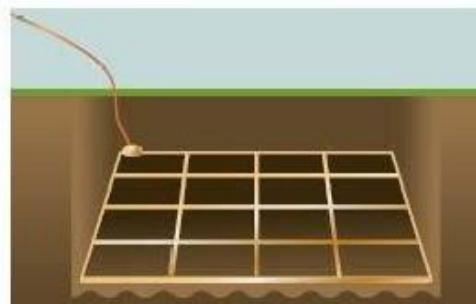
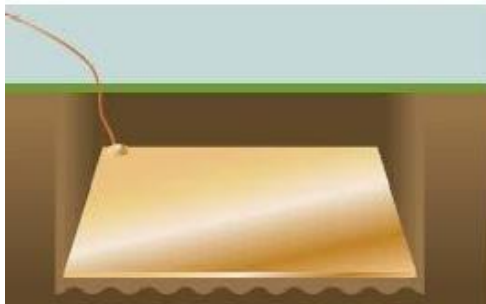
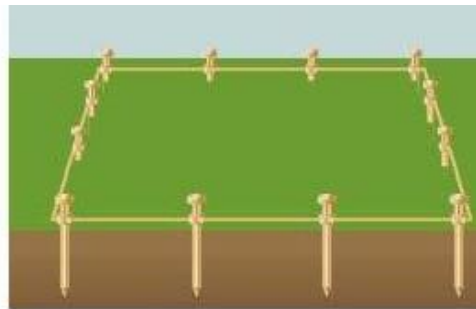


## Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για τη διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη



Φοιτητής: Καλογιάννης Παναγιώτης

ΑΜ: Ele212017035

Επιβλέπων Καθηγητής

Μορώνης Αντώνιος

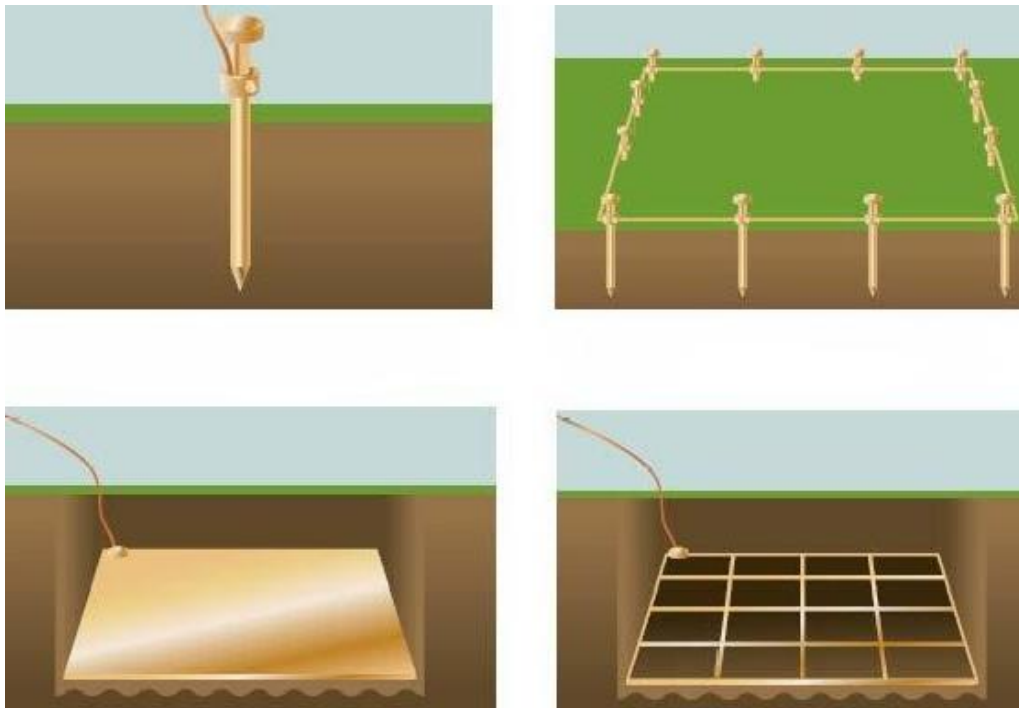
Καθηγητής



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Development of a software application for electrical grounding resistance calculations in single-layer and multi-layer soils**



**Kalogiannis Panagiotis**  
**RegistrationNumber: Ele212017035**

**Supervisor**

**Moronis Antonios**  
**Professor**

**ATHENS-EGALEO, March 2024**

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Μορώνης Αντώνιος, Καθηγητής	Ψωμόπουλος Κωνστάντιος, Καθηγητής	Τσεκούρας Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.Allrightsreserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΚΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ,  
Μήνας, Έτος**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος .....ΚΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ .....  
του... ΣΤΑΥΡΟΥ..., με αριθμό μητρώου ...Ele212017035..... φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

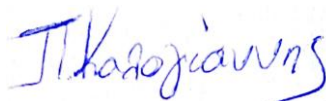
**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών  
Καλογιάννης Παναγιώτης



## Ευχαριστίες

Με την παράδοση της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές μου σπουδές και μια πολύ όμορφη διαδρομή που ξεκίνησε με πολλά όνειρα και προσδοκίες. Μια διαδρομή με πολύ ευχάριστες στιγμές αλλά και με εμπόδια και δυσκολίες. Μια διαδρομή που εκτός από τις πολύτιμες γνώσεις και τα εφόδια που μου προσέφερε, με ενδυνάμωσε και με ολοκλήρωσε ως προσωπικότητα.

Σε αυτήν τη διαδρομή είχα την τύχη να συναντήσω κάποιους ανθρώπους που με την ευγένεια του χαρακτήρα τους και την ανιδιοτέλειά τους στάθηκαν πολύτιμοι αρωγοί.

Αρχικά θέλω να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου σε έναν άνθρωπο που από την πρώτη στιγμή με εμπιστεύτηκε και που με την επιστημονική του κατάρτιση στάθηκε για μένα μέντορας και πρότυπο. Ο επιβλέπων καθηγητής κ. Μορώνης Αντώνιος, συνέβαλε τα μέγιστα με την πολύτιμη καθοδήγηση του στην ολοκλήρωση της εργασίας μου, από την πρώτη στιγμή της επιλογής του θέματος και σε όλα τα στάδια της εκπόνησής της. Τον ευχαριστώ για τις ιδέες του, τις χρήσιμες υποδείξεις του και τις καίριες παρεμβάσεις του. Επίσης τον ευχαριστώ για την προθυμία του, την κατανόηση του, αλλά κυρίως για την άμεση ανταπόκρισή του κάθε φορά που ζητούσα τη βοήθειά του.

Θα ήμουν αγνώμων αν δεν αναφερόμουν στην οικονομική αλλά κυρίως ψυχολογική και συναισθηματική υποστήριξη της οικογένειάς μου όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος ευχαριστώ φίλους και συμφοιτητές για τις γλυκές αναμνήσεις των φοιτητικών μου χρόνων που θα κρατήσω για πάντα στην ψυχή μου.

## Περίληψη

Τα συστήματα γειώσεων αποτελούν σημαντικό μέρος των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και έχουν ως στόχο την αγωγή σύνδεση ενός σημείου μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης ή γενικότερα του ηλεκτρικού δικτύου με τη γη, ώστε να λειτουργούν είτε ως σημεία αναφοράς του δυναμικού, είτε και να κάνουν εφικτή την ασφαλή διοχέτευση ηλεκτρικών ρευμάτων που μπορεί να εμφανιστούν σε περίπτωση σφαλμάτων. Με αυτόν τον τρόπο προστατεύονται τόσο οι άνθρωποι, όσο και ο εξοπλισμός από πιθανούς κινδύνους, όπως η ηλεκτροπληξία ή η πυρκαγιά.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια πρωτότυπη εφαρμογή λογισμικού σε περιβάλλον excel, η οποία θα προσφέρει νέες δυνατότητες όπως:

**Ανάλυση Γειώσεων:** Οι χρήστες θα μπορούν να εισάγουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά και άλλες παραμέτρους του συστήματος γειώσεων για ανάλυση.

**Σχεδίαση Συστημάτων:** Η εφαρμογή θα επιτρέπει στους χρήστες να σχεδιάζουν προσαρμοσμένα συστήματα γειώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος (ποικιλομορφία του εδάφους, την υγρασία και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος γειώσεων).

**Προσομοίωση:** Η εφαρμογή θα επιτρέπει την εκτέλεση προσομοιώσεων για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος γειώσεων υπό διάφορες συνθήκες.

**Απεικόνιση και Αναφορές:** Η εφαρμογή θα παρέχει γραφικές παραστάσεις και αναφορές, καθώς και ευανάγνωστα δεδομένα, για να βοηθήσει τους χρήστες στην κατανόηση των αποτελεσμάτων.

**Ευκολία Χρήσης:** Η εν λόγω εφαρμογή στοχεύει στο να παρέχει ένα εύχρηστο εργαλείο σε όσους ασχολούνται με τα συστήματα γειώσεων, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματά της χωρίς περίπλοκες διαδικασίες. Επιπλέον συμβάλλει στην κατανόηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης αυτών των συστημάτων, συνεισφέροντας στην ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

## **Λέξεις – κλειδιά**

γείωση, μονοστρωματικό έδαφος, διστρωματικό έδαφος, αντίσταση γείωσης, γείωση υποσταθμού, ειδική αντίσταση εδάφους

## **Abstract**

Earthing systems are important part of electrical installations and aim to conductively connect a point of an electrical installation or the electrical network in general to earth, in order to act either as potential reference points or to enable the safe conduction of electrical currents that may occur in case of faults. In this way, both people and equipment are protected from potential hazards such as electric shock or fire.

In this thesis we present a prototype software application in excel environment which will offer new features such as:

**Grounding Analysis:** Users will be able to input geometric characteristics and other grounding system parameters for analysis.

**System Design:** the application will allow users to design customized earthing systems, taking into account the requirements of the environment (soil diversity, humidity and other parameters affecting the behaviour of the earthing system).

**Simulation:** The application will allow to perform simulations to evaluate the performance of the grounding system under different conditions.

**Visualisation and references:** The application will provide graphs and reports, as well as easy-to-read data, to assist users in understanding the results.

**Ease of Use:** This application aims to provide an easy-to-use tool for those involved in grounding systems, taking advantage of its benefits without complicated procedures. It also contributes to the understanding and optimisation of the performance of these systems, contributing to the safety and efficiency of electrical installations.

## **Keywords :**

grounding, single-layer ground , two-layer ground , grounding resistance , substation grounding , ground resistivity

## Περιεχόμενα

Λίστα πινάκων .....	10
Λίστα σχημάτων .....	11
Σκοπός και Στόχοι .....	13
Μεθοδολογία .....	13
Καινοτομία.....	13
Δομή.....	14

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> Βιβλιογραφική ανασκόπηση..... 15**

1.1	Γενικές έννοιες-ορισμοί .....	15
1.2	Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους .....	18
1.2.1	Η μέθοδος Wenner τεσσάρων σημείων .....	18
1.2.2	Η μέθοδος Schlumberger .....	19
1.2.3	Διάταξη Διπόλου- Διπόλου.....	20
1.3	Μέτρηση αντίστασης γείωσης .....	21
1.3.1	Μέθοδος πτώσης δυναμικού (Fall of Potential).....	21
1.3.2	Μέθοδος πτώσης δυναμικού σε διστρωματικό έδαφος.....	22
1.4	Παρατηρήσεις επί των μεθόδων της μέτρησης ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης .....	23
1.5	Αντίσταση γείωσης τυπικών γειωτών .....	23
1.5.1	Αντίσταση γείωσης ράβδου.....	24
1.5.2	Μεμονωμένη ράβδου γείωσης .....	24
1.5.3	Πολλαπλές ράβδοι σε ευθεία διάταξη ή βρόχο μεγάλου μήκους.....	25
1.5.4	Τριγωνική διάταξη γείωσης .....	26
1.5.5	Ράβδοι σε διάταξη συστοιχίας ( διάταξη array ).....	27
1.5.6	Ράβδοι σε κοίλη τετραγωνική διάταξη (hollow square ) .....	28
1.5.7	Γειωτής Πλέγματος .....	28
1.5.8	Θεμελιακή γείωση .....	31
1.5.9	Γειωτής πλάκας .....	32
1.5.10	Οριζόντιος κυκλικός γειωτής.....	32
1.5.11	Συνδυασμός γείωσης ράβδου και γείωση πλέγματος σε διστρωματικό έδαφος .....	33
1.5.12	Δίκτυο ύδρευσης .....	33
1.6	Γειώσεις υποσταθμών .....	34
1.6.1	Εποχιακές Επιδράσεις στην Ασφάλεια του Συστήματος Γείωσης Υποσταθμού .....	34
1.6.2	Διαστασιολόγηση αγωγών ( A ) .....	35
1.6.3	Μέγιστα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής( Estep , Etouth ).....	37
1.6.4	Το μέγιστο ρεύμα μέσω του σώματος .....	38
1.6.5	Αντίσταση γείωσης συστοιχίας ράβδων - πλέγματος (R <sub>g</sub> ).....	38
1.6.6	Μέγιστη ένταση ρεύματος πλέγματος ( I <sub>G</sub> ).....	40
1.6.7	Ανύψωση Δυναμικού Γείωσης (GPR) ; .....	41
1.6.8	Τάση βρόχου (Mesh Voltage ) E <sub>m</sub> .....	42
1.6.9	Βηματική τάση (Step Voltage ) E <sub>s</sub> .....	44
1.7	Κριτήρια επιτυχούς σχεδιασμού και τελικές δοκιμές .....	46



<b>2</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> Ανάπτυξη πρωτότυπης εφαρμογής διεξαγωγής υπολογισμών σε γειωτές .....</b>	<b>47</b>
2.1	Εισαγωγή.....	47
2.2	Αναλυτική δομή της εφαρμογής .....	47
2.3	Μέθοδος Wenner 4 σημείων .....	48
2.4	Υπολογισμοί για μονοστρωματικό έδαφος .....	49
2.5	Εφαρμογή της γραφικής μεθόδου Sunde .....	50
2.6	Υπολογισμών γειωτών ράβδων .....	51
2.6.1	Μεμονωμένη ράβδους.....	52
2.6.2	Τριγωνικός γειωτής.....	53
2.6.3	Συστοιχία ράβδων .....	53
2.6.4	Πολλαπλές ράβδοι σε ευθεία διάταξη ή σε βρόχο μεγάλου μήκους.....	54
2.7	Γειωτής πλέγματος.....	54
2.7.1	Υπολογισμός αντίστασης γείωσης πλέγματος .....	55
2.7.2	Υπολογισμός αντίστασης γείωσης σε διστρωματικό έδαφος .....	55
2.8	Αντίσταση γείωσης συνδυασμού πλέγματος με συστοιχία ράβδων .....	56
2.8.1	1 <sup>η</sup> Περίπτωση υπολογισμού αντίστασης γείωσης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων .....	57
2.8.2	2 <sup>η</sup> Περίπτωση υπολογισμού αντίστασης γείωσης συνδυασμού πλέγματος με ράβδους στην περίμετρό του.....	58
2.8.3	3 <sup>η</sup> Περίπτωση υπολογισμού αντίστασης γείωση συνδυασμού πλέγματος – ράβδους σε διστρωματικό έδαφος .....	58
2.9	Γειωτής πλάκας .....	58
2.9.1	Τετραγωνική πλάκα .....	59
2.9.2	Οριζόντιος κυκλικός γειωτής.....	59
2.10	Θεμελειακός γειωτής.....	60
2.10.1	Θεμελειακός γειωτής.....	60
2.10.2	Εξωτερικός περιμετρικός γειωτής .....	61
2.11	Μελέτη γείωσης υποσταθμού .....	61
2.11.1	Πίνακας δεδομένων 1.....	62
2.11.2	Υπολογισμοί στοιχείων Δικτύου, καλωδίου και μετασηματιστή.....	64
2.11.3	Υπολογισμοί θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας και σφάλματος Φάσης – Γης.....	65
2.11.4	Υπολογισμός τριφασικού συμμετρικού σφάλματος βραχυκύκλωσης $I_f$ .....	65
2.11.5	Υπολογισμός ενεργούς τιμή ασύμμετρου ρεύματος βραχυκύκλωσης $I_F$ .....	66
2.11.6	Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος .....	66
2.11.7	Διαστασιολόγηση αγωγών πλέγματος .....	67
2.11.8	Πίνακας δεδομένων 2 .....	68
2.11.9	Μέγιστα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής .....	69
2.11.10	Συνδυασμένη αντίσταση συστοιχίας ράβδων – πλέγματος.....	70
2.11.11	Έλεγχος GPR.....	72
2.11.12	Τάση Βρόχου ( $E_m$ ).....	72
2.11.13	Βηματική Τάση ( $E_s$ ).....	73
<b>3.</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> Διεξαγωγή υπολογισμών μέσω της εφαρμογής που αναπτύχθηκε – παραδείγματα εφαρμογής από πρότυπο IEEE80 2013.....</b>	<b>76</b>
3.1	Εισαγωγή .....	76
3.2	1 <sup>ο</sup> Παράδειγμα εφαρμογής.....	76
3.3	2 <sup>ο</sup> Παράδειγμα.....	78
<b>4.</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>81</b>

### Λίστα πινάκων

Πίνακας 1.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά των τυποποιημένων υλικών .....	37
Πίνακας 2.1. Εισαγωγή τιμών ειδικής αντίστασης από μετρήσεις και προαιρετική συμπλήρωση πρόσθετων τιμών για διαφορετικές κατευθύνσεις μέτρησης. ....	58
Πίνακας 3.1. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μιας πλήρους μελέτης γείωσης με χρήση ράβδων γειώσεων .....	77
Πίνακας 3.2. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μιας πλήρους μελέτης γείωσης χωρίς χρήση ράβδων γειώσεων .....	79

## Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1.1. Διάταξη μεθόδου Wenner .....	18
Σχήμα 1.2. Διάταξη μεθόδου Schlumberger.....	19
Σχήμα 1.3. Διάταξη διπόλου-διπόλου με C1 , C2 τα ηλεκτρόδια ρεύματος και P1, P2 τα ηλεκτρόδια δυναμικού.....	20
Σχήμα 1.4. Απεικόνιση της μεθόδου πτώσης δυναμικού, με CP το βοηθητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος, PP το βοηθητικό ηλεκτρόδιο τάσης και G το ηλεκτρόδιο γείωσης.....	21
Σχήμα 1.5. Επίδραση επικάλυψης πεδίου ροής.....	21
Σχήμα 1.6. Διάταξη με ηλεκτρόδια σε κατάλληλες αποστάσεις ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη των πεδίων ροής.....	22
Σχήμα 1.7. Αναλογία x/d για την απαιτούμενη θέση ηλεκτροδίου δυναμικού σε γη δύο στρωμάτων.....	23
Σχήμα 1.8. Μία ράβδος γείωσης.....	24
Σχήμα 1.9. Τετραγωνική διάταξη γείωσης .....	24
Σχήμα 1.10. Πολλαπλή διάταξη γειωτών σε ευθεία διάταξη ή βρόχο μεγάλου μήκους.....	25
Σχήμα 1.11. Τριγωνική διάταξη γείωσης.....	26
Σχήμα 1.12. Πολλαπλή διάταξη γειωτών που δημιουργούν μια επιφάνεια A.....	27
Σχήμα 1.13. Πολλαπλή διάταξη γειωτών που δημιουργούν μια επιφάνεια A.....	28
Σχήμα 1.14. Ενδεικτικά είδη πλεγμάτων .....	29
Σχήμα 1.15. Κάτοψη πλέγματος με ανοίγματα μήκους α .....	29
Σχήμα 1.16. Επίδραση της αναλογίας των αντιστάσεων σε πλέγματα γείωσης στην τιμή αντίστασης γείωσης. Αναφέρονται οι περιπτώσεις βρόχων τετραγωνικού σχήματος και βρόχων ορθογωνικού σχήματος με αναλογίες 2:1 και 4:1.....	30
Σχήμα 1.17. Γείωση τετραγωνικής πλάκας .....	32
Σχήμα 1.18. Γειωτής οριζόντιας κυκλικής πλάκας .....	32
Σχήμα 1.19. Πλέγμα συνδεδεμένο με ράβδους.....	32
Σχήμα 1.20. Γείωση στο δίκτυο ύδρευσης ( Μη αποτελεσματική ) .....	34
Σχήμα 1.21. Διάγραμμα ροής για τον σχεδιασμό συστήματος γείωσης υποσταθμού.....	35
Σχήμα 1.22. Απόσταση γειτονικών αγωγών $\alpha_g$ .....	42
Σχήμα 2.1. Καρτέλα περιεχομένων (μέρος α), εδώ γίνεται προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης $\rho$ για μονοστρωματικό ή διστρωματικό έδαφος .....	47
Σχήμα 2.2. Καρτέλα περιεχομένων, μέρος β.....	48
Σχήμα 2.3. Αναπαράσταση των τιμών της ειδικής αντίστασης με τη βοήθεια γραφικής παράστασης .....	49
Σχήμα 2.4. Υπολογισμοί για τον προσδιορισμό ειδικής αντίστασης σε μονοστρωματικό έδαφος.....	49
Σχήμα 2.5. Πίνακας δεδομένων για την εύρεση ειδικής αντίστασης σε διστρωματικό έδαφος.....	50
Σχήμα 2.6. Καμπύλες Sundé .....	50
Σχήμα 2.7. Αποτέλεσμα υπολογισμών για το προσδιορισμό του διστρωματικού μοντέλου εδάφους.....	51
Σχήμα 2.8. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό γειωτών με την μορφή ράβδων (μεμονωμένη ή πολλαπλών ράβδων).....	52
Σχήμα 2.9. Δοαδικασίας εισαγωγής τιμής ειδικής αντίστασης του εδάφους .....	52
Σχήμα 2.10. Υπολογισμοί για γειωτές ράβδους .....	52
Σχήμα 2.11. Υπολογισμοί τριγωνικού γειωτή .....	53
Σχήμα 2.12. Υπολογισμοί συστοιχίας ράβδων.....	53
Σχήμα 2.13. Υπολογισμοί σε γειωτές πολλαπλών ράβδων σε ευθεία διάταξη ή σε βρόχου μεγάλου μήκους.....	54
Σχήμα 2.14. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό γείωσης γειωτή πλέγματος.....	54
Σχήμα 2.15. Εισαγωγή τιμής ειδικής αντίστασης και βάθους τοποθέτησης πλέγματος.....	55
Σχήμα 2.16. Καρτέλα υπολογισμών αντίστασης γείωσης πλέγματος .....	55
Σχήμα 2.17. Χρήση διστρωματικού μοντέλου για υπολογισμό αντίστασης γείωσης πλέγματος.....	55
Σχήμα 2.18. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό γείωσης συνδυασμού πλέγματος – συστοιχία ράβδων .....	56
Σχήμα 2.19. Εισαγωγή τιμής ειδικής αντίστασης του εδάφους και βάθους τοποθέτησης πλέγματος .....	56
Σχήμα 2.19.α. Διαδικασία εύρεσης ισοδύναμης τιμής ειδικής αντίστασης του εδάφους $\rho_{eq}$ .....	57

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Σχήμα 2.20. 1 <sup>η</sup> περίπτωση υπολογισμού αντίστασης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων.....	57
Σχήμα 2.21. 2 <sup>η</sup> περίπτωση υπολογισμού αντίστασης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων.....	58
Σχήμα 2.22. 3 <sup>η</sup> περίπτωση υπολογισμού αντίστασης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων .....	58
Σχήμα 2.23. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό αντίστασης με χρήση γειωτή πλάκας .....	58
Σχήμα 2.24. Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης .....	59
Σχήμα 2.25. Χρήση τετραγωνικής πλάκας.....	59
Σχήμα 2.26. Υπολογισμοί οριζόντιου κυκλικού γειωτή.....	59
Σχήμα 2.27. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό αντίστασης γειωτή ταινίας.....	60
Σχήμα 2.28. Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης .....	60
Σχήμα 2.29. Υπολογισμοί σε θεμελειακό γειωτή .....	60
Σχήμα 2.30. Εξωτερική περιμετρική γείωση .....	61
Σχήμα 2.31. Επιλογή ειδικής αντίστασης εδάφους για την μελέτη γείωσης υποσταθμού .....	61
Σχήμα 2.32. Πινάκας δεδομένων .....	62
Σχήμα 2.33. Πίνακας δεδομένων 1, (στοιχεία του μετασχηματιστή).....	62
Σχήμα 2.34. Πίνακας δεδομένων 1, καθορισμός λόγου $\lambda=Z_0/Z_1$ .....	63
Σχήμα 2.35. Πίνακας δεδομένων 1, περιγραφή υλικού.....	63
Σχήμα 2.36. Σύνθετες αντιστάσεις δικτύου .....	64
Σχήμα 2.37. Σύνθετη αντίσταση του καλωδίου.....	64
Σχήμα 2.38. Σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή .....	64
Σχήμα 2.39. Υπολογισμοί σύνθετων αντιστάσεων μέχρι τη θέση του σφάλματος θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας .....	65
Σχήμα 2.40. Ωμικό και επαγωγικό μέρος σύνθετης αντίστασης σφάλματος .....	65
Σχήμα 2.41. Υπολογισμός τριφασικού συμμετρικού σφάλματος βραχυκύκλωσης $I_F$ .....	65
Σχήμα 2.42. Υπολογισμός ενεργούς τιμής ασύμμετρου ρεύματος βραχυκύκλωσης $I_F$ .....	66
Σχήμα 2.43. Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος .....	66
Σχήμα 2.44. Υπολογισμός διατομής αγωγού πλέγματος με βάση το υλικό .....	67
Σχήμα 2.45. Πίνακας δεδομένων 2, στοιχεία ειδικής αντίστασης εδάφους .....	68
Σχήμα 2.46. Επεξήγηση εισαγωγής διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης .....	68
Σχήμα 2.47. Επεξήγηση εισαγωγής διαφορετικής τιμής συντελεστή διαίρεσης ρεύματος σφάλματος.....	68
Σχήμα 2.48. Πίνακας δεδομένων 2, στοιχεία του πλέγματος και των ράβδων γείωσης. ....	69
Σχήμα 2.49. Επιλογή για χρήση ράβδων ή μη.....	69
Σχήμα 2.50. Μέγιστο ρεύμα σώματος για σωματικό βάρος 50 και 70 kg .....	69
Σχήμα 2.51. Μέγιστο όριο βηματικής τάσης και τάσης επαφήςγια σωματικό βάρος 50 και 70 kg.....	70
Σχήμα 2.52. Υπολογισμός γείωσης πλέγματος.....	70
Σχήμα 2.53. Υπολογισμός αμοιβαίας αντίστασης ράβδων – πλέγματος και αντίσταση γείωσης ράβδων .....	71
Σχήμα 2.54. Τελική τιμή αντίστασης συνδυασμένης συστοιχίας ράβδων – πλέγματος.....	71
Σχήμα 2.55. Έλεγχος GPR.....	72
Σχήμα 2.56. Επιλογή κατάλληλης τιμής τάσης βρόχου ( $E_m$ ).....	72
Σχήμα 2.57. Έλεγχος Τάσης Βρόχου ( $E_m$ ) .....	73
Σχήμα 2.58. Υπολογισμός γεωμετρικού παράγοντα $n$ .....	73
Σχήμα 2.59. Υπολογισμός συντελεστή ανομοιομορφίας και συντελεστή διόρθωσης για βάθος πλέγματος.....	74
Σχήμα 2.60. Υπολογισμός παραμέτρων για την περίπτωση χρήση ράβδων γείωσης .....	74
Σχήμα 2.61. Υπολογισμός παραμέτρων στην περίπτωση που δεν γίνεται χρήση ράβδων γείωσης .....	75
Σχήμα 2.62. Έλεγχος βηματικής τάσης $E_s$ .....	75
Σχήμα 3.1. Τετραγωνικό πλέγμα με ράβδους .....	76
Σχήμα 3.2. Τετραγωνικό πλέγμα με ράβδους .....	78

## Σκοπός και Στόχοι

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη πρωτότυπης εφαρμογής σε περιβάλλον excel για τη διεξαγωγή υπολογισμών σε γειωτές διαφόρων τύπων.

