



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

**Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Κωνσταντίνος Ε. Κοντομάρης  
Φώτιος Α. Σουρτζής

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Φεβρουάριος 2005

**Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κωνσταντίνος Ε. Κοντομάρης**

**Φώτιος Α. Σουρτζής**

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2005.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Φεβρουάριος 2005

Κωνσταντίνος Ε. Κοντομάρης

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

Φώτιος Α. Σουρτζής

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.



# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	i
Περίληψη	v
Abstract	vi
Πρόλογος	vii
Ευχαριστίες	ix
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενικά στοιχεία για τους μονωτήρες	1
1.1.1 Χρησιμότητα των μονωτήρων	1
1.1.2 Διάταξη κεραμικών μονωτήρων	1
1.1.3 Διάταξη συνθετικών μονωτήρων	2
1.1.4 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τη θέση τους στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς	2
1.1.5 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης	3
1.2 Κυριότερα μονωτικά υλικά σε διατάξεις μονωτήρων	4
1.2.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών	4
1.2.2 Ιδιότητες πορσελάνης	5
1.2.3 Ιδιότητες σκληρυμένης ύαλου	5
1.2.4 Ιδιότητες πολυμερών	6
1.2.5 Ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες μονωτικών διηλεκτρικών	7
1.3 Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης στα μονωτικά υλικά	7
1.3.1 Σημασία αποφυγής της αστοχίας των μονωτήρων	7
1.3.2 Αγωγιμότητα όγκου και επιφανειακή αγωγιμότητα	8
1.3.3 Η ηλεκτρική διάσπαση	8
1.4 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες	11
1.5 Μορφές ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων	13
1.5.1 Ανάλυση του φαινομένου	13
1.5.2 Θαλάσσια Ρύπανση	13
1.5.3 Βιομηχανική Ρύπανση	13
1.6 Ρύπανση – παράγοντας αύξησης της επιφανειακής αγωγιμότητας	14

1.6.1	Επίδραση της υγρασίας σε συνδυασμό με ρύπανση _____	14
1.6.2	Ρύπανση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση _____	15
1.7	Το φαινόμενο της υπερπήδησης – φυσική ερμηνεία _____	16
1.7.1	Σχηματισμός «ξηρών ζωνών» _____	16
1.7.2	Υπερπήδηση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση _____	18
1.8	Τεχνικές αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ρύπανσης _____	19
1.9	Αρχές σχεδίασης του μονωτήρα _____	20
<b>Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση – μοντέλα υπερπήδησης _____</b>		<b>22</b>
2.1	Εισαγωγή _____	22
2.2	Μελέτες πάνω στο φαινόμενο της υπερπήδησης _____	23
2.2.1	Το μοντέλο του Obenhaus _____	23
2.2.2	Τα πειράματα των Alston και Zoledziowski σε κυλινδρικό μονωτήρα _	24
2.2.3	Το κριτήριο του Hampton _____	26
2.2.4	Η μελέτη του Wilkins σε μια επίπεδη λωρίδα από μονωτικό υλικό ____	27
2.2.5	Η αντικατάσταση των «ισοδύναμων» πλακών και κυλίνδρων από το μοντέλο των Zhicheng και Renyu _____	30
2.2.6	Ο προσδιορισμός των σταθερών του τόξου A και n από τους Ghosh και Chatterjee _____	33
2.2.7	Το μοντέλο των Dhahbi-Megrache, Beroual και Krahenbuhl _____	35
2.2.8	Το βελτιωμένο μοντέλο των Dhahbi - Megrache και Beroual _____	37
<b>Κεφάλαιο 3: Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου ____</b>		<b>40</b>
3.1	Οι δυο κατηγορίες των αριθμητικών μεθόδων _____	40
3.2	Μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου _____	41
3.2.1	Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων των Rasolonjanahary, Krahenbuhl και Nicolas _____	41
3.2.2	Η μέθοδος προσομοίωσης φορτίου των Chakravorti και Mukherjee ____	44
3.2.3	Η μέθοδος διαφορικών εξισώσεων των Skopec, Wankowicz και Sikorski	47
3.3	Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων _____	48
3.3.1	Η μέθοδος των Asenjo, Morales και Valdenegro _____	48
3.3.2	Μια απλοποίηση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων από τον Imre Sebestyen _____	51

<b>Κεφάλαιο 4: Το πρόγραμμα PC OPERA-2d</b>	54
4.1 Εισαγωγή	54
4.2 Πρόγραμμα ανάλυσης	55
4.3 Φιλοσοφία του προγράμματος	57
4.3.1 Μοντέλο στο OPERA-2d	57
4.3.2 Προ-επεξεργασία (pre-processing)	58
4.3.3 Ανάλυση	64
4.3.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)	64
4.4 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	66
4.4.1 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων	70
4.4.2 Συναρτήσεις λάθους	71
4.5 Συνοριακές συνθήκες	71
4.6 Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιεί το PC OPERA-2d	73
4.6.1 Μαγνητοστατική και δινορρεύματα	73
4.6.2 Ηλεκτροστατική	74
4.7 Στατική ανάλυση	74
4.7.1 Οι εξισώσεις που επιλύονται	75
4.7.2 Προετοιμασία για επίλυση με το OPERA-2d/St	75
4.7.3 Επίλυση προβλήματος με το OPERA-2d/St	76
<b>Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση συνθετικών μονωτήρων στο πρόγραμμα PC OPERA</b>	77
5.1 Προσομοίωση συνθετικού μονωτήρα και σύγκριση των αποτελεσμάτων	77
5.1.1 Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του μονωτήρα στο πρόγραμμα PC OPERA	77
5.1.2 Δημιουργία πλέγματος	78
5.1.3 Κατανομή του δυναμικού	79
5.1.4 Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου	84
5.2 Επίδραση της ρύπανσης στα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός συνθετικού μονωτήρα	88
5.2.1 Εισαγωγή των χαρακτηριστικών νέου μοντέλου μονωτήρα στο πρόγραμμα PC OPERA	88
5.2.2 Κατανομή του δυναμικού	90

5.2.3	Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	92
5.2.4	Επισημάνσεις σχετικά με την κατανομή της έντασης και σημασία των πτυχών _____	94
5.2.5	Εισαγωγή ρύπανσης στο μοντέλο του μονωτήρα _____	96
5.2.6	Επίδραση της ρύπανσης στην κατανομή της έντασης _____	97
<b>Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση κεραμικών μονωτήρων στο πρόγραμμα PC</b>		
	<b>OPERA</b> _____	99
6.1	Προσομοίωση πορσελάνινου μονωτήρα στήριξης _____	99
6.1.1	Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του μονωτήρα στο πρόγραμμα PC OPERA _____	99
6.1.2	Δημιουργία πλέγματος _____	100
6.1.3	Κατανομή του δυναμικού _____	101
6.1.4	Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	105
6.1.5	Εισαγωγή ρύπανσης στο μονωτήρα _____	107
6.1.6	Συμπεράσματα _____	109
6.2	Προσομοίωση αλυσίδας cap and pin μονωτήρων _____	110
6.2.1	Σημασία του συγκεκριμένου μονωτήρα _____	110
6.2.2	Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του cap and pin μονωτήρα _____	111
6.2.3	Δημιουργία πλέγματος _____	112
6.2.4	Κατανομή του δυναμικού _____	113
6.2.5	Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	115
6.2.6	Παρατηρήσεις για την κατανομή της έντασης _____	117
6.2.7	Εισαγωγή στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων _____	118
6.2.8	Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού στις τρεις εκδοχές του μοντέλου _____	119
6.2.9	Σύγκριση της κατανομής της έντασης στους τρεις μονωτήρες _____	120
6.2.10	Συμπεράσματα _____	122
<b>Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα</b> _____		123
<b>Βιβλιογραφία</b> _____		128



## *Περίληψη*

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

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση του πεδίου, διάφορα μοντέλα μονωτήρων από πορσελάνη, αλλά και από πολυμερή υλικά, προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera V10.0. Η προσομοίωση έλαβε χώρα τόσο σε ιδανικές συνθήκες, όσο και υπό την επίδραση ημιαγώγιμου στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτικού υλικού των διατάξεων. Και στις δυο περιπτώσεις καταγράφηκε και μελετήθηκε η κατανομή τόσο του δυναμικού, όσο και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Παράλληλα, ελέγχθηκε η επίδραση που ασκούν στη συμπεριφορά των μοντέλων οι διάφορες παράμετροι όπως το σχήμα του μονωτήρα, και το μέγεθος της ρύπανσης. Τέλος, προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια της μεθόδου τα αποτελέσματα που ελήφθησαν υπέστησαν σύγκριση με αντίστοιχες τιμές που είχαν προκύψει στο παρελθόν από πειραματικές μετρήσεις, καθώς και από αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού του πεδίου.

## *Λέξεις Κλειδιά*

Μαθηματικά μοντέλα, Μονωτήρας, Υπερπήδηση, Υψηλή Τάση, Ηλεκτρικό πεδίο, Προσομοίωση, Ρύπανση, Ηλεκτρικό Τόξο, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, Ηλεκτρικό δυναμικό.

## ***Abstract***

The aim of this thesis was the study of the electric field which is formed in the internal regions of an HV insulator as well as in the surrounding air in case that d.c. voltage is applied.

A number of polymeric and ceramic insulators were simulated through the field analysis computational package Opera V10.0. The simulation process was carried out under pollution-free conditions as well as under the influence of a surface pollution layer. In both cases the distribution of the electric potential and the electric stress were examined. The simulation process was carried out under pollution-free conditions as well as under the influence of a surface pollution layer. In both cases the distribution of the electric potential and the electric stress were examined. Furthermore, the effects of several parameters, such as the configuration geometry and the severity of the pollution layer, on the field distribution were examined. Finally, in order to validate the accuracy of the method, the results were compared to corresponding values which had been brought to light in previous experimental researches and analytical method calculations.

## ***Key Words***

Mathematical Models, Insulator, Flashover, High Voltage, Electric field, Simulation, Contamination, Electric Arc, Finite element method, Electric potential

## *Πρόλογος*

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική μας εργασία 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 ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται σε μονωτήρες γραμμών μεταφοράς υπό την επίδραση ή όχι ρύπανσης. Για το σκοπό αυτό μια σειρά μονωτήρων από πορσελάνη και πολυμερή υλικά προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-2d V10.0.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα είδη των μονωτήρων που μπορεί κανείς να συναντήσει στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές, καθώς και τα κυριότερα πεδία εφαρμογής τους. Ακόμα, γίνεται αναφορά στις συνθήκες, κάτω από τις οποίες είναι δυνατό να οδηγηθούν σε αστοχία οι διατάξεις των μονωτήρων, ενώ υποδεικνύεται το φαινόμενο της υπερπήδησης ως ο σημαντικότερος μηχανισμός απώλειας της μονωτικής ιδιότητας των τελευταίων. Επιπλέον, αναλύεται η επίδραση του φαινομένου της ρύπανσης ως παράγοντας που μπορεί να ευνοήσει την υπερπήδηση και προτείνονται τρόποι αντιμετώπισής του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται με χρονολογική σειρά ορισμένες από τις σημαντικότερες πειραματικές και θεωρητικές μελέτες που έχουν κατά καιρούς πραγματοποιηθεί σχετικά με το φαινόμενο της υπερπήδησης των μονωτήρων. Για κάθε μια από τις εργασίες αυτές γίνεται αναφορά στα διάφορα πειραματικά μοντέλα, καθώς και στις εξισώσεις με βάση τις οποίες μπορούν να περιγραφούν οι «κρίσιμες» συνθήκες υπερπήδησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί μια ανασκόπηση ορισμένων σημαντικών μελετών σχετικών με τις αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου σε διατάξεις μονωτήρων. Οι μελέτες αυτές διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το είδος των αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, ενώ στη δεύτερη οι μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου και οι μέθοδοι συνοριακών στοιχείων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθεται το εγχειρίδιο λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-2d V10.0. Περιγράφονται οι αλγόριθμοι λειτουργίας του, ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εντολές που αντιστοιχούν στις επί μέρους λειτουργίες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου για δυο διαφορετικά μοντέλα μονωτήρων από συνθετικό υλικό. Στο πρώτο μοντέλο παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού που προκύπτει για το μονωτήρα, καθώς και για διάφορες απλοποιημένες μορφές της διάταξής του, ενώ διαπιστώνεται ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε με εκείνα που καταγράφονται στη βιβλιογραφία. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου μελετάται η επίδραση που ασκεί ένα αγώγιμο στρώμα ρύπανσης στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Το μοντέλο που επιλέχθηκε για την εφαρμογή αυτή ήταν μια διάταξη συνθετικού μονωτήρα της εταιρίας NGK με την κωδική ονομασία 301-SC210-YJ.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετώνται ως προς την κατανομή της έντασης και του δυναμικού του ηλεκτρικού πεδίου δυο διατάξεις μονωτήρων από πορσελάνη. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου μέσα από τη σύγκριση ενός πορσελάνινου μονωτήρα τύπου στήριξης με άλλες διαφοροποιημένες μορφές του επιβεβαιώνεται η σημασία που έχει το μεγάλο μήκος ερπυσμού για τον περιορισμό του φαινομένου της υπερπήδησης. Στο δεύτερο τμήμα του κεφαλαίου μελετάται η επίδραση διαφορετικών στρωμάτων ρύπανσης στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου για μια αλυσίδα μονωτήρων τύπου cap and pin της εταιρίας NGK.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται σε συγκεντρωτική μορφή τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των μοντέλων όσον αφορά στην επίδραση που ασκούν στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου τα διαφορετικά επιφανειακά στρώματα ρύπανσης, καθώς και η απαλοιφή ορισμένων από τις δισκοειδείς πτυχώσεις της επιφάνειας των διατάξεων.

## *Ευχαριστίες*

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στους:

Κο. Ιωάννη. Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για το ενδιαφέρον και την εμπιστοσύνη που μας έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την ουσιαστική και αδιάκοπη καθοδήγηση που μας παρείχε, καθώς και για την υπομονή που έδειξε μέχρι την τελική ολοκλήρωση της εργασίας. Επίσης, την ευχαριστούμε για την παραχώρηση της υπό έγκριση ενδιάμεσης κρίσης της με θέμα «Ρύπανση Μονωτήρων» που αποτέλεσε πολύτιμο βοήθημα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κο. Ιωάννη. Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την υποστήριξη και την συνεργασία που μας παρείχε στην εργασία αυτή, όπως, επίσης, και για τις εύστοχες επισημάνσεις του σε καίρια σημεία της εργασίας.

Θέλουμε, ακόμα, να ευχαριστήσουμε τον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο Γιώργο Φώτη τόσο για τις χρήσιμες συμβουλές του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας, όσο και για το εξαιρετικά ευχάριστο και «δροσερό» κλίμα που βοήθησε να δημιουργηθεί στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλουμε 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 ιδιαίτερα σημαντικές δυσκολίες που συναντήσαμε σε κρίσιμα σημεία της προσπάθειάς μας.

Πολλά ευχαριστώ σε όλους τους συναδέλφους και φίλους που συνέβαλαν με το δικό τους τρόπο στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερα στους Νίκο Χρηστάκη και Γιώργο Μπαρούτα για τη βοήθεια αλλά και τις τεχνικές συμβουλές, όπως και στους Άρη Τσιάμα, Άγγελο Γκικόκα και Χρήστο Νάκο για τις ιδέες τους και την αντικειμενική τους κρίση τις ώρες που η συνεργασία μας έφτανε στα όρια.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη που μας παρείχαν και την κατανόησή τους όλο αυτό το διάστημα.

# **Κεφάλαιο 1**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Γενικά στοιχεία για τους μονωτήρες**

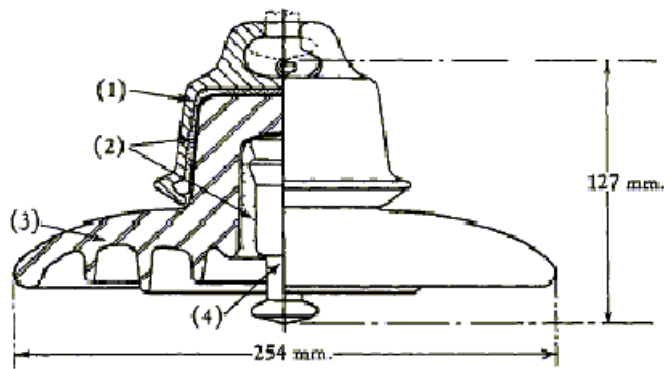
#### **1.1.1 Χρησιμότητα των μονωτήρων**

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [1]. Το πιο συνηθισμένο πεδίο εφαρμογής τους είναι τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν ρευματοφόρους αγωγούς [2].

Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους οι μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις πάνω από 20 kV διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: σε κεραμικούς (από πορσελάνη ή γυαλί) και σε συνθετικούς (από πολυμερή υλικά).

#### **1.1.2 Διάταξη κεραμικών μονωτήρων**

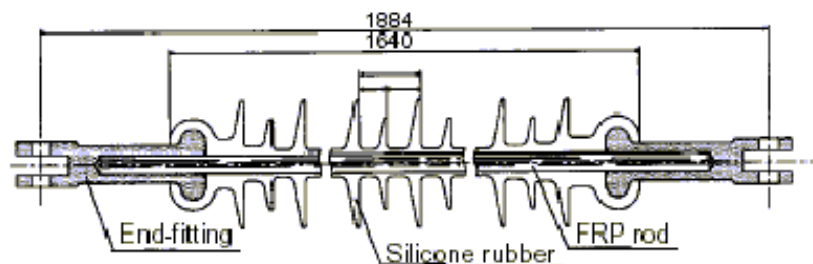
Η διάταξη ενός τυπικού κεραμικού *cap and pin* μονωτήρα αποτελείται από το δισκοειδές κέλυφος του μονωτικού υλικού, στην κορυφή του οποίου εφαρμόζεται γαλβανισμένη θήκη (*cap*) και στο εσωτερικό του οποίου εφαρμόζεται μεταλλικός πείρος (*pin*). Τα τρία τμήματα της διάταξης συγκολλούνται με τσιμέντο. Η διάταξή τους αυτή επιτρέπει τη δημιουργία αλυσίδων μονωτήρων στις οποίες ο πείρος του ενός εφαρμόζει στη θήκη του επόμενου. Ένας χαρακτηριστικός *cap and pin* μονωτήρας διακρίνεται στο Σχήμα 1.1. Στην κάτω επιφάνεια του μονωτικού υλικού διακρίνονται πτυχώσεις, προκειμένου να αυξάνεται το μήκος της διαδρομής επί της επιφάνειας του μονωτήρα ανάμεσα στους δύο μεταλλικούς ακροδέκτες του. Η συντομότερη τέτοια διαδρομή ονομάζεται μήκος ερπυσμού (*leakage path*) και, με μεγαλύτερη ακρίβεια, ορίζεται ως το μήκος της εξωτερικής ημιπεριμέτρου του μονωτικού υλικού σε επίπεδο τομής διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα [1].



Σχήμα 1.1 Τυπικός cap and pin μονωτήρας (1): Γαλβανισμένη μεταλλική θήκη(cap), (2): Τσιμέντο, (3): Πορσελάνη, (4): μεταλλικός πείρος (pin)

### 1.1.3 Διάταξη συνθετικών μονωτήρων

Αντίστοιχα, μια διάταξη ενός τυπικού συνθετικού μονωτήρα φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Σ' αυτήν την περίπτωση η διάταξη του μονωτήρα είναι πιο απλή και αποτελείται από 4 μέρη: τον κορμό από ινώδες γυαλί (*fiberglass*), ένα περίβλημα του κορμού από πολυμερές υλικό, τις χαρακτηριστικές δισκοειδείς πτυχώσεις κατά μήκος του κορμού από το ίδιο πολυμερές υλικό και, τέλος, δυο μεταλλικούς ακροδέκτες στο επάνω και στο κάτω μέρος της διάταξης (*metal end fittings*) [3].



Σχήμα 1.2: Τυπικός συνθετικός μονωτήρας

### 1.1.4 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τη θέση τους στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς

Στους πυλώνες που συνδέουν τις γραμμές μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας συναντάμε τους εξής τύπους μονωτήρων ανάλογα με την εγκατάσταση (τρόπο σύνδεσης) και τον προορισμό τους:

- **Μονωτήρες ανάρτησης.** Αυτοί οι μονωτήρες χρησιμεύουν στις περιπτώσεις που η γραμμή κρέμεται από το μονωτήρα. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και αποτελούνται από μια ή δύο σειρές δισκοειδών μονωτήρων, διατεταγμένων ο ένας πάνω στον άλλο σε μορφή αλυσίδας. Το πλήθος των τελευταίων σε μία διάταξη αλύσου εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής, αλλά και από τη διηλεκτρική αντοχή που εμφανίζει ο κάθε ένας από αυτούς [1].
- **Μονωτήρες στήριξης.** Σε αυτήν την περίπτωση η γραμμή στηρίζεται πάνω στο μονωτήρα. Οι μονωτήρες στήριξης (*post type insulators*) χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών υψηλής τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες γραμμής μεταφοράς και σε μονωτήρες υποσταθμών.
- **Μονωτήρες γραμμής.** Έτσι καλούνται οι μονωτήρες που χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 70 kV.
- **Μονωτήρες διέλευσης.** 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 εγκάρσιως μέσω χωρισμάτων (τοιχών κ.α.) [1].

### 1.1.5 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης

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

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



- **Εσωτερικού τύπου** Οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους – κυρίως σε κλειστούς υποσταθμούς.

## **1.2 Κυριότερα μονωτικά υλικά σε διατάξεις μονωτήρων**

### **1.2.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών**

Ως μονωτικά σώματα ή μονωτές χαρακτηρίζονται τα υλικά που, πρακτικά, δεν εμφανίζουν καθόλου ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν εκτίθενται σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος (συνήθως θεωρούνται ως χαμηλές οι τάσεις που δεν ξεπερνούν τα 1000V). Η μη δυνατότητα εκδήλωσης ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα παραπάνω σώματα έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτά δεν υπάρχουν σε κάποια επαρκή ποσότητα ευκίνητοι φορείς ηλεκτρικού φορτίου, τέτοιοι που να επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από το εσωτερικό τους (σε αντίθεση π.χ. με τα μέταλλα). Πραγματικά, στη χημική τους σύσταση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής και, σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές, τα σωματίδια από τα οποία αποτελούνται δε μπορούν να διασπασθούν εύκολα σε φορτισμένα ιόντα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερα ιόντα από τα οποία αποτελούνται είναι κατά κανόνα δυσκίνητα, είτε στο ότι η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους είναι μεγάλη, είτε, ακόμα, στο ότι τα μόρια τους παρουσιάζουν ιδιαίτερη σταθερότητα [4].

Στην πραγματικότητα, βέβαια, είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη σε κάθε μονωτικό σώμα ενός κάποιου πλήθους προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων ή διασπάσεων που δημιουργούν ένα μικρό αριθμό φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, ο γενικός κανόνας είναι πως, χάρη στην έλλειψη αξιόλογης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίζουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων διαμέσου της μάζας τους και για να διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων [4].

### 1.2.2 Ιδιότητες πορσελάνης

Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο μονωτικό υλικό στις διατάξεις των μονωτήρων είναι η πορσελάνη. Γενικά, οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξης, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο) και, τέλος, υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα. [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 [4]. 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 [2].

### 1.2.3 Ιδιότητες σκληρυμένου γυαλιού

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

Η βελτιωμένη μηχανική αντοχή του σκληρυμένου γυαλιού συγκριτικά με την πορσελάνη επιτρέπει τη χρησιμοποίηση λεπτότερων δακτυλίων στις διατάξεις των δισκοειδών μονωτήρων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται σημαντικά το μήκος του ερπυσμού, ενώ, η ονομαστική τάση λειτουργίας του μονωτήρα μπορεί να αυξηθεί σε ποσοστό μέχρι και 40% [2].

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

Αξίζει να τονισθεί πως το εύρος της βιομηχανικής εφαρμογής του μονωτήρα από γυαλί είναι περισσότερο περιορισμένο από εκείνο του μονωτήρα πορσελάνης. Στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές η χρήση του γυαλιού, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση, περιορίζεται στους μονωτήρες τύπου “cap and pin” (ανάρτησης) ή σε εκείνους τους τύπους, όπως είναι οι μονωτικοί στύλοι στήριξης των σιδηροδρομικών δικτύων και οι στύλοι πολλαπλών κώνων που αποτελούνται από διακριτές διατάξεις δισκοειδούς μορφής [2].

#### **1.2.4 Ιδιότητες πολυμερών**

Ελαφρύτερα, αλλά και εξαιρετικά ανθεκτικά στις μηχανικές καταπονήσεις, μονωτικά υλικά είναι, γενικά, τα πολυμερή υλικά. Από αυτά, ιδιαίτερα διαδεδομένες, λόγω του χαμηλού τους κόστους, είναι οι θερμοπλαστικές εποξειδικές ρητίνες με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους λόγω του γεγονότος ότι είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε αλλοίωση της χημικής τους σύστασης υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (φωτόλυση). Μια άλλη ποιότητα πλαστικού, οι κυκλοαλειφατικές ρητίνες, παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή στη φωτόλυση και πιστεύεται ότι θα αντικαταστήσει μελλοντικά την πορσελάνη και το γυαλί στην κατασκευή των μονωτήρων. Εξάλλου, μια άλλη σημαντική κατηγορία συνθετικών μονωτικών είναι οι ελαστομερείς ρητίνες σιλικόνης, οι οποίες αντέχουν ικανοποιητικά στην καύση και δεν υπόκεινται σε μόνιμες βλάβες από τον ερπυσμό και τις μερικές εκκενώσεις (όπως οι οργανικές ρητίνες) αφού αποτελούνται από σκελετό από πυρίτιο και περιέχουν πολύ λίγο άνθρακα στη χημική τους σύσταση [4].

Η πλέον συνηθισμένη εφαρμογή των συνθετικών μονωτήρων είναι η χρησιμοποίησή τους για την ανάρτηση ή στήριξη των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στις γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται μεγάλες δέσμες αγωγών προκειμένου να περιοριστούν οι ηλεκτρικές απώλειες, οπότε τα μηχανικά φορτία είναι πολύ μεγαλύτερα από εκείνα που έχουν τη δυνατότητα να φέρουν οι συνήθεις μονωτήρες ανάρτησης γυαλιού ή πορσελάνης. Πραγματικά, οι συνθετικοί μονωτήρες πολύ δύσκολα προσβάλλονται από τις συνήθεις ηλεκτρικές βλάβες και επιδράσεις χειρισμού, ενώ είναι δυνατό να αντεπεξέλθουν σε συγκράτηση φορτίου που υπερβαίνει τους 100 τόνους. [2]

## 1.2.5 Ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες μονωτικών διηλεκτρικών

Η πορσελάνη, το μονωτικό γυαλί και τα πολυμερή υλικά αποτελούν, λοιπόν, τα διηλεκτρικά εκείνα που συναντώνται συνηθέστερα σε μια διάταξη μονωτήρα. Εκτός από την ικανότητα να διατηρούν την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να παρουσιάσουν αστοχία, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μηχανικές ιδιότητες τέτοιες που να τα καθιστούν κατάλληλα για την ανάρτηση ή στήριξη μιας σειράς στοιχείων ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (όπως είναι π. χ. οι γραμμές μεταφοράς). Στον πίνακα που ακολουθεί μπορεί κανείς να δει τις κυριότερες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών σε μια συγκεντρωτική μορφή [2].

Ιδιότητα	Μονάδα	Υαλώδης πορσελάνη	Σκληρυνμέν ο γυαλί	Πολυμερές	RBGF
Πυκνότητα	g/cm	2.3 - 3.9	2.5	0.9 - 2.5	2.1 - 2.2
Αντοχή σε εφελκυσμό	Mpa lb/in <sup>2</sup> (x10 <sup>3</sup> )	30 - 100 4.0 - 14.0	100 - 120 14.5 - 17.4	20 - 35 3.0 - 13	1300 - 1600 190 - 230
Αντοχή σε θλίψη	Mpa lb/in <sup>2</sup> (x10 <sup>3</sup> )	240 - 820 34 - 120	210 - 300 30 - 40	80 - 170 11 - 24	700 - 750 100 - 107
Συντελεστής εφελκυσμού	Gpa lb/in <sup>2</sup> (x10 <sup>3</sup> )	50 - 100 7 - 14	7.2 10.1	0.6 - 16 0.1 - 2	43 - 60 6.0 - 8.0
Θερμική αγωγιμότητα	W/m °K	1 - 4	1.0	0.17 - 0.9	0.2 - 1.2
Διασταλτικότητα (20-100 °C)	(x10 <sup>-6</sup> )/°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)	(x10 <sup>-3</sup> )	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 <sup>11</sup> - 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup> - 10 <sup>17</sup>	10 <sup>11</sup> - 10 <sup>14</sup>

Σχήμα 1.3: Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών

## 1.3 Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης στα μονωτικά υλικά

### 1.3.1 Σημασία αποφυγής της αστοχίας των μονωτήρων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται προκειμένου να αποφευχθεί η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ηλεκτρικές συσκευές καθώς και η απώλεια ενέργειας στις διατάξεις διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της δημιουργίας αγωγίμου δρόμου ανάμεσα στις γραμμές μεταφοράς και τους πυλώνες στήριξής τους. Ενδεχόμενη αστοχία των μονωτήρων, δηλαδή προσωρινή ή μόνιμη απώλεια της μονωτικής τους ικανότητας, εμφανίζεται, με

πραγματικούς όρους, με ποσοστό που κυμαίνεται από 0.1 έως 1% ετησίως [2] και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό καθώς και στη λειτουργία των δικτύων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μελέτη των φαινομένων της διάσπασης, αλλά, κυρίως, της υπερπήδησης του μονωτήρα χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

### **1.3.2 Αγωγιμότητα όγκου και επιφανειακή αγωγιμότητα**

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η εμφάνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας κάποιου βαθμού στα στερεά μονωτικά σώματα είναι πρακτικά αναπόφευκτη λόγω των προσμίξεων στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μια ιδιομορφία. Δηλαδή, εκτός από την αγωγιμότητα δια μέσου της μάζας τους, εκδηλώνεται και μια επιφανειακή αγωγιμότητα με μετακίνηση φορέων κατά μήκος της εξωτερικής τους επιφάνειας, έξω απ' το κυρίως σώμα. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο. Για διάκριση, οι αντίστοιχες ειδικές αγωγιμότητες ονομάζονται ειδική αγωγιμότητα όγκου η πρώτη ( $\sigma$ ) και ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα η δεύτερη ( $\sigma_e$ ).

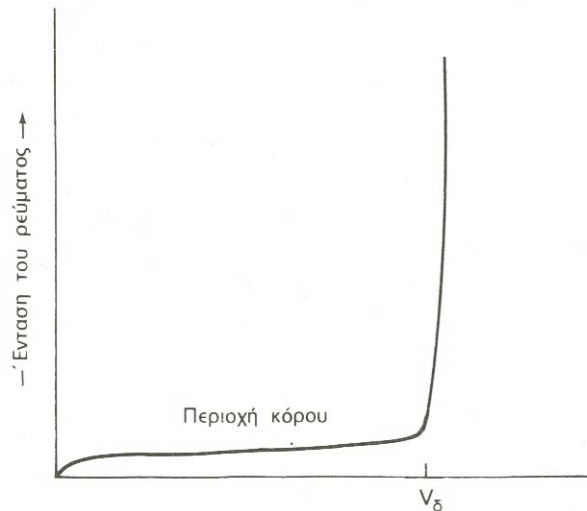
Στα περισσότερα μονωτικά υλικά η αγωγιμότητα όγκου είναι πολύ μικρή και, έτσι, η επιφανειακή τους αγωγιμότητα αποκτά συχνά κυριαρχική σημασία, ιδίως όταν ευνοείται από το γεωμετρικό τους σχήμα.

Το ρεύμα που δημιουργεί η επιφανειακή αγωγιμότητα των στερεών μονωτικών σωμάτων ονομάζεται ρεύμα ερπυσμού διότι έρπει, δηλαδή, σέρνεται πάνω στην επιφάνειά τους. Τα ρεύματα ερπυσμού είναι σχετικά σταθερά όταν οι συνθήκες δεν μεταβάλλονται. Η κατανομή, όμως, της πυκνότητας των ρευμάτων αυτών δεν είναι ομοιόμορφη διότι οι φορείς τους ακολουθούν κατά προτίμηση ορισμένους αγωγίμους δρόμους διαρροής στην επιφάνεια ή σε ρωγμές των σωμάτων [4].

### **1.3.3 Η ηλεκτρική διάσπαση**

Ως αποτέλεσμα της ύπαρξης κάποιου βαθμού ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα μονωτικά υλικά, εμφανίζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο εσωτερικό τους. Στο Σχήμα 1.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή των καμπυλών μεταβολής της έντασης του

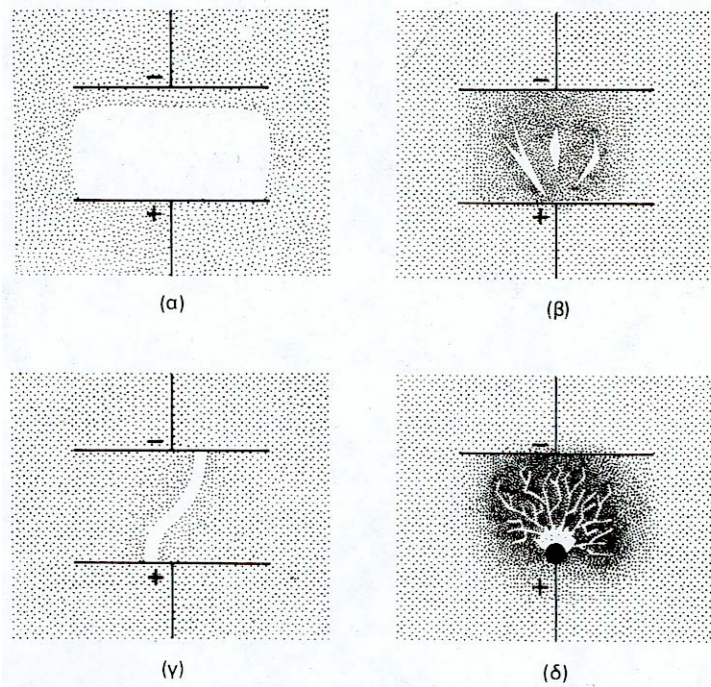
ρεύματος που διαρρέει τη μάζα ενός αέριου, υγρού ή στερεού μονωτικού σώματος σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση [4].



*Σχήμα 1.4: Η μεταβολή της έντασης του ρεύματος σε ένα μονωτικό υλικό, σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση, μέχρι την ηλεκτρική διάσπαση*

Αρχικά, υπάρχει μια περιοχή όπου η ένταση του ρεύματος παρουσιάζει μια σχετικά μικρή τιμή - περίπου ανάλογη προς την τάση - και η οποία, κυρίως, οφείλεται στα λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και στις προσμίξεις του μονωτικού σώματος. Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιοχή κόρου, όπου η ένταση του ρεύματος διατηρείται περίπου σταθερή, διότι το πλήθος των φορέων μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος που εκπέμπονται από τα ηλεκτρόδια ή που δημιουργεί το πεδίο ιονίζοντας τα συστατικά του σώματος αντισταθμίζεται περίπου από το πλήθος τους που εξουδετερώνεται στα ηλεκτρόδια (οι φορείς δια μέσου του σώματος στο οποίο επιβάλλεται τάση κατευθύνονται από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο όπου και εξουδετερώνονται λόγω αντίθετου φορτίου). Η περιοχή αυτή των τάσεων ονομάζεται και περιοχή ιονισμού. Τέλος, με την αύξηση της τάσης πέρα από μια κρίσιμη τιμή  $V_{\delta}$ , που ονομάζεται τάση διάσπασης, η ένταση του ρεύματος αυξάνει απότομα και γίνεται ανεξέλεγκτη. Εμφανίζεται, δηλαδή, το φαινόμενο της ηλεκτρικής (ή διηλεκτρικής) διάσπασης του μονωτικού. [4]

Μαζί με την εκκένωση ισχυρού ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου του μονωτικού η ηλεκτρική διάσπαση συνοδεύεται με την υπερθέρμανση του σώματος και με φωτεινά φαινόμενα



Σχήμα 1.5: Διάφορες μορφές ηλεκτρικών εκκενώσεων σε αέρια σώματα, ανάλογα με την πίεση του αερίου, τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων, την ένταση του πεδίου κλπ.

(α) Εκκένωση αίγλης, (β) Εκκένωση θυσάνου σε μορφή σπινθήρα, (γ) Εκκένωση τόξου, (δ) Στεμματόμορφη εκκένωση (κορώνα)

Ειδικότερα, στα στερεά μονωτικά υλικά συγχρόνως με την ηλεκτρική διάσπαση πραγματοποιείται και η διάτρηση του σώματος. Δηλαδή, η μεγάλη θερμοκρασία που δημιουργεί η διέλευση του πολύ έντονου ρεύματος της διάσπασης προκαλεί τοπικά την τήξη, καύση ή εξαέρωση του υλικού και έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας λεπτής τρύπας στο σώμα κατά μήκος του πεδίου. Προκαλείται, επομένως, καταστροφή του υλικού και μόνιμη απώλεια της μονωτικής του ικανότητας. Αντίθετα, στα αέρια και υγρά μονωτικά η διάσπαση δεν προκαλεί σοβαρή μόνιμη βλάβη αφού αν στη συνέχεια μειωθεί η τάση κάτω από την κρίσιμη τιμή έχουμε αποκατάσταση των μονωτικών συνθηκών.

Η πεδιακή ένταση  $E_{\delta}$ , στην οποία αντιστοιχεί η τάση διάσπασης  $V_{\delta}$ , ονομάζεται διηλεκτρική αντοχή. Δηλαδή: [4]

$$E_{\delta} = \frac{V_{\delta}}{d} \quad (1.1)$$

όπου:  $d$  είναι το πάχος του μονωτικού σώματος το οποίο υπόκειται σε διάσπαση.

Για ένα μονωτικό σώμα, σαν διηλεκτρική αντοχή ορίζεται η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου δια μέσου της μάζας του πέρα από την οποία έχουμε απώλεια της μονωτικής του ιδιότητας

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών σωμάτων είναι ένα φυσικό μέγεθος το οποίο εξαρτάται από μια σειρά από παράγοντες, όπως είναι το υλικό και το σχήμα των ηλεκτροδίων, ο ρυθμός αύξησης της επιβαλλόμενης τάσης, η μηχανική καταπόνηση του σώματος κ.ά.

#### 1.4 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες

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

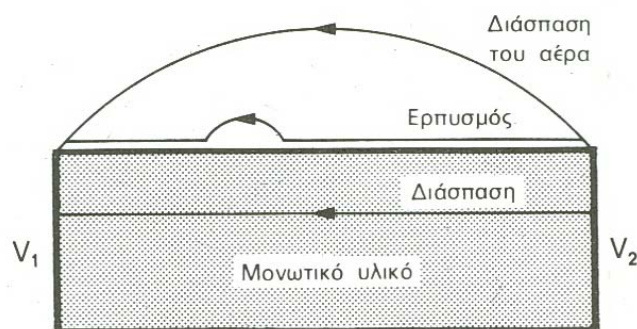
- Ο πρώτος είναι η κανονική ηλεκτρική διάσπαση του μονωτήρα (**διάτρηση**) και η εκκένωση ρεύματος δια μέσου της μάζας του, φαινόμενο που, όπως είδαμε και πιο πάνω, εκδηλώνεται όταν η διαφορά δυναμικού ξεπεράσει την τάση διάσπασης του υλικού [4]. Η διάτρηση του μονωτήρα είναι ένα εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο, αφού (όπως, επίσης αναφέρθηκε προηγουμένως), η ειδική αγωγιμότητα όγκου του μονωτικού υλικού είναι πολύ μικρότερη της ειδικής επιφανειακής αγωγιμότητάς του. Έτσι, οι ενδεχόμενες ηλεκτρικές εκκενώσεις πραγματοποιούνται ως επί το πλείστον στην επιφάνεια του μονωτήρα ή μέσω διάσπασης μορίων του αέρα γύρω από αυτήν, παρά διαμέσου του υλικού του. Διάτρηση, βέβαια, μπορεί να επιτευχθεί και μέσα σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, εφόσον, όμως, η επιβαλλόμενη τάση είναι κρουστική, μεγάλης τιμής και μεγάλης κλίσεως μετώπου (π.χ. κεραυνοπληξία) [1].
- Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να επέλθει απώλεια της μόνωσης σε μια διάταξη μονωτήρα είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού ρεύματος ερπυσμού πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Το ρεύμα ερπυσμού μπορεί να εκτείνεται σε όλο το μήκος της επιφάνειας του μονωτικού ή, συνήθως, σε διάφορα μέρη της που συνδέονται με μικρά ηλεκτρικά τόξα. Μάλιστα, τα δημιουργούμενα κατά



την υπερπήδηση ηλεκτρικά τόξα έρχονται σε επαφή με το στερεό μονωτικό καθορίζοντας, ταυτόχρονα, (κατά ένα ποσοστό τουλάχιστο 50%) την “οδό διέλευσης” νέου ηλεκτρικού τόξου που, ενδεχόμενα, θα λάβει χώρα στο μέλλον. Για αυτό το λόγο, συνήθως, εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή κερατίδια με τα οποία “υποδεικνύεται” στο ηλεκτρικό τόξο η οδός διέλευσής του, μακριά από το στερεό μονωτικό [4].

- Όταν η μεταξύ των δύο ακρότατων σημείων του μονωτήρα επιβαλλόμενη τάση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, σημειώνεται υπερπήδηση (*flashover*) του μονωτήρα, δηλαδή γεφύρωση του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα [1].

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η υπερπήδηση επέρχεται εν μέρει λόγω επιφανειακών εκκενώσεων, ερπυσμών επί της επιφάνειας του μονωτήρα, και εν μέρει λόγω διασπάσεως στρωμάτων αέρα [1]. Γι’ αυτό το λόγο τα δύο τελευταία φαινόμενα αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο [4]. Αξίζει, εδώ, να επισημάνουμε το γεγονός ότι, από τα παραπάνω, τα πλέον συνήθη φαινόμενα είναι η υπερπήδηση των μονωτήρων από επιφανειακό ρεύμα ερπυσμού ή μέσω εναέριου ηλεκτρικού τόξου. Η εξήγηση είναι προφανής και έγκειται στο γεγονός ότι το σώμα του μονωτήρα έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα και από το υλικό στην επιφάνειά του. Έτσι, τα τελευταία αποτελούν προσφορότερο αγωγίμο δρόμο διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 1.6: Η απώλεια της μονωτικής δράσης ενός στερεού μονωτικού μπορεί να γίνει με ηλεκτρική διάσπαση του υλικού ή με υπερπήδηση που εκδηλώνεται με ρεύμα ερπυσμού και με διάσπαση στον αέρα

## **1.5 Μορφές ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων**

### **1.5.1 Ανάλυση του φαινομένου**

Ο όρος ρύπανση για τους μονωτήρες των δικτύων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται στην επικάθηση ακαθαρσιών σε ολόκληρη την επιφάνειά τους.

Γενικά, οι μορφές της ρύπανσης μονωτήρων μπορούν να ταξινομηθούν σε αρκετές κατηγορίες, όπως: θαλάσσια ρύπανση, βιομηχανική ρύπανση, μικτή ρύπανση (που είναι το αποτέλεσμα της συνύπαρξης των δύο παραπάνω μορφών) ή, ακόμα, και ερημική ρύπανση – μορφή ρύπανσης που συναντάται σε περιοχές ερήμου που πολλές φορές οι επικαθήσεις περιέχουν αλάτι (η τελευταία, αυτή, μορφή δεν υπάρχει στη χώρα μας). Από αυτές, πιο σημαντικές είναι η θαλάσσια και η βιομηχανική ρύπανση [5].

### **1.5.2 Θαλάσσια Ρύπανση**

Είναι η βασικότερη μορφή ρύπανσης στη χώρα μας, όπως και σε πολλές άλλες μεσογειακές χώρες, λόγω της μεγάλης ακτογραμμής αλλά και του γεγονότος ότι τόσο μεγάλα αστικά κέντρα, όσο και τα βιομηχανικά συγκροτήματα είναι κατά κανόνα συγκεντρωμένα κοντά στις ακτές.

Το φαινόμενο της θαλάσσιας ρύπανσης δεν παρουσιάζεται, όμως, μόνο σε παραθαλάσσιες περιοχές. Μπορεί, επίσης, να εμφανιστεί και στην ενδοχώρα, σε περιοχές που βρίσκονται σε μικρές ή ακόμα και σε σημαντικές αποστάσεις από ακτές στις οποίες η παραλία είναι ανοικτή και επικρατούν σφοδροί άνεμοι με κατεύθυνση από τη θάλασσα προς τις μεσόγειες περιοχές σε συνδυασμό και με άλλες ειδικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες, θερμοκρασίας, ανέμου, υγρασίας κλπ. [5]

### **1.5.3 Βιομηχανική Ρύπανση**

Η μορφή αυτή της ρύπανσης οφείλεται σε στερεά κατάλοιπα βιομηχανικών συγκροτημάτων που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα, χωρίς προηγουμένως να έχουν υποστεί χημικές διεργασίες καθαρισμού. [5]

Η προέλευση των κατάλοιπων αυτών μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις μορφές της βιομηχανικής δραστηριότητας (χημική ή μεταλλουργική βιομηχανία, τσιμεντοβιομηχανία κ.λ.π.) και επικάθονται σε ολόκληρη την επιφάνεια των μονωτήρων, δημιουργώντας, έτσι, ένα στερεό λεπτό επίστρωμα.

Πέρα, όμως, από τη βιομηχανική και τη θαλάσσια ρύπανση, στις μεγάλες πόλεις παρουσιάζεται το φαινόμενο της ρύπανσης των μονωτήρων λόγω των καυσαερίων, τόσο των αυτοκινήτων, όσο και των κεντρικών θερμάνσεων των κτιρίων [5].

## **1.6 Ρύπανση – παράγοντας αύξησης της επιφανειακής αγωγιμότητας**

Εξαιτίας της ρύπανσης η αγωγιμότητα που παρουσιάζει στην επιφάνειά του το μονωτικό υλικό της διάταξης του μονωτήρα είναι δυνατόν, υπό προϋποθέσεις, να αυξηθεί αρκετά. Εκτός από τις διάφορες ακαθαρσίες (αδρανής ορυκτή ύλη, ηλεκτρικά αγωγήμη σκόνη, διαλυτά άλατα στο νερό κ. α.) που, όπως είδαμε πριν, επικάθονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, τα ιόντα που συγκεντρώνονται σ' αυτήν, και τα οποία θα προκαλέσουν την όποια αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας, είναι δυνατό να προέρχονται και από την ίδια τη χημική δομή των στερεών αυτών (όπως π.χ. τα ιόντα νατρίου του κοινού γυαλιού) [4].

