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

Υπολογισμός πεδίου σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαμπρινή Νικ. Πλατή

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

Αθήνα, Μάρτιος 2006

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

130

Υπολογισμός πεδίου σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λαμπρινή Νικ. Πλατή

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα : Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15η Μαρτίου 2006.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος Καθηγητής	Περικλής Δ. Μπούρκας Καθηγητής	Φραγκίσκος Β. Τοπαλής Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2006

Λαμπρινή Νικ. Πλατή

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.

“Εις ζωήν αγαθήν η παιδεία και η αρετή άγουσι”
Αριστοτέλης

“Για να φθάσει κάποιος στην Αλήθεια, είναι απαραίτητο,
έστω μια φορά στη ζωή του, να αμφιβάλει για τα πάντα,
όσο το δυνατόν περισσότερο”
Καρτέσιος

“Imagination is more important than knowledge”
Albert Einstein

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στο εσωτερικό και στην περιοχή του αέρα γύρω από έναν αλυσοειδή μονωτήρα όταν στους ακροδέκτες αυτού εφαρμόζεται συνεχής τάση.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση του πεδίου, διάφορα μοντέλα αλυσοειδών μονωτήρων από γυαλί και πορσελάνη προσομοιώθηκαν σε τρισδιάστατο περιβάλλον με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3d V10.5. Η προσομοίωση έλαβε χώρα σε ιδανικές συνθήκες. 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 πειραματικές μετρήσεις που διεξήγαγε η Κυρία Ζυγογιάννη. Τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά, αν και υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του τρισδιάστατου πακέτου ανάλυσης PC OPERA.

Λέξεις Κλειδιά

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

Abstract

The aim of this diploma thesis was the calculation of the electric field in the internal regions of an HV insulator as well as in the surrounding air when d.c. voltage is applied to the HV electrode of the insulator.

A number of ceramic insulators was simulated. A three-dimensional electric field analysis program, Opera V10.5, has been used for the calculations. The simulation process was carried out under dry and clean conditions. 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 results were compared to corresponding values which derive from the diploma thesis of Mrs Zigogianni, who calculated the electric field around the insulator with a fieldmeter. The 3-d analysis program gave satisfactory results, although there is further work to be done in the future in order to improve the potential of Opera V10.5.

Key Words

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

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα i

Πρόλογος iv

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 1

1.1 Γενικά 1

1.1.1 Βασικοί ορισμοί 4

1.2 Τα διηλεκτρικά υλικά των μονωτήρων 6

1.2.1 Ιδιότητες των μονωτήρων 7

1.2.2 Τύποι μονωτήρων 11

1.3 Ρύπανση μονωτήρων 18

1.3.1 Γενικά 18

1.3.2 Το φαινόμενο της υπερπήδησης στους μονωτήρες 21

1.3.3 Παράγοντες που ευνοούν τη διαδικασία της υπερπήδησης 22

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση 24

2.1 Αριθμητικές μέθοδοι 24

2.2 Προσομοιώσεις μονωτήρων με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων 26

2.3 Διεξαγωγή πειραμάτων σε μονωτήρες 52

Κεφάλαιο 3: Το πρόγραμμα Opera-3d 59

3.1 Εισαγωγή 59

3.2 Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d 62

3.2.1 Τοπολογία στο μοντελοποιητή 63

3.2.2 Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute) 66

3.2.3 Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων 67

3.2.4 Δημιουργία σύνθετων σωμάτων 68

3.2.5 Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία του πλέγματος 69

3.2.6 Δημιουργία του πλέγματος 72

3.2.7 Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση 73

3.2.8 Ανάλυση του μοντέλου 73

3.2.9 Μετ-Επεξεργασία 74
3.3 Προγράμματα ανάλυσης 77
3.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων 77
3.3.2 Επιλύτης Tosca, Ανάλυση στατικού πεδίου 82
3.3.3 ELEKTRA, Ανάλυση χρονομεταβλητού πεδίου 84

Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις αλυσοειδών μονωτήρων με το πρόγραμμα Opera - 3d 86
4.1 Εισαγωγή 86
4.2 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 150kV 88
4.2.1 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV 88
4.2.2 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV 101
4.2.3 Συγκριτικές γραφικές μεταξύ των δύο αλυσοειδών μονωτήρων 150kV 111
4.3 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 400 kV 114
4.3.1 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400kV 114
4.3.2 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 400kV 124
4.3.3 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400kV 134
4.3.4 Συγκριτικές γραφικές μεταξύ των τριών αλυσοειδών μονωτήρων 400kV 144

Κεφάλαιο 5: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα 148
5.1 Εισαγωγή 148
5.2 Κατανομή τάσης 148
5.2.1 Κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV 148
5.2.2 Κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV 150
5.2.3 Διαδικασία επιλογής της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου 151
5.2.3.1 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV 152
5.2.3.2 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV 154
5.3 Κατανομή της έντασης του πεδίου 157

5.3.1 Κατανομή της έντασης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV __ 157
5.3.2 Κατανομή της έντασης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV _____ 163
5.3.3 Συμπεράσματα για την κατανομή της έντασης στις θέσεις γύρω από τους αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV_____ 168

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Η επόμενη μέρα _____ 169

Βιβλιογραφία _____ 175

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Πλατή Λαμπρινής για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της κατανομής του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται σε μονωτήρες γραμμών μεταφοράς. Για το σκοπό αυτό, μια σειρά μονωτήρων από πορσελάνη και γυαλί προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3d V10.5.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στους μονωτήρες. Αναλύονται τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται, οι ιδιότητες που προσδίδουν αυτά στους μονωτήρες, ενώ επιχειρείται και μια κατηγοριοποίηση των τύπων μονωτήρων. Επίσης, περιγράφεται το πρόβλημα της ρύπανσης των μονωτήρων και η συνεισφορά του στο φαινόμενο της υπερπήδησης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί μια εισαγωγή στις αριθμητικές μεθόδους, με τις οποίες επιλύονται προβλήματα κατανομής δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου. Γίνεται μια ανασκόπηση ορισμένων σημαντικών μελετών σχετικών με τις αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού, με χρήση διαφόρων πακέτων λογισμικού, του ηλεκτρικού πεδίου σε διατάξεις μονωτήρων. Επιπλέον, παρουσιάζονται κάποιες πειραματικές μελέτες, στις οποίες υπολογίζεται η μέγιστη τάση αντοχής σε μονωτήρες υπό συνθήκες ρύπανσης και πάγου.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται το εγχειρίδιο λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3d V10.5. Περιγράφονται οι αλγόριθμοι λειτουργίας του, ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εντολές που αντιστοιχούν στις επί μέρους λειτουργίες. Επιπλέον, αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται δύο επιλύτες του τρισδιάστατου προγράμματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d κεραμεικών αλυσοειδών μονωτήρων 150kV και 400kV 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 κατόπιν συγκρίσεως των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία αντλήθηκαν από τη διπλωματική εργασία της Κυρίας Ζυγογιάννη. Το πρώτο μέρος του κεφαλαίου αφορά στη σύγκριση της κατανομής της τάσης στους δύο αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, ενώ το δεύτερο μέρος αφορά στη σύγκριση της κατανομής έντασης σε διάφορες θέσεις γύρω από τις δύο αλυσίδες.

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

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και για το άριστο κλίμα συνεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Βασιλική Κονταργύρη, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε πρόθυμα και αδιάκοπα, αλλά και για την ηθική στήριξή της καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Την ευχαριστώ για το υλικό που μου παρείχε, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και τμήμα της ενδιάμεσης κρίσης της διδακτορικής διατριβής της.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω επίσης προς τον κο. Ιωάννη. Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για την υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και για τις εύστοχες επισημάνσεις του σε καίρια σημεία της εργασίας μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Dr. Alex Michaelides, υπεύθυνο υποστήριξης και εφαρμογών της Vector Fields, για την καθοριστική, αν και από απόσταση, συμβολή του στο να ξεπεραστούν με επιτυχία ορισμένες σημαντικές δυσκολίες που συνάντησα σε κρίσιμα σημεία της προσπάθειάς μου.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστήριου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη και το φιλικό κλίμα που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, που καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, με στήριξαν ηθικά και υλικά, όντας δίπλα μου στην όλη προσπάθειά μου.

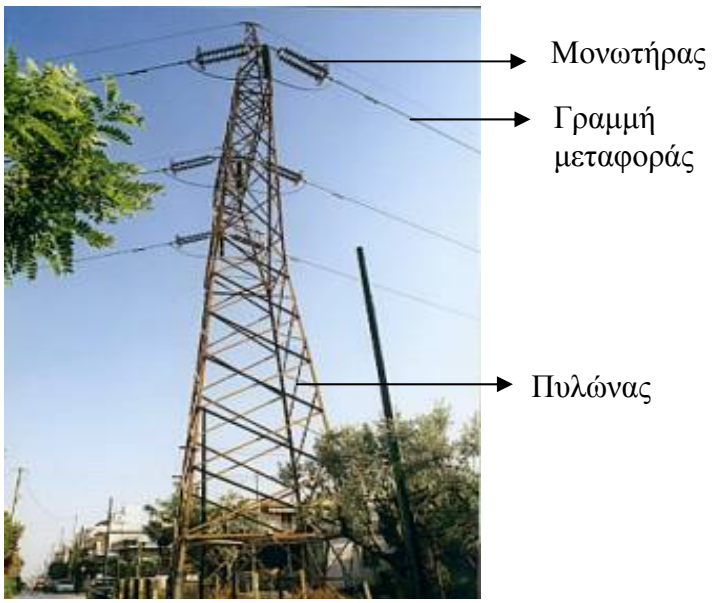
Κεφάλαιο

1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

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]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια εναέρια γραμμή μεταφοράς (transmission line) διανομής ενέργειας:



Σχήμα 1.1: Εναέρια γραμμή μεταφοράς.

Η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς καθορίζεται από τις ελάχιστες αποστάσεις μέσα στον αέρα μεταξύ στοιχείων υπό δυναμικό γης και φάσεων, καθώς και μεταξύ φάσεων. Αυτές οι ελάχιστες αποστάσεις εξασφαλίζονται μέσω της αναρτήσεως ή στηρίξεως των αγωγών των φάσεων με μονωτήρες.

Χαρακτηριστικά της μόνωσης μιας γραμμής μεταφοράς είναι ότι αυτή είναι εξωτερική και αυτοεπανερχόμενη: υπόκειται σε εξωγενείς επιδράσεις (π.χ. ρύπανση) και μετά από μία διάσπαση (αν δεν έχουν υπάρξει καταστροφικές συνέπειες) η μόνωση επανακτά τις αρχικές ιδιότητές της. Συνέπεια αυτού είναι ότι ένα σφάλμα, που εμφανίζεται πάνω στη γραμμή μετά από μία υπέρταση, δεν έχει κάποια σοβαρή συνέπεια στη μόνωση της γραμμής, η οποία αποκαθίσταται μετά τη σβέση του τόξου.

Γενικά, τις καταπονήσεις που δέχεται η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς τις κατατάσουμε σε εξωτερικές και εσωτερικές: οι εξωτερικές καταπονήσεις, προερχόμενες από κεραυνοπληξίες της ηλεκτρικής γραμμής και διαδιδόμενες μέσω αυτής, καταπονούν με σοβαρές, συχνά, συνέπειες τον εξοπλισμό του δικτύου. Οι εσωτερικές καταπονήσεις προέρχονται από το γεγονός ακριβώς της λειτουργίας της ηλεκτρικής γραμμής και υποδιαιρούνται:

- στην τάση βιομηχανικής συχνότητας, με την οποία λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες η ηλεκτρική γραμμή,
- στις παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας, με διάρκεια της τάξεως του δευτερολέπτου και
- στις υπερτάσεις χειρισμών, με διάρκεια εκατοντάδων έως χιλιάδων μs [3]

Οι προς μελέτη μονωτήρες στην εργασία αυτή είναι οι λεγόμενοι μονωτήρες Υψηλής Τάσης (High Voltage Insulators). Για εγκαταστάσεις πάνω από 20 kV το υλικό των μονωτήρων είναι είτε κεραμεικό (πορσελάνη), είτε γυαλί, είτε συνθετικό (δηλ. ίνες fiber glass σε συνδυασμό με εποξεικές ρητίνες) [1].

Όμως οι πρώτες εφαρμογές των μονωτήρων δεν είχαν σχέση με τη μεταβίβαση ηλεκτρικής ισχύος. Αρχικά χρησιμοποιούνταν στα δίκτυα τηλεγράφων (1835), ενώ η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία το 1882. Αυτή η σύντομη γραμμή μεταφοράς ήταν συνεχούς τάσης (1343 V) και συνέδεε το Miesbach με το Μόναχο. Στη συνέχεια η ανάπτυξη ήταν ταχύτατη, ενώ τα τελευταία

50 χρόνια η μεταφορά γίνεται με γραμμές υψηλών τάσεων μήκους πολλών χιλιομέτρων, όπως συμβαίνει στις Η.Π.Α και στην πρώην Σοβιετική Ένωση, και με πυκνά διασυνδεδεμένα δίκτυα στην Ευρώπη. Οι ηλεκτρικές και μηχανικές τάσεις στις οποίες έπρεπε να ανθίστανται οι τηλεγραφικοί μονωτήρες ήταν προφανώς αμελητέες σε σύγκριση με εκείνες που προκύπτουν από το φορτίο μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι νέες αυτές απαιτήσεις αποκάλυψαν σοβαρές ελλείψεις όχι μόνο στα υλικά, αλλά και στα σχέδια των μονωτήρων τα οποία αρχικά ήταν απλά αντίγραφα των τύπων τηλεγράφων. Η πρόσφατη ιστορία ανάπτυξης των μονωτήρων δε χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα τεχνολογικά επιτεύγματα, αλλά από διαρκείς αυξήσεις στο μέγεθος, προκειμένου να αντιμετωπιστούν επιτυχώς οι απαιτήσεις μεταφοράς συνεχούς ρεύματος και υπερυψηλών τάσεων [2].

Η εμπειρία της χρήσης και συνεπώς η ανάπτυξη των προϊόντων από γυαλί ή πορσελάνη για τους μονωτήρες γραμμών υψηλής τάσης συγκεντρώνεται εδώ και πάνω από 100 χρόνια. Οι μονωτήρες τύπου cap and pin από γυαλί ή πορσελάνη, μαζί με τους μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους κυριαρχούσαν στην αγορά μέχρι την εμφάνιση των εναλλακτικών μονωτήρων από πολυμερή τη δεκαετία 1960.

Τα προβλήματα αξιοπιστίας αποδείχθηκαν, και συνεχίζουν να αποδεικνύονται, δύσκολα να επιλυθούν στην πράξη. Για το λόγο αυτό γίνονται προσπάθειες να αντιμετωπιστούν επιτυχώς οι απαιτήσεις μεταφοράς υψηλής ή υπερυψηλής εναλλασσόμενης τάσης, καθώς και συνεχούς τάσης.

Οι ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών, η ικανότητά τους να λειτουργούν κάτω από δυσμενείς συνθήκες και φυσικά το κόστος είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τον τρόπο κατασκευής των μονωτήρων [2].

Ένα από τα κρίσιμα σημεία για τους υπαίθριους μονωτήρες είναι η διεπιφάνεια μεταξύ του στερεού μονωτικού σώματος και του περιβάλλοντος αέρα. Τόσο το σώμα του στερεού, όσο και ο αέρας έχουν ορισμένες διηλεκτρικές ιδιότητες, που δεν επηρεάζονται από τη διεπιφάνεια. Οι λόγοι για τους οποίους η διεπιφάνεια προκαλεί προβλήματα προέρχονται από το γεγονός ότι η επιφάνεια του μονωτήρα μπορεί να ρυπανθεί [10].

1.1.1 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 [4].

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 [5].

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 [5].

Συντελεστής μορφής (F): Καθορίζεται από τις διαστάσεις του μονωτήρα. Προκειμένου να προσδιοριστεί γραφικά, σχεδιάζεται η αντίστροφη τιμή της περιφέρειας του μονωτήρα (1/p) συναρτήσει 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 [5]:

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

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

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

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 [5].

Στρώμα ρύπανσης: Είναι ένα αγώγιμο ηλεκτρολυτικό στρώμα στην επιφάνεια του μονωτήρα, το οποίο αποτελείται από αλάτι και αδρανή υλικά [5].

Αγωγιμότητα στρώματος: Η αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή μορφής. Συνήθως εκφράζεται σε μS [5].

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 [5].

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 [7].

Διαβρεξιμότητα (wettability): Είναι η ικανότητα μίας επιφάνειας να υγρανθεί από ένα υγρό (π.χ. νερό) [6].

Υδροφοβικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με χαμηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδρόφοβη επιφάνεια έχει χαμηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να απωθεί το νερό [6].

Υδροφιλικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με υψηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδρόφιλη επιφάνεια έχει υψηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να υγραίνεται από το νερό, το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα πάνω στην επιφάνεια [6].

Tracking: Είναι μια μη-αναστρέψιμη επιδείνωση του μονωτικού υλικού, λόγω του σχηματισμού αγώγιμων δρόμων που ξεκινούν και αναπτύσσονται στην επιφάνεια του υλικού αυτού. Αυτοί οι δρόμοι είναι αγώγιμοι 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 μλεσω 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.

Υδρόλυση: Είναι μια χημική διαδικασία που περιλαμβάνει την αντίδραση του υλικού με νερό σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτρικό ή μηχανικό υποβιβασμό των ιδιοτήτων του υλικού.

1.2 Τα διηλεκτρικά υλικά των μονωτήρων

Τα τρία βασικά μέρη ενός 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, λιπαντικά ή βαφές.

Τα διηλεκτρικά είναι κυρίως κεραμεικά (πορσελάνη, γυαλί), ή πολυμερή. Τα υλικά αυτά απαιτείται να διατηρούν την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς να αστοχήσουν. Πρέπει επίσης να ανθίστανται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπτών του δικτύου χωρίς να διασπώνται. Επειδή οι επιφάνειες των διηλεκτρικών είναι πάντα, στην πράξη, ηλεκτρικά αγώγιμες εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθίσεων, είναι απαραίτητη μία διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση.

Στην περίπτωση των κεραμεικών διηλεκτρικών, το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο είναι το πυρίτιο, ενώ στην περίπτωση των πολυμερών ο άνθρακας. Η βασική χημική δομή των διηλεκτρικών διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό τόσο των ηλεκτρικών, όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων των μονωτήρων. Τόσο τα κεραμεικά, όσο και τα πολυμερή υλικά αποτελούνται από τετρασθενή άτομα, τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών.

Η πορσελάνη αποτελείται από ένα υαλώδες πλέγμα (άμορφη δομή) που περιλαμβάνει κρυστάλλους διαφορετικών ειδών και κόκκους από τα αρχικά συστατικά των ορυκτών, ορισμένα από τα οποία έχουν διαλυθεί μερικώς. Το γυαλί,

στην ιδανική περίπτωση, είναι ένα μίγμα πυριτικών αλάτων υαλώδους μορφής χωρίς προσμίξεις και ακαθαρσίες. Στην πράξη όμως πάντα περιέχονται παγιδευμένες φυσαλίδες αερίων και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό τα οποία εισάγουν ατέλειες στη δομή του υλικού. Οι μονωτήρες πορσελάνης είναι πάντα άμορφα υλικά (υαλώδης κατάσταση).

Τα καθαρά πολυμερή αποτελούνται από ένα επαναλαμβανόμενο βασικό είδος μορίων και είναι απαλλαγμένα από ξένες ουσίες. Αυτά σπάνια χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μονωτήρων, καθώς η τακτική παγκοσμίως είναι να χρησιμοποιούνται συμπολυμερή και ορυκτά πληρωτικά μέσα για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων [2].

1.2.1 Ιδιότητες των μονωτήρων

Όλοι οι μονωτήρες πρέπει να καλύπτουν ηλεκτρικές και μηχανικές λειτουργικές ανάγκες, οι οποίες συνήθως εμφανίζουν αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις.

Η αξιοπιστία είναι η σημαντικότερη ιδιότητα ενός μονωτήρα. Η μεγαλύτερη αστοχία σε έναν μονωτήρα γραμμής συμβαίνει όταν αυτός σπάσει μηχανικά και «κοπεί» η γραμμή. Ωστόσο, ακόμα κι αν αυτό συμβεί, οι μονωτήρες στους γειτονικούς πυλώνες θα πρέπει να μπορούν όχι μόνο να αναλάβουν το επιπλέον φορτίο, αλλά και να αντέξουν τη μηχανική καταπόνηση που σχετίζεται με ένα τέτοιο γεγονός, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα αποκατάστασης και το κόστος.

Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ πολυμερών και κεραμεικών υλικών βρίσκεται στη σταθερότητα. Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμεικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξεως, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο) και υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα [2].

Οι μονωτήρες είναι δυνατόν να αστοχήσουν στον προορισμό τους για τους εξής λόγους : α) Διάτρηση, δηλαδή υπερνίκηση της διηλεκτρικής αντοχής τους.

β) Υπερπήδηση, δηλαδή δημιουργία ηλεκτρικού τόξου που έρπει στην επιφάνεια του μονωτήρα.

γ) Διάσπαση του αέρα γύρω από το μονωτήρα.

δ) Πτώση κεραυνού μικρού χρόνου μετώπου.

Επειδή, όμως, η διηλεκτρική αντοχή του υλικού των μονωτήρων είναι μεγαλύτερη από αυτή του αέρα, η αστοχία οφείλεται βασικά στους δύο τελευταίους λόγους, ενώ ο πρώτος λόγος είναι σπάνιος, αφού συμβαίνει μόνο σε περιπτώσεις εσωτερικών ατελειών του υλικού. Στην αστοχία συντελεί και η επικάθιση σκόνης ή αλμύρας (σε παραθαλάσσιες περιοχές) επειδή μειώνει σημαντικά τη διηλεκτρική αντοχή στην επιφάνεια του μονωτήρα σε συνδυασμό με την ατμοσφαιρική υγρασία. Για τη μείωση των αστοχιών, αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, δηλαδή το μήκος της ημιπεριμέτρου της εγκάρσιας διατομής, με τη δημιουργία πτυχώσεων στην επιφάνεια του μονωτήρα [1].

Η ύπαρξη ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια των κεραμεικών μονωτήρων συμβάλλει στην αύξηση της ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη συνάφεια ή τη δύναμη συνάφειας των επιφανειακών προσμίξεων, και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμεικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα. Αντίθετα, οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση [2].

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 [9]. 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 [8].

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%.

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 [8].

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυμερών είναι οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές της ελεύθερης επιφανειακής τους ενέργειας. Θερμοδυναμικά, το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στα πολυμερή να ανθίστανται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση περισσότερο απ’ ό,τι τα κεραμεικά υλικά. Όταν λοιπόν λαμβάνεται υπόψη και η αντοχή στις διασπάσεις λόγω ρύπανσης, οι μονωτήρες με ελαστομερή προστατευτικά καλύμματα σιλικόνης (silicon rubber housing) αποδεικνύεται ότι υπερτερούν έναντι των παραδοσιακών μονωτήρων από πορσελάνη και γυαλί. Με άλλα λόγια, τα πολυμερή υλικά φαίνεται να είναι ιδανικά για εξωτερικούς μονωτήρες. Όμως, οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι συχνά τέτοιες που οδηγούν στη διάβρωση της επιφάνειας του πολυμερούς. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην απώλεια των άριστων επιφανειακών ιδιοτήτων. Οι διαβρωτικές διαδικασίες συμβάλλουν σε μια μη αναστρέψιμη και χρονικά εξαρτώμενη φθορά.

Όλα τα πολυμερή αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, ενώ επίσης υπόκεινται σε φωτόλυση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών τους δεσμών από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πιθανό να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, προκαλώντας επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών πηγάζει από το γεγονός ότι το βασικό στοιχείο τους, ο άνθρακας, αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις έναν καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή προσβολή της επιφάνειας, ιδιαίτερα από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγώγιμες επιφανειακές οδούς που είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας [2].

Η αντίσταση στην περιβαλλοντική φθορά μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση υλικών που προστατεύουν από τη θερμοκρασία (thermal protective fillers), όπως είναι το ATH (aluminum tri hydrate) ή αντιοξειδωτικών. Στους μονωτήρες υψηλών τάσεων ο κυριότερος λόγος που χρησιμοποιούμε ATH είναι η ιδιότητά του να μειώνει την

επιφανειακή θερμοκρασία στις περιπτώσεις εμφάνισης τόξου, μέσω της διάσπασής του σε οξείδιο του αλουμινίου και νερό που ακολουθείται από εξάτμιση του νερού.

Όσον αφορά στους κεραμεικούς μονωτήρες, είναι αναγκαίο να γίνει εκμετάλλευση των καλών ιδιοτήτων τους, αλλά με ταυτόχρονη μείωση της επιφανειακής υγροσκοπικότητάς τους και της ανεπιθύμητης έλξης ρύπων.

Οι κυριότερες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

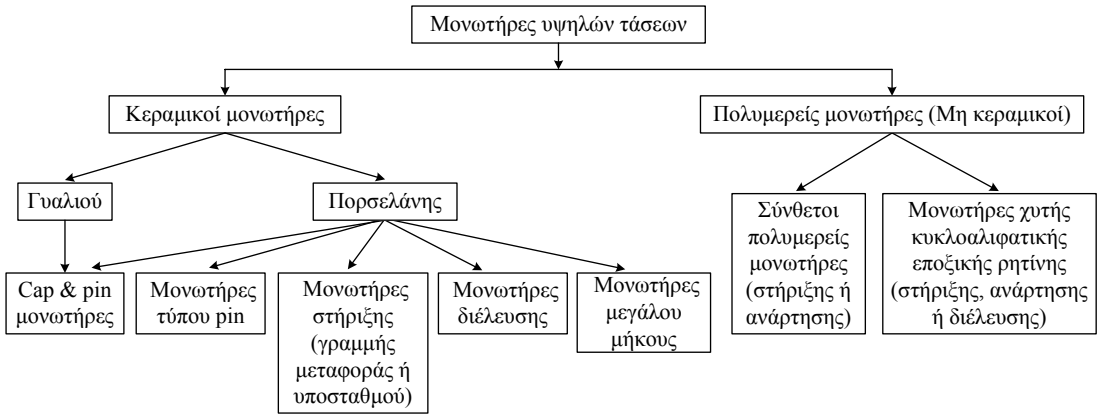
Πίνακας 1.1: Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών [8].

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 [Gpa]	50 – 100	7.2	0.6 – 16	43 – 60
Θερμική αγωγιμότητα [W/m ^{o}K]	1 – 4	1.0	0.17 – 0.9	0.2 – 1.2
Διασταλτικότητα (20 – 100 ^{o}C) [10^{-6} / ^{o}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}

1.2.2 Τύποι μονωτήρων

Είναι γνωστό ότι τόσο το υλικό, όσο και το γεωμετρικό σχέδιο των μονωτήρων παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο για τις μονωτικές τους επιδόσεις, καθώς επηρεάζει τον αυτοκαθαρισμό τους (από τη βροχή), τα μονοπάτια διαρροής, αλλά και την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου [10].

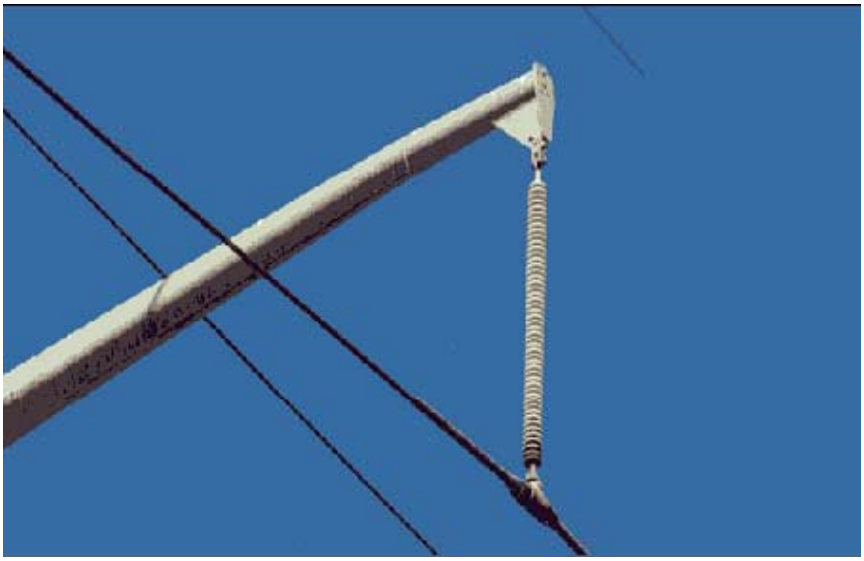
Μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων σύμφωνα με το υλικό και το σχήμα τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, ενώ στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές κατηγορίες μονωτήρων.



Σχήμα 1.2: Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης.

Η εφαρμογή των κεραμεικών και των μη-κεραμεικών μονωτήρων φαίνεται στα δύο παρακάτω σχήματα:

Σχήμα 1.3: Κεραμεικοί μονωτήρες σε εναέρια γραμμή.



Σχήμα 1.4: Μη-κεραμεικός μονωτήρας σε εναέρια γραμμή.

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. Ένας μονωτήρας τέτοιου τύπου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.

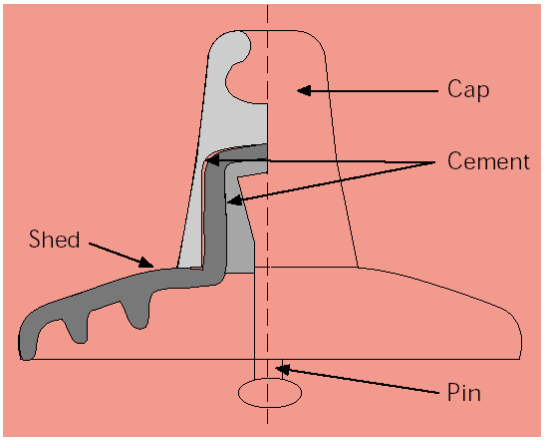
Σχήμα 1.5: Μονωτήρας τύπου pin.

Μονωτήρες τύπου cap & pin (cap and pin insulators)

Αυτοί κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί και είναι βασισμένοι στις ίδιες κατασκευαστικές αρχές με τους μονωτήρες τύπου pin (Σχήμα 1.6). Ένας αριθμός

τέτοιων μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins) σχηματίζοντας μια αλυσίδα μονωτήρων. Αυτές οι αλυσίδες χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Τα καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο (Σχήμα 1.7). Οι κωνικές μορφές των συναρμολογήσεων εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή κατά την άσκηση δυνάμεων εφελκυσμού. Στους μονωτήρες τύπου pin και τύπου cap & 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 διατρηθεί 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.

Σχήμα 1.6: Μονωτήρες τύπου cap and pin.

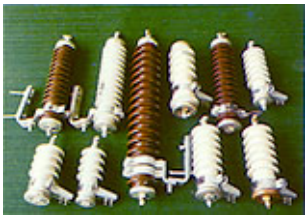


Σχήμα 1.7: Χαρακτηριστικά μέρη ενός μονωτήρα τύπου cap and pin.

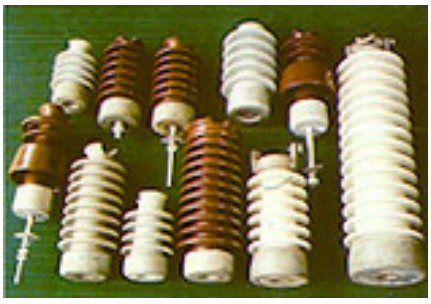
Μονωτήρες στήριξης (post type insulators)

Αυτοί οι μονωτήρες αποτελούνται από ένα 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 ή 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. Οι μονωτήρες τύπου post είναι μονωτήρες με ένα συμπαγή πυρήνα που χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ή απευθείας στους υποσταθμούς. Υποβάλλονται σε εκτατικά, αρθρωτά και συμπιεστικά φορτία [13]. Μονωτήρες τύπου post εικονίζονται στα Σχήματα 1.8 και 1.9.



Σχήμα 1.8: Μονωτήρες τύπου line post.



Σχήμα 1.9: Μονωτήρες τύπου station post.

Μονωτήρες διέλευσης (bushings)

Οι μονωτήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να μονώσουν τους αγωγούς

των ακροδεκτών υψηλής τάσης κυρίως μετασχηματιστών ή άλλων διατάξεων. Συνήθως οι μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται από πορσελάνη. Οι μονωτήρες διέλευσης προτιμώνται όταν η γραμμή πρέπει να περνάει μέσα από το μονωτήρα και ταυτόχρονα να στηρίζεται σε αυτόν. Χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές ή άλλες συσκευές και για τη διέλευση αγωγών εγκαρσίως μέσω χωρισμάτων (τοίχων κ.α.) [1].

Σχήμα 1.10: Μονωτήρες διέλευσης (station wall bushings).

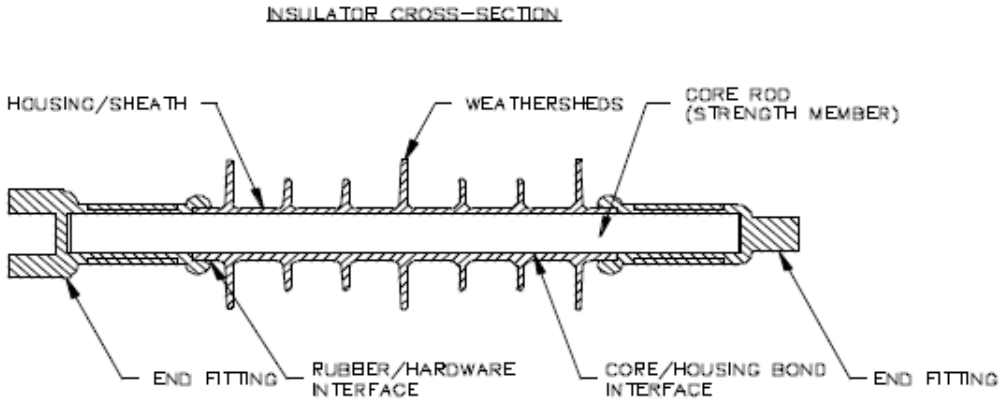
Μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους (longrod insulators)

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

Σχήμα 1.11: Μονωτήρες τύπου longrod (από πορσελάνη).

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 φαίνονται και στο Σχήμα 1.12 είναι τα εξής:



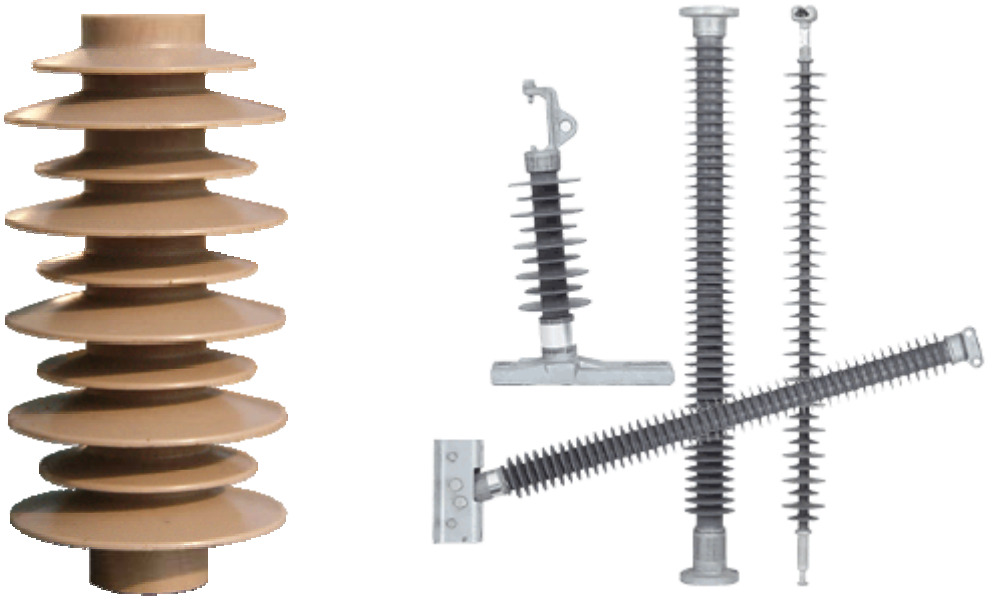
Σχήμα 1.12: Δομή πολυμερούς μονωτήρα.

- Ο πυρήνας (core) που είναι το εσωτερικό μονωτικό μέρος του πολυμερούς μονωτήρα. Μεταφέρει το μηχανικό φορτίο. Αποτελείται κυρίως από ίνες γυαλιού που βρίσκονται σε μάζα ρητίνης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη δύναμη εφελκυσμού.
- Ένα ελαστομερές περίβλημα (housing) για να προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες.
- Ελαστομερείς δίσκοι (weathersheds), που αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ώστε να ανθίσταται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα. Ακόμα, παρέχουν μια διακοπτόμενη διαδρομή για την αποστράγγιση του μονωτήρα από το νερό. Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και το αιθυλένιο-προπυλένιο-διένιο μονομερές καουτσούκ (ethylene propylene diene monomer – EDPM).
- Μεταλλικά μέρη (end fitting) που μεταδίδουν το μηχανικό φορτίο στον πυρήνα.
- Η ζώνη σύνδεσης (coupling zone), που αποτελεί μέρος των end fitting, μεταφέρει το φορτίο στη γραμμή, στον πύργο ή σε έναν άλλο μονωτήρα. Δεν περιλαμβάνει τη διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και των μεταλλικών μερών.

- ❖ Διεπιφάνειες (interfaces), δηλαδή οι επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών υλικών, όπως είναι η διεπιφάνεια μεταξύ του περιβλήματος και των ελαστομερών δισκών ή η διεπιφάνεια μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος [13].

Οι μεταλλικοί ακροδέκτες αυτών των μονωτήρων είναι συνήθως στερεωμένοι πάνω στην εξωτερική πλευρά της ράβδου του πυρήνα και τα συγκεκριμένα σημεία επαφής μεταξύ του ελαστομερούς και των ακροδεκτών είναι πολύ σημαντικά. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90% σε σύγκριση με τους αντίστοιχους κεραμεικούς.

Οι πολυμερείς μονωτήρες λέγονται και σύνθετοι (composite), που σημαίνει ότι αποτελούνται από τουλάχιστον δύο μονωτικά μέρη-έναν πυρήνα και το περίβλημα, εξοπλισμένα με τα μεταλλικά μέρη [13].



Σχήμα 1.13: Πολυμερείς μονωτήρες.

Μονωτήρες κυκλοαλιφατικής εποξεικής ρητίνης (Cyclo-alifatic epoxy resin insulators)

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

1.3 Ρύπανση μονωτήρων

1.3.1 Γενικά

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μονωτική ικανότητα των μονωτικών υλικών, σε περίπτωση που είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό χώρο, είναι η ρύπανση. Με τον όρο ρύπανση, όπως έχει ήδη ειπωθεί στην ενότητα 1.1.3, προσδιορίζεται η επικάθιση ακαθαρσιών που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα ή θαλάσσιας άλμης (καθαλάτωση) στην επιφάνεια τους. Η ρύπανση στην επιφάνεια ενός μονωτικού υλικού μπορεί να είναι είτε θαλάσσια, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι ο μονωτικό βρίσκεται σε παραθαλάσσια περιοχή και οι άνεμοι μεταφέρουν θαλασσινό νερό υπό τη μορφή καταιωνισμένου νερού στην επιφάνεια του όπου επικάθεται και σχηματίζεται ένα λεπτό υγρό αλατούχο επίστρωμα, είτε βιομηχανική, η οποία προέρχεται από τα στερεά κατάλοιπα των βιομηχανιών που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα. Η συνύπαρξη ρύπανσης (θαλάσσιας, βιομηχανικής ή συνδυασμού των προαναφερθέντων) και δροσιάς, ομίχλης ή σιγανής βροχής αποτελεί δυσμενέστατη συνθήκη λειτουργίας των μονωτικών υλικών και μπορεί να υποβιβάσει τη μονωτική τους ικανότητα σε μεγάλο βαθμό (40% έως 80%) με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου [1].

Συνεπώς, η παρατεταμένη ξηρασία, η περιβαντολλογική ρύπανση καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα μεταβάλλουν τη συμπεριφορά των μονωτικών υλικών που εκτίθενται σε αυτές με αποτέλεσμα να χρίζουν ιδιαίτερης μελέτης.

Στους τρόπους μείωσης των αστοχιών των μονωτήρων περιλαμβάνονται η αύξηση του μήκους ερπυσμού (leakage length) στις πιο «ευάλωτες» τοποθεσίες, η επικάλυψη των επιφανειών των μονωτήρων με υδροφοβικά υλικά και ο περιοδικός καθαρισμός των μονωτήρων ή η αντικατάσταση των πορσελάνινων μονωτήρων από πολυμερείς. Όλες αυτές οι τεχνικές παρουσιάζουν όμως μειονεκτήματα. Οι μη κεραμικές επιφάνειες χάνουν την υδροφοβικότητά τους και υφίστανται φθορά της επιφάνειάς τους έπειτα από παρατεταμένη έκθεση σε ρύπανση και ηλεκτρικές εκκενώσεις. Η καθιέρωση ενός αξιόπιστου προγράμματος καθαρισμού και συντήρησης φαίνεται σε πρώτο επίπεδο να είναι μια ευρέως αποδεκτή πρακτική για τη βελτίωση της κατάστασης. Όμως, το υψηλό κόστος και η ανάγκη για

εκπαιδευμένο εργατικό προσωπικό κάνουν το πλύσιμο των μονωτήρων ιδιαιτέρως δαπανηρό. Στο Σχήμα 1.14 φαίνεται πως γίνεται το πλύσιμο των μονωτήρων σε μια γραμμή μεταφοράς.

Σχήμα 1.14: Πλύσιμο μονωτήρων σε μια γραμμή μεταφοράς.

Στο πρότυπο IEC 815/1986 [11], προκειμένου να υπάρχει μία κατηγοριοποίηση των περιοχών ανάλογα με το ποσοστό ρύπανσης, έχουν καθοριστεί ποιοτικά τέσσερα επίπεδα ρύπανσης. Τα επίπεδα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 1.2.

Για κάθε επίπεδο ρύπανσης που περιγράφεται στον Πίνακα 1.2, το αντίστοιχο ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού (minimal nominal specific creepage distance), μετρούμενο σε mm/kV (πολική τάση) της υψηλότερης εφαρμοζόμενης τάσης στο μονωτήρα δίνεται στον Πίνακα 1.3 [11].

Πίνακας 1.2: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815 [11]

Επίπεδο ρύπανσης	**Παραδείγματα τυπικού περιβάλλοντος**
Ελαφριά	▪ Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης ▪ Περιοχές με μικρή πυκνότητα βιομηχανιών ή κατοικιών, αλλά εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις ▪ Αγροτικές περιοχές ▪ Ορεινές περιοχές Όλες αυτές οι περιοχές πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 10km με 20km από τη θάλασσα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε ανέμους κατ' ευθείαν από τη θάλασσα
Μεσαία	▪ Περιοχές με βιομηχανίες, οι οποίες δεν παράγουν ιδιαίτερα ρυπασμένο καπνό, και/ή με μέση πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης ▪ Περιοχές με υψηλή πυκνότητα κατοικιών και/ή βιομηχανιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις ▪ Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους από τη θάλασσα, αλλά όχι πολύ κοντά σε ακτή (τουλάχιστον σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων ανάλογα με τη μορφολογία της παράκτιας περιοχής και τις συνθήκες ανέμου).
Βαριά	▪ Περιοχές με υψηλή πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με υψηλή πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης, οι οποίες παράγουν ρύπανση ▪ Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή κάθε περιοχή που εκτίθεται σε σχετικά ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα
Πολύ βαριά	▪ Περιοχές περιορισμένης έκτασης, εκτεθειμένες σε αγώγιμη σκόνη και βιομηχανικό καπνό που προκαλεί αγώγιμες εναποθέσεις σημαντικού πάχους ▪ Περιοχές περιορισμένης έκτασης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε ακτή και εκτίθενται σε ψεκασμό θαλασσινού νερού ή σε πολύ δυνατό και ρυπασμένο αέρα από τη θάλασσα ▪ Περιοχές ερήμου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έλλειψη βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι και υποβάλλονται σε κανονική συμπύκνωση

Πίνακας 1.3: Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού συναρτήσει του επιπέδου ρύπανσης

Επίπεδο ρύπανσης	**Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού (mm/kV)**
I. Ελαφριά	16
II. Μεσαία	20
III. Βαριά	25
IV. Πολύ βαριά	31

Η ρύπανση μπορεί να μειώσει την τάση υπερπήδησης του μονωτήρα, οδηγώντας έτσι σε μη προγραμματισμένες βλάβες και μειωμένη αξιοπιστία. Η υπερπήδηση σε ένα μονωτήρα εξαιτίας της ρύπανσης είναι μια περίπλοκη διαδικασία που περνά από διάφορα στάδια. Αυτά ονομαστικά είναι τα εξής:

- Η δημιουργία στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα
- Ο σχηματισμός ξηρών ζωνών
- Οι μερικές εκκενώσεις και τέλος, αν οι συνθήκες το ευνοούν
- Η υπερπήδηση

Αν κάποιο από τα προηγούμενα στάδια δεν πραγματοποιηθεί, το φαινόμενο της υπερπήδησης δεν είναι δυνατόν να εκδηλωθεί.

1.3.2 Το φαινόμενο της υπερπήδησης στους μονωτήρες

Το φαινόμενο της υπερπήδησης (flashover) μονωτήρων λόγω ρύπανσης αναφέρεται στο γεγονός ότι δημιουργείται γεφύρωση με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα. Μια χαρακτηριστική φωτογραφία του φαινομένου της υπερπήδησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.15. Με κάποιον τρόπο, η παρουσία δυσδιάκριτων αγώγιμων σωματιδίων, τα οποία επικάθονται σε μια επιφάνεια, που αλλιώς θα ήταν ισχυρά μονωτική, μειώνει την πραγματική ηλεκτρική αντοχή της.

Σχήμα 1.15: Υπερπήδηση μονωτήρα (University of Stellenbosch, South Africa).

Το φαινόμενο της υπερπήδησης συμβαίνει στις υγρές επιφάνειες μονωτήρων στις οποίες έχουν συγκεντρωθεί ρύποι από το περιβάλλον με συνέπεια την δημιουργία αγώγιμου στρώματος. Όταν λοιπόν η διάδοση των μερικών ηλεκτρικών εκκενώσεων, οι οποίες ξεκινούν από το κέντρο του, γίνουν αρκετά ισχυρές ώστε να γεφυρώσουν τον μονωτήρα τότε αυτός χάνει εντελώς την ηλεκτρική του αντοχή. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι υπόλοιποι εν σειρά συνδεδεμένοι μονωτήρες θα υποστούν ολόκληρο το μέγεθος της τάσης και όταν και σε αυτούς εξελιχθεί το παραπάνω φαινόμενο θα οδηγηθούμε σε ολική γεφύρωση και διακοπή της τροφοδοσίας [12].

Τα αίτια της υπερπήδησης είναι δύο: α) η εντοπισμένη αφυδάτωση ενός στρώματος ηλεκτρολύτη αυξάνει τις ασυνέχειες στο αγώγιμο στρώμα – γνωστές ως ξηρές ζώνες – κατά μήκος των οποίων παράγονται ηλεκτρικές τάσεις (stresses) που επαρκούν για να ιονιστεί ο αέρας και β) τα τόξα σε ένα αέριο, από τη στιγμή που δημιουργούνται μπορούν εύκολα να επεκταθούν χωρίς εξασθένιση με σχετικά αργή απομάκρυνση των άκρων μεταξύ των οποίων εμφανίζονται [8].

Για μεγάλο μέρος της ζωής του ένας μονωτήρας θα λειτουργεί με ξηρές ζώνες στην επιφάνειά του, τις οποίες κατά καιρούς διαπερνούν ηλεκτρικές εκκενώσεις. Αυτές οι εκκενώσεις είναι ακίνδυνες, εκτός από τα προβλήματα πιθανής πρόκλησης επιφανειακών βλαβών για τα οποία ευθύνονται. Μόνο πολύ σπάνια ο συνδυασμός αγωγιμότητας και ηλεκτρικής τάσης θα είναι τέτοιος που θα επιτρέπει την ανάπτυξη ενός τόξου με τόσο ρεύμα ώστε να αυτο-διατηρείται και να διαδίδεται. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται υπερπήδηση. Το τεχνικό πρόβλημα είναι ότι η επιφανειακή αγωγιμότητα που προκαλεί την υπερπήδηση παραμένει, ακόμα κι όταν το τόξο έχει εξαλειφθεί από τη λειτουργία της προστασίας, γεγονός που επιτρέπει να ακολουθήσουν κι άλλες υπερπηδήσεις.

1.3.3 Παράγοντες που ευνοούν τη διαδικασία της υπερπήδησης

Συνηθισμένες προειδοποιήσεις για διάσπαση μονωτήρων λόγω ρύπανσης είναι οι παρακάτω [8]:

- Η πτώση σχεδόν καθαρού νερού, όπως σταγόνες, βροχή ή ομίχλη, σε ένα μονωτήρα, πάνω στον οποίο βρίσκεται ποσότητα ρύπανσης που

περιλαμβάνει διαλυτά ιονικά στοιχεία, όπως το κοινό αλάτι. Αυτή είναι και η πιο συχνή προειδοποίηση πριν τη διάσπαση του μονωτήρα.

- Η εναπόθεση σταγονιδίων θαλάσσιας ή βιομηχανικής ομίχλης, ή άλλου συνδυασμού νερού και ηλεκτρολύτη.
- Η συγκέντρωση παγετού, παγετώδους ομίχλης ή πάγου στη βρώμικη επιφάνεια ενός μονωτήρα. Τότε, τα ιοντικά συστατικά των ρύπων ενεργούν ώστε να μειώσουν το σημείο ψύξης του νερού κι έτσι επιτρέπουν την ύπαρξη υγρού διαλύματος στο σημείο επαφής των δύο επιφανειών.
- Η ένταξη ενός κυκλώματος που περιέχει υγρούς και βρώμικους μονωτήρες
- Η δημιουργία μιας προσωρινής υπέρτασης, ή μιας μεταβατικής αιχμής, σε ένα μονωτήρα υγρό, βρώμικο και πιθανόν ήδη ενεργοποιημένο.

Κεφάλαιο

2

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 γεωμετρίες-γραμμικά μέσα). Το πλεονέκτημα ότι οι αριθμητικές μέθοδοι επιλύουν προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες 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 επιδιωκώμενη 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 [14]. 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 [10].

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 Προσομοιώσεις μονωτήρων με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων

Στο άρθρο [15] παρουσιάστηκαν από τους Fan YaDong et al. τα αποτελέσματα της ανάλυσης της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου κάτω από διαφορετικές συνθήκες και σε σχέση με διάφορες κατασκευαστικές παραμέτρους σύνθετων πολυμερών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, το οποίο είναι ένα γενικό πακέτο για την αριθμητική επίλυση μεγάλου αριθμού μηχανικών προβλημάτων. Αυτά τα προβλήματα περιλαμβάνουν στατική ή δυναμική ανάλυση δομής, μεταφορά θερμότητας και προβλήματα ρευστών, καθώς και ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. Μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται πάρα πολλά είδη πολυμερών μονωτήρων ανάρτησης για γραμμές 35-500 kV. Γι'αυτό, οι ερευνητές έχουν δώσει πλέον έμφαση στο βέλτιστο μοντέλο (σχέδιο) των μονωτήρων με στόχο τη μείωση των αστοχιών τους.

Η απόδοση του πολυμερούς μονωτήρα σε συνθήκες ρύπανσης και υγρασίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του υλικού και από τη δομή της εξωτερικής μόνωσης. Ακόμα, η υδροφοβικότητα της επιφάνειας του μονωτήρα αυτού μπορεί να μειωθεί λόγω της ηλεκτρικής καταπόνησης και της επίδρασης του περιβάλλοντος. Σε αυτή την περίπτωση, η δομή της εξωτερικής μόνωσης επηρεάζει

όχι μόνο την απόδοση του μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης και υγρασίας, αλλά και τη γήρανση του εξωτερικού μονωτικού υλικού. Έχει προηγηθεί ανάλυση της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού των μονωτήρων αναρτήσεως σε δεδομένο μήκος για διαφορετική διάμετρο των ελαστομερών δίσκων και για διαφορετικές γωνίες ανάρτησης μέσω του λογισμικού ANSYS.

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση και ανάλυση έχουν ως εξής:

- Η κατανομή του δυναμικού σε έναν πολυμερή μονωτήρα επηρεάζεται από τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά.
- Η αλλαγή της απόστασης των ελαστομερών δίσκων μεταξύ τους μπορεί να επηρεάσει την τάση υπερπήδησης του πολυμερούς μονωτήρα.
- Η αύξηση της διαμέτρου των ελαστομερών δίσκων και της γωνίας ανάρτησης προκαλεί χειρότερη κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στους δίσκους που βρίσκονται κοντά στο άκρο(ηλεκτρόδιο) υψηλής τάσης.
- Οι πολυμερείς μονωτήρες έχουν καλύτερη επιφανειακή κατανομή του δυναμικού όταν οι δίσκοι έχουν περίμετρο περίπου 120 mm και απόσταση μεταξύ των δίσκων κοντά στα 50 mm.
- Εάν τοποθετηθεί τοροειδές στο μονωτήρα, βελτιώνεται εμφανώς η κατανομή του ηλεκτρικού δυμανικού σε αυτόν.

