



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υπολογισμός των αναπτυσσομένων στην επιφάνεια του
εδάφους δυναμικών, των προερχομένων από κεραυνικά
πλήγματα σε ηλεκτρικά δίκτυα υψηλής τάσης**

Επαμεινώνδας Α. Κοντός

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπουσα: Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Ιούνιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υπολογισμός των αναπτυσσομένων στην επιφάνεια του
εδάφους δυναμικών, των προερχομένων από κεραυνικά
πλήγματα σε ηλεκτρικά δίκτυα υψηλής τάσης**

Επαμεινώνδας Α. Κοντός

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπουσα: Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνος Γ.
Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2010

.....
Επαμεινώνδας Α. Κοντός

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

Copyright © Επαμεινώνδας Α. Κοντός, 2010
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Επαμεινώνδα Α. Κοντού για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι ο υπολογισμός των αναπτυσσομένων στην επιφάνεια του εδάφους δυναμικών, των προερχομένων από κεραυνικά πλήγματα σε ηλεκτρικά δίκτυα υψηλής τάσης. Για το σκοπό αυτό προσομοιώθηκαν, με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος CDEGS, δίκτυα υψηλής τάσης αποτελούμενα από πυλώνες και τα αντίστοιχα συστήματα γείωσής τους. Εξετάστηκαν τρία βασικά συστήματα γείωσης πυλώνων, που χρησιμοποιούνται ευρέως, καθώς και παραλλαγές τους, για τον υπολογισμό των αναπτυσσομένων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής σε περίπτωση κεραυνοπληξίας και τη μελέτη της παρεχόμενης ασφάλειας τόσο για τον εξοπλισμό, όσο και για τους ανθρώπους, που ενδέχεται να βρεθούν πλησίον των πυλώνων. Μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις έγχυσης κεραυνικού ρεύματος $8/20\mu\text{s}$ σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Επίσης προστέθηκαν μεταλλικές κατασκευές (μεταλλικοί φράχτες) σε κοντινή απόσταση από τους εξεταζόμενους πυλώνες, με στόχο την μελέτη της επίδρασης σε αυτές ενδεχόμενου κεραυνικού πλήγματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία επεξήγηση της ορολογίας που χρησιμοποιείται στην εργασία. Γίνεται αναφορά στους κεραυνούς, τα χαρακτηριστικά τους, τα είδη τους και τον τρόπο δημιουργίας τους. Αναλύονται οι περιπτώσεις σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς με και χωρίς αγωγό προστασίας, καθώς και το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης σε περίπτωση κεραυνοπληξίας. Ακόμη γίνεται αναφορά των χαρακτηριστικών των ελληνικών γραμμών μεταφοράς και περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης ενός συστήματος γείωσης, καθώς και τα κριτήρια που λαμβάνονται υπ' όψιν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί μια ανασκόπηση σε πρώιμες προσπάθειες μοντελοποίησης συστημάτων γείωσης και γίνεται αναφορά σε μελέτες σχετικά με την μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης σε περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων. Στη συνέχεια επιχειρείται μία προσέγγιση των διαφορετικών

αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην μελέτη συστημάτων γείωσης, ενώ παράλληλα γίνεται μία βιβλιογραφική αναφορά στις σημαντικότερες προσπάθειες μελέτης γειώσεων, που έγιναν με χρήση των παραπάνω μεθόδων. Τέλος, παρουσιάζονται εκτενώς σύγχρονες επιστημονικές εργασίες, που παρουσιάστηκαν στα πλαίσια διεθνών συνεδρίων, με θέμα την μελέτη των συστημάτων γείωσης δικτύων υψηλών τάσεων, καθώς και τη χρήση υπολογιστικών πακέτων προς αυτή την κατεύθυνση.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή και επεξήγηση των βασικών εφαρμογών του πακέτου λογισμικού SES-CDEGS Version 11.0.54 και των βημάτων λειτουργίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των υπό μελέτη δικτύων, καθώς και για τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται ένα διάγραμμα ροής που δείχνει τα βήματα που ακολουθήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δίκτυα που προσομοιώθηκαν και περιγράφονται τα επιμέρους χαρακτηριστικά των πυλώνων, των συστημάτων γείωσης, καθώς και των μεταλλικών κατασκευών πλησίον των πυλώνων. Επίσης, παρουσιάζεται η τοπολογία του δικτύου και γίνεται επεξήγηση των διαφορών μεταξύ των διενεργούμενων προσομοιώσεων, για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των δικτύων που παρουσιάστηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο. Γίνεται σύγκριση των υπολογιζόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής για συγκεκριμένες χαρακτηριστικές συχνότητες του φάσματος του κεραυνικού ρεύματος, με βάση τον χρησιμοποιούμενο τύπο γείωσης και το σημείο που λαμβάνει χώρα το πλήγμα.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη διπλωματική εργασία. Επίσης, διατυπώνονται και κάποιες προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση του αντικειμένου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, που με εμπιστεύτηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση και τη βοήθειά που πρόθυμα μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θέλω από τα βάθη της καρδιάς μου να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αγάπη και την υποστήριξή τους σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Επαμεινώνδας Α. Κοντός

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η περίπτωση εμφάνισης σφαλμάτων σε δίκτυα υψηλής τάσης, προερχομένων από κεραυνικά πλήγματα. Με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος CDEGS γίνεται σχεδιασμός και προσομοίωση δικτύων υψηλής τάσης και των αντίστοιχων συστημάτων γείωσής τους, με σκοπό τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων στην επιφάνεια του εδάφους δυναμικών. Συγκεκριμένα γίνεται έγχυση κεραυνικού ρεύματος 8/20μs σε τρία διαφορετικά σημεία των μελετώμενων δικτύων, ενώ εξετάζονται τρία βασικά είδη γειώσεων και παραλλαγές αυτών. Παράλληλα, υπολογίζεται η κατανομή των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων στην περιοχή των πυλώνων, με στόχο τη μελέτη της παρεχόμενης ασφάλειας τόσο για τον εξοπλισμό, όσο και για τους ανθρώπους που ενδέχεται να βρεθούν πλησίον αυτών. Επίσης, τοποθετούνται μεταλλικές κατασκευές σε κοντινή απόσταση από τους πυλώνες, για να μελετηθούν οι επιδράσεις σε αυτές των προαναφερόμενων κεραυνικών πληγμάτων. Στο τέλος των προσομοιώσεων, ακολουθεί συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων, βάσει του χρησιμοποιούμενου συστήματος γείωσης και του σημείου έγχυσης.

Λέξεις Κλειδιά

Συστήματα γείωσης, Γείωση πυλώνα, Κεραυνικό ρεύμα, Τάσεις επαφής, Βηματικές τάσεις, CDEGS

Abstract

This diploma thesis examines the occurrence of errors in high voltage networks, originating from lightning strikes. With the aid of the CDEGS software, the design and simulation of high voltage networks and their grounding systems are computed, in order to calculate the potentials that develop on the ground surface. More specifically, an injection of lightning current $8/20\mu\text{s}$ took place in three different spots of the tested networks, as well as an examination of the three main types of grounding and their variations. Additionally, the distribution of touch and step voltages close to the towers were calculated, with the aim of studying the security provided for both the equipment and people approaching them. Moreover, metal structures were placed nearby the towers, in order to study the effect of lightnings. At the end of these simulations, a comparative study of the previous results based on the used grounding system and the injection point is presented.

Keywords

Grounding systems, Tower grounding, Lightning current, Touch voltages, Step voltages, CDEGS

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Ευχαριστίες.....	v
Περίληψη.....	vii
Abstract.....	ix
Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Ορολογία	1
1.3 Κεραυνοί.....	6
1.4 Μηχανισμοί διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτιών εντός των νεφών	7
1.5 Τύποι ατμοσφαιρικών εκκενώσεων	8
1.6 Τύποι κεραυνικών εκκενώσεων	8
1.7 Εξωτερικές καταπονήσεις γραμμών μεταφοράς και μόνωση	9
1.7.1 Γ.Μ. χωρίς αγωγό προστασίας.....	9
1.7.2 Γ.Μ. με αγωγούς προστασίας	9
1.8 Απευθείας κεραυνοπληξία αγωγού φάσης – Ανάστροφη διάσπαση.....	10
1.9 Ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο	11
1.10 Χαρακτηριστικά ελληνικών γραμμών μεταφοράς	12
1.11 Σχεδίαση συστημάτων γείωσης.....	15
1.11.1 Καθορισμός ορίων ασφαλείας.....	15
1.11.2 Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη διάρκεια σφάλματος	18
1.11.3 Επίδραση λεπτού στρώματος υλικού επιφανείας	22
1.11.4 Κριτήρια ανεκτής τάσης	23
1.11.5 Κριτήρια για τη βηματική τάση και την τάση επαφής.....	26
1.11.6 Στόχος και αντικείμενο των πλεγμάτων γείωσης	27
1.11.7 Γενικές αρχές στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης.....	28
1.11.8 Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας	29

1.11.9 Εκτίμηση της επικινδυνότητας των κεραυνών	30
Κεφάλαιο 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	31
2.1 Γενικά	31
2.2 Πρώιμες προσπάθειες μοντελοποίησης συστημάτων γείωσης – Αναλυτικές και εμπειρικές μέθοδοι.....	31
2.3 Μεταγενέστερες προσπάθειες μοντελοποίησης συστημάτων γείωσης – Αριθμητικές μέθοδοι	33
2.3.1 Η κυκλωματική προσέγγιση	33
2.3.2 Η ηλεκτρομαγνητική προσέγγιση	35
2.3.3 Η υβριδική μέθοδος	36
2.3.4 Η προσέγγιση γραμμών μεταφοράς.....	36
2.4 Σύγχρονες προσπάθειες μοντελοποίησης συστημάτων γείωσης και εισαγωγή υπολογιστικών προγραμμάτων	37
Κεφάλαιο 3: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SES – CDEGS	59
3.1 Εισαγωγή.....	59
3.2 Καταχώρηση Δεδομένων	60
3.2.1 HIFREQ	61
3.2.2 SESCAD	64
3.2.3 FFTSES.....	64
3.3 Προσομοίωση	68
3.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	68
3.4.1 HIFREQ	69
3.4.2 FFTSES.....	72
3.5 AUTOTRANSIENT.....	73

3.5.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά	74
3.6	Κυριότερα βήματα προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων.....	74
Κεφάλαιο 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ		77
Κεφάλαιο 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ		87
5.1	Σύγκριση με βάση το πλέγμα γείωσης	87
5.2	Προσπάθειες βελτίωσης του συστήματος γείωσης με πλέγμα.....	119
5.3	Σύγκριση με βάση το σημείο έγχυσης.....	124
Κεφάλαιο 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		143
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		149

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η συμπεριφορά των ηλεκτρικών δικτύων υψηλής τάσης σε περίπτωση κεραυνοπληξίας. Συγκεκριμένα, σκοπός είναι η μελέτη της κατανομής του, δια των πυλώνων και των αντίστοιχων συστημάτων γείωσης, διερχόμενου κεραυνικού ρεύματος και ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων δυναμικών στην επιφάνεια του εδάφους, με στόχο την ελαχιστοποίηση των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής.

1.2 ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην ορολογία που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας. Η επεξήγηση των όρων γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 80 – 2000 [1].

Γείωση (ground): Μια αγώγιμη σύνδεση, είτε ηθελημένη είτε τυχαία, με την οποία ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή εξοπλισμός συνδέεται στη γη ή σε κάποιο αγώγιμο σώμα σχετικά μεγάλης έκτασης που παίζει το ρόλο της γης.

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

Ηλεκτρόδιο γείωσης (ground electrode): Αγωγός τοποθετημένος μέσα στη γη που χρησιμοποιείται για να συλλέγει το ρεύμα γης ή το διαρρέον ρεύμα προς τη γη.

Πλέγμα γείωσης (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.

Σύστημα γείωσης (grounding system): Περιλαμβάνει όλες τις διασυνδεδεμένες κατασκευές γείωσης μιας συγκεκριμένης περιοχής.

Υπομεταβατική αντίδραση (subtransient reactance): Η αντίδραση μιας γεννήτριας στην αρχή ενός σφάλματος. Αυτή η αντίδραση χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του αρχικού συμμετρικού ρεύματος σφάλματος. Το ρεύμα διαρκώς ελαττώνεται, αλλά θεωρείται ότι είναι σταθερό σε αυτή την τιμή ως πρώτο βήμα, που διαρκεί κατά προσέγγιση 0.05sec μετά την εφαρμογή του σφάλματος.

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 [1]:

$$GPR = Z \cdot I \quad (1.1)$$

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.

Ενεργό μη συμμετρικό ρεύμα σφάλματος (effective asymmetrical fault current):

Η *rms* τιμή της κυματομορφής της ασύμμετρης έντασης, σαν ολοκλήρωμα καθόλη τη διάρκεια του σφάλματος. Ισχύει [1]:

$$I_F = D_f \cdot I_f \quad (1.2)$$

όπου

I_F το ενεργό ρεύμα ασύμμετρου σφάλματος σε A

I_f το *rms* ρεύμα συμμετρικού σφάλματος ως προς γη σε A

D_f ο συντελεστής ελάττωσης

Μέγιστο ρεύμα πλέγματος (maximum grid current): Τιμή του μέγιστου ρεύματος πλέγματος, που προκύπτει από τον σχεδιασμό του πλέγματος και τις συνιστώσες του προβλήματος γείωσης. Ορίζεται από τον τύπο [1]:

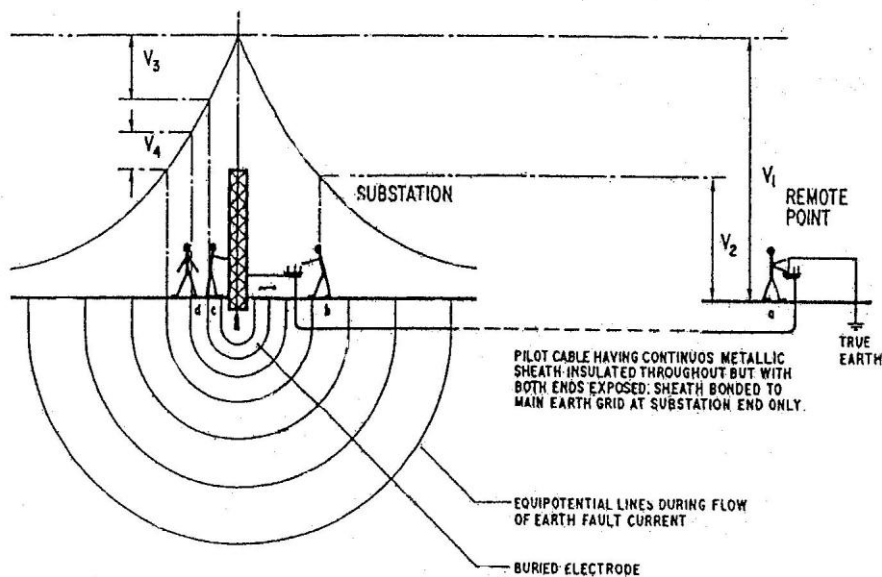
$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (1.3)$$

όπου

I_G το μέγιστο ρεύμα πλέγματος σε A

D_f ο συντελεστής ελάττωσης για ολόκληρη τη διάρκεια του σφάλματος, t_f , σε s

I_g η *rms* τιμή του συμμετρικού ρεύματος στο πλέγμα σε A



Σχήμα 1.1 Βηματική τάση, τάση επαφής, μεταφερόμενη τάση [1]

Τάση πλέγματος (mesh voltage): Η μέγιστη τάση επαφής μέσα στο βρόγχο ενός πλέγματος γείωσης.

Τάση επαφής (touch voltage): Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (*GPR*) και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη δομή. Στο σχήμα 1.1 το άτομο *b* χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της τάσης επαφής. Η διαφορά δυναμικού V_2 που 'βλέπει' το σώμα είναι το αποτέλεσμα επαφής ενός χεριού με τα δυο πόδια. Το υψηλότερο δυναμικό προκύπτει όταν υπάρχει μια μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού δυναμικού, και το άτομο στέκεται 1m μακριά και ακουμπά αυτή τη δομή. Ο κίνδυνος από αυτό τον τύπο της επαφής είναι μεγαλύτερος από τον κίνδυνο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, γιατί η τάση εφαρμόζεται δια μέσου του σώματος και δύναται να επηρεάσει τους μύες της καρδιάς.

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-συνδεδεμένα 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.

Βηματική τάση (step voltage): Η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος 1m, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Στο σχήμα 1.1 το άτομο *a* χρησιμοποιείται για την επεξήγηση της βηματικής τάσης. Η διαφορά δυναμικού V_1 που 'βλέπει' το σώμα περιορίζεται από την τομή ανάμεσα στα δυο σημεία στη γη που απέχουν μεταξύ τους 1m. Εφόσον το δυναμικό στη γη είναι μεγαλύτερο στην περιοχή που γειτονεύει με το ηλεκτρόδιο, συνεπάγεται ότι το μέγιστο βηματικό δυναμικό υπό συνθήκες σφάλματος προς γη θα προκύπτει όταν το άτομο έχει ένα

πόδι στην περιοχή της μέγιστης δυναμικής ανύψωσης και το άλλο πόδι κατά ένα βήμα προς τη γη.

Υλικό επιφανείας (surface material): Ένα υλικό που τοποθετείται πάνω από το έδαφος και αποτελείται από, αλλά δεν περιορίζεται σε, πέτρα ή χαλίκι, ασφαλτο, ή τεχνητά υλικά. Το υλικό επιφανείας, ανάλογα με την ειδική αντίστασή του, μπορεί να επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα για την τάση επαφής και τη βηματική τάση που αφορούν τα πόδια του ανθρώπου.

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. Μπορεί να εκφραστεί ως [1]:

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

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. Στο σχήμα 1.1 το άτομο c χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του υψηλού δυναμικού που μεταφέρεται σε μια περιοχή μηδενικού δυναμικού μέσω του οπλισμού μιας κεραίας. Εφόσον ο οπλισμός είναι συνδεδεμένος στην κεντρικό πλέγμα γείωσης του υποσταθμού, η τάση V_3 θα είναι ίση με την ανύψωση του δυναμικού της γης του υποσταθμού. Στην εικόνα η V_4 παρουσιάζεται μικρότερη από τη V_3 . Αυτό συμβαίνει διότι το άτομο d βρίσκεται σε μερική απόσταση από το κύριο ηλεκτρόδιο γείωσης και συνεπώς υπόκειται στην κλίση δυναμικού γείωσης (ground potential gradient). Τα μεταφερόμενα δυναμικά θεωρείται ότι είναι τα πιο επικίνδυνα, διότι η τάση που εφαρμόζεται στο άτομο δύναται να είναι ίση με την πλήρη ανύψωση δυναμικού και όχι με κλάσμα της, όπως στην περίπτωση της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής.

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.

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 τη σχέση [2]:

$$l_e = 1.4 \cdot \sqrt{(\rho \cdot T)} \quad (1.5)$$

όπου

ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

T ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής σε msec

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.

1.3 ΚΕΡΑΥΝΟΙ

Ο κεραυνός μπορεί να οριστεί ως μια παροδική, υψηλή τρέχουσα ηλεκτρική εκκένωση η πορεία της οποίας μετριέται γενικά σε χιλιόμετρα. Ο κεραυνός εμφανίζεται όταν κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας επιτυγχάνει μια ηλεκτρική φόρτιση αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά πεδία που συνδέονται με τη φόρτιση προκαλούν την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα. Ο κεραυνός δημιουργείται κυρίως σε νέφη καταιγίδας, αν και κεραυνοί έχουν εμφανιστεί και σε χιονοθύελλες και νέφη επάνω από ηφαίστεια που εκρήγνυνται. Κεραυνοί έχουν παρατηρηθεί ακόμη και σε καθαρό ουρανό [3].

1.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΕΝΤΟΣ ΤΩΝ ΝΕΦΩΝ

Έως σήμερα δεν έχει διατυπωθεί μία μονοσήμαντη θεωρία για τον τρόπο διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό των νεφών. Οι σύνθετες και πολύπλοκες διεργασίες που εξελίσσονται δεν βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Για το λόγο αυτό θα περιορισθούμε στην αναφορά τριών φαινομένων, για τα οποία μπορεί να υποθεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο κατά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων. Αυτά είναι:

- α) το φαινόμενο διασποράς,
- β) το φαινόμενο ισχυράς ψύξεως και
- γ) το φαινόμενο διαρρήξεως.

Από τα φαινόμενα αυτά και με βάση τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρισμένου νέφους προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

α) Ένα ηλεκτρισμένο νέφος περιέχει ηλεκτρικά φορτία και των δύο προσήμων σε ίσες ποσότητες που καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Δηλαδή η φόρτιση ενός νέφους δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας διαχωρισμός φορτίων. Τα νέφη παρουσιάζουν κατά κανόνα στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας, που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες Cb και στο πάνω μέρος τους ένα φορτίο θετικής πολικότητας. Έτσι στο χώρο μεταξύ νέφους και γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν στη γη πάνω σε επαγόμενα φορτία, αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχουν τα φορτία του νέφους.

β) Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των πρόσημων δημιουργούν μια συγκεχυμένη εικόνα μέσα στο νέφος, που διαρκώς μεταβάλλεται, γεγονός που εμποδίζει τη συστηματική ταξινόμηση των ηλεκτρικών καταστάσεων που μπορούν να επικρατούν μέσα σ' ένα ηλεκτρισμένο νέφος.

γ) Ο διαχωρισμός των φορτίων μέσα στο νέφος συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (από μερικά πρώτα λεπτά της ώρας έως μισή ώρα περίπου) [4].

1.5 ΤΥΠΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις μπορούν να διακριθούν ανάλογα της πολικότητάς τους σε:

α) Θετικές εκκενώσεις, που αποτελούνται από μία μόνο εκκένωση διάρκειας από 0,1 έως 0,2 s. Η διάρκεια μετώπου αυτών κυμαίνεται μεταξύ 20 μ s και 50 μ s, το δε εύρος του ρεύματος εκκενώσεως που αντιπροσωπεύουν μπορεί να υπερβεί τα 100 kA, ενώ η μέση κλίση μετώπου είναι περί τα 2 kA/ μ s.

β) Αρνητικές εκκενώσεις, που αποτελούνται συνήθως από τρεις ή και περισσότερες διαδοχικές εκφορτίσεις. Η διάρκεια όλου του φαινομένου, κυμαίνεται μεταξύ 0,2 s και 1 s. Η διάρκεια μετώπου και το εύρος της πρώτης εκκένωσης είναι μικρότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για θετικές εκκενώσεις (διάρκεια μετώπου 10 μ s έως 15 μ s). Για τις, μετά την πρώτη, εκφορτίσεις το μεν εύρος είναι λίγο μικρότερο από αυτό της πρώτης, η δε διάρκεια μετώπου είναι σημαντικά μικρότερη κυμαινόμενη μεταξύ 0,5 s και 1 μ s. Η κλίση μετώπου για την πρώτη εκκένωση υπερβαίνει τα 20 kA/ μ s, ενώ για τις επόμενες είναι πολύ μεγαλύτερη (τάξεως 40 kA/ μ s) [3].

1.6 ΤΥΠΟΙ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

α) Μεταξύ νέφους και γης ή και αντίστροφα: Οι κεραυνοί της κατηγορίας αυτής παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, ή πλησίον της γης, οπότε έχουμε εκκένωση ανερχόμενη. Ως πολικότητα της εκκένωσης λαμβάνεται εκείνη του φορτίου του κάτω μέρους του νέφους, που την προκάλεσε.

β) Εντός του ίδιου του συννέφους: Οι υπάρχουσες πληροφορίες για τους κεραυνούς του τύπου αυτού είναι λίγες και επιπλέον συχνά αντιφάσκουν μεταξύ τους. Γενικά στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές από μερικές εκατοντάδες έως 1000 Amperes.

γ) Μεταξύ των συννέφων: Κεραυνοί αυτού του τύπου εκδηλώνονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km και μικρότερο των 12 km. Βασικό χαρακτηριστικών των κεραυνών αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου, έως και 40 km [4].

1.7 ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΙΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΜΟΝΩΣΗ

1.7.1 Γ.Μ. ΧΩΡΙΣ ΑΓΩΓΟ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Εάν ο κεραυνός προσβάλει αγωγό φάσεως, προκαλεί σ'αυτόν ανύψωση δυναμικού που μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές (αν ληφθεί υπόψη μία τιμή για την κυματική αντίσταση του αγωγού κοντά στην πραγματικότητα και η κατανομή των ευρών των κεραυνικών ρευμάτων) π.χ. πάνω από 60% των κεραυνών προκαλούν ανύψωση δυναμικού πάνω από 2000kV, ενώ 20% δίνουν υπέρταση πάνω από 6000kV. Είναι προφανές ότι είναι εντελώς ασύμφορο να κατασκευασθεί μία Γ.Μ. ώστε να αντέχει σε τέτοιες υπερτάσεις.

Εάν ο κεραυνός προσβάλει τον πυλώνα, ούτος εμφανίζει κατά το άνω μέρος του ανύψωση δυναμικού, η οποία, πάντως, είναι μικρότερη από την ανύψωση που είδαμε προηγουμένως, υπό την προϋπόθεση ότι η αντίσταση γειώσεως του πυλώνα έχει κατάλληλα μικρή τιμή.

Συμπερασματικά, μπορούμε να ισχυρισθούμε ότι είναι άσκοπο να διαστασιοποιηθεί η μόνωση μιας Γ.Μ. χωρίς αγωγούς προστασίας, με βάση τις αναμενόμενες κεραυνικές υπερτάσεις.

1.7.2 Γ.Μ. ΜΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Εφόσον οι αγωγοί προστασίας έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα, κάθε ατμοσφαιρική εκκένωση με τιμή ρεύματος πάνω από συγκεκριμένο όριο προσβάλλει τους αγωγούς προστασίας. Κεραυνοί μικρότερης έντασης προσβάλλουν τις φάσεις, πλην όμως η προκύπτουσα υπέρταση δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει σφάλμα πάνω στην γραμμή. Επομένως, πρέπει να υπολογισθεί η ανύψωση δυναμικού του αγωγού προστασίας, ώστε να καθορισθούν οι αποστάσεις μεταξύ αγωγών προστασίας και φάσεων και να υπολογισθεί η ανύψωση δυναμικού μεταξύ γειτονικών πυλώνων, ώστε να καθορισθεί η μόνωση μεταξύ αυτών και των φάσεων.

Υπάρχουν δύο εναλλακτικές, όσον αφορά τη σχεδίαση μιας Γ.Μ.:

α) καλές γειώσεις και σχετικά χαμηλή μόνωση στη γραμμή

β) μέτριες γειώσεις και σχετικά υψηλή μόνωση στη γραμμή.

Βασικές παράμετροι στη σχεδίαση μιας Γ.Μ., όσον αφορά τη μόνωσή της, είναι το διάκενο αέρα ανάμεσα στις φάσεις και τους πύργους, το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων, το διάκενο αέρα μεταξύ φάσεων και αγωγών προστασίας και τέλος, το διάκενο αέρα μεταξύ διαφορετικών φάσεων. Ανάλογα με το εκάστοτε ελεγχόμενο είδος διηλεκτρικής καταπόνησης για κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους προκύπτει μία ελάχιστη τιμή. Η σωστή σχεδίαση της μόνωσης μίας γραμμής μεταφοράς απαιτεί όπως για κάθε μία παράμετρο ληφθεί η μέγιστη από τις ελάχιστες τιμές που προέκυψαν για την ίδια παράμετρο, όταν εξετάζονταν χωριστά τα διάφορα είδη καταπονήσεων [4].

1.8 ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΚΕΡΑΥΝΟΠΛΗΞΙΑ ΑΓΩΓΟΥ ΦΑΣΗΣ- ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Οι δύο τρόποι που ο κεραυνός προκαλεί ενδεχομένως βλάβη ή διαταραχή σε μία γραμμή μεταφοράς είναι η απευθείας κεραυνοπληξία του αγωγού φάσης (shielding failure) και η ανάστροφη διάσπαση (backflashover).

Για την περίπτωση της απευθείας κεραυνοπληξίας του αγωγού φάσης αναπτύχθηκε μία ηλεκτρογεωμετρική θεωρία της οποίας η κύρια παραδοχή είναι η ακόλουθη: Η ποσότητα του φορτίου που είναι συγκεντρωμένη στην κεφαλή της κατερχόμενης βηματικής προεκκένωσης (stepped leader) ανυψώνει το δυναμικό της κεφαλής σε μια υψηλή τιμή, η οποία εξαρτάται αφ'ενός από το ρεύμα του κεραυνού που θα ακολουθήσει και αφ'ετέρου από την απόσταση της κεφαλής από διάφορα αντικείμενα επί του εδάφους από τα οποία θα ξεκινήσουν ανερχόμενες προεκκενώσεις για να σχηματισθεί τελικά η πλήρης γεφύρωση μεταξύ νέφους και γης [3].

Στην περίπτωση της ανάστροφης διάσπασης υπάρχουν δύο ενδεχόμενα δημιουργίας της:

α) απευθείας προσβολή ενός πυλώνα ή ενός αγωγού προστασίας από κεραυνό, με αποτέλεσμα την ανύψωση του δυναμικού του πυλώνα.

β) προσβολή μίας φάσης από κεραυνό, διάσπαση της μόνωσής της και ανύψωση του δυναμικού του πυλώνα, οπότε, ενδεχομένως, σημειώνεται ανάστροφη διάσπαση μεταξύ πυλώνα και μιας υγιούς, μέχρι τότε, φάσεως [4].

Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες, που δεν είναι σαφώς γνωστοί σχετιζόμενοι με το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης. Όπως:

- η συμπεριφορά της μεταλλικής κατασκευής του πύργου όταν αυτός διαρρέεται από το κρουστικό ρεύμα,
- η κατανομή του ρεύματος προς τον πύργο και τον προσβληθέντα αγωγό γης και
- η τάση διάσπασης μεταξύ μίας φάσης που βρίσκεται σε βιομηχανική συχνότητα και του πύργου με το ανυψωμένο δυναμικό, λόγω του ρεύματος του κεραυνού κ.λ.π.

1.9 ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Μία πρώτη εκδοχή του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου αναπτύχθηκε από τους F.S. Young, J.M. Clayton, A.R. Hileman στην προσπάθειά τους να αναλύσουν την αποτελεσματικότητα των αγωγών προστασίας που χρησιμοποιούνταν στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, ενώ η μελέτη τους συνεχίστηκε, βελτιώθηκε και τροποποιήθηκε από πολλούς άλλους ερευνητές [3].

Θεωρείται ότι το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο αποδίδει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς που εκδηλώνονται κατά την κεραυνοπληξία μιας γραμμής μεταφοράς. Βασική παραδοχή είναι ότι το δυναμικό της κεφαλής του κατερχόμενου οδηγού σχετού εξαρτάται από το ρεύμα I του κεραυνού και από την απόσταση από γειωμένα αντικείμενα, από τα οποία θα ξεκινήσουν ανερχόμενες προεκκενώσεις, που, συναντώντας τον κατερχόμενο οδηγό σχετό, συμβάλλουν στη γεφύρωση του διακένου νέφους - γης. Ο οδηγός σχετός θα πλήξει εκείνο το γειωμένο αντικείμενο που πρώτο θα βρεθεί σε απόσταση από την κεφαλή του. Τα δύο μεγέθη I (σε kA) και d (σε m) συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$d = A \cdot I^b \quad (1.6)$$

όπου A και b σταθερές που εξαρτώνται από το σημείο κατάληξης του σχετού.

Αν και υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία πολλές εκδοχές του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου όπου η κάθε μία από αυτές χρησιμοποιεί διαφορετικές τιμές για τις σταθερές A και b, όλες λαμβάνουν υπόψη τους τις ακόλουθες τρεις παραδοχές:

α) οι οχετοί προσπίπτουν κάθετα,

β) ο οδηγός οχετός αναπτύσσεται ανεπηρέαστος από την παρουσία γειωμένων αντικειμένων έως ότου φτάσει σε απόσταση ανάμεσα στην κεφαλή του και στο γειωμένο αντικείμενο και

γ) η απόσταση d σχετίζεται με το ρεύμα I του κεραυνού [3].

1.10 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, που χρησιμοποιούνται σήμερα στον ηπειρωτικό ελλαδικό χώρο είναι κατά κύριο λόγο εναέριες και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την τάση που μεταφέρουν. Στις γραμμές μεταφοράς των 150 kV και στις γραμμές μεταφοράς των 400 kV. Τόσο οι γραμμές των 150 kV, όσο και οι γραμμές των 400 kV, διαχωρίζονται σε γραμμές ελαφρύ και βαρύ τύπου, όπως επίσης και σε μονού ή διπλού κυκλώματος.

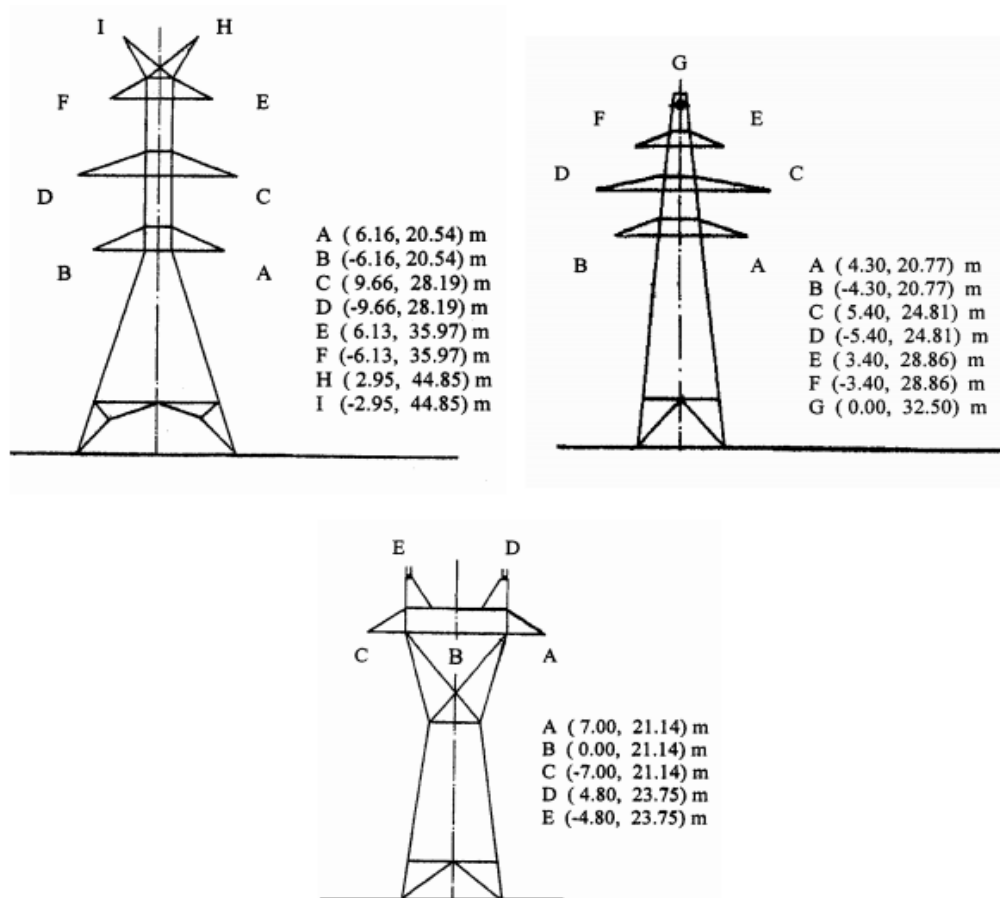
Οι εναέριες γραμμές αναρτώνται από μονωτήρες που με τη σειρά τους αναρτώνται από πύργους. Οι πύργοι ή πυλώνες είναι συνήθως χαλύβδινα στατικά δικτυώματα. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πύργων εξαρτάται από το επιτρεπόμενο κατακόρυφο βέλος του τόξου (κοιλία) του αναρτημένου αγωγού και για χαλύβδινους πύργους με γραμμές υψηλής τάσεως, το άνοιγμα, η απόσταση των πύργων οριζοντίως κυμαίνεται μεταξύ 330 m και 400 m.

Υπάρχουν δύο κύρια είδη πύργου:

α) Οι πύργοι ευθύγραμμου πορείας στους οποίους πρέπει να υποστηριχθεί μόνο η δύναμη που προέρχεται από το βάρος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

β) Οι πύργοι αλλαγής πορείας που ονομάζονται πύργοι αποκλίσεως ή πύργοι γωνίας, επειδή υποστηρίζουν επιπλέον και τη δύναμη που χρειάζεται για να αλλάξει η κατεύθυνση της γραμμής.

Οι πύργοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα μας είναι κυρίως τριών τύπων και παρουσιάζονται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Οι πύργοι των ελληνικών γραμμών μεταφοράς 400 kV και 150 kV

Στις γραμμές μεταφοράς των 150 kV το μέσο ύψος των αγωγών φάσης είναι περί τα 22 m (ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους μπορούν να αναρτηθούν έως και στα 25 m), ενώ στις γραμμές μεταφοράς των 400 kV το μέσο ύψος των αγωγών φάσης είναι περί τα 28 m (ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους μπορούν να αναρτηθούν έως και τα 47 m). Επίσης η μέση οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς φάσης για τις γραμμές μεταφοράς των 150 kV με μονό κύκλωμα είναι τα 7 m, ενώ με διπλό κύκλωμα τα 8,5 m. Αντίθετα η μέση οριζόντια απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς φάσης για τις γραμμές μεταφοράς των 400 kV με μονό κύκλωμα είναι τα 8,5 m, ενώ με διπλό κύκλωμα φτάνουν έως και τα 13 m. Ανάλογα, πάντα, με τον τύπο του πύργου στον οποίο αναρτώνται οι γραμμές μεταφοράς, χρησιμοποιούνται ένας ή δύο αγωγοί προστασίας (γειωμένοι αγωγοί), έτσι ώστε να μπορούν να καλυφθούν (προστατευθούν) οι αγωγοί φάσης από απευθείας πτώση κεραυνού και να

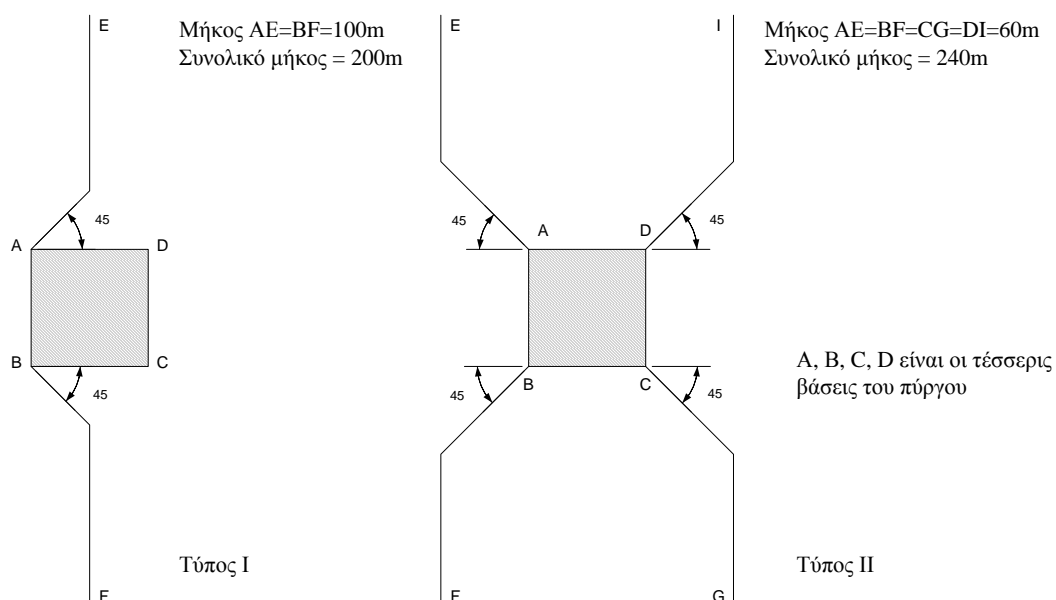
ανακουφισθούν από μέρος της επαγομένης τάσης από έμμεσους κεραυνούς (κεραυνός που κτυπά τη γη κοντά σε μία γραμμή).

Η ΔΕΗ Α.Ε. σχεδιάζει τις γραμμές μεταφοράς των 150 kV να έχουν μέγιστη τάση αντοχής ίση με 750 kV, ενώ η μέγιστη τάση αντοχής που προβλέπεται για τις γραμμές μεταφοράς των 400 kV είναι τα 1425 kV και 1550 kV.

Τέλος στην ελληνική επικράτεια χρησιμοποιούνται από τη ΔΕΗ Α.Ε. δύο διαφορετικά συστήματα γείωσης πύργων, όπως δίνονται στο σχήμα 1.3.

Η χρήση των συστημάτων αυτών εξαρτάται από τη σύσταση του εδάφους, με το σύστημα γείωσης τύπου I να χρησιμοποιείται όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει χαμηλές τιμές και το σύστημα γείωσης τύπου II να χρησιμοποιείται όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει υψηλές τιμές.

Για όλους τους πύργους του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, το σύστημα γείωσης τύπου I έχει συνολικό μήκος 200 m και το σύστημα γείωσης τύπου II 240 m. Η πλευρά όμως του τετραγώνου, και συνεπώς το μήκος και των υπόλοιπων ηλεκτροδίων μεταβάλλονται και είναι διαφορετικά σε κάθε πύργο, εφόσον εξαρτώνται από τις διαστάσεις του εκάστοτε πύργου [3].



Σχήμα 1.3 Τα συστήματα γείωσης για τους πύργους των ελληνικών γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

1.11 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

1.11.1 Καθορισμός ορίων ασφαλείας

Κατά τη διάρκεια ενός τυπικού σφάλματος προς γη, η ροή του ρεύματος προς τη γη θα παράγει ανυψώσεις δυναμικού μέσα στον υποσταθμό και γύρω από αυτόν. Εάν δεν ληφθούν προφυλάξεις στο σχεδιασμό της γείωσης, οι μέγιστες κλίσεις δυναμικού στην επιφάνεια της γης μπορεί να έχουν αρκετά μεγάλη τιμή κατά τη διάρκεια σφάλματος προς γη, ώστε να τεθεί σε κίνδυνο άτομο που βρίσκεται στην περιοχή. Επιπλέον, επικίνδυνες τάσεις μπορεί να αναπτυχθούν ανάμεσα σε γειωμένες κατασκευές ή περιβλήματα εξοπλισμών και της κοντινής γης.

Οι συνθήκες υπό τις οποίες είναι πιθανό ένα ατύχημα ηλεκτροπληξίας είναι οι εξής:

- i) Σχετικά μεγάλο ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με την περιοχή του συστήματος γείωσης και την αντίστασή του ως προς απόμακρη γη.
- ii) Η ειδική αντίσταση του εδάφους και η κατανομή των ρευμάτων γης, που προκαλούν υψηλές κλίσεις δυναμικού σε σημεία στην επιφάνεια της γης.
- iii) Η παρουσία ατόμου σε τέτοιο σημείο, στιγμή και στάση, ώστε το σώμα του γεφυρώνει δυο σημεία μεγάλης διαφοράς δυναμικού.
- iv) Η απουσία επαρκούς αντίστασης επαφής ή άλλης αντίστασης σε σειρά για να περιορίσει το ρεύμα που διαρρέει το σώμα σε μια ασφαλή τιμή, όταν πληρούνται οι συνθήκες i έως iii.
- v) Η διάρκεια του σφάλματος και της επαφής με το σώμα, και συνεπώς της ροής του ρεύματος μέσα στο σώμα για επαρκή χρόνο ώστε να προκαλέσει τραυματισμό του ατόμου, για τη συγκεκριμένη ένταση ρεύματος.

Η μικρή συχνότητα ατυχημάτων οφείλεται κυρίως στη μικρή πιθανότητα ταυτόχρονης εμφάνισης όλων των παραπάνω συνθηκών.

Τα όρια ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιεί ένα σύστημα γείωσης μιας εγκατάστασης, καθορίζονται από το συνδυασμό τιμών των διαφόρων παραμέτρων (π.χ. χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος, συχνότητα, ένταση ρεύματος μονοφασικού βραχυκυκλώματος, μοντέλο εδάφους) που προκαλούν τραυματισμό στο άτομο.

i) Επίδραση της συχνότητας. Η επίδραση του ρεύματος στον άνθρωπο είναι σημαντική σε συχνότητες 50Hz ή 60Hz. Στις συγκεκριμένες συχνότητες, ρεύματα

έντασης περίπου 0.1A μπορεί να προκαλέσουν τον θάνατο. Σε ορισμένες περιπτώσεις το ανθρώπινο σώμα μπορεί να αντέξει πολύ μεγάλα ρεύματα που οφείλονται σε κεραυνική τάση.

ii) Επίδραση της έντασης του ρεύματος και της διάρκειας. Ρεύμα έντασης 1mA θεωρείται το κατώτατο όριο που γίνεται αντιληπτό. Ρεύματα έντασης 1-6mA, που συχνά αναφέρονται ως ρεύματα διαφεύγοντα, αν και είναι δυσάρεστα στην αίσθηση που προκαλούν, δεν επηρεάζουν την ικανότητα του ατόμου που κρατά ένα αντικείμενο να ελέγξει τους μύες του και να αφήσει το αντικείμενο. Ρεύματα έντασης 9-25mA μπορούν να είναι επώδυνα, και να προκαλέσουν δυσκολία ή αδυναμία στον έλεγχο αντικειμένου που κρατά το άτομο. Ρεύματα ακόμη μεγαλύτερης έντασης προκαλούν μυικές συσπάσεις, που με τη σειρά τους μπορούν να επιφέρουν δυσκολία στην αναπνοή. Αυτές, όμως, οι επιδράσεις δεν είναι μόνιμες και παύουν όταν διακοπεί η ροή του ρεύματος μέσα στο άτομο, εκτός εάν η σύσπαση είναι πολύ σοβαρή και η αναπνοή έχει διακοπεί για λεπτά της ώρας. Ρεύματα έντασης 60-100mA προκαλούν κοιλιακό ινιδισμό, καρδιακή ανακοπή, δυσκολία στην αναπνοή και μπορούν να επιφέρουν τραυματισμό ή θάνατο. Στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης δίνεται σημασία στο κατώφλι κοιλιακού ινιδισμού, δηλαδή επιδιώκεται τα ρεύματα σφάλματος να είναι έντασης μικρότερης από 60mA.

Τα ρεύματα έντασης I_B , μικρότερης του κατωφλίου κοιλιακού ινιδισμού, και με διάρκεια 0.03-3.0sec σχετίζονται με την ενέργεια που απορροφάται από το σώμα του ατόμου σύμφωνα με την εξίσωση [1]:

$$S_B = I_B^2 \cdot t_s \quad (1.7)$$

όπου

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

t_s η διάρκεια έκθεσης στο ρεύμα, σε sec

S_B η εμπειρική σταθερά που σχετίζεται με την ενέργεια που αντέχει ορισμένο ποσοστό του πληθυσμού.

iii) Χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία του χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος, όπως διαφαίνεται στην εξίσωση (1.7), συμπεραίνεται ότι επιδιώκεται όσο το δυνατόν ταχύτερη εκκαθάριση του σφάλματος, για τους παρακάτω λόγους:

- Η πιθανότητα έκθεσης σε ηλεκτρικό σοκ μειώνεται δραματικά εάν ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος είναι μικρός.
- Δοκιμές και η εμπειρία από το παρελθόν έχουν δείξει ότι η πιθανότητα σοβαρού τραυματισμού ή θανάτου μειώνεται σημαντικά εάν η χρονική διάρκεια της ροής του ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα είναι σύντομη.

Συνεπώς, στον καθορισμό της ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής για το ρεύμα που διαρρέει το σώμα λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος των συσκευών προστασίας, ή της εφεδρικής ασφάλειας (*backup*). Για πιο συντηρητικά όρια, χρησιμοποιείται στη σχέση (1.7) ο χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος της εφεδρικής ασφάλειας.

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, ο σχεδιασμός συστήματος γείωσης πρέπει να εξασφαλίζει ότι η διάρκεια και η ένταση του ρεύματος συχνότητας 50Hz ή 60Hz που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα δεν θα υπερβαίνει το κατώφλι πέρα από το οποίο προκαλείται κοιλιακός ινιδισμός. Από τη σχέση (1.7) είναι εμφανής η σχέση του χρονικού διαστήματος που είναι ανεκτή η ροή του ρεύματος στο σώμα και της έντασης του ρεύματος, θεωρώντας πάντα συχνότητα 50Hz ή 60Hz. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.7) προκύπτει [1]:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (1.8)$$

όπου

$$k = \sqrt{S_B} \quad (1.9)$$

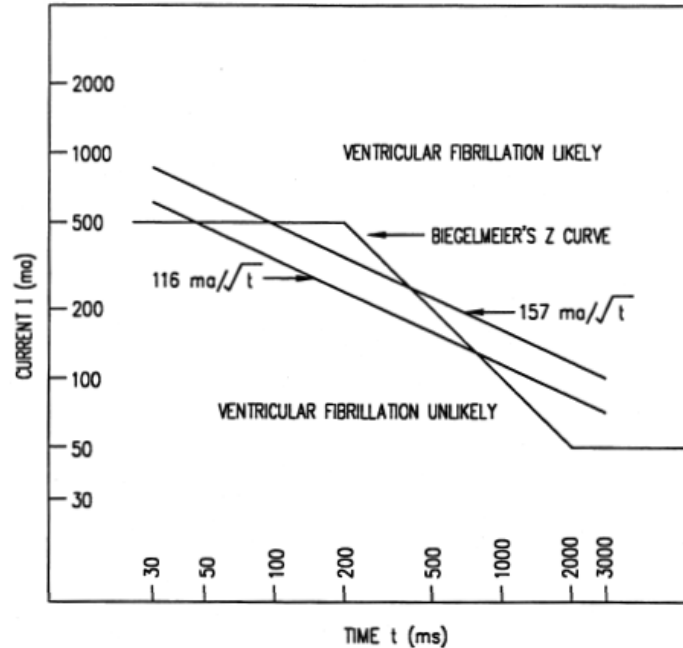
Πειράματα απέδειξαν ότι το 99.5% των ατόμων που ζυγίζουν περίπου 50kg έχουν ως ανώτατο όριο απορροφούμενης ενέργειας από ρεύμα $S_B = 0.0135$. Τότε $k_B = 0.116$ και η σχέση για τον υπολογισμό του ανώτατου ορίου για την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σώμα γίνεται [1]:

$$I_B = 0.116 / \sqrt{t_s} \quad \text{για άτομα σωματικού βάρους 50kg.} \quad (1.10)$$

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η σχέση (1.10) δίνει $I_B = 116\text{mA}$ για $t_s = 1\text{sec}$ και $I_B = 367\text{mA}$ για $t_s = 0.1\text{sec}$. Αντίστοιχα πειράματα για άτομα σωματικού βάρους 70kg αντιστοιχούν σε $S_B = 0.0246$ και $k = 0.157$, οπότε [1]:

$$I_B = 0.157 / \sqrt{t_s} \text{ για άτομα σωματικού βάρους 70kg.} \quad (1.11)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (1.10) και (1.11) συμπεραίνεται ότι επιτρέπονται ρεύματα αρκετά μεγαλύτερης έντασης για άτομα σωματικού βάρους 70kg. Τα παραπάνω συμπεράσματα αποδίδονται και γραφικά στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4 Ρεύμα που ρέει στο ανθρώπινο σώμα, συναρτήσεως του χρόνου [1]

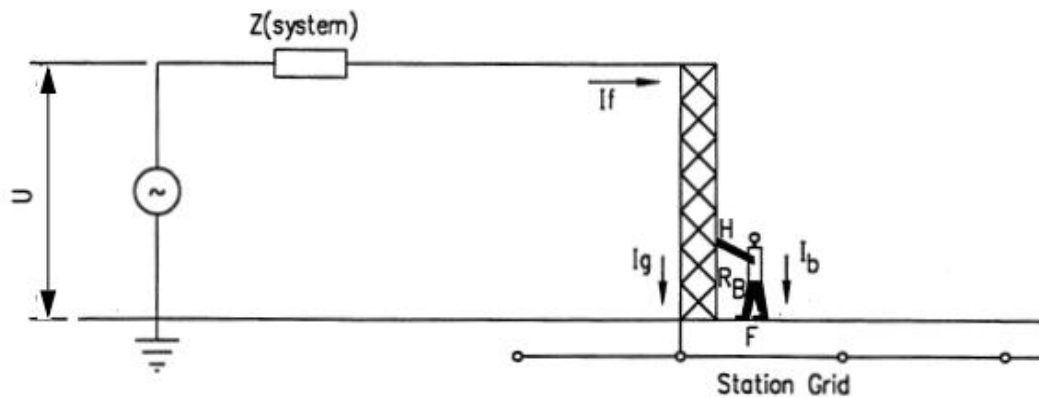
1.11.2 Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη διάρκεια σφάλματος

Το ανθρώπινο σώμα προσεγγίζεται με μια αντίσταση, για συνεχή και εναλλασσόμενα ρεύματα, συχνότητας 50Hz ή 60Hz. Στη μελέτη ασφάλειας από ρεύματα σφάλματος θεωρείται ότι το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα ακολουθεί τη διαδρομή από το ένα χέρι προς τα δυο πόδια, δηλαδή την χειρότερη περίπτωση, διότι όλο το σώμα διαρρέεται από το ρεύμα, και μάλιστα οι σημαντικότεροι μύες του ανθρώπινου σώματος. Η εσωτερική αντίσταση του σώματος είναι περίπου 300Ω, ενώ οι τιμές για την αντίσταση του σώματος, συμπεριλαμβανομένου του δέρματος, κυμαίνονται από 500Ω έως 3000Ω. Η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μειώνεται όταν το δέρμα τρυπηθεί στο σημείο επαφής. Θεωρώντας μηδενικές τις αντιστάσεις επαφής του χεριού και του ποδιού, καθώς επίσης και τις αντιστάσεις για γάντια και για παπούτσια, είθισται να λαμβάνεται ως τιμή για την αντίσταση του ανθρώπινου σώματος από χέρι σε πόδι ή από χέρι σε χέρι τα 1000Ω [1]:

$$R_B = 1000\Omega \quad (1.12)$$

Στα πλαίσια μελέτης της λιγότερο επικίνδυνης περίπτωσης για τον άνθρωπο, όπως είναι η περίπτωση ροής του ρεύματος από πόδι σε πόδι, είναι δυνατή η θεώρηση μεγαλύτερης αντίστασης για το ανθρώπινο σώμα, όμως προτιμάται η διεξαγωγή της μελέτης από την ασφαλή πλευρά.

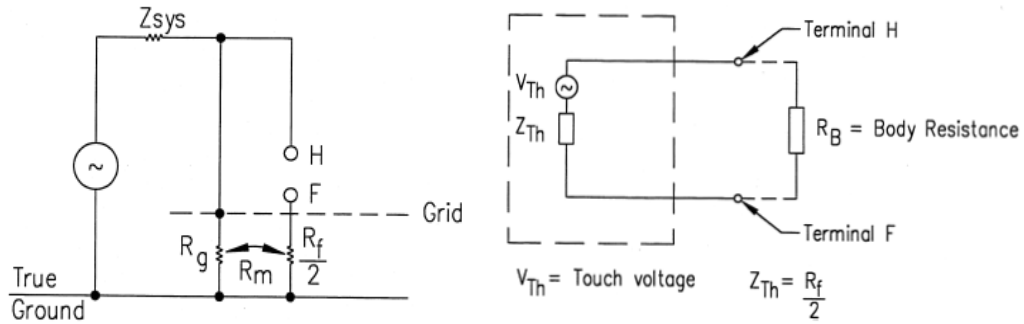
Στο σχήμα 1.5 απεικονίζεται η περίπτωση που το άτομο εκτίθεται σε τάση επαφής. Η συνολική εγκατάσταση ισοδυναμεί με μία σύνθετη αντίσταση Z και το ρεύμα σφάλματος, I_f , διαχωρίζεται στο ρεύμα που ρέει προς τη γη, I_g , και το ρεύμα I_b που διαρρέει τον άνθρωπο αντίστασης R_B . Το άτομο αγγίζει το σύστημα στο σημείο H και ακουμπά στη γη στο σημείο F .



Σχήμα 1.5 Έκθεση σε τάση επαφής [1].

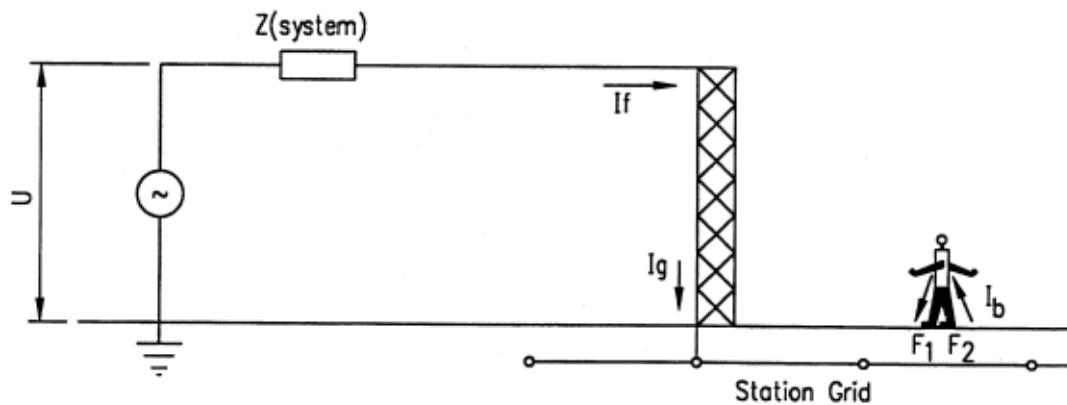
Το ισοδύναμο Thevenin κύκλωμα για την έκθεση σε τάση επαφής δίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.6.β. Έχει υπολογιστεί η V_{Th} από το σχήμα 1.6.α, όπου είναι ανοικτοκυκλωμένα τα σημεία H και F στα οποία συνδέεται ο άνθρωπος. Η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin είναι η αντίσταση του συστήματος, όπως αυτή φαίνεται από τα σημεία H και F . Το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα είναι [1]:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (1.13)$$



Σχήμα 1.6 α: Η σύνθετη αντίσταση σε κύκλωμα τάσης επαφής. β: Ισοδύναμο κύκλωμα τάσης επαφής [1]

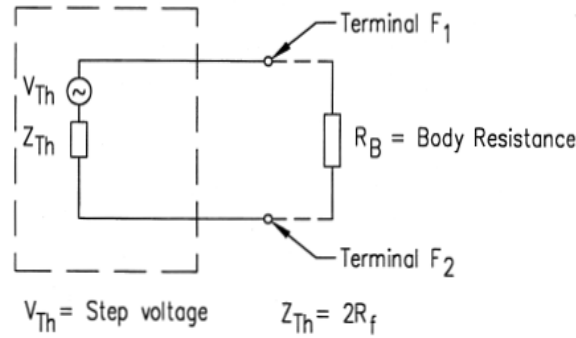
Στο σχήμα 1.7 απεικονίζεται η περίπτωση που το άτομο εκτίθεται σε βηματική τάση. Η συνολική εγκατάσταση ισοδυναμεί με μία σύνθετη αντίσταση Z και το ρεύμα σφάλματος, I_f , ισούται με το ρεύμα που ρέει προς τη γη, I_g . Το ρεύμα I_b που διαρρέει τον άνθρωπο ακολουθεί μέσα στο σώμα του τη διαδρομή από το ένα πόδι F_1 ως το άλλο πόδι F_2 . Τα σημεία F_1 και F_2 είναι τα σημεία της επιφάνειας της γης που είναι σε επαφή με τα πόδια του ανθρώπου.



Σχήμα 1.7 Έκθεση σε βηματική τάση [1]

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin δίνεται στο σχήμα 1.8. Όπως και προηγουμένως, η τάση V_{Th} είναι η τάση στα άκρα που ακουμπά ο άνθρωπος, F_1 και F_2 , όταν αυτά είναι ανοικτοκυκλωμένα. Το άτομο αγγίζει το σύστημα στο σημείο H και ακουμπά στη γη στο σημείο F . Η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin είναι η αντίσταση του συστήματος, όπως αυτή φαίνεται από τα σημεία F_1 και F_2 . Το ρεύμα που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα είναι [1]:

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (1.14)$$



Σχήμα 1.8 Ισοδύναμο κύκλωμα βηματικής τάσης [1]

Για το κύκλωμα που αντιστοιχεί στην τάση επαφής [1]:

$$Z_{Th} = R_f / 2 \quad (1.15)$$

και για το κύκλωμα που αντιστοιχεί στη βηματική τάση [1]:

$$Z_{Th} = 2 \cdot R_f \quad (1.16)$$

όπου

R_f είναι η αντίσταση του ενός ποδιού, ως προς το έδαφος, αγνοώντας το σύστημα γείωσης, σε Ω .

