος. Αυτά που εξετάστηκαν και στις τρεις περιπτώσεις είναι τα δυναμικά επιφανείας και κυρίως οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής καθώς είναι οι πιο αυστηρές και επικίνδυνες για το ανθρώπινο δυναμικό του υποσταθμού.

Κάθε διαφορετική περίπτωση συστήματος γείωσης, (πυκνότερο ή πιο αραιό πλέγμα, τοποθέτηση διαφορετικού αριθμού κάθετων ηλεκτροδίων γείωσης, διαφορετικού μήκους αυτών, ύπαρξη επιφανειακού υλικού υψηλής ειδικής αντίστασης), δεν επιδρά στα όρια ασφαλείας των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, όπως αυτά εξάγονται από κάθε Πρότυπα αντίστοιχα, αλλά στις τιμές των αναπτυσσόμενων δυναμικών στην επιφάνεια του οικοπέδου του υποσταθμού.

Από την ανάλυση και της προσομοιώσεις, παρατηρείται ότι τα ανώτερα όρια ανεκτών βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής είναι ανάλογα της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Συνεπώς, μεγαλύτερη τιμή της ειδικής αντίστασης, του άνω στρώματος του εδάφους, οδηγεί σε υψηλότερα όρια ασφαλείας.

Ωστόσο, ενώ σε ένα μοντέλο εδάφους με μικρή τιμή ειδικής αντίστασης έχουμε χαμηλότερα επιτρεπτά όρια αναπτυσσόμενων τάσεων, η μικρή τιμή της ειδικής αντίστασης οδηγεί σε χαμηλή τιμή αντίσταση γείωσης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη τιμή του μέγιστου δυναμικού γείωσης (GPR). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ανάπτυξη χαμηλότερων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι τα όρια ασφαλείας των επιτρεπόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής μειώνονται με την εφαρμογή του Προτύπου IEC 60479-1 [39] σε σχέση με τα αντίστοιχα όρια ασφαλείας που προκύπτουν από το Πρότυπο IEEE Std 80-2013 [1] τόσο για άνθρωπο 50kg όσο και 70Kg. Η προδιαγραφή της Δ.Ε.Η [29], υπολογίζει τα όρια ασφαλείας των αναπτυσσόμενων τάσεων για άτομα 70kg. Με αυτή τη θεώρηση για το ανθρώπινο σωματικό βάρος, αυξάνονται τα επιτρεπτά όρια των αναπτυσσόμενων τάσεων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα όρια για άνθρωπο 50Kg.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των διάφορων συστημάτων γείωσης συνοψίζονται στα ακόλουθα:

Αρχικά, τα όρια των επιτρεπτών τάσεων καθορίζονται πρωταρχικά από το Πρότυπο σύμφωνα με το οποίο θα γίνει ο υπολογισμός, από το μοντέλου του εδάφους που θα εγκατασταθεί το πλέγμα γείωσης και τα χαρακτηριστικά του ρεύματος σφάλματος (μέγιστη τιμή ρεύματος σφάλματος, συχνότητα, χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος). Συνεπώς, οποιαδήποτε αλλαγή στα χαρακτηριστικά του συστήματος γείωσης (διαστάσεις, πλήθος ηλεκτροδίων και διαστάσεις αυτών) δεν επιδρά στον υπολογισμό των ανώτερων ορίων των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής.

Όσον αφορά, τις τιμές των αναπτυσσόμενων τάσεων, τόσο επαφής όσο και βηματικής, αυτές επηρεάζονται κυρίως από την πυκνότητα του πλέγματος γείωσης και λιγότερο από την συνολική αντίσταση αυτού. Οι κύριοι στόχοι της σχεδίασης ενός συστήματος γείωσης, είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης γείωσης του πλέγματος και των αναπτυσσόμενων τάσεων σε όλη την έκταση του υποσταθμού.

Στις περιπτώσεις όπου εμφανίζονται αναπτυσσόμενες τάσεις πάνω από τα επιτρεπτά όρια συνίσταται ως λύση η πυκνωση του πλέγματος γείωσης καθώς με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται μία μείωση στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Ωστόσο, δεν πρέπει να ξεχνάμε πως η τιμή της αντίστασης γείωσης του συστήματος εξαρτάται από τη συνολική έκταση του πλέγματος και όχι από την πυκνότητα του πλέγματος (διάσταση «ματιού»).

Πολλές φορές, παρατηρήθηκε η ύπαρξη επικίνδυνων εκτός ορίων τάσεων, μόνο στις γωνίες του συστήματος γείωσης (μελετήθηκαν μόνο ορθογώνια πλέγματα). Σε αυτές τις περιπτώσεις με την προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης κατασκευασμένα συνήθως από χαλκό ή από επιψευδαργυρωμένο χάλυβα, οι τάσεις μειώνονται και αρκετές φορές περιορίζονται κάτω από τα επιτρεπτά όρια ασφαλείας.

