



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

## Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δήμητρα Π. Βάρλα

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Οκτώβριος 2004





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

120

## Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δήμητρα Π. Βάρλα

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2004.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2004

Δήμητρα Π. Βάρλα

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

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Τα συστήματα γείωσης σχεδιάζονται με σκοπό να παρέχουν την απαραίτητη ασφάλεια σε συνθήκες τόσο κανονικής λειτουργίας όσο και σφάλματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται αρχικά οι κανόνες βάσει των οποίων γίνεται ο σχεδιασμός συστημάτων γείωσης, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80 – 2000. Στη συνέχεια γίνεται μελέτη της απόκρισης συχνότητας του συστήματος και κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος (δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους, τάση επαφής) για διάφορες διατάξεις γείωσης. Τέλος γίνεται η σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης και η μελέτη ασφάλειας του.

## Λέξεις κλειδιά

Σύστημα γείωσης, Αντίσταση γείωσης, Πλέγμα, Ράβδος, Ειδική αντίσταση εδάφους, Μοντέλο εδάφους, IEEE Std 80 – 2000.

# Abstract

Earthing systems in AC substations are designed to provide safety under normal operating and fault conditions. In this diploma thesis we first present the design procedure of an earthing system, according to the IEEE Std 80 – 2000 guide. Next, we examine the frequency response of the earthing system and some critical parameters (potential at the earth surface, touch voltage) for several earthing layouts. Finally, we design an earthing system and examine its safety.

## **Key words**

Earthing, Impedance, Grid, Rod, Resistivity, Soil model, IEEE Std 80 – 2000.

# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vi</b>
<b>Πρόλογος</b> .....	<b>1</b>
<b>Ορολογία</b> .....	<b>3</b>
1.1 Ορισμοί βασικών εννοιών .....	3
1.1.1 Γείωση .....	3
1.1.2 Ηλεκτρόδιο Γείωσης.....	3
1.1.3 Πλέγμα γείωσης.....	4
1.1.4 Ράβδοι Γείωσης.....	4
1.1.5 Αντίσταση γείωσης ( $R_g$ ) .....	4
1.1.6 Άπειρη γη.....	4
1.1.7 Αποτελεσματική γείωση .....	5
1.1.8 Πολυστρωματική δομή εδάφους.....	5
1.1.9 Ουδετέρωση.....	5
1.1.10 DC συνιστώσα .....	5
1.1.11 Ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος, $I_F$ .....	5
1.1.12 Λόγος X/R .....	6
1.1.13 Μέγιστο Δυναμικό Γείωσης (Ground Potential Rise, GPR).....	7
1.1.14 Μέγιστο ρεύμα πλέγματος, $I_G$ .....	7
1.1.15 Συμμετρικό ρεύμα πλέγματος, $I_g$ .....	7
1.1.16 Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος Γείωσης, $I_f$ .....	7
1.1.17 Συντελεστής εξασθένησης, $D_f$ .....	8
1.1.18 Αντίσταση ποδιού, $R_f$ .....	8
1.1.19 Τάση Βρόχου, $E_m$ .....	8
1.1.20 Βηματική Τάση, $E_s$ .....	8
1.1.21 Τάση επαφής, $E_t$ .....	9
1.1.22 Τάση επαφής μεταξύ μετάλλων.....	9
1.1.23 Τάση σφάλματος ή Δυναμικό προς άπειρη γη, $U_f$ .....	9
1.1.24 Υλικό επιφανείας.....	9
1.1.25 Μεταφερόμενη τάση.....	9
<b>Γείωση</b> .....	<b>10</b>
2.1 Είδη Γειώσεων.....	10
2.1.1 Γείωση λειτουργίας.....	10
2.1.2 Γείωση προστασίας.....	11
2.1.3 Γείωση ασφάλειας ή αντικεραυνικής προστασίας .....	11
2.2 Μέθοδοι Γείωσης .....	11
2.2.1 Ουδετέρωση.....	11
2.2.2 Άμεση γείωση .....	11
2.2.1 Μέσω διακόπτη διαφυγής.....	11
2.3 Είδη Γειωτών .....	11
2.3.1 Γειωτής ράβδου .....	12
2.3.2 Γειωτής ταινίας ή συρματοσόχεινου .....	12
2.3.3 Γειωτής πλάκας.....	13
2.3.4 Γειωτής ακτινικός.....	13
2.3.5 Γειωτής πλέγματος.....	13
2.3.6 Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής.....	13
2.3.7 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές .....	14
2.3.8 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης.....	14
2.3.9 Θεμελιακή γείωση .....	14

<b>Ειδική Αντίσταση .....</b>	<b>18</b>
3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους.....	18
3.1.1 Είδος του εδάφους – Προσμίξεις .....	19
3.1.2 Υγρασία .....	19
3.1.3 Θερμοκρασία .....	20
3.1.4 Μορφή της τάσης.....	20
3.1.5 Ηλεκτρικό ρεύμα .....	21
3.2 Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους.....	21
3.2.1 Μέθοδος Wenner .....	21
3.2.2 Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού (fall – of – potential) .....	22
3.2.3 Σύγκριση μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης .....	23
<b>Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης.....</b>	<b>25</b>
4.1 Διαδικασία Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης.....	26
4.2 Ανάλυση της Διαδικασίας Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης.....	27
4.2.1 Επιλογή μοντέλου εδάφους.....	27
4.2.2 Επιλογή Αγωγών – Υλικό – Διατομή .....	28
4.2.2.1 Υλικό .....	29
4.2.2.2 Διατομή Αγωγών .....	29
4.2.3 Βασικές αρχές στη σχεδίαση του πλέγματος γείωσης .....	30
4.2.4 Επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα.....	31
4.2.5 Αντίσταση ανθρώπινου σώματος.....	33
4.2.6 Τάση Επαφής.....	33
4.2.7 Βηματική Τάση.....	35
4.2.8 Υλικό Επιφάνειας .....	36
4.2.9 Επιτρεπτά Όρια Τάσης.....	37
4.2.10 Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης .....	38
4.2.11 Προσδιορισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος .....	40
4.2.11.1 Είδη σφαλμάτων .....	40
4.2.11.2 Προσδιορισμός του συντελεστή καταμερισμού.....	42
4.2.11.3 Προσδιορισμός του συντελεστή εξασθένησης.....	42
4.3 Σύνοψη .....	44
<b>SES CDEGS.....</b>	<b>45</b>
5.1 Εισαγωγή .....	45
5.2 Καταχώρηση Δεδομένων .....	46
5.2.1 RESAP.....	47
5.2.2 MALZ.....	49
5.3 Προσομοίωση.....	54
5.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	55
5.4.1 RESAP.....	55
5.4.2 MALZ.....	57
<b>Απόκριση Συχνότητας της Σύνθετης αντίστασης Γείωσης.....</b>	<b>61</b>
6.1 Απόκριση Συχνότητας για διάφορες τιμές Ειδικής Αντίστασης Εδάφους.....	61
6.2 Απόκριση Συχνότητας για μεταβλητή Επιφάνεια Πλέγματος .....	63
6.3 Απόκριση Συχνότητας για μεταβλητή Πυκνότητα Πλέγματος.....	64
6.4 Ράβδοι Γείωσης και Συχνότητα.....	66
6.4.1 Προσθήκη ράβδων σε πλέγμα 100m ×100m σε διστρωματικό έδαφος.....	66
6.4.2 Πλέγμα 100m×100m με ράβδους σε διστρωματικό έδαφος μεταβλητού πάχους .....	67
6.4.3 Πλέγμα 10m×10m με ράβδους σε διστρωματικό έδαφος μεταβλητού πάχους .....	69
6.5 Παρατηρήσεις.....	70
<b>Μελέτη Συστήματος Γείωσης.....</b>	<b>72</b>
7.1 Περιγραφή Συστήματος Γείωσης.....	72
7.2 Αντίσταση Γείωσης .....	73
7.3 Δυναμικό στην Επιφάνεια του Εδάφους .....	75
7.4 Τάση Επαφής.....	78



---

<b>Μελέτη Συστήματος Γείωσης Υποσταθμού.....</b>	<b>82</b>
8.1 Μοντελοποίηση Εδάφους.....	82
8.1.1 Levenberg - Marquardt .....	83
8.1.1.1 Διστρωματικό Μοντέλο.....	83
8.1.1.2 Τριστρωματικό Μοντέλο.....	84
8.1.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι .....	85
8.1.2.1 Διστρωματικό Μοντέλο.....	85
8.1.3 Επιλογή μοντέλου εδάφους.....	86
8.2 Σύστημα Γείωσης .....	87
8.2.1 Θεωρητική Προσέγγιση.....	87
8.2.1.1 Ράβδοι.....	87
8.2.1.1.1 Μία Ράβδος .....	87
8.2.1.1.2 Διατάξεις Ράβδων.....	89
8.2.1.2 Ταινία .....	91
8.2.2 Μελέτη αντίστασης με το υπολογιστικό πακέτο CDEGS .....	92
8.2.2.1 Ράβδοι.....	92
8.2.2.2 Ταινία .....	92
8.2.2.3 Πλέγμα γείωσης.....	92
8.2.3 Σχεδίαση συστήματος γείωσης – Έλεγχος Ασφάλειας .....	93
8.2.3.1 Πλέγμα.....	93
8.2.3.2 Πλέγμα με ράβδους .....	97
8.2.4 Συμπέρασμα.....	99
<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>100</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>102</b>

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα του σχεδιασμού συστημάτων γείωσης. Αναφέρεται περιληπτικά στο πρότυπο IEEE Std 80 – 2000 και παρουσιάζει συνοπτικά τους βασικούς όρους στη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Επιπλέον εξετάζει τρεις περιπτώσεις γειώσεων με τη βοήθεια του πακέτου λογισμικού CDEGS.

Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

**Κεφάλαιο 1.** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ορολογία που χρησιμοποιείται στη συνέχεια στη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης υποσταθμού.

**Κεφάλαιο 2.** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα είδη γειώσεων καθώς και η μορφή και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γειωτών.

**Κεφάλαιο 3.** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λόγος για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους καθώς και για τις μεθόδους μέτρησής της.

**Κεφάλαιο 4.** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές σχεδίασης ενός συστήματος γείωσης και στη διαδικασία που ακολουθείται σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80 – 2000.

**Κεφάλαιο 5.** Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης ενός συστήματος γείωσης με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου CDEGS.

**Κεφάλαιο 6.** Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης με παραμέτρους την ειδική αντίσταση εδάφους, την πυκνότητα και το μέγεθος του πλέγματος γείωσης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, εξετάζεται η συμπεριφορά των ράβδων γείωσης σε σχέση με τη συχνότητα.

**Κεφάλαιο 7.** Στο κεφάλαιο αυτό υπολογίζουμε την αντίσταση γείωσης, το δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους και την τάση επαφής για την περίπτωση τριών διατάξεων γείωσης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας.

**Κεφάλαιο 8.** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η μελέτη συστήματος γείωσης ενός υποσταθμού. Επιλέγεται το κατάλληλο μοντέλο εδάφους, υπολογίζεται η αντίσταση γείωσης και γίνεται η μελέτη ασφάλειας του συστήματος γείωσης για ορισμένο ρεύμα σφάλματος.

**Κεφάλαιο 9.** Στο κεφάλαιο αυτό περιέχονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας σχετικά με τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης υποσταθμού.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συμπαράσταση και την ανεκτίμητη βοήθειά τους όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την αμέριστη συμπαράστασή του και το άριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη διάθεση του πολύτιμου χρόνου του προς καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράστασή μου.

Την κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ουσιαστική βοήθεια που πρόθυμα και ακούραστα μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Την οικογένειά μου για την αγάπη και την υποστήριξη που μου προσφέρει σε κάθε δυσκολία.

# Ορολογία

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην ορολογία που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας. Η επεξήγηση των όρων γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [1] το οποίο αποτελεί την αναθεωρημένη έκδοση του προτύπου IEEE Std 80 – 1986.

## 1.1 Ορισμοί βασικών εννοιών

### 1.1.1 Γείωση

Η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιας έκτασης που να θεωρείται γη [2]. Αναλυτικότερος ορισμός της γείωσης, οι κατηγορίες γειώσεων καθώς και τα είδη γειωτών αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2.

### 1.1.2 Ηλεκτρόδιο Γείωσης

Ηλεκτρόδιο τοποθετημένο μέσα στο έδαφος μέσω του οποίου γίνεται συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη γη.

Τα ηλεκτρόδια γείωσης (γειωτές) έχουν τις μορφές που παρουσιάζονται στο *Κεφάλαιο 2, Σχήμα 2.1*. Οι ελάχιστες διαστάσεις των ηλεκτροδίων γείωσης δίνονται στο *Κεφάλαιο 2, Πίνακας 2.1* κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε. (Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων) [7] και στον *Πίνακα 2.2* αναφέρονται οι τύποι που δίνουν τις αντιστάσεις τους.

### **1.1.3 Πλέγμα γείωσης**

Σύστημα από οριζόντια ηλεκτρόδια γείωσης που αποτελούνται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων αγωγών θαμμένων στο έδαφος και συνιστούν γείωση για ηλεκτρικές συσκευές ή μεταλλικές κατασκευές. Το σύστημα αυτό περιορίζεται σε μια ορισμένη περιοχή.

Πλέγματα τοποθετημένα σε μικρό βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης βοηθούν επίσης στον έλεγχο της κλίσης του δυναμικού στην επιφάνεια [1].

### **1.1.4 Ράβδοι Γείωσης**

Μεταλλικοί ράβδοι θαμμένοι κατακόρυφα ή πλάγια μέσα στο έδαφος, συνήθως περιμετρικά του πλέγματος και αγωγή συνδεδεμένοι με αυτό, που εξασφαλίζουν μικρότερη αντίσταση γείωσης.

### **1.1.5 Αντίσταση γείωσης ( $R_g$ )**

Η ωμική αντίσταση του συστήματος γείωσης προς την άπειρη γη. Εξαρτάται από την ειδική αντίσταση  $\rho$  του εδάφους όπου είναι εγκατεστημένη η γείωση (για την ειδική αντίσταση του εδάφους και τους παράγοντες που την επηρεάζουν γίνεται λόγος στο Κεφάλαιο 3), την επιφάνεια  $A$  που η γείωση καταλαμβάνει καθώς και το βάθος  $h$  όπου είναι τοποθετημένη.

Ένα καλό σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση προς μείωση του μέγιστου δυναμικού γείωσης (Ορισμός 1.13). Συνήθεις τιμές για μεγάλους υποσταθμούς είναι μικρότερες του  $1\Omega$  και για υποσταθμούς διανομής από 1 ως  $5\Omega$  [1].

### **1.1.6 Άπειρη γη**

Είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του εδάφους σε άπειρη απόσταση από το γειωτή. Λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών. Η τάση της άπειρης γης θεωρείται μηδενική. Για πρακτικούς σκοπούς η «άπειρη απόσταση» είναι 5-10 φορές επί την μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή [2].

### **1.1.7 Αποτελεσματική γείωση**

Έτσι ονομάζεται μια γείωση που καθιστά αδύνατη την εκδήλωση επικίνδυνων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων στην περιοχή που καλύπτει [2].

### **1.1.8 Πολυστρωματική δομή εδάφους**

Ανομοιογενές έδαφος που μοντελοποιείται με τουλάχιστον δύο οριζόντια ή κατακόρυφα στρώματα. Κάθε στρώμα έχει ξεχωριστή ομοιογενή ειδική αντίσταση [3].

### **1.1.9 Ουδέτερωση**

Η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών τμημάτων των συσκευών ή των στοιχείων του δικτύου με τον ουδέτερο αγωγό [1].

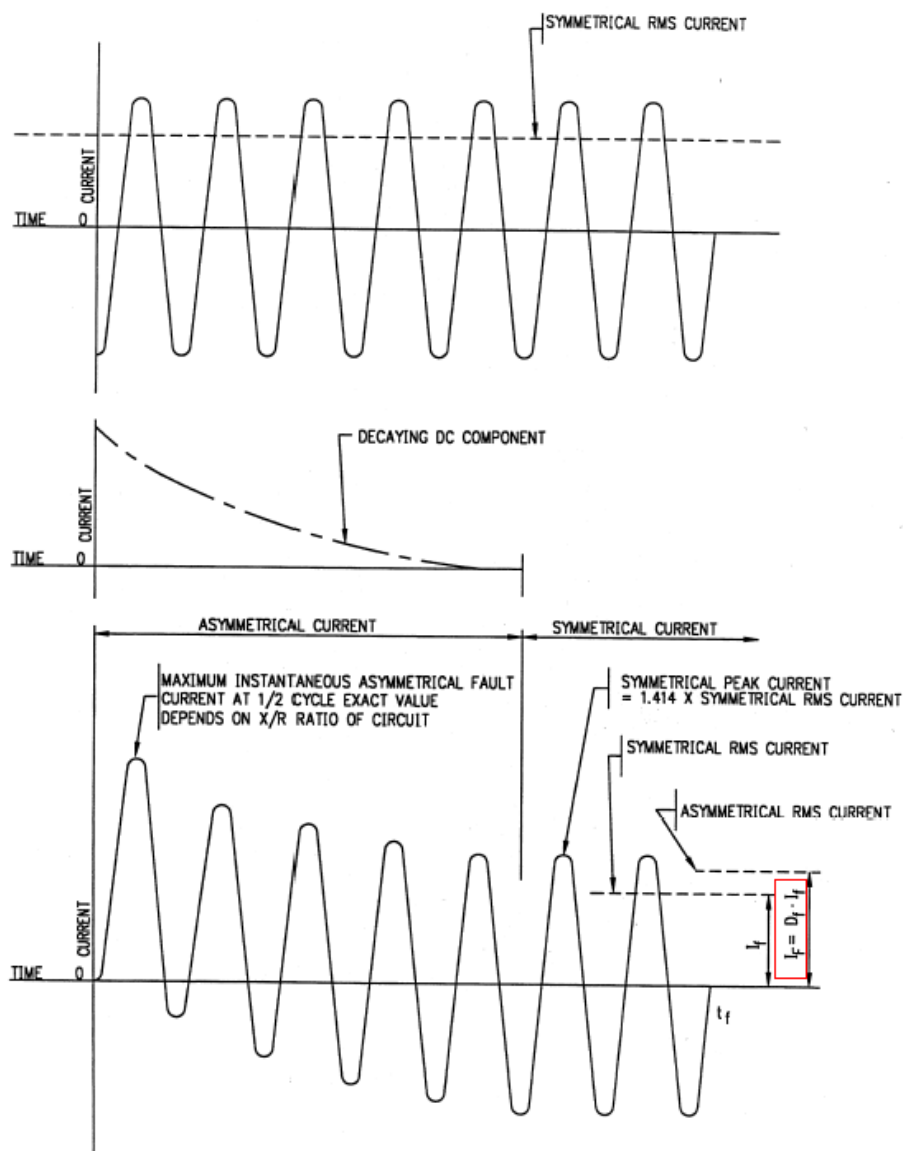
### **1.1.10 DC συνιστώσα**

Η διαφορά του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος από το συνολικό ρεύμα. Πρόκειται για έναν παράγοντα ενιαίας και σταθερής πολικότητας το πλάτος του οποίου μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά με ορισμένο ρυθμό (Σχήμα 1.1) [1].

### **1.1.11 Ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος, $I_F$**

Προκύπτει από το γινόμενο του συντελεστή εξασθένησης,  $D_f$ , επί την ενεργό τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος,  $I_f$  [1]:

$$I_F = D_f \cdot I_f \quad (1.1)$$



Σχήμα 1.1: Συμμετρικό ρεύμα σφάλματος – dc offset – συνολικό ρεύμα

### 1.1.12 Λόγος X/R

Ο λόγος της αντίδρασης προς την αντίσταση του συστήματος. Είναι ενδεικτικός του βαθμού εξασθένησης της dc συνιστώσας. Αυτό σημαίνει ότι μεγάλος λόγος X/R αντιστοιχεί σε μεγάλη χρονική σταθερά και αργή εξασθένηση της dc συνιστώσας [1].

### 1.1.13 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 επί την αντίσταση γείωσης:

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (1.2)$$

Σε κανονικές συνθήκες το δυναμικό του συστήματος γείωσης είναι σχεδόν ίσο με το μηδέν. Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος προς γη το ρεύμα σφάλματος που άγεται μέσω της γείωσης στο έδαφος προκαλεί την αύξηση του εν λόγω δυναμικού [1].

### 1.1.14 Μέγιστο ρεύμα πλέγματος, $I_G$

Δίνεται από το γινόμενο του συντελεστή εξασθένησης,  $D_f$ , επί την ενεργό τιμή του ρεύματος πλέγματος,  $I_g$  [1]:

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (1.3)$$

### 1.1.15 Συμμετρικό ρεύμα πλέγματος, $I_g$

Το μέρος εκείνο του ρεύματος σφάλματος γείωσης,  $I_f$ , που ρέει από το πλέγμα γείωσης στον περιβάλλοντα χώρο. Δίνεται από τον τύπο [1]:

$$I_g = S_f \cdot I_f \quad (1.4)$$

όπου  $S_f$  είναι ο συντελεστής καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος.

### 1.1.16 Συμμετρικό Ρεύμα Σφάλματος Γείωσης, $I_f$

Η μέγιστη ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος γείωσης αμέσως μόλις εκδηλωθεί το σφάλμα, δηλαδή τη στιγμή  $t = 0^+$ .

Για σφάλμα φάσης – γης

$$I_f = 3I_0 \quad (1.5)$$



όπου  $I_0$  η ενεργός τιμή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας που ρέει αμέσως μετά την εκδήλωση του σφάλματος [1].

### 1.1.17 Συντελεστής εξασθένησης, $D_f$

Συντελεστής που προσδιορίζει το ενεργό ισοδύναμο του μη συμμετρικού ρεύματος σφάλματος για μια δεδομένη διάρκεια σφάλματος  $t_f$ , εκφράζοντας την επίδραση της παρουσίας dc offset στο ρεύμα σφάλματος και τη μείωσή του με την πάροδο του χρόνου. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται στη μελέτη ασφάλειας του συστήματος γείωσης, όπως αναφέρεται στο *Κεφάλαιο 4* [1].

### 1.1.18 Αντίσταση ποδιού, $R_f$

Η αντίσταση του ποδιού σε σχέση με τη γη, αμελώντας τις αντιστάσεις των υποδημάτων, και θεωρώντας ότι το πόδι προσεγγίζεται με έναν αγωγίμο μεταλλικό δίσκο, ακτίνας  $b$  σε m, που εφάπτεται σε επιφάνεια ομογενούς εδάφους, ειδικής αντίστασης  $\rho$  σε  $\Omega \cdot m$ . Η αντίσταση  $R_f$  υπό αυτές τις υποθέσεις δίνεται από τον τύπο

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (1.6)$$

Συνήθως η ακτίνα του μεταλλικού δίσκου λαμβάνεται ίση με 0.08m κι έτσι καταλήγουμε στη σχέση

$$R_f = 3.125\rho \quad (1.7)$$

### 1.1.19 Τάση Βρόχου, $E_m$

Η μέγιστη τάση επαφής μέσα σε ένα βρόχο πλέγματος γείωσης, συγκεκριμένα στο μέσο του γωνιακού βρόχου σε περίπτωση συμμετρικού πλέγματος [1].

### 1.1.20 Βηματική Τάση, $E_s$

Η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης μεταξύ των ποδιών ενός ανθρώπου. Θεωρούμε άνοιγμα βήματος 1m και ότι ο άνθρωπος δεν έρχεται σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο. Αναλυτικότερη επεξήγηση του όρου γίνεται στο *Κεφάλαιο 4* [1].

### **1.1.21 Τάση επαφής, $E_t$**

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του GPR και του δυναμικού στην επιφάνεια της γης τη στιγμή που ένας άνθρωπος στέκεται και ταυτόχρονα ακουμπά με το χέρι του τη γειωμένη εγκατάσταση. Αναλυτικότερη επεξήγηση του όρου γίνεται στο *Κεφάλαιο 4* [1].

### **1.1.22 Τάση επαφής μεταξύ μετάλλων**

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικών κατασκευών ενός υποσταθμού σε περίπτωση έμμεσης σύνδεσής τους μέσω των μελών ενός ανθρώπου (χέρια, πόδια) [1].

### **1.1.23 Τάση σφάλματος ή Δυναμικό προς άπειρη γη, $U_f$**

Είναι η τάση που εμφανίζεται μεταξύ των προσιτών αγωγίμων στοιχείων, τα οποία δεν αποτελούν τμήμα του κυκλώματος αλλά είναι δυνατόν να βρεθούν υπό τάση λόγω βλάβης της μόνωσης, και κάποιου σημείου της γης επαρκώς απομακρυσμένου [5].

### **1.1.24 Υλικό επιφανείας**

Ένα υλικό που προστίθεται επάνω στο έδαφος και αποτελείται από χαλίκι ή ασφαλτο ή άλλο τεχνητό υλικό με σκοπό τη μείωση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα λόγω της τάσης επαφής και της βηματικής [1].

### **1.1.25 Μεταφερόμενη τάση**

Ειδική περίπτωση της τάσης επαφής όταν μια τάση μεταφέρεται μέσα ή έξω από τον υποσταθμό από ή προς ένα απομακρυσμένο σημείο εκτός της περιοχής του υποσταθμού (εναέρια γραμμές μεταφοράς κλπ) [1].

# Γείωση

Η γείωση ορίζεται ως η αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος των προς γείωση τμημάτων μιας εγκαταστάσεως ή του ουδετέρου κόμβου μετασχηματιστών και γεννητριών [4]. Σκοπός της γείωσης είναι η εκφόρτιση των ηλεκτρικών ρευμάτων προερχόμενων από σφάλμα στη γη.

## 2.1 Είδη Γειώσεων

Οι γειώσεις διακρίνονται στα παρακάτω τρία είδη ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους [26]:

### 2.1.1 Γείωση λειτουργίας

Ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους ή για την αποφυγή υπερτάσεων. Αυτή διακρίνεται σε:

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

Η περίπτωση της ανοικτής γείωσης, δηλαδή όταν στη γραμμή της γείωσης έχει παρεμβληθεί σπινθηριστής ή ασφάλεια διάσπασης, δε συμπεριλαμβάνεται στις γειώσεις λειτουργίας.

### **2.1.2 Γείωση προστασίας**

Καλείται η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά.

### **2.1.3 Γείωση ασφάλειας ή αντικεραυνικής προστασίας**

Η γείωση ασφάλειας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον περιβάλλοντα χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.

## **2.2 Μέθοδοι Γείωσης**

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι εξής [26]:

### **2.2.1 Ουδετέρωση**

Η αγώγιμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό ή άλλο γειωμένο αγωγό φάσης δικτύου

### **2.2.2 Άμεση γείωση**

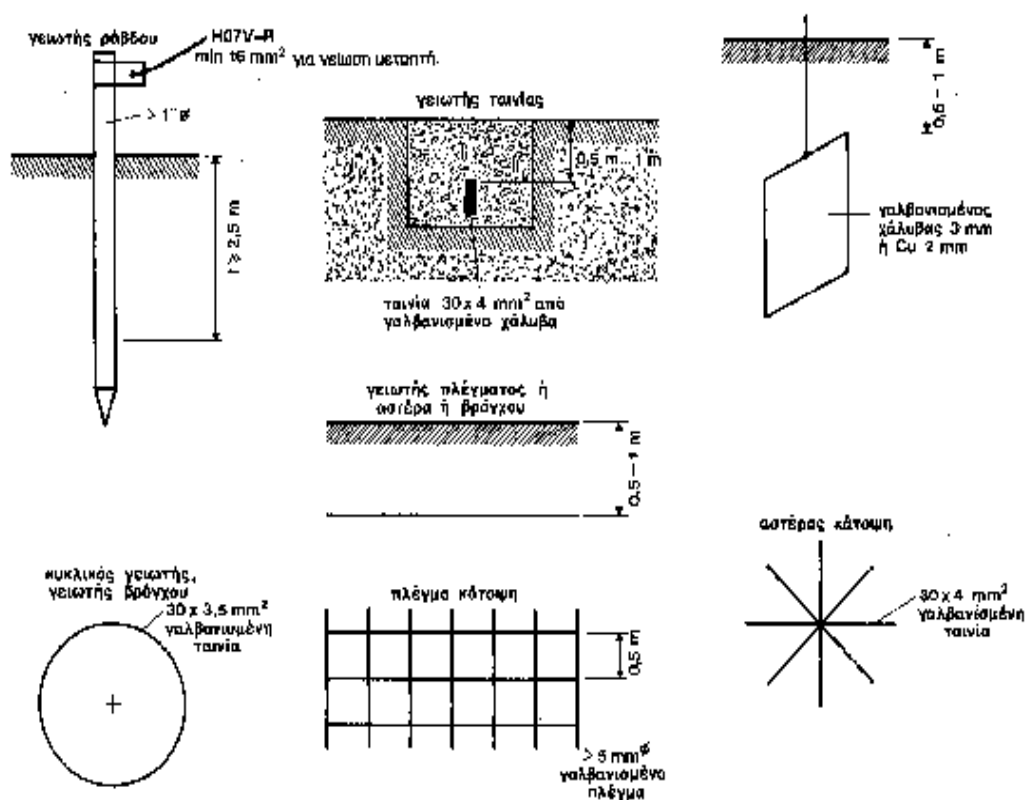
Με απ'ευθείας αγώγιμη σύνδεση στο σύστημα γείωσης (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, πλέγμα κλπ)

#### **2.2.1. Μέσω διακόπτη διαφυγής**

Γίνεται αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης.

## **2.3 Είδη Γειωτών**

Τα κυριότερα είδη των γειωτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Είδη γειωτών

### 2.3.1 Γειωτής ράβδου

Είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μίας ίντσας ή μία ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, π.χ. U, L, T ή I-προφίλ. Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ.  $20^\circ$ ) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος σε βάθος, π.χ. 2,5 m με σφυρί χεριού, ή με μηχανικό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους (Πίνακας 1.1). Η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Εφόσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, γιατί αντέχουν στη διάβρωση.

### 2.3.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινο

Ταινία ή συρματόσχοινο που τοποθετείται σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 0,5 m. Το βάθος που προτιμάται είναι 0,7-1,0 m, για να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχαλωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμα ή κυκλικά γύρω από

την εγκατάσταση. Η τελευταία γείωση λέγεται γειωτής βρόγχου. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Για το ίδιο μήκος ταινίας ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Δε συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης, αν και το επιτρέπουν οι Κ.Ε.Η.Ε. [7], γιατί διαβρώνεται εύκολα. Γι' αυτό το λόγο δεν το συνιστούν και οι κανονισμοί VDE 100.

### **2.3.3 Γειωτής πλάκας**

Πρόκειται για πλάκα μορφής παραλληλογράμμου, πχ  $0,5 \times 0,5 \text{m}^2$ , η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνειά της κατακόρυφη. Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1,0 m. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι γαλβανισμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3 mm ή χαλκός ή μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2 mm.

### **2.3.4 Γειωτής ακτινικός**

Είναι ταινίες ή ράβδοι που διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες (Πίνακας 2.1). Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0,8 m. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια, όπως στον γειωτή ταινίας.

### **2.3.5 Γειωτής πλέγματος**

Πλέγμα από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 3 – 7 m τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0,5 – 1,0 m (Πίνακας 2.1). Τα ελάχιστα πάχη είναι όπως στους γειωτές ταινίας. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Επιτρέπονται, προφανώς, και ανοίγματα μικρότερα από 3 m. Αυτά όμως δεν έχουν μικρότερες βηματικές τάσεις από ότι πλέγματα με ανοίγματα 3 m.

### **2.3.6 Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής**

Επιτρέπεται κατά το άρθρο 24 των Κ.Ε.Η.Ε. [7], χωρίς ιδιαίτερη άδεια, η χρησιμοποίηση μεταλλικών δικτύων ύδρευσης ως γειωτών για εγκαταστάσεις με τάσεις ως προς γη μικρότερες των 250 V, εφ' όσον υπάρχει η συγκατάθεση του Οργανισμού Ύδρευσης. Πάνω από αυτές τις τάσεις χρειάζεται ειδική άδεια από τον Οργανισμό Ύδρευσης. Η γραμμή γείωσης συνδέεται κατά προτίμηση πριν από το

μετρητή. Αν η σύνδεση γίνει μετά το μετρητή, πρέπει να βραχυκυκλωθεί μονίμως ο μετρητής με χάλκινο σύρμα H03V-U και διατομή τουλάχιστον  $6 \text{ mm}^2$ .

