

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



ΤΟΚΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ (ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2012)

Περίληψη

Στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ισχύος και σε κτιριακές κατασκευές με ηλεκτρικό εξοπλισμό, ως κυρίαρχο μέλημα τίθεται η ασφάλεια των ατόμων που διαμένουν, κινούνται ή εργάζονται σε αυτούς τους χώρους και των ζώων που ζουν στη γύρω περιοχή. Προς το σκοπό αυτό, είναι αναγκαίος ο περιορισμός της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής. Αυτό επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση ενός αποτελεσματικού συστήματος γείωσης, με αντίσταση γείωσης μέσα στα επιθυμητά όρια. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να μετρηθεί η ειδική αντίσταση του εδάφους μιας περιοχής, οι οποίες και θα αναλυθούν παρακάτω.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η επέκταση των αποτελεσμάτων με την ανάλυση των μεθόδων υπολογισμού της αντίστασης συνθέτων συστημάτων γειώσεων με την χρήση ενός λογισμικού με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, του COMSOL Multiphysics, έτσι ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις υπάρχουσες προσεγγιστικές μεθοδολογίες.

Στο 1^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ορολογία που χρησιμοποιείται και δίνονται οι βασικοί ορισμοί για ένα σύστημα γείωσης. Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη γειώσεων καθώς και η μορφή και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γειωτών. Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους καθώς και για τις μεθόδους μέτρησής της. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, στη συνέχεια στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στο COMSOL και στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Θεόδωρο Θεοδουλίδη ο οποίος μου εμπιστεύθηκε το θέμα της διπλωματικής και που στήριξε την προσπάθειά μου για περάτωσή της.

Ευχαριστώ πολύ τον κ. Κωνσταντίνο Ράλλη για τις υποδείξεις και τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε σε διάφορα θέματα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κλείνοντας και με αίσθημα βαθύτατης ευγνωμοσύνης θέλω ιδιαίτερα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Γιώργο και Ελένη αλλά και στο μικρότερό μου αδερφό Βαγγέλη που με στήριξαν υλικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια της πανεπιστημιακής μου θητείας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	02
Κεφάλαιο 1 : Ορισμός βασικών εννοιών	06
1.1 Ορολογία	06
1.1.1 Γείωση	06
1.1.2 Ηλεκτρόδιο Γείωσης	06
1.1.3 Πλέγμα γείωσης	06
1.1.4 Ράβδοι Γείωσης	06
1.1.5 Αντίσταση γείωσης (Rg)	06
1.1.6 Άπειρη γη	07
1.1.7 Πολυστρωματική δομή εδάφους	07
1.2 Στόχοι ενός συστήματος γείωσης	07
1.3 Η σημασία της αντίστασης γείωσης	08
Κεφάλαιο 2 : Μέθοδοι και είδη γείωσης	10
2.1 Είδη Γειώσεων	10
2.1.1 Γείωση λειτουργίας	10
2.1.2 Γείωση προστασίας	10
2.1.3 Γείωση ασφάλειας ή αντικεραυνικής προστασίας	10
2.2 Μέθοδοι Γείωσης	11
2.2.1 Ουδετέρωση	11
2.2.2 Άμεση γείωση	11
2.2.3 Μέσω διακόπτη διαφυγής	11
2.3 Είδη Γειωτών	11
Κεφάλαιο 3 : Ειδική Αντίσταση Εδάφους	17
3.1 Ειδική Αντίσταση	17
3.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους	17
3.2 Διάταξη υπολογισμού ειδικής αντίστασης	19
3.3 Μέθοδος Schwartz	22
3.3.1 Για ομοιογενή γη	22
3.3.2 Για διαστρωματοποιημένη γη	26
3.4 Μέθοδος Nahman – Raunovic	27
3.4.1 Ομοιογενής γη	27
3.4.2 Γη δύο στρωμάτων	28
3.5 Μέθοδος Nahman – Salamon	30
3.5.1 Αντίσταση ενός πασσαλογειωτή	30
3.5.2 Αντίσταση μιας σύνθετης συστοιχίας πασσαλογειωτών	31
Κεφάλαιο 4 : Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	34
4.1 Γενικά	34
4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ στο πεδίο του χρόνου	35
4.3 Εφαρμογή της ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ για μόνιμη κατάσταση	36
4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	37

Κεφάλαιο 5 : Το Πρόγραμμα COMSOL MULTIPHYSICS	39
5.1 Το περιβάλλον COMSOL	39
5.2 Συνθήκες υποπεριοχής	41
5.3 Οριακές συνθήκες	41
5.4 Διακριτοποίηση (Meshing)	42
5.5 Επίλυση και επεξεργασία αποτελεσμάτων	44
Κεφάλαιο 6 : Αποτελέσματα	46
6.1 Διερεύνηση για ένα πασσαλογειωτή	46
6.1.1 Πάσσαλος γείωσης σε ομοιογενή γη	47
6.1.2 Αντίσταση γείωσης σε σχέση με την ειδική αντίσταση του πασσάλου	48
6.2 Εξάρτηση της αντίστασης γείωσης από το μήκος του πασσάλου	52
6.3 Πάσσαλος γείωσης σε διαστρωματοποιημένη γη	54
6.4 Πλέγμα γείωσης	58
6.5 Γειωτής πλάκας	60
6.5.1 Αποτελέσματα	61
Συμπεράσματα	62
Βιβλιογραφία	63

Κεφάλαιο 1 : Ορισμός βασικών εννοιών

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην ορολογία που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας. Η επεξήγηση των όρων γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [1] το οποίο αποτελεί την αναθεωρημένη έκδοση του προτύπου IEEE Std 80 – 1986 [2].

1.1 Ορολογία

1.1.1 Γείωση

Η αγώγιμη σύνδεση, σκόπιμη ή τυχαία, μέσω της οποίας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή μια συσκευή συνδέεται με τη γη ή με αγώγιμο σώμα τέτοιας έκτασης που να θεωρείται γη [3]. Αναλυτικότερος ορισμός της γείωσης, οι κατηγορίες γειώσεων καθώς και τα είδη γειωτών αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2.

1.1.2 Ηλεκτρόδιο Γείωσης

Ηλεκτρόδιο τοποθετημένο μέσα στο έδαφος μέσω του οποίου γίνεται συλλογή και διάχυση των ηλεκτρικών ρευμάτων σφάλματος στη γη. Τα ηλεκτρόδια γείωσης (γειωτές) έχουν τις μορφές που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2, Σχήμα 2.1. Οι ελάχιστες διαστάσεις των ηλεκτροδίων γείωσης δίνονται στο Κεφάλαιο 2, Πίνακας 2.1 κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε. (Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων) [3] και στον Πίνακα 2.2 αναφέρονται οι τύποι που δίνουν τις αντιστάσεις τους.

1.1.3 Πλέγμα γείωσης

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

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

1.1.4 Ράβδοι Γείωσης

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

1.1.5 Αντίσταση γείωσης (R_g)

Η ωμική αντίσταση του συστήματος γείωσης προς την άπειρη γη. Εξαρτάται από την ειδική αντίσταση ρ του εδάφους όπου είναι εγκατεστημένη η γείωση (για την ειδική αντίσταση του εδάφους και τους παράγοντες που την επηρεάζουν γίνεται

λόγος στο Κεφάλαιο 3), την επιφάνεια A που η γείωση καταλαμβάνει καθώς και το βάθος h όπου είναι τοποθετημένη.

Ένα καλό σύστημα γείωσης χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντίσταση προς μείωση του μέγιστου δυναμικού γείωσης. Συνήθεις τιμές για μεγάλους υποσταθμούς είναι μικρότερες του 1Ω και για υποσταθμούς διανομής από 1 ως 5Ω [1].

1.1.6 Άπειρη γη

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

1.1.7 Πολυστρωματική δομή εδάφους

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

1.2 Στόχοι ενός συστήματος γείωσης

Ο σχεδιασμός ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι απαραίτητος για να εξασφαλίσει την προστασία των ατόμων και των συσκευών και τη συνεχή τροφοδότηση ηλεκτρικής ισχύος. Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η ισοδύναμη ηλεκτρική αντίσταση του συστήματος και η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια της γης όταν συμβαίνει σφάλμα.

Ο αντικειμενικός σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να υπάρχει μία αγωγή διαδρομή για να διοχετευθεί το ρεύμα που παράγεται από ένα σφάλμα στη γη. Σε κατάσταση βραχυκυκλώματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα διανεμηθεί στο σύστημα γείωσης και έπειτα θα διοχετευθεί στη γη. Σε μια τέτοια κατάσταση η ροή ρεύματος στη γη παράγει κλίσεις δυναμικού μέσα και γύρω από το σύστημα γείωσης. Η μέγιστη κλίση δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους μπορεί να έχει κατάλληλη τιμή για να κινδυνεύσουν τα άτομα στην περιοχή. Ακόμη επικίνδυνες τάσεις μπορεί να αναπτυχθούν ανάμεσα σε γειωμένες κατασκευές και μεταλλικά καλύμματα ηλεκτρικού εξοπλισμού. Για την αποφυγή ατυχήματος ηλεκτροπληξίας, η σχεδίαση ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη τα εξής: (α) την αντίσταση γείωσης, (β) το μέγεθος και τη θέση της μέγιστης βηματικής τάσης που μπορεί να αναπτυχθεί στην επιφάνεια του εδάφους, όπου βηματική τάση ορίζεται η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται σε ένα άτομο που γεφυρώνει με τα πόδια του απόσταση $1m$ χωρίς να έρχεται σε επαφή με άλλο αντικείμενο, (γ) την τάση επαφής που ορίζεται σαν η πτώση τάσης η οποία εφαρμόζεται σε ένα άτομο όταν αυτό έρχεται σε επαφή με γειωμένη κατασκευή.

Στόχοι ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης είναι οι εξής:

- Να μπορεί να διοχετεύσει ασφαλώς τα διάφορα ρεύματα στο έδαφος κάτω από κανονικές συνθήκες και συνθήκες σφαλμάτων, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία των διαφόρων συσκευών στο χώρο που υπάρχει η γείωση.
- Να διασφαλίζει ότι τα πρόσωπα που κινούνται στην περιοχή που καλύπτεται από το συγκεκριμένο σύστημα δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

Ως ένα τυπικό σύστημα γείωσης θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα πλέγμα από οριζόντια τοποθετημένους αγωγούς σε συνδυασμό με κάποιους κατακόρυφα τοποθετημένους αγωγούς, οι οποίοι συνδέονται με το πλέγμα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης αναφέρονται παρακάτω.

- Σε έναν υποσταθμό η χρήση ενός μόνο ηλεκτροδίου γείωσης είναι ανεπαρκής για να προσφέρει την επιθυμητή προστασία. Χρειάζεται ένας συνδυασμός από ηλεκτρόδια γείωσης, όπως πασσαλογειωτές, τα οποία συνδέονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τα μέρη τα οποία πρέπει να γειωθούν. Το αποτέλεσμα είναι ουσιαστικά ένα πλέγμα από ηλεκτρόδια. Εάν το έδαφος μέσα στο οποίο τοποθετηθεί το πλέγμα αυτό έχει καλή απορροφητικότητα ρεύματος, έχει σχεδιαστεί ένα πλήρως αξιόπιστο σύστημα γείωσης. Αλλιώς τοποθετείται και ένα πλέγμα από οριζόντια τοποθετημένους αγωγούς το οποίο αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος γείωσης και την αποτελεσματικότητά του.
- Εάν η τιμή του ρεύματος που διοχετεύεται στη γη είναι υψηλή είναι πολύ σπάνια εφικτή η τοποθέτηση ενός πλέγματος που θα έχει από μόνο του τόσο χαμηλή αντίσταση ώστε να διασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχει αύξηση δυναμικού τόσο μεγάλη ώστε να αναπτυχθούν επικίνδυνες βηματικές τάσεις. Έτσι είναι απαραίτητη σχεδόν η κατασκευή ενός συνδυασμένου συστήματος γείωσης.

1.3 Η σημασία της αντίστασης γείωσης

Η αντίσταση γείωσης είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους των συστημάτων γείωσης. Επηρεάζει πολύ σημαντικά τη ρευματική κατανομή του συστήματος γείωσης του υποσταθμού, την ανύψωση του δυναμικού της γης κατά τη διάρκεια σφαλμάτων γης και τα δυναμικά που πιθανόν να μεταφερθούν σε γειτονικές μεταλλικές εγκαταστάσεις. Συνεπώς η αντίσταση γείωσης θα πρέπει να εκτιμάται σε πρώιμο στάδιο σχεδίασης για να προσδιοριστεί ποια θα είναι η γεωμετρία των ηλεκτροδίων γείωσης. Αυτό δικαιολογεί τις προσπάθειες που γίνονταν παλαιότερα για την επεξεργασία σχετικά απλών εκφράσεων που προσδιορίζουν την αντίσταση γείωσης τυπικών συστημάτων γείωσης συμπεριλαμβανομένων και των πλεγμάτων. Πολλές εκφράσεις για πλέγματα, συστοιχίες και συνδυασμό αυτών, ενταφιασμένων σε ομοιογενή και διαστρωματοποιημένη γη δύο και τριών στρωμάτων έχουν προταθεί. Για πολυστρωματοποιημένη γη όμως δεν υπάρχουν διαθέσιμες εκφράσεις.

Ο υπολογισμός της αντίστασης γείωσης δεν είναι εύκολος. Διαφορετικά είδη γειώσεων, (πλέγματα, πασσαλογειωτές) έχουν διαφορετική αντίσταση. Στους υπολογισμούς υπεισέρχεται ο σημαντικότερος παράγοντας της σύστασης του εδάφους. Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται ευθέως ανάλογα από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η ειδική αντίσταση εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από το πορώδες του εδάφους, τη θερμοκρασία και την υγρασία. Επίσης επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι είναι αναπόφευκτες οι διακυμάνσεις της αντίστασης. Στόχος του κατασκευαστή είναι η διατήρηση των τιμών των αντιστάσεων κάτω από τα ανώτερα επιτρεπτά επίπεδα έτσι ώστε και οι τάσεις επαφής να είναι στα επιτρεπτά επίπεδα ασφαλείας. Αυτά είναι σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60479 50V για το εναλλασσόμενο (EP) και 120V για το συνεχές (ΣP) με κυμάτωση κάτω του 10%.

Κεφάλαιο 2 : Μέθοδοι και είδη γείωσης

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

2.1 Είδη Γειώσεων

Οι γειώσεις διακρίνονται στα παρακάτω τρία είδη ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους [5]:

2.1.1 Γείωση λειτουργίας

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

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

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

2.1.2 Γείωση προστασίας

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

2.1.3 Γείωση ασφάλειας ή αντικεραυνικής προστασίας

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

2.2 Μέθοδοι Γείωσης

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι εξής [6]:

2.2.1 Ουδετέρωση

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

2.2.2 Άμεση γείωση

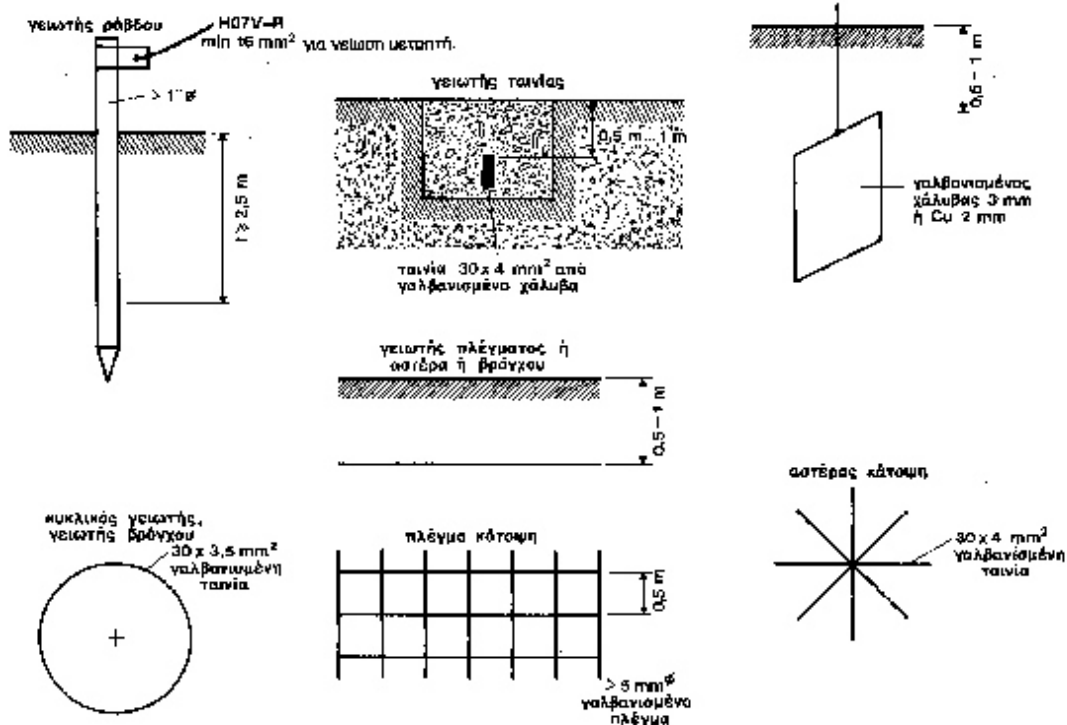
Με απ' ευθείας αγώγιμη σύνδεση στο σύστημα γείωσης (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, πλέγμα κλπ).

2.2.3 Μέσω διακόπτη διαφυγής

Γίνεται αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης.

2.3 Είδη Γειωτών

Τα κυριότερα είδη των γειωτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Είδη γειωτών

2.3.1 Γειωτής ράβδου

Είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μίας ίντσας ή μία ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, π.χ. U, L, T ή I-προφίλ. Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20°) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος σε βάθος, π.χ. 2,5 m με σφυρί χεριού, ή με μηχανικό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους (Πίνακας 2.2). Η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Εφόσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, γιατί αντέχουν στη διάβρωση.

2.3.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινο

Ταινία ή συρματόσχοινο που τοποθετείται σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 0,5 m. Το βάθος που προτιμάται είναι 0,7-1,0 m, για να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμη ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η τελευταία γείωση λέγεται γειωτής βρόγχου. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Για το ίδιο μήκος ταινίας ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Δε συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης, αν και το επιτρέπουν οι Κ.Ε.Η.Ε. [7], γιατί διαβρώνεται εύκολα. Γι' αυτό το λόγο δεν το συνιστούν και οι κανονισμοί VDE 100.

2.3.3 Γειωτής πλάκας

Πρόκειται για πλάκα μορφής παραλληλογράμμου, πχ 0,5×0,5m², η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνειά της κατακόρυφη. Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1,0 m. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι γαλβανισμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3 mm ή χαλκός ή μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2 mm.

2.3.4 Γειωτής ακτινικός

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

2.3.5 Γειωτής πλέγματος

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

προφανώς, και ανοίγματα μικρότερα από 3 m. Αυτά όμως δεν έχουν μικρότερες βηματικές τάσεις από ότι πλέγματα με ανοίγματα 3 m.

2.3.6 Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής

Επιτρέπεται κατά το άρθρο 24 των Κ.Ε.Η.Ε. [7], χωρίς ιδιαίτερη άδεια, η χρησιμοποίηση μεταλλικών δικτύων ύδρευσης ως γειωτών για εγκαταστάσεις με τάσεις ως προς γη μικρότερες των 250 V, εφ' όσον υπάρχει η συγκατάθεση του Οργανισμού Ύδρευσης. Πάνω από αυτές τις τάσεις χρειάζεται ειδική άδεια από τον Οργανισμό Ύδρευσης. Η γραμμή γείωσης συνδέεται κατά προτίμηση πριν από το μετρητή. Αν η σύνδεση γίνει μετά το μετρητή, πρέπει να βραχυκυκλωθεί μονίμως ο μετρητής με χάλκινο σύρμα H03V-U και διατομή τουλάχιστον 6 mm².

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

2.3.7 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές

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


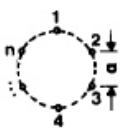

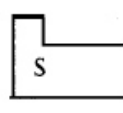
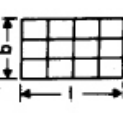
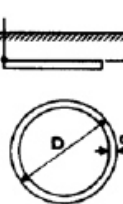
Επιφανειακούς γειωτές, π.χ. γειωτές ταινίας, πλέγματος και ακτινικούς γειωτές
Βαθείς γειωτές, π.χ. ράβδοι γείωσης.