Όταν υπάρχει ανάπτυξη επικίνδυνων τάσεων επαφής σε όλη την έκταση του υποσταθμού, μία αποτελεσματική λύση είναι η χρήση οικοπέδου με μεγαλύτερη έκταση και με ταυτόχρονη πύκνωση του πλέγματος (έτσι ώστε, αφενός να έχουμε μικρότερη αντίσταση γείωσης εξαιτίας του μεγαλύτερου συστήματος γείωσης και αφετέρου μικρότερες τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων εξαιτίας τόσο του πυκνότερου ματιού όσο και της μικρότερης αντίστασης).

Τελειώνοντας, όπως παρατηρήθηκε και από τις προσομοιώσεις μία αποτελεσματική λύση για την υλοποίηση ασφαλών συστημάτων γείωσης είναι η επίστρωση της επιφάνειας του εδάφους του υποσταθμού με υλικό επιφάνειας μεγάλης ειδικής αντίστασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης του επιφανειακού υλικού (χαλίκι 2.5000 Ωm , άσφαλτος 10.000 Ωm) και το πάχος επίστρωσης αυτού (10cm, 20cm) τόσο καλύτερα αποτελέσματα επιφέρει στον περιορισμό των επικίνδυνων βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, κάτω από τα νέα ανώτερων ορίων ασφαλείας, τα οποία είναι ασφαλώς αυξημένα

Συνήθως σε όλους τους υποσταθμούς υπάρχει επίστρωση από χαλίκι λόγω της συνεισφοράς του στην αύξηση των επιτρεπτών ορίων τάσεων, ωστόσο σε δύσκολες παρατηρείται ταυτόχρονη παρουσία και χαλικιού και ασφάλτου (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2: Υποσταθμός Δ.Ε.Η με εξωτερική επίστρωση χαλικιού και επιπλέον προσθήκη ασφάλτου στις εξωτερικές γωνίες του υποσταθμού με στόχο την αύξηση των ορίων ασφαλείας των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής [40].

Σε περιπτώσεις ύπαρξης επικίνδυνων τάσεων επαφής κατά μήκος της περιφράξης, μετά τη λήψη όλων των αναγκαίων μέτρων και διορθώσεων (επίστρωση με κατάλληλο υλικό επιφανείας) τότε αυτή πρέπει να αποτελείται από μη μεταλλικό υλικό όπως ξύλο, πλέξιγκλας, τσιμεντόλιθο κλπ. Η απουσία μεταλλικού αντικειμένου συνεπάγεται την απουσία τάσεων επαφής καθώς αυτές αναπτύσσονται μεταξύ ενός μεταλλικού αντικειμένου και της γης. Στην Εικόνα 6.3 που ακολουθεί, απεικονίζεται ένας υποσταθμός σε όλη την έκταση του οποίου υπάρχει επίστρωση από χαλίκι και περιμετρικά αυτού, χτιστός μαντρότοιχος από πέτρες ώστε να περιοριστούν οι τάσεις επαφής. Ωστόσο, στην σιδερένια πόρτα, η οποία αποτελεί το μεταλλικό μέρος της περιφράξης, υπάρχει επιπλέον επίστρωση με άσφαλτο (υλικό μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης) για την αύξηση των επιτρεπτών ορίων των τάσεων επαφής.



Εικόνα 6.3: Υποσταθμός Δ.Ε.Η με επιφανειακή επίστρωση χαλικιού, περίφραξη από μάντρα και προσθήκη ασφάλτου στην σιδερένια πόρτα.

Βιβλιογραφία

- [1] ANSI/IEEE Std 80-2013 “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, 2013, (Revision of IEEE Std 80-2000).
- [2] Σεμινάριο “Γειώσεις Δικτύων και Εγκαταστάσεων”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 6-10 Οκτωβρίου 1997
- [3] I.F. Gonos, ‘Experimental study of transient behavior of grounding grids using scale model’ Measurement Science and Technology. 17(2006), pp 2022-2026
- [4] Ελληνικό Πρότυπο (Ελληνικός Οργανισμός Πιστοποίησης ΕΛΟΤ) HD 384, «Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, δεύτερη έκδοση, 2004 -03-04.
- [5] Χρήστος Γ. Κουρέλης, “Προσομοίωση Μεταβατικής Συμπεριφοράς Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2010.
- [6] Περής Γ. Χάλαρης, “Γειώσεις-Νομοθεσία και Κανονισμοί”, Σεμινάριο: Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”.
- [7] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, «Επίδραση μικροεδάφους σε συστήματα γείωσης εγκαταστάσεων», Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011.
- [8] Πέτρος Ντοκόπουλος, “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών σύμφωνα με το νέο κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθήνα, 2005
- [9] Ιωάννης Φ. Γκόνος, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.
- [10] Χάρις Γκαμουρά, “Μεταβατική Συμπεριφορά Γείωσης Ανεμογεννητριών”, Διπλωματική εργασία, Πάτρα 2012.
- [11] Νίκος Παναγιωτόπουλος, “Γειώσεις Βιομηχανικών – Επαγγελματικών Κτιρίων και Κατοικιών”, Αθήνα 2004
- [12] Δάφνη Α. Κουτσοδόρη, “Υπολογιστική Προσομοίωση Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2004
- [13] ‘Earth ground resistance: Principles, testing methods and applications’, Fluke 2008
- [14] “Καθιέρωση διατάξεων διαφορικού ρεύματος και θεμελιακής γείωσης”, ΦΕΚ 1222/05-09-2006 τεύχος Β΄ αριθ. Φ. Α΄ 50/12081/642 άρθρο 2.

