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

Προσομοιώσεις Στατικής και Μεταβατικής Συμπεριφοράς Συστημάτων Γείωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Θ. Κορδάτος

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Φανή Η. Ασημακοπούλου, Διδάκτωρ

Αθήνα, Μάρτιος 2012

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

Προσομοιώσεις Στατικής και Μεταβατικής Συμπεριφοράς Συστημάτων Γείωσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Θ. Κορδάτος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την …..…. Μαρτίου 2012

……	……	……
Ι. Α. Σταθόπουλος	Φ. Β. Τοπαλής	Γ. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

……..

Ιωάννης Θ. Κορδάτος
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης Θ. Κορδάτος, 2012
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

“Only two things are infinite, the universe and human stupidity; and I'm not sure about the former!” ***Albert Einstein***

Περιεχόμενα

	Σελίδα
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΟΡΙΣΜΟΙ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	
1.1 Γενικά περί γειώσεων	1
1.2 Είδη Γειώσεων	4
1.2.1 Γείωση Λειτουργίας	4
1.2.2 Γείωση Προστασίας	5
1.2.3 Γείωση Ασφάλειας-Αντικεραυνικής προστασίας	6
1.3 Βασικοί Ορισμοί-Έννοιες	6
1.4 Αντίσταση Γείωσης	14
1.5 Συστήματα Γείωσης	16
1.5.1 Πολυγωνική Διάταξη	16
1.5.2 Γείωση με πλάκες	16
1.5.3 Περιμετρική γείωση	16
1.5.4 Γείωση τύπου «Ε»	16
1.5.5 Θεμελιακή γείωση	17
1.5.5.1 Πλεονεκτήματα θεμελιακής γείωσης έναντι άλλων μορφών γειώσεων	18
1.5.5.2 Σχεδιασμός θεμελιακής γείωσης	20
1.6 Αντίσταση Γείωσης	23
1.6.1 Φυσικές ιδιότητες	23
1.6.2 Χημικές ιδιότητες	24
1.6.3 Σύσταση του εδάφους	25
1.6.4 Ειδική αντίσταση εδάφους	25
1.6.5 Μέτρηση ειδικής αντίστασης Εδάφους- Καθορισμός της πολυστρωματικής δομής του εδάφους	28
1.6.5.1 Μέθοδος Wenner	29

1.6.5.2 Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού (fall of potential) 31
1.6.5.3 Σύγκριση μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης 32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ
2.1 Γενικά 34
2.2 Διαδικασία Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης 35
2.3 Ανάλυση Διαδικασίας Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης 37
2.3.1 Επιλογή μοντέλου εδάφους 37
2.3.2 Επιλογή Αγωγών 39
2.3.2.1 Υλικό 39
2.3.2.2 Διατομή Αγωγών 40
2.4 Βασικές αρχές στη σχεδίαση του πλέγματος γείωσης 40
2.4.1 Συνδέσεις με το πλέγμα 45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ
3.1 Ορισμός μεταβατικής κατάστασης 46
3.2 Κρουστική σύνθετη αντίσταση 47
3.3 Μέθοδοι και Μοντέλα Προσομοίωσης 48
3.3.1 Αναλυτικές και εμπειρικές μέθοδοι 51
3.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι 53
3.3.2.1 Κυκλωματική προσέγγιση 54
3.3.2.2 Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου 57
3.3.2.3 Υβριδική προσέγγιση 61
3.3.2.4 Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς 62
3.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα 63
3.3.2.6 Βελτιωμένες προσεγγίσεις γραμμής μεταφοράς 64
3.3.2.6.1 Μειονεκτήματα της προσέγγισης ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς 65

3.3.2.6.2 Προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς 68
3.4 Προσομοίωσεις μεταβατικής συμπεριφοράς πλεγμάτων γείωσης - Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ PC OPERA-3D

4.1 Προσμοίωση Α – Μεταβολή αριθμού «ματιών» συστήματος γείωσης
4.1.1 Γεωμετρία του προβλήματος 93
4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 97
4.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων 107
4.2 Προσμοίωση Β – Μεταβολή ειδικής αντίστασης εδάφους
4.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος 110
4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 113
4.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων 121
4.3 Προσμοίωση Γ – Διστρωματικό μοντέλο εδάφους
4.3.1 Γεωμετρία του προβλήματος 123
4.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 126
4.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων 129
4.4 Προσμοίωση Δ – Πλέγμα γείωσης με κατακόρυφα ηλεκτρόδια
4.4.1 Γεωμετρία του προβλήματος. 130
4.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 133
4.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων 137

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ
5.1 Ανακεφαλαίωση Διπλωματικής εργασίας 139
5.2 Επόμενη μέρα 140

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – COBHAM OPERA 3D 143
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 175

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και προσομοίωση με τη βοήθεια του τρισδιάστατου λογισμικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης PC OPERA-3D Version 14.0 της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης. Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει την παρουσίαση της σχετικής με τα συστήματα γείωσης και τα μοντέλα προσομοίωσης της στατικής και μεταβατικής συμπεριφοράς αυτών βιβλιογραφίας, την αναλυτική περιγραφή του PC OPERA-3D δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο χειρισμού και λειτουργίας του προγράμματος μεταβατικής ανάλυσης, την περιγραφή των διεξαχθέντων προσομοιώσεων, την επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτές.

Λέξεις Κλειδιά: Σύστημα Γείωσης, Πλέγμα Γείωσης, Μεταβατική Συμπεριφορά, Υψηλή Τάση, Προσομοίωση, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the discussion and simulation with the help of the three-dimensional electric field analysis program, PC OPERA-3D Version 14.0, of the transient behavior of grounding systems. This diploma thesis includes the presentation of the bibliography related to the grounding systems and their steady state and transient behavior simulation models, the analytical description of PC OPERA-3D and its transient analysis program handling and operation, the description of the carried out simulations, the analysis and annotation of the simulation results.

Key Words: Grounding System, Grounding Mesh, Transient Behavior, High Voltage, Simulation, Finite Element Method.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Βασικό αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη και προσομοίωση της στατικής και μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης. Για το σκοπό αυτό, έλαβαν χώρα προσομοιώσεις με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3D Version 14.0 για διάφορα συστήματα γείωσης.

Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην ορολογία και στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Δίνονται ορισμοί της γείωσης και όλων των σχετικών παραμέτρων που αφορούν το φαινόμενο, αναφέρονται τα διάφορα είδη και οι μέθοδοι γείωσης καθώς επίσης και έννοιες όπως η αντίσταση γείωσης και η μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους με διάφορες μεθοδολογίες.

Κεφάλαιο 2. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης αποτελεί βασικό αντικείμενο του δεύτερου κεφαλαίου στο οποίο γίνεται περιγράφονται τα στάδια για μια ορθή και ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού προκειμένου ένα σύστημα γείωσης να κριθεί κατάλληλο για χρήση. Παράλληλα δίνονται και οι βασικές αρχές στη σχεδίαση του πλέγματος γείωσης.

Κεφάλαιο 3. Στο κεφάλαιο αυτό, μετά από τον ορισμό της μεταβατικής κατάστασης και μια σύντομη επεξήγηση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης, ακολουθεί μια γενική βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριοτέρων μεθόδων και μοντέλων προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, τα οποία έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία και περιγράφοντας εκτενώς την προσέγγιση της μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς, που αποτελεί το πιο σύγχρονο μοντέλο προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 4. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται στατική και μεταβατική επίλυση προβλημάτων συστημάτων γείωσης με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος Opera-3D. Παρουσιάζεται

λεπτομερώς η επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα διαγράμματα όπως αυτά αποδόθηκαν από το λογισμικό πρόγραμμα, καθώς επίσης και τα αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση της συμπεριφοράς πλεγμάτων γείωσης.

Κεφάλαιο 5. Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας δίνονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Παράρτημα. Παρατίθενται οι οδηγίες για τη λειτουργία του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3D Version 14.0, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων συστημάτων γείωσης. Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στο πρόγραμμα και εξηγείται η φιλοσοφία του. Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, αφού αναφέρονται τα προγράμματα ανάλυσης, που χρησιμοποιεί το Opera-3D, γίνεται εκτενής περιγραφή της λειτουργίας του επιλύτη της μεταβατικής ανάλυσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίησή της.

Στον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επιβλέποντος της διπλωματικής εργασίας μου, οφείλω το πιο μεγάλο ευχαριστώ για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και για την ουσιαστική του υποστήριξη και καθοδήγηση. Για την καθοριστική και ανεκτίμητη συμβολή του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της μέσα από διεξοδικές επιστημονικές συζητήσεις και εύστοχες παρατηρήσεις, για τη διεύρυνση των επαγγελματικών μου οριζόντων, για την επιβράβευση όταν το άξιζα και για την υπενθύμιση των πραγματικών διαστάσεων όταν έχανα το μέτρο, για την αφοπλιστικά χιουμοριστική του διάθεση που κατάφερνε να μου μεταδώσει σε άπειρες στιγμές άγχους που με διέκριναν, για το γεγονός ότι είναι ένας αξιόλογος άνθρωπος και επιστήμονας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την την Κυρία Φανή Η. Ασημακοπούλου, Διδάκτορα και Διπλωματούχο Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις χρήσιμες συμβουλές της και τη συνολικά πολύτιμη βοήθειά της κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας. Την ευχαριστώ, επίσης, θερμά για το υλικό που μου παρείχε, το οποίο με βοήθησε σημαντικά στη συγγραφή.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω επίσης προς Κυρία Βασιλική Κονταργύρη, Διδάκτορα Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις χρήσιμες συμβουλές της, το χρόνο που μου αφιέρωσε για τις εύστοχες επισημάνσεις της σε καίρια σημεία της εργασίας μου και για τις πολύτιμες συμβουλές της σχετικά με το χειρισμό του προγράμματος PC OPERA.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Alex Michaelides, υπεύθυνο υποστήριξης και εφαρμογών της Vector Fields, για την καθοριστική, ακόμη και από απόσταση, συμβολή του στην επιτυχή αντιμετώπιση ορισμένων σημαντικών δυσκολιών που συνάντησα σε κρίσιμα σημεία της προσπάθειάς μου.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε σε πρακτικά εργαστηριακά θέματα και για το φιλικό κλίμα με το οποίο με περιέβαλλαν όλο αυτό το διάστημα.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική υποστήριξη και συμπαράσταση, που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Σας ευχαριστώ όλους από καρδιάς για αυτό το θαυμαστό ταξίδι που κάνατε μαζί μου. Χαίρομαι ιδιαίτερα που φτάνω στον τελικό προορισμό.

1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΟΡΙΣΜΟΙ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΟΡΙΣΜΟΙ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ-ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην ορολογία και στις βασικές αρχές που διέπουν τα συστήματα γείωσης. Η ερμηνεία και 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 Γενικά περί γειώσεων

Γείωση (Grounding) είναι η αγώγιμη σύνδεση ενός σημείου κυκλώματος ή ενός εκτεθειμένου αγώγιμου μέρους μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης ή ενός αγώγιμου ξένου στοιχείου, με τη γη, μέσω μιας διάταξης γείωσης [3]. Με τον όρο «γη» εννοείται η αγώγιμη μάζα της γης, το δυναμικό της οποίας κατά σύμβαση θεωρείται ίσο με μηδέν. Σκοπός ενός συστήματος γείωσης είναι να παρέχει ένα δρόμο χαμηλής αντίστασης σε ρεύματα από κεραυνούς ή σφαλμάτων προς τη γη και να μειώνει τις πιθανότητες ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων ή τάσεων επαφής, καθορίζοντας ένα δυναμικό αναφοράς. Στην περίπτωση που ένα σύστημα είναι εξολοκλήρου απομονωμένο προκειμένου να βρίσκεται σε πλήρη προστασία, τότε η εφαρμογή συστήματος γείωσης δεν είναι αναγκαία για την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Ωστόσο, στην πράξη τα συστήματα δεν είναι απομονωμένα αλλά βρίσκονται σε επαφή με εξωτερικούς μηχανισμούς σύζευξης, επομένως στην περίπτωση εμφάνισης κεραυνού παρατηρείται αύξηση του δυναμικού και μεταβατική ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ του συστήματος και του εξωτερικού χώρου, προκαλώντας σημαντικές καταστροφές και πιθανόν τραυματισμούς. Για την αποφυγή των φαινομένων που ειπώθηκαν ανωτέρω, επιβάλλεται η

δημιουργία και η εγκατάσταση συστημάτων γείωσης για τη μεταφορά του ρεύματος που φέρει ο κεραυνός στη γη.

Ένα σύστημα γείωσης πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω κριτήρια:

- Να παρέχει χαμηλή εμπέδηση για το κύμα ρεύματος για να είναι αποτελεσματική η λειτουργία του συστηματος προστασίας
- Να μειώνει τον κίνδυνο κατάρρευσης σημαντικών ηλεκτρικών συστημάτων ή ηλεκτρονικού εξοπλισμού
- Να μειώνει (ή και να εξαλείφει) τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας
- Να έχει χαμηλό κόστος

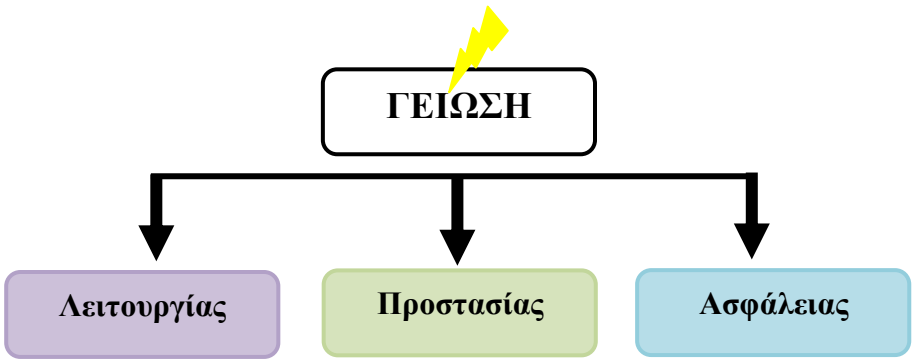
Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [1], όλα τα εκτεθειμένα αγώγιμα μέρη μιας εγκατάστασης, θα πρέπει να συνδέονται προς τη γη μέσω ειδικών αγωγών προστασίας και κάτω από κατάλληλες συνθήκες όπως αυτές επιβάλλονται από το σύστημα σύνδεσης των γειώσεων του δικτύου τροφοδοσίας. Τα διαφορετικά μεταξύ τους αγώγιμα μέρη με τα οποία είναι δυνατό να υπάρξει ταυτόχρονη επαφή θα πρέπει να γειώνονται μέσω του ίδιου ηλεκτροδίου γείωσης. Οι διατάξεις γείωσης μπορούν αν χρησιμοποιούνται είτε συγχρόνως για την προστασία και τη λειτουργία μια ηλεκτρικής εγκατάστασης είτε μόνο για σκοπούς προστασίας της ή λειτουργίας της εν λόγω εγκατάστασης. Σε περιπτώσεις που μια διάταξη γείωσης προορίζεται για προστατευτικό και λειτουργικό σκοπό, προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στις απαιτήσεις που αφορούν τη χρήση της για προστασία.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης και η ανάπτυξη εξειδικευμένων μοντέλων εξομοίωσης τους αποτελεί ένα καινοτόμο και αρκετά περίπλοκο θέμα το οποίο απασχολεί μεγάλη ομάδα ερευνητών. Ιδιαίτερα σημαντικό και κρίσιμο θέμα αποτελεί η μελέτη της μεταβατική κατάστασης των συστημάτων γείωσης η οποία συνοδεύεται από υψηλές τάσεις και επικίνδυνα

φαινόμενα. Η μη γραμμική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης στη μεταβατική κατάσταση, αποτελεί ένα δύσκολο ζήτημα εξαιτίας της εξαιρετικά σύνθετης διεργασίας. Ωστόσο γίνονται προσπάθειες προσέγγισης του φαινομένου και ανάπτυξης κατάλληλων μοντέλων για τη μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς αυτής.

1.2 Είδη Γειώσεων

Οι γειώσεις ανάλογα με το λειτουργικό τους σκοπό σε μια ηλεκτρολογική κατασκευή-εγκατάσταση διακρίνονται σε τρία βασικά είδη, παρόλο που στην πράξη δύνανται να συνυπάρχουν σε ένα σύστημα γείωσης. Τα είδη αυτά είναι η γείωση λειτουργίας, η γείωση προστασίας και η γείωση ασφάλειας (Σχήμα 1.1) [4-6].



Σχήμα 1.1: Είδη γειώσεων

1.2.1 Γείωση Λειτουργίας

Αναφέρεται στο είδος της γείωσης που είναι κατάλληλο για λειτουργικό σκοπό ή για την αποφυγή υπερτάσεων (π.χ. γείωση ουδετέρου κόμβου μετασχηματιστών ή γεννητριών). Εντάσσεται στο κύκλωμα λειτουργίας μιας εγκατάστασης με στόχο τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος ή στη δημιουργία ενός

επιπέδου αναφοράς σημάτων δικτύων τηλεπικοινωνίας ή πληροφορικής εξασφαλίζοντας τη σωστή και αξιόπιστη λειτουργία τους. Η γείωση λειτουργίας διακρίνεται σε άμεση, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης, και σε έμμεση εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις. Η γείωση χαρακτηρίζεται ως ανοικτή, όταν στη γραμμή γειώσεως έχουν παρεμβληθεί διάκενα σπινθηριστών ή ασφάλειες διασπάσεως. Οι ανοικτές γειώσεις δεν θεωρούνται γειώσεις λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν μια διάταξη γείωσης προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα και ως γείωση λειτουργίας και προστασίας, απαιτούμενη έμφαση πρέπει να δοθεί στις απαιτήσεις σχεδιασμού που αφορούν τη γείωση προστασίας. Σε αυτή την περίπτωση η ίδια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ).

1.2.2 Γείωση Προστασίας

Γείωση προστασίας είναι η αγώγιμη σύνδεση με τη γη των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας (π.χ. μεταλλικά περιβλήματα ηλεκτρικών συσκευών, μετασχηματιστών και των διακοπτών, των μολύβδινων μανδυών και των οπλισμών των καλωδίων, μεταλλικά μέρη του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κ.λπ). Τέτοιου είδους γείωση εφαρμόζεται υποχρεωτικά σε κάθε εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την προστασία των ανθρώπων από την ανάπτυξη επικίνδυνης τάσης στα μεταλλικά μέρη των συσκευών. Τα υλικά κατασκευής της επιβάλλεται να εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια συνεχή λειτουργία της, τη διέλευση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ή διαρροών προς τη γη, την αντοχή της σε φαινόμενα διάβρωσης και σε μηχανικές καταπονήσεις. Μια διάταξη γείωσης προστασίας ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί και ως γείωση αντικεραυνικής προστασίας όταν βέβαια πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 62305-3. Η γείωση προστασίας

γίνεται είτε με άμεση γείωση (απευθείας αγώγιμη σύνδεση στο σύστημα γείωση) είτε με ουδετέρωση. Η ουδετέρωση είναι η αγώγιμη σύνδεση με ουδέτερο αγωγό [6].

1.2.3 Γείωση Ασφάλειας-Αντικεραυνικής προστασίας

Γείωση ασφαλείας ονομάζεται κάθε γείωση μιας εγκατάστασης που χρησιμεύει για να διοχετεύονται προς τη γη ρεύματα σφάλματος από εξωτερικά ατμοσφαιρικά αίτια όπως οι κεραυνοί. 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 [6].

1.3 Βασικοί Ορισμοί-Έννοιες

Για την περιγραφή και μελέτη των συστημάτων γείωσης χρησιμοποιούνται ευρέως όροι και ορισμοί οι οποίοι καθορίζονται από το Πρότυπο ANSI/IEEE Std 80-2000 [1], το οποίο αποτελεί την αναθεωρημένη έκδοση του προτύπου IEEE Std 80-1986 [2]. Η ορολογία που ακολουθεί εμπεριέχεται και στο Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384.

Διάταξη-Σύστημα γείωσης (Grounding system): Περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής. Τα βασικά στοιχεία μιας διάταξης γείωσης είναι το ηλεκτρόδιο γείωσης, ο αγωγός γείωσης και ο κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης.

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

Ηλεκτρόδιο γείωσης (Ground electrode) ή γειωτής: Είναι ένα αγώγιμο σώμα ή ένα σύνολο αγώγιμων σωμάτων συνδεδεμένα μεταξύ τους σε μια διάταξη οποιουδήποτε γεωμετρικού σχήματος σε άμεση επαφή με τη γη. Το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων γείωσης είναι

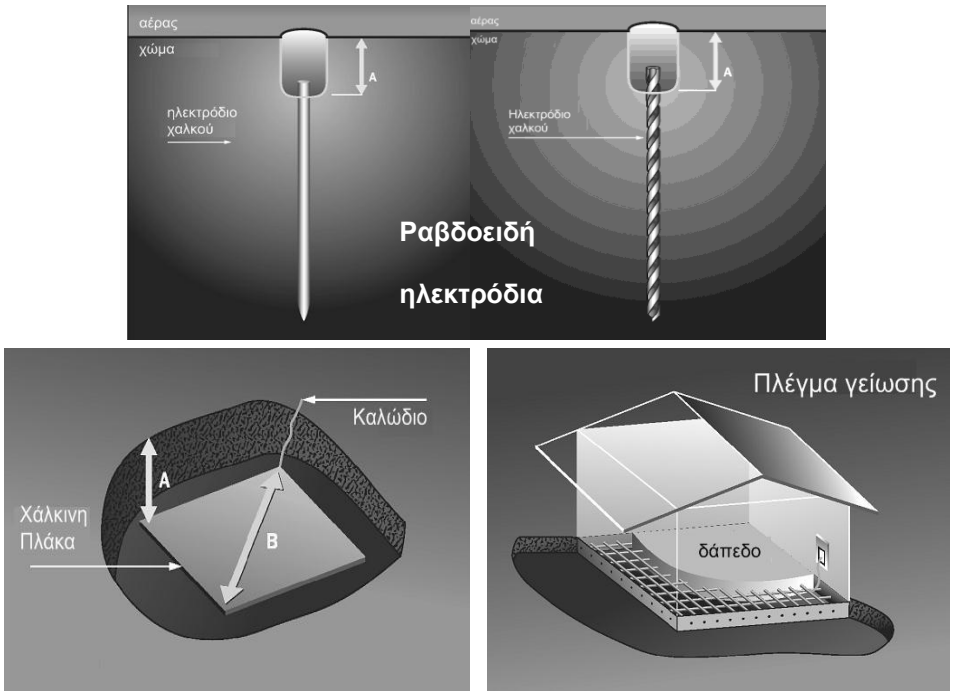
συνήθως χαλκός, χάλυβας θερμά επιψευδαργυρωμένος, χάλυβας ηλεκτρολυτικά επιχαλκωμένος ή ανοξείδωτος χάλυβας (Σχήμα 1.2).

Σχήμα 1.2: Ηλεκτρόδιο γείωσης

Οι βασικοί τύποι των γειωτών που χρησιμοποιούνται ευρέως φαίνονται στο Σχήμα 1.3 και είναι [7]:

- ***Ραβδοειδής***: Ράβδος γείωσης κυκλικής διατομής ή διατομής σταυρού διαφόρων μηκών. Το άνω μέρος της ράβδου (περίπου 25 cm), μπαίνει συνήθως σε φρεάτιο έτσι ώστε το σημείο σύνδεσής της με τον αγωγό γείωσης να είναι επισκέψιμο. Η αντίσταση της γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνει το μήκος της ράβδου, ενώ η επίδραση της διαμέτρου είναι αμελητέα.
- ***Πλάκα γείωσης***: Τοποθετείται κατακόρυφα εντός του εδάφους, σε βάθος τουλάχιστον 50 cm. Η αντίσταση της γείωσης μειώνεται με την αύξηση των διαστάσεων της πλάκας και όσο βαθύτερα τοποθετείται στο έδαφος.
- ***Ταινία γείωσης***: Τοποθετείται κάθετα σε μικρό βάθος μέσα στο έδαφος, περίπου 50 έως 70 cm. Η τιμή της αντίστασης της γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνει το μήκος της ταινίας που βρίσκεται εντός του εδάφους

- ***Γειωτής τύπου «Ε»:*** Αποτελείται από δύο στοιχεία τα οποία αποτελούνται από πλάκες όπου αφού συναρμολογηθούν κατάλληλα μεταξύ τους, το πρώτο παίρνει την μορφή «Π» και το δεύτερο την μορφή «Γ».
- ***Γειωτής ακτινικός*:** Είναι ταινίες ή ράβδοι που διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες. Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0,8 m. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια, όπως το γειωτή ταινίας.
- ***Γειωτής πλέγματος (Grounding grid)*:** Σύστημα οριζόντιων ηλεκτροδίων γείωσης που αποτελείται από έναν αριθμό διασυνδεμένων, γυμνών αγωγών τοποθετημένων στη γη, παρέχοντας μια κοινή γείωση για ηλεκτρικές συσκευές ή μεταλλικές κατασκευές, συνήθως σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Τα πλέγματα που τοποθετούνται οριζόντια κοντά στην επιφάνεια της γης είναι επίσης αποτελεσματικά στον έλεγχο των επιφανειακών κλίσεων του δυναμικού. Ένα τυπικό πλέγμα συνήθως συμπληρώνεται από έναν αριθμό ράβδων, και μπορεί να συνδεθεί σε βοηθητικά ηλεκτρόδια γείωσης ώστε να ελαττωθεί η αντίσταση του πλέγματος [3].



Σχήμα 1.3: Τύποι ηλεκτροδίων γείωσης

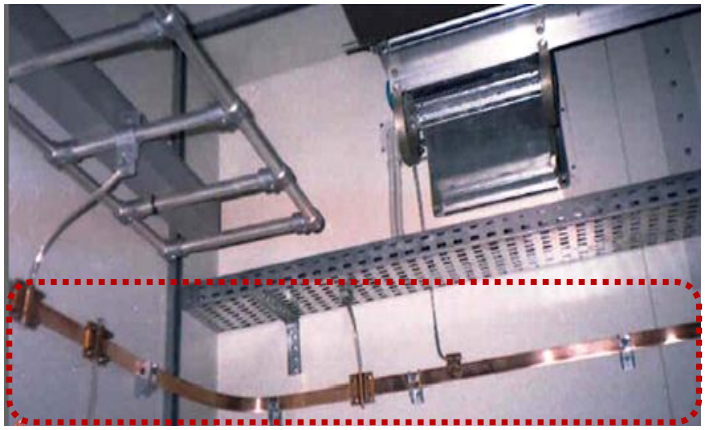
Αγωγός γείωσης: Είναι ο αγωγός που συνδέει το ηλεκτρόδιο γείωσης με έναν ακροδέκτη ή ζυγό γείωσης [1].

Κύριος ακροδέκτης ή ζυγός γείωσης: Ένας ακροδέκτης ή ζυγός στον οποίο συνδέονται οι αγωγοί γείωσης, οι αγωγοί προστασίας, οι αγωγοί ισοδυναμικής σύνδεσης και οι αγωγοί της γείωσης λειτουργίας εάν υπάρχουν [1].

Αγωγός προστασίας (PE): Χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μέτρων προστασίας και προορίζεται για την ηλεκτρική σύνδεση των εκτεθειμένων αγώγιμων μερών που περιλαμβάνονται σε μια εγκατάσταση, με σημεία όπως: τον κύριο ακροδέκτη γείωσης, ξένα αγώγιμα στοιχεία, το ηλεκτρόδιο γείωσης, το γειωμένο σημείο της πηγής τροφοδοσίας ή ένα γειωμένο τεχνητό ουδέτερο κόμβο [1].

Ουδέτερος αγωγός (N): Ο αγωγός που συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο ενός συστήματος τροφοδότησης (π.χ. μετασχηματιστής ή γεννήτριας) και συμμετέχει στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Ισοδυναμική Σύνδεση (ΙΣ): Είναι η ηλεκτρική σύνδεση που διατηρεί στο ίδιο ή περίπου στο ίδιο δυναμικό τα εκτεθειμένα αγώγιμα μέρη και τα ξένα αγώγιμα στοιχεία (Σχήμα 1.4). Μια ισοδυναμική σύνδεση μπορεί να θεωρείται κύρια ισοδυναμική ή συμπληρωματική σύνδεση [1].



Σχήμα 1.4: Ισοδυναμική Σύνδεση (ΙΣ)

Αγωγός ισοδυναμικής σύνδεσης: Ο αγωγός που συνδέει τα εκτεθειμένα αγώγιμα μέρη και τα ξένα αγώγιμα στοιχεία ώστε να εξασφαλίζει την ισοδυναμική τους σύνδεση [1,2].

Κύρια Ισοδυναμική Σύνδεση (ΚΙΣ): Είναι η ισοδυναμική σύνδεση του κύριου αγωγού προστασίας (PE), των εισερχόμενων στο κτίριο αγώγιμων δικτύων των αγώγιμων κατασκευών και στοιχείων του κτιρίου [1].

Συμπληρωματική Ισοδυναμική Σύνδεση (ΣΙΣ): Εφαρμόζεται στη ΚΙΣ κάτω από ειδικές απαιτήσεις. Μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός ξένου αγώγιμου στοιχείου μόνιμης κατασκευής του κτιρίου, το μεταλλικό σκελετό του κτιρίου ή στον τοπικό ζυγό του αγωγού προστασίας ή ζυγό γείωσης που συνδέεται άμεσα με τη γείωση [1].

***Ανύψωση δυναμικού γης (Ground Potential Rise (GPR))*:** Το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που ένα πλέγμα γείωσης υποσταθμού μπορεί να λάβει σε σχέση με ένα απομακρυσμένο σημείο γείωσης, το οποίο υποτίθεται ότι έχει το δυναμικό της απόμακρης γης. Αυτή η τάση, GPR, είναι ίση με το γινόμενο του μέγιστου ρεύματος που διαρρέει το πλέγμα και της αντίστασης της γείωσης (Εξ. (1.1)) [1,3].

$$GPR = \mathrm{Z.I} \qquad (1.2)$$

Όπου Z είναι η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γείωσης, όπως αυτή φαίνεται από τον αγωγό που διοχετεύει το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Η σύνθετη αντίσταση Z συνίσταται από τις αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις των αγωγών που αποτελούν τη γείωση, και την αντίσταση του όγκου του εδάφους που περικλείει το δίκτυο γείωσης. Σε χαμηλές συχνότητες και για δίκτυα γείωσης που είναι σχετικά μικρού μεγέθους, η αντίσταση του όγκου του εδάφους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των αγωγών του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση των αγωγών μπορεί να αμεληθεί στον υπολογισμό του Z.

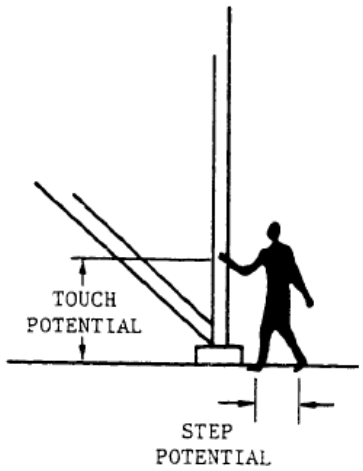
Συντελεστής ελάττωσης (Decrement factor): Συντελεστής προσαρμογής που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την παράμετρο ρεύματος συμμετρικού σφάλματος προς γη, σε υπολογισμούς γείωσης για τον έλεγχο της ασφάλειας. Καθορίζει το ισοδύναμο rms της κυματομορφής της ασύμμετρης έντασης για δοθείσα χρονική διάρκεια σφάλματος, t_f, λογαριάζοντας την επίδραση της αρχικής συνεχούς συνιστώσας και της απόσβεσης της τελευταίας κατά τη διάρκεια του σφάλματος [3].

***Τάση πλέγματος (Mesh voltage)*:** Η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόχο ενός πλέγματος γείωσης [1,2].

***Τάση επαφής (Touch voltage)*:** Η διαφορά δυναμικού μεταξύ γειωμένης μεταλλικής κατασκευής και ενός σημείου στην επιφένεια της γης σε οριζόντια απόσταση περίπου 1 m [1].

***Τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο (Metal-to-metal touch voltage)*:** Η διαφορά στο δυναμικό ανάμεσα στα μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που περικλείονται στην τοποθεσία του υποσταθμού που μπορεί να γεφυρωθεί με άμεση επαφή χέρι-με-χέρι ή χέρι-με-πόδι. Η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο πλέγμα γείωσης θεωρείται ότι είναι αμελητέα σε συμβατικούς υποσταθμούς. Ωστόσο, η τάση επαφής μετάλλου προς μέταλλο ανάμεσα σε μεταλλικά αντικείμενα ή δομές που συνδέονται στο μεταλλικό πλέγμα, και σε μεταλλικά αντικείμενα που υπάρχουν στην τοποθεσία του υποσταθμού, όπως ένας μονωμένος φράκτης, αλλά μη-συνδεμένα στο πλέγμα γείωσης, μπορεί να είναι ουσιαστική. Σε έναν τυπικό υποσταθμό, η χειρότερη τάση επαφής συνήθως είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε ένα χέρι και τα πόδια ενός ατόμου, όταν αυτά απέχουν τη μέγιστη δυνατή απόσταση [1].

***Βηματική τάση (Step voltage)*:** Η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος 1 m, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο (Σχήμα 1.5) [1].



Σχήμα 1.5: Τάση επαφής και βηματική τάση

***Υλικό επιφανείας (Surface material)*:** Ένα υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και αποτελείται από, αλλά δεν περιορίζεται σε, πέτρα ή χαλίκι, άσφαλτο, ή τεχνητά υλικά. Το υλικό επιφανείας, ανάλογα με την ειδική αντίστασή του, επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει το σύστημα γείωσης και τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής [1].

***Συμμετρικό ρεύμα πλέγματος (Symmetrical grid current)*:** Το κλάσμα του συμμετρικού ρεύματος σφάλματος προς γη που ρέει ανάμεσα στο πλέγμα γείωσης και τη γη που το περιβάλλει (Εξ. (1.2)) [1].

$$I_g = S_f . I_f \qquad (1.2)$$

όπου

I_g το rms συμμετρικό ρεύμα πλέγματος σε A

I_f το rms συμμετρικό ρεύμα σφάλματος προς γη σε A

S_f ο συντελεστής διαίρεσης του ρεύματος σφάλματος.

***Μεταφερόμενη τάση (Transferred voltage)*:** Μια ειδική περίπτωση της τάσης επαφής όπου μια τάση μεταφέρεται προς ή από τον υποσταθμό ή σε ένα απόμακρο σημείο εξωτερικό της τοποθεσίας του υποσταθμού [1].

***Λόγος X/R (X/R ratio)*:** Λόγος της αντίδρασης του συστήματος προς την αντίσταση. Είναι ενδεικτικός του ρυθμού της ελάττωσης της dc αρχικής συνιστώσας. Ένας μεγάλος *X/R* λόγος αντιστοιχεί σε μια μεγάλη σταθερά χρόνου και ένα χαμηλό ρυθμό ελάττωσης [1].

***Ενεργό μήκος (Effective length)*:** Το μήκος ενός ηλεκτροδίου γείωσης πέραν του οποίου η αύξησή του δε συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η τιμή του ενεργού μήκους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τον χρόνο μετώπου του κρουστικού ρεύματος του κεραυνού, και μειώνεται τόσο περισσότερο, όσο μικρότερο είναι το μέτωπο της κυματομορφής. Το ενεργό μήκος ενός αγωγού δίνεται από την Εξ. (1.3) [1,8].

$$I_e = 1.4.\sqrt{(\rho.T)} \qquad (1.3)$$

όπου

ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους (Ωm)

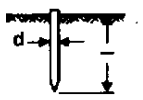
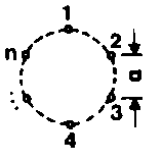
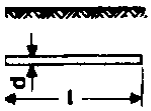
T ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής (μsec)

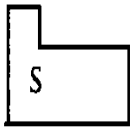
Το ενεργό μήκος ενός αγωγού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης όταν αυτό θα χρησιμοποιηθεί και για λόγους αντικεραυνικής προστασίας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος γείωσης της ανεμογεννήτριας.

1.4 Αντίσταση Γείωσης

Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου για μια δοσμένη εκφόρτιση ρεύματος είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα σε ένα σημείο του ηλεκτροδίου και ενός απομακρυσμένου σημείου της επιφάνειας του εδάφους και του ρεύματος εκφόρτισης. Η αντίσταση γείωσης την οποία παρέχει ένα ηλεκτρόδιο γείωσης εκφράζει την αντίσταση διαβάσεώς του, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το περιβάλλον έδαφος. Συνεπώς, είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος, και ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η αντίσταση γειώσεως R_γ είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως R_δ. Οι αντιστάσεις για τους διάφορους τύπους γειωτών παρατίθενται στον Πίνακα 1.1 [9,10,12,13].

Πίνακας 1.1: Αντιστάσεις διαφόρων τύπων γειωτών

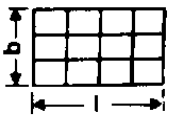
	**Πάσσαλος** **(Πλάγια όψη)**	$R_{Al} = \frac{\rho}{2\pi l_{eff}} . \ln(\frac{4 l_{eff}}{d}), \quad l_{eff} = l - 0,5$ (1) (*)
	**Πολύγωνο πασσάλων** **(Κάτοψη)** $\alpha \geq 1$	$R_A = \kappa . \frac{1}{n} . R_{Al}$ **όπου R_{Al} η αντίσταση του ενός πασσάλου**
	**Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής** **(Πλάγια όψη)** **Βάθος h=0,5-1,0 m**	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} . ln(\frac{2l}{d})$ (*)



Θεμελιακή γείωση

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi}.S}$$

$$R_4 \cong \frac{2}{\pi}.\frac{\rho}{D} \quad (*)$$



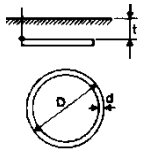
Πλέγμα σε βάθος 0,5 -1,0 m

(Κάτοψη)

$$D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}}$$

$$R_A = \frac{\rho}{2d} + \frac{\rho}{lg}$$, *lg*=**συνολικό μήκος αγωγού**

$$R_A = \frac{\rho}{2D} \quad (*)$$

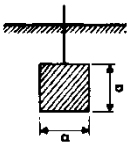


Κυκλικός γειωτής

(Κάτοψη)

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D}.ln\frac{8D}{d}.ln(1 + \frac{ln\frac{2D}{t}}{ln\frac{8D}{d}})$$

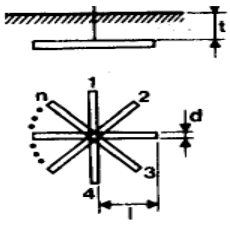
$$R = \frac{2\rho}{\pi D} \quad (2) \quad (*)$$



Γειωτής πλάκας

(Πλάγια όψη S [m^2])

$$R = \frac{\rho}{4,5\alpha} \quad (3) \quad (*)$$

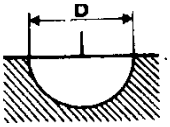


n=1 ⇨ $$R = \frac{\rho}{2\pi l}.ln(\frac{l^2}{0.27td})$$

n=2 ⇨ $$R = \frac{\rho}{2\pi l}.ln(\frac{l^2}{0.25td})$$

n=3 ⇨ $$R = \frac{\rho}{2\pi l}.ln(\frac{l^2}{0.22td})$$

n=4 ⇨ $$R = \frac{\rho}{2\pi l}.ln(\frac{l^2}{0.09td})$$



Ημισφαιρικός γειωτής

$$R = \frac{\rho}{\pi D} \quad (4)$$

(*) Προσεγγιστικός τύπος

(1) Όπου d το ισοδύναμο πάχος του αγωγού, $d = \sqrt{4\frac{A}{\pi}}$

(2) Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος D,

D=0,33 U , U το μήκος του αγωγού

(3) Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνες θέτουμε $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S η επιφάνεια

(4) Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D = 1{,}57\sqrt[3]{V}$

1.5 Συστήματα Γείωσης

Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη συστημάτων γείωσης είναι: η πολυγωνική διάταξη, η γείωση με πλάκες, η περιμετρική γείωση, η γείωση τύπου «Ε» και η θεμελιακή γείωση [11].

1.5.1 Πολυγωνική Διάταξη

Κατασκευάζεται από ραβδοειδείς γειωτές οι οποίοι τοποθετούνται στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου, συνήθως τριγώνου (τριγωνική γείωση). Οι ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης αναλόγου διατομής με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης (συνήθως 50 mm^2 Cu). Η απόσταση μεταξύ των ράβδων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 φορά του βάθους έμπηξης. Πολλές φορές για λόγους έλλειψης χώρου ή ευκολίας, αντί της πολυγωνικής διάταξης οι ράβδοι μπορούν να τοποθετηθούν σε ευθεία διάταξη, σε «Τ» διάταξη, σε κυκλική διάταξη κ.λπ.

1.5.2 Γείωση με πλάκες

Κατασκευάζεται από πλάκες οι οποίες τοποθετούνται σε τυχαία διάταξη αρκεί η απόσταση μεταξύ των να είναι τουλάχιστον 3 m. Οι πλάκες συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης αναλόγου διατομής με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης (συνήθως 50 mm^2 Cu).

1.5.3 Περιμετρική γείωση

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

1.5.4 Γείωση τύπου «Ε»

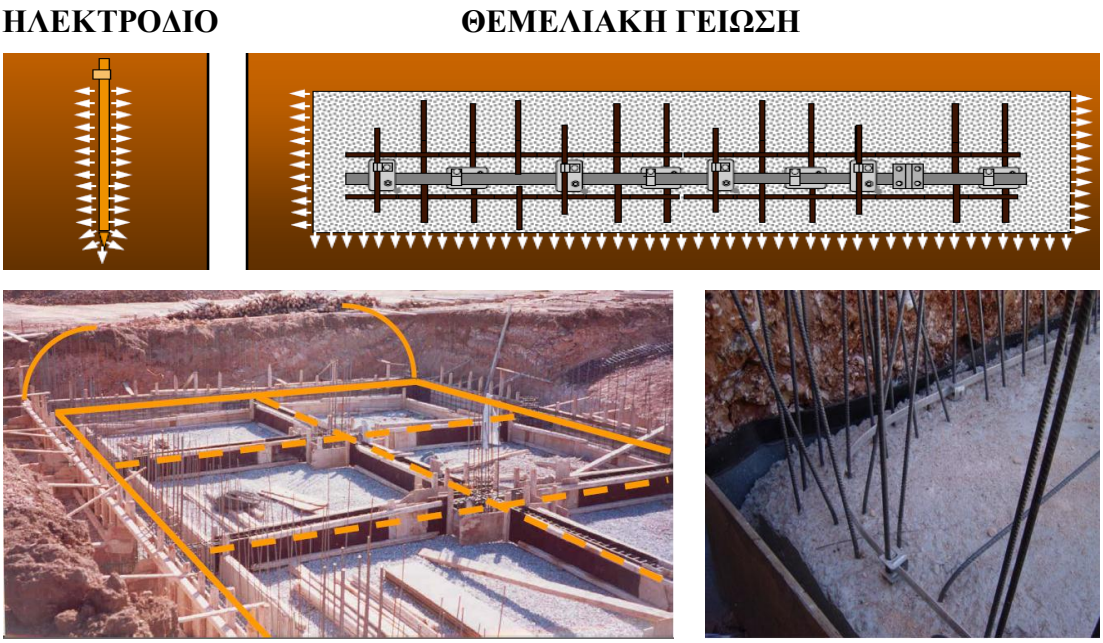
Κατασκευάζεται από ένα στοιχείο «Π» και ένα ή παραπάνω στοιχεία «Γ» και τοποθετείται εντός σκάμματος βάθους τουλάχιστον 1 m, πλάτους τουλάχιστον 75 cm και μήκος αναλόγως του αριθμού των στοιχειών «Γ» που θα τοποθετηθούν

1.5.5 Θεμελιακή γείωση

Είναι ένα αγώγιμο σώμα θαμμένο στο έδαφος κάτω από τα θεμέλια ενός κτιρίου ή εγκιβωτισμένο στο σκυρόδεμα της θεμελίωσης του κτιρίου, σε μορφή κλειστού δακτυλίου (Ορισμός 541.3.Z1 Ευρωπαϊκού Προτύπου HD 60364-5-54). Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης φαίνεται στο Σχήμα 1.4 [14].

Κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας και σπανιότερα αγωγού κυκλικής διατομής, που τοποθετείται εντός των συνδετήριων δοκαριών των πέδιλων ή στα περιμετρικά τοιχία των θεμελίων του κτιρίου, σε μορφή κλειστού δακτυλίου. Για κτίρια μεγάλης περιμέτρου συνιστάται η τοποθέτηση εγκαρσίων ή διαμηκών τμημάτων ταινίας (πάντα εντός σκυροδέματος θεμελίων), έτσι ώστε κανένα σημείο του υπογείου να μην απέχει περισσότερο από 10 m από το γειωτή. Η τιμή της αντίστασης της γείωσης μειώνεται όσο μεγαλώνει το μήκος της ταινίας, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην περίπτωση της περιμετρικής γείωσης με ταινία. Σύμφωνα με το άρθρο 27 των HD 384 η διατομή της ταινίας πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 mm² με ελάχιστο πάχος 3 mm. Όπως αναφέρεται στο ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 62305-3, ως θεμελιακό ηλεκτρόδιο μπορεί

να εγκατασταθεί μέσα στο σκυρόδεμα γαλβανισμένη χαλύβδινη ταινία και να συνδεθεί άμεσα με τις χαλύβδινες ράβδους του οπλισμού. Ο χαλκός και ο ανοξείδωτος χάλυβας στο σκυρόδεμα είναι επίσης αποδεκτά και μπορούν να συνδέονται άμεσα με το χαλύβδινο οπλισμό [ ]. Επίσης και στο ευρωπαϊκό, ελληνικό Πρότυπο HD 60364-5-54 αναφέρεται ρητά ότι το θεμελιακό ηλεκτρόδιο μπορεί να αποτελείται από χαλύβδινες ταινίες ή από χαλύβδινους αγωγούς ή από χάλκινους αγωγούς.



Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση θεμελιακής γείωσης-Εφαρμογή σε δομική κατασκευή

1.5.5.1 Πλεονεκτήματα θεμελιακής γείωσης έναντι άλλων μορφών γειώσεων

Η εφαρμογή και η συνεχής λειτουργία της θεμελιακής γείωσης σε μια εγκατάσταση-κτίριο παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα [6]:

- Χαμηλή αντίσταση γείωσης

Η θεμελιακή γείωση έχει σχεδόν πάντοτε χαμηλή τιμή αντίστασης, μικρότερη έναντι οποιουδήποτε άλλου τύπου γείωσης, γιατί καθώς συνδέεται ηλεκτρικά με τον οπλισμό του

κτιρίου προστίθεται σε όλο το μήκος του οπλισμού και εγκαθίσταται σε σχετικά μεγάλο βάθος όπου η συγκέντρωση της υγρασίας στο υπέδαφος είναι μεγαλύτερη, αποκτώντας έτσι όλες τις ιδιότητες μιας ιδανικής γείωσης.

- Σταθερή τιμή αντίστασης

Η θεμελιακή γείωση παρουσιάζει σταθερή τιμή αντίστασης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους διότι λόγω του βάθους που εγκαθίσταται, η σύσταση του υπεδάφους στις διάφορες εποχές του έτους είναι σχεδόν σταθερή.

- Μηχανική προστασία-Αντοχή από διάβρωση

Η ύπαρξή της μέσα στο σκυρόδεμα της θεμελίωσης παρέχει πλήρη μηχανική προστασία και μακροχρόνια αντοχή σε διάβρωση. Η διάρκεια ζωής της θεμελιακής γείωσης είναι όση και του κτιρίου, αρκεί να έχει εγκατασταθεί όλο το μήκος του γειωτή εντός της θεμελίωσης και να περιβάλλεται τουλάχιστον με πάχος σκυροδέματος 5 cm, προστατευόμενος έτσι από κάθε μηχανική καταπόνηση, όπως εκσκαφές συνεργείων, κηπουρικές εργασίες και από κάθε ηλεκτροχημική διάβρωση.

- Εξάλειψη βηματικών τάσεων

Η θεμελιακή γείωση εξαιτίας της μικρής αντίστασης που έχει και λόγω του βάθους που βρίσκεται, οι τυχόν βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται εκτός του κτιρίου είναι συνήθως μικρότερες από τις μέγιστες αποδεκτές, χωρίς την ανάγκη λήψης πρόσθετων μέτρων που απαιτούν οι άλλες μορφές γειώσεων.

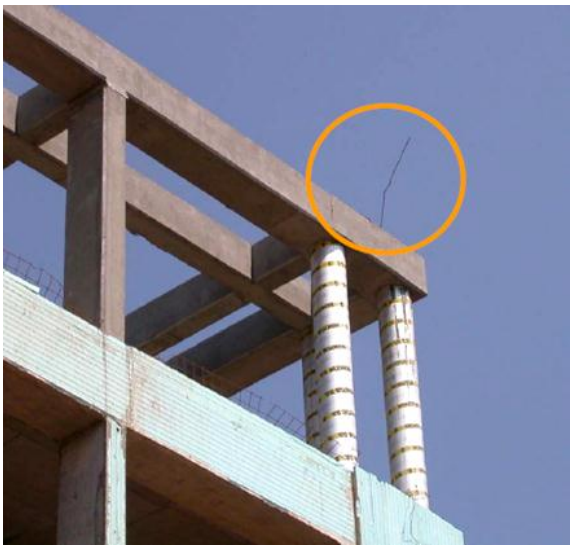
- Ισοδύναμες συνδέσεις

Η διασύνδεση του οπλισμού με τη θεμελιακή γείωση και η έκτασή της περιμετρικά του κτιρίου, καθιστούν την προστασία από τάσεις επαφής πολύ εύκολη, καθώς οι ισοδυναμικές επιφάνειες που δημιουργούνται δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη επικίνδυνων τάσεων σε μηχανήματα και

μεταλλικές εγκαταστάσεις που βρίσκονται στους χώρους αυτούς. Επίσης, όπου απαιτούνται πρόσθετες ισοδυναμικές συνδέσεις, όπως π.χ. είσοδοι κοινωφελών δικτύων, μηχανοστασίων, ειδικών νοσοκομειακών χώρων κ.λπ., είναι εύκολη η πρόβλεψη αναμονών σε οποιαδήποτε θέση του κτιρίου.

- Ευελιξία για εγκατάσταση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ)

Έναντι άλλων μορφών γειώσεων, η θεμελιακή γείωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα και για γείωση Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (ΣΑΠ) μειώνοντας σημαντικά το κόστος σε μια εγκατάσταση (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Εφαρμογή θεμελιακής γείωσης ως ΣΑΠ

- Χαμηλό κόστος

Το απαιτούμενο κόστος της θεμελιακής γείωσης είναι σημαντικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο των άλλων μορφών γειώσεων που παρέχουν το ίδιο με τη θεμελιακή γείωση αποτέλεσμα, χωρίς να ληφθεί υπόψιν τόσο η παράμετρος της αντοχής και της διαχρονικότητας, όσο και των ανωτέρω πλεονεκτημάτων της θεμελιακής γείωσης. Για την εγκατάστασή της δεν απαιτείται

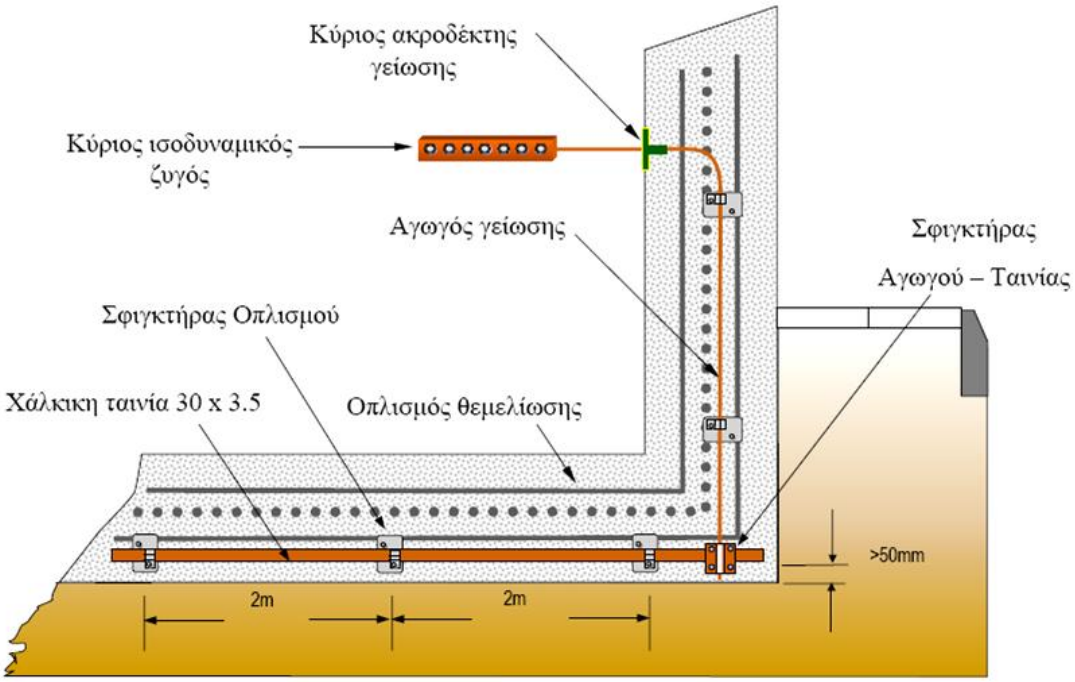
ιδιαίτερα μεγάλος χώρος ούτε επιπλέον χωματουργικές εργασίες, όπως στις άλλες μορφές γειώσεων.