### **1.6.1 Επίδραση της υγρασίας σε συνδυασμό με ρύπανση**

Γενικά, το στρώμα της ρύπανσης, που οφείλεται σε σωματίδια και ουσίες που επικάθονται στην επιφάνεια του μονωτήρα, δεν είναι από μόνο του ιδιαίτερα αγωγίμο. [6] Δηλαδή, όταν εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού στα μεταλλικά άκρα ενός μονωτήρα του οποίου η επιφάνεια είναι ξηρή, τότε, το αγωγίμο στρώμα ρύπανσης διαρρέεται από ένα ρεύμα πολύ μικρής έντασης (που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο) [7]. Ωστόσο, αν στην επιφάνεια του μονωτήρα αναπτυχθεί υγρασία (λόγω ομίχλης, πάχνης κ.α.), τότε, το στρώμα αυτό γίνεται ιδιαίτερα αγωγίμο και μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του μονωτήρα. [6] Συγκεκριμένα, όταν η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερη από 70 – 80%, τότε η επιφανειακή αγωγιμότητα των περισσότερων μονωτικών σωμάτων αποκτά εξαιρετικά μεγάλες τιμές. Το κοινό γυαλί, για παράδειγμα, έχει σε ξηρή ατμόσφαιρα (με σχετική υγρασία περίπου 20%) ασήμαντη επιφανειακή αγωγιμότητα

της τάξης του  $10^{-13} \Omega^{-1}$ . Σε υγρασία, όμως, της τάξης του 70% η επιφανειακή αγωγιμότητα του γυαλιού ανεβαίνει στο  $10^{-11} \Omega^{-1}$  όταν η επιφάνειά του είναι καθαρή και στο  $10^{-8} \Omega^{-1}$  περίπου όταν είναι ακάθαρτη, δηλαδή 100.000 φορές μεγαλύτερη από του καθαρού γυαλιού σε καθαρή ατμόσφαιρα [4]. Στην τελευταία, αυτή, περίπτωση είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός επιφανειακού ρεύματος ερπυσμού αρκετές τάξεις μεγέθους ισχυρότερο από εκείνο που διαρρέει την ξηρή επιφάνεια [7]. Βλέπουμε, λοιπόν, πως η συνύπαρξη ακαθαρσιών και δροσιάς ή ομίχλης αποτελεί δυσμενέστατη συνθήκη λειτουργίας των μονωτήρων. Έχει, μάλιστα, διαπιστωθεί ότι ο συνδυασμός υγρασίας και ρύπανσης μπορεί να υποβιβάσει τη μονωτική ικανότητα των μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς σε ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 40% και 80% [1].

Βέβαια, πέρα από καθεαυτό το συνδυασμό υγρασίας και ρύπανσης, πρέπει να συνεκτιμηθεί ως προς την αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας και η προδιάθεση του μονωτικού υλικού να διαβρέχεται από την υγρασία και να ευνοεί, έτσι, το σχηματισμό του λεπτού επιφανειακού αγωγίμου στρώματος. Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό που σχετίζεται με αυτή την προδιάθεση είναι η **υγροσκοπικότητα**, δηλαδή η τάση να απορροφάται υγρασία από το περιβάλλον [4].

### 1.6.2 Ρύπανση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση

Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι όταν στα άκρα των μονωτήρων η εφαρμόζεται συνεχής τάση, τότε, λόγω της ηλεκτροστατικής έλξης που ασκείται στα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, η επικάλυψη ρύπανσης πάνω στην επιφάνεια τους είναι πολύ εντονότερη τους απ' ό,τι όταν η τάση είναι εναλλασσόμενη. Η άποψη αυτή μπορεί να επιβεβαιωθεί από ένα πλήθος πειραματικών μελετών. Πραγματικά, το 1957, οι Gertsik, Korsunter και Nikolski σε πειράματα που διεξήγαγαν σε κλειστό χώρο κατέγραψαν πως οι μονωτήρες που λειτουργούσαν σε d.c. τάση συνέλεξαν τη διπλάσια ποσότητα ρύπανσης στην επιφάνειά τους απ' ό,τι παρόμοιοι μονωτήρες που λειτουργούσαν υπό τάση a.c.. Στη συνέχεια, όμως, διαπίστωσαν ότι για μονωτήρες που έχουν καλυφθεί με τεχνητή ρύπανση έτσι ώστε να παρουσιάζουν την ίδια πυκνότητα ρυπαρής ύλης στην επιφάνειά τους, παρουσιάζεται πολύ μικρή διαφορά ανάμεσα στη θετική d.c., στην αρνητική d.c. και στη μέγιστη a.c. τιμή της τάσης υπερπήδησης. Θεωρήθηκε, δηλαδή, σαν κύρια αιτία για την αυξημένη

αστοχία των μονωτήρων υπό συνεχή τάση η επιπλέον ποσότητα ρύπανσης που επικάθεται σε αυτούς [8].

Σε μεταγενέστερες δοκιμές σε ανοιχτό περιβάλλον επαληθεύτηκαν τα συμπεράσματα αυτά, αλλά διαπιστώθηκε ότι δεν είναι τόσο έντονη η συσσώρευση ρύπανσης, λόγω της ισχυρής επίδρασης του ανέμου στον καθαρισμό της επιφάνειας του μονωτήρα. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν έδειξαν ότι, όντως, στους d.c. μονωτήρες δημιουργείται ένα πολύ πιο αγωγίμο στρώμα ρύπανσης [9]. Το 1960 οι Forrest, Lambeth και Oakeshot υπολόγισαν [10] ότι το μήκος υπερπήδησης στην περίπτωση των μονωτήρων στους οποίους εφαρμόζεται συνεχή τάση είναι μεγαλύτερο κατά 30% απ' ό,τι εκείνο που αντιστοιχεί στους μονωτήρες εναλλασσόμενης τάσης, ενώ ο Lambeth ανέβασε το ποσοστό αυτό σε 60% 6 χρόνια αργότερα [11].

## **1.7 Το φαινόμενο της υπερπήδησης – φυσική ερμηνεία**

### **1.7.1 Σχηματισμός «ξηρών ζωνών»**

Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης του φαινομένου της υπερπήδησης, ο ιδιαίτερος τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι διαφορετικοί παράγοντες (ρύπανση, υγρασία, διαφορά δυναμικού στα άκρα του μονωτήρα, ένταση πεδίου κατά μήκος της επιφάνειάς του) μπορεί να περιγραφεί με τα εξής βήματα: Η ακάθαρτη επιφάνεια του μονωτήρα αρχίζει να γίνεται αγωγίμη, καθώς η υγρασία επικάθεται πάνω στα ευδιάλυτα συσσωρευμένα άλατα (π.χ. NaCl, MgCl<sub>2</sub>) [5]. Σ' αυτήν την περίπτωση, σε ορισμένες περιοχές της επιφάνειας του μονωτικού υλικού η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται τοπικά, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε διασπάσεις του αέρα όταν η τιμή της υπερβεί την διηλεκτρική αντοχή (*electric strength*) των μορίων του. Οι διασπάσεις αυτές εξελίσσονται σε εκκενώσεις υπό τη μορφή ηλεκτρικού τόξου που «γεφυρώνει», δια μέσου του αέρα, περιοχές της επιφάνειας του μονωτήρα. Οι εκκενώσεις αυτές διατηρούνται λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το μη-γεφυρωμένο μέσω των τόξων, ρυπαρό τμήμα της επιφάνειας. Ταυτόχρονα, λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται στα μέρη της επιφάνειας του μονωτήρα όπου καταλήγουν τα ηλεκτρικά τόξα - αλλά και στα γειτονικά τους σημεία - το στρώμα της ρύπανσης ξηραίνεται (έχουμε εξάτμιση της υγρασίας) και εκφυλίζεται σε «μη

αγώγιμο» προκαλώντας, έτσι, τη δημιουργία «ξηρών ζωνών». Προκειμένου η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος να συνεχιστεί θα πρέπει το «πέρας» των εναέριων εκκενώσεων να μετατοπιστεί κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα μέχρις ότου το τελευταίο να συναντήσει κάποιο τμήμα του στρώματος της ρύπανσης στο οποίο να υπάρχει υγρασία. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι εκκενώσεις μπορούν να επιμηκυνθούν και, τελικά, να οδηγήσουν σε υπερπήδηση του μονωτικού υλικού στην περίπτωση που γίνει δυνατό να καλύψουν όλο το μήκος του (τότε, η εκκένωση «ξεκινάει» από το ένα ηλεκτρόδιο της διάταξης και «καταλήγει» στο άλλο παρακάμπτοντας το μονωτικό υλικό) [6].

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η δημιουργία ξηρών ζωνών εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και όχι από το είδος του (κοινός, ομίχλης κλπ.).

Παραμένει, ωστόσο, ένα βασικό ερώτημα σχετικά με το πότε μπορεί η επιμήκυνση των ηλεκτρικών τόξων να οδηγήσει σε υπερπήδηση του μονωτήρα και πότε όχι. Πάνω στο θέμα αυτό, ο Shkuropat σε μια εργασία του το 1957 [12] διατύπωσε ένα κριτήριο προκειμένου να εξηγήσει το φαινόμενο της προοδευτικής επιμήκυνσης των ηλεκτρικών τόξων που δημιουργούνται στην επιφάνεια του μονωτήρα. Το κριτήριο αυτό, το οποίο υιοθετήθηκε και από πολλούς άλλους έγκυρους μελετητές στη συνέχεια, στηρίζεται στην άποψη ότι η εκκένωση τείνει να μετακινηθεί προς το σημείο εκείνο στο οποίο ο βαθμός κατανάλωσης ενέργειας είναι μέγιστος. Έτσι, θεωρώντας δεδομένη τη σχέση ανάμεσα στην τάση στα άκρα του μονωτήρα και του ρεύματος που τον διαρρέει, αλλά και το ότι η αντίσταση που παρουσιάζει το στρώμα υγρής ρύπανσης ελαττώνεται όσο αυξάνει το μήκος της εκκένωσης, μπορεί να υπολογιστεί μια κρίσιμη τιμή του ρεύματος. Σε περίπτωση που το ρεύμα υπερβεί την τιμή αυτή, τότε η ισχύς που παίρνουμε από την τροφοδοσία αυξάνεται με το μήκος της εκκένωσης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η ισχύς μειώνεται με το μήκος της εκκένωσης. Έτσι, αν  $x$  είναι το μήκος της εκκένωσης, μετακίνηση της εκκένωσης θα συμβεί όταν:

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (1.2)$$

Αν η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της διάταξης είναι σταθερή, τότε η (1) απλοποιείται:

$$\frac{di}{dx} > 0 \quad (1.3)$$

Οι σχέσεις (1.2) και (1.3) μπορούν να βρουν εφαρμογή και στην περίπτωση που η διάταξη του μονωτήρα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση.

Ένα ακόμη ερώτημα, που αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης από τους Rizk και Nguyen [13] είναι η σχέση που συνδέει το πλήθος των ηλεκτρικών τόξων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ενός μονωτήρα και το πλήθος των «ξηρών ζωνών» που δημιουργούνται συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζεται η θέση ότι ενώ, αρχικά, ο αριθμός των τόξων σε σειρά (έστω  $m$ ) είναι ο ίδιος με εκείνον των ξηρών ζωνών (έστω  $m_d$ ), καθώς τα τόξα γεφυρώνουν τη διαδρομή ερπυσμού του μονωτήρα, ο αριθμός τους σταδιακά μειώνεται μέχρι να παραμείνει ένα, σε συνθήκες πλήρους υπερπήδησης.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διάδοσης (propagation) των εκκενώσεων αν θεωρηθεί πως ο αριθμός των τόξων μειώνεται κατά  $\Delta m$  όταν γεφυρωθεί μια απόσταση  $\Delta x$ , τότε επιλύοντας μια σειρά εξισώσεων προκύπτει ότι:

$$m = m_d^{1 - \frac{x}{L}} \quad (1.4)$$

όπου  $x$ : το μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα που έχει γεφυρωθεί από το τόξο και  $L$ : το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα.

### 1.7.2 Υπερπήδηση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση

Κατά την εφαρμογή τάσης σταθερού μέτρου στα άκρα ενός μονωτήρα παρατηρείται μια σταθερή αύξηση του μήκους των τοξοειδών ηλεκτρικών εκκενώσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του μονωτικού υλικού. Σε περίπτωση που το μήκος αυτό υπερβεί μια κρίσιμη τιμή (συνήθως τα  $2/3$  της διαδρομής υπερπήδησης της πειραματικής διάταξης) παρατηρείται ακαριαία εμφάνιση του φαινομένου της ολικής υπερπήδησης.

Στην εναλλασσόμενη τάση το φαινόμενο της υπερπήδησης είναι πιο πολύπλοκο. Εδώ, το μήκος της τοξοειδούς εκκένωσης αυξομειώνεται ανάλογα με την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το κύριο σώμα της αναπτύσσεται όταν το μέτρο της τάσης πλησιάσει τη μέγιστη τιμή του [14].

## 1.8 Τεχνικές αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ρύπανσης

Όπως είδαμε και προηγουμένως, η επίδραση του φαινομένου της ρύπανσης όσον αφορά στη διατήρηση ή μη της μονωτικής ικανότητας μιας διάταξης μονωτήρα είναι εξαιρετικά σημαντική. Ο ρόλος που παίζει η ρύπανση, δεδομένου ότι αυτή συμπεριφέρεται σαν ένας μεταβλητός - μη γραμμικός αντιστάτης, είναι εκείνος του μέσου μέσα από το οποίο μεταφέρεται ηλεκτρικό φορτίο όταν εφαρμοστεί τάση στα άκρα του μονωτήρα. Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα (ρεύμα διαρροής) διευκολύνει τη δημιουργία μερικών εκκενώσεων, η προοδευτική αύξηση των οποίων μπορεί να οδηγήσει σε υπερπήδηση του μονωτήρα, δηλαδή πλήρη απώλεια της μονωτικής ικανότητάς του [2] όταν οι ατμοσφαιρικές και καιρικές συνθήκες που επικρατούν το επιτρέπουν.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ρύπανσης οι επικρατέστερες μέθοδοι είναι οι εξής [5]:

- **Επιλογή κατάλληλου μήκους ερπυσμού**

Έχει αποδειχθεί ότι η κρίσιμη τιμή της τάσης υπερπήδησης είναι ανάλογη του μήκους ερπυσμού. Έτσι, για συγκεκριμένες τιμές ρύπανσης, είναι δυνατό να προσδιορισθεί το ελάχιστο μήκος ερπυσμού που απαγορεύει τη δημιουργία τόξου.

- **Χρησιμοποίηση ημιαγωγικών μονωτήρων**

Με τη χρησιμοποίηση αυτού του είδους των μονωτήρων περιορίζεται η δυνατότητα δημιουργίας μερικών εκκενώσεων κατά μήκος των ξηρών ζωνών, γιατί μειώνεται η ειδική αντίσταση που παρουσιάζουν οι τελευταίες, άρα και η τάση που αναπτύσσεται σε αυτές.

- **Γρασάρισμα μονωτήρων**

Η επάλειψη του μονωτήρα με σιλικονούχο ή πετρελαϊκό γράσο είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται προκειμένου να απορροφηθούν από την επιφάνειά του τα συστατικά της ρύπανσης (όπως π.χ. το NaCl).

- **Πλύσιμο μονωτήρων**

Το πλύσιμο των μονωτήρων γίνεται τακτικά με εκτόξευση νερού υπό πίεση, έτσι ώστε να απομακρυνθούν από την επιφάνεια του μονωτήρα μικροσωματίδια –



εστίες ρύπανσης.

## 1.9 Αρχές σχεδίασης του μονωτήρα

Η ικανότητα ασφαλούς λειτουργίας του μονωτήρα (δηλαδή η αποφυγή δημιουργίας τόξων σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας) καθορίζεται πρωταρχικά από τη γεωμετρία του διηλεκτρικού και δευτερευόντως από τη θέση λειτουργίας του μονωτήρα (κατακόρυφος, κεκλιμένη ή οριζόντια) καθώς και τις ιδιότητες της επιφάνειας, όπως είναι η τραχύτητα ή η υδροφοβία (η ικανότητα μιας επιφάνειας να απωθεί το νερό) [2]

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, λοιπόν, οι αρχές που πρέπει κανείς να ακολουθήσει για το σχεδιασμό μιας διάταξης μονωτήρα είναι οι ακόλουθες: [2]

- **Μεγιστοποίηση της διαδρομής ερπυσμού.** Σε γενικές γραμμές, η αντοχή των μονωτήρων υπό βροχή είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή τους σε συνθήκες ξηρασίας. Θα ήταν, μάλιστα, αυτή πολύ μικρότερη αν οι μονωτήρες δεν είχαν τη γνωστή κυματοειδή διαμόρφωση της κάτω επιφάνειάς τους, που εξασφαλίζει πως ένα μέρος της συνολικής τους επιφάνειάς μένει αδιάβρεκτο, ενώ, παράλληλα, διακόπτεται η συνέχεια του αγώγιμου στρώματος ύδατος. Εκτός απ' αυτό, όμως, η κυμάτωση της κάτω επιφάνειας των μονωτήρων αυξάνει το μήκος ερπυσμού, διαδρομή την οποία ακολουθούν οι έρπουσες εκκενώσεις [1]. Η μεγιστοποίηση της διαδρομής ερπυσμού πρέπει, ωστόσο, να γίνεται σχεδιαστικά χωρίς να καταστρέφεται η αεροδυναμική της επιφάνειας. Το τελευταίο μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα προκειμένου να αποφεύγεται η εναπόθεση με τον άνεμο αιωρούμενων κόκκων και σταγονιδίων στην πάνω επιφάνεια του μονωτήρα, κάτι που αποτελεί και το σημαντικότερο μηχανισμό ρύπανσης [2].
- **Υποβοήθηση της αφύγρανσης των επιφανειών.** Αυτό μπορεί να γίνει αποφεύγοντας τις οριζόντιες και επίπεδες επιφάνειες. [2]
- **Διατήρηση της ταχύτητας του ανέμου κοντά στο μονωτικό.** Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει καθότι, συχνά, η ενδεχόμενη δημιουργία, κατά τη σχεδίαση, περιοχών στροβιλισμού έχει σαν αποτέλεσμα την εναπόθεση των ρύπων στα

ελικοειδή τμήματα της επιφάνειας με τους μικροκυκλώνες που τα τελευταία δημιουργούν τοπικά. [2]

- **Αύξηση της επιφανειακής αντίστασης.** Η ομοιόμορφη διάσπαση των στρωμάτων υγρασίας σε μορφή μεμονωμένων σταγόνων μπορεί να εξασφαλιστεί με κατάλληλη σχεδίαση και επεξεργασία του μονωτικού υλικού. Με τον τρόπο αυτό οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του μονωτήρα μπορούν να μειωθούν αισθητά. [2]

Παρά τις γενικές σχεδιαστικές αρχές που παραθέσαμε παραπάνω, τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί ότι «ιδανικό» σχήμα μονωτήρα δεν υπάρχει, αφού η απόδοση εξαρτάται σημαντικά από την περιεκτικότητα της επιφάνειάς του σε υγρασία. Οι συνέπειες αυτής της αρχής – ότι το «ιδανικό σχήμα» εξαρτάται από το ποσοστό υγρασίας – είναι ευρείες και επεκτείνονται μέχρι την εγκυρότητα των τεχνητών δοκιμών και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αντιμετώπισης της επιφανειακής διάσπασης [2].

## **Κεφάλαιο 2**

### ***ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ***

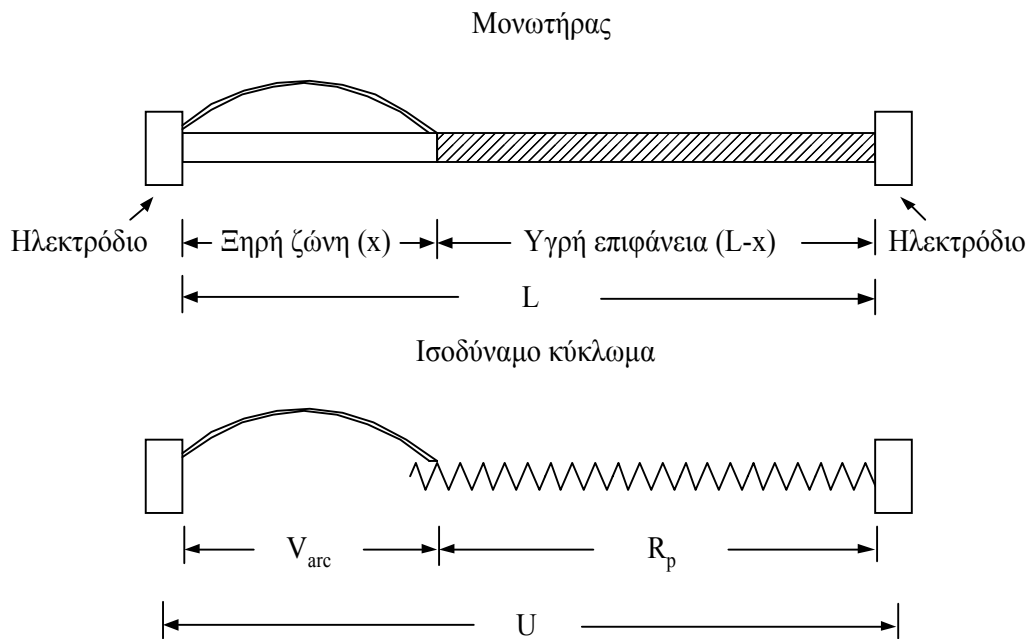
#### **2.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν ορισμένες από τις σημαντικότερες μελέτες πάνω στον κυριότερο μηχανισμό που μπορεί να προκαλέσει απώλεια της μονωτικής ιδιότητας των μονωτήρων, εκείνον της υπερπήδησής τους μέσω ηλεκτρικού τόξου. Η ανάλυση του φαινομένου της υπερπήδησης αποτελεί μέχρι και σήμερα ένα πεδίο της επιστημονικής έρευνας εξαιρετικά ενδιαφέρον από τη μία, αλλά και εξαιρετικά πολύπλοκο και δύσκολο να περιγραφεί από την άλλη. Ιστορικά, οι εργασίες που έχουν αφιερωθεί στο ζήτημα αυτό περνούν από μια διαρκή προσπάθεια για τον προσδιορισμό των κρίσιμων φυσικών μεγεθών κατά τη στιγμή της γεφύρωσης των μεταλλικών ακροδεκτών της διάταξης ενός μονωτήρα (τάση υπερπήδησης, ένταση υπερπήδησης κλπ.). Στην προσπάθεια αυτή, τα βασικότερα προβλήματα που συναντά κανείς είναι από τη μια η ανάγκη για τον προσδιορισμό του ακριβέστερου δυνατού μοντέλου με βάση το οποίο θα μπορούσε να προσομοιωθεί μια διάταξη μονωτήρα και, από την άλλη, η απαίτηση να ληφθεί υπόψη η ταυτόχρονη επίδραση μιας σειράς διαφορετικών παραγόντων στη διαδικασία της εξέλιξης του ηλεκτρικού τόξου (ορισμένοι από αυτούς είναι η ανομοιομορφία των τόξων που σχηματίζονται στην επιφάνεια των μονωτήρων, η διαρκής μεταβολή της ρύπανσης και της υγρασίας στην επιφάνεια των τελευταίων κ.ά.). Οι δημοσιεύσεις στις οποίες θα αναφερθούμε στη συνέχεια έχουν σαν κύριο αντικείμενό τους την ανάλυση του φαινομένου της υπερπήδησης σε συνθήκες συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσης, ενώ βασικό τους σκοπό αποτελεί η συνεισφορά στην αντιμετώπιση των βαθύτερων αιτιών που οδηγούν τις διατάξεις των μονωτήρων σε αστοχία. Θα παραθέσουμε τις μελέτες αυτές με χρονολογική σειρά, έτσι ώστε να μπορέσει κανείς να αντιληφθεί με σαφήνεια τη ροή της ερευνητικής προσπάθειας μέσα από τα διακριτά βήματα εξέλιξής της, κάνοντας, ωστόσο ορισμένες παραπομπές, όπου αυτό είναι απαραίτητο.

## 2.2 Μελέτες πάνω στο φαινόμενο της υπερπήδησης

### 2.2.1 Το μοντέλο του Obenhaus

Πολλές είναι οι απόψεις που κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί προκειμένου να εξηγηθεί και να αναλυθεί το φαινόμενο της υπερπήδησης των διατάξεων μονωτήρων. Στη συντριπτική τους πλειοψηφία, πάντως, οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα αυτό στηρίζονται σε ένα μοντέλο που πρώτος πρότεινε ο Obenhaus το 1958 [15]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το φαινόμενο της ανάπτυξης των τοξοειδών ηλεκτρικών εκκενώσεων στην επιφάνεια των μονωτήρων μπορεί να περιγραφεί σαν μια ηλεκτρική εκκένωση συνδεδεμένη σε σειρά με ένα στοιχείο αντίστασης  $R_p$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Το μοντέλο του Obenhaus

Ο Obenhaus υπολόγισε εμπειρικά την τάση στα άκρα του τόξου ως εξής:

$$V_{arc} = \frac{x \cdot A}{i^n} \quad (2.1)$$

όπου  $x$ : το μήκος του τόξου,  $i$ : η ένταση του ρεύματος που το διαρρέει και  $A$ ,  $n$ : σταθερές

Ο ίδιος δεν κατόρθωσε να προσδιορίσει μια ελάχιστη τιμή για την τάση στα άκρα της διάταξης ( $U_c$ ) πάνω από την οποία θα κάνει την εμφάνισή του το ηλεκτρικό τόξο. Στάθηκε, ωστόσο, ικανός να διατυπώσει μια σχέση για τη μέγιστη τιμή της  $U$

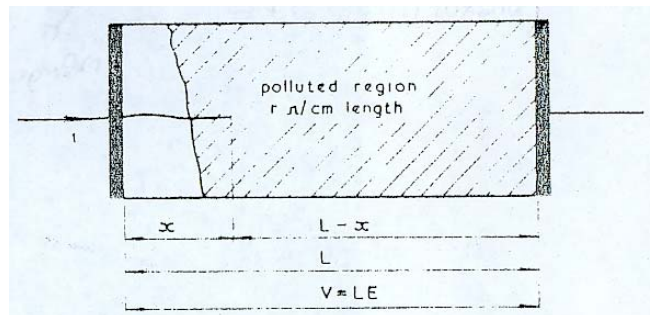
κάτω από την οποία η ανάπτυξη του τελευταίου είναι αδύνατη. Η σχέση είναι η εξής:

$$U_c = \frac{n+1}{n^{n/n+1}} \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot x^{\frac{1}{n+1}} \cdot R^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Τα πειράματα των Alston και Zoledziowski σε κυλινδρικό μονωτήρα

Μια από τις σημαντικότερες μελέτες πάνω στο φαινόμενο της υπερπήδησης θα έρθει στο φως λίγα χρόνια αργότερα, τον Ιούλιο του 1963 [6]. Στην εργασία τους, οι Alston και Zoledziowski θα προτείνουν μια μέθοδο προσομοίωσης μιας διάταξης μονωτήρα υπό ρύπανση και θα υπολογίσουν, μέσω εξισώσεων, τις κρίσιμες συνθήκες που θα πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να αποτραπεί το φαινόμενο της υπερπήδησης.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης προτείνεται η αντικατάσταση ενός πραγματικού μονωτήρα από έναν κυλινδρικό, μήκους  $L$ , με ηλεκτρόδια στα άκρα του. Το απλοποιημένο ισοδύναμο μοντέλο έχει ως εξής:



Σχήμα 2.2: Το απλοποιημένο ισοδύναμο μοντέλο των Alston και Zoledziowski

Όπως φαίνεται, μία εκκένωση υπό μορφή ηλεκτρικού τόξου μαίνεται και τείνει να επιμηκυνθεί. Η εκκένωση έχει μήκος  $x$ , ενώ η αντίσταση του στρώματος ρύπανσης – υγρασίας που καλύπτει το υπόλοιπο μέρος του μονωτικού υλικού είναι  $R$ . Αν η τάση στα άκρα της εκκένωσης είναι  $V_d$  και η τάση που εφαρμόζεται στη διάταξη είναι  $V$ , τότε προκύπτει:

$$V = V_d + i \cdot R \quad (2.3)$$

Σύμφωνα με τους Alston και Zoledziowski, το ρεύμα της εκκένωσης θεωρείται σταθερό (είναι το ίδιο που διαρρέει την εν σειρά συνδεδεμένη αγωγίμη επιφάνεια της

υγρής ρύπανσης), ενώ το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στο στρώμα της υγρής ρύπανσης είναι ομοιόμορφο όταν το μήκος του στρώματος υγρής ρύπανσης ( $L-x$ ) είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο των κυκλικών βάσεων του μονωτήρα.

Με τις σταθερές του τόξου να λαμβάνουν τιμές  $A=63$ ,  $n=0.76$  και με αντικατάσταση της τάσης στα άκρα της εκκένωσης καθώς και της αντίστασης του στρώματος υγρής ρύπανσης από κατάλληλες εκφράσεις, η εξίσωση (2.3) θα πάρει, τελικά, τη μορφή:

$$V = x \cdot 63 \cdot i^{-0.76} + i \cdot r_c \cdot (L - x) \quad (2.4)$$

όπου  $r_c$ : η σταθερή τιμή της αντίστασης που εμφανίζει το στρώμα υγρής ρύπανσης κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου ανά μονάδα μήκους.

Επιλύνοντας την εξίσωση (2.4) οι δυο ερευνητές διαπίστωσαν ότι η υπερπήδηση είναι αδύνατη εφόσον η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα είναι μικρότερη από μια ορισμένη τιμή. Πραγματικά, υπερπήδηση δε μπορεί να συμβεί αν:

$$E < 10.5 \cdot r^{0.43} \quad [V/cm] \quad (2.5)$$

Τότε, η μέγιστη τιμή του ρεύματος που μπορεί να διαρρέει το μονωτήρα είναι:

$$i_{\max} = 233 \cdot E_c^{-1.31} \quad [A] \quad (2.6)$$

όπου το  $E_c$  είναι η κρίσιμη τιμή που παίρνει το μέτρο την έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα και η οποία εκφράζεται σε *volt/cm*.

Μάλιστα, υπολογίζεται πως το μήκος που πρέπει να έχει η αρχική εκκένωση προκειμένου να μην πραγματοποιηθεί υπερπήδηση μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$x < 0.57 \cdot L \quad (2.7)$$

Οι τιμές αυτές ονομάστηκαν από τους ερευνητές «κρίσιμες τιμές», ενώ κατά την εμφάνισή τους οι ίδιοι έκαναν λόγο για «κρίσιμες συνθήκες».

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, πάντως, είναι το γεγονός ότι αν και οι ανισότητες (2.5) και (2.7) καθορίζουν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι αδύνατη η πραγματοποίηση υπερπήδησης, ωστόσο, για μια σειρά από λόγους που αφορούν στην ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη δημιουργία των «ξηρών ζωνών», οι ίδιες ανισότητες δεν περιγράφουν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα πραγματοποιηθεί

υπερπήδηση (με άλλα λόγια υπερπήδηση μπορεί να μην πραγματοποιηθεί ακόμα και αν δεν ικανοποιούνται οι (2.5) και (2.7)).

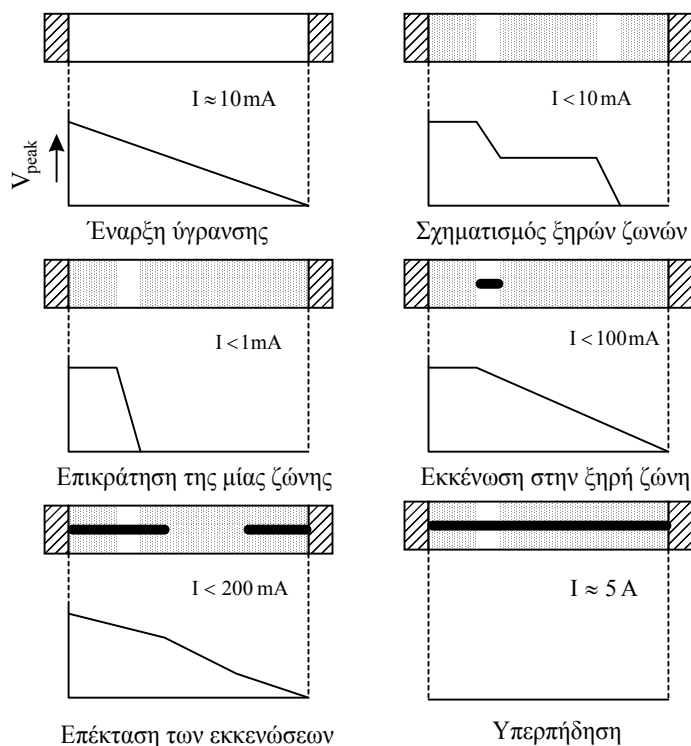
Τέλος, από την εξίσωση (2.6) υπολογίστηκε ότι η κρίσιμη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος  $i_c$  κυμαίνεται μεταξύ των 40 και των 150 mA. Η σχέση αυτή, μάλιστα, ήρθε να επιβεβαιώσει πειράματα που είχαν νωρίτερα πραγματοποιηθεί σε συνθήκες φυσικής ρύπανσης από τους Forrest, Lambeth και Oakeshott [10] και κατά τα οποία είχε προκύψει ότι η μέγιστη τιμή του ρεύματος διαρροής είναι, επίσης, της τάξης μεγέθους των 150 mA.

### 2.2.3 Το κριτήριο του Hampton

Κινούμενος σε παρόμοια λογική, ο Hampton διατύπωσε ένα χρόνο αργότερα [16] ένα κριτήριο με βάση το οποίο μπορούν να προσδιορισθούν οι αναγκαίες συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται σε όλα τα στάδια της διαδικασίας υπερπήδησης από την έναρξη ενός επιφανειακού τόξου έως την τελική διάσπαση του αέρα. Για να καταλήξει στο κριτήριο αυτό, η σημασία του οποίου υπήρξε μεγάλη για το μελλοντικό σχεδιασμό ή την επιλογή μονωτήρων που θα λειτουργούσαν σε ατμοσφαιρική μόλυνση, ο ίδιος μελέτησε τη συμπεριφορά στρωμάτων τεχνητής ρύπανσης υπό ηλεκτρική τάση.

Πιο συγκεκριμένα, λωρίδες γυαλιού καλύφθηκαν με στρώσεις διατομίτη, δεξτρίνης και άλατος και, αφού βράχθηκαν με νερό, καταγράφηκε η εξέλιξη της διάσπασης από εκκενώσεις σε ξηρές ζώνες.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατίθενται με τη μορφή εικόνων τα διακριτά στάδια της διαδικασίας τα οποία έχουν ως εξής: ομοιόμορφη κλίση τάσης, δημιουργία περισσότερων από μία ξηρών ζωνών, κυριαρχία μίας ζώνης, γεφύρωση με τόξο της μιας ζώνης, επέκταση τόξων, υπερπήδηση.



Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της διαδικασίας της υπερπήδησης

Ο Hampton έδειξε πως η οριακή συνθήκη για τη διάδοση των ηλεκτρικών τόξων είναι η ισότητα ανάμεσα στην ένταση του τόξου ( $E_a$ ) και στην ένταση του υγρού στρώματος ( $E_p$ ). Συγκεκριμένα, υποστήριξε πως, όσο η  $E_a$  είναι μεγαλύτερη της  $E_p$  ( $E_a > E_p$ ), η επέκταση του τόξου είναι αδύνατη.

Καταλαβαίνει κανείς ότι στη μελέτη του Hampton, τα πορίσματα της οποίας ήρθαν σε συμφωνία με τις θεωρητικές μελέτες των Obenhaus και Neumaerker, αλλά και με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήγαγαν οι Alston και Zoledziowski, δε συμπεριλαμβάνονται οι *ικανές* συνθήκες που επιβάλλουν την ανάπτυξη μιας πραγματικής διάσπασης σε έναν πραγματικό μονωτήρα, αλλά οι *αναγκαίες* εκείνες συνθήκες που την επιτρέπουν.

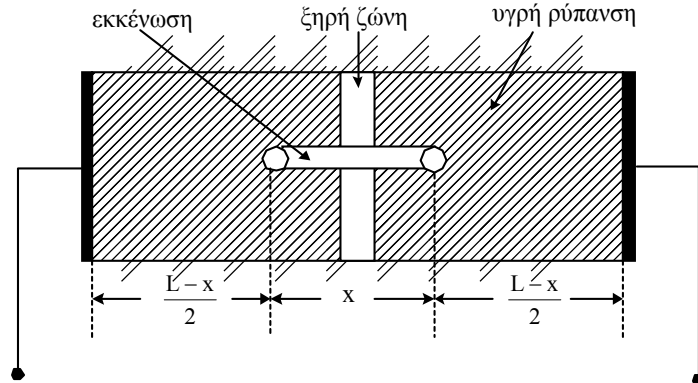
#### 2.2.4 Η μελέτη του Wilkins σε μια επίπεδη λωρίδα από μονωτικό υλικό

Το 1969 είναι η σειρά του Wilkins [7] να διατυπώσει το δικό του μοντέλο για το φαινόμενο της υπερπήδησης, μέσα από μια δική του δημοσίευση.

Εδώ, το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι εκείνο μιας επίπεδης ορθογώνιας λωρίδας από μονωτικό υλικό. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4, η εκκένωση



μαίνεται στο κέντρο μιας λωρίδας πλάτους  $a$  και μήκους  $L$  που καλύπτεται από ομοιόμορφο στρώμα ρύπανσης.



Σχήμα 2.4: Το μοντέλο υπερπήδησης κατά τον Wilkins

Η μεγάλη σημασία αυτού του μοντέλου έγκειται στο ότι μπορεί να προσομοιώσει ένα κυλινδρικό μονωτήρα διαμέτρου  $d$  με μια ορθογώνια λωρίδα πλάτους  $pd$ . Με τη σειρά της, μια αλυσίδα συνήθων δισκοειδών μονωτήρων μπορεί να προσομοιωθεί, από ένα «ισοδύναμο κύλινδρο» με μήκος ίσο με το μήκος ερπυσμού της αλυσίδας και διάμετρο ίση με τη «δραστική διάμετρο» η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$d_{eff} = \frac{L}{\int_0^L \frac{dL}{d(L)}} \quad (2.8)$$

όπου  $L$ : το μήκος ερπυσμού,  $dL$ : ένα στοιχειώδες τμήμα της διαδρομής ερπυσμού και  $d(L)$ : η διάμετρος του μονωτήρα στο  $dL$

Στο Σχήμα 2.4, η τάση που εφαρμόζεται στη διάταξη είναι:

$$V = x \cdot A \cdot i^{-n} + V_E + 2 \cdot i \cdot R \quad (2.9)$$

Στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης έχουμε:

- $x \cdot A \cdot i^{-n}$ : είναι η τάση στα άκρα της εκκένωσης. Πρόκειται για την ίδια έκφραση που χρησιμοποίησαν στο μοντέλο τους οι Alston και Zoledziowski (εξίσωση (2.4)) και στην οποία οι τελευταίοι έχουν αντικαταστήσει τις σταθερές του τόξου με  $A=63$ ,  $n=0.76$ .
- $V_E$ : είναι η πτώση τάσης των ηλεκτροδίων, η οποία είναι ανεξάρτητη του ρεύματος της εκκένωσης. Η τιμή της είναι της τάξης του 1kV.

- $R$ : είναι η σε σειρά ωμική αντίσταση που παρουσιάζει η ρυπασμένη επιφάνεια ανάμεσα σε κάθε «ρίζα» του τόξου της εκκένωσης και στο ηλεκτρόδιο που της αντιστοιχεί.

Στο μοντέλο αυτό, κάνοντας την υπόθεση ότι το πλάτος της «ξηρής ζώνης» είναι πολύ μικρό σε σχέση με το  $L$ , μπορούν να διακριθούν, επιλύοντας την εξίσωση (2.9), δυο περιπτώσεις για τον υπολογισμό των «κρίσιμων μεγεθών»:

(α) Η περίπτωση της «στενής λωρίδας», όπου το πλάτος του στρώματος ρύπανσης σε σειρά είναι μικρότερο από το μήκος του. Στην περίπτωση αυτή η τάση υπερπήδησης δίνεται από τη σχέση:

$$V_c = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \cdot \left( L + \frac{a}{2 \cdot \pi} \log \frac{S \cdot a^2}{4 \cdot \pi \cdot i_c} \right) + V_E \quad (2.10)$$

όπου  $A$ ,  $n$ : οι σταθερές του τόξου,  $r_p$ : η αντίσταση ανά μονάδα μήκους που εμφανίζεται στην επιφάνεια του μονωτήρα,  $S$ : η πυκνότητα ρεύματος στη «ρίζα» της εκκένωσης και  $I_c$ : η ένταση του ρεύματος κατά την υπερπήδηση.

Στην περίπτωση της «στενής λωρίδας» η κρίσιμη τιμή για την τάση υπερπήδησης είναι υψηλότερη από εκείνη στην οποία είχαν καταλήξει οι Alston και Zoledziowski [6]. Αντίθετα, η έκφραση για την κρίσιμη ένταση του ρεύματος υπερπήδησης είναι ίδια και στις δυο περιπτώσεις και ισούται με:

$$i_c = \left( \frac{A}{r_c} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.11)$$

(β) Ακολουθώντας την ίδια λογική και για την περίπτωση της «φαρδιάς λωρίδας», η κρίσιμη τιμή της τάσης υπερπήδησης προκύπτει (για  $x=L/2$ ):

$$V_c = \frac{i_c}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_s} \left( \log \frac{4 \cdot L^2 \cdot S}{\pi \cdot i_c} \right) + \frac{L}{2} \cdot A \cdot i_c^{-n} + V_E \quad (2.12)$$

με:

$$i_c = (A \cdot \sigma_s \cdot L)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.13)$$

όπου  $\sigma_s$ : η επιφανειακή αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου υπέστησαν συγκρίσεις με πειραματικές μετρήσεις που είχαν προηγουμένως ληφθεί για διάφορα είδη μονωτήρων τόσο από τον Von Cron [17], όσο και από τους Nasser [18] και τους Alston και Zoledziowski [19]. Το συμπέρασμα ήταν ότι τα θεωρητικά αποτελέσματα δίνουν τάσεις υπερπήδησης με ακρίβεια της ίδιας τάξης μεγέθους με εκείνη που παίρνουμε από τις πειραματικές μετρήσεις.

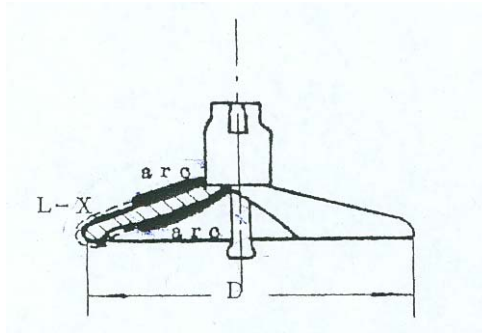
### **2.2.5 Η αντικατάσταση των «ισοδύναμων» πλακών και κυλίνδρων από το μοντέλο των Zhicheng και Renyu**

Όπως είδαμε μέχρι τώρα, το κατεξοχήν μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο πλήθος για την προσομοίωση ενός μονωτήρα υπό ρύπανση είναι εκείνο της «ισοδύναμης ορθογώνιας πλάκας» ή του «ισοδύναμου κυλίνδρου». Πραγματικά, λόγω της απλούστατης γεωμετρίας τους, ο κύλινδρος και το επίπεδο ορθογώνιο χρησιμοποιούνται συχνά για να αντικαταστήσουν ένα μονωτήρα με πολύπλοκο Σχήμα, αφού οι δυο πρώτες διατάξεις παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά στο φαινόμενο της υπερπήδησης με την τελευταία.

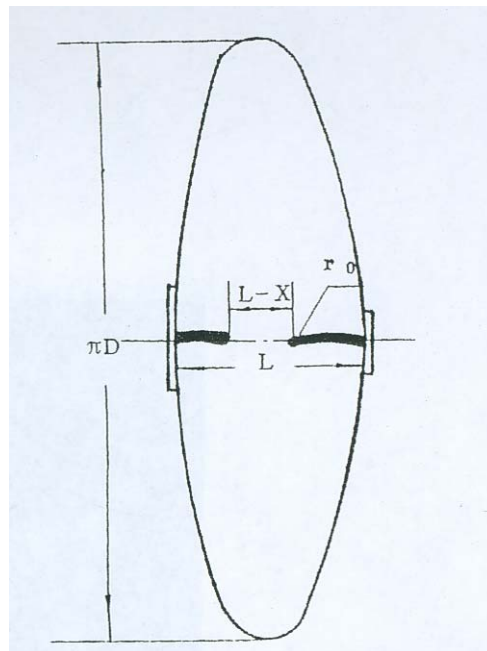
Ωστόσο, όπως έχει διαπιστωθεί από μια σειρά από ερευνητές, ο «ισοδύναμος κύλινδρος» και η «ισοδύναμη ορθογώνια πλάκα» δε μπορούν να εκφράσουν επαρκώς τις επιδράσεις στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου που έχουν ορισμένοι πιο πολύπλοκοι σχηματισμοί μονωτήρων, όπως, επίσης, δεν μπορούν να περιγράψουν επακριβώς το στάδιο των μερικών γεφυρώσεων με ηλεκτρικά τόξα κατά τη διάρκεια του φαινομένου της υπερπήδησης.

Με στόχο να απαντήσουν, λοιπόν, στην απαίτηση για την εισαγωγή ενός νέου μοντέλου πειραματικής προσομοίωσης των διατάξεων μονωτήρων, ενός μοντέλου που να αντιπαρέχεται τα μειονεκτήματα των «ισοδύναμων» ορθογωνίων και κυλίνδρων και που να αναλύει επαρκώς το φαινόμενο των μερικών εκκενώσεων, οι Zhicheng και Renyu [14] προτείνουν το 1990 μια νέα μέθοδο που παρουσιάζεται παρακάτω:

Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται ένας μονωτήρας τύπου cap and pin, ενώ στο Σχήμα 2.6 ο ίδιος μονωτήρας περιγράφεται με τη βοήθεια ενός επίπεδου μοντέλου.



Σχήμα 2.5: Μονωτήρας τύπου cap and pin



Σχήμα 2.6: Επίπεδο μοντέλο του μονωτήρα

Και στα δυο σχήματα, η μεταβλητή  $L$  εκφράζει τη διαδρομή υπερπήδησης κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, ενώ οι μεταβλητές  $D$ ,  $\pi D$  εκφράζουν τη διάμετρο του δίσκου του μονωτήρα και την περιφέρειά του αντίστοιχα. Το μήκος του ηλεκτρικού τόξου που σχηματίζεται συμβολίζεται με  $X$ , ενώ η ακτίνα της βάσης του τόξου είναι  $r_0$ .

Η αντίσταση  $R(x)$  του στρώματος ρύπανσης ανάμεσα στις ρίζες των ηλεκτρικών τόξων που σχηματίζονται μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$R(x) = \frac{1}{\pi \gamma_c} \cdot \ln \frac{L-X}{r_0} \quad (2.14)$$

όπου  $\gamma_c$ : η επιφανειακή αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης την κρίσιμη στιγμή όπου συμβαίνει η υπερπήδηση

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η σχέση ανάμεσα στην ακτίνα της βάσης του ηλεκτρικού τόξου και το ρεύμα που διαρρέει το τόξο είναι:

$$r_0 = \sqrt{\frac{I}{1.45\pi}} \quad (2.15)$$

Μάλιστα, στην ίδια σχέση είχε καταλήξει και ο Wilkins στη μελέτη του που παρουσιάσαμε παραπάνω.