Ως κυκλωματικό ισοδύναμο για το πόδι του ανθρώπου, θεωρείται ένας αγωγίμος μεταλλικός δίσκος. Η αντίσταση επαφής των υποδημάτων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αγνοείται. Η αντίσταση ως προς το έδαφος ενός μεταλλικού δίσκου ακτίνας b (m) στην επιφάνεια ομοιογενούς εδάφους ειδικής αντίστασης ρ (Ωm) δίνεται από τη σχέση [1]:

$$R_f = \rho / 4 \cdot b \quad (1.17)$$

Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται, για την αναπαράσταση του ποδιού, μεταλλικός δίσκος ακτίνας 0.08m, οπότε οι σχέσεις (1.15) και (1.16) γίνονται [1]:

$$Z_{Th} = 1.5 \cdot \rho \text{ για το κύκλωμα τάσης επαφής} \quad (1.18)$$

$$Z_{Th} = 6.0 \cdot \rho \text{ για το κύκλωμα βηματικής τάσης} \quad (1.19)$$

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα επιτρεπτά όρια για τις τάσεις [1]:

$$E_{touch} = I_B \cdot (R_B + 1.5 \cdot \rho) \text{ όριο για την τάση επαφής} \quad (1.20)$$

$$E_{step} = I_B \cdot (R_B + 6.0 \cdot \rho) \text{ όριο για τη βηματική τάση} \quad (1.21)$$

1.11.3 Επίδραση λεπτού στρώματος υλικού επιφανείας

Η παραπάνω ανάλυση έγινε υποθέτοντας ότι το έδαφος είναι ομοιογενές, με συγκεκριμένη ειδική αντίσταση. Ωστόσο, στην επιφάνεια της γης που βρίσκεται πάνω από το θαμμένο πλέγμα γείωσης, είθισται να τοποθετείται ένα στρώμα πάχους 0.08m-0.15m υλικού μεγάλης ειδικής αντίστασης, όπως χαλίκι. Με αυτό τον τρόπο, αυξάνεται η αντίσταση ανάμεσα στο έδαφος και στα πόδια του ανθρώπου, που ακουμπούν σε αυτό. Το σχετικά μικρό βάθος του υλικού επιφανείας είναι συγκρίσιμο με την ακτίνα του μεταλλικού δίσκου που μοντελοποιεί το ανθρώπινο πόδι, οπότε η υπόθεση της ομοιόμορφης ειδικής αντίστασης εδάφους κατά τον κατακόρυφο άξονα δεν ισχύει πλέον. Κατά την οριζόντια διεύθυνση, για ένα άτομο που βρίσκεται στην περιοχή του υποσταθμού, το υλικό επιφανείας θεωρείται ότι εκτείνεται ως το άπειρο.

Εάν το έδαφος κάτω από το υλικό επιφανείας έχει μικρότερη ειδική αντίσταση από το υλικό επιφανείας, τότε κλάσμα του ρεύματος που διαρρέει το πλέγμα γείωσης θα ανέβει στο στρώμα του υλικού, και η τάση στην επιφάνεια ελάχιστα θα διαφέρει από αυτή στην περίπτωση χωρίς το υλικό επιφανείας. Ωστόσο, το ρεύμα που θα εισέλθει στο ανθρώπινο σώμα θα μειωθεί αρκετά, διότι θα υπάρχει μεγαλύτερη αντίσταση επαφής των ποδιών του ανθρώπου με τη γη. Η περίπτωση που το στρώμα επιφανείας είναι αρκετά μεγάλου πάχους, ώστε να θεωρηθεί ομοιογενούς ειδικής αντίστασης προς κάθε διεύθυνση, δύναται να είναι αρκετά ευνοϊκότερη.

Στην αντίθετη περίπτωση που το έδαφος έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από το υλικό επιφανείας, ένα σημαντικό μέρος του ρεύματος που διαρρέει το πλέγμα γείωσης θα ανέβει στο στρώμα του υλικού. Τα δυναμικά επιφανείας τώρα θα είναι διαφορετικά, εξαιτίας της συγκέντρωσης ρεύματος κοντά στην επιφάνεια. Συνεπώς, η τοποθέτηση, ή μη, υλικού επιφανείας επηρεάζει το ρεύμα που διαρρέει το άτομο ή τα δυναμικά επιφανείας, ανάλογα με τη σχέση της ειδικής του αντίστασης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Βασική παράμετρος που καθορίζει το βαθμό που επηρεάζει το υλικό επιφανείας είναι το πάχος του στρώματος αυτού του υλικού.

Οι παρακάτω εξισώσεις δίνουν την αντίσταση προς γη του ποδιού, πάνω στο υλικό επιφανείας [1]:

$$R_f = \left(\frac{\rho_s}{4 \cdot b} \right) \cdot C_s \quad (1.22)$$

$$C_s = 1 + \left(\frac{16 \cdot b}{\rho_s} \right) \cdot \sum k^n \cdot R_{m(2 \cdot n \cdot h_s)} \quad (1.23)$$

$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (1.24)$$

όπου

C_s ο συντελεστής μείωσης του στρώματος επιφανείας

k ο συντελεστής ανάκλασης ανάμεσα σε υλικά διαφορετικών ειδικών αγωγιμοτήτων

ρ_s η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας σε Ωm

ρ η ειδική αντίσταση της γης υπό το υλικό επιφανείας σε Ωm

h_s το πάχος του υλικού επιφανείας σε m

b η ακτίνα του κυκλικού μεταλλικού δίσκου που μοντελοποιεί το πόδι σε m

$R_{m(2nh_s)}$ είναι η αμοιβαία αντίσταση γείωσης ανάμεσα σε δυο παρόμοιες, παράλληλες, ομοαξονικές πλάκες, που απέχουν απόσταση $2nh_s$, μέσα σε ένα μέσο απείρων διαστάσεων, ειδικής αντίστασης ρ_s , σε Ωm , όπου n ακέραιος.

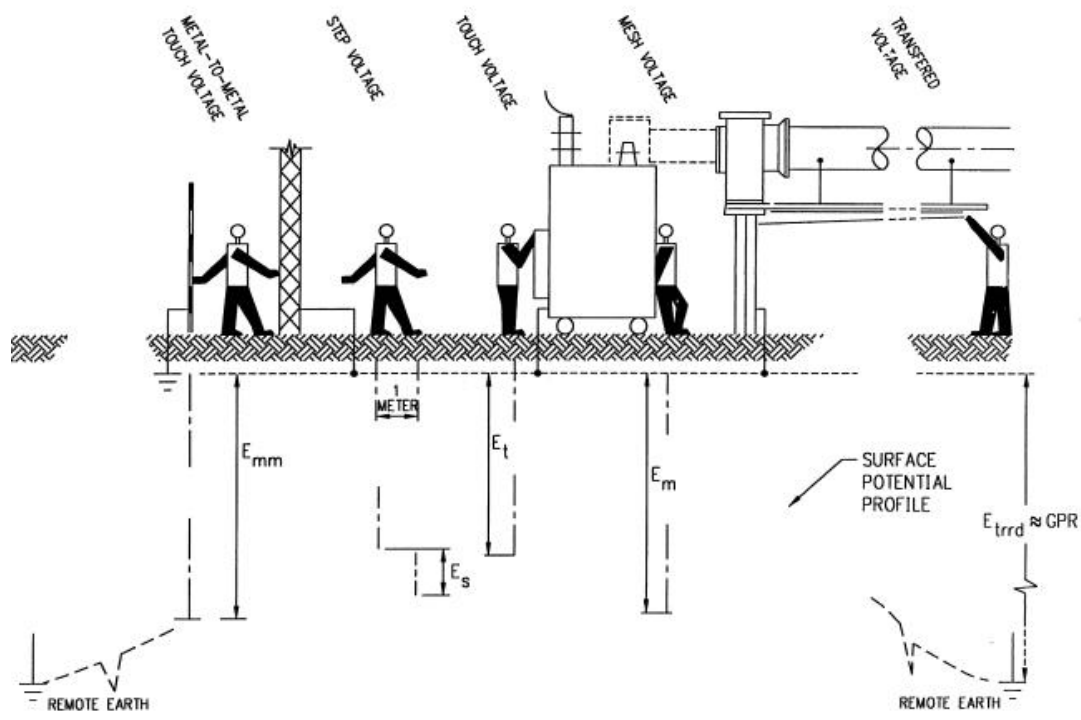
Ο παρακάτω εμπειρικός τύπος δίνει την τιμή του C_s , με απόκλιση 5% από την εξίσωση που προκύπτει από την αναλυτική επίλυση [1]:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 \cdot h_s + 0.09} \quad (1.25)$$

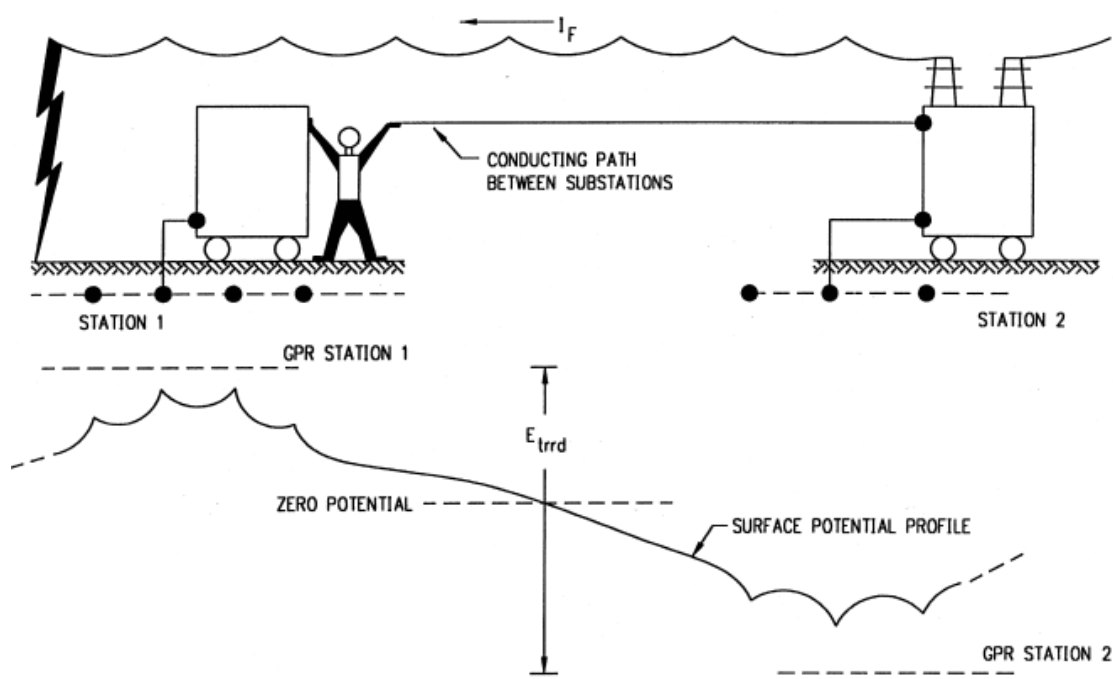
1.11.4 Κριτήρια ανεκτής τάσης

Τα σχήματα 1.9 και 1.10 δείχνουν πέντε βασικές περιπτώσεις που αφορούν ένα άτομο και γειωμένες εγκαταστάσεις κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος. Για τα τρία παραδείγματα επαφής χέρι με πόδια που δίνονται στο σχήμα 1.9, η τάση U ισούται με E_t (τάση επαφής), E_m (τάση πλέγματος) ή E_{trrd} (μεταφερόμενη τάση). Το κύκλωμα που αφορά την επαφή μέταλλο με μέταλλο, είτε χέρι με χέρι, είτε χέρι με πόδια, δίνεται στο σχήμα 1.10, όπου η U είναι ίση με τη μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής, E_{mm} .

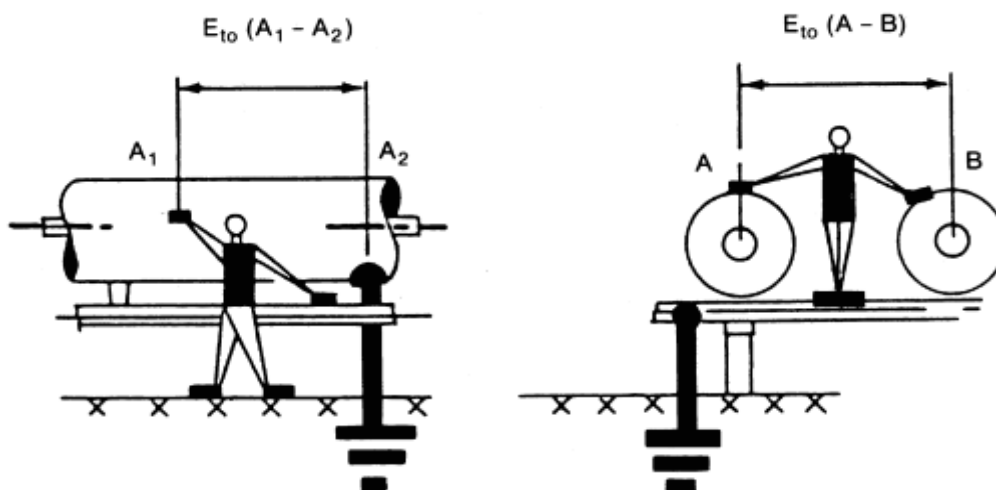
Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, η γη άγει τα ρεύματα που προέρχονται από το πλέγμα και άλλα μόνιμα ηλεκτρόδια γείωσης που είναι θαμμένα κάτω από την επιφάνεια της γης. Οι προκαλούμενες κλίσεις δυναμικού έχουν ουσιαστική επίδραση στην τιμή του U .



Σχήμα 1.9 Βασικές περιπτώσεις προσβολής ανθρώπου από ρεύμα [1]



Σχήμα 1.10 Τυπική περίπτωση εκτεταμένου μεταφερόμενου δυναμικού [1]



Σχήμα 1.11 Τυπικές περιπτώσεις επαφής μέταλλο με μέταλλο σε υποσταθμό GIS [1]

Στην περίπτωση των συμβατικών υποσταθμών, η τυπική περίπτωση της μέταλλο με μέταλλο τάσης επαφής προκύπτει όταν μεταλλικά αντικείμενα ή κατασκευές μέσα στην περιοχή του υποσταθμού δεν είναι συνδεδεμένα με το πλέγμα γείωσης. Αντικείμενα όπως σωλήνες, rails, φράκτες που εντοπίζονται μέσα ή κοντά στην περιοχή όπου είναι θαμμένο το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού, και που δεν είναι συνδεδεμένα με το πλέγμα γείωσης, ικανοποιούν την παραπάνω συνθήκη. Η μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής θα αποκτήσει τότε μεγάλη τιμή, επικίνδυνη για ένα άτομο που στέκεται πάνω ή ακουμπά σε ένα γειωμένο αντικείμενο ή κατασκευή και που έρχεται σε επαφή με μεταλλικό αντικείμενο ή κατασκευή που δεν είναι γειωμένο. Στην πράξη, για να αποφευχθεί ο κίνδυνος από τη μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής, συνδέονται τα δυνητικά επικίνδυνα σημεία με το πλέγμα του υποσταθμού.

Η περίπτωση της μεταφερόμενης τάσης προκύπτει όταν ένα άτομο που στέκεται μέσα στην περιοχή του υποσταθμού, ακουμπήσει έναν αγωγό γειωμένο σε απόμακρο σημείο, ή όταν ένα άτομο που στέκεται σε απόμακρο σημείο ακουμπήσει αγωγό που συνδέεται με το πλέγμα γείωσης του υποσταθμού. Κατά τη διάρκεια σφάλματος, το προκαλούμενο δυναμικό στη γη μπορεί να είναι ίσο ή και μεγαλύτερο από το *GPR* ενός πλέγματος γείωσης που αποφορτίζει το ρεύμα σφάλματος. Ο κίνδυνος από τις εξωτερικές μεταφερόμενες τάσεις (επαγόμενες από κυκλώματα επικοινωνιών, σωλήνες, κτλ) αποφεύγεται χρησιμοποιώντας συσκευές απομόνωσης ή ουδετέρωσης και θεωρώντας τα εν λόγω κυκλώματα, σωλήνες, κτλ, ισοδύναμα με ενεργοποιημένες γραμμές.

1.11.5 Κριτήρια για τη βηματική τάση και την τάση επαφής

Η ασφάλεια ενός ατόμου έγκειται στην αποφυγή απορρόφησης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας μεγαλύτερης από ένα συγκεκριμένο όριο, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

Για τη βηματική τάση το όριο είναι [1]:

$$E_{step} = (R_B + 2 \cdot R_f) \cdot I_B \quad (1.26)$$

Για σωματικό βάρος 50kg [1]:

$$E_{step50} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (1.27)$$

και για σωματικό βάρος 70kg [1]:

$$E_{step70} = (1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (1.28)$$

Όμοια, το όριο για την τάση επαφής είναι [1]:

$$E_{touch} = R_B + R_f / 2 \cdot I_B \quad (1.29)$$

Για σωματικό βάρος 50kg [1]:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.116 / \sqrt{t_s} \quad (1.30)$$

και για σωματικό βάρος 70kg [1]:

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot 0.157 / \sqrt{t_s} \quad (1.31)$$

όπου

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

E_{step} η βηματική τάση σε V

E_{touch} η τάση επαφής σε V

ρ_s η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας σε Ωm

t_s η διάρκεια που διαρρέει το ρεύμα το ανθρώπινο σώμα, σε sec

Εάν δεν χρησιμοποιείται υλικό επιφανείας, τότε $C_s=1$ και $\rho_s=\rho$. Αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις $\rho_s=0$ προκύπτουν τα όρια για τη μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής:

Για σωματικό βάρος 50kg [1]:

$$E_{mm-touch50} = 116 / \sqrt{t_s} \quad (1.32)$$

και για σωματικό βάρος 70kg [1]:

$$E_{mm-touch70} = 157 / \sqrt{t_s} \quad (1.33)$$

όπου

E_{mm} η μέταλλο με μέταλλο τάση επαφής σε V.

1.11.6 Στόχος και αντικείμενο των πλεγμάτων 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 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 μελέτη της γείωσης δεν πρέπει να αμελείται η αλληλεπίδραση του συστήματος γείωσης προς σχεδιασμό και της “τυχαίας” (accidental) γείωσης, που πρόσκαιρα εγκαθίσταται όταν ένα άτομο εκτίθεται σε ένα δυναμικό κλίσης στο εσωτερικό μιας γειωμένης εγκατάστασης. Μια χαμηλή αντίσταση του υποσταθμού ως προς τη γη δεν παρέχει την απαιτούμενη ασφάλεια. Δεν υπάρχει απλή σχέση ανάμεσα στην αντίσταση του συστήματος γείωσης ως σύνολο και του μέγιστου ρεύματος στο οποίο ένα άτομο δύναται να εκτεθεί. Συνεπώς, ένας υποσταθμός σχετικά χαμηλής αντίστασης μπορεί να είναι επικίνδυνος, ενώ ένας άλλος υποσταθμός με υψηλή αντίσταση μπορεί να είναι ασφαλής, ή να καταστεί ασφαλής με προσεκτικό σχεδιασμό. Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος προς γη, η ροή του ρεύματος προς γη θα παράγει κλίσεις δυναμικού μέσα στον υποσταθμό και γύρω από αυτόν. Η ασφάλεια του προσωπικού καθορίζεται από τις τιμές της τάσης επαφής, της βηματικής τάσης και του μεταφερόμενου δυναμικού. Επιπλέον, η γείωση μιας

εγκατάστασης πρέπει να προστατεύει την ίδια την εγκατάσταση από καταπόνηση και την καταστροφή των συσκευών που αυτή περιλαμβάνει. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ανύψωσης του δυναμικού γης (rise of earth potential, ισοδύναμα ground potential rise), ώστε να μην καταστραφούν οι μονώσεις της εγκατάστασης. Πάντως το σύστημα γείωσης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε αρκετό ρεύμα σφάλματος να ρέει για να λειτουργήσουν οι συσκευές ασφάλειας της εγκατάστασης, για να απομονωθεί το σφάλμα. Το σύστημα γείωσης πρέπει να περιλαμβάνει ηλεκτρόδια γείωσης για να επιτρέπει το ρεύμα να ρέει προς τη γη, και επίσης ένα δίκτυο αγωγών για να επιτρέπει το ρεύμα σφάλματος να ρέει μέσα σε ολόκληρο το πλέγμα γείωσης, δηλαδή να διαμοιράζεται [5].

1.11.7 Γενικές αρχές στο σχεδιασμό συστήματος γείωσης

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. Επίσης πρέπει να είναι δυνατή η συνέχιση της παροχής υπηρεσίας.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός συστήματος γείωσης λαμβάνει υπόψη τα ασφαλή όρια για τη βηματική τάση και την τάση επαφής, σύμφωνα με την τιμή του ρεύματος σφάλματος και το συνολικό χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος.

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.

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. Ένα σύστημα που συνδυάζει ένα οριζόντιο πλέγμα και έναν αριθμό κατακόρυφων ράβδων έχει τα εξής πλεονεκτήματα:
 - Το οριζόντιο πλέγμα είναι αποτελεσματικό στον περιορισμό των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων στην επιφάνεια της γης, εφόσον αυτό είναι σε μικρό βάθος, συνήθως 0.3-0.5m. Εντούτοις, μακρείς κατακόρυφοι ράβδοι σταθεροποιούν την απόδοση αυτού του συστήματος. Σε πολλές εγκαταστάσεις, η σταθερότητα είναι σημαντική, διότι η ειδική αντίσταση των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (υγρασία και βροχή, θερμοκρασία), ενώ η ειδική αντίσταση των κατώτερων στρωμάτων του εδάφους παραμένει σχεδόν σταθερή.
 - Οι ράβδοι που διαπερνούν το έδαφος χαμηλής ειδικής αντίστασης είναι πολύ πιο αποτελεσματικοί στη διάχυση του ρεύματος σφάλματος στην περίπτωση διστρωματικού ή πολυστρωματικού εδάφους, του οποίου το ανώτερο στρώμα έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση από τα κατώτερα στρώματα.
 - Εάν οι ράβδοι εγκατασταθούν κατά μήκος της περιμέτρου του πλέγματος σε έδαφος με ομοιόμορφη ειδική αντίσταση ή μειούμενη όσο αυξάνεται το βάθος, τότε θα μειωθούν σημαντικά οι απότομες κλίσεις του δυναμικού επιφανείας κοντά στην περιφέρεια του πλέγματος [5].

1.11.8 Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να εξασφαλίζει την ασφαλή αγωγή του κεραυνικού ρεύματος από το σημείο που κτυπά ο κεραυνός προς τη γη. Συγχρόνως πρέπει να ελαχιστοποιεί τις επαγόμενες τάσεις και τις κλίσεις δυναμικού μέσα στην κατασκευή και να αποφορτίζει το κεραυνικό ρεύμα προς τη γείωση χωρίς την παραγωγή επικίνδυνων κλίσεων δυναμικού στην επιφάνεια της γης.

Το φάσμα του κεραυνικού ρεύματος περιέχει συνιστώσες υψηλής συχνότητας, από τα 10kHz έως και μεγαλύτερη των 1MHz, οι οποίες αντιδρούν με την επαγωγική αντίδραση του συστήματος γείωσης. Αυτή η αντίδραση μπορεί να αυξήσει τη συνολική επαγωγική αντίδραση της γείωσης σε τιμή αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή της αντίδρασης στα 50Hz. Κάθε κεραυνός είναι διαφορετικός, επειδή οι κεραυνοί παράγονται από σύννεφα διαφορετικά. Η κατανομή της πιθανότητας για κάθε ηλεκτρική παράμετρο χρησιμοποιείται για την περιγραφή ενός κεραυνικού πλήγματος σε μια συγκεκριμένη δομή, και τον υπολογισμό του ποσοστού των κεραυνικών πληγμάτων των οποίων η ένταση ξεπερνά μια δεδομένη τιμή, σε Amperes [5].

1.11.9 Εκτίμηση της επικινδυνότητας των κεραυνών

Η πιθανότητα να κτυπήσει κεραυνός μια δομή, π.χ. έναν πυλώνα, είναι συνάρτηση του ύψους της συγκεκριμένης δομής, της τοπογραφίας της περιοχής και της κεραυνικής δραστηριότητας της περιοχής.

Οι επιδράσεις των κεραυνικών πληγμάτων σε μια τοποθεσία μπορούν να προκαλέσουν καθένα από τα εξής, ή και συνδυασμό τους:

- Θάνατο ή τραυματισμό του προσωπικού
- Βλάβη του εξοπλισμού ή διακοπή λειτουργίας
- Βλάβη σε κτίρια ή κατασκευές
- Απώλεια ή φθορά αποθηκευμένων δεδομένων

Το σύστημα κεραυνικής προστασίας σχεδιάζεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις, ή ο κίνδυνος, σε ένα ανεκτό όριο. Δεν είναι δυνατή η εγγυημένη πλήρης προστασία από τους παραπάνω κινδύνους, ωστόσο αυτοί μπορούν να μειωθούν σημαντικά εάν δοθεί προσοχή στη γείωση, στις συσκευές ασφάλειας και στο σχεδιασμό ολόκληρου του συστήματος [5].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για να φτάσουμε στο σημερινό επίπεδο γνώσης πάνω στα συστήματα γείωσης και την αντικεραυνική προστασία έπρεπε να προηγηθούν πολυάριθμες προσπάθειες μελετών και πειραμάτων από επιστήμονες από όλο τον κόσμο. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη μία αναφορά στα σημαντικότερα μαθηματικά και μηχανικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν από διάφορες ερευνητικές ομάδες ήδη από το 1934.

2.2 ΠΡΩΙΜΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Πειραματικές και θεωρητικές μελέτες [6], σχετικά με την μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης σε περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων, ξεκίνησαν το 1934 μέσα από τις εργασίες του Bewley [7-8]. Το έργο του ήταν μέρος μιας έρευνας για την αντικεραυνική προστασία συστημάτων ισχύος, όπου βρήκε την σύνθετη αντίσταση που βλέπει μία μοναδιαία βηματική τάση στο σημείο έγχυσης της σε ένα καλώδιο, το οποίο το θεώρησε ως μία γραμμή μεταφοράς μεγάλου μήκους με σταθερές παραμέτρους ανά μονάδα μήκους. Οι έρευνες του συνοψίζονται στο βιβλίο “Travelling waves in transmission systems”.

Στη συνέχεια, το 1943, οι Bellaschi και Armington [9] υπολόγισαν αναλυτικά την απόκριση τάσης στο σημείο έγχυσης ηλεκτροδίων γείωσης για ρεύματα με διαφορετικές κυματομορφές, εκφράσεις πάνω στις οποίες βασίστηκαν πολλοί επιστήμονες για να θεμελιώσουν τις μελέτες τους.

Ένα από τα πλέον σημαντικά και κλασικά βιβλία για συστήματα γειώσεων γράφτηκε από τον Sunde [10], το οποίο ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς για επίλυση προβλημάτων γειώσεων. Σε αυτό επιχειρεί την περιγραφή ενός συστήματος γείωσης από την ηλεκτρομαγνητική σκοπιά μέσω των εξισώσεων του Maxwell. Παρουσιάζει όχι μόνο τον υπολογισμό της dc αντίστασης διαφόρων συστημάτων γειώσεων, αλλά διαμορφώνει και μία λεπτομερή θεωρία για την επαγωγική συμπεριφορά καλωδίων γείωσης σε υψηλές συχνότητες. Ο Sunde ίσως ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την ιδέα προσομοίωσης γραμμών μεταφοράς με εξαρτημένες από την συχνότητα παραμέτρους ανά μονάδα μήκους, με σκοπό την μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς ενός οριζόντιου αγωγού γείωσης στην επιφάνεια του εδάφους εξαιτίας άμεσων κεραυνικών πληγμάτων. Ωστόσο για πιο σύνθετα συστήματα γείωσης, όπως πλέγματα γείωσης, μόνο η εμπειρική ανάλυση μπορούσε να βοηθήσει, κάτι που επιχειρήθηκε από τον Gupta et al. το 1980 [11]. Τα αποτελέσματά του, όσον αφορά την βηματική τάση, έρχονταν σε συμφωνία με αυτά των Bellaschi και Armington [9].

Το 1958 έγινε μία πιο πρακτική μελέτη από τους Caswell, Gross και Koncel Jr. [12] πάνω στη συμπεριφορά των πυλώνων και των γραμμών 138kV της εταιρείας Commonwealth Edison Company εξαιτίας του μεγάλου αριθμού τόξων που εμφανίζονταν σε ένα καινούριο σχέδιο διπλού κυκλώματος με έναν αγωγό προστασίας. Σ' αυτήν την εργασία συνυπολογίστηκε η τάση που εγχέεται στους αγωγούς τη στιγμή της κατάρρευσης του πεδίου μέσω της εκφόρτισης των νεφών, ενώ γίνεται σύγκριση μεταξύ των παλιών και των νέων πυλώνων, καθώς και μεταξύ διαφόρων τροποποιήσεων που θα μπορούσαν να γίνουν στους νέους, πάντα για περιπτώσεις άμεσων κεραυνικών πληγμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή δύο αγωγών προστασίας περιόριζε σημαντικά τις τάσεις που επάγονταν στους αγωγούς των φάσεων. Επίσης βρέθηκε ότι η τοποθέτηση ενός δεύτερου αγωγού κάτω ακριβώς από τον προϋπάρχον σε κατάλληλη απόσταση από αυτόν και τις φάσεις είχε καλύτερα θεωρητικά αποτελέσματα.

Τέλος, ο Janos Endrenyi [13] προσπάθησε το 1967 μέσω της θεωρητικής ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας να μελετήσει τη συμπεριφορά των πυλώνων, καθώς και των συστημάτων γείωσής τους, για διαφορετικές περιπτώσεις σφαλμάτων προς γη, υπολογίζοντας τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, οι οποίες μπορεί να είναι επικίνδυνες για τον άνθρωπο.

2.3 ΜΕΤΑΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ – ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

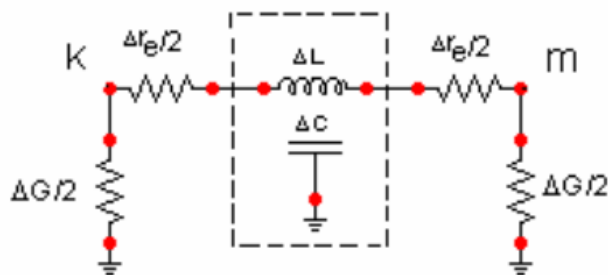
Από τις αρχές της δεκαετίας του '80, η δύναμη των υπολογιστών έχει αυξηθεί δραματικά, γεγονός που βοήθησε σημαντικά όλα τα επιστημονικά και μηχανικά ερευνητικά πεδία να λύσουν ευκολότερα και ταχύτερα σύνθετα πρακτικά προβλήματα που βασίζονταν σε διάφορες αριθμητικές μεθόδους. Σαν αποτέλεσμα, η μοντελοποίηση της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης σε περιπτώσεις κεραυνικών πληγμάτων βρέθηκε μπροστά σε ένα καλύτερο μέλλον, καθώς πολλά από τα προβλήματα που αντιμετώπιζαν οι παραπάνω ερευνητές κατά την επίλυση των σύνθετα διατυπωμένων εξισώσεων, μπορούσαν πλέον εύκολα να επιλυθούν με αριθμητικές μεθόδους.

Διαφορετικές προσεγγίσεις των συστημάτων γείωσης αναπτύχθηκαν από επιστημονικές ομάδες και βασίζονται σε αριθμητικές μεθόδους. Αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής [6]:

- η κυκλωματική προσέγγιση
- η ηλεκτρομαγνητική προσέγγιση
- η προσέγγιση γραμμών μεταφοράς
- η υβριδική μέθοδος

2.3.1 Η ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

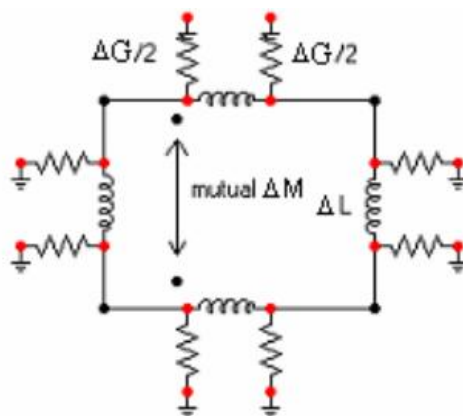
Η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε η κυκλωματική μέθοδος για την ανάλυση της μεταβατικής κατάστασης ενός συστήματος γείωσης ήταν το 1983 από τον καθηγητή Μελιόπουλο et al. [14]. Το μοντέλο το οποίο ανέπτυξε είναι σύμφωνο με την μεθοδολογία EMTP (Electromagnetic Transient Analysis Program). Σε αυτό χρησιμοποιήθηκαν κομμάτια με ανεξάρτητες από τη συχνότητα παραμέτρους, οι οποίες υπολογίζονται με βάση την εξίσωση Laplace. Το ενδιαφέρον σε αυτή την εργασία είναι ότι κάθε κομμάτι του καλωδίου γείωσης μοντελοποιείται κυκλωματικά από μία γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες και από 2 αγωγιμότητες που πάνε προς τη γη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα κάθε στοιχειώδους αγωγού κατά τον Μελιόπουλο et al.[14]

Ως επέκταση της πρώτης αυτής προσέγγισης, ο Μελιόπουλος et al. [15] αργότερα βελτίωσε την κυκλωματική προσέγγιση του συστήματος γείωσης για τους κεραυνούς, υπολογίζοντας την απόκριση κάθε κομματιού σε διέγερση από ρεύμα με βάση τις εξισώσεις του Maxwell, έτσι ώστε οι παράμετροι καθενός και τα αντίστοιχα ρεύματα να εξαρτώνται από τη συχνότητα.

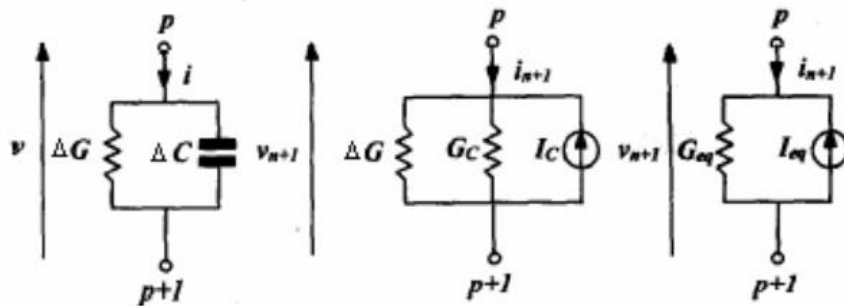
Το 1989 ο Ramamoorty [16] παρουσίασε μία απλοποιημένη κυκλωματική προσέγγιση, στην οποία κάθε τμήμα του καλωδίου γείωσης μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα συγκεντρωμένο κύκλωμα με αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές και από αγωγιμότητες προς γη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.



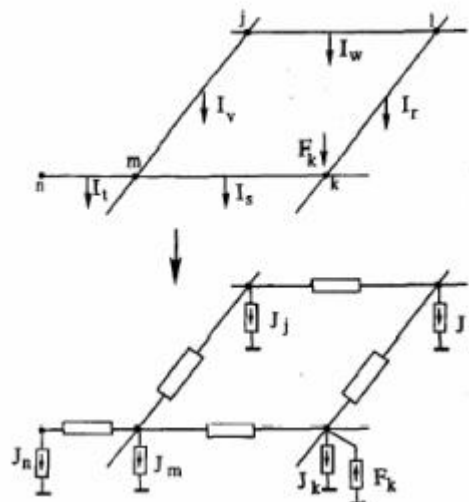
Σχήμα 2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός τετραγώνου του πλέγματος γείωσης

Στα επόμενα χρόνια πολλές εργασίες με τροποποιήσεις πάνω στο έργο του Μελιόπουλου βγήκαν όπως αυτές των Geri [17] και Otero et al. [18], οι οποίες

συμπεριλάμβαναν τα φαινόμενα ιονισμού του εδάφους στα μοντέλα που πρότειναν (σχήματα 2.3 και 2.4).



Σχήμα 2.3 Ισοδύναμα κυκλώματα του μοντέλου Geri [17]



Σχήμα 2.4 Ισοδύναμα κυκλώματα του συστήματος γείωσης του Otero [18]

Γενικά η κυκλωματική προσέγγιση είναι εύκολη στην κατανόηση, καθώς η σύνθετη μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης απλοποιείται μέσω ισοδύναμων κυκλωμάτων.

2.3.2 Η ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Με την ηλεκτρομαγνητική προσέγγιση ασχολήθηκαν στα έργα τους οι Green et al. [19] και Nekhoul et al. [20] που έθεσαν τις βάσεις για την απλοποίηση και συστηματοποίηση των εξισώσεων Maxwell στις εφαρμογές των συστημάτων γείωσης. Σημαντικό πρόβλημα σε αυτή την μέθοδο είναι η εύρεση των οριακών

συνθηκών για τα πεδία. Ωστόσο η εύκολη και προσαρμόσιμη εφαρμογή της σε πλήθος προβλημάτων την κάνουν ευρέως διαδεδομένη.

2.3.3 Η ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η υβριδική μέθοδος εισήχθει για πρώτη φορά από τον Dawalibi et al. [21] το 1986 και αργότερα τροποποιήθηκε από τον Andolfato et al. [22] το 2000. Ονομάζεται υβριδική, καθώς συνδυάζει στοιχεία τόσο της ηλεκτρομαγνητικής όσο και της κυκλωματικής προσέγγισης. Το σύστημα γείωσης χωρίζεται σε n τμήματα, σε καθένα από τα οποία το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις του Maxwell. Το θετικό στοιχείο της μεθόδου είναι ότι η επίδραση της συχνότητας στις σύνθετες αντιστάσεις, στα επαγωγικά και στα χωρητικά στοιχεία συμπεριλαμβάνεται, με αποτέλεσμα αυτή η προσέγγιση να είναι πιο ακριβής από την συμβατική κυκλωματική, ειδικά όταν η συχνότητα της εγχύουσας πηγής είναι υψηλή.

2.3.4 Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η προσέγγιση των γραμμών μεταφοράς ήταν η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος γείωσης. Ωστόσο η ανάπτυξή της δεν ήταν τόσο μεγάλη όσο των προηγούμενων που αναφέρθηκαν. Οι Verma et al. [23], Mazzetti et al. [24], Velazquez et al. [25] εφάρμοσαν την ιδέα των μη ιδανικών γραμμών μεταφοράς σε οριζόντιους αγωγούς γείωσης. Περαιτέρω εργασίες έγιναν από τους Menter και Green [26], στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Sunde [10] για τις γραμμές μεταφοράς με απώλειες, όπου η αντίσταση ανά μονάδα μήκους και η αντίστοιχη αγωγιμότητα είναι στοιχεία εξαρτημένα από την συχνότητα. Αυτές οι παράμετροι ήταν πλέον δυνατόν να υπολογιστούν με αριθμητικές μεθόδους, κάτι που στο παρελθόν ήταν απίθανο.

Η προσέγγιση γραμμών μεταφοράς για την προσομοίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης, μπορεί να γίνει είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας. Στο πεδίο του χρόνου είναι εύκολο να συνυπολογιστεί ο ιονισμός του εδάφους. Μοιάζει αρκετά με την κυκλωματική προσέγγιση, ενώ μπορεί να συμπεριλάβει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών τμημάτων των αγωγών γείωσης. Επιπρόσθετα, η προσέγγιση αυτή μπορεί να προβλέψει την καθυστέρηση της διάδοσης του ρεύματος, η οποία είναι σημαντική όταν το σύστημα γείωσης έχει

μεγάλο μέγεθος. Τέλος, ο χρόνος υπολογισμού που απαιτείται από αυτήν την προσέγγιση είναι εξαιρετικά μικρός σε σύγκριση με αυτόν της ηλεκτρομαγνητικής προσέγγισης.

2.4 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα δούμε αναλυτικότερα ορισμένες από τις πιο σημαντικές προσπάθειες των τελευταίων ετών, ξεκινώντας από το 1998. Πολλοί επιστήμονες βασιζόμενοι στα κλασσικά έργα καθώς και στις αριθμητικές μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω προσπάθησαν είτε να αναπτύξουν τα δικά τους μοντέλα, είτε με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων να προσομοιώσουν συστήματα γείωσης, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους με αντίστοιχα της ήδη υπάρχουσας τεχνικής βιβλιογραφίας.

Το 1998 ο Farag από την Σαουδική Αραβία συνεργάστηκε με τους Cheng και Penn από την Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών με σκοπό την σχεδίαση ασφαλών συστημάτων γείωσης [27]. Στόχος της μελέτης είναι η διατήρηση της βηματικής και της συνολικής τάσης, που αναπτύσσεται εντός και εκτός του πυλώνα και της γείωσης, εντός ασφαλών, για τον εκτεθειμένο άνθρωπο, ορίων. Ο περιορισμός της βηματικής τάσης μπορεί να επιτευχθεί με χρήση συστημάτων γείωσης σε μορφή πλέγματος, με διαστάσεις που σχετίζονται με τη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να ανεχθεί το ανθρώπινο σώμα, η οποία ελήφθει, στην συγκεκριμένη εργασία, για άτομο αντίστασης 500Ω στα $40Ws$.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η συμπεριφορά του συστήματος γείωσης εξαρτάται από το μήκος των αγωγών, την ειδική αντίσταση του εδάφους, το πλάτος και την κυματομορφή του κεραυνικού ρεύματος έκαναν δοκιμές που αφορούσαν όχι μόνο απλά ηλεκτρόδια γείωσης, αλλά και πλέγματα, τρίγωνα γείωσης κτλ. Το έδαφος είχε ειδική αντίσταση που μεταβαλλόταν από 20 έως $4000\Omega m$, ενώ τα κεραυνικά ρεύματα που εφαρμόστηκαν είχαν πλάτος $\sim 50kA$ με μορφή 3-15/10-40 μs .

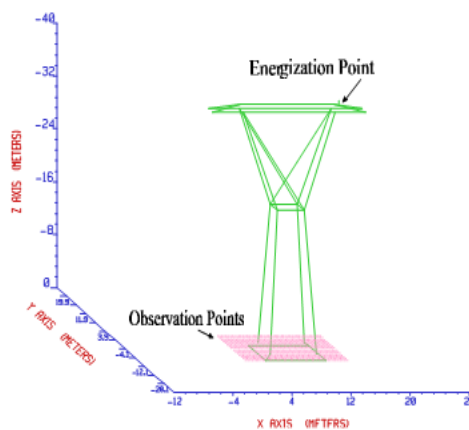
Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι αρνητικοί κεραυνοί είναι αυτοί που καθορίζουν τις διαστάσεις, ενώ το μέγεθος του πλέγματος καθορίζει και την τιμή της σύνθετης

αντίστασης του. Συνήθως μία μέση τιμή των 10 Ω είναι ικανή να εξασφαλίσει ένα καλό επίπεδο ασφαλείας. Επίσης για την προστασία γραμμών κοντά στην προστατευόμενη ζώνη είναι καλή η σύνδεσή τους με το σύστημα γείωσης μέσω καθοδικών αλεξικεραυνών.

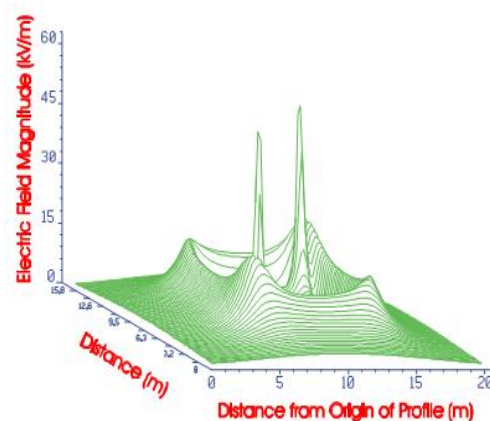
Η επιστημονική ομάδα των Boris Caric, Selva Moorthy, Srete Nikolovski και Damir Slijinac [28] το 1999 χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα CDEGS και συγκεκριμένα τις εφαρμογές του FFTSES και HIFREQ προσπάθησαν να προσομοιώσουν ένα κεραυνικό πλήγμα σε πυλώνα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποίησαν διπλοεκθετική μορφή κεραυνικού ρεύματος 1,2/50μs :

$$i(t) = 20kA [e^{-1,386 \cdot 10^4 t} - e^{-6 \cdot 10^6 t}]$$

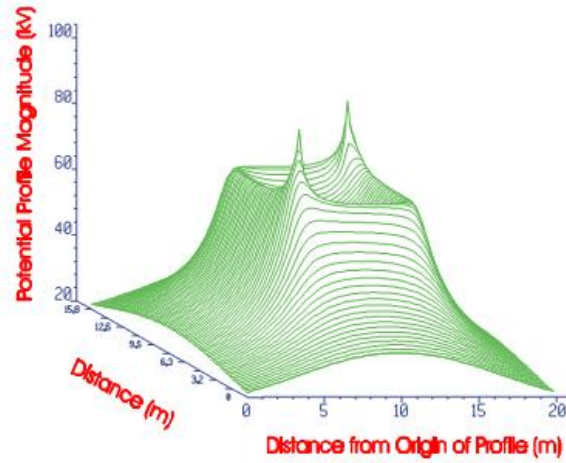
Ο πυλώνας που προσομοιώθηκε ήταν 400kV, ύψους 39m με ορθογωνικό πλέγμα γείωσης 8,2x6m σε βάθος 0,7m. Οι υπολογισμοί έγιναν για συχνότητες 50Hz και 1MHz.



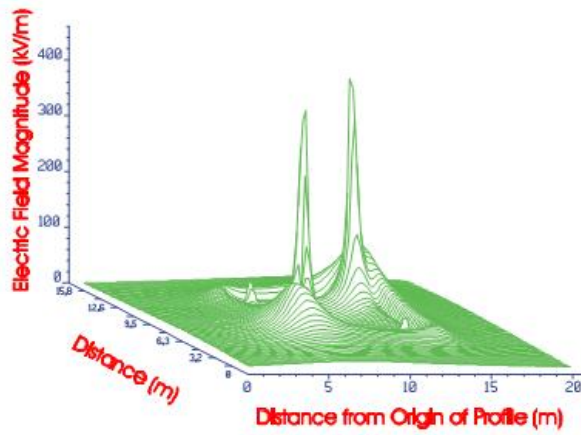
Σχήμα 2.5 Το σύστημα που προσομοιώθηκε



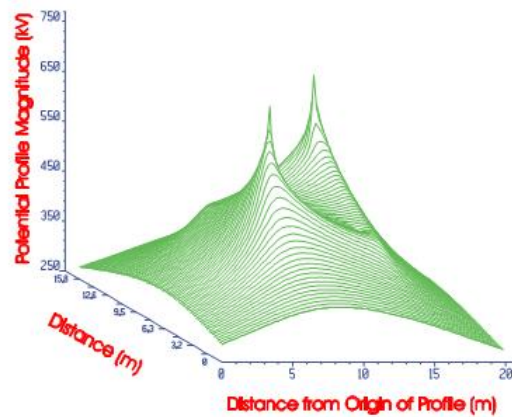
Σχήμα 2.6 Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στα 50Hz



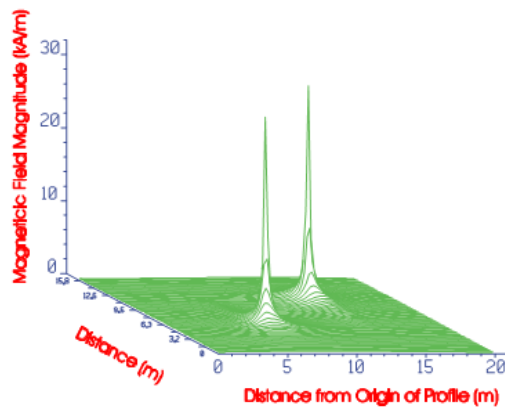
Σχήμα 2.7 Η τάση στα 50Hz



Σχήμα 2.8 Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο 1MHz



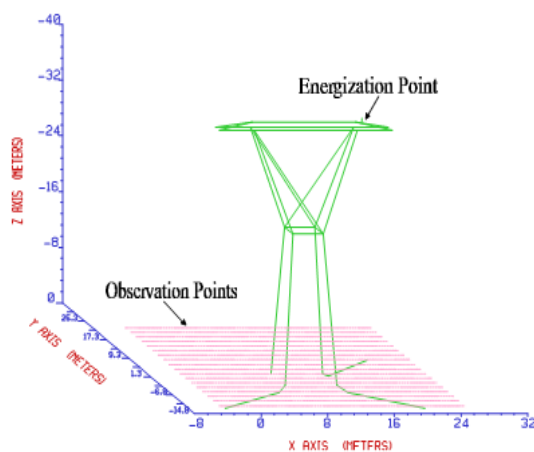
Σχήμα 2.9 Η τάση στο 1MHz



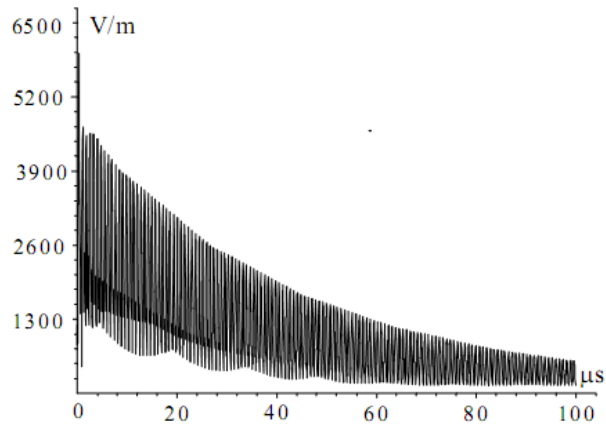
Σχήμα 2.10 Η ένταση του μαγνητικού πεδίου στα 50Hz και στο 1MHz

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η τάση εξαρτώνται από την συχνότητα, ενώ το μαγνητικό πεδίο όχι τόσο.

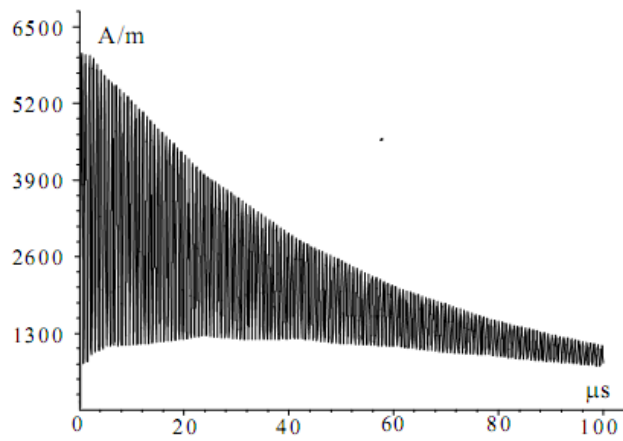
Στο πεδίο του χρόνου τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν θεωρώντας ως γείωση 3 αγωγούς των 5m σε βάθος 0,7m παράλληλους προς την επιφάνεια του εδάφους.



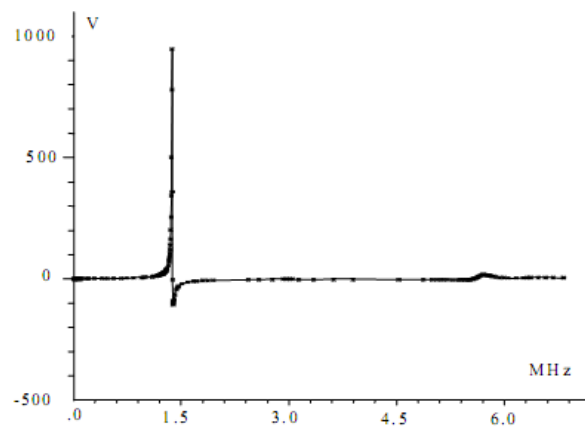
Σχήμα 2.11 Το σύστημα που προσομοιώθηκε στο πεδίο του χρόνου



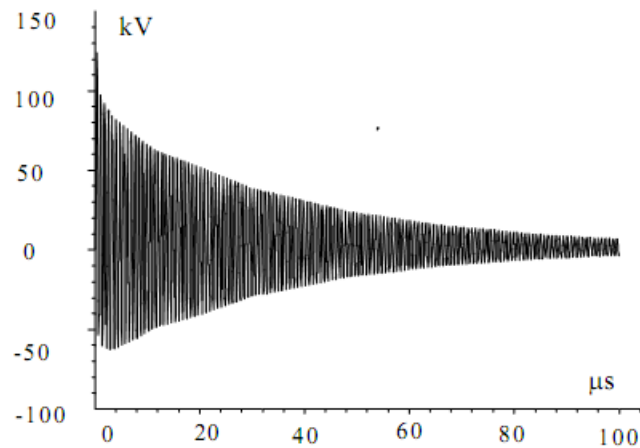
Σχήμα 2.12 Το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο $x=7,5\text{m}$, $y=-2,5\text{m}$, $z=0,0\text{m}$



Σχήμα 2.13 Το μαγνητικό πεδίο στο σημείο $x=7,5\text{m}$, $y=-2,5\text{m}$, $z=0,0\text{m}$

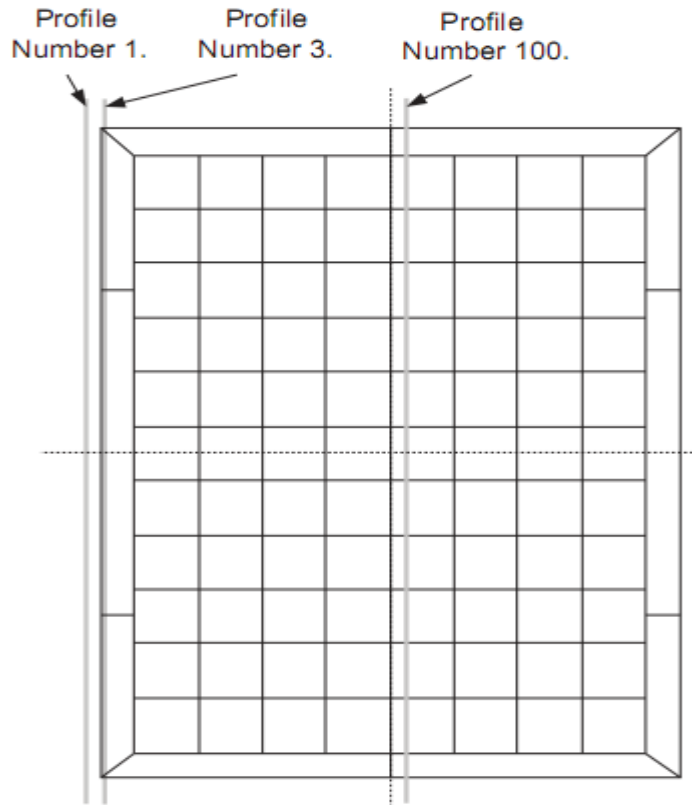


Σχήμα 2.14 Το φάσμα της τάσης στο σημείο $x=7,5\text{m}$, $y=-2,5\text{m}$, $z=0,0\text{m}$



Σχήμα 2.15 Η τάση στο σημείο $x=7,5\text{m}$, $y=-2,5\text{m}$, $z=0,0\text{m}$

Ο Nikolovski μαζί με τον Baric [29], συνεχίζοντας τις εφαρμογές στο CDEGS προσπάθησαν να προσομοιώσουν το 2004 το σύστημα γείωσης διαφόρων σταθμών Μ/Σ (110/35/10 kV) της Κροατίας. Εξέτασαν την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη με ρεύματα σφάλματος της τάξης των 6-10kA. Το σύστημα γείωσης που μελετήθηκε αποτελείται από ένα πλέγμα 110x80m με 20-30 επιπρόσθετες ράβδους μήκους 3m, οι οποίες σχηματίζουν έναν δακτύλιο 5m γύρω από το πλέγμα. Ουσιαστικά το πλέγμα σχηματίζεται από ορθογώνια αγωγών από Fe και Zn διαστάσεων 30x4mm με ισοδύναμη ακτίνα 10,83mm. Το σύστημα γείωσης βρίσκεται σε βάθος 0,8m κάτω από την επιφάνεια του σταθμού (σχήμα 2.16). Για τη μοντελοποίηση του εδάφους θεωρήθηκε ειδική αντίσταση της τάξης των 100Ωm, η οποία σε αυτή την απλοποιημένη μέθοδο θεωρείται η χειρότερη δυνατή. Το εργαλείο RESAP του προγράμματος CDEGS υπολογίζει μέσω της ειδικής αντίστασης του εδάφους, η οποία έχει μετρηθεί με τη μέθοδο 4 σημείων Schlumberger, τη δομή του. Το ρεύμα σφάλματος επιλέχθηκε στα 7kA.



Σχήμα 2.16 Σύστημα γείωσης

Τα αποτελέσματα με και χωρίς τον επιπρόσθετο δακτύλιο έδειξαν ότι αυτός ομαλοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό στην επιφάνεια γύρω από το φράχτη του σταθμού.

Το 2001 οι Thottappillil, Zitnik και Liu [30] δημοσίευσαν μία εργασία στην οποία ακολουθώντας την αριθμητική μέθοδο της προσέγγισης γραμμής μεταφοράς προσπαθούν να μελετήσουν την επίδραση, στο σύστημα γείωσης, διαφόρων παραμέτρων σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος.

Συγκεκριμένα εξετάζουν την επίδραση της ειδικής αντίστασης, της αγωγιμότητας και της επιτρεπτότητας του εδάφους, καθώς και το επιδερμικό φαινόμενο και τη διάμετρο των αγωγών.

Διεξάγουν λοιπόν πειράματα εξετάζοντας έναν οριζόντιο αγωγό χαλκού ακτίνας 15mm, μήκους 15m, ειδικής αντίστασης $1,72 \times 10^{-8} \Omega m$, ο οποίος θάβεται σε βάθος 0,6m σε έδαφος ειδικής αντίστασης $70 \Omega m$ με $\epsilon_r=15$ και $\mu_r=1$. Σε αυτόν εγχέεται ρεύμα διπλοεκθετικής μορφής:

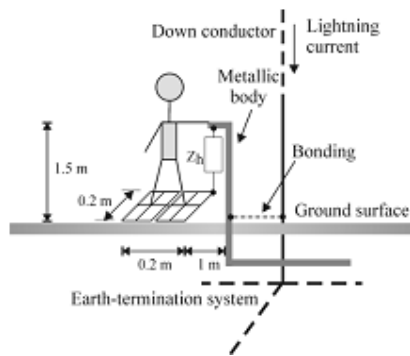
$$i(t) = 36,5kA [e^{-6 \cdot 10^4 t} - e^{-6 \cdot 10^6 t}]$$

Επίσης εξετάστηκαν 2 συστήματα πλεγμάτων γείωσης 1x1 και 2x2 με συνολικές διαστάσεις 10x10m και αγωγούς διαμέτρου 14mm. Η ειδική αντίσταση του εδάφους στο οποίο τοποθετήθηκαν ήταν 1000Ωm και είχε $\epsilon_r=9$. Η διπλοεκθετική του ρεύματος ήταν:

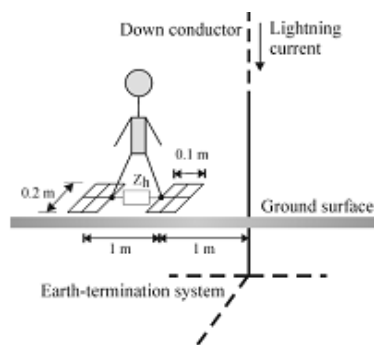
$$i(t) = 1A [e^{-2,7 \cdot 10^4 t} - e^{-5,6 \cdot 10^6 t}]$$

Από τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι η επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι μεγαλύτερη από όλων των άλλων παραμέτρων για σύστημα υπόγειων αγωγών. Μεγάλη ειδική αντίσταση προκαλεί μεγάλη διαφορά τάσης σε διαφορετικά σημεία του συστήματος γείωσης, ειδικά στην αρχή του κεραυνικού πλήγματος. Τετραπλασιασμός της ειδικής αντίστασης προκαλεί αντίστοιχη αύξηση στην τάση της επιφάνειας του συστήματος γείωσης. Η επιρροή της αγωγιμότητας και του επιδερμικού φαινομένου μπορεί να αγνοηθεί, ενώ και αλλαγή της επιτρεπτότητας του εδάφους με παράλληλη διατήρηση της αγωγιμότητας σε σταθερά επίπεδα, δεν έχει μεγάλη επιρροή στην μεταβατική απόκριση του συστήματος γείωσης, εκτός από εδάφη με μεγάλη ειδική αντίσταση. Αύξηση της διαμέτρου μειώνει την μεταβατική τάση του συστήματος γείωσης.

Ο Ala και η Di Silvestre [32] το 2002 πρότειναν μία μέθοδο υπολογισμού των βασικών ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών σε ένα αντικεραυνικό σύστημα προστασίας (LPS). Έτσι επιχειρείται μία πεδιακή προσέγγιση στο πεδίο της συχνότητας και με βοήθεια του διακριτού μετασχηματισμού Fourier υπολογίζεται η συμπεριφορά με το χρόνο σημαντικών ηλεκτρομαγνητικών ποσοτήτων. Μία καινοτομία που εισάγεται είναι ότι στα διάφορα σημεία του LPS λαμβάνονται υπόψιν οι αλληλεπιδράσεις των τμημάτων που περιβάλλονται από αέρα και των ηλεκτροδίων γείωσης με σκοπό τον ορθό υπολογισμό των επικίνδυνων ποσοτήτων που μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτό. Το μοντέλο λαμβάνει επίσης υπόψιν την ύπαρξη του ανθρώπινου παράγοντα, υπολογίζοντας τις επικίνδυνες για αυτόν βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.