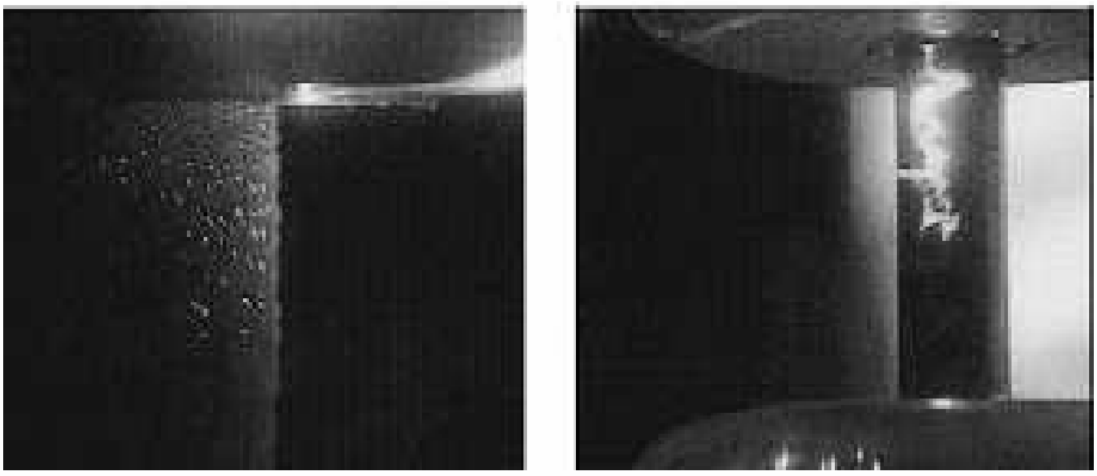
Από το άρθρο [16] προέκυψε ότι η αναλυτική προσομοίωση της συμπεριφοράς των σταγονιδίων σε πολυμερείς επιφάνειες υπό την επίδραση πεδίου υψηλής τάσης είναι ένα απαιτητικό έργο. Το πρώτο βήμα είναι ο αριθμητικός υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της διηλεκτρικής μετατόπισης. Ως αποτέλεσμα των μετρήσεων των σταγονιδίων, προκύπτει η υπόθεση ότι η αύξηση στην πίεση της καμπυλότητας προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη διηλεκτρική μετατόπισης, καθώς αυξάνεται η τάση.

Η γήρανση των υλικών είναι μεγάλης πρακτικής σημασίας σε εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων. Περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως η υγρασία ή η επιφανειακή ρύπανση σε έναν μονωτήρα υψηλής τάσης, έχουν ως αποτέλεσμα να χάνει ο τελευταίος τις μονωτικές του ιδιότητες, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα καταστροφικές εκκενώσεις (disruptive discharges), οι οποίες μετά από μεγάλα διαστήματα επιταχύνουν τη γήρανση του μονωτήρα υψηλής τάσης. Παρόλο που

υπάρχουν εκτεταμένες ερευνητικές μελέτες πάνω σε αυτή τη διαδικασία, δεν υπήρχε μέχρι πρόσφατα μια τρισδιάστατη προσομοίωση του φαινομένου.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Integration Technique) για διακριτοποίηση του μαθηματικού μοντέλου, πρώτα διεξάγονται ποιοτικές προσομοιώσεις που συνεχίζονται παράλληλα με σχετικά πειράματα με στόχο να πραγματοποιηθούν τελικά αναλυτικές ποιοτικές προσομοιώσεις των ηλεκτρικών διαδικασιών που είναι υπεύθυνες για τη γήρανση των υλικών.

Σε ένα στεγνό και καθαρό διηλεκτρικό υλικό, όπως η εποξεική ρυτίνη που χρησιμοποιείται συχνά σε μονωτήρες υψηλής τάσεως, μπορεί να εφαρμοστεί το ηλεκτροστατικό μοντέλο. Κατά την παρουσία αγώγιμης ρύπανσης, η επαλληλία ηλεκτροστατικού πεδίου και ηλεκτρικού πεδίου με την επίλυση της εξίσωσης ροής ρεύματος λαμβάνει χώρα: κάτω από μια κρίσιμη τιμή τάσης U_k, το ηλεκτροστατικό πεδίο του αφόρτιστου χώρου επικρατεί. Το διηλεκτρικό μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τέλειος μονωτήρας χωρίς χωρικά φορτία. Αλλά για τιμές τάσης πάνω από τη U_k, το μονωτικό υλικό χάνει τις μονωτικές του ιδιότητες και γίνεται ο φορέας της εκφόρτισης, η οποία δημιουργεί έναν αγώγιμο δρόμο κατά μήκος του μονωτήρα. Η ένωση ξεχωριστών σταγονιδίων σε υγρούς μονωτήρες, επιτρέπει σε αυτόν να φθάσει στην τάση εκφόρτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 (πριν και κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης):



(α) (β)

Σχήμα 2.1: Υγρός μονωτήρας (α)πριν την εκφόρτιση και (β) κατά την εκφόρτιση

Τα ηλεκτρο-quasistatics (ηλεκτρο-ημιστατικές εξισώσεις) δίνουν μια καλή προσέγγιση για πεδία χαμηλών συχνοτήτων, τα οποία θεωρούνται ότι είναι απαλλαγμένα από δινορρεύματα (δηλαδή η μαγνητική επαγωγή μπορεί να αμεληθεί), ενώ η επίδραση του ρεύματος μετατόπισης παίζει σημαντικό ρόλο. Από τα παραπάνω, η τελική μορφή της εξίσωσης του Maxwell είναι μια εξίσωση διαφοράς:

$\mathrm{div}((i\omega\varepsilon+k)\mathrm{grad}\varphi) = \mathrm{div}(\mathbf{J_L}+\mathbf{J_E})$, όπου $\mathbf{J}= \mathbf{J_L}+\mathbf{J_E}$ και τα γράμματα σε bold είναι διανύσματα.

Κατόπιν, μοντελοποιούμε τις βασικές εξισώσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Προκύπτει τελικά προς επίλυση ένα μιγαδικό γραμμικό σύστημα από εξισώσεις. Ο πίνακας του συστήματος είναι συμμετρικός μιγαδικός. Για την επίλυση του συμμετρικού μιγαδικού συστήματος χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι επανάληψης, όπως οι Kryvol-subspace μέθοδοι και η AMG μεθοδολογία.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα λαμβάνονται από την προσομοίωση τρισδιάστατων απλών μοντέλων πολυμερών μονωτήρων που πάνω τους έχουν εναποτεθεί σταγονίδια νερού. Από την προσομοίωση προκύπτει η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα, καθώς και η πυκνότητα της δύναμης γύρω από ένα σταγονίδιο νερού(στην ίδια διεύθυνση με το ηλεκτρικό πεδίο και κάθετα στα ηλεκτρόδια).

Για να συμπεριληφθεί στην προσομοίωση η παραμόρφωση του σταγονιδίου κατά τη διάρκεια της έκθεσης στην υψηλή τάση, θα πρέπει να χαρακτηριστούν οι κινήσεις των σταγονιδίων. Από τα πειράματα παρατηρείται μείωση του ύψους και αύξηση της διαμέτρου του σταγονιδίου, καθώς αυξάνεται η τάση.

Οι κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού κατά μήκος βρεγμένων μη-κεραμεικών μονωτήρων υπολογίζονται, χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης ηλεκτρικού πεδίου, το COULOMB. Στο άρθρο [17] οι Weiguo Que et al. αναλύουν την ενδυνάμωση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των σταγονιδίων σε μια επίπεδη υδροφοβική επιφάνεια από σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber).

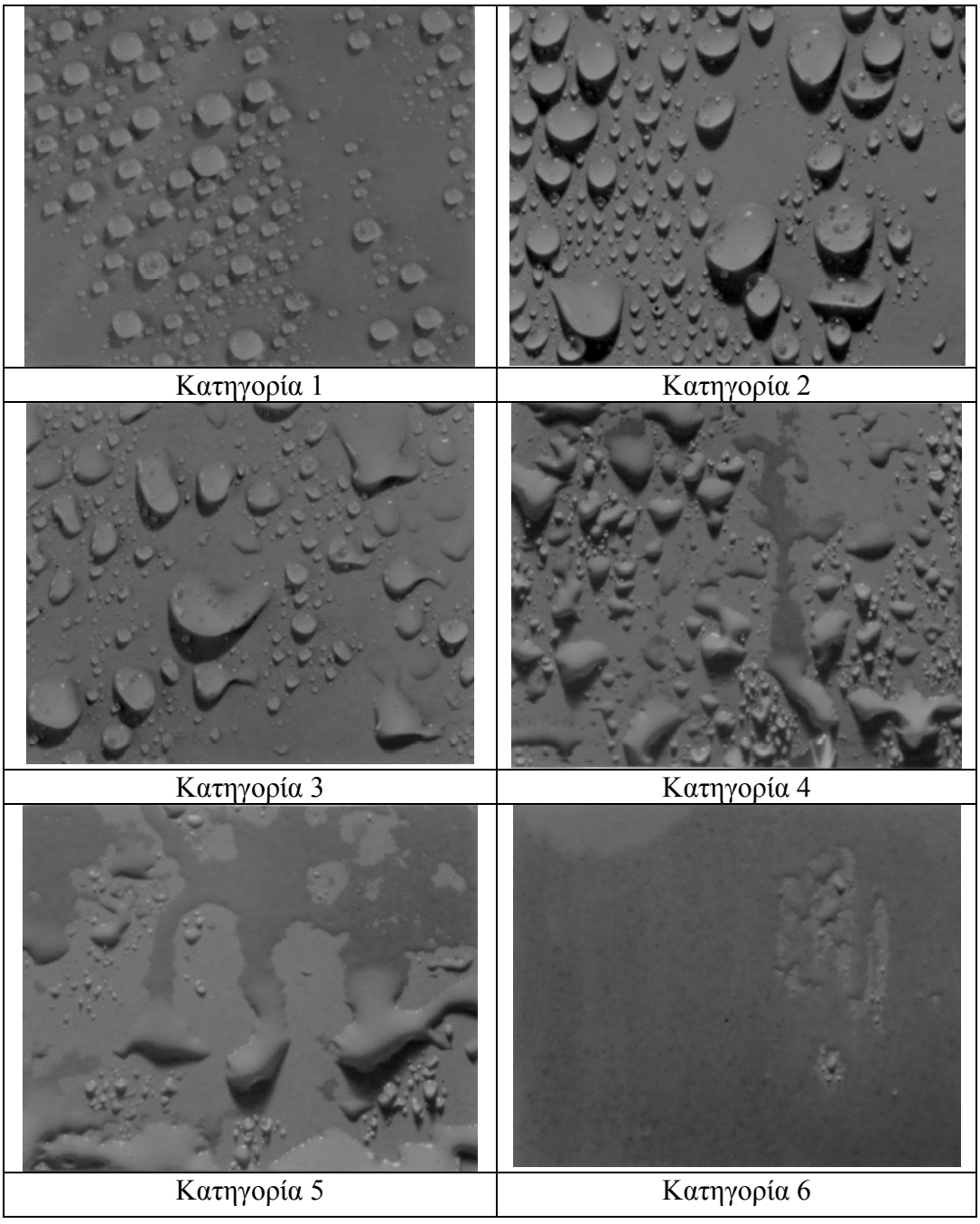
Η υπερπήδηση μη-κεραμεικών μονωτήρων υπό συνθήκες βροχής δείχνει ότι μια εκκένωση γεφυρώνει τους ελαστομερείς δίσκους και ότι δε χρησιμοποιείται αποτελεσματικά το μήκος ερπυσμού κατά μηκος της επιφάνειας των μονωτήρων.

Η υπερπήδηση μη-κεραμεικών μονωτήρων με τεχνητή ρύπανση σε δοκιμές ομίχλης δείχνει ότι οι εκκενώσεις σε έναν πλήρως ρυπασμένο μονωτήρα ακολουθούν το μονοπάτι του μήκους ερπυσμού κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα.

Η παρουσία των σταγονιδίων και των ρυπασμένων στρωμάτων αυξάνουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μη-κεραμεικού μονωτήρα. Τα σταγονίδια νερού παίζουν σημαντικό ρόλο στην υπερπήδηση λόγω ρύπανσης και στη γήρανση μη-κεραμεικών μονωτήρων:

- Τα σταγονίδια αυξάνουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα, λόγω της υψηλής επιτρεπτότητας και αγωγιμότητάς τους.
- Οι επιφανειακές εκκενώσεις Corona, λόγω των σταγονιδίων, προκαλούν τη γήρανση του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένοι οι ελαστομερείς δίσκοι του μονωτήρα.
- Η εκκένωση Corona καταστρέφει τοπικά την υδροφοβικότητα του υλικού τοπικά, προκαλώντας τα γειτονικά σταγονίδια νερού να ενώνονται.

Τα κριτήρια για την ταξινόμηση των υγραμένων επιφανειών είναι οπτικά και λαμβάνουν υπόψη τους δύο παραμέτρους: α) το σχήμα των σταγόνων και β) το επί της εκατό τμήμα της επιφάνειας που έχει υγρανθεί. Η επιφάνεια που ανήκει στην πρώτη κατηγορία είναι η πιο υδρόφοβη επιφάνεια, ενώ η επιφάνεια που ανήκει στην έβδομη κατηγορία είναι η πιο υδρόφιλη επιφάνεια. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται τυπικές φωτογραφίες επιφανειών με διαφορετικές τάξεις (κατηγορίες) ύγρανσης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC TS 62073 [6].



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση των κατηγοριών ύγρανσης.

Το τριδιάστατο πρόγραμμα COULOMB βασίζεται στη μέθοδο των οριακών στοιχείων. Η μέθοδος των οριακών στοιχείων [14] επιτρέπει την ανάλυση ενός προβλήματος χρησιμοποιώντας κόμβους που βρίσκονται μόνο στα σύνορα μεταξύ δύο υλικών. Αυτό επιτυγχάνεται μετασχηματίζοντας κατάλληλα την ολοκληρωτική εξίσωση. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εισάγει μια πολύ περιορισμένη διακριτότητα (σχεδόν μια διάσταση λιγότερο) σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, δηλαδή τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (FIT) και τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή οδηγεί σε συστήματα εξισώσεων με «γεμάτους» πίνακες (ενώ οι άλλες μέθοδοι δημιουργούν συστήματα με πίνακες «ζώνης») και συναντά δυσκολίες στην αναπαράσταση μη γραμμικών υλικών.

Στο άρθρο [17] μελετώνται τα βασικά στοιχεία της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από ένα σταγονίδιο νερού. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιείται μια επίπεδη επιφάνεια από σιλικονούχο καουτσούκ με ένα σταγονίδιο νερού ημισφαιρικού σχήματος (για απλοποίηση) και θα μελετηθεί η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου στην κοντινή περιοχή γύρω από το σταγονίδιο.

Θεωρώντας ένα μονωτήρα που αναρτάται κατακόρυφα, υπάρχουν σταγονίδια νερού τόσο στο πολυμερές περίβλημα (housing) όσο και στους δίσκους (sheds). Η επιφάνεια του δίσκου είναι σχεδόν παράλληλη στις ισοδυναμικές γραμμές, ενώ η επιφάνεια του περιβλήματος κάθετη σε αυτές.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [17] προκύπτει ότι η παρουσία του σταγονιδίου προκαλεί μια αξιοσημείωτη διαταραχή στη διαμόρφωση των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών ίσης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (streamlines) στην περιοχή γύρω από το σταγονίδιο.

Από την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος (sheath) προέκυψε ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνει σημαντικά στη διεπιφάνεια μεταξύ του σταγονιδίου, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Ακριβώς σε αυτό το σημείο, στην επιφάνεια του σταγονιδίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της.

Από την προσομοίωση της περιοχής του ελαστομερούς δίσκου (shed) προέκυψε ότι το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αλλάζει κατά μέτρο και διεύθυνση κατά μήκος της επιφάνειας του σταγονιδίου. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στην κορυφή του σταγονιδίου.

Για την ανάλυση της κατανομής του δυναμικού κάτω από συνθήκες βροχής και ομίχλης χρησιμοποιείται ένας μικρός μονωτήρας τεσσάρων μόνο δίσκων. Για να προσομοιώσουμε συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, χρησιμοποιούμε τα εξής μοντέλα:

- Στεγνό και καθαρό μοντέλο: ο μονωτήρας έχει την ιδανική μορφή του μη-κεραμεικού μονωτήρα
- Το μοντέλο «βροχής»: Θεωρούμε ότι υπάρχουν 252 σταγονίδια σε κάθε δίσκο του μονωτήρα. Η διάμετρος των ημισφαιρικών σταγονιδίων είναι 2 mm. Τα σταγονίδια έχουν διηλεκτρική σταθερά ίση με 80 και αγωγιμότητα ίση με 50 μS/cm. Η επιφάνεια του περιβλήματος (sheath) και η εσωτερική επιφάνεια (undersides) των δίσκων είναι στεγνές.
- Το μοντέλο «ομίχλης»: Η διαφορά του μοντέλου αυτού από το μοντέλο «βροχής» είναι ότι σε αυτό το μοντέλο οι εσωτερικές επιφάνειες των δίσκων είναι καλυμμένες από ένα συνεχές στρώμα νερού. Εδώ, τα σταγονίδια έχουν διηλεκτρική σταθερά ίση με 80 και αγωγιμότητα ίση με 250 μS/cm.

Στη συνέχεια αναφέρονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις [17]. Η παρουσία των σταγονιδίων στην εξωτερική επιφάνεια των ελαστομερών δίσκων, στην περίπτωση του μοντέλου «βροχής», κάνει την κατανομή του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου πιο ομοιόμορφη σε σχέση με την ίδια κατανομή στο στεγνό και καθαρό μοντέλο. Φυσικά, τοπικά η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή γύρω από κάθε σταγονίδιο αυξάνεται. Συνεπώς, η δύναμη του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου γύρω από την περιοχή σύνδεσης (περιβλήματος, αέρα και μετάλλου) θα είναι λίγο μικρότερη από ό,τι στο στεγνό και καθαρό μοντέλο.

Στην περίπτωση του μοντέλου «ομίχλης», οι στεγνές περιοχές κατά μήκος κάποιων κομματιών του περιβλήματος του μονωτήρα συγκρατούν το μεγαλύτερο μέρος της τάσης. Η συνολική δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της κάτω περιοχής του μονωτήρα, η οποία βρίσκεται πλησίον του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ό,τι στο στεγνό και καθαρό μοντέλο.

Μερικά από τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν από τους T. Braunsberger et al. στο άρθρο [18]. Τα σταγονίδια νερού που βρίσκονται στην επιφάνεια του μονωτήρα μεταβάλλουν το ηλεκτρικό πεδίο. Συγκεκριμένα, προκαλούν τη δημιουργία επιφανειακών εκκενώσεων και καταστρέφουν την υδροφοβικότητα των μονωτήρων από σιλικόνη και εποξεική ρητίνη. Για να ερευνηθεί η σχέση μεταξύ των μερικών εκκενώσεων και των σταγονιδίων νερού και η επίδραση της σχέσης αυτής στις υδροφοβικές ιδιότητες του υλικού της επιφάνειας των πολυμερών μονωτήρων, έγιναν δύο είδη εργαστηριακών πειραμάτων. Το πρώτο είδος αφορούσε το

ηλεκτρικό πεδίο στο δίσκο (shed), που είναι κάθετο στην επιφάνειά του και το δεύτερο είδος πειράματος αφορούσε το ηλεκτρικό πεδίο στο περίβλημα (sheath), το οποίο είναι σχεδόν εφαπτομενικό σε αυτό.

Στο πρώτο είδος, δεν ήταν ανιχνεύσιμες οι μερικές εκκενώσεις στο δοκίμιο που προσομοίωνε τον ελαστομερή δίσκο, παρά μόνο αμέσως πριν γίνει η κατάρρευση. Στο δεύτερο είδος, τα σταγονίδια επιμηκύνονται κατά μήκος της επιφάνειας, όταν αυτή βρίσκεται υπό τάση. Αυτή η παραμόρφωση των σταγονιδίων παραμένει και όταν πια το δοκίμιο δε βρίσκεται υπό τάση. Εάν αυξηθεί η τάση, οι μερικές εκκενώσεις είναι ανιχνεύσιμες. Ως γενικότερο κανόνα, έχει παρατηρηθεί ότι όταν η τάση φθάσει σε κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο, τα σταγονίδια αρχίζουν να δονούνται και δημιουργούνται στην επιφάνειά τους κάποια μεταβαλλόμενα σχήματα. Μια περαιτέρω αύξηση στην τάση προκαλεί τη διάσπαση των σταγονιδίων σε μικρότερα. Η ψηφιακή κάμερα που χρησιμοποιήθηκε κατάφερε μόνο κατά τύχη να φωτογραφίσει τις ταλαντωτικές κινήσεις των σταγονιδίων και το «σκάσιμό» τους, καθώς και τη δημιουργία καναλιού κατάρρευσης στο δοκίμιο.

Από τα πειράματα διαπιστώθηκε ότι βραχυπρόθεσμα δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των μερικών εκκενώσεων στην επιφάνεια του πολυμερούς μονωτήρα και της υδροφοβικότητας της επιφάνειας. Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε από προσομοίωση σε υπολογιστή και το συμπέρασμα του άρθρου «Κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού κατά μήκος μη-κεραμεικών μονωτήρων με σταγονίδια νερού», ότι δηλαδή η ένταση του πεδίου στην περίπτωση του δίσκου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στην κορυφή του σταγονιδίου. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση με το περίβλημα, η μέγιστη τιμή του πεδίου εντοπίζεται κοντά στη γραμμή όπου το σταγονίδιο έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του περιβλήματος.

Στο άρθρο [19] οι Weiguo Que et al. χρησιμοποίησαν πάλι το τρισδιάστατο πρόγραμμα COULOMB. Θεώρησαν μια γεωμετρία που περιλαμβάνει πυλώνα με τριφασική γραμμη μεταφοράς 765 kV, ώστε να υπολογιστεί η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων. Ερεύνησαν τα αποτελέσματα της παρουσίας των αγώγιμων γραμμών μεταφοράς και της διέγερσης των τριών φάσεων (αντί για μίας) πάνω στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού.

Ο έλεγχος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μη-κεραμεικούς μονωτήρες είναι πολύ σημαντικός. Υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να προκαλέσει το

φαινόμενο Corona γύρω από τους μονωτήρες και μπορεί να προκαλέσει την αποικοδόμηση των υλικών του περιβλήματος. Όταν οι μη-κεραμεικοί μονωτήρες τοποθετούνται σε τριφασική γραμμή μεταφοράς, οι αγωγοί (γραμμές μεταφοράς), το τοροειδές (grading ring), η διαμόρφωση του πυλώνα και οι άλλες δύο φάσεις του τριφασικού συστήματος μπορούν να επηρεάσουν τις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού (Electric Field and Potential Distribution-EFPD) στην περιοχή κοντά στους μονωτήρες. Για να αναλυθούν οι κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού ενός μονωτήρα σε λειτουργία, είναι σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση των παραπάνω παραγόντων από μια πρακτική σκοπιά. Για να ελεγχθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το σχήμα των μεταλλικών άκρων (end fitting) των πολυμερών μονωτήρων πρέπει να σχεδιαστεί πολύ προσεκτικά. Αν θεωρηθεί απαραίτητο, πρέπει να προστεθεί ένα τοροειδές.

Στο άρθρο αυτό [19] αναλύονται οι επιδράσεις του πυρήνα από ίνες γυαλιού, του πολυμερούς περιβλήματος και των ελαστομερών δίσκων, καθώς και της αγώγιμης 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 ποιό 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. 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 2.3.

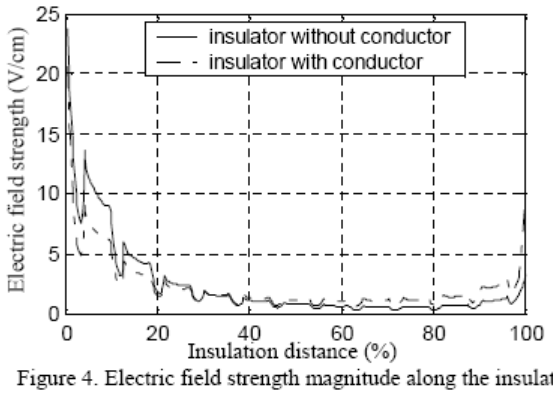


Figure 4. Electric field strength magnitude along the insulation distance at the surface of the sheath.

Σχήμα 2.3: 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.

Οι διαστάσεις των μονωτήρων πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε να αποφευχθεί η υπερπήδηση, ακόμα και όταν εφαρμοστεί η μέγιστη υπέρταση στη γραμμή. Λόγω της γεωμετρίας της γραμμής και του μονωτήρα, η κατανομή της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα δεν είναι ομοιόμορφη. Αυτό έχει αναλυθεί τόσο θεωρητικά, όσο και χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες είναι ιδιαιτέρως χρήσιμες όταν ο μονωτήρας είναι καλυμμένος από ένα αγώγιμο στρώμα ρύπανσης. Στο άρθρο [20] οι W.L. Vosloo et al. χρησιμοποιείται ένα δισδιάστατο πακέτο προσομοίωσης, το ELECTRO, που εφαρμόζει τη μέθοδο οριακών στοιχείων (BEM) και μπορεί να λύσει συμμετρικά προβλήματα εκ περιστροφής.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, μοντελοποιήθηκε ο μονωτήρας μαζί με το στρώμα ρύπανσης, όπου αυτό χρειαζόταν. Λόγω της απαίτησης για συμμετρία εκ περιστροφής, δεν ήταν δυνατόν να μοντελοποιηθεί η αγώγιμη γραμμή. Αντ' αυτής, μοντελοποιήθηκε ένα σφαιρικό ηλεκτρόδιο. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις: α) ένας καθαρός μονωτήρας από σιλικονούχο καουτσούκ, β) ο ίδιος μονωτήρας καλυμμένος με ομοιόμορφο στρώμα μέτριας ρύπανσης, γ) ο μονωτήρας ολοκληρωτικά καλυμμένος από στρώμα ρύπανσης, εξαιρουμένης μιας καθαρής ζώνης 1 cm στο κέντρο του μονωτήρα στην επιφάνεια του περιβλήματος (sheath).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με δύο τρόπους: με ισοδυναμικές γραμμές και με γραμμές ίσης έντασης του πεδίου και παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

Στην περίπτωση (α) οι ηλεκτρικές καταπονήσεις, δηλαδή οι τιμές της τάσης και της έντασης, είναι μέγιστες στην περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης του καθαρού μονωτήρα.

Στην περίπτωση (β) η τάση κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του ρυπασμένου μονωτήρα από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης (εκεί κοντά λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της) προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο. Από την άλλη, οι γραμμές ίσης έντασης δείχνουν ότι οι περιφέρειες των δίσκων (shed rims), που βρίσκονται κοντά

στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης, καταπονούνται περισσότερο από την άποψη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Στην περίπτωση (γ) τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τάση μεταφέρεται από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης προς την ξηρή ζώνη(dry band) και το δυναμικό της γης μεταφέρεται από το γειωμένο ηλεκτρόδιο προς την ξηρή ζώνη. Γι'αυτό, ένα μεγάλο μέρος της τάσης βρίσκεται στην ξηρή ζώνη. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από μετρήσεις πεδίου στους μονωτήρες δοκιμής, με τη βοήθεια ηλεκτροστατικού βολτομέτρου στο Koeberg Insulator Pollution Test Station (KIPTS). Από τις γραμμές ίσης έντασης φαίνεται ότι οι ηλεκτρικές καταπονήσεις είναι μέγιστες στην ξηρή ζώνη (στη μέση του μονωτήρα), στην οποία μετρήθηκε ένταση πεδίου ικανή να προκαλέσει διάσπαση του αέρα γύρω από το μονωτήρα, καθώς και εκκενώσεις στην επιφάνεια του μονωτήρα.

Από τις προσομοιώσεις έγινε αντιληπτό ότι όταν ρυπαίνεται η επιφάνεια ενός μονωτήρα, οι ηλεκτρικές καταπονήσεις μπορούν να συμβούν οπουδήποτε κατά μήκος του μονωτήρα και όχι μόνο πολύ κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η παρουσία ενός ρυπασμένου στρώματος τείνει να γραμμικοποιεί την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα.

Το γεγονός ότι η γραμμικοποίηση της κατανομής της τάσης μεταθέτει τα υψηλότερα δυναμικά προς το κέντρο του μονωτήρα, καθώς και το ότι η επιφάνεια του μονωτήρα είναι αγώγιμη, οδηγεί σε υψηλές τιμές πεδίου, οπότε και ξεκινά το φαινόμενο Corona. Το φαινόμενο επιδεινώνεται από την παρουσία αγώγιμων σταγονιδίων που κρέμονται από τις περιφέρειες των δίσκων. Αυτό παρατηρήθηκε με τη χρήση μιας κάμερας ευαίσθητης σε UV-ακτινοβολία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.

(α) (β)

Σχήμα 2.4: Φαινόμενο Corona λόγω (α) σταγόνων νερού και (β) ξηρής ζώνης.

Στο KIPTS το φαινόμενο Corona λόγω υγρασίας (water drop corona) παρατηρήθηκε πιο συχνά σε μονωτήρες από σιλικονούχο καουτσούκ παρά σε άλλους τύπους μονωτήρων (σιλικονούχο καουτσούκ: 16%, πορσελάνη καλυμμένη με σιλικονούχο καουτσούκ (SR coated porcelain): 20%, καουτσούκ τύπου EPDM (ethylene propylene diene monomer): 13%, πορσελάνη: 13% και κυκλοαλιφατική ρητίνη: 12%).

Στο άρθρο [21] οι Dang ZhenPing et al. μέτρησαν τις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο είδη πολυμερών μονωτήρων τύπου long-rod 500 kV και υπολόγισαν την κατανομή του πεδίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Εξέτασαν μονωτήρες τύπου R, στους οποίους το μέγεθος όλων των δίσκων είναι ίδιο και μονωτήρες τύπου S, στους οποίους το μέγεθος των δίσκων είναι ανομοιόμορφο. Πραγματοποίησαν πειράματα σε σχέση με την αντοχή των υλικών των δίσκων και των περιβλημάτων σε "tracking" και διάβρωση (erosion). Η έρευνα φανερώνει ότι ο λόγος για το σπάσιμο του πολυμερούς μονωτήρα είναι η διάβρωση των περιβλημάτων, τα οποία είναι κατασκευασμένα από σιλικονούχο καουτσούκ. Ο εσωτερικός πυρήνας εκτέθηκε στον αέρα και έσπασε λόγω του φαινομένου Corona. Ο λόγος για τη γήρανση του μονωτήρα είναι η εξωτερικά ασύμμετρη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και οι ρύποι και η υγρασία που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Ο λόγος για τη γήρανση του μονωτήρα εσωτερικά είναι η χαμηλή αντοχή των υλικών των δίσκων και των περιβλημάτων σε "tracking" και η ηλεκτρική διάβρωση.

Η χωρητικότητα του πολυμερούς μονωτήρα είναι μικρότερη από αυτή των πορσελάνινων και γυάλινων μονωτήρων τύπου cap and pin. Συνεπώς, η επίδραση της κατανεμηθείσας χωρητικότητας είναι σχετικά μεγάλη και έχει σαν αποτέλεσμα την ασύμμετρη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους πολυμερείς μονωτήρες υψηλής τάσης. Η έκθεση του περιβλήματος και των δίσκων ενός μονωτήρα σε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο συχνά προκαλεί γήρανση στο μονωτήρα, καθώς και φαινόμενο Corona, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε υπερπήδηση και σπάσιμο του μονωτήρα, επηρεάζοντας σοβαρά την ασφάλεια κατά τη λειτουργία της γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης.

Από το 2002 έως το 2003 έσπασαν κάποιοι πολυμερείς μονωτήρες τύπου longrod 500kV, τόσο τύπου-R όσο και τύπου-S στην ανατολική Κίνα. Συγκεκριμένα, στην

ομάδα των μονωτήρων τύπου-S κάποιοι μονωτήρες έσπασαν και άλλοι υπέστησαν φαινόμενα ηλεκτρικής διάβρωσης. Στην ομάδα των μονωτήρων τύπου-R, ένας μονωτήρας έσπασε (Σχήμα 2.5), ενώ οι άλλοι λειτουργούσαν φυσιολογικά με ελαφρά φαινόμενα κονιορτοποίησης (pulverization).

Σχήμα 2.5: Το σπάσιμο μονωτήρα τύπου-R.

Το υλικό των δίσκων και των περιβλημάτων των μονωτήρων τύπου-R είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό, το σιλικονούχο HTV (High Temperature Vulcanising), ενώ το αντίστοιχο υλικό στους μονωτήρες τύπου-S είναι το LSR (Lidding Sealing Resin) από ρητίνη. Επισημαίνεται ότι οι γραμμές και οι πυλώνες, στους οποίους χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο τύποι μονωτήρων, είχαν ίδια χαρακτηριστικά.

Από την προσομοίωση των μονωτήρων, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προέκυψε ότι το ηλεκτρικό πεδίο και στους δύο τύπους μονωτήρων παραμορφώνεται σημαντικά στην περιοχή κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης, αλλά και κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Επιπλέον, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μερικές φορές μεγαλύτερη γύρω από τα δύο αυτά ηλεκτρόδια (τόσο στους κοντινούς δίσκους όσο και στο περίβλημα) σε σχέση με την τιμή της έντασης στο μέσο του μονωτήρα. Ειδικότερα, στους δίσκους του μονωτήρα κατά μήκος του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης εφαρμόζεται πολύ υψηλότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου από ό,τι στους άλλους δίσκους του μονωτήρα. Εκεί είναι πιθανότερο να συμβεί πρώτα ηλεκτρική διάβρωση και σπάσιμο του μονωτήρα, όταν αυτός ρυπανθεί βαριά.

Επιπλέον, διεξήχθησαν πειράματα για τον έλεγχο της αντοχής των μονωτήρων σε "tracking" και διάβρωση. Για τον έλεγχο της αντοχής των συστατικών μερών του

μονωτήρα, χρησιμοποιήθηκαν δύο καθαρά δείγματα από κάθε τύπο - το ένα τοποθετήθηκε οριζόντια και το άλλο κάθετα. Το πείραμα έγινε σε συνθήκες αλατομίχλης. Μετά από 1000 ώρες δοκιμής προέκυψε ότι η ηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων τύπου-R είναι πολύ καλύτερη από αυτή των μονωτήρων τύπου-S, παρόλο που η κατανομή του πεδίου των τελευταίων είναι πιο ομαλή από των μονωτήρων τύπου-R. Στο κατακόρυφο δείγμα συσσωρεύτηκε περισσότερη αλμυρότητα, ενώ η επιφάνειά του διαβρώθηκε περισσότερο σε σχέση με το οριζόντιο δείγμα. Περισσότερη αλμυρότητα συγκεντρώθηκε στους ελαστομερείς δίσκους (sheds).

Για τον έλεγχο της αντοχής του υλικού των δίσκων των μονωτήρων, πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχα πειράματα, από τα οποία προέκυψε ότι οι μονωτήρες τύπου-R είναι καλύτεροι ως προς την αντοχή τους στη διάβρωση από τους μονωτήρες τύπου-S.

Οι Yu Zhong et al. στο άρθρο τους [22] έδειξαν ότι η συγκέντρωση έντασης κοντά σε σταγονίδια νερού μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία φαινομένου Corona, αλλά και τη δημιουργία ηλεκτρικής διάβρωσης στην επιφάνεια του πολυμερούς μονωτήρα. Η διάβρωση στο περίβλημα (sheath) είναι πιο σοβαρή από ό,τι στους ελαστομερείς δίσκους. Ακόμα, η περιοχή κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης διαβρώνεται περισσότερο από την περιοχή γύρω από το γειωμένο ηλεκτρόδιο του μονωτήρα. Όταν η ρύπανση του μονωτήρα είναι σοβαρή, η ηλεκτρική διάβρωση επιδεινώνεται.

Η διάβρωση είναι μια σύνθετη διαδικασία, όπου λαμβάνουν χώρα ηλεκτρικές, θερμικές και χημικές διαδικασίες. Είναι ένας σημαντικός παράγοντας που οδηγεί στη γήρανση των πολυμερών μονωτήρων.

Σχήμα 2.6: Ηλεκτρική διάβρωση πολυμερούς μονωτήρα σε γραμμή μεταφοράς 330 kV.

Ο έλεγχος του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από εξοπλισμό υψηλής τάσης, όπως μονωτήρες και αγωγοί γραμμών μεταφοράς, είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό του εξοπλισμού αυτού. Πιθανές συνέπειες υψηλών τιμών του ηλεκτρικού πεδίου είναι ο ευδιάκριτος θόρυβος, οι μερικές εκκενώσεις και η πρόωρη γήρανση της μόνωσης. Στο άρθρο [23] οι Tiebin Zhao et al. ανέλυσαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής ενός δισδιάστατου (ELECTRO) και ενός τρισδιάστατου (COULOMB) προγράμματος, που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των οριακών στοιχείων, για την ανάλυση του ηλεκτρικού πεδίου με στόχο τον υπολογισμό της κατανομής του πεδίου των μονωτήρων σε στεγνό και καθαρό περιβάλλον. Αναλύθηκε ένας τριφασικός πυλώνας μεταφοράς 345 kV με μη-κεραμεικούς μονωτήρες ανάρτησης, οι δύο σε Ι-διάταξη και ο τρίτος σε V-διάταξη, θεωρώντας κάθε φάση μόνη της. Φαίνεται ότι οι υπολογισμοί σε μία φάση (αντί να ληφθούν υπόψην και οι άλλες δύο), με αρκετά ακριβή γεωμετρική μοντελοποίηση, παρέχουν στις περισσότερες περιπτώσεις αρκετά ακριβή αποτελέσματα.

Υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να προκαλέσει φαινόμενο Corona στον αέρα που περιβάλλει τους μονωτήρες, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στη γήρανση των πολυμερών (μη-κεραμεικών) υλικών. Οι κατασκευαστές προμηθεύουν στους αγοραστές τοροειδή (grading devices), που τοποθετούνται στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης μαζί με τους μονωτήρες, σε εφαρμογές υψηλών τάσεων, με στόχο την αναδιαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου και τη μείωση της έντασης του πεδίου στα άκρα υψηλής τάσης των μονωτήρων. Ελέγχεται η επίδραση των αγωγών, των πυλώνων και των τοροειδών στο πεδίο κατά μήκος καθαρών μη-κεραμεικών μονωτήρων και κατά πόσο μπορούν οι τρεις παραπάνω παράμετροι (ώστε να απλοποιηθεί η γενικότερη γεωμετρία χωρίς σοβαρά σφάλματα στα αποτελέσματα) να εξαλειφθούν κατά την προσομοίωση των μονωτήρων στον υπολογιστή.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα δύο διαφορετικά προγράμματα, το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο, είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν σε τέτοιο βαθμό, ώστε οι υπολογισμοί σε κάθε πρόγραμμα να παρέχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας.

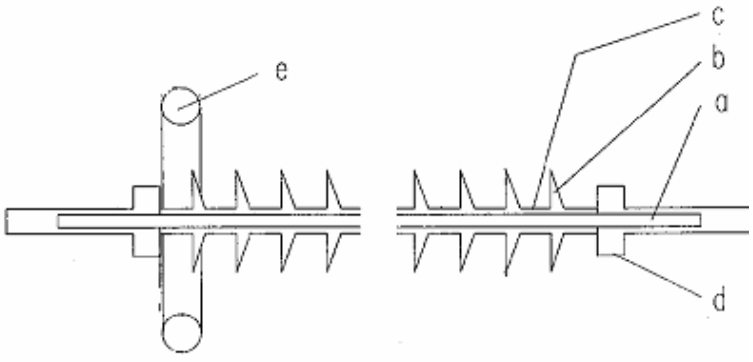
Η μοντελοποίηση του μονωτήρα μόνου του, χωρίς να ληφθεί υπόψην η επίδραση του πυλώνα και των αγωγών, οδηγεί σε μεγάλης ανακρίβειας εκτιμήσεις της κατανομής του πεδίου και του δυναμικού για το μονωτήρα σε λειτουργία. Για να

αποκτηθούν αποτελέσματα, ώστε να ληφθεί υπόψην η επίδραση των αγωγών και των πυλώνων, πρέπει να γίνουν υπολογισμοί σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Είναι δυνατή κάποια απλοποίηση της γεωμετρίας του μονωτήρα με αμελητέα σφάλματα στους τελικούς υπολογισμούς.

Συγκεκριμένα, εάν παραλειφθούν οι ελαστομερείς δίσκοι από τη μοντελοποίηση, εισάγεται πολύ μικρό σφάλμα στους υπολογισμούς της κατανομής του πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα. Μάλιστα, μια τέτοια απλοποίηση μειώνει σημαντικά το χρόνο υπολογισμού.

Εάν οι αγωγοί αγνοηθούν κατά την παρουσίαση της γενικότερης γεωμετρίας, τότε από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι υπεισέρχεται σε αυτά σοβαρή υπερεκτίμηση της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Παρόλα αυτά, οι αγωγοί μπορούν να μοντελοποιηθούν, με αρκετή ακρίβεια, έχοντας σχετικά μικρά μήκη (έως 8 φορές το μήκος του μονωτήρα).

Επιπλέον, η δομή (κατασκευή) του πυλώνα στην περιοχή γύρω από το μονωτήρα, καθώς και η διάμετρος και η θέση του τοροειδούς είναι σημαντικές παράμετροι για τον καθορισμό της μέγιστης τιμής του πεδίου κατά μήκος του μονωτήρα. Η διάμετρος των αγωγών (tubes) του τοροειδούς έχει μικρή επίδραση στο πεδίο κατά μήκος του μονωτήρα, αλλά είναι σημαντική παράμετρος, γιατί μέσω αυτής ελέγχεται το πεδίο (έλεγχος της έναρξης του φαινομένου Corona) στο ίδιο το τοροειδές. Καθώς το τοροειδές μετακινούνταν από το άκρο υψηλής τάσης προς το γειωμένο άκρο, η ένταση του πεδίου μειωνόταν. Η δομή του τοροειδούς φαίνεται στο σχήμα 2.7:



Σχήμα 2.7: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις ενός μη-κεραμεικού μονωτήρα: (a) πυρήνας (b) ελαστομερείς δίσκοι (c) περίβλημα από πολυμερές υλικό (d) ηλεκτρόδιο γείωσης και (e) τοροειδές (grading ring).

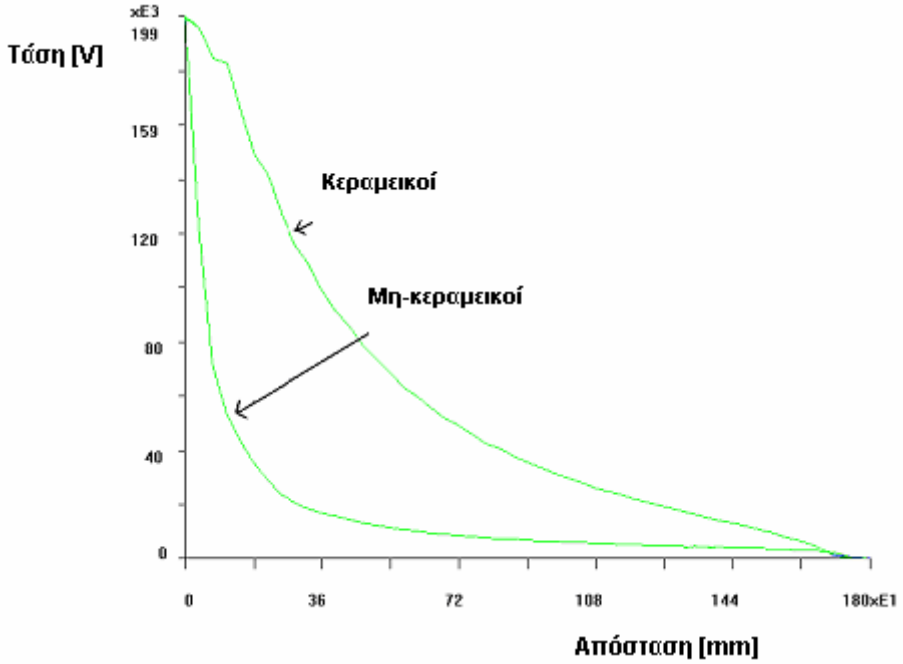
Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από μετρήσεις (δοκιμές) που έγιναν σε έναν μονωτήρα διαθέσιμο στο εμπόριο.

Το άρθρο [24] είναι αποτέλεσμα μιας μελέτης που διενεργήθηκε στο Power Systems Engineering Research Center (PSERC) και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα και την ανάλυση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου, με στόχο τον πιθανό εντοπισμό εσωτερικών ελαττωμάτων σε μη-κεραμεικούς μονωτήρες μέσω της μέτρησης του πεδίου γύρω από το μονωτήρα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο πακέτο λογισμικού, COULOMB. Προσομοιώθηκαν διάφοροι τύποι ελαττωμάτων (defects). Όλοι οι τύποι ελαττωμάτων που προσομοιώθηκαν βρίσκονταν σε κάποια διεπιφάνεια στο μονωτήρα.

Τα συμπεράσματα της έκθεσης έχουν ως εξής:

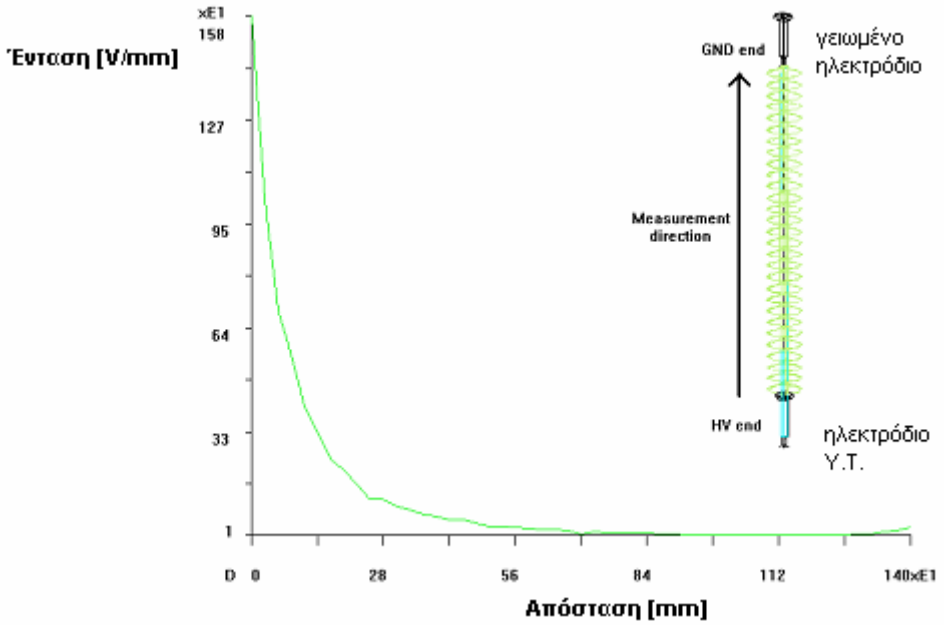
- Ο εντοπισμός του ελαττώματος εξαρτάται από τη θέση που βρίσκεται αυτό και η πιθανότητα να εντοπιστεί είναι μεγαλύτερη, όταν το ελάττωμα βρίσκεται πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.
- Αυτά τα ελαττώματα που είναι μεγαλύτερα ή ενυπάρχουν στο μονωτήρα περισσότερο προκαλούν μεγαλύτερες αλλαγές στο πεδίο του μονωτήρα και γι'αυτό, εντοπίζονται πιο εύκολα από τα μικρότερα ελαττώματα.
- Η αλλαγή που παρατηρείται στην τιμή του πεδίου εξαρτάται από τον τύπο του ελαττώματος. Όσο περισσότερο αγώγιμο είναι το ελάττωμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα εντοπισμού του.
- Η πιθανότητα εντοπισμού των ελαττωμάτων αυξάνει αν ληφθούν ακτινικές (radial) μετρήσεις, αντί των παραδοσιακών αξονικών (axial) μετρήσεων. Ο τρόπος λήψης αυτών των μετρήσεων παρουσιάζεται παρακάτω.

Στους κεραμεικούς μονωτήρες η κατανομή της τάσης είναι σχετικά γραμμικότερη λόγω της παρουσίας των ενδιάμεσων μεταλλικών μερών. Το υλικό τους δε φθείρεται από το φαινόμενο Corona. Συνεπώς, το φαινόμενο Corona δεν αποτελεί τόσο σοβαρή απειλή για τους κεραμεικούς μονωτήρες. Παρόλα αυτά, στους μη-κεραμεικούς μονωτήρες η κατανομή της τάσης είναι εντελώς ανομοιόμορφη, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία φαινομένου Corona. Τα τοροειδή (corona rings) χρησιμοποιούνται σε μη-κεραμεικούς μονωτήρες για τάσεις άνω των 230 kV, με στόχο τη μείωση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

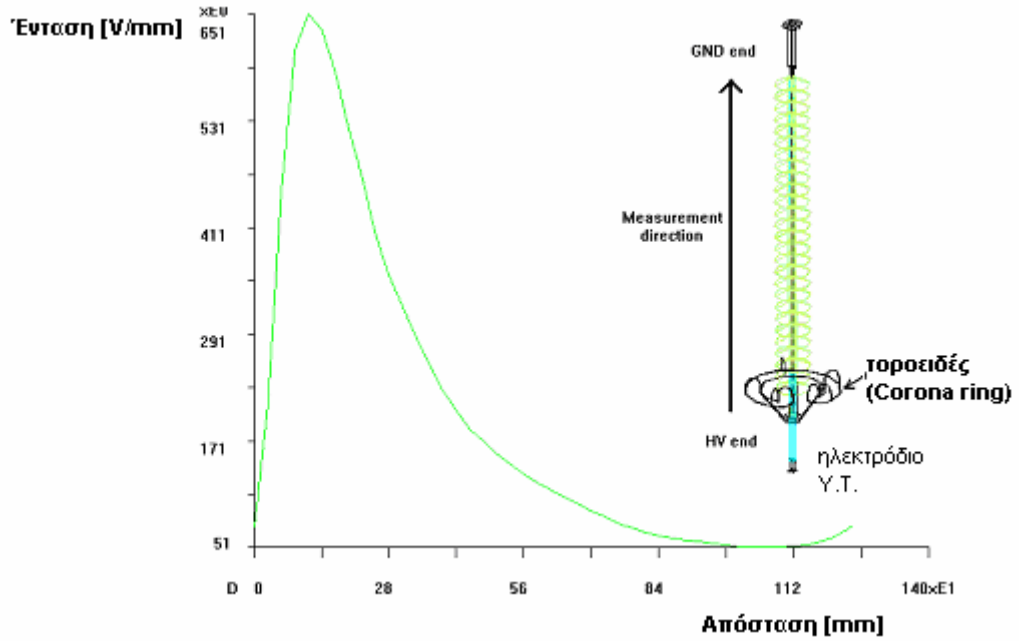


Σχήμα 2.8 : Σύγκριση της κατανομής της τάσης σε κεραμεκούς και μη-κεραμεικούς μονωτήρες.

Από τα παρακάτω σχήματα είναι προφανές ότι για μονωτήρες με τοροειδές, η μέγιστη ένταση του πεδίου μειώνεται σημαντικά και η κατανομή του πεδίου γίνεται πιο ομοιόμορφη σε σχέση με τους μονωτήρες χωρίς τοροειδές:



Σχήμα 2.9: Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα χωρίς τοροειδές.



Σχήμα 2.10 : Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα με τοροειδές.

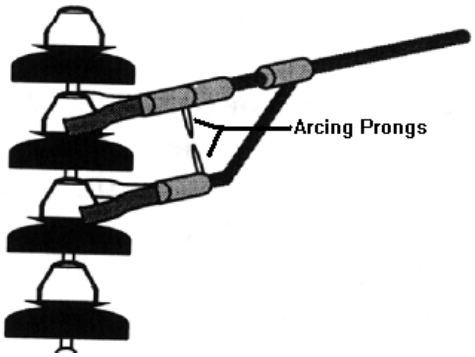
Συστήματα υψηλότερων τάσεων απαιτούν μεγαλύτερες διαστάσεις για τα τοροειδή.

Για την αναγνώριση των ελαττωματικών μονωτήρων, είναι απαραίτητες αποτελεσματικές μέθοδοι για τον εντοπισμό τους και την έγκαιρη αντικατάστασή τους, πριν συμβεί κάποια αστοχία στο σύστημα. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων των μονωτήρων, αλλά η μέθοδος του ηλεκτρικού πεδίου είναι η πιο αποδοτική, γιατί μέσω αυτής εντοπίζονται ελαττώματα στο εσωτερικό του μονωτήρα. Τα ελαττώματα μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή στις ιδιότητες των υλικών που απεικονίζονται σαν αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο. Παρόλα αυτά, κάποια ελαττώματα δεν εντοπίζονται μέσω αυτής της μεθόδου, γιατί δεν εμφανίζουν κάποια σημαντική αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο που να μπορεί να εντοπιστεί.

Κατόπιν λεπτομερούς έρευνας, έγινε αντιληπτό ότι δεν υπάρχει κάποια μέθοδος που να μπορεί αποτελεσματικά να εντοπίζει όλα τα ελαττώματα στους μονωτήρες. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων είναι οι εξής:

- Η μέθοδος στηριζόμενη σε ακουστικό θόρυβο (Buzz Method), που εφαρμόζεται μόνο σε πορσελάνινους μονωτήρες, λόγω των μεταλλικών μερών που υπάρχουν

μόνο σε αυτούς. Πάνω στα μεταλλικά μέρη τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ένας υγιής μονωτήρας θα προκαλέσει τη δημιουργία ενός τόξου μεταξύ των δύο ακίδων (prongs), παράγοντας έναν θόρυβο. Αντίθετα, ένας ελαττωματικός δίσκος δε θα έχει αρκετό δυναμικό για να δημιουργήσει ένα τέτοιο τόξο.



Σχήμα 2.11: Μέθοδος Buzz.