1.5.5.2 Σχεδιασμός θεμελιακής γείωσης

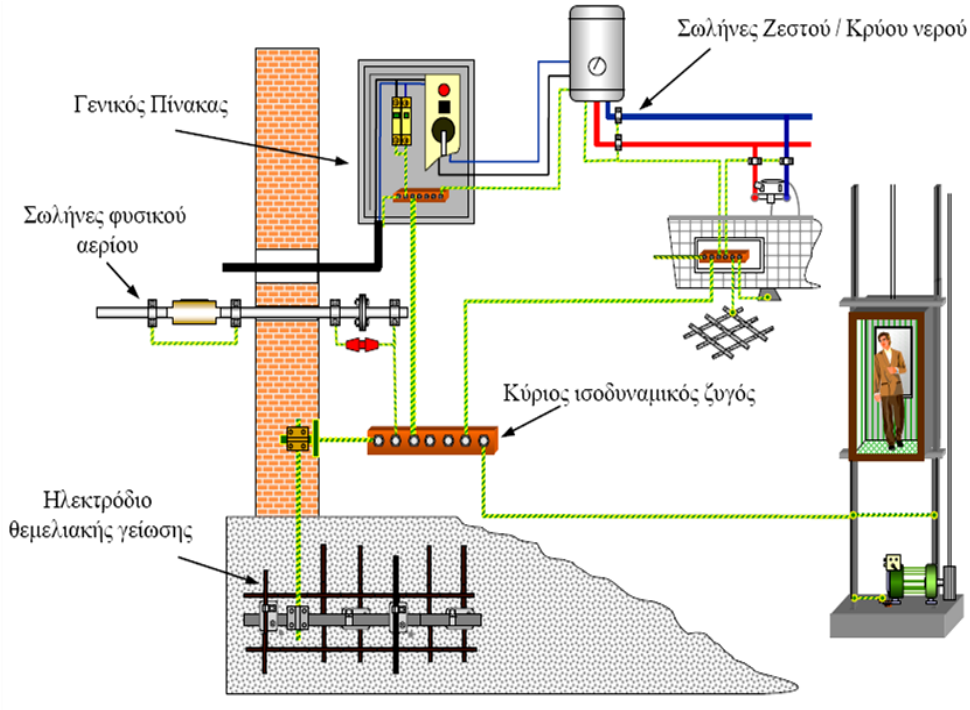
Οι οδηγίες για το σχεδιασμό της θεμελιακής γείωσης αφορούν τη θεμελίωση κτιρίου σε άμεση επαφή με το έδαφος και για εφαρμογή της ως γείωση [15]:

- ηλεκτρικής εγκατάστασης που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ HD 384
- ισοδυναμικών συνδέσεων που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ HD 384
- εγκατάστασης ΣΕΠ που ικανοποιούν τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ΕΛΟΤ HD 384, ΕΛΟΤ EN 62305 και τα Διεθνή IEC 62305.

Για το σχεδιασμό συστημάτων θεμελιακής γείωσης επιβάλλεται να πληρούνται όλες οι προδιαγραφές όπως αυτές καθορίζονται από τα εν λόγω Πρότυπα. Σχηματικές απεικονίσεις εφαρμογών θεμελιακής γείωσης και χρήσης Κύριων και Συμπληρωματικών Ισοδυναμικών συνδέσεων σε θεμελιακή γείωση φαίνονται στα Σχήματα 1.6 και 1.7 αντίστοιχα ενώ απεικόνιση θεμελιακής γείωσης σε πρακτική εφαρμογή φαίνεται στο Σχήμα 1.8.

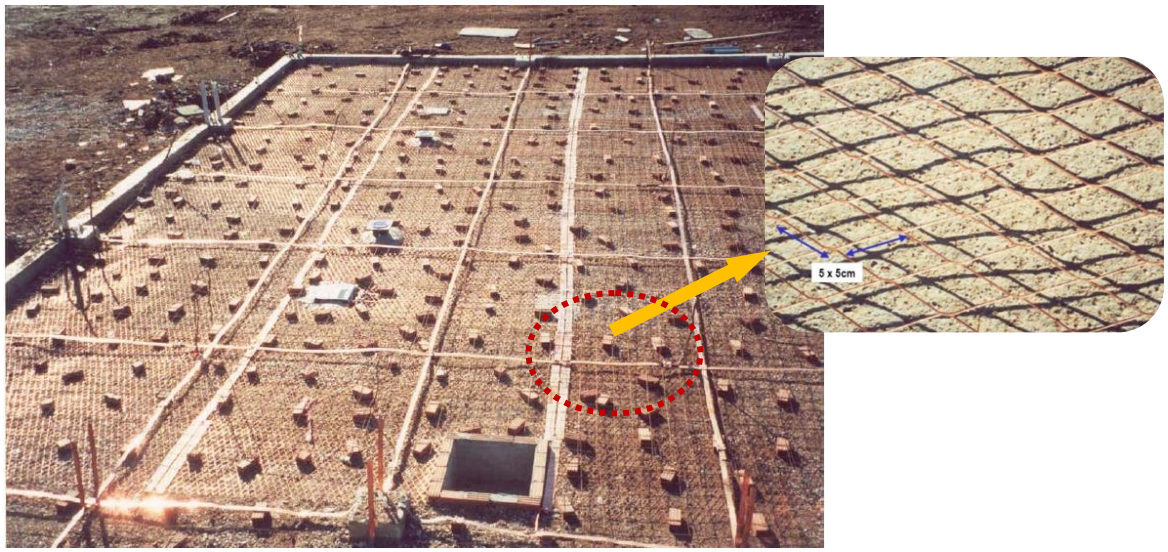


Σχήμα 1.6: Σύνδεση ηλεκτροδίου θεμελιακής γείωσης με κύριο ζυγό γείωσης



Σχήμα 1.7: Κύριες και Συμπληρωματικές Ισοδυναμικές συνδέσεις (ΚΙΣ-ΣΙΣ) εισερχόμενων μεταλλικών δικτύων σε θεμελιακή γείωση

Σχήμα 1.8(α): Εφαρμογές θεμελιακής γείωσης



Σχήμα 1.8(β): Εφαρμογές θεμελιακής γείωσης

1.6 Αντίσταση Εδάφους

Το έδαφος είναι το ανώτατο στρώμα του φλοιού της γης. Αποτελεί το μέσο στήριξης και θρέψης των φυτών, συνιστά τη βάση της αγροτικής και δασικής παραγωγής, το φυσικό φίλτρο και το προστατευτικό στρώμα των αποθεμάτων του υπόγειου νερού καθώς επίσης και το χώρο όπου ζουν μεγάλοι αριθμοί μικροοργανισμών που συμμετέχουν στην διαδικασία ανακύκλωσης στοιχείων όπως του αζώτου και του άνθρακα.

1.6.1 Φυσικές ιδιότητες

Οι βασικές φυσικές ιδιότητες του εδάφους αναφέρονται παρακάτω.

- ***Σύσταση***

Η σύσταση του εδάφους διαμορφώνεται από την αναλογία των υλικών που το αποτελούν (μίγμα ανόργανων και οργανικών υλικών, νερού, αέρα).

- ***Υφή***

Η υφή του εδάφους καθορίζεται από το μέγεθος των ανόργανων υλικών.

- ***Πορώδες και ειδικό βάρος***

Το πορώδες καθορίζεται από τον όγκο που έχουν τα διάκενα του εδάφους. Το πραγματικό ειδικό βάρος (λόγος του βάρους ενός όγκου κόκκων εδάφους προς ίσο όγκο νερού στους 4 ^{o}C) είναι γύρω στα 2,5.

- ***Υγροσκοπικότητα***

Η υγροσκοπικότητα του εδάφους αναφέρεται στην ικανότητα του εδάφους πρόσληψης και απόδοσης υγρασίας. Όταν όλα τα διάκενα του εδάφους είναι γεμάτα νερό η υγροσκοπικότητα του εδάφους είναι μέγιστη.

- ***Ειδική θερμότητα***

Είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους κατά 1 ^{o}C.

1.6.2 Χημικές ιδιότητες

- ***pH***

Το pH καθορίζει την οξύτητα ή την αλκαλικότητα του εδάφους. Ειδικότερα, εκφράζει τον αρνητικό λογάριθμο της συγκεντρώσεως των ιόντων υδρογόνου σε ένα μέσο (διάλυμα). Όταν το pH παίρνει τιμές κάτω από 7, το διάλυμα λέγεται όξινο ενώ όταν οι τιμές είναι πάνω από 7, αλκαλικό. Η ανάπτυξη των φυτών και η βλάστηση κάθε είδους επηρεάζεται από το pH του εδάφους γιατί καθορίζει την απορρόφηση και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων του εδάφους. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το pH είναι η βροχόπτωση, το είδος των καλλιεργούμενων φυτών και η παρουσία θρεπτικών συστατικών τα οποία προέρχονται κυρίως από τα λιπάσματα και γενικότερα από τα βελτιωτικά του εδάφους.

1.6.3 Σύσταση του εδάφους

Το έδαφος αποτελείται κατά το μισό περίπου του όγκου του από στερεά συστατικά (ανόργανα και οργανικά) και κατά το άλλο μισό από αέρα και νερό. Τα ανόργανα υλικά περιέχουν πέτρες, άμμο, πηλό και άργιλο σε διάφορα μεγέθη. Τα οργανικά υλικά περιέχουν υπολείμματα φυτών και ζώων. Το έδαφος περιέχει και ζωντανούς οργανισμούς κυρίως μικροοργανισμούς (βακτήρια, μύκητες).

1.6.4 Ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται κυρίως από την υγρασία, τη θερμοκρασία και το είδος του εδάφους (και περιεκτικότητα σε προσμίξεις), τη μορφή της τάσης και το ηλεκτρικό

ρεύμα. Ανάλογα με την τιμή της καθορίζεται το είδος, το εμβαδόν της επιφάνειας και το βάθος του συστήματος γείωσης, ώστε να έχουμε την επιδιωκόμενη τιμή της αντίστασης γείωσης [8,16]. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους συνοψίζονται παρακάτω:

- ***Είδος εδάφους***

Όσο ξηρότερο και πετρώδες είναι το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική, περιφερειακά του ηλεκτροδίου γειώσεως και μη γραμμική. Στον Πίνακα 1.2 δίνονται ενδεικτικά οι τιμές ειδικής αντίστασης σε διάφορα είδη εδάφους

Πίνακας 1.2: Ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης σε διάφορα είδη εδάφους [13]

ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ωm)
Ελώδες	5-40
Αργιλώδες	20-200
Αμμώδες	200-2500
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	2000-3000
Αμμόλιθος	2000-3000
Λιθώνας	>30000
Γρανίτης	>50000

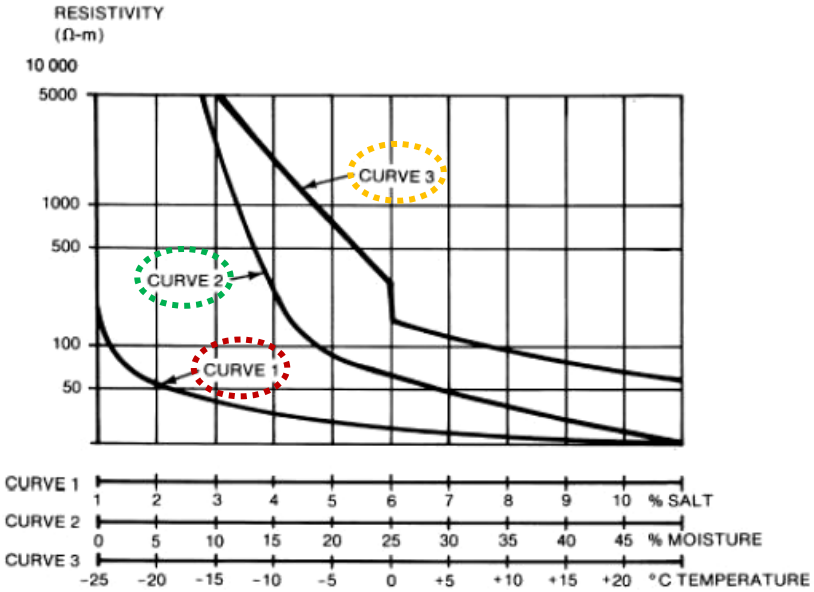
- ***Υγρασία***

Η ειδική αντίσταση μειώνεται αυξανομένης της υγρασίας του εδάφους. 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%. Το έδαφος ξηραίνεται επιφανειακά, αλλά σε βάθος κάτω του μισού μέτρου (0,5 m) διατηρείται συνήθως υγρό.

- ***Θερμοκρασία***

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους λόγω της μεαταβολής της θερμοκρασίας φτάνει περίπου στο 130% κατά τη διάρκεια του έτους. Η ειδική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο Σχήμα 1.9 απεικονίζεται η επίδραση της υγρασίας, της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα στην ειδική αντίσταση του εδάφους.



Σχήμα 1.9: Επίδραση της υγρασίας, θερμοκρασίας και αλάτων στην ειδική αντίσταση του εδάφους

- ***Μορφή τάσης***

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10 m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

- ***Ηλεκτρικό ρεύμα***

Η ειδική αντίσταση εδάφους 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 από το μέγεθος και τη διάρκεια της ροής ρεύματος που προκαλεί ξήρανση του εδάφους και επομένως αύξηση της αντίστασής του. Ανεκτό όριο για την πυκνότητα ρεύματος είναι τα 200 A/m^2 με διάρκεια 1 sec.

1.6.5 Μέτρηση ειδικής αντίστασης Εδάφους- Καθορισμός της πολυστρωματικής δομής του εδάφους

Βασική παράμετρος στη μελέτη του συστήματος γείωσης μιας εγκατάστασης είναι η δομή του εδάφους ακριβώς κάτω από αυτήν. Συνήθως η δομή του εδάφους είναι πολύπλοκη, διότι η ειδική του αντίσταση δεν έχει μία σταθερή τιμή, αλλά διαφέρει ανάλογα με το βάθος το οποίο εξετάζεται, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την υγρασία, και άλλες συνθήκες. Στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης είθισται να μοντελοποιείται το έδαφος, του οποίου η ειδική του αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος, ακολουθώντας μια μαθηματική σχέση, όπως την εκθετική μείωση ή αύξηση, ή συνηθέστερα το διαχωρισμό της γης σε στρώματα με σταθερή ειδική αντίσταση το καθένα. Η μορφή των στρωμάτων αυτών δύναται να είναι οριζόντια, που αποτελεί την πιο συνηθισμένη περίπτωση, κατακόρυφη, σφαιρική, κ.λπ. Προς καθορισμό του μοντέλου γης που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη, χρησιμοποιείται μια σειρά μετρήσεων που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια της γης.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού είναι μέτρο του πόσο ισχυρά αντιστέκεται το υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικό με χαμηλή τιμή ειδικής αντίστασης επιτρέπει την εύκολη διέλευση του ρεύματος. Η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το ohm·meter (Ωm) και δίνεται από την σχέση:

$$\rho = R\,\frac{A}{l} \qquad (1.7)$$

όπου

R η ηλεκτρική αντίσταση ενός ομοιόμορφου δείγματος του υλικού (Ω)

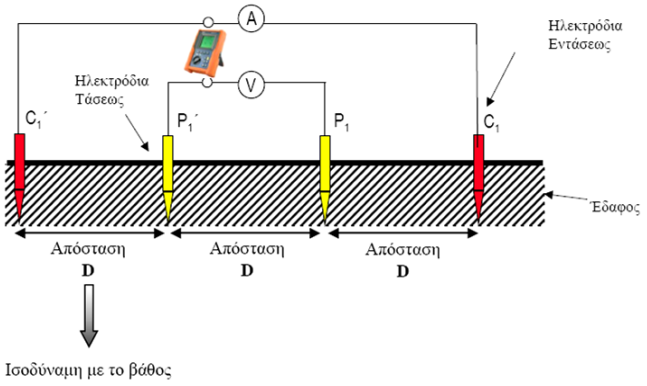
A η διατομή του δείγματος (m^2)

l το μήκος του δείγματος (m)

Οι βασικές μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους περιγράφονται στη συνέχεια.

1.6.5.1 Μέθοδος Wenner

Στο Σχήμα 1.10 δίνεται το σύστημα μέτρησης των τεσσάρων ηλεκτροδίων του Wenner. Τα τέσσερα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε μια ευθεία οριζόντια γραμμή, και απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους, *D*. Το εξωτερικό ζευγάρι ηλεκτροδίων είναι του ρεύματος, και το εσωτερικό ζευγάρι είναι της τάσης [8].



Σχήμα 1.10: Μέτρηση ειδικής αντίστασης με τη διάταξη Wenner

Στο ένα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος το ρεύμα κατευθύνεται προς τη γη και επιστρέφει δια μέσου της στο άλλο. Το εσωτερικό ζευγάρι των ηλεκτροδίων μετρά την αύξηση του δυναμικού της γης ή την τάση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια αυτά. Για διαφορετικές αποστάσεις *D*, παίρνουμε μια δεδομένη τιμή για το ρεύμα που εισρέει στη γη. Όσο αυξάνεται το *D*, τόσο βαθύτερα εισρέει το ρεύμα στη γη. Η δομή και οι παράμετροι του εδάφους προσδιορίζονται από τις σειρές των μετρήσεων ρεύματος και δυναμικού που παίρνουμε με τη μέθοδο Wenner, επιλύοντας το πρόβλημα της αντιστροφής ηλεκτρικού πεδίου. Εφαρμόζοντας στα άκρα των ηλεκτροδίων ρεύματος ρεύμα σταθερής έντασης, η τάση που μετράται στα άκρα του εσωτερικού ζευγαριού ηλεκτροδίων πρέπει να μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση *D* ακόμη και στην περίπτωση που το μοντέλο γης είναι ομοιογενές.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους για το Σχήμα 1.12 δίνεται από τον τύπο [1,17,18]:

$$\rho = R\,\frac{4\pi D}{1+\frac{2D}{\sqrt{D^2+4d^2}}-\frac{D}{\sqrt{D^2+d^2}}} \qquad (1.8)$$

όπου

ρ η ειδική αντίσταση εδάφους (Ωm)

R η μετρούμενη αντίσταση (Ω)

D η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων (m)

d το βάθος όπου φτάνουν τα ηλεκτρόδια (m)

Αν d << D τότε η ειδική αντίσταση δίνεται από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$\rho = 2\pi DR \qquad (1.9)$$

Με τους παραπάνω τύπους υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση ρ σε βάθος d σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην ειδική αντίσταση από στρώμα σε στρώμα.

1.6.5.2 Μέθοδος των τριών ηλεκτροδίων ή πτώσης δυναμικού (fall of potential)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τρία ηλεκτρόδια (E,P,C), εκ των οποίων το ένα είναι θαμμένο σε βάθος L_r μεταβαλλόμενο. Τα δύο άλλα ηλεκτρόδια, γνωστά ως ηλεκτρόδια αναφοράς, θάβονται σε μικρό βάθος, κατακόρυφα. Η σύνδεσή τους φαίνεται στο Σχήμα 1.11 [19].

Η ειδική αντίσταση του εδάφους σε συνάρτηση με το βάθος δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{2\pi L_r R}{\ln\left(\frac{8L_r}{d}\right)-1} \qquad (1.10)$$

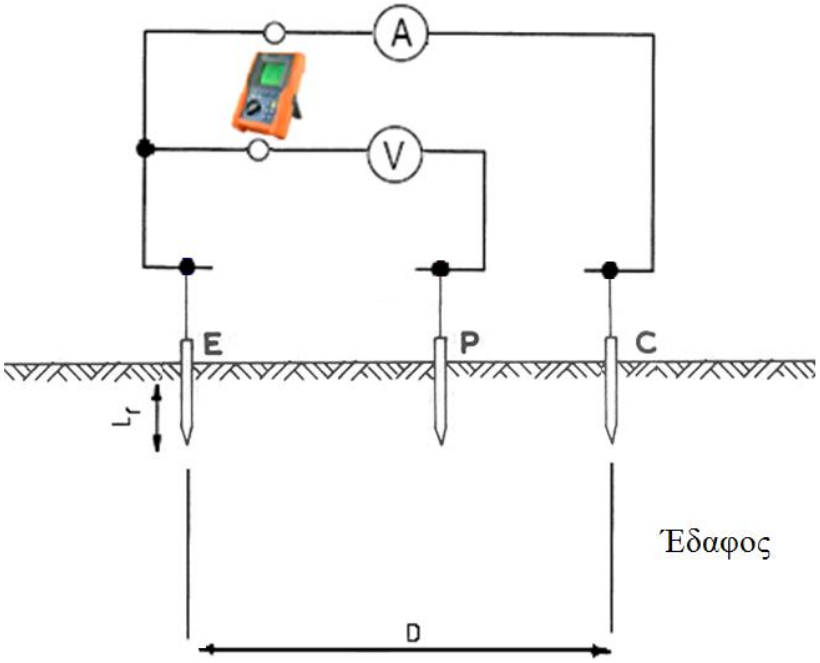
Όπου

ρ η ειδική αντίσταση εδάφους (Ωm)

L_r το βάθος του ηλεκτροδίου E (m)

d η διάμετρος (m)

R η μετρούμενη μέσω των οργάνων αντίσταση (Ω)



Σχήμα 1.11: Διάταξη για την Μέθοδο των τριών ηλεκτροδίων

1.6.5.3 Σύγκριση μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης

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

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

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

της ειδικής αντίστασης στην περιοχή του πλέγματος με την προϋπόθεση ότι το έδαφος θεωρείται ομογενές [19].

2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

2.1 Γενικά

Ένα σύστημα γείωσης σχεδιάζεται και εγκαθίσταται με σκοπό τον περιορισμό των κλίσεων δυναμικού γης σε τέτοια επίπεδα τάσης και ρεύματος ώστε, υπό συνθήκες σφάλματος, να μην κινδυνεύουν άτομα, ούτε όμως ο εξοπλισμός. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης πρέπει να γίνεται κάτω από καθορισμένα στάδια διαδικασίας προκειμένου να κριθεί κατάλληλο για χρήση [1].

2.2 Διαδικασία Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης

Μια ορθή και ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού συστήματος γείωσης αποτελείται από τα εξής βήματα [3]:

- Συλλογή πληροφοριών για την περιοχή όπου θα γίνει η εγκατάσταση. Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1 και ανάλογη επιλογή του μοντέλου εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό (ομοιογενές, διστρωματικό κλπ).
- Προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού, θεωρώντας ως ρεύμα σφάλματος $3I_0$ το μεγαλύτερο αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος και χρόνο t_c το μέγιστο πιθανό χρόνο απόσβεσης.
- Έλεγχος της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης ως προς τα επιτρεπτά όρια
- Επιλογή του χρόνου έκθεσης στο σφάλμα, t_s
- Ένα πρόχειρο σχέδιο πρέπει να περιλαμβάνει έναν αγώγιμο βρόχο που περικλείει ολόκληρη την περιοχή προς γείωση καθώς και τους απαραίτητους συνδέσμους της γείωσης με τις συσκευές

του υποσταθμού. Η εκτίμηση των αποστάσεων μεταξύ των αγωγών γείωσης και της θέσης των ράβδων γείωσης πρέπει να γίνει βάσει της τιμής του *μέγιστου ρεύματος γείωσης*, IG. Εκτίμηση της αντίστασης γείωσης, για ομοιογενές έδαφος αρχικά και υπολογισμός της με μεγαλύτερη ακρίβεια στη συνέχεια, δεδομένου του μοντέλου εδάφους και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

- Για το τελικό σχέδιο του συστήματος γείωσης το ρεύμα IG πρέπει να υπολογιστεί βάσει της πιθανής επέκτασης του υποσταθμού στο μέλλον, του συντελεστή εξασθένησης D_f και του μέγιστου αναμενόμενου μελλοντικά ρεύματος σφάλματος το οποίο διέρχεται από το σύστημα γείωσης προς την άπειρη γη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη και η κατανομή του ρεύματος σφάλματος, ώστε η υλοποίηση να μην είναι υπερεκτιμημένη.
- Αν στο πρόχειρο σχέδιο η τιμή της GPR (*Μέγιστο Δυναμικό Γείωσης Ground Potential Rise*) είναι μικρότερη του επιτρεπτού ορίου για την τάση επαφής, περαιτέρω ανάλυση δεν είναι απαραίτητη. Ακολουθεί η προσθήκη επιπλέον αγωγών για τη σύνδεση των διαφόρων συσκευών του υποσταθμού με τη γείωση.
- Υπολογισμός της τάσης βρόχου και της βηματικής τάσης
- Αν οι τάσεις επαφής και βηματική είναι μικρότερες των επιτρεπτών ορίων, η ολοκλήρωση της σχεδίασης απαιτεί μόνο την προσθήκη συνδέσεων των συσκευών του υποσταθμού στο σύστημα γείωσης.
- Αν οι τάσεις επαφής και βηματική ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια, απαιτείται αναθεώρηση της σχεδίασης, που μπορεί να περιλαμβάνει επιπρόσθετες ράβδους γείωσης, μείωση της απόστασης μεταξύ των αγωγών του πλέγματος γείωσης κλπ.
- Ακόμα και όταν επιτευχθούν οι κατάλληλες τάσεις επαφής και βηματική, μπορεί να χρειάζεται η προσθήκη επιπλέον ράβδων γείωσης και αγωγών στο πλέγμα. Οι αγωγοί αυτοί είναι

απαραίτητοι στην περίπτωση όπου το πλέγμα είναι σε μεγάλη απόσταση από τις συσκευές του υποσταθμού και είναι δύσκολη η σύνδεσή τους με αυτό. Οι ράβδοι γείωσης μπορεί να είναι αναγκαίοι στη βάση αλεξικεύρανων, στη γείωση των ουδετέρων μετασχηματιστών κλπ. Για το τελικό σχέδιο πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη η τάση από μεταφορά μέσω πχ εναέριων γραμμών.

2.3 Ανάλυση Διαδικασίας Σχεδιασμού Συστήματος Γείωσης

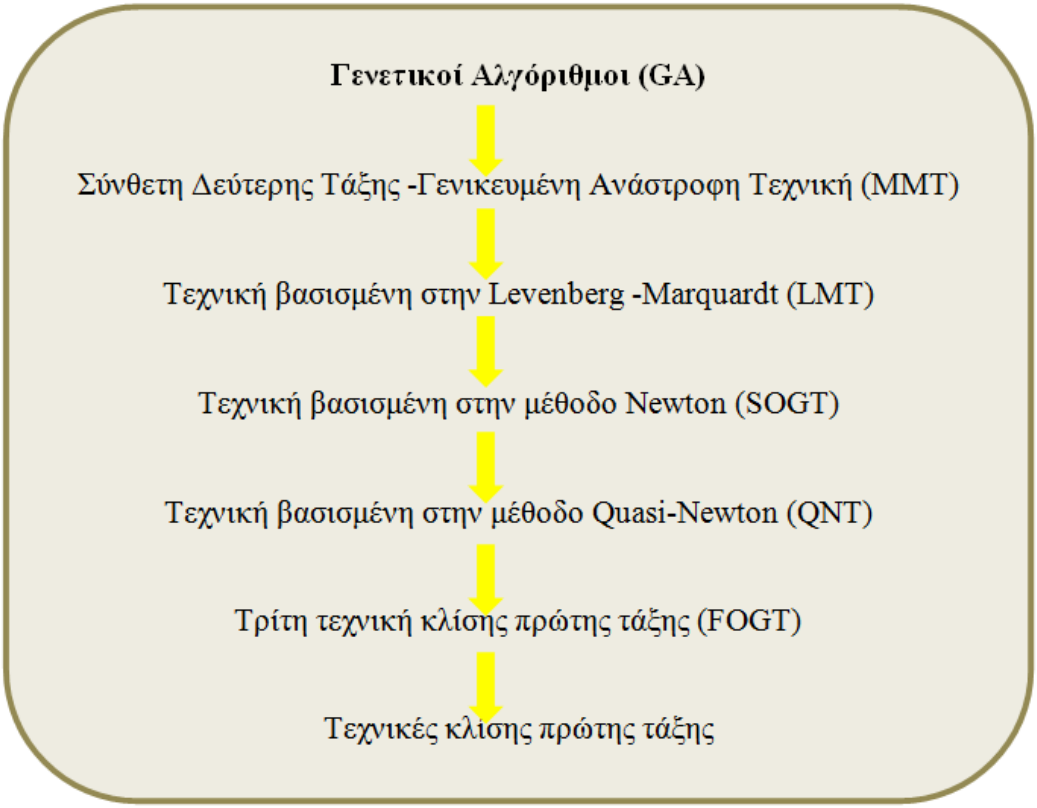
2.3.1 Επιλογή μοντέλου εδάφους

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εδάφους με βάση τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης (οι μέθοδοι μέτρησης περιγράφονται στο Κεφάλαιο 1) αποτελεί ένα από τα βασικότερα μέρη της διαδικασίας σχεδιασμού. Στόχος είναι η προσέγγιση του εδάφους με ένα ή περισσότερα στρώματα, ώστε η απόκλιση της ειδικής αντίστασης σε κάθε σημείο του μοντέλου εδάφους από τις πειραματικές μετρήσεις να είναι η ελάχιστη. Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα εδάφους είναι το ομοιογενές και το διστρωματικό. Το πολυστρωματικό μοντέλο χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου η διακύμανση της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους παρουσιάζει μέγιστα και ελάχιστα [7].

Το μοντέλο ομοιογενούς εδάφους χρησιμοποιείται για εδάφη με ομοιόμορφη ειδική αντίσταση ή ακόμα για μετρήσεις ειδικής αντίστασης που δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους. Μια πιο ακριβής προσέγγιση του εδάφους μπορεί να γίνει με τη χρήση του μοντέλου διστρωματικού εδάφους. Αυτό αποτελείται από το ανώτερο στρώμα, ορισμένου πάχους και ειδικής αντίστασης και το κατώτερο στρώμα άπειρου πάχους και διαφορετικής ειδικής αντίστασης από το υπερκείμενό του.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων, πάχους και ειδικής αντίστασης, του μοντέλου εδάφους έχουν αναπτυχθεί εννέα μέθοδοι. Τρεις από αυτές ανήκουν στην κατηγορία κλίσης πρώτης τάξης, μία στην κατηγορία δεύτερης τάξης (μέθοδος Newton), η πέμπτη βασίζεται στη μέθοδο Levenberg-Marquardt, η έκτη στη Γενικευμένη Ανάστροφη μέθοδο, η έβδομη στην Quasi-Newton, η όγδοη στη μικτή Newton-Γενικευμένη Ανάστροφη μέθοδο και η τελευταία στηρίζεται στους γενετικούς αλγόριθμους και αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. [7].

Στο Σχήμα 3.1 δίνονται οι εννέα μέθοδοι σε σειρά φθίνουσας ακρίβειας και χρόνου σύγκλισης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [7].



Σχήμα 3.1: Μέθοδοι για τον προσδιορισμό του πάχους και ειδικής αντίστασης του μοντέλου εδάφους

2.3.2 Επιλογή Αγωγών

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

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

2.3.2.1. Υλικό

Βασικά κριτήρια για την επιλογή αγωγών αποτελούν το υλικό και η διατομή του αγωγού. Ο χαλκός είναι μια συνήθης επιλογή για το υλικό της γείωσης. Έχει υψηλή αγωγιμότητα και είναι ανθεκτικός στη διάβρωση. Ο χάλυβας είναι επιρρεπής στη διάβρωση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος. Ο επιχαλκωμένος χάλυβας χρησιμοποιείται συνήθως στην κατασκευή των ράβδων γείωσης και σπανιότερα στο πλέγμα γείωσης. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σπάνια στην κατασκευή πλέγματος γείωσης, λόγω της ευαισθησίας του στη διάβρωση από ορισμένα είδη εδαφών και από εναλλασσόμενα ρεύματα σφάλματος. Η διαβρωμένη επιφάνεια του αγωγού από αλουμίνιο δεν είναι αγώγιμη.

2.3.2.2. Διατομή Αγωγών

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

Η ενδεικνυόμενη διατομή του αγωγού γείωσης δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου

A_{mm}^2 η διατομή του αγωγού σε mm2

I η rms τιμή του ρεύματος σφάλματος σε kA

t_c ο χρόνος απόσβεσης του ρεύματος σφάλματος

T_m η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία σε °C

T_α η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C

T_r η θερμοκρασία αναφοράς για τον προσδιορισμό των σταθερών του υλικού σε °C

α_0 ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης στους 0 °C σε $(°C)^{-1}$

α_r ο θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης σε θερμοκρασία T_r σε $(°C)^{-1}$

ρ_r η ειδική αντίσταση του αγωγού γείωσης σε θερμοκρασία T_α σε μΩ-cm

K_0 ισούται με $1/\alpha_0$ ή $(1/\alpha_r) - T_r$ σε °C

TCAP η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου σε $J/(cm^3 \cdot °C)$

Οι παράμετροι α_r , K_0 , T_m , ρ_r και TCAP δίνονται από πίνακες ανάλογα με το υλικό του αγωγού.

2.4 Βασικές αρχές στη σχεδίαση του πλέγματος γείωσης

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή πλέγματος γείωσης για μια εγκατάσταση ή έναν υποσταθμό στοχεύει στην ασφαλή γείωση της εγκατάστασης. Η γείωση πρέπει να παρέχει το μέσο μεταφοράς ηλεκτρικών ρευμάτων στη γη υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες σφάλματος, χωρίς να παραβιάζεται κανένα από τα όρια λειτουργίας και του εξοπλισμού, και χωρίς να επηρεάζεται η συνέχεια της παροχής. Πρέπει ακόμη να εξασφαλίζεται ότι ένα άτομο που βρίσκεται κοντά στις γειωμένες εγκαταστάσεις δεν εκτίθεται στον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

Στη συντριπτική πλειοψηφία των συστημάτων γείωσης που χρησιμοποιούνται, το σχήμα του πλέγματος γείωσης δίνεται από ένα συνδυασμό οριζόντιων αγωγών με κατακόρυφες ράβδους, που ξεκινούν από το πλέγμα και εκτείνονται προς μεγαλύτερο βάθος στη γη (Σχήμα 3.2).

Σχήμα 3.2: Πλέγμα γείωσης εγκατεστημένο στη γη

Μερικοί από τους λόγους που χρησιμοποιούνται κατακόρυφοι ράβδοι σε συνδυασμό με οριζόντιους αγωγούς δίνονται παρακάτω:

- Στους υποσταθμούς ένα ηλεκτρόδιο είναι, από μόνο του, ανεπαρκές για να παρέχει ένα ασφαλές σύστημα γείωσης. Από την άλλη πλευρά, όταν αρκετά ηλεκτρόδια, όπως οι ράβδοι γείωσης, συνδεθούν μεταξύ τους και με όλους τους ουδέτερους και τα μεταλλικά πλαίσια του εξοπλισμού και τις κατασκευές που πρέπει να γειωθούν, το αποτέλεσμα είναι μια διάταξη πλέγματος από ηλεκτρόδια γείωσης, ανεξάρτητα από τον αρχικό σκοπό. Εάν επιπλέον το έδαφος όπου τοποθετείται το πλέγμα έχει χαμηλή ειδική αντίσταση, τότε αυτό το δίκτυο μπορεί να αποτελεί άριστο σύστημα γείωσης.
- Εάν το μέγεθος του ρεύματος που διαχέεται στη γη είναι μεγάλο, τότε πρέπει να εγκατασταθεί πλέγμα με αντίσταση τόσο χαμηλή, ώστε το *GPR* να μην προκαλεί μεταβολές δυναμικού στην επιφάνεια της γης επικίνδυνες για τον άνθρωπο.

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

Ένας συνεχόμενος αγώγιμος βρόχος πρέπει να περιβάλλει όσο δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια στην περιοχή του υποσταθμού. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η υψηλής συγκέντρωσης ρεύματος και συνεπώς αποφεύγεται η δημιουργία υψηλών κλίσεων δυναμικού στην περιοχή του πλέγματος και στις άκρες των αγωγών που προεξέχουν. Αυτό βοηθά την αποφυγή υψηλής συγκέντρωσης ρεύματος και συνεπώς, τη δημιουργία υψηλών κλίσεων δυναμικού στην περιοχή του πλέγματος και στις άκρες των αγωγών που προεξέχουν. Όσο αυξάνεται η περίμετρος της περιοχής που περιβάλλει το πλέγμα, μειώνεται και η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος. Για τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση του πλέγματος, αυτό συμβαίνει μέχρι μια ορισμένη τιμή για την επιφάνεια, την κρίσιμη επιφάνεια (effective area).

- Μέσα στο βρόχο οι αγωγοί γείωσης είναι τοποθετημένοι παράλληλα ή κάθετα κατά μήκος του εξοπλισμού για την καλύτερη αντιμετώπιση βραχυκυκλωμάτων.

- Ένα σύνηθες πλέγμα γείωσης περιλαμβάνει αγωγούς γυμνού χαλκού θαμμένους σε βάθος 0,3-0,5 m από την επιφάνεια, σε απόσταση 3-7 m μεταξύ τους. Οι συνδέσεις μεταξύ των αγωγών στους κόμβους του πλέγματος πρέπει να είναι σταθερές. Οι ράβδοι γείωσης τοποθετούνται στις γωνίες του πλέγματος και στους κόμβους κατά μήκος της περιμέτρου του ώστε να περιορίζουν τις απότομες αυξήσεις της τάσης κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος γείωσης, και σε τέτοιο βάθος ώστε να εισχωρούν στο στρώμα εδάφους με τη μικρότερη ειδική αντίσταση, στην περίπτωση όπου έχουμε επιλέξει διστρωματικό ή πολυστρωματικό μοντέλο. Ράβδοι γείωσης εγκαθίστανται επίσης σε ειδικές περιπτώσεις, κυρίως σε καθοδικά αλεξικέραυνα.
- Στις περιπτώσεις όπου εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις ρευμάτων, όπως για παράδειγμα στη σύνδεση ουδετέρου-γης γεννήτριας ή μετασχηματιστή, απαιτείται αύξηση των διαστάσεων των αγωγών γείωσης, πολλαπλοί αγωγοί γείωσης, καθώς και επέκταση του συστήματος γείωσης ακόμη και εκτός του φράχτη γύρω από τον υποσταθμό.
- Ο λόγος των διαστάσεων του ορθογωνικού πλέγματος κυμαίνεται συνήθως από 1:1 ως 1:3, εκτός αν από την ανάλυση προκύπτουν διαφορετικές τιμές. Η πυκνότητα του πλέγματος έχει σχετικά μικρή επίδραση στη μείωση της αντίστασης του πλέγματος. Ο πρωταρχικός ρόλος των κάθετων και οριζοντίων αγωγών είναι ο έλεγχος των δυναμικών επιφανείας. Επίσης εξασφαλίζουν πολλαπλές διαδρομές για το ρεύμα σφάλματος που θα διαχέεται στο πλέγμα, και έτσι ελαχιστοποιείται η πτώση τάσης μέσα στο ίδιο το πλέγμα.

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

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \tag{4.16}$$

όπου

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

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

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

Όπου

ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

L_c το συνολικό μήκος των αγωγών πλέγματος σε m

2α η διάμετρος του αγωγού γείωσης σε m

α΄ ισούται με $\sqrt{\alpha.2h}$ για αγωγούς γείωσης σε βάθος h (m) ή με α για αγωγούς γείωσης τοποθετημένους στην επιφάνεια του εδάφους (m)

A το εμβαδόν της επιφάνειας που καταλαμβάνει το πλέγμα γείωσης σε m2

k_1 , k_2 συντελεστές, υπολογίζονται από διαγράμματα [1]

L_R το μήκος κάθε ράβδου γείωσης σε m

2b η διάμετρος της ράβδου σε m^2

n_R ο αριθμός των ράβδων στο σύστημα γείωσης

2.4.1 Συνδέσεις με το πλέγμα

Αγωγοί κατάλληλης μέγιστης χωρητικότητας και μηχανικής αντοχής πρέπει να χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις μεταξύ:

- Όλων των ηλεκτροδίων γείωσης και όπου αυτά εφαρμόζονται, μέταλλο, σωλήνες νερού, σωλήνες αερίου, κ.λπ
- Όλων των υπέργειων αγώγιμων μεταλλικών τμημάτων που μπορούν σε περίπτωση ατυχήματος να ενεργοποιηθούν, όπως μεταλλικές κατασκευές, πλαίσια μηχανών, μεταλλικά στέγαστρα, κτλ. Επίσης, τα αγώγιμα μεταλλικά τμήματα που μπορεί να είναι σε διαφορετικό δυναμικό σε σχέση με άλλα μεταλλικά τμήματα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους, συνήθως διαμέσου του πλέγματος γείωσης.
- Όλων των πηγών ρεύματος σφάλματος όπως αλεξικέραυνα, συστοιχίες πυκνωτών ή πυκνωτές ζεύξης, μετασχηματιστές και όπου χρειάζεται, μεταξύ των ουδετέρων των μηχανών και των κυκλωμάτων φωτισμού και ισχύος.

Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά για αυτές τις συνδέσεις είναι καλώδια χαλκού ή ταινίες χαλκού.

3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.1 Ορισμός μεταβατικής κατάστασης

Η μεταβατική (ή κρουστική) κατάσταση περιγράφει τη συμπεριφορά συστημάτων γείωσης όταν η αντίσταση αυτών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στη μόνιμη κατάσταση. Η αύξηση της αντίστασης των συστημάτων γείωσης κατά τη μεταβατική κατάσταση αποτελεί ένα υψηλής σημασίας και προτεραιότητας ζήτημα όσον αφορά τη μελέτη και την εγκατάσταση συστημάτων γείωσης δεδομένου ότι η αυξημένες τιμές στην αντίσταση των συστημάτων αυτών κατά το μεταβατικό στάδιο δύνανται να προκαλέσουν βλάβες ή και καταστροφή της υπό προστασίας εγκατάστασης.

Όταν ένα σύστημα γείωσης βρίσκεται κάτω από συνθήκες μεταβατικής κατάστασης τότε [6]:

- η σύνθετη αντίσταση (φανταστική αντίσταση) μεταξύ των αγωγών και των συνδέσεων γίνεται μεγαλύτερη λόγω της μικρής διάρκειας του φαινομένου: η μικρή διάρκεια του φαινομένου έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη υψηλών συχνοτήτων και επομένως την αύξηση της σύνθετης αντίστασης της γείωσης
- η μείωση του χρόνου μετώπου της διέγερσης συντελεί στη μείωση του «ενεργού μήκους» (effective length) των μεγάλου μήκους αγωγών γείωσης
- το επιδερμικό φαινόμενο αυξάνει τη σύνθετη αντίσταση των αγωγών γείωσης, εξαιτίας της υψηλής συχνότητας κατά το μεταβατικό φαινόμενο,
- η υψηλή τιμή του εγχυόμενου ρεύματος μπορεί να ξηράνει το έδαφος, με αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής αντίστασής του.

Οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης είναι [8]:

- η μορφή του συστήματος γείωσης
- η ειδική αντίσταση του χώματος που το περιβάλλει
- η εκδήλωση ή όχι ιονισμού στο έδαφος
- το σημείο έγχυσης
- η κυματομορφή του εγχεόμενου ρεύματος

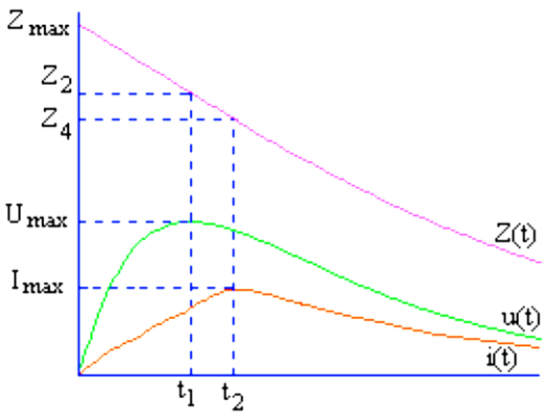
Πέραν της μελέτης για τη μεταβατική συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης,πολλές εργασίες έχουν ασχοληθεί με την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς των ηλεκτροδίων γείωσης. Αυτή έχει ως αντικείμενο τα μεμονωμένα ηλεκτρόδια ανεξάρτητα από κάθε άλλο σύστημα ή μέρος συστήματος γείωσης. Ενδεικτική είναι η εργασία των Devgan και Whitehead (1973) [22], που αναφέρεται σε μεθοδολογία υπολογισμού της μεταβατικής απόκρισης ηλεκτροδίων γείωσης σε διπλοεκθετικής μορφής κρουστικό κύμα διέγερσης.

3.2 Κρουστική σύνθετη αντίσταση

Η κρουστική σύνθετη αντίσταση ενός συστήματος γείωσης (*z(t)*) είναι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος και ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης του ρεύματος ως προς την άπειρη γη (u(t)) προς το εγχυόμενο ρεύμα (*i(t)*) [6].

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \qquad (3.1)$$

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά σημεία των καμπυλών u(t) και i(t) από τα οποία προσδιορίζονται στη συνέχεια οι παράμετροι Z_1, Z_2, Z_3 και Z_4 της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 3.1: Προσδιορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης

Οι Εξισώσεις (3.2)-(3.5) εκφράζουν τις παραμέτρους της κρουστικής σύνθετης αντίστασης Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 [23].

$$Z_1 = \max\big(z(t)\big) = Z_{max} \qquad (3.2)$$

$$Z_2 = \frac{u(t_1)}{i(t_1)} = \frac{U_{max}}{i(t_1)} \qquad (3.3)$$

$$Z_3 = \frac{u(t_1)}{i(t_2)} = \frac{U_{max}}{I_{max}} \qquad (3.4)$$

$$Z_4 = \frac{u(t_2)}{i(t_2)} = \frac{u(t_2)}{I_{max}} \qquad (3.5)$$

όπου Z_1 είναι η μέγιστη τιμή του λόγου της τάσης προς το ρεύμα, Z_2 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς την αντίστοιχη στιγμιαία τιμή του ρεύματος, Z_3 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος και Z_4 είναι ο λόγος της τάσης, όταν το ρεύμα γίνεται μέγιστο, προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος. Η σχέση που συνδέει τις εν λόγω παραμέτρους είναι η ακόλουθη:

$$Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 \qquad (3.6)$$

Είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Επομένως, το ζητούμενο για ένα

κατασκευαστή συστημάτων γείωσης δεν είναι η τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση, αλλά η χρονική μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης έως ότου καταλήξει, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, στην τιμή της μόνιμης κατάστασης. Η αύξηση της αντίστασης του συστήματος γείωσης κατά τη μεταβατική κατάσταση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, δεδομένου ότι μια μεγάλη τιμή της αντίστασης γείωσης κατά το μεταβατικό στάδιο (π.χ. κεραυνικές εκκενώσεις) μπορεί να προκαλέσει βλάβη ή και καταστροφή στην υπό προστασία εγκατάσταση.

Στις περισσότερες εφαρμογές επιλέγεται συνήθως η παράμετρος η παράμετρος Z_3 εξαιτίας της απλότητάς της, ενώ στις περιπτώσεις εκείνες που το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του πριν από το μέγιστο της τάσης η παράμετρος Z_4, σύμφωνα με τον Nixon (2002) [24], κρίνεται η πιο κατάλληλη για να περιγράψει την κρουστική σύνθετη αντίσταση.

Ωστόσο, σε πρακτικές εφαρμογές αντικεραυνικής προστασίας η μέτρηση της Z_3 δεν είναι εφικτή και έτσι μετράται απλά η αντίσταση γείωσης. Επειδή η μέτρηση γίνεται με όργανα που συνήθως εφαρμόζουν ένα σήμα συχνότητας κάτω από 1 kHz, η αντίσταση αυτή είναι γνωστή ως αντίσταση χαμηλής συχνότητας RLF. Ο λόγος Z_3/RLF για μία δοθείσα διάταξη ηλεκτροδίων, γνωστός ως συντελεστής μετάβασης, χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η παράμετρος Z_3 από τη μετρηθείσα αντίσταση RLF. Λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες σχετικά με το έδαφος, ο συντελεστής αυτός συχνά θεωρείται ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδας, λόγω της συντηρητικής προσέγγισης που θέλει τη μεταβατική σύνθετη αντίσταση μεγαλύτερη της αντίστασης χαμηλής συχνότητας. Σύμφωνα, όμως, με την πρόσφατη εργασία των Visacro και Rosado (2009) [25] , φάνηκε ότι ο συντελεστής αυτός δεν είναι πάντα ίσος ή μεγαλύτερος της μονάδος, όπως δείχνουν τα αποτελέσματα πολλών προσομοιώσεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας κατέληξαν σε συντελεστές σημαντικά μικρότερους της μονάδος για ηλεκτρόδια μικρότερα από το αποτελεσματικό μήκος, ακόμα και σε χαμηλής αντίστασης εδάφη.

Συγκεκριμένα, ο λόγος Z_3/ RLF κυμάνθηκε στις περιοχές 0,3-0,6 και 0,68-0,9, για ηλεκτρόδια θαμμένα σε εδάφη υψηλής (3,8-4 kΩm) και χαμηλής (90-300 Ωm) αντίστασης, αντίστοιχα. Τέλος, ηλεκτρόδια μακρύτερα του αποτελεσματικού μήκους LEF είχαν τιμές συντελεστή μετάβασης μεγαλύτερες της μονάδας, αν και εμφανώς μικρότερες από τις προβλεπόμενες μέσω προσομοιώσεων. Είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση (η τιμή που μετριέται με ένα γειωσόμετρο). Επομένως, το ζητούμενο για ένα κατασκευαστή συστημάτων γείωσης, δεν είναι η τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση, αλλά η χρονική μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης έως ότου καταλήξει, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, στην τιμή της μονίμου καταστάσεως.

3.3 Μέθοδοι και Μοντέλα Προσομοίωσης

3.3.1 Αναλυτικές και εμπειρικές μέθοδοι

Τα πρώτα βήματα στη θεωρητική και αργότερα πειραματική μελέτη της μεταβατικής κατάστασης συστημάτων γείωσης που χτυπήθηκαν από κεραυνό πραγματοποιήθηκαν από τον Bewley το 1934 ο οποίος εστιάστηκε στην αντικεραυνική προστασία δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας [26]. Ειδικότερα υπολόγισε τη σύνθετη αντίσταση ενός οριζόντιου αγωγού γείωσης (counterpoise wire) στο σημείο εφαρμογής μίας μοναδιαίας βηματικής τάσης. Ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης έγινε κάτω από την προσέγγιση ότι ο αγωγός μπορεί να θεωρηθεί ως μία μεγάλου μήκους γραμμή μεταφοράς με απώλειες, η οποία έχει σταθερές ανά μονάδα μήκους παραμέτρους. Ο Bewley έδειξε ότι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση του αγωγού διαμορφώνεται από τη μετάβαση από μία αρχική ιδιαίτερα υψηλή σύνθετη αντίσταση σε μία πολύ χαμηλή

τελική αντίσταση και ότι ο χρόνος αυτής της μετάβασης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και την τιμή της υπέρτασης.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1943 οι Bellaschi και Armington υπολόγισαν αναλυτικά την απόκριση τάσης ηλεκτροδίων γείωσης στο σημείο εγχύσεως μεταβατικών ρευμάτων διαφόρων κυματομορφών [27]. Έδωσαν τις εκφράσεις για την τάση που αναπτύσσεται με μία πρόοδο αργής σύγκλισης, αγνοώντας τις χωρητικότητες στο μοντέλο τους, σε αντίθεση με τον Bewley, ενώ παράλληλα έδειξαν ότι για μεγάλου μήκους ηλεκτρόδιο γείωσης, το ισοδύναμο κύκλωμα με κατανεμημένη αντίσταση γείωσης και επαγωγική αντίσταση αγωγού είναι κατάλληλο για τον υπολογισμό της μεταβατικής σύνθετης αντίστασής του.

Το 1949 ο Sunde εισήγαγε μια νέα προσέγγιση για την περιγραφή των συστημάτων γείωσης σε μεταβατική κατάσταση η οποία βασίζεται στη θεωρία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη χρήση των εξισώσεων Maxwell [28]. Με βάση τη νέα αυτή προσέγγιση κατάφερε να υπολογίσει την αντίσταση σταθερού ρεύματος (DC) για διάφορες δομές γείωσης και έδωσε αρκετά στοιχεία που αφορούν την επαγωγική συμπεριφορά αγωγών γείωσης υπό υψηλή συχνότητα. Ο Sunde ήταν ίσως ο πρώτος που παρουσίασε την έννοια της γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες

από τη συχνότητα ανά μονάδα μήκους παραμέτρους. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς ενός οριζόντιου αγωγού γείωσης πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, όταν αυτός δέχεται άμεσα κεραυνικά «χτυπήματα», με χρήση των εξισώσεων (3.7) και (3.8).

$$\frac{dI(x,j\omega)}{dx} = -YV(x,j\omega) \qquad (3.7)$$

$$\frac{dV(x,j\omega)}{dx} = -ZI(x,j\omega) \qquad (3.8)$$

όπου Z είναι η ανά μονάδα μήκους διαμήκης σύνθετη αντίσταση και Y η ανά μονάδα μήκους εγκάρσια αγωγιμότητα του αγωγού.