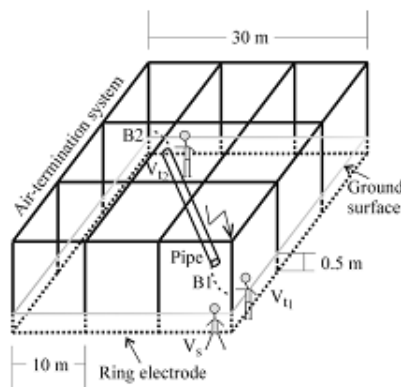


Σχήμα 2.17 Η τάση επαφής που αναπτύσσεται μεταξύ ανθρώπου και ενός γειωμένου μεταλλικού σώματος



Σχήμα 2.18 Η βηματική τάση

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε κεραυνικό ρεύμα 1,2/50μs πλάτους 10kA σε αντίθεση με τις μορφές που προτείνονται από το IEC Standard [31] και είναι η 10/350μs για το πρώτο πλήγμα και η 0,25/100μs για το επακόλουθο. Τα εναέρια τμήματα του LPS που εξετάστηκαν αποτελούνταν από πλέγμα 30x30m και από 12 κατακόρυφους αγωγούς μήκους 10m που συνδέονται στο ηλεκτρόδιο γείωσης, μέσω μεταλλικών μονωμένων καλωδίων.

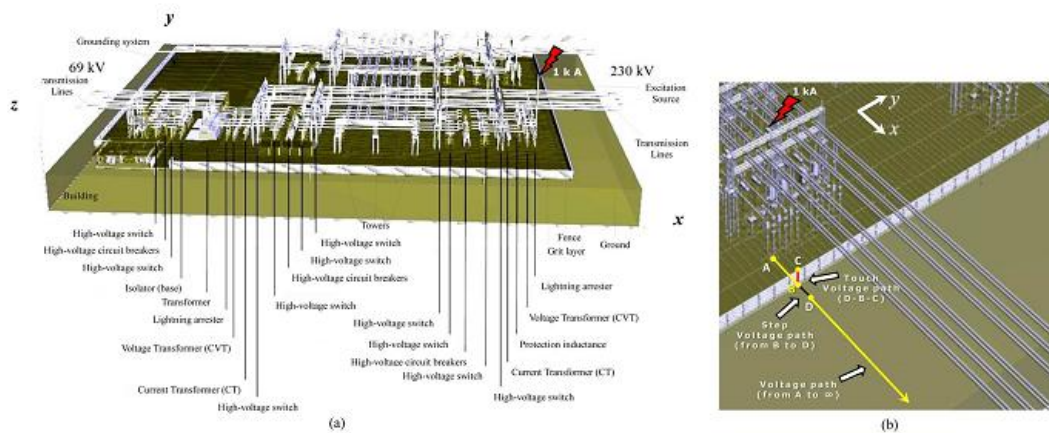


Σχήμα 2.19 Το σύστημα LPS με το σύστημα γείωσης και μία εξωτερική αγωγή ράβδος

Οι δοκιμές έδειξαν ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρινόμενα με ήδη υπάρχουσα τεχνική βιβλιογραφία έδιναν πολύ καλά αποτελέσματα και ουσιαστικά κατέδειξαν την ευελιξία και την ακρίβειά του. Επίσης, φάνηκε ότι η ύπαρξη εκτεταμένων ηλεκτροδίων γείωσης μπορεί να δημιουργήσει επαγόμενες τάσεις σε βρόχους που σχηματίζονται από τμήματα αέρα και τους αγωγούς που αποτελούν το LPS, οι οποίες μπορεί να είναι αρκετά επικίνδυνες.

Πέραν από τη χρήση ήδη υπάρχοντων υπολογιστικών προγραμμάτων όπως το CDEGS, υπήρξαν προσπάθειες ανάπτυξης υπολογιστικού περιβάλλοντος κατάλληλου για προσομοίωση συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από διάφορες επιστημονικές ομάδες.

Στη Βραζιλία τον Νοέμβριο του 2009 παρουσιάστηκε από τους Rodrigo Melo e Silva de Oliveira και Carlos Leonidas da Silva Souza Sobrinho [33] ένα πρόγραμμα με στόχο την προσομοίωση μεταβατικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που αφορούν σύνθετες δομές συστημάτων. Το σύστημα βασίζεται σε μία μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD – Finite-Difference Time-Domain method) και περιλαμβάνει πέραν από ένα εύχρηστο για το χρήστη γραφικό περιβάλλον, εργαλεία τρισδιάστατης σχεδίασης, ενώ έχει τη δυνατότητα απεικόνισης της πεδιακής κατανομής, υπολογισμού τάσεων και ρευμάτων κτλ.



Σχήμα 2.20 Ολόκληρο το σύστημα του υποσταθμού προσομοιωμένο από το SAGS και σημεία ανάπτυξης βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής

Το πρόγραμμα ονομάζεται SAGS (Synthesis and Analysis of Grounding Systems) και απλοποιεί τη διαδικασία εισαγωγής δεδομένων για τους χρήστες, με σκοπό τον εύκολο σχεδιασμό περίπλοκων συστημάτων.

Ένας ακόμα Βραζιλιάνος, ο Marcos André da Frota Mattos [34], προσπάθησε να εισάγει ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί την υβριδική προσέγγιση για τη μελέτη της συμπεριφοράς διαφορετικών πλεγμάτων γείωσης.

Για να εξετάσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία του μοντέλου του διεξήγαγε μία σειρά δοκιμών σε διαφορετικά πλέγματα, σε διαφορετικές συνθήκες εδάφους και για τάσεις που ποικίλλουν από dc μέχρι ac μεγάλων συχνοτήτων.

Τα αποτελέσματά του έδειξαν ότι το μοντέλο μπορεί να εισάγει νέα στοιχεία στην μελέτη συστημάτων γείωσης καθώς:

- έχει δυνατότητα υπολογισμού κατανομής ρευμάτων σε αγωγούς με απώλειες
- έχει επαληθευτεί ως προς την ακρίβεια και την αξιοπιστία του και με διάφορες άλλες μεθόδους μετρήσεων
- είναι αριθμητικά ευσταθές
- κάνει υπολογισμούς στο πεδίο του χρόνου
- είναι ακριβές
- μπορεί να συμβάλει στην αύξηση ασφάλειας σταθμών ισχύος
- μπορεί να επεκταθεί σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα

Μία ακόμη επιστημονική ομάδα στη Βραζιλία διεξήγαγε το 2007 [35] μία μελέτη για την βελτίωση της συμπεριφοράς γραμμών μεταφοράς σε περίπτωση κεραυνοπληξίας. Παρουσιάστηκε, λοιπόν, στο Διεθνές Συμπόσιο Κεραυνικής Προστασίας μία μεθοδολογία για τη βελτίωση της κεραυνικής συμπεριφοράς μίας γραμμής μεταφοράς 69kV στην περιοχή Porto Alegre της Βραζιλίας. Η περιοχή αυτή έχει κεραυνική στάθμη 5 κεραυνών τον χρόνο ανά km². Τα βήματα που ακολουθήθηκαν ήταν:

- επιθεώρηση των ηλεκτρικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γραμμής
- μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων σε υψηλές συχνότητες. Οι παράμετροι του εδάφους είναι συνάρτηση του φάσματος της συχνότητας. Γι' αυτό οι μετρήσεις των

ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών του εδάφους έγιναν σε δείγματα από την περιοχή της γραμμής μεταφοράς.

- μελέτες σχετικά με την απόδοση της γραμμής σε περίπτωση κεραυνοπληξίας μιας φάσης και του αγωγού προστασίας
- χρήση λογισμικού για την μοντελοποίηση των πυλώνων, των φάσεων, των αγωγών προστασίας και των συστημάτων γείωσης, με τη χρήση μετρηθέντων παραμέτρων
- χρήση του υπολογιστικού προγράμματος CDEGS για την καλύτερη εμπορεία της απόδοσης και των βελτιώσεων στο σύστημα γείωσης, με σκοπό τον καλύτερο προσδιορισμό της αντίδρασης της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου στα ωστικά κύματα από τον κεραυνό.

Μετρήσεις της αντίστασης του συστήματος γείωσης έδειξαν μεγάλες τιμές οι οποίες εξηγούν την κακή συμπεριφορά της γραμμής μεταφοράς σε περίπτωση κεραυνοπληξίας. Με τη μέθοδο Wenner προσδιορίστηκαν οι κάτωθι παράμετροι της δομής του εδάφους:

- $\rho_1=137,41\Omega\text{m}$
- $\rho_2=35,53\Omega\text{m}$
- $h=0,79\text{m}$

Οι προσομοιώσεις, με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου πλήθους και της καλύτερης τοποθέτησης μονωτήρων στην γραμμή μεταφοράς, έγιναν σε δύο στάδια. Στο πρώτο θεωρήθηκε υψηλή αντίσταση γείωσης των πυλώνων και μη ύπαρξη αγωγού προστασίας, ενώ στο δεύτερο τοποθετήθηκαν αλεξικέραυνα γραμμών παράλληλα με μονωτές σε κάποιους πυλώνες. Θεωρήθηκε αδύνατο να τοποθετηθεί αγωγός προστασίας σε μία επέκταση της γραμμής των 69kV, καθώς θα έπρεπε η γραμμή να αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Οι προσομοιώσεις που έγιναν ουσιαστικά στόχευαν στον προσδιορισμό των τάσεων των πυλώνων, των μονωτήρων και άλλων στοιχείων του συστήματος σε περίπτωση απευθείας κεραυνοπληξίας στον πυλώνα και σε περίπτωση κεραυνοπληξίας σε σημείο πλησίον της γραμμής.

Όσον αφορά το σύστημα γείωσης σημαντικό ρόλο παίζει το έδαφος, τόσο στις χαμηλές, όσο και στις υψηλές συχνότητες. Οι ηλεκτρικές παράμετροι του εδάφους αλλάζουν με τη συχνότητα. Συνήθως σε χαμηλές συχνότητες το έδαφος

προσομοιώνεται με δύο στρώματα διαφορετικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ένα τέτοιο μοντέλο αγνοεί την επίδραση της ετερογένειας σε ορισμένα σημεία. Σε υψηλές συχνότητες η ηλεκτρική αγωγιμότητα W και η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του εδάφους εξαρτώνται από τη συχνότητα. Για τον καλύτερο προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εδάφους έγιναν μετρήσεις τις διαφορές δυναμικού ηλεκτροδίων σε δείγμα εδάφους με την επιβολή κυματομορφής $8/20\mu s$.

Για τον προσδιορισμό της αντίστασης ηλεκτροδίου σε χαμηλή συχνότητα χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές εκφράσεις. Τα αποτελέσματα αυτών συγκρίθηκαν με αυτά από το υπολογιστικό πακέτο CDEGS. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

$$R(n) = \frac{\rho}{n\pi l} \left[\ln\left(\frac{2l}{a}\right) - 1 + N(n) \right]$$

όπου n : το πλήθος των αγωγών γείωσης (counterpoise)

$a = (2ah)^{1/2}$, a η φυσική ακτίνα του αγωγού, h το βάθος του αγωγού κάτω από την επιφάνεια της γης

$$N(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \ln \left[\frac{1 + \sin\left(\frac{m\pi}{n}\right)}{\sin\left(\frac{m\pi}{n}\right)} \right]$$

Η σύνθετη αντίσταση που συναντά το ρεύμα υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$Z_0 = \left\{ \frac{\mu_0 \left[\ln\left(\frac{2l}{a}\right) - 1 + N(n) \right] \left[\ln\left(\frac{2l}{a}\right) - 1 + N_1(n) \right]}{2(n\pi)^2 \varepsilon_0 (\varepsilon_r + 1)} \right\}^{1/2}$$

όπου

$$N_1(n) = \sum_{m=1}^{n-1} \left[\ln \left(\frac{1 + \sin\left(\frac{m\pi}{n}\right)}{\sin\left(\frac{m\pi}{n}\right)} \right) \right] \cos\left(\frac{m\pi}{n}\right)$$

και

$$\varepsilon_r = 35 + 37.5 \left\{ e^{-0,008(\rho-180)} + e^{-0,0022(\rho-180)} \right\}$$

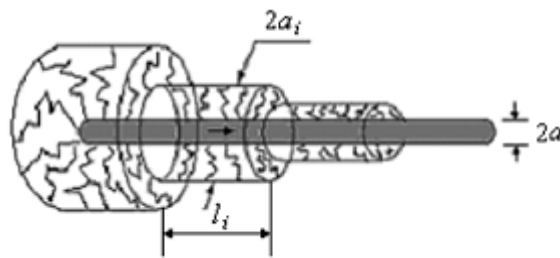
Από αυτές τις σχέσεις βρέθηκε 5.90Ω η εμπέδηση του συστήματος γείωσης.

Έτσι, λοιπόν, για τη βελτίωση της γραμμής μεταφοράς τοποθετήθηκαν σε κρίσιμες περιοχές αλεξικέραυνα, με βάση τις τιμές της μέγιστης απορροφούμενης ενέργειας και των αναπτυσσόμενων τάσεων, ενώ για τη βελτίωση του συστήματος γείωσης έγιναν συνδέσεις των γειωμένων ηλεκτροδίων με τον αγωγό προστασίας στους υπάρχοντες πυλώνες.

Το 2006 συνεργάστηκαν επιστήμονες από το πανεπιστήμιο Tsinghua του Πεκίνου και από την εταιρεία του νότιου δικτύου ισχύος της Κίνας [36] προσπαθώντας να υπολογίσουν τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από τη βάση ενός πυλώνα γραμμής μεταφοράς, έπειτα από πτώση κεραυνού στο πάνω τμήμα του. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ρεύμα με μορφή διπλοεκθετικής με πλάτος 50kA και μορφή 4/40μs. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της βάσης του πυλώνα έχει πολύ μεγάλη σημασία, καθώς επηρεάζει την κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων. Από μετρήσεις έχει προκύψει ότι η σύνθετη αντίσταση βάσης εξαρτάται από το χρόνο και γι' αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί ως καθαρά ωμική αντίσταση, αλλά περιέχει και έναν όρο αυτεπαγωγής. Δύο μοντέλα προτάθηκαν για αυτό το λόγο: α) το R-L και β) το R-C, με το σύστημα γείωσης του κάθε 'ποδιού' του πυλώνα να λαμβάνεται ως ένα ημισφαίριο ακτίνας 5m. Ο πυλώνας θεωρείται ότι αποτελείται από 4 τμήματα τα οποία χωρίζονται με τους βραχίονες στήριξης των φάσεων και παράλληλα R-L κυκλώματα. Το κύμα που ενεργοποιείται από το κεραυνικό πλήγμα ρέει στους αγωγούς προστασίας και στον πυλώνα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι οι τάσεις επαφής και οι βηματικές τάσεις αυξάνονται με το ύψος του πυλώνα. Η αύξηση στην τάση επαφής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν της βηματικής τάσης, καθώς όσο απομακρυνόμαστε από τον πυλώνα μειώνεται η επίδραση του πεδίου του. Επίσης, όσο αυξάνεται η ειδική αντίσταση του εδάφους η βηματική τάση αυξάνεται. Η σχετική ειδική αγωγιμότητα του εδάφους δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη βηματική τάση. Επιπρόσθετα, η τάση στην κορυφή του πυλώνα αυξάνεται με το ύψος του. Το ίδιο συμβαίνει και με την καθυστέρηση της τάσης στη βάση του πυλώνα, καθώς όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο μεγαλύτερος χρόνος απαιτείται για να διαδοθεί η τάση από την κορυφή προς το κατώτερο σημείο του. Τέλος, δεν παρατηρείται σημαντική

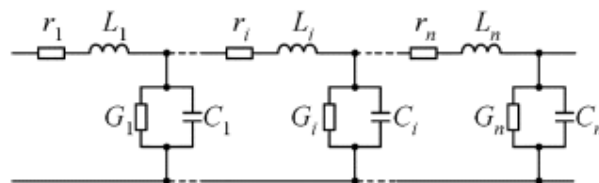
διαφορά μεταξύ των τάσεων στη βάση των πυλώνων σε σχέση με το ύψος τους, καθώς η σύνθετη αντίσταση τους είναι παρόμοια.

Στο ίδιο πανεπιστήμιο του Πεκίνου το 2006 [37] μία άλλη επιστημονική ομάδα διεξήγαγε προσομοιώσεις σε ένα πλήρες σύστημα γραμμής μεταφοράς. Η διαφορά με παρόμοιες προηγούμενες μελέτες είναι ότι, ενώ σε παλιότερες περιπτώσεις το σύστημα γείωσης του υποσταθμού και οι συσκευές γείωσης των πυλώνων προσομοιώνονταν ως συγκεντρωμένες αντιστάσεις με σταθερές τιμές, εδώ θεωρείται ότι έχουν μεταβατικά χαρακτηριστικά μεταβαλλόμενα με το χρόνο και σύνθετη αντίσταση που εξαρτάται από αυτόν. Άλλη μία καινοτομία είναι ότι στα συστήματα γείωσης λαμβάνεται υπόψη και ο ιονισμός του εδάφους, ως παράγοντας που επηρεάζει τους αγωγούς γείωσης. Όταν ένα υψηλό κεραυνικό ρεύμα διεγείρει τον αγωγό γείωσης, τότε το ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος που περικλείει τον αγωγό ξεπερνά μία κρίσιμη τιμή και το έδαφος συμπεριφέρεται σαν αγωγός. Οι αγωγοί γείωσης προσομοιώνονται, λοιπόν, με μία πυραμιδοειδή μορφή όπως στο σχήμα



Σχήμα 2.21 Μοντέλο ενός ηλεκτροδίου γείωσης

ενώ το κυκλωματικό ισοδύναμο είναι



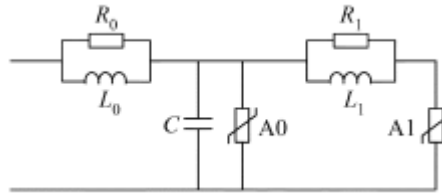
Σχήμα 2.22 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροδίου γείωσης

Η ισοδύναμη ακτίνα κάθε τμήματος του αγωγού δίνεται από τον τύπο

$$J_i = E_c / \rho = \Delta i_i / (2\pi a_i l_i)$$

όπου J_i η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το i -οστό τμήμα και Δi_i το ρεύμα που διαφεύγει από το i -οστό τμήμα προς τη γη.

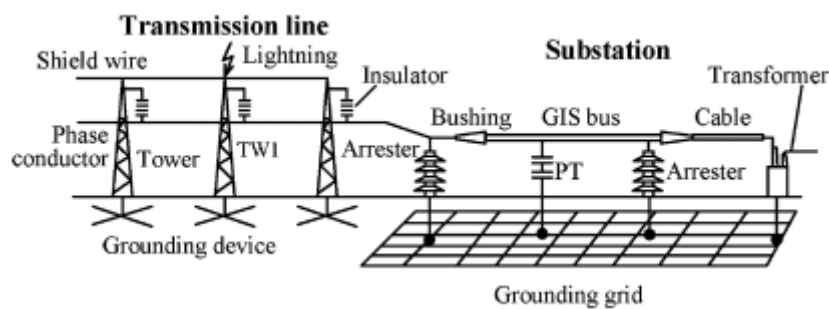
Όσον αφορά το μετασχηματιστή ισχύος, συνήθως θεωρείται ως συγκεντρωμένη χωρητικότητα κατά τη μεταβατική ανάλυση κεραυνού. Το καθοδικό αλεξικέραυνο προσομοιώνεται από το εξής κυκλωματικό μοντέλο:



Σχήμα 2.23 Δυναμικό μοντέλο καθοδικού αλεξικεραύνου όπως προτείνεται από IEEE W.G.3.4.11.

Σε αυτή τη μελέτη η σύνδεση του συστήματος γείωσης με την γραμμή μεταφοράς έγινε με χρήση της χαρακτηριστικής γραμμικής μεθόδου του Bergeron, που ουσιαστικά μετατρέπει το σύστημα σε ισοδύναμο κύκλωμα με συγκεντρωμένες αντιστάσεις και πηγές ρεύματος και στη συνέχεια το κυκλωματικό δίκτυο αναλύεται από τον πρώτο νόμο του Kirchhoff.

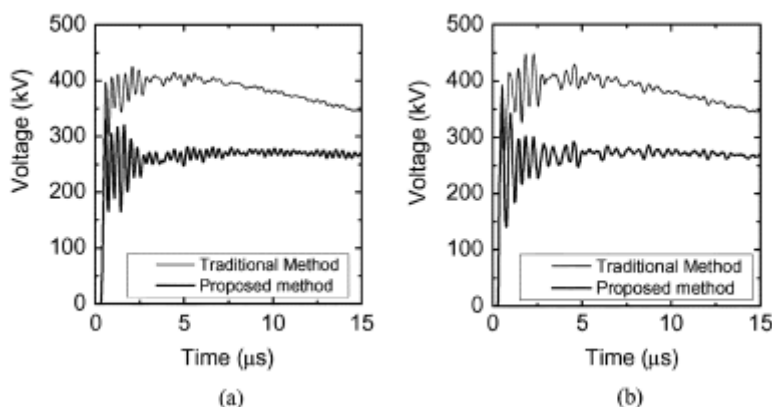
Το κεραυνικό ρεύμα που πλήττει τον υποσταθμό των 100kV (Σχήμα 2.24) είναι της μορφής 2.6/50μs και πλάτους 120kA. Το σύστημα γείωσης έχει μέγεθος 70x70 m² σε βάθος 0.8m και ο πυλώνας γειώνεται με 4 ράβδους μήκους 3.5m. Η ακτίνα των αγωγών είναι 0.01m. Η αντίσταση τόσο των πυλώνων, όσο και του πλέγματος γείωσης είναι 10Ω.



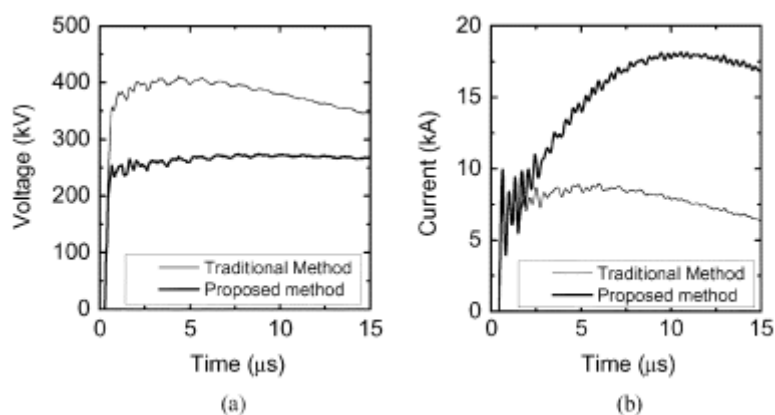
Σχήμα 2.24 Το μοντέλο του υποσταθμού και της γραμμής μεταφοράς

Τα αποτελέσματα της μεθόδου για τις κεραυνικές τάσεις που επάγονται στον ζυγό του σταθμού και το μετασχηματιστή είναι αρκετά διαφορετικά από τα αντίστοιχα των παλιότερων παραδοσιακών μεθόδων (Σχήμα 2.25). Συγκεκριμένα οι τάσεις είναι αρκετά χαμηλότερες, αλλά τα ρεύματα μέσω των αλεξικεραύνων υψηλότερα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους (Σχήμα 2.26). Αποδεικνύεται, ειδικά στα συστήματα

γείωσης, ότι τα μεταβατικά χαρακτηριστικά του κεραυνού επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία του υποσταθμού.



Σχήμα 2.25 Τάσεις που επάγονται από τον κεραυνό στον (a) ζυγό του σταθμού (b) Μ/Σ



Σχήμα 2.26 (a) Τάσεις και (b) ρεύματα μέσω του καθοδικού αλεξικεραύνου κοντά στον Μ/Σ

Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα, καθώς λαμβάνεται υπόψη όλη η επίδραση της κυματικής φύσης των κεραυνικών ρευμάτων.

Οι Sowa και Wiater [38] από το τμήμα ηλεκτρικής ενέργειας του πολυτεχνείου του Bialystok στην Πολωνία μελέτησαν το 2008 το σύστημα γείωσης ενός τηλεπικοινωνιακού σταθμού GSM (Global System for Mobile Communications). Στόχος της μελέτης τους ήταν να υπολογίσουν τις τάσεις επαφής και τις βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται εντός και γύρω από έναν πυλώνα τηλεπικοινωνιών GSM όταν δεχτεί κεραυνικό πλήγμα. Ο σκοπός ενός καλού συστήματος γείωσης σταθμού GSM είναι να εξασφαλίσει ότι όλα τα επιμέρους τμήματα συνδέονται με τη μικρότερη δυνατή σύνθετη αντίσταση. Έτσι ελαχιστοποιείται η διαφορά τάσης

μεταξύ των διαφόρων τμημάτων σε περίπτωση κύματος ρεύματος, με συνέπεια τον περιορισμό των συνεπειών ενός κεραυνού. Επίσης στόχος είναι η παροχή ενός αγωγίμου δρόμου προς το έδαφος, με την ελάχιστη δυνατή αντίσταση γείωσης. Σε συστήματα γείωσης ο στόχος είναι αντιστάσεις γείωσης μικρότερες από 10 ή 5Ω. Στην συγκεκριμένη μελέτη λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν η συμπεριφορά του συστήματος γείωσης σε σχέση με τη συχνότητα του κεραυνικού ρεύματος. Το μοντέλο του σταθμού αποτελείται από ευθείς κυλινδρικούς αγωγούς κατάλληλων διαστάσεων και ηλεκτρικών παραμέτρων. Πέραν του πυλώνα υπάρχει και μία κατασκευή για το σταθμό, ενώ η περιοχή οριοθετείται από έναν φράχτη. Το σύστημα γείωσης αποτελείται από κυκλικά ηλεκτρόδια γύρω από τον πυλώνα και την κατασκευή σε βάθος 60cm, ενώ επίσης σε απόσταση μισού μέτρου από τον φράχτη στην εσωτερική του πλευρά υπάρχει ακόμα ένα. Κάτω από τα 'πόδια' του πυλώνα υπάρχουν τρία τετραγωνικά ηλεκτρόδια γείωσης σε βάθος 3.2m, τα οποία συνδέονται με κάθετες ράβδους με τις βάσεις του πυλώνα. Για την προσομοίωση με την εφαρμογή Multifields του προγράμματος CDEGS η δομή του σταθμού αποτυπώνεται με ένα κατάλληλο δίκτυο αγωγών χωρισμένων σε μικρά κομμάτια. Το μήκος αυτών των κομματιών επιλέχτηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα να μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος τους, για όλες τις συχνότητες που μελετώνται. Στην ανάλυση που γίνεται αυτά προσομοιώνονται ουσιαστικά με δίπολα και τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη σε κάθε σημείο παρατήρησης προκύπτουν από το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών από κάθε δίπολο. Ο κεραυνός προσομοιώθηκε με μία διπολική συνάρτηση της μορφής 10/350μs με peak στα 100kA. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μεγαλύτερες τιμές τάσεις (400kV) προκύπτουν γύρω από τους κάθετους αγωγούς που συνδέουν τη βάση του πυλώνα με το σύστημα γείωσης. Γύρω στα 120kV παρατηρήθηκαν σε απόσταση 20m από τον φράχτη. Όσον αφορά τις τάσεις επαφής, αυτές βρέθηκαν να είναι πολύ μικρές, της τάξης των 27kV γύρω από τον πυλώνα, ενώ σε μικρή απόσταση από τον φράχτη ανέβαιναν σε αρκετά υψηλότερες τιμές (81kV). Ακόμα και τάσεις επαφής 135kV αναμένονται εντός 2m από τον φράχτη, ενώ στις γωνίες του η απόσταση μπορεί να είναι και μικρότερη. Οι βηματικές τάσεις μειώνονται όσο προχωράμε προς το φράχτη του σταθμού, ενώ τις μεγαλύτερες τιμές τους τις παίρνουν κοντά στα ηλεκτρόδια γείωσης. Αυτές οι κατανομές των τάσεων, ωστόσο, εξαρτώνται σημαντικά και από την ειδική αντίσταση του εδάφους.

Σε άλλη μία μελέτη των παραπάνω επιστημόνων το 2004 [39] γίνεται προσπάθεια να υπολογιστεί το καλύτερο δυνατό σύστημα γείωσης ενός υποσταθμού (YT/MT), λαμβάνοντας την περίπτωση κεραυνικού πλήγματος. Ένας τυπικός σταθμός YT/MT αποτελείται από ένα σχέδιο ζυγού το οποίο χωρίζεται σε δύο τμήματα. Υπάρχουν δύο εισερχόμενα κυκλώματα, καθένα από τα οποία τροφοδοτεί ένα τμήμα του ζυγού. Επίσης δύο εξερχόμενα κυκλώματα τροφοδοτούν τα υπαίθρια συστήματα των πυλώνων μεταφοράς και τα κυκλικά κυκλώματα των δικτύων των πόλεων. Συνήθως υπάρχουν 2 Μ/Σ 110/50 kV, 6%, 16MVA και το σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλέγμα 107m x 62m, με 4 όχι ισαπέχοντες αγωγούς κατά μήκος του άξονα X και 11 ισαπέχοντες κατά τον Y. Όλοι οι ατσάλινοι αγωγοί είναι θαμμένοι σε βάθος 80cm σε ομογενές έδαφος με ειδική αντίσταση $\rho=100\Omega\text{m}$ και σχετική επιτρεπτότητα $\epsilon_r=1$. Η περίμετρος του πλέγματος τοποθετήθηκε έτσι ώστε οι πιο απομακρυσμένοι αγωγοί να βρίσκονται 5m από την εξωτερική άκρη του φράχτη που περιβάλλει τον υποσταθμό. Στην ανάλυση προσομοιώθηκε κεραυνός με μορφή 10/350μs και αιχμή 100kA. Ο προς ανάλυση υποσταθμός χωρίστηκε σε 1453 κομμάτια αρκετά μικρά ώστε το ρεύμα να μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος τους. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι στις γωνίες του υποσταθμού έχουμε πολύ μεγάλες τιμές της κατανομής των βηματικών τάσεων. Κατά τη μελέτη εξετάστηκαν 37 διαφορετικά σχήματα γωνιών για το παραπάνω κεραυνικό ρεύμα. Όσον αφορά τους παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτροπληξία του ανθρώπου πρέπει να συνυπολογιστεί η αντίσταση του σώματος, το ποσοστό υγρασίας, η περιοχή επαφής και κατά πόσο ο άνθρωπος είναι γειωμένος. Ένας παράγοντας που εξαρτάται από την βηματική τάση είναι ο k_r με τύπο

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \cdot P_i \cdot U_n}{\left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \cdot U_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

Όπου n = η ποσοτική κλίμακα της περιοχής βηματικής τάσης

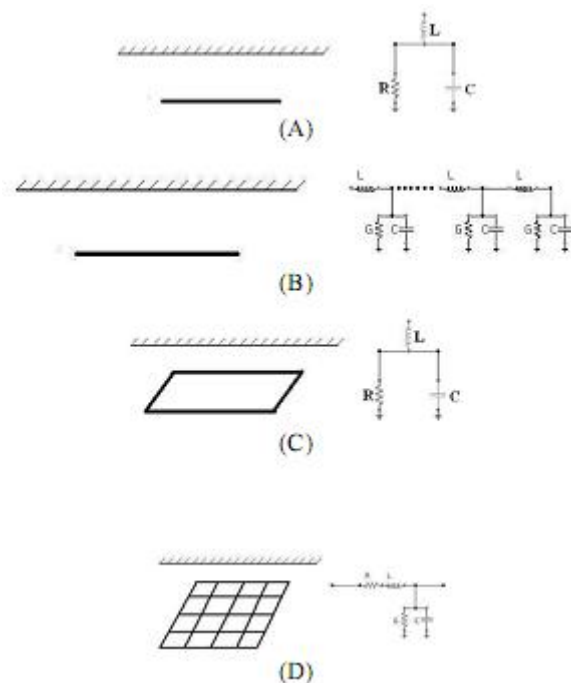
P_i = η περιοχή βηματικής τάσης

U_n = η μέγιστη τιμή της βηματικής τάσης στην εξεταζόμενη περιοχή

Ένας δεύτερος παράγων είναι ο k_{rmax} , ο οποίος βασίζεται στη μέγιστη τιμή της βηματικής τάσης. Ουσιαστικά είναι το κλάσμα του ποσοστού της εξεταζόμενης περιοχής με τη μέγιστη βηματική τάση δια του ποσοστού με τη μικρότερη τιμή αυτής.

Για να γίνει αυτό υποθέτουμε ότι η εξεταζόμενη περιοχή χωρίζεται σε 3 τομείς. Αυτόν με τη μεγαλύτερη τιμή βηματικής τάσης, αυτόν με τη μικρότερη και τον τρίτο με τις ενδιάμεσες τιμές. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν ότι όσο αυξάνεται η τιμή των κεραυνικών παραμέτρων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους, τόσο αυξάνονται και οι παρατηρούμενες τιμές της βηματικής τάσης. Η σωστή επιλογή του σχήματος του συστήματος γείωσης μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας μέχρι και 5 φορές.

Επιστήμονες από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου της Τεχεράνης το 2005 [40] μελέτησαν την συμπεριφορά διαφόρων συστημάτων γείωσης σε περίπτωση κεραυνοπληξίας πυλώνα μεταφοράς υψηλής τάσης.



Σχήμα 2.27 Διαφορετικά μοντέλα συστημάτων γείωσης πυλώνων

Ο κεραυνός προσομοιώθηκε με μία διπλοεκθετική $2/70\mu\text{s}$ με αιχμή στα 30kA , ενώ με κατάλληλο πρόγραμμα έγινε και η προσομοίωση ενός πυλώνα διπλού συστήματος με 2 αγωγούς προστασίας. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τάσεις που αναπτύσσονται στον πυλώνα και στο σύστημα γείωσης προέκυψε ότι ενώ στον πυλώνα η τάση είχε την ίδια μορφή με το χρόνο και το ίδιο peak στα 1500kV , η αναπτυσσόμενη τάση στο σύστημα γείωσης διέφερε αρκετά σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο σύστημα. Συγκεκριμένα, ενώ η μορφή της τάσης παραμένει ίδια

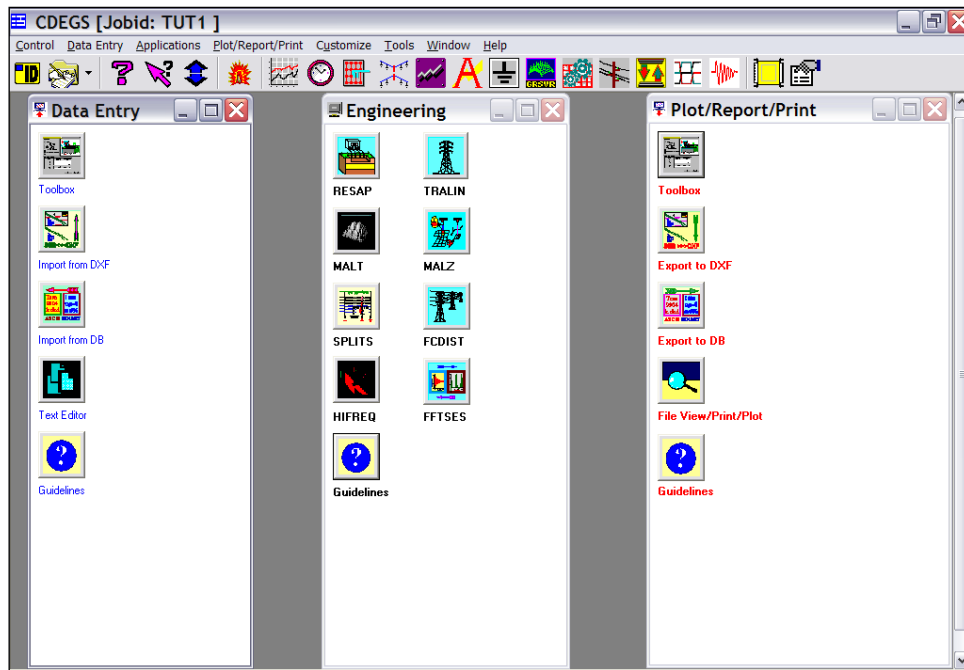
σε σχέση με το χρόνο, το peak διαφέρει σημαντικά. Στην περίπτωση του τετράγωνου γείωσης έχουμε το μικρότερο παρατηρούμενο peak στα 6kV περίπου. Στο πλέγμα φτάνει στα 25kV, ενώ στο δεύτερο σύστημα ανεβαίνει πάνω από τα 40kV και στο πρώτο πάνω από τα 60kV.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SES - CDEGS

Το πακέτο λογισμικού CDEGS (Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure Analysis, Version 11.0.54) της εταιρείας SES χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ηλεκτρικού δικτύου υψηλής τάσης και του συστήματος γείωσης κάθε πυλώνα. Η διαδικασία που ακολουθείται διακρίνεται σε τρία μέρη, την *καταχώρηση δεδομένων*, όπου γίνεται η σχεδίαση του ηλεκτρικού δικτύου και ο ορισμός των παραμέτρων του εδάφους και του συστήματος γείωσης, την *προσομοίωση* της λειτουργίας του συστήματος υπό τις συνθήκες που ορίσαμε στο πρώτο μέρος και την *παρουσίαση των αποτελεσμάτων* της προσομοίωσης, αριθμητικά και με τη μορφή γραφημάτων.

3.1 Εισαγωγή

Εκτελούμε το πρόγραμμα CDEGS.exe. Μας ζητείται να επιλέξουμε ένα JobID. Αυτό εισάγεται στο όνομα των αρχείων εισόδου και εξόδου, ώστε να αναγνωρίζονται εύκολα από το χρήστη, ανάλογα με την εκάστοτε προσομοίωση. Αφού επιλεγεί, η εικόνα του προγράμματος είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 3.1 Αρχική οθόνη του προγράμματος

3.2 Καταχώρηση Δεδομένων

Στο πλαίσιο με την επιγραφή Data Entry επιλέγουμε το Toolbox:

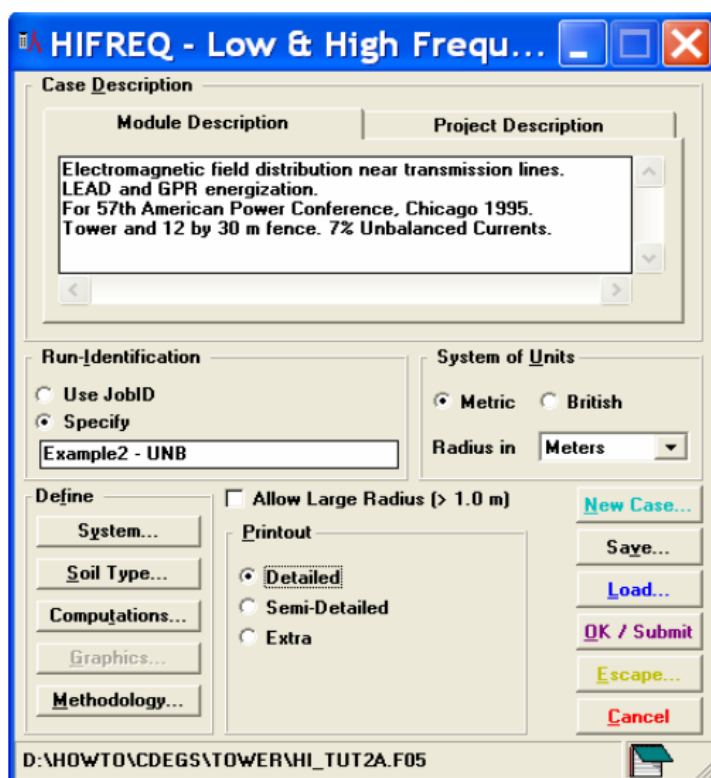


Σχήμα 3.1 Toolbox για εισαγωγή δεδομένων

Εδώ, οι εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν είναι η HIFREQ και η FFTSES.

3.2.1 HIFREQ

Αυτή η εφαρμογή μας βοηθά στον υπολογισμό της κατανομής των ρευμάτων σε δίκτυα υπόγειων ή εναέριων αγωγών. Στη συνέχεια, μπορούν να υπολογιστούν και άλλες ηλεκτρομαγνητικές ποσότητες που ενεργοποιούνται εξαιτίας της παραπάνω κατανομής, όπως το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο και τάσεις (είτε σαν διανυσματικές, είτε σαν αριθμητικές ποσότητες).

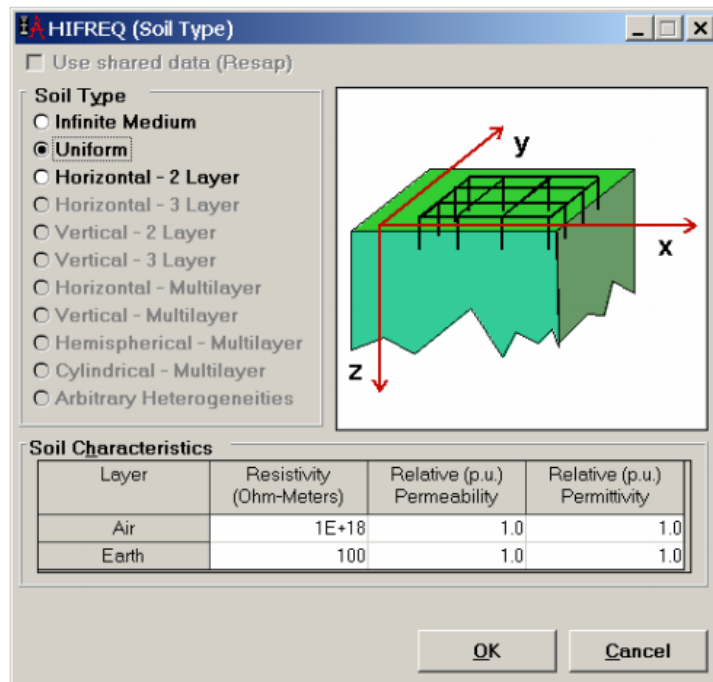


Σχήμα 3.3 Αρχική οθόνη του επιλύτη HIFREQ

Στην αρχική οθόνη, στην επιλογή Module Description μπορούμε να εισάγουμε σχόλια για να περιγράψουμε την περίπτωση που θα αναλυθεί στην εφαρμογή.

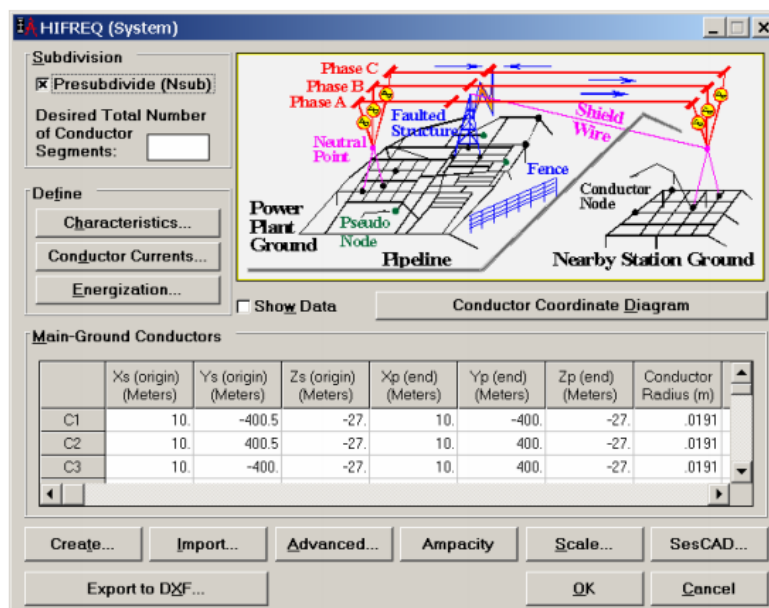
Μπορούμε να επιλέξουμε το σύστημα μονάδων, είτε το μετρητικό είτε το βρετανικό, το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στην εφαρμογή μας, ενώ με την ένδειξη Run-Identification καθορίζουμε το JobID στο οποίο θα γίνει η αποθήκευση.

Στην επιλογή Soil Type προσδιορίζουμε το μοντέλο που πιστεύουμε ότι προσεγγίζει το εν λόγω έδαφος, π.χ. οριζόντια πολυστρωματικό:



Σχήμα 3.4 Επιλογή εδάφους στον επιλύτη HIFREQ

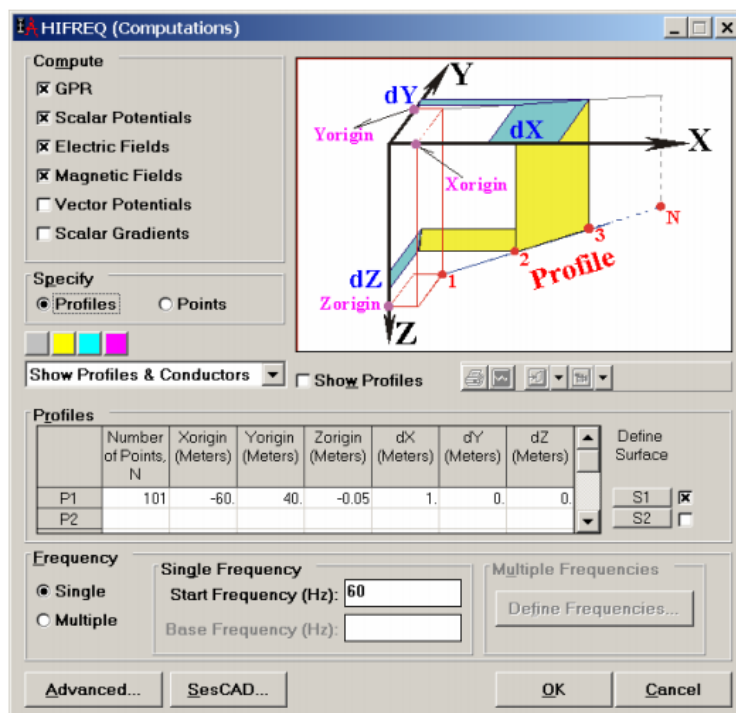
Στην επιλογή System, έχουμε τη δυνατότητα, στις επιλογές Characteristics, Conductor Currents και Energization της υποενότητας Define, να εισάγουμε τα χαρακτηριστικά των αγωγών, όπως ο τύπος και το εξωτερικό τους κάλυμμα, καθώς και τα απαιτούμενα ρεύματα ή τάσεις για την ενεργοποίησή τους. Στη συνέχεια εισάγουμε το δίκτυο των αγωγών και το ενεργοποιούμε στην υποενότητα Main-Ground Conductors.



Σχήμα 3.5 Εισαγωγή δικτύου και χαρακτηριστικών του

Για να δούμε το δίκτυο των αγωγών, μπορούμε στην οθόνη HIFREQ(System) να πατήσουμε την επιλογή Show Data.

Με την επιλογή Computations, στην αρχική οθόνη, μπορούμε να προσδιορίσουμε τις φυσικές ποσότητες που θέλουμε να υπολογιστούν, την θέση των σημείων παρατήρησης και τις ζητούμενες συχνότητες για τις οποίες θα γίνουν οι μετρήσεις.



Σχήμα 3.6 Εισαγωγή profile

Στην επιλογή Specify επιλέγουμε Profiles.

Τον αριθμό των σημείων παρατήρησης, καθώς και τη μορφή του πεδίου στο οποίο θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις, το καθορίζουμε εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα στον πίνακα Profiles. Στα πεδία dX, dY, dZ καθορίζεται η απόσταση μεταξύ των Profiles στους τρεις άξονες.

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

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

3.2.2 SESCAD

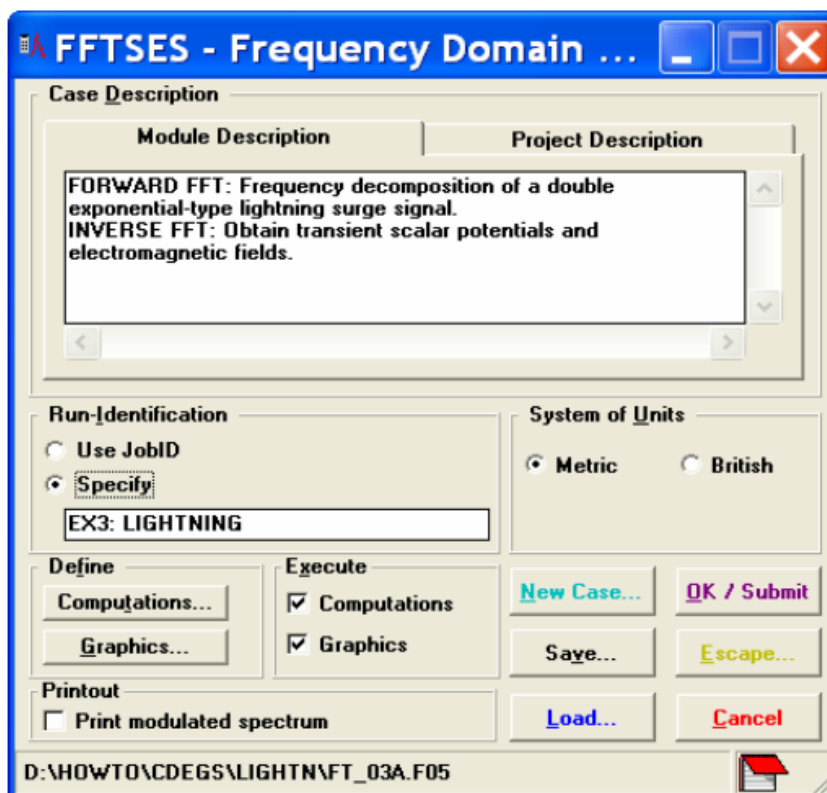
Η εφαρμογή SesCAD είναι ένα γραφιστικό εργαλείο για τον εύκολο σχεδιασμό συστημάτων και δικτύων αγωγών. Παρέχει πολλές ευκολίες για τον σχεδιασμό απλών και πολύπλοκων αντικειμένων, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων, ευκολόχρηστων δυναμικών εργαλείων. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα παρακολούθησης του σχεδιαζόμενου τρισδιάστατου δικτύου από διαφορετικές οπτικές γωνίες, ενώ έχει και δυνατότητες εστίασης έως και 1 εκατομμύριο φορές.

Με αυτή την εφαρμογή μπορούμε να σχεδιάσουμε μεγάλα ολοκληρωμένα δίκτυα πυλώνων υψηλής τάσης με τις βάσεις, τα πλέγματα γείωσης τους και περιφερειακά στοιχεία που μας ενδιαφέρουν, όπως μεταλλικούς φράχτες, ενώ μπορεί να γίνει και ο γραφικός καθορισμός του πεδίου στο οποίο θέλουμε να γίνουν οι μετρήσεις μας.

Στο γραφικό περιβάλλον SesCAD ο σχεδιασμός του πλέγματος και των αγωγών γίνεται επιλέγοντας Edit → Create Object και στη συνέχεια Grid ή Simple Conductor αντίστοιχα και ο σχεδιασμός των ράβδων επιλέγοντας Tools → Create Rods. Επιλέγοντας Detailed Grid προσδιορίζουμε την ακριβή θέση του πλέγματος ενώ με την επιλογή Simple Grid ορίζουμε τις διαστάσεις του πλέγματος, το οποίο τοποθετείται αυτόματα συμμετρικά του άξονα yy' .

3.2.3 FFTSES

Επιλέγοντας την εφαρμογή FFTSES μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ευθύ μετασχηματισμό Fourier, από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων, καθώς και αντίστροφο.



Σχήμα 3.7 Αρχική οθόνη επιλύτη FFTSES

Στην αρχική οθόνη της εφαρμογής υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής σχολίων για την δοκιμή που θα πραγματοποιήσουμε, με την επιλογή Module Description. Επίσης, μπορούμε όπως και στο HIFREQ να επιλέξουμε σύστημα μονάδων, μεταξύ μετρητικού και βρετανικού, για την ανάλυσή μας.

Στην επιλογή Computations, επιλέγουμε τι είδος μετασχηματισμού Fourier θέλουμε να πραγματοποιήσουμε και ποιες φυσικές ποσότητες θα μετέχουν σε αυτόν. Επιλέγοντας ευθύ μετασχηματισμό, το κουμπί Lightning Surge είναι προεπιλεγμένο, ενεργοποιώντας μια εσωτερική συνάρτηση του προγράμματος.

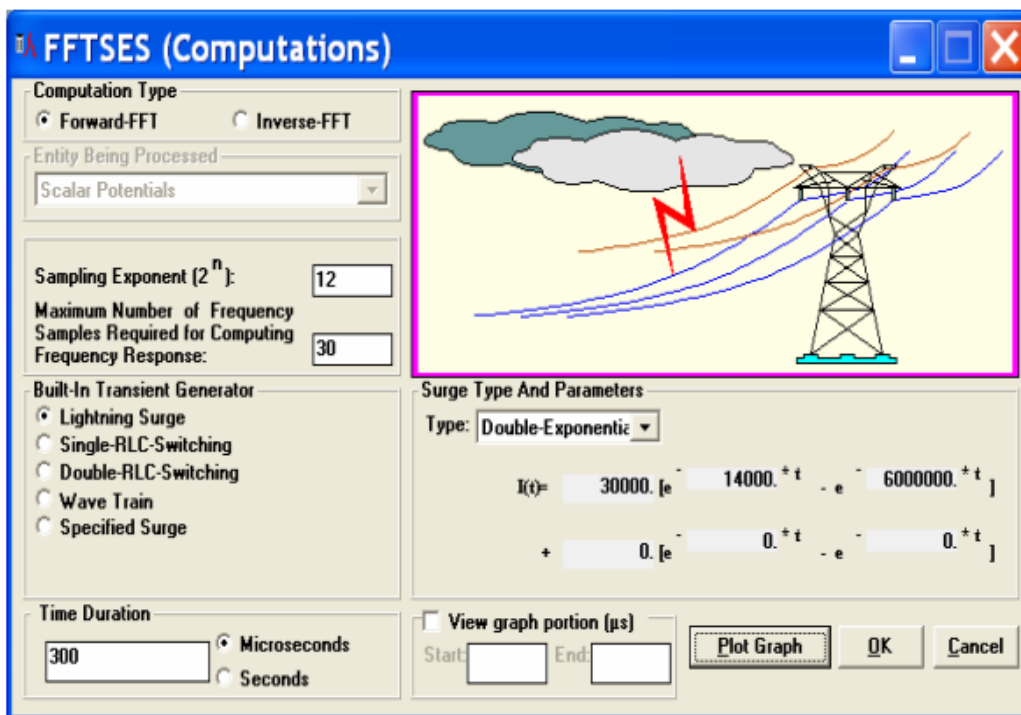
Επιλέγοντας Sampling Exponent καθορίζουμε τον αριθμό των σημείων (N) που ενεργοποιούνται για τον υπολογισμό και την ψηφιοποίηση του χρονικού σήματος ($N=2^{SE}$). Τα δεδομένα που εισάγουμε στην επιλογή Time-Duration καθορίζουν το χρονικό παράθυρο T για το κυματικό σήμα.

Αυτά τα δύο στοιχεία είναι και τα σημαντικότερα για την ψηφιοποίηση του σήματος στο πεδίο του χρόνου.

Το πρώτο κριτήριο στην επιλογή του T είναι ότι το σήμα πρέπει, για χρόνους μεγαλύτερους του T, να γίνεται αμελητέο. Το δεύτερο κριτήριο είναι ότι το T πρέπει

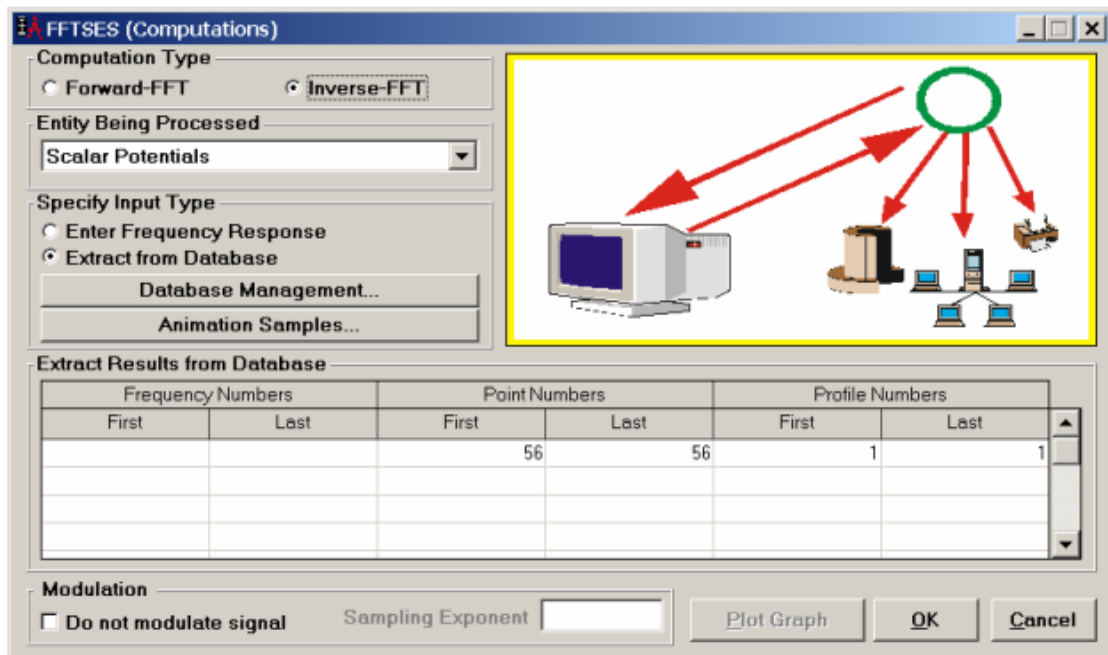
να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το βήμα συχνότητας $\Delta f=1/T$ να γίνεται αρκετά μικρό, ώστε να μπορεί να αναγνωριστεί οποιαδήποτε αιχμή λόγω αντήχησης μπορεί να εμφανιστεί στο πεδίο συχνοτήτων. Αυτό το κριτήριο είναι συνήθως άγνωστο μέχρι να γίνει ο μετασχηματισμός στο πεδίο συχνοτήτων. Όταν το T επιλεγεί, το N πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο που το χρονικό διάστημα $\Delta t=T/N$ να είναι αρκετά μικρό για να διατηρεί όλα τα χαρακτηριστικά του χρονικού σήματος.

Οι απαραίτητοι συντελεστές στην εξίσωση του σήματος εισάγονται στην επιλογή Double Exponential Surge Coefficients. Πατώντας στην επιλογή Plot Graph μπορεί να δει κανείς την κυματομορφή του ρεύματος.



Σχήμα 3.8 Εισαγωγή στοιχείων κεραυνικού ρεύματος και παραμέτρων ευθύ μετασχηματισμού Fourier

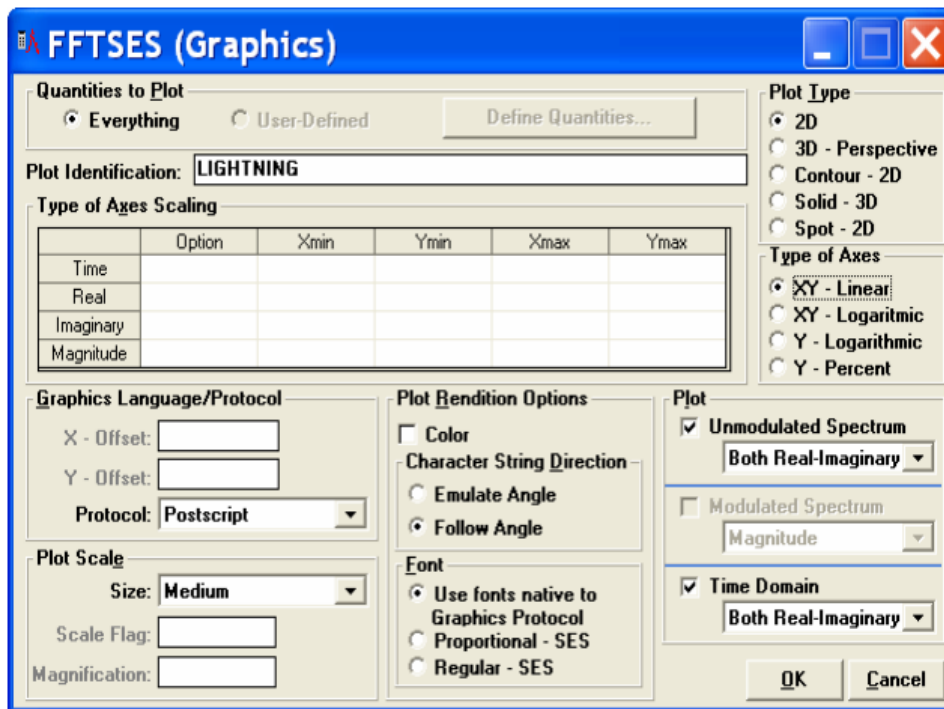
Αν επιλέξουμε να γίνει αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier εμφανίζεται η ακόλουθη οθόνη.



