



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

**Αναβάθμιση της ποιότητας προσομοίωσης μονωτήρων
σε πρόγραμμα πεδιακού υπολογισμού –
Εφαρμογή στον υπολογισμό πεδίου
σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Ε. Γουβαλάρης

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Οκτώβριος 2006

*“Στον πατέρα μου οφείλω το ζην
μα στο δάσκαλό μου το ευ ζην ”*

Μέγας Αλέξανδρος



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

137

**Αναβάθμιση της ποιότητας προσομοίωσης μονωτήρων
σε πρόγραμμα πεδιακού υπολογισμού –
Εφαρμογή στον υπολογισμό πεδίου
σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Ε. Γουβαλάρης

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα : Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30.10.2006.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2006

Ηλίας Ε. Γουβαλάρης

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

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως κύριο στόχο τη μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στο εσωτερικό και στην περιοχή του αέρα γύρω από έναν αλυσοειδή μονωτήρα, όταν στους ακροδέκτες αυτού εφαρμόζεται υψηλή τάση.

Για την πραγματοποίηση της πεδιακής ανάλυσης, προσομοιώθηκαν διάφορα μοντέλα αλυσοειδών μονωτήρων από γυαλί και πορσελάνη σε τρισδιάστατο περιβάλλον με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης Opera-3d V11.0. Η προσομοίωση είχε ποιοτικά αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με προηγούμενες εφαρμογές. Καταγράφηκε και μελετήθηκε η κατανομή τόσο του δυναμικού, όσο και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Τέλος, προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια της μεθόδου, τα αποτελέσματα που ελήφθησαν συγκρίθηκαν με αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά, και αφήνουν περιθώρια για χρήση του λογισμικού πακέτου ανάλυσης PC OPERA και σε ακόμα πιο πολύπλοκες τοπολογίες.

Λέξεις Κλειδιά

Αλυσοειδής Μονωτήρας, Υψηλή Τάση, Ηλεκτρικό πεδίο, Αναβαθμισμένη Προσομοίωση, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, Ηλεκτρικό δυναμικό.

Abstract

This diploma thesis has as primary target the study of the electric field in the internal regions of an HV insulator as well as in the surrounding air when high voltage is applied to the HV electrode of the insulator.

In order to achieve the field analysis a number of ceramic insulators was simulated, with the use of the three-dimensional electromagnetic simulation program, Opera V11.0, for the required calculations. The simulation had advanced quality characteristics in comparison with prior implementations. The electric field and potential distributions in the vicinity of the insulators were examined. Finally, in order to validate the accuracy of the method, the extracted results were compared with available and corresponding experimental values. The results of the field analysis were satisfactory, so further work can be done in the future in order to simulate more complicated topologies with the Opera V11.0.

Key Words

Insulator, High Voltage, Electric field, Advanced Simulation, Finite element method, Electric potential.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα _____	i
Πρόλογος _____	iv
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή _____	1
1.1 Γενικά περί μονωτήρων _____	2
1.1.1 Ιστορική αναδρομή _____	2
1.1.2 Βασικοί ορισμοί _____	5
1.2 Είδη μονωτήρων _____	7
1.2.1 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους _____	7
1.2.2 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης _____	7
1.2.3 Είδη μονωτήρων ανάλογα με το υλικό και το σχήμα τους στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς _____	8
1.3 Σημαντικές παράμετροι ενός μονωτήρα _____	12
1.4 Κυριότερα μονωτικά υλικά σε διατάξεις μονωτήρων _____	13
1.4.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών _____	13
1.4.2 Ιδιότητες πορσελάνης _____	14
1.4.3 Ιδιότητες σκληρυμένου γυαλιού _____	14
1.4.4 Ιδιότητες πολυμερών _____	15
1.4.5 Ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες μονωτικών διηλεκτρικών _____	16
1.5 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες _____	18
1.6 Αρχές σχεδίασης του μονωτήρα _____	19
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση _____	22
2.1 Αριθμητικές μέθοδοι _____	23
2.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων _____	25
2.2.1 Επιλύτης TOSCA, Ανάλυση στατικού πεδίου _____	29
2.3 Σημαντικές παράμετροι κατά την προσομοίωση μονωτήρων με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων _____	32
2.3.1 Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου _____	32
2.3.2 Μήκος αγωγού _____	34

Κεφάλαιο 3: Το πρόγραμμα Opera-3d	36
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d	39
3.2.1 Τοπολογία στο μοντελοποιητή	40
3.2.2 Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute)	43
3.2.3 Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων	44
3.2.4 Δημιουργία σύνθετων σωμάτων	45
3.2.5 Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία του πλέγματος	46
3.2.6 Δημιουργία του πλέγματος	50
3.2.7 Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση	51
3.2.8 Ανάλυση του μοντέλου	51
3.2.9 Μετ-Επεξεργασία	51
3.3 Προγράμματα ανάλυσης	54
Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις αλυσοειδών μονωτήρων με το πρόγραμμα Opera - 3d	55
4.1 Εισαγωγή	56
4.2 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 150kV	58
4.2.1 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 150kV	58
4.2.2 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 150kV	71
4.2.3 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV	81
4.3 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 400 kV	91
4.3.1 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400kV	91
Κεφάλαιο 5: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα	101
5.1 Εισαγωγή	102
5.2 Κατανομή τάσης	102
5.2.1 Κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV	102
5.2.2 Κατανομή της τάσης στον γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV	104
5.2.3 Κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV	106
5.3 Κατανομή της έντασης του πεδίου	108
5.3.1 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης, αποτελούμενος	

από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες [No 069 ΔΕΗ]	109
5.3.2 Καθαρός γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης, αποτε- λούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες [No 161 ΔΕΗ]	121
5.3.3 Καθαρός πορσελάνινος, αλυσοειδής μονωτήρας, κανονικού τύπου, αποτελούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες [No 010 ΔΕΗ]	133
5.3.4 Καθαρός πορσελάνινος, αλυσοειδής μονωτήρας, κανονικού τύπου, αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες [No 070 ΔΕΗ]	145
Κεφάλαιο 6: Ανάλυση-Συμπεράσματα-Η επόμενη μέρα	161
Βιβλιογραφία	166

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η αναβάθμιση της ποιότητας προσομοίωσης μονωτήρων με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3d V11.0 και η εφαρμογή στον υπολογισμό της κατανομής του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά σε βασικά χαρακτηριστικά των μονωτήρων. Στη συνέχεια γίνεται μια κατηγοριοποίηση των τύπων μονωτήρων και αναλύονται τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται, ενώ περιγράφονται και ορισμένες σημαντικές παράμετροι των μονωτήρων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί μια εισαγωγή στις αριθμητικές μεθόδους, με τις οποίες επιλύονται προβλήματα κατανομής δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου. Ειδικότερη αναφορά γίνεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά και στην εφαρμογή της μεθόδου αυτής για την προσομοίωση διατάξεων μονωτήρων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται μέρος του εγχειριδίου λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3d V11.0. Περιγράφονται οι αλγόριθμοι λειτουργίας του, ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εντολές που αντιστοιχούν στις επί μέρους λειτουργίες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κεραμικών αλυσοειδών μονωτήρων 150kV και 400kV στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στο εσωτερικό και στην περιοχή του αέρα γύρω από την κάθε αλυσίδα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πειραματικά αποτελέσματα.

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

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για το ενδιαφέρον αλλά και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, ευχαριστώ ειλικρινά την κα. Βασιλική Κονταργύρη, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ουσιαστική στήριξη που μου προσέφερε πρόθυμα και αδιάκοπα κατά την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και για την μεγάλη υπομονή που έδειξε καθ' όλη την διάρκεια αυτής.

Ακόμη, εκφράζω τις ευχαριστίες μου προς τον κο. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία του και για τις εύστοχες επισημάνσεις του σε αρκετά σημεία της εργασίας μου.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για το εγκάρδιο και φιλικό κλίμα που υπήρξε όλο το διάστημα της παραμονής μου στο εργαστήριο.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου για την ηθική και υλική στήριξη που μου παρείχαν, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κεφάλαιο
1^ο

Εισαγωγή



1.1 Γενικά περί μονωτήρων

Οι μονωτήρες (insulators) είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [1]. Χρησιμοποιούνται σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς υψηλής τάσης [2]. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν οι μονωτήρες Υψηλής Τάσης (High Voltage Insulators), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως μέσο ανάρτησης των γραμμών μεταφοράς Υψηλής Τάσης σε ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού.

1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Οι μονωτήρες εμφανίστηκαν αρχικά στα πρώτα δίκτυα τηλεγράφων το 1835 [3]. Η χρήση τους για μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος έγινε για πρώτη φορά το 1882 σε γραμμή συνεχούς τάσης 1343 V που συνέδεε το Miesbach με το Μόναχο. Η ανάπτυξη από τότε στην μεταφορά ισχύος ήταν ραγδαία, ανάπτυξη την οποία έπρεπε να ακολουθήσει και η τεχνολογία των μονωτήρων. Οι νέες απαιτήσεις σύντομα αποκάλυψαν σοβαρές ελλείψεις όχι μόνο στα υλικά αλλά και στα σχέδια των μονωτήρων τα οποία αρχικά ήταν απλά αντίγραφα των τύπων που χρησιμοποιούνταν στους τηλεγράφους. Οι ηλεκτρικές και μηχανικές τάσεις στις οποίες έπρεπε να ανθίστανται τώρα οι μονωτήρες ήταν προφανώς πολύ μεγαλύτερες από εκείνες των τηλεγραφικών μονωτήρων. Ειδικότερα, η διάτρηση από τις ηλεκτρικές τάσεις των κεραμικών που είχαν πόρους ή ελαττώματα, οι ρωγμές που προκαλούνταν από τη θερμική διαστολή ή οι διαβρωτικές συνέπειες στο μέταλλο ή το τσιμέντο και οι υπερπηδήσεις με τόξα που δημιουργούνται από τους επιφανειακούς ρύπους σε συνδυασμό με την υγρασία, έδειχναν την ανάγκη εξέλιξης των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών κανόνων. Αυτή η εξέλιξη έχει βασιστεί περισσότερο σε μια μέθοδο δοκιμής και λάθους παρά σε μια μεθοδική πρόοδο και συνεχίζει την άτακτη πορεία της μέχρι σήμερα (σχήμα 1.1).

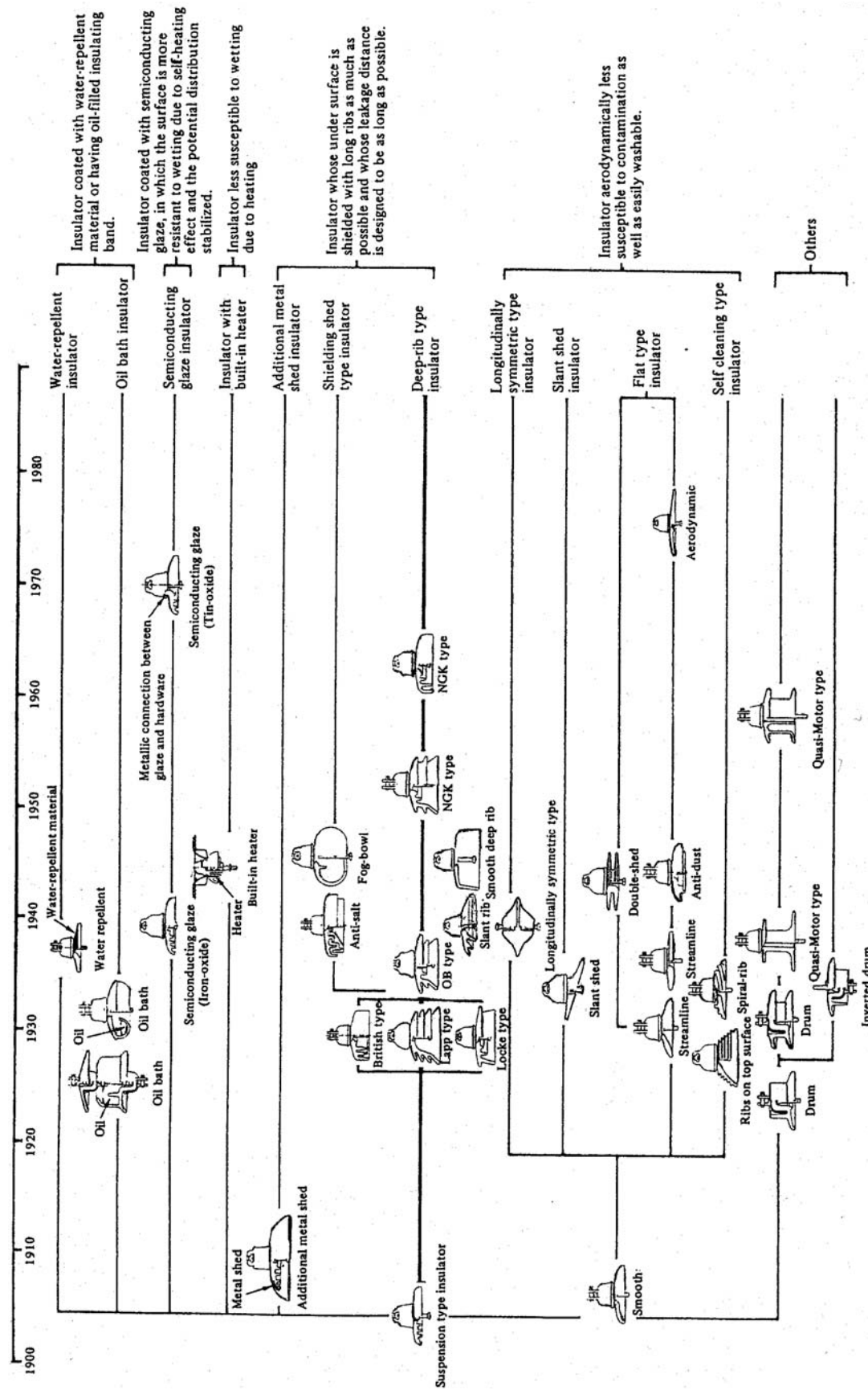
Με το σταδιακό πέρασμα σε όλο και υψηλότερες τάσεις, τα μειονεκτήματα της απώλειας απόδοσης και οι βλάβες στις εγκαταστάσεις των σταθμών παραγωγής που προέρχονταν από τόξα γύρω από τους μονωτήρες των γραμμών αυξήθηκαν σημαντικά. Έτσι η έρευνα στράφηκε στη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης των μονωτήρων σε συνθήκες ρύπανσης. Η απαίτηση για αυξημένη ηλεκτρική αξιοπιστία οδήγησε στην ανάπτυξη μονωτήρων με μεγάλο μήκος ερπυσμού θέτοντας τις βάσεις,

για την κατασκευή μεγάλων μονωτήρων στους υποσταθμούς, που θα έδιναν την δυνατότητα να συνεργάζονται ανάλογα με αυτούς των εναέριων γραμμών.

Λίγο πριν το 1962 διαπιστώθηκε ότι η απόδοση των μονωτήρων θα μπορούσε να προβλεφθεί από εργαστηριακές δοκιμές και έτσι η γεωμετρία και ο όγκος τους ελέγχονταν επιστημονικά και συγκρίνονταν μεταξύ τους. Η σημαντικότερη δοκιμή ήταν η δοκιμή λειτουργίας σε περιβάλλον ομίχλης και αλάτων βάσει της οποίας απορρίφθηκαν αρκετά παράδοξα σχήματα μονωτικών που είχαν σχεδιαστεί σύμφωνα με λανθασμένες φυσικές υποθέσεις και ερμηνείες μη έγκυρων δοκιμών.

Εξαιτίας της αύξησης των τάσεων μεταφοράς και της εισαγωγής πολλαπλών αγωγών ανά φάση, τα μηχανικά φορτία που έπρεπε να στηριχθούν από τους μονωτήρες εναέριων γραμμών υπερέβησαν το κατωφλικό επίπεδο των 40 τόννων, που προξενεί θραύση σε έναν απλό δίσκο πορσελάνης λογικού βάρους και όγκου. Κατασκευές ενισχυμένες με πολλαπλές συνθετικές ίνες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για παράδειγμα στη Βρετανία, είχαν όμως το μειονέκτημα της αντιαισθητικής εμφάνισης και μηχανικής πολυπλοκότητας. Αυτό οδήγησε στην χρήση πολυμερών μονωτικών, τα οποία χρησιμοποιούσαν ινώδη συνθετικά υλικά και εμφάνιζαν υψηλές αναλογίες αντοχής εφελκυσμού ως προς το μέγεθος και το βάρος τους.

Η πρόσφατη ιστορία ανάπτυξης των μονωτήρων δεν χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα τεχνολογικά επιτεύγματα, αλλά από διαρκείς αυξήσεις στο μέγεθος, προκειμένου να αντιμετωπιστούν επιτυχώς οι απαιτήσεις μεταφοράς συνεχούς ρεύματος και υπερυψηλής τάσης.



Σχήμα 1.1: Χρονολογική κατάταξη των κανόνων σχεδιασμού των μονωτήρων με στόχο την αποφυγή εναπόθεσης ρύπανσης [4]

1.1.2 Βασικοί ορισμοί

Μονωτικά υλικά ή διηλεκτρικά: Είναι τα υλικά στα οποία όλοι οι φορείς (ηλεκτρόνια) είναι πλήρως και σταθερά δεσμευμένα στα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος και μια συνηθισμένη προσφορά ενέργειας δεν μπορεί να δημιουργήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια, άρα δεν παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα [5].

Μονωτήρες δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας: Είναι εξαρτήματα των γραμμών μεταφοράς, αποτελούμενα κυρίως από μονωτικό υλικό, τα οποία χρησιμοποιούνται για να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς τάσης.

Μήκος ερπυσμού (L): Είναι η συντομότερη διαδρομή επί της επιφανείας του μονωτήρα ανάμεσα σε δύο μεταλλικά άκρα του (μήκος της εξωτερικής ημιπεριμέτρου του μονωτικού υλικού σε επίπεδο τομής διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα [6].

Ειδικό μήκος ερπυσμού (L_s): Είναι το ολικό μήκος ερπυσμού ενός μονωτήρα διαιρεμένο με το γινόμενο της rms τιμής της τάσης επί $\sqrt{3}$. Συνήθως εκφράζεται σε mm/kV [6].

Συντελεστής μορφής (F): Καθορίζεται από τις διαστάσεις του μονωτήρα. Προκειμένου να προσδιοριστεί γραφικά, σχεδιάζεται η αντίστροφη τιμή της περιφέρειας του μονωτήρα ($1/p$) συναρτήσεως του μερικού μήκους ερπυσμού (l) υπολογιζόμενο από το τέλος του μονωτήρα μέχρι το μετρούμενο σημείο. Ο συντελεστής μορφής δίνεται από το εμβαδό κάτω από τη σχηματιζόμενη καμπύλη και υπολογίζεται από τη σχέση [6]:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{p(l)} \quad (1.1)$$

Αν $D(l)$ είναι η διάμετρος του μονωτήρα, τότε η σχέση 1.1 τροποποιείται ως εξής [9]:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{\pi \cdot D(l)} \quad (1.2)$$

Αλμυρότητα: Η συγκέντρωση αλατιού σε διάλυμα προερχόμενο από νερό βρύσης, εκφρασμένο σε ποσότητα αλατιού διαιρεμένη με τον όγκο του διαλύματος. Συνήθως εκφράζεται σε kg/m^3 [6].

Στρώμα ρύπανσης: Είναι ένα αγωγίμο ηλεκτρολυτικό στρώμα στην επιφάνεια του μονωτήρα, το οποίο αποτελείται από αλάτι και αδρανή υλικά [6].

Αγωγιμότητα στρώματος: Η αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή μορφής. Συνήθως εκφράζεται σε μS [6].

Πυκνότητα εναποθέματος αλατιού (salt deposit density – SDD): Η ποσότητα αλατιού που εναποτίθεται σε δεδομένη επιφάνεια του μονωτήρα (μεταλλικά μέρη και υλικά σύνδεσης δεν πρέπει να συμπεριλαμβάνονται σε αυτή την επιφάνεια) διαιρεμένη με το εμβαδό της επιφάνειας. Συνήθως εκφράζεται σε mg/cm^2 [6].

Ισοδύναμη πυκνότητα εναποθέματος αλατιού (equivalent salt deposit density – ESDD): Είναι η ισοδύναμη ποσότητα εναποθέματος σε mg NaCl ανά cm^2 στην επιφάνεια ενός μονωτήρα, η οποία έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με το πραγματικό εναπόθεμα διαλυμένο στην ίδια ποσότητα νερού [8].

Διαβρεξιμότητα (wettability): Είναι η ικανότητα μίας επιφάνειας να υγρανθεί από ένα υγρό (π.χ. νερό) [7].

Υδροφοβικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με χαμηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδροφοβή επιφάνεια έχει χαμηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να απωθεί το νερό [7].

Υδροφιλικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με υψηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδροφιλή επιφάνεια έχει υψηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να υγραίνεται από το νερό, το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα πάνω στην επιφάνεια [7].

Tracking: Είναι μια μη-αναστρέψιμη επιδείνωση του μονωτικού υλικού, λόγω του σχηματισμού αγωγίμων δρόμων που ξεκινούν και αναπτύσσονται στην επιφάνεια του υλικού αυτού. Αυτοί οι δρόμοι είναι αγωγίμοι ακόμα και σε ξηρές συνθήκες. Αυτή η διεργασία μπορεί να συμβεί στην επιφάνεια του μονωτικού υλικού που έρχεται σε επαφή με τον αέρα, αλλά και σε διεπιφάνειες μεταξύ δύο διαφορετικών μονωτικών υλικών.

Διάβρωση (Erosion): Η διάβρωση είναι μια ανέκκλητη και μη-αγώγιμη επιδείνωση της επιφάνειας του μονωτήρα που συμβαίνει μέσω της απώλειας μέρους του υλικού. Η απώλεια αυτή μπορεί να είναι ομοιόμορφη ή τοπική.

Θραύση (Cracking): Είναι οποιοδήποτε είδος θραύσης στην επιφάνεια με βάθος μεγαλύτερο από 0.1 mm.

1.2 Είδη μονωτήρων

1.2.1 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους οι μονωτήρες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες [1]:

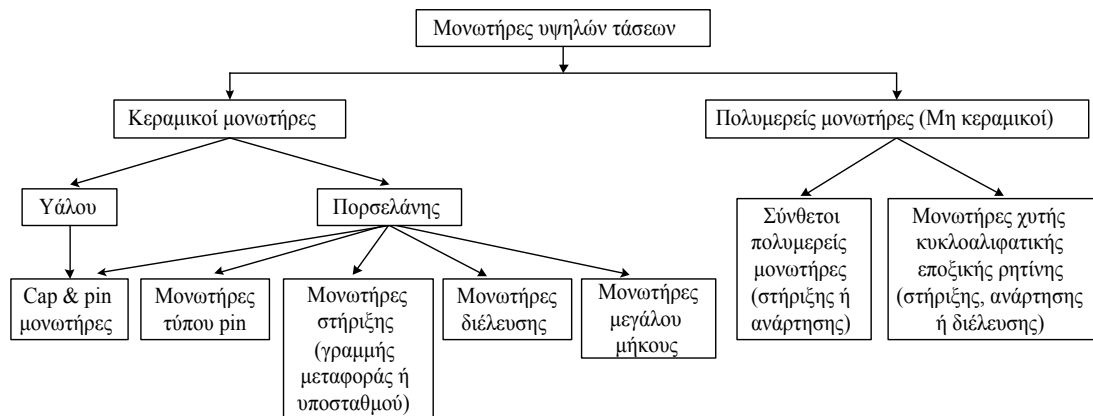
1. **Μονωτήρες αναρτήσεων**, που χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς Υ.Τ. και αποτελούνται από μια ή δυο σειρές δισκοειδών μονωτήρων, διατεταγμένων σε μορφή αλύσου. Το πλήθος των δισκοειδών μονωτήρων σε μια διάταξη αλύσου εξαρτάται προφανώς από την τάση λειτουργίας της γραμμής και από τη διηλεκτρική αντοχή έκαστου δισκοειδούς μονωτήρα.
2. **Μονωτήρες στηρίξεως**, που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών υψηλής τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες μεταφοράς και μονωτήρες σταθμών.
3. **Μονωτήρες γραμμής**, που χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 70kV.
4. **Μονωτήρες διελεύσεως**, που χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές.

1.2.2 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης

Ανάλογα με τους χώρους χρήσης τους και, κατ' επέκταση, τον ειδικό τρόπο σχεδιάσής τους, έχουμε τους εξής τύπους μονωτήρων [1]:

- **Τύπου ομίχλης** Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες έντονης ρύπανσης (συνήθως, κοντά σε βιομηχανικές ή παραθαλάσσιες περιοχές). Οι μονωτήρες αυτοί έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού και τέτοια διαμόρφωση της εξωτερικής επιφάνειας, ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή προστασία έναντι επικάλυψης ακαθαρσιών.
- **Κανονικού τύπου** Αυτοί χρησιμοποιούνται σε σύνηθες περιβάλλον και έχουν μικρότερο μήκος ερπυσμού.
- **Εσωτερικού τύπου** Οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους – κυρίως σε κλειστούς υποσταθμούς.

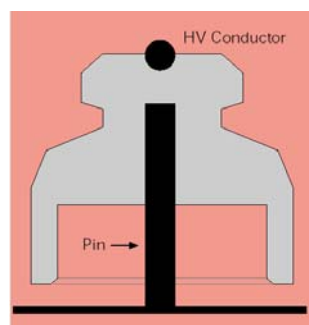
1.2.3 Είδη μονωτήρων ανάλογα με το υλικό και το σχήμα τους στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς [9]



Σχήμα 1.2: Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης.

Μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin (porcelain pin type insulators)

Αυτός ο τύπος μονωτήρων χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις τηλεφωνικές γραμμές και τα αλεξικέραυνα, ενώ στη συνέχεια τροποποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές παραλλαγές του είναι ακόμα σε χρήση στα συστήματα μέσης τάσης. Ο μονωτήρας αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3.

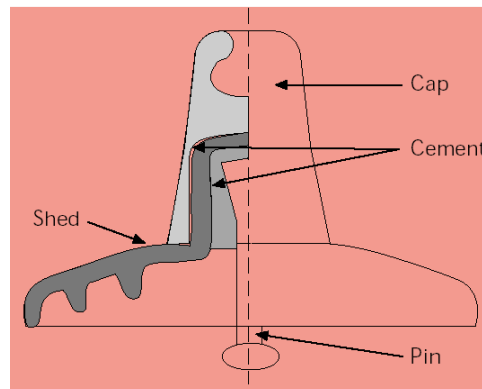


Σχήμα 1.3: Μονωτήρας τύπου pin.

Μονωτήρες τύπου cap and pin (cap and pin insulators)

Αυτοί κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί και είναι βασισμένοι στις ίδιες κατασκευαστικές αρχές με τους μονωτήρες τύπου pin. Ένας αριθμός τέτοιων μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pin)

σχηματίζοντας μια αλυσίδα μονωτήρων. Αυτές οι αλυσίδες χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Το καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στον γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο. Οι κωνικές μορφές των συναρμολογήσεων εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή κατά την άσκηση δυνάμεων εφελκυσμού. Ένας τυπικός δισκοειδής μονωτήρας cap and pin στο Σχήμα 1.4. Στους μονωτήρες τύπου pin και τύπου cap and pin η συντομότερη απόσταση μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων μέσω της πορσελάνης ή του γυαλιού είναι λιγότερη από το 50% της συντομότερης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσω του αέρα. Συνεπώς, η πορσελάνη ή το γυαλί μπορεί να διατηρηθεί κατόπιν μεγάλης ηλεκτρικής καταπόνησης. Η διαδικασία κατασκευής των μονωτήρων υάλου περιλαμβάνει τη θερμική ψύξη, που εξασφαλίζει ότι οι γυάλινοι δίσκοι θρυμματίζονται σε περίπτωση διάτρησης, οπότε ο ελαττωματικός δίσκος είναι εμφανής. Βέβαια σε τέτοια περίπτωση η μηχανική ικανότητα του μονωτήρα παραμένει άθικτη.



Σχήμα 1.4: Μονωτήρας τύπου cap and pin.

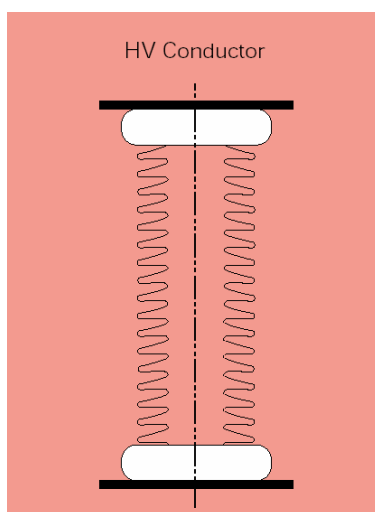
Μονωτήρες στήριξης (post type insulators)

Αυτοί οι μονωτήρες αποτελούνται από έναν συμπαγή κύλινδρο πορσελάνης, με κυματοειδείς πτυχές για να αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, και από μεταλλικά ηλεκτρόδια σε κάθε άκρη. Οι μονωτήρες στήριξης έχουν μεγάλο μήκος. Χρησιμοποιούνται οριζόντια ή κάθετα για να στηρίξουν τον αγωγό υψηλής τάσης και τοποθετούνται στις βάσεις ή στους εγκάρσιους βραχίονες των γραμμών μεταφοράς (line post insulators). Επιπλέον, οι μονωτήρες στήριξης χρησιμοποιούνται ευρέως σε υποσταθμούς (station post insulators). Στους μονωτήρες αυτούς η συντομότερη απόσταση μέσω της πορσελάνης υπερβαίνει το 50% της συντομότερης απόστασης

μέσω του αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων, οπότε δεν διαρρηγνύονται εύκολα. Ένας μονωτήρας τύπου post εικονίζεται στο σχήμα 1.5.

Μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους (longrod insulators)

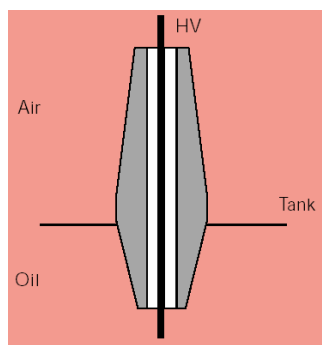
Οι μονωτήρες μεγάλου μήκους είναι παρόμοιοι με τους μονωτήρες στήριξης, αλλά είναι ελαφρύτεροι, λεπτότεροι και χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης.



Σχήμα 1.5: Μονωτήρας τύπου post.

Μονωτήρες διέλευσης (bushings)

Οι μονωτήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να μονώσουν τους αγωγούς των ακροδεκτών υψηλής τάσης κυρίως μετασχηματιστών ή άλλων διατάξεων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6. Συνήθως, οι μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται από πορσελάνη.



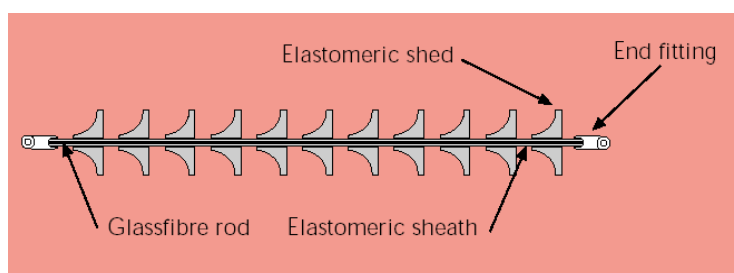
Σχήμα 1.6: Μονωτήρας διέλευσης.

Σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες (composite polymeric insulators)

Αυτοί οι μονωτήρες είναι παρόμοιοι με τους πορσελάνινους μονωτήρες μεγάλου μήκους ως προς το σχήμα, αλλά διαφέρουν ως προς τα υλικά κατασκευής, τα οποία είναι τα εξής:

- Ένας πυρήνα ρητίνης ενισχυμένο με υαλώδεις ίνες (glass fibre), ο οποίος παρέχει μηχανική αντοχή, ενώ ταυτόχρονα ανθίσταται και στην ηλεκτρική καταπόνηση.
- Ένα ελαστομερές περίβλημα (sheath/housing) για να προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες.
- Ελαστομερείς δίσκοι (sheds), τα αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ώστε να ανθίσταται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα. Δύο ευρέως χρησιμοποιημένα υλικά είναι το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και το αιθυλένιο-προπυλένιο-διένιο μονομερές καουτσούκ (ethylene propylene diene monomer – EDPM).

Ένας τυπικός μονωτήρας αυτού του τύπου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7. Οι μεταλλικοί ακροδέκτες είναι συνήθως στερεωμένες πάνω στην εξωτερική πλευρά της ράβδου του πυρήνα και τα συγκεκριμένα σημεία επαφής μεταξύ του ελαστομερούς και των ακροδεκτών είναι πολύ σημαντικά. Οι δοκιμές που εξασφαλίζουν την ποιότητα των σύνθετων μονωτήρων περιλαμβάνονται στο IEC 1109 [10]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90% σε σύγκριση με τους αντίστοιχους κεραμικούς.



Σχήμα 1.7: Σύνθετος πολυμερής μονωτήρας.

Μονωτήρες κυκλοαλιφατικής εποξικής ρητίνης (Cyclo-aliphatic epoxy resin insulators)

Η κυκλοαλιφατική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χυτευτούν μονωτήρες παρόμοιοι με αυτούς πορσελάνης και τύπου line post για διανομή των τάσεων. Σε περιβάλλον με κακές καιρικές συνθήκες οι επιφάνειες των μονωτήρων αυτών γίνονται τραχιές ένας παράγοντας που μπορεί να έχει επιπτώσεις στην αξιοπιστία του μονωτήρα, αν εφαρμοστεί εσφαλμένα.

1.3 Σημαντικές παράμετροι ενός μονωτήρα

Οι τρεις βασικές παράμετροι που καθορίζουν τον τρόπο κατασκευής ενός μονωτήρα αλλά και την απόδοση του είναι οι εξής: α) οι ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών β) η ικανότητα τους να λειτουργούν κάτω από δυσμενείς καιρικές συνθήκες και σε περιβάλλον βιομηχανικής ρύπανσης γ) το κόστος τους [2, 3, 9].

A) Ιδιότητες μονωτικών υλικών:

Τα τρία βασικά υλικά σε έναν μονωτήρα είναι το διηλεκτρικό, οι ακροδέκτες που συνδέουν το διηλεκτρικό με την υπόλοιπη μηχανολογική δομή και τα ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα όπως τσιμέντο και λιπαντικά. Τα διηλεκτρικά, που είναι συνήθως πορσελάνη, γυαλί ή πολυμερή, απαιτείται να διατηρούν την εφαρμοσμένη διάφορα δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς να αστοχήσουν. Θα πρέπει επίσης να ανθίστανται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπών του δικτύου χωρίς να διασπώνται. Επειδή οι επιφάνειες των διηλεκτρικών είναι ηλεκτρικά αγωγίμες εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθίσεων είναι απαραίτητη μια διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση. Τα διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στους μονωτήρες είναι τα κεραμικά και τα πολυμερή. Οι ακροδέκτες αποτελούνται από σφυρήλατο χυτό σίδηρο που έχει υποστεί θερμική κατεργασία και έχει γαλβανιστεί εν θερμών. Για ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται μη σιδηρομαγνητικά κράματα που βασίζονται στο χαλκό, ενώ για μικρά φορτία και χαμηλές τάσεις χρησιμοποιούνται χυτά κράματα αλουμινίου ή χυτεύσεις υπό πίεση κραμάτων ψευδαργύρου.

Τα ενδιάμεσα τμήματα που συνδέουν το διηλεκτρικό με τη μεταλλική κατασκευή είναι συνήθως από τσιμέντο, αργιλικό ή πορσελάνη Portland ή σπανιότερα εύτηκτες συγκολλήσεις με βάση το θείο.

B) Λειτουργία σε δυσμενείς συνθήκες.

Η ικανότητα λειτουργίας του μονωτήρα (δηλαδή η αποφυγή δημιουργίας τόξων σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας) καθορίζεται πρωταρχικά από τη γεωμετρία του διηλεκτρικού και δευτερευόντως από τη θέση λειτουργίας του μονωτήρα (κατακόρυφος, κεκλιμένη, οριζόντια) καθώς και από τις ιδιότητες της επιφανείας (υδροφοβία, τραχύτητα) [2, 3].

Γ) Το κόστος των μονωτήρων.

Η τιμή πώλησης των μονωτήρων, ιδιαίτερα εκείνων από γυαλί ή πορσελάνη, διαμορφώνεται από τους νομούς της αγοράς και δεν εξαρτάται από την τεχνική σημασία της μόνωσης σε μια γραμμή μεταφοράς ή από το κόστος της αντικατάστασης και τις απώλειες σε περίπτωση αστοχίας. Είναι δυνατόν, μάλιστα να ισχυριστεί κανείς ότι οι μονωτήρες είναι παράλογα φθηνοί.[2, 3].

1.4 Κυριότερα μονωτικά υλικά σε διατάξεις μονωτήρων

1.4.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών

Ως μονωτικά σώματα ή μονωτές χαρακτηρίζονται τα υλικά που, πρακτικά, δεν εμφανίζουν καθόλου ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν εκτίθενται σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος (συνήθως θεωρούνται ως χαμηλές οι τάσεις που δεν ξεπερνούν τα 1000V). Η μη δυνατότητα εκδήλωσης ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα παραπάνω σώματα έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτά δεν υπάρχουν σε κάποια επαρκή ποσότητα ευκίνητοι φορείς ηλεκτρικού φορτίου, τέτοιοι που να επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από το εσωτερικό τους (σε αντίθεση π.χ. με τα μέταλλα). Πραγματικά, στη χημική τους σύσταση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής και, σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές, τα σωματίδια από τα οποία αποτελούνται δε μπορούν να διασπαστούν εύκολα σε φορτισμένα ιόντα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερα ιόντα από τα οποία αποτελούνται είναι κατά κανόνα

δυσκίνητα, είτε στο ότι η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους είναι μεγάλη, είτε, ακόμα, στο ότι τα μόρια τους παρουσιάζουν ιδιαίτερη σταθερότητα [11]. Στην πραγματικότητα, βέβαια, είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη σε κάθε μονωτικό σώμα ενός κάποιου πλήθους προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων ή διασπάσεων που δημιουργούν ένα μικρό αριθμό φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, ο γενικός κανόνας είναι πως, χάρη στην έλλειψη αξιόλογης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίζουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων διαμέσου της μάζας τους και για να διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων [11].

1.4.2 Ιδιότητες πορσελάνης

Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο μονωτικό υλικό στις διατάξεις των μονωτήρων είναι η πορσελάνη. Γενικά, οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξης, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο) και, τέλος, υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα, [3].

Σαν βασικότερο μειονέκτημα της πορσελάνης θα μπορούσε να καταγραφεί η δυσκολία και το υψηλό κόστος βιομηχανικής παρασκευής της σε συμπαγή τεμάχια με πάχος μεγαλύτερο από 2cm. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μονωτήρες πορσελάνης μέσης και υψηλής τάσης κατασκευάζονται συνήθως από περισσότερα τεμάχια που συγκολλούνται με τσιμέντο [11]. Τέλος, ένα ακόμα σοβαρό μειονέκτημα της πορσελάνης, είναι το ότι η πορσελάνη μπορεί να υποστεί διάτρηση εσωτερικά χωρίς καμία εξωτερική ένδειξη και, έτσι, ο βαθμός της ενδεχόμενης βλάβης δεν είναι γνωστός μέχρι να επέλθει ολική συντριβή του δοκιμίου [3].

1.4.3 Ιδιότητες σκληρυμένου γυαλιού

Οι πρώτες ύλες που, συνήθως, χρησιμοποιούνται για την παρασκευή γυαλιού σα μονωτικό υλικό είναι το πυρίτιο (περίπου σε ποσοστό 57%), ο ασβεστόλιθος (9%), το άνυδρο ανθρακικό νάτριο (14%) κ.α..

Η βελτιωμένη μηχανική αντοχή του σκληρυμένου γυαλιού συγκριτικά με την πορσελάνη επιτρέπει τη χρησιμοποίηση λεπτότερων δακτυλίων στις διατάξεις των

δισκοειδών μονωτήρων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται σημαντικά το μήκος του ερπυσμού, ενώ, η ονομαστική τάση λειτουργίας του μονωτήρα μπορεί να αυξηθεί σε ποσοστό μέχρι και 40% [3].

Εξάλλου, ένα βασικό χαρακτηριστικό των μονωτήρων γυαλιού είναι το ότι έχουν την ιδιότητα να αποθηκεύουν σημαντική ενέργεια όταν οι τελευταίοι υπόκεινται σε μηχανικές καταπονήσεις. Όταν αυτή η ενέργεια απελευθερωθεί, όπως συνήθως συμβαίνει κατά την έντονη μηχανική κρούση ή ύστερα από την καθολική διάβρωση ενός στρώματος, τότε ολόκληρο το τεμάχιο διασπάται σε μικροσκοπικά κυβικά θραύσματα, τα οποία εκτοξεύονται με μεγάλη σφοδρότητα. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίησή τους κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

Αξίζει να τονισθεί πως το εύρος της βιομηχανικής εφαρμογής του μονωτήρα από γυαλί είναι περισσότερο περιορισμένο από εκείνο του μονωτήρα πορσελάνης. Στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές η χρήση του γυαλιού, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση, περιορίζεται στους μονωτήρες τύπου “cap and pin” (ανάρτησης) ή σε εκείνους τους τύπους, όπως είναι οι μονωτικοί στύλοι στήριξης των σιδηροδρομικών δικτύων και οι στύλοι πολλαπλών κώνων που αποτελούνται από διακριτές διατάξεις δισκοειδούς μορφής [3].

1.4.4 Ιδιότητες πολυμερών

Ελαφρύτερα, αλλά και εξαιρετικά ανθεκτικά στις μηχανικές καταπονήσεις, μονωτικά υλικά είναι, γενικά, τα πολυμερή υλικά. Από αυτά, ιδιαίτερα διαδεδομένες, λόγω του χαμηλού τους κόστους, είναι οι θερμοπλαστικές εποξειδικές ρητίνες με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους λόγω του γεγονότος ότι είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε αλλοίωση της χημικής τους σύστασης υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (φωτόλυση). Μια άλλη ποιότητα πλαστικού, οι κυκλοαλειφατικές ρητίνες, παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή στη φωτόλυση και πιστεύεται ότι θα αντικαταστήσει μελλοντικά την πορσελάνη και το γυαλί στην κατασκευή των μονωτήρων. Εξάλλου, μια άλλη σημαντική κατηγορία συνθετικών μονωτικών είναι οι ελαστομερείς ρητίνες σιλικόνης, οι οποίες αντέχουν ικανοποιητικά στην καύση και δεν υπόκεινται σε μόνιμες βλάβες από τον ερπυσμό και τις μερικές εκκενώσεις (όπως οι οργανικές ρητίνες) αφού αποτελούνται από

σκελετό από πυρίτιο και περιέχουν πολύ λίγο άνθρακα στη χημική τους σύσταση [11].

Η πλέον συνηθισμένη εφαρμογή των συνθετικών μονωτήρων είναι η χρησιμοποίησή τους για την ανάρτηση ή στήριξη των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στις γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται μεγάλες δέσμες αγωγών προκειμένου να περιοριστούν οι ηλεκτρικές απώλειες, οπότε τα μηχανικά φορτία είναι πολύ μεγαλύτερα από εκείνα που έχουν τη δυνατότητα να φέρουν οι συνήθεις μονωτήρες ανάρτησης γυαλιού ή πορσελάνης. Πραγματικά, οι συνθετικοί μονωτήρες πολύ δύσκολα προσβάλλονται από τις συνήθεις ηλεκτρικές βλάβες και επιδράσεις χειρισμού, ενώ είναι δυνατό να ανταπεξέλθουν σε συγκράτηση φορτίου που υπερβαίνει τους 100 τόνους. [3]

1.4.5 Ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες μονωτικών διηλεκτρικών

Η πορσελάνη, το μονωτικό γυαλί και τα πολυμερή υλικά αποτελούν, λοιπόν, τα διηλεκτρικά εκείνα που συναντώνται συνηθέστερα σε μια διάταξη μονωτήρα. Εκτός από την ικανότητα να διατηρούν την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να παρουσιάσουν αστοχία, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μηχανικές ιδιότητες τέτοιες που να τα καθιστούν κατάλληλα για την ανάρτηση ή στήριξη μιας σειράς στοιχείων ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (όπως είναι π. χ. οι γραμμές μεταφοράς). Στον πίνακα που ακολουθεί μπορεί κανείς να δει τις κυριότερες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών σε μια συγκεντρωτική μορφή. [3]

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών [3].

Ιδιότητα	Υαλώδης πορσελάνη	Σκληρυμένο γυαλί	Πολυμερές	Υαλώδεις ίνες συνδεδεμένες με ρητίνη
Πυκνότητα [g/cm]	2.3 – 3.9	2.5	0.9 – 2.5	2.1 – 2.2
Αντοχή σε εφελκυσμό [Mpa]	30 – 100	100 – 120	20 – 35	1300 – 1600
Αντοχή σε θλίψη [Mpa]	240 – 820	210 – 300	80 – 170	700 – 750
Συντελεστής εφελκυσμού [Gra]	50 – 100	7.2	0.6 – 16	43 – 60
Θερμική αγωγιμότητα [W/m °K]	1 – 4	1.0	0.17 – 0.9	0.2 – 1.2
Διασταλτικότητα (20 – 100 °C) [10 ⁻⁶ / °K]	3.5 – 9.1	8.0 – 9.5	45 – 200	7.5 – 20
Διηλεκτρική σταθερά (50 – 60 Hz)	5.0 – 7.5	7.3	2.3 – 5.5	2.5 - 6.5
Εφαπτομένη απωλειών (50 – 60 Hz) [10 ⁻³]	20 – 40	15 – 50	0.1 – 5.0	5.0 – 20
Πεδιακή αντοχή [kV/mm]	10 – 20	>25	>25	3.0 – 20
Ειδική αντίσταση [Ω cm]	10 ¹¹ – 10 ¹³	10 ¹²	10 ¹⁵ – 10 ¹⁷	10 ¹¹ – 10 ¹⁴

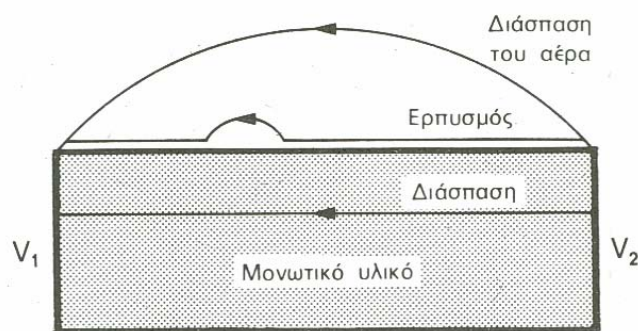
1.5 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ηλεκτρική διάσπαση στα στερεά μονωτικά υλικά που βρίσκονται σε αέριο περιβάλλον και κυρίως στον ατμοσφαιρικό αέρα. Τέτοιες διατάξεις είναι και οι μονωτήρες, στους οποίους απώλεια της μόνωσης μπορεί να επέλθει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Ο πρώτος είναι η κανονική ηλεκτρική διάσπαση του μονωτήρα (διάτρηση) και η εκκένωση ρεύματος δια μέσου της μάζας του, φαινόμενο που, όπως είδαμε και πιο πάνω, εκδηλώνεται όταν η διαφορά δυναμικού ξεπεράσει την τάση διάσπασης του υλικού [11]. Η διάτρηση του μονωτήρα είναι ένα εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο, αφού (όπως, επίσης αναφέρθηκε προηγουμένως), η ειδική αγωγιμότητα όγκου του μονωτικού υλικού είναι πολύ μικρότερη της ειδικής επιφανειακής αγωγιμότητάς του. Έτσι, οι ενδεχόμενες ηλεκτρικές εκκενώσεις πραγματοποιούνται ως επί το πλείστον στην επιφάνεια του μονωτήρα ή μέσω διάσπασης μορίων του αέρα γύρω από αυτήν, παρά διαμέσου του υλικού του. Διάτρηση, βέβαια, μπορεί να επιτευχθεί και μέσα σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, εφόσον, όμως, η επιβαλλόμενη τάση είναι κρουστική, μεγάλης τιμής και μεγάλης κλίσεως μετώπου (π.χ. κεραυνοπληξία) [1].
- Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να επέλθει απώλεια της μόνωσης σε μια διάταξη μονωτήρα είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού ρεύματος ερπυσμού πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Το ρεύμα ερπυσμού μπορεί να εκτείνεται σε όλο το μήκος της επιφάνειας του μονωτικού ή, συνήθως, σε διάφορα μέρη της που συνδέονται με μικρά ηλεκτρικά τόξα. Μάλιστα, τα δημιουργούμενα κατά την υπερπήδηση ηλεκτρικά τόξα έρχονται σε επαφή με το στερεό μονωτικό καθορίζοντας, ταυτόχρονα, (κατά ένα ποσοστό τουλάχιστο 50%) την “οδό διέλευσης” νέου ηλεκτρικού τόξου που, ενδεχόμενα, θα λάβει χώρα στο μέλλον. Για αυτό το λόγο, συνήθως, εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή κερατίδια με τα οποία “υποδεικνύεται” στο ηλεκτρικό τόξο η οδός διέλευσής του, μακριά από το στερεό μονωτικό [11].
- Όταν η μεταξύ των δύο ακρότατων σημείων του μονωτήρα επιβαλλόμενη τάση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, σημειώνεται υπερπήδηση (*flashover*) του μονωτήρα, δηλαδή γεφύρωση του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της

γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα [1].