- Η μέθοδος αντίστασης που στηρίζεται σε μέτρηση με μονωσιόμετρο (megger) υψηλής τάσης, που χρησιμοποιείται τόσο σε κεραμεικούς όσο και σε μη-κεραμεικούς μονωτήρες. Η χαμηλή αντίσταση σε κάποιο κομμάτι του μονωτήρα αποκαλύπτει την παρουσία κάποιου ελαττώματος. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη μόνο για επιφανειακά ελαττώματα και για μεγάλα αγώγιμα εσωτερικά ελαττώματα.
- Οι μετρήσεις διηλεκτρικού ρεύματος (dielectric current measurements). Η παρουσία υψηλών ρευμάτων φανερώνει την παρουσία ελαττωμάτων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό μόνο μεγάλων ελαττωμάτων και στα δύο είδη μονωτήρων.
- Η μέθοδος της μερικής εκκένωσης, που γίνεται μόνο σε κλωβό Faraday, επειδή προκαλεί μεγάλο θόρυβο. Οι εκκενώσεις σε έναν υγιή μονωτήρα είναι πολύ λίγες και είναι της τάξεως των μερικών pico coulombs. Μεγαλύτερες εκκενώσεις αναδεικνύουν την ύπαρξη αυξημένης πεδιακής έντασης και φαινομένου Corona.
- Μετρήσεις RIV (Radio Influence Voltage). Η μέθοδος αυτή δεν είναι πολύ αξιόπιστη, γιατί δεν μπορεί να εντοπίσει τη θέση του σφάλματος (είναι εκεί που γίνεται το φαινόμενο Corona).
- Δοκιμές θέρμανσης μονωτήρων (Heating tests/Time withstand). Η εργαστηριακή αυτή μέθοδος εφαρμόζεται και στα δύο είδη μονωτήρων. Στα

άκρα των μονωτήρων εφαρμόζεται για λίγα λεπτά το 80% της τάσης υπερπήδησής τους. Η παρουσία σημείων με υψηλή θερμοκρασία (hot spots) μετά τη δοκιμή φανερώνει την παρουσία ελαττωμάτων.

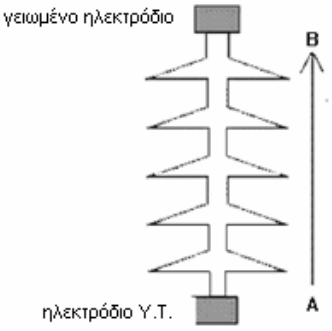
- Δοκιμή αντίστασης σε κρουστική τάση που προσομοιώνει κεραυνική τάση (Dry lightning impulse withstand tests). Αυτή είναι μια εργαστηριακή μέθοδος που εφαρμόζεται και στα δύο είδη μονωτήρων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην εφαρμογή κρουστικής τάσης της μορφής 1,2/50 μs και στον έλεγχο της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα. Ένας υγιής μονωτήρας θα έχει μια γραμμική αύξηση της τάσης για 1,2 μs, που θα ακολουθείται από μια εκθετικά ελαττούμενη τάση για 50 μs. Η παρουσία βραχυκυκλώματος θα οδηγήσει σε κατάρρευση τάσης.
- Μέθοδος που στηρίζεται στη μέτρηση της θερμοκρασίας των μονωτήρων (Infrared Thermography), που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ελαττωμάτων και στους δύο τύπους μονωτήρων. Η κατανομή της θερμοκρασίας του υπό δοκιμή μονωτήρα συγκρίνεται με αυτή ενός υγιούς και έτσι, διαπιστώνεται εάν ο υπό δοκιμή μονωτήρας έχει κάποιο ελάττωμα.
- Η μέθοδος του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη και πολλά υποσχόμενη μέθοδος εντοπισμού ελαττωμάτων στους κεραμεικούς και μη-κεραμεικούς μονωτήρες. Σε αυτή τη μέθοδο, συγκρίνονται οι τιμές πεδίου στην επιφάνεια του υπό δοκιμή μονωτήρα με τις τιμές πεδίου σε έναν αντίστοιχο υγιή μονωτήρα. Τυχόν σημαντικές αλλαγές στις πεδιακές τιμές φανερώνουν την ύπαρξη ελαττωμάτων.

Προσομοιώθηκαν πολλοί τύποι ελαττωμάτων που μπορεί να συμβούν σε έναν πολυμερή (μη-κεραμεικό) μονωτήρα. Οι διάφοροι κρίσιμοι τύποι ελαττωμάτων, που θεωρείται δύσκολο να εντοπιστούν, ενσωματώνονται στο «υγιές» μοντέλο και προσομοιώνονται. Το μέγεθος, η θέση και η αγωγιμότητα τέτοιων ελαττωμάτων ποικίλλουν. Σημειώνονται οι τιμές του πεδίου σε περιοχές κοντά στο ελάττωμα κατά μήκος του αισθητήρα (probe). Κατόπιν, αυτές οι τιμές συγκρίνονται με τις τιμές που ελήφθησαν στις «υγιείς» περιπτώσεις. Οι πιο ευαίσθητοι αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου έχουν ευαισθησία για τιμές πεδίου άνω των 2 kV/m. Συνεπώς, ελαττώματα που προκαλούν μια διαφορά των 2 kV/m και πάνω θεωρούνται ανιχνεύσιμα, ενώ τα άλλα θεωρούνται μη ανιχνεύσιμα.

Προσομοιώθηκαν και αναλύθηκαν ελαττώματα που βρίσκονταν μεταξύ δύο (single shed defect), τριών (two shed defect) και τεσσάρων (three shed defect) διαδοχικών ελαστομερών δίσκων. Όλα τα ελαττώματα βρίσκονταν στη διεπιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος και ήταν: α) Εξ ολοκλήρου αγώγιμη ατέλεια β) Ύπαρξη νερού(conductive water defect) γ) Κενό αέρος(air void defect).

Έγιναν δύο είδη μετρήσεων σε έναν μη-κεραμεικό μονωτήρα (NCI) με 20 δίσκους: οι αξονικές μετρήσεις πεδίου και οι ακτινικές μετρήσεις πεδίου.

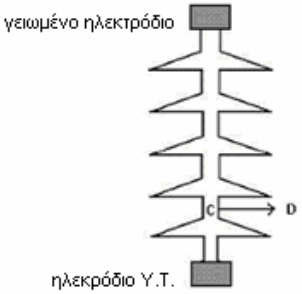
α) Στο πρώτο είδος, οι πεδιακές μετρήσεις στο μονωτήρα γίνονται κατά μήκος του άξονα και της επιφάνειας των δίσκων, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 2.12:



Σχήμα 2.12: Κατεύθυνση λήψης των αξονικών μετρήσεων.

Η "ατέλεια" τοποθετείται σε διαφορετικές θέσεις (σε διαφορετικούς δίσκους) και μετακινείται ξεκινώντας από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης προς το ηλεκτρόδιο γείωσης. Δίπλα στους αριθμημένους δίσκους σημειώνεται η διαφορά στις τιμές μεταξύ του υγιούς και του μη-υγιούς μονωτήρα. Εάν αυτή είναι πάνω από 2 kV/m, τότε είναι ανιχνεύσιμη.

β) Στο δεύτερο είδος, οι πεδιακές μετρήσεις έγιναν ακτινικά, κατά μήκος του μονοπατιού CD, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, για διαφορετικές ατέλειες και θέσεις αυτών:



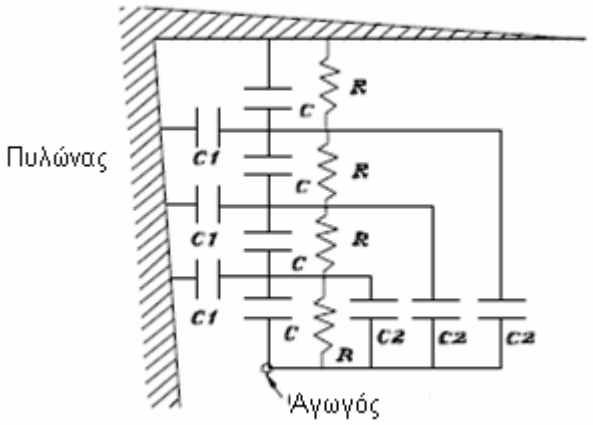
Σχήμα 2.13: Κατεύθυνση λήψης των ακτινικών μετρήσεων.

Από τις μετρήσεις που έγιναν, αποδείχθηκε ότι η πιθανότητα εντοπισμού των ατελειών σε ένα μη-κεραμεικό μονωτήρα με είκοσι δίσκους, ο οποίος χρησιμοποιείται σε γραμμή μεταφοράς 345 kV, αυξάνεται, εάν διενεργηθούν ακτινικές μετρήσεις αντί για αξονικές. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 2.1 και είναι φανερό ότι με την ακτινική (radial) μέθοδο, ο αριθμός των δίσκων, στους οποίους η ατέλεια είναι ανιχνεύσιμη (detectable), είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με την αξονική μέθοδο.

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αξονικής και ακτινικής μεθόδου.

	Τύπος ατέλειας	Αξονική μέθοδος		Ακτινική μέθοδος	
		Ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους:	Μη ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους:	Ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους:	Μη ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους:
Ατέλεια μεταξύ δύο δίσκων	Εξ ολοκλήρου αγώγιμη	1-7, 20	8-19	1-20	καμιά
	Ύπαρξη νερού	1-8	9-20	1-10, 12-20	11
	Κενό αέρος	1-8	9-20	1-7, 19-20	8-18
Ατέλεια μεταξύ τριών δίσκων	Εξ ολοκλήρου αγώγιμη	1-12, 20	13-19	1-20	καμιά
	Ύπαρξη νερού	1-6, 20	7-19	1-6, 8,10,11, 13,14,15,16, 19,20	7,9,12,17,18
	Κενό αέρος	1-7	8-20	1-8, 19, 20	9-18
Ατέλεια μεταξύ τεσσάρων δίσκων	Εξ ολοκλήρου αγώγιμη	1-17, 20	18,19	1-20	καμιά
	Ύπαρξη νερού	1-7	8-20	1-7, 10,11,15,17	8,9,12-14,16,18
	Κενό αέρος	1-7	8-20	1-8, 19, 20	9-18

Σε τεχνικό άρθρο [13] ο Kapal Sharma παρουσίασε το μοντέλο χωρητικοτήτων ενός πορσελάνινου μονωτήρα. Το μοντέλο που φαίνεται στο σχήμα 2.14 απεικονίζει την κατανομή της χωρητικότητας σε έναν πορσελάνινο μονωτήρα που αποτελείται ενδεικτικά από τέσσερεις δίσκους.



Σχήμα 2.14: Μοντέλο χωρητικοτήτων πορσελάνινου μονωτήρα.

Ισοδύναμη χωρητικότητα πορσελάνινου μονωτήρα = C_{eq}+C_{1eq}+C_{2eq}

όπου:

C_{eq} η ισοδύναμη αντίσταση των χωρητικοτήτων C στο μονωτήρα

C_{1eq} η ισοδύναμη αντίσταση των χωρητικοτήτων C_1 στο μονωτήρα

C_{2eq} η ισοδύναμη αντίσταση των χωρητικοτήτων C_2 στο μονωτήρα

C χωρητικότητα του ενός δίσκου

C_1 παράσιτη χωρητικότητα του μονωτήρα προς γη

C_2 παράσιτη χωρητικότητα του μονωτήρα προς τη γραμμή (αγωγός)

R αντίσταση ερπυσμού, η οποία εξαρτάται από την παρουσία στρώματος ρύπανσης στις επιφάνειες του μονωτήρα και μεταβάλλεται σημαντικά κάτω από συνθήκες βροχής ή ομίχλης

Λόγω της χωρητικότητας που υπάρχει μεταξύ του μονωτήρα, του αγωγού και του πυλώνα, η κατανομή της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα δεν είναι ομοιόμορφη. Μάλιστα, το κομμάτι του μονωτήρα που βρίσκεται πιο κοντά στον αγωγό, καταπονείται περισσότερο.

2.3 Διεξαγωγή πειραμάτων σε μονωτήρες

Στο άρθρο [25] οι Ahmet Rumeli et al. παρουσίασαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διενήργησαν σε δύο τύπους μονωτήρων, με στόχο να εκτιμηθεί η συμπεριφορά τους υπό συνθήκες ρύπανσης.

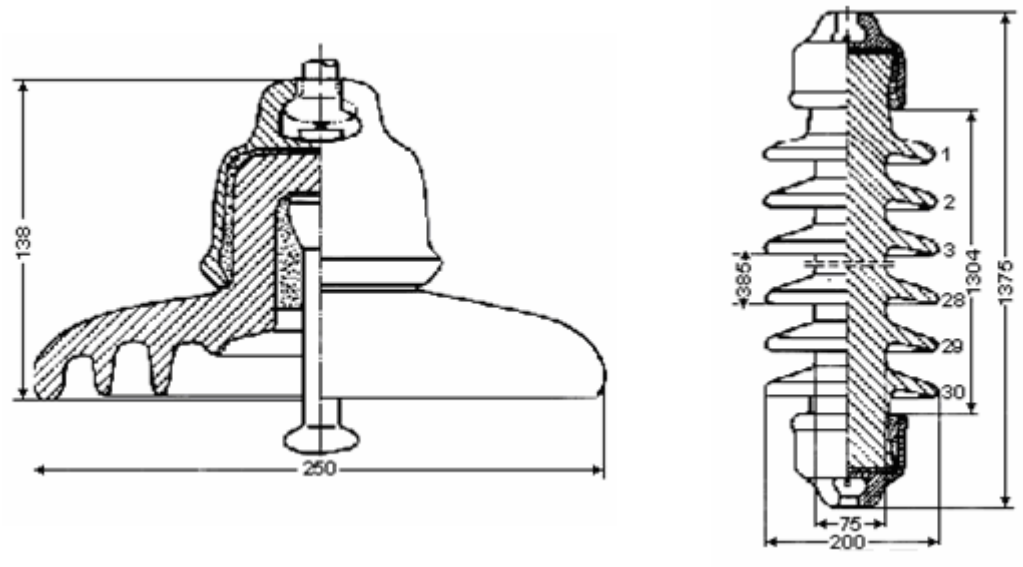
Ως συνέπεια της ταχείας ανάπτυξης και αύξησης του πληθυσμού σε διάφορες περιοχές του Βασιλείου της Σαουδικής Αραβίας, κάποια συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης που λειτουργούσαν σε τάσεις μέχρι και 380 kV, αντιμετώπισαν προβλήματα, λόγω του φαινομένου της υπερπήδησης που παρουσιάστηκε σε μονωτήρες των συστημάτων λόγω της ρύπανσης. Η ρύπανση είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας στο φαινόμενο της υπερπήδησης. Με στόχο να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των μονωτήρων στις γραμμές μεταφοράς σε σχέση με τη ρύπανση στη Δυτική περιοχή του Βασιλείου, δύο τύποι μονωτήρων (longrod και cap-and-pin) εκτέθηκαν σε φυσική ρύπανση σε τέσσερεις διαφορετικές τοποθεσίες για 2 περιόδους: η πρώτη περίοδος ισοδυναμούσε με 100 μέρες και η δεύτερη με 2 χρόνια, χωρίς να εφαρμοστεί τάση στα άκρα τους. Κατόπιν, οι μονωτήρες αυτοί υπεβλήθησαν σε δοκιμές στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων στο πανεπιστήμιο του βασιλιά Abdulaziz.

Για να πραγματοποιηθεί η έρευνα, επιλέχθηκαν τέσσερεις περιοχές, διαφορετικού είδους ρύπανσης η καθεμιά, κατά μήκος των γραμμών 110 kV- 380 kV που συνδέουν τις περιοχές Jeddah και Makkah. Η περιγραφή των τοποθεσιών και τα χαρακτηριστικά της ρύπανσής τους παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Περιγραφή των τοποθεσιών ως προς το επίπεδο ρύπανσης.

Τοποθεσία	Περιγραφή της τοποθεσίας
1	Βιομηχανική περιοχή της Jeddah (βιομηχανική και μερικώς θαλάσσια ρύπανση, επίπεδο ρύπανσης: βαριά)
2	Υποσταθμός 110/380 kV σε περιοχή ερήμου (επίπεδο ρύπανσης: ελαφριά)
3	Πυλώνας No: 9 στη γραμμή μεταφοράς 110 kV (πρόκειται για αγροτική-ερημική περιοχή με επίπεδο ρύπανσης: ελαφριά)
4	Πυλώνας No: 42 (ερημική περιοχή, όπου οι μονωτήρες εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους με επίπεδο ρύπανσης: ελαφριά)

Οι δύο τύποι πορσελάνινων μονωτήρων που επιλέχτηκαν εκτέθηκαν σε ρύπανση διαφορετικής έντασης και διαφορετικού τύπου στις προαναφερθείσες τοποθεσίες για περίοδο δύο χρόνων. Οι διαστάσεις των μονωτήρων αυτών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.15:



(α) (β)

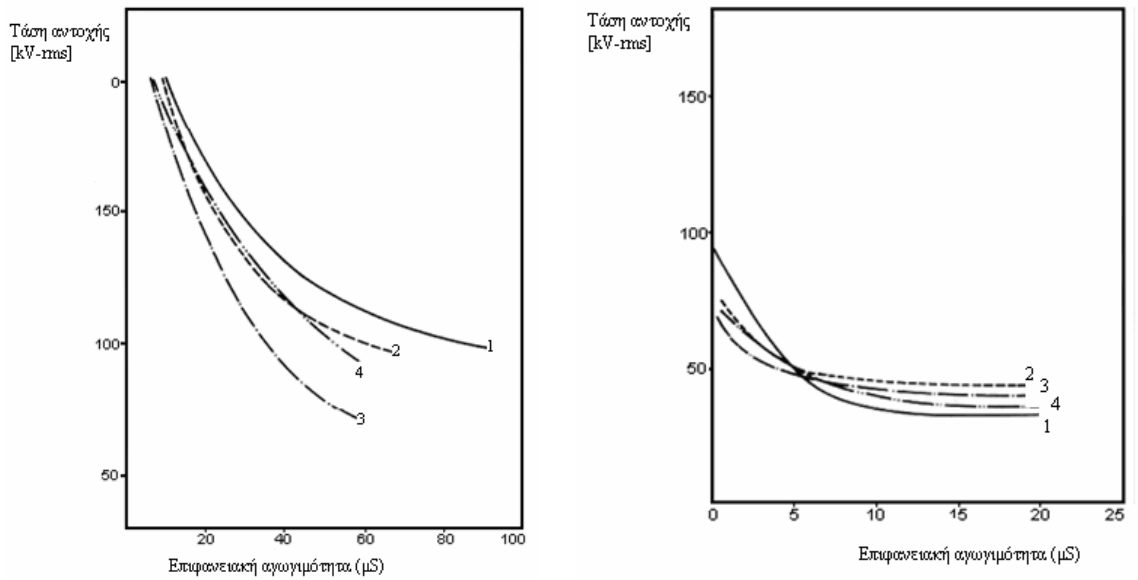
Σχήμα 2.15: Οι διαστάσεις των υπό δοκιμή μονωτήρων (α) Τύπου cap and pin με μήκος ερπυσμού 292 mm και (β) Τύπου longrod με μήκος ερπυσμού 4650 mm και 30 δίσκους (sheds).

Οι υπό δοκιμή μονωτήρες τοποθετήθηκαν στο ίδιο ύψος, στο οποίο ήταν αναρτημένοι και οι μονωτήρες γραμμής, χωρίς όμως να εφαρμοστεί τάση στους πρώτους. Η πρώτη ομάδα μονωτήρων, μετά από 100 ημέρες έκθεσης σε φυσική ρύπανση οδογήθηκε στο Εργαστήριο για δοκιμές, ενώ η δεύτερη ομάδα μετά από δύο χρόνια έκθεσης.

Έγιναν διάφορα είδη μετρήσεων στους μονωτήρες, όπως μετρήσεις επιφανειακής αντίστασης και χωρητικότητας, αλλά δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις μετρήσεις των χαρακτηριστικών αντοχής (withstand characteristics) , τα οποία είναι ενδεικτικά της συμπεριφοράς των ρυπασμένων μονωτήρων όσον αφορά στο φαινόμενο της υπερπήδησης.

Τα χαρακτηριστικά αντοχής των υπό δοκιμή μονωτήρων δίνονται στο σχήμα 2.16 για τις τέσσερεις διαφορετικές τοποθεσίες, αλλά μόνο για τη δεύτερη ομάδα των μονωτήρων, καθώς οι τάσεις αντοχής (withstand voltages) των μονωτήρων της

πρώτης ομάδας (δηλαδή της πρώτης περιόδου) ήταν σημαντικά μικρότερες σε σχέση με της δεύτερης ομάδας:



(α) (β)

Σχήμα 2.16: Τάση αντοχής του μονωτήρα α) τύπου longrod, β) τύπου cap and pin

Στην παρούσα έρευνα, στην πρώτη περίοδο σε συνθήκες 100% υγρασίας, μετρήθηκαν οι μέγιστες τιμές επιφανειακών αγωγιμοτήτων και παρέμειναν κάτω από 20 μS για τις περιοχές 2,3 και 4 (ελαφριά ρύπανση), ενώ ήταν περίπου 70 μS για την περιοχή 1 (βαριά ρύπανση). Όμως, στη δεύτερη περίοδο αυτές οι τιμές κυμαίνονταν από 45 έως 100 μS, που φανερώνει ότι μετά την πάροδο δύο χρόνων οι μονωτήρες είχαν ρυπανθεί βαριά.

Τα χαρακτηριστικά αντοχής που μετρήθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επίδοσης των μονωτήρων αυτών σε μια πιθανή υπερπήδηση, κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες κάθε περιοχής.

Αφού έγιναν περαιτέρω υπολογισμοί, διαπιστώθηκε ότι οι μονωτήρες τύπου longrod που δοκιμάστηκαν, δε θα παρουσιάσουν καμιά δυσκολία στη λειτουργία τους λόγω ρύπανσης, εάν χρησιμοποιηθούν σε σύστημα 110 kV για περίοδο δύο χρόνων. Αυτό σημαίνει παράλληλα ότι για αυτή την περίοδο οι μονωτήρες δε χρειάζονται καθάρισμα. Για να επιτευχθεί η λειτουργία των γραμμών μεταφορών χωρίς προβλήματα, εφαρμόζονται δύο λύσεις. Η πρώτη και επικρατέστερη, λόγω της πρακτικής ευκολίας της, είναι το πλύσιμο των ρυπασμένων μονωτήρων και η δεύτερη είναι η τοποθέτηση σιλικονούχας επίστρωσης στην επιφάνεια των

πορσελάνινων μονωτήρων.

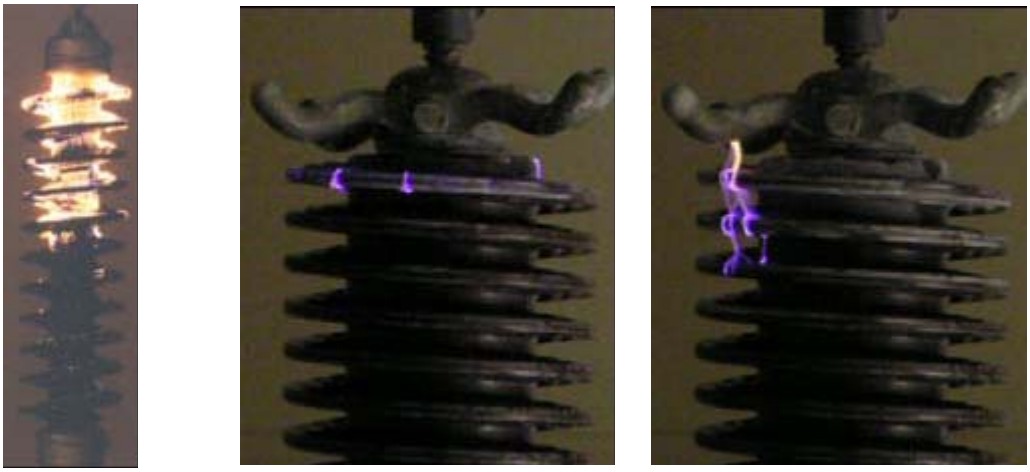
Επιπλέον, η έρευνα έδειξε ότι μια αλυσίδα μονωτήρων, που αποτελείται από δέκα μονάδες cap and pin μονωτήρων, παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά στο φαινόμενο της υπερπήδησης από έναν μονωτήρα τύπου longrod ίδιου ύψους. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι cap-and-pin μονωτήρες εμφανίζουν ακόμα καλύτερα χαρακτηριστικά, εάν είναι τύπου ομίχλης.

Στο άρθρο [26] παρουσιάζεται η έρευνα των Dr. Krystian Leonard Chrzan et al. σε σχέση με τα χαρακτηριστικά των μονωτήρων με δίσκους σπειροειδούς (ελικοειδούς) σχήματος. Η έρευνα έγινε σε διαφορετικές χώρες, όπως στη Γερμανία, τη Σουηδία και την Αίγυπτο, αλλά και στο εργαστήριο από τους συγγραφείς του άρθρου. Από την έρευνα έγινε φανερό ότι η τάση υπερπήδησης των μονωτήρων αυτών είναι μικρότερη από αυτή των μονωτήρων με κοινούς δίσκους (standard sheds). Η λιγότερο καλή επίδοση των μονωτήρων με δίσκους ελικοειδούς σχήματος οφείλεται στο σχηματισμό ανομοιόμορφου επιφανειακού στρώματος ρύπανσης κατά μήκος της απόστασης ερπυσμού.

(α) (β)

Σχήμα 2.17: (α) Σύνθετος πολυμερής σπειροειδής μονωτήρας από εποξεική ρητίνη και (β) πορσελάνινος σπειροειδής μονωτήρας.

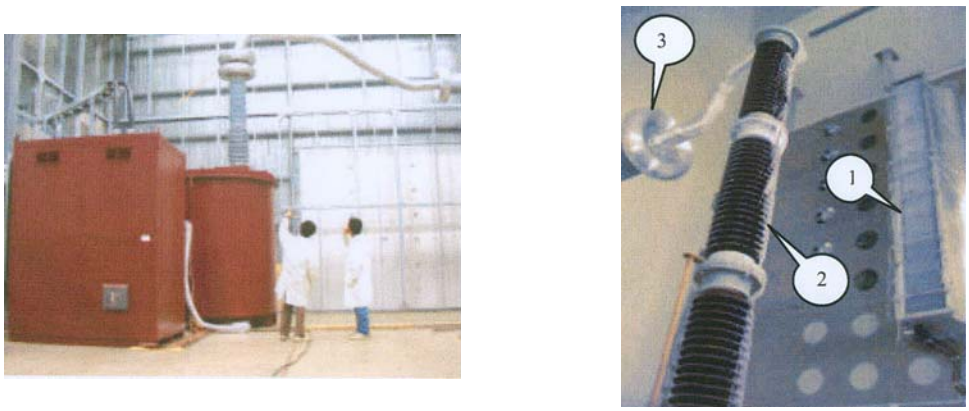
Η μορφή (δομή) κάποιων σπειροειδών μονωτήρων διευκολύνουν τη δημιουργία ξηρών ζωνών κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Στο σχήμα 2.18(α) φαίνονται οι εκκενώσεις σε έναν πολυμερή μονωτήρα. Στα σχήματα 2.18(β) και 2.18(γ) φαίνεται η εξέλιξη των εκκενώσεων σε έναν πορσελάνινο μονωτήρα, ίδιου με του σχήματος 2.17(β). Πρώτα, μικρές εκκενώσεις εμφανίζονται κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης και σταδιακά επεκτείνονται προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο.



(α) (β) (γ)

Σχήμα 2.18: Εκκενώσεις (α) σε πολυμερή μονωτήρα και (β),(γ) σε πορσελάνινο μονωτήρα

Στο άρθρο [27] παρουσιάστηκε το καινούριο κατασκευαστικό επίτευγμα του UQAC (University of Quebec at Chicoutimi), το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε ένα πρόγραμμα σε συνεργασία με τη Hydro-Quebec, με στόχο την αξιολόγηση της ηλεκτρικής αντοχής των μονωτήρων υπό συνθήκες παγετού. Πρόκειται για έναν θάλαμο ρυθμιζομένων κλιματολογικών συνθηκών (climatic chamber) που προσφέρει σπουδαίες δυνατότητες όσον αφορά σε δοκιμές ευρείας κλίμακας υπό συνθήκες παγετού. Πρακτικά, δηλαδή, αυτός ο θάλαμος προσομοιώνει τις επιθυμητές καιρικές συνθήκες και διευκολύνει, έτσι, την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στην εύρεση νέων λύσεων για τη βελτίωση της ηλεκτρικής επίδοσης των μονωτήρων υπό συνθήκες πάγου και χιονιού.



(α) (β)

Σχήμα 2.19: (α) Σύστημα υψηλής τάσης 350 kV και (β) το εσωτερικό του θαλάμου που χρησιμοποιείται στη μελέτη αυτή (1-γεννήτρια σταγονιδίων, 2-μονωτήρας υπό δοκιμή, 3-μονωτήρας διέλευσης υψηλής τάσης).

Το φαινόμενο της υπερπήδησης στους μονωτήρες σε περιβάλλον με πάγο ή χιόνι αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στα εναέρια συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Εκθέσεις αναφέρουν ότι το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί στους περισσότερους μονωτήρες ανάρτησης και μονωτήρες τύπου post κατά τη διάρκεια ή μετά την αύξηση του πάγου ή του χιονιού, που ακολουθείται από μια θερμότερη περίοδο. Συγκεκριμένα, στον Καναδά, τα πιο σημαντικά περιστατικά υπερπήδησης σε μονωτήρες τύπου station post που είναι καλυμμένοι με χιόνι ή πάγο, έχουν συμβεί την περίοδο που λιώνουν οι πάγοι.

Το χιόνι και ο πάγος έχουν δύο σημαντικούς ρόλους στη μείωση της τάσης υπερπήδησης στους υπαίθριους μονωτήρες. Πρώτον, εάν οι αποστάσεις μεταξύ των δίσκων είναι απόλυτα γεφυρωμένες, το μήκος ερπυσμού μειώνεται και γίνεται ίσο περίπου με το μήκος ξηρής ζώνης. Δεύτερον, το νερό που βρίσκεται στον πάγο ή στο χιόνι είναι ιδιαιτέρως αγώγιμο, προκαλώντας σχετικά μεγάλες πτώσεις τάσης κατά μήκος των ζωνών στους μονωτήρες που δεν έχουν χιόνι ή πάγο. Αυτές οι ζώνες δημιουργούνται συνήθως κοντά στα ηλεκτρόδια από τη διαδικασία της τήξης που προκαλείται από τις θερμικές επιδράσεις κάποιων ενεργών τόξων σε αυτές τις περιοχές, καθώς οι πτώσεις τάσης είναι σχετικά υψηλές.

Ο βασικός στόχος του άρθρου αυτού είναι η περιγραφή του τρόπου της εκτίμησης της μέγιστης τάσης αντοχής των μονωτήρων που καλύπτονται από πάγο.

Εκτιμήθηκε κάτω από σοβαρές συνθήκες παγετού η ηλεκτρική συμπεριφορά μέρους ενός πρότυπου μονωτήρα τύπου station post 735 kV με μήκος ξηρής ζώνης δύο μέτρα-περίπου. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τέσσερα στάδια: (1) τη δημιουργία και αύξηση του πάγου υπό ονομαστική τάση λειτουργίας του μονωτήρα, (2) το στάδιο, όπου δεν εφαρμόζεται υψηλή τάση στα άκρα του μονωτήρα, αλλά η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία στο θάλαμο διατηρούνται στα ίδια επίπεδα με το πρώτο στάδιο, (3) το στάδιο τήξης του πάγου και (4) το στάδιο του καθορισμού της μέγιστης τάσης αντοχής.

Στο πείραμα που έγινε σε συνθήκες τήξης του πάγου, όπου υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί υπερπήδηση, και με πάγο πάχους 15 mm, η μέγιστη τάση αντοχής που μετρήθηκε ήταν περίπου 7% μικρότερη από την τάση λειτουργίας. Αυτό επιβεβαιώνει ότι οι εργαστηριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν για τη μελέτη αυτή ανήκουν στις πιο σοβαρές περιπτώσεις που θα μπορούσε να έρθει αντιμέτωπο

το σύστημα μεταφοράς της Hydro-Quebec. Κάτω από τέτοιες συνθήκες, οι αποστάσεις μεταξύ των δίσκων είναι γεφυρωμένες με παγοκρύσταλλους και η απόσταση ερπυσμού έχει μειωθεί δραματικά στο μήκος της ξηρής ζώνης.

Φυσικά, παράμετροι των μονωτήρων όπως η απόσταση μεταξύ των δίσκων και το υλικό της επιφάνειας του μονωτήρα ανήκουν στις άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν τη μέγιστη τάση αντοχής ενός μονωτήρα.

(α) (β)

Σχήμα 2.20: Πορσελάνινος μονωτήρας 735 kV τύπου station post (ύψος: 1540mm, μήκος ξηρής ζώνης: 1360mm, μήκος ερπυσμού: 3500mm) (α) χωρίς πάγο και (β) με πάγο.

Κεφάλαιο

3

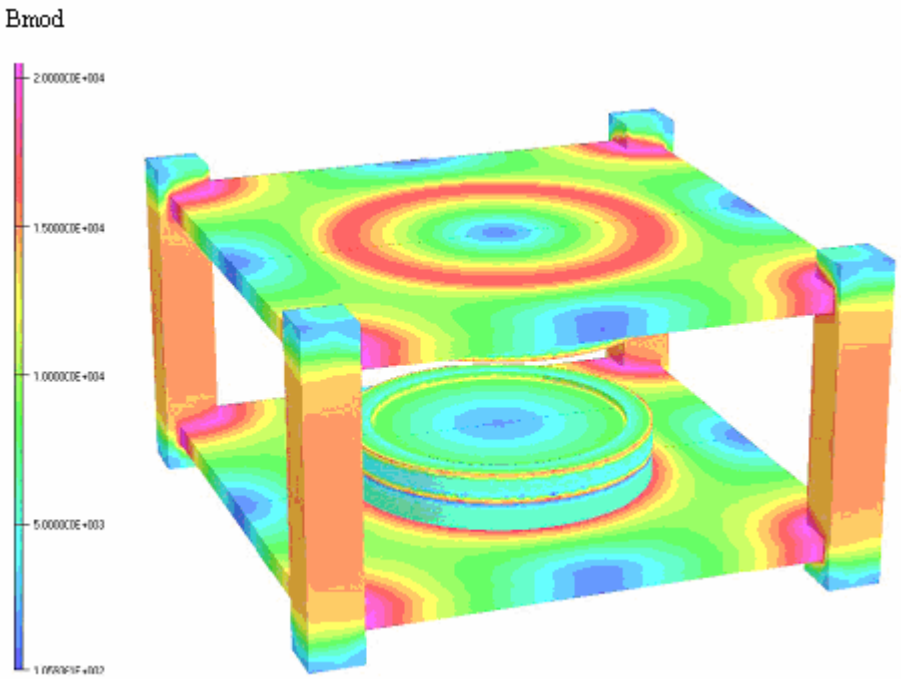
Το πρόγραμμα Opera-3d

3.1 Εισαγωγή

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

Ομοίως, ο Μετ-Επεξεργαστής του Opera-3d παρέχει τα απαραίτητα μέσα για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Μέσω αυτού μπορούν να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη που αφορούν κάθε πρόβλημα (π.χ. ένταση ηλεκτρικού πεδίου, δυναμικό, ρεύμα ή δύναμη) είτε πάνω στο μοντέλο είτε με

γραφικές παραστάσεις. Για παράδειγμα, σε μια απλοποιημένη γεωμετρία ενός μόνιμου (MRI) μαγνήτη, η ένταση του μαγνητικού πεδίου (Bmod) παρουσιάζεται πάνω στο μαγνήτη:



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

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

TOSCA

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

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

ELEKTRA

Το πακέτο αυτό αναλύει χρονικά εξαρτώμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων των δινορρευμάτων σε τρεις διαστάσεις.

Υπάρχουν τρεις δυνατότητες ανάλυσης. Το πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε:

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

SCALA

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

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

CARMEN

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

- κινητήρες και γεννήτριες
- αισθητήρες θέσης

SOPRANO

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

TEMPO

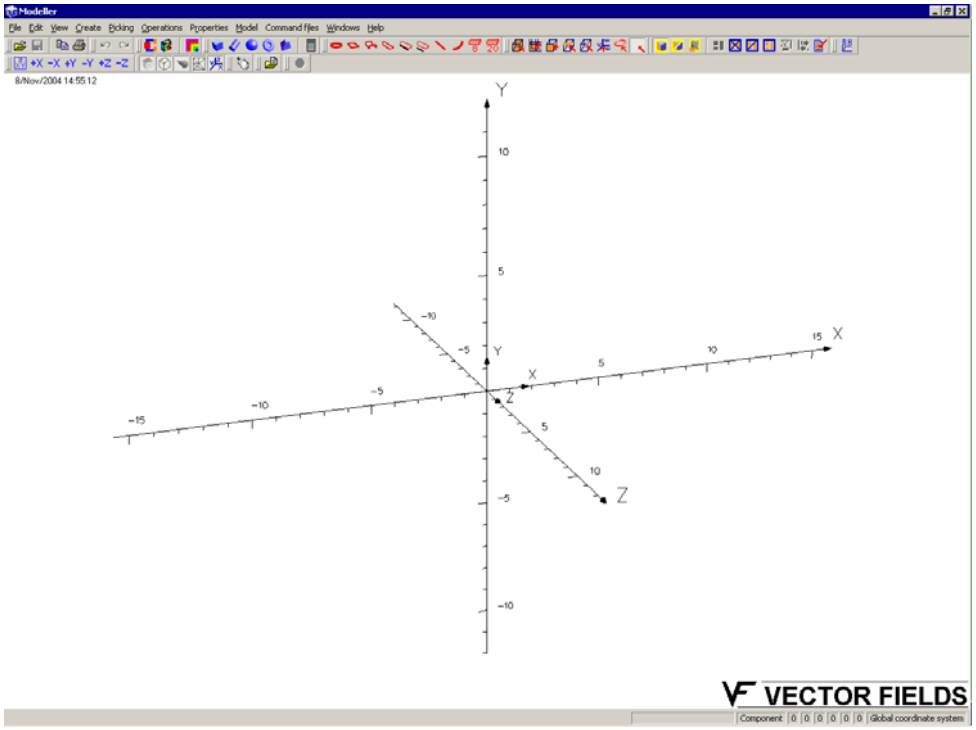
Το πακέτο αυτό αναλύει μεταβαλλόμενα και σταθερά θερμικά πεδία που δημιουργούνται από ηλεκτρομαγνητική θέρμανση (heating) και εξωτερικές πηγές θέρμανσης.

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

3.2 Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d

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

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



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

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

3.2.1 Τοπολογία στο Μοντελοποιητή

Κελί (cell)

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

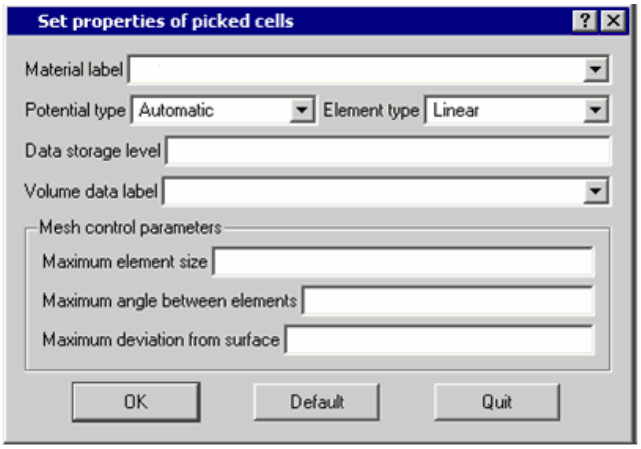
Ένα κελί μπορεί να έχει τα εξής δεδομένα που να αποδίδονται σε αυτό:

- Μια ετικέτα υλικού (material label).
  Είναι μια ετικέτα που χρησιμοποιείται για να αναφέρεται στις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με το κελί. Όταν δημιουργείται ένα κελί, έχει αυτόματα την ετικέτα air (αέρας), δηλαδή έχει τις εξής ιδιότητες: $\mu=\mu_0$, $\varepsilon=\varepsilon_0$, $\sigma=0$. Ακόμα, αυτόματα έχει Potential type: Automatic και Element type: Linear. Όμως, μπορεί να ανατεθεί σε κάθε κελί διαφορετική ετικέτα. Στη συνέχεια, και προτιμότερο είναι να γίνει μετά τη δημιουργία του πλέγματος, προσδιορίζονται οι ιδιότητες κάθε ετικέτας, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, η επιτρεπτότητα, η αγωγιμότητα και τυχόν θερμικές ιδιότητες. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της ετικέτας γίνεται από το πεδίο Model→ Set material properties.
- Τύπος δυναμικού (Potential type (TOTAL, REDUCED, VECTOR)). Στο Tosca electrostatics, χρησιμοποιείται ο τύπος TOTAL.
- Τύπος στοιχείου (γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, και τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού). Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως Element type (LINEAR, QUADRATIC).
- Ετικέτα που σχετίζεται με τις ιδιότητες του συγκεκριμένου όγκου (Volume properties label).

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

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

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



Σχήμα 3.3: Τρόπος ανάθεσης ιδιοτήτων ενός κελιού.

Σώμα (body)

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

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

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

Δεδομένα επιφάνειας

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

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

Δεδομένα γραμμής

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

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

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

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

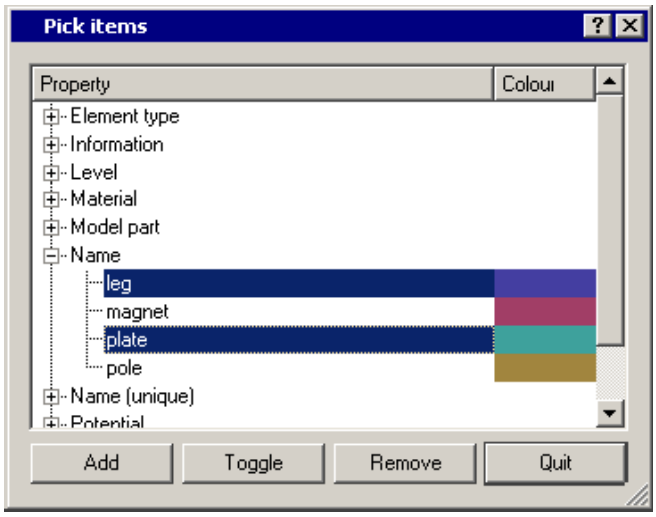
Επιπλέον, μπορεί να δημιουργηθεί και μια ορισμένη ομάδα αγωγών μέσα από ξεχωριστές εντολές, όπως RACETRACK και BEDSTEAD και άλλες. Αυτοί οι αγωγοί δεν αποτελούν φυσικό κομμάτι του μοντέλου και δεν περιλαμβάνονται στο πλέγμα. Μπορούν όμως να επιλεγούν για να μετασχηματιστούν, να αντιγραφούν ή να επανατοποθετηθούν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

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

3.2.2 Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute)

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

από τί υλικό είναι φτιαγμένο το κελί (material label), μια ετικέτα όγκου, έναν αριθμό που καθορίζει το μικρότερο μέγεθος του πλέγματος σε αυτό το κελί, αλλά και άλλες ετικέτες. Η εντολή Pick εκμεταλλεύεται αυτά τα χαρακτηριστικά (ιδιότητες) για να αναγνωρίσει τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα μοντέλο, με στόχο την τροποποίηση ή τη θέαση του μοντέλου. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται ο τρόπος που επιλέγεται οποιαδήποτε οντότητα σε ένα μοντέλου.



Σχήμα 3.4: Επιλογή οντοτήτων σύμφωνα με τις ιδιότητές τους.

3.2.3 Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων

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

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

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

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

3.2.4 Δημιουργία σύνθετων σωμάτων

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

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

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

3.2.5 Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία του πλέγματος

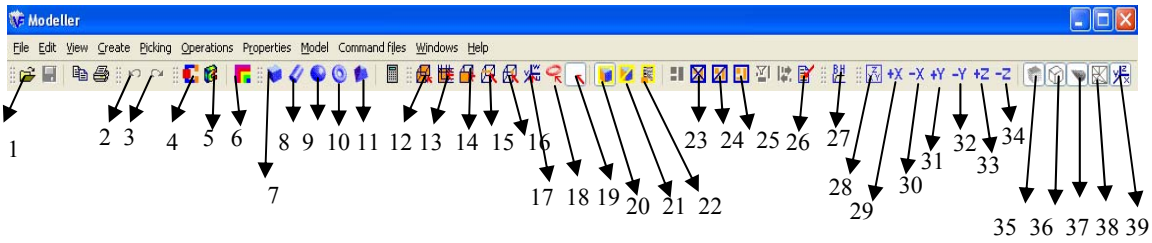
Για τη δημιουργία ενός συνεχούς πλέγματος σε όλο τον όγκο του χώρου που μοντελοποιείται, είναι απαραίτητο να έχει δημιουργηθεί ένα ενιαίο σώμα. Αυτό το σώμα αποτελείται από πολλαπλά κελιά, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Για να γίνει πιο εύκολη η μοντελοποίηση, είναι προτιμότερο να προκύψουν πολλά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

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

να αποτελέσει μια περιοχή αέρα, αρκεί κατά τη δημιουργία του κελιού αυτού να ανατεθεί σε αυτό η ονομασία background.

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

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



Σχήμα 3.5 : Η γραμμή εργαλείων του Μοντελοποιητή.

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

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

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

4: Παρέχει τη δυνατότητα για επιλογή οντοτήτων προς επίδειξη.

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

6: Δυνατότητα αλλαγής χρώματος των υλικών του μοντέλου.

7: Δημιουργία κύβου ή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.

8: Δημιουργία κυλίνδρου, κώνου ή ελλειψοειδούς κυλίνδρου.

9: Δημιουργία σφαίρας.

10: Δημιουργία τοροειδούς.

11: Δημιουργία πρίσματος ή πυραμίδας n-πλευρών.

12: Επιλογή σώματος.

13: Επιλογή κελιού.

14: Επιλογή επιφάνειας.

15: Επιλογή ακμής.

16: Επιλογή κόμβου.

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

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

19: Αναιρεί την επιλογή των κουμπιών 17 και 18.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

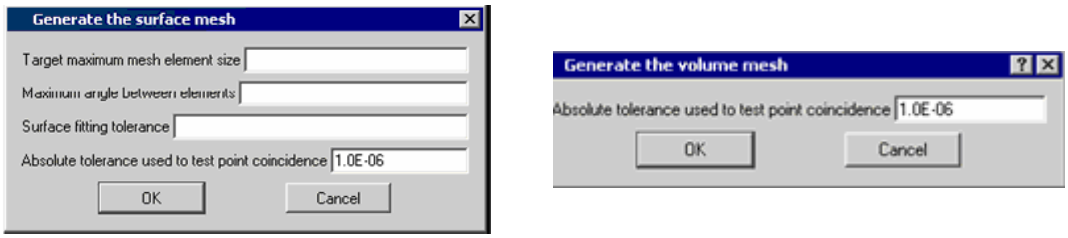
34: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα z.

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

3.2.6 Δημιουργία του πλέγματος

Η εντολή δημιουργίας του πλέγματος είναι έγκυρη, μόνο αφού έχει δημιουργηθεί το ενιαίο σώμα.. Η δημιουργία του πλέγματος είναι μια διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, δημιουργείται το επιφανειακό πλέγμα, χρησιμοποιώντας την εντολή Generate surface mesh από το πεδίο Model. Το μέγεθος του επιφανειακού πλέγματος δημιουργείται από τις πληροφορίες που έχουν δοθεί για κάθε κελί στο πεδίο maximum element size. Το πλέγμα στις επιφάνειες των κελιών δημιουργείται διαδοχικά. Κατά τη δημιουργία του επιφανειακού πλέγματος, το εξωτερικό περίβλημα κάθε επιφάνειας, στην οποία δημιιουργείται το πλέγμα, φωτίζεται έντονα με ροζ χρώμα. Για πολύπλοκα μοντέλα, όπως και οι αλυσίδες των μονωτήρων που προσομοιώσαμε, ο χρόνος δημιουργίας του πλέγματος είναι αρκετά μεγάλος. Πάντως, αυτός ο χρόνος μπορεί να μειωθεί αρκετά, εάν ελαχιστοποιήσουμε το παράθυρο του Μοντελοποιητή. Κατόπιν, με την εντολή Generate volume mesh από το πεδίο Model, δημιουργούνται τα τετραεδρικά στοιχεία όγκου στο χώρο του

μοντέλου. Η δημιουργία του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου είναι εφικτή, εφόσον υπάρχει έγκυρο επιφανειακό πλέγμα. Μετά και το πέρας της επιτυχούς δημιουργίας του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου, το μοντέλο αποθηκεύεται με την κατάληξη .opcb. Τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του μοντέλου θα καταστρέψουν το πλέγμα. Επίσης, είναι δυνατόν να επιστρέψουμε σε παλαιότερο πλέγμα με την εντολή Undo, αλλά τα πλέγματα πριν από αυτό, θα έχουν διαγραφεί. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα δύο στάδια δημιουργίας του πλέγματος του μοντέλου.



(α) (β)

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

3.2.7 Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση

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

3.2.8 Ανάλυση του μοντέλου

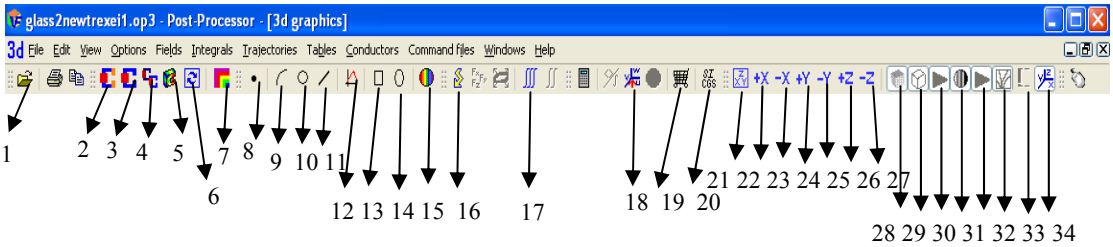
Από το πεδίο Model→Analysis settings επιλέγουμε όποιο πρόγραμμα ανάλυσης επιθυμούμε. Κατά την προσομοίωση των μονωτήρων, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα επίλυσης Tosca electrostatics. Κατόπιν, δημιουργούμε τη βάση δεδομένων του μοντέλου από το πεδίο Model→Create analysis database. Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε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

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

3.2.9 Μετ-Επεξεργασία

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

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



Σχήμα 3.7: Η γραμμή εργαλείων του Μετ-Επεξεργαστή.

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

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

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

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

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

6: Ανανέωση της εικόνας του μοντέλου.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

18: Υπολογισμός κάποιου μεγέθους σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 Προγράμματα ανάλυσης

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

3.3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

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

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

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

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = \rho \tag{3.1}$$

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

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \tag{3.2}$$

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

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

$$\phi(x) = \alpha + \beta \cdot x \tag{3.3}$$

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

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

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

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

όπου x_i είναι η x συντεταγμένη του κόμβου i.

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

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

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

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot (1 - \xi)$$

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

$$-1 \le \xi \le 1$$

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

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

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

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

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

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

όπου α, b τα όρια ολοκλήρωσης της εξίσωσης.

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

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

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

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

για όλα τα στοιχεία που περιέχουν τον κόμβο i.

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

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{\Phi} = \mathbf{S} \qquad (3.10)$$

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

Οι συντελεστές στον πίνακα K έχουν τη μορφή:

$$K_{ij} = \int_a^b \nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j dx \qquad (3.11)$$

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

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

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} επιλύνοντας το γραμμικοποιημένο Ιακωβιανό σύστημα:

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

όπου το υπόλοιπο R_n δίνεται από την:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{K}_n \cdot \mathbf{\Phi}_n - \mathbf{S}_n \tag{3.13}$$

και η Ιακωβιανή J_n από την:

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

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

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων

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

- Εάν είναι εφικτό, είναι πιο ασφαλές να λυθεί πρώτα ένα απλοποιημένο δισδιάστατο μοντέλο του συστήματος, να εφαρμοστούν σε αυτό τα τρία παρακάτω βήματα σε αυτή τη δισδιάστατη λύση και μετά να χρησιμοποιηθεί αυτή σαν αρχικός έλεγχος της πλήρους τρισδιάστατης λύσης.
- Εφόσον έχει οριστεί το τρισδιάστατο μοντέλο, κρίνεται σκόπιμη η επίλυση του απλούστερου δυνατού προβλήματος με αυτή τη διάταξη στο χώρο, π.χ.

χρησιμοποιώντας μόνο γραμμικά υλικά ή σχετικά μεγάλη επιτρεπτότητα.

- Έλεγχος ότι η λύση έχει την αναμενόμενη συμμετρία. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει έλεγχος του πεδίου στα σύνορα του προβλήματος, εάν δηλαδή είναι όπως αναμένεται.
- Έλεγχος ότι η λύση συμφωνεί με τις προβλέψεις που προέκυψαν μέσω της απλής γραμμικής ολοκλήρωσης (εφόσον είναι εφαρμόσιμη η προσέγγιση της άπειρης διαπερατότητας).

3.3.2 Επιλύτης TOSCA, Ανάλυση στατικού πεδίου

Αυτό το πρόγραμμα ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων βασίζεται σε ένα άλλο πρόγραμμα με το ίδιο όνομα, το οποίο δημιουργήθηκε στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Rutherford Appleton στην Αγγλία. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε περαιτέρω και σήμερα αποτελεί ένα από τα προγράμματα ανάλυσης του Opera-3d. Το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για να υπολογίσει μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά πεδία, αλλά και προβλήματα ροής ρεύματος (current flow), συμπεριλαμβανομένων και των επιδράσεων μη-γραμμικών μέσων στις τρεις διαστάσεις. Παρακάτω περιγράφονται οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο TOSCA, ώστε να καταστεί σαφής η σχέση μεταξύ του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και του εκάστοτε προβλήματος που επιθυμούμε να προσομοιώσουμε.