Σχήμα 3.9 Εισαγωγή στοιχείων αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier και επιθυμητών μετρούμενων ποσοτήτων

Στο κουτάκι Entity Being Processed επιλέγουμε την ποσότητα για την οποία θέλουμε να γίνει αντίστροφος Fourier. Επίσης μπορούμε στην ένδειξη Specify Input Type να επιλέξουμε αν η απόκριση του συστήματος στο πεδίο συχνοτήτων θα καθοριστεί από δεδομένα που θα εισάγει ο χρήστης ή από αρχεία στην βάση δεδομένων του προγράμματος.

Στην αρχική οθόνη της εφαρμογής υπάρχει και η επιλογή Graphics, στην οποία μπορούμε να εισάγουμε τον τίτλο που θέλουμε να εμφανίζεται στις γραφικές μας παραστάσεις, το πρωτόκολλο που ακολουθείται, την κλίμακα, τον τύπο των αξόνων και τον τύπο της γραφικής παράστασης, π.χ. δισδιάστατη. Επίσης, μπορούμε στην επιλογή Unmodulated Spectrum και στην Time Domain, να διαλέξουμε αν θέλουμε να εμφανίζονται στην γραφική, τόσο τα πραγματικά όσο και τα φανταστικά μέρη του σήματος ρεύματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας.



Σχήμα 3.10 Επιλογές γραφικών παραστάσεων του επιλύτη FFTSES

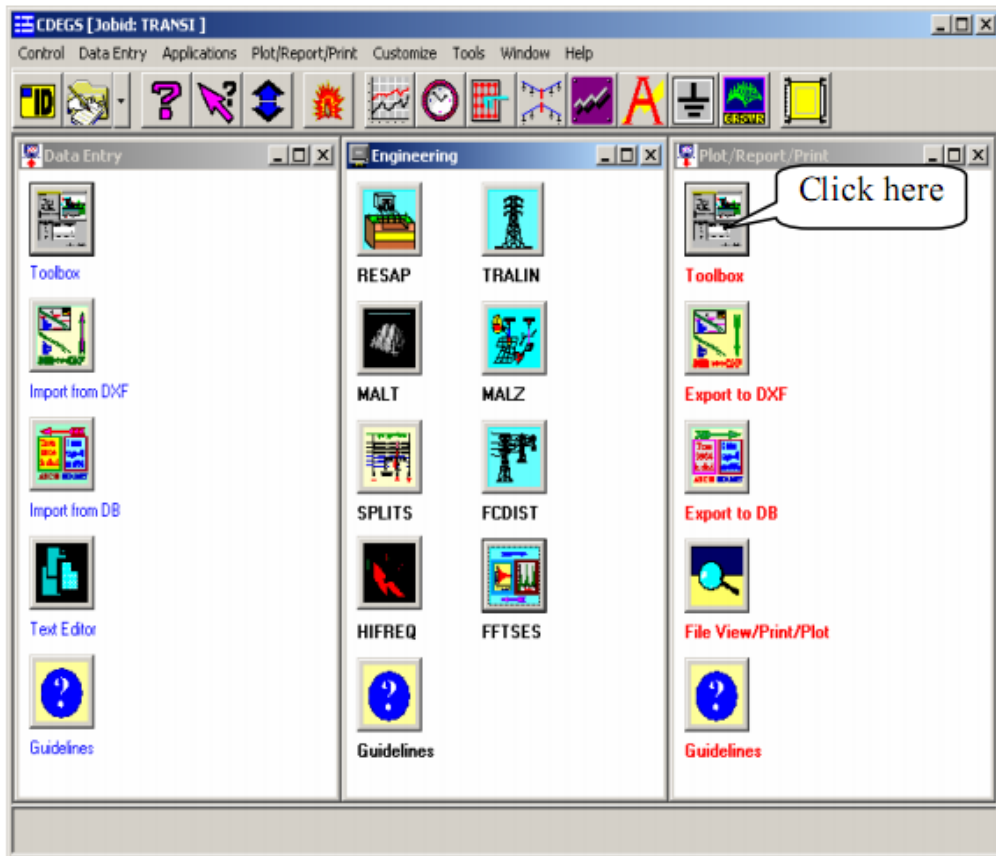
Επιστρέφουμε στο αρχικό παράθυρο του FFTSES και επιλέγουμε OK/Submit.

3.3 Προσομοίωση

Αφού επιλέξουμε Submit All στο Toolbox, πατάμε στο κουμπί HIFREQ ή FFTSES στο παράθυρο Engineering. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η προσομοίωση του συστήματος που σχεδιάσαμε, στις συνθήκες που ορίσαμε και υπολογίζονται τα δεδομένα που καθορίσαμε (π.χ. ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο) (HIFREQ) και ο ευθύς ή αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier (FFTSES).

3.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

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

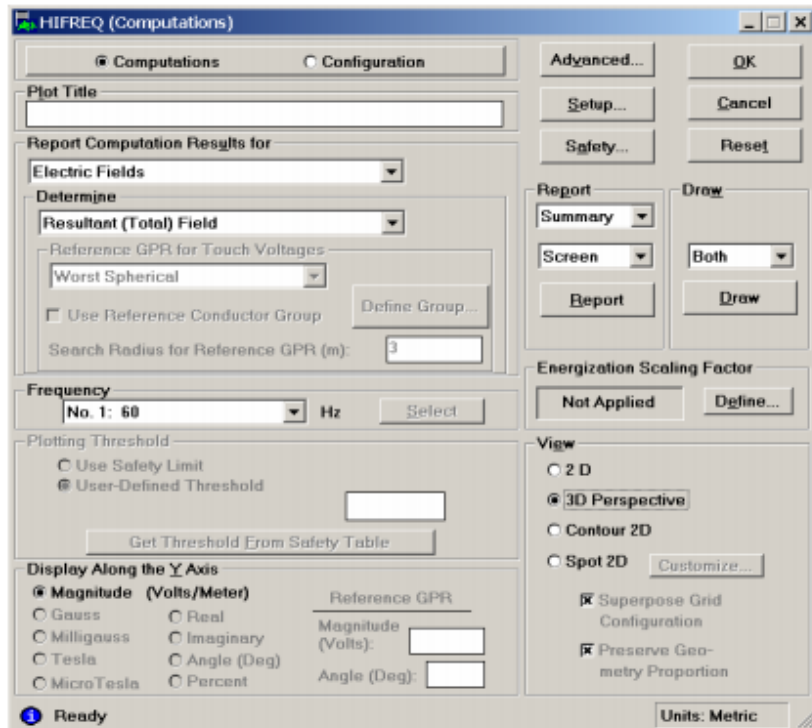


Σχήμα 3.11 Οθόνη CDEGS

Εδώ μας ενδιαφέρουν οι εφαρμογές HIFREQ και FFTSES.

3.4.1 HIFREQ

Επιλέγοντας την εφαρμογή εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο επιλογών:



Σχήμα 3.12 Επιλογές γραφικών παραστάσεων του επιλύτη HIFREQ

Πατάμε την επιλογή Computations. Μπορούμε να εισάγουμε το όνομα που θέλουμε να δώσουμε στην γραφική παράσταση στην επιλογή Plot Title.

Στο κουτάκι Report Computation Results for μπορούμε να διαλέξουμε το στοιχείο το οποίο θέλουμε να εμφανιστεί στην γραφική (π.χ. Electric Field).

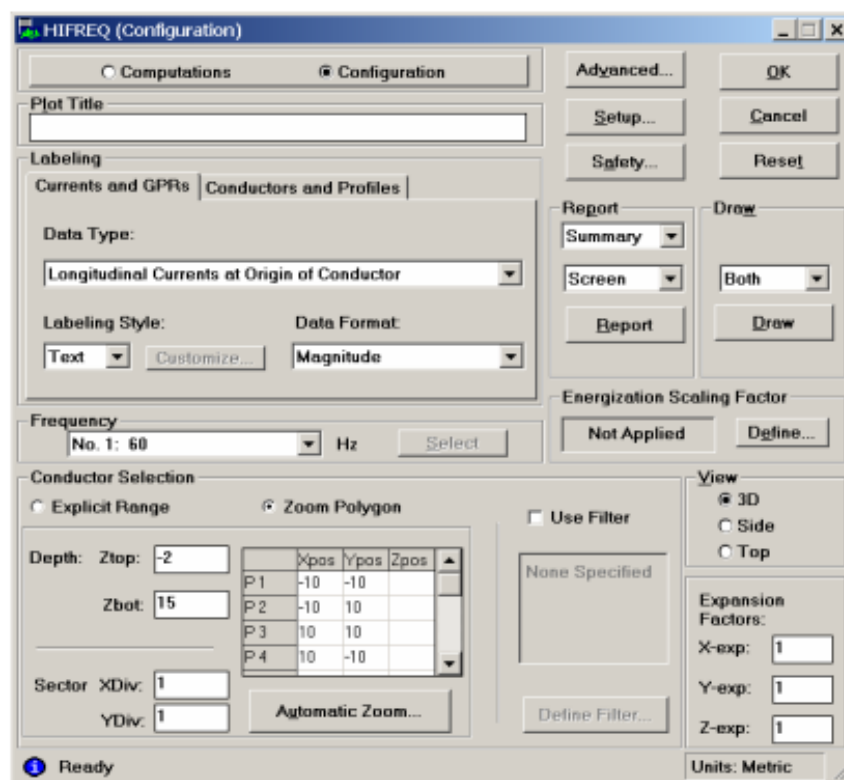
Επιλέγουμε την συχνότητα για την οποία θέλουμε να γίνει η γραφική (επιλογή Frequency), ενώ μπορούμε να ζωγραφίσουμε την γραφική με διαφορετικά χρώματα, βάζοντας όρια στις τιμές της γραφικής με βάση κάποιους κανονισμούς, είτε με δική μας πρωτοβουλία αν έχουμε συγκεκριμένες προδιαγραφές (επιλογή Plotting Threshold).

Μπορούμε να καθορίσουμε, επίσης, τις μονάδες μέτρησης που θέλουμε να εμφανίζονται ανάλογα με το εκάστοτε μέγεθος, στον y άξονα.

Τέλος, επιλέγουμε το είδος της γραφικής που επιθυμούμε (π.χ. τρισδιάστατη) και στην επιλογή Draw διαλέγουμε το Both, ώστε η γραφική παράσταση να εμφανιστεί και στην οθόνη και να αποθηκευτεί σε ένα αρχείο.

Στην επιλογή Setup, μπορούμε να καθορίσουμε όρια για τις συντεταγμένες x,y,z, για να εμφανίσουμε και συγκεκριμένα κομμάτια της γραφικής, που θέλουμε να εμφανιστούν.

Επιλέγοντας Configuration στην αρχική οθόνη εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο:



Σχήμα 3.13 Εισαγωγή επιθυμητών χαρακτηριστικών των γραφικών παραστάσεων του επιλύτη HIFREQ

Εδώ μπορούμε με την επιλογή Data Type να καθορίσουμε, από μία σειρά επιλογών, ποια συγκεκριμένα ρεύματα ή τάσεις, θέλουμε να παραστήσουμε γραφικά. Ακόμη, μπορούμε να καθορίσουμε αν θέλουμε να υπολογιστεί και να παρασταθεί γραφικά το μέτρο του διανυσματικού μεγέθους, η γωνία του ή να εμφανιστεί το πραγματικό ή το φανταστικό του μέρος. Υπάρχει και η επιλογή εμφάνισης του μεγέθους σαν κείμενο στην γραφική, ή με χρωματικό κώδικα, όπου στο κάθε χρώμα αντιστοιχεί ένα εύρος τιμών του μεγέθους.

Με την επιλογή Conductor Selection μπορούμε να επιλέξουμε συγκεκριμένους αγωγούς για τους οποίους θέλουμε να γίνουν οι υπολογισμοί. Αν επιλέξουμε το κουτάκι Use ZOOM Polygon, μπορούμε με τα 4 πεδία P1 έως και P4 να καθορίσουμε μία ορθογωνική περιοχή στο επίπεδο X-Y και με το Depth να δημιουργήσουμε ένα τρισδιάστατο ορθογωνικό κουτί επιλογής αγωγών, σε αυτήν την περιοχή.

Η επιλογή Energization Scaling Factor είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη λήψη αποτελεσμάτων προσομοιώσεων. Οι τάσεις επαφής, οι βηματικές τάσεις, τα ρεύματα

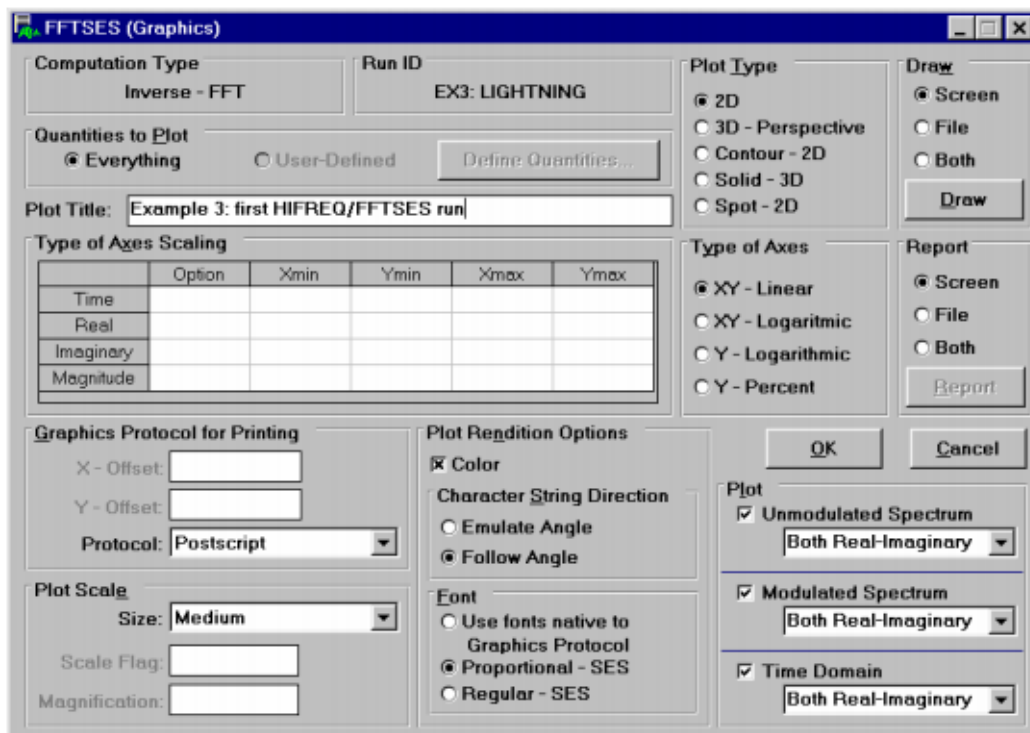
και όλα τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη που υπολογίζουμε είναι ανάλογα του μεγέθους του ρεύματος ή της τάσης ενεργοποίησης του συστήματος. Για παράδειγμα, αν διπλασιαστεί το ρεύμα σφάλματος που εγχέεται στο σύστημα και αυτή είναι η μόνη πηγή ενέργειας που υπάρχει τη δεδομένη στιγμή, τότε και όλες οι παραπάνω ποσότητες θα διπλασιαστούν. Επιλέγοντας, λοιπόν, κατάλληλο συντελεστή ενεργοποίησης προκύπτουν γραφικές ζητούμενων μεγεθών για διαφορετικά σενάρια ενεργοποίησης του δικτύου, χωρίς να χρειάζεται η επανάληψη της διαδικασίας για τον επιλύτη HIFREQ.

Στη συνέχεια επιλέγουμε Both και Draw.

Πατάμε OK στην οθόνη του HIFREQ και αφού επιστρέψουμε στο Toolbox πατάμε Exit.

3.4.2 FFTSES

Η οθόνη για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ως εξής:



Σχήμα 3.14 Επιλογές γραφικών παραστάσεων του επιλύτη FFTSES

Αφού επιλέξουμε τίτλο για την γραφική παράσταση, μπορούμε να καθορίσουμε ποια από τα μεγέθη που είχαμε επιλέξει ότι θέλουμε να υπολογιστούν, θέλουμε να εμφανίσουμε στην γραφική παράσταση.

Έχουμε τη δυνατότητα διαφορετικών τύπων γραφικών παραστάσεων, όπως και στην εφαρμογή HIFREQ, ενώ μπορούμε να καθορίσουμε και τον τύπο των αξόνων μας (π.χ. λογαριθμικοί).

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του τρόπου εμφάνισης των σχεδιαζόμενων διανυσματικών στοιχείων (σαν διάνυσμα, μόνο το μέτρο, μόνο η γωνία, πραγματικό, φανταστικό μέρος). Ακόμη μπορούμε να θέσουμε όρια στους άξονες, ώστε να περιορίσουμε το πεδίο ενδιαφέροντός μας με την επιλογή Types of Axes Scaling, ενώ με την επιλογή Plot Scale καθορίζουμε το μέγεθος που θέλουμε να έχουν οι γραφικές μας παραστάσεις.

Στις επιλογές Unmodulated Spectrum, Modulated Spectrum και Time Domain επιλέγουμε αν θέλουμε στην γραφική για καθένα από αυτά, να εμφανιστούν και τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη των ποσοτήτων που υπολογίζουμε.

Τέλος, έχουμε την επιλογή Draw με την οποία, όπως και στο HIFREQ επιλέγουμε αν θέλουμε η γραφική παράσταση να εμφανιστεί στην οθόνη και να αποθηκευτεί σε αρχείο.

Πατάμε το κουμπί Draw και μπορούμε να επιστρέψουμε στην αρχική οθόνη του CDEGS.

3.5 AUTOTRANSIENT

Το εργαλείο AutoTransient αυτοματοποιεί τα «μηχανικά» μέρη της ανάλυσης μεταβατικών φαινομένων με τις εφαρμογές HIFREQ και FFTSES.

Ουσιαστικά, τρέχει και τα δύο προγράμματα, χρησιμοποιώντας τις συχνότητες υπολογισμών που εισάγονται στο FFTSES, για να τρέξει το HIFREQ, μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια που έχει εισάγει ο χρήστης, για τερματισμό της εφαρμογής.

Επίσης δημιουργεί τη βάση δεδομένων των υπολογισμών του FFTSES από τα αποτελέσματα της βάσης δεδομένων του HIFREQ (αρχεία F21).

3.5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το πρόγραμμα AutoTransient πραγματοποιεί, αυτόματα, τα συγκεκριμένα βήματα της ανάλυσης HIFREQ-FFTSES. Ξεκινώντας από τα πρότυπα αρχεία HIFREQ και FFTSES (που δημιουργούνται με το CDEGS Input Toolbox ή οποιονδήποτε άλλο editor), το πρόγραμμα πραγματοποιεί ευθύ μετασχηματισμό Fourier (Forward FFTSES) και βρίσκει ένα πρώτο σύνολο από προτεινόμενες συχνότητες υπολογισμών. Αφού τρέξει το HIFREQ στις δεδομένες συχνότητες, το πρόγραμμα πραγματοποιεί αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (Inverse FFTSES) και συνάγει το επόμενο σύνολο προτεινόμενων συχνοτήτων. Το τελευταίο βήμα επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού.

Μπορεί ο χρήστης να σταματήσει το πρόγραμμα από τη στιγμή που δεν υπάρχουν άλλες προτεινόμενες συχνότητες, όταν έχει παρέλθει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ή όταν έχει ολοκληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων της παραπάνω διαδικασίας.

Όταν τρέχει το HIFREQ, μπορεί ο χρήστης να επιλέξει αν θα τρέξει όλες τις προτεινόμενες συχνότητες ή μόνο μία κάθε φορά. Η τελευταία αυτή μέθοδος, η οποία μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρα, δίνει μεγάλο βαθμό ευελιξίας, από τη στιγμή που πολλές ηλεκτρικές ιδιότητες (ειδικές αντιστάσεις, διαπερατότητες, κτλ.) μπορούν να μεταβάλλονται με τη συχνότητα. Το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του εδάφους που εξαρτώνται από την συχνότητα μέσω ενός απλού παραθύρου.

Το πρόγραμμα πραγματοποιεί επαλήθευση στοιχείων μεταξύ HIFREQ και FFTSES, προς αποφυγή προβλημάτων κατά την ανάλυση.

Η ανάλυση μπορεί να διακοπεί σε οποιαδήποτε στιγμή από το χρήστη και να συνεχιστεί αργότερα από εκεί που την άφησε.

3.6 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

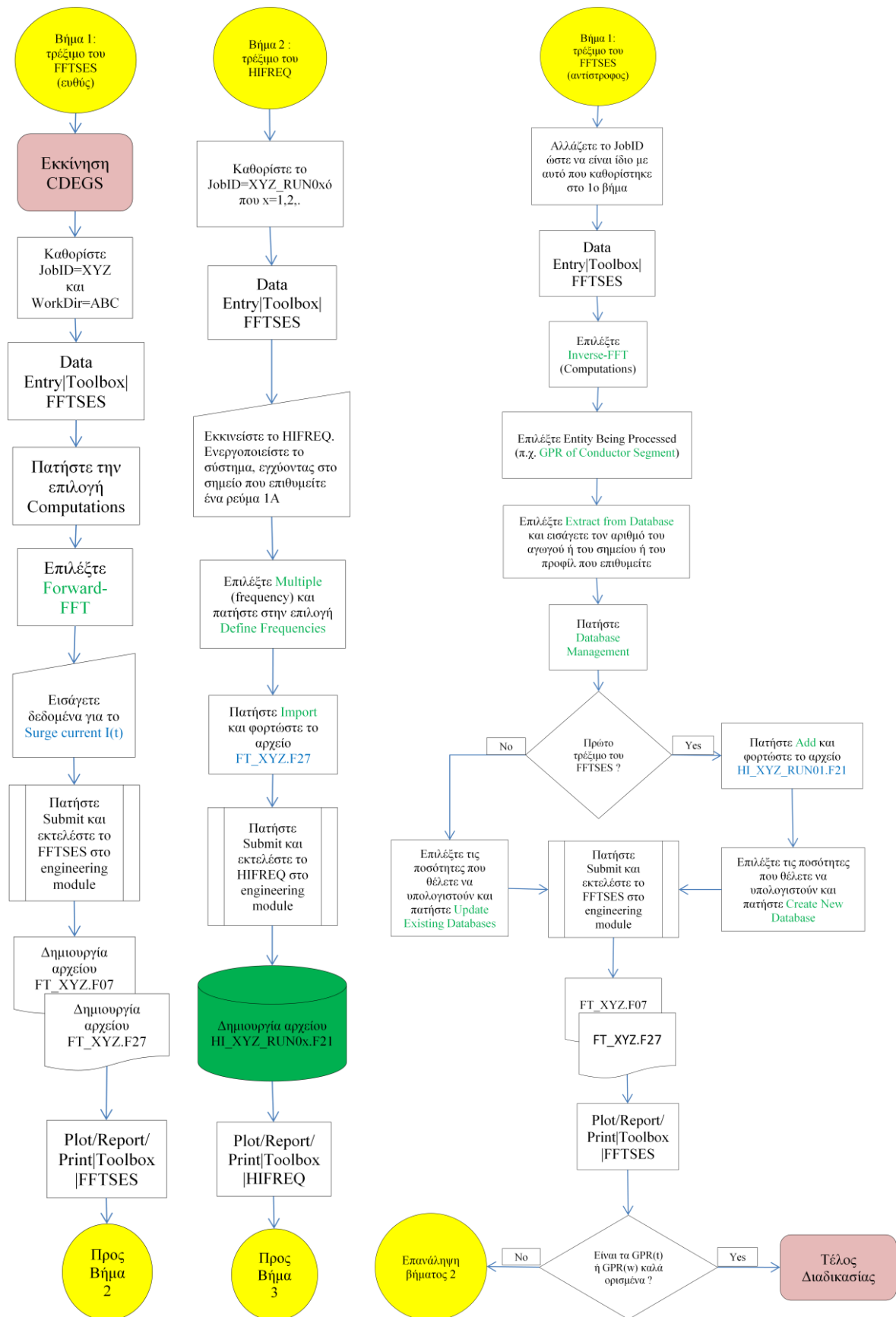
Τα βήματα μιας τυπικής μελέτης μεταβατικών φαινομένων είναι τα εξής:

1. **Ευθύς μετασχηματισμός Fourier:** Μετά την εισαγωγή της μορφής του κεραυνικού ρεύματος, υπολογίζεται από τον επιλύτη FFTSES το φάσμα της

συχνότητάς του. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα ο επιλύτης προτείνει ένα πλήθος κρίσιμων συχνοτήτων.

2. **Επιλογή δειγμάτων από το φάσμα συχνοτήτων:** Για να προσομοιωθεί σωστά η αιχμή του κεραυνικού ρεύματος, ο αριθμός των δειγμάτων για τον ευθύ μετασχηματισμό Fourier πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος. Για να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό των ζητούμενων μεγεθών από τον επιλύτη (HIFREQ), έχει δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος, ο οποίος επιλέγει ένα μικρό δείγμα συχνοτήτων που εκπροσωπούν ολόκληρο το φάσμα, για το οποίο γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί.
3. **Υπολογισμοί στο πεδίο της συχνότητας:** Ο επιλύτης HIFREQ υπολογίζει τις ηλεκτρομαγνητικές ποσότητες που μας ενδιαφέρουν, στις επιλεγμένες συχνότητες. Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται για μοναδιαία τάση ή μοναδιαίο ρεύμα ενεργοποίησης στο σημείο του δικτύου, που θεωρούμε ότι έχει συμβεί η κεραυνοπληξία. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την επιλογή Energization Scaling Factor μπορούμε να εισάγουμε το επιθυμητό μέγεθος ενεργοποίησης, δημιουργώντας διαφορετικά σενάρια. Οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν είτε σε μία επανάληψη είτε να χωριστούν σε περισσότερες.
4. **Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier:** Όταν ο επιλύτης HIFREQ ολοκληρώσει τους απαραίτητους υπολογισμούς, μπορεί το αρχείο που δημιουργείται να εισαχθεί στον επιλύτη FFTSES για την εκτέλεση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier, ώστε να γίνει αναγωγή των υπολογιζόμενων μεγεθών στο πεδίο του χρόνου.

Συνοπτικά τα βήματα λειτουργίας μιας τυπικής προσομοίωσης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.15 Βασικά βήματα προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις συστημάτων μεταφοράς υψηλών τάσεων, με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος CDEGS, με σκοπό τη μελέτη και τον υπολογισμό της κατανομής των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του εδάφους, σε περίπτωση κεραυνικού πλήγματος. Εξετάζουμε και συγκρίνουμε συστήματα πυλώνων με διαφορετικά είδη γειώσεων, σε διαφορετικές περιπτώσεις κεραυνικού πλήγματος, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των επικίνδυνων για τον άνθρωπο αναπτυσσόμενων τάσεων.

Σε όλες τις προσομοιώσεις το έδαφος θεωρήθηκε ομοιογενές. Η ειδική αντίσταση του αέρα είναι $10^{18}\Omega\text{m}$, ενώ η αντίστοιχη του εδάφους $100\Omega\text{m}$. Το κεραυνικό πλήγμα που προσομοιώθηκε είναι διπλοεκθετικής μορφής 8/20μs με αναλυτική έκφραση: $I(t) = 63496,04 \cdot (e^{-57762,27t} - e^{-231049,1t})$.

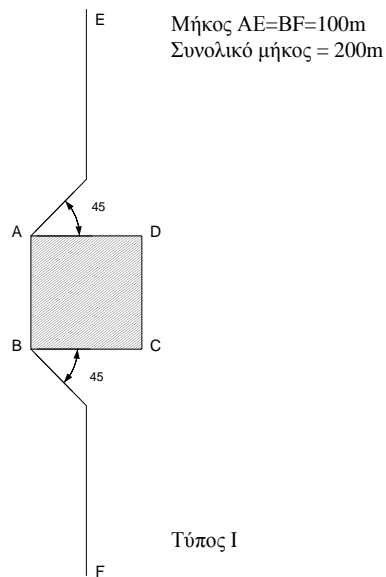
Οι αγωγοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαφορετικών τύπων για κάθε τμήμα του συστήματος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1. Η σχετική ειδική αντίσταση εκφράζεται σε α.μ. σε σχέση με την σχετική ειδική αντίσταση του ανοπτημένου χαλκού, ενώ η σχετική διαπερατότητα μ_r σε σχέση με το κενό.

Τύπος αγωγού	Σχετική ειδική αντίσταση (α.μ.)	Σχετική διαπερατότητα μ_r (α.μ.)	Εσωτερική ακτίνα R_{in} (m)
0	1	1	0
1	12	250	0
2	1,67	1	0
3	12	250	0,01

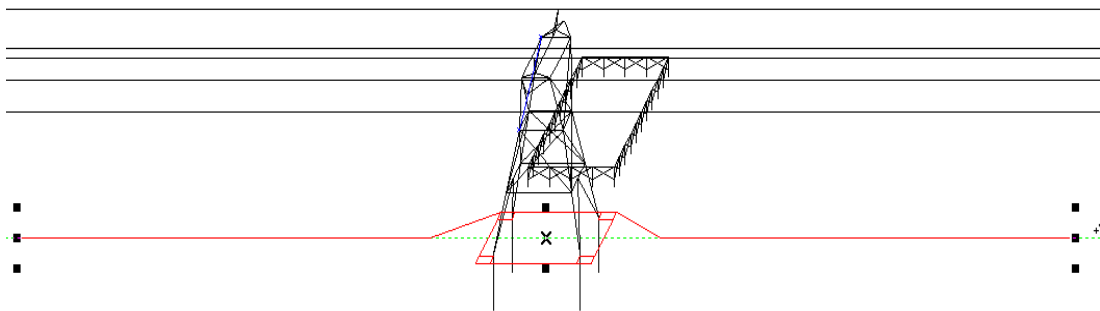
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά αγωγών

1^η περίπτωση

Θέλουμε να εξετάσουμε την επίδραση κεραυνικού πλήγματος σε σύστημα περισσότερων του ενός πυλώνων. Φτιάχνουμε, λοιπόν, μία γραμμή μεταφοράς μήκους 1745m, όπου ανά 350-400m έχουμε και έναν πυλώνα. Κάθε πυλώνας είναι κατασκευασμένος από ατσάλινους αγωγούς τύπου 1 ακτίνας 0,015m και έχει ύψος 24m. Σε απόσταση 8m υπάρχει φράχτης μεταλλικός μήκους 30m και πλάτους 12m. Αυτός, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, αποτελείται από 28 κάθετες ράβδους, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με χιαστί αγωγούς. Οι κάθετες ράβδοι, καθώς και το άνω τμήμα του φράχτη, είναι ατσάλινοι σωλήνες τύπου 3, εξωτερικής ακτίνας 0,02m. Τα χιαστί κομμάτια είναι ατσάλινοι αγωγοί τύπου 1 ακτίνας 0,003m. Επίσης, οι φάσεις είναι καλώδια 1565kcmil 36/7 ACSR τύπου 2 με ακτίνα 0,0126m και οι αγωγοί προστασίας είναι γαλβανισμένοι ατσάλινοι αγωγοί υψηλής αντοχής τύπου 1 ακτίνας 0,00475m. Ως σύστημα γείωσης χρησιμοποιείται σύστημα γείωσης τύπου I, που αποτελείται από χάλκινους αγωγούς ακτίνας 0,007m τύπου 0. Ο τύπος γείωσης, που είναι ίδιος για όλους τους πυλώνες, έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1 και φαίνεται στα σχήματα 4.1 και 4.2.



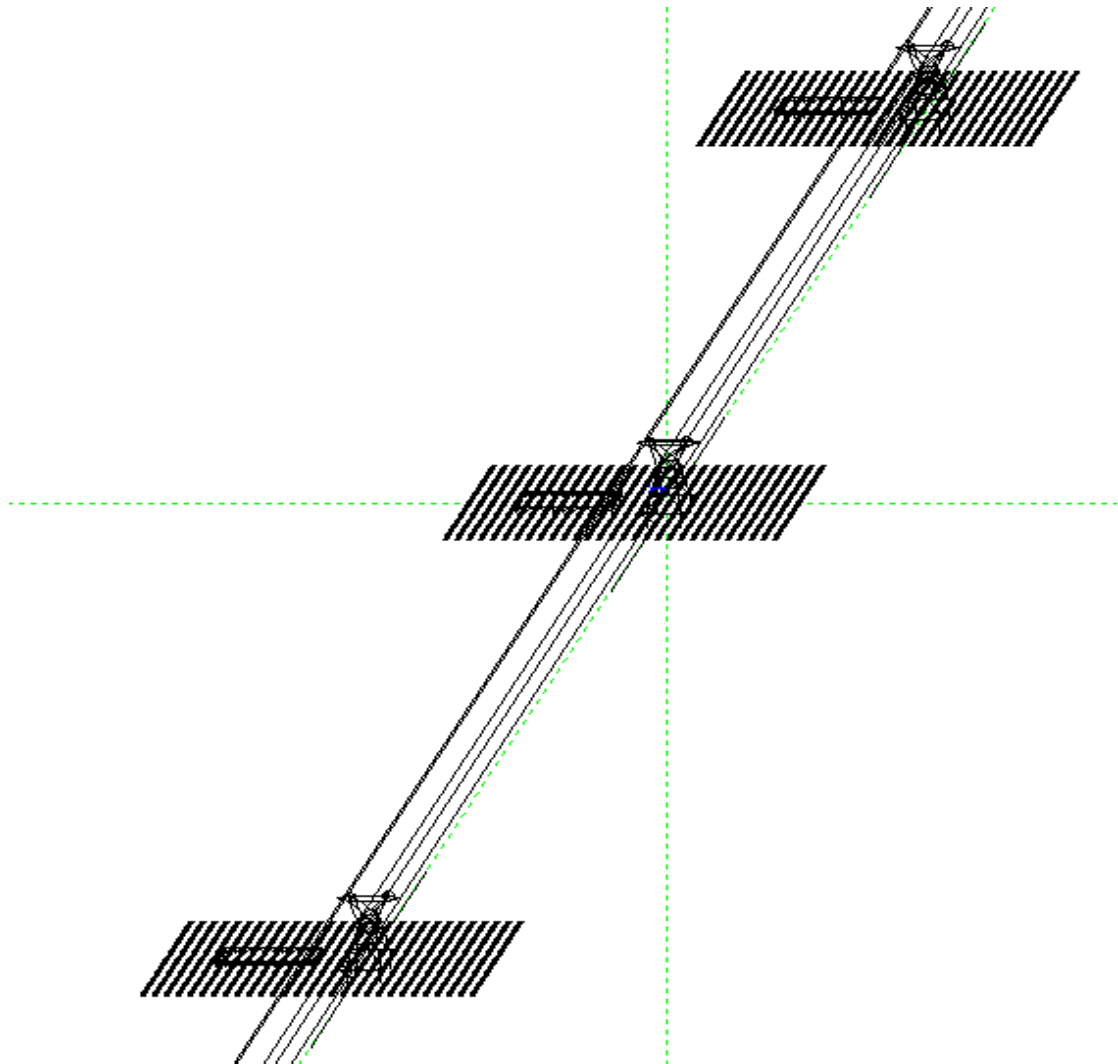
Σχήμα 4.1 Σύστημα γείωσης τύπου Ι



Σχήμα 4.2 Τμήμα του συστήματος της πρώτης περίπτωσης και επισήμανση της γείωσής του

Κάνουμε έγχυση ρεύματος στον έναν από τους δύο αγωγούς προστασίας 1A στα 10m από τον κεντρικό πυλώνα. Εκεί υποθέτουμε ότι εκδηλώνεται κεραυνικό πλήγμα. Λαμβάνουμε αποτελέσματα για την κατανομή των τάσεων σε όλους τους πυλώνες.

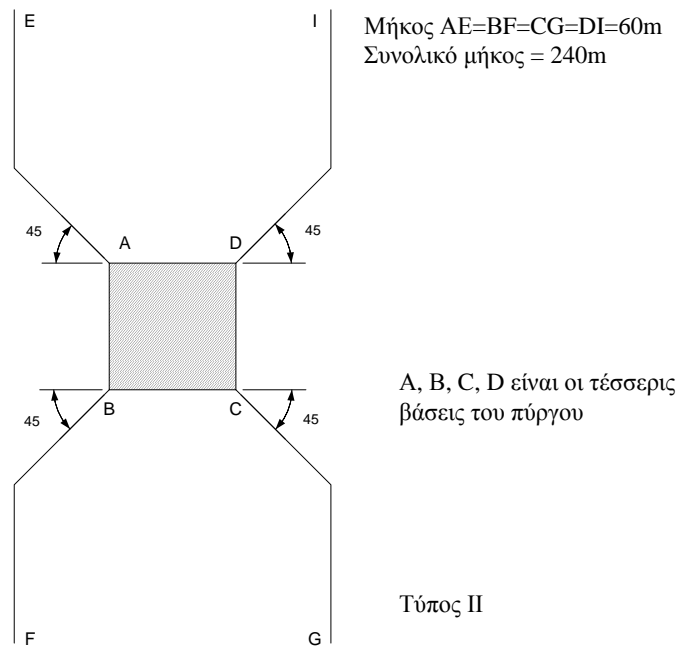
Το δίκτυο που θα μελετηθεί στην πρώτη περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 4.3.



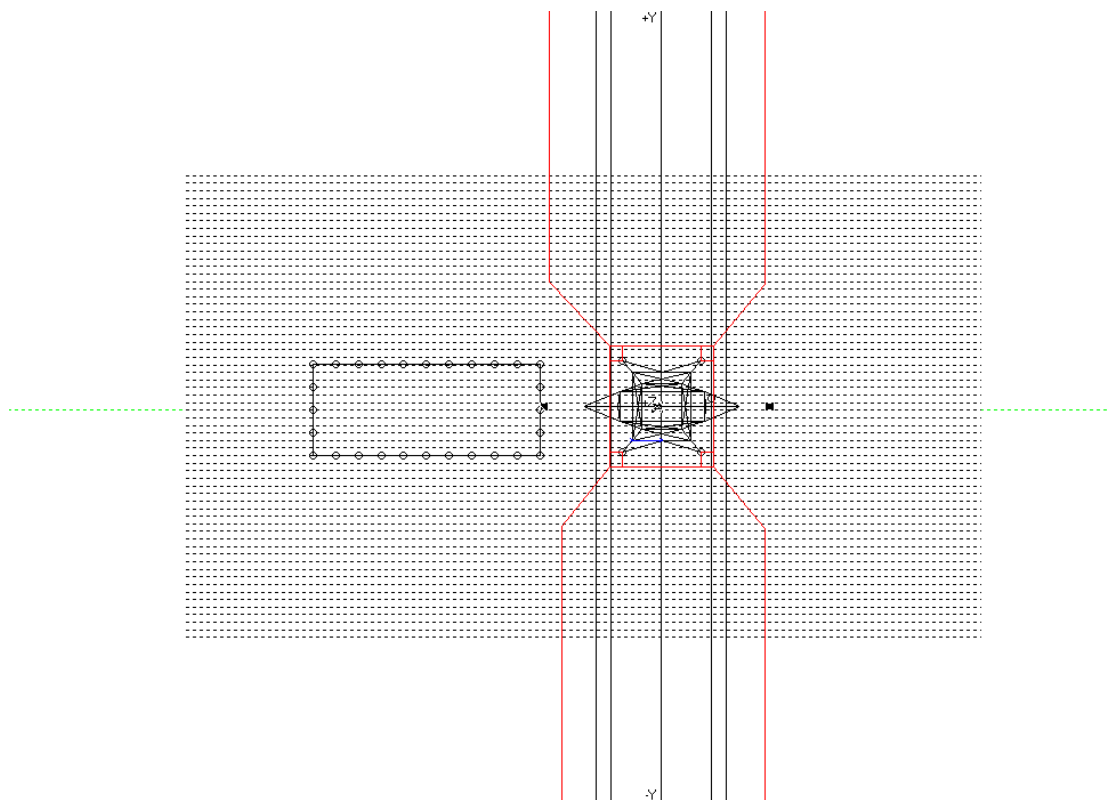
Σχήμα 4.3 Σύστημα πρώτης περίπτωσης

2^η περίπτωση

Στο σύστημα των 3 πυλώνων με τους μεταλλικούς φράχτες χρησιμοποιούμε ένα διαφορετικό σύστημα γείωσης. Το σύστημα γείωσης τύπου II, που έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1, φαίνεται στο σχήμα 4.4 και το τελικό σύστημά μας φαίνεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.4 Σύστημα γείωσης τύπου II

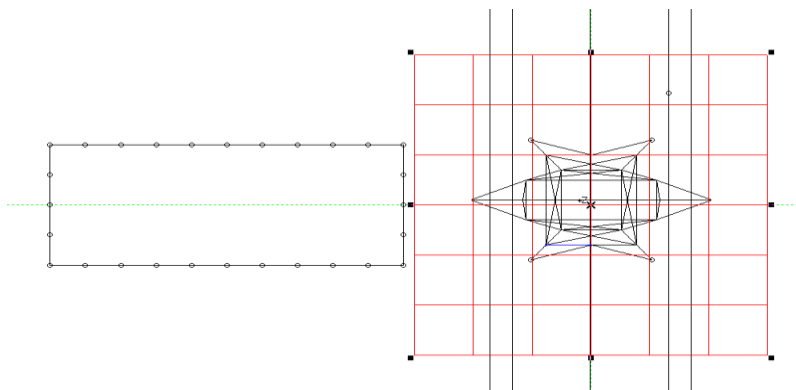


Σχήμα 4.5 Σύστημα δεύτερης περίπτωσης

Η έγχυση γίνεται πολύ κοντά στην κορυφή του κεντρικού πυλώνα του εξεταζόμενου συστήματος, ενώ λαμβάνουμε αποτελέσματα και από τους 3 πυλώνες.

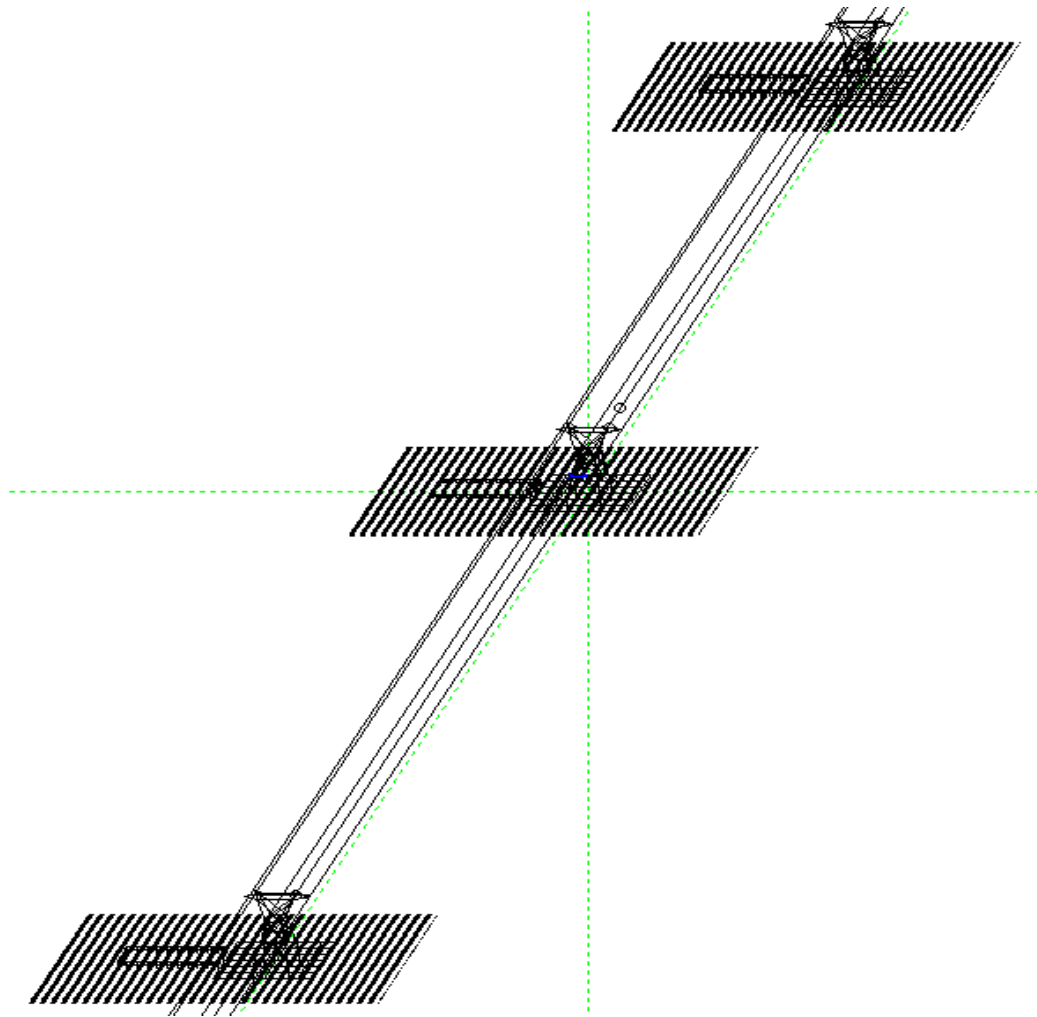
3^η περίπτωση

Διατηρούμε το υπάρχον σύστημα όπως έχει, εξετάζοντας ένα τρίτο διαφορετικό σύστημα γείωσης για τους πυλώνες. Χρησιμοποιούμε πλέγμα 30m x 30m, με “μάτι” 5m x 5m. Οι αγωγοί είναι χάλκινοι τύπου 0 με διατομή 120mm². Έτσι έχουμε το πλέγμα, που φαίνεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6 Τμήμα του συστήματος της τέταρτης περίπτωσης και επισήμανση της γείωσής του

Έχουμε, λοιπόν, το σύστημα του σχήματος 4.7, κάνουμε έγχυση σε απόσταση 10m από τον κεντρικό πυλώνα και λαμβάνουμε αποτελέσματα από την προσομοίωση σε όλους τους πυλώνες.



Σχήμα 4.7 Σύστημα τρίτης περίπτωσης

4^η περίπτωση

Κάνουμε έγχυση πολύ κοντά στην κορυφή του κεντρικού πυλώνα και λαμβάνουμε αποτελέσματα σε όλους τους πυλώνες, στους εξής δύο τύπους δικτύων:

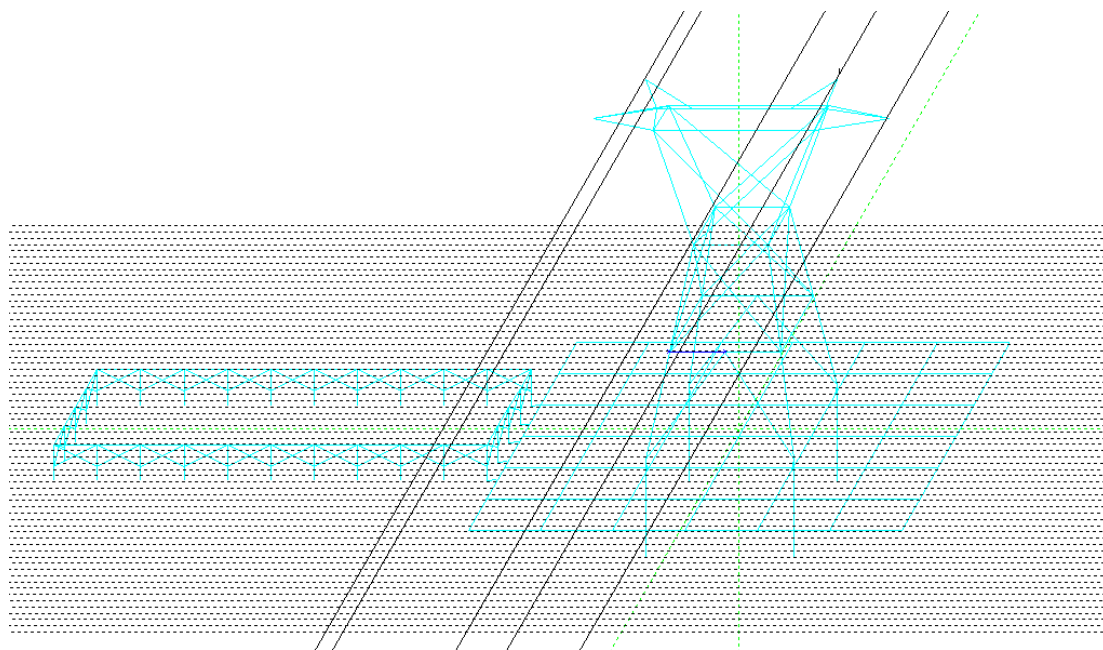
- 1) Δίκτυο 3 πυλώνων με σύστημα γείωσης τύπου I (σχήμα 4.3)
- 2) Δίκτυο 3 πυλώνων με πλέγμα γείωσης (σχήμα 4.7)

5^η περίπτωση

Κάνουμε έγχυση στο μέσο μεταξύ δύο πυλώνων και λαμβάνουμε αποτελέσματα σε όλους τους πυλώνες και των δύο συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση 4.

6^η περίπτωση

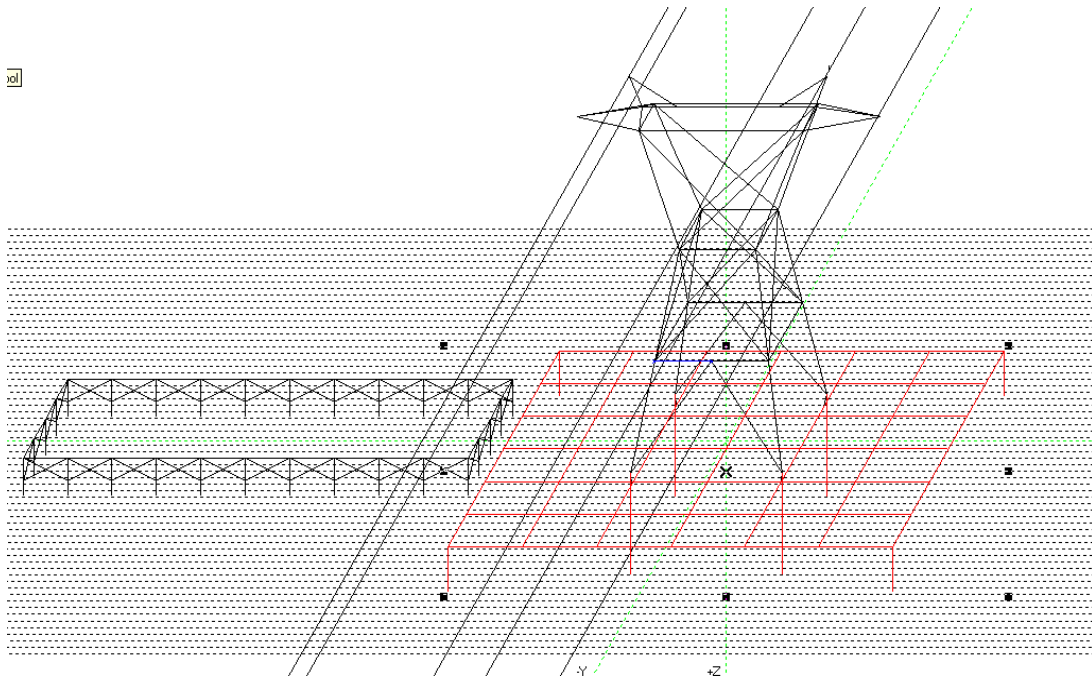
Στην προσπάθεια βελτίωσης της συμπεριφοράς του πλέγματος γείωσης, γειώνουμε τον φράχτη συνδέοντας την πλευρά προς τον πυλώνα με το πλέγμα γείωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Η έγχυση γίνεται πολύ κοντά στην κορυφή του κεντρικού πυλώνα και τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε όλους τους πυλώνες του συστήματος.



Σχήμα 4.8 Σύστημα έκτης περίπτωσης

7^η περίπτωση

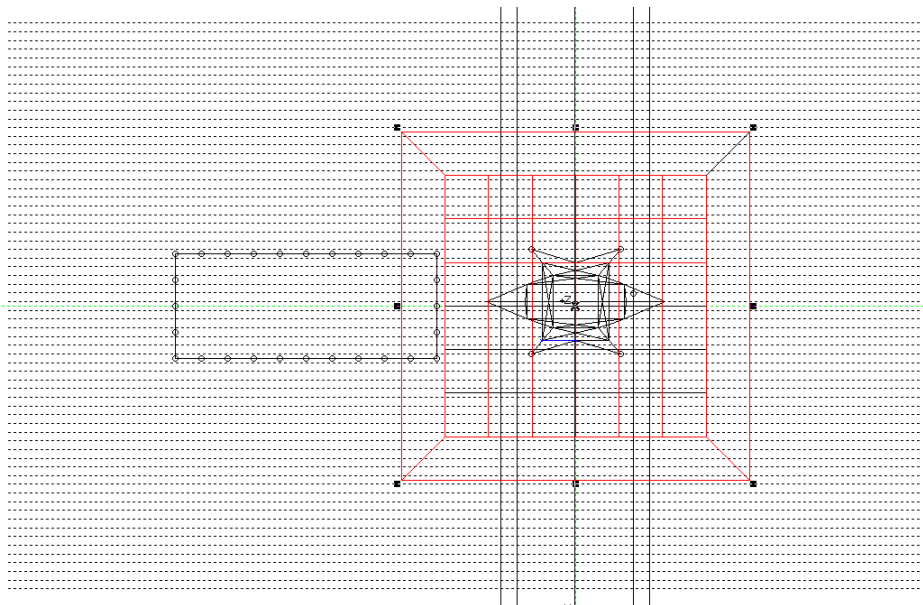
Τοποθετούμε στο πλέγμα γείωσης 4 πρόσθετες ράβδους γείωσης στα άκρα του, μήκους 3m. Εξετάζουμε την περίπτωση έγχυσης πολύ κοντά στον κεντρικό πυλώνα (σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9 Σύστημα έβδομης περίπτωσης

8^η περίπτωση

Γύρω από το πλέγμα γείωσης δημιουργούμε ένα τετράγωνο από πρόσθετες αγωγίμες ράβδους πλευράς 20m, το οποίο συνδέεται με το πλέγμα μέσω ράβδων στις 4 γωνίες του (σχήμα 4.10). Εξετάζεται η περίπτωση έγχυσης πολύ κοντά στον κεντρικό πυλώνα.



Σχήμα 4.10 Σύστημα όγδοης περίπτωσης

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

5.1 Σύγκριση με βάση το σύστημα γείωσης

Για να μπορέσουμε να αποφανθούμε σχετικά με την καταλληλότητα ενός συστήματος γείωσης πρέπει να εξετάσουμε την συμπεριφορά του σε όλο το φάσμα συχνοτήτων του κεραυνικού ρεύματος και να συγκρίνουμε τις εκάστοτε τιμές των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων που εμφανίζονται με τα προβλεπόμενα από τους κανονισμούς όρια ασφαλείας για τον άνθρωπο [1].

Με βάση τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν θα γίνει σύγκριση των 3 βασικών τύπων γείωσης που επιλέχθηκαν, οι οποίοι είναι οι συνηθέστεροι σε δίκτυα υψηλών τάσεων. Αυτοί είναι:

1. Ο τύπος γείωσης I
2. Ο τύπος γείωσης II
3. Το πλέγμα

Η έγχυση του κεραυνικού ρεύματος γίνεται πολύ κοντά στην κορυφή του κεντρικού πυλώνα του συστήματος (<1m) και η μέγιστη τιμή του είναι 10kA. Από την ανάλυση Fourier του κεραυνικού ρεύματος με την εφαρμογή FFTSES του προγράμματος CDEGS, που εξετάσαμε στο κεφάλαιο 3, προέκυψαν 19 βασικές συχνότητες στις οποίες μπορεί να αναλυθεί η διπλοεκθετική συνάρτηση. Για τη σύγκριση επιλέγουμε 5 εξ αυτών και συγκεκριμένα τις συχνότητες:

1. 6666,667Hz (3^n)
2. 33333,34Hz (10^n)
3. 5840001Hz (15^n)
4. 6813334Hz (17^n)

5. 6826667Hz (19th)

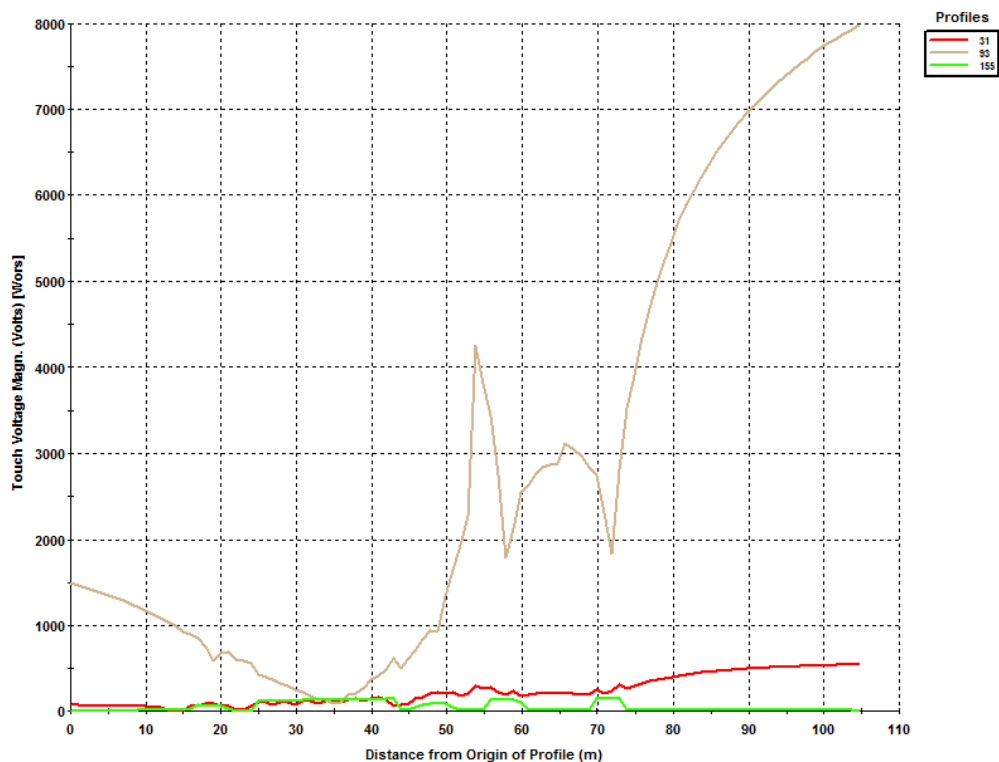
Τα δίκτυα που συγκρίνουμε είναι:

- Το δίκτυο της περίπτωσης 2, που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 (σχήμα 4.5)
- Το δίκτυο της περίπτωσης 4.1 (σχήμα 4.3)
- Το δίκτυο της περίπτωσης 4.2 (σχήμα 4.7)

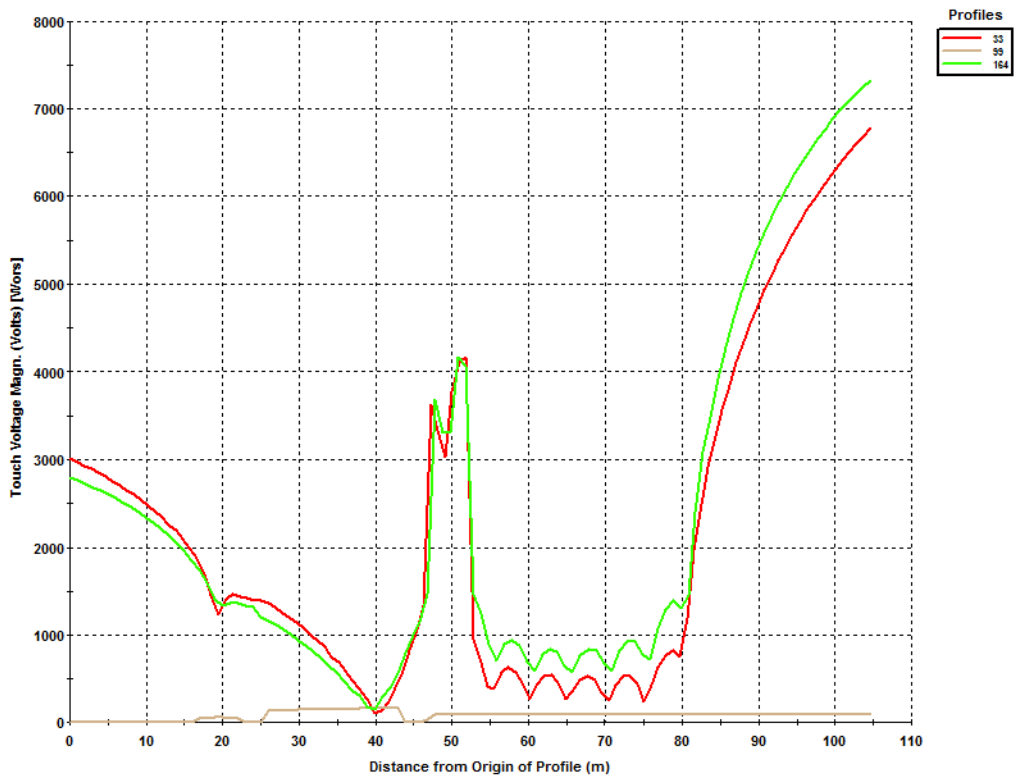
Εξετάζουμε τις τάσεις επαφής που αναπτύσσονται στο μέσο των προφίλ, που κόβουν συμμετρικά το σύστημά μας (πυλώνα με φράχτη). Για να είμαστε ακριβείς ως προς τα επιτρεπτά όρια, λαμβάνουμε υπόψιν μας τις μέγιστες τιμές που εμφανίζονται από το μεταλλικό τμήμα είτε του φράχτη είτε του πυλώνα και για απόσταση 1m περιμετρικά. Με βάση αυτές τις τιμές κάνουμε την σύγκρισή μας. Προς διευκρίνιση των κάτωθι γραφικών παραστάσεων λαμβάνεται υπόψιν ότι ο φράχτης βρίσκεται σε απόσταση 20m από το αριστερό άκρο του προφίλ και φτάνει μέχρι τα 50m, ενώ ο πυλώνας ξεκινά στα 58m και φτάνει μέχρι τα 72m. Έτσι, λοιπόν, εμείς εξετάζουμε τις μέγιστες τιμές μεταξύ 19-20m, 50-51m, 57-58m και 72-73m.