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η υπερπήδηση επέρχεται εν μέρει λόγω επιφανειακών εκκενώσεων, ερπουσών επί της επιφάνειας του μονωτήρα, και εν μέρει λόγω διασπάσεως στρωμάτων αέρα [1]. Γι' αυτό το λόγο τα δύο τελευταία φαινόμενα αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο [11]. Αξίζει, εδώ, να επισημάνουμε το γεγονός ότι, από τα παραπάνω, τα πλέον συνήθη φαινόμενα είναι η υπερπήδηση των μονωτήρων από επιφανειακό ρεύμα ερπυσμού ή μέσω εναέριου ηλεκτρικού τόξου. Η εξήγηση είναι προφανής και έγκειται στο γεγονός ότι το σώμα του μονωτήρα έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα και από το υλικό στην επιφάνειά του. Έτσι, τα τελευταία αποτελούν προσφορότερο αγωγίμο δρόμο διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 1.8: Η απώλεια της μονωτικής δράσης ενός στερεού μονωτικού μπορεί να γίνει με ηλεκτρική διάσπαση του υλικού ή με υπερπήδηση που εκδηλώνεται με ρεύμα ερπυσμού και με διάσπαση στον αέρα

1.6 Αρχές σχεδίασης του μονωτήρα

Η ικανότητα ασφαλούς λειτουργίας του μονωτήρα (δηλαδή η αποφυγή δημιουργίας τόξων σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας) καθορίζεται πρωταρχικά από τη γεωμετρία του διηλεκτρικού και δευτερευόντως από τη θέση λειτουργίας του μονωτήρα (κατακόρυφος, κεκλιμένη ή οριζόντια) καθώς και τις ιδιότητες της

επιφάνειας, όπως είναι η τραχύτητα ή η υδροφοβία (η ικανότητα μιας επιφάνειας να απωθεί το νερό) [3]

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, λοιπόν, οι αρχές που πρέπει κανείς να ακολουθήσει για το σχεδιασμό μιας διάταξης μονωτήρα είναι οι ακόλουθες: [3]

- **Μεγιστοποίηση της διαδρομής ερπυσμού.**

Σε γενικές γραμμές, η αντοχή των μονωτήρων υπό βροχή είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή τους σε συνθήκες ξηρασίας. Θα ήταν, μάλιστα, αυτή πολύ μικρότερη αν οι μονωτήρες δεν είχαν τη γνωστή κυματοειδή διαμόρφωση της κάτω επιφάνειάς τους, που εξασφαλίζει πως ένα μέρος της συνολικής τους επιφάνειάς μένει αδιάβρεκτο, ενώ, παράλληλα, διακόπτεται η συνέχεια του αγώγιμου στρώματος ύδατος. Εκτός απ' αυτό, όμως, η κυμάτωση της κάτω επιφάνειας των μονωτήρων αυξάνει το μήκος ερπυσμού, διαδρομή την οποία ακολουθούν οι έρπουσες εκκενώσεις [1]. Η μεγιστοποίηση της διαδρομής ερπυσμού πρέπει, ωστόσο, να γίνεται σχεδιαστικά χωρίς να καταστρέφεται η αεροδυναμική της επιφάνειας. Το τελευταίο μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα προκειμένου να αποφεύγεται η εναπόθεση με τον άνεμο αιωρούμενων κόκκων και σταγονιδίων στην πάνω επιφάνεια του μονωτήρα, κάτι που αποτελεί και το σημαντικότερο μηχανισμό ρύπανσης [3].

- **Υποβοήθηση της αφύγρανσης των επιφανειών.**

Αυτό μπορεί να γίνει αποφεύγοντας τις οριζόντιες και επίπεδες επιφάνειες. [3]

- **Διατήρηση της ταχύτητας του ανέμου κοντά στο μονωτικό.**

Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει καθότι, συχνά, η ενδεχόμενη δημιουργία, κατά τη σχεδίαση, περιοχών στροβιλισμού έχει σαν αποτέλεσμα την εναπόθεση των ρύπων στα ελικοειδή τμήματα της επιφάνειας με τους μικροκυκλώνες που τα τελευταία δημιουργούν τοπικά. [3]

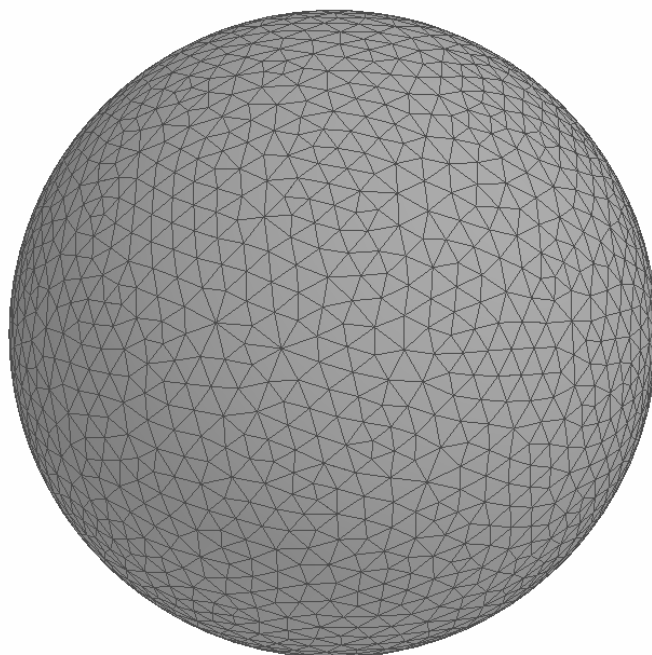
- **Αύξηση της επιφανειακής αντίστασης.**

Η ομοιόμορφη διάσπαση των στρωμάτων υγρασίας σε μορφή μεμονωμένων σταγόνων μπορεί να εξασφαλιστεί με κατάλληλη σχεδίαση και επεξεργασία του μονωτικού υλικού. Με τον τρόπο αυτό οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του μονωτήρα μπορούν να μειωθούν αισθητά. [3]

Παρά τις γενικές σχεδιαστικές αρχές που παραθέσαμε παραπάνω, τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί ότι «ιδανικό» σχήμα μονωτήρα δεν υπάρχει, αφού η απόδοση εξαρτάται σημαντικά από την περιεκτικότητα της επιφάνειάς του σε υγρασία. Οι συνέπειες αυτής της αρχής – ότι το «ιδανικό σχήμα» εξαρτάται από το ποσοστό υγρασίας – είναι ευρείες και επεκτείνονται μέχρι την εγκυρότητα των τεχνητών δοκιμών και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αντιμετώπισης της επιφανειακής διάσπασης [3].

Κεφάλαιο
2^ο

Βιβλιογραφική ανασκόπηση



2.1 Αριθμητικές μέθοδοι

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου (εξισώσεις Laplace, Poisson, Διαχύσεως, Maxwell και Helmholtz, καθώς και συνθήκες Coulomb και Lorentz) επιτρέπει την ανάλυση προβλημάτων χωρίς τους περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται οι αναλυτικές τεχνικές (απλές γεωμετρικές-γραμμικά μέσα). Το πλεονέκτημα ότι οι αριθμητικές μέθοδοι επιλύουν προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρικές και μη γραμμικά μέσα «αντισταθμίζεται» από το γεγονός ότι δεν επιτυγχάνουν την εύρεση της ακριβούς λύσης του προβλήματος, αλλά μιας προσεγγιστικής λύσης, η οποία όμως, όταν γίνεται κατάλληλη χρήση των μεθόδων, παρέχει την επιθυμητή ακρίβεια. Η διαφορά αυτή προκύπτει, διότι δεν επιλύεται το συνεχές πρόβλημα όπως αυτό εκφράζεται από τις διαφορικές εξισώσεις του πεδίου, αλλά επιλύεται κάποιο αντίστοιχο διακριτό πρόβλημα.

Έτσι, δεν υπολογίζεται η άγνωστη ποσότητα (συνήθως βαθμωτό ή διανυσματικό δυναμικό) σε όλα τα σημεία του πεδίου ορισμού, αλλά σε ένα αριθμό «κατάλληλα» επιλεγμένων σημείων (κόμβων). Με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με αγνώστους τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους που επελέγησαν. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων παρέχει την προσεγγιστική λύση. Η τιμή του δυναμικού για τα υπόλοιπα σημεία του χώρου ανάγεται με τη βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής. Επομένως, η επιλογή της διακριτότητας κατά την αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος αποτελεί το συμβιβασμό μεταξύ δύο αντιμαχόμενων παραγόντων:

- ❖ την εκλογή αρκετών κόμβων ώστε το διακριτό πρόβλημα να προσεγγίζει αρκετά το αντίστοιχο συνεχές και τα αποτελέσματα να έχουν την επιδιωκόμενη ακρίβεια και
- ❖ την εκλογή λίγων κόμβων, ώστε το σύστημα εξισώσεων που θα προκύψει να επιλυθεί σε «λογικό» χρόνο από το διατιθέμενο ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το σφάλμα προσεγγίσεως δεν εξαρτάται μόνο από τη διακριτότητα, αλλά είναι στενά συνυφασμένο και με το είδος της χρησιμοποιούμενης μεθόδου [12]. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σύνθετη γεωμετρία των μονωτήρων, οι αριθμητικές μέθοδοι προτιμώνται για την επίλυση των προβλημάτων κατανομής δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου [2]. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη αριθμητικών αναλυτικών μεθόδων,

χρησιμοποιώντας είτε διαφορικές είτε ολοκληρωτικές εξισώσεις. Η πρώτη μέθοδος (με τις διαφορικές εξισώσεις) είναι γνωστή σαν προσέγγιση «πεδίου» ή βασική μέθοδος και η δεύτερη είναι γνωστή σαν μέθοδος οριακών στοιχείων. Οι βασικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (finite difference method-FDM) και τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (finite element method-FEM), που εφαρμόζονται κυρίως σε περιοχές με περιορισμένες συνοριακές συνθήκες, όπως π.χ. σε προβλήματα μετασχηματιστών. Η δεύτερη μέθοδος είναι η μέθοδος των οριακών στοιχείων και περιλαμβάνει τη μέθοδο προσομοίωσης φορτίου (charge simulation method-CSM) και τη μέθοδο των οριακών στοιχείων (boundary element method-BEM), οι οποίες εφαρμόζονται σε προβλήματα ανοιχτών συνόρων, όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς [13].

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα πακέτα λογισμικού για την προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων στηριζόμενα σε αριθμητικές μεθόδους. Παρακάτω θα παρουσιαστεί μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας όσον αφορά στην εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων σε προβλήματα υπολογισμού της κατανομής του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου σε μονωτήρες γραμμών μεταφοράς.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) παρουσιάστηκε το 1960 και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην επιστήμη του ηλεκτρολόγου μηχανικού το 1965. Επιπλέον, επεκτάθηκε στα μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η FEM χρησιμοποιείται ευρέως ως η βασική αριθμητική μέθοδος υπολογισμού για την ανάλυση ποσοτήτων (quantity analysis) και για το βέλτιστο σχεδιασμό των προβλημάτων που αφορούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η μέθοδος αυτή είναι η βάση διαφόρων εξελιγμένων και πρακτικών υπολογιστικών πακέτων λογισμικού.

Παραδοσιακά, η FEM στηρίζεται στην αρχή της μεταβολής. Αρχικά, μεταφέρει το μαθηματικό μοντέλο της διαφορικής εξίσωσης, δηλαδή το πρόβλημα συνοριακών τιμών, σε ένα πρόβλημα μεταβολής (variation problem), το οποίο μετατρέπεται σε συνοριακό πρόβλημα συνήθων συναρτήσεων μέσω των μεθόδων της ανάλυσης, της παρεμβολής και της μετάδοσης (dispersion). Τελικά, το πρόβλημα εκφυλίζεται σε μερικές αλγεβρικές εξισώσεις και έτσι, η σχετική αριθμητική λύση μπορεί εύκολα να αποκτηθεί. Το κλειδί της FEM είναι η ανάλυση και η παρεμβολή.

2.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της λύσης των μερικών διαφορικών ή ολοκληρωτικών εξισώσεων που δεν μπορούν να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Οι μερικές διαφορικές και ολοκληρωτικές εξισώσεις περιγράφουν τη χωρική και χρονική μεταβολή ενός πεδίου είτε άμεσα με τις μεταβλητές του πεδίου αυτού π.χ. την πυκνότητα μαγνητικής ροής \mathbf{B} είτε χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση δυναμικού που σχετίζεται με το πεδίο μέσω του βαθμωτού ανάδελα ∇ (gradient) και του στροβιλισμού $\nabla \times$ (curl). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να εφαρμοστεί γενικά σε οποιοδήποτε πρόβλημα με οποιοδήποτε είδος μη γραμμικότητας. Βασίζεται στην διαίρεση του χώρου στον οποίο ικανοποιείται η εξίσωση σε μικρά στοιχεία όγκου (τα πεπερασμένα στοιχεία). Μέσα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο χρησιμοποιείται ένα απλό πολυώνυμο που προσεγγίζει την λύση.[14,15]

Η γενική ιδέα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του χώρου. Παρόλα αυτά, είναι βολικότερο να χρησιμοποιείται ένα απλό μονοδιάστατο πρόβλημα, με στόχο οι αλγεβρικές εξισώσεις και τα επεξηγηματικά διαγράμματα να γίνονται πιο κατανοητά.

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

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = \rho \quad (2.1)$$

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

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

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

Για την λύση της εξίσωσης (2.1) με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία. Ένα τέτοιο τυπικό γραμμικό στοιχείο θα έχει δύο κόμβους αριθμημένους π.χ. 1 και 2. Μέσα σε κάθε τέτοιο στοιχείο το δυναμικό θα προσεγγίζεται από το γραμμικό πολυώνυμο:

$$\phi(x) = \alpha + \beta \cdot x \quad (2.3)$$

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

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να μπορεί να δείξει αυτή την συμπεριφορά και έτσι είναι βολικό η εξίσωση (2.3) να χαρακτηρίζεται από τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους του στοιχείου και να χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές για άλλα στοιχεία που συναντώνται στους κόμβους αυτούς.

Μια περαιτέρω απλοποίηση μπορεί να γίνει τροποποιώντας την εξίσωση (2.3) με όρους κομβικών συναρτήσεων N_i που καθορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} N_i(x) &= 1, & x &= x_i \\ N_i(x) &= 0, & x &= x_j \quad j \neq i \end{aligned} \quad (2.4)$$

όπου x_i είναι η x συντεταγμένη του κόμβου i .

Η εξίσωση (2.3) μπορεί τώρα να πάρει την μορφή:

$$\phi(x) = N_1(x) \cdot \phi_1 + N_2(x) \cdot \phi_2 \quad (2.5)$$

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

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2} \cdot (1 - \xi) \\ N_2 &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \xi) \\ -1 &\leq \xi \leq 1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

Η διακριτή μέθοδος υπολογισμού του δυναμικού ϕ με χρήση χαρακτηριστικών τιμών δυναμικού των κόμβων και συναρτήσεων N_i αποτελεί τη βάση, στην οποία πολλές εναλλακτικές διαδικασίες μπορούν να στηριχθούν για την επίλυση της εξίσωσης (2.1). Οι μέθοδοι διακύμανσης (variational methods), ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστών βαρύτητας (weighted residual) είναι τρεις από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Οι συντελεστές βαρύτητας έχουν διαδεδομένη εφαρμογή σε προγράμματα λογισμικού προκειμένου να υλοποιηθεί μία αριθμητική επίλυση. Μία προσεγγιστική επίλυση ως προς ϕ καθορίζεται από την απαίτηση να ικανοποιείται η παρακάτω συνάρτηση:

$$\int W (\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi - \rho) \cdot dx = 0 \quad (2.7)$$

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

Ολοκληρώνοντας την (2.7) κατά τμήματα, προκειμένου να μειωθεί η τάξη της διαφορίσης που εφαρμόζεται στο ϕ , προκύπτει μια προσεγγιστική λύση για το δυναμικό ϕ :

$$\int_a^b (\nabla W \cdot \varepsilon \nabla \phi + W \rho) dx - [W \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x}]_a^b = 0 \quad (2.8)$$

όπου a, b τα όρια ολοκλήρωσης της εξίσωσης.

Η εξίσωση (2.8) οδηγεί κατευθείαν σε μια μέθοδο αριθμητικής επίλυσης, χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία και τις συναρτήσεις N_i που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης πλεονεκτεί έναντι των άλλων, αφού οι συναρτήσεις W και ϕ δεν απαιτούν συνέχεια των παραγώγων και επιπλέον καθορίζονται εύκολα οι φυσικές οριακές συνθήκες στην επιφάνεια του χώρου $\frac{\partial \phi}{\partial x}$.

Ο τομέας από a έως b διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι δίνουν ένα συνδυασμό ανεξάρτητων συναρτήσεων βάρους. Από αυτές τις συναρτήσεις βάρους μπορούν να αναπτυχθούν εξισώσεις με την απαίτηση ότι η εξίσωση (2.8) ικανοποιείται για κάθε συνάρτηση βάρους.

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

$$\sum_j \left(\int_a^b (\nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j \phi_j + N_i \rho) dx \right) - \left[N_i \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_a^b = 0 \quad (2.9)$$

για όλα τα στοιχεία που περιέχουν τον κόμβο i .

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

$$\mathbf{K} \cdot \Phi = \mathbf{S} \quad (2.10)$$

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

Οι συντελεστές στον πίνακα \mathbf{K} έχουν τη μορφή:

$$K_{ij} = \int_a^b \nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j dx \quad (2.11)$$

Αξίζει να σημειωθεί, ότι, παρ' όλο που η ολοκλήρωση στην εξίσωση (2.11) γίνεται για όρια από a έως b , μόνο τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και τους δύο κόμβους i και j συνεισφέρουν.

Ο εξισώσεις στη σχέση (2.10) συχνά δεν είναι γραμμικές επειδή η επιτρεπτότητα ε εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, που προφανώς δεν είναι γραμμική.

Μη γραμμικά υλικά

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

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n - \mathbf{J}_n^{-1} \cdot \mathbf{R}_n \quad (2.12)$$

όπου το υπόλοιπο \mathbf{R}_n δίνεται από την:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{K}_n \cdot \Phi_n - \mathbf{S}_n \quad (2.13)$$

και η Ιακωβιανή \mathbf{J}_n από την:

$$\mathbf{J}_n = \frac{\partial}{\partial \Phi_n} (\mathbf{K}_n \cdot \Phi_n - \mathbf{S}_n) \quad (2.14)$$

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

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων

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

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

2.2.1 Επιλύτης TOSCA, Ανάλυση στατικού πεδίου

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

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

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

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.15)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής (\mathbf{D}) συνδέεται με την πυκνότητα φορτίου (ρ) ως εξής:

$$\nabla \mathbf{D} = \rho \quad (2.16)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.15 και 2.16 και εισάγοντας τη διηλεκτρική επιτρεπτότητα (ϵ), παίρνουμε τη συνήθη περιγραφή της εξίσωσης Poisson για το ηλεκτρικό δυναμικό:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho \quad (2.17)$$

όπου

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.18)$$

Μια παρόμοια εξίσωση προκύπτει από τα προβλήματα ροής ρεύματος:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (2.19)$$

όπου σ η αγωγιμότητα και

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.20)$$

Συνοριακές συνθήκες

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

χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν κατά προσέγγιση το πεδίο σε μεγάλες αποστάσεις από το πρόβλημα.

Η συμμετρία του προβλήματος και η συμμετρία των πεδίων υπονοείται από τις συνοριακές συνθήκες δυναμικού που εφαρμόζονται σε οποιοδήποτε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Οι πιο απλοί τύποι συνοριακών συνθηκών φαίνονται στον Πίνακα 2.1, όπου \mathbf{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα της εκάστοτε επιφάνειας.

Πίνακας 2.1: Συνοριακές συνθήκες στο TOSCA.

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

Το φ αναφέρεται σε βαθμωτό δυναμικό. Να σημειωθεί ότι τα \mathbf{H} και \mathbf{E} είναι διανύσματα, όπου \mathbf{H} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου [A/m] και \mathbf{E} είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου [V/m].

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

μηδενικές παράγωγοι δυναμικού ($\frac{\partial V}{\partial n} = \text{τιμή}$), ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των

ρευμάτων. Επίσης, είναι διαθέσιμες και μικτές οριακές συνθήκες για τη μοντελοποίηση δυναμικών πόλωσης που παράγονται από τη διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών. Εκτός από αυτές τις περιπτώσεις, οι άλλες οριακές συνθήκες που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.1 θα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Οι συνθήκες που θα εφαρμόζονται αυτόματα, εάν δεν τίθενται άλλες οριακές συνθήκες στις εξωτερικές επιφάνειες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Οριακές συνθήκες που τίθενται αυτόματα στις εξωτερικές επιφάνειες.

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

2.3 Σημαντικές παράμετροι κατά την προσομοίωση μονωτήρων με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων

2.3.1 Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου

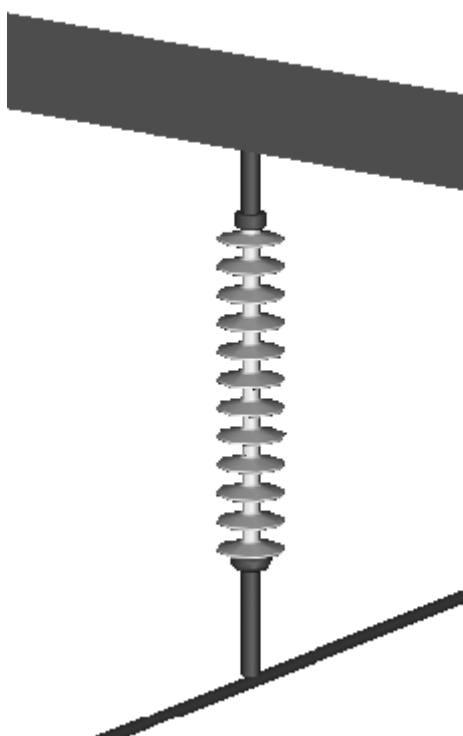
Στο άρθρο [16] αναλύονται οι επιδράσεις του πυρήνα από ίνες γυαλιού, του πολυμερούς περιβλήματος και των ελαστομερών δίσκων, καθώς και της αγωγικής γραμμής μεταφοράς πάνω στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού γύρω από ένα μονωτήρα. Η επίδραση των άλλων δύο φάσεων του τριφασικού συστήματος υπολογίζονται σε μονωτήρες τοποθετημένους τόσο σε I-διάταξη όσο και σε V-διάταξη ενός πυλώνα 765 kV.

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιείται ένας τυπικός μη-κεραμεικός μονωτήρας 34.5 kV. Με στόχο να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού των κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού όταν αναλύουμε σύνθετους (long) μονωτήρες, κρίνεται απαραίτητη η απλοποίηση του μονωτήρα. Για να αποφασιστεί ποιο χαρακτηριστικό της γεωμετρίας μπορεί να παραληφθεί με τη λιγότερη δυνατή επίδραση στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων, χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς αυτός ο μονωτήρας 34.5 kV. Έτσι, για τη διαδικασία της αντιπαραβολής, χρησιμοποιούνται τέσσερα μοντέλα: (α) μόνο δύο ηλεκτρόδια, (β) τα δύο ηλεκτρόδια και ο πυρήνας, (γ) τα δύο ηλεκτρόδια, ο πυρήνας και το περίβλημα, χωρίς τους ελαστομερείς δίσκους και (δ) ο «πλήρης» μονωτήρας

των 34.5 kV. Στο άκρο της γραμμής εφαρμόζεται τάση 100 V, ενώ στο άλλο (γειωμένο) άκρο μηδενική τάση.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ελαστομερείς δίσκοι του μονωτήρα μπορούν να παραλειφθούν κατά την προσομοίωση, χωρίς να χάνεται σημαντική ακρίβεια στον υπολογισμό της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα. Συγκεκριμένα, στην (δ) περίπτωση η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατά 4% μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της (γ) περίπτωσης. Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να προσομοιώσουμε ένα πέμπτο μοντέλο με λίγους μόνο ελαστομερείς δίσκους, το οποίο δίνει ακόμα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο αριθμός των δίσκων καθορίζεται από την επιθυμητή ακρίβεια και τις δοκιμές.

Η επίδραση ενός αγωγού (γραμμής μεταφοράς) στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού μελετήθηκε προσθέτοντας στο μοντέλο του μονωτήρα έναν αγωγό μήκους 3m, ο οποίος προσομοιώνει τη γραμμή μεταφοράς. Ο μονωτήρας αναρτάται από το κέντρο μίας γειωμένης επιφάνειας 1.6m*0.4m. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.1: Χρήση γειωμένης επιφάνειας στο μοντέλο προσομοίωσης του μονωτήρα.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η μονάδα του αγωγού μειώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο άκρο του μονωτήρα από το οποίο

αναρτάται η γραμμή, αλλά αυξάνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.

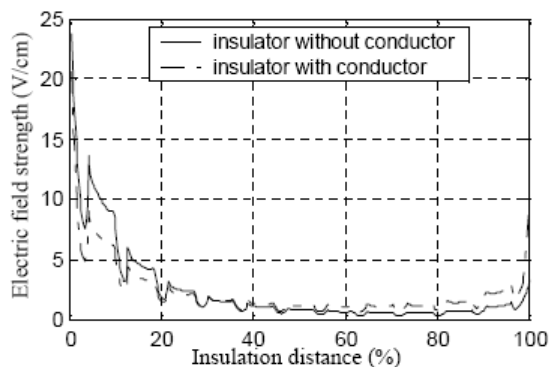


Figure 4. Electric field strength magnitude along the insulation distance at the surface of the sheath.

Σχήμα 2.2: Επίδραση της ύπαρξης ή μη του αγωγού στην ένταση του πεδίου.

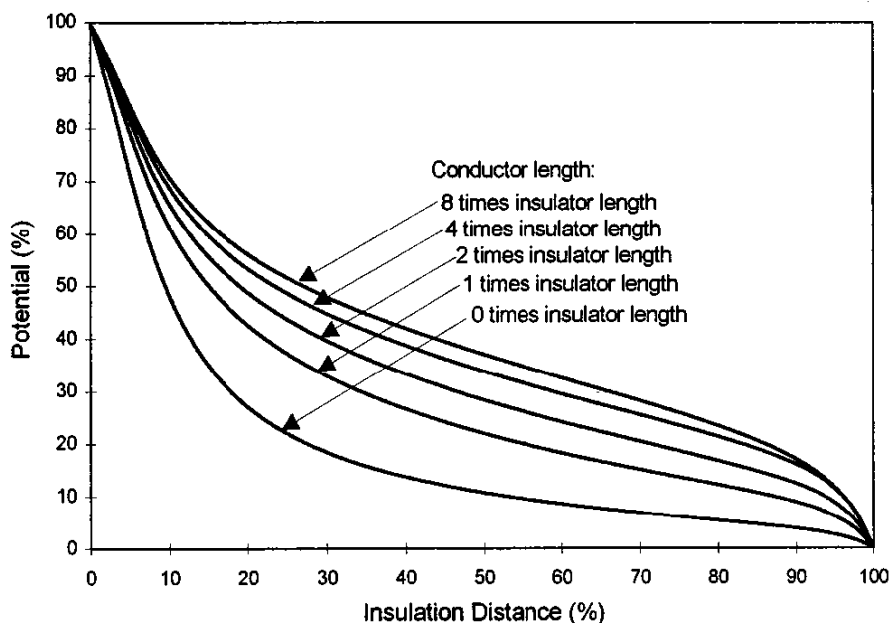
Η επίδραση των άλλων δύο φάσεων του τριφασικού συστήματος ερευνήθηκαν για I- και V-διάταξη των μονωτήρων. Ο αγωγός της κεντρικής φάσης βρίσκεται μέσα στο «παράθυρο» του πυλώνα. Αυτή είναι η χειρότερη περίπτωση κατά τη μελέτη των κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο της τριπλής σύνδεσης στο μεταλλικό άκρο (metal fitting) κοντά στον αγωγό υψηλής τάσης, του ελαστομερούς δίσκου και του αέρα είναι περίπου 16% μεγαλύτερη για I-string και 6% μεγαλύτερη για V-string στην τριφασική διέγερση, συγκρινόμενη με την περίπτωση μονοφασικής διέγερσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε έναν σύνθετο (long) πολυμερή μονωτήρα το 10% περίπου των ελαστομερών δίσκων που βρίσκονται πιο κοντά στο άκρο που είναι συνδεδεμένη η γραμμή, συγκρατούν ένα 30-35% της εφαρμοζόμενης τάσης. Αντίθετα, το 10% περίπου των δίσκων που βρίσκονται κοντά στο γειωμένο άκρο συγκρατούν το 10-15% της εφαρμοζόμενης τάσης.

2.3.2 Μήκος αγωγού

Όσον αφορά στο μήκος του αγωγού που χρησιμοποιείται για την ολοκληρωμένη προσομοίωση του μοντέλου κάθε φορά, αυτό θα επιλέγεται να είναι περίπου ίσο με το συνολικό μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα. Από το άρθρο [17] προκύπτει ότι εάν οι αγωγοί αγνοηθούν κατά την παρουσίαση της γενικότερης γεωμετρίας, τότε τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπεισέρχεται σε αυτά σοβαρή υπερεκτίμηση της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, αλλά και υποεκτίμηση της τιμής του

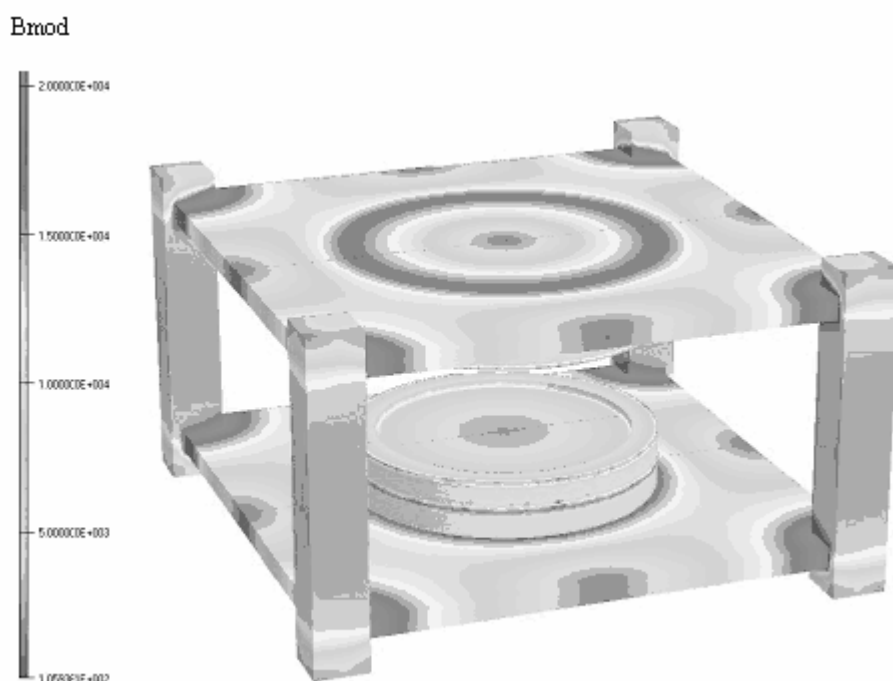
δυναμικού. Παρόλα αυτά, οι αγωγοί μπορούν να μοντελοποιηθούν, με αρκετή ακρίβεια, έχοντας σχετικά μικρά μήκη (από 1 έως 8 φορές το μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα). Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της γραμμής που περνά από το κέντρο του μονωτήρα και διασχίζει όλη την αλυσίδα για διάφορα μήκη αγωγών.



Σχήμα 2.2: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της της γραμμής που περνά από το κέντρο του μονωτήρα και διασχίζει όλη την αλυσίδα για διάφορα μήκη αγωγών.

Κεφάλαιο 3^ο

Το πρόγραμμα Opera-3d



3.1 Εισαγωγή

Το Opera-3d (**OP**erating environment for **E**lectromagnetic **R**esearch and **A**nalysis, δηλαδή ένα λειτουργικό περιβάλλον για ηλεκτρομαγνητική έρευνα και ανάλυση) είναι ένα σύστημα προ- και μετ- επεξεργασίας για γνωστά προγράμματα ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, που είναι τα εξής: TOSCA, ELEKTRA, SCALA, CARMEN, SOPRANO και TEMPO. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τη βασική μέθοδο που χρησιμοποιείται σε αυτά τα προγράμματα ανάλυσης. Αυτή η ευρέως διαδεδομένη τεχνική για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτεί ειδικές τροποποιήσεις για να εφαρμοστεί σε υπολογισμούς ηλεκτρικού πεδίου. Αυτές οι τροποποιήσεις υποστηρίζονται από τον Μοντελοποιητή (Modeller) και τον Προ-Επεξεργαστή του Opera-3d. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τον καθορισμό σύνθετης γεωμετρίας με αγωγούς και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών συμπεριλαμβανομένων μη-γραμμικών και μη-ισοτροπικών περιγραφών, αλλά και γραφικών παραστάσεων για τον έλεγχο των δεδομένων [14, 15].

Ομοίως, ο Μετ-Επεξεργαστής του Opera-3d παρέχει τα απαραίτητα μέσα για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Μέσω αυτού μπορούν να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη που αφορούν κάθε πρόβλημα (π.χ. ένταση ηλεκτρικού πεδίου, δυναμικό, ρεύμα ή δύναμη) είτε πάνω στο μοντέλο είτε με γραφικές παραστάσεις. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, υπάρχουν έξι πακέτα ανάλυσης, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

TOSCA

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

- οι μαγνήτες MRI (Magnetic Resonance Imaging magnets)
- κινητήρες και γεννήτριες
- διακόπτες

ELEKTRA

Το πακέτο αυτό αναλύει χρονικά εξαρτώμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων των δινορρευμάτων σε τρεις διαστάσεις. Υπάρχουν τρεις δυνατότητες ανάλυσης. Το πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε:

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

SCALA

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

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

CARMEN

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

- κινητήρες και γεννήτριες
- αισθητήρες θέσης

SOPRANO

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

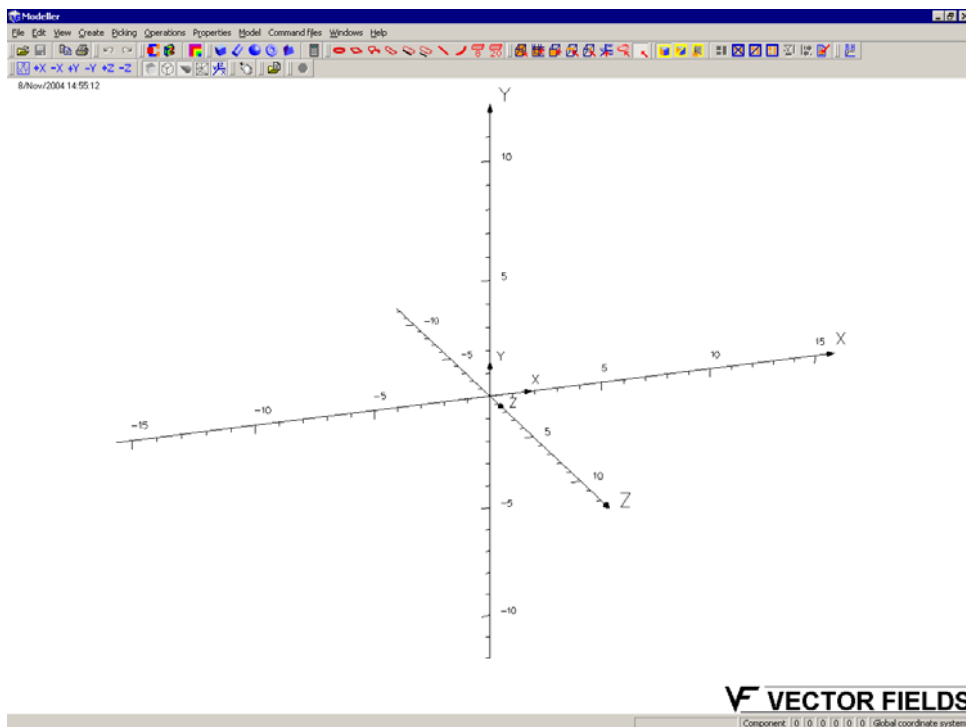
TEMPO

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

3.2 Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d

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

Όταν ξεκινά ο Μοντελοποιητής, εμφανίζονται στην οθόνη, σε τρισδιάστατη εικόνα, οι τρεις άξονες (x,y,z), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 :Η αρχική εικόνα στον Μοντελοποιητή, χρησιμοποιώντας τα Microsoft Windows.

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

3.2.1 Τοπολογία στο Μοντελοποιητή

Κελί (cell)

Ένα κελί αποτελεί έναν κλειστό όγκο του χώρου που περιορίζεται από ένα ή περισσότερα τοιχώματα. Η νοητή γραμμή που ενώνει δύο οποιαδήποτε σημεία μέσα στο κελί δεν τέμνει καμιά επιφάνεια. Οι ιδιότητες του κελιού ανατίθενται σε αυτό από το πεδίο Properties → Cell properties, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.

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

- ❖ Μια ετικέτα υλικού (material label).

Είναι μια ετικέτα που χρησιμοποιείται για να αναφέρεται στις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με το κελί. Όταν δημιουργείται ένα κελί, έχει αυτόματα την ετικέτα air (αέρας), δηλαδή έχει τις εξής ιδιότητες: $\mu=\mu_0$, $\epsilon=\epsilon_0$, $\sigma=0$. Ακόμα, αυτόματα έχει Potential type: Automatic και Element type: Linear. Όμως, μπορεί να ανατεθεί σε κάθε κελί διαφορετική ετικέτα. Στη συνέχεια, και προτιμότερο είναι να γίνει μετά τη δημιουργία του πλέγματος, προσδιορίζονται οι ιδιότητες κάθε ετικέτας, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, η επιτρεπτότητα, η αγωγιμότητα και τυχόν θερμικές ιδιότητες. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της ετικέτας γίνεται από το πεδίο Model → Set material properties.

- ❖ Τύπος δυναμικού (Potential type (TOTAL, REDUCED, VECTOR)). Στο Tosca electrostatics, χρησιμοποιείται ο τύπος TOTAL.

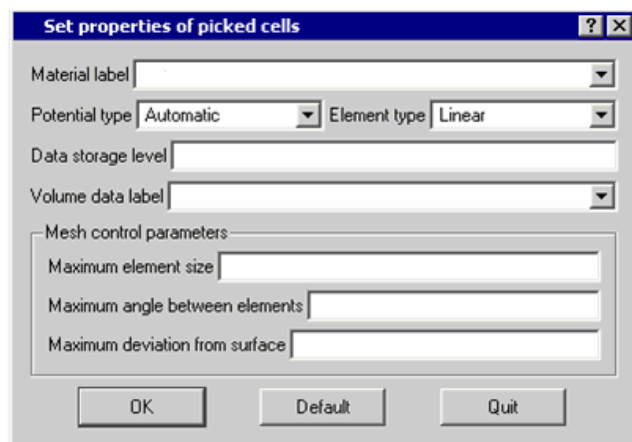
- ❖ Τύπος στοιχείου (γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, και τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού). Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως Element type (LINEAR, QUADRATIC).

- ❖ Ετικέτα που σχετίζεται με τις ιδιότητες του συγκεκριμένου όγκου (Volume properties label).

Αυτή η ετικέτα συνδέεται με τα κελιά και αποθηκεύει άλλου είδους δεδομένα που αφορούν το κελί. Αυτά περιλαμβάνουν ταχύτητα, τοπικό προσανατολισμό και άλλους παράγοντες.

- ❖ Παράμετροι που σχετίζονται με το πλέγμα που δημιουργείται στο κελί αυτό (Mesh control parameters). Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το μέγιστο μέγεθος του πλέγματος που δημιουργείται στο κελί.
- ❖ Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.

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



Σχήμα 3.2: Τρόπος ανάθεσης ιδιοτήτων ενός κελιού.

Σώμα (body)

Ένα σώμα αποτελείται από κορυφές (σημεία), γραμμές, επιφάνειες και κελιά. Όλα τα αντικείμενα μέσα στο σώμα είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους, όσον αφορά στη γεωμετρία τους. Έτσι, τα μέλη ενός σώματος δεν μπορούν να μετακινηθούν, χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση αυτής της μετακίνησης σε αυτά. Για παράδειγμα, ένα σώμα μπορεί να περιέχει δύο κελιά. Το κάθε κελί από αυτά καταλαμβάνει το δικό του χώρο. Η μετακίνηση του ενός κελιού μέσα στο σώμα μπορεί να προκαλέσει την αλληλοεπικάλυψη των κελιών, η οποία θα έκανε τα κελιά

αυτά άκυρα (invalid). Παρόλα αυτά, εάν υπάρχουν δυο σώματα, καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα κελί, είναι επιτρεπτό να αλληλοεπικαλύπτονται τα σώματα αυτά, αφού δεν υπάρχει καμιά σύνδεση μεταξύ των σωμάτων.

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

Δεδομένα επιφάνειας

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

- ❖ Ετικέτα συνοριακής συνθήκης (boundary condition label).
Αυτή η ετικέτα χρησιμοποιείται για το μετέπειτα προσδιορισμό των ιδιοτήτων της επιφάνειας αυτής από το πεδίο Model → Set boundary conditions.
- ❖ Τύπος στοιχείου (γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, και τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού). Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως Element type (LINEAR, QUADRATIC).
- ❖ Παράμετροι που σχετίζονται με το πλέγμα που δημιουργείται στην επιφάνεια αυτή (Mesh control parameters). Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το μέγιστο μέγεθος του πλέγματος που δημιουργείται στην επιφάνεια.
- ❖ Layering, που χρησιμοποιείται για να δημιουργεί λεπτά στρώματα σε οποιαδήποτε ή και στις δύο πλευρές της επιφάνειας, με στόχο τη μεγαλύτερη λεπτομέρεια κατά τη δημιουργία του πλέγματος στις πλευρές αυτές. Εφαρμόζεται ιδιαίτερα σε προβλήματα όπου οι «λεπτές» γεωμετρικές θεωρούνται σημαντικές.
- ❖ Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.
Όπως και στα κελιά, η ένωση των επιφανειών δημιουργεί αμφίβολο αποτέλεσμα. Έτσι, θα διατηρηθούν τα δεδομένα εκείνης της επιφάνειας με το μεγαλύτερο data storage level.

Δεδομένα γραμμής

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

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

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

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

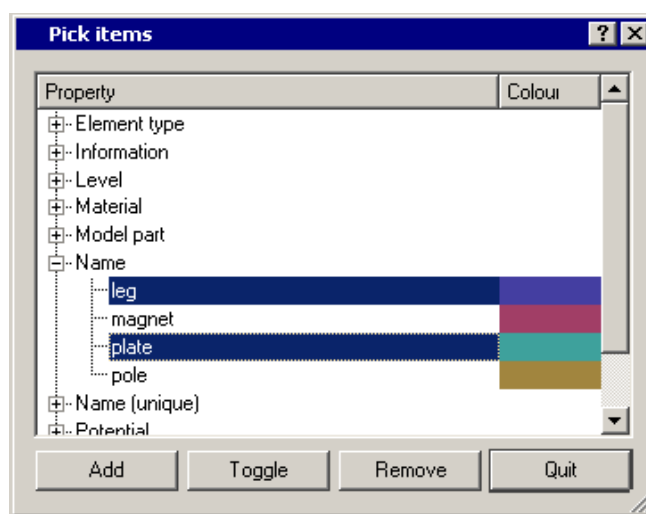
Επιπλέον, μπορεί να δημιουργηθεί και μια ορισμένη ομάδα αγωγών μέσα από ξεχωριστές εντολές, όπως RACETRACK και BEDSTEAD και άλλες. Αυτοί οι αγωγοί δεν αποτελούν φυσικό κομμάτι του μοντέλου και δεν περιλαμβάνονται στο πλέγμα. Μπορούν όμως να επιλεγούν για να μετασχηματιστούν, να αντιγραφούν ή να επανατοποθετηθούν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

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

3.2.2 Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute)

Κάθε οντότητα μπορεί να έχει δεδομένα που αφορούν τις ιδιότητές της. Αυτά τα δεδομένα ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της οντότητας κάθε φορά. Για παράδειγμα, ένα σώμα έχει ένα όνομα που συνδέεται με αυτό, καθώς και μια ομάδα ετικετών που μπορούν να εφαρμοστούν. Ένα κελί έχει μια ετικέτα που υποδεικνύει

από τι υλικό είναι φτιαγμένο το κελί (material label), μια ετικέτα όγκου, έναν αριθμό που καθορίζει το μικρότερο μέγεθος του πλέγματος σε αυτό το κελί, αλλά και άλλες ετικέτες. Η εντολή Pick εκμεταλλεύεται αυτά τα χαρακτηριστικά (ιδιότητες) για να αναγνωρίσει τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα μοντέλο, με στόχο την τροποποίηση ή τη θέαση του μοντέλου. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται ο τρόπος που επιλέγεται οποιαδήποτε οντότητα σε ένα μοντέλο.



Σχήμα 3.3: Επιλογή οντοτήτων σύμφωνα με τις ιδιότητές τους.

3.2.3 Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων

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

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

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

- Η εντολή Bend, κατά την οποία ένα σώμα λυγίζει μέσω μιας κατάλληλης γωνίας.
- Η εντολή Morph, κατά την οποία εφαρμόζεται στο σώμα οποιαδήποτε μορφοποίηση υπό μορφή συνάρτησης.
- Η εντολή Stretch, κατά την οποία οποιοδήποτε κομμάτι του σώματος επιμηκύνεται μεταξύ δύο σημείων που έχουν επιλεγθεί.
- Η εντολή Twist, κατά την οποία οποιοδήποτε κομμάτι του σώματος στρίβει (κάμπτεται) μεταξύ δύο σημείων που έχουν επιλεγθεί.

3.2.4 Δημιουργία σύνθετων σωμάτων

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

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

- Η εντολή Cutaway, όπου αφήνει ανέπαφο το πρώτο επιλεγμένο σώμα και «κόβει» τις άκρες των άλλων σωμάτων, ώστε να μην υπάρχει αλληλεπικάλυψη.

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

3.2.5 Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία του πλέγματος

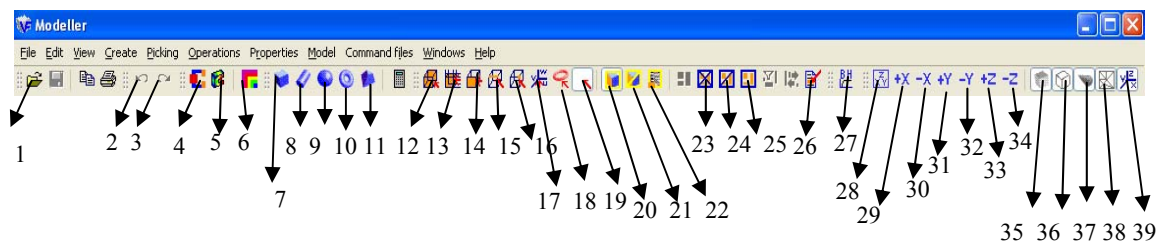
Για τη δημιουργία ενός συνεχούς πλέγματος σε όλο τον όγκο του χώρου που μοντελοποιείται, είναι απαραίτητο να έχει δημιουργηθεί ένα ενιαίο σώμα. Αυτό το σώμα αποτελείται από πολλαπλά κελιά, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Για να γίνει πιο εύκολη η μοντελοποίηση, είναι προτιμότερο να προκύψουν πολλά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

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

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

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

Στο σχήμα 3.4 φαίνεται η γραμμή εργαλείων στο Μοντελοποιητή και παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος χρήσης του Μοντελοποιητή μέσω αυτής.



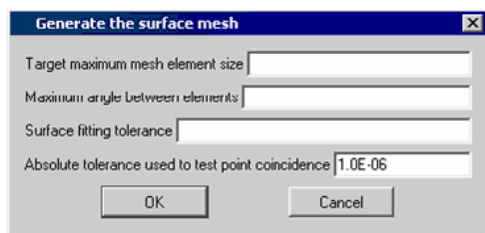
Σχήμα 3.4 : Η γραμμή εργαλείων του Μοντελοποιητή.

- 1: Άνοιγμα ενός ήδη υπάρχοντος αρχείου (load a data file).
- 2: Undo (remove the last change to the model) (εναλλακτικά, Edit→ Undo)
- 3: Redo (re-apply a change which has been undone)
- 4: Παρέχει τη δυνατότητα για επιλογή οντοτήτων προς επίδειξη.
- 5: Ελέγχει την επίδειξη της γεωμετρίας του μοντέλου (Controls the display of the geometry).
- 6: Δυνατότητα αλλαγής χρώματος των υλικών του μοντέλου.
- 7: Δημιουργία κύβου ή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.
- 8: Δημιουργία κυλίνδρου, κώνου ή ελλειψοειδούς κυλίνδρου.
- 9: Δημιουργία σφαίρας.
- 10: Δημιουργία τοροειδούς.
- 11: Δημιουργία πρίσματος ή πυραμίδας n-πλευρών.
- 12: Επιλογή σώματος.
- 13: Επιλογή κελιού.
- 14: Επιλογή επιφάνειας.
- 15: Επιλογή ακμής.
- 16: Επιλογή κόμβου.
- 17: Χρησιμοποιείται για την επιλογή ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων (Coordinate systems button). Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 20.
- 18: Χρησιμοποιείται για την επιλογή αγωγών. Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 20.

- 19: Αναιρεί την επιλογή των κουμπιών 17 και 18.
- 20: Επιλογή οντότητας (pick entity toolbutton). Αυτό το κουμπί πρέπει να είναι πατημένο, πριν την επιλογή κάποιας από τις εξής οντότητες: σώμα, κελί, επιφάνεια, ακμή ή κομβος.
- 21: Πατώντας αυτό το κουμπί και επιλέγοντας κατόπιν κάποια από τις οντότητες 10 ή 11 ή 12 ή 13 ή 14, τότε επιλέγοντας κάποια οντότητα από το μοντέλο, αυτή θα εξαφανιστεί, οπτικώς μόνο, από την οθόνη.
- 22: Επίδειξη των ιδιοτήτων που έχουν τεθεί στην επιλεγθείσα οντότητα (Show entity properties).
- 23: Με το πάτημα αυτού του κουμπιού αναιρείται η επιλογή των ήδη επιλεγμένων οντοτήτων (Reset picked entities).
- 24: Επιλογή αφαίρεσης της επιλεγθείσας οντότητας από τη θέαση του μοντέλου (Hide entity toolbutton).
- 25: Με αυτή την εντολή, όλες οι κρυμμένες οντότητες γίνονται πάλι ορατές (Unhide entities).
- 26: Επιλογή οντότητας μέσω των ιδιοτήτων της (Pick by property).
- 27: Αφορά την permeability (μ) στο Set material properties σε μαγνητοστατικής φύσεως προβλήματα (Set BH curve properties).
- 28: Με αυτή την εντολή, επιστρέφουμε στην αρχική θέαση (initial view) του μοντέλου, ώστε αυτό να φαίνεται ολόκληρο στην οθόνη.
- 29: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα x.
- 30: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα x.
- 31: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα y.
- 32: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα y.
- 33: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα z.
- 34: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα z.
- 35-39: Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων κομματιών του μοντέλου.

