



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

Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Υψηλής Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ν. Χατζηπέτρος

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσες: Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Μάρτιος 2012



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

Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Υψηλής Τάσης

172

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ν. Χατζηπέτρος

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσες: Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Ελένη Π. Νικολοπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28^η Μαρτίου 2012.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Ν. Κορρές

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2012

.....

Δημήτριος Ν. Χατζηπέτρος

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

Copyright © Δημήτριος Χατζηπέτρος, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να 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.

...Να ισοδυναμείς κάθε μέρα. Να γεννιέσαι
κάθε μέρα. Ν' αρνιέσαι ό,τι έχεις κάθε
μέρα. Η ανώτατη αρετή δεν είναι να 'σαι
ελεύθερος, ιωρά να μάχεσαι για ελευτερία.

Μην καταδέχεσαι να ρωτάς: «Θα
νικήσουμε; Θα νικηθούμε;» Πολέμα!

Η ειδική ρηση του Σίμωντος, για μια
εφήμερη ειρήνη, όσα γεις, να γίνει
ειδική ρηση δική σου. Τόπος είναι,
είντροφοι, ο καινούριος Δεκάλογός μας!...

Νίκος Καραντάκης, «Αθικητική»

Περίληψη

Η «ηλικία» των μονωτήρων, ως προς τη χρήση τους σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ταυτίζεται, λίγο ή πολύ, με εκείνη των πρώτων γραμμών μεταφοράς. Οι μονωτήρες, οι οποίοι στήριζαν τις πρώτες αυτές γραμμές, ήταν κατασκευασμένοι, ως επί το πλείστον, από πορσελάνη και η φιλοσοφία σχεδιάσής τους προσιδίαζε με εκείνη των μονωτήρων των πρώτων τηλεγραφικών και τηλεφωνικών γραμμών. Εντούτοις, οι παραπάνω είχαν ένα πρακτικό όριο τάσης μεταφοράς 40 kV. Αυξανόμενων των αναγκών για υψηλότερα επίπεδα τάσης, με σκοπό την περεταίρω μείωση των απωλειών μεταφοράς, άρχισαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα να σχεδιάζονται και να παράγονται μονωτήρες οποιουδήποτε μήκους, με διαφορετική πλέον φιλοσοφία, προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας υπό Υψηλή Τάση (Υ.Τ.).

Έκτοτε και μετά, η πορεία των μονωτήρων δε χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες τεχνολογικές καινοτομίες. Οι όποιες διαφοροποιήσεις αφορούν κυρίως στο σχεδιαστικό μέρος, ενώ εισάγονται κεραμικά υλικά, όπως το σκληρυμένο γυαλί, που καλούνται να βελτιώσουν τη μηχανική κυρίως αντοχή τους.

Ωστόσο, έπειτα από εκατονταετή και πλέον χρήση των κεραμικών μονωτήρων και υπό την επίδραση νέων απαιτήσεων που ανακύπτουν συνεχώς, εισάγονται στα τέλη της δεκαετίας του 1950 οι πρώτοι συνθετικοί (ή πολυμερείς ή μη-κεραμικοί) μονωτήρες, οι οποίοι, διαθέτοντας μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως π.χ. το χαμηλότερο βάρος, η ευκολία χειρισμών, το μειωμένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, η μεγαλύτερη αντίσταση σε βανδαλισμούς και κυρίως η καλύτερη απόδοση έναντι της ρύπανσης, καλούνται να αυξήσουν την απόδοση και να βελτιώσουν την αξιοπιστία του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Καθοριστικής σημασίας τόσο κατά τη σχεδίαση, όσο και κατά τη λειτουργία των μονωτήρων είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και η κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό και σε περιοχές γύρω απ' αυτούς. Υψηλές τιμές της πεδιακής έντασης ευθύνονται για την πρόκληση ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως είναι η δημιουργία επιφανειακών μερικών εκκενώσεων (μεταξύ αυτών και οι εκκενώσεις corona), η συνακόλουθη μείωση της μονωτικής ικανότητας και τελικά η υπερπήδηση του μονωτήρα, ενώ η γήρανση αποτελεί δυσάρεστη εξέλιξη, η οποία μειώνει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των συνθετικών μονωτήρων.

Μέχρι τη δεκαετία του 1970 η θεωρητική προσέγγιση της πεδιακής ανάλυσης μονωτήρων, μέσω αναλυτικών τεχνικών, ήταν εξαιρετικά δυσχερής ή και αδύνατη, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας τους, και μόνο η πειραματική μελέτη ήταν εφικτή. Εντούτοις, από τη δεκαετία του 1970 και έπειτα, η ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επίλυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και η θεαματική αύξηση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος κατέστησαν υλοποιήσιμη τη μελέτη της πεδιακής ανάλυσης, μέσω διεξαγωγής προσομοιώσεων σε Η/Υ.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό και στην περιοχή του αέρα γύρω από ένα συνθετικό μονωτήρα, όταν στους ακροδέκτες αυτού εφαρμόζεται Υψηλή Τάση (Υ.Τ.). Για την πραγματοποίηση της πεδιακής ανάλυσης προσομοιώνονται διάφορα μοντέλα συνθετικών μονωτήρων σε τρισδιάστατο περιβάλλον, με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης Opera-3d V15, το οποίο κάνει εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Οι συνθήκες έκθεσης θεωρούνται ιδανικές, ενώ κατά τις προσομοιώσεις λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις τόσο του αγωγού, όσο και τμήματος του πυλώνα απ' τον οποίο αναρτάται ο μονωτήρας. Ακόμη, προστίθενται τοροειδή

εξομάλυνσης και αναδεικνύεται η σπουδαιότητα τοποθέτησης αυτών τόσο στο ενεργό, όσο και στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα.

Λέξεις-κλειδιά

Συνθετικός μονωτήρας, Υψηλή Τάση, Ηλεκτρικό πεδίο, Προσομοίωση, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, Κατανομή δυναμικού, Αγωγοί, Πυλώνας, Τοροειδή εξομάλυνσης.

Abstract

The history of insulators, as to their use in power systems, coincides, more or less, to that of the first transmission lines. Insulators, which supported these first lines, were constructed mostly from porcelain and their design philosophy was similar to that of the first telegraph and telephone lines. However, these had a practical limit transfer voltage 40 kV. Increasing needs for higher voltage levels in the early 20th century, in order to further reduce power transmission losses, brought a different philosophy in the designing and production of insulators, adapted to the requirements for transmission of electricity at high voltage (HV).

Since then, the development of insulators is not characterized by specific technological innovations. Any differences mainly concerned the design part, while new ceramic materials, such as toughened glass, were introduced, in order to improve their mechanical strength.

However, having use ceramic insulators for more than a century and under the influence of modern requirements, that arise continually, the first composite (or polymer or non-ceramic) insulators were introduced in the late 1950s, which, having a number of advantages, such as lower weight, ease of handling (e.g. during transportation or installation), reduced installation and maintenance cost, greater resistance to vandalism and especially better performance against pollution, are expected to improve the reliability of the electricity transmission system and to make it more efficient.

Electric field strength and potential distribution are of great importance concerning the design and operation of insulators. High levels of electric field intensity are responsible for causing adverse effects, such as creation of surface partial discharge (including corona discharge), degradation of insulating properties and probably flashover of the insulator. Furthermore, aging is an adverse impact, which reduces the performance and life time of composite insulators.

Until the 1970's, a theoretical approach to the field analysis of insulators, through analytical techniques, was extremely difficult or even impossible, due to their complex geometry, and only test study was feasible, through the implementation of measurements. However, since 1970 (onwards), the development of numerical methods for solving electromagnetic field problems and the great increase in available computing power made it feasible to study field analysis by using computer software.

The aim of this diploma thesis is the study of electric field distribution in the internal regions of a HV composite insulator as well as in the surrounding air when High Voltage (HV) is applied to the HV electrode. For this purpose a number of composite insulators models are simulated in three-dimensional environment, using the computational electromagnetic field analysis package Opera-3d V15, which applies the finite element method (FEM). The simulation progress is carried out under dry and clean conditions and the simulated models take into account the effects of both the phase conductor and part of the transmission tower, from which the insulator is suspended. Furthermore, two grading rings are installed in order to underline the importance of such a placement both at the HV and at the grounded end of the insulator.

Keywords

Composite insulator, High Voltage, Electric field, Simulation, Finite element method, Potential distribution, Conductors, Transmission tower, Grading rings.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract.....	vii
Περιεχόμενα.....	viii
Πρόλογος	1
1 Εισαγωγή.....	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Κατηγοριοποίηση μονωτήρων	6
1.3 Υλικά των μονωτήρων	8
1.3.1 Η φύση των διηλεκτρικών των μονωτήρων.....	8
1.4 Συνθετικοί μονωτήρες.....	13
1.4.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη.....	13
1.4.2 Χρήση συνθετικών μονωτήρων	14
1.4.3 Συστατικά στοιχεία ενός συνθετικού μονωτήρα	17
1.5 Ρύπανση & Υπερπήδηση μονωτήρων.....	24
1.5.1 Ρύπανση	24
1.5.2 Υπερπήδηση	29
1.6 Γήρανση συνθετικών μονωτήρων.....	34
1.6.1 Περιβαλλοντικές αιτίες γήρανσης	34
1.6.2 Οπτική αναγνώριση αλλοιώσεων/φθορών σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης	42
1.6.3 Οπτική αναγνώριση ζημιών/βλαβών σε συνθετικούς μονωτήρες.....	44
1.6.4 Οπτική αναγνώριση αστοχίας μονωτήρα	48
1.6.5 Τρόποι βελτίωσης της απόδοσης και της διάρκειας ζωής συνθετικών μονωτήρων.....	49
2 Υπολογισμός Ηλεκτρικού Πεδίου & Κατανομή Δυναμικού	53
2.1 Γενικά.....	53
2.2 Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού	54
2.2.1 Κατηγοριοποίηση αριθμητικών μεθόδων	56
2.2.2 Συνδυασμός αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού	56
2.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM)	58
2.3.1 Γενικά	58
2.3.2 Τι είναι τα πεπερασμένα στοιχεία-μαθηματικό υπόβαθρο της FEM.....	60

2.3.3 Τα βασικά βήματα της FEM	61
3 Πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων	69
3.1 Γενικά.....	69
3.2 Εφαρμογές της FEM στον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες ..	70
3.2.1 Η Μέθοδος Αποσύνθεσης Χωρίου	70
3.2.2 Η Μέθοδος του Υπο-Μοντέλου	75
3.2.3 Σύγκριση FEM-BEM	80
3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων.....	83
3.3.1 Απλοποίηση του μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα	83
3.3.2 Επίδραση του αγωγού και τμήματος του πυλώνα	88
3.3.3 Επίδραση του 3φ συστήματος μεταφοράς και ολόκληρου του πυλώνα	95
3.3.4 Επίδραση των παραμέτρων του τοροειδούς εξομάλυνσης	99
3.3.5 Επίδραση της επιφανειακής ρύπανσης	120
3.3.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα.....	122
4 Προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. με το πρόγραμμα Opera-3d.....	129
4.1 Εισαγωγή.....	129
4.2 Συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης 345 kV του άρθρου [41]	132
4.2.1 Μοντέλο απομονωμένου μονωτήρα	133
4.2.2 Επίδραση του αγωγού στα τελικά αποτελέσματα.....	140
4.2.3 Επίδραση τμήματος του πυλώνα στα τελικά αποτελέσματα.....	146
4.2.4 Βελτίωση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού με προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο	150
4.2.5 Σύγκριση των επιδράσεων των επιμέρους παραμέτρων στα τελικά αποτελέσματα	151
4.2.6 Πλήρες (τελικό) μοντέλο του άρθρου [41]	157
4.3 Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης ελληνικού συστήματος μεταφοράς	164
4.3.1 Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης 150 kV	164
4.3.2 Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης 400 kV	186
4.4 Σχολιασμός της γενικής εικόνας των διαγραμμάτων	207
5 Συμπεράσματα – Η επόμενη μέρα.....	209
5.1 Γενικά.....	209
5.2 Η πορεία της εργασίας.....	210
5.2.1 Υπολογιστικοί πόροι και μεγέθη.....	212
5.3 Προτάσεις & προκλήσεις για επόμενες εργασίες.....	212

5.3.1	Απλοποίηση του μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα	212
5.3.2	Επίδραση του 3φ συστήματος μεταφοράς και ολόκληρου του πυλώνα	214
5.3.3	Συνθήκες θεωρούμενης ηλεκτρικής καταπόνησης	215
5.3.4	Έλεγχος και βελτιστοποίηση των παραμέτρων των τοροειδών εξομάλυνσης.....	216
5.3.5	Επιβεβαίωση προσομοιώσεων με πειραματικές μετρήσεις	216
Παράρτημα		217
Το υπολογιστικό πακέτο Opera-3d		217
I. Εισαγωγή.....		217
i.	Τα υπολογιστικά πακέτα ανάλυσης του Opera-3d	218
ii.	Τα όρια του προγράμματος	220
II. Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d		221
i.	Τοπολογία στο Μοντελοποιητή	222
ii.	Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute)	225
iii.	Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων	226
iv.	Δημιουργία σύνθετων σωμάτων.....	226
v.	Ανάγνωση και φόρτωση από άλλα σχεδιαστικά αρχεία (CAD files).....	227
vi.	Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία πλέγματος	227
vii.	Δημιουργία του πλέγματος.....	232
viii.	Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση	233
ix.	Ανάλυση του μοντέλου	233
III. Ο Μετ-Επεξεργαστής του Opera-3d		233
IV. Αλγόριθμοι επίλυσης – τι υπάρχει πίσω από τα υπολογιστικά πακέτα.....		237
i.	Επιλύτης TOSCA, ανάλυση στατικού πεδίου	237
Βιβλιογραφία		241

Πρόλογος

Οι συνθετικοί μονωτήρες χρησιμοποιούνται στις μέρες μας ευρέως, για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων από τα μη ηλεκτροφόρα σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές ή σε περιοχές που υποφέρουν από βιομηχανική ρύπανση. Ο υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό και στην περιοχή του αέρα γύρω απ' αυτούς αποτελούν καθοριστικές παραμέτρους, οι οποίες χρήζουν μελέτης και ελέγχου. Δυσμενή και ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως π.χ. οι επιφανειακές εκκενώσεις (μεταξύ των οποίων και το φαινόμενο corona), το αυξημένο ρεύμα διαρροής ή ακόμη και η υπερπήδηση του μονωτήρα σχετίζονται άμεσα με τα επίπεδα τιμών της πεδιακής έντασης και την κατανομή του δυναμικού.

Ένας παραπάνω λόγος που η ανάγκη της πεδιακής ανάλυσης καθίσταται επιτακτική για τους συνθετικούς μονωτήρες αποτελεί το γεγονός ότι αυτοί υποφέρουν από υποβάθμιση του πολυμερούς τους περιβλήματος (όρος που στη βιβλιογραφία απαντάται ως «γήρανση»), η οποία οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στις υψηλές τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και στην ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού. Η μοντελοποίηση των συνθετικών μονωτήρων, μέσω κατάλληλου υπολογιστικού πακέτου, και ο υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής του δυναμικού μπορούν να συνεισφέρουν στην κατανόηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς και συνακόλουθα στον αποτελεσματικότερο και οικονομικότερο σχεδιασμό των συνθετικών μονωτήρων. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις παραπάνω παραμέτρους είναι η γεωμετρία των μερών που απαρτίζουν ένα συνθετικό μονωτήρα και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια γενική αναφορά στους μονωτήρες. Περιγράφονται τα βασικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται, οι ιδιότητες που τους προσδίδουν, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε ό,τι αφορά τους συνθετικούς μονωτήρες. Αναλύονται διεξοδικά τα υλικά κατασκευής, τα επιμέρους πεδία χρήσης, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν, σε σύγκριση με τους κεραμικούς μονωτήρες. Γίνεται επίσης αναφορά στη ρύπανση των μονωτήρων και στον τρόπο που αυτή επιδρά στο φαινόμενο της υπερπήδησης, εστιάζοντας και πάλι την προσοχή στους συνθετικούς μονωτήρες. Το κεφάλαιο κλείνει με μια εκτενή και λεπτομερή περιγραφή του φαινομένου της γήρανσης, το οποίο ταλανίζει τους συνθετικούς μονωτήρες και επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και τη διάρκεια ζωής τους.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και τίγεται η υπεροχή τους, έναντι των αναλυτικών τεχνικών, σε προβλήματα με πολύπλοκη γεωμετρία. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία αποτελεί και τη χρησιμοποιούμενη από το υπολογιστικό πακέτο Omega-3d αριθμητική μέθοδο. Πέραν της ιστορικής εξέλιξης της μεθόδου, περιγράφεται αναλυτικά το μαθηματικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο βασίζεται.

Στο **Κεφάλαιο 3** εκτίθενται σημαντικές μελέτες και εργασίες, οι οποίες ασχολούνται με την πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ., και αναφέρονται τόσο οι εφαρμοζόμενες αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης, όσο και τα υπολογιστικά πακέτα που κάνουν χρήση αυτών. Και εδώ γίνεται ιδιαίτερη μνεία σε εργασίες στις οποίες προσομοιώνονται συνθετικοί μονωτήρες με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), ενώ περιγράφονται 2 χαρακτηριστικές παραλλαγές αυτής. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από διάφορες προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων. Ο τρόπος αυτής της παρουσίασης αποτελεί και τη βάση της λογικής

δομής και πορείας των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται αναλυτικά στο 4^ο Κεφάλαιο: ξεκινώντας από το μοντέλο του απομονωμένου μονωτήρα, εξετάζεται αρχικά το ενδεχόμενο απλοποίησης του συνθετικού μονωτήρα, μέσω αφαίρεσης ικανού αριθμού των δίσκων, και στη συνέχεια προστίθενται σταδιακά τα διάφορα γεωμετρικά σώματα, τα οποία καθιστούν ολοένα και ρεαλιστικότερες τις συνθήκες της προσομοίωσης. Μελετάται η επίδραση ορισμένων εξωτερικών παραγόντων, όπως το μήκος του αγωγού, η διαμόρφωση του πυλώνα και η διάταξη του 3φ συστήματος μεταφοράς, ενώ θίγεται και η επιρροή της ρύπανσης στις διάφορες προσομοιώσεις. Επιπλέον, διερευνάται ξεχωριστά η επίδραση των παραμέτρων του τοροειδούς εξομάλυνσης, ενώ στο τέλος γίνεται μια αναφορά στη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων και δοκιμών, προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια των προσομοιώσεων.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν στην παρούσα εργασία με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου Opera-3d. Ακολουθείται, σε γενικές γραμμές, η λογική πορεία του 3^{ου} Κεφαλαίου για ένα συνθετικό μονωτήρα 345 kV, τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του οποίου λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία. Η διαδικασία αυτή καταλήγει σε ένα μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει τις επιδράσεις του αγωγού φάσης και ενός τμήματος της διαμόρφωσης του πυλώνα και το οποίο θεωρείται ως «πλήρες», ενώ στη συνέχεια προστίθεται ένα επιπλέον τοροειδές εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο της διάταξης, οπότε προκύπτει το τελικό μοντέλο. Με αφετηρία το τελευταίο, προσομοιώνονται στη συνέχεια συνθετικοί μονωτήρες που χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς 150 kV και 400 kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και εκτίθενται τα αποτελέσματα της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στο εσωτερικό, στην επιφάνεια και στην περιοχή του αέρα γύρω από την εκάστοτε υπό μελέτη διάταξη.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη διπλωματική εργασία. Γίνεται αναφορά στις τεχνικές προδιαγραφές του Η/Υ που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις και παρατίθενται ορισμένα απ' τα χαρακτηριστικότερα υπολογιστικά μεγέθη που καταγράφηκαν. Διατυπώνονται, τέλος, ορισμένες προτάσεις-προκλήσεις που αφορούν στη μελέτη των συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. και θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση για κάποια μελλοντική εργασία.

Στο **Παράρτημα** μπορεί κανείς να πάρει μια ιδέα από το εγχειρίδιο λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-3d V15. Γίνεται συνοπτική περιγραφή των επιμέρους υπολογιστικών πακέτων που περιλαμβάνει, ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εντολές που αντιστοιχούν στις επιμέρους λειτουργίες. Επιπλέον, θίγονται επιμελώς ορισμένες από τις δυνατότητες του προγράμματος, οι οποίες θεωρήθηκαν πολύτιμες και αξιοποιήθηκαν για την υλοποίηση των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

ο Τον κ. Ιωάννη Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για το άριστο κλίμα συνεργασίας, καθώς και για τη γενναιοδωρία και την ηθική στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

- Την κα. Βασιλική Κονταργύρη, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών ΕΜΠ, για την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε πρόθυμα και αδιάκοπα, τη συνεχή καθοδήγηση και τις εύστοχες παρεμβάσεις της σε κάθε βήμα, καθώς και για την εμπιστοσύνη που επέδειξε σε μένα από το ξεκίνημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Την κα. Ελένη Νικολοπούλου, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών ΕΜΠ και υποψήφια διδάκτορα του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για την ιδιαίτερη ψυχολογική, ηθική και θερμή στήριξη που μου προσέφερε, τόσο με την πολύτιμη εμπειρία της στη χρήση του υπολογιστικού πακέτου Omega-3d, όσο και με τη γενικότερη καθοδήγησή της σε καίρια θέματα που ανέκυπταν κατά τη διάρκεια της εργασίας.
- Τον κ. Χρήστο Ηλία, ο οποίος αποτέλεσε το έναυσμα για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

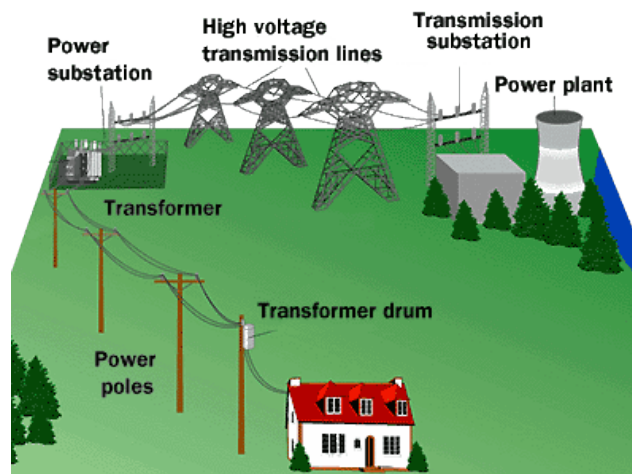
Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την ξεχωριστή στήριξη και το ιδιαίτερα ζεστό, φιλικό και ευχάριστο κλίμα που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου, που στηρίζει κάθε μου επιλογή.

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η αξιοπιστία των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και των διαφόρων διατάξεων που συμμετέχουν σε αυτά είναι καθοριστικής σημασίας για την ορθή λειτουργία και απόδοση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ευρέως γραμμές Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσης (Υ.Τ. και Υ.Υ.Τ.), προκειμένου να μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής προς τους τελικούς καταναλωτές [1].



Σχήμα 1.1: Απλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [2].

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [3]. Χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς Υψηλής Τάσης [4, 5]. Από το συνολικό κόστος μιας γραμμής μεταφοράς καταλαμβάνουν λιγότερο του 5%, εντούτοις παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην αξιοπιστία του συστήματος [6].

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

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

Οι καταπονήσεις που δέχεται η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς κατατάσσονται σε εξωτερικές και εσωτερικές: οι εξωτερικές καταπονήσεις προέρχονται από κεραυνοπληξίες της ηλεκτρικής γραμμής και διαδίδονται μέσω αυτής. Οι συγκεκριμένες καταπονούν τον εξοπλισμό με σοβαρές, συχνά, συνέπειες. Οι εσωτερικές καταπονήσεις προέρχονται από την ίδια τη λειτουργία της ηλεκτρικής γραμμής και υποδιαιρούνται:

- ❖ στην τάση βιομηχανικής συχνότητας, με την οποία λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες η ηλεκτρική γραμμή,
- ❖ στις παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας, με διάρκεια της τάξεως του δευτερολέπτου και
- ❖ στις υπερτάσεις χειρισμών, με διάρκεια εκατοντάδων έως χιλιάδων μς [7].

Είναι φανερό πως όλοι οι μονωτήρες πρέπει να ικανοποιούν ηλεκτρικές και μηχανικές λειτουργικές ανάγκες, οι οποίες συνήθως εμφανίζουν στο σχεδιαστή αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις. Ο πιο σημαντικός παράγοντας πολυπλοκότητας είναι η δημιουργία ενός μη αγώγιμου στοιχείου στην πράξη. Όλοι οι μονωτήρες έχουν εξωτερικές επιφάνειες οι οποίες θα ρυπανθούν μέχρι ενός σημείου, όσο αυτοί χρησιμοποιούνται. Μέσω της ρύπανσης, θα μεταφέρεται το ρεύμα διαρροής: το επιφανειακό στρώμα ενός αντιπροσωπευτικά ρυπαρού μονωτήρα θα περιέχει αδρανή ορυκτή ύλη, ηλεκτρικά αγώγιμη σκόνη, όπως άνθρακα ή οξείδια μετάλλου, διαλυτά άλατα στο νερό και υγρασία. Αυτό το στρώμα θα συμπεριφέρεται ως ένας μεταβλητός, μη γραμμικός αντιστάτης, ασταθής στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διαρροής θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας, των ηλεκτροχημικών προϊόντων ηλεκτρόλυσης και των ηλεκτρικών μερικών εκκενώσεων, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στην υπερπήδηση του μονωτήρα και το σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου στο περιβάλλον μέσω [4, 5].

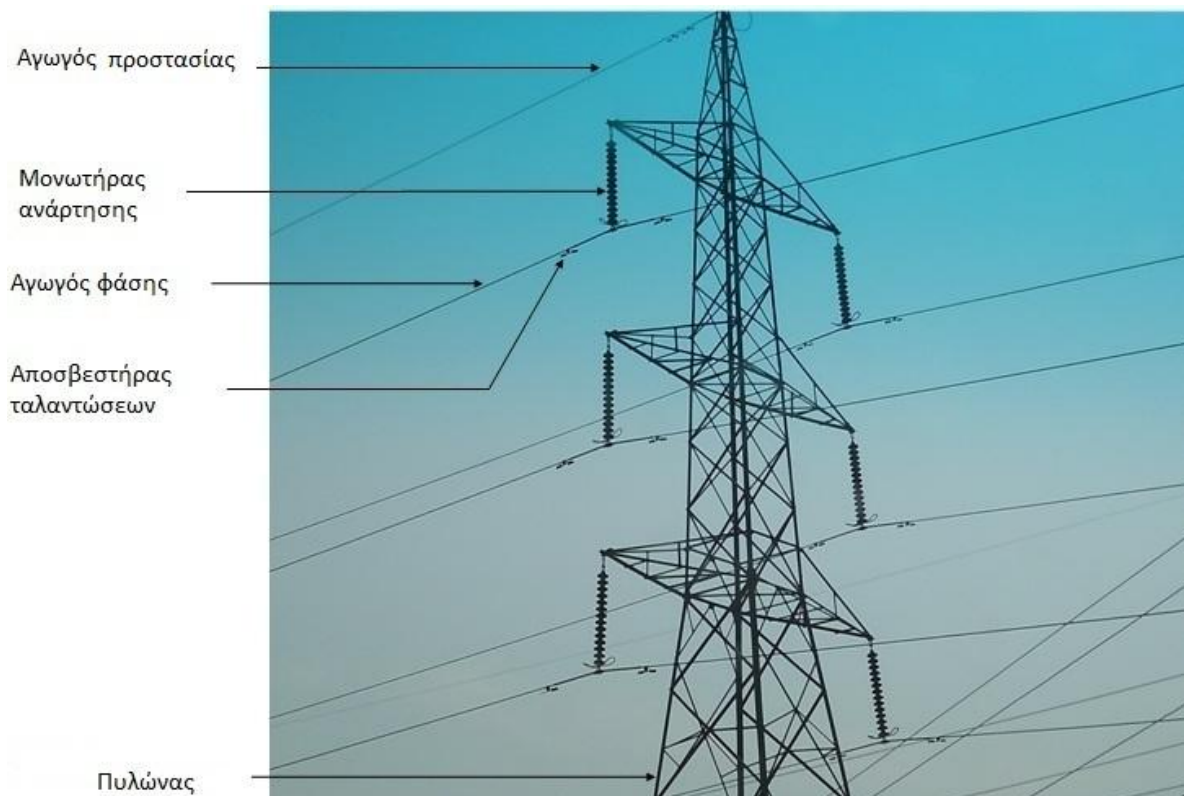
1.2 Κατηγοριοποίηση μονωτήρων

Πέραν του γενικού ορισμού περί απομόνωσης των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [3], οι μονωτήρες μπορούν να διακριθούν σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με τον **τρόπο σύνδεσης**, το **χώρο χρήσης**, το **υλικό** και το **σχήμα** τους [9].

➤ Ως προς τον τρόπο σύνδεσής τους, οι μονωτήρες κατατάσσονται σε [3]:

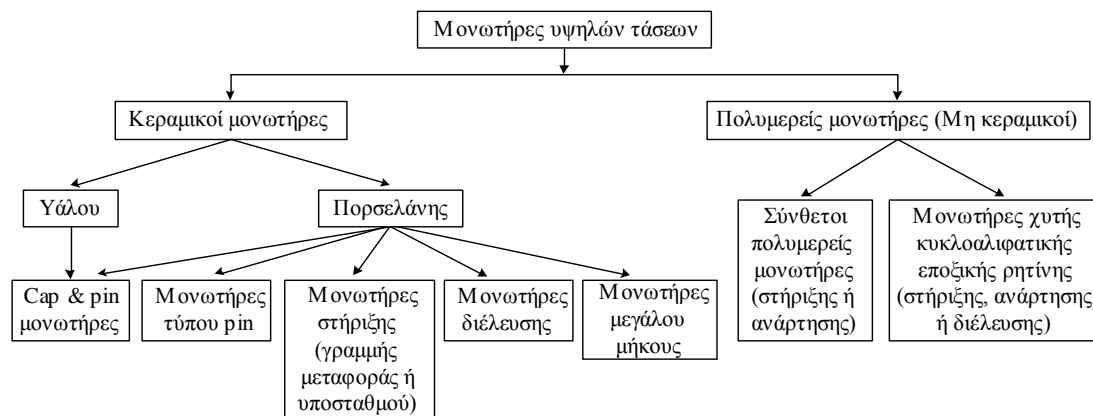
- *Μονωτήρες ανάρτησης*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς και αποτελούνται από απλή ή διπλή σειρά δίσκων, σε μορφή αλυσίδας (αν πρόκειται για κεραμικούς), ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής.

- *Μονωτήρες στήριξης*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την στήριξη των αγωγών Υψηλής Τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες γραμμής μεταφοράς και σε μονωτήρες υποσταθμών.
- *Μονωτήρες γραμμής*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, έως 70kV.
- *Μονωτήρες διέλευσης*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την έξοδο των αγωγών από τους μετασχηματιστές ή τις συσκευές καθώς επίσης και για τη διέλευση μέσω διαχωρισμάτων [9].



Σχήμα 1.2: Πυλώνας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος όπου διακρίνονται, μεταξύ άλλων στοιχείων, οι μονωτήρες ανάρτησης [10].

- Ως προς το χώρο χρήσης, έχουμε την ακόλουθη κατάταξη [3]:
 - *Μονωτήρες τύπου ομίχλης*, οι οποίοι έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού και διαμόρφωση εξωτερικής επιφάνειας τέτοια ώστε να παρέχεται μεγαλύτερη προστασία από ρύπανση. Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου παρατηρείται έντονη υγρασία ή/και ρύπανση του περιβάλλοντος.
 - *Μονωτήρες κανονικού τύπου*, μικρότερου μήκους ερπυσμού από τους προηγούμενους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε σύνηθες περιβάλλον.
 - *Μονωτήρες εσωτερικού τύπου*, για χρήση εντός εσωτερικών χώρων [9].
- Όσον αφορά στο υλικό και το σχήμα των μονωτήρων, παρατίθεται το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 1.3: Κατηγοριοποίηση μονωτήρων ως προς το υλικό και το σχήμα τους.

Τόσο οι πορσελάνινοι, όσο και οι γυάλινοι μονωτήρες χρησιμοποιούνται εδώ και πάνω από έναν αιώνα. Αν και οι κεραμικοί μονωτήρες έχουν αποδείξει ότι ανθίστανται στη γήρανση εξαιτίας περιβαλλοντικών συνθηκών, η απόδοσή τους έναντι της ρύπανσης είναι αρκετά χαμηλή λόγω της υδρόφιλης επιφάνειάς τους. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχουν εισαχθεί και χρησιμοποιούνται ευρύτατα πολυμερείς μονωτήρες, λόγω της καλύτερης απόδοσής τους έναντι της ρύπανσης [1]. Οι πολυμερείς μονωτήρες συχνά ονομάζονται και συνθετικοί ή μη-κεραμικοί (composite ή non-ceramic insulators). Στην παρούσα εργασία οι όροι αυτοί εναλλάσσονται αδιακρίτως, αφού εννοείται πως αφορούν στο ίδιο αντικείμενο.

1.3 Υλικά των μονωτήρων

Τα τρία βασικά υλικά σε ένα μονωτήρα είναι το διηλεκτρικό, οι ακροδέκτες που το συνδέουν με την υπόλοιπη μηχανολογική δομή και τα ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα, όπως τσιμέντο, λιπαντικά ή βαφές.

1.3.1 Η φύση των διηλεκτρικών των μονωτήρων

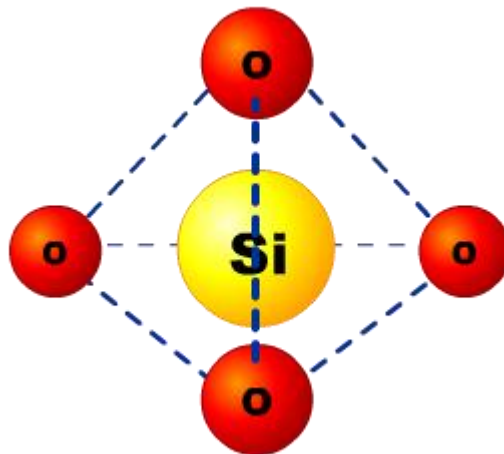
Το διηλεκτρικό, το οποίο είναι είτε κεραμικό (πορσελάνη ή γυαλί) είτε πολυμερές, είναι αυτό που καλείται να διατηρεί την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες, χωρίς να αστοχήσει. Πρέπει επιπλέον να ανθίσταται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκαλούνται είτε από εξωτερικούς είτε από εσωτερικούς παράγοντες (κεραυνοί ή χειρισμοί των διακοπών του δικτύου, αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω), χωρίς να διασπάται. Επειδή η επιφάνεια του διηλεκτρικού θα είναι πάντα, στην πράξη, ηλεκτρικά αγώγιμη, εξαιτίας της υγρασίας και των επικαθήσεων, είναι απαραίτητη μια διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση [4, 5].

Αν και έχουν εκπονηθεί αρκετές εργασίες που αφορούν στους κεραμικούς μονωτήρες [8, 11, 12, 13, 17], κρίνεται σκόπιμη για λόγους πληρότητας, καθώς και δυνατότητας σύγκρισης, η αναφορά τόσο στα κεραμικά, όσο και στα πολυμερή υλικά. Και τα δύο είδη υλικών εξάλλου αποτελούνται από τετρασθενή άτομα (πυριτίου τα κεραμικά, άνθρακα τα πολυμερή), τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού εκτεταμένων δομών. Έτσι, πέραν της αναφοράς στη βασική χημική δομή κάθε είδους, η οποία διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό τόσο των ηλεκτρικών, όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων των μονωτήρων, γίνεται ακολούθως εκτενής παράθεση των

ιδιαίτερων χαρακτηριστικών αυτών, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα αντιπαραβολής των δύο διηλεκτρικών υλικών.

➤ Κεραμικά υλικά

Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα μονωτικά υλικά στις διατάξεις των μονωτήρων είναι τα κεραμικά (πορσελάνη ή γυαλί). Το SiO_2 είναι στερεό και τήκεται σε υψηλή θερμοκρασία (1700°C). Στα κεραμικά υλικά κάθε άτομο Si ενώνεται, μέσω ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών, με τέσσερα άτομα οξυγόνου. Τα άτομα αυτά του οξυγόνου είναι τετραεδρικά διατεταγμένα γύρω από κάθε άτομο Si. Κάθε άτομο οξυγόνου ενώνεται μέσω επίσης ομοιοπολικού δεσμού με δύο άτομα Si. Η διάταξη αυτή των δεσμών επεκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο πλέγμα του SiO_2 , με αποτέλεσμα το υλικό να έχει μεγάλη σκληρότητα, υψηλό σημείο τήξης, κακή αγωγιμότητα και ελάχιστη διαλυτότητα [14]. Το σχηματιζόμενο υλικό είναι είτε ένα κρυσταλλικό ορυκτό, π.χ. ο χαλαζίας, η δομή του οποίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και αποτελείται από κανονικά τετράεδρα Si-O, είτε μια άμορφη κατάσταση, που είναι γνωστή με την ονομασία «fused silica». Όταν προστεθούν και άλλα στοιχεία στις δύο δομές που προαναφέρθηκαν, δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός πυριτικών αλάτων, κρυσταλλικής ή άμορφης δομής.



Σχήμα 1.4: Τετραεδρική διάταξη της βασικής δομικής μονάδας των κεραμικών υλικών [15].

Η ηλεκτρική πορσελάνη αποτελείται από ένα υαλώδες πλέγμα (άμορφη δομή), το οποίο περιλαμβάνει κρυστάλλους διαφορετικών ειδών και κόκκους από τα αρχικά συστατικά των ορυκτών, ορισμένα από τα οποία έχουν διαλυθεί μερικώς. Το γυαλί, στην ιδανική περίπτωση, είναι ένα μίγμα πυριτικών αλάτων υαλώδους μορφής, χωρίς προσμίξεις και ακαθαρσίες. Στην πράξη όμως, πάντα εμπεριέχονται παγιδευμένες φυσαλίδες αερίων και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό, τα οποία εισάγουν ατέλειες στη δομή του υλικού. Οι μονωτήρες πορσελάνης κατασκευάζονται πάντα από άμορφα υλικά (υαλώδης κατάσταση) [4, 5].

Οι πρώτες ύλες, οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται για την παρασκευή γυαλιού ως μονωτικού υλικού, είναι το πυρίτιο (περίπου σε ποσοστό 57%), ο ασβεστόλιθος (9%), το άνυδρο ανθρακικό νάτριο (14%) κ.α.. Μια συνήθης επεξεργασία στην οποία υφίσταται το γυαλί κατά τις ηλεκτρολογικές εφαρμογές του ως μονωτικό υλικό είναι η σκλήρυνση, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μηχανικής αντοχής του [17].

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που αφορούν στους

μονωτήρες από κεραμικά υλικά.

- ✓ Χημική σταθερότητα, μηχανική αντοχή: Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου, οι οποίοι συγκρατούν τα κεραμικά υλικά, έχουν ως αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξης, τη μεγάλη μηχανική αντοχή και την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση από χημικά μέσα.
- ✓ Χαμηλό Κόστος πρώτης ύλης: Οι κύριες πρώτες ύλες της πορσελάνης, όπως ο άργιλος (πηλός) και ο χαλαζίας, είναι σχετικά φθηνές και σε εύκολη διάθεση [18].



Σχήμα 1.5: Πορσελάνινοι μονωτήρες διέλευσης που χρησιμοποιούνται στα ακροκιβώτια μετασηματιστών ισχύος [16].

- ✓ Διαβρεξιμότητα και επικάλυψη ρύπανσης: Η ύπαρξη των ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια συμβάλλει στην αύξηση της ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή της θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη συνάφεια ή δύναμη συνάφειας των επιφανειακών προσμίξεων και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα [4, 5]. Καθώς μέρος του ύδατος διαλύει τους αγώγιμους ρυπαντές, μειώνοντας τη συνολική επιφανειακή αντίσταση του μονωτήρα, σχηματίζεται μία συνεχής διαδρομή από ηλεκτρολύτη και δημιουργούνται συνθήκες για την εκδήλωση ηλεκτρικής υπερπήδησης.
- ✓ Παραγωγική διαδικασία και χρόνος επεξεργασίας: Το στάδιο παραγωγής της πορσελάνης περιλαμβάνει πολλά βήματα. Για μεγαλύτερα καλύμματα απαιτούνται μεγάλα διαστήματα, ώστε να μειωθεί το περιεχόμενο σε νερό του πυρήνα, προτού σχηματοποιηθεί και πυρωθεί.
- ✓ Σπάσιμο: Τα κεραμικά είναι πολύ εύθραυστα. Αυτό σημαίνει ότι σπάνε εύκολα κατά τη διαχείριση, τη μεταφορά ή την εγκατάστασή τους. Ο βανδαλισμός είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που συνεισφέρει στη μηχανική καταπόνηση. Είναι πλέον κοινή πρακτική να περιλαμβάνεται μία ρωγμή ή ένας παράγοντας απώλειας όταν αγοράζονται μονωτήρες από πορσελάνη για την εγκατάστασή τους σε γραμμές μεταφοράς. Οι ατέλειες αυτές του κεραμικού μονωτήρα προκαλούν επιπλέον άνοδο στο κόστος.
- ✓ Βάρος: Η φύση των κεραμικών καταδεικνύει ότι τα κομμάτια από πορσελάνη είναι πολύ πυκνά. Αυτό σημαίνει ότι είναι δύσκολη η μεταφορά τους και απαιτεί τη χρήση γερανών ή/και άλλων ενισχυτικών δομών. Το μεγάλο μέγεθος και το βάρος των προϊόντων πορσελάνης επιβάλλει, τις

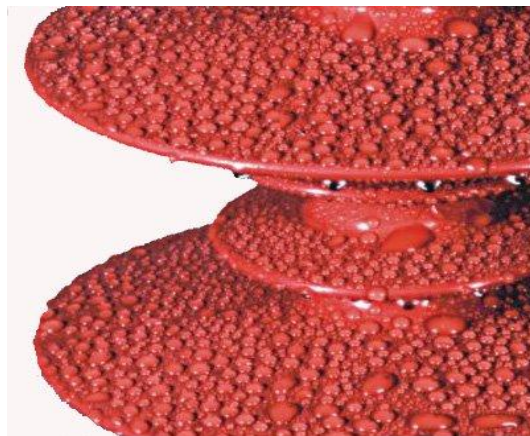
περισσότερες φορές, τουλάχιστον ακριβή και χρονοβόρα μέσα μεταφοράς που να ελαχιστοποιούν το κόστος. Έτσι, η μεταφορά μέσω ναυσιπλοΐας και η αποστολή εμπορευμάτων δια θαλάσσης ή άλλες περισσότερο οικονομικές μέθοδοι παρατείνουν το χρόνο διανομής και παράδοσης τους [18].

➤ Πολυμερή υλικά

Στην περίπτωση των πολυμερών, ο άνθρακας (που αποτελεί το επαναλαμβανόμενο άτομο της κατηγορίας αυτής, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω) ενώνεται με άνθρακα όπως επίσης και με υδρογόνο, οξυγόνο και πολλά άλλα στοιχεία, για το σχηματισμό αλυσίδων και δακτυλίων, που μπορούν να συνδέονται σταυροειδώς σε πολύπλοκες δομές, σχηματίζοντας μακρομόρια. Τα καθαρά πολυμερή αποτελούνται από ένα επαναλήψιμο βασικό είδος μορίων και είναι απαλλαγμένα από ξένες ουσίες. Αυτά σπανίως χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μονωτήρων, καθώς η τακτική παγκοσμίως είναι να χρησιμοποιούνται συμπολυμερή και ορυκτά πληρωτικά μέσα για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των παραγομένων προϊόντων [4, 5].

Ακολουθούν ορισμένα απ' τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διαθέτουν οι πολυμερείς μονωτήρες, ιδωμένα βεβαίως απ' τη σκοπιά του υλικού.

✓ Μειωμένη επιφανειακή ρύπανση, υδροφοβικότητα: Οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς και, κατά συνέπεια, δεν παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση, εξαιτίας των εξαιρετικά χαμηλών τιμών της ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας. Το εξωτερικό περίβλημα ατόμων υδρογόνου, τα οποία είναι συνδεδεμένα με άτομα άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στα πολυμερή να ανθίστανται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση περισσότερο απ' ότι τα κεραμικά υλικά. Τα πολυμερή υλικά είναι, επομένως, υδρόφοβα από τη φύση τους. Η διατήρηση των υδρόφοβων ιδιοτήτων τους κατά την έκθεσή τους αποτελεί ένα επιθυμητό και ιδιαίτερος αποδοτικό γνώρισμα. Το νερό στην επιφάνεια υδρόφοβων υλικών σχηματίζει διακριτές σταγόνες, με αποτέλεσμα οι ρυπαντές να διαλύονται από τις σταγόνες νερού που δεν έχουν συνενωθεί και το αγωγίμο μέρος να μην είναι συνεχές. Αυτές οι συνθήκες έχουν ως συνέπεια τη μειωμένη ροή ρεύματος διαρροής και τη χαμηλή πιθανότητα σχηματισμού ξηρών ζωνών, οπότε απαιτείται εφαρμογή υψηλότερης τάσης για την πρόκληση υπερπήδησης. Σε σύγκριση με την πορσελάνη, μερικά πολυμερή υλικά έχουν συνήθως μεγαλύτερη αντοχή στην υπερπήδηση, ακόμα και γηρασμένα.



Σχήμα 1.6: Ελαστομερές περίβλημα όπου φαίνεται ο σχηματισμός διακριτών σταγόνων ως απόρροια της υδρόφοβης συμπεριφοράς της σιλικόνης [19].

✓ Χαμηλό βάρος: Η πυκνότητα των πολυμερών υλικών είναι πολύ χαμηλότερη απ' αυτή των κεραμικών, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα μία σημαντική μείωση στο βάρος των προϊόντων. Η διαφορά βάρους αυξάνει ανάλογα με την κατηγορία των τάσεων. Εξαρτήματα από πολυμερή δεν απαιτούν γερανούς ή άλλα ανυψωτικά μηχανήματα για τη διαχείριση και εγκατάστασή τους. Το μειωμένο βάρος, επίσης, επιτρέπει τη χρήση ελαφρύτερων και λιγότερο ακριβών δομών και υποστηρικτικών διατάξεων. Μειωμένα, για τον ίδιο λόγο, είναι και τα ναύλα, στην περίπτωση που η μεταφορά των εξαρτημάτων γίνεται με πλοίο. Οι πολυμερείς μονωτήρες υπερτερούν όταν χρησιμοποιούνται σε πυκνές αστικές περιοχές και έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να τοποθετηθούν και σε στενές διαδρομές περιορισμένου χώρου. Οι μη κεραμικοί μονωτήρες προσφέρουν υψηλή αντοχή, αναλογικά με το βάρος τους, που επιτρέπει μεγαλύτερα ανοίγματα, κομψότερες δομές και βελτιωμένο αισθητικό αποτέλεσμα.

✓ Διαδικασία παραγωγής και τρόποι βελτίωσης της απόδοσης και της διάρκειας ζωής: Η διαδικασία παραγωγής πολυμερών μονωτήρων είναι βραχύτερη από εκείνη της πορσελάνης, παρ' ότι χρησιμοποιούνται εκτενώς πρόσθετα στις κατάλληλες συγκεντρώσεις, ώστε να ενισχύονται οι ιδιότητες των πολυμερών υλικών. Σε αυτά περιλαμβάνονται αντιοξειδωτικά, πλαστικοποιητές, χρωστικές ουσίες, άλλα βοηθητικά μέσα, καταλύτες, παρεμποδιστές ανάφλεξης, απορροφητές υπεριώδους ακτινοβολίας και αντιδιαβρωτικά. Πολύ συχνά, τα πρόσθετα και τα πληρωτικά υλικά είναι εκείνα που, τόσο όλα μαζί, όσο και ανεξάρτητα το καθένα, επηρεάζουν την ολική απόδοση του υλικού.

✓ Χημική και φωτοχημική προσβολή: Από την άλλη πλευρά, όλα τα πολυμερή αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, υπόκεινται σε φωτο-οξείδωση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών δεσμών τους από την πρόσπτωση υπεριώδους ακτινοβολίας, και είναι πιθανό να αντιδράσουν, κατά τη έκθεσή τους, με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Έτσι, λόγω όλων των παραπάνω, δεν αποκλείεται να προκληθούν επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών πηγάζει από το γεγονός ότι το βασικό στοιχείο τους, ο άνθρακας, αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις έναν καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή προσβολή της επιφάνειας, ιδιαίτερα από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγωγίμες επιφανειακές οδούς, που είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά ο μονωτήρας καταστρέφεται [18, 20].

✓ Υψηλό κόστος πρώτων υλών: Επιπλέον, το κόστος πρώτων υλών των πολυμερών είναι υψηλότερο από εκείνο της πορσελάνης. Πληρωτικά υλικά και πρόσθετα αναμιγνύονται με το βασικό πολυμερές υλικό, όχι μόνον για να μειώσουν το κόστος, αλλά και για ν' αυξήσουν την απόδοση και να διευκολύνουν τη διαδικασία παραγωγής. Το κύριο υλικό μπορεί να αποτελέσει στην % κλίμακα το 20%-80% κατά βάρος του τελικού υλικού.

✓ Μειωμένη μηχανική αντοχή: Οι πολυμερείς μονωτήρες συνήθως δεν είναι ούτε δύσκαμπτοι ούτε μπορούν να υποστηριχτούν από μόνοι τους. Όπου απαιτείται μηχανική αντοχή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κεραμικοί πυρήνες, ενισχυμένοι με σωληνώσεις και στρώματα, τα οποία είναι καλυμμένα από κάποιο πολυμερές υλικό, για αντοχή και ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε μικτούς (υβριδικούς) μονωτήρες από πορσελάνη και πολυμερές

υλικό [18].

Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες των βασικότερων –ως προς τις Υψηλές Τάσεις- μονωτικών υλικών.

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

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών [4, 5].

1.4 Συνθετικοί μονωτήρες

1.4.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη

Η χρήση και η εμπειρία στις εξωτερικές μονώσεις έχει τις ρίζες της πίσω στην ανάπτυξη των πρώτων τηλεγραφικών γραμμών, το 19^ο αιώνα. Οι πρώτοι μονωτήρες χρονολογούνται από το έτος 1835 στα δίκτυα τηλεγράφων. Το έτος 1882 χρησιμοποιούνται σε δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όταν τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς τάσης (1343V), η οποία συνέδεε το Miesbach με το Μόναχο [4, 5]. Όσον αφορά στην ανάπτυξη και χρήση των μονωτήρων γραμμών Υ.Τ. από πορσελάνη και γυαλί, υπάρχει εκατονταετής και πλέον πείρα. Οι πορσελάνινοι και γυάλινοι μονωτήρες τύπου cap & pin μαζί με τους πορσελάνινους μονωτήρες μεγάλου μήκους είχαν κυριεύσει ολοκληρωτικά την αγορά, μέχρι την εμφάνιση της εναλλακτικής λύσης που πρόσφεραν τα πολυμερή.

Ο πρώτος πολυμερής μονωτήρας (εποξικός) κατασκευάστηκε στις Η.Π.Α. το 1959· εντούτοις, έπασχε από σοβαρά προβλήματα διάβρωσης και δημιουργίας ιχνών (tracking). Στις αρχές του 1960 οι Ευρωπαίοι εισήγαγαν την πρώτη γενιά των σύγχρονων συνθετικών μονωτήρων: μια ράβδος από υαλώδεις ίνες καλυπτόταν από κάποιο πολυμερές περίβλημα και διαφόρων τύπων πολυμερείς δίσκους. Γενικότερα, οι μονωτήρες των πρώτων γενιών αστοχούσαν έπειτα από μια σύντομη περίοδο λειτουργίας. Κύριες αιτίες, οι μηχανικές αστοχίες του υλικού (traction & brittle fracture).

Τα πολυμερή μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για εξωτερική μόνωση εδώ και 50 χρόνια, ενώ οι πολυμερείς μονωτήρες μεγάλου μήκους χρησιμοποιούνται τουλάχιστον από το 1967. Έκτοτε, το ενδιαφέρον των εταιριών αυξάνεται συνεχώς. Με την αύξηση της χρήσης των πολυμερών μονωτήρων και λόγω του ότι η παραγωγή γίνεται με χαμηλότερο εργατικό δυναμικό, η αγοραστική αξία τους, συγκρινόμενη με αυτήν των πορσελάνινων, μειώνεται. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 στη Βόρεια Αμερική είναι φθηνότερο να αγοράσει κανείς συνθετικούς μονωτήρες και σήμερα, περίπου τα 2/3 των νεοεγκατασταθέντων μονωτήρων είναι πολυμερείς. Επιπλέον, στην Κίνα το ποσοστό εγκατάστασης των πολυμερών μονωτήρων αυξάνεται και το σιλικονούχο καουτσούκ (SIR) θεωρείται ως η μόνη λύση στις χειρότερα ρυπασμένες περιοχές. Αυτό αντανακλάται επιπλέον στο γεγονός ότι το 88% των εγκατεστημένων μονωτήρων χρησιμοποιούνται σε περιοχές που ανήκουν στην κατηγορία μέτριας προς υψηλής ρύπανσης [21].

1.4.2 Χρήση συνθετικών μονωτήρων

Σήμερα οι εφαρμογές των συνθετικών μονωτήρων δεν είναι λίγες. Χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης ή/και στήριξης, ως διαχωριστές φάσεων σε γραμμές μεταφοράς Υψηλής Τάσης, καθώς και σε δίκτυα διανομής. Καθοδικά αλεξικέραυνα ή αλεξικέραυνα γραμμής (απαγωγείς υπερτάσεων) κάνουν επίσης χρήση συνθετικών μονωτήρων. Μετασχηματιστές, διακοπτικός εξοπλισμός, μονωτήρες διέλευσης, πυκνωτές και οπουδήποτε αλλού υπάρχει ανάγκη μόνωσης, γίνεται πλέον ευρεία χρήση συνθετικών μονωτήρων.



Σχήμα 1.7: Συνθετικοί μονωτήρες στήριξης σε Υποσταθμό Υψηλής Τάσης [22].



Σχήμα 1.8: Συνθετικοί μονωτήρες ως διαχωριστές φάσεων [23].

Ωστόσο, η χρήση τους, στην πράξη, ως μονωτήρων γραμμών μεταφοράς Υψηλής Τάσης διαφέρει, ανάλογα με τη χώρα και την πολιτική που ακολουθείται γύρω από το ζήτημα αυτό. Μερικές χώρες, όπως οι Η.Π.Α., έχουν υιοθετήσει τη χρήση τους και το 60% των μονωτήρων γραμμών μεταφοράς Υ.Τ. είναι πολυμερούς τύπου. Κάποιες άλλες όμως, διεξάγουν έρευνες προκειμένου να επιβεβαιώσουν την απόδοση και τη συμπεριφορά τους, προτού τους υιοθετήσουν. Μερικές χώρες υιοθέτησαν τη χρήση τους σε πραγματικές γραμμές, περιορισμένης όμως κλίμακας, ώστε να ελέγξουν τη συμπεριφορά τους υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ορισμένες άλλες είναι ολότελα διστακτικές απέναντί τους είτε λόγω του υφιστάμενου κόστους, εξαιτίας της αναγκαίας εισαγωγής τους από το εξωτερικό, είτε λόγω του γεγονότος ότι η συμπεριφορά τους σε βάθος χρόνου δεν είναι ακόμη πλήρως γνωστή, όπως συμβαίνει με τους κεραμικούς μονωτήρες. Ωστόσο, το μερίδιο της αγοράς που καταλαμβάνουν εκτιμάται πως θα συνεχίσει να αυξάνεται, καθώς ενθαρρυντικά είναι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται τόσο σε τεχνικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο απόδοσης έναντι του φαινομένου της ρύπανσης [24].

1.4.2.1 Μια ενδιαφέρουσα έρευνα

Στατιστική έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε 18 εταιρίες ηλεκτρισμού σε Ευρώπη, Βόρεια Αμερική και Αυστραλία έδειξε πως ένα συντριπτικό ποσοστό αυτών χρησιμοποιεί συνθετικούς μονωτήρες. Συγκεκριμένα, 16 από τις 18 εταιρίες που συμμετείχαν, κάνουν χρήση συνθετικών μονωτήρων σε εναέριες γραμμές μεταφοράς άνω των 66 kV. Οι δύο ευρωπαϊκές εταιρίες που δεν χρησιμοποιούν έκαναν λόγο για ανησυχίες ως προς την αξιοπιστία σε βάθος χρόνου, καθώς και για έλλειψη τεχνολογιών ανίχνευσης σφαλμάτων.

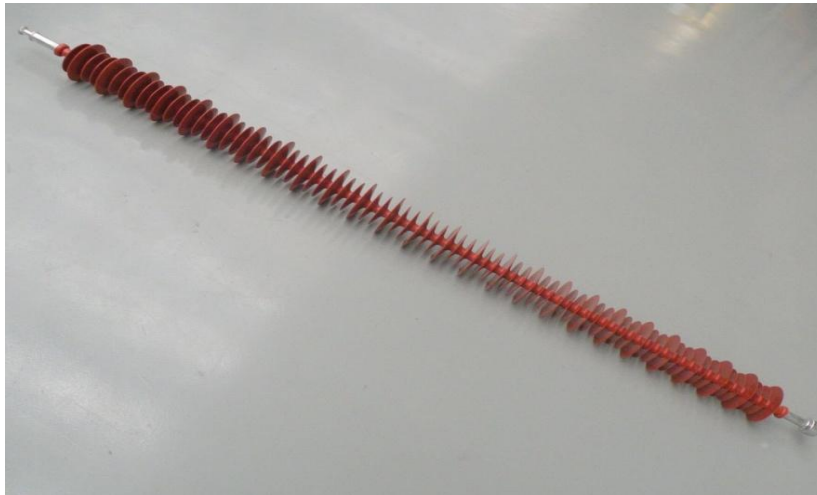
Ως προς τις επιμέρους εφαρμογές των συνθετικών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται, 73000 είναι μονωτήρες ανάρτησης, 83000 μονωτήρες στήριξης, 3000 σε αλεξικέραυνα και 40 σε διαχωριστές φάσεων. Όσον αφορά στο υλικό του περιβλήματος, το σιλικονούχο καουτσούκ (Silicone Rubber, SiR) αγγίζει το 60%, ενώ το καουτσούκ από αιθυλένιο-προπυλένιο (ethylene-propylene, EP Rubber) φτάνει το 40%.

Σημαντικά είναι επίσης και τα ποσοστά χρήσης συνθετικών μονωτήρων ανάλογα με το επίπεδο τάσης υπαρχουσών γραμμών μεταφοράς. Ειδικότερα, χρήση άνω του 50% ανέφεραν δύο εταιρίες για επίπεδα μεταξύ 66 και 99 kV, τρεις για επίπεδα από 100 έως 199 kV, μία για επίπεδα από 300 μέχρι 499 kV και μία για πάνω από 500 kV. Σε μερικές εταιρίες η χρήση αυτών των μονωτήρων αγγίζει ποσοστά άνω του 90%. Μια βορειοαμερικανική εταιρία έκανε λόγο για χρήση πάνω από

90% σε υπάρχουσες γραμμές άνω των 500 kV και σε γραμμές μεταξύ 66 και 99 kV, ενώ μια ευρωπαϊκή ανέφερε αντίστοιχο ποσοστό σε γραμμές από 300 μέχρι 499 kV.