Με βάση τη μέθοδο αυτή, οι Zhicheng και Renyu προχώρησαν, μέσα από μια σειρά θεωρητικών υπολογισμών, στον προσδιορισμό των κρίσιμων συνθηκών υπερπήδησης πραγματικών μονωτήρων με πολύπλοκη γεωμετρία, χωρίς το Σχήμα των τελευταίων να προσομοιωθεί από ένα ισοδύναμο κύλινδρο. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα τυχαίων ηλεκτρικών εκκενώσεων υπό μορφή ηλεκτρικών τόξων, η τάση υπερπήδησης προσδιορίστηκε ως εξής:

$$U = A \cdot X \cdot K \cdot I^{-n} + \left[ \frac{K_t \cdot I}{\pi \cdot \gamma_c} \right] \cdot \ln \left[ \frac{L - X}{K_t \cdot R_0} \right] \quad (2.16)$$

όπου  $K_t$ : ο αριθμός των τμημάτων ρύπανσης σε σειρά με τα τόξα και  $K$ : η σχέση αναλογίας ανάμεσα στο μήκος του τόξου και στη διαδρομή ερπυσμού που αντιστοιχεί σ' αυτό κατά μήκος της επιφάνειας του στρώματος ρύπανσης. Αν  $K > I$ , τότε έχουμε την εμφάνιση ενός φαινομένου κατά το οποίο το ηλεκτρικό τόξο παρεκκλίνει της πορείας του (*arc drift phenomenon*). Στην περίπτωση που  $K < I$  προκύπτει γεφύρωση του ηλεκτρικού τόξου.

Οι δυο ερευνητές θα υποστηρίξουν ότι ο πιο σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον προσδιορισμό της κρίσιμης τιμής της τάσης υπερπήδησης όταν στα άκρα του μονωτήρα υπό ρύπανση εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση είναι η συνθήκη επανεμφάνισης του ηλεκτρικού τόξου. Η συνθήκη αυτή στην περίπτωση που δεν έχουμε σβέση του ηλεκτρικού τόξου όταν η τιμή του ρεύματος που το διαρρέει πάρει την τιμή μηδέν έχει ως εξής:

$$U_m = 531 \frac{L}{I_m} \quad (2.17)$$

όπου  $U_m$  και  $I_m$  είναι τα πλάτη της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα.

Αντίθετα, αν έχουμε σβέση και, στη συνέχεια, επαναπυροδότηση του τόξου, τότε η συνθήκη είναι:

$$U_m = 1050 \frac{X_c}{I_m} \quad (2.18)$$

όπου  $X_c$ : το «κρίσιμο» μήκος του ηλεκτρικού τόξου.

Σε κάθε περίπτωση, την κρίσιμη στιγμή της υπερπήδησης θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση:

$$A \cdot X_c \cdot I_m^{-n} + R(X_c) \cdot I_m = f(I_m) \quad (2.19)$$

όπου  $f(I_m) = U_m$ : μια από τις δυο σχέσεις που εκφράζουν τη συνθήκη επανεμφάνισης ((2.17) ή (2.18)).

### 2.2.6 Ο προσδιορισμός των σταθερών του τόξου $A$ και $n$ από τους Ghosh και Chatterjee

Ήδη, από τις αρχές της δεκαετίας του '80 ορισμένοι ερευνητές είχαν επισημάνει την επίδραση που ασκεί στην τιμή της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης η χημική σύσταση του στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια ενός μονωτήρα. Ωστόσο, οι πρώτοι που κατάφεραν να διατυπώσουν ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο να περιγράφει επαρκώς τη σχέση ανάμεσα στους δυο αυτούς παράγοντες σε συνθήκες εναλλασσόμενης τάσης ήταν οι Ghosh και Chatterjee, μόλις το 1995 [20].

Στη μελέτη αυτή, προκειμένου να αναλυθεί το φαινόμενο της υπερπήδησης σε συνθήκες ρύπανσης, ένας τυπικός μονωτήρας προσομοιώθηκε, κατά τη συνήθη πρακτική, από μία επίπεδη πλάκα μήκους  $L$  και πλάτους  $a$ , ενώ, κατά την υλοποίηση του πειράματος, τα μετρούμενα μεγέθη ήταν η ενεργή τιμή της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης  $V_{ec}$ , η ενεργή τιμή του κρίσιμου ρεύματος  $I_{ec}$  και ο χρόνος υπερπήδησης  $t$ .

Τα μεγέθη αυτά μετρήθηκαν για μεταβλητό μήκος  $L$  και για μεταβλητή αντίσταση ανά μονάδα μήκους  $r_p$ . Επίσης χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά άλατα για να διαφοροποιηθεί η χημική σύνθεση της τεχνητής ρύπανσης. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε ότι το ρεύμα υπερπήδησης  $I_{ec}$  είναι ανεξάρτητο της μεταβολής του  $L$ . Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι ο χρόνος μέχρι την υπερπήδηση  $t$

εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση  $V_e$ , καθώς και από τα μεγέθη  $r_p$ ,  $L$ , αλλά και από τη χημική φύση της ρύπανσης. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος για την υπερπήδηση  $t$  μειώνεται με την αύξηση της τάσης  $V_e$ , ενώ διαπιστώθηκε ότι για κάθε διαφορετικό ηλεκτρολύτη υπάρχει μια συγκεκριμένη τιμή της  $V_e$ , που ονομάζεται  $V_{em}$ , για την οποία ο χρόνος  $t$  είναι 1ms και για κάθε περαιτέρω αύξηση της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης, η τιμή του  $t$  δεν αλλάζει.

Η σχέση, στην οποία καταλήγει το προτεινόμενο μοντέλο για την ανάλυση του φαινομένου της υπερπήδησης υπό ρύπανση σε συνθήκες εναλλασσόμενης τάσης είναι:

$$V_e = kxAI_e^{-n} + r_p(L-x)I_e + U_e \quad (2.20)$$

όπου  $V_e$ : η ενεργός τιμή της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης,  $x$ : το μήκος του ηλεκτρικού τόξου,  $I_e$ : η ενεργός τιμή του ρεύματος υπερπήδησης,  $U_e$ : η ενεργός τιμή της πτώσης τάσης των ηλεκτροδίων και

$$k = \left[ \frac{\sqrt{2}}{1.3} \right]^{-(n+1)} \quad (2.21)$$

Με βάση την εξίσωση (2.20) προκύπτουν οι σχέσεις για τις κρίσιμες τιμές της τάσης και της έντασης υπερπήδησης. Οι σχέσεις έχουν ως εξής:

$$V_{ec} = Lk^{\frac{1}{n+1}} A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.22)$$

και

$$I_{ec} = \left[ \frac{kA}{r_p} \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.23)$$

Αν  $V_e = V_{em}$ , τότε σίγουρα έχουμε υπερπήδηση και, επομένως, ισχύει:  $X \approx L$  και  $I_e = I_{ec}$ . Στην περίπτωση αυτή και με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.20) είναι δυνατός μέσω δοκιμών ο προσδιορισμός των σταθερών  $A$  και  $n$  (και κατ' επέκταση του  $k$ ) για μια σειρά από διαφορετικούς ηλεκτρολύτες. Οι τιμές που παίρνουν οι σταθερές αυτές εξαρτώνται από τη χημική σύνθεση του κάθε ηλεκτρολύτη, αφού για κάθε έναν από αυτούς οι τιμές για τα μεγέθη  $V_{em}$  και  $I_{ec}$  προκύπτουν διαφορετικές.

Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται οι τιμές που παίρνουν οι σταθερές υπερπήδησης  $A$  και  $n$

για τέσσερις διαφορετικούς ηλεκτρολύτες:

<b>Ρύπανση</b>	<b>A</b>	<b>n</b>
<b>NaCl</b>	360	0.59
<b>FeCl<sub>3</sub></b>	270	0.66
<b>CuSO<sub>4</sub></b>	450	0.49
<b>CaCl<sub>2</sub></b>	461	0.42

*Πίνακας 2.1: Σταθερές A, n για διάφορους τύπους ηλεκτρολυτών [20]*

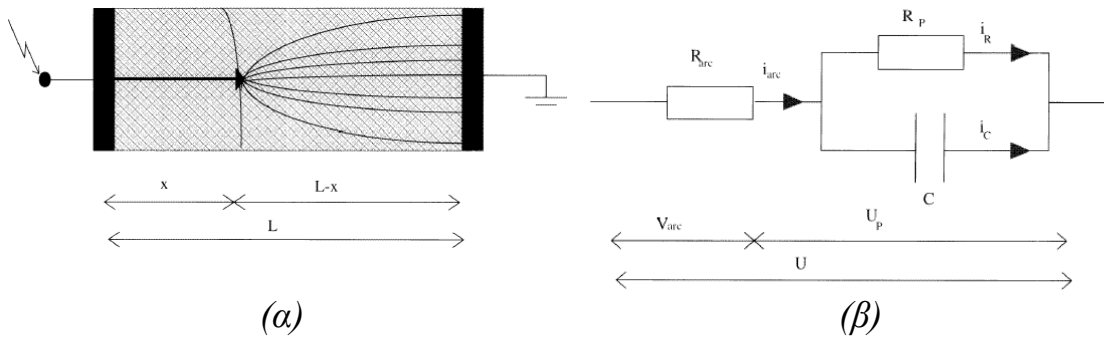
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου με πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα άλλων ερευνών [6], [7], κατέδειξε ότι οι ενδεχόμενες ανακρίβειες όσον αφορά στις προβλέψεις για τα κρίσιμα μεγέθη υπερπήδησης είναι δυνατόν να ξεπεραστούν με την επιλογή κατάλληλων σταθερών τόξου *A* και *n* για κάθε διαφορετικό είδος ρύπανσης.

### **2.2.7 Το μοντέλο των Dhahbi - Megriche, Beroual και Krahenbuhl**

Το 1996 οι Dhahbi-Megriche, Beroual και Krahenbuhl [21] θα έρθουν να επισημάνουν μια βασική αδυναμία που χαρακτήριζε τις σημαντικότερες έως τότε αναλύσεις πάνω στο ζήτημα της διάδοσης του ηλεκτρικού τόξου. Σύμφωνα με τους ισχυρισμούς τους, τα μοντέλα των Alston (1963), Hampton (1964) και Wilkins (1969), όπου το φαινόμενο της υπερπήδησης παριστάνεται μέσω μιας ηλεκτρικής εκκένωσης συνδεδεμένης σε σειρά με την αντίσταση του στρώματος ρύπανσης, παρουσίαζαν συγκεκριμένα μειονεκτήματα που τα καθιστούσαν ανεπαρκή. Η βασική ένσταση ήταν εκείνη που αφορούσε την ελλιπή ακρίβεια των υπολογισμών σχετικά με την πρόβλεψη των συνθηκών υπερπήδησης και η οποία, κατά τους τρεις ερευνητές είχε ως βασική της αιτία το γεγονός ότι σε όλα τα παραπάνω μοντέλα η φύση των μερικών τόξων που παράγονται μετά το σχηματισμό των ξηρών ζωνών θεωρούταν στατική. Ειδικά σε συνθήκες εναλλασσόμενης τάσης η έως τότε συνήθης πρακτική ήταν η μελέτη του φαινομένου να γίνεται υπό συνεχή τάση και, ύστερα, τα πορίσματά της να επεκτείνονται και στη δεύτερη περίπτωση εφαρμογής, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διαδικασία επανανάφλεξης. Έτσι, τα μοντέλα αυτά δεν ήταν δυνατόν να προβλέψουν τη συνολική χρονική εξέλιξη της διαδικασίας υπερπήδησης.



Απαντώντας στην αδυναμία αυτή, οι τρεις ερευνητές θα προτείνουν ένα νέο μοντέλο με βάση το οποίο ένας ρυπασμένος μονωτήρας, στην επιφάνεια του οποίου μαίνεται μια μερική εκκένωση, μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια συνδεσμολογία εν σειρά μιας εκκένωσης μήκους  $x$  και αντίστασης  $R_{arc}$  με μια αντίσταση κι έναν πυκνωτή συνδεδεμένους παράλληλα



Σχήμα 2.7: (α) Επίπεδο μοντέλο μονωτήρα, (β) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, η ανάπτυξη του φαινομένου της μερικής εκκένωσης δε μελετάται πάνω στην επιφάνεια ενός πραγματικού μονωτήρα, αλλά σε εκείνη μιας επίπεδης πλάκας μήκους  $L$ . Βλέπει κανείς ότι  $R_{arc}$  είναι η αντίσταση που παρουσιάζει η εκκένωση, ενώ η αντίσταση  $R_p$  και ο πυκνωτής  $C$  αντιστοιχούν στην αντίσταση και στη χωρητικότητα του στρώματος ρύπανσης, ενώ  $x$  είναι το μήκος του τμήματος της επιφάνειας της πλάκας που καλύπτει η μερική εκκένωση (ουσιαστικά, το μήκος της ξηρής ζώνης).

Αν  $\rho_p$ ,  $\epsilon$  και  $S$  είναι οι τιμές που παίρνουν η ειδική αντίσταση, η επιτρεπτότητα και το εμβαδόν της διατομής του στρώματος της ρύπανσης, αντίστοιχα, και αν  $\rho_{arc}$ ,  $s$  είναι οι τιμές της ειδικής αντίστασης του ηλεκτρικού τόξου και του εμβαδού της διατομής του, τότε η συνθήκη που πρέπει να πληρείται προκειμένου να έχουμε διάδοση της εκκένωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{x}{L} - 1 < \frac{S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}}{\alpha} (s \rho_p - S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}) \quad (2.24)$$

όπου  $\beta = 1 + \omega^2 \cdot \rho_p^2 \cdot \epsilon^2$  και  $\alpha = (\rho_{arc} \cdot S \cdot \beta - \rho_p \cdot s)^2 + \omega^2 \cdot \epsilon^2 \cdot s^2 \cdot \rho_p^4$

Με βάση την παραπάνω σχέση διακρίνονται τρεις περιπτώσεις όσον αφορά στη διάδοση ή μη του ηλεκτρικού τόξου:

1) Στην περίπτωση που

$$\frac{S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}}{\alpha} (s\rho_p - S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}) \geq 0 \quad (2.25)$$

η διάδοση του τόξου θεωρείται σίγουρη.

2) Στη δεύτερη περίπτωση, όπου

$$\frac{S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}}{\alpha} (s\rho_p - S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}) < -1 \quad (2.26)$$

το τόξο ενδεχομένως να μην προεκταθεί.

3) Τέλος, στην περίπτωση που

$$-1 < \frac{S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}}{\alpha} (s\rho_p - S \cdot \beta \cdot \rho_{arc}) < 0 \quad (2.27)$$

το τόξο είναι δυνατόν να προεκταθεί μέχρι το μήκος του να πάρει μια συγκεκριμένη τιμή, πέρα από την οποία παρουσιάζεται σβέση της εκκένωσης. Έτσι, στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε ολική υπερπήδηση της επιφάνειας του μονωτικού υλικού.

Όσον αφορά στις εκφράσεις για τις κρίσιμες τιμές της τάσης και του ρεύματος υπερπήδησης, αυτές, με βάση το μοντέλο που νωρίτερα είχαν προτείνει οι Wilkins και Albaghdadi [21], προκύπτουν ως εξής:

$$I_C = n^{1/n+1} \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left(\frac{k}{r_p}\right)^{1/n+1} \quad \text{και} \quad (2.28)$$

$$U_C = n^{1/n+1} \left(\frac{1}{(n+1)^{n+1}} + n^{n-1}\right) k^{1/n+1} r_p^{n/n+1} L \quad (2.29)$$

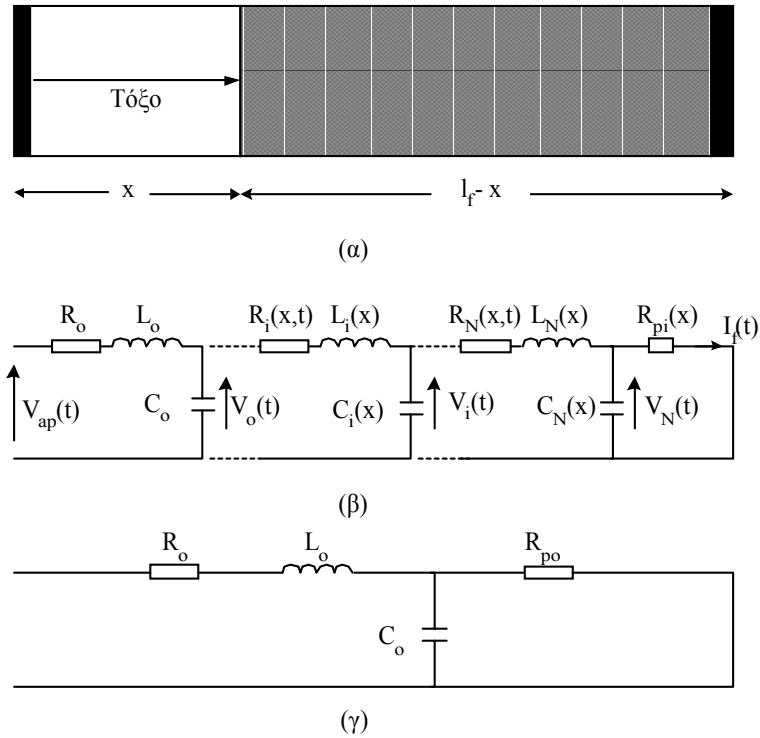
όπου  $r_p$ : η αντίσταση του που εμφανίζει το στρώμα ρύπανσης ανά μονάδα μήκους και  $k$ : μια σταθερά που εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα, το ποσοστό του περιβάλλοντος όγκου και το συντελεστή κινητικής ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε αέριο που καλύπτει τη γύρω περιοχή του μονωτικού υλικού.

### 2.2.8 Το βελτιωμένο μοντέλο των Dhahbi - Megriche και Beroual

Βασιζόμενοι στην προηγούμενη μελέτη, οι Dhahbi-Megriche και Beroual θα προχωρήσουν, λίγα χρόνια αργότερα, στην παρουσίαση και ενός άλλου δυναμικού

μοντέλου που επιτρέπει την ακόμα πιο ακριβή πρόβλεψη ολόκληρης της διαδικασίας εμφάνισης της ηλεκτρικής εκκένωσης λαμβάνοντας υπόψη του τις στιγμιαίες αλλαγές των παραμέτρων του ηλεκτρικού τόξου [22].

Στο νέο αυτό μοντέλο, ο μηχανισμός διάδοσης του ηλεκτρικού τόξου παριστάνεται με τη βοήθεια ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8:



Σχήμα 2.8: Μοντέλο για την επέκταση των εκκενώσεων κατά τους Dhabbi-Megrache και Beroual

Αν και το τόξο, στην πραγματικότητα, περιγράφεται σαν μια κυλινδρική αψίδα ακτίνας  $r_i$  και μήκους  $x_i$ , εντούτοις, το ίδιο μπορεί να προσομοιωθεί στο κυκλωματικό μοντέλο με τη μορφή βρόχων  $R_i$ ,  $L_i$  και  $C_i$  συνδεδεμένων σε σειρά. Κάθε ένας από τους βρόχους αυτούς αντιστοιχεί σε μια διακριτή προέκταση του ηλεκτρικού τόξου καθώς αυτό τείνει να διαδοθεί.

Από το κυκλωματικό μοντέλο, και με βάση το κριτήριο διάδοσης που είχε διατυπωθεί στην αρχική εργασία [21], η τάση στα άκρα του ηλεκτρικού τόξου και η ένταση του ρεύματος που το διαρρέει μπορούν να περιγραφούν από τις κάτωθι εξισώσεις:

$$V_{i-1}(t) - V(t) = R_i \cdot I_i(t) + L_i \frac{dI_i(t)}{dt} \quad (2.30)$$

$$I_i(t) = I_{i-1}(t) - C_{i-1} \frac{dV_{i-1}(t)}{dt} \quad (2.31)$$

Οι Dhahbi-Megrache και Beroual θα επισημάνουν την ύπαρξη μιας στενής σχέσης ανάμεσα στο ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το τόξο και στην ταχύτητα διάδοσής, μιας και κάθε στοιχειώδης αύξηση στην ένταση του ρεύματος συνεισφέρει σε μια αντίστοιχη στοιχειώδη προέκταση του μήκους της εκκένωσης. Η σχέση που δίνει την ταχύτητα διάδοσης του τόξου ( $v_i$ ) όταν ικανοποιείται το κριτήριο διάδοσής του είναι η εξής:

$$v_i^2 = \frac{2\beta}{\pi \cdot r_i^2 \cdot \rho} q_i \cdot E_i \quad (2.32)$$

όπου  $q_i$ : το στοιχειώδες φορτίο που μεταφέρεται μέσω του  $i$ -οστού ηλεκτρικού τόξου,  $E_i$ : η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην «κεφαλή» του τελευταίου,  $\rho$ : η πυκνότητα του αερίου μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διάδοση (σε μονάδες μάζας προς όγκο) και  $\beta$ : μια σταθερά που δείχνει την αναλογία της κινητικής ενέργειας που καταναλώνεται για την προέκταση του τόξου προς το συνολικό ποσό ενέργειας που καταναλώνεται για τον ίδιο σκοπό ( $0 \leq \beta \leq 1$ ).

Όταν το κριτήριο διάδοσης δεν ικανοποιείται, η εκκένωση δε διαδίδεται (η ταχύτητα διάδοσης του τόξου είναι μηδενική).

## Κεφάλαιο 3

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

#### 3.1 Οι δυο κατηγορίες των αριθμητικών μεθόδων

Για τον κατάλληλο σχεδιασμό και την προστασία των διατάξεων που λειτουργούν σε συνθήκες υψηλών τάσεων (π.χ. μονωτήρες) έχει μεγάλη σημασία να μπορεί κανείς να προσδιορίσει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό τους, στην επιφάνεια, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή που τις περιβάλλει. Γενικά, υπάρχουν δυο κατηγορίες αριθμητικών μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (*finite element methods*) και μεθόδους πεπερασμένων διαφορών (*finite difference methods*). Το μειονέκτημα, εδώ, είναι το γεγονός ότι για μια ανάλυση πεδίου με ανοιχτές οριακές συνθήκες οι μέθοδοι αυτές χρειάζονται ένα υπερβολικά μεγάλο πλήθος στοιχείων ή γραμμών πλέγματος προκειμένου να μοντελοποιηθεί ο χώρος και οι άπειρης έκτασης περιοχές του. Αυτός είναι και ο λόγος που οι τελευταίες εφαρμόζονται, κυρίως, για τη μοντελοποίηση διατάξεων με περιορισμένες οριακές συνθήκες (*limited boundary conditions*), όπως είναι οι μετασχηματιστές ισχύος ή οι ηλεκτρικές μηχανές.

Η δεύτερη κατηγορία των αριθμητικών μεθόδων περιλαμβάνει τη μέθοδο προσομοίωσης φορτίου (*charge simulation method*) και τη μέθοδο συνοριακών στοιχείων (*boundary element method*) ή μέθοδο προσομοίωσης επιφανειακού φορτίου (*surface charge simulation*). Στη μέθοδο προσομοίωσης φορτίου, η συνεχής πυκνότητα φορτίου στην επιφάνεια των αγωγών με οριακές συνθήκες αντικαθίσταται από πεπερασμένα εικονικά φορτία τα οποία κατανέμονται στον όγκο των τελευταίων. Στη μέθοδο συνοριακών στοιχείων, φορτία τοποθετούνται στις συνοριακές επιφάνειες καθώς και στις κοινές επιφάνειες διαφορετικών υλικών, ενώ οι πηγές των φορτίων αρχικοποιούνται με τις οριακές συνθήκες που είναι γνωστές εκ των προτέρων. Οι δύο αυτές μέθοδοι προτιμούνται σε περιπτώσεις όπου έχουμε προβλήματα «ανοιχτών» συνόρων (*open boundary conditions*) αφού δεν υπάρχει

ανάγκη να κατασκευαστεί πλέγμα για το χώρο που περιβάλλει το μοντέλο υπό ανάλυση.

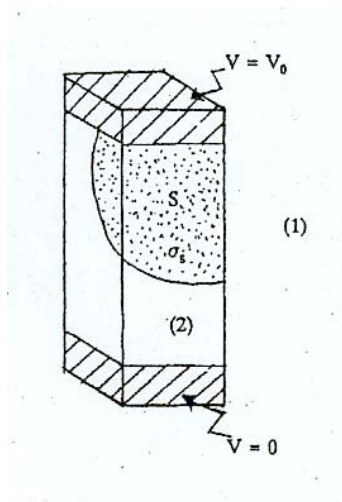
Συγκρίσεις ανάμεσα στις διαφορετικές αριθμητικές μεθόδους έχουν δείξει ότι οι προσεγγίσεις μέσω προσομοίωσης φορτίου και συνοριακών στοιχείων υπερτερούν λόγω χαμηλότερης πολυπλοκότητας και, ως εκ τούτου, μικρότερης χρονικής διάρκειας της φάσης της μοντελοποίησης, εις βάρος, ωστόσο, περισσότερου χρόνου που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η γεωμετρία της αναλυόμενης διάταξης είναι εκείνη που καθορίζει το ποια από τις μεθόδους απαιτεί το λιγότερο χρόνο και είναι, συνεπώς, η πιο συμφέρουσα [23].

## **3.2 Μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου**

### **3.2.1 Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων των Rasolonjanahary, Krahenbuhl και Nicolas**

Το 1992, ήρθε στο φως μια από τις πλέον σημαντικές μελέτες, που αφορά στις αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης πεδίων από τους Rasolonjanahary, Krahenbuhl και Nicolas [24]. Οι ίδιοι, αξιοποιώντας τα πορίσματα της ερευνητικής προσπάθειας του Huang [25, 26], θα διατυπώσουν μια ολοκληρωμένη μέθοδο οριακών εξισώσεων βάσει της οποίας μπορούν να μελετηθούν ως προς τη γεωμετρία, αλλά και τη ρύπανση, τρισδιάστατες διατάξεις μονωτήρων. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι εμφανίζεται μειωμένος αριθμός αγνώστων σε σχέση με τις υπόλοιπες προτεινόμενες αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης πεδίων (μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών, μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου).

Σύμφωνα με το μοντέλο που προτείνουν, λοιπόν, οι τρεις ερευνητές ο μονωτήρας υπό ρύπανση μπορεί να προσομοιωθεί από το μοντέλο του σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1: Το προτεινόμενο μοντέλο του ρυπασμένου μονωτήρα

Στο μοντέλο αυτό διακρίνονται δύο περιοχές του χώρου στο εσωτερικό των οποίων η πυκνότητα φορτίου θεωρείται μηδενική: την περιοχή του αέρα ( $\Omega_1$ ) με σχετική επιτρεπτότητα  $\epsilon_{r1}=1$  και την περιοχή που καλύπτεται από το μονωτικό υλικό ( $\Omega_2$ ) με σχετική επιτρεπτότητα  $\epsilon_{r2}$ . Η επιφάνεια υπό ρύπανση του μονωτήρα θεωρείται ότι έχει επιφανειακή αγωγιμότητα  $\sigma_s$ .

Έστω, τώρα, ότι  $\Sigma$  είναι το σύνορο του χώρου στον οποίο ορίζεται ένα πεδίο  $\Omega$  και  $\epsilon_r$  είναι η σχετική επιτρεπτότητα στο εσωτερικό του. Αν  $n$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που αντιστοιχεί σε στοιχειώδη επιφάνεια  $d\Sigma$  (με φορά προς τα έξω), τότε ορίζεται η μεταβλητή ποσότητα

$$\Psi = \epsilon_r \cdot \frac{\partial V}{\partial n} \quad (3.1)$$

όπου  $V$  είναι το δυναμικό στο σύνορο  $\Sigma$ .

Υστερα από τον ορισμό της μεταβλητής  $\Psi$ , η ανάλυση προχωράει ως εξής:

Για την περιοχή του αέρα, που έχει σύνορο το  $S_1$ , εφαρμόζοντας το θεώρημα Green προκύπτει η σχέση:

$$c \cdot V = - \int_{S_1} \left( V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\epsilon_{r1}} G \cdot \Psi_1 \right) ds \quad (3.2)$$

όπου  $V$ : το δυναμικό σε τυχαίο σημείο της περιοχής αυτής,  $G$ : είναι ο τελεστής Green και  $c$ : μια μεταβλητή που δίνεται από τη σχέση

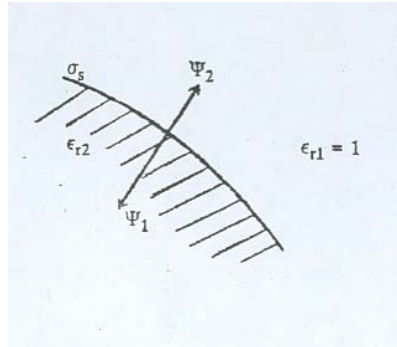
$$c = \frac{A}{4 \cdot \pi} \quad (3.3)$$

με  $A$  να είναι η γωνία υπό την οποία το τυχαίο σημείο με δυναμικό  $V$  «βλέπει» την προσανατολισμένη επιφάνεια  $S_l$ .

Για την περιοχή του μονωτικού υλικού, που έχει σύνορο το  $S_2$ , ισχύει:

$$c \cdot V = - \int_{S_2} \left( V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\epsilon_{r2}} G \cdot \Psi_2 \right) ds \quad (3.4)$$

Στις σχέσεις (3.2) και (3.4)  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$  είναι οι τιμές που παίρνει η μεταβλητή  $\Psi$  στις περιοχές του αέρα και του μονωτικού υλικού αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2: Καθορισμός των  $\Psi_1$  και  $\Psi_2$

Στις περιοχές που δεν υπάρχει ρύπανση ισχύει ότι:  $\Psi_1 + \Psi_2 = 0$ . Ωστόσο, συνδέοντας το μονωτήρα με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης και λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη ηλεκτρικού ρεύματος στην περιοχή της επιφάνειας του όπου υπάρχει ρύπανση οι Rasolonjanahary, Krahenbuhl και Nicolas καταλήγουν στην εξίσωση:

$$\int_S (\sigma_s \cdot \text{grad}_s w \cdot \text{grad}_s V) ds - \int_{\Gamma_1} (\sigma_s \cdot w \cdot \frac{\partial V}{\partial n}) ds + j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \int_S (w \cdot \Theta) ds = 0 \quad (3.5)$$

όπου  $\epsilon_0$  είναι η επιτρεπτότητα του κενού χώρου,  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα της πηγής (και ισχύει  $\frac{\partial}{\partial t} = j \cdot \omega$  με  $j = \sqrt{-1}$ ),

$w$  είναι ένας κατάλληλος τελεστής βάρους και  $\Theta = \Psi_1 + \Psi_2$ .

Πλέον, το σύστημα των εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν αποτελείται από τις εξισώσεις (3.2), (3.4) και (3.5).



Η διαδικασία της μοντελοποίησης συνεχίζεται διαιρώντας τα διαφορετικά όρια  $S_1$  και  $S_2$  σε πεπερασμένα στοιχεία και αντιστοιχίζοντας για κάθε πεπερασμένο στοιχείο τις κομβικές τιμές  $V_i, \Psi_i, \Theta_i$  στις μεταβλητές  $V, \Psi = \Psi_I$  και  $\Theta$  ως εξής:

$$V = \sum \alpha_i V_i$$

$$\Psi = \sum \alpha_i \Psi_i$$

$$\Theta = \sum \alpha_i \Theta_i,$$

όπου  $\alpha_i$ : είναι οι τελεστές αντιστοίχισης. Έπειτα από την ανάλυση και τη συναρμολόγηση παίρνουμε ένα σύστημα από σύνθετες γραμμικές εξισώσεις το οποίο μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια της μεθόδου Gauss.

### 3.2.2 Η μέθοδος προσομοίωσης φορτίου των Chakravorti και Mukherjee

Το 1993, οι Ινδοί Chakravorti και Mukherjee πειραματίστηκαν πάνω σε μια μέθοδο προσομοίωσης φορτίου [27], μελετώντας την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από έναν πορσελάνινο μονωτήρα στήριξης τύπου “post-type”. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, λόγω της σφαιρικής συμμετρίας που παρουσιάζει η διάταξη μονωτήρα – ηλεκτροδίων, το κάθε ηλεκτρόδιο, όπως και η κοινή επιφάνεια πορσελάνης και αέρα, μπορούν να προσομοιωθούν από ένα φανταστικό σύνολο φορτισμένων δακτυλίων. Έτσι, με συνδυασμό κατάλληλων τέτοιων δακτυλοειδών φορτίων, μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές που παίρνει το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο της διάταξης.

Εφαρμόζοντας εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας στη διάταξη του μονωτήρα, οι οριακές συνθήκες με βάση τις οποίες μπορεί να περιγραφεί η κατανομή του πεδίου αφορούν στη διασφάλιση της συνέχειας της συνάρτησης δυναμικού. Πραγματικά, σε κάθε σημείο της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, το δυναμικό θα πρέπει να έχει τιμή ίση με εκείνη που εφαρμόζεται στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο, ενώ συνεχής θα πρέπει να είναι η τιμή του στην κοινή επιφάνεια πορσελάνης και αέρα. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης του φορτίου στην επιφάνεια αυτή θα πρέπει, επίσης, να ισχύει (τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε μιγαδικούς αριθμούς):

$$\bar{D}_{nD}(i) - \bar{D}_{nA}(i) = \bar{\sigma}(i) \quad (3.6)$$

όπου:  $D_n$  είναι η κάθετη συνιστώσα της πυκνότητας ηλεκτρικής ροής, ενώ οι δείκτες  $D$  και  $A$  αναφέρονται, αντίστοιχα, στην πορσελάνη και στον αέρα.. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου ( $\sigma$ ) είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο ως προς την επιφανειακή ειδική αντίσταση ( $\rho_s$ ) και την κυκλική συχνότητα ( $\omega$ ).

Στην περίπτωση της τάσης βιομηχανικής συχνότητας, προκύπτει μία σειρά από συμπεράσματα:

- Κατ' αρχήν, μεταβάλλοντας την επιφανειακή ειδική αντίσταση ( $\rho_s$ ) σε ένα εύρος από  $10^8$  έως  $10^{11}\Omega$ , η επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή των οριακών συνθηκών καταδεικνύει ότι το πεδίο γύρω από το μονωτήρα είναι χωρητικό όταν το  $\sigma$  είναι χαμηλό (άρα το  $\rho_s$  υψηλό) και ωμικό στην αντίθετη περίπτωση.
- Επιπλέον, καταγράφοντας τις περιπτώσεις στις οποίες η ένταση του πεδίου αυξάνεται ανεπιθύμητα στην επιφάνεια του μονωτήρα, οι Chakravorti και Mukherjee διαπίστωσαν ότι τα μέτρα του διανύσματος της έντασης ( $E_R$ ) καθώς και της κάθετης συνιστώσας του ( $E_n$ ) παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους όταν το πεδίο είναι ωμικό. Αντίθετα, η εφαπτομενική συνιστώσα της έντασης ( $E_t$ ) εμφανίζει τις μέγιστες (κατά μέτρο) τιμές της στο χωρητικό πεδίο.
- Οι δυο ερευνητές παρατήρησαν πως όταν σε μια ρυπασμένη επιφάνεια δημιουργείται ξηρή ζώνη, οι υπερβολικά υψηλές τιμές της έντασης εμφανίζονται στα άκρα της τελευταίας. Μάλιστα, όσο πιο πλατιά είναι η ξηρή ζώνη, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού κατά μήκος της και τόσο πιο χαμηλές είναι οι εντάσεις στα άκρα της. Τέλος, όσον αφορά στην επίδραση που ασκεί η δημιουργία πολλαπλών ξηρών ζωνών στην κατανομή του πεδίου, διαπιστώθηκε ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στις όχθες των ταυτόχρονα δημιουργηθέντων ξηρών ζωνών είναι χαμηλότερη από αυτή στις όχθες μίας μεμονωμένης ξηρής ζώνης. Με άλλα λόγια, η ταυτόχρονη εμφάνιση πολλών ξηρών ζωνών είναι λιγότερο επιβλαβής από ό,τι η ύπαρξη μόνο μίας.

Στο δεύτερο κομμάτι της μελέτης, οι Chakravorti και Mukherjee μελέτησαν τη συμπεριφορά μιας σειράς παραμέτρων που επηρεάζουν το ηλεκτρικό πεδίο, όταν στα άκρα της διάταξης του μονωτήρα εφαρμοστούν κρουστικές τάσεις.

Στις κρουστικές τάσεις, προέκυψαν παρόμοια συμπεράσματα με εκείνα για τις τάσεις βιομηχανικής συχνότητας. Στην περίπτωση των τυπικών κρουστικών τάσεων το πεδίο είναι χωρητικό για τιμές της επιφανειακής ειδικής αντίστασης ( $\rho_s$ ) μεγαλύτερες των  $10^8 \Omega$ , ενώ το ίδιο είναι ωμικό για  $\rho_s < 10^4 \Omega$ . Το πεδίο χαρακτηρίζεται ως χωρητικό – ωμικό για ενδιάμεσες τιμές του  $\rho_s$ . Στην περίπτωση των κεραυνικών κρουστικών τάσεων οι αλλαγές της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου από χωρητικό σε χωρητικό – ωμικό και, στη συνέχεια, σε ωμικό πραγματοποιούνται για τιμές της επιφανειακής ειδικής αντίστασης  $10^6$  και  $10^{10} \Omega$  αντίστοιχα.

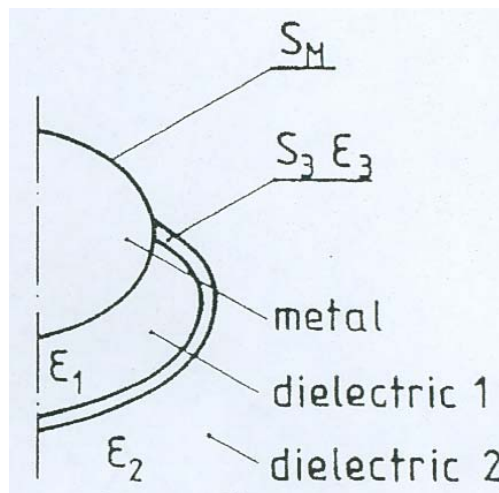
Όσον αφορά στην επίδραση της μερικής ρύπανσης, αλλά και της εμφάνισης ξηρών ζωνών, στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, αυτή είναι λίγο πολύ η ίδια σε σχέση με εκείνη που ασκούν στις τάσεις βιομηχανικής συχνότητας. Έτσι, λοιπόν, και στις κρουστικές τάσεις, όσο πιο κοντά βρίσκεται η ρύπανση στα ηλεκτρόδια της διάταξης, τόσο περισσότερο επιβλαβής μπορεί να αποβεί για τη μονωτική απόδοση του μονωτήρα – τόσο πιο ισχυρό είναι, δηλαδή, το ενδεχόμενο εμφάνισης επιφανειακής υπερπήδησης.

Μια άλλη διαφορά ανάμεσα στην τυπική κρουστική και στην κεραυνική κρουστική τάση είναι ότι, για μια (συνήθη) ένταση ρύπανσης της τάξης του  $\rho_s = 10^7 \Omega$ , το πεδίο είναι σχεδόν ωμικό για την πρώτη περίπτωση, ενώ σχεδόν χωρητικό για τη δεύτερη. Με άλλα λόγια, η τυπική κρουστική τάση είναι πιο επιβλαβής για το ρυπαρό μονωτήρα, συγκρινόμενη με την κεραυνική κρουστική. Επιπλέον, για σχετικά χαμηλή ένταση ρύπανσης (π. χ.  $\rho_s = 10^9 \Omega$ ), το πεδίο είναι σχεδόν ωμικό όταν υπόκειται σε τάσεις βιομηχανικής συχνότητας, ενώ είναι σχεδόν χωρητικό και για τις δύο κρουστικές τάσεις. Προκύπτει, λοιπόν, ότι για ένα μονωτήρα με επιφανειακή ρύπανση οι τάσεις βιομηχανικής συχνότητας είναι οι πλέον επιβλαβείς.

### 3.2.3 Η μέθοδος διαφορικών εξισώσεων των Skopec, Wankowicz και Sikorski

Σε αρκετές επιστημονικές έρευνες, προκειμένου να μελετηθεί η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται σε μια διάταξη μονωτήρα, εφαρμόστηκε η μέθοδος του προσδιορισμού του ηλεκτρικού φορτίου στις δύο γειτονικές επιφάνειες μονωτικού υλικού – ρύπανσης και ρύπανσης – αέρα. Η πρακτική αυτή, ωστόσο, παρουσίαζε το μειονέκτημα ότι η εφαρμογή των οριακών συνθηκών Laplace στις επιφάνειες αυτές οδηγούσε αναγκαστικά σε μια σειρά από πολύπλοκες και πολυάριθμες εξισώσεις. Απαντώντας στο πρόβλημα αυτό, οι Skopec, Wankowicz και Sikorski υποστήριξαν ότι η θεώρηση δύο τέτοιων κοινών επιφανειών δεν είναι απαραίτητη αν δεχτούμε την ύπαρξη ενός λεπτού ομοιογενούς στρώματος σταθερού πάχους  $h$ . Με τον τρόπο αυτό το μαθηματικό μοντέλο απλοποιείται σημαντικά.

Στην εργασία τους [28], η οποία είδε το φως της δημοσιότητας τον Απρίλιο του 1994, ο μονωτήρας προσομοιώνεται από μια κυλινδρικά συμμετρική μονωτική διάταξη. Η διάταξη, που φαίνεται στο σχήμα 3.3, αποτελείται από μια μεταλλική σφαίρα επιφάνειας  $S_M$  (και η οποία φέρει δυναμικό  $\Phi_{met}$ ), από μια περιοχή του χώρου που καλύπτεται από μονωτικό υλικό και από ένα λεπτό στρώμα ρύπανσης, πάχους  $h$  που καλύπτει την εξωτερική επιφάνεια της τελευταίας ( $S_3$ ).



Σχήμα 3.3: Η διάταξη της παρούσας εργασίας

Οι σταθερές  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  και  $\epsilon_3$  είναι οι σχετικές επιτρεπτότητες του διηλεκτρικού, του αέρα και της ρύπανσης αντίστοιχα.

Για να προσδιοριστεί η κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στο μονωτήρα, η επιφάνεια του συστήματος υπό μελέτη διαιρέθηκε σε  $k_{max}$  στήλες και  $l_{max}$  σειρές. Με

τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ένα πλέγμα από  $k_{max} * l_{max}$  στοιχειώδεις επιφάνειες πάνω στις οποίες, εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες, θα προκύψει μια σειρά από εξισώσεις. Αθροίζοντας τις τελευταίες κατά μέλη παίρνουμε δυο βασικές εξισώσεις για την ένταση και το δυναμικό σε κάθε σημείο της επιφάνειας της διάταξης:

$$\Phi_{mn} = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \sum_{k=1, l=1}^{k_{max}, l_{max}} \frac{q_{slk}}{r_{lk}} \Delta S_{lk} + \frac{R_{mn} q_{smn}}{2\epsilon_0} \quad (3.7)$$

και

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \sum_{k=1, l=1}^{k_{max}, l_{max}} \frac{q_{slk} \cdot \vec{r}_{lk}}{r_{lk}^3} \Delta S_{lk} + \frac{q_{smn}}{2\epsilon_0} \cdot \vec{n} \quad (3.8)$$

όπου  $q_{slk}$ : η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου για τη στοιχειώδη επιφάνεια  $\Delta S_{lk}$  και ισχύει ότι:  $k \neq n$ ,  $l \neq m$ , ενώ  $\Delta S_{mn} = \pi R_{mn}^2$ .

Είναι προφανές ότι η πυκνότητα της υποδιαίρεσης της επιφάνειας του μονωτήρα σε στοιχειώδεις επιφάνειες  $\Delta S$  θα επηρεάσει την ακρίβεια των υπολογισμών. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των στοιχειωδών επιφανειών, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια των λαμβανομένων αποτελεσμάτων των υπολογισμών.

### 3.3 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων

#### 3.3.1 Η μέθοδος των Asenjo, Morales και Valdenegro

Το 1997, οι Asenjo, Morales και Valdenegro διατύπωσαν μια μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων με βάση την οποία είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ηλεκτρικού πεδίου για μια σειρά από μονωτικά συστήματα με κυλινδρική συμμετρία. Η μέθοδος παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περιπτώσεις που η επιφανειακή αγωγιμότητα σε όλα τα ενδιάμεσα διηλεκτρικά υλικά ενός μονωτικού συστήματος είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη ή μεγαλύτερη από το γινόμενο της γωνιακής συχνότητας με την επιτρεπτότητα των υλικών (δηλαδή:  $\sigma \gg \omega \epsilon$  ή  $\sigma \gg \omega \epsilon$ ). Η εργασία τους [29] αποτέλεσε, ουσιαστικά, την προέκταση προηγούμενης δικής τους δουλειάς [30], με βάση την οποία οι ίδιοι είχαν καταφέρει να υπολογίσουν το

ηλεκτρικό πεδίο, στις περιπτώσεις, όμως, που τα παραπάνω δυο μεγέθη κινούνται σε σχετικά κοντινές περιοχές τιμών.

Σύμφωνα με τους τρεις ερευνητές, το πρόβλημα προσδιορισμού του ηλεκτρικού πεδίου είναι δυνατόν να εκφυλιστεί σε ένα πρόβλημα προσδιορισμού μιας λύσης της εξίσωσης Laplace, τέτοιας που να ικανοποιεί τις κανονικές οριακές συνθήκες (*normal boundary conditions*) (π.χ. σε κάθε σημείο της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, το δυναμικό θα πρέπει να έχει τιμή ίση με εκείνη που εφαρμόζεται στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο), καθώς και τις «συμπληρωματικές» οριακές συνθήκες. Οι τελευταίες είναι εκείνες που αφορούν στη διατήρηση των εφαπτομενικών συνιστωσών του διανύσματος  $\vec{E}$ , καθώς και των κάθετων συνιστωσών του  $\vec{D}$  κατά μήκος της κοινής επιφάνειας μονωτικού υλικού και αέρα (αρχή διατήρησης φορτίου). Η καινοτομία της συγκεκριμένης μελέτης έγκειται στο γεγονός ότι καθ' όλη τη διάρκεια των αριθμητικών ή αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού που λαμβάνουν χώρα σ' αυτή, προτείνεται η αντικατάσταση της επιτρεπτότητας με μια μιγαδική παράσταση που σαν πραγματικό μέρος έχει την επιφανειακή αγωγιμότητα και σαν φανταστικό το γινόμενο της κυκλικής συχνότητας με την επιτρεπτότητα ( $\sigma + i\omega\epsilon$ ). Εκείνο που αλλάζει σε αυτήν την περίπτωση είναι το γεγονός ότι το δυναμικό εμφανίζεται ως ένας μιγαδικός βαθμωτός αριθμός και όχι ως πραγματικός.

Πιο συγκεκριμένα, για τα σημεία που δεν ανήκουν κάποια απ' τις κοινές επιφάνειες των διηλεκτρικών υλικών στη διάταξη που μελετάται θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση Laplace:

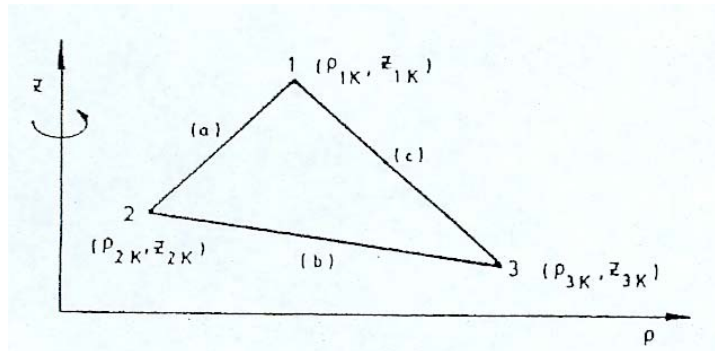
$$\nabla^2\phi = 0 \quad (3.9)$$

Ακόμα, για τα σημεία αυτά θα πρέπει να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες, όπως και οι συμπληρωματικές οριακές συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω, μια προσέγγιση του ηλεκτρικού πεδίου είναι δυνατή θεωρώντας τη μιγαδική συνάρτηση δυναμικού  $\phi$ , που ικανοποιεί την εξίσωση Laplace, καθώς και τις οριακές συνθήκες.