3.2.6 Δημιουργία του πλέγματος

Η εντολή δημιουργίας του πλέγματος είναι έγκυρη, μόνο αφού έχει δημιουργηθεί το ενιαίο σώμα.. Η δημιουργία του πλέγματος είναι μια διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, δημιουργείται το επιφανειακό πλέγμα, χρησιμοποιώντας την εντολή Generate surface mesh από το πεδίο Model. Το μέγεθος του επιφανειακού πλέγματος δημιουργείται από τις πληροφορίες που έχουν δοθεί για κάθε κελί στο πεδίο maximum element size. Το πλέγμα στις επιφάνειες των κελιών δημιουργείται διαδοχικά. Κατά τη δημιουργία του επιφανειακού πλέγματος, το εξωτερικό περίβλημα κάθε επιφάνειας, στην οποία δημιουργείται το πλέγμα, φωτίζεται έντονα με ροζ χρώμα. Για πολύπλοκα μοντέλα, όπως και οι αλυσίδες των μονωτήρων που προσομοιώσαμε, ο χρόνος δημιουργίας του πλέγματος είναι αρκετά μεγάλος. Πάντως, αυτός ο χρόνος μπορεί να μειωθεί αρκετά, εάν ελαχιστοποιήσουμε το παράθυρο του Μοντελοποιητή. Κατόπιν, με την εντολή Generate volume mesh από το πεδίο Model, δημιουργούνται τα τετραεδρικά στοιχεία όγκου στο χώρο του μοντέλου. Η δημιουργία του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου είναι εφικτή, εφόσον υπάρχει έγκυρο επιφανειακό πλέγμα. Μετά και το πέρας της επιτυχούς δημιουργίας του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου, το μοντέλο αποθηκεύεται με την κατάληξη .oprb. Τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του μοντέλου θα καταστρέψουν το πλέγμα. Επίσης, είναι δυνατόν να επιστρέψουμε σε παλαιότερο πλέγμα με την εντολή Undo, αλλά τα πλέγματα πριν από αυτό, θα έχουν διαγραφεί. Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα δύο στάδια δημιουργίας του πλέγματος του μοντέλου.



(α)



(β)

Σχήμα 3.5: Δημιουργία πλέγματος (α) στην επιφάνεια του μοντέλου και (β) στον όγκο του μοντέλου.

3.2.7 Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση

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

3.2.8 Ανάλυση του μοντέλου

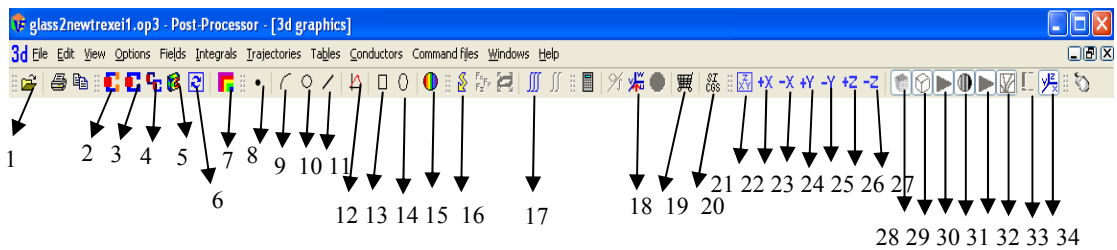
Από το πεδίο Model→Analysis settings επιλέγουμε όποιο πρόγραμμα ανάλυσης επιθυμούμε. Κατά την προσομοίωση των μονωτήρων, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα επίλυσης *Tosca electrostatics*. Κατόπιν, δημιουργούμε τη βάση δεδομένων του μοντέλου από το πεδίο Model→Create analysis database. Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε τις μονάδες κατασκευής του μοντέλου. Στα μοντέλα των μονωτήρων, επιλέξαμε το πεδίο SI (mm) για μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση. Μπορούμε να αποθηκεύσουμε το μοντέλο με το πλέγμα του και με τις έως τώρα αλλαγές που έχουν γίνει μέσω της εντολής File→Save model with mesh. Το τελικό στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιείται μέσω του πεδίου Model→Start Analysis.

3.2.9 Μετ-Επεξεργασία

Μετά το πέρας και αυτής της διαδικασίας, μπορούμε απευθείας να ανοίξουμε το παράθυρο του Μετ-Επεξεργαστή μέσω του Μοντελοποιητή με την εντολή Model→Launch Post Processor και να δούμε τα αποτελέσματα που επιθυμούμε, όπως την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου και γύρω από αυτό. Το αρχείο αυτό είναι πλέον αποθηκευμένο στο Μετ-Επεξεργαστή με κατάληξη .op3 και μπορούμε να το ανοίγουμε οποιαδήποτε στιγμή, για να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι λύσεις αποτελούνται από τις τιμές του δυναμικού που λαμβάνονται στους κόμβους του πλέγματος, καθώς και από τις τιμές των στοιχείων του πλέγματος για το ρεύμα, την πυκνότητα φορτίου, τη

διαπερατότητα ή την επιτρεπτότητα. Οποιαδήποτε απλή πεδιακή ποσότητα (δυναμικό, ένταση πεδίου, πυκνότητα ροής, πυκνότητα ρεύματος κλπ.) μπορεί να εμφανίζεται σε σημεία, (με την εντολή Fields at a point), κατά μήκος γραμμών, (με την εντολή Fields along a line) ή με τη μορφή δυναμικών γραμμών ή χρωματισμένων περιοχών (με την εντολή Contour map).

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται η γραμμή εργαλείων στο Μετ-Επεξεργαστή και παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος χρήσης του Μετ-Επεξεργαστή μέσω αυτής.



Σχήμα 3.6: Η γραμμή εργαλείων του Μετ-Επεξεργαστή.

- 1: Άνοιγμα ενός .op3 αρχείου για λήψη γραφικών και μη αποτελεσμάτων.
- 2: Επιλογή συγκεκριμένων κομματιών του μοντέλου προς επίδειξη στην οθόνη του Μετ-Επεξεργαστή (select parts of model to be displayed).
- 3: Κάνοντας αυτή την επιλογή, στην οθόνη εμφανίζονται όλα τα υλικά του μοντέλου εκτός από τον αέρα (Default select and refresh).
- 4: Γίνεται μόνο ανανέωση της εικόνας στο Μετ-Επεξεργαστή, χωρίς να γίνει κάποια αλλαγή σε προηγούμενες επιλογές όσον αφορά στην επίδειξη του μοντέλου.
- 5: Η επιλογή αυτή επιτρέπει την απεικόνιση μέσω χρωμάτων της μαγνητικής επαγωγής, του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού ή της διηλεκτρικής μετατόπισης πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου(3d display button).
- 6: Ανανέωση της εικόνας του μοντέλου.
- 7: Παρέχει τη δυνατότητα αλλαγής των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.
- 8: Μέσω αυτής της εντολής, υπολογίζεται απευθείας η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού, της μαγνητικής επαγωγής ή της διηλεκτρικής μετατόπισης σε

ένα σημείο με συγκεκριμένες συντεταγμένες που καθορίζονται από το χρήστη (Fields at a point).

- 9: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός τόξου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες των άκρων και του κέντρου του.
- 10: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός κυκλικού τόξου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες του κέντρου, αλλά και την ακτίνα του.
- 11: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής.
- 12: Μέσω αυτής της επιλογής, η οποία ακολουθείται από την 8, 9, 10 ή 11, απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος.
- 13: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός καρτεσιανού επιπέδου, πάνω στο οποίο, με το κουμπί 15 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a cartesian patch).
- 14: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός πολικού επιπέδου, πάνω στο οποίο, με το κουμπί 15 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a polar patch).
- 15: Με αυτή την εντολή απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος πάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, που έχει οριστεί πρώτα με τις εντολές 13 και 14. Το μέγεθος αυτό απεικονίζεται είτε ως χρωματισμένες περιοχές (zone map) είτε ως ιστόγραμμα (histogram) είτε ως γραμμές (lines) (Contour or vector map).
- 16: Παρέχει τη δυνατότητα να υπολογιστούν, μέσω της ολοκλήρωσης του όγκου του μοντέλου, διάφορα παράγωγα μεγέθη της γεωμετρίας, όπως η δύναμη, η ενέργεια και η χωρητικότητα (Energy, power and force button).
- 17: Ολοκλήρωση οποιασδήποτε επιθυμητής ποσότητας (μεγέθους) σε οποιονδήποτε όγκο του μοντέλου.
- 18: Υπολογισμός κάποιου μεγέθους σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

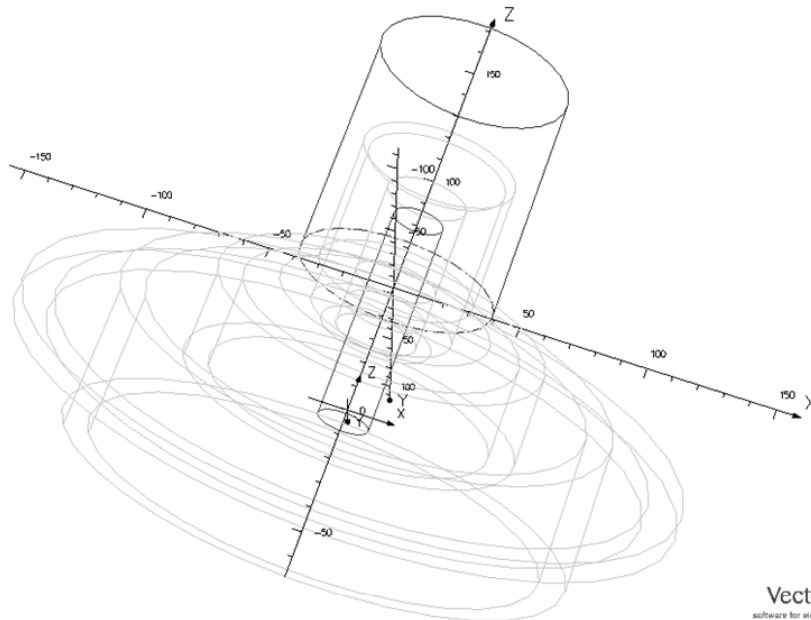
- 19: Έλεγχος ποιό σύστημα μεταβλητών είναι διαθέσιμο για τους υπολογισμούς πεδίου.
- 20: Με αυτή την επιλογή, παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής μονάδων στο Μετ-Επεξεργαστή.
- 21: Επιτρέπει την ολοκληρωμένη θέαση του μοντέλου στην οθόνη (Initial view toolbutton).
- 22: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα x.
- 23: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα x.
- 24: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα y.
- 25: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα y.
- 26: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα z.
- 27: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα z.
- 28-34: Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων κομματιών του μοντέλου.

3.3 Προγράμματα ανάλυσης

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

Κεφάλαιο
4^ο

*Προσομοιώσεις αλυσοειδών
μονωτήρων με το πρόγραμμα
Opera-3d*



4.1 Εισαγωγή

Με τη βοήθεια του προγράμματος Opera-3d προσομοιώσαμε πορσελάνινους και γυάλινους αλυσοειδείς μονωτήρες. Η γεωμετρία και το πλέγμα τους κατασκευάστηκαν στο Μοντελοποιητή, ενώ η λήψη των επιθυμητών γραφικών παραστάσεων και αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω του Μετ-Επεξεργαστή (Post-Processor).

Σε όλα τα μοντέλα έχουν δοθεί παρόμοιες ιδιότητες από το πεδίο Model→Set material properties, καθώς και οριακές συνθήκες σε ορισμένες επιφάνειες από το πεδίο Model→Set boundary conditions. Αυτές έχουν ως εξής:

Ιδιότητες υλικών

Στα μοντέλα που προσομοιώθηκαν δόθηκαν οι εξής τιμές διηλεκτρικής σταθεράς:

Πίνακας 4.1: Τιμές διηλεκτρικής σταθεράς για τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα.

Υλικά	Διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)
Πορσελάνη	5.5
Γυαλί	7
Τσιμέντο	14
Αγωγός	10^5
Cap, pin και άλλα μεταλλικά μέρη	10^5
Αέρας	1 (by default)

Η διηλεκτρική σταθερά των αγωγών θεωρείται άπειρη. Επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα να εισάγουμε στο πρόγραμμα μια τέτοια τιμή, βάζουμε μια μεγάλη τιμή ($\epsilon_r=10^5$), ώστε να γίνει αντιληπτό από το πρόγραμμα ότι πρόκειται για αγωγό.

Στο τσιμέντο επιλέχθηκε $\epsilon_{r, \text{τσιμέντου}}=14$. Η επιλογή αυτή έγινε σύμφωνα με τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, αλλά και κυρίως λαμβάνοντας υπ'όψιν την διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.3 της διπλωματικής εργασίας της κυρίας Πλατή [18]. Η διατήρηση της τιμής αυτής εξασφαλίζει την λογική συνέχεια αυτής της εργασίας αλλά και το συγκρίσιμο των προκύπτοντων αποτελεσμάτων.

Με τη βοήθεια του προγράμματος, πραγματοποιήσαμε μόνο ηλεκτροστατική ανάλυση (Tosca electrostatic analysis). Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα λύνει μόνο την εξίσωση Laplace:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = 0 \quad (4.1)$$

Σε επόμενη εφαρμογή του Opera-3d θα υπάρχει δυνατότητα ταυτόχρονης επίλυσης του ηλεκτροστατικού προβλήματος, αλλά και του προβλήματος ροής ρεύματος (current flow problem). Έτσι, ο χρήστης θα εισάγει τις επιθυμητές τιμές τόσο για τις διηλεκτρικές σταθερές, όσο και για τις αγωγιμότητες των υλικών που θα εμπλέκονται στην εκάστοτε γεωμετρία. Συνεπώς, θα επιλύονται ταυτόχρονα η εξίσωση 4.1 με την εξίσωση 4.2:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (4.2)$$

Επιφανειακές συνθήκες

- ❖ Στην επιφάνεια του αγωγού τίθεται το δυναμικό ίσο με $\frac{150}{\sqrt{3}}$ kV ή ίσο με $\frac{400}{\sqrt{3}}$ kV, ανάλογα με τον αλυσοειδή μονωτήρα που προσομοιώνεται κάθε φορά.
- ❖ Στην επιφάνεια του όγκου, το οποίο προσομοιώνει τη γείωση (τον πυλώνα), το δυναμικό τίθεται ίσο με μηδέν.
- ❖ Θεωρώντας ότι το δυναμικό στο άπειρο είναι μηδέν, θέτουμε το δυναμικό στις εξωτερικές επιφάνειες του background ίσο με μηδέν.

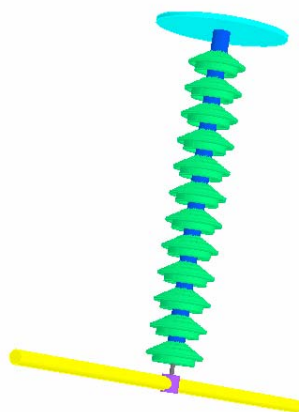
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ξεχωριστά οι προσομοιώσεις των αλυσοειδών μονωτήρων.

4.2 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 150 kV

4.2.1 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 150kV [No 069 ΔΕΗ]

Ο πρώτος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 150 kV που αποτελείται από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 280 mm, βήμα 146 mm και μήκος ερπυσμού 430 mm.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο αλυσοειδής μονωτήρας στο Μοντελοποιητή, χωρίς τον αέρα (background) και χωρίς το πλέγμα. Το γαλάζιο παραλληλεπίπεδο είναι η γείωση και ο κίτρινος κύλινδρος είναι ο αγωγός, ο οποίος έχει ακτίνα 30 mm, μήκος 2,35 m και έχει εφαρμοστεί σε αυτόν δυναμικό $\frac{150}{\sqrt{3}}$ kV. Το μωβ παραλληλεπίπεδο συνδέει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης με τον αγωγό.



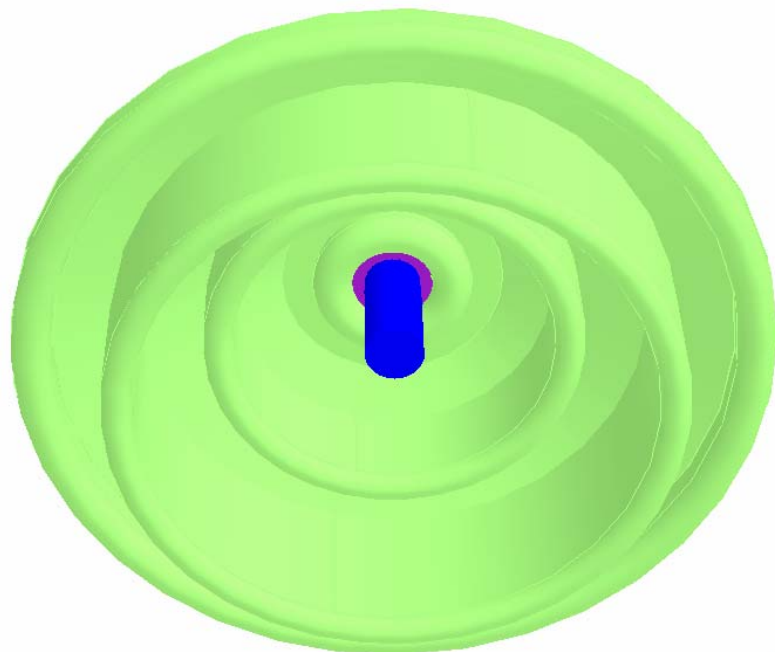
Vector Fields 
software for electromagnetic design

Σχήμα 4.2: Εικόνα του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα από το Μοντελοποιητή.

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται ο γυάλινος δισκοειδής μονωτήρας σε φωτογραφία, ώστε να γίνει φανερή η ομοιότητα με το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης παρακάτω, καθώς και η ποιοτικά αναβαθμισμένη σχεδίαση του, η οποία εισάγει ακόμη περισσότερες κατασκευαστικές του λεπτομέρειες στο μοντέλο. Ακολουθεί το σχήμα 4.4 όπου φαίνεται το μοντέλο προσομοίωσης του.



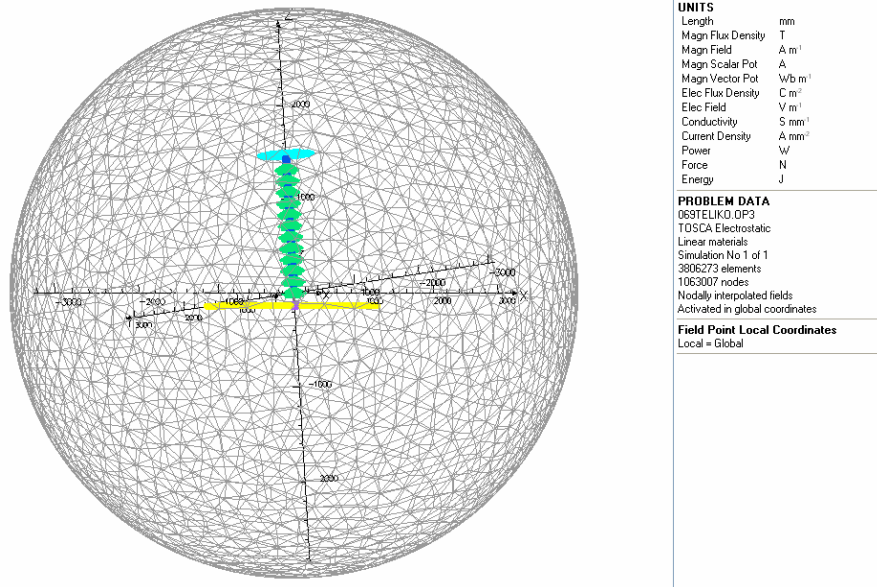
Σχήμα 4.3: Ο μονωτήρας σε φωτογραφία..



Vector Fields
software for electromagnetic design

Σχήμα 4.4: Ο δισκοειδής μονωτήρας όπως απεικονίζεται στον Μοντελοποιητή.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



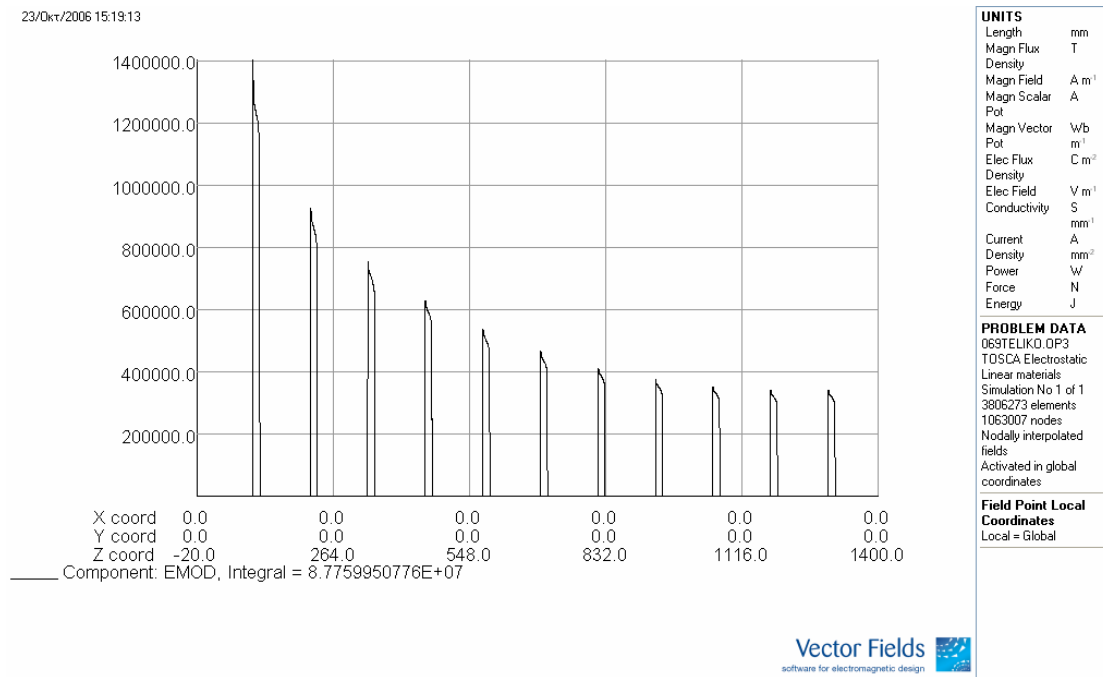
Σχήμα 4.5: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή.

Στο σχήμα 4.6(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του μονωτήρα. Προφανώς, στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν, όπως αναμέναμε. Στο σχήμα 4.6(β) φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι το δυναμικό μειώνεται κατά μήκος της επιφάνειας του αλυσοειδούς μονωτήρα με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως άλλωστε αναμενόταν.



Σχήμα 4.6: Κατανομή (α) της έντασης του πεδίου και (β) του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά γραφήματα, τα οποία εμπεριέχουν τρεις ή τέσσερις γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν την ένταση ή το δυναμικό κατά μήκος μιας γραμμής κάθε φορά. Οι γραμμές αυτές καθορίζονται από τις συντεταγμένες τους. Δηλαδή, η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή ($x=120 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) ή η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=120 \text{ mm}$) «αγγίζει» τις εξωτερικές γυάλινες πτυχωσεις του αλυσοειδούς μονωτήρα, αφού η ακτίνα κάθε γυάλινου μονωτήρα είναι 129 mm . Να σημειωθεί ότι ο αγωγός είναι παράλληλος στον άξονα x , ενώ οι μονωτήρες βρίσκονται κατά μήκος του άξονα z . Η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) παρουσιάζεται μόνη της στο σχήμα 4.7, γιατί λόγω των αρκετά υψηλών τιμών που παρουσιάζει, δεν ήταν δυνατόν να συμπεριληφθεί στην ίδια κλίμακα με τις άλλες γραφικές.



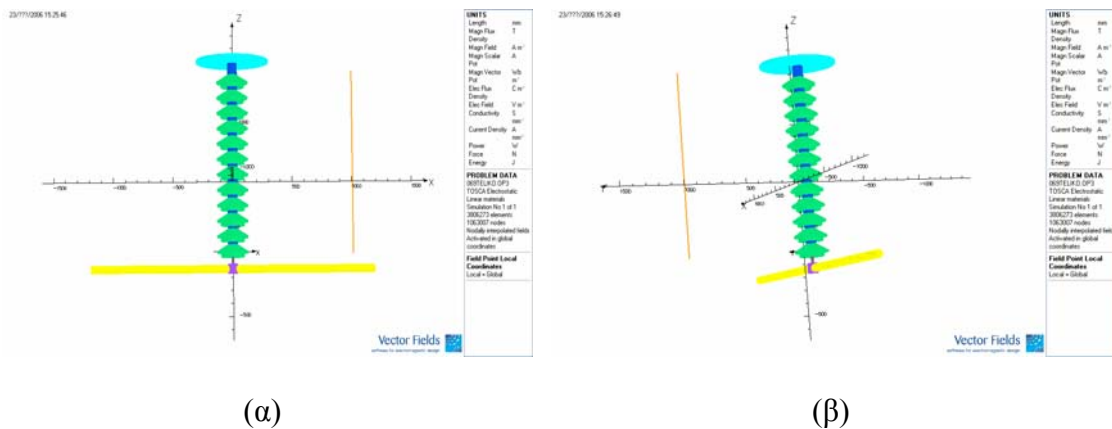
Σχήμα 4.7: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$, $z=-20...1400 \text{ mm}$) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή ($x=0$, $y=0$, $z=-20...1400$) διαπερνά όλα τα pins της αλυσίδας, αλλά και την περιοχή του μονωτικού (γυαλιού) και τις δύο περιοχές τσιμέντου που βρίσκονται εντός του cap. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγωγίμων μερών (cap και pin) της αλυσίδας, που είναι απόλυτα αναμενόμενο. Η γραφική παράσταση της έντασης σχηματίζει 12 κορυφές, όσες και ο

αριθμός των μονωτήρων. Οι κορυφές της έντασης παρουσιάζονται στην περιοχή του γυαλιού του κάθε μονωτήρα, μιας και το γυαλί έχει τη μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με το cap, το pin και το τσιμέντο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Παρατηρείται, όμως, μια μικρή αύξηση της κορυφής της έντασης στους δύο τελευταίους μονωτήρες και ειδικά στον τελευταίο (το γειωμένο), του οποίου η κορυφή έχει υψηλότερη τιμή πεδίου σε σχέση με τους δύο προηγούμενους μονωτήρες.

Η κατανομή της τάσης κατά μήκος της αλυσίδας διαφέρει σημαντικά από την ιδανική κατανομή. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των παράσιτων χωρητικοτήτων προς γη και προς τον αγωγό Υ.Τ. που παρουσιάζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα [1]. Λόγω του ότι η παράσιτη χωρητικότητα προς γη είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την παράσιτη χωρητικότητα προς την πλευρά Υ.Τ., η ανά δισκοειδή μονωτήρα επιβαλλόμενη τάση βαίνει αυξανόμενη όσο πλησιάζουμε προς τον αγωγό Υ.Τ. Κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο παρατηρείται μια ποσοστιαία αύξηση της τάσης και προφανώς αυτή η αύξηση της τάσης δικαιολογεί και την αύξηση της έντασης του πεδίου στο γειωμένο μονωτήρα στο σχήμα 4.7.

Λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων. Η πρώτη αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $y=0$ και αυξάνεται σταδιακά η x -συντεταγμένη, άρα και η απόσταση από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αλλά το ένα τους άκρο βρίσκεται πολύ κοντά στον αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8(α). Η δεύτερη σειρά γραφημάτων αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $x=0$ και απομακρύνονται σταδιακά τόσο από τον αλυσοειδή μονωτήρα όσο και από τον αγωγό, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.8(β).

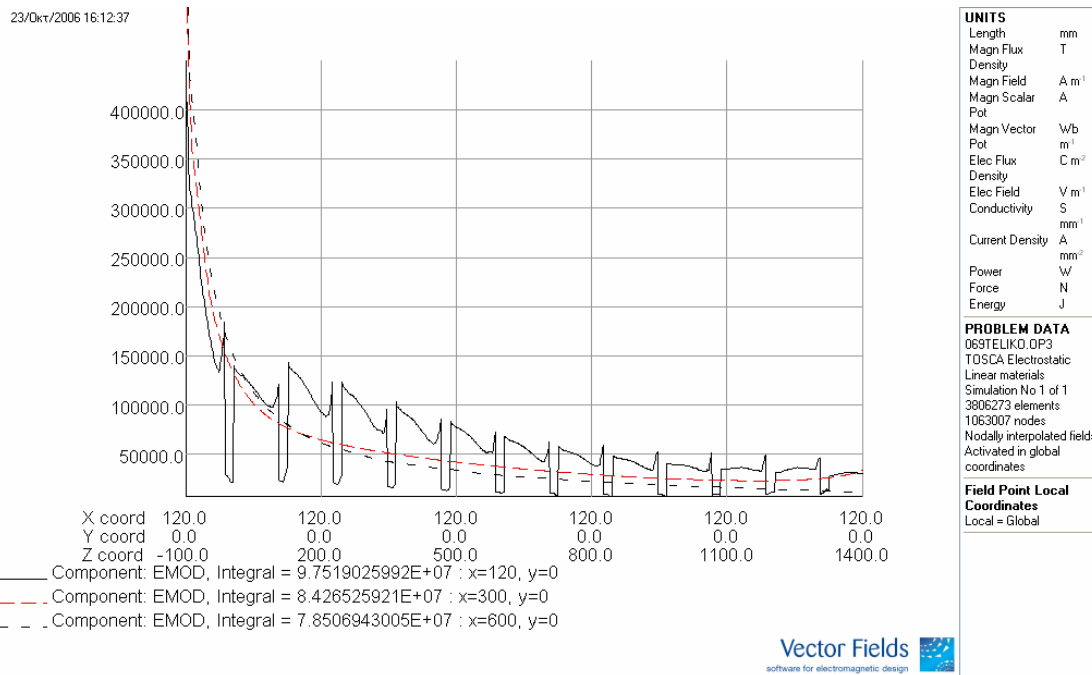


Σχήμα 4.8: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

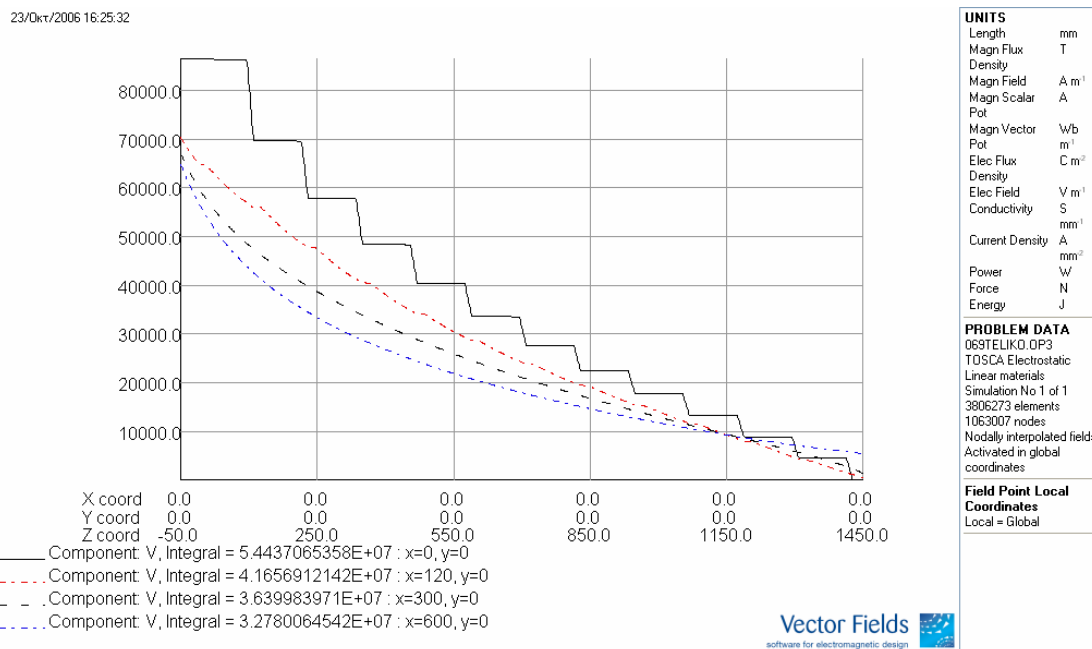
Παρατηρούμε ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από τον αλυσοειδή μονωτήρα, τόσο η ένταση του πεδίου όσο και το δυναμικό μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή, καθώς απομακρυνόμαστε και από τον αλυσοειδή μονωτήρα και από τον αγωγό, δηλαδή για γραμμές του σχήματος 4.8(β), όπως επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 4.11 και 4.12. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος των γραμμών ($x=120$ mm, $y=0$ mm) και ($x=0$ mm, $y=120$ mm), που αγγίζουν τις εξωτερικές πτυχώσεις της αλυσίδας, παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που η γραμμή διαπερνά τις γυάλινες πτυχώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το γυαλί έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον περιβάλλοντα αέρα και έτσι, στο γυαλί παρατηρούμε μείωση της έντασης του πεδίου.

Οι βυθίσεις αυτές επιβεβαιώνονται και από το άρθρο [16], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.2 της παραγράφου 2.3 του κεφαλαίου 2. Βέβαια, όπως αναμέναμε, η ένταση μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Το δυναμικό κατά μήκος των ίδιων γραμμών μειώνεται προς την ίδια κατεύθυνση, μέχρι να λάβει μηδενική τιμή στο γειωμένο μονωτήρα. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη-αγώγιμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στο γυαλί, γεγονός που οφείλεται στις μονωτικές ιδιότητες του γυαλιού.

Στα σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $y=0$, σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8(α).

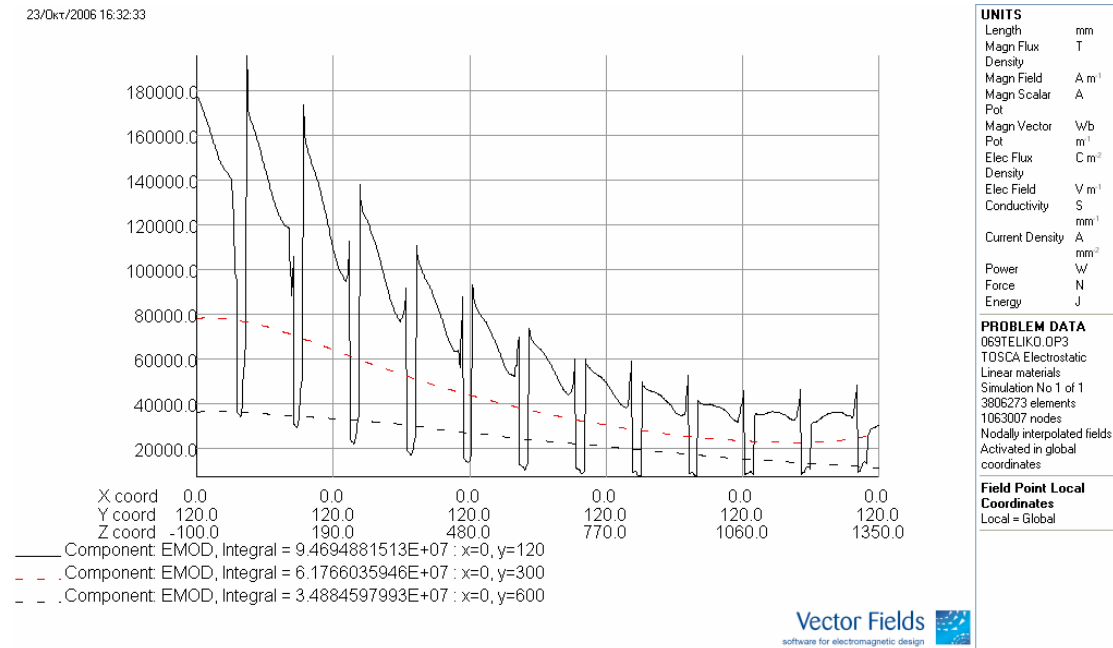


Σχήμα 4.9: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.8(α).

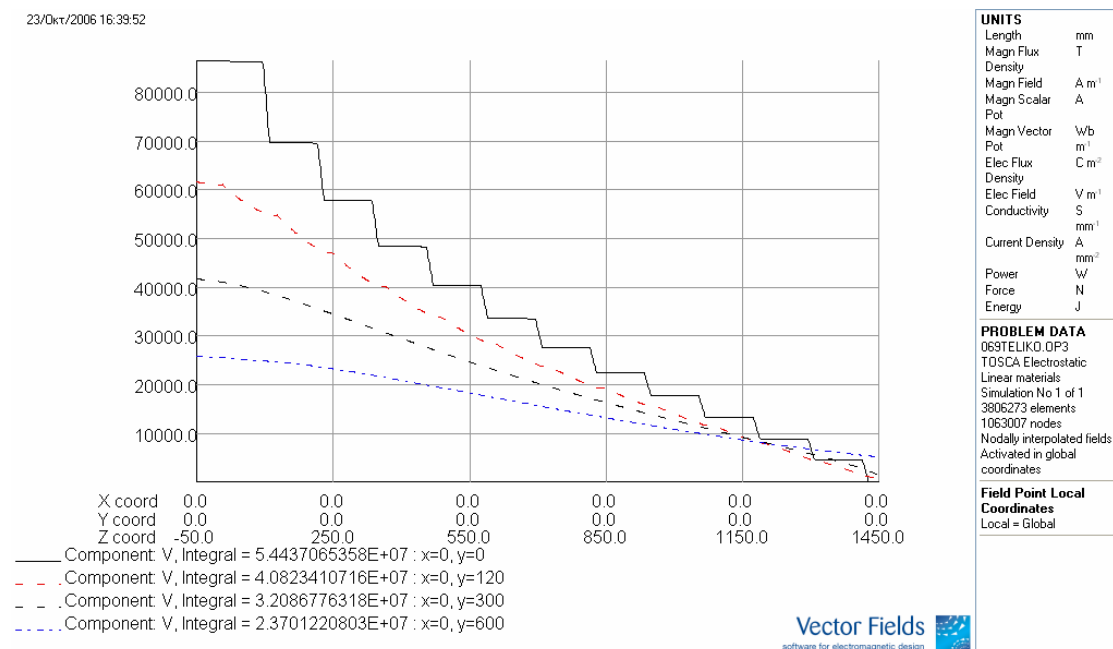


Σχήμα 4.10: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.8(α).

Στα σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $x=0$, σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8(β).



Σχήμα 4.11: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.8(β).



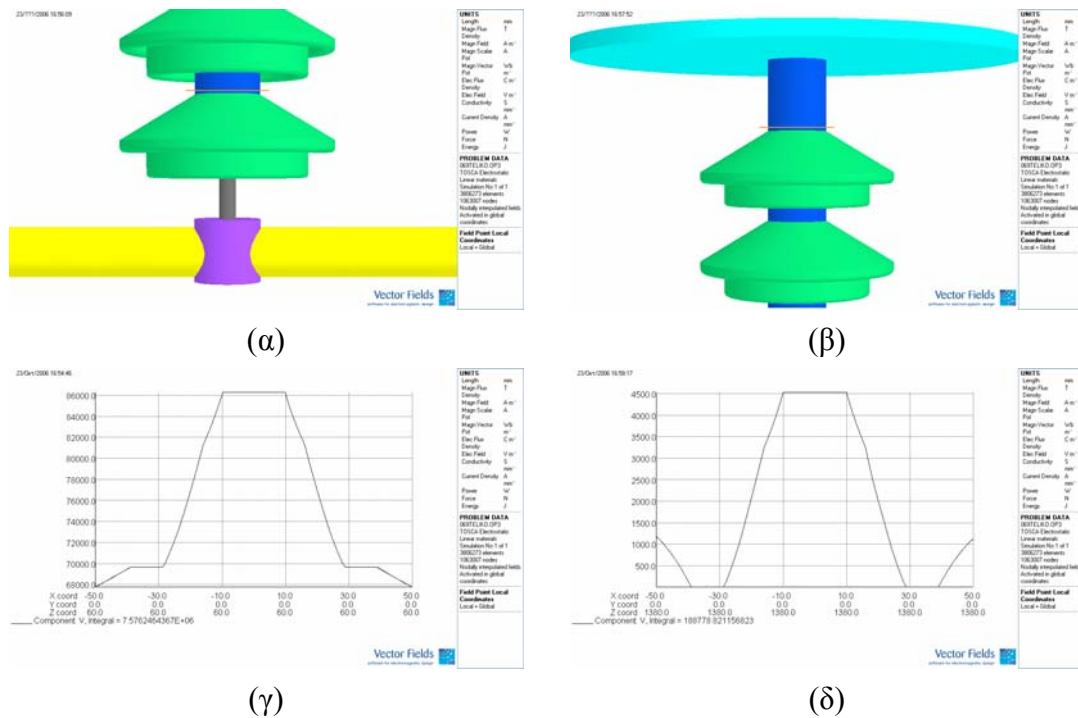
Σχήμα 4.12: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.8(β).

Στο σχήμα 4.13(α) φαίνεται η γραμμή ($x=-50..50$ mm, $y=0$ mm, $z=60$ mm) που διαπερνά το cap του μονωτήρα υψηλής τάσης και στο σχήμα 4.13(γ) η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτής. Η ακτίνα της βάσης του cap είναι 39 mm και έτσι, για $|x|>39$ mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα.

Για $x=-10..10$ mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγωγίμο και γι' αυτό, στην περιοχή αυτή το δυναμικό διατηρείται σταθερό και ίσο με 86 kV, περίπου όσο είναι και το δυναμικό που εφαρμόστηκε στον αγωγό, επειδή το pin αυτό συνδέεται με τον αγωγό, μέσω του μωβ κυλίνδρου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή $x=-16..-10$ mm και $x=10..16$ mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή $x=-28..-16$ mm και $x=16..28$ mm βρίσκεται το γυαλί και στην περιοχή $x=-29..-28$ mm και $x=28..29$ mm ένα λεπτό στρώμα τσιμέντου.

Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται μείωση του δυναμικού, όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση. Έτσι, μετά την παρεμβολή των μη αγωγίμων μερών του μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται περίπου στα 70 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγωγίμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα.

Στο σχήμα 4.13(β) φαίνεται η γραμμή ($x=-50..50$ mm, $y=0$ mm, $z=1380$ mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Από το σχήμα 4.13(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin του γειωμένου μονωτήρα και είναι ίση με 4,5 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap αφού αυτό είναι γειωμένο.

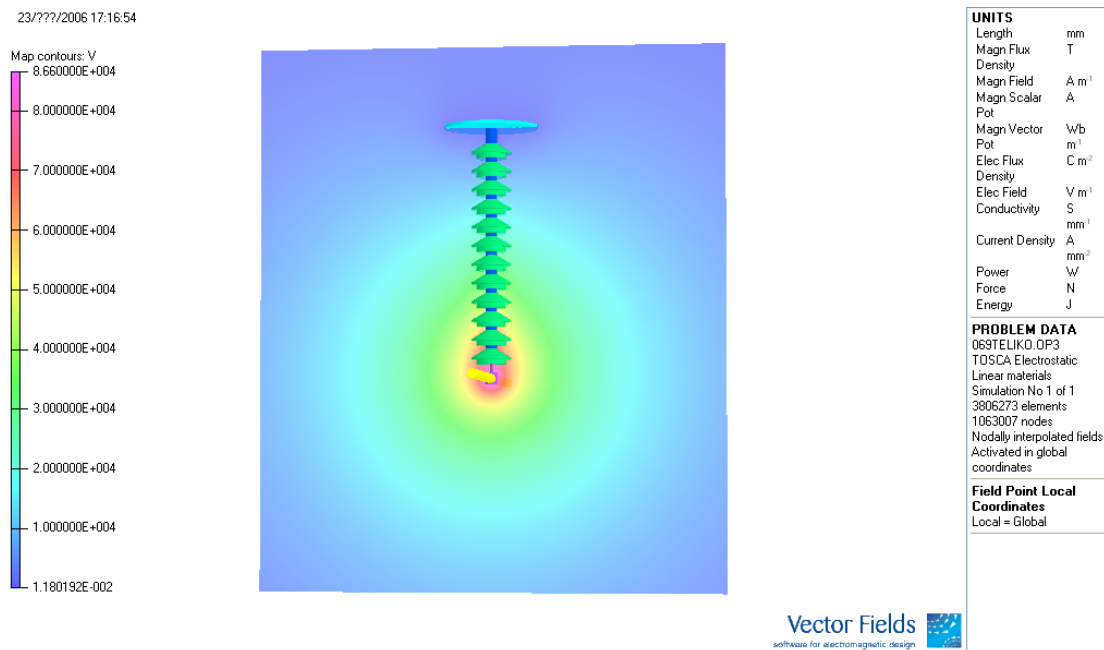


Σχήμα 4.13: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Y.T. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα yz-επίπεδο, πάνω στο οποίο απεικονίζεται με τρεις τρόπους το δυναμικό και με δύο τρόπους η ένταση του πεδίου. Στο σχήμα 4.14 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι $\frac{150}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 86600 \text{ V}$, όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται.

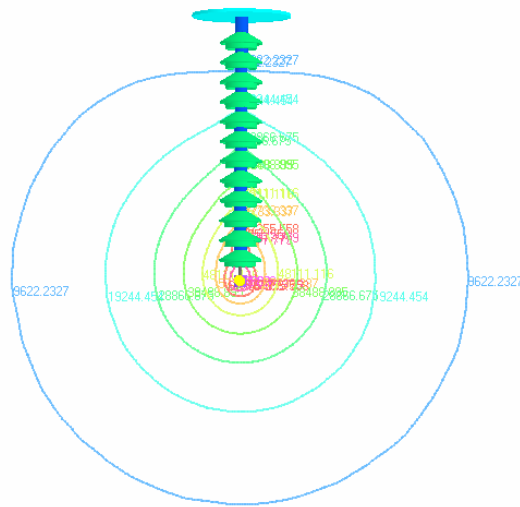
Στο σχήμα 4.15 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο ίδιο επίπεδο και στο σχήμα 4.16 φαίνεται το ιστόγραμμα, το οποίο αποκαλύπτει πώς κατανέμεται το δυναμικό στο εσωτερικό της αλυσίδας. Το δυναμικό μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από τον αγωγό, όπου το δυναμικό είναι 86600 V, προς το γειωμένο μονωτήρα, του οποίου το cap έχει μηδενικό δυναμικό. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη-αγώγιμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στο γυαλί. Αυτός είναι, άλλωστε, και ένας από τους ρόλους ενός μονωτικού υλικού μέσα στο μονωτήρα: να μειώνει το δυναμικό σταδιακά κατά μήκος του εσωτερικού της αλυσίδας.

Στο σχήμα 4.17 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.18 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται η ένταση στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα. Μεγαλύτερη τιμή έντασης παρουσιάζει ο μονωτήρας υψηλής τάσης. Σε κάθε μονωτήρα η μέγιστη τιμή έντασης λαμβάνεται στο μονωτικό υλικό (στο γυαλί, εδώ), λόγω της μικρής διηλεκτρικής του σταθεράς. Αξιοσημείωτο είναι ότι, επειδή το yz-επίπεδο τέμνει κάθετα και τον αγωγό, ακριβώς εκεί η ένταση λαμβάνει μηδενική τιμή, όπως αναμενόταν.



Σχήμα 4.14: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.

23/??/2006 17:29:04



Map contours: V
1.180192E-002 to 8.660000E+004

Vector Fields
software for electromagnetic design

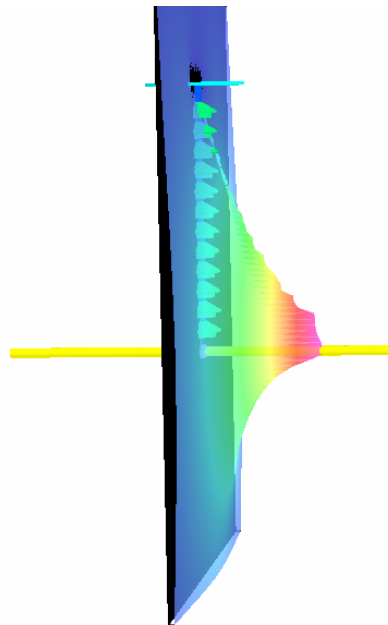
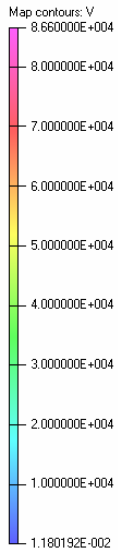
UNITS	
Length	mm
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A m ⁻¹
Magn Scalar	A
Pot	
Magn Vector	Wb
Pot	m ¹
Elec Flux	C m ⁻²
Density	
Elec Field	V m ⁻¹
Conductivity	S mm ⁻¹
Current Density	A mm ⁻²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA	
069TELIK0.OP3	
TOSCA Electrostatic	
Linear materials	
Simulation No 1 of 1	
3806273 elements	
1063007 nodes	
Nodally interpolated fields	
Activated in global coordinates	

Field Point Local Coordinates	
Local = Global	

Σχήμα 4.15: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.