Τάσεις επαφής

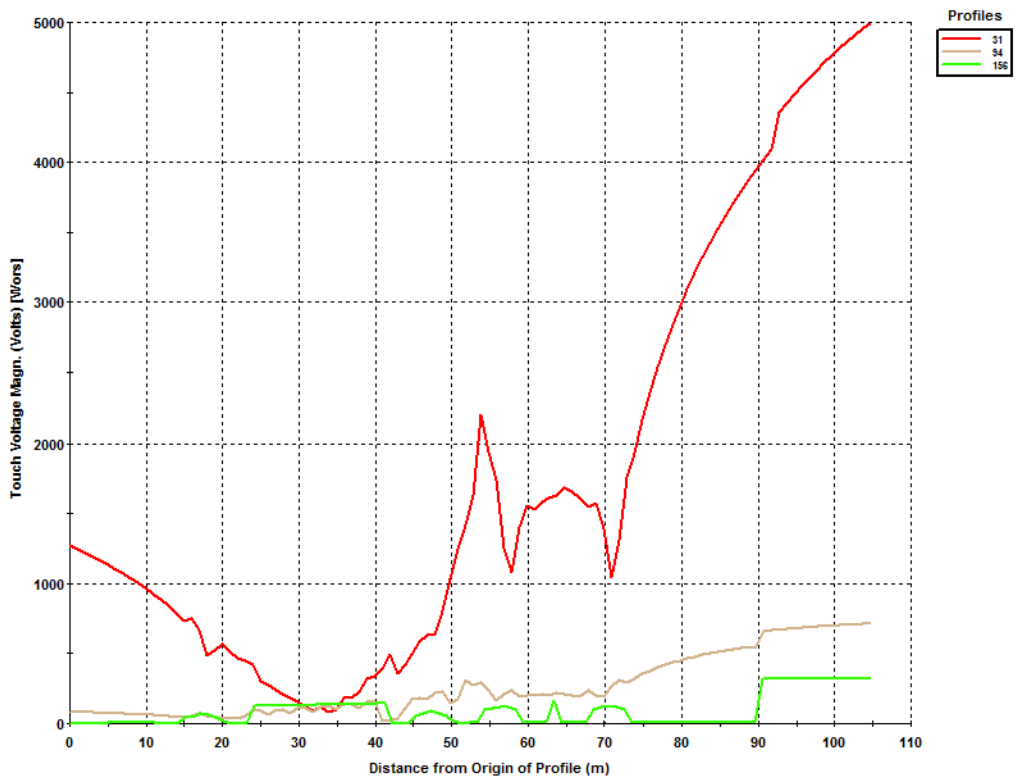
Συχνότητα 1 (6666,667Hz)



Σχήμα 5.1 Τάσεις επαφής συστήματος 4.1 στην πρώτη συχνότητα



Σχήμα 5.2 Τάσεις επαφής συστήματος 4.2 στην πρώτη συχνότητα

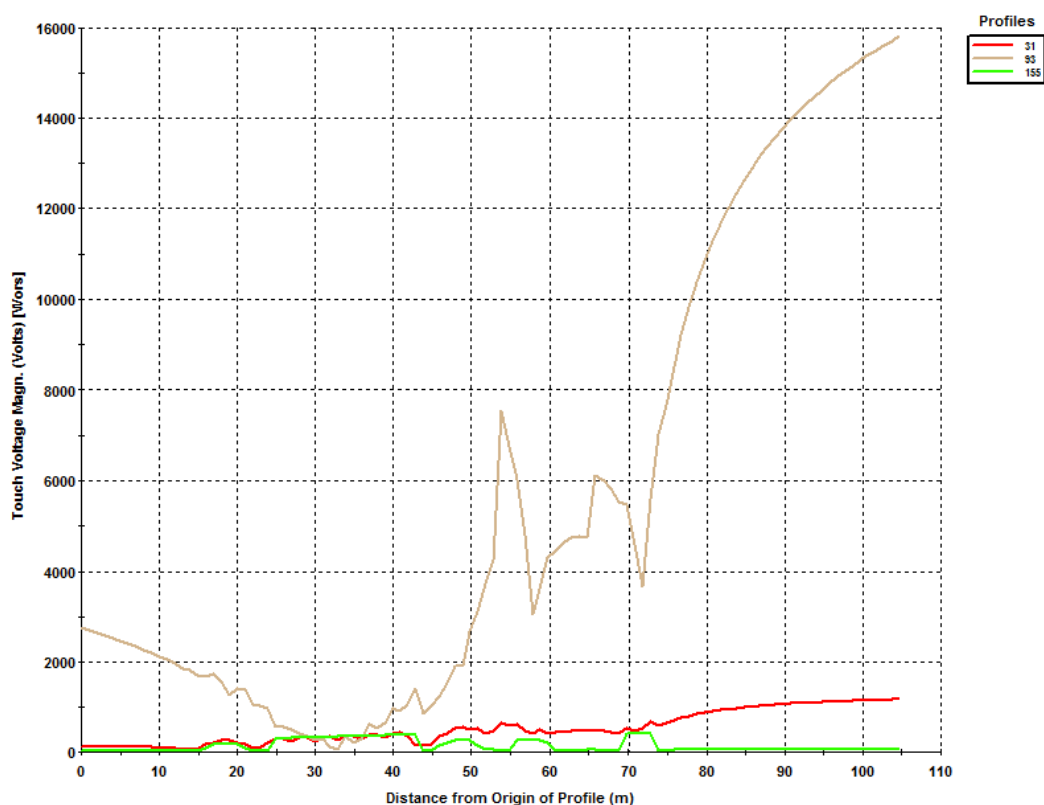


Σχήμα 5.3 Τάσεις επαφής συστήματος 2 στην πρώτη συχνότητα

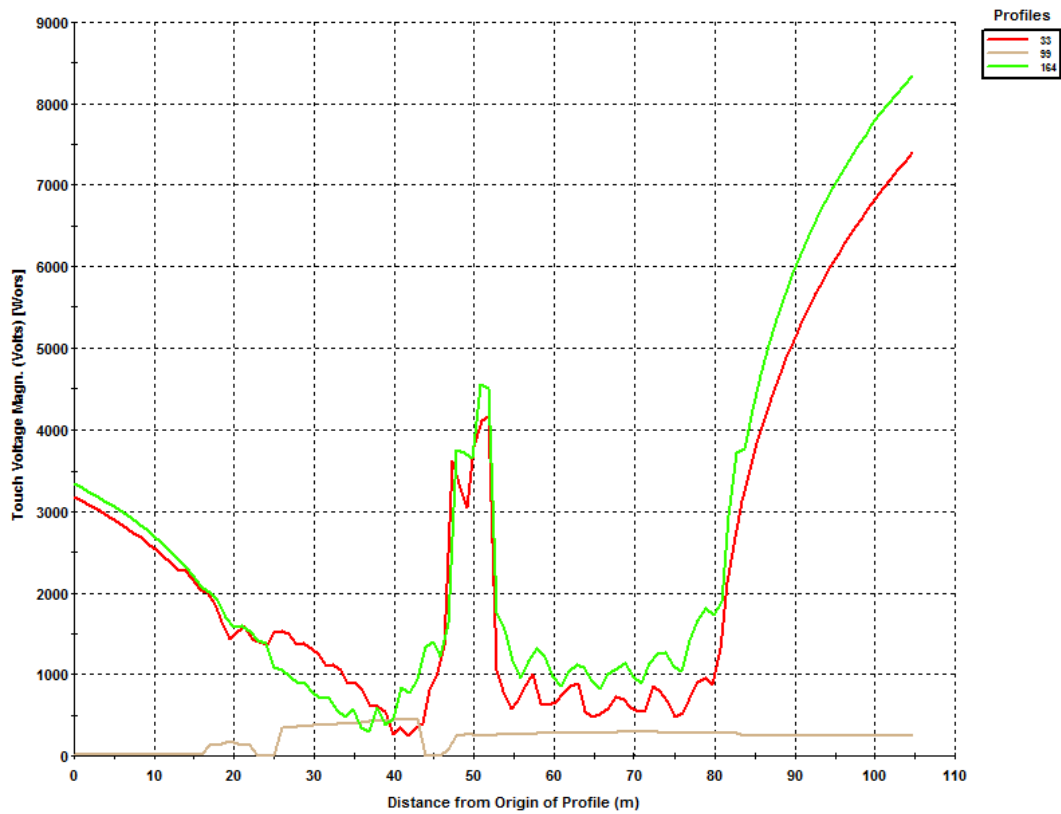
Παρατηρήσεις

Στο σύστημα 4.1 με κόκκινο παρουσιάζεται η συμπεριφορά στο προφίλ του κεντρικού πυλώνα, με μπλε του πάνω και με πράσινο του κάτω. Στο σύστημα 4.2 ο πάνω πυλώνας εμφανίζεται με πράσινο, ο κεντρικός με κόκκινο και ο κάτω με μπλε. Για το σύστημα 2 ο πάνω πυλώνας εμφανίζεται με κόκκινο, ο κεντρικός με μπλε και ο κάτω με πράσινο.

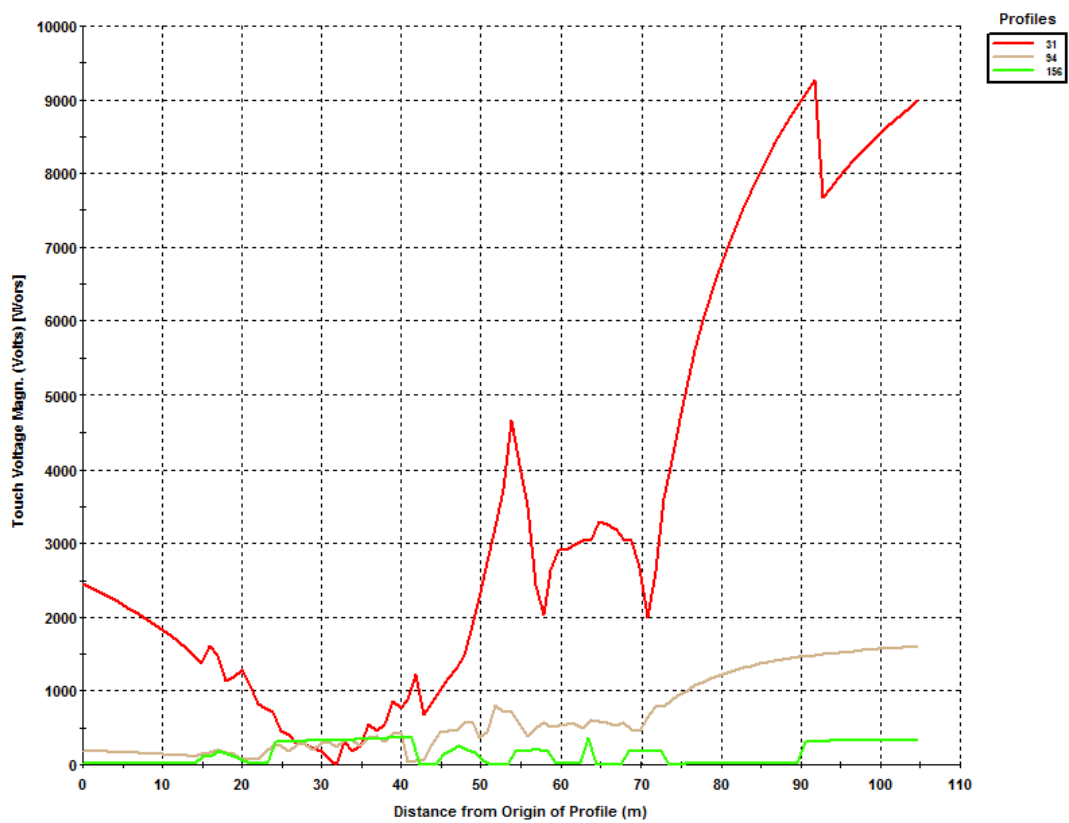
Συχνότητα 2 (33333,34Hz)



Σχήμα 5.4 Τάσεις επαφής συστήματος 4.1 στην δεύτερη συχνότητα

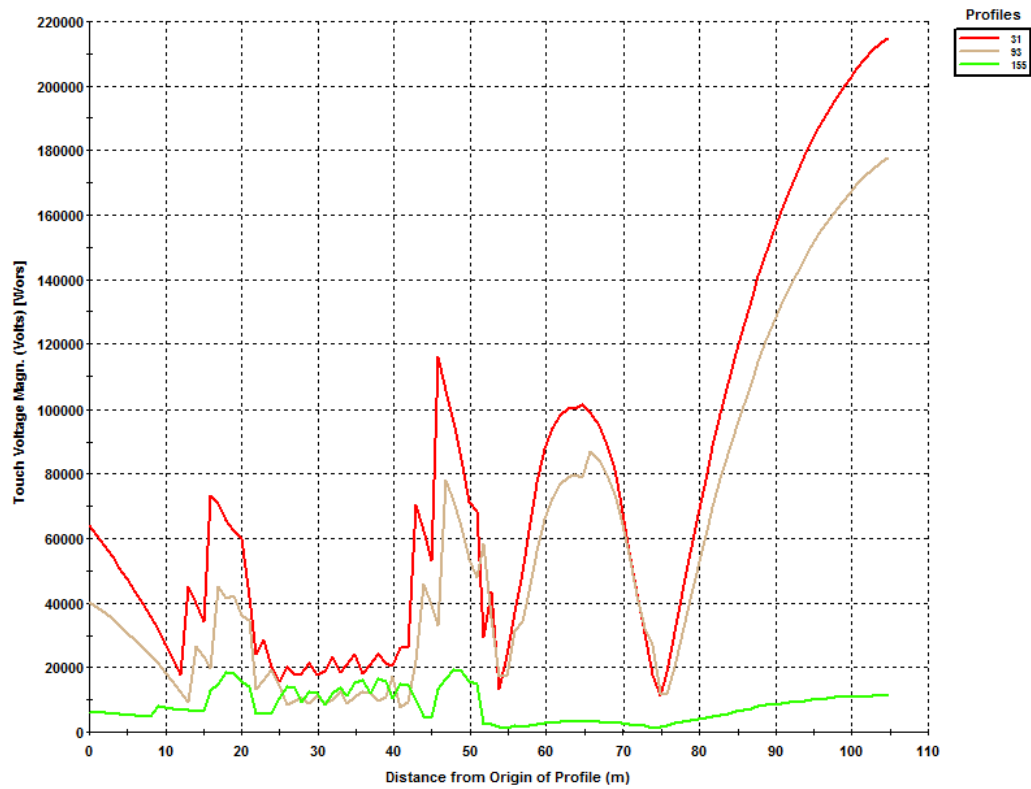


Σχήμα 5.5 Τάσεις επαφής συστήματος 4.2 στην δεύτερη συχνότητα

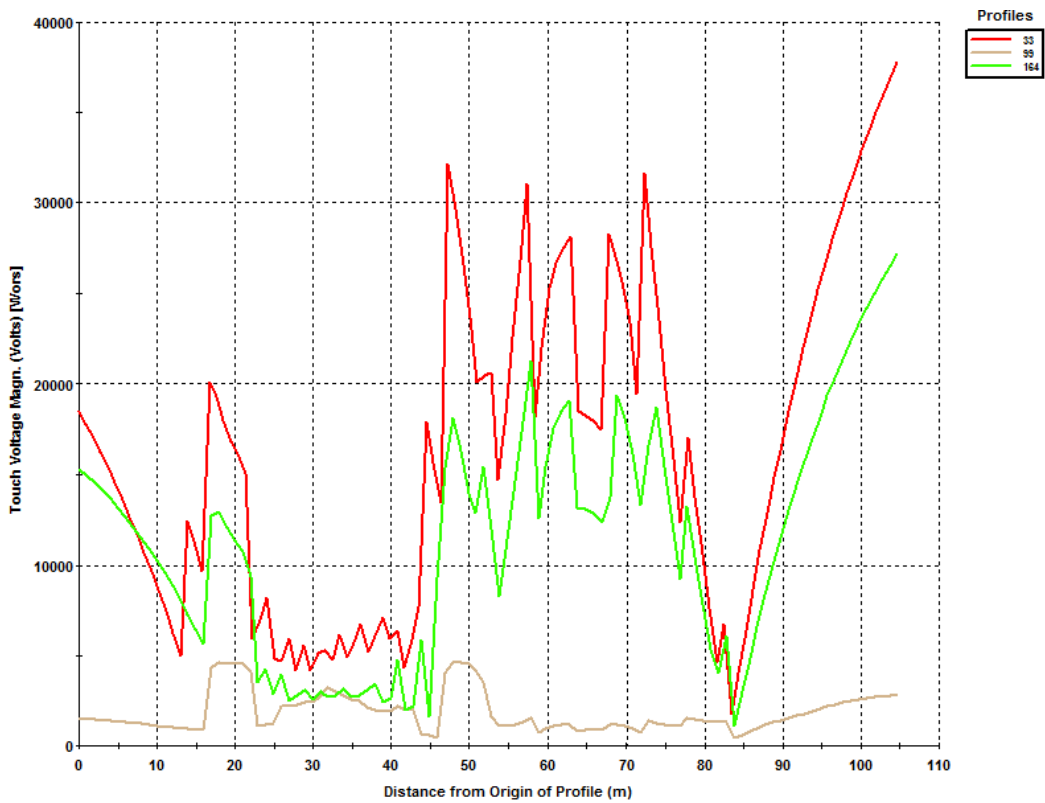


Σχήμα 5.6 Τάσεις επαφής συστήματος 2 στην δεύτερη συχνότητα

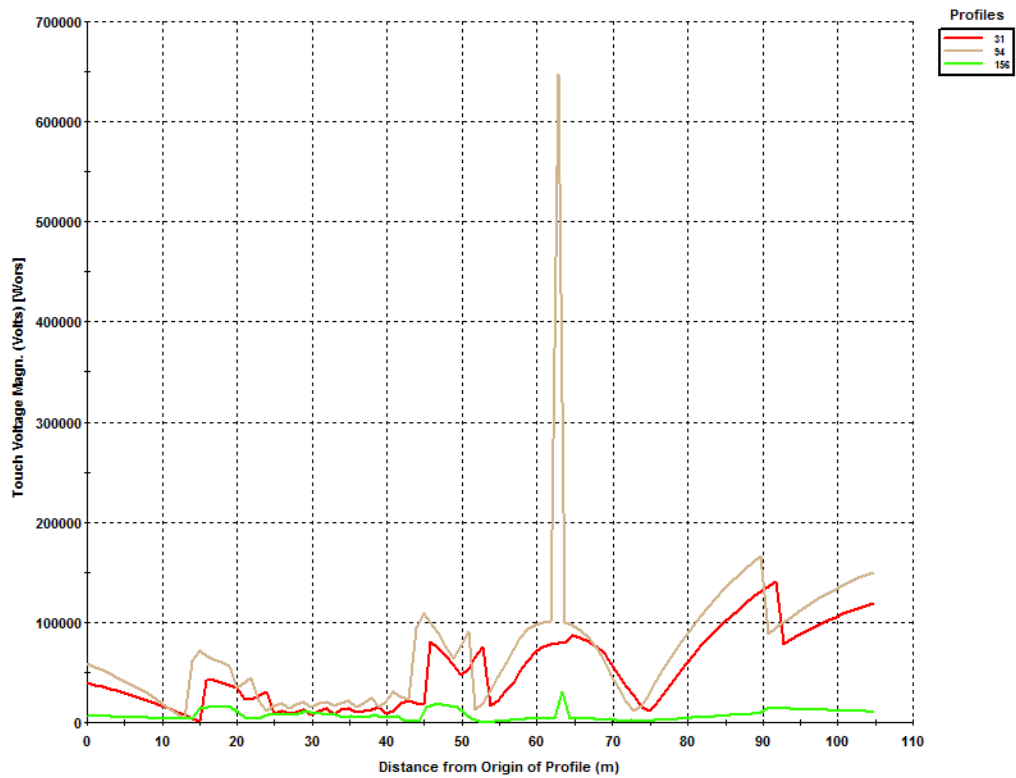
Συχνότητα 3 (5840001Hz)



Σχήμα 5.7 Τάσεις επαφής συστήματος 4.1 στην τρίτη συχνότητα

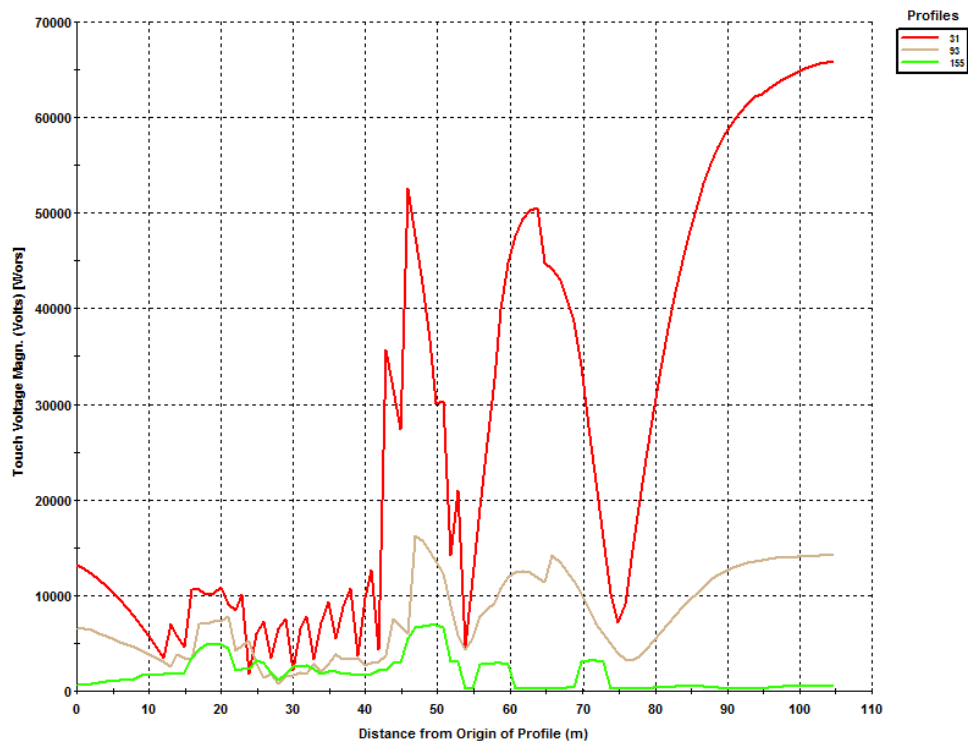


Σχήμα 5.8 Τάσεις επαφής συστήματος 4.2 στην τρίτη συχνότητα

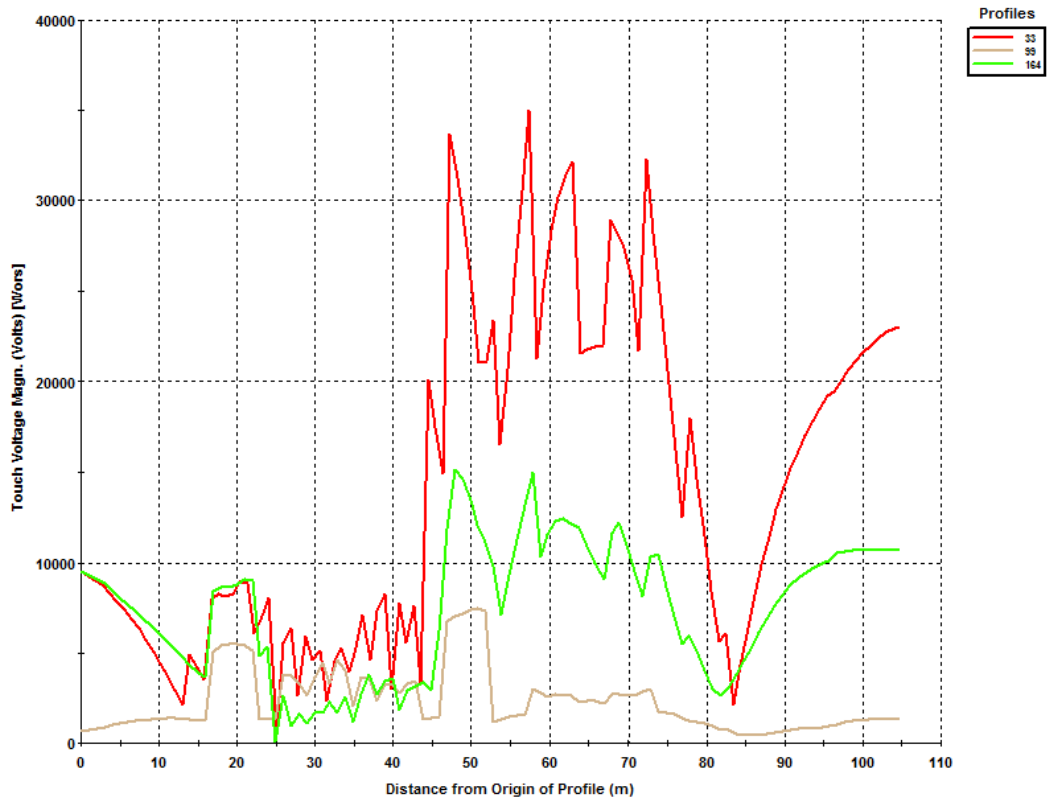


Σχήμα 5.9 Τάσεις επαφής συστήματος 2 στην τρίτη συχνότητα

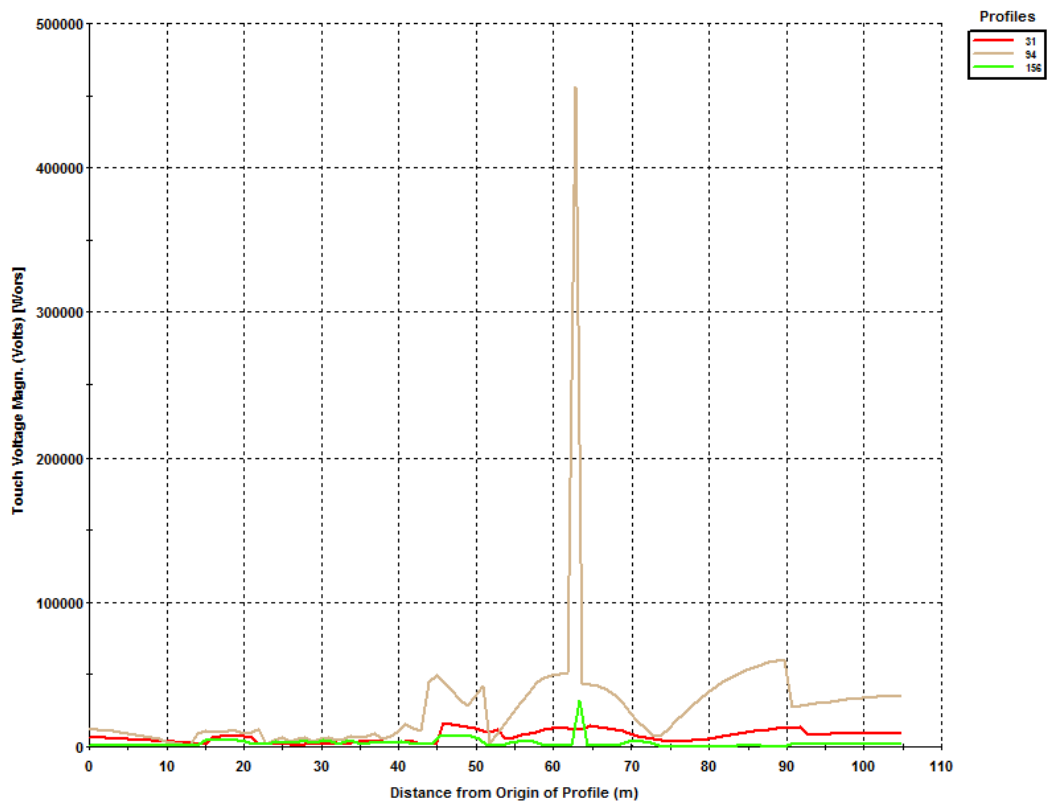
Συχνότητα 4 (6813334Hz)



Σχήμα 5.10 Τάσεις επαφής συστήματος 4.1 στην τέταρτη συχνότητα

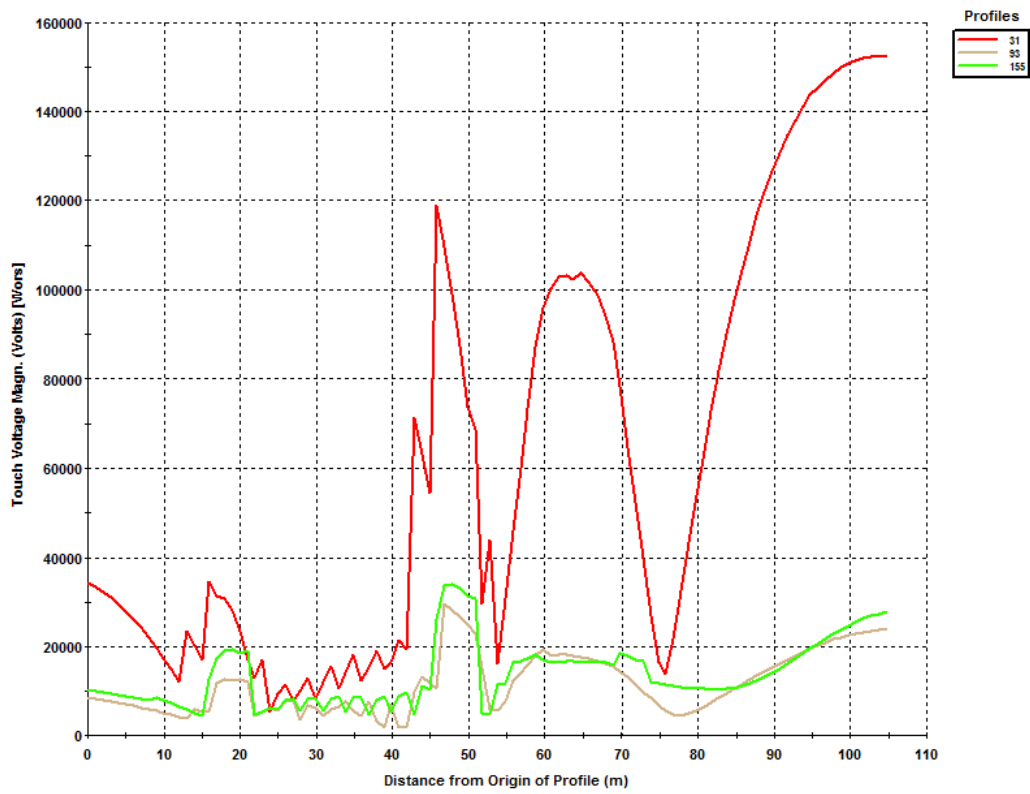


Σχήμα 5.11 Τάσεις επαφής συστήματος 4.2 στην τέταρτη συχνότητα

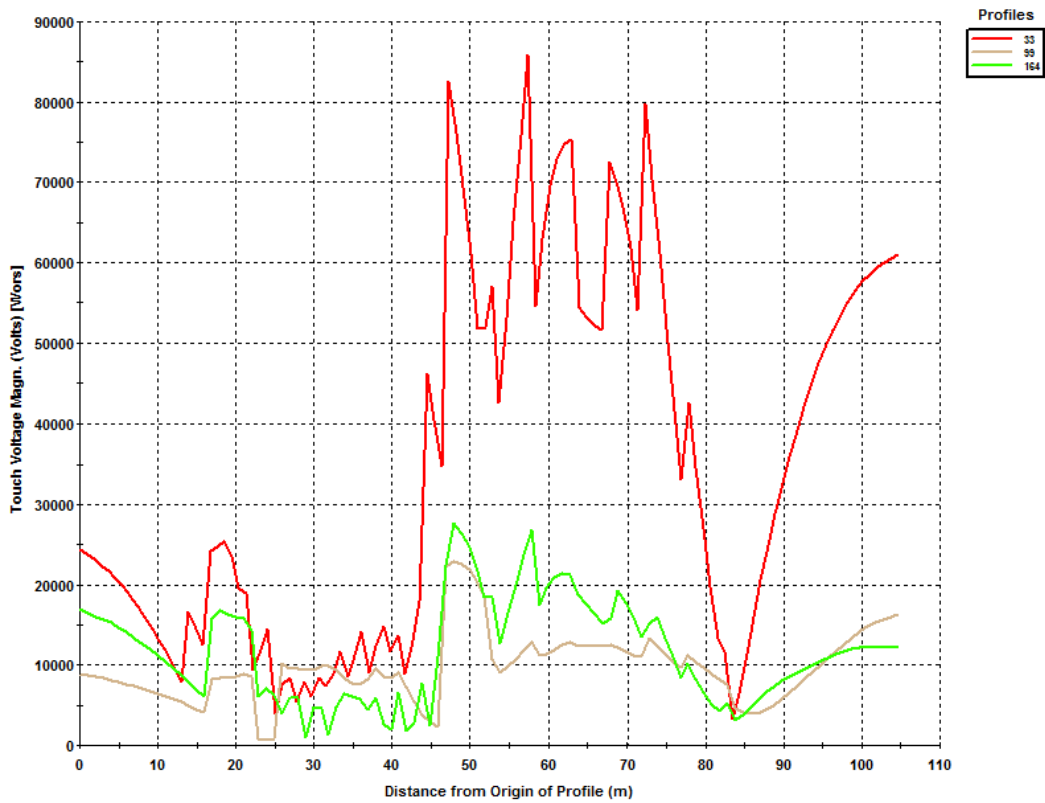


Σχήμα 5.12 Τάσεις επαφής συστήματος 2 στην τέταρτη συχνότητα

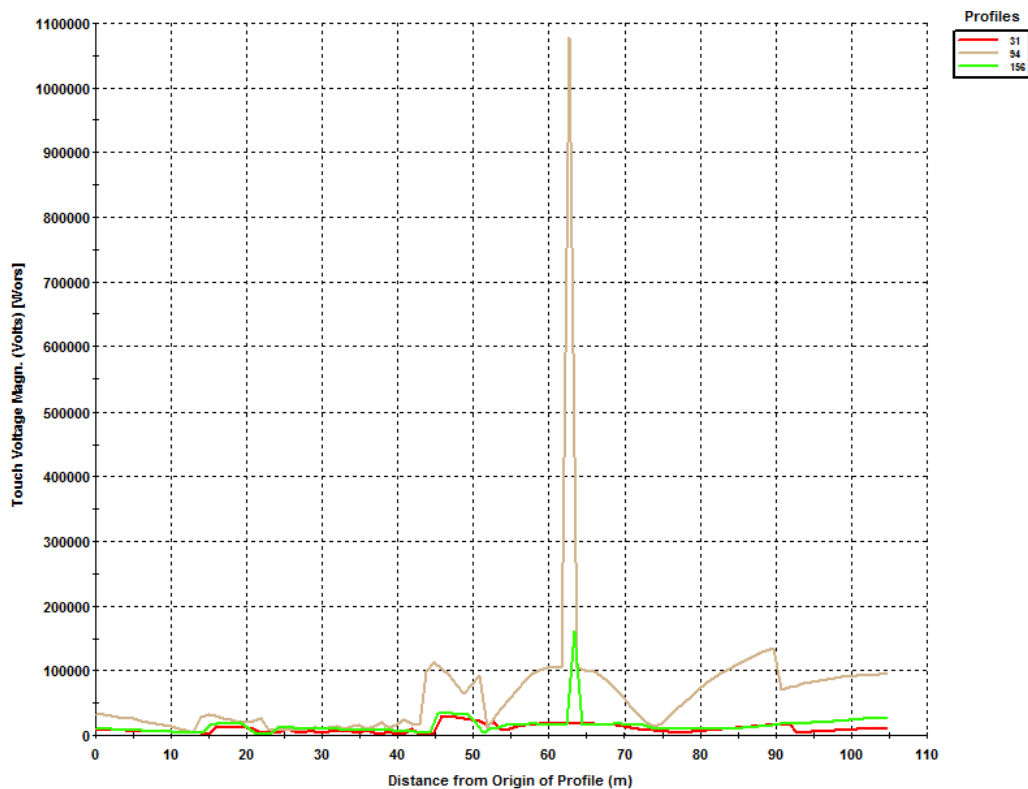
Συχνότητα 5 (6826667Hz)



Σχήμα 5.13 Τάσεις επαφής συστήματος 4.1 στην πέμπτη συχνότητα



Σχήμα 5.14 Τάσεις επαφής συστήματος 4.2 στην πέμπτη συχνότητα



Σχήμα 5.15 Τάσεις επαφής συστήματος 2 στην πέμπτη συχνότητα

Με τη βοήθεια των παραπάνω γραφικών μπορεί να γίνει μία συγκεντρωτική καταγραφή των μέγιστων τιμών τάσεων επαφής που αναπτύσσονται στις περιοχές ενδιαφέροντος στους πίνακες 5.1, 5.2, 5.3.

Συχνότητα f (Hz)	Τύποι γείωσης					
	I		II		ΠΛΕΓΜΑ	
	Μέγιστες τιμές τάσεων επαφής (V)					
	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ
6666,667	234	243	352	365	4085	587
33333,34	562	565	765	882	4103	783
5840001	69994	56104	90895	85632	24102	30605
6813334	50000	35865	41292	49372	25714	30731
6826667	72967	86824	90588	102520	62637	80000

Πίνακας 5.1: Μέγιστες τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής σε Volt, που εμφανίζονται στην περιοχή του φράχτη και του πυλώνα του κεντρικού προφίλ

		Τύποι γείωσης				
		I	II		ΠΛΕΓΜΑ	
Συχνότητα f (Hz)	Μέγιστες τιμές τάσεων επαφής (V)					
	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ
6666,667	1564	2031	1282	1280	4085	998
33333,34	2506	4102	2753	2323	4503	1102
5840001	59903	58704	68760	67890	15105	14605
6813334	13300	10000	15078	14980	14200	11890
6826667	23230	18872	25690	24700	24800	19978

Πίνακας 5.2: Μέγιστες τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής σε Volt, που εμφανίζονται στην περιοχή του φράχτη και του πυλώνα του πάνω προφίλ

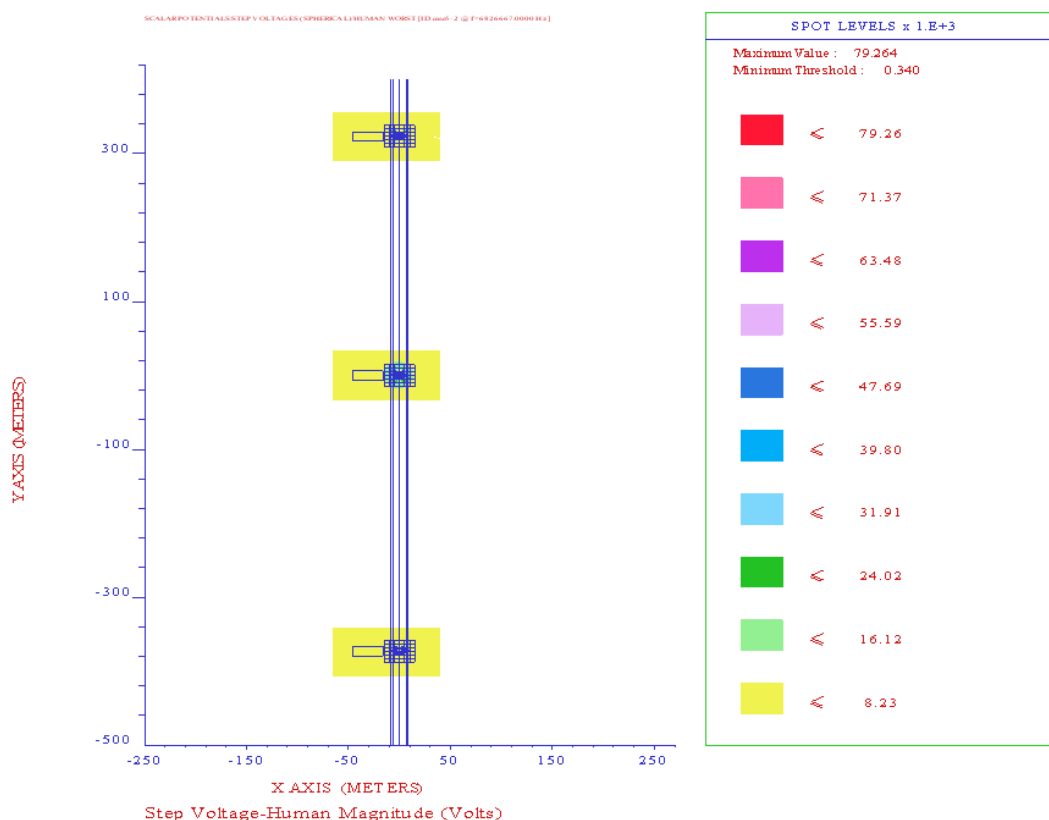
		Τύποι γείωσης				
		I	II		ΠΛΕΓΜΑ	
Συχνότητα f (Hz)	Μέγιστες τιμές τάσεων επαφής (V)					
	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ	ΦΡΑΧΤΗΣ	ΠΥΛΩΝΑΣ
6666,667	1564	2031	1282	1280	4085	998
33333,34	2506	4102	2753	2323	4503	1102
5840001	69994	56104	90895	85632	24102	30605
6813334	50000	35865	41292	49372	25714	30731
6826667	72967	86824	90588	102520	62637	80000

Πίνακας 5.3: Μέγιστες τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής σε Volt, που εμφανίζονται σε όλες τις εξεταζόμενες περιοχές του συστήματός μας

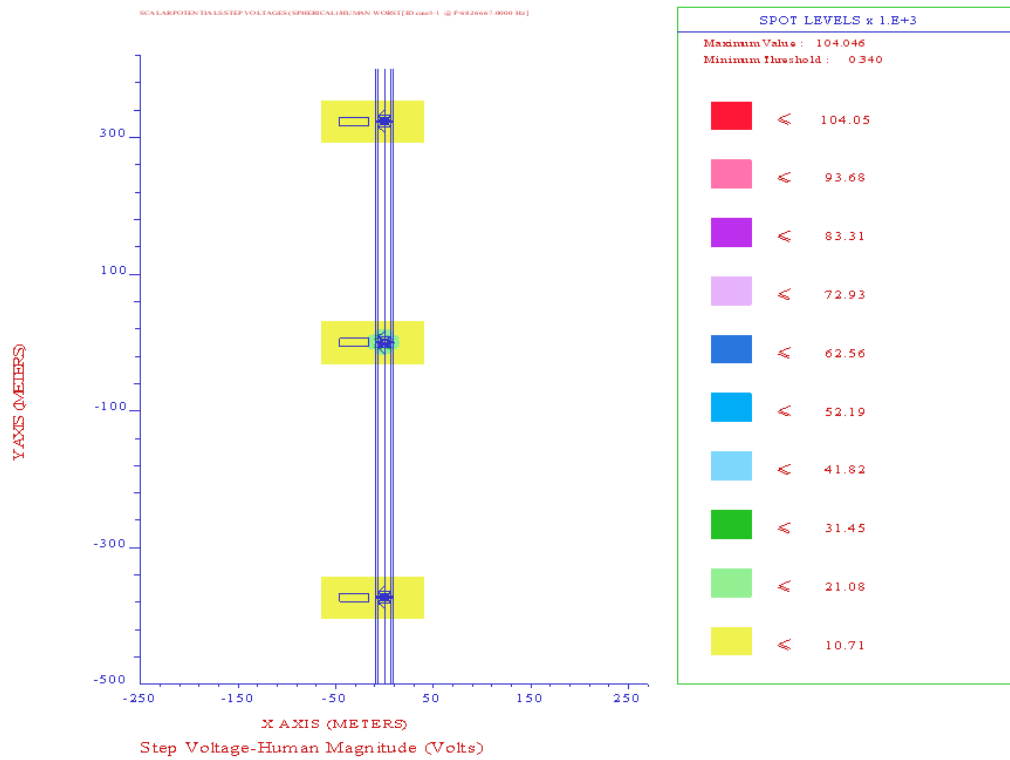
Βηματικές τάσεις

Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις για τα 3 είδη γειώσεων προκύπτει ότι χειρότερη συμπεριφορά εμφανίζεται όσο αυξάνεται η συχνότητα. Έτσι, λοιπόν, μελετάμε, κυρίως, την 5^η εξεταζόμενη συχνότητα για την επιλογή της κατάλληλης γείωσης πυλώνα.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.16, 5.17 η μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή βηματικής τάσης είναι αρκετά μεγαλύτερη στην περίπτωση της γείωσης τύπου I και συγκεκριμένα η διαφορά φτάνει κοντά στα 25kV.

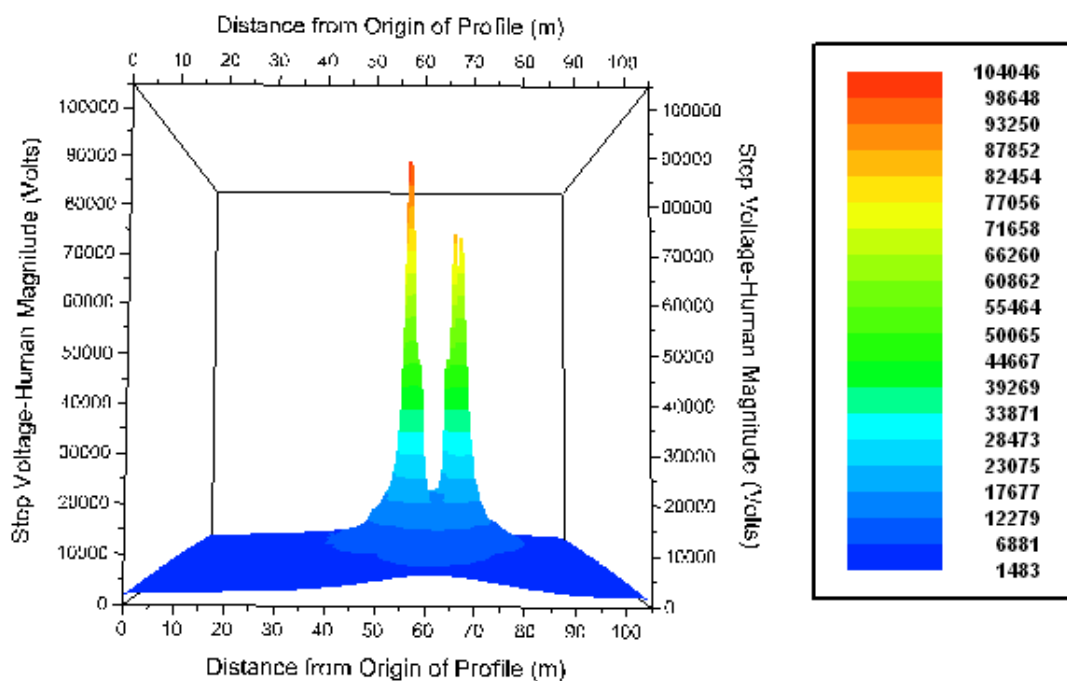


Σχήμα 5.16 Κατανομή των τάσεων επαφής σε σύστημα με πλέγμα γείωσης

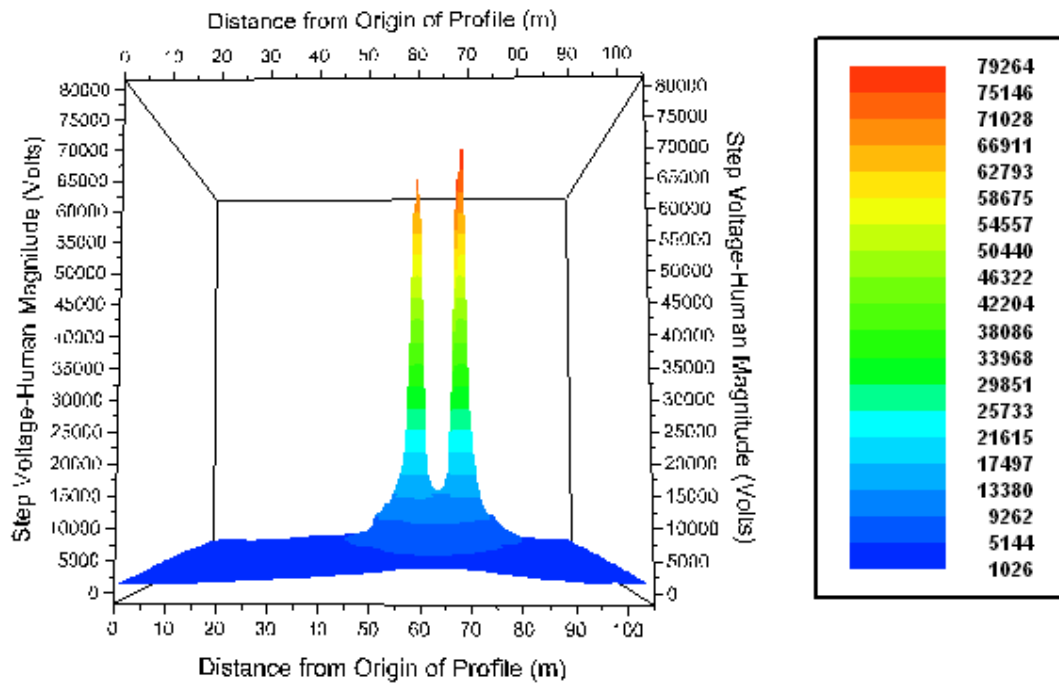


Σχήμα 5.17 Κατανομή των βηματικών τάσεων σε σύστημα με γείωση τύπου I

Μία καλύτερη απεικόνιση της κατανομής των βηματικών τάσεων στο σύστημά με χρήση συστήματος γείωσης τύπου I φαίνεται στο σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος με σύστημα γείωσης τύπου I

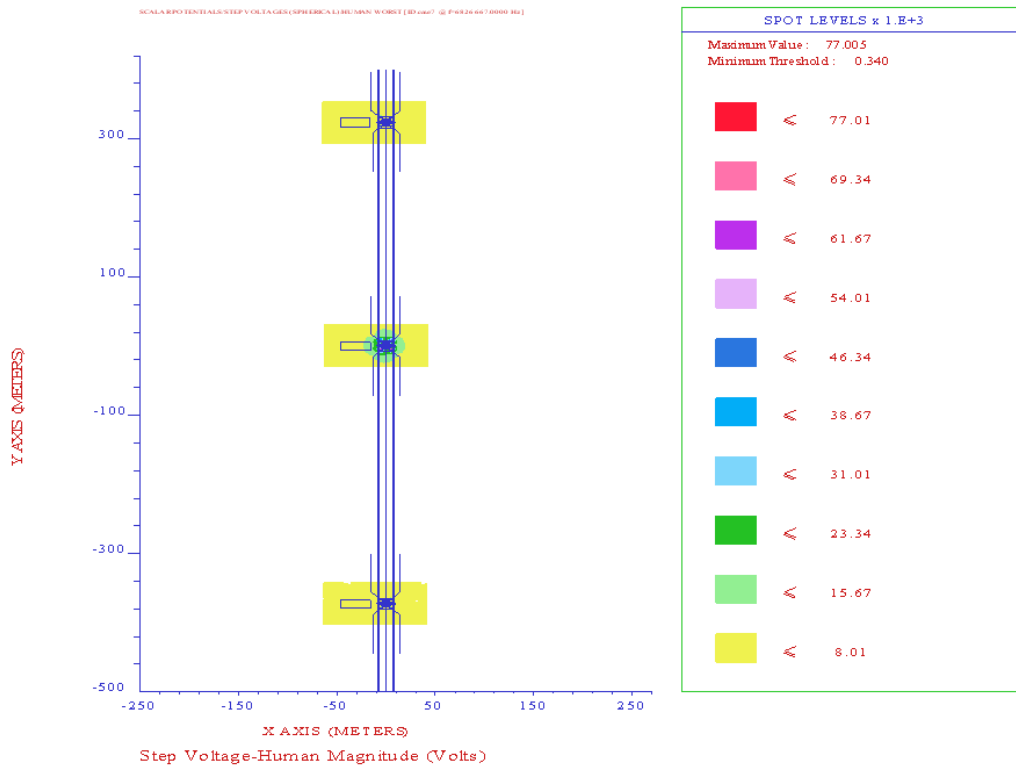


Σχήμα 5.19 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος με πλέγμα

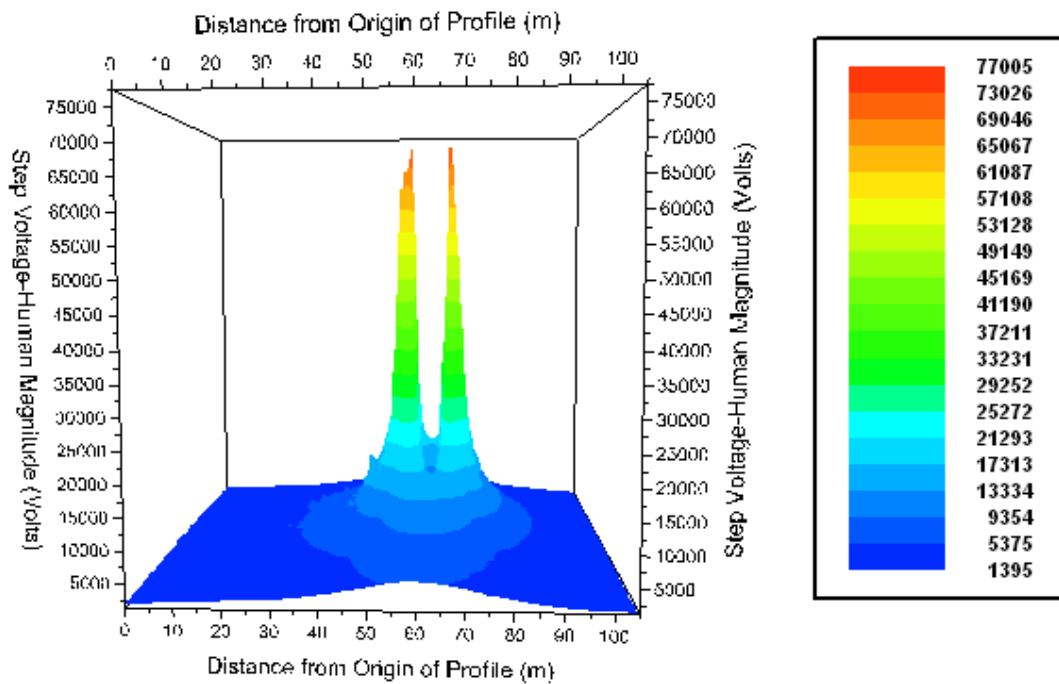
Στον κεντρικό πυλώνα του συστήματος που χρησιμοποιείται η λύση του πλέγματος η αντίστοιχη κατανομή φαίνεται στο σχήμα 5.19.

Από τα παραπάνω, διαπιστώνουμε ότι το πλέγμα είναι πολύ καλύτερη λύση από την γείωση τύπου I, παρέχοντας μεγαλύτερη προστασία και επιτρέποντας την ανάπτυξη μικρότερων τιμών βηματικών τάσεων. Όπως προκύπτει από τις τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις, οι επικίνδυνες βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται είναι πολύ κοντά στη βάση του πυλώνα, στα 4 πόδια του και για απόσταση περίπου 3m. Στο υπόλοιπο προφίλ γενικά είναι πολύ μικρότερες οι αναπτυσσόμενες τιμές.

Το σύστημα με το σύστημα γείωσης τύπου II φαίνεται στο σχήμα 5.20, ενώ στο σχήμα 5.21 φαίνεται η κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα.



Σχήμα 5.20 Κατανομή των βηματικών τάσεων σε σύστημα με γείωση τύπου II



Σχήμα 5.21 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος με σύστημα γείωσης τύπου II

Παρατηρούμε ότι στο σύστημα γείωσης τύπου II έχουμε τη μικρότερη μέγιστη τιμή βηματικών τάσεων. Το σύστημα γείωσης τύπου I είναι πολύ χειρότερο από το πλέγμα και από το σύστημα γείωσης τύπου II, που έχουν παρόμοια συμπεριφορά.

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις και τις τιμές των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων για τα διάφορα είδη γειώσεων, μπορούμε να πούμε ότι η καλύτερη προτεινόμενη λύση από πλευράς ασφάλειας και καλύτερης συμπεριφοράς σε κεραυνικά πλήγματα, ειδικά στην περιοχή του πυλώνα για όλες τις εξεταζόμενες συχνότητες, είναι η γείωση με πλέγμα.

Ωστόσο για να μπορέσουμε να αποφανθούμε με μεγαλύτερη ακρίβεια θα πρέπει να εξετάσουμε τα όρια που ορίζονται από τους κανονισμούς [1].

Συγκεκριμένα η μελέτη έγινε για συχνότητα δικτύου 50Hz, ομοιόμορφο έδαφος με ειδική αντίσταση 100Ωm και προσθήκη υλικού επιφανείας πάχους 0,2m και ειδικής αντίστασης που εξαρτάται από το υλικό.

Επιλέγοντας συχνότητα δικτύου 50Hz, η οποία είναι πολύ μικρότερη από τις συχνότητες που εξετάζουμε, θέτουμε επιτρεπτά όρια πολύ συντηρητικά, καθώς ο ανθρώπινος οργανισμός μπορεί να ανεχτεί πολύ υψηλότερα ρεύματα, όσο αυξάνεται η συχνότητά τους.

Σύμφωνα με το IEC 80-2000 τα επιτρεπτά για άνθρωπο 70kg και για χρόνους εκκαθάρισης σφάλματος 0,1 και 0,5 sec φαίνονται στον πίνακα 5.4 [1].