Προκειμένου να καταστρωθεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων σε μια διάταξη με κυλινδρική συμμετρία θεωρείται ένα κυλινδρικό επίπεδο και ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων με άξονες  $\rho$  και  $z$  – όπου  $z$  ο άξονας συμμετρίας της διάταξης. Καθώς η διάταξη αποτυπώνεται στο κυλινδρικό επίπεδο, η περιοχή που

μας ενδιαφέρει υποδιαιρείται σε απλά πεπερασμένα τριγωνικά στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Τριγωνικό στοιχείο  $k$

Θεωρείται ότι στα εσωτερικά σημεία κάθε τριγωνικού στοιχείου, το δυναμικό μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$\phi = A + B \cdot \rho + C \cdot z \quad (3.10)$$

Στην περίπτωση που η διάταξη που μελετάται είναι ένας μονωτήρας υπό ρύπανση, είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες επισημάνσεις. Έτσι, αν  $\delta$  είναι το πάχος του ημιαγωγικού στρώματος ρύπανσης και  $\sigma$  είναι το σύμβολο που εκφράζει την αγωγιμότητα όγκου, τότε η επιφανειακή αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης είναι:

$$\sigma_s = \delta \sigma.$$

Μάλιστα, επειδή  $\delta \rightarrow 0$  και  $\sigma \rightarrow \infty$ , το  $\sigma_s$  παραμένει πεπερασμένο.

Στις πλευρές  $a$ ,  $b$  και  $c$  του στοιχειώδους τριγωνικού στοιχείου οι επιφανειακές αγωγιμότητες είναι αντίστοιχα:  $\sigma_{sa}$ ,  $\sigma_{sb}$ ,  $\sigma_{sc}$ . Επίσης, η τιμή του δυναμικού που φέρει το σημείο στη μια γωνία του στοιχειώδους τριγώνου (έστω κόμβος 1) συνδέεται με τις αντίστοιχες τιμές των άλλων δυο κόμβων (έστω 2 και 3) με τη σχέση:

$$\sum_{\Omega_1} (C_{1k} + D_{ak} + D_{ck}) \phi_{1k} + \sum_{\Omega_2} (C_{2k} - D_{ak}) \phi_{2k} + \sum_{\Omega_3} (C_{3k} - D_{ck}) \phi_{3k} = 0 \quad (3.11)$$

όπου  $k$ : ο αριθμός όλων των τριγωνικών στοιχείων στα οποία ανήκει ο κόμβος 1 και  $\Omega_l$ : η περιοχή του κυλινδρικού επιπέδου που περιέχει τα τελευταία. Οι συντελεστές  $C$ ,  $D$  εξαρτώνται από μια σειρά από μεγέθη, όπως είναι οι τιμές της αγωγιμότητας και της επιτρεπτότητας που εμφανίζουν τα τριγωνικά στοιχεία στην επιφάνεια και στις πλευρές τους.

Όταν, συγκρίνοντας το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων με το πραγματικό τρισδιάστατο πρόβλημα, στη μια πλευρά ενός στοιχειώδους τριγώνου δεν αντιστοιχεί ημιαγώγιμη επιφάνεια, τότε, για την πλευρά αυτή θα πρέπει να τεθεί:

$$\sigma_s=0$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (3.11) σε όλα τα τριγωνικά στοιχεία, προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$AV=U \tag{3.12}$$

όπου  $A$ : η μήτρα συντελεστών του συστήματος,  $V$ : το διάνυσμα των αγνώστων  $\varphi$  και  $U$ : ένα διάνυσμα γνωστών δυναμικών, το οποίο εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή ορισμένοι από τους συντελεστές της μήτρας  $A$  είναι μιγαδικοί, τα στοιχεία του  $V$  είναι, γενικά, μιγαδικοί αριθμοί, παρότι τα στοιχεία του  $U$  είναι πραγματικοί.

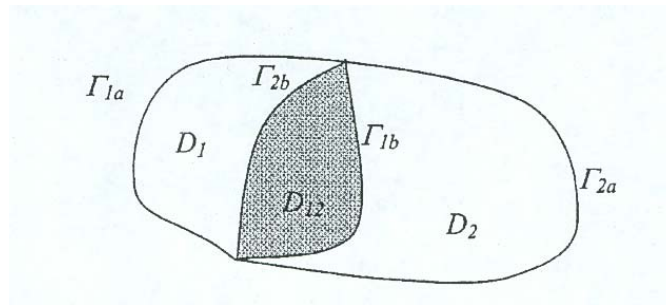
Με βάση τη μέθοδο ανάλυσης των πεπερασμένων τριγωνικών στοιχείων είναι δυνατή η επίλυση του συστήματος εξισώσεων που περιγράφεται στη σχέση (3.12) με ακρίβεια αποτελεσμάτων που υπερβαίνει το 99%.

### **3.3.2 Μια απλοποίηση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων από τον Imre Sebestyen**

Μια από τις πλέον πρόσφατες δημοσιεύσεις πάνω στο ζήτημα της μεθόδου υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου είναι εκείνη του Imre Sebestyen [31], που δημοσιεύτηκε το Μάρτιο του 2002. Ο Sebestyen διατύπωσε σ' αυτήν σοβαρές επιφυλάξεις όσον αφορά στην αποτελεσματικότητα των μεθόδων προσομοίωσης φορτίου ακόμα και για περιπτώσεις όπου οι τελευταίες θεωρούνται καταλληλότερες, όπως είναι εκείνες των «ανοιχτών οριακών συνθηκών». Έτσι, στην εργασία του, με αντικείμενο τον υπολογισμό του πεδίου που αναπτύσσεται στην επιφάνεια και στο εσωτερικό μονωτήρων ανάρτησης γραμμών μεταφοράς από πυλώνες υψηλής τάσης, θα αποφύγει να χρησιμοποιήσει μια τέτοια μέθοδο. Στη θέση της θα προτιμήσει μια παραλλαγή της κλασικής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων Schwartz (που θα παρουσιαστεί αμέσως μετά) με βάση την οποία το πρόβλημα μπορεί να απλοποιηθεί αρκετά.



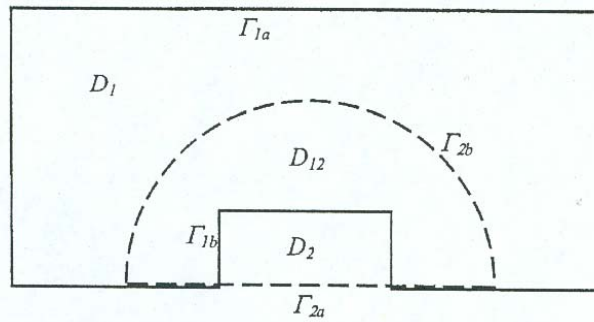
Σε γενικές γραμμές το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου Schwartz, στο οποίο βασίζεται η μελέτη του Sebestyén, έχει ως εξής: Σε πρώτη φάση το πεδίο υπό ανάλυση (έστω  $D_a$ ) υποδιαιρείται σε δυο υποπεδία. Για χάρη απλότητας θεωρούμε δυο υπερτιθέμενα υποπεδία  $D_1$  και  $D_2$  που αλληλεπικαλύπτονται στην περιοχή  $D_{12}$ , όπως φαίνονται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Διαίρεση του πεδίου  $D$  σε δύο υποπεδία  $D_1$  και  $D_2$

Η περιοχή  $D_a$  έχει σαν σύνορο την ένωση των  $\Gamma_{1a}$  και  $\Gamma_{2a}$ , όπου οι οριακές συνθήκες θεωρούνται γνωστές. Τα υποπεδία  $D_1$  και  $D_2$  έχουν σαν σύνορο την ένωση των  $\Gamma_{1a}$  και  $\Gamma_{1b}$  και την ένωση των  $\Gamma_{2a}$  και  $\Gamma_{2b}$  αντίστοιχα. Η κλασική μέθοδος Schwartz ξεκινάει με την επίλυση του προβλήματος οριακών τιμών για το υποπεδίο  $D_1$  εφαρμόζοντας τις γνωστές οριακές συνθήκες για το  $\Gamma_{1a}$  και υποθέτοντας αυθαίρετα επιλεγμένες συνθήκες για το  $\Gamma_{1b}$ . Μετά από αυτό, το πρόβλημα οριακών τιμών για υποπεδίο  $D_2$  επιλύεται χρησιμοποιώντας τις δοσμένες οριακές συνθήκες για το  $\Gamma_{2a}$  και αντικαθιστώντας την τιμή του πεδίου που υπολογίσαμε στο πρώτο βήμα για το σύνορο  $\Gamma_{2b}$ . Αυτή η διαδικασία εναλλαγής επαναλαμβάνεται έως ότου φτάσουμε την απαιτούμενη ακρίβεια.

Στην εργασία του Sebestyén η μέθοδος που περιγράφεται παραπάνω προσαρμόζεται ελαφρά. Γίνεται η υπόθεση ότι το μοντέλο της διάταξης στο «οικουμενικό» πεδίο  $D_1 \cup D_{12}$  είναι το μοντέλο «μεγάλης κλίμακας» του όλου προβλήματος (βλ. σχήμα 3.6)



Σχήμα 3.6: Σχηματικά η υπόθεση της εργασίας του Sebestyén

Η περιοχή  $D_2 \cup D_{12}$ , που χαρακτηρίζεται ως «τοπικό πεδίο», απαιτείται η ακριβής κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Οι δύο αυτές περιοχές ( $D_1 \cup D_{12}$  και  $D_2 \cup D_{12}$ ) υπερτίθενται η μια πάνω στην άλλη κατά μήκος του  $D_{12}$  («επικαλυπτόμενο πεδίο»).

Η προσαρμοσμένη επαναληπτική διαδικασία ξεκινά με την αρχικοποίηση των οριακών τιμών κατά μήκος των συνόρων  $\Gamma_{1b}$  και  $\Gamma_{2b}$ . Αντί να δοθούν τυχαία επιλεγμένες τιμές, η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο, αρχικά, πλέγμα για το εσωτερικό του «τοπικού πεδίου». Με αυτό τον τρόπο μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των επαναλήψεων που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου να ληφθούν οι αρχικές οριακές συνθήκες για τα  $\Gamma_{1b}$  και  $\Gamma_{2b}$ .

## ***Κεφάλαιο 4***

### ***ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PC OPERA-2d***

#### **4.1 Εισαγωγή**

Το OPERA-2d είναι μια ακολουθία προγραμμάτων ανάλυσης δισδιάστατων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα προγράμματα χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να λύσουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πεδίων [31]. Αυτές οι εξισώσεις περιλαμβάνουν:

- Εξίσωση Poisson
- Εξίσωση Helmholtz
- Εξίσωση Διάχυσης

Η επίλυση αυτών των εξισώσεων αποτελεί ένα βασικό τμήμα του σχεδιασμού στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Μαγνητοστατική
- Ηλεκτροστατική
- Χρονομεταβλητά μαγνητικά πεδία (χαμηλή συχνότητα )

Η δυνατότητα μοντελοποίησης μη γραμμικών υλικών είναι βασική σε αυτές τις εφαρμογές.

Το λογισμικό χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω της απαίτησης πολλών πληροφοριών πριν γίνει η ανάλυση, η εισαγωγή δεδομένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν ισχυρό αμφίδρομο προ-επεξεργαστή. Χρησιμοποιώντας τη γραφική αμφίδρομη διαδικασία στα πλαίσια της προ-επεξεργασίας, ο μοντελοποιημένος χώρος διαιρείται σε μια συνεχή ομάδα τριγωνικών στοιχείων. Το φυσικό μοντέλο μπορεί να περιγραφεί σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές συντεταγμένες.

Όταν ετοιμαστεί το μοντέλο, η λύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο τύπο ανάλυσης. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις για ανάλυση των διαφορετικών τύπων ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης π.χ. στατική και στη μόνιμη κατάσταση. Το πρόγραμμα ανάλυσης καθορίζει τη σωστή λύση, περιλαμβάνοντας μη γραμμικά φαινόμενα αν αυτά έχουν μοντελοποιηθεί.

Το αποτέλεσμα τότε μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας έναν «έξυπνο και εύελικτο» μετ-επεξεργαστή. Όπως και στην περίπτωση του προ-επεξεργαστή, ο μετ-επεξεργαστής ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την αμφίδρομη επικοινωνία μέσα από έναν κατάλογο με γραφικά. Πολλές μεταβλητές του συστήματος είναι διαθέσιμες για έλεγχο, περιλαμβάνοντας δυναμικά, ρεύματα, πεδία, δυνάμεις και θερμοκρασία. Το πρόσθετο χαρακτηριστικό των μεταβλητών που ορίζονται από το χρήστη επιτρέπει στα αποτελέσματα της επίλυσης να είναι προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα αριθμητικά σφάλματα, λόγω του κακού προσδιορισμού του πλέγματος, αναλύονται και αυτά ώστε το πλέγμα να βελτιωθεί και να επιτύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

## **4.2 Πρόγραμμα ανάλυσης**

Υπάρχουν 7 προγράμματα ανάλυσης στη δισδιάστατη έκδοση του OPERA. Όλα δέχονται δεδομένα προετοιμασμένα από τον προ- και τον μετ-επεξεργαστή και δημιουργούν αρχεία αποτελεσμάτων που μπορούν να διαβαστούν από τον προ- και τον μετ-επεξεργαστή [31].

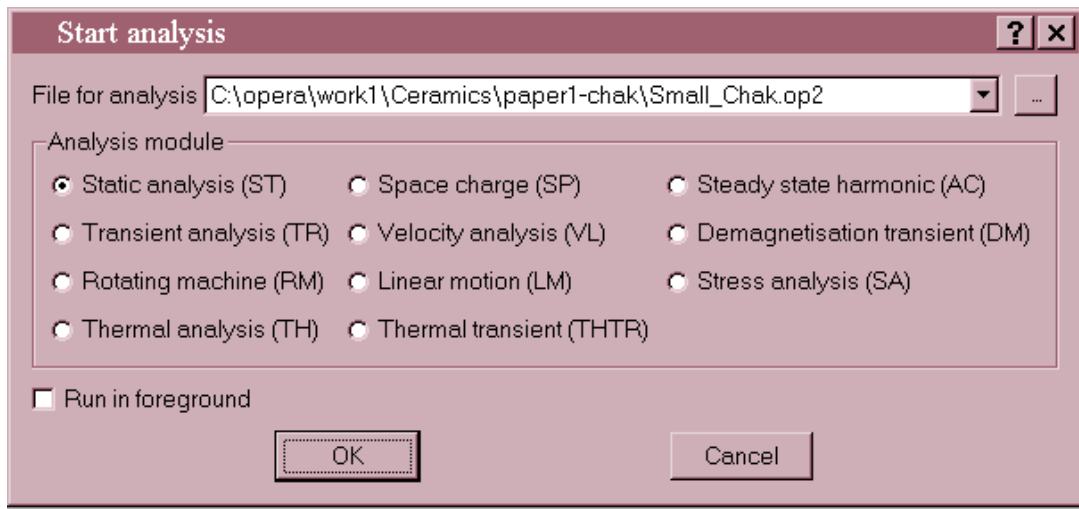
Τα 7 προγράμματα ανάλυσης είναι:

<i>Στατικά</i>	
ST	Γραμμικά ή μη γραμμικά μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά με ισοτροπικά υλικά και μόνιμους μαγνήτες
SP	Ηλεκτροστατικά, περιλαμβάνοντα τις συνέπειες χωρικών φορτίων από δέσμες σωματιδίων
<i>Δινορρεύματα</i>	
AC	Μόνιμης κατάστασης εναλλασσόμενα δινορρεύματα με γραμμικά ή μη γραμμικά υλικά και εξαρτημένες πηγές ρεύματος ή τάσης. Οι επιτρεπτότητες μπορούν να ληφθούν από τα δεδομένα της περιοχής, από μια προηγούμενη ST ή TR λύση, ή να υπολογιστούν από το πεδίο της AC λύσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η επιτρεπτότητα μπορεί να είναι σύνθετη.
TR	Μεταβατικά δινορρεύματα γραμμικά με ή μη γραμμικά υλικά, συνδεδεμένα σε εξωτερικά κυκλώματα.
VL	Δινορρεύματα επαγόμενα από κίνηση σταθερής ταχύτητας ενός τμήματος του μοντέλου λαμβάνοντας υπ' όψη και το υπόλοιπο.
RM	Διαμορφωτής περιστροφικής κίνησης: ένας διαμορφωτής μεταβατικών δινορρευμάτων, επεκτεινόμενος ώστε να περικλείει τις συνέπειες της περιστροφής συμπαγούς σώματος, χρονομεταβλητά ρεύματα και σύνδεση σε εξωτερικά κυκλώματα.
<i>Ανάλυση καταπόνησης</i>	
SA	Ανάλυση καταπόνησης, χρησιμοποιώντας σημειακές δυνάμεις σαν εισόδους ή πυκνότητες δύναμης του σώματος υπολογισμένες από προηγούμενη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.
<i>Θερμική ανάλυση</i>	
TH	Θερμική ανάλυση, χρησιμοποιώντας σημειακές θερμοκρασίες σαν εισόδους και πυκνότητες ισχύος στοιχείων από προηγούμενη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.
THTR	Μεταβατική έκδοση της θερμικής ανάλυσης.

Υπάρχει επίσης ένα ακόμα χρήσιμο πρόγραμμα:

DXF	Ένα πρόγραμμα που μεταφράζει DXF αρχεία σε OPERA-2d εκτελέσιμα αρχεία εισαγωγής (.comi).
-----	--

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ένα εικονίδιο του OPERA-2d στο οποίο διακρίνονται τα διαφορετικά προγράμματα ανάλυσης



Σχήμα 4.1: Τα διαφορετικά προγράμματα ανάλυσης του OPERA-2d

### 4.3 Φιλοσοφία του προγράμματος

Μια πλήρης λύση προβλήματος με το OPERA-2d αποτελείται από 3 φάσεις: προετοιμασία δεδομένων ή προ-επεξεργασία, ανάλυση και επίδειξη αποτελεσμάτων ή μετ-επεξεργασία [31]. Επειδή ο προ- και ο μετ-επεξεργαστής είναι ένα πρόγραμμα, οποιαδήποτε τροποποίηση στα δεδομένα μπορεί να γίνει αμέσως μετά την μετ-επεξεργασία.

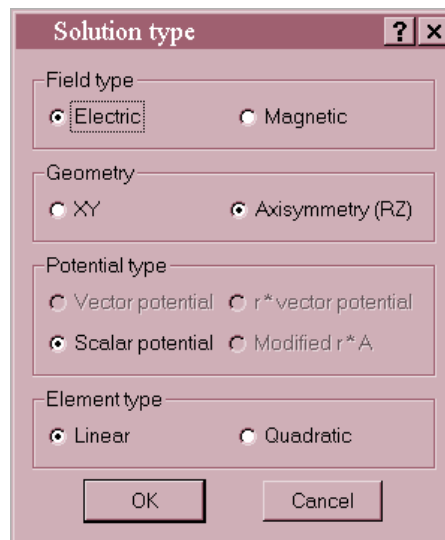
#### 4.3.1 Μοντέλο στο OPERA-2d

Ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων μπορούν να αναπαρασταθούν από δισδιάστατα μοντέλα. Αυτό υποθέτει ότι η διάταξη εμπίπτει σε μια από τις ακόλουθες κατηγορίες [31]:

- μεγάλο μήκος σε μια διεύθυνση, με ομοιόμορφη εγκάρσια διατομή στο μεγαλύτερο μήκος. Σε τέτοιες διατάξεις, μια λογική προσέγγιση είναι να

υποθέσουμε ότι για μεγάλο μέρος του μήκους, η κατανομή του πεδίου στη διατομή δεν μεταβάλλεται και ότι δεν υπάρχει συνιστώσα του πεδίου παράλληλα στον διαμήκη άξονα. Στο OPERA-2d, τέτοια μοντέλα έχουν XY συμμετρία.

- συμμετρικό εκ περιστροφής. Δεν υπάρχει γωνιακή συνιστώσα του πεδίου και η κατανομή του πεδίου είναι ίδια για κάθε αξονική τομή. Για να μοντελοποιηθεί μια τέτοια διάταξη επιλέγεται ένα σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Με την επιλογή “Axisymmetry” υποδεικνύεται ένα σύστημα κυλινδρικής συμμετρίας

#### 4.3.2 Προ-επεξεργασία (pre-processing)

Η γεωμετρία μιας διάταξης που θα αναλυθεί με το OPERA-2d παρουσιάζεται στον προ- και μετ-επεξεργαστή σαν μια ομάδα πολυγωνικών περιοχών στο διδιάστατο επίπεδο [31].

Τα δεδομένα της κάθε περιοχής εισάγονται με τη γραμμή εντολών **Draw**, ενώ τα εικονίδια που αντιστοιχούν στις εντολές σχεδιασμού των περιοχών (επιλογή σημείων, σχεδιασμός άξονα συντεταγμένων κ.ο.κ.) φαίνονται στο σχήμα 4.3:



Σχήμα 4.3: Η γραμμή εντολών draw για τη σχεδίαση των περιοχών της διάταξης υπό μελέτη

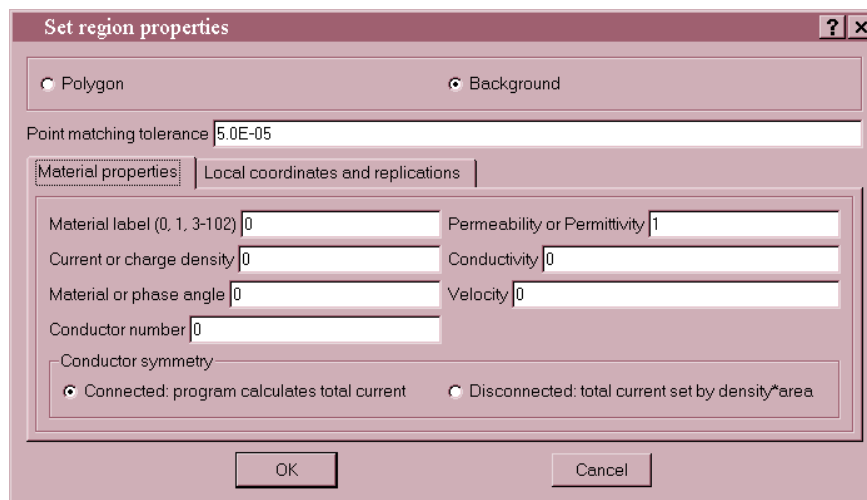
Τα δεδομένα αυτά μπορούν να «μορφοποιηθούν» με τη γραμμή εντολών **Modify**, από την οποία προκύπτει ένα σύνολο επιλογών (μετακίνηση περιοχών, επιλογή ιδιοτήτων πλευρών κ.α.) που φαίνεται στη σειρά εργαλείων του σχήματος 4.4:



Σχήμα 4.4: Η γραμμή εντολών *modify*

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αν η σχεδίαση μίας περιοχής δεν έχει ολοκληρωθεί ώστε να κλείσει το πολύγωνο / περιοχή, τότε, σε περίπτωση που κλείσει το παράθυρο της εντολής **Draw**, η σχεδίαση που έχει προηγηθεί, ακυρώνεται.

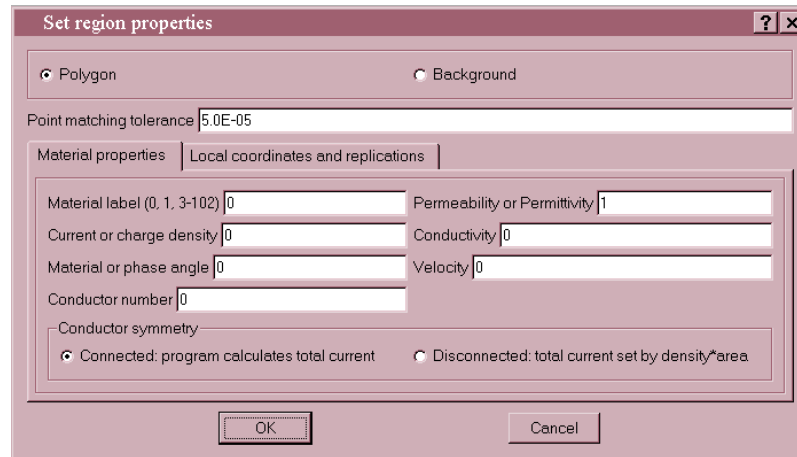
Μια περιοχή μπορεί να είναι μια «δευτέρου πλάνου» περιοχή η οποία καλύπτει όλο το χώρο του προβλήματος. Στο σχήμα 4.5 φαίνεται ο χαρακτηρισμός μιας περιοχής σαν περιοχή «δευτέρου πλάνου» με την επιλογή “background”:



Σχήμα 4.5: Χαρακτηρισμός μιας περιοχής σαν περιοχή «δευτέρου πλάνου» (*background*)

Οι άλλες περιοχές είναι μη επικαλυπτόμενα πολύγωνα που προσδιορίζουν τα άλλα υλικά στο πρόβλημα. Για τις περιοχές αυτές επιλέγουμε το χαρακτηρισμό “polygon” (Σχήμα 4.6).





Σχήμα 4.6: Χαρακτηρισμός μιας περιοχής σαν πολύγωνο (polygon)

Σε μαγνητικές διατάξεις για παράδειγμα, μια περιοχή μπορεί ν' αναπαριστά ένα από τα ακόλουθα:

- ελεύθερος χώρος
- ένας αγωγός με προκαθορισμένη ή επαγόμενη πυκνότητα ρεύματος
- μαγνητικό υλικό με γραμμικά ή μη γραμμικά χαρακτηριστικά.

Μια ειδική περιοχή κενού πρέπει να καθοριστεί για την διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του στάτη και του ρότορα περιστρεφόμενων μηχανών για το PC OPERA-2d/RM.

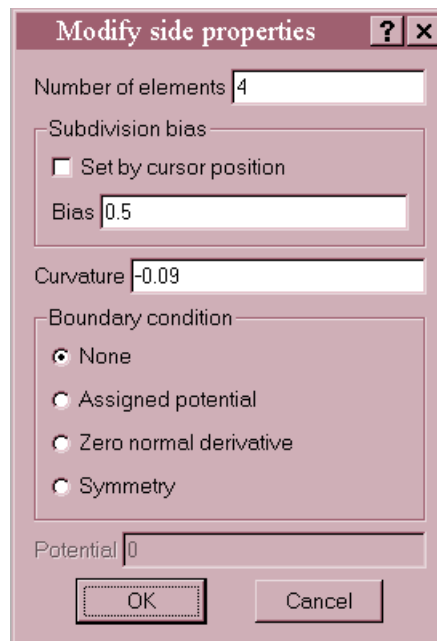
Όλες οι ιδιότητες των υλικών και οι οριακές συνθήκες αποθηκεύονται με την κάθε περιοχή. Εξαιρέση σε αυτό αποτελούν οι μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ πυκνότητας ροής και έντασης πεδίου που αποθηκεύονται ως πίνακες τιμών, οι οποίοι συνδέονται με τις περιοχές με κωδικούς αριθμούς υλικών. Τέτοιοι ΒΗ πίνακες τιμών προσδιορίζονται και μορφοποιούνται με την εντολή **BH data**.

Για διατάξεις με επαναλαμβανόμενες περιοχές υπάρχουν εντολές αντιγραφής, οι οποίες δημιουργούν πολλαπλά αντίγραφα της περιοχής με τις ίδιες ιδιότητες υλικού.

Οι περιοχές μπορούν να αντιγραφούν με την εντολή **Make copies of regions**.

Μέσα σε κάθε περιοχή, η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτόματη, χρησιμοποιώντας σαν εισαγόμενα δεδομένα τις συντεταγμένες των κορυφών, τις καμπυλότητες και τις υποδιαιρέσεις των πλευρών. Στο σχήμα 4.7

βλέπει κανείς ότι είναι δυνατή η κατά βούληση μεταβολή του μεγέθους της καμπυλότητας που φέρει μια πλευρά ενός πολυγώνου (curvature), καθώς και των πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος που αντιστοιχούν σε αυτήν (number of elements).

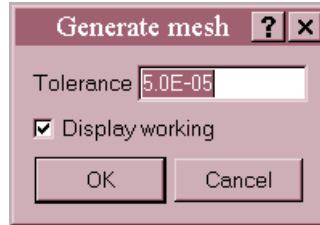


Σχήμα 4.7: Καθορισμός της καμπυλότητας και των στοιχείων μιας πλευράς

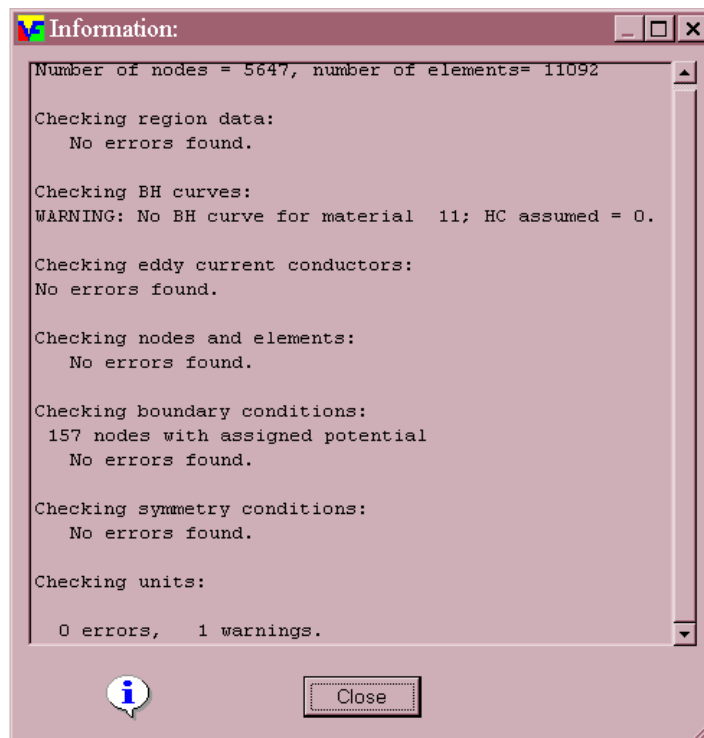
Υπάρχουν δύο κατηγορίες σχημάτων των περιοχών, τα τετράπλευρα και γενικά πολύγωνα. Το πλέγμα μέσα στα τετράπλευρα δημιουργείται από μετασχηματισμό σε μοναδιαίο τετράγωνο και κανονική υποδιαίρεση. Το πλέγμα είναι κατ' αυτό τον τρόπο προβλεπόμενο και ο χρόνος δημιουργίας του μικρός.

Το πλέγμα μέσα στα πολύγωνα δημιουργείται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που βασίζεται στον τριγωνισμό Delaunay. Εσωτερικοί κόμβοι προστίθενται, αν είναι απαραίτητο, για να επιτύχουν μεγέθη στοιχείων που διαφέρουν λίγο εκατέρωθεν των περιοχών και σχήματα στοιχείων που είναι κατά το δυνατό περίπου ισόπλευρα. Τα πολύγωνα επιτρέπουν σε μεγάλες περιοχές χώρου, ειδικά κοντά στα όρια να πλεγματοποιούνται με τον ελάχιστο αριθμό περιοχών. Το πλέγμα δημιουργείται με την εντολή **Generate mesh**, οπότε εμφανίζεται το εικονίδιο του σχήματος 4.8, ενώ, ύστερα από τη διαμόρφωσή του τελευταίου κάνει την εμφάνισή του ένα ενημερωτικό εικονίδιο που πληροφορεί το χρήστη για το πλήθος των πεπερασμένων

στοιχείων που έχουν σχηματιστεί (number of elements), αλλά και για τον αριθμό των κόμβων (number of nodes) του πλέγματος (Σχήμα 4.9).



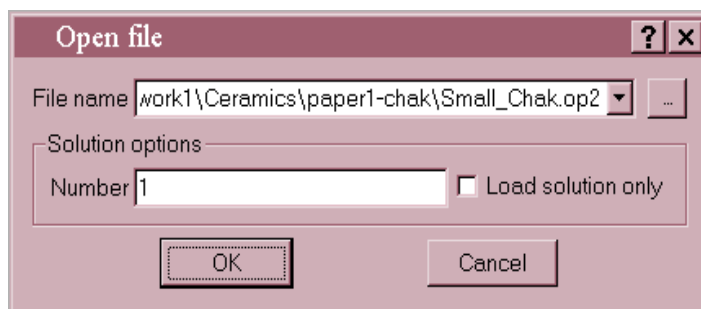
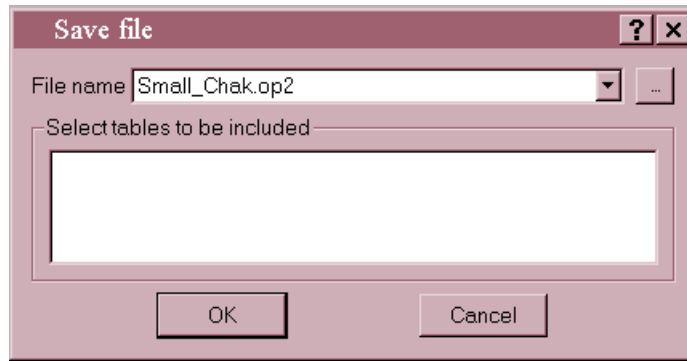
Σχήμα 4.8: Η εντολή δημιουργίας πλέγματος *generate mesh*



Σχήμα 4.9: Το παράθυρο που εμφανίζεται μετά τη δημιουργία του πλέγματος

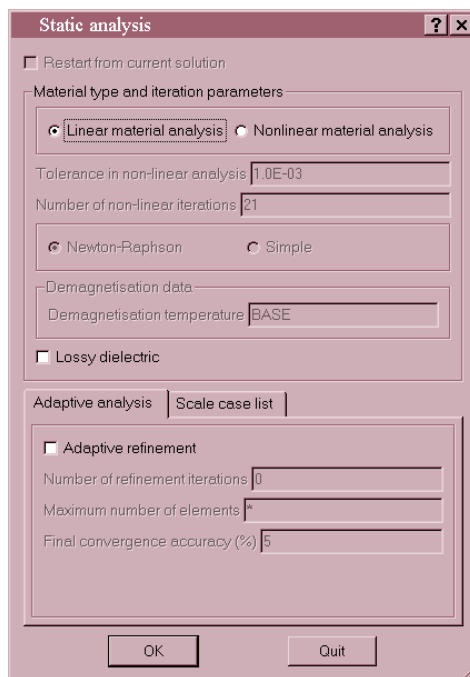
Οι περιοχές χρησιμοποιούνται επίσης στη μετ-επεξεργασία ως οι μικρότερες μονάδες της περιοχής στην οποία μπορεί να γίνει ολοκλήρωση (εντολή **Field Integrals**).

Το OPERA-2d, κατά την προ-επεξεργασία, εκτός από τις εντολές δημιουργίας και επίδειξης του πλέγματος (**Generate mesh** και **Display mesh**), διαθέτει, επίσης, εντολή επίδειξης των δεδομένων της περιοχής, (**List region data**), όπως, επίσης, και εντολές αποθήκευσης (**Save**) και ανάγνωσης (**Open**) αρχείων οι οποίες διακρίνονται στα εικονίδια του σχήματος 4.10.



Σχήμα 4.10: Τα εικονίδια που εμφανίζονται κατά την αποθήκευση (save) και την ανάγνωση (open) ενός αρχείου

Όπως φαίνεται, τα αρχεία αποθηκεύονται με τη μορφή (.op2). Πριν αποθηκευτεί ένα αρχείο δεδομένων πρέπει να καθοριστεί το είδος της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση ανάλυσης για ηλεκτροστατικό πεδίο, η εντολή που επιλέγεται είναι η **Static analysis** (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Εντολή ανάλυσης για ηλεκτροστατικό πεδίο

Δεν είναι απαραίτητη περαιτέρω αλληλεπίδραση πριν τρέξουμε το πρόγραμμα ανάλυσης, το οποίο μπορεί να τρέξει χωρίς να «βγούμε» από τον προ- και τον μετ-επεξεργαστή.

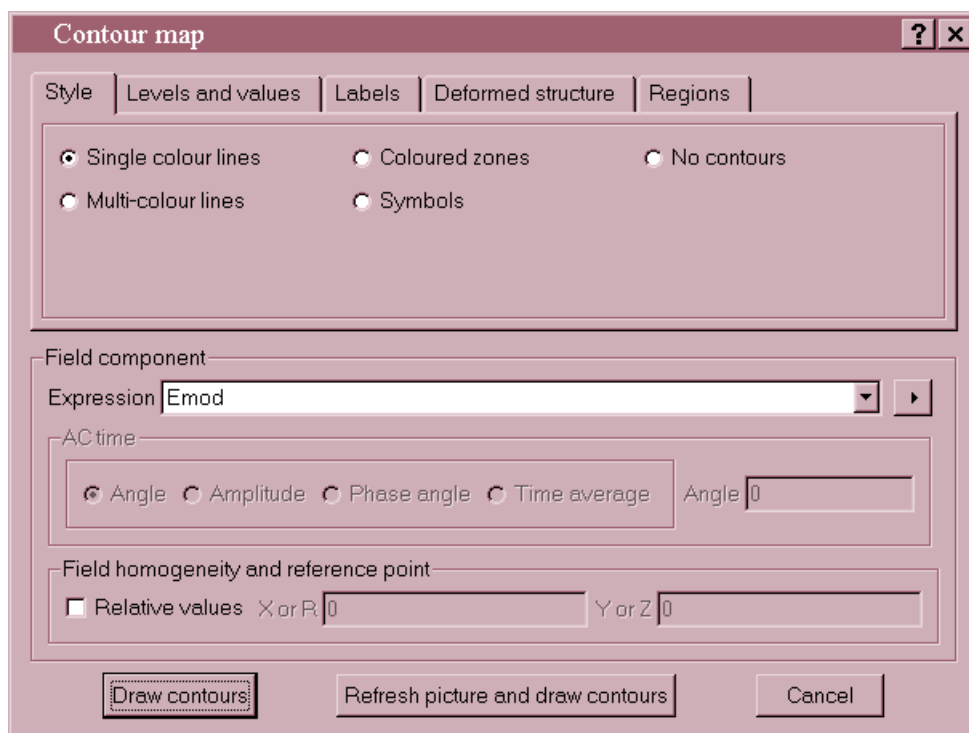
### 4.3.3 Ανάλυση

Για την παροχή των επιπρόσθετων πληροφοριών που είναι απαραίτητες για κάθε πρόγραμμα ανάλυσης, χρησιμοποιείται η εντολή **Start analysis**, η οποία επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει στοιχεία όπως: ανοχή σύγκλισης, σημεία χρονικής εισόδου, μη γραμμικό επαναληπτικό τύπο κλπ. Μετά από αυτό τα προγράμματα ανάλυσης δεν χρειάζονται πρόσθετες πληροφορίες από τον χρήστη. Τα προγράμματα δημιουργούν αρχεία αποτελεσμάτων που περιέχουν ένα αντίγραφο των δεδομένων και της λύσης και ένα αρχείο που περιέχει διαγνωστικά [31].

### 4.3.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)

Ο προ- και ο μετ-επεξεργαστής, OPERA-2d/PP, μπορεί να διαβάσει αρχεία αποτελεσμάτων από τα προγράμματα ανάλυσης, να εμφανίζει και να επεξεργάζεται λύσεις. 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 χρωματικών περιοχών που υπερτίθενται στο σχήμα της διάταξης σαν περιγράμματα στις περιοχές. (με την εντολή **Contour map**). Το αντίστοιχο εικονίδιο διακρίνεται στο σχήμα 4.12.



*Σχήμα 4.12: Με την επιλογή “single colour lines” το ηλεκτρικό πεδίο είναι δυνατό να παρασταθεί μέσω των δυναμικών γραμμών*

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αλγεβρικές εκφράσεις τέτοιων πεδιακών ποσοτήτων.

Πρόσθετη επεξεργασία μπορεί να πάρει την μορφή ολοκληρώσεων κατά μήκος γραμμών ή πάνω σε περιοχές (με την εντολή **Fields along region sides**), δίνοντας τιμές για δυνάμεις, αποθηκευμένες ενέργειες κλπ, ή υπολογισμό τροχιάς σωματιδίων.

Η πρώτη απαίτηση για μια πεδιακή τιμή από τον μετ-επεξεργαστή δείχνει στο πρόγραμμα να εκτελέσει «μέση τιμή πεδίου». Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων δίνει παραγωγούς δυναμικού ασυνεχείς από το ένα στοιχείο στο επόμενο. Η διαδικασία «μέσης τιμής πεδίου» βρίσκει την μέση τιμή κάθε στοιχείου που περικλείει ένα κόμβο και εφαρμόζει αυτή τη μέση τιμή στον κόμβο (οι φυσικές ασυνέχειες διατηρούνται). Οι επιλεγείσες μέσες τιμές χρησιμοποιούνται σε όλες τις εντολές του μετ-επεξεργαστή, αλλά μερικές εντολές μπορούν να χρησιμοποιήσουν και τις κανονικές τιμές (αυτές που δεν έχουν υποστεί τη διαδικασία «μέσης τιμής»). Σύγκριση των «μέσων τιμών» και των κανονικών τιμών πεδίου επιτρέπει μια εκτίμηση των τοπικών και ολικών σφαλμάτων στη λύση. Αυτές οι εκτιμήσεις σφάλματος υπολογίζονται ακολουθώντας τη διαδικασία «μέσης τιμής» του πεδίου και μπορούν να εμφανιστούν με τον ίδιο τρόπο που εμφανίζονται τα πεδία.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία  $B$  και  $H$ , μπορούν επίσης να υπολογισθούν με την ολοκλήρωση των μαγνητίσεων και των πυκνοτήτων ρεύματος σε κάθε στοιχείο.

#### **4.4 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων**

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό λύσης των μερικών διαφορικών ή ολοκληρωτικών εξισώσεων που είναι δύσκολο να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους [31]. Οι μερικές διαφορικές και ολοκληρωτικές εξισώσεις περιγράφουν ένα πεδίο είτε άμεσα με τις μεταβλητές του πεδίου αυτού π.χ. την πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  είτε χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση που σχετίζεται με το πεδίο μέσω των  $grad$  και  $div$ . 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.

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

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = \rho \quad (4.1)$$

Η συνάρτηση δυναμικού μπορεί να είναι ένα ηλεκτροστατικό δυναμικό. Σε αυτή την περίπτωση, το  $\rho$  θα είναι γραμμική πυκνότητα φορτίου. Για να οριστεί το δυναμικό χρειάζονται οριακές συνθήκες που μπορεί να είναι είτε τιμές του δυναμικού, είτε της παραγώγου του, για παράδειγμα:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (4.2)$$

Για την λύση της εξίσωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος διαιρείται σε στοιχεία όγκου. Μέσα σε κάθε τέτοιο στοιχείο το δυναμικό θα προσεγγίζεται από το γραμμικό πολυώνυμο:

$$\phi(x) = \alpha + \beta \cdot x \quad (4.3)$$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό θα είναι συνεχές στο χώρο, παρ' όλο που η παράγωγος του μπορεί να είναι ασυνεχής αν και η επιτρεπτικότητα  $\varepsilon$  είναι ασυνεχής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να μπορεί να δείξει αυτή την συμπεριφορά έτσι είναι βολικό η εξίσωση (4.3) να χαρακτηρίζεται από τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους του στοιχείου και να χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές για άλλα πολυώνυμα που έχουν κοινό κόμβο.

Μια περαιτέρω απλοποίηση μπορεί να γίνει τροποποιώντας την εξίσωση (4.3) με όρους κομβικών συναρτήσεων  $N_i$  που καθορίζονται ως εξής:

$$N_i(x) = 1, \quad x = x_i \quad (4.4)$$

$$N_i(x) = 0, \quad x = x_j \quad j \neq i$$

όπου  $x_i$  είναι η  $x$  συντεταγμένη του κόμβου  $i$ .

Η εξίσωση (4.3) μπορεί τώρα να πάρει την μορφή:



$$\phi(x) = N_1(x) \cdot \phi_1 + N_2(x) \cdot \phi_2 \quad (4.5)$$

Οι συναρτήσεις  $N_i$  εκφράζονται σε όρους τοπικών συντεταγμένων μέσα στο στοιχείο. Χρησιμοποιώντας το σύστημα τοπικών συντεταγμένων  $\xi$  οι συναρτήσεις  $N_i$  γράφονται ως εξής:

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

$$N_2 = \frac{1}{2} \cdot (1 + \xi) \quad (4.6)$$

$$-1 \leq \xi \leq 1$$

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

Η μέθοδος υπολογισμού του δυναμικού  $\phi$  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 (4.2). 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  $\phi$  καθορίζεται από την απαίτηση να ικανοποιείται η παρακάτω συνάρτηση:

$$\int W(\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi - \rho) \cdot dx = 0 \quad (4.7)$$

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

Ολοκληρώνοντας την (4.7) κατά τμήματα, προκειμένου να μειωθεί η τάξη της διαφορίσης που εφαρμόζεται στο  $\phi$ , προκύπτει μια προσεγγιστική λύση για το δυναμικό  $\phi$ :

$$\int_a^b (\nabla W \cdot \varepsilon \nabla \phi + W \rho) dx - [W \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x}]_a^b = 0 \quad (4.8)$$

όπου  $a, b$  τα όρια ολοκλήρωσης της εξίσωσης.

Η εξίσωση (4.8) οδηγεί κατευθείαν σε αριθμητικό υπολογισμό της λύσης χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία και τις συναρτήσεις  $N_i$  που εξηγήθηκαν πιο πάνω. Η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης πλεονεκτεί έναντι των άλλων, αφού οι συναρτήσεις  $W$  και  $\phi$  δε χρειάζονται συνεχή παραγωγή και επιπλέον καθορίζονται εύκολα οι φυσικές οριακές συνθήκες στην επιφάνεια της περιοχής  $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ .

Ο τομέας από  $a$  έως  $b$  διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι δίνουν ένα συνδυασμό ανεξάρτητων συναρτήσεων βάρους. Από αυτές τις συναρτήσεις βάρους μπορούν να αναπτυχθούν εξισώσεις με την απαίτηση ότι η εξίσωση (4.8) ικανοποιείται για κάθε συνάρτηση βάρους.

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

$$\sum_j \left( \int_a^b (\nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j \phi_j + N_i \rho) dx \right) - \left[ N_i \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_a^b = 0 \quad (4.9)$$

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:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{\Phi} = \mathbf{S} \quad (4.10)$$

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

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

$$K_{ij} = \int_a^b \nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j dx \quad (4.11)$$

Αξίζει να σημειωθεί, ότι, παρ' όλο που η ολοκλήρωση στην εξίσωση (4.11) γίνεται για όρια από  $a$  έως  $b$ , μόνο τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και τους δύο κόμβους  $i$  και  $j$  συνεισφέρουν.

Ο εξισώσεις στη σχέση (4.10) συχνά δεν είναι γραμμικές επειδή η επιτρεπτότητα  $\varepsilon$  εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, που προφανώς δεν είναι γραμμική.