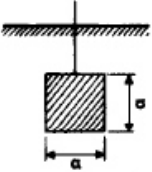
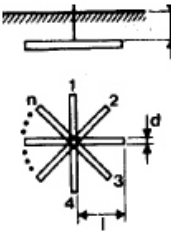
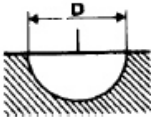
2.3.9 Θεμελιακή γείωση

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

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

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

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

	<p>Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m²]</p>		$R = \frac{\rho}{4.5 \cdot \alpha} \text{***}$
	<p>n=2</p> <p>n=3</p> <p>n=4</p> <p>n=5</p>	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{l^2}{0.27 \cdot t \cdot d}\right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{l^2}{0.25 \cdot t \cdot d}\right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{l^2}{0.22 \cdot t \cdot d}\right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{l^2}{0.09 \cdot t \cdot d}\right)$	
	<p>Ημισφαιρικός γειωτής</p>	$R = \frac{\rho}{\pi \cdot D} \text{****}$	
<p>* Όπου εμφανίζεται το πάχος του αγωγού d, αυτό είναι το ισοδύναμο πάχος</p> $d = \sqrt{4 \cdot \frac{A}{\pi}}$, όπου A η διατομή του αγωγού. <p>** Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος</p> $D = 0,33 \cdot U$, U το μήκος αγωγού. <p>*** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε: $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S η επιφάνεια.</p> <p>**** Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V}$.</p>			

Πίνακας 2.2 Αντιστάσεις γειωτών

Κεφάλαιο 3 : Ειδική Αντίσταση Εδάφους

3.1 Ειδική Αντίσταση

Η ειδική αντίσταση ρ είναι ένα χαρακτηριστικό του εδάφους, το οποίο δείχνει πόσο αγωγίμη ηλεκτρικά είναι η γη. Συνήθως δεν έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σημεία του εδάφους.

Η αντίσταση γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους.

3.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων. Εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. Με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του, ρ , μετρούμενη συνήθως σε $\Omega \cdot m$. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική, περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική [8].

Ειδικότερα, η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση ήταν 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ($CaCl_2$), θειικό χαλκό ($CuSO_4$), ή θειικό μαγνήσιο ($MgSO_4$) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Η επίδραση των διακυμάνσεων αυτών στην αποτελεσματικότητα της γείωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος [9].

Συμπερασματικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι οι εξής [3]:

1. Είδος του εδάφους – Προσμίξεις

Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται ενδεικτικά οι ειδικές αντιστάσεις ορισμένων εδαφών. Στο Διάγραμμα 3.1 φαίνεται η επίδραση της περιεκτικότητας του εδάφους σε αλάτι με υγρασία 30% στην ειδική αντίσταση εδάφους.

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση ρ (Ωm)
Ελώδες έδαφος	5-40
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	20-200
Αμμώδες	200-2500
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	2000-3000
Αποσαθρωμένος βράχος	Κάτω από 1000
Αμμόλιθος	2000-3000
Λιθώνας	Πάνω από 30000
Γρανίτης	Πάνω από 50000

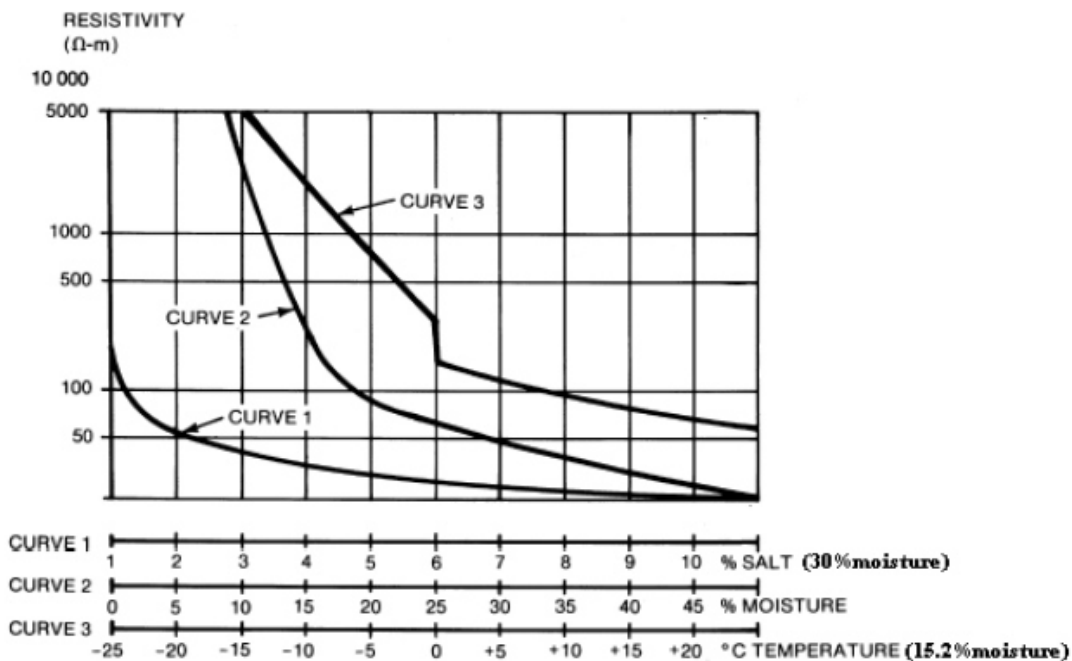
Πίνακας 3.1 Ειδικές αντιστάσεις εδαφών, ενδεικτικές μέσες τιμές κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε.

2. Υγρασία

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

3. Θερμοκρασία

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



Διάγραμμα 3.1 Επίδραση άλατος, υγρασίας και θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση εδάφους

4. Μορφή της τάσης

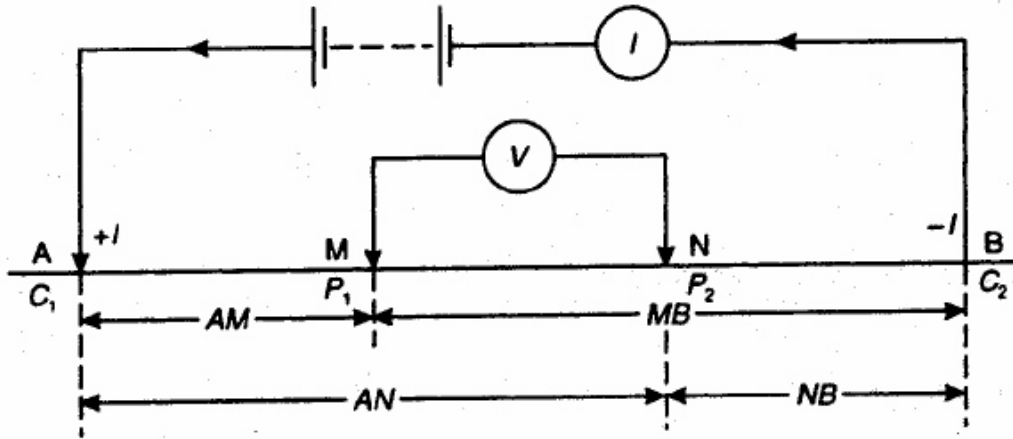
Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10 m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0,3/30 μ s, η αντίσταση θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από τα 3 Ω στα 26 Ω . Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο τάσης. Η αντίσταση υπό κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται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

5. Ηλεκτρικό ρεύμα

Η ειδική αντίσταση στην περιοχή των ηλεκτροδίων γείωσης επηρεάζεται από τη ροή ρεύματος από τα ηλεκτρόδια προς το περιβάλλον έδαφος. Η επίδραση αυτή εξαρτάται από το ποσό υγρασίας στο έδαφος και τη θερμοκρασία του καθώς και το μέγεθος και τη διάρκεια της ροής ρεύματος που προκαλεί ξήρανση του εδάφους και επομένως αύξηση της αντίστασής του. Ανεκτό όριο για την πυκνότητα ρεύματος είναι τα 200A/m² με διάρκεια 1s.

3.2 Διάταξη υπολογισμού ειδικής αντίστασης

Η πιο συνηθισμένη συνδεσμολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων του εδάφους, αποτελείται από τέσσερα ηλεκτρόδια τα οποία μπαίνουν στην επιφάνεια της γης σε αποστάσεις που καθορίζονται από την μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται. Η μέθοδος αυτή είναι πειραματική. Το ρεύμα διοχετεύεται από μια ηλεκτρική πηγή στα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια, ενώ η τάση μετρείται από το εσωτερικό ζεύγος ηλεκτροδίων. Το βάθος ταφής των ηλεκτροδίων είναι κατά πολύ μικρότερο σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Μια τυπική αναπαράσταση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2.1 Συνδεσμολογία ηλεκτροδίων

Η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη διάταξη είναι η διάταξη Wenner. Το χαρακτηριστικό της είναι ότι τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε ίσαπέχουσες αποστάσεις. Σε ομοιογενή γη η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{i} \quad (3.1)$$

όπου:

a η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων

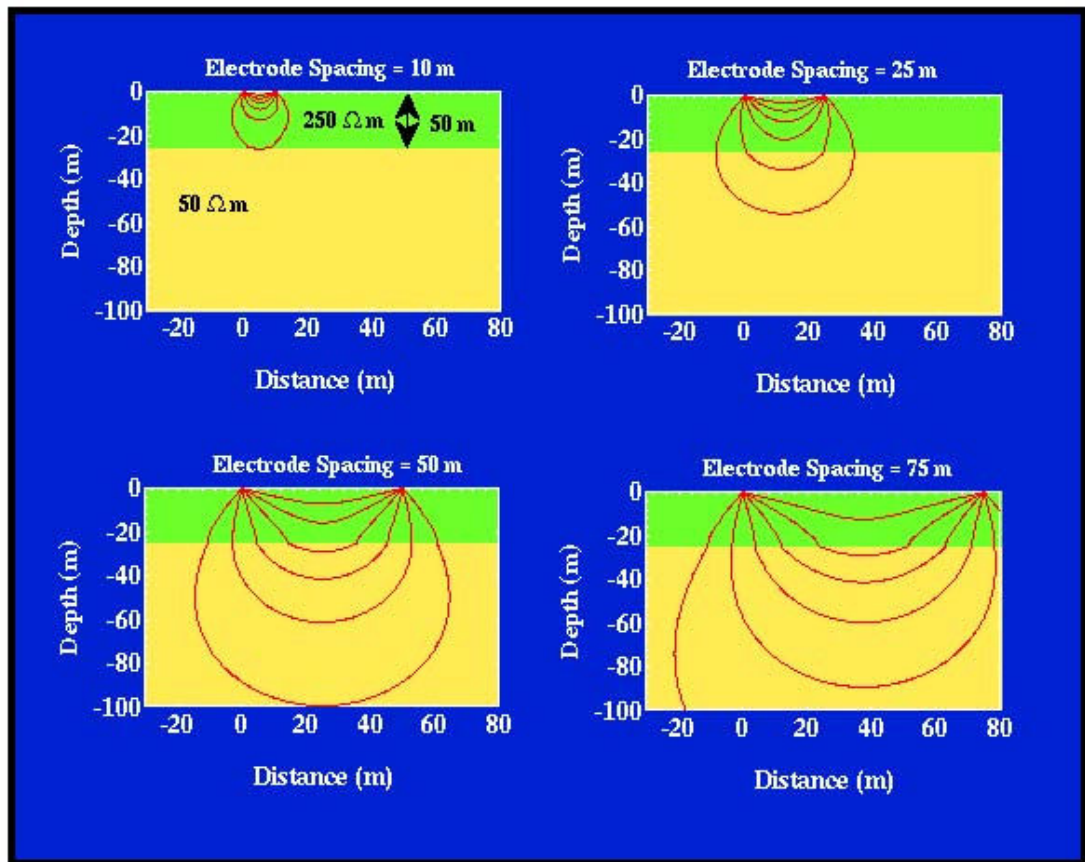
ΔV η διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων τάσης

i το ρεύμα

Αναλυτικά, τα τέσσερα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή στην επιφάνεια της γης σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Το ρεύμα I ρέει μεταξύ των δύο εξωτερικών ηλεκτροδίων και η τάση μετρείται μεταξύ των δύο εσωτερικών. Το βάθος ταφής των ηλεκτροδίων είναι μικρό σε σχέση με την απόσταση a μεταξύ τους, με λόγο τουλάχιστον 1:10, για να μπορούν να θεωρηθούν ως σημειακά στη μέτρηση του δυναμικού τους. Λαμβάνονται διάφορες μετρήσεις με ταυτόχρονη αύξηση της απόστασης a κατά βήματα. Σε ομοιογενή γη η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι σταθερή και ανεξάρτητη από την απόσταση των ηλεκτροδίων, ενώ σε διστρωματοποιημένη γη η φαινόμενη ειδική αντίσταση εξαρτάται από την απόσταση αυτή. Ουσιαστικά η απόσταση των ηλεκτροδίων γείωσης αυξάνεται κατά βήματα γιατί με τον τρόπο αυτό αυξάνει το βάθος διεύθυνσης του ρεύματος μέσα στη γη. Το φαινόμενο εξηγείται παρακάτω.

Σε μη ομοιογενή γη, στόχος των μετρητικών διατάξεων είναι να μπορέσουν να προσδιορίσουν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την ειδική αντίσταση των στρωμάτων, ακόμα και των κατώτερων. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο να αυξάνει η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης για να αυξάνεται έτσι και το βάθος διεύθυνσης.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τυπική κατανομή του ρεύματος με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος, ενώ διατηρούνται σταθερά τα ηλεκτρόδια δυναμικού, σε ένα μοντέλο γης δύο στρωμάτων, όπου το ανώτερο στρώμα έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από το κατώτερο.



Σχήμα 3.2.2 Κατανομή ρεύματος

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, όταν τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε μικρή απόσταση το ένα από το άλλο, η μεγαλύτερη ποσότητα του ρεύματος διέρχεται από το ανώτερο στρώμα της γης. Αν δεν αυξηθεί η απόσταση αυτή, μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της μετρητικής διάταξης θα μπορούσε να προκύψει το λανθασμένο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ομοιογενή γη με τιμή ειδικής αντίστασης σχεδόν ίσης με την ειδική αντίσταση του πρώτου στρώματος, (στην περίπτωση αυτή περίπου ίση με 250 Ω·m). Αντίθετα για πολύ μεγάλες αποστάσεις ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος το ρεύμα θα διέρχεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το δεύτερο στρώμα γης. Οι παρακάτω καμπύλες δείχνουν την εξάρτηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για γη δύο στρωμάτων συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων του ρεύματος.

Όπου:

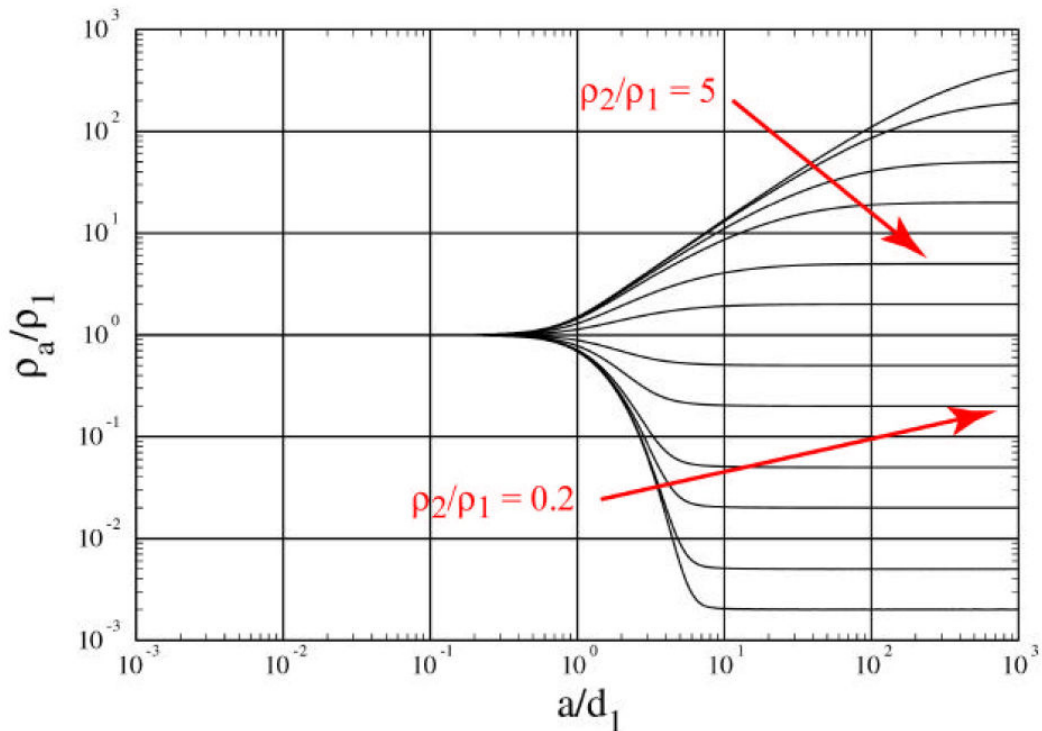
ρ_a η φαινόμενη ειδική αντίσταση της διαστρωματοποιημένης γης

ρ_1 η ειδική αντίσταση του πρώτου στρώματος

ρ_2 η ειδική αντίσταση του δεύτερου στρώματος

α η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος

d₁ το πάχος του πρώτου στρώματος γης



Σχήμα3.2.3 Ειδική αντίσταση συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων

3.3 Μέθοδος Schwartz

3.3.1 Για ομοιογενή γη

Από τον κανονισμό της IEEE για τις γειώσεις υποσταθμών AC του 1986 [1] ο οποίος περιέχει τη μέθοδο Schwartz, προτείνονται οι παρακάτω εξισώσεις για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης ενός συστήματος γείωσης που αποτελείται τόσο από οριζόντια τοποθετημένα ηλεκτρόδια, τα οποία σχηματίζουν πλέγμα, όσο και από κατακόρυφα τοποθετημένους πασσαλογειωτές. Το σύστημα αυτό είναι τοποθετημένο σε ομοιογενή γη, σε γη δηλαδή με την ίδια τιμή ειδικής αντίστασης σε όλο τον χώρο ο οποίος επηρεάζει τη γείωση.