23/??/2006 17:30:10



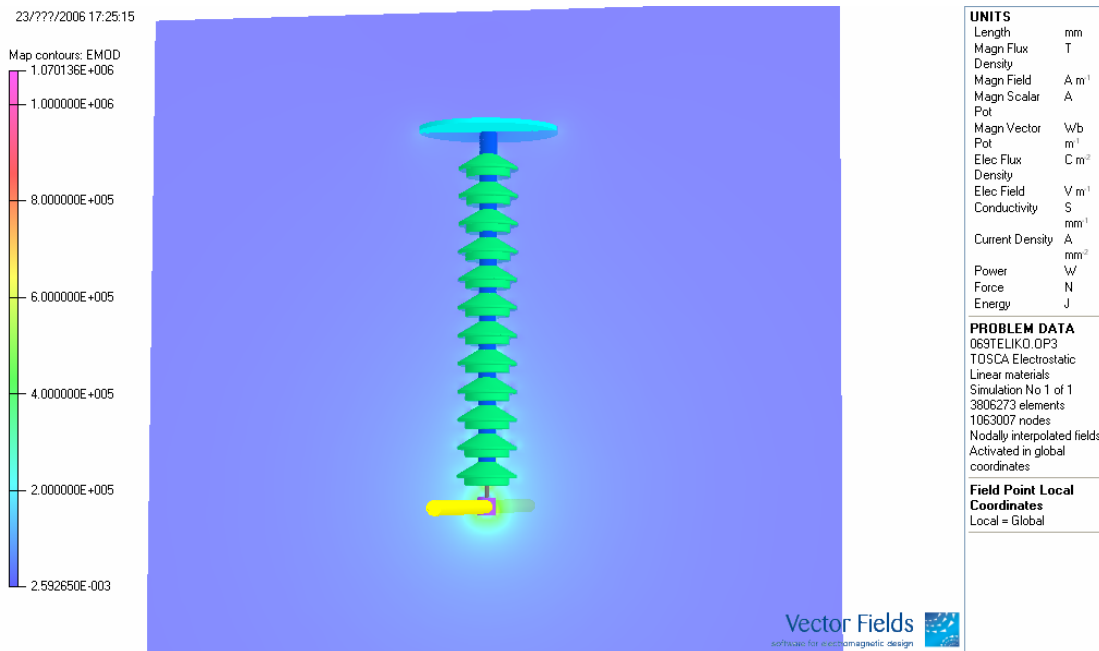
Vector Fields
software for electromagnetic design

UNITS	
Length	mm
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A m ⁻¹
Magn Scalar	A
Pot	
Magn Vector	Wb
Pot	m ¹
Elec Flux	C m ⁻²
Density	
Elec Field	V m ⁻¹
Conductivity	S mm ⁻¹
Current Density	A mm ⁻²
Power	W
Force	N
Energy	J

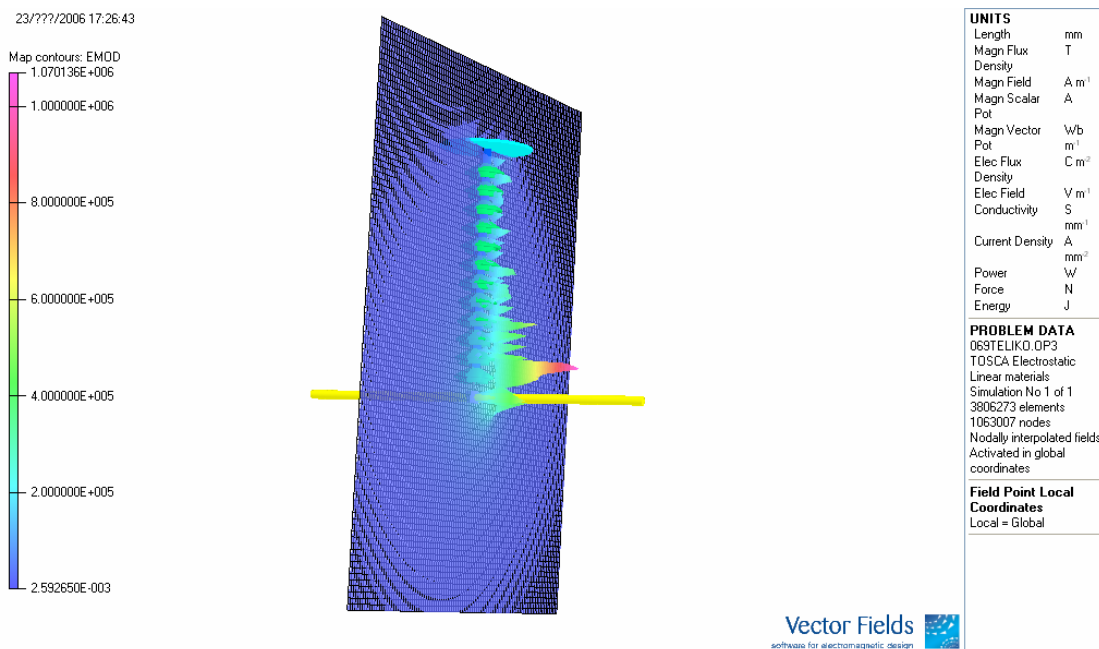
PROBLEM DATA	
069TELIK0.OP3	
TOSCA Electrostatic	
Linear materials	
Simulation No 1 of 1	
3806273 elements	
1063007 nodes	
Nodally interpolated fields	
Activated in global coordinates	

Field Point Local Coordinates	
Local = Global	

Σχήμα 4.16: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για το δυναμικό στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.



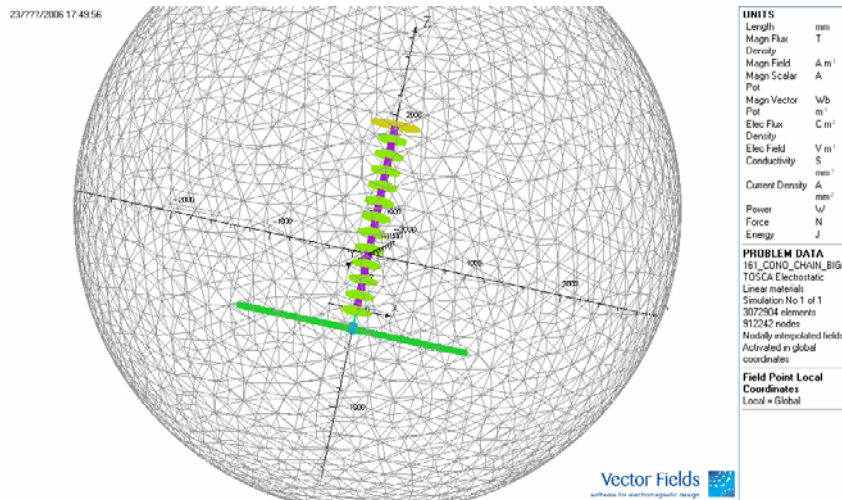
Σχήμα 4.17: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.18: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.

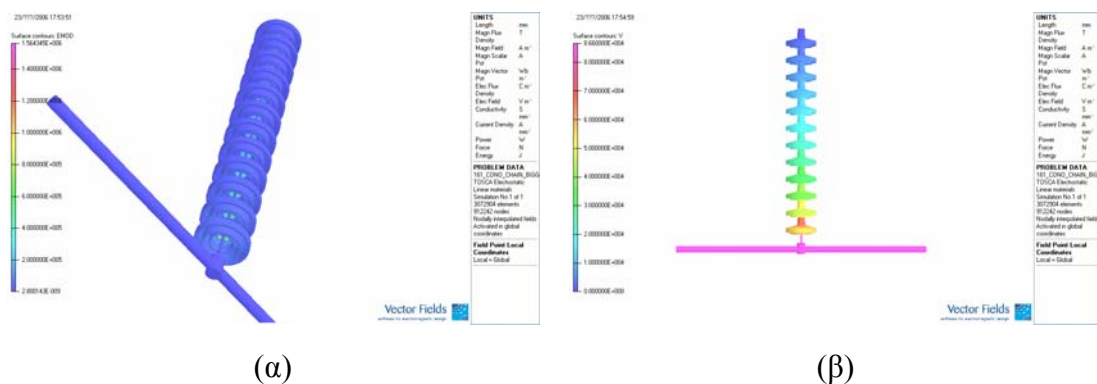
4.2.2 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 150kV [No 161 ΔΕΗ]

Ο δεύτερος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας ακόμη γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 150 kV που αποτελείται από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 255 mm, βήμα 127 mm και μήκος ερπυσμού 390 mm. Στο σχήμα 4.19 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



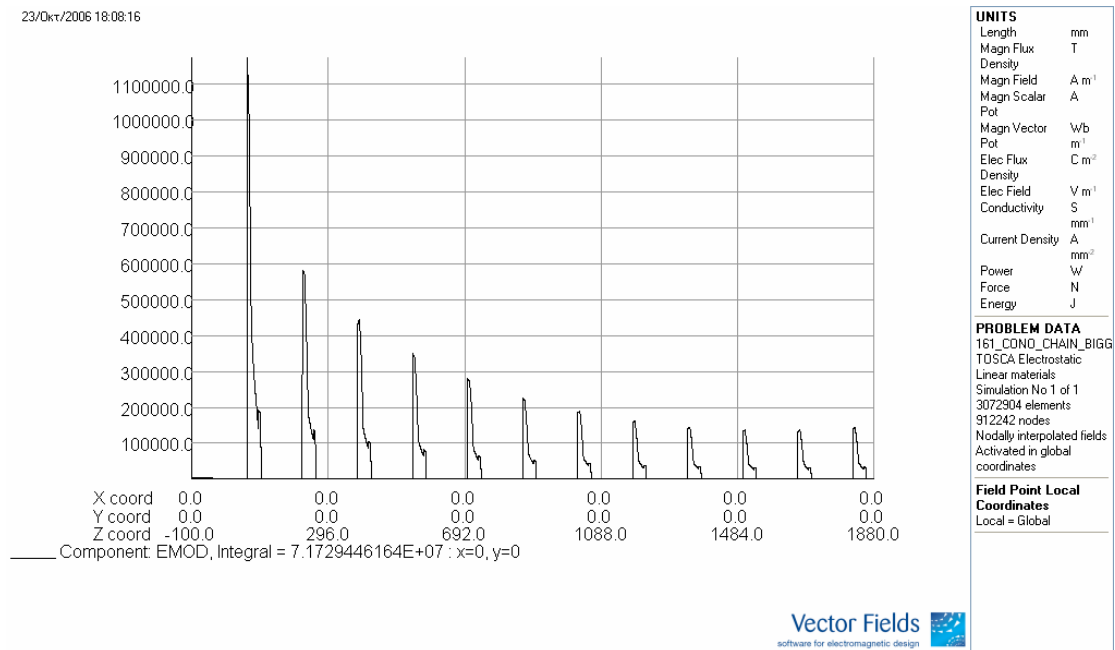
Σχήμα 4.19: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή.

Στο σχήμα 4.20(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του μονωτήρα. Στο εσωτερικό όλων των αγωγίων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι, προφανώς, μηδέν. Στο σχήμα 4.20(β) φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Το δυναμικό μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του μονωτήρα, όπως άλλωστε αναμενόταν.



Σχήμα 4.20: Κατανομή (α) της έντασης του πεδίου και (β) του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά γραφήματα, τα οποία εμπεριέχουν τρεις ή τέσσερις γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν την ένταση ή το δυναμικό κατά μήκος μιας γραμμής κάθε φορά. Οι γραμμές αυτές καθορίζονται από τις συντεταγμένες τους. Δηλαδή, η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή ($x=135 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) ή η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=135 \text{ mm}$) «αγγίζει» τις εξωτερικές γυάλινες πτυχωσεις του αλυσοειδούς μονωτήρα, αφού η ακτίνα του κάθε γυάλινου μονωτήρα είναι 143 mm . Να σημειωθεί ότι ο αγωγός είναι παράλληλος στον άξονα x , ενώ οι μονωτήρες βρίσκονται κατά μήκος του άξονα z . Η ένταση του πεδίου σε γραμμή που διαπερνά το κέντρο του μονωτήρα ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) παρουσιάζεται μόνη της στο σχήμα 4.21, γιατί λόγω των αρκετά υψηλών τιμών που παρουσιάζει, δεν ήταν δυνατόν να συμπεριληφθεί στην ίδια κλίμακα με τις άλλες γραφικές.



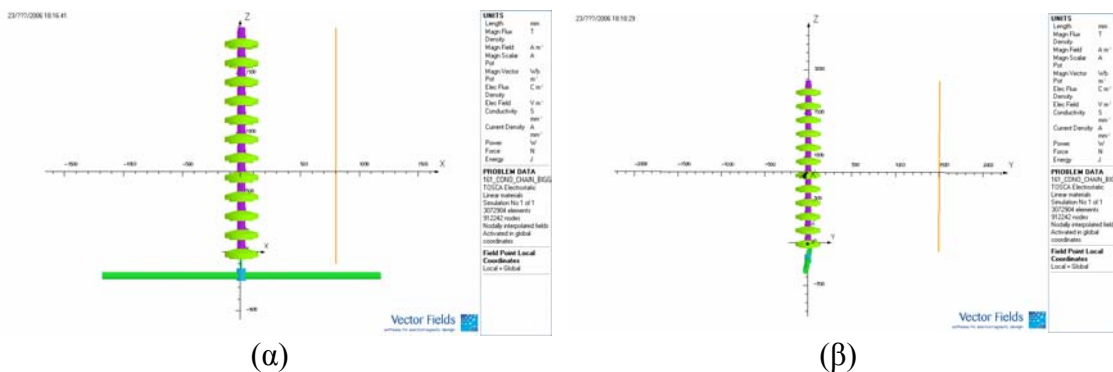
Σχήμα 4.21: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$, $z=-100..1880 \text{ mm}$) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$, $z=-100..1880 \text{ mm}$) διαπερνά όλα τα pins της αλυσίδας, αλλά και την περιοχή του μονωτικού (γυαλί) και τις δύο περιοχές τσιμέντου που βρίσκονται εντός του cap. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.21, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγωγικών μερών (cap και pin) της αλυσίδας, που είναι απόλυτα αναμενόμενο. Η γραφική παράσταση της έντασης σχηματίζει 12

κορυφές, όσες και ο αριθμός των μονωτήρων της αλυσίδας. Οι κορυφές της έντασης παρουσιάζονται στην περιοχή του γυαλιού του κάθε μονωτήρα, αφού αυτό έχει τη μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με το cap, το pin και το τσιμέντο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Παρατηρείται, όμως, μια μικρή αύξηση της κορυφής της έντασης στους δύο τελευταίους μονωτήρες και ειδικά στο γειωμένο, στον οποίο η κορυφή της έντασης έχει υψηλότερη τιμή σε σχέση με τους δύο προηγούμενους μονωτήρες.

Η ύπαρξη των παράσιτων χωρητικοτήτων προς γη και προς τον αγωγό Υ.Τ. που παρουσιάζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα δικαιολογεί την ποσοστιαία αύξηση της τάσης που παρατηρείται κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Αυτή η αύξηση της τάσης δικαιολογεί και την αύξηση της έντασης του πεδίου στο γειωμένο μονωτήρα.

Λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων. Η πρώτη αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $y=0$ και αυξάνεται σταδιακά η x -συντεταγμένη, άρα και η απόσταση από το μονωτήρα, αλλά το ένα τους άκρο βρίσκεται πολύ κοντά στον αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.22(α). Η δεύτερη σειρά γραφημάτων αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $x=0$ και απομακρύνονται σταδιακά τόσο από τον αλυσοειδή μονωτήρα όσο και από τον αγωγό, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.22(β).

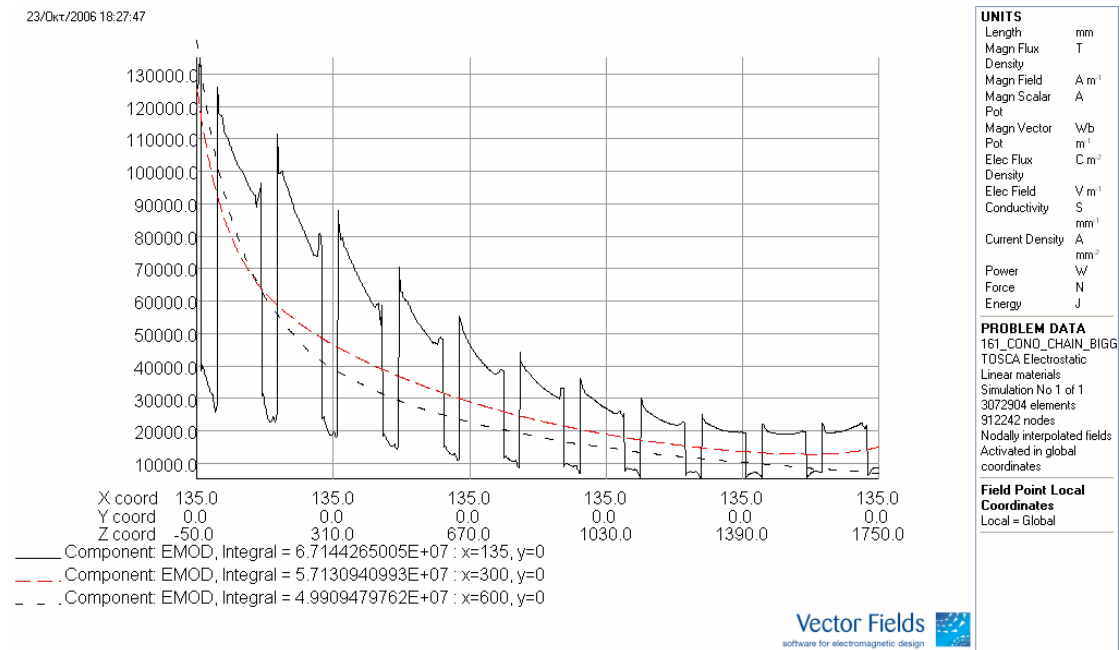


Σχήμα 4.22: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

Παρατηρούμε ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από τον αλυσοειδή μονωτήρα, τόσο η ένταση του πεδίου όσο και το δυναμικό μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή, καθώς απομακρυνόμαστε και από τον αλυσοειδή μονωτήρα και από τον αγωγό, δηλαδή για γραμμές του σχήματος 4.22(β), όπως επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 4.25 και 4.26. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος των γραμμών ($x=135$ mm, $y=0$ mm) και ($x=0$ mm, $y=135$ mm), που αγγίζουν τις εξωτερικές πτυχώσεις της

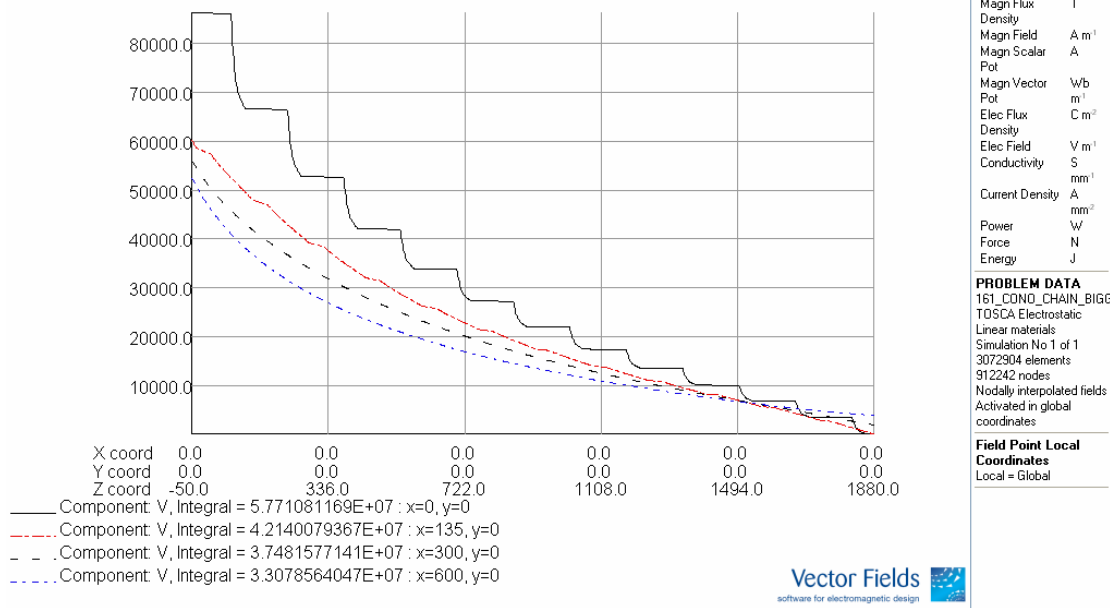
αλυσίδας, παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που η γραμμή διαπερνά τις γυάλινες πτυχώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το γυαλί έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον περιβάλλοντα αέρα και έτσι, στο γυαλί παρατηρούμε μείωση της έντασης του πεδίου. Οι βυθίσεις αυτές επιβεβαιώνονται και από το άρθρο [16], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.2 της παραγράφου 2.3 του κεφαλαίου 2. Βέβαια, όπως αναμέναμε, η ένταση μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Το δυναμικό κατά μήκος των ίδιων γραμμών μειώνεται προς την ίδια κατεύθυνση, μέχρι να λάβει μηδενική τιμή στο γειωμένο μονωτήρα. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη αγωγίμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στην πορσελάνη, γεγονός που οφείλεται στις μονωτικές ιδιότητες της πορσελάνης.

Στα σχήματα 4.23 και 4.24 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $y=0$, σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.22(α).



Σχήμα 4.23: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(α).

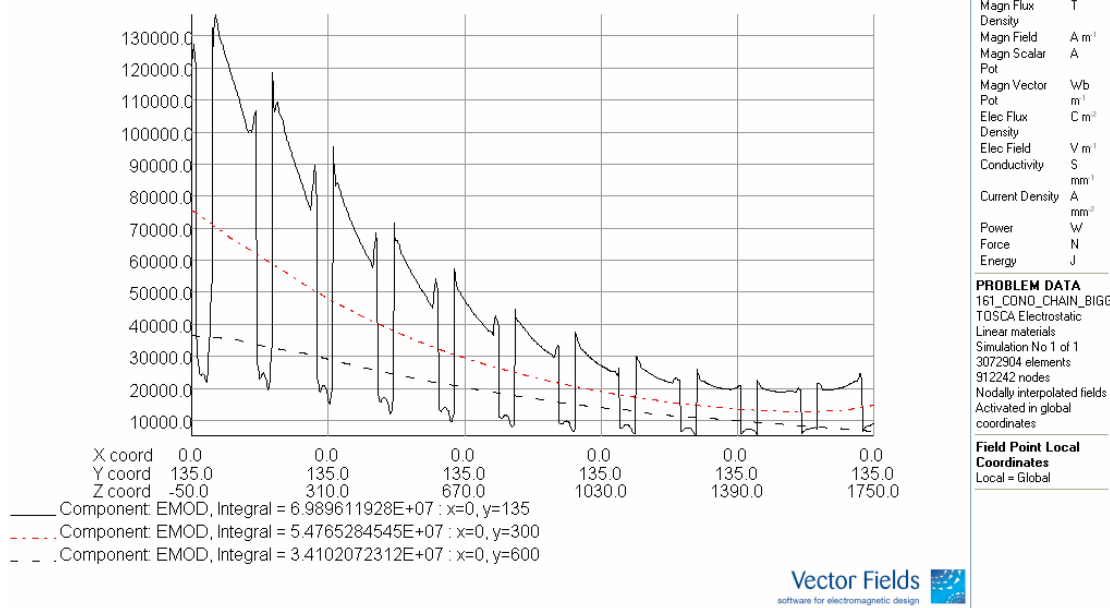
23/0κτ/2006 18:35:00



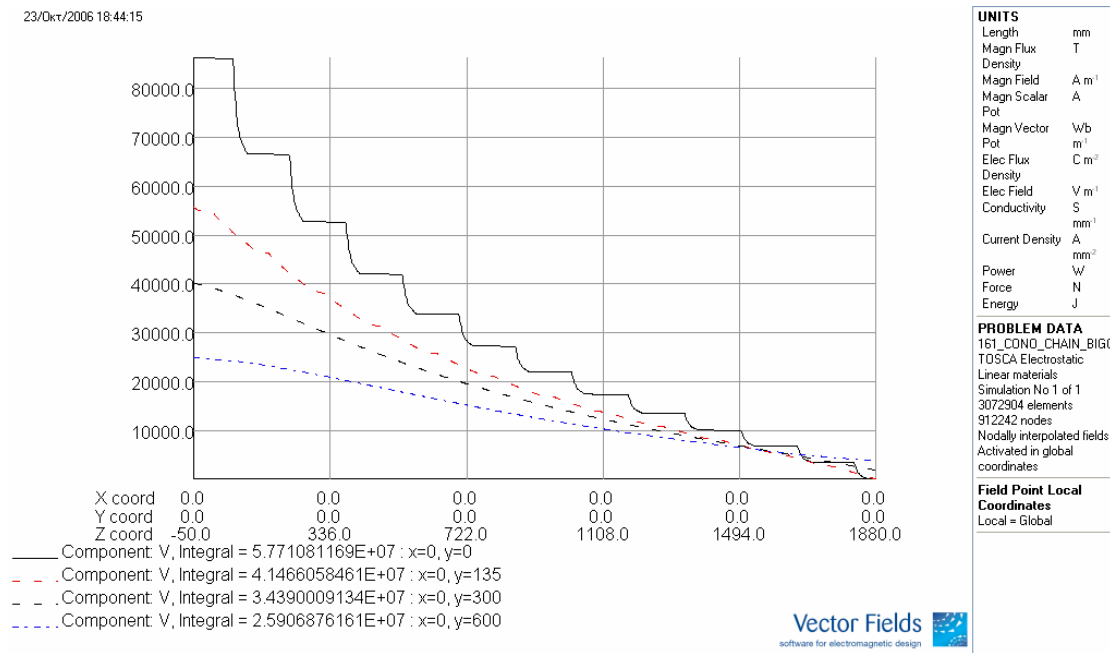
Σχήμα 4.24: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(α).

Στα σχήματα 4.25 και 4.26 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $x=0$, σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.22(β).

23/0κτ/2006 18:41:08



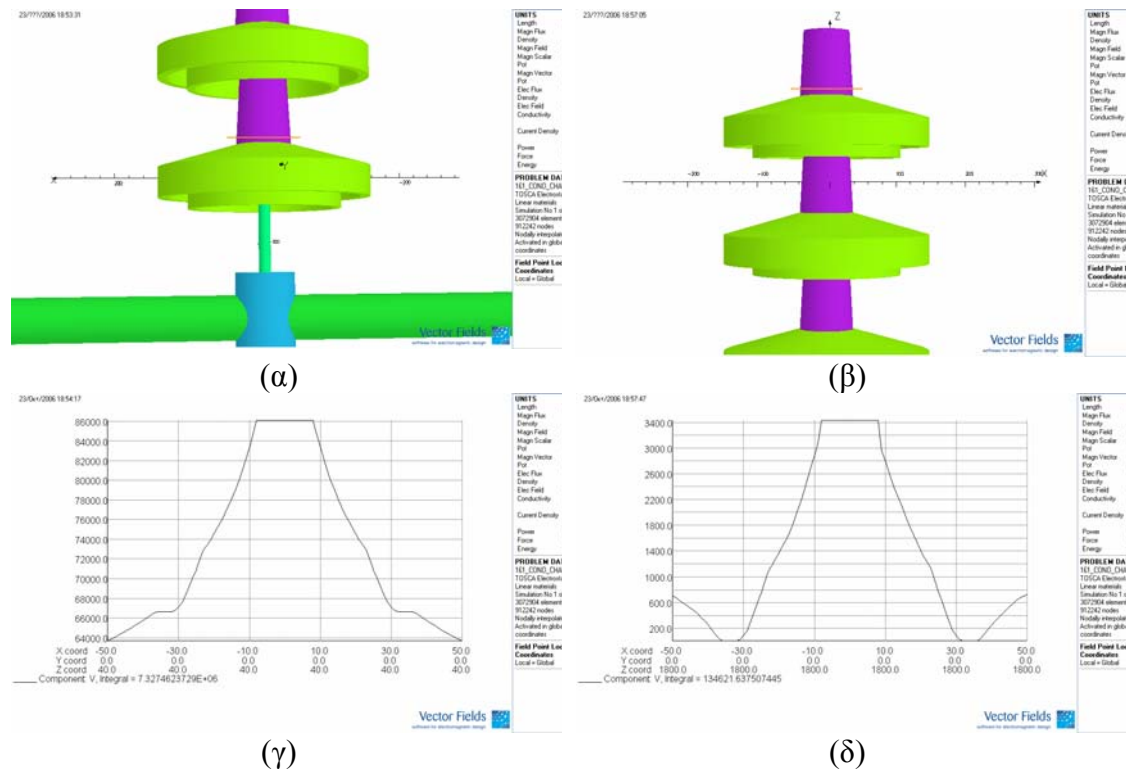
Σχήμα 4.25: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(β).



Σχήμα 4.26: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(β).

Στο σχήμα 4.27(α) φαίνεται η γραμμή ($x=-50..50$ mm, $y=0$ mm, $z=40$ mm) που διαπερνά το cap του μονωτήρα υψηλής τάσης και στο σχήμα 4.27(γ) η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτής. Η ακτίνα της βάσης του cap είναι 37 mm και έτσι, για $|x|>37$ mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για $x=-8..8$ mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγωγίμο και γι' αυτό, στην περιοχή αυτή το δυναμικό διατηρείται σταθερό και ίσο με 86 kV, περίπου όσο είναι και το δυναμικό που εφαρμόστηκε στον αγωγό, επειδή το pin αυτό συνδέεται με τον αγωγό, μέσω του γαλάζιου κυλίνδρου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή $x=-24..-8$ mm και $x=8..24$ mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή $x=-30..-24$ mm και $x=24..30$ mm βρίσκεται το γυαλί και στην περιοχή $x=-32..-30$ mm και $x=32..30$ mm ένα λεπτό στρώμα τσιμέντου. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται μείωση του δυναμικού, όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση. Έτσι, μετά την παρεμβολή των μη αγωγίμων μερών του δισκοειδούς μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται περίπου στα 60 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγωγίμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα υψηλής τάσης.

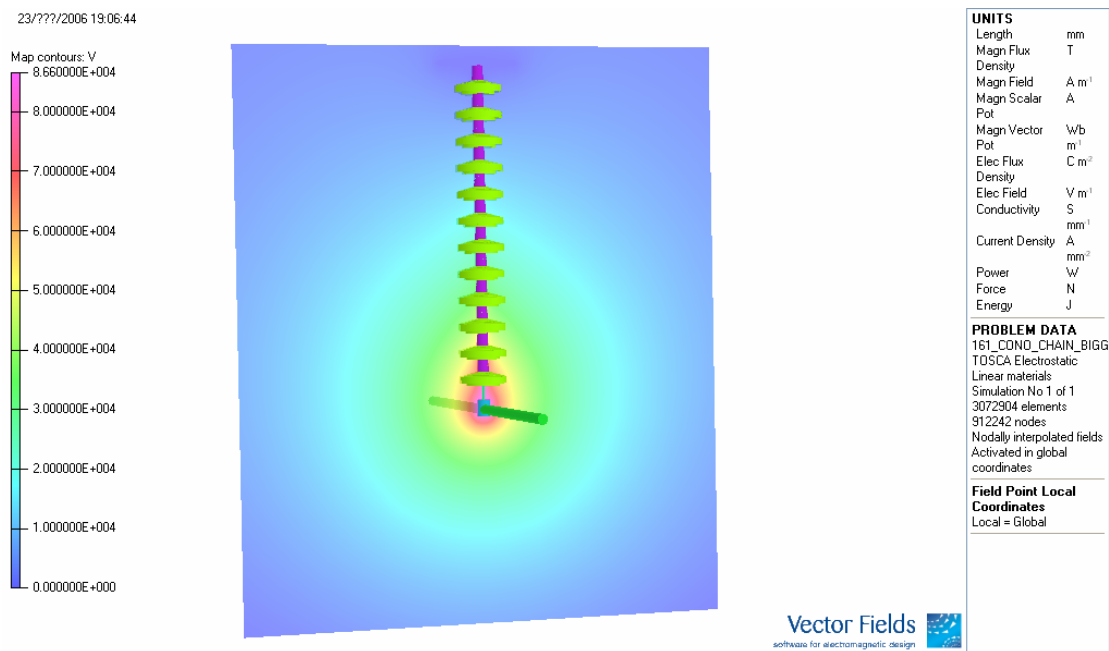
Στο σχήμα 4.27(β) φαίνεται η γραμμή ($x=-50..50$ mm, $y=0$, $z=1800$ mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Για το γειωμένο μονωτήρα, από το σχήμα 4.27(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin και είναι ίση με 3,4 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.



Σχήμα 4.27: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Y.T. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

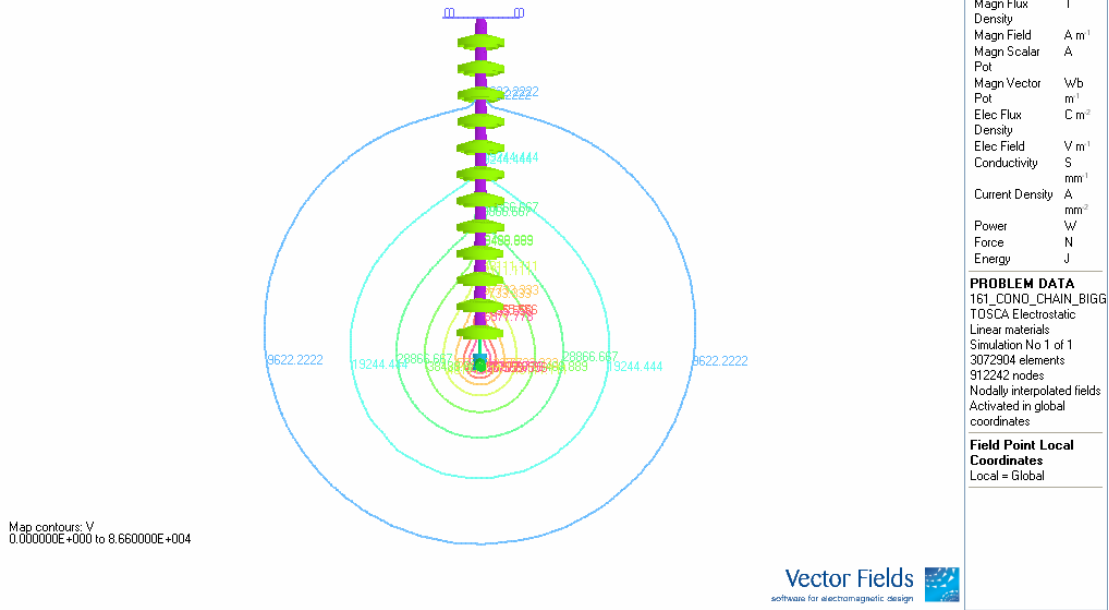
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα yz-επίπεδο, πάνω στο οποίο απεικονίζεται με τρεις τρόπους το δυναμικό και με δύο τρόπους η ένταση του πεδίου. Στο σχήμα 4.28 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι 86600 V, όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται. Στο σχήμα 4.29 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσσοειδή μονωτήρα στο ίδιο επίπεδο και στο σχήμα 4.30 φαίνεται το ιστόγραμμα, το οποίο αποκαλύπτει πώς κατανέμεται το δυναμικό στο εσωτερικό της αλυσίδας. Το δυναμικό μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από τον αγωγό, όπου το δυναμικό είναι 86600 V, προς το γειωμένο μονωτήρα, του οποίου το cap έχει μηδενικό δυναμικό. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη-αγώγιμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στην πορσελάνη. Αυτός είναι, άλλωστε, και ένας από τους

ρόλους ενός μονωτικού υλικού μέσα στο μονωτήρα: να μειώνει το δυναμικό σταδιακά κατά μήκος του εσωτερικού της αλυσίδας. Στο σχήμα 4.31 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.32 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται η ένταση στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα. Μεγαλύτερη τιμή έντασης πεδίου παρουσιάζει ο μονωτήρας υψηλής τάσης. Σε κάθε δίσκο η μέγιστη τιμή έντασης λαμβάνεται στο μονωτικό υλικό (στην πορσελάνη, εδώ), λόγω της μικρής διηλεκτρικής του σταθεράς. Αξιοσημείωτο είναι ότι, επειδή το yz-επίπεδο τέμνει κάθετα και τον αγωγό, ακριβώς εκεί η ένταση λαμβάνει μηδενική τιμή, όπως αναμενόταν.

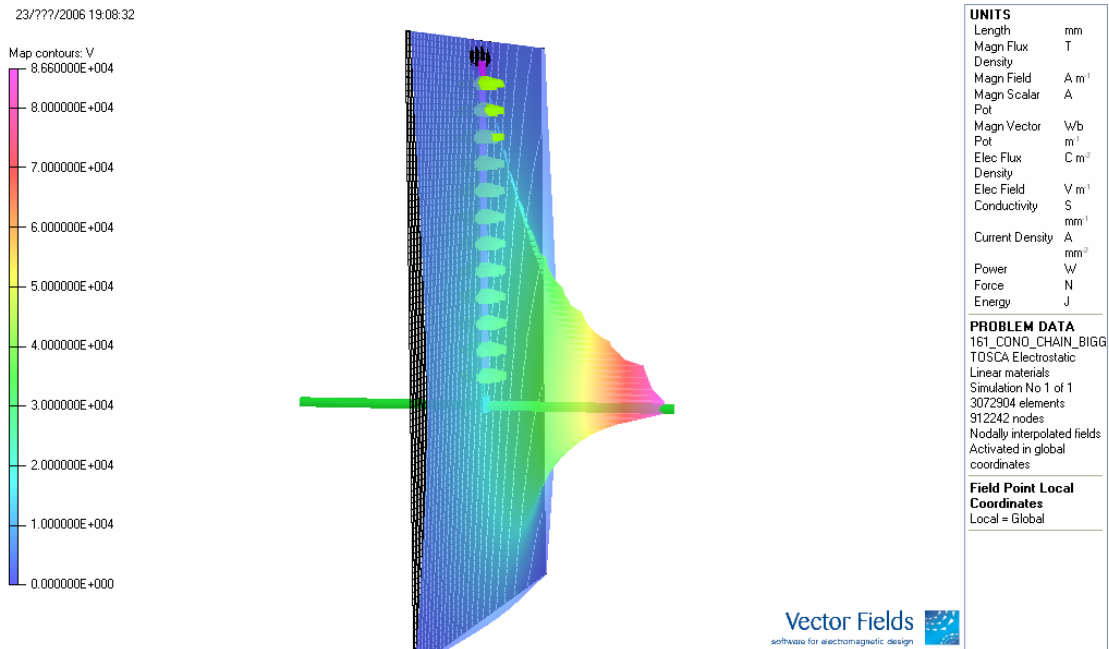


Σχήμα 4.28: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.

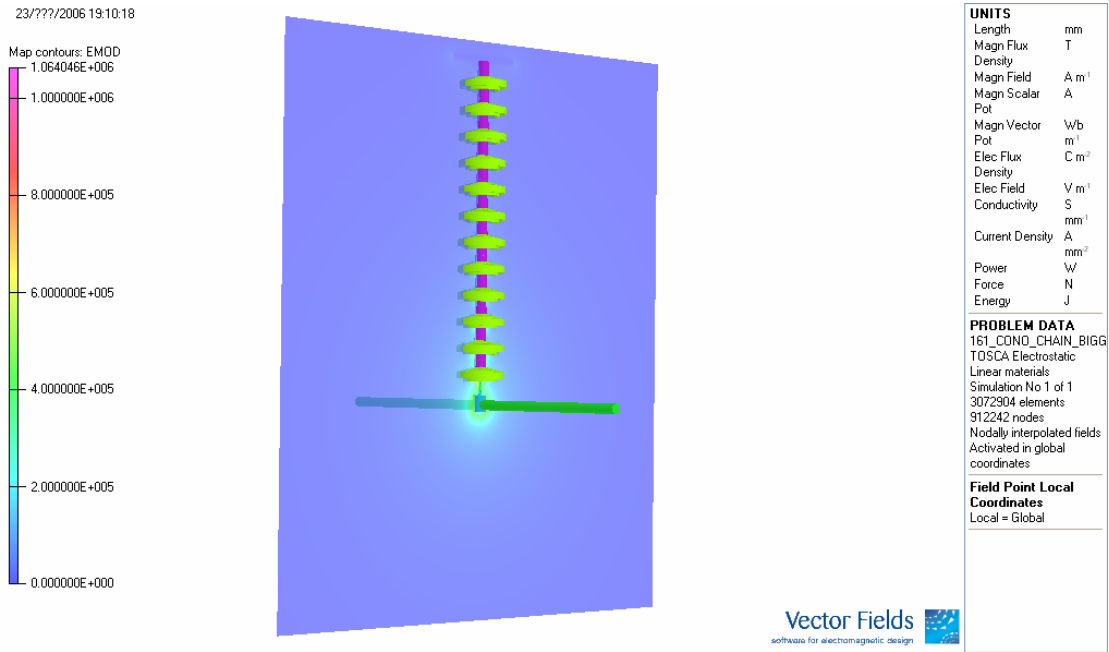
23/??/2006 19:07:36



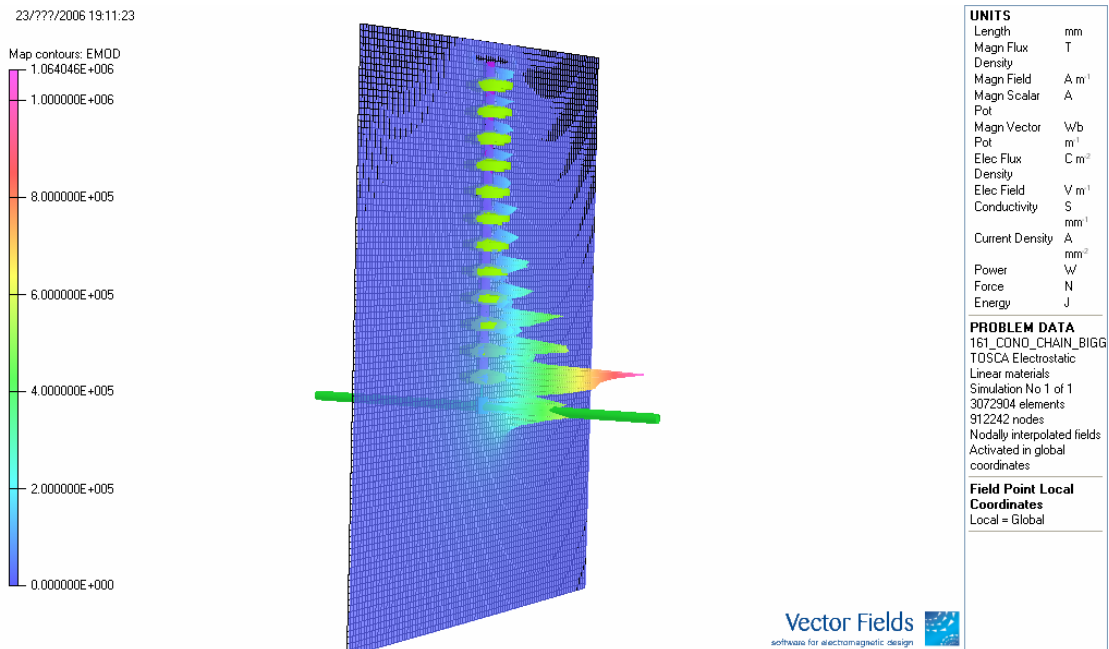
Σχήμα 4.29: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.30: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για το δυναμικό στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.



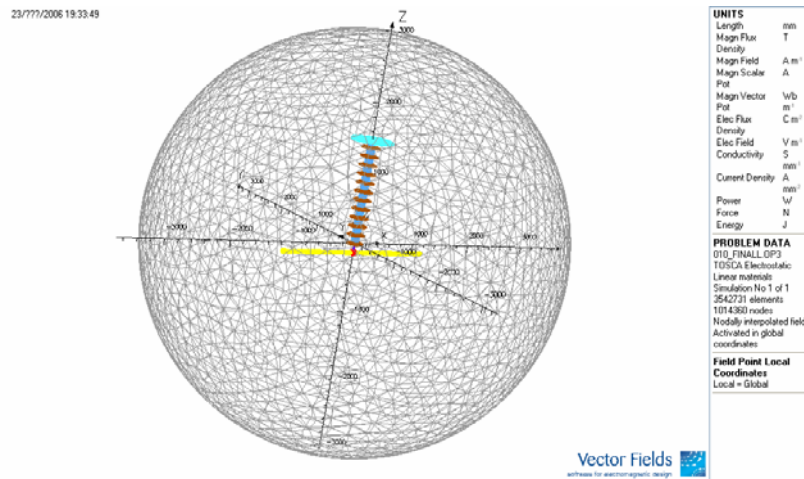
Σχήμα 4.31: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.32: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.

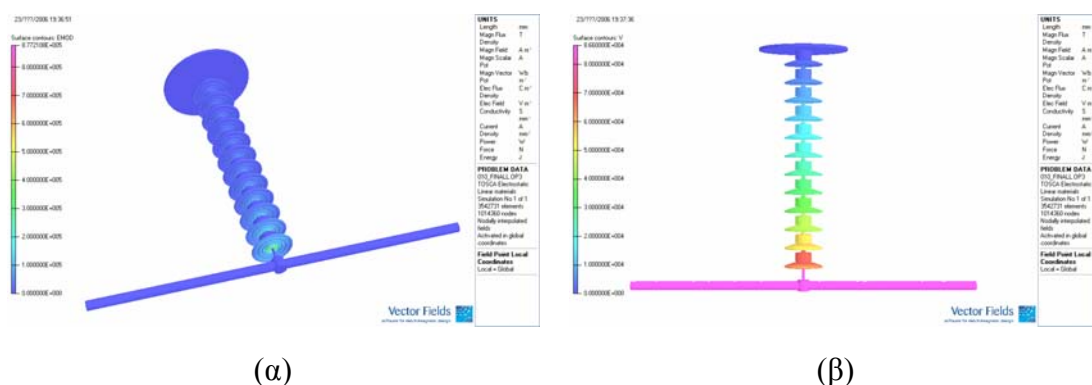
4.2.3 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV[No010 ΔΕΗ]

Ο τρίτος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150 kV που αποτελείται από 12 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 254 mm, βήμα 146 mm και μήκος ερπυσμού 290 mm. Στο σχήμα 4.33 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



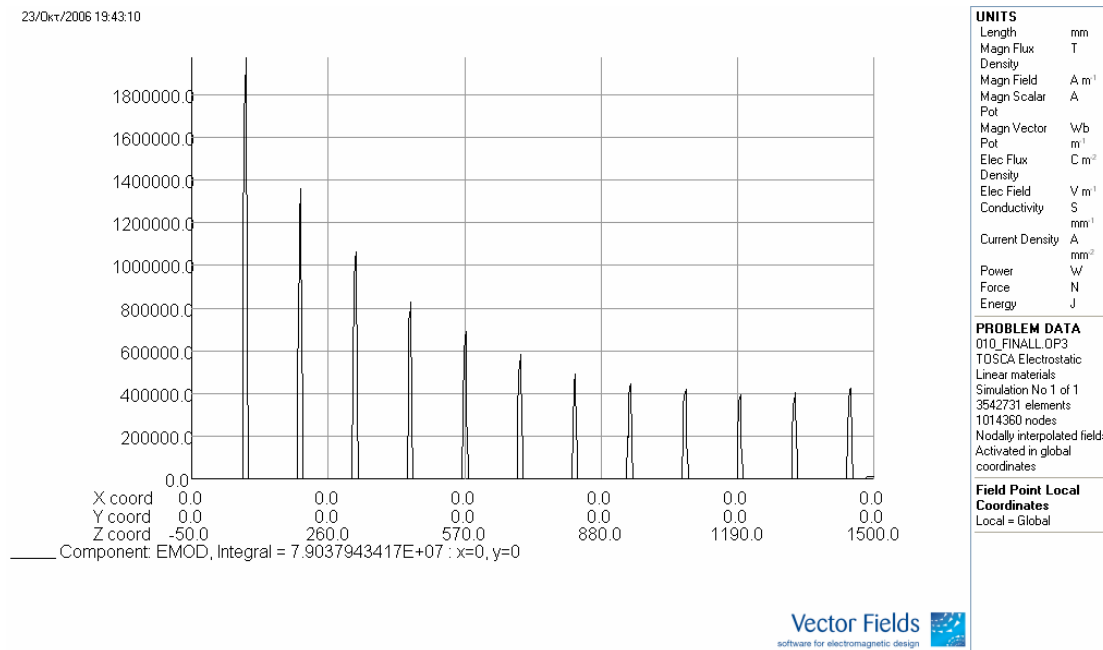
Σχήμα 4.33: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή.

Στο σχήμα 4.34(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του μονωτήρα. Στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι, προφανώς, μηδέν. Στο σχήμα 4.34(β) φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Το δυναμικό μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του μονωτήρα, όπως άλλωστε αναμενόταν.



Σχήμα 4.34: Κατανομή (α) της έντασης του πεδίου και (β) του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά γραφήματα, τα οποία εμπεριέχουν τρεις ή τέσσερις γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν την ένταση ή το δυναμικό κατά μήκος μιας γραμμής κάθε φορά. Οι γραμμές αυτές καθορίζονται από τις συντεταγμένες τους. Δηλαδή, η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή ($x=125 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) ή η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=125 \text{ mm}$) «αγγίζει» τις εξωτερικές πορσελάνινες πτυχώσεις του αλυσοειδούς μονωτήρα, αφού η ακτίνα του κάθε πορσελάνινου μονωτήρα είναι 130 mm . Να σημειωθεί ότι ο αγωγός είναι παράλληλος στον άξονα x , ενώ οι μονωτήρες βρίσκονται κατά μήκος του άξονα z . Η ένταση του πεδίου σε γραμμή που διαπερνά το κέντρο του μονωτήρα ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) παρουσιάζεται μόνη της στο σχήμα 4.35, γιατί λόγω των αρκετά υψηλών τιμών που παρουσιάζει, δεν ήταν δυνατόν να συμπεριληφθεί στην ίδια κλίμακα με τις άλλες γραφικές.



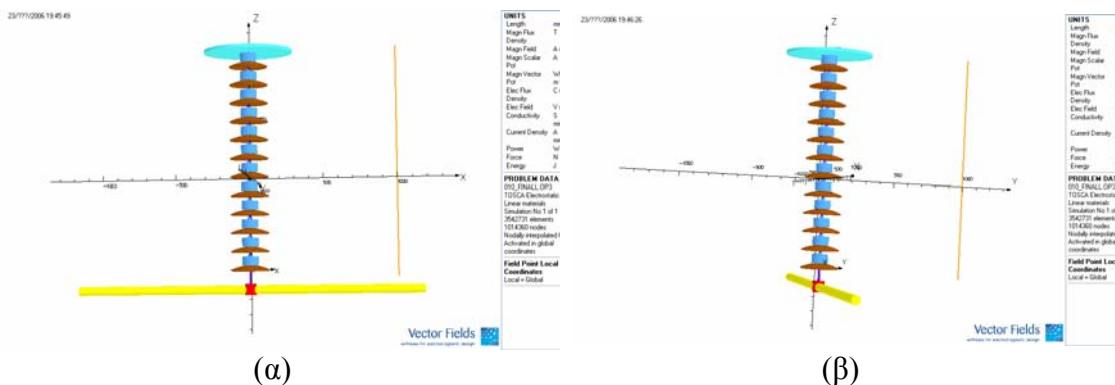
Σχήμα 4.35: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$, $z=-50..1500 \text{ mm}$) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$, $z=-50..1500 \text{ mm}$) διαπερνά όλα τα pins της αλυσίδας, αλλά και την περιοχή του μονωτικού (πορσελάνης) και τις δύο περιοχές τσιμέντου που βρίσκονται εντός του cap. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.35, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγωγικών μερών (cap και pin) της αλυσίδας, που είναι απόλυτα αναμενόμενο. Η γραφική παράσταση της έντασης σχηματίζει 12

κορυφές, όσες και ο αριθμός των μονωτήρων της αλυσίδας. Οι κορυφές της έντασης παρουσιάζονται στην περιοχή της πορσελάνης του κάθε μονωτήρα, αφού αυτή έχει τη μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με το cap, το pin και το τσιμέντο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Παρατηρείται, όμως, μια μικρή αύξηση της κορυφής της έντασης στους δύο τελευταίους μονωτήρες και ειδικά στο γειωμένο, στον οποίο η κορυφή της έντασης έχει υψηλότερη τιμή σε σχέση με τους δύο προηγούμενους μονωτήρες.

Η ύπαρξη των παράσιτων χωρητικότητας προς γη και προς τον αγωγό Υ.Τ. που παρουσιάζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα δικαιολογεί την ποσοστιαία αύξηση της τάσης που παρατηρείται κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Αυτή η αύξηση της τάσης δικαιολογεί και την αύξηση της έντασης του πεδίου στο γειωμένο μονωτήρα.

Λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων. Η πρώτη αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $y=0$ και αυξάνεται σταδιακά η x -συντεταγμένη, άρα και η απόσταση από το μονωτήρα, αλλά το ένα τους άκρο βρίσκεται πολύ κοντά στον αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.36(α). Η δεύτερη σειρά γραφημάτων αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $x=0$ και απομακρύνονται σταδιακά τόσο από τον αλυσοειδή μονωτήρα όσο και από τον αγωγό, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.36(β).