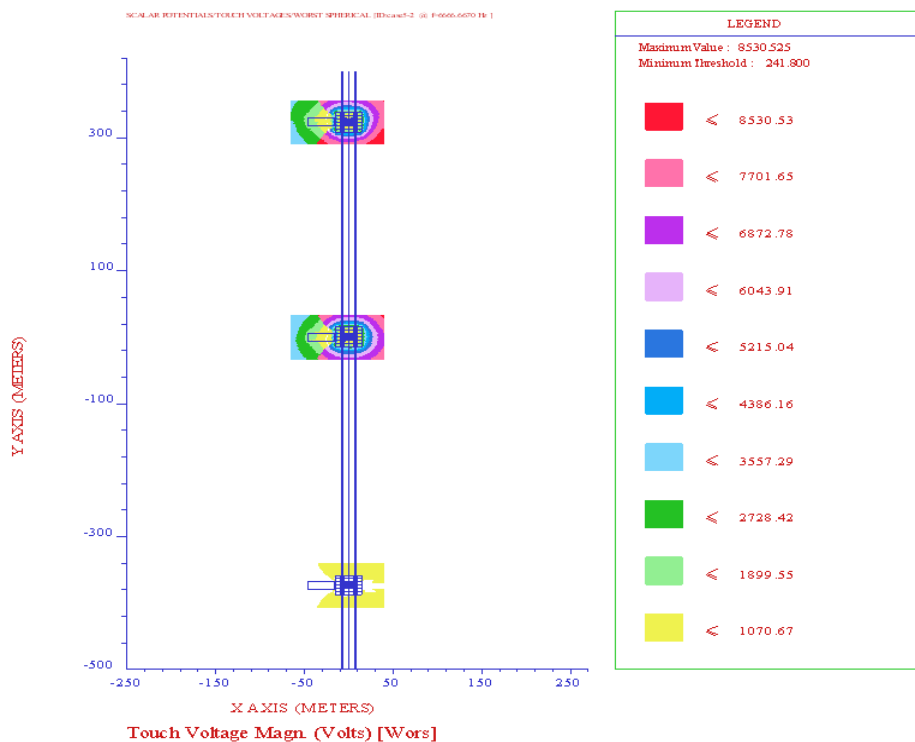
Ειδική αντίσταση υλικού επιφανείας (Ωm)	Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος			
	0,1sec		0,5sec	
	Βηματική τάση (V)	Τάση επαφής (V)	Βηματική τάση (V)	Τάση επαφής (V)
0	636	452,5	339,8	241,8
2500 (χαλίκι)	5517,2	1672,8	2947,8	893,8
10000 (άσφαλτος)	20718,8	5473,2	11070	2924,3

Πίνακας 5.4: Επιτρεπτά όρια για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής [1]

Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα 5.4 με τις αντίστοιχες των πινάκων 5.1, 5.2, 5.3 για τις τάσεις επαφής, μπορούμε να πούμε ότι και στις 2 περιπτώσεις χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος το πλέγμα μπορεί να προστατευτεί μόνο μέχρι την 11^η συχνότητα του φάσματος της διπλοεκθετικής 8/20μs. Από εκεί και πέρα οι τιμές ξεπερνούν κατά πολύ τα όρια στην περιοχή του πυλώνα. Η βελτίωση που επιφέρει η χρήση χαλκιού ή ασφάλτου στο σύστημα που χρησιμοποιεί πλέγμα γείωσης φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

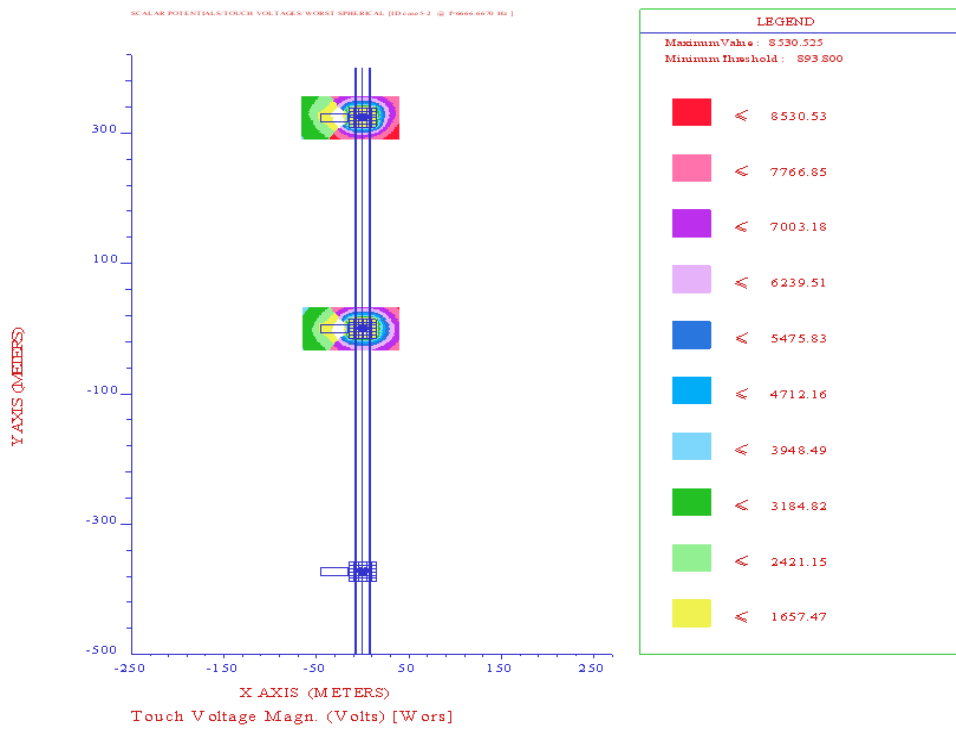
Συχνότητα 1 (6666,667Hz)

α)



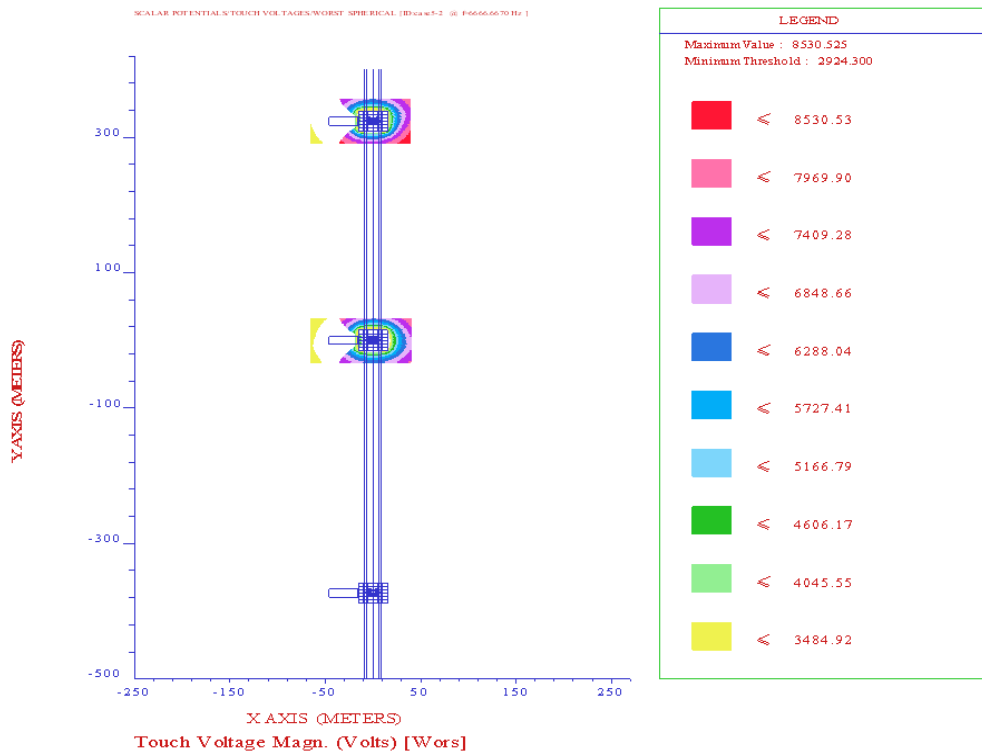
Σχήμα 5.22 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.23 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση χαλκικού

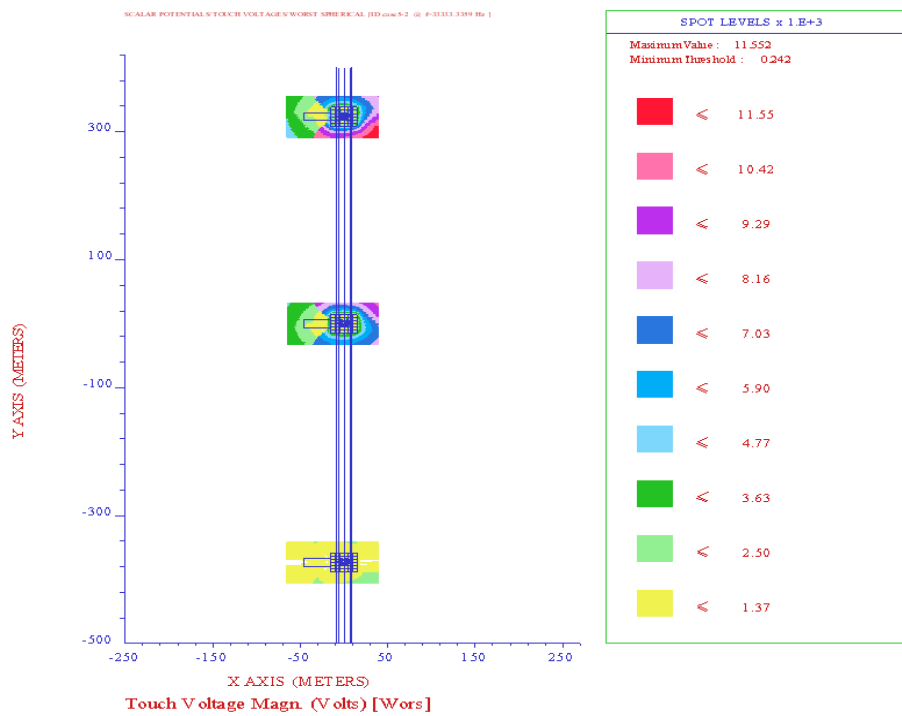
γ)



Σχήμα 5.24 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

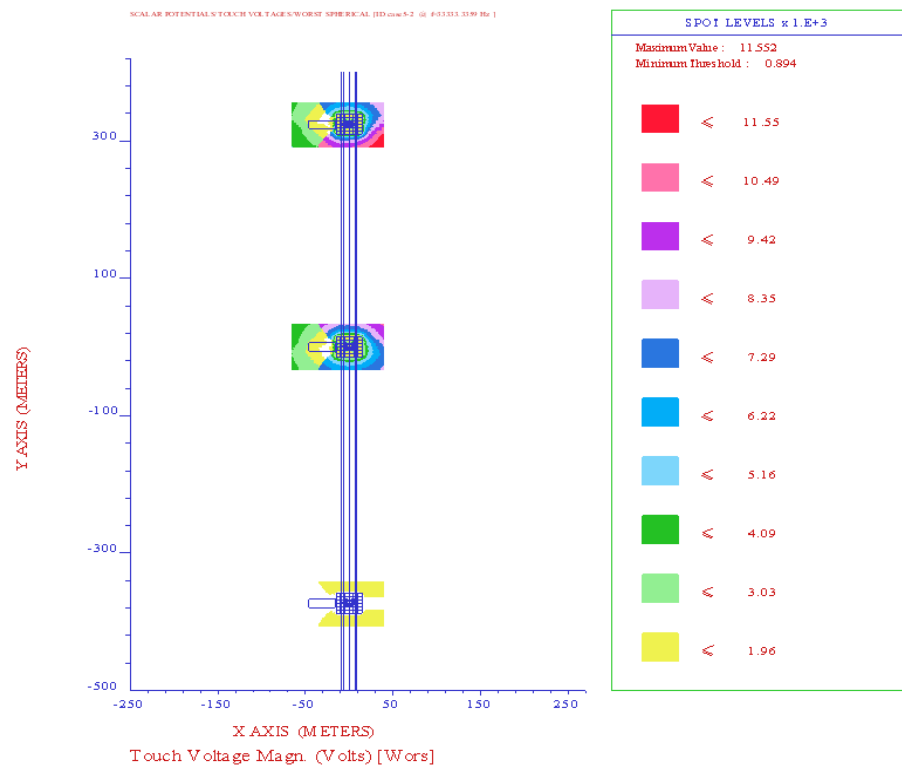
Συχνότητα 2 (33333,34Hz)

α)



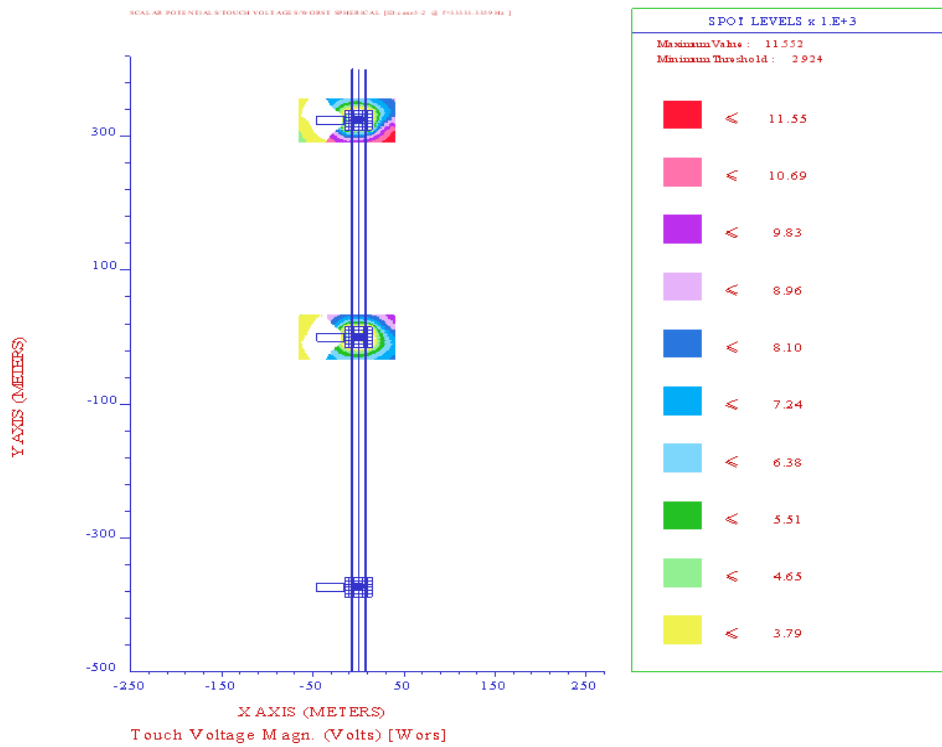
Σχήμα 5.25 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.26 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση χαλκικού

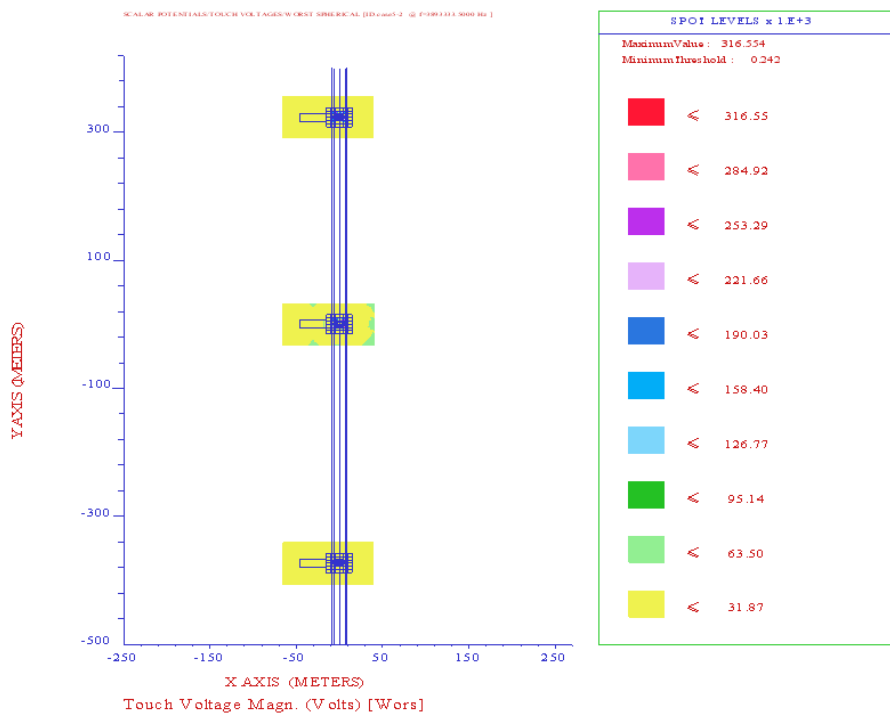
γ)



Σχήμα 5.27 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

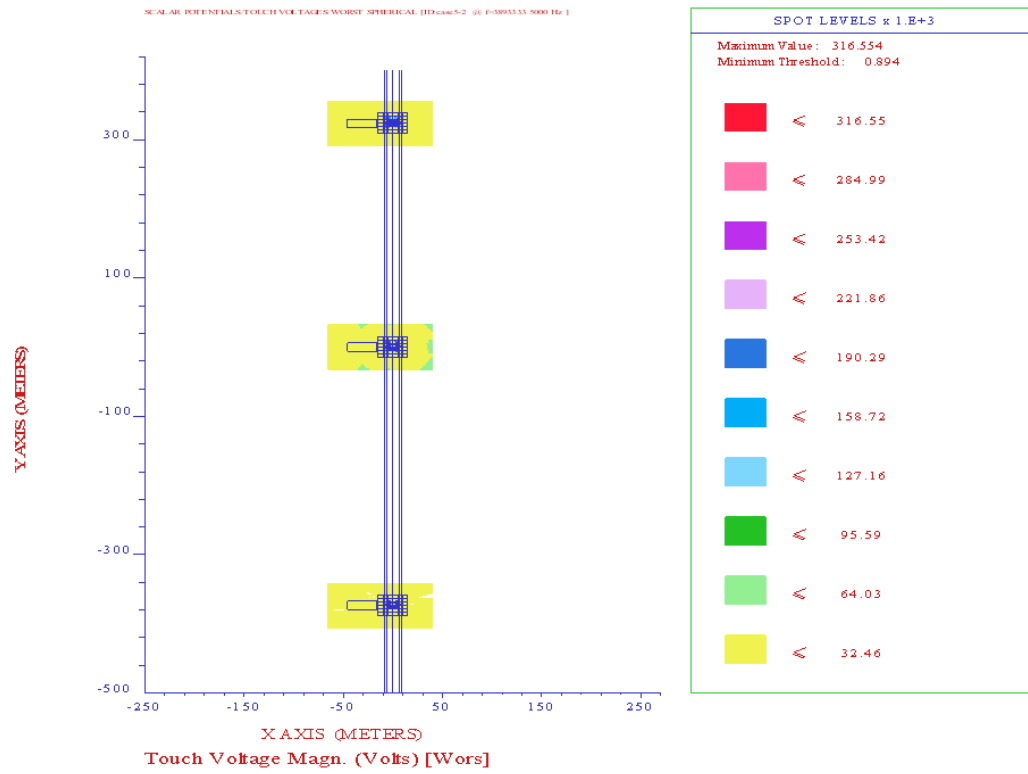
Συχνότητα 3 (3893334Hz)

α)



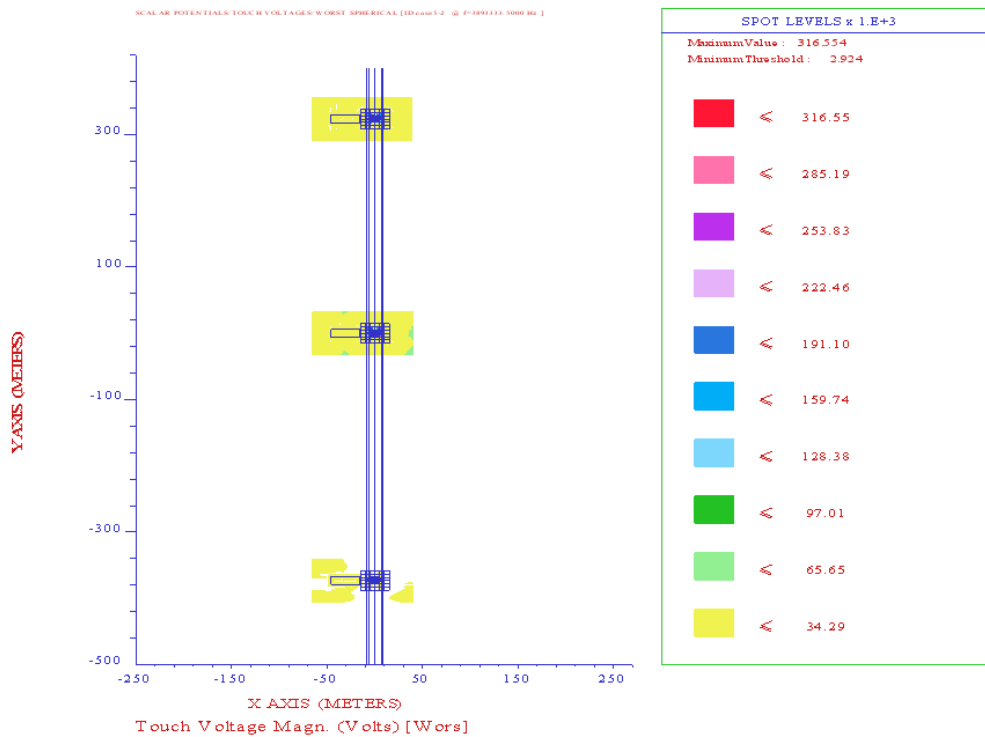
Σχήμα 5.28 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.29 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση χαλκιού

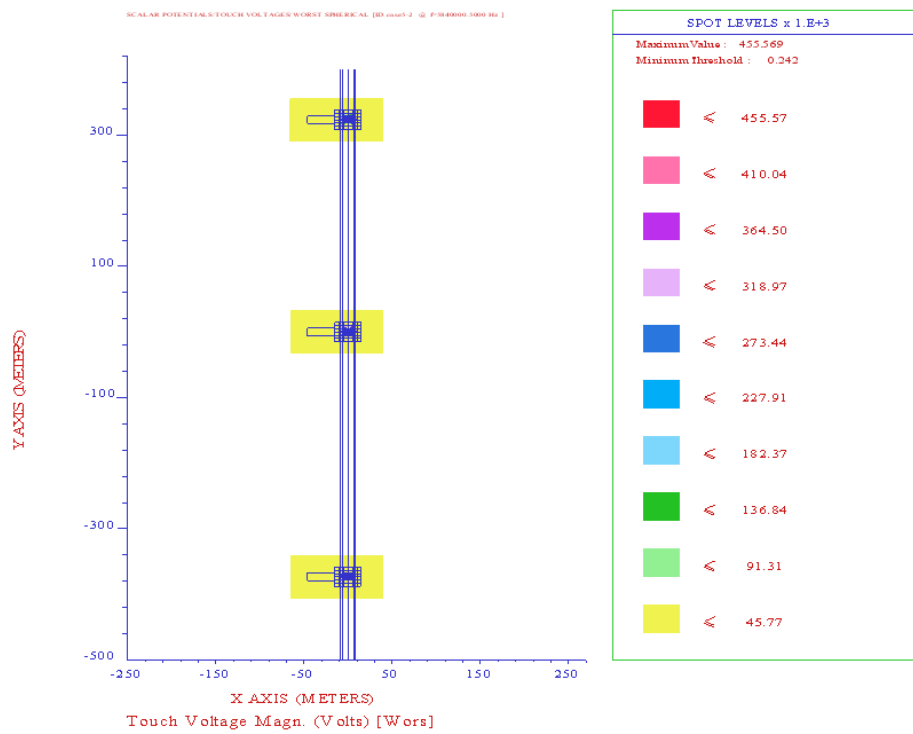
γ)



Σχήμα 5.30 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

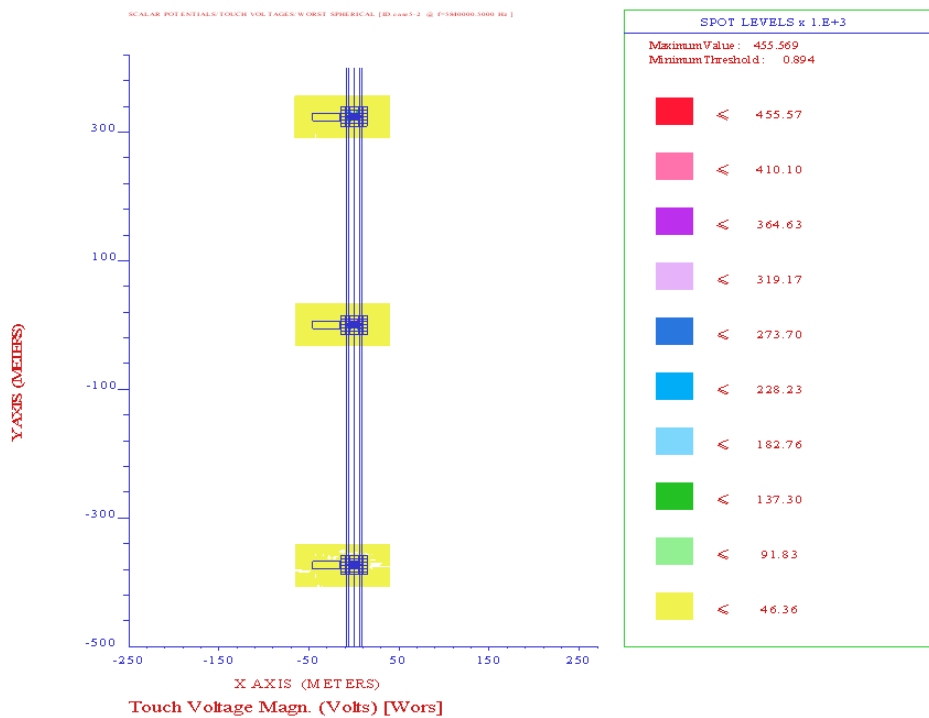
Συχνότητα 4 (5840001Hz)

α)



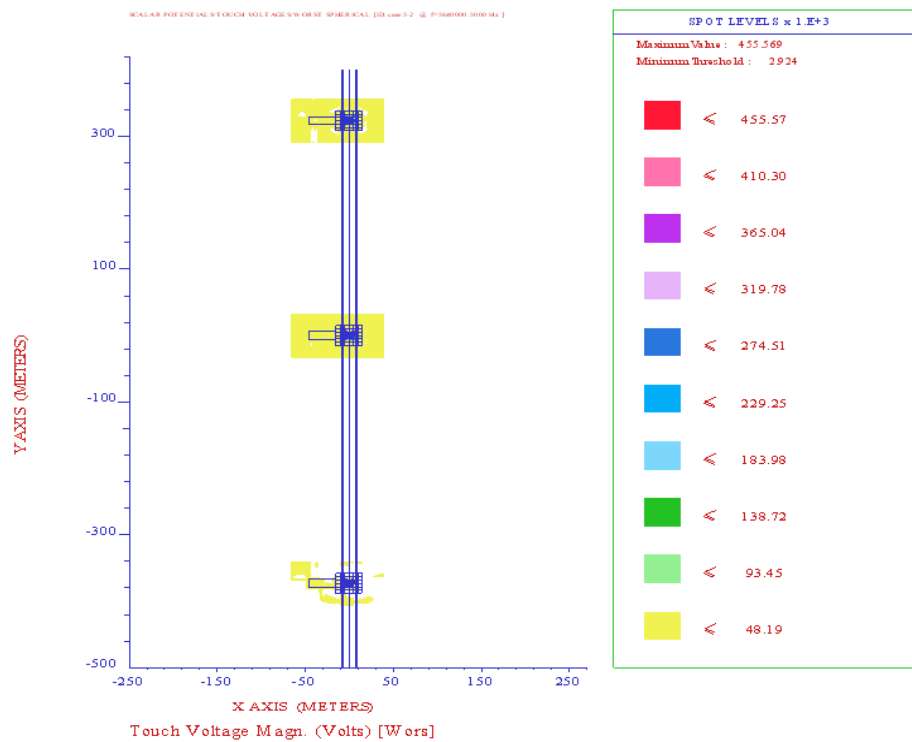
Σχήμα 5.31 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.32 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση χαλκικού

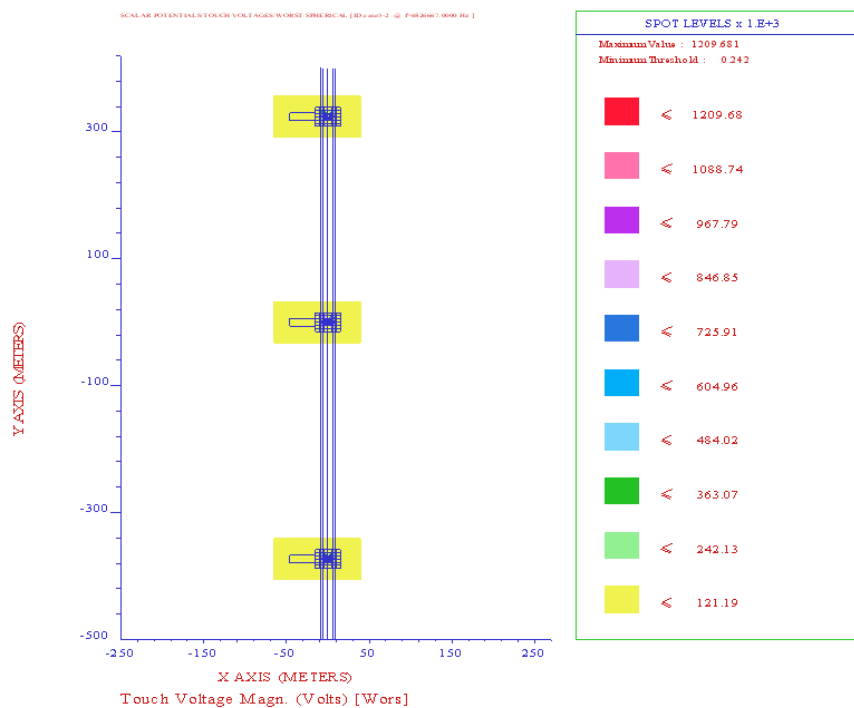
γ)



Σχήμα 5.33 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

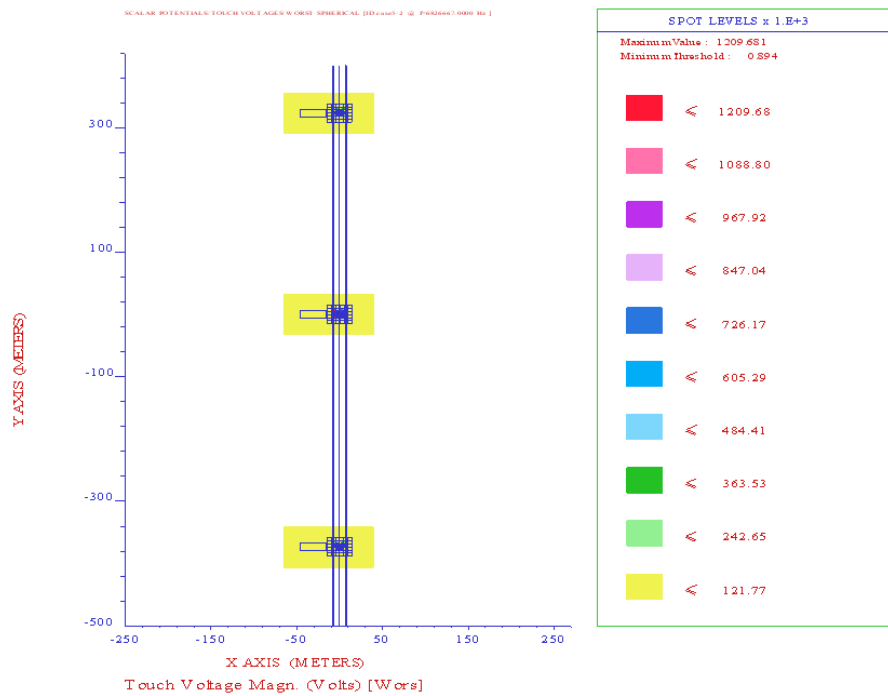
Συχνότητα 5 (682667Hz)

α)



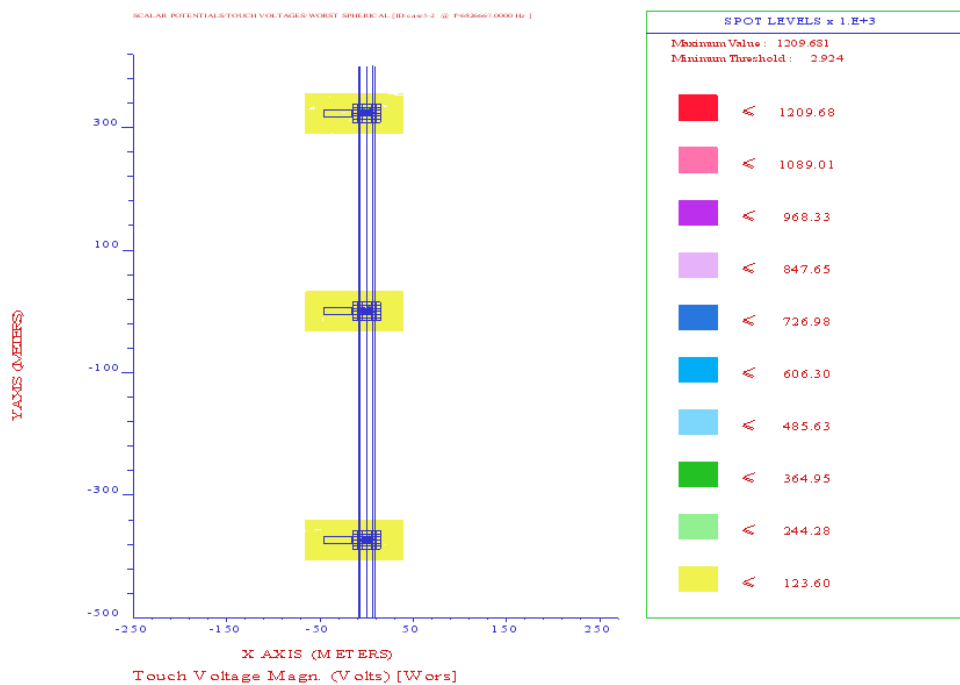
Σχήμα 5.34 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.35 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση χαλκιού

γ)



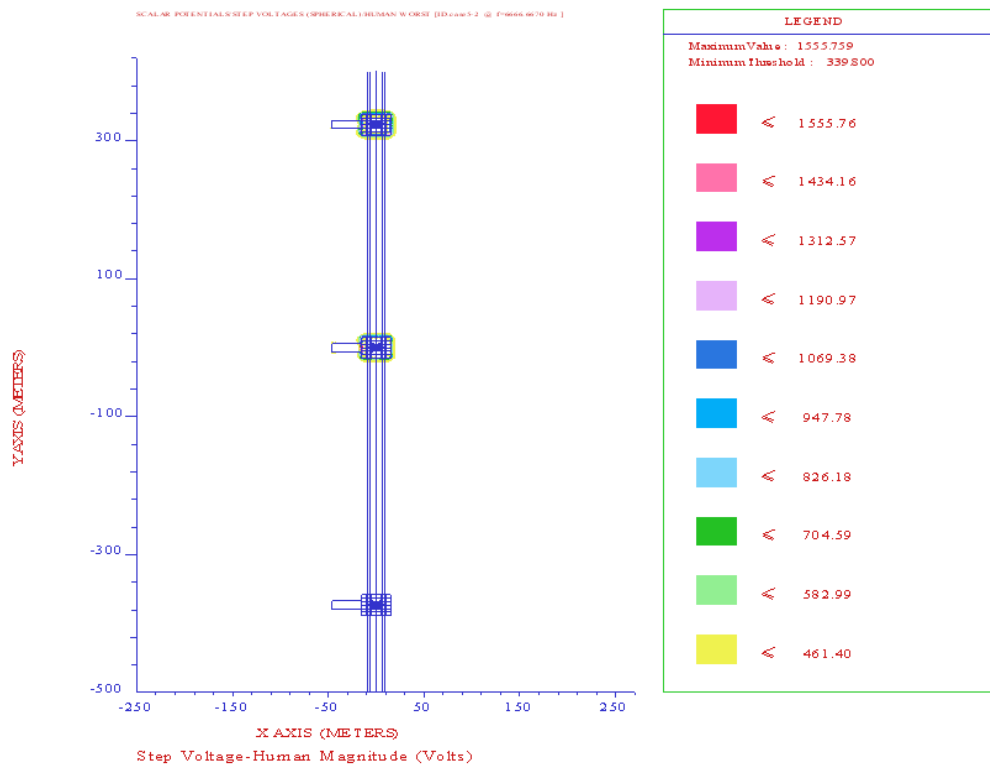
Σχήμα 5.36 Κατανομή τάσεων επαφής σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

Όσον αφορά τις βηματικές τάσεις η χρήση επίστρωσης χαλκιού ή ασφάλτου μπορεί να περιορίσει σημαντικά την επικίνδυνη για τον άνθρωπο ζώνη, γύρω από την

περιοχή του πυλώνα, στην οποία είδαμε ότι εμφανίζεται και το μεγαλύτερο πρόβλημα. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της ασφάλτου, δεν υπάρχει ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων στην περιοχή του φράχτη. Αυτό φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα.

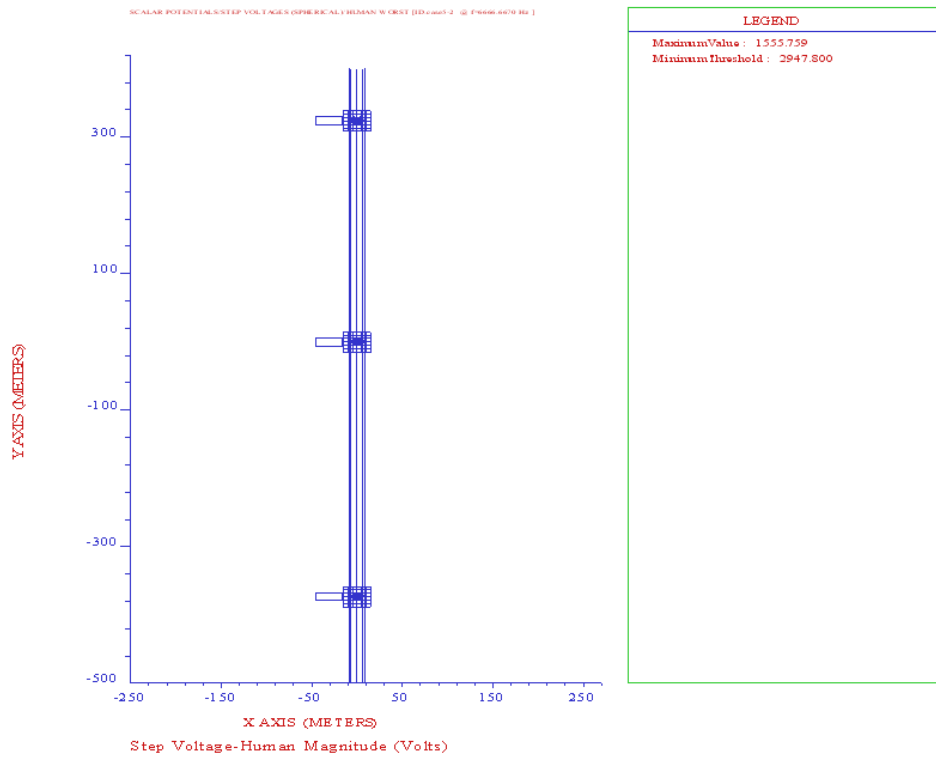
Συχνότητα 1 (6666,667Hz)

α)



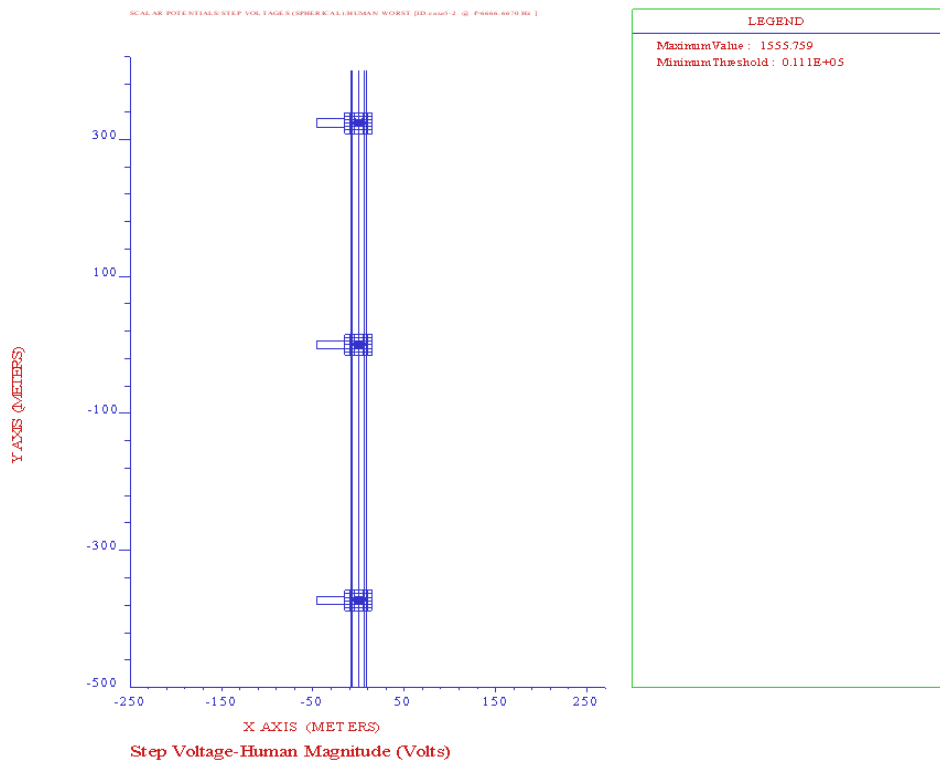
Σχήμα 5.37 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.38 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση χαλκικού

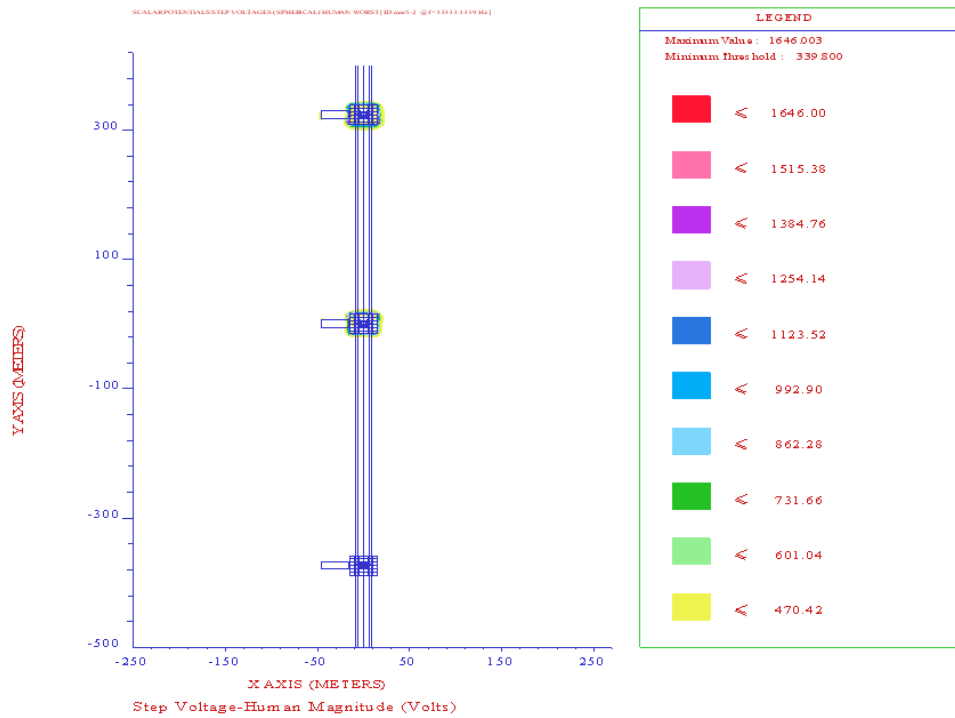
γ)



Σχήμα 5.39 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

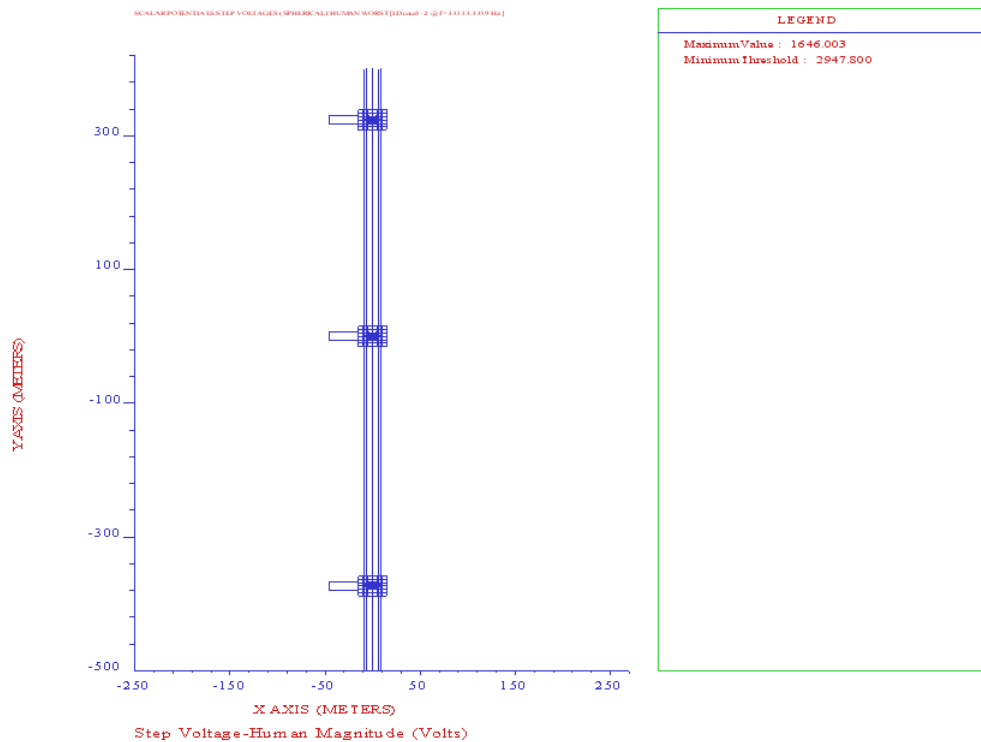
Συχνότητα 2 (33333,34Hz)

α)



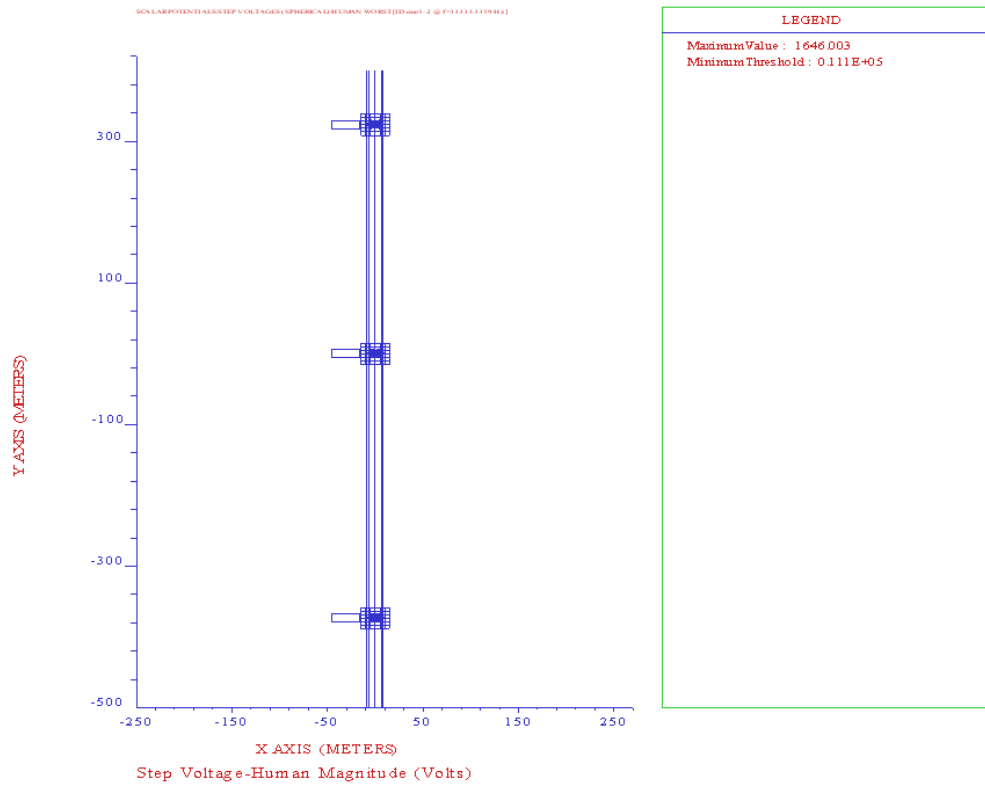
Σχήμα 5.40 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.41 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση χαλκιού

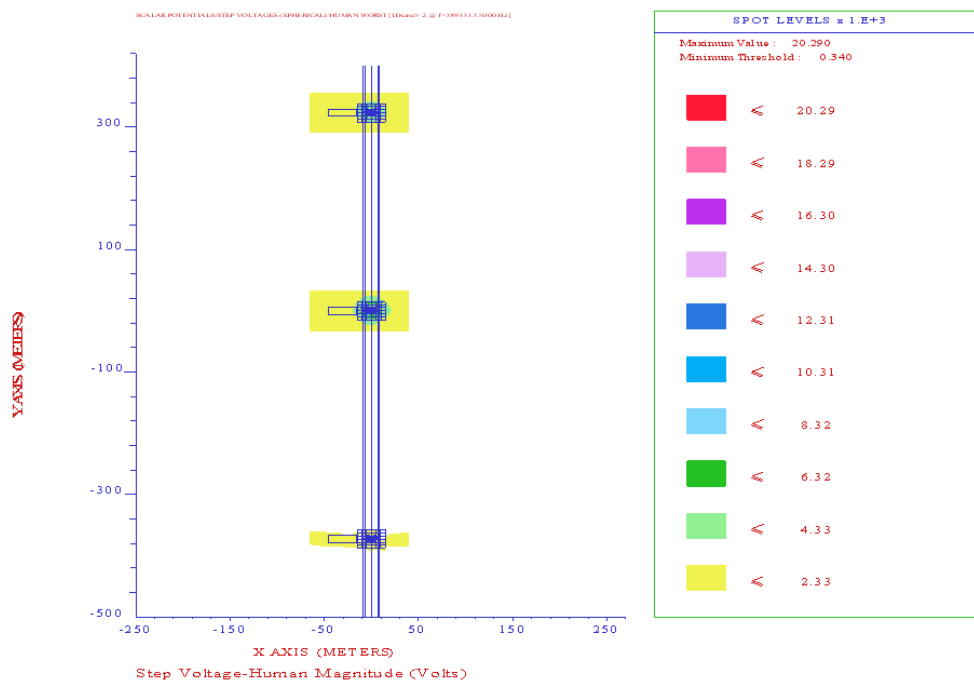
γ)



Σχήμα 5.42 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

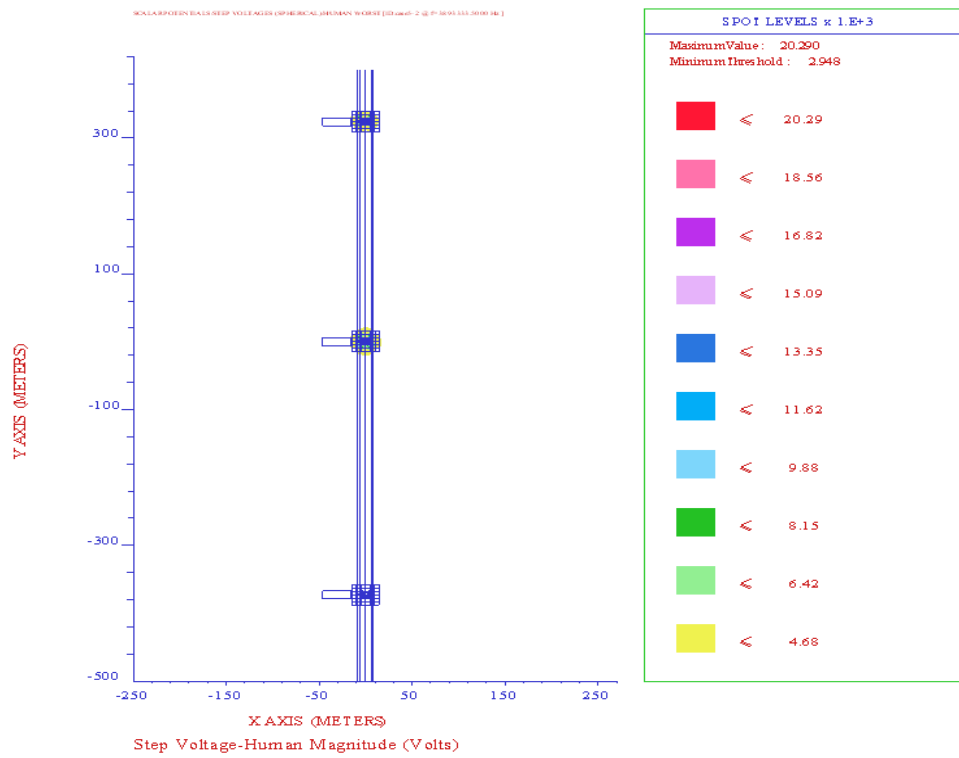
Συχνότητα 3 (3893334Hz)

α)



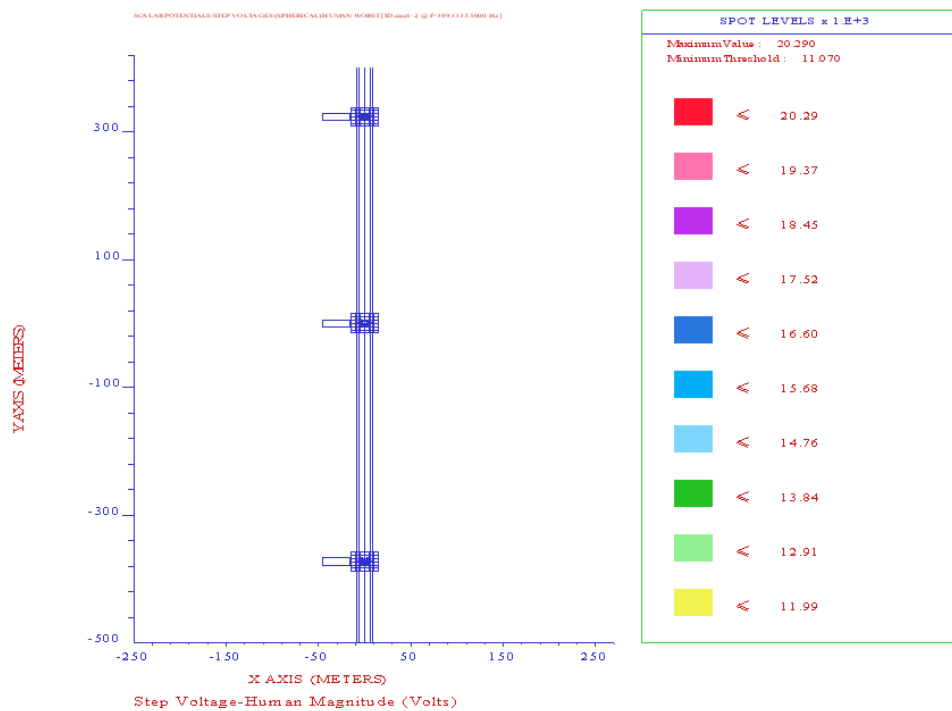
Σχήμα 5.43 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.44 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση χαλκικού

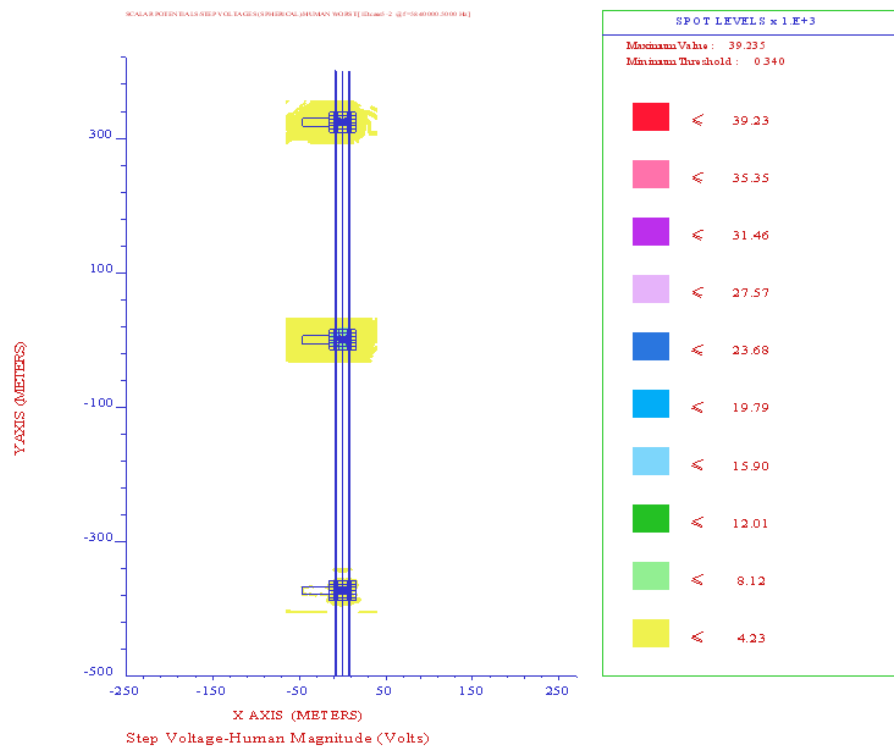
γ)



Σχήμα 5.45 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

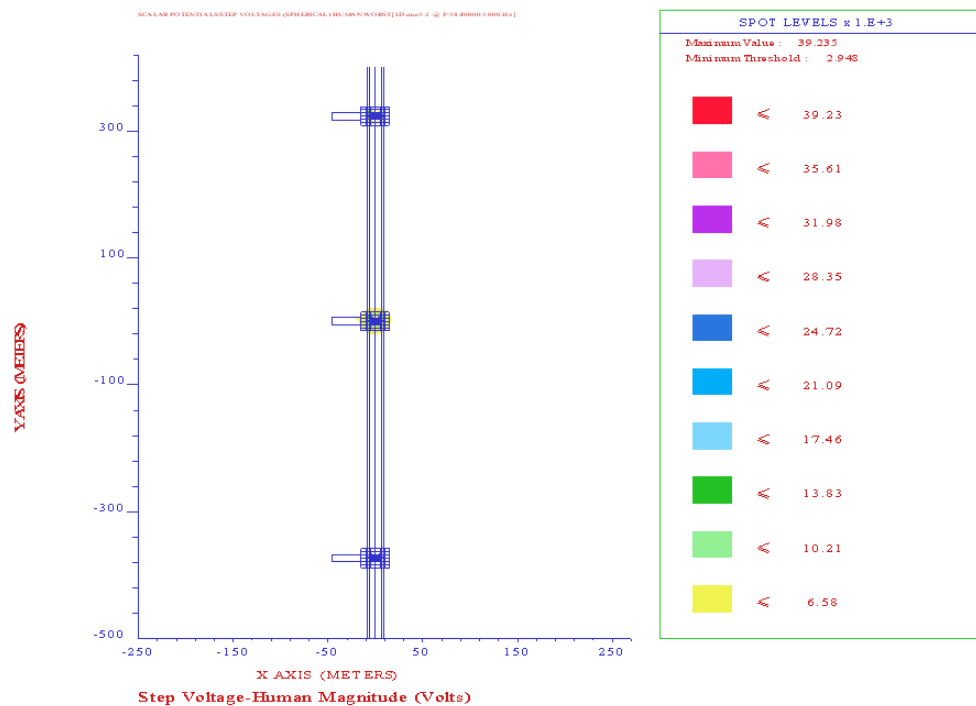
Συχνότητα 4 (5840001Hz)

α)



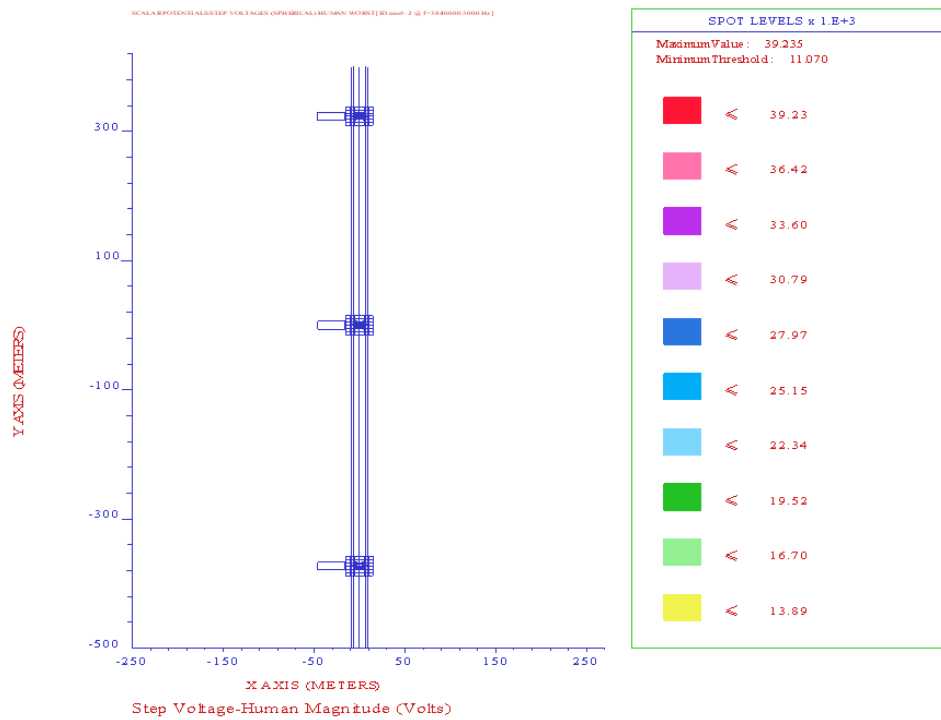
Σχήμα 5.46 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



Σχήμα 5.47 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση χαλκικού

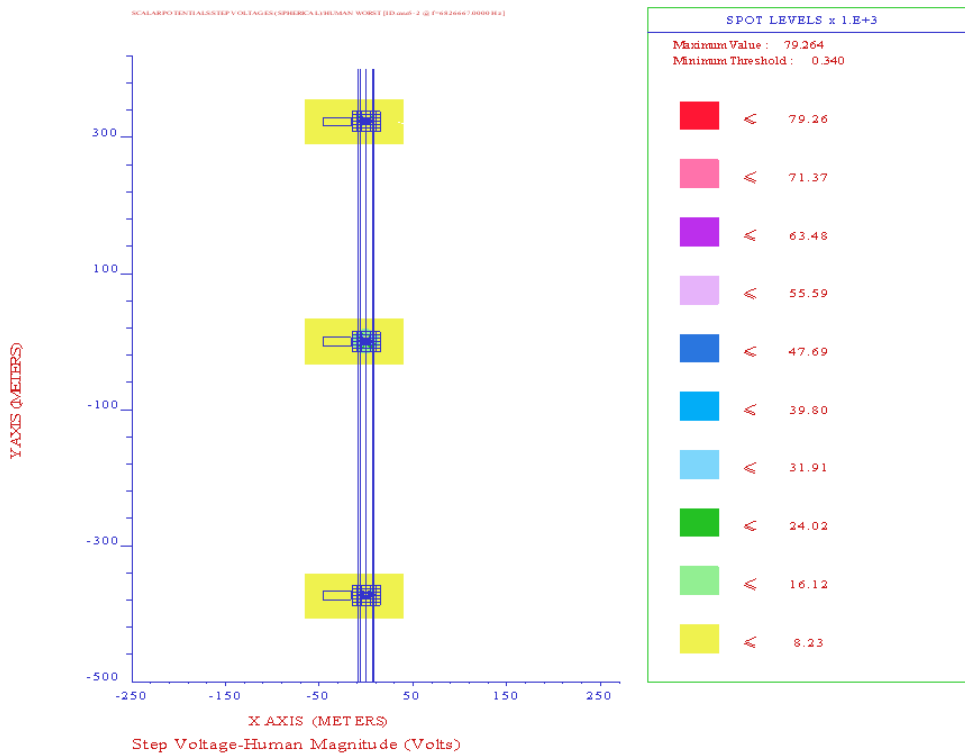
γ)



Σχήμα 5.48 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

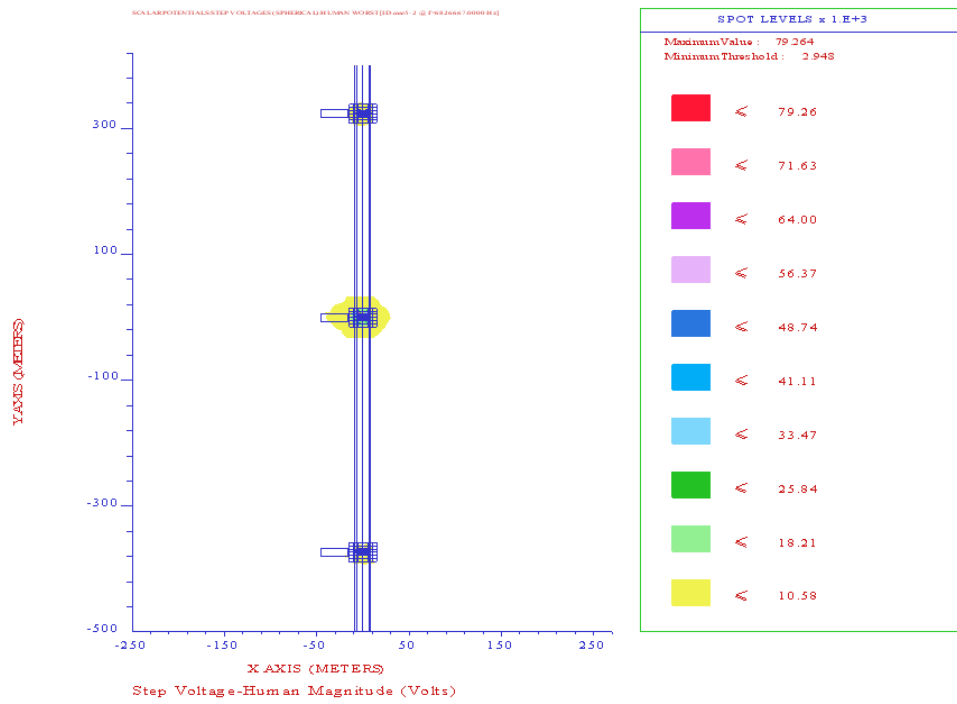
Συχνότητα 5 (6826667Hz)

α)



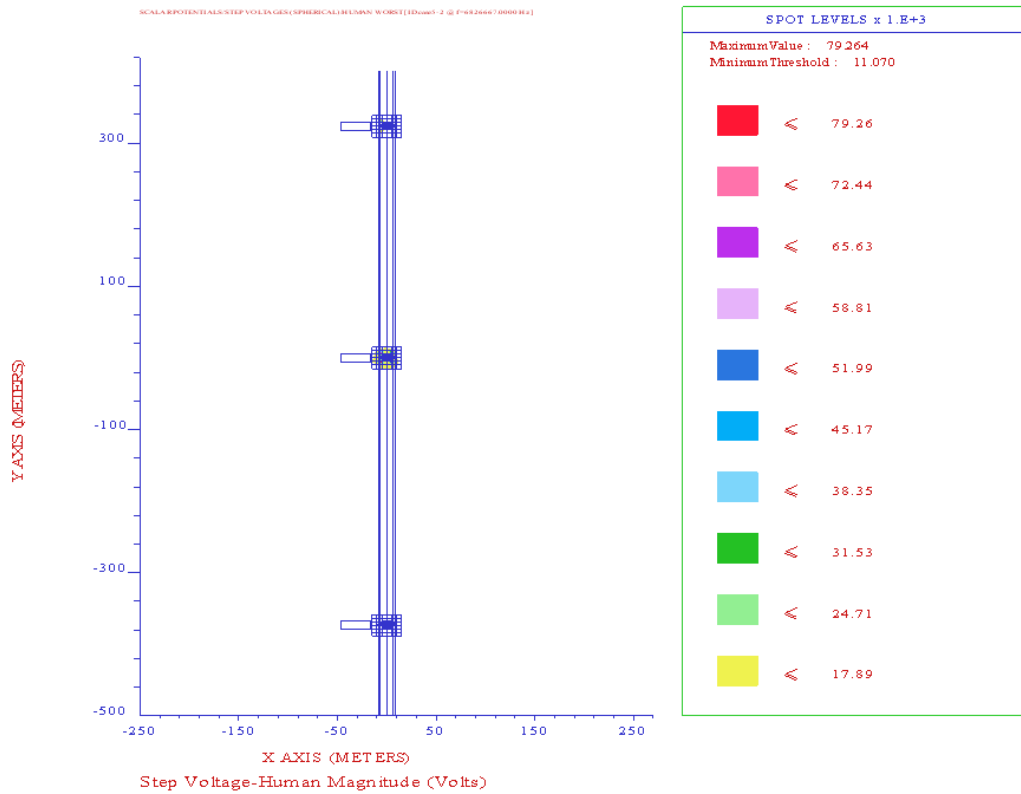
Σχήμα 5.49 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος χωρίς υλικό επιφανείας

β)



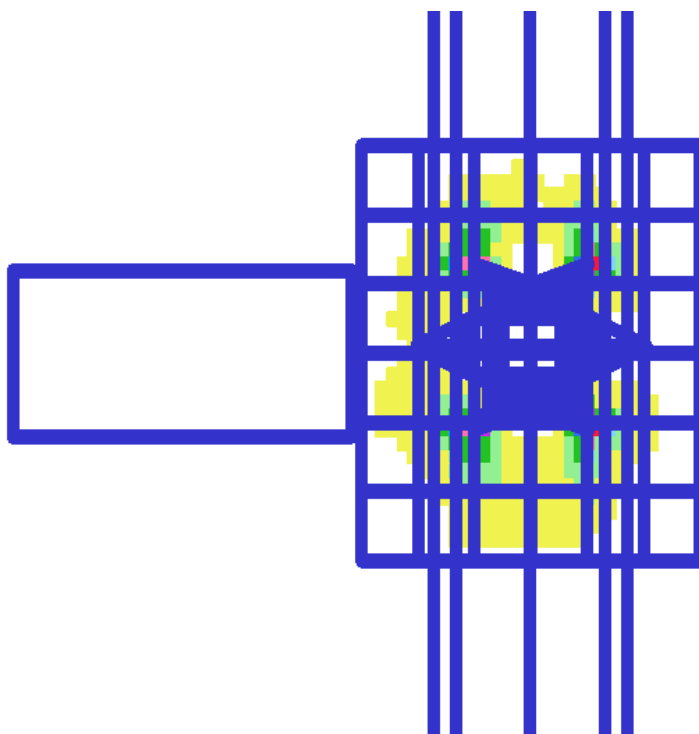
Σχήμα 5.50 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση χαλκιού

γ)



Σχήμα 5.51 Κατανομή βηματικών τάσεων σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

Παρατηρούμε ότι με χρήση ασφάλτου, ακόμα και στην μέγιστη συχνότητα, η περιοχή στην οποία αναπτύσσονται επικίνδυνες για τον άνθρωπο βηματικές τάσεις είναι πολύ μικρή και περιορίζεται πολύ κοντά στην βάση του (σχήμα 5.52).