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

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{3.15}$$

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

$$\nabla \mathbf{D} = \rho \tag{3.16}$$

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

ηλεκτρικό δυναμικό:

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla V = -\rho \tag{3.17}$$

όπου

$$\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E} \tag{3.18}$$

Μια παρόμοια εξίσωση προκύπτει από τα προβλήματα ροής ρεύματος:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \tag{3.19}$$

όπου σ η αγωγιμότητα και

$$\mathbf{J}=\sigma\mathbf{E} \tag{3.20}$$

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 3.1, όπου **n** είναι το μοναδιαίο διάνυσμα της εκάστοτε επιφάνειας.

Πίνακας 3.1: Συνοριακές συνθήκες στο TOSCA.

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

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

Στα ηλεκτροστατικά πεδία, θα έχουν προφανώς τεθεί στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων οριακές συνθήκες με συγκεκριμένες τιμές δυναμικού (V=τιμή). Στο αντίστοιχο πρόβλημα ροής ρεύματος, για το οποίο το πρόγραμμα TOSCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μπορεί να φανεί απαραίτητο να τεθούν στις επιφάνειες και μη-μηδενικές παράγωγοι δυναμικού ($\frac{\partial V}{\partial n} = \tau\iota\mu\eta$), ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των ρευμάτων. Επίσης, είναι διαθέσιμες και μικτές οριακές συνθήκες για τη μοντελοποίηση δυναμικών πόλωσης που παράγονται από τη διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών. Εκτός από αυτές τις περιπτώσεις, οι άλλες οριακές συνθήκες που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3.1 θα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Οι συνθήκες που θα εφαρμόζονται αυτόματα, εάν δεν τίθενται άλλες οριακές συνθήκες στις εξωτερικές επιφάνειες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

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

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

3.3.3 ELEKTRA, Ανάλυση χρονομεταβλητού πεδίου

Το πρόγραμμα ανάλυσης ELEKTRA χρησιμοποιείται για να υπολογίσει χρονομεταβλητά ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε τρεις διαστάσεις, συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης των δινορευμάτων. Το πρόγραμμα αυτό δε μοντελοποιεί την επίδραση των ρευμάτων μετατόπισης. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι

η μεγαλύτερη διάσταση του μοντέλου πρέπει να είναι μικρότερη από το 1/10 του μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο κενό. Παρακάτω περιγράφεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται σε αυτό το πρόγραμμα.

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

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

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

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

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

όπου τα διανύσματα J, B και H είναι:

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

B: μαγνητική επαγωγή [T]

H: ένταση μαγνητικού πεδίου [A/m]

u: ταχύτητα του μέσου

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

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

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

- Το ELEKTRA/SS υπολογίζει εναλλασσόμενα ρεύματα μόνιμης κατάστασης, όπου όλα τα πεδία και τα δυναμικά ταλαντώνονται με την ίδια συχνότητα.
- Το ELEKTRA/TR υπολογίζει μεταβατικά δινορεύματα που επάγονται από τα πεδία των driving ρευμάτων. Οι συνοριακές συνθήκες και τα εξωτερικά πεδία μεταβάλλονται σε προκαθορισμένο χρόνο.
- Το ELEKTRA/VL υπολογίζει δινορεύματα που επάγονται από κίνηση, η οποία δεν αλλάζει τη γεωμετρία του προβλήματος.

Κεφάλαιο

4

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 ($\varepsilon_r=10^5$), ώστε να γίνει αντιληπτό από το πρόγραμμα ότι πρόκειται για αγωγό.

Στο τσιμέντο επιλέχθηκε $\varepsilon_{r,\text{τσιμέντου}}=14$. Η επιλογή αυτή έγινε κατόπιν δοκιμών σύμφωνα με τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, αλλά και λαμβάνοντας υπ'όψιν τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά στην κατανομή τάσης στους δύο αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV. Αναλυτικά η σύγκριση θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 5, στην παράγραφο 5.2.3.

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

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla V = 0 \qquad (4.1)$$

Σε επόμενη έκδοση 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:

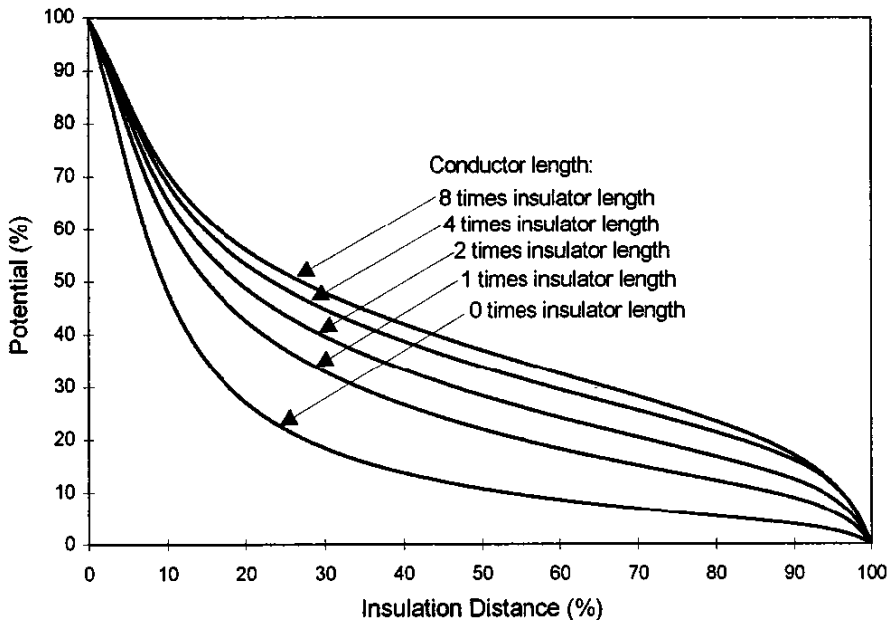
$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \qquad (4.2)$$

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 προσομειώνεται κάθε φορά.
- Στην επιφάνεια του παραλληλεπιπέδου, το οποίο προσομειώνει 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.

Όσον αφορά στο μήκος του αγωγού που χρησιμοποιείται για την ολοκληρωμένη προσομοίωση του μοντέλου κάθε φορά, αυτό επιλέγεται να είναι περίπου ίσο με το συνολικό μήκος του αλυσοειδούς μονωτήρα. Από το άρθρο [23] 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 4.1 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 4.1: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της της γραμμής που περνά από το κέντρο του μονωτήρα και διασχίζει όλη την αλυσίδα για διάφορα μήκη αγωγών.

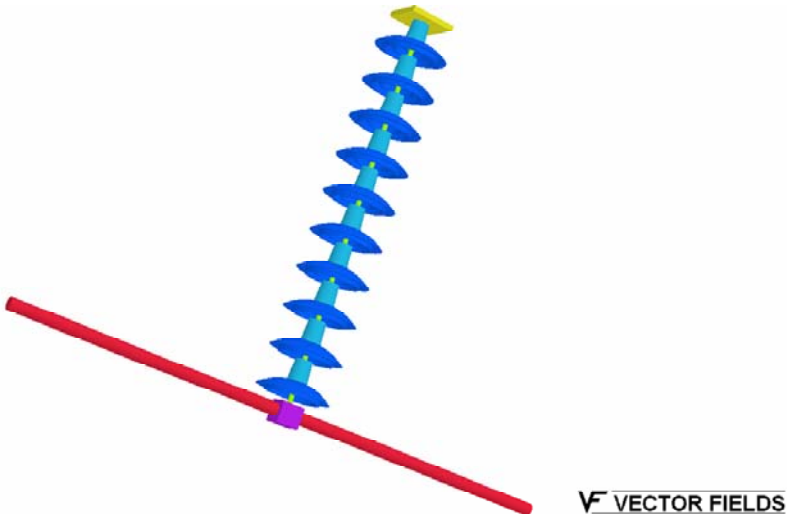
Παρακάτω παρουσιάζονται ξεχωριστά οι προσομοιώσεις των αλυσοειδών μονωτήρων.

4.2 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 150 kV

4.2.1 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV

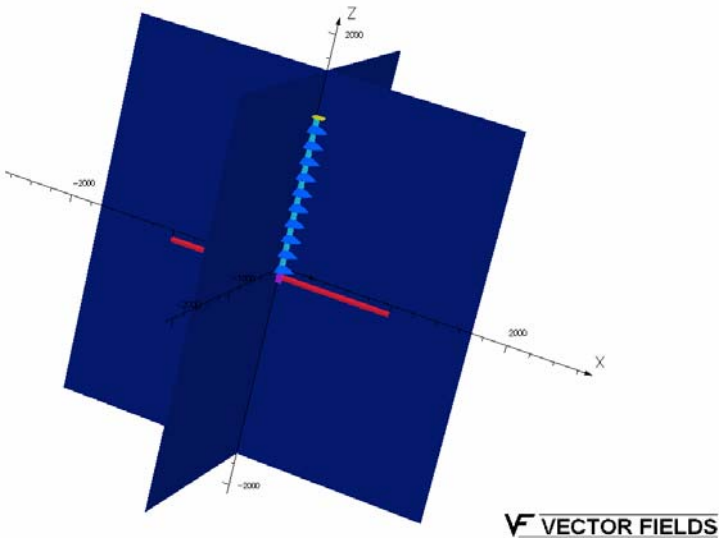
Ο πρώτος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150 kV που αποτελείται από 10 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 254 mm, βήμα 146 mm και μήκος ερπυσμού 290 mm.

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

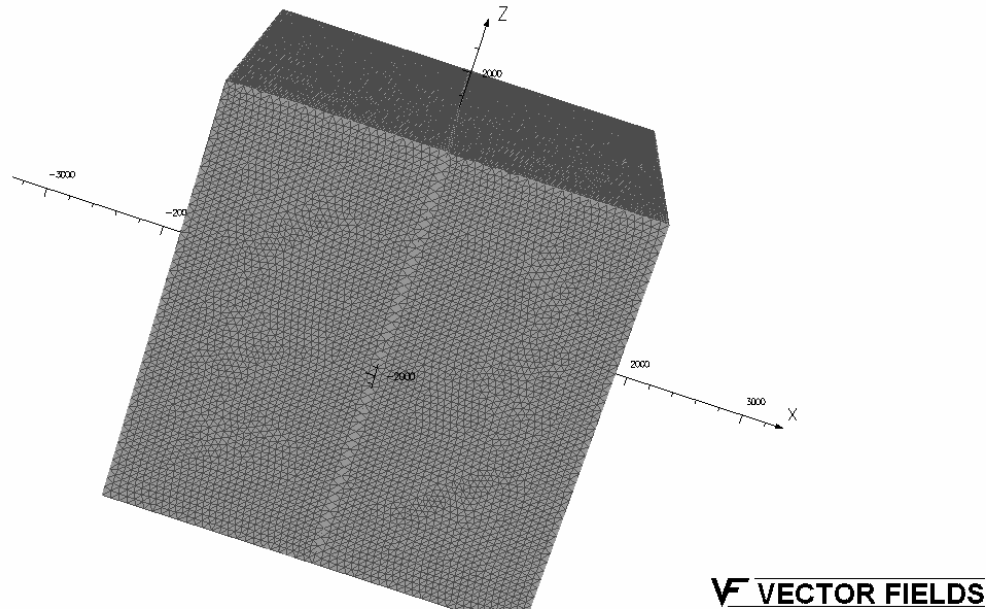


Σχήμα 4.2: Εικόνα του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα από το Μοντελοποιητή.

Οι μεγάλες μπλε επιφάνειες που φαίνονται στο σχήμα 4.3 ονομάζονται «sheets» και βοηθούν στην επιτάχυνση της διαδικασίας κατασκευής του πλέγματος και τις έχουμε χρησιμοποιήσει σε όλα τα μοντέλα που προσομοιώσαμε. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται το μοντέλο με το πλέγμα.

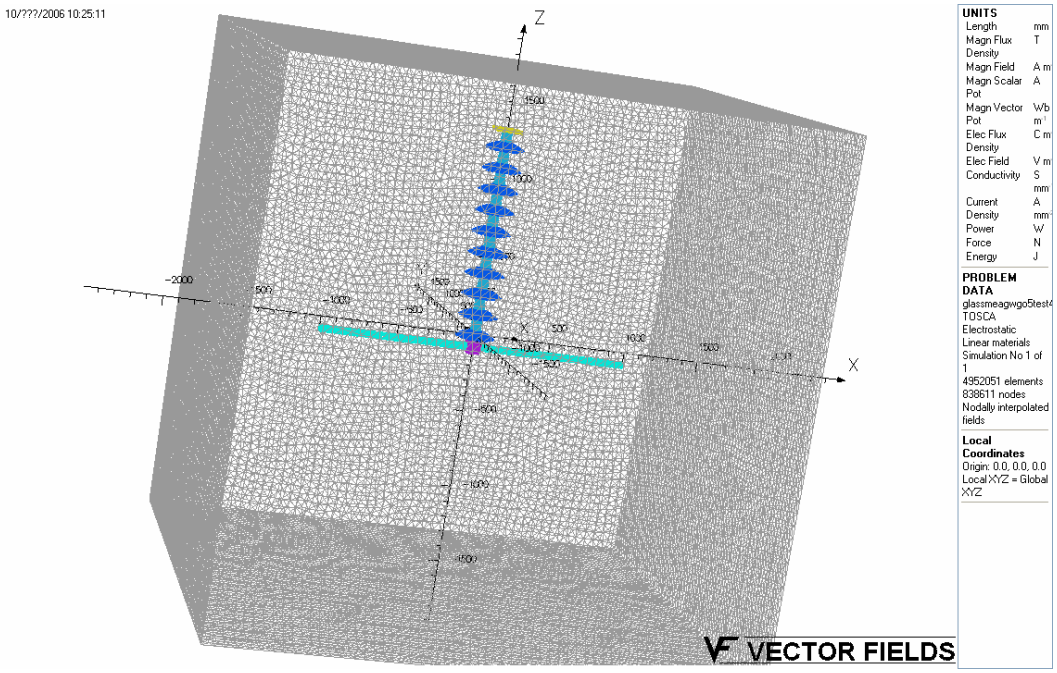


Σχήμα 4.3: Ο μονωτήρας με τα sheets.



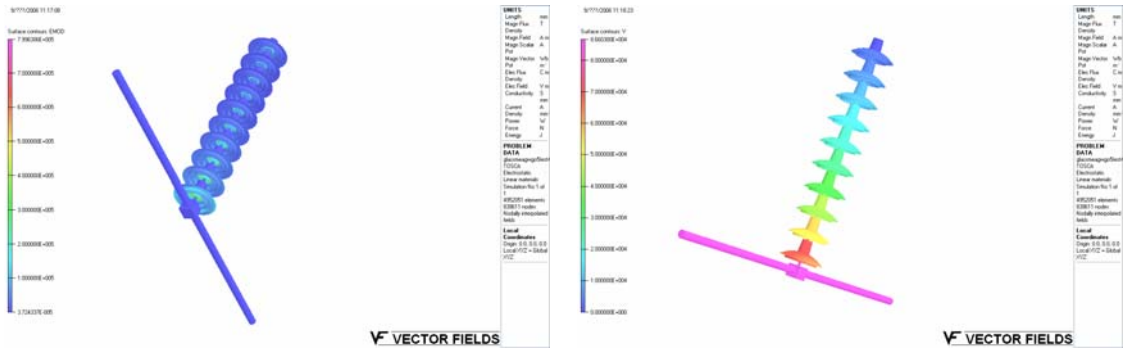
Σχήμα 4.4: Ο αλυσοειδής μονωτήρας με τον αέρα, μετά την ολοκλήρωση του πλέγματος τόσο στην επιφάνεια όσο και στον όγκο του μοντέλου.

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



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

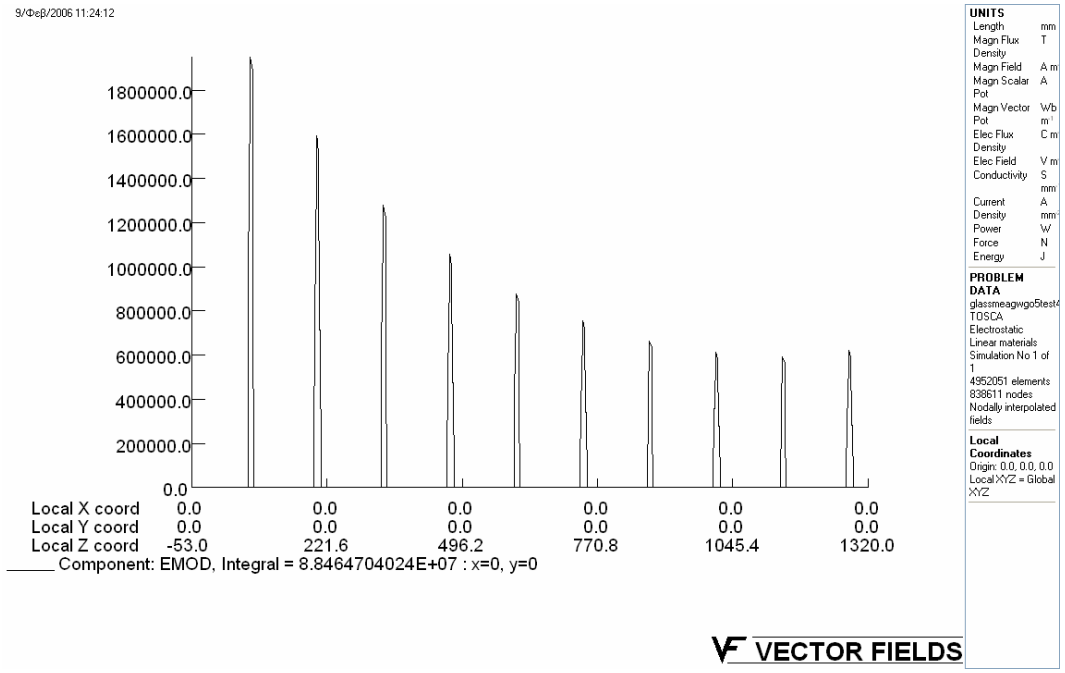
Στο σχήμα 4.6(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του μονωτήρα. Προφανώς, στο εσωτερικό όλων των αγώγιμων μερών της διάταξης, η ένταση 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.



(α) *(β)*

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 τέσσερεις 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 mm, y=0 mm) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή (x=120 mm, y=0 mm) ή η γραμμή (x=0 mm, y=120 mm) «αγγίζει» τις εξωτερικές γυάλινες πτυχώσεις του αλυσοειδούς μονωτήρα, αφού η ακτίνα κάθε γυάλινου μονωτήρα είναι 127 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 mm, y=0 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.



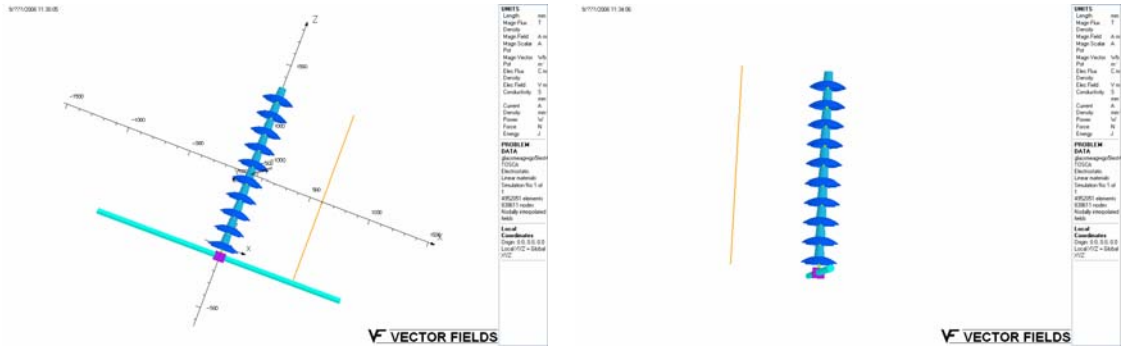
Σχήμα 4.7: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής (x=0 mm, y=0 mm, z=-53..1320 mm) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή (x=0, y=0, z=-53..1320) 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 αγώγιμων μερών (cap και pin) της αλυσίδας, που είναι απόλυτα αναμενόμενο. Η γραφική παράσταση της έντασης σχηματίζει 10 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).



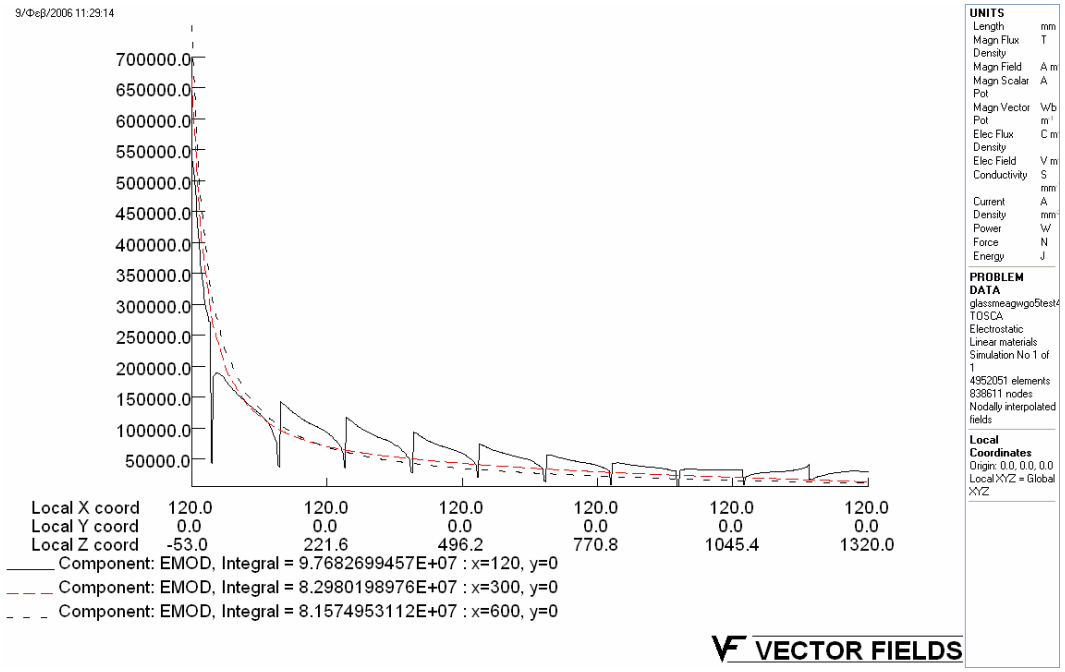
(α) (β)

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

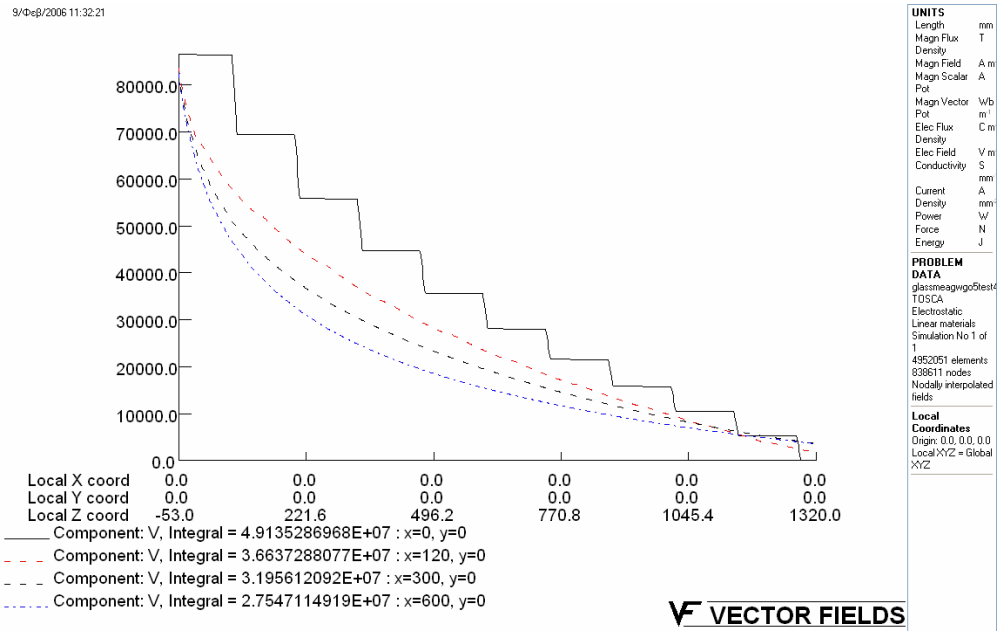
Παρατηρούμε ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από τον αλυσοειδή μονωτήρα, τόσο η ένταση του πεδίου όσο και το δυναμικό μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή, καθώς απομακρυνόμαστε και από τον αλυσοειδή μονωτήρα και από τον αγωγό, δηλαδή για γραμμές του σχήματος 4.8(β), όπως επιβεβαιώνεται από 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 [19], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 της παραγράφου 2.2 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).

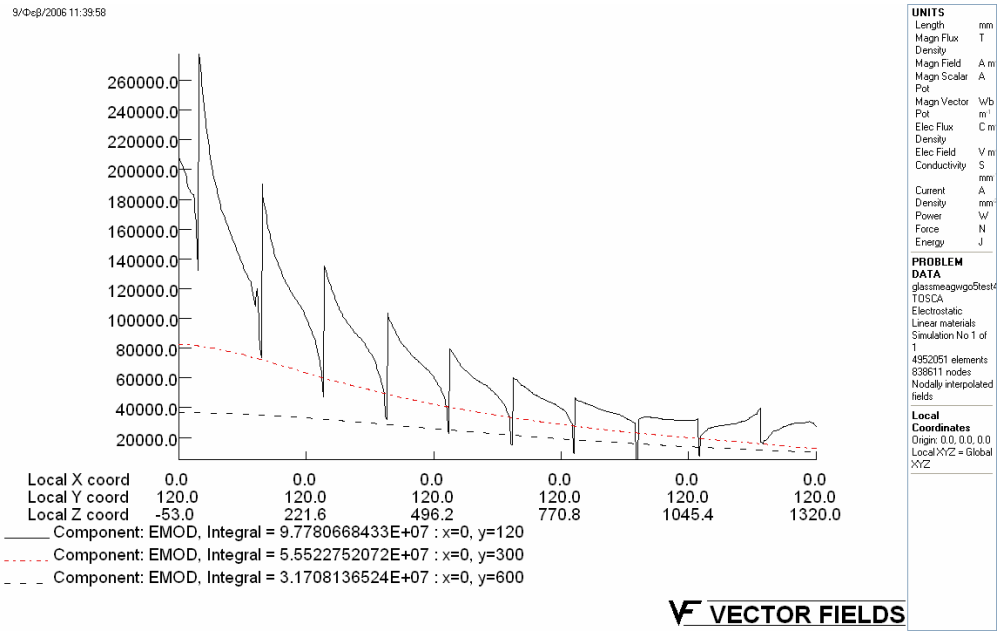


Σχήμα 4.9: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.8(α).

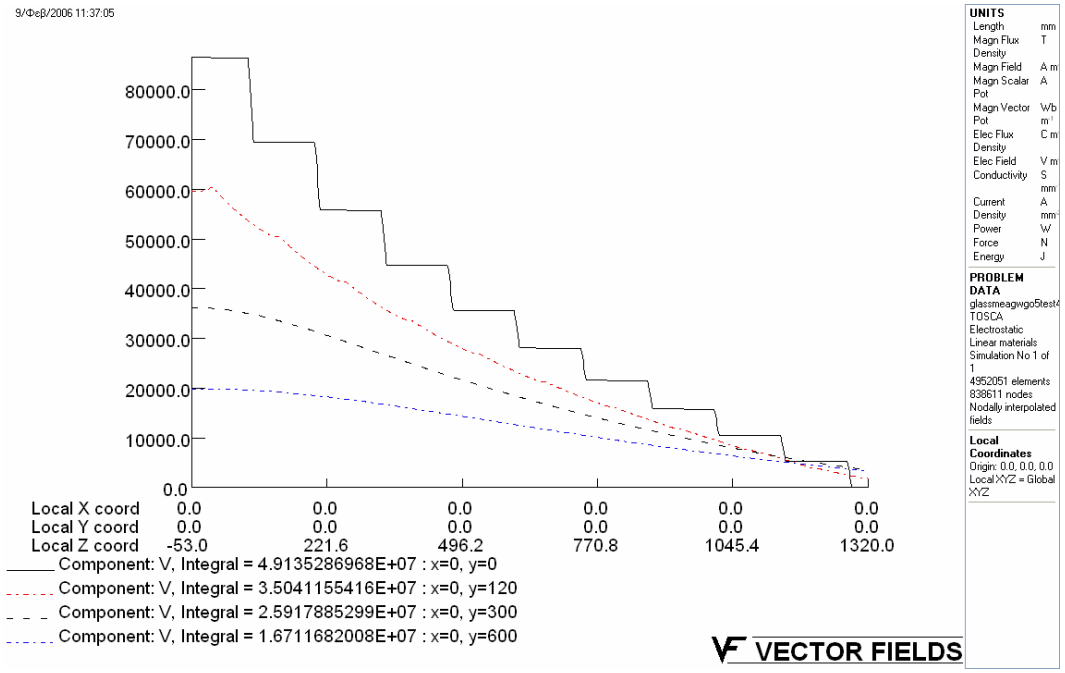


Σχήμα 4.10: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.8(α).

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).



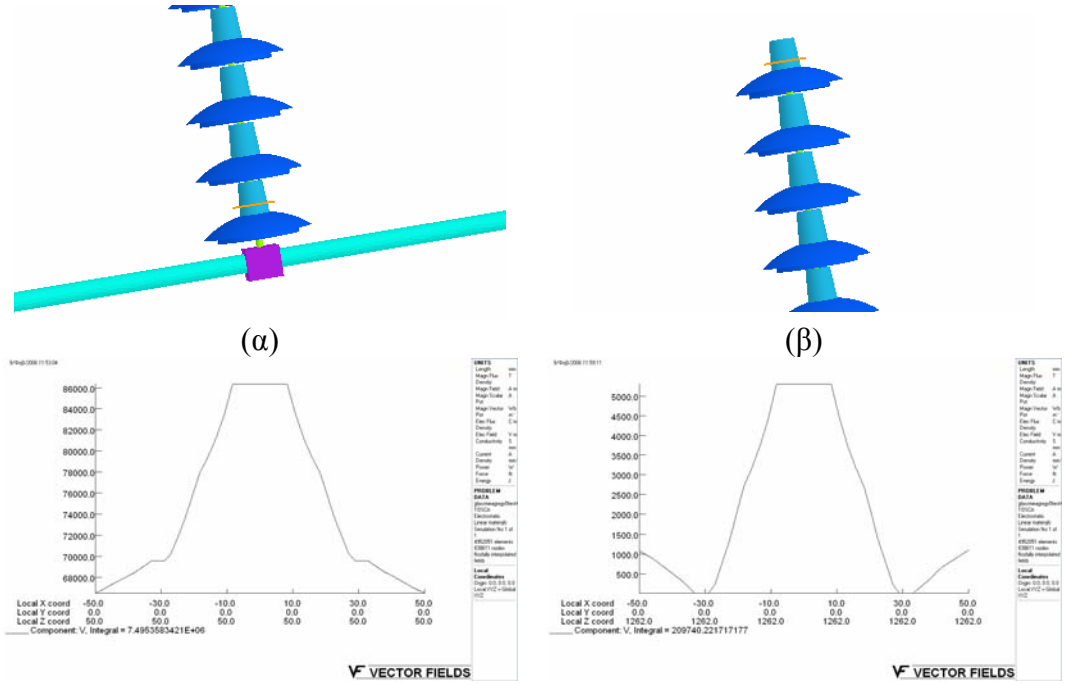
Σχήμα 4.11: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.8(β).



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=50 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 35 mm και έτσι, για |x|>35 mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για x=-8.3..8.3 mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγώγιμο 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 κύβου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή x=-18.3..-8.3 mm και x=8.3..18.3 mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή x=-27..-18.3 mm και x=18.3..27 mm βρίσκεται το γυαλί και στην περιοχή x=-29..-27 mm και x=27..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 αγώγιμων μερών του μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται περίπου στα 70 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγώγιμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα.

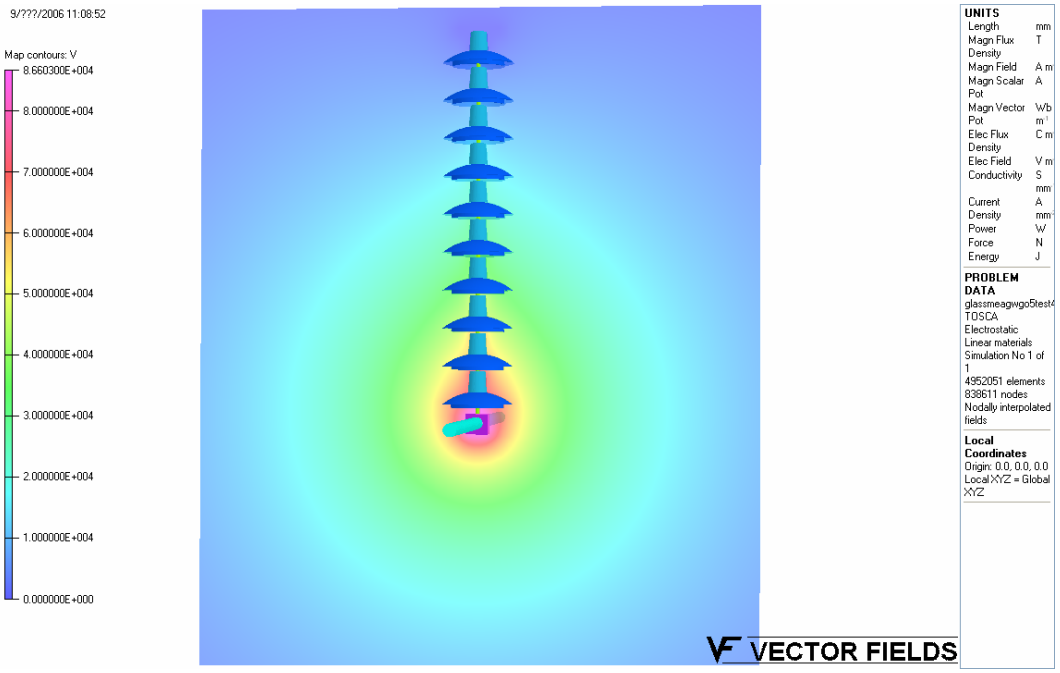
Στο σχήμα 4.13(β) φαίνεται η γραμμή (x=-50..50 mm, y=0 mm, z=1262 mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Από το σχήμα 4.13(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin του γειωμένου μονωτήρα και είναι ίση με 5 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.



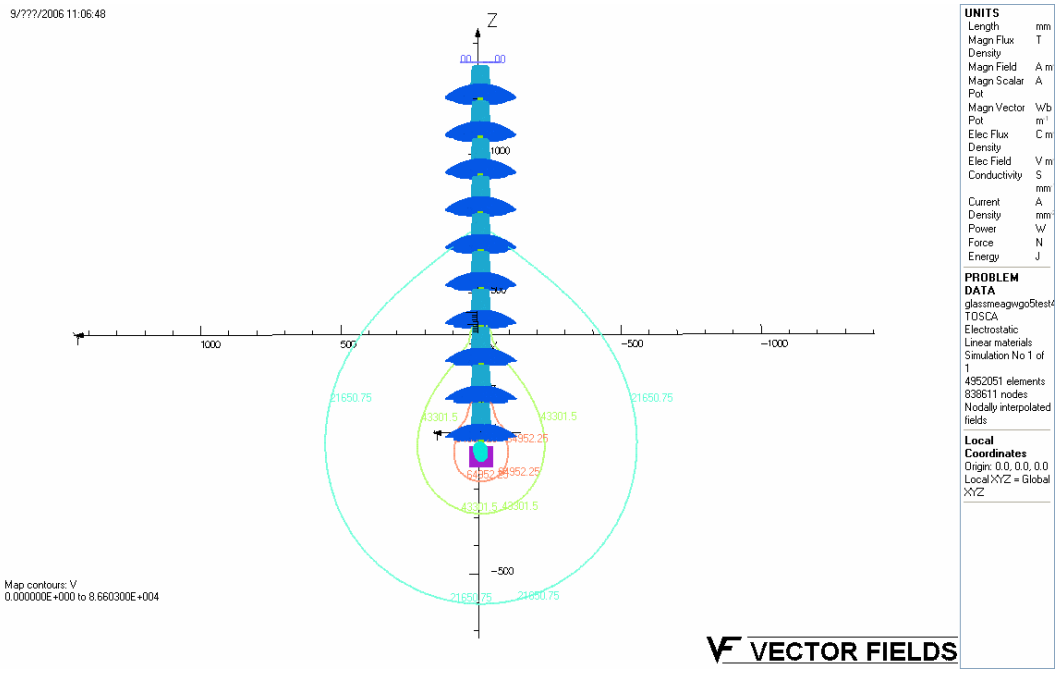
Σχήμα 4.13: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Υ.Τ. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

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 $\frac{150}{\sqrt{3}}\text{kV}=86603\text{V}$, 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 86603 V, προς το γειωμένο μονωτήρα, του οποίου το cap έχει μηδενικό δυναμικό. Οι απότομες μειώσεις (σκαλοπάτια) του δυναμικού παρατηρούνται στις μη-αγώγιμες περιοχές,

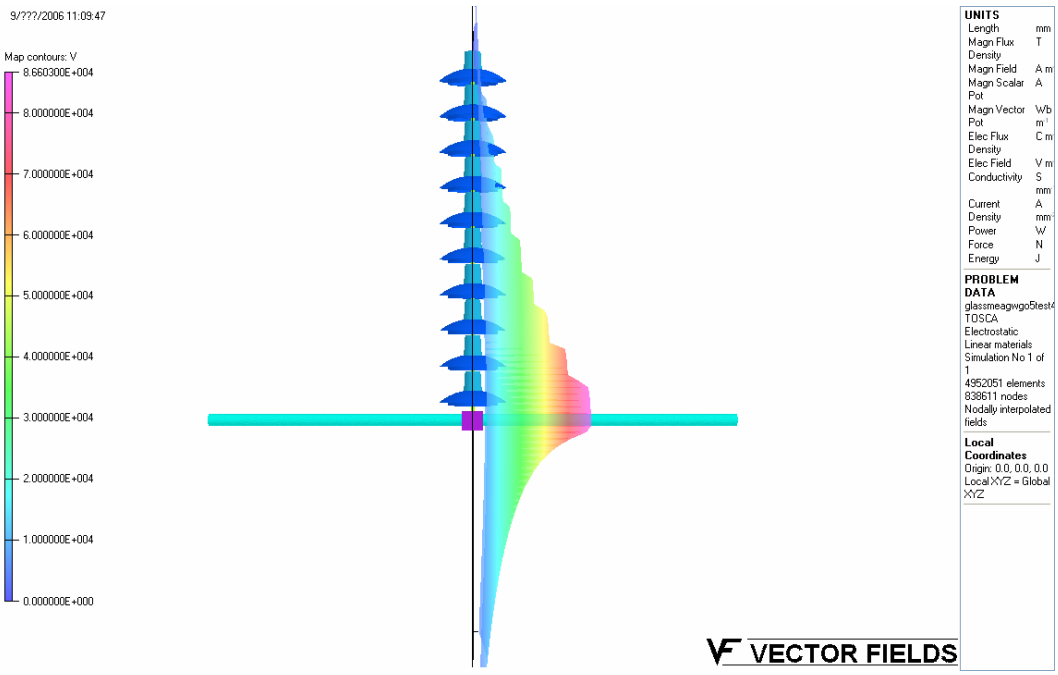
δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στο γυαλί. Αυτός είναι, άλλωστε, και ένας από τους ρόλους ενός μονωτικού υλικού μέσα στο μονωτήρα: να μειώνει το δυναμικό σταδιακά κατά μήκος του εσωτερικού της αλυσίδας. Στο σχήμα 4.17 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. 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 πεδίου 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.



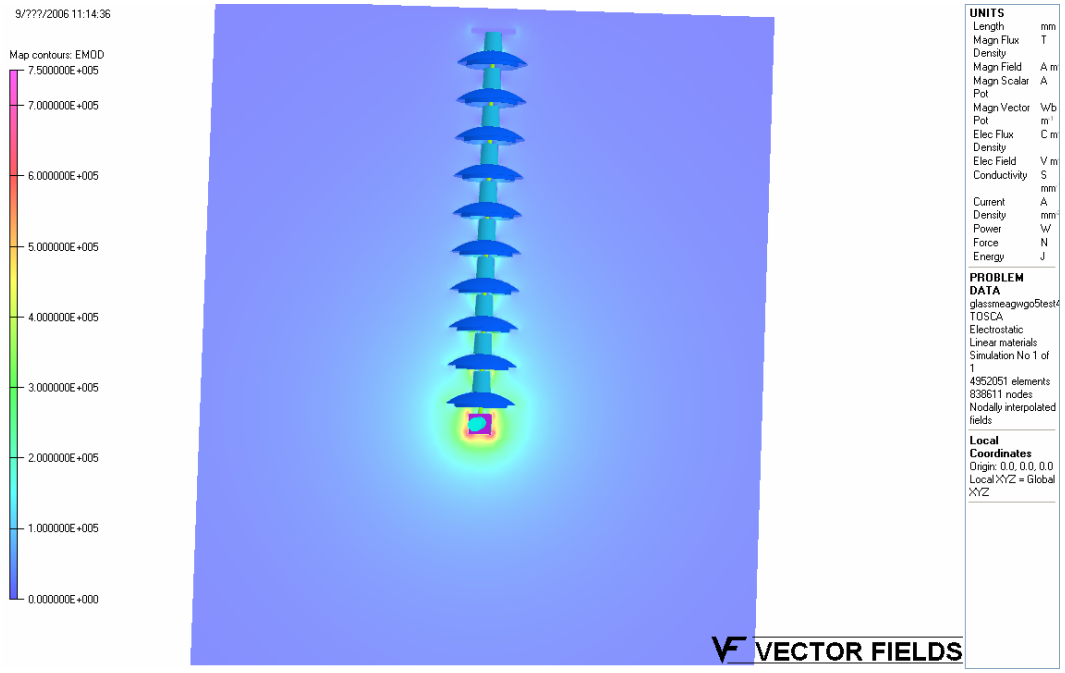
Σχήμα 4.14: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



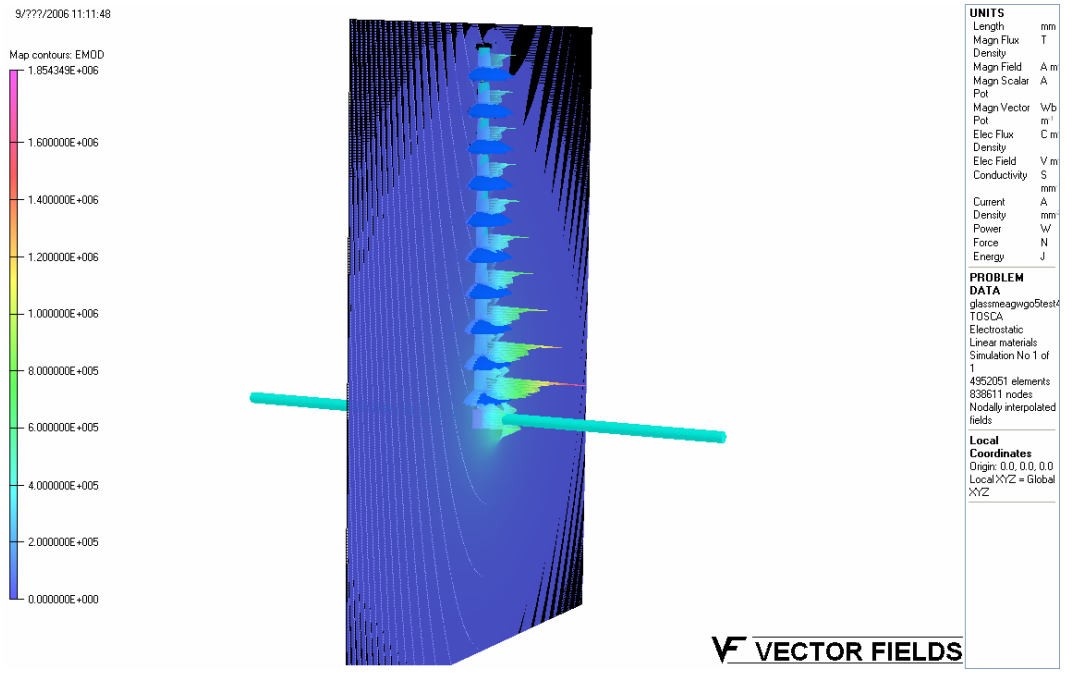
Σχήμα 4.15: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



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



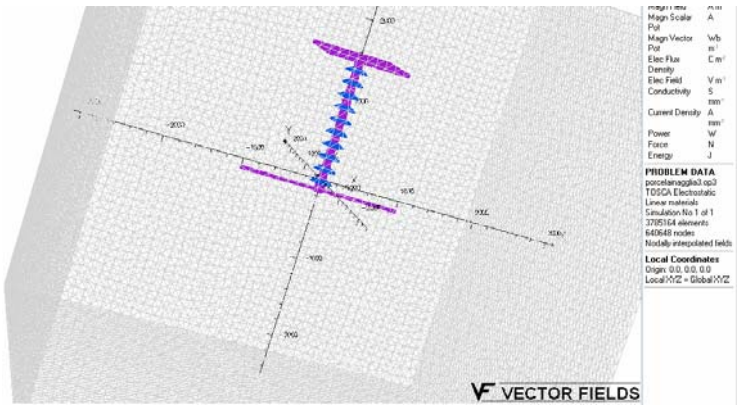
Σχήμα 4.17: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



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

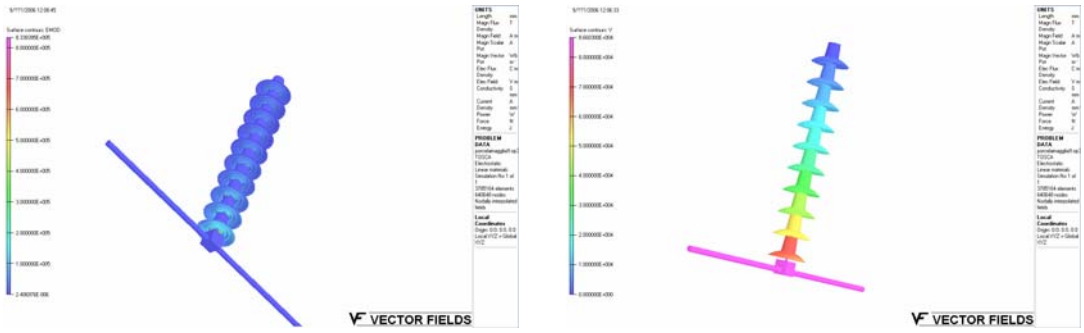
4.2.2 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV

Ο δεύτερος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150 kV που αποτελείται από 10 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 254 mm, βήμα 146 mm και μήκος ερπυσμού 305 mm. Στο σχήμα 4.19 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



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

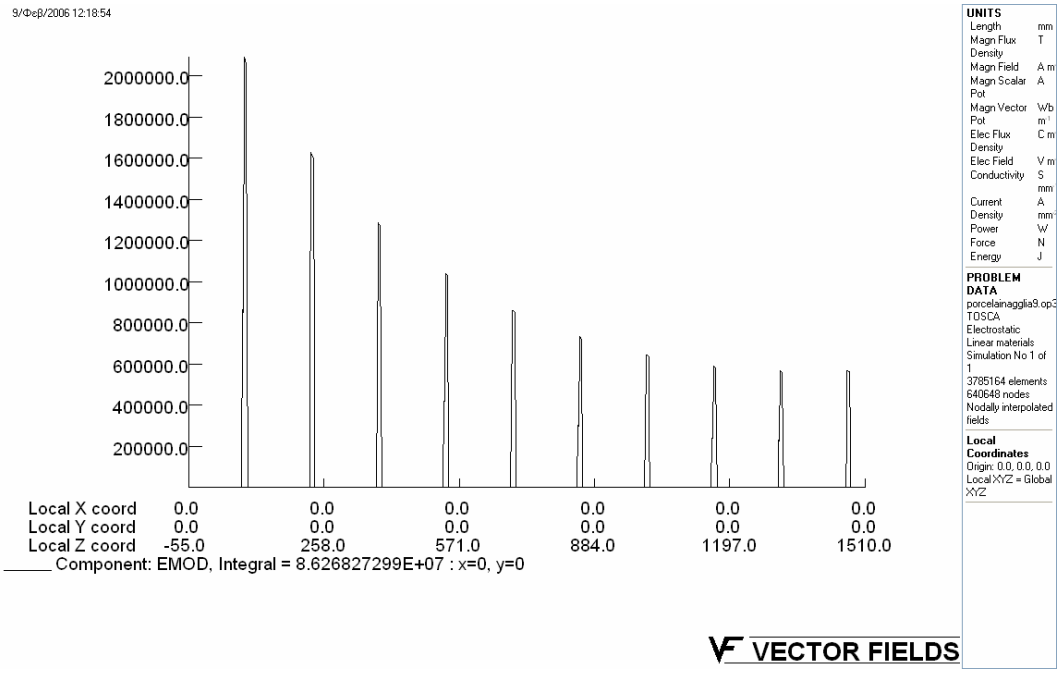
Στο σχήμα 4.20(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του μονωτήρα. Στο εσωτερικό όλων των αγώγιμων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι, προφανώς, μηδέν. 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.



(α) (β)

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 τέσσερεις 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 mm, y=0 mm) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή (x=125 mm, y=0 mm) ή η γραμμή (x=0 mm, y=125 mm) «αγγίζει» τις εξωτερικές πορσελάνινες πτυχώσεις του αλυσοειδούς μονωτήρα, αφού η ακτίνα του κάθε πορσελάνινου μονωτήρα είναι 127 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 mm, y=0 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.



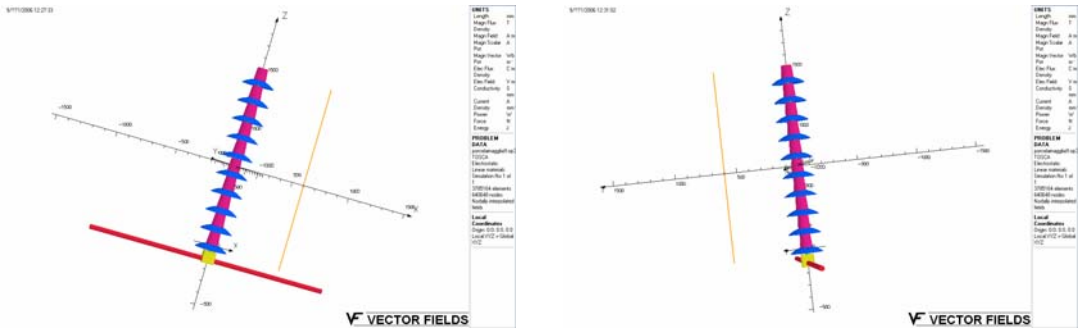
Σχήμα 4.21: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής (x=0 mm, y=0 mm, z=-55..1510 mm) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή (x=0 mm, y=0 mm, z=-55..1510 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 4.21, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγώγιμων μερών (cap και pin) της αλυσίδας, που

είναι απόλυτα αναμενόμενο. Η γραφική παράσταση της έντασης σχηματίζει 10 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 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).



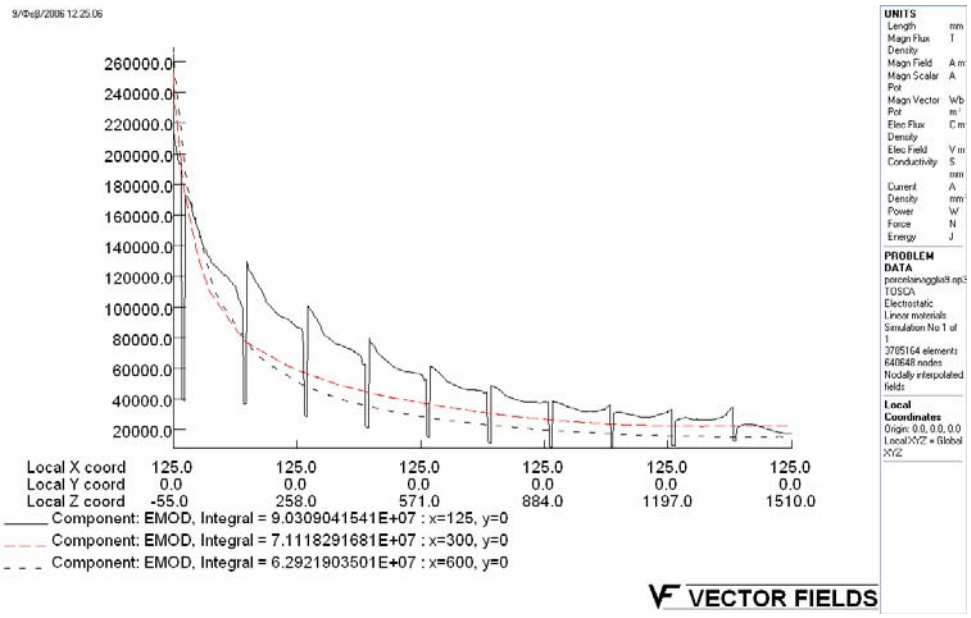
(α) (β)

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

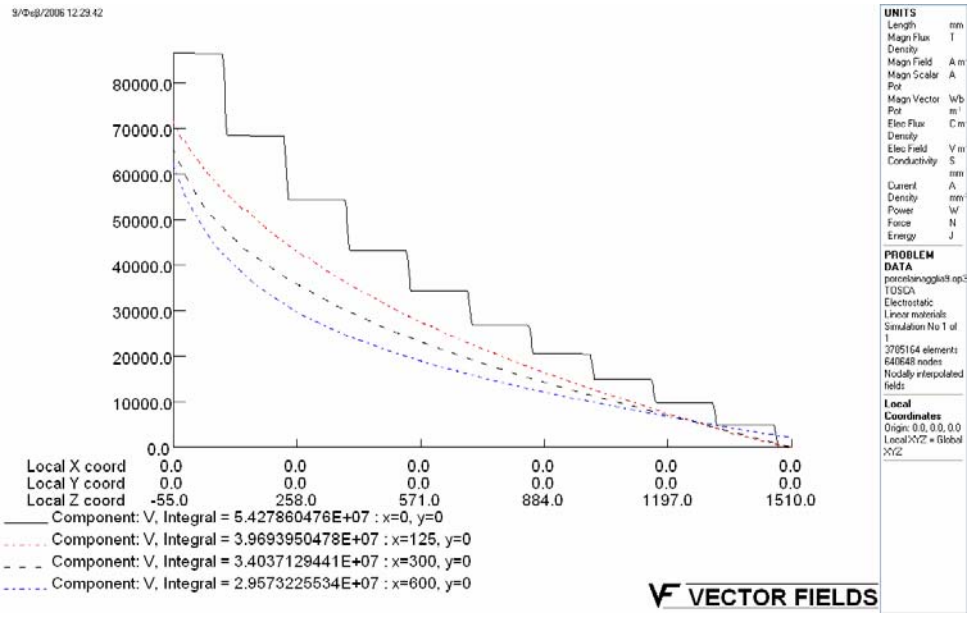
Παρατηρούμε ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από τον αλυσοειδή μονωτήρα, τόσο η ένταση του πεδίου όσο και το δυναμικό μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή, καθώς απομακρυνόμαστε και από τον αλυσοειδή μονωτήρα

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=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 [19], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 της παραγράφου 2.2 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 4.23 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).