Οι στόχοι της εργασίας είναι :

- Διευκόλυνση της διεξαγωγής υπολογισμών για τον προσδιορισμό του μοντέλου εδάφους που αντιστοιχεί σε αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων της ειδικής του εδάφους που έχουν ληφθεί στο σημείο όπου θα τοποθετηθεί ο γειωτής.
- Χρήση του μοντέλου εδάφους για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης διαφόρων τύπων γειωτών (απλών ή σύνθετων).
- Δημιουργία εργαλείου για τη μελέτη και τον υπολογισμό γειωτών υποσταθμών με τη χρήση τόσο μονοστρωματικού, όσο και διστρωματικού μοντέλου εδάφους.
- Γενικότερα η ανάπτυξη ενός εύχρηστου εργαλείου το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ασφαλή σχεδιασμό διαφορετικών τύπων γειωτών σε μία μεγάλη ποικιλία πρακτικών εφαρμογών.
- Η ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού η οποία θα είναι σε θέση να διεξάγει όλες τις προαναφερόμενες εργασίες σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον.

## Μεθοδολογία

Για την υλοποίηση του σκοπού και του στόχου της εργασίας θα γίνει βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου θα παρουσιασθούν οι γενικά καθιερωμένες μέχρι σήμερα μεθοδολογίες υπολογισμού για διαφορετικούς τύπους γειωτών που συναντώνται στην πράξη. Επίσης θα γίνει μια διερεύνηση των δυνατοτήτων υπολογισμών σε πολυστρωματικά και ιδιαιτέρως σε διστρωματικά εδάφη με βάση το εκάστοτε μοντέλο εδάφους που προκύπτει από τις μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους στο χώρο εγκατάστασης του γειωτή. Τα μαθηματικά μοντέλα τόσο για τον υπολογισμό του μοντέλου εδάφους, όσο και τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης θα κατηγοριοποιηθούν και θα ενισχυθούν σε μια πρωτότυπη εφαρμογή σε περιβάλλον Excel. Η κατηγοριοποίηση αυτή θα γίνει ανάλογα με τον τύπο του γειωτή που προκύπτει να μελετηθεί και θα περιλαμβάνει όλους τους καθιερωμένους τύπους απλών ή και σύνθετων γειωτών.

## Καινοτομία

Η συγκεκριμένη εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη μιας πρωτότυπης εφαρμογής λογισμικού σε περιβάλλον excel, το οποίο είναι ευρέως διαθέσιμο, η οποία θα δίνει τη δυνατότητα διεξαγωγής όλων των απαραίτητων υπολογισμών σε ένα ενιαίο περιβάλλον για τη μελέτη τυπικών γειωτών σε μια μεγάλη ποικιλία πρακτικών εφαρμογών.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

## Δομή

Στο 1<sup>ο</sup>Κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος. Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο γίνονται αναφορές στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, στη μέτρηση αντίστασης γείωσης, την αντίσταση γείωσης τυπικών γειωτών καθώς επίσης και μια πλήρης αναφορά στις γειώσεις υποσταθμού.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ακολουθεί εκτενής περιγραφή της λειτουργίας της πρωτότυπης εφαρμογής λογισμικού excel.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύγκριση τιμών μεταξύ της εφαρμογής λογισμικού και του πρότυπου IEEE 80 2013, με σκοπό να φανεί η εγγύτητα και η αξιοπιστία της εφαρμογής.

Τέλος, καταγράφονται οι πηγές στις οποίες στηρίχτηκε η βιβλιογραφική και διαδικτυακή ανασκόπηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 1.1 Γενικές έννοιες-ορισμοί

Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η σύσταση του εδάφους, η υγρασία του, η θερμοκρασία και άλλες παράμετροι. Η υψηλή τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους σημαίνει ότι το έδαφος είναι λιγότερο αγώγιμο (ξηρά ή βραχώδη εδάφη), ενώ η χαμηλή τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους υποδεικνύει ότι το έδαφος είναι πιο αγώγιμο (εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία).

Για τη μέτρηση της αντίστασης ενός συστήματος γείωσης χρησιμοποιείται συνήθως ένα όργανο δοκιμής που ονομάζεται μετρητής γείωσης. Ο μετρητής γείωσης εφαρμόζει δοκιμαστικό ρεύμα μεταξύ του συστήματος γείωσης και στη συνέχεια μετρά την προκύπτουσα πτώση τάσης. Η αντίσταση του συστήματος γείωσης υπολογίζεται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, ο οποίος ορίζει ότι η αντίσταση ισούται με την τάση διαιρούμενη με την ένταση του ρεύματος.

Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους  $\rho$  υπολογίζεται με 3 μεθόδους,

- ⇒ Μέθοδο Wenner τεσσάρων σημείων,
- ⇒ Μέθοδο Schlumberger,
- ⇒ Διάταξη Διπόλου – Διπόλου.

Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι ο εξοπλισμός μέτρησης είναι σωστά βαθμονομημένος και ότι η μέτρηση διεξάγεται υπό κατάλληλες συνθήκες. Σημειώνεται ότι η αντίσταση ενός συστήματος γείωσης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες, όπως η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία και η σύνθεσή του. Ως εκ τούτου, συνιστάται η τακτική δοκιμή των συστημάτων γείωσης για να διασφαλίζεται ότι παρέχουν επαρκή ηλεκτρική ασφάλεια.[1],[2],[3]

Η βηματική τάση (Step Voltage) αναφέρεται στη διαφορά δυναμικού που μπορεί να εμφανιστεί στην επιφάνεια του εδάφους μεταξύ δύο σημείων όπου στέκεται ένας άνθρωπος (σημεία επαφής των δύο ποδιών με το έδαφος), σε απόσταση βηματισμού 1 m, κατά τη διάρκεια διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του εδάφους. Τα όρια ασφαλείας για τη βηματική τάση καθορίζονται προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

Η τάση επαφής (Touch Voltage) αναφέρεται στη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται μεταξύ του χεριού ενός ατόμου που έρχεται σε επαφή με ένα ηλεκτροφόρο μεταλλικό αντικείμενο και των ποδιών του, ενώ το άτομο αυτό στέκεται στο έδαφος. Η τάση αυτή είναι σημαντική, καθώς μπορεί να διαρρεύσει ρεύμα μέσα από το σώμα ενός ανθρώπου, και να οδηγήσει σε ηλεκτροπληξία.

Τα ασφαλή όρια για τη Βηματική Τάση και την τάση επαφής καθορίζονται από πρότυπα ασφαλείας, όπως το IEEE 80, το οποίο παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τον υπολογισμό και τον περιορισμό αυτών των τάσεων, προκειμένου να διατηρηθεί η ασφάλεια των ανθρώπων που εργάζονται κοντά σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Η τάση σφάλματος αναφέρεται στην τάση που εμφανίζεται σε ένα μεταλλικό αντικείμενο κατά την εκδήλωση σφάλματος όπως π.χ. βραχυκύκλωμα, σε σχέση το σημείο αναφοράς των δυναμικών (άπειρη γη). Όταν εμφανιστεί σφάλμα σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, μπορεί να οδηγήσει σε μη φυσιολογική ροή ρεύματος, η οποία με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει σημαντική αύξηση της τάσης στο σημείο του σφάλματος. Αυτή η αύξηση τάσης μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον εξοπλισμό και να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια του προσωπικού.

## Είδη γειωτών

Για οικιακές ή γενικότερα για κτηριακές εγκαταστάσεις , το σύστημα γείωσης σχεδιάζεται συνήθως για να παρέχει προστασία από ηλεκτροπληξία και να αποτρέπει βλάβες στον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Το σύστημα γείωσης που έχει πλέον καθιερωθεί για την καλύτερη αξιοπιστία σε κτηριακές εγκαταστάσεις είναι η θεμελιακή γείωση.

Ωστόσο , υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων γείωσης που χρησιμοποιούνται συνήθως, μεταξύ των οποίων:

- ✓ Ηλεκτρόδια ράβδου: Πρόκειται για μακριούς, κυλινδρικούς αγωγούς από χαλκό ή γαλβανισμένο χάλυβα, που συνήθως εισάγονται στο έδαφος σε βάθος ενός ή περισσότερων μέτρων [4].
- ✓ Γειωτής πλάκα: Σε αυτό το σύστημα, μια μεταλλική πλάκα θάβεται κάθετα στη γη για να δημιουργήσει μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης για τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος προς τη γη. Γειωτές αυτού του τύπου τοποθετούνται σε σκάμμα κατάλληλου βάθους έτσι ώστε το πάνω μέρος του γειωτή να βρίσκεται τουλάχιστον σε 0,5m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους [5].
- ✓ Γειωτής πλέγματος: Αποτελείται από ένα πλέγμα διασυνδεδεμένων αγωγών, συνήθως τοποθετημένων εντός του εδάφους σε σχετικά χαμηλό βάθος [6],[7].
- ✓ Θεμελιακή γείωση: Σε αυτό το σύστημα, χρησιμοποιείται μία μεταλλική ταινία η οποία εγκαθίσταται εντός των θεμελίων ενός κτηρίου, ώστε να εγκιβωτίζεται μέσα στο σκυρόδεμα θεμελίων αυτών. Η ταινία συνδέεται ηλεκτρικά με τον μεταλλικό οπλισμό των θεμελίων. Αυτή η μέθοδος προτιμάται, επειδή παρέχει μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης για τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος προς τη γη, η οποία συμβάλλει στην προστασία από ηλεκτροπληξία και ζημιές στον εξοπλισμό δεδομένου του γεγονότος ότι λόγω του βάθους τοποθέτησης η συμπεριφορά του γειωτή διατηρείται σταθερή καθ' όλο το έτος διατηρώντας σταθερά χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης [8].

Η επιλογή του ηλεκτροδίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του εδάφους, η απαιτούμενη αντίσταση και ο διαθέσιμος χώρος. Η σωστή εγκατάσταση και συντήρηση του συστήματος γείωσης είναι επίσης κρίσιμες για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά του στην παροχή προστασίας από ηλεκτρικούς κινδύνους.

Ορισμένες κατευθυντήριες γραμμές για την τοποθέτηση ράβδων γείωσης:

1. Οι ράβδοι γείωσης πρέπει να τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον εξοπλισμό που γειώνουν. Αυτό θα εξασφαλίσει ότι η διαδρομή του ρεύματος σφάλματος προς τη γη είναι όσο το δυνατόν πιο σύντομη και άμεση.
2. Θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον απόσταση διπλάσια από το βάθος έμπηξης ώστε να μην υπάρχει έντονη επικάλυψη των πεδίων ροής τους και να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ( ελάχιστη ) τιμή της αντίστασης γείωσης.
3. Το έδαφος γύρω από κάθε ράβδο πρέπει να διατηρείται υγρό για να βελτιωθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους και να επιτυγχάνεται χαμηλή τιμή αντίστασης γείωσης.
4. Οι ράβδοι γείωσης θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους και με τον εξοπλισμό που γειώνουν χρησιμοποιώντας χάλκινο σύρμα βαρέως τύπου.



5. Εκτός από τις ράβδους γείωσης, ενδέχεται να απαιτούνται και άλλα στοιχεία γείωσης, όπως πλάκες γείωσης ή πλέγματα, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του συστήματος γείωσης που εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

### Μελέτη Γείωσης Υποσταθμού

Για τους υποσταθμούς, το σύστημα γείωσης είναι συνήθως σχεδιασμένο για να αντέχει υψηλά ρεύματα και τάσεις, καθώς και κεραυνικά πλήγματα. Περιλαμβάνει συνήθως διάφορα ηλεκτρόδια γείωσης, όπως ράβδοι ή πλάκες, που συνδέονται σε ένα κοινό πλέγμα γείωσης. Το σύστημα γείωσης του υποσταθμού έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτυγχάνει χαμηλή αντίσταση γείωσης για να παρέχει ασφαλή και αποτελεσματική διαδρομή για τη ροή των ρευμάτων σφάλματος προς το έδαφος. Επίσης, οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι χρήσιμες για τον σχεδιασμό και την ανάλυση που ασκείται σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Τα ακόλουθα βήματα περιλαμβάνονται συνήθως σε μια μελέτη γείωσης υποσταθμού:

1. Καθορισμός των απαιτήσεων γείωσης: Το πρώτο βήμα της μελέτης γείωσης είναι ο προσδιορισμός των απαιτήσεων γείωσης με βάση τον τύπο του εξοπλισμού, τα επίπεδα τάσης και την ειδική αντίσταση του εδάφους της περιοχής.
2. Μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους: Πραγματοποιούνται μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους, οι οποίες χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό του πλέγματος γείωσης.
3. Σχεδιασμός του πλέγματος γείωσης: Σχεδιάζεται ένα πλέγμα γείωσης με βάση τις καθορισμένες απαιτήσεις γείωσης. Το πλέγμα γείωσης αποτελείται από ένα πλέγμα αγωγών και ηλεκτροδίων που θάβονται στο έδαφος, για να δημιουργήσουν ένα μονοπάτι χαμηλής αντίστασης για τη ροή των ρευμάτων σφάλματος.
4. Προσομοίωση πλέγματος γείωσης: Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του πλέγματος γείωσης, πραγματοποιείται προσομοίωση για την ανάλυση της απόδοσης του συστήματος γείωσης υπό διάφορες συνθήκες σφάλματος.
5. Εγκατάσταση του πλέγματος γείωσης: Αφού εγκριθεί ο σχεδιασμός του πλέγματος γείωσης, τότε εγκαθίσταται στον υποσταθμό.
6. Δοκιμή του πλέγματος γείωσης: Πραγματοποιείται μια σειρά δοκιμών για να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα γείωσης πληροί τις καθορισμένες απαιτήσεις.

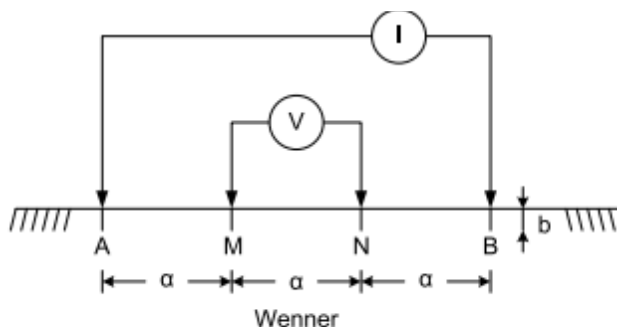
Συνολικά, μια μελέτη γείωσης υποσταθμού είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί τεχνογνωσία. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το σύστημα γείωσης έχει σχεδιαστεί και εγκατασταθεί, σωστά για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του προσωπικού και η σωστή λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού.

## 1.2 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μία αναφορά στις διατάξεις που χρησιμοποιούνται τυπικά για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν γενικά τη χρήση τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων σε ευθεία διάταξη, τα οποία εμπηγνύονται στο έδαφος.

### 1.2.1 Η μέθοδος Wenner τεσσάρων σημείων

Η μέθοδος Wenner 4 σημείων είναι μια μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε μια συγκεκριμένη περιοχή και στην περίπτωση πολυστρωματικών εδαφών να παρέχει στοιχεία για το προσδιορισμό της δομής του εδάφους υπό την έννοια του καθορισμού της ειδικής αντίστασης και του πάχους κάθε στρώματος. Η μέθοδος Wenner 4 σημείων απαιτεί τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή, με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση από την αλληλεπίδραση των πεδίων ροής των βοηθητικών ηλεκτροδίων. Για τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους, δύο από τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια ρεύματος τα οποία τοποθετούνται εξωτερικά στις θέσεις A και B σύμφωνα με το σχήμα 1.1, ενώ επιπλέον χρησιμοποιούνται δύο πρόσθετα βοηθητικά ηλεκτρόδια τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος στις θέσεις M και N, ώστε να ανιχνεύεται η πτώση τάσης στο έδαφος [9],[10],[11],[12].



Σχήμα 1.1. Διάταξη μεθόδου Wenner

Η ειδική αντίσταση του εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί με τη σχέση :

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

όπου :

- R : η φαινόμενη αντίσταση (λόγος μετρούμενης τάσης V προς την ένταση του ρεύματος I),
- $\rho$  : η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ,
- a : η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων,
- b : το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Όταν  $a > b$ , τότε η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στην ακόλουθη

$$\rho = 2\pi R \alpha \quad (1-2)$$

Επιπρόσθετα, η Μέθοδος Wenner 4 σημείων είναι σημαντική στα πολυστρωματικά, διότι μπορεί να υπάρξει διαφορετική σύσταση και ιδιότητες σε κάθε στρώμα. Κατανοώντας τις διαφορές στην ειδική αντίσταση του εδάφους και το πάχος των στρωμάτων, μπορεί να γίνει ανάλυση για πληροφορίες σχετικά με τη δομή του εδάφους και τη γεωλογική σύνθεσή του. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους, καθώς και στην ανάπτυξη αποτελεσματικών σχεδίων κατασκευής γείωσης.

### 1.2.2 Η μέθοδος Schlumberger

Χρησιμοποιείται εναλλακτικά για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους με βασικό χαρακτηριστικό ότι απαιτεί μικρότερες αποστάσεις για τη διεξαγωγή της μέτρησης. Μπορεί να παρέχει στην περίπτωση πολυστρωματικών εδαφών πληροφορίες σχετικά με την πυκνότητα και την κατανομή των υποκείμενων στρωμάτων του εδάφους. Βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιώντας ένα ζεύγος ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους. Απαιτεί τη χρήση ενός ευαίσθητου οργάνου και τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων καταγράφοντας μια σειρά από μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντίστασης του εδάφους σε βάθος. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τη σχέση [9] :

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{I}}{\frac{1}{c} - \frac{1}{a+c} + \frac{1}{\sqrt{c^2+4 \cdot d^2}} - \frac{1}{\sqrt{(a+c)^2+4 \cdot d^2}}} = \quad (1-3)$$

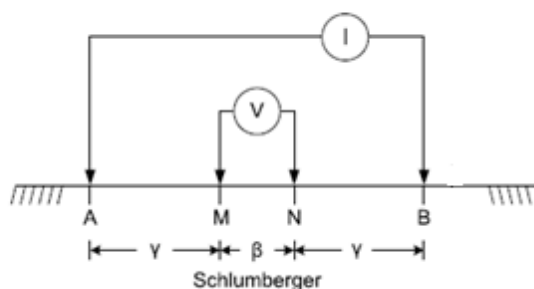
όπου :

$\rho$  : η μετρούμενη ειδική αντίσταση του εδάφους,

$\beta$  : η απόσταση των δύο μεσαίων βοηθητικών ηλεκτροδίων (MN),

$\gamma$  : το μισό της απόστασης των ακραίων βοηθητικών ηλεκτροδίων, αν αφαιρεθεί από το διάστημα MN σύμφωνα με το σχήμα 1.2

$$\beta = MN \text{ και } \gamma = \frac{AB - MN}{2}$$



Σχήμα 1.2. Διάταξη μεθόδου Schlumberger

### 1.2.3 Διάταξη Διπόλου- Διπόλου

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη χρήση τεσσάρων ηλεκτροδίων, δύο για την πηγή ρεύματος και δύο για τη μέτρηση της διαφοράς τάσης. Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετούνται σε σταθερή απόσταση  $a$  μεταξύ τους και διαρρέονται από ρεύμα. Στη συνέχεια, τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού απομακρύνονται από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, επίσης σε σταθερή απόσταση  $a$  μεταξύ τους, και μετράται η διαφορά τάσης μεταξύ τους. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού αυξάνεται σταδιακά σε πολλαπλάσιο του  $a$  (δηλαδή  $n \cdot a$ ) και η διαφορά τάσης μετράται σε κάθε βήμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε διάφορες αποστάσεις και τα δεδομένα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης. Η διάταξη διπόλου-διπόλου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης μιας μεγάλης περιοχής, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη διασπορά των μετρήσεων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα ηλεκτρόδια είναι σωστά τοποθετημένα και ότι οι συνθήκες του εδάφους είναι σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης, προκειμένου να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα. Όμως, λόγω της μεγάλης απόστασης που δημιουργείται μεταξύ των ζευγών ηλεκτροδίων, προκειμένου να καταγραφούν οι μετρήσεις, τα όργανα αποκτούν μεγαλύτερη "ευαισθησία", με αποτέλεσμα οι θόρυβοι να αλλοιώνουν τις μετρήσεις. Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τη μετρούμενη τιμή ειδικής αντίστασης του εδάφους για τη διάταξη διπόλου-διπόλου είναι [13] :

$$\rho^m = \pi \cdot n(n + 1) \cdot (n + 2) \cdot a \cdot \frac{U}{I} \quad (1-4)$$

Με,

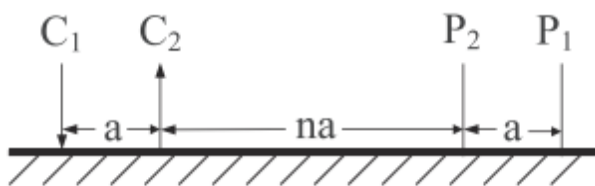
$\rho^m$ : η φαινόμενη ειδική αντίσταση,

$U$  : η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων τάσης,

$I$  : η ένταση του εισερχόμενου ρεύματος,

$a$  : η απόσταση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων ρεύματος ή δύο ηλεκτροδίων τάσης,

$n$  : μια παράμετρος απόστασης ηλεκτροδίων



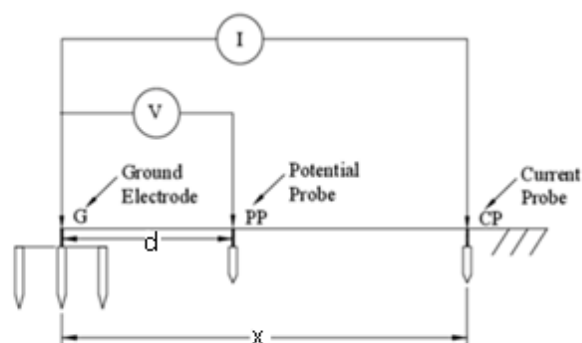
Σχήμα 1.3. Διάταξη διπόλου-διπόλου με  $C_1$ ,  $C_2$  τα ηλεκτρόδια ρεύματος και  $P_1$ ,  $P_2$  τα ηλεκτρόδια δυναμικού [4].

Το βάθος ταφής των ηλεκτροδίων είναι αμελητέο σε σύγκριση με το  $a$ . Η απόσταση των ηλεκτροδίων  $a$  είναι σταθερή, και μόνο το  $n$  είναι μεταβλητό κατά τη μέτρηση των δεδομένων πεδίου.

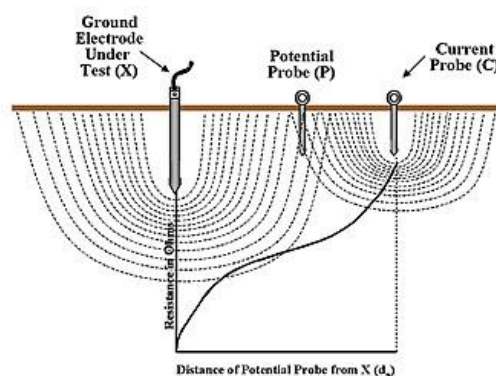
### 1.3 Μέτρηση αντίστασης γείωσης

#### 1.3.1 Μέθοδος πτώσης δυναμικού (Fall of Potential)

Η μέθοδος της πτώσης του δυναμικού είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για τη δοκιμή της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος γείωσης. Περιλαμβάνει τη χρήση ενός ειδικού οργάνου που ονομάζεται γειωσόμετρο. Η συνήθης μέθοδος μέτρησης της αντίστασης γείωσης περιλαμβάνει 2 βοηθητικά ηλεκτρόδια, ένα ακραίο και ένα μεσαίο. Για την εκτέλεση της δοκιμής πτώσης δυναμικού, μια πηγή ρεύματος (συνήθως μια γεννήτρια) διοχετεύει ρεύμα διαμέσου του γειωτή στο έδαφος με τη βοήθεια του ακραίου ηλεκτροδίου προκειμένου να κλείσει κύκλωμα ενώ το μεσαίο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της πτώσης τάσης στο έδαφος μεταξύ του γειωτή και ενός ενδιάμεσου σημείου [14],[15],[16].



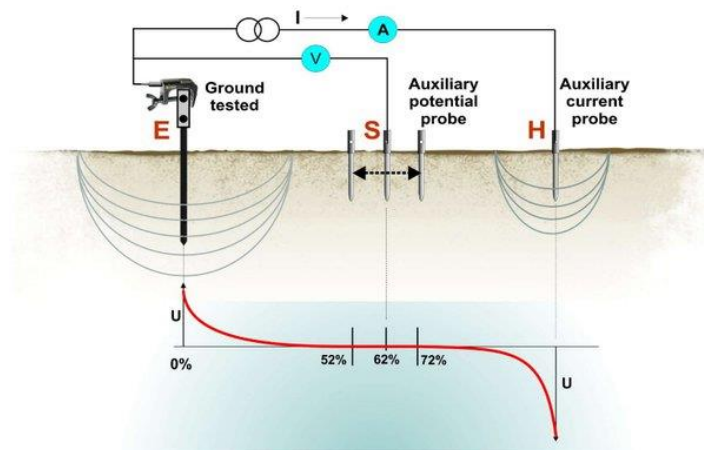
Σχήμα 1.4. Απεικόνιση της μεθόδου πτώσης δυναμικού, με CP το βοηθητικό ηλεκτρόδιο ρεύματος, PP το βοηθητικό ηλεκτρόδιο τάσης και G το ηλεκτρόδιο γείωσης.



Σχήμα 1.5. Επίδραση επικάλυψης πεδίων ροής

Στην περίπτωση που υπάρχει επικάλυψη των πεδίων ροής, δηλαδή, τα ηλεκτρόδια είναι κοντά με αποτέλεσμα να μην δίνει μια επίπεδη περιοχή στην καμπύλη μεταβολής της αντίστασης με την απόσταση, όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 1.5, έτσι η μέτρηση δεν μπορεί να γίνει, διότι δεν εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της και κατά συνέπεια οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη



Σχήμα 1.6. Διάταξη με ηλεκτρόδια σε κατάλληλες αποστάσεις, ώστε να μην υπάρχει επικάλυψη των πεδίων ροής.

Διαπιστώνεται ότι η μεταβολή της αντίστασης γείωσης σε συνάρτηση με την απόσταση μέτρησης εμφανίζει ένα επίπεδο τμήμα, που σημαίνει ότι η μέτρηση μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη.

### 1.3.2 Μέθοδος πτώσης δυναμικού σε διστρωματικό έδαφος

Στην περίπτωση διστρωματικών εδαφών μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια διάταξη, όπως αυτή που περιγράφεται για τη μέθοδο πτώσης δυναμικού. Όμως, προκειμένου η μέτρηση να είναι ικανοποιητική, χρειάζεται να προσδιορίσει κανείς κάποιες ελάχιστες αποστάσεις τοποθέτησης των ηλεκτροδίων σύμφωνα με το σχήμα 1.7 υπό την έννοια καθορισμού του λόγου  $x/D$ . Μόνο όταν η απόσταση  $d \gg r$ , όπου  $r$  είναι είτε η διάμετρος του ηλεκτροδίου γείωσης είτε η μεγαλύτερη πλευρά του πλέγματος γείωσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι καμπύλες του σχήματος 1.7. Στην περίπτωση αυτή ορίζεται ο συντελεστής  $K$  ως εξής :

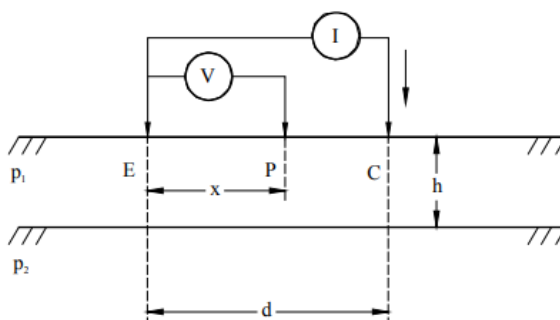
$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (1-5)$$

όπου,

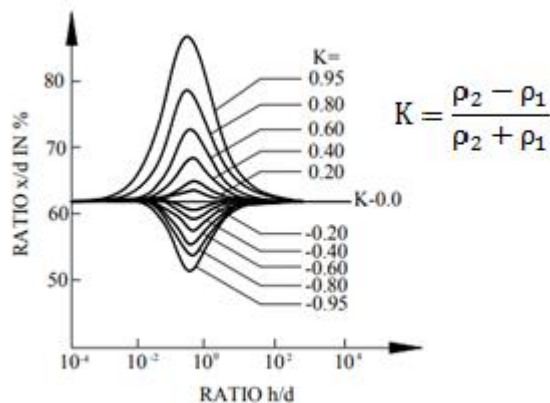
$\rho_1$ : η ειδική αντίσταση του πρώτου στρώματος γης

$\rho_2$ : η ειδική αντίσταση του δεύτερου στρώματος.