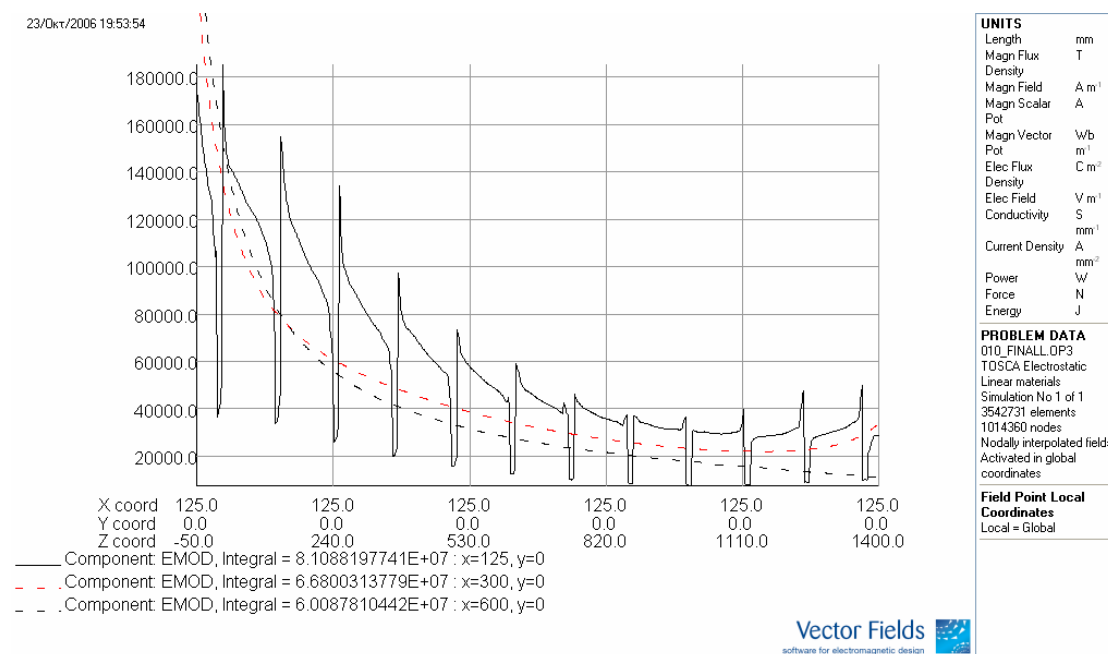


Σχήμα 4.36: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

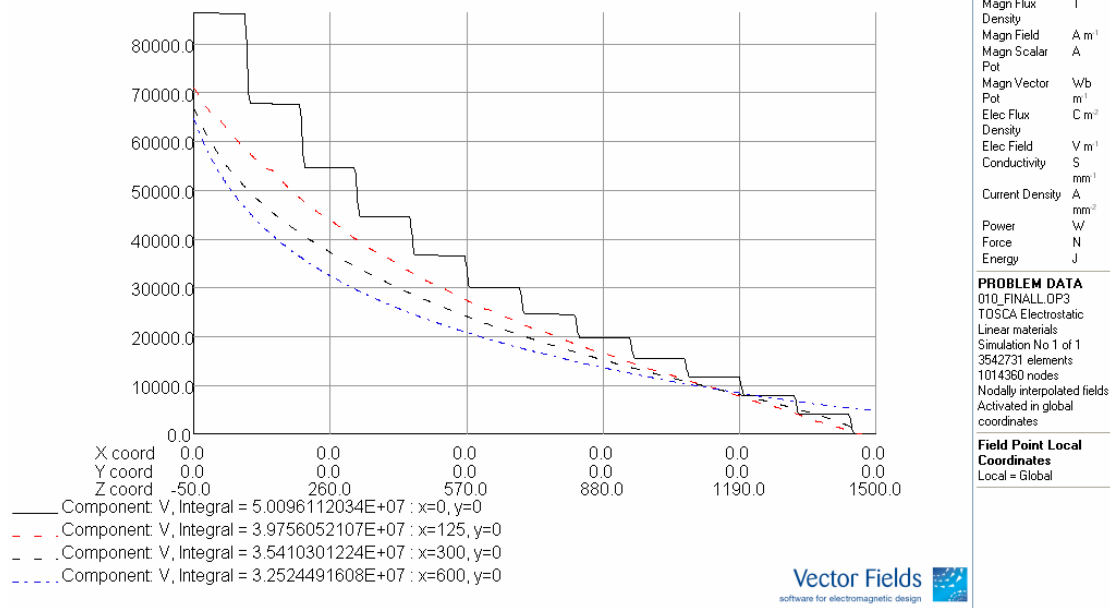
Παρατηρούμε ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από τον αλυσοειδή μονωτήρα, τόσο η ένταση του πεδίου όσο και το δυναμικό μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή, καθώς απομακρυνόμαστε και από τον αλυσοειδή μονωτήρα και από τον αγωγό, δηλαδή για γραμμές του σχήματος 4.36(β), όπως επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 4.39 και 4.40. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος των γραμμών ($x=125$

mm, $y=0$ mm) και ($x=0$ mm, $y=125$ mm), που αγγίζουν τις εξωτερικές πτυχώσεις της αλυσίδας, παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που η γραμμή διαπερνά τις πορσελάνινες πτυχώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πορσελάνη έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον περιβάλλοντα αέρα και έτσι, στην πορσελάνη παρατηρούμε μείωση της έντασης του πεδίου. Οι βυθίσεις αυτές επιβεβαιώνονται και από το άρθρο [16], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.2 της παραγράφου 2.3 του κεφαλαίου 2. Βέβαια, όπως αναμέναμε, η ένταση μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Το δυναμικό κατά μήκος των ίδιων γραμμών μειώνεται προς την ίδια κατεύθυνση, μέχρι να λάβει μηδενική τιμή στο γειωμένο μονωτήρα. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη αγωγίμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στην πορσελάνη, γεγονός που οφείλεται στις μονωτικές ιδιότητες της πορσελάνης.

Στα σχήματα 4.37 και 4.38 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $y=0$, σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.36(α).

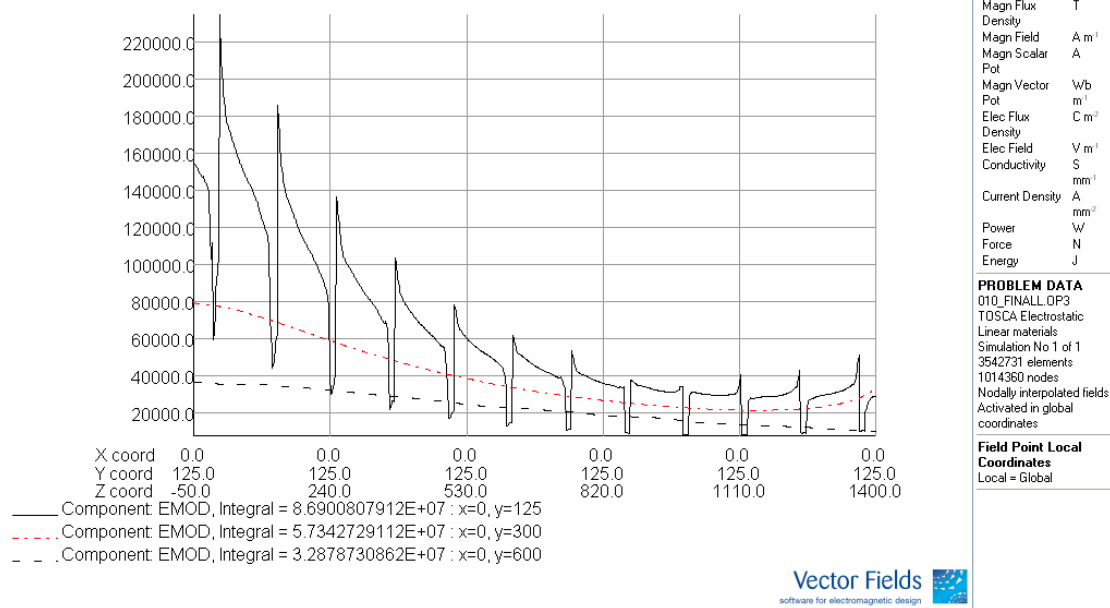


Σχήμα 4.37: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.36(α).

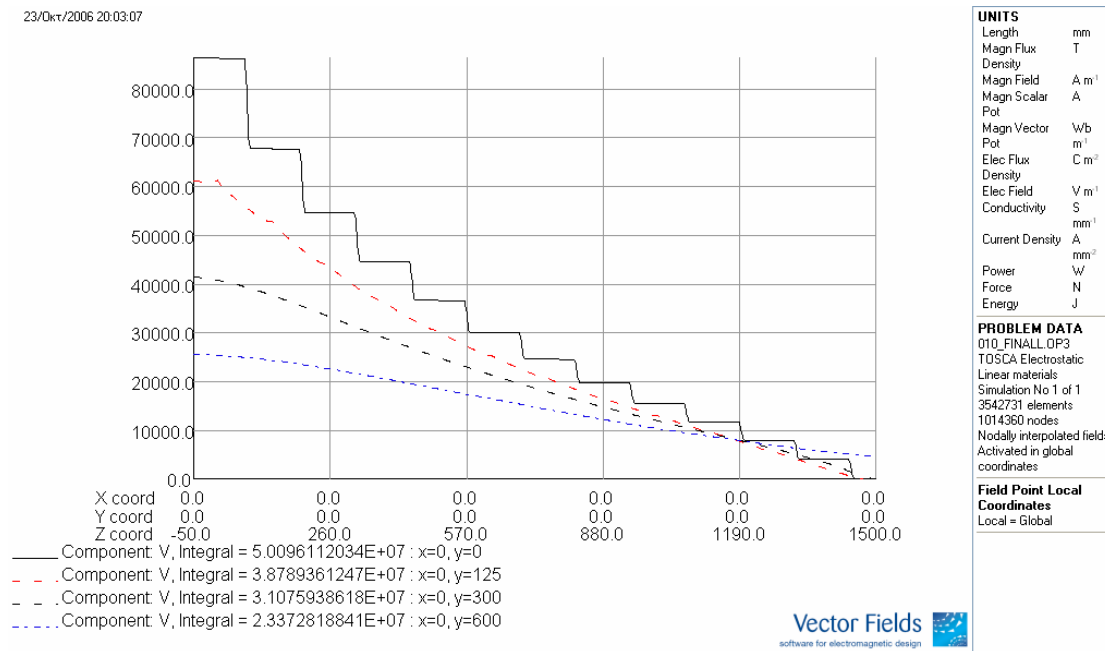


Σχήμα 4.38: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.36(α).

Στα σχήματα 4.39 και 4.40 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $x=0$, σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.36(β).



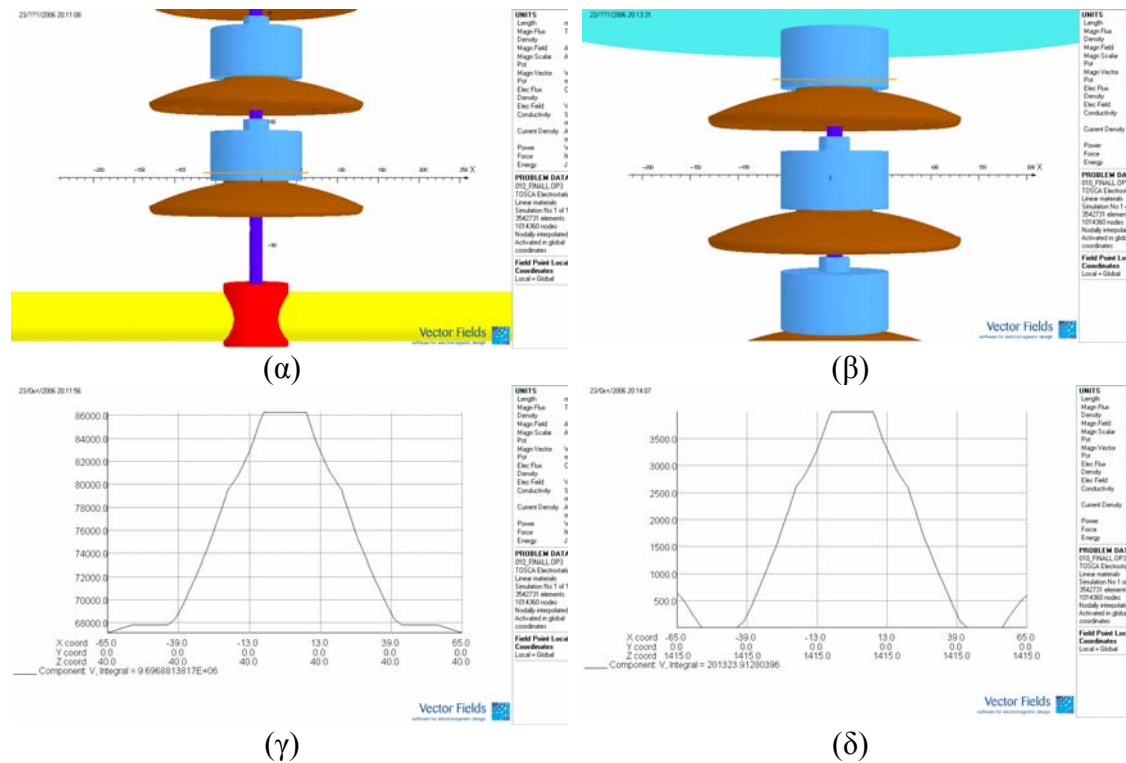
Σχήμα 4.39: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.36(β).



Σχήμα 4.40: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.36(β).

Στο σχήμα 4.41(α) φαίνεται η γραμμή ($x=-65..65$ mm, $y=0$ mm, $z=40$ mm) που διαπερνά το cap του μονωτήρα υψηλής τάσης και στο σχήμα 4.41(γ) η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτής. Η ακτίνα της βάσης του cap είναι 56 mm και έτσι, για $|x|>56$ mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για $x=-8..8$ mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγωγίμο και γι' αυτό, στην περιοχή αυτή το δυναμικό διατηρείται σταθερό και ίσο με 86 kV, περίπου όσο είναι και το δυναμικό που εφαρμόστηκε στον αγωγό, επειδή το pin αυτό συνδέεται με τον αγωγό, μέσω του κόκκινου κυλίνδρου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή $x=-21..-8$ mm και $x=8..21$ mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή $x=-40..-21$ mm και $x=21..40$ mm βρίσκεται η πορσελάνη και στην περιοχή $x=-43..-40$ mm και $x=40..43$ mm ένα λεπτό στρώμα τσιμέντου. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται μείωση του δυναμικού, όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση. Έτσι, μετά την παρεμβολή των μη αγωγίμων μερών του δισκοειδούς μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται περίπου στα 68 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγωγίμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα υψηλής τάσης.

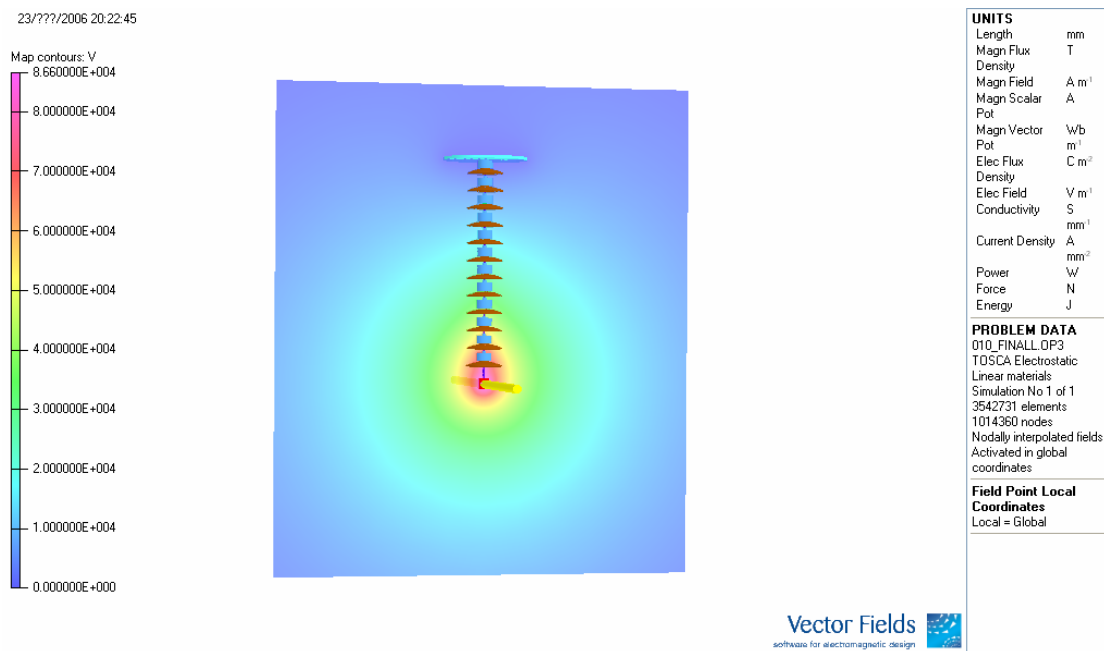
Στο σχήμα 4.41(β) φαίνεται η γραμμή ($x=-65..65$ mm, $y=0$, $z=1415$ mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Για το γειωμένο μονωτήρα, από το σχήμα 4.41(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin και είναι ίση με 4 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.



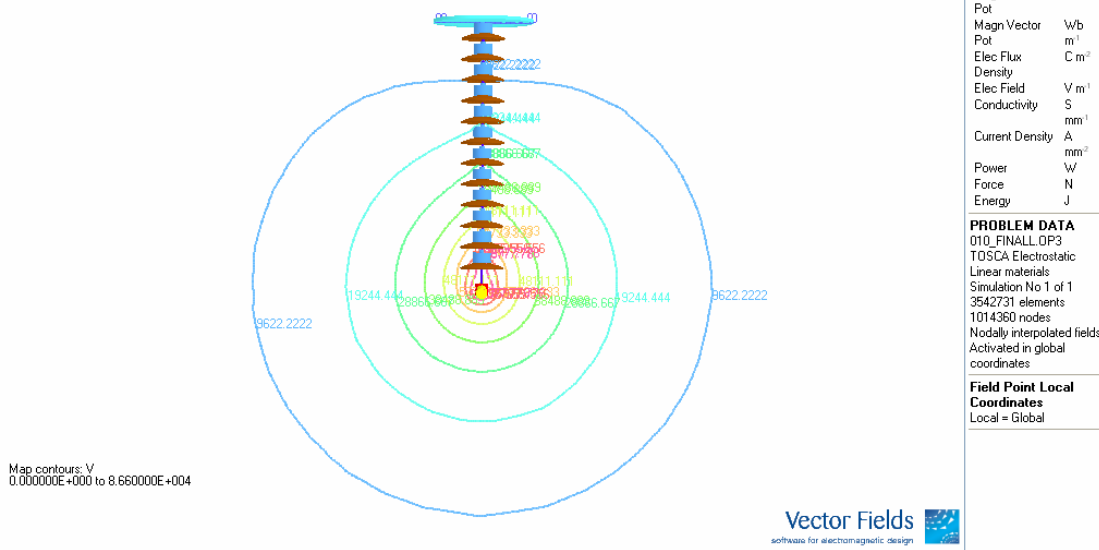
Σχήμα 4.41: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Y.T. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα yz-επίπεδο, πάνω στο οποίο απεικονίζεται με τρεις τρόπους το δυναμικό και με δύο τρόπους η ένταση του πεδίου. Στο σχήμα 4.42 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι 86600 V, όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται. Στο σχήμα 4.43 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο ίδιο επίπεδο και στο σχήμα 4.44 φαίνεται το ιστόγραμμα, το οποίο αποκαλύπτει πώς κατανέμεται το δυναμικό στο εσωτερικό της αλυσίδας. Το δυναμικό μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από τον αγωγό, όπου το δυναμικό είναι 86600 V, προς το γειωμένο μονωτήρα, του οποίου το cap έχει μηδενικό δυναμικό. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη-αγώγιμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στην πορσελάνη. Αυτός είναι, άλλωστε, και ένας από τους

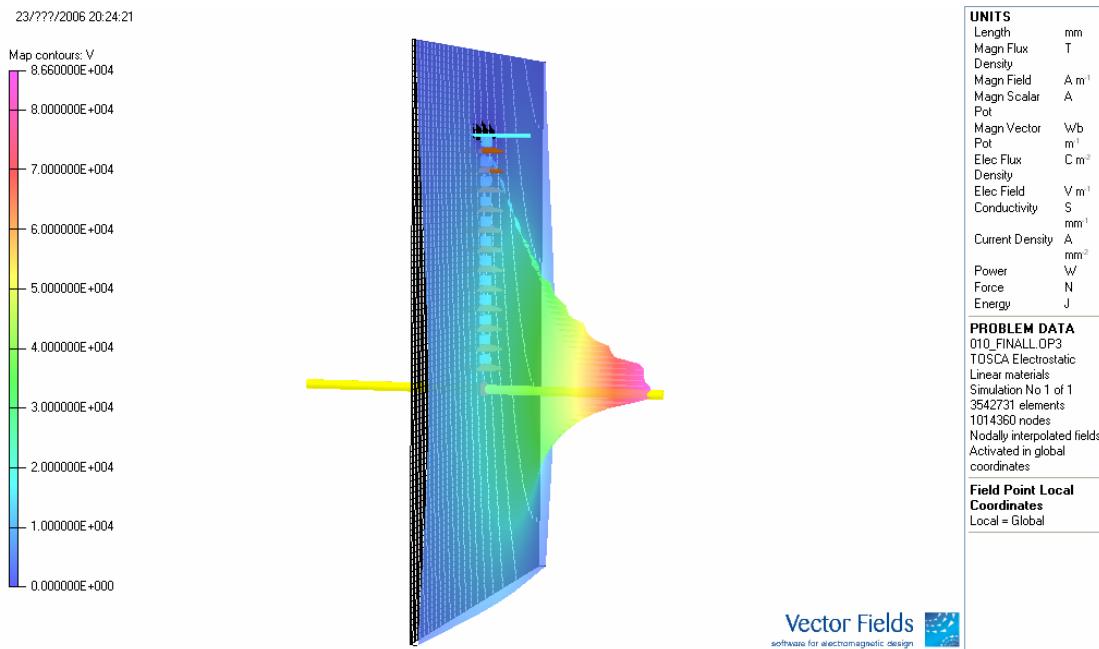
ρόλους ενός μονωτικού υλικού μέσα στο μονωτήρα: να μειώνει το δυναμικό σταδιακά κατά μήκος του εσωτερικού της αλυσίδας. Στο σχήμα 4.45 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.46 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται η ένταση στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα. Μεγαλύτερη τιμή έντασης πεδίου παρουσιάζει ο μονωτήρας υψηλής τάσης. Σε κάθε δίσκο η μέγιστη τιμή έντασης λαμβάνεται στο μονωτικό υλικό (στην πορσελάνη, εδώ), λόγω της μικρής διηλεκτρικής του σταθεράς. Αξιοσημείωτο είναι ότι, επειδή το yz-επίπεδο τέμνει κάθετα και τον αγωγό, ακριβώς εκεί η ένταση λαμβάνει μηδενική τιμή, όπως αναμενόταν.



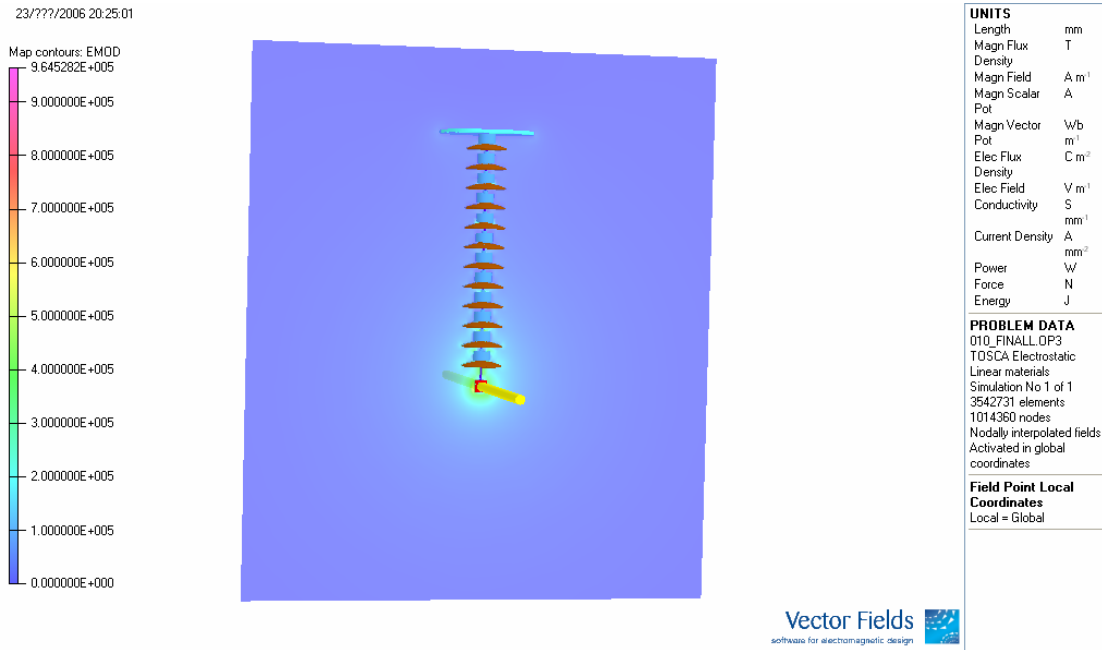
Σχήμα 4.42: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



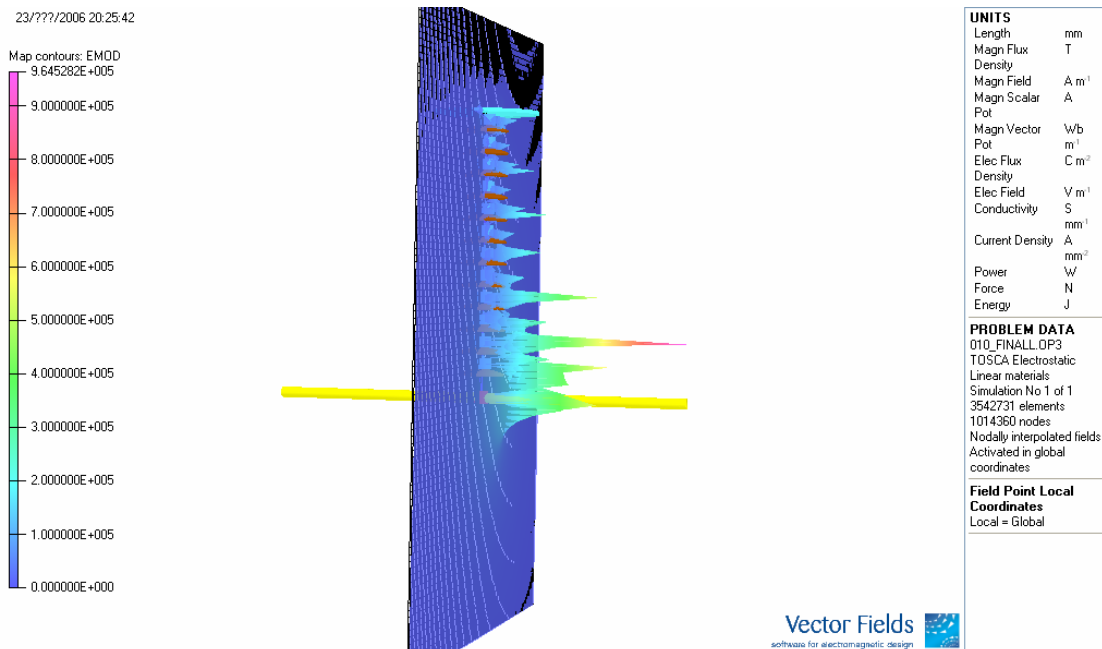
Σχήμα 4.43: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.44: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για το δυναμικό στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.



Σχήμα 4.45: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



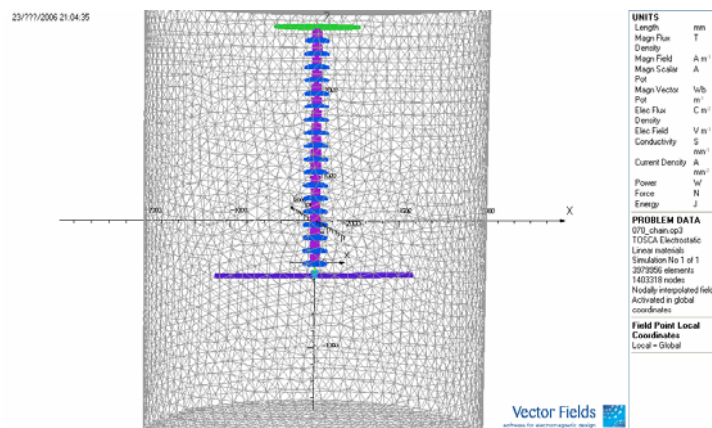
Σχήμα 4.46: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.

4.3 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 400 kV

4.3.1 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400kV [No 070 ΔΕΗ]

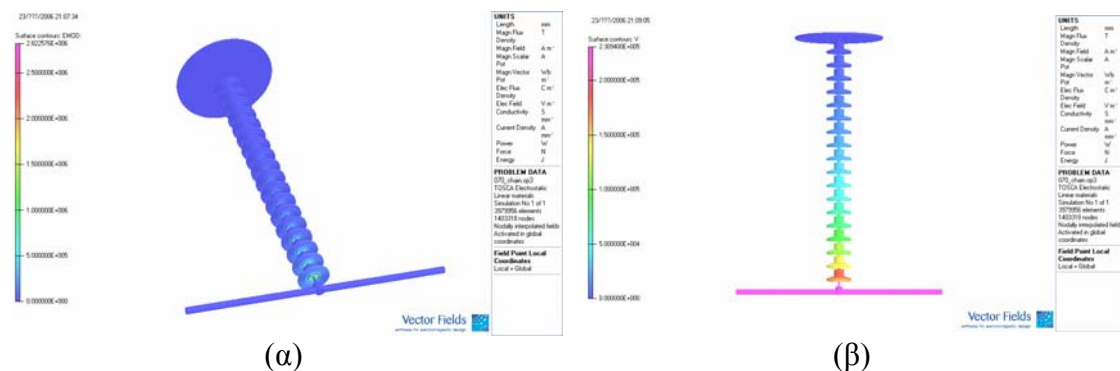
Ο τελευταίος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400 kV που αποτελείται από 18 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 320 mm, βήμα 170 mm και μήκος ερπυσμού 540 mm.

Στο σχήμα 4.47 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



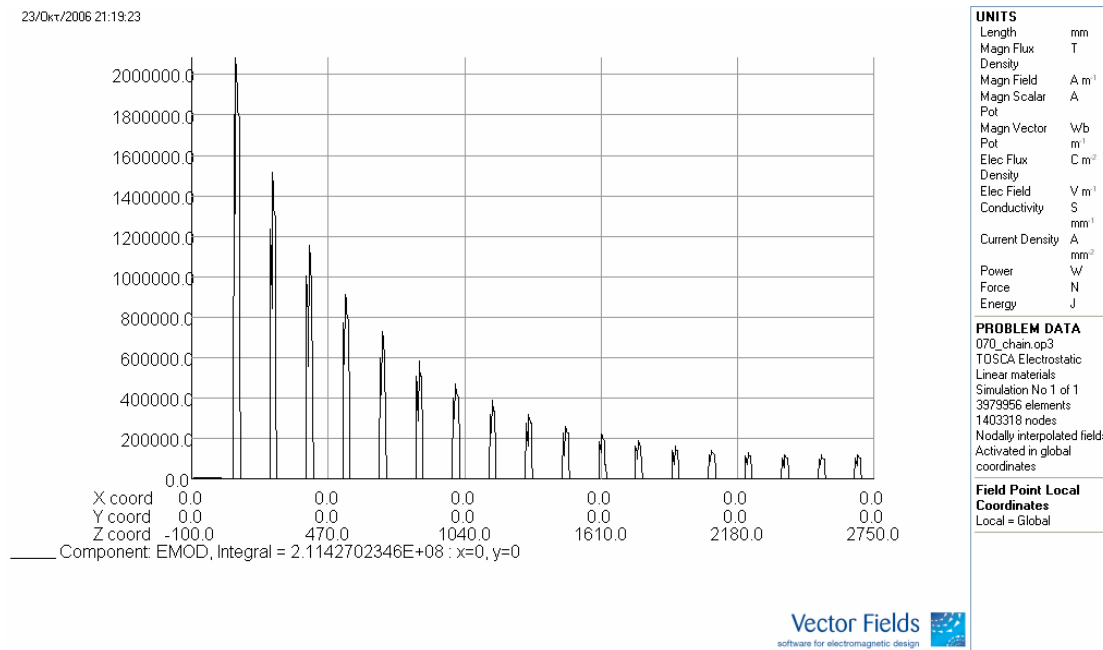
Σχήμα 4.47: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή.

Στο σχήμα 4.48(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση του πεδίου μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα. Προφανώς, στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν. Στο σχήμα 4.48(β) φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Το δυναμικό μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως άλλωστε αναμενόταν.



Σχήμα 4.48: Κατανομή (α) της έντασης του πεδίου και (β) του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά γραφήματα, τα οποία εμπεριέχουν τρεις ή τέσσερις γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν την ένταση ή το δυναμικό κατά μήκος μιας γραμμής κάθε φορά. Οι γραμμές αυτές καθορίζονται από τις συντεταγμένες τους. Δηλαδή, η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή ($x=145 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) ή η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=145 \text{ mm}$) διαπερνά τις εξωτερικές πορσελάνινες πτυχώσεις του αλυσοειδούς μονωτήρα, αφού η ακτίνα του κάθε πορσελάνινου μονωτήρα είναι 160 mm . Να σημειωθεί ότι ο αγωγός είναι παράλληλος στον άξονα x , ενώ η αλυσίδα των μονωτήρων βρίσκεται κατά μήκος του άξονα z . Η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$) παρουσιάζεται μόνη της στο σχήμα 4.49, γιατί λόγω των αρκετά υψηλών τιμών που παρουσιάζει, δεν ήταν δυνατόν να συμπεριληφθεί στην ίδια κλίμακα με τις άλλες γραφικές.



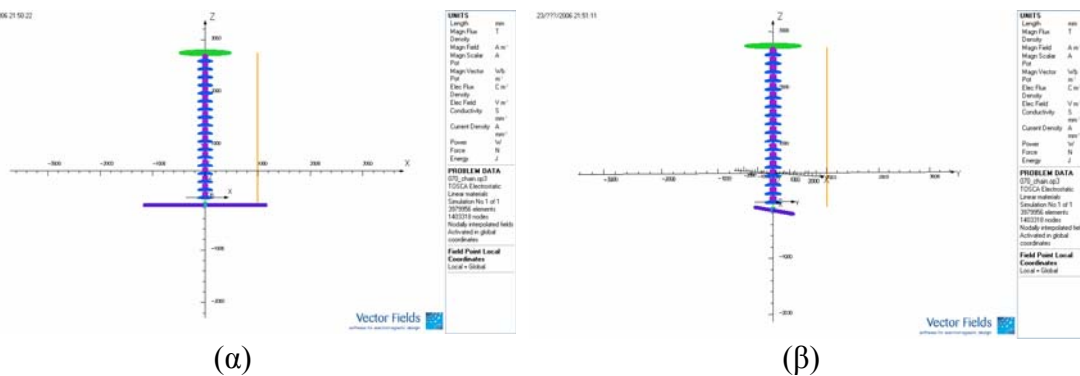
Σχήμα 4.49: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$, $z=-100..2750 \text{ mm}$) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή ($x=0 \text{ mm}$, $y=0 \text{ mm}$, $z=-100..2750 \text{ mm}$) διαπερνά όλα τα pins της αλυσίδας, αλλά και την περιοχή του μονωτικού (πορσελάνης) και τις δύο περιοχές τσιμέντου που βρίσκονται εντός του cap. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.49, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγωγικών μερών (cap και pin) της αλυσίδας, που είναι απόλυτα αναμενόμενο. Η γραφική παράσταση της έντασης σχηματίζει 18 κορυφές, όσες και ο αριθμός των δισκοειδών μονωτήρων. Οι κορυφές της έντασης

παρουσιάζονται στην περιοχή της πορσελάνης του κάθε μονωτήρα, μιας και αυτή έχει τη μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με το cap, το pin και το τσιμέντο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Παρατηρείται, όμως, μια μικρή αύξηση της κορυφής της έντασης στους δύο τελευταίους μονωτήρες και ειδικά στον τελευταίο (το γειωμένο), του οποίου η κορυφή έχει υψηλότερη τιμή πεδίου σε σχέση με τους 4 προηγούμενους μονωτήρες.

Η ύπαρξη των παράσιτων χωρητικοτήτων προς γη και προς τον αγωγό Υ.Τ. που παρουσιάζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα δικαιολογεί την ποσοστιαία αύξηση της τάσης που παρατηρείται κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Σε αυτή την αύξηση της τάσης οφείλεται και η αύξηση της έντασης του πεδίου στο γειωμένο μονωτήρα.

Λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων. Η πρώτη αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $y=0$ και αυξάνεται σταδιακά η x -συντεταγμένη, άρα και η απόσταση από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αλλά το ένα τους άκρο βρίσκεται πολύ κοντά στον αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.50(α). Η δεύτερη σειρά γραφημάτων αφορά γραμμές που έχουν σταθερά $x=0$ και απομακρύνονται σταδιακά τόσο από τον αλυσοειδή μονωτήρα όσο και από τον αγωγό, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.50(β).

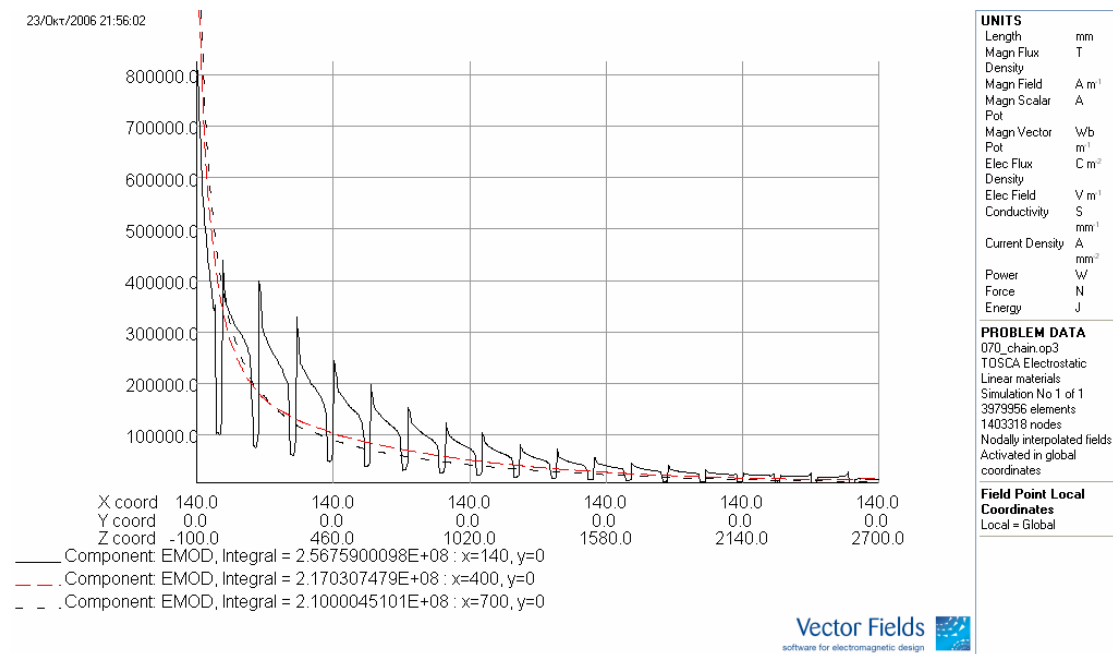


Σχήμα 4.50: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

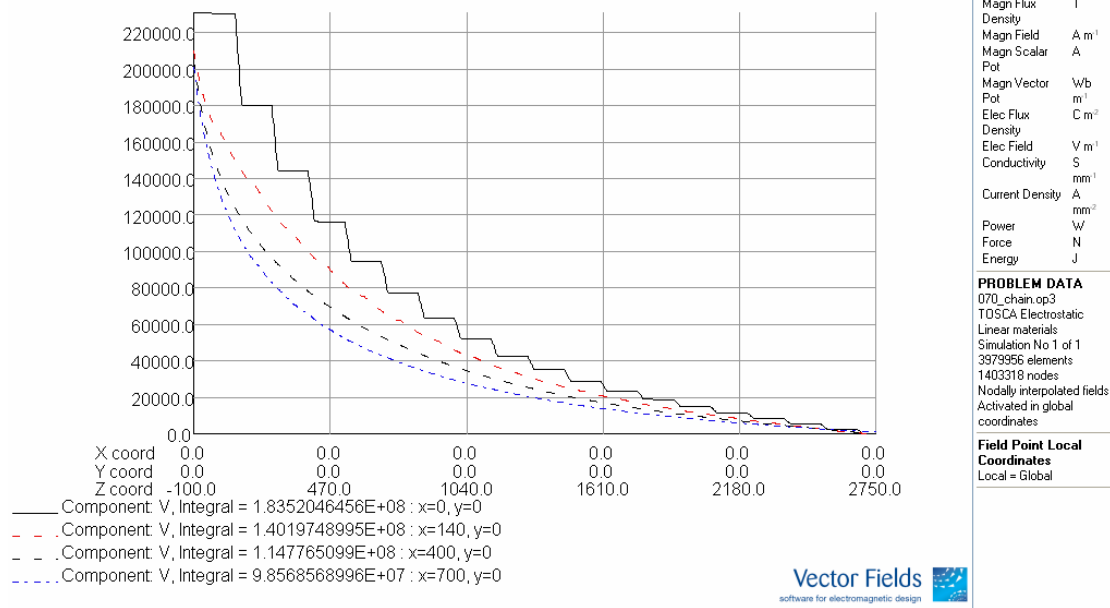
Παρατηρούμε ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από τον αλυσοειδή μονωτήρα, τόσο η ένταση του πεδίου όσο και το δυναμικό μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή, καθώς απομακρυνόμαστε και από τον αλυσοειδή μονωτήρα και από τον αγωγό, δηλαδή για γραμμές του σχήματος 4.50(β), όπως επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 4.53 και 4.54. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος των γραμμών ($x=140$ mm, $y=0$ mm) και ($x=0$ mm, $y=140$ mm), που αγγίζουν τις εξωτερικές πτυχώσεις της αλυσίδας, παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που η γραμμή διαπερνά τις

πορσελάνινες πτυχώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πορσελάνη έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον περιβάλλοντα αέρα και έτσι, στην πορσελάνη παρατηρούμε μείωση της έντασης του πεδίου. Οι βυθίσεις αυτές επιβεβαιώνονται και από το άρθρο [16], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.2 της παραγράφου 2.3 του κεφαλαίου 2. Βέβαια, όπως αναμέναμε, η ένταση μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Το δυναμικό κατά μήκος των ίδιων γραμμών μειώνεται προς την ίδια κατεύθυνση, μέχρι να λάβει μηδενική τιμή στο γειωμένο μονωτήρα. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη-αγώγιμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στην πορσελάνη, γεγονός που οφείλεται στις μονωτικές ιδιότητες της πορσελάνης.

Στα σχήματα 4.51 και 4.52 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $y=0$, σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.50(α).

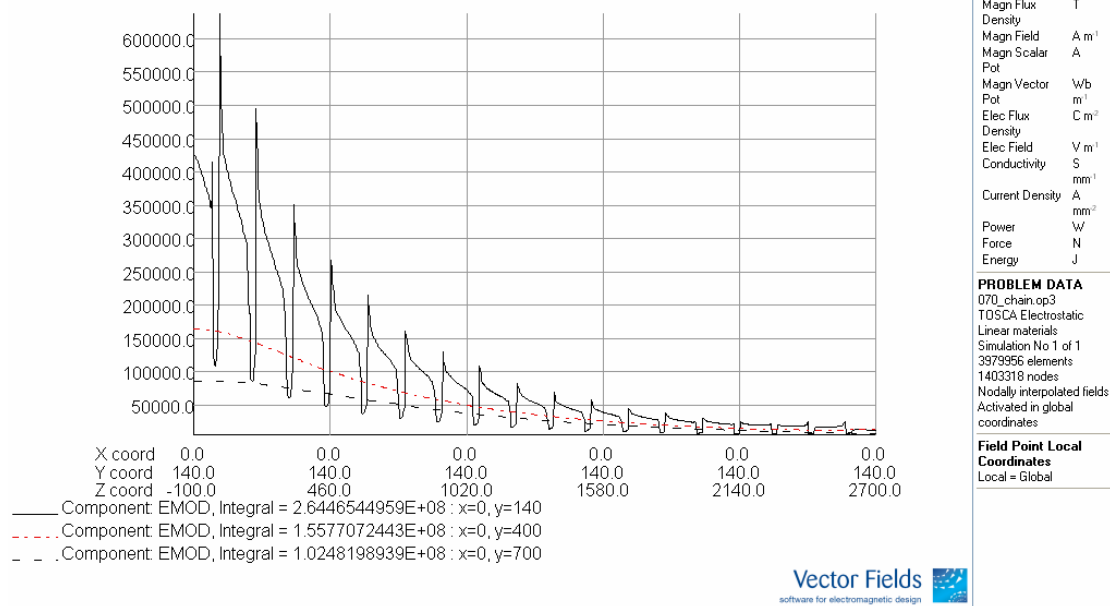


Σχήμα 4.51: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.40(α).

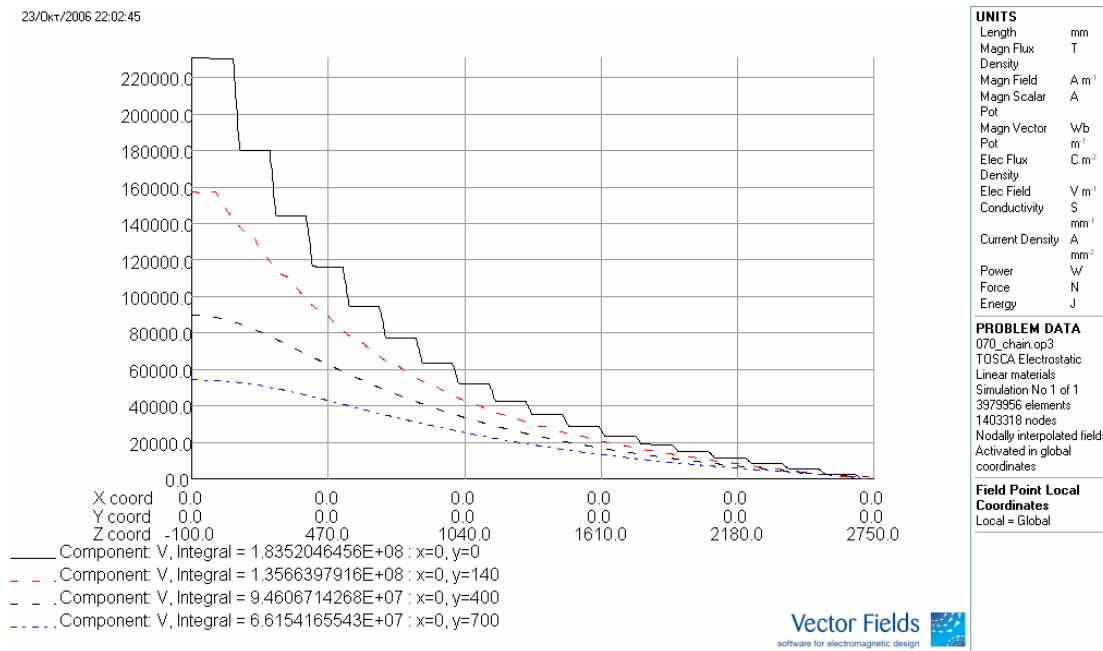


Σχήμα 4.52: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.50(α).

Στα σχήματα 4.53 και 4.54 παρουσιάζονται η ένταση και το δυναμικό, αντίστοιχα, κατά μήκος γραμμών που έχουν σταθερά $x=0$, σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο λήψης γραφικών παραστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.50(β).



Σχήμα 4.53: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.50(β).

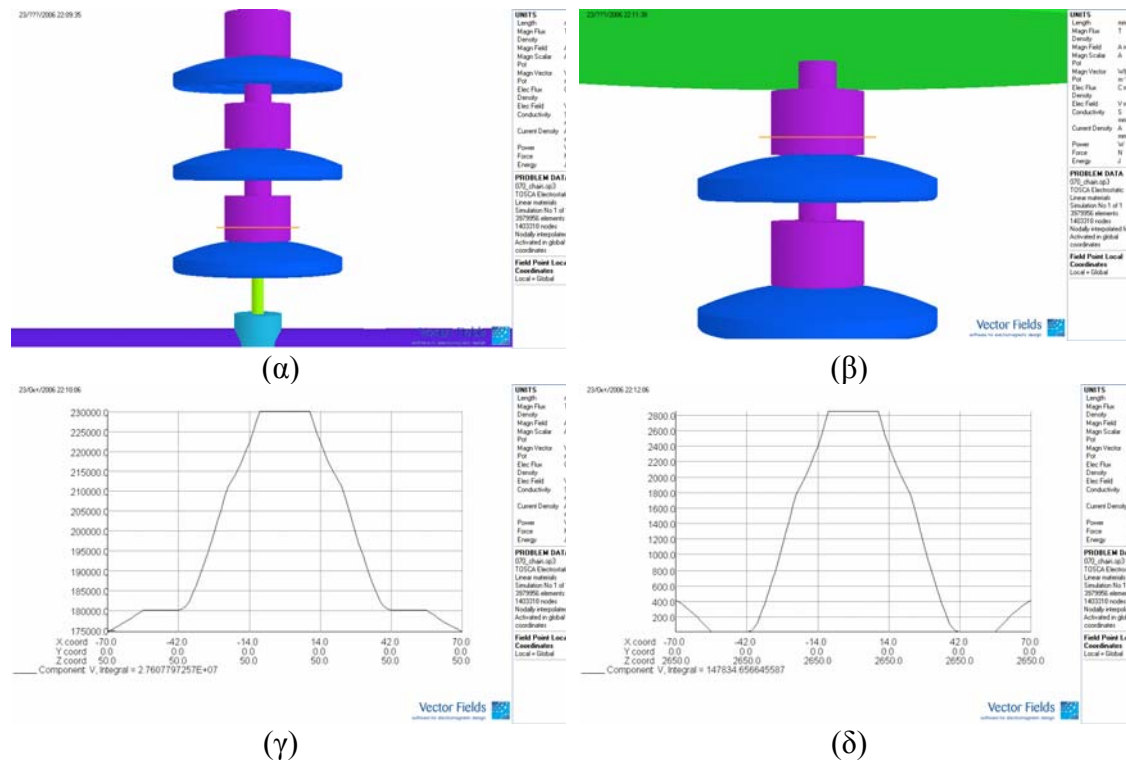


Σχήμα 4.54: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.50(β).