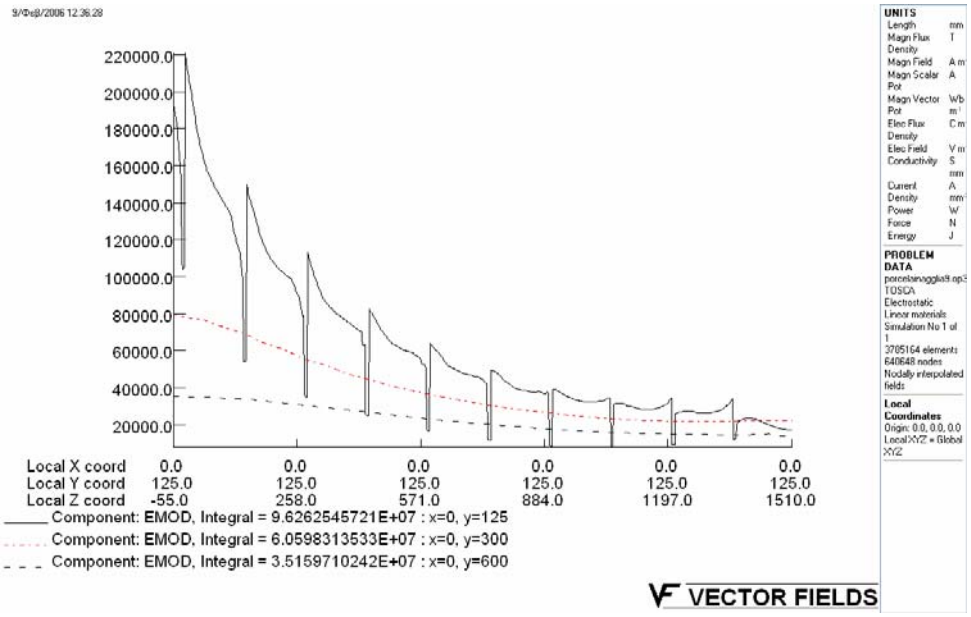


Σχήμα 4.23: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(α).

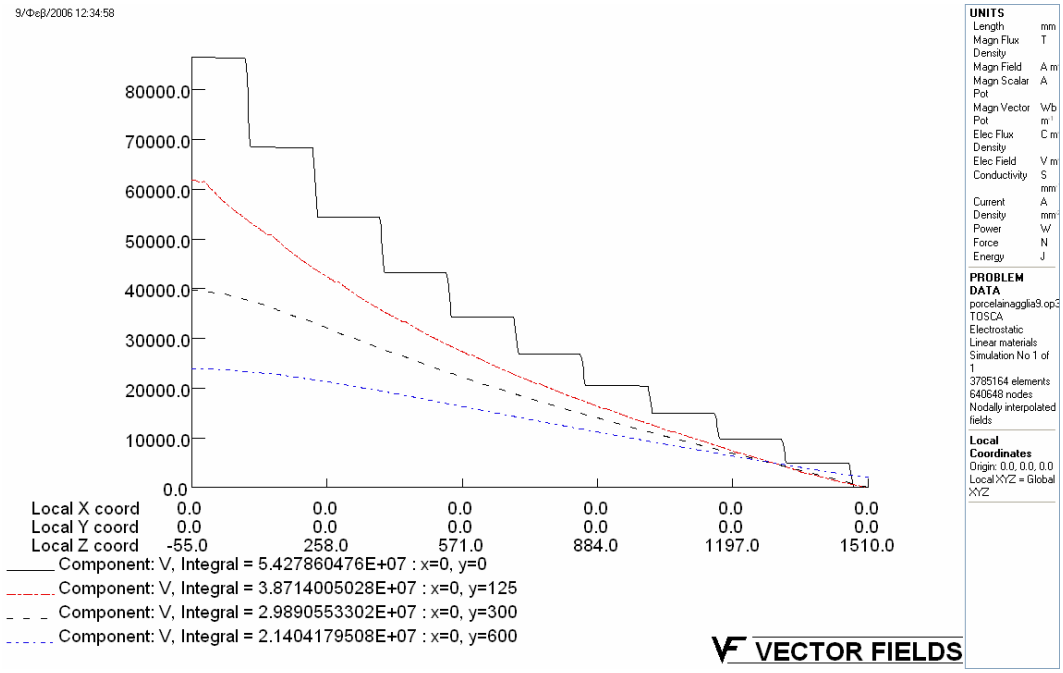


Σχήμα 4.24: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(α).

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).



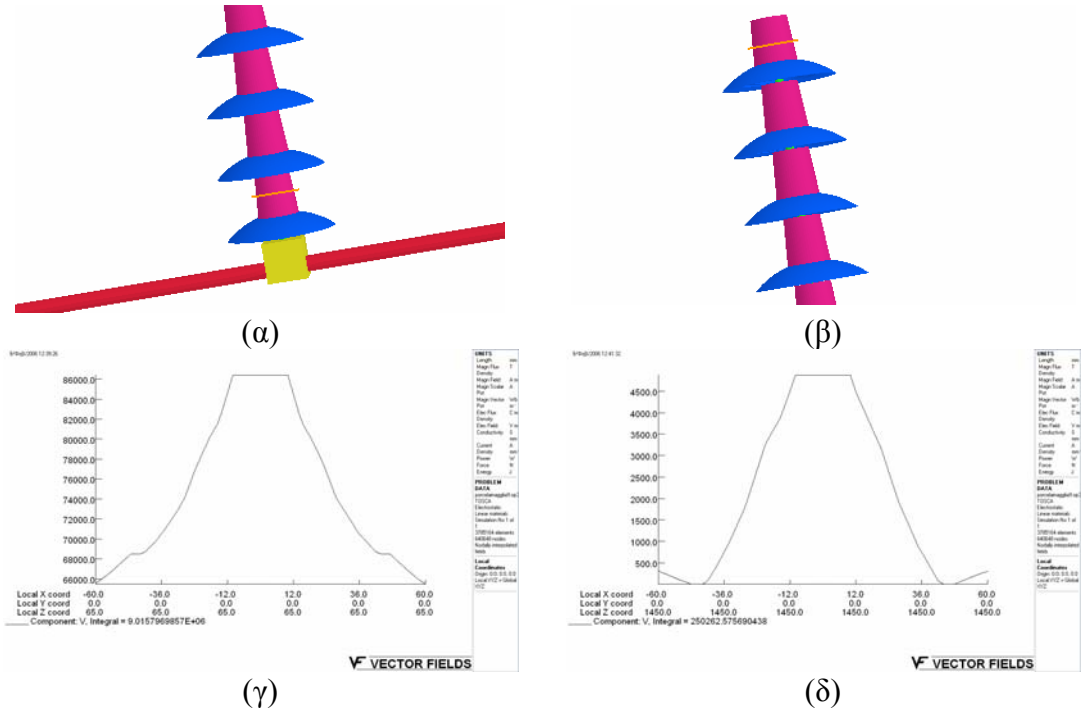
Σχήμα 4.25: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(β).



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

Στο σχήμα 4.27(α) φαίνεται η γραμμή (x=-60..60 mm, y=0 mm, z=65 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 52 mm και έτσι, για |x|>52 mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για x=-10..10 mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγώγιμο 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 κίτρινου κύβου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή x=-21..-10 mm και x=10..21 mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή x=-42..-21 mm και x=21..42 mm βρίσκεται η πορσελάνη και στην περιοχή x=-44..-42 mm και x=42..44 mm ένα λεπτό στρώμα τσιμέντου. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται μείωση του δυναμικού, όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση. Έτσι, μετά την παρεμβολή των μη αγώγιμων μερών του δισκοειδούς μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται περίπου στα 68 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγώγιμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα υψηλής τάσης.

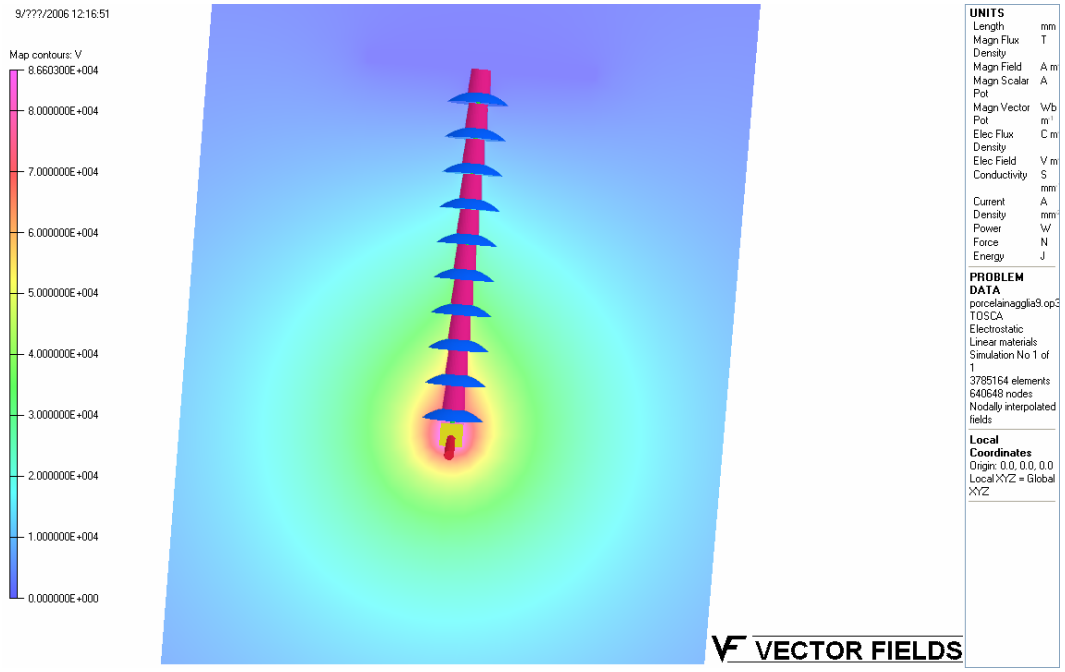
Στο σχήμα 4.27(β) φαίνεται η γραμμή (x=-60..60 mm, y=0, z=1450 mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Για το γειωμένο μονωτήρα, από το σχήμα 4.27(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin και είναι ίση με 4.7 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.



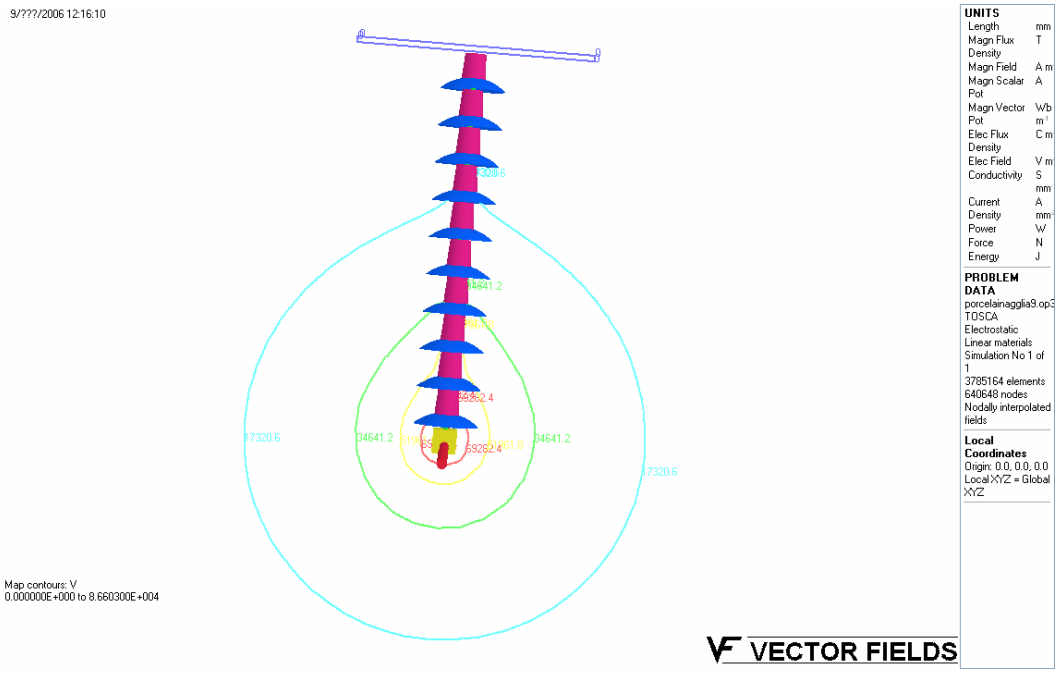
Σχήμα 4.27: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Υ.Τ. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

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 αλυσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι 86603 V, όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται. Στο σχήμα 4.29 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσοειδή 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 86603 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

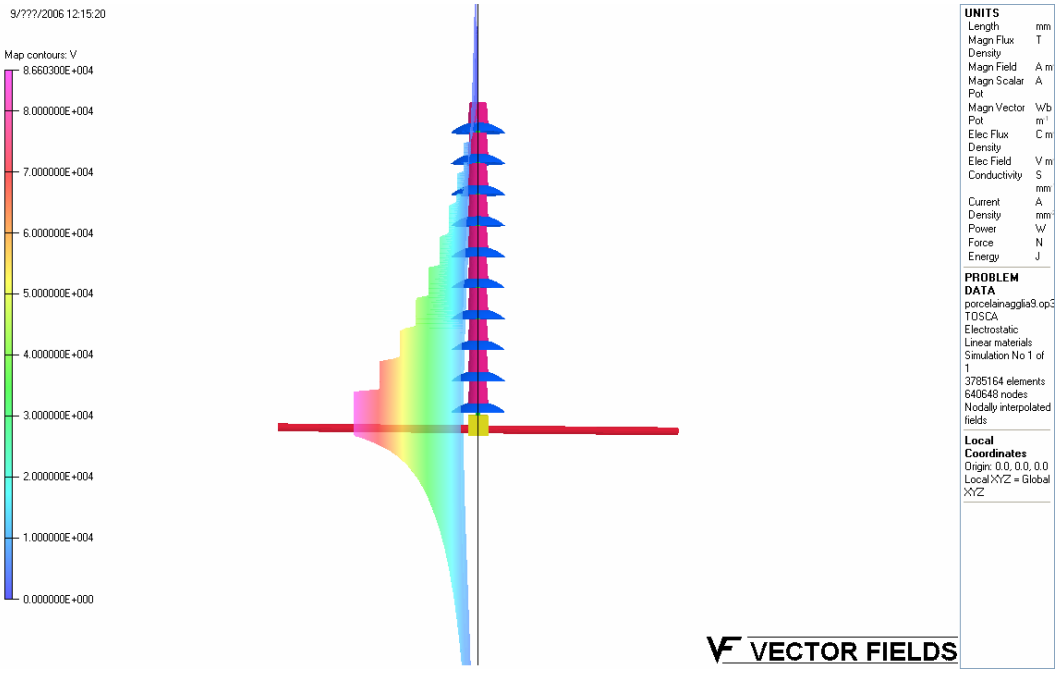
σταδιακά κατά μήκος του εσωτερικού της αλυσίδας. Στο σχήμα 4.31 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.32 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται 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.



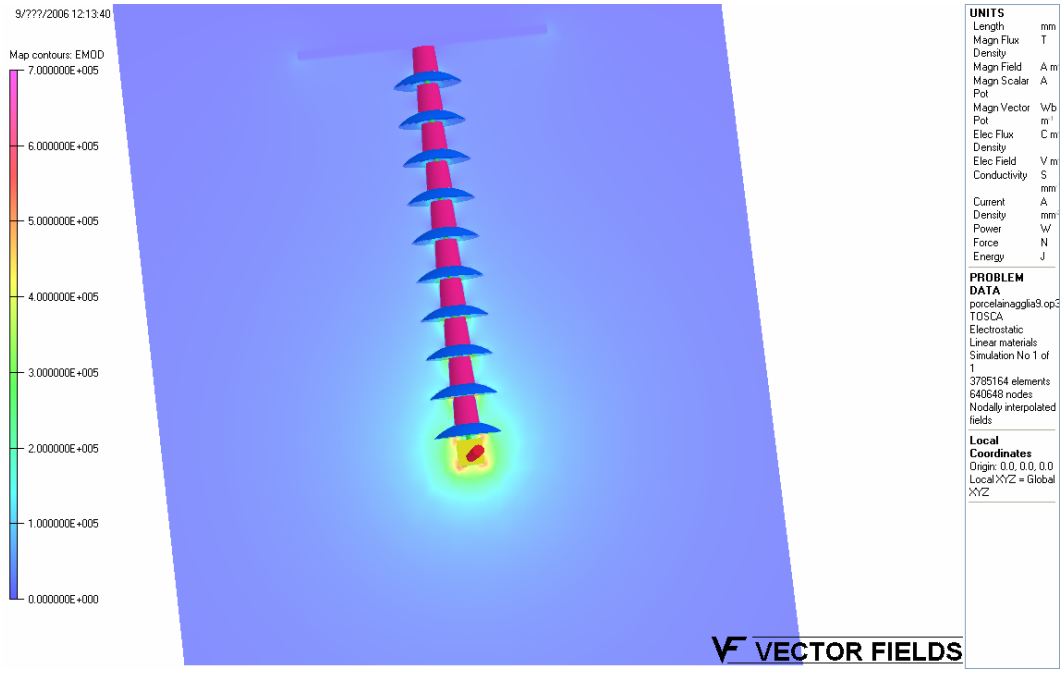
Σχήμα 4.28: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



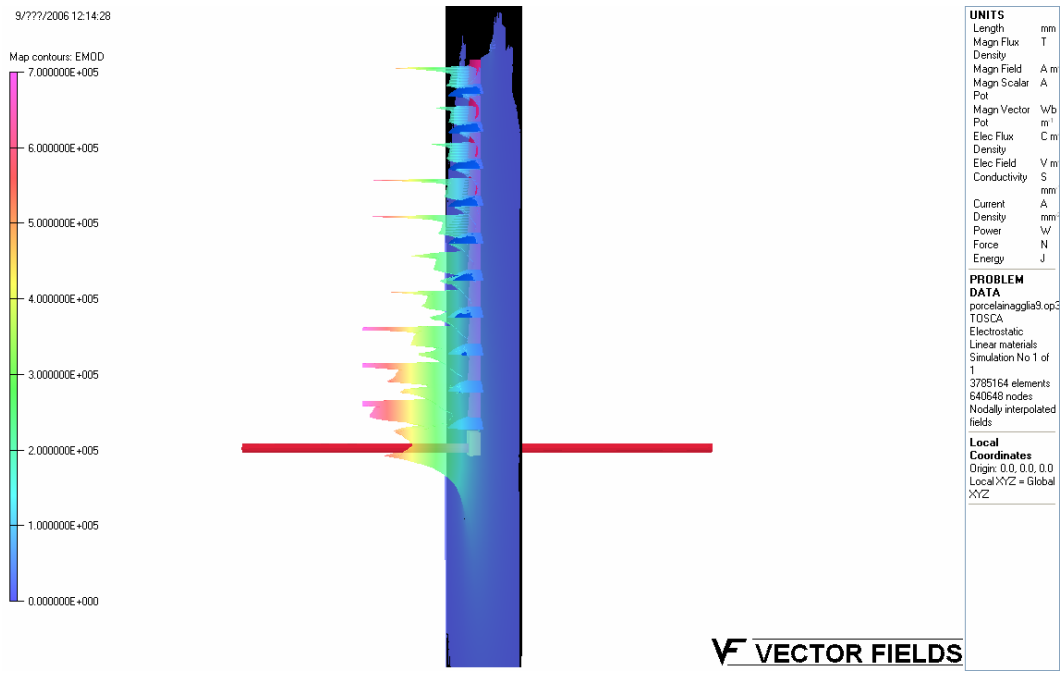
Σχήμα 4.29: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



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



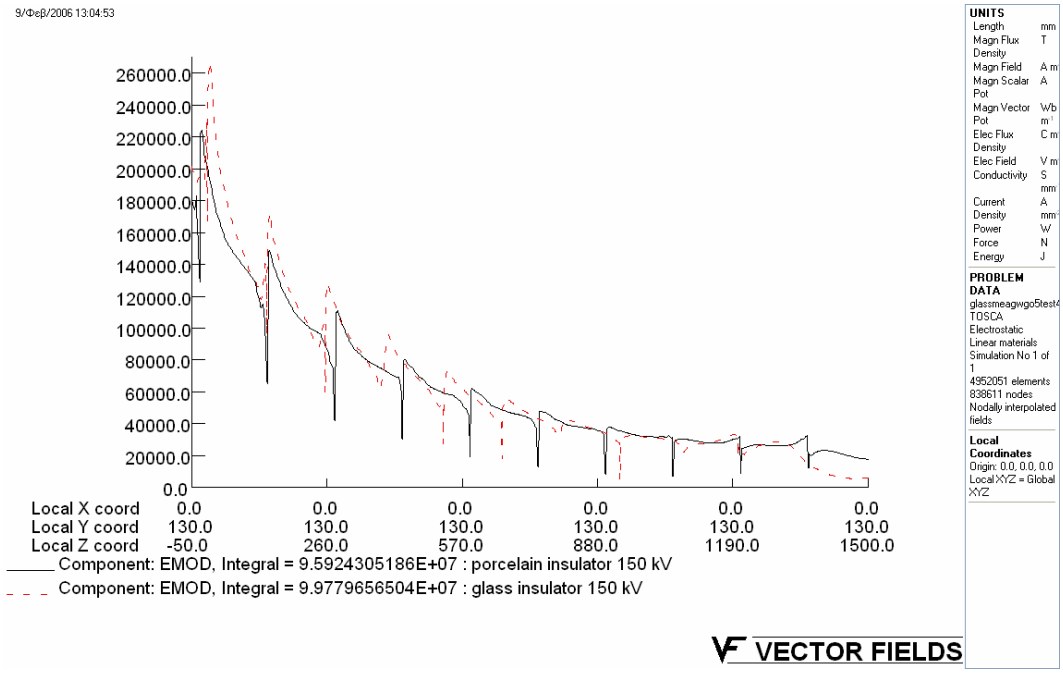
Σχήμα 4.31: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



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

4.2.3 Συγκριτικές γραφικές μεταξύ των δύο αλυσοειδών μονωτήρων 150kV

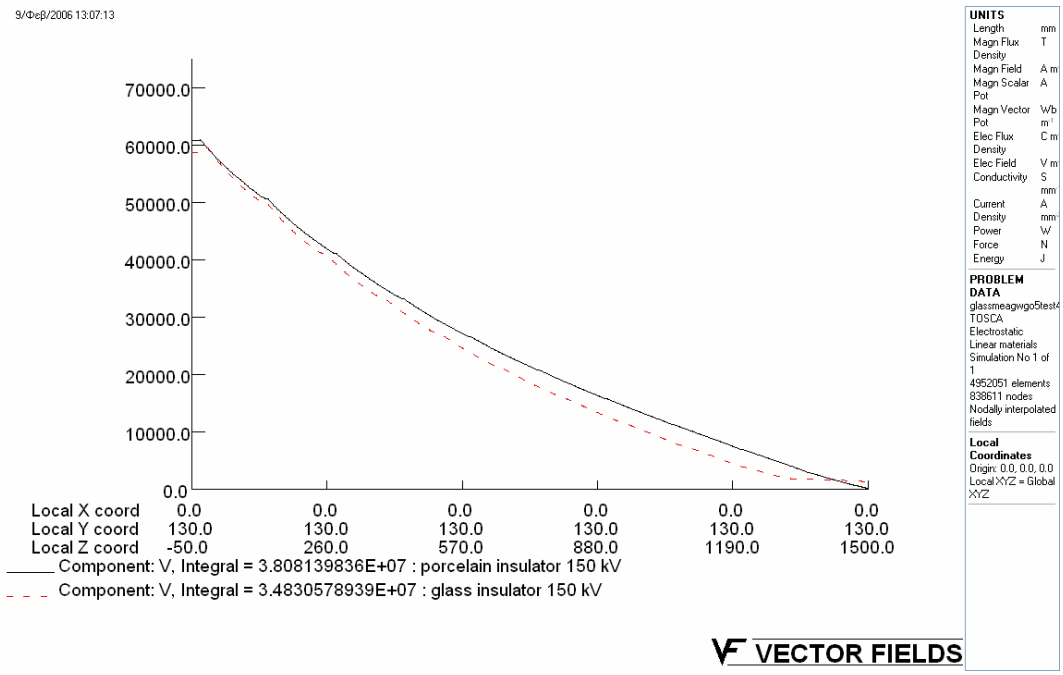
Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικές γραφικές για τους δύο αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV που παρουσιάστηκαν παραπάνω (σχήματα 4.33 - 4.36). Λαμβάνεται πρώτα μια γραμμή που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα και κατόπιν, μια γραμμή 300 mm μακριά από το κέντρο του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(β). Στις γραμμές αυτές υπολογίζεται και παρουσιάζεται γραφικά η ένταση του πεδίου και το δυναμικό. Η μαύρη συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει τον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή το γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.33: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε γραμμή που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα 150kV.

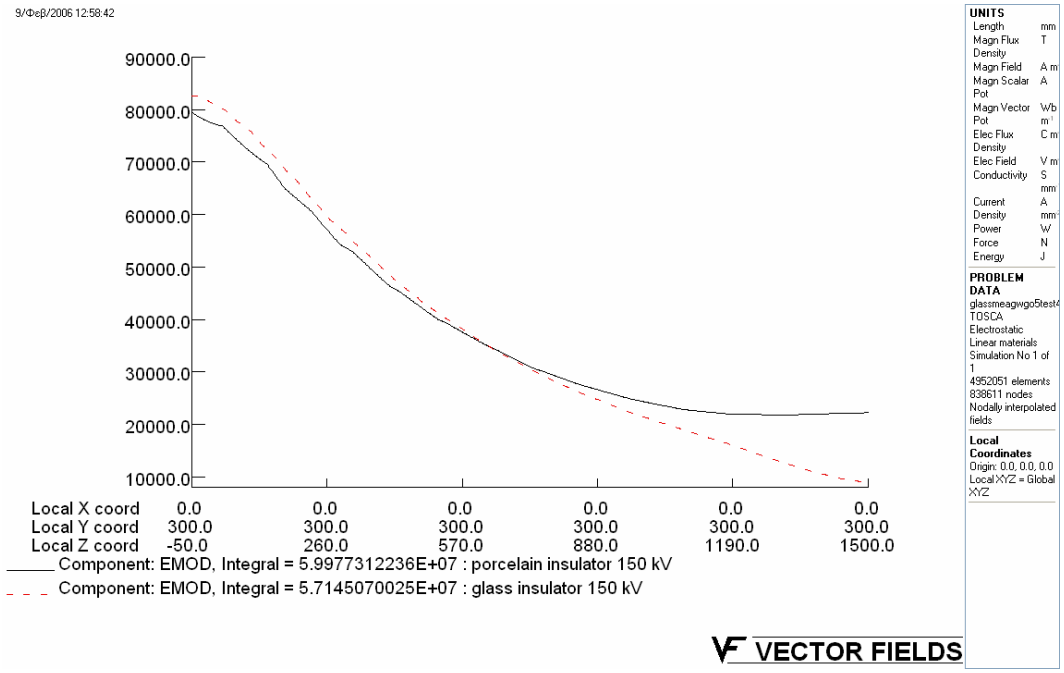
Από το σχήμα 4.33 φαίνεται ότι η ένταση του πεδίου κατά μήκος της γραμμής που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις της κάθε αλυσίδας, παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που η γραμμή διαπερνά τις πτυχώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μονωτικό υλικό (πορσελάνη ή γυαλί), από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι πτυχώσεις, έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον περιβάλλοντα αέρα και έτσι, σε αυτό παρατηρείται μείωση της έντασης του πεδίου. Η μορφή της κατανομής

της έντασης επιβεβαιώνεται και από το άρθρο [19] , όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 της παραγράφου 2.2 του κεφαλαίου 2.

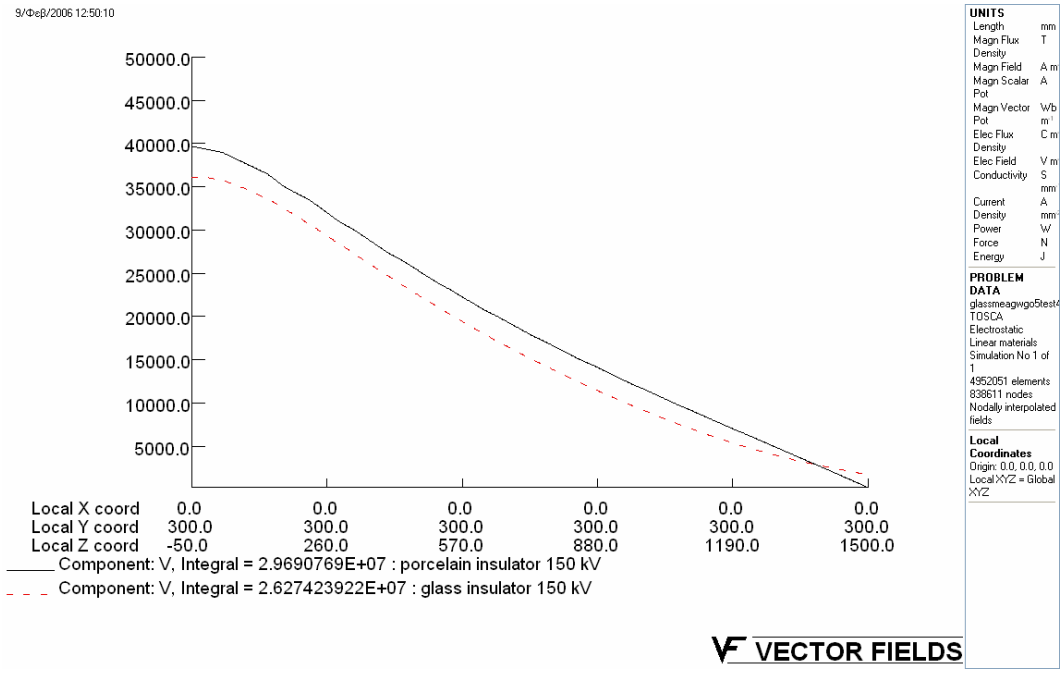


Σχήμα 4.34: Κατανομή του δυναμικού σε γραμμή που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα 150kV.

Στο σχήμα 4.34 βλέπουμε ότι το δυναμικό κατά μήκος της γραμμής που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις της κάθε αλυσίδας, μειώνεται σχεδόν γραμμικά με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Όμως, εκεί που η γραμμή διέρχεται από την κάθε πτύχωση, το δυναμικό διατηρείται σχεδόν σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γυάλινες/πορσελάνινες πτυχώσεις έχουν μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με τον αέρα, οπότε σε αυτές το δυναμικό μειώνεται λιγότερο απότομα.



Σχήμα 4.35: Κατανομή της έντασης του πεδίου σε γραμμή 300mm μακριά από το κέντρο του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(β).



Σχήμα 4.36: Κατανομή του δυναμικού σε γραμμή 300mm μακριά από το κέντρο του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.22(β).

Από τα σχήματα 4.35 και 4.36 παρατηρούμε ότι τόσο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου όσο και το δυναμικό, μειώνονται ομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής (x=0 mm, y=300 mm, z=-50..1500 mm), με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα.

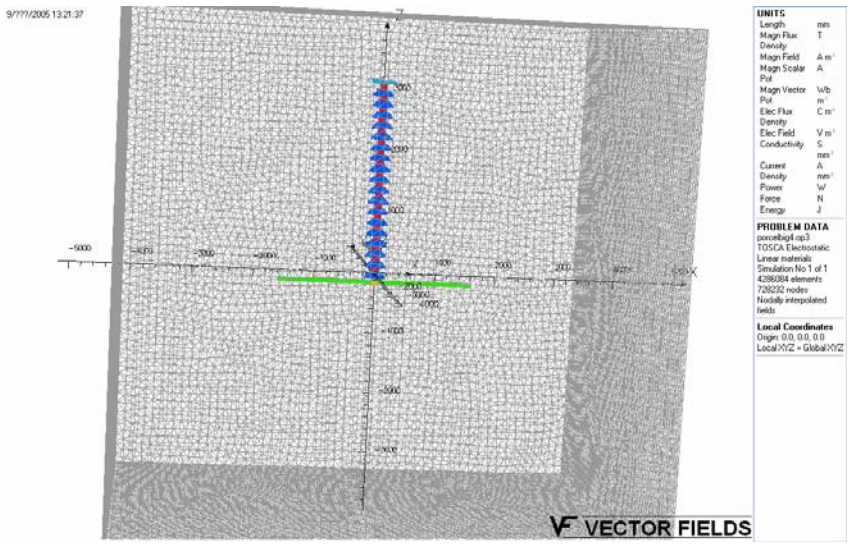
Επιπλέον, παρατηρούμε ότι όλες οι συγκριτικές γραφικές έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν κοντινές τιμές πεδίου και δυναμικού. Οι όποιες διαφορές παρουσιάζονται στις παραπάνω γραφικές οφείλονται στη διαφορετική τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς για το γυαλί και την πορσελάνη ($\varepsilon_{r,\text{πορσελάνης}}$=5.5 και $\varepsilon_{r,\text{γυαλιού}}$=7), στο διαφορετικό μήκος ερπυσμού, όπου για τον κάθε πορσελάνινο μονωτήρα είναι 30.5 cm και για τον κάθε γυάλινο μονωτήρα είναι 29 cm, καθώς και στις διάφορες γεωμετρικές διαφορές μεταξύ των δύο αλυσοειδών μονωτήρων (ύψος και ακτίνα των διάφορων μερών που συνθέτουν το μονωτήρα).

4.3 Αλυσοειδείς μονωτήρες ανάρτησης 400 kV

4.3.1 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400kV

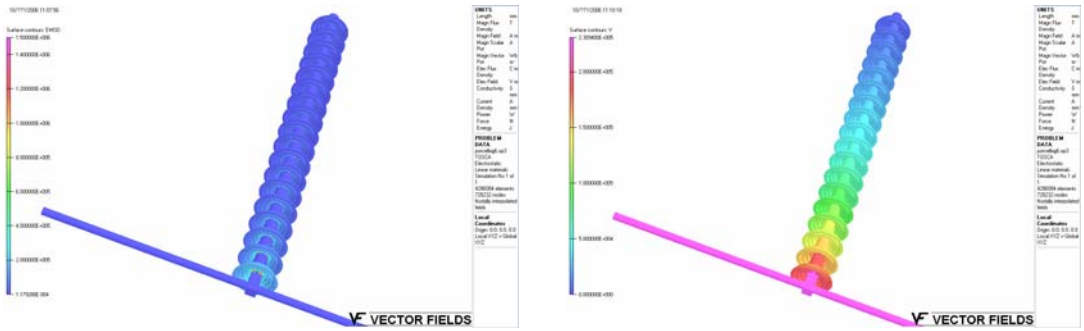
Ο τρίτος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400 kV που αποτελείται από 18 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 320 mm, βήμα 170 mm και μήκος ερπυσμού 540 mm.

Στο σχήμα 4.37 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



Σχήμα 4.37: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή.

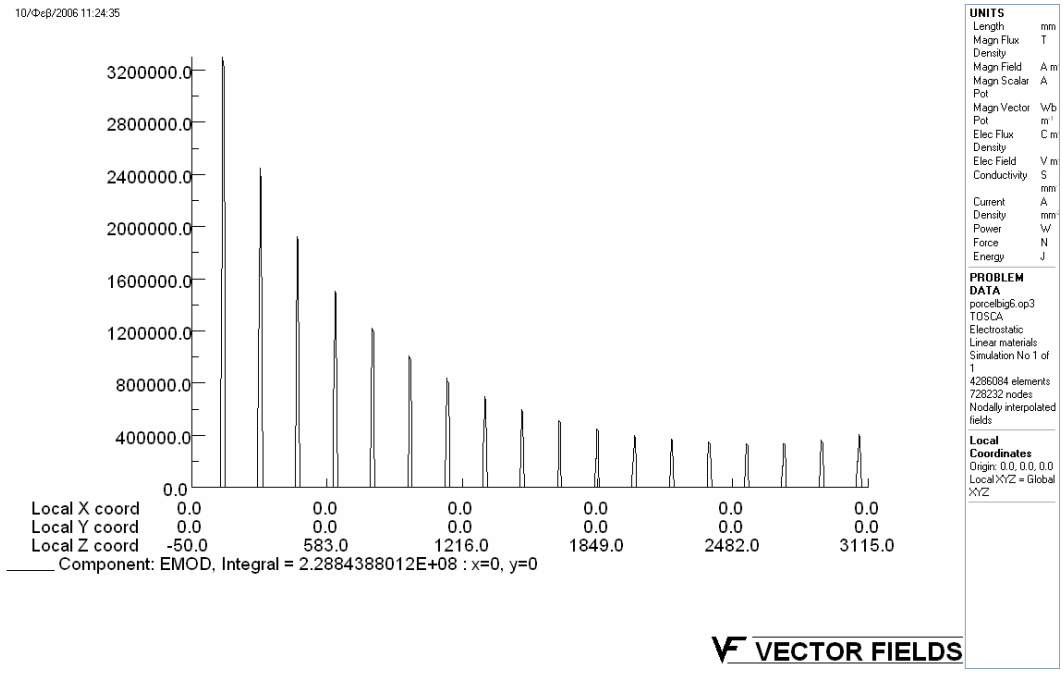
Στο σχήμα 4.38(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση του πεδίου μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα. Προφανώς, στο εσωτερικό όλων των αγώγιμων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν. Στο σχήμα 4.38(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.



(α) (β)

Σχήμα 4.38: 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 τέσσερεις 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 mm, y=0 mm) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή (x=145 mm, y=0 mm) ή η γραμμή (x=0 mm, y=145 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 mm, y=0 mm) παρουσιάζεται μόνη της στο σχήμα 4.39, γιατί λόγω των αρκετά υψηλών τιμών που παρουσιάζει, δεν ήταν δυνατόν να συμπεριληφθεί στην ίδια κλίμακα με τις άλλες γραφικές.



Σχήμα 4.39: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής (x=0 mm, y=0 mm, z=-50..3115 mm) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή (x=0 mm, y=0 mm, z=-50..3115 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 4.39, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγώγιμων 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 έξι 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 4.40(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 4.40(β).

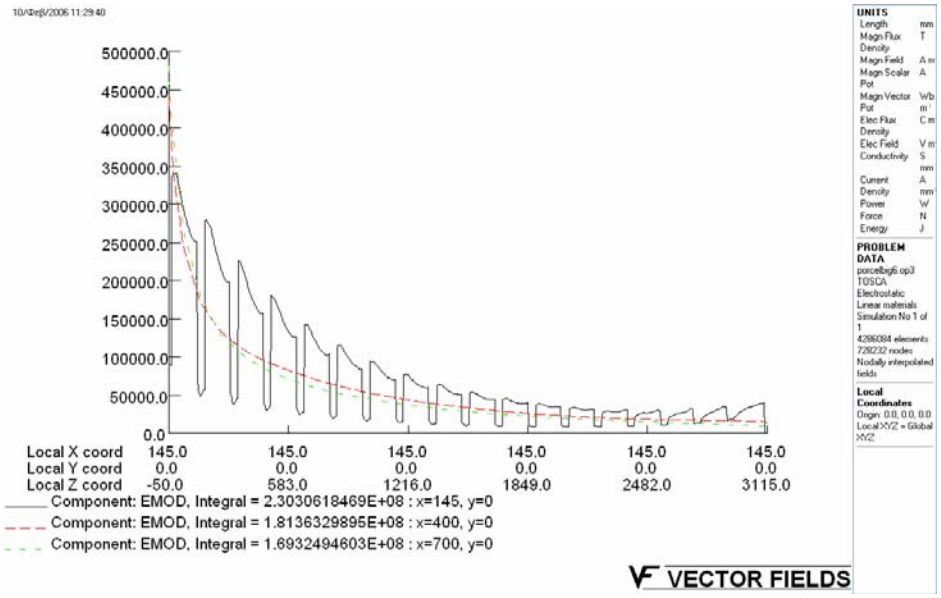
(α) (β)

Σχήμα 4.40: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

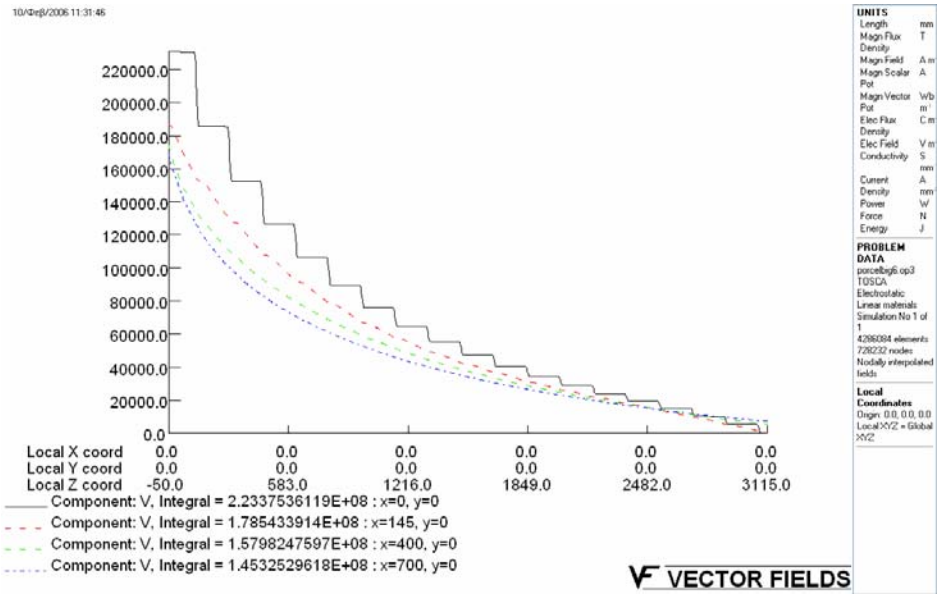
Παρατηρούμε ότι, καθώς απομακρυνόμαστε από τον αλυσοειδή μονωτήρα, τόσο η ένταση του πεδίου όσο και το δυναμικό μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή, καθώς απομακρυνόμαστε και από τον αλυσοειδή μονωτήρα και από τον αγωγό, δηλαδή για γραμμές του σχήματος 4.40(β), όπως επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 4.43 και 4.44. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος των γραμμών (x=145 mm, y=0 mm) και (x=0 mm, y=145 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 [19], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 της παραγράφου 2.2 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 4.41 και 4.42 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 4.40(α).

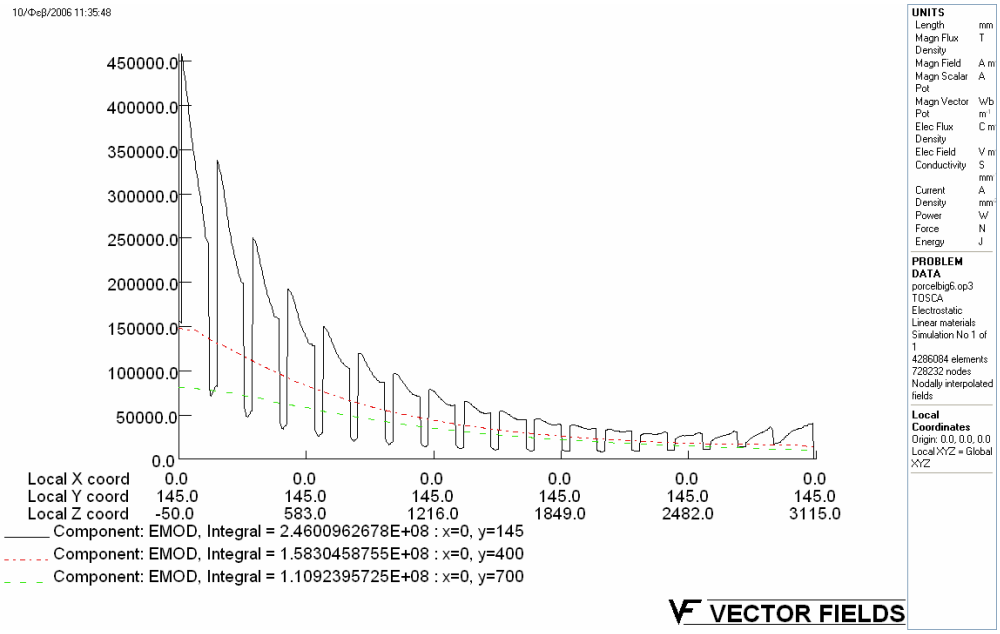


Σχήμα 4.41: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.40(α).

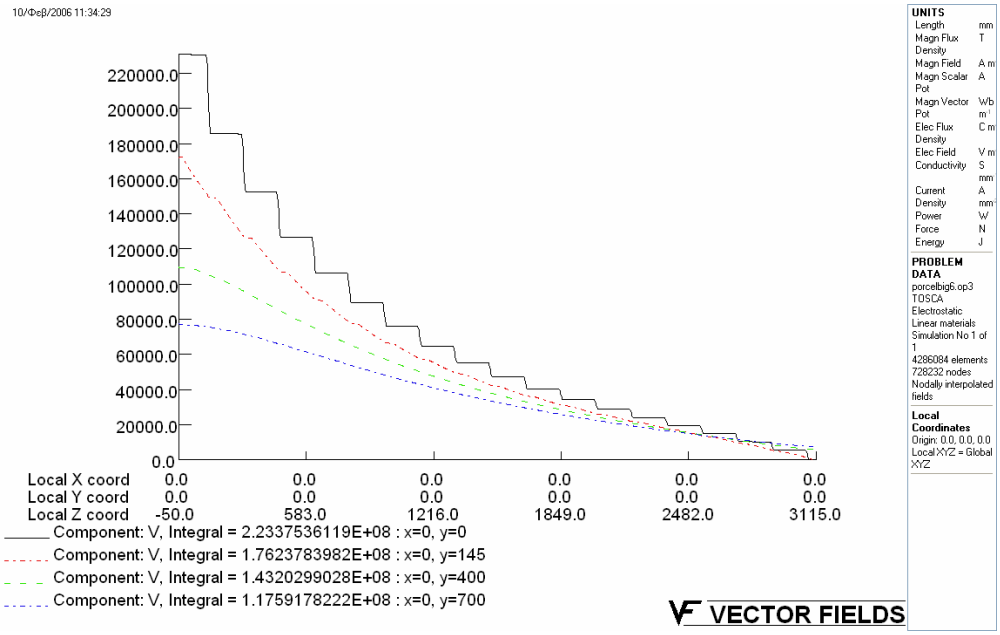


Σχήμα 4.42: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.40(α).

Στα σχήματα 4.43 και 4.44 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 4.40(β).



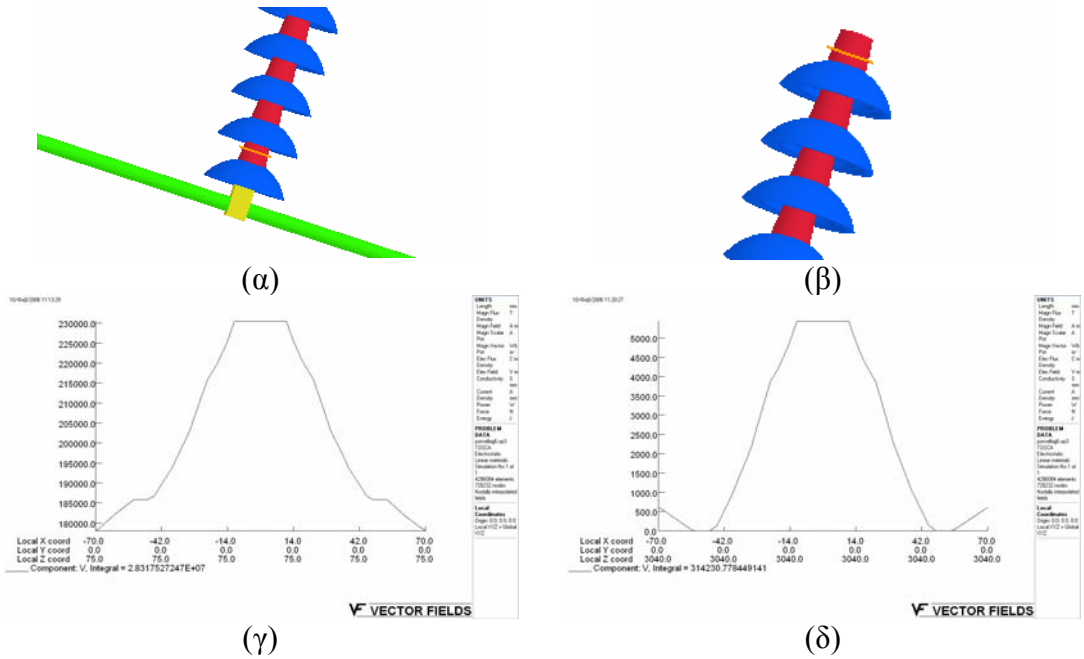
Σχήμα 4.43: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.40(β).



Σχήμα 4.44: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.40(β).

Στο σχήμα 4.45(α) φαίνεται η γραμμή (x=-70..70 mm, y=0 mm, z=75 mm) που διαπερνά το cap του μονωτήρα υψηλής τάσης και στο σχήμα 4.45(γ) η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτής. Για |x|>59 mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για x=-11..11 mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγώγιμο 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 κίτρινου αγώγιμου κύβου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή x=-22.5..-11 mm και x=11..22.5 mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή x=-51..-22.5 mm και x=22.5..51 mm βρίσκεται η πορσελάνη και στην περιοχή x=-54..-51 mm και x=51..54 mm ένα λεπτό στρώμα τσιμέντου. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται μείωση του δυναμικού, όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση. Έτσι, μετά την παρεμβολή των μη αγώγιμων μερών του μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται στα 185 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγώγιμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα.

Στο σχήμα 4.45(β) φαίνεται η γραμμή (x=-70..70 mm, y=0 mm, z=3040 mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Από το σχήμα 4.45(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin του γειωμένου μονωτήρα και είναι ίση με 5.3 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.