- [15] Αλέξανδρος Κουτσομάρκος, Κωνσταντίνος Κουτσομάρκος, “Διερεύνηση της αντίστασης γείωσης στηριγμάτων- θεμελίων φωτοβολταϊκών πάνελ μέσω του λογισμικού προσομοίωσης”, Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2012
- [16] Ελένη Κούρνη, “Μελέτη της αντίστασης γείωσης με χρήση νευρωνικών δικτύων”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2011
- [17] Megger, ‘Getting down to earth, a practical guide to earth resistance’
- [18] G.F. Tagg, ‘Earth resistances’, George Newnes Limited, London, 1964
- [19] Χρυσούλα Αδάμ, Σωτήριος Βιλλιώτης, “Υπολογισμός αντιστάσεων στρωματοποιημένης γης από μετρήσεις αντίστασης στην επιφάνεια”, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2008.
- [20] Dawalibi, F. (1982). Transmission Line Grounding. EL-2699, Research Project 1494-1. Montreal, Quebec, Canada, Safe Engineering Services Ltd. 1.
- [21] Roy B. Carpenter, Jr. Joseph A. Lanzoni, “Designing for a low resistance earth interface (grounding)”, October 2007.
- [22] Δημήτριος Χατζηδήμος, “Μελέτη και Σχεδιασμός Συστημάτων Γείωσης σε Υποσταθμούς Υψηλής και Μέσης Τάσεις”, Καβάλα 2010.
- [23] Danziel C. F. and Mansfield T. H., “Effect of frequency on perception currents”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 69, 1950
- [24] Danziel C. F., “Threshold 60-cycle fibrillating currents”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 79, 1960.
- [25] Dalziel, C. F. and Lee W. R., “Lethal electric currents”, IEEE Spectrum, 1969
- [26] Aravanis J., Tzouvelekis E., Chronopoulos C., Antoniou T., “Computing Method of the Equivalent resistivity of non-uniform Soil for the Design of transmission Substation Grounding Grids”, Proceedings of the 38th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2003), Thessalonica, Greece, September 1-3, 2003.
- [27] Del Alamo J.L., “A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth”, IEEE Transactions on Power Delivery, 8, 4, October 1993, pp. 1890-1899.

- [28] Ι.Φ. Γκόνος, Β.Θ. Κονταργύρη, Ι.Α. Σταθόπουλος και Γ.Α. Μάνος, “Μεθοδολογία Σχεδίασης, Ανάλυσης και Μέτρησης Συστημάτων Γείωσης Υποσταθμών Υψηλής Τάσεως”, Σύνοδος Cigre, Αθήνα 2009.
- [29] Προδιαγραφή ΔΕΗ/ΔΝΕΜ-ΥΣ1, Τεύχος ΝΕΜ/ΥΣ.Ι-6), Τόμος Ι “Τεχνική Περιγραφή Υπαίθριου Υ/Σ Μεταφοράς 150 kV/MT», 2009.
- [30] Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Transactions on Power Delivery, January 2005, pp. 100-106.
- [31] IEEE Std 81.2-1983, “IEEE guide for measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems”, June 1992.
- [32] ElectroTechnik Pty Ltd, “Comparison of IEEE and IEC Safety Criteria”, www.elek.com.au, 2013.
- [33] Lee C. H., Meliopoulos A. P., “A Comparison of touch and step voltages between IEEE Std 80 and IEC 479-1. IEE” Proc. Gener. Transm. Distrib. 1999, 146 (5): 593–601.
- [34] Dalziel, C. F. (1946). "Dangerous electric currents." AIEE Transactions on Power Apparatur and Systems 62: 579-585.
- [35] Dawalibi, F. (1982). Transmission Line Grounding. EL-2699, Research Project 1494-1. Montreal, Quebec, Canada, Safe Engineering Services Ltd. 1.
- [36] Thapar, B., V. Gerez, et al. (1994). "Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards." IEEE Trans. on Power Delivery 9(1): 360-368.
- [37] Grainger, L. and R. Boulton (2005) A method to apply IEEE Std. 80 safe touch and step potentials to relay coordination. http://www.gerl.ca/gerl/gerl_papers/wprc2005.pdf
- [38] Lee C. H., Chang C-Nan. “Comparison of the safety criteria for ground grid design at 161/23.9- kV indoor-type substation”, 2013.
- [39] “Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects”, CEI TECHNICAL SPECIFICATION TS IEC 60479-1, 4η έκδοση, 2005-07.
- [40] Δημήτριος Σ. Γαλανής, "Συμβολή στη μελέτη Συστήματος Γείωσης Υποσταθμών Υψηλής Τάσης", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2016.