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

### **2.3.7 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές**

Γίνεται διάκριση στους γειωτές ανάλογα με το βάθος τους, σε:

*Επιφανειακούς γειωτές, π.χ. γειωτές ταινίας, πλέγματος και ακτινικούς γειωτές*

*Βαθείς γειωτές, π.χ. ράβδοι γείωσης.*

### **2.3.8 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης**

Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης που προεξέχει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά και μάλιστα 30 cm μέσα και 30 cm έξω από το έδαφος. Οι συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης γίνονται σε γειώσεις ουδέτερου με Cu, ελάχιστης διατομής ίσης με τη διατομή του ουδετέρου, όχι όμως μικρότερη των  $16 \text{ mm}^2$  (H07V-U), μονόκλινα. Σε εγκαταστάσεις αλεξικέραυνου η ελάχιστη διατομή για χαλκό είναι  $50 \text{ mm}^2$ . Η σύνδεση του ουδετέρου του Μ/Σ με το γειωτή γίνεται με καλώδια H07-R (πριν NYA)  $25 \text{ mm}^2$  τουλάχιστον.

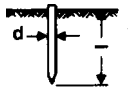
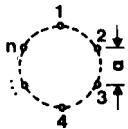
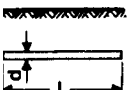

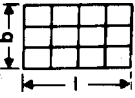
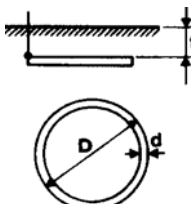
### **2.3.9 Θεμελιακή γείωση**

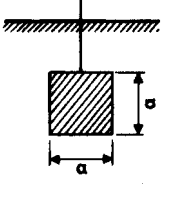
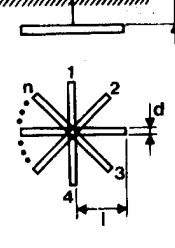
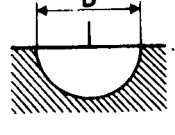
Η θεμελιακή γείωση είναι ένας γειωτής ταινίας που τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Η τοποθέτηση γίνεται στη βάση των εξωτερικών τοίχων και είναι ένας κλειστός βρόγχος. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι υγρό όλο το έτος συνήθως, ο θεμελιακός γειωτής έχει σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τιμές των  $2 \Omega$  ή μικρότερες δεν είναι σπάνιες.

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

Πίνακας 2.1: Ελάχιστες διατομές και πάχη γειωτών, κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε.



	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}^*$	$R_A \cong \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασάλων $\alpha \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{a}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1.2$ $R_{A1} = \text{αντίσταση ενός πασάλου}$	$K = (1 \dots 1.5) \text{ για } n = 10 : k \approx 1.25$
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right)$	$R_A \approx \frac{2 \cdot \rho}{l}$
	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S}$		$R_4 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\rho}{D}$
	Πλέγμα σε βάθος $0,5 - 1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot l}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot d} + \frac{\rho}{l \cdot g}$ $l \cdot g = \text{συνολικό μήκος αγωγού}$	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot D}$
	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{8 \cdot D}{d}$ $\cdot \left( 1 + \frac{\ln \frac{2 \cdot D}{t}}{\ln \frac{8 \cdot D}{d}} \right)$	$R = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot D}^{**}$

	<p>Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m<sup>2</sup>]</p>		$R = \frac{\rho}{4.5 \cdot \alpha} \text{ ***}$
	<p>n=2</p> <p>n=3</p> <p>n=4</p> <p>n=5</p>	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.27 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.25 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.22 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.09 \cdot t \cdot d} \right)$	
	<p>Ημισφαιρικός γειωτής</p>	$R = \frac{\rho}{\pi \cdot D} \text{ ****}$	
<p>* Όπου εμφανίζεται το πάχος του αγωγού d, αυτό είναι το ισοδύναμο πάχος</p> $d = \sqrt{4 \cdot \frac{A}{\pi}}, \text{ όπου } A \text{ η διατομή του αγωγού.}$ <p>** Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος</p> $D = 0,33 \cdot U, \text{ } U \text{ το μήκος αγωγού.}$ <p>*** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: <math>a = \sqrt{S}</math>, όπου S η επιφάνεια.</p> <p>**** Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με <math>D = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V}</math>.</p>			

Πίνακας 2.2: Αντιστάσεις γειωτών



## Ειδική Αντίσταση

### 3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων. Εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. Με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του,  $\rho$ , μετρούμενη συνήθως σε  $\Omega \cdot m$ . Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική, περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [21].

Ειδικότερα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ( $CaCl_2$ ), θεικό χαλκό ( $CuSO_4$ ), ή θεικό μαγνήσιο ( $MgSO_4$ ) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Η επίδραση των διακυμάνσεων

αυτών στην αποτελεσματικότητα της γείωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος [23].

Συμπερασματικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι οι εξής [24]:

### 3.1.1 Είδος του εδάφους – Προσμίξεις

Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται ενδεικτικά οι ειδικές αντιστάσεις ορισμένων εδαφών [21].

Στο Διάγραμμα 3.1 φαίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε αλάτι με υγρασία 30% στην ειδική αντίσταση εδάφους.

<i>Τύπος εδάφους</i>	<i>Ειδική αντίσταση <math>\rho</math> (<math>\Omega \cdot m</math>)</i>
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος,	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

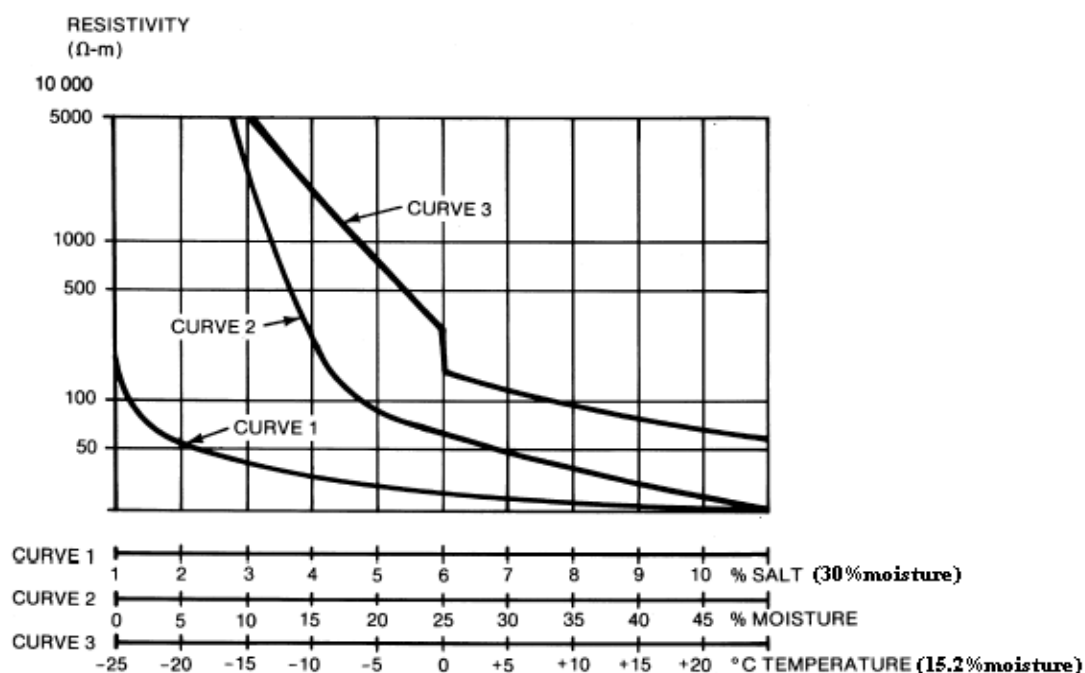
**Πίνακας 3.1: Ειδικές αντιστάσεις εδαφών,  
ενδεικτικές μέσες τιμές κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε.**

### 3.1.2 Υγρασία

Η αντίσταση μειώνεται αυξανόμενης της υγρασίας του εδάφους. Πρέπει εδώ να επισημάνουμε ότι το έδαφος ξηραίνεται επιφανειακά, αλλά σε βάθος κάτω του μισού μέτρου (0,5 m) διατηρείται συνήθως υγρό, σε όλες τις εποχές του έτους. Έτσι, σε γειωτές ράβδων πασσαλωμένων λαμβάνεται σαν ενεργό μήκος αυτό που είναι κάτω από 0,5 m. Για τον ίδιο λόγο τοποθετούμε τους γειωτές ταινίας σε βάθη μεγαλύτερα από 0,5 m [21]. Στο Διάγραμμα 3.1 φαίνεται η επίδραση της υγρασίας στην ειδική αντίσταση. Επιπλέον, έχει μετρηθεί ότι η επίδραση της υγρασίας και της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μεγαλύτερη σε μικρά βάθη (0,5-1 m). Έτσι, ο γειωτής ράβδου που φτάνει σε μεγάλο βάθος, σε σύγκριση με ένα επιφανειακό γειωτή, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της σταθερότητας της αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους [21].

### 3.1.3 Θερμοκρασία

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας φθάνει περίπου τα 130% κατά τη διάρκεια του έτους. Από τον Ιανουάριο έως τον Φεβρουάριο είναι υψηλότερη και από τον Ιούλιο έως τον Αύγουστο χαμηλότερη. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [21]. Στο *Διάγραμμα 3.1* φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση του εδάφους με υγρασία 15.2%. Παρατηρούμε ότι η επίδραση αυτή γίνεται αρκετά έντονη για θερμοκρασίες υπό του μηδενός.



**Διάγραμμα 3.1: Επίδραση άλατος, υγρασίας και θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση εδάφους [1]**

### 3.1.4 Μορφή της τάσης

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10 m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0,3/30 μs, η αντίσταση θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από τα 3 Ω στα 26 Ω. Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο τάσης. Η αντίσταση υπό κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση [21].

### 3.1.5 Ηλεκτρικό ρεύμα

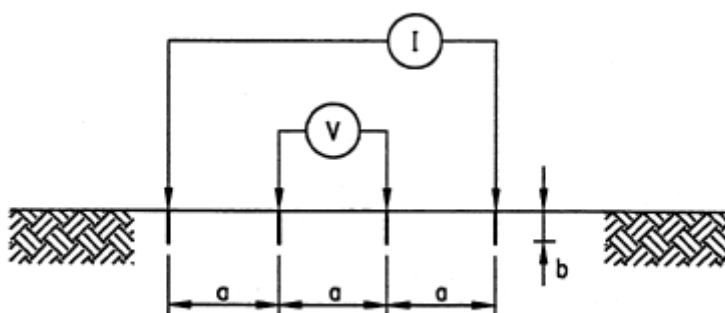
Η ειδική αντίσταση στην περιοχή των ηλεκτροδίων γείωσης επηρεάζεται από τη ροή ρεύματος από τα ηλεκτρόδια προς το περιβάλλον έδαφος. Η επίδραση αυτή εξαρτάται από το ποσό υγρασίας στο έδαφος και τη θερμοκρασία του καθώς και το μέγεθος και τη διάρκεια της ροής ρεύματος που προκαλεί ξήρανση του εδάφους και επομένως αύξηση της αντίστασής του. Ανεκτό όριο για την πυκνότητα ρεύματος είναι τα  $200\text{A/m}^2$  με διάρκεια 1s [24].

## 3.2 Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους

Εκτιμήσεις της ειδικής αντίστασης βάσει των χαρακτηριστικών του εδάφους δίνουν προσεγγιστικές τιμές. Επιπλέον η ειδική αντίσταση ποικίλλει ανάλογα με το βάθος χωρίζοντας το έδαφος σε στρώματα διαφορετικής ειδικής αντίστασης το καθένα. Για τον καθορισμό των στρωμάτων και της ειδικής αντίστασης καθενός έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι (λεπτομερής αναφορά στο IEEE Std 81-1983) από τις οποίες αναφέρουμε τη μέθοδο Wenner και των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού.

### 3.2.1 Μέθοδος Wenner

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο συχνά εφαρμοζόμενη. Χρησιμοποιεί τέσσερα ηλεκτρόδια θαμμένα στο έδαφος σε βάθος  $b$ , σε ευθεία και σε ίση απόσταση  $a$  μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Η τάση μεταξύ των δύο μεσαίων ηλεκτροδίων μετριέται με βολτόμετρο και διαιρείται με το ρεύμα που διαρρέει τα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια και το οποίο μετριέται με αμπερόμετρο. Το πηλίκο δίνει την αντίσταση  $R$ .



Σχήμα 3.1: Μέθοδος Wenner τεσσάρων ηλεκτροδίων

Η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{4\pi\alpha R}{1 + \frac{2\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4b^2}} - \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + b^2}}} \quad (3.1)$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση εδάφους σε  $\Omega \cdot m$

$R$  η μετρούμενη αντίσταση σε  $\Omega$

$\alpha$  η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων σε  $m$

$b$  το βάθος όπου φτάνουν τα ηλεκτρόδια σε  $m$

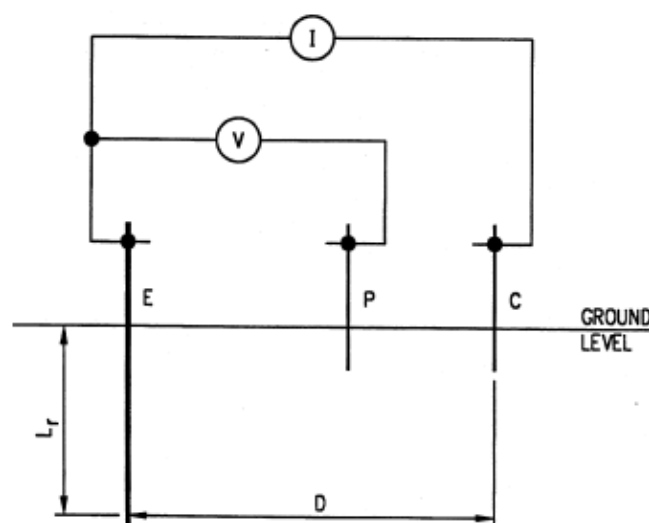
Αν  $b \ll \alpha$  η ειδική αντίσταση δίνεται από τον προσεγγιστικό τύπο

$$\rho = 2\pi\alpha R \quad (3.2)$$

Με τους παραπάνω τύπους υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση  $\rho$  σε βάθος  $\alpha$  σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην ειδική αντίσταση από στρώμα σε στρώμα [1].

### 3.2.2 Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού (*fall – of – potential*)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τρία ηλεκτρόδια, εκ των οποίων το ένα είναι θαμμένο σε βάθος  $L_r$ , μεταβαλλόμενο. Τα δύο άλλα ηλεκτρόδια, γνωστά ως ηλεκτρόδια αναφοράς, θάβονται σε μικρό βάθος, κατακόρυφα. Η σύνδεσή τους φαίνεται στο Σχήμα 3.2 [25].



Σχήμα 3.2: Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων

Η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right) - 1} \quad (3.3)$$

όπου

- $\rho$  η ειδική αντίσταση εδάφους σε  $\Omega \cdot \text{m}$   
 $L_r$  το βάθος του ηλεκτροδίου E σε m  
 $d$  η διάμετρος του σε m  
 $R$  η μετρούμενη μέσω των οργάνων αντίσταση σε  $\Omega$

Η σχέση αυτή δίνει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος.

### 3.2.3 Σύγκριση μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης

Η μέθοδος Wenner είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης. Αυτό οφείλεται στην απλότητα της εφαρμογής της και του εξοπλισμού καθώς και στο γεγονός ότι δίνει τιμές της ειδικής αντίστασης σε στρώματα μεγάλου βάθους χωρίς την οδήγηση ηλεκτροδίων σε τέτοιο βάθος. Επιπλέον, οι μετρήσεις δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις αντιστάσεις των ηλεκτροδίων.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου των τριών ηλεκτροδίων είναι ο προσδιορισμός του βάθους όπου μπορεί να οδηγηθεί το ηλεκτρόδιο. Αυτό καθορίζει το εάν και με ποιον τρόπο είναι δυνατή η εγκατάσταση πλέγματος γείωσης σε αυτό το βάθος. Παρά το πλεονέκτημα αυτό, τεχνικής φύσεως, η εν λόγω μέθοδος αδυνατεί να εφαρμοστεί σε βραχώδη εδάφη και παρουσιάζει σφάλμα στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης όταν το ηλεκτρόδιο οδηγείται σε μεγάλο βάθος. Αυτό οφείλεται στην απώλεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος εξαιτίας δονήσεων και μεγαλύτερης διαμέτρου συνδέσεων που οδηγούν σε μετρήσεις μεγαλύτερες του πραγματικού και επακόλουθα σε εγκατάσταση υπερεκτιμημένης γείωσης.

Γενικά, στην εφαρμογή μεθόδου μέτρησης της ειδικής αντίστασης εδάφους πρέπει να καταγράφονται εκτός από τις μετρήσεις η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη οποιαδήποτε αγώγιμα αντικείμενα είναι θαμμένα στην περιοχή της μέτρησης, καθώς αυτά επηρεάζουν τη μετρούμενη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος. Συγκεκριμένα στην περίπτωση όπου πλέγμα γείωσης έχει ήδη εγκατασταθεί στην περιοχή, οι μετρήσεις ενδείκνυται να γίνονται σε μικρή απόσταση από το πλέγμα και με τέτοιο τρόπο (απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων) ώστε το πλέγμα να μην επιδρά στο μετρούμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν



---

να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης στην περιοχή του πλέγματος με την προϋπόθεση ότι το έδαφος θεωρείται ομογενές [25].

## Σχεδίαση Συστημάτων Γείωσης

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80-2000 [1] ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης έχει ως στόχο

- Να παρέχει δίοδο στο ηλεκτρικό ρεύμα προς τη γη σε κανονικές και συνθήκες σφάλματος χωρίς να προκαλεί υπέρβαση των ορίων λειτουργίας του εξοπλισμού του υποσταθμού.
- Να εξασφαλίζει ότι ένας άνθρωπος στην περιοχή της γείωσης δεν εκτίθεται στον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

Σχετικά με τη δεύτερη προϋπόθεση που καθιστά ένα σύστημα γείωσης αποτελεσματικό, επισημαίνουμε τους παράγοντες που επιφέρουν ηλεκτροπληξία:

- i. Μεγάλο ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με το σύστημα γείωσης και την αντίστασή του προς άπειρη γη.
- ii. Αντίσταση εδάφους τέτοια που η ροή του ρεύματος να δημιουργεί μεγάλες τάσεις στην επιφάνεια.
- iii. Ύπαρξη ανθρώπου στην επιφάνεια με τρόπο τέτοιο που το σώμα του να βρίσκεται υπό υψηλή διαφορά δυναμικού.
- iv. Απουσία αντίστασης σε επαφή με το σώμα που στις παραπάνω περιπτώσεις μειώνει το διαρρέον ηλεκτρικό ρεύμα.
- v. Διάρκεια ροής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ανθρωπίνου σώματος τέτοια που να προκαλεί σωματική βλάβη ή θάνατο.

## 4.1 Διαδικασία Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης

Αποτελείται από τα εξής βήματα:

- a. Συλλογή πληροφοριών για την περιοχή όπου θα γίνει η εγκατάσταση. Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όπως περιγράφεται στο *Κεφάλαιο 3* και ανάλογη επιλογή του μοντέλου εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό (ομοιογενές, διστρωματικό κλπ).
- b. Προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού, θεωρώντας ως ρεύμα σφάλματος  $3I_0$  το μεγαλύτερο αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος και χρόνο  $t_c$  το μέγιστο πιθανό χρόνο απόσβεσης.
- c. Έλεγχος της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης ως προς τα επιτρεπτά όρια. Επιλογή του χρόνου έκθεσης στο σφάλμα,  $t_s$ .
- d. Ένα πρόχειρο σχέδιο πρέπει να περιλαμβάνει έναν αγωγίμο βρόχο που περικλείει ολόκληρη την περιοχή προς γείωση καθώς και τους απαραίτητους συνδέσμους της γείωσης με τις συσκευές του υποσταθμού. Η εκτίμηση των αποστάσεων μεταξύ των αγωγών γείωσης και της θέσης των ράβδων γείωσης πρέπει να γίνει βάσει της τιμής του μέγιστου ρεύματος γείωσης,  $I_G$ .
- e. Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης, για ομοιογενές έδαφος αρχικά και υπολογισμός της με μεγαλύτερη ακρίβεια στη συνέχεια, δεδομένου του μοντέλου εδάφους και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.
- f. Για το τελικό σχέδιο του συστήματος γείωσης το ρεύμα  $I_G$  πρέπει να υπολογιστεί βάσει της πιθανής επέκτασης του υποσταθμού στο μέλλον, του συντελεστή εξασθένησης  $D_f$  και του μέγιστου αναμενόμενου μελλοντικά ρεύματος σφάλματος το οποίο διέρχεται από το σύστημα γείωσης προς την άπειρη γη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη και η κατανομή του ρεύματος σφάλματος, ώστε η υλοποίηση να μην είναι υπερεκτιμημένη.
- g. Αν στο πρόχειρο σχέδιο η τιμή της GPR είναι μικρότερη του επιτρεπτού ορίου για την τάση επαφής, περαιτέρω ανάλυση δεν είναι απαραίτητη. Ακολουθεί η προσθήκη επιπλέον αγωγών για τη σύνδεση των διαφόρων συσκευών του υποσταθμού με τη γείωση.
- h. Υπολογισμός της τάσης βρόχου και της βηματικής τάσης. Αν οι τιμές των τάσεων αυτών είναι μικρότερες των επιτρεπτών ορίων η σχεδίαση προχωρά στο *βήμα 9*, αλλιώς στο *βήμα 10*.

- i. Αν οι τάσεις επαφής και βηματική είναι μικρότερες των επιτρεπτών ορίων, η ολοκλήρωση της σχεδίασης απαιτεί μόνο την προσθήκη συνδέσεων των συσκευών του υποσταθμού στο σύστημα γείωσης.
- j. Αν οι τάσεις επαφής και βηματική ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια, απαιτείται αναθεώρηση της σχεδίασης, που μπορεί να περιλαμβάνει επιπρόσθετες ράβδους γείωσης, μείωση της απόστασης μεταξύ των αγωγών του πλέγματος γείωσης κλπ.
- k. Ακόμα και όταν επιτευχθούν οι κατάλληλες τάσεις επαφής και βηματική, μπορεί να χρειάζεται η προσθήκη επιπλέον ράβδων γείωσης και αγωγών στο πλέγμα. Οι αγωγοί αυτοί είναι απαραίτητοι στην περίπτωση όπου το πλέγμα είναι σε μεγάλη απόσταση από τις συσκευές του υποσταθμού και είναι δύσκολη η σύνδεσή τους με αυτό. Οι ράβδοι γείωσης μπορεί να είναι αναγκαίοι στη βάση αλεξικυράνων, στη γείωση των ουδετέρων μετασχηματιστών κλπ. Για το τελικό σχέδιο πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη η τάση από μεταφορά μέσω πχ εναέριων γραμμών.

## 4.2 Ανάλυση της Διαδικασίας Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης

### 4.2.1 Επιλογή μοντέλου εδάφους

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εδάφους με βάση τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης (οι μέθοδοι μέτρησης περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3) είναι από τα δυσκολότερα μέρη της μελέτης. Στόχος είναι η προσέγγιση του εδάφους με ένα ή περισσότερα στρώματα, ώστε η απόκλιση της ειδικής αντίστασης σε κάθε σημείο του μοντέλου εδάφους από τις πειραματικές μετρήσεις να είναι η ελάχιστη.

Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα εδάφους είναι το ομοιογενές και το διστρωματικό. Το πολυστρωματικό μοντέλο χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου η διακύμανση της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα.

Το μοντέλο ομοιογενούς εδάφους χρησιμοποιείται για εδάφη με ομοιόμορφη ειδική αντίσταση ή ακόμα για μετρήσεις ειδικής αντίστασης που δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους.

Μια πιο ακριβής προσέγγιση του εδάφους μπορεί να γίνει με τη χρήση του μοντέλου διστρωματικού εδάφους. Αυτό αποτελείται από το ανώτερο στρώμα, ορισμένου πάχους και ειδικής αντίστασης και το κατώτερο στρώμα άπειρου πάχους και διαφορετικής ειδικής αντίστασης από το υπερκείμενό του.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων, πάχους και ειδικής αντίστασης, του μοντέλου εδάφους έχουν αναπτυχθεί εννέα μέθοδοι. Τρεις από αυτές ανήκουν στην κατηγορία κλίσης πρώτης τάξης, μία στην κατηγορία δεύτερης τάξης (μέθοδος Newton), η πέμπτη βασίζεται στη μέθοδο Levenberg – Marquardt, η έκτη στη Γενικευμένη Ανάστροφη μέθοδο, η έβδομη στην Quasi – Newton, η όγδοη στη μικτή Newton – Γενικευμένη Ανάστροφη μέθοδο [28] και η τελευταία στηρίζεται στους γενετικούς αλγόριθμους και αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. [29].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [28] αναφέρουμε τις εννέα μεθόδους σε σειρά φθίνουσας ακρίβειας και χρόνου σύγκλισης:

- Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA)
- Σύνθετη Δεύτερης Τάξης – Γενικευμένη Ανάστροφη Τεχνική (MMT)
- Τεχνική βασισμένη στην Levenberg – Marquardt (LMT)
- Τεχνική βασισμένη στην μέθοδο Newton (SOGT)
- Τεχνική βασισμένη στην μέθοδο Quasi-Newton (QNT)
- Τρίτη τεχνική κλίσης πρώτης τάξης (FOGT)
- Τεχνικές κλίσης πρώτης τάξης [30, 31]
- Γενικευμένη Ανάστροφη τεχνική (IGT)

#### **4.2.2 Επιλογή Αγωγών – Υλικό – Διατομή**

Κάθε στοιχείο του συστήματος γείωσης, περιλαμβανομένων των αγωγών πλέγματος, συνδέσεων, ηλεκτροδίων πρέπει να σχεδιαστεί σύμφωνα με τον επιθυμητό χρόνο ζωής της εγκατάστασης. Πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Κατάλληλη αγωγιμότητα ώστε να μην προκαλεί αυξομειώσεις της τάσης.
- Αντοχή στην τήξη και τη μηχανική καταπόνηση στη χειρότερη περίπτωση ρεύματος σφάλματος και διάρκειας αυτού.
- Μηχανική αξιοπιστία.
- Αμετάβλητες ηλεκτρικές ιδιότητες ακόμα και σε περίπτωση διάβρωσης ή άλλης βλάβης από φυσικά αίτια.

#### 4.2.2.1. Υλικό

Ο χαλκός είναι μια συνήθης επιλογή για το υλικό της γείωσης. Έχει υψηλή αγωγιμότητα και είναι ανθεκτικός στη διάβρωση.

Ο χάλυβας είναι επιρρεπής στη διάβρωση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος. Ο επιχαλκωμένος χάλυβας χρησιμοποιείται συνήθως στην κατασκευή των ράβδων γείωσης και σπανιότερα στο πλέγμα γείωσης.

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σπάνια στην κατασκευή πλέγματος γείωσης, λόγω της ευαισθησίας του στη διάβρωση από ορισμένα είδη εδαφών και από εναλλασσόμενα ρεύματα σφάλματος. Η διαβρωμένη επιφάνεια του αγωγού από αλουμίνιο δεν είναι αγωγή.

Το μέρος των στοιχείων του συστήματος γείωσης που προεξέχει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά και μάλιστα 30 cm μέσα και 30 cm έξω από το έδαφος.

#### 4.2.2.2. Διατομή Αγωγών

Η επιλογή της διατομής του αγωγού γείωσης γίνεται με βάση τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν καθώς και των περιορισμών στην αναπτυσσόμενη θερμοκρασία του αγωγού.

Η ενδεικνυόμενη διατομή του αγωγού γείωσης δίνεται από τη σχέση:

$$A_{mm^2} = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_\alpha}\right)}} \quad (4.1)$$

όπου

$A_{mm^2}$  η διατομή του αγωγού σε  $mm^2$

$I$  η rms τιμή του ρεύματος σφάλματος σε kA

$t_c$  ο χρόνος απόσβεσης του ρεύματος σφάλματος

$T_m$  η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία σε °C

$T_\alpha$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C

$T_r$  η θερμοκρασία αναφορά για τον προσδιορισμό των σταθερών του υλικού

	σε °C
$\alpha_0$	ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης στους 0 °C σε (°C) <sup>-1</sup>
$\alpha_T$	ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης σε θερμοκρασία $T_T$ σε (°C) <sup>-1</sup>
$\rho_T$	η ειδική αντίσταση του αγωγού γείωσης σε θερμοκρασία $T_a$ σε $\mu\Omega\text{-cm}$
$K_0$	ισούται με $1/\alpha_0$ ή $(1/\alpha_T) - T_T$ σε °C
TCAP	η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου σε $J/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

Οι παράμετροι  $\alpha_T$ ,  $K_0$ ,  $T_m$ ,  $\rho_T$  και TCAP δίνονται από πίνακες ανάλογα με το υλικό του αγωγού.

#### 4.2.3 Βασικές αρχές στη σχεδίαση του πλέγματος γείωσης

Για τη σχεδίαση του πλέγματος γείωσης ακολουθούνται τα ακόλουθα βασικά βήματα:

- Ένας συνεχόμενος αγωγίμος βρόχος πρέπει να περιβάλλει όσο δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια στην περιοχή του υποσταθμού. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η αντίσταση γείωσης και αποφεύγεται η συγκέντρωση υψηλών ρευμάτων.
- Μέσα στο βρόχο οι αγωγοί γείωσης είναι τοποθετημένοι παράλληλα ή κάθετα κατά μήκος του εξοπλισμού για την καλύτερη αντιμετώπιση βραχυκυκλωμάτων.
- Ένα σύνηθες πλέγμα γείωσης περιλαμβάνει αγωγούς γυμνού χαλκού θαμμένους σε βάθος 0.3 – 0.5m από την επιφάνεια, σε απόσταση 3 – 7m μεταξύ τους. Οι 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 ώστε να περιορίζουν τις απότομες αυξήσεις της τάσης κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος γείωσης, και σε τέτοιο βάθος ώστε να εισχωρούν στο στρώμα εδάφους με τη μικρότερη ειδική αντίσταση, στην περίπτωση όπου έχουμε επιλέξει διστρωματικό ή πολυστρωματικό μοντέλο. Ράβδοι γείωσης εγκαθίστανται επίσης σε ειδικές περιπτώσεις, κυρίως σε καθοδικά αλεξικέραυνα .
- Στις περιπτώσεις όπου εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις ρευμάτων, όπως για παράδειγμα στη σύνδεση ουδετέρου – γης γεννήτριας ή μετασχηματιστή, απαιτείται αύξηση των διαστάσεων των αγωγών γείωσης, πολλαπλοί αγωγοί γείωσης, καθώς και επέκταση του συστήματος γείωσης ακόμη και εκτός του φράχτη γύρω από τον υποσταθμό.

- Ο λόγος των διαστάσεων των βρόχων του πλέγματος γείωσης κυμαίνεται συνήθως από 1:1 έως 1:3.

#### 4.2.4 Επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα

Η επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα εξαρτάται από το πλάτος του, τη διάρκεια και τη συχνότητά του. Αυξανόμενων των παραμέτρων αυτών, ροή ηλεκτρικού ρεύματος από το ανθρώπινο σώμα προκαλεί σύσπαση των μυών, απώλεια των αισθήσεων, καρδιακή ινίδωση, φραγή των αναπνευστικών οδών και ανάφλεξη.

Σχετικά με την επίδραση της συχνότητας, στα 50 ή 60Hz, ρεύμα 0.1A μπορεί να αποβεί θανάσιμο. Αντίθετα για συχνότητες 0 – 25Hz και 3000 – 10000Hz η ανεκτή ένταση ρεύματος είναι μεγαλύτερη [8, 9].

Σχετικά με την επίδραση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας στο ανθρώπινο σώμα, έχει δειχθεί ότι 1mA γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο, 1 – 6mA προκαλούν δυσφορία μα ταυτόχρονα ικανότητα ελέγχου των μυών, 9 – 25mA μπορεί να προκαλέσουν πόνο και απώλεια ελέγχου των μυών, ενώ ακόμα μεγαλύτερες εντάσεις επιφέρουν αναπνευστικά προβλήματα. Παρόλα αυτά οι παραπάνω επιπτώσεις είναι συνήθως αναστρέψιμες. Ρεύμα έντασης 60 – 100mA μπορεί να προκαλέσει ινίδωση των καρδιακών κοιλιών και θάνατο. Σε πρόσφατες έρευνες γίνεται λόγος για δύο όρια έντασης ρεύματος: ένα όπου η διάρκεια έκθεσης είναι μικρότερη της διάρκειας του καρδιακού παλμού και ένα για διάρκεια μεγαλύτερη του καρδιακού παλμού. Συγκεκριμένα για έναν ενήλικα βάρους 50kg τα δύο όρια είναι 500mA και 50mA αντίστοιχα [12, 13]. Στην ανάλυση που ακολουθεί ο σχεδιασμός συστημάτων γείωσης λαμβάνει ως όριο για την ένταση του ρεύματος αυτή της καρδιακής ινίδωσης, ανεξάρτητα της διάρκειας έκθεσης, καθώς για εντάσεις μικρότερες αυτής ο θάνατος μπορεί να αποφευχθεί.