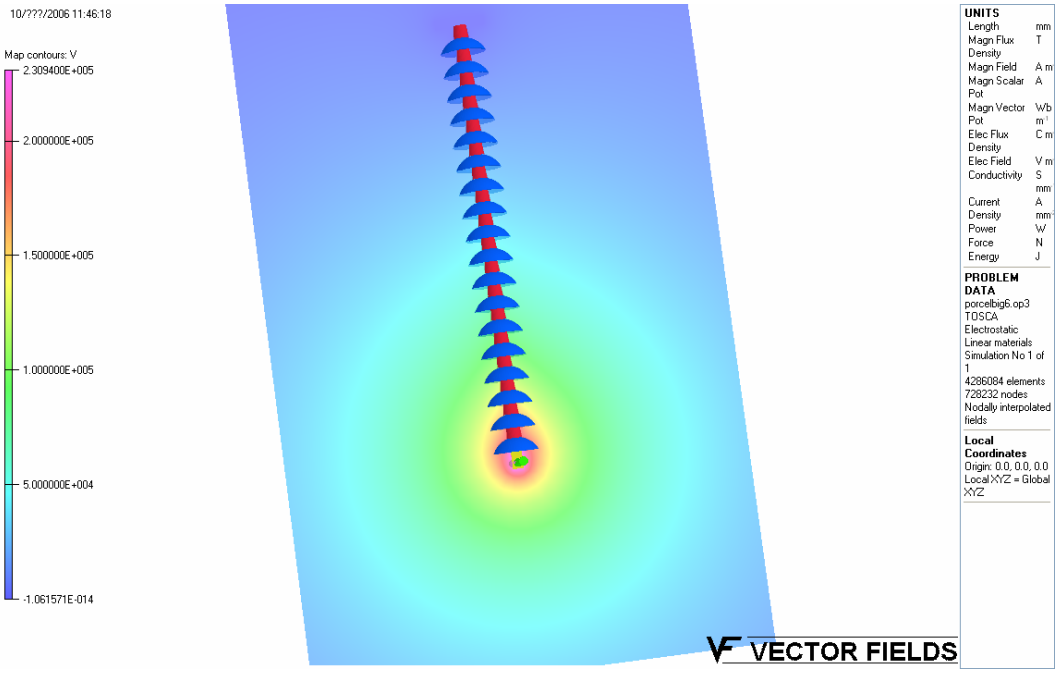


Σχήμα 4.45: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Υ.Τ. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

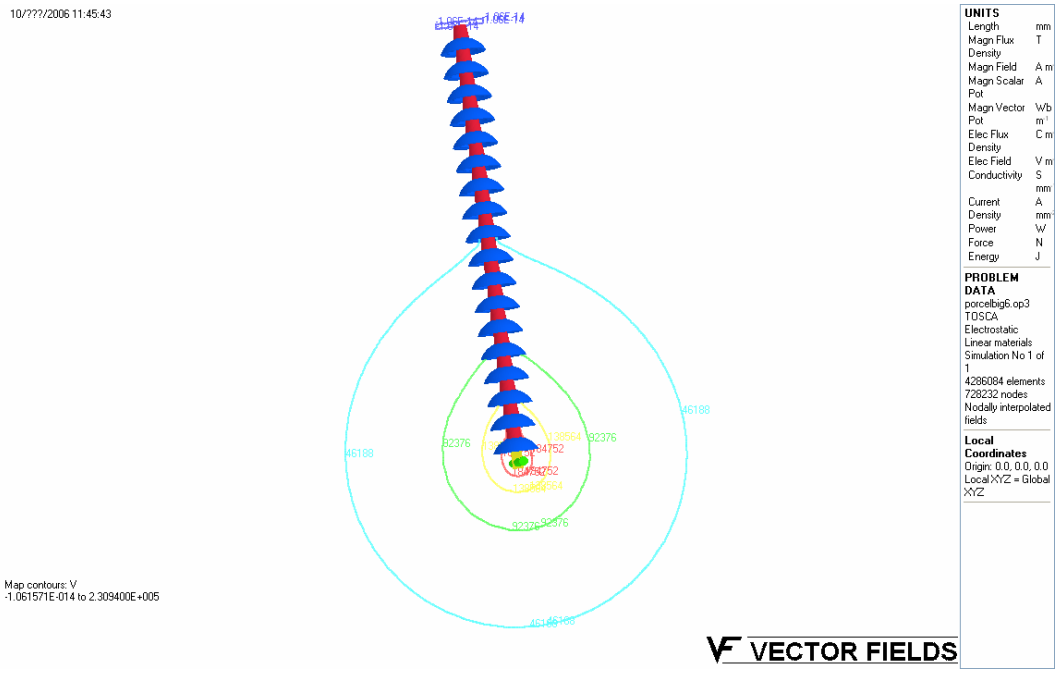
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα yz-επίπεδο, πάνω στο οποίο απεικονίζεται με τρεις τρόπους το δυναμικό και με δύο τρόπους η ένταση του πεδίου. Στο σχήμα 4.46 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι $\frac{400}{\sqrt{3}}$kV=230940V , όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται.

Στο σχήμα 4.47 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο ίδιο επίπεδο και στο σχήμα 4.48 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.

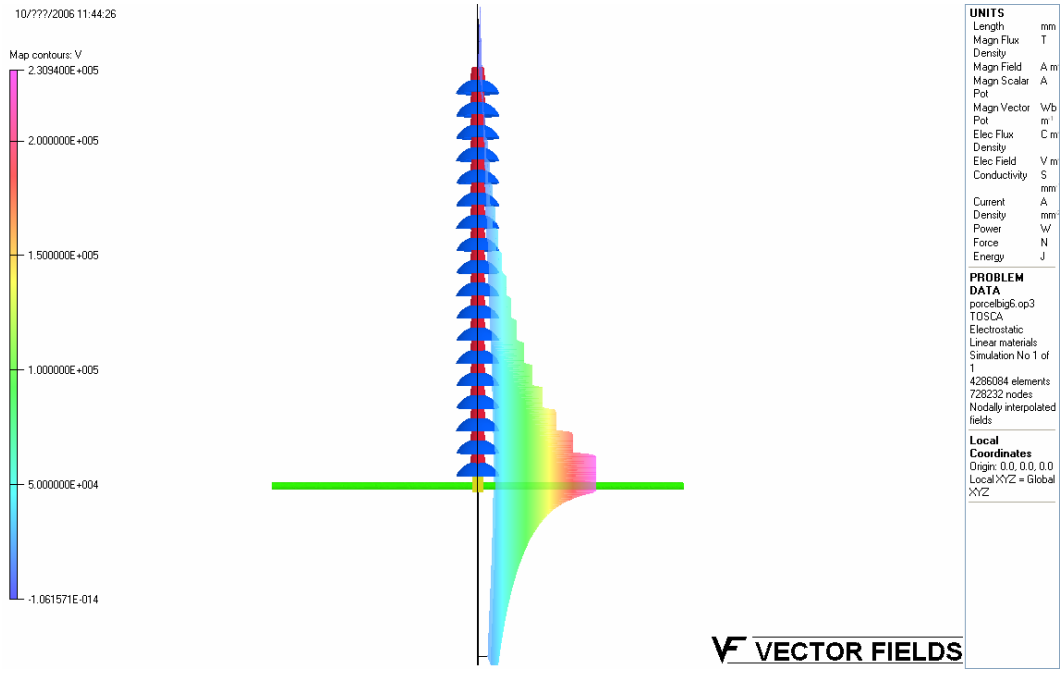
Στο σχήμα 4.49 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.50 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται η ένταση στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα. 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.



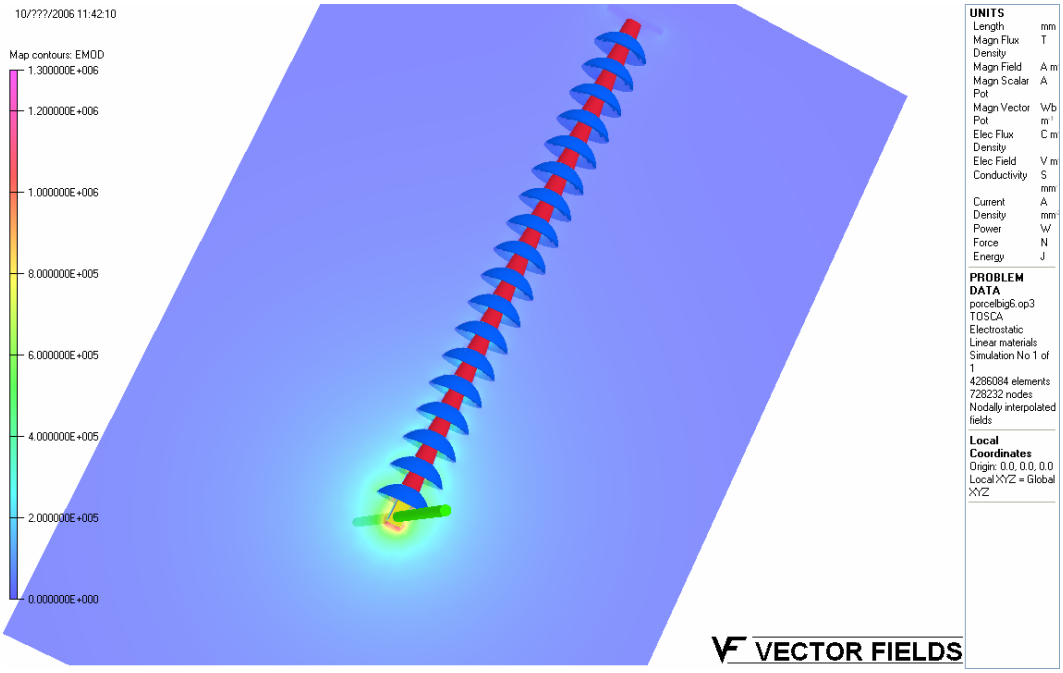
Σχήμα 4.46: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



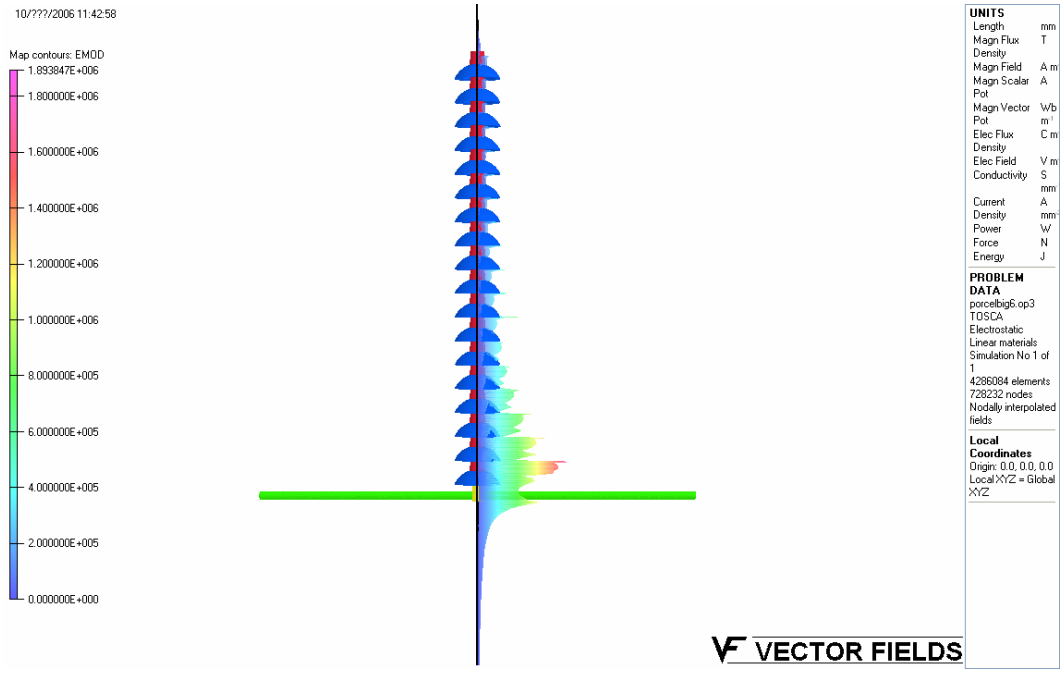
Σχήμα 4.47: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.48: Ισόγραμμα σε yz-επίπεδο για την κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.



Σχήμα 4.49: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.

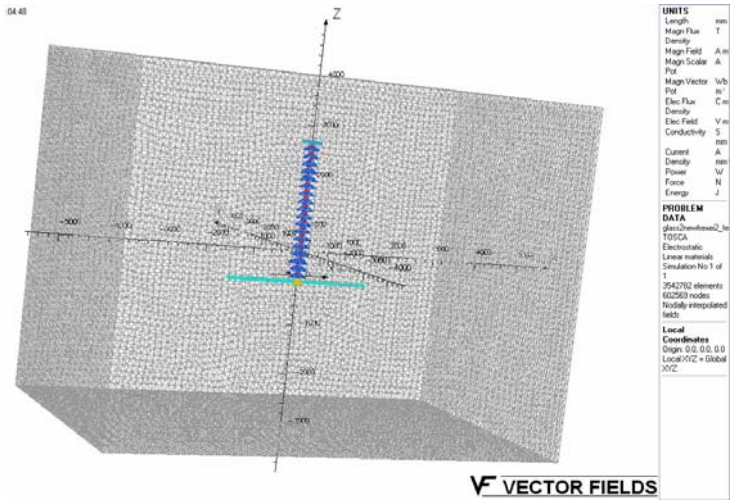


Σχήμα 4.50: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.

4.3.2 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 400kV

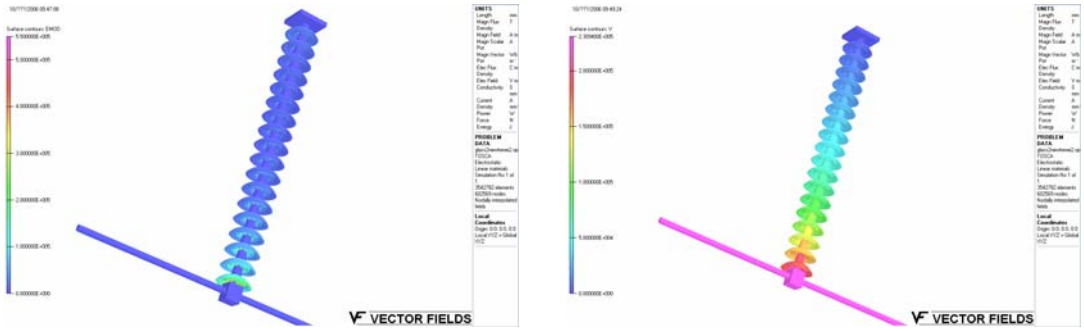
Ο τέταρτος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 400 kV που αποτελείται από 18 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 280 mm, βήμα 170 mm και μήκος ερπυσμού 370 mm.

Στο σχήμα 4.51 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



Σχήμα 4.51: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή.

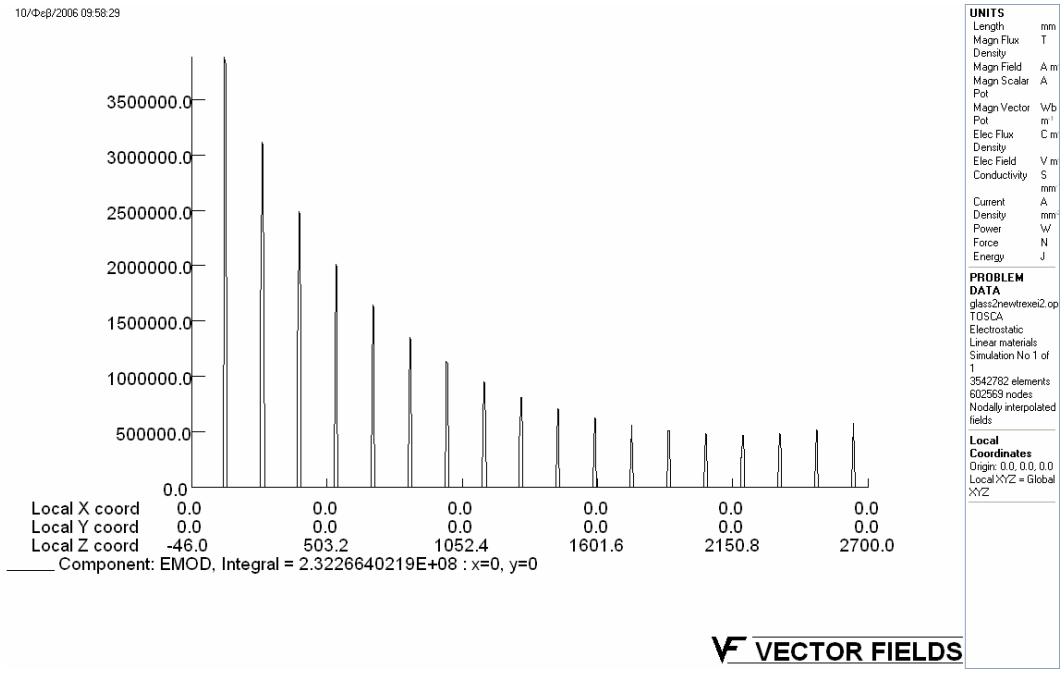
Στο σχήμα 4.52(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση του πεδίου μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα. Προφανώς, στο εσωτερικό όλων των αγώγιμων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν. Στο σχήμα 4.52(β) φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι το δυναμικό μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως άλλωστε αναμενόταν.



(α) (β)

Σχήμα 4.52: 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 τέσσερεις 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 mm, y=0 mm) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή (x=145 mm, y=0 mm) ή η γραμμή (x=0, y=145) «αγγίζει» τις εξωτερικές γυάλινες πτυχώσεις της αλυσίδας, αφού η ακτίνα κάθε γυάλινου δισκοειδούς μονωτήρα είναι περίπου 140 mm. Να σημειωθεί ότι ο αγωγός είναι παράλληλος στον άξονα x, ενώ ο αλυσοειδής μονωτήρας βρίσκεται κατά μήκος του άξονα z. Η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα (x=0 mm, y=0 mm) παρουσιάζεται μόνη της στο σχήμα 4.53, γιατί λόγω των αρκετά υψηλών τιμών που παρουσιάζει, δεν ήταν δυνατόν να συμπεριληφθεί στην ίδια κλίμακα με τις άλλες γραφικές.



Σχήμα 4.53: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής (x=0 mm, y=0 mm, z=-46..2700 mm) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή (x=0 mm, y=0 mm, z=-46..2700 mm) 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 4.53, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγώγιμων 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 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 έξι 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.

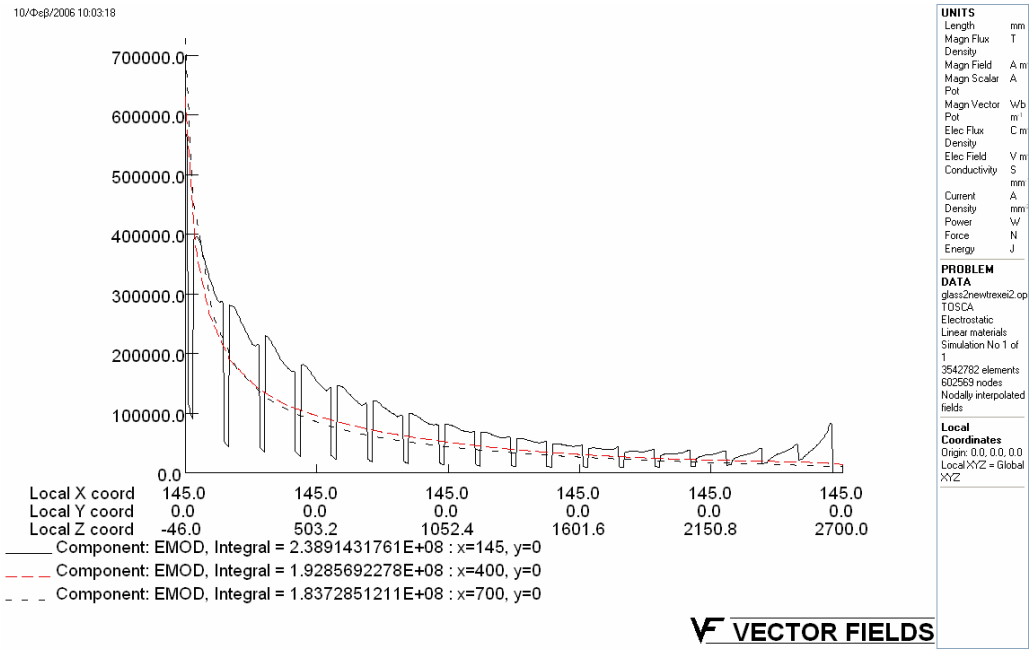
Λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων. Η πρώτη αφορά γραμμές που έχουν σταθερά y=0 και αυξάνεται σταδιακά η x-συντεταγμένη, άρα και η απόσταση από τον αλυσοειδή μονωτήρα, αλλά το ένα τους άκρο βρίσκεται πολύ κοντά στον αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.54(α). Η δεύτερη σειρά γραφημάτων αφορά γραμμές που έχουν σταθερά x=0 και απομακρύνονται σταδιακά τόσο από τον αλυσοειδή μονωτήρα όσο και από τον αγωγό, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.54(β).

(α) (β)

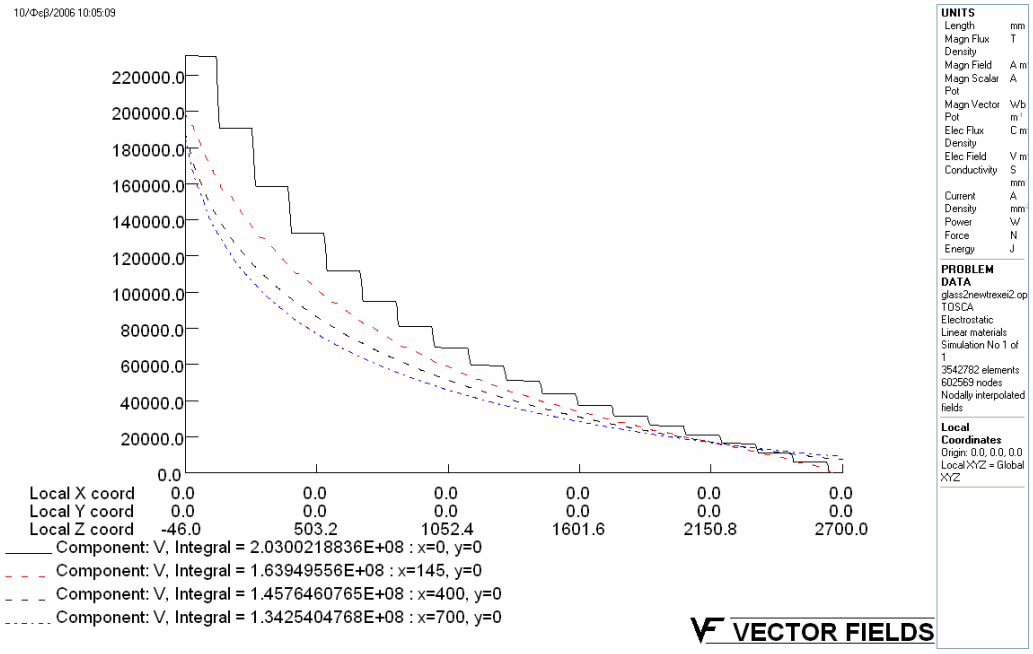
Σχήμα 4.54: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

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 4.54(β), όπως επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 4.57 και 4.58. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος των γραμμών (x=145 mm, y=0 mm) και (x=0 mm, y=145 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 [19], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 της παραγράφου 2.2 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 4.55 και 4.56 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 4.54(α).

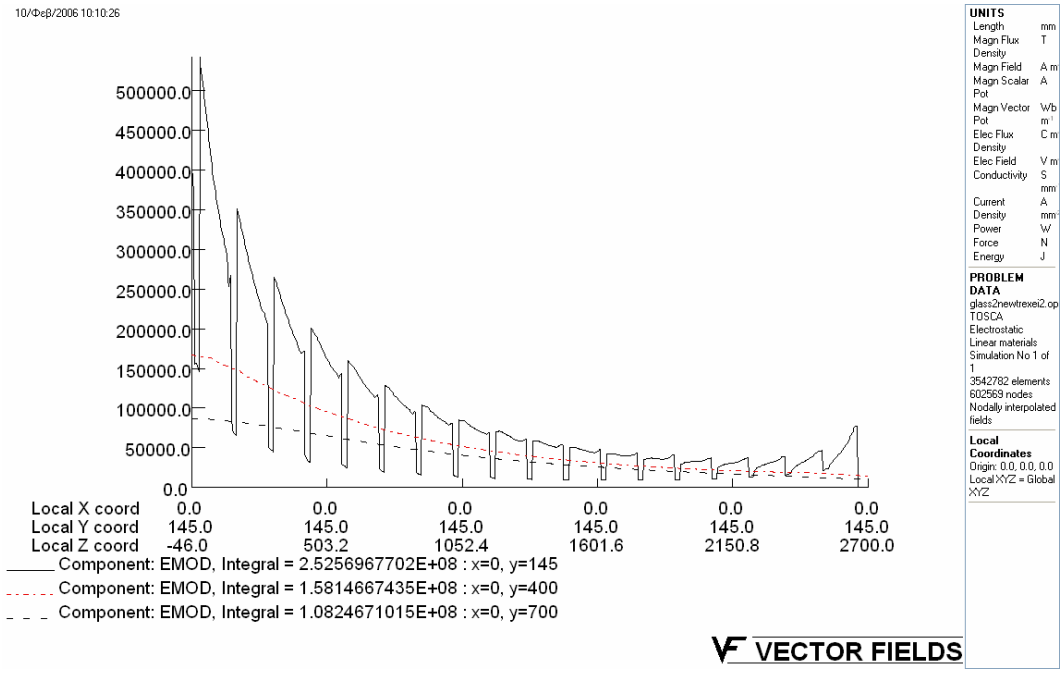


Σχήμα 4.55: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.54(α).

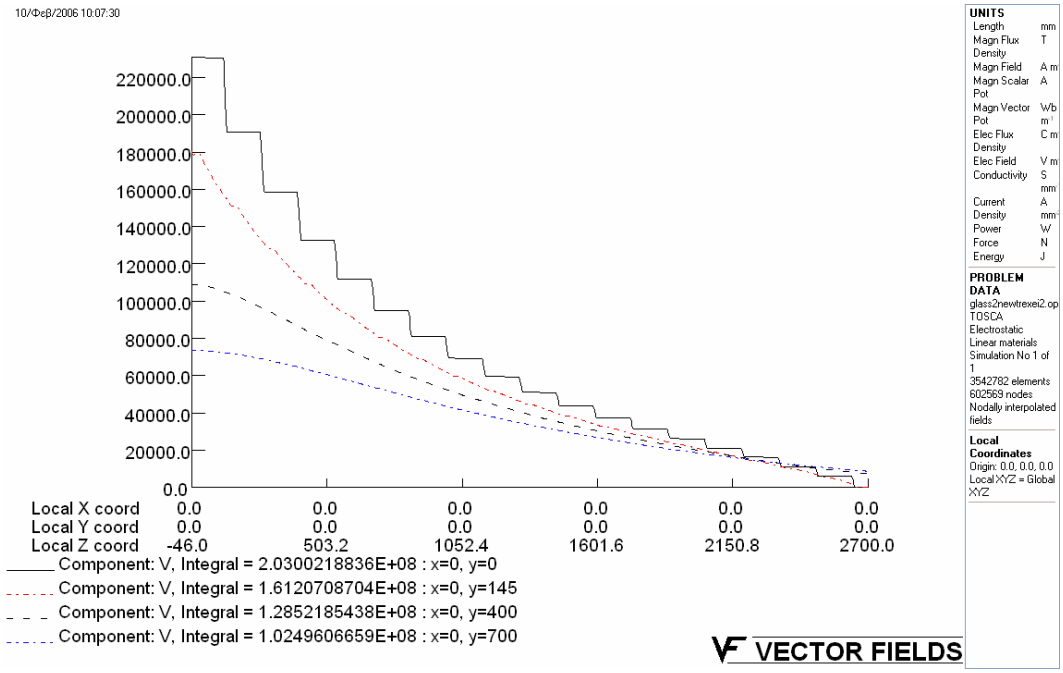


Σχήμα 4.56: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.54(α).

Στα σχήματα 4.57 και 4.58 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 4.54(β).

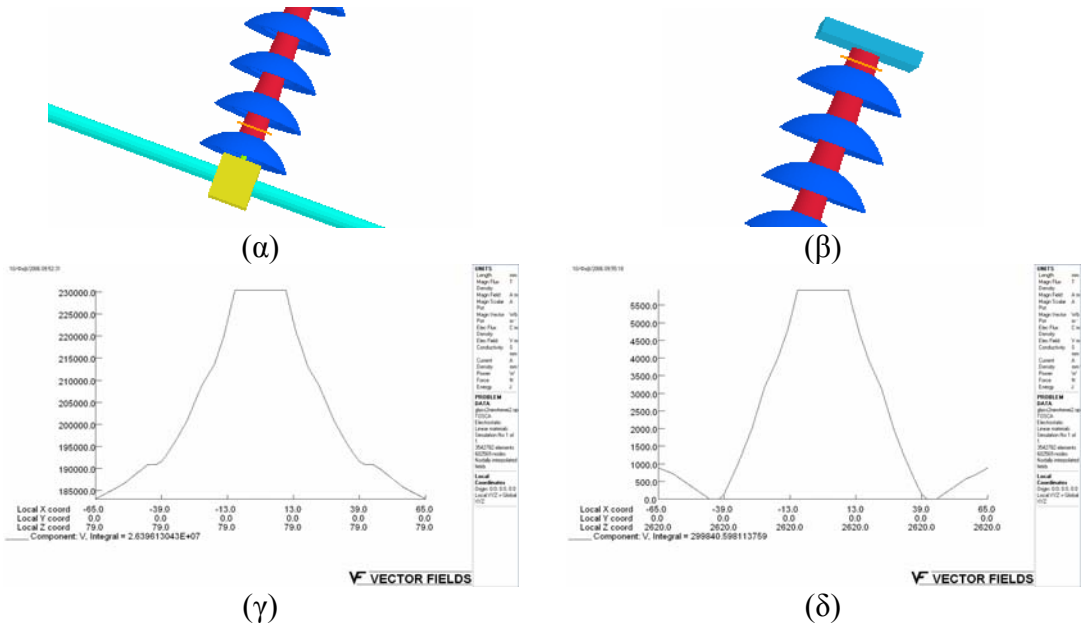


Σχήμα 4.57: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.54(β).



Σχήμα 4.58: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.54(β).

Στο σχήμα 4.59(α) φαίνεται η γραμμή (x=-65..65 mm, y=0 mm, z=79 mm) που διαπερνά το cap του μονωτήρα υψηλής τάσης και στο σχήμα 4.59(γ) η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτής. Η ακτίνα της βάσης του cap είναι 48 mm και έτσι, για |x|>48 mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για x=-10..10 mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγώγιμο 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 κίτρινου αγώγιμου 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=-39..-23 mm και x=23..39 mm βρίσκεται το γυαλί και στην περιοχή x=-41..-39 mm και x=39..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 αγώγιμων μερών του μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται στα 190 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγώγιμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα. Στο σχήμα 4.59(β) φαίνεται η γραμμή (x=-65..65 mm, y=0 mm, z=2620 mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Από το σχήμα 4.59(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin του γειωμένου μονωτήρα και είναι ίση με 5.6 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.

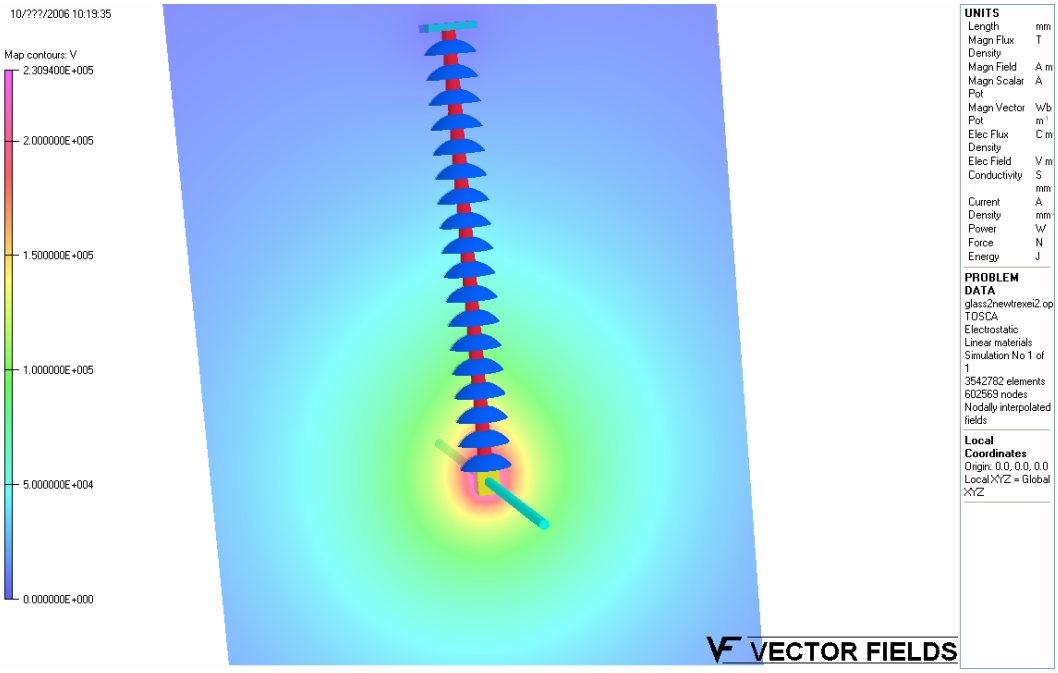


Σχήμα 4.59: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Υ.Τ. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

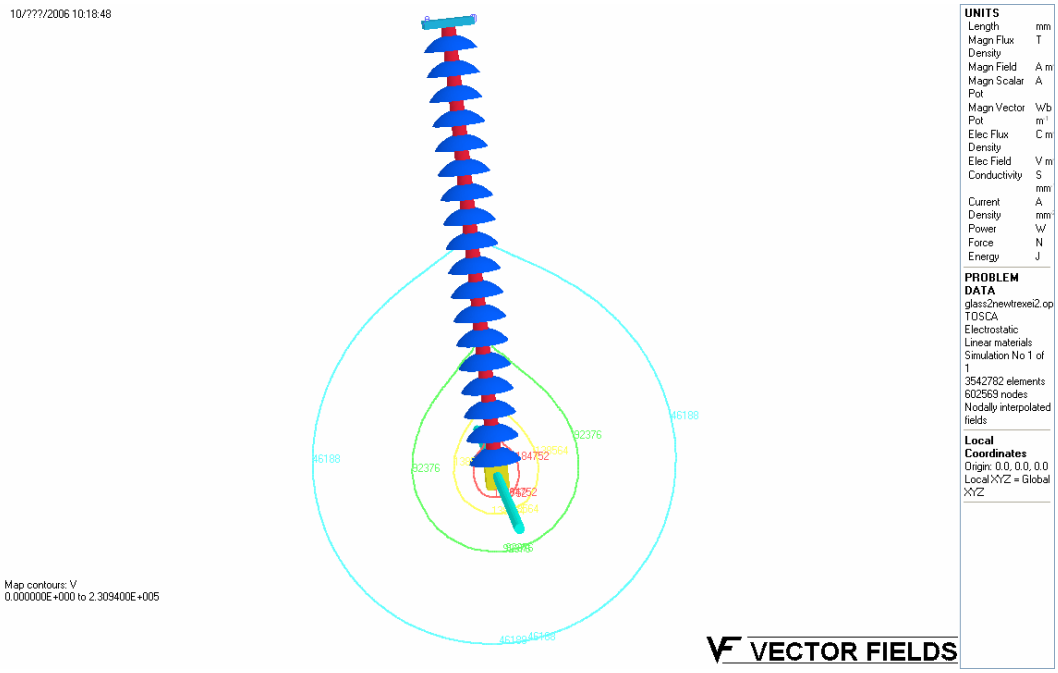
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα yz-επίπεδο, πάνω στο οποίο απεικονίζεται με τρεις τρόπους το δυναμικό και με δύο τρόπους η ένταση του πεδίου. Στο σχήμα 4.60 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι 230940 V, όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται.

Στο σχήμα 4.61 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο ίδιο επίπεδο και στο σχήμα 4.62 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 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.

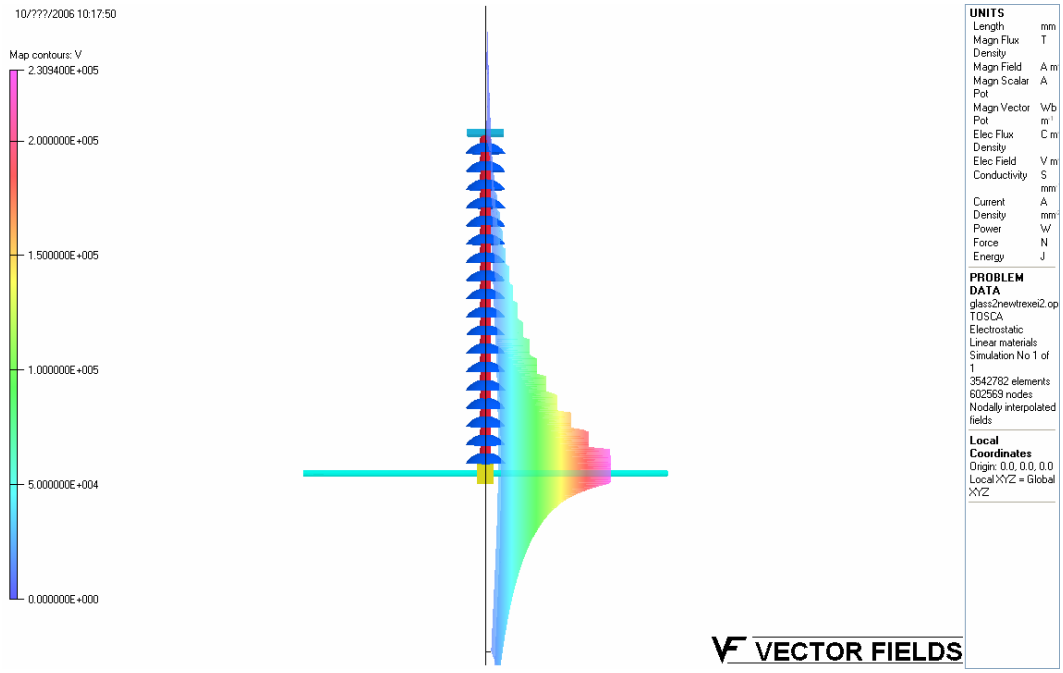
Στο σχήμα 4.63 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.64 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται η ένταση στο εσωτερικό της αλυσίδας των δισκοειδών μονωτήρων. Μεγαλύτερη τιμή έντασης πεδίου 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.



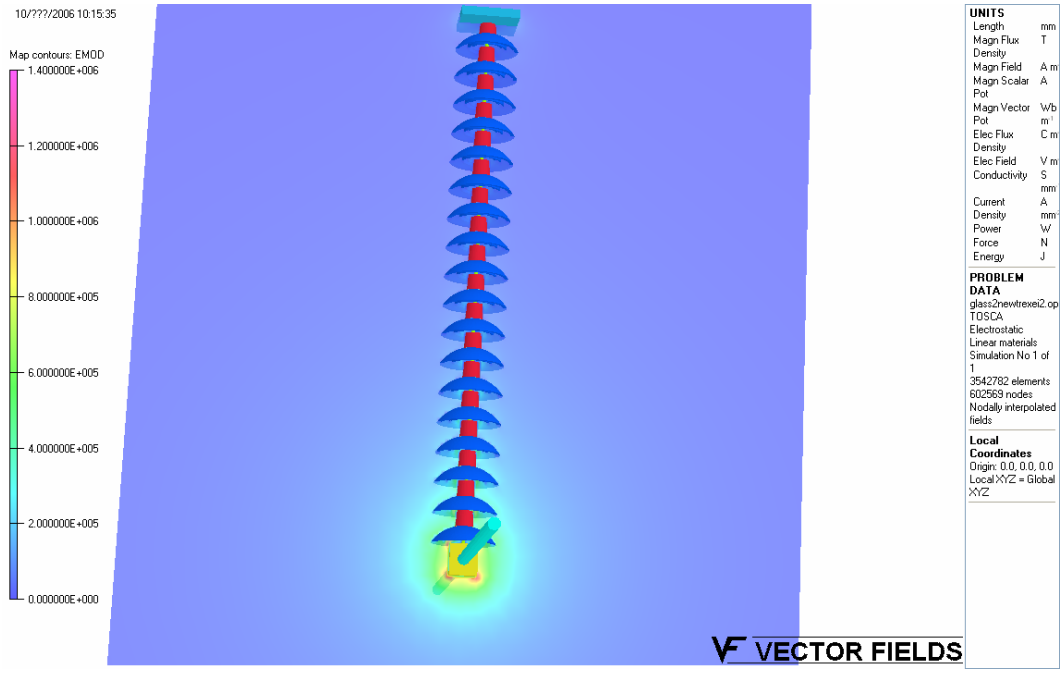
Σχήμα 4.60: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



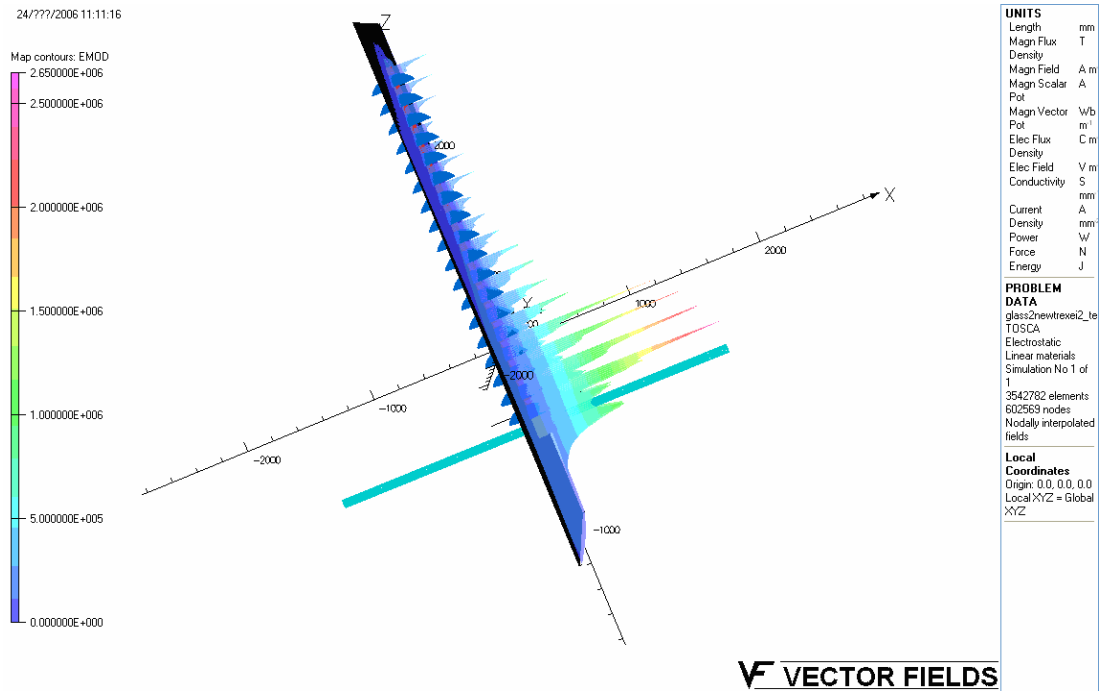
Σχήμα 4.61: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.62: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.



Σχήμα 4.63: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.

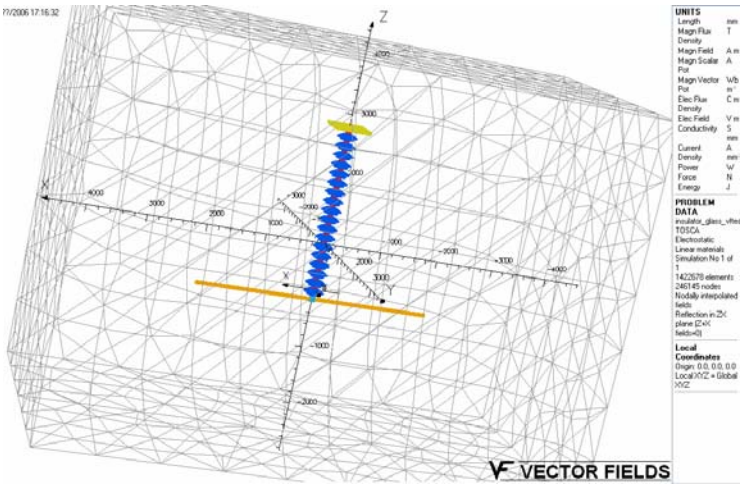


Σχήμα 4.64: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.

4.3.3 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400kV

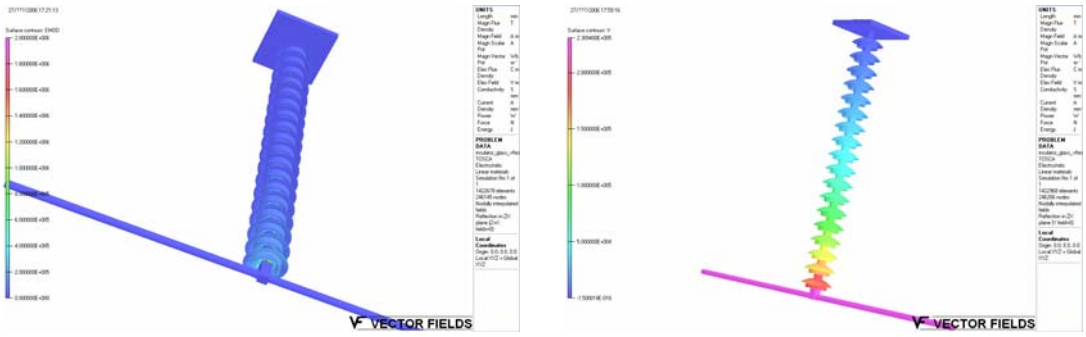
Ο πέμπτος αλυσοειδής μονωτήρας που προσομοιώθηκε είναι ένας γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης 400 kV που αποτελείται από 18 δισκοειδείς μονωτήρες. Έχει διάμετρο 320 mm, βήμα 170 mm και μήκος ερπυσμού 540 mm.

Στο σχήμα 4.65 φαίνεται ο αλυσοειδής μονωτήρας, όπως είναι στον Μετ-Επεξεργαστή:



Σχήμα 4.65: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή.

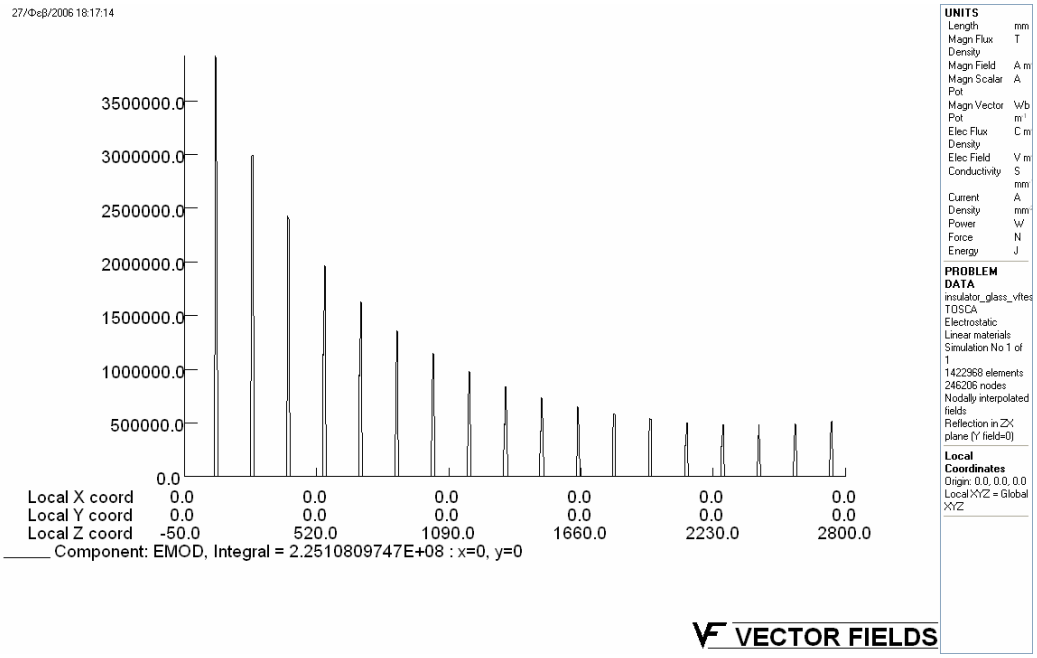
Στο σχήμα 4.66(α) παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Η ένταση του πεδίου μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα. Προφανώς, στο εσωτερικό όλων των αγώγιμων μερών της διάταξης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν. Στο σχήμα 4.66(β) φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του αλυσοειδούς μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι το δυναμικό μειώνεται με κατεύθυνση από τον αγωγό προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα, όπως άλλωστε αναμενόταν.



(α) (β)

Σχήμα 4.66: 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 τέσσερεις 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 mm, y=0 mm) περνά από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα, ενώ η γραμμή (x=160 mm, y=0 mm) ή η γραμμή (x=0, y=160) «αγγίζει» τις εξωτερικές γυάλινες πτυχώσεις της αλυσίδας, αφού η ακτίνα κάθε γυάλινου δισκοειδούς μονωτήρα είναι περίπου 160 mm. Να σημειωθεί ότι ο αγωγός είναι παράλληλος στον άξονα x, ενώ ο αλυσοειδής μονωτήρας βρίσκεται κατά μήκος του άξονα z. Η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα (x=0 mm, y=0 mm) παρουσιάζεται μόνη της στο σχήμα 4.67, γιατί λόγω των αρκετά υψηλών τιμών που παρουσιάζει, δεν ήταν δυνατόν να γίνει σωστή σύγκριση με τις άλλες γραφικές.

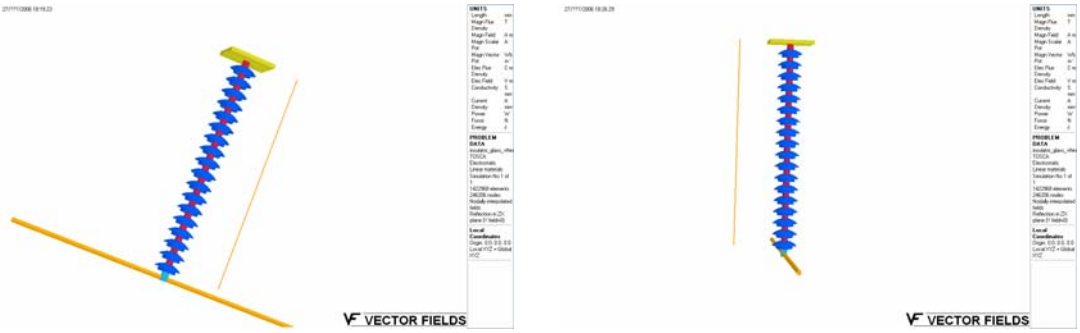


Σχήμα 4.67: Κατανομή της έντασης του πεδίου κατά μήκος της γραμμής (x=0 mm, y=0 mm, z=-50..2800 mm) που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα.

Η γραμμή (x=0 mm, y=0 mm, z=-50..2800 mm) 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 4.67, η ένταση του πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγώγιμων 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 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 πέντε 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 4.68(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 4.68(β).

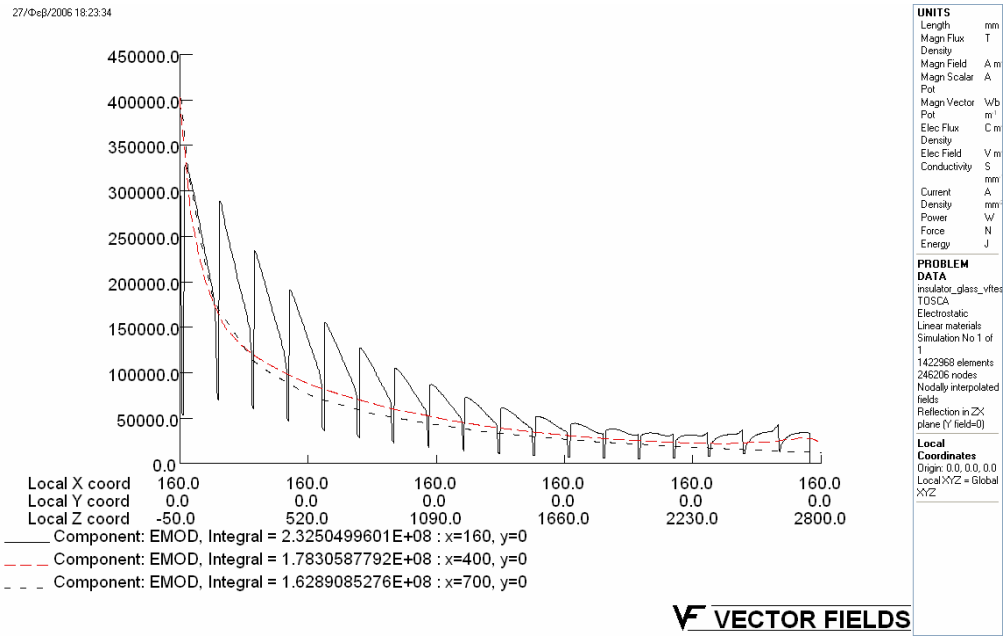


(α) (β)

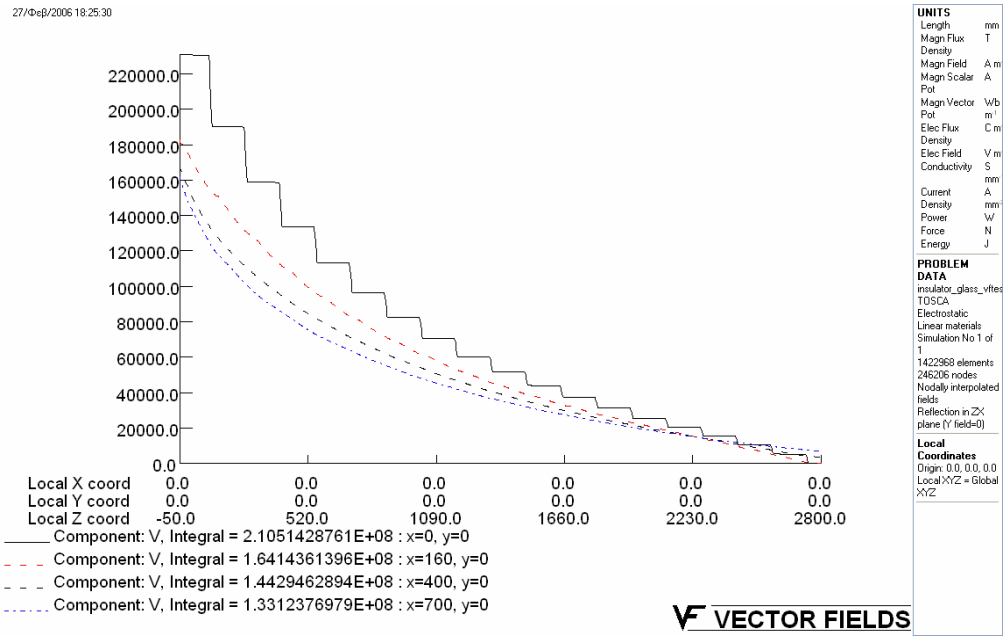
Σχήμα 4.68: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

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 4.68(β), όπως επιβεβαιώνεται από τα σχήματα 4.71 και 4.72. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος των γραμμών (x=160 mm, y=0 mm) και (x=0 mm, y=160 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 [19], όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 της παραγράφου 2.2 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 4.69 και 4.70 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 4.68(α).