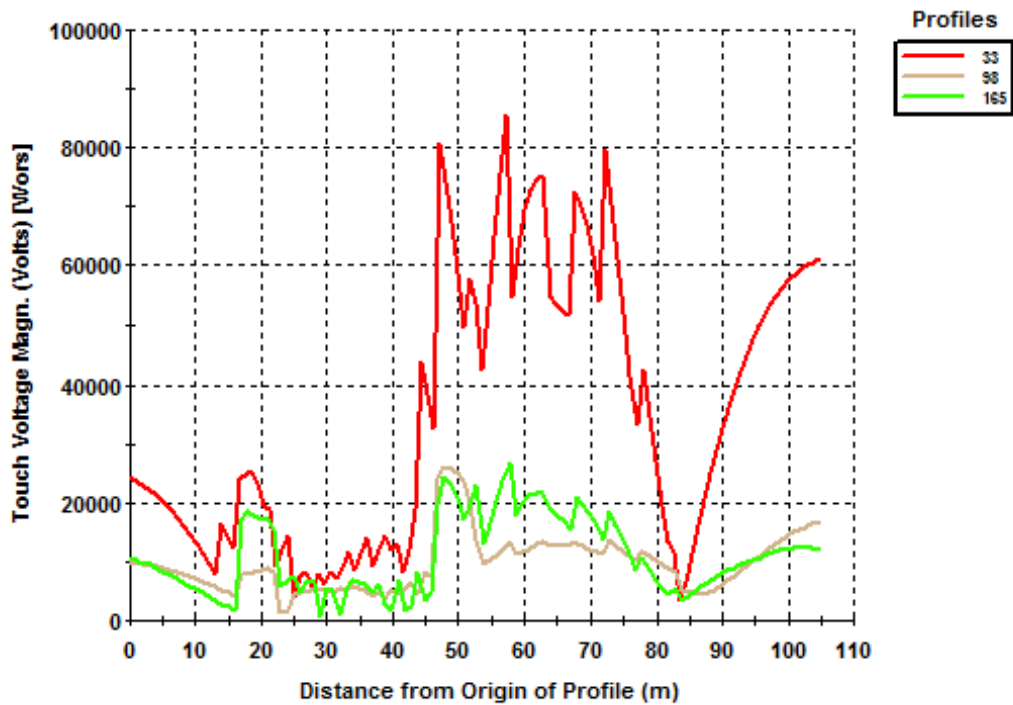
Σχήμα 5.52 Κατανομή βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα σε έδαφος με επίστρωση ασφάλτου

5.2 Προσπάθειες βελτίωσης του συστήματος γείωσης με πλέγμα

Από τις συγκρίσεις της προηγούμενης παραγράφου καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το καλύτερο συνολικά σύστημα γείωσης για το δίκτυο είναι το πλέγμα. Σε αυτή την παράγραφο εξετάζονται παραλλαγές του πλέγματος με σκοπό την επίτευξη καλύτερου επιπέδου ασφαλείας.

1^η προσπάθεια

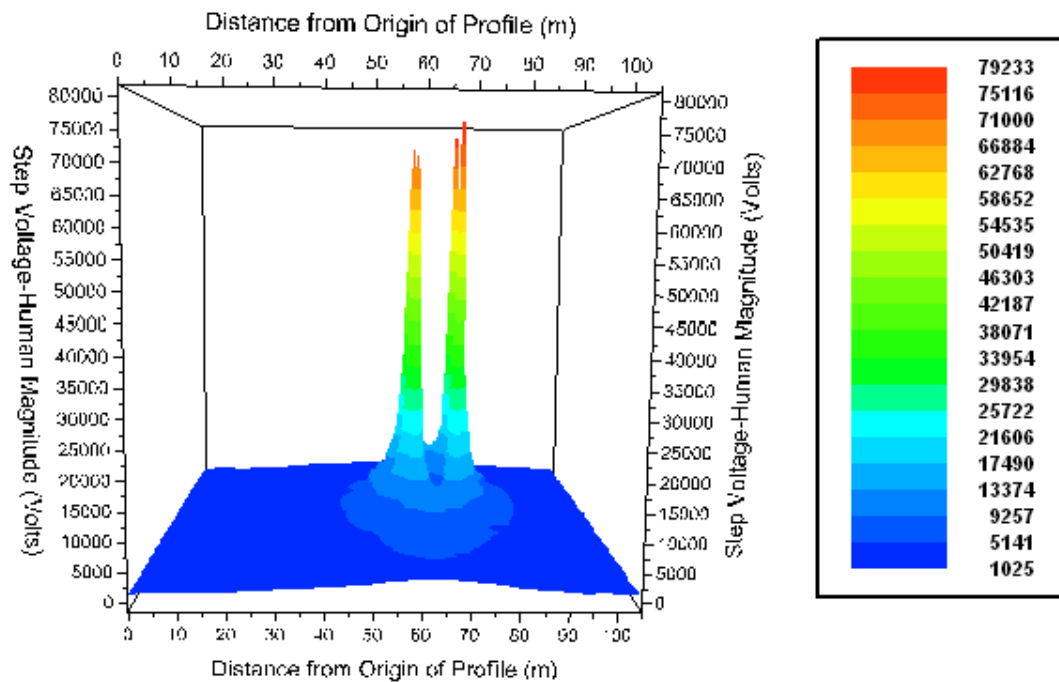
Μία παραλλαγή που εξετάστηκε στην έκτη περίπτωση (σχήμα 4.8) είναι η σύνδεση του φράχτη με το σύστημα γείωσης του πυλώνα.



Σχήμα 5.53 Τάσεις επαφής συστήματος 8 σε συχνότητα 6826667Hz

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 5.47 και κάνοντας μία σύγκριση με το αντίστοιχο σχήμα 5.14 για την τελευταία εξεταζόμενη συχνότητα του πλέγματος, οι διαφορές που παρουσιάζονται είναι αμελητέες. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η γείωση του φράχτη στο ίδιο σύστημα με τον γειτονικό πυλώνα, δεν προσφέρει ιδιαίτερη βελτίωση στις υψηλές συχνότητες. Το μόνο που παρατηρήθηκε για συχνότητες μέχρι τη 10^1 του φάσματος, είναι μία τοπική μείωση της τάσης επαφής που αναπτύσσεται στο άκρο του φράχτη προς τον πυλώνα σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στην περίπτωση του απλού πλέγματος.

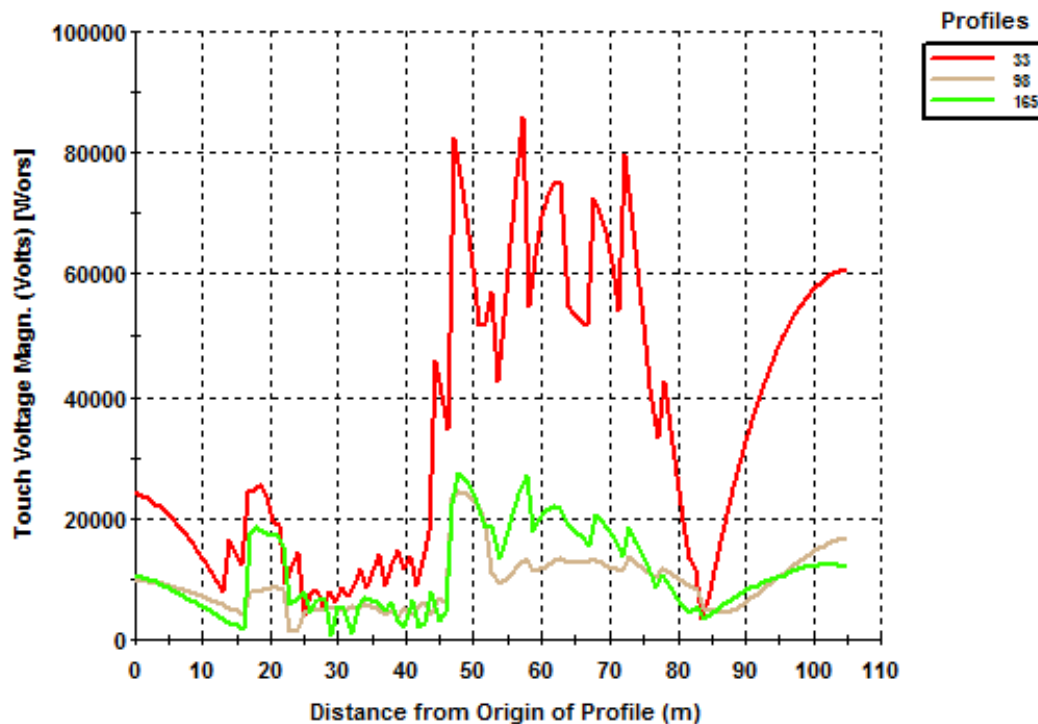
Όσον αφορά τις βηματικές τάσεις η διαφορά που προέκυψε στην μέγιστη τιμή είναι της τάξης των 31V, που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (σχήμα 5.54).



Σχήμα 5.54 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος με σύνδεση φράχτη στο πλέγμα γείωσης

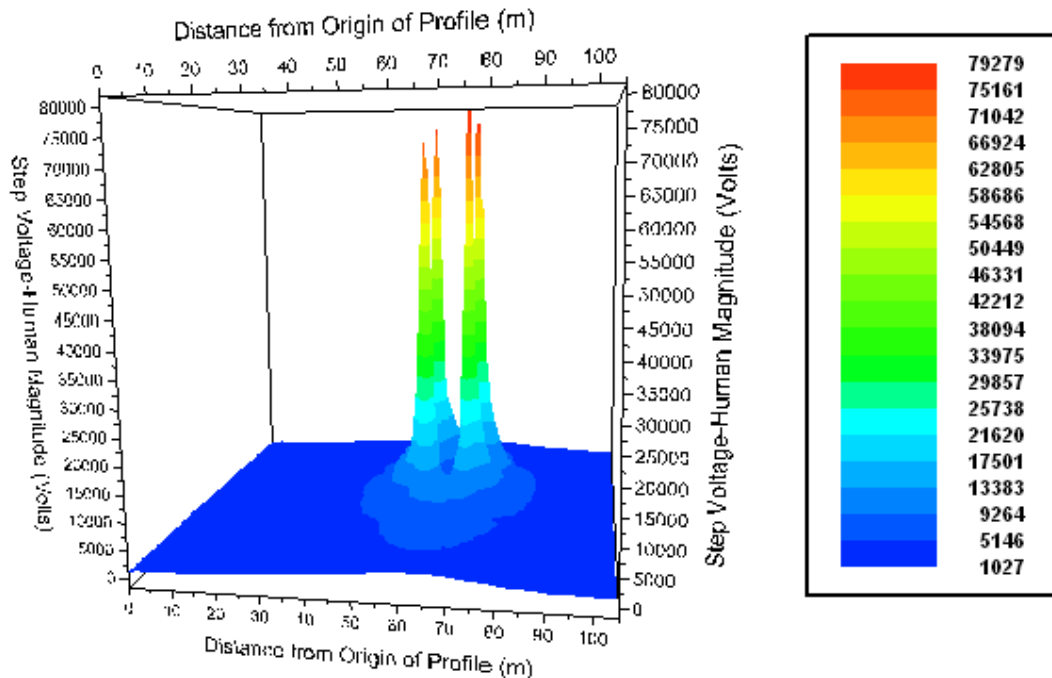
2^η προσπάθεια

Τοποθετούμε στα 4 άκρα του πλέγματος ράβδους γείωσης μήκους 3m (σχήμα 4.9).



Σχήμα 5.55 Τάσεις επαφής συστήματος 7 σε συχνότητα 6826667Hz

Δεν παρατηρείται καμία ουσιώδης διαφορά στο σχήμα 5.48 σε σχέση με το απλό πλέγμα (σχήμα 5.14), στην μέγιστη εξεταζόμενη συχνότητα.

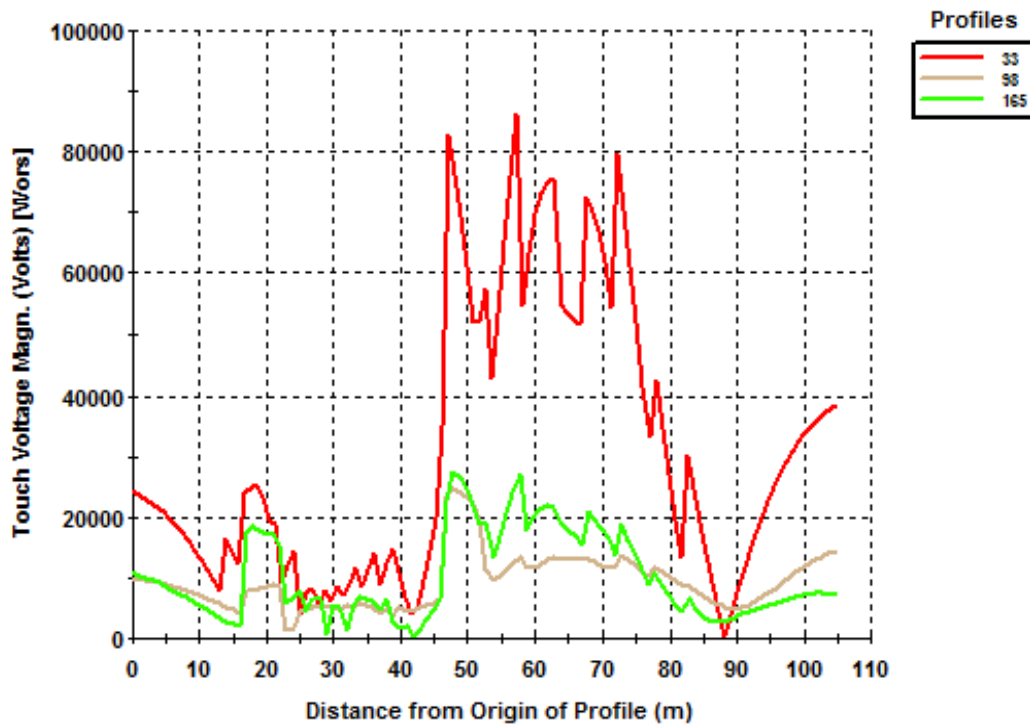


Σχήμα 5.56 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος με σύνδεση επιπλέον ράβδων γείωσης στα άκρα του πλέγματος

Στο σχήμα 5.56 παρατηρούμε ότι ούτε η κατανομή των βηματικών τάσεων βελτιώνεται σε σχέση με τη χρήση απλού πλέγματος, ούτε η μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή μειώνεται.

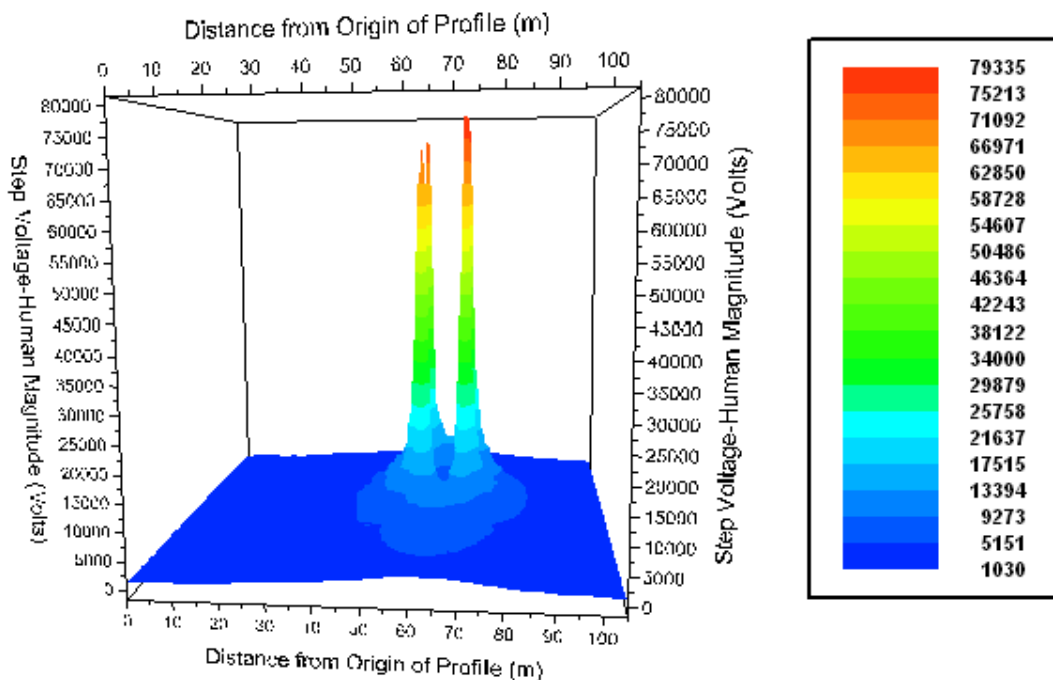
3^η προσπάθεια

Δημιουργούμε ένα τετράγωνο από αγωγούς γείωσης πλευράς 40m και το συνδέουμε με το πλέγμα γείωσης με 4 αγωγούς στα 4 άκρα (σχήμα 4.10). Εξετάζουμε την συμπεριφορά του συστήματος στην υψηλότερη συχνότητα, όπου εμφανίζεται η χειρότερη συμπεριφορά του συστήματος γείωσης.



Σχήμα 5.57 Τάσεις επαφής συστήματος 8 σε συχνότητα 6826667Hz

Παρατηρείται μία εξομάλυνση των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής στην περιοχή του φράχτη στα 45-48m σε σύγκριση με το απλό πλέγμα, ωστόσο αυτή δεν προσφέρει κάποια ουσιαστική βελτίωση στην συμπεριφορά του πλέγματος.



Σχήμα 5.58 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος με σύνδεση του πλέγματος με μία περίμετρο αγωγών γείωσης

5.3 Σύγκριση με βάση το σημείο έγχυσης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, εξετάστηκαν 3 διαφορετικά σημεία έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος 10kA, για κάθε σύστημα στις προσομοιώσεις μας. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν ως σημεία έγχυσης τα εξής:

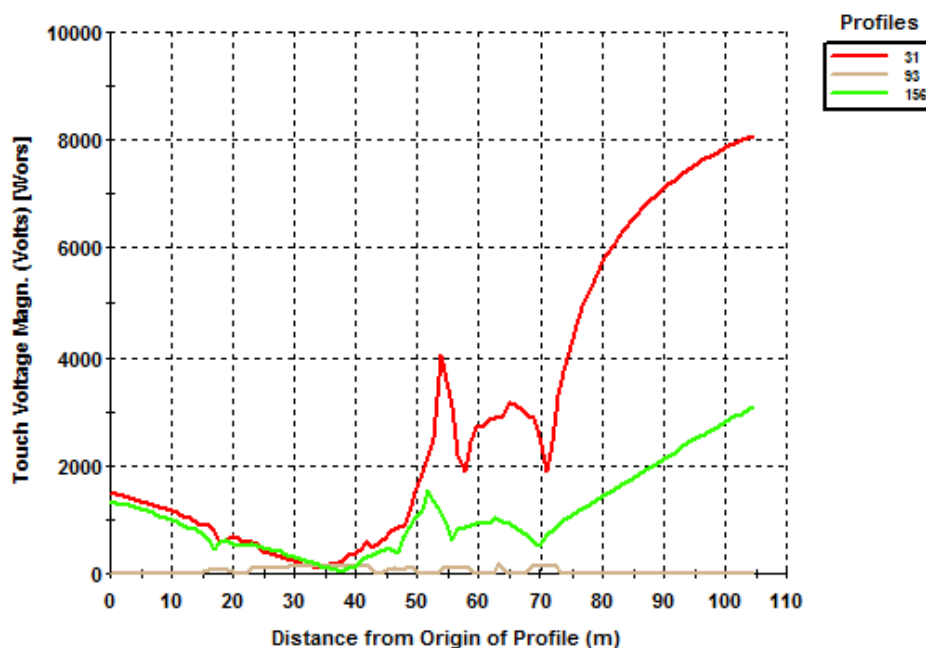
- 10m από τον κεντρικό πυλώνα
- Κορυφή του πυλώνα (απόσταση <1m)
- Το μέσο μεταξύ δύο πυλώνων

Στην παρούσα παράγραφο θα εξετάσουμε τις επιπτώσεις της διαφορετικής έγχυσης στο σύστημα που χρησιμοποιεί σύστημα γείωσης τύπου I (σχήμα 4.3), δηλαδή θα συγκρίνουμε τις περιπτώσεις 1, 4.1 και 5.1.

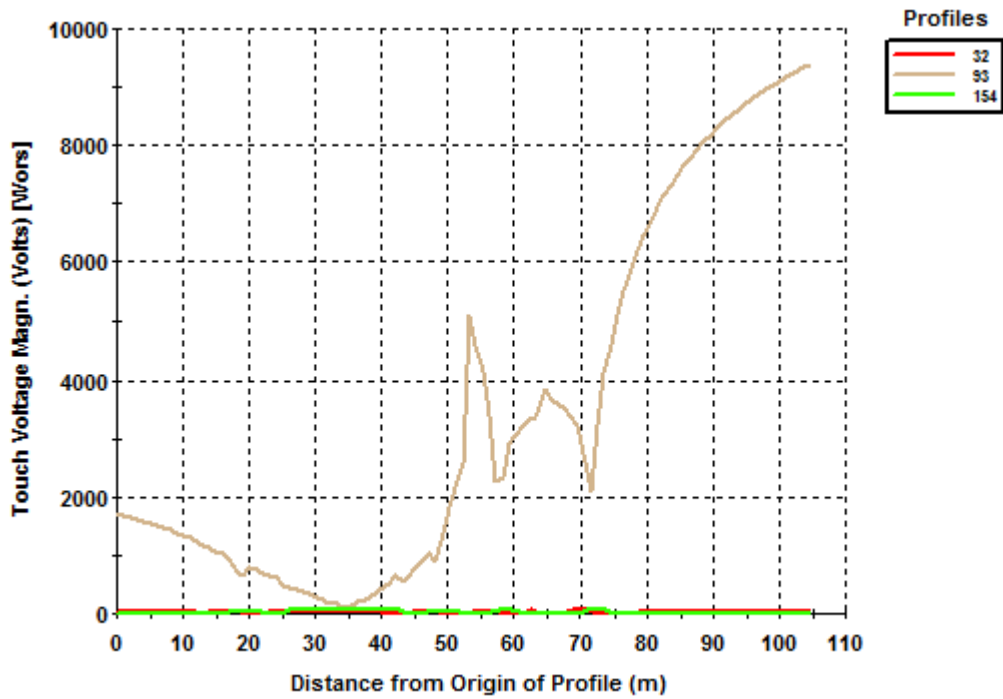
Οι γραφικές παραστάσεις που δείχνουν την ανάπτυξη των τάσεων επαφής στο σύστημα 4.1 για καθεμία από τις 5 εξεταζόμενες συχνότητες έχουν δοθεί παραπάνω και είναι οι 5.1, 5.4, 5.7, 5.10, 5.13.

Τάσεις επαφής

Συχνότητα 1 (6666,667Hz)



Σχήμα 5.59 Τάσεις επαφής συστήματος 1 στην πρώτη συχνότητα

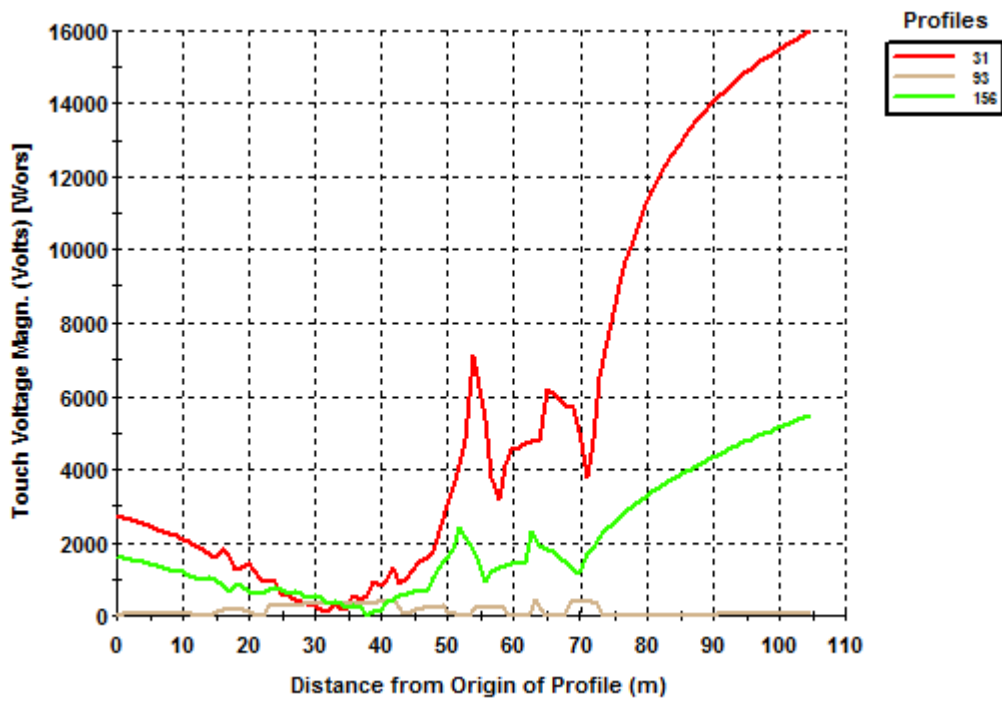


Σχήμα 5.60 Τάσεις επαφής συστήματος 5.1 στην πρώτη συχνότητα

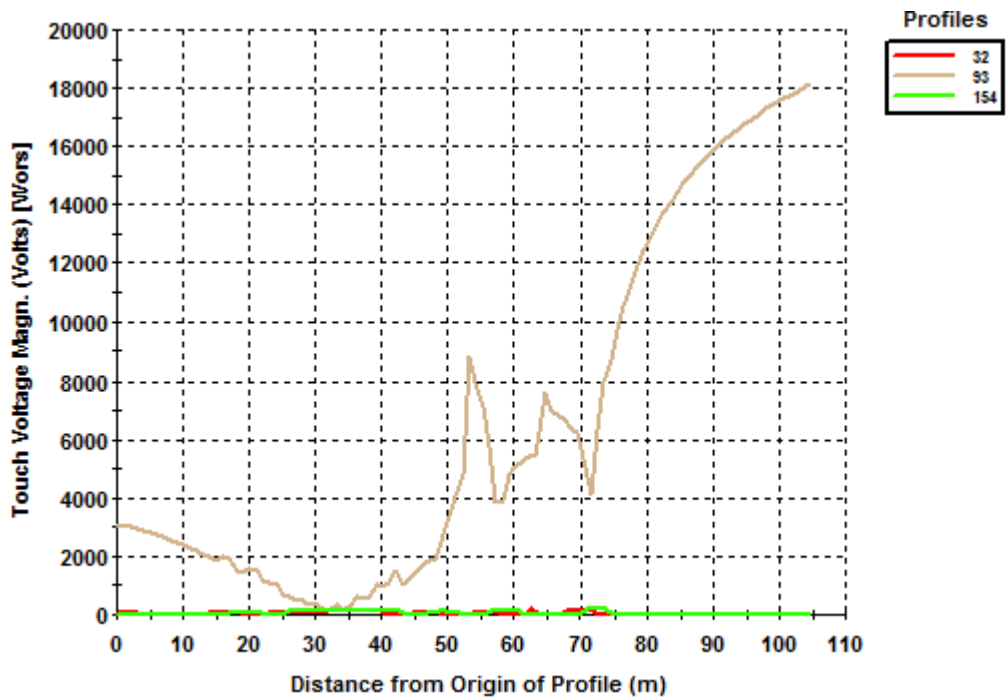
Παρατηρήσεις

Στο σύστημα 1 με κόκκινο παρουσιάζεται η συμπεριφορά στο προφίλ του πάνω πυλώνα, με μπλε του κάτω και με πράσινο του κεντρικού. Στο σύστημα 5.1 ο πάνω πυλώνας εμφανίζεται με μπλε, ο κεντρικός με κόκκινο και ο κάτω με πράσινο.

Συχνότητα 2 (33333,34Hz)

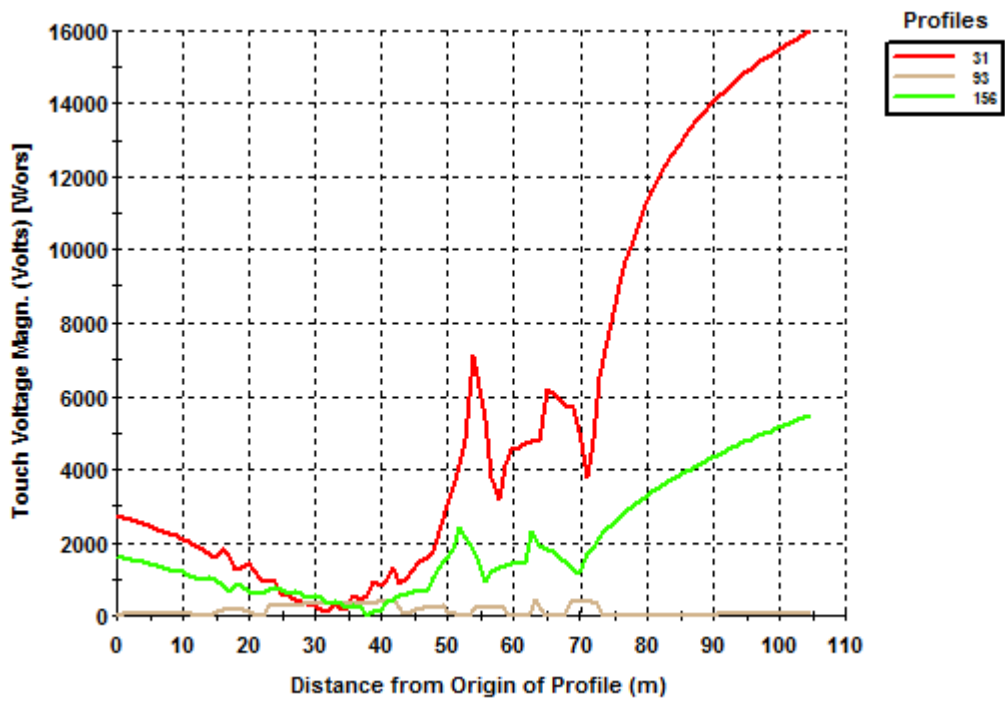


Σχήμα 5.61 Τάσεις επαφής συστήματος 1 στην δεύτερη συχνότητα

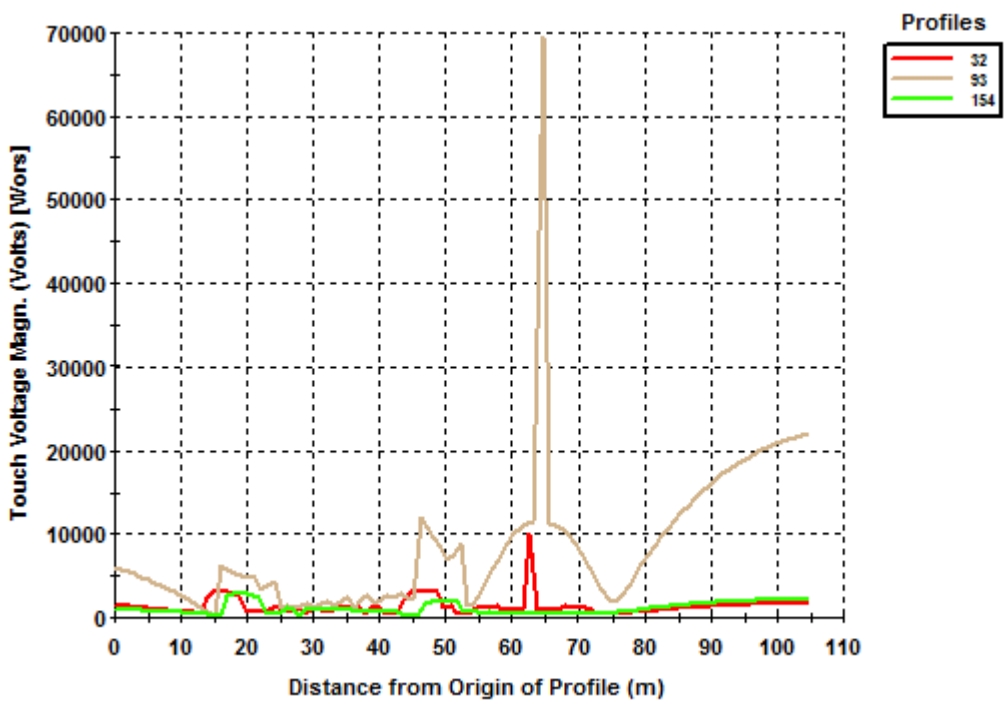


Σχήμα 5.62 Τάσεις επαφής συστήματος 5.1 στην δεύτερη συχνότητα

Συχνότητα 3 (5840001Hz)

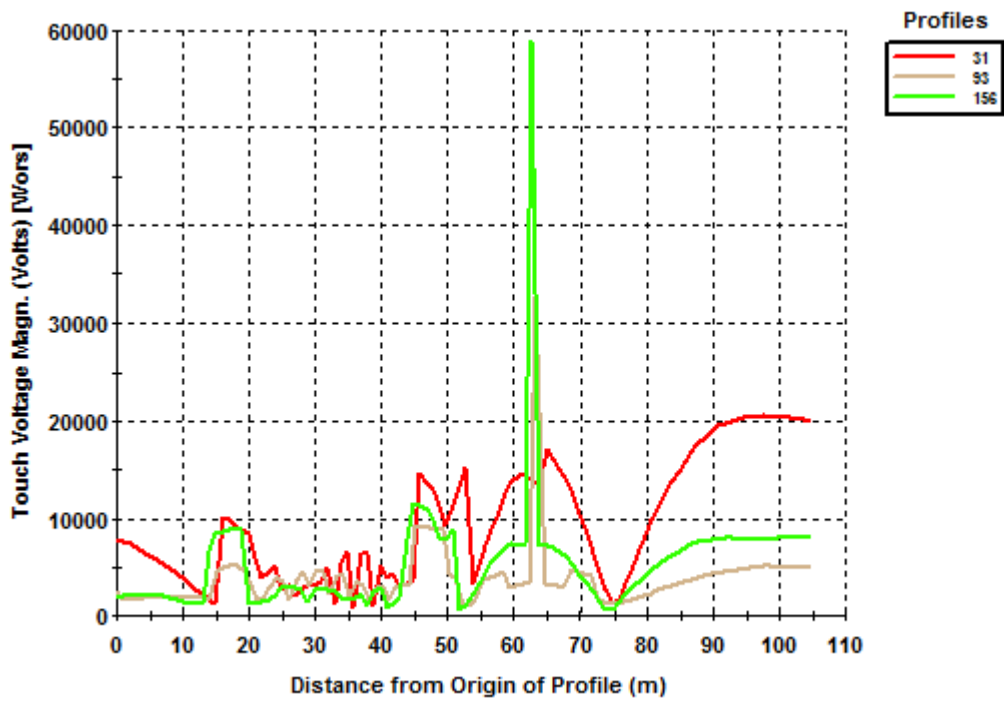


Σχήμα 5.63 Τάσεις επαφής συστήματος 1 στην τρίτη συχνότητα

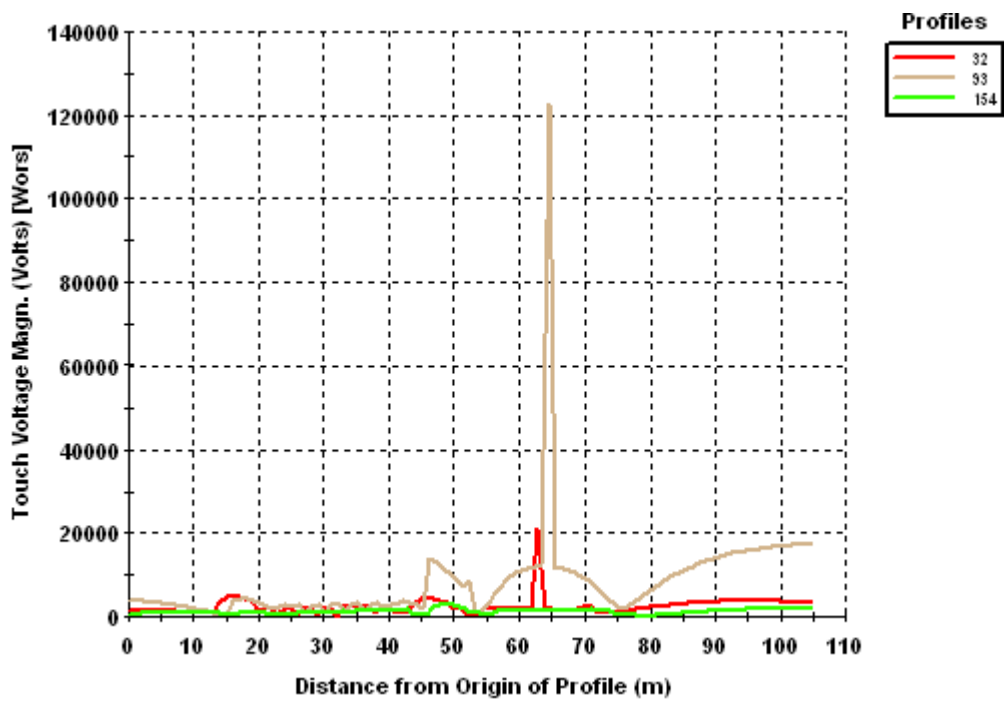


Σχήμα 5.64 Τάσεις επαφής συστήματος 5.1 στην τρίτη συχνότητα

Συχνότητα 4 (6813334Hz)

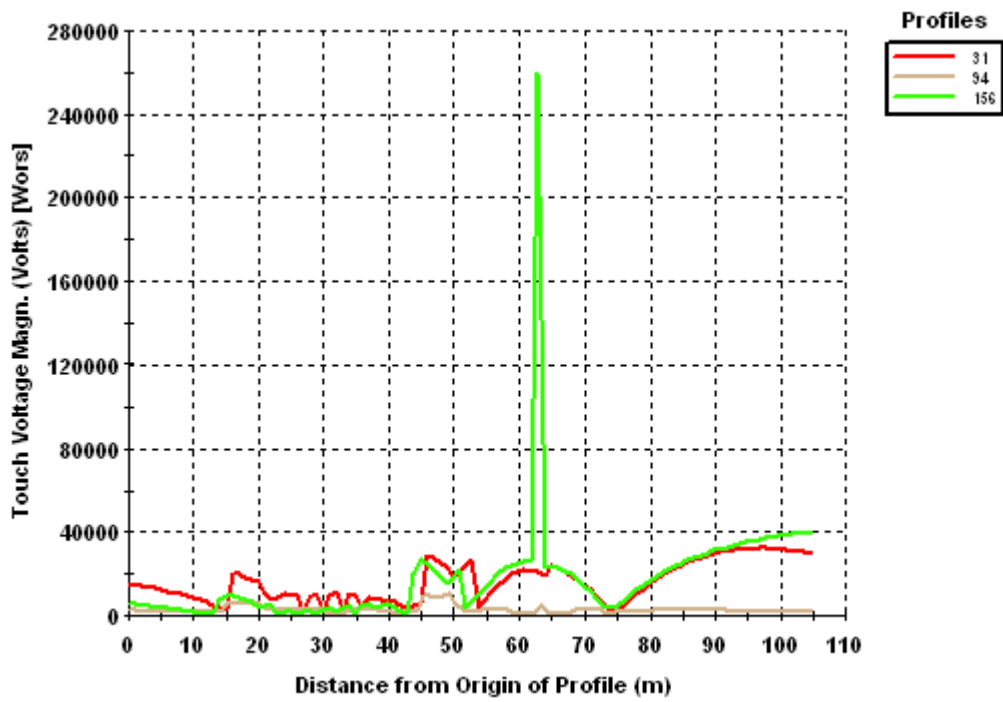


Σχήμα 5.65 Τάσεις επαφής συστήματος 1 στην τέταρτη συχνότητα

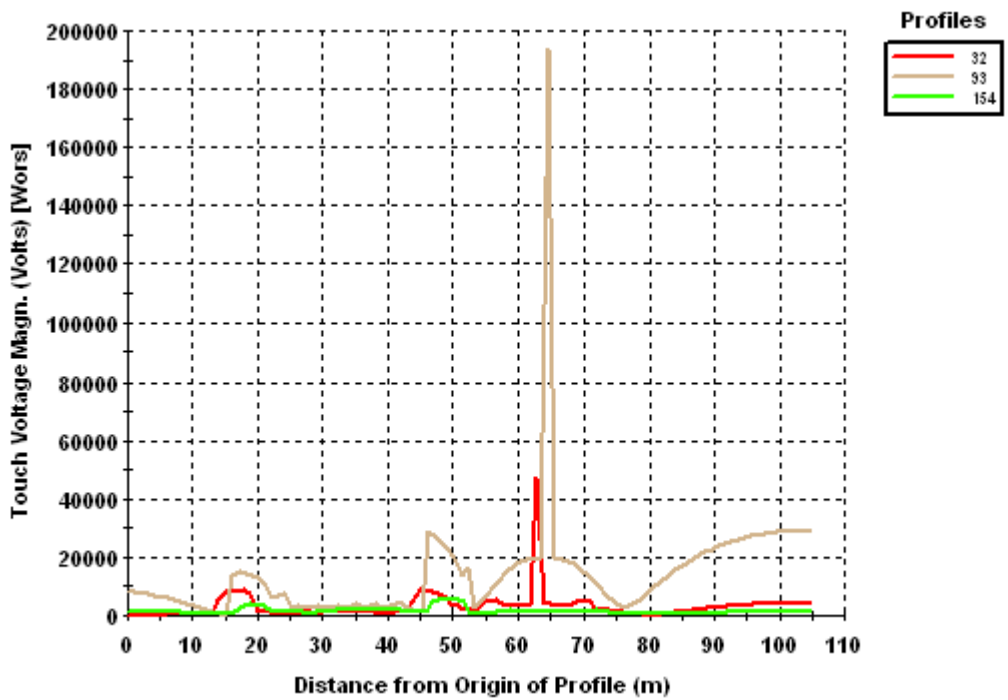


Σχήμα 5.66 Τάσεις επαφής συστήματος 5.1 στην τέταρτη συχνότητα

Συχνότητα 5 (6826667Hz)



Σχήμα 5.67 Τάσεις επαφής συστήματος 1 στην πέμπτη συχνότητα

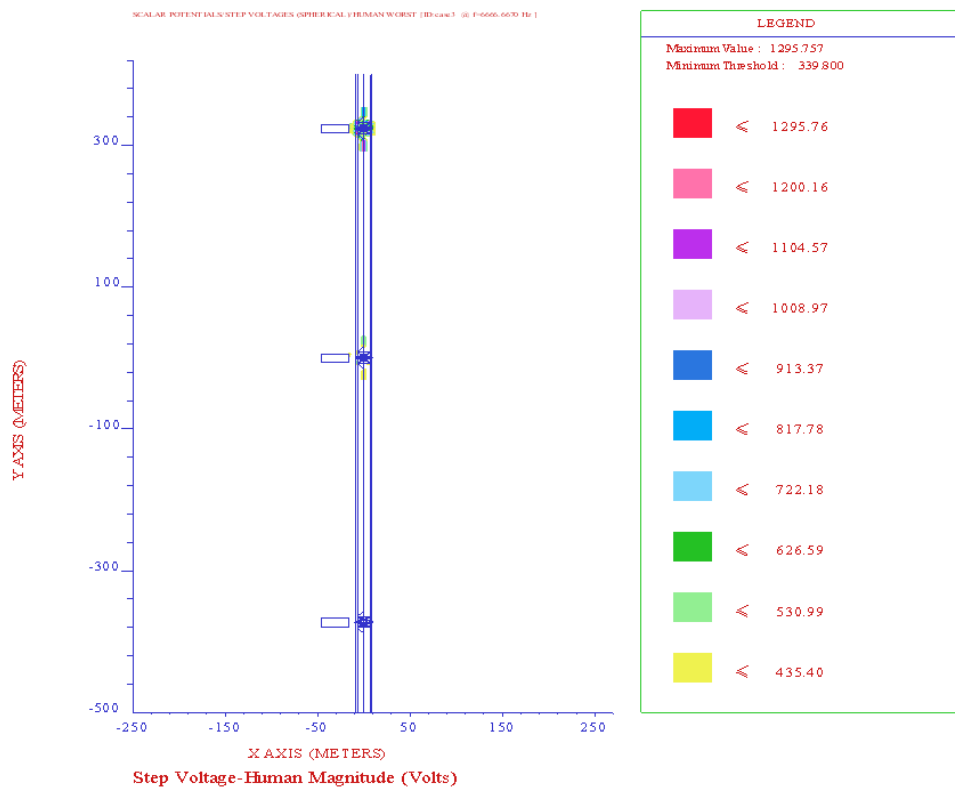


Σχήμα 5.68 Τάσεις επαφής συστήματος 5.1 στην πέμπτη συχνότητα

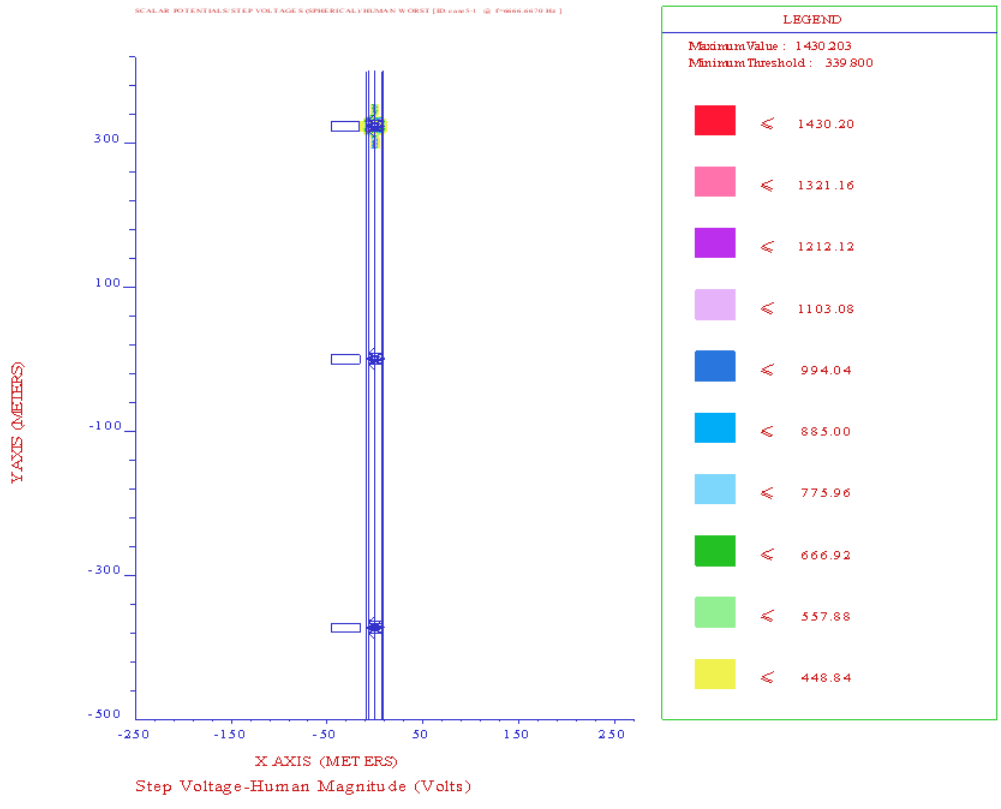
Βηματικές τάσεις

Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις για τις 3 περιπτώσεις έγχυσης κεραυνικού ρεύματος εξετάζουμε την συμπεριφορά και την ανάπτυξή τους σε σχέση με την συχνότητα, για έδαφος χωρίς επικάλυψη.