Η διάρκεια διαρροής του σώματος από ηλεκτρικό ρεύμα,  $t_s$ , καθορίζεται από την εξίσωση [10, 11]:

$$S_B = (I_B)^2 \cdot t_s \quad (4.2)$$

όπου

$S_B$  εμπειρική σταθερά που σχετίζεται με την ανεκτή ενέργεια ηλεκτροπληξίας



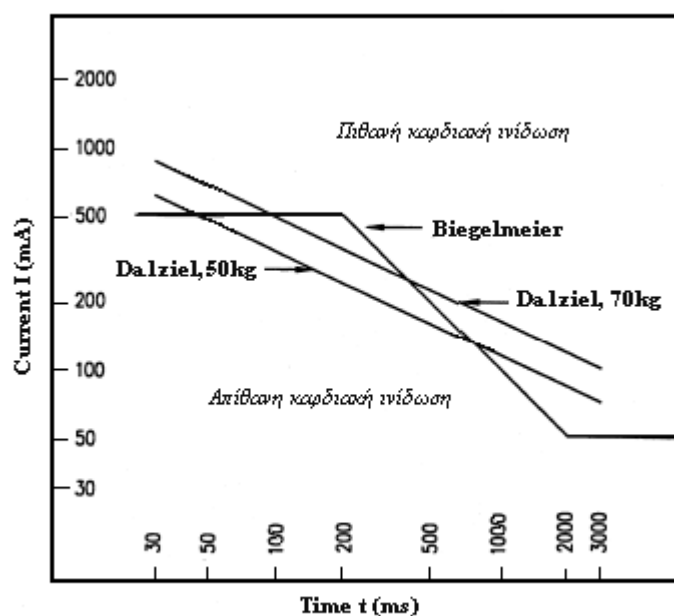
$I_B$  η rms τιμή του ρεύματος που διαρρέει το σώμα σε A

Ενδεικτικά, για βάρος σώματος 50kg έχει μετρηθεί  $S_B = 0.0135$  και για 70kg  $S_B = 0.0246$  [11, 14].

Η επιτρεπόμενη ένταση ηλεκτρικού ρεύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο σφάλμα φαίνεται στο *Διάγραμμα 4.1*, σε τρεις καμπύλες: δύο για σωματικό βάρος 50kg και 70kg που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση και τις προαναφερθείσες τιμές της  $S_B$ , σύμφωνα με τον *Dalziel* [11, 14], και μία που προκύπτει από τη μελέτη του *Biegelmeier* [12, 13] για την εξάρτηση της ανεκτής έντασης από τη σχέση χρόνου έκθεσης και καρδιακού παλμού.

Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι η ενέργεια  $S_B$  έχει προκύψει από πειράματα για χρόνο έκθεσης στο σφάλμα από 0.03 έως 3.0s. Για το λόγο αυτό η παραπάνω εξίσωση δεν ισχύει για μικρότερους ή μεγαλύτερους χρόνους.

Είναι φανερό ότι μικρός χρόνος έκθεσης μειώνει την πιθανότητα σοβαρής σωματικής βλάβης. Συγκεκριμένα για την καρδιακή ινίδωση έχει αποδειχθεί ότι ο κίνδυνος είναι σημαντικά μικρότερος όταν ο χρόνος έκθεσης κυμαίνεται μεταξύ 0.06 και 0.3s. Ο χρόνος αυτός έχει άμεση σχέση με το χρόνο αντίδρασης του συστήματος γείωσης.



Διάγραμμα 4.1:  $I_B - t_s$

#### 4.2.5 Αντίσταση ανθρώπινου σώματος

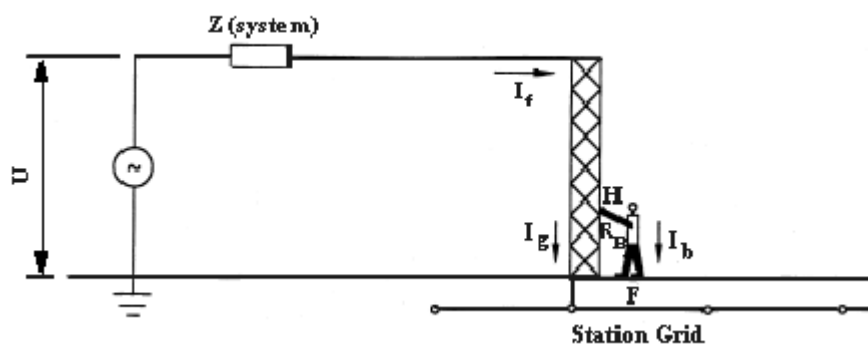
Για ρεύμα συνεχές ή βιομηχανικής συχνότητας το ανθρώπινο σώμα μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμο μιας ωμικής αντίστασης. Η τιμή αυτής, συμπεριλαμβανομένου του δέρματος υπολογίζεται από 500Ω έως 3000Ω, ενώ μειώνεται σε περίπτωση εκδοράς του δέρματος στο σημείο επαφής. Η τιμή της μάλιστα διαφοροποιείται ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθεί το ρεύμα μέσω του σώματος. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο δρόμοι για το ρεύμα, είτε από χέρι σε πόδι είτε από το ένα πόδι στο άλλο. Στη δεύτερη περίπτωση η αντίσταση εκτιμάται σημαντικά μεγαλύτερη της πρώτης, έως και 25 φορές [15]. Στην παρούσα μελέτη η αντίσταση σώματος θεωρείται ίση με 1000Ω, για διαδρομή ρεύματος από χέρι σε πόδι. Για ροή ρεύματος από το ένα πόδι στο άλλο, παρόλο που η αντίσταση θεωρείται υψηλότερη κι επομένως η ένταση του ρεύματος και συγχρόνως ο κίνδυνος θανάτου μειώνεται, υπάρχει μια περίπτωση που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης:

Τάση μεταξύ των ποδιών επιφέρει πόνο και μπορεί να προκαλέσει πτώση του ατόμου, που έρχεται σε επαφή, στο έδαφος. Άμεσα ο κίνδυνος αυξάνεται καθώς προκαλείται ροή ρεύματος στην περιοχή των ζωτικών οργάνων.

Καθώς έχουν καταγραφεί θάνατοι αυτής της αιτίας, θεωρείται απαραίτητος ο έλεγχος και της τάσης μεταξύ των ποδιών (βηματική τάση) εκτός της τάσης μεταξύ ποδιού και χεριού σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο (τάση επαφής).

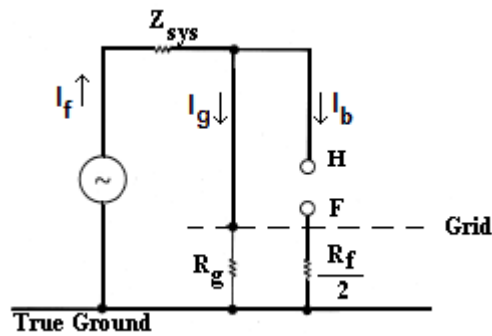
#### 4.2.6 Τάση Επαφής

Η τάση επαφής αναπτύσσεται μεταξύ χεριού που έρχεται σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο και ποδιού στη γη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4. 1: Τάση Επαφής

Οι αντιστάσεις του κυκλώματος που δημιουργείται φαίνονται στο Σχήμα 4.2.



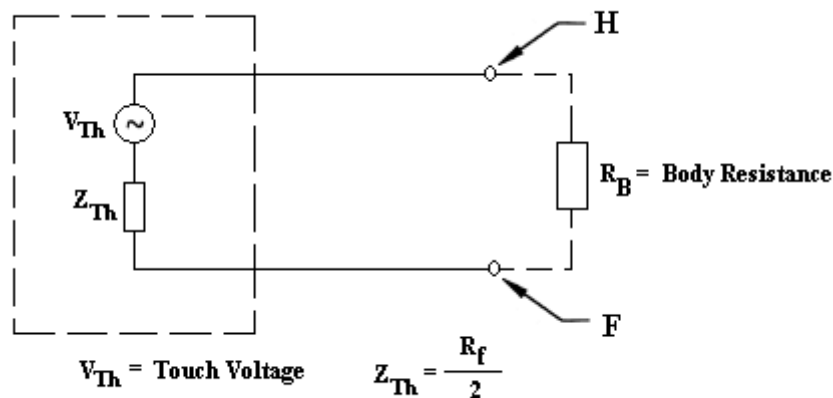
Σχήμα 4. 2: Αντιστάσεις στο κύκλωμα για την τάση επαφής

Η αντίσταση  $R_g$  είναι η αντίσταση γείωσης και η  $R_f$  είναι η αντίσταση του ποδιού σε σχέση με τη γη.

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

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (4.3)$$

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται το ισοδύναμο Thevenin.



Σχήμα 4. 3: Ισοδύναμο Thevenin – Τάση Επαφής

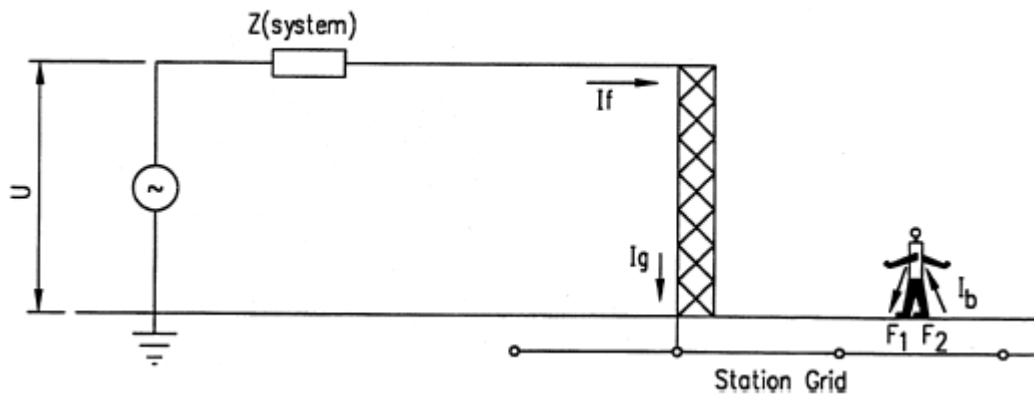
Η αντίσταση Thevenin υπολογίζεται ίση με  $R_f / 2$  λόγω της παραλληλίας των αντιστάσεων των ποδιών.

Εφαρμόζοντας τη Σχέση 1.6 στην 4.2 και για ρεύμα  $I_b$  ίσο με το ανεκτό,  $I_B$ , καταλήγουμε στη σχέση:

$$E_{\text{touch}} = I_B (R_B + 1.5\rho) \quad (4.4)$$

#### 4.2.7 Βηματική Τάση

Η τάση επαφής αναπτύσσεται μεταξύ των δύο ποδιών ανθρώπου που στέκεται στην επιφάνεια της γης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



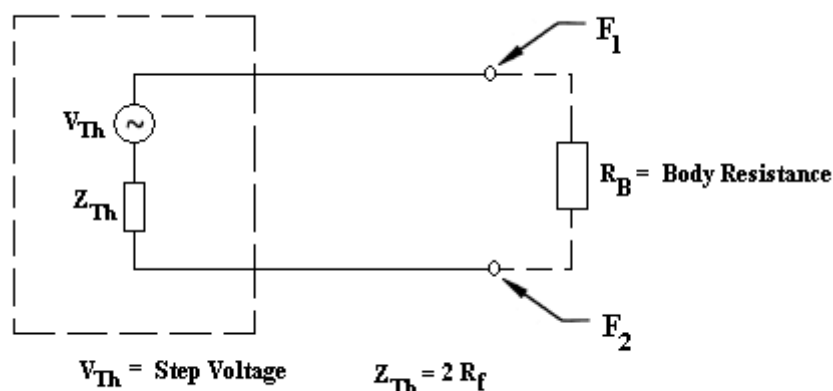
Σχήμα 4. 4: Βηματική Τάση

Η τάση Thevenin αναπτύσσεται ανάμεσα στα σημεία  $F_1$  και  $F_2$ . Το ρεύμα που διαρρέει το σώμα του ατόμου σε επαφή δίνεται από τη σχέση (1.2)

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (4.5)$$

όπου η αντίσταση Thevenin,  $Z_{th}$ , ισούται με  $2R_f$  λόγω της εν σειρά σύνδεσης των αντιστάσεων των ποδιών.

Στο Σχήμα 4.5 εικονίζεται το ισοδύναμο Thevenin.



Σχήμα 4. 5: Ισοδύναμο Thevenin – Βηματική Τάση

Εφαρμόζοντας τη Σχέση 1.2 στην 4.3 και για ρεύμα  $I_b$  ίσο με το ανεκτό,  $I_B$ , καταλήγουμε στη σχέση:

$$E_{step} = I_B (R_B + 6.0\rho) \quad (4.6)$$

#### 4.2.8 Υλικό Επιφάνειας

Η Σχέση 1.6 που δίνει την αντίσταση ποδιού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης εδάφους βασίζεται στην υπόθεση ομογενούς εδάφους. Πολλές φορές όμως στην επιφάνεια του εδάφους τοποθετείται το λεγόμενο υλικό επιφάνειας σε στρώμα πάχους 0.08 – 0.15m με σκοπό την αύξηση της αντίστασης επαφής. Έτσι, σε περίπτωση που το έδαφος κάτω από το υλικό επιφάνειας έχει μικρότερη ειδική αντίσταση από αυτό, μόνο ένα μικρό μέρος του ρεύματος σφάλματος θα κινηθεί προς τα επάνω και το  $I_b$  θα μειωθεί. Η μείωση αυτή εξαρτάται τόσο από τη διαφορά των ειδικών αντιστάσεων του υλικού επιφάνειας και του υποκείμενου στρώματος εδάφους όσο και από το πάχος του υλικού επιφάνειας.

Η επίδραση των δύο αυτών παραγόντων εκφράζεται από ένα συντελεστή,  $C_s$ , ο εμπειρικός τύπος του οποίου ακολουθεί:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (4.7)$$

όπου

$\rho$  η ειδική αντίσταση του εδάφους σε  $\Omega \cdot m$

$\rho_s$  η ειδική αντίσταση του υλικού επιφάνειας σε  $\Omega \cdot m$

$h_s$  το πάχος του υλικού επιφάνειας σε m

Η αντίσταση ποδιού δίνεται από τη σχέση:

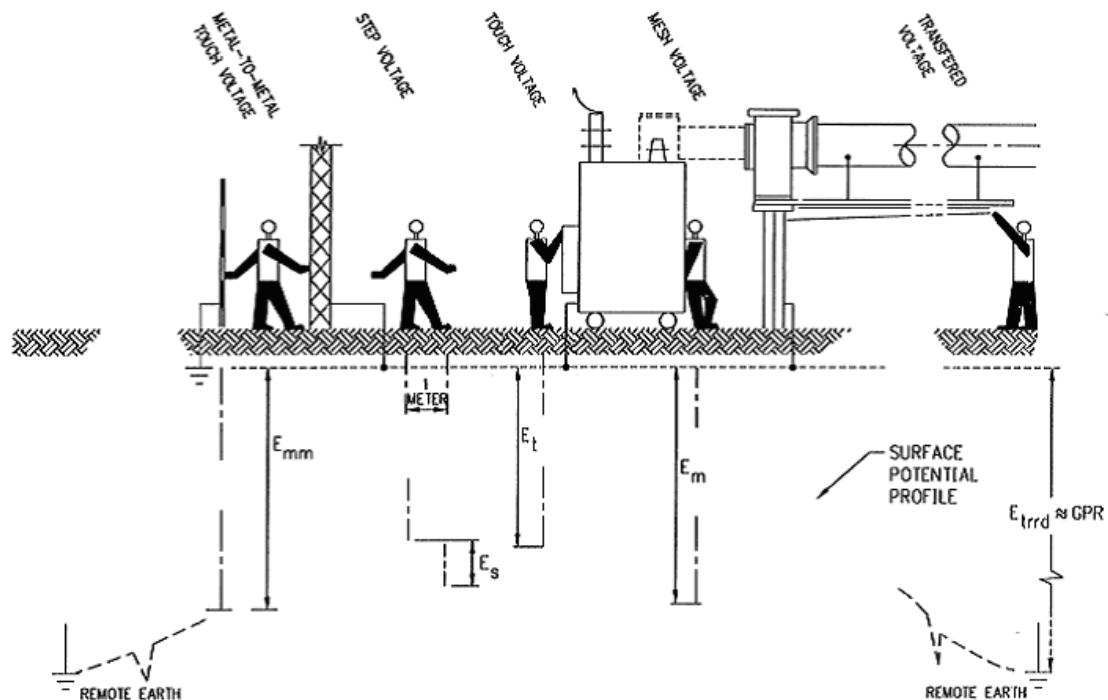
$$R_f = \left(\frac{\rho_s}{4b}\right) C_s = \left(\frac{\rho_s}{4b}\right) \left[1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}\right] \Rightarrow \quad (4.8)$$

$$R_f = \frac{1}{4b} \left[\rho_s - \frac{0.09(\rho_s - \rho)}{2h_s + 0.09}\right]$$

Παρατηρούμε ότι για δεδομένο πάχος του υλικού επιφάνειας και ειδική αντίσταση του υποκείμενου στρώματος, αύξηση της ειδικής αντίστασης  $\rho_s$  σε σχέση με την ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho$  προκαλεί αύξηση στην αντίσταση ποδιού. Το ρεύμα  $I_b$  τότε μειώνεται και συγχρόνως μειώνεται η τάση επαφής και η βηματική, γεγονός επιθυμητό για την ασφάλεια του ατόμου που βρίσκεται στην επιφάνεια, στην περιοχή του πλέγματος γείωσης.

#### 4.2.9 Επιτρεπτά Όρια Τάσης

Στο Σχήμα 4.6 παριστάνονται οι τάσεις επαφής, βηματική, βρόχου, επαφής μεταξύ μετάλλων και τάσης από μεταφορά.



Σχήμα 4.6: Τάσεις επαφής, βηματική, βρόχου, επαφής μεταξύ μετάλλων και από μεταφορά [1]

Τα επιτρεπτά όρια για τη βηματική και την τάση επαφής σε Volt δίνονται βάσει των Σχέσεων 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 για σωματικό βάρος 50kg και 70kg:

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.9)$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.10)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.11)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.12)$$

Αν δε χρησιμοποιείται υλικό επιφάνειας,  $C_s = 1$  και  $\rho_s = \rho$ .

Το επιτρεπτό όριο για την τάση επαφής μεταξύ μετάλλων προκύπτει για  $\rho_s = 0$ , που σημαίνει ότι η αντίσταση Thevenin ισούται μόνο με αυτή του σώματος. Ακολουθούν οι σχέσεις που δίνουν το επιτρεπτό όριο για την τάση επαφής μεταξύ μετάλλων σε Volt για σωματικό βάρος 50kg και 70kg.

$$E_{mm,touch50} = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \quad (4.13)$$

$$E_{mm,touch70} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad (4.14)$$

#### 4.2.10 Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης

Η τιμή της αντίστασης γείωσης μας απασχολεί στον υπολογισμό του μέγιστου δυναμικού γείωσης. Για σύστημα γείωσης πλέγματος χωρίς ράβδους και ομοιογενές έδαφος ειδικής αντίστασης  $\rho$ , η αντίσταση γείωσης,  $R_g$ , δίνεται από τη σχέση [16]:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4.15)$$

όπου

$L_T$  το συνολικό μήκος των αγωγών γείωσης σε m

$A$  το εμβαδό της επιφάνειας που καταλαμβάνει το πλέγμα γείωσης σε  $m^2$

$h$  το βάθος όπου είναι τοποθετημένο το πλέγμα γείωσης σε m

Για σύστημα γείωσης με πλέγμα και ράβδους γείωσης η σχέση που δίνει την αντίσταση γείωσης είναι πιο πολύπλοκη [17]:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (4.16)$$

όπου

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{\alpha'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (4.17)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \cdot L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (4.18)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (4.19)$$

όπου

$\rho$	η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot m$
$L_c$	το συνολικό μήκος των αγωγών πλέγματος σε m
$2a$	η διάμετρος του αγωγού γείωσης σε m
$\alpha'$	ισούται με $\sqrt{\alpha \cdot 2h}$ για αγωγούς γείωσης σε βάθος h, σε m ή με a για αγωγούς γείωσης τοποθετημένους στην επιφάνεια του εδάφους, σε m
$A$	το εμβαδό της επιφάνειας που καταλαμβάνει το πλέγμα γείωσης σε $m^2$
$k_1, k_2$	συντελεστές, υπολογίζονται από διαγράμματα [1]
$L_R$	το μήκος κάθε ράβδου γείωσης σε m
$2b$	η διάμετρος της ράβδου σε $m^2$
$n_R$	ο αριθμός των ράβδων στο σύστημα γείωσης

Οι παραπάνω σχέσεις δεν περιλαμβάνουν την εξάρτηση της αντίστασης γείωσης από τη συχνότητα του ρεύματος σφάλματος. Στην περίπτωση όπου το σφάλμα εκδηλώνεται μέσα στον υποσταθμό (πχ βραχυκύκλωμα), η συχνότητα του ρεύματος σφάλματος είναι η βιομηχανική. Στην περίπτωση όμως που το σφάλμα οφείλεται σε κεραυνό, το ρεύμα σφάλματος αναλύεται σε περισσότερες της μιας συνιστώσες σε συχνότητες έως την τάξη του MHz. Η σχέση της αντίστασης γείωσης με τη συχνότητα αναλύεται στο *Κεφάλαιο 6* με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού πακέτου.



#### 4.2.11 Προσδιορισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος

Για τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος πλέγματος ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

- Εντοπίζουμε το είδος και το σημείο εκδήλωσης των σφαλμάτων προς γη που προκαλούν τη μεγαλύτερη ροή ρεύματος μεταξύ του συστήματος γείωσης και του περιβάλλοντος εδάφους κι επομένως τη μεγαλύτερη τιμή του GPR και της κλίσης του δυναμικού στην επιφάνεια της γης.
- Υπολογίζουμε το συντελεστή καταμερισμού  $S_f$  για το σφάλμα του *Βήματος 1* και μετέπειτα προσδιορίζουμε το ρεύμα  $I_g$ .
- Υπολογίζουμε για κάθε σφάλμα το συντελεστή εξασθένησης  $D_f$  βάσει του χρόνου  $t_f$ .
- Επιλέγουμε το μεγαλύτερο από τα γινόμενα  $D_f \times I_g$  ( $= I_G$ ) που αντιπροσωπεύει τη χειρότερη περίπτωση.

##### 4.2.11.1 Είδη σφαλμάτων

Υπάρχουν πολλοί τύποι σφαλμάτων που μπορεί να συμβούν σε έναν υποσταθμό. Στο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης πρέπει να ληφθεί όμως υπόψη η πιθανότητα εκδήλωσης κάθε τύπου σφάλματος. Ταυτόχρονα σφάλματα δεν εξετάζονται αν η πιθανότητα να συμβούν συγχρόνως είναι αμελητέα, παρόλο που προκαλούν την εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων. Για πρακτικούς λοιπόν λόγους εξετάζονται το μονοφασικό σφάλμα προς γη και το διφασικό σφάλμα προς γη.

Η ενεργός τιμή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας,  $I_0$ , για μονοφασικό σφάλμα προς γη υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$I_0 = \frac{E}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (4.20)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας,  $I_0$ , για διφασικό σφάλμα προς γη σύμφωνα με τον τύπο:

$$I_0 = \frac{E(R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) \cdot [R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2) \cdot [R_0 + 3R_f + jX_0]} \quad (4.21)$$

όπου

E η φασική τάση σε V

$R_f$	η αντίσταση σφάλματος σε $\Omega$ (συνήθως λαμβάνεται ίση με μηδέν)
$R_1$	η αντίσταση θετικής ακολουθίας σε $\Omega$
$R_2$	η αντίσταση αρνητικής ακολουθίας σε $\Omega$
$R_0$	η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας σε $\Omega$
$X_1$	η αντίδραση θετικής ακολουθίας σε $\Omega$
$X_2$	η αντίδραση αρνητικής ακολουθίας σε $\Omega$
$X_0$	η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας σε $\Omega$

Αν αμελήσουμε τις ωμικές αντιστάσεις καταλήγουμε στους παρακάτω τύπους για το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας, μονοφασικού (Σχέση 4.22) και διφασικού σφάλματος προς γη (Σχέση 4.23):

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (4.22)$$

$$I_0 = \frac{EX_2}{X_1(X_0 + X_2) + X_2X_0} \quad (4.23)$$

Αμελώντας την ωμική αντίσταση του συστήματος και την αντίσταση γείωσης προκύπτει ένα μικρό σφάλμα στον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος πλέγματος, από την πλευρά της ασφάλειας.

Η αντίσταση σφάλματος μπορεί να αμεληθεί στην περίπτωση σφάλματος λόγω βλάβης στη μόνωση εντός του υποσταθμού. Στην περίπτωση που το σφάλμα εκδηλώνεται εκτός του υποσταθμού και μεταφέρεται μέσω της γραμμής στην περιοχή του μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή της αντίστασης σφάλματος και να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας.

Βάσει των τύπων υπολογισμού του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας που προαναφέρθηκαν μπορούμε να προσδιορίσουμε τη χειρότερη περίπτωση σφάλματος, όπου το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας γίνεται μέγιστο. Προκύπτει ότι οδηγούμαστε στην περίπτωση αυτή όταν σε μονοφασικό σφάλμα ισχύει η ανισότητα  $Z_1Z_0 > Z_2^2$  και σε διφασικό σφάλμα προς γη η ανισότητα  $Z_1Z_0 < Z_2^2$ . Θεωρώντας  $Z_i = R_i + jX_i$ ,  $i = 0, 1, 2$ , οι ανισότητες γίνονται  $Z_0 > Z_2$  και  $Z_0 < Z_2$  αντίστοιχα, όπου  $Z_i = R_i + jX_i$ ,  $i = 0, 1, 2$ .

#### 4.2.11.2 Προσδιορισμός του συντελεστή καταμερισμού

Ο συντελεστής καταμερισμού,  $S_f$ , δίνεται από τη σχέση:

$$S_f = \frac{I_g}{I_f} \quad (4.24)$$

όπου

$I_g$  είναι η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος πλέγματος σε A

$I_f$  είναι η rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος γείωσης σε A

Ο συντελεστής καταμερισμού εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Τοποθεσία εκδήλωσης του σφάλματος.
- Πλάτος αντίστασης συστήματος γείωσης.
- Θαμμένοι αγωγοί και σωλήνες στην περιοχή του συστήματος γείωσης.
- Εναέριοι αγωγοί γείωσης και ουδετέρου.

Για τον υπολογισμό του έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Λεπτομερής αναφορά γίνεται στο *Παράρτημα C* του προτύπου [1].

#### 4.2.11.3 Προσδιορισμός του συντελεστή εξασθένησης

Το μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$i_f(t) = \sqrt{2}E \cdot Y_{ac} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-t/T_\alpha} \cdot \sin(\alpha - \theta) \right] \quad (4.25)$$

όπου

$i_f(t)$  η στιγμιαία τιμή του μη συμμετρικού ρεύματος σφάλματος σε A τη χρονική στιγμή t, t σε s

E η rms τιμή της φασικής τάσης πριν το σφάλμα σε V

$\omega$  κυκλική συχνότητα σε rad/s

$\alpha$  η γωνία της τάσης κατά την εκδήλωση του σφάλματος σε rad

$\theta$  η φάση του ρεύματος σε rad

$Y_{ac}$  η ισοδύναμη ac αγωγιμότητα του συστήματος σε mhos

$T_\alpha$  η σταθερά χρόνου του dc offset σε s [ $T_\alpha = X/(\omega R)$ ]

Για τον προσδιορισμό του λόγου  $X/R$  χρησιμοποιούνται το φανταστικό ( $X$ ) και πραγματικό ( $R$ ) μέρος της υπομεταβατικής εμπέδησης σφάλματος.

Εξετάζουμε τη χειρότερη περίπτωση που αφορά τη μεγιστοποίηση του dc offset, δηλαδή την περίπτωση όπου  $(\alpha - \theta) = -\pi/2$ .

Τότε η Σχέση 4.25 γίνεται:

$$i_f(t) = \sqrt{2}E \cdot Y_{ac} \left[ e^{-t/T_a} - \cos(\omega t) \right] \quad (4.26)$$

Ορίζουμε την ενεργό τιμή του μη συμμετρικού ρεύματος,  $I_F$ , ως εξής:

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (4.27)$$

όπου

$t_f$  η διάρκεια του σφάλματος σε s

Ορίζοντας  $I_F = E \cdot Y_{ac}$ , ο συντελεστής εξασθένησης  $D_f$  δίνεται από τη σχέση:

$$D_f = \frac{I_F}{I_f} \quad (4.28)$$

Υπολογίζουμε το ολοκλήρωμα της Σχέσης 4.28 και καταλήγουμε στον ακόλουθο τύπο για το συντελεστή εξασθένησης:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left( 1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}} \right)} \quad (4.29)$$

Για μεγάλη διάρκεια σφάλματος (μεγαλύτερη των 30 κύκλων) ο συντελεστής εξασθένησης θεωρείται ίσος με τη μονάδα.

### 4.3 Σύνοψη

Συνοψίζοντας την περιγραφή σχεδίασης ενός συστήματος γείωσης επισημαίνουμε τη σπουδαιότητα ορισμένων παραμέτρων:

➤ **Μέγιστο ρεύμα πλέγματος ( $I_G$ )**

Για τον προσδιορισμό του ρεύματος που ρέει μέσω του πλέγματος γείωσης του υποσταθμού στη γη λαμβάνονται υπόψη η αντίσταση γείωσης, ο συντελεστής καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος καθώς και ο συντελεστής εξασθένησης.

➤ **Διάρκεια σφάλματος ( $t_f$ ) και διάρκεια έκθεσης στο σφάλμα ( $t_s$ )**

Οι δύο αυτοί χρόνοι συνήθως λαμβάνονται ίσοι. Η επιλογή τους πρέπει να εκφράζει τη χειρότερη περίπτωση σε σχέση με το συντελεστή εξασθένησης και τη μέγιστη τιμή του ανεκτού από το ανθρώπινο σώμα ρεύματος.

➤ **Ειδική αντίσταση εδάφους ( $\rho$ )**

Η αντίσταση γείωσης και η κλίση της τάσης εξαρτώνται άμεσα από την ειδική αντίσταση εδάφους. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της (βλ. Κεφάλαιο 3) και η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου εδάφους (ομοιογενές, διστρωματικό, πολυστρωματικό).

➤ **Ειδική αντίσταση υλικού επιφανείας ( $\rho_s$ )**

Το πρόσθετο υλικό επιφανείας μειώνει το ρεύμα που ρέει μέσα από το ανθρώπινο σώμα αυξάνοντας την αντίστασή του.

➤ **Γεωμετρία πλέγματος**

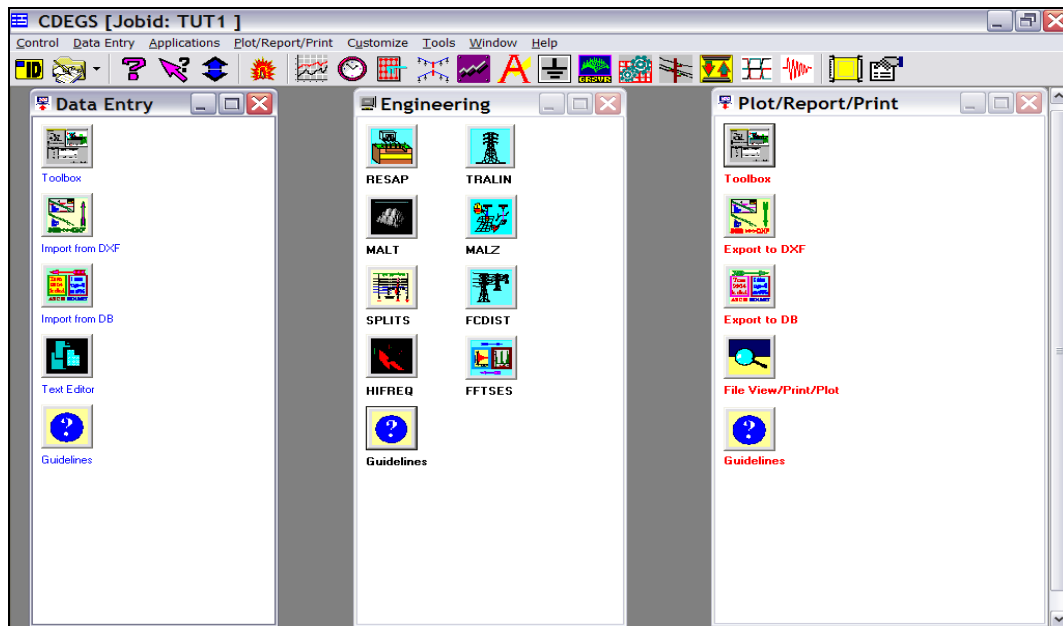
Γενικά η γεωμετρία του πλέγματος γείωσης εξαρτάται από τον προϋπολογισμό της κατασκευής και το χώρο όπου γίνεται η εγκατάσταση. Οι παράγοντες που σχετίζονται με τη γεωμετρία του πλέγματος και επηρεάζουν την τιμή της τάσης επαφής είναι το εμβαδό της περιοχής που καλύπτει το πλέγμα, η απόσταση μεταξύ των αγωγών καθώς και το βάθος στο οποίο τοποθετείται το πλέγμα. Παράγοντες όπως η διάμετρος των αγωγών γείωσης είναι λιγότερο σημαντικοί.