Αξίζει τέλος να σημειωθούν τα σχέδια των εταιριών αυτών για χρησιμοποίηση συνθετικών μονωτήρων στο μέλλον. Επτά από αυτές πρόκειται να τους χρησιμοποιήσουν για συστήματα από 100 έως 199 kV, τρεις για συστήματα από 200 μέχρι 299 kV και μία για συστήματα από 66 έως 99 kV και από 300 έως 499 kV, όλες σε ποσοστό από 90 έως 100% [25].

1.4.2.2 Εφαρμογές Υψηλών Συνεχών Τάσεων (HVDC)



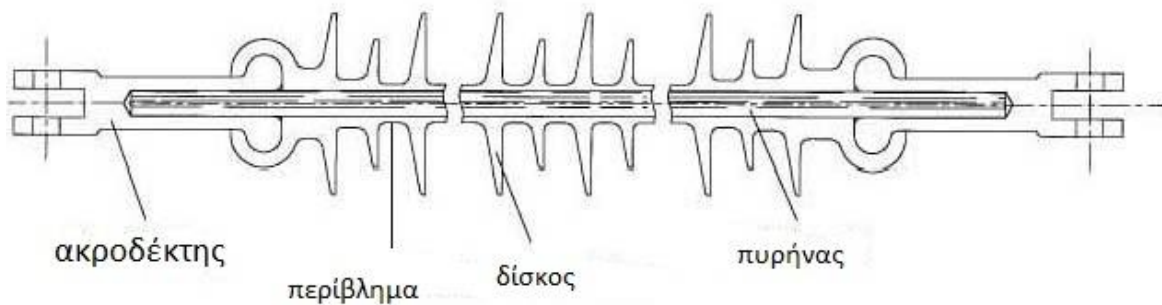
Σχήμα 1.9: Συνθετικός μονωτήρας μεγάλου μήκους 800 kV DC [26].

Ο αριθμός των εγκατεστημένων πολυμερών μονωτήρων σε γραμμές μεταφοράς Υψηλής Συνεχούς Τάσης (HVDC) είναι αρκετά χαμηλότερος από αυτόν σε γραμμές μεταφοράς Υψηλής Εναλλασσόμενης Τάσης (HVAC) και επομένως τα δεδομένα σχετικά με τη λειτουργική εμπειρία υπό HVDC δεν είναι και τόσο εκτενή. Η Cigre WG 22.03 παρουσίασε το 1995 μια έρευνα σχετικά με τη λειτουργική εμπειρία πολυμερών μονωτήρων σε γραμμές HVDC. Πεδιακές δοκιμές με πολυμερείς μονωτήρες χρονολογούνται τουλάχιστον από το 1970, ακόμη κι αν σχετικά λίγοι μονωτήρες ήταν εγκατεστημένοι πριν το 1992. Οι περισσότεροι απ' αυτούς ήταν εγκατεστημένοι είτε σε κάποιο πειραματικό σταθμό είτε σε περιοχές όπου οι κεραμικοί μονωτήρες δεν συμπεριφέρονταν ικανοποιητικά. Στη Νέα Ζηλανδία πολυμερείς μονωτήρες αντικαταστάθηκαν έπειτα από 7 χρόνια λειτουργίας, καθώς πραγματοποιήθηκε αύξηση της τάσης της γραμμής από 270 σε 350 kV. Κατά τη διάρκεια της επταετούς λειτουργίας τους δεν παρατηρήθηκε καμιά αστοχία. Η εγκατάσταση και χρήση πολυμερών μονωτήρων στην Pacific Intertie (HVDC γραμμή μεταφοράς κατά μήκος της δυτικής ακτής των Η.Π.Α. που συνδέει τη Βορειοδυτική Ακτή με το Λος Άντζελες και είναι μεταφορικής ικανότητας 3.1 MW) χρονολογείται πίσω, στο 1976. Το 1993 οι μονωτήρες αυτοί ήταν ακόμη σε λειτουργία. Παρ' όλο που είχαν μειωμένο μήκος ερπυσμού σε σχέση με τους αντίστοιχους κεραμικούς, οι πολυμερείς μονωτήρες κατέστειλαν επιτυχώς την υπερπήδηση, ενώ το πλύσιμο δεν ήταν πια απαραίτητο σε θέσεις όπου αυτοί χρησιμοποιούνταν (όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, το πλύσιμο αποτελεί μια πρακτική για καθαρισμό της επιφάνειας ως επί το πλείστον των κεραμικών μονωτήρων και αντιμετώπιση του φαινομένου της ρύπανσης). Αντιθέτως, στους κεραμικούς το πλύσιμο έπρεπε να γίνεται κάθε 2 μήνες. Έπειτα από 8 χρόνια λειτουργίας σε έντονα ρυπαρό, παραθαλάσσιο περιβάλλον, χωρίς καμιά μείωση της απόδοσης ή των μηχανικών ιδιοτήτων τους,

αποφασίστηκε να επεκταθεί η χρήση των συνθετικών μονωτήρων, εγκαθιστώντας μονωτήρες υψηλής θερμοκρασίας βουλκανισμένου σιλικονούχου καουτσούκ (High Temperature Vulcanized Silicone Rubber, HTV SIR) σ' ένα άλλο, μεγάλου μήκους τμήμα 48 km. Στη συνέχεια, η γραμμή αναβαθμίστηκε από τα 400 στα 500 kV χωρίς να αλλαχθούν οι μονωτήρες [21].

1.4.3 Συστατικά στοιχεία ενός συνθετικού μονωτήρα

Ένας τυπικός συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.10: Σκαρίφημα τυπικού συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης [27].

Όπως είναι φανερό, ένας τέτοιος μονωτήρας προσομοιάζει με έναν πορσελάνινο μονωτήρα μεγάλου μήκους. Εντούτοις, διαφοροποιείται εξολοκλήρου ως προς τα συστατικά του μέρη και τα υλικά κατασκευής αυτών. Τα δύο τελευταία αναλύονται διεξοδικά ακολούθως.

1.4.3.1 Πυρήνας ρητίνης ενισχυμένος με υαλώδεις ίνες (Reinforced Fibreglass Resin Core)

Η ενίσχυση των υλικών με ενσωμάτωση ινών αποτελεί ξεχωριστό τομέα στην επιστήμη κατασκευής νέων υλικών. Στις σημαντικότερες διατάξεις των μονωτικών υλικών (π.χ. σε εξαρτήματα γραμμών μεταφοράς ή σε επιμήκεις ράβδους πολυμερών, όπως στην περίπτωση του εσωτερικού του συνθετικού μονωτήρα) εμπεριέχονται ίνες, οι οποίες φέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό των μηχανικών φορτίων που καλούνται να «σηκώσουν» οι διατάξεις αυτές. Ο σκοπός του περιβάλλοντος πλέγματος της ρητίνης είναι να προστατεύει τις ίνες αυτές και να μεταφέρει το μηχανικό φορτίο όταν κάποιες ίνες έχουν καταστραφεί. Σε αυτές μόνο τις εφαρμογές η περιβάλλουσα ρητίνη μπορεί να είναι λιγότερο ανθεκτική και δύσκαμπτη απ' ό,τι οι ίνες του εσωτερικού. Συνήθη ελαστικά, μέχρι ενός βαθμού, πλέγματα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι οι πολυεστέρες και οι εποξικές ρητίνες. Οι περισσότερες ρητίνες εμφανίζουν αλλαγές στις ιδιότητές τους με την πάροδο του χρόνου, καθώς και με τη μεταβολή της θερμοκρασίας [4, 5]. Ωστόσο, σήμερα κυριαρχούν έναντι των πολυεστέρων, χάρη στην υψηλότερη αντοχή τους έναντι της διάβρωσης [21].

Στόχος των ρητινών είναι η προστασία των κεντρικών υαλωδών ινών από πιθανή εισχώρηση ανεπιθύμητων στοιχείων λόγω ενδεχόμενης δημιουργίας μικρορωγμών –ιδιαίτερα από το νερό που είναι σαφώς ανεπιθύμητο, μεταξύ άλλων, και από ηλεκτρολογικής σκοπιάς-, καθώς και η προστασία των εγκάρσιων συνδέσεων στις δέσμες παραλλήλων ινών.

Εξίσου μεγάλης σημασίας με τις ιδιότητες του περιβάλλοντος πλέγματος της ρητίνης αποτελούν και οι ιδιότητες του υλικού το οποίο χρησιμοποιείται σαν επικάλυψη των ινών, ενισχύοντας το χημικό δεσμό ρητίνης-γυαλιού και αποκλείοντας την εξάτμιση νερού από το εσωτερικό των υαλωδών ινών προς το περιβάλλον πλέγμα ρητίνης. Γενικά χρησιμοποιούνται μόρια οργανικού σιλανίου, τα οποία συνδέονται στο ένα άκρο με γυαλί και στο άλλο με ρητίνη. Έχει αποδειχθεί ότι τα βελτιωτικά υλικά, σε ορισμένες περιπτώσεις, διασφαλίζουν υψηλές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης στις μονωτικές διατάξεις, ακόμη και μετά τη βύθισή τους σε νερό.

Στους περισσότερους συνθετικούς μονωτήρες ο πυρήνας χρησιμοποιεί μονοκατευθυντικές ίνες, παράλληλες στον άξονα, που αποτελούν περίπου το 70% του βάρους της σύνθεσης και δημιουργούνται με τη διαδικασία της άμεσης έλξης ή περιέλιξης από τήγματα διαφόρων συστατικών. Μια αντιπροσωπευτική ράβδος, π.χ. διαμέτρου 20 mm, περιλαμβάνει περισσότερο από ένα εκατομμύριο ίνες, οι οποίες τοποθετούνται παράλληλα υπό πίεση και διαβρέχονται με υγρή ρητίνη, η οποία σκληρύνεται με θερμική κατεργασία μέσα σε μία μήτρα [4, 5].

- Μηχανικές ιδιότητες του RGBF

Η δομή του ενισχυμένου με υαλώδεις ίνες, συνδεδεμένων με ρητίνη (συντομογραφία στα Αγγλικά: Resin-Bonded Glass Fibre, RGBF) πυρήνα, ο οποίος κατασκευάζεται με έλξη από τήγμα, παρέχει τόσο μηχανικές, όσο και ηλεκτρικές ανισοτροπικές ιδιότητες. Για το λόγο αυτό, το εν λόγω υλικό εμφανίζει σημαντικές ιδιαιτερότητες σε σχέση με την πορσελάνη και το σκληρυμένο γυαλί. Ειδικότερα, η μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό δε συνοδεύεται και από ισοδύναμη αντοχή σε θλίψη, ενώ στα κεραμικά υλικά η αντοχή σε θλίψη είναι πάντοτε μεγαλύτερη και σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικά μεγαλύτερη (μέχρι και 15 φορές για ορισμένα κεραμικά) απ' ότι η αντοχή σε εφελκυσμό.

Οι τάσεις στρέψεως, οι οποίες εμφανίζονται όταν το ένα άκρο του πυρήνα είναι σταθερό ενώ το άλλο περιστρέφεται, είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητες. Αυτές οι μηχανικές καταπονήσεις συνήθως εμφανίζονται στις γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους. Η εσωτερική αστοχία που μπορεί να προέλθει από τη σχάση των δακτυλίων σύσφιξης των παραλλήλων ινών μετατρέπεται σε έναν αποτελεσματικό «συλλέκτη» νερού, ο οποίος είναι δύσκολο να εντοπιστεί.

Η χρονική εξάρτηση της αντοχής σε εφελκυσμό ενός RGBF προέρχεται από αλλοιώσεις που δημιουργούνται στο πλέγμα ή τις ίνες. Η απώλεια αντοχής ποικίλλει ανάλογα με τη φύση του πλέγματος του πολυμερούς, την ποιότητα του γυαλιού και του πληρωτικού μέσου, καθώς και του κύκλου θερμικής και μηχανικής καταπόνησης που έχει υποστεί το μονωτικό υλικό. Η αυξημένη θερμοκρασία γενικά επιταχύνει το ρυθμό μείωσης της αντοχής ενός RGBF, παρ' όλο που είναι πιθανό να υπάρξουν περιστασιακές βελτιώσεις, οφειλόμενες κυρίως στη σταδιακή σκλήρυνση ορισμένων πολυμερών.

Ο σχεδιαστής, τέλος, μονωτήρων καλείται να εκτιμήσει το ρυθμό με τον οποίο ο πυρήνας του RGBF πρόκειται να εξασθενήσει χρονικά, βασιζόμενος είτε σε βραχυχρόνιες δοκιμές που επιτελούνται κατά τα πρώτα στάδια της λειτουργίας του είτε σε γενικότερες θεωρητικές γνώσεις και διαπιστώσεις είτε, τέλος, στα αποτελέσματα δοκιμών ποιοτικού ελέγχου. Οι στόχοι των σχεδιαστών δύσκολα επιτυγχάνονται και δεν εκπλήσσει το γεγονός ότι συνήθως ακολουθούνται υψηλές προδιαγραφές ασφαλείας, ιδιαίτερα στις περιοχές που περικλείονται μεταξύ των παραλλήλων ινών των συμπιεσμένων πυρήνων RGBF [4, 5].

Προκειμένου να έχει κανείς μια αίσθηση της μηχανικής ικανότητας των ινωδών πυρήνων, ένας τυπικός πυρήνας διαμέτρου 50 mm μπορεί να «σηκώσει» ένα ελάχιστο φορτίο γύρω στα 500 kN

[28]. Ακόμη, μια ινώδης συνθετική ράβδος διαμέτρου 22 mm θα έχει ικανότητα εφελκυσμού ίδια με έναν πορσελάνινο πυρήνα διαμέτρου 75 mm, επομένως ο ινώδης πυρήνας καταπονείται 12 φορές περισσότερο από τον πορσελάνινο και μπορεί να εκταθεί σχεδόν 20 φορές περισσότερο, επειδή ο λόγος ελαστικότητας είναι περίπου 11:7 (πορσελάνινο/συνθετικός ινώδης πυρήνας) [4].

- Ηλεκτρικές ιδιότητες του RGF

Όσο ένα δείγμα ενισχυμένο με ίνες βρίσκεται αποθηκευμένο σε ξηρή και ανέπαφη κατάσταση, οι ηλεκτρικές του ιδιότητες είναι ταυτόσημες με τις αναμενόμενες, ανάλογα με τη σύνθεσή του. Η διηλεκτρική του αντοχή είναι της τάξης των 10 kV/mm. Η διηλεκτρική του σταθερά εξαρτάται (στα μονοδρομικά ινώδη υλικά) από τον προσανατολισμό των ινών και καθορίζεται κυρίως από το γυαλί, σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς περίπου 7 κατά μήκος του άξονα, η οποία όμως μειώνεται από τα πολλαπλά παρεμβαλλόμενα στρώματα του πολυμερούς. Η επαπτομένη απωλείν προκύπτει από το μέσο όρο των τιμών των αλληπάλληλων στρωμάτων πολυμερούς και γυαλιού και εξαρτάται από το ποσοστό σε γυαλί, λαμβάνοντας τιμές συνήθως 10^{-2} περίπου.

1.4.3.2 Πολυμερές περίβλημα και ελαστομερείς δίσκοι (housing/sheath & sheds)

Η συνηθέστερη χρήση των πολυμερών είναι στις ενδύσεις, οι οποίες περιβάλλουν μηχανικά ανθεκτικούς ινώδεις σύνθετους πυρήνες. Οι κυριότερες λειτουργίες των πολυμερών που χρησιμοποιούνται για να περιβάλλουν πυρήνες RGF είναι:

- ✓ η προστασία του εσωτερικού όγκου του μονωτικού και της εσωτερικής ινώδους σύνθεσης από την προσβολή υγρασίας και
- ✓ η διαμόρφωση μιας λειτουργικής εξωτερικής γεωμετρίας του μονωτήρα, η οποία να αποκλείει τις επιφανειακές μερικές εκκενώσεις και να περιορίζει τα ρεύματα διαρροής. Η γεωμετρία πρέπει να παρέχει το απαιτούμενο μήκος ερπυσμού και την ελάχιστη δυνατή αεροδυναμική σύλληψη των μεταφερόμενων, μέσω του αέρα, ρυπαντών, καθώς και να αποβάλει το συμπυκνωμένο και ιζηματικό νερό.

Το πολυμερές περίβλημα πρέπει να αποκλείει τη δημιουργία επιφανειακών ιχνών και να λειτουργεί ικανοποιητικά στις καιρικές μεταβολές, χωρίς μείωση των μηχανικών ή ηλεκτρικών του ιδιοτήτων. Πρέπει επίσης να διαβρώνεται σε έναν αποδεκτό ελάχιστο βαθμό και με έναν ανεκτό τρόπο, ώστε να ανθίσταται σε στατικά και κυκλικά φορτία, καθώς επίσης και να είναι σε θέση να λειτουργεί άνετα σε θερμοκρασιακές κλίμακες μεταξύ -40°C και $+120^{\circ}\text{C}$.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής πολυμερών περιβλημάτων (τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή αυτών των δεδομένων καταπονήθηκαν με 25 kV σε συνθήκες έντονης εφύγρανσης) [4, 5].

Τα κριτήρια για ένα καλό περίβλημα πολυμερούς είναι πολύπλοκα και αντιφατικά. Μια επιφάνεια που δεν είναι υγροσκοπική και δεν επιτρέπει την πρόσφυση ακαθαρσιών αναμένεται ότι θα μειώνει το ρεύμα διαρροής σε συνθήκες έντονης ρύπανσης, αλλά θα αποτελεί ανεπαρκή σύνδεσμο με το προστατευμένο υπόστρωμα: οι φθοράνθρακες, όπως είναι το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE/Teflon), αποτελούν ένα τέτοιο παράδειγμα.

Υλικό	Προβλεπόμενη διάρκεια ζωής (έτη)	Παρατηρούμενη καταστροφή
PTFE/Teflon	20	Ελαφριά διάβρωση
Ελαστομερές σιλικόνης, κάλλιστο	25	Δημιουργία ιχνών & διατρήσεις
Ελαστομερές σιλικόνης, χείριστο	2.6	Δημιουργία ιχνών
Πολυολεφίνη, κάλλιστη	5	Διάτρηση
Πολυολεφίνη, χείριστη	1	Δημιουργία ιχνών

Πίνακας 1.2: Προβλεπόμενη διάρκεια ζωής πολυμερών περιβλημάτων: δοκιμές σε εξωτερικούς χώρους [4, 5].

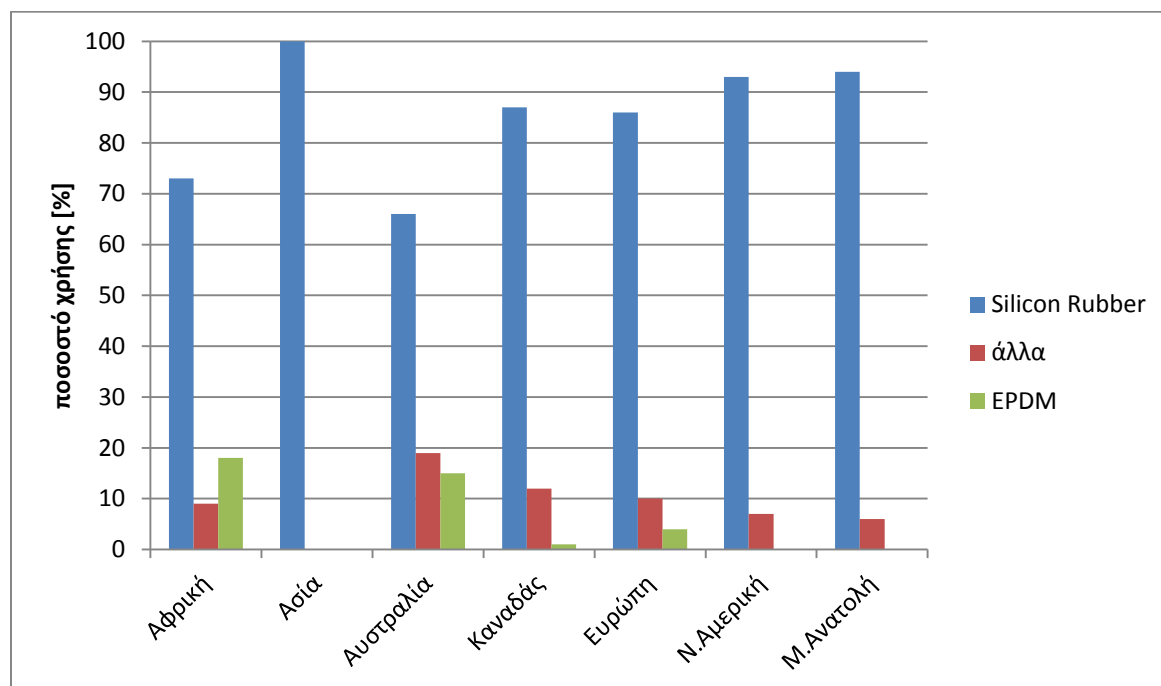
Μια ισχυρά ελκτική ρητίνη, όπως είναι μια εποξική, θα παρέχει άριστη συγκόλληση στο υπόστρωμα· εντούτοις, στις συνηθισμένες μορφές πλήρωσης θα απολήγουν στην επιφάνεια ρύποι και νερό, επομένως θα υπόκειται σε ταχεία επιφανειακή φθορά. Οι εποξικές ρητίνες τείνουν επίσης να γίνονται περισσότερο εύθραυστες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ορισμένες ομάδες που προφανώς θα ήταν κατάλληλες, όπως π.χ. οι πολυολεφίνες και τα συμπολυμερή, είναι αναγκαίο να προστατεύονται από την οξειδωση κατά τη διάρκεια της κατεργασίας τους, όπως επίσης και κατά τη λειτουργία τους.

Επειδή όλα τα πολυμερή περιβλήματα πρέπει να συνδυαστούν και να συνδεθούν σταθερά σε μονωτικούς πυρήνες, καθώς και σε μεταλλικούς ακροδέκτες ή ενθέσεις, η δυνατότητα της εξωτερικής διαμόρφωσης και της λειτουργικής συμβατότητας μεταξύ των ανόμοιων υλικών συνιστούν πρωταρχικούς παράγοντες για την εύρυθμη λειτουργία των κατασκευών. Μετά από όλους αυτούς τους περιορισμούς, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι για τα πολυμερή περιβλήματα δε χρησιμοποιούνται ποτέ οι απλές μορφές πολυμερών ουσιών, αλλά πάντοτε μίγματα, μερικές φορές σύνθετα, αποτελούμενα από ορισμένα βασικά πολυμερή, πληρωτικά και βοηθητικά μέσα, έτσι ώστε να παρέχεται π.χ. χρωστική θερμοκρασιακή διάγνωση ή αντιοξειδωτική κάλυψη και προφύλαξη από προσπίπτουσα ακτινοβολία U.V.. Επιπλέον, πολλές φορές παραβλέπεται το γεγονός ότι οι πραγματικές διαδικασίες σκλήρυνσης και διαμόρφωσης εισάγουν επιπρόσθετες ουσίες, όπως π.χ. τα κατάλοιπα πολυμερισμού ή των καταλυτών, και ότι ήπιες προσθετικές ουσίες, όπως η αλουμίνα, ενίοτε ρυπαίνονται με ανεπιθύμητα άλατα ιοντικής μορφής. Τα περιβλήματα στην πράξη δεν μπορούν να χαρακτηριστούν μόνο από το κύριο συστατικό τους: είναι άσκοπο να αναφερόμαστε σε «μονωτήρες ελαστικής σιλικόνης», όταν η μεταβολή της πρόγνωσης διάρκειας ζωής ανάμεσα στην καλύτερη και χειρότερη ποιότητα είναι πολύ μεγαλύτερη ανάμεσα σε μια σιλικόνη και μια πολυολεφίνη [4, 5].

Στους πρώτους συνθετικούς μονωτήρες χρησιμοποιήθηκε πολυσουλφιδικό καουτσούκ (polysulphide rubber). Αργότερα έγινε χρήση μονομερούς αιθυλενίου-προπυλενίου (EPM), αιθυλενίου-προπυλενίου-διενίου (EPDM), καθώς και άλλων μονομερών και πολυμερών. Χρησιμοποιήθηκε ακόμη κυκλοαλιφατική εποξική ρητίνη (Cyclo-aliphatic epoxy resin). Τα περισσότερα από τα υλικά αυτά υπέφεραν σοβαρά από φθορές που οφείλονταν στην προσβολή υπεριώδους ακτινοβολίας. Η φθορά αυτή μετέτρεπε τη λεία επιφάνεια, που είχε παραχθεί κατά την κατασκευή, σε τραχιά, επιτρέποντας έτσι τη συγκέντρωση ρυπαντών. Η τραχιά επιφάνεια είχε ως συνέπεια την αύξηση των ρευμάτων διαρροής και, όταν ήταν αρκετή ενέργεια διαθέσιμη, εκείνη έλιωνε. Τα πρώτα αυτά υλικά αποτελούνταν γενικά από οργανικές ενώσεις και πολύ γρήγορα η επιφάνεια απανθρακωνόταν, ως αποτέλεσμα των υψηλών ρευμάτων διαρροής [28].

Σημαντικές, ωστόσο, βελτιώσεις καταγράφηκαν με τη χρήση ενώσεων σιλικόνης (μεταξύ των οποίων το δημοφιλές σιλικονούχο καουτσούκ, ή Silicon Rubber, SIR), κυρίως χάρη στην υδροφοβή συμπεριφορά τους, καθώς και στην ικανότητα ανάκτησης της υδροφοβικότητας έπειτα από μερική απώλεια αυτής, όπως θα περιγραφεί διεξοδικά και παρακάτω. Τα πλεονεκτήματα αυτά

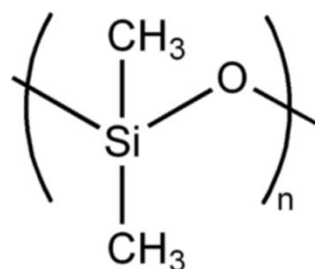
αντικατοπτρίζονται με σαφή τρόπο στα ποσοστά χρήσης των κυριότερων υλικών για περιβλήματα συνθετικών μονωτήρων ανά τον κόσμο, όπως αυτά απεικονίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 1.11: ποσοστά χρήσης υλικών σε περιβλήματα συνθετικών μονωτήρων [6].

- Περιβλήματα από σιλικόνη

Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί διάφορες παρατηρήσεις για τη σιλικόνη, χωρίς όμως να υπάρχει πραγματική κατανόηση της χημείας ή της δομής της. Ο όρος «σιλικόνη» αναφέρεται σ' ένα πολυμερές που αποτελείται από ένα ανόργανο δεσμό μεταξύ πυριτίου και οξυγόνου. Η πιο γνωστή σιλικόνη είναι το πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο (PDMS), το οποίο έχει ως κύριο δεσμό το δεσμό μεταξύ πυριτίου και οξυγόνου και περιέχει, επιπλέον, δύο μεθυλικές ομάδες ανά μονάδα μονομερούς.



Σχήμα 1.12: Επαναλαμβανόμενη μονάδα στο PDMS.

Η παραπάνω ομάδα έχει συνδεθεί με έναν αριθμό n παρόμοιων μονάδων, σχηματίζοντας την αλυσίδα του πολυμερούς, και ο δείκτης n μπορεί να είναι σε χιλιάδες. Άλλες πλευρικές ομάδες υδρογονανθράκων εκτός από τις μεθυλικές, οι οποίες συχνά αναγνωρίζονται στις αλυσίδες των πολυσιλοξάνιων, είναι η αιθυλική, η φαινυλική και η βίνυλο-ομάδα. Υπάρχουν ακόμη κι άλλοι τύποι παράπλευρων ομάδων (όπως φθορίου, που σχηματίζει φθοροσιλικόνες, ή υδρογόνου, όπως στις μονο-υποκατεστημένες σιλικόνες). ωστόσο, ο **δεσμός Si-O** αποτελεί το κλειδί, ώστε αυτές ν' αποκαλούνται σιλικόνες. Έτσι, με τη σημαντική παρουσία των ανθρακικών ομάδων, η αντίληψη ότι

η σιλικόνη είναι αποκλειστικά ανόργανη δεν είναι αληθής. Αυτή η χημική σύνθεση και η θέση του δεσμού κατά μήκος της αλυσίδας της σιλοξάνης θα καθορίσουν πολλές από τις ιδιότητες του υλικού. Το μήκος και η κατανομή της έκτασης των πολυμερών κυμαίνεται σε διάφορα επίπεδα και, επιπλέον, συνεισφέρει στις συνολικές ιδιότητες της «σιλικόνης» που επιλέγεται και χρησιμοποιείται.

Για το σχηματισμό ενός ελαστομερούς από σιλικόνη θα πρέπει να συνενωθούν οι αλυσίδες του πολυμερούς με τέτοιον τρόπο, ώστε να δημιουργηθεί δίκτυο σταυροδεσμών το οποίο να έχει ελαστικές ιδιότητες (π.χ. να επανέλθει στην ίδια μορφή μετά από έκτασή του). Οι βινυλο-ομάδες και άλλες, χημικά ενεργές, ομάδες είναι επίσης παρούσες σαν πλευρικές ή τερματικές ομάδες. Αυτές οι ομάδες επιτρέπουν το σχηματισμό των σταυροδεσμών κατά τη χημική αντίδραση (πολλές από αυτές τις ομάδες περιέχουν πολλαπλά άτομα άνθρακα). Τα πολυμερή μπορούν να συνενωθούν κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης είτε από τα άκρα είτε από διάφορα τμήματα της αλυσίδας, σχηματίζοντας σταυροδεσμό. Η φύση και ο τύπος του σταυροδεσμού εξαρτάται από τις χημικά ενεργές ομάδες, τα μέσα για τη δημιουργία σταυροδεσμών, τους παρεμποδιστές και τους καταλύτες. Πριν το σχηματισμό των σταυροδεσμών, το υλικό χαρακτηρίζεται ως «κόμμι σιλικόνης». Μετά τη δημιουργία των σταυροδεσμών, χαρακτηρίζεται ως «ελαστομερές σιλικόνης» ή ελαστικό σιλικόνης. Τα ελαστομερή από σιλικόνη συνήθως περιέχουν σίλικα (γυαλί ή χαλαζία) ως ενισχυτικά μέσα των μηχανικών ιδιοτήτων του σιλικονούχου πολυμερούς. Η σίλικα διαθέτει χημικά ενεργές ομάδες, οι οποίες συνδέονται στο πολυμερές από σιλικόνη και επιδρούν στην ισχύ, τη σκληρότητα, την ανθεκτικότητα και σε άλλες φυσικές ιδιότητες. Άλλα πληρωτικά μέσα, όπως η σίλικα σε αυξημένο ποσοστό, προστίθενται για να μειωθεί το κόστος. Αυτού του είδους τα πληρωτικά χαρακτηρίζονται ως «μη ενισχυτικά μέσα». Άλλα πληρωτικά υλικά που περιλαμβάνονται επιδρούν, επίσης, στις ιδιότητες του προϊόντος κατά την κατεργασία και τη μορφοποίηση του σε καλούπι, όπως στην αντίσταση στη διάβρωση, στη βελτίωση της απόδοσης στις καιρικές συνθήκες, στο χρώμα. Αυτού του είδους τα πληρωτικά που επιλέγονται πρέπει να πληρούν δύο κύρια κριτήρια: 1) μακροπρόθεσμη σταθερότητα κάτω από συνθήκες συνθήκες λειτουργίας και 2) χημική αδράνεια σε άλλα συστατικά κατά το σχηματισμό, έτσι ώστε η σιλικόνη να διατηρεί τη λειτουργικότητά της στη διάρκεια του χρόνου.

Ο όρος «σιλικόνη» με την ευρεία έννοια καλύπτει υλικά που μπορούν να αποκτήσουν μια σειρά από ιδιότητες. Μερικές σιλικόνες είναι καλύτερες για εφαρμογές ηλεκτρικών μονωτικών εξωτερικής χρήσης, ενώ άλλες δεν είναι κατάλληλες. Παρ' όλα αυτά, από τη στιγμή που το βασικό σιλικονούχο πολυμερές επιλέγεται, θα πρέπει αυτό να σχηματιστεί καταλλήλως, περιλαμβάνοντας πρόσθετα τα οποία βελτιστοποιούν τις ιδιότητες που επηρεάζουν την απόδοση του υλικού.

Τα πολυμερή από σιλικόνη έχουν τόσο προτερήματα, όσο και μειονεκτήματα. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων, τα οποία αξιοποιούνται σε εφαρμογές μονωτικών εξωτερικής χρήσης, είναι η υδροφοβικότητα και η ανάκτηση αυτής σε περίπτωση απώλειας, η αντοχή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, η δυνατότητα κατεργασίας και η ελαστικότητα ως μηχανική ιδιότητα. Οι περιορισμοί που τίθενται περιλαμβάνουν υψηλά κόστη πρώτων υλών, μαλακή υφή και σχετικά χαμηλή μηχανική αντοχή [29].

Λόγος για τα σιλικονούχα περιβλήματα και τις διάφορες μορφές του Silicon Rubber (SIR) που διατίθενται και χρησιμοποιούνται στην πράξη σε μονωτήρες γίνεται και παρακάτω, στην υποενότητα 1.5.1.

1.4.3.3 Ακροδέκτες (terminal end-fittings)

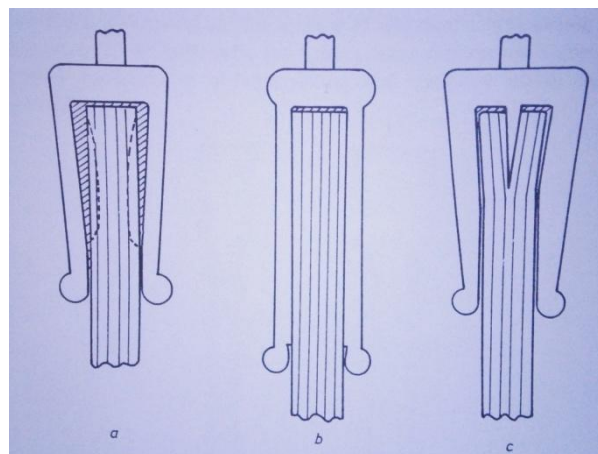
Οι μεταλλικοί ακροδέκτες στους οποίους καταλήγουν οι κεραμικοί μονωτήρες κατασκευάζονται, σχεδόν πάντοτε, από σιδηρούχα υλικά. Εξάιρεση αποτελούν τα κελύφη των μονωτήρων διέλευσης, οι φλάντζες των οποίων δεν θα πρέπει να είναι από μαγνητικό υλικό. Έτσι, τα βασικά υλικά εδώ είναι ο ελατός σίδηρος, ο σφαιροειδής γραφίτης ή ο όλκιμος σίδηρος. Χρησιμοποιούνται επιπλέον κράματα αλουμινίου και ψευδαργύρου, ενώ σε περιπτώσεις μονωτήρων διέλευσης γίνεται χρήση κραμάτων βασισμένων στο χαλκό.

Ο ελατός σίδηρος, είτε μαύρου είτε λευκού πυρήνα, κατασκευάζεται με θερμική επεξεργασία από χυτοσίδηρο, είτε σε ουδέτερα είτε σε οξειδωτικά περιβάλλοντα, αντίστοιχα. Ο όλκιμος σίδηρος φτιάχνεται με προσθήκη στο χυτοσίδηρο δραστικών μετάλλων, όπως το μαγνήσιο, με επακόλουθη θερμική επεξεργασία. Όλοι οι σιδηρούχοι ακροδέκτες είναι γαλβανισμένοι εν θερμώ.

Στην ίδια κατηγορία υλικών ανήκουν και οι ακροδέκτες των συνθετικών μονωτήρων. Ειδικότερα, όλκιμα μέταλλα είναι απαραίτητα όπου χρησιμοποιούνται τεχνικές συμπίεσης για τη σύνδεση των ακροδεκτών με τις ινώδεις συνθετικές ράβδους.

Καθώς οι ινώδεις πυρήνες των συνθετικών μονωτήρων είναι αυτοί που «σηκώνουν» το μεγαλύτερο μηχανικό φορτίο, οι ακροδέκτες (οι οποίοι συνδέονται με αυτούς) θα πρέπει να σχεδιάζονται κατ' αυτό τον τρόπο, έτσι ώστε να δέχονται τάσεις εφελκυσμού υπό φορτίο και συστολές Poisson ιδιαίτερα υψηλών τιμών, συγκρινόμενων με αυτών των κεραμικών μονωτήρων. Θα πρέπει ακόμη να επιτρέπουν τη σταδιακή κατανομή του φορτίου απ' το μέταλλο προς τις συνθετικές ίνες, απ' τη στιγμή που οι ίνες συνδυάζονται μηχανικά με πολυμερές και το μέτρο της εγκάρσιας ελαστικότητας δεν είναι πάνω από το 10% της αξονικής. Τα περισσότερα σχέδια των ακροδεκτών επομένως είναι σχετικά μεγάλου μήκους -4 ή 5 φορές η διάμετρος του πυρήνα είναι ένα σύνηθες μήκος επιφάνειας επαφής- και απαιτείται είτε ένα κωνικό σχήμα, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή ακτινική πίεση, είτε μια συμπιεστική άρθρωση.

Μερικές απ' τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συνδέσεις εικονίζονται παρακάτω [3]. Όπως φαίνεται, είτε το τέλειωμα του ακροδέκτη είτε η ράβδος είτε και τα δύο, είναι κωνικοποιημένα (έχουν σχήμα κώνου). Για την απόκτηση αυτού του σχήματος στη ράβδο, ένα κέλυφος εφαρμόζεται στο άκρο ή η ράβδος διαιρείται αξονικά με κάποια σφηνοειδή μορφή να εισάγεται, ώστε να επεκταθούν τα επιμέρους τμήματα. Η συμπιεστική άρθρωση περιλαμβάνει μια σειρά παράλληλων ανάγλυφων προεξοχών, που συνιστούν μια πολυγωνική μορφή στο εξωτερικό του ακροδέκτη.



Σχήμα 1.13: Συνδετικά συστήματα ακροδεκτών πολυμερών μονωτήρων: α. Κωνικός ακροδέκτης, κωνική ράβδος, μαζί ή χωριστά, β. Παράλληλη ράβδος, ανάγλυφη ή «τσιμεντοποιημένη», γ. Εσωτερική σφήνα [4, 5].

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τους ακροδέκτες του ινώδους πυρήνα περιλαμβάνουν συμβατικό γαλβανισμένο σίδηρο, κράματα βασισμένα στο χαλκό, ειδικά για συστήματα εφελκυσμού, αλουμίνιο και κράματα αυτού. Λόγω του σχετικά μικρού μεγέθους του ακροδέκτη, σε σύγκριση με εκείνο που χρειάζεται σ' έναν κεραμικό μονωτήρα, των υψηλών μηχανικών καταπονήσεων, καθώς και της ανάγκης για μια, καλής ποιότητας, λεία εσωτερική επιφάνεια, κοστοβόρες επεξεργασίες, όπως είναι π.χ. η χύτευση των ενδύσεων, είναι δικαιολογημένες σε ορισμένες περιπτώσεις [4].

1.5 Ρύπανση & Υπερπήδηση μονωτήρων

1.5.1 Ρύπανση

Ο σημαντικότερος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει τη μονωτική ικανότητα των μονωτικών υλικών σε περιπτώσεις που αυτά είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό χώρο, όπως οι μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς, είναι η ρύπανση. Με τον όρο ρύπανση προσδιορίζεται η επικάλυψη αιωρούμενων στην ατμόσφαιρα ακαθαρσιών ή θαλάσσιας άλμης (καθαλάτωση) στην επιφάνεια των υλικών αυτών. Η ρύπανση στην επιφάνεια ενός μονωτικού υλικού μπορεί να είναι είτε θαλάσσια, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το μονωτικό βρίσκεται σε παράκτια περιοχή και οι άνεμοι μεταφέρουν θαλασσινό νερό υπό μορφή σταγονιδίων στην επιφάνεια του, όπου επικάθεται και σχηματίζει ένα λεπτό υγρό αλατούχο επίστρωμα, είτε βιομηχανική, η οποία προέρχεται από τα στερεά κατάλοιπα των βιομηχανιών που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα. Η συνύπαρξη ρύπανσης (θαλάσσιας, βιομηχανικής ή συνδυασμού των προαναφερθέντων) και δροσιάς, ομίχλης ή σιγανής βροχής αποτελεί δυσμενέστατη συνθήκη λειτουργίας των μονωτικών υλικών και μπορεί να υποβιβάσει τη μονωτική τους ικανότητα σε μεγάλο βαθμό, κατά 40% έως 80%, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου [3].

Συνεπώς, η παρατεταμένη ξηρασία, η περιβαλλοντική ρύπανση, καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα μεταβάλλουν τη συμπεριφορά των μονωτικών υλικών που εκτίθενται σε αυτά.

Στο Πρότυπο IEC 815/1986 [31], προκειμένου να υπάρχει μία κατηγοριοποίηση των περιοχών ανάλογα με τη βαρύτητα ρύπανσης, έχουν καθοριστεί, ποιοτικά, τέσσερα επίπεδα ρύπανσης: ελαφρά, μεσαία, βαριά και πολύ βαριά. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθεται η ταξινόμηση αυτή με πιο περιγραφικό τρόπο, καθώς και με αναφορά μιας τυπικής περιοχής για κάθε επίπεδο.

Από τεχνικής άποψης, το φαινόμενο της ρύπανσης των μονωτήρων αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα, όσον αφορά στη θεωρητική του ανάλυση, καθώς και την πρακτική του αντιμετώπιση. Ωστόσο, δεν απασχολεί όλες τις χώρες, παρά μόνο εκείνες που διαθέτουν νησιωτικά και παράκτια δίκτυα, όπως η Ελλάδα, η οποία δυστυχώς βρίσκεται στις πρώτες θέσεις της λίστας. Για την επίλυση του προβλήματος γίνεται σημαντική έρευνα διεθνώς σε Πανεπιστήμια και Εργαστήρια και μεγάλο πλήθος επιστημονικών εργασιών έχουν δει το φως της δημοσιότητας. Το φαινόμενο είναι πολυπαραμετρικό, στοχαστικού χαρακτήρα και η μοντελοποίησή του αρκετά δύσκολη [32]. Ιδιαίτερα έντονο και εμφανές (ειδικά κατά τις νυχτερινές ώρες προς το τέλος του καλοκαιριού, όταν η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι πλέον αυξημένη) παρουσιάζεται το πρόβλημα της ρύπανσης των μονωτήρων στην Κρήτη. Η πρακτική αντιμετώπιση που ακολουθείται για τους υπάρχοντες κεραμικούς μονωτήρες είναι η εξής:

➤ Πλύσιμο με ελικόπτερο: Οι μονωτήρες των γραμμών Υψηλής Τάσης 150 kV καθαρίζονται από ελικόπτερο, ενώ η γραμμή βρίσκεται υπό τάση.

Επίπεδο ρύπανσης	Παράδειγμα τυπικού περιβάλλοντος
I. Ελαφριά	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης. • Περιοχές με μικρή πυκνότητα βιομηχανιών ή κατοικιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. • Αγροτικές περιοχές. • Ορεινές περιοχές. <p>Όλες αυτές οι περιοχές πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 10km με 20km από τη θάλασσα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε ανέμους κατ' ευθείαν από τη θάλασσα.</p>
II. Μεσαία	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές με βιομηχανίες, οι οποίες δεν παράγουν ιδιαίτερα ρυπασμένο καπνό, και/ή με μέση πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης. • Περιοχές με υψηλή πυκνότητα κατοικιών και/ή βιομηχανιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. • Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους από τη θάλασσα, αλλά όχι πολύ κοντά στην ακτή (τουλάχιστον σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων ανάλογα με τη μορφολογία της παράκτιας περιοχής και τις συνθήκες ανέμου).
III. Βαριά	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές με υψηλή πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με υψηλή πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης, οι οποίες παράγουν ρύπανση. • Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή κάθε περιοχή που εκτίθεται σε σχετικά ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα.
IV. Πολύ βαριά	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές περιορισμένης έκτασης εκτεθειμένες σε αγωγίμη σκόνη και βιομηχανικό καπνό προκαλώντας αγωγίμες εναποθέσεις σημαντικού πάχους. • Περιοχές περιορισμένης έκτασης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε ακτή και εκτίθενται σε ψεκάσμο θαλασσινού νερού ή σε πολύ δυνατό και ρυπασμένο αέρα από τη θάλασσα. • Περιοχές ερήμου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έλλειψη βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι και υποβάλλονται σε κανονική συμπίκνωση.

Πίνακας 1.3: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815 [31].

Για τον καθαρισμό χρησιμοποιείται νερό χαμηλής αγωγιμότητας, εκτοξευόμενο μέσω ειδικής πούμας, την οποία χρησιμοποιεί εκπαιδευμένος χειριστής από το ελικόπτερο. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται να τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή και παράλληλα είναι πολύ γρήγορη σε σχέση με την παλαιά μέθοδο, η οποία απαιτούσε την αναρρίχηση τεχνίτη πάνω στον πυλώνα για τον σκοπό αυτό. Η πιθανότητα να εκδηλωθεί ηλεκτρικό τόξο προς το ελικόπτερο είναι υπαρκτή, όμως δεν επιφέρει ηλεκτροπληξία στους επιβαίνοντες, δεδομένου ότι το ελικόπτερο βρίσκεται στον αέρα και άρα είναι αγείο. Αυτό δεν σημαίνει ότι το ενδεχόμενο αυτό δεν ενέχει κάποιο κίνδυνο, καθώς ένα ηλεκτρικό τόξο στο δίκτυο Υψηλής Τάσης συνεπάγεται μεγάλη έκλυση ενέργειας, που συνοδεύεται από λάμψη και κρότο, ικανά να οδηγήσουν τον πιλότο σε ξαφνική απώλεια ελέγχου και πτώση του ελικοπτερού επί της γραμμής.

➤ Πλύσιμο με επίγεια μέσα: Στους Υποσταθμούς Υψηλής Τάσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελικόπτερο και ο καθαρισμός γίνεται με δέσμη νερού μέσω αντλίας υψηλής πίεσης ή μέσω ειδικού ενσωματωμένου συστήματος πλύσης, αφού προηγουμένως έχουν τεθεί εκτός λειτουργίας οι αντίστοιχες εγκαταστάσεις.



Σχήμα 1.14: Τεχνίτες αναρριχώνται πάνω στον πυλώνα για πλύσιμο κεραμικών μονωτήρων [34].



Σχήμα 1.15: Πλύσιμο κεραμικών μονωτήρων με ελικόπτερο [35].

Η χρησιμοποίηση συνθετικών μονωτήρων συνιστά μια πιο ολοκληρωμένη επίλυση του ζητήματος, καθώς, χάρη στην υδρόφοβη συμπεριφορά της εξωτερικής τους επιφάνειας, παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερη απόδοση έναντι της ρύπανσης (τουλάχιστον κατά την πρώτη φάση της ζωής τους), σε σχέση με τους κεραμικούς μονωτήρες. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της υδρόφοβης συμπεριφοράς του περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων, η υγρασία δεν σχηματίζει ενιαίο φιλμ νερού πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα, αλλά διασκορπίζεται σε διακριτές σταγόνες, διακόπτοντας με τον τρόπο αυτό το ρεύμα διαρροής. Στις νέες γραμμές Υψηλής Τάσης που κατασκευάζονται στην Κρήτη γίνεται χρήση των μονωτήρων αυτών, η επιφάνεια των οποίων, αξίζει να σημειωθεί, δεν χρειάζεται πλύσιμο.

Εναλλακτική μέθοδος που εφαρμόζεται σε υπάρχοντες κεραμικούς (πορσελάνης ή γυαλιού) μονωτήρες αποτελεί το βάψιμο των επιφανειών τους με ελαστομερείς σιλικονούχες επικαλύψεις. Στις εγκαταστάσεις Υψηλής Τάσης της Κρήτης έχει γίνει εκτεταμένη χρήση των υλικών αυτών και τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Μόνο ο Υποσταθμός 150 kV στα Λινοπεράματα πε-



Σχήμα 1.16: Πλύσιμο κεραμικών μονωτήρων σε Υποσταθμό με ενσωματωμένο σύστημα πλύσης [36].

ριλαμβάνει πάνω από 1200 μονωτήρες, στους οποίους έχει γίνει εφαρμογή της μεθόδου και δεν απαιτούνται πλέον εργασίες καθαρισμού [32].

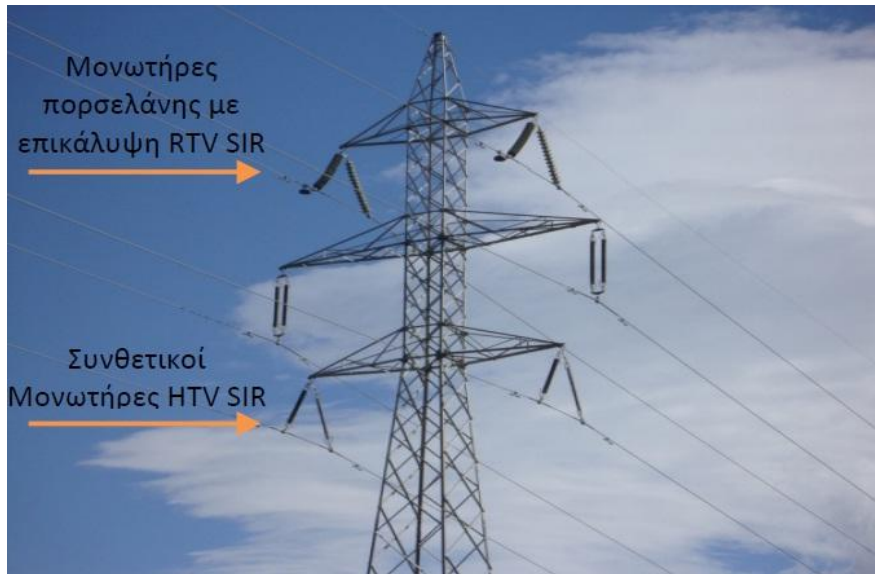
Το πλέον σύννηθες υλικό κατασκευής του περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων (SIR) διατίθεται στην αγορά σε τρεις διαφορετικές μορφές, όλες βασισμένες στο ίδιο βασικό πολυμερές, την πολυδιμεθυλοσιλοζάνη (Polydimethylsiloxane, PDMS). Ο παράγοντας διαφοροποίησης είναι η διαδικασία βουλκανισμού, δηλαδή του μηχανισμού ανάπτυξης δεσμών μεταξύ των μακρομορίων. Οι τρεις αυτές μορφές και το σύννηθες πεδίο εφαρμογής τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

1 RTV SIR (Room Temperature Vulcanized)				
	(i)	Ενός συστατικού	Βουλκανισμός σε θερμοκρασία δωματίου με τη συμβολή της υγρασίας στην ατμόσφαιρα	Επικαλύψεις μονωτήρων (Coatings)
	(ii)	Δύο συστατικών	Βουλκανισμός με την ένωση των δύο συστατικών σε θερμοκρασία 60 °C	-
2 LSR SIR (Liquid Silicone Rubber)			Βουλκανισμός σε θερμοκρασία 150 °C- 200 °C	Συνθετικοί μονωτήρες
3 HTV SIR (High Temperature Vulcanized)			Βουλκανισμός σε υψηλή θερμοκρασία > 200 °C και πίεση	Συνθετικοί μονωτήρες

Πίνακας 1.4: Διαθέσιμες μορφές Silicone Rubber και χρήσεις [33].

Οι επικαλύψεις μονωτήρων βρίσκουν εφαρμογή συνήθως σε υποσταθμούς, όπου το κόστος αντικατάστασης των μονωτήρων είναι σημαντικό και υπάρχει ζήτημα διαθεσιμότητας μονωτήρων με συνθετικό κέλυφος σε συγκεκριμένες κατηγορίες. Παράλληλα, η διαδικασία τοποθέτησης είναι σχετικά εύκολη, δεδομένης της γεωγραφικής συγκέντρωσης του εξοπλισμού. Οι άλλοι δύο τύποι βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις γραμμές μεταφοράς, δεδομένου ότι το κόστος αντικατάστασης των κεραμικών είναι μικρότερο από το κόστος επικάλυψής τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες κεραμικοί μονωτήρες με επικάλυψη έχουν χρησιμοποιηθεί σε γραμμές μεταφοράς, ενώ τελευταία άρχισαν να διατίθενται και κεραμικοί μονωτήρες επικαλυμμένοι από τον κατασκευαστή. Μια τυπική εφαρμογή είναι η χρήση επικαλυμμένων κεραμικών μονωτήρων αντί συνθετικών σε περιπτώσεις στις οποίες επιδιώκεται μείωση του

αξονικού μήκους του μονωτήρα, διατηρώντας το απαιτούμενο μήκος ερπυσμού (σχήμα 1.17). Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι εφικτό σε συνάρτηση και με την γεωμετρία του κεραμικού μονωτήρα. Μια άλλη εφαρμογή αφορά σε περιπτώσεις καταστροφής μονωτήρων, λόγω επιθέσεων πτηνών, τα οποία αποκόπτουν τμήματα του κελύφους των μονωτήρων (σχήμα 1.18) με κίνδυνο αποκάλυψης του πυρήνα και θραύσης αυτού. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η χρήση κεραμικών επικαλυμμένων μονωτήρων μπορεί να προσφέρει λύση, διατηρώντας την επιθυμητή υδρόφοβη συμπεριφορά [33].



Σχήμα 1.17: Κεραμικοί μονωτήρες με επικάλυψη από RTV SIR και συνθετικοί HTV SIR στον ίδιο πυλώνα γραμμής 150 kV του συστήματος μεταφοράς της Κρήτης [33].



Σχήμα 1.18: Συνθετικοί μονωτήρες έπειτα από επίθεση μεγάλων πτηνών σε γραμμή 150 kV του συστήματος μεταφοράς της Κρήτης [33].

Σημαντικό ερώτημα είναι η συγκριτική συμπεριφορά των δύο τεχνικών, δηλαδή της χρήσης κεραμικών μονωτήρων με επικάλυψη από RTV SIR και συνθετικών μονωτήρων κατασκευασμένων από HTV ή LSR SIR. Η σύγκριση δεν είναι εύκολη, καθώς αφορά τόσο στην ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων, όσο και στην αντοχή σε πιθανούς μηχανισμούς γήρανσης (βλέπε ενότητα 1.6).

Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί πως το σύστημα μεταφοράς Υψηλής Τάσης της Κρήτης κατέχει το παγκόσμιο ρεκόρ της πιο ευρείας χρησιμοποίησης των σιλικονούχων επικαλύψεων και ελκύει τα βλέμματα των ειδικών από όλο τον κόσμο για την συμπεριφορά των νέων αυτών υλικών στη πράξη [32, 33].

1.5.2 Υπερπήδηση

1.5.2.1 Γενικά

Η διηλεκτρική αντοχή των υλικών κατασκευής των μονωτήρων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος αέρα, άρα και η ηλεκτρική καταπόνηση αυτών των υλικών είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την καταπόνηση του αέρα. Όταν η μεταξύ των δύο ακρότατων σημείων του μονωτήρα επιβαλλόμενη τάση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, σημειώνεται υπερπήδηση (flashover, uberschlag), δηλαδή γεφύρωση με ηλεκτρικό τόξο, η οποία οδεύει διαμέσου του αέρα του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα. Η υπερπήδηση επέρχεται εν μέρει λόγω επιφανειακών εκκενώσεων, οι οποίες έρχονται πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα (η οποία σημειωτέον είναι επιφάνεια διαχωρισμού δύο διαφορετικών διηλεκτρικών, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου στην περιοχή αυτή), και εν μέρει λόγω διάσπασης στρωμάτων αέρα. Το δημιουργούμενο κατά την υπερπήδηση ηλεκτρικό τόξο έρχεται σε επαφή με το στερεό μονωτικό, προκαλώντας καταστροφή του υαλώδους επιχρίσμάτος του. Η επιφανειακή αγωγιμότητα που προκαλεί την υπερπήδηση παραμένει, ακόμα κι όταν το τόξο έχει εξαλειφθεί από τη λειτουργία της προστασίας, γεγονός που επιτρέπει να ακολουθήσουν κι άλλες υπερπηδήσεις. Με άλλα λόγια, καθορίζεται (κατά ένα ποσοστό τουλάχιστον 50%) η «οδός διέλευσης» νέου ηλεκτρικού τόξου που ενδεχομένως θα λάβει χώρα στο μέλλον. Για το λόγο αυτό συνήθως εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή κερατίδια, με τα οποία «υποδεικνύεται» στο ηλεκτρικό τόξο η «οδός διέλευσής» του, μακριά από το στερεό μονωτικό [3].

Το φαινόμενο της υπερπήδησης αποδίδεται στα παρακάτω δύο αίτια:

- Η εντοπισμένη αφυδάτωση ενός στρώματος ηλεκτρολύτη αυξάνει τις ασυνέχειες στο αγωγίμο στρώμα -γνωστές ως ξηρές ζώνες-, κατά μήκος των οποίων παράγονται ηλεκτρικές τάσεις (stresses) που επαρκούν για να ιονιστεί ο αέρας.
- Τα τόξα σε ένα αέριο, από τη στιγμή που δημιουργούνται, μπορούν εύκολα να επεκταθούν χωρίς εξασθένιση, με σχετικά αργή απομάκρυνση των άκρων μεταξύ των οποίων εμφανίζονται [4].

1.5.2.2 Παράγοντες που ευνοούν τη διαδικασία υπερπήδησης

Παράγοντες που ευνοούν την ηλεκτρική διάσπαση στα μονωτικά υλικά κατά την εκδήλωση του φαινομένου της υπερπήδησης είναι οι παρακάτω [4]:

1. Η πτώση σχεδόν καθαρού νερού, όπως σταγόνες, βροχή ή ομίχλη σε ένα μονωτήρα, πάνω στον οποίο βρίσκεται ποσότητα ρύπανσης που περιλαμβάνει διαλυτά ιονικά στοιχεία, όπως το κοινό αλάτι.

2. Η εναπόθεση σταγονιδίων θαλάσσιας, βιομηχανικής ομίχλης ή άλλου συνδυασμού νερού και ηλεκτρολύτη.

3. Η συγκέντρωση παγετού, παγετώδους ομίχλης ή πάγου στη ρυπασμένη επιφάνεια ενός μονωτήρα. Στην περίπτωση αυτή, τα ιοντικά συστατικά των ρύπων ενεργούν έτσι, ώστε να μειώσουν το σημείο ψύξης του νερού· κατ' αυτό τον τρόπο, επιτρέπουν την ύπαρξη υγρού διαλύματος στο σημείο επαφής των δύο επιφανειών.

4. Η ένταξη ενός κυκλώματος που περιέχει υγρούς και ρυπασμένους μονωτήρες.