Η προσέγγιση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με μοντέλα ξεκίνησε από τη θεωρία γραμμής μεταφοράς, και «παράχθηκε» αναλυτικά κάτω από ορισμένες προσεγγίσεις για γρήγορες λύσεις λόγω έλλειψης δυνατών υπολογιστικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό αυτές οι μέθοδοι/μοντέλα περιορίστηκαν σε απλά συστήματα γείωσης π.χ. οριζόντιοι αγωγοί γείωσης ή κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης. Για πολύπλοκα συστήματα γείωσης, όπως μεγάλα πλέγματα γείωσης, μόνο η εμπειρική ανάλυση θα μπορούσε να βοηθήσει, η οποία επιχειρήθηκε από τους Gupta και Thapar το 1980 για τον υπολογισμό της απόκρισης πλεγμάτων γείωσης σε μοναδιαία βηματικά ρεύματα [29].

3.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι

Από τις αρχές της δεκαετίας του ’80, η δύναμη των υπολογιστών αυξήθηκε δραματικά, δίνοντας σε όλα σχεδόν τα ερευνητικά πεδία της επιστήμης του μηχανικού τη δυνατότητα επίλυσης πολύπλοκων πρακτικών προβλημάτων έχοντας ως βάση διάφορες ισχυρές αριθμητικές μεθόδους. Κατά συνέπεια, η μοντελοποίηση της πολύπλοκης μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης σε περίπτωση ισχυρού ρεύματος σφάλματος είχε καλύτερο μέλλον κυρίως για τους ακόλουθους λόγους:

- Τα αρχικά μοντέλα που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.3.1 ξεκινούσαν από διάφορες υποθέσεις προκειμένου να φτάσουν σε απλές εξισώσεις. Με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, οι περισσότερες πολύπλοκες εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν
- Πρακτικά πολύπλοκα συστήματα γείωσης μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν χάρη στη μεγάλη μνήμη και ταχύτητα του υπολογιστή

Οι διάφορες αριθμητικές μέθοδοι μοντελοποίησης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, που αναπτύχθηκαν από το 1980 μέχρι σήμερα, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

- Κυκλωματική προσέγγιση
- Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου
  - Μέθοδος Στιγμών
  - Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων
- Υβριδική προσέγγιση
- Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς

3.3.2.1 Κυκλωματική προσέγγιση

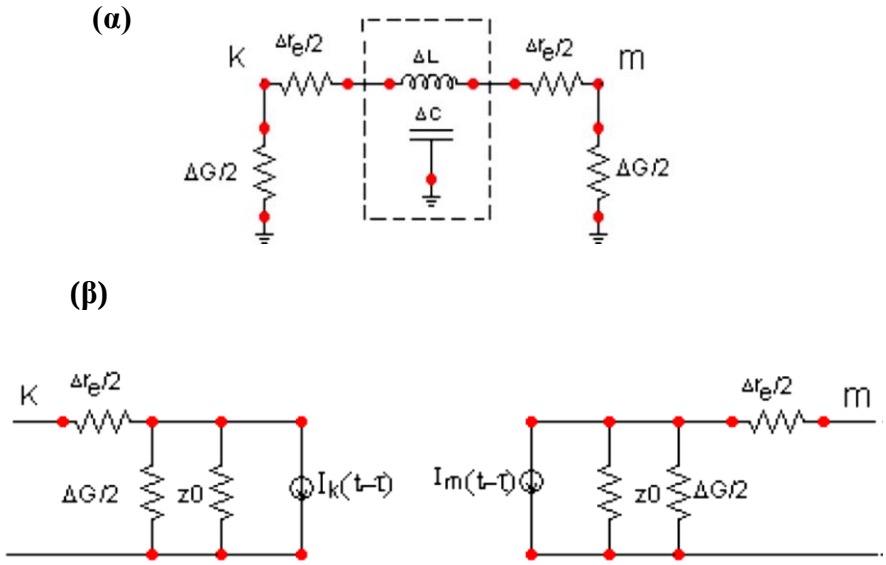
Ένα από τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιείται συχνά για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με πολύπλοκη γεωμετρία είναι η κυκλωματική προσέγγιση (circuit approach). Τα κύρια βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα ακόλουθα:

• Χωρισμός του συστήματος γείωσης σε πολλά πεπερασμένα τμήματα

• Δημιουργία του ισοδύναμου συγκεντρωτικού κυκλώματος για κάθε τμήμα και υπολογισμός των παραμέτρων του: αυτεπαγωγή και αλληλεπαγωγή (ΔL), χωρητικότητα (ΔC), αγωγιμότητα (ΔG) και εσωτερική αντίσταση (Δr_e)

• Επίλυση των εξισώσεων κόμβων του ισοδύναμου κυκλώματος που αντιπροσωπεύει ολόκληρο το σύστημα γείωσης βάσει των νόμων Kirchoff. Οι εξισώσεις κόμβων μπορούν να εμφανιστούν σε διαφορετικές μορφές ανάλογα με το ισοδύναμο κύκλωμα που έχει υιοθετηθεί για τη μοντελοποίηση.

Η κυκλωματική προσέγγιση για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους A. P. Meliopoulos και M. G. Moharam το 1983 [30]. Χρησιμοποίησε παραμέτρους ανεξάρτητες της συχνότητας για κάθε τμήμα (ΔL, ΔC, ΔG, Δr_e), οι οποίες υπολογίζονται με βάση την εξίσωση Laplace ($\nabla^2 V = 0$) στο ημι-άπειρο αγώγιμο μέσο της γης. Το ενδιαφέρον σε αυτή την εργασία είναι ότι κάθε τμήμα του αγωγού γείωσης αντικαταστάθηκε από μία γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες και από δύο επιπλέον αγωγιμότητες διαρροής προς γη σε διακλάδωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 (α), και το οποίο μπορεί να μετασχηματιστεί στο κύκλωμα του Σχήματος 3.2 (β).



Σχήματα 3.2: Ισοδύναμο κύκλωμα για κάθε τμήμα στην κυκλωματική προσέγγιση του Meliopoulos [30]

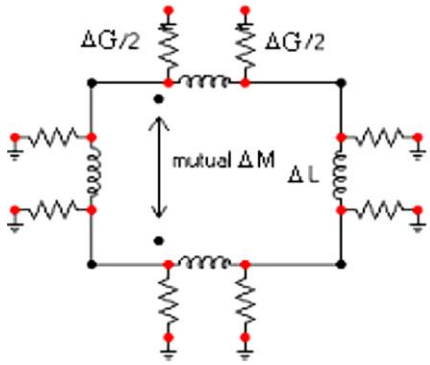
Η εξίσωση κόμβων που περιγράφει το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.2 είναι:

$$[Y].[V(t)] = [I_s(t)] + [b(t-\Delta t,...)] \qquad (3.9)$$

όπου $[Y]$ είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων κόμβων του ισοδύναμου κυκλώματος, $[V(t)]$ είναι το διάνυσμα τάσης στο χρόνο t για τους κόμβους, $[I(t)]$ s είναι το διάνυσμα του εξωτερικού ρεύματος που εισάγεται στους κόμβους του κυκλώματος και $[b(t - \Delta t,...)]$ είναι το διάνυσμα προηγούμενων τιμών ρεύματος (current history).

Αργότερα οι A. D. Papalexopoulos και A. P. Meliopoulos (1987) την κυκλωματική προσέγγιση συστήματος γείωσης για αντικεραυνικές μελέτες υπολογίζοντας την απόκριση κάθε τμήματος σε οποιαδήποτε υπερδιέγερση ρεύματος βασιζόμενος στις μερικώς στατικές εξισώσεις Maxwell, έτσι ώστε οι παράμετροι κάθε τμήματος και οι προηγούμενες τιμές ρεύματος να είναι εξαρτώμενες από τη συχνότητα [31].

Αργότερα, οι M. Ramamoorty et al. (1989) ανέπτυξαν ένα απλοποιημένο κυκλωματικό μοντέλο για το πλέγμα γείωσης [32]. Στην προσέγγισή τους, μετά τη διαίρεση ολόκληρου του συστήματος γείωσης σε n τμήματα, κάθε τμήμα αντικαταστάθηκε από ένα συγκεντρωτικό κύκλωμα με μόνο αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές (ΔL) και αγωγιμότητες διαρροής προς γη (ΔG), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός τετραγωνικού στοιχείου πλέγματος γείωσης

Η εξίσωση κόμβων που περιγράφει το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.3 είναι:

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1}\left\{\frac{dI_s}{dt} - L^{-1}[V]\right\} \qquad (3.10)$$

όπου $[V]$ είναι το διάνυσμα τάσεων κόμβων, $[I_s]$ είναι το διάνυσμα ρεύματος έγχυσης κόμβων, $[G]$ είναι το διάνυσμα αγωγιμοτήτων κόμβων και $[L]$ το διάνυσμα επαγωγικών αντιστάσεων κόμβων. Παρά το γεγονός ότι αυτό το μοντέλο αγνοεί τη χωρητική σύζευξη, παραμένει ακριβές για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης σε εδάφη χαμηλών ειδικών αντιστάσεων.

Το 1999, δύο τροποποιήσεις της κυκλωματικής προσέγγισης των εργασιών του A. P. Meliopoulos δημοσιεύτηκαν από τους Geri (1999) και Otero et al. (1999), οι οποίοι συμπεριέλαβαν και φαινόμενα ιονισμού του εδάφους στα μοντέλα τους [33, 34].

Η κυκλωματική προσέγγιση είναι εύκολη στην κατανόηση από την άποψη ότι η πολύπλοκη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης μετασχηματίζεται σε μία απλή μεταβατική ανάλυση ισοδύναμων κυκλωμάτων. Οι κυκλωματικές προσεγγίσεις μπορούν να συμπεριλάβουν όλες τις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στους αγωγούς γείωσης, ενώ μπορούν εύκολα να ενσωματώσουν και τα μη γραμμικά φαινόμενα ιονισμού του εδάφους. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν μπορεί να προβλέψει την καθυστέρηση διάδοσης κύματος.

3.3.2.2 Προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι η πιο ενδελεχής μέθοδος μοντελοποίησης μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης, επειδή επιλύει πλήρεις εξισώσεις Maxwell με ελάχιστες προσεγγίσεις. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί είτε με τη Μέθοδο Στιγμών (Method of Moment-MoM) είτε με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method -FEM).

- *Μέθοδος Στιγμών*

Το βασιζόμενο στη Μέθοδο Στιγμών μοντέλο για τη μεταβατική συμπεριφορά συστήματος γείωσης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους Grcev και Dawalibi το 1990 [35]. Η μέθοδος ξεκινά από την ολοκληρωτική εξίσωση του Maxwell για το ηλεκτρικό πεδίο.

$$E^s = \frac{1}{4\pi j\omega\varepsilon}(\nabla\nabla - \gamma^2)\int_l t'.\ I_l\ (r')G_n\ (r,r')dl \qquad (3.11)$$

$$G_n(r,r') = G_1(r,r') + G_i(r,r') + G_s(r,r') \qquad (3.12)$$

Όπου E^s είναι το συνολικό διασκορπισμένο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επιφάνειας του αγωγού, $t'.\ I_l(r')$ είναι το ρεύμα που ρέει κατά μήκος του αγωγού, $\varepsilon = \varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ είναι η μιγαδική επιτρεπτότητα του μέσου,$\sigma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$ είναι η σταθερά διάδοσης κύματος στο μέσο, όπου σ, ε και μ είναι η αγωγιμότητα, επιτρεπτότητα και διαπερατότητα αντίστοιχα, $G_n(r,\ r')$ είναι η πλήρης συνάρτηση Green, $G_l(r,\ r')$ και $G_i(r\ r')$ είναι οι δυαδικές συναρτήσεις Green για το ηλεκτρικό πεδίο στο r λόγω του στοιχείου ρεύματος και της εικόνας του, και $G_s(r,\ r')$ είναι ένας όρος διόρθωσης που οφείλεται στην διεπιφάνεια αέρα-εδάφους, ο οποίος είναι απαραίτητος για την πλήρη επίλυση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η οριακή συνθήκη είναι ότι το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επιφάνειας

του αγωγού γείωσης πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$t\,.\left(E^i + E^s\right) = I\,.Z_s.\Delta l \qquad (3.13)$$

όπου E^i είναι το αναμενόμενο ηλεκτρικό πεδίο και Z_s είναι η ανά μονάδα μήκους εσωτερική σύνθετη αντίσταση σε σειρά του αγωγού γείωσης συμπεριλαμβανομένου του επιδερμικού φαινομένου.

Η αριθμητική επεξεργασία της Εξ. (3.13) καλείται Μέθοδος Στιγμών, που δεν είναι τίποτε άλλο από το μετασχηματισμό της σχετικής ολοκληρωτικής εξίσωσης σε ένα σύστημα γραμμικών

αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους, όπου οι N άγνωστοι συνήθως αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές του ρεύματος βάσει μερικών κατάλληλων επεκτάσεων. Ανάλογα, λοιπόν, με τη διανομή του ρεύματος κατά μήκος του αγωγού που προσεγγίζεται, διαμορφώνεται και η αντίστοιχη ολοκληρωτική Εξ. (3.11) για το ηλεκτρικό πεδίο. Αν οι πηγές ρεύματος για όλα τα τμήματα του αγωγού γείωσης είναι γνωστές, το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το σύστημα γείωσης και το ρεύμα διαρροής από το τμήμα του αγωγού γείωσης προς το έδαφος μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με χρήση στοιχειωδών εξισώσεων για τη σχετική πηγή και μέσο. Το δυναμικό σε διάφορα σημεία της επιφάνειας του αγωγού γείωσης μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση του κανονικού ηλεκτρικού πεδίου από το σημείο της επιφάνειας του αγωγού προς την απομακρυσμένη γη.

Καθώς η βασισμένη στη Μέθοδο Στιγμών προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επιλύει πλήρεις εξισώσεις Maxwell στο πεδίο της συχνότητας, έχει ελάχιστες παραδοχές. Κατά συνέπεια, πιστεύεται ότι είναι πολύ ακριβής. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των πηγών εισόδου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό είναι αρκετά πολύπλοκο για να υλοποιηθεί. Επίσης, όταν η δομή της γείωσης είναι μεγάλη, ο χρόνος υπολογισμού γίνεται και αυτός πολύ μεγάλος. Ένα ακόμα μειονέκτημα της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ότι, λόγω της διαδικασίας επίλυσης στο πεδίο της συχνότητας, δεν μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να συμπεριλάβει τη μη γραμμικότητα κατά τον ιονισμό του εδάφους, και να συνδυάσει άλλες μη γραμμικές διατάξεις που έχουν μοντέλα στο πεδίο του χρόνου.

- *Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων*

Είναι η μέθοδος που εφαρμόζεται στο λογισμικό πρόγραμμα OPERA που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μεταβατικής κατάστασης σε πλέγμα γείωσης στην παρούσα διπλωματική εργασία, λεπτομερής ανάλυση του οποίου περιγράφεται εκτενώς στο Παράρτημα Α.

Η προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης αναπτύχθηκε από τους Nekhoul et al. (1995) [36]. Το μοντέλο ξεκινά από εξισώσεις ηλεκτρικής ή μαγνητικής ενέργειας, οι οποίες εμπεριέχουν μερικώς διαφορικές εξισώσεις Maxwell αναφορικά με το διανυσματικό δυναμικό (A) και το βαθμωτό δυναμικό (V) σε διαφορετικές περιοχές του συστήματος. Υλοποιείται, έπειτα, με τη χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων για τις λύσεις που βασίζονται στη φυσική αρχή ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο σύστημα. Οι τελικές συναρτήσεις A-V δίνονται από τις εξισώσεις (3.14)-(3.16), οι οποίες εμπεριέχουν τη συνάρτηση βάρους W και w για το διανυσματικό και βαθμωτό δυναμικό αντίστοιχα.

$$\int \left[\frac{1}{\mu_0}(\nabla \times \vec{W}).(\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0}(\nabla.\vec{W})(\nabla.\vec{A}) + (\sigma_{soil} + j\omega\varepsilon_{soil})\left(j\omega\vec{W}.\vec{A} + \vec{W}.\nabla V\right)\right] d\Omega = 0 \qquad (3.14)$$

$$\int_{\Omega} \left[(\sigma_{soil} + j\omega\varepsilon_{soil})\nabla w.\left(j\omega\vec{A} + \nabla V\right)\right] d\Omega = 0 \qquad (3.15)$$

$$\int_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_0}(\nabla \times w).(\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0}(\nabla.\vec{W})(\nabla.\vec{A})\right] d\Omega = 0 \qquad (3.16)$$

Οι (3.14) και (3.15) αφορούν το πεδίο στο έδαφος ενώ η (3.16) το πεδίο στον αέρα. Προκειμένου να λυθούν τα προβλήματα αριθμητικά οι εξισώσεις (3.14)-(3.16) μετασχηματίζονται σε γραμμικές εξισώσεις με διαίρεση ολόκληρου του συστήματος σε N μικρά στοιχεία. Η δυσκολία σε αυτήν την προσέγγιση έγκειται στο μετασχηματισμό των ανοιχτών ορίων του περιβάλλοντος τόσο του αέρα όσο και της γης σε ένα κλειστό οριακό πρόβλημα με

χρήση χωρικού μετασχηματισμού, ο οποίος θα μειώσει το μέγεθος του προβλήματος. Το κύριο πλεονέκτημα της βασισμένης στη FEM προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ότι η περιγραφή της περιοχής (γεωμετρία του μέσου) του προβλήματος διευκολύνεται από ιδιαίτερα ευέλικτα μη ομοιόμορφα στοιχεία, που μπορούν εύκολα να περιγράψουν πολύπλοκα σχήματα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ο ιονισμός του εδάφους μπορεί εύκολα να συμπεριληφθεί στο συγκεκριμένο μοντέλο. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι ακόμα πιο περίπλοκη στην κατανόηση από αυτή που βασίζεται στη MoM, επειδή δεν λύνει απευθείας τις εξισώσεις Maxwell.

3.3.2.3 Υβριδική προσέγγιση

Η υβριδική προσέγγιση για τη μεταβατική ανάλυση συστήματος γείωσης ξεκίνησε αρχικά από τον F. Dawalibi (1986) [37], και αργότερα τροποποιήθηκε το 2000 από τους Andolfato et al. (2000) [38]. Εδώ, η λέξη «υβριδική» σημαίνει ότι η προσέγγιση αυτή αποτελεί συνδυασμό της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της κυκλωματικής προσέγγισης. Η μεθοδολογία του μοντέλου αυτού έγκειται στη διαίρεση ολόκληρου του συστήματος γείωσης σε *n* μικρά τμήματα, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο δίνεται από την εξίσωση (3.17), η οποία προκύπτει από τις πλήρεις εξισώσεις Maxwell:

$$E = -gradV - j\omega\vec{A} \quad (3.17)$$

όπου $\vec{A}$ είναι το διανυσματικό δυναμικό και V το βαθμωτό δυναμικό, ενώ η εξίσωση μετασχηματίζεται κατάλληλα σε κάθε τμήμα k .

Το πλεονέκτημα της υβριδικής προσέγγισης είναι ότι συμπεριλαμβάνεται στις εσωτερικές σύνθετες αντιστάσεις, και στις επαγωγικές και χωρητικές-αγώγιμες συνιστώσες σε σειρά η

επίδραση της συχνότητας, η οποία κάνει την προσέγγιση αυτή πιο ακριβή από τη συμβατική κυκλωματική προσέγγιση, ειδικά όταν η συχνότητα του ρεύματος σφάλματος είναι υψηλή.

3.3.2.4 Προσέγγιση γραμμής μεταφοράς

Όπως περιγράψαμε στο υποκεφάλαιο 3.3.1 η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς ήταν η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστήματος γείωσης. Ωστόσο, η ανάπτυξη της προσέγγισης αυτής δεν ήταν τόσο γρήγορη όσο αυτή της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της κυκλωματικής προσέγγισης.

Οι Verma και Mukhedkar (1980) και Mazetti και Veca (1983) εφάρμοσαν την έννοια της γραμμής μεταφοράς με απώλειες σε οριζόντιο αγωγό γείωσης, με την περιγραφή του οποίου να δίνεται από τις τηλεγραφικές εξισώσεις (3.18) και (3.19) [39, 40].

$$\frac{\partial V}{\partial x} + L\frac{\partial I}{\partial t} + r_e I = 0 \qquad (3.18)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C\frac{\partial V}{\partial t} + GV = 0 \qquad (3.19)$$

Σκοπός της επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων (3.18) και (3.19) ήταν η εύρεση της αναλυτικής κατανομής ρεύματος και τάσης κατά μήκος του αγωγού γείωσης στο μιγαδικό επίπεδο και η μετατροπή αργότερα των μιγαδικών εξισώσεων σε εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου με χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Laplace. Αργότερα, οι Lorentzou et al. (2003) ξεκίνησαν από τις ίδιες τηλεγραφικές εξισώσεις (3.18) και (3.19), αλλά παρήγαγαν την εξίσωση κατανομής ρεύματος και τάσης του αγωγού απευθείας στο πεδίο του χρόνου [41]. Το κοινό χαρακτηριστικό των προσεγγίσεων γραμμής μεταφοράς που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ότι οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι είναι ομοιόμορφοι κατά μήκος των αγωγών γείωσης. Ο λόγος που η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς ήταν η πρώτη για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης είναι ότι χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τη

προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς οριζόντιου αγωγού γείωσης (counterpoise wire). Ο οριζόντιος αγωγός γείωσης έχει μεταβατική συμπεριφορά παρόμοια με αυτή των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο αγωγός είναι θαμμένος στο έδαφος ενώ η εναέρια γραμμή μεταφοράς βρίσκεται στον αέρα. Η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς για τη μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης μπορεί να είναι είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας, αλλά είναι εύκολο να συμπεριληφθεί ο ιονισμός του εδάφους στο πεδίο του χρόνου. Παρόμοια με την κυκλωματική προσέγγιση, μπορεί επίσης να εμπεριέχει όλες τις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στα διάφορα τμήματα των αγωγών γείωσης. Επιπλέον, η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς μπορεί να προβλέψει τη καθυστέρηση διάδοσης κύματος, η οποία είναι σημαντική όταν το σύστημα γείωσης έχει μεγάλο μέγεθος. Τέλος, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την προσέγγιση γραμμής μεταφοράς είναι πολύ μικρότερος συγκριτικά με την προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

3.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων που παρουσιάστηκαν στα υποκεφάλαια 3.3.2.1-3.3.2.4 καταγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων μεταβατικής συμπεριφόράς συστημάτων γείωσης

Προσεγγίσεις	Μαθηματικές εκφράσεις	Οπτική αναπαράσταση	Διαδικασία επίλυσης	Υπολογιστικός χρόνος	Ακρίβεια
Ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	Πολύπλοκες	Δύσκολη	Πολύπλοκη, δύσκολα μοντελοποιεί ιονισμό, μπορεί να προβλέψει την καθυστέρηση διάδοσης κύματος	Μεγάλος	Πιστεύεται ότι είναι η πιο ακριβής

Κυκλωματική	Απλές	Εύκολη	Απλή, εύκολα μοντελοποιεί ιονισμό, δεν μπορεί να προβλέψει την καθυστέρηση διάδοσης κύματος	Μικρός	Λογικά ακριβής
Υβριδική	Πολύπλοκες	Μέτριας δυσκολίας	Ελαφρώς πολύπλοκη, μπορεί να μοντελοποιήσει ιονισμό, δυνατότητα πρόβλεψης καθυστέρησης διάδοσης κύματος όχι ξεκάθαρη	Μικρός	Λογικά Ακριβής
Γραμμής μεταφοράς	Απλές	Πολύ εύκολη	Πολύ απλή, μπορεί να προβλέψει καθυστέρηση διάδοσης κύματος, εύκολα μοντελοποιεί ιονισμό	Μικρός	Λογικά Ακριβής

3.3.2.6 Βελτιωμένες προσεγγίσεις γραμμής μεταφοράς

Ένα μοντέλο για τη μεταβατική ανάλυση συστημάτων γείωσης πρέπει να είναι απλό για γρήγορες εφαρμογές, και την ίδια στιγμή, να μπορεί να προβλέψει όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης. Έχοντας ως βάση, λοιπόν, τις συγκρίσεις του Πίνακα 3.1 φαίνεται ότι η προσέγγιση γραμμής μεταφοράς είναι η καλύτερη. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτής της προσέγγισης δεν ήταν τόσο γρήγορη όσο αυτή της κυκλωματικής και της προσέγγισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Μέχρι το 2004, όλες οι προσεγγίσεις γραμμής μεταφοράς ήταν περιορισμένες στη μοντελοποίηση απλών συστημάτων γείωσης, όπως οριζόντιοι αγωγοί γείωσης και απλά ηλεκτρόδια γείωσης.

Το 2004, όμως, η Liu (2004) μέσα από την εργασία της [42], μελέτησε τη βελτίωση της προσέγγισης γραμμής μεταφοράς επεκτείνοντας, αρχικά, τη συμβατική προσέγγιση με σταθερές ανά μονάδα μήκους παραμέτρους (L, C, G, r_e) από ένα απλό ηλεκτρόδιο γείωσης σε πλέγματα γείωσης, και παρουσιάζοντας μία προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς, ώστε να υπερκεραστούν τα μειονεκτήματα της συμβατικής προσέγγισης ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς.

3.3.2.6.1 Μειονεκτήματα της προσέγγισης ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς

Οι εξισώσεις του πρώτου μοντέλου γραμμής μεταφοράς του Sunde, το οποίο παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 3.3.1, των εξαρτώμενων από τη συχνότητα ανά μονάδα μήκους διαμήκους σύνθετης αντίστασης Z και εγκάρσιας αγωγιμότητας Y, για έναν απλό οριζόντιο αγωγό γείωσης με άπειρο μήκος πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, είναι αντίστοιχα [28]:

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi}\log\frac{1.85}{a\left(\gamma^2+\Gamma^2\right)^{1/2}} \tag{3.20}$$

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi\left(\sigma_{soil}+i\omega\varepsilon_{soil}\right)}\log\left(\frac{1.12}{\Gamma a}\right)\right]^{-1} \tag{3.21}$$

όπου $\gamma^2 = i\omega\mu_0\left(\sigma_{soil}+i\omega\varepsilon_{soil}\right), Z_s$ είναι η ανά μονάδα μήκους εσωτερική σύνθετη αντίσταση, Y_i είναι η ανά μονάδα μήκους αγωγιμότητα της μόνωσης του αγωγού, η οποία είναι 0 όταν ο αγωγός είναι σε τέλεια επαφή με το χώμα, a είναι η ακτίνα του αγωγού γείωσης και Γ η σταθερά διάδοσης. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για έναν θαμμένο αγωγό γείωσης με απλή αλλαγή της ακτίνας του αγωγού από a σε $\sqrt{2ad}$, όπου d το βάθος στο οποίο είναι θαμμένος ο αγωγός. Δεν είναι, όμως, βέβαιο αν μια τέτοια επέκταση είναι βάσιμη.

Επιπλέον, είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστούν οι αμοιβαίες διαμήκεις σύνθετες αντιστάσεις και εγκάρσιες αγωγιμότητες, που αντιστοιχούν στις αμοιβαίες συζεύξεις ανάμεσα στους αγωγούς γείωσης. Επιπλέον, για τη μέγιστη μεταβατική τάση, υπήρχε μια διαφορά περίπου 13%-40% μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραμάτων [43]. Αυτό σημαίνει ότι η βασισμένη στο μοντέλο του Sunde προσέγγιση γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες από τη συχνότητα παραμέτρους είναι δύσκολο να υιοθετηθεί για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς πλεγμάτων γείωσης.

Από εδώ και μέχρι το τέλος του Κεφαλαίου 2, όταν θα αναφερόμαστε σε ανά μονάδα μήκους παραμέτρους αγωγών γείωσης θα υποθέτουμε ότι είναι ανεξάρτητες της συχνότητας.

Στην εργασία των Mazetti και Veca (1983) [40], οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι (G, C και L) υπολογίστηκαν με χρήση των εξισώσεων Sunde (3.3.14)-(3.3.15) για αγωγό μήκους 1 m όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.22)-(3.24):

$$G = \frac{\pi}{\rho_{soil}\left[\ln\frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1\right]} \tag{3.22}$$

$$C = \frac{\pi\varepsilon_{soil}}{\ln\frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1} \tag{3.23}$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi}\left[\ln\frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1\right] \tag{3.24}$$

όπου a είναι η ακτίνα του αγωγού και d το βάθος στο οποίο είναι θαμμένος ο αγωγός. Με χρήση αυτών των παραμέτρων, η ανάλυση μεταβατικών φαινομένων των αγωγών γείωσης με διαφορετικό μήκος πραγματοποιήθηκε στο πεδίο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι θεωρήθηκε πως

οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι είναι ανεξάρτητες του μήκους. Ή μπορεί κάποιος να πει ότι σε αυτήν την προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή της άπειρης γραμμής μεταφοράς. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προβλέψει το αποτελεσματικό μήκος των ηλεκτροδίων γείωσης, αλλά από έρευνες [43] βρέθηκε ότι η μέθοδος αυτή δίνει λάθος μεταβατικές τάσεις στο σημείο εγχύσεων των αγωγών. Αφ' ετέρου, έχει γίνει αντιληπτό ότι οι αγωγοί γείωσης πεπερασμένου μήκους εκτεθειμένοι σε κρουστικούς παλμούς δεν έχουν μια δομή πεδίου που να είναι πραγματικά εγκάρσια ηλεκτρικά και μαγνητικά (TEM) ή εν μέρει TEM, επομένως οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι (G, C και L) θα πρέπει να περιλαμβάνουν την επίδραση του μήκους του αγωγού.

Βασιζόμενοι στο παραπάνω γεγονός, μερικοί συγγραφείς υπολόγισαν την αγωγιμότητα, τη χωρητικότητα και την αυτεπαγωγή πεπερασμένου μήκους αγωγού χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Sunde (3.25)-(3.27) και κατένειμαν τις παραμέτρους εξ' ίσου σε μια ανά μονάδα μήκους βάση:

$$G = \frac{\pi}{\rho_{soil}\left[\ln\frac{2l_c}{\sqrt{2ad}} - 1\right]} \tag{3.25}$$

$$C = \frac{\pi\varepsilon_{soil}}{\ln\frac{2l_c}{\sqrt{2ad}} - 1} \tag{3.26}$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi}\left[\ln\frac{2l_c}{\sqrt{2ad}} - 1\right] \tag{3.27}$$

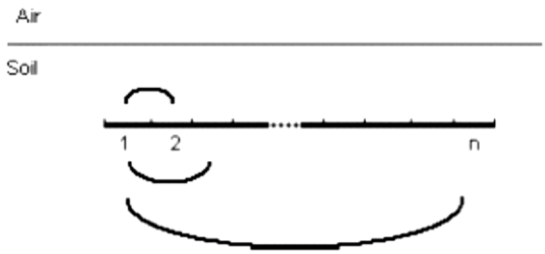
όπου l_c είναι το μήκος του αγωγού. Όλες οι άλλες παράμετροι είναι ίδιες όπως και στις εξισώσεις (3.22)-(3.24). Χρησιμοποιώντας τις κατανεμημένες αυτές παραμέτρους, η μεταβατική

ανάλυση υλοποιήθηκε λύνοντας τις τηλεγραφικές εξισώσεις. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή αποτυγχάνει να προβλέψει το αποτελεσματικό μήκος τον αγωγών γείωσης.

3.3.2.6.2 Προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς

Λόγω του ότι η προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς αποτελεί το πιο σύγχρονο και πλήρες μοντέλο προσομοίωσης της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, κρίνεται σκόπιμη η εκτενέστερη, σε σχέση με τις υπόλοιπες προσεγγίσεις, περιγραφή του.

Η επίδειξη της προσέγγισης μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς [43, 44] για τη μεταβατική ανάλυση συστημάτων γείωσης ξεκινά από έναν απλό οριζόντιο αγωγό γείωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4:



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση ενός απλού αγωγού, η διαίρεσή του σε τμήματα και η σύζευξη αυτών

Ο αγωγός θεωρείται ως ένα λεπτό σύρμα και διαιρείται σε *n* μικρά τμήματα με σκοπό να υπολογίσουμε τις μήτρες των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων (αντιστάσεις γης, δεκτικότητες, αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές):

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}, \; P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \text{ και}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix}$$

Το μήκος του τμήματος θα πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των τμημάτων να λαμβάνεται υπόψη αποτελεσματικά. Αυτό σημαίνει ότι κάποιος δεν μπορεί να διαλέξει τμήματα μεγάλου μήκους για τις προσομοιώσεις καθώς αυτή η κατάσταση θα αντιστοιχούσε στην προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με ανά μονάδα μήκους παραμέτρους εξαρτώμενες από το μήκος του ηλεκτροδίου (βλέπε παράγραφο 3.3.2.6.1). Για να το ξεπεράσουμε αυτό, στο παρόν μοντέλο, το μήκος των τμημάτων θα πρέπει να είναι επαρκώς μικρό ($<<1/10$ του μήκους κύματος στο έδαφος σε αντιστοιχία με την υψηλότερης συχνότητας συνιστώσα της πηγής ρεύματος) έτσι ώστε κάθε τμήμα κατά τη διάρκεια διάδοσης κυμάτων να συνεισφέρει στα φαινόμενα σύζευξης. Συνεπώς, ο αριθμός των τμημάτων n θα πρέπει να είναι μεγάλος, αλλά ταυτόχρονα, το μήκος κάθε τμήματος l_{seg} θα πρέπει να ικανοποιεί την υπόθεση λεπτών καλωδίων, η οποία είναι $l_{seg} >> \alpha$ (α είναι η ακτίνα του αγωγού γείωσης).

Η ανά μονάδα μήκους αντίσταση σε σειρά, που είναι ίδια για όλα τα τμήματα, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.28):

$$r_e = \frac{\rho_e}{2\pi\alpha^2} \qquad (3.28)$$

όπου α είναι η ακτίνα και ρ_e η ειδική αντίσταση του αγωγού. Οι άλλες ανά μονάδα μήκους παράμετροι, όπως αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές, αντιστάσεις γης και δεκτικότητες, μπορούν

να υπολογιστούν βάσει της θεωρίας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [28]. Αυτές οι παράμετροι είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων του εδάφους και της γεωμετρίας του συστήματος. Η μέθοδος των ειδώλων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων που αφορούν την αντίσταση γης και τη δεκτικότητα, λόγω του ότι το έδαφος θεωρείται πως είναι ημι-άπειρο μέσο και επειδή έχει διαφορετική αγωγιμότητα και επιτρεπτότητα συγκρινόμενο με τον αέρα. Για την επαγωγική αντίσταση, το είδωλο δεν υπάρχει, επειδή αέρας και έδαφος θεωρούνται μη μαγνητικά υλικά με την ίδια μαγνητική διαπερατότητα μ_0.

Τα στοιχεία της μήτρας αντιστάσεων γης μπορούν να υπολογιστούν με την εξίσωση (3.29):

$$R_{ji} = \frac{v_{ji}}{I_{\perp i}} = \frac{\rho_{soil}}{4\pi l_j} \int_{l_j}\int_{l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dldl + k_{sigma} \cdot \frac{\rho_{soil}}{4\pi l_j} \int_{l_j}\int_{l_{i'}} \frac{1}{r'_{ji'}} dldl \qquad (3.29)$$

όπου $I_{\perp i}$ είναι η ομοιόμορφη διασπορά πυκνότητας ρεύματος που ρέει από τον άξονα του τμήματος i στο έδαφος, $k_{sigma} = (\sigma_{soil} - \sigma_{air})/(\sigma_{soil} + \sigma_{air})$ είναι ο συντελεστής ανάκλασης λόγω των διαφορετικών αγωγιμοτήτων του αέρα και του εδάφους, v_{ji} είναι η μέση επαγόμενη τάση ανά μέτρο στην επιφάνεια του τμήματος i, λόγω της διασποράς ρεύματος από το τμήμα j, ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους, l_i, l_j και $l_{i'}$ είναι τα μήκη των τμημάτων i, j και του ειδώλου i' αντίστοιχα, ενώ r'_{ji} και $r'_{ji'}$ είναι οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου πηγής και του σημείου πεδίου. Όταν $i = j$, είναι η ίδια η αντίσταση γης του τμήματος i, ενώ όταν $i \neq j$ είναι η αμοιβαία αντίσταση γης μεταξύ των τμημάτων i και j.

Ομοίως, τα στοιχεία της μήτρας δεκτικοτήτων μπορούν να υπολογιστούν με την εξίσωση (3.30):

$$P_{ji} = \frac{v_{ji}}{q_i} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_{soil} l_j} \int_{l_j}\int_{l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dldl + k_{epsilon} \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon_{soil} l_j} \int_{l_j}\int_{l_{i'}} \frac{1}{r'_{ji'}} dldl \qquad (3.30)$$

όπου q_i είναι η ομοιόμορφη πυκνότητα φορτίου στον άξονα του τμήματος i, $k_{epsilon} = (\varepsilon_{soil} - \varepsilon_{air})/(\varepsilon_{soil} + \varepsilon_{air})$ είναι ο συντελεστής ανάκλασης λόγω των διαφορετικών διηλεκτρικών σταθερών (επιτρεπτοτήτων) του αέρα και του εδάφους, v_{ji} είναι η μέση επαγόμενη τάση ανά μέτρο στην επιφάνεια του τμήματος i, λόγω της διασποράς ρεύματος από το τμήμα j, ε_{soil} είναι η επιτρεπτότητα του εδάφους, l_i, l_j και $l_{i'}$ είναι τα μήκη των τμημάτων i, j και του ειδώλου i' αντίστοιχα, ενώ r'_{ji} και $r'_{ji'}$ είναι οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου πηγής και του σημείου πεδίου. Όταν $i = j$, είναι η δεκτικότητα του ίδιου του τμήματος i, ενώ όταν $i \neq j$ είναι η αμοιβαία δεκτικότητα μεταξύ των τμημάτων i και j.

Τα στοιχεία της μήτρας αυτεπαγωγών και αλληλεπαγωγών μπορούν να υπολογιστούν θεωρώντας ότι το ρεύμα i_i κατά μήκος του άξονα του τμήματος i είναι ομοιόμορφο. Έτσι, η αυτεπαγωγή L_{ii} του τμήματος i και η αμοιβαία επαγωγή L_{ji} μεταξύ των τμημάτων i και j, δίνονται από τις εξισώσεις (3.31α) και (3.31β) αντίστοιχα:

$$L_{ii} = \frac{v_{ii}}{i_i} = \frac{\mu_0}{4\pi l_i} \int_{l_i}\int_{l_i} \frac{1}{r'_{ii}} dl dl \qquad (3.31\alpha)$$

$$L_{ji} = \frac{v_{ji}}{i_i} = \frac{\mu_0}{4\pi l_j} \int_{l_j}\int_{l_i} \frac{1}{r'_{ji}} \vec{dl} \times \vec{dl} \qquad (3.32\beta)$$

όπου v_{ii} και v_{ji} είναι η μέση πτώση τάσης ανά μέτρο κατά μήκος της επιφάνειας του τμήματος i και j αντίστοιχα λόγω του διαμήκους ρεύματος i_i, μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του εδάφους, l_i και l_j είναι τα μήκη των τμημάτων i και j αντίστοιχα, ενώ r'_{ji} και $r'_{ji'}$ είναι οι αποστάσεις μεταξύ του σημείου πηγής και του σημείου πεδίου. Αν τα τμήματα i και j είναι κάθετα μεταξύ τους, η αμοιβαία επαγωγή είναι μηδέν.

Αφού γνωρίζουμε τις ηλεκτρικές παραμέτρους του αγωγού και την πηγή ρεύματος έγχυσης που αντιστοιχεί σε κρουστικό παλμό, η μεταβατική συμπεριφορά του αγωγού γείωσης μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας τις τροποποιημένες τηλεγραφικές εξισώσεις (3.32) και (3.33):

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = r_e I(x,t) + l(x,t)\frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \qquad (3.32)$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = g(x,t)V(x,t) + c(x,t)\frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \qquad (3.33)$$

όπου $V(x,t)$ και $I(x,t)$ είναι η άγνωστη κατανεμημένη τάση και το άγνωστο κατανεμημένο ρεύμα αντίστοιχα κατά μήκος του αγωγού γείωσης, r_e είναι η ανά μονάδα μήκους αντίσταση σε σειρά, $l(x,t)$, $g(x,t)$ και $c(x,t)$ είναι η αποτελεσματική ανά μονάδα μήκους επαγωγική αντίσταση, αγωγιμότητα και χωρητικότητα του αγωγού αντίστοιχα, στη θέση *x* και για χρόνο *t*. Οι τηλεγραφικές εξισώσεις (3.32) και (3.33) λύνονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Finite Difference Time Domain (FDTD) [43], ενώ το πιο σημαντικό στάδιο κατά την επίλυσή τους είναι να εκτιμήσουμε τις αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παραμέτρους $l(x,t)$, $g(x,t)$ και $c(x,t)$ σε κάθε χρονικό βήμα για κάθε τμήμα. Κατά την επίλυση των τηλεγραφικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο FDTD, το dx είναι ίσο με το μήκος του κάθε τμήματος l_{seg}. Όταν το μήκος κύματος καθοριστεί, το χρονικό βήμα dt θα πρέπει να επιλεγεί για την προσομοίωση, έτσι ώστε το dx/dt να είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη ταχύτητα διάδοσης κύματος στο έδαφος $\frac{v_{air}}{\sqrt{\varepsilon_{r_soil}}}$, ώστε να εξασφαλίσουμε σταθερά και συνεπή αποτελέσματα. Εδώ, v_{air} είναι η ταχύτητα του φωτός στον αέρα.

Πριν περιγράψουμε τη μεθοδολογία υπολογισμού των αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων του τμήματος i , $l(x,t)$, $g(x,t)$ και $c(x,t)$, για κάθε χρονικό βήμα, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε πώς δουλεύει η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με ανά μονάδα μήκους παραμέτρους εξαρτώμενες από το μήκος ηλεκτροδίου.

Η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς (βλέπε παράγραφο 3.3.2.6.1) εμπεριείχε την επιρροή του μήκους του αγωγού γείωσης στις ανά μονάδα μήκους παραμέτρους υπολογίζοντας τη συνολική αγωγιμότητα, επαγωγική αντίσταση και χωρητικότητα του πεπερασμένου μήκους καλωδίου και μοιράζοντας τις παραμέτρους εξίσου πάνω σε μια ανά μονάδα μήκους βάση. Οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι δίνονται από τις εξισώσεις (3.25)-(3.27). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκφράσεις C και L στις (3.26) και (3.27) αντίστοιχα είναι εσφαλμένες, γιατί οι εξισώσεις (3.25)-(3.27) ισχύουν μόνο για ομογενές μέσο. Εφόσον έχουμε έδαφος μισού χώρου, όπως υποθέσαμε παραπάνω, οι συντελεστές ανάκλασης λόγω της διεπιφάνειας αέρα-εδάφους για τον υπολογισμό των G , C και L είναι διαφορετικοί, έτσι, οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι του αγωγού θα πρέπει να υπολογιστούν όπως φαίνεται παρακάτω χρησιμοποιώντας τις (3.34)-(3.36):

$$G = \frac{2\pi}{\rho_{soil}\left[\left(\ln\frac{2l_c}{a} - 1\right) + \frac{\sigma_{soil} - \sigma_{air}}{\sigma_{soil} + \sigma_{air}} \cdot \left(\ln\frac{2l_c}{2d} - 1\right)\right]} \tag{3.34}$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_{soil}}{\left(\ln\frac{2l_c}{a} - 1\right) + \frac{\varepsilon_{soil} - \varepsilon_{air}}{\varepsilon_{soil} + \varepsilon_{air}} \cdot \left(\ln\frac{2l_c}{2d} - 1\right)} \tag{3.35}$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi}\left[\ln\frac{2l_c}{a} - 1\right] \tag{3.36}$$

Η μεταβατική ανάλυση με την προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας τις τηλεγραφικές εξισώσεις (3.32)-(3.33), με τις ανά μονάδα μήκους παραμέτρους, r_e , C , G και L να είναι σταθερές κατά μήκος του αγωγού σύμφωνα με τις (3.34)-(3.36). Αλλά για τους αγωγούς με διαφορετικό μήκος, οι ανά μονάδα μήκους παράμετροι διαφέρουν. Σε αυτήν την προσέγγιση, είναι φανερό ότι, για όλη τη διάρκεια του παλμού ρεύματος, υπάρχει πλήρης αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των διάφορων τμημάτων του αγωγού που οφείλεται στις ανά μονάδα μήκους παραμέτρους εξαρτώμενες από το μήκος.

Κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου, το οδεύον κύμα διαδίδεται από το πρώτο τμήμα στο τελευταίο τμήμα με συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνεπώς, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των δυο τμημάτων μπορεί να υπάρξει αν και μόνο αν τα δυο τμήματα είναι τροφοδοτημένα (αυτό είναι όταν μεταφέρουν ρεύμα ή φορτίο) και επιπρόσθετα η τιμή των συντελεστών σύζευξης θα πρέπει να είναι εξαρτώμενοι από πηγή. Έτσι, στην προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με παραμέτρους εξαρτώμενες από το μήκος ηλεκτροδίου, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τμημάτων έχει υπερεκτιμηθεί κατά τη διάρκεια της μεταβατικής ανάλυσης. Οι συνέπειες αυτής της υπερεκτιμημένης αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των τμημάτων είναι η μεταβατική τάση στο σημείο εισόδου για μακρύτερο αγωγό (π.χ. 280 m) να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή κοντύτερου αγωγού (π.χ. 20 m) [43], το οποίο είναι λάθος από την οπτική γωνία του συστήματος γείωσης. Αυτό σημαίνει, για δεδομένες παραμέτρους εδάφους, διατομή αγωγού, και παλμό ρεύματος έγχυσης, ο αγωγός με το μεγαλύτερο μήκος θα πρέπει να έχει μεταβατική τάση στο σημείο εισόδου η οποία είναι ίση ή μικρότερη από αυτή του αγωγού με το μικρότερο μήκος.

Σύμφωνα με την προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς βρήκαμε ότι:

- αν η επιρροή του μήκους θα πρέπει να περιλαμβάνεται στον υπολογισμό των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων, μόνο για ομοιόμορφη κατανομή πηγής, οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ οποιοδήποτε δυο τμημάτων θα είναι μονάδα.
- κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τμημάτων δε θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη από συντελεστές σύζευξης, επειδή κατά τη διάρκεια του παλμού η κατανομή πηγής κατά μήκος του αγωγού δε θα είναι ποτέ ομοιόμορφη.

Συνεπώς, στη μεταβατική ανάλυση του συστήματος γείωσης, οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ οποιοδήποτε δυο τμημάτων θα πρέπει να ποικίλουν με το χρόνο για τους αποτελεσματικούς υπολογισμούς των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων. Έτσι, στο παρόν μοντέλο, οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι $l(x,t)$, $g(x,t)$ και $c(x,t)$ στις τηλεγραφικές εξισώσεις (3.32) και (3.33) είναι συναρτήσεις του χώρου και του χρόνου.

Ο υπολογισμός των αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων βασίζεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές της μεταβατικής περιόδου.

Η πρώτη περιοχή είναι η περιοχή μηδενικής σύζευξης, η οποία εφαρμόζεται για t=0. Όσο ο παλμός ρεύματος έγχυσης δεν είναι συνδεδεμένος στον αγωγό γείωσης, τα τμήματα του αγωγού είναι ανεξάρτητα, το οποίο σημαίνει ότι δεν είναι συζευγμένα μεταξύ τους. Η κατάσταση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί όπως αν τα τμήματα του αγωγού βρίσκονται στον αέρα. Υπό την παραπάνω συνθήκη, για κάθε τμήμα i, με $i = 1,....,n$ οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι είναι $g_i(t=0) = 1/R_{ii}$, $c_i(t=0) = 1/P_{ii}$ και $l_i(t=0) = L_{ii}$. Εδώ, R_{ii}, P_{ii} και L_{ii} είναι οι διαγώνιες τιμές των παραμετρικών μητρών [R], [P] και [L] αντίστοιχα.

Η δεύτερη περιοχή αντιστοιχεί σε κάθε χρόνο t>0, αφού ο παλμός ρεύματος εγχυθεί στον αγωγό γείωσης, και λέγεται μεταβατική περιοχή σύζευξης. Σε αυτή την περιοχή, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ διαφορετικών τμημάτων αρχίζει να συνεισφέρει στον υπολογισμό των αποτελεσματικών

ανά μονάδα μήκους παραμέτρων, βασιζόμενοι στην κατανομή πηγής κατά μήκος του αγωγού. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ένα τμήμα παραμένει ελεύθερο (αιωρούμενο) μέχρι να τροφοδοτηθεί από τον οδεύοντα παλμό. Και δεν θα υπάρχει καμία αμοιβαία σύζευξη μεταξύ ενός ελεύθερου τμήματος και ενός τροφοδοτημένου τμήματος. Η συνέπεια του να λάβουμε υπόψη τη χρονικά μεταβλητή αμοιβαία σύζευξη είναι να μειώσουμε τα αποτελεσματικά *c* και *g*, και ταυτόχρονα να αυξήσουμε το αποτελεσματικό *l* για ένα δεδομένο τμήμα. Ανάλογα με το είδος του παλμού ρεύματος, η μείωση των *c* και *g* και η αύξηση του *l* θα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε τμήμα να μπορεί να έχει τιμές αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων οι οποίες είναι το πολύ, αντιστοιχώντας σε μια κατάσταση μέγιστης σύζευξης, ομοιόμορφη κατανομή πηγής. Βασιζόμενοι σε αυτή τη γνώση, είναι προφανές ότι οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ των τμημάτων για τον υπολογισμό των αποτελεσματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων μπορούν να ποικίλουν ανάμεσα στο μηδέν και το ένα.

Η τρίτη περιοχή είναι η περίπτωση όπου η αμοιβαία σύζευξη φτάνει ένα μέγιστο και οι συντελεστές σύζευξης θα είναι σχεδόν μονάδα. Αυτή είναι ιδανική περίπτωση που αντιστοιχεί σε σταθερό ρεύμα DC, που δεν πρόκειται ποτέ να επιτευχθεί για παλμό ρεύματος που αντιστοιχεί σε κεραυνό.

Σύμφωνα με την παραπάνω εξήγηση, ο απ' ευθείας υπολογισμός των πραγματικών ανά μονάδα μήκους παραμέτρων του i-οστού τμήματος $g_i(n\Delta t)$, $c_i(n\Delta t)$ και $l_i(n\Delta t)$ για $t = n\Delta t$ είναι ο ακόλουθος:

Με χρήση των αποτελεσματικών $g_i((n-1)\Delta t)$, $c_i((n-1)\Delta t)$ και $l_i((n-1)\Delta t)$, μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (3.32) και (3.33) η τάση του i-οστού κόμβου $V(i, n\Delta t)$και το ρεύμα μέσα από το i-οστό τμήμα $I(i, n\Delta t)$. Η μέση τάση του i-οστού τμήματος για $t = n\Delta t$ θα είναι:

$$V_ave(i,n\Delta t) = 0.5 \cdot [V(i,n\Delta t) + V(i+1,n\Delta t)] \qquad (3.3)$$

Έπειτα, το διαμήκες ρεύμα κατά μήκος του i-οστού τμήματος είναι $I(i,n\Delta t)$, το ρεύμα διασποράς από αυτό το τμήμα και το φορτίο του για t = nΔt μπορούν να υπολογιστούν ως εξής :

$$I_dis(i,n\Delta t) = g_i((n-1)\Delta t) \cdot V_ave(i,n\Delta t) \qquad (3.3.32)$$

$$Q(i,n\Delta t) = c_i((n-1)\Delta t) \cdot V_ave(i,n\Delta t) \qquad (3.3.33)$$

Γνωρίζοντας τις νέες κατανομές πηγής, οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι του i-οστού τμήματος για $t = n\Delta t$ μπορούν να υπολογιστούν ως εξής :

$$g_i(n\Delta t) = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^{n} R_{ij} \cdot \alpha_{ji}\right)} \qquad (3.3.34)$$

$$c_i(n\Delta t) = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^{n} P_{ij} \cdot b_{ji}\right)} \qquad (3.3.35)$$

$$l_i(n\Delta t) = \sum_{j=1}^{n} L_{ij} \cdot d_{ji} \qquad (3.3.36)$$

όπου α_{ji}, b_{ji}, και d_{ji} είναι συντελεστές σύζευξης προκειμένου να συμπεριληφθεί για το τμήμα i η σύζευξη από άλλα τμήματα j. Αυτοί οι συντελεστές σύζευξης κυμαίνονται μεταξύ του μηδενός και του ένα ανάλογα με την κατανομή της πηγής κατά μήκος του αγωγού. Όταν οι αναλογίες των πηγών στα τμήματα j και i είναι μεγαλύτερες από 1, υποθέτουμε ότι οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ τους είναι 1 για να μην παραβιαστούν οι μέγιστες συνθήκες

σύζευξης. Αν κάποιος επιλέξει τους συντελεστές σύζευξης ίσους με τις αναλογίες των πηγών στα τμήματα, που είναι μεγαλύτερες από 1, οι προκύπτουσες αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι θα είναι μικρότερες για τα c και g και μεγαλύτερες για το l έναντι των αντίστοιχων τιμών που έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας ομοιόμορφες κατανομές πηγής.