Αναλυτικότερα ισχύει:

$$R_g = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2 \cdot R_m} \quad (3.2)$$

Όπου:

R₁ αντίσταση γείωσης του πλέγματος σε Ω

R₂ αντίσταση γείωσης των πασσαλογειωτών σε Ω

R_m αμοιβαία αντίσταση γείωσης, μεταξύ των αγωγών του πλέγματος και των πασσαλογειωτών σε Ω

Η αντίσταση γείωσης του πλέγματος υπολογίζεται ως εξής:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 \cdot L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (3.3)$$

Όπου:

ρ η ειδική αντίσταση του ομογενούς εδάφους σε $\Omega \cdot m$

L_c το συνολικό μήκος των αγωγών του πλέγματος σε m

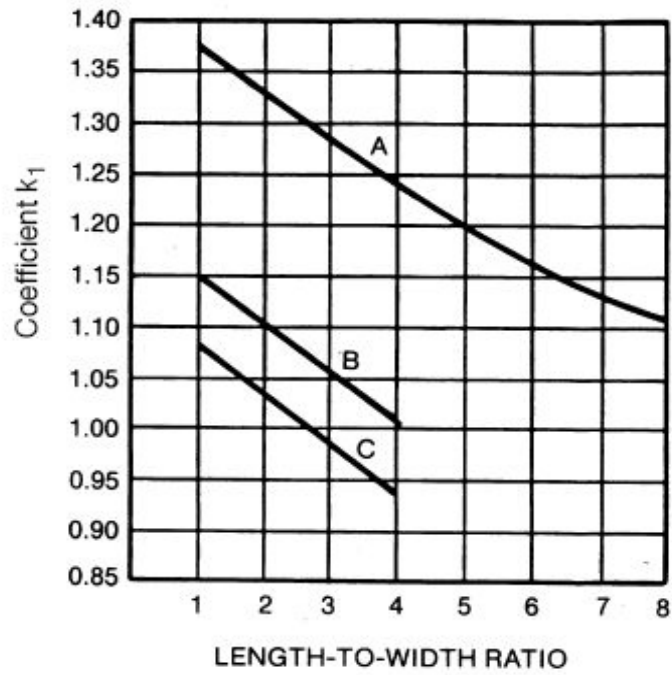
a' είναι ίσο με $\sqrt{a \cdot 2h}$ στην περίπτωση αγωγών που είναι ενταφιασμένοι σε βάθος h σε m, ή

a' ισούται με a στην περίπτωση που οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια της γης

$2a$ η διάμετρος των αγωγών σε m

A η περιοχή που καλύπτεται από τους αγωγούς σε m^2

k_1 , k_2 συντελεστές που προσδιορίζονται από τα παρακάτω γραφήματα:



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$

$$\gamma_A = -0.04x + 1.41$$

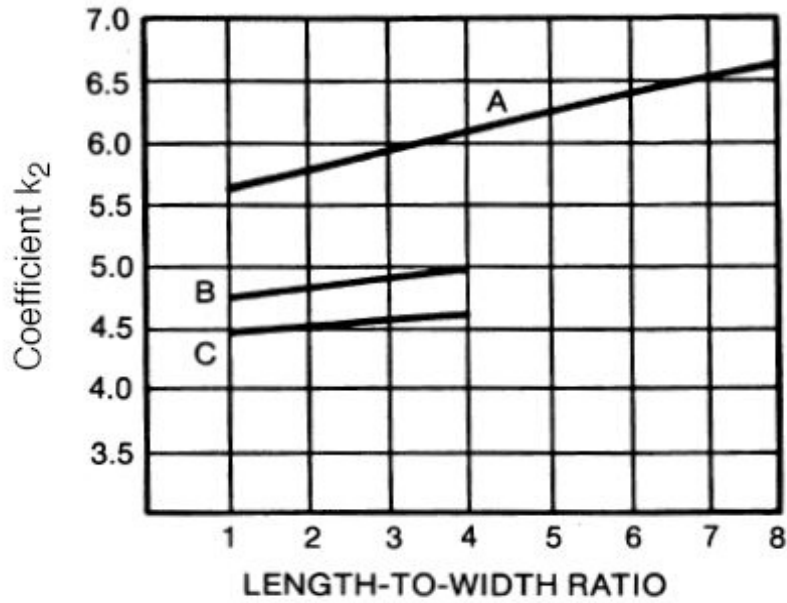
CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_B = -0.05x + 1.20$$

CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_C = -0.05x + 1.13$$

Γράφημα 3.3.1 Συντελεστής k_1



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$
 $\gamma_A = 0.15x + 5.50$
 CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$
 $\gamma_B = 0.10x + 4.68$
 CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$
 $\gamma_C = -0.05x + 4.40$

Γράφημα 3.3.2 Συντελεστής k_2

Για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης των πασσαλογειωτών ισχύει:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_R \cdot L_R} \left[\ln \left(\frac{4 \cdot L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2 \cdot k_1 \cdot L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (3.4)$$

όπου:

L_R είναι το μήκος κάθε πασσαλογειωτή σε m

n_R είναι ο αριθμός των πασσαλογειωτών που έχουν τοποθετηθεί στην περιοχή A

$2b$ είναι η διάμετρος του κάθε πασσαλογειωτή σε m

Τέλος για τον υπολογισμό της αμοιβαίας αντίστασης μεταξύ του πλέγματος και των πασσαλογειωτών ισχύει:

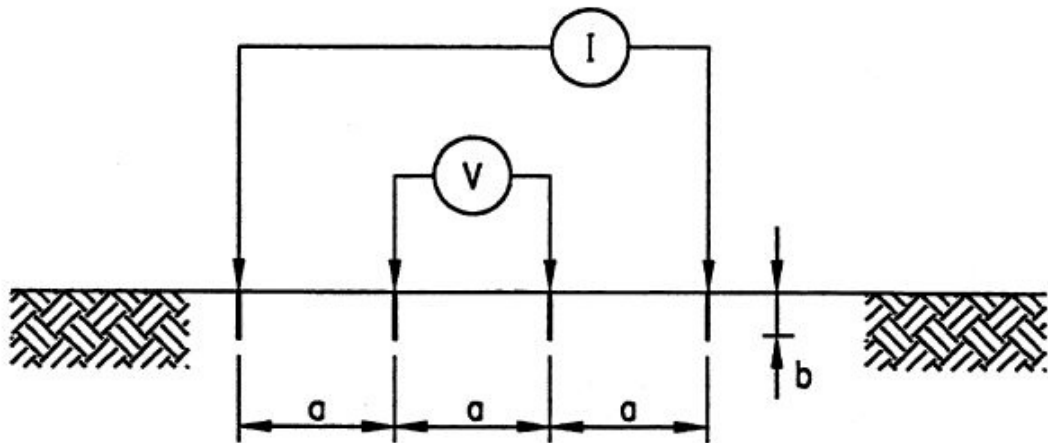
$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_C} \left[\ln \left(\frac{2 \cdot L_C}{L_R} \right) + \frac{k_1 \cdot L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (3.5)$$

πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της αμοιβαίας αντίστασης προκύπτει μικρότερη από τις τιμές των δύο αντιστάσεων (R_1 , R_2) ξεχωριστά. Ωστόσο η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από τον παράλληλο συνδυασμό τους.

3.3.2 Για διαστρωματοποιημένη γη

Λόγω έντονης ανομοιογένειας του εδάφους συνήθως το έδαφος δεν θεωρείται ομοιογενές. Στην περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί η διαστρωματοποιημένη γη με στρώματα συγκεκριμένου πάχους οριζόντια τοποθετημένα με το τελευταίο στρώμα γης να εκτείνεται θεωρητικά στο άπειρο. Κάθε στρώμα έχει συγκεκριμένη ειδική αντίσταση.

Για την περίπτωση αυτή, ισχύουν οι εξισώσεις όπως και στην ομοιογενή γη με τη διαφορά ότι αντί για την ειδική αντίσταση ρ , χρησιμοποιείται η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ_a . Για τον υπολογισμό της ρ_a προτείνεται από τον κανονισμό IEEE Std. 80-2000 η παρακάτω μέθοδος. Σύμφωνα με αυτό τον κανονισμό είναι απαραίτητο να υπάρχει μια σειρά τιμών της ρ_a , οι οποίες προέρχονται από τη μέτρηση του εδάφους με τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων (Wenner):



όπου η φαινόμενη ειδική αντίσταση προκύπτει ως:

$$\rho_a = \frac{4\pi\alpha R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3.6)$$

όπου:

R είναι η αντίσταση που μετράται με τη βοήθεια των οργάνων σε $\Omega \cdot m$

a είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων της διάταξης σε m

b είναι το βάθος στο οποίο είναι τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια σε m

εάν το βάθος b θεωρηθεί πολύ μικρότερο της απόστασης a τότε ο παραπάνω τύπος απλοποιείται σημαντικά και γίνεται:

$$\rho_a = 4\pi a R \quad (3.7)$$

Αφού λοιπόν ληφθούν οι διάφορες τιμές της ρ_a , οι οποίες προκύπτουν από σταδιακή αύξηση της απόστασης a μεταξύ των ηλεκτροδίων της, η συνολική ρ_a του εδάφους που μας ενδιαφέρει προκύπτει ως ο αριθμητικός μέσος όλων των προηγούμενων μετρήσεων. Ισχύει δηλαδή ότι:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (3.8)$$

Όπου:

$\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$ είναι η τιμές που έχουν προκύψει με τη μέθοδο Wenner για διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων

n είναι ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων αυτών.

Η μέθοδος αυτή απαιτεί διεξαγωγή των μετρήσεων στον τόπο που θα εγκατασταθεί το σύστημα γείωσης.

3.4 Μέθοδος Nahman – Paunovic

Στη δημοσίευση των Nahman – Paunovic, [10] προτείνεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης πλεγμάτων.

3.4.1 Ομοιογενής γη

Μία γνωστή έκφραση που προτείνεται από τον Laurent για τον υπολογισμό αντίστασης πλέγματος σε ομοιογενή γη είναι η εξής:

$$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{L} \quad (3.9)$$

όπου L είναι το συνολικό μήκος των αγωγών του πλέγματος και $D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$ είναι η διάμετρος ενός ισοδύναμου κυκλικού δίσκου που καλύπτει την ίδια περιοχή.

Η οδηγία της IEEE προτείνει την εξής σχέση:

$$R = \frac{\rho}{L} + \frac{\rho}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + d\sqrt{20/A}} \right) \quad (3.10)$$

Μια εμπειρική σχέση που έχει προταθεί και από τους Nahman και Djordjevic για τον υπολογισμό αντίστασης πλέγματος σε ομοιογενή γη είναι η εξής:

$$R = 0.13 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{A}} \log_{10} \left(\frac{2400}{N} \cdot \sqrt{\frac{A}{A_0}} \right) \quad (3.11)$$

όπου:

ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε $\Omega \cdot m$

A είναι η περιοχή που καλύπτεται από το πλέγμα σε m^2

A_0 ισούται με $1m^2$

N είναι ο αριθμός των μικρότερων τετραγώνων ή ορθογωνίων που σχηματίζονται μέσα στο πλέγμα

Ο δεύτερος και πιο απλός τύπος υπολογισμού της αντίστασης πλέγματος είναι:

$$R = 0.443 \cdot \rho \cdot A^{-\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

3.4.2 Γη δύο στρωμάτων

Όσον αφορά τη γη δύο στρωμάτων στον προσδιορισμό της αντίστασης γείωσης πλέγματος, η επίδραση του κάτω στρώματος λαμβάνεται υπ' όψη από την εξής σχέση.

$$R(\rho_1, \rho_2) = C_{2/1} \cdot R(\rho_1) \quad (3.13)$$

- **Α τρόπος υπολογισμού $C_{2/1}$:**

$$C_{2/1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \quad (3.14)$$

$$x = 0.14 \cdot \log_{10} \left[44N \left(\frac{A}{A_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_0}{h} \right)^2 \right] \quad \text{εάν ισχύει } \frac{\rho_2}{\rho_1} < 1 \quad (3.15)$$

Ενώ

$$x = 0.12 \cdot \log_{10} \left[3160N \left(\frac{A}{A_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - 0.2 \cdot \log_{10} \left(\frac{h}{h_0} \right) \cdot \log_{10} \left[1000 \left(\frac{A_0}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.16)$$

εάν ισχύει $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$

και h είναι το πάχος του επάνω (πρώτου) στρώματος γης σε m
 $A_0 = 1m^2$ και $h_0 = 1m$

- **Β τρόπος υπολογισμού $C_{2/1}$:**

$$C_{2/1} = \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \left[1 - e^{\frac{-h_0}{K(h+zd)}} \right] \right\}^{-1} \quad \text{εάν } K < 0 \quad (3.17)$$

και

$$C_{2/1} = 1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \left[1 - e^{\frac{-h_0}{K(h+zd)}} \right] \quad \text{εάν } K > 0 \quad (3.18)$$

$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ είναι ο παράγοντας ανάκλασης

όπου:

ρ_1 ρ_2 είναι οι ειδικές αντιστάσεις του επάνω (πρώτου) και του κάτω (δεύτερου) στρώματος γης αντίστοιχα σε $\Omega \cdot m$

h είναι το πάχος του επάνω (πρώτου) στρώματος γης σε m

$h_0 = 1m$

d είναι το βάθος ταφής του πλέγματος σε m

- **Γ τρόπος υπολογισμού του $C_{2/1}$:**

$$C_{2/1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \quad \text{με} \quad x = \frac{0.08\sqrt{A}}{h} \quad (3.19)$$

και την προϋπόθεση ότι $\frac{\sqrt{\alpha}}{h} \leq 8$

Στη δημοσίευση γράφονται και οι εξής τύποι για την εύρεση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης γης δύο στρωμάτων.

$$\rho_a = \rho_2 \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) - 1 \right] \cdot \left[1 - e^{\frac{-h_0}{K(d+2h)}} \right] \right\} \quad \text{για } K > 0, \text{ και} \quad (3.20)$$

$$\rho_a = \rho_1 \cdot \left\{ 1 + \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) - 1 \right] \cdot \left[1 - e^{\frac{-h_0}{K(d+2h)}} \right] \right\} \quad \text{για } K < 0 \quad (3.21)$$

Για διαστρωματοποιημένη γη τριών στρωμάτων προτείνονται οι παρακάτω τύποι:

$$R(\rho_1, \rho_2, \rho_3) = C_{3/2} \cdot R(\rho_1, \rho_2) \quad (3.22)$$

$$C_{3/2} = \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} \right)^x \quad \text{με} \quad x = \frac{0.08\sqrt{A}}{h_1 + h_2} \quad (3.23)$$

και την προϋπόθεση ότι ισχύει: $\frac{\sqrt{A}}{h_1 + h_2} \leq 8$

Μια εναλλακτική λύση του τύπου για γη τριών στρωμάτων είναι η εξής:

$$R(\rho_1, \rho_2, \rho_3) = C_{3/2} \cdot C_{2/1} \cdot R(\rho_1, \rho_2) \quad (3.24)$$

Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να υπολογιστεί η αντίσταση γείωσης χρησιμοποιώντας τον τύπο για ομοιογενή γη, ο οποίος είναι σχετικά πιο απλός.

3.5 Μέθοδος Nahman – Salomon

Η μέθοδος αυτή προτείνει αναλυτικούς τύπους για τον υπολογισμό αντίστασης ενός πασσαλογειωτή, ο οποίος είναι τοποθετημένος σε γη δύο στρωμάτων [11], σύνθετης συστοιχίας πασσαλογειωτών (rodbed) πάλι για δύο στρώματα και υπολογισμό αντίστασης πλέγματος [12].

3.5.1 Αντίσταση ενός πασσαλογειωτή

Όταν ένας πασσαλογειωτής είναι κάθετα τοποθετημένος σε γη δύο στρωμάτων υπάρχουν οι εξής τρεις περιπτώσεις για την τοποθεσία του:

- Βρίσκεται εξ' ολοκλήρου στο ανώτερο στρώμα γης με ειδική αντίσταση ρ_1 , και ισχύει ότι: $\rho_1 > \rho_2$. Όπου ρ_2 είναι η ειδική αντίσταση του κατώτερου στρώματος γης
- Βρίσκεται εξ' ολοκλήρου στο ανώτερο στρώμα γης αλλά ισχύει $\rho_1 < \rho_2$
- Ένα τμήμα του βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα και το υπόλοιπο εισέρχεται και στο κατώτερο στρώμα.

Για την πρώτη περίπτωση για τον υπολογισμό της αντίστασης προτείνεται η σχέση:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi \cdot l} \ln \frac{4l}{d} \quad (3.25)$$

όπου:

l το μήκος του πασσάλου σε m

d η διάμετρος του πασσάλου σε m

Για την δεύτερη περίπτωση προτείνεται η σχέση:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi \cdot l} \ln \frac{4l}{d} + \frac{\rho_1}{2\pi \cdot h} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3.26)$$

όπου:

h το πάχος του ανώτερου στρώματος του εδάφους σε m

Τέλος, για την τρίτη περίπτωση προτείνεται η σχέση:

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi \cdot l_e} \ln \frac{4l_e}{d}$$

όπου:

$$l_e = l_2 + l_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Για την τρίτη περίπτωση, όπου δηλαδή έχουμε εισχώρηση του πασσαλογειωτή και στο κατώτερο στρώμα του εδάφους, ισχύει ενιαία ο παραπάνω τύπος ανεξάρτητα από τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων.

3.5.2 Αντίσταση μιας σύνθετης συστοιχίας πασσαλογειωτών

Η σύνθετη συστοιχία περιέχει πασσαλογειωτές στην περίμετρο της περιοχής που καλύπτει το σύστημα γείωσης και στο εσωτερικό αυτής. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη οι πάσσαλογειωτές βρίσκονται εξ' ολοκλήρου στο ανώτερο στρώμα γης χωρίς να διεισδύουν καθόλου στο κατώτερο. Στη δεύτερη, ένα μέρος του πασσάλου διεισδύει και στο κατώτερο στρώμα γης με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η αντίσταση του.

• Αντίσταση πασσαλογειωτών όταν δεν υπάρχει εισχώρηση στο κατώτερο στρώμα γης

Για την περίπτωση που δεν υπάρχει εισχώρηση των πασσάλων μιας συστοιχίας στο κατώτερο στρώμα, η αντίσταση γείωσης τους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_R = \frac{\rho_1}{2\pi \cdot l \cdot n} \left[\ln \frac{8l}{d} - 1 + \frac{2l}{\sqrt{A}} K_1 K_p (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$$

όπου:

ρ_1 η ειδική αντίσταση του επάνω (πρώτου) στρώματος γης σε m

l το μήκος του κάθε πασσάλου σε m

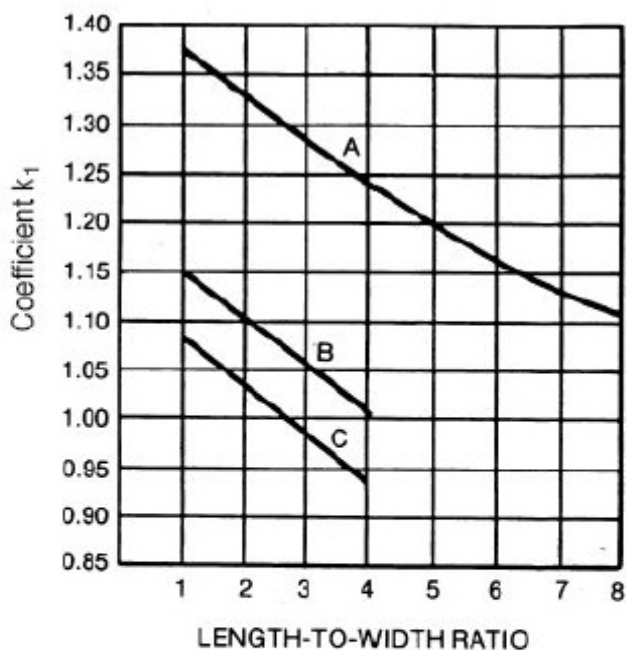
d η διάμετρος του πασσάλου σε m

n ο συνολικός αριθμός των πασσάλων που υπάρχουν

A η περιοχή που καλύπτεται από τη συστοιχία σε m²

K_1, K_p είναι διορθωτικοί παράγοντες οι οποίοι προσδιορίζονται από τα παρακάτω γραφήματα:

Για τον παράγοντα K_1 :



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$

$$\gamma_A = -0.04x + 1.41$$

CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

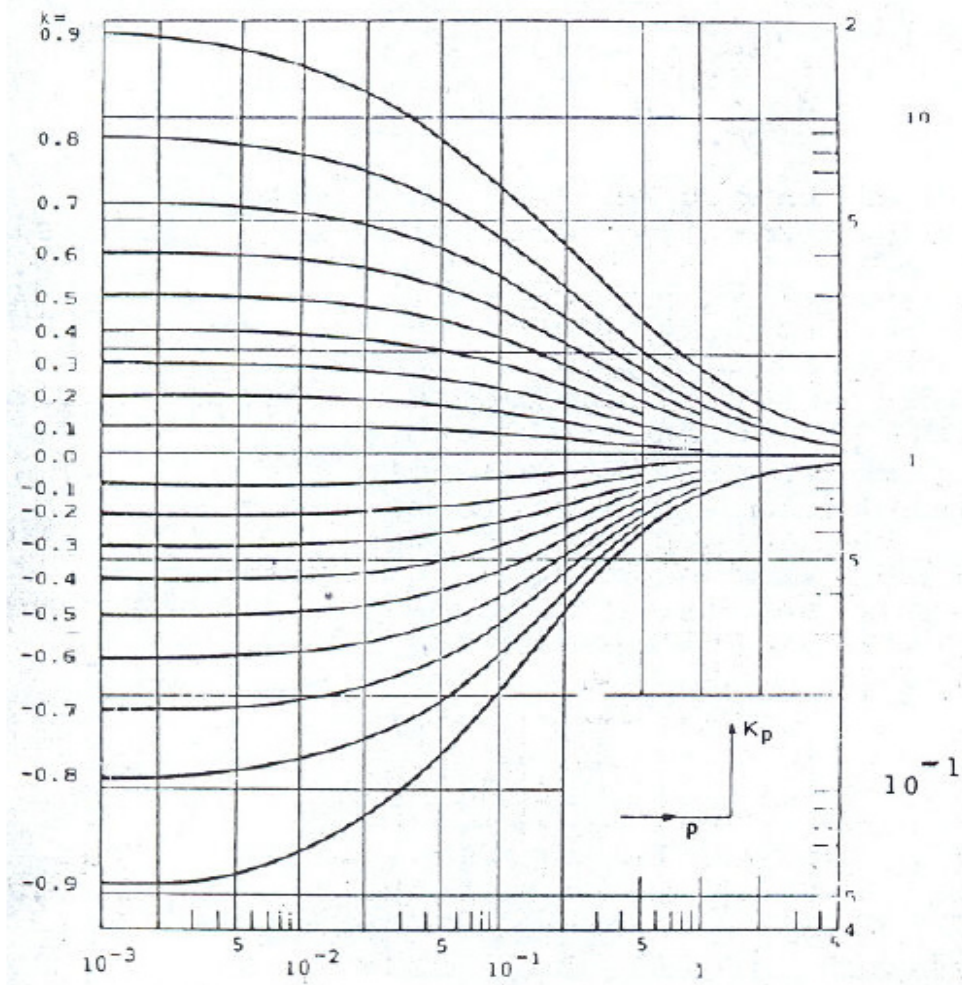
$$\gamma_B = -0.05x + 1.20$$

CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_C = -0.05x + 1.13$$

Όπως φαίνεται πρώτα προσδιορίζεται ο λόγος μήκους προς πλάτους της περιοχής A και στη συνέχεια ανάλογα με το βάθος h στο οποίο είναι τοποθετημένες οι κορυφές των πασσάλων, προσδιορίζεται η καμπύλη A, B ή C που θα ακολουθηθεί. Εάν οι κορυφές βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή $h = 0$, ακολουθείται η καμπύλη A. Για τιμές του h διαφορετικές από αυτές που αναφέρθηκαν, πρέπει να γίνει γραμμική παρεμβολή μεταξύ των καμπυλών. Διαδικασία αρκετά χρονοβόρα.