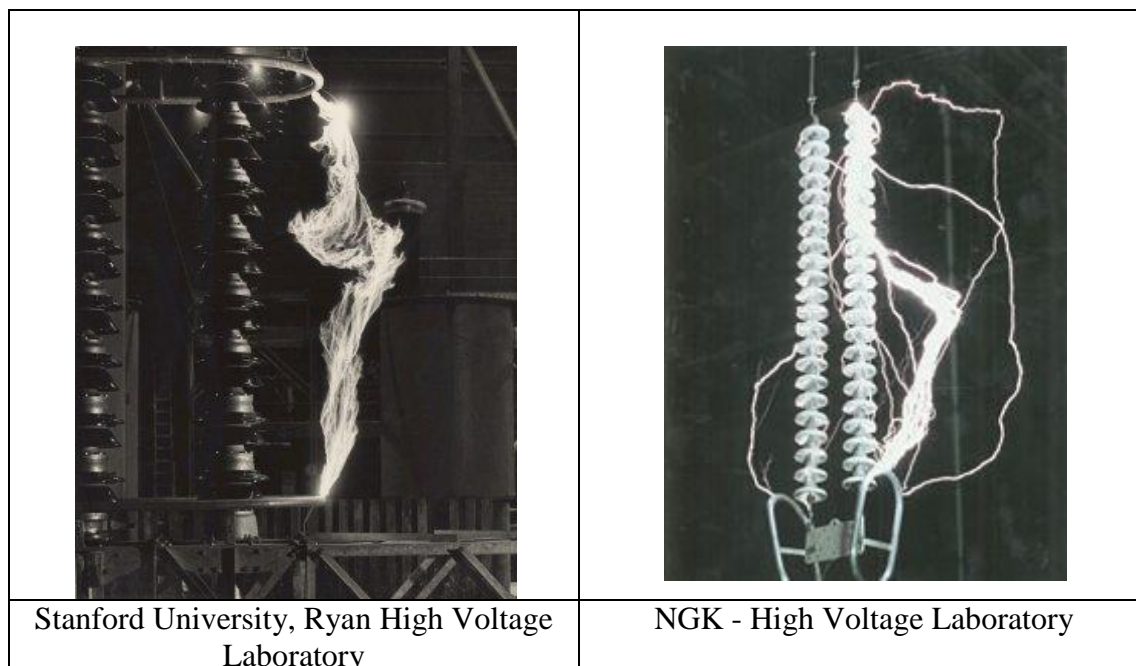
5. Η δημιουργία μιας προσωρινής υπέρτασης ή μιας μεταβατικής αιχμής σε ένα μονωτήρα υγρό, ρυπασμένο και πιθανόν ήδη ενεργοποιημένο.

1.5.2.3 Μηχανισμός υπερπήδησης σε συνθετικούς μονωτήρες

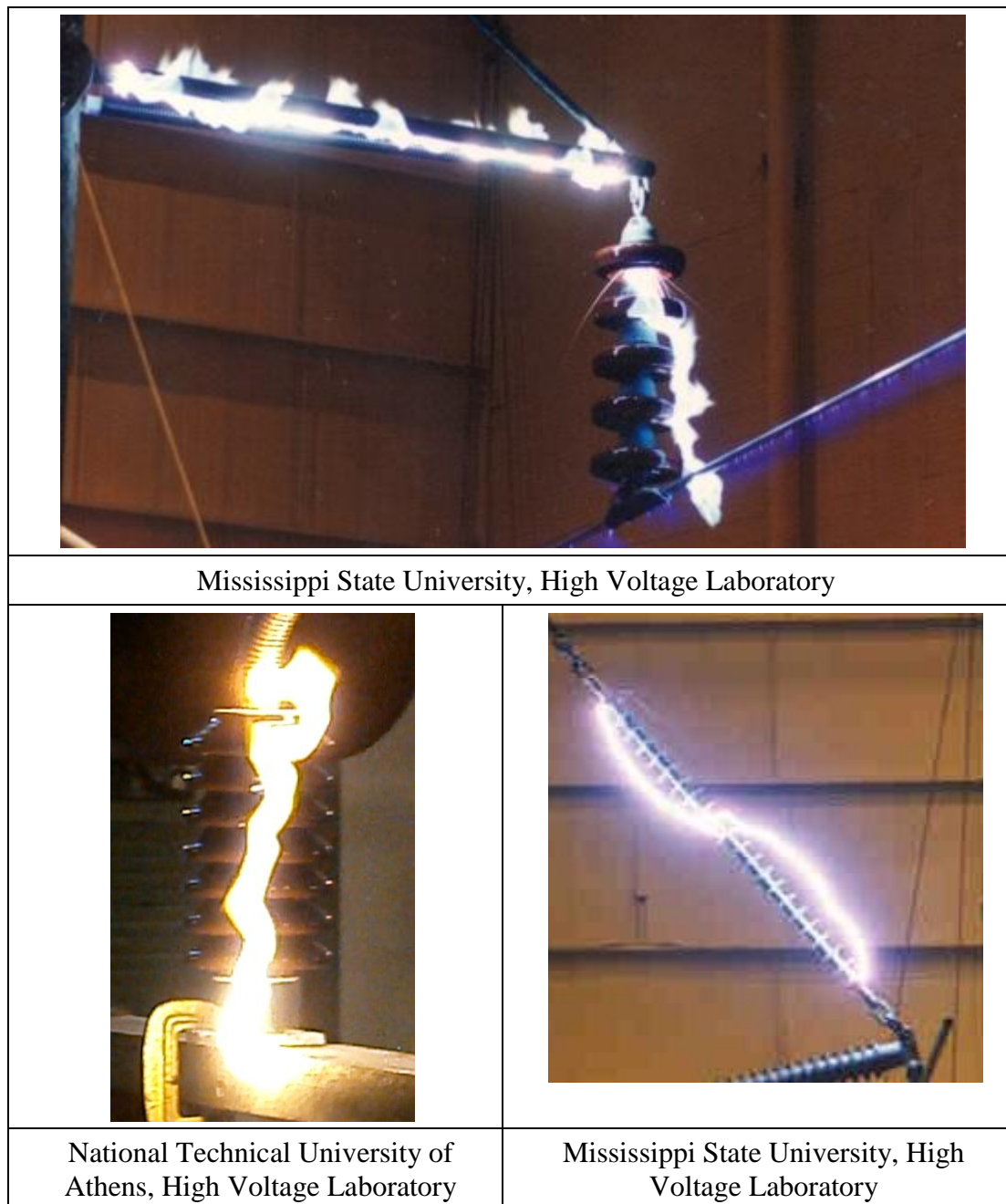
Τα βασικά στάδια της διαδικασίας της υπερπήδησης, λόγω ρύπανσης, σε συνθετικούς μονωτήρες είναι τα εξής [18]:

1. Εναπόθεση ρύπανσης: Σκόνη ή/και άλλα αγωγίμα σωματίδια εναποτίθενται στην επιφάνεια του μονωτήρα από τον αέρα.

2. Ύγρανση της επιφάνειας: Μεγάλη ποσότητα υγρασίας, δροσιάς, ομίχλης ή ασθενούς βροχής εναποτίθεται στην επιφάνεια σχηματίζοντας σταγονίδια, εξαιτίας των **υδρόφοβων** ιδιοτήτων του υλικού. Τα σταγονίδια αυτά κυλούν λόγω της βαρύτητας.



Σχήμα 1.19: : Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του φαινομένου της υπερπήδησης προερχόμενες από ιστοσελίδες Εργαστηρίων Υψηλών Τάσεων.



Σχήμα 1.20: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του φαινομένου της υπερπήδησης προερχόμενες από ιστοσελίδες Εργαστηρίων Υψηλών Τάσεων, καθώς και από προσωπικά αρχεία του συγγραφέα (κάτω αριστερά φωτογραφία).

Όταν η βαρύτητα δεν είναι ικανή να ενισχύσει την κίνηση των σταγονιδίων, τότε αυτά παραμένουν διαχωρισμένα στις θέσεις τους. Άλατα ή/και αγωγίμη ρύπανση διαλύονται στις σταγόνες νερού αυξάνοντας την αγωγιμότητα του υγρού.

3.Σχηματισμός αγωγίμου στρώματος: Η παραμένουσα ξηρή επιφάνεια ρύπανσης σταδιακά υγραίνεται μέσω της μετακίνησης σταγονιδίων. Αυτό σχηματίζει ένα αγωγίμο στρώμα ισχυρά ωμικής συμπεριφοράς, με αποτέλεσμα το ρεύμα διαρροής να μεταβάλεται από χωρητικό σε ωμικό.

4.Θερμότητα (ωμική): Το ρεύμα διαρροής που κυκλοφορεί προκαλεί μείωση στην αντίσταση και αύξηση του ρεύματος, μέχρι ο ηλεκτρολύτης να αποκτήσει αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας

στην αντίσταση. Με τη συσσώρευση θερμικής ενέργειας (I^2R) προκαλείται εξάτμιση νερού και αύξηση του βαθμού ξηρότητας.

5. Επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου σε υδρόφοβη επιφάνεια: Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί την ένωση των σταγονιδίων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους σε μία μεγάλη σταγόνα νηματοειδούς μορφής. Ο μηχανισμός της υπερπήδησης διαρκεί περισσότερο σε μία **υδρόφοβη** επιφάνεια, εξαιτίας του χρόνου που απαιτείται για να σχηματιστεί μία αγώγιμη διαδρομή με νηματοειδείς σταγόνες. Επίσης, το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να έχει ικανή τιμή ώστε να σχηματιστούν οι νηματοειδείς σταγόνες.

6. Μερικές εκκενώσεις σε υδρόφοβες επιφάνειες: Οι νηματοειδείς σταγόνες μειώνουν την απόσταση μεταξύ των άκρων του μονωτικού, αυξάνοντας το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των γειτονικών νηματοειδών σταγόνων. Όταν η τάση αποκτήσει κατάλληλη τιμή, τότε μπορεί να συμβούν επιφανειακές εκκενώσεις.

7. Εξασθένηση της υδροφοβικότητας: Οι εκκενώσεις καταστρέφουν ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς γύρω από τα σταγονίδια και μειώνουν την υδροφοβικότητα, περιστρέφοντας ή σπάζοντας τις πολυμερείς αλυσίδες. Η απώλεια ή η εξασθένηση της επιφανειακής υδροφοβικότητας έχει ως αποτέλεσμα την εξάπλωση των σταγόνων και τον σχηματισμό ενός συνεχούς αγώγιμου υμενίου, επιτρέποντας, κατ' αυτό τον τρόπο, τη ροή του ρεύματος διαρροής.

8. Σχηματισμός ξηρής ζώνης: Οι περιοχές της επιφάνειας με τη μεγαλύτερη διαφεύγουσα ισχύ ξηραίνονται πρώτες. Η γεωμετρία του μονωτήρα παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς η πυκνότητα ρεύματος τείνει να συγκεντρωθεί σε περιοχές με τα μικρότερα τμήματα, στα οποία η ξήρανση επιταχύνεται. Η ξήρανση αυξάνει τη διαφυγή ισχύος, επειδή αυξάνει την ειδική αντίσταση και οδηγεί σε ασταθείς συνθήκες. Καθώς οι ξηρές ζώνες είναι απομονωμένες, η επιφανειακή δραστηριότητα συνεχίζεται μέσα στην περιοχή της ζώνης. Η προκύπτουσα δραστηριότητα προκαλεί επιφανειακή διάβρωση (της οποίας ο ρυθμός εξαρτάται από τη μορφή του συγκεκριμένου υλικού) και συμβάλλει στη γήρανση του μονωτήρα.

9. Αποκατάσταση της υδροφοβικότητας: Η ολική ή μερική αποκατάσταση της υδροφοβικότητας είναι δυνατή μόνο αν το υλικό εκφορτιστεί ελεύθερα για ικανό χρονικό διάστημα. Η διαδικασία αποκατάστασης εξαρτάται από το υλικό, τον τρόπο σχηματισμού του, το σχεδιασμό του μονωτήρα και το περιβάλλον.

10. Επανάληψη του κύκλου γήρανσης: Η επανάληψη του κύκλου γήρανσης προκαλεί επιπλέον ύγρανση και πιθανόν διάβρωση της επιφάνειας, φαινόμενα τα οποία ενισχύονται από χημικές αντιδράσεις και τοπική άνοδο της θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια εκκένωσης η θερμοκρασία σε κάποια σημεία μπορεί να φθάσει τους 400°C.

11. Υπερπήδηση: Εάν η επιφάνεια γίνει υδρόφιλη, είναι πολύ πιθανό να συμβεί υπερπήδηση του μονωτήρα. Προϋπόθεση της εκδήλωσης του φαινομένου αποτελεί η επέκταση της εκκένωσης της ξηρής ζώνης στην εναπομένουσα υγρή επιφάνεια του μονωτήρα. Οι μερικές εκκενώσεις εξαλείφονται λίγο πριν το μηδενισμό της τάσης. Εάν, παρ' όλα αυτά, οι τιμές της τάσης και του ρεύματος διαρροής είναι αρκετά υψηλές, οι εκκενώσεις μπορεί να επεκταθούν σε ολόκληρο το

μήκος του μονωτικού και να αρχίσει το φαινόμενο της υπερπήδησης. Η ορατή δραστηριότητα στην επιφάνεια δεν σημαίνει πάντα ότι θα συμβεί υπερπήδηση, καθώς το ρεύμα διαρροής μπορεί να εξαλειφθεί εάν υπάρχει ανεπαρκής διαφεύγουσα ισχύς.

Εάν ένα από τα παραπάνω διακοπεί και δεν επιτραπεί λόγω των συνθηκών να ακολουθήσουν τα επόμενα στάδια διαδοχικά, τότε δεν θα εκδηλωθεί το φαινόμενο της υπερπήδησης. Με το πλύσιμο, το οποίο μπορεί να συμβεί για παράδειγμα λόγω βροχής, θα μειωθεί η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Η δε παρουσία του ήλιου ελαττώνει την υγρασία. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δυνατό να παρατηρηθούν ξηρές ζώνες, οι οποίες όμως δεν θα οδηγήσουν σε υπερπήδηση, γιατί ο μηχανισμός θα έχει διακοπεί.

Από την άλλη, οι **υδροφοβες** επιφάνειες αντιστέκονται περισσότερο στη ροή του ρεύματος διαρροής από τις υδρόφιλες και απαιτούν υψηλότερο ρεύμα διαρροής και αντίστοιχη έκλυση ενέργειας προκειμένου να ξεκινήσει υπερπήδηση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι συνθετικοί μονωτήρες παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση υπερπήδησης από τους μονωτήρες πορσελάνης. Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση που η διαδικασία διακοπεί, για παράδειγμα λόγω ενδεχόμενης επανάκτησης της επιφανειακής **υδροφοβικότητας**, η υπερπήδηση δεν λαμβάνει χώρα.

1.5.2.4 Η ικανότητα ανάκτησης της υδροφοβικότητας

Το περίβλημα των σύγχρονων συνθετικών μονωτήρων κατασκευάζεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω, από σιλικονούχο καουτσούκ (SIR). Η χαμηλή επιφανειακή ενέργεια του υλικού αυτού έχει ως αποτέλεσμα την πολύ καλή υδροφοβικότητα, η οποία οδηγεί στην εκδήλωση ιδιαίτερα χαμηλού ρεύματος διαρροής σε συνθήκες ύγρανσης και ρύπανσης. Οι οργανικές ομάδες που συγκεντρώνονται γύρω από τον άξονα του δεσμού πυριτίου-οξυγόνου (Si-O) είναι ουσιαστικά υπεύθυνες για την υδροφοβικότητα της σιλικόνης. Δεδομένα δοκιμών πεδίου σε προϊόντα του ομίλου της Raychem με σιλικονούχα ελαστομερή παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλά ρεύματα διαρροής, σε σχέση με ελέγχους προερχόμενους από κεραμικά και άλλα πολυμερή προϊόντα [29].

Η ιδιότητα της σιλικόνης να ανακτά την υδροφοβικότητά της σε περίπτωση απώλειας έχει εκτενώς αναφερθεί στη βιβλιογραφία ως ένα στοιχείο-κλειδί στη χρήση της σε εφαρμογές μονωτήρων εξωτερικού χώρου. Η ιδιότητα αυτή αποδίδεται στην ελαστικότητα του δεσμού Si-O και στην παρουσία των ευκίνητων και ελεύθερων αλυσίδων πυριτίου. Εργαστηριακές μελέτες έδειξαν ότι ισχυρή ρύπανση με ταυτόχρονη ύγρανση παρήγαγε τόξο στην επιφάνεια, το οποίο κατέστρεψε την επιφανειακή υδροφοβικότητα, προκαλώντας αυξημένο ρεύμα διαρροής. Παρ' όλ' αυτά, η επιφάνεια επανέκτησε την υδροφοβικότητά της μετά από ένα διάστημα ξηρασίας και απαλλαγής από τις συνθήκες που προκάλεσαν το ηλεκτρικό τόξο για 10 έως 12 ώρες. Η ανάκτηση της επιφανειακής υδροφοβικότητας αποδίδεται στη διασπορά των ευκίνητων πολυμερών αλυσίδων χαμηλού μοριακού βάρους από το κύριο σώμα προς την επιφάνεια και την περιστροφή των υδροφιλικών ομάδων μακριά από την επιφάνεια [29].

1.5.2.5 Τρόποι μετριασμού του φαινομένου της υπερπήδησης

Στα πολυμερή υλικά σπάνια χρησιμοποιούνται πρόσθετα μέτρα για την αποφυγή υπερπηδήσεων. Απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή κατά τη δημιουργία του υλικού και το σχεδιασμό του μονωτήρα [30, 35]. Τα πολυμερή μονωτικά υλικά είναι απαραίτητο να έχουν δύο

αμυντικούς μηχανισμούς κατά της ρύπανσης και, κατ' επέκταση, της δημιουργίας υπερπηδήσεων. Αυτοί είναι:

1. Έλεγχος του ρεύματος διαρροής. Επειδή είναι πιθανό να συμβεί φθορά του υλικού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ένας αμυντικός μηχανισμός είναι ο περιορισμός του ρεύματος διαρροής. Εάν το ρεύμα διαρροής δεν έχει ικανή τιμή, ώστε να προκαλέσει ξήρανση του ηλεκτρολύτη και δημιουργία ξηρών ζωνών, τότε ο μηχανισμός της υπερπήδησης δεν μπορεί να εξελιχθεί. Το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί τόσο με την επιλογή του κατάλληλου υλικού, όσο και με τον κατάλληλο σχεδιασμό του μονωτήρα.

2. Αντοχή στη διάβρωση. Τα πολυμερή υλικά δεν θα πρέπει να υφίστανται σημαντική διάβρωση κατά τη διάρκεια περιόδων στις οποίες η επιφανειακή δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει απώλεια της υδροφοβικότητας. Ειδικότερα, υλικά που έχουν την τάση να ανακτούν την υδροφοβικότητα τους πρέπει να αντέχουν σε περιόδους επιφανειακής δραστηριότητας, χωρίς να υφίστανται σημαντική διάβρωση. Ένα υλικό με μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, ακόμα κι αν χάσει την υδροφοβικότητά του, υπερτερεί ενός υλικού το οποίο μπορεί να επανακτήσει την υδροφοβικότητά του, αλλά έχει μικρή αντοχή στη διάβρωση. Το τελευταίο δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε περιοχή με έντονη ρύπανση, διότι θα οδηγηθεί σε πρόωρη βλάβη.

1.6 Γήρανση συνθετικών μονωτήρων

Τα πολυμερή υλικά υφίστανται συχνά με την πάροδο του χρόνου μια βραδεία και μη αντιστρεπτή μεταβολή των ιδιοτήτων τους, η οποία αντιστοιχεί στην μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και κυρίως της ελαστικότητας. Η μεταβολή αυτή γίνεται με τους ακόλουθους μηχανισμούς: οξειδωση, υδρόλυση, φωτόλυση, ράγισμα υπό την επίδραση δυνάμεων, βιολογική αποσύνθεση. Οι μηχανισμοί αυτοί επηρεάζονται από το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται το πολυμερές: μολυσμένος αέρας, κενό, αδρανές αέριο ή κάποιο υγρό αποτελούν πιθανές περιπτώσεις έκθεσης, ενώ ακτινοβολίες ορατού και υπεριώδους φωτός, μικροοργανισμοί και μηχανικές τάσεις συνιστούν κάποιους πρόσθετους παράγοντες που το επηρεάζουν. Ειδικά μετά τις περιβαλλοντικές μεταβολές που έχουν σημειωθεί τα τελευταία χρόνια (αύξηση της θερμοκρασίας της Γης, φαινόμενο του θερμοκηπίου) και ειδικότερα την αύξηση της υπεριώδους ακτινοβολίας (λόγω της τρύπας του όζοντος), είναι ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη της επίδρασης του περιβάλλοντος σε μονωτικά υλικά εξωτερικής χρήσης [38].

1.6.1 Περιβαλλοντικές αιτίες γήρανσης

Η γήρανση ενός μονωτήρα αποτελεί το σύνολο των επιδράσεων που αυτός υφίσταται λόγω του περιβάλλοντος (φυσικού και τεχνικού) στο οποίο εκτίθεται, έπειτα από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας του. Είναι μια φθοροποιός και σταδιακά καταστροφική διεργασία για το συνθετικό μονωτήρα, ωστόσο προέρχεται από φυσικούς παράγοντες και για το λόγο αυτό καταχωρείται στη βιβλιογραφία με τον όρο «γήρανση». Η γήρανση των συνθετικών μονωτήρων αφορά κυρίως στη γήρανση του εξωτερικού περιβλήματος και των δίσκων. Οι εξωτερικές καιρικές συνθήκες αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο επιφέρει γήρανση, μέχρι ενός βαθμού, σε όλα τα υλικά. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες των πολυμερών υλικών πηγάζουν απ' τα υψηλά μοριακά τους βάρη. Η σταθερότητά τους προέρχεται από τη δομή των πολυμερών αλυσίδων, ενώ η

υποβάθμισή τους σχετίζεται με το σπάσιμο των μακρομορίων, το οποίο με τη σειρά του προκαλεί μείωση του μοριακού τους βάρους. Το σπάσιμο αυτό είναι δυνατόν να προκληθεί από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι συνοπτικά είναι:

- **Βιολογική υποβάθμιση**, οφειλόμενη κυρίως στην ανάπτυξη μικροοργανισμών.
- **Χημικοί ρύποι**, όπως το διοξείδιο του θείου (SO₂), το οξυγόνο (O₂), το όζον (O₃) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂)
- **Περιβαλλοντικές καταπονήσεις**, όπως η θερμότητα, το φως (με τη μορφή της υπεριώδους ακτινοβολίας), η υγρασία, ο αέρας, η σκόνη, οι κατακρημνίσεις, καθώς και το φαινόμενο corona (το οποίο, μεταξύ άλλων, προκαλεί εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας) [24].

I. Βιολογική υποβάθμιση

Όλα τα οργανικά υλικά ευνοούν, περισσότερο ή λιγότερο, την ανάπτυξη βιολογικών μικροοργανισμών πάνω σε αυτά. Οι μικροοργανισμοί αυτοί αποικίζουν την επιφάνειά τους, σχηματίζοντας μορφές «Βιοφίλμ».

Οι προϋποθέσεις για το σχηματισμό Βιοφίλμ είναι μάλλον απλές: νερό και θρεπτικά συστατικά είναι αρκετά για να εμφανιστούν οι πρώτοι μικροοργανισμοί. Οι μικροοργανισμοί παρουσιάζονται πάντα εξωτερικά και τα θρεπτικά συστατικά προέρχονται είτε από το εσωτερικό του ίδιου του υλικού είτε από την περιοχή που το περιβάλλει. Η προσκόλληση σε επιφάνειες αποτελεί κοινή πρακτική για τους μικροοργανισμούς, προκειμένου αυτοί να επιβιώσουν σε περιβάλλοντα χαμηλής θρεπτικής αξίας· έτσι, τα Βιοφίλμ είναι πιθανό να βρεθούν σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τις αναφορές για βιολογική ανάπτυξη σε εξωτερικούς μονωτήρες, οι οποίες αποκαλύπτουν ότι ο αποικισμός μικροοργανισμών τόσο σε κεραμικούς, όσο και σε συνθετικούς μονωτήρες, είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει σε όλο τον κόσμο. Τα βιολογικά στοιχεία που μπορούν να αναπτυχθούν σε μία επιφάνεια δεν ήταν πλήρως γνωστά μέχρι οι πρόσφατες έρευνες με θέμα «Ανάπτυξη σε μονωτήρες» να προσδιορίσουν ευρύτατα αναπτυσσόμενους μικροοργανισμούς, όπως βρύα, μύκητες ή λειχήνες. Οι μικροοργανισμοί αυτοί περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

i. Βρύα

Τα βρύα, τα οποία είναι σχετικά απλά φυτά και παράγουν την τροφή που χρειάζονται φωτοσυνθέτοντας, χωρίζονται σε έξι κατηγορίες: Μπλε-πράσινα (Κυανόφυτα/Cyanophyta), Πράσινα (Χλωρόφυτα/Chlorophyta), Κιτρινοπράσινα (Ξανθόφυτα/Xanthophyta), Καφέ (Φαεόφυτα/Phaeophyta), Κόκκινα (Ροδόφυτα/Rhodophyta) και Διάτομα (Βακιλλαριόφυτα/Bacillariophyta). Τα βρύα βρίσκονται σχεδόν παντού, ακόμη και σε αρκτικά κλίματα. Διαδίδονται μέσω του νερού, του αέρα και της κινητικότητας των ζώων και πολλαπλασιάζονται υπό συγκεκριμένες ευνοϊκές συνθήκες, π.χ. θερμοκρασίας, υγρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας.

ii. Μύκητες

Οι μύκητες είναι ευκαρυωτικοί, πολυκυτταρικοί οργανισμοί, όπως τα φυτά και τα ζώα. Η δομή τους, ωστόσο, είναι αρκετά διαφορετική, καθώς αποτελούνται από μακριές, νηματοειδείς ίνες που ονομάζονται υφές. Επιπλέον, δεν μπορούν να φτιάξουν την τροφή τους με φωτοσύνθεση· αντίθετα, προσλαμβάνουν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά από το εξωτερικό περιβάλλον. Χρησιμοποιούν ένζυμα για να διαλύσουν το υπόστρωμα, ώστε να επιτρέψουν την απορρόφηση των θρεπτικών ουσιών που βρίσκονται σε αυτό. Η διαδικασία αυτή διευκολύνεται χάρη στη μεγάλη επιφάνεια επαφής των υφών, καθώς αυτές αναπτύσσονται πάνω και εντός του υποστρώματος του υλικού. Δεδομένου ότι οι μύκητες καταναλώνουν ποσότητες υλικού από τον περιβάλλοντα χώρο, είναι εύλογο να θεωρήσει κανείς πως οι συνθετικοί μονωτήρες προσβάλλονται, κατά τη λειτουργία τους, από μύκητες. Η καθιέρωση σχεδιαστικών δοκιμών που μπορούν να αξιολογούν την αντίσταση διαφόρων υλικών περιβλήματος στην εν λόγω μυκητιακή ανάπτυξη, αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα.

iii. Λειχήνες

Οι λειχήνες μπορούν να αναπτυχθούν σχεδόν σε οποιαδήποτε επιφάνεια υπάρχει αρκετό ηλιακό φως. Είναι ένας συνδυασμός βρύων και μυκήτων που ζουν μαζί, που συνυπάρχουν. Οι περισσότερες λειχήνες αποτελούνται από ίνες μυκήτων, μεταξύ των οποίων αναπτύσσονται κύτταρα βρύων. Οι μύκητες και τα βρύα (που απαρτίζουν τις λειχήνες) μπορούν επίσης να υπάρχουν και να επιβιώνουν απομονωμένα· πολλές λειχήνες όμως αποτελούνται από μύκητες που εξαρτώνται από τα βρύα-συντρόφους τους και δεν μπορούν να επιβιώσουν χωρίς αυτά, για παράδειγμα στους βράχους και τα δέντρα. Βασικά, τα κύτταρα των βρύων παρέχουν τις απαραίτητες θρεπτικές ουσίες μέσω φωτοσύνθεσης. Ακόμη και τότε όμως, οι μύκητες ίσως χρησιμοποιήσουν στερεά θρεπτικά συστατικά από το υλικό της επιφάνειας. Οι περισσότεροι τύποι λειχήνας αναπτύσσονται σε εύκρατες ή αρκτικές περιοχές· εντούτοις ορισμένες μπορούν και ζουν σε τροπικές ή ερημικές τοποθεσίες. Ένας λόγος που εμφανίζονται και επιβιώνουν σε ακραία περιβάλλοντα είναι, κατά πάσα πιθανότητα, το ότι οι λειχήνες ξηραίνονται ολοκληρωτικά απουσία υγρασίας, δηλαδή όλο το νερό του σώματός τους χάνεται, και η ανάπτυξή τους παύει. Όταν όμως η υγρασία επανεμφανισθεί, απορροφούν νερό και συνεχίζουν να αναπτύσσονται κανονικά. Δεδομένου ότι οι λειχήνες αναπαράγονται με διασπορά των περιελιγμένων στις ίνες βρυϊκών κυττάρων, επεκτείνονται σχετικά αργά.

Η ανάπτυξη μικροοργανισμών πάνω στην επιφάνεια συνθετικών μονωτήρων χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Η βιολογική αλλοίωση των πολυμερών επιφανειών εξελίσσεται μεταξύ των επιφανειακών στρωμάτων και καθορίζεται από τις τοπικές συνθήκες που επικρατούν. Τα Βιοφίλμ που δημιουργούνται στην αρχή είναι ιδιαίτερα ενυδατωμένα: περιέχουν από 80 έως 95% νερό. Επιπλέον, παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα για την ανάπτυξη των κυττάρων των μικροοργανισμών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται ο σχηματισμός ενός σταθερού μικρο-συνόλου, η διευκόλυνση της ανταλλαγής ύλης, η συσσώρευση θρεπτικών συστατικών μέσα στο νερό, η προστασία έναντι τοξικών ουσιών, καθώς και η προστασία έναντι της ξηρότητας.

Συνέπειες της βιολογικής αλλοίωσης

Οι μικροοργανισμοί μπορούν να επηρεάσουν τη δομή και τη λειτουργία των συνθετικών πολυμερών που καλύπτουν τους συνθετικούς μονωτήρες με διάφορους τρόπους. Οι πέντε σημαντικότερες επιδράσεις είναι:

i) Επικάθηση ακαθαρσιών (ρύπανση του μονωτήρα)

Πρόκειται για μια ανεπιθύμητη εναπόθεση και ανάπτυξη μικροοργανισμών πάνω σε μία επιφάνεια. Η επιφάνεια δεν θα πρέπει να ευνοεί την ανάπτυξη αυτή ή να επηρεάζεται: η παρουσία του Βιοφίλμ ενδεχομένως να παρεμβαίνει στη λειτουργία και τις ιδιότητες του υλικού, όπως είναι η μείωση της υδροφοβικότητας ή η αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας.

ii) Υποβάθμιση διηθουμένων συστατικών

Πρόσθετα, πληρωτικά και άλλα αδρανή υλικά που διηθούνται έξω απ' το πολυμερές περίβλημα, ενδεχομένως να αποτελέσουν μια πηγή τροφής για τους μικροοργανισμούς στο Βιοφίλμ. Η κατανάλωσή αυτών των υλικών έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορά στη συγκέντρωσή τους και την περεταίρω διάχυσή τους απ' το εσωτερικό του πολυμερούς προς το εξωτερικό, με επακόλουθη συνέπεια την αλλοίωση. Για παράδειγμα, η κατανάλωση πλαστικοποιητών οδηγεί σε μηχανική υποβάθμιση του εναπομείναντος πολυμερούς και απώλεια της μηχανικής σταθερότητας.

iii) Διάβρωση

Η διάβρωση είναι γενικά μια διαδικασία που επηρεάζεται έντονα από τις τοπικές συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια. Τα Βιοφίλμ προκαλούν μεταβολές στην τιμή του pH, στο δυναμικό οξειδοαναγωγής, στις συγκεντρώσεις οξυγόνου και αλάτων. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τις, σχετικές με τη διάβρωση, παραμέτρους στην επιφάνεια. Η υποβάθμιση περιλαμβάνει αντιδράσεις που ενεργοποιούνται από ελεύθερες ρίζες και εξωκυττάρια ένζυμα που δημιουργούνται από το μεταβολισμό των μυκήτων. Τόσο η ικανότητα των μυκήτων να εκκρίνουν ποσότητες εξωκυττάρων ενζύμων, όσο και το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να αποικίζουν πάνω σε επιφάνειες, συνεισφέρουν σε μια ταχύτατη υποβάθμιση των υλικών. Αυτοί οι λόγοι καθιστούν τους μύκητες ιδιαίτερα σημαντικούς για τις δοκιμές βιο-αντίστασης.

iv) Ενυδάτωση (διείσδυση νερού σε ένα υλικό)

Λόγω του γεγονότος ότι τα Βιοφίλμ περιέχουν κυρίως νερό, ενεργούν ως ηλεκτρολύτες, αυξάνοντας την αγωγιμότητα των επιφανειών. Έχει βρεθεί ότι η ανάπτυξη μυκήτων και μούχλας σε πλακέτες κυκλωμάτων και υπολογιστές προκαλεί βραχυκυκλώματα και επακόλουθες αστοχίες του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Κατά ένα παρόμοιο τρόπο, η αγωγιμότητα των πολυμερών υλικών αυξάνεται, μέσω της διείσδυσης νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες τιμές ρεύματος διαρροής οι οποίες, την ίδια στιγμή, μειώνουν τη μηχανική σταθερότητα.

ν) Αποχρωματισμός

Τα Βιοφίλμ περιέχουν χρωστικές ουσίες που προκαλούν σημαντική απώλεια των χρωμάτων. Μερικές χρωστικές, ειδικά εκείνες που παράγονται από ορισμένα είδη μυκήτων, είναι γνωστές για την εύκολη διάλυσή τους μέσα σε λιπόφιλα πολυμερή, όπως το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Ο αποχρωματισμός αυτός δεν μπορεί να αφαιρεθεί με το πλύσιμο. Πέρα απ' αυτό, ορισμένα προϊόντα της μικροβιακής υποβάθμισης, προκαλούν σοβαρά προβλήματα λόγω της μυρωδιάς τους.

Προστασία από μικροβιολογική προσβολή

Προκειμένου να προστατευθεί ένα πολυμερές υλικό από μικροβιολογική προσβολή, διάφορα μέτρα μπορούν να ληφθούν. Δεδομένου ότι οι μικροοργανισμοί δεν είναι δυνατό να αλλοιώσουν τα μη οργανικά τμήματα, η ανάπτυξή τους μπορεί να περιοριστεί έως ένα βαθμό, κατασκευάζοντας το μονωτήρα από ένα μίγμα τόσο οργανικών, όσο και μη οργανικών υλικών.

Γενικά, η προσθήκη διαφόρων τύπων πρόσθετων, η οποία εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή, σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση της πολυμερούς βάσης διαμόρφωσης, θα δώσουν ένα υλικό πιο ανθεκτικό στη βιο-υποβάθμιση. Για παράδειγμα, η προσθήκη του υδροβοριούχου ψευδαργύρου (που λειτουργεί ως επιβραδυντικό φλόγας) διαφοροποιεί τις δομές του σιλικονούχου καουτσούκ (SIR), ενώ έχει παρατηρηθεί ότι καταστέλλει την ανάπτυξη μυκήτων. Ακόμη καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν με την προσθήκη των λεγόμενων «μικροβιοκτόνων», ενεργών δηλαδή συστατικών που εξοντώνουν ή αναστέλλουν την αναπαραγωγή των μικροοργανισμών. Αυτή η μέθοδος έχει προταθεί από τους Gubanski et al. για την πρόληψη της ανάπτυξης βρύων σε μονωτήρες σιλικονούχου καουτσούκ (SIR). Ένα καλό μικροβιοκτόνο πρέπει να έχει ευρύ φάσμα αντιμετώπισης, να διαχέεται εύκολα στην εν λόγω επιφάνεια χωρίς να ξεπλένεται, να έχει μικρή πιθανότητα δημιουργίας ανθεκτικότητας (με την έννοια της ανοσίας) σε αυτό, να μην επηρεάζει τις ιδιότητες του υλικού και, την ίδια στιγμή, να είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Η προστασία του τελικού προϊόντος μπορεί να επιτευχθεί με περιοδική απομάκρυνση του στρώματος οργανικής ρύπανσης (καθαρισμός), με έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών και, αν χρειαστεί, με απολύμανση μέσω αποστείρωσης [24].

II. Χημικοί ρύποι

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) απαντάται συχνά στον ατμοσφαιρικό αέρα, καθώς εξέρχεται από τα αέρια απόβλητα των βιομηχανιών. Διαμορφώνει σταδιακά ένα στρώμα ρύπανσης (το οποίο περιέχει κυρίως θείο) στην επιφάνεια του μονωτήρα, το οποίο τελικά προκαλεί υπερπήδηση αυτού. Ωστόσο, η συμπεριφορά των πολυμερών μονωτήρων έναντι της ρύπανσης είναι σημαντικά καλύτερη απ' αυτήν των κεραμικών. Το οξυγόνο (O_2) αποτελεί μια ακόμη πηγή υποβάθμισης των μονωτικών υλικών, επειδή ευνοεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Τέλος, όζον (O_3) και διοξείδιο του αζώτου (NO_2) παράγονται λόγω της επίδρασης του φαινομένου cogona γύρω από γραμμές Υψηλής Τάσης. Το όζον (O_3) είναι καταστροφικό για όλα τα υλικά, συμπεριλαμβανομένων και των μονωτικών. Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) αντιδρά με το νερό στην επιφάνεια των μονωτήρων, σχηματίζοντας νιτρικό οξύ (HNO_3). Προφανώς, το τελευταίο τείνει να διαβρώσει την επιφάνεια, με πιθανό αποτέλεσμα την αστοχία του μονωτήρα [24].

III. Περιβαλλοντικές καταπονήσεις

Η θερμότητα, το φως και η υγρασία που παράγονται από το φυσικό περιβάλλον επιδρούν σημαντικά σε έναν, εν λειτουργία, μονωτήρα. Η θερμότητα και το φως προκαλούν ράγισμα και διάβρωση της επιφάνειας. Απουσία φωτός, τα περισσότερα πολυμερή είναι σταθερά για πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, επιταχύνεται ο ρυθμός οξείδωσης. Η φωτο-οξείδωση οδηγεί στο σπάσιμο των αλυσίδων των υδρόφοβων μέθυλ-ομάδων, κάτι που έχει ως συνέπεια την παραγωγή αλδεϋδών, κετονών και καρβολικών οξέων στα άκρα των πολυμερών αλυσίδων. Το σπάσιμο αυτό ενδεχομένως να είναι σχετικά ήπιο, επηρεάζοντας μόνο πλευρικές ομάδες· ενδεχομένως όμως να είναι αρκετά σοβαρό, προκαλώντας μείωση του μεγέθους των μακρομορίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ακόμη και ένα μόλις σπάσιμο αλυσίδας ανά μόριο σε ένα πολυμερές με μοριακό βάρος 100 000 αρκεί για να καταστρέψει την τεχνική του χρησιμότητα. Η υγρασία εισχωρεί μέσα σ' αυτά τα ραγίσματα και τελικά προκαλεί εκκενώσεις κάτω από τη ράβδο του μονωτήρα.

Παρακάτω αναλύονται η επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας και του φαινομένου corona.

i. Υπεριώδης ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελεί έναν απ' τους σημαντικότερους παράγοντες υποβάθμισης των πολυμερών μονωτήρων. Οι κυριότερες πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας είναι ο ήλιος, το φαινόμενο corona και η επιφανειακή δραστηριότητα που οφείλεται στη δημιουργία ξηρών ζωνών. Το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι καταστροφικό για τα πολυμερή κυμαίνεται μεταξύ 320 και 270 nm. Το εύρος των καταστροφικών μηκών κύματος (και η συνακόλουθη ενέργεια) αποτελεί λιγότερο του 5% της συνολικής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη μας. Η απορρόφηση αυτής της υπεριώδους ακτινοβολίας έχει ως συνέπεια τη χημική και μηχανική υποβάθμιση της δομής των πολυμερών, η οποία με τη σειρά της μπορεί να επηρεάσει τις διηλεκτρικές και υδρόφοβες ιδιότητες αυτών. Ο ρυθμός της υποβάθμισης εξαρτάται από την ένταση και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οι παράγοντες αυτοί μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή, το υψόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος και την ώρα της ημέρας. Οι επιδράσεις αυτής της υποβάθμισης επιταχύνονται περεταίρω αν υπάρχει υγρασία στην επιφάνεια των πολυμερών. Ως εκ τούτου, συνίσταται οι πολυμερείς ενώσεις που προορίζονται για χρήση σε εξωτερικό χώρο να αξιολογούνται υπό τη συνδυασμένη επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας και υγρασίας.

Οι επιδράσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας σ' ένα πολυμερές είναι, συνοπτικά: ράγισμα, κρητιδική μορφή της επιφάνειας, αποχρωματισμός και απώλεια της υδροφοβικότητας.

ii. Το φαινόμενο corona

Οι «στεμματοειδείς» εκκενώσεις, διεθνώς γνωστές corona, αποτελούν φωτεινές μερικές εκκενώσεις που δημιουργούνται σε μία επιφάνεια, όταν η ηλεκτρική πεδιακή ένταση πάνω σ' αυτήν υπερβεί την ένταση διάσπασης του αέρα, η οποία είναι γύρω στα 15 kV/cm· με άλλα λόγια, όταν προκύψει ιονισμός του αέρα. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επηρεάζουν τη δημιουργία του φαινομένου είναι η πυκνότητα του αέρα και η υγρασία. Η γεωμετρία του ίδιου του μονωτήρα παίζει σημαντικό ρόλο στην έναρξη της δραστηριότητας corona. Το φαινόμενο corona προκαλεί

εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας, έκλυση θερμότητας και παραγωγή αέριων υποπροϊόντων (όπως το όζον - O₃- και το διοξείδιο του αζώτου - NO₂-).

Οι εκκενώσεις corona υποβάλλουν το μονωτήρα σε σημαντικές ηλεκτρικές καταπονήσεις και χημική υποβάθμιση. Η συνεχιζόμενη υποβάθμιση ενδεχομένως να καταστήσει το πολυμερές τελικά άχρηστο. Ένας πολυμερής μονωτήρας θα πρέπει να έχει χημική σύσταση τέτοια, ώστε να ανθίσταται στη χημική αυτή υποβάθμιση καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του. Άλλες ανεπιθύμητες επιδράσεις του φαινομένου corona είναι η πρόκληση θορύβου και παρεμβολών σε γειτονικούς ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς δέκτες, η δημιουργία όζοντος (O₃) και οι απώλειες ενέργειας.

Η δημιουργία του φαινομένου corona πάνω σε μια υγρή επιφάνεια συνεπάγεται τη λεγόμενη «δραστηριότητα corona υπό συνθήκες ύγρανσης». Η δραστηριότητα αυτή προέρχεται από μια ανομοιόμορφη ύγρανση, η οποία προκαλεί με τη σειρά της υψηλές ηλεκτρικές πεδιακές εντάσεις. Εξαρτάται δε από τον τύπο και το μέγεθος της ύγρανσης, καθώς και από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της επιφάνειας. Το μέγεθος της ύγρανσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (αν είναι υδρόφιλη ή υδρόφοβη) και από τον τύπο της ύγρανσης, αν δηλαδή προέρχεται από επικάλυψη βροχής, πάχνης, δροσιάς ή συμπύκνωση υδρατμών. Το μέγεθος του επιφανειακού ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από τις διαστάσεις του τοροειδούς εξομάλυνσης, της θέσης του και από το υλικό των ακροδεκτών του μονωτήρα.

Η δραστηριότητα corona υπό συνθήκες ύγρανσης λαμβάνει χώρα κυρίως σε περιοχές κοντά στο ενεργό και γειωμένο άκρο του μονωτήρα. Είναι επομένως πιθανή η φθορά των μεταλλικών αυτών άκρων. Η χαμηλή υδροφοβικότητα κάνει την εμφάνιση εκκενώσεων πιο πιθανή. Επιπλέον, το φαινόμενο corona, παρουσία νερού, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νιτρικού οξέος (NO₂ + H₂O → HNO₃), το οποίο ενδεχομένως να προκαλέσει επιφανειακή αλλοίωση [24].

Παράγοντες όπως η **βροχή**, η **σκόνη**, ο **αέρας** και η **επικάλυψη αλάτων** είναι δυνατό να μεταβάλουν το μονωτικό υλικό είτε φυσικά, με τη δημιουργία προεξοχών και ραγισμάτων στην επιφάνεια, είτε χημικά, με την απώλεια των διαλυτών συστατικών και με τις αντιδράσεις αλάτων, οξέων και άλλων ακαθαρσιών που επικάλυπτονται στην επιφάνεια. Οι επιφάνειες μετατρέπονται σε υδρόφιλες και το νερό διεισδύει στα μονωτικά υλικά προκαλώντας βλάβες [24].

Οι επιδράσεις σχεδόν όλων των προαναφερθέντων παραγόντων (μικροβιολογική προσβολή, περιβαλλοντικές καταπονήσεις -χημικοί ρύποι, υπεριώδης ακτινοβολία, φαινόμενο corona- σε συνδυασμό με τη βροχή, τον αέρα, τη σκόνη και την επικάλυψη αλάτων) προκαλούν χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια του πολυμερούς υλικού. Αποτέλεσμα αυτών είναι η μείωση της υδροφοβικότητας του υλικού και ο σχηματισμός υδρόφιλων ομάδων, που επιτρέπουν στην επιφάνεια να υγρανθεί και να επιτρέψει με τη σειρά της τη δημιουργία αυξημένων ρευμάτων διαρροής. Ένα υλικό που υφίσταται μείωση της υδροφοβικότητας δεν σημαίνει ότι χάνει και την αντοχή του έναντι της διάβρωσης σε συνθήκες υγρασίας. Παρ' όλα αυτά, η διατήρηση της υδροφοβικότητας είναι εξαιρετικά επιθυμητή. Εάν η υδροφοβικότητα μειωθεί, το προϊόν δεν πρέπει να υποστεί σημαντικά ρεύματα διαρροής, τα οποία θα οδηγήσουν στο σχηματισμό ξηρών ζωνών, οπότε είναι πιθανό να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός υπερπήδησης του μονωτήρα, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου [29].

Καταστροφή του περιβλήματος οφειλόμενη σε άλλους εξωγενείς παράγοντες

Πέραν του τυπικού ορισμού της γήρανσης που δόθηκε στην αρχή της προηγούμενης υποενότητας και αφορά σε χημικές αντιδράσεις και φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο μικρόκοσμου (σπάσιμο των μακρομορίων των πολυμερών), ιδιαίτερο ενδιαφέρον, από πρακτικής σκοπιάς, παρουσιάζει η επίδραση άλλων εξωγενών παραγόντων στη λειτουργία και τη διάρκεια ζωής των συνθετικών μονωτήρων. Εκτός από την ανάπτυξη μικροοργανισμών και τη βιολογική υποβάθμιση που προκαλείται εξαιτίας της, είναι πιθανό οι συνθετικοί μονωτήρες να αποτελέσουν στόχο συνθετότερων βιολογικών οργανισμών, όπως είναι τα πουλιά. Ένα απ' τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι συνθετικοί μονωτήρες αποτελεί η μερική απώλεια του πολυμερούς περιβλήματος και των δίσκων από το «ροκάνισμα» που κάνουν σε αυτό διάφορα πτηνά. Το φαινόμενο έχει παρατηρηθεί σε μονωτήρες στήριξης 110 kV συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Αυστραλίας (σχήμα 1.21), καθώς και σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης 150 kV του συστήματος μεταφοράς της Κρήτης (βλέπε σχήμα 1.18).

Σε γενικές γραμμές, η καταστροφή μερικών ελαστομερών δίσκων δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα, καθώς το εναπομείναν μήκος ερπυσμού συνήθως αρκεί, προκειμένου να παράσχει την απαραίτητη μόνωση. Ωστόσο, υψηλότερα επίπεδα κινδύνου παρουσιάζονται όταν ο συνθετικός μονωτήρας εκτίθεται σε βαριά ρυπασμένες περιοχές (π.χ. παράκτιες ή βιομηχανικές), οπότε και η παραμικρή μείωση του μήκους ερπυσμού θα μπορούσε να αποβεί μοιραία. Αν το περίβλημα καταστραφεί τόσο, ώστε να αποκαλυφθεί ο πυρήνας της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες ράβδου, τότε θα πρέπει να γίνει αντικατάσταση του μονωτήρα, λόγω της πιθανής εκδήλωσης υπερπήδησης κατά μήκος αυτού.



Σχήμα 1.21: Συνθετικός μονωτήρας 110 kV, το πολυμερές περίβλημα και οι ελαστομερείς δίσκοι του οποίου έχουν δεχθεί «επίθεση» ιδιαίτερος λαίμαργων, καθώς φαίνεται, πτηνών [30].

Δεν είναι λίγες οι φορές κατά τις οποίες παπαγάλοι ή άλλα μεγαλύτερα πτηνά στέκονται στα γειωμένα άκρα συνθετικών μονωτήρων και αρχίζουν να ροκανίζουν το περίβλημα κατά μήκος των δίσκων, τείνοντας προς το άκρο Υ.Τ.. Μόλις το ηλεκτρικό πεδίο φτάσει σε επίπεδα ενοχλητικά για τα πτηνά, αυτά εγκαταλείπουν το μονωτήρα, αφήνοντας πρακτικά λειτουργικό ένα μικρό μόνο τμήμα του.

Έως όμως το οριακό αυτό σημείο ενόχλησης, φαίνεται πως τα πουλιά ανθίστανται στην υφιστάμενη πεδιακή καταπόνηση. Από μια πρώτη, σχετικά πρόχειρη και βεβιασμένη σκοπιά, θα μπορούσε κανείς να προτείνει αύξηση της τοπικής έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (με το σχεδιασμό π.χ. μιας ειδικής συσκευής ή διάταξης) ώστε τα όποια πτηνά έχουν κακές διαθέσεις, ως προς το μονωτήρα, να ενοχλούνται προτού τις υλοποιήσουν. Έχοντας όμως κατά νου ότι βασικός στόχος αποτελεί η γενικά μειωμένη και ομοιόμορφη πεδιακή κατανομή για την αντιμετώπιση της γήρανσης (με αύξηση της διάρκειας ζωής) των μονωτήρων, κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε υψηλά επίπεδα ηλεκτρικής έντασης, επομένως θα επιτάχυνε την υποβάθμιση λόγω πιθανής εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων corona.

Μια διαφορετική προσέγγιση του θέματος αποτελεί ο σχεδιασμός κάποιας χωριστής κατασκευής, η οποία θα μπορούσε να προστεθεί στην υπάρχουσα διάταξη του μονωτήρα, χωρίς ασφαλώς να αυξάνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του, και να παράσχει συνολική προστασία από τις ενδεχόμενες επιθέσεις μεγάλων πτηνών.

Η πρώτη εναλλακτική ιδέα που προτείνεται είναι η επικάλυψη των ελαστομερών δίσκων του μονωτήρα με κάποιο είδους υλικό το οποίο θα απωθούσε και θα ήταν ακατάλληλο προς βρώση από τα «επιθετικά», έναντι του μονωτήρα, πτηνά. Εντούτοις, η πρόταση αυτή εγείρει περιβαλλοντικά ζητήματα σε σχέση με τις επιδράσεις που θα μπορούσε να έχει η χημική ουσία της επικάλυψης στα πουλιά που θα την προσλάμβαναν μέσω της τροφής. Συγχρόνως, ένα τέτοιο προστατευτικό περίβλημα θα μπορούσε να έχει επιπλέον δυσμενείς επιδράσεις και στο σιλικονούχο υλικό των δίσκων. Είναι επομένως σαφές ότι, κατά το σχεδιασμό και τη μελέτη μιας τέτοιας χημικής ουσίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη αυτές οι παράμετροι. Η χημική ένωση $Al_2(SO_4)_3$ (θειικό αργίλιο) είναι αυτή χρησιμοποιείται σήμερα από την εταιρία Power Queensland της Αυστραλίας για το σκοπό αυτό.

Μια δεύτερη εναλλακτική, μάλλον φιλικότερη προς το περιβάλλον, πρόταση είναι η εγκατάσταση ειδικών ηχητικών ή υπερηχητικών συσκευών, οι οποίες θα ξάφνιαζαν και θα απομάκρυναν τα πουλιά. Πέραν της περιβαλλοντικής συμβατότητας, η υλοποίηση μιας τέτοιας ιδέας δεν θα επέφερε καμιά καταστροφική επίδραση στους ίδιους τους μονωτήρες. Ωστόσο, πρόκειται για μια ακριβή πρόταση, από πλευράς κόστους κατασκευής και συντήρησης. Επιπλέον, τέτοιου είδους συσκευές ενδεχομένως να μη γίνονταν αποδεκτές σε κατοικημένες περιοχές· επομένως η εγκατάστασή τους αφορά σε περιορισμένο αριθμό τοποθεσιών και συνεπώς σε μερική επίλυση του προβλήματος [30].

1.6.2 Οπτική αναγνώριση αλλοιώσεων/φθορών σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης

Οι αλλοιώσεις ή οι βλάβες που ενδέχεται να υποστούν οι μονωτήρες μπορούν να προκληθούν από διάφορα αίτια, όπως από την κακή ποιότητα προϊόντος πολυμερούς και σχεδίων μονωτήρα, από ανεπαρκή παραγωγική διαδικασία ή/και ποιοτικό έλεγχο, από υπερβολικές ηλεκτρικές ή/και μηχανικές καταπονήσεις, από δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονότα ανωτέρας βίας (τυφώνες, καταιγίδες, φωτιά, σεισμοί κ.λ.π), από ακατάλληλες πρακτικές συντήρησης ή από λανθασμένη εφαρμογή και κακομεταχείριση από τους χρήστες, κ.λ.π. [14].

Αλλοίωση: Με τον όρο αλλοίωση προσδιορίζεται η κατασκευαστική ή επιφανειακή γήρανση, η οποία εμφανίζεται στους συνθετικούς μονωτήρες ως άμεσο αποτέλεσμα της έκθεσής τους στο περιβάλλον λειτουργίας, την ηλεκτρική καταπόνηση, τις μηχανικές φορτίσεις ή/και τον απρόσεκτο

χειρισμό. Το είδος αυτό της γήρανσης δεν αναμένεται να προκαλέσει τη μείωση της απόδοσης ούτε της διάρκειας ζωής του μονωτήρα. Με την αλλοίωση δεν μειώνεται σημαντικά το πάχος του περιβλήματος από πολυμερές υλικό, το οποίο αποτρέπει την είσοδο της υγρασίας στον πυρήνα του μονωτήρα, και δεν μειώνεται το μήκος ερπυσμού περισσότερο από το 10%.

Κρητιδική μορφή: Μετατροπή της, αρχικά λείας, επιφάνειας του μονωτήρα σε πορώδη και εύθριπτη, εξαιτίας της έκθεσης στο περιβάλλον των υλικών πλήρωσης του καλύμματος [39].



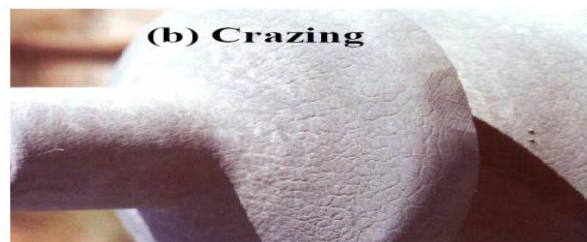
Σχήμα 1.22: Αλλοίωση στην περιοχή των δίσκων του μονωτήρα [39].

Αποχρωματισμός: Αλλαγή στο χρώμα του υλικού του μονωτήρα.



Σχήμα 1.23: Αλλοίωση στην περιοχή των δίσκων με μεταβολή του χρώματος που επικαλύπτει το μονωτήρα [39].

Ράγισμα: Συνίσταται σε μικρές ρωγμές βάθους περίπου 0.01 έως 0.1 mm.



Σχήμα 1.24: Αλλοίωση στην περιοχή των δίσκων λόγω της εμφάνισης ραγισμάτων [39].

Οξειδωση: Χημική προσβολή από την έκθεση του υλικού στο περιβάλλον (σκουριά).



Σχήμα 1.25: Αλλοίωση στην περιοχή του μεταλλικού άκρου του μονωτήρα [39].

Διαρροή λιπαντικού υλικού: Διαφυγή λιπαντικού υλικού από τη διεπιφάνεια μεταξύ δίσκου/ περιβλήματος ή περιβλήματος/περιβλήματος (π.χ. των συνδετικών δακτυλίων) επάνω στην επιφάνεια του περιβλήματος ή του δίσκου.



Σχήμα 1.26: Αλλοίωση στη διεπιφάνεια μεταξύ δίσκου και περιβλήματος του μονωτήρα [39].

Φωτοχημική προσβολή: Μη αντιστρέψιμη αποικοδόμηση της επιφάνειας του μονωτήρα από την απώλεια υλικού σε βάθος 1 mm. Παρατηρείται είτε ομοιόμορφα στο μονωτήρα είτε τοπικά, σε μία περιοχή του.



Σχήμα 1.27: Αλλοίωση στο περίβλημα/άτρακτο του μονωτήρα [39].

Μικρή αποσυναρμολόγηση: Αποσυναρμολόγηση προκύπτει μεταξύ διαφορετικών μερών του μονωτήρα και μπορεί να θεωρηθεί ως αλλοίωση και όχι ως βλάβη στο μονωτήρα (μείωση στο μήκος ερπυσμού λιγότερη από 10% ή μείωση στο πάχος του πολυμερούς περιβλήματος λιγότερη από 1mm) [39].



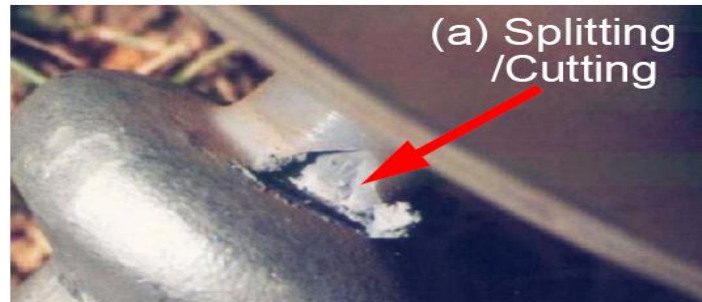
Σχήμα 1.28: Αλλοίωση στη διεπιφάνεια μεταξύ δίσκου και περιβλήματος του μονωτήρα [39].

1.6.3 Οπτική αναγνώριση ζημιών/βλαβών σε συνθετικούς μονωτήρες

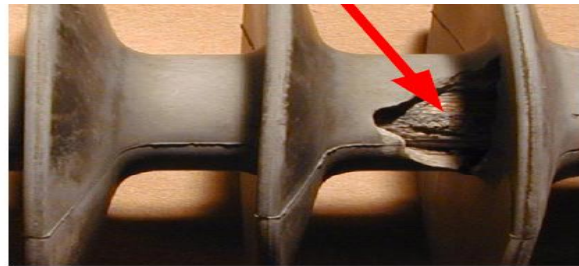
Βλάβη: Με τον όρο βλάβη προσδιορίζονται οι μεταβολές στο συνθετικό μονωτήρα που είναι το αποτέλεσμα φθορών ή σειράς αλλοιώσεων ή/και εξωτερικών επιδράσεων που περιλαμβάνει

απρόσεκτους χειρισμούς. Από τις ζημιές αναμένεται να υπάρχουν επιπτώσεις στην απόδοση ή/και τη διάρκεια ζωής του μονωτήρα.