Όταν υπολογιστούν οι νέες αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι $g_i(n\Delta t)$, $c_i(n\Delta t)$ και $l_i(n\Delta t)$, η τάση στον i-οστό κόμβο $V(i,(n+1)\Delta t)$ και το ρεύμα δια του i-οστού τμήματος $I(i,(n+1)\Delta t)$, μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία όπως προηγουμένως.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω και τις κατάλληλες προσομοιώσεις [43, 44], φάνηκε ότι το μοντέλο μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς μπορεί να προβλέψει τόσο το αποτελεσματικό μήκος οριζόντιου αγωγού γείωσης όσο και τις μεταβατικές τάσεις στον αγωγό επακριβώς. Ωστόσο, η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες ανά μονάδα μήκους παραμέτρους από το μήκος ηλεκτροδίων αποτυγχάνει να προβλέψει το αποτελεσματικό μήκος και τη μεταβατική τάση στο σημείο έγχυσης. Η προσέγγιση ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς με εξαρτώμενες παραμέτρους από το μήκος ηλεκτροδίων είναι βάσιμη μόνο όταν το μήκος του αγωγού γείωσης είναι πολύ μικρότερο από το αποτελεσματικό μήκος και το ρεύμα έγχυσης έχει χαμηλούς χρόνους ανόδου.

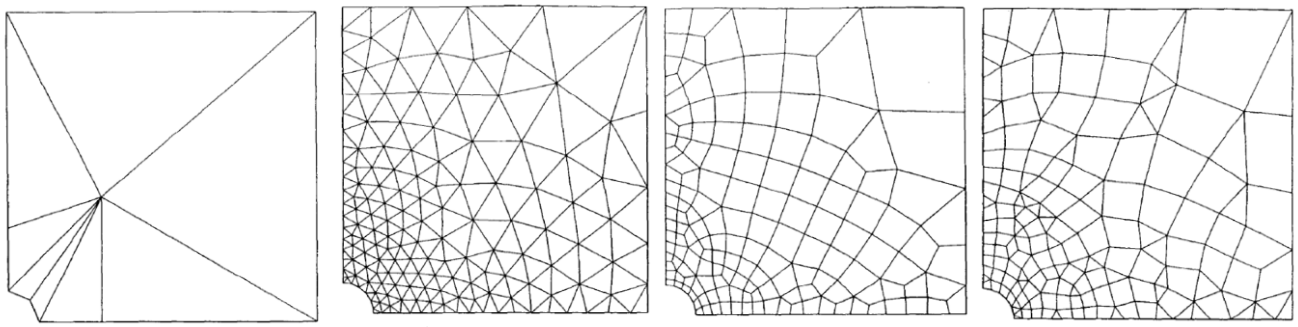
Η προσέγγιση μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε πολύπλοκα πλέγματα γείωσης με μεγάλο μέγεθος. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για τα πλέγματα γείωσης με διαφορετικά μεγέθη και τους οριζόντιους αγωγούς γείωσης είναι συγκρίσιμα με αυτά που βασίζονται στις προσεγγίσεις κυκλωματικής θεωρίας και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (βλέπε παραγράφους 3.3.2.1 και 3.3.2.2). Επίσης το μοντέλο μη ομοιόμορφης γραμμής μεταφοράς

μπορεί να προσομοιώσει την καθυστέρηση διάδοσης κύματος, που είναι αδύνατο να προβλεφθεί με το κυκλωματικό μοντέλο, καθώς δεν χρησιμοποιείται διάκριση χώρου στην προσέγγιση κυκλωματικής θεωρίας. Από την άλλη πλευρά, είναι πολύ απλούστερο και χρονικά αποδοτικό από τις προσεγγίσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, επειδή χρειάζεται να λυθούν μόνο οι τηλεγραφικές εξισώσεις χρησιμοποιώντας τεχνική FDTD και να υπολογισθούν οι αποτελεσματικές ανά μονάδα μήκους παράμετροι για κάθε τμήμα σε κάθε χρονικό βήμα. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των μητρών των ανά μονάδα μήκους παραμέτρων [P], [R] και [L] του συστήματος γείωσης είναι επίσης απλές και άμεσες.

Αφού το παρόν μοντέλο είναι στην περιοχή του χρόνου, είναι πιθανό να συμπεριλάβει μελλοντικά ιονισμό εδάφους αυξάνοντας την ακτίνα του αγωγού γείωσης, όταν το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού υπερβεί την κρίσιμη τιμή του ιονισμού του εδάφους. Αυτό συμβαίνει επειδή η αύξηση της ακτίνας του αγωγού γείωσης δεν κάνει τίποτα άλλο παρά να αλλάξει τις ηλεκτρικές παραμέτρους ([L], [C] και [G]) του συστήματος γείωσης.

3.4 Προσομοίωσεις μεταβατικής συμπεριφοράς πλεγμάτων γείωσης - βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Lo και Lee (1994) ανέπτυξαν ένα αλγόριθμο με σκοπό τη δημιουργία ενός πλέγματος με τη μέθοδο των πεπρερασμένων στοιχείων. Ο αλγόριθμος δύναται να εφαρμοστεί σε αυθαίρετα διδιάστατα (2D) μοντέλα. Στη μελέτη αυτή συγκρίνονται αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου σε πλέγματα με τρίγωνα, τετράεδρα και συνδυασμό των δύο. Επίσης η μέθοδος αυτή εισήγαγε μεθόδους για τον πιο ακριβή υπολογισμό του μεγέθους των πολυέδρων καθώς και τον αριθμό και τις αποστάσεις των κόμβων. Τα σχετικά διαγράμματα παρατίθενται στο Σχήμα 3.5.

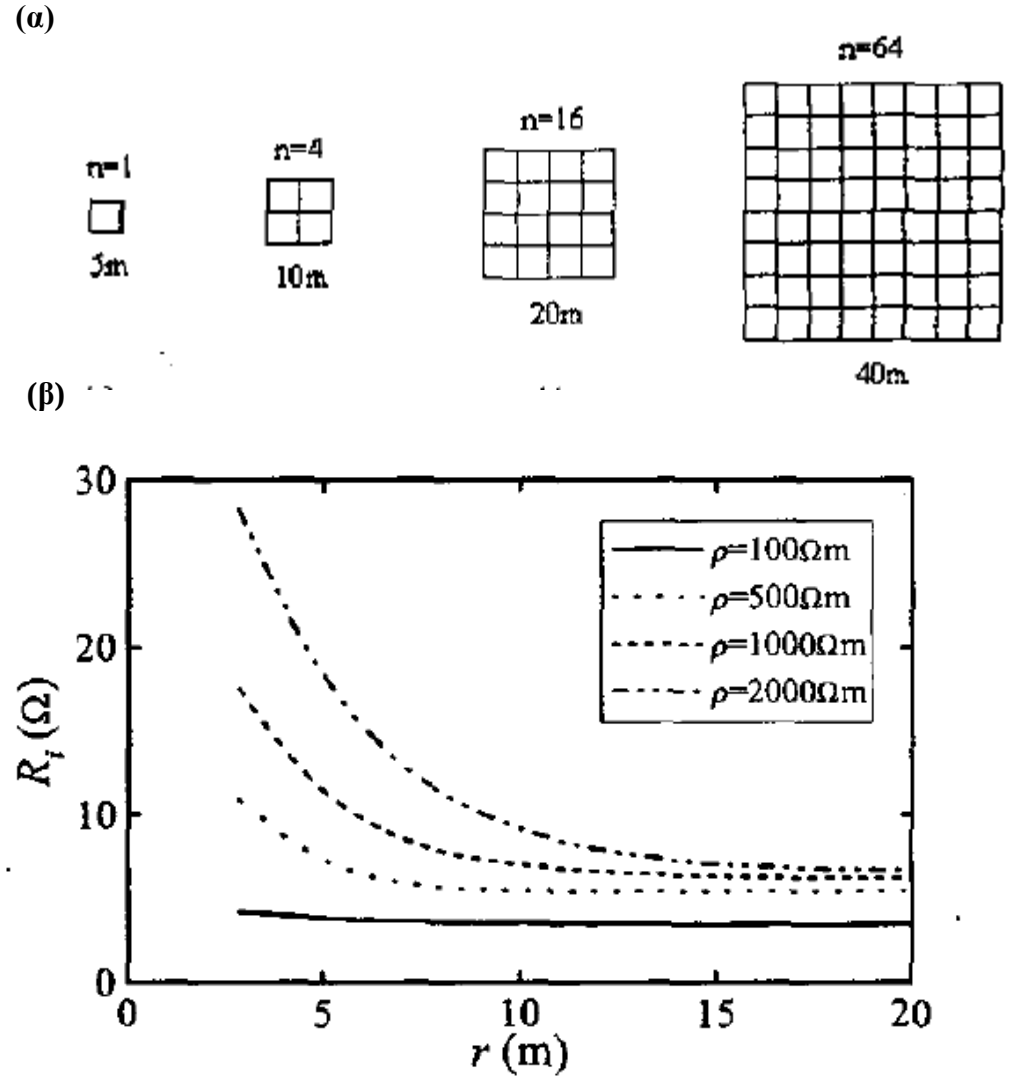


Αρχικό (initial mesh) | Πλέγμα με τρίγωνα (triangular mesh) (α=0,954, χ=0,878) | Πλέγμα με τετράεδρα (quadrilateral mesh) (α=0,642, χ=0,842) | Πλέγμα με συνδυασμό (mix mesh) (α=0,737, χ=0,883)

Σχήμα 3.5: Εφαρμογή αλγόριθμου σε πλέγματα

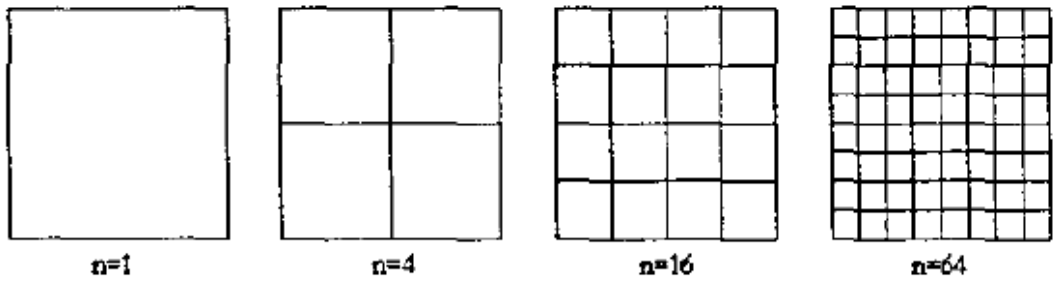
Η έρευνα των Yanging et al (2002) εστιάστηκε στη μελέτη της επίδρασης σχεδιαστικών παραμέτρων στη μεταβατική συμπεριφορά πλεγμάτων γείωσης σε ένα υποσταθμό. Ειδικότερα διερευνήθηκαν η επίδραση της δομής του πλέγματος μεταβάλλοντας (α) τις διαστάσεις και (β) τον αριθμό των «ματιών»του πλέγματος (Σχήμα 3.6 και Σχήμα 3.7 αντίστοιχα), η επίδραση του

εγχυόμενου ρεύματος στο σημείο τροφοδοσίας (Σχήμα 3.8) και η επίδραση του κρουστικού ρεύματος μεταβάλλοντας (α) το χρόνο μετώπου (front time) και (β) το πλάτος ρεύματος (current amplitude) (Σχήμα 3.9).

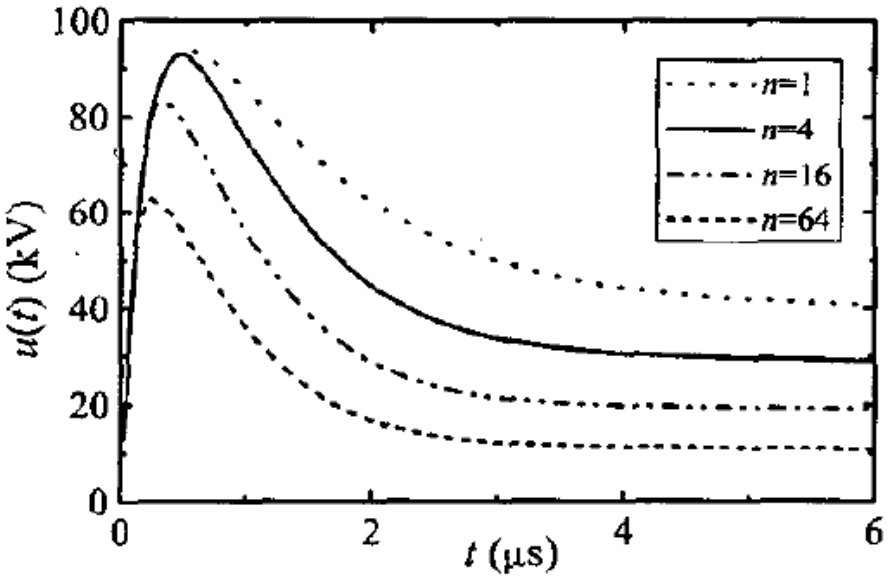


Σχήμα 3.6: (α) Παρουσίαση των πλεγμάτων γείωσης και (β) επίδραση των διαστάσεων των πλεγμάτων γείωσης στην κρουστική αντίσταση γείωσης.

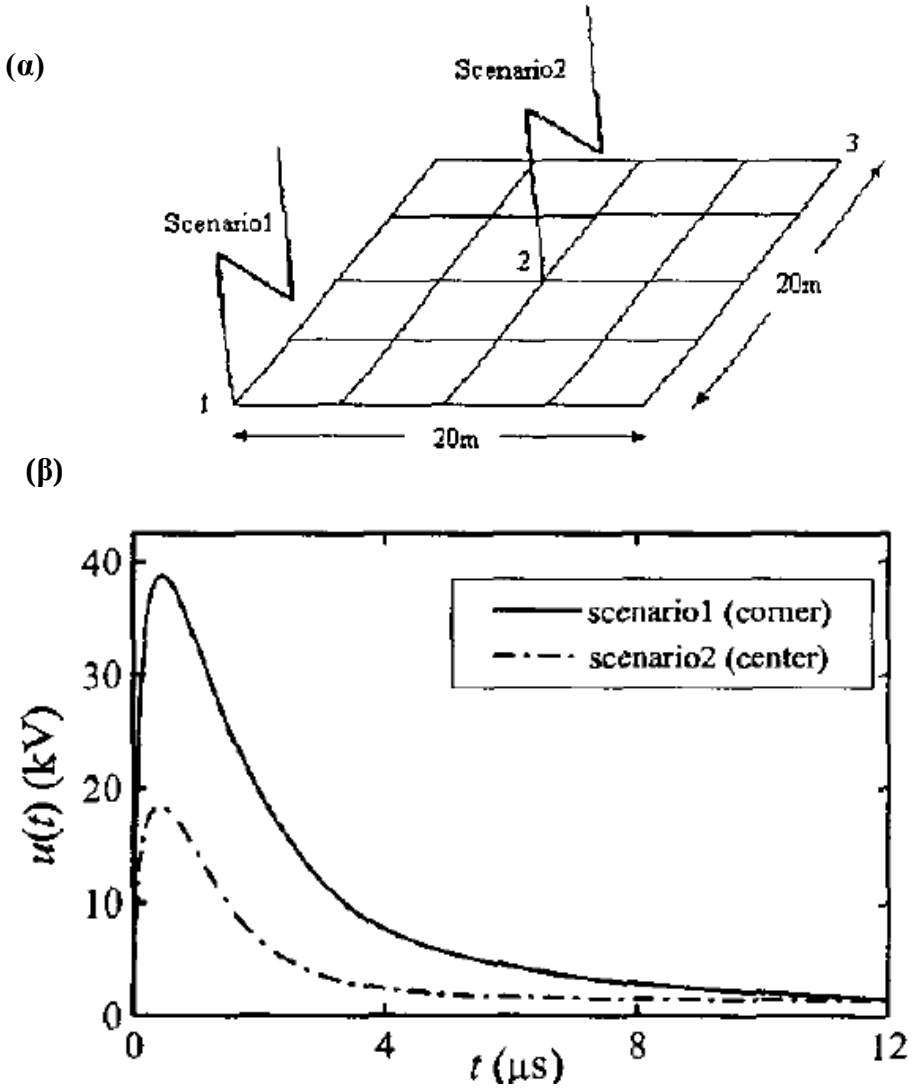
(α)



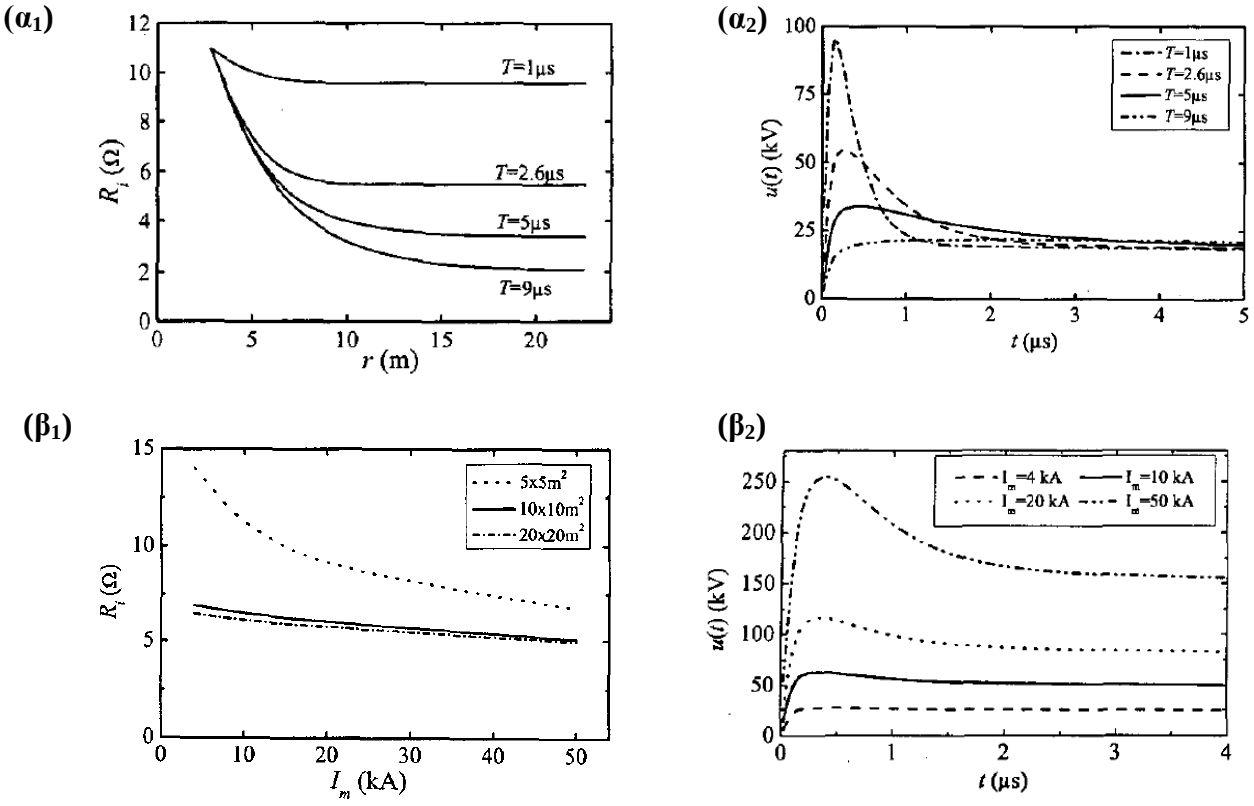
(β)



Σχήμα 3.7: (α) Παρουσίαση των πλεγμάτων γείωσης με διαφορετικές αποστάσεις αγωγών και (β) επίδραση της απόστασης μεταξύ των αγωγών στην κρουστική αντίσταση γείωσης.

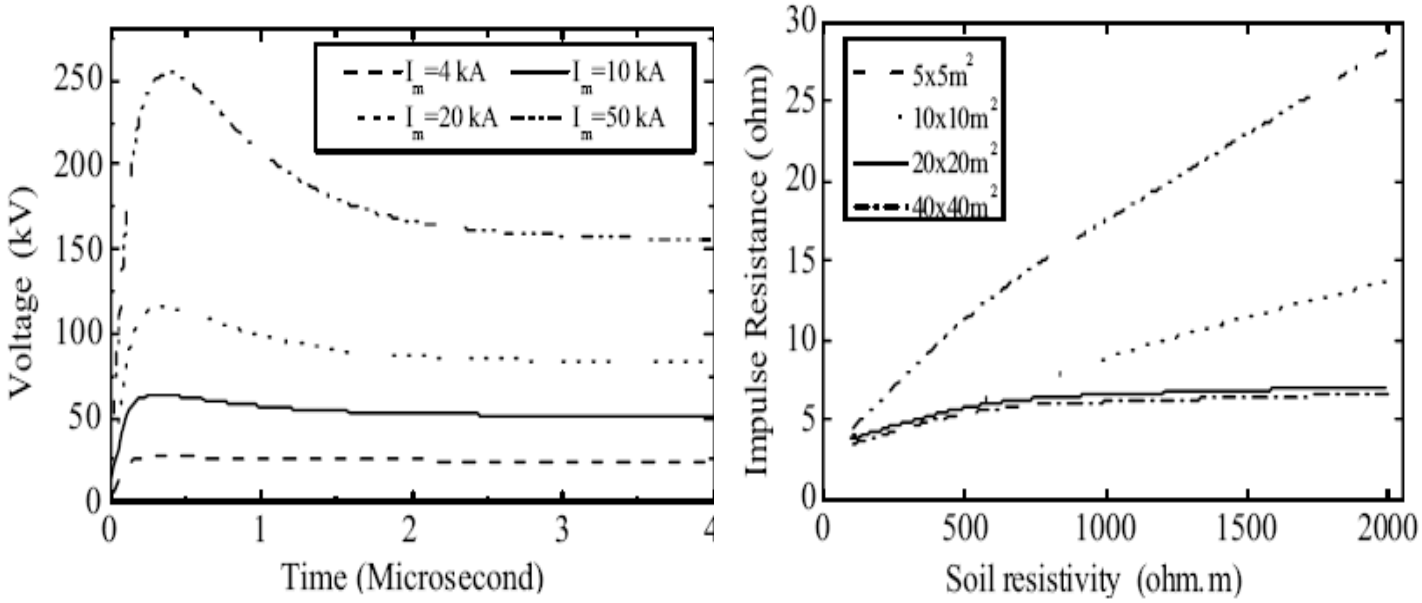


Σχήμα 3.8: (α) Παρουσίαση των διαφορετικών σημείων τροφοδοσίας και (β) επίδραση των σημείων τροφοδοσίας στη μέγιστη μεταβατική GPR.



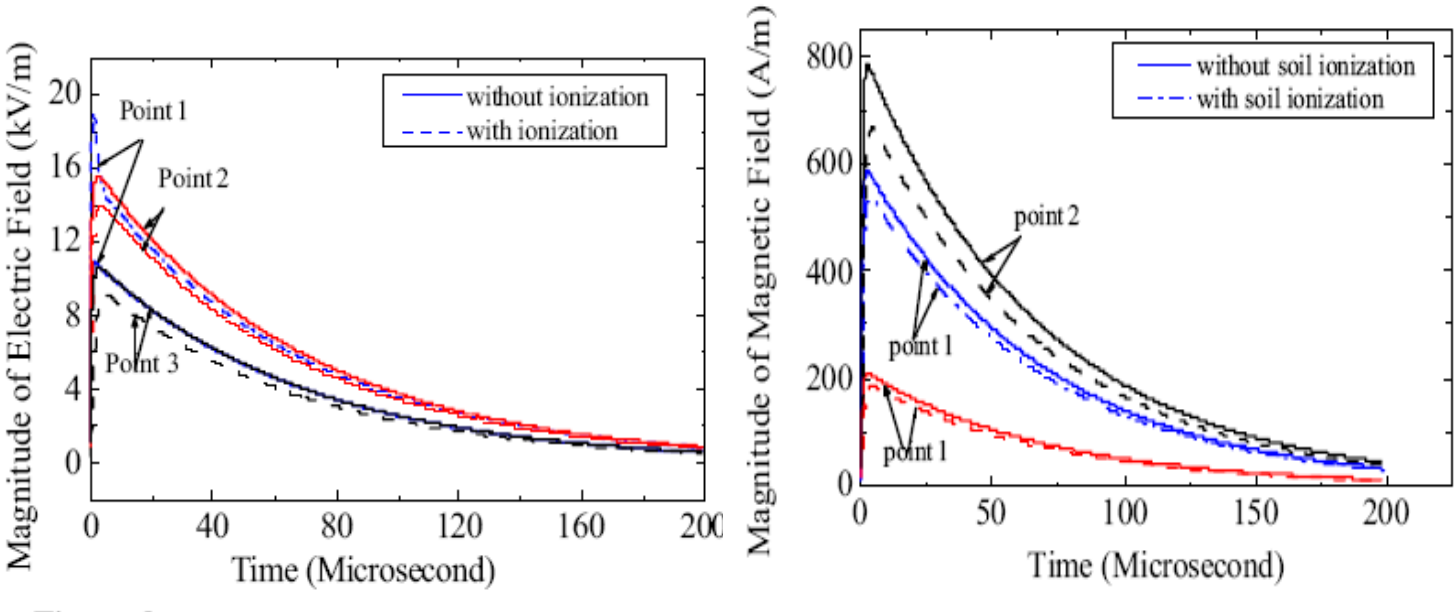
Σχήμα 3.9: Επίδραση του χρόνου μετώπου: στην κρουστική αντίσταση (α_1) και στη μέγιστη μεταβατική GPR(α_2) και επίδραση του πλάτους του ρεύματος στην κρουστική αντίσταση (β_1) και στη μέγιστη μεταβατική GPR (β_2).

Σχετική έρευνα διεξήχθησε από τους Jinliang et al (2003) οι οποίοι ανέπτυξαν μοντέλο για τη μελέτη των επιδράσεων του επαγωγικού ρεύματος στα μεταβατικά χαρακτηριστικά συστημάτων πλεγμάτων γείωσης. Παράλληλα μελέτησαν την επίδραση της αντίστασης του εδάφους στα μεταβατικά χαρακτηριστικά του πλέγματος γείωσης. Η επίδραση των εν λόγω παραμέτρων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10.



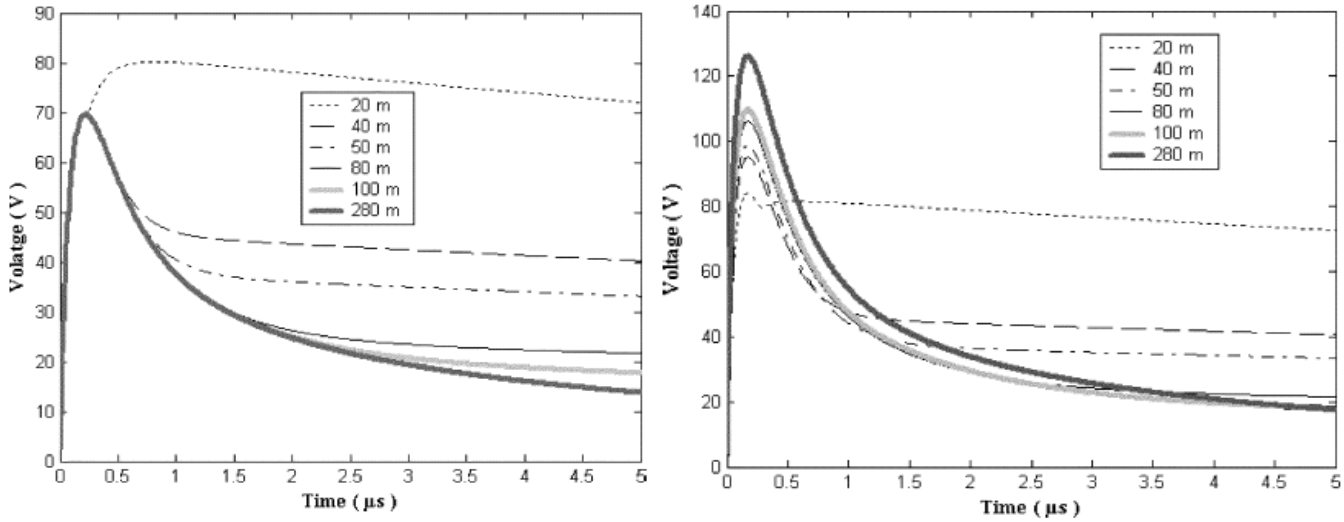
Σχήμα 3.10 : (α) επίδραση πλάτους επαγωγικού ρεύματος (β) επίδραση αντίστασης εδάφους

Από το Σχήμα 3.10 είναι εμφανές ότι η επαγωγική αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Επίσης εξετάσθηκε η επίδραση του ιονισμού του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο, όπου παρατηρείται ότι η επίδραση αυτού στο ηλεκτρικό πεδίο είναι μεγάλη ενώ στο μαγνητικό πεδίο είναι πολύ μικρή (Σχήμα 3.11).



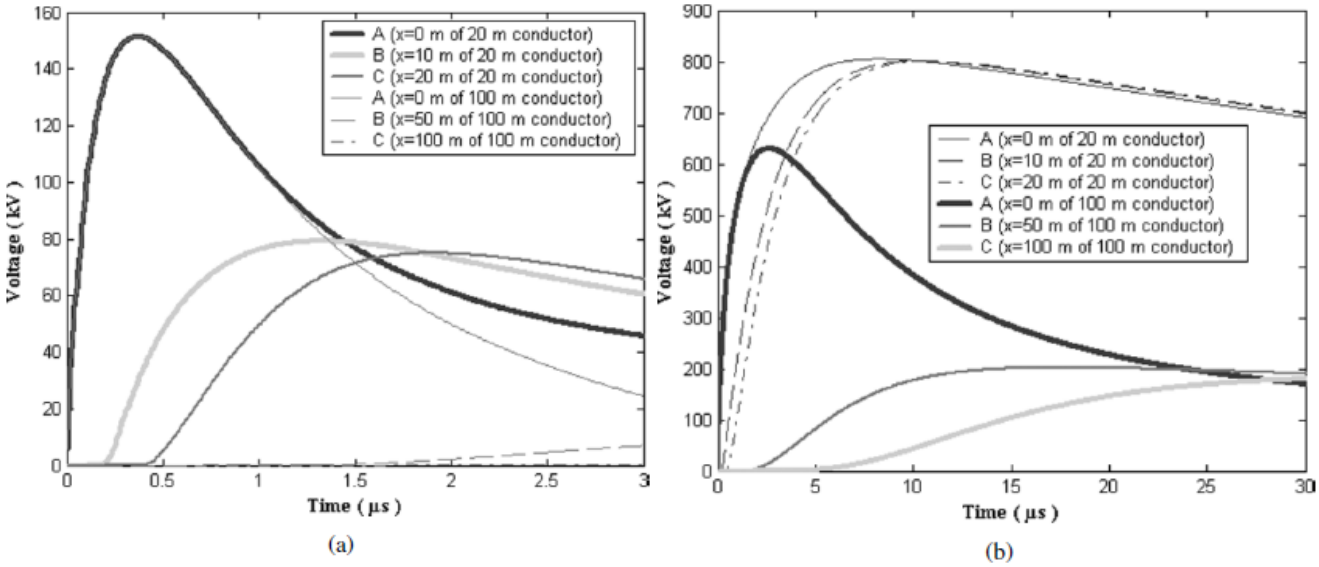
Σχήμα 3.11: (α) επίδραση ιονισμού στο ηλεκτρικό πεδίο (β) επίδραση ιονισμού στο μαγνητικό πεδίο

Η έρευνα των Yaqing et al (2005) μεταξύ άλλων ασχολήθηκε μετην επίδραση του μεγέθους του ηλεκτροδίου στο ίδιο οριζόντιο πλέγμα γείωσης. Τα αποτελέσματα διακρίνονται σε αργή και γρήγορη έγχυση επαγωγικού ρεύματος (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12 (α) γρήγορη έγχυση επαγωγικού ρεύματος (β) αργή έγχυση επαγωγικού ρεύματος

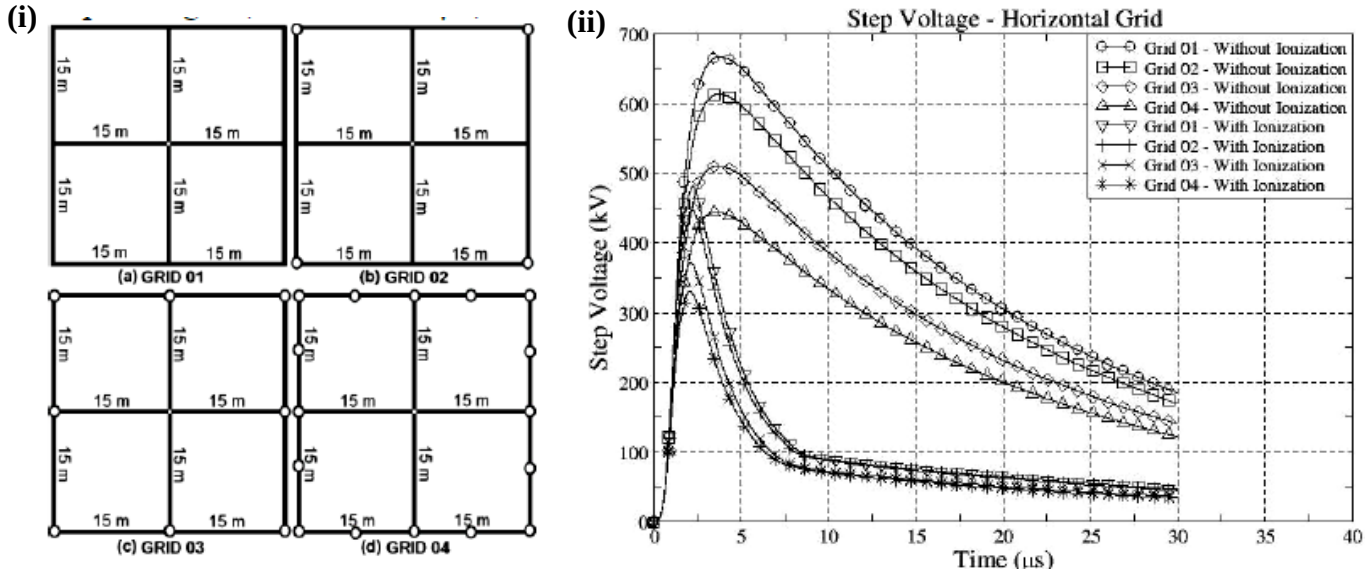
Επίσης πραγματοποίησαν εγχύσεις σε πλέγματα διαφορετικών μεγεθών σε διαφορετικά σημεία με σκοπό να υποδείξουν ότι αντίστοιχα αποτελέσματα ισχύουν για όλα τα μεγέθη πλέγματος (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13 (α) γρήγορη έγχυση επαγωγικού ρεύματος (β) αργή έγχυση επαγωγικού ρεύματος

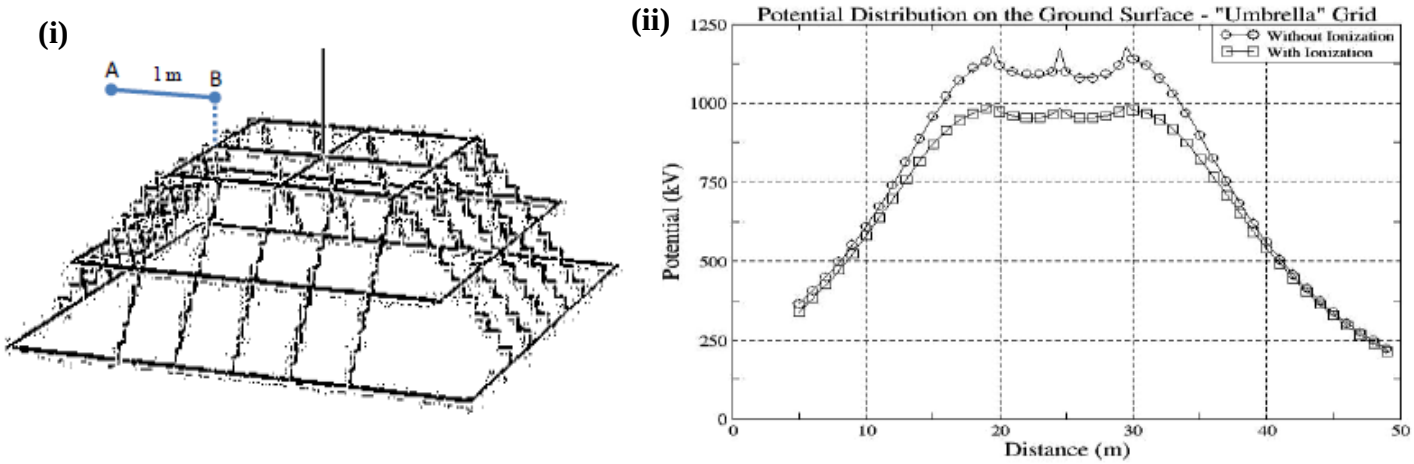
Η εργασία των Santos et al (2009) ασχολείται με διαφορετικά σχηματικά πλέγματα γείωσης καθώς και με την επίδραση του ιονισμού του εδάφους.

(A) <u>οριζόντιο πλέγμα</u>



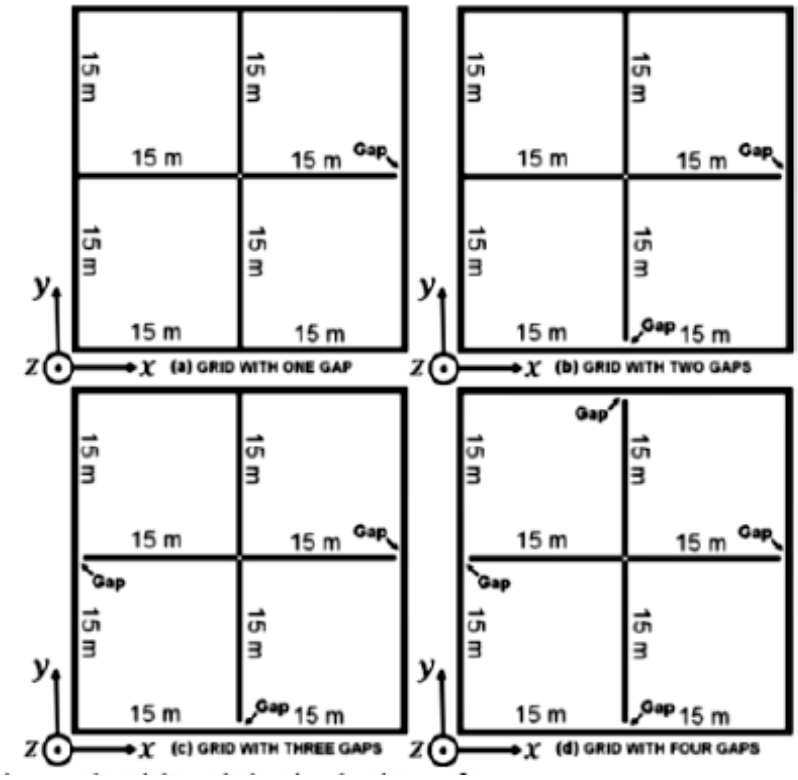
Σχήμα 3.14: (i) Οριζόντιο πλέγμα (a) αρχικό (χωρίς ηλεκτρόδια), (b) με 4 κάθετα ηλεκτρόδια, (c) με 8 κάθετα ηλεκτρόδια και (d) με 16 κάθετα ηλεκτρόδια και (ii) Βηματικές τάσεις στα οριζόντια πλέγματα.

(B) <u>σε σχήμα ομπρέλας πλέγμα</u>



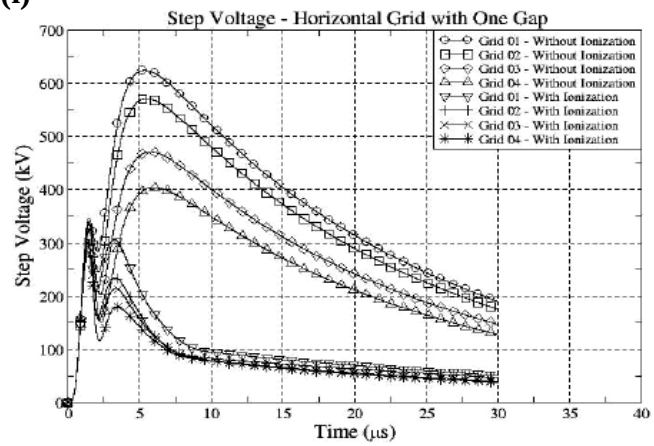
Σχήμα 3.15: (i) Πλέγμα σε σχήμα ομπρέλας και (ii) Βηματικές τάσεις στα οριζόντια πλέγματα.

(Γ) <u>οριζόντιο πλέγμα με κενά</u>

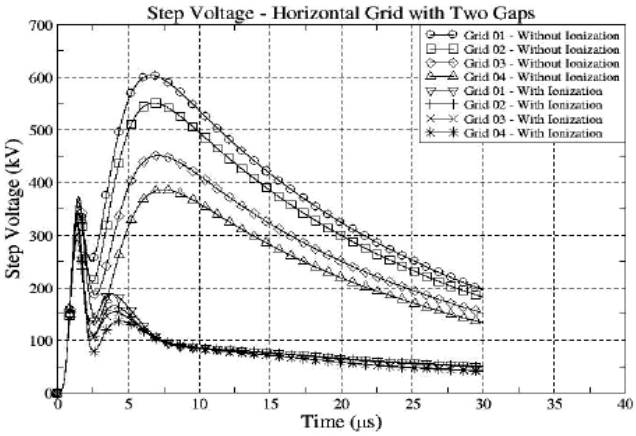


Σχήμα 3.16: (i) Οριζόντιο πλέγμα με κενά.

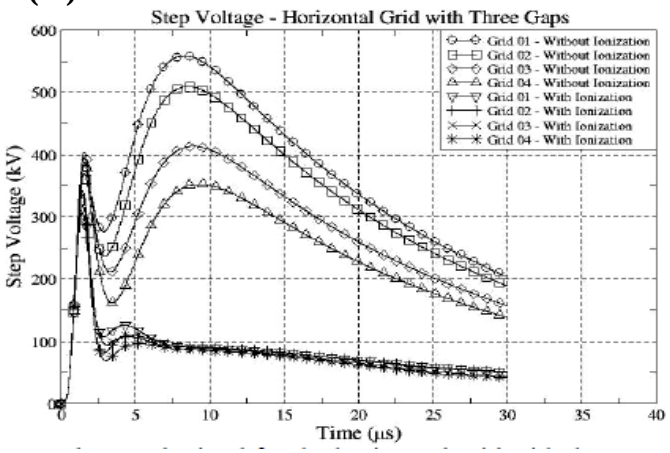
(i)



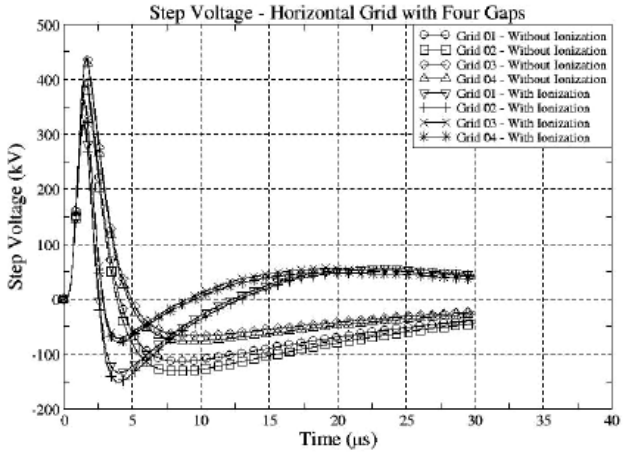
(ii)



(iii)



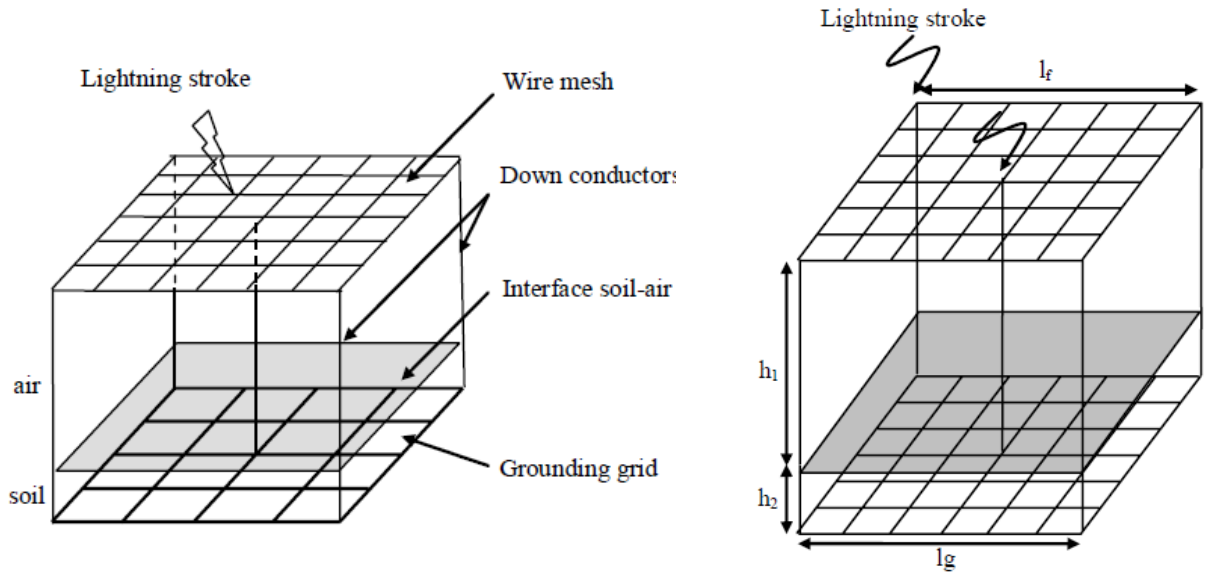
(iv)



Σχήμα 3.17: Βηματικές τάσεις σε οριζόντιο πλέγμα με (i) ένα κενό, (ii) δύο κενά, (iii) τρία κενά και (iv) τέσσερα κενά.

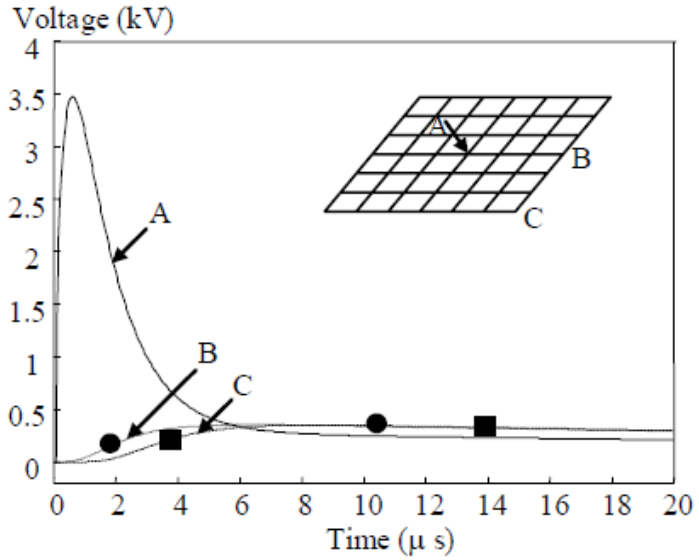
Ο ιονισμός επιδρά σε όλα τα σχηματικά μοντέλα. Στο μοντέλο με τα κενά μειώνονται σημαντικά οι τιμές των τάσεων και η προσθήκη επιπρόσθετων κενών και ηλεκτροδίων στο μοντέλο γείωσης οδηγού σε μείωση των τιμών τάσεως.

Οι Harrat et al (2009) εισήγαγαν την ιδέα για ένα νέο μοντέλο όπου ένα εναέριο πλέγμα καλωδίων συνδέεται με το πλέγμα γείωσης μέσω καθοδικών ηλεκτροδίων σε πέντε σημεία (Σχήμα 3.18).



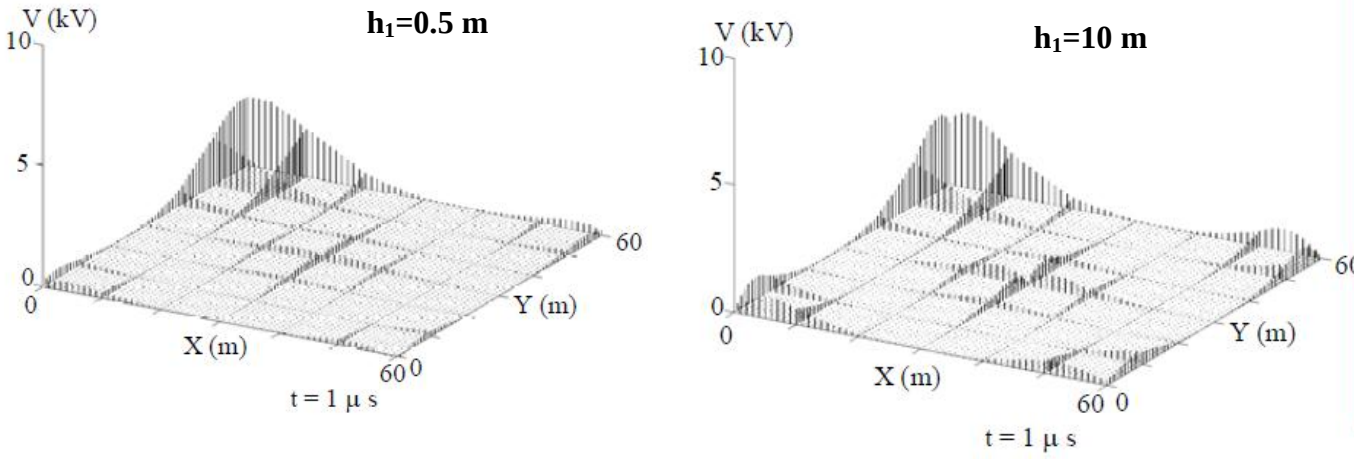
Σχήμα 3.18: Μοντέλο πλέγματος γείωσης

Πραγματοποιήθηκε έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος σε τρία διαφορετικά σημεία A, B και C (Σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19: Έγχυση ηλεκτρικού ρεύματος στα σημεία A, B και C.

Επιπρόσθετα διεξήχθησαν δοκιμές αυξάνοντας την απόσταση του εναέριου πλέγματος καλωδίων από το έδαφος όπου βρίσκεται το πλέγμα γείωσης.



Σχήμα 3.20: Μεταβολή στη μεταβατική τάση αλλάζοντας την απόσταση του εναέριου πλέγματος καλωδίων από το έδαφος (h_1) όπου βρίσκεται το πλέγμα γείωσης.

4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ PC OPERA-3D

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ PC OPERA-3D

Για την παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν διάφοροι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την συμπεριφορά ενός πλέγματος γείωσης. Αρχικά εξετάσαμε πως επιδρά η αύξηση στον αριθμό των αγωγών (ματιών) του πλέγματος ***(Προσομοίωση Α)*** σε μονοστρωματικό έδαφος με δεδομένες ηλεκτρικές ιδιότητες τόσο για ανάλυση στατικής και μεταβατικής συμπεριφοράς. Στην συνέχεια προσομοιώνουμε το μοντέλο γείωσης σε διαφορετικά είδη εδάφους, όσο αφορά τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες, σε μεταβατική ανάλυση ***(Προσομοίωση Β)***. Για το τρίτο μέρος των προσομοιώσεων μας τοποθετούμε το μοντέλο γείωσης σε διστρωματικό έδαφος και μεταβάλλουμε τις ιδιότητες του εδάφους ***(Προσομοίωση Γ)***. Ακολούθως προσθέτουμε ηλεκτρόδια στο μοντέλο γείωσης, το οποίο βρίσκεται σε διστρωματικό έδαφος και για το τελευταίο μέρος των προσομοιώσεων ***(Προσομοίωση Δ)***.