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

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n - \mathbf{J}_n^{-1} \cdot \mathbf{R}_n \quad (4.12)$$

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

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{K}_n \cdot \Phi_n - \mathbf{S}_n \quad (4.13)$$

και η Ιακωβιανή  $\mathbf{J}_n$  από την:

$$\mathbf{J}_n = \frac{\partial}{\partial \Phi_n} (\mathbf{K}_n \cdot \Phi_n - \mathbf{S}_n) \quad (4.14)$$

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

#### 4.4.1 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων

Οι χρήστες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να αποδείξουν ότι το μοντέλο είναι σύμφωνο με το φυσικό πρόβλημα [31]. 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:

- Επίλυση του απλούστερου δυνατού προβλήματος, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας γραμμικά υλικά ή υλικά με μοναδιαία ή μεγάλη σχετική διαπερατότητα ή επιτρεπτότητα.
- Έλεγχος ότι η λύση έχει την αναμενόμενη συμμετρία.
- Έλεγχος ότι η λύση συμφωνεί με τις προβλέψεις που προέκυψαν μέσω της απλής γραμμικής ολοκλήρωσης (εφ' όσον είναι εφαρμόσιμη η προσέγγιση της άπειρης διαπερατότητας)
- Εάν το πεδίο είναι χρονομεταβλητό, κρίνεται σκόπιμος ο έλεγχος ότι οι σταθερές του χρόνου συμφωνούν τα μοντέλα ισοδυνάμων κυκλωμάτων.

#### 4.4.2 Συναρτήσεις λάθους

Το πρόγραμμα PC OPERA-2d χρησιμοποιεί τεχνικές εκτίμησης λάθους προκειμένου να υπολογίσει το τοπικό και το καθολικό λάθος του πεδίου, που παράγεται από επιλύσεις μέσω δυναμικού. Κατά την προ- και την μετ-επεξεργασία το τοπικό λάθος (σε μονάδες πυκνότητας ροής) και το *rms* λάθος μπορούν να προσεγγιστούν μέσω των συναρτήσεων του συστήματος ERROR και RMSERROR. Οι τιμές του *rms* λάθους υπολογίζονται από το πρόγραμμα με δύο τρόπους:

- «RMS λάθος του συνολικού προβλήματος» είναι η τιμή που αποθηκεύεται στη μεταβλητή του συστήματος RMSERROR. Αυτή υπολογίζεται μέσω των σχετικών λαθών σε κάθε στοιχείο.
- «RMS λάθος με βάρη» χρησιμοποιεί τα μεγέθη των στοιχείων ως βάρη στους υπολογισμούς, ώστε τα μικρότερα στοιχεία να έχουν μικρότερη συμμετοχή στην τιμή του λάθους.

#### 4.5 Συνοριακές συνθήκες

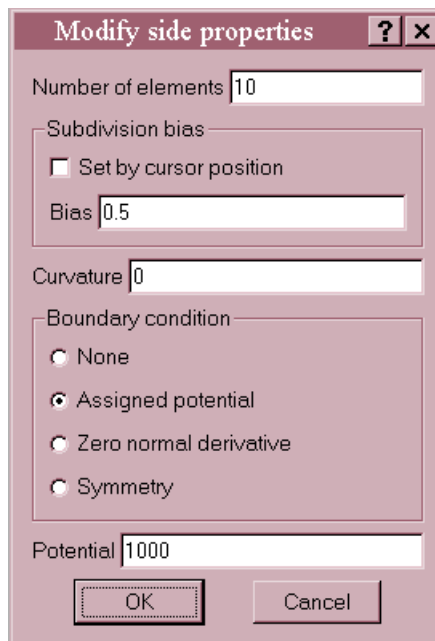
Οι συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται για δύο λόγους, αφ' ενός παρέχουν τον τρόπο ώστε να μειωθεί το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων κατά την

αναπαράσταση συμμετρικών προβλημάτων και αφ' ετέρου προσεγγίζουν το μαγνητικό πεδίο σε μεγάλες αποστάσεις από τη διάταξη.

Τα προβλήματα συμμετρίας και τα συμμετρικά πεδία υποδηλώνονται με συνοριακές συνθήκες δυναμικού εφαρμοζόμενες στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Οι απλούστεροι τύποι συνοριακών συνθηκών είναι:

ΑΠΛΕΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ		
Συμμετρικό πεδίο	Βαθμωτό δυναμικό	Διανυσματικό δυναμικό
$\mathbf{H}_n = 0$ ή $\mathbf{B}_n = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\mathbf{A} = \text{constant}$
$\mathbf{H}_t = 0$ ή $\mathbf{B}_t = 0$	$\phi = \text{constant}$	$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} = 0$

Στο ηλεκτροστατικό πεδίο οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων πρέπει να προσδιοριστούν με συνοριακή συνθήκη δυναμικού ( $v = \text{value}$ ). Στο σχήμα 4.13 φαίνεται η διαδικασία αυτή μέσω της εντολής “assigned potential”.



Σχήμα 4.13: Ορισμός δυναμικού

Εκτός από αυτή την περίπτωση, οι υπόλοιπες συνοριακές συνθήκες που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Η συνθήκη που εφαρμόζεται από το πρόγραμμα, εάν καμία συνθήκη δεν οριστεί σε μία εξωτερική επιφάνεια, είναι:

ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ		
Συμμετρικό πεδίο	Βαθμωτό δυναμικό	Διανυσματικό δυναμικό
$\mathbf{H}_n = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	
$\mathbf{B}_t = 0$		$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} = 0$

## 4.6 Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιεί το PC OPERA-2d

### 4.6.1 Μαγνητοστατική και δινορρεύματα

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $\mathbf{H}$ ) και η πυκνότητα ρεύματος ( $\mathbf{J}$ ) συνδέονται με τη σχέση:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.15)$$

ενώ η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $\mathbf{E}$ ) συνδέεται με την πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mathbf{B}$ ) με την σχέση:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\mathbf{B}}{t} \quad (4.16)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας μαγνητικής ροής ( $\mathbf{B}$ ) ισούται με μηδέν

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.17)$$

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της διαπερατότητας ως εξής:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot (\mathbf{H} - \mathbf{H}_c) \quad (4.18)$$

όπου  $\mathbf{H}_c$  η δύναμη κάθε μόνιμου μαγνήτη.

Η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της έντασης ηλεκτρικού πεδίου και της αγωγιμότητας  $\sigma$  με την σχέση:

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (4.19)$$

Το διάνυσμα μαγνητικού δυναμικού ( $\mathbf{A}$ ) ορίζεται ως:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.20)$$

και το βαθμωτό δυναμικό ( $\phi$ ) ως:

$$\mathbf{H} = -\nabla\phi \quad (4.21)$$

#### 4.6.2 Ηλεκτροστατική

Η διηλεκτρική μετατόπιση ( $\mathbf{D}$ ) και η πυκνότητα φορτίου συνδέονται με την σχέση:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4.22)$$

και η ένταση ηλεκτρικού πεδίου και η επιτρεπτότητα συνδέονται με τη διηλεκτρική μετατόπιση μέσω της:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad (4.23)$$

Το ηλεκτρικό δυναμικό ( $V$ ) ορίζεται ως:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4.24)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας ρεύματος ( $\mathbf{J}$ ) ισούται με μηδέν:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4.25)$$

#### 4.7 Στατική ανάλυση

Η στατική ανάλυση των πεδίων του PC-OPERA επιλύει σταθερό μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο. Το μοντέλο μπορεί να περιέχει υλικά με μη γραμμική διαπερατότητα  $\mu$  ή επιτρεπτότητα  $\varepsilon$  σε σύστημα καρτεσιανών ή κυλινδρικών συντεταγμένων. Μπορούν επίσης να λυθούν και άλλοι τύποι πεδίων όπως, για παράδειγμα, πεδία που περιγράφονται από μη-γραμμικές εξισώσεις Poisson ή από ροή ηλεκτρικών ρευμάτων.

#### 4.7.1 Οι εξισώσεις που επιλύονται

Το OPERA-2d/St υπολογίζει το βαθμωτό ή διανυσματικό δυναμικό που καθορίζεται από μια μη γραμμική εξίσωση Poisson [31]. Το διανυσματικό δυναμικό συνήθως χρησιμοποιείται για ανάλυση μαγνητικών πεδίων επειδή τα αποτελέσματα του βαθμωτού δυναμικού δεν μπορούν να περιέχουν ρεύμα σαν πηγή των πεδίων, ωστόσο αν ένα μοντέλο έχει σαν διέγερση μόνο οριακές συνθήκες ή μόνιμους μαγνήτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο μορφές δυναμικού. Η εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί στην περίπτωση μαγνητοστατικού πεδίου που χρησιμοποιεί διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό είναι η εξής:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \vec{H}_c \right) = \vec{J} \quad (4.26)$$

Η αντίστοιχη εξίσωση στην περίπτωση υπολογισμού βαθμωτού δυναμικού είναι:

$$\nabla \mu (\nabla \phi - \mathbf{H}_c) = \rho \quad (4.27)$$

Η τιμή του  $\rho$  πρέπει να είναι μηδενική για το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό, ενώ εάν το  $\phi$  είναι βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό τότε το  $\rho$  είναι πυκνότητα φορτίου. Ο όρος  $\mathbf{H}_c$  παριστάνει μόνιμους μαγνήτες για ανάλυση μαγνητικών πεδίων και ηλεκτρήτες για ανάλυση ηλεκτρικών πεδίων.

#### 4.7.2 Προετοιμασία για επίλυση με το OPERA-2d/St

Τα δεδομένα που χρειάζονται για την ανάλυση ενός μοντέλου εισάγονται με την εντολή **Solution type**. Ο χρήστης μπορεί να δώσει τις πιο κάτω εντολές:

- Γραμμική ή μη γραμμική λύση

Για γραμμική επίλυση χρησιμοποιείται η τιμή της επιτρεπτότητας που δίνεται ως παράμετρος της περιοχής ενώ για μη γραμμική επίλυση (μη γραμμικά υλικά) χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές BH ή DE.

- Καθορισμός η όχι του πλέγματος



Με αυτή την εντολή ο χρήστης επιλέγει αν το πλέγμα ορίζεται αυτόματα από την ανάλυση ή αν ορίζεται από τον χρήστη. Αν το πλέγμα ορίζεται από τον χρήστη τότε μπορούν να δοθούν:

- Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων
- Ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων
- Τελική ακρίβεια σύγκλισης %
- Συντελεστής κλίμακας. Ο συντελεστής κλίμακας πολλαπλασιάζει τις τιμές των φορτίων, της πυκνότητας ρεύματος και τις μη μηδενικές οριακές συνθήκες.
- Νέα λύση ή φόρτωση της ήδη υπάρχουσας

#### **4.7.3 Επίλυση προβλήματος με το OPERA-2d/St**

Η επίλυση προβλημάτων με την στατική ανάλυση γίνεται από το κύριο μενού του προγράμματος και ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

- Εισάγεται το αρχείο του μοντέλου που είναι σε μορφή (.op2)
- Επιλογή στατικής ανάλυσης
- Επεξεργασία αρχείου (.op2)
- Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο μορφής (.st)
- Έξοδος από το πρόγραμμα ανάλυσης

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ανοίγουμε το αρχείο μορφής (.st) που έχει δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ανάλυσης.

## **Κεφάλαιο 5**

### **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PC OPERA**

#### **5.1 Προσομοίωση συνθετικού μονωτήρα και σύγκριση των αποτελεσμάτων**

##### **5.1.1 Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του μονωτήρα στο πρόγραμμα PC OPERA**

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσομοιωθούν δύο διαφορετικά είδη συνθετικών μονωτήρων. Ο πρώτος ελήφθη από την εργασία των Que και Sebo [3], επομένως θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που θα πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα PC OPERA με τα δεδομένα που εξάγονται από τη μελέτη τους. Υπενθυμίζουμε ότι τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν κατά τη μελέτη ενός μονωτήρα είναι η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, μέσα, στην επιφάνεια και στην ευρύτερη περιοχή ενός μονωτήρα.

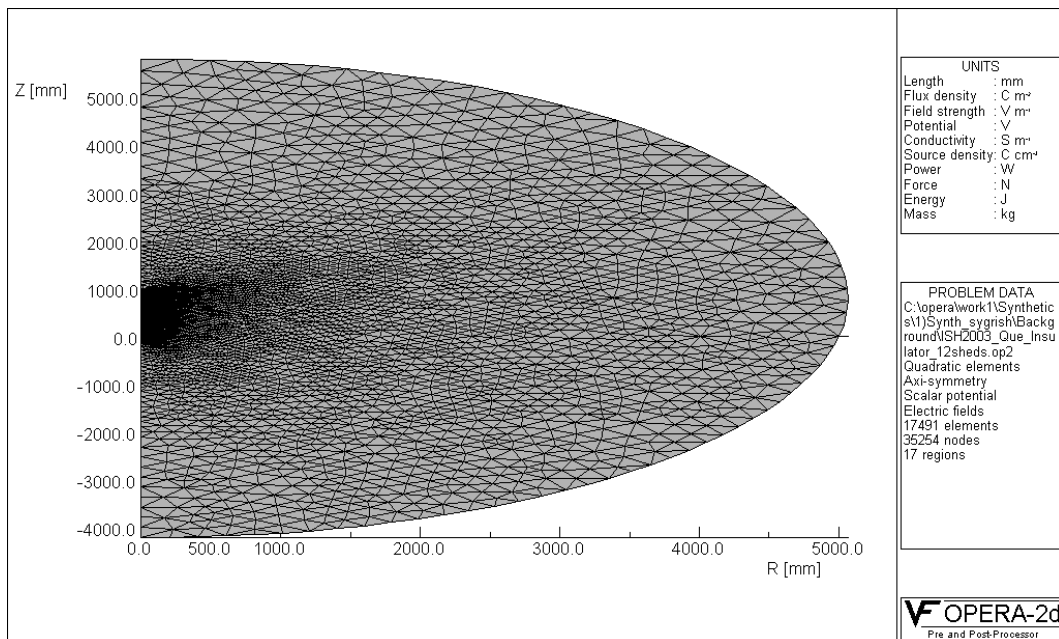
Η διάταξη ενός συνθετικού μονωτήρα αποτελείται από 4 εξαρτήματα: μια ράβδο από υαλώδεις ίνες (*fiberglass*), ένα πολυμερές περίβλημα της ράβδου, πολυμερείς «δισκοειδείς πτυχές» (*sheds*) και δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Στο κάτω ηλεκτρόδιο του συγκεκριμένου μοντέλου εφαρμόζεται τάση 1000 V, ενώ το άνω είναι γειωμένο. Ο σίδηρος, που συνιστά το υλικό των ηλεκτροδίων, έχει ειδική αντίσταση  $\rho = 105 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ . Επειδή το PC OPERA δέχεται ως δεδομένο στον καθορισμό των υλικών την ειδική αγωγιμότητα, για το σίδηρο ισχύει ότι  $\sigma = 9.5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ . Η διηλεκτρική σταθερά της ράβδου είναι  $\epsilon_r = 7.2$  και του πολυμερούς υλικού 4.3.

Στην εργασία τους [3] οι Que και Sebo διαπιστώνουν ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα απλοποιημένο μοντέλο μονωτήρα με μόνο ένα μικρό αριθμό πτυχών στα δύο άκρα του, ώστε να υπολογιστεί η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και της τάσης στην κοντινή περιοχή του «πλήρους» μονωτήρα, χωρίς σημαντική επίδραση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αντικείμενο της παρούσας προσομοίωσης είναι η επιβεβαίωση του πορίσματος αυτού. Έτσι, λοιπόν, θα

συγκριθούν παρακάτω τα χαρακτηριστικά και των δύο διατάξεων, τόσο μεταξύ τους, όσο και με τα δεδομένα της παραπάνω εργασίας.

### 5.1.2 Δημιουργία πλέγματος

Προκειμένου να κατασκευαστεί το πλέγμα της συνολικής διάταξης, κάθε γραμμή σχεδιασμού του μονωτήρα χωρίστηκε σε κατάλληλο αριθμό τμημάτων. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθείται στο συγκεκριμένο υπολογιστικό περιβάλλον προσομοίωσης, οι γραμμές κοντά στα κρίσιμα σημεία διαμερίστηκαν σε περισσότερα τμήματα, ώστε στα σημεία αυτά να δημιουργηθεί πυκνότερο πλέγμα [33]. Στο Σχήμα 5.1 εμφανίζεται το πλέγμα της συνολικής διάταξης, που συμπεριλαμβάνει το μονωτήρα, καθώς και μια περιοχή που οριοθετεί ένα εξωτερικό όριο στο πρόβλημα. Να τονίσουμε ότι στην κοντινή περιοχή του μονωτήρα, σχεδιάστηκε μια επιπλέον περιοχή του αέρα, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια.

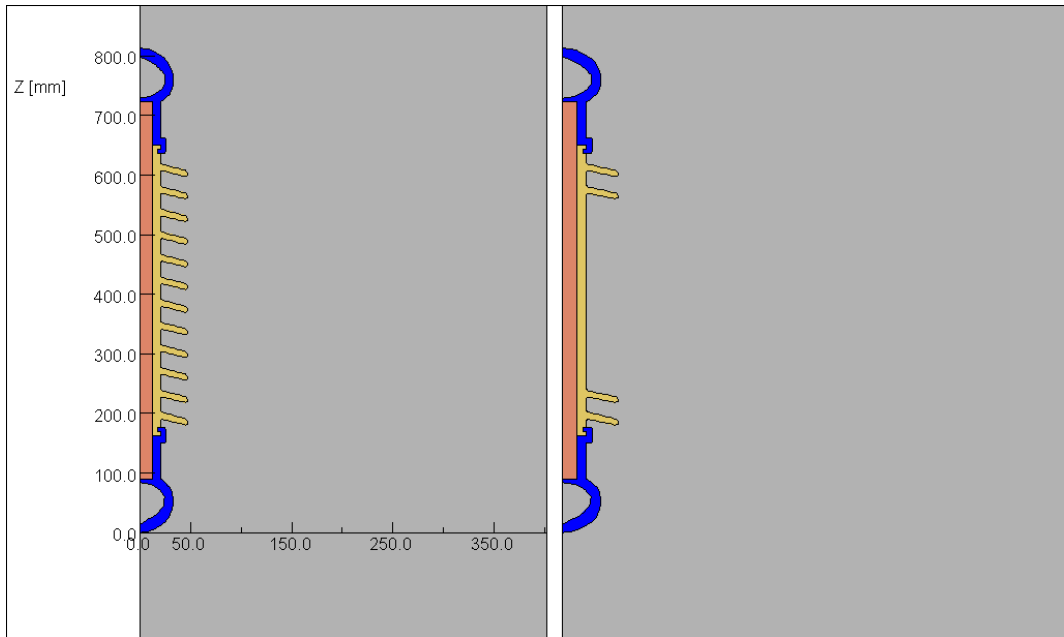


Σχήμα 5.1: Το πλέγμα της συνολικής διάταξης

Πρέπει να τονιστεί ότι το πρόγραμμα PC OPERA, προκειμένου να προσομοιώσει μία διάταξη, απαιτεί την εισαγωγή μιας τέτοιας περιοχής. Στην περίμετρό της, που συμβολίζει το άπειρο, ορίστηκε το δυναμικό ίσο με μηδέν. Τέλος, το μέγεθος του εξωτερικού περιβλήματος ορίστηκε μετά από δοκιμές, ούτως ώστε να μην επηρεάζει την κατανομή του δυναμικού στην περιοχή γύρω από το μονωτήρα.

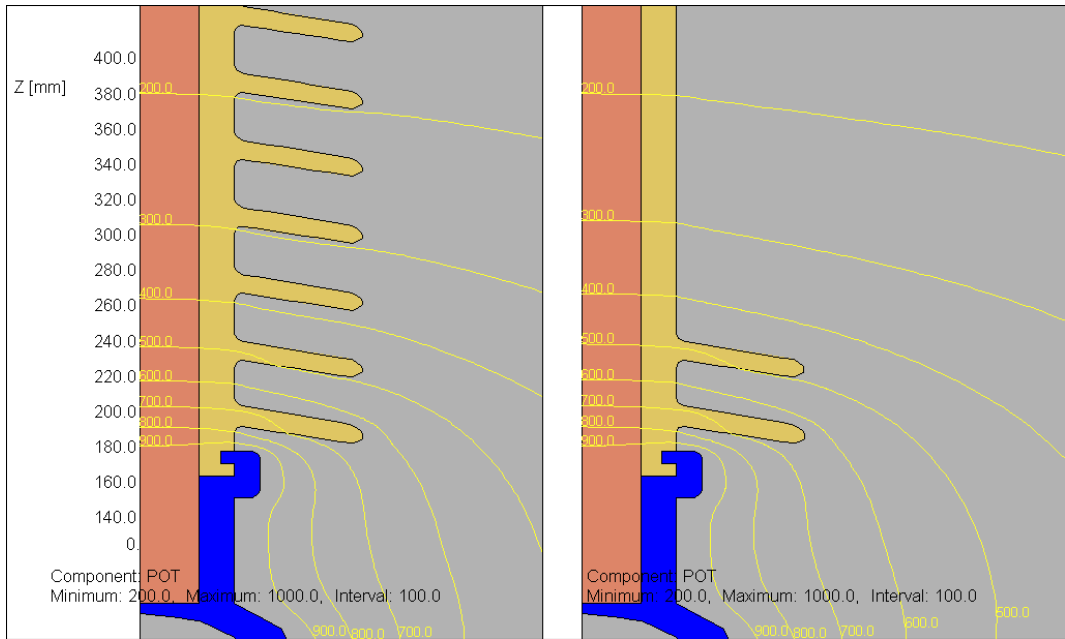
### 5.1.3 Κατανομή του δυναμικού

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται μια μεγέθυνση του μονωτήρα που παριστάνεται στο Σχήμα 5.1, αρχικά του πλήρους μοντέλου και στη συνέχεια του απλοποιημένου μοντέλου που προτείνουν οι δύο ερευνητές, όπως αυτά σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης PC OPERA.

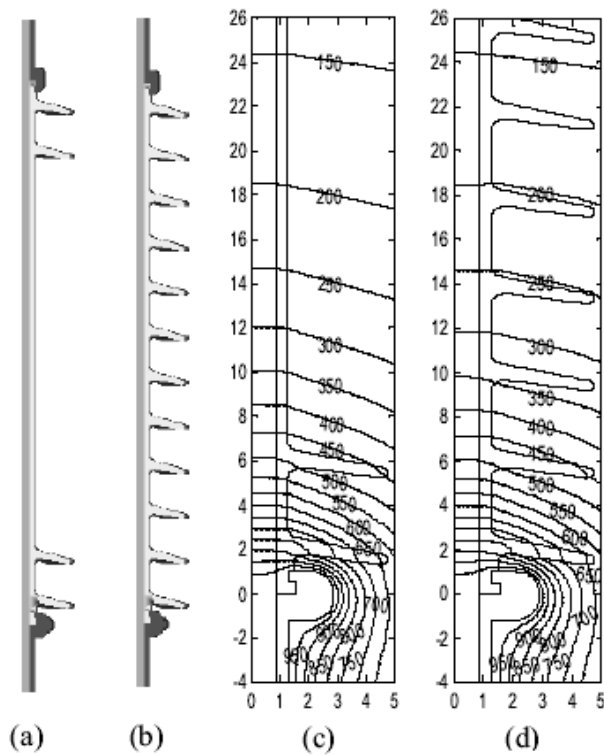


Σχήμα 5.2: Το πλήρες και το απλοποιημένο ισοδύναμο μοντέλο του μονωτήρα

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 5.3, εστιάζοντας στην περιοχή που, κυρίως, εξαπλώνεται το δυναμικό, διακρίνουμε την κατανομή του δυναμικού στο μονωτήρα και στη γύρω περιοχή του, συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα. Παρατηρούμε ότι οι κατανομές είναι ιδιαίτερα παραπλήσιες, αφού οι θέσεις των ισοδυναμικών γραμμών σχεδόν ταυτίζονται. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού των δύο μοντέλων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δύο ερευνητών. Είναι εμφανής η ομοιότητα μεταξύ των δύο προσομοιώσεων, γεγονός που επιβεβαιώνει την καλή συμπεριφορά του προγράμματος PC OPERA στην προσομοίωση των μονωτήρων.



Σχήμα 5.3: Ισοδυναμικές γραμμές του δυναμικού στον πλήρη και στον απλοποιημένο μονωτήρα



Σχήμα 5.4: Κατανομή δυναμικού σύμφωνα με την προσομοίωση των Que και Sebo (a) απλοποιημένο μοντέλο μονωτήρα, (b) πλήρες μοντέλο μονωτήρα, (c) ισοδυναμικές γραμμές του απλοποιημένου μοντέλου (d) ισοδυναμικές γραμμές του πλήρους μοντέλου

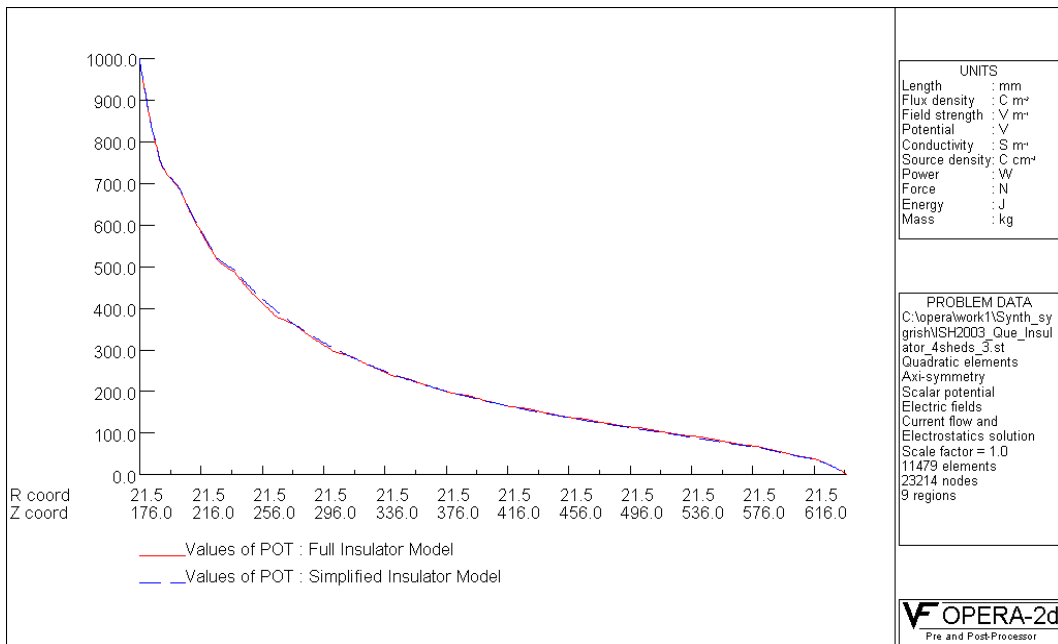
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα. Στο πρώτο, του Σχήματος 5.5, διακρίνονται οι γραφικές παραστάσεις των δύο κατανομών του δυναμικού, όπου υπολογίζονται οι κατανομές στην επιφάνεια του πολυμερούς περιβλήματος της ράβδου, κατά μήκος ευθείας που συνδέει τις άκρες των δύο ηλεκτροδίων και είναι παράλληλη με τον κορμό του μονωτήρα. Οι δύο γραφικές παραστάσεις συμπίπτουν, εμφανίζοντας μικρές, μόνο, αποκλίσεις και επιβεβαιώνοντας, ουσιαστικά, την ορθότητα της απλοποίησης του αρχικού, «πλήρους» μοντέλου του μονωτήρα.

Επίσης, στο Σχήμα 5.6 διακρίνονται οι ίδιες κατανομές του δυναμικού, όπως αυτές ελήφθησαν από τους Que και Sebo. Παρατηρούμε ότι και στη δική τους έρευνα οι δύο κατανομές ουσιαστικά ταυτίζονται.

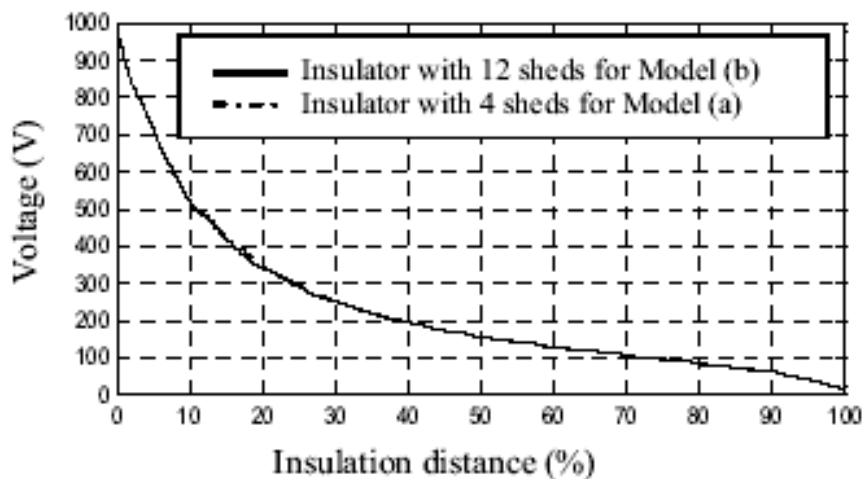
Ταυτόχρονα, συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.5 και 5.6 μεταξύ τους, καταλήγουμε πάλι στη διαπίστωση ότι, τουλάχιστον ως προς την κατανομή του δυναμικού, τα αποτελέσματα της παρούσας προσομοίωσης προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα δεδομένα της έρευνας των Que και Sebo. Οι μικρές αποκλίσεις που παρουσιάζονται, ενδεχομένως να οφείλονται σε διαφορές ως προς τη σχεδίαση των μοντέλων, μια και ήταν διαθέσιμα ενδεικτικά στοιχεία για τις διαστάσεις των εξαρτημάτων του μονωτήρα και όχι απόλυτα ακριβή.

Ένα επιπλέον συμπέρασμα που προκύπτει από τις γραφικές παραστάσεις, είναι ότι η κατανομή της τάσης κατά μήκος της ορισμένης ευθείας είναι μη γραμμική σε ένα συνθετικό μονωτήρα.

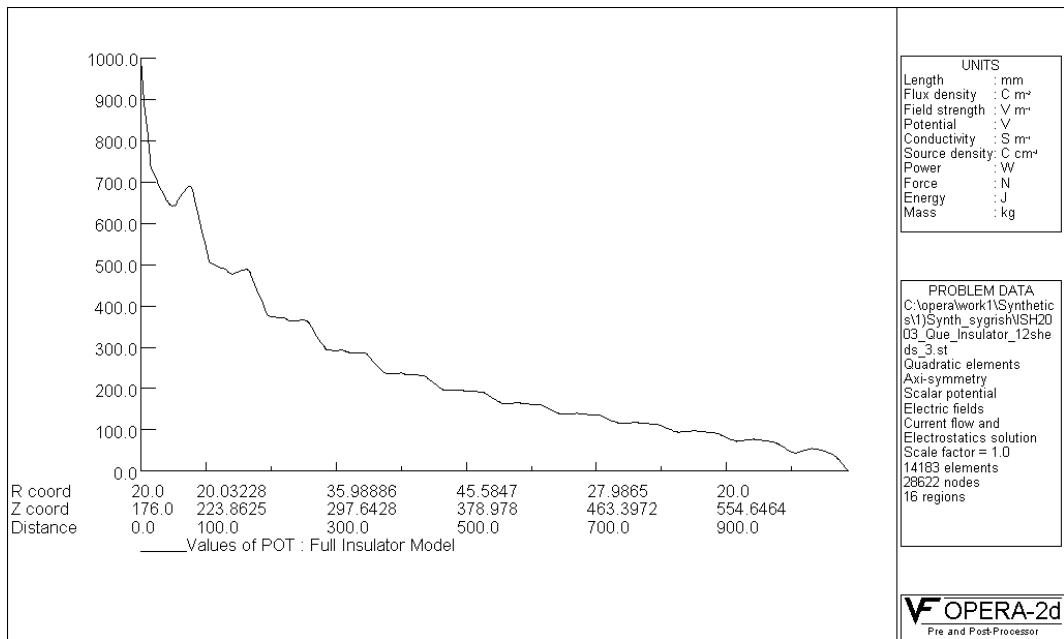
Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, περιγράφουν με ικανοποιητικό τρόπο τη γενική μορφή της κατανομής του δυναμικού. Πρέπει, ωστόσο, να τονιστεί ότι δε μας δίνουν πλήρη εικόνα για τις μεταβολές του δυναμικού που λαμβάνουν χώρα κατά το μήκος ερπυσμού, δεν αναδεικνύουν, δηλαδή, την ανομοιομορφία που επικρατεί στην επιφάνεια των δισκοειδών πτυχών. Για αυτό και στο Σχήμα 5.7 διακρίνουμε την κατανομή του δυναμικού κατά το μήκος ερπυσμού του απλοποιημένου μοντέλου του μονωτήρα, από την οποία μπορούν να εξαχθούν πρόσθετα συμπεράσματα.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού μεταξύ των δύο μοντέλων κατά μήκος ευθείας παράλληλης με τον κορμό του μονωτήρα



Σχήμα 5.6: Γραφική παράσταση της μεταβολής του δυναμικού στη μελέτη των Que και Sebo



Σχήμα 5.7: Κατανομή του δυναμικού κατά το μήκος ερπυσμού

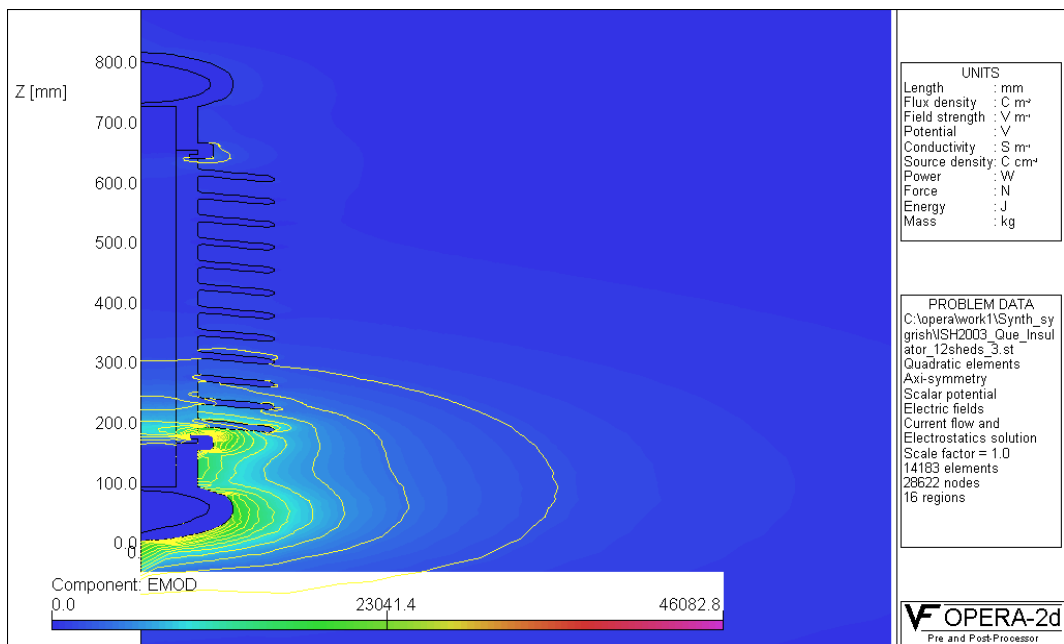
Στο Σχήμα 5.7 παρατηρείται ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται το δυναμικό, διατρέχοντας το μήκος ερπυσμού του απλοποιημένου μονωτήρα. Είναι εμφανές ότι στην επιφάνεια των δισκοειδών πτυχών – ιδιαίτερα αυτού που βρίσκεται πλησιέστερα στο φορτισμένο ηλεκτρόδιο – υπάρχει έντονη ανομοιομορφία. Η ανομοιομορφία, μετά από πιο προσεκτική μελέτη, εμφανίζεται στην επιφάνεια του πολυμερούς περιβλήματος της ράβδου μεταξύ των πτυχών. Συγκεκριμένα, μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου δίσκου, όπου η μεταβολή αυτή είναι πιο έντονη, το δυναμικό από 689.32 V καταλήγει στα 516.34 V, μειώνεται δηλαδή κατά 25.09%. Η περιοχή αυτή ενδέχεται, επομένως, να δίνει έντονες διαφοροποιήσεις στις τιμές της έντασης. Επίσης παρατηρούμε ότι στις άκρες των πτυχών υπάρχει επίσης μια απότομη, σε σχέση με το μικρό μήκος του συγκεκριμένου τμήματος, μεταβολή της τάσης. Τα άκρα των πτυχών είναι ιδιαίτερα κρίσιμες περιοχές, καθώς, συχνά, εμφανίζονται εκεί υψηλές τιμές της έντασης, που συμβάλλουν στην εμφάνιση των μερικών τόξων.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της κατανομής του δυναμικού, διαπιστώνουμε ότι, προκειμένου να μειώσουμε την πολυπλοκότητα του μοντέλου, άρα και το χρόνο υπολογισμού, είναι θεμιτό να απλοποιηθεί το μοντέλο, μειώνοντας τον αριθμό των πτυχών.

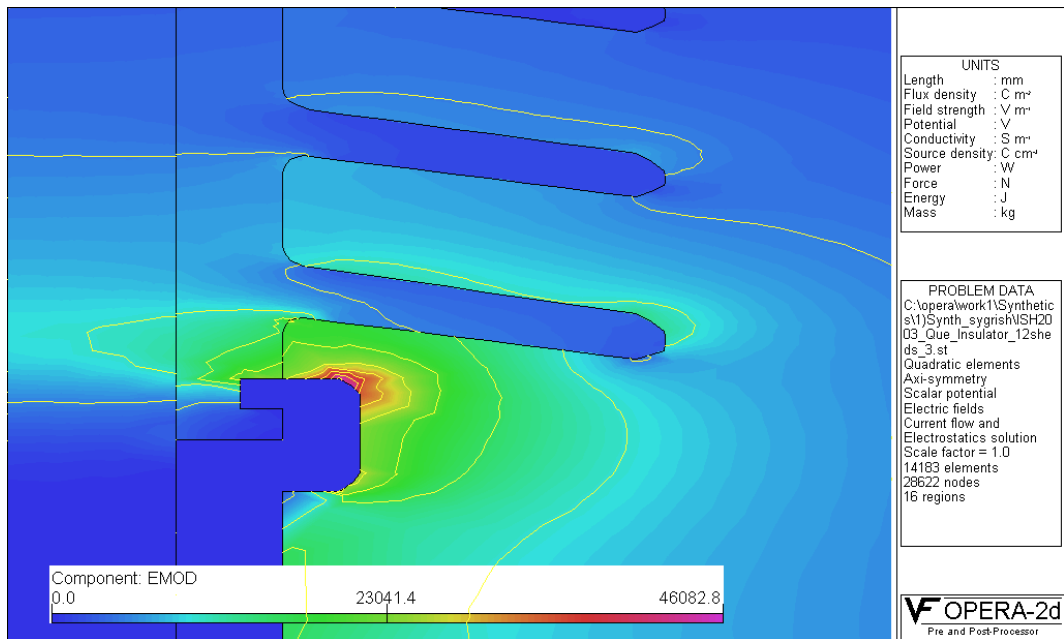


### 5.1.4 Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Παρόμοια με την κατανομή του δυναμικού, στο Σχήμα 5.8 διακρίνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη συνολική διάταξη. Επειδή όμως η ένταση ελαττώνεται με γρήγορο ρυθμό, στο Σχήμα 5.9 φαίνεται ευκρινέστερα η κατανομή της, εστιάζοντας στην περιοχή γύρω από το κάτω ηλεκτρόδιο του μονωτήρα. Η ένταση έχει αυξημένες τιμές κοντά στο ηλεκτρόδιο και η μέγιστη τιμή της είναι 46082.8 V/m. Το τμήμα του σωληνοειδούς πυρήνα από υαλώδεις ίνες που περικλείεται από το ηλεκτρόδιο, εμφανίζει μηδενική ένταση στο εσωτερικό του, γεγονός αναμενόμενο, αφού το ηλεκτρόδιο που περικλείει το συγκεκριμένο τμήμα έχει δυναμικό 1000 V, δημιουργώντας μια αγωγίμη φορτισμένη επιφάνεια γύρω του.

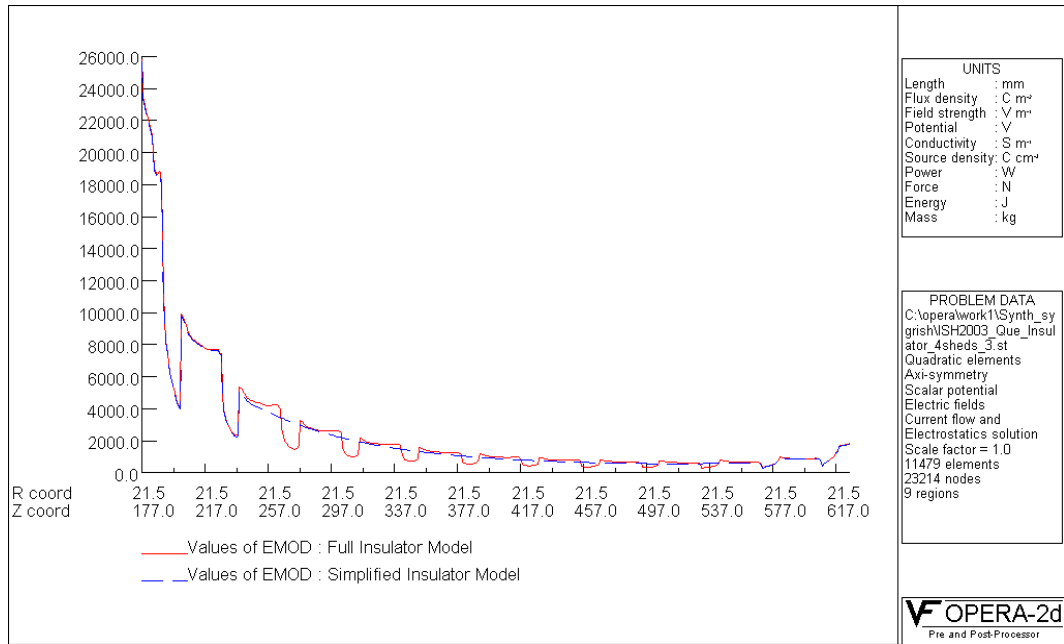


Σχήμα 5.8: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη συνολική διάταξη

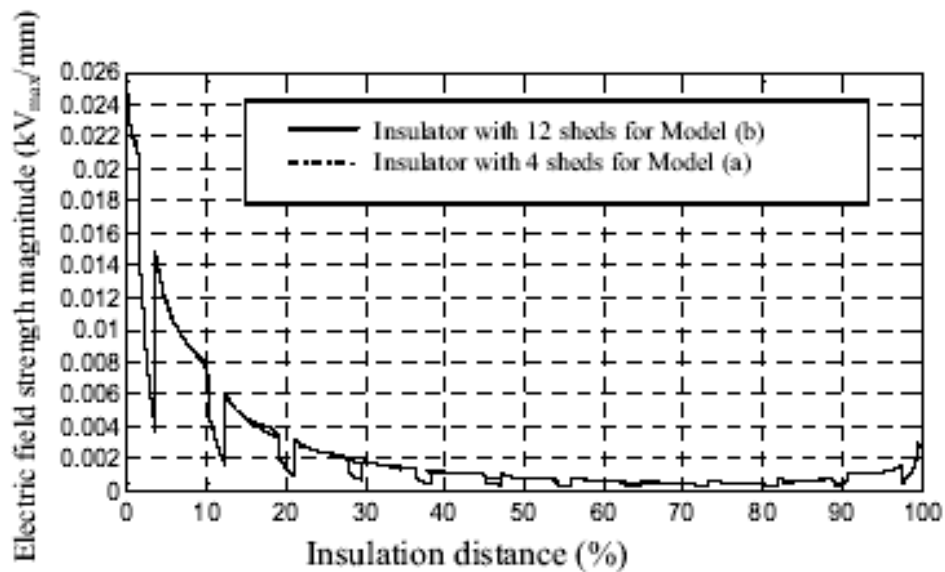


Σχήμα 5.9: Εστίαση στην περιοχή γύρω από το φορτισμένο ηλεκτρόδιο

Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση της κατανομής της έντασης των δύο μοντέλων στο Σχήμα 5.10, επιβεβαιώνεται η ορθότητα της απλοποίησης του μοντέλου του μονωτήρα και η χρήση ενός περιορισμένου αριθμού πτυχών. Οι βυθίσεις του διαγράμματος του ηλεκτρικού πεδίου, οφείλονται στο γεγονός ότι η ευθεία στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί διέρχεται εντός των πολυμερών δίσκων, στους οποίους η τιμή της έντασης μειώνεται αισθητά. Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις, παρατηρούμε ότι στην περιοχή γύρω από τα δύο ηλεκτρόδια που περιλαμβάνει τις κοινές πτυχές, οι δύο γραφικές παραστάσεις ταυτίζονται. Στην περιοχή όπου έχουν απαλειφθεί οι ενδιάμεσες πτυχές, παρουσιάζεται μια ελαφριά μεταβολή στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, που δεν επηρεάζει, όμως, καθοριστικά τα εξαγόμενα συμπεράσματα και τη γενική μορφή του διαγράμματος της έντασης.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των δύο μοντέλων κατά μήκος του κορμού του μονωτήρα

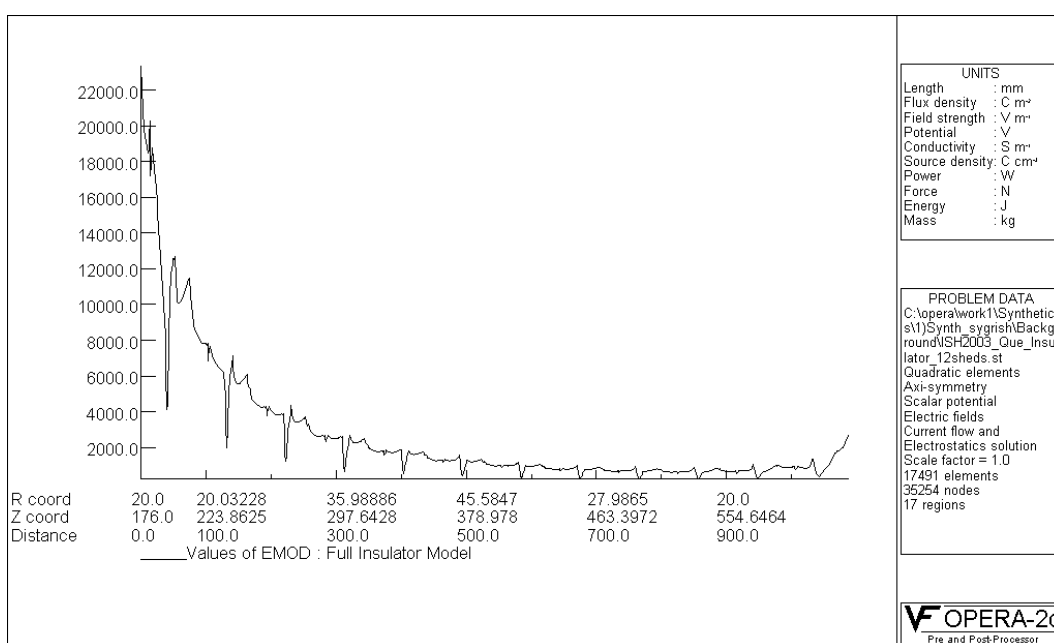


Σχήμα 5.11: Μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη μελέτη των Que και Sebo

Οι γραφικές παραστάσεις που δίνονται στην υπό σύγκριση μελέτη και διακρίνονται στο Σχήμα 5.11, προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα διαγράμματα που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία. Στην εργασία των Que και Sebo η μέγιστη τιμή της έντασης είναι  $E_{max} = 0.0256 \text{ kV/mm}$ , τιμή που επιβεβαιώνεται και στην παρούσα εργασία, καθώς η μέγιστη τιμή στη συγκεκριμένη ευθεία που λαμβάνονται οι μετρήσεις είναι

$E_{\max} = 25656 \text{ V/m}$ . Βέβαια, όπως διαπιστώθηκε και παραπάνω, αυτή δεν είναι η μέγιστη τιμή της έντασης στη συνολική διάταξη. Αυτή παρουσιάζεται στο άκρο του φορτισμένου ηλεκτροδίου και είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε,  $E'_{\max} = 46083 \text{ V/m}$ , σε σημείο, όμως, που δε σχετίζεται με το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα, άρα, ουσιαστικά, δεν επηρεάζει τη διάταξη.