Για τον παράγοντα K_p :



Ο K_p δίνεται ως συνάρτηση της παραμέτρου p . Όπου $p = H / \sqrt{A}$, με H το πάχος του ανώτερου στρώματος.

Κεφάλαιο 4 : Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Γενικά

Το σύστημα γείωσης είναι στοιχείο κλειδί για την προστασία των συστημάτων ισχύος, και ο ακριβής υπολογισμός του είναι σημαντικός. Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στην ανάλυση των υπολογισμών των συστημάτων γείωσης. Η ολοκληρωτική και η διαφορική για την οποία γίνεται μια σύντομη αναφορά παρακάτω.

Η διαφορική προσέγγιση χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η αδυναμία στην αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου είναι ότι από τη φύση του το πρόβλημα εκτείνεται στον ημιάπειρο χώρο. Το πρόβλημα συνήθως λύνεται επιλέγοντας σαν περιοχή υπολογισμού μία αρκετά μεγάλη αλλά πεπερασμένων διαστάσεων περιοχή μέσα στην οποία γίνεται η διακριτοποίηση.

Για τον προσδιορισμό της αντίστασης γείωσης θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω υποθέσεις:

- Το έδαφος να είναι ημιάπειρο, ιστροπικό και διαστρωματοποιημένο σε στρώματα συγκεκριμένου πάχους.
- Οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού να μπορούν να εφαρμοστούν για τον υπολογισμό αντίστασης γείωσης και κατανομής δυναμικού στο έδαφος.
- Οι ράβδοι του πλέγματος γείωσης να θεωρούνται γραμμικοί, ενωμένοι μεταξύ τους και θαμμένοι κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.
- Για τη συχνότητα δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ανάλυσης στατικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Στα περισσότερα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι δυνατό να γραφούν οι διαφορικές εξισώσεις, καθώς και οι αρχικές και οριακές συνθήκες που τα περιγράφουν. Συνήθως όμως, το πρόβλημα είναι δυνατό να λυθεί με αναλυτικές μεθόδους μόνον όταν πρόκειται για πολύ απλές γεωμετρίες. Σε σύνθετα προβλήματα καταφεύγει κανείς είτε σε παραδοχές προκειμένου να απλοποιήσει το πρόβλημα, είτε ανατρέχει σε μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης οι οποίες όμως δε δίνουν αναλυτική λύση για το πρόβλημα.

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) βασίζεται στο λογισμό των μεταβολών. Στη μέθοδο αυτή η περιοχή μέσα στην οποία αναζητείται η λύση (περιοχή λύσης) προσεγγίζεται από μια συνάθροιση στοιχείων (elements). Κατασκευάζεται δηλαδή, μια διαμέριση της περιοχής λύσης, που αποτελείται από διακριτά στοιχεία τα οποία μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα. Έτσι για παράδειγμα, σε δισδιάστατα προβλήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία τρίγωνα ή τετράπλευρα, ενώ σε τρισδιάστατα προβλήματα τετράεδρα ή παραλληλεπίπεδα.

4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ στο πεδίο του χρόνου [13]

Για να αναλυθεί η μεταβατική συμπεριφορά από την πτώση ενός κεραυνού σε ένα σύστημα γείωσης η περιοχή υπολογισμού μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη: Το ένα είναι η αγώγιμη περιοχή συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτροδίου και του εδάφους με σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ και ειδική αγωγιμότητα σ αντίστοιχα. Το άλλο είναι η μη αγώγιμη περιοχή του αέρα. Σε αυτή την ανάλυση, το ρεύμα μετατόπισης αγνοείται πράγμα που σημαίνει ότι η ανάλυση γίνεται σε ψευδοστατικό (quasi-static) πεδίο. Οι εξισώσεις του Maxwell στην αγώγιμη περιοχή,[14], είναι:

$$\nabla \times \bar{H} = \sigma \bar{E} + \bar{J}_s \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \bar{E} + \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4.3)$$

Στην περιοχή του αέρα οι εξισώσεις είναι:

$$\nabla \times \bar{H} = 0 \quad (4.4)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4.5)$$

Εισάγουμε το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (4.6)$$

και το βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό:

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (4.7)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να πάρουμε τις εξισώσεις \bar{A} - ϕ που ακολουθούν στην αγώγιμη περιοχή:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \bar{A} \right) + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \phi = \bar{J}_s \quad (4.8)$$

και στη μη αγώγιμη περιοχή:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \bar{A} \right) = 0 \quad (4.9)$$

Από αυτές τις εξισώσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Galerkin, έχουμε την ολοκληρωτική εξίσωση που ακολουθεί στην αγώγιμη περιοχή:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} \left(\nabla \times \bar{W} \right) \cdot \left(\nabla \times A \right) + \frac{1}{\mu} \left(\nabla \cdot \bar{W} \right) \cdot \left(\nabla \cdot A \right) + \sigma \bar{W} \cdot \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \right) \partial v - \int_S \bar{W} \cdot \bar{H} \partial s = \int_{\Omega} \bar{W} \cdot \bar{J}_s \partial v \quad (4.10)$$

όπου \bar{W} είναι μία συνάρτηση βαρύτητας ενός διανύσματος δυναμικού για ένα στοιχείο. Στη μη αγώγιμη περιοχή ισχύει:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} \left(\nabla \times \bar{W} \right) \cdot \left(\nabla \times A \right) + \frac{1}{\mu} \left(\nabla \cdot \bar{W} \right) \cdot \left(\nabla \cdot A \right) \right) \partial v - \int_S \bar{W} \cdot \bar{H} \partial s = 0 \quad (4.11)$$

Αυτή η μέθοδος περιγράφει τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος γείωσης από την πτώση κεραυνού. Παρακάτω δίνεται η εφαρμογή της ΜΠΣ για τη μόνιμη κατάσταση.

4.3 Εφαρμογή της ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ για μόνιμη κατάσταση [15].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης συστημάτων γείωσης σε ομοιογενή και διαστρωματοποιημένη γη. Οι αγωγοί του συστήματος γείωσης μοντελοποιήθηκαν από ισοδυναμικούς κόμβους πεπερασμένων στοιχείων. Η περιοχή που περιβάλλει τους αγωγούς μοντελοποιείται από ποικίλα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.

Οι παρακάτω εξισώσεις ισχύουν για κάθε πεπερασμένο στοιχείο.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (4.12)$$

$$\bar{E} = -\nabla \phi \quad (4.13)$$

$$\bar{J} = \frac{\bar{E}}{\rho} \quad (4.14)$$

$$\phi = N \phi_e \quad (4.15)$$

όπου ϕ είναι το δυναμικό οποιουδήποτε σημείου μέσα στο πεπερασμένο στοιχείο, ϕ_e το διάνυσμα στήλη των δυναμικών των κόμβων του πεπερασμένου στοιχείου, N είναι ο πίνακας που εξαρτάται από τον τύπο του πεπερασμένου στοιχείου, \bar{E} και

\vec{J} είναι η ένταση ηλεκτρικού πεδίου και η πυκνότητα ρεύματος και ρ η ειδική αντίσταση μέσα στο πεπερασμένο στοιχείο. Έστω ότι οι οριακές συνθήκες είναι οι εξής:

$$\phi_{e0} = 100V$$

$$\phi_{e\text{ inf}} = 0V$$

$$E_{1t} = E_{2t}$$

$$E_{1n} = E_{2n}$$

όπου ϕ_{e0} το δυναμικό στην επιφάνεια των αγωγών του συστήματος γείωσης και $\phi_{e\text{ inf}}$ το δυναμικό των οριακών επιφανειών μέσα στις οποίες υπολογίζεται η ρευματική κατανομή. E_{1t} , E_{2t} , E_{1n} και E_{2n} είναι οι εφαπτομενικές και οι κάθετες συνιστώσες του διανύσματος του πεδίου στην οριακή επιφάνεια μεταξύ δύο γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων.

Το συνολικό ρεύμα που διαχέεται από το γειωτή στο γύρω έδαφος ισούται με:

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{\delta s}$$

όπου S είναι η επιφάνεια που περικλείει το σύστημα γείωσης.

Η αντίσταση γείωσης ισούται με:

$$R = \frac{\phi_{e0}}{I}$$

Με αυτό τον τρόπο μπορούν να υπολογιστούν τα δυναμικά όλων των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιώντας το δυναμικό είναι εύκολο να υπολογιστεί η πυκνότητα ρεύματος σε οποιαδήποτε περιοχή προσδιοριστεί. Στη συνέχεια μπορεί να προσδιοριστεί το συνολικό ρεύμα και έπειτα η αντίσταση γείωσης.

4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα πλεονεκτήματα της ΜΠΣ είναι η ικανότητά της να διαπραγματευτεί με οποιοδήποτε τύπο γεωμετρίας σε αντίθεση με τις αναλυτικές μεθόδους όπου υπάρχει σχέση για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης για ένα πασσαλογειωτή. Επίσης η ΜΠΣ μπορεί να επιλύσει προβλήματα διαστρωματοποιημένης γης όπου τα διάφορα στρώματα γης έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως η ειδική αντίσταση ρ . Η μέθοδος μπορεί επίσης να υπολογίσει και να απεικονίσει γραφικά την κατανομή του δυναμικού για όλη την περιοχή και να υπολογίσει το συνολικό ρεύμα που διαχέει ο γειωτής.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής: Υπάρχει μικρή ακρίβεια στους υπολογισμούς και η επίλυση εξαρτάται κατά πολύ από την πυκνότητα της διακριτοποίησης. Μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς και πιο έξυπνοι αλγόριθμοι για τη μαθηματική επεξεργασία του προβλήματος θα μπορούσε να συμβάλει στη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Κεφάλαιο 5 : ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL MULTIPHYSICS

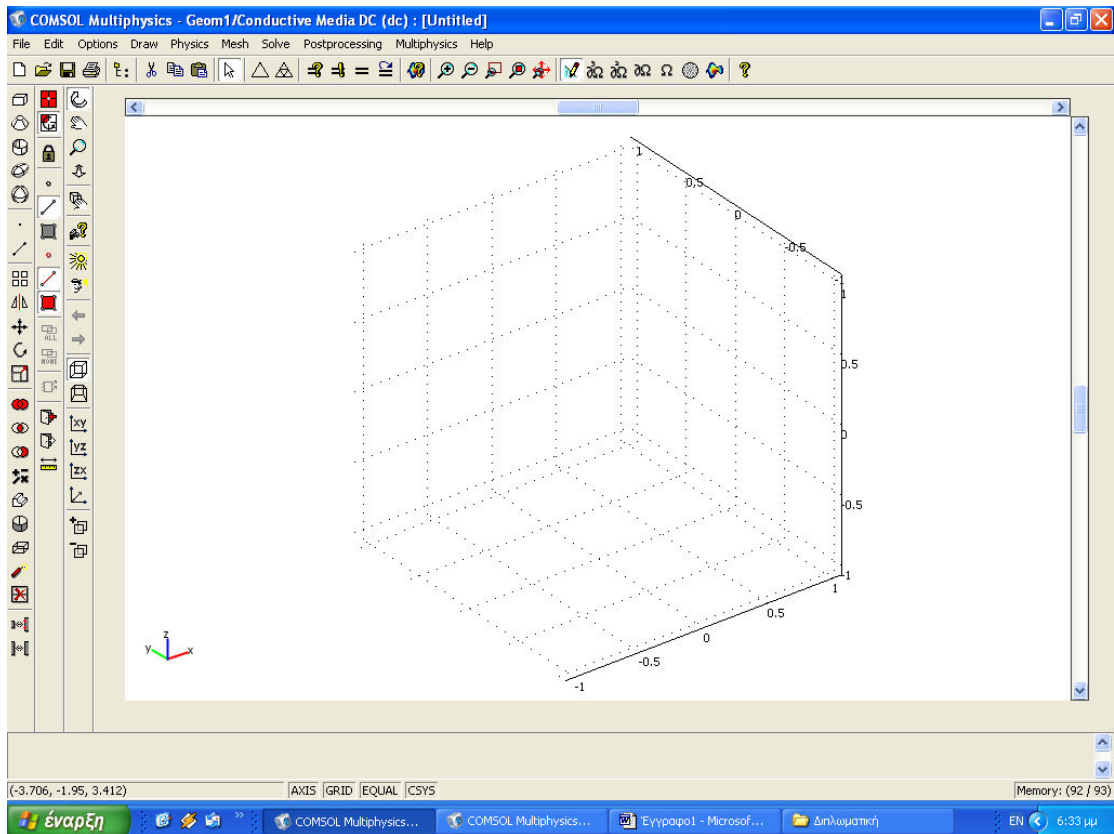
Το COMSOL MULTIPHYSICS είναι ένα πρόγραμμα για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για ποικίλα προβλήματα εφαρμογών φυσικής και μηχανικής, κυρίως για συνδυασμένα προβλήματα δύο ή πολλών τομέων. Κάποιοι από αυτούς τους τομείς είναι ο Ηλεκτρομαγνητισμός (Electromagnetics), ηλεκτροστατικό, μαγνητοστατικό πεδίο, εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικού ψευδοστατικού πεδίου, ο τομέας χημικής μηχανικής (Chemical Engineering), η μεταφορά θερμότητας (Heat Transfer), μικροηλεκτρομηχανολογικά (microelectromechanics ή MEMS) κ.α.

5.1 Το περιβάλλον COMSOL

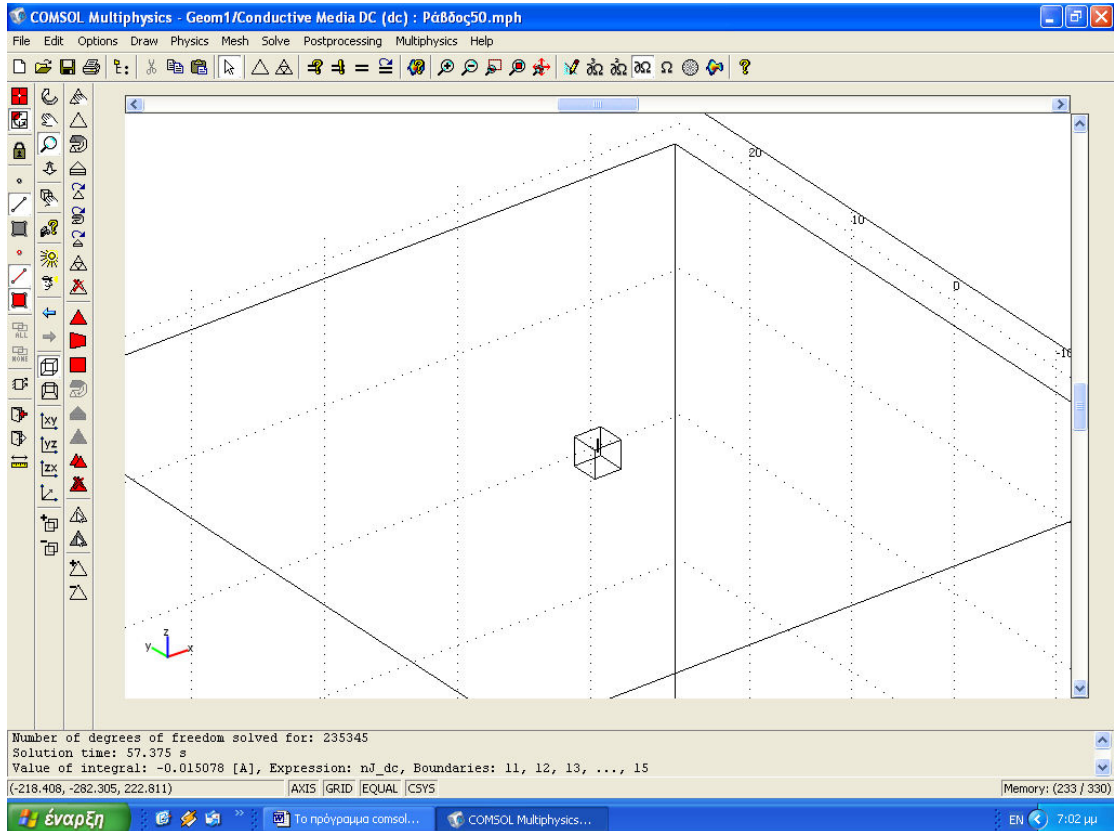
Για να γίνει η προσομοίωση μιας γεωμετρίας αρχικά γίνεται η σχεδίαση της προς επίλυση διάταξης. Έπειτα ορίζονται τα χαρακτηριστικά της κάθε υποπεριοχής (πχ ειδική αντίσταση του εδάφους). Ακόμη ορίζονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος και γίνεται η διακριτοποίηση του χώρου με πεπερασμένα στοιχεία. Στη συνέχεια επιλύεται η διάταξη και ακολουθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Αρχικά για να προσομοιωθούν οι διατάξεις γείωσης επιλέγεται το εξής μοντέλο: Comsol Multiphysics → Electromagnetics → Conductive Media DC.

Παρακάτω απεικονίζεται το βασικό περιβάλλον εργασίας του comsol. Αποτελείται από το κύριο μενού (main menu), από την οριζόντια γραμμή εργαλείων και από τις κάθετες γραμμές εργαλείων οι οποίες περιέχουν συντομεύσεις για το σχεδιασμό και την επεξεργασία της διάταξης. Οι πιο σημαντικές από αυτές οι οποίες χρειάστηκαν και για την επίλυση των διατάξεων είναι στην πρώτη κάθετη γραμμή η ένωση, η τομή και η διαφορά (union, intersection, difference).

Στις επόμενες δύο εικόνες φαίνεται μία διάταξη με ένα πασσαλογειωτή 1m, σε περιοχή 50m³. Η πάνω επιφάνεια του πασσαλογειωτή είναι στην επιφάνεια του εδάφους. Τα 50m³ οριοθετούν την περιοχή επίλυσης του προβλήματος. Ακόμη για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα είναι επιθυμητό κοντά στο γειωτή να είναι πιο πυκνή η διακριτοποίηση ενώ μακριά από αυτόν πιο αραιή. Για το λόγο αυτό κοντά στη διάταξη υπάρχει ένας εσωτερικός κύβος 2m³ όπου και η διακριτοποίηση γίνεται πιο πυκνή για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η δημιουργία της διάταξης μπορεί να γίνει από την επιλογή του κύριου μενού Draw.