Έκθεση πυρήνα μονωτήρα: Απευθείας επαφή του πυρήνα του μονωτήρα με το εξωτερικό περιβάλλον (εξαιτίας διάβρωσης, ραγισμάτων, ρωγμών ή απρόσεκτων χειρισμών) [39].



Σχήμα 1.29: Βλάβη στον πυρήνα του μονωτήρα λόγω έκθεσης του σε εξωτερικό περιβάλλον από θραύση/τομή εξαρτημάτων του [39].



Σχήμα 1.30: Βλάβη στον πυρήνα του μονωτήρα λόγω έκθεσης του σε εξωτερικό περιβάλλον από θραύση/τομή του πολυμερούς περιβλήματος [39].

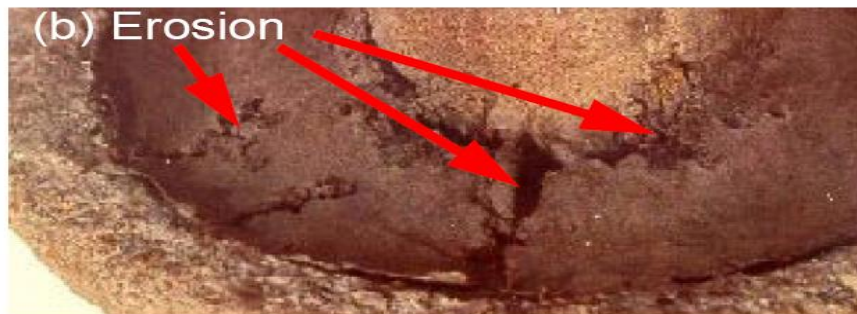
Σπάσιμο: Πλήρης διαχωρισμός διαφορετικών μερών ενός συνθετικού μονωτήρα, ο οποίος μειώνει δραστικά το μήκος ερπυσμού (περισσότερο από 10%) ή το πάχος του υλικού που εμποδίζει την είσοδο της υγρασίας στον πυρήνα, εσωτερικά του μονωτήρα (περισσότερο από 1 mm).



Σχήμα 1.31: Βλάβη στο πολυμερές περίβλημα εξαιτίας της μη συναρμογής των διαφορετικών μερών του μονωτήρα [39].

Διάβρωση: Μη αντιστρέψιμη αποσύνθεση της επιφάνειας του μονωτήρα, η οποία προκύπτει με σημαντική απώλεια υλικού και προκαλεί δραστική μείωση του πάχους του πολυμερούς περιβλήματος, το οποίο παρεμποδίζει την είσοδο της υγρασίας στον πυρήνα του μονωτήρα

(περισσότερο από 1 mm). Παρατηρείται είτε ομοιόμορφα στο μονωτήρα είτε τοπικά, σε μία περιοχή του.



Σχήμα 1.32: Βλάβη στο πολυμερές περίβλημα εξαιτίας της διάβρωσης [39].

Αποφλοίωση: Αποκόλληση του παρεμβύσματος από το άκρο του μονωτήρα. Η βλάβη θεωρείται όταν το σφράγισμα ανοίξει σε βάθος περισσότερο του 1 cm.



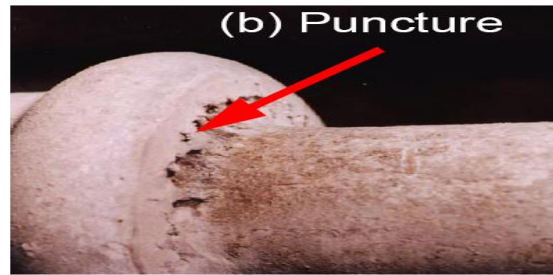
Σχήμα 1.33: Βλάβη στη διεπιφάνεια μεταξύ του πολυμερούς περιβλήματος και της εσοχής του (σφράγισμα) λόγω αποκόλλησής του [39].

Βλάβη ηλεκτρικού τόξου: Βλάβη η οποία προκύπτει από την υψηλή τιμή του ρεύματος και της θερμοκρασίας στο μεταλλικό άκρο του μονωτήρα μετά από υπερπήδηση.

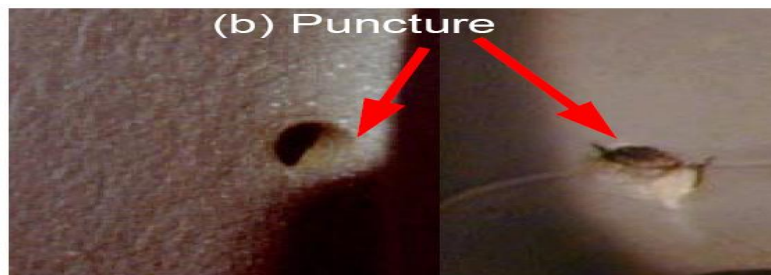


Σχήμα 1.34: Βλάβη στο μεταλλικό άκρο του μονωτήρα [39].

Διάτρηση: Δημιουργία οπής στο περίβλημα του μονωτήρα ή στο δίσκο.

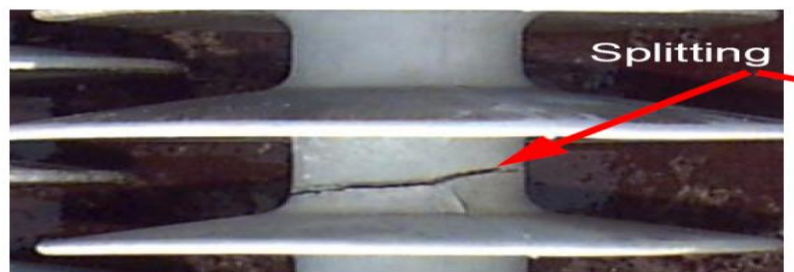


Σχήμα 1.35: Βλάβη στη διεπιφάνεια μεταξύ του πολυμερούς περιβλήματος και της εσοχής του (σφράγισμα) λόγω διάτρησης [39].



Σχήμα 1.36: Βλάβη στο περίβλημα του μονωτήρα λόγω διάτρησης [39].

Σπάσιμο/Σχίσσιμο: Σπάσιμο, σχίσσιμο ή ράγισμα που ενδέχεται να προκύψει στο πολυμερές κάλυμμα (περιβλήματος ή δίσκου) και να προκαλέσει μετακίνηση υλικού και ουσιαστική μείωση του μήκους ερπυσμού (περισσότερο από 10%) ή του πάχους του πολυμερούς περιβλήματος που παρεμποδίζει την είσοδο υγρασίας στον πυρήνα του μονωτήρα (περισσότερο από 1 mm).

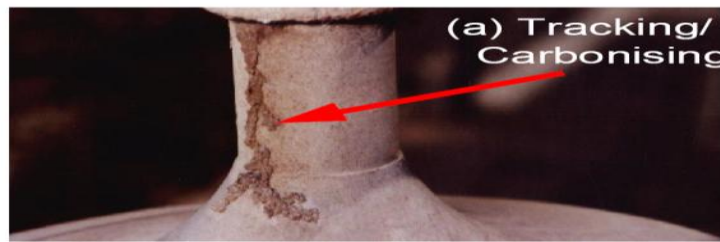


Σχήμα 1.37: Βλάβη στο περίβλημα μονωτήρα από σπάσιμο [39].

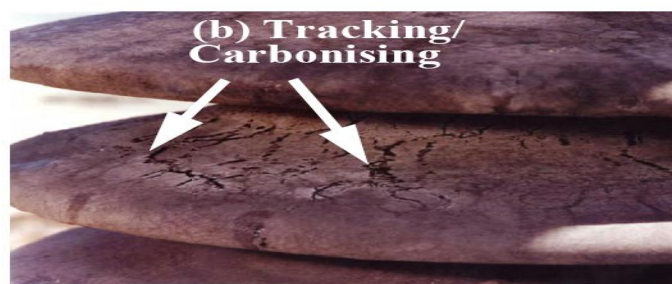


Σχήμα 1.38: Βλάβη στους δίσκους μονωτήρα με μείωση του μήκους ερπυσμού >10% από σπάσιμο [39].

Απανθράκωση: Μη αντιστρέψιμη αποσύνθεση της επιφάνειας του μονωτικού υλικού με το σχηματισμό αγώγιμων οδών (carbon tracks), οι οποίες παραμένουν αγώγιμες ακόμα και απουσία υγρασίας [39].



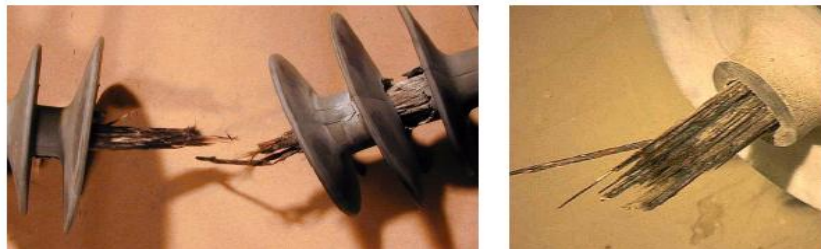
Σχήμα 1.39: Βλάβη στο περίβλημα μονωτήρα από αποσύνθεση της επιφάνειάς του [39].



Σχήμα 1.40: Βλάβη στους δίσκους μονωτήρα από αποσύνθεση της επιφάνειάς τους [39].

1.6.4 Οπτική αναγνώριση αστοχίας μονωτήρα

Μηχανική αστοχία: Σπάσιμο του πυρήνα των μονωτήρων, έτσι ώστε να μην είναι πλέον δυνατό να υποστηρίξουν το μηχανικό φορτίο.



Σχήμα 1.41: Μηχανική αστοχία πυρήνα από ίνες υάλου που δεν οφείλεται σε θραύση αλλά είναι αποτέλεσμα βλάβης στον πυρήνα του μονωτήρα από διάβρωση και απανθράκωση του υλικού [39].



Σχήμα 1.42: Μηχανική αστοχία πυρήνα μονωτήρα από ίνες σκληρυμένης υάλου [39].

Ηλεκτρική αστοχία: Μόνιμη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτήρα μετά από εκδήλωση του φαινομένου της υπερπήδησης, ώστε να μην είναι πλέον δυνατόν ο μονωτήρας να διατηρήσει τις διαφορές δυναμικού της εγκατάστασης [39].

1.6.5 Τρόποι βελτίωσης της απόδοσης και της διάρκειας ζωής συνθετικών μονωτήρων

Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των συνθετικών μονωτήρων είναι η πιο σημαντική και η πιο αβέβαιη παράμετρος που αντιμετωπίζουν τόσο οι χρήστες, όσο και οι κατασκευαστές. Τα σχέδια των μονωτήρων τρίτης γενιάς (τέλη 1980 έως τέλη 1990), τα οποία είναι σήμερα σε χρήση, αναμένεται να παρουσιάσουν ανώτερη απόδοση από τα σχέδια μονωτήρων πρώτης και δεύτερης γενιάς, τα οποία αρχικώς χρησιμοποιήθηκαν τη δεκαετία 1970 και 1980 αντίστοιχα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα πολυμερή υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των συνθετικών μονωτήρων θα υποστούν γήρανση με το χρόνο· εντούτοις, αυτό που είναι σημαντικό κατά τη διάρκεια χρήσης τους είναι να μην αστοχήσουν ή να μην επιτρέψουν ηλεκτρική υπερπήδηση. Ο μηχανισμός γήρανσης των συνθετικών μονωτήρων καθορίζεται από τον τύπο του πολυμερούς υλικού, το ποσοστό των πληρωτικών μέσων που προστίθενται, το έτος κατασκευής, την ποιότητα, το σχέδιο μονωτήρα, τις συνθήκες λειτουργίας και ηλεκτρικής καταπόνησης, τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας, τις συνθήκες εγκατάστασης, χειρισμού κ.λ.π..

Τα πολυμερή υλικά έχουν ασθενέστερους δεσμούς απ' ότι η πορσελάνη (ομοιοπολικοί σε αντίθεση προς ιοντικούς), που σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια των χρόνων που είναι σε χρήση μπορούν να μεταβληθούν από τις πολλαπλές τάσεις που ασκούνται κατά τη χρήση και τη λειτουργία τους. Με την κατάλληλη επεξεργασία των υλικών και του προορισμού των προϊόντων, τα πολυμερή μονωτικά υλικά παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και επιθυμητή διάρκεια ζωής [29]. Ένας συνδυασμός βέλτιστων συνθηκών σχεδιασμού και παραγωγής πρέπει να υλοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση και διάρκεια ζωής για μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας. Αυτό προϋποθέτει ότι ο επιστήμονας των υλικών θα σχεδιάσει το πολυμερές υλικό με τα κατάλληλα πρόσθετα στις απαραίτητες συγκεντρώσεις, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μεθόδους ανάμιξης. Ο σχεδιαστής του προϊόντος πρέπει να λάβει υπόψη του τόσο τις ιδιότητες, όσο και την εφαρμογή του. Πρέπει ακόμη να συνυπολογιστούν οι συνθήκες παραγωγής, ώστε να μην αποσυντίθεται το προϊόν κατά την παραγωγή του.

Η απόδοση ενός πολυμερούς και η διάρκεια λειτουργίας του αποτελούν κύριο μέλημα του χρήστη. Ο σχηματισμός πολυμερών υλικών είναι ένας συνδυασμός βέλτιστων συνθηκών οι οποίες μπορούν να επιτευχθούν με εκτενείς πειραματισμούς και δοκιμές, μέσα από βαθιά γνώση και εμπειρία της τεχνολογίας των υλικών. Ο σχηματισμός του πολυμερούς υλικού μπορεί να ποικίλλει με ένα βασικό πολυμερές να συνιστά το 20%-80% κατά βάρος του υλικού. Πρόσθετα χρησιμοποιούνται εκτενώς, ώστε να ενισχύονται οι μηχανικές ιδιότητες. Στα συνήθη πληρωτικά υλικά που ενισχύουν τις ιδιότητες των πολυμερών υλικών περιλαμβάνονται αντιοξειδωτικά, πλαστικοποιητές, χρωστικές ουσίες, άλλα μέσα, βοηθητικά, καταλύτες, παρεμποδιστές ανάφλεξης, απορροφητές υπεριώδους ακτινοβολίας, αντιδιαβρωτικά και άλλα, τα οποία εξαρτώνται κάθε φορά από τον ειδικό σχεδιασμό. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, τα πρόσθετα και τα πληρωτικά υλικά, τόσο όλα μαζί, όσο και ανεξάρτητα το καθένα, επηρεάζουν την ολική απόδοση του υλικού.

Η δομή των πολυμερών υλικών (εύκαμπτοι δεσμοί, ευκινησία των μακρών αλυσίδων) παρέχει πολλά από τα εγγενή πλεονεκτήματα των πολυμερών. Παρ' όλ' αυτά, καθώς όλα τα πολυμερή υλικά είναι οργανικά, συνεχόμενη καταπόνηση κατά τη χρήση τους οδηγεί, όπως αναφέρθηκε και

παραπάνω, σε απώλεια των ιδιοτήτων επί της επιφάνειας του υλικού και των χαρακτηριστικών της αντίστασης έναντι στη ρύπανση. Η απώλεια αυτή περιορίζεται, εάν ενισχύονται με κατάλληλα πρόσθετα και καλύμματα που περιορίζουν το ρεύμα διαρροής. Η αναγνώριση των παραπάνω, σε συνδυασμό με την απόκτηση εμπειρίας στην επιστήμη των υλικών, οδηγεί στο σχεδιασμό προϊόντων με αποδεδειγμένα υψηλά επίπεδα απόδοσης σε πληθώρα εφαρμογών.

1.6.5.1 Εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός συνθετικού μονωτήρα

Ένας γρήγορος έλεγχος, ο οποίος χρησιμοποιείται συχνά για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ενός προϊόντος, δεν είναι πάντα κατατοπιστικός. Γι' αυτό, πρέπει κανείς να είναι πολύ προσεκτικός στη διεξαγωγή τέτοιων ελέγχων, καθώς οι συνθήκες συνήθως δεν μπορούν να επισπευτούν και είναι πιθανό να προκύψουν άτυπες καταπονήσεις ή αστοχίες. Το δείγμα δεν πρέπει να υπόκειται σε μηχανισμούς που δεν προκύπτουν κατά τη λειτουργία. Μία συνηθισμένη τακτική που επικυρώνει το χρόνο ζωής είναι η υποβολή των δειγμάτων σε ελέγχους εφαρμογής Υπερυψηλής Τάσης (Υ.Υ.Τ.) [37]. Η εξίσωση που ακολουθεί χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής:

$$\text{Προβλεπόμενη διάρκεια ζωής} = \text{Διάρκεια ελέγχου} * \left(\frac{\text{Εφαρμοζόμενη τάση (kV)}}{\text{Ονομαστική τάση λειτουργίας (kV)}} \right)^n$$

όπου n: εκθέτης που αντιπροσωπεύει τον παράγοντα επιτάχυνσης του ελέγχου εφαρμογής τάσης και μπορεί να είναι της τάξης του 5 (οπότε πρόκειται για μια συντηρητική προσέγγιση) ή της τάξης του 8 (οπότε αφορά σε μια μάλλον πιο ακραία προσέγγιση).

1.6.5.2 Κριτήρια τέλους διάρκειας ζωής συνθετικών μονωτήρων

Από την οπτική του χρήστη, το τέλος ζωής θεωρείται συνήθως εκείνο το χρονικό σημείο στο οποίο το προϊόν αστοχεί και δεν μπορεί να παραμείνει σε λειτουργία.

Τα κριτήρια τέλους ζωής των πολυμερών υλικών καθορίζονται από τους τεχνικούς ανάπτυξης των υλικών ως ένας ελάχιστος συνδυασμός φυσικών ιδιοτήτων, οι οποίες είναι επιθυμητές σε εφαρμογές χρήσης εξωτερικού χώρου, μετά από γήρανση πραγματικού χρόνου ή μετά από τεχνητά επιβαλλόμενη (accelerated) γήρανση. Για τα πολυμερή υλικά, η τάση εφελκυσμού και η επιμήκυνση είναι δύο συνήθεις ιδιότητες, οι οποίες μελετώνται συχνά και εξετάζονται κατά το στάδιο εφαρμογής του προϊόντος. Κατά την ανάπτυξη των υλικών στον όμιλο Raychem, η τάση και η επιμήκυνση συνήθως μετρώνται μετά από τη διεξαγωγή ελέγχων στη συγκράτηση ρυπαντών και στην αντοχή έναντι της διάβρωσης (TERT), τη γρήγορη έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία, είτε φυσική είτε εργαστηριακή, και τη θερμική γήρανση. Επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής μπορούν να βρεθούν θεωρώντας ένα χαρακτηριστικό πολυμερές υλικό.

Ο προσδιορισμός της γήρανσης ενός υλικού λόγω έκθεσης σε θερμότητα προβλέπεται με τη μέθοδο Arrhenius, στην οποία τα κριτήρια του τέλους του χρόνου ζωής καθορίζονται από γρήγορη θερμική γήρανση και τα δεδομένα που συγκεντρώνονται ανάγονται σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας και σε ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας [37].

Για την περίπτωση της θερμικής καταπόνησης εξάγεται εύκολα ένα μαθηματικό μοντέλο διάρκειας ζωής, επειδή ο φυσικός μηχανισμός της θερμικής υποβάθμισης είναι γνωστός. Αυτός ο μηχανισμός βασίζεται στην επιτάχυνση των χημικών αντιδράσεων, εξαιτίας της θερμοκρασιακής αύξησης. Η εξίσωση για τη διάρκεια ζωής μπορεί να προκύψει ξεκινώντας από την εξίσωση του Arrhenius και θέτοντας την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων ίση με το ρυθμό γήρανσης ή θερμικής υποβάθμισης, δηλαδή το ρυθμό υποβάθμισης των φυσικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με την κατάρρευση.

1.6.5.3 Συντελεστές απόδοσης συνθετικών μονωτήρων

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι συντελεστές απόδοσης των μονωτήρων από πολυμερή υλικά, οι παράγοντες που τους επηρεάζουν και ο τρόπος βελτίωσής τους.

Συντελεστές απόδοσης	Εξάρτηση των συντελεστών απόδοσης	Τρόποι βελτίωσης των συντελεστών απόδοσης
Χρόνος ζωής / λειτουργίας	Ιδιότητες υλικών	Τυποποίηση προϊόντος και παραγωγικής διαδικασίας
Υπερπήδηση	Σχηματισμός ξηρών ζωνών	Έλεγχος ρεύματος διαρροής ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης πολυμερούς υλικού και γεωμετρίας μονωτήρα
Καταστροφή λόγω διάβρωσης	Απώλεια της υδροφοβικότητας	Τυποποίηση υλικού με επαρκή αντίσταση στη διάβρωση
Μηχανική αντοχή	Ιδιότητες υλικών	Τυποποίηση υλικού παραγωγικής διαδικασίας, γεωμετρίας μονωτήρα

Πίνακας 1.5: Συντελεστές απόδοσης συνθετικών μονωτήρων, παράγοντες που τους επηρεάζουν και τρόποι βελτίωσής τους [37].

Υπολογισμός Ηλεκτρικού Πεδίου & Κατανομή Δυναμικού

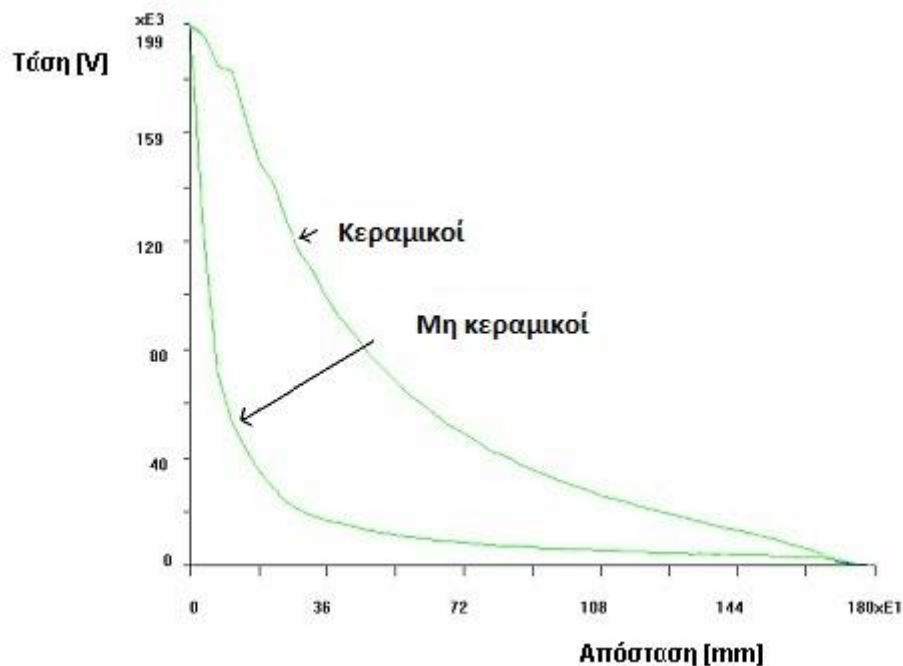
2.1 Γενικά

Η σπουδαιότητα της πεδιακής μελέτης και ανάλυσης στο εσωτερικό, στην επιφάνεια, καθώς και σε περιοχές του χώρου γύρω από ηλεκτρικές διατάξεις και συσκευές έγκειται στο γεγονός ότι η κατανομή του πεδίου επηρεάζει σημαντικά την ηλεκτρική συμπεριφορά αυτών. Η σπουδαιότητα αυτή αποκτά ακόμη μεγαλύτερο βάρος όταν οι υπό μελέτη διατάξεις είναι μονωτήρες, αφού ο έλεγχος του ηλεκτρικού πεδίου αποτελεί σημαντική παράμετρο κατά τη φάση του σχεδιασμού τους. Εξάλλου, οι μονωτήρες διαδραματίζουν ιδιαίτερα κρίσιμο ρόλο στην αξιοπιστία του συστήματος μεταφοράς, όπως αναφέρθηκε στο 1^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Δεν είναι λίγες οι εργασίες που έχουν ήδη εκπονηθεί και αφορούν στην πεδιακή μελέτη και ανάλυση κεραμικών μονωτήρων [8, 11, 12, 13]. Η κατανομή της τάσης κατά μήκος αλυσειδών (και άρα κεραμικών) μονωτήρων εμφανίζει κάποια ανομοιομορφία, λόγω της ύπαρξης παράσιτων χωρητικότητων προς γη και προς τον αγωγό Υψηλής Τάσης που παρουσιάζουν οι μεταλλικοί οπλισμοί του κάθε δισκοειδούς μονωτήρα. Ωστόσο, η κατανομή αυτή είναι γραμμικότερη σε σχέση με την αντίστοιχη κατά μήκος συνθετικών μονωτήρων, λόγω της ύπαρξης ενδιάμεσων μεταλλικών μερών στους κεραμικούς μονωτήρες. Έτσι, η ανομοιομορφία της κατανομής της τάσης είναι ακόμη εντονότερη στους μη κεραμικούς μονωτήρες, όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει από το ακόλουθο σχήμα.

Όσον αφορά στο ηλεκτρικό πεδίο, αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές κοντά στο ενεργό (προς τον αγωγό Υ.Τ.), καθώς και στο γειωμένο άκρο (προς τον πυλώνα), δημιουργώντας μια επίσης ανομοιομορφη κατανομή και προκαλώντας φαινόμενο corona, με ό,τι αρνητικές επιπτώσεις συνεπάγεται αυτό (φωτεινές μερικές εκκενώσεις, απώλειες ενέργειας, παρεμβολές σε γειτονικούς τηλεοπτικούς ή ραδιοφωνικούς δέκτες, καθώς και πρόωρη γήρανση των συνθετικών μονωτήρων, όπως περιγράφηκε στο 1^ο Κεφάλαιο).

Πέραν όμως της έντονης ανομοιομορφίας στην κατανομή της τάσης και του πεδίου, είναι και η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των συνθετικών μονωτήρων που καθιστά τη μελέτη και ανάλυση του ηλεκτρικού πεδίου και της τάσης ενδιαφέρουσα και αναγκαία, τόσο για τη βελτιστοποίηση σε επίπεδο σχεδιασμού, όσο και για την πιο αξιόπιστη λειτουργία τους.



Σχήμα 2.1: Η κατανομή της τάσης σε κεραμικούς και μη κεραμικούς μονωτήρες [40].

Η αυξανόμενη αυτή χρήση δικαιολογείται, λόγω των πλεονεκτημάτων που συγκεντρώνουν οι συνθετικοί έναντι των κεραμικών μονωτήρων: το χαμηλότερο βάρος, η ευκολία χειρισμών (π.χ. κατά τη μεταφορά ή εγκατάστασή τους), το μειωμένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, η μεγαλύτερη αντίσταση σε βανδαλισμούς και κυρίως η καλύτερη απόδοση έναντι της ρύπανσης είναι τα βασικότερα από αυτά.

Αν και η κατανομή της τάσης και του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να εκτιμηθεί με πειραματικές μετρήσεις σ' ένα πλήρως εξοπλισμένο εργαστήριο Υ.Τ., εντούτοις οι μετρήσεις αυτές χρειάζονται σημαντικό χρόνο (συχνά απαιτώντας έναν αρκετά μεγάλο πλήθος «δοκιμών και λάθους») και απαιτούν επιπλέον πόρους για να διεξαχθούν. Ακόμη, για την εκτίμηση των μεγεθών αυτών (πεδίου & τάσης) σε διαφορετικού τύπου και διαστάσεων μοντέλα (όπως π.χ. για τη σύγκριση διαφόρων διαστάσεων μονωτήρων ή διαφόρων γεωμετριών πυλώνων ή συνδυασμού αυτών) απαιτείται εκ νέου διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων, με αποτέλεσμα ακόμη περισσότερο χρονοβόρες διαδικασίες και υψηλότερα κόστη εξοπλισμού.

Για όλους αυτούς τους λόγους, ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος συνθετικών μονωτήρων προβάλλει ως ο μοναδικός οικονομικός και αποτελεσματικός τρόπος εκτίμησης.

2.2 Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού

Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell, όλα τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μπορούν να εκφραστούν μέσω μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες ικανοποιούν τις εκάστοτε οριακές συνθήκες. Με τη χρήση της συνάρτησης Green, οι μερικές αυτές διαφορικές εξισώσεις μπορούν να μετατραπούν σε ολοκληρωτικές [1].

Για την επίλυση των προβλημάτων πεδίου, των οποίων η πολυπλοκότητα είτε της υφιστάμενης γεωμετρίας είτε του θεωρούμενου μέσου καθιστά αδύνατη την αναλυτική επίλυσή τους, συχνά

καταφεύγει κανείς στη χρησιμοποίηση διαφόρων αριθμητικών μεθόδων. Ο υπολογισμός του πεδίου σε μονωτήρες σαφώς αποτελεί ένα τέτοιου είδους πρόβλημα, αφ' ενός διότι ο απομονωμένος μονωτήρας αποτελεί πολύπλοκο γεωμετρικά σώμα, αφ' ετέρου επειδή, λαμβάνοντας υπόψη δευτερεύουσες γεωμετρίες, όπως το τοροειδές εξομόλυνσης, τον αγωγό φάσης ή τη διαμόρφωση του πυλώνα μαζί με τις άλλες δύο φάσεις, το υπό μελέτη μοντέλο γίνεται ακόμη πιο περίπλοκο. Επιπλέον, οι χαρακτηριστικές διαστάσεις του πλήρους μοντέλου κυμαίνονται σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος τριών, τεσσάρων ή ακόμα περισσότερων τάξεων μεγέθους. Ενδεικτικά, η ακτίνα των 2-3 mm στους ακροδέκτες του μονωτήρα, συγκρινόμενη με ένα ύψος πυλώνα 40-50 m αποφέρει μια διαφορά τεσσάρων τάξεων μεγέθους, οδηγώντας κατ' αυτόν τον τρόπο στην κατασκευή ενός μοντέλου στο οποίο η υπό μελέτη, μικρότερης κλίμακας, περιοχή κοντά στο μονωτήρα θα πρέπει να θεωρηθεί σε συνδυασμό με τη συνολική, μεγαλύτερης κλίμακας, διάταξη του πυλώνα. Αποτέλεσμα της μεγάλης αυτής διακύμανσης των διαφόρων διαστάσεων του μοντέλου είναι να καθίσταται εξαιρετικά δυσχερής η προσέγγιση της λύσης του προβλήματος μέσω αναλυτικών τεχνικών. Έτσι, οι επιδράσεις που έχουν στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου οι δευτερεύουσες, από πλευράς ενδιαφέροντος, γεωμετρίες του πυλώνα και της υπόλοιπης γραμμής μεταφοράς μπορούν εύκολα και γρήγορα να μελετηθούν και να αξιολογηθούν με τη βοήθεια λογισμικών που κάνουν χρήση αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού (τα Coulomb, ANSYS/Emag, Mawell 3D και Flux 3D είναι μερικά απ' τα πιο δημοφιλή).

Παρ' όλα αυτά, «ουδέν καλόν αμιγές κακού» έλεγαν οι αρχαίοι μας πρόγονοι και στην περίπτωση των αριθμητικών μεθόδων βγαίνουν αληθινοί, καθώς το πλεονέκτημα ότι επιλύονται προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες και μη γραμμικά μέσα «αντισταθμίζεται» από το γεγονός ότι δεν επιτυγχάνεται η εύρεση της ακριβούς λύσης του προβλήματος, αλλά μιας προσεγγιστικής λύσης, η οποία όμως, όταν γίνεται κατάλληλη χρήση των μεθόδων, παρέχει την επιθυμητή ακρίβεια. Η διαφορά αυτή προκύπτει, διότι δεν επιλύεται το συνεχές πρόβλημα, όπως αυτό εκφράζεται από τις διαφορικές εξισώσεις του πεδίου, αλλά επιλύεται κάποιο αντίστοιχο διακριτό.

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

✚ την εκλογή αρκετών κόμβων, ώστε το διακριτό πρόβλημα να προσεγγίζει αρκετά το αντίστοιχο συνεχές και τα αποτελέσματα να έχουν την επιδιωκόμενη ακρίβεια και

✚ την εκλογή λίγων κόμβων, ώστε το σύστημα εξισώσεων που θα προκύψει να επιλυθεί σε «λογικό» χρόνο από το διατιθέμενο ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το σφάλμα προσέγγισης εξαρτάται μεν από τη διακριτότητα, είναι δε στενά συνυφασμένο με το είδος της χρησιμοποιούμενης μεθόδου [11].

2.2.1 Κατηγοριοποίηση αριθμητικών μεθόδων

Οι διάφορες αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις διαφορικές και τις ολοκληρωτικές μεθόδους. Όσον αφορά στη δυνατότητα εφαρμογής κάθε κατηγορίας, μια διαφορική μέθοδος μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, υπό την προϋπόθεση ότι το ηλεκτρικό πεδίο θα έχει σαφώς καθορισμένα όρια και δεν θα εκτείνεται μέχρι το άπειρο, ενώ με μια ολοκληρωτική μέθοδο μπορούν να επιλυθούν και ηλεκτρικά πεδία εκτεινόμενα ως το άπειρο [3]. Με άλλα λόγια, οι διαφορικές μέθοδοι φαίνονται κατάλληλες για κλειστά προβλήματα, προβλήματα δηλαδή με περιορισμένες οριακές συνθήκες (*limited boundary conditions*), όπως είναι η μοντελοποίηση μετασχηματιστών ισχύος και ηλεκτρικών μηχανών, ενώ οι ολοκληρωτικές μέθοδοι προτιμώνται σε ανοικτά προβλήματα, σε προβλήματα δηλαδή όπου έχουμε ανοικτές οριακές συνθήκες (*open boundary conditions*), όπως είναι η μοντελοποίηση γραμμών μεταφοράς.

Η μέθοδος των διαδοχικών επαναλήψεων, γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών» (*Finite Difference Method, FDM*) και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method, FEM*) ανήκουν στις διαφορικές μεθόδους, ενώ στις ολοκληρωτικές υπάγονται η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων, γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «μέθοδος προσομοίωσης φορτίου» (*Charge Simulation Method, CSM*) και η μέθοδος των επιφανειακών τμημάτων, γνωστή και ως «μέθοδος των οριακών στοιχείων» (*Boundary Element Method, BEM*).

Στην CSM η συνεχής πυκνότητα φορτίου στην επιφάνεια των αγωγών με οριακές συνθήκες αντικαθίσταται από πεπερασμένα εικονικά φορτία, τα οποία κατανέμονται στον όγκο των τελευταίων. Στη BEM 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.

Συγκρίσεις ανάμεσα στις διαφορετικές αριθμητικές μεθόδους έχουν δείξει ότι οι προσεγγίσεις μέσω CSM και BEM υπερτερούν λόγω χαμηλότερης πολυπλοκότητας και, ως εκ τούτου, μικρότερης χρονικής διάρκειας στο στάδιο της μοντελοποίησης. Οι διαφορικές μέθοδοι (FEM & FDM) έχουν το μειονέκτημα ότι για μια ανάλυση πεδίου με ανοικτές οριακές συνθήκες χρειάζονται ένα υπερβολικά μεγάλο πλήθος στοιχείων ή γραμμών πλέγματος, προκειμένου να μοντελοποιηθεί ο χώρος και οι άπειρης έκτασης περιοχές του. Ωστόσο, κερδίζουν έδαφος έναντι των προηγούμενων, καθώς σημαντικά λιγότερος χρόνος 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 [41].

2.2.2 Συνδυασμός αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού

Συχνά, στα προς επίλυση προβλήματα ηλεκτρικών πεδίων, παρουσιάζονται διαφορετικής φύσης και γεωμετρίας σώματα (όπως π.χ. τα τοροειδή εξομάλυνσης, οι πυλώνες, οι αγωγοί φάσης και προστασίας απ' τη μια και οι μονωτήρες απ' την άλλη), ώστε μια απομονωμένη αριθμητική μέθοδος να μην είναι αρκετή για να δώσει ικανοποιητική λύση.

Πηγαίνοντας αρκετά χρόνια πίσω, στο 1975, ο Καθηγητής Hans Prinz [3] πρότεινε, κλείνοντας το δεύτερο διεθνές συμπόσιο Υψηλής Τάσης στη Ζυρίχη, το συνδυασμό της μεθόδου των ισοδυνάμων φορτίων (CSM) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), εκφράζοντας τη γνώμη πως θα μπορούσε έτσι να δημιουργηθεί μια νέα μέθοδος υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων, η οποία θα

αξιοποιούσε τα πλεονεκτήματα και των δύο αυτών μεθόδων. Η πεποίθηση του μεγάλου αυτού επιστήμονα δικαιώθηκε, έστω και μετά θάνατον, όταν ο στενότερος συνεργάτης του Dr. Hans Steinbigler [3], το 1979, και κατά τη διάρκεια του τρίτου διεθνούς συμποσίου Υψηλής Τάσης στο Μιλάνο, παρουσίασε την **υβριδική μέθοδο**, μια απ' τις πιο σύγχρονες αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων.

Ανεξάρτητα της παραλλαγής της υβριδικής μεθόδου που χρησιμοποιείται (είτε η ευθεία μέθοδος είτε η μέθοδος των διαδοχικών διορθώσεων), ο χώρος στον οποίο εκτίθεται το προς υπολογισμό ηλεκτρικό πεδίο χωρίζεται σε δύο περιοχές: σε μια περιοχή C (όπου το πεδίο υπολογίζεται με τη μέθοδο των ισοδυνάμων φορτίων, CSM) και σε μια περιοχή F (όπου το πεδίο υπολογίζεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, FEM). Στην C τα επιφανειακά φορτία των αγωγών αντικαθίστανται κατά τα γνωστά από φανταστικά (εικονικά) φορτία τοποθετημένα στο εσωτερικό αυτών, ενώ σε κάθε ιδεατό φορτίο αντιστοιχίζεται και ένα σημείο της επιφάνειας των αγωγών (επιφανειακά σημεία). Τα πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία χωρίζεται η F, είναι είτε τετράεδρα είτε τρίγωνα (αν πρόκειται για υπολογισμό πεδίων συμμετρικών εκ περιστροφής). Ο συσχετισμός ανάμεσα στις δύο περιοχές (C & F) στηρίζεται στο γεγονός πως το δυναμικό και η πεδιακή ένταση δεν θα πρέπει να εμφανίζουν ασυνέχειες στο σύνορο των δύο αυτών περιοχών. Ανεξάρτητα της παραλλαγής της υβριδικής μεθόδου που εφαρμόζεται, επιλέγονται κατόπιν αυτού διακεκριμένα σημεία στο σύνορο των δύο περιοχών και για τα σημεία αυτά απαιτείται η εξασφάλιση της συνθήκης συνέχειας του δυναμικού και της πεδιακής έντασης. Τέλος, είναι απαραίτητο σε καθένα «συνοριακό» σημείο να αντιστοιχισθεί ένα φανταστικό φορτίο τοποθετημένο εκτός της περιοχής C, όπως με την τοποθέτηση φανταστικών φορτίων στο εσωτερικό των αγωγών [3].

Ένα παράδειγμα μιας άλλης «υβριδικής μεθόδου» αποτελεί ο συνδυασμός της BEM με την CSM για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης από πυλώνες γραμμής μεταφοράς Υ.Τ., όπως παρουσιάστηκε στο άρθρο [42]. Η CSM είναι αρκετά αποτελεσματική στο να υπολογίζει το πεδίο που δημιουργείται από πυλώνες και γραμμές μεταφοράς, αλλά είναι αναποτελεσματική στον υπολογισμό του πεδίου ενός πολύπλοκου, ετερογενούς μέσου, όπως είναι ο συνθετικός μονωτήρας. Η BEM μπορεί να συμπληρώσει αυτή την αδυναμία, αφού μπορεί να μετατρέψει το πεδίο ενός πολύπλοκου ετερογενούς μέσου σ' αυτό ενός ομογενούς μέσου, αλλά απ' την άλλη δεν ενδείκνυται για τον υπολογισμό του πεδίου που δημιουργείται από νηματοειδείς μεταλλικές δομές, όπως ο πυλώνας και οι γραμμές μεταφοράς.

Αρχικά, ο πυλώνας, οι αγωγοί φάσης και οι αγωγοί προστασίας χωρίζονται σε μικρά τμήματα. Την ίδια στιγμή, οι επιφάνειες των συνθετικών μονωτήρων διαιρούνται σε μικρά οριακά στοιχεία. Έστω ότι υπάρχουν N τμήματα και M οριακά στοιχεία. Σε κάθε μικρό τμήμα και σε κάθε οριακό στοιχείο θεωρούνται ένα γραμμικό φορτίο και ένα επιφανειακό φορτίο ως άγνωστοι, αντίστοιχα. Έχουμε έτσι μια ομάδα $M \times N$ αγνώστων η οποία σχηματίζει ένα σύστημα εξισώσεων, με την επίλυση του οποίου μπορούν να ληφθούν οι γραμμικές πυκνότητες φορτίου των τμημάτων και οι επιφανειακές πυκνότητες φορτίου των οριακών στοιχείων, αντίστοιχα [42].

Ένα παρόμοιου τύπου «πάντρεμα» μεθόδων παρουσιάζεται στο άρθρο [43]. Εδώ, αντί της CSM χρησιμοποιείται -για τους ίδιους λόγους- η μέθοδος των ροπών ή αλλιώς MoM (*Moment Method*). Αρχικά, ο πυλώνας, τα τοροειδή εξομάλυνσης, οι αγωγοί φάσης και προστασίας χωρίζονται σε μικρά τμήματα. Συγχρόνως, οι επιφάνειες των συνθετικών μονωτήρων διαιρούνται σε μικρά οριακά στοιχεία, όπως και πριν. Δημιουργείται και πάλι μια ομάδα $M \times N$ αγνώστων, όπου όμως αντί του γραμμικού φορτίου θεωρείται ένα ρεύμα διαρροής ως άγνωστη μεταβλητή σε κάθε μικρό τμήμα. Η διαφοροποίηση αυτή καθιστά το συνδυασμό αυτό πλεονεκτικότερο σε σχέση με τον προηγούμενο, καθώς χάρη στη MoM μπορεί να ληφθεί υπόψη όχι μονάχα η επιτρεπτότητα, αλλά και η αντίσταση

του μέσου, χρησιμοποιώντας τη μιγαδική αντίσταση¹ και τα ρεύματα διαρροής ως άγνωστες μεταβλητές. Συνεπώς, η MoM μπορεί να υπολογίσει το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από τον πυλώνα σε ορισμένη συχνότητα λειτουργίας (και όχι μόνο σε dc), ενώ οι διαφορές φάσης μεταξύ των αγωγών του τριφασικού συστήματος μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη. Ένα άλλο πλεονέκτημα της MoM είναι ότι δεν χρειάζεται να ορίζει το δυναμικό για κάθε τμήμα. Καθώς ένα ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί να δημιουργηθεί βασισμένο στη MoM, το δυναμικό κάθε τμήματος ορίζεται από το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα. Αν στην περίπτωση του πρώτου συνδυασμού (CSM & BEM) γίνει χρήση της μιγαδικής αντίστασης, τότε η CSM και η MoM θα έχουν τα ίδια αποτελέσματα, διότι η αντίσταση του μεταλλικού τμήματος είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν του αέρα και κάθε συνδεδεμένο μέρος είναι σχεδόν ισοδυναμικό [43].

2.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM)

2.3.1 Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αναπτύχθηκε αρχικά κατά τη δεκαετία του 1940. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις, στην οποία παρουσιάσθηκε η βασική ιδέα της μεθόδου, ήταν εκείνη των Turner, Clough, Martin, και Topp το 1956, ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγραφεί μερικά χρόνια νωρίτερα από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Ιωάννη Ν. Αργύρη και των συνεργατών του την περίοδο 1954-60. Αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι ο Ιωάννης Ν. Αργύρης θεωρείται από πολλούς ως ο «εφευρέτης» της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και αποτελεί μία από τις διαπρεπέστερες επιστημονικές προσωπικότητες παγκοσμίως στον τομέα της Υπολογιστικής Μηχανικής.

Εντούτοις, η FEM γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη μετά τη δεκαετία του 1970, λόγω της σημαντικής αύξησης της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Μέχρι τότε εφαρμοζόταν στην αεροναυπηγική (για τον υπολογισμό μηχανικών καταπονήσεων, στις οποίες υπόκεινται οι πτέρυγες αεροσκαφών ή άλλα τμήματά τους) και στην αμυντική και πυρηνική βιομηχανία, αλλά το εύρος χρήσης της ήταν σχετικά περιορισμένο. Στην εποχή μας οι διαθέσιμοι υπερυπολογιστές καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό ακριβών αποτελεσμάτων για όλων των ειδών τις παραμέτρους. Ενδεικτικό της προόδου της τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι οι σημερινοί προσωπικοί υπολογιστές είναι 10 φορές περίπου πιο ισχυροί από τους υπερυπολογιστές της δεκαετίας του 1980 [44, 45].

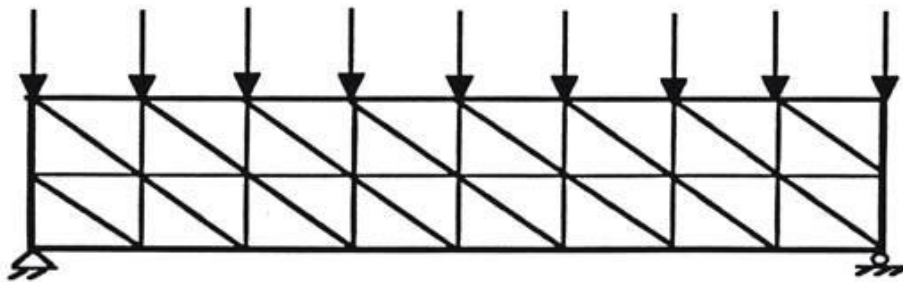
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για όσους ασχολούνται με το βιομηχανικό και μηχανολογικό σχεδιασμό και χρησιμοποιείται ευρύτατα σε

¹ Προκειμένου να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς όχι μονάχα η επιτρεπτότητα, αλλά και η αντίσταση (ή αλλιώς η αγωγιμότητα) του μέσου, χρησιμοποιείται η μιγαδική αντίσταση η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho}{1+j\omega\epsilon\rho} \quad (2.1)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση, ϵ η διηλεκτρική σταθερά του μέσου και ω η κυκλική συχνότητα λειτουργίας [40].

διάφορα επιστημονικά πεδία, όπως είναι ο σχεδιασμός της δομικής αντοχής κατασκευών, η ανάλυση του Shock, η ακουστική, η θερμική ανάλυση, η μελέτη των δονήσεων, η προσομοίωση των συγκρούσεων, τα προβλήματα λυγισμού, οι δυναμικές αναλύσεις κ.α.. Συγκεκριμένα, τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης [44], αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα, όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για την επίλυση δε προβλημάτων με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού, έγινε χρήση επαναληπτικής διαδικασίας.



Σχήμα 2.2: Χρήση τριγωνικών στοιχείων για τη διακριτοποίηση αμφιέριστης δοκού υπό καμπτική φόρτιση [44].

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αναγνωρίστηκε ότι η μέθοδος αποτελεί συγκεκριμένη μορφή της μεθόδου Ritz και το 1964 οι Zienkiewicz και Cheung έδειξαν ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα πεδίου που έχουν μεταβολική διατύπωση [44].

Πέραν όμως των αμιγώς μηχανολογικών ή βιομηχανικών εφαρμογών, η FEM γνωρίζει σήμερα ευρύτατη ανάπτυξη και σε εφαρμογές συναφείς με τις επιστήμες υγείας. Χρησιμοποιείται στην εμβιομηχανική της σπονδυλικής στήλης ήδη από τη δεκαετία του 1970, έχει επομένως ξεπεράσει τα 35 έτη εφαρμογής στον τομέα αυτό. Χάρη στη FEM, κατέστη δυνατή η προσομοίωση και μελέτη διαφόρων φυσιολογικών και παθολογικών καταστάσεων της σπονδυλικής στήλης, ενώ μελετήθηκε η επάρκεια και οι εμβιομηχανικές ιδιότητες της χρήσης υλικών οστεοσύνθεσης και σπονδυλοδεσίας που τοποθετούνται σε όλο το μήκος της. Τα αποτελέσματα που παρέχει η FEM χρησιμεύουν στην επίλυση τόσο ερευνητικών, όσο και κλινικών προβλημάτων και έχουν καταστήσει τη μέθοδο αυτή απαραίτητο συμπλήρωμα των πειραματικών μεθόδων [45].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην επιστήμη του ηλεκτρολόγου μηχανικού το 1965. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται σε όλο και μεγαλύτερη έκταση για τον υπολογισμό ηλεκτροστατικών και μαγνητοστατικών πεδίων. Επιπλέον, επεκτάθηκε και στα μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ενώ χρησιμοποιείται ευρέως ως η βασική αριθμητική μέθοδος υπολογισμού για την ανάλυση ποσοτήτων (quantity analysis) και για το βέλτιστο σχεδιασμό των προβλημάτων που αφορούν σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία και κύματα [11]. Επίσης, οι εφαρμογές της μεθόδου δεν περιορίζονται σε δισδιάστατα, ούτε σε γραμμικά μόνο προβλήματα, αλλά επεκτείνονται και σε τρισδιάστατα μη γραμμικά προβλήματα με απλή ή πολύπλοκη γεωμετρία. Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αριθμητική επίλυση πεδριακών προβλημάτων τόσο σε μόνιμες όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις. Η ευρύτατη χρήση της μεθόδου έχει ευνοήσει την ανάπτυξη πολλών προγραμμάτων-πακέτων, τα οποία επιτρέπουν την εύκολη προσαρμογή της για την επιτυχή επίλυση ποικίλων προβλημάτων, μεταξύ αυτών το ANSYS

ή το Opera 3d (OPERating environment for Electromagnetic Research and Analysis), το οποίο και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

2.3.2 Τι είναι τα πεπερασμένα στοιχεία-μαθηματικό υπόβαθρο της FEM

Έστω το γενικό πρόβλημα συνοριακών τιμών:

$$\begin{cases} Lu = f \text{ στο } \Omega \\ \text{συνοριακές συνθήκες στο } \Gamma \end{cases} \quad (2.2)$$

όπου Ω είναι μια περιοχή του \mathbb{R}^m με σύνορο Γ και L ένας διαφορικός τελεστής. Η αριθμητική επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία γίνεται σε τέσσερις φάσεις:

1^η φάση: Κάνουμε ένα μερισμό της περιοχής Ω σε ένα **πεπερασμένο** πλήθος απλών υποσυνόλων (π.χ. υποδιαστήματα αν $m=1$, τρίγωνα ή τετράγωνα αν $m=2$, πολύεδρα αν $m>2$).

2^η φάση: Διαλέγουμε ένα **χώρο συναρτήσεων πεπερασμένης διάστασης** V_n , οι οποίες είναι συνήθως πολώνυμα σε κάθε τμήμα του μερισμού του Ω . Ο χώρος V_n μπορεί να είναι υποχώρος του V στον οποίο βρίσκεται η θεωρητική (ακριβής) λύση του προβλήματος. Σημειωτέον ότι συνήθως $V_n \subset C^k(\bar{\Omega})$ για κάποιο μικρό k , τυπικά $k \leq 2$.

3^η φάση: Διαλέγουμε μια **βάση** $\{\varphi_j\}_{j=1}^n$ του χώρου V_n και προσεγγίζουμε την ακριβή λύση u με μια συνάρτηση της μορφής:

$$\bar{u}_n = \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j \in V_n \quad (2.3)$$

Οι συναρτήσεις φ_j κατασκευάζονται έτσι, ώστε να έχουν όσο το δυνατό μικρότερο φορέα και προσδιορίζονται με ένα πεπερασμένο πλήθος παρεμβολικών συνθηκών τύπου Lagrange, Hermite ή αλ. σε επίλεκτα σημεία του Ω (π.χ. κορυφές ή μέσα πλευρών τριγώνων).

4^η φάση: Χρησιμοποιούμε **κάποια μέθοδο προσέγγισης των εξισώσεων** του προβλήματος. Δηλαδή αντικαθιστούμε τις εξισώσεις με ένα **πεπερασμένο** πλήθος προσεγγιστικών αλγεβρικών εξισώσεων. Αν ο τελεστής L είναι γραμμικός, τότε αυτές οι εξισώσεις αποτελούν ένα γραμμικό σύστημα $n \times n$, $Ax=b$, όπου ο πίνακας A περιέχει «λίγα» μη μηδενικά στοιχεία (αυτό προκύπτει από το «μικρό» φορέα των φ_j).

Τυπικές μέθοδοι προσέγγισης των εξισώσεων του προβλήματος είναι οι μέθοδοι:

- Galerkin
- Collocation (Μέθοδος Ταξιθεσίας)
- Ελαχίστων Τετραγώνων
- Rayleigh-Ritz

Ο όρος «πεπερασμένα στοιχεία» χρησιμοποιείται με κάποια ανακρίβεια στη σχετική βιβλιογραφία. Π.χ. συχνά με «**πεπερασμένα στοιχεία**» εννοείται:

- Το βασικό στοιχείο του μερισμού του Ω (π.χ. το τρίγωνο)
- Οι συναρτήσεις βάσης φ_j του χώρου V_n
- Οι συναρτήσεις φ_j με το φορέα τους και τις συνθήκες που τις προσδιορίζουν
- Η μέθοδος προσέγγισης (π.χ. Galerkin)
- Μερικοί συνδυασμοί των παραπάνω εννοιών...

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των Πεπερασμένων Στοιχείων υπήρξε διεθνώς ιδιαίτερα έντονη. Αυτή η δραστηριότητα έγινε σχεδόν αποκλειστικά σε συνδυασμό με τη μέθοδο Galerkin [46].

2.3.3 Τα βασικά βήματα της FEM

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος στον οποίο εκτείνεται το πεδίο θεωρείται ότι απαρτίζεται από πολλά μικρά στοιχεία πεπερασμένων –όχι δηλαδή απειροστών– διαστάσεων. Αντίθετα με τις εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών που προκύπτουν πάντοτε απ' τις διαφορικές εξισώσεις του συστήματος και συσχετίζουν τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη στους κόμβους του πλέγματος, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οι εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη στους κόμβους (nodes ή nodal points) του συστήματος προκύπτουν, συνήθως, μέσα από διαδικασίες ελαχιστοποίησης κάποιων ενεργειακών εκφράσεων (συναρτησιακών) που περιλαμβάνουν τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη [47].

Ακολουθούν τα βασικά βήματα της μεθόδου σ' ένα απλό δισδιάστατο ηλεκτροστατικό πρόβλημα. Σ' ένα τέτοιο πρόβλημα θεωρούμε ότι το ζητούμενο πεδιακό μέγεθος είναι το δυναμικό φ . Σύμφωνα με το θεώρημα της ελάχιστης ενέργειας του Thomson, η πραγματική συνάρτηση δυναμικού $\varphi(x, y)$ του πεδίου που ικανοποιεί ως γνωστόν την εξίσωση Laplace

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2.4)$$

ελαχιστοποιεί τη συναρτησιακή

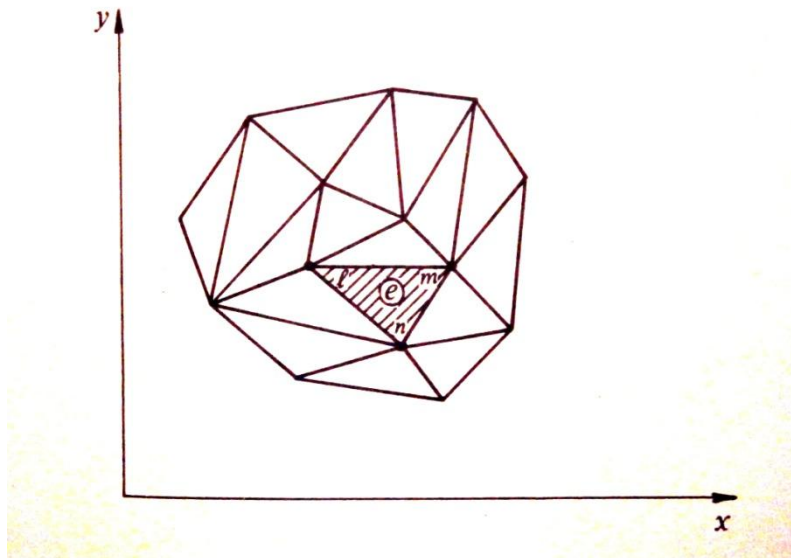
$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \iint_S (\nabla \varphi)^2 dx dy \quad (2.5)$$

Η (2.5) εκφράζει, προφανώς, την ανά μονάδα μήκους του συστήματος ενταμιευμένη δυναμική ενέργεια.

Καμιά άλλη συνάρτηση $\varphi'(x, y)$ που ικανοποιεί τις ίδιες οριακές συνθήκες του προβλήματος δεν μπορεί να ικανοποιεί την (2.4) ή να ελαχιστοποιεί την (2.5).

Το **πρώτο βήμα** στην πορεία της μεθόδου είναι ο χωρισμός του πεδίου σ' ένα σύνολο «αλληλοσυνδεόμενων» πεπερασμένων στοιχείων. Τα απλούστερα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σ' ένα δισδιάστατο πρόβλημα είναι τα τριγωνικά. Η χρησιμοποίηση στοιχείων άλλου σχήματος (π.χ. παραλληλογράμμων, καμπυλόγραμμων στοιχείων κ.λπ.), αν και είναι δυνατή, δεν συνηθίζεται ιδιαίτερα, κυρίως λόγω της απλότητας των σχέσεων που προκύπτουν κατά τη χρήση των τριγωνικών στοιχείων και της συνεπακόλουθης ευκολίας με την οποία τα τελευταία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον προγραμματισμό σ' έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στο σχήμα που

ακολουθεί φαίνεται ένα τμήμα της περιοχής του πεδίου χωρισμένο σε μικρά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία και το τυπικό στοιχείο e με κορυφές τους κόμβους ℓ , m , n .



Σχήμα 2.3: Διαίρεση τμήματος της περιοχής του πεδίου σε τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία [47].