Ενδιαφέρον, όμως, παρουσιάζει, η μελέτη της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά το μήκος ερπυσμού, σε αντιστοιχία με τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την κατανομή του δυναμικού. Στο Σχήμα 5.12 εμφανίζεται η κατανομή αυτή, στην περίπτωση του πλήρους μοντέλου.



Σχήμα 5.12: Κατανομή της έντασης κατά το μήκος ερπυσμού

Μελετώντας διεξοδικότερα την κατανομή της έντασης, διαπιστώνουμε ότι, εκτός από τον πλησιέστερο στο ηλεκτρόδιο δίσκο, που εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές, οι πλέον επικίνδυνες περιοχές του μονωτήρα, οι περιοχές δηλαδή που, όπως φαίνεται και στο γράφημα, η τιμή της έντασης αυξάνεται ιδιαίτερα, είναι στα άκρα των πτυχών. Στο κάτω μέρος των άκρων, αντίθετα, εμφανίζονται βυθίσεις της έντασης.

Από τη μελέτη της κατανομής της έντασης, διαπιστώνουμε ότι η έντονη μεταβολή της τάσης ενδεχομένως να προβλέπουν περιοχές που η ένταση θα λάβει υψηλές τιμές, χωρίς, όμως, να αποτελούν το μοναδικό κριτήριο. Πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπ' όψη οι ιδιομορφίες της σχεδίασης του κάθε μοντέλου.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι η γνώση των επιφανειών του μονωτήρα που η ένταση λαμβάνει υψηλές τιμές, συμβάλλει στην πρόβλεψη και αποτροπή ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως είναι η υπερπήδηση του μονωτήρα.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη του συγκεκριμένου μονωτήρα, διαπιστώνουμε ότι η απλοποίηση του μοντέλου ενός συνθετικού μονωτήρα, απαλείφοντας κάποιες από τις ενδιάμεσες πτυχές του, δε συνιστά ουσιώδη αλλοίωση των αποτελεσμάτων των κατανομών του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Επιπλέον, η ταύτιση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από το πρόγραμμα PC OPERA με τα αποτελέσματα των ερευνητών Que και Sebo, αναδεικνύει το συγκεκριμένο περιβάλλον προσομοίωσης ως ιδιαίτερα αξιόπιστο.

## **5.2 Επίδραση της ρύπανσης στα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός συνθετικού μονωτήρα**

### **5.2.1 Εισαγωγή των χαρακτηριστικών νέου μοντέλου μονωτήρα στο πρόγραμμα PC OPERA**

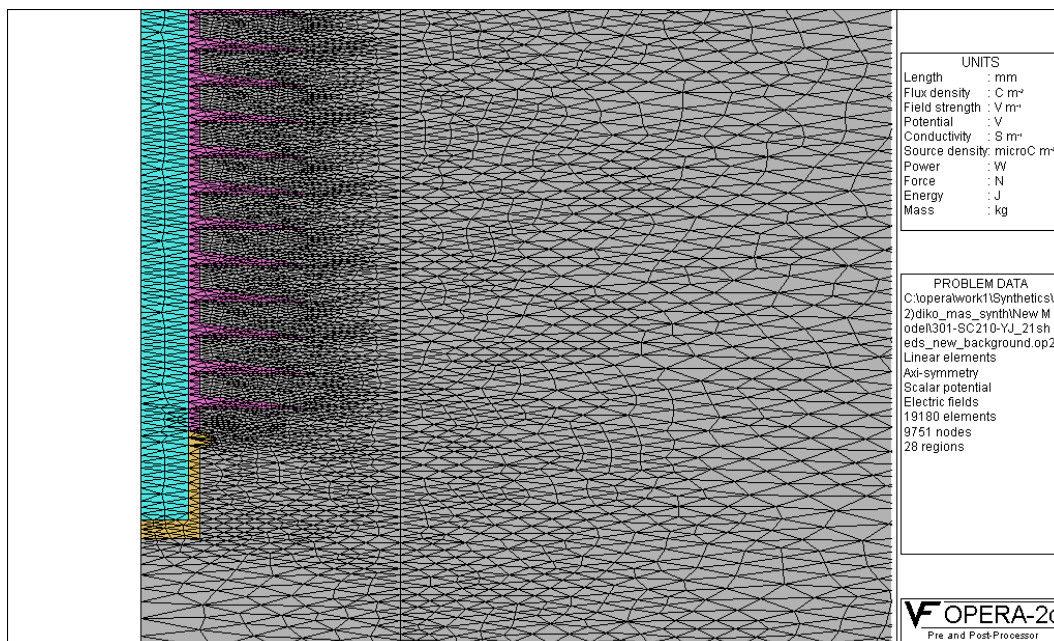
Στην προηγούμενη μελέτη διαπιστώθηκε η εγκυρότητα του προγράμματος προσομοίωσης και επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα απλούστευσης του μοντέλου ενός συνθετικού μονωτήρα κατά τη μελέτη των χαρακτηριστικών του. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα νέο μοντέλο συνθετικού μονωτήρα, ο οποίος προσομοιώνεται επίσης με το πρόγραμμα PC OPERA. Εδώ θα μελετηθεί η σημασία της ύπαρξης των δίσκων που περιβάλλουν τον κορμό του μονωτήρα, καθώς και η επίδραση της ρύπανσης στα χαρακτηριστικά του μεγέθη. Ο συγκεκριμένος μονωτήρας είναι το μοντέλο 301-SC210-YJ της εταιρείας NGK και χρησιμοποιείται για τάσεις των 69 kV. Εσωτερικά, ο μονωτήρας έχει παρόμοια διάταξη με τον προηγούμενο, καθώς και αυτός αποτελείται από έναν πυρήνα από υαλώδεις ίνες (*fiberglass*) με επιτρεπτότητα  $\epsilon_r = 7.2$ , που περιβάλλεται από πολυμερές υλικό με 21 πτυχές, επιτρεπτότητας 4.5. Στο πάνω και στο κάτω μέρος του προσαρμίζονται δύο ηλεκτρόδια ειδικής αντίστασης  $\rho = 105 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ , που αντιστοιχεί σε αγωγιμότητα  $\sigma = 9.5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ . Στο κάτω ηλεκτρόδιο επιβάλλεται τάση  $U = 69 \text{ kV}$ , ενώ το άνω είναι γειωμένο. Ο μονωτήρας, ο οποίος είναι συνολικού μήκους 846mm και αποτελείται από 21 δίσκους, τοποθετήθηκε εντός μιας περιοχής που συνιστά τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η συνολική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13, σε μια πιο κοντινή απεικόνιση.



Σχήμα 5.13: Ο μονωτήρας εντός της εξωτερικής επιφάνειας

Οι πτυχές στην πραγματικότητα δεν είναι τριγωνικές, αλλά στα άκρα τους παρουσιάζουν μια καμπυλότητα. Η απλοποίηση αυτή, όμως, είναι αποδεκτή και χρησιμοποιείται ευρύτατα και από άλλους ερευνητές, χωρίς ουσιαστική αλλοίωση των αποτελεσμάτων [23].

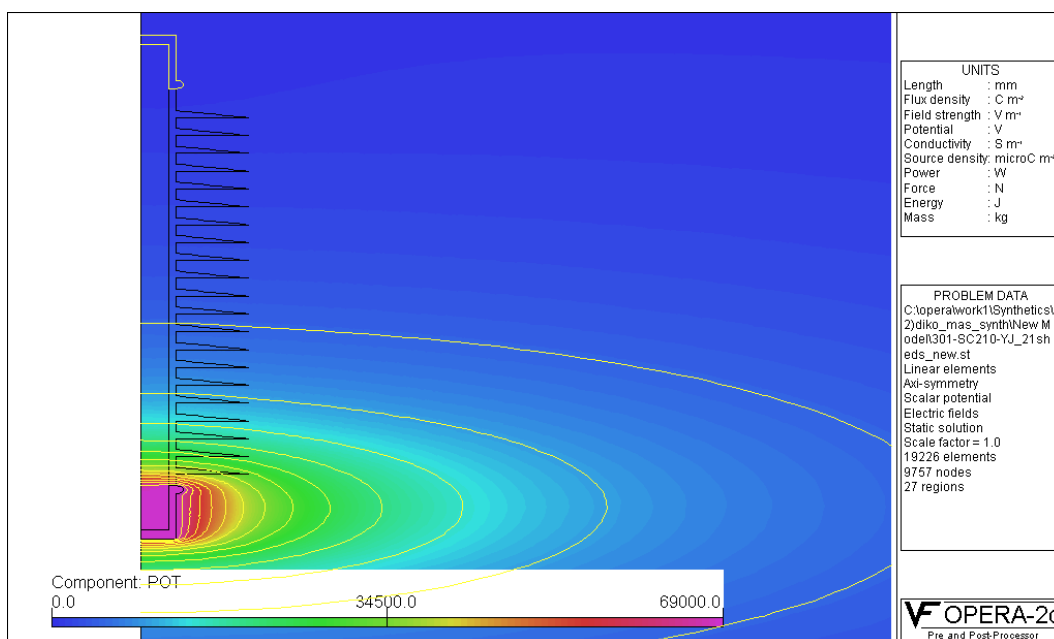
Το πλέγμα που δημιουργήθηκε αποτελείται από 19180 στοιχεία, αριθμός ικανός να μας δώσει αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας. Στο Σχήμα 5.14 διακρίνεται μια άποψη του μονωτήρα με εφαρμοσμένο το πλέγμα που, όπως γίνεται αντιληπτό, είναι πυκνότερο στην κοντινή περιοχή του μοντέλου.



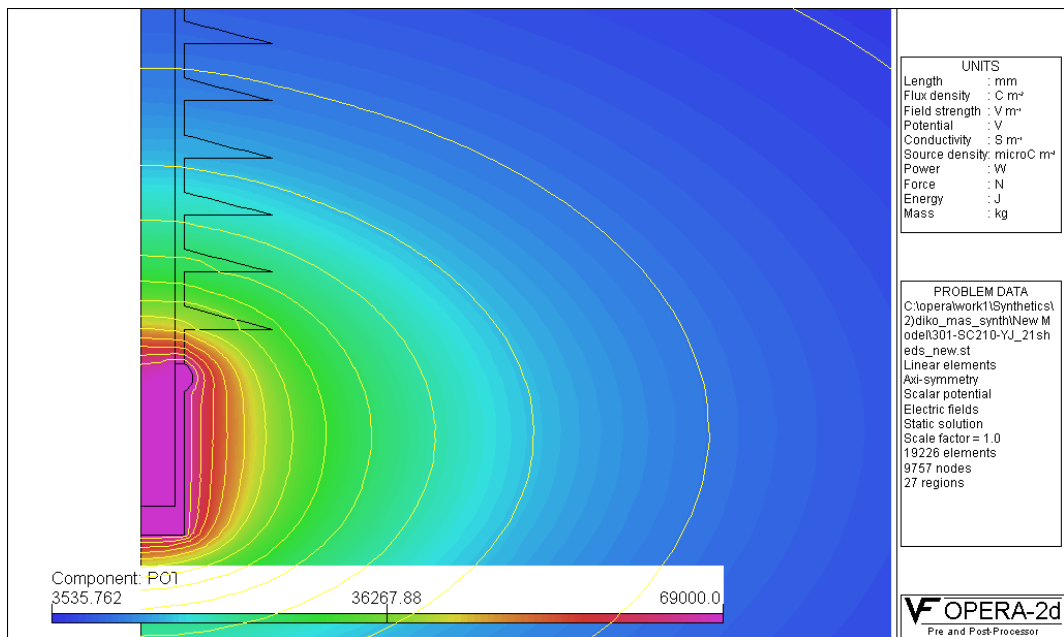
Σχήμα 5.14: Το πλέγμα που δημιουργήθηκε γύρω από το μονωτήρα

## 5.2.2 Κατανομή του δυναμικού

Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού στη συνολική διάταξη, ενώ στο Σχήμα 5.16 γίνεται εστίαση στην περιοχή που, κυρίως, εξαπλώνεται το δυναμικό.



Σχήμα 5.15: Η κατανομή του δυναμικού μέσω χρωματισμένων περιοχών και ισοδυναμικών γραμμών

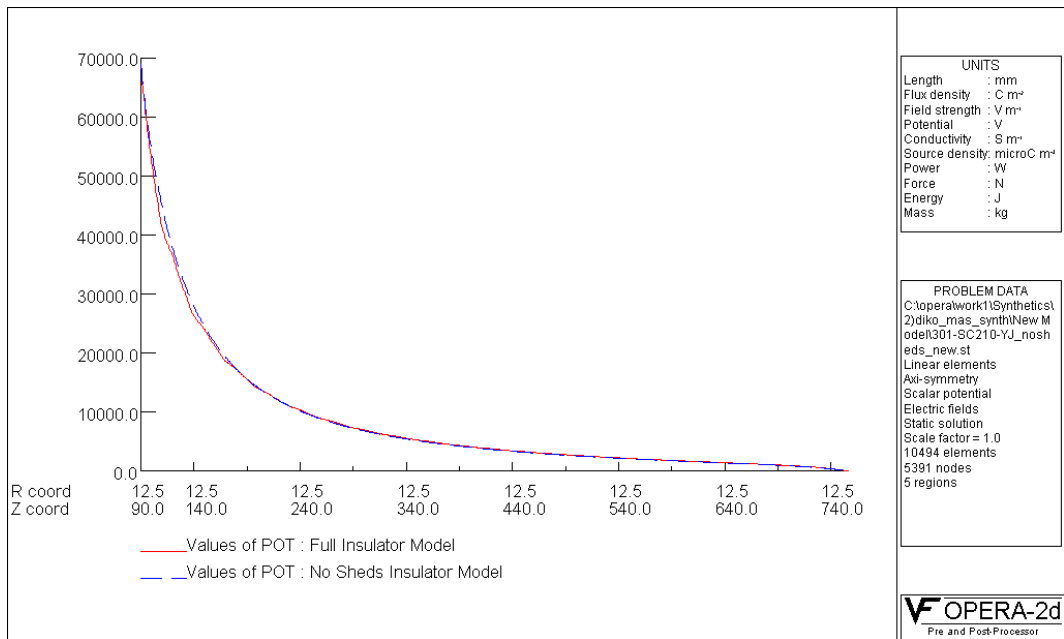


Σχήμα 5.16: Εστίαση στο κάτω τμήμα της διάταξης

Όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση, είναι εμφανές ότι το δυναμικό ελαττώνεται αρκετά γρήγορα, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από άλλες μελέτες [3].

Στο Σχήμα 5.17 διακρίνεται η μεταβολή του δυναμικού σε ευθεία παράλληλη με τον κορμό (sheath) του μονωτήρα, στην επιφάνεια του πολυμερούς περιβλήματος της ράβδου. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή συμβολίζει την κατανομή του δυναμικού στο μοντέλο χωρίς τις πτυχές, ενώ η κόκκινη γραμμή στο πλήρες μοντέλο. Συγκρίνοντας το Σχήμα 5.17 με το αντίστοιχο της προηγούμενης ενότητας (Σχήμα 5.5), είναι προφανές ότι η κατανομή του δυναμικού είναι παραπλήσια με αυτή που παρατηρήθηκε και στο προηγούμενο μοντέλο, το οποίο είναι λογικό, εφ' όσον πρόκειται για δύο συνθετικούς μονωτήρες παρόμοιας κατασκευής.





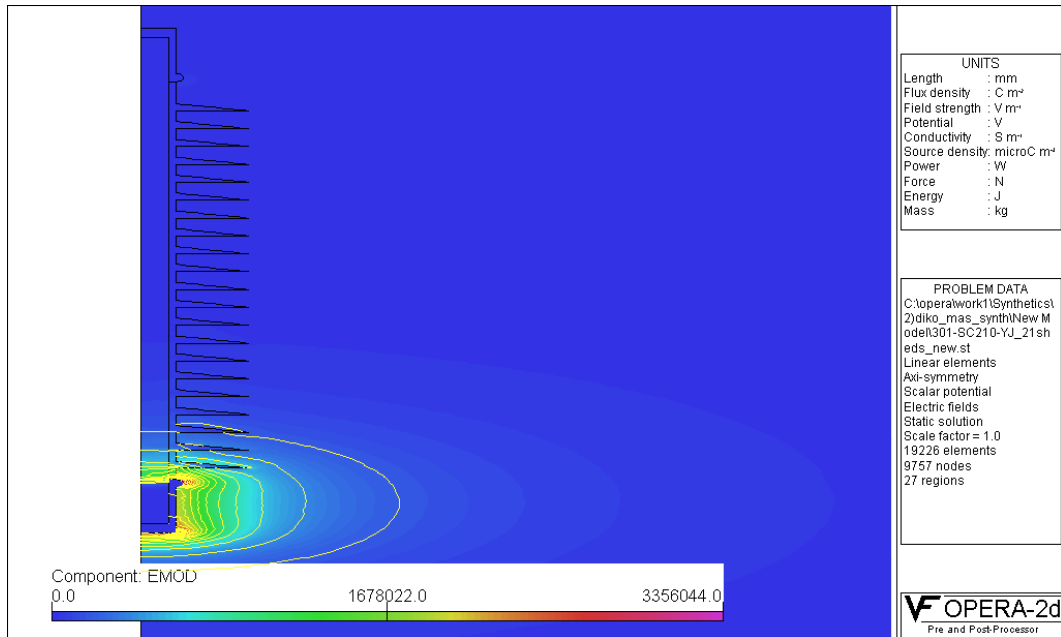
Σχήμα 5.17: Κατανομή δυναμικού κατά μήκος του κορμού του μονωτήρα

Στην προηγούμενη ενότητα είχαμε διαπιστώσει ότι η απλοποίηση του μονωτήρα, αφαιρώντας ορισμένες δισκοειδείς πτυχές, δεν αλλοιώνει σημαντικά τη μορφή της κατανομής του δυναμικού. Από το διάγραμμα του Σχήματος 5.17 εξάγεται το συμπληρωματικό συμπέρασμα ότι, ακόμα κι αν αφαιρεθεί το σύνολο των πτυχών ενός συνθετικού μονωτήρα, δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή στην κατανομή του δυναμικού. Η χρησιμότητα των δισκοειδών πτυχών έγκειται στη μεταβολή των τιμών της έντασης στην ευρύτερη περιοχή του μονωτήρα. Το γεγονός αυτό θα μελετηθεί εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα.

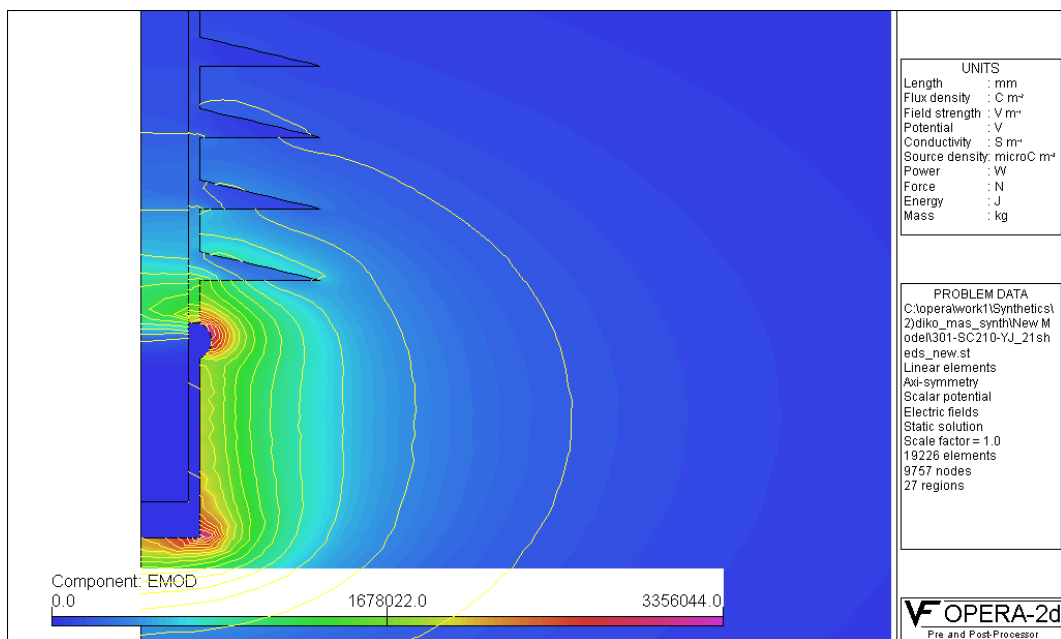
### 5.2.3 Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Αντίστοιχα με την κατανομή του δυναμικού, στο Σχήμα 5.18 διακρίνουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη συνολική διάταξη, ενώ στο Σχήμα 5.19 φαίνεται ευκρινέστερα η κατανομή της έντασης στο κάτω ηλεκτρόδιο του μονωτήρα. Η ένταση έχει αυξημένες τιμές γύρω από το ηλεκτρόδιο του μονωτήρα, και η μέγιστη τιμή της είναι  $E_{\max} = 3.356044 \cdot 10^6$  V/m. Ενδιαφέρον παρουσιάζει, όπως και στην περίπτωση του δυναμικού, ότι το τμήμα του κυλίνδρου από υαλώδεις ίνες που περικλείεται από το ηλεκτρόδιο, εμφανίζει μηδενική ένταση στο εσωτερικό του. Τέλος, όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση του Σχήματος 5.20, η ένταση μειώνεται εκθετικά, τουλάχιστον ως προς τα τοπικά μέγιστα που εμφανίζονται,

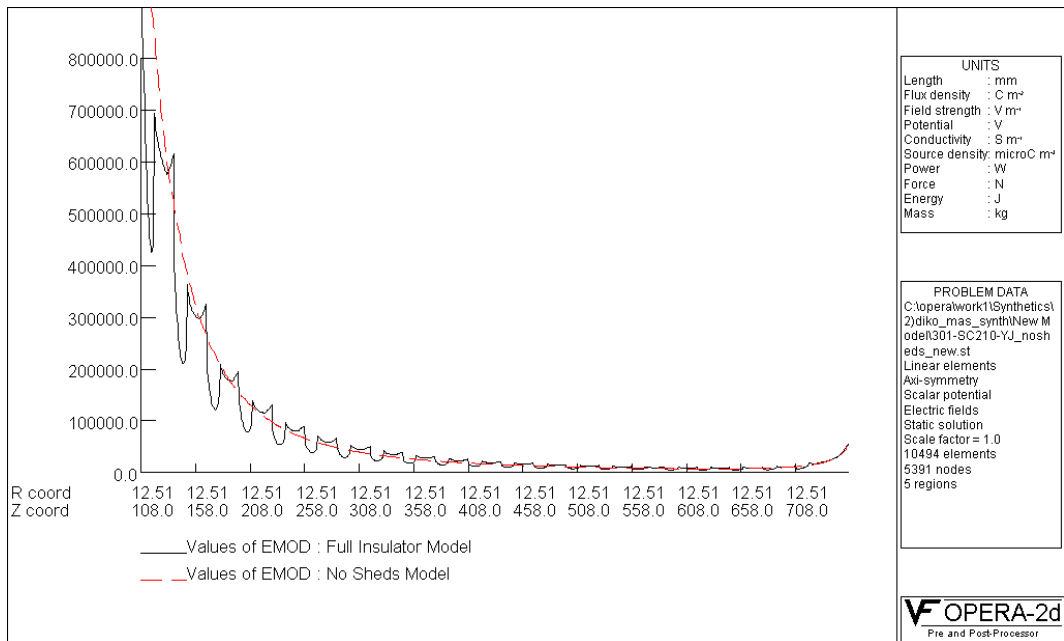
γεγονός που συμφωνεί με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που έχουν εξαχθεί από παλαιότερη έρευνα [3]. Παρατηρούμε ότι και σε αυτό το μοντέλο εμφανίζονται «βυθίσεις» της έντασης, οι οποίες παρουσιάζονται όταν η ευθεία των υπολογισμών περνάει εντός των πτυχών. Πραγματικά, όπως διακρίνουμε και στο Σχήμα 5.19, οι πτυχές του μονωτήρα ανακόπτουν την εξάπλωση της έντασης στην υπόλοιπη διάταξη.



Σχήμα 5.18: Η κατανομή της έντασης μέσω χρωματισμένων περιοχών και ισοδυναμικών γραμμών



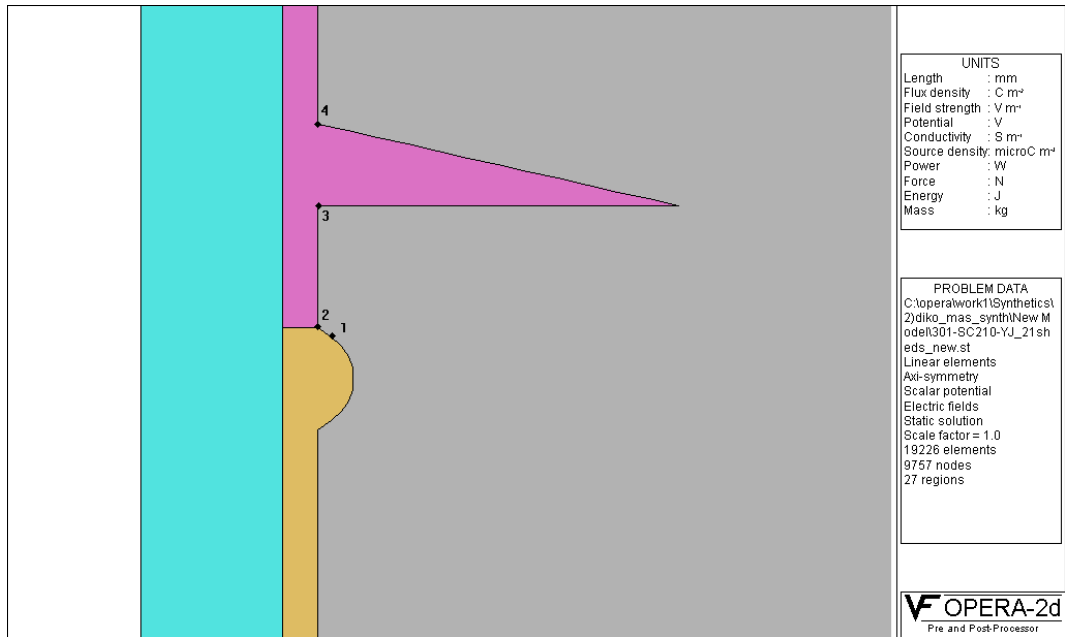
Σχήμα 5.19: Εστίαση στο κάτω μέρος του μονωτήρα



Σχήμα 5.20: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στις δύο εκδοχές του μοντέλου

#### 5.2.4 Επισημάνσεις σχετικά με την κατανομή της έντασης και σημασία των πτυχών

Στο παρόν μοντέλο, όπως και στο προηγούμενο, διαπιστώνεται ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην κοντινή περιοχή του φορτισμένου ηλεκτροδίου έχει αισθητά υψηλότερες τιμές. Όσο απομακρυνόμαστε και πλησιάζουμε τον πρώτο δίσκο, η τιμή της μειώνεται αισθητά, ενώ η παρουσία των δίσκων συμβάλλει σε περαιτέρω πτώση της τιμής της. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό, παρουσιάζουμε την τιμή της έντασης σε 4 ενδεικτικά σημεία, όπως αυτά διακρίνονται στο Σχήμα 5.21. Η μέγιστη τιμή της έντασης, που εμφανίζεται στο κυρτό τμήμα του ηλεκτροδίου, στο σημείο 1 συγκεκριμένα, είναι  $E_1 = 33.56 \text{ kV/cm}$ , ενώ στη συμβολή του ηλεκτροδίου με το περίβλημα, στο σημείο 2, (απόσταση 2mm) έχει τιμή  $E_2 = 31.71 \text{ kV/cm}$  και παρουσιάζει πτώση της τάξης του 5.51%. Στη συμβολή του πρώτου δίσκου με το περίβλημα στο τρίτο σημείο (απόσταση 18mm από το σημείο 2), η ένταση έχει τιμή  $E_3 = 15.42 \text{ kV/cm}$ , τιμή κατά 54.05% μειωμένη από τη μέγιστη ένταση, σε απόσταση που αντιστοιχεί στο 2.7% της συνολικής απόστασης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Τέλος στο σημείο 4, αμέσως μετά, δηλαδή, τον πρώτο δίσκο, η ένταση είναι  $E_4 = 7.00 \text{ kV/cm}$ . Μεταξύ των σημείων 3 και 4, η ένταση ελαττώνεται κατά 53.76%. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.21: Τα σημεία στα οποία, ενδεικτικά, υπολογίστηκε η ένταση

Σημείο	Ένταση (kV/cm)	Μεταβολή (%) από τη μέγιστη τιμή
1	33.56	0
2	31.71	5.51
3	15.42	54.05
4	7.00	79.14

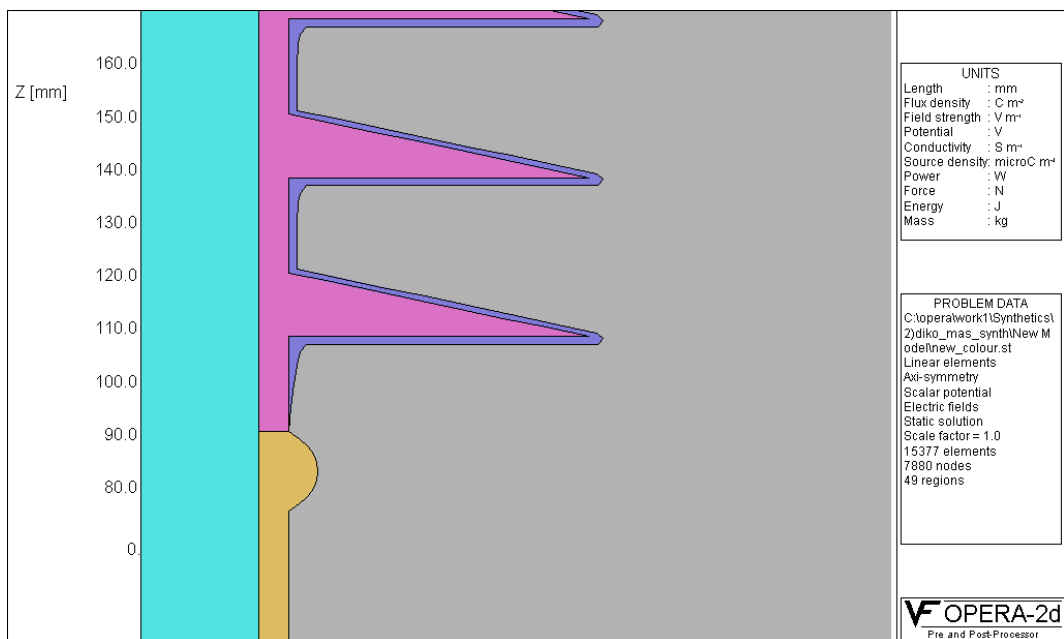
Πίνακας 5.1: Τιμές της έντασης σε επιλεγμένα σημεία του μονωτήρα

Διαπιστώνουμε δηλαδή ότι η πτώση της έντασης είναι ταχύτατη, περισσότερο από τη μεταβολή του δυναμικού. Αυτό είναι απολύτως αναμενόμενο για τους εξής λόγους. Κατ' αρχάς η ένταση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης, ενώ το δυναμικό αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης. Αλλά ο πιο βασικός λόγος έγκειται στη φύση του μονωτικού υλικού, αφού, όπως διαπιστώνεται και στο Σχήμα 5.19, το πολυμερές υλικό από το οποίο αποτελούνται οι δισκοειδείς πτυχές δεν ευνοεί την ανάπτυξη της έντασης εντός των πτυχών και, άρα, εμποδίζει και την εξάπλωσή της. Εδώ ακριβώς γίνεται εμφανής η σημασία της χρήσης των πτυχών στην κατασκευή ενός μονωτήρα. Εφ' όσον η αυξημένη ένταση δεν είναι επιθυμητή, επειδή ευνοεί τη δημιουργία του φαινομένου της ηλεκτρικής διάσπασης, οι πτυχές προκαλούν μείωση της τιμής της κατά το μήκος ερπυσμού.

Για αυτό και στο διάγραμμα του Σχήματος 5.20 παρακάμφθηκε το τμήμα της διάταξης που βρίσκεται κάτω από τον πρώτο δίσκο, προκειμένου να φανεί ευκρινέστερα η μορφή της κατανομής της έντασης στο συνολικό μήκος του μονωτήρα.

### 5.2.5 Εισαγωγή ρύπανσης στο μοντέλο του μονωτήρα

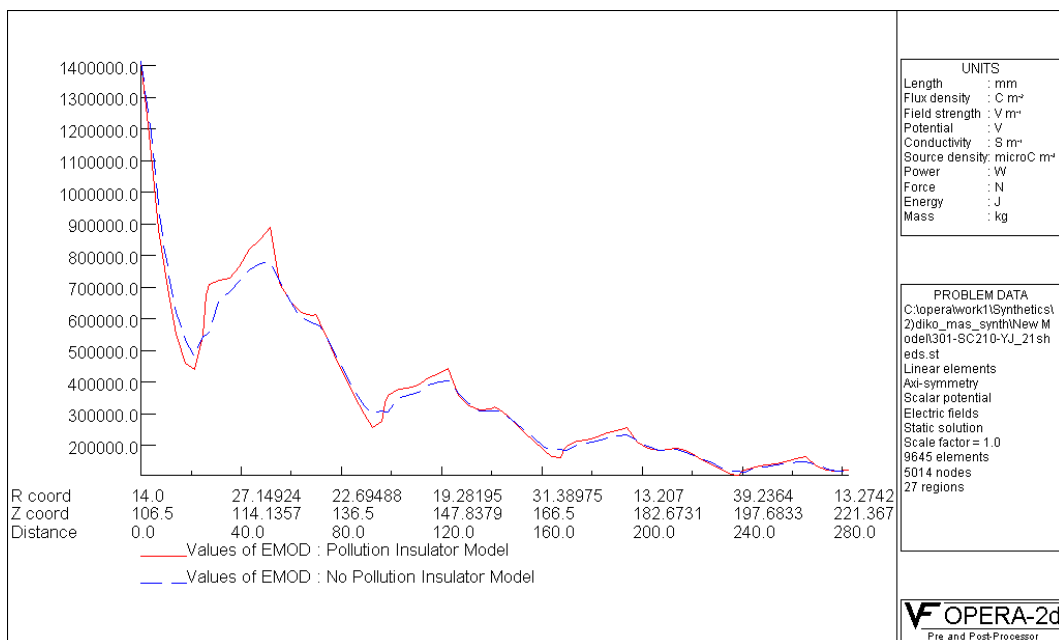
Ο σημαντικότερος παράγοντας που μπορεί να μειώσει τη μονωτική ικανότητα των μονωτήρων είναι η ρύπανση. Εξ' αιτίας του σημαντικού ρόλου που διαδραματίζει στη συμπεριφορά του μονωτήρα, κρίνεται απαραίτητη η προσπάθεια προσομοίωσης της. Στο παρόν μοντέλο θα μελετηθεί η επίδραση της ρύπανσης στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην ευρύτερη περιοχή. Η ρύπανση προσομοιώνεται με ένα ομοιόμορφο στρώμα πάνω στην επιφάνεια του πολυμερούς υλικού σε όλο το μήκος του μονωτήρα. Το στρώμα αυτό έχει μεγαλύτερο πάχος στην κάτω επιφάνεια των πτυχών από ότι στην πάνω. Αυτό ισχύει επειδή η κάτω επιφάνεια είναι πιο δυσπρόσιτη και δεν καθαρίζεται εύκολα, σε αντίθεση με την πάνω επιφάνεια. Στο συγκεκριμένο μοντέλο προσομοιώθηκε ισχυρό στρώμα ρύπανσης, επιφανειακής αγωγιμότητας 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , με πάχος 1.5mm στην κάτω και 1mm στην πάνω επιφάνεια. Στο Σχήμα 5.22 διακρίνεται το στρώμα ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα.



Σχήμα 5.22: Άποψη του μοντέλου με εφαρμοσμένο το στρώμα της ρύπανσης

### 5.2.6 Επίδραση της ρύπανσης στην κατανομή της έντασης

Για να μελετηθεί αποτελεσματικότερα η επίδραση του στρώματος ρύπανσης, παρατηρήθηκε η μεταβολή της κατά το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα. Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.23, διακρίνεται η κατανομή της έντασης σε ρυπασμένο μονωτήρα σε σύγκριση με την κατανομή στο ιδανικό, χωρίς ρύπανση, μοντέλο. Διακρίνονται μόνο οι τέσσερις πρώτες πτυχές, ώστε να είναι ευκρινέστερα τα δύο διαγράμματα, διευκολύνοντας την εξαγωγή των συμπερασμάτων. Από τα διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η ρύπανση επιδρά αρνητικά στη συνολική διάταξη, αυξάνοντας την τιμή της έντασης στην επιφάνεια του μοντέλου. Η ένταση στο ρυπασμένο μοντέλο είναι μικρότερη μόνο σε ένα τμήμα της κάτω επιφάνειας των πτυχών. Στα τμήματα αυτά, όμως, η τιμή της έντασης είναι χαμηλή και κατά τη μελέτη των μονωτήρων περισσότερο σημαντική είναι η συμπεριφορά του μονωτήρα στις περιοχές της επιφάνειας που παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές της έντασης. Και σε αυτές τις περιοχές διαπιστώνονται σημαντικές αποκλίσεις, γεγονός που αυξάνει τις πιθανότητες εμφάνισης του φαινομένου της υπερπήδησης.



Σχήμα 5.23: Σύγκριση της κατανομής της έντασης στο ρυπασμένο και στο μη ρυπασμένο μοντέλο

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της επίδρασης της ρύπανσης, διαπιστώνεται ότι η παρουσία ενός αγωγίμου στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα έχει δυσμενείς συνέπειες στη λειτουργία του, καθώς μεταβάλλει με ανεπιθύμητο τρόπο

την κατανομή της έντασης. Πράγματι, η αύξηση της έντασης αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας του μονωτήρα, για αυτό και ο καθαρισμός του, αλλά και η επιλογή ενός κατάλληλου Σχήματος και υλικού ανάλογα με την εκάστοτε χρήση του καθίσταται απαραίτητη, ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν η επικάλυψη ρύπανσης.

## **Κεφάλαιο 6**

### **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΟΡΣΕΛΑΝΙΝΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PC OPERA**

#### **6.1 Προσομοίωση πορσελάνινου μονωτήρα στήριξης**

##### **6.1.1 Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του μονωτήρα στο πρόγραμμα PC OPERA**

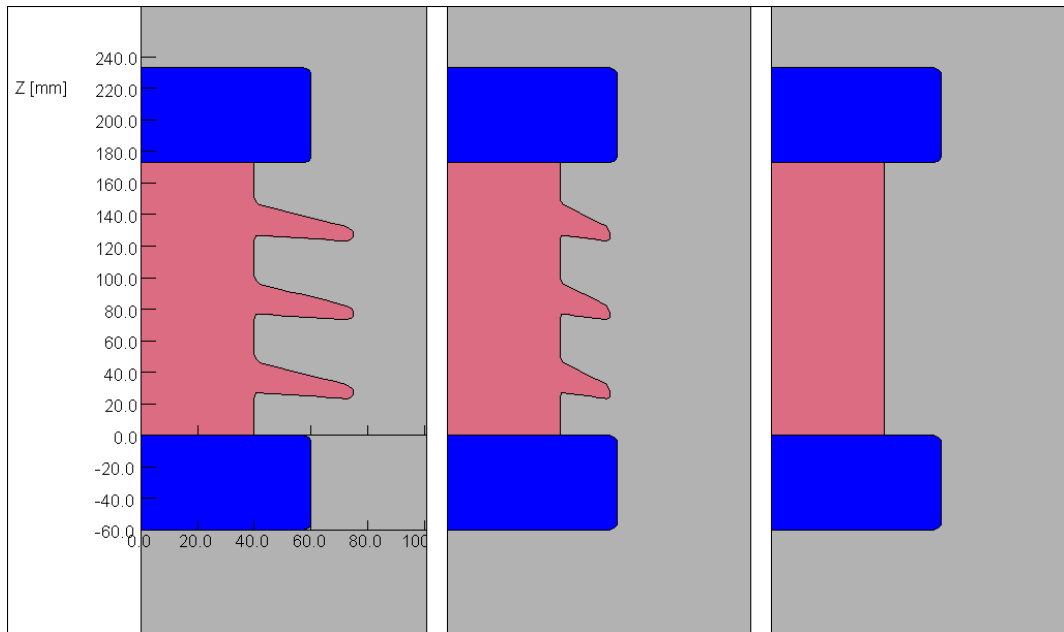
Μετά τη μελέτη των συνθετικών μονωτήρων, στο κεφάλαιο αυτό θα προσομοιωθούν δύο πορσελάνινα μοντέλα. Ο πρώτος μονωτήρας είναι ένας μονωτήρας στήριξης (*post type insulator*). Αποτελείται από έναν ενιαίο κορμό από πορσελάνη με 3 δισκοειδείς πτυχές, με συνολικό ύψος 173mm, οι δίσκοι έχουν διάμετρο 150mm και ο κορμός 80mm. Στο πάνω και στο κάτω μέρος του προσαρμόζονται δύο μεταλλικοί ακροδέκτες. Στο πάνω ηλεκτρόδιο εφαρμόζεται τάση 1V, ενώ το κάτω είναι γειωμένο. Προφανώς η τάση αυτή δεν ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες, απλά τη χρησιμοποιούμε στη συγκεκριμένη προσομοίωση, για να έχουμε καλύτερα αριθμητικά αποτελέσματα. Το υλικό των δύο ηλεκτροδίων είναι σίδηρος, ο οποίος, όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενες προσομοιώσεις, έχει αγωγιμότητα με τιμή  $\sigma = 9.5 \cdot 10^6$  S/m. Η πορσελάνη, τέλος, έχει επιτρεπτότητα  $\epsilon_r = 6$  [34].

Στη συνέχεια θα μελετηθεί πώς επιδρά η μεταβολή του μεγέθους των δισκοειδών πτυχών, άρα του μήκους ερπυσμού, στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της τάσης στην κοντινή περιοχή γύρω από το μονωτήρα. Επίσης, θα διερευνηθεί πώς επιδρά η ρύπανση ειδικότερα στην κατανομή της έντασης, λόγω της σημασίας της στη διατήρηση της καλής συμπεριφοράς του μονωτήρα και στην αποφυγή ενδεχόμενων αστοχιών. Τέλος, θα εφαρμοστούν στρώματα ρύπανσης διαφορετικού πάχους, ώστε να διαπιστωθεί σε ποιο βαθμό επηρεάζει τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μονωτήρα.

Το σχήμα 6.1 περιλαμβάνει τρεις εκδοχές του ίδιου μονωτήρα. Αριστερά διακρίνεται το αρχικό μοντέλο που σχεδιάσαμε, στη μέση το μοντέλο με μικρότερες πτυχές (με περίπου το μισό μήκος ερπυσμού) και δεξιά το τρίτο, χωρίς καθόλου πτυχές, παρά



μόνο με τον κορμό. Στη συνέχεια θα συγκριθούν τα αποτελέσματα που εξάγονται από τα μοντέλα αυτά, προκειμένου να διαπιστωθούν ενδεχόμενες διαφορές.



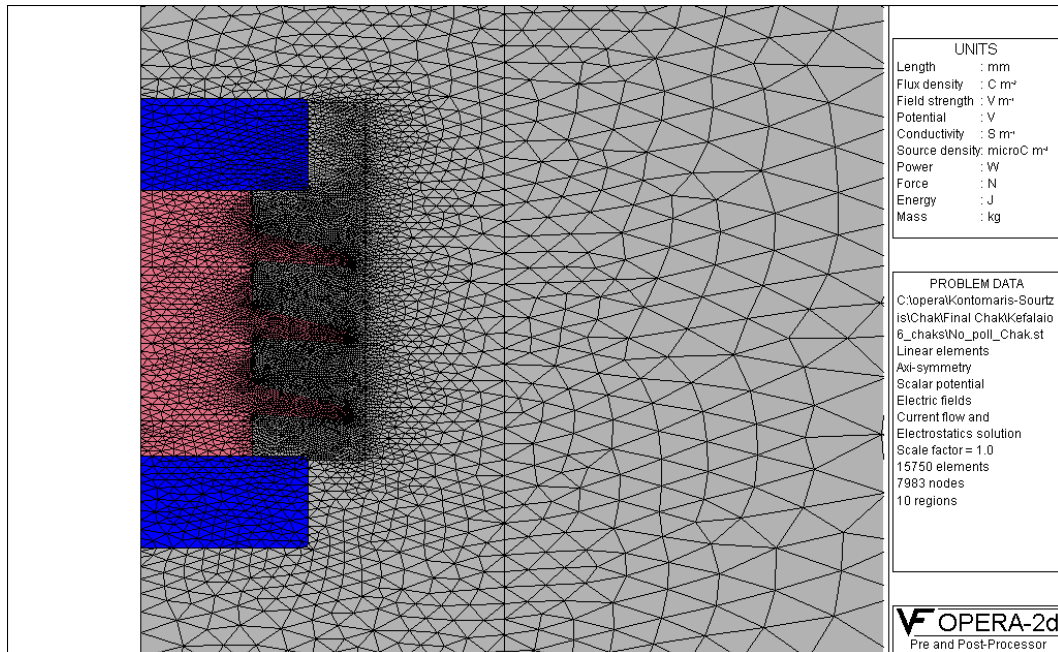
Σχήμα 6.1: Οι τρεις εκδοχές του μονωτήρα: αριστερά (α) ο αρχικός μονωτήρας, στη μέση (β) το μοντέλο με δισκοειδείς πτυχές μισής διαμέτρου και δεξιά (γ) το μοντέλο χωρίς καθόλου πτυχές.

### 6.1.2 Δημιουργία πλέγματος

Για τη δημιουργία του πλέγματος, ακολουθούμε τη γνωστή από τα προηγούμενα διαδικασία, χωρίζουμε δηλαδή κάθε γραμμή σχεδιασμού του μονωτήρα σε αριθμό τμημάτων τέτοιο, που να μας δίνει την κατάλληλη ακρίβεια, χωρίς παράλληλα να υπερβαίνουμε το μέγιστο αριθμό τριγωνικών στοιχείων που επιβάλλει το πρόγραμμα PC OPERA. Στο συγκεκριμένο μονωτήρα, τα 15750 τριγωνικά στοιχεία τα οποία συνιστούν το πλέγμα, είναι ένας ικανοποιητικός αριθμός, προκειμένου να λάβουμε αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Εξ' άλλου, η προσθήκη του στρώματος ρύπανσης στη συνέχεια, θα απαιτήσει έναν επιπλέον αριθμό στοιχείων. Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, κατασκευάστηκε μια περιοχή κατάλληλου μεγέθους, που συμπεριλαμβάνει το μονωτήρα και οριοθετεί ένα εξωτερικό όριο στο πρόβλημα. Στην περίμετρό της ορίστηκε το δυναμικό ίσο με μηδέν.