Οι διατάξεις, που προσομοιώθηκαν, παρουσιάζουν αξονική συμμετρία, η οποία και λήφθηκε υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση του μοντέλου για διεκόλυνση στην επίλυση λόγω των αυξημένων απαιτήσεων μνήμης από το λογισμικό. Επίσης, η πλεγματοποίηση του μοντέλου (κατόπιν δοκιμών) και ο καθορισμός των οριακών συνθηκών (σε ποια απόσταση από τη διάταξη το δυναμικό μηδενίζεται) έγιναν κατά τέτοιον τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Στη στατική ανάλυση εφαρμόστηκε στο ηλεκτρόδιο σταθερή τάση 1000V, ενώ για την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς επιβάλλαμε στο ηλεκτρόδιο την ακόλουθη διπλοεκθετικής μορφής κρουστική τάση:

$$V(t) = 100(e^{-0.4054t} - e^{-68.49t})kV$$

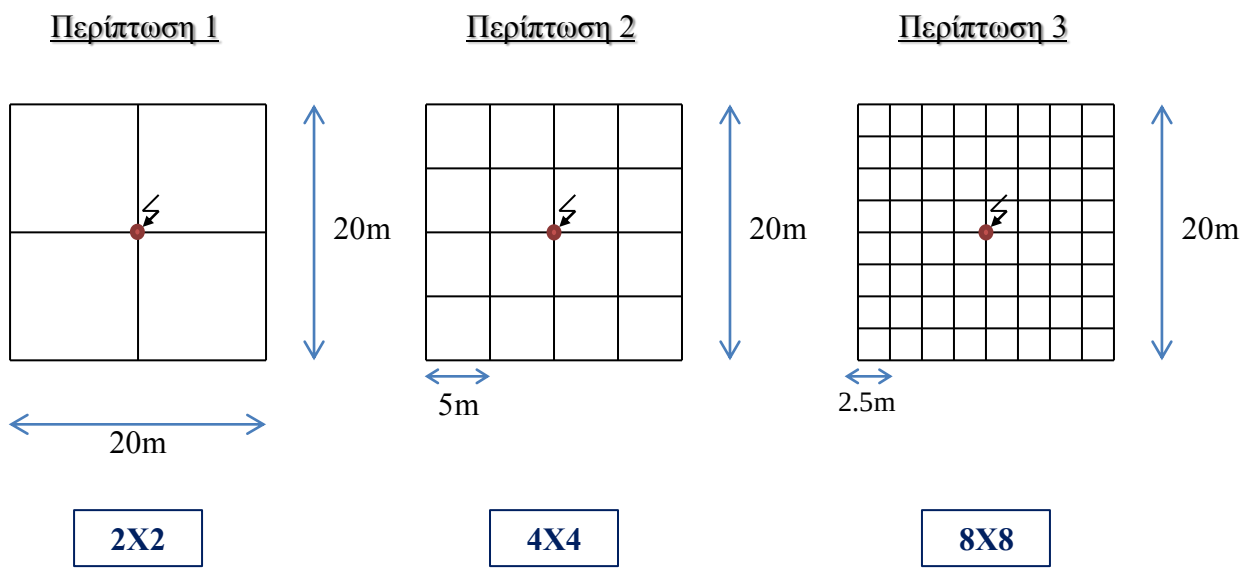
όπου t σε μs. Η κρουστική αυτή τάση έχει χρόνο μεγίστου T_p = 0.08μs.

4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ Α

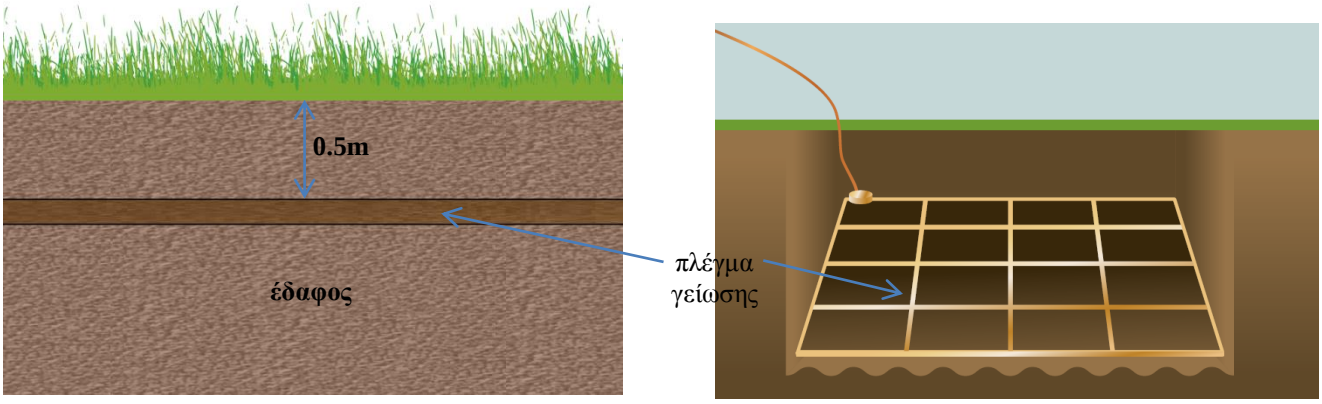
Αύξηση του αριθμού των αγωγών του πλέγματος γείωσης

4.1.1 Γεωμετρία του προβλήματος

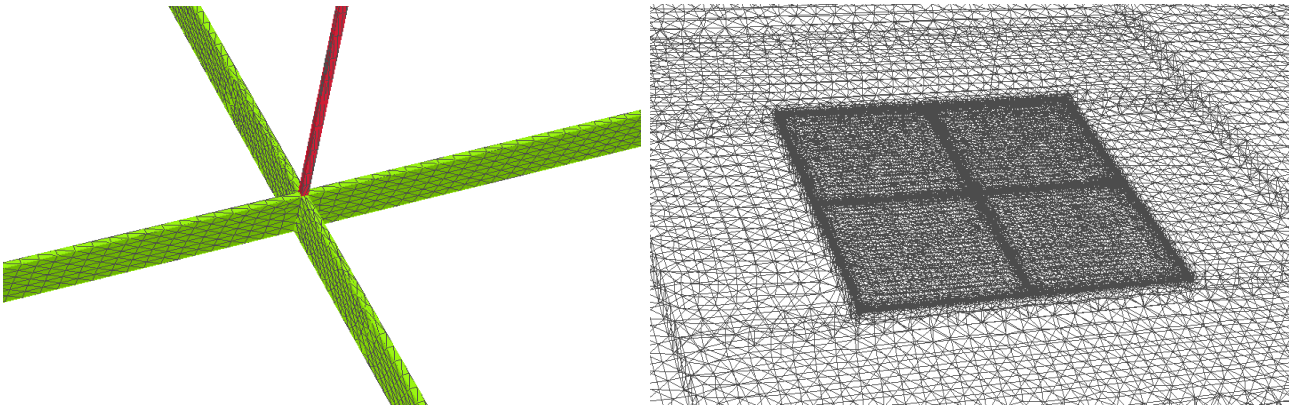
Το προς εξέταση σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα πλέγμα γείωσης περιμετρικών διαστάσεων 20x20m^2 θαμμένο στο 0,5m. Ο αγωγός μας είναι ταινία διαστάσεων 40x4mm. Από ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο στο κέντρο του συστήματος εκχύεται αρχικά σταθερή τάση V=1000V για την ανάλυση σταθερής κατάστασης (Steady State) και στην συνέχεια εκχυέται διπλοεκθετικής μορφής κρουστική τάση $V(t) = 100(e^{-0.4054t} - e^{-68,49t})kV$ για την ανάλυση μεταβατικής συμπεριφοράς (Transient Analysis). Στις Περιπτώσεις προς εξέταση μεταβάλαμε τον αριθμό «ματιών» του πλέγματος γείωσης (αύξηση αριθμού αγωγών πλέγματος) κρατώντας σταθερές τις περιμετρικές διαστάσεις του όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Η γεωμετρία του προβλήματος – πλέγμα γείωσης



Σχήμα 4.2: Η γεωμετρία του προβλήματος στο PC OPERA-3D



(a) **(b)**

Σχήμα 4.3: (a) Μεγέθυνση στην περιοχή του ηλεκτροδίου, **(b)** πλέγμα επίλυσης μεθόδου FEM

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, συγκεκριμένα, η τιμή της ειδικής αντίστασης(ρ), ηλεκτρικής επιτρεπτότητας(ε) και αγωγιμότητας(σ).

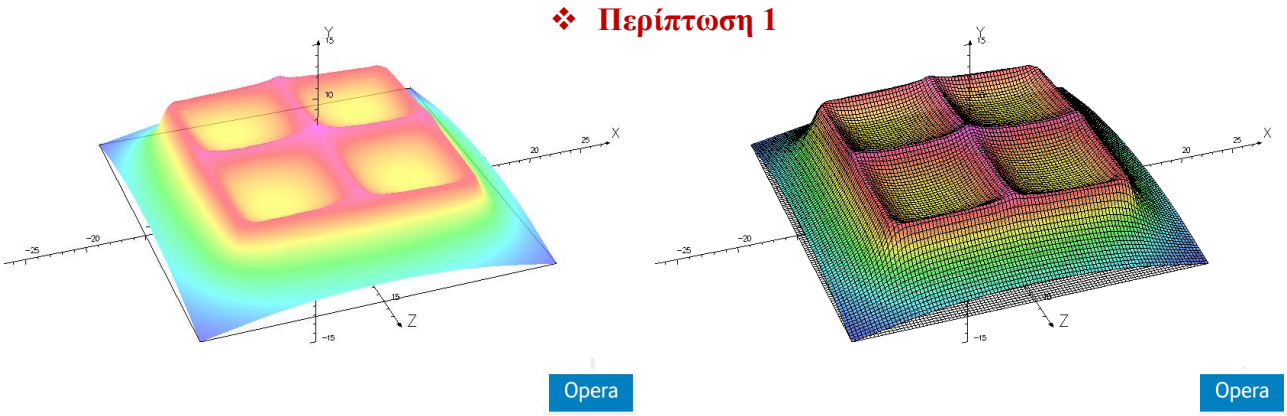
Έδαφος	**Περίπτωση 1**	**Περίπτωση 2**	**Περίπτωση 3**
ρ [Ωm]	1000	1000	1000
ε	36	36	36
σ [S/m]	0.001	0.001	0.001
Αριθμός Ματιών	2x2	4x4	8x8

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις

4.1.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Α

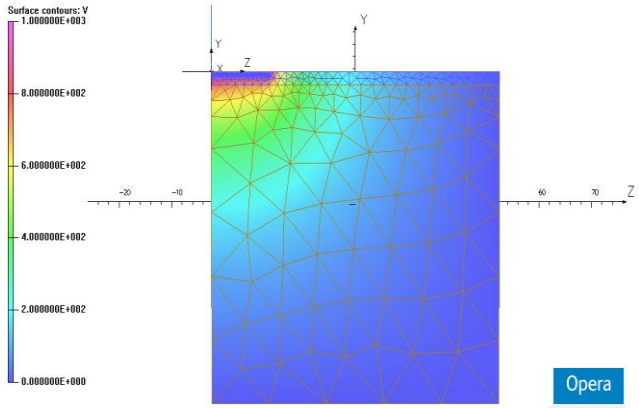
Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις τρεις περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Στατική Ανάλυση και Μεταβατική Ανάλυση.

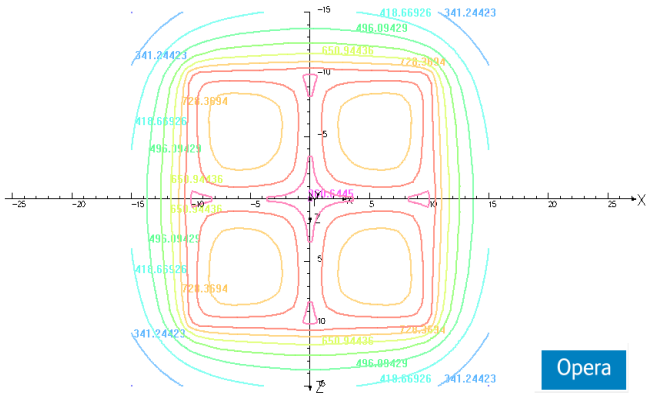
❖ **Περίπτωση 1**



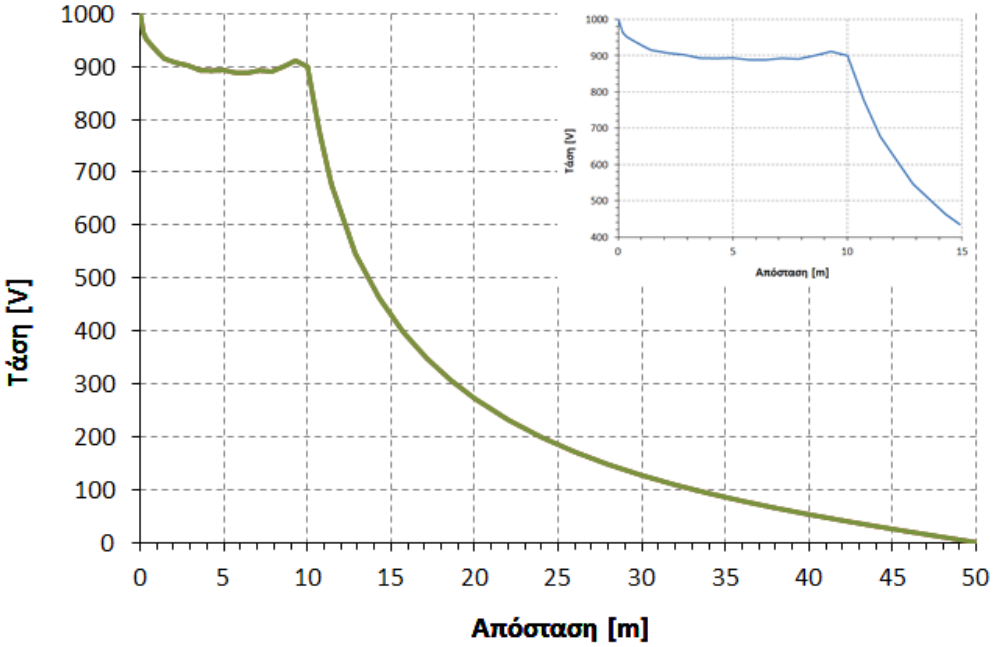
Σχήμα 4.4: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Στατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.5-4.6 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





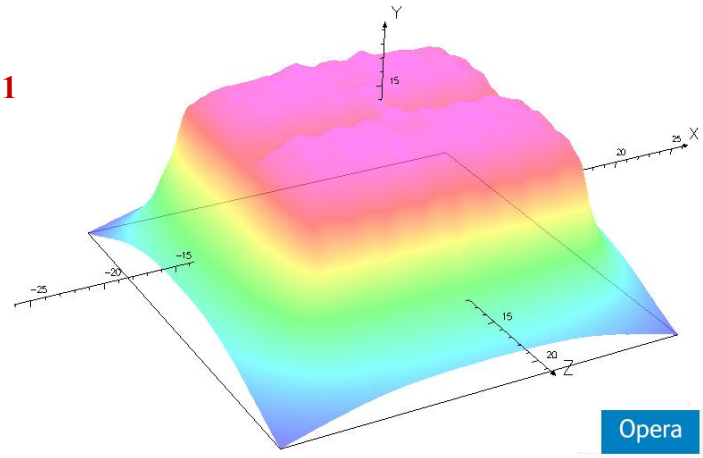
Σχήμα 4.5: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.6:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Στατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.7: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Στατική Ανάλυση)

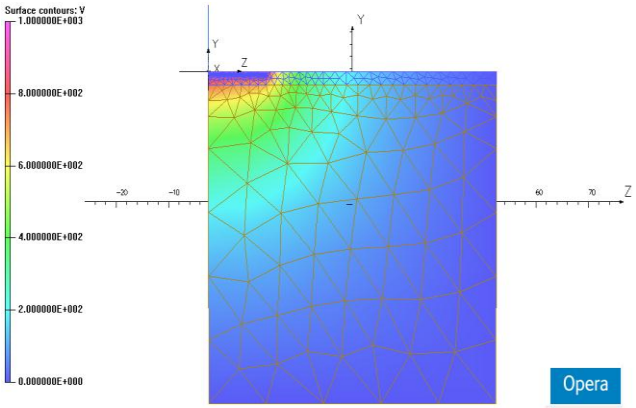
Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση για το χρόνο μεγίστου της διπλοεκθετικής (0.8 μs)..

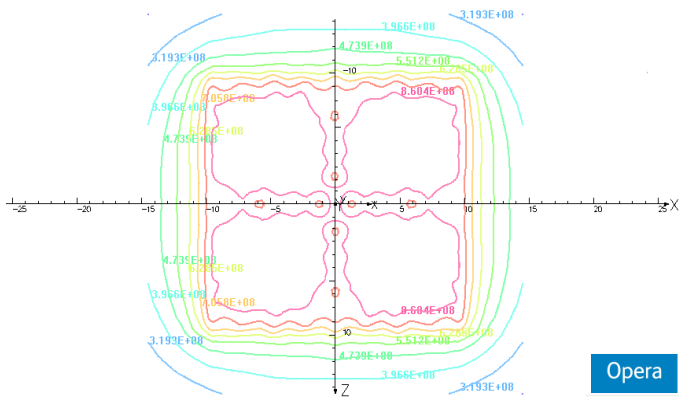
❖ **Περίπτωση 1**



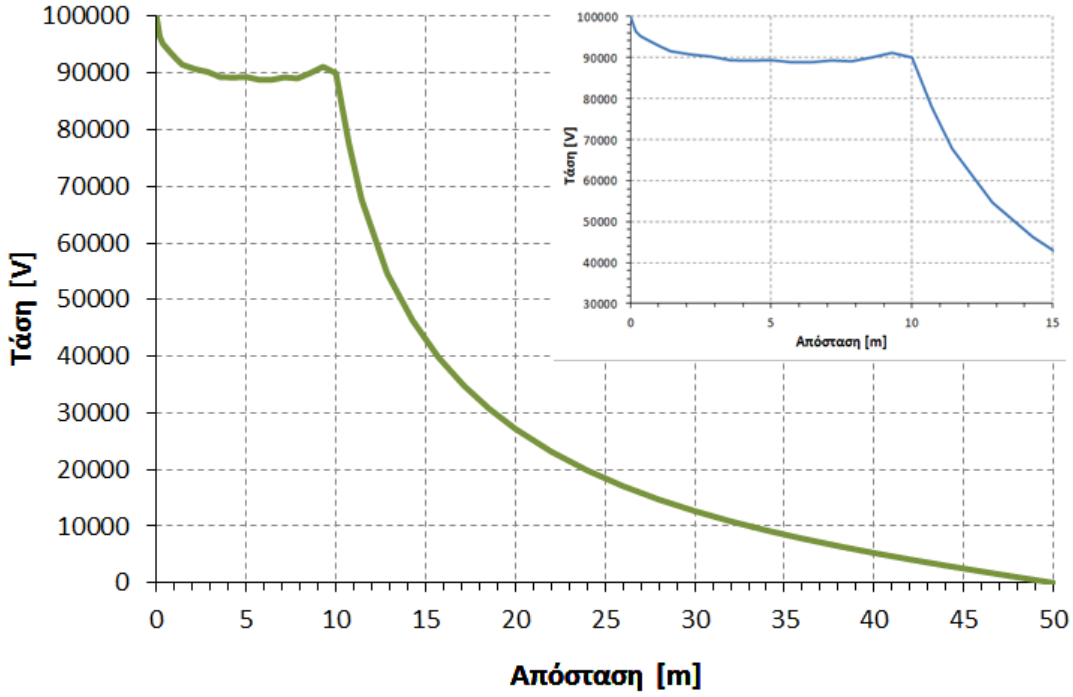
Σχήμα 4.8: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.9-4.10 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.11 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.



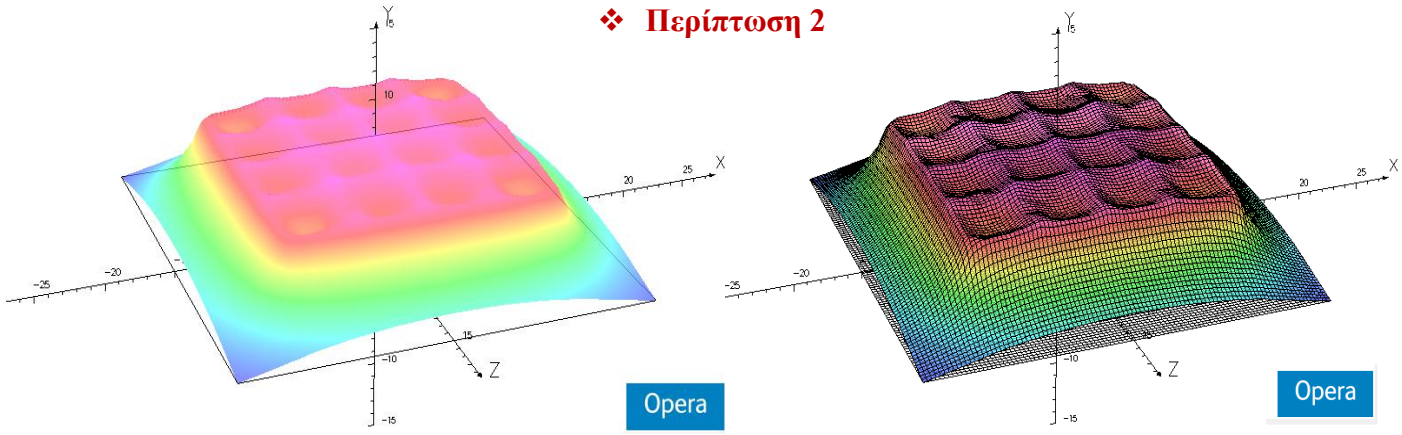


Σχήμα 4.9: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.10:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)



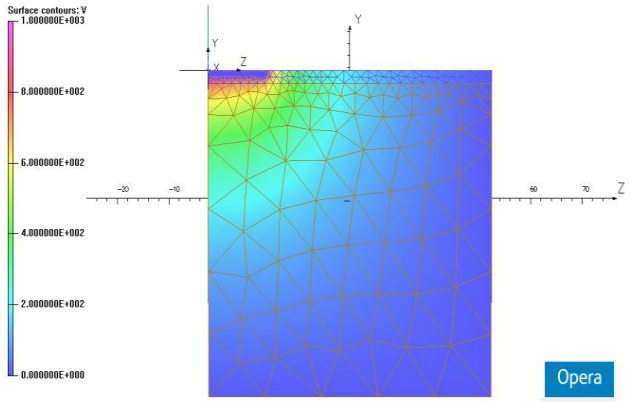
Σχήμα 4.11: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

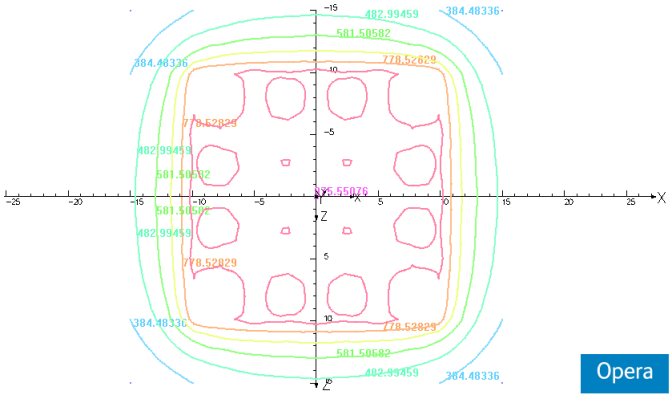
Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για την Περίπτωση 2, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D με όλα τα γραφήματα για την Στατική Ανάλυση.



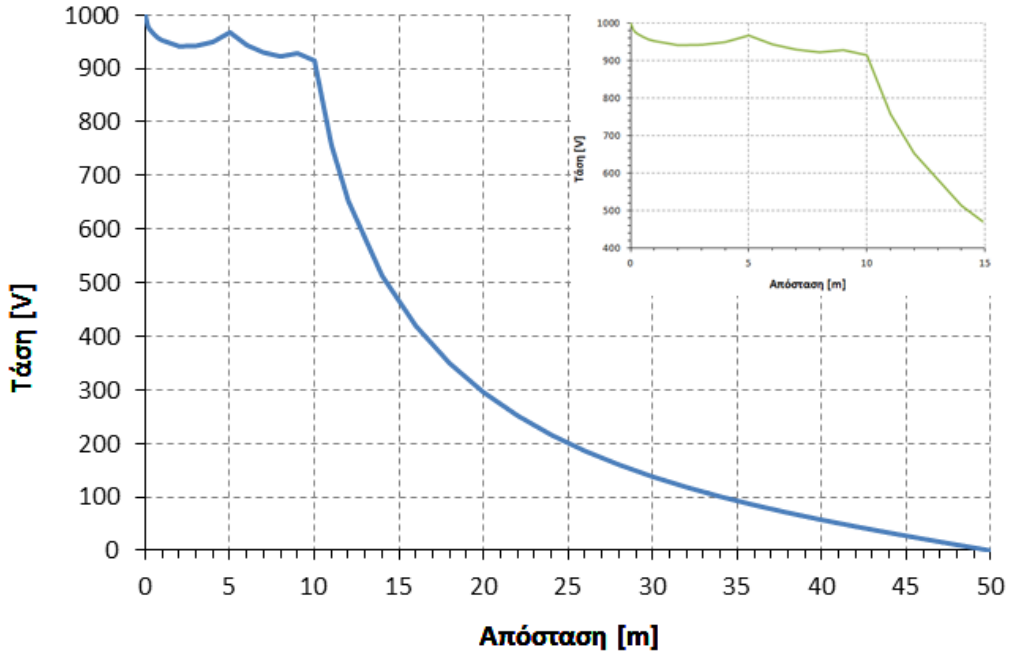
Σχήμα 4.12: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Στατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.13-4.14 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





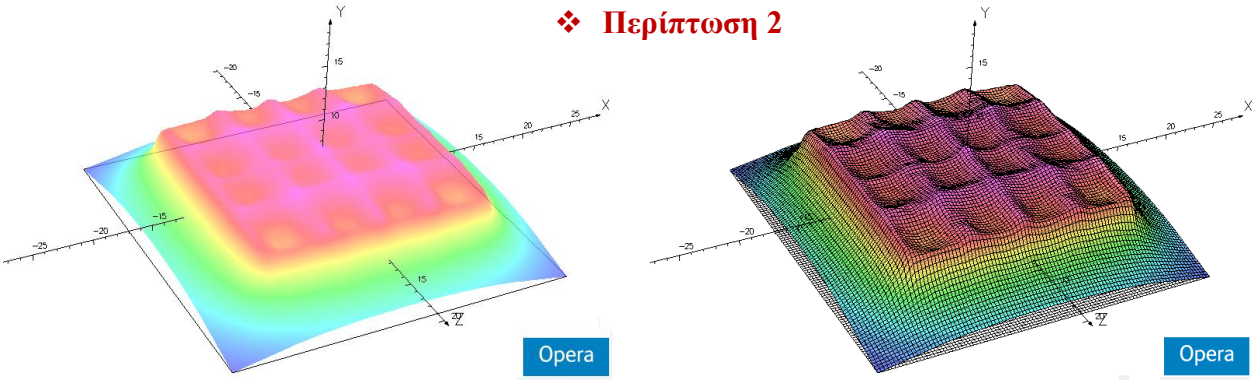
Σχήμα 4.13: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.14:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Στατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.15: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Στατική Ανάλυση)

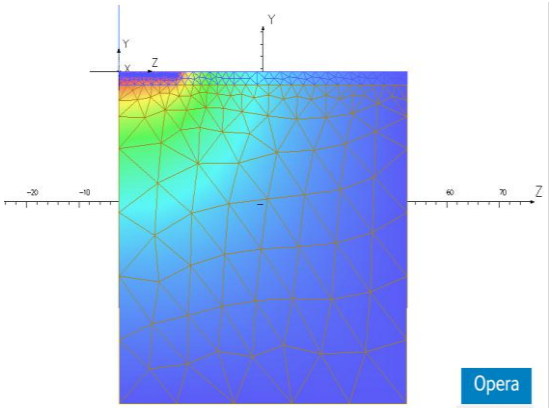
Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση για το χρόνο μεγίστου της διπλοεκθετικής (0.8 μs)..

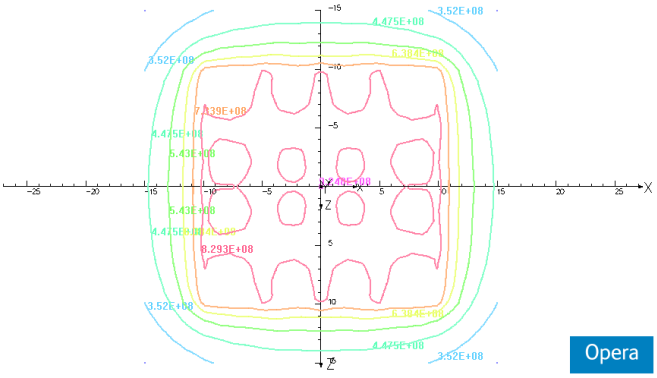
❖ **Περίπτωση 2**



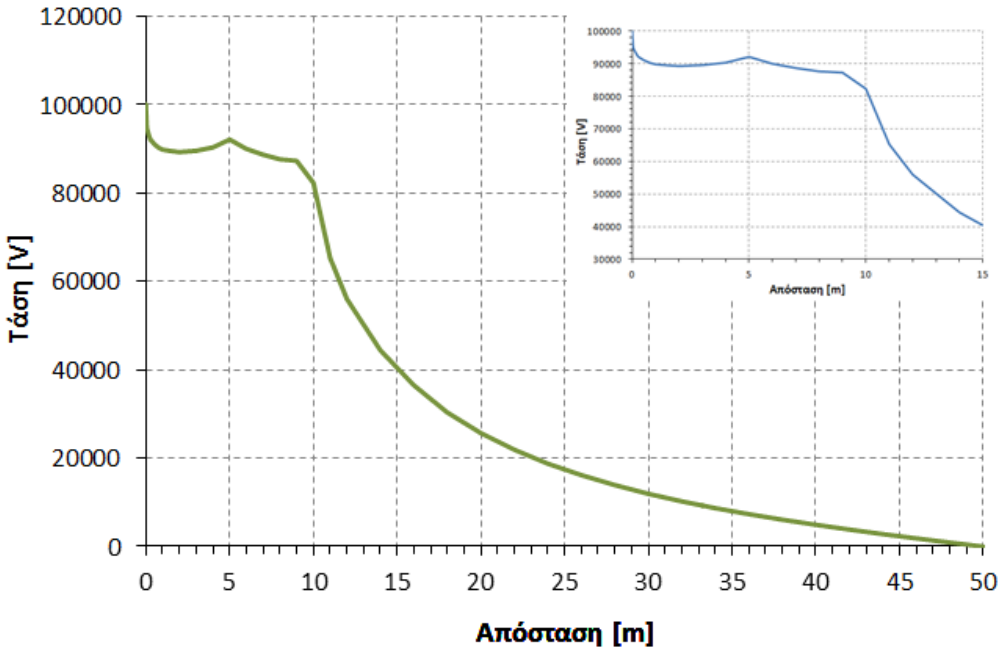
Σχήμα 4.16: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.17-4.18 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.19 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





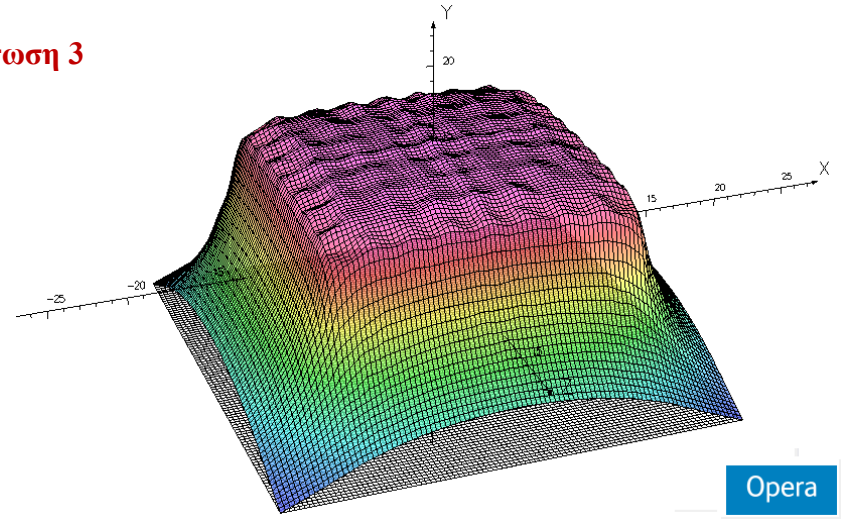
Σχήμα 4.17: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.18:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.19: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

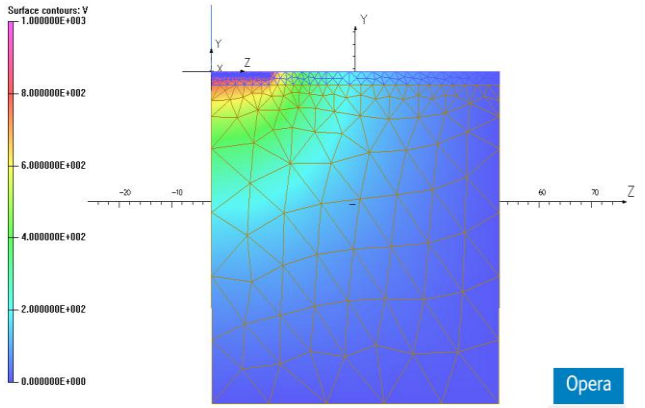
Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους για την Περίπτωση 3, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D με όλα τα γραφήματα για την Στατική Ανάλυση.

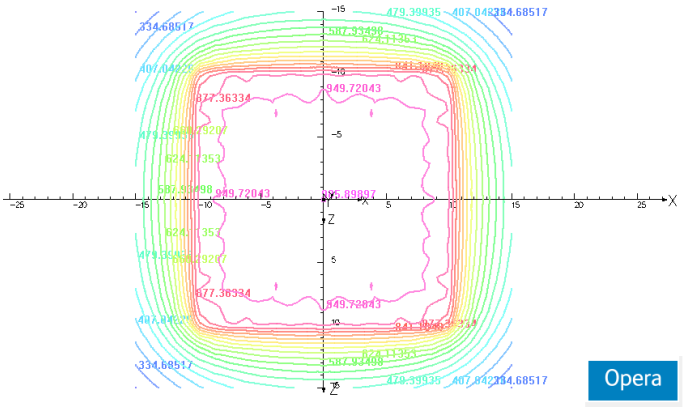
❖ **Περίπτωση 3**



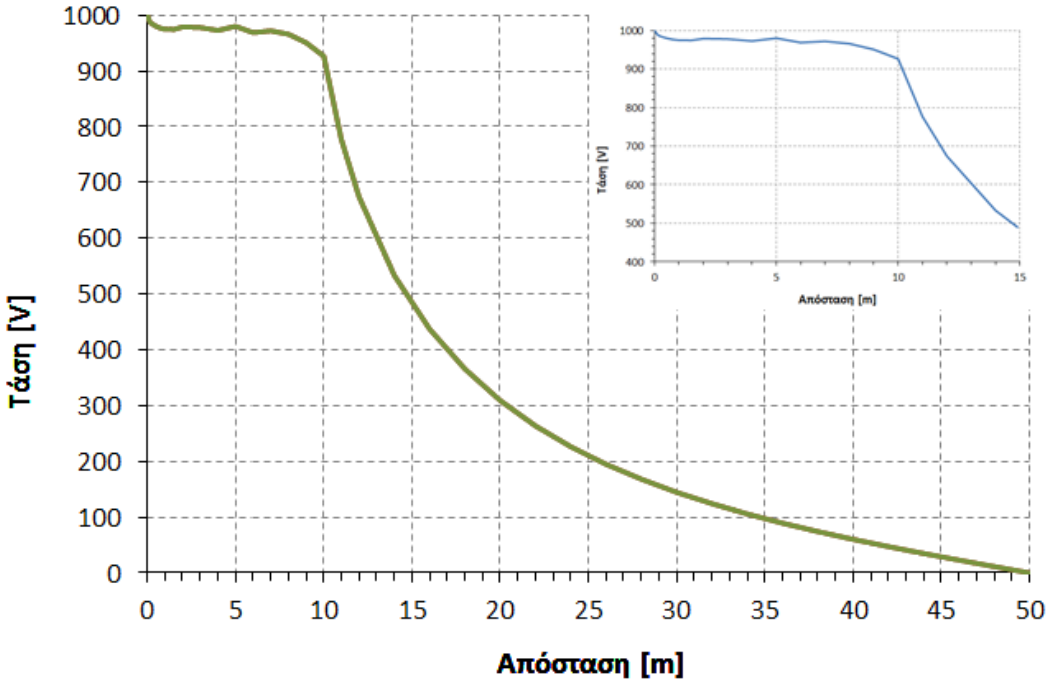
Σχήμα 4.20: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Στατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.21-4.22 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.23 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





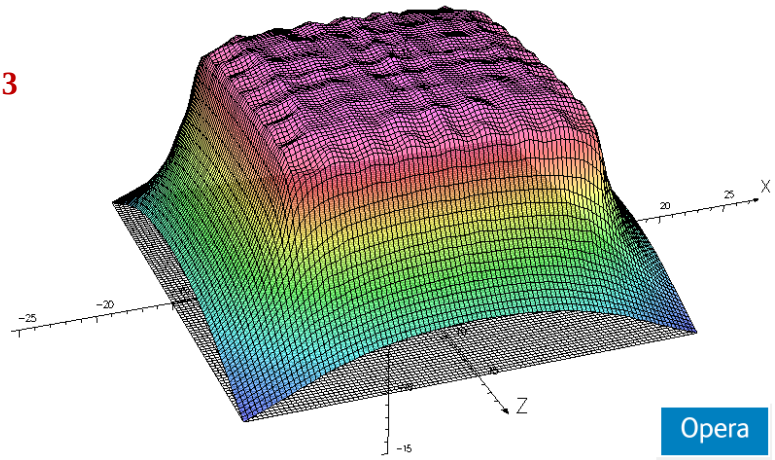
Σχήμα 4.21: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.22:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Στατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.23: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Στατική Ανάλυση)

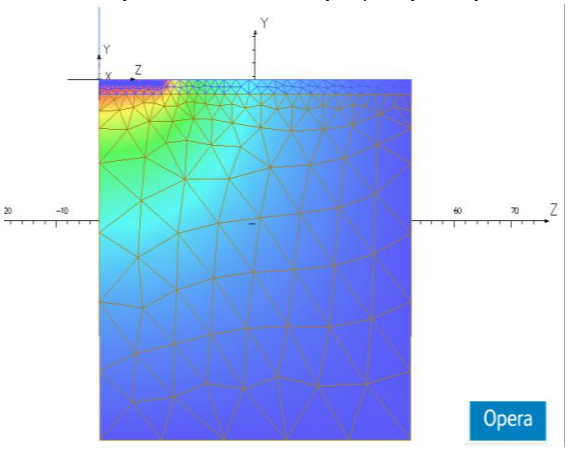
Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση για το χρόνο μεγίστου της διπλοεκθετικής (0.8 μs)..

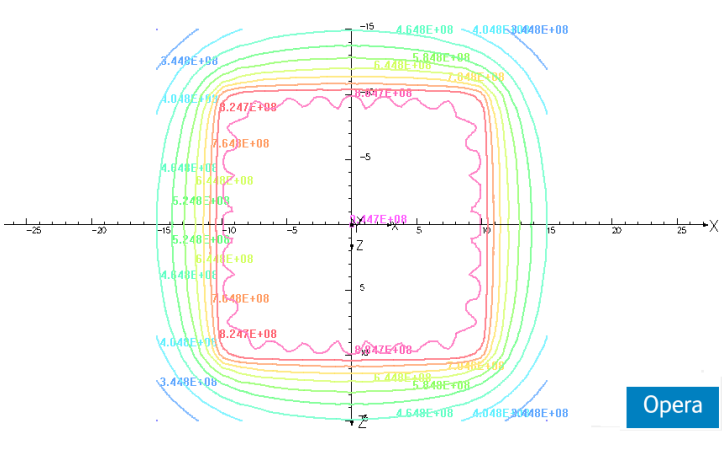
❖ **Περίπτωση 3**



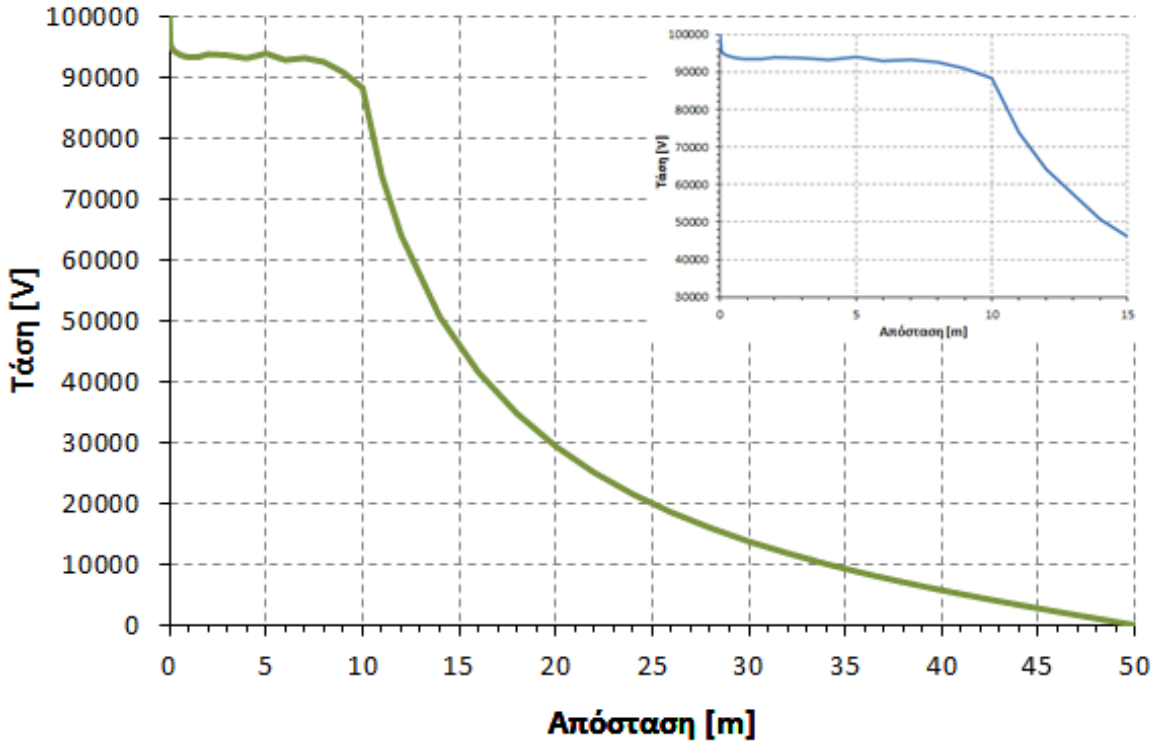
Σχήμα 4.24: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.25-4.26 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.27 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





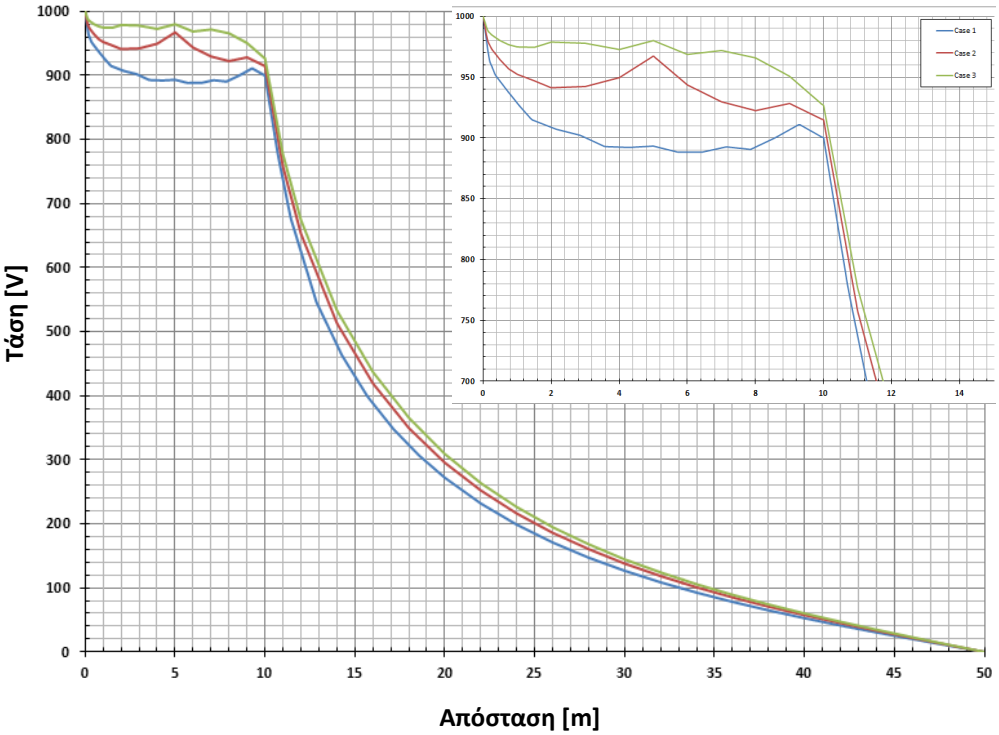
Σχήμα 4.25: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.26:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.27: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

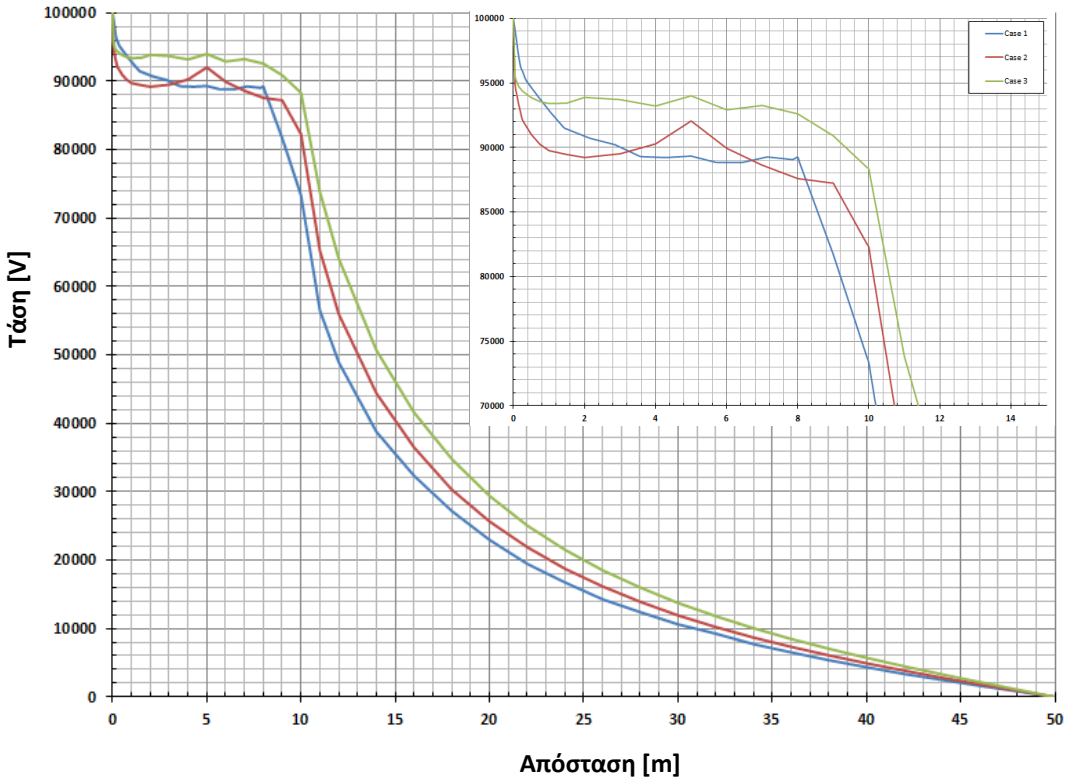
4.1.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Α

Τα αποτελεσματα της Στατικής Ανάλυσης και για τις 3 Περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 28, καθώς και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την Μεταβατική Ανάλυση για τις 3 Περιπτώσεις στο Σχήμα 29.



Σχήμα 4.28: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης (Στατική Ανάλυση)

Στο Σχήμα 4.29 φαίνεται η αντίστοιχη κατανομή δυναμικού μετά από τη μεταβατική ανάλυση για το χρόνο μεγίστου της διπλοεκθετικής (0.8 μs).



Σχήμα 4.29: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης (Μεταβατική Ανάλυση)

- Τόσο στη στατική όσο και στη μεταβατική ανάλυση τα αποτελέσματα υποδεικνείουν ότι η αύξηση των αγωγών στο πλέγμα γείωσης δεν αποφέρει καλύτερη απόδοση του συστήματος. Αντίθετα παρατηρούμε υψηλές τάσεις πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους στις Περιπτώσεις 2 και 3.
- Σημαντική παρατήρηση: είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι σε χαμηλές συχνότητες δεν παίζει σημαντικό ρόλο ο αριθμός των αγωγών αλλά το μέγεθος του συστήματος γείωσης. Ωστόσο πρέπει να αναφέρουμε ότι σε υψηλές συχνότητες η αύξηση του αριθμού των αγωγών μειώνει δραματικά την μεταβολή του δυναμικού διαχύοντας το στο έδαφος.

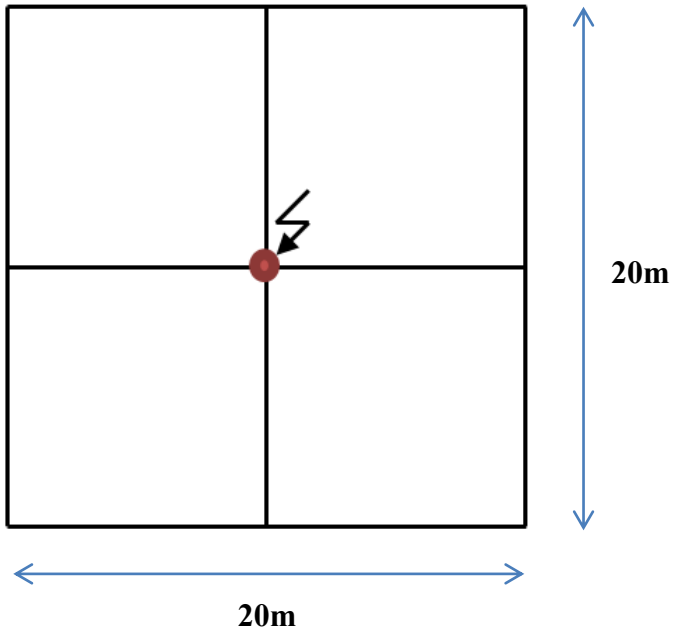
- Μεγάλο ενδιαφέρον αποτελεί η σύγκριση της στατικής και μεταβατικής ανάλυσης. Από το Σχήμα 4.29 είναι εμφανής η μεταβαλλόμενα έντονη καταπόνηση του συστήματος γείωσης μετά την επιβολή της κρουστικής τάσης, σε σχέση με τη σταθερή τάση της στατικής ανάλυσης. Από όσα έχουν αναφερθεί συμπεραίνουμε, ότι κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όχι μόνο η ειδική αντίσταση του εδάφους και οι διάφορες ανομοιομορφίες του, αλλά και οι κρουστικές τάσεις που είναι πιθανόν να πλήξουν το σύστημα, έως ότου αυτές αποσβεθούν.

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ Β

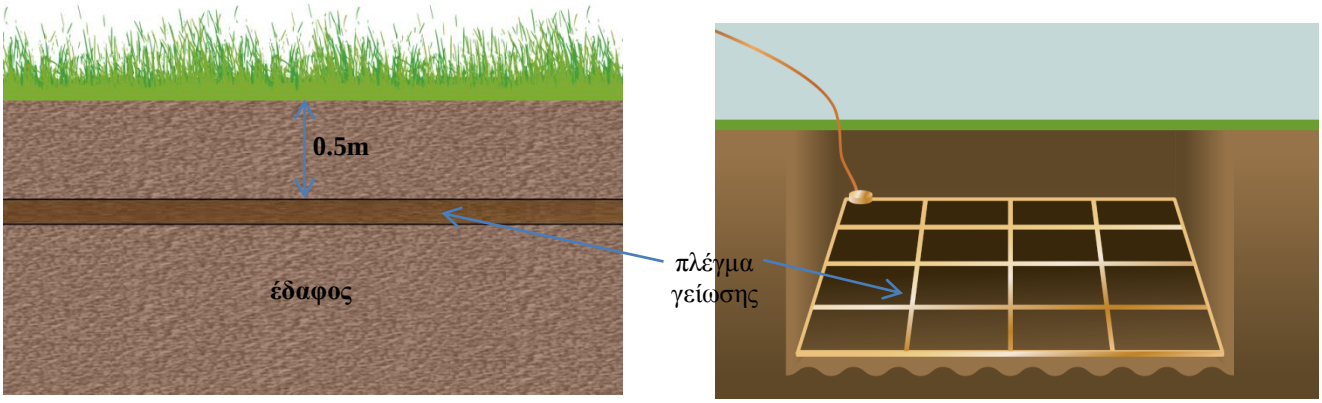
Μεταβολή Ειδικής Αντίστασης Εδάφους

4.2.1 Γεωμετρία του προβλήματος

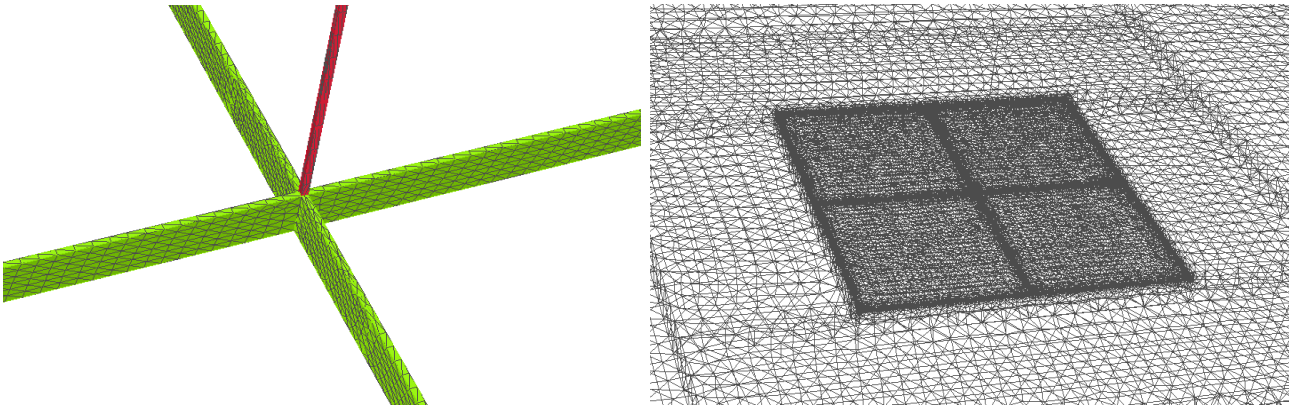
Το προς εξέταση σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα πλέγμα γείωσης περιμετρικών διαστάσεων 20x20m^2 θαμμένο στο 0,5m. Ο αγωγός μας είναι χάλκινη ταινία διαστάσεων 40x4mm. Από ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο στο κέντρο του συστήματος εκχυέται διπλοεκθετικής μορφής κρουστική τάση $V(t) = 100(e^{-0.4054t} - e^{-68,49t})kV$ για την ανάλυση μεταβατικής συμπεριφοράς (Transient Analysis). Στις Περιπτώσεις προς εξέταση το μοντέλο εδάφους είναι μονοστρςματικό και μεταβάλουμε την αντίσταση του κρατώντας σταθερές τις ύπόλοιπες παραμέτρους του και τις περιμετρικές διαστάσεις του πλέγματος όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.30.