Το **δεύτερο βήμα** μετά της διακριτοποίηση της περιοχής του πεδίου σε πολλά τριγωνικά στοιχεία, είναι να καθοριστεί ο –προσεγγιστικός– τρόπος μεταβολής της συνάρτησης δυναμικού σε κάθε τριγωνικό στοιχείο, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ενεργειακή συναρτησιακή (2.5) πρέπει να ελαχιστοποιείται. Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος ανήκει σε όριο του προβλήματος με γνωστή τιμή δυναμικού (συνθήκη Dirichlet) η τιμή αυτή λαμβάνεται από την αρχή ως η τιμή του δυναμικού στο θεωρούμενο κόμβο. Αξίζει να αναφερθεί (χωρίς να δοθεί η σχετική απόδειξη) ότι στα όρια όπου επιβάλλεται η συνθήκη Neumann ($\partial\varphi/\partial n = 0$) δεν χρειάζεται να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα για την ικανοποίηση της συνθήκης, αφού αυτή προσεγγίζεται αυτόματα με την ίδια τάξη προσέγγισης με την οποία προσεγγίζεται η εξίσωση Laplace (2.4). Η μεταβολή του δυναμικού σε κάθε στοιχείο μπορεί να είναι οποιαδήποτε, συνήθως όμως χρησιμοποιούνται απλές γραμμικές προσεγγιστικές εκφράσεις. Η χρησιμοποίηση πολυωνυμικών προσεγγιστικών εκφράσεων ανώτερης τάξης (π.χ. τετραγωνικές, κυβικές κ.λπ.) είναι μεν δυνατή, το τίμημα όμως που απαιτείται να καταβληθεί –ως πρόσθετος υπολογιστικός φόρος– για την κάποια καλύτερη ακρίβεια που παρέχουν σε σύγκριση με τις γραμμικές προσεγγίσεις είναι μάλλον μεγάλο. Γι’ αυτό εννοείται στη συνέχεια ότι η συνάρτηση δυναμικού $\varphi(x, y)$ στο τυχόν στοιχείο e με κορυφές ℓ , m , n μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varphi^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y \quad (2.6)$$

όπου οι σταθεροί συντελεστές a^e , b^e και c^e είναι καθορισμένοι, όταν είναι γνωστά τα δυναμικά των κόμβων ℓ , m και n .

Αν λοιπόν φ_ℓ , φ_m , φ_n είναι τα δυναμικά των τριών κόμβων ℓ , m , n και (x_ℓ, y_ℓ) , (x_m, y_m) , (x_n, y_n) οι συντεταγμένες των αντίστοιχων κόμβων, ισχύουν, σύμφωνα με τη (2.6), οι σχέσεις:

$$\varphi_\ell = a^e + b^e x_\ell + c^e y_\ell \quad (2.7)$$

$$\varphi_m = a^e + b^e x_m + c^e y_m \quad (2.8)$$

$$\varphi_n = a^e + b^e x_n + c^e y_n \quad (2.9)$$

Από το σύστημα των εξισώσεων (2.7), (2.8) και (2.9) υπολογίζονται οι τιμές των σταθερών a^e , b^e και c^e :

$$a^e = \frac{1}{2\Delta_e} [(x_m y_n - x_n y_m)\varphi_l + (x_n y_l - x_l y_n)\varphi_m + (x_l y_m - x_m y_l)\varphi_n] \quad (2.10)$$

$$b^e = \frac{1}{2\Delta_e} [(y_m - y_n)\varphi_l + (y_n - y_l)\varphi_m + (y_l - y_m)\varphi_n] \quad (2.11)$$

$$c^e = \frac{1}{2\Delta_e} [(x_n - x_m)\varphi_l + (x_l - x_n)\varphi_m + (x_m - x_l)\varphi_n] \quad (2.12)$$

όπου

$$\Delta_e = -\frac{1}{2} [x_l(y_m - y_n) + x_m(y_n - y_l) + x_n(y_l - y_m)] \varphi_n \quad (2.13)$$

είναι το εμβαδόν του στοιχείου e .

Με αντικατάσταση των (2.10), (2.11), (2.12) στην (2.6) προκύπτει εύκολα η ακόλουθη προσεγγιστική έκφραση για τη συνάρτηση δυναμικού $\varphi^e(x, y)$ στο στοιχείο e :

$$\begin{aligned} \varphi^e(x, y) &= \\ &= \frac{1}{2\Delta_e} [(a_l^e + b_l^e x + c_l^e y)\varphi_l + (a_m^e + b_m^e x + c_m^e y)\varphi_m + (a_n^e + b_n^e x + c_n^e y)\varphi_n] \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \text{όπου } a_l^e &= x_m y_n - x_n y_m \\ b_l^e &= y_m - y_n \\ c_l^e &= x_n - x_m \end{aligned} \quad (2.15)$$

ενώ οι εκφράσεις των υπόλοιπων σταθερών $a_m^e, b_m^e, c_m^e, a_n^e, b_n^e, c_n^e$ προκύπτουν από τις (2.15) με κυκλική εναλλαγή των δεικτών l, m, n .

Η (2.14) γράφεται συνήθως με τη μορφή:

$$\varphi^e(x, y) = \varphi_l \zeta_l^e(x, y) + \varphi_m \zeta_m^e(x, y) + \varphi_n \zeta_n^e(x, y) = [\zeta_l^e \quad \zeta_m^e \quad \zeta_n^e] \begin{bmatrix} \varphi_l \\ \varphi_m \\ \varphi_n \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

όπου $\zeta_l^e, \zeta_m^e, \zeta_n^e$ είναι συναρτήσεις που ονομάζονται *συναρτήσεις μορφής* (shape functions) του στοιχείου e , δίνονται δε από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}\zeta_l^e &= \frac{1}{2\Delta_e} (a_l^e + b_l^e x + c_l^e y) \\ \zeta_m^e &= \frac{1}{2\Delta_e} (a_m^e + b_m^e x + c_m^e y) \\ \zeta_n^e &= \frac{1}{2\Delta_e} (a_n^e + b_n^e x + c_n^e y)\end{aligned}\quad (2.17)$$

Η συνεισφορά του στοιχείου e στην ενεργειακή συναρτησιακή (2.5) του συστήματος μετά την αντικατάσταση της (2.14) στη (2.5) δίνεται από την τετραγωνική μορφή:

$$W^e = \frac{\varepsilon}{8\Delta_e} [(b_l^e \varphi_l + b_m^e \varphi_m + b_n^e \varphi_n)^2 (c_l^e \varphi_l + c_m^e \varphi_m + c_n^e \varphi_n)^2] \quad (2.18)$$

που μπορεί επίσης να γραφεί και με τη μορφή:

$$W^e = \frac{1}{2} [\Phi^e]^T [A^e] [\Phi^e] \quad (2.19)$$

όπου

$$[\Phi^e] = \begin{bmatrix} \varphi_l \\ \varphi_m \\ \varphi_n \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$[\Phi^e]^T = [\varphi_l \quad \varphi_m \quad \varphi_n]$ είναι η ανάστροφη μήτρα της $[\Phi^e]$ και $[A^e]$ είναι ο συμμετρικός πίνακας (μήτρα):

$$[A^e] = \begin{bmatrix} a_{ll}^e & a_{lm}^e & a_{ln}^e \\ a_{ml}^e & a_{mm}^e & a_{mn}^e \\ a_{nl}^e & a_{nm}^e & a_{nn}^e \end{bmatrix} = \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_l^{e2} + c_l^{e2} & b_l^e b_m^e + c_l^e c_m^e & b_l^e b_n^e c_l^e + c_n^e \\ b_m^e b_l^e + c_m^e c_l^e & b_m^{e2} + c_m^{e2} & b_m^e b_n^e + c_m^e c_n^e \\ b_n^e b_l^e + c_n^e c_l^e & b_n^e b_m^e + c_n^e c_m^e & b_n^{e2} + c_n^{e2} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

όπου τα στοιχεία του a_{ij}^e δίνονται από τις σχέσεις:

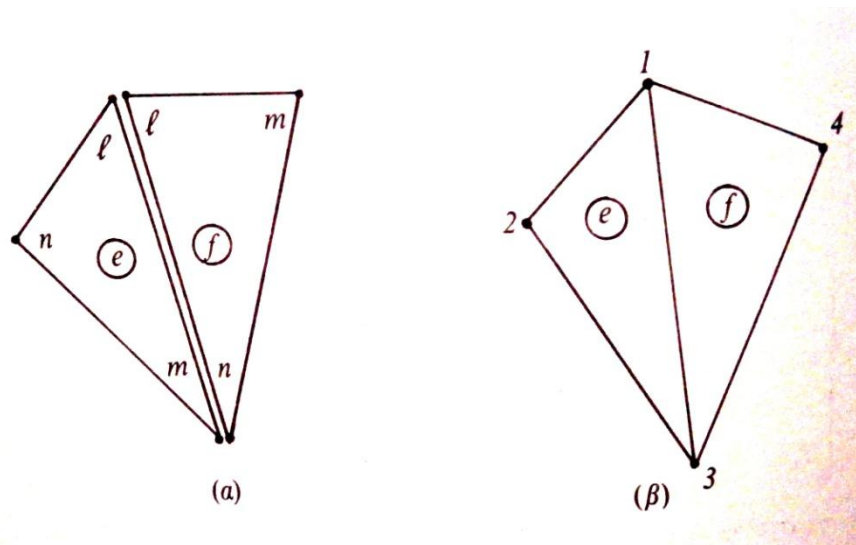
$$a_{ii}^e = \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} (b_i^{e2} + c_i^{e2}) \quad (i = l, m, n) \quad (2.22)$$

$$a_{ij}^e = a_{ji}^e = \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} (b_i^e b_j^e + c_i^e c_j^e) \quad (i \neq j, \quad i = l, m, n \text{ και } j = l, m, n) \quad (2.23)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μήτρα $[A^e]$ εξαρτάται μόνο από τις θέσεις l, m, n των κορυφών του τριγωνικού στοιχείου e και από ένα συντελεστή ανάλογο προς τη διηλεκτρική σταθερά ε του στοιχείου.

Το **επόμενο βήμα** είναι να υλοποιηθεί η «συναρμολόγηση» όλων των στοιχείων, υπολογίζοντας τη συνεισφορά τους στη συνολική ενέργεια του συστήματος. Λόγω της απαίτησης συνεχούς μεταβολής της συνάρτησης δυναμικού $\varphi(x, y)$ στα κοινά όρια των γειτονικών στοιχείων, τα δυναμικά που αντιστοιχούν στις κοινές κορυφές διαφόρων τριγώνων και αντιπροσωπεύουν στην ουσία τον ίδιο κόμβο, οφείλουν να έχουν την ίδια τιμή. Για παράδειγμα, στο σχήμα που ακολουθεί,

φαίνονται δύο συνδεδεμένα γειτονικά στοιχεία e και f , που έχουν μονάχα τέσσερα ανεξάρτητα δυναμικά κόμβων αντί των έξι που θα είχαν αν θεωρούσαμε τα στοιχεία ασύνδετα. Στο συναρμολογημένο σύστημα επαναριθμούμε τους κόμβους, έτσι ώστε πολλοί από αυτούς να ανήκουν συγχρόνως σε περισσότερα τρίγωνα. Στο σχήμα οι κόμβοι 1 και 3 ανήκουν συγχρόνως στα τρίγωνα e και f , ο κόμβος 2 ανήκει μόνο στο τρίγωνο e , ενώ ο κόμβος 4 ανήκει μόνο στο τρίγωνο f . Αν λοιπόν $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, είναι τα δυναμικά των τεσσάρων κόμβων 1, 2, 3 και 4, είναι φανερό από τη συνέχεια του δυναμικού ότι ισχύουν οι σχέσεις $\varphi_1 = \varphi_l^e = \varphi_l^f, \varphi_3 = \varphi_m^e = \varphi_n^f, \varphi_2 = \varphi_n^e, \varphi_4 = \varphi_m^f$.



Σχήμα 2.4: α) Ασύνδετα στοιχεία, β) Συνδεδεμένα στοιχεία [47].

Η συνεισφορά W_{ef} των δύο στοιχείων e και f είναι εύκολο να δειχτεί με βάση τα προηγούμενα ότι μπορεί να γραφεί με μορφή ανάλογη προς την (2.19) ως:

$$W_{ef} = W_e + W_f = \frac{1}{2} [\Phi^{ef}]^T [A^{ef}] [\Phi^{ef}] \quad (2.24)$$

όπου

$$[\Phi^{ef}] = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$[\Phi^{ef}]^T = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4] \quad (2.26)$$

και

$$[A^{ef}] = \begin{bmatrix} a_{ll}^e + a_{ll}^f & a_{ln}^e & a_{lm}^e + a_{ln}^f & a_{lm}^f \\ a_{nl}^e & a_{nn}^e & a_{mm}^e & 0 \\ a_{ml}^e + a_{nl}^f & a_{mn}^e & a_{mm}^e + a_{nn}^f & a_{nm}^f \\ a_{ml}^f & 0 & a_{mn}^f & a_{mm}^f \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Εντελώς ανάλογα μπορεί να συνεχιστεί η συναρμολόγηση όλων των στοιχείων, οπότε τελικά προκύπτει μια μητρική εξίσωση της μορφής:

$$W = \frac{1}{2} [\Phi_M]^T [A_{MM}] [\Phi_M] \quad (2.28)$$

όπου $[\Phi_M]$ είναι μια μήτρα-στήλη με στοιχεία τα δυναμικά όλων των κόμβων, $[\Phi_M]^T$ είναι η ανάστροφη της $[\Phi_M]$ και $[A_{MM}]$ μια τετραγωνική συμμετρική μήτρα $M \times M$ όπου M είναι ο αριθμός των κόμβων. Ας σημειωθεί για μια ακόμη φορά ότι τα στοιχεία της μήτρας $[A_{MM}]$ εξαρτώνται μόνο από τις θέσεις των κόμβων και τη διηλεκτρική σταθερά.

Η διαδικασία προχωρά με την ελαχιστοποίηση της (2.28). Για το σκοπό αυτό, αν υποθεθεί ότι P συνοριακοί κόμβοι έχουν γνωστά δυναμικά, τα –άγνωστα- δυναμικά των υπόλοιπων $N=M-P$ κόμβων πρέπει να είναι τέτοια ώστε οι κόμβοι στους οποίους είναι γνωστή η τιμή του δυναμικού να γραφούν τελευταίοι στη μήτρα στήλη $[\Phi_M]$, δηλαδή η $[\Phi_M]$ έχει τη μορφή:

$$[\Phi_M] = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \\ \dots \\ \varphi_{N+1} \\ \varphi_{N+2} \\ \vdots \\ \varphi_{N+P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Phi_N] \\ [\Phi_P] \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

όπου $[\Phi_N]$ και $[\Phi_P]$ είναι οι μήτρες στήλης

$$[\Phi_N] = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

και

$$[\Phi_P] = \begin{bmatrix} \varphi_{N+1} \\ \varphi_{N+2} \\ \vdots \\ \varphi_{N+P} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Η (2.28), με χωρισμό των μητρών στους αντίστοιχους υποπίνακες (υπομήτρες), γράφεται στη μορφή:

$$W = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [\Phi_N]^T & [\Phi_P]^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A_{NN}] & [A_{NP}] \\ [A_{PN}] & [A_{PP}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Phi_N] \\ [\Phi_P] \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Αν τώρα παραλειφθούν οι αγκύλες από τα σύμβολα των μητρών για ευκολία στη γραφή και εκτελεσθούν οι πολλαπλασιασμοί στην (2.32), σύμφωνα με τους γνωστούς κανόνες από τη θεωρία των πινάκων η (2.32) καταλήγει στην ακόλουθη:

$$W = \frac{1}{2} (\Phi_N^T A_{NN} \Phi_N + \Phi_N^T A_{NP} \Phi_P + \Phi_P^T A_{PN} \Phi_N + \Phi_P^T A_{PP} \Phi_P) \quad (2.33)$$

Για να ελαχιστοποιηθεί όμως η (2.33) πρέπει τα άγνωστα δυναμικά $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ της μήτρας $[\Phi_N]$ να είναι τέτοια, ώστε να ισχύουν οι σχέσεις:

$$\frac{\partial W}{\partial \varphi_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.34)$$

Από τις (2.33) και (2.34) και αφού ληφθεί υπόψη ότι η μήτρα $[A_{NN}]$ είναι συμμετρική, προκύπτει τελικά το σύστημα:

$$A_{NN} \Phi_N + A_{NP} \Phi_P = 0 \quad (2.35)$$

Όμως ο δεύτερος όρος στο πρώτο μέλος της (2.35) είναι γνωστός, αφού τόσο τα στοιχεία της μήτρας A_{NP} όσο και της Φ_P είναι γνωστά. Αν λοιπόν $[U]$ είναι η μήτρα-στήλη που αντιπροσωπεύει ο όρος αυτός, η (2.35) με επαναφορά των αγκυλών στο συμβολισμό των μητρών γράφεται:

$$[A_{NN}][\Phi_N] = [U] \quad (2.36)$$

Συνήθως, η μήτρα $[A_{NN}]$ συμβολίζεται ως $[S]$ με στοιχεία s_{ij} ($i = 1, \dots, N \cdot j = 1, \dots, N$), ενώ στη μήτρα $[\Phi_N]$ παραλείπεται ο δείκτης N , οπότε το σύστημα των N εξισώσεων με τους N αγνώστους $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$ που εκφράζει η (2.36) γράφεται με μητρική πάλι μορφή ως εξής:

$$[S][\Phi] = [U] \quad (2.37)$$

Η μήτρα $[S]$ ονομάζεται *μήτρα ακαμψίας* (stiffness matrix) ή μήτρα αγωγιμότητας, ενώ η μήτρα-στήλη $[U]$ είναι γνωστή και ως *μήτρα φορτίου*. Θα πρέπει τέλος να αναφερθεί η ειδική αξιοποίηση που γίνεται στις διάφορες τεχνικές επίλυσης του γεγονότος ότι η μήτρα ακαμψίας $[S]$ είναι συμμετρική και πολύ αραιά με τα μη μηδενικά στοιχεία συγκεντρωμένα –ως επί το πλείστον- γύρω από την κύρια διαγώνιο [47].

Πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων

3.1 Γενικά

Αντικειμενικός στόχος μιας προσομοίωσης είναι η αναπαράσταση, με τη βοήθεια κάποιου λογισμικού Η/Υ, του υπό μελέτη μοντέλου, υπό τις –κατά το δυνατόν- ρεαλιστικότερες συνθήκες, έτσι ώστε να προκύψουν ασφαλή και ακριβή συμπεράσματα που θα ανταποκρίνονται, με μια ικανοποιητική προσέγγιση, στην πραγματικότητα.

«Ευχή και κατάρα» των προσομοιώσεων αποτελεί η προσδοκώμενη ακρίβειά τους. «Ευχή», για τον προφανή λόγο ότι υψηλότερη ακρίβεια σημαίνει επικύρωση της προσομοίωσης, βάσει της πραγματικότητας. «Κατάρα», διότι αύξηση της επιθυμητής ακρίβειας συνεπάγεται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο υπό μελέτη μοντέλο και άρα υπέρογκο υπολογιστικό φόρτο, ο οποίος επιφέρει, με τη σειρά του, υπερβολικό υπολογιστικό χρόνο ή και αδυναμία υπολογισμού, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τις σύγχρονες υπολογιστικές παροχές (άνω όρια συχνότητας ρολογιού CPU και χωρητικότητας της μνήμης). Έτσι, τα αποτελέσματα προέρχονται τελικά από κάποιο συμβιβασμό μεταξύ των δύο αυτών ανταγωνιστικών παραγόντων (πραγματικότητα έναντι πολυπλοκότητας) και στη συνέχεια εκτιμάται η ακρίβειά τους.

Εύλογο λοιπόν είναι να ξεκινήσει κανείς από τα απλούστερα δυνατά μοντέλα, να προσθέτει προοδευτικά παράγοντες πολυπλοκότητας (άρα και πραγματικότητας) και να εκτιμά κάθε φορά αν και κατά πόσον η εκάστοτε προσθήκη επηρέασε τα εξαγόμενα αποτελέσματα, προς την κατεύθυνση της επιδιωκόμενης ακρίβειας. Βάσει αυτής της λογικής, ακολουθεί μια συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση στην πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ..

Προτού όμως παρουσιαστούν τα ληφθέντα αποτελέσματα του πεδιακού υπολογισμού και της κατανομής του δυναμικού, όπως αυτά προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. με τη βοήθεια διάφορων αριθμητικών μεθόδων, κρίνεται σκόπιμο να δοθεί έμφαση στην εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) στον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες, μια και το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας (Opera-3d) εφαρμόζει αυτή τη μέθοδο. Για το λόγο αυτό, γίνεται αναφορά σε δημοσιευμένες εργασίες, στις οποίες αναδεικνύεται η χρήση της FEM με τις διάφορες παραλλαγές αυτής, χάρη στις οποίες καθίσταται εφαρμόσιμη και αποδοτική στην επίλυση «ανοικτών» προβλημάτων, όπως είναι αυτό της πεδιακής ανάλυσης μονωτήρων. Επιπλέον, παρέχονται τα απαραίτητα εκείνα δεδομένα προκειμένου να μπορεί κανείς να προβεί σε συγκρίσεις με άλλες αριθμητικές μεθόδους και να αποφανθεί τελικά για την καταλληλότητα και την αποτελεσματικότητα της FEM.

3.2 Εφαρμογές της FEM στον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) μετρά ήδη αρκετές εφαρμογές στον αριθμητικό υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου και υπάρχουν λογισμικά που τη χρησιμοποιούν για το σκοπό αυτό. Οι εφαρμογές αυτές της FEM έχουν δημοσιευτεί σε πληθώρα άρθρων είτε στην αρχική της μορφή (όπως περιγράφηκε συνοπτικά στο 2^ο Κεφάλαιο) είτε, συνηθέστερα, σε κάποια παραλλαγή αυτής. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή και χρήση της FEM αντιμετωπίζει τους εγγενείς περιορισμούς μοντελοποίησης, λόγω της απαίτησης όσο το δυνατό περισσότερων στοιχείων για την αναπαράσταση του πολύ μεγάλων (πρακτικά άπειρων) διαστάσεων χώρου όπου εκτίθεται το υπό μελέτη μοντέλο και ακριβώς αυτούς τους περιορισμούς έχουν ως στόχο να παρακάμψουν οι διάφορες προαναφερθείσες παραλλαγές της μεθόδου.

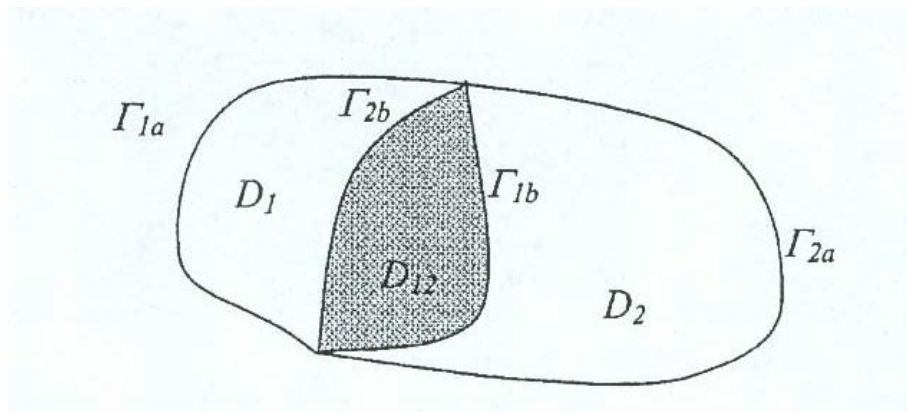
3.2.1 Η Μέθοδος Αποσύνθεσης Χωρίου

Αν και η FEM ανήκει στην κατηγορία των διαφορικών μεθόδων επίλυσης (που προτιμώνται στα κλειστά προβλήματα με περιορισμένες οριακές συνθήκες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω) και φαίνεται «ακατάλληλη» για τον προσδιορισμό του πεδίου σε μονωτήρες, εντούτοις έχουν διατυπωθεί αρκετές επιφυλάξεις για τη χρήση των ολοκληρωτικών μεθόδων (ανοικτών οριακών συνθηκών), ειδικά κατά το στάδιο των υπολογισμών. Ενδεικτικά, με τη χρήση της μεθόδου των οριακών στοιχείων (*Boundary Element Method, BEM*) δημιουργούνται ιδιαιτέρως πυκνοί, μη συμμετρικοί πίνακες από τη διακριτοποίηση και, προκειμένου να μειωθούν οι απαιτήσεις υπολογιστικών πόρων (μνήμης και CPU), απαιτούνται σημαντικές απλοποιήσεις. Για παράδειγμα, στο άρθρο [41] μελετήθηκε μόνο μια απλοποιημένη γεωμετρία του μονωτήρα (χωρίς το ακριβές μοντέλο με όλους τους ελαστομερείς δίσκους) και παρουσιάστηκαν υπολογισμοί μιας μονάχα φάσης. Οι απλοποιήσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα οι υπολογιζόμενες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα να στερούνται ακρίβειας και αξιοπιστίας, λόγω ύπαρξης μη ρεαλιστικών συνθηκών [48].

Μια παραλλαγή της FEM παρουσιάζεται στο άρθρο [48]. Η «Μέθοδος Αποσύνθεσης Χωρίου» (*Domain-Decomposition Method, DDM*), όπως ονομάζεται, αποτελεί μια πρακτική προσέγγιση μετατροπής ενός πολύπλοκου και εκτενούς προβλήματος σ' ένα απλούστερο και ευκολότερα επιλύσιμο πρόβλημα. Οι κλασικοί αλγόριθμοι αποσύνθεσης, όπως η μέθοδος Schwarz, έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και εφαρμόζονται και σε αυτό το άρθρο.

Σε γενικές γραμμές, το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου Schwarz έχει ως εξής: σε πρώτη φάση το χωρίο υπό ανάλυση (έστω D_α) διαιρείται σε δυο υποχωρία. Χάριν απλότητας, θεωρούμε δύο υπερτιθέμενα υποχωρία D_1 και D_2 που αλληλεπικαλύπτονται στην περιοχή D_{12} , όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

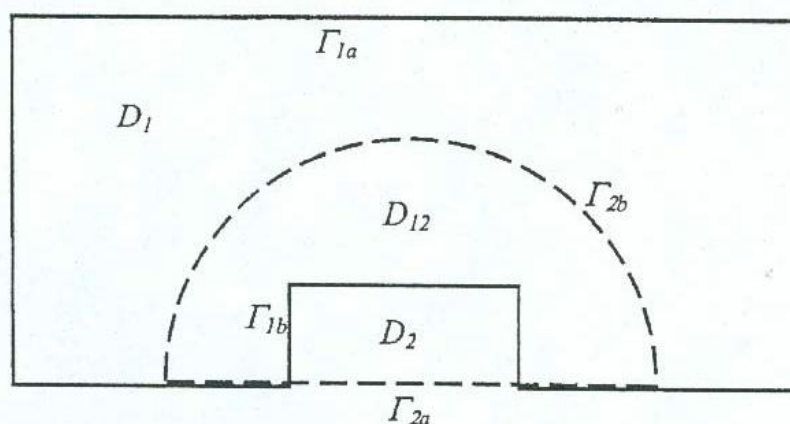
Το χωρίο D_α έχει σαν σύνορο την $\Gamma_{1\alpha} \cup \Gamma_{2\alpha}$, όπου οι οριακές συνθήκες θεωρούνται γνωστές. Τα υποχωρία D_1 και D_2 έχουν σαν σύνορο την $\Gamma_{1\alpha} \cup \Gamma_{1b}$ και την $\Gamma_{2\alpha} \cup \Gamma_{2b}$ αντίστοιχα. Η κλασική μέθοδος Schwarz ξεκινάει με την επίλυση του προβλήματος οριακών τιμών για το υποχωρίο D_1 , εφαρμόζοντας τις γνωστές οριακές συνθήκες για το $\Gamma_{1\alpha}$ και υποθέτοντας αυθαίρετα επιλεγμένες για το Γ_{1b} .



Σχήμα 3.1: Διαίρεση του υπό ανάλυση χωρίου D_α σε δύο υποχωρία D_1 και D_2 [48].

Έπειτα, το πρόβλημα οριακών τιμών για το υποχωρίο D_2 επιλύεται χρησιμοποιώντας τις δοσμένες οριακές συνθήκες για το Γ_{2a} και αντικαθιστώντας την τιμή του πεδίου που υπολογίσαμε στο πρώτο βήμα για το σύνορο Γ_{2b} . Αυτή η διαδικασία εναλλαγής επαναλαμβάνεται έως ότου φτάσουμε την απαιτούμενη ακρίβεια.

Στο συγκεκριμένο άρθρο [48] η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω έχει ελαφρώς τροποποιηθεί. Γίνεται η υπόθεση ότι το μοντέλο της διάταξης στο χωρίο $D_1 \cup D_{12}$ («πλήρες χωρίο», όπως αλλιώς ονομάζεται) αποτελεί το «μεγάλης κλίμακας» μοντέλο του πλήρους προβλήματος, ενώ στο χωρίο $D_2 \cup D_{12}$ (που καλείται και «τοπικό χωρίο») μοντελοποιείται μονάχα το υποπρόβλημα, εκεί δηλαδή όπου απαιτείται η ακριβής κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Τα δύο αυτά χωρία (δηλαδή τα $D_1 \cup D_{12}$ και $D_2 \cup D_{12}$) αλληλεπικαλύπτονται κατά μήκος του D_{12} («επικαλυπτόμενο χωρίο»). Κατά κανόνα, τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων δεν γειτνιάζουν στα σύνορα Γ_{1b} και Γ_{2b} . Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται ο μερισμός ενός χωρίου σε δύο χωρία, ένα «πλήρες» ($D_1 \cup D_{12}$) και ένα «τοπικό» ($D_2 \cup D_{12}$).



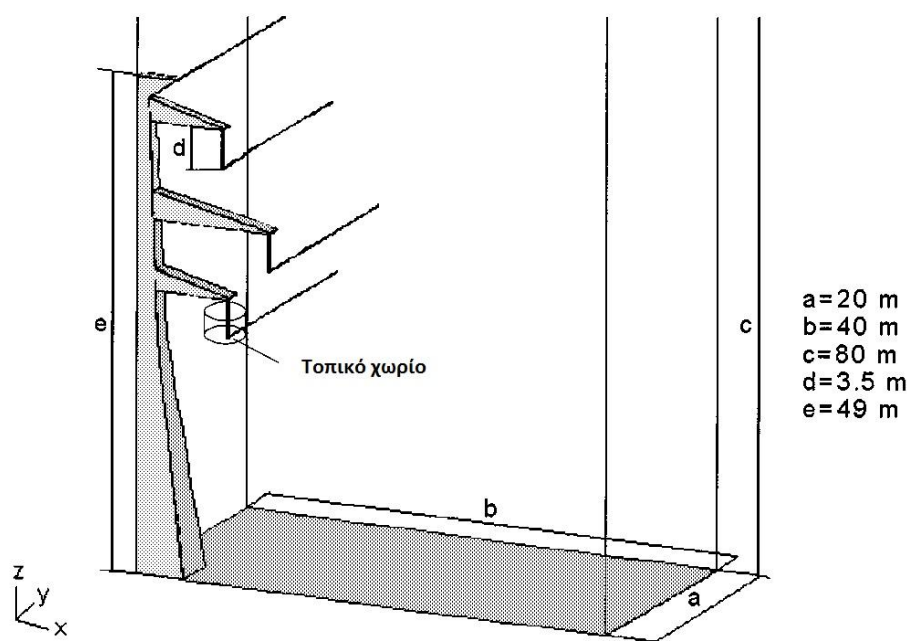
Σχήμα 3.2: Ο μερισμός ενός χωρίου σε «πλήρες» και «τοπικό» χωρία [48].

Η τροποποιημένη επαναληπτική διαδικασία ξεκινά με την επίλυση του προβλήματος οριακών τιμών για όλο το υπό ανάλυση χωρίο $D_\alpha = D_1 \cup D_{12} \cup D_2$, χρησιμοποιώντας ένα αρχικό γειτνιάζον πλέγμα για το «τοπικό χωρίο», στο εσωτερικό του οποίου η διάταξη είναι σημαντικά απλοποιημένη. Αυτό το βήμα χρησιμοποιείται προκειμένου να αρχικοποιηθούν οι οριακές συνθήκες κατά μήκος

των συνόρων Γ_{1b} και Γ_{2b} , αντί να δοθούν αυθαίρετα επιλεγμένες τιμές. Μετά από αυτή την αρχικοποίηση, το πρόβλημα οριακών τιμών επιλύεται επαναληπτικά με δύο διαφορετικά πλέγματα στα υποχωρία. Αυτή η τεχνική για την αρχικοποίηση των οριακών τιμών κατά μήκος των συνόρων Γ_{1b} και Γ_{2b} έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των επαναληπτικών βημάτων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

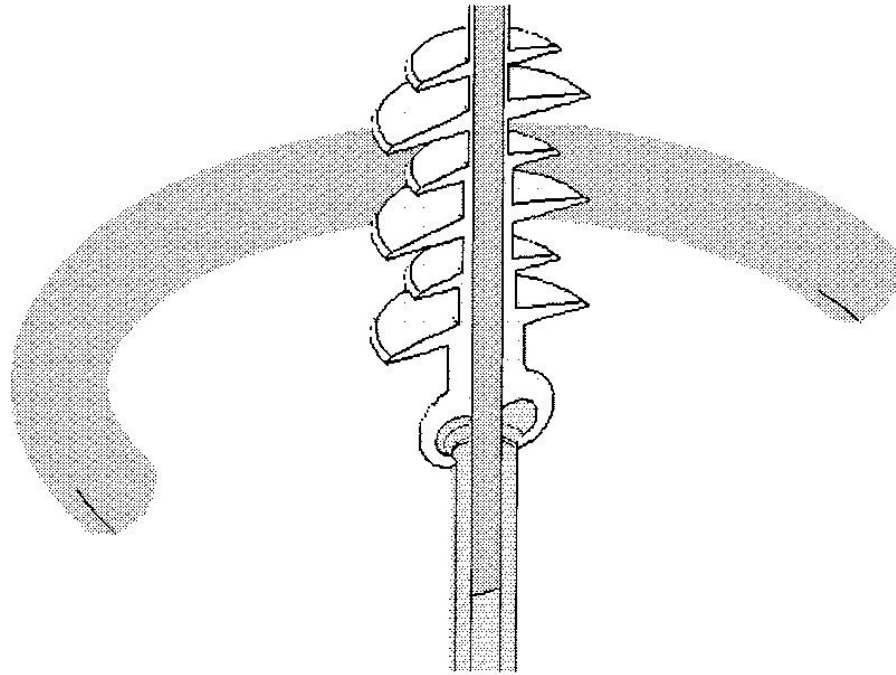
Η αποτελεσματικότητα της παραπάνω τροποποιημένης «Μεθόδου Αποσύνθεσης» (πλήρης-τοπική μέθοδος) επιβεβαιώνεται με την παρουσίαση της μεθοδολογίας του πεδιακού υπολογισμού σε συνθετικούς μονωτήρες, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε μια τυπική γραμμή μεταφοράς ονομαστικής τάσης λειτουργίας 400 kV στην Ουγγαρία. Η «χωρική» επίλυση του πλήρους προβλήματος ορίζεται από ένα ορθογώνιο εξάεδρο (σε μορφή ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου), το οποίο περιλαμβάνει τον πυλώνα της γραμμής μεταφοράς μαζί με τους αγωγούς φάσης και προστασίας, καθώς και τους μονωτήρες. Οι τελευταίοι μοντελοποιούνται από μια απλή διηλεκτρική ράβδο με μια ισοδύναμη επιτρεπτότητα, αγνοώντας τους ελαστομερείς δίσκους (τα γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία ως sheds). Οι ακροδέκτες είναι επίσης απλοποιημένοι σ' αυτό το μοντέλο.

Η υπό μελέτη γραμμή είναι διπλού κυκλώματος με δύο αγωγούς προστασίας. Το σχετικά απλοποιημένο αυτό μοντέλο φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Λόγω της υπάρχουσας συμμετρίας, εξετάζεται μόνο το $\frac{1}{4}$ του χώρου (εκεί όπου $x > 0, y > 0$), εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικό υπολογιστικό φόρτο και άρα επιτυγχάνοντας πολύ καλύτερους χρόνους υπολογισμού, χωρίς παράλληλα η ακρίβεια να θίγεται ούτε στο ελάχιστο. Στο επίπεδο όπου αναπαρίσταται η επιφάνεια του εδάφους (επίπεδο $z = 0$), στους αγωγούς γείωσης και στον πυλώνα της γραμμής το ηλεκτρικό δυναμικό Φ τίθεται ίσο με το μηδέν. Τα δυναμικά των αγωγών φάσης προσδιορίζονται από τις στιγμιαίες τιμές φασικής τάσης, θεωρώντας την ονομαστική τάση λειτουργίας, δηλαδή $\Phi_1 = 326.6 \text{ kV}$, $\Phi_2 = -163.3 \text{ kV}$, $\Phi_3 = -163.3 \text{ kV}$. Οι οριακές συνθήκες κατά μήκος των εξωτερικών συνόρων-επιπέδων του χωρίου ορίζονται με τη μέθοδο των ειδώλων, όταν οι αγωγοί φάσης και προστασίας μοντελοποιούνται με άπειρα γραμμικά φορτία.



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση του πλήρους μοντέλου με τον πυλώνα της γραμμής και επισήμανση του τοπικού χωρίου του προβλήματος [48].

Το τοπικό χωρίο οριοθετείται από μια κυλινδρική επιφάνεια, ομοαξονική προς τον υπό μελέτη μονωτήρα, με ακτίνα $R = 1 \text{ m}$. Η επικαλυπτόμενη περιοχή D_{12} ορίζεται από ένα εξάεδρο μέσα σ' αυτόν τον κύλινδρο (η εγκάρσια τομή αυτών των χωρίων είναι παρόμοια με το σχήμα 2.6). Μέσα στο τοπικό χωρίο, ο εξεταζόμενος μονωτήρας μοντελοποιήθηκε βάσει της ακριβούς γεωμετρίας του, τόσο με τους μεταλλικούς ακροδέκτες, όσο και με τους ελαστομερείς δίσκους. Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου φαίνεται η εγκάρσια τομή του άκρου Υ.Τ. του μονωτήρα.



Σχήμα 3.4: Όψη του άκρου Υ.Τ. του μοντελοποιημένου μονωτήρα (με το τοροειδές εξομάλυνσης) [48].

Η κατανομή του δυναμικού στο σύνορο του τοπικού χωρίου (Γ_{2a} και Γ_{2b}) ορίζεται στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων που γειτνιάζουν με το σύνορο. Αυτές οι τιμές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την κατανομή δυναμικού στο πλήρες χωρίο, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο βήμα. Η εφαρμοζόμενη αλγοριθμική διαδικασία είναι η ακόλουθη: αρχικά, μπορούν να οριστούν οι πραγματικές συντεταγμένες του κόμβου του πεπερασμένου στοιχείου στο τοπικό χωρίο, $x_{kl}(n_{li})$, εστιάζοντας μ' αυτόν τον τρόπο στο σύνορο. Έπειτα, οι υπολογισθείσες συντεταγμένες του τοπικού κόμβου μεταφέρονται στο πλήρες χωρίο. Χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες αυτές x_{kg} , το πεπερασμένο στοιχείο g_j στο πλήρες χωρίο πρέπει να οριστεί έτσι, ώστε να περιλαμβάνει το υπό εξέταση σημείο x_{kg} . Ύστερα από την εύρεση του πεπερασμένου στοιχείου g_j του πλήρους χωρίου, υπολογίζεται η τιμή του δυναμικού φ_{kg} , χρησιμοποιώντας τα δυναμικά των κόμβων και τις συναρτήσεις μορφής. Αυτή η τιμή προσδιορίζει το δυναμικό του συνόρου του κόμβου στο τοπικό χωρίο. Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα και μπορεί επιπλέον να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να οριστεί το δυναμικό κατά μήκος του συνόρου Γ_{1b} στο επόμενο επαναληπτικό βήμα, όταν επανυπολογίζεται το δυναμικό για το, μικρότερο πλέον, πλήρες χωρίο ($D_1 \cup D_{12}$).

```

ΓΙΑ κάθε_στοιχείο_στο_τοπικό_χωρίο
  ΑΝ επιφανειακό_στοιχείο => επί του συνόρου
    ΓΙΑ κάθε_κόμβο_στο_επιφανειακό_στοιχείο
      Υπολόγισε_συντεταγμένες => xk(nli)
      Μετάφερε_συντεταγμένες(xkl) => xkg
      Αναζήτησε_πεπερασμένο_στοιχείο_στο_πλήρες_χωρίο(xkg) => gj
      Υπολόγισε_δυναμικό(xkg) => φkg
      Θέσε_οριακή_τιμή(φkg) => φkl
    ΤΕΛΟΣ_κάθε_κόμβο_στο_επιφανειακό_στοιχείο
  ΤΕΛΟΣ_επιφανειακό_στοιχείο
ΤΕΛΟΣ_κάθε_στοιχείο_στο_τοπικό_χωρίο

```

Σχήμα 3.5: Αλγόριθμος υπολογισμού των συνοριακών δυναμικών [48].

Οι εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος Dirichlet σταματούν όταν οι μεταβολές του δυναμικού στο επικαλυπτόμενο χωρίο (D_{12}) και κατά μήκος των συνόρων Γ_{1b} και Γ_{2b} γίνουν πρακτικά ασήμαντες. Εφαρμόζουμε την έκφραση:

$$\varphi_err = \text{Max} \left(\left| \frac{\varphi_k^{(i)} - \varphi_k^{(i-1)}}{\varphi_k^{(i-1)}} \right| \right) < err \quad (3.1)$$

όπου υπολογίζεται το μέγιστο του σχετικού σφάλματος των δυναμικών κόμβων φ_k των δύο επακόλουθων επαναληπτικών βημάτων (i και $i - 1$). Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή του φ_err μαζί με τη μεταβολή της μέγιστης τιμής της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης στο τοπικό χωρίο. Καθώς το σχετικό σφάλμα της E_{max} μπορεί πρακτικά να αμεληθεί μετά το δεύτερο βήμα, η τροποποιημένη μέθοδος του Schwarz θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική για την επίλυση του «πλήρους-και-τοπικού» προβλήματος.

Επανάληψη	φ_err	$E_{max} [kV/mm]$	$\Delta E_{max} /E_{max}$
0	-	0.9823	-
1	$4.68 \cdot 10^{-2}$	0.9790	$3.36 \cdot 10^{-3}$
2	$4.61 \cdot 10^{-3}$	0.9775	$1.50 \cdot 10^{-3}$
3	$1.72 \cdot 10^{-3}$	0.9767	$8.18 \cdot 10^{-4}$
4	$8.73 \cdot 10^{-4}$	0.9761	$6.14 \cdot 10^{-4}$
5	$6.54 \cdot 10^{-4}$	0.9757	$4.10 \cdot 10^{-4}$

Πίνακας 3.1: Μεταβολή των σχετικών σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας [48].

Οι υπολογισμοί που αφορούν στην υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου έγιναν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή Pentium-III 700-MHz με δυναμική μνήμη 512 MB. Τα δεδομένα της υπολογιστικής διαδικασίας συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα. Στη στήλη με τις τιμές του χρόνου CPU εννοείται το άθροισμα των δευτερολέπτων που απαιτείται για τη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία και τον υπολογισμό του δυναμικού μόνο για το επικαλυπτόμενο χωρίο.

Μοντέλο	Πλήθος Στοιχείων	Πλήθος Αγνώστων	Χρόνος CPU [s]
Πλήρες	83895	342081	262 + 47
Τοπικό	174620	710491	806 + 448

Πίνακας 3.2: Δεδομένα υπολογισμών [48].

Από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα είναι προφανές ότι, ενσωματώνοντας το πλήρους κλίμακας τρισδιάστατο μοντέλο των μονωτήρων μέσα σε πραγματικό περιβάλλον γραμμών μεταφοράς (χωρίς δηλαδή το διαχωρισμό σε πλήρες και τοπικό μοντέλο), προκύπτει ένας τεράστιος αριθμός αγνώστων. Ο αριθμός αυτός μπορεί να εκτιμηθεί τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους υψηλότερα, απ' ότι στην περίπτωση εφαρμογής της «Μεθόδου Αποσύνθεσης Χωρίου». Μια τάξη μεγέθους του πλήρους αγνώστων υψηλότερα ($\sim 10^7$), συνεπάγεται δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερο χρόνο επίλυσης (γύρω στις 27 ώρες σε έναν υπολογιστή Pentium-III) και μια τάξη μεγέθους υψηλότερη RAM ($\sim 5 GB$).

Η «Μέθοδος Αποσύνθεσης Χωρίου» που περιγράφηκε παραπάνω υλοποιήθηκε θεωρώντας τις ελάχιστες δυνατές υπολογιστικές απαιτήσεις, τόσο σε μνήμη όσο και σε χρόνο CPU. Αν και δεν είναι εύκολη η εκτίμηση του χρόνου που απαιτείται συνολικά για τη φάση της μοντελοποίησης (κατασκευή του μοντέλου, δημιουργία του πλέγματος κ.λπ.), εντούτοις αναμένεται να είναι πολύ μικρός.

Είναι σαφές ότι το βασικό σκεπτικό της «πλήρους και τοπικής» μεθόδου μπορεί να εφαρμοστεί, πέραν των υπολογισμών ηλεκτροστατικού πεδίου που έγιναν παραπάνω, σε οποιονδήποτε άλλο τύπο προβλημάτων, αν οι απαιτούμενες οριακές συνθήκες μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας το πλήρες μοντέλο. Επιπλέον, είναι δυνατό να θεωρήσει κανείς το τοπικό ως ένα νέο πλήρες μοντέλο, οπότε η διαδοχική βελτιστοποίηση της επίλυσης είναι δυνατή χωρίς αντίστοιχη αύξηση του πλήθους των αγνώστων [48].

3.2.2 Η Μέθοδος του Υπο-Μοντέλου

Μια πανομοιότυπη προσέγγιση «υπομοντελοποίησης» (sub-model approach), η οποία βασίζεται στη FEM, επιχειρείται στο άρθρο [49] για τον υπολογισμό και την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού κατά μήκος συνθετικών μονωτήρων γραμμής 1000 kV εναλλασσομένου ρεύματος (AC), υπό καθαρές και ξηρές συνθήκες. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό (και αυτής της μεθόδου είναι ότι δίνει τη δυνατότητα να εξεταστούν οι επιδράσεις διαφόρων εξωτερικών παραγόντων (μήκος –πολλαπλών- αγωγών φάσης, ύπαρξη τοροειδών εξομάλυνσης και διαμόρφωση πυλών) και εισάγει, κατ' αυτόν τον τρόπο, ένα μοντέλο αρκετά πολύπλοκης γεωμετρίας, χωρίς, συγχρόνως, να επιφέρει πρόσθετο υπολογιστικό φόρτο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, καθώς στο συγκεκριμένο άρθρο [49] περιλαμβάνονται και πειραματικές μετρήσεις προκειμένου να καταστούν δυνατές τυχόν συγκρίσεις με τις προσομοιώσεις, ενδεχομένως αυτό να αποτελεί μια αρκετά καλή αναφορά για το σχεδιασμό συνθετικών μονωτήρων γραμμών Εξαιρετικά Υψηλής Τάσης (Ultra High Voltage, UHV) 1 MV στην Κίνα.

A. Μέθοδος Υπο-Μοντέλου

Συχνά, σε μια αριθμητική ανάλυση είναι απαραίτητο να ληφθούν αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας για μια συγκεκριμένη περιοχή μέσα στο πλήρες μοντέλο. Δύο τρόποι υπάρχουν για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός: απ' τη μια, να «πλεγματοποιηθεί» (δηλαδή να αναπαρασταθεί με τη μορφή πλέγματος) το πλήρες μοντέλο με την υψηλότερη δυνατή ανάλυση (κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική κατανάλωση υπολογιστικού χρόνου στην καλύτερη περίπτωση ή, ακόμη χειρότερα, αδυναμία υπολογισμού λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων) κι από την άλλη, να δημιουργηθεί και να εξεταστεί ένα μοντέλο υψηλής «πλεγματικής» ανάλυσης μονάχα στην

περιοχή ενδιαφέροντος, χρησιμοποιώντας την τεχνική υπο-μοντελοποίησης (sub-modeling technique) [49].

Η τεχνική αυτή στηρίζεται στην αρχή της ανάλυσης τάσεων του St. Venant, σύμφωνα με την οποία οι επιδράσεις της συγκέντρωσης τάσεων εντοπίζονται στην περιοχή γύρω από τη συγκέντρωση αυτή. Με άλλα λόγια, αν τα όρια του υπο-μοντέλου είναι αρκετά μακριά από το σημείο συγκέντρωσης της τάσης, είναι δυνατό να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα μέσα σ' αυτό (ενν. στο υπο-μοντέλο).

Αρχικά, δημιουργείται ένα, μεγάλης κλίμακας, πλήρες μοντέλο, προκειμένου να προσδιοριστεί η κατανομή του δυναμικού κοντά στη διάταξη του μονωτήρα. Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να είναι σε τέτοιο βαθμό «κεντημένο», έτσι ώστε να προκύψει μια –σε λογικά πλαίσια– ακριβής επίλυση του δυναμικού, κοντά (και όχι μέσα) στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Έπειτα, δημιουργείται ένα, κατά το δυνατόν, πιο τελειοποιημένο υπο-μοντέλο, που περιλαμβάνει τη διάταξη του μονωτήρα. Πρόκειται για ένα, ολωσδιόλου ανεξάρτητο από το πλήρες, μοντέλο, το οποίο μάλιστα έχει και τις ίδιες γενικές συντεταγμένες (global coordinates) με αυτό. Τα όρια του υπο-μοντέλου λέγονται «όρια τομής» (cut boundaries) και τα δυναμικά στους κόμβους κατά μήκος των ορίων αυτών λαμβάνονται από τις τιμές του δυναμικού του πλήρους μοντέλου, μέσω παρεμβολής.

Για κάθε κόμβο του υπο-μοντέλου κατά μήκος των ορίων τομής χρησιμοποιούνται κατάλληλα στοιχεία, ώστε να ορίσουν τις τιμές του δυναμικού από το πλήρες μοντέλο. Αυτές οι τιμές παρεμβάλλονται στη συνέχεια πάνω στους κόμβους των ορίων τομής, με τη βοήθεια των συναρτήσεων διαμόρφωσης στοιχείων.

Ακολούθως, είναι απαραίτητο να προστεθούν τα φορτία και οι οριακές συνθήκες που εμφανίζονται στις αντίστοιχες περιοχές του πλήρους μοντέλου, επί του υπο-μοντέλου. Ύστερα, το υπο-μοντέλο αναλύεται, προκειμένου να ληφθούν οι σωστές κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων.

Τέλος, πρέπει να τονισθεί ότι τα αποτελέσματα του υπο-μοντέλου είναι σχεδόν ολότελα βασισμένα σε τιμές δυναμικού που προέκυψαν μέσω παρεμβολής στα όρια τομής. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα τελευταία βρίσκονται τόσο μακριά, ώστε να ληφθεί η ακριβής κατανομή δυναμικού κοντά στους μονωτήρες. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί συγκρίνοντας τις ληφθείσες τιμές του υπο-μοντέλου κατά μήκος των ορίων αυτών, με εκείνες κατά μήκος των αντίστοιχων περιοχών του πλήρους μοντέλου. Μια καλή προσέγγιση μεταξύ τους, υποδεικνύει πως έχουν επιλεχθεί τα σωστά όρια τομής· σε αντίθετη περίπτωση, το υπο-μοντέλο θα πρέπει να σχεδιαστεί από την αρχή και να αναλυθεί εκ νέου, με όρια τομής αρκετά μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος αυτή τη φορά.

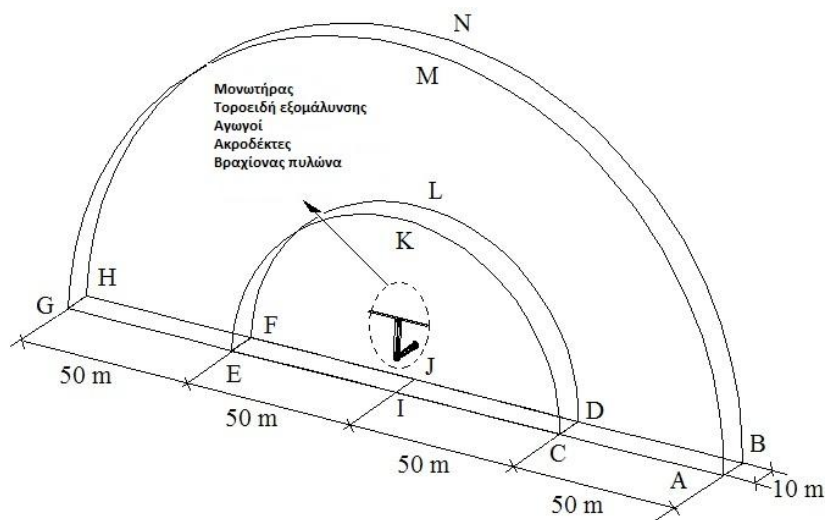
B. Πλήρες μοντέλο

Όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές και παραπάνω, ο τύπος του μονωτήρα, των τοροειδών εξομάλυνσης, του πλαισίου του πυλώνα, των συνδετικών «πιάτων»² και των ίδιων των αγωγών επηρεάζει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού κατά μήκος της διάταξης του μονωτήρα. Τυπικά, η ονομαστική συχνότητα ισχύος στις γραμμές μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) είναι 50 ή 60 Hz. Επομένως, το πρόβλημα υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου και

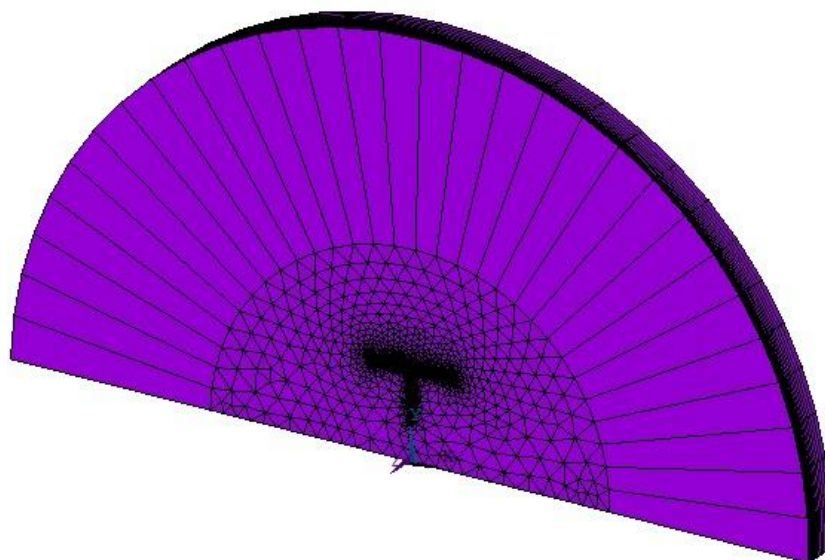
² Τα συνδετικά «πιάτα» (ή αλλιώς yoke plates) είναι οι μεταλλικές εκείνες επιφάνειες που ενώνουν τον ακροδέκτη Υ.Τ. του μονωτήρα με τον πολλαπλό, κατά κανόνα, αγωγό φάσης.

κατανομής του δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τρισδιάστατο ηλεκτροστατικό πρόβλημα ανοικτών συνόρων. Το μοντέλο του τρισδιάστατου αυτού ηλεκτροστατικού υπολογισμού στηρίζεται στην υπόθεση πως το φαινόμενο corona και τα ρεύματα διαρροής αμελούνται, ενώ ο μονωτήρας βρίσκεται υπό καθαρές και ξηρές συνθήκες.

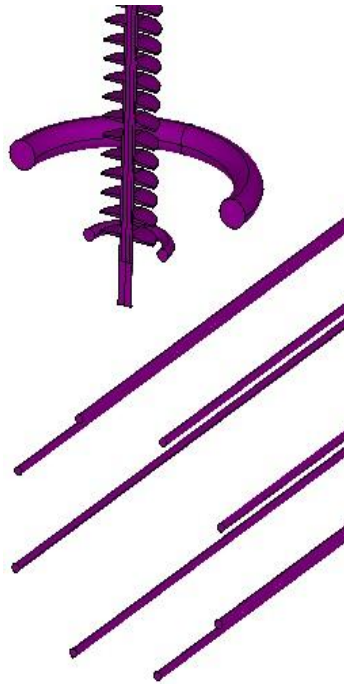
Σύμφωνα με τη συμμετρία που χαρακτηρίζει τη γραμμή μεταφοράς (συμπεριλαμβανομένων των μονωτήρα, πυλώννα, αγωγών, ακροδεκτών και τοροειδών εξομάλυνσης), το $\frac{1}{2}$ του μοντέλου λαμβάνεται υπόψη κατά την υλοποίηση της εφαρμοζόμενης αριθμητικής μεθόδου. Οι επιτρεπτότητες των ελαστομερών δίσκων (sheds) και του πυρήνα της ράβδου του μονωτήρα τέθηκαν ίσες προς 3.5 και 3.0 αντίστοιχα, το μήκος των αγωγών στο υπό εξέταση μοντέλο είναι 10 m και όλα τα προαναφερθέντα σώματα που συναποτελούν τη γραμμή μεταφοράς περιβάλλονται από αέρα, ο οποίος επίσης μοντελοποιείται βάσει της $\frac{1}{2}$ συμμετρίας. Τμήματα του «μισού» αυτού μοντέλου φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα.



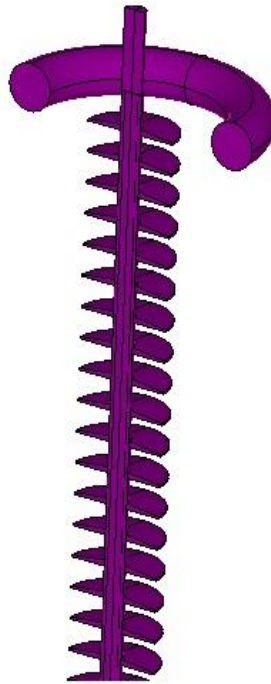
Σχήμα 3.6: Πλήρες μοντέλο [49].



Σχήμα 3.7: Πλέγμα του πλήρους μοντέλου [49].



Σχήμα 3.8: Μονωτήρας, τοροειδή εξομάλυνσης, οκταπλός αγωγός φάσης και ακροδέκτης στο άκρο Υ.Τ. [49].



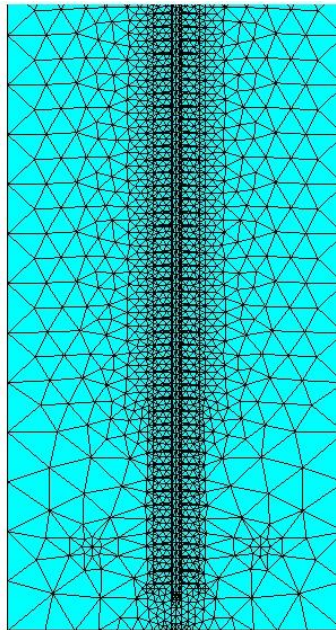
Σχήμα 3.9: Μονωτήρας, τοροειδές εξομάλυνσης και ακροδέκτης στο γειωμένο άκρο [49].