Στο σχήμα 4.55(α) φαίνεται η γραμμή ($x=-70..70$ mm, $y=0$ mm, $z=50$ mm) που διαπερνά το cap του μονωτήρα υψηλής τάσης και στο σχήμα 4.55(γ) η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτής. Για $|x|>56$ mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για $x=-10..10$ mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγωγίμο και γι' αυτό, στην περιοχή αυτή το δυναμικό διατηρείται σταθερό και ίσο με 230 kV, περίπου όσο είναι και το δυναμικό που εφαρμόστηκε στον αγωγό, επειδή το pin αυτό συνδέεται με τον αγωγό, μέσω του γαλάζιου αγωγίμου κύβου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή $x=-23..-10$ mm και $x=10..23$ mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή $x=-38..-23$ mm και $x=23..38$ mm βρίσκεται η πορσελάνη και στην περιοχή $x=-41..-38$ mm και $x=38..41$ mm ένα λεπτό στρώμα τσιμέντου. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται μείωση του δυναμικού, όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση. Έτσι, μετά την παρεμβολή των μη αγωγίμων μερών του μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται στα 180 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγωγίμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα.

Στο σχήμα 4.55(β) φαίνεται η γραμμή ($x=-70..70$ mm, $y=0$ mm, $z=2650$ mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Από το σχήμα 4.55(δ) φαίνεται ότι η

μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin του γειωμένου μονωτήρα και είναι ίση με 2,8 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.

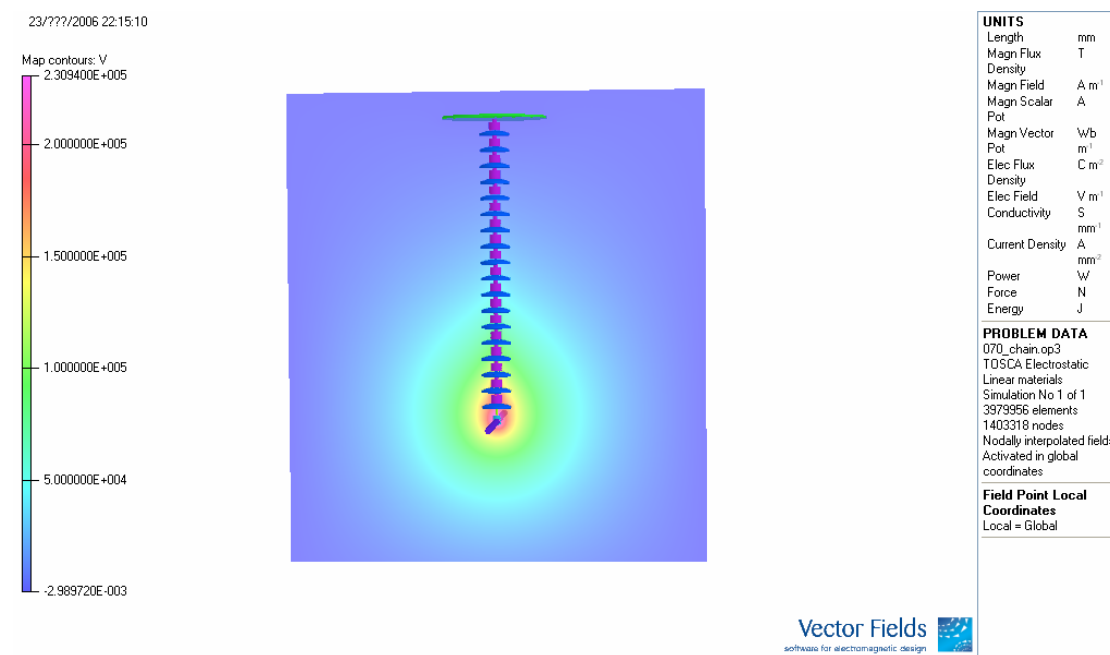


Σχήμα 4.55: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Y.T. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

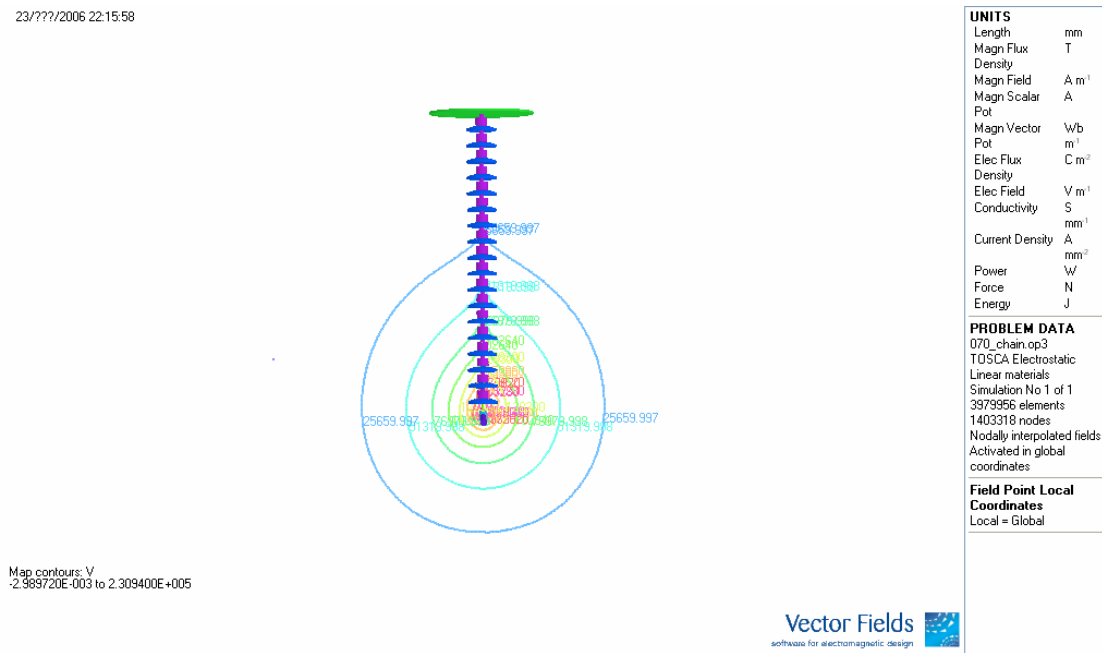
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα yz-επίπεδο, πάνω στο οποίο απεικονίζεται με τρεις τρόπους το δυναμικό και με δύο τρόπους η ένταση του πεδίου. Στο σχήμα 4.56 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι $\frac{400}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 230940 \text{ V}$, όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται.

Στο σχήμα 4.57 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο ίδιο επίπεδο και στο σχήμα 4,58 φαίνεται το ιστόγραμμα, το οποίο αποκαλύπτει πώς κατανέμεται το δυναμικό στο εσωτερικό της αλυσίδας. Το δυναμικό μειώνεται σταδιακά με κατεύθυνση από τον αγωγό, όπου το δυναμικό είναι 230940 V, προς το γειωμένο μονωτήρα, του οποίου το cap έχει μηδενικό δυναμικό. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη-αγώγιμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στην πορσελάνη. Αυτός είναι, άλλωστε, και ένας από τους ρόλους ενός μονωτικού υλικού μέσα στο μονωτήρα: να μειώνει το δυναμικό σταδιακά κατά μήκος του εσωτερικού της αλυσίδας.

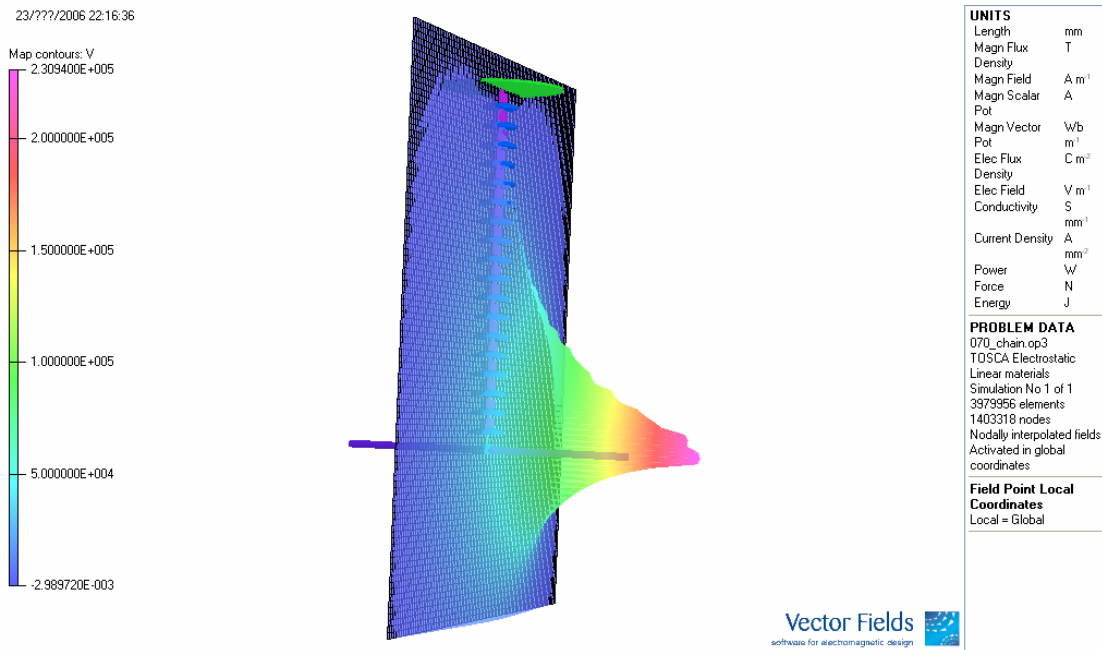
Στο σχήμα 4.59 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.60 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται η ένταση στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα. Μεγαλύτερη τιμή έντασης πεδίου παρουσιάζει ο μονωτήρας υψηλής τάσης. Σε κάθε δισκοειδή μονωτήρα η μέγιστη τιμή έντασης λαμβάνεται στο μονωτικό υλικό (στην πορσελάνη, εδώ), λόγω της μικρής διηλεκτρικής του σταθεράς. Αξιοσημείωτο είναι ότι, επειδή το yz-επίπεδο τέμνει κάθετα και τον αγωγό, ακριβώς εκεί η ένταση λαμβάνει μηδενική τιμή, όπως αναμενόταν.



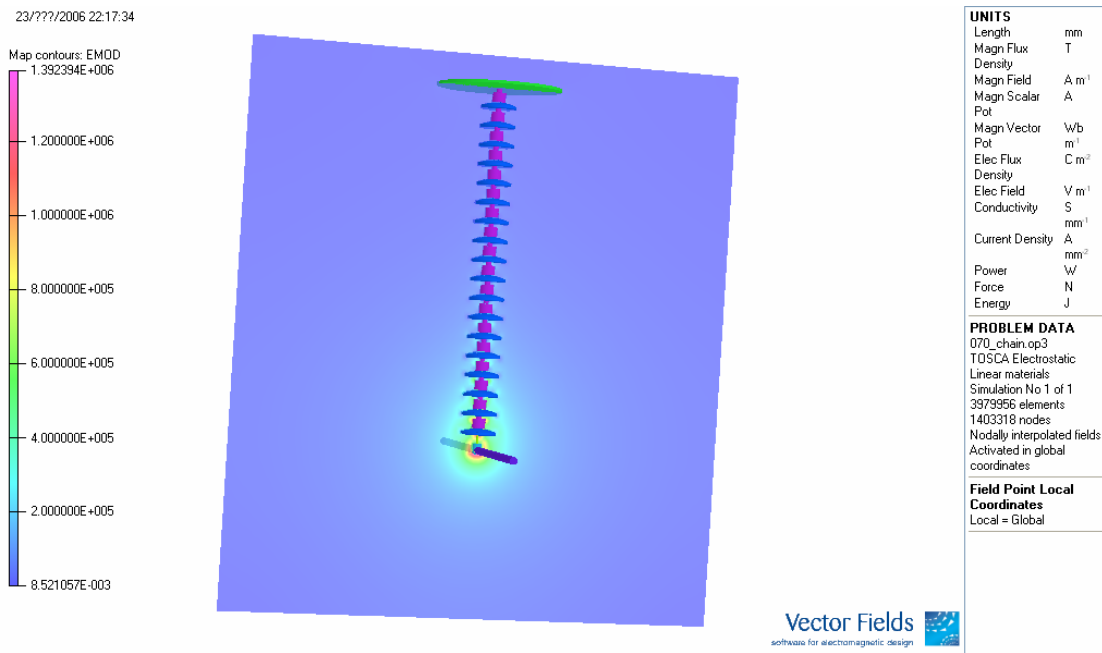
Σχήμα 4.56: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



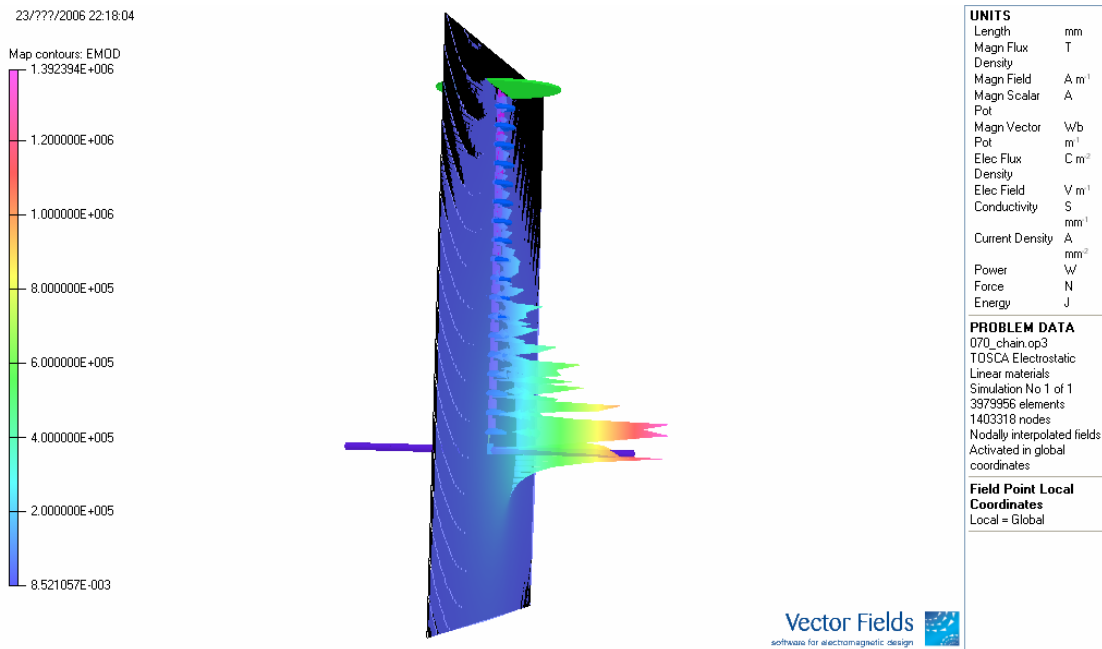
Σχήμα 4.57: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.58: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.



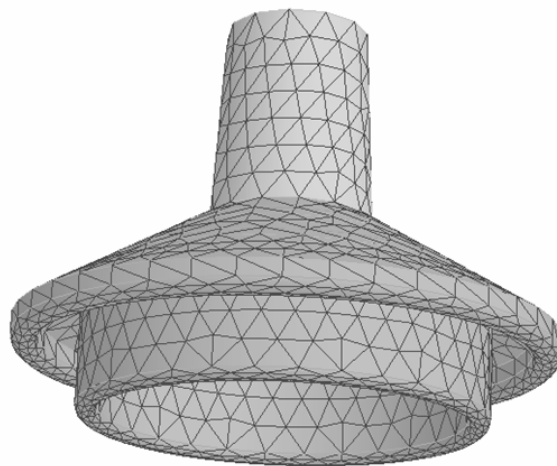
Σχήμα 4.59: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.60: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Κεφάλαιο
5^ο

*Σύγκριση των αποτελεσμάτων
προσομοίωσης με τα πειραμα-
τικά αποτελέσματα*



5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων των εργαστηριακών μετρήσεων που διεξάγονται στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Το πρώτο μέρος του κεφαλαίου αφορά στη σύγκριση της κατανομής τάσης στους αλυσοειδείς μονωτήρες. Το δεύτερο μέρος του κεφαλαίου αφορά στη σύγκριση της κατανομής έντασης σε διάφορα σημεία γύρω από τις αλυσίδες. Η σύγκριση για την κατανομή τάσης θα περιοριστεί στους αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, μιας και για αυτές τις αλυσίδες μονωτήρων υπήρχαν πειραματικές μετρήσεις για την κατανομή τάσης.

5.2 Κατανομή τάσης

5.2.1 Κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150KV [No 069]

Στην παρακάτω φωτογραφία απεικονίζεται το πρώτο προσομοιωθέν δοκίμιο:

- ♦ Δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες γυαλιού για 150 kV, τύπου ομίχλης με διάμετρο 280mm, βήμα 146mm, και μήκος ερπυσμού 430mm.

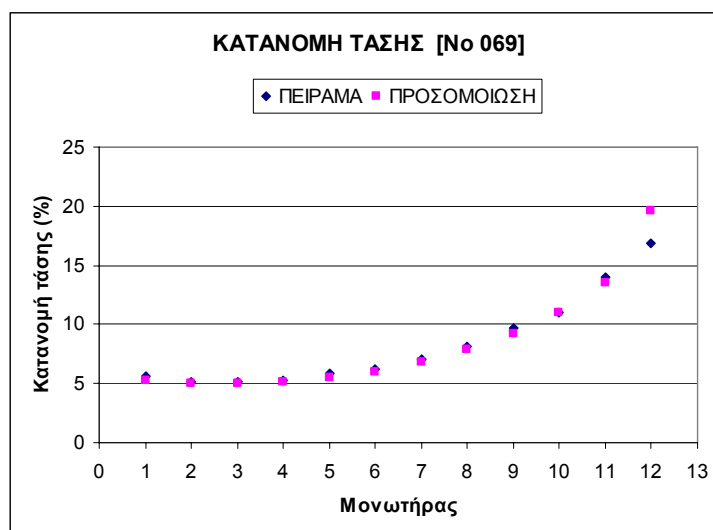


Εικόνα 5.1: Γυάλινος δισκοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης

Στον πίνακα 5.1 φαίνεται η κατανομή της τάσης στους δισκοειδείς μονωτήρες του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο PC-OPERA. Να σημειωθεί ότι ο μονωτήρας 1 είναι ο γειωμένος μονωτήρας και ο μονωτήρας 12 είναι ο μονωτήρας υψηλής τάσης. Στο σχήμα 5.1 αποτυπώνεται γραφικά η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση της κατανομής τάσης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για το γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

Μονωτήρας	Πειραματικά (%)	PC-OPERA (%)	Σφάλμα (%)
1	5,57	5,26	-5,63
2	5,11	5,01	-1,99
3	5,19	4,99	-3,84
4	5,29	4,15	-2,69
5	5,82	5,50	-5,50
6	6,24	6,04	-3,20
7	7,02	6,82	-2,91
8	8,11	7,85	-3,24
9	9,72	9,23	-5,07
10	11,01	11,04	-0,25
11	14,05	13,54	-3,62
12	16,91	19,58	15,80
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			5,81



Σχήμα 5.1: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

Παρατηρούμε ότι η κατανομή τάσης που προκύπτει από την προσομοίωση δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκρινόμενη με την κατανομή τάσης που προκύπτει από το πείραμα. Αυτό αποδεικνύεται από τις χαμηλές τιμές σφάλματος για τον κάθε δισκοειδή μονωτήρα ξεχωριστά, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.1, αλλά και από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για όλη την αλυσίδα που προκύπτει ίσο μόλις με 5,81% .

5.2.2 Κατανομή της τάσης στον γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV [No 161]

Ο δεύτερος γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας που αποτέλεσε δοκίμιο προσομοίωσης απεικονίζεται παρακάτω:

- ♦ Δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες γυαλιού για 150 kV, τύπου ομίχλης με διάμετρο 255mm, βήμα 127mm, και μήκος ερπυσμού 390mm.



Εικόνα 5.2: Γυάλινος δισκοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης

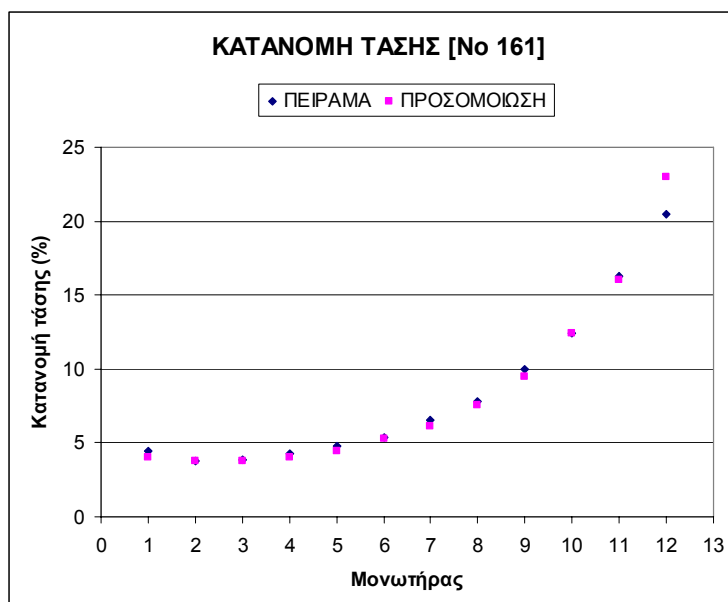
Στον πίνακα 5.2 φαίνεται η κατανομή της τάσης στους δισκοειδείς μονωτήρες του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο PC-OPERA.

Στο σχήμα 5.2 αποτυπώνεται γραφικά η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή τάσης στον γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τάσης που προκύπτει από την προσομοίωση δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα

συγκρινόμενη με την κατανομή τάσης που προκύπτει από το πείραμα. Αυτό αποδεικνύεται από τις χαμηλές τιμές σφάλματος για τον κάθε δισκοειδή μονωτήρα ξεχωριστά, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.2, αλλά και από την μικρή τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για την κατανομή τάσης σε ολόκληρη την αλυσίδα, η οποία υπολογίζεται ίση με 5,91%.

Πίνακας 5.2: Σύγκριση της κατανομής τάσης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για τον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

Μονωτήρας	Πειραματικά (%)	PC-OPERA (%)	Σφάλμα (%)
1	4,47	4,01	-10,40
2	3,76	3,78	0,65
3	3,88	3,79	-2,37
4	4,24	4,02	-5,27
5	4,77	4,49	-5,94
6	5,39	5,25	-2,58
7	6,55	6,15	-6,10
8	7,83	7,57	-3,32
9	9,98	9,50	-4,84
10	12,45	12,38	-0,58
11	16,30	16,05	-1,53
12	20,43	23,02	12,66
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			5,91



Σχήμα 5.2: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στον γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

5.2.3 Κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV

[No 010]

Ο πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας που αποτέλεσε επίσης δοκίμιο προσομοίωσης φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία:

- ♦ Δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες πορσελάνης 150 kV, τύπου κανονικού με διάμετρο 254mm, βήμα 146mm, και μήκος ερπυσμού 290mm.



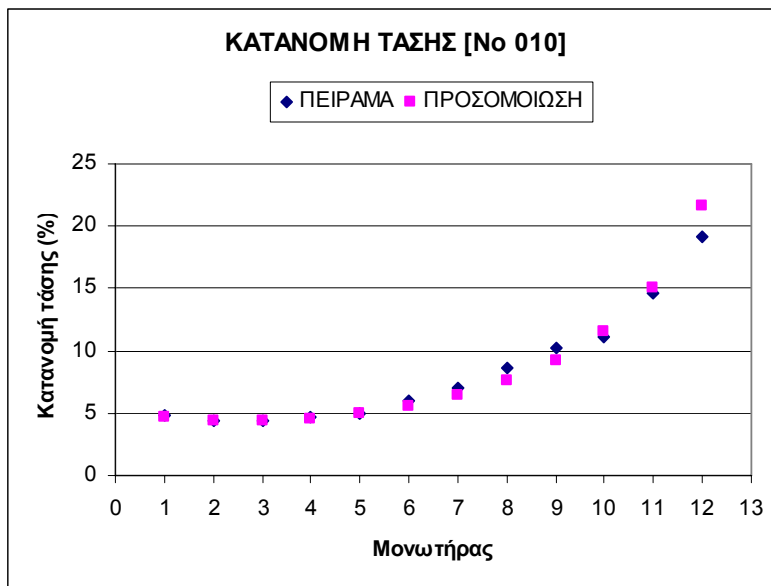
Εικόνα 5.3: Πορσελάνινος δισκοειδής μονωτήρας πορσελάνης, τύπου κανονικού

Στον πίνακα 5.3 φαίνεται η κατανομή της τάσης στους δισκοειδείς μονωτήρες του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο PC-OPERA.

Στο σχήμα 5.3 αποτυπώνεται γραφικά η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά στην κατανομή τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV. Παρατηρούμε ότι η κατανομή τάσης που προκύπτει από την προσομοίωση δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκρινόμενη με την κατανομή τάσης που προκύπτει από το πείραμα. Αυτό αποδεικνύεται τόσο από τις χαμηλές τιμές του σφάλματος για τον κάθε δισκοειδή μονωτήρα ξεχωριστά, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.3, όσο και από την προκύπτουσα τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για ολόκληρη την αλυσίδα η οποία περιορίζεται στο 7,17%.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση της κατανομής τάσης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για τον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

Μονωτήρας	Πειραματικά (%)	PC-ΟΡΕΡΑ (%)	Σφάλμα (%)
1	4,81	4,65	-3,30
2	4,34	4,43	2,12
3	4,43	4,39	-0,87
4	4,66	4,54	-2,52
5	5,03	4,90	-2,51
6	6,04	5,49	-9,03
7	7,01	6,37	-9,19
8	8,56	7,58	-11,43
9	10,22	9,27	-9,30
10	11,14	11,62	4,30
11	14,67	15,06	2,64
12	19,13	21,69	13,39
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			7,17

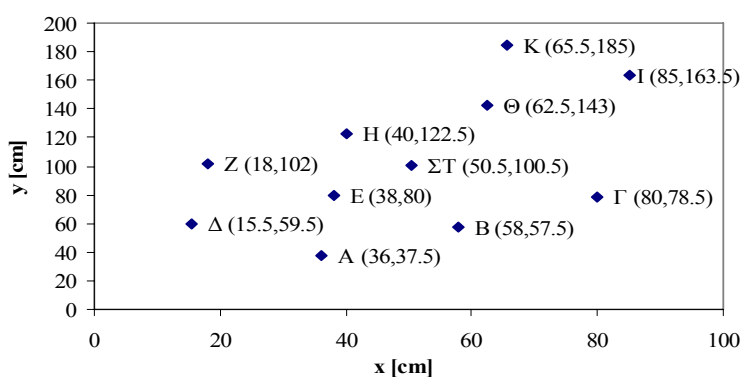


Σχήμα 5.3: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

5.3 Κατανομή της έντασης του πεδίου

Στην παράγραφο αυτή ακολουθείται η λογική, με την οποία ελήφθησαν οι τιμές της έντασης του πεδίου πειραματικά σε διάφορες θέσεις γύρω από τον κάθε αλυσοειδή μονωτήρα. Σημείο έναρξης των μετρήσεων για τις μετρήσεις στο κατακόρυφο επίπεδο θεωρήθηκε για τις αλυσίδες με τους 12 μονωτήρες τα 11 cm πάνω από το ύψος του αγωγού, ενώ για αυτή με τους 18 μονωτήρες σημείο έναρξης των μετρήσεων ήταν τα 3 cm πάνω από το ύψος του αγωγού. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα 11 σημεία του επιπέδου στα οποία έγιναν οι μετρήσεις. Στο δισδιάστατο επίπεδο, ως άξονας x θεωρείται ο άξονας που είναι παράλληλος στον αγωγό υψηλής τάσης, ενώ ως άξονας y θεωρείται ο άξονας κάθετος στον αγωγό. Το σημείο (0,0) είναι το σημείο όπου ο κατακόρυφος άξονας του μονωτήρα τέμνει το οριζόντιο πεδίο.

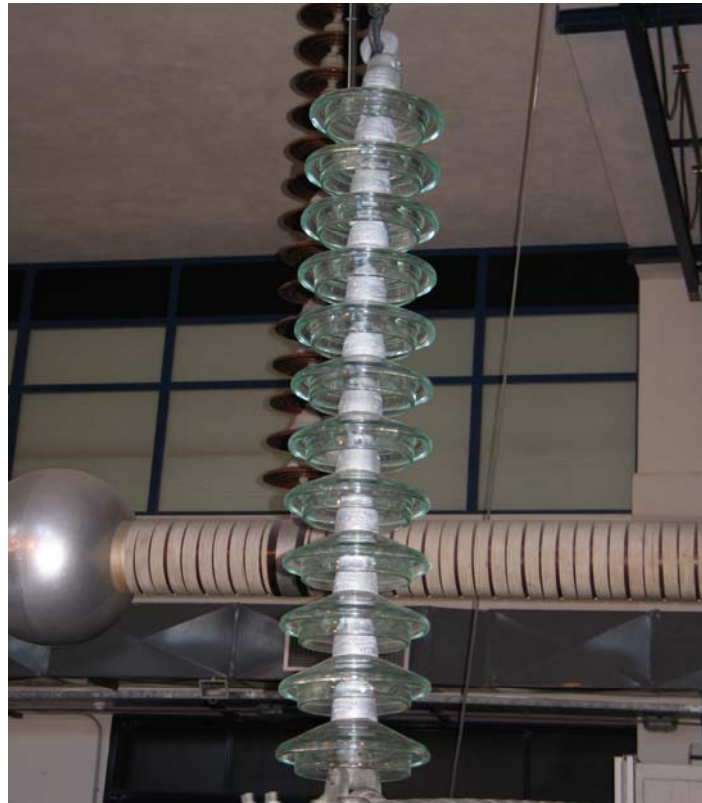
Θέση	X [cm]	Y [cm]
A	36	37,5
B	58	57,5
Γ	80	78,5
Δ	15,5	59,5
E	38	80
ΣΤ	50,5	100,5
Z	18	102
H	40	122,5
Θ	62,5	143
I	85	163,5
K	65,5	185



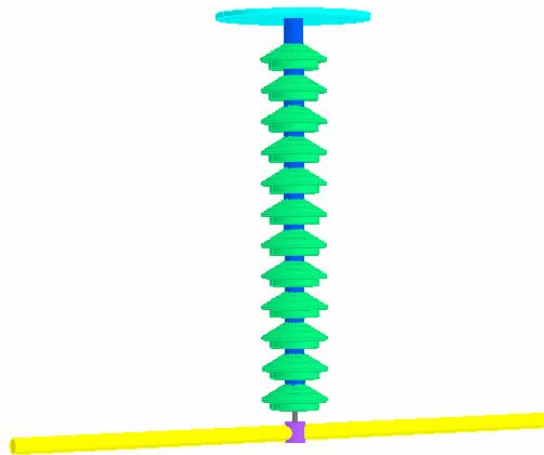
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση σημείων στο δισδιάστατο επίπεδο.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης στις θέσεις αυτές, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση και το πείραμα, καθώς και το επί τοις εκατό σφάλμα των τιμών αυτών. Ύστερα από κάθε πίνακα ακολουθεί και γραφική απεικόνιση της μέσης τιμής της έντασης του πεδίου, όπως προέκυψε από την προσομοίωση και το πείραμα, για κάθε θέση.

5.3.1. Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες. [No 069 ΔΕΗ]



Εικόνα 5.4: Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες

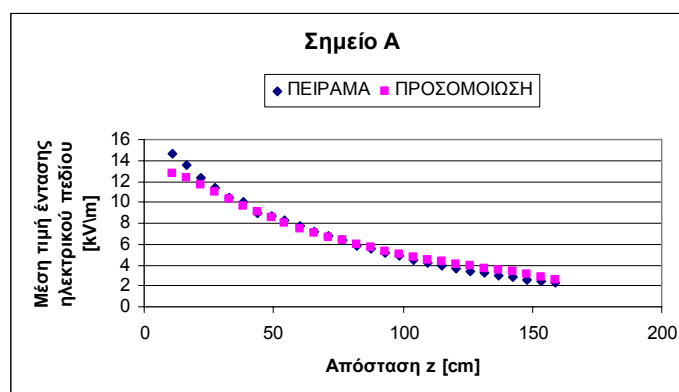


Σχήμα 5.5: Το μοντέλο προσομοίωσης του παραπάνω αλυσοειδούς μονωτήρα

Για το σημείο Α με συνιστώσες ($x=36\text{cm}$, $y=37,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.4: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	14,670	12,741	-13,151
2	16,5	13,530	12,344	-8,763
3	22,0	12,290	11,649	-5,219
4	27,5	11,390	10,950	-3,866
5	33,0	10,450	10,360	-0,865
6	38,5	10,090	9,666	-4,199
7	44,0	8,998	9,079	0,899
8	49,5	8,701	8,497	-2,341
9	54,5	8,284	8,009	-3,317
10	60,0	7,676	7,518	-2,058
11	65,5	7,189	7,113	-1,062
12	71,0	6,825	6,710	-1,683
13	76,5	6,334	6,320	-0,218
14	82,0	5,894	5,989	1,605
15	87,5	5,560	5,630	1,252
16	93,0	5,202	5,264	1,183
17	98,5	4,839	4,982	2,958
18	104,0	4,514	4,722	4,604
19	109,5	4,254	4,495	5,656
20	115,0	3,937	4,276	8,616
21	120,5	3,666	4,040	10,197
22	126,0	3,407	3,869	13,564
23	131,5	3,206	3,669	14,435
24	137,0	2,972	3,483	17,210
25	142,5	2,791	3,335	19,488
26	148,0	2,590	3,145	21,419
27	153,5	2,399	2,820	17,566
28	159,0	2,261	2,572	13,735
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				10,209

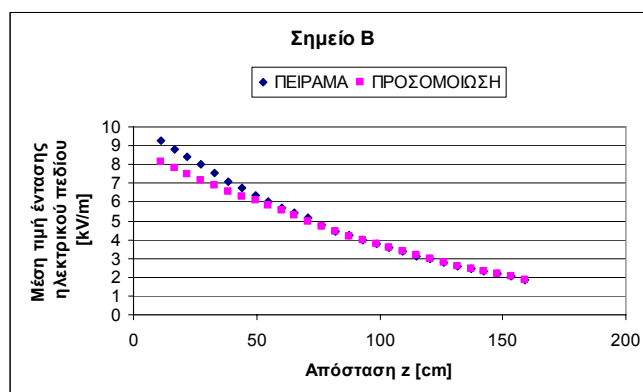


Σχήμα 5.6: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Α

Για το σημείο Β με συνιστώσες ($x=58\text{cm}$, $y=57,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.5: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	9,273	8,151	-12,096
2	16,5	8,839	7,792	-11,840
3	22,0	8,383	7,511	-10,403
4	27,5	7,998	7,183	-10,194
5	33,0	7,518	6,859	-8,772
6	38,5	7,092	6,567	-7,406
7	44,0	6,730	6,274	-6,774
8	49,5	6,334	6,062	-4,293
9	54,5	6,041	5,841	-3,308
10	60,0	5,688	5,550	-2,420
11	65,5	5,443	5,269	-3,193
12	71,0	5,162	4,982	-3,483
13	76,5	4,770	4,703	-1,413
14	82,0	4,467	4,433	-0,765
15	87,5	4,236	4,193	-1,003
16	93,0	3,976	3,981	0,129
17	98,5	3,777	3,781	0,110
18	104,0	3,560	3,581	0,583
19	109,5	3,354	3,370	0,489
20	115,0	3,113	3,166	1,705
21	120,5	2,952	2,967	0,499
22	126,0	2,763	2,764	0,022
23	131,5	2,611	2,606	-0,174
24	137,0	2,433	2,465	1,296
25	142,5	2,310	2,334	1,047
26	148,0	2,171	2,183	0,553
27	153,5	2,028	2,022	-0,309
28	159,0	1,874	1,863	-0,564
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			5,157	

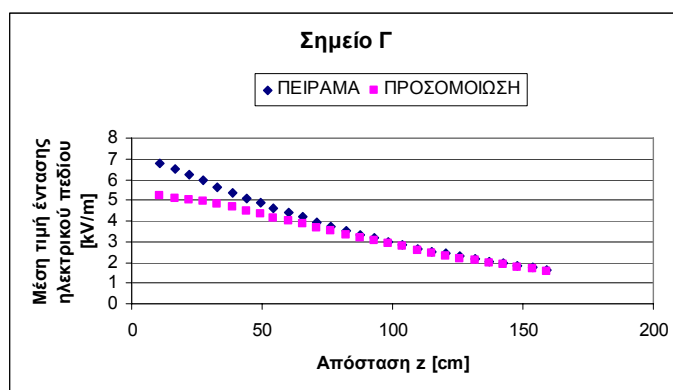


Σχήμα 5.7: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Β

Για το σημείο Γ με συνιστώσες ($x=80\text{cm}$, $y=78,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.6: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	6,796	5,239	-22,916
2	16,5	6,494	5,102	-21,440
3	22,0	6,222	4,989	-19,816
4	27,5	5,953	4,955	-16,772
5	33,0	5,626	4,847	-13,848
6	38,5	5,389	4,665	-13,435
7	44,0	5,098	4,484	-12,048
8	49,5	4,877	4,313	-11,557
9	54,5	4,628	4,168	-9,948
10	60,0	4,373	4,030	-7,838
11	65,5	4,200	3,866	-7,941
12	71,0	3,935	3,686	-6,315
13	76,5	3,757	3,516	-6,427
14	82,0	3,517	3,330	-5,323
15	87,5	3,352	3,183	-5,048
16	93,0	3,193	3,052	-4,418
17	98,5	2,995	2,903	-3,082
18	104,0	2,836	2,756	-2,836
19	109,5	2,671	2,609	-2,304
20	115,0	2,536	2,465	-2,786
21	120,5	2,411	2,323	-3,656
22	126,0	2,295	2,191	-4,510
23	131,5	2,174	2,085	-4,082
24	137,0	2,054	1,983	-3,480
25	142,5	1,951	1,884	-3,412
26	148,0	1,847	1,794	-2,886
27	153,5	1,730	1,693	-2,134
28	159,0	1,651	1,591	-3,646
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				10,033

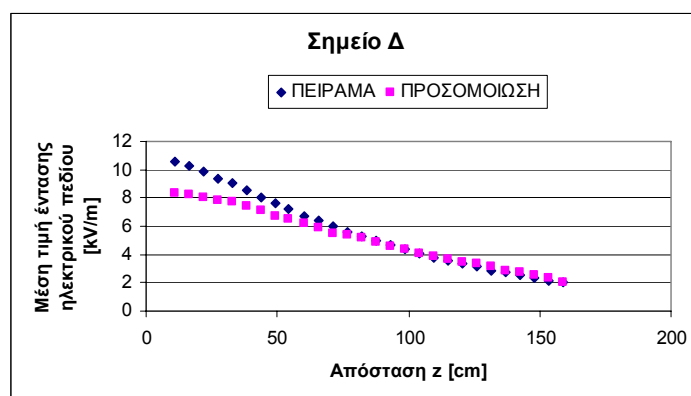


Σχήμα 5.8: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Γ

Για το σημείο Δ με συνιστώσες ($x=15,5\text{cm}$, $y=59,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.7: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	10,580	8,329	-21,280
2	16,5	10,290	8,230	-20,016
3	22,0	9,913	8,068	-18,609
4	27,5	9,389	7,872	-16,154
5	33,0	9,014	7,725	-14,294
6	38,5	8,585	7,406	-13,732
7	44,0	8,050	7,092	-11,900
8	49,5	7,641	6,717	-12,090
9	54,5	7,233	6,512	-9,975
10	60,0	6,731	6,208	-7,767
11	65,5	6,403	5,879	-8,187
12	71,0	5,977	5,532	-7,437
13	76,5	5,637	5,339	-5,286
14	82,0	5,283	5,168	-2,172
15	87,5	5,009	4,897	-2,239
16	93,0	4,667	4,558	-2,339
17	98,5	4,362	4,349	-0,301
18	104,0	4,036	4,096	1,480
19	109,5	3,813	3,855	1,106
20	115,0	3,519	3,676	4,451
21	120,5	3,312	3,503	5,759
22	126,0	3,124	3,310	5,965
23	131,5	2,882	3,102	7,630
24	137,0	2,703	2,890	6,910
25	142,5	2,534	2,724	7,481
26	148,0	2,337	2,549	9,081
27	153,5	2,176	2,320	6,627
28	159,0	2,033	2,079	2,287
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				10,093

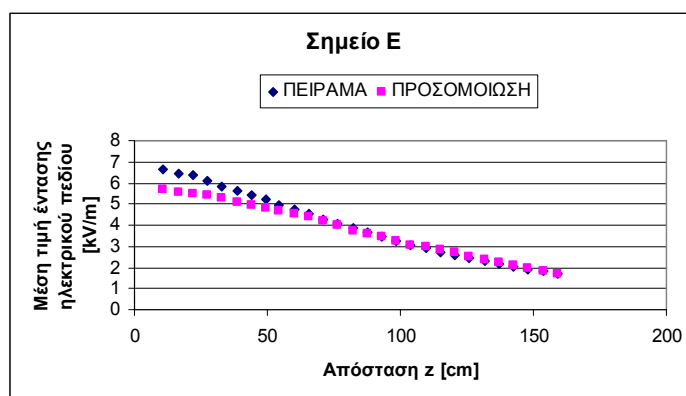


Σχήμα 5.9: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Δ

Για το σημείο E με συνιστώσες ($x=38\text{cm}$, $y=80\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.8: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	6,660	5,690	-14,572
2	16,5	6,455	5,566	-13,779
3	22,0	6,358	5,498	-13,531
4	27,5	6,107	5,415	-11,329
5	33,0	5,821	5,271	-9,443
6	38,5	5,607	5,113	-8,802
7	44,0	5,424	4,979	-8,200
8	49,5	5,194	4,823	-7,149
9	54,5	4,982	4,681	-6,051
10	60,0	4,750	4,535	-4,534
11	65,5	4,534	4,381	-3,383
12	71,0	4,301	4,209	-2,149
13	76,5	4,089	4,011	-1,895
14	82,0	3,834	3,700	-3,502
15	87,5	3,651	3,582	-1,893
16	93,0	3,437	3,443	0,160
17	98,5	3,266	3,250	-0,477
18	104,0	3,080	3,071	-0,296
19	109,5	2,898	2,956	2,002
20	115,0	2,717	2,815	3,624
21	120,5	2,567	2,678	4,327
22	126,0	2,407	2,520	4,684
23	131,5	2,329	2,341	0,507
24	137,0	2,142	2,229	4,082
25	142,5	2,021	2,094	3,630
26	148,0	1,926	1,948	1,155
27	153,5	1,812	1,827	0,844
28	159,0	1,690	1,700	0,575
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			6,497	

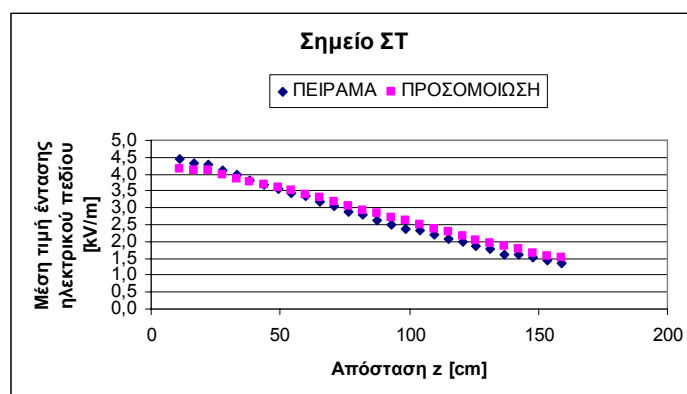


Σχήμα 5.10: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο E

Για το σημείο ΣΤ με συνιστώσες ($x=50,5\text{cm}$, $y=100,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.9: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	4,443	4,139	-6,851
2	16,5	4,327	4,125	-4,670
3	22,0	4,281	4,115	-3,872
4	27,5	4,118	4,003	-2,792
5	33,0	4,004	3,854	-3,752
6	38,5	3,832	3,777	-1,439
7	44,0	3,706	3,703	-0,089
8	49,5	3,569	3,610	1,160
9	54,5	3,447	3,516	1,996
10	60,0	3,330	3,405	2,264
11	65,5	3,178	3,314	4,294
12	71,0	3,066	3,187	3,948
13	76,5	2,888	3,064	6,094
14	82,0	2,778	2,940	5,831
15	87,5	2,645	2,840	7,355
16	93,0	2,500	2,730	9,183
17	98,5	2,387	2,615	9,569
18	104,0	2,312	2,501	8,171
19	109,5	2,208	2,391	8,275
20	115,0	2,092	2,284	9,180
21	120,5	1,992	2,171	8,969
22	126,0	1,860	2,052	10,310
23	131,5	1,766	1,953	10,583
24	137,0	1,601	1,871	16,871
25	142,5	1,610	1,771	9,987
26	148,0	1,508	1,672	10,867
27	153,5	1,435	1,577	9,864
28	159,0	1,347	1,508	11,935
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			7,823	

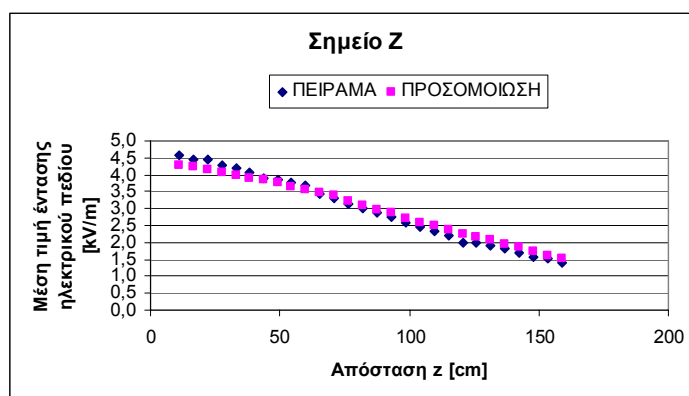


Σχήμα 5.11: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο ΣΤ

Για το σημείο Z με συνιστώσες ($x=18\text{cm}$, $y=102\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.10: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	4,576	4,273	-6,613
2	16,5	4,460	4,223	-5,321
3	22,0	4,428	4,145	-6,387
4	27,5	4,275	4,079	-4,583
5	33,0	4,208	3,986	-5,281
6	38,5	4,088	3,911	-4,328
7	44,0	3,911	3,856	-1,399
8	49,5	3,835	3,782	-1,370
9	54,5	3,763	3,653	-2,924
10	60,0	3,673	3,572	-2,748
11	65,5	3,437	3,484	1,372
12	71,0	3,290	3,394	3,153
13	76,5	3,144	3,234	2,861
14	82,0	3,021	3,089	2,238
15	87,5	2,886	2,976	3,113
16	93,0	2,748	2,868	4,353
17	98,5	2,589	2,725	5,245
18	104,0	2,445	2,588	5,862
19	109,5	2,337	2,481	6,157
20	115,0	2,214	2,359	6,563
21	120,5	2,005	2,258	12,643
22	126,0	1,989	2,160	8,608
23	131,5	1,925	2,065	7,261
24	137,0	1,826	1,968	7,794
25	142,5	1,708	1,844	7,975
26	148,0	1,567	1,727	10,182
27	153,5	1,525	1,626	6,627
28	159,0	1,395	1,528	9,499
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			6,111	

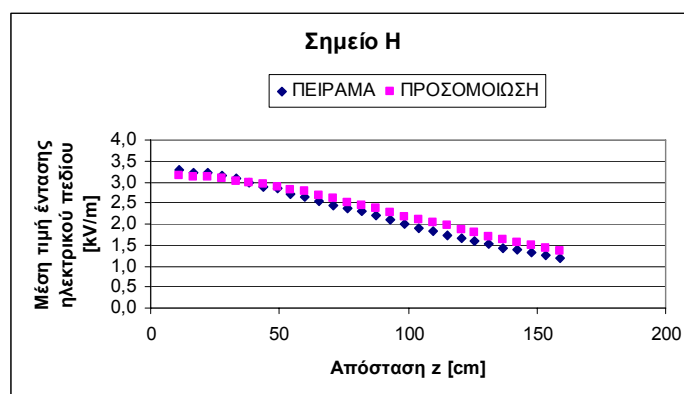


Σχήμα 5.12: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Z

Για το σημείο H με συνιστώσες ($x=40\text{cm}$, $y=122,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.11: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	3,284	3,163	-3,677
2	16,5	3,237	3,133	-3,211
3	22,0	3,220	3,108	-3,487
4	27,5	3,155	3,079	-2,413
5	33,0	3,078	3,029	-1,577
6	38,5	2,998	2,972	-0,871
7	44,0	2,894	2,936	1,454
8	49,5	2,839	2,889	1,777
9	54,5	2,727	2,827	3,676
10	60,0	2,632	2,764	4,996
11	65,5	2,544	2,690	5,724
12	71,0	2,442	2,603	6,602
13	76,5	2,377	2,521	6,059
14	82,0	2,300	2,448	6,451
15	87,5	2,205	2,373	7,614
16	93,0	2,092	2,282	9,059
17	98,5	1,994	2,186	9,645
18	104,0	1,889	2,109	11,649
19	109,5	1,830	2,037	11,286
20	115,0	1,745	1,964	12,570
21	120,5	1,667	1,878	12,654
22	126,0	1,582	1,781	12,565
23	131,5	1,519	1,705	12,220
24	137,0	1,424	1,637	14,982
25	142,5	1,373	1,572	14,459
26	148,0	1,316	1,491	13,272
27	153,5	1,244	1,421	14,204
28	159,0	1,178	1,350	14,639
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				9,240