## **SES CDEGS**

Το πακέτο λογισμικού CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis, Version 11.0.54) της εταιρείας SES χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση 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.

### **5.1 Εισαγωγή**

Εκτελούμε το πρόγραμμα CDEGS.exe. Μας ζητείται να επιλέξουμε ένα JobID. Η φράση αυτή εισάγεται στο όνομα των αρχείων εισόδου και εξόδου ώστε να αναγνωρίζονται εύκολα από το χρήστη. Αφού επιλεγεί, η εικόνα του προγράμματος είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 5.1

## 5.2 Καταχώρηση Δεδομένων

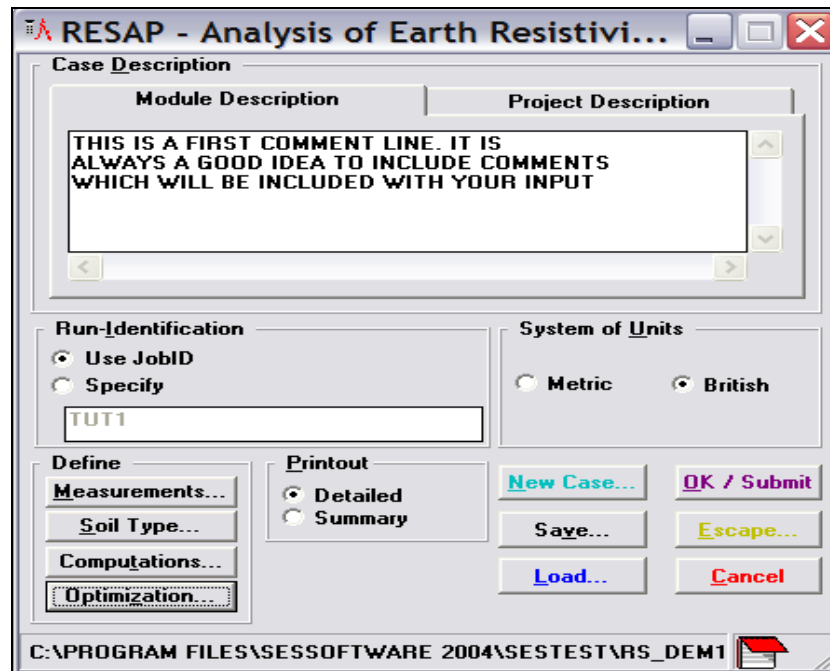
Στο πλαίσιο με την επιγραφή Data Entry επιλέγουμε το Toolbox:



Εικόνα 5.2

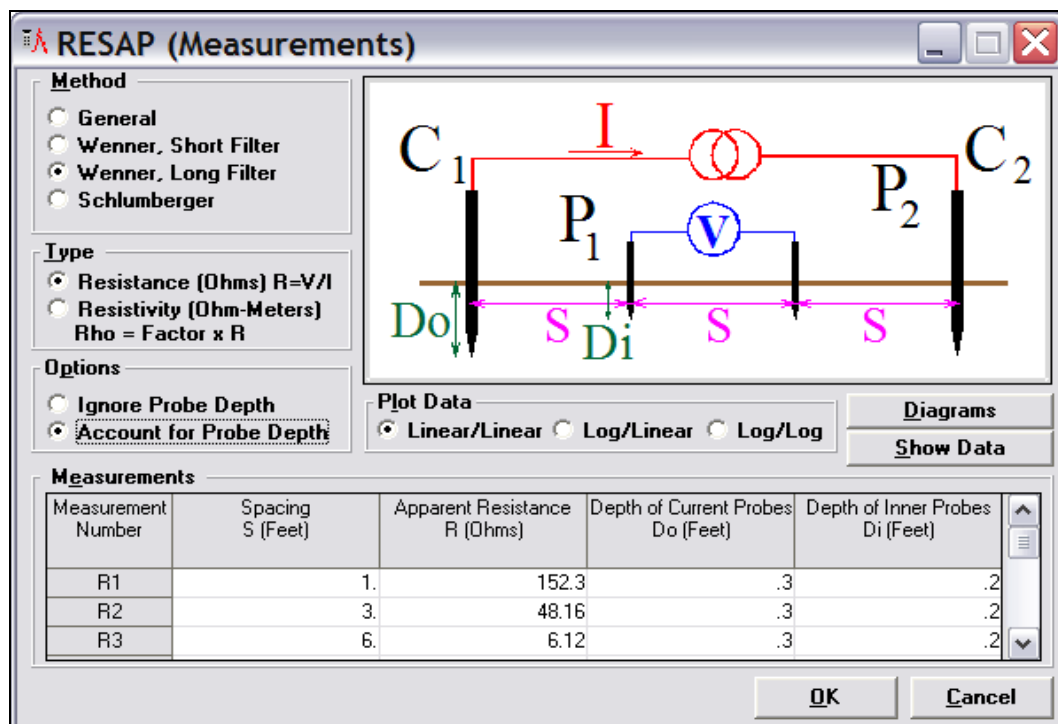
Εδώ, οι εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν είναι η RESAP και η MALZ.

## 5.2.1 RESAP



Εικόνα 5.3

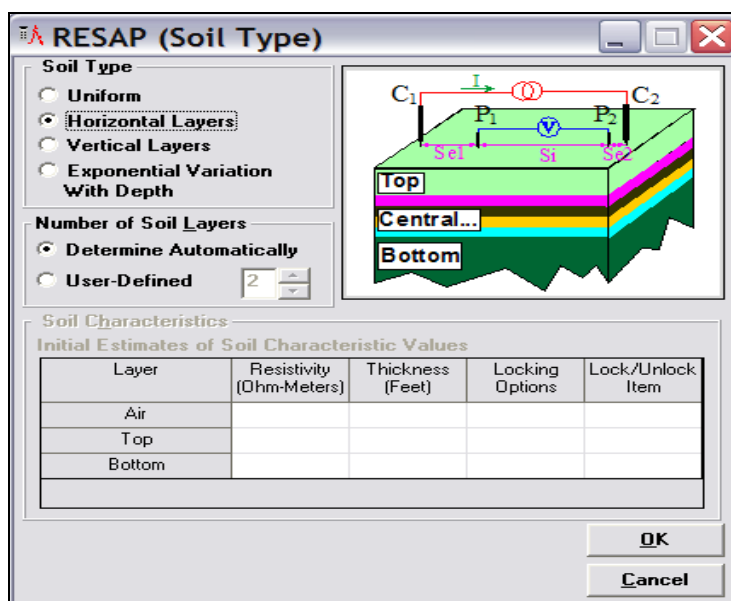
Επιλέγοντας τη RESAP εισάγουμε μετρήσεις για την ειδική αντίσταση εδάφους οι οποίες έχουν γίνει είτε με τη μέθοδο Wenner (βλ. Κεφάλαιο 3) είτε με τη μέθοδο Schlumberger.



Εικόνα 5.4



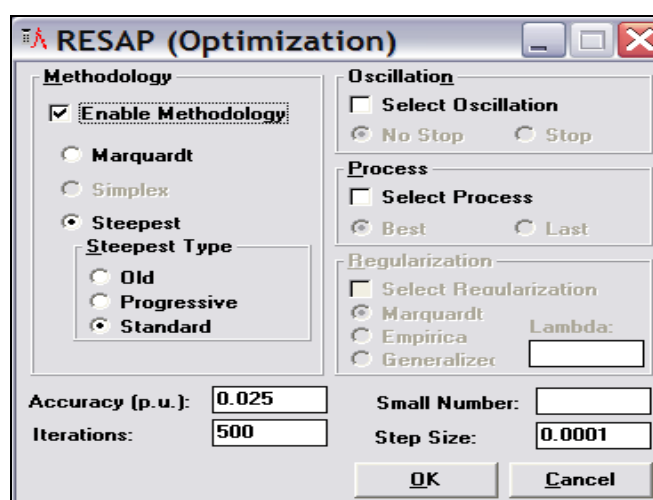
Αφού εισάγουμε τις μετρήσεις, με την επιλογή Soil Type προσδιορίζουμε το μοντέλο που πιστεύουμε ότι προσεγγίζει το εν λόγω έδαφος, πχ οριζόντια πολυστρωματικό:



Εικόνα 5.5

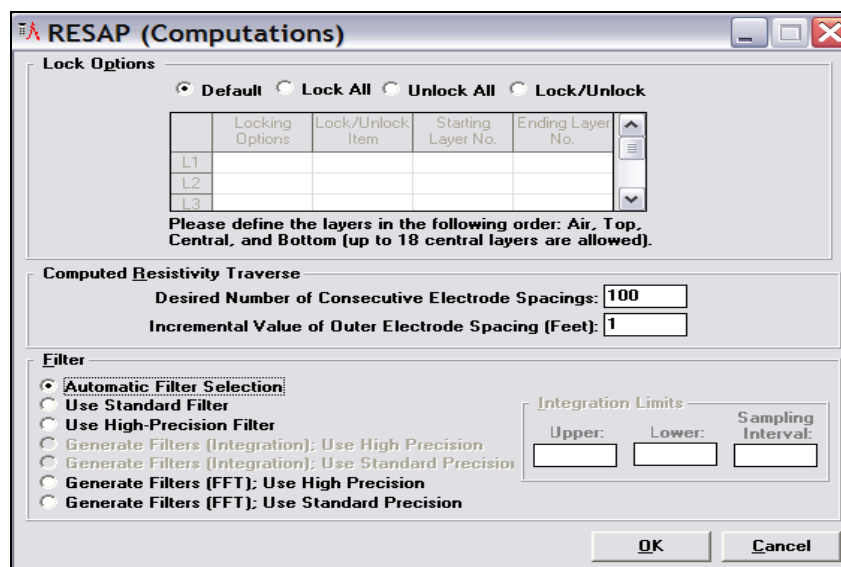
Η εφαρμογή RESAP στη συνέχεια υπολογίζει αυτόματα (ή καθ'ορισμό του χρήστη) πόσα στρώματα περιλαμβάνει το μοντέλο και την ειδική αντίσταση καθενός.

Με την επιλογή Optimization επιλέγουμε τη μέθοδο ελαχιστοποίησης για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου εδάφους και ρυθμίζουμε την ακρίβεια των υπολογισμών (η μέθοδος Marquardt περιορίζεται στον προσδιορισμό των παραμέτρων πολυστρωματικού μοντέλου οριζόντιων στρωμάτων):



Εικόνα 5.6

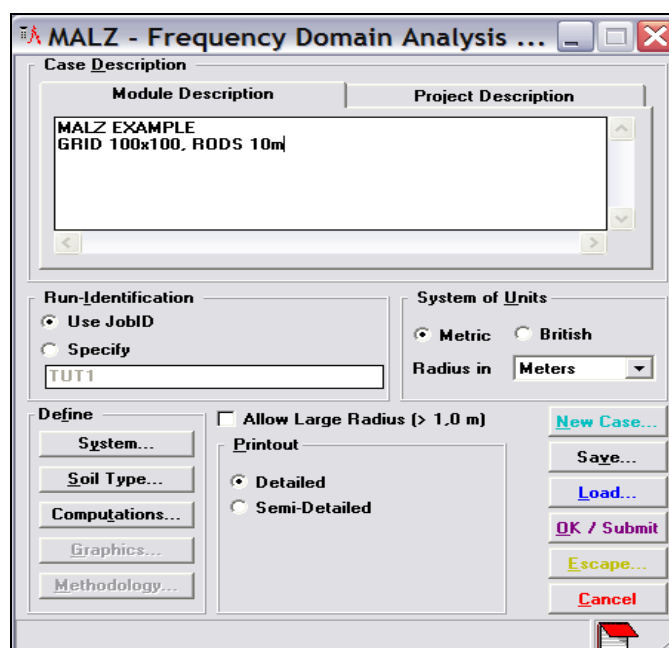
Με την επιλογή Computations μπορούμε να επιλέξουμε ορισμένες μετρήσεις τις οποίες επιθυμούμε να ακολουθήσει το μοντέλο εδάφους (επιλογή Lock), όπως επίσης να επιλέξουμε το κατάλληλο φίλτρο για τους υπολογισμούς. Συνήθως επιλέγεται το Standard Filter, ενώ το High Precision Filter επιλέγεται μόνο σε περιπτώσεις όπου η ειδική αντίσταση εδάφους παρουσιάζει πολύ μεγάλες διαφορές.



Εικόνα 5.7

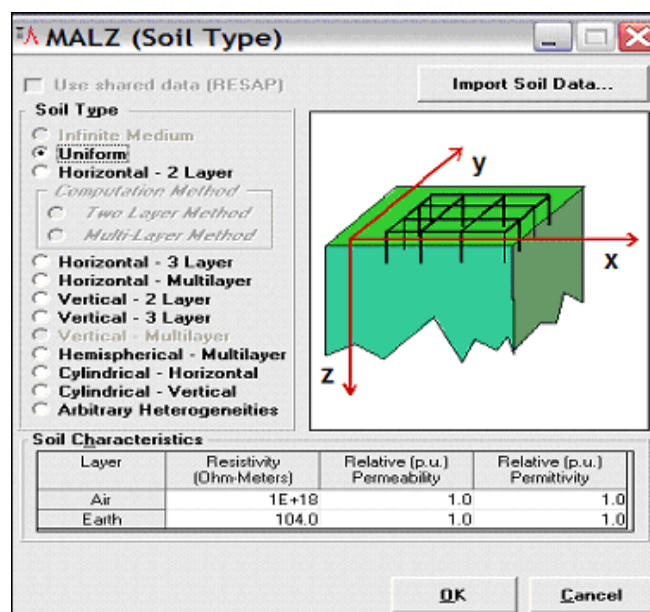
Επιστρέφουμε στο αρχικό παράθυρο του RESAP και επιλέγουμε OK / Submit.

### 5.2.2 MALZ



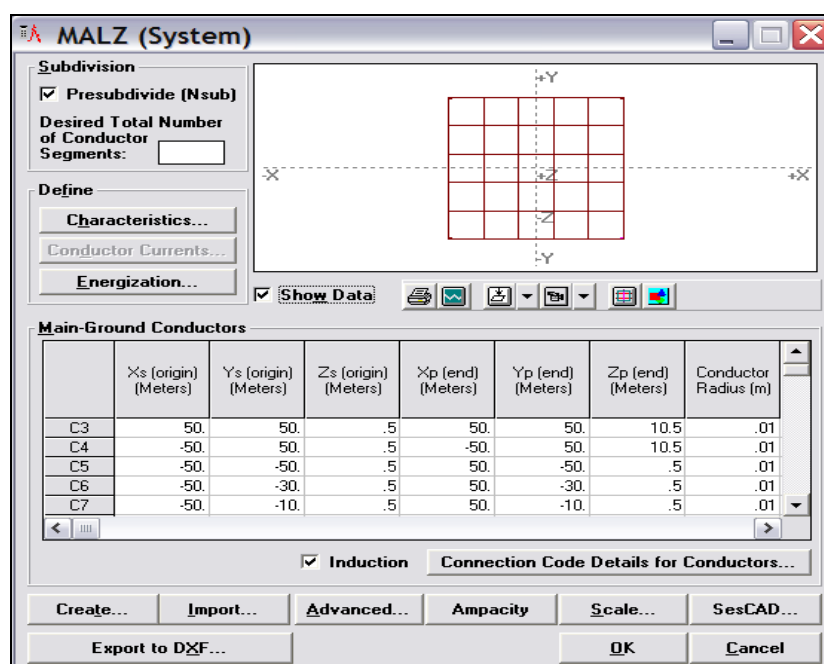
Εικόνα 5.8

Επιλέγοντας αυτή την εφαρμογή έχουμε τη δυνατότητα σχεδιασμού του συστήματος γείωσης. Αρχικά, επιλέγουμε το σύστημα μονάδων που θα χρησιμοποιήσουμε, δηλαδή το μετρικό ή το βρετανικό σύστημα μονάδων. Με την επιλογή Soil Type ορίζουμε το μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιούμε προσδιορίζοντας τις τιμές για την ειδική αντίσταση και το πάχος κάθε στρώματος ή εισάγοντας αυτόματα τις πληροφορίες αυτές με την επιλογή Import Soil Data από την εφαρμογή RESAP:



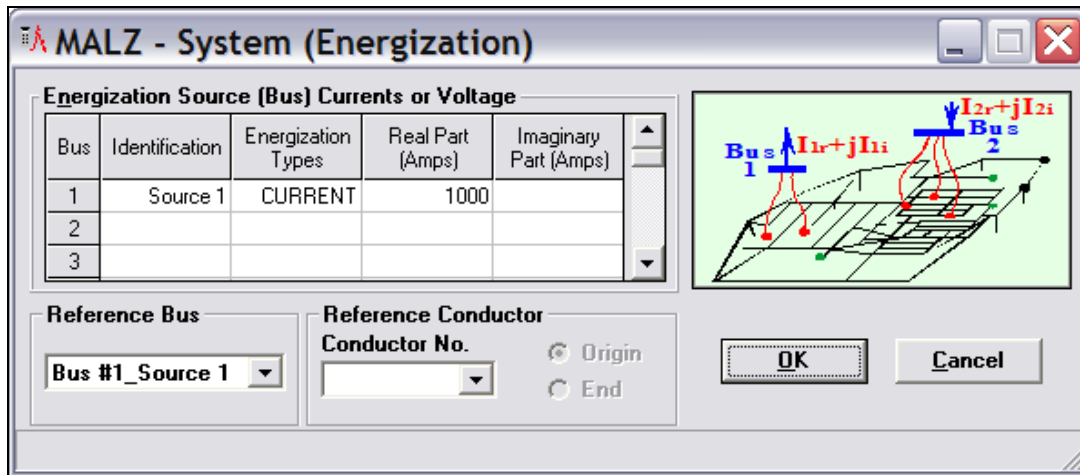
Εικόνα 5.9

Στη συνέχεια σχεδιάζουμε το σύστημα γείωσης επιλέγοντας System.



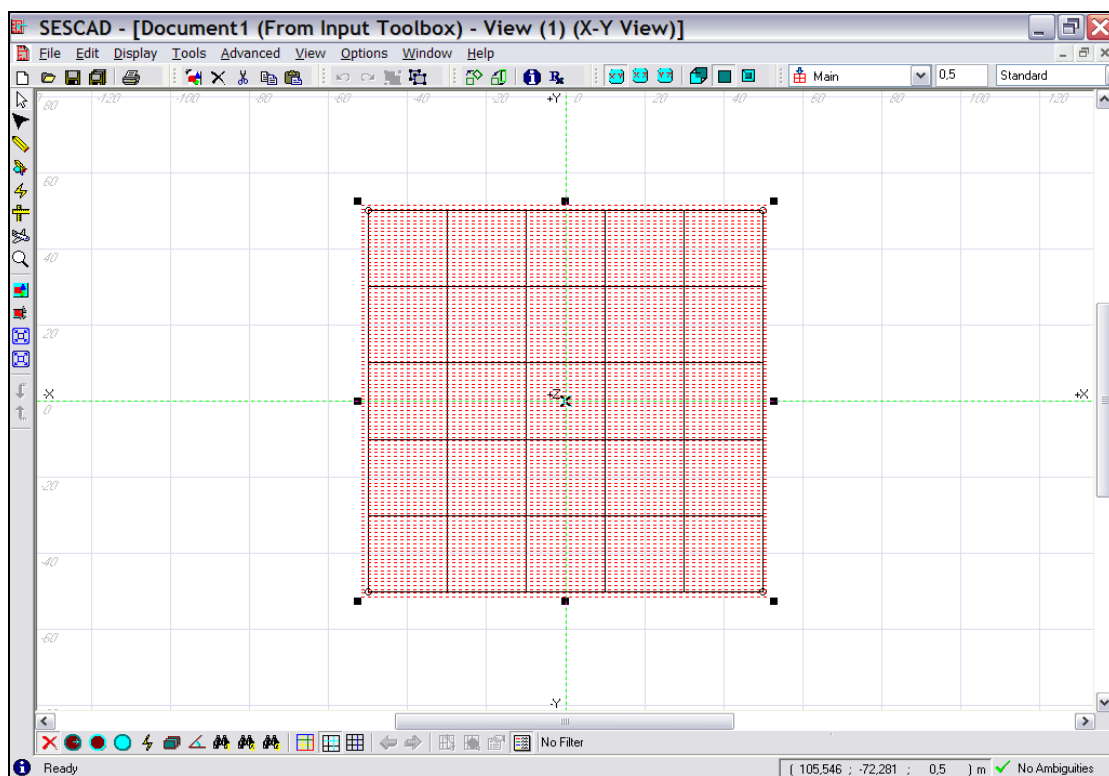
Εικόνα 5.10

Εδώ προσδιορίζουμε τις διαστάσεις των αγωγών ή του πλέγματος, τη διάταξή τους, το υλικό τους, καθώς και το ρεύμα ενεργοποίησης (ρεύμα σφάλματος που διαρρέει το σύστημα γείωσης):




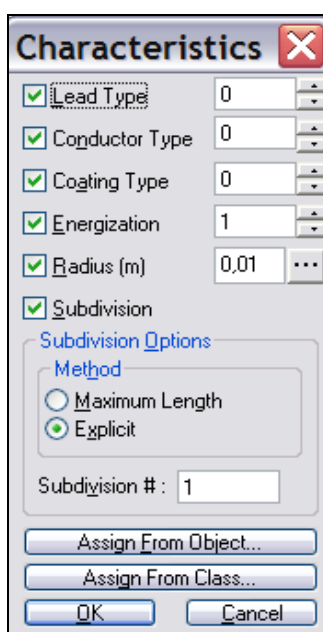
Εικόνα 5.11

Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει με χειροκίνητη εισαγωγή των στοιχείων στον πίνακα που εικονίζεται παραπάνω είτε με γραφικό τρόπο με την επιλογή SesCAD:



Εικόνα 5.12

Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στις *Εικόνες 5.10 και 5.12* το σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα τετραγωνικό πλέγμα διαστάσεων 100m×100m και τέσσερις ράβδους στις γωνίες του πλέγματος, μήκους 10m. Στο γραφικό περιβάλλον SesCAD ο σχεδιασμός του πλέγματος και των αγωγών γίνεται επιλέγοντας Edit → Create Object και στη συνέχεια Grid ή Simple Conductor αντίστοιχα και ο σχεδιασμός των ράβδων επιλέγοντας Tools → Create Rods. Επιλέγοντας Detailed Grid προσδιορίζουμε την ακριβή θέση του πλέγματος ενώ με την επιλογή Simple Grid ορίζουμε τις διαστάσεις του πλέγματος, το οποίο τοποθετείται αυτόματα συμμετρικά του άξονα  $yy'$ . Το υλικό των αγωγών ορίζεται στο πεδίο Characteristics, όπου έχουμε τη δυνατότητα επιλογής του τύπου σύνδεσης των αγωγών (Lead Type), του τύπου αγωγού (Conductor Type), τον τύπο του επικαλυπτικού στρώματος του αγωγού (Coating Type) και της ακτίνας διατομής του αγωγού (Radius), η οποία μπορεί να επιλεγεί από μια λίστα τυποποιημένων αγωγών (επιλογή κουμπιού ).



**Εικόνα 5.13**

Το πεδίο Energization σχετίζεται με τον ορισμό του ρεύματος ενεργοποίησης που γίνεται στο System, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.11* και το Subdivision με την διαίρεση του αγωγού σε όσα κομμάτια προσδιορίσουμε με την επιλογή explicit, στο πεδίο Subdivision #. Η διαίρεση του αγωγού γίνεται επίσης αυτόματα στις συνδέσεις του με τους υπόλοιπους αγωγούς με την επιλογή Presubdivide (Nsub) στο System (*Εικόνα 5.10*). Η διαίρεση του αγωγού αποσκοπεί στον ακριβή υπολογισμό της

κατανομής του ρεύματος διαρροής προς γη στο πλέγμα γείωσης σε περίπτωση μη ομογενούς εδάφους [20].

Στην περίπτωση όπου εξετάζουμε την απόκριση του συστήματος γείωσης σε υψηλές συχνότητες πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη τον εξής περιορισμό για την κατάτμηση του αγωγού:

$$segm \leq \frac{1}{6} \underbrace{3160 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}}_{\text{wavelength}} \Rightarrow segm \leq 527 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (5.1)$$

όπου

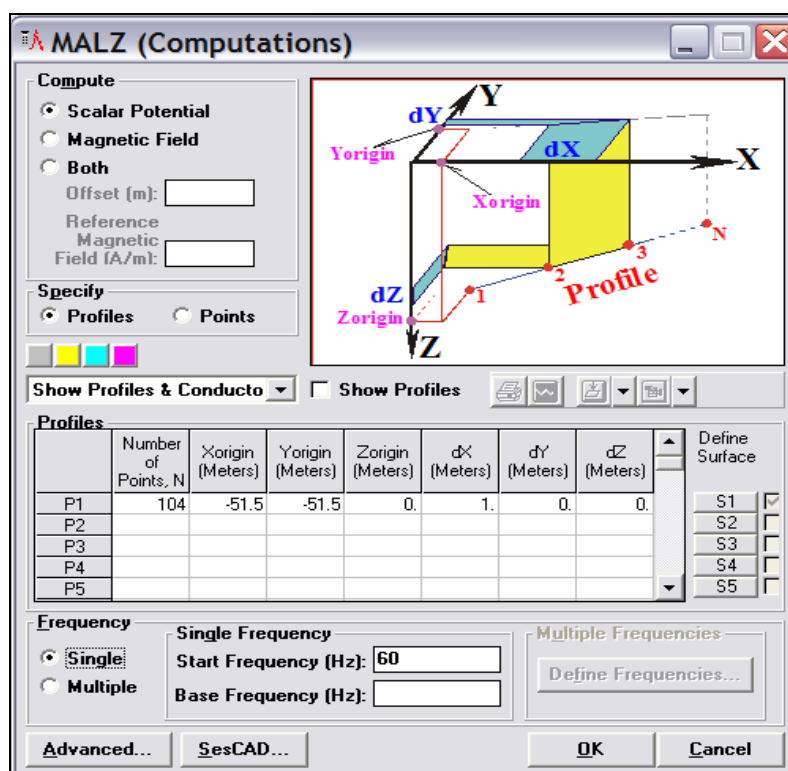
$segm$  το μήκος των κομματιών στα οποία χωρίζεται ο αγωγός, σε m

$\rho$  η ειδική αντίσταση σε  $\Omega m$

$f$  η συχνότητα σε Hz

Επιπλέον, γενικά, θα πρέπει το μήκος του κομματιού,  $segm$ , να είναι τουλάχιστον πέντε φορές μεγαλύτερο της ακτίνας του αγωγού πλέγματος.

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης απαραίτητη είναι η δημιουργία ενός Profile (κόκκινο πλέγμα στην Εικόνα 5.12). Αυτό ορίζεται είτε στο SesCAD επιλέγοντας Edit → Create Object → Profiles είτε επιλέγοντας Computations στο αρχικό παράθυρο της εφαρμογής MALZ:



Εικόνα 5.14

Το Profile ορίζει «σημεία παρατήρησης» για τον υπολογισμό της τάσης επαφής και της βηματικής και είναι απαραίτητο να επεκτείνεται κατά περίπου 3 μέτρα εκτός του υποσταθμού που μελετάμε [20]. Στα πεδία dX, dY, dZ καθορίζεται η απόσταση μεταξύ των Profiles στους τρεις άξονες.

Με την επιλογή Computations μπορούμε, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.14 να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος γείωσης σε διάφορες συχνότητες, επιλέγοντας Multiple στο πεδίο Frequency και ορίζοντας τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν στο πεδίο Define Frequencies. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται στην ανάλυση σφαλμάτων με ευρύ φάσμα συχνοτήτων, όπως είναι οι κεραυνοί.

Επιστρέφουμε στο αρχικό παράθυρο του MALZ και επιλέγουμε OK / Submit.

### 5.3 Προσομοίωση

Αφού επιλέξουμε Submit All στο Toolbox, πατάμε στο κουμπί RESAP ή MALZ στο παράθυρο Engineering. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η προσομοίωση του συστήματος γείωσης που σχεδιάσαμε, στις συνθήκες που ορίσαμε και υπολογίζονται η ειδική αντίσταση και το μοντέλο εδάφους (RESAP) και η εμπέδηση γείωσης, το GPR, η βηματική και η τάση επαφής κοκ (MALZ).

## 5.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στο πλαίσιο με την επιγραφή Plot / Report / Print επιλέγουμε το Toolbox:

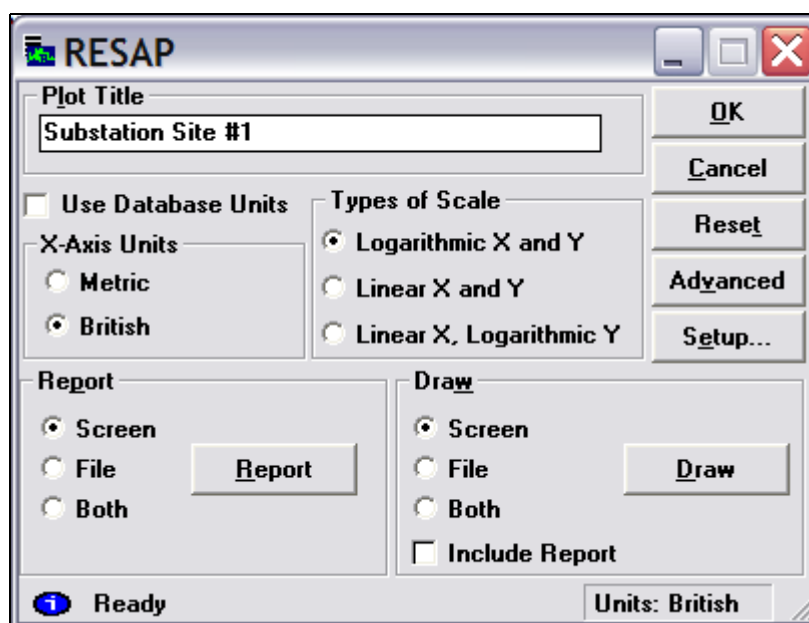


Εικόνα 5.15

Εδώ μας ενδιαφέρουν οι εφαρμογές RESAP και MALZ.