Η κυρτή επιφάνεια ABMNGH στο σχήμα 3.6 αποτελεί τη μοντελοποίηση του ανοικτού ορίου, χρησιμοποιώντας μη πεπερασμένα στοιχεία, ενώ το επίπεδο ABGH παριστάνει τη γη. Τάση πλάτους μιας μονάδας (εννοώντας 1 MV) φορτίζει τον υπό μελέτη μονωτήρα, καθώς και τους αγωγούς, τα τοροειδή εξομάλυνσης και τον ακροδέκτη στο άκρο Υ.Τ., ενώ τάση μηδενικού πλάτους εφαρμόζεται

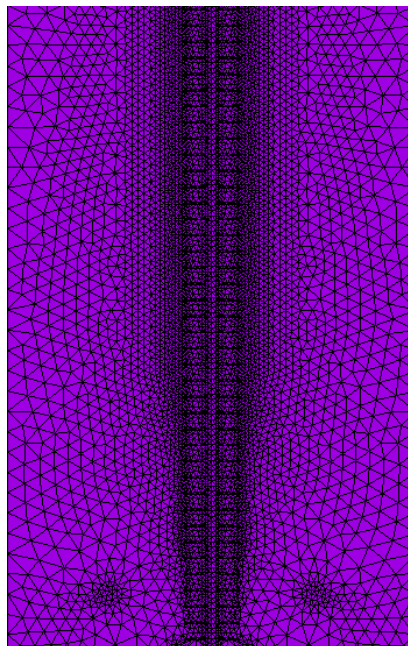
επί του υπό μελέτη μονωτήρα, του τοροειδούς εξομάλυνσης, του ακροδέκτη, καθώς και του βραχίονα του πυλώνα στο γειωμένο άκρο.

C. Υπο-Μοντέλο

Ο συνθετικός μονωτήρας, τα τοροειδή εξομάλυνσης, οι ακροδέκτες και ο περιβάλλον χώρος όπου τα σώματα αυτά γειτνιάζουν, συναποτελούν την περιοχή ενδιαφέροντος. Το πλέγμα της περιοχής ενδιαφέροντος τόσο του πλήρους, όσο και του υπο-μοντέλου, παρουσιάζεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 3.10: Πλέγμα τμήματος του πλήρους μοντέλου στην περιοχή ενδιαφέροντος [49].



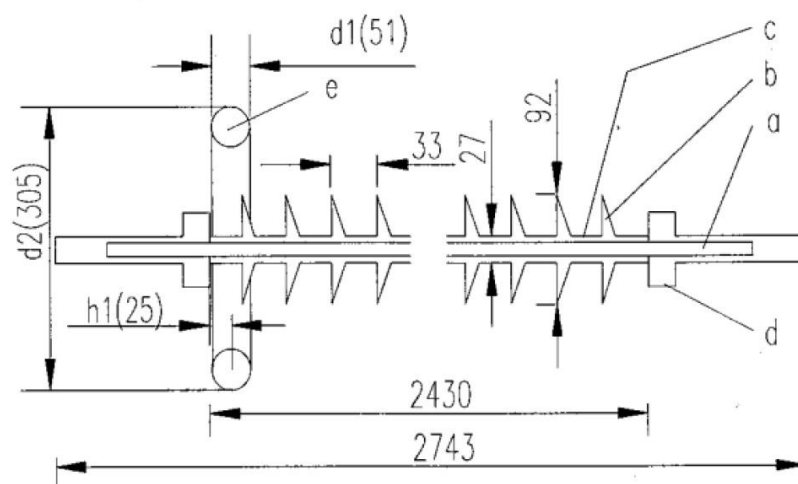
Σχήμα 3.11: Πλέγμα τμήματος του υπο-μοντέλου στην περιοχή ενδιαφέροντος [49].

Το πλήθος των στοιχείων του πλήρους μοντέλου είναι 113520, ενώ για το υπο-μοντέλο ανέρχεται στα 229920. Σύμφωνα με τη θεωρία της FEM, όσο πιο πυκνά και με λεπτομέρεια δομημένο είναι το πλέγμα, τόσο ακριβέστερα είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν· συνεπώς, τα αποτελέσματα του υπο-μοντέλου είναι ακριβέστερα από εκείνα του πλήρους μοντέλου [49].

3.2.3 Σύγκριση FEM-BEM

Στο άρθρο [53] πραγματοποιήθηκαν δύο κατηγοριών προσομοιώσεις ενός μοντέλου συνθετικού μονωτήρα, εκ των οποίων η μια έγινε με τη βοήθεια στατικού επιλύτη και η άλλη μέσω επιλύτη ac μόνιμης κατάστασης. Οι υπολογισμοί και για τις δύο κατηγορίες υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια της δισδιάστατης έκδοσης του προγράμματος ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης OPERA (Opera-2d), η λειτουργία του οποίου βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρήθηκε ίδιων ακριβώς χαρακτηριστικών με εκείνο άλλων ερευνητών σε προγενέστερα δημοσιευμένα άρθρα [41, 43], στα οποία είχε γίνει χρήση της BEM (*Boundary Element Method*, «μέθοδος των οριακών στοιχείων»), και είναι αυτό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Πρόκειται για συνθετικό μονωτήρα ανάρτησης σε γραμμή μεταφοράς 345 kV, ο οποίος αποτελείται από μια ράβδο ενισχυμένη με υαλώδεις ίνες (σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς 7.2), ένα πολυμερές περίβλημα (αποτελούμενο από 72 ελαστομερείς δίσκους σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς 4.5), δύο μεταλλικούς ακροδέκτες, καθώς και ένα τοροειδές εξομάλυνσης στο ενεργό άκρο.



Σχήμα 3.12: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις συνθετικών μονωτήρων που πρόκειται να μοντελοποιηθούν: (a) ράβδος ενισχυμένη με υαλώδεις ίνες, (b) πολυμερείς ελαστομερείς δίσκοι (sheds), (c) πολυμερές περίβλημα, (d) μεταλλικός ακροδέκτης και (e) τοροειδές εξομάλυνσης [41, 53].

Το πακέτο λογισμικού Opera-2d, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δισδιάστατη ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, κάνει εφαρμογή της FEM, προκειμένου να επιλύσει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις των Poisson και Helmholtz, καθώς και τις εξισώσεις Διάχυσης που περιγράφουν το πεδίο. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου προγράμματος αποτελεί η δυνατότητα επιλογής «διηλεκτρικών απωλειών»³, η οποία επιτρέπει τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς διατάξεων που αποτελούνται από υλικά τόσο αγώγιμων, όσο και διηλεκτρικών

³ Αναφέρεται ως «lossy dielectric» option.

ιδιοτήτων, όπως είναι τα ηλεκτρομονωτικά υλικά. Χάρη στην ύπαρξη ειδικών ρουτινών στο λογισμικό Opera-2d, υποστηρίζεται η δημιουργία μιας μιγαδικής επιτρεπτότητας (η οποία ορίζεται παρακάτω, στη σχέση (3.9)) και κατά συνέπεια, ενός μιγαδικού ηλεκτρικού βαθμωτού δυναμικού.

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή του μαθηματικού υποβάθρου του οποίου κάνει χρήση το πακέτο λογισμικού Opera. Μια στατική επίλυση περιλαμβάνει καταρχάς έναν υπολογισμό του προβλήματος ροής ρεύματος, τα αποτελέσματα του οποίου χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως είσοδοι για την ηλεκτροστατική ανάλυση. Οι θεμελιώδεις εξισώσεις που συσχετίζουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} με το βαθμωτό δυναμικό V και την απόκλιση της πυκνότητας ηλεκτρικής ροής \vec{D} με τη χωρική πυκνότητα φορτίου ρ είναι οι ακόλουθες:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (3.2)$$

και

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.3)$$

αντίστοιχα. Η συνήθης εξίσωση περιγραφής του ηλεκτροστατικού δυναμικού του Poisson προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων (3.2) και (3.3) και εισάγει τον τανυστή διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ε ως ακολούθως:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \varepsilon \vec{\nabla}V = -\rho \quad (3.5)$$

Το λογισμικό ορίζει αν το μοντέλο περιέχει υλικά μη μηδενικής αγωγιμότητας, οπότε και επιλύει την ακόλουθη εξίσωση αγωγιμότητας (ροής ρεύματος), επιπλέον της ηλεκτροστατικής εξίσωσης Poisson:

$$\vec{\nabla} \cdot \sigma \vec{\nabla}V = 0 \quad (3.6)$$

όπου σ είναι η αγωγιμότητα
και \vec{j} η πυκνότητα ρεύματος:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.7)$$

Στα χρονομεταβλητά προβλήματα (αρμονική ac ανάλυση) τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία επιλύονται με συνδυασμένο τρόπο. Υποθέτοντας ότι οι επιδράσεις λόγω επαγωγής θεωρούνται αμελητέες στα διηλεκτρικά προβλήματα ημιαγωγιμότητας, το λογισμικό επιλύει τις εξισώσεις:

$$\vec{\nabla} \cdot \varepsilon_c \vec{\nabla}V = 0 \quad (3.8)$$

και

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (3.9)$$

όπου ϵ_c είναι η μιγαδική επιτρεπτότητα

ϵ_r είναι η σχετική επιτρεπτότητα του μέσου

ϵ_0 είναι η επιτρεπτότητα του κενού

$\omega = 2\pi f$ είναι η γωνιακή συχνότητα και

f η κανονική συχνότητα λειτουργίας.

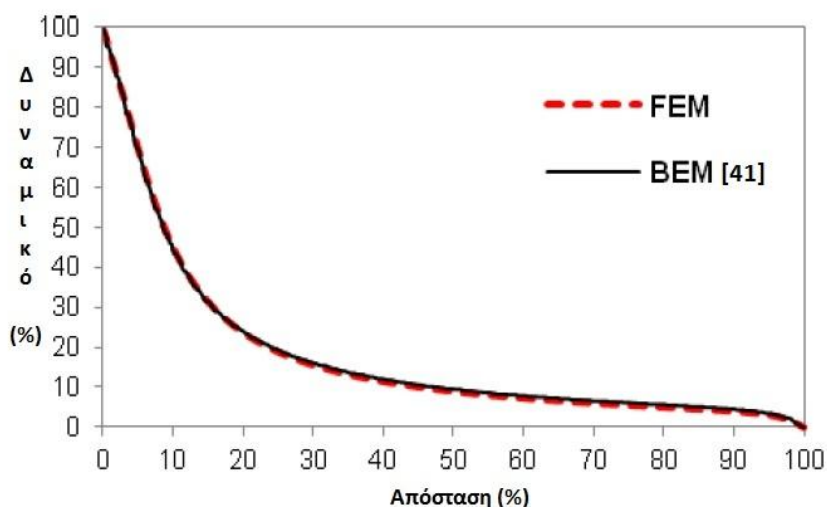
Και στο άρθρο [53] τίθεται το ζήτημα καταλληλότητας ή μη της FEM για τον υπολογισμό πεδίου σε προβλήματα ανοικτών συνόρων, όπως η κατανομή του δυναμικού και ο υπολογισμός της πεδιακής έντασης σε έναν συνθετικό μονωτήρα Υ.Τ.. Τονίζεται και πάλι το μειονέκτημα του πολύ μεγάλου υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται από τη BEM (η οποία, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο εδάφιο, αποτελεί τη θεωρητικώς «καταλληλότερη» μέθοδο επίλυσης τέτοιων προβλημάτων και είναι ένας απ' τους κύριους «ανταγωνιστές» της FEM), οπότε επιχειρείται η εφαρμογή της FEM ως εναλλακτική πρόταση. Εντούτοις, επισημαίνεται πως και η τελευταία παρουσιάζει το μειονέκτημα της προσθήκης επιπλέον πολυπλοκότητας κατά τη φάση μοντελοποίησης του προβλήματος, καθώς τα εξωτερικά όρια του εξεταζόμενου μοντέλου πρέπει να ρυθμίζονται σχεδιάζοντας κάθε φορά μια εκτενή περιοχή γύρω από τη θεωρούμενη διάταξη (με άλλα λόγια, αναπαράσταση του απείρου μέσω ενός τεράστιου «background»). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το πλήθος των στοιχείων που απαιτούνται για το πλέγμα του συνολικού μοντέλου.

Το υπό ανάλυση μοντέλο θεωρήθηκε ως αξονικά-συμμετρικό, βασιζόμενο στη συμμετρία τόσο του μονωτήρα, όσο και του τοροειδούς εξομάλυνσης. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή δεν είναι δυνατό να λάβει υπόψη της την τρισδιάστατη τοπολογία του αγωγού στο ενεργό άκρο του μονωτήρα, επομένως δεν μπορεί επί της ουσίας να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη αγωγού. Ο χώρος γύρω απ' τον υπό μελέτη μονωτήρα αναπαρίσταται ως ένα background σχετικής επιτρεπτότητας ίσης με 1 (η σχετική διηλεκτρική σταθερά του αέρα προσεγγίζει πρακτικά κατά πολύ εκείνη του κενού). Τα τελικά όρια του background αυτού επιλέγονται αυξάνοντας τις διαστάσεις του συνεχώς, έως ότου το μέγεθός του να μην επιφέρει πλέον καμία επίδραση στην κατανομή του δυναμικού.

Ένα κρίσιμο σημείο που αφορά στο σχεδιασμό της διάταξης του προβλήματος αποτελεί η «πλεγματοποίηση» του μοντέλου μέσω της κατάτμησης της περιοχής αυτού σε τριγωνικά στοιχεία, όπου η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) θα λάβει χώρα. Η πυκνότητα του πλέγματος είναι υψηλότερη στο εσωτερικό του μονωτήρα –ειδικά σε κρίσιμες περιοχές, όπως οι γωνίες ή οι ακμές των ελαστομερών δίσκων- και σταδιακά μειώνεται, καθώς προσεγγίζουμε τα όρια του background. Το πλέγμα του μονωτήρα του εν λόγω άρθρου μαζί με το background αποτελείται από 201766 στοιχεία και 405857 κόμβους.

Με τη βοήθεια του στατικού επιλύτη του Opera-2d υπολογίστηκε η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα και εκτίθεται παρακάτω, στο σχήμα που ακολουθεί. Οι άξονες αναφέρονται σε % τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης και της απόστασης μόνωσης. Τα αποτελέσματα του υπολογισμού αυτού συγκρίθηκαν με εκείνα της BEM ανάλυσης του άρθρου [41], στο οποίο το μοντέλο του μονωτήρα μαζί με το τοροειδές εξομάλυνσης αποτελείτο συνολικά από 1249 στοιχεία τόσο πάνω στην επιφάνεια των συνόρων, όσο και επί των διεπιφανειών μεταξύ των διαφόρων μέσων.

Παρατηρώντας το παρακάτω σχήμα, διαπιστώνει κανείς μια αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Εύκολα επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι η FEM, η οποία γενικά απαιτεί λιγότερο χρόνο υπολογισμού, μπορεί να αντικαταστήσει τη BEM με πολύ καλή προσέγγιση σε τέτοιου είδους ανοικτά προβλήματα [53].



Σχήμα 3.13: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της απόστασης μόνωσης στον άξονα του μονωτήρα με εφαρμογή των δύο διαφορετικών αριθμητικών μεθόδων [53].

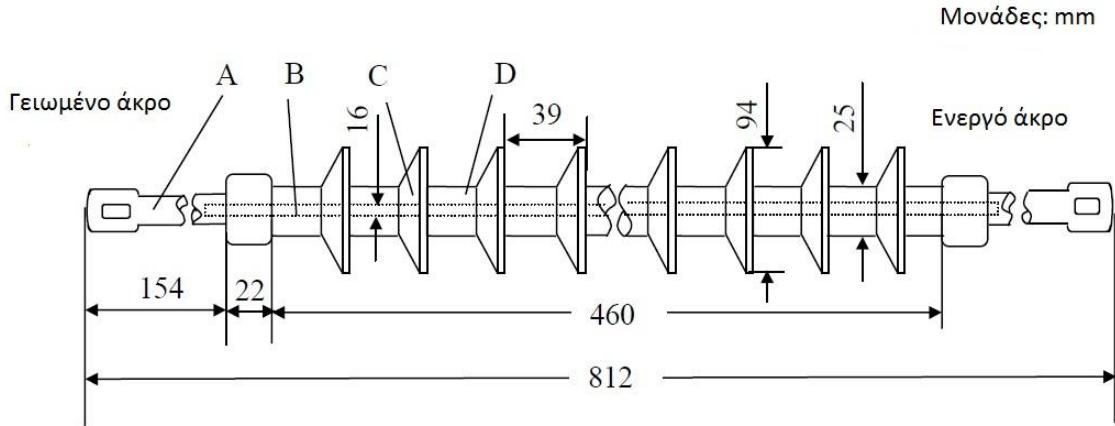
3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων

3.3.1 Απλοποίηση του μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα

Οι διαστάσεις και τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνθετικών μονωτήρων ποικίλουν ανάλογα με το επίπεδο τάσης στο οποίο χρησιμοποιούνται. Ένας τυπικός μη κεραμικός μονωτήρας των 34.5 kV αποτελείται από 12 ελαστομερείς δίσκους (sheds) και το μήκος του είναι γύρω στα 80 cm, ενώ ο αντίστοιχος για σύστημα μεταφοράς 765 kV διαθέτει 103 δίσκους, ενώ το μήκος του ανέρχεται στα 4.7 m. Προκειμένου να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα, απαιτούνται πολλά περισσότερα στοιχεία για την προσομοίωση του 765 kV μονωτήρα απ' ό,τι στην περίπτωση εκείνου των 34.5 kV. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των οριακών στοιχείων (BEM), όσο περισσότερα στοιχεία χρησιμοποιούνται, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται κατά το στάδιο των υπολογισμών. Για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου (ιδιαίτερα κατά την ανάλυση μεγάλου μήκους μονωτήρων) κρίνονται αναγκαίες κάποιες απλοποιήσεις στο μοντέλο που εξετάζεται.

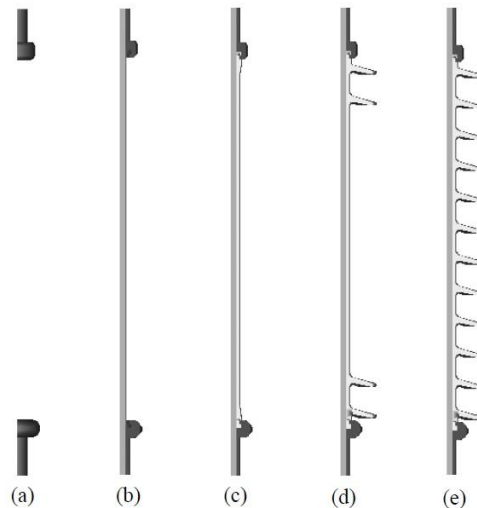
Ένας συνθετικός μονωτήρας αποτελείται από τέσσερα κύρια συστατικά στοιχεία (όπως άλλωστε έχει αναλυθεί διεξοδικά και στο 1^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας): την ενισχυμένη με υαλώδεις ίνες ράβδο, το πολυμερές περίβλημα αυτής (το οποίο συνήθως είναι κατασκευασμένο από σιλικονούχο καουτσούκ, γνωστό και ως Silicone Rubber, SIR), τους επίσης πολυμερείς ελαστομερείς δίσκους (οι οποίοι είναι ένα με το περίβλημα και κατασκευάζονται απ' το ίδιο υλικό) και τους δύο μεταλλικούς ακροδέκτες. Ποια από αυτά τα στοιχεία και κατά πόσο μπορούν να απλοποιηθούν, με τη μικρότερη δυνατή αλλοίωση στα υπολογισθέντα αποτελέσματα κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού; Για την απάντηση στο ερώτημα αυτό εξετάστηκε στην εργασία [1] ένας συνθετικός μονωτήρας γραμμής μεταφοράς 34.5 kV, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται με λεπτομέρεια στο ακόλουθο σχήμα. Για τις προσομοιώσεις που έγιναν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό «Coulomb» το οποίο κάνει εφαρμογή της μεθόδου των οριακών στοιχείων (BEM). Η σχετική διηλεκτρική σταθερά του περιβλήματος τέθηκε ίση προς 4.3 και για τη

ράβδο η αντίστοιχη τιμή ήταν 7.2. Ο μονωτήρας διαθέτει 12 ελαστομερείς δίσκους, οι οποίοι έλαβαν την ίδια τιμή διηλεκτρικής σταθεράς με το περίβλημα, ενώ ο περιβάλλων αέρας είχε αντίστοιχη τιμή ίση προς 1. Ο άνω ακροδέκτης ελήφθη ως το γειωμένο ηλεκτρόδιο και στον κάτω εφαρμόστηκε σταθερή πηγή τάσης 1 kV.



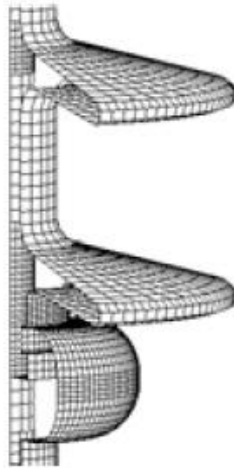
Σχήμα 3.14: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις του υπό μελέτη μονωτήρα. A: μεταλλικός ακροδέκτης, B: ενισχυμένη με υαλώδεις ίνες ράβδος, C: πολυμερείς ελαστομερείς δίσκοι και D: πολυμερές περίβλημα [1].

Τέσσερα απλοποιημένα μοντέλα υπολογισμού χρησιμοποιήθηκαν για την, βήμα προς βήμα, υλοποίηση της σύγκρισης, ενώ το πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο του μονωτήρα τέθηκε ως αναφορά για τη μελέτη των επιδράσεων των τεσσάρων απλοποιημένων μοντέλων στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού. Τα πέντε αυτά μοντέλα απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



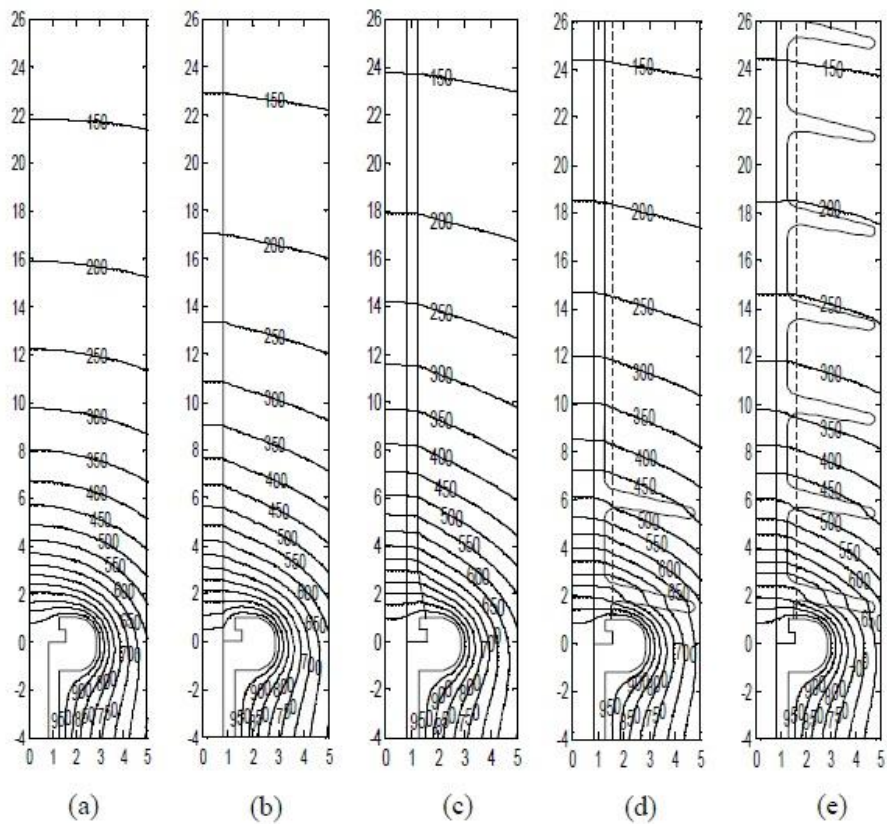
Σχήμα 3.15: Τέσσερα απλοποιημένα και πλήρες μοντέλα του μονωτήρα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τους υπολογισμούς. Αναλυτικά: (a) τα δύο απομονωμένα ηλεκτρόδια, (b) τα δύο ηλεκτρόδια μαζί με τη ράβδο, (c) τα δύο ηλεκτρόδια μαζί με τη ράβδο και το περίβλημά της, χωρίς τους ελαστομερείς δίσκους, (d) τα δύο ηλεκτρόδια μαζί με τη ράβδο, το περίβλημά της και δύο ελαστομερείς δίσκους σε κάθε άκρο και τέλος, (e) το πλήρες μοντέλο του μονωτήρα 34.5 kV [1].

Ως παράδειγμα του πλέγματος των στοιχείων, αναφέρεται ότι το πλήρες μοντέλο του μονωτήρα διαθέτει 12553 τετράπλευρα στοιχεία τα οποία αναπτύχθηκαν στην επιφάνεια των συνόρων καθώς και στις διεπιφάνειες των διαφόρων μέσων. Παρακάτω φαίνεται τμήμα του πλέγματος των στοιχείων επί της επιφάνειας του μονωτήρα.



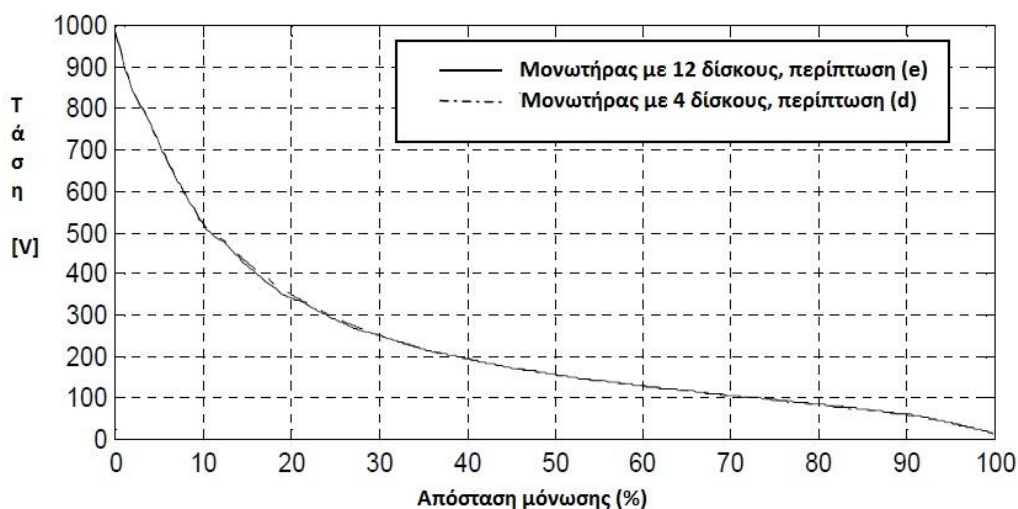
Σχήμα 3.16: Διαμόρφωση με στοιχεία στο μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 34.5 kV [1].

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι ισοδυναμικές καμπύλες γύρω από τα πέντε μοντέλα υπολογισμού του σχήματος 3.15. Υπενθυμίζεται πως το κάτω ηλεκτρόδιο είναι ενεργό (εφαρμογή τάσης 1000 V) και το άνω γειωμένο, ενώ η απόσταση μόνωσης μεταξύ τους ανέρχεται στα 46 cm.



Σχήμα 3.17: Ισοδυναμικές καμπύλες γύρω απ' τα μοντέλα υπολογισμού [1].

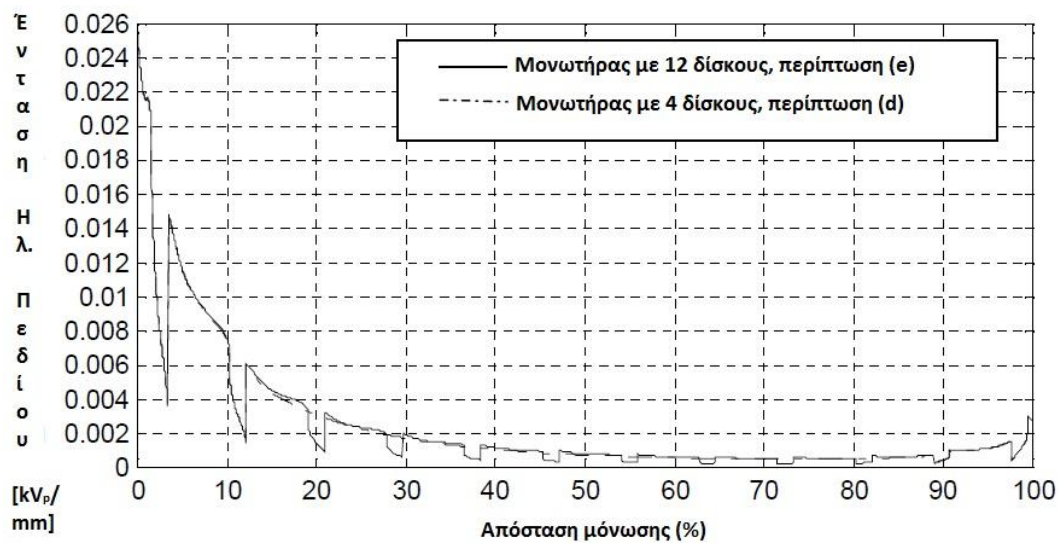
Το νούμερο κατά μήκος της περιμέτρου κάθε καμπύλης σε καθένα απ' τα σχεδιαγράμματα του παραπάνω σχήματος εννοείται σε cm. Στην περίπτωση (a), όπου δεν υπάρχει στερεό μονωτικό υλικό μεταξύ των ηλεκτροδίων, φαίνεται ότι περίπου το 20% της απόστασης μόνωσης «σηκώνει» γύρω στο 70% της εφαρμοζόμενης τάσης. Η παρουσία της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες ράβδου μεταβάλλει ελαφρώς την εικόνα, όπως δείχνει το (b) σχεδιάγραμμα. Η κατανομή των ισοδυναμικών καμπυλών της περίπτωσης (c), με το πολυμερές περιβλήμα (από SIR) πάνω στη ράβδο δείχνει να προσιδιάζει με την εικόνα της περίπτωσης (e), ωστόσο η παρουσία των ελαστομερών δίσκων στην (e) αλλάζει κατά τι το αποτέλεσμα. Αν ενδιαφέρουν περισσότερο οι περιοχές κοντά στο ενεργό και στο γειωμένο άκρο, μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί το απλοποιημένο μοντέλο με τους δύο ελαστομερείς δίσκους της περίπτωσης (d), λαμβάνοντας αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα από άποψη ακρίβειας. Συγκρίνοντας τα (d) και (e) σχεδιαγράμματα, η κατανομή της τάσης στην περιοχή των δύο δίσκων (άνω και κάτω άκρου) μοιάζει σε μεγάλο βαθμό, ενώ και οι θέσεις των ισοδυναμικών γραμμών κατά μήκος της επιφάνειας του περιβλήματος προσεγγίζουν αρκετά η μια την άλλη. Για την ακόμη καθαρότερη ανάδειξη της σύγκλισης των (d) και (e), σχεδιάστηκε η κατανομή της τάσης σε σχέση με την απόσταση μόνωσης και φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα, η μέγιστη διαφορά μεταξύ των τάσεων κατά μήκος της επιφάνειας του περιβλήματος του μονωτήρα βρέθηκε ίση μόλις με το 1.2% της εφαρμοζόμενης τάσης, γεγονός το οποίο καθιστά αποδεκτή την απλοποίηση που έγινε στην περίπτωση (d).



Σχήμα 3.18: Κατανομή της τάσης σε σχέση με την απόσταση μόνωσης κατά μήκος της επιφάνειας του περιβλήματος για τις περιπτώσεις (d) και (e) [1].

Εκτός από την κατανομή της τάσης, υπολογίστηκε για τις περιπτώσεις (d) και (e) και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του περιβλήματος του μονωτήρα, για λόγους σύγκρισης. Τα διαγράμματα κατανομών πεδιακής έντασης για τις δύο αυτές περιπτώσεις απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί. Οι «βυθίσεις» των διαγραμμάτων οφείλονται στο ότι η παράλληλη με τον κατακόρυφο άξονα του μονωτήρα ευθεία, κατά μήκος της οποίας υπολογίζεται η πεδιακή ένταση, συναντά τις προεξοχές των ελαστομερών δίσκων, των οποίων η σχετική διηλεκτρική σταθερά τέθηκε ίση προς 4.3 (μεγαλύτερη δηλαδή από αυτήν του αέρα, 1.0). επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (3.4), κατά την οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μικρότερη κατά μήκος υλικών με μεγαλύτερη επιτρεπτότητα, οι βυθίσεις αυτές ήταν αναμενόμενες. Τα δύο διαγράμματα είναι πανομοιότυπα στην περιοχή γύρω από τους δύο ελαστομερείς δίσκους, κοντά

στα άκρα του μονωτήρα. Μια ελαφρά διαφοροποίηση λαμβάνει χώρα κοντά στους υπόλοιπους 8 δίσκους που εμφανίζονται στην περίπτωση (e).



Σχήμα 3.19: Κατανομή της πεδιακής έντασης σε σχέση με την απόσταση μόνωσης κατά μήκος της επιφάνειας του περιβλήματος για τις περιπτώσεις (d) και (e) [1].

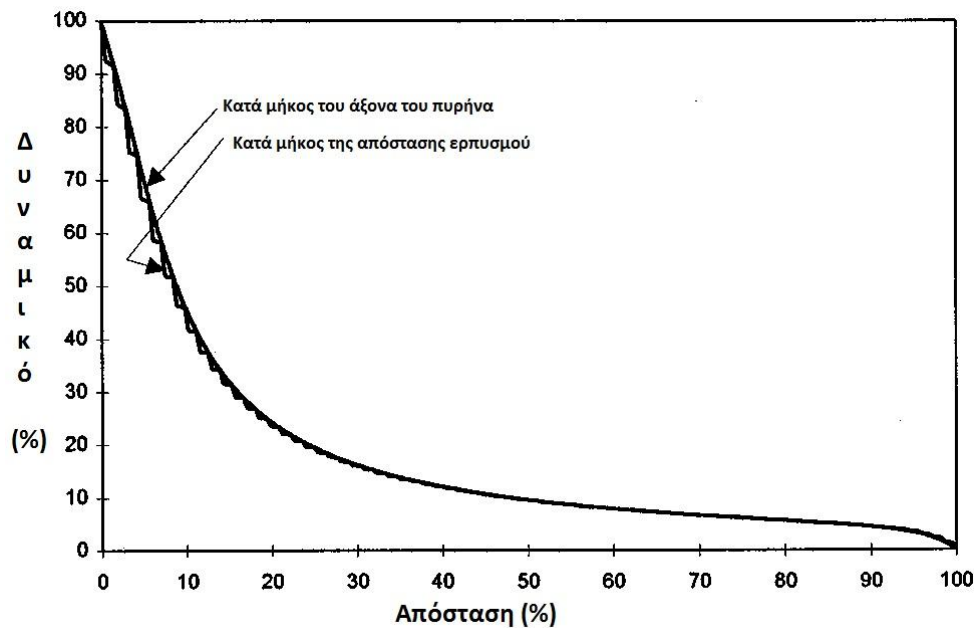
Ωστόσο, στην περιοχή πέραν των δίσκων, το ηλεκτρικό πεδίο παρουσιάζει αξιόλογη συμφωνία για τις δύο περιπτώσεις: η μέγιστη πεδιακή ένταση είναι $0.0256 \text{ kV}_p/\text{mm}$, τόσο για την (d) όσο και για την (e). Επομένως, η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου του μονωτήρα με το συνολικό αριθμό δίσκων μπορεί να εκτιμηθεί, με αρκετά καλή προσέγγιση, από έναν απλοποιημένο μονωτήρα μικρότερου αριθμού δίσκων (π.χ. 2 το πλήθος) σε κάθε άκρο αυτού [1].

Αλλά και στο άρθρο [41] εξετάστηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο μονωτήρα και έγινε σύγκριση με το αντίστοιχο πλήρες. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των ελαστομερών δίσκων στον πεδιακό υπολογισμό και στην κατανομή του δυναμικού κατά μήκος ενός συνθετικού μονωτήρα (η απλοποιημένη γεωμετρία και οι διαστάσεις του οποίου έχουν ήδη παρουσιαστεί στο σχήμα 3.12), υλοποιήθηκαν δισδιάστατοι, αξονικά συμμετρικοί υπολογισμοί και μοντελοποιήθηκε ο μονωτήρας με όλα τα συστατικά του στοιχεία (πυρήνας, περίβλημα, ακροδέκτες, τοροειδές εξομάλυνσης καθώς και οι 72 ελαστομερείς δίσκοι, βλέπε σχήμα 3.12). Το μοντέλο διέθετε 1249 στοιχεία τα οποία κατανέμονταν στην επιφάνεια των συνόρων και στις διεπιφάνειες των διαφόρων μέσων.

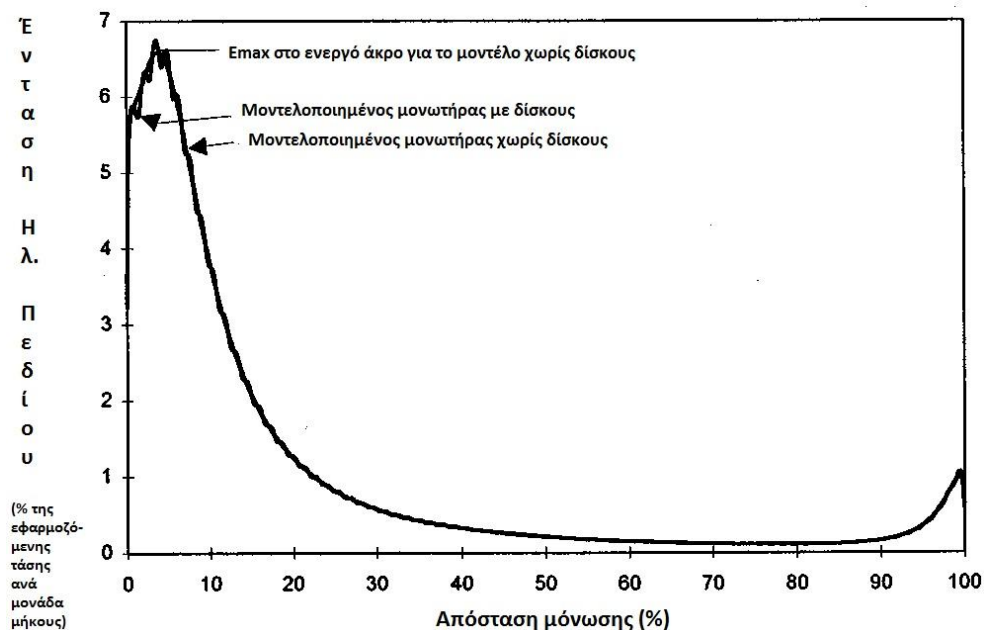
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα (μοντέλο χωρίς δίσκους) και κατά μήκος της απόστασης ερπυσμού (μοντέλο με δίσκους). Το δυναμικό και η απόσταση είναι σε τιμές %. Το ολικό μέσο σχετικό σφάλμα ανάμεσα στις δύο καμπύλες βρέθηκε ίσο με 0.3%, με ένα μέγιστο της τάξης των 7.2% να λαμβάνει χώρα στο γειωμένο άκρο.

Μια πανομοιότυπη σύγκριση που αφορά στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.21. Για την περίπτωση αυτή το ολικό μέσο σχετικό σφάλμα ανάμεσα στις δύο καμπύλες βρέθηκε ίσο με 1.7%, με ένα μέγιστο περίπου 3% να εμφανίζεται κοντά στο ενεργό, αυτή τη φορά, άκρο του μονωτήρα. Η σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων (χωρίς και με δίσκους) υποδεικνύει πως, αν παραλειφθούν οι ελαστομερείς δίσκοι, ένα πολύ μικρό σφάλμα θα

εισαγόταν στον υπολογισμό της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα. Αξίζει ασφαλώς να σημειωθεί ότι μια τέτοια απλοποίηση μειώνει σημαντικά το χρόνο υπολογισμού [41].



Σχήμα 3.20: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του πυρήνα και της απόστασης ερπυσμού (μοντέλο χωρίς και με δίσκους, αντίστοιχα) [41].



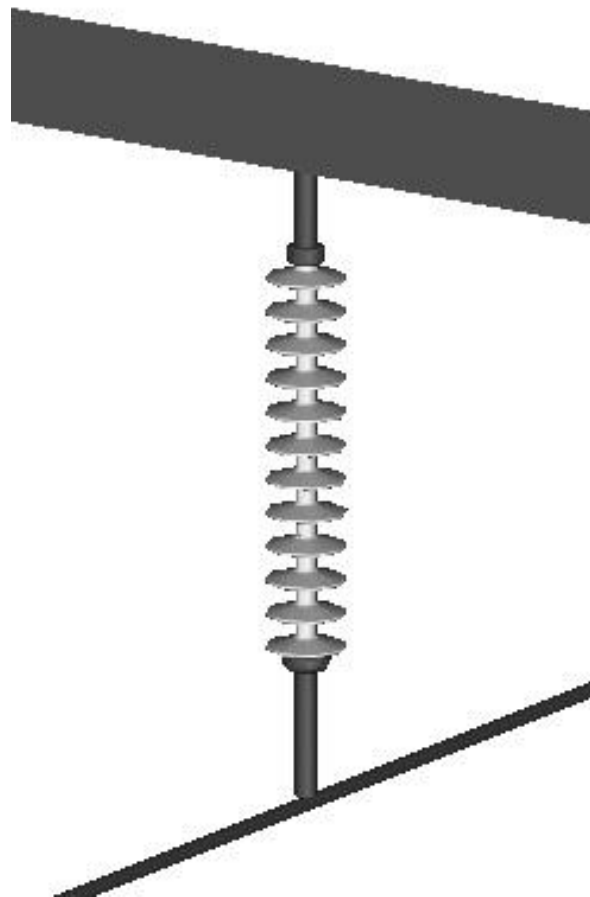
Σχήμα 3.21: Κατανομή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου (μέτρο) κατά μήκος της απόστασης μόνωσης στον άξονα του πυρήνα [41].

3.3.2 Επίδραση του αγωγού και τμήματος του πυλώνα

Μετά την απλοποίηση του μοντέλου του μονωτήρα, τις συγκρίσεις που διενεργήθηκαν, ώστε να καταστεί σαφές κατά πόσο αυτή επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα, και τις διάφορες εναλλακτικές

προτάσεις απλοποίησης που μειώνουν σημαντικά το χρόνο υπολογισμού, επιφέροντας μικρές αλλοιώσεις στα τελικά αποτελέσματα, σειρά έχει η κατασκευή και προσομοίωση του πλήρους μοντέλου του μονωτήρα, με όλα τα συστατικά στοιχεία αυτού (πυρήνας, περίβλημα, δίσκοι, ακροδέκτες), καθώς και με την επιπλέον προσθήκη αγωγού, κάποιας δομής πυλώνα και, ενδεχομένως, τοροειδούς εξομάλυνσης. Σημειώνεται εδώ ότι στο άρθρο [41], που παρουσιάστηκε παραπάνω, το μοντέλο του σχήματος 3.12 διέθετε τοροειδές και οι προσομοιώσεις απλοποίησης έγιναν με αυτό· εντούτοις, η ύπαρξη ή όχι τοροειδούς δεν ήταν παράγοντας διερεύνησης της προηγούμενης υποενότητας.

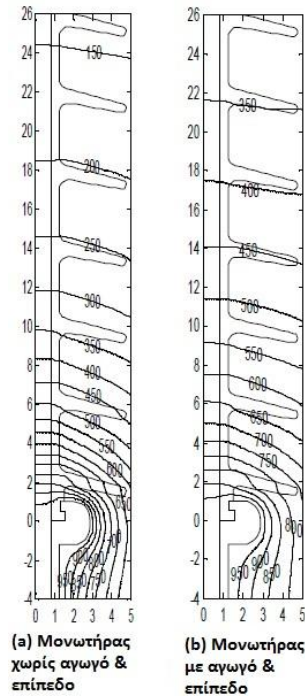
Όταν ένας μη κεραμικός μονωτήρας ανάρτησης τίθεται σε λειτουργία, η ύπαρξη του πυλώνα, ο οποίος βρίσκεται υπό δυναμικό γης, και του αγωγού φάσης επιφέρουν ορισμένες επιδράσεις στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του μονωτήρα. Οι επιδράσεις αυτές εξετάζονται στην εργασία [1] με την προσθήκη, ακριβώς κάτω από το μοντέλο του μονωτήρα, ενός απλού αγωγού μήκους 3 m και διαμέτρου 17.4 mm και την ανάρτησή του από το μέσον ενός 1.6 m x 0.4 m γειωμένου επιπέδου στήριξης. Η δομή αυτή περιγράφεται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 3.22: Πλήρες μοντέλο μονωτήρα ανάρτησης από γειωμένο επίπεδο στήριξης με την προσθήκη αγωγού φάσης [1].

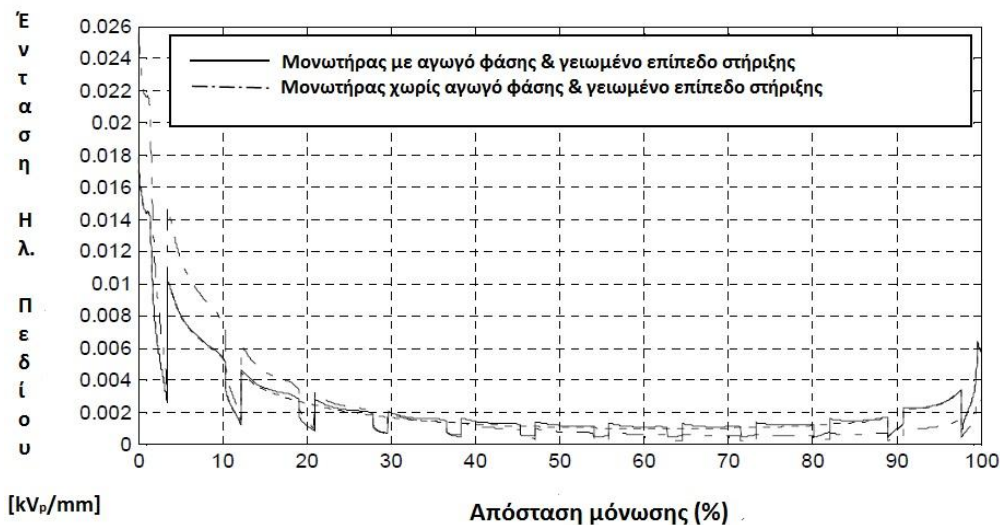
Οι ισοδυναμικές καμπύλες των μοντέλων με και χωρίς την προσθήκη αγωγού φάσης και γειωμένου επιπέδου στήριξης φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, στο μονωτήρα χωρίς αγωγό και επίπεδο το 20% της απόστασης μόνωσης «σηκώνει» το 65%

περίπου της εφαρμοζόμενης τάσης. Αντίθετα, στο μοντέλο με αγωγό και επίπεδο, το 20% της απόστασης μόνωσης «σηκώνει» το 47% της εφαρμοζόμενης τάσης.



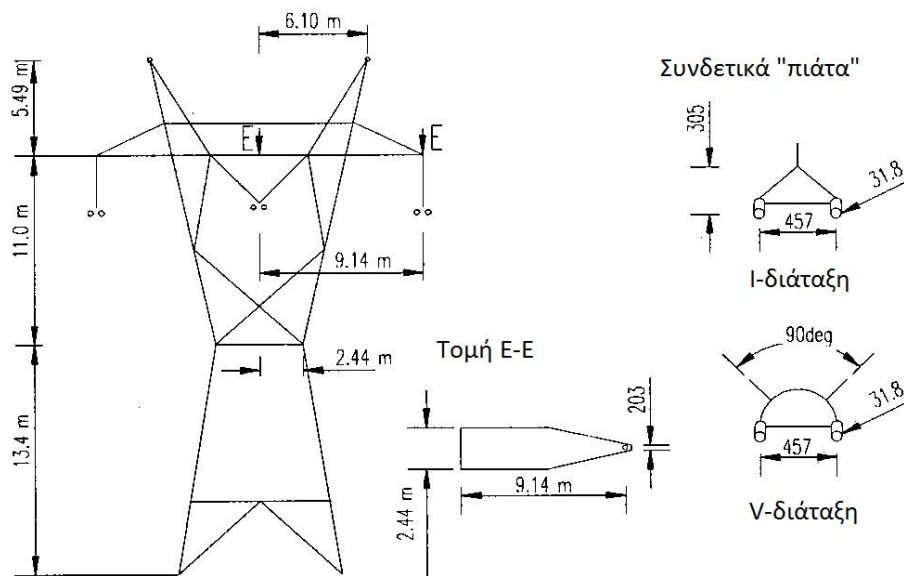
Σχήμα 3.23: Ισοδυναμικές καμπύλες γύρω από δύο μοντέλα υπολογισμού [1].

Οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με και χωρίς την προσθήκη αγωγού και επιπέδου εικονίζονται παρακάτω. Η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης παρουσία του αγωγού είναι $0.018 \text{ kV}_p/\text{mm}$ και $0.006 \text{ kV}_p/\text{mm}$ για το ενεργό και γειωμένο άκρο του μονωτήρα, αντίστοιχα, όταν εφαρμόζεται τάση 1000 V . Οι αντίστοιχες τιμές για το μοντέλο χωρίς τον αγωγό είναι $0.0256 \text{ kV}_p/\text{mm}$ και $0.003 \text{ kV}_p/\text{mm}$. Είναι φανερό πως η ύπαρξη αγωγού φάσης και γειωμένου επιπέδου στήριξης έχει ως αποτέλεσμα η ηλεκτρική πεδιακή ένταση να μειώνεται στο ενεργό, αλλά να αυξάνεται κοντά στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα.



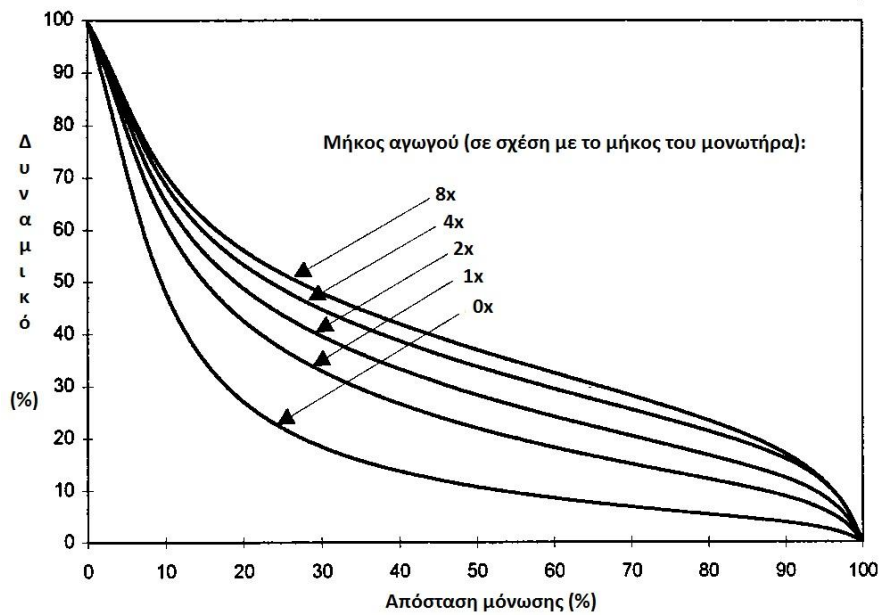
Σχήμα 3.24: Μέτρο πεδιακής έντασης κατά μήκος της απόστασης μόνωσης στην επιφάνεια του περιβλήματος του μονωτήρα με και χωρίς την προσθήκη αγωγού φάσης & γειωμένου επιπέδου στήριξης [1].

Η επίδραση του αγωγού και της διαμόρφωσης του πυλώνα μελετήθηκε και στο άρθρο [41]. Ειδικότερα, το μοντέλο του σχήματος 3.12 τοποθετήθηκε σ' έναν πυλώνα συστήματος μεταφοράς 345 kV, η απλοποιημένη γεωμετρία και οι διαστάσεις του οποίου, μαζί με εκείνες των συνδετικών «πιάτων» και των αγωγών, φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί. Τρεις διατάξεις μονωτήρων (δύο Ι-διατάξεις και μία V-διάταξη) εγκαταστάθηκαν σ' αυτόν, ενώ κάθε φάση που αναρτάται αποτελείται από ένα διπλό αγωγό. Η διάμετρος κάθε αγωγού είναι 32 mm και εκείνη του ζεύγους των δύο (μαζί) 457 mm. Και οι δύο αγωγοί μοντελοποιήθηκαν ως λείοι και καθαροί, ενώ οι αγωγοί προστασίας αγνοήθηκαν κατά την πεδιακή ανάλυση. Το πάχος των συνδετικών «πιάτων» τόσο της Ι, όσο και της V-διάταξης είναι 25.4 mm. Αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι παραπάνω διαστάσεις αποτελούν αναφορικές τιμές και δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα σε κάποιο πρακτικό σχεδιασμό, ενώ πρέπει να τονιστεί ότι το υπό μελέτη μοντέλο περιορίζεται σε **μία απομονωμένη φάση**, μη λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές επιδράσεις των άλλων δύο φάσεων (με όλα τα συμπαρομαρτούντα αυτών, δηλαδή αγωγούς, διατάξεις μονωτήρων και διαμορφώσεις πυλώνα) στην περιοχή του εξετασθέντος μονωτήρα.



Σχήμα 3.25: Απλοποιημένη γεωμετρία και μέγιστες διαστάσεις των πυλώνα μεταφοράς, συνδετικών «πιάτων» και αγωγών προς μοντελοποίηση [41].

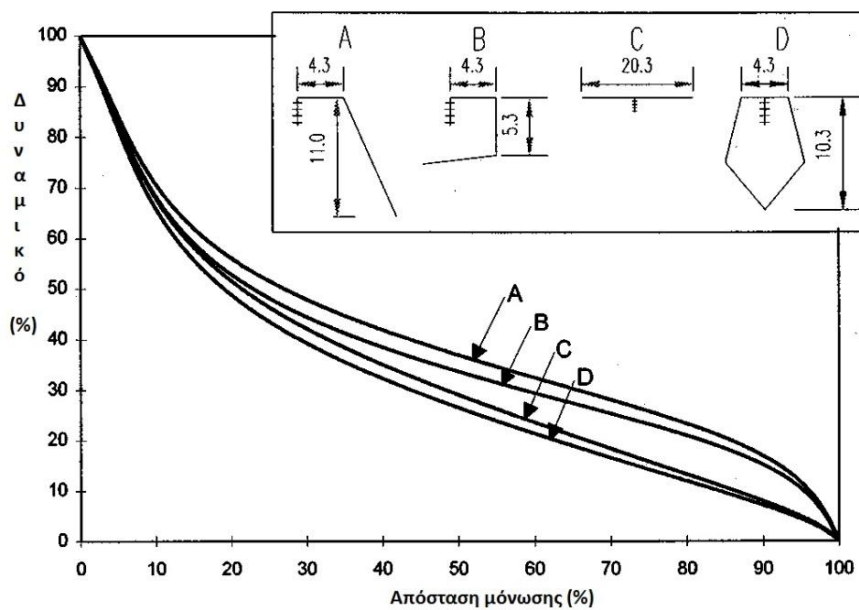
Η επίδραση των αγωγών στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού εξετάστηκε για την περίπτωση της Ι-διάταξης, μοντελοποιώντας τη γεωμετρία της εξωτερικής (πλευρικής) φάσης του πυλώνα, μαζί με το συνδετικό πιάτο και τον αγωγό, όπως αυτά φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Το μήκος του αγωγού επιλέχθηκε διαδοχικά 0, 1, 2, 4 και 8 φορές επί το μήκος του μονωτήρα (2743 mm), προκειμένου να καταστεί σαφής η επίδρασή του στα τελικά αποτελέσματα. Η κατανομή του δυναμικού που προέκυψε για κάθε περίπτωση μήκους φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Εύκολα μπορεί κανείς να διακρίνει ότι το μήκος του αγωγού ασκεί σημαντική επίδραση στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας ως αναφορά τον αγωγό μηδενικού μήκους, η τιμή του δυναμικού στο μέσον του μονωτήρα αυξήθηκε κατά τους παράγοντες 2.1, 2.7, 3.2 και 3.5 για μήκη αγωγού 1, 2, 4 και 8 φορές το μήκος του μονωτήρα, αντίστοιχα. Την ίδια στιγμή, η μέγιστη πεδιακή ένταση κατά μήκος της απόστασης μόνωσης (δεν δείχνεται στο σχήμα) μειώθηκε κατά τους παράγοντες 0.74, 0.65, 0.59 και 0.55, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.26: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της απόστασης μόνωσης στον άξονα του πυρήνα του μονωτήρα της Ι-διάταξης, συμπεριλαμβανομένων των πυλώνων, συνδετικού πιάτου και διαφόρων τιμών μήκους αγωγού, όπως υποδεικνύονται [41].

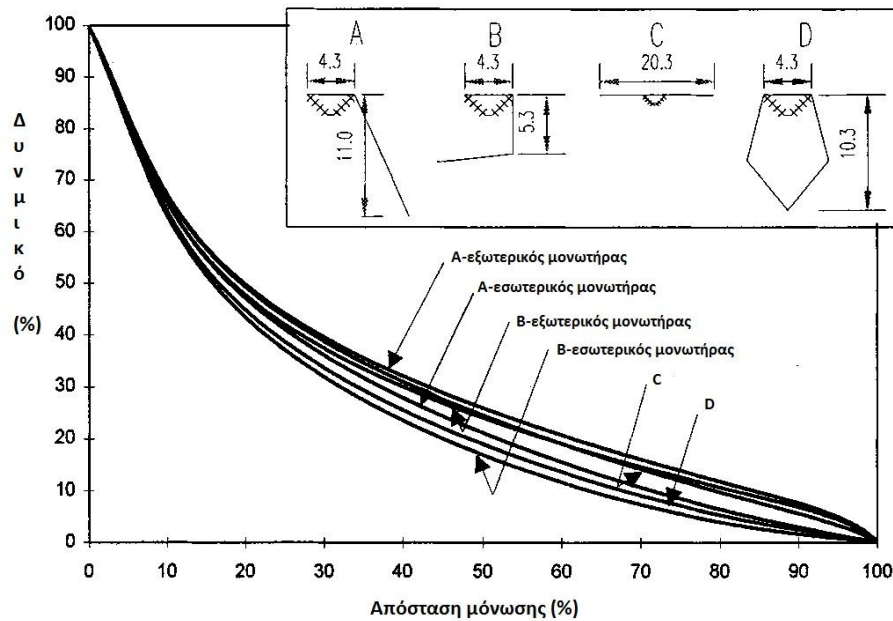
Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν πως τυχόν αγνόηση του αγωγού στην όλη γεωμετρία θα συνεπαγόταν ένα υπερεκτιμημένο, στο σύνολό του, ηλεκτρικό πεδίο και ένα υποεκτιμημένο δυναμικό κατά μήκος του μονωτήρα.

Οι επιδράσεις διαμορφώσεων πυλώνων μελετήθηκαν επίσης στο άρθρο [41] τόσο για Ι, όσο και για V-διατάξεις. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος Ι-διάταξης με τέσσερις τυπικές διαμορφώσεις πυλώνων.



Σχήμα 3.27: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της απόστασης μόνωσης της Ι-διάταξης με 4 διαμορφώσεις πυλώνων [41].