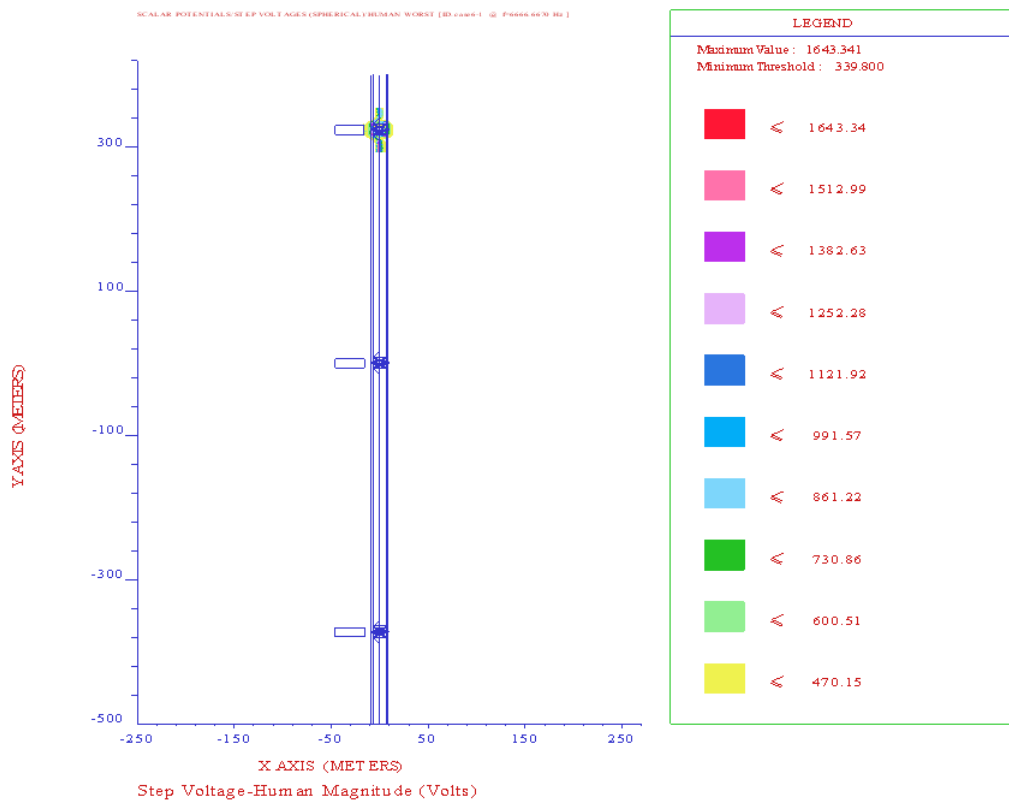
Συχνότητα 1 (6666,667Hz)



Σχήμα 5.69 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 1 (6666,667Hz)

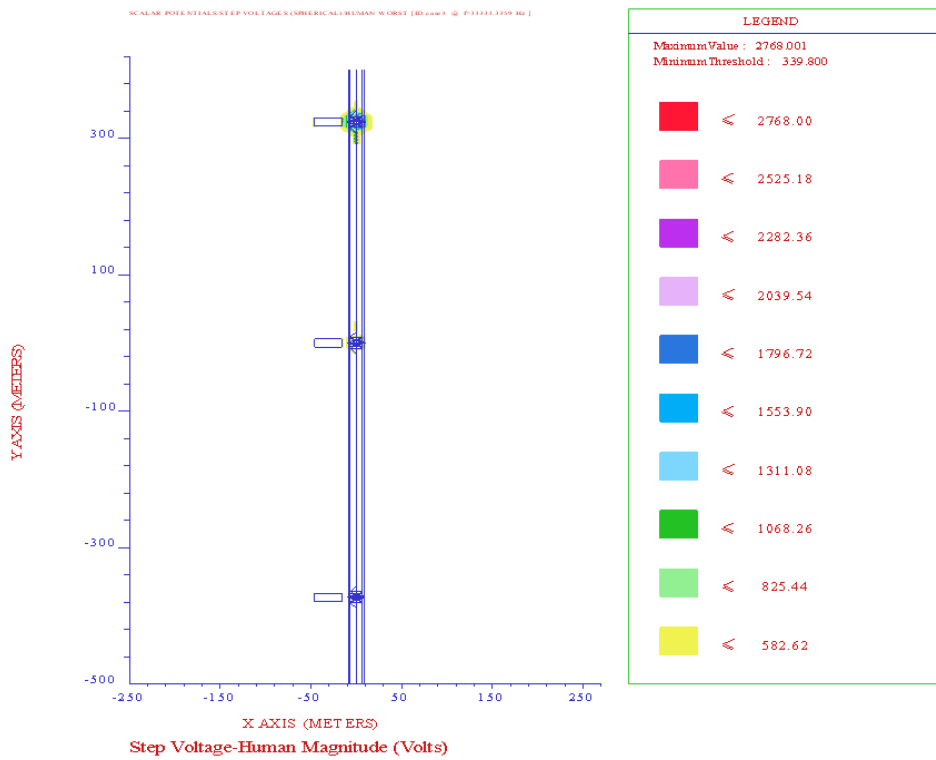


Σχήμα 5.70 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 4.1 (6666,667Hz)

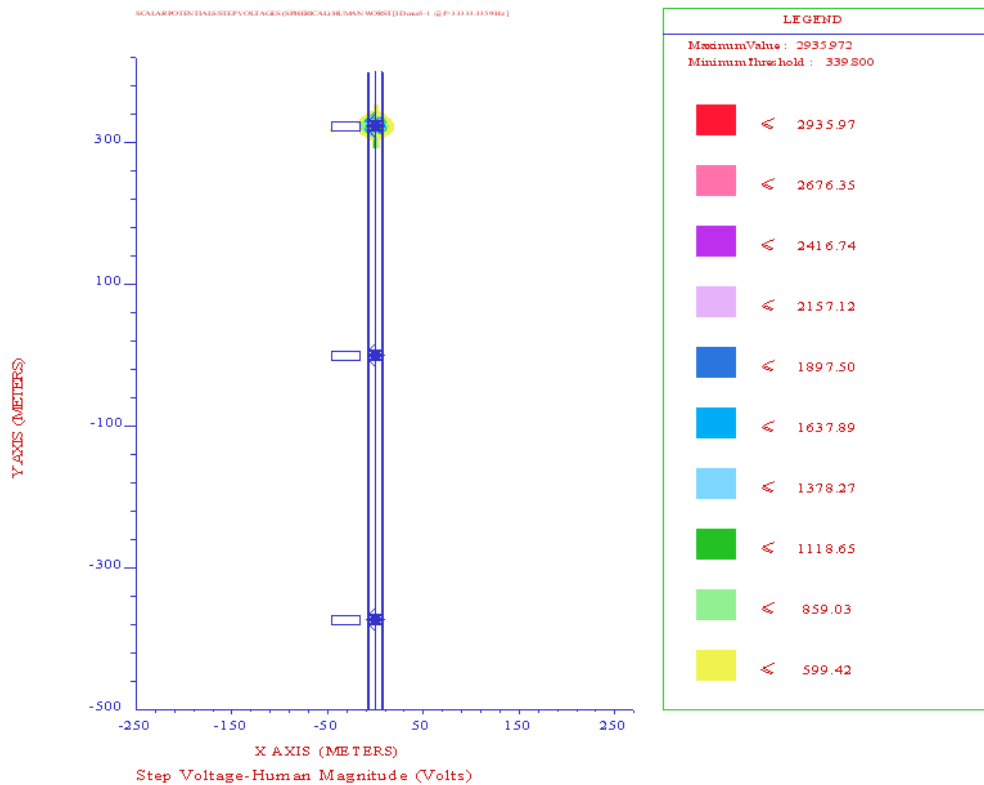


Σχήμα 5.71 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 5.1 (6666,667Hz)

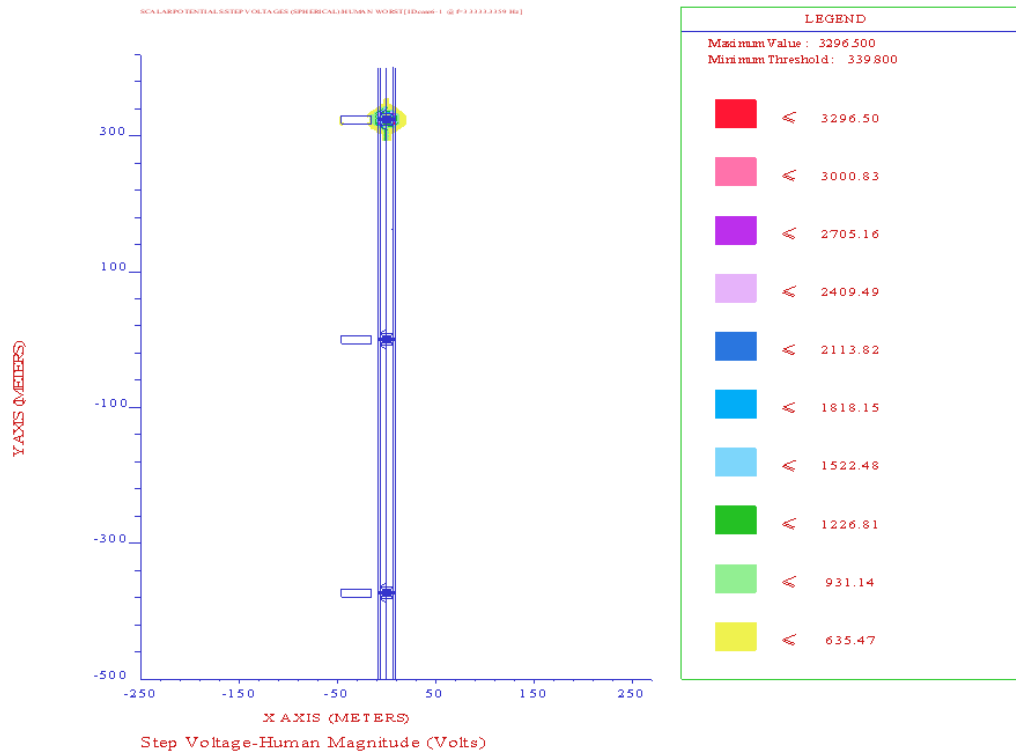
Συχνότητα 2 (33333,34Hz)



Σχήμα 5.72 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 1 (33333,34Hz)

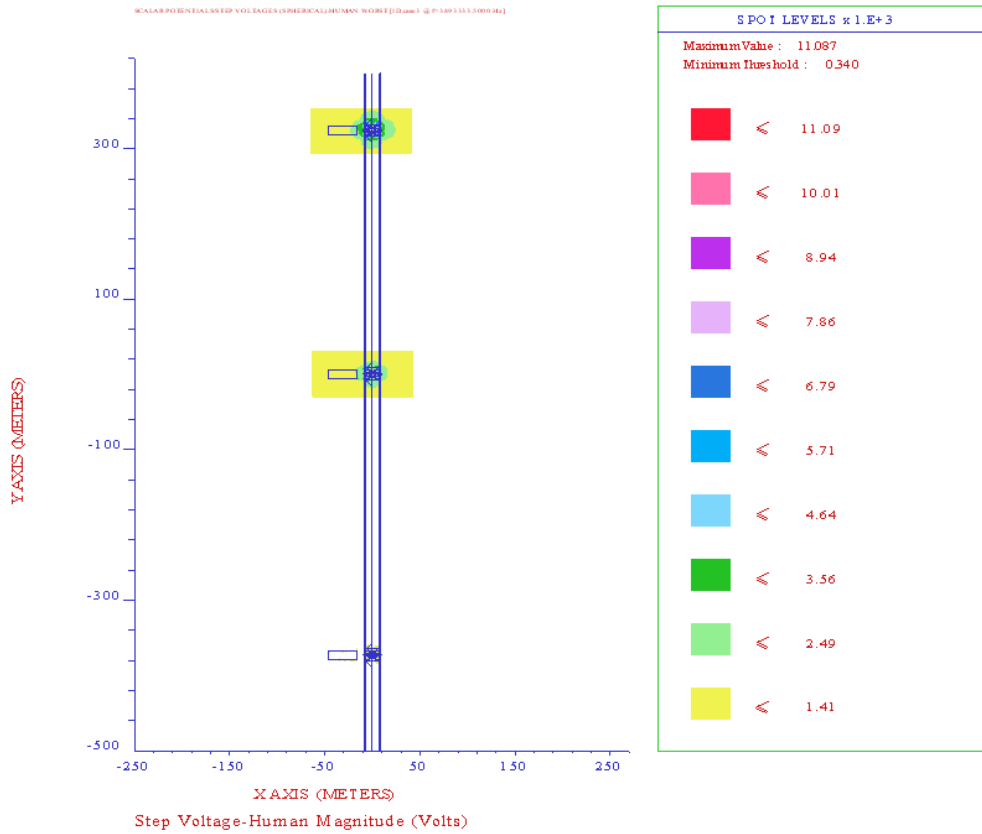


Σχήμα 5.73 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 4.1 (33333,34Hz)

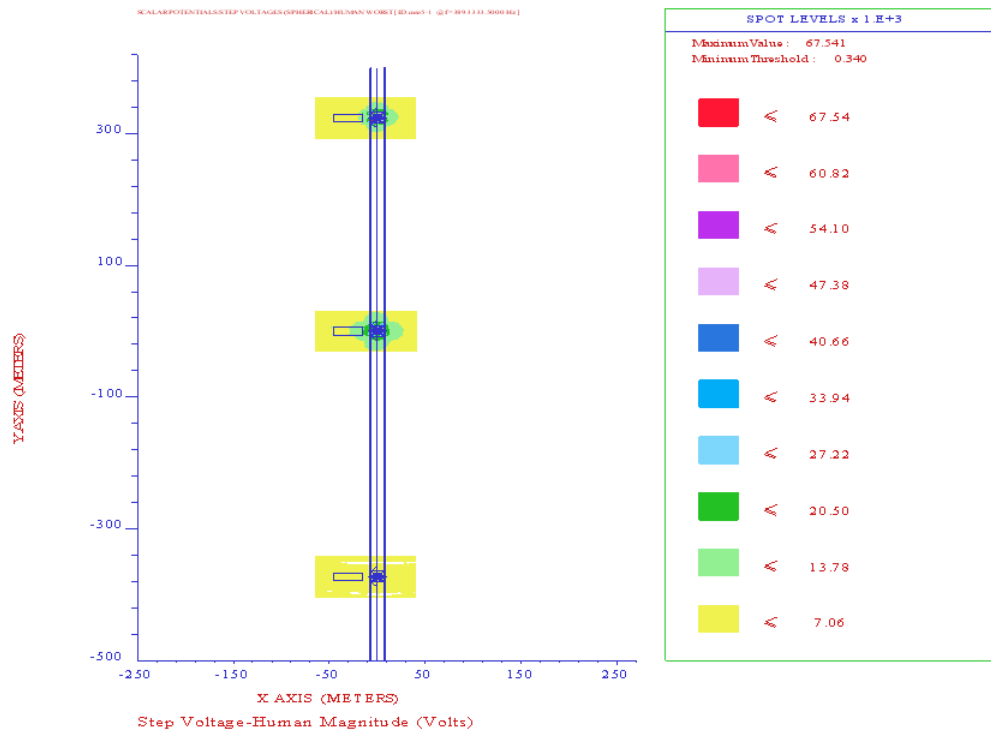


Σχήμα 5.74 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 5.1 (33333,34Hz)

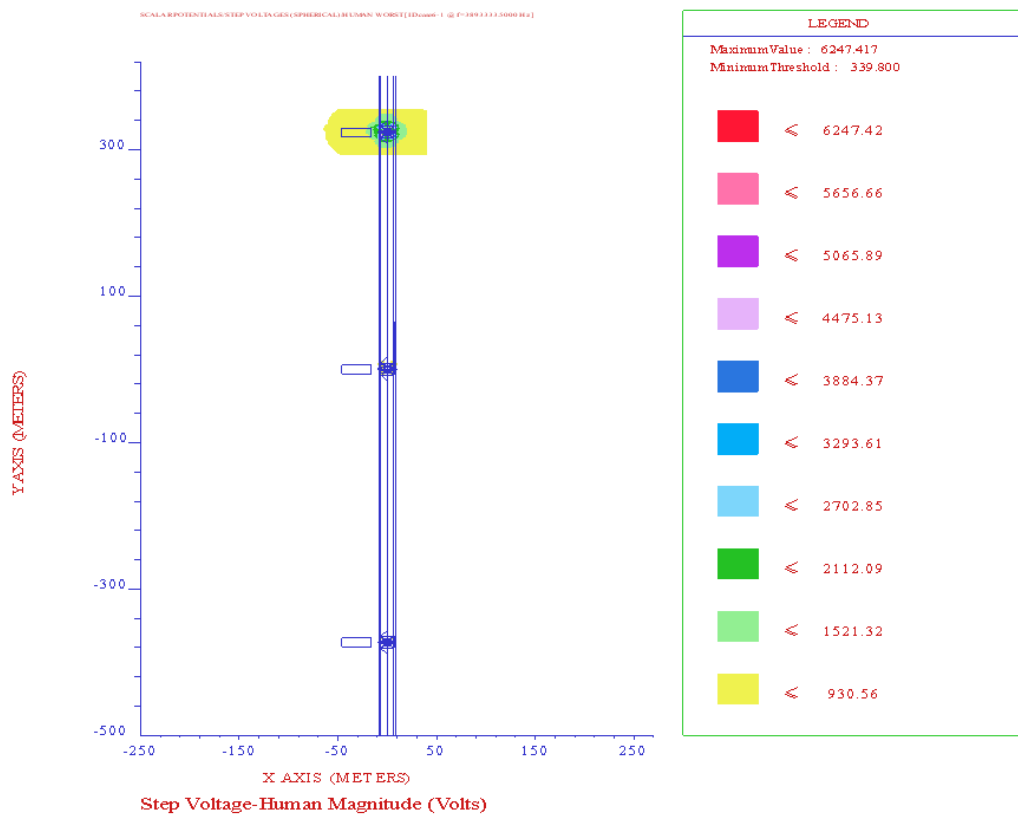
Συχνότητα 3 (5840001Hz)



Σχήμα 5.75 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 1 (5840001Hz)

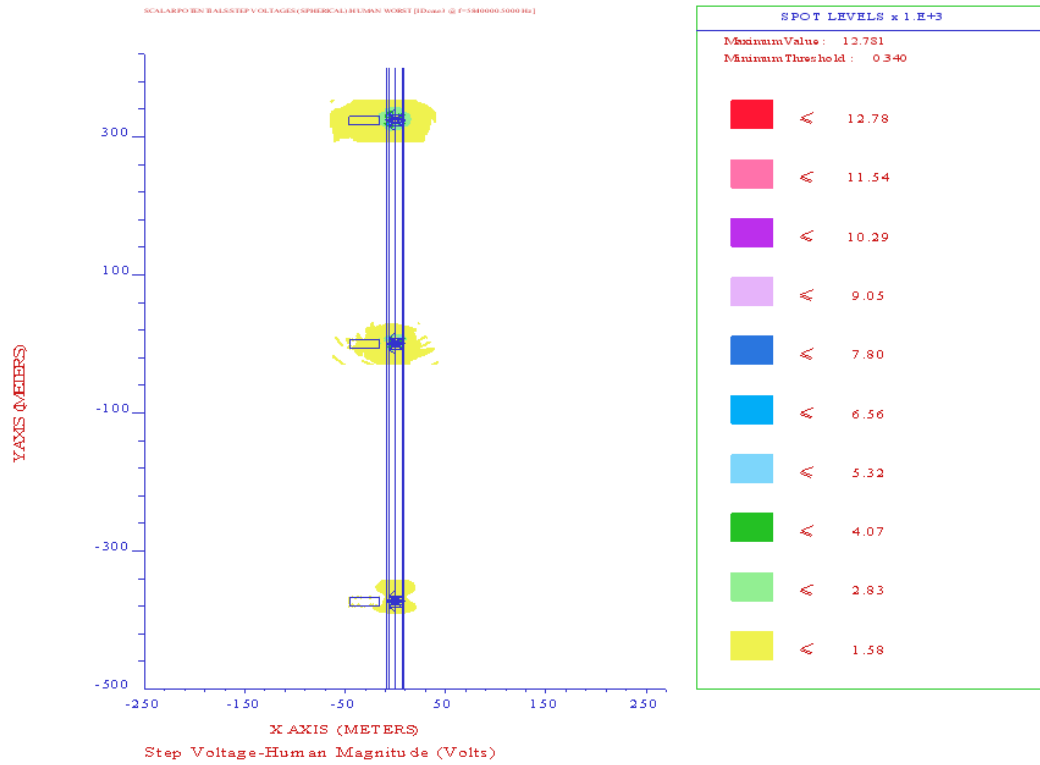


Σχήμα 5.76 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 4.1 (5840001Hz)

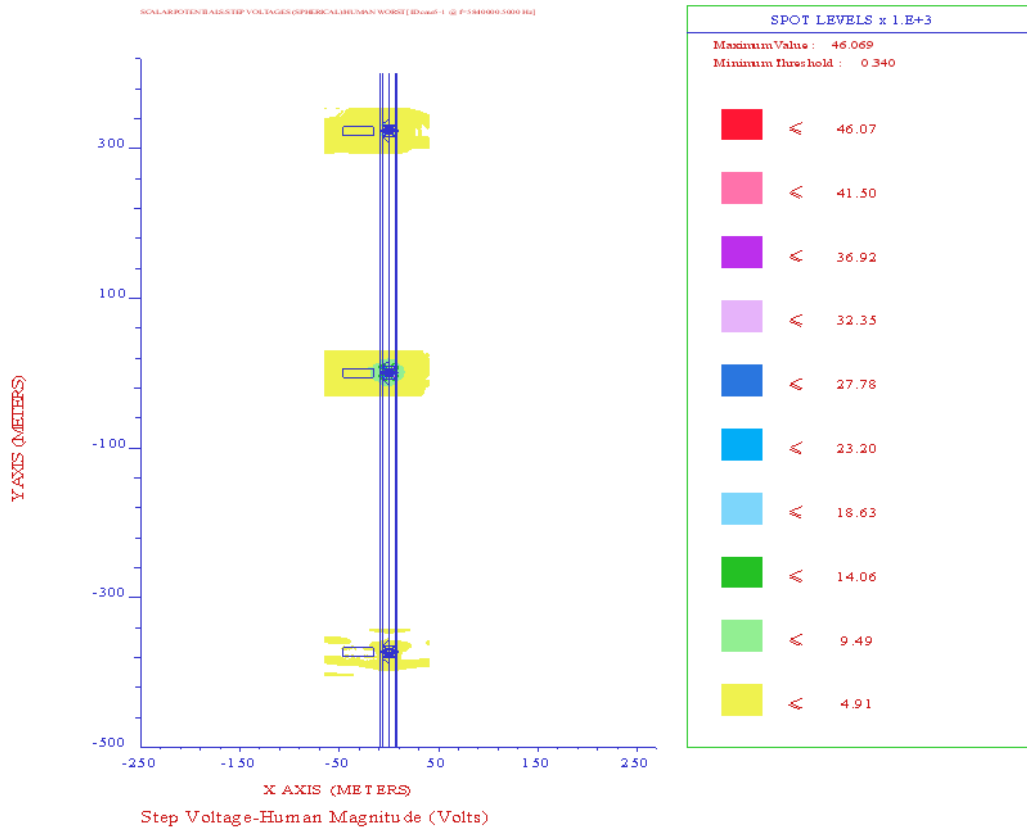


Σχήμα 5.77 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 5.1 (5840001Hz)

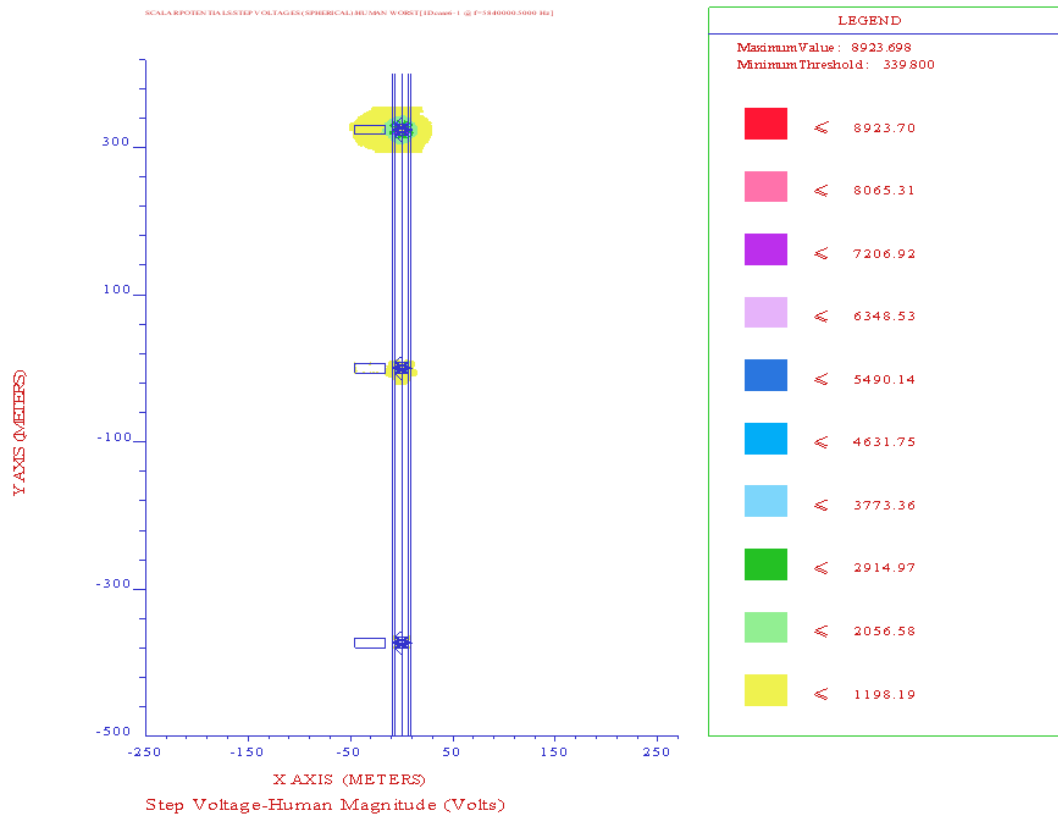
Συχνότητα 4 (6813334Hz)



Σχήμα 5.78 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 1 (6813334Hz)

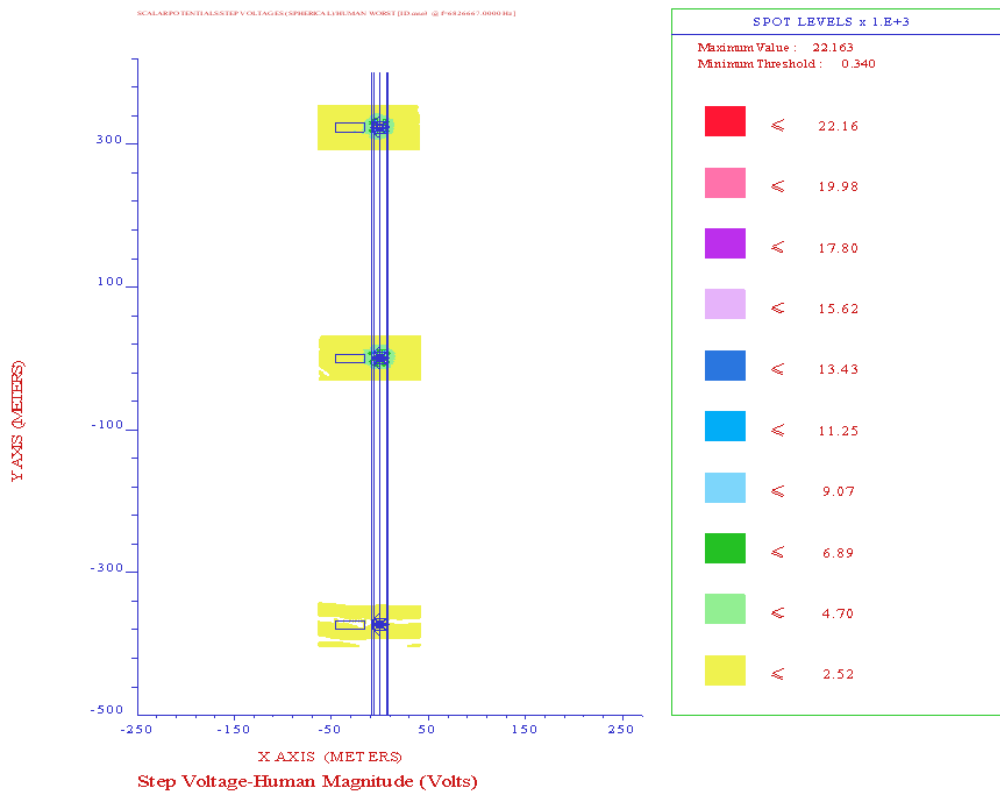


Σχήμα 5.79 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 4.1 (6813334Hz)

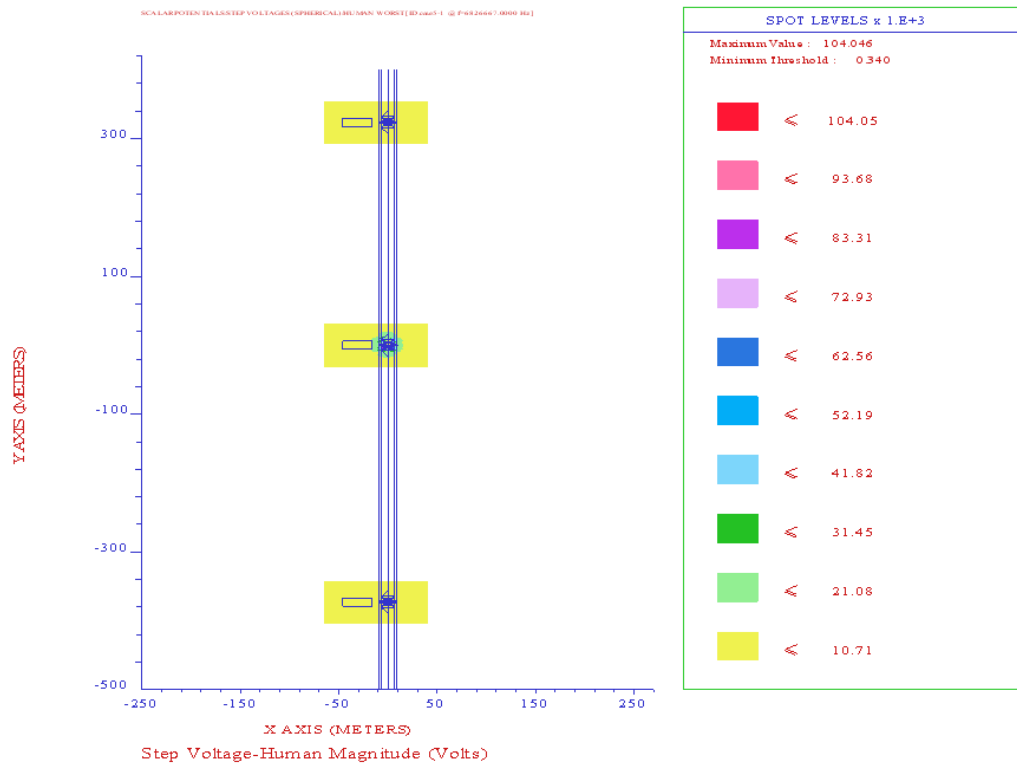


Σχήμα 5.80 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 5.1 (6813334Hz)

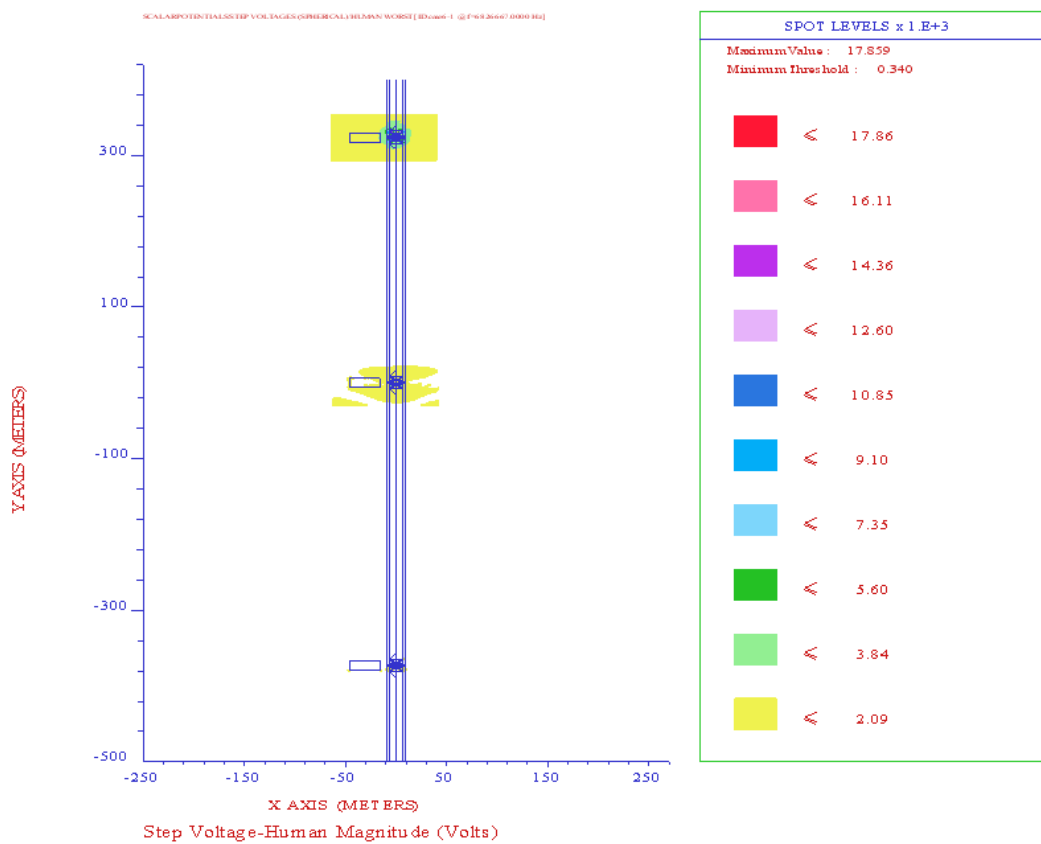
Συχνότητα 5 (6826667Hz)



Σχήμα 5.81 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 1 (6826667Hz)

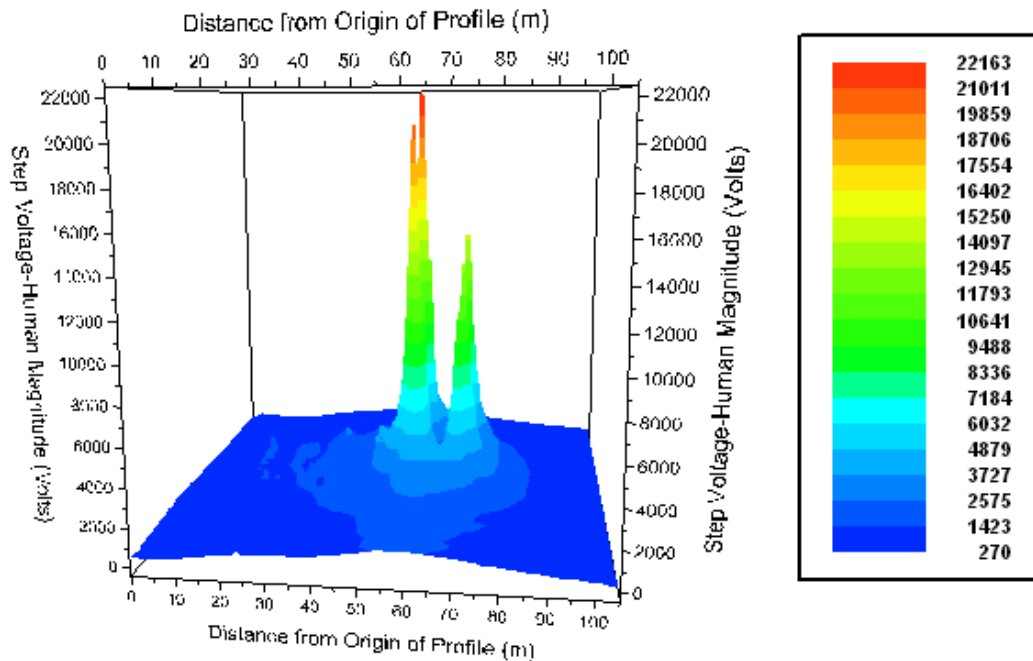


Σχήμα 5.82 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 4.1 (6826667Hz)

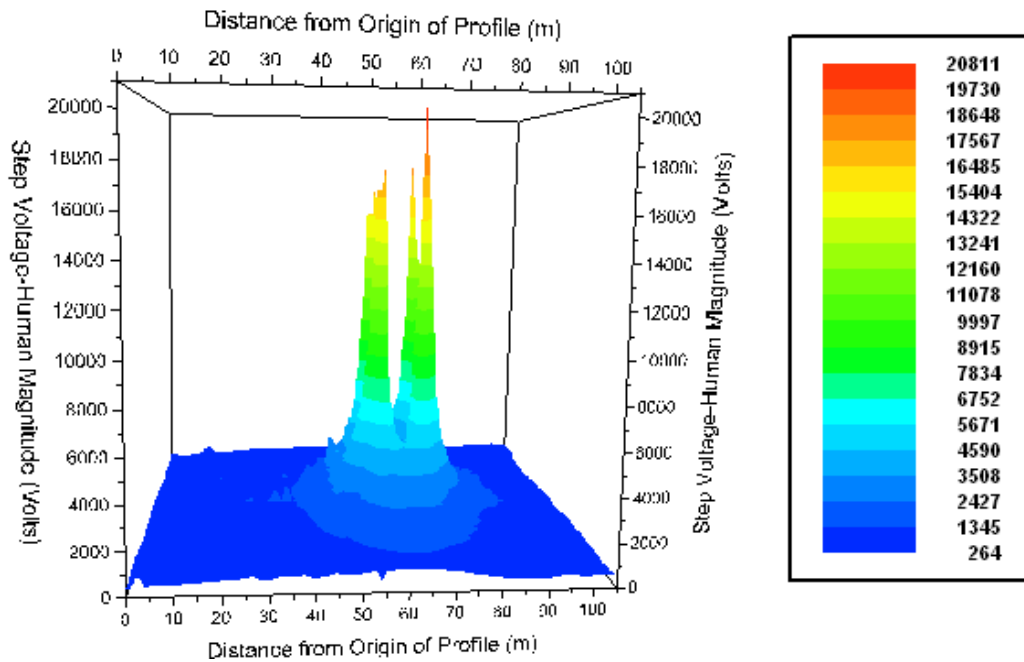


Σχήμα 5.83 Κατανομή βηματικών τάσεων στο σύστημα 5.1 (6826667Hz)

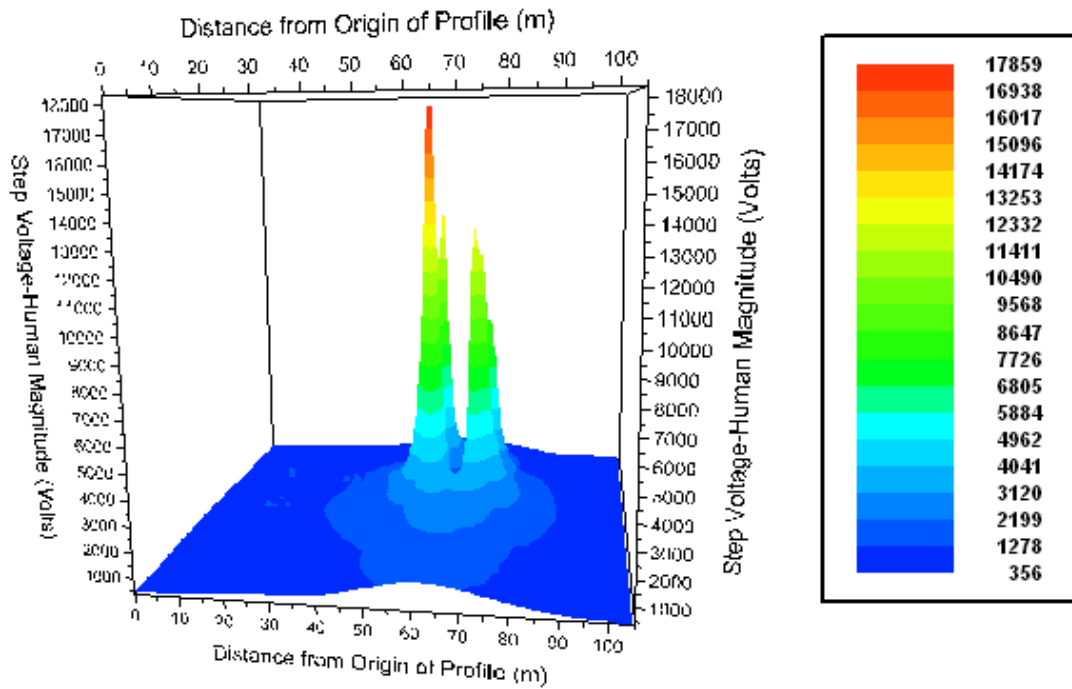
Για την χειρότερη εξεταζόμενη συχνότητα (6826667Hz) μπορούμε να δούμε καλύτερα την κατανομή των βηματικών τάσεων για τις 3 περιπτώσεις στα τρισδιάστατα σχήματα. 5.84, 5.85, 5.86, 5.87. Για την περίπτωση 4.1 το αντίστοιχο σχήμα για τον κεντρικό πυλώνα είναι το 5.18.



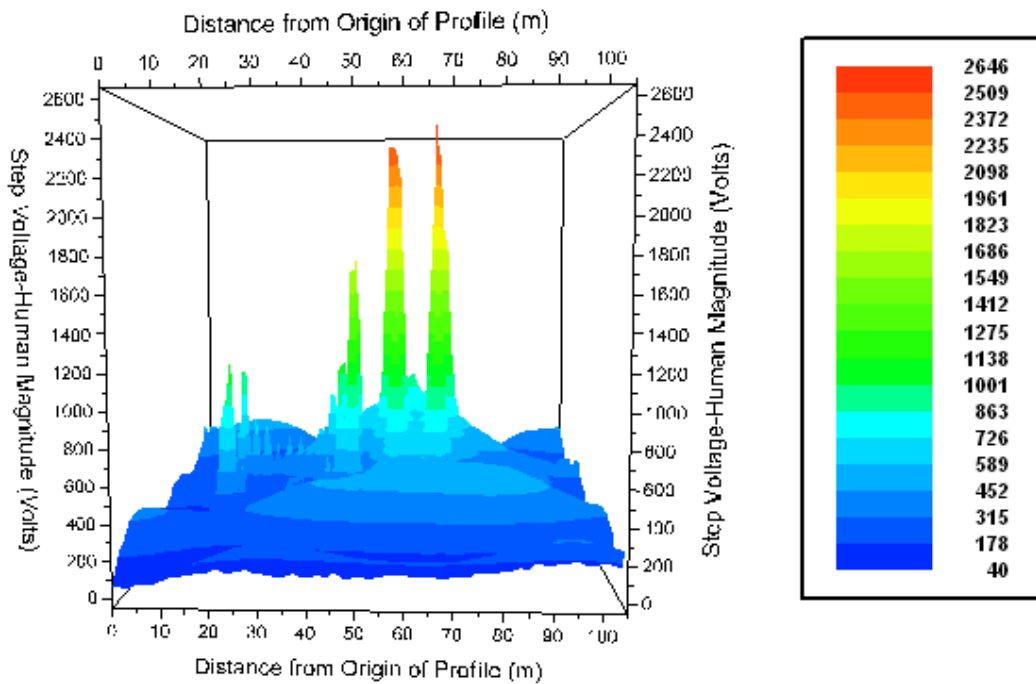
Σχήμα 5.84 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον πάνω πυλώνα συστήματος για έγχυση στα 10m



Σχήμα 5.85 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος για έγχυση στα 10m



Σχήμα 5.86 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον πάνω πυλώνα συστήματος για έγχυση στο μέσο των πυλώνων



Σχήμα 5.87 Κατανομή των βηματικών τάσεων στον κεντρικό πυλώνα συστήματος για έγχυση στο μέσο των πυλώνων

Από τις παραπάνω γραφικές και συγκρίνοντας με τις αντίστοιχες για την περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στην κορυφή του πυλώνα, μπορούμε να κάνουμε τις κάτωθι παρατηρήσεις.

Τάσεις επαφής

- Μέχρι και τη $10^{\text{η}}$ συχνότητα του φάσματος (33333,34 Hz) του κεραυνικού ρεύματος, στον άνω πυλώνα οι αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους για κάθε συχνότητα. Εκεί αναπτύσσονται τάσεις επαφής της τάξης των 5kV. Αντίθετα, ο κεντρικός πυλώνας εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές τάσεων επαφής στην περίπτωση πλήγματος στα 10m από αυτόν.
- Στην $15^{\text{η}}$ συχνότητα του φάσματος (5840001 Hz) ανεβαίνει πολύ η τιμή των τάσεων επαφής στην περίπτωση πλήγματος του κεντρικού πυλώνα, φτάνοντας τα 50-60kV. Για την περίπτωση της κεραυνοπληξίας στο μέσο των πυλώνων η κυματομορφή των τάσεων επαφής αλλάζει μορφή και φτάνει τα 10kV κοντά στον κεντρικό πυλώνα. Στην περίπτωση πλήγματος σε απόσταση 10m διατηρείται σταθερή η συμπεριφορά όπως στις συχνότητες μέχρι τη $10^{\text{η}}$ του φάσματος.
- Στη $17^{\text{η}}$ συχνότητα (6813334 Hz), για τις περιπτώσεις πέραν της απευθείας κεραυνοπληξίας πυλώνα, έχουμε τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής στον κεντρικό πυλώνα κοντά στα 10kV. Οι κυματομορφές για τις δύο περιπτώσεις, είναι παρόμοιες. Για την περίπτωση της απευθείας κεραυνοπληξίας, οι τιμές διατηρούνται πολύ υψηλότερες φτάνοντας τα 36kV.
- Στη $19^{\text{η}}$ συχνότητα του φάσματος (6826667 Hz) παρατηρούνται αναπτυσσόμενες τάσεις επαφής της ίδιας τάξης μεγέθους για τις δύο περιπτώσεις κεραυνοπληξίας εκτός της απευθείας. Στην περίπτωση απευθείας πλήγματος πυλώνα εμφανίζεται μέγιστο της τάξης των 86kV.

Βηματικές τάσεις

- Για τις βηματικές τάσεις, σε όλες τις περιπτώσεις επηρεάζεται πρώτα ο πάνω πυλώνας, μέχρι τη $10^{\text{η}}$ συχνότητα του φάσματος. Όσο αυξάνεται η συχνότητα η ανάπτυξη των βηματικών τάσεων στους 3 πυλώνες αλλάζει ανάλογα με το σημείο έγχυσης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της απευθείας κεραυνοπληξίας από την $11^{\text{η}}$ συχνότητα αρχίζουν να αναπτύσσονται βηματικές τάσεις επικίνδυνες και στους 3 πυλώνες. Στην περίπτωση του πλήγματος στα 10m επηρεάζονται κατά σειρά πρώτα ο πάνω, στη συνέχεια ο κεντρικός και τελευταίος ο κάτω για μεγάλες συχνότητες. Για κεραυνοπληξία στο μέσο πυλώνων επικίνδυνες για τον άνθρωπο βηματικές τάσεις

αναπτύσσονται μόνο στους 2 πυλώνες, ανάμεσα στους οποίους λαμβάνει χώρα το πλήγμα.

- Χαρακτηριστική είναι η σύγκριση μεταξύ των τρισδιάστατων γραφημάτων (Σχήματα 5.18, 5.84, 5.85, 5.86, 5.87), όπου φαίνονται οι μέγιστες τιμές βηματικών τάσεων που αναπτύσσονται στον κεντρικό και στον πάνω πυλώνα, για την τελευταία συχνότητα. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση απευθείας πλήγματος του πυλώνα οι βηματικές τάσεις φτάνουν τα 100kV, σε αντίθεση με τις άλλες 2 περιπτώσεις, για τις οποίες αγγίζει τα 20kV, όταν η κεραυνοπληξία γίνεται στα 10m από τον κεντρικό πυλώνα και τα 3kV, όταν το πλήγμα γίνεται στο μέσο των πυλώνων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκαν, με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου SES-CDEGS, ηλεκτρικά δίκτυα υψηλής τάσης και προσομοιώθηκαν συνθήκες κεραυνοπληξίας σε διαφορετικά σημεία αυτών, με σκοπό τη μελέτη των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα των σφαλμάτων αυτών, στο έδαφος. Εξετάστηκε ένας τύπος πυλώνα με διαφορετικά συστήματα γείωσης, στην προσπάθεια εύρεσης του κατάλληλου τύπου γείωσης, που προσφέρει την μέγιστη δυνατή ασφάλεια για τον εξοπλισμό του δικτύου, αλλά και για τον άνθρωπο, που μπορεί να βρεθεί κοντά ή σε επαφή με αυτόν κατά την διάρκεια κεραυνικού πλήγματος. Πλησίον των πυλώνων τοποθετήθηκαν μεταλλικοί φράχτες, για την μελέτη των επιδράσεων κεραυνικού πλήγματος της γραμμής επί αυτών.

Αρχικά σχεδιάστηκε ηλεκτρικό δίκτυο υψηλής τάσης 150kV με τρεις πυλώνες σε ομογενές έδαφος με ειδική αντίσταση 100Ωm. Ως συστήματα γείωσης χρησιμοποιήθηκαν, κατά σειρά, οι δύο προτεινόμενοι τύποι συστημάτων γείωσης από τη ΔΕΗ. Προσομοιώθηκαν και οι δύο τύποι υπό συνθήκες κεραυνικού πλήγματος 8/20μs στην κορυφή του πυλώνα. Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, προκύπτει ότι το σύστημα γείωσης τύπου I έχει καλύτερη συμπεριφορά, όσον αφορά την ανάπτυξη επικίνδυνων τάσεων επαφής στην περιοχή του φράχτη και του πυλώνα, ειδικά στις υψηλές συχνότητες, σε σύγκριση με το σύστημα γείωσης τύπου II, το οποίο εμφανίζει πολύ χαμηλότερες τιμές αναπτυσσομένων βηματικών τάσεων. Ωστόσο, συγκρινόμενες οι τιμές των τάσεων επαφής και των βηματικών τάσεων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με τα επιτρεπτά όρια για άνθρωπο 70kg, που τίθενται από το πρότυπο IEC 80-2000 [1] για χρόνους εκκαθάρισης σφάλματος 0,1 και 0,5sec, προκύπτει ότι κανένα από τα δύο συστήματα γείωσης δεν μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές, ακόμα και μετά την επίστρωση του εδάφους με χαλίκι ή άσφαλτο.

Συγκεκριμένα, για τις τάσεις επαφής, οι τιμές που μετρήθηκαν μέχρι τη $10^{\text{η}}$ συχνότητα του φάσματος του κεραυνικού ρεύματος, ήταν εντός των επιτρεπών ορίων για επίστρωση του εδάφους με άσφαλτο και για τους δύο τύπους, ενώ όσον αφορά τις βηματικές τάσεις αυτές περιορίζονται σημαντικά γύρω από τη βάση του πυλώνα, με αποτέλεσμα να μπορεί να εφαρμοστεί μία λύση μη μεταλλικής περιφράξης γύρω από τον πυλώνα, ώστε να εμποδίζεται η διέλευση ατόμων κοντά στη βάση του. Πάνω από τη $10^{\text{η}}$ συχνότητα, ενώ η λύση της μη μεταλλικής περιφράξης μπορεί να προσφέρει επαρκή ασφάλεια έναντι των αναπτυσσομένων βηματικών τάσεων, οι τάσεις επαφής ανέρχονται σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια, που ισχύουν για οποιαδήποτε επίστρωση του εδάφους.

Από τη στιγμή που κανένας από τους δύο προτεινόμενους τύπους συστημάτων γείωσης της ΔΕΗ δεν είναι απόλυτα ασφαλής, προχωρήσαμε στην εξέταση της λύσης του πλέγματος, ενός τύπου γείωσης που προτείνεται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν μία σαφώς καλύτερη συμπεριφορά του πλέγματος σε σχέση με τους προαναφερθέντες τύπους γείωσης. Συγκεκριμένα, τόσο στην περιοχή του πυλώνα όσο και στην περιοχή του φράχτη, ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες, εμφανίζεται μία μεγάλη μείωση στην τιμή των αναπτυσσομένων τάσεων επαφής σε όλα τα εξεταζόμενα προφίλ του δικτύου. Επίσης, η περιοχή ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων περιορίζεται ακόμη περισσότερο γύρω από τη βάση του πυλώνα, ενώ η μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή είναι συγκρίσιμη με αυτήν που προέκυψε για το σύστημα γείωσης τύπου II και πολύ χαμηλότερη από την αντίστοιχη του συστήματος I. Στο πλέγμα, η επίστρωση του εδάφους με χαλίκι ή άσφαλτο μπορεί να επιφέρει σημαντική βελτίωση του επιπέδου ασφάλειας, κυρίως για τις βηματικές τάσεις. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της ασφάλτου, δεν υπάρχει ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων, για καμία συχνότητα, στην περιοχή του φράχτη, ενώ ακόμα και στην μέγιστη συχνότητα, στην οποία εμφανίζεται και η χειρότερη συμπεριφορά, η περιοχή ανάπτυξης επικίνδυνων τιμών βηματικών τάσεων περιορίζεται πολύ κοντά στη βάση του πυλώνα.

Ωστόσο ακόμα και η λύση του πλέγματος, η οποία φαίνεται να είναι πολύ καλύτερη από τις προηγουμένως εξεταζόμενες, δεν μπορεί να θεωρηθεί από μόνη της ασφαλής. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν και μελετήθηκαν περαιτέρω παραλλαγές της.

Αρχικά δοκιμάστηκε η διασύνδεση της βάσης του φράχτη με το σύστημα γείωσης του πυλώνα. Το μόνο που παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

είναι μία εξομάλυνση της έντονης διακύμανσης της κυματομορφής των τάσεων επαφής, που εμφανιζόταν στο μη διασυνδεδεμένο με το φράχτη πλέγμα, στο άκρο του φράχτη, για την μέγιστη συχνότητα, ενώ και σε μικρότερες συχνότητες υπάρχει μία τοπική πτώση των αναπτυσσομένων τάσεων επαφής στο άκρο του φράχτη που βρίσκεται πλησιέστερα στον πυλώνα. Συνεπώς η διασύνδεση του φράχτη με το πλέγμα γείωσης του πυλώνα δεν προσφέρει καμία βελτίωση σε επίπεδο ασφάλειας, ούτε βελτιώνει την κατανομή των εξεταζόμενων τάσεων.

Μία δεύτερη παραλλαγή που εξετάστηκε ήταν η προσθήκη αγωγίων ράβδων γείωσης μήκους 3m, στα άκρα του πλέγματος. Ωστόσο ούτε αυτή η περίπτωση μας έδωσε μία ασφαλή λύση γείωσης, μη παρουσιάζοντας καμία διαφορά σε σχέση με το απλό πλέγμα.

Η τελευταία παραλλαγή που μελετήθηκε, είναι η προσθήκη ενός τετραγώνου πλευράς 40m γύρω από το πλέγμα, το οποίο συνδέεται με αυτό μέσω τεσσάρων αγωγών στα άκρα του. Η μείωση των τάσεων επαφής, που αναπτύσσονται εντός της περιοχής του φράχτη, δεν προσφέρει καμία ουσιαστική βελτίωση στη συμπεριφορά του πλέγματος.

Καταλήγουμε, γενικά, στο συμπέρασμα ότι καμία από τις εξεταζόμενες λύσεις συστημάτων γείωσης, τόσο αυτών που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ, όσο και το πλέγμα και οι παραλλαγές του, δεν προσφέρει απόλυτη ασφάλεια στους ανθρώπους που θα βρεθούν πλησίον του εξοπλισμού σε περίπτωση κεραυνικού σφάλματος.

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, η βέλτιστη λύση συστήματος γείωσης είναι το πλέγμα. Για να είναι όμως ο χώρος του πυλώνα ασφαλής, θα πρέπει να τοποθετηθεί μία μη μεταλλική περίφραξη τμήματος του χώρου γύρω από τη βάση του σε απόσταση περίπου 7-8m από αυτήν, ώστε να εμποδίζεται η διέλευση ατόμων στην περιοχή ανάπτυξης επικίνδυνων βηματικών τάσεων και να μην μπορεί κανείς να έρθει σε επαφή με μεταλλικό τμήμα του πυλώνα. Αν δεν χρησιμοποιηθεί πλέγμα αυτή η περίφραξη πρέπει να είναι μεγαλύτερη, περίπου στα 15m από τη βάση του πυλώνα. Επίσης, δεν θα πρέπει να υπάρχουν μη μονωμένες μεταλλικές κατασκευές πλησίον πυλώνων υψηλής τάσης, καθώς η επαφή με αυτές, κατά τη διάρκεια κεραυνοπληξίας της γραμμής, είναι πολύ επικίνδυνη.

Εκτός από την σύγκριση των διαφορετικών τύπων συστημάτων γείωσης, προχωρήσαμε και σε σύγκριση της συμπεριφοράς σε σχέση με το σημείο της κεραυνοπληξίας στο εξεταζόμενο δίκτυο. Έτσι εξετάστηκε, για το δίκτυο με σύστημα

γείωσης πυλώνων τύπου I, η περίπτωση απευθείας κεραυνοπληξίας πυλώνα, η περίπτωση κεραυνοπληξίας σε απόσταση 10m από τον κεντρικό πυλώνα και η αντίστοιχη στο μέσο μεταξύ δύο πυλώνων. Η απόσταση μεταξύ των πυλώνων του δικτύου είναι περίπου 350m.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προέκυψε ότι ανάλογα με το σημείο έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος στο δίκτυο αλλάζει και η μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή των τάσεων επαφής. Συγκεκριμένα, μετά τις πρώτες συχνότητες του φάσματος (μέχρι τη 10^1), όπου η συμπεριφορά του πυλώνα και του αντίστοιχου συστήματος γείωσης είναι παρόμοια, οι τάσεις επαφής ανεβαίνουν δραματικά στην περίπτωση απευθείας κεραυνοπληξίας και αγγίζουν ένα μέγιστο 86kV στη μέγιστη συχνότητα. Αντίθετα οι άλλες δύο περιπτώσεις κεραυνοπληξίας οδηγούν σε ανάπτυξη τάσεων επαφής ίδιας κυματομορφής κατά μήκος του εξεταζόμενου προφίλ του πυλώνα φτάνοντας τα 10kV. Το σημείο κεραυνοπληξίας παίζει σημαντικό ρόλο, κυρίως όσον αφορά την ανάπτυξη των βηματικών τάσεων στους πυλώνες του δικτύου. Συγκεκριμένα, η θέση του κεραυνικού πλήγματος καθορίζει τη σειρά με την οποία επηρεάζονται οι πυλώνες του δικτύου. Στην περίπτωση της απευθείας κεραυνοπληξίας, από την 11^1 συχνότητα αρχίζουν να αναπτύσσονται βηματικές τάσεις επικίνδυνες και στους 3 πυλώνες, οι οποίες αγγίζουν τα 100kV. Στην περίπτωση του πλήγματος στα 10m επηρεάζονται κατά σειρά πρώτα ο πάνω πυλώνας, στη συνέχεια ο κεντρικός και τελευταίος ο κάτω για μεγάλες συχνότητες, φτάνοντας μία μέγιστη τιμή των 20kV. Για κεραυνοπληξία στο μέσο πυλώνων επικίνδυνες για τον άνθρωπο βηματικές τάσεις αναπτύσσονται μόνο στους 2 πυλώνες, ανάμεσα στους οποίους λαμβάνει χώρα το πλήγμα, ωστόσο μπορεί να επιτευχθεί ασφάλεια σε αυτή την περίπτωση, με κατάλληλο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος και επικάλυψη εδάφους με άσφαλτο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια μελλοντικών μελετών συστημάτων γείωσης ηλεκτρικών δικτύων υψηλής τάσης. Ενδιαφέρουσα προέκταση της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να είναι η προσομοίωση μεγαλύτερων δικτύων, κάτι που θα ήταν εφικτό μόνο αν ο υπολογιστικός χρόνος του λογισμικού πακέτου SES-CDEGS περιοριζόταν αρκετά. Ακόμη, θα μπορούσε να μελετηθεί η συμπεριφορά του δικτύου σε περιπτώσεις κεραυνοπληξίας με κεραυνικά ρεύματα διαφορετικών κυματομορφών και με μεγαλύτερες μέγιστες τιμές. Τα δίκτυα που προσομοιώθηκαν αποτελούνταν

από πυλώνες ενός τύπου που προτείνεται από τη ΔΕΗ. Σε μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να γίνουν προσομοιώσεις για διαφορετικούς τύπους πυλώνων, με σκοπό τη συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς τους. Ακόμη μία ενδιαφέρουσα πρόταση για περαιτέρω μελέτη είναι η προσομοίωση δικτύων σε διαφορετικά εδάφη (π.χ. πετρώδες, αμμώδες κτλ.), καθώς και σε εδάφη διστρωματικά ή πολυστρωματικά. Τέλος, προτείνεται η χρήση διαφορετικού υπολογιστικού πακέτου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τη χρήση του SES-CDEGS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, ANSI/IEEE Std 80-2000 (Revision of IEEE Std 80 – 1986), 2000.
- [2] Ιωάννης Φ. Γκόνος, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.
- [3] Λάμπρος Σ. Οικονόμου, “Ανάπτυξη Μεθοδολογιών για τον Υπολογισμό της Κεραυνικής Συμπεριφοράς και τη Σχεδίαση Γραμμών Μεταφοράς Υψηλής Τάσης”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2006.
- [4] Ι. Α. Σταθόπουλος, “Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων”, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 1989.
- [5] Δάφνη Α. Κουτσορόδη, “Υπολογιστική Προσομοίωση Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2004.
- [6] Yaqing Liu, “Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments”, ed. ACTA UNIVERSITATIS UPSALIENSIS, Uppsala 2004.
- [7] L. V. Bewley, “Theory and Tests of the Counterpoise”, Elec. Engr., Vol.53, 1934.
- [8] L. V. Bewley, “The Counterpoise”, G. E. Rev., Vol. 37, 1934.
- [9] P.L. Bellaschi, “Impulse and 60-cycle Characteristics of Driven Grounds, part III Effect of Lead in Ground Installation”, AIEE Transactions, Vol. 62, 1943.
- [10] E. D. Sunde, “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, ed. Bell Telephone Laboratories, Incorporated, 1949.
- [11] B. G. Gupta and B. Thapar, “Impulse Impedance of Grounding Grids”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, 1980.
- [12] R.W. Caswell, E.T.B. Gross, E.F. Koncel, Jr., “Analytical Studies of Lightning Performance of 1- and 2-Groundwire 138-Kv Double-Circuit Lines of the Commonwealth Edison Company”, 1958.

- [13] Janos Endrenyi, "Analysis of Transmission Tower Potentials During Ground Faults", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No.10, 1967.
- [14] A. P. Meliopoulos and M. G. Moharam, "Transient Analysis of Grounding Systems", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.2, 1983.
- [15] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, 1987.
- [16] M. Ramamoorthy, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran et al., "Transient Performance of Grounding Grids", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, 1989.
- [17] A. Geri, "Behaviour of Grounding Systems excited by High Impulse Currents: The Model and its Validation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 14, No.3, 1999.
- [18] A. F. Otero, J. Cidras and J. L. del Alamo, "Frequency-dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No.3, 1999.
- [19] L. D. Greev, "Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, 1996.
- [20] 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, 1995.
- [21] F. Dawalibi, "Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors, part II- Ground Networks", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.4, 1986.
- [22] 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, 2000.
- [23] R. Verma and D. Mukhedkar, "Impulse to Impedance of Buried Ground Wires", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.5, 1980.

- [24] C. Mazzetti and G. M. Veca, "Impulse Behaviour of Grounding Electrodes", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.9, 1983.
- [25] R. Velazquez and D. Mukhedkar, "Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior", IEEE Trans. On Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No.6, 1984.
- [26] F. Menter, L. Green, "EMTP-Based Model for Grounding System Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, 1994.
- [27] A.S. Farag, T.C. Cheng, D. Penn, "Ground Terminations of Lightning Protective Systems", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No.6, 1998.
- [28] Boris Caric, Selva Moorthy, Srete Nikolovski, Damir Sljivac, "Time Domain Solutions for Transient Response of Transmission Tower Structures and Associated Grounding Systems", AUPEC, 1999.
- [29] S. Nikolovski, T. Baric, "Computer Aided Design of Transformer Station Grounding System using CDEGS Software", Acta Polytechnica, Vol. 44, No.2, 2004.
- [30] Yaqing Liu, Mihael Zitnik, Rajeev Thottappillil, "An Improved Transmission-Line Model of Grounding System", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No.3, 2001.
- [31] "Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse, Part1- General Principles", Int. Std. IEC 61312-1, 1995-02.
- [32] Guido Ala, Maria Luisa Di Silvestre, "Simulation Model for Electromagnetic Transient in Lightning Protection Systems", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 44, No.4, 2002.
- [33] Rodrigo Melo e Silva de Oliveira, Carlos Leonidas da Silva Souza Sobrinho, "Computational Environment for Simulating Lightning Strokes in a Power Substation by Finite-Difference Time-Domain Method", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No.4, 2009.
- [34] Marcos André da Frota Mattos, "Grounding Grids Transient Simulation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.2, 2005.

- [35] Marcos Telló, Vicente M. Canalli, Roberto P. Homrich, Daniel Gazzana, Daniel S. Roso, Guilherme A. D. Dias, Virgilio T. D. B. Filho, Flávio R. P. M. Júnior, “Improvement of Transmission Line Lightning Performance”, IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 26th-30th November 2007.
- [36] Mohamed Nayel, Jie Zhao, Jinliang He, Zongyuan Cai, Qi Wang, “Study of Step and Touch Voltages in Resistive/Capacitive Ground due to Lightning Stroke”, Environmental Electromagnetics, The 2006 4th Asia-Pacific Conference, 1-4 Aug. 2006.
- [37] Rong Zeng, Peng Kang, Jinliang He, Bo Zhang, Shuiming Chen, and Jun Zou, “Lightning Transient Performance Analysis of Substation Based on Complete Transmission Line Model of Power Network and Grounding Systems”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No.4, 2006.
- [38] R. Markowska, A. Sowa, J. Wiater , “Ground Potential Rise, Step and Touch Voltages during Lightning Strokes to GSM Base Station”, High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2008. International Conference, 9-12 Nov. 2008.
- [39] A. Sowa, J. Wiater, “Decreasing Lightning Shock Hazard at the HV Substation by the Modification of the Grounding System”, Electromagnetic Compatibility, 2004. EMC 2004, 2004 International Symposium, 9-13 Aug. 2004.
- [40] B. Vahidi, R. Shariati Nassab, S. Ghahghahe Zadeh, A. A. Khaniki, “Modeling of Lightning Transient Overvoltage by Using Different Models of Grounding System”, 9th CHILE, Spain, 2005.
- [39] CDEGS Documentation, Toolbox Edition, SES Release 2004.