$h$ : είναι το πάχος του πρώτου στρώματος γης.



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη



Σχήμα 1.7. Αναλογία  $x/d$  για την απαιτούμενη θέση ηλεκτροδίου δυναμικού σε γη δύο στρωμάτων [5]

#### 1.4 Παρατηρήσεις επί των μεθόδων της μέτρησης ειδικής αντίστασης του εδάφους και της αντίστασης γείωσης

Η μέθοδος Wenner με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές, έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει ακριβείς μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε βάθος, αλλά απαιτεί συνήθως πολλές μετρήσεις για να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα αλλά επηρεάζεται λιγότερο από φαινόμενα αλλοίωσης του σήματος (π.χ. θόρυβος) σε σχέση με τη μέθοδο Schlumberger [9],[10].

Η μέθοδος πτώσης δυναμικού θεωρείται μία από τις πιο ακριβείς μεθόδους μέτρησης της αντίστασης γείωσης ενός συστήματος γείωσης, ωστόσο, η δοκιμή μπορεί να είναι χρονοβόρα και απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνογνωσία για την ακριβή εκτέλεση.

Συνολικά, η μέτρηση της αντίστασης των πλεγμάτων και άλλων διατάξεων γείωσης είναι μια κρίσιμη πτυχή της ηλεκτρικής ασφάλειας που δεν πρέπει να παραβλέπεται. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία αυτών των μετρήσεων μπορεί να συμβάλει στην πρόληψη ατυχημάτων και να διασφαλίσει τη σωστή λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού.

#### 1.5 Αντίσταση γείωσης τυπικών γειωτών

Η γείωση είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό ασφαλείας τόσο για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις (κτηριακές βιομηχανίες), όσο και για το ηλεκτρικό δίκτυο. Σκοπός της γείωσης είναι να παρέχει μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης για τη ροή των ρευμάτων σφάλματος προς το έδαφος, ώστε να προστατεύει τους ανθρώπους και τον εξοπλισμό και να περιορίζει το μέγεθος των ρευμάτων σφάλματος.

### 1.5.1 Αντίσταση γείωσης ράβδου

Αυτά τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως από χαλκό ή γαλβανισμένο χάλυβα και εισάγονται στο έδαφος κάθετα. Χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό πολλαπλών όμοιων ή και σε συνδυασμό με άλλα ηλεκτρόδια, όπως πλέγματα για τη δημιουργία σύνθετων γειωτών.

Η διάμετρος και το μήκος της ράβδου μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή και τις συνθήκες του εδάφους.

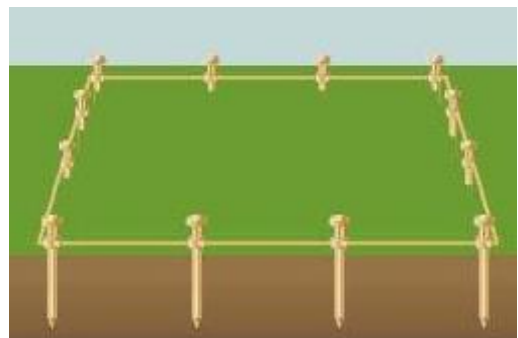
Είναι επίσης σημαντικό να συνδεθεί το ηλεκτρόδιο γείωσης ράβδου με την εγκατάσταση χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο αγωγό. Ο αγωγός θα πρέπει να έχει το κατάλληλο μέγεθος για το αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος και θα πρέπει να είναι σταθερά συνδεδεμένος με το ηλεκτρόδιο και την εγκατάσταση.

Σημειώνεται ότι στους υπολογισμούς για την αντίσταση γείωσης των ράβδων σε διστρωματικό έδαφος λαμβάνεται υπ' όψη το ανηγμένο μήκος των ράβδων  $l_{eq}$ , που αντιστοιχεί σε μονοστρωματικό έδαφος ειδικής αντίστασης  $\rho_1$ .

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος γείωσης με χρήση ράβδων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της ειδικής αντίστασης του εδάφους, του βάθους τοποθέτησης, το μήκος των ράβδων καθώς και της αντίστασης μεταξύ τους στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται πολλαπλές ράβδοι [17],[18].



Σχήμα 1.8. Μία ράβδος γείωσης [14]



Σχήμα 1.9. Τετραγωνική διάταξη γείωσης [15]

### 1.5.2 Μεμονωμένη ράβδου γείωσης

Η αντίσταση γείωσης μιας μεμονωμένης ράβδου υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο IEEE80 [19],[20],[21]:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 \right] \quad (1-6)$$

όπου :

- $\rho$  : η ειδική αντίσταση εδάφους,
- $l$  : το μήκος της ράβδου (m),
- $d$  : η διάμετρος της ράβδου (m).



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η παρακάτω σχέση :

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right) \quad (1-7)$$

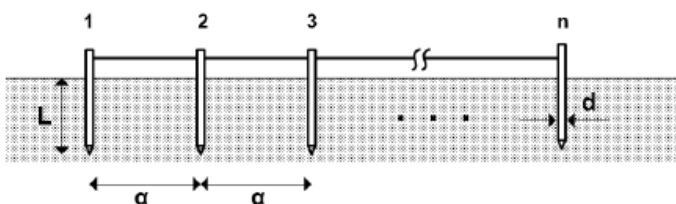
### 1.5.3 Πολλαπλές ράβδοι σε ευθεία διάταξη ή βρόχο μεγάλου μήκους

Σε αυτήν τη διαμόρφωση, πολλές ράβδοι γείωσης εγκαθίστανται σε ευθεία γραμμή, συνήθως σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Κάθε ράβδος οδηγείται κάθετα στο έδαφος και η ηλεκτρική εγκατάσταση συνδέεται με αυτές τις ράβδους μέσω ενός αγωγού. Οι ράβδοι μπορεί να είναι κατασκευασμένες από χαλκό ή άλλα αγωγιμα υλικά.

Αυτή η διάταξη βοηθά στη διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος από το σύστημα σε μεγαλύτερο όγκο εδάφους, γεγονός που ενισχύει την απαγωγή των ρευμάτων σφάλματος και παρέχει μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης προς το έδαφος. Η απόσταση μεταξύ των ράβδων καθορίζεται με βάση την ειδική αντίσταση του εδάφους. Όσο περισσότερες ράβδοι χρησιμοποιούνται, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή αντίστασης γείωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί [50].

Τα πλεονεκτήματα της γείωσης σε ευθεία γραμμή είναι ,

- α) εύκολη εγκατάσταση,
- β) κατάλληλη για μικρότερες περιοχές ή όπου ο χώρος είναι περιορισμένος



Σχήμα 1.10. Πολλαπλή διάταξη γείωσης ράβδου σε ευθεία διάταξη ή βρόχο μεγάλου μήκους [19]

Η σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της τιμής αντίστασης γείωσης σε ράβδους σε ευθεία διάταξη ή βρόχο μεγάλου μήκους είναι :

$$R_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left\{ \ln\left(\frac{8 \cdot l}{d}\right) - 1 + \left[ \frac{2 \cdot l}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot n}{\pi}\right) \right] \right\} \quad (1-11)$$

όπου :

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega \cdot m$ )

$\alpha$  : η απόσταση μεταξύ των ράβδων (m)

$d$  : η διάμετρος της κάθε ράβδου (m)

$l$  : το μήκος της ράβδου (m)

$n$  : ο αριθμός των ράβδων

### 1.5.4 Τριγωνική διάταξη γείωσης

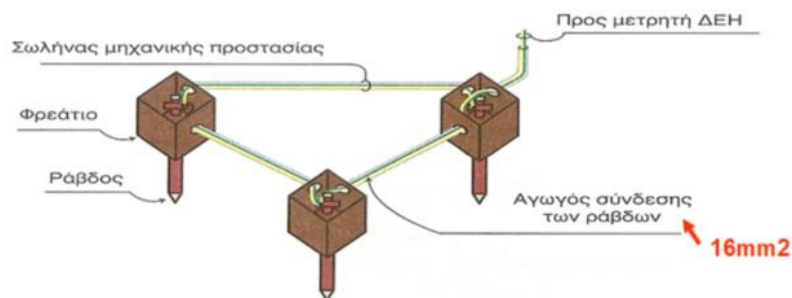
Ένα τριγωνικό σύστημα γείωσης με ράβδους είναι ένας τύπος συστήματος γείωσης που αποτελείται από τρεις κατακόρυφες ράβδους συνήθως μήκους 2,5 έως 3 μέτρα, τοποθετημένες σε τριγωνικό σχήμα με απόσταση 6 έως 9 μέτρα μεταξύ τους σε ίσες αποστάσεις η μία από την άλλη. Οι ράβδοι εισάγονται στο έδαφος και συνδέονται μεταξύ τους με ένα οριζόντιο αγωγό που είναι θαμμένος στο έδαφος. Η τριγωνική διάταξη των ράβδων βοηθά στην ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου σε μια ευρύτερη περιοχή του εδάφους, γεγονός που βελτιώνει την αποτελεσματικότητα του συστήματος γείωσης. Η τριγωνική διαμόρφωση χρησιμοποιείται επίσης για να παρέχει ένα πιο σταθερό και ισορροπημένο σύστημα γείωσης σε σύγκριση με μια απλή ράβδο ή δύο ράβδους που τοποθετούνται σε μια ευθεία γραμμή. Η αντίσταση γείωσης ενός τριγωνικού γειωτή δίνεται από τη σχέση [22] :

$$R_{tr} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 + \frac{2 \cdot l}{\alpha} \right] \quad (1-8)$$

όπου :

- $\rho$  : ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega \cdot m$ )
- $l$  : το μήκος του κάθε γειωτή (m)
- $d$  : η διάμετρος του κάθε γειωτή (m)
- $\alpha$  : η απόσταση μεταξύ των ράβδων (m)

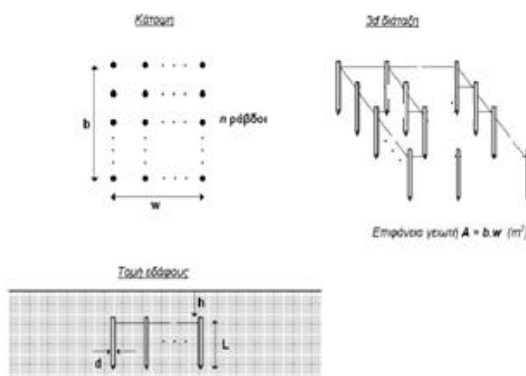
*Σημείωση* : Το  $\alpha > 2l$  για την αποφυγή της έντονης επικάλυψης των πεδίων ροής



Σχήμα 1.11. Τριγωνική διάταξη γείωσης [16]

### 1.5.5 Ράβδοι σε διάταξη συστοιχίας ( διάταξη array )

Μια συστοιχία ράβδων αναφέρεται σε έναν συγκεκριμένο τύπο συστήματος γείωσης που συνήθως είναι μια ομάδα ράβδων τοποθετημένων σε μια συγκεκριμένη σειρά ή μοτίβο. Σε αυτό το πλαίσιο, μια συστοιχία είναι μια σειρά διασυνδεδεμένων ράβδων γείωσης που τοποθετούνται εντός του εδάφους και διασυνδέονται μεταξύ τους. Η διάταξη array συνήθως συνδυάζει ράβδους με πλέγμα για να πετύχει χαμηλότερη τιμή αντίστασης [23],[24].



Σχήμα 1.12. Πολλαπλή διάταξη γειωτών που δημιουργούν μία επιφάνεια A [17]

Η σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης μιας συστοιχίας ράβδων είναι :

$$R_a = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot l} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 + \frac{2 \cdot k_1 \cdot l}{\sqrt{A}} * (\sqrt{n} - 1)^2 \right] \quad (1-9)$$

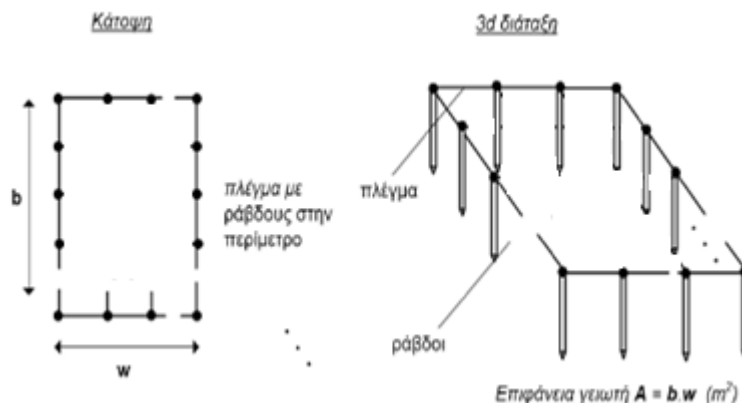
όπου :

- $\rho$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους,
- $A$  : η επιφάνεια που καλύπτει η συστοιχία των ράβδων,
- $l$  : το μήκος του κάθε γειωτή,
- $d$  : η διάμετρος του κάθε γειωτή,
- $n$  : ο αριθμός των ράβδων που χρησιμοποιούνται,
- $k_1$  : μια σταθερά,

$$k_1 = 1,37 \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\sqrt{A}}{h}\right)^{0,25}} \right] - 0,045 \cdot (N - 1) \quad (1-10)$$

- $h$  : το βάθος τοποθέτησης της κάθε ράβδου
- $N$  : ο λόγος μήκους/πλάτους ( $N=b/w$ ) της επιφάνειας που καλύπτει η συστοιχία. Το μήκος  $b$  είναι η μεγαλύτερη πλευρά και το  $w$  η μικρότερη .

### 1.5.6 Ράβδοι σε κοίλη τετραγωνική διάταξη (hollow square)



Σχήμα 1.13. Πολλαπλή διάταξη γειωτών που δημιουργούν μία επιφάνεια A [18]

Η αντίσταση γείωσης πολλαπλών ράβδων σε κοίλη τετραγωνική διάταξη δίνεται από τη σχέση[50]:

$$R_a = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_e} \cdot \left[ 1 + \frac{2,16 \cdot r_e \cdot n \cdot \ln(n) \cdot (1 - e^{-k})}{P} \right] \text{ με } k = \frac{3 \cdot \sqrt{s}}{r_e} \quad (1-12)$$

όπου :

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega \text{ m}$ ),

$r_e$  : η ισοδύναμη ακτίνα επιφάνειας εδάφους με  $r_e = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$  (m),

$n$  : ο αριθμός των ράβδων που χρειάζονται

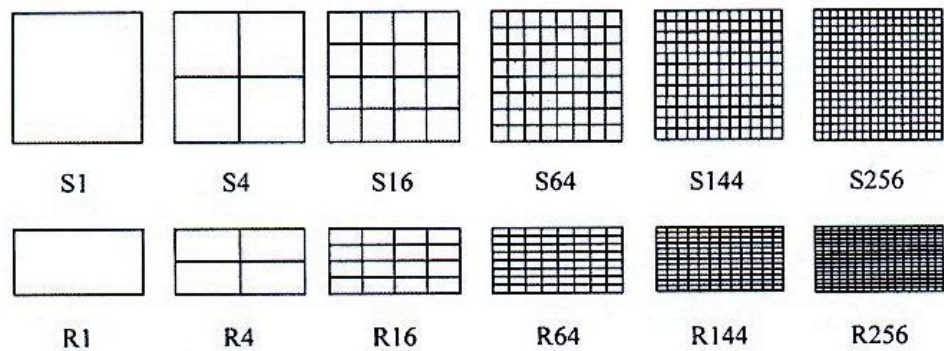
$P$  : η περίμετρος της επιφάνειας που περικλείουν οι ράβδοι (m),

$s$  : η απόσταση μεταξύ των ράβδων (m).

### 1.5.7 Γειωτής Πλέγματος

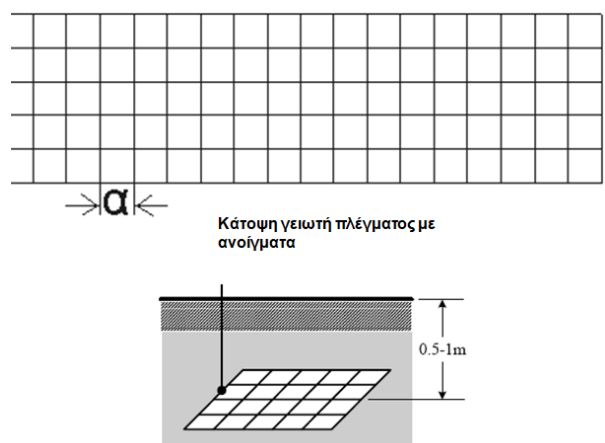
Ο γειωτής πλέγματος είναι σημαντικός τύπος γειωτή για την ασφαλή λειτουργία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και την προστασία του εξοπλισμού, όπως και για την προστασία των ανθρώπων από τους κινδύνους ηλεκτροπληξίας[3],[15]. Οι βηματικές τάσεις στην επιφάνεια τους είναι χαμηλές και εξαρτώνται γενικά από τις αποστάσεις μεταξύ των αγωγών του πλέγματος. Όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα, τόσο χαμηλότερες είναι οι βηματικές τάσεις στην επιφάνεια. Τα πλέγματα συχνά συνδυάζονται με ράβδους ειδικά σε γειώσεις υποσταθμών, ώστε να επιτυγχάνονται χαμηλές τιμές για την αντίσταση γείωσης τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε πολυστρωματικά εδάφη, όπου με τις ράβδους δίνεται η δυνατότητα ο γειωτής να έρθει σε επαφή με κατώτερα στρώματα χαμηλής ειδικής αντίστασης που ενδεχομένως βρίσκονται σε μεγάλο βάθος, ώστε να βελτιώνεται η συμπεριφορά του [25],[26].

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

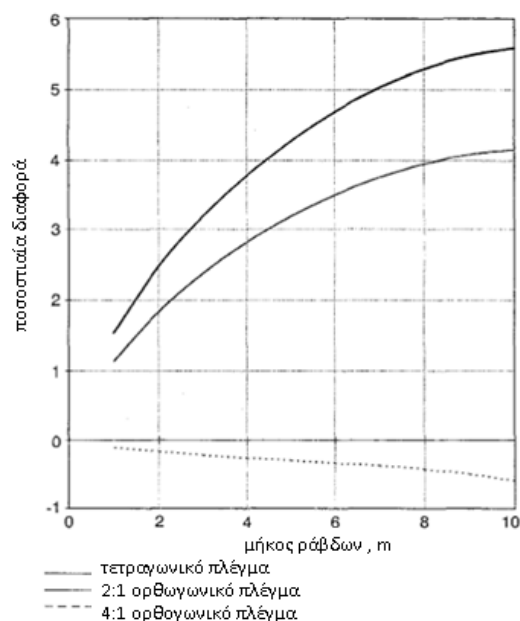


Σχήμα 1.14. Ενδεικτικά είδη πλεγμάτων [17]

- ⇒ Τα πλέγματα που συμβολίζονται με S αναφέρονται σε τετραγωνικά πλέγματα
- ⇒ Τα πλέγματα που συμβολίζονται με R αναφέρονται σε ορθογωνικά πλέγματα



Σχήμα 1.15. Κάτοψη πλέγματος με ανοίγματα μήκους  $\alpha$ . Η τοποθέτηση του γίνεται σε βάθος 0,5 έως 1 m. [11]



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

*Σχήμα 1.16. Επίδραση της αναλογίας των αντιστάσεων των αγωγών σε πλέγματα γείωσης στην τιμή αντίστασης γείωσης. Αναφέρονται οι περιπτώσεις βρόχων τετραγωνικού σχήματος και βρόχων ορθογωνικού σχήματος με αναλογίες πλευρών 2:1 και 4:1*

Η αντίσταση γείωσης ενός πλέγματος για μονοστρωματικά εδάφη δίνεται από τη σχέση :

$$R = \rho \left[ \frac{1}{l} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1-13)$$

όπου :

R : η αντίσταση του πλέγματος ( $\Omega$ ),

A : εμβαδόν του πλέγματος ( $m^2$ ),

l : το συνολικό μήκος του πλέγματος ( $l = n_b \cdot W + n_w \cdot b$ ) (m),

$n_b$ : αριθμός κόμβων κατά μήκος πλέγματος

$n_w$ : αριθμός κόμβων κατά πλάτος πλέγματος

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του στρώματος ( $\Omega \cdot m$ ).

Στην περίπτωση διστρωματικών εδαφών μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προηγούμενη σχέση αντικαθιστώντας την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους  $\rho$  με την ισοδύναμη τιμή  $\rho_\alpha$  η οποία υπολογίζεται ως [40] :

$$\rho_\alpha = \frac{\rho_1}{\left\{ 1 + \left[ \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right] \cdot \left[ 1 - e^{-K \cdot (h+2 \cdot hg)} \right] \right\}} \quad \text{για } \rho_2 < \rho_1 \quad (1-14)$$

$$\rho_\alpha = \rho_2 \left\{ 1 + \left[ \frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right] \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{1}{K \cdot (h+2 \cdot hg)}} \right] \right\} \quad \text{για } \rho_2 > \rho_1 \quad (1-15)$$

όπου :

K : συντελεστής ανάκλασης με  $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$

$\rho_\alpha$  : η φαινόμενη ειδική αντίσταση,

$\rho_1, h$  : επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης  $\rho_1$  και βάθους h,

$\rho_2$  : η δεύτερο στρώμα ειδικής αντίστασης ,

h : είναι το πάχος του ανώτερου στρώματος (m),

b : το βάθος τοποθέτησης πλέγματος (m).

### 1.5.8 Θεμελιακή γείωση

Η θεμελιακή γείωση είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο και καθιερωμένο σύστημα ηλεκτρικής γείωσης για τα κτίρια. Έχει αναπτυχθεί και βελτιωθεί επί πολλά χρόνια από ηλεκτρολόγους μηχανικούς, σχεδιαστές κτηρίων για να εξασφαλίσει την ασφάλεια και την αξιοπιστία των ηλεκτρικών συστημάτων στα κτίρια.

Το ηλεκτρόδιο γείωσης είναι συνήθως μια χάλκινη ή γαλβανισμένη ταινία, που θάβεται βαθιά στο έδαφος μέσα στο σκυρόδεμα των θεμελίων του κτηρίου και πρέπει να περικλείεται και από τις 4 πλευρές του σκυροδέματος πάχους τουλάχιστον 5 cm . Συνδέεται με την ηλεκτρική εγκατάσταση μέσω ενός χάλκινου αγωγού, ο οποίος είναι συνήθως ενσωματωμένος στο σκυρόδεμα του θεμελίου.

Η ταινία όσο γίνεται πρέπει να είναι συνεχής έτσι ώστε να αποφεύγονται οι πολλές συνδέσεις και να επιτυγχάνεται μικρή τιμή της αντίστασης γείωσης.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση της θεμελιακής γείωσης έχει γίνει υποχρεωτική σύμφωνα με το νέο πρότυπο ΕΛΟΤ HD384 [48].

Η αντίσταση του θεμελιακού γειωτή υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R_c = \frac{2 \cdot \rho}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4 \cdot A}} \quad (1-16)$$

όπου :

- A : η επιφάνεια που καλύπτει η θεμελιακή γείωση (m<sup>2</sup>),
- ρ : η ειδική αντίσταση του εδάφους ( Ω m ),
- dc : το βάθος τοποθέτησης της ταινίας (m).

Η θεμελιακή γείωση διαθέτει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Λόγω ότι η θεμελιακή γείωση βρίσκεται θαμμένη στο κατώτερο σημείο του κτηρίου και το σημείο αυτό είναι αρκετά υγρό αλλά και σε συνδυασμό ότι είναι ενσωματωμένη με όλο τον οπλισμό του κτηρίου, αυτομάτως επιτυγχάνεται και η μικρότερη τιμή αντίστασης που πρέπει να υπάρχει (<2 Ω) .
- Η τιμή της αντίστασης δεν επηρεάζεται από εξωτερικές συνθήκες (χειμώνα, καλοκαίρι) πράγμα που θα την καθιστά ιδιαίτερα ασφαλή.
- Συγκριτικά με άλλα είδη γειωτών, η διάρκεια ζωής της θεμελιακής γείωσης, είναι αρκετά μεγαλύτερη, αρκεί βέβαια να έχει τοποθετηθεί σωστά για να αποφευχθούν τυχουσες μηχανικές καταπονήσεις .
- Η γείωση παρέχει ένα μονοπάτι για την ασφαλή εκτόνωση κεραυνικών πληγμάτων, μειώνοντας τον κίνδυνο ζημιών στο κτήριο και αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για κτήρια που βρίσκονται σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης κεραυνών.

### 1.5.9 Γειωτής πλάκας

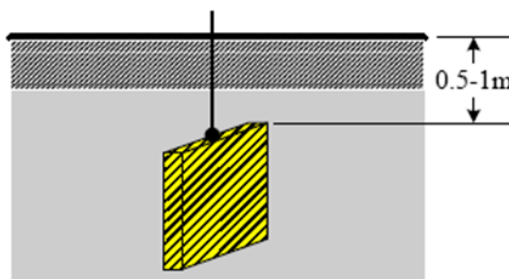
Ο γειωτής πλάκας είναι μια μεταλλική πλάκα που είναι θαμμένη στη γη και συνδέεται με ένα ηλεκτρικό σύστημα για να παρέχει μια ασφαλή διαδρομή για τη ροή των ηλεκτρικών ρευμάτων σε περίπτωση σφάλματος ή υπέρτασης. Είναι κατασκευασμένη από χαλκό ή κράμα χαλκού και θάβεται κατακόρυφα σε βάθος 0,5-1 μέτρο σε σημείο με καλή αγωγιμότητα προς τη γη, όπως υγρό έδαφος. Ο υπολογισμός του γειωτή πλέγματος γίνεται με την εξής σχέση :

$$R_p = \frac{\rho}{4,5 \cdot b} \quad (1-17)$$

Με  $b$  να είναι το μήκος της πλευράς της τετραγωνικής πλάκας (m)

Σημείωση : Σε περίπτωση που η πλάκα δεν είναι τετραγωνική , τότε λαμβάνεται :

$$b = \sqrt{A} \quad (1-18)$$



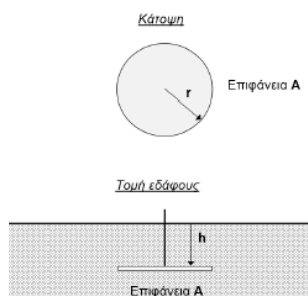
Σχήμα 1.17. Γειωτής τετραγωνικής πλάκας

### 1.5.10 Οριζόντιος κυκλικός γειωτής

Η χρήση της οριζόντιας κυκλικής πλάκας με την τετραγωνική είναι η ίδια μόνο που τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0,5-1 μέτρο. Ο τύπος που την περιγράφει είναι :

$$R_p = \frac{\rho}{4 \cdot r} \quad (1-19)$$

με  $r$  να είναι η ακτίνα του κύκλου της πλάκας

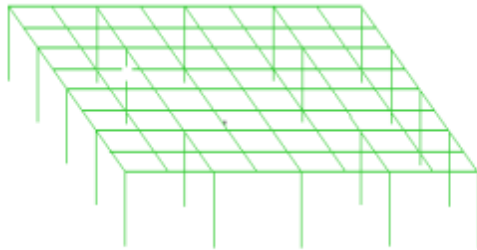


Σχήμα 1.18. Οριζόντιος κυκλικός γειωτής



### 1.5.11 Συνδυασμός γείωσης ράβδου και γείωση πλέγματος σε διστρωματικό έδαφος

Ο συνδυασμός αυτών των δύο μεθόδων εξασφαλίζει μια πιο αποτελεσματική απόδοση γείωσης σε διστρωματικά εδάφη. Η ράβδος παρέχει βαθύτερη γείωση ενώ το πλέγμα διασφαλίζει μια ευρύτερη επαφή με το έδαφος, βοηθώντας στη μείωση αντίστασης γείωσης. Επιπλέον, η συνδυασμένη γείωση παρέχει μεγαλύτερη αντοχή σε διάφορες καταστάσεις, όπως σε περιοχές με υψηλή υγρασία ή μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες. [27].