Οι διαμορφώσεις A και D είναι οι ίδιες με αυτές που περιγράφηκαν στον πυλώνα του σχήματος 3.25. Η διαμόρφωση B αποτελεί μια απλοποίηση μιας τυπικής 6-αγωγών δομής πυλώνα (η συγκεκριμένη αφορά στην ανώτερη φάση). Η διαμόρφωση C είναι μια εργαστηριακή προσομοίωση στην οποία ο μονωτήρας αναρτήθηκε από το μέσον ενός 20.3 m x 2.4 m γειωμένου επιπέδου. Πανομοιότυπα αποτελέσματα που αφορούν στη V-διάταξη φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί, στο οποίο η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος τόσο του εξωτερικού, όσο και του εσωτερικού (προς την πλευρά του πυλώνα) μονωτήρα των διαμορφώσεων A και B έχει σχεδιαστεί ξεχωριστά.



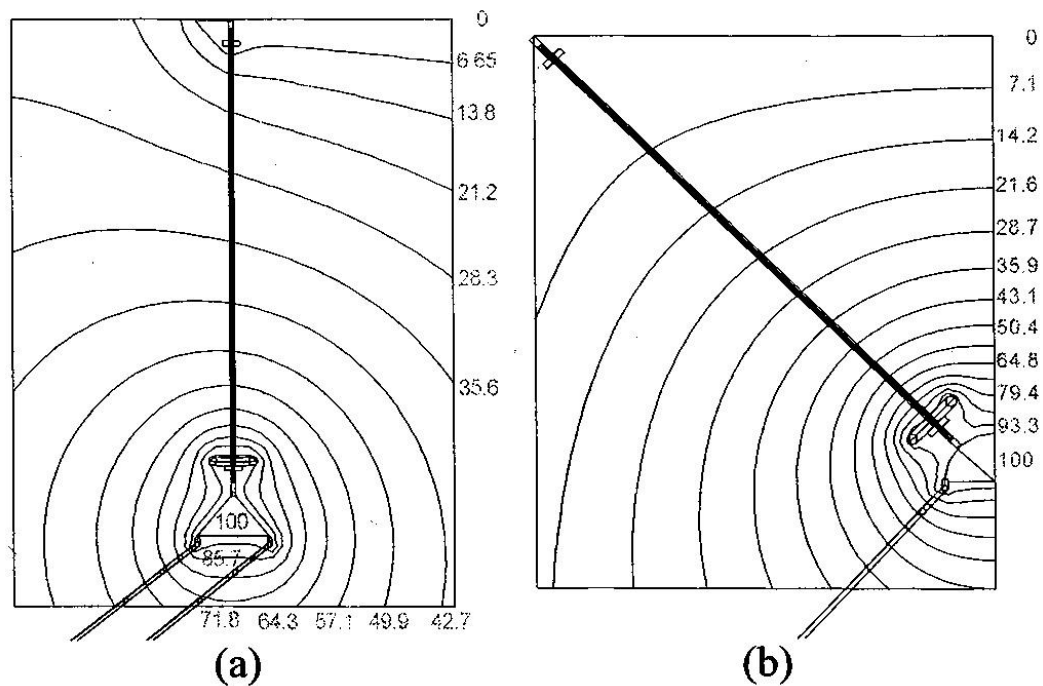
Σχήμα 3.28: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της απόστασης μόνωσης της V-διάταξης με 4 διαμορφώσεις πυλώνα [41].

Η κατανομή της πεδιακής έντασης (κατά μέτρο) κατά μήκος του άξονα των μονωτήρων είναι παρόμοια, ως προς τη μορφή, με αυτήν του σχήματος 3.21. Ωστόσο, η μέγιστη τιμή αυτής (E_{max}) εξαρτάται απ' την εκάστοτε διαμόρφωση. Για την I-διάταξη η E_{max} λαμβάνει τιμές 3.44, 3.72, 3.79 και 4.00 % της εφαρμοζόμενης τάσης ανά μονάδα μήκους για τις δομές A, B, C και D, αντίστοιχα. Ακριβέστερα, όσο περισσότερο περικυκλωμένος από γειωμένα κατασκευαστικά τμήματα είναι ο μονωτήρας, τόσο υψηλότερη είναι η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης, E_{max} . Όσον αφορά στη V-διάταξη, η E_{max} είναι 3.82% (εξωτερικός μονωτήρας)/4.00%(εσωτερικός μονωτήρας, προς την πλευρά του πυλώνα) για τη διαμόρφωση A, 4.00% (εξωτερικός μονωτήρας)/4.30%(εσωτερικός μονωτήρας, προς την πλευρά του πυλώνα) για τη δομή B, 3.84 και 4.01 % για τις διαμορφώσεις C και D, αντίστοιχα [41].

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ισοδυναμικές καμπύλες για την I-διάταξη διαμόρφωσης A και για τη V-διάταξη διαμόρφωσης D.

Λόγος για την επίδραση του αγωγού, ενός βραχίονα του πυλώνα, καθώς και του τορροειδούς εξομάλυνσης γίνεται και στο άρθρο [49], του οποίου η χρησιμοποιούμενη συνδυαστική μέθοδος (εκείνη του «Υπο-Μοντέλου») παρουσιάστηκε και αναλύθηκε διεξοδικά στην υποενότητα 3.2.2.

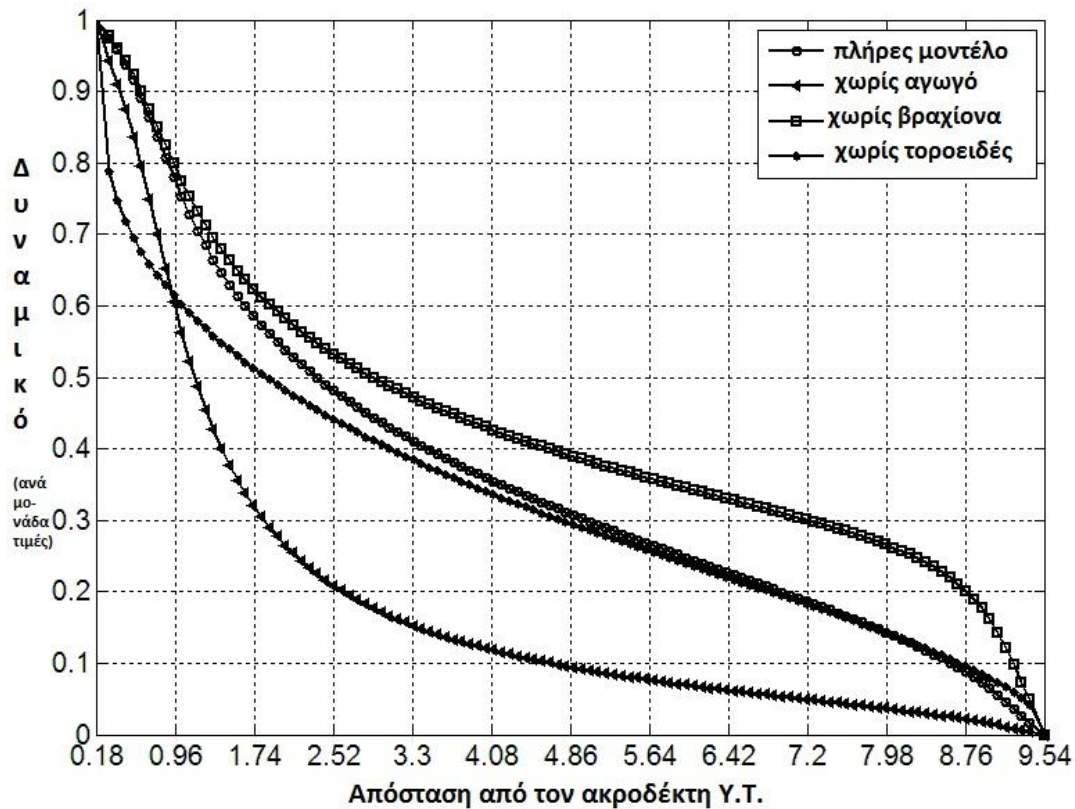
Στο άρθρο αυτό προσομοιώνεται ένας συνθετικός μονωτήρας υποτιθέμενου συστήματος μεταφοράς 1000 kV AC. Ο μονωτήρας διαθέτει 117 ίσες διαμέτρου (250 mm) ελαστομερείς δίσκους και η απόσταση μεταξύ τεσσάρων δίσκων είναι 79 mm.



Σχήμα 3.29: Ισοδυναμικές καμπύλες για την (α) I-διάταξη πυλώνα A και για την (β) V-διάταξη πυλώνα D [41].

Η διάμετρος της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες ράβδου είναι 40 mm και η αντίστοιχη για τους μεταλλικούς ακροδέκτες 30 mm. Το μήκος των τελευταίων είναι 180 και 210 mm, ενεργού και γειωμένου, αντίστοιχα. Η μηχανική αντοχή του μονωτήρα ανέρχεται στα 210 kN, ενώ το συνολικό του μήκος στα 9750 mm. Το άκρο Υ.Τ. είναι εξοπλισμένο με δύο τοροειδή εξομάλυνσης, οι διάμετροι σωλήνα των οποίων είναι 50 και 120 mm, οι εξωτερικές διαμέτροι των δακτυλίων 400 και 1120 mm και το ύψος τοποθέτησης (μετρώντας από το ενεργό άκρο) 250 και 500 mm, αντίστοιχα. Το γειωμένο άκρο είναι εξοπλισμένο με ένα ακόμη τοροειδές, διαμέτρου σωλήνα 120 mm, εξωτερικής διαμέτρου δακτυλίου 720 mm και ύψους (απ' το ενεργό άκρο) 9480 mm. Η επιτρεπτότητα των ελαστομερών δίσκων και του πυρήνα της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες ράβδου τέθηκαν ίσες προς 3.5 και 3.0, αντίστοιχα. Το μήκος του οκταπλού αγωγού (η διάμετρος κάθε αγωγού του οποίου ήταν 33.6 mm) τέθηκε ίσο προς 10 m στο υπό μελέτη μοντέλο. Προκειμένου να αναλυθούν οι επιδράσεις των αγωγού, τοροειδών εξομάλυνσης και βραχίονα πυλώνα, εξετάστηκε το πλήρες μοντέλο (με όλα τα συμπαρομαρτούντα που μόλις αναφέρθηκαν), καθώς και τα μοντέλα χωρίς αγωγό, χωρίς τοροειδή και χωρίς βραχίονα με εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου του υπο-μοντέλου. Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα δίδεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει από το σχήμα αυτό, χωρίς τοροειδές εξομάλυνσης και αγωγό, το δυναμικό μειώνεται έντονα στο άκρο Υ.Τ.· ιδιαίτερα η μείωση του δυναμικού του χωρίς τοροειδές εξομάλυνσης μοντέλου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με εκείνου χωρίς αγωγό. Αφαιρώντας το βραχίονα του πυλώνα, το δυναμικό αυξάνει κοντά στο γειωμένο άκρο. Επομένως, ο αγωγός, τα τοροειδή εξομάλυνσης και ο βραχίονας του πυλώνα επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή του δυναμικού [49].

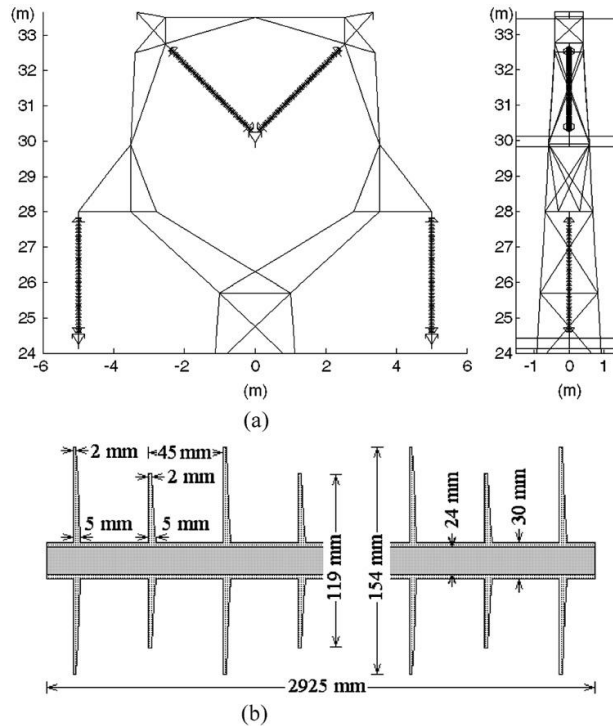


Σχήμα 3.30: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα [49].

3.3.3 Επίδραση του 3φ συστήματος μεταφοράς και ολόκληρου του πυλώνα

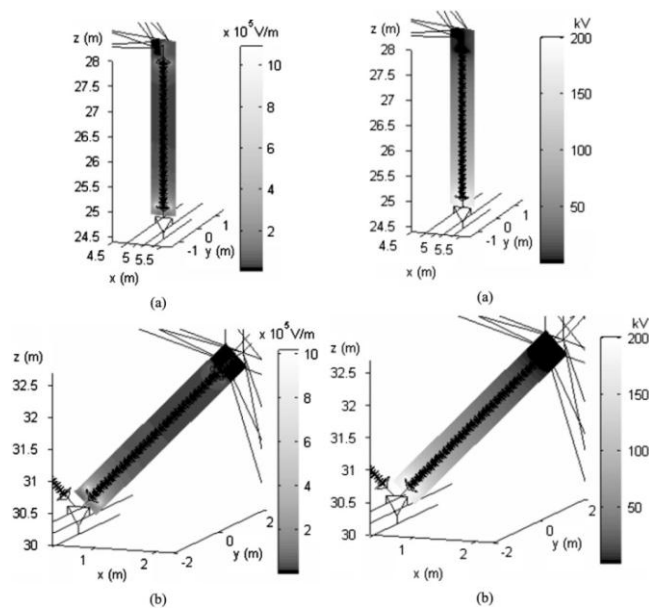
Προχωρώντας λίγο ακόμη στο «στήσιμο» ενός μοντέλου που θα λαμβάνει υπόψη του ακόμη ρεαλιστικότερες συνθήκες, το επόμενο βήμα είναι να συνυπολογισθεί η επίδραση των άλλων δύο φάσεων, με όλα τα επιμέρους στοιχεία που τις απαρτίζουν (αγωγοί, διατάξεις μονωτήρων, τορρειδή εξομάλυνσης), καθώς και της πλήρους κατασκευής του πυλώνα στον οποίο αναρτώνται όλα τα παραπάνω. Προς την κατεύθυνση αυτή κινούνται οι δημοσιεύσεις [42] και [43], των οποίων οι χρησιμοποιούμενες συνδυαστικές αριθμητικές μέθοδοι (CSM με BEM και MOM με BEM, αντίστοιχα) αναφέρθηκαν και περιγράφηκαν συνοπτικά στην υποενότητα 2.2.2 της παρούσας εργασίας.

Τόσο στο [42], όσο και στο [43] πραγματοποιείται πεδιακή ανάλυση και προσδιορίζεται η κατανομή του δυναμικού γύρω από ένα πυλώνα μεταφοράς 330 kV με συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης (δύο I-διατάξεις και μία V-διάταξη). Το υπό εξέταση μοντέλο φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η rms τιμή της εφαρμοζόμενης φασικής τάσης είναι 200 kV. Κάθε μονωτήρας αποτελείται από 33 μεγάλους και 32 μικρούς ελαστομερείς δίσκους. Ο αγωγός κάθε φάσης είναι τριπλός, με τους υπο-αγωγούς να έχουν διάμετρο ίση προς 18.9 mm (έκαστος) και να είναι τοποθετημένοι σε διάταξη ανάποδου ισοπλεύρου τριγώνου. Η πλευρά του τριγώνου αυτού είναι 350 mm, ενώ το μήκος τόσο των αγωγών φάσης, όσο και των αγωγών προστασίας (εδώ δεν αγνοήθηκαν, όπως στο [41]) είναι 400 m. Η διάμετρος του μεταλλικού σωλήνα καθενός από τα (δύο) τορρειδή εξομάλυνσης είναι 30 mm, ενώ η εξωτερική διάμετρος ανέρχεται στα 340 mm. Η απόσταση από την άνω επιφάνεια του τορρειδούς ως το άκρο του μονωτήρα φτάνει τα 65 mm.



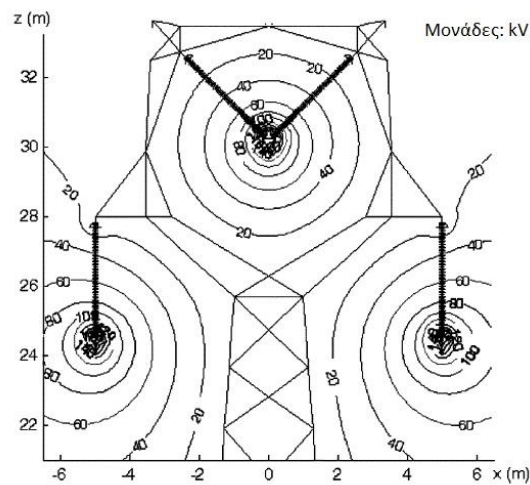
Σχήμα 3.31: Πυλώνας 3φ γραμμής μεταφοράς 330 kV με συνθετικούς μονωτήρες. (α) Ο πυλώνας 3φ γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος 330 kV. (β) Πλήρης γεωμετρία του συνθετικού μονωτήρα που χρησιμοποιήθηκε [42, 43].

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού στην περιοχή γύρω από τους μονωτήρες (I και V-διάταξης, αντίστοιχα), όπως προέκυψαν από τα παράθυρα του χρησιμοποιούμενου λογισμικού προσομοίωσης. Όσον αφορά στην εικονιζόμενη πεδιακή κατανομή, αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αναφέρεται σε rms τιμές που προέκυψαν απ' τη σχέση $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$, όπου E_x , E_y και E_z είναι επίσης rms τιμές. Στην πραγματικότητα, η κατεύθυνση και το μέτρο της πεδιακής έντασης μεταβάλλεται με το χρόνο, λόγω της θεώρησης του τριφασικού συστήματος μεταφοράς.



Σχήμα 3.32: Κατανομή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού κατά μήκος των συνθετικών μονωτήρων (α) της I-διάταξης και (β) μιας εκ των δύο V-διάταξης [42, 43].

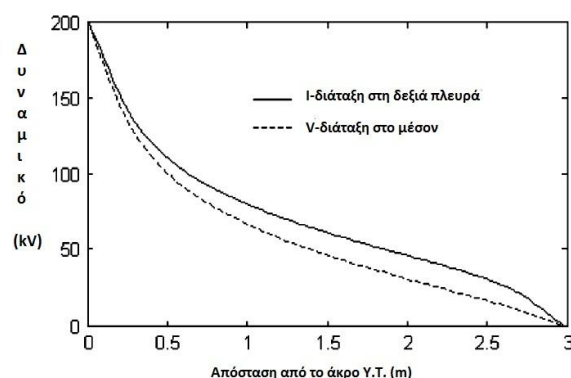
Η κατανομή του δυναμικού στην περιοχή γύρω από τον πυλώνα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, μέσω ισοδυναμικών καμπυλών.



Σχήμα 3.33: Κατανομή του δυναμικού γύρω από τον πυλώνα (rms τιμές) [42, 43].

Από τα παραπάνω δύο σχήματα καθίσταται σαφές ότι η επίδραση της ύπαρξης των συνθετικών μονωτήρων στην όλη κατανομή ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού γύρω απ' τον πυλώνα είναι πολύ μικρή, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του πολύ μικρότερου όγκου των μονωτήρων σε σχέση με ολόκληρο τον πυλώνα. Ωστόσο, η παρουσία του πυλώνα και της γραμμής επιδρά σημαντικά στην πεδιακή κατανομή κατά μήκος των μονωτήρων.

Λόγω της ύπαρξης του πυλώνα και των διαφορετικών διατάξεων εγκατάστασης των μονωτήρων (I & V-διάταξη), οι κατανομές της πεδιακής έντασης στην περιοχή γύρω απ' τους μονωτήρες διαφέρουν αρκετά. Από το ακόλουθο σχήμα φαίνεται ότι το δυναμικό στο άκρο Υ.Τ. της V-διάταξης μειώνεται γρηγορότερα απ' αυτό της I-διάταξης· αντίθετα, το δυναμικό μειώνεται με βραδύτερο ρυθμό στο γειωμένο άκρο της V-διάταξης απ' ότι στην I-διάταξη. Εύκολα συμπεραίνει κανείς, λαμβάνοντας υπόψη του τη σχέση (3.2), ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι υψηλότερη στο άκρο Υ.Τ. και χαμηλότερη στο γειωμένο άκρο της V-διάταξης, σε σχέση με εκείνη της I-διάταξης στα άκρα αυτά, αντίστοιχα.



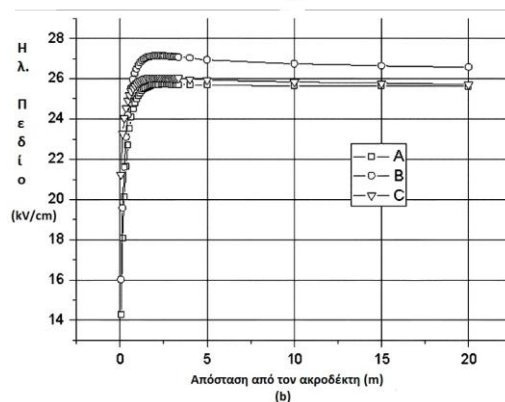
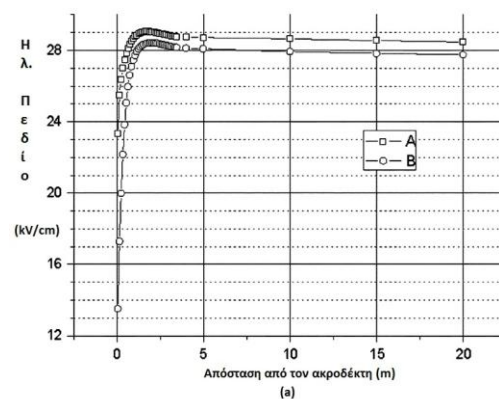
Σχήμα 3.34: Κατανομή του δυναμικού (rms τιμές) κατά μήκος των αξόνων των μονωτήρων [42].

Συγκρίνοντας οπτικά την κατανομή του παραπάνω με εκείνη του σχήματος 3.20, διαπιστώνει κανείς ότι το δυναμικό εδώ μειώνεται με ομαλότερο τρόπο (με μικρότερο δηλαδή ρυθμό). Στην

προσομοίωση του σχήματος 3.20 δεν είχε ληφθεί υπόψη η κατασκευή του πυλώνα ούτε και οι αγωγοί φάσης ή προστασίας, γίνεται επομένως ξεκάθαρο πως τόσο ο πυλώνας, όσο και η 3φ γραμμή μεταφοράς επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των μονωτήρων [42].

Εμβαθύνοντας περισσότερο στη λεπτομέρεια, παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον η κατάσταση που επικρατεί, από τη σκοπιά της ηλεκτρικής καταπόνησης πάντα, στις διαφορετικές διατάξεις κάθε φάσης. Όπως κατέδειξαν οι προσομοιώσεις, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο άκρο Υ.Τ. της V-διάταξης είναι κατά τι υψηλότερη απ' αυτήν στο άκρο Υ.Τ. της I-διάταξης, ενώ η αντίστοιχη τιμή στο γειωμένο άκρο της V-διάταξης είναι αρκετά χαμηλότερη από εκείνη στο γειωμένο άκρο της I-διάταξης. Το γεγονός αυτό οφείλεται ενδεχομένως στο ότι ο πυλώνας επιδρά με διαφορετικό τρόπο στα γειωμένα άκρα των διαφόρων διατάξεων των μονωτήρων. Εντούτοις, αν και η V-διάταξη βρίσκεται στο παράθυρο του πυλώνα (επομένως υφίσταται τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική καταπόνηση, όπως προαναφέρθηκε), η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου **επί των επιφανειών των τοροειδών εξομαλυνσης** του άκρου Υ.Τ. της V-διάταξης είναι μικρότερη από εκείνη του άκρου Υ.Τ. της I-διάταξης, γεγονός το οποίο, κατά πάσα πιθανότητα, εξηγείται, λόγω της παρουσίας δύο τοροειδών στο άκρο αυτό, οπότε αυτά, κατά κάποιον τρόπο, «αλληλοεξομαλύνονται», από πεδιακής άποψης.

Αξίζει να σημειωθεί πως, εξαιτίας της εξομαλυντικής επίδρασης των ακροδεκτών και των τοροειδών, οι μέγιστες τιμές της πεδιακής έντασης κατά μήκος των επιφανειών των υπο-αγωγών στην περιοχή κοντά στον πυλώνα δε λαμβάνουν χώρα ακριβώς πάνω στο άκρο σύνδεσης αλλά λίγο μακρύτερα απ' αυτό.



Σχήμα 3.35: Μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των επιφανειών των υπο-αγωγών στην περιοχή κοντά στον πυλώνα. (α) Μεσαία φάση: A είναι ο χαμηλότερος και B ο ψηλότερος υπο-αγωγός και των δύο πλευρών. (β) Πλευρική φάση: A είναι ο υψηλότερος μακριά απ' τον πυλώνα, B ο ψηλότερος κοντά στον πυλώνα και C είναι ο χαμηλότερος υπο-αγωγός. [43].

Από το παραπάνω σχήμα είναι ευδιάκριτο ότι η πεδιακή ένταση επί των επιφανειών των αγωγών σε εξαιρετικά κοντινή απόσταση από τα άκρα σύνδεσης διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, ενώ αυξάνει ταχύτατα καθώς μεγαλώνει η απόσταση απ' αυτά, φτάνοντας τη μέγιστη τιμή της, λόγω της επίδρασης του πυλώνα. Ύστερα μειώνεται ελαφρώς, έως ότου σταθεροποιηθεί σε κάποια μέση τιμή.

Όσον αφορά στους υπο-αγωγούς της μεσαίας φάσης, λόγω του ότι ο χαμηλότερος απ' αυτούς απέχει περισσότερο απ' τα τοροειδή, η πεδιακή ένταση στην επιφάνειά του κοντά στους ακροδέκτες είναι μεγαλύτερη από εκείνη των ψηλότερων υπο-αγωγών και των δύο πλευρών· εντούτοις, με την αύξηση της απόστασης από το άκρο σύνδεσης, η διαφορά ανάμεσά στους τρεις μειώνεται. Η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζεται σε απόσταση 1.7 m από το άκρο σύνδεσης και είναι 10% υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή επί της επιφάνειας των υπο-αγωγών λίγα μέτρα μακρύτερα από αυτό.

Όσον αφορά στους υπο-αγωγούς της πλευρικής φάσης (οποιασδήποτε απ' τις δύο), λόγω του ότι ο χαμηλότερος απ' αυτούς απέχει περισσότερο απ' το τοροειδές, η πεδιακή ένταση στην επιφάνειά του αρκετά κοντά στο άκρο σύνδεσης είναι, και σ' αυτή την περίπτωση, μεγαλύτερη από αυτήν των δύο ψηλότερων υπο-αγωγών και των δύο πλευρών. Επιπλέον, όπως και προηγουμένως, με την αύξηση της απόστασης από το άκρο σύνδεσης, η διαφορά ανάμεσά στους τρεις μειώνεται. Ωστόσο, η πεδιακή ένταση επί της επιφάνειας του χαμηλότερου αυξάνει με βραδύτερο ρυθμό από εκείνη του ψηλότερου υπο-αγωγού κοντά στον πυλώνα και στην απόσταση των 0.6 m απ' το άκρο σύνδεσης αρχίζει να γίνεται μικρότερη. Η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζεται σε απόσταση 2 m απ' το άκρο σύνδεσης και είναι 8% υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή επί της επιφάνειας των υπο-αγωγών λίγα μέτρα μακρύτερα από αυτό.

Συμπερασματικά, θα μπορούσε κανείς να σημειώσει πως, χάρη στην εξομαλυντική επίδραση των μεταλλικών ακροδεκτών των μονωτήρων και των τοροειδών εξομάλυνσης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια των αγωγών διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα στην περιοχή αρκετά κοντά στα σημεία σύνδεσης. Καθώς όμως η απόσταση αυξάνει λίγο από αυτά, οι επιδράσεις του πυλώνα και των αγωγών των άλλων δύο φάσεων επικρατούν και οι πεδιακές εντάσεις φτάνουν στις αντίστοιχες μέγιστες τιμές τους. Λόγω της ύπαρξης του πυλώνα, οι μέγιστες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου στις επιφάνειες των υπο-αγωγών **κάθε φάσης** είναι επίσης διαφορετικές. Καθώς η μεσαία φάση περνά απ' το παράθυρο του πυλώνα, η μέγιστη πεδιακή ένταση αυτής είναι 7% υψηλότερη από εκείνες των δύο πλευρικών φάσεων. Η μέγιστη τιμή στη μεσαία φάση εμφανίζεται στο χαμηλότερο υπο-αγωγό, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τις πλευρικές φάσεις εμφανίζεται στον ψηλότερο υπο-αγωγό κοντά στον πυλώνα [43].

3.3.4 Επίδραση των παραμέτρων του τοροειδούς εξομάλυνσης

Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τόσο επί της επιφάνειας ενός συνθετικού μονωτήρα, όσο και πάνω στους μεταλλικούς ακροδέκτες του ξεπεράσει ένα κατώτατο όριο, τότε ξεκινούν να εκδηλώνονται «στεμματοειδείς» φωτεινές μερικές εκκενώσεις, φαινόμενο διεθνώς γνωστό και ως «corona». Λόγω των μερικών αυτών εκκενώσεων είναι δυνατό να προκληθούν προβλήματα στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον της γραμμής μεταφοράς, καθώς και στο μονωτικό υλικό των συνθετικών μονωτήρων που αναρτώνται σ' αυτήν (το φαινόμενο corona αποτελεί έναν περιβαλλοντικό παράγοντα γήρανσης, όπως αναφέρθηκε και περιγράφηκε στην υποενότητα 1.6.1 της παρούσας εργασίας).

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου και την τοπική μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εγκαθίστανται μεταλλικοί κυλινδρικοί δακτύλιοι (γνωστοί και ως «τοροειδή εξομάλυνσης») τόσο στο

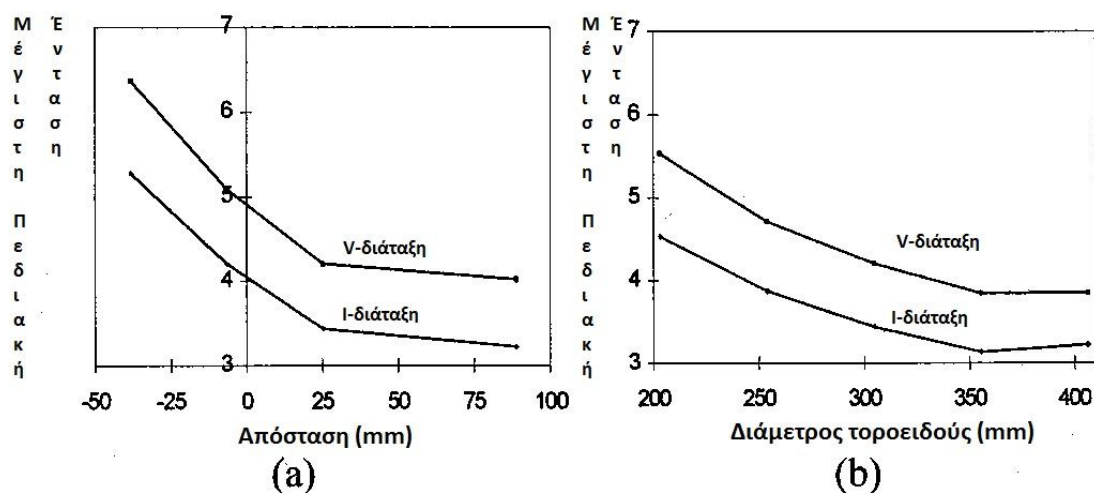
άκρο σύνδεσης του αγωγού φάσης, όσο και στο γειωμένο άκρο του συνθετικού μονωτήρα, όταν το επίπεδο τάσης λειτουργίας της γραμμής υπερβαίνει τα 330 kV [52]. Οι κατασκευαστικές παράμετροι κάθε τοροειδούς εξομάλυνσης επηρεάζουν άμεσα την κατανομή ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα. Εγκαθιστώντας καλώς σχεδιασμένα τοροειδή, όχι μόνο περιορίζεται το φαινόμενο corona (με τη συνακόλουθη μείωση των προκαλούμενων απ' αυτό ακουστικού θορύβου και ραδιοφωνικών παρεμβολών) και βελτιώνονται οι κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού, αλλά μπορεί επιπλέον να προληφθεί η χημική υποβάθμιση του περιβλήματος και των ελαστομερών δίσκων (κατασκευασμένων συνήθως από SIR). Ακατάλληλο τοροειδές εξομάλυνσης ενδεχομένως να προκαλέσει φαινόμενο corona στην επιφάνεια του ίδιου, όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γίνει αρκετά υψηλή, κάτι το οποίο μπορεί με τη σειρά του να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μονωτικής ικανότητας του συνθετικού μονωτήρα. Επομένως, ο σχεδιασμός και η μελέτη του τοροειδούς εξομάλυνσης διαδραματίζουν δεσπόζοντα ρόλο τόσο από θεωρητικής-ακαδημαϊκής, όσο και από πρακτικής και λειτουργικής σκοπιάς [52].

Στο άρθρο [41] εξετάστηκε η επίδραση των παραμέτρων του τοροειδούς εξομάλυνσης (ύψος, διάμετροι δακτυλίου και σωλήνα) στην πεδιακή κατανομή κατά μήκος συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης από πυλώνα της μορφής του σχήματος 3.25. Το σχήμα 3.36 (a) δείχνει τη μέγιστη πεδιακή ένταση (κατά μέτρο) κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα συναρτήσει της απόστασης του τοροειδούς από τον ακροδέκτη Υ.Τ. (συμβολίζεται ως h_1 στο σχήμα 3.12) για τις I και V-διατάξεις. Καθώς το τοροειδές μετακινείται από το ενεργό προς το γειωμένο άκρο κατά μήκος της υπό μελέτη απόστασης, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται. Ωστόσο, από την απόσταση των 25 mm περίπου πάνω από τον ακροδέκτη και πέρα, η θέση του τοροειδούς δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την τιμή αυτή. Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως το μήκος εκδήλωσης τόξου⁴ μειώνεται, καθώς το τοροειδές μετακινείται πάνω από τον ακροδέκτη Υ.Τ. (αύξηση της παραμέτρου h_1 στο σχήμα 3.12), κάτι που έχει ως συνέπεια τη μείωση των κρίσιμων τάσεων υπερπήδησης (είτε κρουστικής μορφής είτε βιομηχανικής συχνότητας), επομένως επιβάλλεται κάποιο άνω επιτρεπτό όριο ανύψωσης.

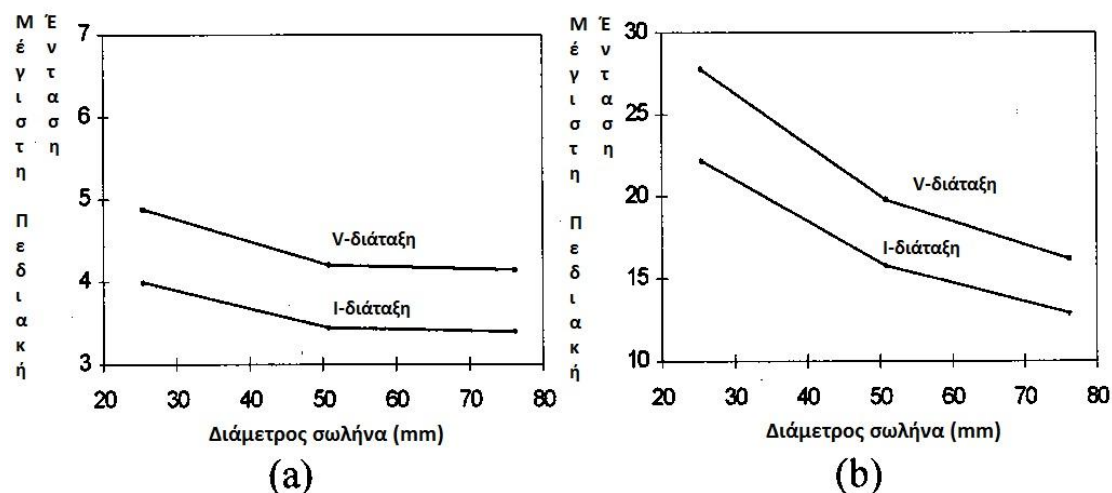
Η επίδραση της διαμέτρου του δακτυλίου (συμβολίζεται ως d_2 στο σχήμα 3.12) φαίνεται στο σχήμα 3.36 (b). Εδώ με την αύξηση της τιμής της διαμέτρου, η μέγιστη πεδιακή ένταση αγγίζει μια ελάχιστη τιμή. Αύξηση της διαμέτρου πέραν αυτού του σημείου συνεπάγεται αύξηση της μέγιστης πεδιακής έντασης.

Όσον αφορά στη διάμετρο σωλήνα του τοροειδούς, μεταβολή αυτής στο εύρος 25-76 mm δεν επιφέρει σημαντική επίδραση στο ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του μονωτήρα, καθώς φαίνεται στο σχήμα 3.37 (a): εντούτοις, η παράμετρος αυτή αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα ελέγχου της πεδιακής έντασης επί του ίδιου του τοροειδούς εξομάλυνσης, προκειμένου να αποφευχθεί πιθανή εκδήλωση του φαινομένου corona (βλέπε σχήμα 3.37 (b)). Για όλα τα διαγράμματα των σχημάτων 3.36 και 3.37 η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εννοείται σε % τιμές επί της εφαρμοζόμενης τάσης ανά μονάδα μήκους της απόστασης μόνωσης του μονωτήρα.

⁴ Ως «μήκος εκδήλωσης τόξου» (dry arcing distance) εννοείται η απόσταση μεταξύ του ενεργού και του γειωμένου άκρου του μονωτήρα.



Σχήμα 3.36: Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου (% της εφαρμοζόμενης τάσης ανά μονάδα μήκους) κατά μήκος της απόστασης μόνωσης της I και V-διάταξης (α): συναρτήσει της απόστασης μεταξύ τοροειδούς εξομάλυνσης και ενεργού άκρου (h_1 στο σχήμα 3.12) και (β): συναρτήσει της διαμέτρου του δακτυλίου (d_2 στο σχήμα 3.12) [41].

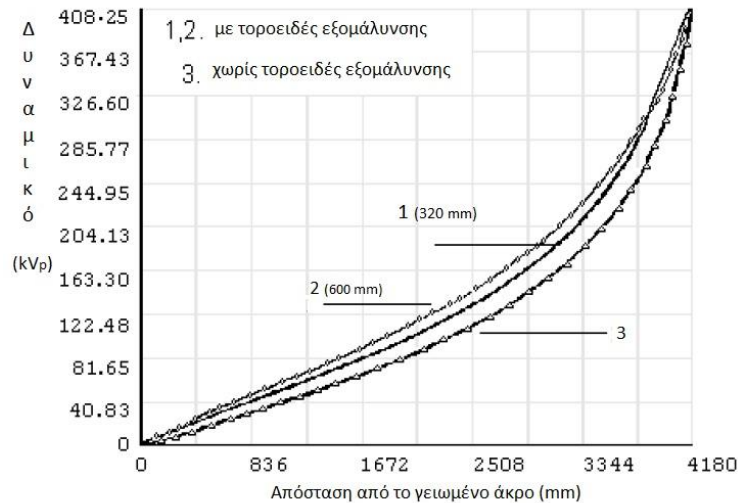


Σχήμα 3.37: (α) Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου (% της εφαρμοζόμενης τάσης ανά μονάδα μήκους) κατά μήκος της απόστασης μόνωσης και (β) μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του τοροειδούς εξομάλυνσης συναρτήσει της διαμέτρου του σωλήνα (d_1 στο σχήμα 3.12) αυτού για I και V-διάταξη [41].

Εύκολα παρατηρεί κάποιος ότι η V-διάταξη εκτίθεται σε υψηλότερες τιμές μέγιστης πεδιακής έντασης, συγκρινόμενες με εκείνες της I-διάταξης για τη μορφή πυλώνα του σχήματος 3.25. Ωστόσο, και για τις δύο διατάξεις η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει των υπό εξέταση παραμέτρων παρουσιάζει την ίδια κλίση. Προκειμένου να σχεδιάσει κανείς ένα τοροειδές εξομάλυνσης, πρέπει να οριστούν κριτήρια τέτοια, σύμφωνα με τα οποία η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης να μην είναι ικανή να προκαλέσει φαινόμενο corona υπό καθαρές και ξηρές συνθήκες στην περιοχή γύρω απ' το ενεργό άκρο του μονωτήρα και γενικότερα να περιορίζει την πιθανότητα εκδήλωσης κάθε είδους μερικών εκκενώσεων. Συνίσταται τα κριτήρια αυτά να στηρίζονται σε περεταιρω ανάλυση και να καθορίζονται κυρίως βάσει μακρόχρονης λειτουργικής εμπειρίας, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη το σχεδιασμό του μονωτήρα, τα υλικά του περιβλήματος και των ακροδεκτών αυτού καθώς και εκείνα των αγωγών, τις διάφορες δομές πυλώνα και τέλος, το φυσικό περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται η γραμμή μεταφοράς [41].

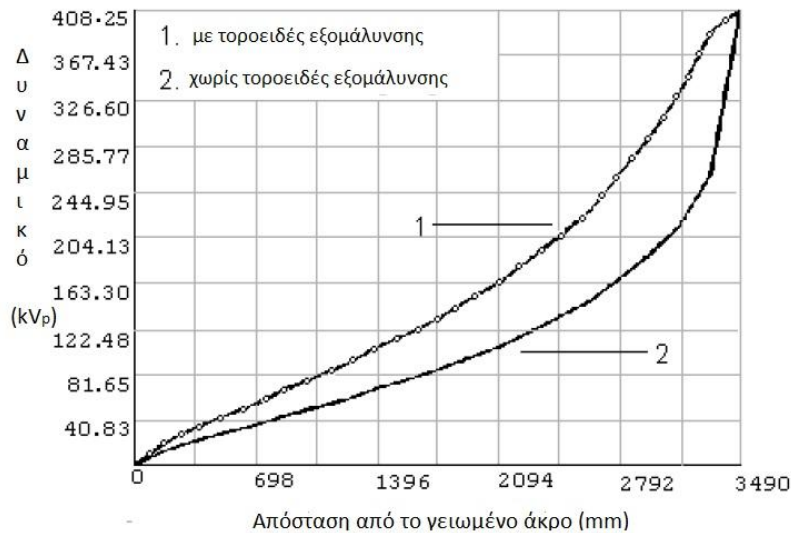
Στο άρθρο [51] προσομοιώνονται συνθετικοί και γυάλινοι μονωτήρες ανάρτησης γραμμής μεταφοράς 500 kV με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS (το οποίο κάνει χρήση της FEM), έτσι ώστε να αναλυθούν και να συγκριθούν, από ηλεκτρικής σκοπιάς, τα δύο αυτά είδη μονωτήρων. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοίωσης είναι ένα γενικού σκοπού λογισμικό FEM για αριθμητικά επιλύσιμα υπολογιστικά προβλήματα. Περιλαμβάνει τρία μέρη: το μπλοκ του προ-επεξεργαστή για την κατασκευή των μοντέλων, τη διακριτοποίηση σε στοιχεία και τον ορισμό των υλικών, το μπλοκ ανάλυσης και υπολογισμού (το οποίο περιλαμβάνει αρκετές αναλύσεις φυσικών πεδίων) και το μπλοκ του μετ-επεξεργαστή για την απεικόνιση των υπολογισθέντων αποτελεσμάτων [51].

Η πεδιακή ανάλυση που πραγματοποιήθηκε κατέδειξε ότι η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα βελτιώθηκε αισθητά με την προσθήκη τοροειδών εξομάλυνσης, ιδιαίτερα στην περιοχή 3344-4180 mm των μοντέλων, κοντά στο άκρο Υ.Τ.. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά τοροειδή με ακτίνες 320 (αριθμός 1) και 620 mm (αριθμός 2), αντίστοιχα. Σε γενικές γραμμές, η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα με το μεγαλύτερης ακτίνας τοροειδές είναι ομαλότερη από εκείνη με το μικρότερης-εντούτοις, κοντά στο άκρο Υ.Τ. (περιοχή 3344-4180 mm) υπερέρχει ποιοτικά η κατανομή δυναμικού υπ' αριθμόν 1, πράγμα που σημαίνει πως η επιλογή της ακτίνας του τοροειδούς θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη διεξοδικά τις δύο διαφορετικές αυτές παρατηρήσεις. Τέλος, η εμφανής πτώση του διαγράμματος 3 (ιδιαίτερα στην περιοχή 3762-4180 mm) επιβεβαιώνει την προφανή βελτίωση της κατανομής του δυναμικού με την προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης (είτε η κατανομή 1 είτε η 2 υπερέρχουν ποιοτικά έναντι της 3). Τα παραπάνω φαίνονται συνοπτικά στο ακόλουθο σχήμα.



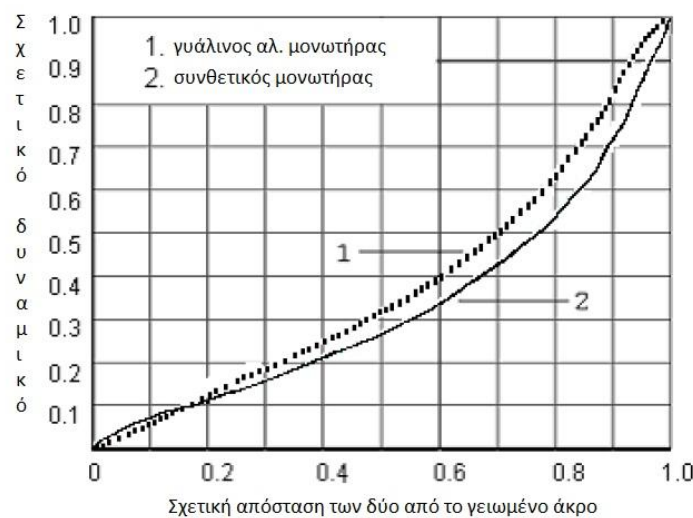
Σχήμα 3.38: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα συνθετικού μονωτήρα [51].

Η προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης σε γυάλινο αλυσσοειδή μονωτήρα επέφερε πανομοιότυπα αποτελέσματα. Και σ' αυτήν την περίπτωση είναι εμφανής η βελτίωση της κατανομής του δυναμικού, όπως απεικονίζει το ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.39: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα [51].

Η κατανομή του δυναμικού και των δύο παραπάνω μονωτήρων με τα τορροειδή εξομάλυνσής τους φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου όλα τα μεγέθη (δηλαδή το μήκος των μονωτήρων και η εφαρμοζόμενη τάση) έχουν κανονικοποιηθεί. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διακρίνει, η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του γυάλινου αλυσοειδούς μονωτήρα είναι ποιοτικά καλύτερη απ' την αντίστοιχη του συνθετικού, ιδιαίτερα κοντά στο άκρο Υ.Τ., κάτι το οποίο υποδηλώνει πως η βελτίωση που προέκυψε λόγω της προσθήκης του τορροειδούς εξομάλυνσης είναι περισσότερο εμφανής στους γυάλινους παρά στους συνθετικούς μονωτήρες.

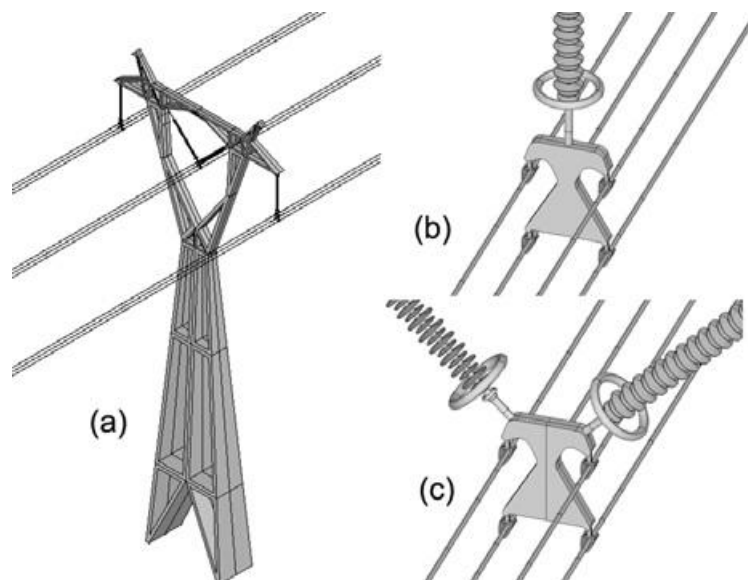


Σχήμα 3.40: Σύγκριση γυάλινου αλυσοειδούς και συνθετικού μονωτήρων (και οι δύο με τορροειδή εξομάλυνσης) [51].

Δύο ακόμη πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις που σχετίζονται με τις παραμέτρους του τορροειδούς εξομάλυνσης και τη βελτιστοποίηση αυτών αποτελούν οι [52] και [54].

Πιο συγκεκριμένα, στο άρθρο [52] παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός τρισδιάστατου μοντέλου συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης γραμμής μεταφοράς 500 kV AC και προσδιορίζονται οι κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού, με σκοπό τη διερεύνηση των παραγόντων της όλης διάταξης που

επηρεάζουν τις κατανομές αυτές. Το υπό μελέτη μοντέλο κατασκευάστηκε βάσει πραγματικών δεδομένων των γραμμών μεταφοράς 500 kV AC που βρίσκονται σε λειτουργία στην Κίνα, συμπεριλαμβανομένων των πυλώνων, συνθετικού μονωτήρα, αγωγών και ακροδεκτών και φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Όλες οι διατάξεις υποτέθηκαν σε ξηρό και καθαρό φυσικό περιβάλλον, ενώ οι βραχίονες στήριξης των τοροειδών εξομάλυνσης καθώς και οι δύο αγωγοί προστασίας αγνοήθηκαν. Ο πυλώνας είναι ύψους 52.5 m και πλάτους 21.2 m και αποτελείται από δύο I-διατάξεις και μία V-διάταξη («I-string» & «V-string» αντίστοιχα). Ο συνθετικός μονωτήρας συνίσταται από 48 μεγάλους (διαμέτρου 165 mm) και 49 μικρούς (διαμέτρου 125 mm) ελαστομερείς δίσκους (sheds), ενώ το μήκος του είναι 4450 mm. Κάθε φάση αποτελείται από έναν τετραπλό αγωγό (με διάμετρο δέσμης ίση προς 450 mm), κάθε υπο-αγωγός του οποίου έχει διάμετρο 23.76 mm. Κατά τη μοντελοποίηση θεωρήθηκαν καθαροί και λείοι αγωγοί, ενώ η επιτρεπτότητα τέθηκε 4.2 για τους δίσκους (sheds), 5 για τη ράβδο που περικλείεται στο εσωτερικό του μονωτήρα και 10^{10} για τα μεταλλικά μέρη αυτού, δηλαδή τους αγωγούς, τους ακροδέκτες, τα τοροειδή και τον πυλώνα.



Σχήμα 3.41: Μοντέλο υπολογισμού, (a) το πλήρες μοντέλο, (b) όψη του τετραπλού αγωγού της πλευρικής φάσης και (c) όψη του τετραπλού αγωγού της μεσαίας φάσης [52].

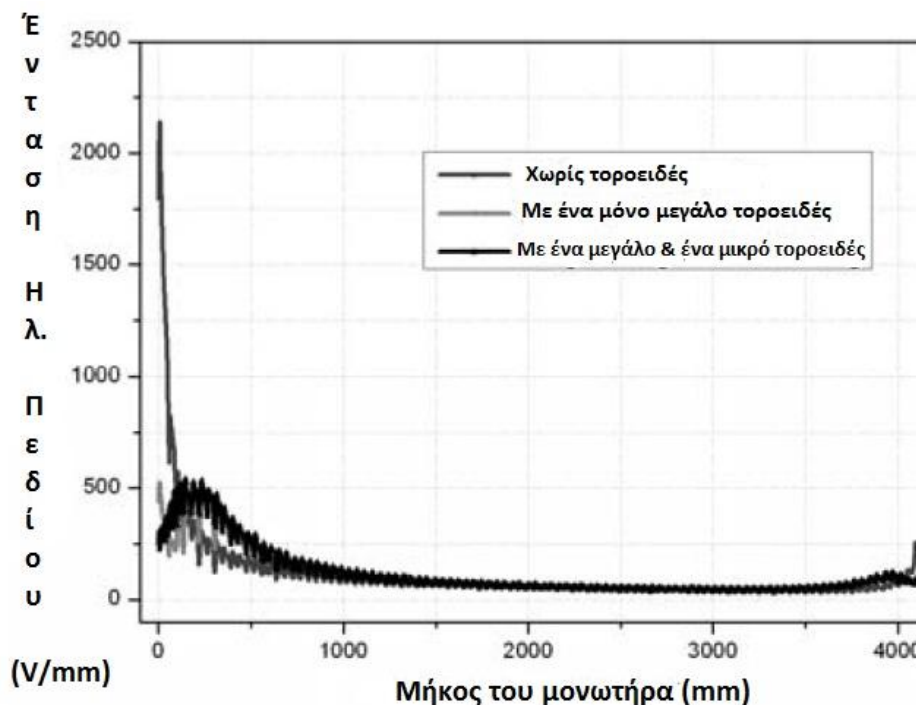
Όταν η τάση μιας φάσης αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της και οι άλλες δύο έχουν, την ίδια στιγμή, το ήμισυ της μέγιστης αυτής τιμής, υπό το μηδέν, η αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών είναι η εντονότερη δυνατή και η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου της φάσης με τη μέγιστη τιμή τάσης η πλέον ανομοιόμορφη (πρόκειται για τη χειρότερη δυνατή περίπτωση κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου του τριφασικού συστήματος μεταφοράς). Όσον αφορά στο παράθυρο του πυλώνα, η V-διάταξη της μεσαίας φάσης είναι εκείνη που καταπονείται περισσότερο και παρουσιάζει, κατά συνέπεια, σοβαρότερη αλλοίωση στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, σε σχέση με τις I-διατάξεις των πλευρικών φάσεων. Για το λόγο αυτό, στη μεσαία φάση εφαρμόστηκε η μέγιστη τιμή της μέγιστης δυνατής τάσης λειτουργίας του συστήματος 500 kV AC, δηλαδή $(550000 \text{ V}/\sqrt{3}) \times \sqrt{2} = 449073 \text{ V}$, ενώ το αρνητικό ήμισυ της μέγιστης τιμής της τάσης, που εφαρμόστηκε σε καθεμιά απ' τις άλλες δύο φάσεις, ήταν $-449073 \text{ V}/2 = -224536 \text{ V}$.

Με βάση το μοντέλο του σχήματος 3.41, πραγματοποιήθηκαν τρεις κατηγορίες υπολογισμών, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται ακολούθως, και αφορούν στον προσδιορισμό των

επιδράσεων των τοροειδών εξομάλυνσης στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες. Πρόκειται για τις εξής προσομοιώσεις:

1. Προσομοίωση χωρίς κανένα τοροειδές εξομάλυνσης.
2. Προσομοίωση με ένα μεγάλο τοροειδές σε κάθε άκρο του μονωτήρα, τόσο στην πλευρά του αγωγού (άκρο Υ.Τ.) όσο και στην πλευρά του πυλώνα (γειωμένο άκρο).
3. Προσομοίωση με ένα ζευγάρι ενός μεγάλου κι ενός μικρού τοροειδούς εξομάλυνσης στο άκρο Υ.Τ., απ' τη μια, και ένα μεγάλο τοροειδές εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο, απ' την άλλη.

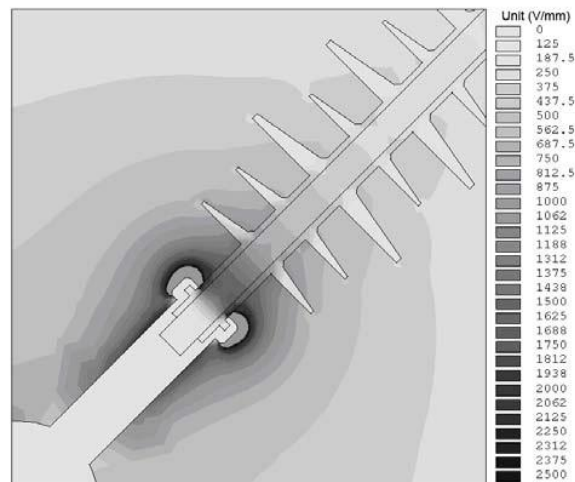
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι καμπύλες κάθε πεδιακής κατανομής κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα, όπως προέκυψαν από τους παραπάνω (τρεις) υπολογισμούς. Το ευθύγραμμο τμήμα πάνω στο οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις, ξεκινά από τη χαμηλότερη ακμή του πρώτου ελαστομερούς δίσκου, στην πλευρά του αγωγού, και φτάνει ως την ανώτερη ακμή του τελευταίου ελαστομερούς δίσκου, στην πλευρά του πυλώνα, σε απόσταση 1 mm μακριά από το πολυμερές περίβλημα του μονωτήρα.



Σχήμα 3.42: Καμπύλες κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συνθετικού μονωτήρα [52].

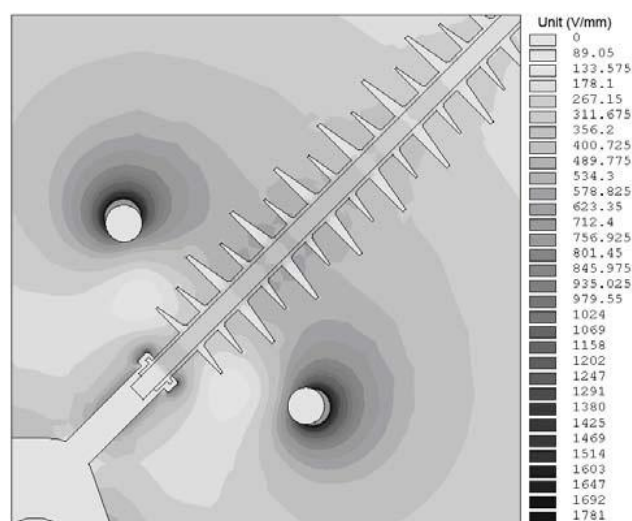
Το σχήμα 3.43 δείχνει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην πλευρά του αγωγού του συνθετικού μονωτήρα χωρίς κανένα τοροειδές εξομάλυνσης. Πρόκειται για μια εξαιρετικά ανομοιομορφη κατάσταση, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ανέρχεται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα στην περιοχή γύρω απ' τη ράβδο, το περίβλημα και τον ακροδέκτη Υ.Τ., φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 7049 V/mm, τιμή πολύ μεγαλύτερη απ' την κρίσιμη ένταση διάσπασης του ατμοσφαιρικού αέρα. Υπ' αυτές τις συνθήκες, αρκετά εύκολα αρχίζουν να δημιουργούνται μερικές εκκενώσεις και προκαλείται έντονο φαινόμενο corona. Απ' το ίδιο σχήμα μπορεί επίσης κανείς να διακρίνει ότι η μέγιστη τιμή της αξονικής κατανομής κατά μήκος του μονωτήρα υπερβαίνει την τιμή των 2000 V/mm, δηλαδή φτάνει σε επίπεδα αρκετά υψηλότερα από εκείνα που το πολυμερές

περίβλημα και οι ελαστομερείς δίσκοι μπορούν να «σηκώσουν». Συνέπεια όλων αυτών είναι η υποβάθμιση της μονωτικής ικανότητας του μονωτήρα και η μείωση της διάρκειας ζωής του.