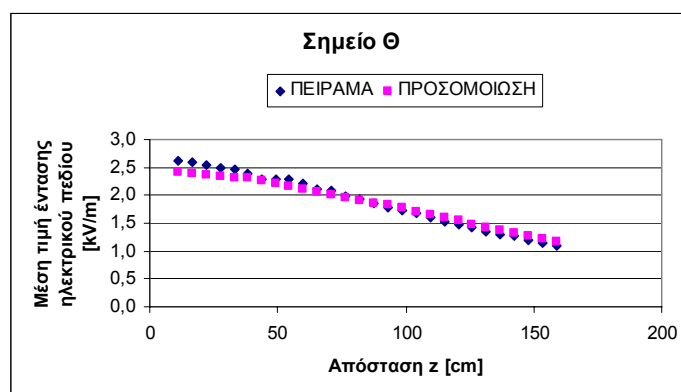


Σχήμα 5.13: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο H

Για το σημείο Θ με συνιστώσες ($x=62,5\text{cm}$, $y=143\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.12: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	2,629	2,408	-8,414
2	16,5	2,598	2,389	-8,048
3	22,0	2,536	2,361	-6,900
4	27,5	2,495	2,342	-6,146
5	33,0	2,473	2,326	-5,955
6	38,5	2,394	2,301	-3,881
7	44,0	2,300	2,255	-1,942
8	49,5	2,296	2,209	-3,800
9	54,5	2,282	2,165	-5,107
10	60,0	2,203	2,116	-3,933
11	65,5	2,121	2,059	-2,929
12	71,0	2,078	2,005	-3,511
13	76,5	1,988	1,965	-1,136
14	82,0	1,924	1,914	-0,500
15	87,5	1,852	1,865	0,702
16	93,0	1,777	1,824	2,642
17	98,5	1,732	1,771	2,224
18	104,0	1,672	1,712	2,382
19	109,5	1,589	1,647	3,645
20	115,0	1,535	1,591	3,627
21	120,5	1,465	1,541	5,189
22	126,0	1,416	1,484	4,832
23	131,5	1,347	1,426	5,834
24	137,0	1,301	1,367	5,103
25	142,5	1,263	1,322	4,653
26	148,0	1,189	1,278	7,456
27	153,5	1,143	1,227	7,340
28	159,0	1,095	1,175	7,352
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				4,978

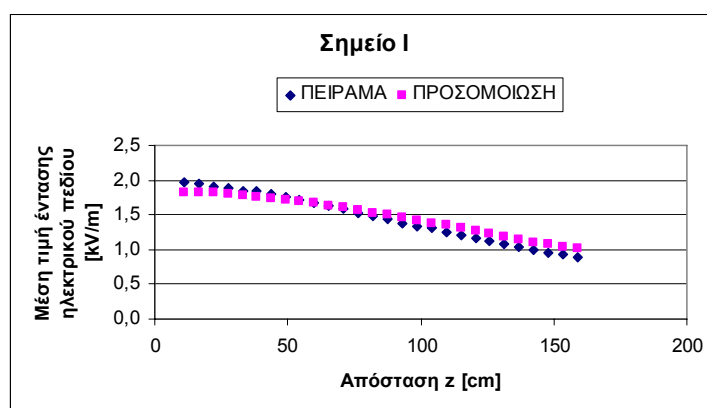


Σχήμα 5.14: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Θ

Για το σημείο I με συνιστώσες ($x=85\text{cm}$, $y=163,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.13: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	1,964	1,826	-7,028
2	16,5	1,943	1,819	-6,361
3	22,0	1,909	1,812	-5,106
4	27,5	1,880	1,799	-4,295
5	33,0	1,852	1,771	-4,358
6	38,5	1,847	1,754	-5,028
7	44,0	1,801	1,734	-3,702
8	49,5	1,756	1,714	-2,395
9	54,5	1,721	1,692	-1,675
10	60,0	1,668	1,667	-0,043
11	65,5	1,626	1,634	0,473
12	71,0	1,585	1,600	0,937
13	76,5	1,534	1,568	2,185
14	82,0	1,488	1,534	3,123
15	87,5	1,433	1,497	4,483
16	93,0	1,375	1,461	6,252
17	98,5	1,335	1,422	6,494
18	104,0	1,304	1,383	6,079
19	109,5	1,251	1,348	7,722
20	115,0	1,214	1,304	7,435
21	120,5	1,163	1,262	8,475
22	126,0	1,118	1,227	9,727
23	131,5	1,078	1,185	9,927
24	137,0	1,041	1,143	9,796
25	142,5	1,004	1,103	9,910
26	148,0	0,960	1,071	11,605
27	153,5	0,928	1,043	12,418
28	159,0	0,895	1,014	13,324
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				7,059

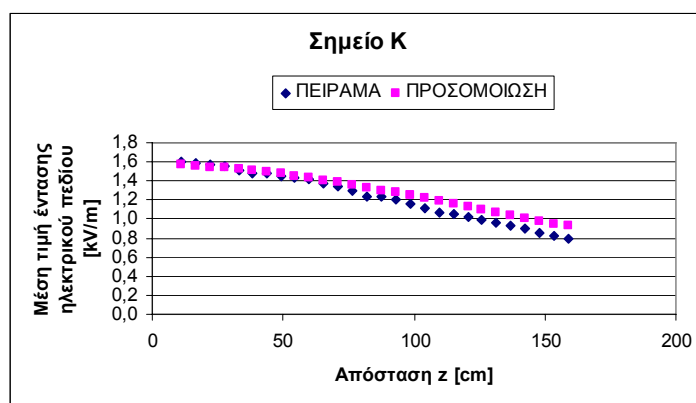


Σχήμα 5.15: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο I

Για το σημείο K με συνιστώσες ($x=65,5\text{cm}$, $y=185\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.14: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	1,602	1,567	-2,213
2	16,5	1,579	1,557	-1,407
3	22,0	1,568	1,546	-1,416
4	27,5	1,551	1,536	-0,969
5	33,0	1,510	1,522	0,779
6	38,5	1,487	1,509	1,513
7	44,0	1,481	1,489	0,544
8	49,5	1,443	1,476	2,308
9	54,5	1,430	1,454	1,684
10	60,0	1,412	1,431	1,367
11	65,5	1,370	1,411	2,976
12	71,0	1,340	1,394	4,055
13	76,5	1,303	1,364	4,684
14	82,0	1,236	1,333	7,854
15	87,5	1,235	1,301	5,344
16	93,0	1,208	1,278	5,764
17	98,5	1,165	1,254	7,681
18	104,0	1,115	1,224	9,790
19	109,5	1,071	1,193	11,360
20	115,0	1,056	1,161	9,974
21	120,5	1,019	1,131	10,956
22	126,0	0,992	1,102	11,050
23	131,5	0,954	1,075	12,713
24	137,0	0,925	1,043	12,751
25	142,5	0,895	1,011	12,949
26	148,0	0,861	0,978	13,586
27	153,5	0,830	0,949	14,327
28	159,0	0,798	0,924	15,823
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			8,348	

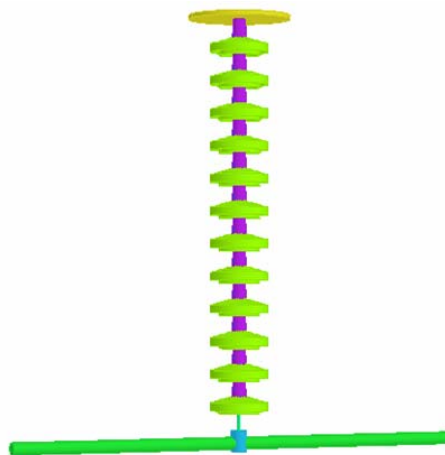


Σχήμα 5.16: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο K

5.3.2 Καθαρός γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες. [No 161 ΔΕΗ]



Εικόνα 5.5: Καθαρός γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες



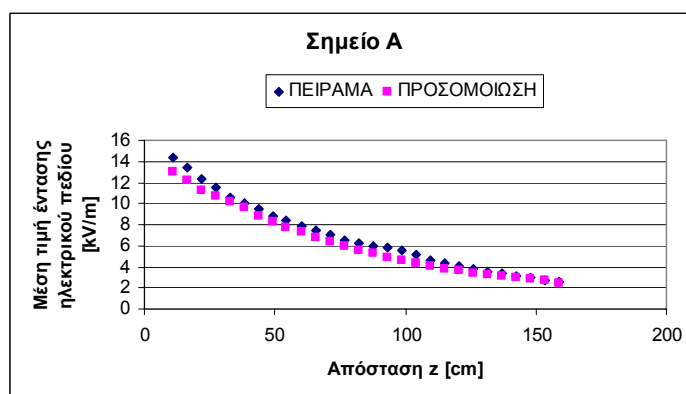
Vector Fields
software for electromagnetic design

Σχήμα 5.17: Το μοντέλο προσομοίωσης του παραπάνω αλυσοειδούς μονωτήρα

Για το σημείο Α με συνιστώσες ($x=36\text{cm}$, $y=37,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.15: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	14,330	12,968	-9,505
2	16,5	13,420	12,181	-9,233
3	22,0	12,300	11,300	-8,127
4	27,5	11,470	10,755	-6,231
5	33,0	10,630	10,131	-4,691
6	38,5	10,060	9,580	-4,774
7	44,0	9,424	8,877	-5,800
8	49,5	8,782	8,237	-6,203
9	54,5	8,443	7,734	-8,396
10	60,0	7,912	7,263	-8,207
11	65,5	7,415	6,781	-8,557
12	71,0	7,011	6,363	-9,245
13	76,5	6,530	5,929	-9,206
14	82,0	6,225	5,593	-10,149
15	87,5	5,906	5,289	-10,455
16	93,0	5,806	4,921	-15,245
17	98,5	5,526	4,653	-15,798
18	104,0	5,189	4,370	-15,777
19	109,5	4,561	4,121	-9,654
20	115,0	4,337	3,861	-10,985
21	120,5	4,044	3,646	-9,841
22	126,0	3,825	3,443	-10,000
23	131,5	3,590	3,263	-9,121
24	137,0	3,349	3,072	-8,273
25	142,5	3,161	2,928	-7,369
26	148,0	2,965	2,786	-6,048
27	153,5	2,778	2,665	-4,071
28	159,0	2,629	2,499	-4,931
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				9,289

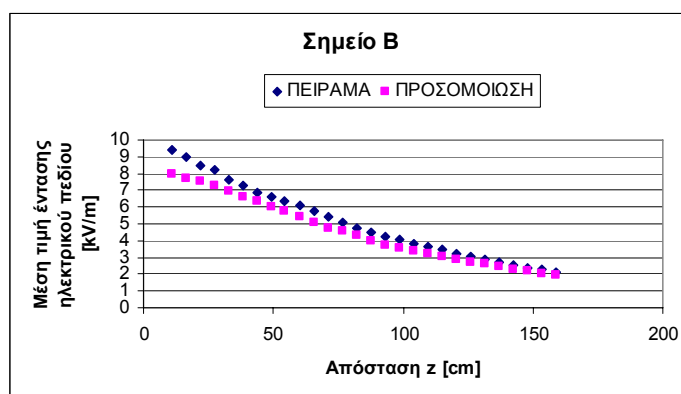


Σχήμα 5.18: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Α

Για το σημείο Β με συνιστώσες ($x=58\text{cm}$, $y=57,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.16: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	9,389	7,977	-15,041
2	16,5	8,995	7,705	-14,339
3	22,0	8,503	7,511	-11,670
4	27,5	8,186	7,277	-11,104
5	33,0	7,652	6,958	-9,065
6	38,5	7,273	6,624	-8,918
7	44,0	6,906	6,338	-8,230
8	49,5	6,623	5,979	-9,716
9	54,5	6,368	5,722	-10,146
10	60,0	6,093	5,424	-10,981
11	65,5	5,740	5,049	-12,033
12	71,0	5,400	4,729	-12,426
13	76,5	5,084	4,541	-10,675
14	82,0	4,787	4,287	-10,437
15	87,5	4,475	4,017	-10,230
16	93,0	4,254	3,755	-11,725
17	98,5	4,035	3,574	-11,422
18	104,0	3,834	3,403	-11,234
19	109,5	3,607	3,224	-10,605
20	115,0	3,439	3,063	-10,922
21	120,5	3,217	2,908	-9,614
22	126,0	3,049	2,745	-9,984
23	131,5	2,877	2,592	-9,915
24	137,0	2,701	2,468	-8,612
25	142,5	2,555	2,308	-9,675
26	148,0	2,411	2,183	-9,449
27	153,5	2,282	2,075	-9,059
28	159,0	2,133	1,961	-8,078
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			10,667	

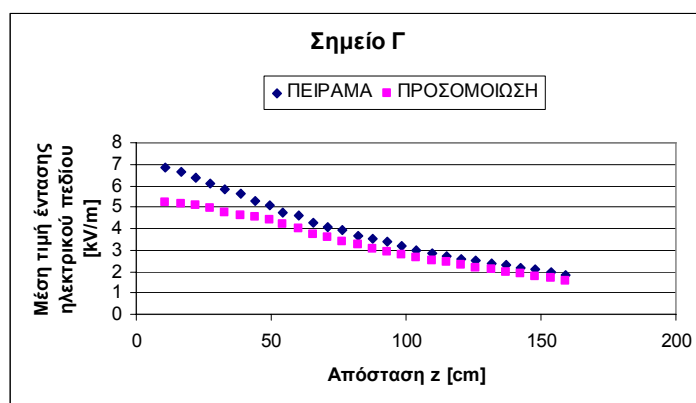


Σχήμα 5.19: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Β

Για το σημείο Γ με συνιστώσες ($x=80\text{cm}$, $y=78,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.17: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	6,824	5,237	-23,262
2	16,5	6,657	5,159	-22,497
3	22,0	6,402	5,087	-20,543
4	27,5	6,118	4,967	-18,814
5	33,0	5,847	4,714	-19,377
6	38,5	5,603	4,587	-18,125
7	44,0	5,300	4,560	-13,960
8	49,5	5,051	4,397	-12,947
9	54,5	4,769	4,219	-11,525
10	60,0	4,590	3,981	-13,274
11	65,5	4,296	3,746	-12,809
12	71,0	4,088	3,573	-12,586
13	76,5	3,920	3,403	-13,178
14	82,0	3,694	3,232	-12,496
15	87,5	3,510	3,065	-12,684
16	93,0	3,378	2,903	-14,059
17	98,5	3,206	2,775	-13,441
18	104,0	3,014	2,665	-11,588
19	109,5	2,870	2,535	-11,666
20	115,0	2,740	2,408	-12,102
21	120,5	2,602	2,288	-12,081
22	126,0	2,499	2,188	-12,443
23	131,5	2,375	2,078	-12,508
24	137,0	2,282	1,969	-13,696
25	142,5	2,166	1,867	-13,818
26	148,0	2,074	1,764	-14,946
27	153,5	1,954	1,666	-14,723
28	159,0	1,848	1,576	-14,719
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			14,999	

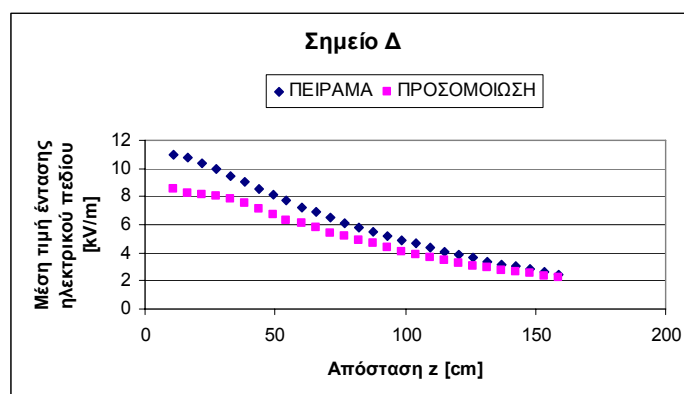


Σχήμα 5.20: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Γ

Για το σημείο Δ με συνιστώσες ($x=15,5\text{cm}$, $y=59,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.18: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	11,010	8,559	-22,262
2	16,5	10,750	8,282	-22,955
3	22,0	10,380	8,118	-21,791
4	27,5	10,000	7,997	-20,028
5	33,0	9,499	7,857	-17,286
6	38,5	9,040	7,566	-16,307
7	44,0	8,566	7,149	-16,548
8	49,5	8,106	6,725	-17,037
9	54,5	7,733	6,305	-18,472
10	60,0	7,241	6,084	-15,979
11	65,5	6,943	5,775	-16,826
12	71,0	6,543	5,439	-16,867
13	76,5	6,129	5,156	-15,871
14	82,0	5,789	4,904	-15,286
15	87,5	5,464	4,634	-15,182
16	93,0	5,179	4,344	-16,128
17	98,5	4,909	4,091	-16,666
18	104,0	4,633	3,908	-15,656
19	109,5	4,328	3,688	-14,795
20	115,0	4,109	3,498	-14,879
21	120,5	3,838	3,296	-14,112
22	126,0	3,613	3,093	-14,397
23	131,5	3,380	2,918	-13,665
24	137,0	3,170	2,747	-13,354
25	142,5	3,003	2,621	-12,714
26	148,0	2,811	2,503	-10,947
27	153,5	2,653	2,376	-10,448
28	159,0	2,481	2,265	-8,696
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			16,222	

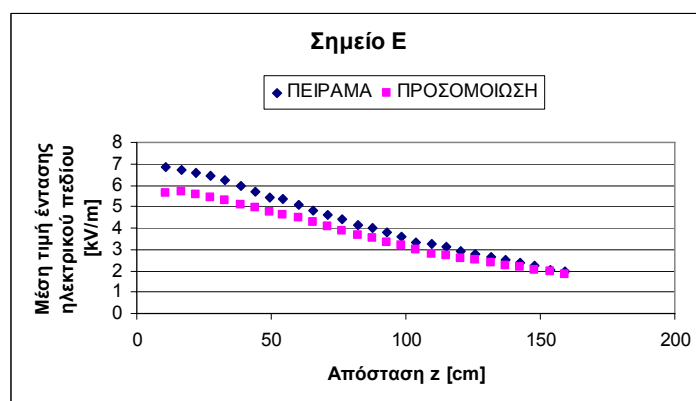


Σχήμα 5.21: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Δ

Για το σημείο E με συνιστώσες ($x=38\text{cm}$, $y=80\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.19: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	6,832	5,648	-17,327
2	16,5	6,736	5,677	-15,726
3	22,0	6,545	5,569	-14,916
4	27,5	6,466	5,438	-15,906
5	33,0	6,204	5,260	-15,215
6	38,5	5,934	5,118	-13,757
7	44,0	5,726	4,973	-13,144
8	49,5	5,457	4,779	-12,433
9	54,5	5,370	4,626	-13,862
10	60,0	5,087	4,448	-12,567
11	65,5	4,835	4,274	-11,605
12	71,0	4,614	4,046	-12,305
13	76,5	4,379	3,849	-12,098
14	82,0	4,160	3,663	-11,943
15	87,5	4,001	3,501	-12,491
16	93,0	3,802	3,347	-11,957
17	98,5	3,598	3,182	-11,566
18	104,0	3,292	2,983	-9,395
19	109,5	3,256	2,787	-14,411
20	115,0	3,111	2,686	-13,660
21	120,5	2,945	2,581	-12,346
22	126,0	2,768	2,477	-10,529
23	131,5	2,623	2,368	-9,720
24	137,0	2,490	2,262	-9,158
25	142,5	2,349	2,160	-8,066
26	148,0	2,206	2,050	-7,049
27	153,5	2,067	1,933	-6,489
28	159,0	1,940	1,819	-6,228
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				12,318

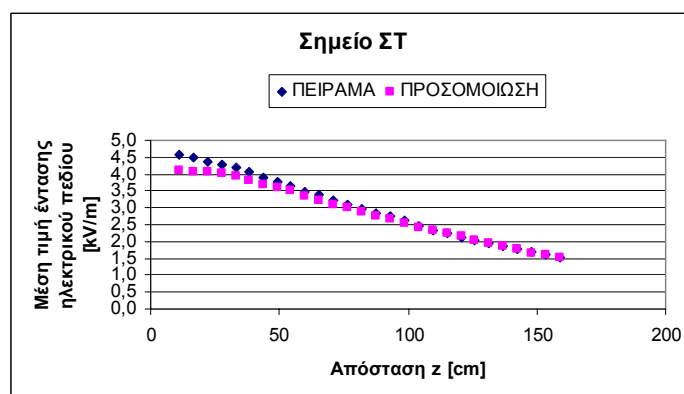


Σχήμα 5.22: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο E

Για το σημείο ΣΤ με συνιστώσες ($x=50,5\text{cm}$, $y=100,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.20: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	4,583	4,127	-9,957
2	16,5	4,488	4,070	-9,318
3	22,0	4,359	4,048	-7,139
4	27,5	4,290	4,009	-6,541
5	33,0	4,193	3,937	-6,110
6	38,5	4,079	3,820	-6,357
7	44,0	3,909	3,685	-5,720
8	49,5	3,788	3,590	-5,240
9	54,5	3,642	3,512	-3,578
10	60,0	3,482	3,366	-3,345
11	65,5	3,390	3,223	-4,929
12	71,0	3,219	3,112	-3,317
13	76,5	3,084	3,001	-2,685
14	82,0	2,967	2,880	-2,920
15	87,5	2,837	2,772	-2,298
16	93,0	2,743	2,670	-2,678
17	98,5	2,614	2,550	-2,454
18	104,0	2,458	2,435	-0,956
19	109,5	2,340	2,342	0,091
20	115,0	2,235	2,254	0,858
21	120,5	2,120	2,146	1,215
22	126,0	2,045	2,033	-0,596
23	131,5	1,939	1,937	-0,085
24	137,0	1,845	1,848	0,161
25	142,5	1,762	1,760	-0,138
26	148,0	1,700	1,672	-1,627
27	153,5	1,612	1,595	-1,085
28	159,0	1,510	1,517	0,466
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				4,304

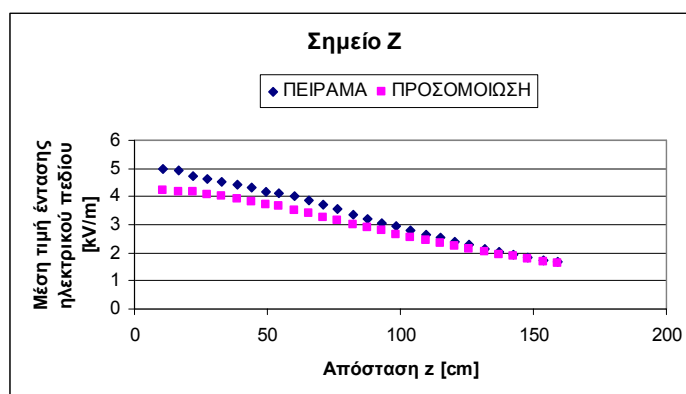


Σχήμα 5.23: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο ΣΤ

Για το σημείο Z με συνιστώσες ($x=18\text{cm}$, $y=102\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.21: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	4,993	4,239	-15,098
2	16,5	4,913	4,174	-15,043
3	22,0	4,736	4,145	-12,482
4	27,5	4,652	4,088	-12,127
5	33,0	4,536	4,010	-11,594
6	38,5	4,448	3,909	-12,114
7	44,0	4,328	3,838	-11,317
8	49,5	4,172	3,735	-10,470
9	54,5	4,112	3,649	-11,251
10	60,0	4,012	3,525	-12,140
11	65,5	3,855	3,398	-11,865
12	71,0	3,688	3,255	-11,729
13	76,5	3,538	3,142	-11,200
14	82,0	3,361	3,012	-10,379
15	87,5	3,210	2,899	-9,690
16	93,0	3,069	2,791	-9,047
17	98,5	2,956	2,660	-10,030
18	104,0	2,801	2,536	-9,454
19	109,5	2,654	2,436	-8,205
20	115,0	2,531	2,338	-7,621
21	120,5	2,375	2,243	-5,565
22	126,0	2,275	2,141	-5,892
23	131,5	2,150	2,040	-5,113
24	137,0	2,048	1,944	-5,102
25	142,5	1,930	1,869	-3,147
26	148,0	1,841	1,786	-3,004
27	153,5	1,732	1,701	-1,778
28	159,0	1,660	1,618	-2,536
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				9,818

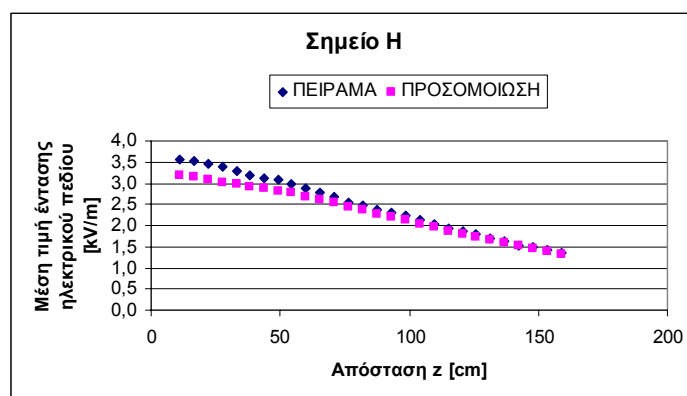


Σχήμα 5.24: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Z

Για το σημείο H με συνιστώσες ($x=40\text{cm}$, $y=122,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.22: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	3,563	3,181	-10,730
2	16,5	3,513	3,139	-10,636
3	22,0	3,465	3,077	-11,183
4	27,5	3,382	3,020	-10,705
5	33,0	3,290	2,971	-9,691
6	38,5	3,187	2,928	-8,130
7	44,0	3,127	2,883	-7,805
8	49,5	3,068	2,823	-7,998
9	54,5	2,986	2,770	-7,237
10	60,0	2,879	2,694	-6,435
11	65,5	2,766	2,608	-5,698
12	71,0	2,674	2,528	-5,476
13	76,5	2,544	2,451	-3,659
14	82,0	2,472	2,371	-4,082
15	87,5	2,387	2,280	-4,466
16	93,0	2,309	2,220	-3,858
17	98,5	2,225	2,135	-4,061
18	104,0	2,140	2,047	-4,328
19	109,5	2,030	1,955	-3,677
20	115,0	1,941	1,867	-3,826
21	120,5	1,874	1,797	-4,129
22	126,0	1,789	1,731	-3,238
23	131,5	1,711	1,673	-2,220
24	137,0	1,616	1,607	-0,534
25	142,5	1,540	1,533	-0,462
26	148,0	1,487	1,461	-1,739
27	153,5	1,422	1,398	-1,709
28	159,0	1,357	1,338	-1,400
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				6,205

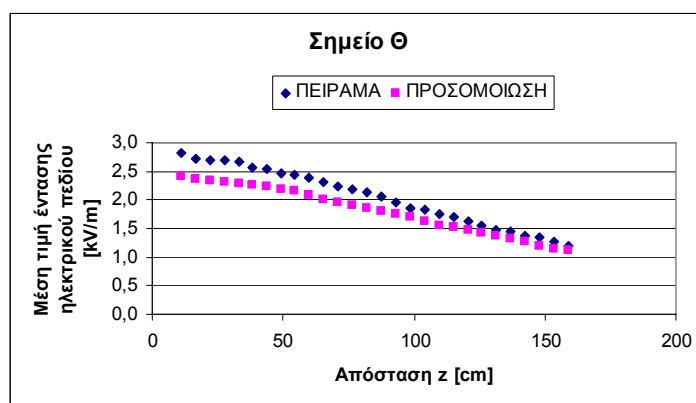


Σχήμα 5.25: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο H

Για το σημείο Θ με συνιστώσες ($x=62,5\text{cm}$, $y=143\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.23: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	2,819	2,421	-14,110
2	16,5	2,724	2,374	-12,837
3	22,0	2,694	2,338	-13,225
4	27,5	2,697	2,318	-14,054
5	33,0	2,659	2,300	-13,513
6	38,5	2,558	2,262	-11,557
7	44,0	2,536	2,227	-12,168
8	49,5	2,465	2,195	-10,961
9	54,5	2,437	2,151	-11,721
10	60,0	2,381	2,082	-12,553
11	65,5	2,312	2,015	-12,854
12	71,0	2,238	1,952	-12,801
13	76,5	2,186	1,907	-12,769
14	82,0	2,132	1,863	-12,601
15	87,5	2,049	1,810	-11,675
16	93,0	1,954	1,762	-9,810
17	98,5	1,863	1,695	-9,024
18	104,0	1,842	1,627	-11,681
19	109,5	1,749	1,560	-10,784
20	115,0	1,698	1,519	-10,526
21	120,5	1,628	1,479	-9,154
22	126,0	1,545	1,422	-7,978
23	131,5	1,485	1,366	-8,045
24	137,0	1,441	1,312	-8,935
25	142,5	1,374	1,259	-8,337
26	148,0	1,335	1,205	-9,708
27	153,5	1,262	1,156	-8,390
28	159,0	1,203	1,116	-7,237
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				11,216

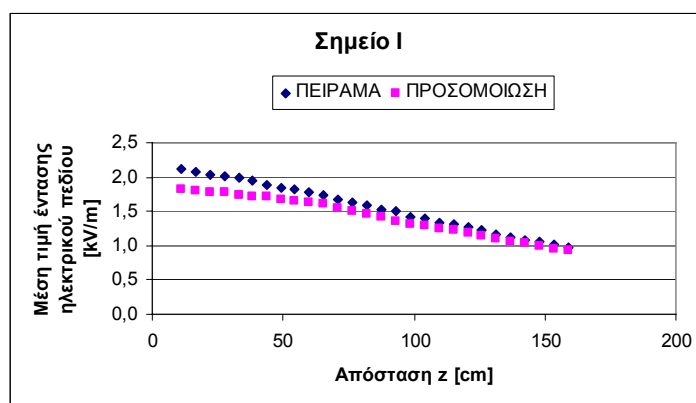


Σχήμα 5.26: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Θ

Για το σημείο I με συνιστώσες ($x=85\text{cm}$, $y=163,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.24: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	2,116	1,813	-14,318
2	16,5	2,077	1,797	-13,475
3	22,0	2,041	1,783	-12,623
4	27,5	2,021	1,771	-12,354
5	33,0	1,988	1,742	-12,376
6	38,5	1,950	1,725	-11,528
7	44,0	1,877	1,709	-8,936
8	49,5	1,847	1,679	-9,081
9	54,5	1,814	1,651	-8,981
10	60,0	1,771	1,632	-7,858
11	65,5	1,728	1,602	-7,312
12	71,0	1,676	1,556	-7,156
13	76,5	1,629	1,510	-7,301
14	82,0	1,580	1,464	-7,329
15	87,5	1,527	1,412	-7,518
16	93,0	1,503	1,356	-9,794
17	98,5	1,428	1,320	-7,590
18	104,0	1,388	1,293	-6,833
19	109,5	1,332	1,259	-5,463
20	115,0	1,304	1,224	-6,140
21	120,5	1,265	1,186	-6,266
22	126,0	1,225	1,144	-6,633
23	131,5	1,165	1,102	-5,394
24	137,0	1,129	1,063	-5,866
25	142,5	1,087	1,028	-5,391
26	148,0	1,056	0,995	-5,811
27	153,5	1,018	0,962	-5,542
28	159,0	0,967	0,929	-3,919
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				8,621

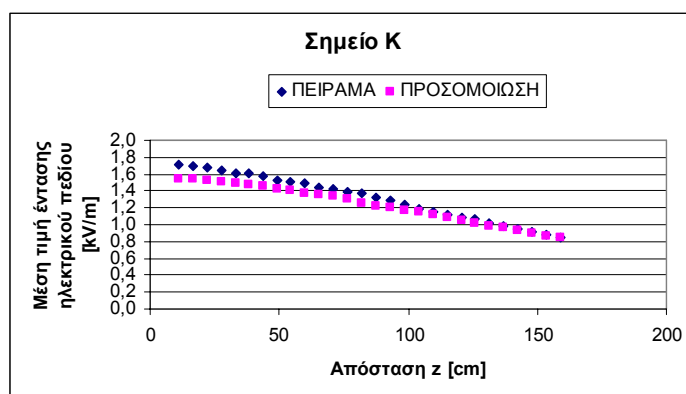


Σχήμα 5.27: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο I

Για το σημείο K με συνιστώσες ($x=65,5\text{cm}$, $y=185\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.25: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	1,712	1,548	-9,557
2	16,5	1,703	1,537	-9,721
3	22,0	1,677	1,525	-9,054
4	27,5	1,642	1,506	-8,255
5	33,0	1,609	1,486	-7,675
6	38,5	1,603	1,468	-8,424
7	44,0	1,582	1,452	-8,212
8	49,5	1,529	1,428	-6,577
9	54,5	1,516	1,405	-7,348
10	60,0	1,498	1,373	-8,348
11	65,5	1,436	1,363	-5,114
12	71,0	1,422	1,340	-5,781
13	76,5	1,394	1,302	-6,566
14	82,0	1,365	1,258	-7,811
15	87,5	1,322	1,224	-7,404
16	93,0	1,284	1,197	-6,801
17	98,5	1,236	1,173	-5,120
18	104,0	1,193	1,150	-3,617
19	109,5	1,155	1,120	-3,054
20	115,0	1,124	1,085	-3,473
21	120,5	1,084	1,051	-3,067
22	126,0	1,064	1,017	-4,414
23	131,5	1,021	0,986	-3,460
24	137,0	0,989	0,959	-3,065
25	142,5	0,954	0,926	-2,980
26	148,0	0,918	0,893	-2,694
27	153,5	0,884	0,864	-2,319
28	159,0	0,848	0,840	-0,995
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				6,263



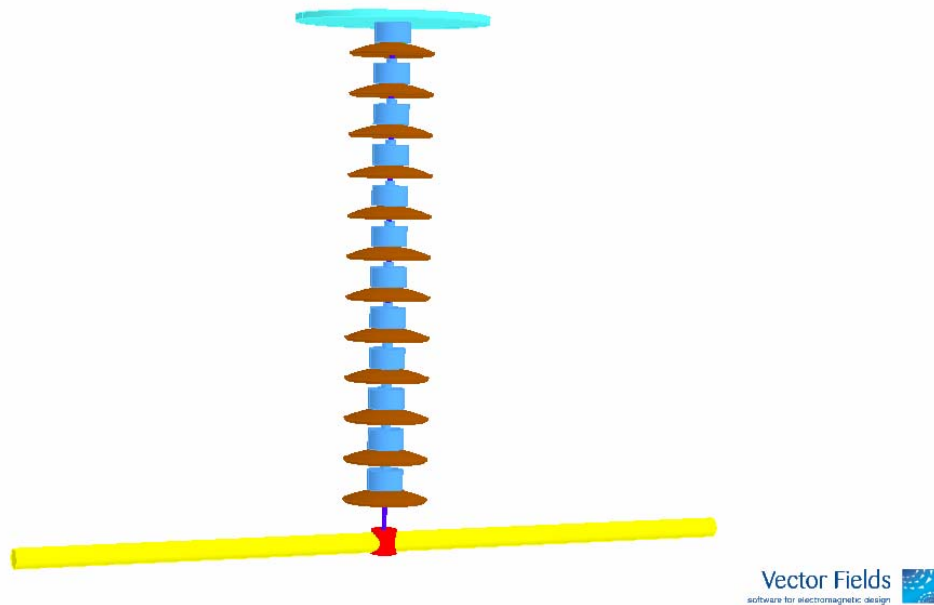
Σχήμα 5.28: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο K

5.3.3.Καθαρός πορσελάνινος, αλυσοειδής μονωτήρας, κανονικού τύπου, αποτελούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες. [No 010 ΔΕΗ]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας στο περιβάλλον του εργαστηρίου κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων.



Εικόνα 5.6: Καθαρός πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου κανονικού, αποτελούμενος από δώδεκα (12) δισκοειδείς μονωτήρες.

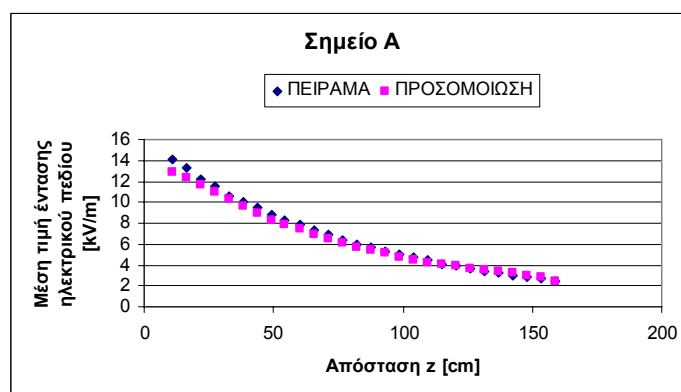


Σχήμα 5.29: Το μοντέλο προσομοίωσης του παραπάνω αλυσοειδούς μονωτήρα

Για το σημείο Α με συνιστώσες ($x=36\text{cm}$, $y=37,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.26: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	14,130	12,902	-8,690
2	16,5	13,280	12,330	-7,157
3	22,0	12,270	11,675	-4,846
4	27,5	11,510	10,986	-4,551
5	33,0	10,630	10,371	-2,434
6	38,5	10,040	9,602	-4,358
7	44,0	9,466	8,906	-5,917
8	49,5	8,813	8,313	-5,670
9	54,5	8,271	7,849	-5,105
10	60,0	7,859	7,400	-5,834
11	65,5	7,325	6,960	-4,984
12	71,0	6,858	6,555	-4,413
13	76,5	6,400	6,139	-4,081
14	82,0	6,010	5,722	-4,792
15	87,5	5,648	5,422	-4,003
16	93,0	5,301	5,110	-3,602
17	98,5	5,062	4,802	-5,146
18	104,0	4,750	4,532	-4,600
19	109,5	4,445	4,258	-4,203
20	115,0	4,098	4,059	-0,959
21	120,5	3,880	3,896	0,422
22	126,0	3,676	3,705	0,779
23	131,5	3,390	3,527	4,041
24	137,0	3,203	3,376	5,413
25	142,5	3,028	3,227	6,582
26	148,0	2,812	3,038	8,054
27	153,5	2,646	2,789	5,392
28	159,0	2,439	2,466	1,101
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				4,954

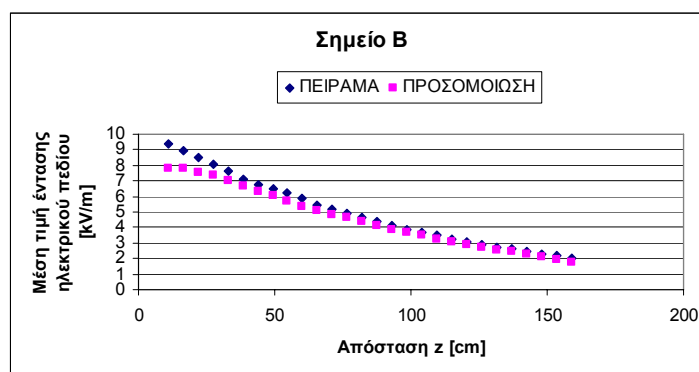


Σχήμα 5.30: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Α

Για το σημείο B με συνιστώσες ($x=58\text{cm}$, $y=57,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.27: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	9,397	7,849	-16,474
2	16,5	8,915	7,806	-12,445
3	22,0	8,526	7,536	-11,606
4	27,5	8,051	7,360	-8,583
5	33,0	7,660	7,007	-8,525
6	38,5	7,148	6,658	-6,857
7	44,0	6,729	6,357	-5,526
8	49,5	6,480	6,049	-6,656
9	54,5	6,217	5,728	-7,871
10	60,0	5,863	5,383	-8,187
11	65,5	5,468	5,106	-6,611
12	71,0	5,196	4,840	-6,849
13	76,5	4,925	4,668	-5,215
14	82,0	4,681	4,355	-6,971
15	87,5	4,371	4,091	-6,414
16	93,0	4,137	3,878	-6,254
17	98,5	3,899	3,704	-4,990
18	104,0	3,699	3,499	-5,420
19	109,5	3,528	3,267	-7,391
20	115,0	3,273	3,062	-6,437
21	120,5	3,088	2,881	-6,714
22	126,0	2,916	2,726	-6,502
23	131,5	2,709	2,577	-4,873
24	137,0	2,616	2,432	-7,026
25	142,5	2,451	2,248	-8,301
26	148,0	2,324	2,062	-11,269
27	153,5	2,188	1,936	-11,531
28	159,0	2,019	1,759	-12,867
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			8,473	

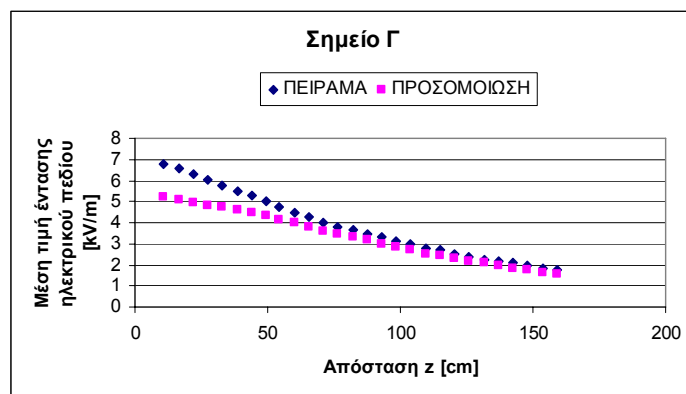


Σχήμα 5.31: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο B

Για το σημείο Γ με συνιστώσες ($x=80\text{cm}$, $y=78,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.28: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	6,761	5,230	-22,642
2	16,5	6,574	5,115	-22,199
3	22,0	6,289	4,954	-21,224
4	27,5	6,021	4,833	-19,726
5	33,0	5,749	4,718	-17,926
6	38,5	5,469	4,623	-15,461
7	44,0	5,256	4,483	-14,702
8	49,5	4,992	4,311	-13,632
9	54,5	4,722	4,156	-11,978
10	60,0	4,479	3,984	-11,062
11	65,5	4,281	3,799	-11,269
12	71,0	4,001	3,605	-9,895
13	76,5	3,785	3,443	-9,028
14	82,0	3,637	3,314	-8,875
15	87,5	3,436	3,168	-7,805
16	93,0	3,289	2,987	-9,189
17	98,5	3,109	2,855	-8,175
18	104,0	2,978	2,718	-8,737
19	109,5	2,812	2,530	-10,044
20	115,0	2,679	2,410	-10,044
21	120,5	2,526	2,293	-9,209
22	126,0	2,398	2,179	-9,153
23	131,5	2,264	2,072	-8,495
24	137,0	2,189	1,949	-10,946
25	142,5	2,077	1,838	-11,519
26	148,0	1,942	1,736	-10,625
27	153,5	1,849	1,637	-11,459
28	159,0	1,751	1,550	-11,484
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				13,118

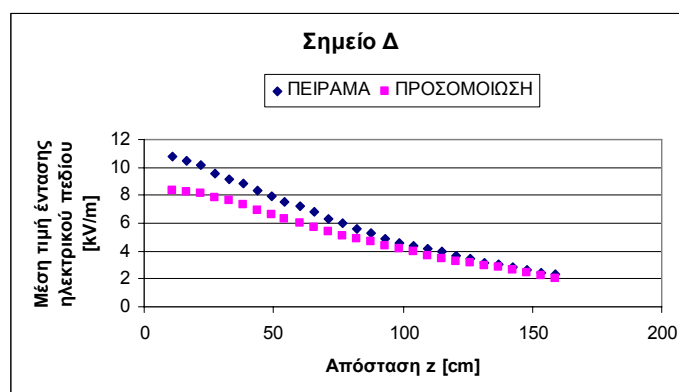


Σχήμα 5.32: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Γ

Για το σημείο Δ με συνιστώσες ($x=15,5\text{cm}$, $y=59,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.29: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	10,740	8,389	-21,890
2	16,5	10,450	8,219	-21,349
3	22,0	10,160	8,129	-19,995
4	27,5	9,603	7,836	-18,400
5	33,0	9,170	7,602	-17,096
6	38,5	8,805	7,307	-17,009
7	44,0	8,301	6,939	-16,412
8	49,5	7,973	6,575	-17,539
9	54,5	7,558	6,294	-16,725
10	60,0	7,197	5,995	-16,701
11	65,5	6,846	5,692	-16,856
12	71,0	6,345	5,359	-15,545
13	76,5	5,968	5,131	-14,028
14	82,0	5,557	4,913	-11,592
15	87,5	5,246	4,678	-10,821
16	93,0	4,916	4,408	-10,331
17	98,5	4,617	4,180	-9,474
18	104,0	4,417	3,944	-10,705
19	109,5	4,184	3,694	-11,703
20	115,0	3,934	3,481	-11,513
21	120,5	3,661	3,293	-10,061
22	126,0	3,464	3,127	-9,722
23	131,5	3,197	2,979	-6,805
24	137,0	3,013	2,803	-6,984
25	142,5	2,798	2,649	-5,329
26	148,0	2,656	2,404	-9,484
27	153,5	2,469	2,246	-9,045
28	159,0	2,307	2,012	-12,792
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				14,142

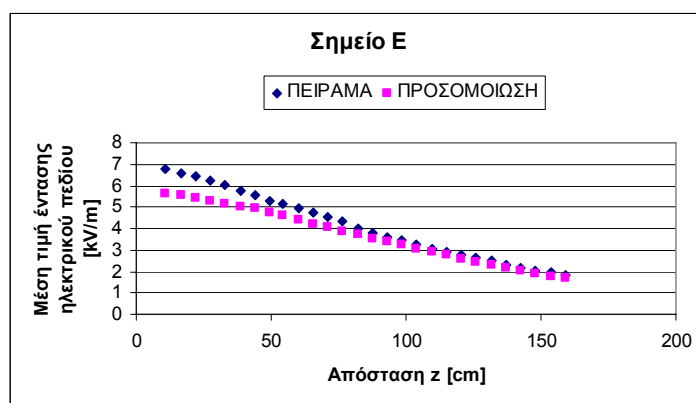


Σχήμα 5.33: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Δ

Για το σημείο E με συνιστώσες ($x=38\text{cm}$, $y=80\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.30: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	6,749	5,595	-17,103
2	16,5	6,607	5,540	-16,143
3	22,0	6,434	5,449	-15,315
4	27,5	6,225	5,284	-15,117
5	33,0	6,006	5,150	-14,244
6	38,5	5,745	5,048	-12,127
7	44,0	5,564	4,921	-11,556
8	49,5	5,288	4,748	-10,208
9	54,5	5,136	4,590	-10,640
10	60,0	4,970	4,392	-11,622
11	65,5	4,756	4,199	-11,717
12	71,0	4,561	4,057	-11,050
13	76,5	4,307	3,885	-9,808
14	82,0	4,030	3,710	-7,930
15	87,5	3,814	3,519	-7,746
16	93,0	3,609	3,375	-6,492
17	98,5	3,431	3,230	-5,854
18	104,0	3,256	3,083	-5,326
19	109,5	3,079	2,895	-5,989
20	115,0	2,936	2,769	-5,698
21	120,5	2,760	2,604	-5,666
22	126,0	2,612	2,443	-6,488
23	131,5	2,480	2,297	-7,362
24	137,0	2,319	2,160	-6,850
25	142,5	2,195	2,028	-7,618
26	148,0	2,047	1,894	-7,477
27	153,5	1,962	1,776	-9,468
28	159,0	1,845	1,662	-9,940
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα			10,319	

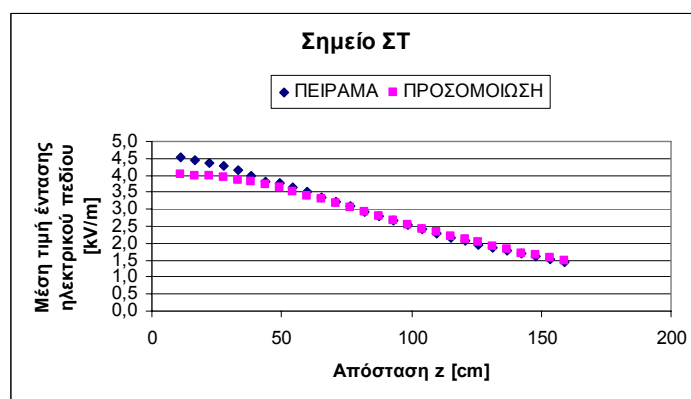


Σχήμα 5.34: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο E

Για το σημείο ΣΤ με συνιστώσες ($x=50,5\text{cm}$, $y=100,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.31: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	4,527	4,032	-10,933
2	16,5	4,446	4,004	-9,937
3	22,0	4,367	3,978	-8,901
4	27,5	4,265	3,926	-7,940
5	33,0	4,143	3,876	-6,448
6	38,5	3,993	3,812	-4,534
7	44,0	3,830	3,731	-2,585
8	49,5	3,770	3,627	-3,796
9	54,5	3,654	3,530	-3,398
10	60,0	3,501	3,409	-2,617
11	65,5	3,361	3,299	-1,834
12	71,0	3,224	3,182	-1,298
13	76,5	3,083	3,061	-0,717
14	82,0	2,940	2,926	-0,483
15	87,5	2,810	2,789	-0,741
16	93,0	2,675	2,669	-0,226
17	98,5	2,531	2,542	0,452
18	104,0	2,417	2,419	0,092
19	109,5	2,294	2,312	0,792
20	115,0	2,178	2,212	1,567
21	120,5	2,082	2,112	1,436
22	126,0	1,966	2,014	2,450
23	131,5	1,874	1,911	1,989
24	137,0	1,785	1,803	0,985
25	142,5	1,685	1,705	1,199
26	148,0	1,615	1,632	1,033
27	153,5	1,523	1,553	1,972
28	159,0	1,455	1,472	1,110
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				4,194

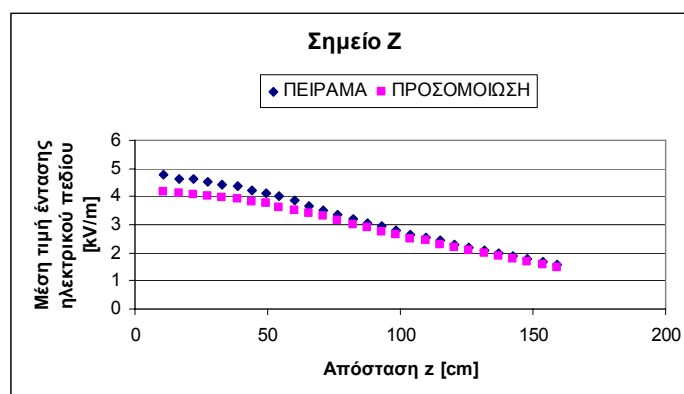


Σχήμα 5.35: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο ΣΤ

Για το σημείο Z με συνιστώσες ($x=18\text{cm}$, $y=102\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.32: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	4,766	4,186	-12,177
2	16,5	4,628	4,107	-11,261
3	22,0	4,628	4,068	-12,093
4	27,5	4,513	4,040	-10,491
5	33,0	4,434	3,975	-10,353
6	38,5	4,352	3,892	-10,573
7	44,0	4,218	3,826	-9,282
8	49,5	4,110	3,740	-9,008
9	54,5	4,004	3,631	-9,306
10	60,0	3,862	3,511	-9,096
11	65,5	3,644	3,405	-6,565
12	71,0	3,492	3,299	-5,517
13	76,5	3,352	3,156	-5,854
14	82,0	3,197	3,018	-5,609
15	87,5	3,064	2,892	-5,619
16	93,0	2,952	2,764	-6,358
17	98,5	2,777	2,634	-5,133
18	104,0	2,633	2,516	-4,436
19	109,5	2,528	2,423	-4,151
20	115,0	2,419	2,307	-4,620
21	120,5	2,273	2,193	-3,521
22	126,0	2,180	2,083	-4,454
23	131,5	2,068	1,986	-3,978
24	137,0	1,965	1,902	-3,199
25	142,5	1,859	1,801	-3,143
26	148,0	1,770	1,696	-4,197
27	153,5	1,659	1,592	-4,033
28	159,0	1,577	1,497	-5,087
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				7,346