Σχήμα 1.19. Πλέγμα συνδυαζόμενο με ράβδους

$$\rho_{\alpha} = \frac{l \cdot (\rho_1 \cdot \rho_2)}{(\rho_2 \cdot (h - h_g) + \rho_1 \cdot (l_2 + h_g - h))} \quad \text{όπου } \rho_1 > \rho_2 \quad (1-20)$$

όπου :

$\rho_{\alpha}$  : η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους (  $\Omega \text{ m}$  ),

$l$  : το μήκος της κάθε ράβδου (m),

$\rho_1$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους του ανώτερου στρώματος (  $\Omega \text{ m}$  ),

$\rho_2$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους του κατώτερου στρώματος (  $\Omega \text{ m}$  ),

$h$  : είναι το πάχος του επιφανειακού στρώματος (m),

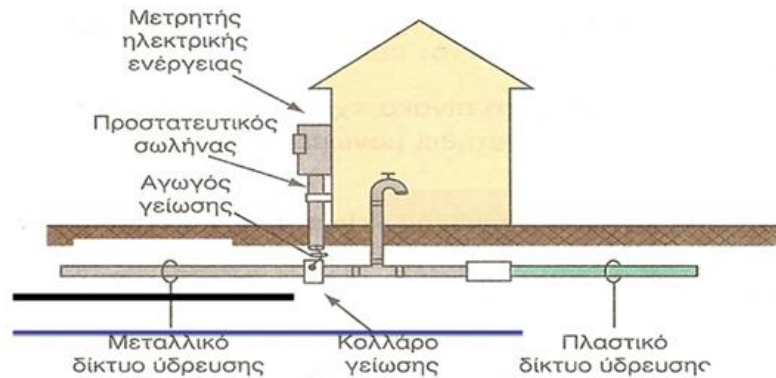
$h_g$  : το βάθος τοποθέτησης του πλέγματος (m).

### 1.5.12 Δίκτυο ύδρευσης

Δεν είναι ασφαλές να χρησιμοποιείται ένα σύστημα ύδρευσης ως ηλεκτρόδιο γείωσης. Η χρήση του δικτύου ύδρευσης ως συστήματος γείωσης μπορεί να είναι μια οικονομικά αποδοτική και αποτελεσματική λύση σε ορισμένες περιπτώσεις, αλλά απαιτεί προσεκτική εξέταση και σχεδιασμό για να διασφαλιστεί ότι είναι ασφαλής και αποτελεσματική.

Στην πραγματικότητα, η χρήση των συστημάτων ύδρευσης ως συσκευών γείωσης απαγορεύεται ρητά από τα πρότυπα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι σωλήνες νερού μπορεί να διαβρωθούν, να αποσυνδεθούν ή να αντικατασταθούν με μη αγώγιμα υλικά (π.χ πλαστικοί σωλήνες), γεγονός που μπορεί να διακόψει την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ του συστήματος και της γης.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη



Σχήμα 1.20. Γείωση στο δίκτυο ύδρευσης (Μη αποτελεσματική) [13]

## 1.6 Γειώσεις υποσταθμών

Η γείωση του υποσταθμού είναι μια κρίσιμη πτυχή του σχεδιασμού και της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη γείωσης πραγματοποιείται για να διασφαλιστεί ότι ο υποσταθμός είναι επαρκώς γειωμένος για την προστασία του προσωπικού από ηλεκτροπληξία και για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου ζημιών του εξοπλισμού (π.χ λόγω υπερθέρμανσης) [28],[29],[30].

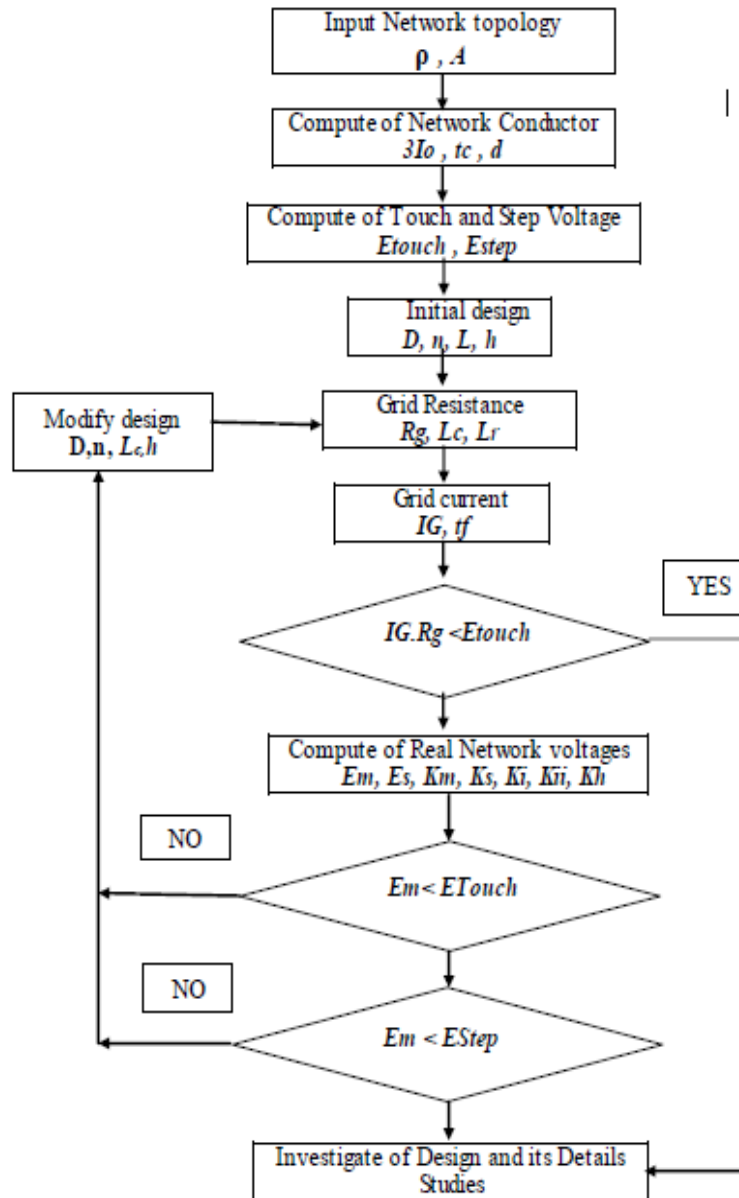
### 1.6.1 Εποχιακές Επιδράσεις στην Ασφάλεια του Συστήματος Γείωσης Υποσταθμού

Οι εποχιακές αλλαγές στις καιρικές συνθήκες μπορούν να έχουν σημαντικές επιδράσεις στην ασφάλεια του συστήματος γείωσης υποσταθμού. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, μπορεί να συσσωρευτεί πάχος στο έδαφος και στις επιφάνειες του υποσταθμού, εμποδίζοντας την αποτελεσματική γείωση. Επίσης, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η ξηρότητα του εδάφους, εξαιτίας της ανομβρίας, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και επομένως της αντίστασης γείωσης του γειωτή που μπορεί να αποβεί επικίνδυνη, υπό την έννοια της αύξησης των τάσεων επαφής, των βηματικών τάσεων κτλ [5],[7].

- ⇒ Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της βροχής, η υγρασία μπορεί να εισχωρήσει στα εδάφη και να αυξήσει την αγωγιμότητά τους, με αποτέλεσμα να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος γείωσης.
- ⇒ Η παγωμένη επιφάνεια μπορεί να δημιουργήσει μια μόνωση μεταξύ της γείωσης και του εδάφους, κάνοντας το σύστημα γείωσης ανεπαρκές ή ακόμα και ανίκανο να διοχετεύσει στο έδαφος ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διάρκεια εκδήλωσης σφαλμάτων

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Στο σχήμα 1.21 που ακολουθεί δίνεται το λογικό διάγραμμα της διαδικασίας υπολογισμού ενός γειωτή υποσταθμού όπου φαίνονται όλα τα απαραίτητα ενδιάμεσα βήματα υπολογισμών τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 1.21. Διάγραμμα ροής για τον σχεδιασμό συστήματος γείωσης υποσταθμού [31]

### 1.6.2 Διαστασιολόγηση αγωγών ( A )

Για ένα πλέγμα γείωσης, η διατομή των αγωγών γείωσης καθορίζεται συνήθως με βάση το ρεύμα σφάλματος, τη διάρκεια του σφάλματος, καθώς και την ειδική αντίσταση του εδάφους και άλλους παράγοντες.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το βάθος της ταφής του αγωγού και η πιθανότητα διάβρωσης κατά την επιλογή του υλικού του αγωγού. Σε γενικές γραμμές, οι αγωγοί για τα πλέγματα γείωσης κατασκευάζονται συχνά από υλικά όπως [28],[31]:

- ανοδιώμενος μαλακός χαλκός με αγωγιμότητα 100% ,
- σκληρός χαλκός ,με αγωγιμότητα 97% ,
- επιχαλκωμένο χαλύβδινο σύρμα με αγωγιμότητα 40% ,
- επιχαλκωμένο χαλύβδινο σύρμα με αγωγιμότητα 30% ,
- επιχαλκωμένη χαλύβδινη ράβδος με αγωγιμότητα 17% ,
- χαλύβδινο σύρμα με επίστρωση αλουμινίου με αγωγιμότητα 20,3% ,
- χάλυβας με αγωγιμότητα 10,8% ,
- χάλυβας με ανοξειδωτη επικάλυψη με αγωγιμότητα 9,8% ,
- επιψευδαργυρωμένος χάλυβας με αγωγιμότητα 8,6% και
- ανοξειδωτος χάλυβας με αγωγιμότητα 2,4% .

Συγκεκριμένα σύμφωνα με τη σχέση του Sverak που προσδιορίζει την ελάχιστη διατομή των αγωγών είναι :

$$A = \frac{I}{\left[ \left( \frac{T_{CAP} \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) \cdot \ln \left( \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right) \right]^{0,5}} \quad (1-21)$$

όπου :

I (kA) : η ενεργός τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό

A (mm<sup>2</sup>) : απαιτούμενη διατομή των αγωγών πλέγματος γείωσης

T<sub>CAP</sub> : θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου ( J/m<sup>3</sup>·K ),

t<sub>c</sub> : διάρκεια του ρεύματος σφάλματος ( 0,5-1 sec ),

α<sub>r</sub> : θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης αναφοράς θερμοκρασία T<sub>r</sub> ,

T<sub>r</sub> : θερμοκρασία αναφοράς υλικού αγωγού,

ρ<sub>r</sub> :ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία αναφοράς T<sub>r</sub> ,

T<sub>m</sub> : μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία,

T<sub>a</sub>: θερμοκρασία περιβάλλοντος,

K<sub>0</sub> : θερμοκρασία αναφοράς για τις υλικές σταθερές ( °C )

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Αγωγιμότητα Υλικού [% IACS]	$\alpha_t$ (στους 20 °C) [1/°C]	$K_0$ στους 0 °C [°C]	Θερμοκρασία τήξης $T_m$ [°C]	Ειδική αντίσταση (στους 20 °C) $\rho_t$ [μΩ.cm]	Θερμοχωρητικότητα αγωγού TCAP [J/(cm <sup>3</sup> ·°C)]
1	Ανοδιωμένος μαλακός χαλκός (soft-drawn)	100	0.00393	234	1083	1.72	3.4
2	Σκληρός χαλκός (hard-drawn)	97	0.00381	242	1084	1.78	3.4
3	Επιχαλωμένο χαλύβδινο σύρμα	40	0.00378	245	1084	4.4	3.8
4	Επιχαλωμένο χαλύβδινο σύρμα	30	0.00378	245	1084	5.86	3.8
5	Επιχαλωμένη χαλύβδινη ράβδος	17	0.00378	245	1084	10.1	3.8
6	Χαλύβδινο σύρμα με επίστρωση αλουμινίου	20.3	0.0036	258	657	8.48	3.561
7	Χάλυβας (Steel 1020)	10.8	0.00377	245	1510	15.9	3.8
8	Χάλυβας με ανοξείδωτη επικάλυψη	9.8	0.00377	245	1400	17.5	4.4
9	Επιψευδαργυρωμένος χάλυβας	8.6	0.0032	293	419	20.1	3.9
10	Ανοξείδωτος χάλυβας (SS-304)	2.4	0.0013	749	1400	72	4

Πίνακας 1.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά των τυποποιημένων υλικών [50\_σελ.36]

### 1.6.3 Μέγιστα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής( Estep , Etouth )

Τα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής σε Volt για σωματικό βάρος 50 και 70kg μπορούν να υπολογιστούν με τις σχέσεις [31],[39] :

$$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (V) \quad (1-22)$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad (V) \quad (1-23)$$

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (V) \quad (1-24)$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad (V) \quad (1-25)$$

όπου :

$\rho_s$  : ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος  
 $t$  : η διάρκεια του ρεύματος σφάλματος σε δευτερόλεπτα  
 $C_s$ : ο διορθωτικός συντελεστής επιφανειακού στρώματος

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (1-26)$$

όπου :

$h_s$  : όπου είναι το πάχος του υλικού της επιφάνειας (m),

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega \cdot m$ ),

$\rho_s$  : η ειδική αντίσταση επιφανειακού στρώματος ( $\Omega \cdot m$ ).

Ωστόσο, ένα λεπτό στρώμα (8 - 15 cm) υλικού υψηλής ειδικής αντίστασης απλώνεται συχνά στην επιφάνεια της γης πάνω από το σύστημα γείωσης για να αυξηθεί το όριο της αντίστοιχης τάσης επαφής. Σε περίπτωση απουσίας τέτοιου επιφανειακού υλικού τότε  $C_s = 1$  και  $\rho_s = \rho$  [7].

#### 1.6.4 Το μέγιστο ρεύμα μέσω του σώματος

Η μέγιστη ανεκτή ένταση ρεύματος μέσω του σώματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η συχνότητα του ρεύματος, η διάρκεια διέλευσης του ρεύματος από το σώμα και η αντίσταση του σώματος και η υγρασία του περιβάλλοντος [33].

Συγκεκριμένα για το επιτρεπόμενο ρεύμα σώματος βάρους 50 kg και 70 kg δίνεται από τη σχέση:

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ (mA)} \quad (1-27)$$

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t}} \text{ (mA)} \quad (1-28)$$

όπου  $t$  η διάρκεια σφάλματος (s)

#### 1.6.5 Αντίσταση γείωσης συστοιχίας ράβδων - πλέγματος ( $R_g$ )

Οι σχέσεις Schwarz που ακολουθούν δείχνουν τη σχέση μεταξύ του συντελεστή ανάκλασης και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους, της αντίστασης ράβδων, της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ του πλέγματος και των ράβδων, καθώς και η ειδική αντίσταση του εδάφους [27],[34] :

Για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης του πλέγματος ισχύει :

$$R_1 = \left(\frac{\rho_1}{\pi \cdot l_1}\right) \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot l_1}{h'}\right) + \kappa_1 \cdot \left(\frac{l_1}{\sqrt{A}}\right) - k_2\right] \quad (1-29)$$

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Για τον υπολογισμό της αντίστασης των ράβδων ισχύει :

$$R_2 = \left( \frac{\rho_a}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot l_2} \right) \cdot \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot l_2}{d_2} \right) - 1 + 2 \cdot \kappa_1 \cdot \left( \frac{l_2}{\sqrt{A}} \right) \cdot (\sqrt{n-1})^2 \right] \quad (1-30)$$

Αφού έχουν υπολογιστεί οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  , για να υπολογιστεί η αμοιβαία μεταξύ τους αντίσταση χρησιμοποιείται ο τύπος :

$$R_{12} = \left( \frac{\rho_a}{\pi \cdot l_1} \right) \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l_1}{l_2} \right) + \kappa_1 \cdot \left( \frac{l_1}{\sqrt{A}} \right) - \kappa_2 + 1 \right] \quad (1-31)$$

Συνολική αντίσταση του συστήματος γείωσης:

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_{12}} \quad (1-32)$$

όπου :

- $R_1$  : η αντίσταση όλων των ράβδων γείωσης,
- $R_2$  : η αντίσταση όλων των αγωγών του πλέγματος,
- $R_{12}$  : η αμοιβαία αντίσταση μεταξύ των πλεγμάτων και των ράβδων γείωσης,
- $n$  : ο αριθμός ράβδων γείωσης ,
- $d_2$  : η διάμετρος των οδηγούμενων ράβδων σε m,
- $A$  : η επιφάνεια που καλύπτουν οι ράβδοι σε  $m^2$  ,
- $K_1, K_2$  η σταθερές που σχετίζονται με τη γεωμετρία του συστήματος,
- $h' = \sqrt{d \cdot h}$  για αγωγό θαμμένο σε βάθος  $h$ , ή
- $h' = 0,5d$  για αγωγούς σε  $h = 0$  (στην επιφάνεια της γης),
- $l_1$ : το συνολικό μήκος των αγωγών του πλέγματος σε m,
- $l_2$  : το μήκος της κάθε ράβδου.

$$K_1 = 1,41 - (0,04 \cdot X) \quad (1-33)$$

$$K_2 = 5,5 + (0,15 \cdot X) \quad (1-34)$$

$X$  : είναι ο λόγος του μήκους προς το πλάτος

### 1.6.5.1 Εναλλακτική μορφή υπολογισμού συστοιχίας πλέγματος – ράβδων

Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοστούν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό συνδυασμού ράβδων – πλέγμα . Πιο αναλυτικά ,

$$R_c = \frac{R_g \cdot (R_r + R_m)}{R_g + R_r + R_m} \quad (1-35)$$

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

$$R_g = \rho \cdot \left[ \frac{1}{L_{tot}} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h_g \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1-36)$$

$$R_r = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left( \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right) \quad (1-37)$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L \cdot n} \cdot \ln \left( \frac{L_{tot}}{L^{1,2}} + 1 \right) \quad (1-38)$$

όπου ,

$R_r$  : η αντίσταση γείωσης κάθε ράβδου ( $\Omega$ ),

$R_m$  : η αμοιβαία αντίσταση ράβδων - πλέγματος ( $\Omega$ ),

$n$  : ο αριθμός ράβδων γείωσης που τοποθετούνται στην περιοχή  $A$ ,

$d$  : η διάμετρος των οδηγούμενων ράβδων (m),

$L$  (m) : μήκος ράβδου,

$\rho$  : η ειδική αντίσταση εδάφους ( $\Omega \text{ m}$ ).

### 1.6.6 Μέγιστη ένταση ρεύματος πλέγματος ( $I_G$ )

Το μέγιστο ρεύμα πλέγματος αναφέρεται στη μέγιστη ποσότητα έντασης ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να διαρρέυσει μέσω ενός συγκεκριμένου ηλεκτρικού πλέγματος χωρίς να προκληθεί βλάβη στον εξοπλισμό ή να υπερβεί τα όρια σχεδιασμού του. Η υπέρβαση μπορεί να προκαλέσει μια σειρά προβλημάτων, όπως υπερθέρμανση και πτώση τάσης,. Η σχέση που δίνει την τιμή του μέγιστης έντασης ρεύματος πλέγματος είναι [28],[34] :

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot I_f \quad (1-39)$$

όπου :

$I_G$ : Μέγιστη ένταση ρεύματος πλέγματος που ρέει μεταξύ του γειωτή και της περιβάλλουσας γης

$D_f$  : Συντελεστής απόσβεσης για τον προσδιορισμό του  $I_G$

$I_f$  : Σ'ένταση συμμετρικό ρεύματος σφάλματος

Αυτό μπορεί να βρεθεί από τις μελέτες συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ή από υπολογισμό. Σε γενικές γραμμές, η υψηλότερη τιμή έντασης ηλεκτρικού ρεύματος υπό συνθήκες σφάλματος θα βρίσκεται στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή του υποσταθμού, συνήθως ανάλογα με όποιο από αυτά έχει τη χαμηλότερη ονομαστική τάση [34].



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Συντελεστής διαίρεσης ρεύματος σφάλματος

$S_f = 0,9$  για μία πύλη, μία γραμμή μεταφοράς επιστρέφει στον υποσταθμό

0,8 για δύο πύλες δύο γραμμές μεταφοράς επιστρέφουν στον υποσταθμό

0,7 για περισσότερες πύλες, περισσότερες γραμμές μεταφοράς επιστρέφουν στον υποσταθμό

$$\text{Ο Συντελεστής απόσβεσης } D_f \text{ ισούται με : } D_f = \sqrt{\left[1 + \frac{T_\alpha}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot t_f}{T_\alpha}}\right)\right]} \quad (1-40)$$

όπου :

$t_f$ : είναι η διάρκεια του σφάλματος (sec)

$T_\alpha$ : η σταθερά χρονικής μετατόπισης

$$T_\alpha = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (1-41)$$

Το ρεύμα σφάλματος  $I_F$  μπορεί να προκαλέσει υψηλότερες αυξήσεις τάσης από ότι το συμμετρικό ρεύμα σφάλματος και μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε γειωμένα συστήματα υψηλής αντίστασης.

### 1.6.7 Ανύψωση Δυναμικού Γείωσης (GPR) :

Η ανύψωση του δυναμικού γείωσης (GPR) είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται στα ηλεκτρικά συστήματα όταν υπάρχει σφάλμα στο σύστημα, όπως ένα κεραυνικό πλήγμα, το οποίο προκαλεί ξαφνική αύξηση του ηλεκτρικού δυναμικού σε ένα σημείο του εδάφους.

Αυτή η αύξηση του δυναμικού μπορεί να δημιουργήσει μια επικίνδυνη κατάσταση, ιδιαίτερα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του εδάφους, η οποία μπορεί να αποτελέσει απειλή για ανθρώπους.

Για τον περιορισμό των επιπτώσεων του GPR χρησιμοποιείται συστήματα γείωσης το οποίο παρέχει μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης για τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας προς το έδαφος όπου συμβάλλει στη μείωση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ διαφορετικών σημείων του εδάφους. Το GPR υπολογίζεται ως εξής [28],[31],[35] :

$$GRP = I_G \cdot R_g \quad (1-42)$$

όπου :

$I_G$ : Μέγιστη ένταση ρεύματος πλέγματος που ρέει μεταξύ του γειωμένου δικτύου και της περιβάλλουσας γης

$R_g$  : Αντίσταση γείωσης

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

### 1.6.8 Τάση βρόχου (Mesh Voltage) $E_m$

Η απόσταση μεταξύ των γειτονικών αγωγών και ο αριθμός των αγωγών εξαρτώνται οπωσδήποτε ο ένας από τον άλλον για σταθερή επιφάνεια του πλέγματος. Όσο περισσότεροι αγωγοί εγκαθίστανται, τόσο μικρότερη η απόσταση μεταξύ των αγωγών. Η σχέση που περιγράφει την τάση βρόχου είναι [28],[34],[36] :

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (1-43)$$

όπου :

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega \cdot m$ ),

$I_G$  : η μέγιστη ένταση του ρεύματος που διέρχεται διαμέσου του γειωτή προς το έδαφος (A),

$K_m$  : ο συντελεστής γεωμετρικής απόστασης,

$K_i$  : ο συντελεστής ανομοιομορφίας,

$L_M$  : το ενεργό μήκος που αποτελούν το πλέγμα, που συμπεριλαμβάνει και το ενεργό μήκος των ράβδων, αν υπάρχουν,

n: γεωμετρική παράμετρος.

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left( \frac{a_g^2}{16 \cdot h_g \cdot d} + \frac{(a_g + 2 \cdot h_g)^2}{8 \cdot a_g \cdot d} - \frac{h_g}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \left( \ln \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right\} \quad (1-44)$$

όπου :

$a_g$  : Η απόσταση μεταξύ των παράλληλων αγωγών δικτύου (m)

$h_g$  : Το βάθος τοποθέτησης πλέγματος (m)

$d$  : Η διάμετρος της διατομής ενός αγωγού (m)

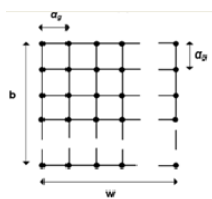
$K_h$  : Συντελεστής στάθμισης για το βάθος ταφής

$$K_h = 1 + \sqrt{\frac{h}{h_0}} \quad (1-45)$$

$K_{ii}$ : Συντελεστής στάθμισης για τα ηλεκτρόδια γείωσης σε γωνιακό πλέγμα

$K_{ii} = 1$  για πλέγματα με χρήση ράβδων γης κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος ή τις γωνίες

$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{n/2}}$  για πλέγματα **χωρίς** χρήση ράβδων κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του δικτύου



Σχήμα 1.22. Απόσταση γειτονικών αγωγών  $a_g$

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

### Γεωμετρικός παράγοντας, n

Ο γεωμετρικός συντελεστής, n είναι μια βασική παράμετρος που χρησιμοποιείται στη μαθηματική ανάλυση των πλεγμάτων γείωσης σε υποσταθμούς για τον υπολογισμό της τάσης του πλέγματος. Εξαρτάται από τη γεωμετρία του πλέγματος και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής ασφάλειας και της ορθής λειτουργίας του υποσταθμού [13],[34],[37]. Πιο αναλυτικά,

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (1-46)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (1-47)$$

$n_b = 1$  για τετραγωνικά πλέγματα ή

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (1-48)$$

$n_c = 1$  για τετραγωνικά και ορθογώνια πλέγματα ή

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A} \quad (1-49)$$

$n_d = 1$  για τετραγωνικά, ορθογώνια και σχήματος L πλέγματα ή

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (1-50)$$

όπου :

$L_c$  : Συνολικό μήκος οριζόντιων αγωγών πλέγματος (m)

$L_p$  : Το μήκος της περιμέτρου του πλέγματος (m)

$A$  : Συνολικό εμβαδόν του πλέγματος (m<sup>2</sup>)

$L_x$  και  $L_y$  : Το μέγιστο μήκος των πλευρών του πλέγματος στις διευθύνσεις X και Y (m)

$D_m$ : Η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σημείων του πλέγματος (m)

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (1-51)$$

όπου n είναι ο γεωμετρικός συντελεστής που προέκυψε παραπάνω.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Για πλέγματα με λίγα ή καθόλου ηλεκτρόδια ράβδων (και κανένα κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του πλέγματος):

$$L_M = L_C + L_R \quad (1-52)$$

Για πλέγματα με ηλεκτρόδια ράβδων κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του πλέγματος:

$$L_M = L_C + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_T}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad (1-53)$$

όπου :

$L_C$  : Το συνολικό μήκος των αγωγών του οριζόντιου πλέγματος (m)

$L_R$ : Το συνολικό μήκος των ηλεκτροδίων γείωσης (m)

$L_T$ : Το μήκος κάθε ηλεκτροδίου γείωσης/ ράβδου (m)

$L_X$  και  $L_Y$  : είναι το μέγιστο μήκος των πλεγμάτων στις διευθύνσεις X και Y (m)

### 1.6.9 Βηματική τάση (Step Voltage) $E_s$

Η έγχυση ρεύματος κατά την εκδήλωση σφαλμάτων στο έδαφος δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού, η οποία μετράται με τη βηματική τάση. Η βηματική τάση είναι μια σημαντική παράμετρος στα συστήματα γείωσης, καθώς επηρεάζει την ασφάλεια του προσωπικού που εργάζεται βηματίζοντας στο έδαφος.

Συγκεκριμένα, μια υψηλή βηματική τάση μπορεί να δημιουργήσει μια επικίνδυνη κατάσταση για τους εργαζόμενους και μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτροπληξία, ενώ μια χαμηλή βηματική τάση είναι λιγότερο πιθανό να προκαλέσει βλάβη.