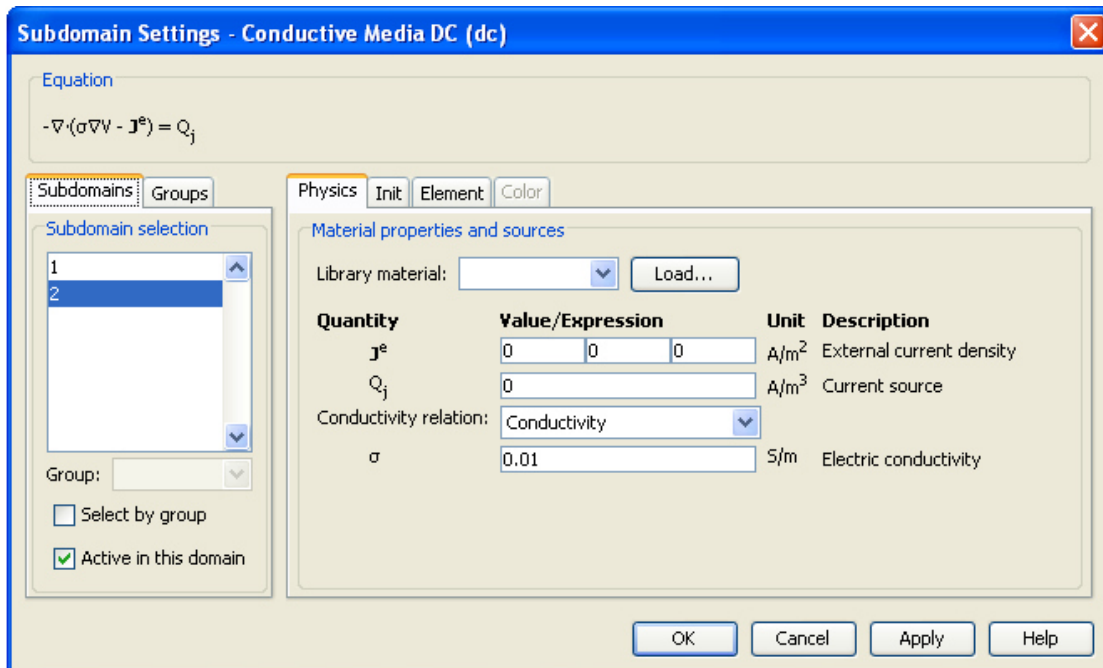
Σχήμα 5.1 Περιβάλλον εργασίας



Σχήμα 5.2 Περίπτωση πασαλογειωτή

5.2 Συνθήκες υποπεριοχής

Οι συνθήκες υποπεριοχής καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της κάθε υποπεριοχής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για το έδαφος ορίζεται η ειδική αντίσταση του εδάφους. Από το μενού Physics γίνεται η επιλογή Subdomain Settings όπου δίνεται η παράμετρος της ειδικής αντίστασης στις υποπεριοχές.



Σχήμα 5.3 Καθορισμός ειδικής αγωγιμότητας εδάφους σ

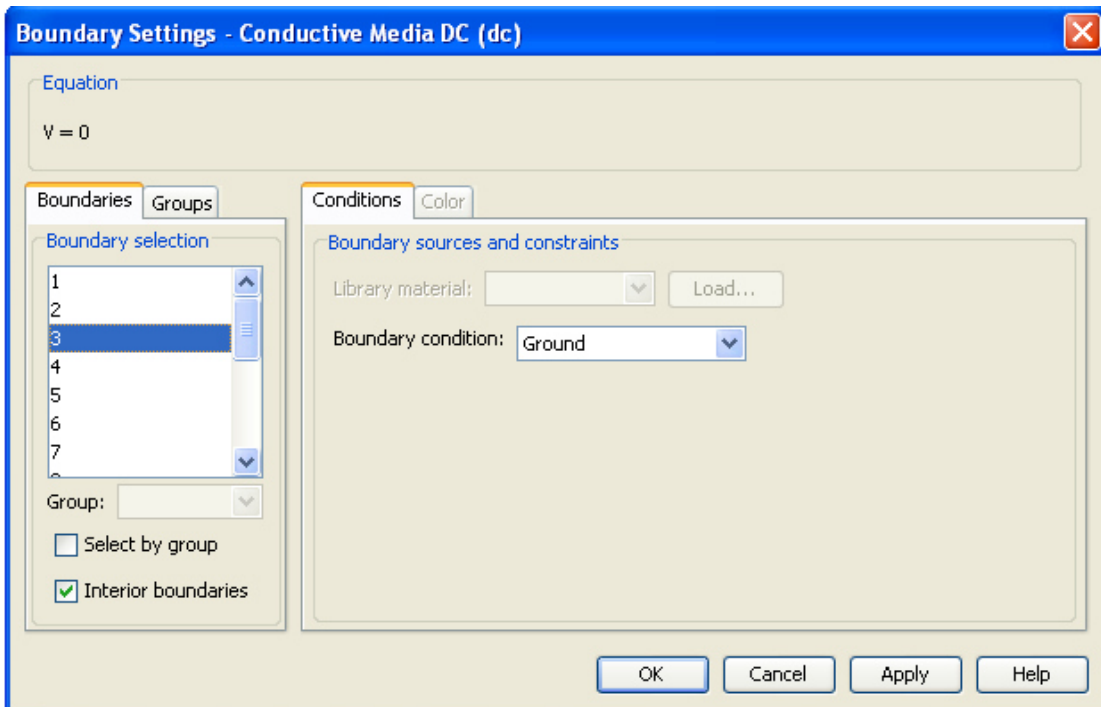
5.3 Οριακές συνθήκες

Από το μενού Physics επιλέγεται το Boundary Settings. Στο πλαίσιο που εμφανίζεται επιλέγονται οι οριακές επιφάνειες και τίθενται αντίστοιχα οι οριακές συνθήκες. Επιλέγεται για κάθε επιφάνεια ένα από τα εξής:

- ELECTRIC INSULATION
- ELECTRIC POTENTIAL
- GROUND
- CONTINUITY

Η πάνω επιφάνεια που προσομοιώνει την επιφάνεια της γης είναι μονωμένη και έτσι επιλέγεται γι' αυτήν το electric insulation (ηλεκτρική μόνωση).

Για τις επιφάνειες του πασσαλογειωτή επιλέγεται το electric potential (ηλεκτρικό δυναμικό). Το δυναμικό έχει τιμή 1Volt. Οι επιφάνειες του εξωτερικού κύβου, εκτός από την πάνω, έχουν δυναμικό 0 και έτσι επιλέγεται γι' αυτές το ground (έδαφος), ενώ για τις επιφάνειες του εσωτερικού κύβου επιλέγεται το continuity (συνέχεια) που υποδηλώνει τη συνέχεια του πεδίου ροής ρευμάτων.

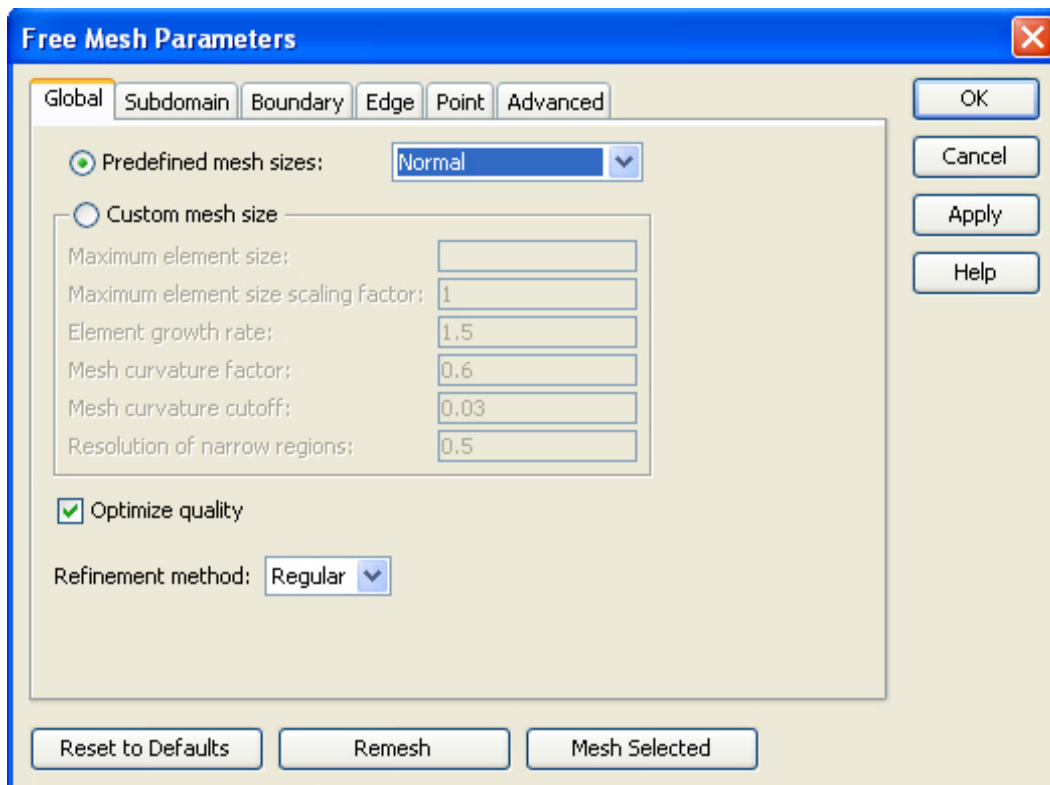


Σχήμα 5.4 Καθορισμός οριακών συνθηκών

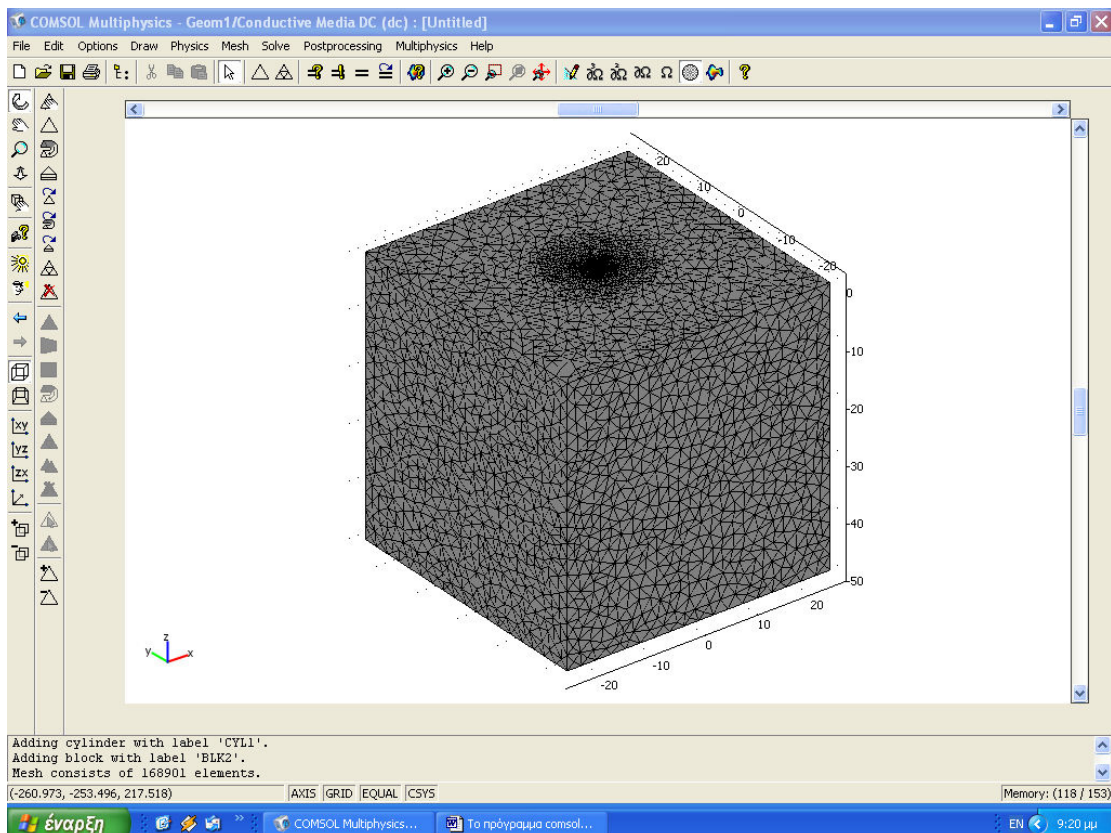
5.4 Διακριτοποίηση (Meshing)

Από την επιλογή του μενού mesh επιλέγεται το free mesh parameters. Υπάρχουν διάφορες επιλογές μέσα στις οποίες και οι Global και Subdomain. Στην καρτέλα Global τίθενται οι παράμετροι που καθορίζουν τη διακριτοποίηση στη γεωμετρία συνολικά. Η επιλογή γίνεται συνήθως από την παράμετρο Predefined mesh sizes η οποία καθορίζει αυτόματα τις παραμέτρους διακριτοποίησης. Normal είναι μία κανονική διακριτοποίηση, extra fine μία πολύ πυκνή ενώ extra coarse μία πολύ αραιή.

Στην καρτέλα Subdomain εισάγονται οι παράμετροι Maximum element size και Element growth rate. Η πρώτη παράμετρος καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπτή διάσταση του πεπερασμένου στοιχείου. Η δεύτερη παράμετρος καθορίζει το μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό αύξησης του πεπερασμένου στοιχείου από μια περιοχή με μικρά στοιχεία σε μια περιοχή με μεγαλύτερα στοιχεία. Η παράμετρος πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας. Τιμή 1,5 σημαίνει ότι το μέγεθος του στοιχείου μπορεί να αυξηθεί κατά 50% (κατά προσέγγιση) σε σχέση με ένα γειτονικό του. Τα πεπερασμένα στοιχεία με τα οποία προσομοιώθηκαν οι διατάξεις είναι τετράεδρα. Στη συνέχεια από την επιλογή του μενού Mesh επιλέγεται το Initialize mesh έτσι ώστε να γίνει η διακριτοποίηση. Μπορεί ακόμη να επιλεγεί και το Refine mesh κάτι που όμως δημιουργεί πολύ πυκνή διακριτοποίηση και δεν προτιμήθηκε λόγω περιορισμένης μνήμης. Για να σβηστούν τα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία έχουν δημιουργηθεί σε μια γεωμετρία επιλέγεται από το File το Reset model.



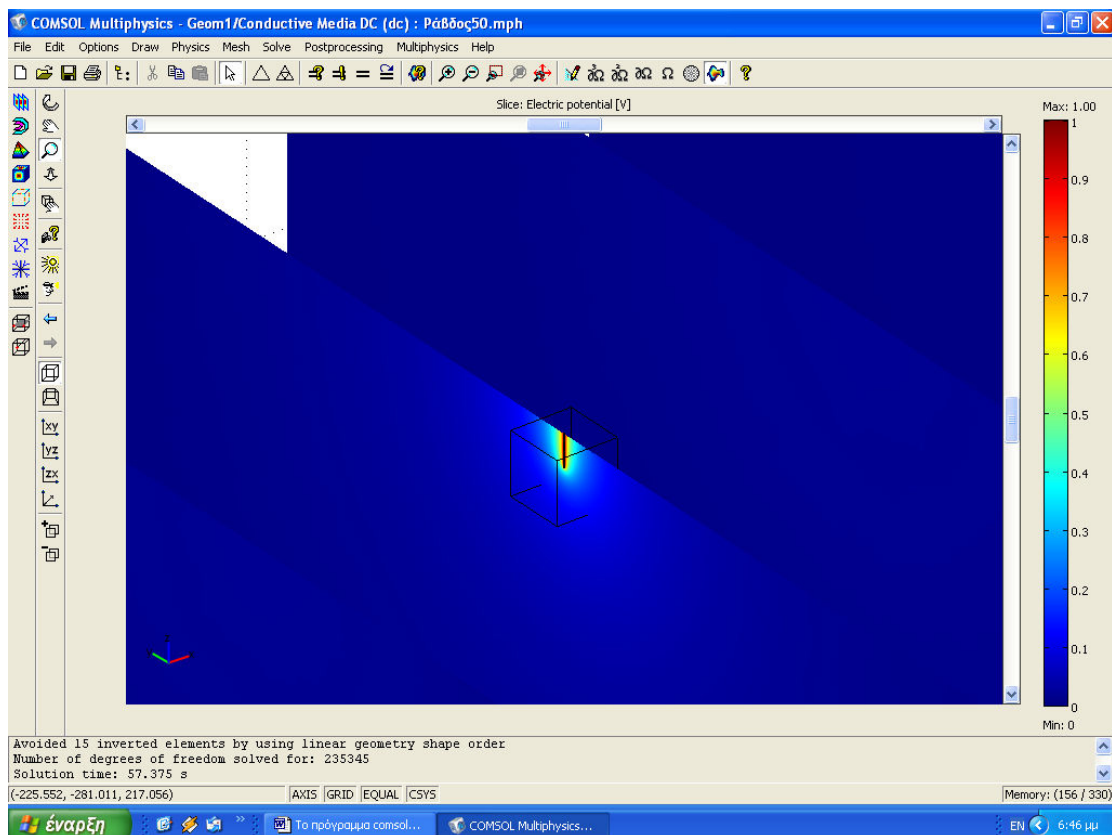
Σχήμα 5.5 Παράμετροι διακριτοποίησης – Γενικές (Global)



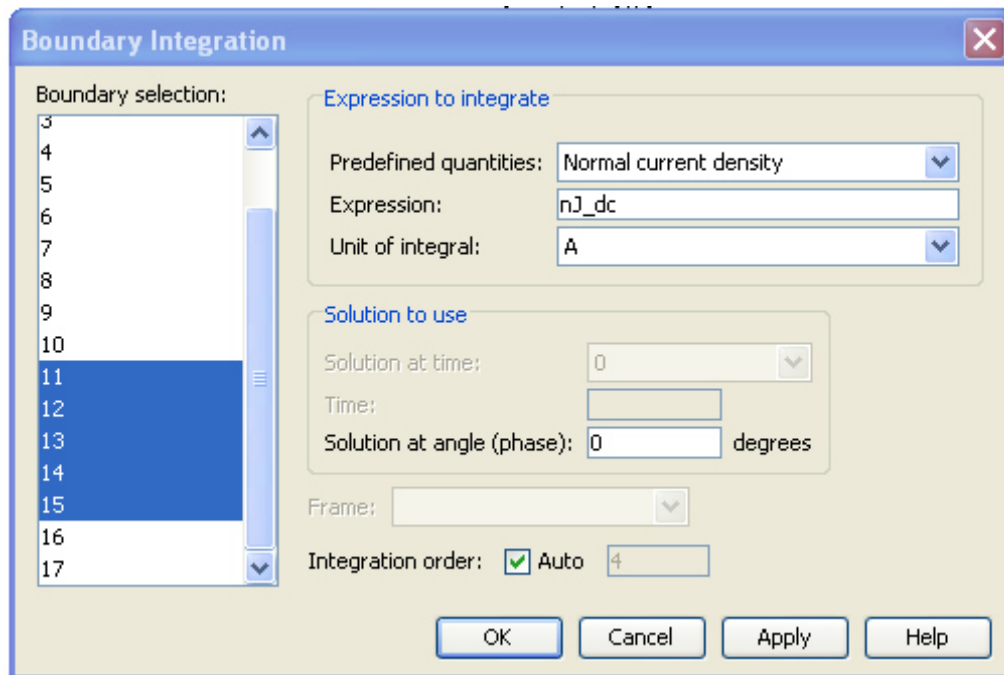
Σχήμα 5.6 Δημιουργία πλέγματος με πεπερασμένα στοιχεία

5.5 Επίλυση και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Για την επίλυση του προβλήματος από το μενού Solve επιλέγεται το Solve problem. Παρακάτω φαίνεται η κατανομή του δυναμικού για ένα πασσαλογειωτή. Είναι χαρακτηριστικό ότι κοντά στο γειωτή το δυναμικό είναι υψηλό ενώ μακριά από αυτόν το δυναμικό πέφτει σημαντικά και από κάποιο σημείο και μετά μηδενίζεται. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων επιλέγεται από το Main menu το Post processing και έπειτα Boundary integration (Εικόνα). Στο μενού που εμφανίζεται επιλέγεται η κανονική πυκνότητα ρεύματος (Normal current density) για την οποία θα γίνει και ο υπολογισμός. Στη συνέχεια επιλέγονται οι οριακές επιφάνειες από τις οποίες διαχέεται το ρεύμα (στην περίπτωση μας οι επιφάνειες του πασσαλογειωτή).