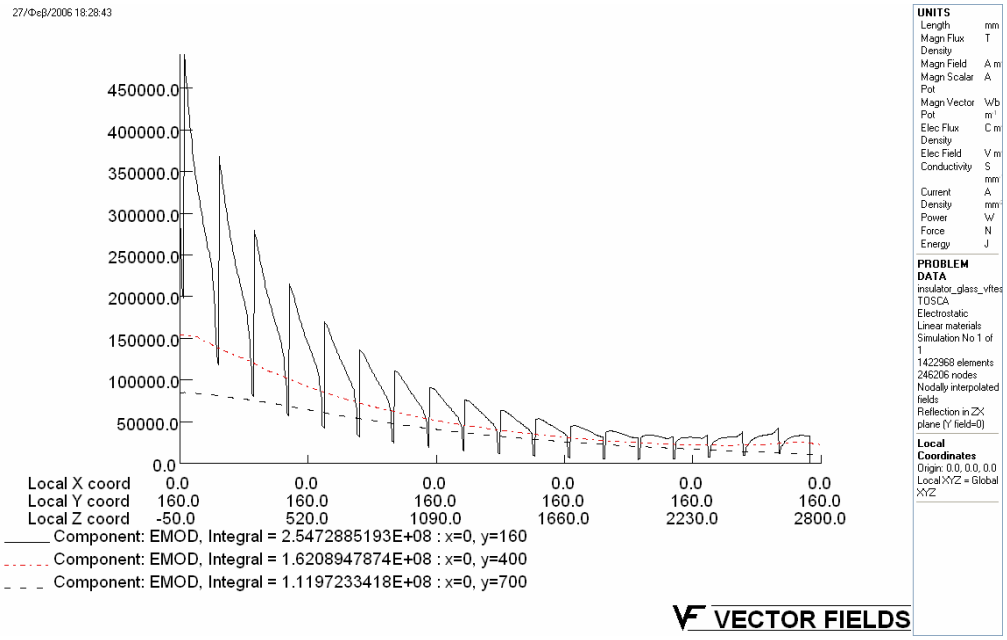


Σχήμα 4.69: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.68(α).

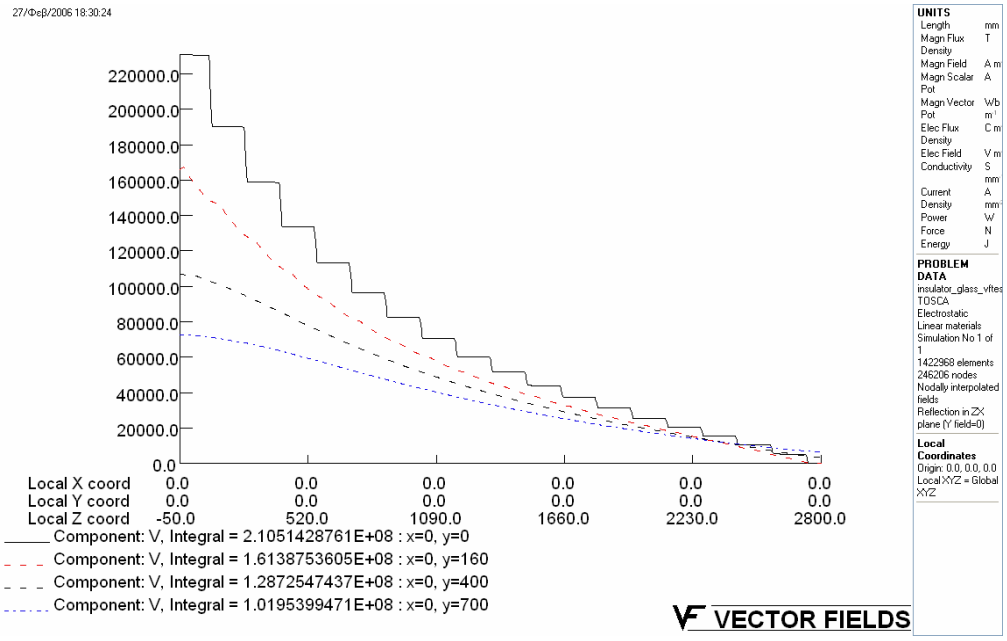


Σχήμα 4.70: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.68(α).

Στα σχήματα 4.71 και 4.72 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 4.68(β).

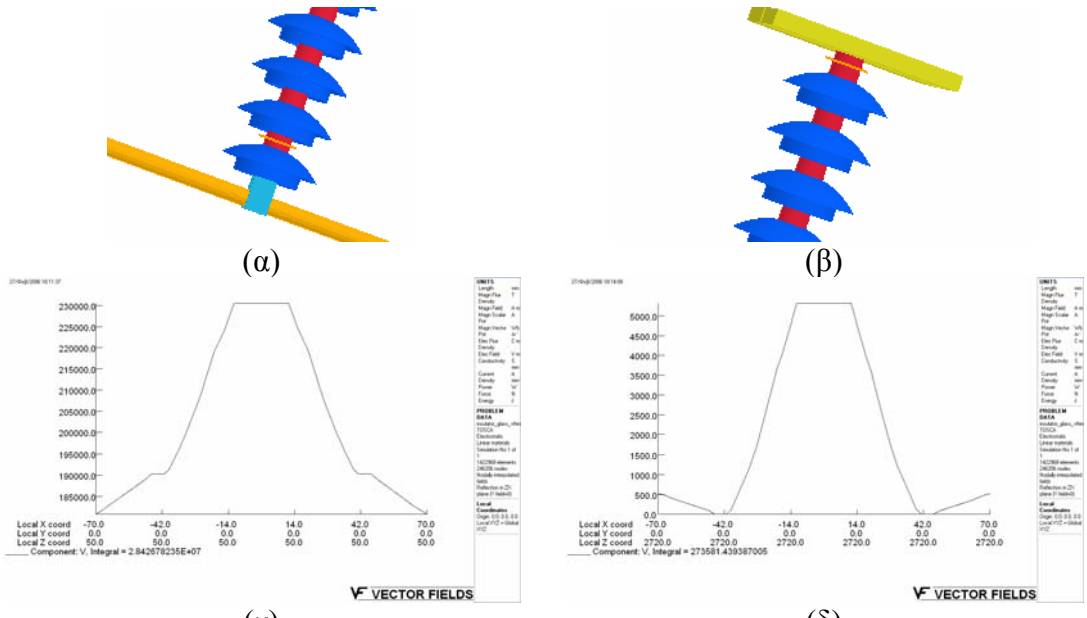


Σχήμα 4.71: Σύγκριση της κατανομής της έντασης κατά μήκος τριών διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.68(β).



Σχήμα 4.72: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών γραμμών παράλληλων στον αλυσοειδή μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.68(β).

Στο σχήμα 4.73(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 4.73(γ) η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτής. Η ακτίνα της βάσης του cap είναι 47 mm και έτσι, για |x|>47 mm, η περιοχή καλύπτεται από αέρα. Για x=-11.5..11.5 mm, υπάρχει το pin του μονωτήρα υψηλής τάσης, το οποίο είναι αγώγιμο 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 αγώγιμου κύβου, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στην περιοχή x=-20..-11.5 mm και x=11.5..20 mm βρίσκεται η πρώτη περιοχή τσιμέντου. Στην περιοχή x=-39..-20 mm και x=20..39 mm βρίσκεται το γυαλί και στην περιοχή x=-41..-39 mm και x=39..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 αγώγιμων μερών του μονωτήρα, το δυναμικό μειώνεται στα 190 kV, όπου διατηρείται σταθερό, επειδή εκεί βρίσκεται το αγώγιμο cap του μονωτήρα υψηλής τάσης. Κατόπιν, το δυναμικό μειώνεται σχεδόν γραμμικά στον αέρα έξω από το μονωτήρα. Στο σχήμα 4.73(β) φαίνεται η γραμμή (x=-70..70 mm, y=0 mm, z=2720 mm) που διαπερνά το cap του γειωμένου μονωτήρα. Από το σχήμα 4.73(δ) φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή του δυναμικού λαμβάνεται στο pin του γειωμένου μονωτήρα και είναι ίση με 5.2 kV, ενώ μηδενίζεται το δυναμικό στο cap, αφού αυτό είναι γειωμένο.

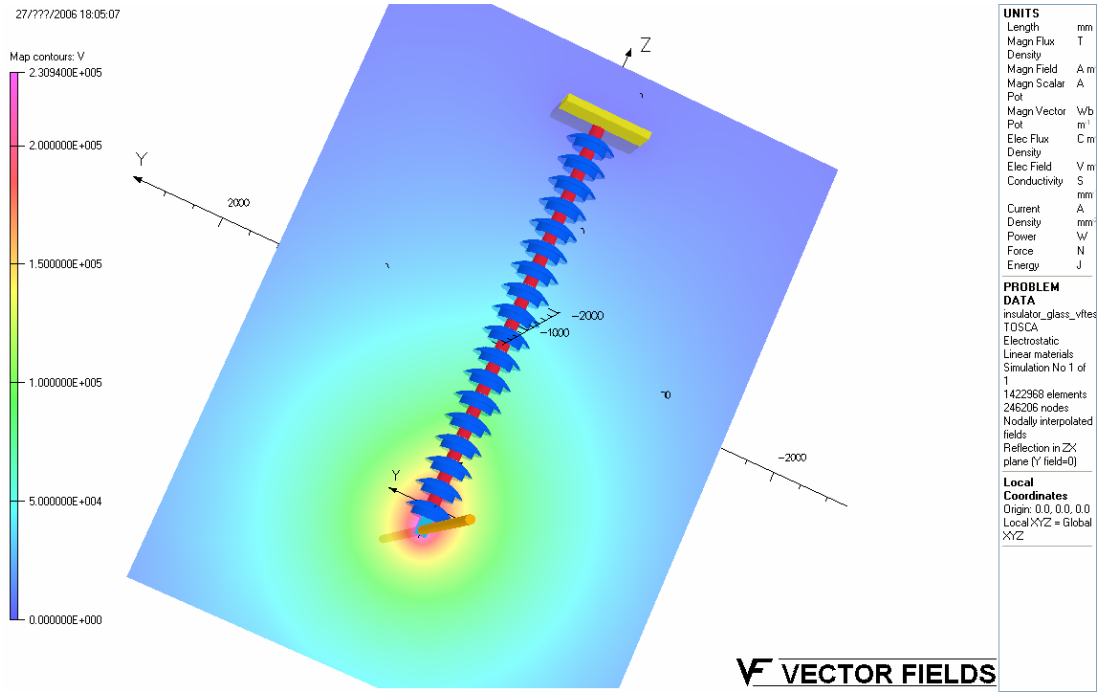


Σχήμα 4.73: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στο cap του μονωτήρα Υ.Τ. (αριστερά) και στο γειωμένο cap (δεξιά).

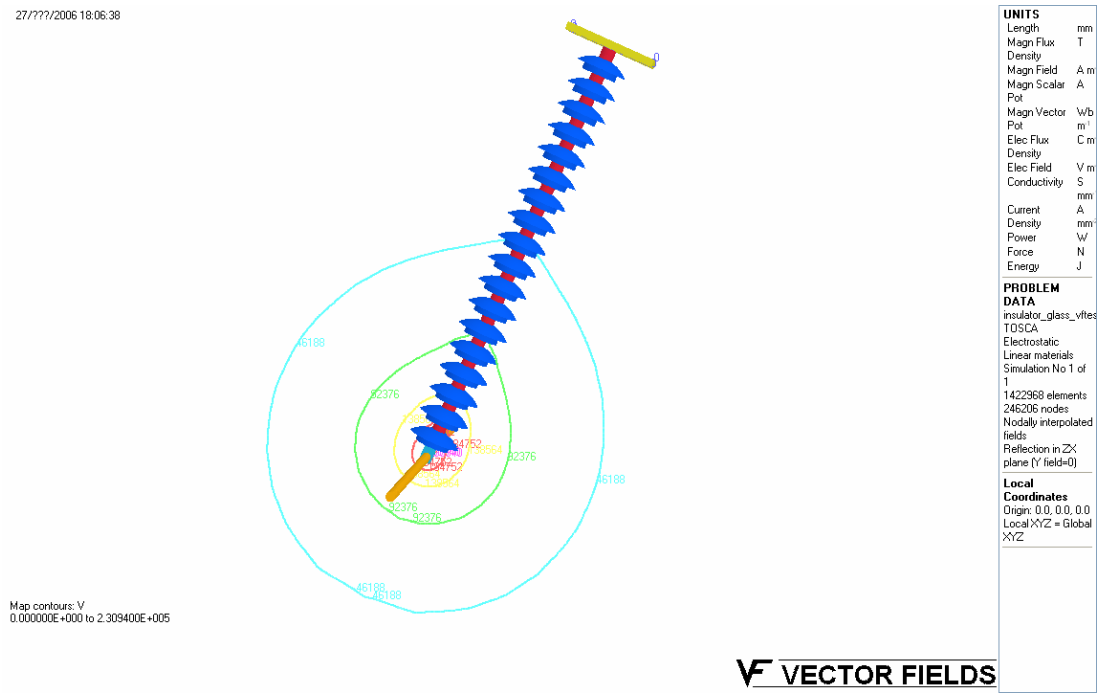
Παρακάτω παρουσιάζεται ένα yz-επίπεδο, πάνω στο οποίο απεικονίζεται με τρεις τρόπους το δυναμικό και με δύο τρόπους η ένταση του πεδίου. Στο σχήμα 4.74 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Βλέπουμε ότι ακριβώς γύρω από τον αγωγό το δυναμικό είναι 230940 V, όπως αναμενόταν και σταδιακά μειώνεται.

Στο σχήμα 4.75 βλέπουμε τις ισοδυναμικές γραμμές γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα στο ίδιο επίπεδο και στο σχήμα 4.76 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 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.

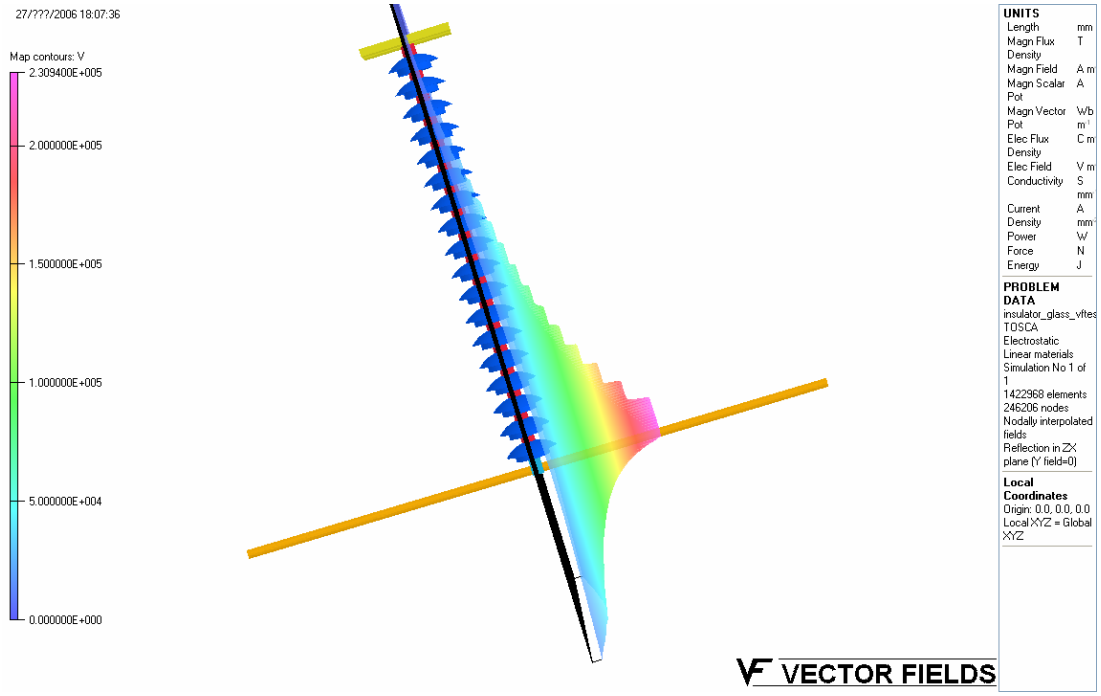
Στο σχήμα 4.77 φαίνεται η ένταση του πεδίου μέσω χρωματισμένων περιοχών γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διάταξη. Στο σχήμα 4.78 φαίνεται το ιστόγραμμα που δείχνει πώς κατανέμεται η ένταση στο εσωτερικό της αλυσίδας των δισκοειδών μονωτήρων. Μεγαλύτερη τιμή έντασης πεδίου παρουσιάζει ο μονωτήρας υψηλής τάσης. Σε κάθε δισκοειδή 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.



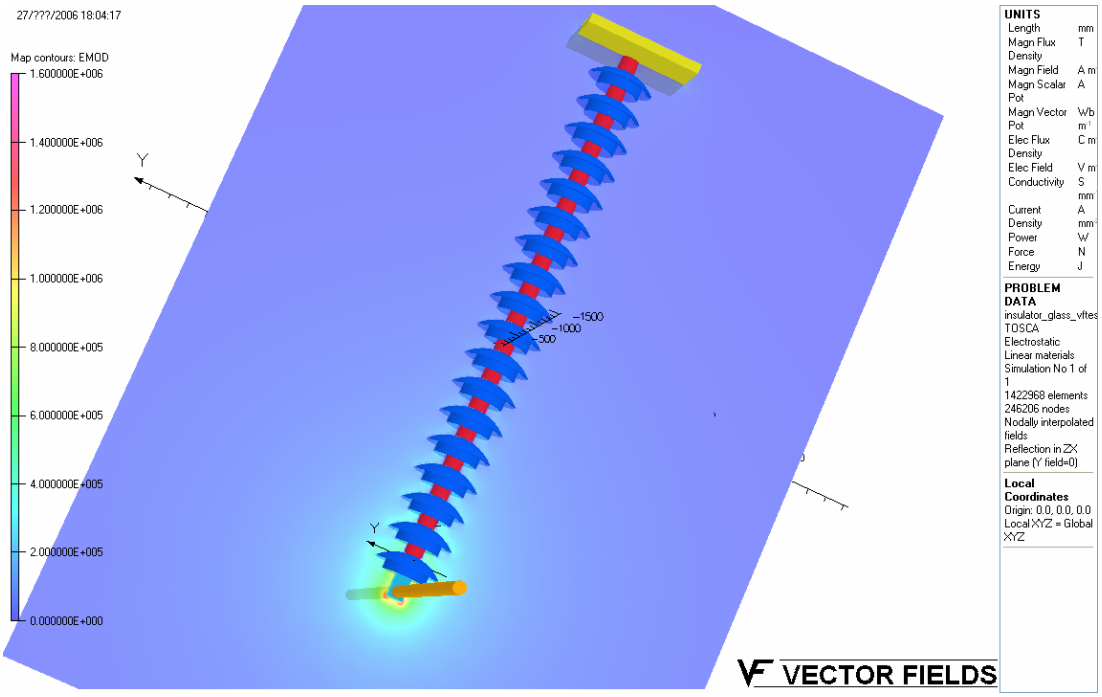
Σχήμα 4.74: Χάρτης ζωνών για το δυναμικό στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



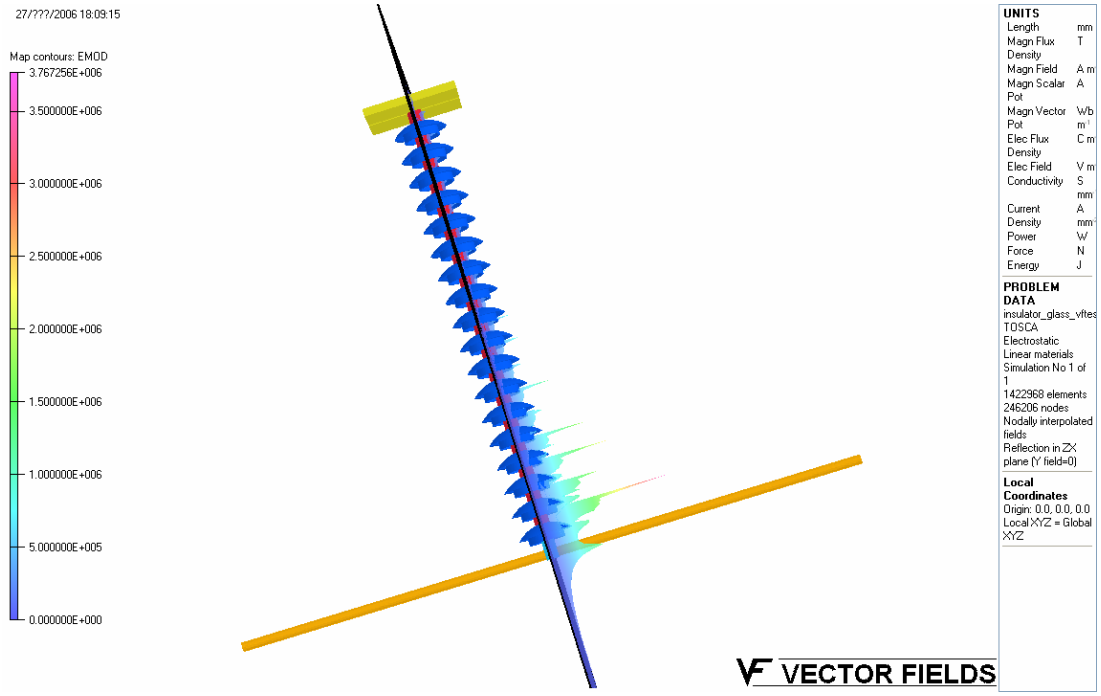
Σχήμα 4.75: Ισοδυναμικές γραμμές στο yz-επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



Σχήμα 4.76: Ισόγραμμα σε yz-επίπεδο για την κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.



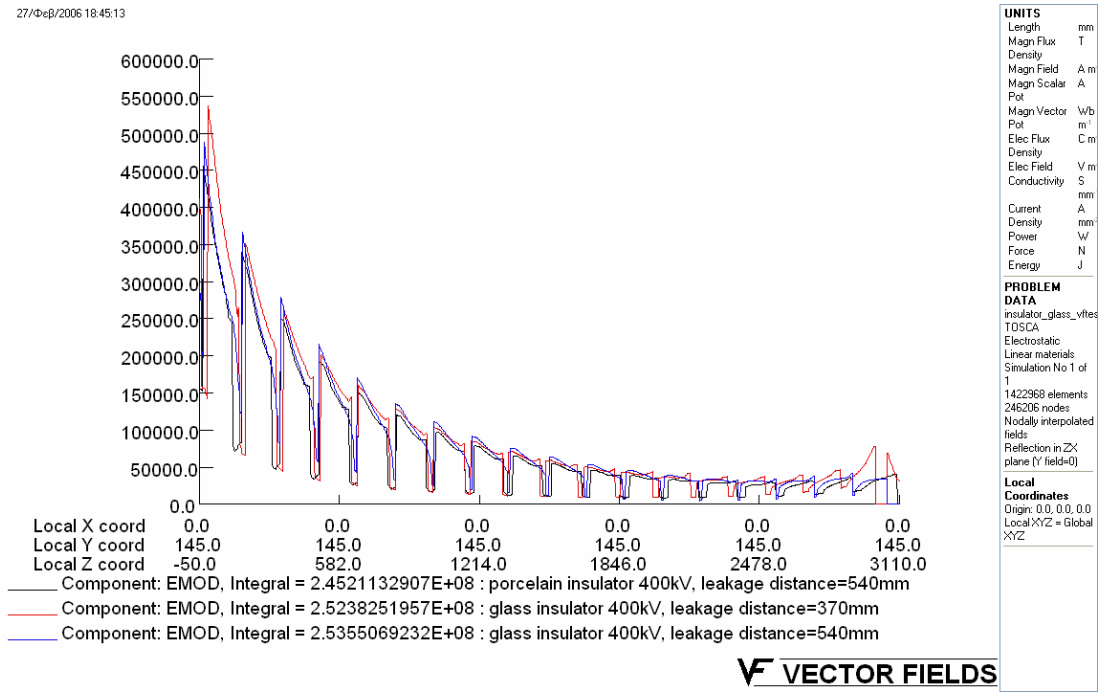
Σχήμα 4.77: Χάρτης ζωνών για την ένταση του πεδίου στο yz- επίπεδο γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα.



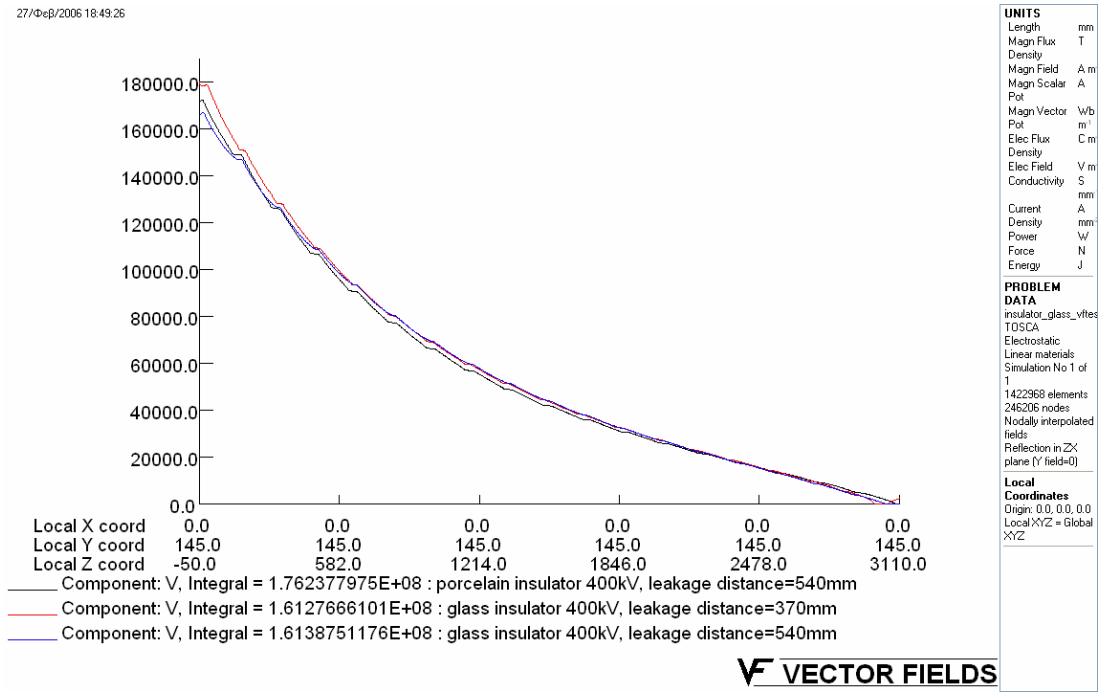
Σχήμα 4.78: Ιστόγραμμα σε yz-επίπεδο για την ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του αλυσοειδούς μονωτήρα.

4.3.4 Συγκριτικές γραφικές μεταξύ των τριών αλυσοειδών μονωτήρων 400kV

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικές γραφικές για τους τρεις αλυσοειδείς μονωτήρες 400kV που παρουσιάστηκαν παραπάνω (σχήματα 4.79 – 4.82). Λαμβάνεται πρώτα μια γραμμή που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα και κατόπιν, μια γραμμή 500 mm μακριά από το κέντρο του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.68(β). Στις γραμμές αυτές υπολογίζεται και παρουσιάζεται γραφικά η ένταση του πεδίου και το δυναμικό. Η μαύρη συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει τον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα (με μήκος ερπυσμού=540mm), η κόκκινη συνεχής γραμμή το γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα κανονικού τύπου (με μήκος ερπυσμού=370mm) και η μπλε συνεχής το γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα τύπου ομίχλης (με μήκος ερπυσμού=540mm).



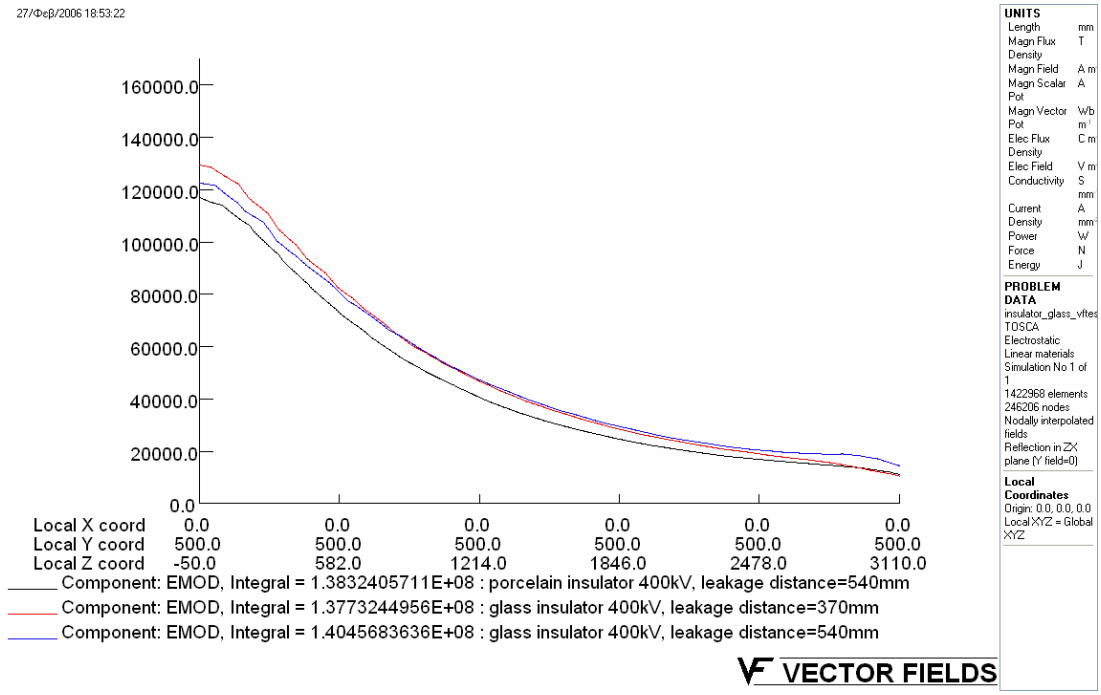
Σχήμα 4.79: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε γραμμή που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα 400kV.



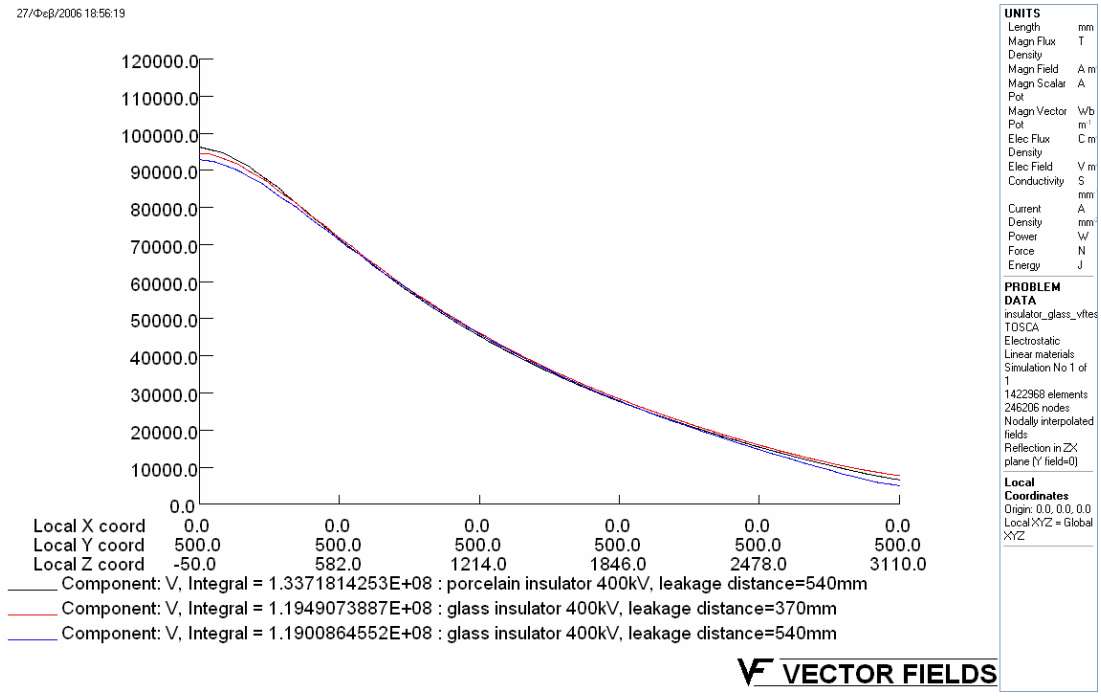
Σχήμα 4.80: Κατανομή του δυναμικού σε γραμμή που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα 400kV.

Από το σχήμα 4.79 φαίνεται ότι η ένταση του πεδίου κατά μήκος της γραμμής που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις της κάθε αλυσίδας, παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που η γραμμή διαπερνά τις πτυχώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μονωτικό υλικό (πορσελάνη ή γυαλί), από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι πτυχώσεις, έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον περιβάλλοντα αέρα και έτσι, σε αυτό παρατηρείται μείωση της έντασης του πεδίου.Η μορφή της κατανομής της έντασης επιβεβαιώνεται και από το άρθρο [19] , όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 της παραγράφου 2.2 του κεφαλαίου 2.

Στο σχήμα 4.80 βλέπουμε ότι το δυναμικό κατά μήκος της γραμμής που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις της κάθε αλυσίδας, μειώνεται σχεδόν γραμμικά με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Όμως, εκεί που η γραμμή διέρχεται από την κάθε πτύχωση, το δυναμικό διατηρείται σχεδόν σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γυάλινες/πορσελάνινες πτυχώσεις έχουν μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με τον αέρα, οπότε σε αυτές το δυναμικό μειώνεται λιγότερο απότομα.



Σχήμα 4.81: Κατανομή της έντασης του πεδίου σε γραμμή 500mm μακριά από το κέντρο του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.68(β).



Σχήμα 4.82: Κατανομή του δυναμικού σε γραμμή 500mm μακριά από το κέντρο του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.68(β).

Από τα σχήματα 4.81 και 4.82 παρατηρούμε ότι τόσο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου όσο και το δυναμικό, μειώνονται ομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής (x=0 mm, y=500 mm, z=-50..3110 mm), με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι όλες οι συγκριτικές γραφικές έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν κοντινές τιμές πεδίου και δυναμικού. Οι διαφορές που παρουσιάζονται στις παραπάνω γραφικές οφείλονται στη διαφορετική τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς για το γυαλί και την πορσελάνη ($\varepsilon_{r,\text{πορσελάνης}}$=5.5 και $\varepsilon_{r,\text{γυαλιού}}$=7), στο διαφορετικό μήκος ερπυσμού, καθώς και στις διάφορες γεωμετρικές διαφορές μεταξύ των τριών αλυσοειδών μονωτήρων (ύψος και ακτίνα των διάφορων μερών που συνθέτουν το μονωτήρα).

Κεφάλαιο

5

Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατόπιν συγκρίσεως των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντλήθηκαν από τη διπλωματική εργασία της Κυρίας Ζυγογιάννη [30]. Η σύγκριση θα περιοριστεί στους αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, μιας και αυτές οι αλυσίδες μονωτήρων ήταν κοινό αντικείμενο των διπλωματικών εργασιών μας. 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 δύο αλυσίδες.

5.2 Κατανομή τάσης

5.2.1 Κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV

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. Στον

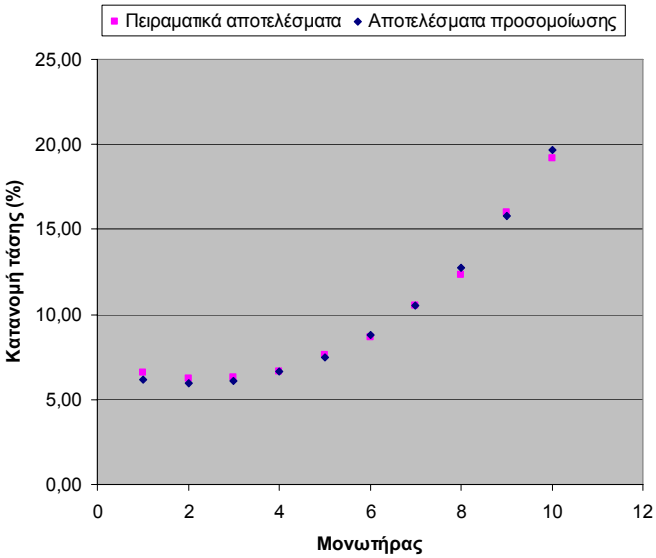
ίδιο πίνακα δίνεται και το σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων, όπως αυτό υπολογίζεται από τη σχέση 5.1:

$$\Sigma\varphi\acute{\alpha}\lambda\mu\alpha = \frac{\text{Τιμή Προσομοίωσης} - \text{Πειραματική Τιμή}}{\text{Πειραματική Τιμή}} \qquad (5.1)$$

Να σημειωθεί ότι ο μονωτήρας 1 είναι ο γειωμένος μονωτήρας και ο μονωτήρας 10 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	6,57	6,17	-6,12
2	6,21	5,95	-4,17
3	6,29	6,12	-2,63
4	6,66	6,64	-0,28
5	7,60	7,51	-1,16
6	8,69	8,77	0,92
7	10,55	10,5	-0,48
8	12,33	12,77	3,61
9	16,00	15,81	-1,20
10	19,16	19,64	2,49



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 και από τις πολύ χαμηλές τιμές του σφάλματος για τον κάθε δισκοειδή μονωτήρα ξεχωριστά, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.1.

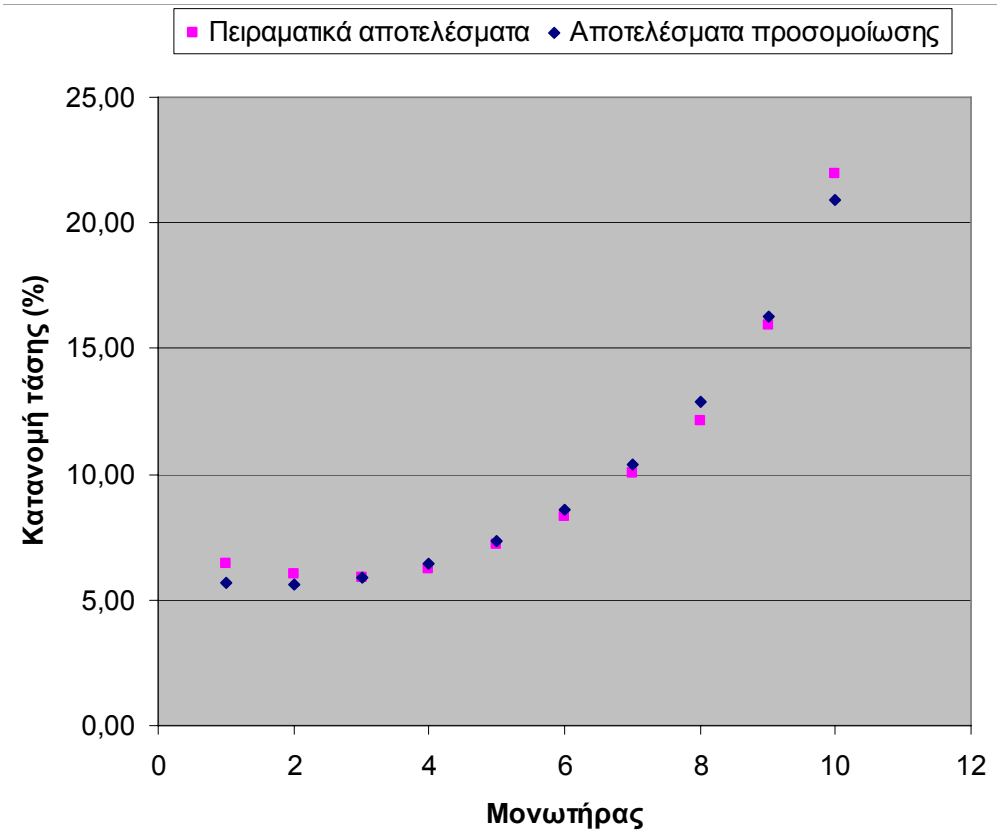
5.2.2 Κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV

Στον πίνακα 5.2 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 5.2 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 και από τις χαμηλές τιμές του σφάλματος για τον κάθε δισκοειδή μονωτήρα ξεχωριστά, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.2.

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

Μονωτήρας	Πειραματικά (%)	PC-OPERA (%)	Σφάλμα (%)
1	6,44	5,66	-12,08
2	6,01	5,64	-6,13
3	5,87	5,9	0,58
4	6,26	6,44	2,90
5	7,22	7,33	1,46
6	8,34	8,61	3,24
7	10,08	10,39	3,12
8	12,14	12,86	5,97
9	15,89	16,24	2,17
10	21,97	20,91	-4,81



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

5.2.3 Διαδικασία επιλογής της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στην κατανομή τάσης, έγινε αντιληπτό ότι αυτά εξαρτώνται άμεσα από την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου. Στο τσιμέντο επιλέχθηκε $\varepsilon_{r,\text{τσιμέντου}}=14$. Η επιλογή αυτή έγινε κατόπιν δοκιμών σύμφωνα με τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, αλλά και λαμβάνοντας υπ'όψιν τα πειραματικά αποτελέσματα. Στις παραγράφους 5.2.1 και 5.2.2 παρουσιάστηκε η κατανομή τάσης στους δισκοειδείς μονωτήρες των δύο αλυσίδων για τη βέλτιστη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου, δηλαδή για $\varepsilon_{r,\text{τσιμέντου}}=14$. Παρακάτω θα παρουσιαστούν συγκριτικές γραφικές μεταξύ της κατανομής τάσης που προέκυψε από το πείραμα και της κατανομής τάσης που προέκυψε από την προσομοίωση στο PC-OPERA για διάφορες τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου και για τους δύο αλυσοειδείς μονωτήρες

150kV. Να σημειωθεί ότι, για τις διάφορες τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου, η τιμή της έντασης του πεδίου σε διάφορες θέσεις επηρεάζεται ελάχιστα.

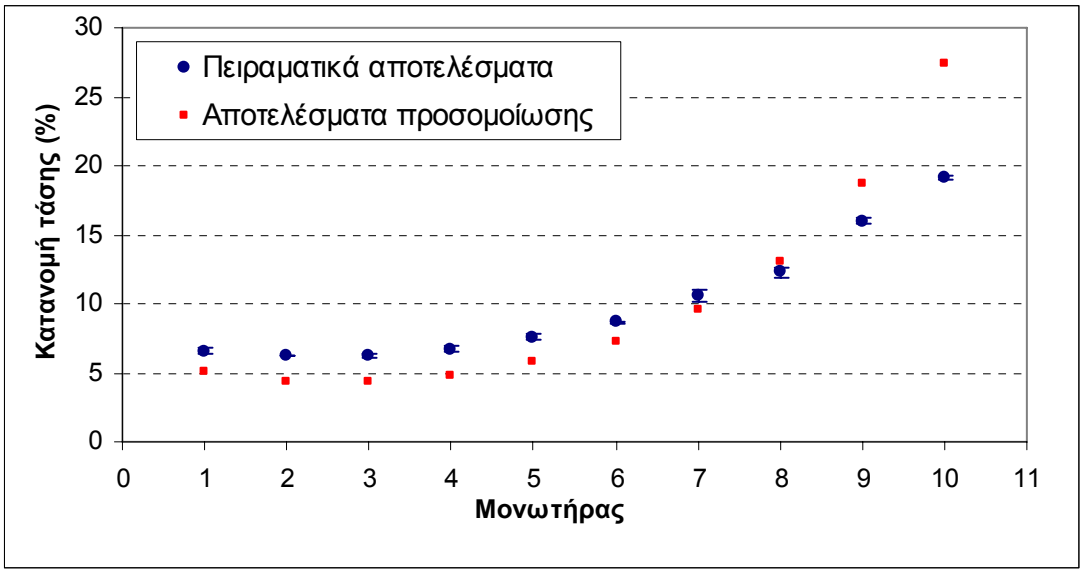
5.2.3.1 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV

Στον πίνακα 5.3 φαίνεται ότι για $\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=14 η προσομοίωση δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά στην κατανομή τάσης στους δέκα δισκοειδείς μονωτήρες του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα 150kV, δηλαδή δίνει το μικρότερο σφάλμα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για κάθε δισκοειδή μονωτήρα.

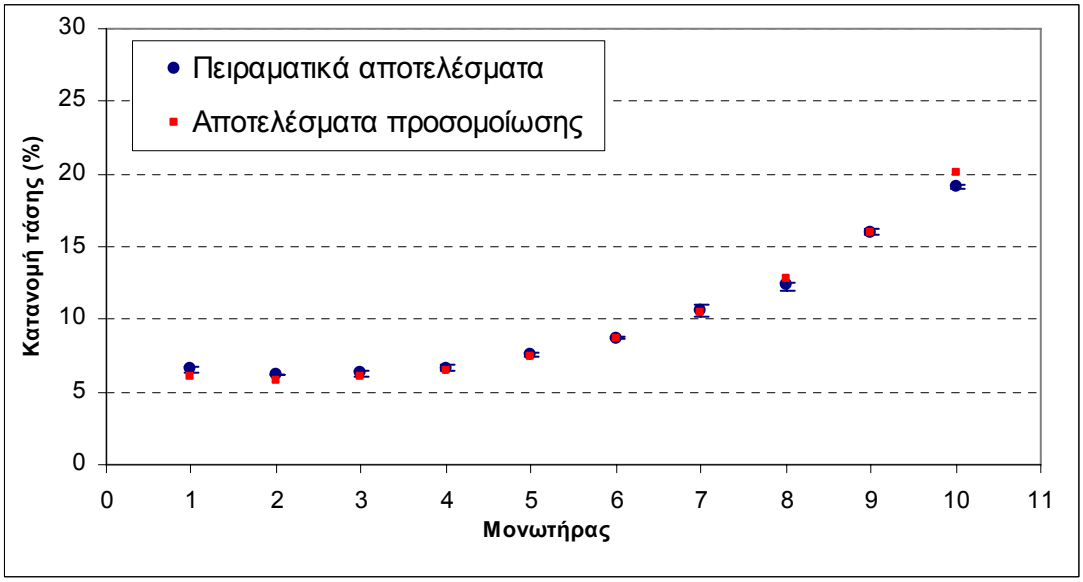
Πίνακας 5.3: Σύγκριση της κατανομής τάσης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για διάφορες τιμές διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου για το γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

Πειραματικά (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)
	$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=2		$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=12		$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=13		$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=14	
6,57	5,08	-22,71	6,06	-7,79	6,12	-6,88	6,17	-6,12
6,21	4,33	-30,26	5,82	-6,26	5,89	-5,14	5,95	-4,17
6,29	4,33	-31,11	5,99	-4,70	6,06	-3,59	6,12	-2,63
6,66	4,82	-27,62	6,51	-2,24	6,58	-1,18	6,64	-0,28
7,60	5,76	-24,19	7,41	-2,47	7,46	-1,82	7,51	-1,16
8,69	7,26	-16,45	8,7	0,12	8,73	0,46	8,77	0,92
10,55	9,52	-9,77	10,47	-0,77	10,48	-0,67	10,5	-0,48
12,33	13,03	5,72	12,84	4,17	12,82	4,01	12,77	3,61
16,00	18,65	16,55	16,03	0,17	15,92	-0,51	15,81	-1,19
19,16	27,32	42,57	20,13	5,05	19,85	3,59	19,64	2,49

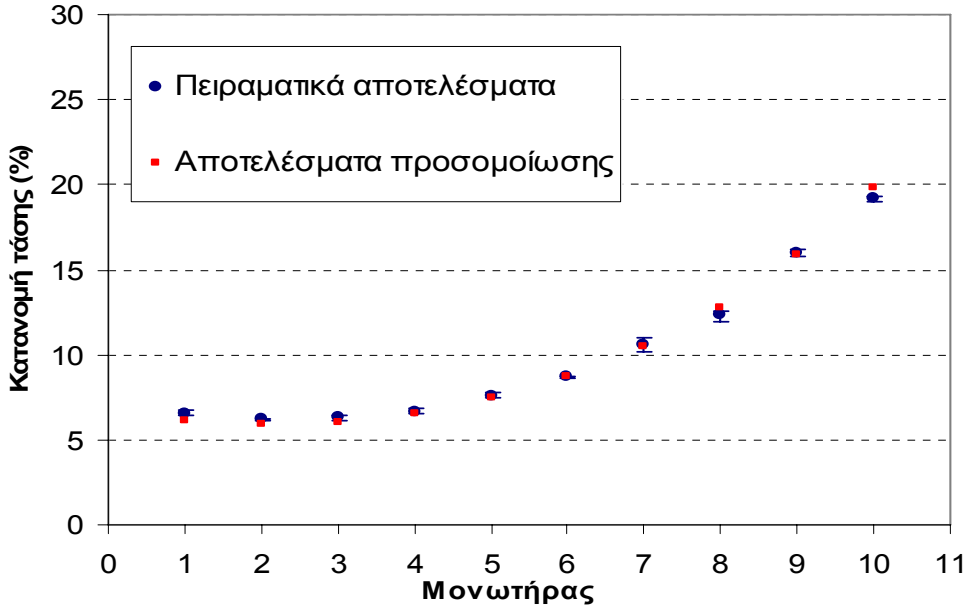
Στα σχήματα 5.3-5.5 φαίνεται γραφικά η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για τιμές διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου: 2, 12 και 13. Για τη βέλτιστη τιμή, δηλαδή για $\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=14, η αντίστοιχη γραφική φαίνεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.3: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για $\varepsilon_{r,\text{τσιμέντου}}=2$.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για $\varepsilon_{r,\text{τσιμέντου}}=12$.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για $\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=13.

Από τα παραπάνω σχήματα γίνεται αντιληπτό ότι με την αύξηση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου, τόσο βελτιώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή τάσης, όπως προκύπτει από την προσομοίωση, προσεγγίζει όλο και καλύτερα την κατανομή της τάσης, όπως προκύπτει από το πείραμα. Όταν η διηλεκτρική σταθερά του τσιμέντου ξεπεράσει την τιμή 14, τότε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αρχίζουν να αποκλίνουν από τα αποτελέσματα του πειράματος. Συνεπώς, ως βέλτιστη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς για το τσιμέντο, επιλέχθηκε $\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=14.

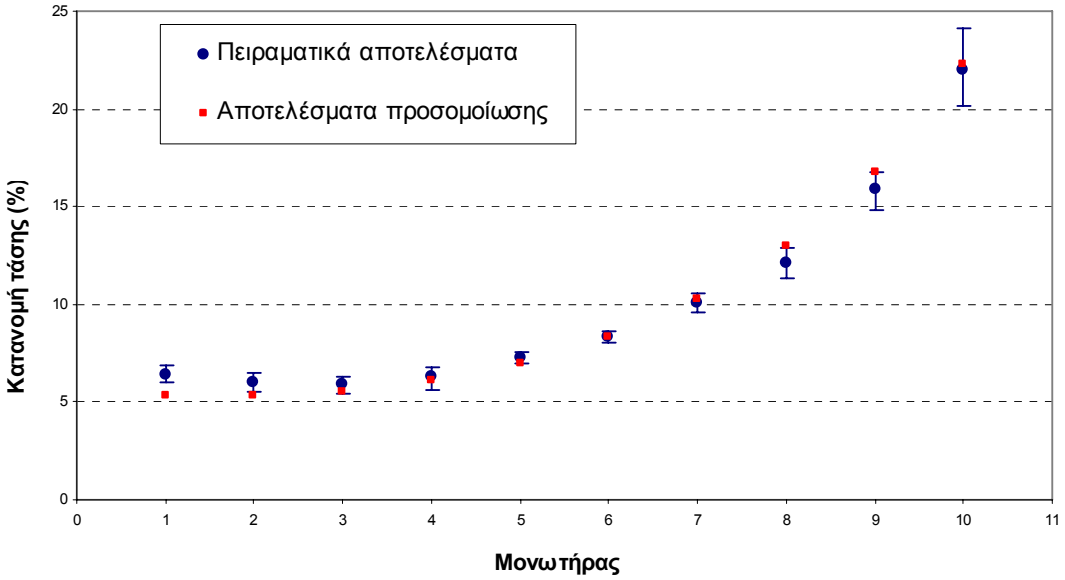
5.2.3.2 Πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 150kV

Στον πίνακα 5.4 φαίνεται ότι για $\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=14 η προσομοίωση δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά στην κατανομή τάσης στους δέκα δισκοειδείς μονωτήρες του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα 150kV, δηλαδή δίνει το μικρότερο σφάλμα μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για κάθε δισκοειδή μονωτήρα.

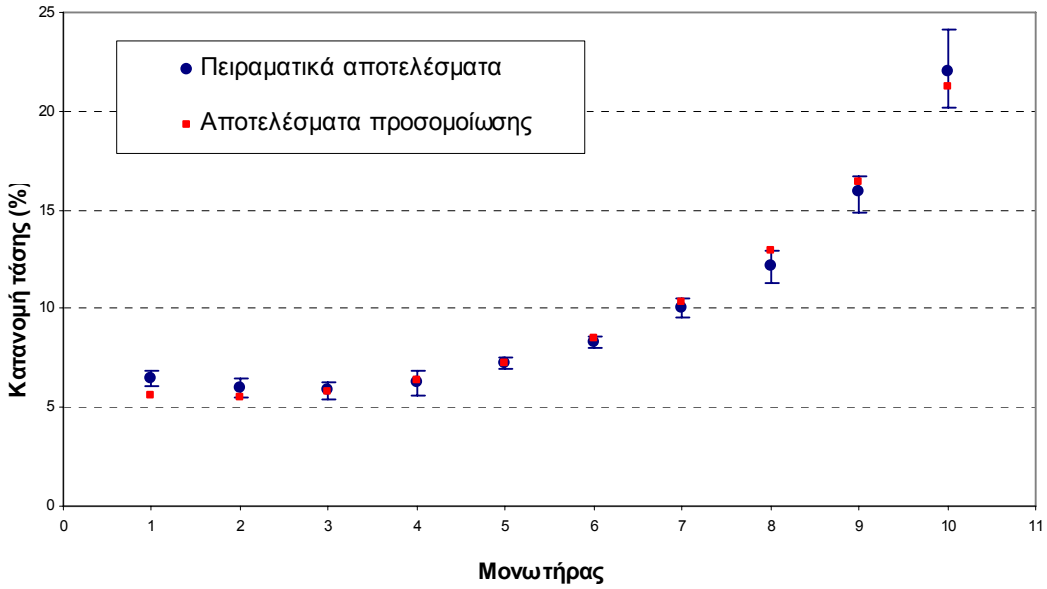
Πίνακας 5.4: Σύγκριση της κατανομής τάσης μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης για διάφορες τιμές διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου για τον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV.