Για τη μείωση της βηματικής τάσης και των κινδύνων που μπορεί να προκαλέσει, τα συστήματα γείωσης χρησιμοποιούν συνήθως έναν συνδυασμό μέτρων, όπως η διασπορά των ηλεκτροδίων γείωσης, η χρήση αγώγιμων υλικών με χαμηλή αντίσταση και ο περιορισμός του ρεύματος που εγχέεται στο έδαφος. Η βηματική τάση υπολογίζεται από [28],[34],[38] :

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R} \quad (1-54)$$

όπου :

$E_s$ : η βηματική τάση (V),

$L_C$  : το συνολικό μήκος αγωγού του πλέγματος (m),

$L_R$  : το συνολικό μήκος ράβδων (m),

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega m$ ),

$I_G$  : η ένταση του ρεύματος στο έδαφος σε (A),

$K_s, K_i$  : γεωμετρικές σταθερές.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

ισχύει ότι :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 \cdot h_g} + \frac{1}{a_g + h_g} + \frac{W}{a_g} \right) \quad (1-55)$$

$$\mu\epsilon W = 1 - 0,5^{n-2}$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (1-56)$$

όπου :

$a_g$ : Η απόσταση μεταξύ των παράλληλων αγωγών του πλέγματος (m)

$h_g$ : Το βάθος τοποθέτησης πλέγματος (m)

$n$  : Γεωμετρικός συντελεστής όπως έχει οριστεί σύμφωνα με τη σχέση 1-46

Στη βιβλιογραφία έχει προταθεί εναλλακτικά η ακόλουθη έκφραση για τη μέγιστη βηματική τάση ενός γειωτή πλέγματος -πολλαπλών ράβδων [38] :

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L} \quad (1-57)$$

για πλέγμα με λίγες μόνο ράβδους γείωσης στο κέντρο, μακριά από την περίμετρο :

$$L = L_C + L_R \quad (1-58)$$

για πλέγμα με ράβδους γείωσης κυρίως στην περίμετρο :

$$L = L_C + 1,15 \cdot L_R \quad (1-59)$$

όπου :

$E_s$ : η βηματική τάση βρόχου (V)

$L_C$  : το συνολικό μήκος του πλέγματος (m)

$L_R$  : το συνολικό μήκος ράβδων (m)

$\rho$  : η ειδική αντίσταση του εδάφους ( $\Omega\text{m}$ )

$I_G$  : η ένταση του ρεύματος που διοχετεύεται από το ηλεκτρόδιο γείωσης στο έδαφος (A)

$K_s, K_i$  : γεωμετρικές σταθερές του πλέγματος

Για το συνηθισμένο βάθος του πλέγματος  $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$  ισχύει η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση, για  $n > 2$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 \cdot h_g} + \frac{1}{a_g} \cdot 1 - 0,5^{n-2} \right) \quad (1-60)$$

$$K_i = 0,656 + 0,172 \cdot n \quad (1-61)$$

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

όπου :

$a_g$  : η απόσταση μεταξύ των παράλληλων αγωγών πλέγματος (m)

$n$  : ο αριθμός των αγωγών παράλληλου πλέγματος

$h_g$  : το βάθος του πλέγματος (m)

Η χρήση πολλαπλών ράβδων γείωσης μπορεί να μειώσει την αντίσταση του συστήματος γείωσης και να βελτιώσει την απόδοση.

## 1.7 Κριτήρια επιτυχούς σχεδιασμού και τελικές δοκιμές

Ακολουθώντας τους αναλυτικούς υπολογισμούς που προαναφέρθηκαν και σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του σχήματος 1.21 τα κριτήρια ασφαλούς σχεδιασμού ενός γειωτή υποσταθμού είναι τα παρακάτω :

- ⇒ Εάν  $GPR < E_{touch}$  τότε ο σχεδιασμός είναι ασφαλής  
Εάν  $GPR > E_{touch}$  τότε υπολογίζονται τα  $E_m$  και  $E_s$
- ⇒ Εάν η υπολογιζόμενη τάση επαφής ( $E_m$ ) είναι μικρότερη από την ανεκτή τάσης επαφής ( $E_{touth}$ ), ο σχεδιασμός είναι ασφαλής. Διαφορετικά γίνεται τροποποίηση του σχεδιασμού και επανέλεγχος.
- ⇒ Εάν η υπολογιζόμενη βηματική τάση ( $E_s$ ) είναι μικρότερη από το ανεκτό όριο βηματικής τάσης ( $E_{step}$ ), ο σχεδιασμός είναι ασφαλής. Διαφορετικά γίνεται τροποποίηση του σχεδιασμού και επανέλεγχος εξαρχής .

Αν δεν ικανοποιούνται οι ανωτέρω περιορισμοί , χρειάζεται να γίνει επανέλεγχος του πλέγματος γείωσης, ώστε να γειωθεί η αντίστασή του (όπως πύκνωση του πλέγματος με μείωση των αποστάσεων μεταξύ των αγωγών, χρήση επιπρόσθετων ράβδων ειδικά στην περίμετρο και στις γωνίες, αύξηση του μήκους των υπαρχόντων ράβδων ειδικά στην περίπτωση διστρωματικών εδαφών ώστε οι ράβδοι αυτές να διαπερνούν το υποκείμενο στρώμα (εφόσον αυτό έχει χαμηλότερη ειδική αντίσταση), αύξηση της επιφάνειας του γειωτή κ.λπ.

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού ενός συστήματος γείωσης υποσταθμού και την κατασκευή αυτού θα πρέπει να διεξάγονται κάποιες δοκιμές ώστε να πιστοποιείται ασφαλής λειτουργία του συστήματος γείωσης. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιούνται οι παρακάτω δοκιμές [34] :

1. Δοκιμή ηλεκτρικής συνέχειας: Θα πρέπει να διενεργείται δοκιμή ηλεκτρικής συνέχειας για να διασφαλιστεί ότι όλα τα μέρη του πλέγματος γείωσης είναι σωστά συνδεδεμένα μεταξύ τους.
2. Δοκιμή αντίστασης γείωσης: Θα πρέπει επίσης να διενεργείται μέτρηση της αντίστασης του πλέγματος γείωσης με τη χρήση γειωσόμετρου.
3. Δοκιμή βηματικής τάσης και τάσης επαφής : Η δοκιμή αυτή περιλαμβάνει τη μέτρηση της βηματικής τάσης και τάσης επαφής του πλέγματος για να διασφαλιστεί ότι βρίσκεται εντός ασφαλών ορίων.

## **2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> Ανάπτυξη πρωτότυπης εφαρμογής διεξαγωγής υπολογισμών σε γειωτές**

### **2.1 Εισαγωγή**

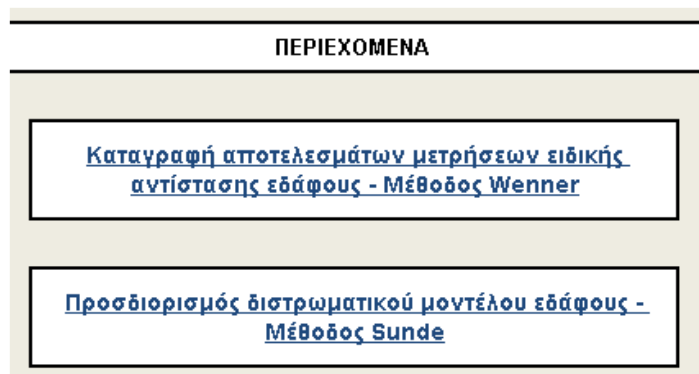
Το Microsoft Excel είναι ένα ευέλικτο λογισμικό και παρέχει ένα ισχυρό περιβάλλον που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματική μελέτη και ανάλυση συστημάτων γειώσεων. Ένα από τα πλεονεκτήματα του Excel είναι η δυνατότητα χρήσης των ενσωματωμένων λειτουργιών για την εκτέλεση υπολογισμών, τη δημιουργία, τη μετατροπή και την ανάλυση πινάκων δεδομένων. Χρησιμοποιούνται αριθμητικές και λογικές συναρτήσεις για τον υπολογισμό των δεδομένων και υπάρχουν ενσωματωμένες δυνατότητες για τη δημιουργία γραφημάτων που διευκολύνουν τη μελέτη.

Στόχος της πρωτότυπης εφαρμογής που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον excel είναι η οργάνωση και η διευκόλυνση της διεξαγωγής των απαραίτητων υπολογισμών για τη μελέτη τυπικών γειωτών. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τις πρακτικές εφαρμογές.

### **2.2 Αναλυτική δομή της εφαρμογής**

Στις ενότητες που ακολουθούν θα γίνει μία ανάλυση της δομής ενός εφαρμογής λογισμικού που αναπτύχθηκε, όπου θα γίνει αναφορά ενός διάφορες επιλογές υπολογισμών, στα αντίστοιχα φύλλα υπολογισμών καθώς και στην αλληλουχία με την οποία δομούνται αυτά, προκειμένου ο χρήστης να είναι σε θέση να ολοκληρώσει μια ομάδα υπολογισμών που αφορά τη μελέτη ενός συγκεκριμένου γειωτή.

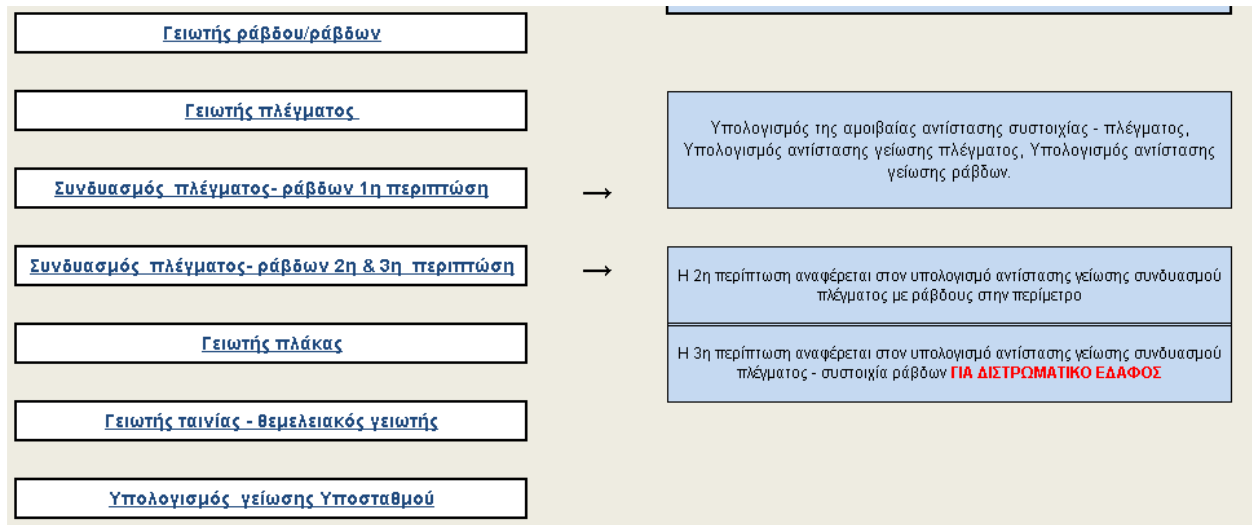
Κατ' αρχήν για τον προσδιορισμό του μοντέλου εδάφους απαιτείται η λήψη και η καταγραφή των αποτελεσμάτων μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους της με τη μέθοδο Wenner. Για τον προσδιορισμό διστρωματικού μοντέλου εδάφους απαιτείται η εφαρμογή της μεθόδου Sunde. Σε όλες τις καρτέλες γειωτών που ακολουθούν δίνεται η επιπρόσθετη δυνατότητα να ορίσει ο χρήστης μια τιμή ειδικής αντίστασης απευθείας, χωρίς να απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων μετρήσεων με βάση τη Μέθοδο Wenner.



Σχήμα 2.1. Καρτέλα περιεχομένων (μέρος α) εδώ γίνεται προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης  $\rho$  για μονοστρωματικό ή διστρωματικό έδαφος

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Στην καρτέλα περιεχομένων που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι διαθέσιμοι τύποι γειωτών. Με βάση τις ανάγκες επιλέγεται ο επιθυμητός τύπος γειωτή για τον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί της αντίστασης γείωσης.



Σχήμα 2.2. Καρτέλα περιεχομένων (μέρος β)

### 2.3 Μέθοδος Wenner 4 σημείων

Προκειμένου να υπολογισθεί η ειδική αντίσταση του εδάφους για μονοστρωματικά εδάφη θα πρέπει να γίνουν και να καταχωρηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους που έχουν διεξαχθεί στον χώρο εγκατάστασης του γειωτή με τη μέθοδο Wenner 4 σημείων.

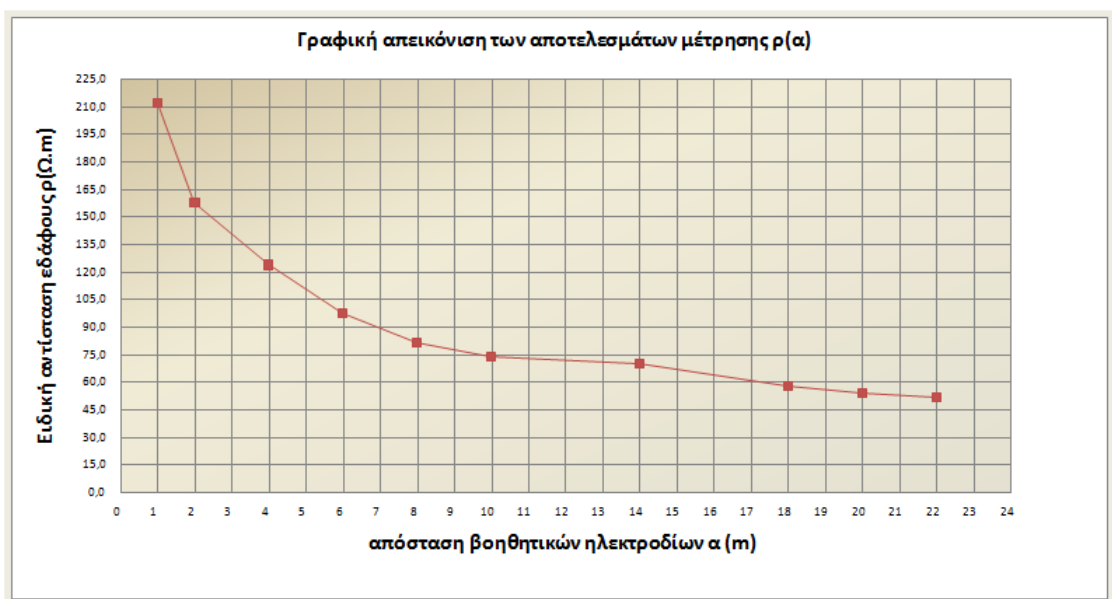
**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**

Μέτρηση (i)	α (m)	Δεδομένα μέτρησης ρ για διαφορετικές κατευθύνσεις ( προαιρετική συμπλήρωση )				Μέση τιμή ρ
		$\rho_{m1} (\Omega.m)$	$\rho_{m2} (\Omega.m)$	$\rho_{m3} (\Omega.m)$	$\rho_{m4} (\Omega.m)$	
1	1	212,0				212,0
2	2	158,0				158,0
3	4	124,0				124,0
4	6	98,0				98,0
5	8	82,0				82,0
6	10	74,0				74,0
7	14	70,0				70,0
8	18	58,0				58,0
9	20	54,0				54,0
10	22	52,0				52,0
11						#ΔΙΑΙΡΣΙ!
12						#ΔΙΑΙΡΣΙ!
13						#ΔΙΑΙΡΣΙ!
14						#ΔΙΑΙΡΣΙ!
15						#ΔΙΑΙΡΣΙ!

Πίνακας 2.1. Εισαγωγή τιμών ειδικής αντίστασης από μετρήσεις και προαιρετική συμπλήρωση πρόσθετων τιμών για διαφορετικές κατευθύνσεις μέτρησης.



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη



Σχήμα 2.3. Αναπαράσταση των τιμών της ειδικής αντίστασης με τη βοήθεια γραφικής παράστασης

## 2.4 Υπολογισμοί για μονοστρωματικό έδαφος

Με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων, προκύπτουν τα αποτελέσματα της ειδικής αντίστασης του εδάφους για μονοστρωματικό έδαφος.

Για μελέτη του εδάφους ως **μονοστρωματικό**, η ειδική αντίσταση του εδάφους  $\rho$  μπορεί να υπολογιστεί με δύο εναλλακτικούς τρόπους ως εξής :

1ος τρόπος

$\rho_{min} = 52,0$  (Ω.μ)

$\rho_{max} = 212,0$  (Ω.μ)

$\rho_{\alpha} = \frac{\rho_{min} + \rho_{max}}{2} = 132$  (Ω.μ)

2ος τρόπος

$$\rho_{\alpha'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{i,m} = 98,2$$
 (Ω.μ)

[Βιβλιογραφικές αναφορές](#)

Σχήμα 2.4. Υπολογισμοί για τον προσδιορισμό ειδικής αντίστασης σε μονοστρωματικό έδαφος.

## 2.5 Εφαρμογή της γραφικής μεθόδου Sunde

Με τις καμπύλες Sunde υπολογίζεται το μοντέλο του διστρωματικού εδάφους. Η χρήση της μεθόδου είναι συγκριτικά απλή σε σχέση με άλλους τρόπους εύρεσης ειδικής των παραμέτρων  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  και  $h$ .

**Προσδιορισμός διστρωματικού μοντέλου εδάφους ( Μέθοδος Sunde )**

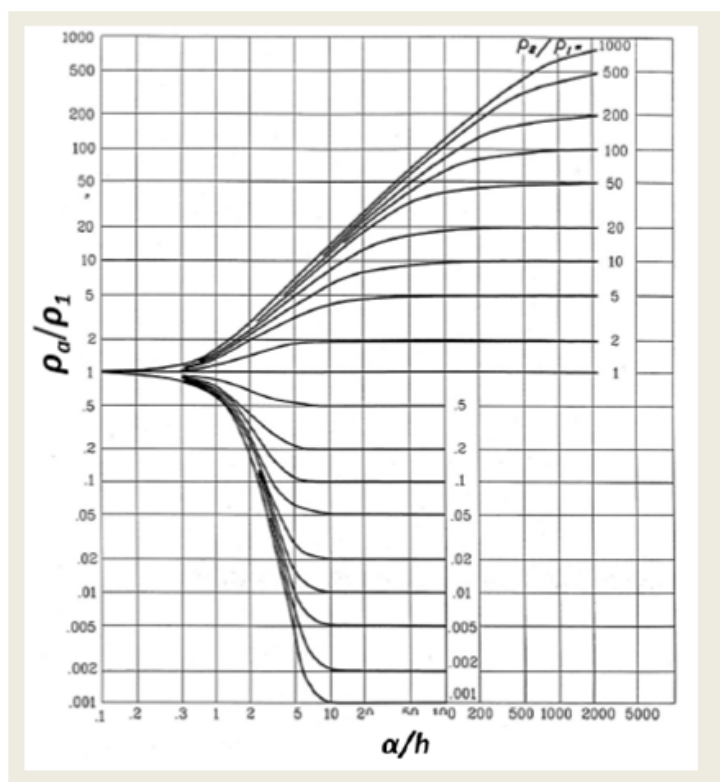
Με τη μέθοδο Sunde υπολογίζονται οι παράμετροι ενός διστρωματικού μοντέλου εδάφους,  $\rho_1$  ( αντίσταση επιφανειακού στρώματος ),  $\rho_2$  ( αντίσταση υποκείμενου στρώματος ) και  $h$  ( βάθος επιφανειακού στρώματος ).

Διστρωματικό έδαφος	
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 1</b>	
$\rho_1$ : επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης	212,00 ( Ω.m )
$\rho_2$ : δεύτερο στρώμα ειδικής αντίστασης	52,00 ( Ω.m )
$\rho_2/\rho_1$ : Λόγος ειδικών αντιστάσεων	0,245

$\rho_1$  : Μετρούμενη ειδική αντίσταση για την ελάχιστη απόσταση ηλεκτροδίων  $\alpha$  ( μέθοδος wenner )

$\rho_2$  : Μετρούμενη ειδική αντίσταση για την μέγιστη απόσταση ηλεκτροδίων  $\alpha$  ( μέθοδος wenner )

Σχήμα 2.5. Πίνακας δεδομένων για την εύρεση ειδικής αντίστασης σε διστρωματικό έδαφος.



Σχήμα 2.6. Καμπύλες Sunde

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Προσδιορισμός βάθους επιφανειακού στρώματος :		
Λόγος $\rho_2/\rho_1 =$	0,50	
Λόγος $a/h =$	2,00	
$\rho_\alpha = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \rho_1 =$	105,00	( $\Omega \cdot m$ )
$a' =$	5,46	( m )
$h = \frac{a'}{a/h} =$	<b>2,73</b>	( m )
<b>βάθος επιφανειακού στρώματος</b>		

$a'$  -> προκύπτει από το γράφημα μεταβολής ειδικής αντίστασης  $\rho(a)$  ως η απόσταση που αντιστοιχεί σε τιμή ειδικής αντίστασης  $\rho = \rho_\alpha$

Σχήμα 2.7. Αποτέλεσμα υπολογισμών για το προσδιορισμό του διστρωματικού μοντέλου εδάφους

Χρήση μεθόδου Sunde

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Sunde για τα δεδομένα του σχήματος 2.5.

- Θεωρούμε τις μετρήσεις  $\rho_1 = 212 \Omega \cdot m$  και  $\rho_2 = 52 \Omega \cdot m$  από σχήμα 2.5.
- Επομένως  $\rho_2/\rho_1 = 0,245$ .
- Στο σχήμα 2.6 χαράζουμε με γραμμική παρεμβολή την καμπύλη  $\rho_2/\rho_1 = 0,245$ .
- Χαράζουμε την οριζόντια ευθεία από το μέσο της κεκλιμένης καμπύλης και από την προβολή της στον άξονα Y προκύπτει ότι  $\rho_\alpha/\rho_1 = 0,5$ .
- Από το σημείο τομής της οριζόντιας ευθείας με την καμπύλη Sunde που χαράξαμε, χαράζουμε την κάθετο στον άξονα X και παίρνουμε ότι  $a/h = 2$ .
- Υπολογίζουμε  $\rho_\alpha = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \cdot \rho_1 = 105 \Omega \cdot m$
- Από το γράφημα του σχήματος 2.3 βρίσκουμε για  $\rho_\alpha = 105 \Omega \cdot m$  ότι  $a' = 5,46 \text{ m}$

Τελικά υπολογίζουμε το βάθος του επιφανειακού στρώματος  $h = \frac{a'}{a/h} = 2,73 \text{ m}$ .

**Σημείωση :** Ο λόγος  $\rho_2/\rho_1$ ,  $a/h$ , η σχέση  $\rho_\alpha$  και το  $a'$  υπολογίζονται από το πρόγραμμα χωρίς την παρέμβαση του χρήστη.

## 2.6 Υπολογισμών γειωτών ράβδων

Στον πίνακα δεδομένων που φαίνεται στο σχήμα 2.8, δίνεται στον χρήστη να εισάγει είτε την τιμή της ειδικής αντίστασης όπως αυτή έχει προσδιοριστεί από την επεξεργασία των μετρήσεων με τη μέθοδο Wenner (μονοστρωματικό ή διστρωματικό μοντέλο εδάφους) είτε να εισάγει μία διαφορετική τιμή χειροκίνητα.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Υπολογισμός αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων ράβδου ( μεμονωμένη ή πολλαπλών ράβδων )					
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b>			Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης		
<p><math>\rho</math> : ειδική αντίσταση εδάφους</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Μονοστρωματικό - <math>\rho_a</math></li> <li><input type="radio"/> Μονοστρωματικό - <math>\rho_a'</math></li> <li><input type="radio"/> Διστρωματικό ( χρήση τιμής <math>\rho_1</math> και ανηγμένου μήκους <math>l_{eq}</math> )</li> <li><input checked="" type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης</li> </ul>	50,00	( $\Omega \cdot m$ )	50	( $\Omega \cdot m$ )	
I : το φυσικό μήκος της μεμονωμένης ράβδου	3	(m)	n : ο αριθμός των ράβδων	9	
d : η διάμετρος της ράβδου	0,02	(m)	$\alpha$ : η απόσταση μεταξύ των ράβδων	6	(m)
Ανηγμένο μήκος $l_{eq}$	3,00	(m)			
** Υποχρεωτική συμπλήρωση ΜΟΝΟ των πράσινων κελιών					

Σχήμα 2.8. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό γειωτών με τη μορφή ράβδων ( μεμονωμένη ή πολλαπλών ράβδων )

Στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης πέρα από τις 3 προεπιλεγμένες (  $\rho_a$  ,  $\rho_a'$  ,  $\rho$  ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα "εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης" (1) και παράλληλα να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).


ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ			Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης		
<p><math>\rho</math> : ειδική αντίσταση εδάφους</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Μονοστρωματικό - <math>\rho_a</math></li> <li><input type="radio"/> Μονοστρωματικό - <math>\rho_a'</math></li> <li><input type="radio"/> Διστρωματικό ( χρήση τιμής <math>\rho_1</math> και ανηγμένου μήκους <math>l_{eq}</math> )</li> <li><input checked="" type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης</li> </ul>	50,00	( $\Omega \cdot m$ )	50	( $\Omega \cdot m$ )	1
					2

Σχήμα 2.9. Διαδικασία εισαγωγής τιμής ειδικής αντίστασης του εδάφους

Σημειώνεται επίσης ότι στους υπολογισμούς για την αντίσταση γείωσης των ράβδων σε διστρωματικό έδαφος λαμβάνεται υπόψη το ενεργό μήκος των ράβδων  $l_{eq}$  που αντιστοιχεί σε μονοστρωματικό έδαφος ειδικής αντίστασης  $\rho_1$ . Λαμβάνεται υπόψη το ενεργό μήκος  $l_{eq}$  για να φαίνεται η επίδραση και του 2<sup>ου</sup> στρώματος [50].

## 2.6.1 Μεμονωμένη ράβδους

Μεμονωμένη ράβδου



$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 \right] = 32,31 \text{ } (\Omega)$$

Για μήκος l μέχρι 2,5 m μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η παρακάτω σχέση

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot l}{d} \right) = 33,94 \text{ } (\Omega)$$

Βιβλιογραφικές αναφορές

Σχήμα 2.10. Υπολογισμοί για γειωτές ράβδου

### 2.6.2 Τριγωνικός γειωτής

Τριγωνικός γειωτής (3 ράβδοι σε διάταξη ισόπλευρου τριγώνου)

$$R_{tr} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 + \frac{2 \cdot l}{\alpha} \right] = \mathbf{12,54} \text{ } (\Omega)$$

Βιβλιογραφικές αναφορές

Σχήμα 2.11. Υπολογισμοί τριγωνικού γειωτή

### 2.6.3 Συστοιχία ραβδών

Συστοιχία ραβδών (αγγ.)

<b>w</b> : πλάτος της επιφάνειας A	12	(m)
<b>b</b> : μήκος της επιφάνειας A	12	(m)
<b>h</b> : το βάθος τοποθέτησης της ράβδου	0,2	(m)
A : η επιφάνεια που καλύπτει η συστοιχία των ραβδών { A = b·w }	144	(m <sup>2</sup> )
N : ο λόγος μήκους/πλάτους	1	

$$k_1 = 1,37 \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{\sqrt{A} \cdot 0,25}{h}} \right] - 0,045 \cdot (N - 1) = \mathbf{1,29}$$

$$R_a = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot l} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 + \frac{2 \cdot k_1 \cdot l}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n} - 1)^2 \right] = \mathbf{2,55} \text{ } (\Omega)$$

Βιβλιογραφικές αναφορές

Σχήμα 2.12. Υπολογισμοί συστοιχίας ραβδών

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

## 2.6.4

### Πολλαπλές ράβδοι σε ευθεία διάταξη ή σε βρόχο μεγάλου μήκους

Πολλαπλές ράβδοι σε ευθεία διάταξη ή βρόχου μεγάλου μήκους

$$R_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left\{ \ln\left(\frac{8 \cdot l}{d}\right) - 1 + \left[ \frac{2 \cdot l}{a} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot n}{\pi}\right) \right] \right\} = \mathbf{4,62} \ (\Omega)$$

Βιβλιογραφικές αναφορές

Σχήμα 2.13. Υπολογισμοί σε γειωτές πολλαπλών ράβδων σε ευθεία διάταξη ή σε βρόχο μεγάλου μήκους

## 2.7

### Γειωτής πλέγματος

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ				
Μήκος b (m)		12		
Πλάτος w (m)		12		
Εμβαδόν A (m <sup>2</sup> )		144		
Απόσταση αγωγών πλέγματος a <sub>g</sub> (m)		0,5		
Βάθος τοποθέτησης πλέγματος h <sub>g</sub> (m) <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;"> <input checked="" type="radio"/> Από Μέθοδο Σunde  <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής                 </div>	0,5	0,2	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής	
Ειδική αντίσταση εδάφους ρ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;"> <input type="radio"/> Μονοστρωματικά - ρ<sub>σ</sub>  <input type="radio"/> Μονοστρωματικά - ρ<sub>β</sub>  <input checked="" type="radio"/> Δυστρωματικά ρ<sub>δ</sub>  <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής ειδικής αντίστασης                 </div>	100,96	100	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης	

Σχήμα 2.14. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό αντίστασης γείωσης γειωτή πλέγματος.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης πέρα από τις 3 προεπιλεγμένες ( $\rho_a$ ,  $\rho_a'$ ,  $\rho$ ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης "(1) και έπειτα να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).