Σχήμα 5.7 Κατανομή του δυναμικού γύρω από τον πασσαλογειωτή



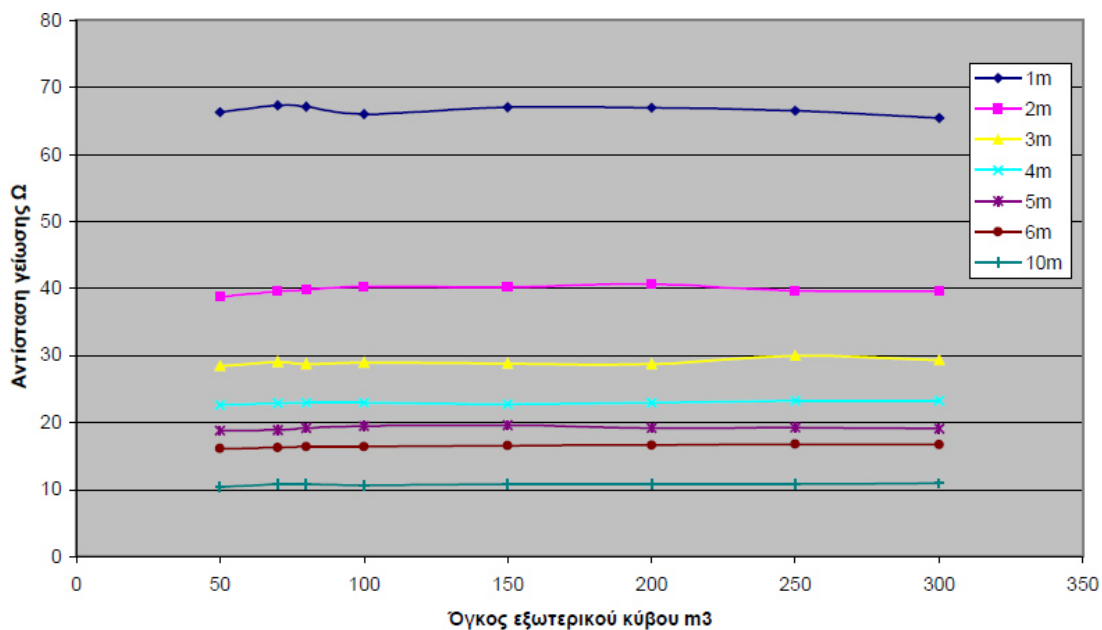
Σχήμα 5.8 Boundary integration (Ολοκλήρωση Επιφάνειας)

Κεφάλαιο 6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Διερεύνηση για ένα πασσαλογειωτή

Αντίσταση γείωσης είναι η αντίσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Άπειρη γη είναι ένα σημείο στην επιφάνεια σε πολύ μεγάλη απόσταση από το γειωτή και έχει πρακτικά δυναμικό μηδεν (σημείο αναφοράς δυναμικών).

Παρακάτω παρατίθενται αποτελέσματα προσομοίωσης στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics για τη μεταβολή της αντίστασης γείωσης για ένα πασσαλογειωτή συναρτήσει του εξωτερικού κύβου ο οποίος προσομοιώνει την περιοχή υπολογισμού του πεδίου. Η αντίσταση έχει μικρή εξάρτηση από το μέγεθος του εξωτερικού κύβου και αυτό φαίνεται από τη μικρή μεταβολή. Ακόμη φαίνεται ότι η πλησιέστερη τιμή σε αυτή που δίνουν οι αναλυτικοί τύποι είναι για μικρούς εξωτερικούς κύβους. Για πασσαλογειωτή 1m η πλησιέστερη τιμή σε αυτή του αναλυτικού τύπου είναι για 100m^3 , ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις η πλησιέστερη τιμή δίνεται για 50m^3 .



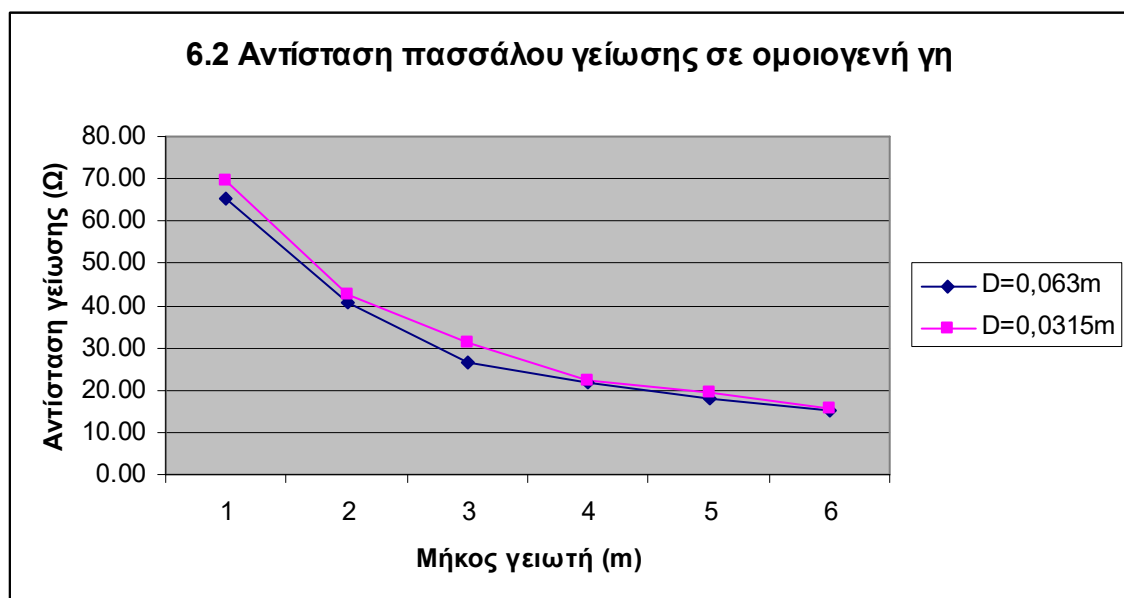
6.1 Αντίσταση γείωσης για 1 πασσαλογειωτή συν/σει του εξωτερικού κύβου

Το συμπέρασμα είναι ότι μικρός εξωτερικός κύβος δηλαδή περιοχή μέσα στην οποία γίνεται ο υπολογισμός της ροής του ρεύματος συνεπάγεται αποτελέσματα τα οποία είναι πιο κοντά στις αναλυτικές σχέσεις εξαιτίας πιο πυκνής διακριτοποίησης κοντά στη διάταξη γείωσης. Δηλαδή με τον ίδιο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων γίνεται ο υπολογισμός του ρεύματος σε μικρότερο όμως χώρο που σημαίνει μεγαλύτερη πυκνότητα διακριτοποίησης και άρα πιο σωστό αποτέλεσμα. Ο χώρος στον οποίο διαχέεται το μεγαλύτερο ρεύμα είναι κοντά στη διάταξη γείωσης και όχι μακριά από αυτή αφού οι τιμές της ρευματικής πυκνότητας

μακριά από τη διάταξη γείωσης είναι πολύ μικρές σχεδόν αμελητέες. Το ζητούμενο είναι λοιπόν η μεγάλη πυκνότητα διακριτοποίησης κοντά στη διάταξη γείωσης.

6.1.1 Πάσσαλος γείωσης σε ομοιογενή γη

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η αντίσταση γείωσης για ένα πάσσαλο γείωσης τοποθετημένο κατακόρυφα στην επιφάνεια της γης με ειδική αντίσταση εδάφους $\rho=100 \Omega \cdot m$, που θεωρείται η τυπική τιμή για ομοιογενές έδαφος. Η διάμετρος του γειωτή είναι 0,063m. Για αυτήν την περίπτωση θα γίνει υπολογισμός και για διάμετρο γειωτή 0,0315m .



Ο πίνακας αποτελεσμάτων στη συνέχεια περιλαμβάνει τους υπολογισμούς με τον αναλυτικό τύπο (6.1) ο οποίος προκύπτει από την πεδιακή ανάλυση ενός κατακόρυφου πασσάλου γείωσης σε γη με σταθερή ειδική αντίσταση ρ . Περιλαμβάνει επίσης τις προσομοιώσεις με το Comsol. Ο αναλυτικός τύπος απ' όπου υπολογίστηκαν οι αντιστάσεις είναι ο εξής:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d} \tag{6.1}$$

Όπου:

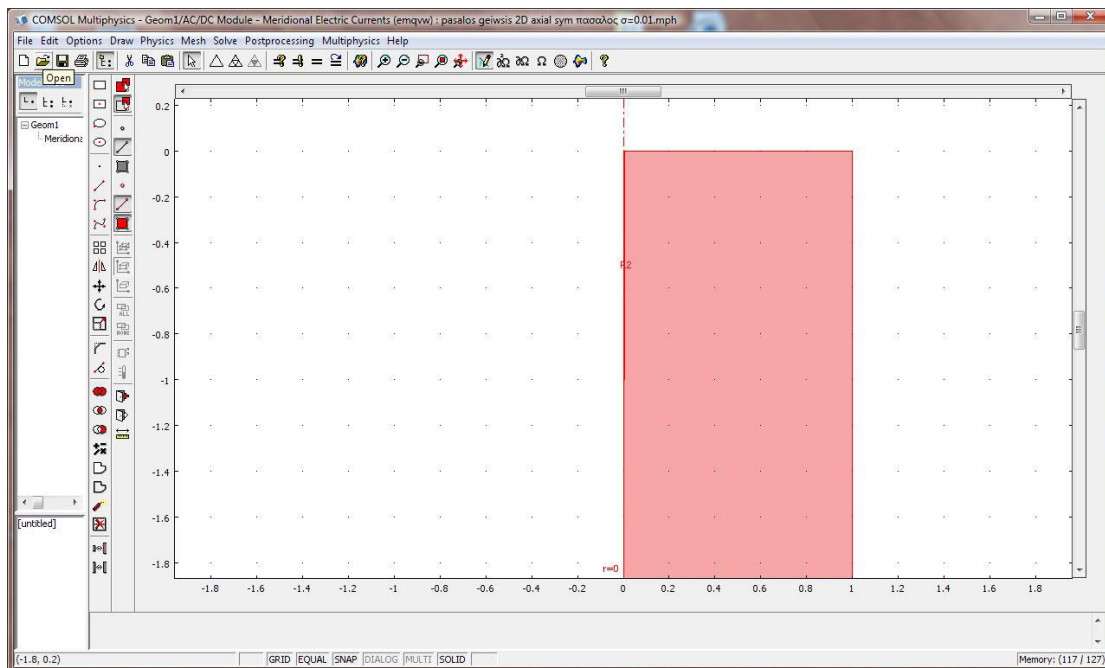
- ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους
- l το μήκος του πασσάλου
- d η διάμετρος της ράβδου

Πίνακας 6.1 Αντίσταση πασσάλου γείωσης σε ομοιογενή γη

	Προσομοίωση με Comsol		Αναλυτικός τύπος	
Μήκος (m)	0,063m	0,0315m	0,063m	0,0315m
	[Ω]		[Ω]	
1	65,13	69,392	66,10	77,13475
2	40,80	42,712	38,57	44,08606
3	26,59	31,292	27,86	31,54286
4	21,94	22,114	22,04	24,80237
5	18,02	19,301	18,35	20,55255
6	14,97	15,685	15,77	17,61099

6.1.2 Αντίσταση γείωσης σε σχέση με την ειδική αντίσταση του πασσάλου

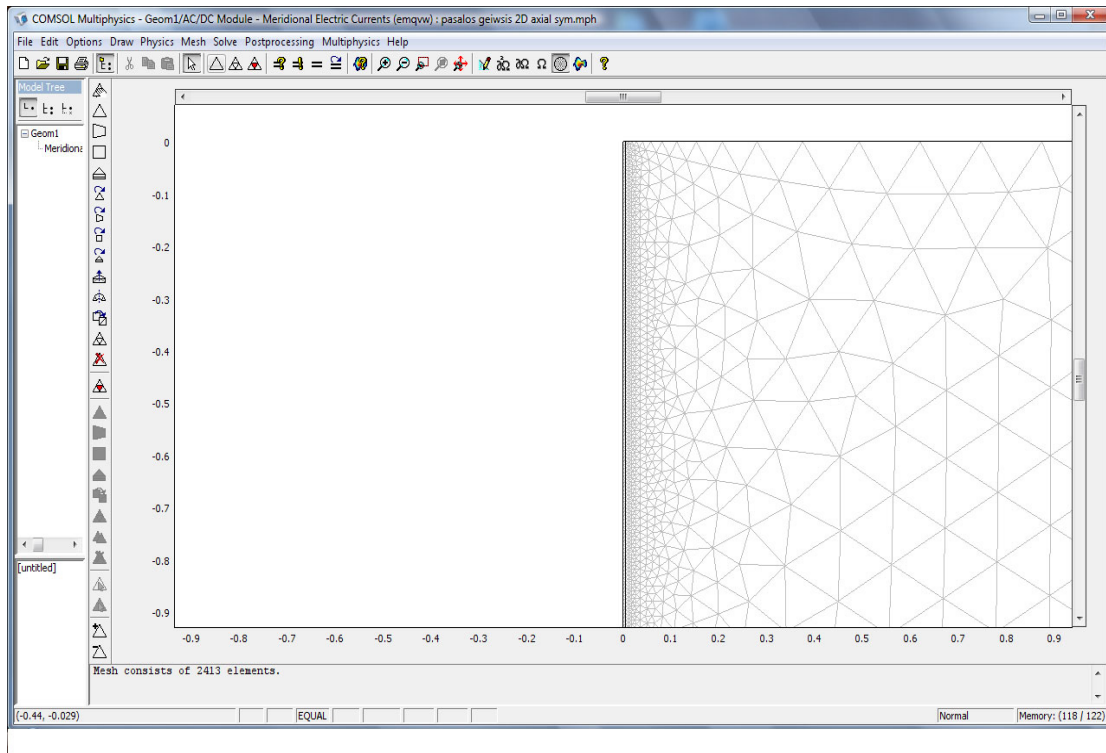
Το προς εξέταση σύστημα γείωσης αποτελείται από έναν κατακόρυφο πάσσαλο γείωσης μήκους 1m και ακτίνα 1mm. Το μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε είναι ομοιογενής γη με $\rho = 100 \Omega \cdot m$. Η γεωμετρία του προβλήματος στο COMSOL φαίνεται στο σχήμα 6.3, όπου είναι φανερό ότι λάβαμε υπόψη την αξονική συμμετρία του πασσαλογειωτή.



Σχήμα 6.3 Η γεωμετρία του προβλήματος στο Comsol Multiphysics

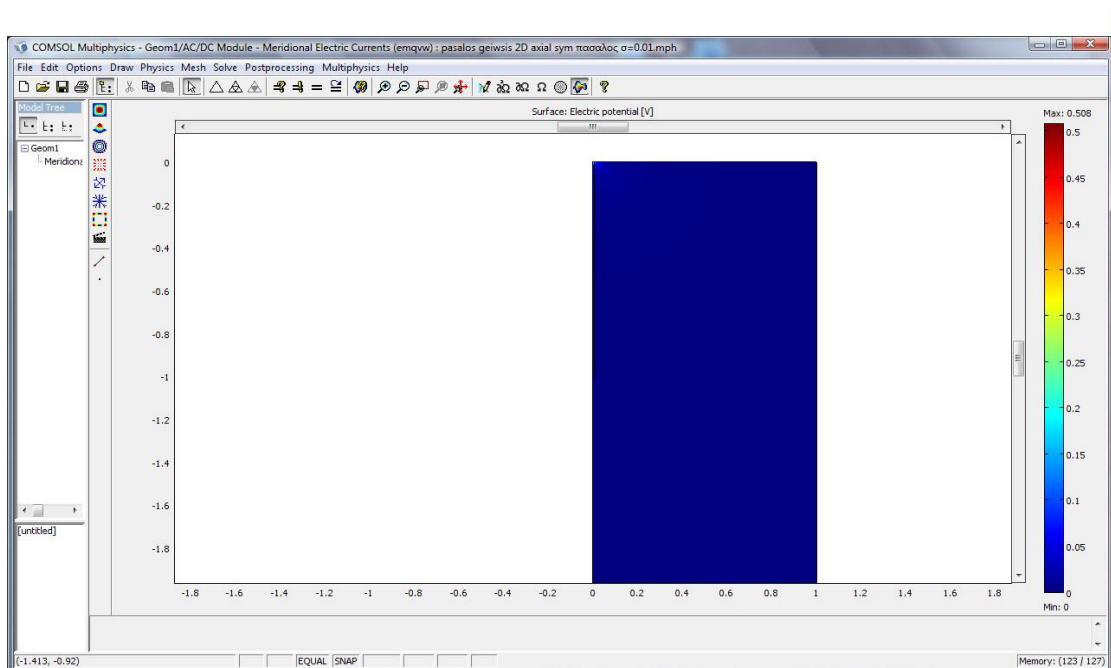
Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζεται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τέσσερις περιπτώσεις.

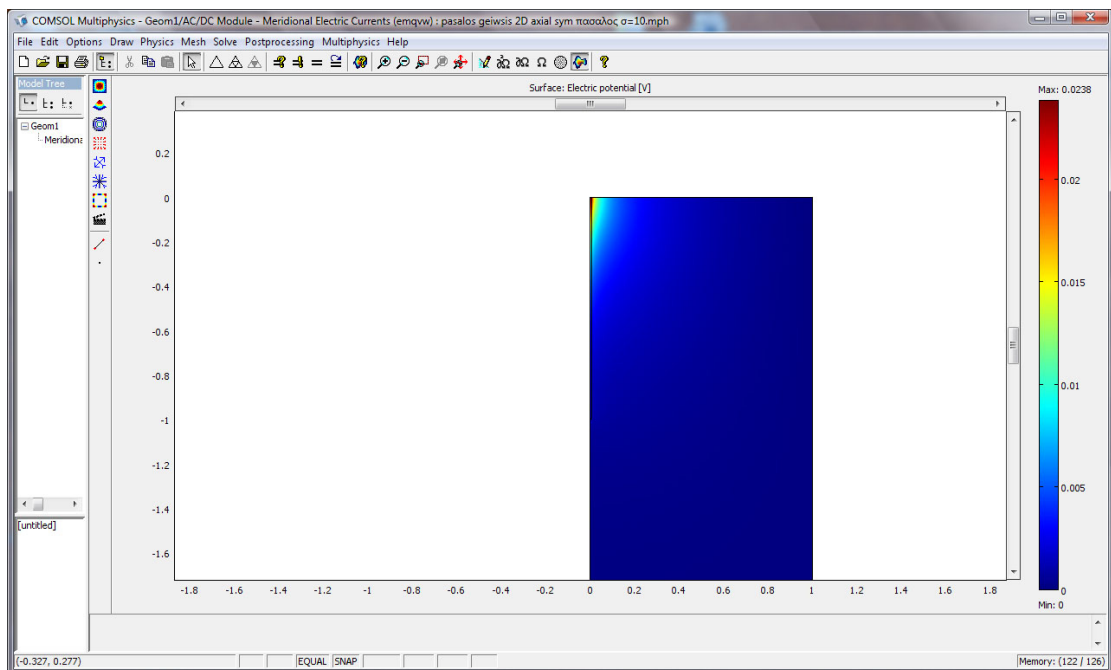


Σχήμα 6.4 Το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος

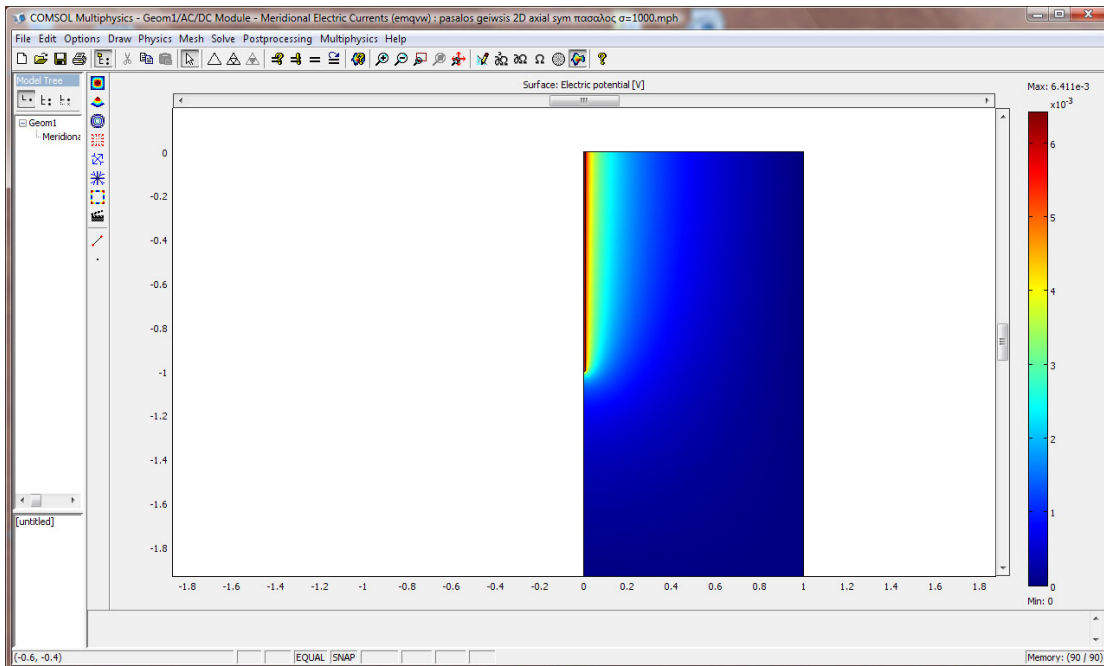
Στα σχήματα 6.5 – 6.8 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού στη γη