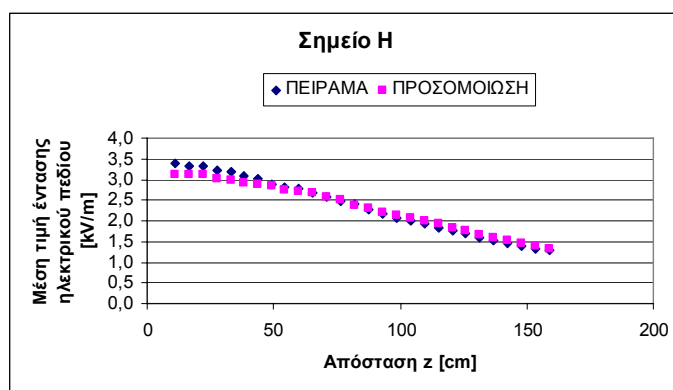


Σχήμα 5.36: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Z

Για το σημείο H με συνιστώσες ($x=40\text{cm}$, $y=122,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.33: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	3,388	3,111	-8,184
2	16,5	3,325	3,104	-6,659
3	22,0	3,318	3,103	-6,488
4	27,5	3,213	3,019	-6,037
5	33,0	3,183	2,967	-6,800
6	38,5	3,095	2,923	-5,551
7	44,0	3,004	2,891	-3,763
8	49,5	2,894	2,848	-1,593
9	54,5	2,829	2,739	-3,169
10	60,0	2,773	2,703	-2,524
11	65,5	2,667	2,666	-0,041
12	71,0	2,571	2,584	0,504
13	76,5	2,478	2,493	0,607
14	82,0	2,408	2,376	-1,326
15	87,5	2,286	2,291	0,234
16	93,0	2,173	2,212	1,792
17	98,5	2,081	2,138	2,732
18	104,0	2,011	2,063	2,592
19	109,5	1,926	1,988	3,225
20	115,0	1,831	1,918	4,729
21	120,5	1,766	1,835	3,887
22	126,0	1,692	1,754	3,681
23	131,5	1,600	1,673	4,579
24	137,0	1,519	1,593	4,864
25	142,5	1,456	1,522	4,528
26	148,0	1,380	1,463	6,035
27	153,5	1,336	1,398	4,625
28	159,0	1,273	1,332	4,649
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				4,334

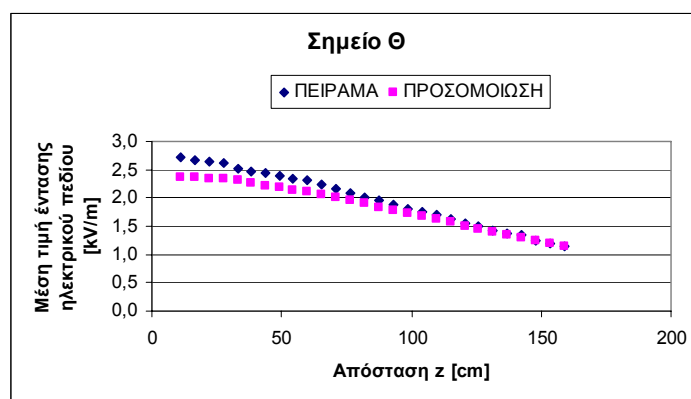


Σχήμα 5.37: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο H

Για το σημείο Θ με συνιστώσες ($x=62,5\text{cm}$, $y=143\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.34: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	2,723	2,373	-12,855
2	16,5	2,658	2,356	-11,365
3	22,0	2,644	2,341	-11,458
4	27,5	2,622	2,330	-11,119
5	33,0	2,526	2,303	-8,843
6	38,5	2,475	2,265	-8,497
7	44,0	2,438	2,223	-8,824
8	49,5	2,383	2,183	-8,383
9	54,5	2,346	2,134	-9,028
10	60,0	2,302	2,101	-8,719
11	65,5	2,240	2,047	-8,595
12	71,0	2,162	1,998	-7,606
13	76,5	2,080	1,954	-6,041
14	82,0	2,007	1,901	-5,277
15	87,5	1,946	1,841	-5,372
16	93,0	1,873	1,784	-4,763
17	98,5	1,794	1,733	-3,382
18	104,0	1,762	1,686	-4,309
19	109,5	1,703	1,628	-4,407
20	115,0	1,620	1,566	-3,329
21	120,5	1,556	1,510	-2,974
22	126,0	1,505	1,456	-3,284
23	131,5	1,433	1,405	-1,949
24	137,0	1,381	1,355	-1,855
25	142,5	1,338	1,299	-2,889
26	148,0	1,253	1,244	-0,731
27	153,5	1,192	1,190	-0,176
28	159,0	1,152	1,152	-0,012
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				6,942

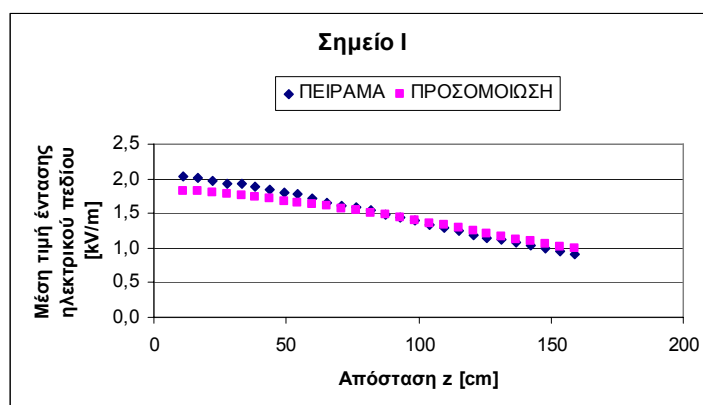


Σχήμα 5.38: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Θ

Για το σημείο I με συνιστώσες ($x=85\text{cm}$, $y=163,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.35: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	2,030	1,825	-10,096
2	16,5	2,005	1,820	-9,231
3	22,0	1,968	1,808	-8,144
4	27,5	1,932	1,786	-7,572
5	33,0	1,923	1,766	-8,181
6	38,5	1,884	1,743	-7,475
7	44,0	1,842	1,708	-7,265
8	49,5	1,808	1,679	-7,162
9	54,5	1,788	1,647	-7,908
10	60,0	1,711	1,622	-5,221
11	65,5	1,654	1,600	-3,255
12	71,0	1,618	1,566	-3,190
13	76,5	1,593	1,537	-3,533
14	82,0	1,538	1,513	-1,632
15	87,5	1,483	1,483	-0,026
16	93,0	1,433	1,439	0,440
17	98,5	1,394	1,398	0,270
18	104,0	1,345	1,364	1,439
19	109,5	1,293	1,327	2,612
20	115,0	1,243	1,289	3,712
21	120,5	1,195	1,253	4,816
22	126,0	1,153	1,207	4,681
23	131,5	1,114	1,161	4,215
24	137,0	1,080	1,128	4,481
25	142,5	1,032	1,095	6,120
26	148,0	1,006	1,060	5,364
27	153,5	0,963	1,026	6,491
28	159,0	0,917	0,992	8,216
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				5,810

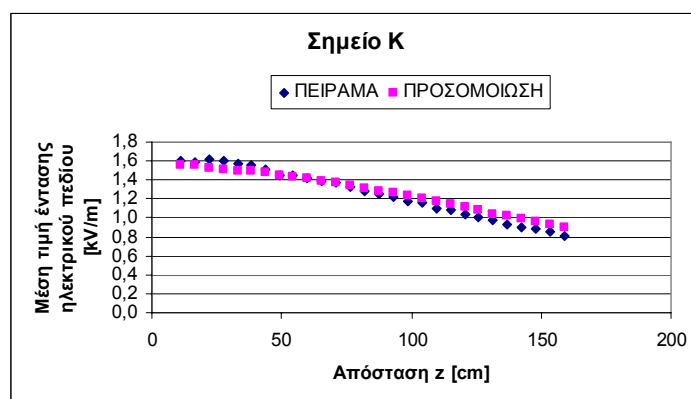


Σχήμα 5.39: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο I

Για το σημείο K με συνιστώσες ($x=65,5\text{cm}$, $y=185\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.36: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	11,0	1,605	1,559	-2,848
2	16,5	1,592	1,552	-2,481
3	22,0	1,621	1,530	-5,638
4	27,5	1,597	1,508	-5,570
5	33,0	1,567	1,498	-4,400
6	38,5	1,558	1,488	-4,487
7	44,0	1,504	1,473	-2,052
8	49,5	1,455	1,456	0,071
9	54,5	1,454	1,440	-0,946
10	60,0	1,416	1,415	-0,105
11	65,5	1,386	1,393	0,507
12	71,0	1,368	1,369	0,054
13	76,5	1,320	1,341	1,604
14	82,0	1,282	1,312	2,376
15	87,5	1,248	1,285	2,936
16	93,0	1,227	1,264	3,018
17	98,5	1,182	1,237	4,652
18	104,0	1,155	1,206	4,403
19	109,5	1,100	1,175	6,826
20	115,0	1,089	1,145	5,152
21	120,5	1,041	1,111	6,749
22	126,0	1,002	1,076	7,339
23	131,5	0,975	1,042	6,906
24	137,0	0,932	1,017	9,094
25	142,5	0,905	0,990	9,338
26	148,0	0,880	0,960	9,107
27	153,5	0,851	0,932	9,520
28	159,0	0,807	0,905	12,174
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				5,672



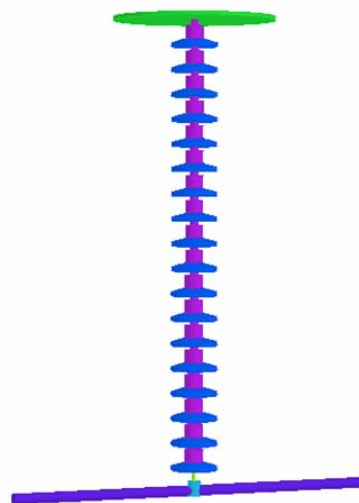
Σχήμα 5.40: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο K

5.3.4. Καθαρός πορσελάνινος, αλυσοειδής μονωτήρας, κανονικού τύπου, αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες. [No 070 ΔΕΗ]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας στο περιβάλλον του εργαστηρίου κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων.



Εικόνα 5.7: Καθαρός πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου κανονικού, αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες.



Vector Fields
software for electromagnetic design

Σχήμα 5.41: Το μοντέλο προσομοίωσης του παραπάνω αλυσοειδούς μονωτήρα

Για το σημείο Α με συνιστώσες ($x=36\text{cm}$, $y=37,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.37: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	13,010	13,957	7,282
2	8,5	12,240	13,684	11,799
3	14,0	11,480	13,174	14,752
4	19,5	10,800	12,563	16,320
5	25,0	10,170	11,740	15,433
6	30,5	9,580	11,069	15,543
7	36,0	9,025	10,283	13,935
8	41,5	8,557	9,606	12,262
9	46,5	8,233	9,044	9,845
10	52,0	7,767	8,505	9,505
11	57,5	7,310	7,960	8,885
12	63,0	6,921	7,423	7,260
13	68,5	6,541	6,946	6,191
14	74,0	6,153	6,492	5,516
15	79,5	5,853	6,059	3,511
16	85,0	5,599	5,670	1,264
17	90,5	5,291	5,317	0,494
18	96,0	5,006	5,012	0,120
19	101,5	4,726	4,685	-0,862
20	107,0	4,472	4,349	-2,751
21	112,5	4,232	4,058	-4,113
22	118,0	3,999	3,828	-4,267
23	123,5	3,781	3,597	-4,871
24	129,0	3,573	3,396	-4,941
25	134,5	3,372	3,187	-5,497
26	140,0	3,206	2,978	-7,101
27	145,5	3,040	2,783	-8,448
28	151,0	2,868	2,613	-8,876
29	156,5	2,702	2,475	-8,384
30	162,0	2,575	2,340	-9,142
31	167,5	2,403	2,193	-8,751
32	173,0	2,273	2,049	-9,865
33	178,5	2,139	1,934	-9,573
34	184,0	2,029	1,816	-10,507
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				9,001

Για το σημείο B με συνιστώσες ($x=58\text{cm}$, $y=57,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές

Πίνακας 5.38: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	9,059	8,651	-4,500
2	8,5	8,628	8,493	-1,561
3	14,0	8,228	8,298	0,851
4	19,5	7,775	8,172	5,109
5	25,0	7,380	7,861	6,520
6	30,5	7,052	7,558	7,181
7	36,0	6,694	7,174	7,174
8	41,5	6,304	6,885	9,217
9	46,5	6,019	6,560	8,993
10	52,0	5,720	6,249	9,248
11	57,5	5,441	5,955	9,441
12	63,0	5,214	5,568	6,787
13	68,5	4,928	5,264	6,822
14	74,0	4,683	4,972	6,172
15	79,5	4,437	4,691	5,715
16	85,0	4,231	4,398	3,953
17	90,5	4,010	4,111	2,509
18	96,0	3,823	3,878	1,431
19	101,5	3,634	3,664	0,837
20	107,0	3,466	3,463	-0,101
21	112,5	3,284	3,234	-1,524
22	118,0	3,110	3,060	-1,594
23	123,5	2,958	2,891	-2,280
24	129,0	2,830	2,728	-3,603
25	134,5	2,683	2,563	-4,465
26	140,0	2,563	2,403	-6,245
27	145,5	2,434	2,272	-6,662
28	151,0	2,287	2,148	-6,076
29	156,5	2,196	2,020	-8,007
30	162,0	2,097	1,901	-9,332
31	167,5	1,973	1,781	-9,754
32	173,0	1,871	1,681	-10,135
33	178,5	1,782	1,589	-10,846
34	184,0	1,651	1,497	-9,339
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				6,510

Για το σημείο Γ με συνιστώσες ($x=80\text{cm}$, $y=78,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.39: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	6,872	5,887	-14,328
2	8,5	6,579	5,877	-10,673
3	14,0	6,330	5,754	-9,101
4	19,5	6,007	5,652	-5,909
5	25,0	5,776	5,526	-4,320
6	30,5	5,521	5,335	-3,360
7	36,0	5,264	5,149	-2,191
8	41,5	4,978	4,940	-0,759
9	46,5	4,748	4,755	0,154
10	52,0	4,504	4,561	1,264
11	57,5	4,299	4,380	1,875
12	63,0	4,110	4,178	1,655
13	68,5	3,932	3,983	1,295
14	74,0	3,721	3,770	1,319
15	79,5	3,552	3,589	1,029
16	85,0	3,373	3,410	1,088
17	90,5	3,229	3,232	0,099
18	96,0	3,078	3,070	-0,272
19	101,5	2,933	2,904	-0,972
20	107,0	2,820	2,757	-2,238
21	112,5	2,657	2,616	-1,532
22	118,0	2,562	2,466	-3,755
23	123,5	2,435	2,332	-4,230
24	129,0	2,331	2,190	-6,034
25	134,5	2,234	2,092	-6,341
26	140,0	2,134	1,972	-7,590
27	145,5	2,041	1,868	-8,466
28	151,0	1,948	1,749	-10,196
29	156,5	1,852	1,643	-11,285
30	162,0	1,785	1,554	-12,920
31	167,5	1,698	1,462	-13,914
32	173,0	1,626	1,387	-14,689
33	178,5	1,539	1,306	-15,172
34	184,0	1,487	1,226	-17,584
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				7,820

Για το σημείο Δ με συνιστώσες ($x=15,5\text{cm}$, $y=59,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.40: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	10,330	8,998	-12,892
2	8,5	10,060	8,973	-10,801
3	14,0	9,728	9,050	-6,968
4	19,5	9,454	8,849	-6,404
5	25,0	9,016	8,536	-5,323
6	30,5	8,703	8,129	-6,590
7	36,0	8,277	7,928	-4,212
8	41,5	7,862	7,622	-3,051
9	46,5	7,435	7,288	-1,972
10	52,0	7,029	6,929	-1,425
11	57,5	6,638	6,631	-0,104
12	63,0	6,371	6,324	-0,740
13	68,5	6,064	6,001	-1,031
14	74,0	5,752	5,648	-1,807
15	79,5	5,434	5,287	-2,699
16	85,0	5,220	4,992	-4,362
17	90,5	4,903	4,737	-3,376
18	96,0	4,632	4,418	-4,620
19	101,5	4,406	4,153	-5,742
20	107,0	4,176	3,934	-5,792
21	112,5	3,952	3,686	-6,727
22	118,0	3,765	3,498	-7,078
23	123,5	3,542	3,317	-6,364
24	129,0	3,346	3,132	-6,383
25	134,5	3,171	2,893	-8,773
26	140,0	3,014	2,751	-8,738
27	145,5	2,835	2,586	-8,785
28	151,0	2,732	2,381	-12,846
29	156,5	2,549	2,281	-10,527
30	162,0	2,481	2,148	-13,434
31	167,5	2,301	2,025	-11,982
32	173,0	2,187	1,910	-12,686
33	178,5	2,057	1,805	-12,235
34	184,0	1,998	1,699	-14,962
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				7,950

Για το σημείο E με συνιστώσες (x=38cm, y=80cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.41: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	6,645	6,186	-6,906
2	8,5	6,511	6,226	-4,375
3	14,0	6,324	6,171	-2,418
4	19,5	6,126	6,098	-0,451
5	25,0	5,863	6,024	2,743
6	30,5	5,711	5,837	2,214
7	36,0	5,421	5,655	4,324
8	41,5	5,273	5,457	3,499
9	46,5	5,130	5,261	2,551
10	52,0	4,946	5,082	2,745
11	57,5	4,726	4,872	3,084
12	63,0	4,528	4,625	2,143
13	68,5	4,333	4,456	2,848
14	74,0	4,158	4,274	2,798
15	79,5	3,968	4,040	1,808
16	85,0	3,778	3,849	1,890
17	90,5	3,594	3,655	1,699
18	96,0	3,434	3,468	0,996
19	101,5	3,264	3,285	0,635
20	107,0	3,129	3,116	-0,408
21	112,5	2,966	2,952	-0,487
22	118,0	2,814	2,810	-0,156
23	123,5	2,673	2,647	-0,963
24	129,0	2,539	2,504	-1,373
25	134,5	2,416	2,370	-1,908
26	140,0	2,270	2,243	-1,169
27	145,5	2,170	2,108	-2,859
28	151,0	2,080	1,985	-4,571
29	156,5	1,982	1,871	-5,601
30	162,0	1,887	1,772	-6,083
31	167,5	1,783	1,681	-5,739
32	173,0	1,675	1,592	-4,953
33	178,5	1,609	1,502	-6,665
34	184,0	1,487	1,423	-4,301
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				3,419

Για το σημείο ΣΤ με συνιστώσες ($x=50,5\text{cm}$, $y=100,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.42: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	4,606	4,492	-2,474
2	8,5	4,518	4,503	-0,328
3	14,0	4,385	4,460	1,715
4	19,5	4,287	4,459	4,006
5	25,0	4,172	4,359	4,481
6	30,5	4,049	4,309	6,416
7	36,0	3,902	4,199	7,601
8	41,5	3,748	4,095	9,259
9	46,5	3,635	3,987	9,679
10	52,0	3,483	3,875	11,257
11	57,5	3,361	3,774	12,288
12	63,0	3,229	3,625	12,249
13	68,5	3,092	3,470	12,236
14	74,0	2,957	3,351	13,323
15	79,5	2,836	3,225	13,730
16	85,0	2,715	3,102	14,264
17	90,5	2,587	2,960	14,424
18	96,0	2,483	2,811	13,192
19	101,5	2,369	2,682	13,210
20	107,0	2,242	2,566	14,437
21	112,5	2,160	2,450	13,435
22	118,0	2,069	2,330	12,628
23	123,5	1,988	2,199	10,618
24	129,0	1,891	2,091	10,600
25	134,5	1,819	1,977	8,669
26	140,0	1,727	1,881	8,942
27	145,5	1,658	1,781	7,410
28	151,0	1,593	1,684	5,691
29	156,5	1,517	1,596	5,212
30	162,0	1,450	1,514	4,399
31	167,5	1,387	1,425	2,738
32	173,0	1,317	1,351	2,592
33	178,5	1,251	1,275	1,912
34	184,0	1,178	1,202	2,077
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				9,567

Για το σημείο Z με συνιστώσες ($x=18\text{cm}$, $y=102\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.43: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	4,846	4,641	-4,233
2	8,5	4,726	4,587	-2,947
3	14,0	4,692	4,549	-3,051
4	19,5	4,537	4,512	-0,562
5	25,0	4,451	4,467	0,366
6	30,5	4,332	4,389	1,312
7	36,0	4,236	4,314	1,834
8	41,5	4,045	4,203	3,909
9	46,5	3,987	4,114	3,181
10	52,0	3,862	4,021	4,116
11	57,5	3,701	3,906	5,527
12	63,0	3,558	3,781	6,269
13	68,5	3,403	3,635	6,825
14	74,0	3,264	3,493	7,031
15	79,5	3,157	3,352	6,163
16	85,0	3,044	3,216	5,665
17	90,5	2,919	3,069	5,131
18	96,0	2,762	2,944	6,602
19	101,5	2,660	2,797	5,151
20	107,0	2,541	2,668	5,010
21	112,5	2,415	2,549	5,548
22	118,0	2,309	2,431	5,296
23	123,5	2,197	2,309	5,112
24	129,0	2,096	2,190	4,501
25	134,5	2,013	2,083	3,454
26	140,0	1,928	1,961	1,691
27	145,5	1,832	1,872	2,209
28	151,0	1,753	1,775	1,251
29	156,5	1,684	1,672	-0,719
30	162,0	1,604	1,576	-1,720
31	167,5	1,496	1,489	-0,491
32	173,0	1,425	1,423	-0,174
33	178,5	1,357	1,337	-1,475
34	184,0	1,252	1,254	0,125
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				4,108

Για το σημείο H με συνιστώσες (x=40cm, y=122,5cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.44: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	3,507	3,474	-0,929
2	8,5	3,460	3,487	0,788
3	14,0	3,402	3,493	2,664
4	19,5	3,330	3,472	4,269
5	25,0	3,233	3,446	6,584
6	30,5	3,175	3,404	7,215
7	36,0	3,072	3,360	9,366
8	41,5	2,998	3,297	9,968
9	46,5	2,943	3,234	9,891
10	52,0	2,846	3,165	11,195
11	57,5	2,739	3,066	11,935
12	63,0	2,647	2,976	12,423
13	68,5	2,568	2,882	12,219
14	74,0	2,474	2,789	12,715
15	79,5	2,387	2,682	12,368
16	85,0	2,315	2,584	11,629
17	90,5	2,224	2,486	11,765
18	96,0	2,124	2,398	12,920
19	101,5	2,066	2,302	11,440
20	107,0	1,983	2,210	11,423
21	112,5	1,894	2,117	11,772
22	118,0	1,821	2,012	10,493
23	123,5	1,743	1,904	9,258
24	129,0	1,673	1,815	8,472
25	134,5	1,606	1,725	7,428
26	140,0	1,536	1,647	7,209
27	145,5	1,484	1,567	5,594
28	151,0	1,415	1,483	4,805
29	156,5	1,366	1,402	2,624
30	162,0	1,301	1,329	2,162
31	167,5	1,250	1,257	0,537
32	173,0	1,189	1,189	-0,027
33	178,5	1,139	1,124	-1,323
34	184,0	1,070	1,058	-1,133
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				8,707

Για το σημείο Θ με συνιστώσες (x=62,5cm, y=143cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.45: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	2,836	2,768	-2,410
2	8,5	2,793	2,769	-0,849
3	14,0	2,752	2,767	0,561
4	19,5	2,719	2,752	1,228
5	25,0	2,648	2,733	3,212
6	30,5	2,626	2,693	2,537
7	36,0	2,556	2,659	4,048
8	41,5	2,507	2,620	4,501
9	46,5	2,399	2,588	7,898
10	52,0	2,369	2,528	6,703
11	57,5	2,321	2,463	6,111
12	63,0	2,252	2,394	6,325
13	68,5	2,191	2,319	5,820
14	74,0	2,129	2,245	5,448
15	79,5	2,065	2,178	5,451
16	85,0	2,000	2,105	5,229
17	90,5	1,933	2,030	5,037
18	96,0	1,877	1,945	3,603
19	101,5	1,806	1,874	3,791
20	107,0	1,752	1,804	2,975
21	112,5	1,683	1,719	2,155
22	118,0	1,620	1,645	1,531
23	123,5	1,560	1,574	0,891
24	129,0	1,510	1,505	-0,349
25	134,5	1,463	1,436	-1,855
26	140,0	1,413	1,369	-3,099
27	145,5	1,342	1,300	-3,160
28	151,0	1,305	1,233	-5,552
29	156,5	1,260	1,170	-7,150
30	162,0	1,193	1,107	-7,242
31	167,5	1,154	1,039	-9,986
32	173,0	1,095	0,976	-10,872
33	178,5	1,076	0,930	-13,575
34	184,0	1,011	0,879	-13,042
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				5,857

Για το σημείο I με συνιστώσες ($x=85\text{cm}$, $y=163,5\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

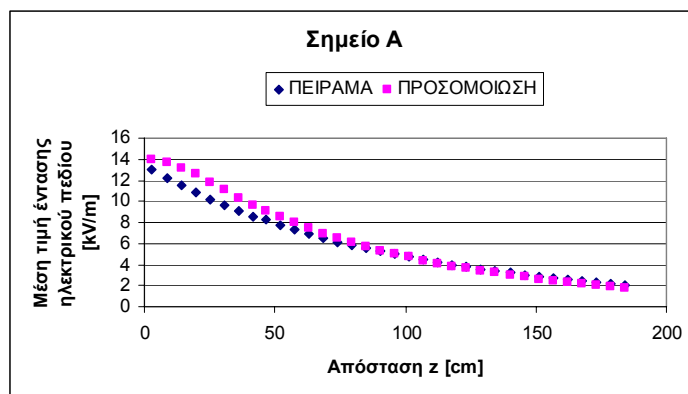
Πίνακας 5.46: Μετρήσεις

Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	2,100	2,322	10,564
2	8,5	2,083	2,321	11,433
3	14,0	2,087	2,316	10,961
4	19,5	2,041	2,304	12,888
5	25,0	1,985	2,280	14,872
6	30,5	1,953	2,258	15,622
7	36,0	1,935	2,232	15,373
8	41,5	1,883	2,209	17,287
9	46,5	1,818	2,173	19,506
10	52,0	1,808	2,120	17,244
11	57,5	1,748	2,068	18,286
12	63,0	1,718	2,018	17,441
13	68,5	1,667	1,966	17,929
14	74,0	1,601	1,915	19,612
15	79,5	1,575	1,850	17,490
16	85,0	1,534	1,792	16,797
17	90,5	1,486	1,730	16,444
18	96,0	1,444	1,668	15,479
19	101,5	1,398	1,596	14,145
20	107,0	1,351	1,535	13,595
21	112,5	1,305	1,469	12,568
22	118,0	1,274	1,403	10,131
23	123,5	1,227	1,337	8,998
24	129,0	1,189	1,277	7,379
25	134,5	1,130	1,218	7,751
26	140,0	1,115	1,158	3,827
27	145,5	1,064	1,089	2,388
28	151,0	1,033	1,034	0,116
29	156,5	1,000	0,984	-1,587
30	162,0	0,957	0,937	-2,140
31	167,5	0,928	0,888	-4,336
32	173,0	0,900	0,833	-7,460
33	178,5	0,874	0,782	-10,576
34	184,0	0,822	0,736	-10,505
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				13,077

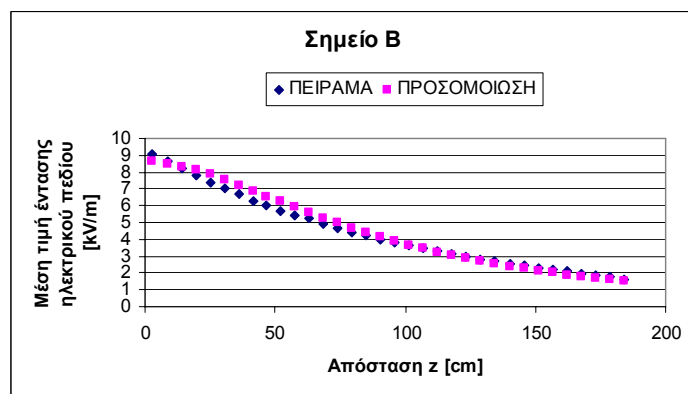
Για το σημείο K με συνιστώσες ($x=65,5\text{cm}$, $y=185\text{cm}$) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.47: Μετρήσεις

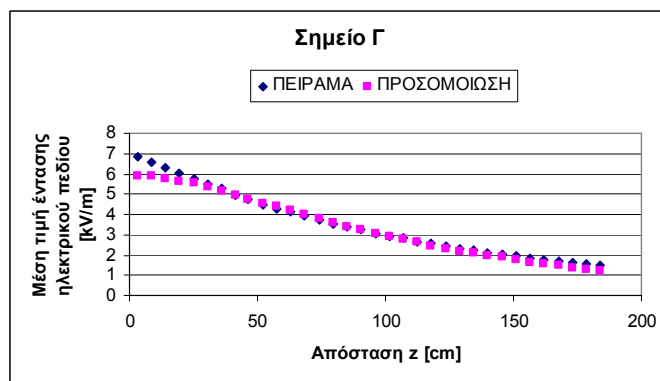
Θέση probe στον άξονα z	z (cm)	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου		
		Πείραμα [kV/m]	Προσομοίωση [kV/m]	Σφάλμα %
1	3,0	1,718	2,042	18,837
2	8,5	1,716	2,050	19,453
3	14,0	1,687	2,048	21,390
4	19,5	1,671	2,039	22,004
5	25,0	1,642	2,025	23,296
6	30,5	1,625	2,008	23,579
7	36,0	1,592	1,989	24,918
8	41,5	1,573	1,968	25,114
9	46,5	1,539	1,939	26,009
10	52,0	1,498	1,895	26,518
11	57,5	1,485	1,850	24,561
12	63,0	1,448	1,806	24,743
13	68,5	1,412	1,758	24,488
14	74,0	1,388	1,709	23,158
15	79,5	1,351	1,660	22,896
16	85,0	1,317	1,604	21,810
17	90,5	1,273	1,554	22,065
18	96,0	1,242	1,499	20,718
19	101,5	1,207	1,442	19,498
20	107,0	1,171	1,388	18,518
21	112,5	1,138	1,334	17,231
22	118,0	1,102	1,279	16,020
23	123,5	1,080	1,222	13,126
24	129,0	1,022	1,165	14,015
25	134,5	0,993	1,110	11,777
26	140,0	0,967	1,064	10,077
27	145,5	0,933	1,013	8,568
28	151,0	0,895	0,958	7,064
29	156,5	0,865	0,906	4,772
30	162,0	0,840	0,855	1,836
31	167,5	0,801	0,809	0,983
32	173,0	0,776	0,765	-1,480
33	178,5	0,736	0,722	-1,919
34	184,0	0,708	0,679	-4,057
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα				18,575



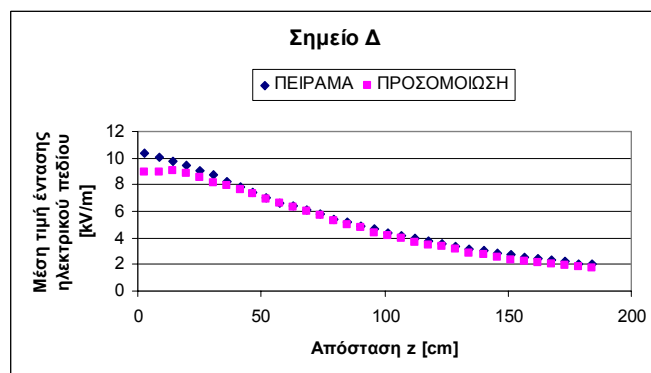
Σχήμα 5.42: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο A



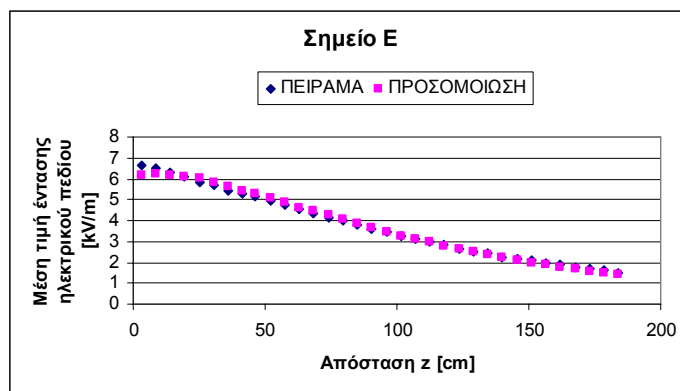
Σχήμα 5.43: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο B



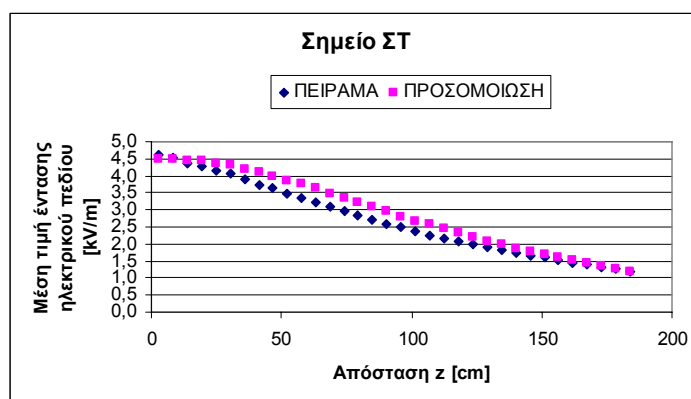
Σχήμα 5.44: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Γ



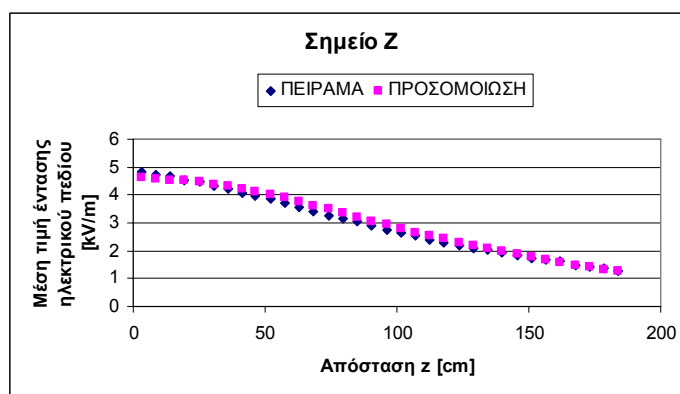
Σχήμα 5.45: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Δ



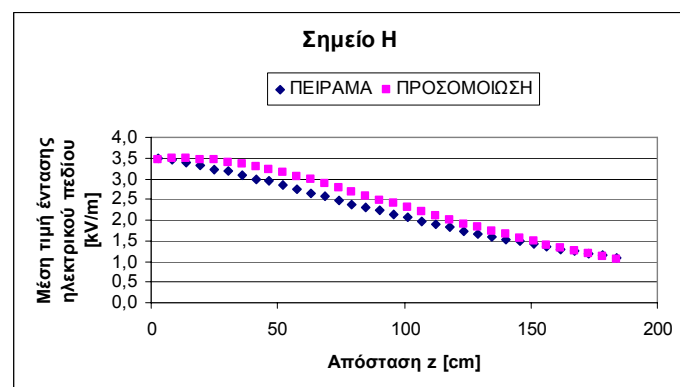
Σχήμα 5.46: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο E



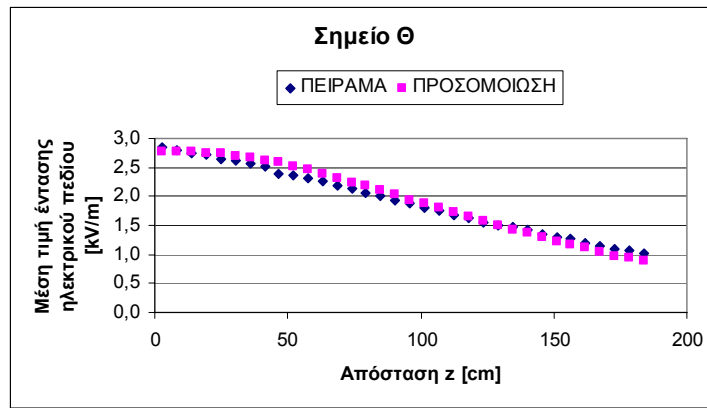
Σχήμα 5.47: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο ST



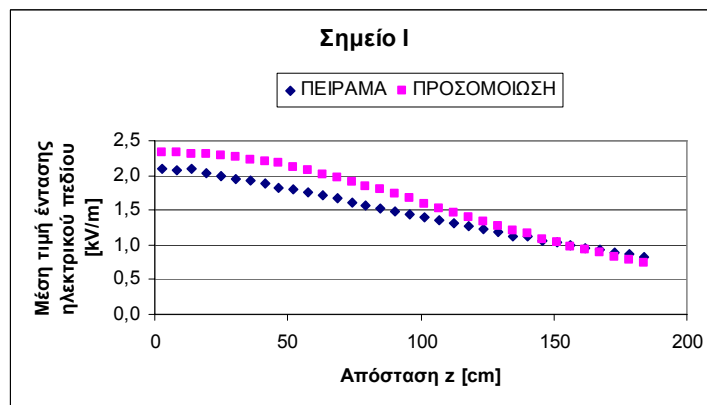
Σχήμα 5.48: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Z



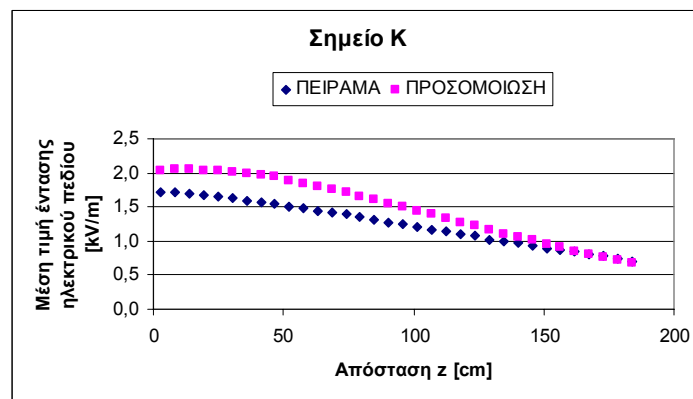
Σχήμα 5.49: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο H



Σχήμα 5.50: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Θ



Σχήμα 5.51: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Ι



Σχήμα 5.52: Μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Κ

Σημείωση:

Για την επεξεργασία όλων των δεδομένων που παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίστηκε το σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων, σύμφωνα με τη σχέση 5.1:

$$\text{Σφάλμα} = \frac{\text{Τιμή Προσομοίωσης} - \text{Πειραματική Τιμή}}{\text{Πειραματική Τιμή}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Επίπλέον, έχει υπολογιστεί και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα m , κατά τη σχέση 5.2:

$$m = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{(\text{Σφάλμα}(i))^2}{N} \right)} \quad (5.2)$$

Κεφάλαιο
6^ο

*Ανάλυση-Συμπεράσματα-
Η επόμενη μέρα*



Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής ήταν η μελέτη της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτροστατικού πεδίου στο εσωτερικό, στην επιφάνεια και στην ευρύτερη περιοχή κεραμικών αλυσοειδών μονωτήρων αποτελούμενων από δισκοειδείς μονωτήρες. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης PC OPERA-3d 11.0, προκειμένου να προσομοιωθούν γυάλινοι και πορσελάνινοι αλυσοειδείς μονωτήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150kV και 400kV στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (οι αριθμοί που αναγράφονται δίπλα από κάθε μονωτήρα στα Κεφάλαια 4 και 5 είναι κωδικοί που θέτει η ΔΕΗ για τον διαχωρισμό των μονωτήρων). Να σημειωθεί ότι κατά την προσομοίωση κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα λήφθηκε υπ'όψιν και η επίδραση του αγωγού υψηλής τάσης, του οποίου το μήκος επιλέχθηκε να είναι περίπου ίσο με το πραγματικό μήκος του αγωγού που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα του εργαστηρίου. Ειδικά η μελέτη της κατανομής της έντασης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μελέτη της διηλεκτρικής συμπεριφοράς των μονωτήρων. Πράγματι, η παρουσία υψηλών τιμών της έντασης σε ορισμένα τμήματα της επιφάνειας του μονωτήρα ευνοεί τη δημιουργία μερικών εκκενώσεων και, συνακόλουθα, το ενδεχόμενο επέκτασής τους και εμφάνισης του φαινομένου της υπερπήδησης.

Για την αναβάθμιση της ποιότητας της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν αρκετά πολύπλοκες εντολές μορφοποίησης στον μοντελοποιητή του προγράμματος Opera 11.0, ώστε να προστεθούν όσο το δυνατό περισσότερες κατασκευαστικές λεπτομέρειες των μονωτήρων στα μοντέλα προσομοίωσης αυτών. Ακόμη, και με ορισμένες νέες εντολές που προστέθηκαν σε αυτή την έκδοση του λογισμικού πακέτου ο μοντελοποιητής πλέον μετατρέπεται, εάν γίνει χρήση όλων των δυνατοτήτων και εντολών σχεδίασης, σε ένα ισχυρό εργαλείο CAD, το οποίο μπορεί να αποδώσει πολύπλοκες και ακριβείς τοπολογίες που προσομοιάζουν σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα. Αυτό είναι πράγματι φανερό στα μοντέλα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 και ειδικά με την σύγκριση που υπάρχει στην αρχή του κεφαλαίου μεταξύ μιας φωτογραφίας ενός μονωτήρα και του αντίστοιχου σχεδίου του στο πρόγραμμα Opera.

Η πιστότητα και η ακρίβεια της προσομοίωσης, όμως, γίνεται ακόμα πιο εμφανής στο Κεφάλαιο 5 όπου παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για την

κατανομή της τάσης, αλλά και για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε όλα τα προκαθορισμένα σημεία του χώρου. Παρατηρούμε λοιπόν πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνονται πλήρως από τα πειραματικά αποτελέσματα, με εξαίρεση ορισμένα τυχαία σφάλματα που παρουσιάζονται και οφείλονται στην τοπολογία, αλλά και στη φύση της προσομοίωσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Τα συστηματικά σφάλματα, που εμφανίζονται, είναι απολύτως δικαιολογημένα και σημαντικά βελτιωμένα σε σχέση με προηγούμενες εφαρμογές του προγράμματος για τον ίδιο σκοπό. Έχει αξία να αναφερθεί πως για τις μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου επιτυγχάνονται κατά το πλείστον στους πίνακες του Κεφαλαίου 5 μέσα τετραγωνικά σφάλματα μικρότερα από 10%, ενώ είναι πολλές οι περιπτώσεις που το νούμερο αυτό περιορίζεται σημαντικά ακόμα και κάτω από το 5%.

Οι όποιες διαφορές υπάρχουν μεταξύ πειραματικών τιμών και τιμών προσομοίωσης και οδηγούν σε ορισμένα σημεία σε κάπως μεγαλύτερα σφάλματα οφείλονται κατά κύριο λόγο στα παρακάτω:

- ❖ Στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατή η εισαγωγή των τιμών της αγωγιμότητας για τα διάφορα υλικά από τα οποία αποτελείται ο αλυσοειδής μονωτήρας σε αυτή την έκδοση του Opera-3d και έτσι, το πρόγραμμα δεν παρέχει απολύτως ακριβή αποτελέσματα.
- ❖ Στο γεγονός ότι οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα δεν ήταν τελείως καθαροί και γι' αυτό, οι τιμές της έντασης που ελήφθησαν από το πείραμα ήταν συνήθως μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση.
- ❖ Στο πρόγραμμα προσομοίωσης επιβάλλονται ακριβείς και ιδανικές συνθήκες σε μικρή περιοχή του χώρου για να είναι δυνατός ο υπολογισμός των πεπερασμένων στοιχείων, κάτι που φυσικά δεν υφίσταται κατά το πείραμα.

Είναι σημαντικό να επισημανθούν ορισμένες ιδιαιτερότητες που παρατηρήθηκαν κατά το χειρισμό του τρισδιάστατου προγράμματος προσομοίωσης PC OPERA. Αν και πρόκειται για δευτερεύουσας σημασίας παρατηρήσεις, πρέπει ωστόσο, να ληφθούν υπόψη από τους μελλοντικούς χρήστες του προγράμματος, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος προσαρμογής τους στο περιβάλλον του.

- ❖ Η σχεδίαση πρέπει να πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να είναι λεπτομερής στις περιοχές αυξημένης σημασίας για το εκάστοτε μοντέλο και λιγότερο ακριβής σε περιοχές μικρότερης σημασίας, με στόχο να μην υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός πεπερασμένων τριγωνικών στοιχείων, ο οποίος εμποδίζει την περαιτέρω επεξεργασία του μοντέλου.
- ❖ Η εξωτερική περιοχή, που συνιστά τον ατμοσφαιρικό αέρα, πρέπει να είναι ικανοποιητικά μεγάλη. Σε διαφορετική περίπτωση, το δυναμικό της εξωτερικής επιφάνειας, που ορίζεται ίσο με μηδέν εκφράζοντας το άπειρο, θα επηρεάσει τη διάταξη, παρέχοντας ανακριβείς τιμές για τα υπό μελέτη χαρακτηριστικά μεγέθη της διάταξης. Επίσης, εφόσον η περιοχή του ατμοσφαιρικού αέρα που βρίσκεται αρκετά μακριά από τη διάταξη δεν είναι απαραίτητο να έχει μεγάλη ακρίβεια, θα ήταν ορθό να σχεδιαστούν επιπλέον περιοχές του αέρα κοντά στη διάταξη, που να παρέχουν αυξημένη ακρίβεια.
- ❖ Το λογισμικό Opera, ως πρόγραμμα που χρησιμοποιεί μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να επιτύχει την προσομοίωση, έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις τόσο σε υπολογιστική ισχύ όσο και σε μνήμη τυχαίας προσπέλασης. Η επαγγελματική του έκδοση δεν έχει περιορισμούς στην πολυπλοκότητα της σχεδίασης, ούτε και στην ακρίβεια της προσομοίωσης. Οι περιορισμοί, όμως, τίθενται από την υπολογιστική μονάδα που χρησιμοποιείται κάθε φορά και ειδικά από την έλλειψη μνήμης RAM. Για τον λόγο αυτό, υπάρχει και σχετική αναφορά στο εγχειρίδιο του προγράμματος, συνίσταται η χρήση σύγχρονων επεξεργαστών τεχνολογίας 64-bit καθώς και όσο το δυνατό μεγαλύτερης χωρητικότητας RAM. Έτσι βελτιώνονται σημαντικά και η ταχύτητα της προσομοίωσης, αλλά και η δυνατότητα για πολυπλοκότερες και μεγαλύτερου μεγέθους σχεδιάσεις.

Με τη βοήθεια του προγράμματος, πραγματοποιήσαμε μόνο ηλεκτροστατική ανάλυση (Tosca electrostatic analysis). Σε επόμενη προσπάθεια εφαρμογής του Opera-3d θα υπάρχει δυνατότητα ταυτόχρονης επίλυσης του ηλεκτροστατικού προβλήματος, αλλά και του προβλήματος ροής ρεύματος (current flow problem). Έτσι, ο χρήστης θα εισάγει τις επιθυμητές τιμές τόσο για τις διηλεκτρικές σταθερές όσο και για τις αγωγιμότητες των υλικών που θα εμπλέκονται στην εκάστοτε γεωμετρία.

Αυτό που θα μπορούσε να εξεταστεί στο μέλλον, εφ' όσον είναι διαθέσιμος ο μετεπεξεργαστής που θα επιλύει ταυτόχρονα το ηλεκτροστατικό πρόβλημα και το πρόβλημα ροής ρεύματος, είναι η τοποθέτηση ρύπανσης στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα, με σκοπό να διερευνηθεί κατά πόσον η ρύπανση επηρεάζει την ένταση και το δυναμικό στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή γύρω από αυτόν. Επιπλέον, σε μελλοντικές διπλωματικές εργασίες θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί η δυνατότητα απλοποίησης της σχεδίασης του μοντέλου ενός αλυσοειδούς μονωτήρα, αφαιρώντας ορισμένα στοιχεία αυτού, έχοντας ως στόχο τη μη αξιόλογη μεταβολή των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται μείωση του υπολογιστικού χρόνου ανάλυσης και της πολυπλοκότητας του υπό σχεδίαση μοντέλου.

Βιβλιογραφία

- [1] I. A. Σταθόπουλος, “Υψηλές Τάσεις Ι”, Εκδόσεις Συμμεών.
- [2] Κ.Θ. Δέρβος, “Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων”, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα 2001.
- [3] J.S.T. Looms, “Insulators for high voltages”, Peter Peregrinus Ltd., London, Unighted Kingdom, 1990.
- [4] T. Fujimura, “The evolution of porcelain insulator technology in Japan”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 3, May/June 1995, pp. 26-36.
- [5] “Βασικές έννοιες στερεάς κατάστασης”, Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.ceid.upatras.gr/courses/electron/oldsite/kefalaio1.html>.
- [6] IEC 507, “Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems”, 1991.
- [7] IEC TS 62073, “Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces”, 2003.
- [8] CIGRE Working Group 04 of Study Committee No. 33, “The measurement of site pollution severity and its application to insulator dimensioning for A.C. systems”, Electra No. 64, May 1979, pp. 101-116.
- [9] Βασιλική Κονταργύρη, “Ρύπανση μονωτήρων”, Ενδιάμεση Κρίση, ΕΜΠ, 2005.
- [10] IEC 1109, “Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V – Definitions, test methods and acceptance criteria”, 1992.
- [11] Κ. Καγκαράκης, “Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.
- [12] Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος: “Ανάλυση Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας με τη βοήθεια H/Y”, Διδάσκοντες: Ι.Α. Σταθόπουλος, Π. Γιαννοπούλου, Α. Κλαδάς.
- [13] Tomas Gustavsson, “Outdoor Aging of Silicone Rubber Formulations in Coastal Environment”, Licentiate thesis, Chalmers University of Technology,

School of Electrical and Computer Engineering, Göteborg, Sweden, Technical report No. 353L, June 2000.

- [14] Vector Fields, “OPERA-3d User Guide”, Vector Fields Limited, England, November 2004.
- [15] Vector Fields, “OPERA-3d Reference Manual”, Vector Fields Limited, England, November 2004.
- [16] Weiguo Que, Stephen A. Sebo, “Electric field and potential distributions along non-ceramic insulators with water droplets”, Department of Electrical Engineering, The Ohio State University, Columbus, U.S.A, Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.integratedsoft.com/Papers/research/Coulomb_High_Voltage_paper2.pdf.
- [17] Tiebin Zhao, Michael G. Comber, “Calculation of Electric Field and Potential Distribution Along Nonceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp. 313-318.
- [18] Λαμπρινή Νικ. Πλατή, “Υπολογισμός πεδίου σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2006.