Στο σχήμα 6.2 διακρίνεται το πλέγμα στο εσωτερικό και στην κοντινή περιοχή γύρω από το μονωτήρα. Στο συγκεκριμένο μονωτήρα, η εξωτερική περιοχή που

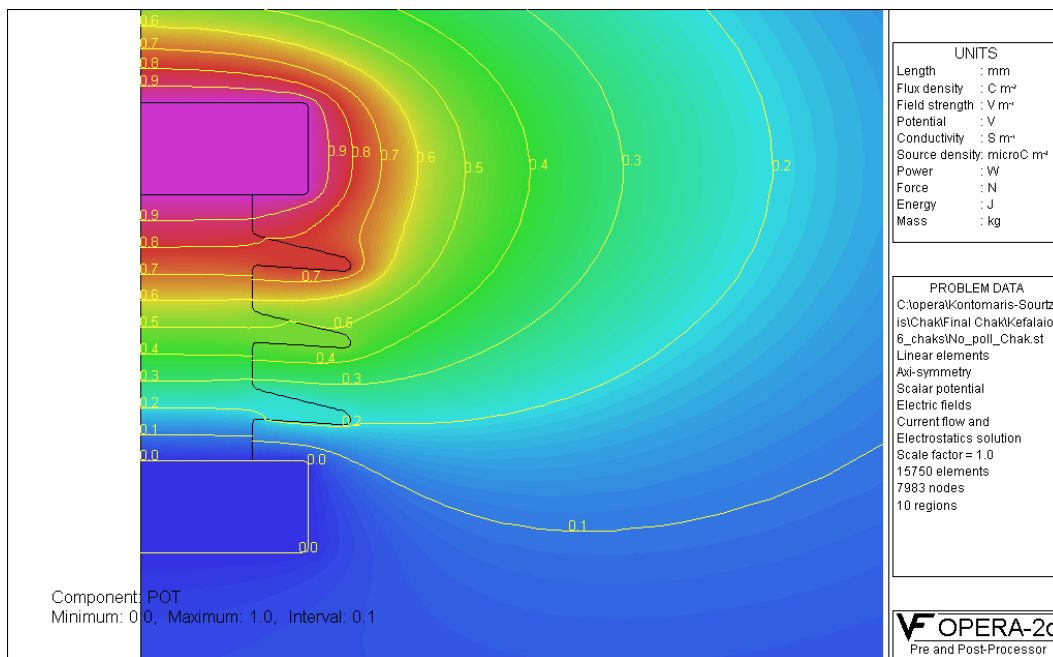
παριστάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα χωρίστηκε σε μικρότερες περιοχές. Οι πλησιέστερες σε αυτόν είναι πιο πυκνές, καθώς μας ενδιαφέρει η βέλτιστη, δυνατή, ακρίβεια στο περιβάλλον που βρίσκεται αρκετά κοντά στο μονωτήρα.



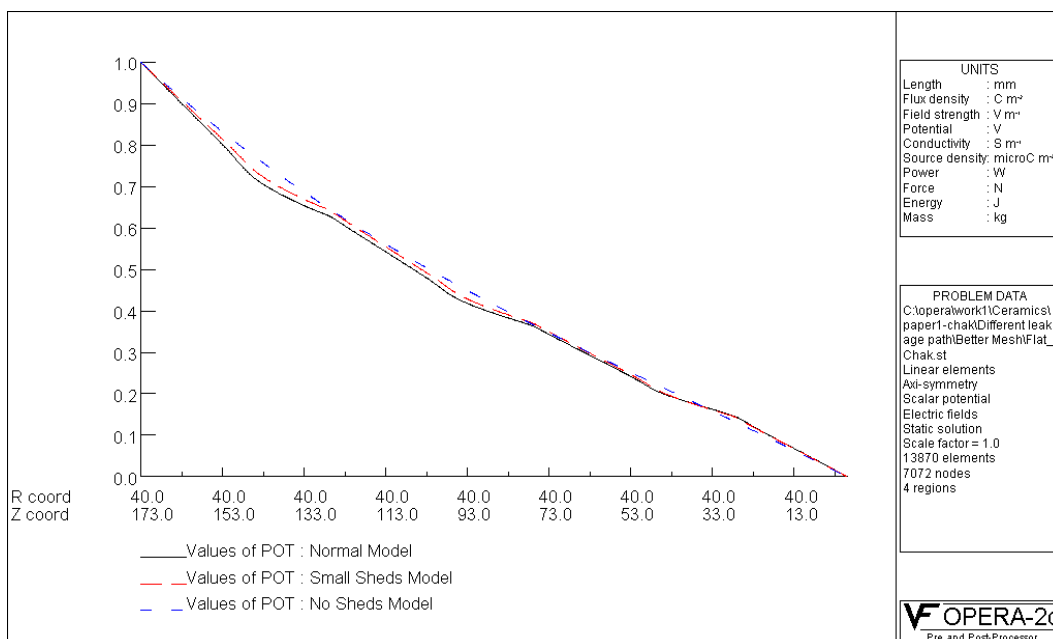
Σχήμα 6.2: Το πλέγμα γύρω από το μονωτήρα.

### 6.1.3 Κατανομή του δυναμικού

Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε την κατανομή του δυναμικού στο αρχικό μοντέλο και θα συγκριθεί με την κατανομή στις άλλες δύο εκδοχές του μονωτήρα. Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού στον πρώτο μονωτήρα. Και σε αυτή την προσομοίωση, επιλέξαμε την παρουσίαση των κατανομών με χρωματισμένες περιοχές, σε συνδυασμό με έναν αριθμό ισοδυναμικών γραμμών, ώστε να είναι ευκρινέστερος ο τρόπος που κατανέμεται το δυναμικό στην ευρύτερη περιοχή. Στο σχήμα 6.4 διακρίνεται, σε μορφή διαγράμματος, η κατανομή του δυναμικού και των τριών μοντέλων κατά μήκος ευθείας παράλληλης με τον κορμό του μονωτήρα, που εφάπτεται στο περίβλημα και ενώνει τα δύο ηλεκτρόδια. Με μαύρη συνεχή γραμμή παριστάνεται το δυναμικό του αρχικού μοντέλου, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή το δυναμικό στο μοντέλο με τους μικρούς δίσκους και με μπλε διακεκομμένη γραμμή στην περίπτωση του μονωτήρα χωρίς δισκοειδείς πτυχές.



Σχήμα 6.3: Κατανομή του δυναμικού μέσω χρωματισμένων περιοχών και ισοδυναμικών γραμμών



Σχήμα 6.4: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού μεταξύ των τριών εκδοχών του μοντέλου κατά μήκος ευθείας εφαπτόμενης στην επιφάνεια του κορμού του μονωτήρα

Παρατηρούμε ότι οι κατανομές είναι ιδιαίτερα παραπλήσιες και στις τρεις περιπτώσεις. Διακρίνουμε, βέβαια, μια μικρή απόκλιση ανάμεσα στις τρεις γραφικές παραστάσεις. Αυτή η απόκλιση παρουσιάζεται σε τρεις περιοχές, εκεί όπου η ευθεία

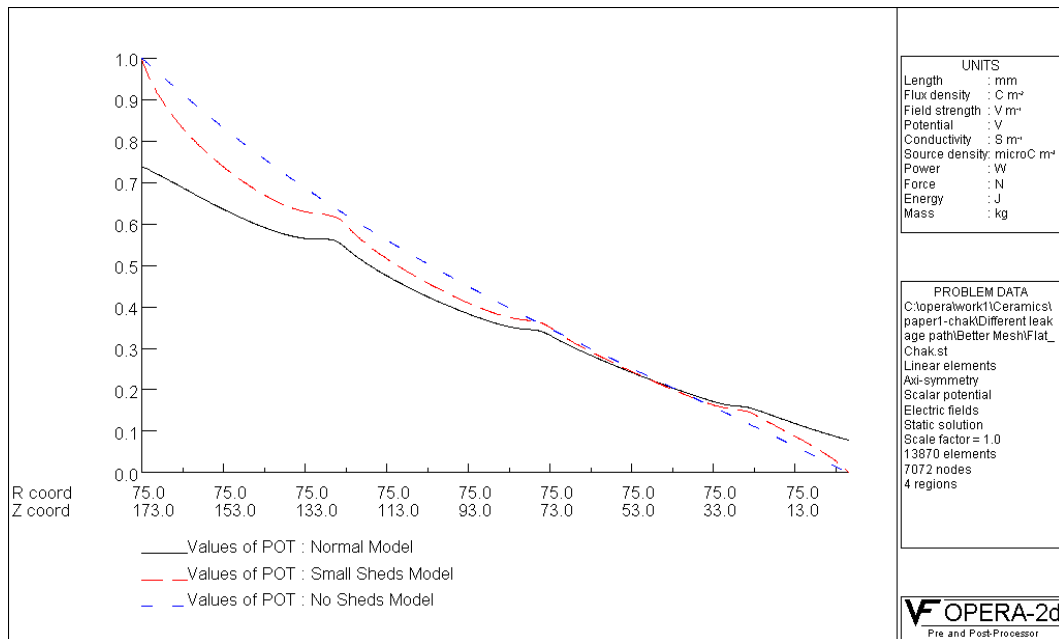
πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί (*calculation path*) περνά εντός των πτυχών. Παρατηρώντας προσεκτικά το διάγραμμα, διαπιστώνουμε ότι οι πτυχές προκαλούν μια μικρή πτώση του δυναμικού εντός του μονωτικού υλικού. Η πτώση αυτή είναι μεγαλύτερη, όσο το μέγεθος των πτυχών μεγαλώνει.

Ένα ακόμη συμπέρασμα που προκύπτει, συγκρίνοντας το σχήμα 6.4 με τις κατανομές του δυναμικού στην περίπτωση των συνθετικών μονωτήρων που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ότι στους πορσελάνινους μονωτήρες, η πτώση του δυναμικού είναι πιο ομαλή, αφού είναι σχεδόν γραμμική.

Προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον σε κάθε μοντέλο υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της υπερπήδησης ή όχι, είναι αναγκαίο να διερευνηθεί επίσης η κατανομή του δυναμικού στις άκρες των δισκοειδών πτυχών. Πραγματικά, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων των διαδοχικών πτυχών, αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα που αυξάνει την πιθανότητα δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου και, επομένως, αστοχίας του μονωτήρα.

Για το λόγο αυτό, σε κάθε μοντέλο ελήφθη, επίσης, η κατανομή του δυναμικού σε μια ευθεία που να εφάπτεται των άκρων των πτυχών. Στο μοντέλο που δεν έχει πτυχές, η ευθεία αυτή ταυτίζεται με την επιφάνεια του κορμού. Τα αποτελέσματα διακρίνονται στο σχήμα 6.5.

Από τα διαγράμματα του σχήματος 6.5 προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Διαπιστώνουμε ότι η κλίση της γραμμής που παριστάνει το δυναμικό είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του μονωτήρα χωρίς πτυχές, μικραίνει στο ενδιάμεσο μοντέλο και, τέλος, στον αρχικό μονωτήρα είναι ακόμα μικρότερη. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλώνει το μήκος των δισκοειδών πτυχών, το δυναμικό ομαλοποιείται.



Σχήμα 6.5: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος ευθείας εφαπτομένης των πτυχών

Είναι χαρακτηριστικό ότι, μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου δίσκου, η διαφορά δυναμικού στα άκρα των πτυχών στον αρχικό μονωτήρα είναι  $\Delta V_1 = 0.218 \text{ V}$ , στο μοντέλο μεσαίου μήκους ερπυσμού αυξάνεται κατά 16.97%, λαμβάνοντας τιμή ίση με  $\Delta V_2 = 0.255 \text{ V}$ , ενώ στο μοντέλο χωρίς πτυχές η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ίδιων τεταγμένων είναι  $\Delta V_3 = 0.279 \text{ V}$ , δηλαδή αυξημένη κατά 27.98%. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στον πίνακα 6.1.

Μοντέλο μονωτήρα	Μεταβολή του δυναμικού ( $\Delta V$ ) (V)	Αύξηση της $\Delta V$ σε σχέση με το μοντέλο ( $\alpha$ ) (%)
(α)	0.218	0
(β)	0.255	16.97
(γ)	0.279	27.98

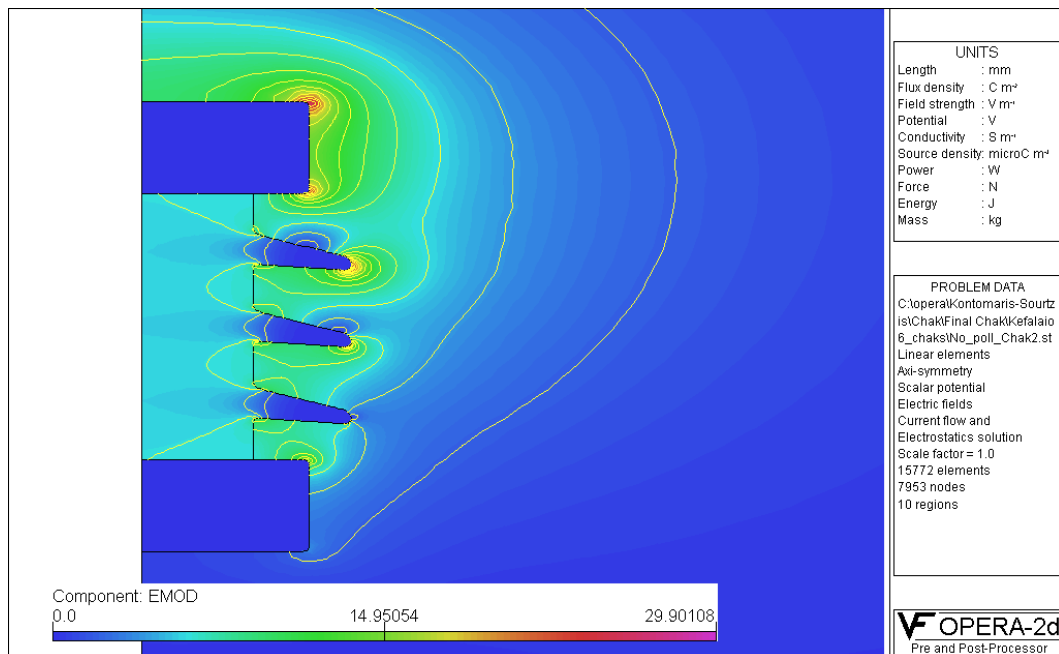
Πίνακας 6.1: Σύγκριση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο πτυχών στα τρία μοντέλα: στο αρχικό μοντέλο (α), στο μοντέλο με τους μικρούς δίσκους (β) και στο επίπεδο μοντέλο (γ)

Από τη μελέτη της κατανομής του δυναμικού συμπεραίνουμε ότι είναι προτιμότερο ο μονωτήρας να έχει πτυχές με μεγάλη διάμετρο. Πέρα από το ότι προφανώς

αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, παράλληλα διαπιστώσαμε ότι συμβάλλει στην ομαλοποίηση της κατανομής του δυναμικού, άρα μειώνει το ενδεχόμενο εμφάνισης υπερπήδησης. Βέβαια αυτό δε σημαίνει ότι η διάμετρος των πτυχών μπορεί να αυξάνεται επ' άπειρο. Η σωστή σχεδίαση ενός μονωτήρα, όπως έχουμε δει σε προηγούμενα κεφάλαια, λαμβάνει υπ' όψη της και άλλα δεδομένα, ενώ ταυτόχρονα συνυπολογίζει και το κόστος κατασκευής του.

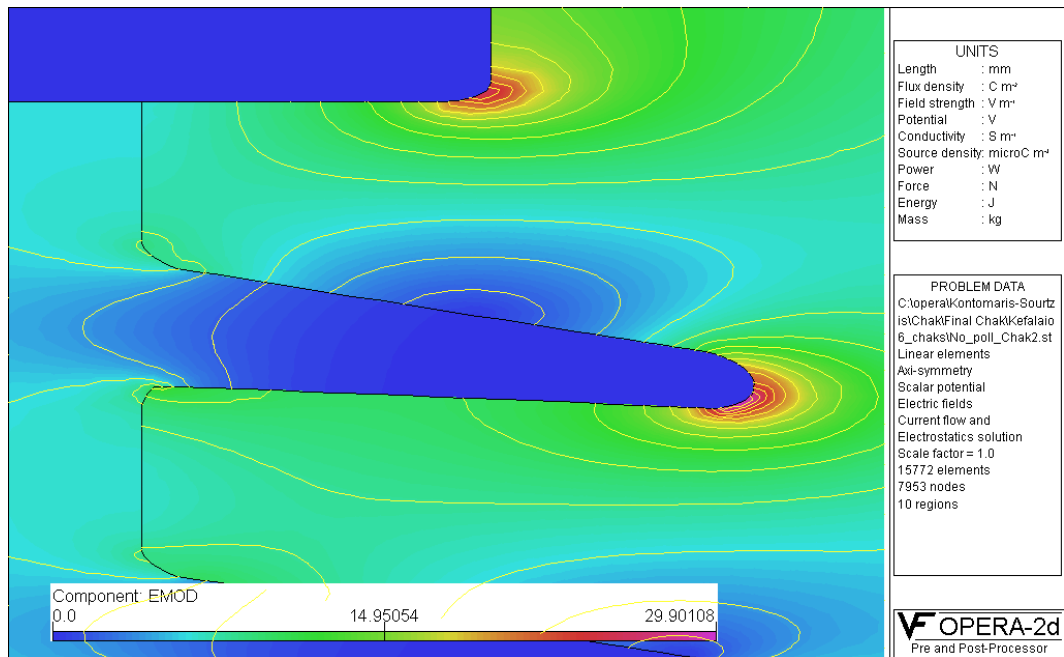
#### 6.1.4 Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο αρχικό μοντέλο, μέσω χρωματισμένων περιοχών και ισοδυναμικών γραμμών, όπως και στην περίπτωση του δυναμικού. Η μέγιστη τιμή της είναι  $E_{\max1}=29.90$  V/m και εμφανίζεται στο άκρο του πρώτου δίσκου. Για το μοντέλο ( $\beta$ ) η μέγιστη τιμή είναι  $E_{\max2}=37.46$  V/m και για το μοντέλο ( $\gamma$ ) είναι  $E_{\max3}=32.68$  V/m, αλλά παρουσιάζεται στο άκρο του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 6.6: Η κατανομή της έντασης στο αρχικό μοντέλο

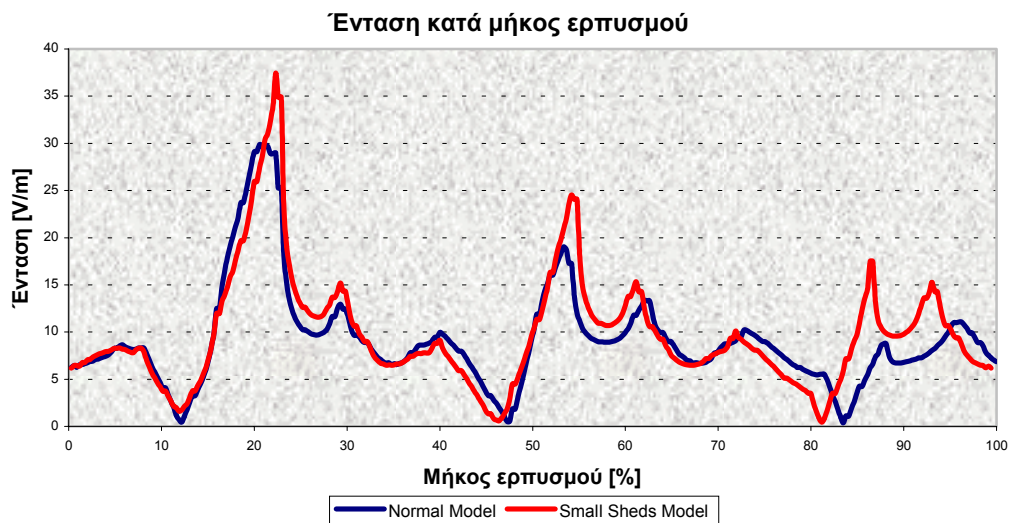
Στο σχήμα 6.7 γίνεται εστίαση στον πρώτο δίσκο, όπου φαίνεται ευκρινέστερα η κατανομή της έντασης στην επιφάνειά του.



Σχήμα 6.7: Εστίαση στον πρώτο δίσκο του μονωτήρα

Παρατηρούμε πως η ένταση λαμβάνει υψηλές τιμές στο κάτω μέρος της άκρης του δίσκου, ενώ σε ολόκληρο το κάτω τμήμα του, η ένταση έχει υψηλότερες τιμές απ' ότι στην πάνω επιφάνεια. Για αυτό και τα άκρα των δίσκων είναι ιδιαίτερα κρίσιμες περιοχές, όσον αφορά στο ενδεχόμενο εμφάνισης υπερπήδησης. Εντός του μονωτικού υλικού, όπως ήταν αναμενόμενο, η ένταση παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές.

Για να εξαχθούν, όμως, πιο ακριβή συμπεράσματα, μελετήθηκε η κατανομή της έντασης διατρέχοντας το μήκος ερπυσμού, τόσο του αρχικού μονωτήρα, όσο και του μοντέλου με τις μικρές δισκοειδείς πτυχές. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης PC OPERA δεν επιτρέπει τη σύγκριση των τιμών οποιουδήποτε μεγέθους, κατά μήκος διαφορετικών διαδρομών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα μήκη ερπυσμού των δύο μονωτήρων είναι διαφορετικά. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με την εξαγωγή των τιμών από το OPERA και επεξεργασία τους με το πρόγραμμα Microsoft Excel. Τα αποτελέσματα διακρίνονται στο σχήμα 6.8.



Σχήμα 6.8: Σύγκριση της κατανομής της έντασης μεταξύ του αρχικού μοντέλου (*normal model*) και του μοντέλου με τους μικρούς δίσκους (*small sheds model*)

Το διάγραμμα επαληθεύει το παραπάνω πόρισμα, αφού είναι εμφανές ότι στην περίπτωση του μοντέλου με τις μικρές δισκοειδείς πτυχές η μεταβολή της έντασης είναι μεγαλύτερη, ενώ, ταυτόχρονα, λαμβάνει υψηλότερες τιμές, πάντα σε σχέση με το αρχικό μοντέλο. Η ένταση, τέλος, παρατηρούμε ότι παρουσιάζει φθίνουσα πορεία, όσο πλησιάζουμε στο γειωμένο ηλεκτρόδιο.

Στο παραπάνω διάγραμμα δεν ελήφθησαν οι αντίστοιχες τιμές για τον επίπεδο μονωτήρα. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει τιμές μη συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες των άλλων δύο, καθώς το μήκος ερπυσμού του είναι μια ευθεία, χωρίς πτυχές και ανομοιομορφίες στην επιφάνειά του.

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη του πορσελάνινου μονωτήρα στήριξης, επιβεβαιώνουμε τη χρησιμότητα του ορθού σχεδιασμού των δισκοειδών πτυχών και στην περίπτωση των πορσελάνινων μονωτήρων. Συγκεκριμένα, το –σχετικά– μεγάλο μήκος ερπυσμού των πτυχών συμβάλλει στην ομαλότερη κατανομή του δυναμικού, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις τιμές της έντασης που εμφανίζεται τόσο στην επιφάνεια του μονωτήρα, όσο και στην ευρύτερη περιοχή γύρω από αυτόν.

### 6.1.5 Εισαγωγή ρύπανσης στο μονωτήρα

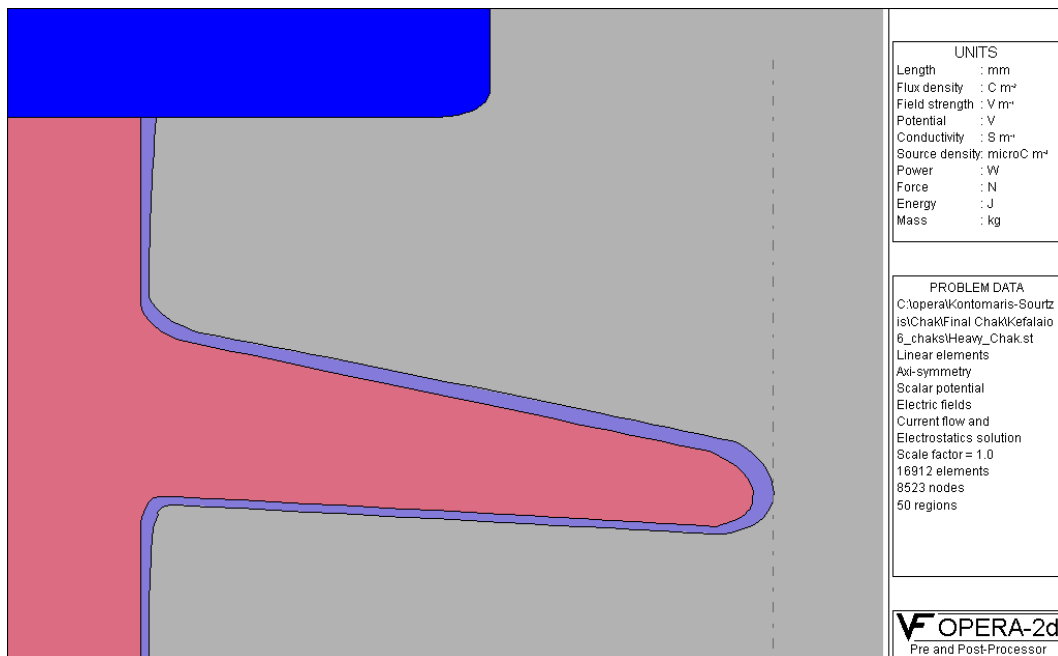
Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε την επίδραση της παρουσίας ενός ανομοιογενούς στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα. Επίσης, θα



διερευνηθεί και η επίδραση του πάχους του στρώματος ρύπανσης στη συνολική διάταξη.

Αρχικά ο μονωτήρας καλύφθηκε με ένα αρκετά ελαφρύ στρώμα ρύπανσης, πάχους 0.5 mm στην άνω επιφάνεια και 1 mm στην κάτω, καθώς είναι πιο δυσπρόσιτη και καθαρίζεται δυσκολότερα. Στη συνέχεια το στρώμα αυτό σχεδόν διπλασιάστηκε, ενώ επίσης σχεδιάστηκε και πιο ανομοιόμορφο. Το στρώμα ρύπανσης ορίστηκε ως μια νέα επιφάνεια, που καλύπτει το μονωτήρα και έχει αγωγιμότητα  $\sigma = 0.1 \text{ S/m}$ , δηλαδή αρκετά αγωγίμο.

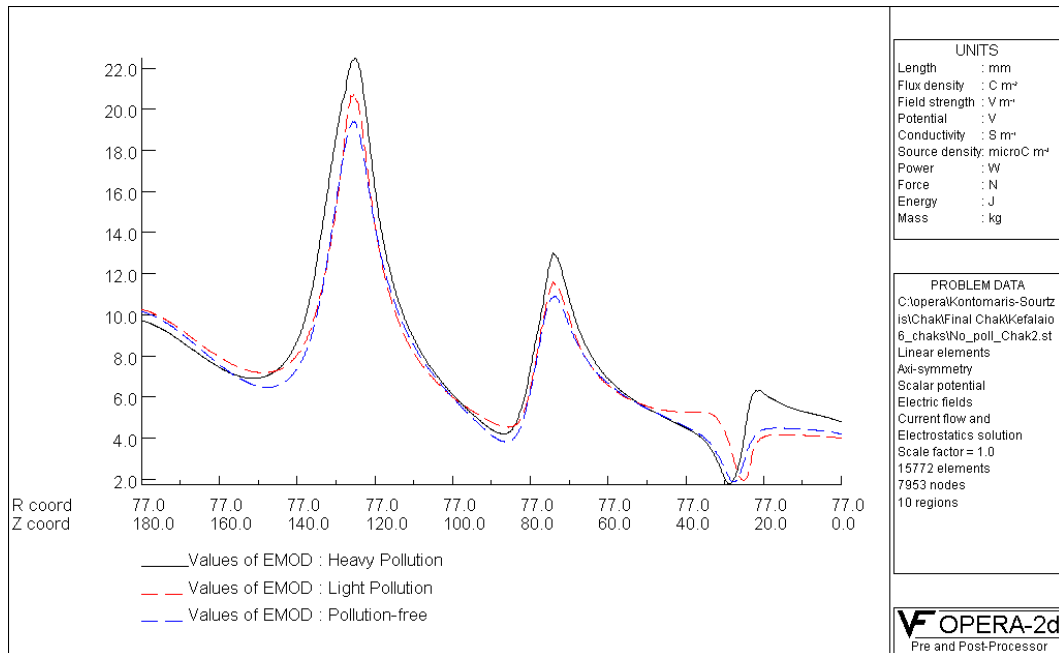
Στο σχήμα 6.9 διακρίνουμε μια άποψη του μονωτήρα, με βαριά ρύπανση.



Σχήμα 6.9: Άποψη του μονωτήρα, με ισχυρό στρώμα ρύπανσης στην επιφάνειά του

Προκειμένου να συγκρίνουμε την κατανομή της έντασης στις τρεις περιπτώσεις, συγκρίναμε τις τιμές τους κατά μήκος ευθείας που εφάπτεται των άκρων των μονωτήρων και είναι παράλληλη στον κορμό. Η ευθεία διακρίνεται στο σχήμα 6.9 με μια λεπτή διακεκομμένη γραμμή. Η επιλογή μας να επιλεγεί η συγκεκριμένη ευθεία υπολογισμών και όχι το μήκος ερπυσμού, οφείλεται στην ανάγκη να διερευνηθούν οι διακυμάνσεις της έντασης όχι, μόνο, στην επιφάνεια των μονωτήρων, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή. Εξ' άλλου, ο τρόπος διακύμανσης της έντασης κατά μήκος ερπυσμού έχει ήδη μελετηθεί στην προηγούμενη παράγραφο.

Στο σχήμα 6.10 διακρίνουμε την κατανομή της έντασης κατά μήκος της ευθείας υπολογισμού. Με μαύρη γραμμή παριστάνεται η ένταση του μονωτήρα με ισχυρή ρύπανση, με κόκκινη διακεκομμένη του μονωτήρα με ελαφριά ρύπανση και, τέλος, η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο μονωτήρα χωρίς καθόλου ρύπανση.



Σχήμα 6.10: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος ευθείας που εφάπτεται στα άκρα των δίσκων

Μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα, διαπιστώνουμε ότι, όντως, η ρύπανση επιφέρει δυσμενείς συνθήκες στη λειτουργία του μονωτήρα. Παρατηρούμε ότι η παρουσία ακόμα κι ενός λεπτού στρώματος αυξάνει την ένταση, ιδιαίτερα τη μέγιστη τιμή της. Πραγματικά, διαπιστώνουμε ότι καθ' όλο το μήκος της ευθείας, η ένταση είναι αυξημένη στην περίπτωση που ο μονωτήρας είναι ρυπασμένος. Ειδικότερα στις άκρες των πτυχών, όπου η ένταση λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές, η επίδραση της ρύπανσης είναι ακόμα πιο δραστική. Επίσης και σε αυτή τη γραφική παράσταση, διαπιστώνουμε ότι οι μέγιστες τιμές της έντασης παρατηρούνται στις άκρες των δίσκων και μάλιστα με σημαντικά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την υπόλοιπη διάταξη.

### 6.1.6 Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη του πρώτου πορσελάνινου μονωτήρα, εξάγονται αρκετά και σημαντικά συμπεράσματα. Κατ' αρχάς διαπιστώσαμε τη σημασία των

δισκοειδών πτυχών στην κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το μεγάλο μήκος ερπυσμού που εξασφαλίζουν, σε συνδυασμό με τις ιδιότητες της πορσελάνης ως μονωτικού υλικού, ευνοούν την ομαλότερη κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του μονωτήρα. Ταυτόχρονα, επιδρούν σημαντικά και στην ένταση, εμποδίζοντας την εμφάνιση ιδιαίτερα υψηλών τιμών.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο που διερευνήθηκε ήταν η παρουσία της ρύπανσης. Πράγματι, η παρουσία ενός αγωγίμου στρώματος πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα δεν είναι ευνοϊκή για την αποφυγή αστοχιών. Αντίθετα μάλιστα, θα επισημαίναμε ότι η αύξηση της έντασης που επιφέρει, επιβαρύνει τη λειτουργία του μονωτήρα. Για αυτό και ο καθαρισμός του καθίσταται απαραίτητος, ώστε, κατά το δυνατόν, να απομακρύνονται οι επικαθίσεις.

## **6.2 Προσομοίωση αλυσίδας cap and pin μονωτήρων**

### **6.2.1 Σημασία του συγκεκριμένου μονωτήρα**

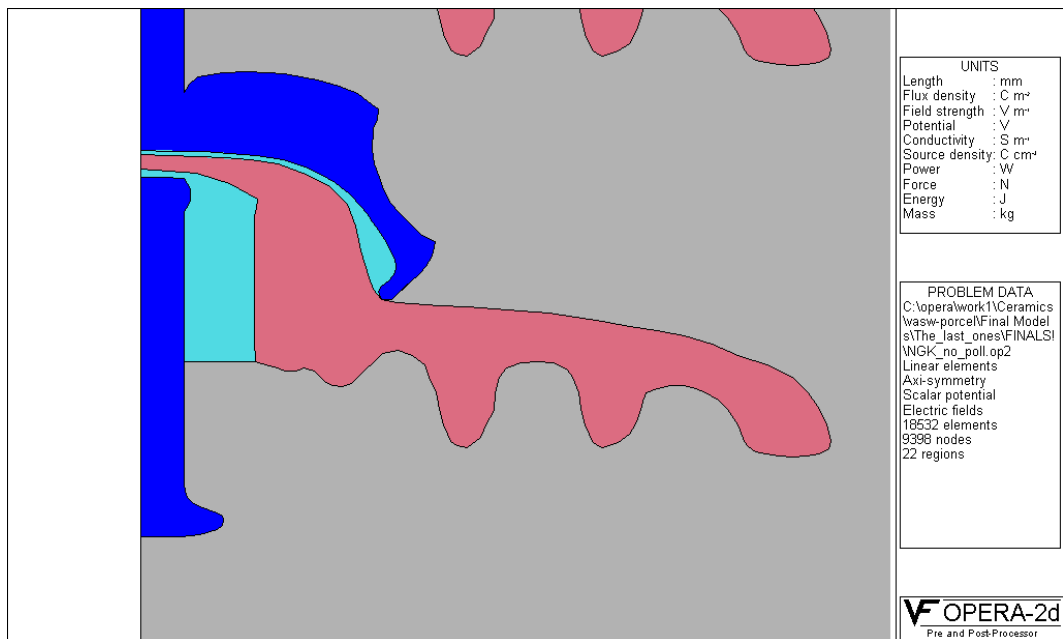
Στη δεύτερη ενότητα του κεφαλαίου αυτού, θα προσομοιωθεί μια αλυσίδα τεσσάρων *cap and pin* μονωτήρων. Πρόκειται για ένα μοντέλο μονωτήρα ανάρτησης κανονικού τύπου (*normal type*), από πορσελάνη, διαστάσεων  $10\cdot5\frac{3}{4}''$  και μήκους ερπυσμού 305mm, κατασκευής NGK 1984. Ο συγκεκριμένος μονωτήρας χρησιμοποιείται από τη ΔΕΗ, με τη μορφή αλυσίδας μονωτήρων, κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Η άμεση εφαρμογή του στη χώρα μας, κατέστησε το μοντέλο αυτό ιδιαίτερα σημαντικό για την επιστημονική έρευνα. Για αυτό και το 1986 πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή μελέτη στο Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων (ΚΔΕΠ) της ΔΕΗ, στα πλαίσια της εκπόνησης διπλωματικής εργασίας [35] του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε. Μ. Π. .

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσομοιωθεί το παραπάνω μοντέλο στο πρόγραμμα PC OPERA, σε διάταξη αλυσίδας τεσσάρων μονωτήρων. Τα δεδομένα του προβλήματος ελήφθησαν από τη διπλωματική εργασία [35]. Θα μελετηθεί η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και η

επίδραση στρωμάτων ρύπανσης διαφορετικού πάχους στην επιφάνεια του μονωτήρα.

### 6.2.2 Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του cap and pin μονωτήρα

Ο μονωτήρας έχει ύψος 146 mm και διάμετρο 254mm. Το κύριο τμήμα του, το δισκοειδές κέλυφος, αποτελείται από πορσελάνη επιτρεπτότητας  $\epsilon_r = 6$ , που φέρει τις χαρακτηριστικές πτυχώσεις στο κάτω μέρος. Στην κορυφή του εφαρμόζεται η γαλβανισμένη θήκη (cap) και στο εσωτερικό του ο μεταλλικός πείρος (pin). Τα δύο αυτά στοιχεία αποτελούνται από σίδηρο, που έχει αγωγιμότητα  $\sigma = 9.5 \cdot 10^6$  S/m. Η τιμή της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ορίστηκε  $\epsilon_r = 1000$ . Τα τρία τμήματα της διάταξης συγκολλούνται με τσιμέντο, επιτρεπτότητας  $\epsilon_r = 8$ . Ο μονωτήρας απεικονίζεται στο Σχήμα 6.11.



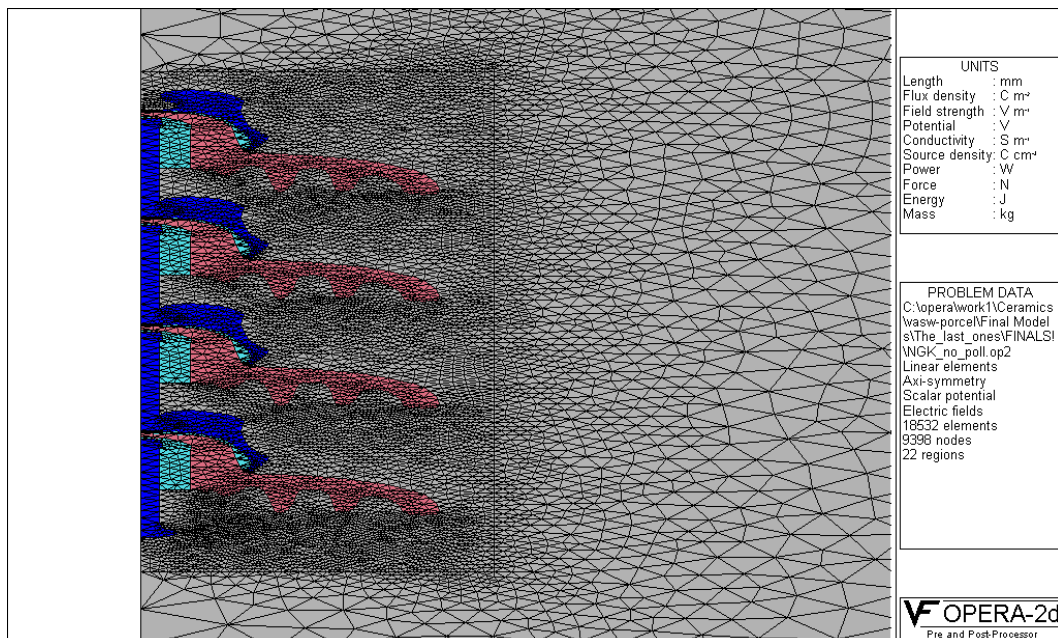
Σχήμα 6.11: Κοντινή άποψη του μονωτήρα

Στον πείρο του πρώτου μονωτήρα εφαρμόζεται τάση 50 kV, ενώ η θήκη του τέταρτου, ο οποίος βρίσκεται στην κορυφή της αλυσίδας, είναι γειωμένη. Στα υπόλοιπα μεταλλικά στοιχεία της διάταξης δεν εφαρμόστηκε δυναμικό.

### 6.2.3 Δημιουργία πλέγματος

Προκειμένου να προχωρήσουμε στην ανάλυση της διάταξης, είναι απαραίτητη η δημιουργία του πλέγματος. Σύμφωνα με τη γνωστή διαδικασία, κάθε γραμμή σχεδιασμού του μονωτήρα χωρίζεται σε αριθμό τμημάτων τέτοιο, που να μας δίνει την κατάλληλη ακρίβεια, χωρίς παράλληλα να υπερβαίνουμε το μέγιστο αριθμό τριγωνικών στοιχείων που επιβάλλει το πρόγραμμα PC OPERA. Στο συγκεκριμένο μονωτήρα κατασκευάστηκε πλέγμα, αποτελούμενο από 18532 τριγωνικά στοιχεία. Εφ' όσον ο μέγιστος αριθμός στοιχείων του προγράμματος προσομοίωσης ανέρχεται σε 20.000, θεωρούμε ότι έχει ήδη επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια. Εξ' άλλου, η δημιουργία στη συνέχεια του στρώματος ρύπανσης, θα απαιτήσει έναν επιπλέον αριθμό τριγωνικών στοιχείων.

Η συνολική διάταξη, με εφαρμοσμένο το πλέγμα, διακρίνεται στο Σχήμα 6.12. Η γκρίζα περιοχή γύρω από τους μονωτήρες παριστάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα, ενώ στην περίμετρό της, που συνιστά το άπειρο, ορίστηκε το δυναμικό ίσο με μηδέν. Να τονίσουμε ότι και σε αυτό το μοντέλο, ο ατμοσφαιρικός αέρας διαιρέθηκε σε δύο περιοχές, με την κοντινότερη στον μονωτήρα να εξασφαλίζει μεγάλη πυκνότητα πλέγματος γύρω από αυτόν.

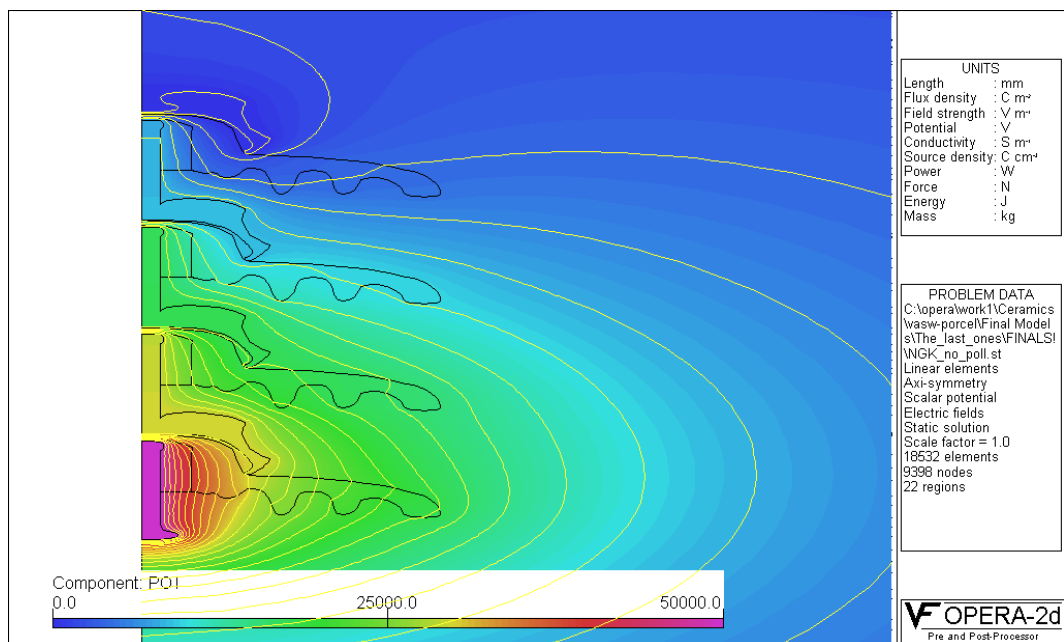


Σχήμα 6.12: Το πλέγμα της διάταξης

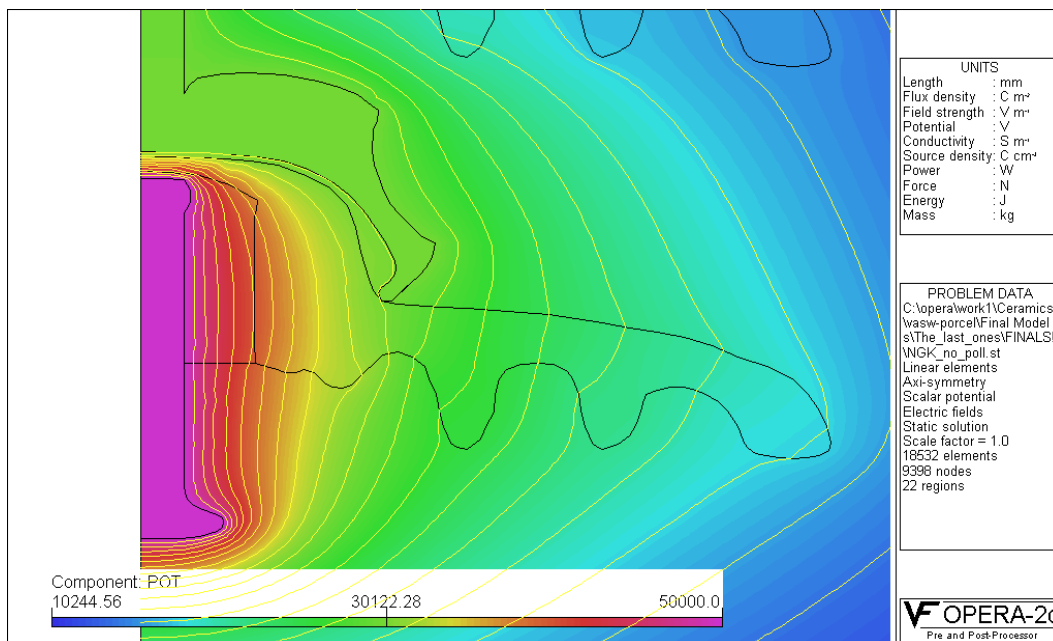
#### 6.2.4 Κατανομή του δυναμικού

Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε την κατανομή του δυναμικού, τόσο κατά το μήκος ερπυσμού, όσο και στον ευρύτερο χώρο της διάταξης. Η διερεύνηση της κατανομής του δυναμικού διατρέχοντας την επιφάνεια του μονωτήρα, πραγματοποιείται, έτσι ώστε να εντοπιστούν περιοχές που, λόγω της γεωμετρίας του, παρουσιάζεται έντονη ανομοιομορφία και η οποία θα οδηγήσει σε υψηλές τιμές της έντασης.

Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού στη συνολική διάταξη με χρωματισμένες περιοχές, σε συνδυασμό με έναν αριθμό ισοδυναμικών γραμμών, ώστε να είναι ευκρινέστερος ο τρόπος που κατανέμεται το δυναμικό στην ευρύτερη περιοχή. Στη συνέχεια, στο Σχήμα 6.14, εστιάζουμε στον πρώτο μονωτήρα της αλυσίδας, στον πείρο του οποίου εφαρμόζεται η τάση των 50kV.