### 5.4.1 RESAP

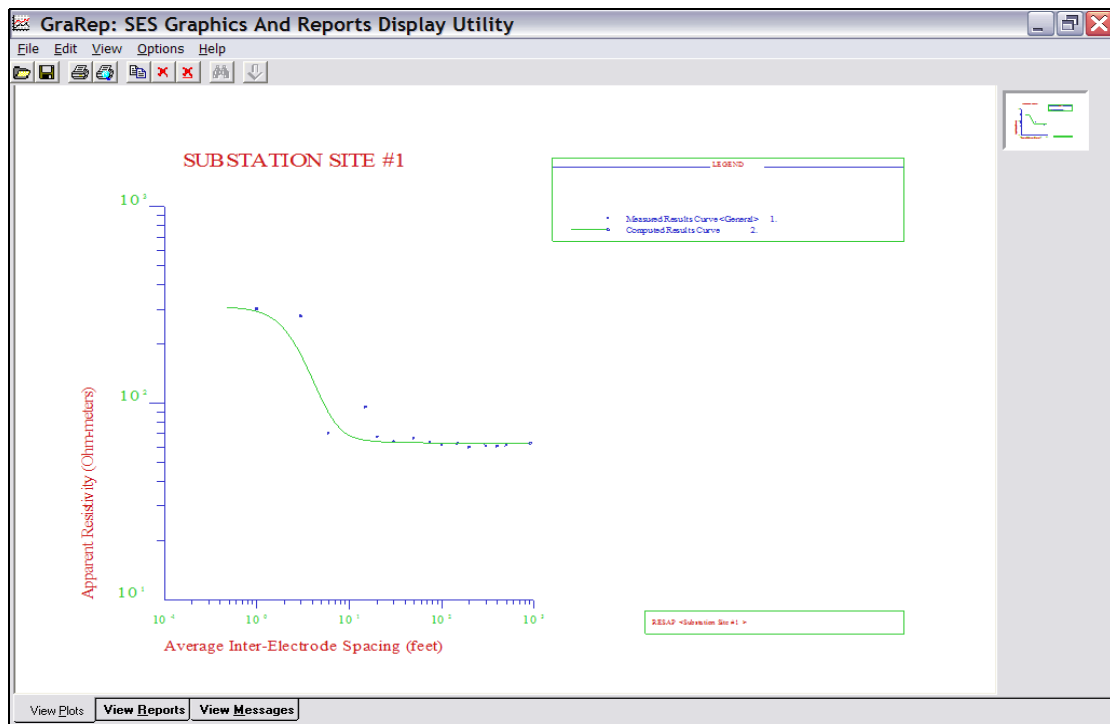
Επιλέγοντας την εφαρμογή RESAP εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο επιλογών:



Εικόνα 5.16

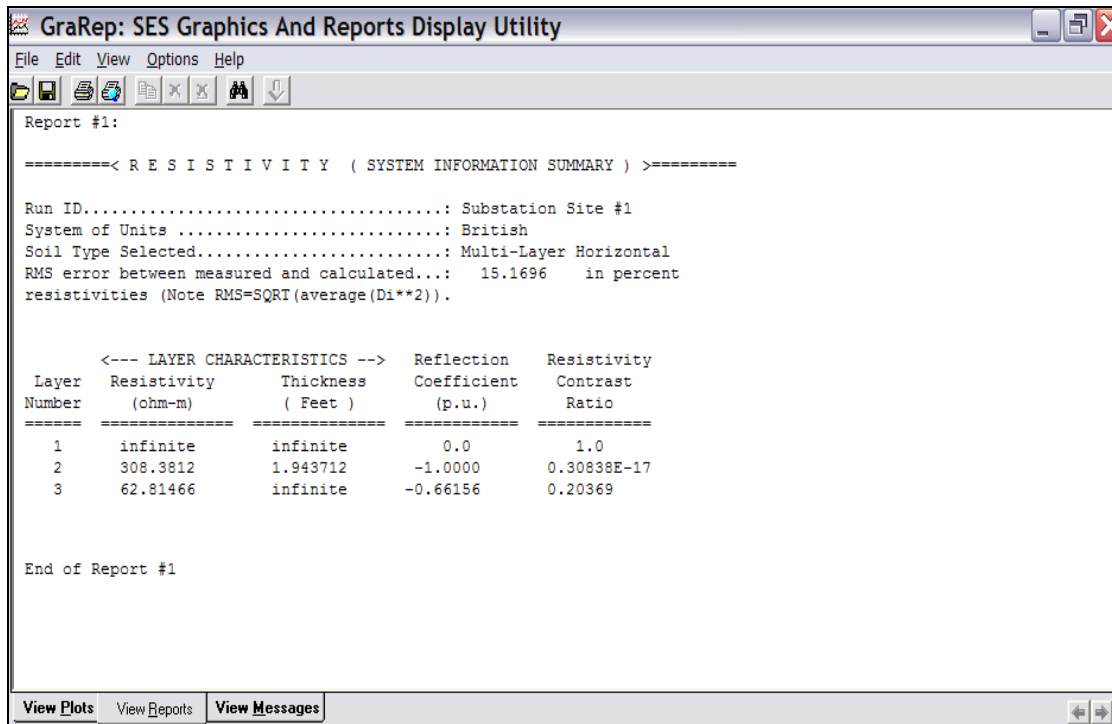


Ορίζουμε τον τίτλο του γραφήματος ώστε να ξεχωρίζουμε τις διάφορες περιπτώσεις μετρήσεων και πατώντας στο κουμπί Draw σχεδιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου GraRep το γράφημα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης εδάφους. Σημειώνουμε ότι στον οριζόντιο άξονα του γραφήματος, μεταβλητή είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων μέτρησης. Όπως επισημαίνουμε όμως στο *Κεφάλαιο 3* η ειδική αντίσταση σε βάθος  $a$  δίνεται από τη σχέση 3.1 ή 3.2 του *Κεφαλαίου* για απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων ίση με  $a$ . Γίνεται φανερό λοιπόν ότι η μεταβλητή στον οριζόντιο άξονα αναφέρεται είτε στην απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων είτε στο βάθος. Σημειώνουμε ότι η ειδική αντίσταση που δίνεται από τη σχέση 3.2 λέγεται «φαινόμενη» στην περίπτωση μη ομοιογενούς εδάφους [25].



Εικόνα 5.17

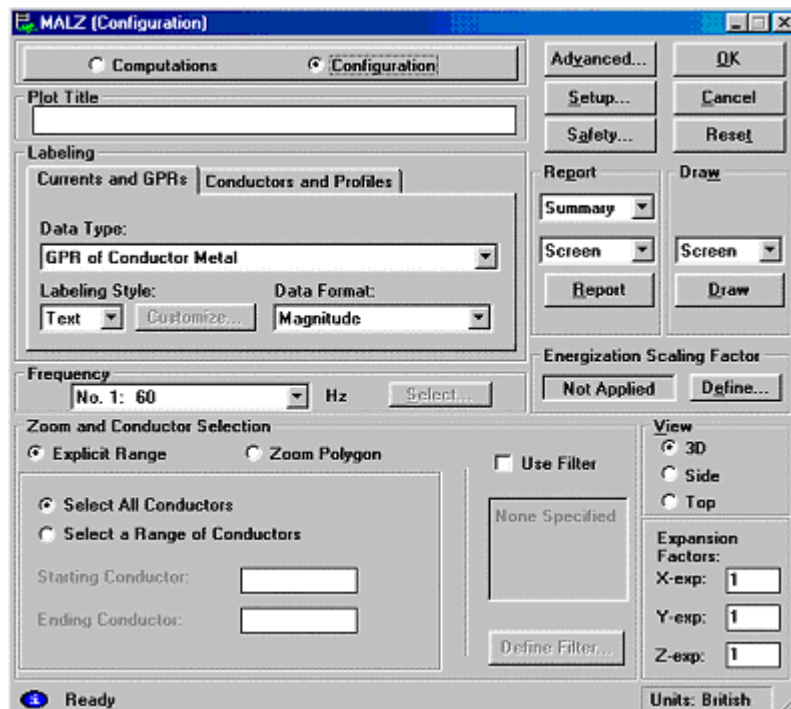
Πατώντας στο κουμπί Report στο παράθυρο RESAP (Εικόνα 5.16) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε μορφή κειμένου:



Εικόνα 5.18

### 5.4.2 MALZ

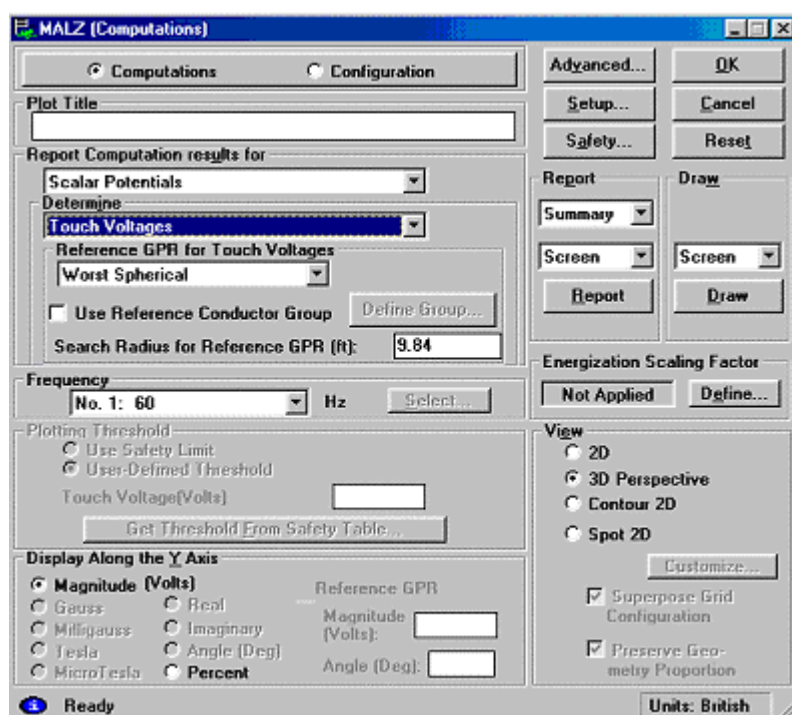
Επιλέγοντας την εφαρμογή MALZ εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο επιλογών:



Εικόνα 5.19

Εισάγουμε τον τίτλο του διαγράμματος στο πεδίο Plot Title. Με την επιλογή Report εμφανίζονται σε μορφή κειμένου τα δεδομένα που εισάγουμε στο πρώτο μέρος, σε σχέση με τις διαστάσεις του πλέγματος και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, καθώς επίσης η τιμή της σύνθετης αντίστασης γείωσης για μία ή περισσότερες συχνότητες (πεδίο Frequency → Select). Επίσης με την επιλογή Select a Range of Conductors εξετάζουμε ένα μέρος μόνο του πλέγματος όπως και με την επιλογή Zoom, ενώ με την επιλογή Energization Scaling Factor έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής του ρεύματος ενεργοποίησης χωρίς να είναι απαραίτητη η εκ νέου προσομοίωση. Πατώντας στο κουμπί Draw εμφανίζεται το διάγραμμα του δυναμικού, του ρεύματος διαρροής ή διαφόρων χαρακτηριστικών των αγωγών γείωσης (επιλέγουμε το μέγεθος που μας ενδιαφέρει στο πεδίο Data Type).

Επιλέγοντας Computations έχουμε την παρακάτω εικόνα:

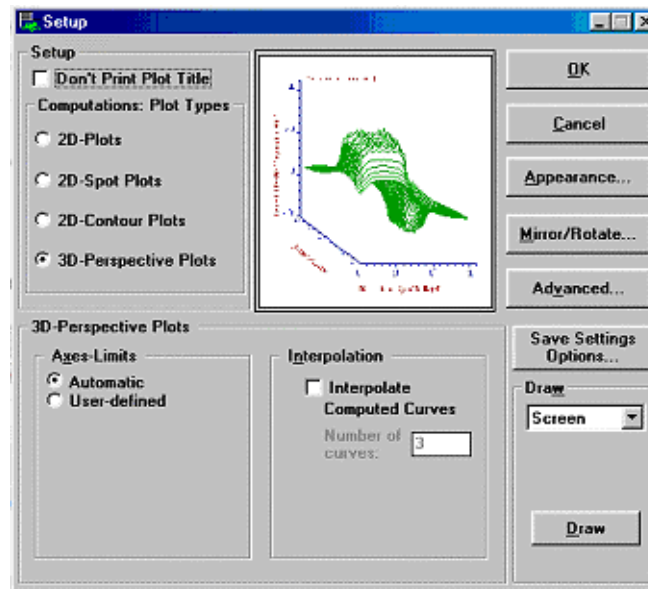


Εικόνα 5.20

Εδώ υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του δυναμικού σε οποιοδήποτε σημείο του profile, της τάσης επαφής και της βηματικής, οι οποίες υπολογίζονται ως η διαφορά του GPR από το δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους και η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δυο σημεία της επιφάνειας αντίστοιχα. Τα μεγέθη αυτά απεικονίζονται συναρτήσει των διαστάσεων του profile σε φυσικές μονάδες ή ποσοστό (%) σε διδιάστατο ή τρισδιάστατο διάγραμμα. Οι γραφικές παραστάσεις σχεδιάζονται με την επιλογή Draw. Με την επιλογή Advanced

έχουμε στη διάθεσή μας ένα ολοκληρωμένο report της προσομοίωσης, όπου καταγράφονται αναλυτικά οι υπολογιζόμενες τιμές της τάσης σε κάθε σημείο του profile.

Με την επιλογή Setup επιλέγουμε τον τρόπο απεικόνισης των διαγραμμάτων, πχ διδιάστατο, τρισδιάστατο, με ισοψηφείς:



Εικόνα 5.21

Τέλος, η επιλογή Safety, μας δίνει τη δυνατότητα του υπολογισμού της αντίστασης ποδιού καθώς και των επιτρεπόμενων τάσεων βηματικής και επαφής (επιλογή Report) σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς (IEEE, IEC):

**SAFETY**

**Sample of 3 Fault Clearing Times (sec)**

**Fibrillation Current Calculation Method**

**Body Resistance**

IEEE  
 IEC  
 User-Defined

**IEC Percentage**

Percentage:  %

100% (hand-to-hand)  
 75% (hand-to-2 feet)  
 50% (2 hands-to-2 feet)

**Resistivity**

Sub-Surface Uniform Soil Layer Resistivity:

**Foot Resistance Calculation Method**

Extra Resistance (shoe, glove, etc):

Foot Resistance:

Soil Surface Covering Resistivity:

**Frequency**

**Report**

Screen  File  Both

**IEC Curve**

Body Resistance of 95% of Population Exceeds Curve  
 Body Resistance of 50% of Population Exceeds Curve  
 Body Resistance of 5% of Population Exceeds Curve

**Insulating Surface Layer**

**Thickness**  
 Centimeters  
 Meters  
 Inches  
 Feet

Number of Surface Resistivities:   
 Surface Layer Thickness:   
 Starting Surface Resistivity:   
 Incremental Surface Resistivity:   
(Resistivities in Ohm-m)

**Decrement Factor**

Default  
 User-Defined  
 Computed

X/R Ratio:

Decr. 1:

Decr. 2:

Decr. 3:

**Safety Limits**

Safe Touch Voltage (Volts): 753.7

Safe Step Voltage (Volts): 2382.6

**Save Settings**

for MALT Only  
 for MALT, MALZ and HIFREQ

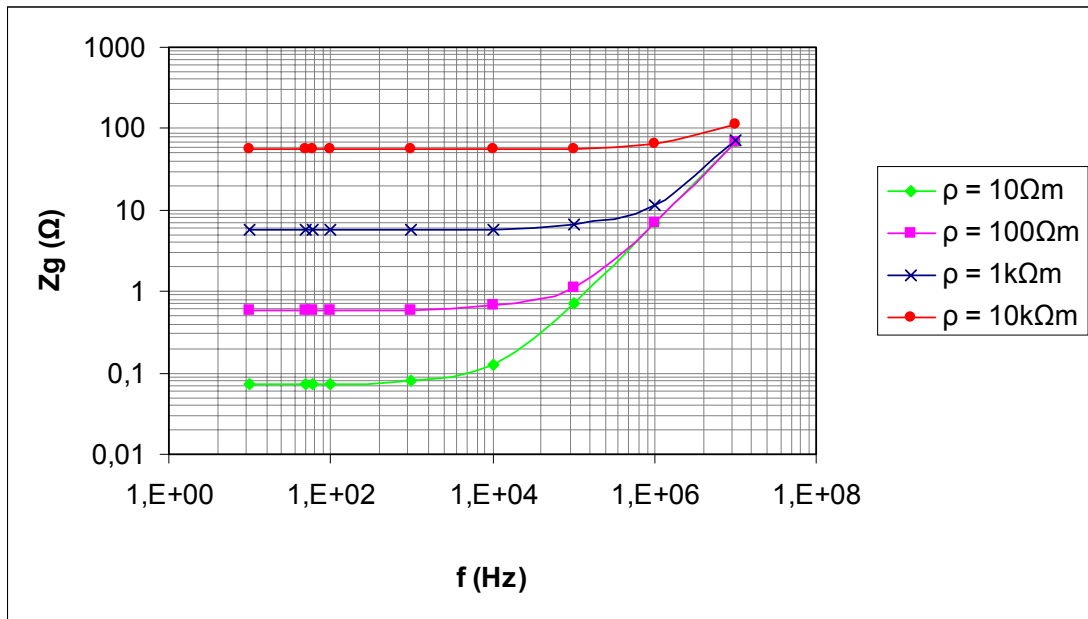
Εικόνα 5.22

# Απόκριση Συχνότητας της Σύνθετης αντίστασης Γείωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης γείωσης,  $Z_g$ , ενός υποσταθμού από τη συχνότητα,  $f$ , του ρεύματος σφάλματος και προτείνονται τρόποι μείωσής της. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με το πακέτο λογισμικού CDEGS (βλ. Κεφάλαιο 5). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα στη βιβλιογραφία [18].

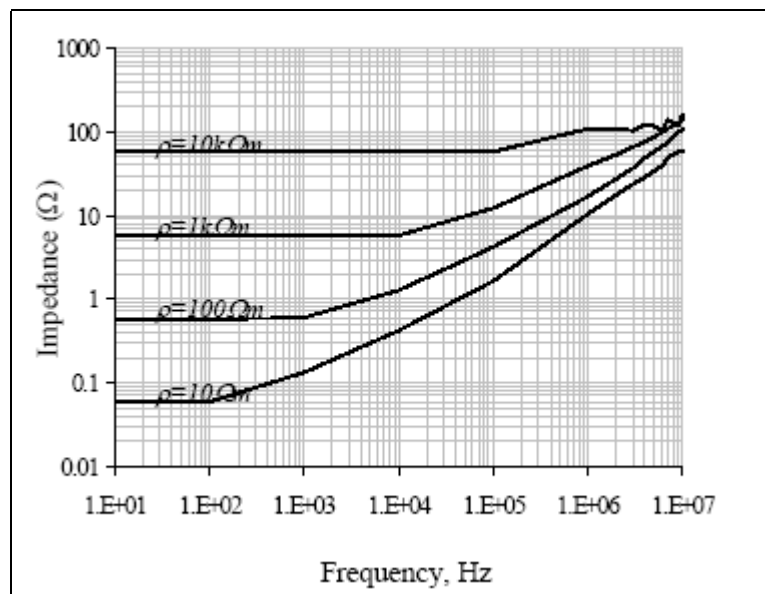
## 6.1 Απόκριση Συχνότητας για διάφορες τιμές Ειδικής Αντίστασης Εδάφους

Εξετάζουμε τη μεταβολή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος σφάλματος για τετραγωνικό πλέγμα γείωσης τεσσάρων βρόχων διαστάσεων 100m×100m και ειδική αντίσταση ομογενούς εδάφους  $\rho = 10, 100, 1000, 10000 \Omega\text{m}$ . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο *διάγραμμα 6.1*:



**Διάγραμμα 6.1:** Μεταβολή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος σφάλματος

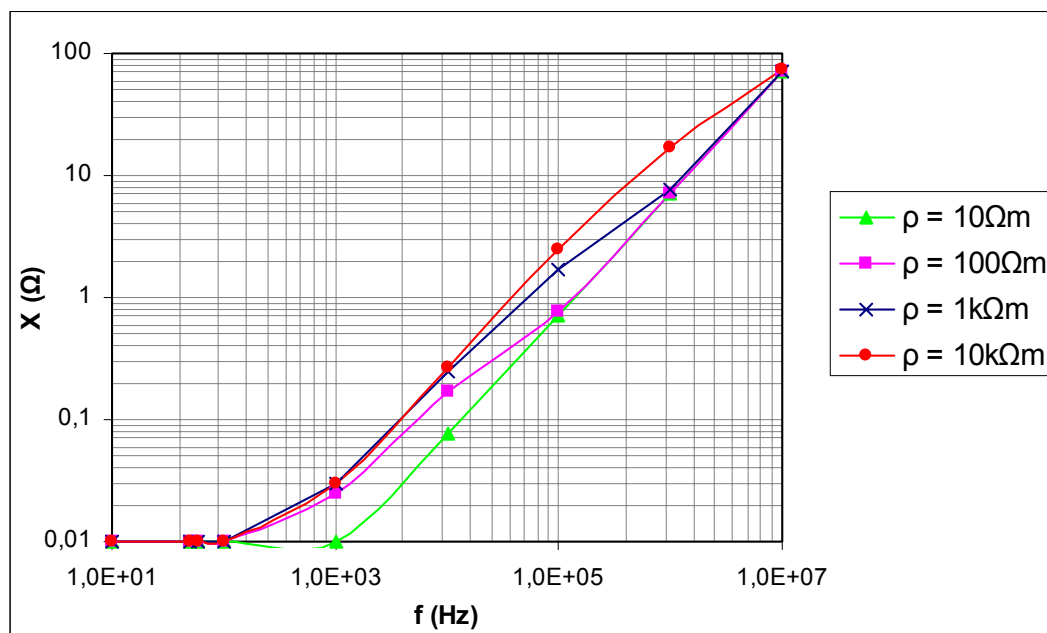
Παραθέτουμε στη συνέχεια το αντίστοιχο διάγραμμα (Διάγραμμα 6.2) από τη βιβλιογραφία [18]:



**Διάγραμμα 6.2:** Μεταβολή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος σφάλματος [18]

Όπως παρατηρούμε και στα δύο παραπάνω διαγράμματα για χαμηλές συχνότητες η σύνθετη αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης εδάφους. Σε υψηλότερες συχνότητες επικρατούν τα επαγωγικά φαινόμενα, γεγονός που επιβεβαιώνεται από το

διάγραμμα 6.3 του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης γείωσης (αντίδραση X) συναρτήσει της συχνότητας:



Διάγραμμα 6.3: Μεταβολή του μέτρου της αντίδρασης γείωσης συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος σφάλματος

Παρατηρούμε επίσης ότι για υψηλές τιμές της ειδικής αντίστασης η σύνθετη αντίσταση επηρεάζεται λιγότερο από τις μεταβολές της συχνότητας σε σχέση με την περίπτωση μικρής ειδικής αντίστασης.

## 6.2 Απόκριση Συχνότητας για μεταβλητή Επιφάνεια Πλέγματος

Εξετάζουμε τη μεταβολή της σύνθετης αντίστασης γείωσης με τη συχνότητα για τετραγωνικό πλέγμα διαστάσεων 10m×10m, 50m×50m και 100m×100m. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Διαστάσεις Πλέγματος (m)	$\rho = 10\Omega\text{m}$				$\rho = 1000\Omega\text{m}$			
	50 Hz	10 kHz	1 MHz	10 MHz	50 Hz	10 kHz	1MHz	10 MHz
10x10	0,46	0,47	0,62	70	43	43	46	70
50x50	0,11	0,40	0,43	70	11	11	11,80	70
100x100	0,07	0,12	0,90	70	5,60	5,70	11,20	70

Πίνακας 6.1



Παραθέτουμε ακολούθως τα αντίστοιχα αποτελέσματα όπως καταγράφονται στη βιβλιογραφία [18]:

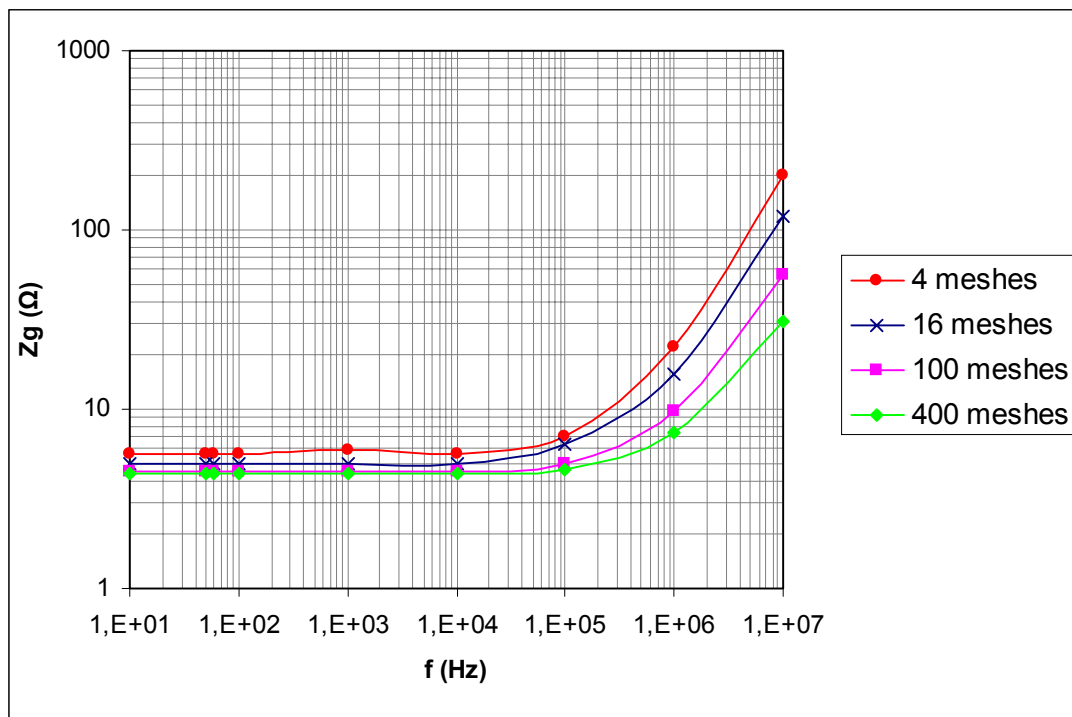
Διαστάσεις Πλέγματος (m x m)	$\rho = 10\Omega\text{m}$			$\rho = 1000\Omega\text{m}$		
	50 Hz	10 kHz	10 MHz	50 Hz	10 kHz	10 MHz
10x10	0,4	0,5	50	40	40	100
50x50	0,1	0,4	50	10	10	100
100x100	0,06	0,4	50	0,6	6	100

Πίνακας 6.2

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της επιφάνειας του πλέγματος προκαλεί μείωση της σύνθετης αντίστασης γείωσης σε χαμηλές συχνότητες, ενώ σε συχνότητες της τάξης του MHz η σύνθετη αντίσταση φαίνεται αμετάβλητη στις αλλαγές του εμβαδού του πλέγματος. Επιπλέον, όπως και παραπάνω, παρατηρούμε ότι σε έδαφος υψηλής ειδικής αντίστασης η συχνότητα δεν επιδρά τόσο στην σύνθετη αντίσταση γείωσης όσο σε χαμηλές συχνότητες.

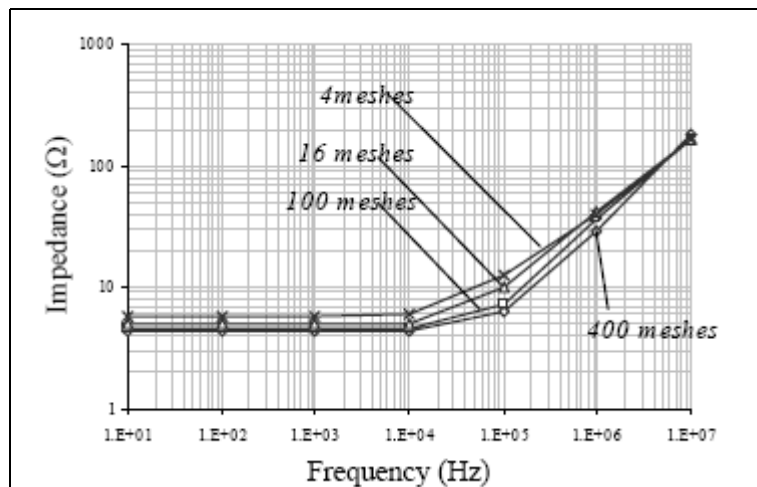
### 6.3 Απόκριση Συχνότητας για μεταβλητή Πυκνότητα Πλέγματος

Εξετάζουμε την απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης για τετραγωνικό πλέγμα, 100m×100m, σε έδαφος ειδικής αντίστασης 1kΩm, με μεταβαλλόμενη πυκνότητα πλέγματος. Στο *διάγραμμα 6.4* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για πυκνότητες πλέγματος 4, 16, 100 και 400 βρόχων.



**Διάγραμμα 6.4:** Μεταβολή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος σφάλματος για τετραγωνικό πλέγμα,  $100\text{m}\times 100\text{m}$ , σε έδαφος ειδικής αντίστασης  $1\text{k}\Omega\text{m}$

Στη συνέχεια παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα από τη βιβλιογραφία [18]:

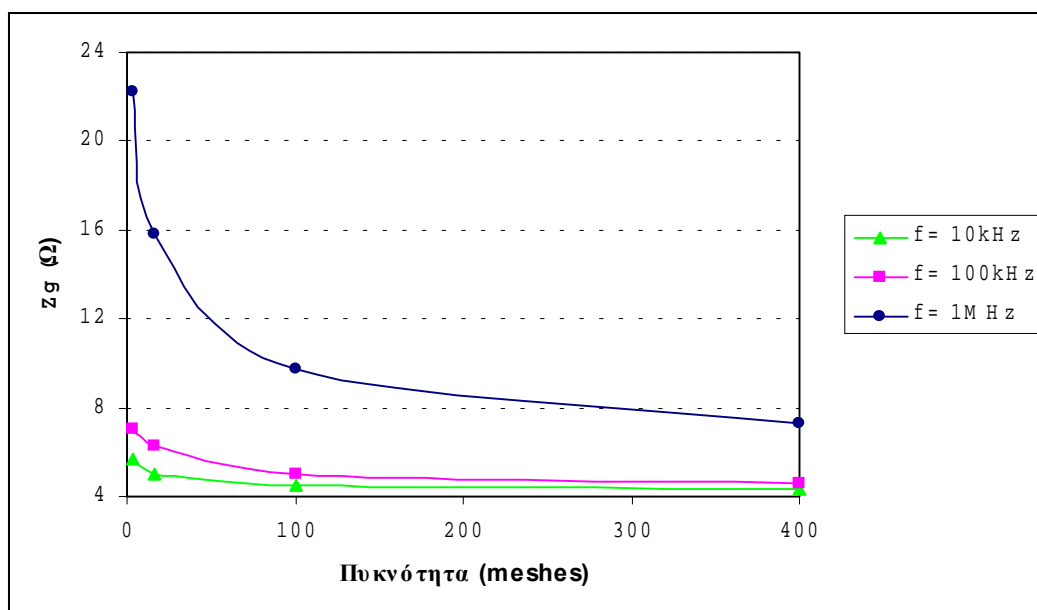


**Διάγραμμα 6.5:** Μεταβολή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της συχνότητας του ρεύματος σφάλματος για τετραγωνικό πλέγμα,  $100\text{m}\times 100\text{m}$ , σε έδαφος ειδικής αντίστασης  $1\text{k}\Omega\text{m}$

[18]

Παρατηρούμε ότι αυξανόμενη η πυκνότητα πλέγματος προκαλεί μείωση στην τιμή της σύνθετης αντίστασης γείωσης. Η επίδραση αυτή της πυκνότητας πλέγματος στην σύνθετη αντίσταση γείωσης γίνεται εντονότερη για συχνότητες μεγαλύτερες των  $100\text{kHz}$ . Η διαπίστωση αυτή γίνεται φανερή στο *Διάγραμμα 6.6*, όπου παρατηρούμε ότι σε συχνότητες

άνω των 100kHz η κλίση της καμπύλης σύνθετης αντίστασης – πυκνότητα πλέγματος αυξάνεται.