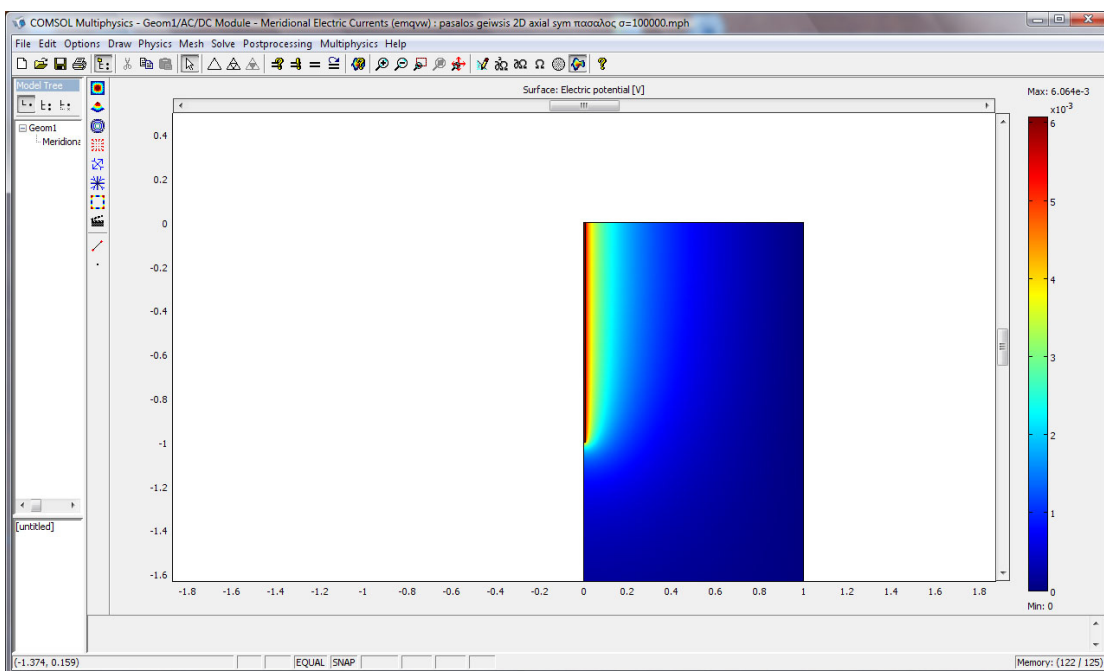
Σχήμα 6.5 Κατανομή δυναμικού για $\sigma = 0,01 \Omega \cdot m$



Σχήμα 6.6 Κατανομή δυναμικού για $\sigma = 10 \Omega \cdot m$



Σχήμα 6.7 Κατανομή δυναμικού για $\sigma = 1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$



Σχήμα 6.8 Κατανομή δυναμικού για $\sigma = 100000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$

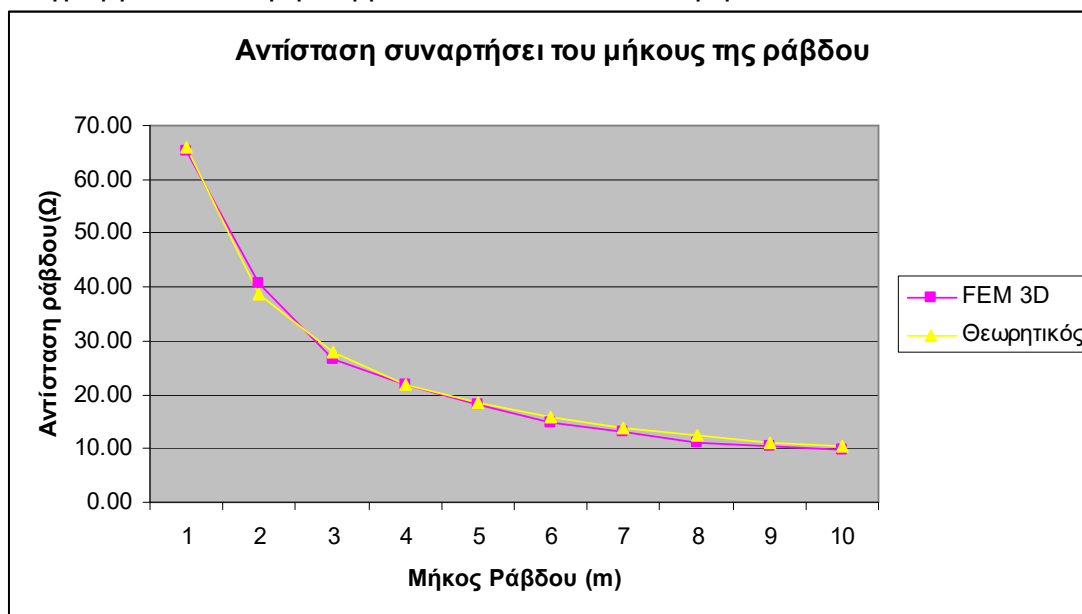
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ειδική αντίσταση της ράβδου τόσο αυξάνεται και η τιμή του δυναμικού κατά μήκος της.

6.2 Εξάρτηση της αντίστασης γείωσης από το μήκος του πασσάλου

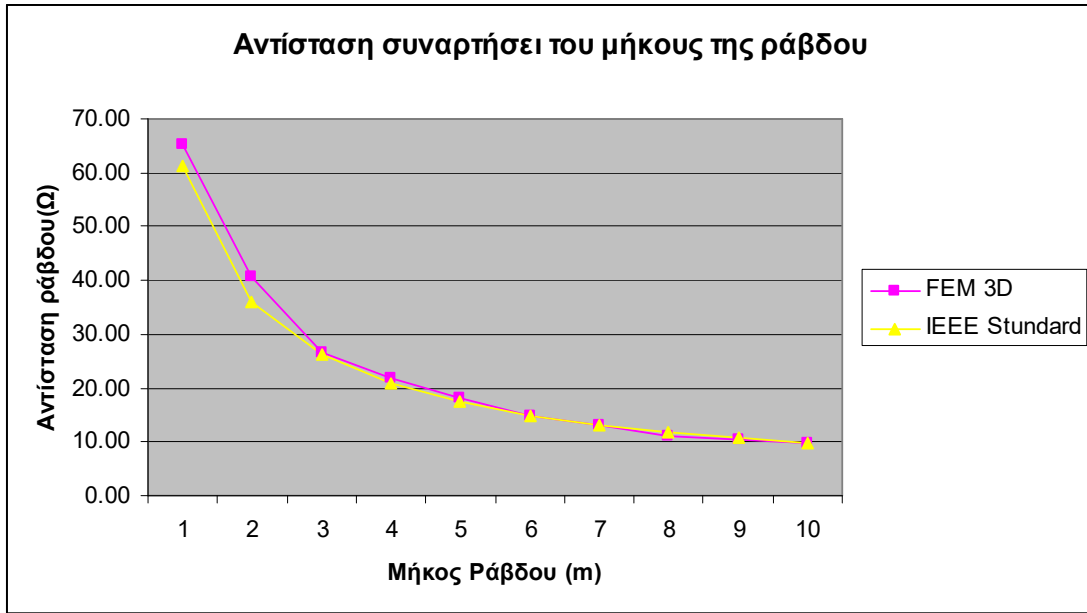
Παρακάτω δίνεται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης συναρτήσει του μήκους πασσαλογειωτή για ομοιογενή γη με $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$. Ο γειωτής έχει διάμετρο 0,063m και το μήκος του κυμαίνεται από 1 έως 10m. Γίνεται υπολογισμός της αντίστασης με το Comsol Multiphysics αλλά και με κάποιες άλλες μεθόδους που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Μήκος ράβδου(m)	Αντίσταση ράβδου (Ω)			
	FEM 3D	Θεωρητικός	IEEE Standard	Sullivan
1	65.13	66.09	61.21	61.51
2	40.80	38.56	36.12	36.27
3	26.59	27.86	26.23	26.33
4	21.94	22.04	20.82	20.89
5	18.02	18.34	17.36	17.42
6	14.97	15.77	14.95	15.00
7	13.23	13.86	13.17	13.21
8	11.26	12.40	11.79	11.82
9	10.29	11.23	10.68	10.72
10	9.66	10.27	9.78	9.81

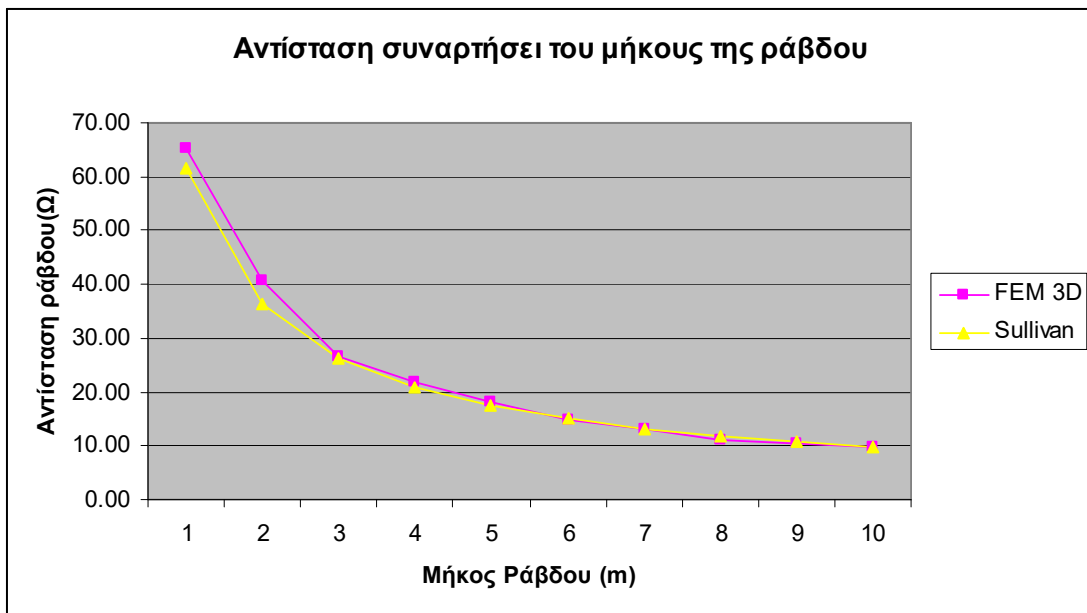
Διάγραμμα 6.9 Σύγκριση μεθόδων FEM και Θεωρητικού Τύπου



Διάγραμμα 6.10 Σύγκριση μεθόδων FEM και IEEE Std



Διάγραμμα 6.11 Σύγκριση μεθόδων FEM και Sullivan



Γενικό συμπέρασμα από τα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι με την αύξηση του μήκους του γειωτή μειώνεται η αντίσταση γείωσης. Επίσης τα αποτελέσματα για όλες τις προσεγγίσεις είναι σχεδόν πανομοιότυπα. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις είναι της τάξης του 7% και συναντώνται ανάμεσα στο Θεωρητικό τύπο και στη μέθοδο IEEE Std. Οι αποκλίσεις αυτές μειώνονται όσο το μήκος της ράβδου αυξάνεται. Περαιτέρω τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το Comsol (FEM 3D) είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα των άλλων μεθόδων.

Για ομοιογενή γη η αντίσταση γείωσης μειώνεται ομαλά με την αύξηση του μήκους του πασσαλογειωτή.

6.3 Πάσσαλος γείωσης σε διαστρωματοποιημένη γη

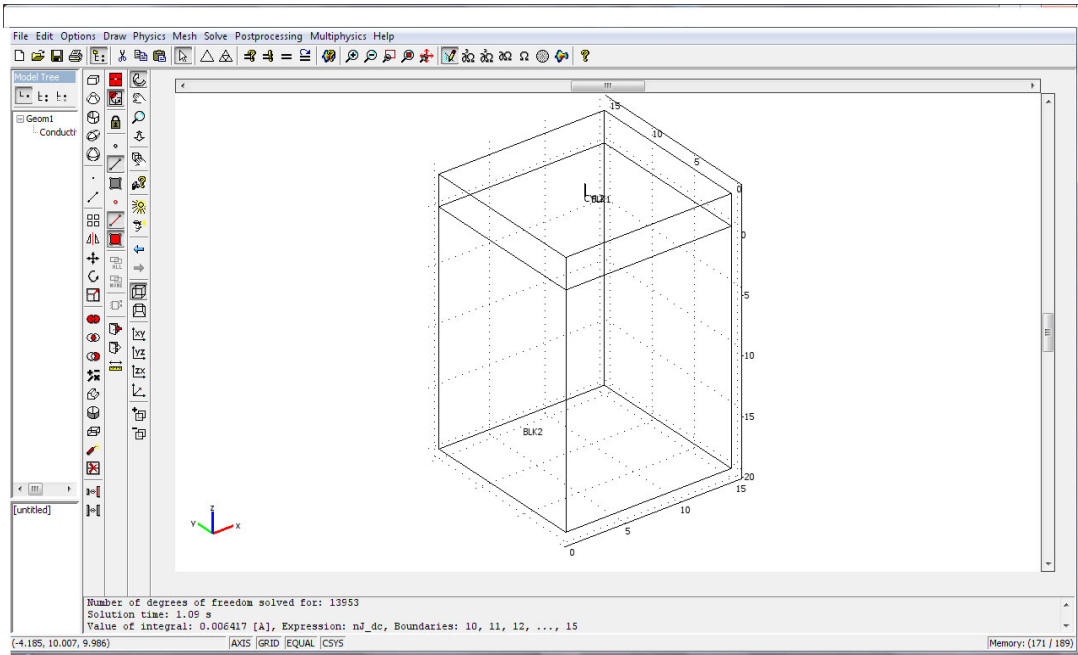
Στη συνέχεια δίνεται η μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει του μήκους πασσαλογειωτή για τις έξι τυπικές περιπτώσεις περιπτώσεις διαστρωματοποιημένης γης τις οποίες πρότεινε ο del' Alamo [16], [17] μετά από μετρήσεις που έκανε σε διάφορα είδη εδάφους με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι έξι αυτές περιπτώσεις είναι:

Πίνακας 6.3.1 Περιπτώσεις γης 2 στρωμάτων del' Alamo

Περίπτωση	ρ_1 [Ωm]	ρ_2 [Ωm]	H [m]
1	372,729	145,259	2,69
2	246,836	1058,63	2,139
3	57,344	96,714	1,651
4	494,883	93,663	4,37
5	160,776	34,074	1,848
6	125,526	1093,08	2,713

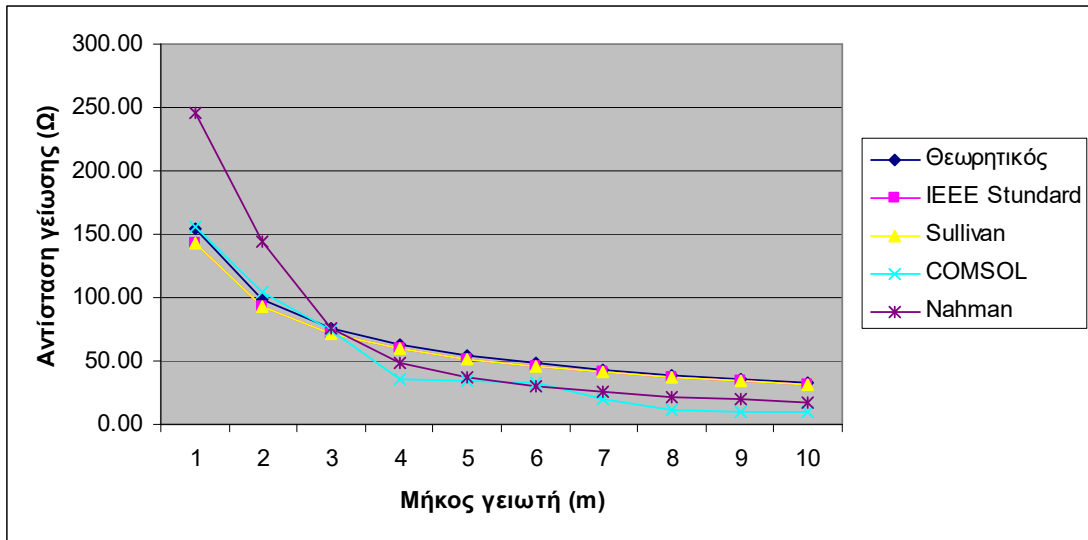
Όπου ρ_1 είναι η ειδική αντίσταση του πρώτου στρώματος γης, ρ_2 η ειδική αντίσταση του δεύτερου στρώματος γης σε m και H το πάχος του πρώτου στρώματος σε m.

Η ανάλυση θα γίνει για την πρώτη και δεύτερη περίπτωση διαστρωματοποιημένης γης. Οι δυο αυτές περιπτώσεις επιλέγονται αντιπροσωπευτικά αφού για την πρώτη ισχύει $\rho_1 > \rho_2$ ενώ για την δεύτερη $\rho_1 < \rho_2$. Πάλι οι υπολογισμοί γίνονται για πάσσαλο τοποθετημένο στην επιφάνεια της γης και για μήκος από 1 έως 10m.



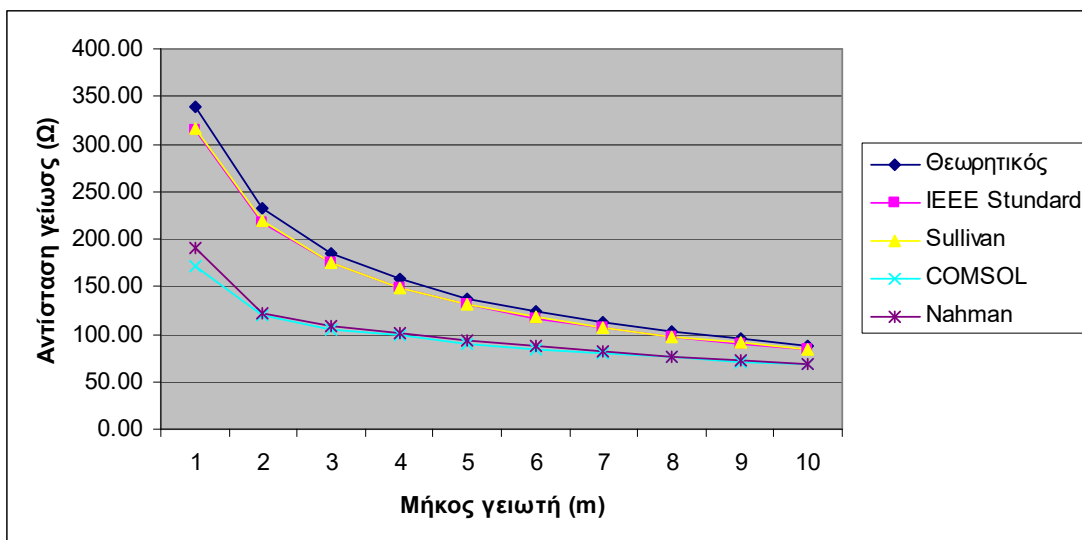
Εικόνα 6.3.1 Γεωμετρία του προβλήματος

Περίπτωση 1: $\rho_1 = 372,729 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 145,259 \Omega\text{m}$, $H = 2,69 \text{ m}$



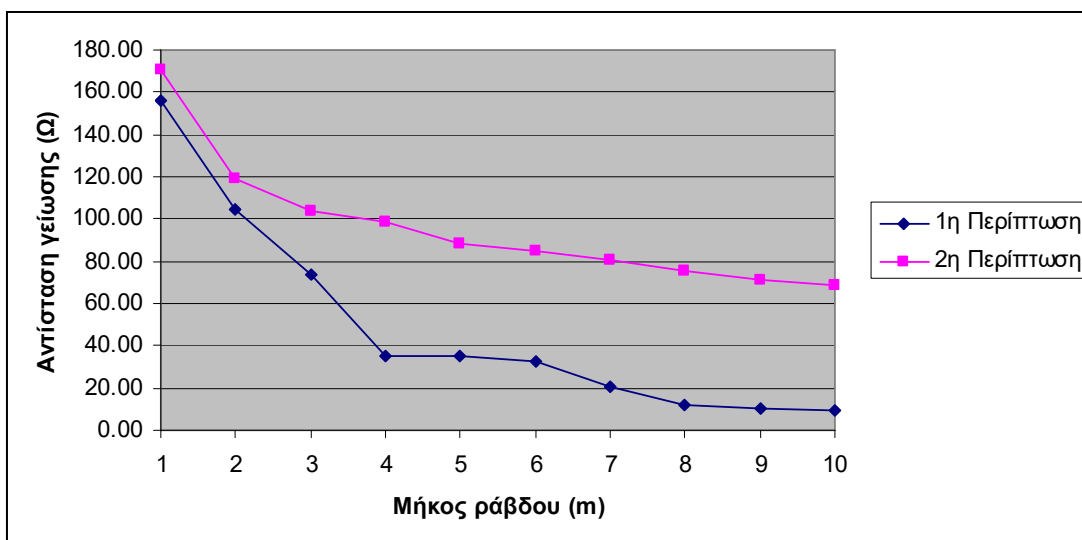
Διάγραμμα 6.3.1 Πρώτη περίπτωση διαστρωματοποιημένης γης

Περίπτωση 2: $\rho_1 = 246,836 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 1058,63 \Omega\text{m}$, $H = 2,139 \text{ m}$



Διάγραμμα 6.3.2 Δεύτερη περίπτωση διαστρωματοποιημένης γης

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δυο διαφορετικών τύπων διαστρωματοποιημένης γης.