Αντίστοιχα και στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή βάθους τοποθέτησης πλέγματος εκτός από την προεπιλεγμένη ( $h_g$ ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης "(1) και έπειτα να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).

Βάθος τοποθέτησης πλέγματος $h_g$ (m)	<input checked="" type="radio"/> Από Μέθωδο Sunde <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής	0,5	0,2	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής
Ειδική αντίσταση εδάφους $\rho$	<input type="radio"/> Μονοστρωματικό - $\rho_a$ <input type="radio"/> Μονοστρωματικό - $\rho_a'$ <input checked="" type="radio"/> Δυστρωματικό $\rho_{sp}$ <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής ειδικής αντίστασης	100,96	100	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

Σχήμα 2.15. Εισαγωγή τιμής ειδικής αντίστασης εδάφους και βάθους τοποθέτησης πλέγματος

### 2.7.1 Υπολογισμός αντίστασης γείωσης πλέγματος

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ**

Συνολικό μήκος πλέγματος:  $L_{tot} = n_b \cdot W + n_w \cdot b =$   (m)

Αντίσταση πλέγματος:  $R_g = \rho \cdot \left[ \frac{1}{L_{tot}} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h_g \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] =$   ( $\Omega$ )

[Βιβλιογραφικές αναφορές](#)

Σχήμα 2.16. Καρτέλα υπολογισμών αντίστασης γείωσης πλέγματος

### 2.7.2 Υπολογισμός αντίστασης γείωσης σε διστρωματικό έδαφος

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ( Με χρήση μοντέλου διστρωματικού εδάφους )**

Συνολικό μήκος πλέγματος:  $L_{tot} = n_b \cdot W + n_w \cdot b =$   (m)

Αντίσταση πλέγματος:  $R_g = \frac{\rho_2}{4 \cdot r_e} \cdot \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^g + \frac{\rho_1}{L_{tot}} =$   ( $\Omega$ )

[Βιβλιογραφικές αναφορές](#)

Σχήμα 2.17. Χρήση διστρωματικού μοντέλου για υπολογισμό αντίστασης γείωσης πλέγματος

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

## 2.8 Αντίσταση γείωσης συνδυασμού πλέγματος με συστοιχία ράβδων

1η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Υπολογισμός αντίστασης γείωσης συνδυασμού πλέγματος - συστοιχίας ράβδων					
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b>					
Μήκος b (m)	40			Αριθμός ράβδων n	20
Πλάτος w (m)	30			Μήκος ράβδου L (m)	6
Απόσταση αγωγών πλέγματος $a_g$ (m)	5			Διάμετρος ράβδου d (m)	0,02
Εμβαδόν $A_g$ (mm <sup>2</sup> )	1200			s : η απόσταση ράβδων (m)	12
Περίμετρος του πλέγματος P (m)	140				
Βάθος τοποθέτησης πλέγματος $h_g$ (m)	0,5	0,2			
Ειδική αντίσταση εδάφους $\rho$	100,96	50		<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης	

Σχήμα 2.18. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό γείωσης συνδυασμού πλέγματος με συστοιχία ράβδων

Στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης πέρα από τις 3 προεπιλεγμένες ( $\rho_a$ ,  $\rho_{a'}$ ,  $\rho$ ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης "(1) και έπειτα να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).

Αντίστοιχα και στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή βάθους τοποθέτησης πλέγματος εκτός από την προεπιλεγμένη ( $h_g$ ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης "(1) και έπειτα να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).

Βάθος τοποθέτησης πλέγματος $h_g$ (m)	<input checked="" type="radio"/> Από Μέθοδο Σύνθε <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής	0,5	0,2	s : η απόσταση ράβδων
Ειδική αντίσταση εδάφους $\rho$	<input type="radio"/> Ημιστρωματικό - ρα <input type="radio"/> Ημιστρωματικό - ρα <input checked="" type="radio"/> Διαστρωματικό ηαβ <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής ειδικής αντίστασης	100,96	50	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

Σχήμα 2.19. Διαδικασία εισαγωγής τιμής ειδικής αντίστασης του εδάφους και βάθους τοποθέτησης πλέγματος

Στην περίπτωση που επιλεγεί διστρωματικού εδάφους, τότε :

Ο υπολογισμός της αντίστασης γείωσης πλέγματος και ο υπολογισμός της αμοιβαίας αντίστασης συστοιχίας – πλέγματος θα γίνει με βάση τη ισοδύναμη ειδική αντίσταση  $\rho_{eq}$ , όπως αυτή ορίζεται στην παρακάτω καρτέλα, σχήμα 2.19.α :



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Στον υπολογισμό αντίστασης γείωσης ράβδων, ως  $l$  χρησιμοποιείται το ισοδύναμο μήκος  $L_{eq}$  για να φανεί η επίδραση του διστρωματικού εδάφους καθώς και ως ειδική αντίσταση  $\rho$ , χρησιμοποιείται η ειδική αντίσταση  $\rho_1$  όπου έχει αναχθεί το  $L_{eq}$

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ		
$\rho_1$ : επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης	212,00	( Ω.m )
$\rho_2$ : δεύτερο στρώμα ειδικής αντίστασης	52,00	( Ω.m )
$h_g$ : βάθος υπολογισμού	0,5	( m )

Ισοδύναμη ειδική αντίσταση για διστρωματικό μοντέλο εδάφους $\rho_{eq}$	$\rho_{eq} =$	<b>100,96</b>	( Ω.m )
---	---------------	---------------	---------

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1** ( $h \geq h_g$ )

$$\rho_\alpha = \frac{\rho_1}{\left[1 + \frac{\rho_1 - 1}{\rho_2 - 1} \left[1 - e^{-\frac{1}{K(h+2h_g)}}\right]\right]} = \mathbf{100,96} \text{ ( Ω.m )}$$

$$\rho_\alpha = \rho_2 \left\{1 + \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{K(h+2h_g)}}\right]\right\} = \mathbf{73,83} \text{ ( Ω.m )}$$

Σχέση 1 ( $\rho_1 > \rho_2$ ) Σχέση 2 ( $\rho_1 < \rho_2$ )

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2** ( $h < h_g$ )

$$\rho_\alpha = \frac{\rho_1}{\left[1 + \frac{\rho_1 - 1}{\rho_2 - 1} \left[1 - e^{-\frac{1}{K(h)}}\right]\right]} = \mathbf{88,50} \text{ ( Ω.m )}$$

$$\rho_\alpha = \rho_2 \left\{1 + \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{K(h)}}\right]\right\} = \mathbf{84,57} \text{ ( Ω.m )}$$

Σχήμα 2.19.α. Διαδικασία εύρεσης ισοδύναμης τιμής ειδικής αντίστασης του εδάφους  $\rho_{eq}$ .

## 2.8.1 1<sup>η</sup> Περίπτωση υπολογισμού αντίστασης γείωσης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων

ΒΗΜΑ 1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ
Συνολικό μήκος πλέγματος :	$L_{tot} = n_b \cdot W + n_w \cdot b = \mathbf{550} \text{ (m)}$
Αντίσταση πλέγματος :	$R_g = \rho \cdot \left[ \frac{1}{L_{tot}} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h_g \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = \mathbf{1,47} \text{ (Ω)}$

ΒΗΜΑ 2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΜΟΙΒΑΙΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ - ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ
Αμοιβαία αντίσταση συστοιχίας-πλέγματος :	$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L \cdot n} \cdot \ln \left( \frac{L_{tot}}{1,2} + 1 \right) = \mathbf{1,12} \text{ (Ω)}$

ΒΗΜΑ 3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΡΑΒΔΩΝ
Ειδική αντίσταση εδάφους $\rho$	$\mathbf{212,00} \text{ (Ω.m)}$
$L_{eq}$ (m) : Συνολικό ανηγμένο μήκος	$\mathbf{22,58} \text{ (m)}$
Αντίσταση γείωσης ράβδων :	$R_r = \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi \cdot L_{eq}} \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot L_{eq}}{d} \right) - 1 \right) = \mathbf{12,12} \text{ (Ω)}$

ΒΗΜΑ 4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ - ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ
	$R_c = \frac{R_g \cdot (R_r + R_m)}{R_g + R_r + R_m} = \mathbf{1,30} \text{ (Ω)}$

Σχήμα 2.20. 1<sup>η</sup> περίπτωση υπολογισμού αντίστασης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

### 2.8.2 2<sup>η</sup> Περίπτωση υπολογισμού αντίστασης γείωσης συνδυασμού πλέγματος με ράβδους στην περιμέτρο του

Πολλαπλή διάταξη γείωσης ράβδου σε κοίλη τετραγωνική διάταξη ( διάταξη hollow square )

ισοδύναμη ακτίνα επιφάνειας εδάφους :  $r_e = \sqrt{A/\pi} = 19,55$   $k = \frac{3 \cdot \sqrt{5}}{r_e} = 0,53$

ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho$  (Υπολογισμένοι από Μέθοδο Sunde) : 212,00 (Ω.m)

$R_a = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \cdot \left[ 1 + \frac{2,16 \cdot r_e \cdot \pi \cdot \ln(n) \cdot (1 - e^{-kh})}{\rho} \right] = 0,73$  (Ω)

Βιβλιογραφικές αναφορές

Σχήμα 2.21. 2<sup>η</sup> περίπτωση υπολογισμού αντίστασης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων

### 2.8.3 3<sup>η</sup> Περίπτωση υπολογισμού αντίστασης γείωση συνδυασμού πλέγματος – ράβδους σε διστρωματικό έδαφος

3η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Υπολογισμός αντίστασης γείωσης συνδυασμού πλέγματος - συστοιχίας ράβδων ΣΕ ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΈΔΑΦΟΣ

Αντίσταση γείωσης γειωτή πλέγματος σε συνδυασμό συστοιχίας ράβδων

Όποιαδήποτε διαφοροποίηση στις μεταβλητές γίνεται στην προηγούμενη σελίδα.

$N_g$  : Πλήθος βρόχων που απαρτίζουν το πλέγμα

Αντίσταση γείωσης πλέγματος σε συνδυασμό συστοιχίας ράβδων για μονοστρωματικό έδαφος :

$$R_{cs} = 0,13 \cdot \frac{\rho_1}{\sqrt{A}} \cdot \left( 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{\sqrt{A}} \right) \cdot \log_{10} \left( \frac{2400 \cdot \sqrt{A}}{N_g} \right) = 2,63$$
 (Ω)

Αντίσταση γείωσης πλέγματος σε συνδυασμό συστοιχίας ράβδων σε διστρωματικό έδαφος :

$$R_e = \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \cdot R_{cs} = 0,06$$
 (Ω)

Αναλυτικοί υπολογισμοί

Σχήμα 2.22. 3<sup>η</sup> περίπτωση υπολογισμού αντίστασης συνδυασμού πλέγματος – ράβδων

## 2.9 Γειωτής πλάκας

Υπολογισμός αντίστασης R χρησιμοποιώντας πλάκα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ		
Μήκος b (m)	1	
Πλάτος w (m)	1	
Ειδική αντίσταση εδάφους $\rho$ (Ω.m)	98,20	100
r : η ακτίνα της πλάκας (m)	1	

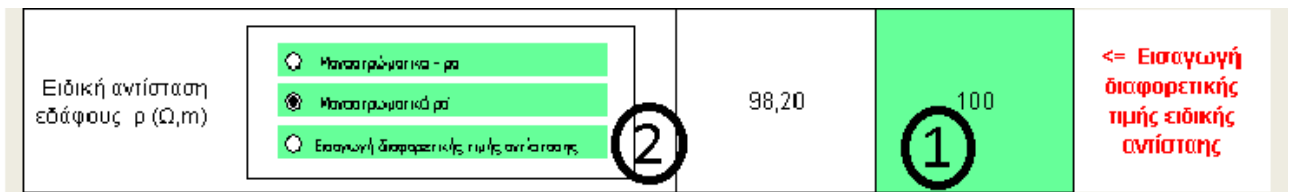
Μονοστρωματικό -  $\rho_1$   
 Μονοστρωματικό -  $\rho_2$   
 Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

Σχήμα 2.23. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό αντίστασης με χρήση γειωτή πλάκας

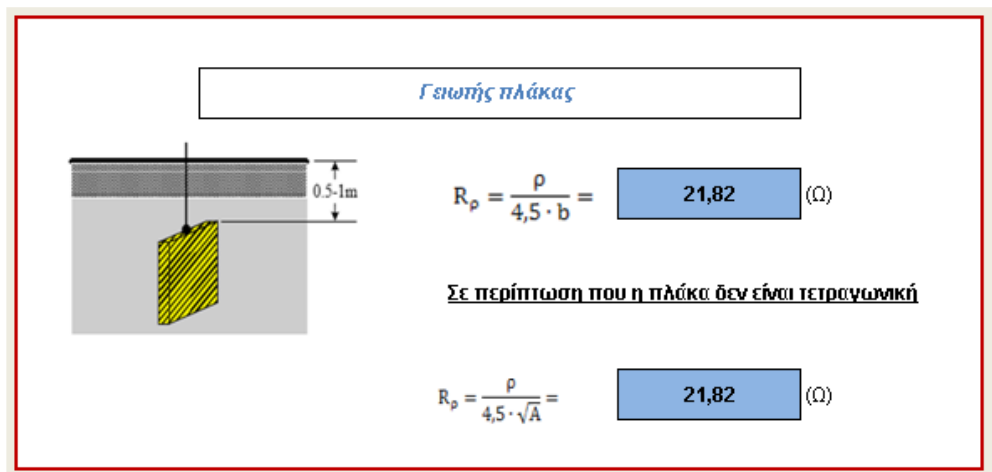
Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης πέρα από τις 3 προεπιλεγμένες (  $\rho_a$  ,  $\rho_{a'}$  ,  $\rho$  ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης "(1) και να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).



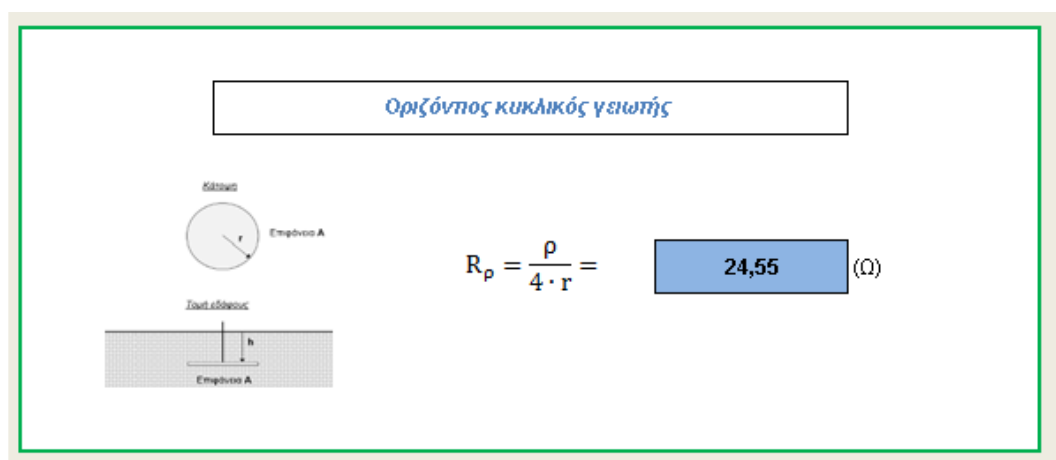
Σχήμα 2.24. Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

### 2.9.1 Τετραγωνική πλάκα



Σχήμα 2.25. Χρήση τετραγωνικής πλάκας

### 2.9.2 Οριζόντιος κυκλικός γειωτής



Σχήμα 2.26. Υπολογισμοί οριζόντιου κυκλικού γειωτή

## 2.10 Θεμελειακός γειωτής

Υπολογισμός αντίστασης R χρησιμοποιώντας ταινία			
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b>			
Ειδική αντίσταση εδάφους ρ (Ω.m)	<input type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρ <sub>a</sub> <input type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρ <sub>a'</sub> <input checked="" type="radio"/> Διαστρωματικό - ρ <sub>σ</sub> <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής αντίστασης	100,96	30
l <sub>c</sub> : το μήκος της ταινίας (m)		48	
d <sub>c</sub> : το πλάτος της ταινίας		0,04	
A : το εμβαδόν της επιφάνειας (m <sup>2</sup> )		144	

<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

Σχήμα 2.27. Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό αντίστασης γείωσης γειωτή ταινίας

Στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης πέρα από τις 3 προεπιλεγμένες ( ρ<sub>a</sub> , ρ<sub>a'</sub> , ρ ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης "(1) και να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).


<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b>			
Ειδική αντίσταση εδάφους ρ (Ω.m)	<input type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρ <sub>a</sub> <input type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρ <sub>a'</sub> <input checked="" type="radio"/> Διαστρωματικό - ρ <sub>σ</sub> <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής αντίστασης	100,96	30
	<b>2</b>		<b>1</b>

<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

Σχήμα 2.28. Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

### 2.10.1 Θεμελειακός γειωτής

Θεμελειακή γείωση

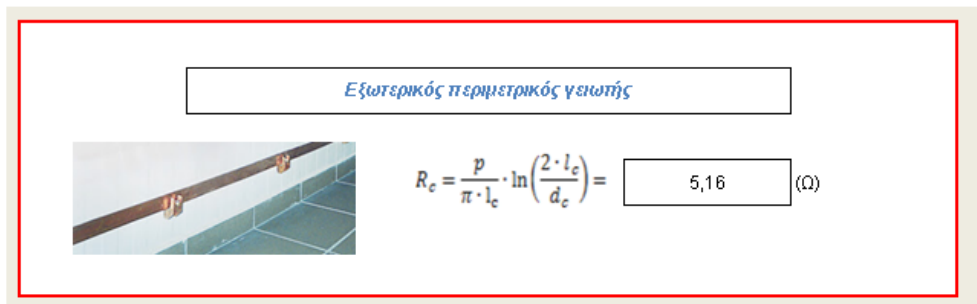


$$R_c = \frac{2 \cdot \rho}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4 \cdot A}} = 4,70 \text{ (}\Omega\text{)}$$

Σχήμα 2.29 Υπολογισμοί σε θεμελειακό γειωτή

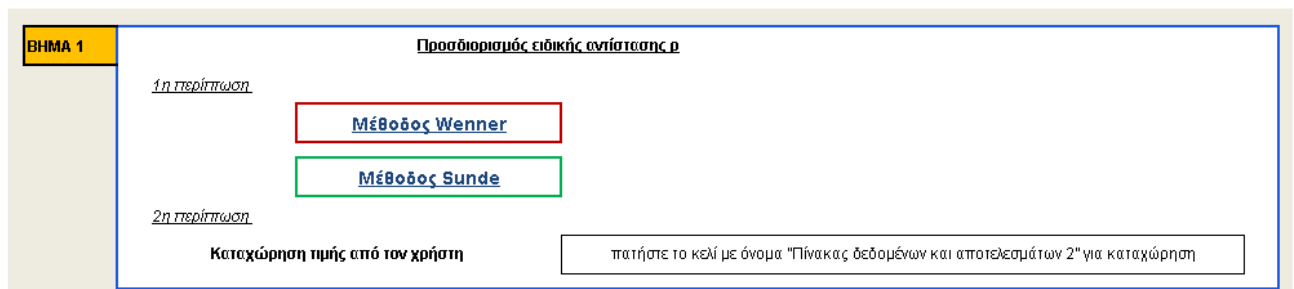
Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

## 2.10.2 Εξωτερικός περιμετρικός γειωτής



Σχήμα 2.30. Εξωτερική περιμετρική γείωση

## 2.11 Μελέτη γείωσης υποσταθμού



Σχήμα 2.31. Επιλογή ειδικής αντίστασης εδάφους για την μελέτη γείωσης υποσταθμού

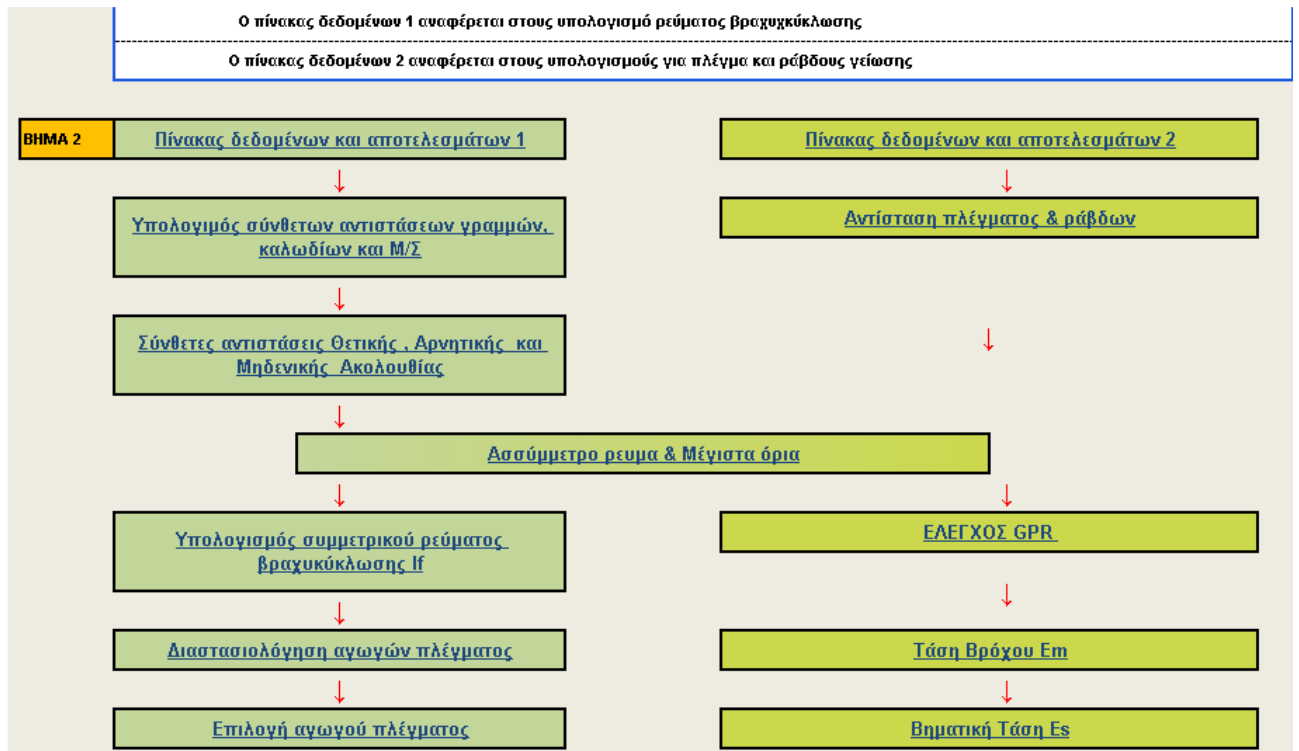
Για τον προσδιορισμό του μοντέλου εδάφους απαιτείται η λήψη και η καταγραφή των αποτελεσμάτων διεξαγωγής μετρήσεων με τη Μέθοδο Wenner. Για τον προσδιορισμό διστρωματικού εδάφους απαιτείται η εφαρμογή της γραφικής μεθόδου Sunde. Δίνεται η επιπρόσθετη δυνατότητα να ορίσει ο χρήστης μια τιμή ειδικής αντίστασης απευθείας.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται δύο πίνακες δεδομένων . Ο 1<sup>ος</sup> πίνακας ( σχήμα 2.33, 2.34, 2.34) εξυπηρετεί τους υπολογισμούς για το ρεύμα βραχυκύκλωσης, το συμμετρικο και το ασύμμετρο ρεύμα σφάλματος και τη διαστασιολόγηση του αγωγού πλέγματος

Ο 2<sup>ος</sup> πίνακας (σχήμα 2.45, 2.48 ) εξυπηρετεί τους υπολογισμούς για την αντίσταση πλέγματος – συστοιχίας ράβδων , τα μέγιστα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής , τον έλεγχο GPR, την τάση βρόχου και τη βηματική τάση, καθώς επίσης και τον έλεγχο του GPR, τον έλεγχο της τάσης βρόχου και τον έλεγχο της βηματικής τάσης, δηλαδή κατά πόσον αυτές βρίσκονται εντός ορίων.

Παρακάτω φαίνονται ονομαστικά οι κατηγορίες που αναφέρθηκαν προωύτερα.

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη



Σχήμα 2.32. Πίνακας δεδομένων

### 2.11.1 Πίνακας δεδομένων 1

Στον πίνακα δεδομένων 1 καταχωρούνται στοιχεία που αφορούν τον μετασχηματιστή του υποσταθμού.

Στην περίπτωση που δεν δίνονται αναλυτικά δεδομένα από τον κατασκευαστή για την ισχύ και την τάση βραχυκύκλωσης, τότε χρησιμοποιείται ο βοηθητικός πίνακας που βρίσκεται στα δεξιά

Στοιχεία του δικτύου και του Μ/Σ		χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία	
→ Ονομαστική τάση πρωτεύοντος Μ/Σ $U_{1n}$ (V)	20000	$S_T$ (VA)	$u_k$ (%)
→ Ονομαστική τάση δευτερεύοντος Μ/Σ $U_{2n}$ (V)	150000	630000	4
→ Ονομαστική ισχύς Μ/Σ $S_T$ (VA)	400000	800000	4,5
→ Σχετική τάση βραχυκύκλωσης του Μ/Σ $u_k$ (%)	6	1000000	5
→ Απώλειες χαλκού Μ/Σ $P_{ot}$ (W)	5200	1250000	5,5
→ Ισχύς βραχυκύκλωσης $S_k$ (VA)	250000000	1600000	6
→ Συντελεστής $k$ . Ο συντελεστής παίρνει την τιμή 0.1 ή 0.2. Τυπικά για δίκτυο έως 60kV θέτουμε $k=0.2$ και για δίκτυα από 150kV θέτουμε $k=0.1$ . Η αλλαγή γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα.	0,2	2000000	7

Σχήμα 2.33. Πίνακας δεδομένων 1, (στοιχεία του μετασχηματιστή).

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Έπειτα στη δεύτερη καρτέλα του πίνακα δεδομένων 1, υπολογίζεται ο λόγος  $\lambda$  που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των σύνθετων αντιστάσεων μηδενικής ακολουθίας στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τυλίγμα, όπου σημαντικό ρόλο παίζει η συνδεσμολογία του μετασχηματιστή.

Σε τυλίγματα σε συνδεσμολογία αστέρα ( Y ) ρεύματα μηδενικής ακολουθίας μπορούν να ρέουν στις γραμμές που συνδέονται σε αυτά μόνο αν ο κόμβος του αστέρα είναι γειωμένος .

Σε τυλίγματα σε συνδεσμολογία τριγώνου ( Δ ) τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας δεν μπορούν να ρέουν στις γραμμές που συνδέονται σε αυτά διότι δεν υφίσταται δρόμος γης.