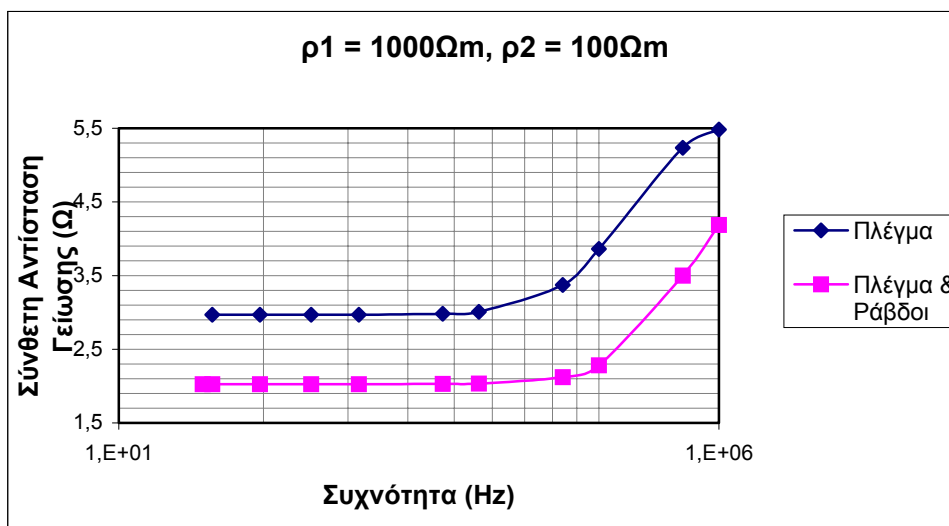
**Διάγραμμα 6.6:** Μεταβολή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης γείωσης συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος για τετραγωνικό πλέγμα, 100m×100m, σε έδαφος ειδικής αντίστασης 1kΩm

## 6.4 Ράβδοι Γείωσης και Συχνότητα

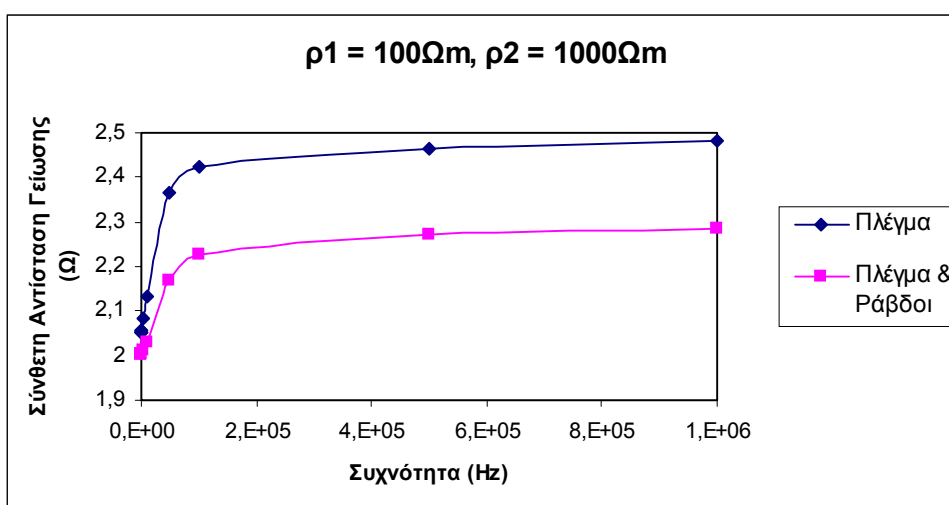
### 6.4.1 Προσθήκη ράβδων σε πλέγμα 100m × 100m σε διστρωματικό έδαφος

Εξετάζουμε τετραγωνικό πλέγμα 100m×100m σε διστρωματικό έδαφος ειδικής αντίστασης άνω στρώματος 1000Ωm, πάχους 10m και υποκείμενου στρώματος 100Ωm (Διάγραμμα 6.7). Προσθέτουμε ράβδους στις τέσσερις γωνίες του πλέγματος, μήκους 15m. Εξετάζουμε επίσης την απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης για τετραγωνικό πλέγμα 100m×100m σε διστρωματικό έδαφος ειδικής αντίστασης άνω στρώματος 100Ωm, πάχους 10m και υποκείμενου στρώματος 1000Ωm (Διάγραμμα 6.8):. Συγκρίνουμε την απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης για σύστημα γείωσης πλέγματος και πλέγματος – ράβδων στις δύο περιπτώσεις διστρωματικού εδάφους (Διαγράμματα 6.7-6.8) και όπως ήταν αναμενόμενο η προσθήκη των ράβδων γείωσης επιφέρει σημαντική μείωση στην σύνθετη αντίσταση γείωσης, στην περίπτωση που το μήκος των ράβδων είναι τέτοιο ώστε να φτάνουν στο στρώμα με τη μικρότερη ειδική αντίσταση. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σε υψηλές συχνότητες η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη. Συγκεκριμένα, στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρούμε ότι σε χαμηλές συχνότητες η διαφορά στην σύνθετη αντίσταση που επιτυγχάνεται με την προσθήκη των ράβδων είναι 1Ω, ενώ σε υψηλές

συχνότητες φτάνει τα 1,7Ω. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογεί την ονομασία των ράβδων γείωσης ως «υψηλής συχνότητας» ηλεκτροδία και τη χρήση τους σε συστήματα γείωσης για τη μελέτη μεταβατικών φαινομένων [19].



Διάγραμμα 6.7: Απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης

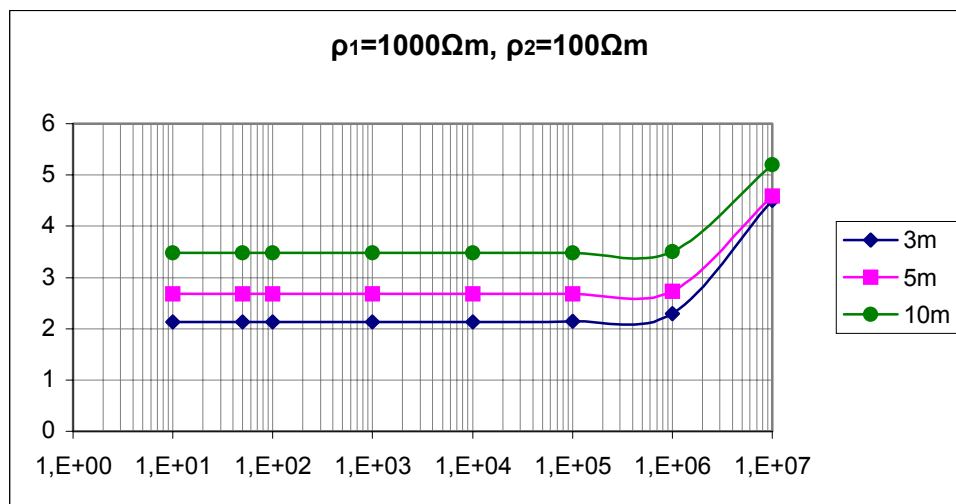


Διάγραμμα 6.8: Απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης

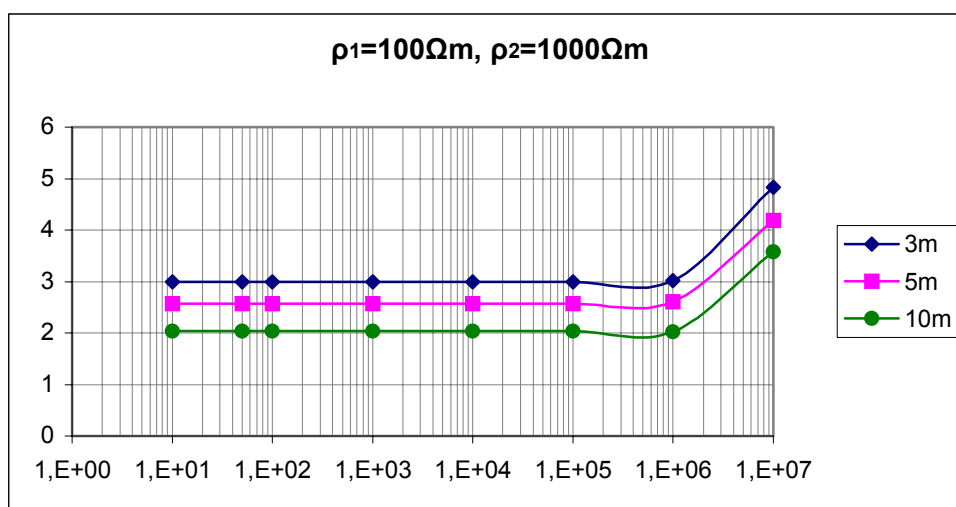
#### 6.4.2 Πλέγμα 100m×100m με ράβδους σε διστρωματικό έδαφος μεταβλητού πάχους

Εξετάζουμε τετραγωνικό πλέγμα 100m×100m σε διστρωματικό έδαφος ειδικής αντίστασης άνω στρώματος 1000Ωm, πάχους 3, 5 και 10m και υποκείμενου στρώματος 100Ωm (Διάγραμμα 6.9). Προσθέτουμε ράβδους στις τέσσερις γωνίες του πλέγματος, μήκους 5m.

Εξετάζουμε επίσης την απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης για το ίδιο πλέγμα γείωσης με ράβδους, σε διστρωματικό έδαφος ειδικής αντίστασης άνω στρώματος  $100\Omega\text{m}$ , πάχους 3, 5 και 10m και υποκείμενου στρώματος  $1000\Omega\text{m}$  (Διάγραμμα 6.10).



Διάγραμμα 6.9: Απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης πλέγματος  $100\text{m} \times 100\text{m}$



Διάγραμμα 6.10: Απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης πλέγματος  $100\text{m} \times 100\text{m}$

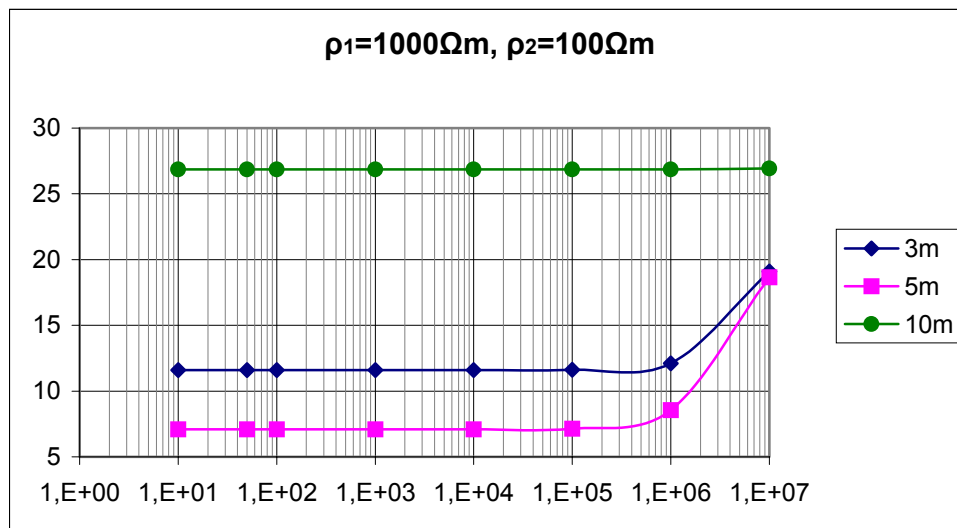
Όπως και παραπάνω παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις όπου οι ράβδοι φτάνουν στο στρώμα εδάφους με τη μικρότερη ειδική αντίσταση, η συνολική αντίσταση γείωσης μειώνεται. Επιπλέον, η μείωση αυτή γίνεται μεγαλύτερη όταν το μήκος των ράβδων που βρίσκονται μέσα στο στρώμα με τη χαμηλότερη ειδική αντίσταση αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει στην πρώτη περίπτωση, Διάγραμμα 6.7, όταν το μήκος της κάθε ράβδου που βρίσκεται μέσα στο δεύτερο στρώμα αυξάνεται από 1m (πάχος επάνω στρώματος 5m) σε 3m (πάχος επάνω στρώματος 3m). Σε ανάλογα συμπεράσματα οδηγούμαστε από την

παρατήρηση του *Διαγράμματος 6.8*, όπου το μέγιστο μήκος ράβδου στο στρώμα με χαμηλή ειδική αντίσταση παρατηρείται για πάχος του επάνω στρώματος ίσο με 10m.

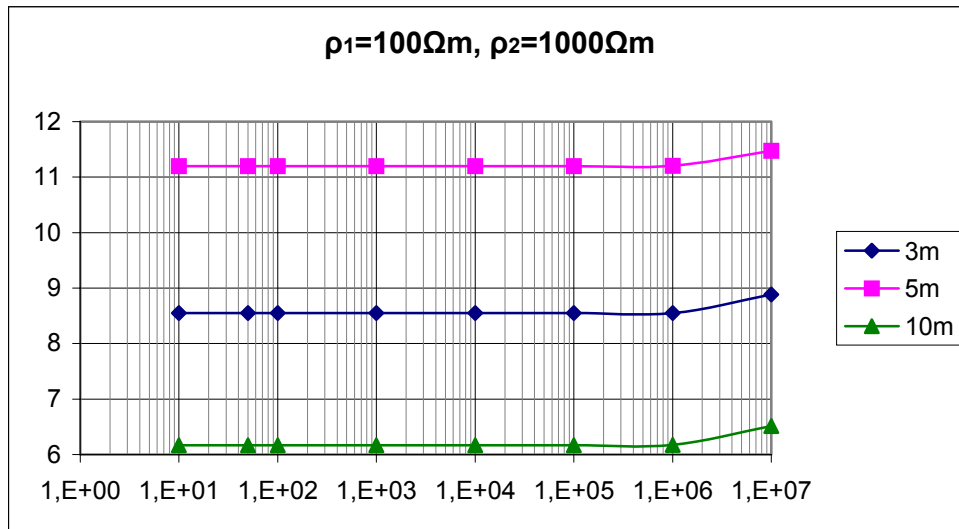
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε επίσης ότι η αντίσταση γείωσης δεν είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης εδάφους, όπως ίσως θα περίμενε κανείς. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ανομοιομορφία του εδάφους. Συγκεκριμένα, η σχέση της αντίστασης γείωσης με την ειδική αντίσταση εδάφους είναι αναλογική αποκλειστικά σε ομοιόμορφα εδάφη. Στην περίπτωση διστρωματικού εδάφους οι προσεγγιστικές σχέσεις που συνδέουν την αντίσταση γείωσης με την ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος εδάφους είναι οι *Σχέσεις 8.2* και *8.3*, από τις οποίες φαίνεται πως για διστρωματικό έδαφος ο υπολογισμός της αντίστασης γείωσης είναι πολύπλοκος και η εξάρτησή της από την ειδική αντίσταση εδάφους δεν είναι αναλογική.

#### 6.4.3 Πλέγμα 10m×10m με ράβδους σε διστρωματικό έδαφος μεταβλητού πάχους

Εξετάζουμε το ίδιο πρόβλημα της περίπτωσης 6.4.2. για μικρότερο πλέγμα, διαστάσεων 10m×10m. Συγκρίνουμε την απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης για τα δύο διστρωματικά μοντέλα εδάφους (*Διαγράμματα 6.11-6.12*):



Διάγραμμα 6.11: Απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης πλέγματος 10m×10m



Διάγραμμα 6.12: Απόκριση συχνότητας της σύνθετης αντίστασης γείωσης πλέγματος 10m×10m

Τα συμπεράσματα για την αντίσταση γείωσης σε σχέση με το είδος του διστρωματικού εδάφους και το πάχος του επάνω στρώματος είναι ανάλογα με αυτά της περίπτωσης 6.4.2. Επίσης η απόκριση συχνότητας είναι παρόμοια. Σημειώνουμε όμως ότι συγκρίνοντας την αντίσταση γείωσης των πλεγμάτων 10m×10m και 100m×100m παρατηρούμε μείωσή της αυξανόμενων των διαστάσεων πλέγματος. Σημαντικό είναι να επισημάνουμε ακόμα ότι η επίδραση του πάχους του επάνω στρώματος εδάφους στην αντίσταση γείωσης είναι σαφώς εντονότερη στην περίπτωση μικρού πλέγματος σε σχέση με τη συμπεριφορά της αντίστασης γείωσης μεγαλύτερου πλέγματος στις ίδιες μεταβολές. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι πλέγματα μεγάλων διαστάσεων παρουσιάζουν μια γενικά μικρή και σταθερή αντίσταση γείωσης σε σχέση με πλέγματα μικρών διαστάσεων. Το συμπέρασμα αυτό έχει εφαρμογή στην περίπτωση κατά την οποία λόγω καιρικών μεταβολών η ειδική αντίσταση εδάφους αλλάζει και ταυτόχρονα μεταβάλλεται το θεωρούμενο μοντέλο εδάφους. Επομένως, επιλέγοντας πλέγμα μεγάλων διαστάσεων μπορούμε να πούμε πως εγγυόμαστε σταθερότητα και αξιοπιστία από την άποψη της ασφάλειας.

## 6.5 Παρατηρήσεις:

Στα Διαγράμματα 6.1 και 6.4 καθώς και στον Πίνακα 6.1 παρατηρούμε διαφορές σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα και τον πίνακα της βιβλιογραφίας [18] στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων ( $f > 1\text{MHz}$ ). Ο λόγος είναι η χρήση διαφορετικών εφαρμογών του υπολογιστικού πακέτου CDEGS για την έκδοση αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα στο παρόν κεφάλαιο οι υπολογισμοί έγιναν με χρήση της εφαρμογής MALZ (βλ. Κεφάλαιο 5), ενώ στη

βιβλιογραφία με τη χρήση των εφαρμογών FFTSES και HIFREQ. Η εφαρμογή FFTSES έχει τη δυνατότητα υπολογισμού του μετασχηματισμού Fourier μιας κυματομορφής, για παράδειγμα κεραυνικού ρεύματος. Τα αποτελέσματα για το φάσμα της κυματομορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις εφαρμογές MALZ και HIFREQ για τον υπολογισμό τάσεων και ρευμάτων και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αντίστοιχα κατά τη μεταβατική περίοδο. Η απόκλιση που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα και πίνακες οφείλεται στη μεγαλύτερη ακρίβεια της εφαρμογής HIFREQ σε υψηλές συχνότητες, της τάξης των δεκάδων MHz, σε σχέση με την εφαρμογή MALZ της οποίας το εύρος συχνοτήτων είναι από DC έως 1MHz. Οι υπολογισμοί μας επεκτάθηκαν έως τα 10MHz για λόγους σύγκρισης με τις αντίστοιχες τιμές της βιβλιογραφίας [18]. Πρέπει όμως να τονισθεί ότι το φάσμα των συχνοτήτων που έχει ένας κεραυνός είναι μικρότερο του 1MHz [32].



## Μελέτη Συστήματος Γείωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η εκτίμηση της αντίστασης γείωσης, του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους και της τάσης επαφής για το σύστημα γείωσης που περιγράφεται στη βιβλιογραφία [27]. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με το πακέτο λογισμικού CDEGS (βλ. Κεφάλαιο 5). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα στη βιβλιογραφία [27].

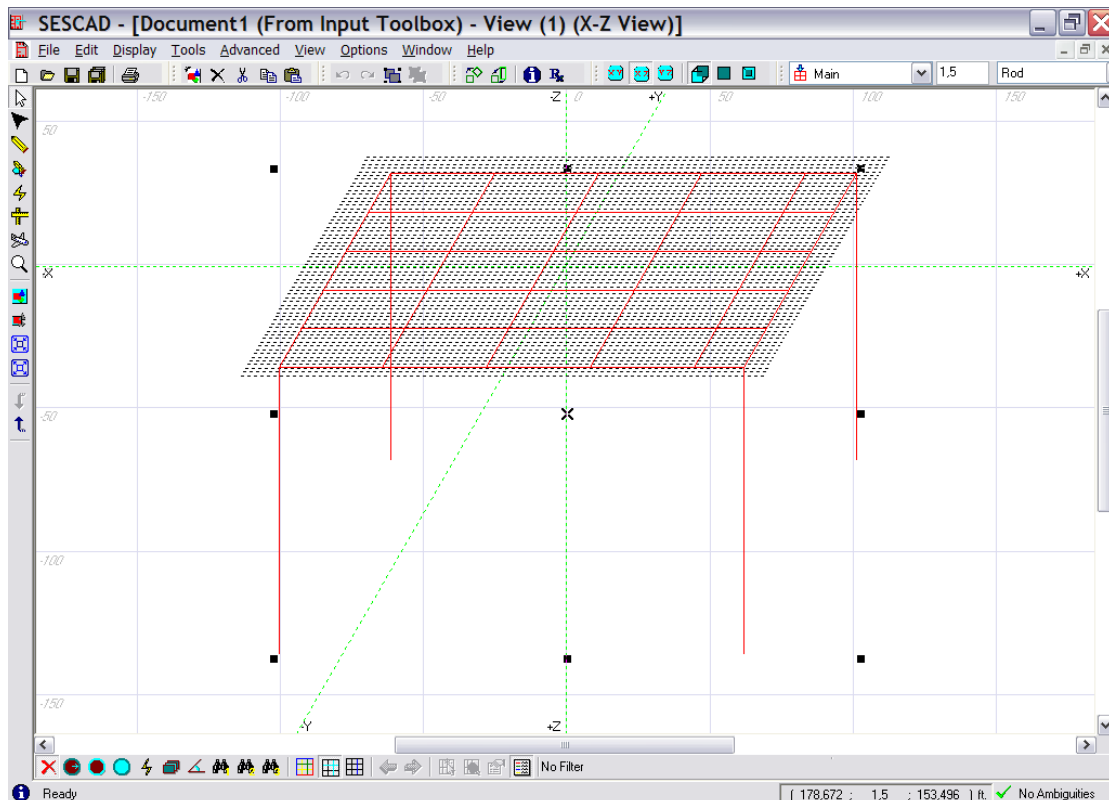
### 7.1 Περιγραφή Συστήματος Γείωσης

Εξετάζουμε την περίπτωση του υποσταθμού West Davenport στη Florida. Η ειδική αντίσταση εδάφους έχει μετρηθεί με τη μέθοδο Wenner όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία [27] και προσεγγίζεται από τρία μοντέλα (Πίνακας 7.1).

Μοντέλο Εδάφους	A/A Στρώματος	Ειδική Αντίσταση ( $\Omega\text{m}$ )	Πάχος Στρώματος (ft)	Πάχος Στρώματος (m)
Διστρωματικό	1	3257	33,3	10
	2	157	$\infty$	$\infty$
Πολυστρωματικό 1	1	3100	3,3	1
	2	4000	10	3
	3	3000	23	7
	4	4000	10	3
	5	75	$\infty$	$\infty$
Πολυστρωματικό 2	1	3100	3.3	1
	2	4000	10	3
	3	3000	23	7
	4	1400	10	3
	5	124	$\infty$	$\infty$

Πίνακας 7.1

Για τις τρεις αυτές περιπτώσεις υπολογίζουμε την αντίσταση γείωσης συστήματος γείωσης το οποίο αποτελείται από πλέγμα και τέσσερις ράβδους όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.1:



**Εικόνα 7.1**

Οι διαστάσεις του πλέγματος είναι 160×156 ft ( 48×47m) και το μήκος της ράβδου 100 ft (30m). Το profile έχει οριστεί ώστε να επεκτείνεται 10 ft (3m) εκτός του πλέγματος [20]. Το πλέγμα είναι τοποθετημένο σε βάθος 1.5 ft (0,5m) και το profile σε μηδενικό βάθος, καθώς στη συνέχεια μελετάμε το δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους.

## 7.2 Αντίσταση Γείωσης

Με τη βοήθεια του προγράμματος CDEGS γίνεται προσομοίωση του συστήματος γείωσης στις συνθήκες που περιγράφονται, για τρεις περιπτώσεις:

1. Απλός βρόχος
2. Πλέγμα χωρίς ράβδους
3. Πλέγμα με ράβδους

Τα αποτελέσματα για την αντίσταση γείωσης σε Ω καταγράφονται στον Πίνακα 7.2.

<i>Μοντέλο</i> <i>Σύστημα</i> <i>Γείωσης</i>	<i>Μοντέλο</i>		
	Διστρωματικό	Πολυστρωματικό 1	Πολυστρωματικό 2
Απλός Βρόχος	31,5	33,7	32,8
Πλέγμα χωρίς ράβδους	17,1	19,5	17,5
Πλέγμα με ράβδους	2,6	1,6	2,4

Πίνακας 7.2 – Αντίσταση Γείωσης

Στη συνέχεια παρατίθεται ο αντίστοιχος πίνακας της βιβλιογραφίας [27] ο οποίος περιλαμβάνει επιπλέον τις μετρήσεις που διεξήχθησαν για τον καθορισμό της ειδικής αντίστασης:

<i>Μοντέλο</i> <i>Σύστημα</i> <i>Γείωσης</i>	<i>Μοντέλο</i>			Μετρήσεις
	Διστρωματικό	Πολυστρωματικό 1	Πολυστρωματικό 2	
Απλός Βρόχος	31,9	35,0	34,9	32,3
Πλέγμα χωρίς ράβδους	17,2	20,3	20,3	17,0
Πλέγμα με ράβδους	2,6	1,5	2,4	2,9

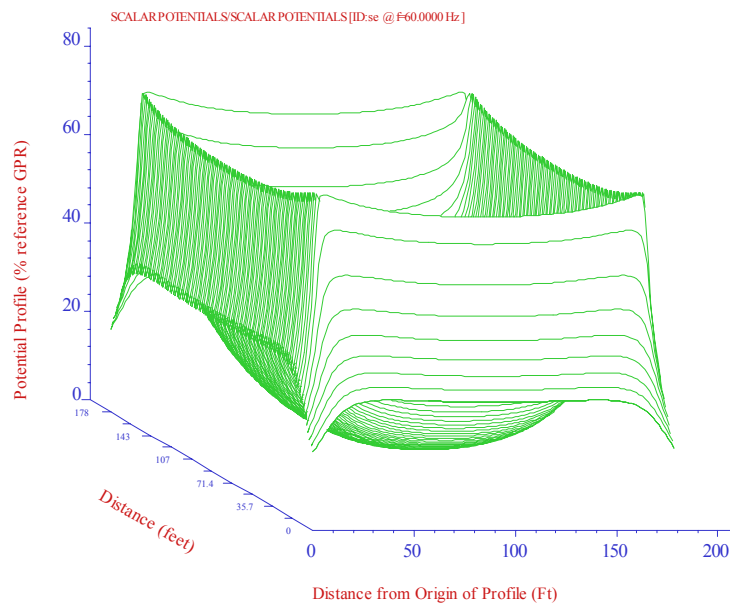
Πίνακας 7.3 – Αντίσταση Γείωσης

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα τις μετρήσεις είναι το διστρωματικό. Επιπλέον, πρέπει να επισημάνουμε τη σημαντική μείωση της αντίστασης γείωσης με την προσθήκη των ράβδων γείωσης, η οποία όμως εξαρτάται από τη σχέση του μήκους της ράβδου με το βάθος του στρώματος υψηλής ειδικής αντίστασης. Συγκεκριμένα, μείωση της αντίστασης γείωσης παρατηρείται μόνο στην περίπτωση όπου οι ράβδοι

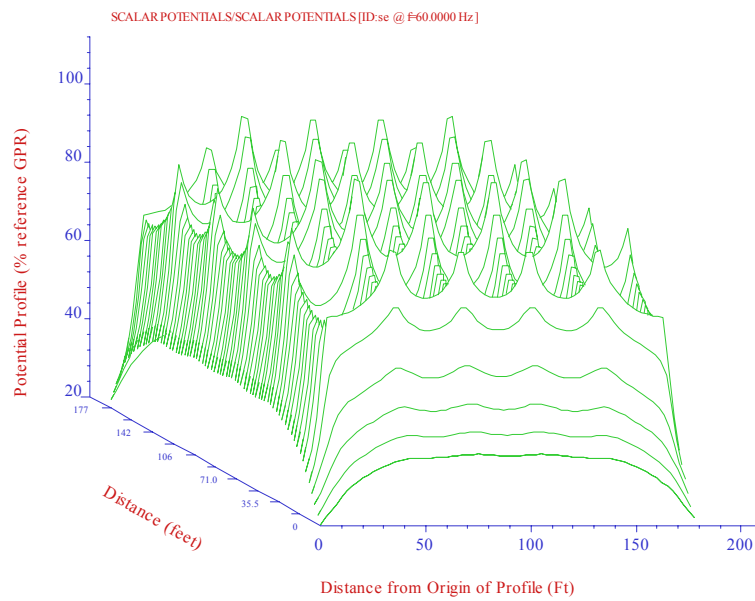
φτάνουν στο στρώμα με τη μικρότερη ειδική αντίσταση [27] (βάθος 33.3 ft (10m) για διστρωματικό μοντέλο και 46.6 ft (14m) για τα πολυστρωματικά μοντέλα).

### 7.3 Δυναμικό στην Επιφάνεια του Εδάφους

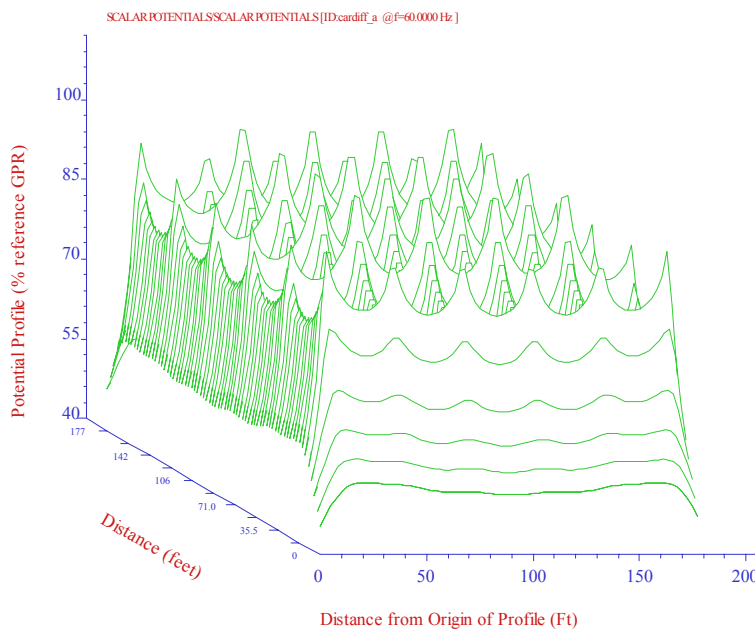
Θεωρώντας διστρωματικό μοντέλο εδάφους υπολογίζουμε το δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους για τις τρεις μορφές του συστήματος γείωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται (Διαγράμματα 7.1-7.3) σε τρισδιάστατη απεικόνιση:



Διάγραμμα 7.1: Δυναμικό στην Επιφάνεια του Εδάφους - Απλός Βρόχος

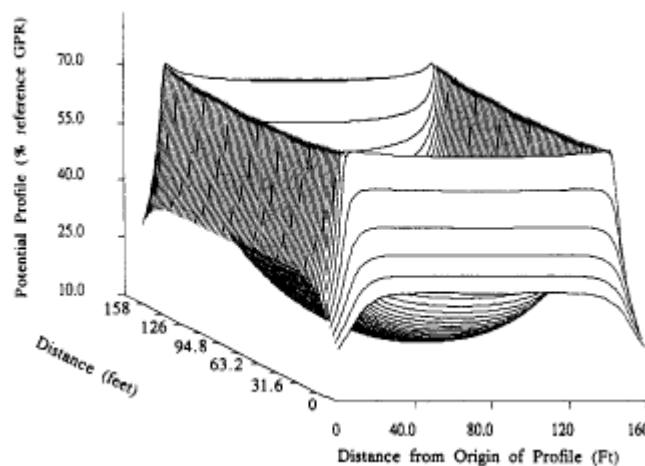


**Διάγραμμα 7.2: Δυναμικό στην Επιφάνεια του Εδάφους - Πλέγμα χωρίς ράβδους**

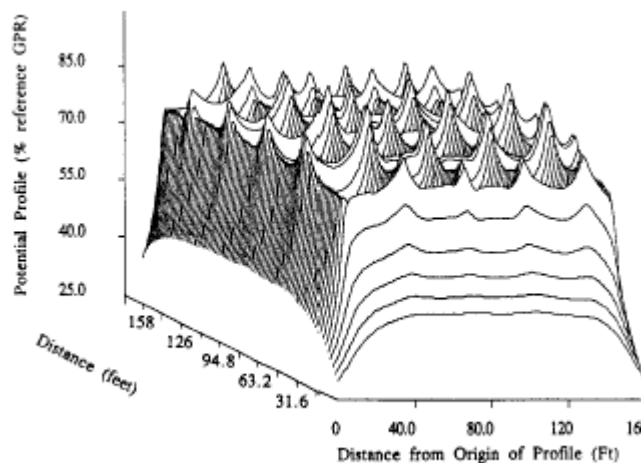


**Διάγραμμα 7.3: Δυναμικό στην Επιφάνεια του Εδάφους - Πλέγμα με ράβδους**

Στη βιβλιογραφία [27] παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα των 7.1 και 7.3:



Διάγραμμα 7.4: Δυναμικό στην Επιφάνεια του Εδάφους - Απλός βρόχος [27]



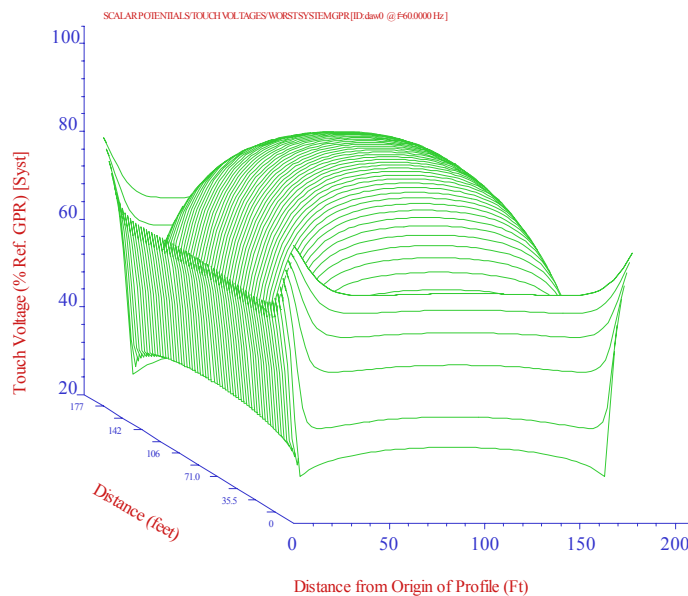
Διάγραμμα 7.5: Δυναμικό στην Επιφάνεια του Εδάφους - Πλέγμα με ράβδους [27]

Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους σαν ποσοστό (%) του GPR και στον οριζόντιο η απόσταση των σημείων υπολογισμού από την αρχή του profile. Παρατηρούμε ότι η μορφή των διαγραμμάτων της βιβλιογραφίας [27] και της προσομοίωσης είναι παρόμοια, ενώ οι αριθμητικές τιμές του δυναμικού παρουσιάζουν μια μικρή απόκλιση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα *Διαγράμματα 7.4* και *7.5* προέρχονται από προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε το 1991 με παλαιότερη έκδοση του προγράμματος CDEGS. Από το 1993 και ύστερα οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για την προσομοίωση συστημάτων γείωσης έγιναν πιο αποτελεσματικοί και ακριβείς. Για το λόγο αυτό τα *Διαγράμματα 7.1 – 7.3* θεωρούνται πιο κοντά στην πραγματικότητα.