Σχήμα 4.30: Η γεωμετρία του προβλήματος – πλέγμα γείωσης



Σχήμα 4.31: Η γεωμετρία του προβλήματος στο PC OPERA-3D



(a) **(b)**

Σχήμα 4.32: (a) Μεγέθυνση στην περιοχή του ηλεκτροδίου, **(b)** πλέγμα επίλυσης μεθόδου FEM

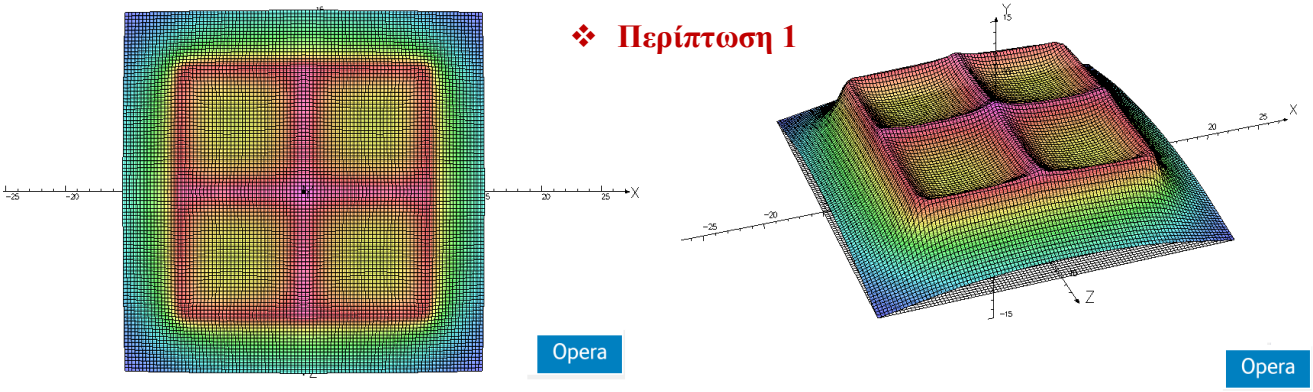
Τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, συγκεκριμένα, η τιμή της ειδικής αντίστασης(ρ) για κάθε Περίπτωση καθώς και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα(ε) και αγωγιμότητα(σ).

Έδαφος	**Περίπτωση 1**	**Περίπτωση 2**	**Περίπτωση 3**	**Περίπτωση 4**	**Περίπτωση 5**
ρ [Ωm]	10	50	200	1000	2000
σ [S/m]	0.1	0.02	0.005	0.001	0.0005

Πίνακας 4.2: Παράμετροι του εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις

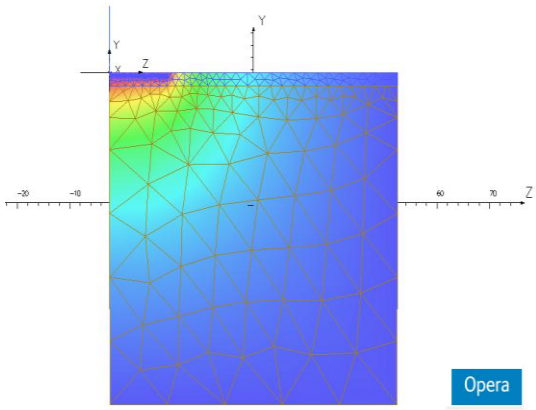
4.2.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Β

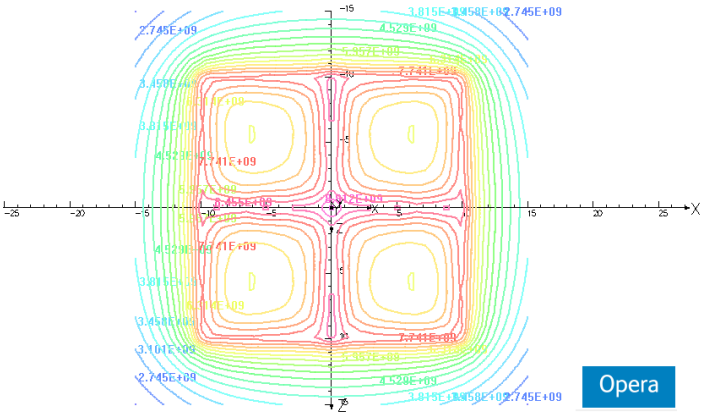
Στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις πέντε περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.



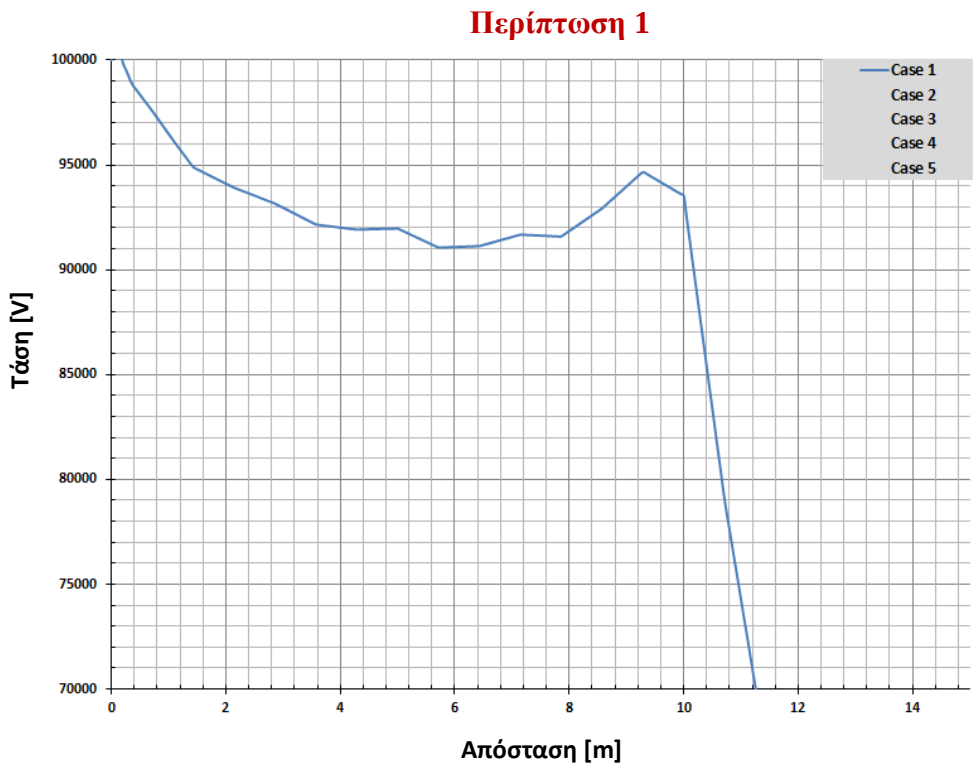
Σχήμα 4.33: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.34-4.35 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.36 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.



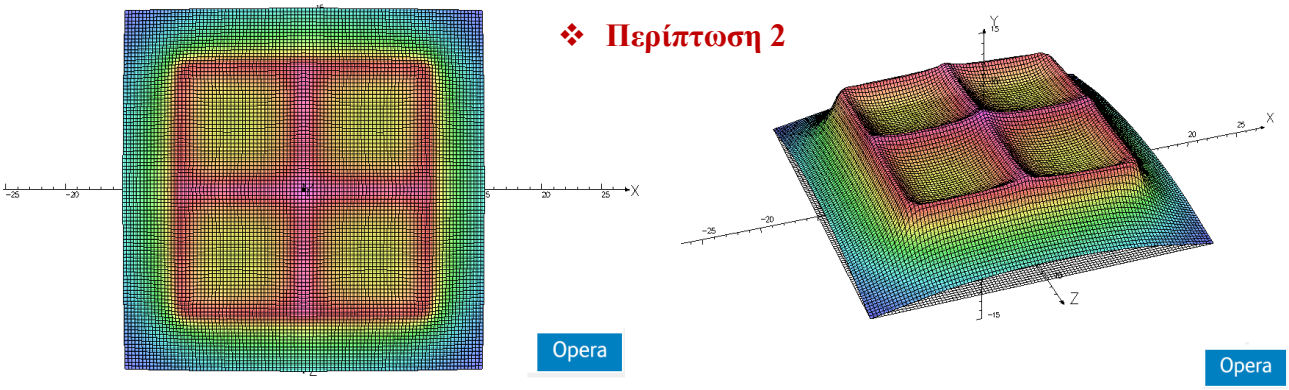


Σχήμα 4.34: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.35:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.36: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

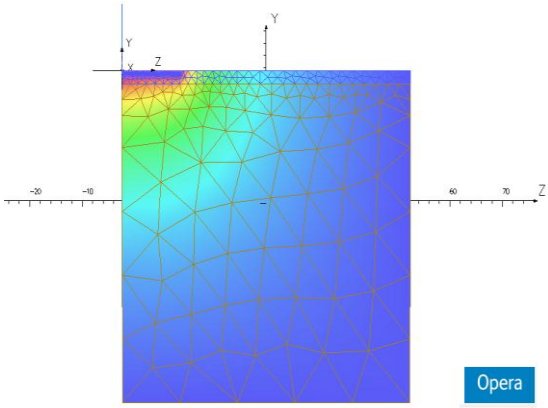
Στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις τέσσερις περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.

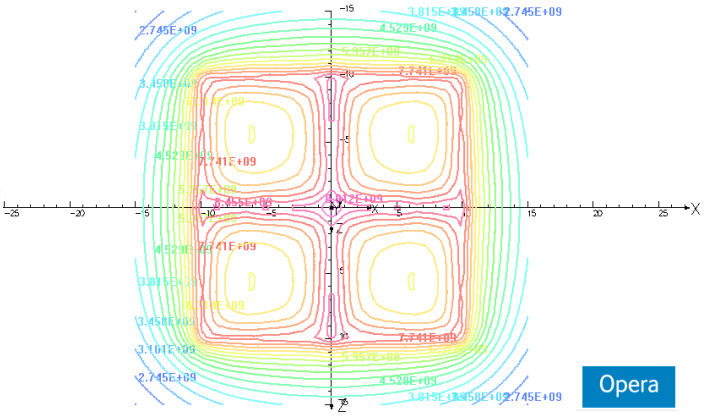


Σχήμα 4.37: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.38-4.39 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.40 παρουσιάζονται

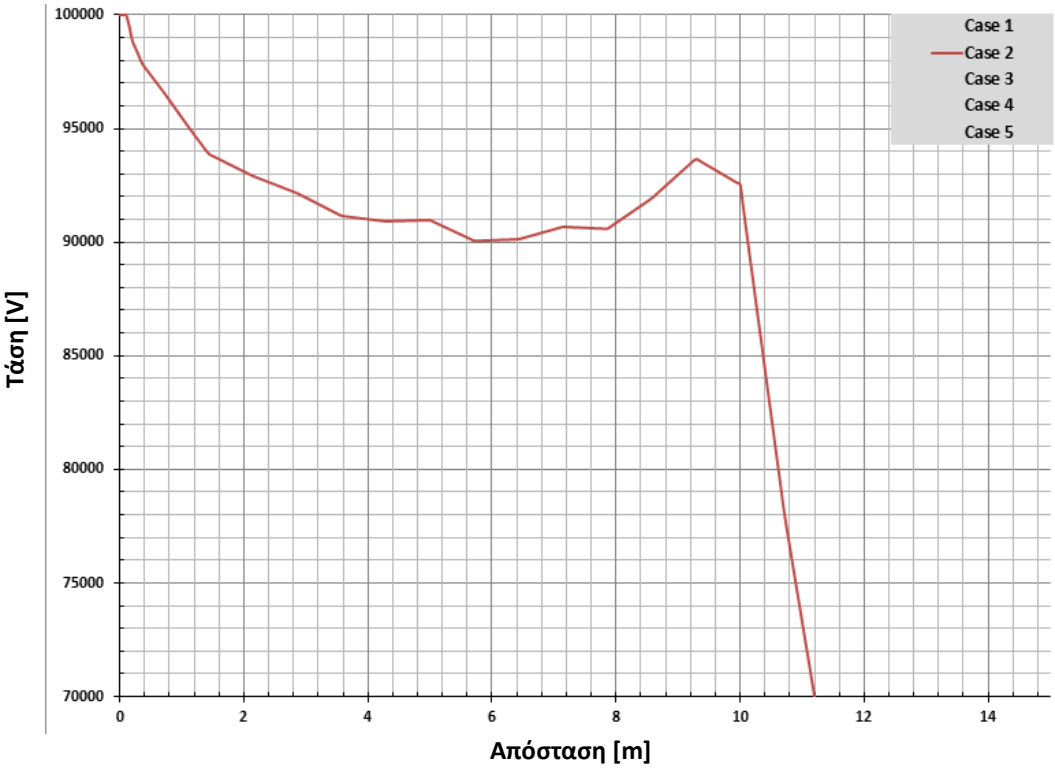
οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





Σχήμα 4.38: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.39:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)

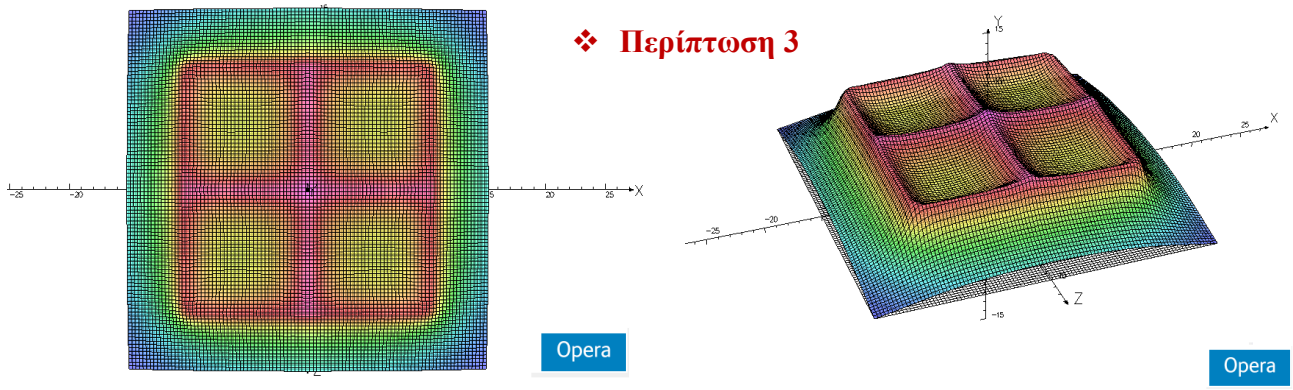
Περίπτωση 2



Σχήμα 4.40: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

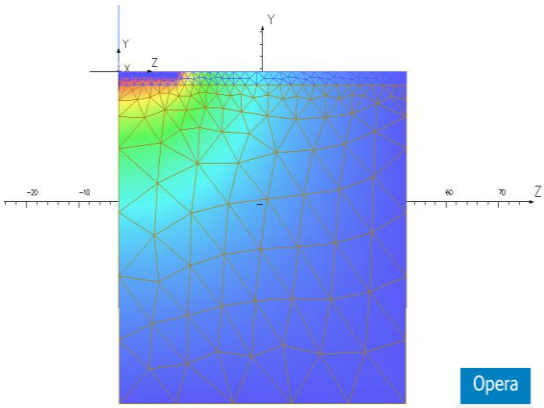
Στο Σχήμα 4.41 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις τέσσερις περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.

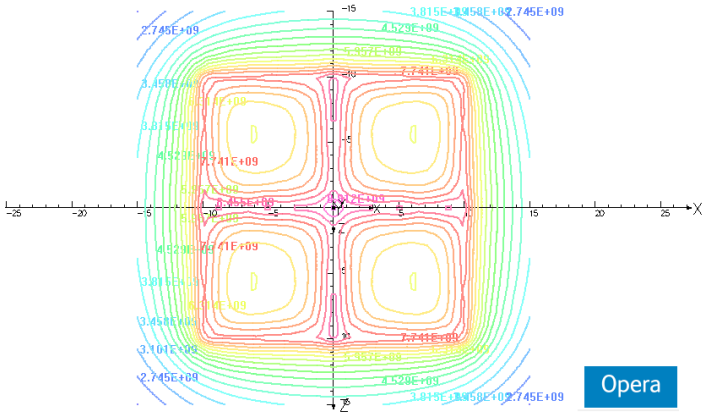
❖ **Περίπτωση 3**



Σχήμα 4.41: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.42-4.43 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.44 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.

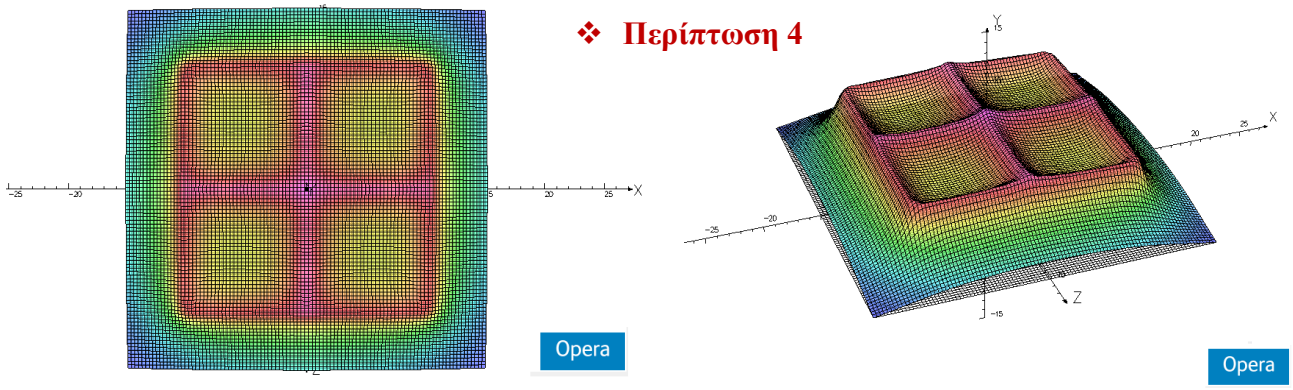




Σχήμα 4.42: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.43:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)

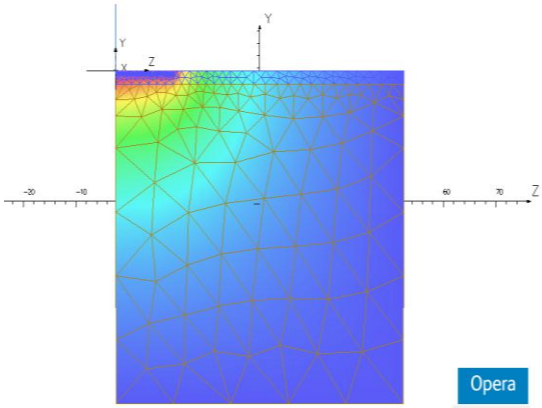
Σχήμα 4.44: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

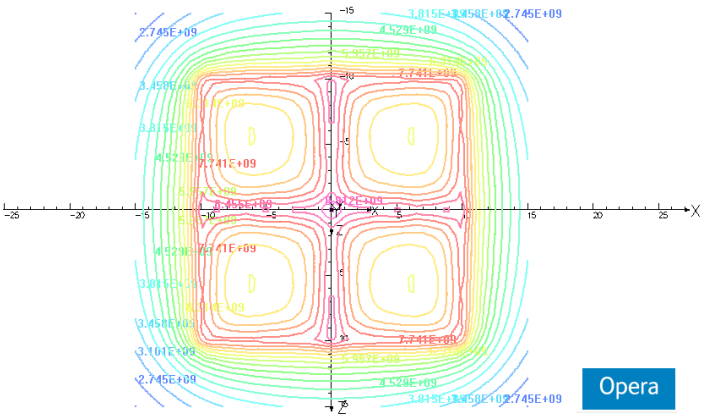
Στο Σχήμα 4.45 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις τέσσερις περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.



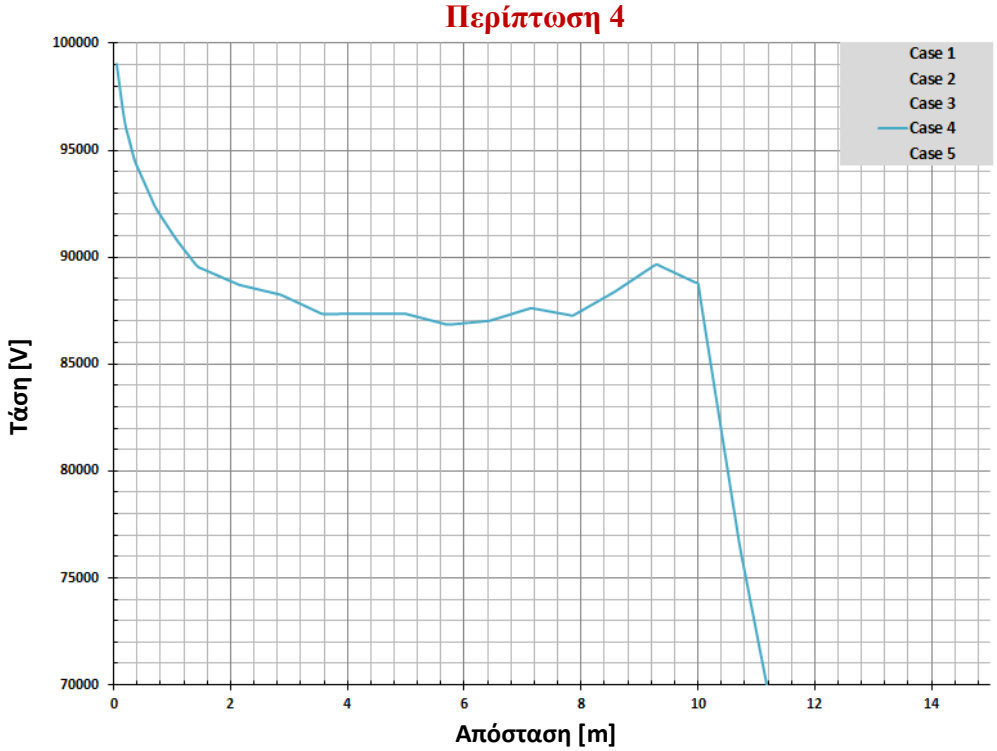
Σχήμα 4.45: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.46-4.47 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.48 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





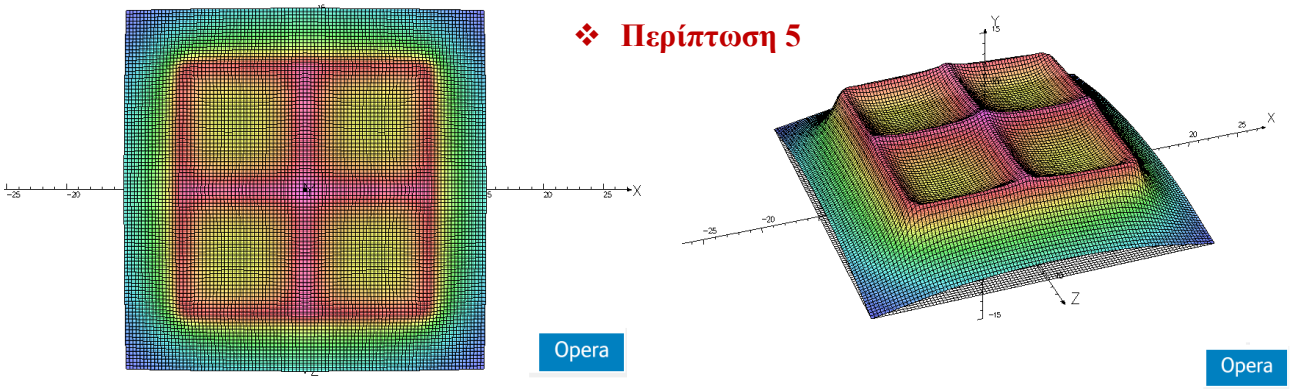
Σχήμα 4.46: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.47:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.48: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

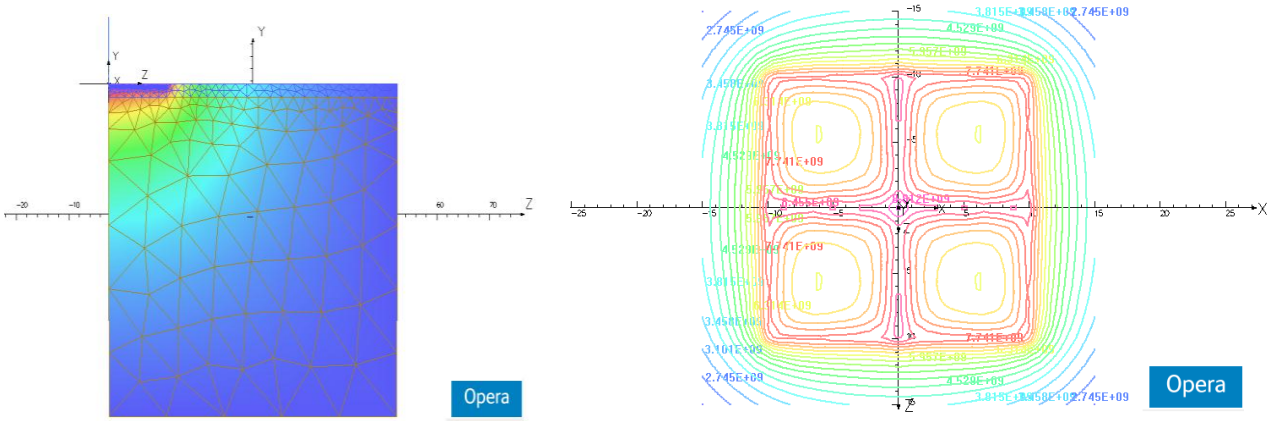
Στο Σχήμα 4.49 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις τέσσερις περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.

❖ **Περίπτωση 5**

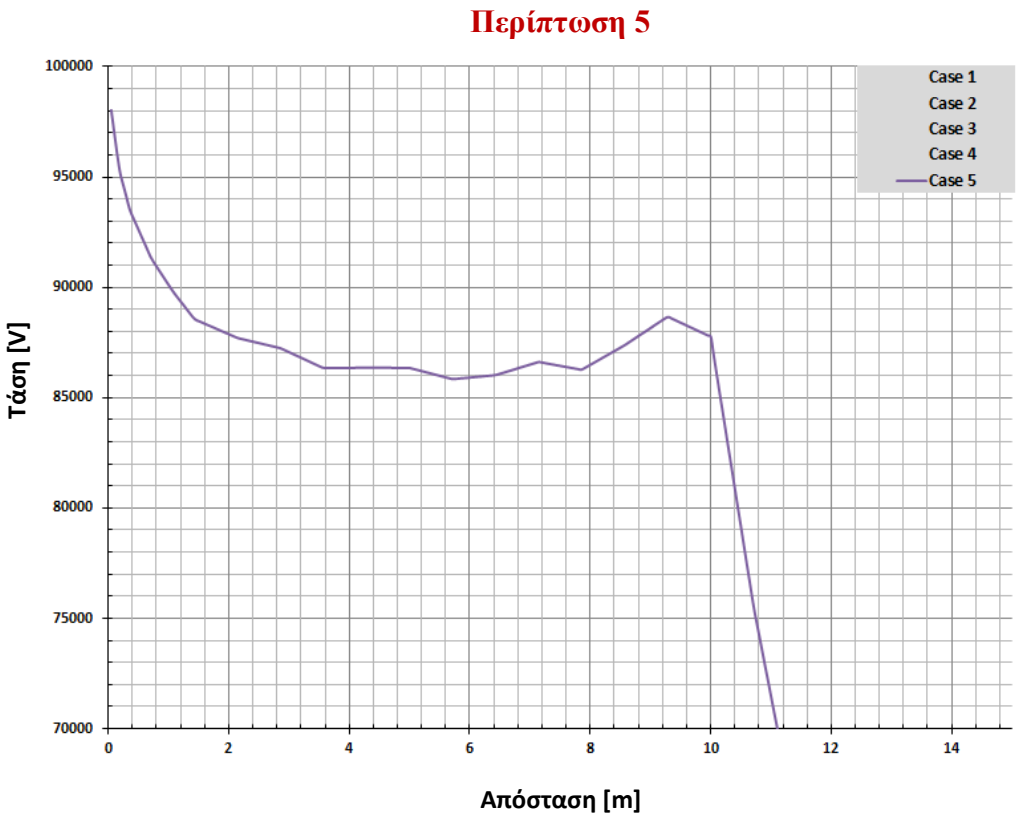


Σχήμα 4.49: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

Στα Σχήματα 4.50-4.51 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.52 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.



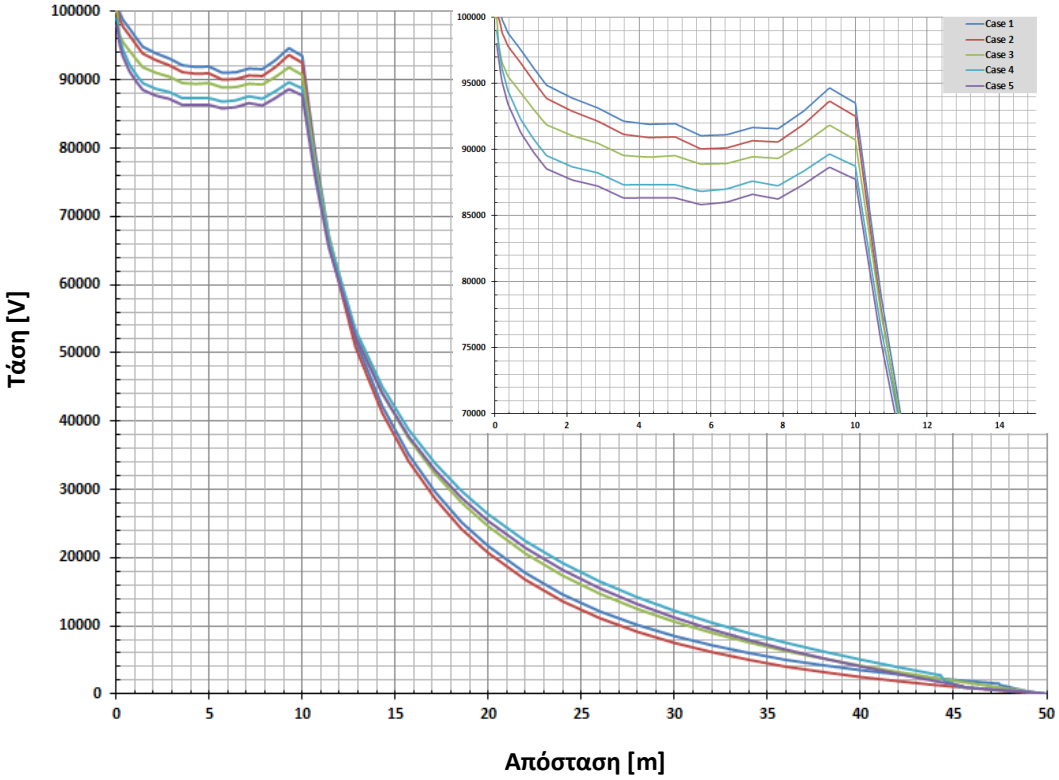
Σχήμα 4.50: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.51:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.52: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

4.2.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Β

Τα αποτελεσματα της Μεταβατικής Ανάλυσης και για τις 5 Περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.53.



Σχήμα 4.53: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης για ρ_1=10, ρ_2=50, ρ_3=200, ρ_4=1000 και ρ_5=2000

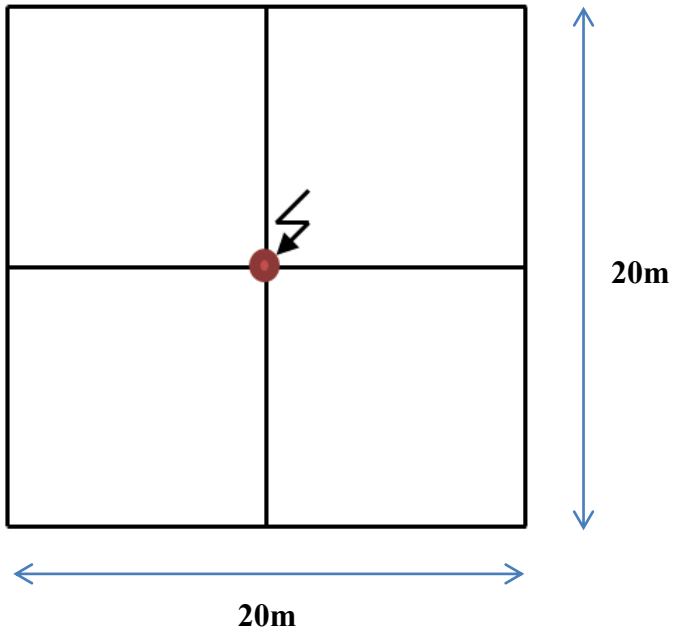
- Η ειδική αντίσταση εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην μεταβατική συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης. Στο έδαφος με την υψηλότερη ειδική αντίσταση είναι πιο δύσκολο για τους αγωγούς του συστήματος γείωσης να εγχύσουν την κρουστική τάση προς το έδαφος. Ως αποτέλεσμα παρατηρούμε ότι το δυναμικό είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με το έδαφος χαμηλής ειδικής αντίστασης.

4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ Γ

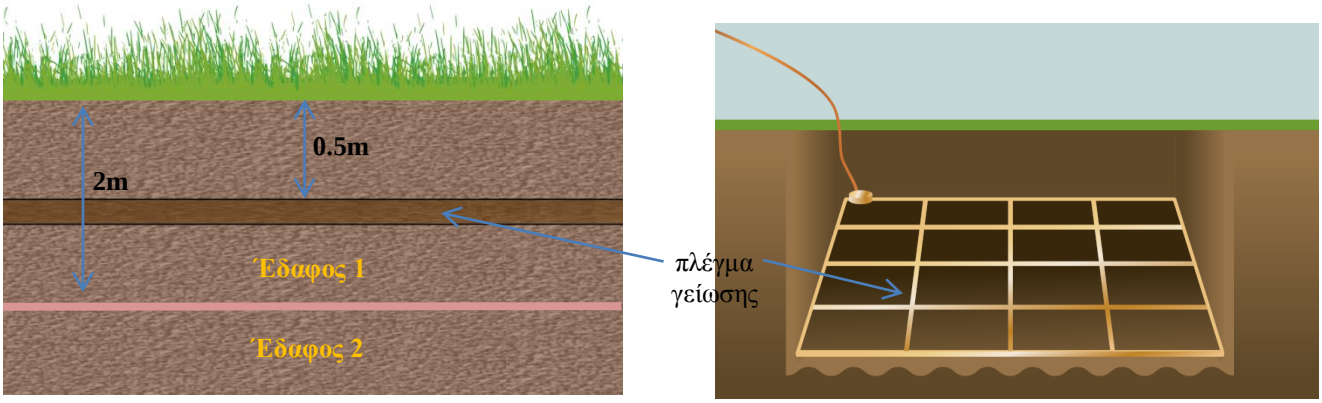
Διστρωματικό μοντέλο εδάφους

4.3.1 Γεωμετρία του προβλήματος

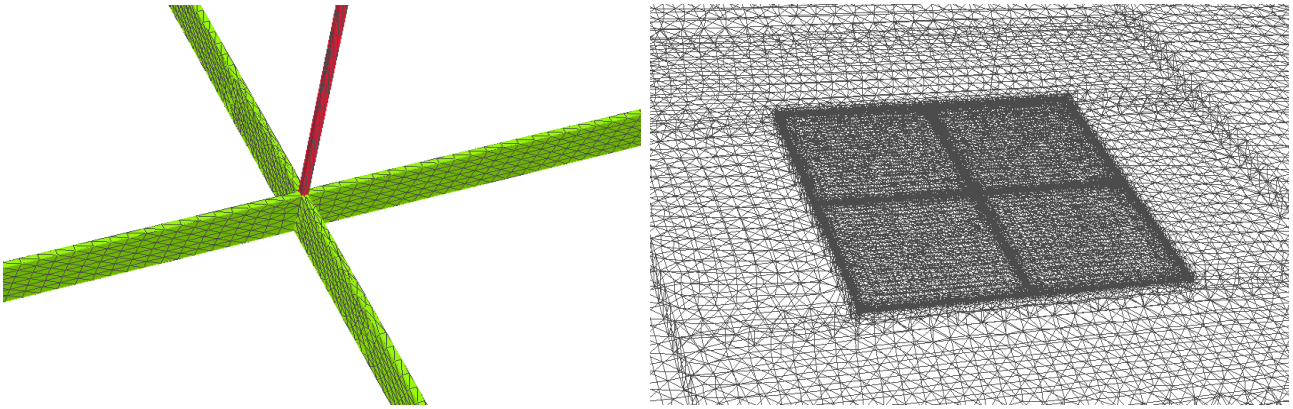
Το προς εξέταση σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα πλέγμα γείωσης περιμετρικών διαστάσεων 20x20m^2 θαμμένο στο 0,5m. Ο αγωγός μας είναι χάλκινη ταινία διαστάσεων 40x4mm. Από ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο στο κέντρο του συστήματος εκχυέται διπλοεκθετικής μορφής κρουστική τάση $V(t) = 100(e^{-0.4054t} - e^{-68,49t})kV$ για την ανάλυση μεταβατικής συμπεριφοράς (Transient Analysis). Στις Περιπτώσεις προς εξέταση το μοντέλο εδάφους είναι διστρωματικό και μεταβάλουμε την αντίσταση του κρατώντας σταθερές τις ύπόλοιπες παραμέτρους του και τις περιμετρικές διαστάσεις του πλέγματος όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.54.



Σχήμα 4.54: Η γεωμετρία του προβλήματος – πλέγμα γείωσης



Σχήμα 4.55: Η γεωμετρία του προβλήματος στο PC OPERA-3D



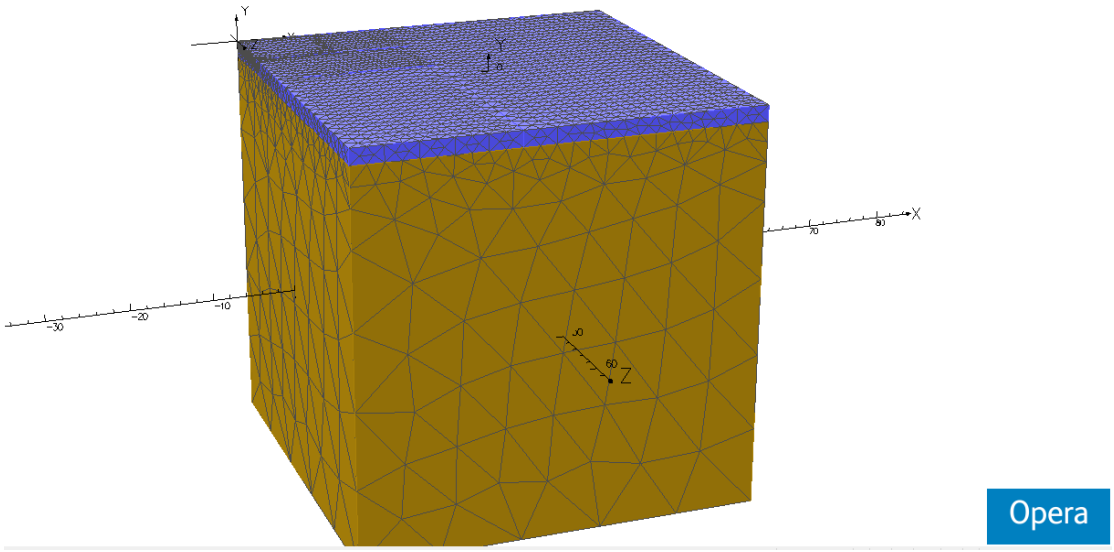
(a) **(b)**

Σχήμα 4.56: (a) Μεγέθυνση στην περιοχή του ηλεκτροδίου, **(b)** πλέγμα επίλυσης μεθόδου FEM

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3, συγκεκριμένα, η τιμή της ειδικής αντίστασης(ρ) για κάθε Περίπτωση καθώς και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα(ε) και αγωγιμότητα(σ).

	Έδαφος	**Περίπτωση 1**	**Περίπτωση 2**
0-2m	**ρ_1 [Ωm]**	100	1000
	ε_1	36	9
	σ_1 [S/m]	0.01	0.001
2-∞ m	**ρ_2 [Ωm]**	1000	100
	ε_2	9	36
	σ_2 [S/m]	0.001	0.01

Πίνακας 4.3: Παράμετροι του εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις

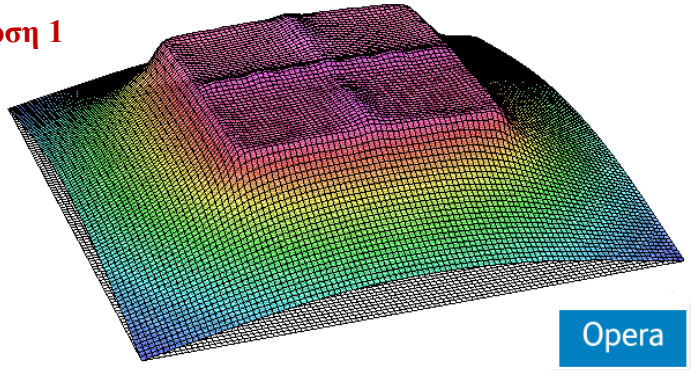


Σχήμα 4.57: Διστρωματικό μοντέλο εδάφους με πλέγμα

4.3.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Γ

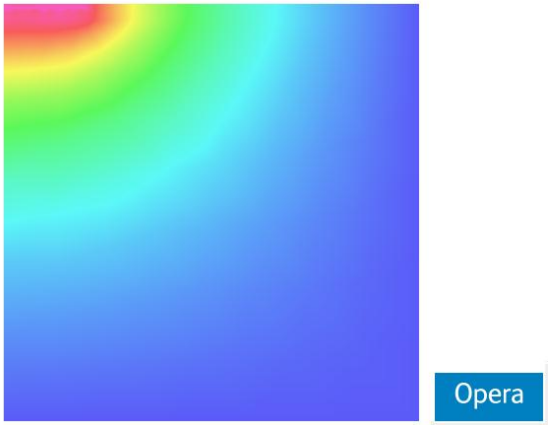
Στο Σχήμα 4.58 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις πέντε περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.

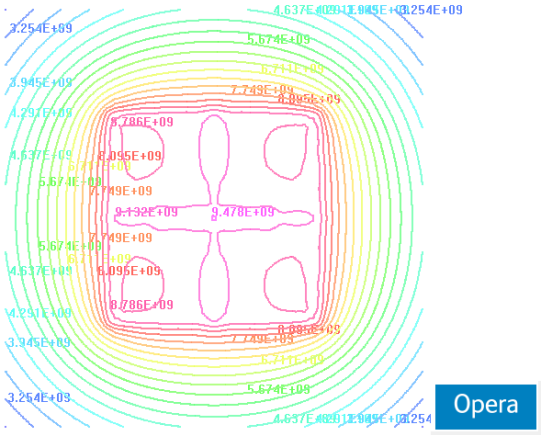
❖ **Περίπτωση 1**



Σχήμα 4.58: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

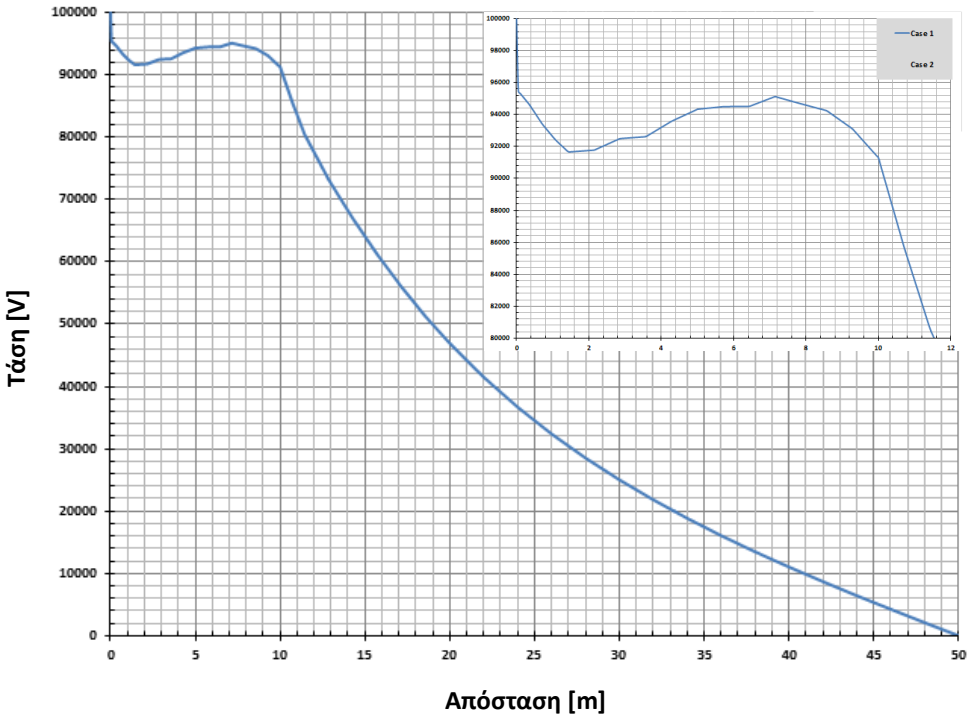
Στα Σχήματα 4.59-4.60 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.61 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





Σχήμα 4.59: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.60:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)

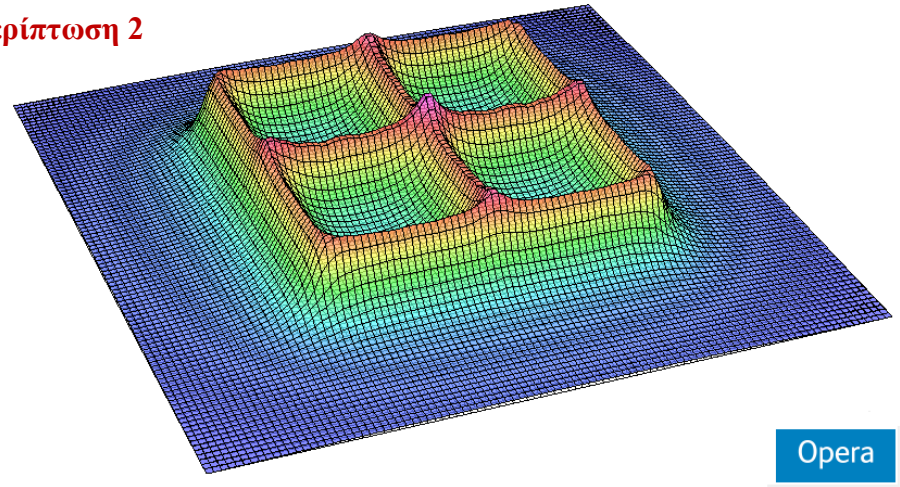
Περίπτωση 1



Σχήμα 4.61: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

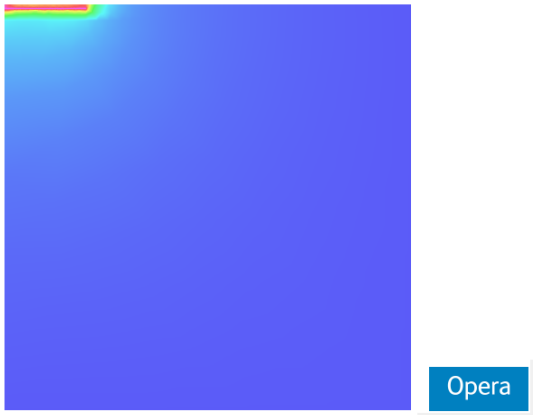
Στο Σχήμα 4.62 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις πέντε περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.

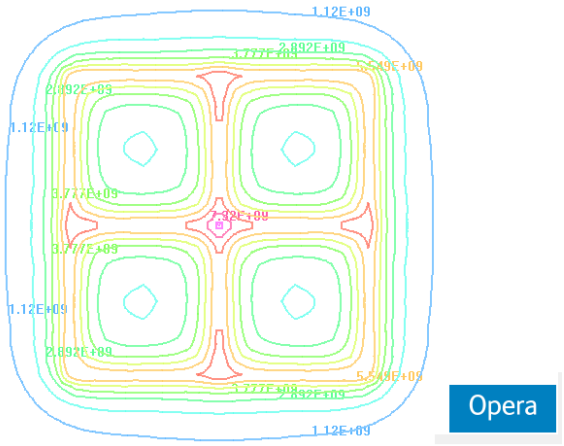
❖ **Περίπτωση 2**



Σχήμα 4.62: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

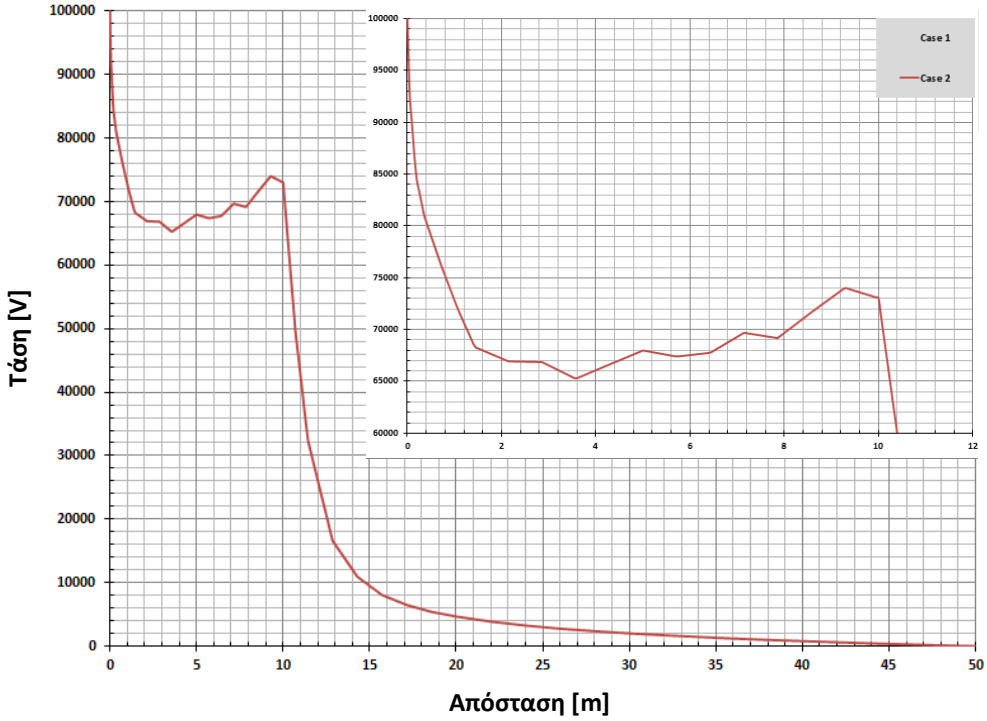
Στα Σχήματα 4.63-4.64 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.65 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





Σχήμα 4.63: κατανομή δυναμικού σε κάθετη τομή **Σχήμα 4.64:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)

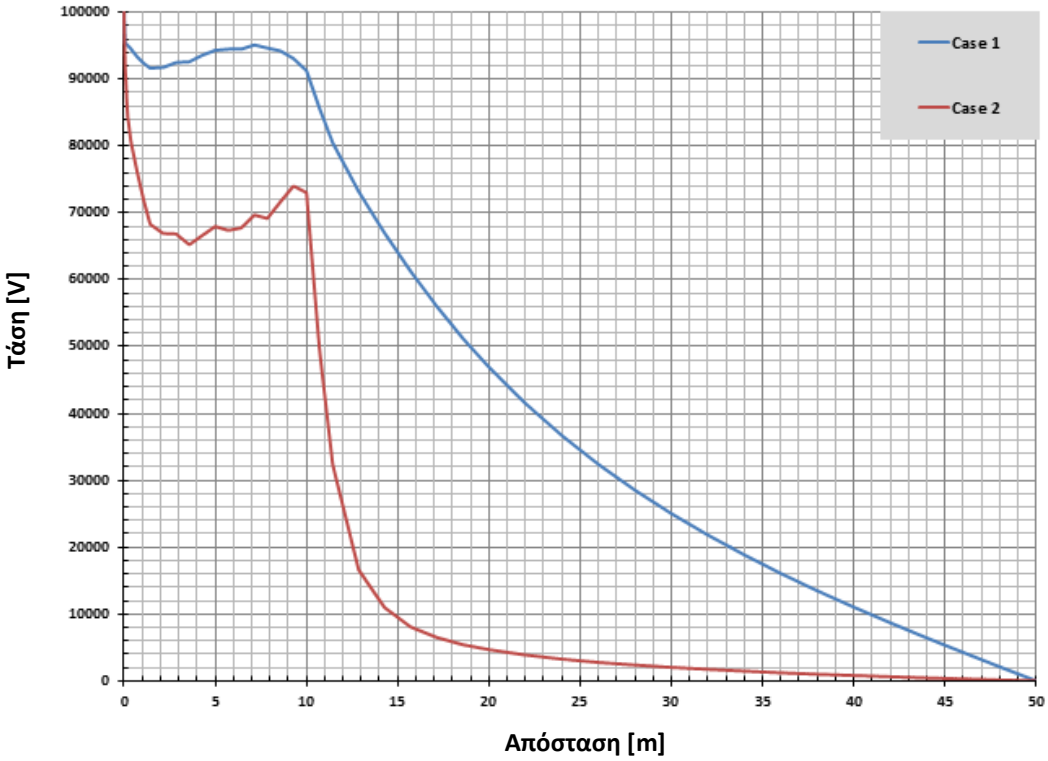
Περίπτωση 2



Σχήμα 4.65: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

4.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Γ

Τα αποτελεσματα της Μεταβατικής Ανάλυσης και για τις 2 Περιπτώσεις συγκριτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.66.