Διάγραμμα 6.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Είναι χαρακτηριστικό στο παραπάνω διάγραμμα ότι για τις περιπτώσεις 1 και 2 η διαφορά στην αντίσταση γείωσης είναι μικρή όσο βρισκόμαστε στο πρώτο στρώμα

γης. Με την είσοδο όμως του γειωτή στο δεύτερο στρώμα η διαφορά γίνεται περισσότερο αισθητή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ οι ειδικές αντιστάσεις στο πρώτο στρώμα γης και στις δύο περιπτώσεις έχουν κοντινές τιμές (372,729 Ωm και 246,836 Ωm αντίστοιχα), στο δεύτερο στρώμα γης οι ειδικές αντιστάσεις είναι πολύ διαφορετικές (145,259 Ωm και 1058,63 Ωm). Βέβαια είναι σημαντικός και ο ρόλος του πάχους του πρώτου στρώματος όμως και στις δύο περιπτώσεις το πάχος δε διαφέρει πολύ.

Για μήκος γειωτή 1 και 2m και στις δύο περιπτώσεις δεν υπάρχει διείσδυση στο δεύτερο στρώμα γης οπότε η επίδραση αυτού στον καθορισμό της αντίστασης δεν είναι πολύ σημαντική. Για το λόγο αυτό οι αντιστάσεις γείωσης προκύπτουν περίπου ίσες. Όσο αυξάνεται όμως το μήκος των γειωτών η επίδραση του δεύτερου στρώματος γίνεται σημαντική με συνέπεια να εμφανίζεται διαφορά στο αποτέλεσμα στις δύο αυτές περιπτώσεις διαστρωματοποιημένης γης και να γίνεται πιο έντονη στα μεγάλα βάθη.

Επίσης είναι φανερό ότι όταν το 2ο στρώμα σε διαστρωματοποιημένη γη έχει μεγάλη ειδική αντίσταση τότε μεγάλη αύξηση του μήκους του γειωτή και διείσδυση στο 2ο στρώμα δε μειώνει πολύ την αντίσταση γείωσης.

Στη διαστρωματοποιημένη γη παρατηρούνται τα εξής:

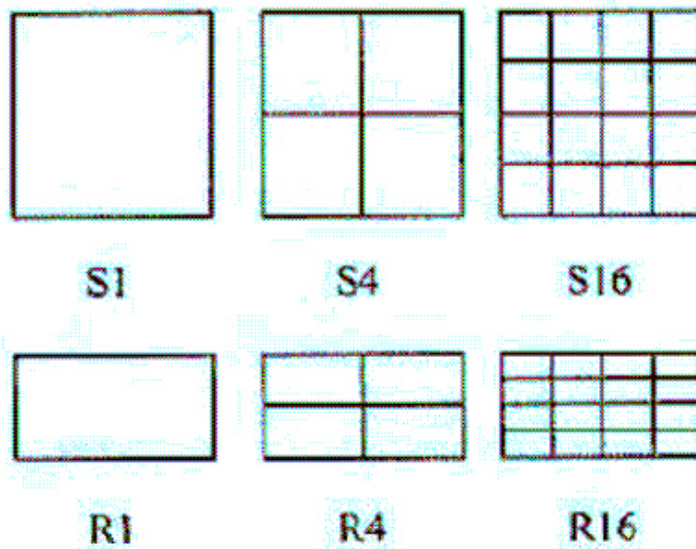
Για $\rho_1 > \rho_2$ η αντίσταση γείωσης μειώνεται λίγο όταν οι γειωτές βρίσκονται στο πρώτο στρώμα γης. Για μεγαλύτερο μήκος γειωτών και για διείσδυση στο δεύτερο στρώμα γης η αντίσταση μειώνεται πιο απότομα. Αυτό οφείλεται στη ικανότητα για μεγαλύτερη απορροφητικότητα ρεύματος εκεί όπου η ειδική αντίσταση είναι μικρότερη.

Για $\rho_1 < \rho_2$ η αντίσταση γείωσης μειώνεται για μήκη που φτάνουν μέχρι το όριο του πρώτου στρώματος γης. Για μεγαλύτερα μήκη όμως και για διείσδυση στο δεύτερο στρώμα γης η αντίσταση μειώνεται με πιο αργό ρυθμό εξαιτίας της μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης του δευτέρου στρώματος γης.

6.4 Πλέγμα γείωσης

Τα πλέγματα αποτελούνται από οριζόντιους κυλινδρικούς αγωγούς οι οποίοι τοποθετούνται οριζόντια συνήθως σε βάθος ενταφιασμού 0.5m έτσι ώστε να σχηματίζουν τετράγωνους ή ορθογώνιους βρόχους (meshes). Αυτά με τους τετράγωνους βρόχους τυποποιούνται σαν S ενώ με τους ορθογώνιους σαν R.

Τα υπάρχοντα είδη πλεγμάτων φαίνονται στο σχήμα:



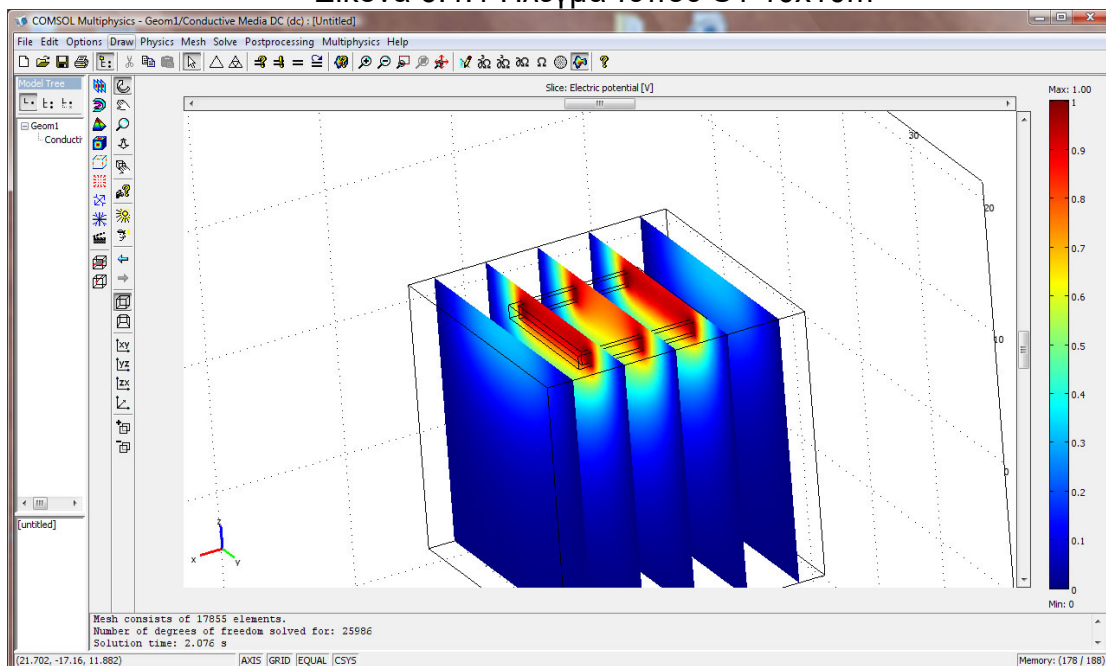
Διαστάσεις πλεγμάτων:

Όνομα	Περιοχή (m ²)
S1	10*10
S4	10*10
S16	10*10
R1	10*20
R4	10*20
R16	10*20

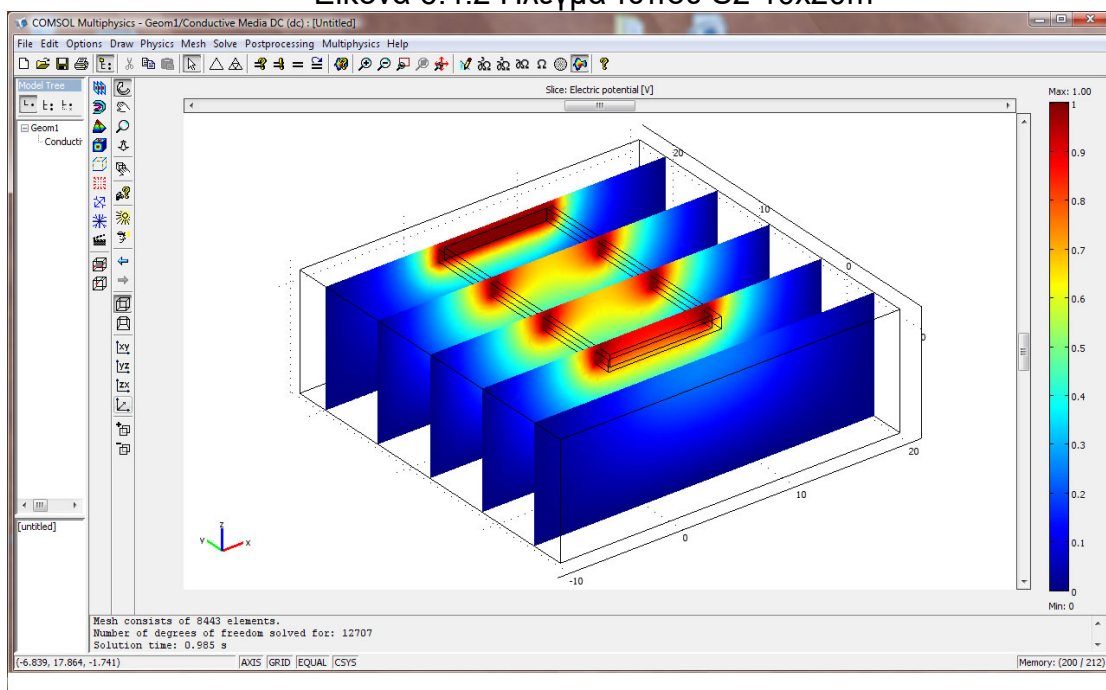
Στην παρούσα διπλωματική θα εξεταστούν τα πλέγματα τύπου S1 και R1.

Στις επόμενες εικόνες δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για πλέγματα σε μορφή S1 για περιοχή 10x10m και R1 για περιοχή 10x20m και ειδική αντίσταση εδάφους $\rho = 100 \Omega \cdot m$.

Εικόνα 6.4.1 Πλέγμα τύπου S1 10x10m



Εικόνα 6.4.2 Πλέγμα τύπου S2 10x20m



Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός της αντίστασης γείωσης για τα πλέγματα και σύγκριση τους με τα αποτελέσματα της μεθόδου Schwartz (Κεφάλαιο 3).

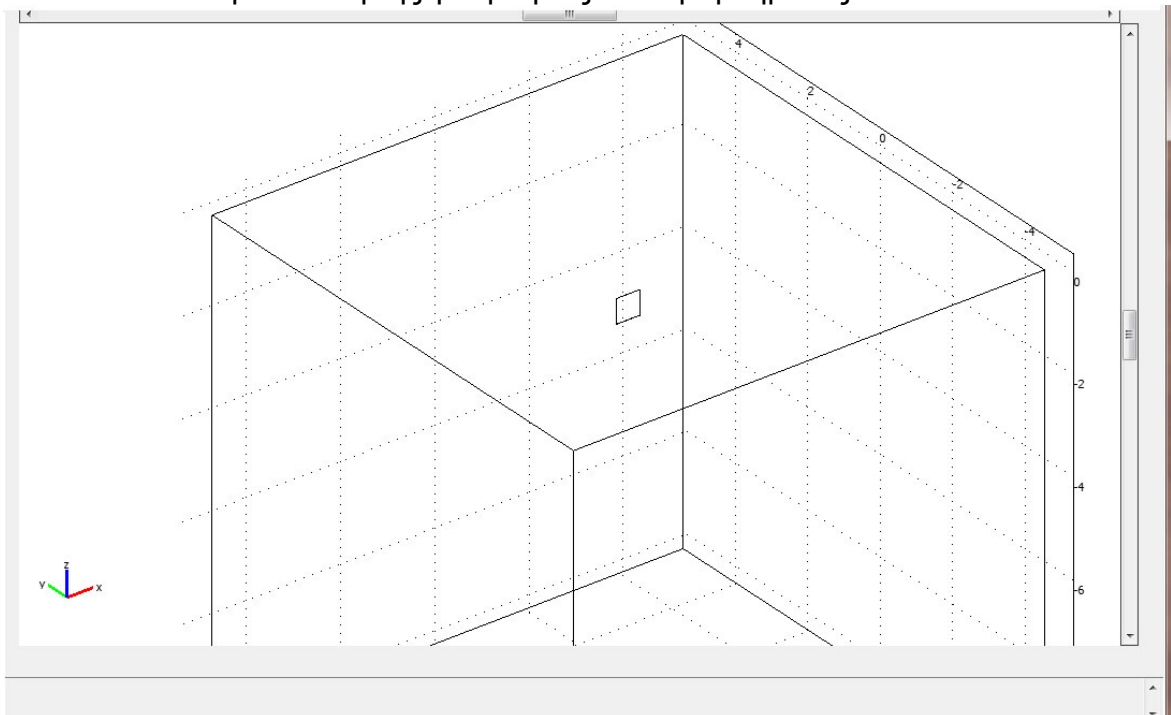
Περίπτωση	Αντίσταση πλέγματος (Ω)	
	FEM 3D	Schwartz
S1	9.05	9.4
R1	5.89	6.02

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις από τους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι αρκετά μικρές. Το πλέγμα R1 έχει μικρότερη τιμή αντίστασης από το S1 πράγμα που είναι αναμενόμενο(μεγαλύτερο μήκος αγωγού). Η διαφορά στους υπολογισμούς οφείλεται στην μικρή πυκνότητα διακριτοποίησης στην προσομοίωση του πλέγματος.

6.5 Γειωτής πλάκας

Το προς εξέταση σύστημα γείωσης αποτελείται από μια πλάκα μορφής παραλληλογράμμου $0,5 \times 0,5 \text{m}^2$ και πάχους 3mm. Ενταφιάζεται με την επιφάνειά της κατακόρυφη σε έδαφος με ειδική αντίσταση $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$. Το πάνω μέρος βρίσκεται σε βάθος 1m. Θα γίνει προσομοίωση με το Comsol Multiphysics και εν συνεχεία σύγκριση των αποτελεσμάτων με τον προσεγγιστικό τύπο που υπάρχει στη βιβλιογραφία.

Εικόνα 6.5.1 Παρουσίαση της γεωμετρίας του προβλήματος



6.5.1 Αποτελέσματα

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το Comsol αλλά και με τον θεωρητικό τύπο.

Αντίσταση πλάκας (Ω)	
Comsol	Προσεγγιστικός
78.71	44.44

Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα

Παρατηρούμε μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο προσεγγιστικός τύπος όπως είναι αναμενόμενο δεν έχει μεγάλη ακρίβεια. Παρατηρούμε λοιπόν πως ο προσεγγιστικός τύπος για την πλάκα γείωσης κάνει μια αισθητή υποεκτίμηση της αντίστασης γείωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μελέτη συστημάτων γείωσης με τη χρήση του προγράμματος COMSOL MULTIPHYSICS. Επιλέχθηκαν στη κάποιες υπολογιστικές και προσεγγιστικές μέθοδοι για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο μοντέλο του πασσαλογειωτή παρατηρούμε ότι η διάμετρος του πασσάλου δεν επηρεάζει αισθητά την αντίσταση γείωσης. Αποδεικνύεται επίσης ότι η ειδική αντίσταση ρ είναι ένας απλός συντελεστής ο οποίος επηρεάζει γραμμικά το αποτέλεσμα, αύξησή του ή μείωσή του μεταβάλλει αναλογικά το αποτέλεσμα, με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται παντα οι ίδιες παράμετροι διακριτοποίησης.

Γενικό συμπέρασμα είναι ότι με την αύξηση του μήκους του πασσάλου μειώνεται η αντίσταση γείωσης. Επίσης τα αποτελέσματα για όλες τις προσεγγίσεις είναι σχεδόν πανομοιότυπα. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις συναντώνται ανάμεσα στο Θεωρητικό τύπο και στη μέθοδο IEEE Std. Οι αποκλίσεις αυτές μειώνονται όσο το μήκος της ράβδου αυξάνεται.

Σε διαστρωματοποιημένη γη η διαφορά στην αντίσταση γείωσης είναι μικρή στα μοντέλα 1 και 2 όσο βρισκόμαστε στο πρώτο στρώμα γης. Με την είσοδο όμως του γειωτή στο δεύτερο στρώμα η διαφορά γίνεται περισσότερο αισθητή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ οι ειδικές αντιστάσεις στο πρώτο στρώμα γης και στις δύο περιπτώσεις έχουν κοντινές τιμές στο δεύτερο στρώμα γης οι ειδικές αντιστάσεις είναι πολύ διαφορετικές

Στα πλέγματα παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις από τους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι μικρές. Το πλέγμα R1 έχει μικρότερη τιμή αντίστασης από το S1 πράγμα που είναι αναμενόμενο (μεγαλύτερο μήκος αγωγού). Η διαφορά στους υπολογισμούς οφείλεται στην μικρή πυκνότητα διακριτοποίησης στην προσομοίωση του πλέγματος.

Στην πλάκα γείωσης παρατηρούμε μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο προσεγγιστικός τύπος όπως είναι αναμενόμενο δεν έχει μεγάλη ακρίβεια. Παρατηρούμε λοιπόν πως ο προσεγγιστικός τύπος για την πλάκα γείωσης κάνει μια αισθητή υποεκτίμηση της αντίστασης γείωσης.

Βιβλιογραφία

1. "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", ANSI/IEEE Std 80-2000, 2000
2. "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", ANSI/IEEE Std 80-1986, 1986
3. Πέτρος Ντοκόπουλος, "Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης", Εκδόσεις Ζήτη 2η έκδοση, Θεσσαλονίκη 1992
4. Προκόπης Χριστοδούλου, "Συστήματα Γείωσης. Θεωρητική προσέγγιση", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2000
5. Δήμητρα Βάρλα, "Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2004
6. Περής Γ. Χάλαρης, "Γειώσεις – Νομοθεσία και Κανονισμοί", "Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων "
7. Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980
8. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, "Κυκλωματική Επίλυση Συστημάτων Γείωσης", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002
9. Β. Κ. Παπαδιάς, "Εισαγωγή στην Τεχνική των Γειώσεων", "Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων"
10. Jovan Nahman, Ivica Paunovic, "Resistance to earth of earthing grids buried in multi-layer soil", Springer-Verlag 2005
11. J.Nahman, D.Salamon, "A practical method for the interpretation of earth resistivity data obtained from driven rod tests", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988
12. J.Nahman, D.Salamon, "Analytical expression for the resistance of rodbeds and of combined grounding systems in nonuniform soil, IEEE Trans. PWRD-1, No.3, July 1986 pp. 90-96
13. Wen Wu, Ruan Jiangjun, Chen Yunping, "Transient Analysis of Grounding System under Lightning Stroke Using 3D FEM Method", 2002 IEEE
14. COMSOL Multiphysics 3.4 User's Guide
15. Jovan Nahman, Ivica Paunovic, " Effects of the Local Soil Nonuniformity Upon Performances of Ground Grids" , IEEE Transactions on Power Delivery, 2007