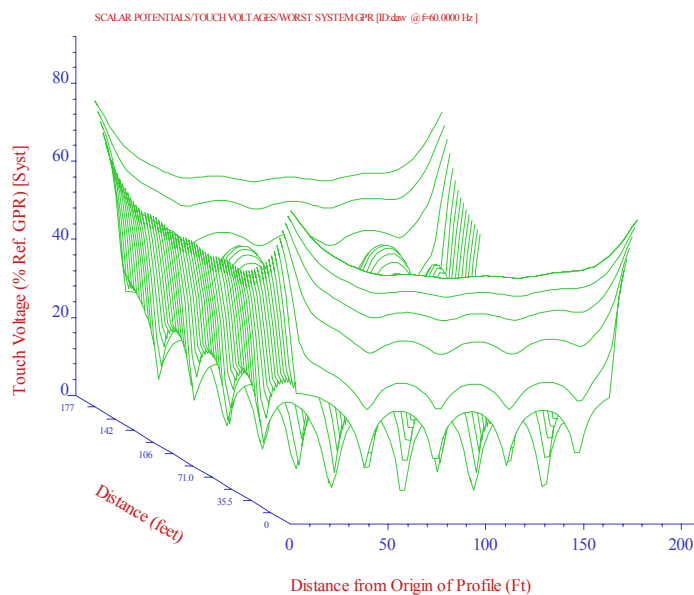
## 7.4 Τάση Επαφής

Η τάση επαφής υπολογίζεται ως τη διαφορά του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους από το GPR. Επομένως, αναμένουμε το διάγραμμα της τάσης επαφής να έχει μορφή αντίστροφη αυτής των παραπάνω γραφικών παραστάσεων.

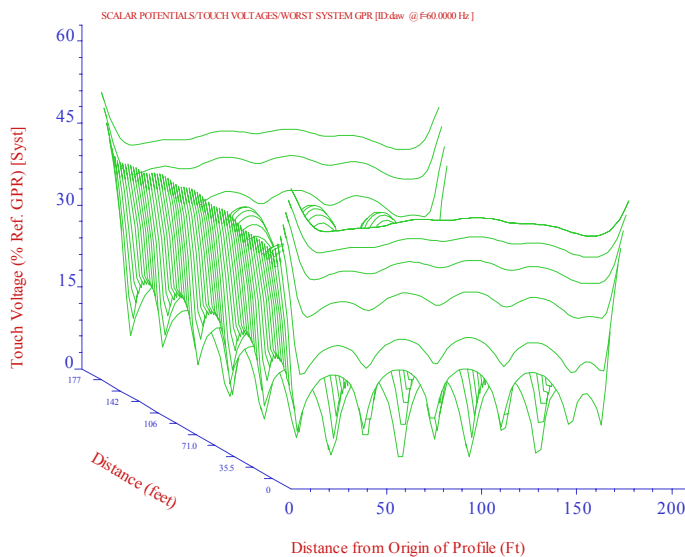
Στη συνέχεια στα *διαγράμματα 7.6-7.8* παρουσιάζεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση η τάση επαφής, σαν ποσοστό του υψηλότερου GPR που μετρείται στο σύστημα γείωσης, για τις τρεις περιπτώσεις πλέγματος, θεωρώντας διστρωματικό έδαφος.



**Διάγραμμα 7.6: Τάση επαφής στην Επιφάνεια του Εδάφους - Απλός Βρόχος**



**Διάγραμμα 7.7: Τάση επαφής στην Επιφάνεια του Εδάφους - Πλέγμα χωρίς ράβδους**



**Διάγραμμα 7.8: Τάση επαφής στην Επιφάνεια του Εδάφους – Πλέγμα με ράβδους**

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της τάσης επαφής είναι η  $E_m$ , όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 1, δηλαδή η τάση επαφής στους τέσσερις γωνιακούς βρόχους του πλέγματος. Η τάση αυτή μειώνεται ελάχιστα με την αύξηση της πυκνότητας πλέγματος, ενώ με την προσθήκη των ράβδων η μείωση αυτή είναι σημαντική (25 ποσοστιαίες μονάδες).



Η τάση επαφής εκφράζεται στα παραπάνω διαγράμματα σαν ποσοστό του GPR. Στην περίπτωση όπου είναι γνωστό το μέρος του ρεύματος σφάλματος που διατρέχει το σύστημα γείωσης, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της τάσης επαφής σε Volt και η σύγκρισή της με τα επιτρεπτά από τον κανονισμό [1] όρια, με τη βοήθεια της επιλογής Safety (βλ. *Κεφάλαιο 5*).



# Μελέτη Συστήματος Γείωσης Υποσταθμού

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η εκτίμηση του μοντέλου εδάφους σε περιοχή όπου προβλέπεται η εγκατάσταση υποσταθμού, καθώς και η μελέτη της δυνατότητας σχεδιασμού συστήματος γείωσης. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει με το πακέτο λογισμικού CDEGS (βλ. Κεφάλαιο 3).

## 8.1 Μοντελοποίηση Εδάφους

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Wenner (βλ. Κεφάλαιο 3). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Στη μια διεύθυνση τα αποτελέσματα της μέτρησης είναι τα ακόλουθα:

$\alpha$ [m]	2	4	8	12	16	20	30
$R$ [ $\Omega$ ]	17,80	2,10	1,82	2,01	2,22	2,48	4,62
$\rho$ [ $\Omega$ m]	223,68	52,78	91,48	151,55	223,18	311,65	870,85

Πίνακας 8.1

Τα αποτελέσματα της μέτρησης στην κάθετη της προηγούμενης διεύθυνσης είναι:

$\alpha$ [m]	2	4	8	12	16	20	30
$R$ [ $\Omega$ ]	4,19	1,46	1,51	1,98	2,10	2,19	3,21
$\rho$ [ $\Omega$ m]	52,65	36,69	75,90	149,29	211,12	275,20	605,07

Πίνακας 8.2

Στην εφαρμογή RESAP του προγράμματος προσομοίωσης, εισάγουμε το μέσο όρο των δύο μετρήσεων της αντίστασης R είτε της ειδικής αντίστασης  $\rho$ , καθώς και τις τιμές της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων μέτρησης,  $a$ .

Στη συνέχεια επιλέγουμε το μοντέλο εδάφους που θεωρούμε ότι προσεγγίζει καλύτερα το έδαφος όπου έγιναν οι μετρήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού διστρωματικού και τριστρωματικού μοντέλου με τη μέθοδο Levenberg – Marquardt και διστρωματικού μοντέλου με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων [29].

### 8.1.1 Levenberg - Marquardt

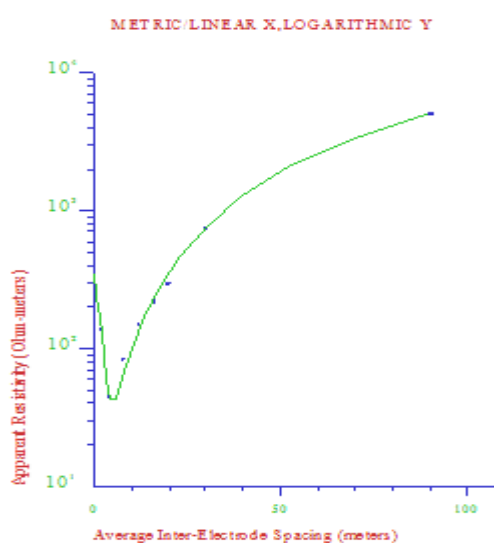
#### 8.1.1.1 Διστρωματικό Μοντέλο

Η εφαρμογή RESAP υπολογίζει το πάχος του στρώματος και την ειδική αντίσταση των δύο στρωμάτων του μοντέλου:

Διστρωματικό Μοντέλο		
Α\Α Στρώματος	Ειδική Αντίσταση $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Πάχος (m)
1	341	3,69
2	3000	Άπειρο

Πίνακας 8.3

Η μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με το βάθος παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.1.



Διάγραμμα 8.1: Διστρωματικό Μοντέλο (Levenberg – Marquardt)

Οι μετρήσεις συμβολίζονται με κουκκίδες χρώματος μπλε ενώ το μοντέλο με συνεχή πράσινη γραμμή.

Η εκτιμώμενη απόκλιση από τις πειραματικές μετρήσεις είναι 14%.

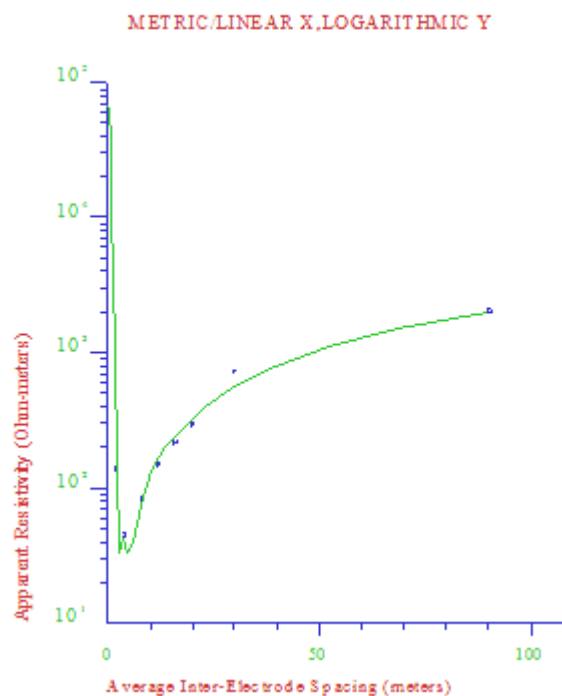
#### 8.1.1.2 Τριστρωματικό Μοντέλο

Η εφαρμογή RESAP υπολογίζει το πάχος κάθε στρώματος και την ειδική αντίσταση των τριών στρωμάτων του μοντέλου:

Τριστρωματικό Μοντέλο		
Α\Α Στρώματος	Ειδική Αντίσταση $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Πάχος (m)
1	3000	0,38
2	16,77	0,95
3	3000	Άπειρο

Πίνακας 8.4

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος παρουσιάζεται στο *διάγραμμα 8.2*.



Διάγραμμα 8.2: Τριστρωματικό Μοντέλο (Levenberg – Marquardt)

Η εκτιμώμενη απόκλιση από τις πειραματικές μετρήσεις είναι 14%.

### 8.1.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

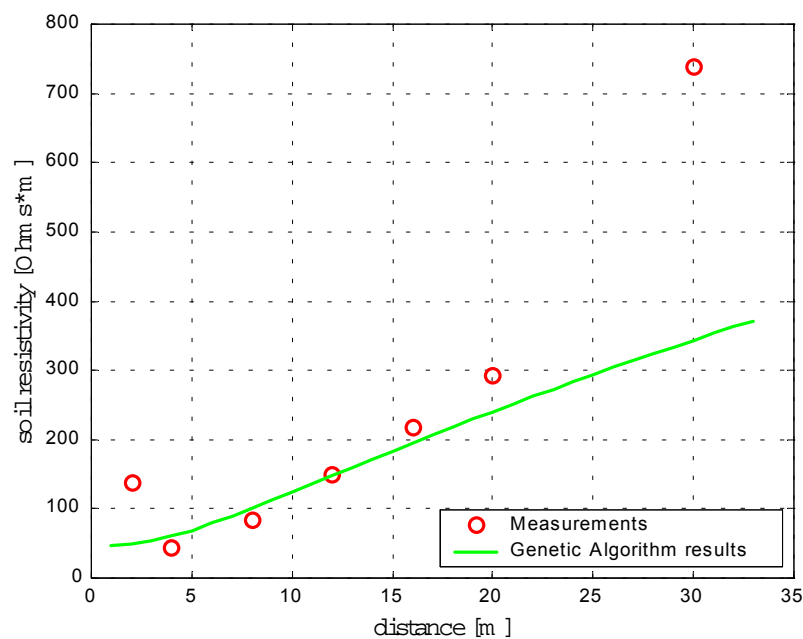
#### 8.1.2.1 Διστρωματικό Μοντέλο

Η εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων [29, 32] υπολογίζει το πάχος του επάνω στρώματος και την ειδική αντίσταση των στρωμάτων του μοντέλου:

Διστρωματικό Μοντέλο		
Α\Α Στρώματος	Ειδική Αντίσταση $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Πάχος (m)
1	46,38	5,06
2	3000	Άπειρο

Πίνακας 8.5

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος παρουσιάζεται στο *διάγραμμα 8.3*.



Διάγραμμα 8.3: Διστρωματικό Μοντέλο (Γενετικοί Αλγόριθμοι)

Η εκτιμώμενη απόκλιση από τις πειραματικές μετρήσεις είναι 13%.

### 8.1.3 Επιλογή μοντέλου εδάφους

Η απόκλιση του μοντέλου από τις πειραματικές τιμές ορίζεται ως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των μετρήσεων και δίνεται από τη σχέση:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (\rho_m - \rho_c)^2}{n}} \quad (8.1)$$

όπου

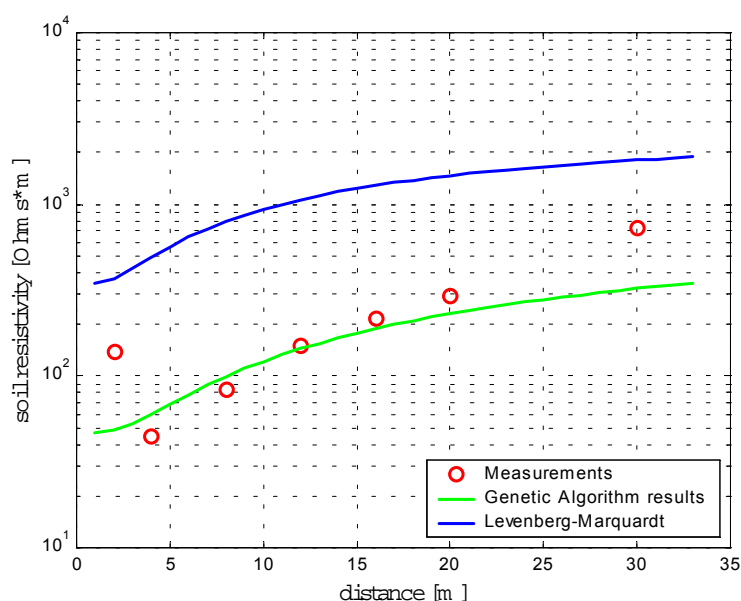
$\rho_m$  η μετρούμενη ειδική αντίσταση

$\rho_c$  η υπολογιζόμενη από το μοντέλο

$n$  το πλήθος των μετρήσεων

Πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι η τιμή 3000 Ωm στους παραπάνω πίνακες προέκυψε ως η μέγιστη τιμή ειδικής αντίστασης που παρατηρείται στη περιοχή κατασκευής του υποσταθμού και αναφέρεται στον Πίνακα 3.1 του Κεφαλαίου 3. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν έδιναν για κάποια στρώματα τιμές ειδικής αντίστασης υπερβολικές που για το λόγο αυτό αντικαταστάθηκαν με την τιμή 3000Ωm.

Η επιλογή του μοντέλου εδάφους γίνεται με κριτήριο την τυπική απόκλιση από τις μετρήσεις. Επομένως, ακριβέστερο θεωρείται το διστρωματικό μοντέλο που προέκυψε από την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων. Η ακρίβεια του μοντέλου γενετικών αλγορίθμων [29, 32] σε σχέση με το μοντέλο της μεθόδου Levenberg – Marquardt φαίνεται στο Διάγραμμα 8.5. Με το δεδομένο αυτό προχωρούμε στη μελέτη κατάλληλου συστήματος γείωσης.



Διάγραμμα 8.4: Διστρωματικό μοντέλο (Levenberg – Marquardt)

## 8.2 Σύστημα Γείωσης

Η απαίτηση για το εν λόγω σύστημα γείωσης είναι η αντίσταση γείωσης να προσεγγίζει το  $1\Omega$  καθώς επίσης να ικανοποιούνται τα όρια ασφαλείας για τη βηματική και την τάση επαφής. Η διαθέσιμη έκταση για την εγκατάσταση του συστήματος γείωσης έχει διαστάσεις  $120m \times 100m$ . Ακολουθούν θεωρητική μελέτη του προβλήματος καθώς και πρακτική μελέτη με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου CDEGS.

### 8.2.1 Θεωρητική Προσέγγιση

#### 8.2.1.1 Ράβδοι

Το μοντέλο εδάφους είναι διστρωματικό. Η χρήση ράβδων στο σύστημα γείωσης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, τοποθετώντας τις ράβδους αποκλειστικά στο επάνω στρώμα ή τοποθετώντας τις ράβδους έτσι ώστε να διαπερνούν και τα δύο στρώματα.

##### 8.2.1.1.1 Μία Ράβδος

Η αντίσταση γείωσης καθεμιάς ράβδου που περιορίζεται στο επάνω στρώμα δίνεται από την ακόλουθη σχέση [25]:

$$R = R_o + R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \cdot \left( \ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right) + \frac{\rho_1}{2\pi l} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{2} \ln \frac{nh/l+1}{nh/l-1} \quad (8.2)$$

όπου

$R_o$  η αντίσταση μιας ράβδου σε ομοιογενές έδαφος, ειδικής αντίστασης  $\rho_1$

$R_a$  η επιπλέον αντίσταση λόγω της παρουσίας του δεύτερου στρώματος

$l$  το μήκος της ράβδου

$\alpha$  η ακτίνα της ράβδου

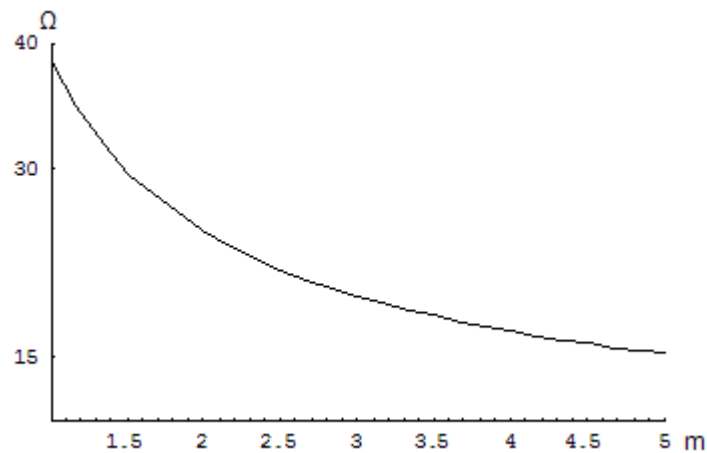
$h$  το πάχος του επάνω στρώματος

$\rho_1$  η αντίσταση του επάνω στρώματος

$k$  ο λόγος  $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_1 + \rho_2)$

Το πάχος του επάνω στρώματος στο μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιούμε είναι 5.06m. Επομένως, το μήκος των ράβδων μπορεί να φτάνει τα 5m. Με τη βοήθεια του προγράμματος Mathematica (Version 4.0) υπολογίζουμε την αντίσταση καθεμιάς ράβδου συναρτήσει του μήκους της για ακτίνα ράβδου 17mm:





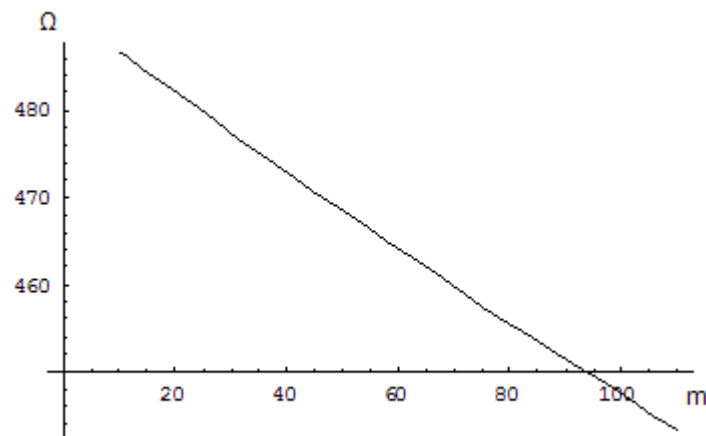
**Διάγραμμα 8.5 : Ράβδος στο επάνω στρώμα εδάφους**

Παρακάτω εξετάζουμε διάφορες διατάξεις ράβδων για τη μείωση της αντίστασης.

Στην περίπτωση μιας ράβδου που διαπερνά και τα δύο στρώματα η αντίσταση δίνεται από τη σχέση [25]:

$$R = R_o + R_a = \frac{\rho_1}{2\pi l} \cdot \frac{1+k}{1-k+2k\frac{h}{l}} \left[ \left( \ln \frac{2l}{\alpha} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \frac{2nh+l}{(2n-2)h+l} \right] \quad (8.3)$$

Για ακτίνα ράβδου ίση με 17mm και μήκος ράβδου από 5 έως 100m η αντίσταση της ράβδου μεταβάλλεται όπως στο διάγραμμα που ακολουθεί:



**Διάγραμμα 8.6 : Ράβδος έως το δεύτερο στρώμα εδάφους**

Όπως είναι φανερό η τοποθέτηση ράβδων που διαπερνούν και τα δύο στρώματα δεν έχει αποτέλεσμα στην περίπτωση που εξετάζουμε.

### 8.2.1.1.2 Διατάξεις Ράβδων

Όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία [25] υπάρχουν διατάξεις ράβδων με τις οποίες επιτυγχάνεται μείωση της συνολικής αντίστασης γείωσης. Συγκεκριμένα, οι ράβδοι μπορούν να τοποθετηθούν παράλληλα σε ευθεία γραμμή, στις κορυφές τριγώνου, σε κύκλο, στην περίμετρο τετραγώνου καθώς και σε διάταξη συμπαγούς τετραγώνου. Συγκεκριμένα, στην τελευταία περίπτωση τοποθετούνται  $n$  σειρές από  $n$  ράβδους παράλληλα και επομένως ο συνολικός αριθμός ράβδων της διάταξης είναι  $N = n^2$ .

Στη βιβλιογραφία [25] δίνονται εξισώσεις που συνδέουν το λόγο της αντίστασης της διάταξης,  $R_{\text{διατ}}$ , προς την αντίσταση της ράβδου,  $R_{\text{ραβδ}}$ , με το λόγο της ακτίνας προς την απόσταση μεταξύ των ράβδων,  $\alpha = r / d$ :

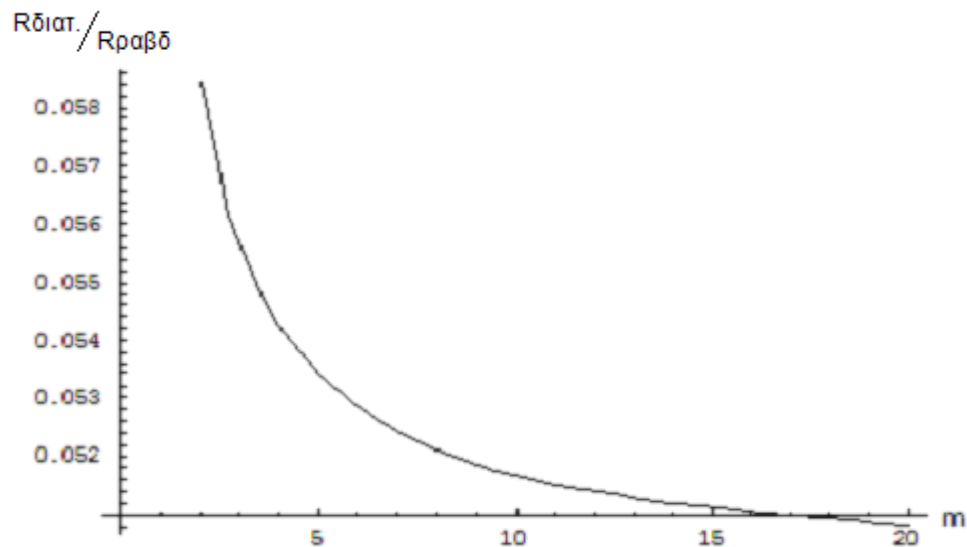
Είδος Διάταξης	Λόγος $R_{\text{διατ}}/R_{\text{ραβδ}}$
Δύο παράλληλες ράβδοι	$\frac{1+\alpha}{2}$
Τρεις παράλληλες ράβδοι	$\frac{2+\alpha-4\alpha^2}{6-7\alpha}$
Τέσσερις παράλληλες ράβδοι	$\frac{12+16\alpha-21\alpha^2}{48-40\alpha}$
Ράβδοι στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου	$\frac{1+2\alpha}{3}$
$N$ ισαπέχουσες ράβδοι στην περίμετρο τετραγώνου	$\frac{1+k\alpha}{N}$
Ισαπέχουσες ράβδοι σε κύκλο	$\frac{1+0.5\frac{r}{R}+\frac{r}{R}\sum_{s=1}^{N/2-1}\sec\frac{s\cdot\pi}{N}}{N}$
$N$ ράβδοι σε συμπαγές τετράγωνο	$\frac{1+k\alpha}{N}$

Πίνακας 8.6

Η παράμετρος  $k$  δίνεται από πίνακες, ανάλογα με το είδος της διάταξης και το πλήθος των ράβδων. Η παράμετρος  $R$  είναι η ακτίνα του κύκλου στην περιφέρεια του οποίου τοποθετούνται οι ράβδοι.

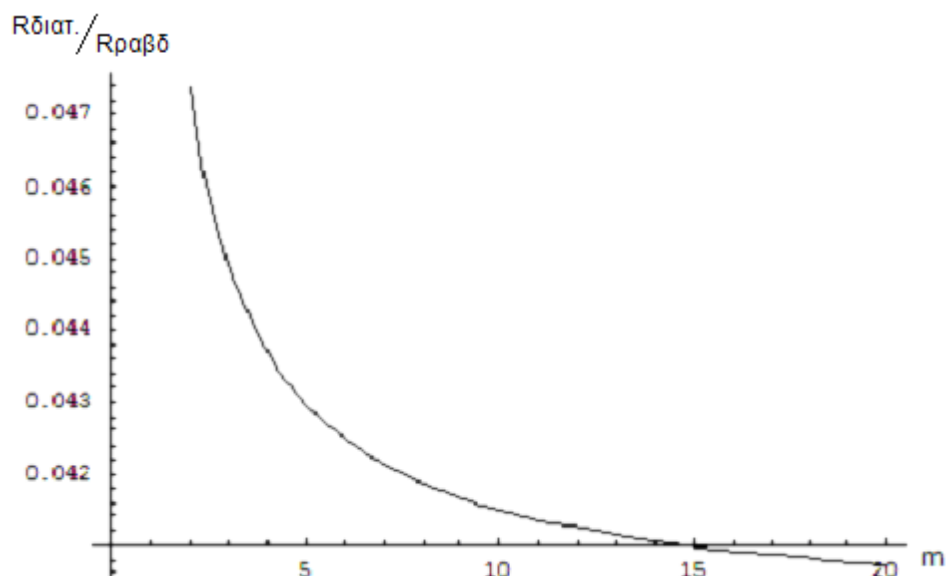
Στο Διάγραμμα 8.4 η τιμή της αντίστασης ράβδου μήκους 5m είναι ίση με 18Ω. Η επιθυμητή συνολική αντίσταση είναι περίπου 1Ω. Επομένως, ο λόγος της αντίστασης της

διάταξης προς την αντίσταση κάθε ράβδου είναι  $1/18$ . Επιλύοντας τις παραπάνω εξισώσεις ως προς την απόσταση μεταξύ των ράβδων,  $d$ , οι τιμές που προκύπτουν είναι μάλλον μικρές, με μέγιστη  $0.5\text{m}$  για την τελευταία περίπτωση, συμπαγούς τετραγώνου και πλήθους ράβδων 25. Θεωρούμε την ακτίνα της ράβδου  $17\text{mm}$ . Πρέπει να σημειώσουμε ότι για τη διάταξη σε κύκλο τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά. Με τοποθέτηση 20 ράβδων σε κύκλο, ο λόγος των αντιστάσεων συναρτήσει της ακτίνας του κύκλου μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 8.7 : 20 ράβδοι σε κύκλο

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη τείνει να σταθεροποιηθεί στην τιμή  $0,05$  για το λόγο αντιστάσεων. Το αντίστοιχο διάγραμμα με τοποθέτηση 25 ράβδων σε κύκλο είναι το 8.8.



Διάγραμμα 8.8: 25 ράβδοι σε κύκλο

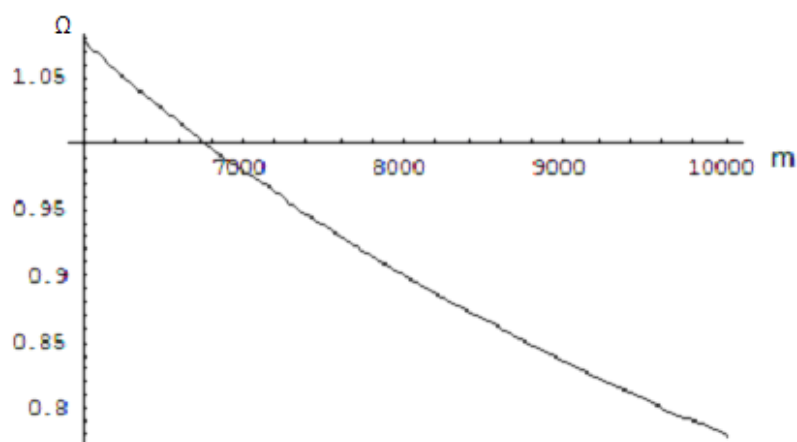
Παρατηρούμε ότι ο λόγος αντιστάσεων μειώνεται με την αύξηση του πλήθους των ράβδων. Στο πρακτικό μέρος της μελέτης παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την κυκλική διάταξη ράβδων.

### 8.2.1.2 Ταινία

Θεωρούμε ταινία μήκους  $l$  και ισοδύναμης ακτίνας  $a$  σε διστρωματικό έδαφος ειδικής αντίστασης επάνω στρώματος  $\rho_1$ , πάχους  $h$  και λόγου  $k = \rho_2 - \rho_1 / \rho_1 + \rho_2$ . Η αντίσταση γείωσης,  $R$ , δίνεται από τη σχέση [25]:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left\{ \left[ \ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[ 4 \ln \left( \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2nh}{l}\right)^2 + 1}}{2n \frac{h}{l}} \right) + \frac{8nh}{l} - 4 \sqrt{\left(\frac{2nh}{l}\right)^2 + 1} \right] \right\} \quad (8.4)$$

Με χρήση του προγράμματος Mathematica και δεδομένου του μοντέλου εδάφους προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα της αντίστασης γείωσης συναρτήσει του μήκους της ταινίας:



**Διάγραμμα 8.9:** Αντίσταση γείωσης ταινίας συναρτήσει του μήκους της

Παρατηρούμε ότι η αντίσταση γείωσης είναι μικρότερη του  $1\Omega$  για μήκος ταινίας μεγαλύτερο των 6800m. Υπενθυμίζεται ότι η ταινία τοποθετείται στο έδαφος σε ευθεία γραμμή κι όχι με τη μορφή πλέγματος.

Δεδομένου ότι το διαθέσιμο για την εγκατάσταση του συστήματος γείωσης οικόπεδο έχει διαστάσεις  $120\text{m} \times 100\text{m}$  είναι αδύνατη η υλοποίηση της παραπάνω διάταξης.

## 8.2.2 Μελέτη αντίστασης με το υπολογιστικό πακέτο CDEGS

### 8.2.2.1 Ράβδοι

Τοποθετούμε μία ράβδο μήκους 5m κατακόρυφα μέσα στο έδαφος. Επειδή το πάχος του επάνω στρώματος είναι επίσης 5m, η ράβδος ξεκινά από την επιφάνεια.