3,5		Καθορισμός Λόγου $Z_0/Z_1$					
Είδος γραμμής	Γραμμή απλού κυκλώματος		Γραμμή διπλού κυκλώματος		Υπόγεια καλώδια		
	Αγωγός γείωσης γραμμής	Δεν υπάρχει	Υπάρχει	Δεν υπάρχει	Υπάρχει	-	-
Τύπος καλωδίου	-	-	-	-	Μονοπολικό	Τριπολικό	
Λόγος $\lambda = Z_0/Z_1$	3,5	2	5,5	3	1 έως 1,25	3 έως 5	

Συνδεσμολογία τριγώνου ( Δ ) στα τυλίγματα του μετασχηματιστή		
<input checked="" type="radio"/> ΝΑΙ <input type="radio"/> ΟΧΙ	Λόγος $\lambda = Z_0/Z_1$	3,5

Σχήμα 2.34. Πίνακας δεδομένων 1, καθορισμός λόγου  $\lambda = Z_0/Z_1$

Τέλος ,στην τρίτη καρτέλα του πίνακα δεδομένων 1 , γίνεται η επιλογή τύπου των αγωγών υλικού που θα βοηθήσει στην διαστασιολόγηση των αγωγών του πλέγματος

Περιγραφή Υλικού																	
<input checked="" type="radio"/> Ανακυκλωμένο μαλακό χαλκό <input type="radio"/> Σκληρός χαλός <input type="radio"/> Επεξεκλωμένο χαλύβδινο σύρμα <input type="radio"/> Επεξεκλωμένο χαλύβδινο σύρμα 2 <input type="radio"/> Επεξεκλωμένη χαλύβδινη ράβδος <input type="radio"/> Χαλύβδινο σύρμα με επίστρωση αλουμινίου <input checked="" type="radio"/> Χάλυβας <input type="radio"/> Χάλυβας με ανθεκτική επίστρωση <input type="radio"/> Επεκτατοειδές χαλκόβιο <input type="radio"/> Ανθεκτικό χαλκόβιο	<table border="1"> <tr><td><math>T_B</math> (<math>^{\circ}C</math>)</td><td>40</td></tr> <tr><td><math>T_{CAP}</math> (<math>J/m^3 K</math>)</td><td>3,8</td></tr> <tr><td><math>t_c</math> (s)</td><td>0,5</td></tr> <tr><td><math>\alpha_r</math> (<math>1/^{\circ}C</math>)</td><td>0,00377</td></tr> <tr><td><math>K_0</math> (<math>^{\circ}C</math>)</td><td>245</td></tr> <tr><td><math>\rho_r</math> (<math>\Omega.m</math>)</td><td>15,9</td></tr> <tr><td><math>T_m</math> (<math>^{\circ}C</math>)</td><td>1510</td></tr> <tr><td><math>I_k</math> (kA)</td><td>15,57</td></tr> </table>	$T_B$ ( $^{\circ}C$ )	40	$T_{CAP}$ ( $J/m^3 K$ )	3,8	$t_c$ (s)	0,5	$\alpha_r$ ( $1/^{\circ}C$ )	0,00377	$K_0$ ( $^{\circ}C$ )	245	$\rho_r$ ( $\Omega.m$ )	15,9	$T_m$ ( $^{\circ}C$ )	1510	$I_k$ (kA)	15,57
$T_B$ ( $^{\circ}C$ )	40																
$T_{CAP}$ ( $J/m^3 K$ )	3,8																
$t_c$ (s)	0,5																
$\alpha_r$ ( $1/^{\circ}C$ )	0,00377																
$K_0$ ( $^{\circ}C$ )	245																
$\rho_r$ ( $\Omega.m$ )	15,9																
$T_m$ ( $^{\circ}C$ )	1510																
$I_k$ (kA)	15,57																
Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_a$ ( $^{\circ}C$ )	40																
Διάρκεια σφάλματος $t_c = t_f$ (s)	0,5																

Σχήμα 2.35. Πίνακας δεδομένων 1, περιγραφή υλικού αγωγού

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

## 2.11.2

## Υπολογισμοί στοιχείων Δικτύου, καλωδίου και μετασχηματιστή

Υπολογισμός σύνθετων αντιστάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος			
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ			
Σύνθετη αντίσταση δικτύου από την πλευρά του πρωτεύον τυλίγματος :		Σύνθετη αντίσταση δικτύου από την πλευρά του δευτερεύον τυλίγματος :	
Σύνθετη Αντίσταση :	$Z_N = \frac{1,21 \cdot U_{1N}^2}{S_k} =$ <input type="text" value="1,936"/> (Ω)	Σύνθετη Αντίσταση :	$Z'_N = Z_N \cdot \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 =$ <input type="text" value="0,0007744"/> (Ω)
Αντίσταση :	$R_N = k \cdot Z_N =$ <input type="text" value="0,3872"/> (Ω)	Αντίσταση :	$R'_N = R_N \cdot \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 =$ <input type="text" value="0,00015488"/> (Ω)
Αντίδραση :	$X_N = \sqrt{Z_N^2 - R_N^2} =$ <input type="text" value="1,897"/> (Ω)	Αντίδραση :	$X'_N = X_N \cdot \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 =$ <input type="text" value="0,000758754"/> (Ω)

Σχήμα 2.36. Σύνθετες αντιστάσεις δικτύου

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ			
Από την πλευρά του πρωτεύον τυλίγματος :		Από την πλευρά του δευτερεύον τυλίγματος :	
Ωμική αντίσταση :	$r_c = 1000 \cdot \frac{\rho}{A} =$ <input type="text" value="0,574"/> (Ω/km)	Σύνθετη Αντίσταση :	$Z'_c = Z_N \cdot \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 =$ <input type="text" value="0,00011591"/> (Ω)
Αντίδραση καλωδίων :	$x_c =$ <input type="text" value="0,08"/> (Ω/km)	Αντίσταση :	$R'_c = R_N \cdot \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 =$ <input type="text" value="0,0001148"/> (Ω)
Σύνθετη Αντίσταση :	$Z_c = \sqrt{R_c^2 + X_c^2} =$ <input type="text" value="0,29"/> (Ω)	Αντίδραση :	$X'_c = X_N \cdot \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}}\right)^2 =$ <input type="text" value="0,000016"/> (Ω)
Αντίσταση :	$R_c = r_c \cdot L =$ <input type="text" value="0,287"/> (Ω)		
Αντίδραση :	$X_c = x_c \cdot L =$ <input type="text" value="0,04"/> (Ω)		

Σχήμα 2.37. Σύνθετες αντιστάσεις καλωδίου

Σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ, στο επίπεδο τάσης του δευτερεύοντος			
Σύνθετη Αντίσταση :	$Z_T = \frac{u_k \cdot U_{2N}^2}{100 \cdot S_T} =$ <input type="text" value="0,024"/> (Ω)		
Ρεύμα στο δευτερεύον :	$I_{2N} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{2N}} =$ <input type="text" value="577,350"/> (A)		
Αντίσταση:	$R_T = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_{2N}^2} =$ <input type="text" value="0,0052"/> (Ω)		
Αντίδραση :	$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} =$ <input type="text" value="0,023"/> (Ω)		

Σχήμα 2.38. Σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

### 2.11.3 Υπολογισμοί θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας και σφάλματος Φάσης – Γης

Εάνθεις αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στην πλευρά του πρωτεύοντος	Εάνθεις αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στην πλευρά του δευτερεύοντος
Θετική ακολουθία : $Z_1 = \sqrt{R^2 + X^2} = $ <input type="text" value="2,05"/> (Ω)	Θετική ακολουθία : $Z'_1 = \sqrt{R'^2 + X'^2} = $ <input type="text" value="0,025"/> (Ω)
Αρνητική ακολουθία : $Z_2 = Z_1 = $ <input type="text" value="2,05"/> (Ω)	Αρνητική ακολουθία : $Z'_2 = Z'_1 = $ <input type="text" value="0,025"/> (Ω)
Μηδενική ακολουθία : $Z_0 = Z_1 \cdot \lambda = $ <input type="text" value="7,18"/> (Ω)	Μηδενική ακολουθία : $Z'_0 = Z'_1 \cdot \lambda = $ <input type="text" value="0,000"/> (Ω)

Σχήμα 2.39. Υπολογισμοί σύνθετων αντιστάσεων μέχρι τη θέση του σφάλματος θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας

Σφάλμα ΦΑΣΗΣ-ΓΗΣ	Σφάλμα ΦΑΣΗΣ-ΓΗΣ
Ωμική αντίσταση : $R = R_N + R_C = $ <input type="text" value="0,6742"/> (Ω)	Ωμική αντίσταση : $R' = R'_N + R'_C + R_T = $ <input type="text" value="0,0055"/> (Ω)
Επαγωγική αντίδραση : $X = X_N + X_C = $ <input type="text" value="1,937"/> (Ω)	Επαγωγική αντίδραση : $X' = X'_N + X'_C + X_T = $ <input type="text" value="0,024"/> (Ω)

Σχήμα 2.40. Ωμικό και επαγωγικό μέρος σύνθετης αντίστασης σφάλματος

### 2.11.4 Υπολογισμός τριφασικού συμμετρικού σφάλματος βραχυκύκλωσης I<sub>f</sub>

Σε γενικές γραμμές το υψηλότερο συμμετρικό ρεύμα σφάλματος I<sub>f</sub>, θα βρίσκεται στην πλευρά του μετασχηματιστή με τη χαμηλότερη ονομαστική τάση. Ο υπολογισμός για τη διατομή του αγωγού πλέγματος θα γίνει με βάση τη δυσμενέστερη τιμή.

Υπολογισμός τριφασικού συμμετρικού σφάλματος βραχυκύκλωσης I <sub>f</sub>	
<p>Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα βραχυκύκλωσης ρεύματος γης στο πρωτεύον τάληγμα</p> <p><b>Σφάλμα ΦΑΣΗΣ-ΓΗΣ</b></p> $I_{f1} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = $ <input type="text" value="2821,81"/> (A)	<p>Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα βραχυκύκλωσης ρεύματος γης στο δευτερεύον τάληγμα</p> <p><b>Σφάλμα ΦΑΣΗΣ-ΓΗΣ</b></p> $I_{f2} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2N}}{Z'_1 + Z'_2 + Z'_0} = $ <input type="text" value="40,76"/> (A)
<p>Λόγος επαγωγικής αντίδρασης με ωμική αντίσταση :</p> $\frac{X}{R} = $ <input type="text" value="1,642"/>	<p>Λόγος επαγωγικής αντίδρασης με ωμική αντίσταση :</p> $\frac{X'}{R'} = $ <input type="text" value="4,250"/>

Σχήμα 2.41. Υπολογισμός τριφασικού συμμετρικού σφάλματος βραχυκύκλωσης I<sub>f</sub>

### 2.11.5 Υπολογισμός ενεργούς τιμής ασύμμετρου ρεύματος βραχυκύκλωσης I<sub>F</sub>

Όπως φαίνεται και παρακάτω, ως τριφασικό συμμετρικό ρεύμα επιλέγεται το ρεύμα που βρίσκεται στην πλευρά του μετασχηματιστή που εμφανίζει τη δυσμενέστερη κατάσταση. Επίσης η ενεργός τιμή ασύμμετρου ρεύματος σφάλματος μπορεί να προκαλέσει υψηλότερες αυξήσεις τάσης από ότι το τριφασικό συμμετρικό ρεύμα σφάλματος και μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε γειωτές υψηλής αντίστασης.

Τέλος η ενεργός τιμή ασύμμετρου ρεύματος βραχυκύκλωσης θα χρειαστεί και στον υπολογισμό της διατομής του αγωγού πλέγματος.

**ΕΝΕΡΓΟΣ ΤΙΜΗ ΑΣΥΜΜΕΤΡΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ I<sub>F</sub>**

---

σταθερά χρονικής μετατόπισης :  $T_a = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} =$   (s)

Συντελεστής απόσβεσης :  $D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot t_f}{T_a}}\right)} =$

**Ενεργός τιμή ασύμμετρου ρεύματος βραχυκύκλωσης**

$I_F = I_f \cdot D_f =$   (A)

I<sub>f</sub>: Συμμετρικό ρεύμα πρωτεύοντος τυλίγματος

**Βιβλιογραφικές αναφορές**

Σχήμα 2.42. Υπολογισμός ενεργού τιμής ασύμμετρου ρεύματος βραχυκύκλωσης I<sub>F</sub>

### 2.11.6 Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος

**ΜΕΓΙΣΤΟ ΡΕΥΜΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ**

---

**Μέγιστο ρεύμα πλέγματος =>**

$I_G = D_f \cdot S_f \cdot I_f =$   (A)

I<sub>f</sub>: Συμμετρικό ρεύμα πρωτεύοντος τυλίγματος

**Βιβλιογραφικές αναφορές**

Σχήμα 2.43. Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Το μέγιστο ρεύμα πλέγματος  $I_G$  αναφέρεται στη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να ρέει μέσω ενός συγκεκριμένου πλέγματος γείωσης χωρίς να προκληθεί βλάβη στον εξοπλισμό ή να υπερβεί τα όρια σχεδιασμού του. Η υπέρβαση μπορεί να προκαλέσει μια σειρά προβλημάτων, όπως υπερθέρμανση, πτώση τάσης, ακόμη και ενεργοποίηση των μέσων προστασίας.

Προκειμένου να υπολογισθεί το μέγιστο ρεύμα πλέγματος, είναι απαραίτητο το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ( σχήμα 2.43 ).

Το ρεύμα  $I_G$  που θα προκύψει θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα για τον έλεγχο του GPR .

### 2.11.7 Διαστασιολόγηση αγωγών πλέγματος

ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ

\*\* Υποχρεωτική συμπλήρωση ΜΟΝΟ των πράσινων κελιών

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	αr	TCAP	ρr	Κο	Tm	Tα	tc	Ik	A (mm <sup>2</sup> )
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ									
Ανοδιωμένο μεταλλικό χαλκός	0,00393	3,4	1,72	234	1083	40	0,5	15,53	39,09
Σκληρός χαλκός	0,00381	3,4	1,78	242	1084	40	0,5	15,53	39,43
Επιχαλωμένο χαλύβδινο σύρμα	0,00378	3,8	4,4	245	1084	40	0,5	15,53	58,56
Επιχαλωμένο χαλύβδινο σύρμα	0,00378	3,8	5,86	245	1084	40	0,5	15,53	67,58
Επιχαλωμένη χαλύβδινη ράβδος	0,00378	3,8	10,1	245	1084	40	0,5	15,53	88,72
Χαλύβδινο σύρμα με επίσρωση αλουμινίου	0,0036	3,561	8,48	258	657	40	0,5	15,53	96,02
Χάλυβας	0,00377	3,8	15,9	245	1510	40	0,5	15,53	102,32
Χάλυβας με ανοξείδωτη επικάλυψη	0,00377	4,4	17,5	245	1400	40	0,5	15,53	101,58
Επιπευδωμένο χαλύβας	0,0032	3,9	20,1	293	419	40	0,5	15,53	161,81
Ανοξείδωτος χάλυβας	0,0013	4	72	740	1400	40	0,5	15,53	167,86

$$A = \frac{I}{\left( \frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_C \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) \cdot \ln \left( \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \wedge 0,5$$

ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ / Χαλκού	
I	ΤΕΛΙΚΗ ΤΙΜΗ
50	50
70	70
90	90
105	105
105	105
161,81	#Δ/Υ
167,86	#Δ/Υ

Tα	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)
TCAP	Θερμική ικανότητα ανά μονάδα όγκου ( J/cm <sup>3</sup> °C)
tc	Διάρκεια σφάλματος του ρεύματος (0,3 -1 sec)
αr	Θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης αγωγού (1/°C)
Κο	Θερμοκρασία αναφοράς για τις υλικές σταθερές (°C)
ρr	Ειδική αντίσταση του αγωγού γείωσης (μ.Ω * cm)
Tm	Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία (°C)
Ik	Ενεργός τιμή ρεύματος (kA)

Σχήμα 2.44. Υπολογισμός διατομής αγωγού πλέγματος με βάση το υλικό

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

## 2.11.8 Πίνακας δεδομένων 2

Στην πρώτη καρτέλα του πίνακα δεδομένων 2, καταχωρούνται στοιχεία που αφορούν την ειδική αντίσταση εδάφους είτε για μονοστρωματικό είτε για διστρωματικό έδαφος.

Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων και αποτελεσμάτων για τους υπολογισμούς γείωσης υποσταθμού				
→ Συχνότητα δικτύου (Hz)		50		
→ Λόγος X/R		4,43		
→ Βάθος επιφανειακού στρώματος hs (m)		0,102		
→ Ειδική αντίσταση επιφανειακού στρώματος ρs (Ω·m)		2500		
→ Ειδική αντίσταση εδάφους (Ω·m)	<input type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρα <input checked="" type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρα <input type="radio"/> Ισοδύναμη ειδική αντίσταση για διστρωματικό μοντέλο - ραβ <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης	98,20	400	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης
→ Βάθος στρώματος h (m) Από Μέθοδο Sunde		2,73		
→ Συντελεστής διαίρεσης ρεύματος σφάλματος Sf	<input type="radio"/> Για 1 πύλη <input type="radio"/> Για 2 πύλες <input checked="" type="radio"/> Για περισσότερες πύλες <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής	0,7	0,6	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής

Σχήμα 2.45. Πίνακας δεδομένων 2, στοιχεία ειδικής αντίστασης εδάφους

Στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή ειδικής αντίστασης πέρα από τις 3 προεπιλεγμένες (  $\rho_a$  ,  $\rho_a'$  ,  $\rho$  ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης "(1) και να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).

→ Ειδική αντίσταση εδάφους (Ω·m)	<input type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρα <input checked="" type="radio"/> Μονοστρωματικό - ρα <input type="radio"/> Ισοδύναμη ειδική αντίσταση για διστρωματικό μοντέλο - ραβ <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης	98,20	400	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης
----------------------------------	--	-------	-----	---

Σχήμα 2.46. Επεξήγηση εισαγωγής διαφορετικής τιμής ειδικής αντίστασης

Στην περίπτωση που θα εισαχθεί διαφορετική τιμή συντελεστή διαίρεσης ρεύματος σφάλματος πέρα από τις 3 προεπιλεγμένες ( για μία πύλη , για δύο πύλες , για περισσότερες πύλες ) θα χρειαστεί να συμπληρωθεί το πεδίο με όνομα " εισαγωγή διαφορετικής τιμής "(1) και να επιλεγεί το κουμπί με το ίδιο όνομα (2).

→ Συντελεστής διαίρεσης ρεύματος σφάλματος Sf	<input type="radio"/> Για 1 πύλη <input type="radio"/> Για 2 πύλες <input checked="" type="radio"/> Για περισσότερες πύλες <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής	0,7	0,6	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής
---	---	-----	-----	--------------------------------

Σχήμα 2.47. Επεξήγηση εισαγωγής διαφορετικής τιμής συντελεστή διαίρεσης ρεύματος σφάλματος

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Έλεिता στη δεύτερη διαφάνεια του πίνακα δεδομένων 2, αναγράφονται τα στοιχεία του πλέγματος και των ράβδων γείωσης.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ					
Μήκος πλέγματος b, Lx (m)	84				
Πλάτος πλέγματος w, Ly (m)	63				
Απόσταση μεταξύ γειτονικών αγωγών πλέγματος a <sub>g</sub> (m)	7				
Βάθος τοποθέτησης πλέγματος h <sub>g</sub> (m)	<input checked="" type="radio"/> Από μέγιστο 5m <input type="radio"/> Εισαγωγή διαφορετικής τιμής	0,5	0,5	<= Εισαγωγή διαφορετικής τιμής	Το 1ο κουμπί επιλογής θα επιλεγεί στην περίπτωση που η μελέτη θα γίνει με βάση την ειδική αντίσταση του διστρωματικού εδάφους, ειδάλως υπάρχει και το 2ο κουμπί επιλογής για εισαγωγή διαφορετικής τιμής.
ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΝ	<input checked="" type="radio"/> ΝΑΙ <input type="radio"/> ΟΧΙ	ΝΑΙ			
Μήκος ράβδων L (m)	3				Στην περίπτωση διστρωματικού μοντέλου εδάφους, αν συνυπολογισθούν και ράβδοι, τότε το ελάχιστο μήκος που είναι αποδεκτό είναι 3 m.
Αριθμός ράβδων n	38				
Διάμετρος ράβδου d (m)	0,01				

Σχήμα 2.48. Πίνακας δεδομένων 2, στοιχεία του πλέγματος και των ράβδων γείωσης.

Αν γίνει μελέτη με χρήση ράβδων, επιλέγεται το κουμπί “ΝΑΙ” ειδάλως το κουμπί “ΟΧΙ”

ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΝ

ΝΑΙ  
 ΟΧΙ

Εικόνα 2.49. Επιλογή για χρήση ράβδων ή μη.

## 2.11.9

### Μέγιστα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΟΡΙΩΝ	
Μέγιστο ρεύμα μέσω του σώματος για σωματικό βάρος 50kg :	$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t}} = 0,164 \text{ (mA)}$
Μέγιστο ρεύμα μέσω του σώματος για σωματικό βάρος 70kg :	$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t}} = 0,222 \text{ (mA)}$
Συντελεστής επιδιόρθωσης για επιφανειακό στρώμα :	$C_s = 1 - \frac{0,09 \cdot (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 \cdot h_s + 0,09} = 0,788$

Σχήμα 2.50. Μέγιστο ρεύμα σώματος για σωματικό βάρος 50 και 70 kg

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

- Ο διορθωτικός συντελεστής  $C_s$  παίρνει την τιμή μεγαλύτερης της μονάδας ( $C_s > 1$ ), όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από την ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος ( $\rho > \rho_s$ )
- Ο διορθωτικός συντελεστής  $C_s$  παίρνει την τιμή μικρότερη της μονάδας ( $C_s < 1$ ), όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μικρότερη από την ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος ( $\rho < \rho_s$ )
- Γενικά συνιστάται η ειδική αντίσταση του επιφανειακού εδάφους να είναι αρκετά μεγαλύτερη από ειδική αντίσταση του εδάφους.

**Μέγιστα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής (  $E_{step}$  ,  $E_{touch}$  )**

Για σωματικό βάρος 50 kg

$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} =$	1911,269	(V)
$E_{touch50} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} =$	600,854	(V)

Για σωματικό βάρος 70 kg

$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} =$	2586,803	(V)
$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0.116}{\sqrt{t}} =$	813,224	(V)

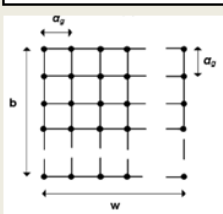
**Βιβλιογραφικές αναφορές**

Σχήμα 2.51. Μέγιστο όριο βηματικής τάσης και τάσης επαφής για σωματικό βάρος 50 και 70 kg

### 2.11.10 Συνδυασμένη αντίσταση συστοιχίας ράβδων – πλέγματος

Για να υπολογισθεί η συνδυασμένη αντίσταση πλέγματος – συστοιχίας ράβδων, πρέπει να ληφθεί υπόψη το εμβαδόν  $A$  και το συνολικό μήκος αγωγών πλέγματος  $L_{tot}$

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΡΑΒΔΩΝ - ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ**



**ΒΗΜΑ 1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ**

Συνολικό μήκος πλέγματος :	$L_{tot} = n_b \cdot W + n_w \cdot b =$	1659	(m)
Αντίσταση πλέγματος :	$R_p = \rho \cdot \left[ \frac{1}{L_{tot}} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{1 + h_p \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] =$	0,88	(Ω)

Εικόνα 2.52. Υπολογισμός γείωσης πλέγματος

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ :** Όταν εφαρμόζεται στην περίπτωση διστρωματικού εδάφους τότε στον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης ράβδων και μόνο, ως  $l$  χρησιμοποιείται το ανηγμένο μήκος  $l_{eq}$  για να φανεί η επίδραση του διστρωματικού εδάφους καθώς και ως ειδική αντίσταση  $\rho$ , χρησιμοποιείται η ειδική αντίσταση  $\rho_1$  όπου έχει αναχθεί το  $l_{eq}$  (σχήμα 2.53)

ΒΗΜΑ 2		ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΜΟΙΒΑΙΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΑΒΔΩΝ - ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	
Αμοιβαία αντίσταση συστοιχίας-πλέγματος :	$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L \cdot n} \cdot \ln\left(\frac{L_{tot}}{L^{1.2}} + 1\right) =$	2,25	(Ω)

ΒΗΜΑ 3		ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΕΙΩΣΗΣ ΡΑΒΔΩΝ	
Ανηγμένο μήκος $L_{eq}$		3,00	(m)
Ειδική αντίσταση $\rho_1$		132,00	(Ω.m)
Αντίσταση γείωσης ράβδων :	$R_r = \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi \cdot L_{eq}} \cdot \left(\ln\left(\frac{8 \cdot L_{eq}}{d}\right) - 1\right) =$	47,50	(Ω)

Σχήμα 2.53. Υπολογισμός αμοιβαίας αντίστασης ράβδων – πλέγματος και αντίσταση γείωσης ράβδων

$R_c = \frac{R_g \cdot (R_r + R_m)}{R_g + R_r + R_m} =$	2,25	(Ω)
<b>Αντίσταση γείωσης πλέγματος</b>		

Σχήμα 2.54. Τελική τιμή αντίστασης συνδυασμένης συστοιχίας ράβδων – πλέγματος

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

## 2.11.11 Έλεγχος GPR

Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος GRP (Ground Potential Rise), θα χρειαστεί η εύρεση της αντίστασης συνδυασμού πλέγματος – συστοιχίας ράβδων και το μέγιστο ρεύμα πλέγματος.

**ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ GPR**

$GPR = I_G \cdot R_C =$ 

2070,956	(V)
----------	-----

**ΕΛΕΓΧΟΣ GPR**

Τάση επαφής <span style="float: right;">↓</span>	813,224	(V)
→ $GRP \leq E_{\text{τουτε}h70}$ →		
GPR <span style="float: right;">↑</span>	2070,956	(V)

**ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟ**

Εάν το αποτέλεσμα βγει **ΑΠΟΔΕΚΤΟ** , τότε η μελέτη έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία .  
 Εάν το αποτέλεσμα βγει **ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟ** , τότε προχωράμε σε επιπλέον υπολογισμούς, υπολογίζοντας την **τάση βρόχου  $E_m$**  και την **βηματική τάση  $E_s$**

Σχήμα 2.55. Έλεγχος GPR

## 2.11.12 Τάση Βρόγου ( $E_m$ )

Πριν τον τελικό έλεγχο της τάσης βρόχου, πρέπει να διευκρινιστεί αν η μελέτη γίνει με χρήση ράβδων ή όχι .

- Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθούν ράβδοι γείωσης , τότε θα επιλεγεί η πρώτη τιμή που εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα ( σχήμα 2.56 )
- Ειδάλλως, αν χρησιμοποιηθούν, θα επιλεγεί η δεύτερη τιμή προκειμένου να γίνει ο έλεγχος.

**Τάση βρόχου =>**

Για πλέγματα **με λίγα ή καθόλου** ηλεκτρόδια γείωσης  
 (και κανένα κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του πλέγματος):

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} =$$

366,36	(V)
--------	-----

Για πλέγματα με ηλεκτρόδια γείωσης κατά μήκος της  
 περιμέτρου ή των γωνιών του πλέγματος:

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} =$$

305,30	(V)
--------	-----

Σχήμα 2.56. Επιλογή κατάλληλης τιμής τάσης βρόχου (  $E_m$  )



Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Αν το αποτέλεσμα βγει μη αποδεκτό, μια πρώτη σκέψη διαφοροποίησης είναι η πύκνωση του πλέγματος ( $\alpha_g$ ) ώστε να μειωθεί η Τάση Βρόχου. Στην περίπτωση που πάλι βγει μη αποδεκτό, η επόμενη αλλαγή είναι στο μήκος των ράβδων ( $l$ ) και πιο συγκεκριμένα στην προσθήκη επιπλέον μήκους ή αύξησης του πλήθους των ράβδων.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΒΡΟΧΟΥ  $E_m$

Τάση επαφής	↑	813,22	(V)		
Em	↓	305,30	(V)	→	$E_m \leq E_{touch}$
				→	ΑΠΟΔΕΚΤΟ

Εάν το αποτέλεσμα βγει **ΑΠΟΔΕΚΤΟ**, τότε συνεχίζουμε στον υπολογισμό της βηματικής τάσης  $E_s$   
 Εάν το αποτέλεσμα βγει **ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟ**, τότε χρειάζεται αναθεώρηση του σχεδιασμού του πλέγματος.