Σχήμα 4.66: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης Case1 [ρ_1=50, ρ_2=500] , Case2 [ρ_1=500, ρ_2=50]

- Στην Περίπτωση 2 όπου το πάνω στρώμα έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από το κάτω, παρατηρούμε αισθητή μέιωση του δυναμικού τόσο στο επίπεδο του πλέγματος όσο και στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του συστήματος γείωσης και την ασφάλεια του ανθρώπινου παράγοντα που εργάζεται στο περιβάλλον επίδρασης του συστήματος.

- Στο διστρωματικό έδαφος όλα τα στρώματα επιδρούν σημαντικά στην κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Πρωταρχικό ρόλο παίζει, φυσικά, η τιμή της ειδικής αντίστασης της εγγύτερης στο ηλεκτρόδιο ζώνης(Έδαφος 1), αλλά όπως παρατηρήσαμε στα σημεία που αλλάζει η ειδική αντίσταση αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό.

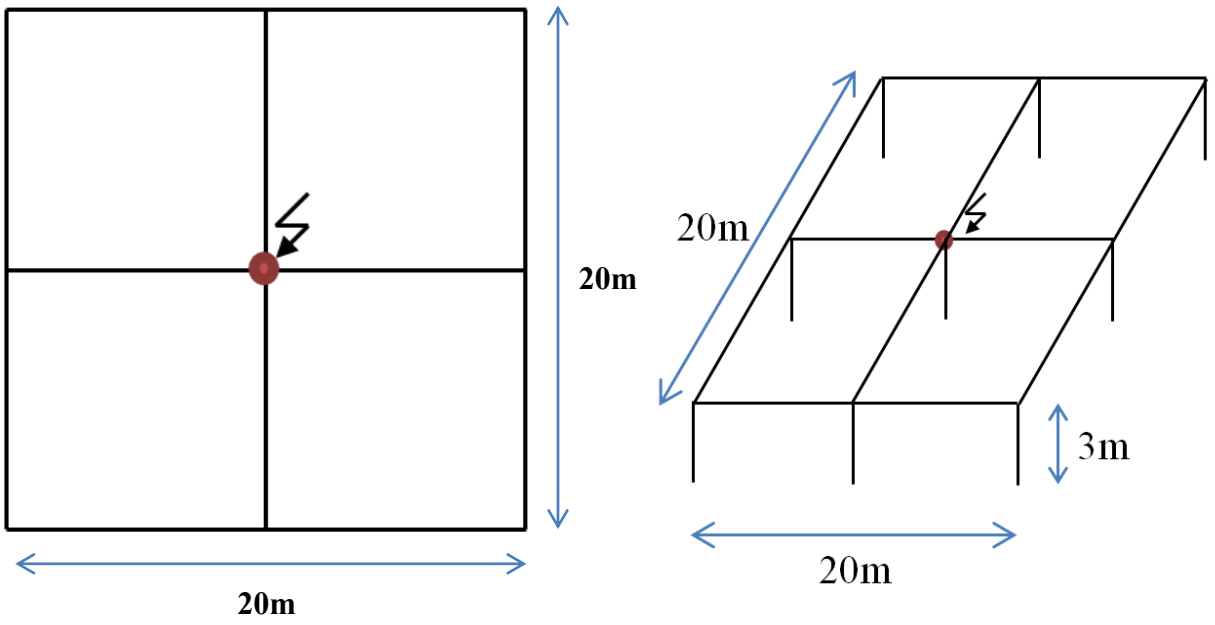
- Είναι φανερό ότι στα σημεία που αλλάζει η ρ αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό.

4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ Δ

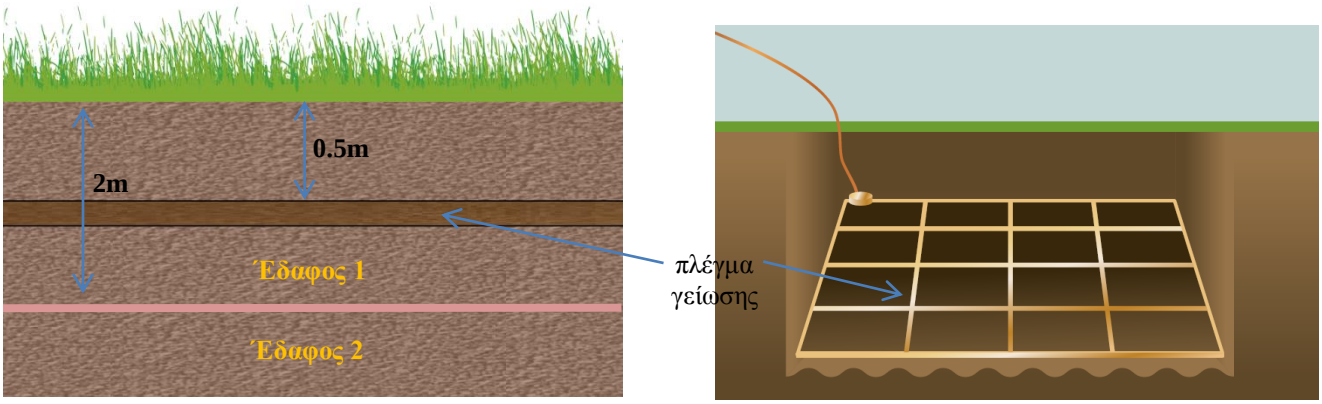
Διστρωματικό μοντέλο εδάφους με κάθετα ηλεκτρόδια

4.4.1 Γεωμετρία του προβλήματος

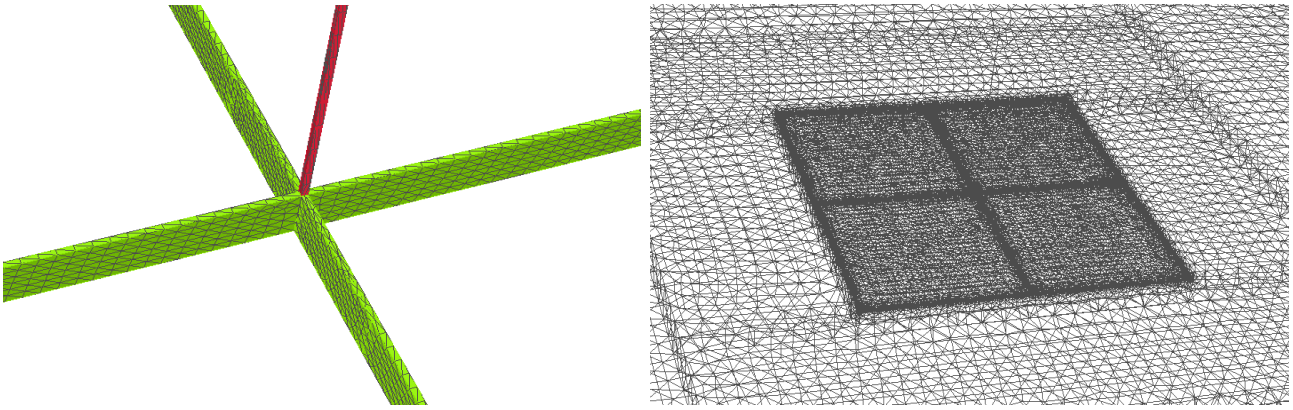
Το προς εξέταση σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα πλέγμα γείωσης περιμετρικών διαστάσεων 20x20m^2 θαμμένο στο 0,5m. Ο αγωγός μας είναι χάλκινη ταινία διαστάσεων 40x4mm. Από ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο στο κέντρο του συστήματος εκχυέται διπλοεκθετικής μορφής κρουστική τάση $V(t) = 100(e^{-0.4054t} - e^{-68,49t})kV$ για την ανάλυση μεταβατικής συμπεριφοράς (Transient Analysis). Στις Περιπτώσεις προς εξέταση το μοντέλο εδάφους είναι διστρωματικό και μεταβάλουμε την αντίσταση του κρατώντας σταθερές τις ύπόλοιπες παραμέτρους του και τις περιμετρικές διαστάσεις του πλέγματος όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.67. Στο πλέγμα γείωσης τοποθετήθηκαν 9 ηλεκτρόδια μήκους 3m τα οποία αρχίζουν από το πλέγμα και τερματίζουν κάθετα σε βάθος 1.5m στο δεύτερο στρώμα εδάφους(Έδαφος 2). Για την Περίπτωση 2 χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από την Προσομοίωση Γ.



Σχήμα 4.67: Η γεωμετρία του προβλήματος – πλέγμα γείωσης



Σχήμα 4.68: Η γεωμετρία του προβλήματος στο PC OPERA-3D



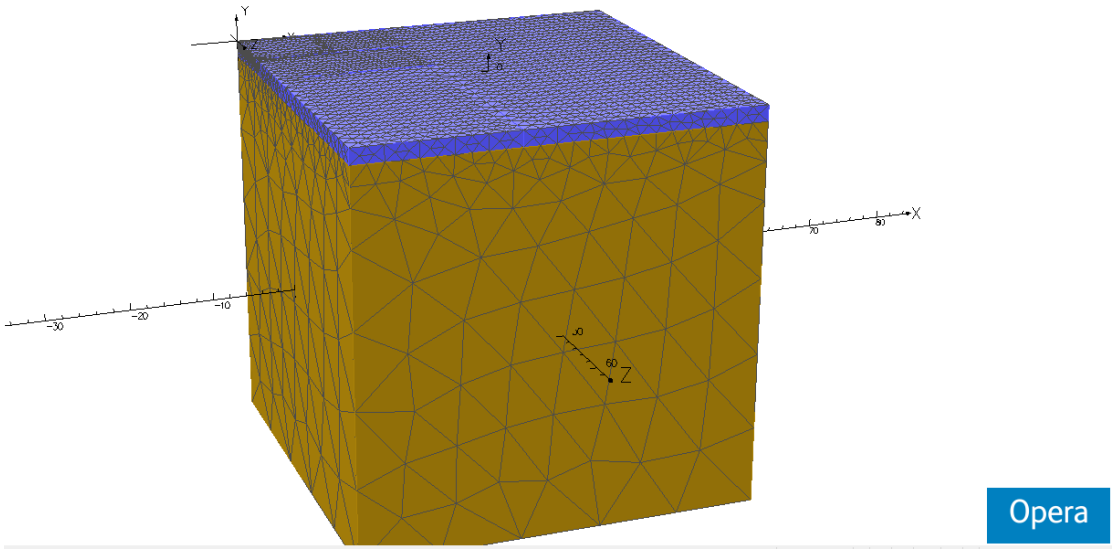
(a) **(b)**

Σχήμα 4.69: (a) Μεγέθυνση στην περιοχή του ηλεκτροδίου, **(b)** πλέγμα επίλυσης μεθόδου FEM

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4, συγκεκριμένα, η τιμή της ειδικής αντίστασης(ρ) για κάθε Περίπτωση καθώς και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα(ε) και αγωγιμότητα(σ).

	Έδαφος	**Περίπτωση 1**	**Περίπτωση 2 (με ηλεκτρόδια)**
0-2m	**ρ_1 [Ωm]**	50	50
	ε_1	36	36
	σ_1 [S/m]	0.02	0.02
2-∞ m	**ρ_2 [Ωm]**	500	500
	ε_2	9	9
	σ_2 [S/m]	0.002	0.002

Πίνακας 4.4: Παράμετροι του εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις

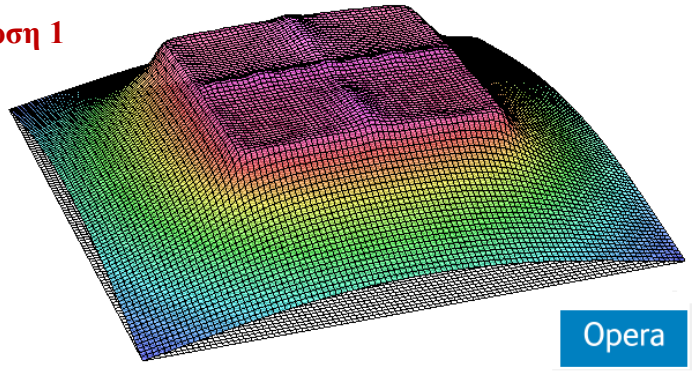


Σχήμα 4.70: Διστρωματικό μοντέλο εδάφους με πλέγμα

4.4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Δ

Στο Σχήμα 4.71 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις πέντε περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.

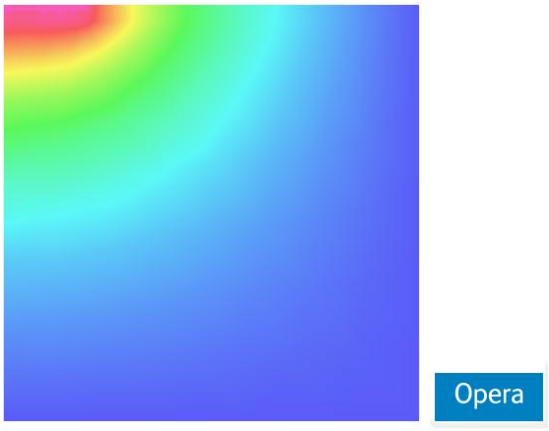
❖ **Περίπτωση 1**

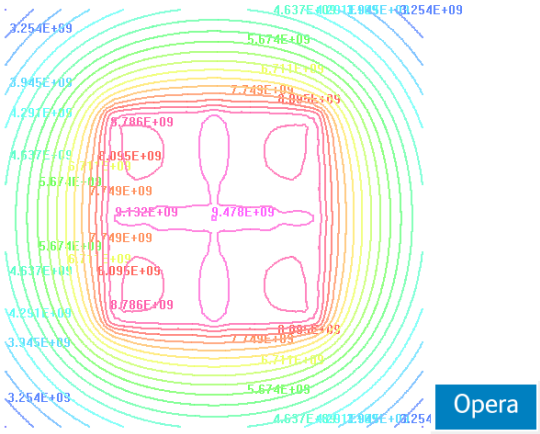


Σχήμα 4.71: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

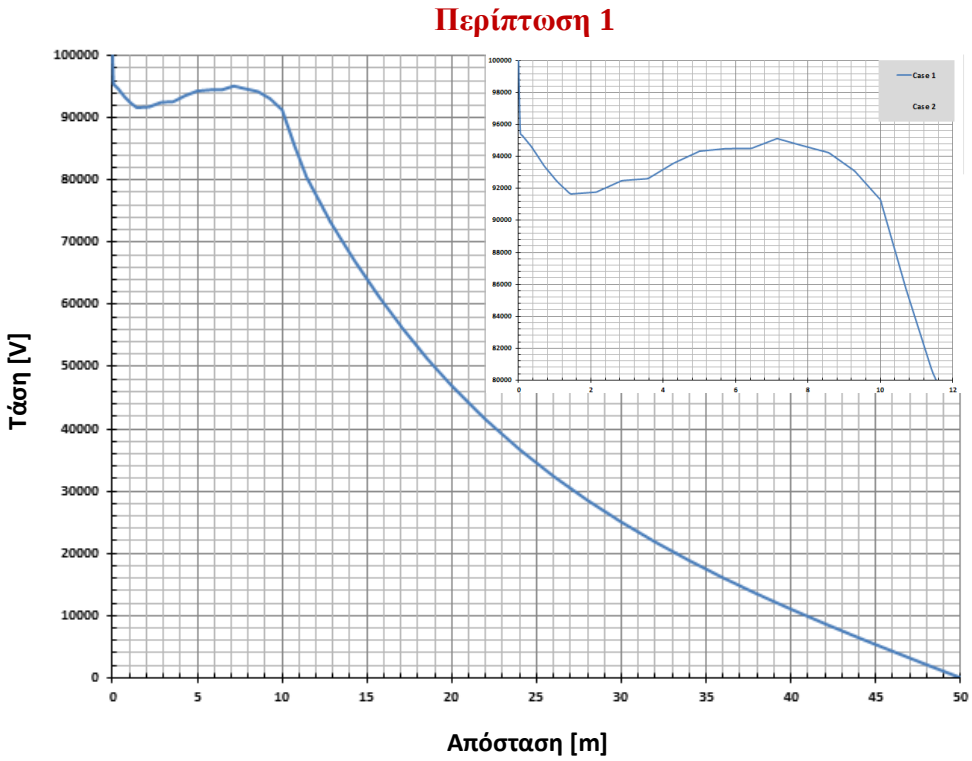
Στα Σχήματα 4.72-4.73 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.74 παρουσιάζονται

οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





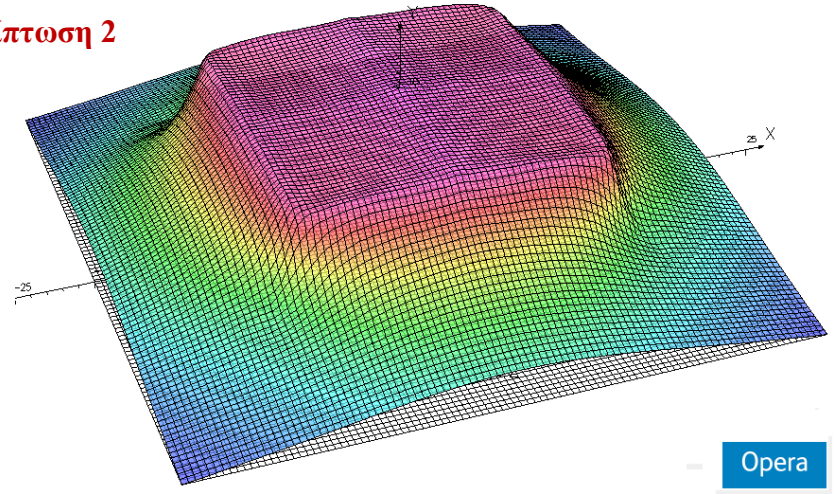
Σχήμα 4.72: πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος **Σχήμα 4.73:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)



Σχήμα 4.74: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

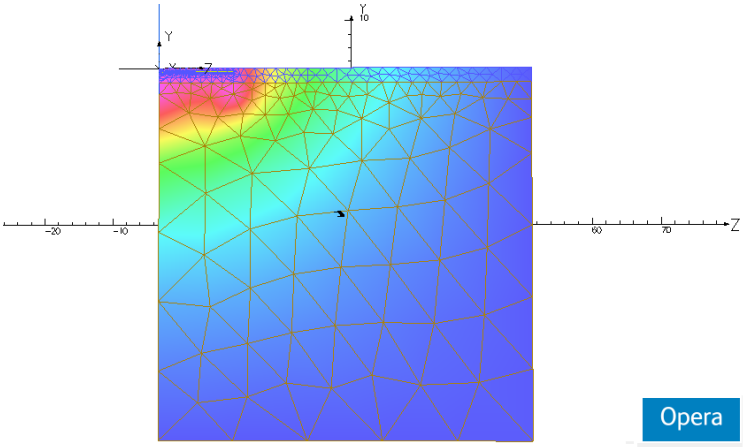
Στο Σχήμα 4.75 παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Opera 3D για τις πέντε περιπτώσεις με όλα τα γραφήματα για την Μεταβατική Ανάλυση.

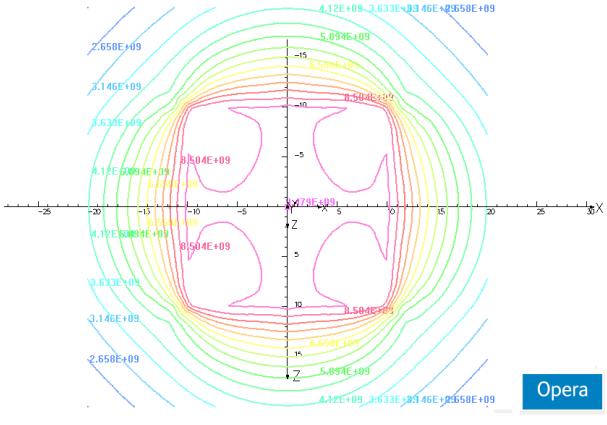
❖ **Περίπτωση 2**



Σχήμα 4.75: Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

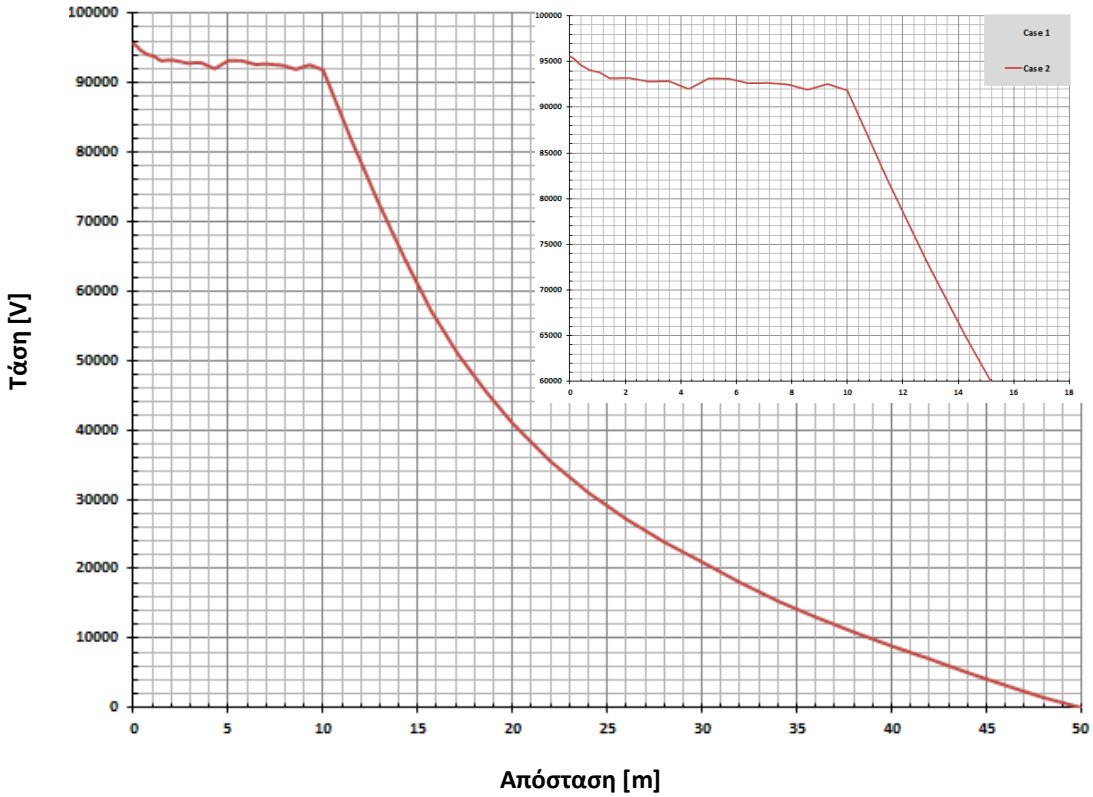
Στα Σχήματα 4.76-4.77 παρουσιάζονται το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος και οι ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού αντίστοιχα. Στο γράφημα του Σχήματος 4.78 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μεταβολής δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο.





Σχήμα 4.76: κατανομή δυναμικού σε κάθετη τομή **Σχήμα 4.77:** Ισοδυναμικές γραμμές δυναμικού στο πλέγμα γείωσης (Μεταβατική Ανάλυση)

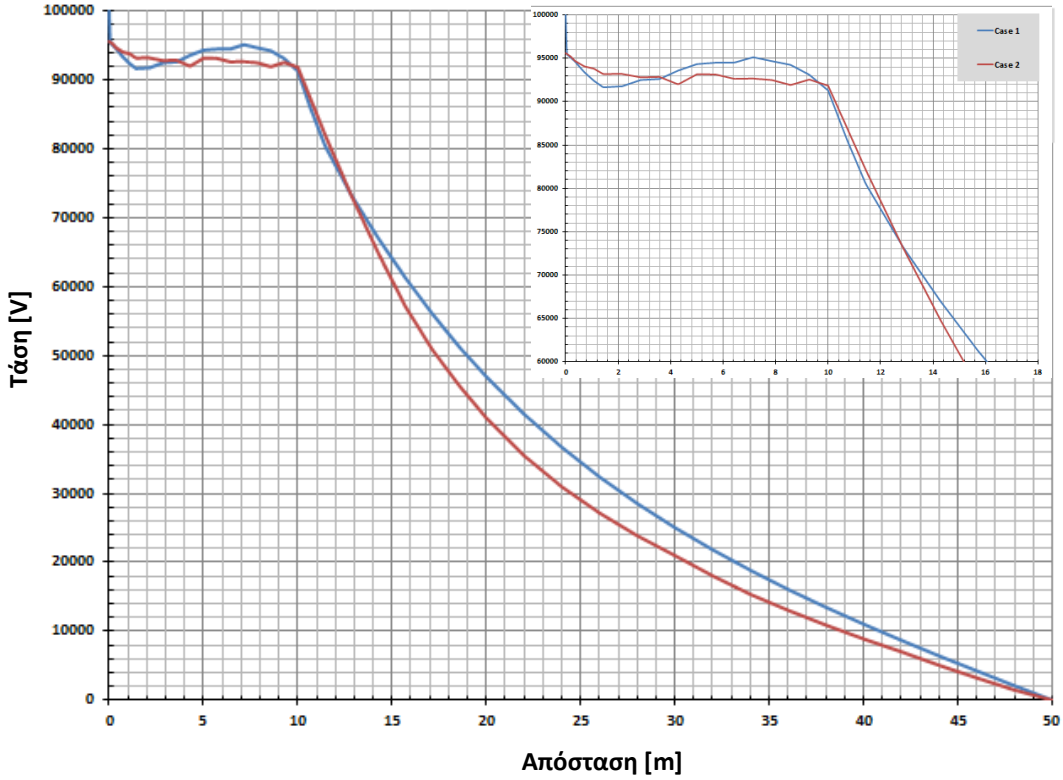
Περίπτωση 2



Σχήμα 4.78: μεταβολή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους (Μεταβατική Ανάλυση)

4.4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Δ

Τα αποτελεσματα της Μεταβατικής Ανάλυσης και για τις 2 Περιπτώσεις συγκριτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.79.



Σχήμα 4.79: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της απόστασης Case1 [χωρίς ηλεκτρόδια] , Case2 [με κατακόρυφα ηλεκτρόδια]

- Με την προσθήκη ηλεκτροδίων είναι εμφανές από τη σύγκριση των Περιπτώσεων 1 και 2 ότι μειώθηκε το δυναμικό τόσο στο επίπεδο του πλέγματος γείωσης όσο και στο επίπεδο του εδάφους. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η κρουστική τάση έχει περισσότερους διεξόδους προς το έδαφος. Άρα με την προσθήκη ηλεκτροδίων στο μοντέλο βελτιώθηκε η απόδοση του συστήματος γείωσης καιτην ασφάλεια του

ανθρώπινου παράγοντα που εργάζεται στο περιβάλλον επίδρασης του συστήματος γείωσης.

- Για την Περίπτωση 2 που το ηλεκτρόδιο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να διεισδύσει και στο δεύτερο στρώμα, η υψηλή τιμή της ειδικής αντίστασης του δεύτερου στρώματος επιδρά θετικά μειώνοντας γρήγορα το δυναμικό κατά μήκος της επιφάνειας, με συνέπεια όμως την εμφάνιση υψηλών βηματικών τάσεων.

- Είναι φανερό ότι στα σημεία που αλλάζει η ρ αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό.

5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη και προσομοίωση της στατικής και μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης για να προσδιοριστούν παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Τόσο για τη στατική όσο και για τη μεταβατική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα τρισδιάστατου προγραμματιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης PC OPERA-3D Version 14.0. Συγκεκριμένα οι επιλύτες Elektra Steady State και Elektra Transient Analysis.

Οι διατάξεις, που προσομοιώθηκαν, παρουσίαζαν αξονική συμμετρία, η οποία και λήφθηκε υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση του μοντέλου ώστε να επιτευχθεί απλοποίησή του.

Για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων πριν να ετοιμαστούν τα μοντέλα προς έλεγχο, σχεδιαστηκε και προσομοιώθηκε ηλεκτρόδιο το οποίο προσομοιώθηκε σε διδιάστατο χώρο σε παλαιότερη διπλωματικη εργασία και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με σκοπό την ορθότητα των αποτελεσμάτων μας.

Σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν τέσσερα μοντέλα για έλεγχο τεσσάρων διαφορετικών παραμέτρων. Η Προσομοίωση Α εξέταζε τη μεταβολή του αριθμού «ματιών» του συστήματος γείωσης, η Προσομοίωση Β εξέταζε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους που είναι βυθισμένο το σύστημα γείωσης, η Προσομοίωση Γ εξέταζε σε διστρωματικά μοντέλα εδάφους και η Προσομοίωση Δ εξέταζε τη προσθήκη κατακόρυφων ηλεκτροδίων σε διστρωματικό μοντέλο εδάφους.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι:

- Τόσο στη στατική όσο και στη μεταβατική ανάλυση για την **Προσομοίωση Α** τα αποτελέσματα υποδεικνείουν ότι η αύξηση των αγωγών στο πλέγμα γείωσης δεν

αποφέρει καλύτερη απόδοση του συστήματος. Αντίθετα παρατηρούμε υψηλές τάσεις πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους στις Περιπτώσεις 2 και 3.

- Επίσης από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι σε χαμηλές συχνότητες δεν παίζει σημαντικό ρόλο ο αριθμός των αγωγών αλλά το μέγεθος του συστήματος γείωσης. Ωστόσο πρέπει να αναφέρουμε ότι σε υψηλές συχνότητες η αύξηση του αριθμού των αγωγών μειώνει δραματικά την μεταβολή του δυναμικού διαχύοντας το στο έδαφος.
- Η ειδική αντίσταση εδάφους **(Προσομοίωση Β)** έχει σημαντική επίδραση στην μεταβατική συμπεριφορά ενός συστήματος γείωσης. Στο έδαφος με την υψηλότερη ειδική αντίσταση είναι πιο δύσκολο για τους αγωγούς του συστήματος γείωσης να εγχύσουν την κρουστική τάση προς το έδαφος. Ως αποτέλεσμα παρατηρούμε ότι το δυναμικό είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με το έδαφος χαμηλής ειδικής αντίστασης.
- Στην Περίπτωση 2 **(Προσομοίωση Γ)** όπου το πάνω στρώμα έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από το κάτω, παρατηρούμε αισθητή μείωση του δυναμικού τόσο στο επίπεδο του πλέγματος όσο και στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του συστήματος γείωσης και την ασφάλεια του ανθρώπινου παράγοντα που εργάζεται στο περιβάλλον επίδρασης του συστήματος.
- Στο διστρωματικό έδαφος όλα τα στρώματα επιδρούν σημαντικά στην κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Πρωταρχικό ρόλο παίζει, φυσικά, η τιμή της ειδικής αντίστασης της εγγύτερης στο ηλεκτρόδιο ζώνης(Έδαφος 1), αλλά όπως παρατηρήσαμε στα σημεία που αλλάζει η ειδική αντίσταση αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό.
- Είναι φανερό ότι στα σημεία που αλλάζει η ρ αλλάζει και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό.

- Για την περίπτωση που το ηλεκτρόδιο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να διεισδύσει και στο δεύτερο στρώμα**(Προσομοίωση Δ)**, η υψηλή τιμή της ειδικής αντίστασης του δεύτερου στρώματος επιδρά θετικά μειώνοντας γρήγορα το δυναμικό κατά μήκος της επιφάνειας, με συνέπεια όμως την εμφάνιση υψηλών βηματικών τάσεων.
- Με την προσθήκη ηλεκτροδίων **(Προσομοίωση Δ)** είναι εμφανές από τη σύγκριση των Περιπτώσεων 1 και 2 ότι μειώθηκε το δυναμικό τόσο στο επίπεδο του πλέγματος γείωσης όσο και στο επίπεδο του εδάφους. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η κρουστική τάση έχει περισσότερους διεξόδους προς το έδαφος. Άρα με την προσθήκη ηλεκτροδίων στο μοντέλο βελτιώθηκε η απόδοση του συστήματος γείωσης καιτην ασφάλεια του ανθρώπινου παράγοντα που εργάζεται στο περιβάλλον επίδρασης του συστήματος γείωσης.
- Η επιβολή της κρουστικής τάσης προκαλεί μια μεταβαλλόμενα έντονη καταπόνηση του συστήματος γείωσης, σε αντίθεση με τη σταθερή τάση της στατικής ανάλυσης. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όχι μόνο η ειδική αντίσταση του εδάφους και οι διάφορες ανομοιομορφίες του, αλλά και οι κρουστικές τάσεις, που είναι πιθανόν να πλήξουν το σύστημα, έως ότου αυτές αποσβεθούν.

Όσον αφορά μελλοντικές εργασίες, κρίνεται σκόπιμη η μοντελοποίηση πλεγμάτων γείωσης και συστημάτων γείωσης που δεν παρουσιάζουν αξονική συμμετρία με το τρισδιάστατο προγραμματιστικό πακέτο πεδιακής ανάλυσης PC OPERA-3D και επίλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς τους. Επιπλέον, διαφορετικές κρουστικές τάσεις με διαφορετικούς χρόνους ανόδου (αν μας ενδιαφέρει η επαγωγική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου) και ημίσεως εύρους (αν μας ενδιαφέρει η ενέργεια που ταλαιπωρεί το ηλεκτρόδιο) θα μπορούσαν να προσομοιωθούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους.

Α

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

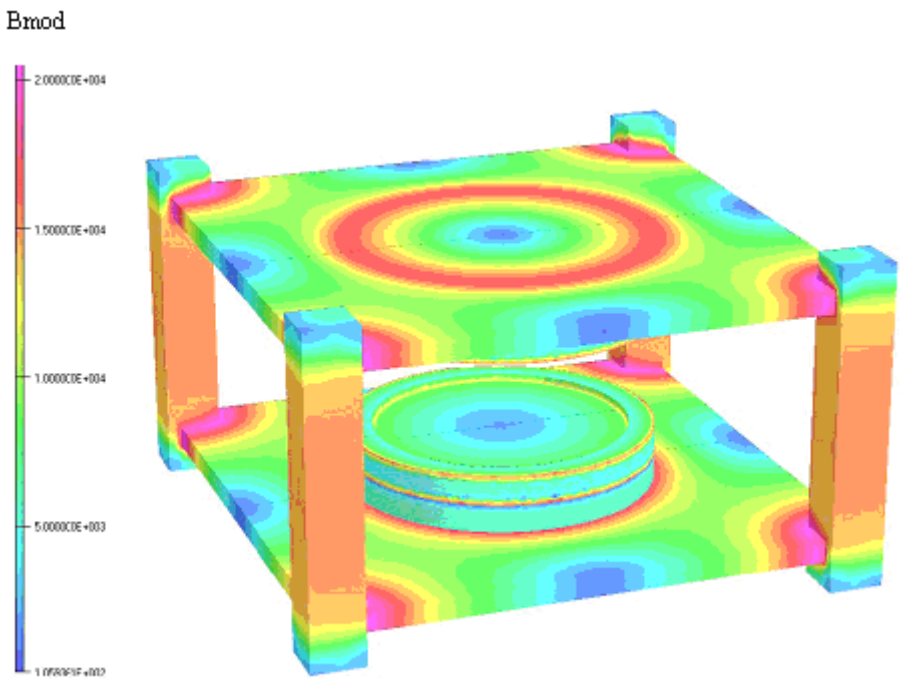
ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PC OPERA-3D

Το πρόγραμμα Opera-3d

3.1 Εισαγωγή

Το Opera-3d (**OP**erating **e**nvironment for **E**lectromagnetic **R**esearch and **A**nalysis, δηλαδή ένα λειτουργικό περιβάλλον για ηλεκτρομαγνητική έρευνα και ανάλυση) είναι ένα σύστημα προ- και μετ- επεξεργασίας για γνωστά προγράμματα ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, που είναι τα εξής: TOSCA, ELEKTRA, SCALA, CARMEN, SOPRANO και TEMPO. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τη βασική μέθοδο που χρησιμοποιείται σε αυτά τα προγράμματα ανάλυσης. Αυτή η ευρέως διαδεδομένη τεχνική για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτεί ειδικές τροποποιήσεις για να εφαρμοστεί σε υπολογισμούς ηλεκτρικού πεδίου. Αυτές οι τροποποιήσεις υποστηρίζονται από τον Μοντελοποιητή (Modeller) και τον Προ-Επεξεργαστή του Opera-3d. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τον καθορισμό σύνθετης γεωμετρίας με αγωγούς και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών συμπεριλαμβανομένων μη-γραμμικών και μη-ισοτροπικών περιγραφών, αλλά και γραφικών παραστάσεων για τον έλεγχο των δεδομένων [28, 29].

Ομοίως, ο Μετ-Επεξεργαστής του Opera-3d παρέχει τα απαραίτητα μέσα για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Μέσω αυτού μπορούν να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη που αφορούν κάθε πρόβλημα (π.χ. ένταση ηλεκτρικού πεδίου, δυναμικό, ρεύμα ή δύναμη) είτε πάνω στο μοντέλο είτε με γραφικές παραστάσεις. Για παράδειγμα, σε μια απλοποιημένη γεωμετρία ενός μόνιμου (MRI) μαγνήτη, η ένταση του μαγνητικού πεδίου (Bmod) παρουσιάζεται πάνω στο μαγνήτη:



Σχήμα 3.1: Εικόνα της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια ενός μόνιμου μαγνήτη από το Μετ-Επεξεργαστή.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, υπάρχουν έξι πακέτα ανάλυσης, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

TOSCA

Το πακέτο αυτό επιλύει προβλήματα μη-γραμμικών μαγνητοστατικών ή ηλεκτροστατικών πεδίων και προβλήματα ροής ρεύματος σε τρεις διαστάσεις. Παραδείγματα εφαρμογής του πακέτου αυτού είναι :

- οι μαγνήτες MRI (Magnetic Resonance Imaging magnets), όπως ο μαγνήτης του Σχήματος 3.1
- κινητήρες και γεννήτριες
- διακόπτες

ELEKTRA

Το πακέτο αυτό αναλύει χρονικά εξαρτώμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, συμπεριλαμβανομένων

των επιδράσεων των δινορρευμάτων σε τρεις διαστάσεις. Υπάρχουν τρεις δυνατότητες ανάλυσης. Το πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε:

- μετασχηματιστές
- προβλήματα επαγωγής θερμότητας (induction heating)
- αγωγοί πετρελαίου και αερίου

SCALA

Το πακέτο αυτό αναλύει ηλεκτροστατικά πεδία λαμβάνοντας υπόψην την επίδραση του φορτισμένου χώρου που δημιουργείται από δέσμες φορτισμένων σωματιδίων. Παραδείγματα εφαρμογής του πακέτου :

- σωλήνες καθοδικών ακτίνων (cathode ray tubes)
- εκπομπή plasma (plasma emission)
- επίπεδες οθόνες

CARMEN

Το πακέτο αυτό αναλύει μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε στρεφόμενες(rotating) μηχανές με σταθερή ταχύτητα ρότορα. Το πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε:

- κινητήρες και γεννήτριες
- αισθητήρες θέσης

SOPRANO

Το πακέτο αυτό αναλύει ηλεκτρομαγνητικά πεδία υψηλών συχνοτήτων σε τρεις διαστάσεις.

TEMPO

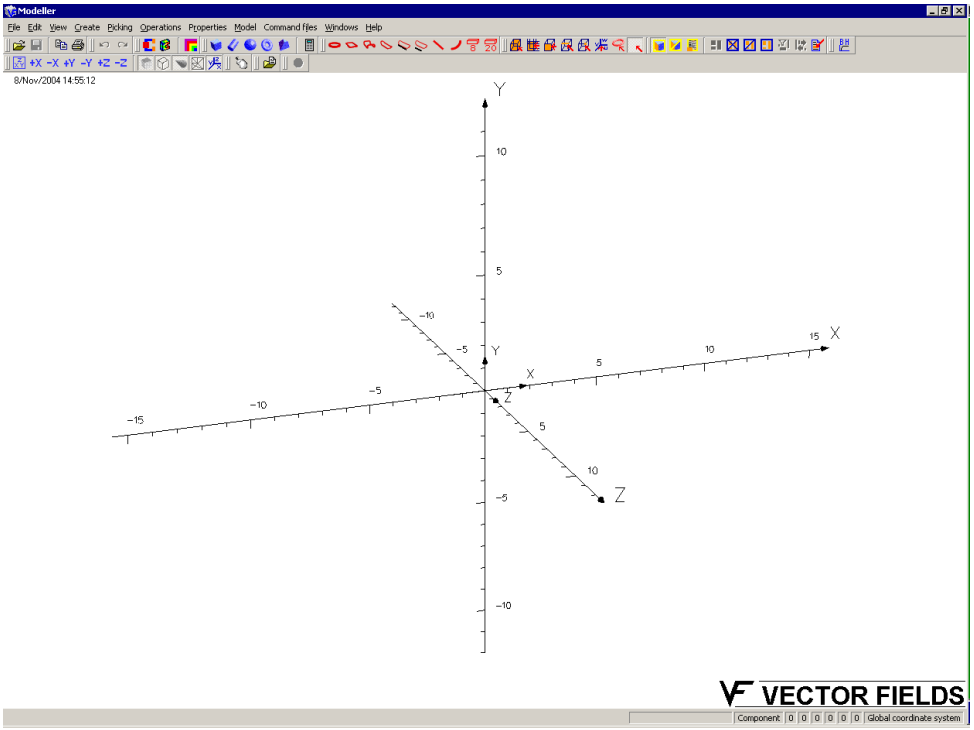
Το πακέτο αυτό αναλύει μεταβαλλόμενα και σταθερά θερμικά πεδία που δημιουργούνται από ηλεκτρομαγνητική θέρμανση (heating) και εξωτερικές πηγές θέρμανσης.

Ο Προ-Επεξεργαστής του Opera-3d έχει κάποια όρια όσον αφορά στο μέγιστο αριθμό οντοτήτων που μπορούν να προσομοιωθούν. Οι κοινές εκδόσεις του Opera-3d έχουν επίσης ένα όριο στο μέγεθος του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που μπορεί να αναλυθεί.

3.2 Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d

Ο Μοντελοποιητής παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων, με στόχο την περαιτέρω ανάλυσή τους και τη μετ-επεξεργασία τους. Στο Μοντελοποιητή, οποιαδήποτε καθορισμένα αντικείμενα μπορούν να μετασχηματιστούν ή να ενωθούν μεταξύ τους. Βασικά αντικείμενα, όπως κύβοι, κύλινδροι, σφαίρες, κώνοι, πυραμίδες, πολυεδρικά πρίσματα και τοροειδή, μπορούν να δημιουργηθούν σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο. Αφού δημιουργηθούν, μπορούν να μετακινηθούν σε άλλη επιθυμητή θέση. Επίσης, μπορούν να συγχωνευτούν ή να αφαιρεθούν από άλλα αντικείμενα στο χώρο, ώστε να δημιουργηθούν πιο σύνθετα γεωμετρικά μοντέλα. Αυτή η τεχνική μοντελοποίησης επιτρέπει σε πολλά μοντέλα να δημιουργηθούν από τα βασικά γεωμετρικά σχήματα. Η γεωμετρία του μοντέλου μπορεί να γίνει πιο περίπλοκη, χρησιμοποιώντας πιο προοδευτικές τεχνικές, όπως για παράδειγμα, τη σάρωση μιας επιφάνειας στο χώρο κατά τη διεύθυνση ενός διανύσματος (εντολή Sweep face).

Όταν ξεκινά ο Μοντελοποιητής, εμφανίζονται στην οθόνη, σε τρισδιάστατη εικόνα, οι τρεις άξονες (x,y,z), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Η αρχική εικόνα στον Μοντελοποιητή, χρησιμοποιώντας τα Microsoft Windows.

Στην κορυφή της οθόνης φαίνεται η γραμμή εργαλείων, από την οποία μπορεί να γίνει η όλη επεξεργασία της επιθυμητής γεωμετρίας. Επιπλέον, στο Μοντελοποιητή μπορούμε να εισάγουμε εντολές, για τη δημιουργία του μοντέλου, από το πληκτρολόγιο. Αυτό γίνεται επιλέγοντας από το πεδίο Windows → Preferences και κατόπιν, συμπληρώνοντας το κουτί διαλόγου που εμφανίζεται κάτω από το τρισδιάστατο σύστημα αξόνων.

3.2.1 Τοπολογία στο Μοντελοποιητή

Κελί (cell)

Ένα κελί αποτελεί έναν κλειστό όγκο του χώρου που περιορίζεται από ένα ή περισσότερα τοιχώματα. Η νοητή γραμμή που ενώνει δύο οποιαδήποτε σημεία μέσα στο κελί δεν τέμνει καμιά επιφάνεια. Οι ιδιότητες του κελιού ανατίθενται σε αυτό από το πεδίο Properties→ Cell properties, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Ένα κελί μπορεί να έχει τα εξής δεδομένα που να αποδίδονται σε αυτό:

- Μια ετικέτα υλικού (material label).

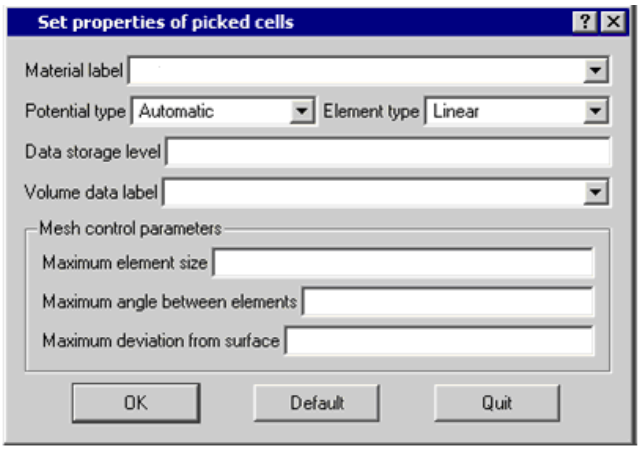
Είναι μια ετικέτα που χρησιμοποιείται για να αναφέρεται στις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με το κελί. Όταν δημιουργείται ένα κελί, έχει αυτόματα την ετικέτα air (αέρας), δηλαδή έχει τις εξής ιδιότητες: $\mu=\mu_0$, $\varepsilon=\varepsilon_0$, $\sigma=0$. Ακόμα, αυτόματα έχει Potential type: Automatic και Element type: Linear. Όμως, μπορεί να ανατεθεί σε κάθε κελί διαφορετική ετικέτα. Στη συνέχεια, και προτιμότερο είναι να γίνει μετά τη δημιουργία του πλέγματος, προσδιορίζονται οι ιδιότητες κάθε ετικέτας, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, η επιτρεπτότητα, η αγωγιμότητα και τυχόν θερμικές ιδιότητες. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της ετικέτας γίνεται από το πεδίο Model→ Set material properties.

- Τύπος δυναμικού (Potential type (TOTAL, REDUCED, VECTOR)). Στο Tosca electrostatics, χρησιμοποιείται ο τύπος TOTAL.
- Τύπος στοιχείου (γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, και τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού). Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως Element type (LINEAR, QUADRATIC).
- Ετικέτα που σχετίζεται με τις ιδιότητες του συγκεκριμένου όγκου (Volume properties label).

  Αυτή η ετικέτα συνδέεται με τα κελιά και αποθηκεύει άλλου είδους δεδομένα που αφορούν το κελί. Αυτά περιλαμβάνουν ταχύτητα, τοπικό προσανατολισμό και άλλους παράγοντες.
- Παράμετροι που σχετίζονται με το πλέγμα που δημιουργείται στο κελί αυτό (Mesh control parameters). Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το μέγιστο μέγεθος του πλέγματος που δημιουργείται στο κελί.
- Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.

  Όταν γίνονται πράξεις μεταξύ σωμάτων, τα κελιά που δημιουργούνται σχηματίζονται από το συνδυασμό των αρχικών κελιών. Σε μια τέτοια περίπτωση, δεν είναι ξεκάθαρο ποιά από τα αρχικά δεδομένα θα καθορίσουν τα τελικά δεδομένα του προκύπτοντος κελιού. Το data storage level χρησιμοποιείται για την επίλυση ακριβώς αυτού του προβλήματος, καθώς το τελικό κελί θα αποκτήσει τελικά τις ιδιότητες εκείνου του κελιού με την υψηλότερη τιμή στο πεδίο data

storage level. Όταν στο πεδίο αυτό τα αρχικά κελιά έχουν την ίδια τιμή, τότε το αποτέλεσμα είναι αμφίβολο.



Σχήμα 3.3: Τρόπος ανάθεσης ιδιοτήτων ενός κελιού.

Σώμα (body)

Ένα σώμα αποτελείται από κορυφές (σημεία), γραμμές, επιφάνειες και κελιά. Όλα τα αντικείμενα μέσα στο σώμα είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους, όσον αφορά στη γεωμετρία τους. Έτσι, τα μέλη ενός σώματος δεν μπορούν να μετακινηθούν, χωρίς να ληφθεί υπόψην η επίδαση αυτής της μετακίνησης σε αυτά. Για παράδειγμα, ένα σώμα μπορεί να περιέχει δύο κελιά. Το κάθε κελί από αυτά καταλαμβάνει το δικό του χώρο. Η μετακίνηση του ενός κελιού μέσα στο σώμα μπορεί να προκαλέσει την αλληλοεπικάλυψη των κελιών, η οποία θα έκανε τα κελιά αυτά άκυρα (invalid). Παρόλα αυτά, εάν υπάρχουν δυο σώματα, καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα κελί, είναι επιτρεπτό να αλληλοεπικαλύπτονται τα σώματα αυτά, αφού δεν υπάρχει καμιά σύνδεση μεταξύ των σωμάτων.

Η βασική διαφορά μεταξύ ενός κελιού και ενός σώματος είναι το γεγονός ότι ένα κελί είναι ένας όγκος του μοντέλου, ενώ ένα σώμα είναι μια ιεραρχημένη σύνθεση κελιών, επιφανειών, γραμμών και σημείων. Ένα σώμα, δηλαδή, αποτελεί ένα υπερσύνολο ενός κελιού.

Δεδομένα επιφάνειας

Οι ιδιότητες μιας επιφάνειας ανατίθενται σε αυτήν από το πεδίο Properties → Face properties. Μια επιφάνεια μπορεί να έχει τα εξής δεδομένα που να συνδέονται με αυτήν:

- Ετικέτα συνοριακής συνθήκης (boundary condition label).

  Αυτή η ετικέτα χρησιμοποιείται για το μετέπειτα προσδιορισμό των ιδιοτήτων της επιφάνειας αυτής από το πεδίο Model → Set boundary conditions.

- Τύπος στοιχείου (γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, και τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού). Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως Element type (LINEAR, QUADRATIC).

- Παράμετροι που σχετίζονται με το πλέγμα που δημιουργείται στην επιφάνεια αυτή (Mesh control parameters). Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το μέγιστο μέγεθος του πλέγματος που δημιουργείται στην επιφάνεια.

- Layering, που χρησιμοποιείται για να δημιουργεί λεπτά στρώματα σε οποιαδήποτε ή και στις δύο πλευρές της επιφάνειας, με στόχο τη μεγαλύτερη λεπτομέρεια κατά τη δημιουργία του πλέγματος στις πλευρές αυτές. Εφαρμόζεται ιδιαίτερα σε προβλήματα όπου οι «λεπτές» γεωμετρίες θεωρούνται σημαντικές.

- Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.

  Όπως και στα κελιά, η ένωση των επιφανειών δημιουργεί αμφίβολο αποτέλεσμα. Έτσι, θα διατηρηθούν τα δεδομένα εκείνης της επιφάνειας με το μεγαλύτερο data storage level.

<u>Δεδομένα γραμμής</u>

Από το πεδίο Properties → Edge Properties, μπορούμε να ορίσουμε και τις ιδιότητες κατά μήκος μιας επιλεχθείσας γραμμής.

Στο Μοντελοποιητή είναι απαραίτητο να τεθούν ιδιότητες των υλικών των κελιών, πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος, ιδιότητες του όγκου, καθώς και οριακές συνθήκες στις επιφάνειες των σωμάτων. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται όταν δημιουργείται η βάση δεδομένων για την ανάλυση του μοντέλου, με απώτερο σκοπό τη μετ-επεξεργασία του.

Πριν το σχηματισμό του τελικού μοντέλου, τα σώματα θα συγχωνευτούν σε ένα ενιαίο σώμα, για να διασφαλιστεί ότι η τοπολογία σχηματίζει μια ενιαία και έγκυρη δομή.

Τα βασικά σχήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, δημιουργούνται κάθε φορά στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων. Μπορούν να οριστούν τοπικά συστήματα συντεταγμένων και ένα από αυτά επιλέγεται να είναι το τρέχον (αυτό στο οποίο εργαζόμαστε) σύστημα. Όλα τα βασικά σχήματα, αλλά και οι μετασχηματισμοί που εφαρμόζονται σε αυτά, δημιουργούνται πάντα στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων.

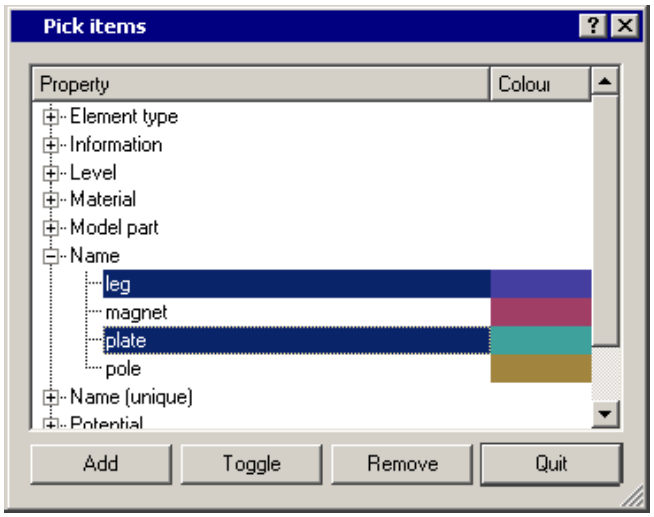
Επιπλέον, μπορεί να δημιουργηθεί και μια ορισμένη ομάδα αγωγών μέσα από ξεχωριστές εντολές, όπως RACETRACK και BEDSTEAD και άλλες. Αυτοί οι αγωγοί δεν αποτελούν φυσικό κομμάτι του μοντέλου και δεν περιλαμβάνονται στο πλέγμα. Μπορούν όμως να επιλεγούν για να μετασχηματιστούν, να αντιγραφούν ή να επανατοποθετηθούν στο χώρο.

Η λειτουργία της αντιγραφής (εντολή Copy) μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα επιλεγμένα σώματα για να δημιουργήσει αντίγραφα των σωμάτων αυτών. Εάν έχει επιλεγεί ένα κελί, αυτό μπορεί να αντιγραφεί μόνο του και η διαδικασία δημιουργεί ένα καινούριο σώμα που περιέχει αυτό το μοναδικό κελί που έχει αντιγραφεί. Στα μοντέλα που προσομοιώθηκαν, πρώτα δημιουργήθηκε ο ένας δίσκος του μονωτήρα και στη συνέχεια, με την εντολή Copy και με κατάλληλη μετατόπιση (Displace) στον άξονα z, δημιουργήθηκε ο επιθυμητός αριθμός δίσκων για κάθε μοντέλο.

3.2.2 Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute)

Κάθε οντότητα μπορεί να έχει δεδομένα που αφορούν τις ιδιότητές της. Αυτά τα δεδομένα ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της οντότητας κάθε φορά. Για παράδειγμα, ένα σώμα έχει ένα όνομα που συνδέεται με αυτό, καθώς και μια ομάδα ετικετών που μπορούν να εφαρμοστούν. Ένα κελί έχει μια ετικέτα που υποδεικνύει από τί υλικό είναι φτιαγμένο το κελί (material label), μια ετικέτα όγκου, έναν αριθμό που καθορίζει το μικρότερο μέγεθος του πλέγματος σε αυτό το κελί, αλλά και άλλες ετικέτες. Η εντολή Pick εκμεταλλεύεται αυτά τα χαρακτηριστικά (ιδιότητες) για να

αναγνωρίσει τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα μοντέλο, με στόχο την τροποποίηση ή τη θέαση του μοντέλου. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται ο τρόπος που επιλέγεται οποιαδήποτε οντότητα σε ένα μοντέλου.



Σχήμα 3.4: Επιλογή οντοτήτων σύμφωνα με τις ιδιότητές τους.

3.2.3 Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων

Η κύρια εντολή για την τροποποίηση της γεωμετρίας είναι η εντολή Transform. Αυτή η εντολή εφαρμόζεται σε σώματα. Όλες οι τροποποιήσεις (μετασχηματισμοί) γίνονται στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων. Οι διαθέσιμοι μετασχηματισμοί είναι οι εξής:

- Παράλληλη τοποθέτηση του αντικειμένου (Translation).
- Περιστροφή του αντικειμένου γύρω από ένα διάνυσμα (Rotation).
- Απεικόνιση του ειδώλου ενός σώματος (Reflection).
- Αύξηση ή μείωση ενός σώματος υπό κλίμακα (Scale).

Πιο πολύπλοκες γεωμετρικές αλλαγές μπορούν να εφαρμοστούν σε σώματα, χρησιμοποιώντας τις εντολές μορφοποίησης. Στις εντολές μορφοποίησης περιλαμβάνονται οι εξής:

- Η εντολή Bend, κατά την οποία ένα σώμα λυγίζει μέσω μιας κατάλληλης γωνίας.

- Η εντολή Morph, κατά την οποία εφαρμόζεται στο σώμα οποιαδήποτε μορφοποίηση υπό μορφή συνάρτησης.
- Η εντολή Stretch, κατά την οποία οποιοδήποτε κομμάτι του σώματος επιμηκύνεται μεταξύ δύο σημείων που έχουν επιλεχθεί.
- Η εντολή Twist, κατά την οποία οποιοδήποτε κομμάτι του σώματος στρίβει (κάμπτεται) μεταξύ δύο σημείων που έχουν επιλεχθεί.

3.2.4 Δημιουργία σύνθετων σωμάτων

Πιο πολύπλοκες δομές μπορούν να κατασκευαστούν, χρησιμοποιώντας την εντολή Combine (συνδυασμός) από το πεδίο Operations του Μοντελοποιητή. Οι πράξεις άλγεβρας Boole που είναι δυνατόν να γίνουν μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων είναι οι εξής:

- Η εντολή Union, που ενώνει τα σώματα, ώστε το τελικό σώμα να έχει τα χαρακτηριστικά των αρχικών σωμάτων (πριν την ένωση).
- Η εντολή Intersection, κατά την οποία παραμένει στο μοντέλο μόνο ο κοινός όγκος των αρχικών σωμάτων που επιλέχθηκαν.
- Η εντολή Subtraction, όπου αφαιρούνται από το πρώτο σώμα που επιλέχθηκε, όσα σώματα επιλέχθηκαν κατόπιν. Δηλαδή, σε αυτή την εντολή παίζει ρόλο η σειρά επιλογής των σωμάτων. Προϋπόθεση αποτελεί, φυσικά, το πρώτο σώμα να έχει κοινό όγκο με τα υπόλοιπα. Η εντολή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία όλων των μονωτήρων που θα παρουσιαστούν παρακάτω.
- Η εντολή Trim, όπου αφήνει ανέπαφα όλα τα επιλεγμένα σώματα, εκτός από το πρώτο, του οποίου «κόβει» τις άκρες, έτσι ώστε το σώμα αυτό να μην αλληλεπικαλύπτεται με τα άλλα.
- Η εντολή Cutaway, όπου αφήνει ανέπαφο το πρώτο επιλεγμένο σώμα και «κόβει» τις άκρες των άλλων σωμάτων, ώστε να μην υπάρχει αλληλεπικάλυψη.

Σε όλες τις λειτουργίες υπάρχει η δυνατότητα να κανονικοποιηθεί το αποτέλεσμα (regularisation), με στόχο να αφαιρεθούν εσωτερικές επιφάνειες που σχηματίστηκαν από τις «πράξεις» μεταξύ των σωμάτων.

3.2.5 Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία του πλέγματος

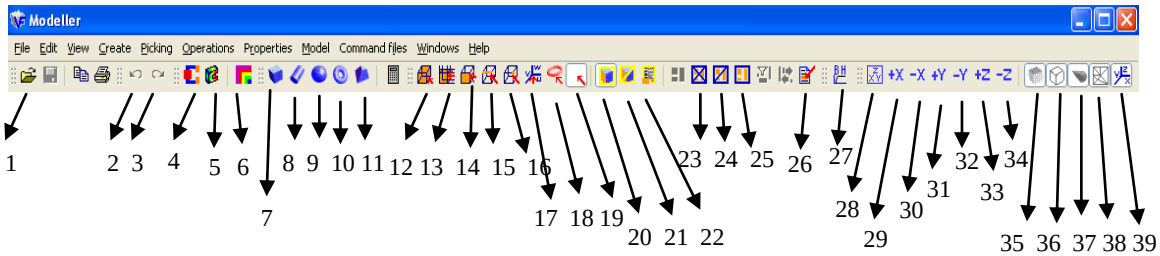
Για τη δημιουργία ενός συνεχούς πλέγματος σε όλο τον όγκο του χώρου που μοντελοποιείται, είναι απαραίτητο να έχει δημιουργηθεί ένα ενιαίο σώμα. Αυτό το σώμα αποτελείται από πολλαπλά κελιά, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Για να γίνει πιο εύκολη η μοντελοποίηση, είναι προτιμότερο να προκύψουν πολλά απλά σώματα, τα οποία να μπορούν εύκολα να μετακινηθούν ή να τεθούν υπό κάποια επιθυμητή κλίμακα. Για να γίνει η μετάβαση από τα πολλά σώματα σε ένα ενιαίο σώμα, στο οποίο να μπορεί να δημιουργηθεί πλέγμα, χρησιμοποιούμε την εντολή Create Model Body από το πεδίο Model. Αυτή η εντολή δημιουργεί ένα αντίγραφο για κάθε ένα σώμα του μοντέλου και τα ενώνει, χρησιμοποιώντας μια πράξη (άλγεβρας Boole) ένωσης χωρίς κανονικοποίηση, για να διασφαλιστεί η διατήρηση των εσωτερικών ιδιοτήτων των υλικών και των συνόρων μεταξύ των υλικών. Το ενιαίο σώμα που σχηματίζεται θα έχει τις ιδιότητες που καθορίζονται από τα συστατικά μέρη του ενιαίου σώματος. Οι ιδιότητες αυτές προσαρμόζονται, όπου αυτό είναι απαραίτητο, για να ληφθούν υπόψην οι αντιθέσεις μεταξύ των υλικών, εκμεταλλεύοντας την τιμή του πεδίου data storage level. Το ενιαίο σώμα που έχει σχηματιστεί είναι πλέον έτοιμο για να δημιουργηθεί πλέγμα στην επιφάνεια και τον όγκο του. Εάν το μοντέλο δεν είναι σωστό, τότε θα εμφανιστεί κάποιο εικονίδιο στο Μοντελοποιητή κατά τη δημιουργία του πλέγματος, στο οποίο θα αναφέρεται η ύπαρξη κάποιου λάθους στο μοντέλο. Για τη διόρθωση του λάθους, πρέπει καταρχήν να καταργηθεί το ενιαίο σώμα με την εντολή Delete Model Body από το πεδίο Model. Στη συνέχεια, με την εντολή Check από το πεδίο Operations, ίσως να εντοπιστεί το σφάλμα αυτό, επιλέγοντας κάποιον αριθμό σωμάτων μαζί, για να διαπιστωθεί εάν αυτά

αλληλεπικαλύπτονται. Να σημειωθεί ότι το μοντέλο, πριν τη δημιουργία του πλέγματος, έχει την κατάληξη .opc.

Κατά τη δημιουργία του μοντέλου, για να περιοριστεί ο χώρος του μοντέλου και για να αποτυπώνει η προσομοίωση όσο το δυνατόν καλύτερα το αντίστοιχο πραγματικό μοντέλο, καλό είναι να χρησιμοποιηθεί μια περιοχή αέρα (background-air). Κατά την προσομοίωση των μονωτήρων θέσαμε το δυναμικό να είναι ίσο με μηδέν στην εξωτερική επιφάνεια του background, θεωρώντας ότι το δυναμικό στο άπειρο είναι μηδενικό. Οποιοδήποτε σώμα (κύβος, κύλινδρος, σφαίρα και άλλα σώματα) μπορεί να αποτελέσει μια περιοχή αέρα, αρκεί κατά τη δημιουργία του κελιού αυτού να ανατεθεί σε αυτό η ονομασία background.

Στο Μοντελοποιητή είναι δυνατή η αυτόματη δημιουργία τετραεδρικού πλέγματος μέσω της εντολής Generate Surface Mesh από το πεδίο Model. Αντίθετα, στον Προ-Επεξεργαστή είναι δυνατή η δημιουργία τόσο τετραεδρικού όσο και εξαεδρικού πλέγματος. Στην πραγματικότητα, η δημιουργία εξαεδρικών στοιχείων παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια, όσον αφορά στα αποτελέσματα της ανάλυσης, σε σχέση με τα τετραδρικά στοιχεία. Σε προβλήματα όπου η ακρίβεια είναι πολύ σημαντική, προτιμάται η δημιουργία εξαεδρικού πλέγματος στον Προ-Επεξεργαστή. Όμως, επειδή μας συμφέρει η δημιουργία του μοντέλου στο Μοντελοποιητή, μια λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν να αυξήσουμε τον αριθμό των τετραεδρικών στοιχείων του πλέγματος, μικραίνοντας την τιμή του πεδίου Maximum element size κατά την κατασκευή των κελιών, στα οποία ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Φυσικά, η λύση αυτή έχει το μειονέκτημα ότι οδηγεί στην αύξηση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος.

Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η γραμμή εργαλείων στο Μοντελοποιητή και παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος χρήσης του Μοντελοποιητή μέσω αυτής.



Σχήμα 3.5 : Η γραμμή εργαλείων του Μοντελοποιητή.

1: Άνοιγμα ενός ήδη υπάρχοντος αρχείου (load a data file).

2: Undo (remove the last change to the model) (εναλλακτικά, Edit→ Undo)

3: Redo (re-apply a change which has been undone)

4: Παρέχει τη δυνατότητα για επιλογή οντοτήτων προς επίδειξη.

5: Ελέγχει την επίδειξη της γεωμετρίας του μοντέλου (Controls the display of the geometry).

6: Δυνατότητα αλλαγής χρώματος των υλικών του μοντέλου.

7: Δημιουργία κύβου ή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.

8: Δημιουργία κυλίνδρου, κώνου ή ελλειψοειδούς κυλίνδρου.

9: Δημιουργία σφαίρας.

10: Δημιουργία τοροειδούς.

11: Δημιουργία πρίσματος ή πυραμίδας n-πλευρών.

12: Επιλογή σώματος.

13: Επιλογή κελιού.

14: Επιλογή επιφάνειας.

15: Επιλογή ακμής.

16: Επιλογή κόμβου.

17: Χρησιμοποιείται για την επιλογή ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων (Coordinate systems button). Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 20.

18: Χρησιμοποιείται για την επιλογή αγωγών. Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 20.

19: Αναιρεί την επιλογή των κουμπιών 17 και 18.

20: Επιλογή οντότητας (pick entity toolbutton). Αυτό το κουμπί πρέπει να είναι πατημένο, πριν την επιλογή κάποιας από τις εξής οντότητες: σώμα, κελί, επιφάνεια, ακμή ή κομβος.

21: Πατώντας αυτό το κουμπί και επιλέγοντας κατόπιν κάποια από τις οντότητες 10 ή 11 ή 12 ή 13 ή 14, τότε επιλέγοντας κάποια οντότητα από το μοντέλο, αυτή θα εξαφανιστεί, οπτικώς μόνο, από την οθόνη.

22: Επίδειξη των ιδιοτήτων που έχουν τεθεί στην επιλεχθείσα οντότητα (Show entity properties).

23: Με το πάτημα αυτού του κουμπιού αναιρείται η επιλογή των ήδη επιλεγμένων οντοτήτων (Reset picked entities).

24: Επιλογή αφαίρεσης της επιλεχθείσας οντότητας από τη θέαση του μοντέλου (Hide entity toolbutton).

25: Με αυτή την εντολή, όλες οι κρυμμένες οντότητες γίνονται πάλι ορατές (Unhide entities).

26: Επιλογή οντότητας μέσω των ιδιοτήτων της (Pick by property).

27: Αφορά την permeability (μ) στο Set material properties σε μαγνητοστατικής φύσεως προβλήματα (Set BH curve properties).

28: Με αυτή την εντολή, επιστρέφουμε στην αρχική θέαση (initial view) του μοντέλου, ώστε αυτό να φαίνεται ολόκληρο στην οθόνη.

29: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα x.

30: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα x.

31: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα y.

32: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα y.

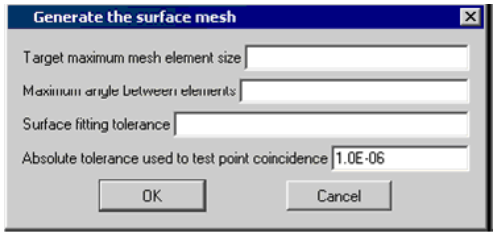
33: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα z.

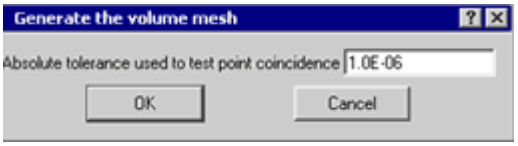
34: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα z.

35-39: Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων κομματιών του μοντέλου.

3.2.6 Δημιουργία του πλέγματος

Η εντολή δημιουργίας του πλέγματος είναι έγκυρη, μόνο αφού έχει δημιουργηθεί το ενιαίο σώμα.. Η δημιουργία του πλέγματος είναι μια διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, δημιουργείται το επιφανειακό πλέγμα, χρησιμοποιώντας την εντολή Generate surface mesh από το πεδίο Model. Το μέγεθος του επιφανειακού πλέγματος δημιουργείται από τις πληροφορίες που έχουν δοθεί για κάθε κελί στο πεδίο maximum element size. Το πλέγμα στις επιφάνειες των κελιών δημιουργείται διαδοχικά. Κατά τη δημιουργία του επιφανειακού πλέγματος, το εξωτερικό περίβλημα κάθε επιφάνειας, στην οποία δημιιουργείται το πλέγμα, φωτίζεται έντονα με ροζ χρώμα. Για πολύπλοκα μοντέλα, όπως και οι αλυσίδες των μονωτήρων που προσομοιώσαμε, ο χρόνος δημιουργίας του πλέγματος είναι αρκετά μεγάλος. Πάντως, αυτός ο χρόνος μπορεί να μειωθεί αρκετά, εάν ελαχιστοποιήσουμε το παράθυρο του Μοντελοποιητή. Κατόπιν, με την εντολή Generate volume mesh από το πεδίο Model, δημιουργούνται τα τετραεδρικά στοιχεία όγκου στο χώρο του μοντέλου. Η δημιουργία του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου είναι εφικτή, εφόσον υπάρχει έγκυρο επιφανειακό πλέγμα. Μετά και το πέρας της επιτυχούς δημιουργίας του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου, το μοντέλο αποθηκεύεται με την κατάληξη .opcb. Τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του μοντέλου θα καταστρέψουν το πλέγμα. Επίσης, είναι δυνατόν να επιστρέψουμε σε παλαιότερο πλέγμα με την εντολή Undo, αλλά τα πλέγματα πριν από αυτό, θα έχουν διαγραφεί. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα δύο στάδια δημιουργίας του πλέγματος του μοντέλου.





(α) (β)

Σχήμα 3.6: Δημιουργία πλέγματος (α) στην επιφάνεια του μοντέλου και (β) στον όγκο του μοντέλου.

3.2.7 Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση

Σε αυτό το στάδιο, και προτιμότερο είναι να γίνει μετά τη δημιουργία του πλέγματος, προσδιορίζονται οι ιδιότητες κάθε ετικέτας, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, η επιτρεπτότητα, η αγωγιμότητα και τυχόν θερμικές ιδιότητες του κάθε υλικού που χρησιμοποιείται στο εκάστοτε μοντέλο. Στα υλικά τίθενται οι ιδιότητές τους από το πεδίο Model→Set material properties. Στις επιφάνειες τίθενται οριακές συνθήκες από το πεδίο Model→Set boundary conditions. Τέλος, τίθενται και σε όγκους ιδιότητες από το πεδίο Model→Set volume properties.

3.2.8 Ανάλυση του μοντέλου

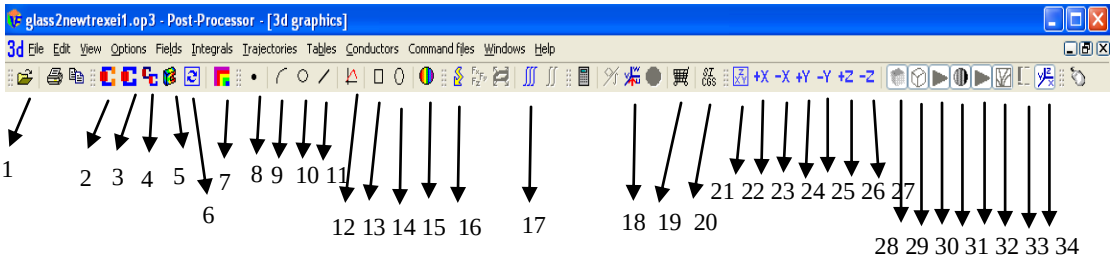
Από το πεδίο Model→Analysis settings επιλέγουμε όποιο πρόγραμμα ανάλυσης επιθυμούμε. Κατά την προσομοίωση των μονωτήρων, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα επίλυσης Tosca electrostatics. Κατόπιν, δημιουργούμε τη βάση δεδομένων του μοντέλου από το πεδίο Model→Create analysis database. Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε τις μονάδες κατασκευής του μοντέλου. Στα μοντέλα των μονωτήρων, επιλέξαμε το πεδίο SI (mm) για μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση.

Μπορούμε να αποθηκεύσουμε το μοντέλο με το πλέγμα του και με τις έως τώρα αλλαγές που έχουν γίνει μέσω της εντολής File→Save model with mesh. Το τελικό στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιείται μέσω του πεδίου Model→Start Analysis.

3.2.9 Μετ-Επεξεργασία

Μετά το πέρας και αυτής της διαδικασίας, μπορούμε απευθείας να ανοίξουμε το παράθυρο του Μετ-Επεξεργαστή μέσω του Μοντελοποιητή με την εντολή Model→Launch Post Processor και να δούμε τα αποτελέσματα που επιθυμούμε, όπως την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου και γύρω από αυτό. Το αρχείο αυτό είναι πλέον αποθηκευμένο στο Μετ-Επεξεργαστή με κατάληξη .op3 και μπορούμε να το ανοίγουμε οποιαδήποτε στιγμή, για να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι λύσεις αποτελούνται από τις τιμές του δυναμικού που λαμβάνονται στους κόμβους του πλέγματος, καθώς και από τις τιμές των στοιχείων του πλέγματος για το ρεύμα, την πυκνότητα φορτίου, τη διαπερατότητα ή την επιτρεπτότητα. Οποιαδήποτε απλή πεδιακή ποσότητα (δυναμικό, ένταση πεδίου, πυκνότητα ροής, πυκνότητα ρεύματος κλπ.) μπορεί να εμφανίζεται σε σημεία, (με την εντολή Fields at a point), κατά μήκος γραμμών, (με την εντολή Fields along a line) ή με τη μορφή δυναμικών γραμμών ή χρωματισμένων περιοχών **(**με την εντολή Contour map**)**.

Στο σχήμα 3.7 φαίνεται η γραμμή εργαλείων στο Μετ-Επεξεργαστή και παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος χρήσης του Μετ-Επεξεργαστή μέσω αυτής.



Σχήμα 3.7: Η γραμμή εργαλείων του Μετ-Επεξεργαστή.

1: Άνοιγμα ενός .op3 αρχείου για λήψη γραφικών και μη αποτελεσμάτων.

2: Επιλογή συγκεκριμένων κομματιών του μοντέλου προς επίδειξη στην οθόνη του Μετ-Επεξεργαστή (select parts of model to be displayed).

3: Κάνοντας αυτή την επιλογή, στην οθόνη εμφανίζονται όλα τα υλικά του μοντέλου εκτός από τον αέρα (Default select and refresh).

4: Γίνεται μόνο ανανέωση της εικόνας στο Μετ-Επεξεργαστή, χωρίς να γίνει κάποια αλλαγή σε προηγούμενες επιλογές όσον αφορά στην επίδειξη του μοντέλου.

5: Η επιλογή αυτή επιτρέπει την απεικόνιση μέσω χρωμάτων της μαγνητικής επαγωγής, του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού ή της διηλεκτρικής μετατόπισης πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου(3d display button).

6: Ανανέωση της εικόνας του μοντέλου.

7: Παρέχει τη δυνατότητα αλλαγής των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.

8: Μέσω αυτής της εντολής, υπολογίζεται απευθείας η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού, της μαγνητικής επαγωγής ή της διηλεκτρικής μετατόπισης σε ένα σημείο με συγκεκριμένες συντεταγμένες που καθορίζονται από το χρήστη (Fields at a point).

9: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός τόξου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες των άκρων και του κέντρου του.

10: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός κυκλικού τόξου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες του κέντρου, αλλά και την ακτίνα του.

11: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής.

12: Μέσω αυτής της επιλογής, η οποία ακολουθείται από την 8, 9, 10 ή 11, απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος.

13: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός καρτεσιανού επιπέδου, πάνω στο οποίο, με το κουμπί 15 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a cartesian patch).

14: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός πολικού επιπέδου, πάνω στο οποίο, με το κουμπί 15 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a polar patch).

15: Με αυτή την εντολή απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος πάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, που έχει οριστεί πρώτα με τις εντολές 13 και 14. Το μέγεθος αυτό απεικονίζεται είτε ως χρωματισμένες περιοχές (zone map) είτε ως ιστόγραμμα (histogram) είτε ως γραμμές (lines) (Contour or vector map).

16: Παρέχει τη δυνατότητα να υπολογιστούν, μέσω της ολοκλήρωσης του όγκου του μοντέλου, διάφορα παράγωγα μεγέθη της γεωμετρίας, όπως η δύναμη, η ενέργεια και η χωρητικότητα (Energy, power and force button).

17: Ολοκλήρωση οποιασδήποτε επιθυμητής ποσότητας (μεγέθους) σε οποιονδήποτε όγκο του μοντέλου.

18: Υπολογισμός κάποιου μεγέθους σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

19: Έλεγχος ποιό σύστημα μεταβλητών είναι διαθέσιμο για τους υπολογισμούς πεδίου.

20: Με αυτή την επιλογή, παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής μονάδων στο Μετ-Επεξεργαστή.

21: Επιτρέπει την ολοκληρωμένη θέαση του μοντέλου στην οθόνη (Initial view toolbutton).

22: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα x.

23: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα x.

24: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα y.

25: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα y.

26: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα z.

27: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα z.

28-34: Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων κομματιών του μοντέλου.

3.3 Προγράμματα ανάλυσης

Τα προγράμματα ανάλυσης ενσωματώνουν τους αλγόριθμους για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τις σύγχρονες διαδικασίες αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργεί τη βάση για τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα προγράμματα ανάλυσης. Αυτή η τεχνική επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτεί ειδικές βελτιώσεις, ώστε να εφαρμοστεί σε υπολογισμούς ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ο Μοντελοποιητής και ο Προ-Επεξεργαστής του Opera-3d παρέχουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τον καθορισμό σύνθετων γεωμετριών με αγωγούς, τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών, συμπεριλαμβανομένων λόγου χάρη μη-γραμμικότητας και ανισοτροπικότητας, καθώς και τη γραφική επίδειξη των αποτελεσμάτων.

3.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της λύσης των μερικών διαφορικών ή ολοκληρωτικών εξισώσεων που δεν μπορούν να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Οι μερικές διαφορικές και ολοκληρωτικές εξισώσεις περιγράφουν τη χωρική και χρονική μεταβολή ενός πεδίου είτε άμεσα με τις μεταβλητές του πεδίου αυτού π.χ. την πυκνότητα μαγνητικής ροής **B** είτε χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση δυναμικού που σχετίζεται με το πεδίο μέσω του βαθμωτού ανάδελτα ∇ (gradient) και του στροβιλισμού $\nabla \times$ (curl) . Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να εφαρμοστεί γενικά σε οποιοδήποτε πρόβλημα με οποιοδήποτε είδος μη γραμμικότητας. Βασίζεται στην διαίρεση του χώρου στον οποίο ικανοποιείται η εξίσωση σε μικρά στοιχεία όγκου (τα πεπερασμένα στοιχεία). Μέσα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο χρησιμοποιείται ένα απλό πολυώνυμο που προσεγγίζει την λύση.

Η γενική ιδέα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του χώρου. Παρόλα αυτά, είναι βολικότερο να χρησιμοποιείται ένα απλό

μονοδιάστατο πρόβλημα, με στόχο οι αλγεβρικές εξισώσεις και τα επεξηγηματικά διαγράμματα να γίνονται πιο κατανοητά.

Αφετηρία της ανάλυσης αποτελεί η εξίσωση Poisson που περιγράφει το δυναμικό σε μια διάσταση:

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = \rho \quad (3.1)$$

Η συνάρτηση δυναμικού μπορεί να είναι ένα ηλεκτροστατικό δυναμικό. Σε αυτή την περίπτωση, το ρ θα είναι γραμμική πυκνότητα φορτίου. Για να οριστεί το δυναμικό φ, χρειάζονται οριακές συνθήκες που μπορεί να είναι συγκεκριμένες τιμές είτε του δυναμικού φ, είτε της παραγώγου του $\frac{\partial \phi}{\partial x}$, για παράδειγμα:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

Σε όλα τα παραδείγματα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι απαραίτητο το δυναμικό να έχει οριστεί τουλάχιστον σε ένα σημείο του χώρου, διαφορετικά προκύπτει ένας άπειρος αριθμός λύσεων, προσθέτοντας μια αυθαίρετη σταθερά στη λύση.

Για την λύση της εξίσωσης (3.1) με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία. Ένα τέτοιο τυπικό γραμμικό στοιχείο θα έχει δύο κόμβους αριθμημένους π.χ. 1 και 2. Μέσα σε κάθε τέτοιο στοιχείο το δυναμικό θα προσεγγίζεται από το γραμμικό πολυώνυμο:

$$\phi(x) = \alpha + \beta \cdot x \quad (3.3)$$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό θα είναι συνεχές στο χώρο, παρ' όλο που η παράγωγός του μπορεί να είναι ασυνεχής αν και η επιτρεπτότητα ε είναι ασυνεχής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να μπορεί να δείξει αυτή την συμπεριφορά και έτσι είναι βολικό η εξίσωση (3.3) να χαρακτηρίζεται από τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους του στοιχείου και να χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές για άλλα στοιχεία που συναντώνται στους κόμβους αυτούς.

Μια περαιτέρω απλοποίηση μπορεί να γίνει τροποποιώντας την εξίσωση (3.3) με όρους κομβικών συναρτήσεων N_i που καθορίζονται ως εξής:

$$N_i(x) = 1, \quad x = x_i$$
$$N_i(x) = 0, \quad x = x_j \quad j \neq i \tag{3.4}$$

όπου x_i είναι η x συντεταγμένη του κόμβου i.

Η εξίσωση (3.3) μπορεί τώρα να πάρει την μορφή:

$$\phi(x) = N_1(x) \cdot \phi_1 + N_2(x) \cdot \phi_2 \tag{3.5}$$

Οι συναρτήσεις N_i εκφράζονται σε όρους τοπικών συντεταγμένων μέσα στο στοιχείο. Αυτό γίνεται, ώστε να απλοποιηθούν οι μαθηματικές εκφράσεις και επιπλέον, έτσι αποφεύγονται λάθη που προκύπτουν από αριθμητικές στρογγυλοποιήσεις. Χρησιμοποιώντας το σύστημα τοπικών συντεταγμένων ξ, οι συναρτήσεις N_i γράφονται ως εξής:

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 - \xi)$$
$$N_2 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \xi) \tag{3.6}$$
$$-1 \leq \xi \leq 1$$

Οι συναρτήσεις N_i κάθε κόμβου ορίζονται μόνο εντός των στοιχείων που περιλαμβάνουν αυτόν τον κόμβο και είναι μηδενικές εκτός των στοιχείων αυτών.

Η διακριτή μέθοδος υπολογισμού του δυναμικού φ με χρήση χαρακτηριστικών τιμών δυναμικού των κόμβων και συναρτήσεων N_i αποτελεί τη βάση, στην οποία πολλές εναλλακτικές διαδικασίες μπορούν να στηριχθούν για την επίλυση της εξίσωσης (3.1). Οι μέθοδοι διακύμανσης (variational methods), ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστών βαρύτητας (weighted residual) είναι τρεις από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Οι συντελεστές βαρύτητας έχουν διαδεδομένη εφαρμογή σε προγράμματα λογισμικού προκειμένου να υλοποιηθεί μία αριθμητική επίλυση. Μία

προσεγγιστική επίλυση ως προς φ καθορίζεται από την απαίτηση να ικανοποιείται η παρακάτω συνάρτηση:

$$\int W\left(\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi - \rho\right) \cdot dx = 0 \qquad (3.7)$$

όπου W είναι η συνάρτηση βάρους, από την οποία παίρνει το όνομά της και η μέθοδος.

Ολοκληρώνοντας την (3.7) κατά τμήματα, προκειμένου να μειωθεί η τάξη της διαφόρισης που εφαρμόζεται στο φ, προκύπτει μια προσεγγιστική λύση για το δυναμικό φ:

$$\int_a^b (\nabla W \cdot \varepsilon \nabla \phi + W \rho) dx - [W \varepsilon \frac{\vartheta \phi}{\vartheta x}]_a^b = 0 \qquad (3.8)$$

όπου α, b τα όρια ολοκλήρωσης της εξίσωσης.

Η εξίσωση (3.8) οδηγεί κατευθείαν σε μια μέθοδο αριθμητικής επίλυσης, χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία και τις συναρτήσεις N_i που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης πλεονεκτεί έναντι των άλλων, αφού οι συναρτήσεις W και φ δεν απαιτούν συνέχεια των παραγώγων και επιπλέον καθορίζονται εύκολα οι φυσικές οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του χώρου $\frac{\partial \phi}{\partial x}$.

Ο τομέας από α έως b διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι δίνουν ένα συνδυασμό ανεξάρτητων συναρτήσεων βάρους. Από αυτές τις συναρτήσεις βάρους μπορούν να αναπτυχθούν εξισώσεις με την απαίτηση ότι η εξίσωση (3.8) ικανοποιείται για κάθε συνάρτηση βάρους.

Η εξίσωση για τη συνάρτηση βάρους W_i θα εξαχθεί από την:

$$\sum_j \left(\int_a^b (\nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j \phi_j + N_i \rho) \partial x \right) - \left[N_i \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_a^b = 0 \qquad (3.9)$$

για όλα τα στοιχεία που περιέχουν τον κόμβο i.

Παίρνοντας όλες τις εξισώσεις για τις διαφορετικές συναρτήσεις βάρους θα έχουμε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που σε μητρική μορφή γράφονται ως:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{\Phi} = \mathbf{S} \tag{3.10}$$

όπου K ο πίνακας των συντελεστών, Φ το διάνυσμα των άγνωστων τάσεων στους κόμβους και S το διάνυσμα των οριακών συνθηκών ή των πυκνοτήτων φορτίου.

Οι συντελεστές στον πίνακα K έχουν τη μορφή:

$$K_{ij} = \int_a^b \nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j \, dx \tag{3.11}$$

Αξίζει να σημειωθεί, ότι, παρ' όλο που η ολοκλήρωση στην εξίσωση (3.11) γίνεται για όρια από α έως b, μόνο τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και τους δύο κόμβους i και j συνεισφέρουν.

Ο εξισώσεις στη σχέση (3.10) συχνά δεν είναι γραμμικές επειδή η επιτρεπτότητα ε εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, που προφανώς δεν είναι γραμμική.

<u>Μη γραμμικά υλικά</u>

Για την επίλυση αυτών των μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson. Δίνεται μια αρχική τιμή-λύση Φ_n στα δυναμικά και υπολογίζεται μια νέα λύση Φ_{n+1} επιλύνοντας το γραμμικοποιημένο Ιακωβιανό σύστημα:

$$\mathbf{\Phi}_{\mathrm{n+1}} = \mathbf{\Phi}_{\mathrm{n}} - \mathbf{J}_{\mathrm{n}}^{-1} \cdot \mathbf{R}_{\mathrm{n}} \tag{3.12}$$

όπου το υπόλοιπο R_n δίνεται από την:

$$\mathbf{R}_{\mathrm{n}} = \mathbf{K}_{\mathrm{n}} \cdot \mathbf{\Phi}_{\mathrm{n}} - \mathbf{S}_{\mathrm{n}} \tag{3.13}$$

και η Ιακωβιανή J_n από την:

$$\mathbf{J}_{\mathrm{n}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{\Phi}_{\mathrm{n}}} (\mathbf{K}_{\mathrm{n}} \cdot \mathbf{\Phi}_{\mathrm{n}} - \mathbf{S}_{\mathrm{n}}) \tag{3.14}$$

Με διαδοχικές επαναλήψεις της μεθόδου Newton-Raphson προσεγγίζεται η ζητούμενη τιμή του δυναμικού.

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων

Οι χρήστες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να αποδείξουν ότι το μοντέλο είναι σύμφωνο με το φυσικό πρόβλημα. Στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι συχνά δυνατό να εκτελεστούν απλοί υπολογισμοί, οι οποίοι δίνουν μία σειρά απαντήσεων που αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της ανάλυσης. Μέχρι να αποδειχτεί η ακρίβεια του μοντέλου, δεν είναι σκόπιμο να εξετάζονται τα λάθη λόγω ασυνέχειας. Προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Εάν είναι εφικτό, είναι πιο ασφαλές να λυθεί πρώτα ένα απλοποιημένο δισδιάστατο μοντέλο του συστήματος, να εφαρμοστούν σε αυτό τα τρία παρακάτω βήματα σε αυτή τη δισδιάστατη λύση και μετά να χρησιμοποιηθεί αυτή σαν αρχικός έλεγχος της πλήρους τρισδιάστατης λύσης.
- Εφόσον έχει οριστεί το τρισδιάστατο μοντέλο, κρίνεται σκόπιμη η επίλυση του απλούστερου δυνατού προβλήματος με αυτή τη διάταξη στο χώρο, π.χ. χρησιμοποιώντας μόνο γραμμικά υλικά ή σχετικά μεγάλη επιτρεπτότητα.
- Έλεγχος ότι η λύση έχει την αναμενόμενη συμμετρία. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει έλεγχος του πεδίου στα σύνορα του προβλήματος, εάν δηλαδή είναι όπως αναμένεται.
- Έλεγχος ότι η λύση συμφωνεί με τις προβλέψεις που προέκυψαν μέσω της απλής γραμμικής ολοκλήρωσης (εφόσον είναι εφαρμόσιμη η προσέγγιση της άπειρης διαπερατότητας).

3.3.2 Επιλύτης TOSCA, Ανάλυση στατικού πεδίου

Αυτό το πρόγραμμα ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων βασίζεται σε ένα άλλο πρόγραμμα με το ίδιο όνομα, το οποίο δημιουργήθηκε στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Rutherford Appleton στην Αγγλία. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε περαιτέρω και σήμερα αποτελεί ένα από τα προγράμματα ανάλυσης του Opera-3d. Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για να υπολογίσει μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά πεδία, αλλά και προβλήματα ροής ρεύματος (current flow),

συμπεριλαμβανομένων και των επιδράσεων μη-γραμμικών μέσων στις τρεις διαστάσεις. Παρακάτω περιγράφονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο TOSCA, ώστε να καταστεί σαφής η σχέση μεταξύ του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και του εκάστοτε προβλήματος που επιθυμούμε να προσομοιώσουμε.

Τα τρισδιάστατα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να θεωρηθούν σαν άθροισμα ενός σωληνοειδούς πεδίου και ενός πεδίου εκ περιστροφής. Στα ηλεκτροστατικά πεδία δεν υπάρχει ποτέ συνιστώσα εκ περιστροφής (rotational), οπότε το πεδίο μπορεί να οριστεί, χρησιμοποιώντας το ηλεκτρικό δυναμικό (V). Η ένταση (**E**) του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \qquad (3.15)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής (**D**) συνδέεται με την πυκνότητα φορτίου (ρ) ως εξής:

$$\nabla \mathbf{D} = \rho \qquad (3.16)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.15 και 3.16 και εισάγοντας τη διηλεκτρική επιτρεπτότητα (ε), παίρνουμε τη συνήθη περιγραφή της εξίσωσης Poisson για το ηλεκτρικό δυναμικό:

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla V = -\rho \qquad (3.17)$$

όπου

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \qquad (3.18)$$

Μια παρόμοια εξίσωση προκύπτει από τα προβλήματα ροής ρεύματος:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \qquad (3.19)$$

όπου σ η αγωγιμότητα και

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \qquad (3.20)$$

<u>Συνοριακές συνθήκες</u>

Οι συνοριακές (οριακές) συνθήκες χρησιμοποιούνται με δύο τρόπους. Πρώτον, παρέχουν ένα τρόπο μείωσης της αναπαράστασης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα που

παρουσιάζουν συμμετρία. Δεύτερον, χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν κατά προσέγγιση το πεδίο σε μεγάλες αποστάσεις από το πρόβλημα.

Η συμμετρία του προβλήματος και η συμμετρία των πεδίων υπονοείται από τις συνοριακές συνθήκες δυναμικού που εφαρμόζονται σε οποιοδήποτε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Οι πιο απλοί τύποι συνοριακών συνθηκών φαίνονται στον Πίνακα 3.1, όπου **n** είναι το μοναδιαίο διάνυσμα της εκάστοτε επιφάνειας.

Συνοριακές Συνθήκες		
Μαγνητικά Πεδία	*Συμμετρία πεδίου*	*Βαθμωτό δυναμικό*
Tangential (Εφαπτομενικό) Magnetic	$\mathbf{H} \cdot n = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$
Normal Magnetic	$\mathbf{H} \times n = 0$	φ=σταθερό
Ηλεκτρικά Πεδία ή Προβλήματα ροής ρεύματος	*Συμμετρία πεδίου*	*Βαθμωτό δυναμικό*
Tangential Electric	$\mathbf{E} \cdot \mathbf{n} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$
Normal Electric	$\mathbf{E} \times \mathbf{n} = 0$	V=σταθερό

Πίνακας 3.1: Συνοριακές συνθήκες στο TOSCA.

Το φ αναφέρεται σε βαθμωτό δυναμικό. Να σημειωθεί ότι τα Η και Ε είναι διανύσματα, όπου Η είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου [A/m] και Ε είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου [V/m].

Στα ηλεκτροστατικά πεδία, θα έχουν προφανώς τεθεί στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων οριακές συνθήκες με συγκεκριμένες τιμές δυναμικού (V=τιμή). Στο αντίστοιχο πρόβλημα ροής ρεύματος, για το οποίο το πρόγραμμα TOSCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μπορεί να φανεί απαραίτητο να

τεθούν στις επιφάνειες και μη-μηδενικές παράγωγοι δυναμικού ($\frac{\partial V}{\partial n} = \tau\iota\mu\eta$), ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των ρευμάτων. Επίσης, είναι διαθέσιμες και μικτές οριακές συνθήκες για τη μοντελοποίηση δυναμικών πόλωσης που παράγονται από τη διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών. Εκτός από αυτές τις περιπτώσεις, οι άλλες οριακές συνθήκες που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3.1 θα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Οι συνθήκες που θα εφαρμόζονται αυτόματα, εάν δεν τίθενται άλλες οριακές συνθήκες στις εξωτερικές επιφάνειες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

Αυτόματα Εφαρμοζόμενες Οριακές Συνθήκες		
Μαγνητικά πεδία	*Συμμετρία πεδίου*	*Βαθμωτό δυναμικό*
Tangential Magnetic	$\mathbf{H} \cdot \mathbf{n} = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$
Ηλεκτρικά πεδία ή προβλήματα ροής ρεύματος	*Συμμετρία πεδίου*	*Βαθμωτό δυναμικό*
Tangential Electric	$\mathbf{E} \cdot \mathbf{n} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$

Πίνακας 3.2: Οριακές συνθήκες που τίθενται αυτόματα στις εξωτερικές επιφάνειες.

3.3.3 ELEKTRA, Ανάλυση χρονομεταβλητού πεδίου

Το πρόγραμμα ανάλυσης ELEKTRA χρησιμοποιείται για να υπολογίσει χρονομεταβλητά ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε τρεις διαστάσεις, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης των δινορευμάτων. Το πρόγραμμα αυτό δε μοντελοποιεί την επίδραση των ρευμάτων μετατόπισης. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η μεγαλύτερη διάσταση του μοντέλου πρέπει να είναι μικρότερη από

το 1/10 του μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο κενό. Παρακάτω περιγράφεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται σε αυτό το πρόγραμμα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell, υπό τον περιορισμό ότι εξαιρούνται τα ρεύματα μετατόπισης. Με αυτό τον περιορισμό, οι εξισώσεις του Maxwell λαμβάνουν τη μορφή:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{3.21}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{3.22}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{3.23}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \tag{3.24}$$

όπου τα διανύσματα J, B και H είναι:

J: πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος [A/m^2]

B: μαγνητική επαγωγή [T]

H: ένταση μαγνητικού πεδίου [A/m]

u: ταχύτητα του μέσου

Από την (3.23) προκύπτει ότι η μαγνητική επαγωγή μπορεί να ληφθεί από ένα διανυσματικό δυναμικό **A**:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{3.25}$$

Υπάρχουν τρεις τύποι ανάλυσης στο πρόγραμμα ELEKTRA, καθένας από τους οποίους έχει διαφορετικό είδος χρονομεταβλητότητας:

- Το ELEKTRA/SS υπολογίζει εναλλασσόμενα ρεύματα μόνιμης κατάστασης, όπου όλα τα πεδία και τα δυναμικά ταλαντώνονται με την ίδια συχνότητα.
- Το ELEKTRA/TR υπολογίζει μεταβατικά δινορεύματα που επάγονται από τα πεδία των driving ρευμάτων. Οι συνοριακές συνθήκες και τα εξωτερικά πεδία μεταβάλλονται σε

προκαθορισμένο χρόνο.

- Το ELEKTRA/VL υπολογίζει δινορεύματα που επάγονται από κίνηση, η οποία δεν αλλάζει τη γεωμετρία του προβλήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80–1986), 2000.

[2] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80-1986, 1986.

[3] Δάφνη Α. Κουτσορόδη, «Υπολογιστική προσομοίωση συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2004.

[4] Περής Γ. Χάλαρης, “Γειώσεις – Νομοθεσία και Κανονισμοί”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων ”.

[5] Μ. Λορέντζου, “Συμβολή στη μοντελοποίηση και ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γειώσεων”, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2001.

[6] Χρήστος Γ. Κουρέλης, «Προσομοίωση Μεταβατικής Συμπεριφοράς Συστημάτων Γείωσης», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2010.

[7] Δήμητρα Π. Βάρλα, «Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2004.

[8] Ιωάννης Φ. Γκόνος, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.

[9] Γεώργιος Φώτης, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2001.

[10] Βασιλική Θ. Κονταργύρη, “Κυκλωματική Επίλυση Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002.

[11] Περής Γ. Χάλαρης: “Γειώσεις–Νομοθεσία και Κανονισμοί”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων ”.

[12] Πέτρος Ντοκόπουλος: “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης”, Εκδόσεις Ζήτη 2η έκδοση, Θεσσαλονίκη 1992.

[13] Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980.

[14] Ν. Παναγιωτόπουλος: “Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων”.

[15] Δημήτριος Κόκκινος, Θεμελειακή Γείωση-Πλεονεκτήματα -Εφαρμογές -Υλικά, 3η Έκδοση Φεβρουάριος 2007

[16] Β. Κ. Παπαδιάς: “Εισαγωγή στην Τεχνική των Γειώσεων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”.

[17] IEEE Std 81.2-1991, “IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems”, June 1992.

[18] I.F. Gonos, I. Stathopulos, “Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Power Engineering Society – 2004 General Meeting, Denver, USA, June 6-10, 2004.

[19] Tag, G. F., “Earth Resistances”, George Newnes Ltd, London, 1964.

[17] Αντικεραυνική προστασία ανεμογεννητριών, Καριπίδης Θεόδωρος, Μαστρογιαννόπουλος Λάμπρος, Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη 2009

[18] Δρ. Δημήτρης Β. Κανελλόπουλος, “Αιολική Ενέργεια”, Εκδόσεις ΙΩΝ

[19] Ευθύμιος Κ. Καραλής, “Λειτουργία και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας με Μηχανή Επαγωγής σε Διάταξη Διπλής Τροφοδότησης”, Διπλωματική Εργασία 2008

[20] Μηνάς Παπουτσάκης, “Αξιοποίηση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας σε δίκτυα ηλεκτρική ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, Πάτρα 2009.

[21] Θεόδωρος Διαγούπης, "Μελέτη, προσομοίωση και κατασκευή αντιστροφέα τάσης για τη διασύνδεση ανεμογγενήτριας με το δίκτυο", Πάτρα 2009

[22] S. S Devgan., E. R Whitehead, “Analytical models for distributed grounding systems”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 92, Sep /Oct 1973.

[23] K. J. Nixon, I. R. Jandrell, “Initial Design of a System to determine the Behaviour of an Earth Electrode subjected to real Lightning Discharges”, France, ICLP 2004.

[24] K. J. Nixon, “Quantifying the lightning transient performance of an earth electrode,” IEEE 6th Africon Conference 2002, Vol. 2, 2nd -4th October, pp.665-670.

[25] S. Visacro and G. Rosado, “Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation”, February 2009.

[26] L. V. Bewley, “Theory and tests of the counterpoise”, Elec. Engr., Vol. 53, pp.1163-1172, Aug 1934.

[27] P. L. Bellaschi, “Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, part III effect of lead in ground installation”, AIEE Transactions, vol. 62, pp.334-345, 1943.

[28] E. D. Sunde, “Earth conduction effects in transmission systems”, Copyright 1949 by Bell Telephone Laboratories, Incorporated.

[29] B. G. Gupta and B. Thapar, “Impulse impedance of grounding grids”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 2357-2362, Nov/Dec.
1980.

[30] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, “Transient analysis of grounding systems”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, pp.389-399, 1983.

[31] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, “Frequency dependent characteristics of grounding systems”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.2, pp. 1073-1081, October 1987.

[32] M. Ramamoorty, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran et al., “Transient performance of grounding grids”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, pp. 2053-2059, October 1989.

[33] A. Geri, “Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1008-1017, July 1999

[34] A. F. Otero, J. Cidras and J. L. del Alamo, “Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 873-878, July 1999.

[35] L. Grcev and F. Dawalibi, “An electromagnetic model for transients in grounding system”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 5, pp. 1773-1781, November 1990.

[36] B. Nekhoul, C. Cuerin, P. Labie, G. Meunier, and R. Feuillet, “A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 3, pp. 2150- 2153, May 1995.

[37] F. Dawalibi, “Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part I-single conductor and part II-ground networks”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, 1986.

[38] R. Andolfato, L. Bernardi and L. Fellin, “Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp.1001-1009, July 2000.

[39] R. Verma and D. Mukhedkar, “Impulse to impedance of buried ground wires”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003-2007, Sep./Oct. 1980.

[40] C. Mazetti and G. M. Veca, “Impulse behaviour of grounding electrodes”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, pp. 3148-3156, 1983.

[41] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou, B. C. Papadias, “Time Domain Analysis of grounding electrodes impulse response”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 517-524, April 2003.

[42] Y. Liu, “Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments”, Dissertation, Uppsala 2004.

[43] Y. Liu, N. Theethayi and R. Thottappillil, “An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning Strikes: Non uniform Transmission-Line Approach”, IEEE. Trans. Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

[44] C. R. Paul, “Analysis of multiconductor transmission lines”, Copyright 1994 by John Wiley & Sons, Inc., chapter 5, p.60 and p.136