Πειραματικά (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)	PC OPERA (%)	Σφάλμα (%)
	$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=8		$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=12		$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=13		$\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=14	
6,44	5,36	-16,74	5,59	-13,17	5,62	-12,70	5,66	-12,08
6,01	5,3	-11,79	5,55	-7,62	5,6	-6,79	5,64	-6,13
5,87	5,55	-5,39	5,81	-0,96	5,85	-0,28	5,9	0,58
6,26	6,09	-2,69	6,35	1,46	6,4	2,26	6,44	2,90
7,22	7,01	-2,97	7,25	0,36	7,29	0,91	7,33	1,46
8,34	8,35	0,13	8,54	2,40	8,57	2,76	8,61	3,24
10,08	10,27	1,93	10,36	2,83	10,38	3,02	10,39	3,12
12,14	12,97	6,88	12,89	6,22	12,87	6,05	12,86	5,97
15,89	16,8	5,69	16,39	3,12	16,31	2,61	16,24	2,17
21,97	22,28	1,43	21,25	-3,26	21,08	-4,04	20,91	-4,81

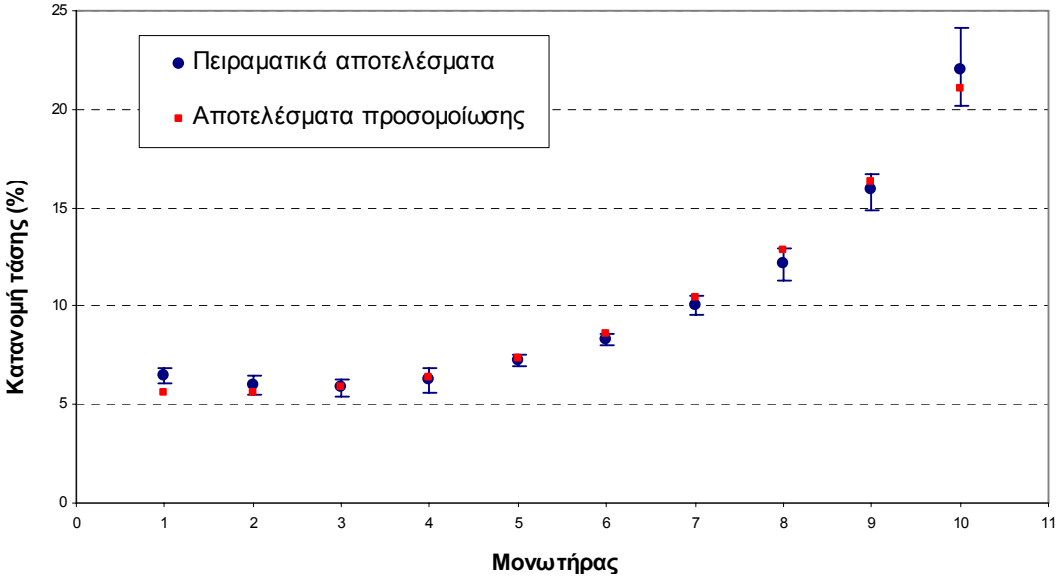
Στα σχήματα 5.6-5.8 φαίνεται γραφικά η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για τιμές διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου: 8, 12 και 13. Για τη βέλτιστη τιμή, δηλαδή για $\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=14, η αντίστοιχη γραφική φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.6: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για $\varepsilon_{r,τσιμέντου}$=8.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για $\varepsilon_{r,\tau\sigma\iota\mu\acute{\varepsilon}\nu\tau ου}=12$.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Opera-3d όσον αφορά στην κατανομή της τάσης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV για $\varepsilon_{r,\tau\sigma\iota\mu\acute{\varepsilon}\nu\tau ου}=13$.

Ομοίως με την παράγραφο 5.2.3.1, από τα σχήματα 5.6-5.8 γίνεται αντιληπτό ότι με την αύξηση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου, τόσο βελτιώνονται

τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή τάσης, όπως προκύπτει από την προσομοίωση, προσεγγίζει όλο και καλύτερα την κατανομή της τάσης, όπως προκύπτει από το πείραμα. Όταν η διηλεκτρική σταθερά του τσιμέντου ξεπεράσει την τιμή 14, τότε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αρχίζουν να αποκλίνουν από τα αποτελέσματα του πειράματος. Συνεπώς, ως βέλτιστη τιμή διηλεκτρικής σταθεράς για το τσιμέντο, επιλέχθηκε $\varepsilon_{r,\text{τσιμέντου}}=14$. Αυτή η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου επιλέχθηκε και για τους αλυσοειδείς μονωτήρες 400kV που προσομοιώθηκαν στο Opera-3d.

5.3 Κατανομή της έντασης του πεδίου

Στην παράγραφο αυτή ακολουθείται η λογική, με την οποία ελήφθησαν οι τιμές της έντασης του πεδίου στο πείραμα της Κυρίας Ζυγογιάννη [30] σε διάφορες θέσεις γύρω από τον κάθε αλυσοειδή μονωτήρα 150kV που αποτελείται από δέκα δισκοειδείς μονωτήρες. Δηλαδή, ως σημείο αναφοράς για τις μετρήσεις στο κατακόρυφο επίπεδο θεωρήθηκε το ύψος του αγωγού, ενώ στο δισδιάστατο επίπεδο ως άξονας x θεωρήθηκε ο άξονας που είναι παράλληλος στον αγωγό υψηλής τάσης και ως άξονας y θεωρήθηκε ο άξονας που είναι κάθετος στον αγωγό. Έτσι, το σημείο (0,0) είναι το σημείο όπου ο κατακόρυφος άξονας του μονωτήρα (άξονας z) τέμνει το οριζόντιο επίπεδο.

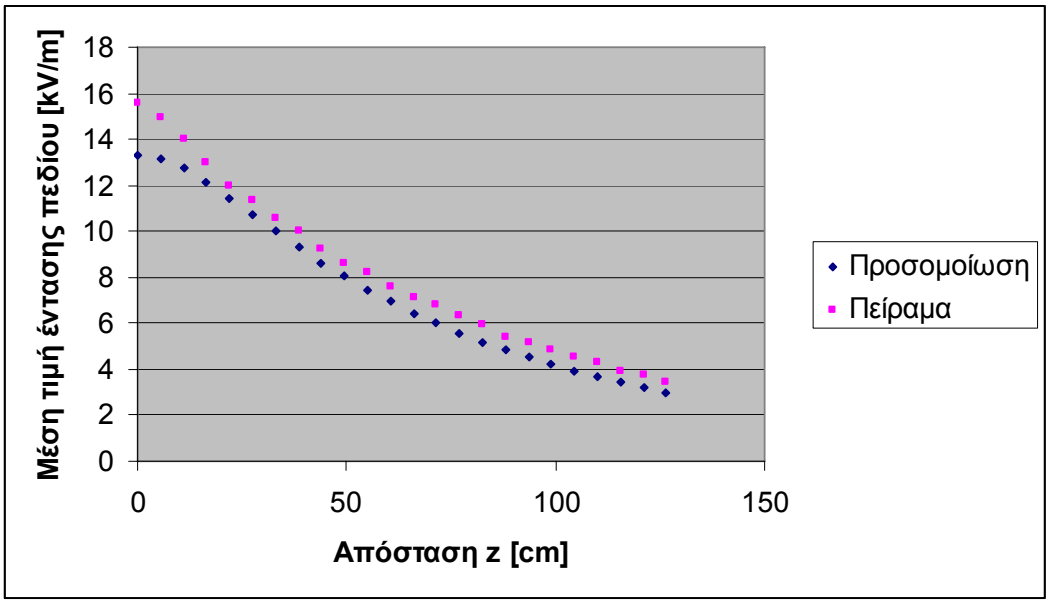
Για κάθε αλυσοειδή μονωτήρα 150 kV, έγινε σύγκριση της τιμής της έντασης του πεδίου σε πέντε, ενδεικτικά, θέσεις του οριζόντιου επιπέδου και σε 24 σημεία για κάθε θέση. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης στις θέσεις αυτές, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση και το πείραμα, καθώς και το σφάλμα μεταξύ 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 Κατανομή της έντασης στο γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV

Για τη θέση Α με συνιστώσες (x=36cm, y=37,5cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.5: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Α.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	13,310	15,610	-14,734
5,5	13,151	14,940	-11,976
11,0	12,783	13,970	-8,499
16,5	12,169	12,960	-6,102
22,0	11,459	11,980	-4,347
27,5	10,748	11,340	-5,223
33,0	10,025	10,590	-5,333
38,5	9,311	9,983	-6,729
44,0	8,598	9,230	-6,845
49,5	8,054	8,638	-6,758
55,0	7,462	8,188	-8,861
60,5	6,933	7,572	-8,433
66,0	6,445	7,126	-9,559
71,5	5,988	6,774	-11,591
77,0	5,592	6,313	-11,427
82,5	5,204	5,919	-12,083
88,0	4,856	5,435	-10,651
93,5	4,532	5,163	-12,214
99,0	4,214	4,814	-12,466
104,5	3,929	4,571	-14,033
110,0	3,656	4,287	-14,725
115,5	3,415	3,937	-13,270
121,0	3,177	3,772	-15,772
126,5	2,955	3,423	-13,672

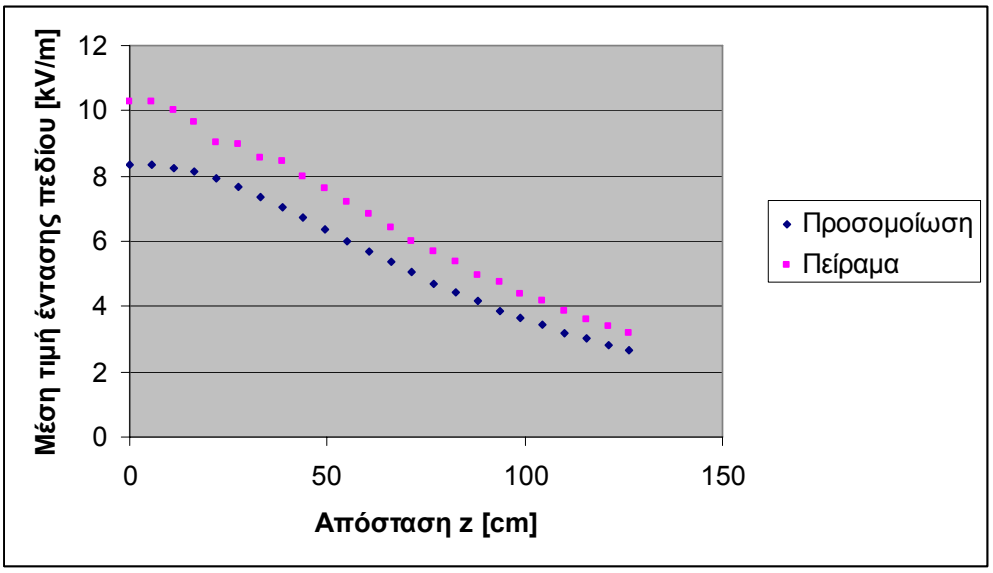


Σχήμα 5.9: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Α.

Για τη Θέση Δ με συνιστώσες (x=15,5cm, y=59,5cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.6: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Δ.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	8,364	10,300	-18,796
5,5	8,343	10,270	-18,762
11,0	8,258	10,000	-17,421
16,5	8,154	9,669	-15,667
22,0	7,921	9,044	-12,417
27,5	7,664	8,969	-14,546
33,0	7,350	8,541	-13,945
38,5	7,059	8,478	-16,737
44,0	6,732	7,964	-15,468
49,5	6,353	7,613	-16,551
55,0	6,026	7,178	-16,048
60,5	5,677	6,812	-16,655
66,0	5,350	6,407	-16,493
71,5	5,042	6,016	-16,184
77,0	4,714	5,670	-16,864
82,5	4,437	5,358	-17,189
88,0	4,159	4,972	-16,345
93,5	3,884	4,747	-18,187
99,0	3,652	4,369	-16,414
104,5	3,421	4,175	-18,070
110,0	3,206	3,853	-16,782
115,5	3,009	3,588	-16,138
121,0	2,815	3,373	-16,529
126,5	2,648	3,167	-16,379

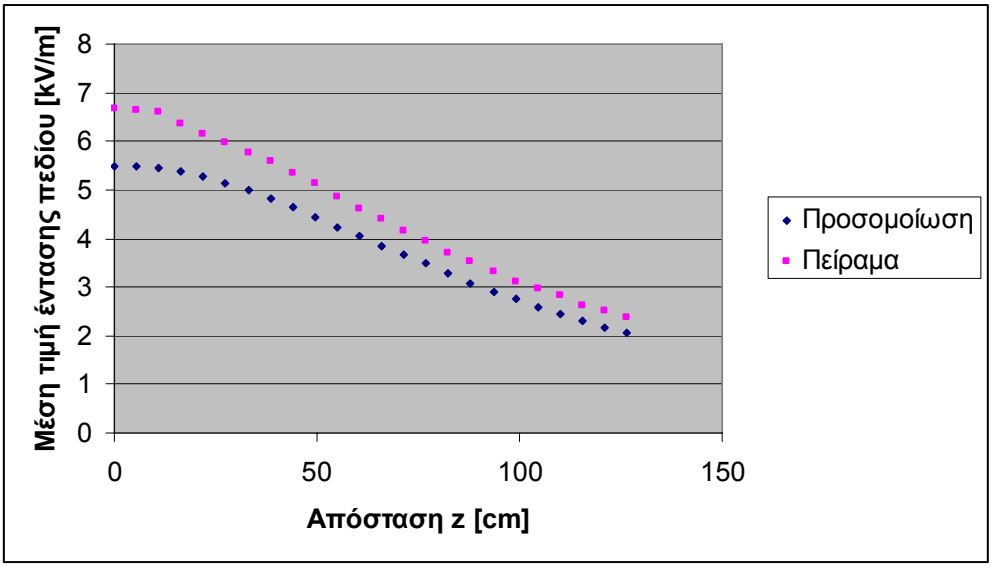


Σχήμα 5.10: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Δ.

Για τη Θέση Ε με συνιστώσες (x=38cm, y=80cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.7: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Ε.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	5,502	6,674	-17,558
5,5	5,499	6,655	-17,377
11,0	5,453	6,612	-17,535
16,5	5,394	6,347	-15,021
22,0	5,289	6,139	-13,853
27,5	5,142	5,968	-13,848
33,0	4,994	5,757	-13,250
38,5	4,830	5,594	-13,659
44,0	4,642	5,356	-13,338
49,5	4,453	5,126	-13,131
55,0	4,241	4,861	-12,762
60,5	4,049	4,615	-12,263
66,0	3,847	4,410	-12,757
71,5	3,658	4,140	-11,644
77,0	3,481	3,939	-11,629
82,5	3,268	3,713	-11,996
88,0	3,087	3,517	-12,232
93,5	2,908	3,305	-12,011
99,0	2,745	3,119	-12,001
104,5	2,597	2,968	-12,491
110,0	2,442	2,821	-13,451
115,5	2,300	2,609	-11,844
121,0	2,174	2,508	-13,334
126,5	2,056	2,373	-13,370

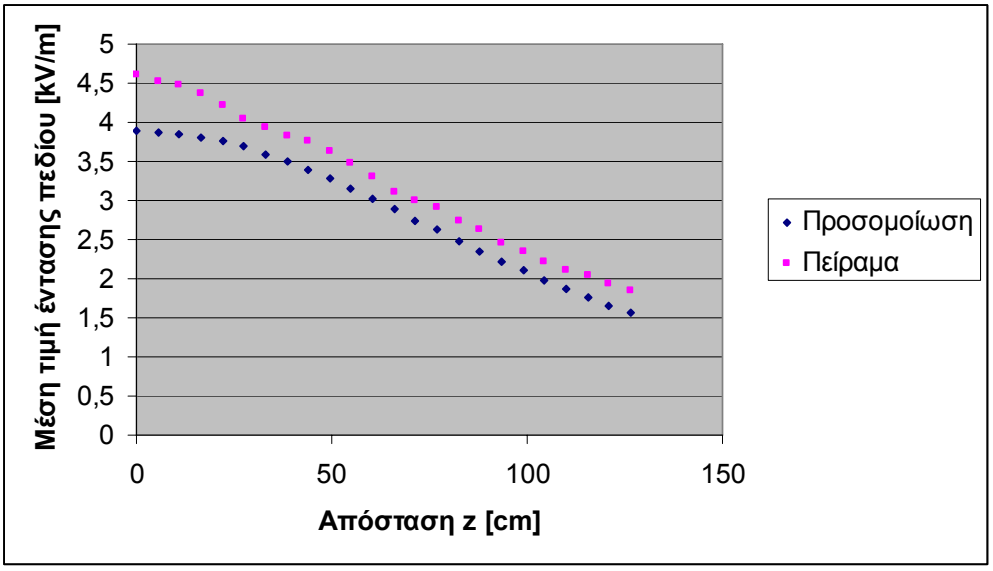


Σχήμα 5.11: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Ε.

Για τη Θέση ΣΤ με συνιστώσες (x=50,5cm, y=100,5cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.8: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση ΣΤ.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	3,894	4,614	-15,606
5,5	3,873	4,522	-14,349
11,0	3,850	4,473	-13,919
16,5	3,812	4,375	-12,878
22,0	3,761	4,214	-10,755
27,5	3,690	4,044	-8,751
33,0	3,594	3,925	-8,436
38,5	3,507	3,819	-8,174
44,0	3,398	3,754	-9,495
49,5	3,286	3,620	-9,234
55,0	3,149	3,489	-9,738
60,5	3,020	3,313	-8,834
66,0	2,883	3,108	-7,226
71,5	2,746	3,004	-8,588
77,0	2,620	2,910	-9,964
82,5	2,479	2,733	-9,291
88,0	2,354	2,622	-10,204
93,5	2,222	2,450	-9,299
99,0	2,098	2,340	-10,342
104,5	1,984	2,221	-10,691
110,0	1,868	2,111	-11,530
115,5	1,762	2,037	-13,479
121,0	1,659	1,941	-14,524
126,5	1,561	1,852	-15,702

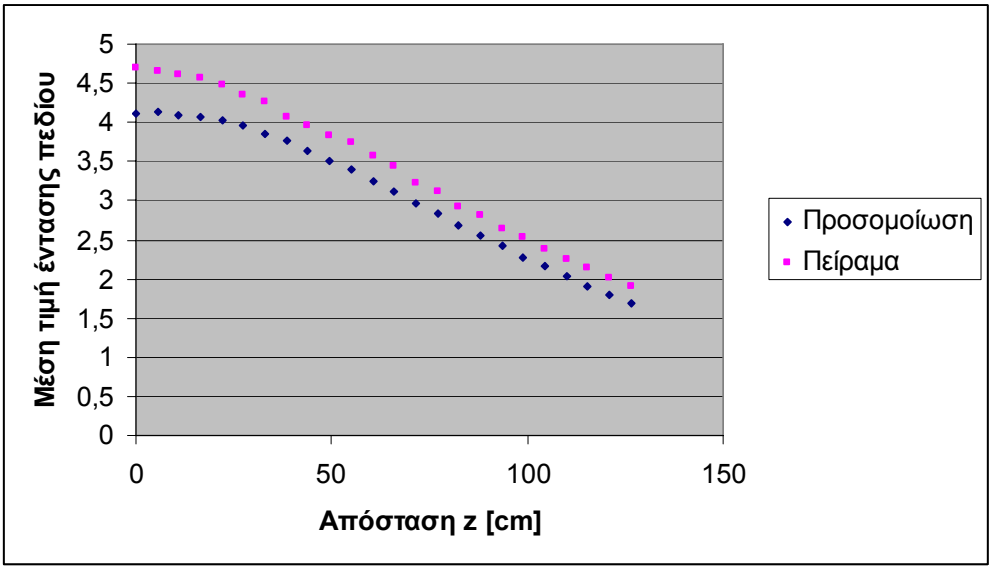


Σχήμα 5.12: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση ΣΤ.

Για τη Θέση Z με συνιστώσες (x=18cm, y=102cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.9: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Z.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	4,108	4,693	-12,474
5,5	4,127	4,647	-11,185
11,0	4,101	4,617	-11,166
16,5	4,068	4,570	-10,985
22,0	4,022	4,480	-10,229
27,5	3,953	4,355	-9,240
33,0	3,858	4,258	-9,391
38,5	3,760	4,076	-7,758
44,0	3,647	3,968	-8,090
49,5	3,517	3,835	-8,296
55,0	3,391	3,743	-9,393
60,5	3,249	3,578	-9,183
66,0	3,116	3,432	-9,218
71,5	2,972	3,235	-8,136
77,0	2,832	3,122	-9,299
82,5	2,689	2,919	-7,879
88,0	2,547	2,813	-9,455
93,5	2,421	2,640	-8,295
99,0	2,277	2,522	-9,705
104,5	2,154	2,380	-9,486
110,0	2,025	2,246	-9,858
115,5	1,912	2,135	-10,424
121,0	1,799	2,015	-10,744
126,5	1,697	1,897	-10,550



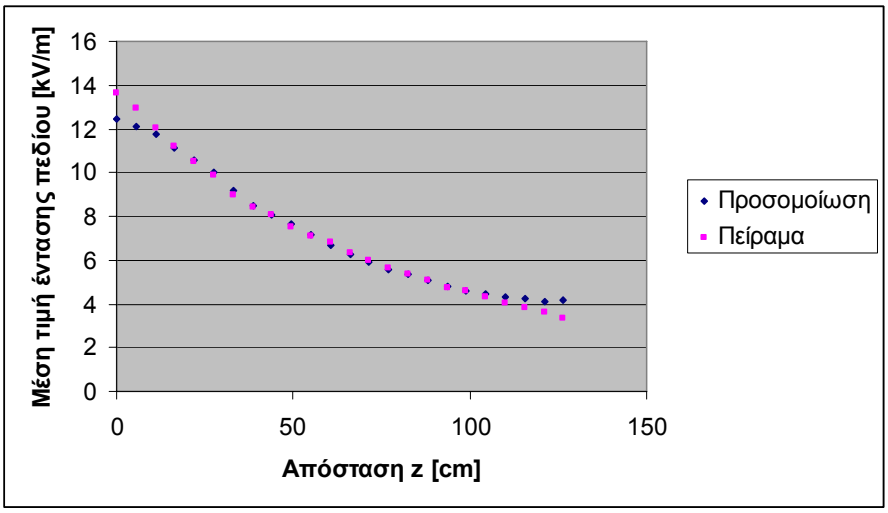
Σχήμα 5.13: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Z.

5.3.2 Κατανομή της έντασης στον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV

Για τη θέση Α με συνιστώσες (x=36cm, y=37,5cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.10: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Α.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	12,455	13,630	-8,618
5,5	12,076	12,920	-6,529
11,0	11,783	12,010	-1,889
16,5	11,151	11,220	-0,614
22,0	10,568	10,480	0,836
27,5	10,017	9,877	1,417
33,0	9,209	8,966	2,707
38,5	8,494	8,430	0,755
44,0	8,074	8,035	0,486
49,5	7,640	7,514	1,679
55,0	7,187	7,119	0,960
60,5	6,704	6,811	-1,574
66,0	6,287	6,365	-1,221
71,5	5,883	5,976	-1,555
77,0	5,598	5,637	-0,688
82,5	5,361	5,375	-0,267
88,0	5,081	5,079	0,033
93,5	4,827	4,738	1,878
99,0	4,608	4,578	0,660
104,5	4,453	4,317	3,161
110,0	4,334	4,059	6,781
115,5	4,223	3,847	9,785
121,0	4,137	3,652	13,276
126,5	4,173	3,358	24,272

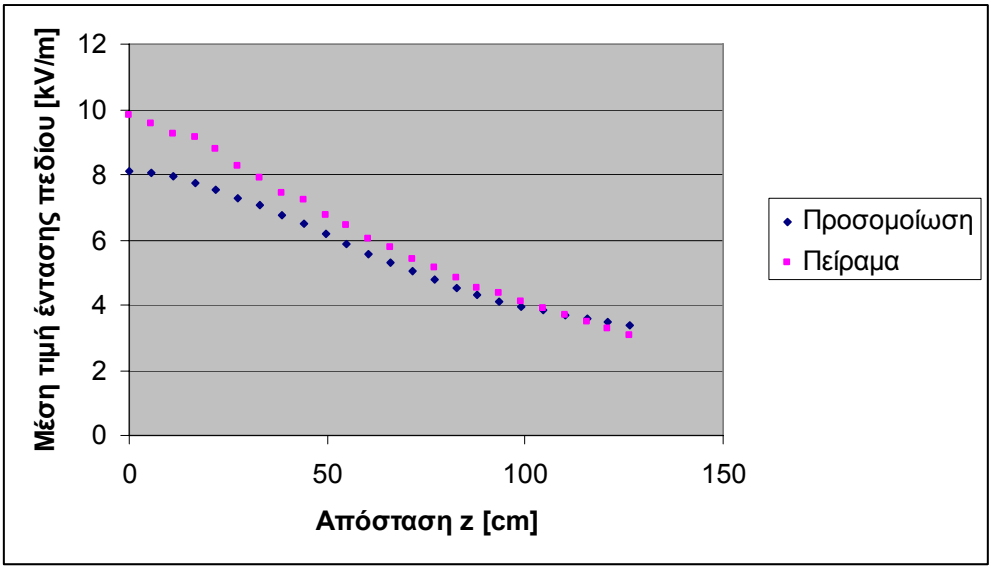


Σχήμα 5.14: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Α.

Για τη Θέση Δ με συνιστώσες (x=15,5cm, y=59,5cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.11: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Δ.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	8,129	9,837	-17,359
5,5	8,045	9,539	-15,664
11,0	7,929	9,248	-14,266
16,5	7,719	9,129	-15,446
22,0	7,528	8,760	-14,064
27,5	7,292	8,257	-11,684
33,0	7,040	7,906	-10,954
38,5	6,747	7,435	-9,254
44,0	6,471	7,232	-10,517
49,5	6,172	6,775	-8,906
55,0	5,864	6,466	-9,317
60,5	5,580	6,010	-7,156
66,0	5,308	5,782	-8,200
71,5	5,024	5,408	-7,101
77,0	4,773	5,121	-6,792
82,5	4,539	4,843	-6,275
88,0	4,325	4,541	-4,763
93,5	4,106	4,351	-5,733
99,0	3,946	4,083	-3,347
104,5	3,833	3,893	-1,535
110,0	3,700	3,680	0,551
115,5	3,586	3,473	3,249
121,0	3,490	3,282	6,329
126,5	3,399	3,056	11,246

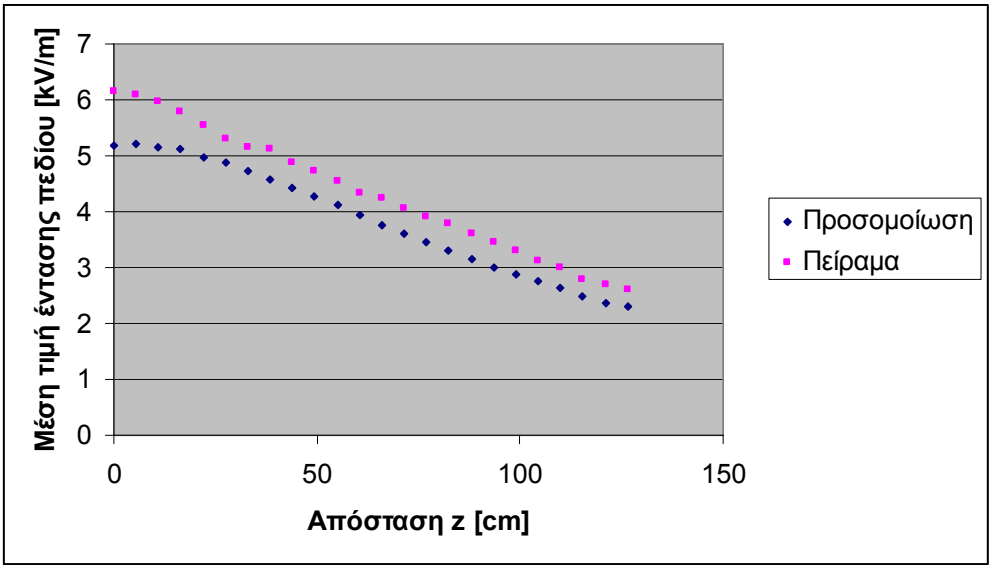


Σχήμα 5.15: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Δ.

Για τη Θέση Ε με συνιστώσες (x=38cm, y=80cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.12: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Ε.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	5,171	6,160	-16,052
5,5	5,208	6,085	-14,414
11,0	5,160	5,970	-13,563
16,5	5,118	5,800	-11,766
22,0	4,981	5,556	-10,355
27,5	4,875	5,300	-8,018
33,0	4,725	5,140	-8,072
38,5	4,581	5,122	-10,561
44,0	4,430	4,886	-9,328
49,5	4,271	4,728	-9,658
55,0	4,107	4,544	-9,613
60,5	3,927	4,342	-9,551
66,0	3,758	4,249	-11,566
71,5	3,608	4,061	-11,160
77,0	3,470	3,911	-11,288
82,5	3,291	3,777	-12,867
88,0	3,154	3,602	-12,433
93,5	3,011	3,450	-12,713
99,0	2,879	3,302	-12,816
104,5	2,763	3,124	-11,558
110,0	2,649	2,996	-11,573
115,5	2,484	2,782	-10,694
121,0	2,375	2,690	-11,708
126,5	2,289	2,594	-11,763

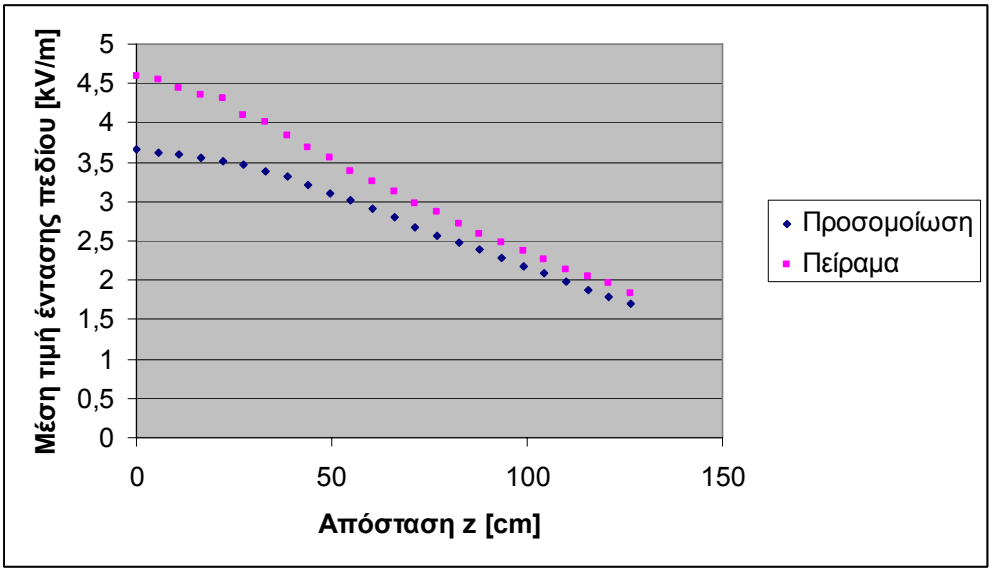


Σχήμα 5.16: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Ε.

Για τη Θέση ΣΤ με συνιστώσες (x=50,5cm, y=100,5cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.13: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση ΣΤ.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	3,669	4,587	-20,007
5,5	3,627	4,543	-20,153
11,0	3,589	4,430	-18,988
16,5	3,567	4,356	-18,119
22,0	3,521	4,314	-18,386
27,5	3,464	4,100	-15,507
33,0	3,389	4,013	-15,539
38,5	3,317	3,844	-13,720
44,0	3,208	3,680	-12,814
49,5	3,111	3,561	-12,638
55,0	3,017	3,385	-10,864
60,5	2,915	3,262	-10,626
66,0	2,792	3,115	-10,384
71,5	2,676	2,983	-10,308
77,0	2,562	2,861	-10,460
82,5	2,483	2,717	-8,606
88,0	2,392	2,587	-7,552
93,5	2,281	2,476	-7,872
99,0	2,180	2,368	-7,929
104,5	2,089	2,260	-7,579
110,0	1,992	2,132	-6,588
115,5	1,882	2,047	-8,048
121,0	1,786	1,959	-8,844
126,5	1,694	1,834	-7,626

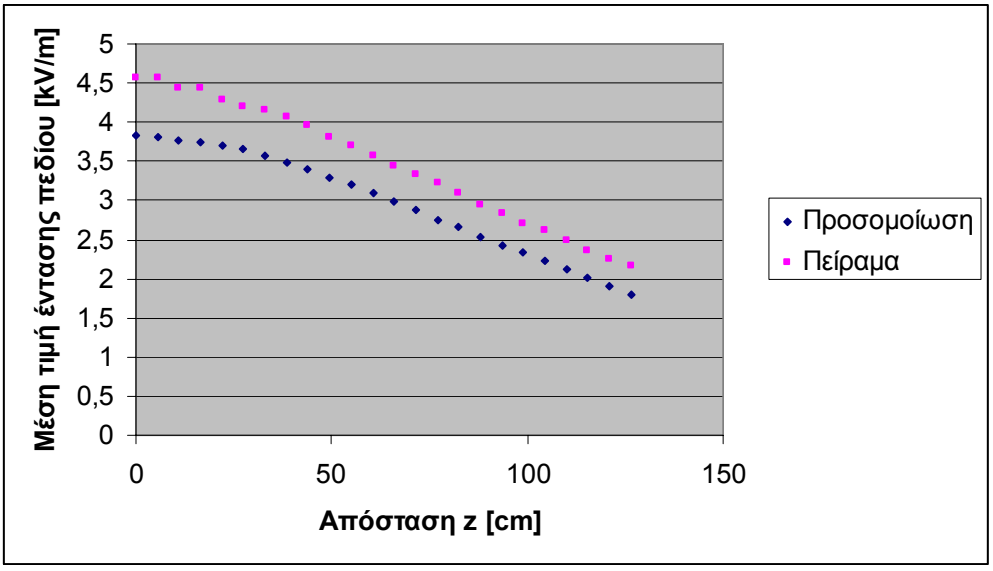


Σχήμα 5.17: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση ΣΤ.

Για τη Θέση Z με συνιστώσες (x=18cm, y=102cm) η ένταση του πεδίου είχε τις παρακάτω τιμές στην προσομοίωση και στο πείραμα.

Πίνακας 5.14: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Z.

z (cm)	Μέση τιμή έντασης πεδίου [kV/m]		Σφάλμα (%)
	Προσομοίωση	Πείραμα	
0,0	3,825	4,561	-16,131
5,5	3,819	4,575	-16,529
11,0	3,770	4,448	-15,242
16,5	3,741	4,437	-15,686
22,0	3,698	4,290	-13,806
27,5	3,664	4,197	-12,691
33,0	3,569	4,147	-13,939
38,5	3,483	4,071	-14,433
44,0	3,392	3,951	-14,153
49,5	3,293	3,818	-13,749
55,0	3,206	3,706	-13,480
60,5	3,102	3,582	-13,409
66,0	2,993	3,450	-13,233
71,5	2,870	3,340	-14,079
77,0	2,759	3,222	-14,379
82,5	2,661	3,088	-13,822
88,0	2,543	2,950	-13,795
93,5	2,432	2,825	-13,925
99,0	2,330	2,707	-13,919
104,5	2,225	2,610	-14,754
110,0	2,124	2,480	-14,356
115,5	2,018	2,355	-14,307
121,0	1,915	2,257	-15,171
126,5	1,805	2,157	-16,304



Σχήμα 5.18: Σύγκριση των τιμών της έντασης του πεδίου του πορσελάνινου αλυσοειδούς μονωτήρα στη θέση Z.

5.3.3 Συμπεράσματα για την κατανομή της έντασης στις θέσεις γύρω από τους αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV

Παρατηρούμε ότι για το γυάλινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV στις θέσεις Α, Δ, Ε, ΣΤ και Ζ το σφάλμα δεν ξεπερνά το 19% κατ'απόλυτο τιμή. Άρα, η προσομοίωση δίνει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα στις θέσεις αυτές. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις θέσεις παρατηρείται συστηματικό σφάλμα, διότι όλες οι τιμές της έντασης που προέκυψαν από την προσομοίωση είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από το πείραμα, γι' αυτό και το σφάλμα προκύπτει πάντα αρνητικό.

Για τον πορσελάνινο αλυσοειδή μονωτήρα 150kV στις θέσεις Α, Δ, Ε, ΣΤ και Ζ η μέγιστη τιμή του σφάλματος είναι 24.3% κατ'απόλυτο τιμή. Μάλιστα, στις θέσεις Α και Δ παρατηρείται τυχαίο σφάλμα, διότι το σφάλμα δεν έχει μόνιμα αρνητικό πρόσημο όπως στην περίπτωση του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα. Όμως, στις θέσεις Ε, ΣΤ και Ζ παρατηρείται συστηματικό σφάλμα, διότι όλες οι τιμές της έντασης που προέκυψαν από την προσομοίωση είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από το πείραμα.

Οι διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές της έντασης μεταξύ του πειράματος και της προσομοίωσης οφείλονται:

- 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.
- Το μήκος του αγωγού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ήταν 2.35m, ενώ στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε αγωγός μήκους 2m.

Κεφάλαιο

6

Συμπεράσματα – Η επόμενη μέρα

Αντικείμενο αυτής της 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, προκειμένου να προσομοιωθούν γυάλινοι και πορσελάνινοι αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV και 400kV. 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 συνολικό μήκος της κάθε αλυσίδας μονωτήρων. Ειδικά η μελέτη της κατανομής της έντασης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την καλή λειτουργία ενός μονωτήρα. Πράγματι, η παρουσία υψηλών τιμών της έντασης σε ορισμένα τμήματα της επιφάνειας του μονωτήρα ευνοεί τη δημιουργία μερικών τόξων και, συνακόλουθα, το ενδεχόμενο επέκτασής τους και εμφάνισης του φαινομένου της υπερπήδησης.

Αρχικά, προσομοιώθηκαν δύο αλυσοειδείς μονωτήρες κανονικού τύπου 150 kV, ο ένας εκ των οποίων αποτελούνταν από δέκα γυάλινους δισκοειδείς μονωτήρες και ο άλλος από δέκα πορσελάνινους δισκοειδείς μονωτήρες. Παρουσιάστηκε η κατανομή της έντασης του πεδίου και του δυναμικού στην επιφάνεια του κάθε αλυσοειδούς μονωτήρα, όπου το δυναμικό και η ένταση του πεδίου μειώνονται κατά μήκος της επιφάνειας του αλυσοειδούς μονωτήρα με κατεύθυνση από τον αγωγό υψηλής τάσης προς τη γείωση του αλυσοειδούς μονωτήρα. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν

συγκεντρωτικά γραφήματα τα οποία εμπεριέχουν γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν την ένταση και το δυναμικό κατά μήκος μιας γραμμής κάθε φορά. Οι γραμμές αυτές έχουν μήκος ίδιο με το μήκος της αλυσίδας και είναι παράλληλες προς αυτή. Από τα γραφήματα αυτά φαίνεται ότι καθώς απομακρυνόμαστε σταδιακά από τον αλυσοειδή μονωτήρα, το δυναμικό και η ένταση του πεδίου μειώνονται, όπως αναμενόταν. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος της γραμμής που διέρχεται από το κέντρο του αλυσοειδούς μονωτήρα μειώνεται από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα και σχηματίζει δέκα κορυφές, όσες και ο αριθμός των δισκοειδών μονωτήρων. Οι κορυφές αυτές παρουσιάζονται στην περιοχή του μονωτικού υλικού σε κάθε δισκοειδή μονωτήρα, αφού αυτό έχει τη μικρότερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με το cap, το pin και το τσιμέντο. Φυσικά, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνει μηδενική τιμή εντός των αγώγιμων μερών (cap και pin) της αλυσίδας. Παρατηρείται, όμως, μια μικρή αύξηση της κορυφής της έντασης στους δύο τελευταίους μονωτήρες και ειδικά στο γειωμένο. Η ύπαρξη των παράσιτων χωρητικοτήτων προς γη και προς τον αγωγό υψηλής τάσης 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. Κατά μήκος της ίδιας γραμμής παρατηρούνται απότομες μειώσεις του δυναμικού στις μη αγώγιμες περιοχές, δηλαδή στο τσιμέντο και ειδικά στην πορσελάνη, γεγονός που οφείλεται στις μικρές τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς των υλικών αυτών. Η ένταση του πεδίου κατά μήκος της γραμμής που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις της κάθε αλυσίδας, παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που η γραμμή διαπερνά τις πτυχώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μονωτικό υλικό (πορσελάνη ή γυαλί), από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι πτυχώσεις, έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον περιβάλλοντα αέρα και έτσι, σε αυτό παρατηρείται μείωση της έντασης του πεδίου. Το δυναμικό κατά μήκος της γραμμής που αγγίζει τις εξωτερικές πτυχώσεις της κάθε αλυσίδας, μειώνεται σχεδόν γραμμικά με κατεύθυνση από το μονωτήρα υψηλής τάσης προς το γειωμένο μονωτήρα. Όμως, εκεί που η γραμμή διέρχεται από την κάθε πτύχωση, το δυναμικό διατηρείται σχεδόν σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γυάλινες/πορσελάνινες πτυχώσεις έχουν μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με τον αέρα, οπότε σε αυτές το δυναμικό μειώνεται λιγότερο

απότομα. Επιπλέον, πάνω σε yz-επίπεδο απεικονίζεται μέσω χρωματισμένων περιοχών και ιστογραμμάτων ο τρόπος που κατανέμεται η ένταση του πεδίου και το δυναμικό γύρω από τον αλυσοειδή μονωτήρα και στο εσωτερικό αυτού, αντίστοιχα. Επίσης, παρουσιάζονται και οι ισοδυναμικές γραμμές γύρω από την αλυσίδα. Κατόπιν, παρουσιάζονται συγκριτικές γραφικές μεταξύ των δύο αλυσοειδών μονωτήρων 150kV. Παρατηρήθηκε ότι όλες οι συγκριτικές γραφικές έχουν την ίδια μορφή και παρουσιάζουν κοντινές τιμές πεδίου και δυναμικού. Οι διαφορές που παρουσιάζονται στις γραφικές αυτές οφείλονται στη διαφορετική τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς για το γυαλί και την πορσελάνη ($\varepsilon_{r,\text{πορσελάνης}}$=5.5 και $\varepsilon_{r,\text{γυαλιού}}$=7), στο διαφορετικό μήκος ερπυσμού, όπου για τον κάθε πορσελάνινο μονωτήρα είναι 30.5 cm και για τον κάθε γυάλινο μονωτήρα είναι 29 cm, καθώς και στις διάφορες γεωμετρικές διαφορές μεταξύ των δύο αλυσοειδών μονωτήρων (ύψος και ακτίνα των διάφορων μερών που συνθέτουν το μονωτήρα).

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκαν τρεις αλυσοειδείς μονωτήρες 400kV: ένας πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης, ένας γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου και ένας γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης. Ομοίως με τους δύο αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω και για τους αλυσοειδείς μονωτήρες 400kV και ελήφθησαν αντίστοιχα γραφήματα και αποτελέσματα.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατόπιν συγκρίσεως των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα αντλήθηκαν από τη διπλωματική εργασία της Κυρίας Ζυγογιάννη [30]. Η σύγκριση περιορίστηκε στους αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, μιας και αυτές οι αλυσίδες μονωτήρων ήταν κοινό αντικείμενο των διπλωματικών εργασιών μας. Παρατηρήθηκε ότι, και για τους δύο αλυσοειδείς μονωτήρες 150kV, η κατανομή της τάσης που προέκυψε από την προσομοίωση δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκρινόμενη με την κατανομή της τάσης που προέκυψε από το πείραμα. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσον αφορά στην κατανομή της τάσης, έγινε αντιληπτό ότι αυτά εξαρτώνται άμεσα από την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του τσιμέντου. Στο τσιμέντο επιλέχθηκε $\varepsilon_{r,\text{τσιμέντου}}$=14. Η επιλογή αυτή έγινε κατόπιν δοκιμών σύμφωνα με τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, αλλά και λαμβάνοντας υπ'όψιν τα πειραματικά αποτελέσματα. Για

κάθε αλυσοειδή μονωτήρα 150 kV, έγινε σύγκριση της τιμής της έντασης του πεδίου σε πέντε, ενδεικτικά, θέσεις του οριζόντιου επιπέδου και σε 24 σημεία για κάθε θέση. Στις περισσότερες θέσεις παρατηρείται συστηματικό σφάλμα, διότι οι περισσότερες τιμές της έντασης που προέκυψαν από την προσομοίωση είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από το πείραμα. Οι διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές της έντασης μεταξύ του πειράματος και της προσομοίωσης οφείλονται:

- 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.
- Το μήκος του αγωγού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ήταν 2.35m, ενώ στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε αγωγός μήκους 2m.

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.

- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον καθορισμό των διαφορετικών υλικών σε μια διάταξη, καθώς σε αυτή την έκδοση του Opera-3d είναι δυνατός ο προσδιορισμός μόνο της διηλεκτρικής σταθεράς (ε_r) ή μόνο της αγωγιμότητας (σ) του κάθε υλικού. Έτσι, επιλύεται ή μόνο το ηλεκτροστατικό πρόβλημα (όπως έγινε σε αυτή τη διπλωματική) ή μόνο το πρόβλημα ροής ρεύματος, στο οποίο, όμως, το μοντέλο δεν πρέπει να περιβάλλεται από αέρα (background).

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούν τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης έναντι της δισδιάστατης προσομοίωσης:

- Η μοντελοποίηση και η ανάλυση απλών, συμμετρικών γεωμετριών σε δύο συντεταγμένες δίνει ακριβή αποτελέσματα. Όμως, για πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως οι μονωτήρες ανάρτησης, η τρισδιάστατη μοντελοποίηση παρέχει καλύτερη αποτύπωση των διαστάσεων του πραγματικού μοντέλου. Από τη σκοπιά της ανάλυσης, η τρισδιάστατη μοντελοποίηση εξασφαλίζει ότι όλες οι πληροφορίες του μοντέλου αποτυπώνονται στην προσομοίωση, ενώ στα δισδιάστατα μοντέλα δε λαμβάνεται υπ' όψιν μία συντεταγμένη.
- Στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση απαιτείται η κατασκευή ενός μόνο μοντέλου, σε αντίθεση με τη δισδιάστατη, όπου απαιτούνται μοντέλα για διαφορετικές όψεις (πρόσοψη, κάτοψη και πλάγιες όψεις), ώστε να περιγραφεί το πλήρες μοντέλο. Έτσι, για τα δισδιάστατα μοντέλα οι πολλαπλές αναλύσεις είναι αναγκαίες, αλλά αυξάνουν το χρόνο σχεδιασμού.
- Τέλος, κρυμμένες και επικαλυπτόμενες επιφάνειες οδηγούν σε λανθασμένες λύσεις. Στις δύο διαστάσεις, η παρουσία τέτοιων επιφανειών δεν μπορεί να αναγνωριστεί. Αντίθετα, στις τρεις διαστάσεις τέτοιες επιφάνειες μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν και να υποστούν τις επιθυμητές τροποποιήσεις πριν την ανάλυση.

Με τη βοήθεια του προγράμματος, πραγματοποιήσαμε μόνο ηλεκτροστατική ανάλυση (Tosca electrostatic analysis). Σε επόμενη έκδοση 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, σε μια βελτιωμένη έκδοση του Opera-3d, 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. Σε αυτή την έκδοση του Opera-3d, σε μια απόπειρα που έγινε να τοποθετηθεί ρύπανση σε έναν από τους αλυσοειδείς μονωτήρες που προσομοιώθηκαν, δημιουργήθηκε τόσο μεγάλος αριθμός τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων, που ήταν αδύνατο –υπολογιστικά- να δημιουργηθεί το πλέγμα στην επιφάνεια και στον όγκο του μοντέλου, ώστε να ληφθούν, κατόπιν, τα επιθυμητά αποτελέσματα από το Μετ-Επεξεργαστή. Εξάλλου, θα ήταν πιο δέον να γίνει η προσομοίωση με την τοποθέτηση ρύπανσης σε έκδοση του προγράμματος που θα επέλυε ταυτόχρονα και το πρόβλημα ροής ρεύματος, δηλαδή θα απαιτούσε και τον προσδιορισμό της τιμής της αγωγιμότητας για το κάθε υλικό που εμπλέκεται στη γεωμετρία και άρα, για το αγώγιμο στρώμα ρύπανσης (σταγόνες νερού ή σκόνη).

Επιπλέον, σε μελλοντικές διπλωματικές θα μπορούσε να διερευνηθεί η δυνατότητα απλοποίησης του μοντέλου ενός αλυσοειδούς μονωτήρα, αφαιρώντας έναν αριθμό δισκοειδών πτυχών ή μειώνοντας το μήκος του αγωγού υψηλής τάσης, έχοντας ως στόχο τη μη αξιόλογη μεταβολή των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου ανάλυσης και της πολυπλοκότητας του υπό σχεδίαση μοντέλου.

Βιβλιογραφία

[1] Ι. Α. Σταθόπουλος, "Υψηλές Τάσεις Ι", Εκδόσεις Συμεών.

[2] Κ.Θ. Δέρβος, "Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων", Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα 2001.

[3] Ι.Α. Σταθόπουλος, "Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων Έναντι Υπερτάσεων", Εκδόσεις Συμεών.

[4] "Βασικές έννοιες στερεάς κατάστασης", Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.ceid.upatras.gr/courses/electron/oldsite/kefalaio1.html.

[5] IEC 507, "Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems", 1991.

[6] IEC TS 62073, "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces", 2003.

[7] 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.

[8] J.S.T. Looms, "Insulators for high voltages", Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.

[9] Κ. Καγκαράκης, "Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.

[10] 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.

[11] IEC 815, "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions", 1986.

[12] T.C. Chang, "Mechanisms of flashover of contaminated insulators", Phd Thesis, Dept. of Electrical Engineering, Cambridge, M.I.T University Press 1974.

[13] Kapal Sharma, “Polymeric Insulators”, Technical article, R.E.T., Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.aset.ab.ca/pdffiles/article3.pdf.

[14] Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος: “Ανάλυση Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας με τη βοήθεια Η/Υ”, Διδάσκοντες: Ι.Α. Σταθόπουλος, Π. Γιαννοπούλου, Α. Κλαδάς.

[15] Fan YaDong, Wen XiShan, Zhang FiYu, “Simulation of Electric Field Distribution of Composite Insulator”, XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, China, August 2005.

[16] Ute Schreiber, Ursula van Rienen, “Simulation of slowly varying electric fields in high-voltage applications”, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik Institut Allgemeine Elektrotechnik, Universität Rostock, Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.it.lut.fi/mat/EcmiNL/ecmi32/art1/node1.html.

[17] 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.

[18] T. Braunsberger, A. Dziubek, W. Kodoll, U. Schumann, M.Kurrat, “PD Between Water Drops Influencing Hydrophobic Processes on SI and EP-resin Systems”, Institute for High-Voltage Technology and Electric Power Systems, Technical University of Braunschweig, Germany

[19] Weiguo Que, Stephen A. Sebo, “Electric field and potential distributions along dry and clean non-ceramic insulators”, 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_paper.pdf.

[20] WL Vosloo, JP Holtzhausen, “The electric field of polluted insulators”, Eskom/University of Stellenbosch, South Africa, Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση:http://research.ee.sun.ac.za/hvlab/download/papers/africon02_jph01.pdf.

[21] Dang ZhenPing, Peng ZongRen, “The erosion experiment and the calculation of electric field on the cracked 500 kV long-rod string composite insulator”, XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, China, August 2005.

[22] Yu Zhong, Peng ZongRen, Cao Li, “The influence of water drops on the electric field distribution and electric erosion of high voltage composite insulators”, XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, China, August 2005.

[23] 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.

[24] Ravi Gorur, Bob Olsen, Art Kroese, Fred Cook, Senthil S. Kumar, “Evaluation of critical components of non-ceramic insulators in service: Role of defective interfaces”, Final Project Report, Power Systems Engineering Research Center, PSERC Publication 04-32, August 2004.

[25] Ahmet Rumeli, Suleiman M. El-Debeiky, “Pollution flashover performance of high voltage insulators around Jeddah region”, Medical Journal of Islamic Academy of Sciences, 3:1, 1-5, 1990.

[26] Krystian Leonard Chrzan, Josef Kindersberger, “Pollution behaviour of insulators with spiral shaped sheds”, ETG Fachtagung, Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau, Germany, 8-9 March 2005.

[27] Masoud Farzaneh, Jean-Francois Drapeau, Changiz Tavakoli, Michel J. Roy, “Laboratory investigations and methods for evaluating the flashover performance of outdoor insulators on a large scale”, 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS 2002, Brno, Czech Republic, 6-9 June 2002.

[28] Vector Fields, “OPERA-3d User Guide”, Vector Fields Limited, England, November 2004.

[29] Vector Fields, “OPERA-3d Reference Manual”, Vector Fields Limited, England, November 2004.

[30] Σοφία Ζυγογιάννη, "Πεδιακή κατανομή πλησίον αλυσοειδών μονωτήρων", Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2006.