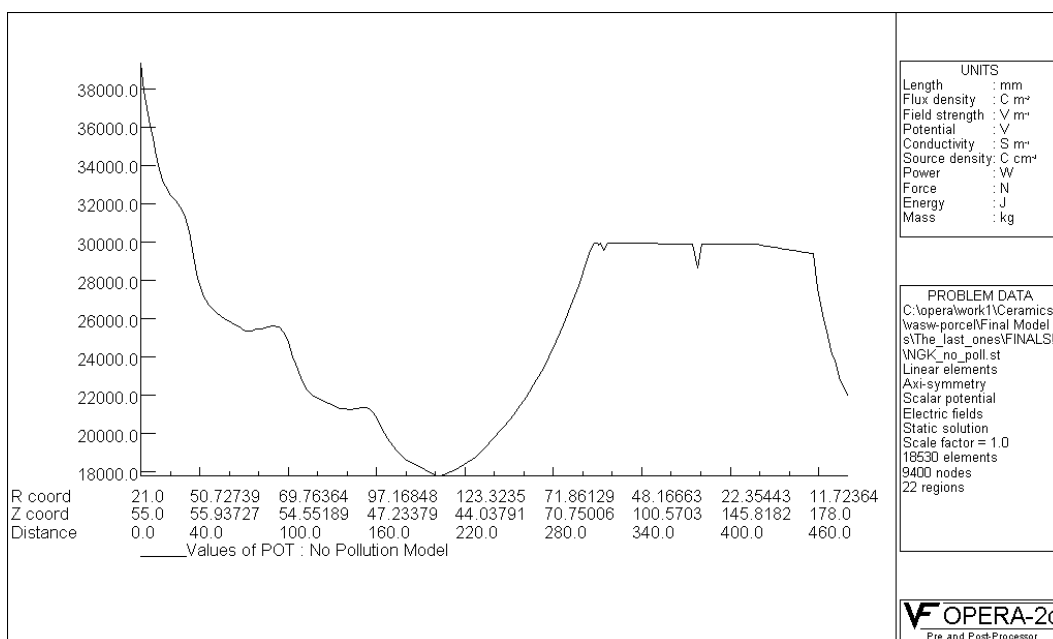


Σχήμα 6.13: Η κατανομή του δυναμικού μέσω χρωματισμένων περιοχών και ισοδυναμικών γραμμών



Σχήμα 6.14: Εστίαση στον αρχικό μονωτήρα της αλυσίδας

Παρατηρούμε ότι η διάχυση του δυναμικού στο χώρο σχετίζεται με το Σχήμα του φορτισμένου ηλεκτροδίου. Ο μεταλλικός πείρος έχει μεγάλο, συγκριτικά, μήκος και επηρεάζει σημαντικό τμήμα της πορσελάνης και το σύνολο, ουσιαστικά, του πρώτου μονωτήρα. Επίσης παρατηρούμε ότι, εντός της θήκης, η μεταβολή του δυναμικού είναι αμελητέα, το οποίο είναι λογικό, εφ' όσον πρόκειται για συμπαγή μεταλλικό αγωγό.



Σχήμα 6.15: Κατανομή του δυναμικού κατά το μήκος ερπυσμού

Για να εξαχθούν ακριβέστερα συμπεράσματα, το Σχήμα 6.15 παρουσιάζει την κατανομή του δυναμικού κατά το μήκος ερπυσμού του πρώτου μονωτήρα. Στους υπόλοιπους, η μορφή του διαγράμματος είναι παρόμοια.

Διατρέχοντας την κάτω επιφάνεια του πρώτου μονωτήρα, το δυναμικό ελαττώνεται, ενώ στην εσωτερική επιφάνεια των πτυχώσεων διακρίνονται πιο απότομες βυθίσεις. Στην άκρη του δίσκου αρχίζει η άνοδος της τιμής της τάσης, που συνεχίζεται στην πάνω επιφάνεια, ενώ στη γαλβανισμένη θήκη διατηρεί υψηλές τιμές παραμένοντας όμως σταθερή. Στην επιφάνεια της θήκης (*pin*) το δυναμικό παραμένει πρακτικά σταθερό, γεγονός που είναι αναμενόμενο, αφού η γαλβανισμένη θήκη, ως αγωγός, διατηρεί σταθερό το δυναμικό στο σύνολο της μάζας της. Τέλος, συμπεριλήφθηκε και το τμήμα του τσιμέντου, που βρίσκεται στο δεύτερο μονωτήρα, καθώς παρουσιάζεται μια έντονη πτώση του δυναμικού, που αναμένεται να επηρεάσει τη διάταξη.

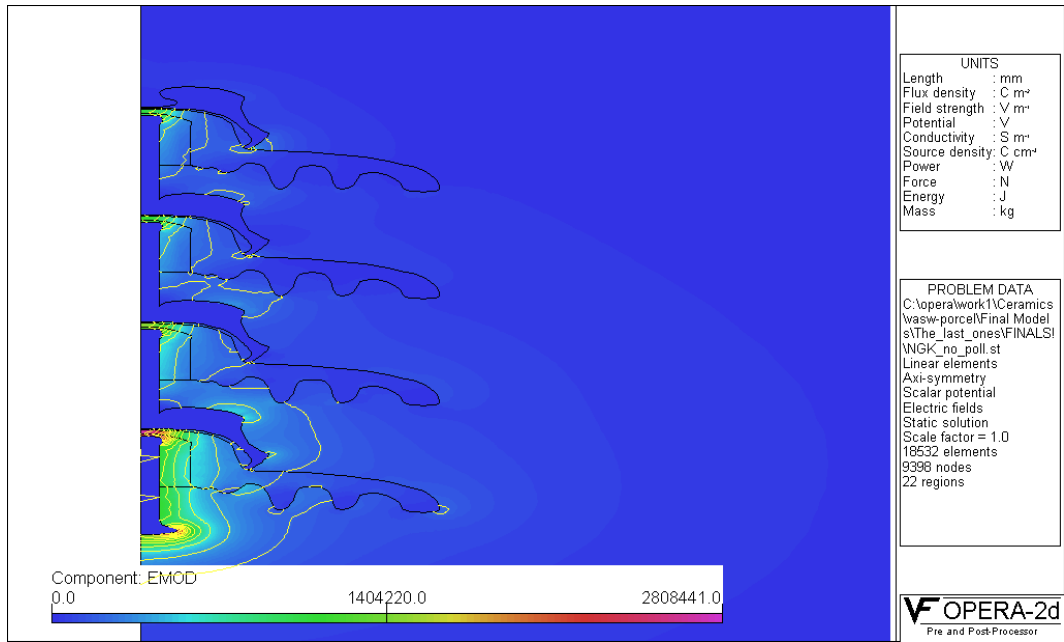
Ο εντοπισμός των περιοχών που παρατηρούνται έντονες μεταβολές του δυναμικού είναι ιδιαίτερα χρήσιμος. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι σε αυτές αναμένονται υψηλές τιμές της τιμής της έντασης, γεγονός ανεπιθύμητο, καθώς ενδέχεται να προκαλέσει φαινόμενα ανεπιθύμητα για την καλή μονωτική συμπεριφορά της αλυσίδας.

### 6.2.5 Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

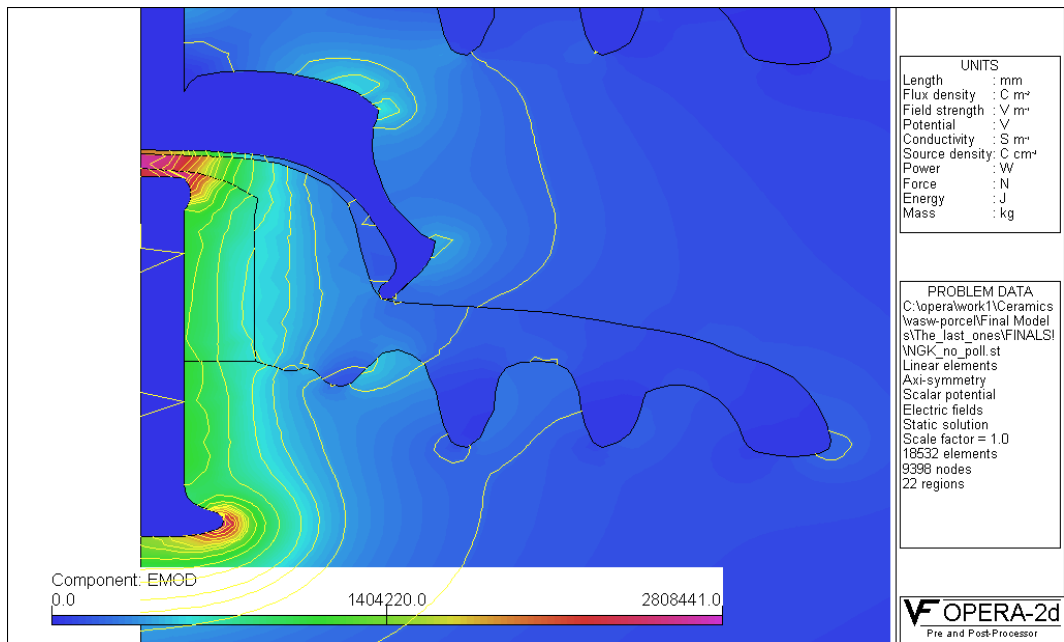
Στη συνέχεια θα διερευνηθεί η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη συνολική διάταξη. Στο Σχήμα 6.16 διακρίνεται η ένταση στη συνολική διάταξη, ενώ στο Σχήμα 6.17 εστιάζουμε στον πρώτο μονωτήρα, ώστε να είναι πιο ευδιάκριτος ο τρόπος που μεταβάλλεται η ένταση.

Η μέγιστη τιμή της έντασης για ολόκληρη τη διάταξη είναι  $E_{\max} = 28.1084 \text{ kV/cm}$  και εμφανίζεται στην περιοχή μεταξύ του πείρου και της θήκης. Μεταξύ των δύο στοιχείων έχει ήδη αναπτυχθεί σημαντική διαφορά δυναμικού, της τάξης των 20 kV και, σε συνδυασμό με τη μικρή απόσταση ανάμεσά τους στην κορυφή του πείρου, είναι αναμενόμενο η ένταση να παρουσιάζει υψηλές τιμές, οι οποίες όμως, εφ' όσον βρίσκονται στο εσωτερικό του μονωτήρα, δεν επηρεάζουν την υπόλοιπη διάταξη. Παρατηρώντας τα Σχήματα, διακρίνουμε ότι η πορσελάνη δεν επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλών τιμών έντασης στο εσωτερικό της.



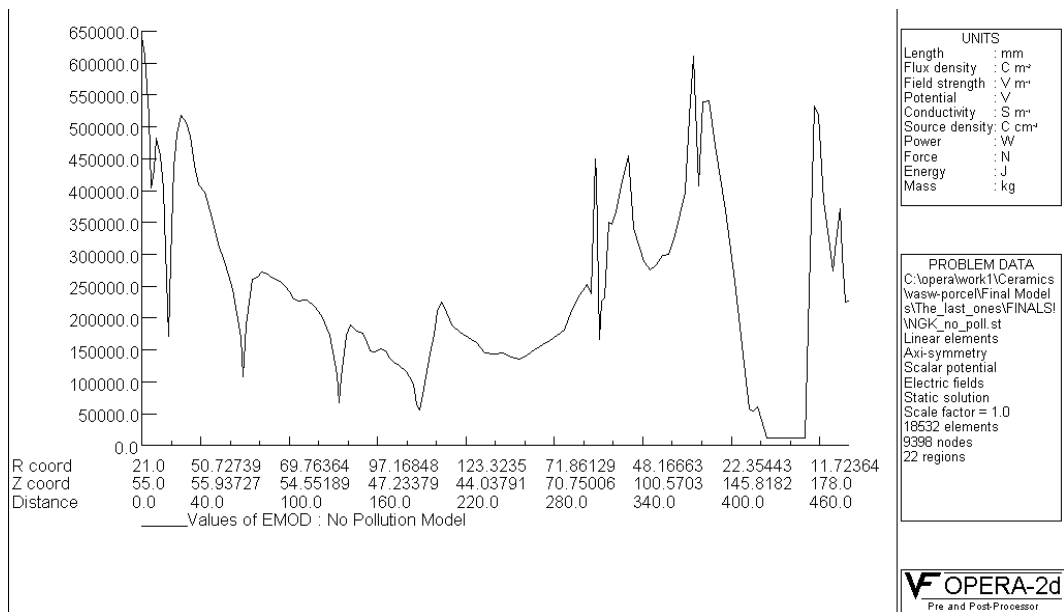


Σχήμα 6.16: Η κατανομή της έντασης στη συνολική διάταξη



Σχήμα 6.17: Εστίαση στον πρώτο μονωτήρα

Το Σχήμα 6.18 παριστάνει την ένταση κατά το μήκος ερπυσμού του πρώτου μονωτήρα, με σκοπό να γίνει κατανοητή η σημασία του τρόπου σχεδίασης ενός μονωτήρα.



Σχήμα 6.18: Η ένταση κατά το μήκος ερπυσμού

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι, διατρέχοντας το μονωτήρα, παρουσιάζονται τέσσερις βυθίσεις της έντασης. Οι βυθίσεις αυτές εμφανίζονται στα άκρα των τεσσάρων πτυχών στο κάτω μέρος του δίσκου. Πέρα από την αύξηση του μήκους ερπυσμού που εξασφαλίζουν, παρατηρούμε, δηλαδή ότι συμβάλλουν στην πτώση της έντασης. Βέβαια, στην εξωτερική επιφάνεια της άκρης του δίσκου η ένταση λαμβάνει υψηλή, σχετικά με την απόσταση από τον πείρο, τιμή. Για αυτό και στη συνέχεια, στη σύγκριση με το ρυπασμένο μοντέλο, θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη μελέτη και σύγκριση των τιμών της έντασης στις άκρες των μονωτήρων.

Στην επιφάνεια της μεταλλικής θήκης, αν και το δυναμικό, όπως είδαμε, διατηρείται σταθερό, παρατηρούνται υψηλές τιμές. Αυτές εμφανίζονται στα σημεία όπου η επιφάνεια δεν έχει ιδιαίτερη καμπυλότητα, αλλά, αντίθετα, σχηματίζεται γωνία. Στη συνέχεια, που η επιφάνεια ομαλοποιείται, η τιμή της έντασης ελαττώνεται σημαντικά, σχεδόν μηδενίζεται. Τέλος, στην ένωση του πείρου του δεύτερου μονωτήρα με το τσιμέντο, παρατηρούμε ότι η ένταση λαμβάνει και πάλι υψηλές τιμές.

### 6.2.6 Παρατηρήσεις για την κατανομή της έντασης

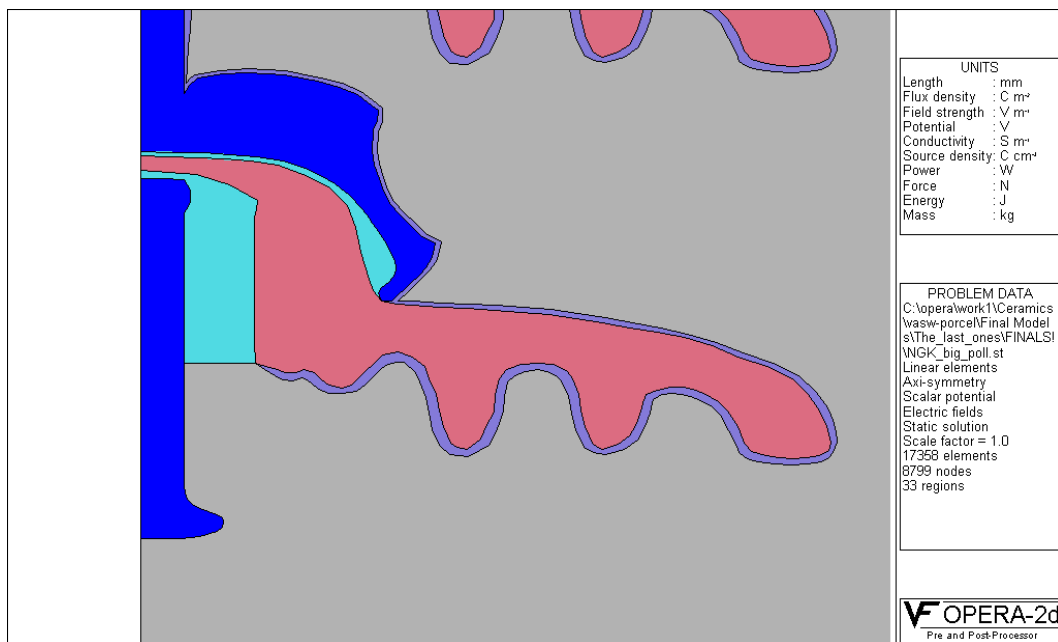
Από την ενδελεχή ανάλυση του διαγράμματος, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η παρουσία των πτυχώσεων στο κάτω μέρος ενός cap and pin μονωτήρα, βοηθά στη μείωση της έντασης κατά το μήκος ερπυσμού. Πραγματικά, λειτουργούν ανασχετικά

στην ανάπτυξη ανεπιθύμητων μεγάλων τιμών της έντασης στο υπόλοιπο τμήμα του μονωτήρα. Διαπιστώθηκε ακόμη, ότι το άκρο του δίσκου είναι ένα σημείο ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς η ένταση εμφανίζει ασυνήθιστα υψηλή τιμή, σε σχέση, πάντα, με την απόσταση του άκρου από το φορτισμένο ηλεκτρόδιο.

Επίσης, η παραπάνω γραφική παράσταση αναδεικνύει ότι η κατανομή του δυναμικού αποτελεί ένα αξιόπιστο κριτήριο, για την πρόβλεψη των περιοχών όπου η ένταση αναμένεται να λάβει υψηλές τιμές, αλλά όχι και το μοναδικό. Πρέπει, επιπλέον, να λαμβάνεται υπ' όψη η σχεδίαση του μονωτήρα και οι ιδιαιτερότητες αυτής, ώστε να καταλήγουμε σε ορθά συμπεράσματα.

### 6.2.7 Εισαγωγή στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε μια ακόμα περιοχή σε κάθε μονωτήρα, όπου αναπαριστά το αγωγίμο στρώμα ρύπανσης. Η αγωγιμότητά της ορίστηκε ίση με  $\sigma = 1.591$ , δηλαδή αρκετά ισχυρή. Και αυτή η τιμή προέκυψε από τη διπλωματική εργασία, από την οποία ελήφθη η διάταξη που προσομοιώσαμε. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση διαφορετικής ρύπανσης, στην επιφάνεια του μονωτήρα εφαρμόστηκαν δύο στρώματα ρύπανσης, διαφορετικού πάχους. Επιπλέον, το παχύ στρώμα ρύπανσης ορίστηκε με επιφανειακή αγωγιμότητα  $\sigma = 5 \text{ S/m}$ .

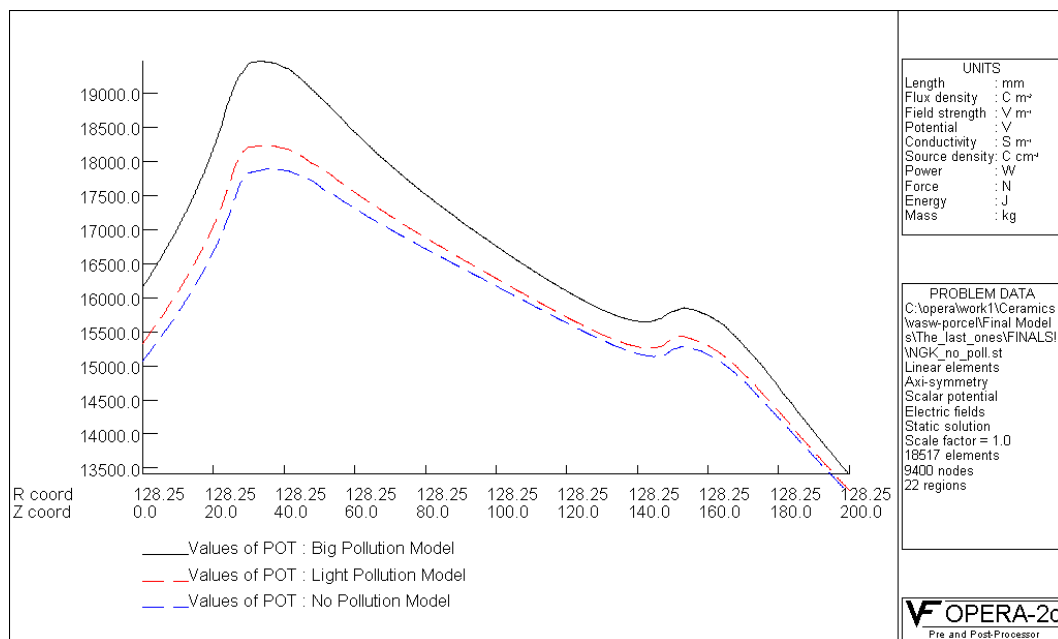


Σχήμα 6.19: Άποψη του μονωτήρα με το παχύ στρώμα ρύπανσης

Στο Σχήμα 6.19 διακρίνεται μια άποψη του μονωτήρα με το παχύ στρώμα ρύπανσης. Το στρώμα ρύπανσης, όπως διακρίνουμε στο παρακάτω Σχήμα, δεν έχει ομοιόμορφο πάχος σε ολόκληρη την επιφάνεια. Συγκεκριμένα, στο κάτω τμήμα του μονωτήρα σχεδιάστηκε παχύτερο. Αυτό ισχύει επειδή η περιοχή αυτή του μονωτήρα είναι πιο δυσπρόσιτη, άρα είναι πιο δύσκολος ο καθαρισμός της.

### 6.2.8 Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού στις τρεις εκδοχές του μοντέλου

Στη συνέχεια θα μελετηθεί η κατανομή του δυναμικού στις τρεις εκδοχές του μοντέλου, με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα και να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα. Η ευθεία υπολογισμού (*calculation path*) στην περίπτωση αυτή, θα είναι μια ευθεία που εφάπτεται στα άκρα των πτυχών και είναι παράλληλη με τους πείρους, καθώς, όπως ήδη έχουμε διαπιστώσει, τα σημεία αυτά είναι ιδιαίτερα κρίσιμα. Για να είναι οι γραφικές παραστάσεις πιο ευκρινείς, η ευθεία δεν επεκτάθηκε στη συνολική διάταξη, αλλά σε τέτοιο μήκος, ώστε να εφάπτεται των δύο πρώτων μονωτήρων της κάθε αλυσίδας. Το Σχήμα 6.20 παριστάνει την κατανομή του δυναμικού των τριών μοντέλων. Με μαύρη συνεχή γραμμή παριστάνεται το δυναμικό του ιδανικού, μη ρυπασμένου, μονωτήρα, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή στην περίπτωση της παρουσίας μικρού στρώματος ρύπανσης και, τέλος, με μπλε διακεκομμένη γραμμή στην περίπτωση του βαριά ρυπασμένου μονωτήρα.



Σχήμα 6.20: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού στα τρία μοντέλα

Παρατηρούμε ότι η παρουσία στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του δυναμικού, όχι μόνο στην επιφάνειά του, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή γύρω απ' αυτόν. Η αύξηση αυτή εξαρτάται και από το είδος της ρύπανσης, όπως είναι εμφανές, καθώς η ταυτόχρονη αύξηση του πάχους και της αγωγιμότητας επιδρά πολύ ισχυρά στην κατανομή του δυναμικού. Επίσης, πρέπει να τονίσουμε ότι, ταυτόχρονα, αυξάνεται και η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων της διάταξης. Στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί, καταγράφεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων του πρώτου και του δεύτερου δίσκου στις τρεις εκδοχές του μονωτήρα, καθώς και η επί τοις εκατό αύξησή της, σε σχέση, πάντα, με τον ιδανικό, μη ρυπασμένο, μονωτήρα.

Μοντέλο μονωτήρα	Διαφορά δυναμικού ( $\Delta V$ ) μεταξύ 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> δίσκου (kV)	Αύξηση της $\Delta V$ σε σχέση με το μοντέλο ( $\alpha$ ) (%)
(α) Ιδανικός	2.545	0
(β) Ελαφρά ρυπασμένος	2.777	9.12
(γ) Βαριά Ρυπασμένος	3.591	41.1

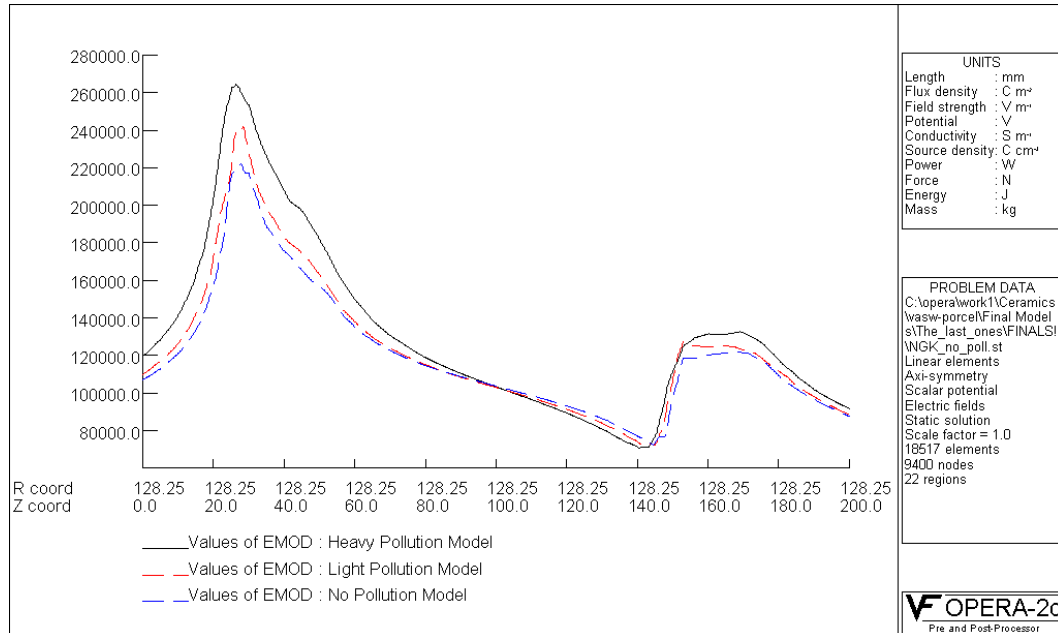
Πίνακας 6.2: Σύγκριση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο πρώτων δίσκων

Από τον Πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι η παρουσία ενός αγωγίμου στρώματος αυξάνει σημαντικά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δίσκων του μονωτήρα. Μάλιστα, παρατηρούμε ότι η αύξηση αυτή δεν είναι γραμμικά σχετιζόμενη με το πάχος της ρύπανσης. Το παχύ στρώμα ρύπανσης, αν και έχει πάχος λίγο μεγαλύτερο από το διπλάσιο του λεπτού στρώματος, εμφανίζει τετραπλάσια αύξηση σε σχέση με το δεύτερο, αφού επιδρά προσθετικά και η αύξηση της αγωγιμότητας. Η επισήμανση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι τιμές της έντασης θα είναι σημαντικά μεγαλύτερες στον βαριά ρυπασμένο μονωτήρα.

### 6.2.9 Σύγκριση της κατανομής της έντασης στους τρεις μονωτήρες

Στην παρούσα παράγραφο, θα μελετηθεί η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα τρία μοντέλα και θα συγκριθούν, ενδεικτικά, οι τιμές της έντασης στις άκρες του πρώτου δίσκου. Η ευθεία υπολογισμού είναι η ίδια με αυτή που

χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση του δυναμικού. Στο Σχήμα 6.21 διακρίνουμε τις κατανομές της έντασης, με χρωματισμό των τριών διαγραμμάτων ανάλογο με του Σχήματος 6.20.



Σχήμα 6.21: Σύγκριση της έντασης των τριών μοντέλων

Από τη μελέτη του γραφήματος, επιβεβαιώνουμε τα πορίσματα της προηγούμενης ενότητας. Πράγματι, λοιπόν, η ρύπανση επιδρά αρνητικά στη συνολική διάταξη, καθώς αυξάνει σημαντικά την τιμή της έντασης. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται, κυρίως, στις άκρες των δίσκων, όπου, εξ' άλλου, εμφανίζονται και οι υψηλότερες τιμές. Ενδιαφέρον έχει και η επισήμανση ότι σε ορισμένες περιοχές του χώρου η ένταση φαίνεται να είναι ελαφρά αυξημένη στην περίπτωση του ιδανικού μονωτήρα, σε σχέση με τους ρυπασμένους. Οι τιμές, όμως, που λαμβάνει είναι χαμηλές και βρίσκονται μακριά από την επιφάνεια του μονωτήρα. Για αυτό το λόγο, δε θεωρούμε ότι επηρεάζουν σημαντικά τα συμπεράσματά μας.

Στον Πίνακα 6.3 συγκρίνονται οι τιμές της έντασης στο άκρο του πρώτου δίσκου και καταγράφεται η μεταβολή που επιφέρει η παρουσία της ρύπανσης.

Μοντέλο μονωτήρα	Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο άκρο του 1 <sup>ου</sup> δίσκου (kV/m)	Αύξηση της έντασης σε σχέση με το μοντέλο (α) (%)
(α) Ιδανικός	217.052	0
(β) Ελαφρά ρυπασμένος	228.248	5.16
(γ) Βαριά Ρυπασμένος	252.989	16.56

*Πίνακας 6.3: Σύγκριση της τιμής της έντασης στο άκρο του πρώτου δίσκου*

Ο Πίνακας επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο. Η ένταση, όντως, επηρεάζεται από την παρουσία ενός αγώγιμου στρώματος ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα. Συγκεκριμένα, εμφανίζει αισθητά υψηλότερες τιμές, ενώ διαπιστώνουμε, επίσης, ότι το πάχος της ρύπανσης και η αυξημένη αγωγιμότητά της επιβαρύνει ακόμα περισσότερο την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, δυσχεραίνοντας τη λειτουργία του. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η εμφάνιση υψηλότερων τιμών της έντασης στην επιφάνεια του μονωτήρα ενισχύει το ενδεχόμενο εμφάνισης ηλεκτρικών τόξων και, τελικά, το ενδεχόμενο υπερπήδησης του μονωτήρα.

### **6.2.10 Συμπεράσματα**

Η προσομοίωση της αλυσίδας cap and pin μονωτήρων της NGK, τόσο σε ιδανική μορφή, όσο και υπό την επίδραση αγώγιμων στρωμάτων ρύπανσης διαφορετικού πάχους, ανέδειξε τη σημασία του συστηματικού καθαρισμού των μονωτήρων. Επιβεβαιώθηκε ότι η ρύπανση επιδρά αρνητικά στην κατανομή της έντασης και του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα, αλλά και στον ατμοσφαιρικό αέρα που τον περιβάλλει. Για αυτό και η ρύπανση πρέπει να απομακρύνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να αποφεύγονται φαινόμενα υπερπήδησης.

Επίσης, επισημάναμε πώς ο προσεκτικός σχεδιασμός ενός cap and pin μονωτήρα συμβάλλει στην αποφυγή ιδιαίτερα υψηλών τιμών της έντασης. Σε αυτό, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι πτυχώσεις στην κάτω επιφάνεια του μονωτήρα, αλλά και ο σωστός σχεδιασμός της μεταλλικής θήκης, καθώς πρόκειται για ένα αγώγιμο τμήμα που βρίσκεται εντός της αλυσίδας και ενδεχομένως να επηρεάσει αρνητικά τη συνολική διάταξη.

## ***Κεφάλαιο 7***

### ***ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ***

Αντικείμενο της διπλωματικής μας ήταν η μελέτη της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτροστατικού πεδίου στο εσωτερικό, στην επιφάνεια και στην ευρύτερη περιοχή ενός μονωτήρα ή μιας αλυσίδας μονωτήρων. Στη διπλωματική μας εργασία χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα προσομοίωσης PC OPERA-2d, προκειμένου να προσομοιώσουμε δύο συνθετικούς και δύο πορσελάνινους μονωτήρες. 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.

Στην περίπτωση των συνθετικών μονωτήρων, αρχικά προσομοιώθηκε ένας μονωτήρας που ελήφθη από μια πρόσφατη εργασία των ερευνητών Que και Sebo [3]. Ο σκοπός αυτής της επιλογής ήταν να συγκριθούν τα αποτελέσματα της εργασίας τους με της δικής μας προσομοίωσης, ώστε να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία της μεθοδολογίας και του προγράμματος προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν προσέγγισαν με ικανοποιητική ακρίβεια τις τιμές των προσομοιώσεων των Que και Sebo. Επίσης, επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα απλοποίησης του μοντέλου ενός μονωτήρα, αφαιρώντας έναν αριθμό πτυχών. Διαπιστώθηκε ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα δε μεταβάλλονται σημαντικά ενώ, παράλληλα, μειώνεται ο χρόνος ανάλυσης και η πολυπλοκότητα του υπό σχεδίαση μοντέλου. Στη συνέχεια, μελετώντας το μονωτήρα κατά το μήκος ερπυσμού του, διαπιστώθηκε ότι οι πλέον επικίνδυνες περιοχές βρίσκονται στις άκρες των δισκοειδών πτυχών, όπου και εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές της έντασης. Επίσης, ένα ακόμη συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη του συγκεκριμένου μοντέλου, είναι ότι οι απότομες μεταβολές του δυναμικού είναι ένα κριτήριο, όχι όμως και το μοναδικό, για την πρόβλεψη των περιοχών που παρουσιάζουν υψηλή ένταση. Ένας άλλος παράγοντας που είναι δυνατό να επηρεάζει την κατανομή του δυναμικού τόσο στο εσωτερικό της διάταξης όσο και στον περιβάλλοντα αέρα είναι τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και το είδος της ρύπανσης.



Στην επόμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση ενός ακόμη συνθετικού μονωτήρα και συγκεκριμένα ενός μοντέλου της εταιρείας NGK. Αρχικά έγινε σύγκριση των κατανομών της έντασης και του δυναμικού του πλήρους μοντέλου με τα αντίστοιχα μεγέθη του ίδιου μονωτήρα, χωρίς τις πτυχές. Διαπιστώθηκε η σημασία των δισκοειδών πτυχών στην κατανομή της έντασης, καθώς κάθε πτυχή συνέβαλλε στη σημαντική ελάττωση της έντασης. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με τις ιδιότητες των μονωτικών υλικών, τα οποία δεν ευνοούν την ανάπτυξη υψηλών τιμών της έντασης στο εσωτερικό τους, επηρεάζοντας, ταυτόχρονα και την επιφάνειά τους. Πέρα από αυτή τη διαπίστωση, είναι προφανές ότι οι πτυχές επιδρούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ελαττώνοντας, έτσι, το ενδεχόμενο εμφάνισης υπερπήδησης. Στη συνέχεια η επιφάνεια του μονωτήρα καλύφθηκε από ένα αγωγίμο στρώμα ρύπανσης, προκειμένου να διερευνηθεί αν και σε ποιο βαθμό επιδρά στα υπό μελέτη μεγέθη. Εξαιτίας της αύξησης της έντασης στην επιφάνεια του μονωτήρα λόγω της ρύπανσης, γίνεται αντιληπτή η σημασία του σωστού και τακτικού καθαρισμού των μονωτήρων, ειδικά σε περιόδους όπου δεν εμφανίζονται έντονες βροχοπτώσεις.

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης των συνθετικών μονωτήρων, η εργασία συνεχίστηκε με τη μελέτη δύο μονωτήρων από πορσελάνη. Αρχικά προσομοιώθηκε ένας μονωτήρας στήριξης με τρεις δισκοειδείς πτυχές. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, διερευνήθηκε η σημασία του μεγέθους των δισκοειδών πτυχών, σχεδιάζοντας δύο μοντέλα με διαφορετικό μήκος ερπυσμού. Διαπιστώθηκε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των δίσκων, τόσο ομαλότερη είναι η κατανομή της έντασης, ενώ, παράλληλα, μειώνονται οι μέγιστες τιμές της τελευταίας. Όπως και στους συνθετικούς μονωτήρες, οι περιοχές που παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές της έντασης είναι οι άκρες των πτυχών. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ρύπανση στην επιφάνεια του μονωτήρα. Αρχικά τοποθετήθηκε ένα μικρό στρώμα ρύπανσης και στη συνέχεια ένα στρώμα μεγαλύτερου πάχους, με σκοπό να διερευνηθεί κατά πόσον το μέγεθος της ρύπανσης επηρεάζει την ένταση και το δυναμικό του μονωτήρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία ακόμα και ενός μικρού στρώματος ρύπανσης προκαλεί την αύξηση της έντασης, ιδιαίτερα στις άκρες των πτυχών, ενώ, αυξάνοντας το πάχος του στρώματος ρύπανσης η τιμή της έντασης αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Συμπεράναμε, επομένως, ότι και στους πορσελάνινους μονωτήρες η ρύπανση προκαλεί δυσάρεστα φαινόμενα, τα οποία εντείνονται ανάλογα με την ισχύ της ρύπανσης.

Η τελευταία προσομοίωση αφορούσε σε μια αλυσίδα cap and pin μονωτήρων της NGK, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα από τη ΔΕΗ και ελήφθη από μια παλαιότερη διπλωματική εργασία. Μελετώντας την κατανομή της έντασης κατά το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα, διαπιστώθηκε η σημασία των πτυχώσεων που βρίσκονται στην κάτω επιφάνεια του μονωτήρα. Οι πτυχώσεις συνέβαλλαν αποφασιστικά στον περιορισμό της εμφάνισης υψηλών τιμών της έντασης, συμβάλλοντας, παράλληλα, στην αύξηση του μήκους ερπυσμού του μονωτήρα. Και σε αυτό το μοντέλο εμφανίστηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές της έντασης στα άκρα των δίσκων, παρά τη μεγάλη διάμετρό τους. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση της ρύπανσης στην κατανομή του δυναμικού και της έντασης, εφαρμόζοντας δύο στρώματα ρύπανσης διαφορετικού πάχους. Διαπιστώσαμε ότι η ρύπανση συμβάλλει στην αύξηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των άκρων δύο διαδοχικών πτυχών, η οποία αυξάνεται επιπλέον με αύξηση του πάχους της. Η αύξηση της διαφοράς δυναμικού θα συνέβαλλε στην εμφάνιση υψηλότερων τιμών της έντασης, όπως και επιβεβαιώθηκε. Πράγματι, λοιπόν, οι ρυπασμένοι μονωτήρες παρουσίασαν υψηλότερη ένταση, ειδικά, μάλιστα, στην κρίσιμη, για τα χαρακτηριστικά μεγέθη που μελετήσαμε, περιοχή του μονωτήρα, δηλαδή στις άκρες των δίσκων.

Ολοκληρώνοντας αυτή τη διπλωματική εργασία, συμπεράναμε τη σημασία του σωστού σχεδιασμού ενός μονωτήρα για την όσο το δυνατόν καλύτερη λειτουργία του. Μελετήθηκε πώς το μέγεθος και, γενικότερα, η παρουσία των δίσκων επιδρούν θετικά σε αυτήν, ενώ, παράλληλα, επισημάναμε την αρνητική επίδραση της επικάλυψης στην επιφάνεια του μονωτήρα ενός αγωγίμου στρώματος ρύπανσης. Τέλος, μελετώντας προσεκτικά την κατανομή της έντασης και του δυναμικού κατά το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων, επιστήσαμε την προσοχή στις περιοχές της επιφάνειάς τους που αναμένεται να επιφέρουν δυσμενή αποτελέσματα στη λειτουργία τους.

Στη συνέχεια καταγράφονται ορισμένες ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει ο χειρισμός του προγράμματος προσομοίωσης PC OPERA, με την ελπίδα οι επισημάνσεις μας να φανούν χρήσιμες στους μελλοντικούς χρήστες του προγράμματος.

Η εκτενής ενασχόλησή μας με το πρόγραμμα προσομοίωσης PC OPERA, ανέδειξε την αξιοπιστία και την ικανοποιητική λειτουργία του. Παράλληλα, όμως, οφείλουμε να επισημάνουμε ορισμένες ιδιαιτερότητες που παρατηρήθηκαν κατά το χειρισμό

του. 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.

- Ο αριθμός των πεπερασμένων τριγωνικών στοιχείων στα οποία το πρόγραμμα υποδιαιρεί την υπό ανάλυση επιφάνεια ανέρχεται σε 20.000. Αν και ο αριθμός φαίνεται ικανοποιητικός, στην πραγματικότητα, ειδικά αν πρόκειται για πολύπλοκες διατάξεις, όπως, για παράδειγμα, η αλυσίδα των τεσσάρων cap and pin μονωτήρων που σχεδιάσαμε και αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 6.2, δεν είναι πάντοτε επαρκής. Για αυτό και 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.
- 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.
- Όταν το μονοπάτι που θέλουμε να διανύσουμε για τον υπολογισμό των διαφορών μεγεθών διατρέχει την επιφάνεια ενός σώματος, από την εσωτερική του μεριά, το πρόγραμμα δίνει τις τιμές που επικρατούν στην επιφάνειά του, αλλά, οριακά, εντός του υλικού. Είναι κατανοητό ότι σε περιπτώσεις μεγεθών που δεν εκφράζονται με συνεχείς συναρτήσεις στη σύνδεση δύο διαφορετικών υλικών, όπως είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, οι τιμές που θα λάβουμε δεν είναι αξιόπιστες, καθώς αφορούν στο εσωτερικό του υλικού. Ο σωστός τρόπος σχεδίασης επιβάλλει την κατασκευή της περιοχής του ατμοσφαιρικού αέρα που περιβάλλει το υλικό ως πολύγωνο (*polygon*) όχι ως φόντο (*background*). Έτσι, μπορούμε, πλέον, να διατρέξουμε την επιφάνεια ενός σώματος από την εξωτερική του πλευρά.

- Ιδιαίτερα προσεκτικός οφείλει να είναι ο καθορισμός των διαφορετικών υλικών σε μια διάταξη. Εκτός από τον ορισμό ρεαλιστικής τιμής της αγωγιμότητάς τους ( $\sigma$ ), είναι απαραίτητος και ο ανάλογος προσδιορισμός της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ( $\epsilon_r$ ). Ορίζοντας μόνο το πρώτο μέγεθος, το πρόγραμμα δεν αντιλαμβάνεται το υλικό που θέλουμε να παραστήσει μία περιοχή.

Παραπάνω περιγράψαμε τις βασικότερες, κατά τη γνώμη μας, επισημάνσεις, στις οποίες πρέπει ο μελλοντικός σχεδιαστής που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα να δώσει ιδιαίτερη προσοχή. Οι υπόλοιπες λειτουργίες του PC OPERA, με την κατάλληλη εξοικείωση, δεν είναι πολύπλοκες. Αντίθετα, οφείλουμε να αναγνωρίσουμε ότι το περιβάλλον εργασίας είναι αρκετά φιλικό προς το χρήστη. Ελπίζουμε πως στη νέα, εξελιγμένη εκδοχή του προγράμματος, το OPERA-3d, που ήδη διαθέτει το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε. Μ. Π., οι δυσλειτουργίες που εντοπίσαμε να έχουν εξαλειφθεί.

## ***Βιβλιογραφία***

- [1] I. Α. Σταθόπουλος, “Υψηλές Τάσεις Ι”, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα.
- [2] J. S. T. Looms, “Insulators for High Voltages”, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.
- [3] Weiguo Que and Stephen A. Sebo, “Discussions of possible simplifications for the electric field and voltage distribution calculations along composite insulators”, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003.
- [4] Κ. Καγκαράκης, “Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.
- [5] Ιωσήφ Σιουκιούρογλου, “Διηλεκτρική Συμπεριφορά Ρυπασμένων Μονωτήρων”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 1995.
- [6] L.L. Alston, S. Zoledziowski, “Growth of discharges on polluted insulation”, proc. IEE vol. 110, No. 7, July 1963.
- [7] R. Wilkins, “Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films”, proc. IEE Vol. 116, No. 3, March 1969.
- [8] A. K. Gertsik, A. V. Korsunter and N. K. Nikolski, “The effect of fouling on insulators for HVDC overhead lines”, Direct Current, 1957.
- [9] N. Hylten-Cavallius, S. Annestrand, H. Wilth and V. Madzarevic “Insulation requirements, corona losses and corona radio interference for HVDC lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-83, 1964.
- [10] J. S. Forrest, P. J. Lambeth, D. F. Oakeshott, “Research on the performance of high voltage insulators in polluted atmospheres”, proc. IEE, 1960, 107, A.
- [11] P. J. Lambeth, “Pollution performance of HVDC outdoor insulators”, IEE Conf. Publ. 22, 1966.
- [12] P. I. Shkuropat, “Development of a discharge on a wet insulator surface with DC”, Leningrad Polytechnic Inst., 1957.

- [13] Farouk Rizk and D. H. Nguyen, "Digital simulation of source-insulator interaction in HVDC pollution tests", IEEE Transactions on power delivery, vol. 3, no. 1, January 1988.
- [14] Guan Zhicheng and Zhang Renyu, "Calculation of DC and AC flashover voltage of polluted insulators", IEEE Transactions on electrical insulation, vol. 25, no. 4, August 1990
- [15] F. Obenhaus, "Fremdschichtuberschlag und kriechweglänge", Dtsch. Electrotechnik, 1958.
- [16] B. F. Hampton, "Flashover mechanism of polluted insulation", Proc. IEE, 1964.
- [17] H. Von Cron, "Die kriechweglänge und das stehvermögen von isolatoren unter fremdschichteinfluss", Elektrotech. Z., 1957.
- [18] E. Nasser, "Zum problem des Fremdschichtuberschlages an isolatoren", Elektrotech. Z. 1962.
- [19] L.L. Alston, S. Zoledziowski, "The flashover of polluted insulation", Reyrolle Research Report, Mar. 1959.
- [20] P. S. Ghosh and N. Chatterjee, "Polluted insulator flashover model for ac voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 1, February 1995
- [21] N. Dhahbi-Megrache, A. Beroual and L.Krahenbuhl, "A new proposal model for flashover of polluted insulators", Centre de Genie Electrique de Lyon, December 1996.
- [22] N. Dhahbi-Megrache, A. Beroual, "Flashover dynamic model of polluted insulators under ac voltage", IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, vol. 7, no 2, April 2000.
- [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.

- [24] J. L. Rasolonjanahary, L. Krahenbuhl, A. Nicolas, “Computation of electric fields and potential on polluted insulators using a boundary element method”, IEEE Transactions on magnetics, vol. 28, no. 2, March 1992.
- [25] Q. S. Huang, “Applications nouvelles de la methode des equationsintegrales de frontiere en electrotechnique”, These E.C.L., 1987
- [26] P. Auriol, Q. S Huang, L Krahenbuhl, “Numerical simulation of the conducting surface of high voltage insulating systems in 3D”, IEEE Transactions on magnetics, vol. 24, no. 1, August 1987.
- [27] S. Chakravorti and P. K. Mukherjee, “Power frequency and impulse field calculation around a HV insulator with uniform or nonuniform surface pollution”, IEEE Transactions on electrical insulation, vol. 28, no. 1, February 1993.
- [28] A. Skopec, J. G. Wankowicz, B. Sikorski, “Electric field calculation for an axially-symmetric insulator with surface contamination”, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, vol. 1, no. 2, April 1994
- [29] E. Asenjo S., N. Morales O., A. Valdenegro E., “Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method”, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, vol. 4, no. 1, Febr. 1997.
- [30] E. Asenjo S., N. Morales O. “Low frequency complex fields in polluted insulators”, IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 17, no. 3, pp. 262 –268, June 1982.
- [31] Imre Sebestyen, “Electric field calculation for HV insulators using domain-decomposition method”, IEEE Transactions on magnetics, vol. 38, no. 2., March 2002.
- [32] Vector Fields, “OPERA-2d User Guide”, Vector Fields Limited, England, 1999.
- [33] Βασιλική Θ. Κονταργύρη, “Μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται σε μονωτήρα γραμμής μεταφοράς 150kV”, Εξαμηνιαία εργασία τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος, ΕΜΠ, Αθήνα 2003.

- [34] M. A. Laughton, M. G. Say, “Electrical engineer’ s reference book”, 14<sup>th</sup> edition, Butterworth – Heinemann, London, 1990.
- [35] Αλέξανδρος Ξευγένης, “Μελέτη της λειτουργίας μονωτήρων αναρτήσεως σε τεχνητά ρυπασμένο περιβάλλον με τη μέθοδο δημιουργίας αλατούχου ομίχλης”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 1986.