Η αντίσταση γείωσης προκύπτει ίση με 14,7Ω. Παρατηρούμε απόκλιση από τη Σχέση 8.2, που οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι παραπάνω σχέσεις υπολογισμού της αντίστασης είναι προσεγγιστικές.

Δοκιμάζουμε τη διάταξη 16 ράβδων σε κύκλο ακτίνας 10m. Η αντίσταση που υπολογίζεται είναι ίση με 5,65Ω. Παρατηρούμε σημαντική διαφορά από τα αποτελέσματα του Διαγράμματος 8.6. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στην ανομοιογένεια του εδάφους η οποία δε λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό των σχέσεων του Πίνακα 8.6.

### 8.2.2.2 Ταινία

Τοποθετούμε ταινία μήκους 6800m σε βάθος 1m μέσα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης υπολογίζεται σε 1.1Ω. Και πάλι παρατηρούμε μια μικρή απόκλιση από τη θεωρητική τιμή της αντίστασης.

### 8.2.2.3 Πλέγμα γείωσης

Τοποθετούμε πλέγμα ταινίας 60mm×6mm, διαστάσεων 120m×100m σε βάθος 1m μέσα στο έδαφος. Το πλέγμα είναι ένας απλός βρόχος, συνολικού μήκους ταινίας 440m. Η υπολογιζόμενη αντίσταση γείωσης είναι 2,95Ω. Εξετάζουμε παρακάτω πώς επηρεάζεται η τιμή της αντίστασης αυτής από τις μεταβολές ορισμένων παραμέτρων του πλέγματος.

#### ➤ Πυκνότητα

Αυξάνουμε το πλήθος των αγωγών σε 5 οριζόντιους και 5 κάθετους, διατηρώντας τις διαστάσεις του αρχικού πλέγματος. Η αντίσταση μειώνεται σε 2,89Ω. Αυξάνοντας την πυκνότητα σε 25×25 αγωγούς η αντίσταση μειώνεται σε 2,86Ω. Παρατηρούμε ότι η επίδραση της πυκνότητας πλέγματος στην αντίσταση γείωσης είναι αμελητέα.

#### ➤ Διάμετρος ταινίας

Αυξάνουμε το μέγεθος της ταινίας σε 100×8mm. Η αντίσταση γείωσης μειώνεται σε 2,94Ω. Παρατηρούμε ότι και η διάμετρος έχει ασήμαντη επίδραση στην αντίσταση γείωσης.

➤ *Βάθος πλέγματος*

Τοποθετούμε το αρχικό πλέγμα σε βάθος 0.5m και 1.5m. Η αντίσταση υπολογίζεται σε 2,96Ω και 2,94Ω αντίστοιχα. Η μείωση της αντίστασης με αύξηση του βάθους είναι αμελητέα.

➤ *Ράβδοι*

Προσθέτουμε τέσσερις ράβδους στις γωνίες του πλέγματος, κατακόρυφα, από το 1m έως 4m βάθος. Η μείωση της αντίστασης είναι 0.05Ω.

➤ *Διαστάσεις πλέγματος*

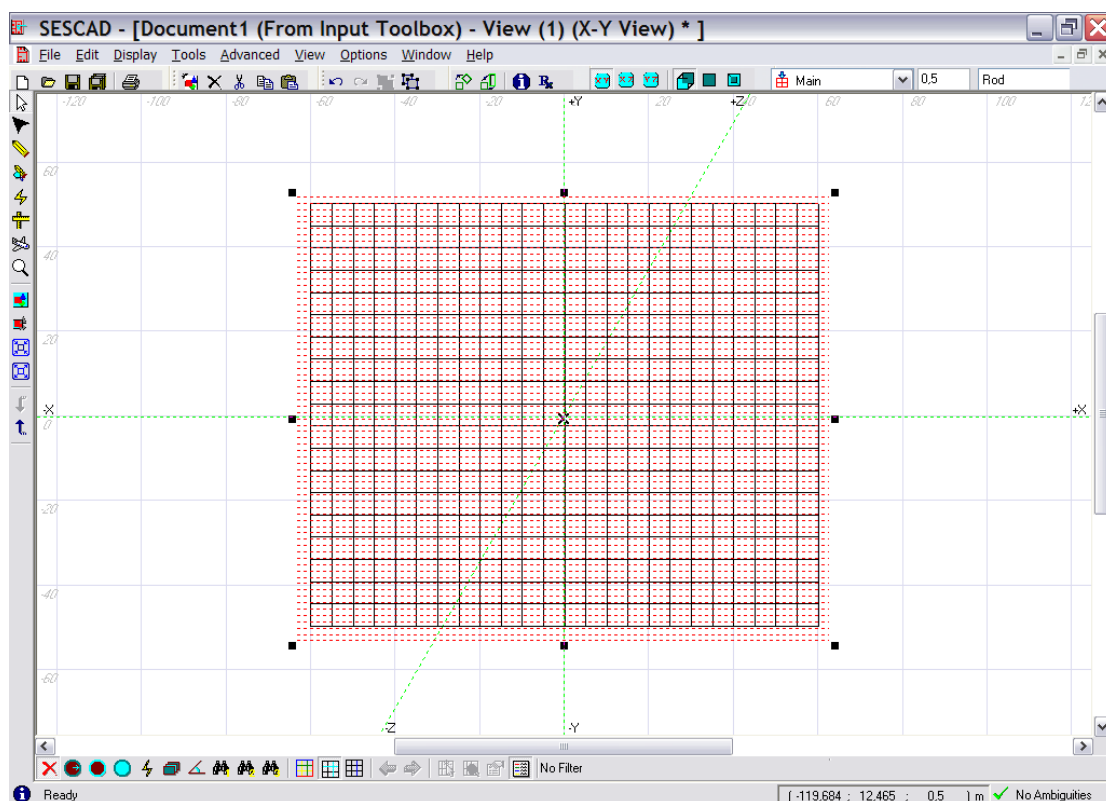
Τοποθετούμε πλέγμα διαστάσεων 70×70m σε βάθος 1m. Η αντίσταση που υπολογίζεται είναι 3,46Ω. Αυξάνουμε τις διαστάσεις σε 100m×100m m. Η αντίσταση μειώνεται σε 2,99Ω.

Από την παραπάνω μελέτη παρατηρούμε ότι η αντίσταση γείωσης επηρεάζεται σημαντικά μόνο από τη μεταβολή των διαστάσεων του πλέγματος. Για το λόγο αυτό, στον έλεγχο ασφάλειας που ακολουθεί θεωρούμε πλέγμα με τις μέγιστες διαστάσεις λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη έκταση του οικοπέδου εγκατάστασης του υποσταθμού. Επιπλέον, θεωρούμε την πυκνότητα και το βάθος του πλέγματος σύμφωνα με τις οδηγίες για γειωτή ταινίας και πλέγματος όπως παρουσιάζονται στα εδάφια 2.3.2 και 2.3.5.

### **8.2.3 Σχεδίαση συστήματος γείωσης – Έλεγχος Ασφάλειας**

#### *8.2.3.1 Πλέγμα*

Θεωρούμε πλέγμα διαστάσεων 120m×100m, πυκνότητας 20×25 τοποθετημένο σε βάθος 1m το οποίο αποτελείται από ταινία διαστάσεων 60×6mm. Υπολογίζουμε τη βηματική και την τάση επαφής σε σχέση με τα επιτρεπτά όρια τα οριζόμενα από το πρότυπο IEEE Std 80-2000. Ακολουθεί το σχήμα του πλέγματος γείωσης όπως ορίζεται στην εφαρμογή MALZ του προγράμματος CDEGS.



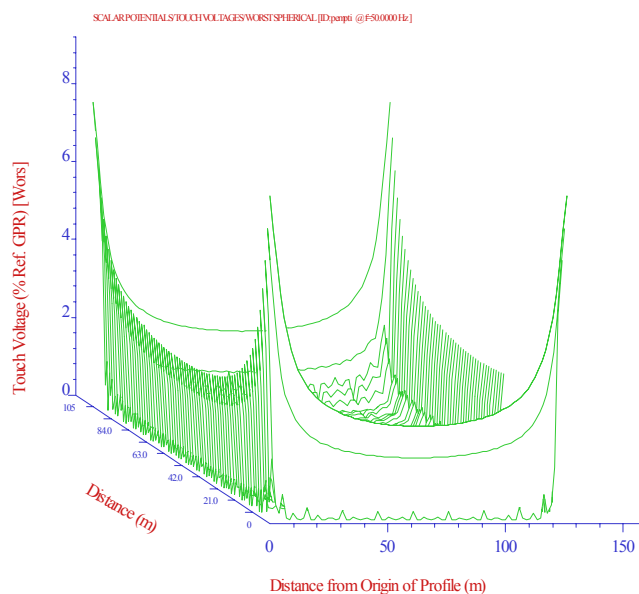
Εικόνα 8.1

Η βηματική και η τάση επαφής που υπολογίζονται συγκρίνονται με τα επιτρεπτά όρια τάσης. Τα όρια αυτά αναφέρονται στον πίνακα που ακολουθεί, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80 – 2000, θεωρώντας την αντίσταση σώματος  $1000\Omega$ , το βάρος σώματος  $50\text{kg}$ , τη συχνότητα σφάλματος  $50\text{Hz}$  και την ειδική αντίσταση εδάφους ίση με  $46,38\Omega\text{m}$ :

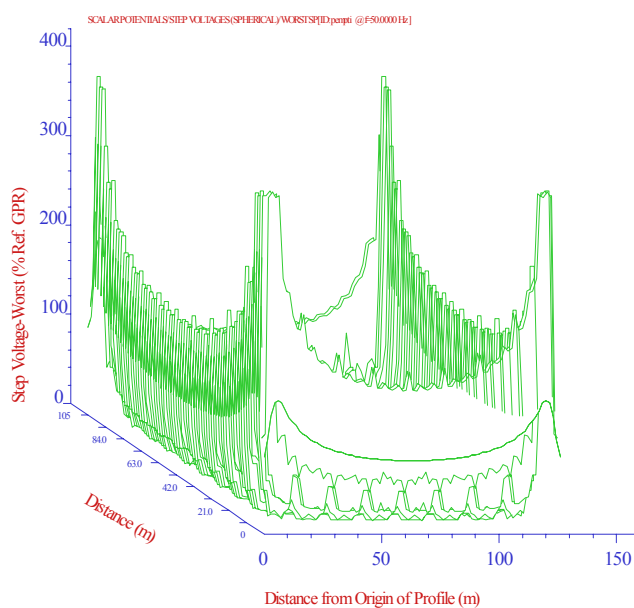
Ειδική αντίσταση υλικού επιφάνειας ( $\Omega\text{m}$ )	Χρόνος απόσβεσης σφάλματος						Αντίσταση ποδιού ( $\Omega$ )
	0,125 sec		0.250 sec		0,500 sec		
	Βηματική Τάση (Volt)	Τάση Επαφής (Volt)	Βηματική ή Τάση (Volt)	Τάση Επαφής (Volt)	Βηματική Τάση (Volt)	Τάση Επαφής (Volt)	
Χωρίς υλικό επιφάνειας	345,6	287,4	267,2	222,1	199,3	165,7	144,9
<b>500</b>	943,9	437,0	729,7	337,8	544,3	252,0	1261,4
<b>1000</b>	1597,0	600,2	1234,5	464,0	920,9	346,1	2480,0
<b>1500</b>	2249,8	763,4	1739,1	590,1	1297,3	440,2	3698,1
<b>2000</b>	2902,5	926,6	2243,6	716,3	1673,6	534,3	4916,0
<b>2500</b>	3555,1	1089,8	2748,1	842,4	2049,9	628,4	6133,8
<b>3000</b>	4207,8	1252,9	3252,6	968,5	2426,3	722,4	7351,6
<b>3500</b>	4860,4	1416,1	3757,1	1094,6	2802,6	816,5	8569,4
<b>4000</b>	5513,0	1579,2	4261,6	1220,7	3178,9	910,6	9787,1
<b>4500</b>	6165,6	1742,4	4766,0	1346,9	3555,2	1004,7	11004,9

Πίνακας 8.7

Τα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζουν την τάση επαφής και τη βηματική τάση σαν ποσοστό των επιτρεπτών ορίων (διάγραμμα 8.10 για 165,7V και διάγραμμα 8.11 για 199,3V) για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει υλικό επιφάνειας, ο χρόνος απόσβεσης σφάλματος είναι 0,5sec και θεωρούμε βάρος σώματος 50kg.



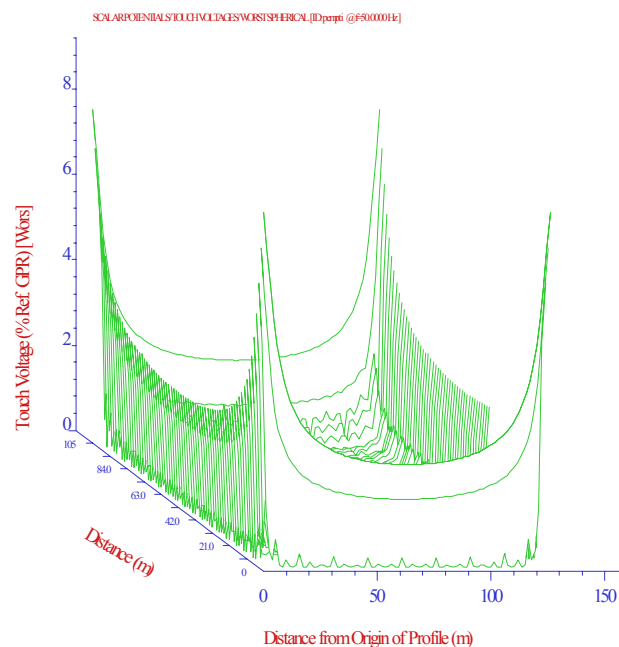
**Διάγραμμα 8.10: Τάση επαφής (% του επιτρεπτού ορίου) - πλέγμα**



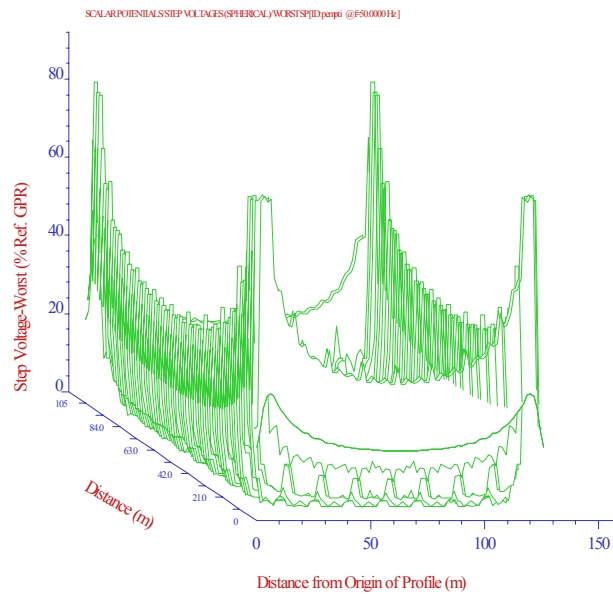
**Διάγραμμα 8.11 : Βηματική τάση (% του επιτρεπτού ορίου) - πλέγμα**



Παρατηρούμε ότι η βηματική τάση ξεπερνά κατά πολύ τα όρια ασφαλείας. Για το λόγο αυτό προσθέτουμε υλικό επιφάνειας (πχ χαλίκι) με τέτοια ειδική αντίσταση ώστε οι τάσεις, βηματική και επαφής, που αντιλαμβάνεται ένας άνθρωπος στην περιοχή του υποσταθμού κατά την εκδήλωση σφάλματος, να μειώνονται επαρκώς, σύμφωνα με τα όρια ασφαλείας. Στο *Διάγραμμα 8.10* παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της βηματικής τάσης επαφής εμφανίζεται στα όρια του profile (βλ. *Κεφάλαιο 5*) και ισούται με 370% του ελάχιστου ορίου ασφαλείας. Το profile ορίστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προγράμματος CDEGS ώστε να περικλείει το πλέγμα γείωσης σε απόσταση 3m γύρω από αυτό. Στον *Πίνακα 8.7* παρατηρούμε ότι το υλικό επιφάνειας που καθιστά το σύστημα γείωσης ασφαλές, δεδομένης της μέγιστης τιμής της βηματικής τάσης, πρέπει να έχει ειδική αντίσταση 1000Ωm. Με την τοποθέτηση του υλικού επιφάνειας οι τάσεις, επαφής και βηματική, εκφράζονται σαν ποσοστό των επιτρεπτών ορίων όπως φαίνεται στα *διαγράμματα 8.12 και 8.13*. Όπως παρατηρούμε στα *Διαγράμματα 8.12 και 8.13* οι τάσεις, επαφής και βηματική, είναι εντός των ορίων ασφαλείας και το σύστημα γείωσης κρίνεται πλέον ασφαλές.



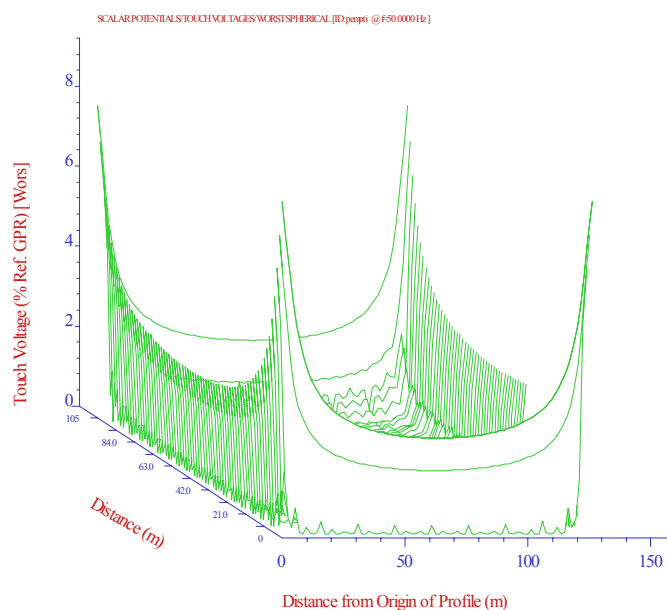
**Διάγραμμα 8.12 : Τάση επαφής – πλέγμα και υλικό επιφάνειας**



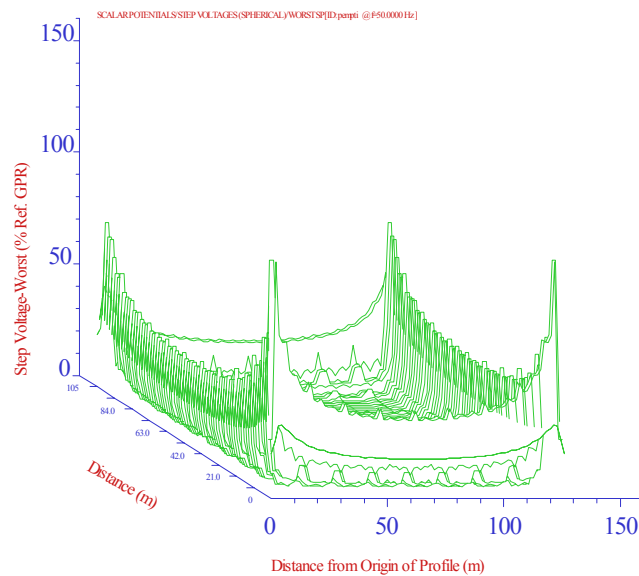
**Διάγραμμα 8.13 :** Βηματική τάση – πλέγμα και υλικό επιφάνειας

### 8.2.3.2 Πλέγμα με ράβδους

Εξετάζουμε τώρα την επίδραση των ράβδων στην ασφάλεια του συστήματος γείωσης. Τοποθετούμε τέσσερις ράβδους στις γωνίες του πλέγματος που μελετήσαμε παραπάνω. Η ακτίνα κάθε ράβδου είναι 17mm και το μήκος της 4m. Ακολουθούν τα διαγράμματα των τάσεων, επαφής (Διάγραμμα 8.14) και βηματικής (Διάγραμμα 8.15), σαν ποσοστό των ελάχιστων επιτρεπτόν ορίων (θεωρούμε ότι έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια υλικό ειδικής αντίστασης 1000Ωm):



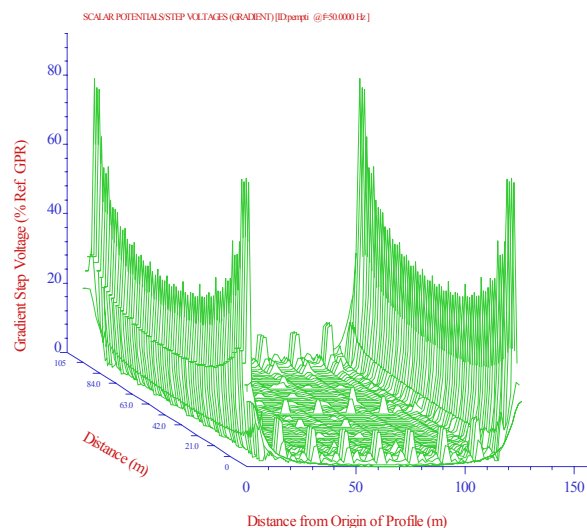
**Διάγραμμα 8.14:** Τάση επαφής – Πλέγμα με ράβδους και υλικό επιφάνειας



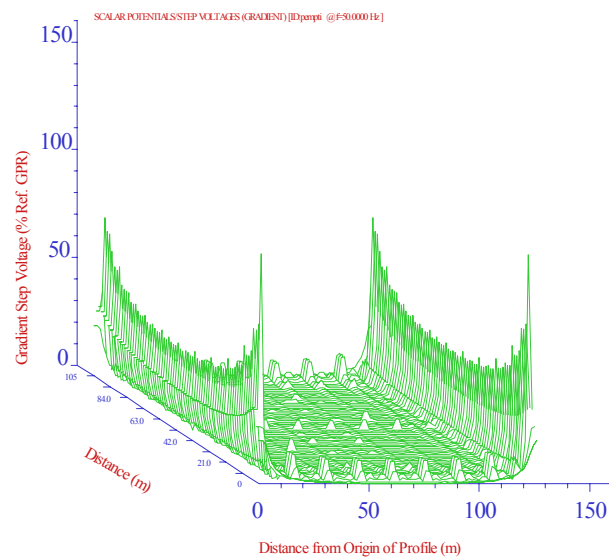
**Διάγραμμα 8.15 : Βηματική Τάση – Πλέγμα με ράβδους και υλικό επιφάνειας**

Παρατηρούμε ότι η βηματική τάση φτάνει μέχρι το 70% του ορίου ασφαλείας ενώ στην περίπτωση πλέγματος χωρίς ράβδους φτάνει το 80% του ίδιου ορίου.

Επιπλέον, παραθέτουμε την κλίση της βηματικής τάσης για τις δύο περιπτώσεις, πλέγματος (Διάγραμμα 8.16) και πλέγματος με ράβδους (Διάγραμμα 8.17):



**Διάγραμμα 8.16: Κλίση βηματικής τάσης – πλέγμα**



Διάγραμμα 8.17: Κλίση βηματικής τάσης – πλέγμα με ράβδους

Παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση ράβδων προκαλεί μείωση της βηματικής τάσης και της κλίσης της. Η μικρή κλίση της βηματικής τάσης υποδηλώνει την ομοιόμορφη κατανομή της βηματικής τάσης στην επιφάνεια. Με την προσθήκη ράβδων η βηματική τάση δεν παρουσιάζει έντονη αυξομείωση στην επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 8.15, σε αντίθεση με την περίπτωση πλέγματος χωρίς ράβδους όπου η βηματική τάση αυξάνεται απότομα στην περιοχή εκτός του πλέγματος (Διάγραμμα 8.13). Η τάση επαφής δεν υφίσταται σημαντική αλλαγή. Οδηγούμαστε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση ράβδων σε πλέγμα γείωσης προκαλεί άμβλυνση των απότομων αυξήσεων της βηματικής τάσης και καθιστά το σύστημα γείωσης περισσότερο ασφαλές.

#### 8.2.4 Συμπέρασμα

Σύμφωνα με τη μελέτη του εδάφους και της σχεδίασης ασφαλούς συστήματος γείωσης που πραγματοποιήθηκε προτείνουμε την κατασκευή συστήματος γείωσης που αποτελείται από πλέγμα ταινίας 60mm×6mm, διαστάσεων 120m×100m, πυκνότητας 20m×25m τοποθετημένο σε βάθος 1m και από τέσσερις ράβδους χαλκού, ακτίνας 17mm και μήκους 4m. Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη στρώματος χαλκιού ειδικής αντίστασης 1000Ωm, ώστε να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί ασφαλείας που ορίζονται από το πρότυπο IEEE Std 80 – 2000 [1].

## **Συμπεράσματα**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται αρχικά οι κανόνες βάσει των οποίων γίνεται ο σχεδιασμός συστημάτων γείωσης, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 80 – 2000 [1]. Γίνεται μελέτη της απόκρισης συχνότητας της σύνθετης αντίστασης του συστήματος γείωσης και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η σύνθετη αντίσταση γείωσης αυξάνεται με τη συχνότητα.
- Αύξηση της ειδικής αντίστασης εδάφους προκαλεί αναλογική αύξηση της σύνθετης αντίστασης στην περίπτωση όπου θεωρούμε ομοιόμορφο έδαφος και η συχνότητα του ρεύματος σφάλματος περιορίζεται σε μερικά kHz. Σε πολυστρωματικό έδαφος παρατηρείται μη αναλογική αύξηση. Το ίδιο συμβαίνει και σε υψηλές συχνότητες του ρεύματος σφάλματος, της τάξης του MHz.
- Αύξηση της επιφάνειας του πλέγματος γείωσης ή της πυκνότητάς του προκαλεί μείωση της σύνθετης αντίστασης γείωσης.
- Προσθήκη ράβδων στο πλέγμα γείωσης προκαλεί μείωση της σύνθετης αντίστασης όταν οι ράβδοι εισέρχονται και στο στρώμα με τη μικρότερη ειδική αντίσταση. Η μείωση αυτή γίνεται εντονότερη σε υψηλές συχνότητες, της τάξης του MHz.

Στη συνέχεια γίνεται μελέτη διαφόρων συστημάτων γείωσης (απλού βρόχου, πλέγματος και πλέγματος με ράβδους) ως προς τις τιμές της αντίστασης γείωσης, του δυναμικού στην επιφάνεια καθώς και της τάσης επαφής. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των ανωτέρω συστημάτων γείωσης είναι τα εξής:

- Η αύξηση της πυκνότητας πλέγματος προκαλεί μείωση του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους και περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή του.
- Η προσθήκη ράβδων στο πλέγμα προκαλεί μείωση της τάσης επαφής.

Τέλος, χρησιμοποιώντας πραγματικές μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους γίνεται η μελέτη της δομής του εδάφους και η σχεδίαση του βέλτιστου συστήματος γείωσης για την περιοχή όπου προβλέπεται η εγκατάσταση υποσταθμού. Από την αναλυτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Για τον προσδιορισμό του μοντέλου εδάφους η μέθοδος ελαχιστοποίησης που στηρίζεται στους γενετικούς αλγόριθμους κρίνεται ακριβέστερη της μεθόδου Levenberg – Marquardt η οποία χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα CDEGS.
- Δεδομένου του μοντέλου εδάφους παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση γείωσης δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα πλέγματος (μετά από κάποια πυκνότητα), τη διατομή των αγωγών του, το βάθος όπου τοποθετείται παρά μόνον από τις διαστάσεις του.
- Στη μελέτη ασφάλειας του πλέγματος κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη ράβδων στις γωνίες του με σκοπό τον περιορισμό απότομων αυξήσεων της βηματικής τάσης στα όρια του πλέγματος.
- Επιπλέον, αναγκαία κρίνεται και η προσθήκη χαλκικού υψηλής ειδικής αντίστασης προς μείωση των τάσεων επαφής και βηματικής.

Το λογισμικό (CDEGS) που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο αρωγό στη σχεδίαση των συστημάτων γείωσης. Σε μελλοντικές εργασίες θα μπορούσε να μελετηθεί η ακριβής επίδραση των στρωμάτων του εδάφους στην τιμή της αντίστασης του συστήματος γείωσης. Θα μπορούσε να διερευνηθεί η δυνατότητα εύρεσης απλών εμπειρικών τύπων που να συνδυάζει τις παραμέτρους του εδάφους και του συστήματος γείωσης για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης αλλά και της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής.

# Βιβλιογραφία

- [1] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80 – 1986), 2000.
- [2] Γεώργιος Φώτης, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2001.
- [3] Ηλιάννα-Λαμπρινή Μ. Κουγιουμτζή, “Προσομοίωση Συστημάτων Γείωσης σε Πολυστρωματικό Έδαφος”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002.
- [4] Προκόπης Χριστοδούλου, “Συστήματα Γείωσης. Θεωρητική προσέγγιση”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2000.
- [5] Ν. Χατζηαργυρίου: “Γειώσεις Αιολικών Πάρκων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”
- [6] Πέτρος Ντοκόπουλος: “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης”, Εκδόσεις Ζήτη 2<sup>η</sup> έκδοση, Θεσσαλονίκη 1992.
- [7] Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980.
- [8] Dalziel, C. F., and Mansfield, T. H., “Effect of frequency on perception currents”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.69, pp. 1161-1168, 1943.
- [9] Dalziel, C. F., Ogden E., and Abbott C. E., “Effect of frequency on let-go currents”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.65, pp. 579-585, 1123-1124, 1946.
- [10] Dalziel, C. F., “Dangerous electric currents”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.62, pp. 745-750, 1950.
- [11] Dalziel, C. F., and Lee, R. W., “Reevaluation of lethal electric currents”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.IGA-4, no. 5, pp. 467-476, Oct. 1968.
- [12] Biegelmeier, U. G., “Die Bedeutung der Z-Schwelle des Herzkammer Herzkammer flimmern für die Festlegung von Berührungspannungsgrenzen bei den Schutzmaßnahmen gegen elektrische Unfälle”, E&M, vol. 93, no. 1, pp.1-8, 1976.

- 
- [13] Biegelmeier, U. G., and Rotter, K., “Elektrische Widerstände und Ströme in Menschlichen Körper”, E&M, vol. 89, pp.104-109, 1971.
- [14] Dalziel, C. F., “Electric shock hazard”, IEEE Spectrum, pp. 41-50, Feb. 1972
- [15] Loucks, W. W., “A new approach to substation grounding”, Electrical News and Engineering”, May 15, 1954.
- [16] Sverak, J. G., “Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid; Part I – How good is the present IEEE method?” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 103, no. 1, pp. 7 – 25, Jan. 1984.
- [17] Schwartz, S. J., “Analytical expression for resistance of grounding systems”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 73, no. 13, part III – B, pp. 1011 – 1016, Aug. 1954.
- [18] Griffiths, H., Haddad, A., Harid, N., “Characterisation of Earthing Systems under High Frequency and Transient Conditions”,
- [19] EA TS-41-24, (Electricity Association, Technical Specification 41-24): “Guidelines for the Design, Installation, Testing and Maintenance of Main Earthing Systems in Substations” Electricity Association Services Limited, 1992.
- [20] SES, “How to ... Engineering Guide. A simple Substation Grounding Grid Analysis.”, 2002.
- [21] Βασιλική Θ. Κονταργύρη, “Κυκλωματική Επίλυση Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002.
- [22] Σπύρος Ποντίκης, “Επίδραση του Σημείου Έγχυσης Κεραυνικού Ρεύματος στη Μεταβατική Σύνθετη Αντίσταση Διαφόρων Πλεγμάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002.
- [23] Β. Κ. Παπαδιάς, “Εισαγωγή στην Τεχνική των Γειώσεων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”
- [24] Armstrong, H.R., “Grounding electrode characteristics from model tests”, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 1301 – 1306, Dec. 1953
- [25] Tag, G. F., “Earth Resistances”, George Newnes Ltd, London, 1964.
- [26] Περός Γ. Χάλαρης, “Γειώσεις – Νομοθεσία και Κανονισμοί”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων ”.



- 
- [27] F. Dawalibi, N. Barbeito, “Measurements and Computations of the Performance of Grounding Systems Buried in Multilayer Soils”, AIEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, Oct.. 1991.
- [28] Alamo J. L., “A comparison among eight techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.4, October 1993, pp.1890-1899.
- [29] I.F. Gonos, I. Stathopoulos, “Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Power Engineering Society – 2004 General Meeting, Denver, USA, June 6-10, 2004.
- [30] Electric Power Research Institute, “Transmission Line Grounding”. Vol.1 Research Project 1494-1. Report EL-2699.Principal Author F. Dawalibi., 1982.
- [31] Dawalibi F. P., Blattner C. J., “Earth resistivity measurement interpretation techniques”, IEEE Transaction on Apparatus and System, Vol.PAS 103, 1, February 1984, pp.374-382.
- [32] Ιωάννης Φ. Γκόνος, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.