Εικόνα 2.57. Έλεγχος Τάσης Βρόχου ( $E_m$ )

### 2.11.13 Βηματική Τάση ( $E_s$ )

Για να φτάσει κανείς στον τελικό έλεγχο της βηματικής τάσης, πρέπει πρώτα να υπολογισθούν κάποιες παράμετροι σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα.

ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΒΡΟΧΟΥ  $E_m$

Γεωμετρικός παράγοντας,  $n$   $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d$

$n_a = \frac{2 \cdot L_{tot}}{L_p} =$	8,500				
$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} =$	1,075	↔	Αποτέλεσμα = 1 για τετραγωνικά πλέγματα		
$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A} =$	1,000	↔	Αποτέλεσμα = 1 για τετραγωνικά και ορθογώνια πλέγματα		
$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} =$	1,000	↔	Αποτέλεσμα = 1 για τετραγωνικά και ορθογώνια πλέγματα		

Οπότε προκύπτει:  $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d =$  9,13

Σχήμα 2.58. Υπολογισμός γεωμετρικού παράγοντα  $n$

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

Συντελεστής ανομοιομορφίας :  $K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n = 2,00$

Συντελεστής διόρθωσης για βάθος πλέγματος :  $K_h = \sqrt{1 + \frac{h_g}{h_0}} = 1,22$

Σχήμα 2.59. Υπολογισμός συντελεστή ανομοιομορφίας και συντελεστή διόρθωσης για βάθος πλέγματος

Στην περίπτωση που έχει γίνει χρήση ράβδων η βηματική τάση υπολογίζεται ως εξής :

συντελεστής γεωμετρικής απόστασης :

για πλέγματα **με** ηλεκτρόδια γης κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος ή των γωνιών

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left( \frac{a_g^2}{16 \cdot h_g \cdot d} + \frac{(a_g + 2 \cdot h_g)^2}{8 \cdot a_g \cdot d} - \frac{h_g}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \left( \ln \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right\} = 0,59$$

για πλέγματα **με** ηλεκτρόδια γης κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος ή των γωνιών

↓

$$K_{ii} = 1$$

Για πλέγματα με ηλεκτρόδια γείωσης κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του πλέγματος:

↓

$$L_M = L_{tot} + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R = 1839,67 \text{ (m)}$$

Σχήμα 2.60. Υπολογισμός παραμέτρων για την περίπτωση χρήσης ράβδων γείωσης

Στην περίπτωση που δεν έχει γίνει χρήση ράβδων η βηματική τάση υπολογίζεται ως εξής :

για πλέγματα **χωρίς** ηλεκτρόδια γείωσης κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του πλέγματος

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left( \frac{a_g^2}{16 \cdot h_g \cdot d} + \frac{(a_g + 2 \cdot h_g)^2}{8 \cdot a_g \cdot d} - \frac{h_g}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \left( \ln \frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right\} = 0,71$$

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

για πλέγματα **χωρίς** ηλεκτρόδια γείωσης κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του δικτύου

↓

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{2/n}} = \boxed{0,53}$$

Για πλέγματα **με λίγα ή καθόλου** ηλεκτρόδια γείωσης (και κανένα κατά μήκος της περιμέτρου ή των γωνιών του πλέγματος):

↓

$$L_M = L_{tot} + L_R = \boxed{1773} \text{ (m)}$$

Σχήμα 2.61. Υπολογισμός παραμέτρων στην περίπτωση που δεν γίνεται χρήση ράβδων γείωσης

Αν το αποτέλεσμα βγει μη αποδεκτό , μια πρώτη σκέψη διαφοροποίησης είναι η πύκνωση του πλέγματος (  $a_g$  ) ώστε να μειωθεί η τάση Βρόχου. Στην περίπτωση που πάλι βγει μη αποδεκτό, η επόμενη αλλαγή είναι στο μήκος των ράβδων (  $l$  ) και πιο συγκεκριμένα στην προσθήκη επιπλέον μήκους για κάθε μεμονωμένη ράβδο ή αύξηση του συνολικού αριθμού των ράβδων που χρησιμοποιείται ή αύξηση του πάχους στρώσης πάνω από το πλέγμα.

Συντελεστή γεωμετρικής απόστασης  $K_s$  :

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2 * h_g} + \frac{1}{a_g + h_g} + \frac{W}{a_g} \right) = \boxed{0,406}$$

Τάση βρόχου =>

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{0,75 \cdot L_{tot} + 0,85 \cdot L_R} = \boxed{222,77} \text{ (V)}$$

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΗΜΑΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ  $E_s$**

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Βηματική τάση</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">↑</td> <td style="width: 50%;">2586,80</td> <td style="width: 10%; text-align: right;">(V)</td> </tr> </table>	Βηματική τάση	↑	2586,80	(V)	→	$E_S \leq E_{step}$	→	<b>ΑΠΟΔΕΚΤΟ</b>
Βηματική τάση	↑	2586,80	(V)					
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Es</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">↓</td> <td style="width: 50%;">222,769</td> <td style="width: 10%; text-align: right;">(V)</td> </tr> </table>	Es	↓	222,769	(V)				
Es	↓	222,769	(V)					

Εάν το αποτέλεσμα βγει **ΑΠΟΔΕΚΤΟ** , τότε έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός  
 Εάν το αποτέλεσμα βγει **ΜΗ ΑΠΟΔΕΚΤΟ** , τότε χρειάζεται αναθεώρηση του σχεδιασμού πλέγματος προκειμένου να βγει αποδεκτό .

Σχήμα 2.62. Έλεγχος Βηματικής Τάσης (  $E_s$  )

### 3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> Διεξαγωγή υπολογισμών μέσω της εφαρμογής που αναπτύχθηκε – παραδείγματα εφαρμογής από πρότυπο IEEE80 2013

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 θα γίνει μια σύγκριση αποτελεσμάτων μελετών γειώσεων υποσταθμών μεταξύ της εφαρμογής λογισμικού excel που αναπτύχθηκε και αναλύθηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2 και παραδειγμάτων υπολογισμών (test cases) από το πρότυπο IEEE80 2013 [50], προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία της εφαρμογής λογισμικού.

Το Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει την εφαρμογή εξισώσεων, πινάκων και γραφικών παραστάσεων για το σχεδιασμό μιας γείωσης υποσταθμού. Οι ειδικοί στόχοι είναι οι ακόλουθοι:

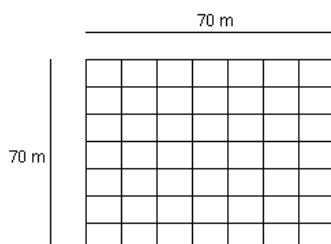
α) Να δείξει την εφαρμογή των κύριων εξισώσεων του παρόντος οδηγού για διάφορες βελτιώσεις του σχεδιασμού προς μια ικανοποιητική τελική λύση σχεδιασμού.

β) Να παρουσιάσει ενδεχόμενες διαφορές που μπορεί να εμφανιστούν μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τη χρήση των απλουστευμένων υπολογισμών του παρόντος οδηγού και των ακριβέστερων υπολογιστικών λύσεων.

#### 3.2 1<sup>ο</sup> Παράδειγμα εφαρμογής

- Διάρκεια σφάλματος  $t_f = 0,5$  s
- Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση συστήματος θετικής ακολουθίας  $Z_1 = 4,0 + j10,0 \Omega$  (πλευρά 115 kV)
- Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση συστήματος μηδενικής ακολουθίας  $Z_0 = 10,0 + j40,0 \Omega$  (πλευρά 115 kV)
- Συντελεστής διαίρεσης ρεύματος  $S_f = 0,6$
- Τάση γραμμής προς γραμμή πολικής τάσης στη χειρότερη θέση σφάλματος = 115 000 V
- Ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho = 400 \Omega\text{-m}$
- Ειδική αντίσταση επιφανειακού στρώματος  $\rho_s = 2500 \Omega\text{-m}$
- Βάθος επιφανειακού στρώματος  $h_s = 0,102$  m
- Βάθος τοποθέτησης πλέγματος  $h = 0,5$  m
- Διαθέσιμη επιφάνεια γείωσης  $A = 63 \text{ m} \times 84 \text{ m}$
- Αντίσταση μετασχηματιστή, ( $Z_1$  και  $Z_0$ ) =  $0,034 + j1,014 \Omega$  (13 kV) ( $Z = 9\%$  σε 15 MVA, 115/13 kV)

Στο παράδειγμα που ακολουθεί θα γίνει μελέτη γείωσης υποσταθμού με χρήση τετραγωνικού γειωτή πλέγματος.



Σχήμα 3.1. Τετραγωνικό πλέγμα [50]

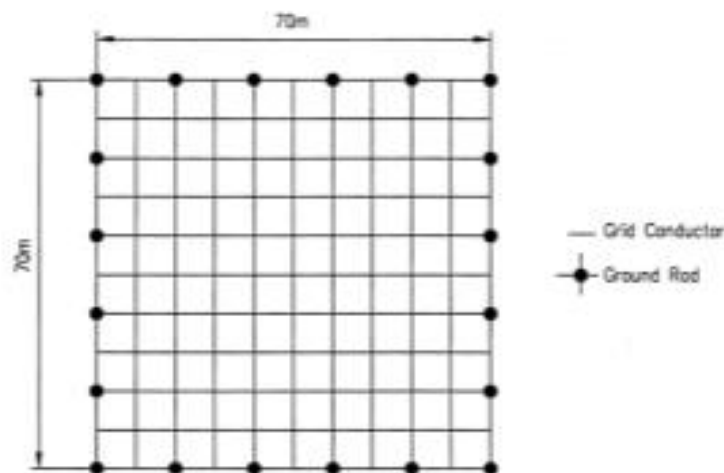
Πλήρης μελέτη υπολογισμού γείωσης υποσταθμού ΧΩΡΙΣ ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ (Συγκεντρωτικός πίνακας )			
Αποτελέσματα με βάση το πρότυπο IEEE80 2013		Αποτελέσματα με βάση την εφαρμογή λογισμικού Excel	
Υπολογισμός συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης	$I_1 = 3180 \text{ (A)}$ $I_2 = 6814 \text{ (A)}$	Υπολογισμός συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης	$I_1 = 3173,16 \text{ (A)}$ $I_2 = 6813,14 \text{ (A)}$
Υπολογισμός διαστασιολόγησης αγωγού πλέγματος	$A = 30,24 \text{ mm}^2$	Υπολογισμός διαστασιολόγησης αγωγού πλέγματος	$A = 31,24 \text{ mm}^2$
Υπολογισμός συντελεστή επιδιόρθωσης για επιφανειακό στρώμα	$C = 0,74$	Υπολογισμός συντελεστή επιδιόρθωσης για επιφανειακό στρώμα	$C = 0,743$
Υπολογισμός μέγιστων ορίων τάσεων και αφής	$E_{step70} = 2686,6 \text{ (v)}$ $E_{touth70} = 838,2 \text{ (v)}$	Υπολογισμός μέγιστων ορίων τάσεων και αφής	$E_{step70} = 2696,097 \text{ (v)}$ $E_{touth70} = 840,548 \text{ (v)}$
Υπολογισμός αντίστασης πλέγματος	$R_g = 2,78 \text{ (}\Omega\text{)}$	Υπολογισμός αντίστασης πλέγματος	$R_g = 2,78 \text{ (}\Omega\text{)}$
Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος	$I_G = 1908 \text{ (A)}$	Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος	$I_G = 1999,483 \text{ (A)}$
Υπολογισμός GPR	$GPR = 5304 \text{ (V)}$	Υπολογισμός GPR	$GPR = 5549,953 \text{ (V)}$
Υπολογισμός βηματικής τάσης	$K_m = 0,89$ $K_h = 1,225$ $K_{ii} = 0,57$ $K_i = 2.272$ $n = 11$ $E_m = 1002,1 \text{ (V)}$	Υπολογισμός βηματικής τάσης	$K_m = 0,89$ $K_h = 1,22$ $K_{ii} = 0,57$ $K_i = 2.27$ $n = 11$ $E_m = 1045,39 \text{ (V)}$

Πίνακας 3.1. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μιας πλήρους μελέτης γείωσης υποσταθμού χωρίς χρήση ράβδων γειώσεων

### 3.3 2<sup>ο</sup> Παράδειγμα

- Διάρκεια σφάλματος  $t_f = 0,5$  s
- Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση συστήματος θετικής ακολουθίας  $Z_1 = 4,0 + j10,0 \Omega$  (πλευρά 115 kV)
- Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση συστήματος μηδενικής ακολουθίας  $Z_0 = 10,0 + j40,0 \Omega$  (πλευρά 115 kV)
- Συντελεστής διαίρεσης ρεύματος  $S_f = 0,6$
- Τάση γραμμής προς γραμμή στη χειρότερη θέση σφάλματος = 115 000 V
- Ειδική αντίσταση εδάφους  $\rho = 400 \Omega\text{-m}$
- Ειδική αντίσταση επιφανειακού στρώματος  $\rho_s = 2500 \Omega\text{-m}$
- Βάθος επιφανειακού στρώματος  $h_s = 0,102$  m
- Βάθος τοποθέτησης πλέγματος  $h = 0,5$  m
- Διαθέσιμη επιφάνεια γείωσης  $A = 70$  m  $\times$   $70$  m
- Αντίσταση μετασχηματιστή, ( $Z_1$  και  $Z_0$ ) =  $0,034 + j1,014 \Omega$  (13 kV) ( $Z = 9\%$  σε 15 MVA, 115/13 kV)
- Αριθμός ράβδων  $n=20$
- Μήκος ράβδων  $l=7,5$  m

Συνήθως η μείωση του διαθέσιμου ρεύματος σφάλματος γείωσης είναι δύσκολο ή ανέφικτο να επιτευχθεί, οπότε το δίκτυο τροποποιείται με την αλλαγή κάποιου ή όλων των ακόλουθων στοιχείων : απόσταση αγωγών πλέγματος, συνολικό μήκος αγωγών, πλέγμα βάθος, προσθήκη ράβδων γείωσης κ.λπ. Σε αυτό το παράδειγμα, ο προκαταρκτικός σχεδιασμός θα τροποποιηθεί, ώστε να περιλαμβάνει ράβδους γείωσης,



Σχήμα 3.2. Τετραγωνικό πλέγμα με ράβδους [50]

<b>Πλήρης μελέτη υπολογισμού γείωσης υποσταθμού ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ</b>			
<b>Αποτελέσματα με βάση το πρότυπο ΙΕΕΕ80 2013</b>		<b>Αποτελέσματα με βάση την εφαρμογή λογισμικού Excel</b>	
Υπολογισμός συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης	$I_1 = 3180 \text{ (A)}$ $I_2 = 6814 \text{ (A)}$	Υπολογισμός συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης	$I_1 = 3173,16 \text{ (A)}$ $I_2 = 6813,14 \text{ (A)}$
Υπολογισμός διαστασιολόγησης αγωγού πλέγματος	$A = 30,24 \text{ mm}^2$	Υπολογισμός διαστασιολόγησης αγωγού πλέγματος	$A = 31,24 \text{ mm}^2$
Υπολογισμός συντελεστή επιδιόρθωσης για επιφανειακό στρώμα	$C = 0,74$	Υπολογισμός συντελεστή επιδιόρθωσης για επιφανειακό στρώμα	$C = 0,743$
Υπολογισμός μέγιστων ορίων τάσεων και αφής	$E_{step70} = 2686,6 \text{ (v)}$ $E_{touth70} = 838,2 \text{ (v)}$	Υπολογισμός μέγιστων ορίων τάσεων και αφής	$E_{step70} = 2696,097 \text{ (v)}$ $E_{touth70} = 840,548 \text{ (v)}$
Υπολογισμός αντίστασης πλέγματος	$R_g = 2,75 \text{ (}\Omega\text{)}$	Υπολογισμός αντίστασης πλέγματος	$R_c = 2,67 \text{ (}\Omega\text{)}$
Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος	$I_G = 1908 \text{ (A)}$	Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος πλέγματος	$I_G = 1999,483 \text{ (A)}$
Υπολογισμός GPR	$GPR = 5247 \text{ (V)}$	Υπολογισμός GPR	$GPR = 5336,927 \text{ (V)}$
Υπολογισμός βηματικής τάσης	$K_m = 0,77$ $K_h = 1,225$ $K_{ii} = 1$ $K_i = 2.272$ $n = 11$ $E_m = 747,4 \text{ (V)}$	Υπολογισμός βηματικής τάσης	$K_m = 0,77$ $K_h = 1,22$ $K_{ii} = 1$ $K_i = 2.27$ $n = 11$ $E_m = 781,22 \text{ (V)}$
Υπολογισμός τάσης βρόχου	$K_s = 0,406 \text{ (V)}$ $E_s = 548,9 \text{ (V)}$	Υπολογισμός τάσης βρόχου	$K_s = 0,406 \text{ (V)}$ $E_s = 575,73 \text{ (V)}$

Πίνακας 3.2. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων μιας πλήρους μελέτης γείωσης υποσταθμού με χρήση ράβδων γειώσεων

### Συμπεράσματα

Η εύρεση ακριβών αποτελεσμάτων είναι κρίσιμη στον τομέα της μελέτης γειώσεων, καθώς η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων εξαρτάται από την ποιότητα της γείωσης. Η χρήση λογισμικού excel προσφέρει έναν αξιόπιστο και ευέλικτο τρόπο για τον υπολογισμό των απαιτούμενων παραμέτρων και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο 3 διαπιστώνεται ότι η εφαρμογή λογισμικού excel έχει γενικά ακριβή αποτελέσματα, όπως προκύπτει μετά την παράθεση των πινάκων με τα συγκριτικά αποτελέσματα και φαίνεται ότι μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διεξαγωγή των απαραίτητων υπολογισμών για τη μελέτη γειώσεων διαφορετικών τύπων που συναντώνται στην πράξη, δηλαδή απλών ή σύνθετων γειωτών σε κτηριακές ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή ακόμη και γειώσεων υποσταθμών.



#### 4. Βιβλιογραφία

- [1] [IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System](#) , IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997 USA
- [2] Freddy Sinchi-Sinchi , Cristian Coronel-Naranjo , Antonio Barragán-Escandón and Flavio Quizhpi- Palomeque , “ Soil Treatment to Reduce Grounding Resistance by Applying Low-Resistivity Material (LRM) Implemented in Different Grounding Systems Configurations and in Soils with Different Resistivities” , Appl. Sci. 2022, 12, 4788,2022
- [3] Srete Nikolovski, Goran Knežević, ZoranBaus, “ Assessment of Step and Touch Voltages for Different Multilayer Soil Models of Complex Grounding Grid” , Vol. 6, No. 4, PP. 1441~1455, August 2016
- [4] Rong ZENG, Jinliang HE, ZANJI Wang, Yanqing GAO Weimin SUN Qi SU, “Analysis on Influence of Long Vertical Grounding Electrodes on Grounding System for Substation” , PP.1475-80 February 2000
- [5] Jinxi Ma, Senior Member, IEEE, and Farid Paul Dawalibi, Senior Member, IEEE , “Computerized Analysis of Grounding Plates in Multilayer Soils” , VOL. 24, NO. 2, pp.650-55 ,APRIL 2009
- [6] Ossama Gouda , GhadaAmer , Hana Ibrahim , “EARTH SURFACE POTENTIALS AND GPR OF SUBSTATION GROUNDING” , paper 0020, Frankfurt, 6-9 June 2011
- [7] Ignatius K. Okakwu<sup>1\*</sup>, France O. Akpojedje, Emmanuel S. Olowasog<sup>3</sup> and Abel E. Airoboman<sup>1</sup> , “Validation of Grid Formulas Using a Scaled Model of Earthing Grid System” , May 2015
- [8] M .B .Kostic, G. H. Shirkoohi, “ NUMERICAL ANALYSIS OF A CLASS OF FOUNDATION GROUNDING SYSTEMS SURROUNDED BY TWO LAYER SOIL” , Vol. 8, No. 3, PP.1080-87 ,July 1993
- [9] I.F. Gonos, V.T. Kontargyri, I.A. Stathopoulos, P.A. Kontaxis and A.X. Moronis, “Variation of Multilayer Structure of the Soil During the Year”, Gigre Greek National Committee, Athens, December 15-16, Session D6, pp.209-216, 2005.
- [10] Γκόνος Ι.Φ., “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης”, Διδακτορική Διатριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.
- [11] Sindisiwe C. Malanda, Innocent E. Davidson, ElutunjiBuraimoh , Eddie Singh “Analysis of Soil Resistivity and its Impact on Grounding Systems Design” , 2018
- [12] M. Nasserddine, J. Rizk, and G. Nasserddine , “Soil Resistivity Data Computations; Single and Two - Layer Soil Resistivity Structure and Its Implication on Earthing Design” , Vol 9(28), pp.,ISSN (Online) : 0974-5645 , 2013
- [13] SonerKara<sup>1</sup> ,OzcanKalenderli , and Ozkan Altay,” Optimum Grounding Grid Design by using Genetic Algorithms”, PP.1117-21 , 2015

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

[14] M. Nassereddine, J. Rizk, M. Nagrial, A. Hellany , ' 'Substation Earth Grid Measurement using the Fall of Potential Method (FOP) for a Limited Test Area' ' , School of Computing Engineering and Mathematics , University of Western Sydney Penrith, Australia, 28 September – 1 October 2014

[15] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System ,IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997 USA 2014

[16] Robert D. Southey, MajidSiahrang, Simon Fortin, and Farid P. Dawalibi, *Senior Member, IEEE* Using Fall-of-Potential “Measurements to Improve Deep Soil Resistivity Estimates” , VOL. 51, NO. 6, PP.5023-29 ,NOVEMBER/DECEMBER 2015

[17] C. J. Blattner, “IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems”, Vol. PAS-99, No. 5 , PP.1758-63, Sept/Oct 1980

[18] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, “IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems”,Vol. PAS-98, No.6 , PP.2089-98, Nov./Dec. 1979

[19] J .A. Su I Ivan , “ Alternative earthing calculations for grids and rods” , *Vol. 145, No. 3 , PP.271-80 , 1998*

[20] I. F. Gonos , F. V. Topalis , I. A. Stathopoulos, “TRANSIENT IMPEDANCE OF GROUNDING RODS” ,National Technical University of Athens Department of Electrical and Computer Engineering, High Voltage Laboratory , 1999

[21] M. Nassereddine J. Rizk A. Hellany, “How to design an effective earthing system to ensure the safety of the people” , Vol. 11, No. 3,, PP.1337-42, 2009

[22] M. A. Salam , SaifulbahriJaafar , Md. Izhermi “Measurement of Grounding Resistance by Triangular Grid in Brunei Darussalam” , 2011

[23] J .A. Su I Ivan , “Alternative earthing calculations for grids and rods' ' , *Vol. 145, No. 3, PP. 270-80 , 1998*

[24] J. Nahman, D. Salamon, “Analytical Expressions for the Resistance of Rodbeds and of Combined Grounding Systems in Nonuniform Soil” , No. 3,PP.90-96 , 1986

[25] M. Nassereddine, J. Rizk, M. Nagrial, A. Hellany, “Estimation of apparent soil resistivity for two-layer soil Structure” , *Volume 4, Issue 4, PP.573-580, 2013*

[26] JovanNahman , IvicaPaunovic “Mesh voltage at earthing grids in multi-layer soil”, PP.556-561, 2010

[27] O.E.Gouda, G. M.Amer and T. M.EL-Saied , “Factors Affecting the Apparent Soil Resistivity of Multi-Layer Soil” ,PP I-19, August 25-29, 2005

[28] Ankita B. Patel , KevalVelani , “ Digital Application for Grouning Grid Design Calculations of Substation” , 2017

[29] William H. Bartley, Jr.”Substation Grounding Study Guide” ,IEEE Std 81™-2012, 28 December 2012

[30] Martin HAVELKA – Didier QUOY ERICO, “ Guidelines for use of Grounding Products' ' ,2020

- [31] IEEE Std 80-2013, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, May 15, 2015
- [32] [He Jinliang](#), [R. Zeng](#) “Seasonal influences on safety of substation grounding system” , VOL. 18, NO. 3 August 2003
- [33] D Prasad, HC Sharma , “[Significance of step and touch voltages](#)” , ISSN: 2231-2307, Volume-1, Issue-5 2011
- [34] Hachimenum Nyebuchi Amadi , “ DESIGN OF GROUNDING SYSTEM FOR A.C. SUBSTATIONS WITH CRITICAL CONSIDERATION OF THE MESH, TOUCH AND STEP POTENTIALS” , Vol. 5 No. 4, 2017 *ISSN 2056-5860* , *PP. 44-57*, 2017
- [35] Osama E. Gouda<sup>1</sup> ✉, Adel Z. El Dein<sup>2</sup>, “ Ground potential rise of faulty substations having equal and unequal spacing grounding grids conductors” , Vol. 11, Iss. 1, PP. 18–26 ,2017
- [36] Kaustubh A. Vyas, and J.G. Jamnani , “Optimal Design and Development of Software for Design of Substation Grounding System” , 08-10 DECEMBER, 2011
- [37] Mohamed Anwar, “DESIGNING SUBSTATION EARTHING GRID SYSTEM USING INTERVAL MATHEMATICS” , Paper 0141, 6-9 June 2011
- [38] [Jovan Nahman V.B. Djordjevic](#) , “Maximum step voltages of combined grid - Multiple rods ground electrodes” , Vol. 13, No. 3, PP. 757-61 , August 1998
- [39] I.F. Gonos, A.X. Moronis , I.A. Stathopoulos “ Variation of Soil Resistivity and Ground Resistance during the Year” , V21 PP. 740-44
- [40] [OP Rahi](#), [AK Singh](#), SK Gupta, S Goyal , “Design of Earthing System for a Substation : A Case Study” , Volume-2 Number-4 Issue-6 PP. 237-242 2012
- [41] Zhong-Xin Li , Shao-Wei Rao , “The determination of frequency domain soil parameters of horizontally layered structure by using dipole-dipole array” , DOI: 10.1002/jnm.2578, Received: 13 June 2018 Revised: 2 December 2018 Accepted: 23 January 2019
- [42] Sobhy Serry Dessouky, Sherif Ghoneim, Saad Awad, “Grounding Resistance, Step and Touch Voltages for a Driven Vertical Rod into Two Layer Model Soil” , 978-1-4244-5940-7 11 o IEEE , 2010
- [43] M. Nassereddine, J. Rizk, and G. Nassereddine, “Soil Resistivity Data Computations; Single and Two - Layer Soil Resistivity Structure and Its Implication on Earthing Design” , Vol:7, No:1, PP. 35-40 , 2013
- [44] M. Nassereddine J. Rizk A. Hellany, “How to design an effective earthing system to ensure the safety of the people” , PP. 416-21, 2009
- [45] Surya Hardi<sup>1\*</sup>, Azwar Nasution<sup>2</sup>, R. Harahap<sup>1</sup> and Ayu Fitriani<sup>1</sup>, “Design grounding grid resistance of substation for two soil layer model” , Journal of Physics: Conference Series 2193 (2022) 012033 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2193/1/012033, 2021

Ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για την διεξαγωγή υπολογισμών της αντίστασης γείωσης γειωτών σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά εδάφη

[46] Surya Hardi<sup>1</sup>, Azwar Nasution<sup>2</sup>, R. Harahap<sup>1</sup> and Ayu Fitriani<sup>1</sup>, “Design grounding grid resistance of substation for two soil layer model” ,Vol. PAS-103, No. 4,PP.880-85,2021

[47] Rajesh Kumar<sup>1</sup>, Kamal Bansal, Devender Kumar Saini and I. P. S. Paul , “Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air Insulated and Gas Insulated Substations” , 2016

[48] Καθιέρωση διατάξεων διαφορικού ρεύματος και θεμελιακής γείωσης”, ΦΕΚ 1222/05-09-2006 τεύχος Β' αριθ. Φ. Α' 50/12081/642 άρθρο 2.

[49] IEEE STD 525 1992 (Reaff 1999),IEEE guide for the design and installation of cable systems in substations

[50] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 11 December 2013