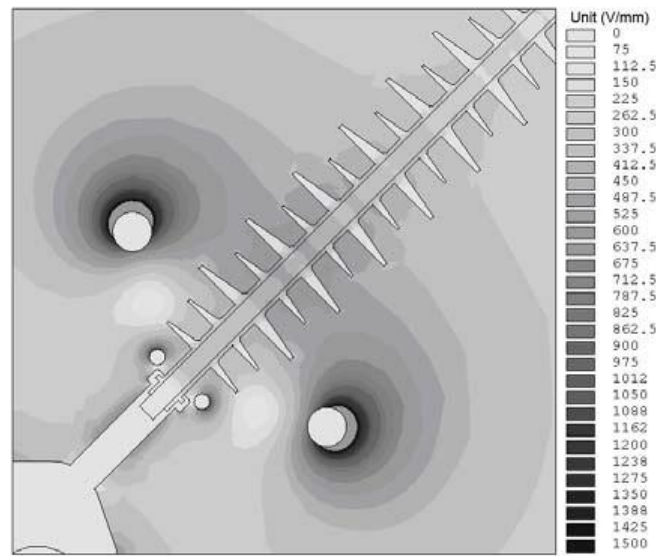
Σχήμα 3.43: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην πλευρά του αγωγού συνθετικού μονωτήρα χωρίς τοροειδές εξομάλυνσης [52].

Προσθέτοντας από ένα μεγάλο τοροειδές εξομάλυνσης, τόσο στην πλευρά του αγωγού, όσο και σ' εκείνη του πυλώνα, το «μέτωπο» αλλά και η «ουρά» της καμπύλης της πεδιακής κατανομής κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα, μειώνονται αισθητά, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από το σχήμα 3.42· ωστόσο, στην περιοχή γύρω απ' το τοροειδές το πεδίο αυξήθηκε σε σχέση με προηγουμένως, αγγίζοντας ένα μέγιστο έως τα 500 V/mm. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η προσθήκη του τοροειδούς εξομάλυνσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την κατανομή της πεδιακής έντασης στην πλευρά του αγωγού (άκρο Υ.Τ.), με τη μέγιστη τιμή αυτής να μεταφέρεται από την επιφάνεια του ακροδέκτη σ' εκείνη του δακτυλίου. Εντούτοις, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του ακροδέκτη ανέρχεται στα 1781 V/mm, παραμένοντας σε υψηλά επίπεδα ακόμη στην περιοχή του περιβλήματος,



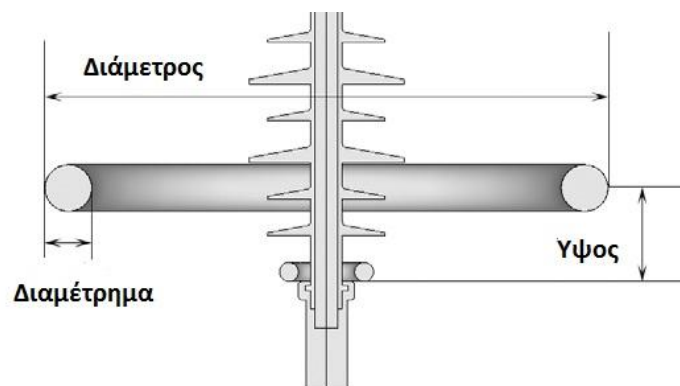
Σχήμα 3.44: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην πλευρά του αγωγού συνθετικού μονωτήρα με ένα μεγάλο τοροειδές εξομάλυνσης [52].

Στην τρίτη προσομοίωση προστέθηκε ένα μικρό τοροειδές εξομάλυνσης ακριβώς πάνω απ' την επιφάνεια του ακροδέκτη, οπότε δημιουργήθηκε μια μικρή περιοχή εξασθενημένου ηλεκτρικού πεδίου, μεταξύ του μικρού δακτυλίου και του ακροδέκτη· αποτέλεσμα ήταν η μείωση της πεδιακής έντασης επί της επιφάνειας του τελευταίου σε ακόμη χαμηλότερα επίπεδα, με μέγιστη τιμή στα 180 V/mm. Επιπλέον, δημιουργήθηκε και μια μεγαλύτερη περιοχή εξασθενημένου ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στο μεγάλο και το μικρό τοροειδές, επομένως το δεύτερο εξομάλυνε σημαντικά την πεδιακή κατανομή. Το μέτωπο της καμπύλης του ηλεκτρικού πεδίου μειώθηκε εκ νέου μετά την εγκατάσταση του μικρού τοροειδούς εξομάλυνσης, όπως δείχνει το σχήμα 3.42 [52].



Σχήμα 3.45: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην πλευρά του αγωγού συνθετικού μονωτήρα μετά την προσθήκη και του μικρού τοροειδούς εξομάλυνσης[52].

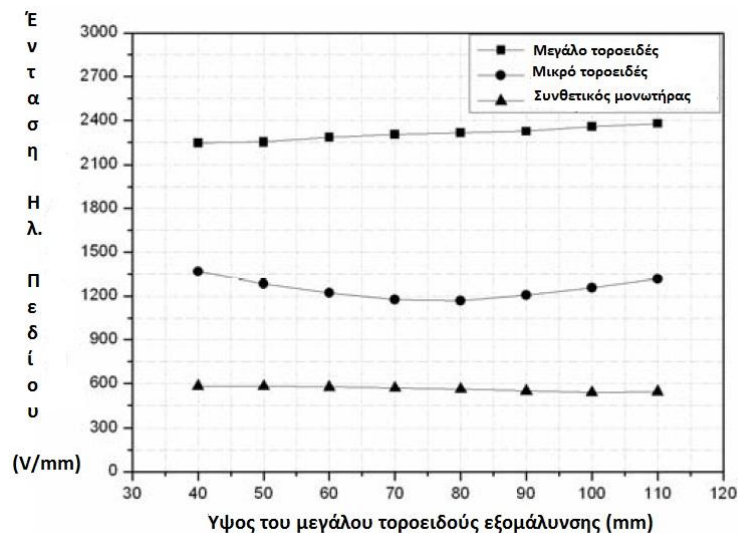
Στο ίδιο άρθρο [52] παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση του μεγάλου τοροειδούς (οι κατασκευαστικές παράμετροι του οποίου φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα), προκειμένου να προκύψει η καλύτερη, κατά το δυνατόν, κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Σε καθεμιά από τις επιμέρους διαδικασίες βελτιστοποίησης, μεταβάλλεται η τιμή μιας μονάχα παραμέτρου, ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές.



Σχήμα 3.46: Κατασκευαστικές παράμετροι του μεγάλου τοροειδούς εξομάλυνσης [52].

I. Βελτιστοποίηση του ύψους τοποθέτησης

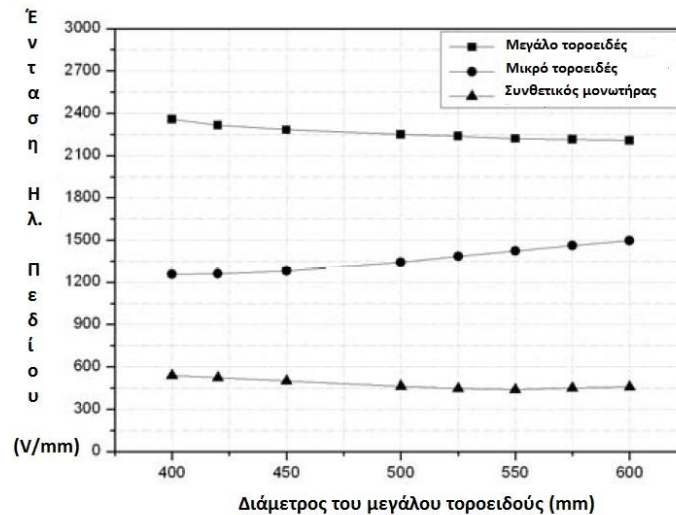
Οι αρχικές τιμές για τη διάμετρο και το διαμέτρημα του τοροειδούς είναι (και παραμένουν σταθερές) 400 mm και 50 mm, αντίστοιχα. Καθώς το ύψος τοποθέτησης αυξάνεται απ' τα 40 στα 110 mm, η μέγιστη πεδιακή ένταση επί του μεγάλου τοροειδούς αυξάνεται βαθμιαία. Η συμβολή της μεταβολής με το μικρό τοροειδές εξομάλυνσης, αρχικά, ήταν ενισχυτική και στη συνέχεια ατόνισε φανερά: ενώ στην αρχή η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώθηκε στην περιοχή γύρω απ' το μικρό δακτύλιο, έπειτα αυτή αυξήθηκε. Με γνώμονα την πεδιακή ένταση πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα, συνίσταται ένα ύψος τοποθέτησης στο εύρος μεταξύ 80-100 mm (βλέπε παρακάτω σχήμα).



Σχήμα 3.47: Μείγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου επί της επιφάνειας των μεγάλου τοροειδούς, μικρού τοροειδούς και συνθετικού μονωτήρα συναρτήσει του ύψους τοποθέτησης του πρώτου [52].

II. Βελτιστοποίηση της διαμέτρου του δακτυλίου

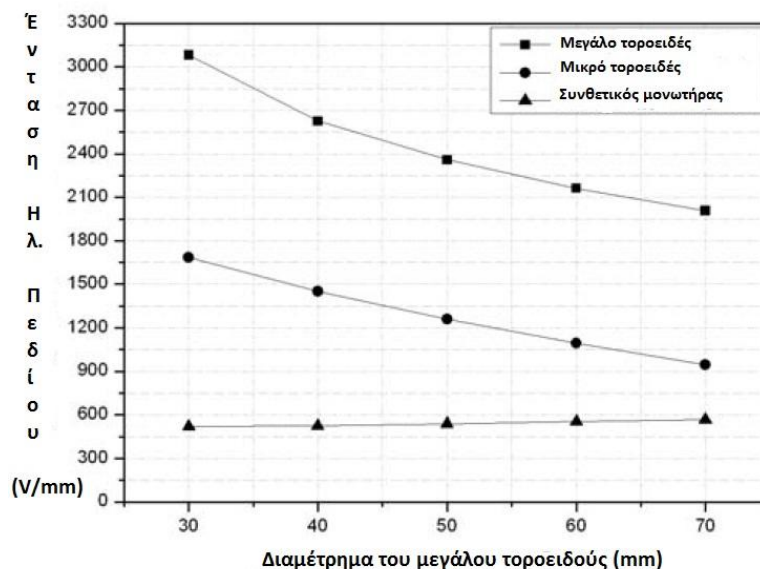
Το ύψος τοποθέτησης και το διαμέτρημα του μεγάλου τοροειδούς ρυθμίστηκαν στα 100 mm και 50 mm, αντίστοιχα. Καθώς η διάμετρος του δακτυλίου (του μεγάλου τοροειδούς) αυξάνεται απ' τα 400 mm στα 600 mm, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου πάνω στην επιφάνειά του επιδεικνύει μια αμυδρή τάση μείωσης. Από την άλλη, με την αύξηση της διαμέτρου αυτής, η πεδιακή ένταση επί της επιφάνειας του μικρού τοροειδούς αυξάνεται. Καθώς η επίδραση της αυξημένης αυτής έντασης στην πεδιακή κατανομή του μονωτήρα (κοντά στην περιοχή γύρω απ' το μεγάλο τοροειδές) εξασθενεί, η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια του τελευταίου μειώνεται· ωστόσο, όταν η διάμετρος του δακτυλίου υπερβεί τα 550 mm, η υψηλή πεδιακή ένταση γύρω απ' το μικρό τοροειδές επηρεάζει την περιοχή κοντά στον πρώτο δίσκο (προς την πλευρά του αγωγού), αυξάνοντας κατά τι την ένταση του πεδίου κοντά στο μονωτήρα. Εντούτοις, η τελευταία κυμαίνεται σε κάθε περίπτωση κάτω απ' τα 550 V/mm, επομένως απ' τη σκοπιά εξοικονόμησης υλικών, μείωσης των κοστών και εύκολης μεταφοράς και εγκατάστασης του μονωτήρα, ως «ιδανική» θεωρείται μια διάμετρος δακτυλίου περί τα 400-500 mm.



Σχήμα 3.48: Μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου επί της επιφάνειας των μεγάλου τοροειδούς, μικρού τοροειδούς και συνθετικού μονωτήρα συναρτήσει της διαμέτρου δακτυλίου του πρώτου [52].

III. Βελτιστοποίηση του διαμετρήματος του δακτυλίου

Ρυθμίζοντας το ύψος τοποθέτησης και τη διάμετρο του μεγάλου τοροειδούς στα 100 mm και 400 mm, αντίστοιχα, η διακύμανση του διαμετρήματος s' ένα εύρος από 30 mm έως 70 mm δε μεταβάλλει σημαντικά τη μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του μονωτήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί· ωστόσο, η παράμετρος αυτή (το διαμέτρημα δηλαδή του τοροειδούς) αποτελεί σημαντικό παράγοντα ελέγχου του ηλεκτρικού πεδίου στις περιοχές κοντά στο μεγάλο και το μικρό τοροειδές εξομάλυνσης, προκειμένου να περιοριστεί η πιθανότητα εκδήλωσης φωτεινών μερικών εκκενώσεων corona s' αυτά. Με γνώμονα τη μέγιστη πεδιακή ένταση πάνω στην επιφάνεια των δύο τοροειδών, η τιμή για το διαμέτρημα του δακτυλίου του μεγάλου τοροειδούς μπορεί να επιλεγεί γύρω στα 50 με 60 mm.



Σχήμα 3.49: Μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου επί της επιφάνειας των μεγάλου τοροειδούς, μικρού τοροειδούς και συνθετικού μονωτήρα συναρτήσει του διαμετρήματος δακτυλίου του πρώτου [52].

IV. Επιβεβαίωση υπολογισμών βελτιστοποίησης

Για τον έλεγχο όλων των προαναφερθέντων, τα οποία αφορούσαν στη βελτιστοποίηση του μεγάλου τοροειδούς εξομάλυνσης, αυτό σχεδιάζεται και μοντελοποιείται με ύψος τοποθέτησης, διάμετρο και διαμέτρηση δακτυλίου στα 100, 400 και 50 mm αντίστοιχα, ενώ οι ανάλογες τιμές για το μικρό τοροειδές ρυθμίζονται στα 10, 100 και 20 mm, αντίστοιχα.

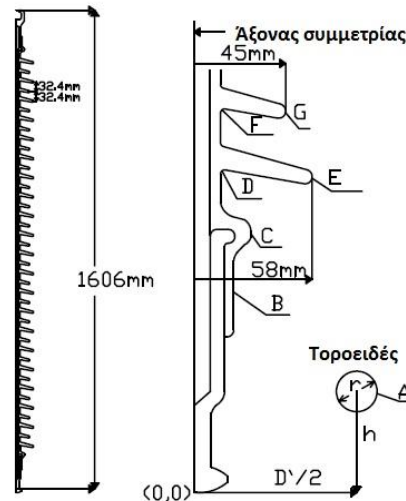
Θέση	Μεγάλο τοροειδές	Μικρό τοροειδές	Ακροδέκτης	Συνθετικός μονωτήρας
Μέγιστη ένταση ηλ. πεδίου [V/mm]	2358	1259	187	539

Πίνακας 3.3: Έλεγχος αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης [52].

Από τον παραπάνω πίνακα, εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι με τη χρήση των βελτιστοποιημένων τοροειδών εξομάλυνσης η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα είναι περισσότερο ομοιόμορφη και η μέγιστη πεδιακή ένταση κοντά στα κρίσιμα σημεία διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, επομένως μειώνονται οι πιθανότητες εκδήλωσης του φαινομένου corona και της συνεπακόλουθης διάβρωσης του μονωτήρα [52].

Το άρθρο [54] πραγματεύεται την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος συνθετικών μονωτήρων που προκύπτει απ' την εφαρμογή ac και κρουστικής τάσης. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώνονται (με τη βοήθεια του εμπορικά διαθέσιμου λογισμικού Electro-2D) συνθετικοί μονωτήρες 154 kV που χρησιμοποιούνται στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ισχύος της Τουρκίας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών, μεταβάλλοντας τις διάφορες σχεδιαστικές παραμέτρους του τοροειδούς εξομάλυνσης (κάθετη απόσταση, διάμετρος δακτυλίου και σωλήνα) για τις δύο κατηγορίες διεγέρσεων που προαναφέρθηκαν (ac & κρουστική διέγερση). Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό των μη κεραμικών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται σήμερα στο Τούρκικο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς αγγίζει το 5%, ενώ αναμένεται ότι αυτό θα αυξηθεί στο εγγύς μέλλον, χάρη στα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνουν οι συνθετικοί έναντι των κεραμικών μονωτήρων (χαμηλό βάρος, ευκολία διαχείρισης και μεταφοράς, μειωμένα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης κ.λπ.).

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η τομή του υπό μελέτη συνθετικού μονωτήρα (ο οποίος θεωρήθηκε υπό καθαρές και ξηρές συνθήκες), καθώς και ένα τμήμα αυτής με το τοροειδές εξομάλυνσης. Οι προσομοιώσεις εστιάζουν στις τιμές στις οποίες ανέρχεται η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E_{max}) στις κρίσιμες περιοχές A, B, C, D, E, F και G, όπως δείχνονται στο σχήμα 3.50. Ο μονωτήρας αποτελείται από 21 μεγάλους και 20 μικρούς ελαστομερείς δίσκους, ενώ οι τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς για το πολυμερές περίβλημα (το οποίο είναι κατασκευασμένο από σιλικονούχο καουτσούκ, γνωστό ως SIR) και την ενισχυμένη με υαλώδεις ίνες ράβδο τέθηκαν ίσες προς 3.5 και 7, αντίστοιχα. Οι παράμετροι των προσομοιώσεων παρουσιάζονται με λεπτομέρειες στον πίνακα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.50: Μοντέλο συνθετικού μονωτήρα με το τοροειδές εξομάλυνής του. Με τα γράμματα του λατινικού αλφαβήτου σημειώνονται οι κρίσιμες περιοχές στις οποίες εστιάζουν οι προσομοιώσεις [54].

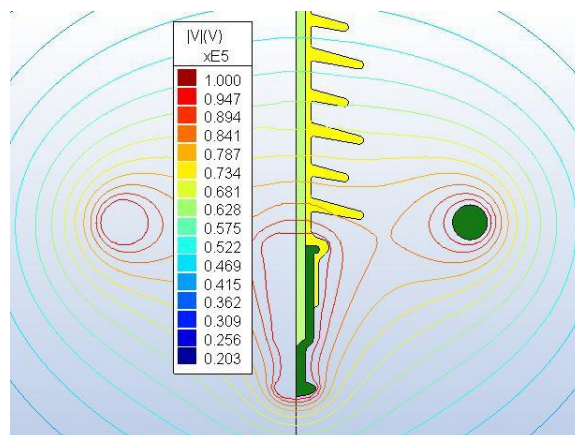
Υλικό	Σχετική διηλ. σταθερά	Αγωγιμότητα (Mho/m)
Αέρας	1	0
SIR	3.5	$1 \cdot 10^{-17}$
Ράβδος	7	$1 \cdot 10^{-17}$

Πίνακας 3.4: Παράμετροι προσομοιώσεων [54].

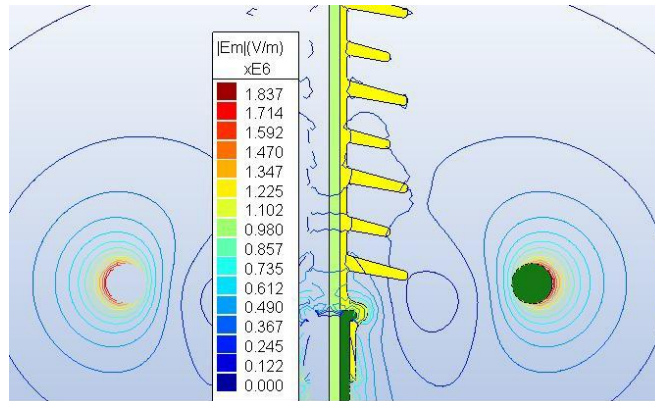
A. Αποτελέσματα προσομοίωσης με εφαρμογή ac τάσης

Αρχικά υλοποιήθηκε προσομοίωση του μονωτήρα υπό ac μορφή τάσης συχνότητας 50 Hz και rms τιμής 100 kV. Οι παράμετροι του τοροειδούς εξομάλυνσης που μεταβάλλονται, με απώτερο στόχο τη βελτιστοποίησή τους, είναι η διάμετρος r του σωλήνα, η διάμετρος D του δακτυλίου και η κάθετη απόσταση h (οι r, D & h δείχνονται στο παραπάνω σχήμα). Σύμφωνα με την εμπειρία του παρελθόντος, καθώς και κάποιες πρόχειρες εκτιμήσεις, το εύρος στο οποίο μπορούν να κυμαίνονται οι προαναφερθείσες παράμετροι είναι περιορισμένο. Έτσι, ως εναλλακτικές τιμές για την r θεωρούνται τα 25, 30 και 35 cm, για την D τα 200, 250, 300 και 350 cm και για την h τα 0, 50, 100, 150 και 200 cm.

Οι ισοδυναμικές καμπύλες και οι καμπύλες περιγραφής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου φαίνονται στα παρακάτω σχήματα για D=300 mm, h=150 mm.



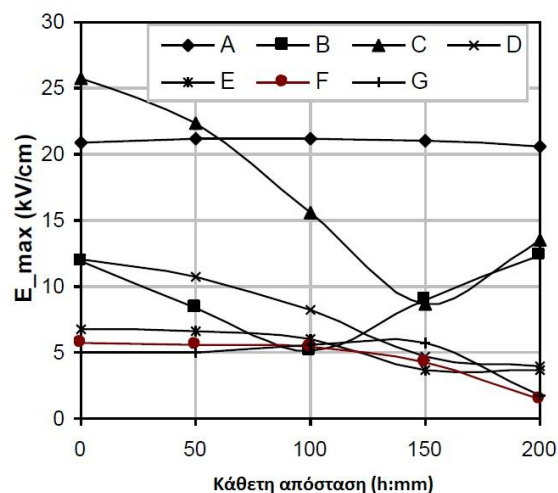
Σχήμα 3.51: Ισοδυναμικές καμπύλες στην περιοχή γύρω από συνθετικό μονωτήρα [54].



Σχήμα 3.52: Καμπύλες περιγραφής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από συνθετικό μονωτήρα [54].

i. Προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης του τοροειδούς εξομάλυνσης

Μια απ' τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την πεδιακή κατανομή είναι, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η θέση του τοροειδούς εξομάλυνσης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της θέσης του τοροειδούς, με τις παραμέτρους D (διάμετρος του δακτυλίου) και r (διάμετρος του σωλήνα) να διατηρούνται σταθερές στα 200 mm και 30 mm, αντίστοιχα. Κάθε γραφική αφορά στο μέτρο της μέγιστης πεδιακής έντασης της εκάστοτε κρίσιμης περιοχής.



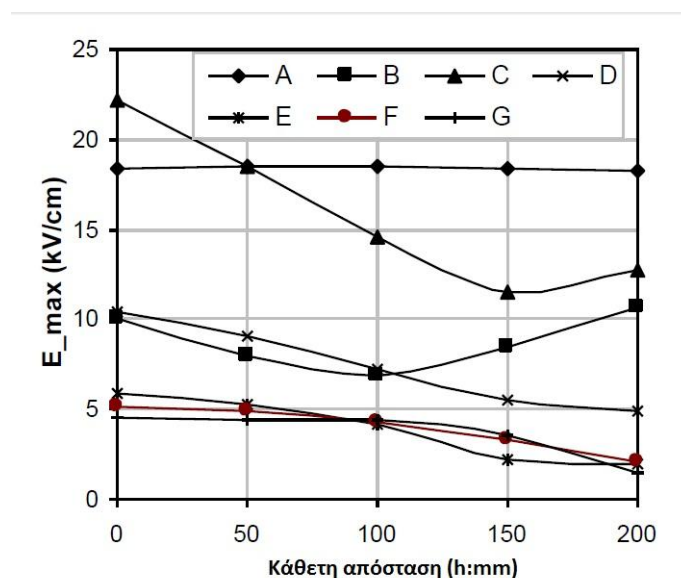
Σχήμα 3.53: Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_{max} , συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης του τοροειδούς, h , στις κρίσιμες περιοχές ($r=30$ mm, $D=200$ mm) [54].

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν οι καμπύλες του παραπάνω σχήματος συνοψίζονται ως ακολούθως:

- Οι τιμές της E_{max} κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα (περιοχές B, C, ..., G) επηρεάζονται έντονα από την κάθετη απόσταση του τοροειδούς· ωστόσο, η αντίστοιχη τιμή για την επιφάνεια του ίδιου του τοροειδούς (περιοχή A) δείχνει να μην επηρεάζεται απ' την παράμετρο αυτή.

- Υψηλότερες πεδιακές εντάσεις παρατηρούνται στην επιφάνεια του τοροειδούς (A) και γύρω απ' τη σφαιρική περιοχή, ακριβώς κάτω από τον πρώτο δίσκο (C), ενώ χαμηλότερες εμφανίζονται στα υπόλοιπα σημεία της επιφάνειας του μονωτήρα (B, D, ..., G). Εντούτοις, δεν υπάρχει κάποια θετική συσχέτιση μεταξύ των μέγιστων τιμών της πεδιακής έντασης στις περιοχές A και C.
- Η E_{max} στις περιοχές γύρω από τους ελαστομερείς δίσκους (G & E) διατηρείται σε χαμηλότερα επίπεδα, συγκρινόμενη με εκείνη στις άλλες κρίσιμες περιοχές.
- Παρατηρείται κάποια θετική συσχέτιση μεταξύ των πεδιακών εντάσεων σ' όλες τις περιοχές του μονωτήρα, με εξαίρεση εκείνων στην B.
- Η C φαίνεται να είναι η πιο κρίσιμη περιοχή της επιφάνειας του μονωτήρα: η μέγιστη πεδιακή ένταση γύρω απ' αυτή δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά από τη θέση του τοροειδούς.
- Η μέγιστη πεδιακή ένταση για την περιοχή C παρουσιάζει ένα τοπικό ελάχιστο σε απόσταση $h=150$ mm πάνω από τον ακροδέκτη Υ.Τ..

Προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι επιδράσεις της κάθετης απόστασης (ανεξάρτητα απ' τη μεταβολή της παραμέτρου D), παρακάτω απεικονίζεται η μέγιστη πεδιακή ένταση συναρτήσει της θέσης του τοροειδούς για διάμετρο δακτυλίου $D=300$ mm, με τη διάμετρο σωλήνα να διατηρείται ίδια με προηγουμένως ($r=30$ mm).



Σχήμα 3.54: Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_{max} , συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης του τοροειδούς, h , στις κρίσιμες περιοχές ($r=30$ mm, $D=300$ mm) [54].

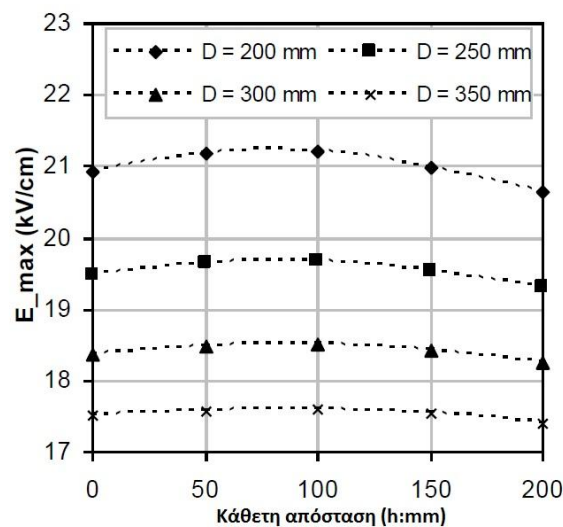
Εύκολα διαπιστώνει κανείς τα παρακάτω:

- Οι καμπύλες του παραπάνω σχήματος είναι παρόμοιες με εκείνες του σχήματος 3.53.

- Η E_{max} στην επιφάνεια του μονωτήρα εμφανίζει και πάλι υψηλότερη ευαισθησία όταν μεταβάλλεται η κάθετη απόσταση του τοροειδούς.
- Η μέγιστη πεδιακή ένταση για την περισσότερο κρίσιμη περιοχή επί της επιφάνειας του μονωτήρα (περιοχή C) παρουσιάζει σημείο ελαχίστου στα $h=150$ mm και αυτή τη φορά.
- Οι τιμές της E_{max} επί της επιφάνειας του τοροειδούς δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή της κάθετης απόστασης. Εντούτοις, κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με προηγουμένως (όπου ήταν $D=200$ mm). Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι αύξηση της διαμέτρου του δακτυλίου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των πεδιακών εντάσεων πάνω στο τοροειδές εξομόλυνσης.
- Επιπλέον, αύξηση της διαμέτρου D βελτιώνει τις πεδιακές εντάσεις ορισμένων περιοχών της επιφάνειας του μονωτήρα.

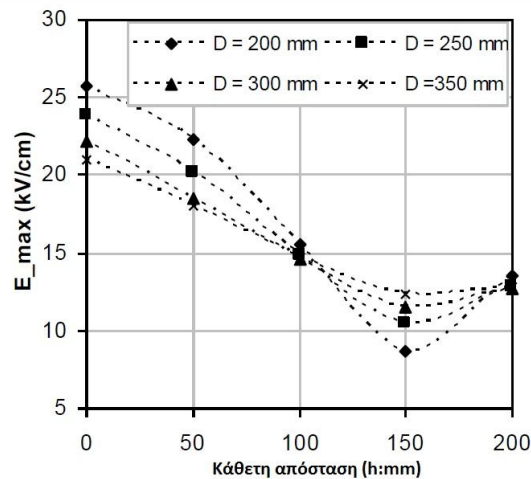
Τα σχήματα 3.53 και 3.54 δείχνουν πως οι περιοχές A και C παίζουν κυρίαρχο ρόλο στο σχεδιασμό του τοροειδούς εξομόλυνσης. Για το λόγο αυτό τα ακόλουθα δύο σχήματα εστιάζουν σ' αυτές τις κυρίαρχες περιοχές.

Στο σχήμα 3.55 φαίνονται οι μεταβολές της E_{max} επί της επιφάνειας του τοροειδούς συναρτήσει της κάθετης απόστασης για τέσσερις διαφορετικές διαμέτρους δακτυλίου. Παρατηρώντας το σχήμα αυτό, εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι η παράμετρος D είναι ο κυρίαρχος παράγοντας ελέγχου της E_{max} επί της επιφάνειας του τοροειδούς. Επιπλέον, αμυδρές (αλλά υπαρκτές) βελτιώσεις παρατηρούνται για κάθετες αποστάσεις μεταξύ 150-200 mm.



Σχήμα 3.55: Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_{max} , συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης του τοροειδούς, h , στην κρίσιμη περιοχή A (επιφάνεια του τελευταίου) για τέσσερις διαφορετικές τιμές της D ($r=30$ mm) [54].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η άλλη κρίσιμη περιοχή που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η C. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τις μεταβολές της E_{max} στην περιοχή C συναρτήσει της κάθετης απόστασης για τέσσερις διαφορετικές διαμέτρους δακτυλίου. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, η τιμή $h=150$ mm είναι η βέλτιστη τιμή στην οποία η μέγιστη πεδιακή ένταση στην περιοχή C ελαχιστοποιείται για όλες τις διαμέτρους δακτυλίου. Επιπλέον, καθώς η διάμετρος D αυξάνει, η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου βελτιώνεται περαιτέρω.



Σχήμα 3.56: Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_{\max} , συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης του τοροειδούς, h , στην κρίσιμη περιοχή C για τέσσερις διαφορετικές τιμές της D ($r=30$ mm) [54].

Οι τιμές της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, E_{\max} , τόσο πάνω στην επιφάνεια του τοροειδούς εξομάλυνσης, όσο και σ' εκείνη του μονωτήρα, συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί για διάμετρο σωλήνα $r=30$ mm.

D[mm]/ h[mm]	Μέγιστη τοπική πεδιακή ένταση (E_{\max} : kV/cm) διάμετρος σωλήνα = 30 mm						
	A	B	C	D	E	F	G
200 / 0	20.91	11.85	25.68	12.01	6.72	5.68	4.95
200 / 50	21.17	8.35	22.31	10.78	6.55	5.59	5.07
200 / 100	21.22	5.20	15.53	8.30	6.07	5.39	5.62
200 / 150	20.99	8.99	8.70	4.70	3.64	4.28	5.70
200 / 200	20.65	12.37	13.52	3.92	3.67	1.42	1.80
250 / 0	19.46	10.78	23.81	11.15	6.26	5.39	4.74
250 / 50	19.64	7.98	20.22	9.81	5.87	5.20	4.76
250 / 100	19.67	6.20	14.83	7.63	4.89	4.80	4.97
250 / 150	19.52	8.54	10.40	5.16	2.08	3.68	4.29
250 / 200	19.30	11.32	12.86	4.48	2.28	1.83	1.30
300 / 0	18.36	10.11	22.21	10.43	5.83	5.12	4.51
300 / 50	18.48	7.92	18.48	9.11	5.30	4.85	4.43
300 / 100	18.51	6.92	14.64	7.29	4.21	4.35	4.37
300 / 150	18.41	8.45	11.52	5.50	2.24	3.37	3.52
300 / 200	18.26	10.65	12.73	4.94	1.91	2.09	1.52
350 / 0	17.50	9.72	21.00	9.86	5.46	4.87	4.29
350 / 50	17.58	8.00	18.00	8.63	4.87	4.55	4.13
350 / 100	17.60	7.46	14.67	7.12	3.85	4.03	3.90
350 / 150	17.53	8.52	12.37	5.78	2.46	3.20	3.08
350 / 200	17.41	10.24	12.83	5.32	2.08	2.26	1.66

Πίνακας 3.5: Τιμές της (αε) μέγιστης πεδιακής έντασης E_{\max} για αρκετούς διαφορετικούς συνδυασμούς [54].

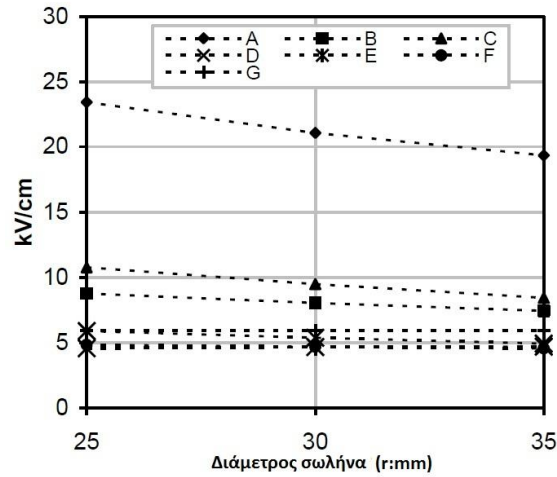
Τα ακόλουθα συμπεράσματα, που αφορούν σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα, καθώς και στον πίνακα 3.5, μπορούν να καταγραφούν:

- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα επηρεάζεται έντονα από τη διάμετρο του δακτυλίου και από την κάθετη απόσταση του τοροειδούς εξομάλυνσης.
- Η περιοχή C αποτελεί την πλέον κρίσιμη περιοχή της επιφάνειας του μονωτήρα. Οι τιμές $D=200$ mm και $h=150$ mm είναι οι βέλτιστες για τις παραμέτρους της διαμέτρου του δακτυλίου και της κάθετης απόστασης τοποθέτησης του τοροειδούς, για τις οποίες προκύπτει η καλύτερη δυνατή πεδιακή κατανομή κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, άρα και γύρω από την περιοχή C (για τον προαναφερθέντα συνδυασμό D/h η E_{\max} ελαχιστοποιείται στη στήλη C, όπως δείχνει ο παραπάνω πίνακας).
- Από την άλλη, η κάθετη απόσταση ασκεί μια δευτερεύουσα επίδραση (μικρότερης κλίμακας) στο ίδιο το τοροειδές (περιοχή A, βλέπε σχήμα 3.55). Αύξηση της διαμέτρου D βελτιώνει σημαντικά την κατάσταση σ' αυτό και ο συνδυασμός $D=350$ mm και $h=200$ mm μοιάζει να είναι ο καλύτερος δυνατός, όπως δείχνει ο πίνακας 3.5 (στήλη A).
- Κάνοντας λίγο και το «συνήγορο του διαβόλου», η υπέρμετρη αύξηση της διαμέτρου D δεν έχει μόνο θετικά αποτελέσματα, αλλά επιφέρει και αρκετά οπτικά και κατασκευαστικά μειονεκτήματα. Επομένως, κρίνεται προτιμότερο να συμπεριληφθεί στη διαδικασία βελτιστοποίησης και μια άλλη σχεδιαστική παράμετρος του τοροειδούς, εκείνη της διαμέτρου του σωλήνα (r). Μ' αυτήν ασχολείται στη συνέχεια το άρθρο [54].

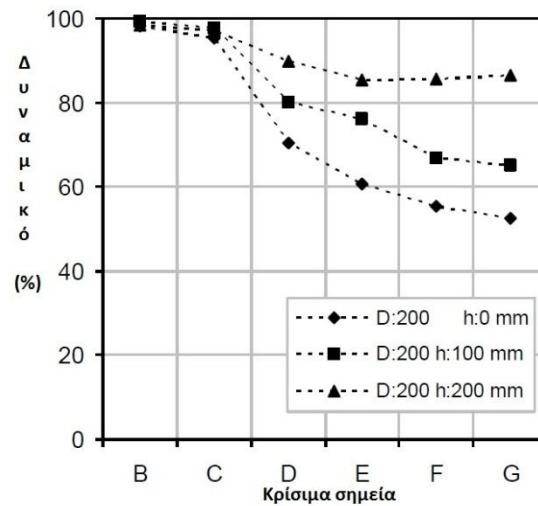
ii. Προσδιορισμός της βέλτιστης διαμέτρου σωλήνα του τοροειδούς εξομάλυνσης

Η παράμετρος r , που ως τώρα διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 30 mm, εξετάζεται εδώ για την επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης βελτίωσης της πεδιακής κατανομής. Στο σχήμα 3.57 φαίνονται οι τοπικές πεδιακές εντάσεις συναρτήσει της διαμέτρου του σωλήνα με διάμετρο δακτυλίου $D=200$ mm και κάθετη απόσταση $h=140$ mm (αυτή τη φορά οι D και h διατηρούνται σταθερές, ενώ μεταβάλλεται η υπό βελτιστοποίηση παράμετρος, r). Αύξηση της r , βελτιώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στις επιφάνειες τόσο του ίδιου του τοροειδούς εξομάλυνσης, όσο και του μονωτήρα. Ωστόσο, η βελτίωση αυτή φαίνεται αισθητά πιο έντονη για το πρώτο. Συνδυάζοντας αυτά τα αποτελέσματα με τα προηγούμενα, προκύπτει ότι ένα τοροειδές με διάμετρο δακτυλίου $D=300$ mm και διάμετρο σωλήνα $r=30-35$ mm τοποθετημένο σε ύψος $h=140-150$ mm αποτελεί την «ιδανικότερη» επιλογή απ' τη σκοπιά της πεδιακής κατανομής.

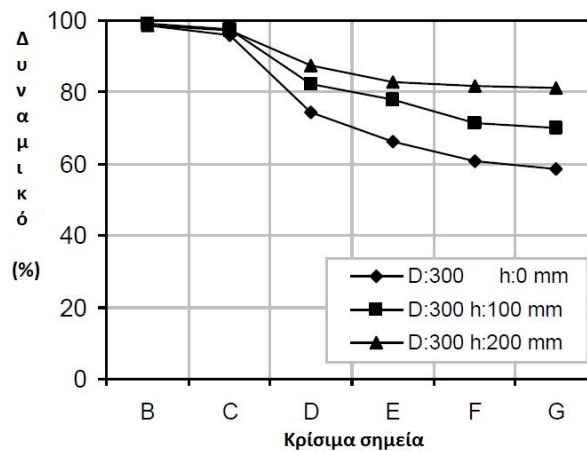
Μια άλλη ένδειξη για το κατά πόσο βελτιωμένη ή μη είναι η πεδιακή κατανομή πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα είναι, ως γνωστόν, η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος αυτού. Τα σχήματα 3.58 και 3.59 δείχνουν την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα συναρτήσει της κάθετης απόστασης h του τοροειδούς για δύο διαφορετικές διαμέτρους δακτυλίου, D .



Σχήμα 3.57: Μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E_{max} συναρτήσει της διαμέτρου σωλήνα του τοροειδούς, r , στις κρίσιμες περιοχές ($D=200$ mm, $h=140$ mm) [54].



Σχήμα 3.58: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των κρίσιμων περιοχών για διάμετρο δακτυλίου $D=200$ mm και διάμετρο σωλήνα $r=30$ mm [54].



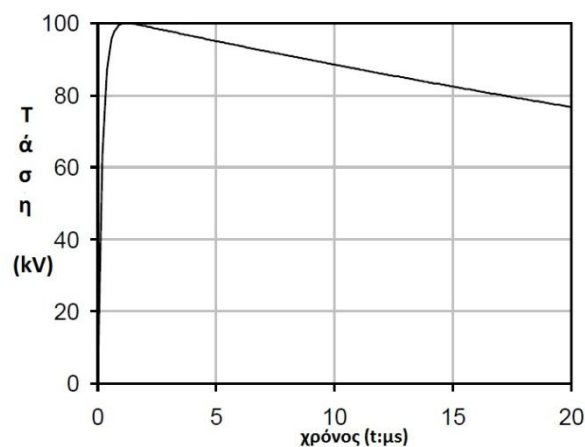
Σχήμα 3.59: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των κρίσιμων περιοχών για διάμετρο δακτυλίου $D=300$ mm και διάμετρο σωλήνα $r=30$ mm [54].

Είναι προφανές από τα δύο παραπάνω σχήματα ότι η κάθετη απόσταση τοποθέτησης του τοροειδούς εξομάλυνσης διαφοροποιεί την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα. Όσο αυξάνει το ύψος h , τόσο περισσότερο οριζόντια τείνει να γίνει η καμπύλη, και άρα τόσο καλύτερη είναι η προκύπτουσα κατανομή. Ενδεικτικά, για $h=200$ mm η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα είναι σαφώς πιο ομοιόμορφη, συγκρινόμενη με τις άλλες δύο τιμές (0 και 100 mm). Τέλος, η αύξηση της διαμέτρου D του δακτυλίου δείχνει να βελτιώνει την εικόνα, ιδιαίτερα για τις χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου h .

B. Αποτελέσματα προσομοίωσης με εφαρμογή κρουστικής τάσης

Όλες οι μέχρι τώρα παρουσιασθείσες προσομοιώσεις αφορούσαν σε μοντέλα συνθετικού μονωτήρα και τοροειδών εξομάλυνσης στα οποία εφαρμόστηκε Υ.Τ. βιομηχανικής συχνότητας (αφορούσαν επομένως στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας). Στον αντίποδα, η μονωτική συμπεριφορά του μονωτήρα ανάρτησης θα πρέπει να μελετηθεί και στην περίπτωση που αυτός υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα.

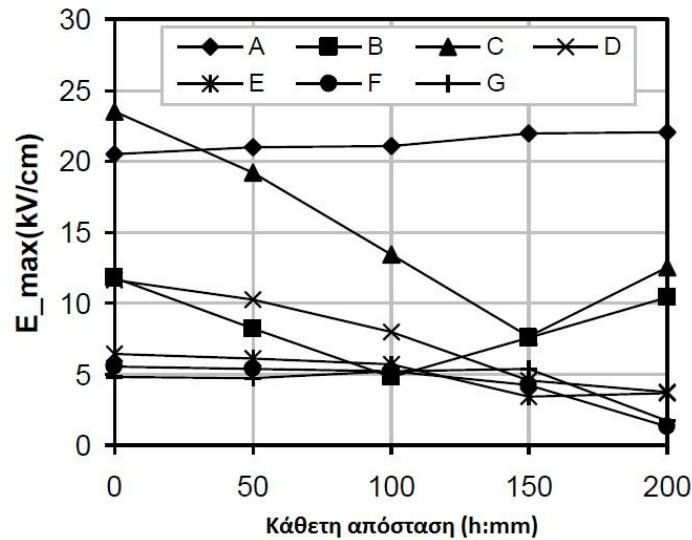
Κρουστικές τάσεις της μορφής $1.2/50$ μs μετώπου 100 kV_m (όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα) χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να ληφθούν οι μεταβατικές κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού. Χάριν εξοικονόμησης χρόνου υπολογισμών, ελήφθη υπόψη το χρονικό διάστημα 0-20 μs με βήμα χρόνου ίσο προς 0.1 μs . Όλα τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν σε μέγιστες (peak) τιμές των χρονικά εξαρτώμενων τάσεων.



Σχήμα 3.60: Μορφή κρουστικής τάσης που χρησιμοποιήθηκε για τις «μεταβατικές» προσομοιώσεις [54].

Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει ένα παράδειγμα τοπικής πεδιακής έντασης συναρτήσει της κάθετης απόστασης του τοροειδούς εξομάλυνσης για μια διέγερση κρουστικής μορφής. Από τη μεταβολή των γραφικών παραστάσεων του σχήματος αυτού καθώς από τη σύγκριση των τελευταίων με εκείνες του σχήματος 3.53, μπορούν να αντληθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

➤ Η πεδιακή κατανομή μοιάζει αρκετά με την περίπτωση της ac διέγερσης: οι εντάσεις στις περιοχές A και C ανέρχονται κι εδώ στα υψηλότερα επίπεδα τιμών, σε σχέση με τις υπόλοιπες.



Σχήμα 3.61: Τοπική μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_{max} συναρτήσει της κάθετης απόστασης h του τοροειδούς εξομάλυνσης ($r=30$ mm, $D=200$ mm) [54].

- Η E_{max} κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα εμφανίζει και πάλι υψηλότερη ευαισθησία όταν μεταβάλλεται η κάθετη απόσταση του τοροειδούς.
- Η E_{max} επί της επιφάνειας του τοροειδούς επηρεάζεται ελαφρώς από την κάθετη απόσταση h αυτού: σε αντίθεση με την περίπτωση της ac διέγερσης (όπου η E_{max} παρέμενε σχεδόν σταθερή), αυξάνει με την αύξηση του h .
- Δεν παρατηρείται καμία θετική συσχέτιση μεταξύ των πεδιακών εντάσεων των περιοχών A και C (όπως και στην περίπτωση της ac διέγερσης).
- Η E_{max} στις περιοχές γύρω από τους ελαστομερείς δίσκους (G & E) διατηρείται σε χαμηλότερα επίπεδα, συγκρινόμενη με εκείνη στις άλλες κρίσιμες περιοχές, όπως και στο σχήμα 3.53.
- Και εδώ παρατηρείται κάποια θετική συσχέτιση μεταξύ των πεδιακών εντάσεων σ' όλες τις περιοχές του μονωτήρα, με εξαίρεση εκείνων στην B.
- Η C είναι η περισσότερο κρίσιμη περιοχή της επιφάνειας του μονωτήρα, όπου οι τιμές της πεδιακής έντασης επηρεάζονται σημαντικά από την κάθετη απόσταση h του τοροειδούς (όπως και στο σχήμα 3.53).
- Η E_{max} γύρω απ' την περιοχή C ελαχιστοποιείται για ύψος $h=150$ mm, όπως και προηγουμένως. Ωστόσο εδώ εντοπίζεται μια ελαφρά αύξηση της πεδιακής έντασης επί της επιφάνειας του τοροειδούς εξομάλυνσης για την τιμή αυτή του h .
- Όσον αφορά στην εφαρμογή κρουστικών τάσεων, θα μπορούσε κανείς να πει ότι «ιδανικό» ύψος τοποθέτησης του τοροειδούς εξομάλυνσης είναι εκείνο των 100 mm [54].

3.3.5 Επίδραση της επιφανειακής ρύπανσης

Η πορεία κατασκευής του πλήρους μοντέλου μιας προσομοίωσης προσιδιάζει με εκείνη που ακολουθεί κάποιος όταν φτιάχνει ένα παζλ: ξεκινά από τα θεμελιώδη συστατικά στοιχεία του και συμπληρώνει, ένα-ένα, τα επιμέρους γεωμετρικά «κομμάτια» του, προσθέτοντας κάθε φορά ένα επιπλέον «λιθαράκι» πραγματικότητας (άρα και πολυπλοκότητας, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του Κεφαλαίου), καθώς τείνει προς την ολοκλήρωση του πλήρους μοντέλου. Ακόμη κι αν καταφέρει όμως να «τρέξει» το πλήρες αυτό μόρφωμα, ούτε και σ' αυτήν την περίπτωση θα έχει πετύχει μια ικανοποιητική αναπαράσταση της υπαρκτής διάταξης, καθώς δεν θα έχει λάβει υπόψη του την επίδραση των πραγματικών συνθηκών του περιβάλλοντος λειτουργίας αυτής.

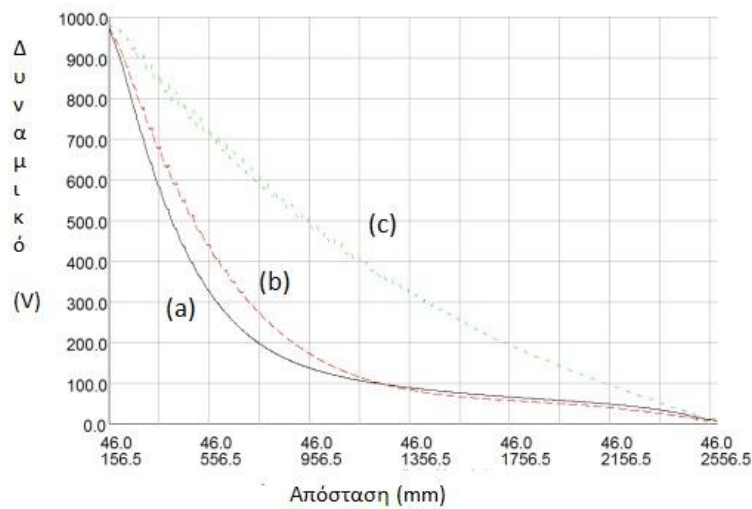
Έχοντας διερευνήσει ως τώρα τις επιδράσεις των διαφόρων κατασκευαστικών παραμέτρων στα τελικά αποτελέσματα, προβάλλει ως λογική συνέχεια το επόμενο βήμα, το οποίο αφορά στον υπολογισμό της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στην περιοχή γύρω από ένα ρυπασμένο συνθετικό μονωτήρα. Η σπουδαιότητα της προσομοίωσης ενός τέτοιου μοντέλου είναι προφανέστατα ιδιαίτερης αξίας, επειδή το φαινόμενο της υπερπήδησης των μονωτήρων (το οποίο ενδεχομένως να προκαλέσει σφάλμα στο υπάρχον σύστημα μεταφοράς) λαμβάνει χώρα σε ρυπασμένους, κατά κανόνα, μονωτήρες, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι, ως επί το πλείστον, σε παράκτιες ή βιομηχανικές περιοχές.

Η περιβαλλοντική αυτή ρύπανση προσομοιώνεται στο άρθρο [53], προσθέτοντας ένα λεπτό ρυπασμένο στρώμα στην επιφάνεια του ήδη υπάρχοντος μοντέλου του μονωτήρα (του οποίου η απλοποιημένη γεωμετρία παρουσιάστηκε στο σχήμα 3.12). Η εικασία μόλυνσης που ερευνηθήκε στην εργασία αυτή περιλαμβάνει ένα βαριά ρυπασμένο πολυμερές περίβλημα μαζί με τις, επίσης βαριά ρυπασμένες, άνω επιφάνειες των ελαστομερών δίσκων και τις μέτρια ρυπασμένες κάτω επιφάνειες των τελευταίων. Η διαφοροποίηση στο βαθμό ρύπανσης προσομοιώνεται, μεταβάλλοντας το πάχος του στρώματος ρύπανσης, το οποίο τίθεται ίσο προς 10^{-3} m για τις βαριά ρυπασμένες περιοχές και $0.5 \cdot 10^{-3}$ m για εκείνες που έχουν μέτριο βαθμό ρύπανσης. Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σ (S/m) του ρυπασμένου, πλέον, μοντέλου, παραμένει ως είχε, όσον αφορά στην επιφάνεια του προϋπάρχοντος μονωτήρα· επιλέγεται υψηλότερη τιμή αυτής για το πρόσθετο στρώμα ρύπανσης, συγκριτικά με εκείνη του πολυμερούς περιβλήματος του μονωτήρα, προκειμένου να προσομοιωθεί η υψηλότερη ροή ρεύματος στην επιφάνεια του μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης.

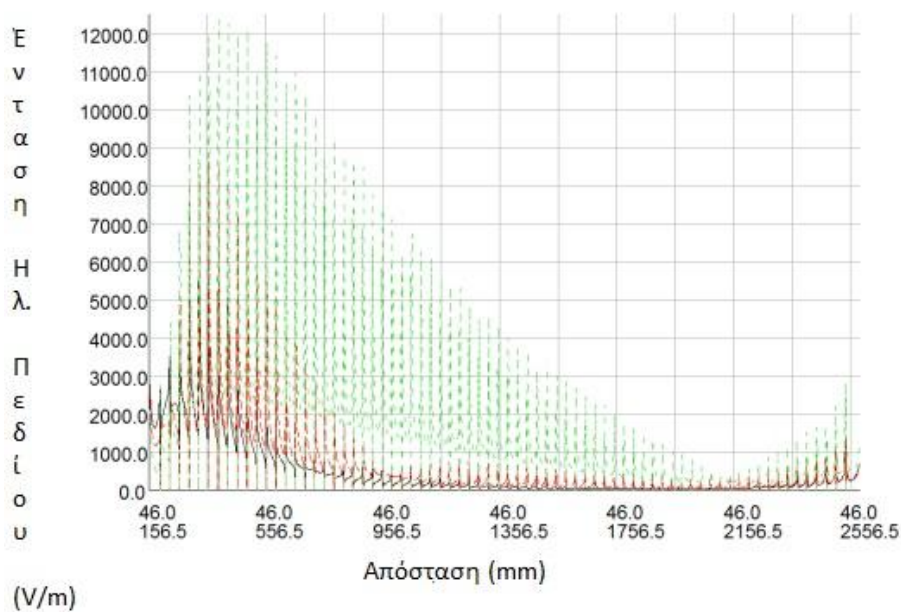
Η προσομοίωση του ρυπασμένου μοντέλου υλοποιείται με τη βοήθεια του επιλύτη ac μόνιμης κατάστασης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του με μεγαλύτερη ακρίβεια την ύπαρξη υψηλής επιφανειακής αγωγιμότητας. Οι κατανομές του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των ακμών των ελαστομερών δίσκων για (a) το μοντέλο του καθαρού μονωτήρα και εκείνο του ρυπασμένου μονωτήρα με αγωγιμότητα ρύπανσης (b) $\sigma=10^{-5}$ S/m και (c) $\sigma=10^{-4}$ S/m παρουσιάζονται στα ακόλουθα δύο σχήματα. Είναι προφανές ότι ο ρυπασμένος μονωτήρας υφίσταται πολύ μεγαλύτερη ηλεκτρική καταπόνηση.

Η κατανομή του δυναμικού του καθαρού μονωτήρα παρουσιάζει χωρητική συμπεριφορά, με την έννοια ότι προσδιορίζεται κυρίως από τη χωρητικότητα του ίδιου του μονωτήρα (από ηλεκτρικής-κυκλωματικής σκοπιάς ο μονωτήρας δεν είναι τίποτε άλλο από έναν πυκνωτή) καθώς και από τις παράσιτες χωρητικότητες που εμφανίζονται σ' αυτόν. Ωστόσο, μετά την προσθήκη του στρώματος ρύπανσης, η επιφάνεια του μονωτήρα γίνεται περισσότερο αγωγίμη και η κατανομή της τάσης

αποκτά ωμική-χωρητική συμπεριφορά. Καθώς το στρώμα ρύπανσης αυξάνει, η κατανομή αυτή προσεγγίζει σταδιακά τη γραμμική ωμική συμπεριφορά.



Σχήμα 3.62: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος μιας κατακόρυφης ευθείας που διέρχεται απ' τις ακμές των δίσκων σε απόσταση $R=46$ mm όπως υπολογίστηκε απ' τον επιλύτη ac μόνιμης κατάστασης για (a) τον καθαρό, (b) το ρυπασμένο με αγωγιμότητα ρύπανσης $\sigma=10^{-5}$ S/m και (c) το ρυπασμένο μονωτήρα με αγωγιμότητα ρύπανσης $\sigma=10^{-4}$ S/m [53].



Σχήμα 3.63: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος μιας κατακόρυφης ευθείας που διέρχεται απ' τις ακμές των δίσκων σε απόσταση $R=46$ mm όπως υπολογίστηκε απ' τον επιλύτη ac μόνιμης κατάστασης για (a-μαύρο χρώμα) τον καθαρό, (b-κόκκινο χρώμα) το ρυπασμένο με αγωγιμότητα ρύπανσης $\sigma=10^{-5}$ S/m και (c-πράσινο χρώμα) το ρυπασμένο μονωτήρα με αγωγιμότητα ρύπανσης $\sigma=10^{-4}$ S/m [53].

Για την καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, θα μπορούσε να θεωρήσει κανείς το πάχος του στρώματος (δ) και την αγωγιμότητα (σ) ρύπανσης ως μια και ενιαία παράμετρο με το όνομα «επιφανειακή αγωγιμότητα» ($\sigma\delta$ σε μονάδες S). Για τις επιλεχθείσες τιμές του δ και ένα στρώμα

ρύπανσης αγωγιμότητας $\sigma=10^{-5}$ S/m προκύπτει μια επιφανειακή αγωγιμότητα που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10^{-10} και 10^{-8} S, οπότε αναμένεται μια ωμική-χωρητική συμπεριφορά σύμφωνα με το [55]. Αύξηση της αγωγιμότητας του στρώματος ρύπανσης πέραν της τιμής $\sigma=10^{-4}$ S/m, προκαλεί τη μετάβαση σε εξ' ολοκλήρου ωμική συμπεριφορά, καθώς δημιουργείται μια επιφανειακή αγωγιμότητα μεταξύ 10^{-8} και 10^{-7} S [55].

Κάνοντας ένα σχόλιο για τα δύο παραπάνω διαγράμματα, είναι εμφανές ότι και στις δύο περιπτώσεις αγωγιμότητας ρύπανσης του ευρισκόμενου υπό τις αντίστοιχες συνθήκες μονωτήρα, οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου υπερέρχουν εκείνων του καθαρού. Συμπερασματικά, η ύπαρξη ενός στρώματος ρύπανσης υψηλότερης αγωγιμότητας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας κατανομής ηλεκτρικού πεδίου υψηλότερων τιμών, γεγονός το οποίο ενδεχομένως να οδηγούσε ευκολότερα στην υπερπήδηση του μονωτήρα [53].

3.3.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα

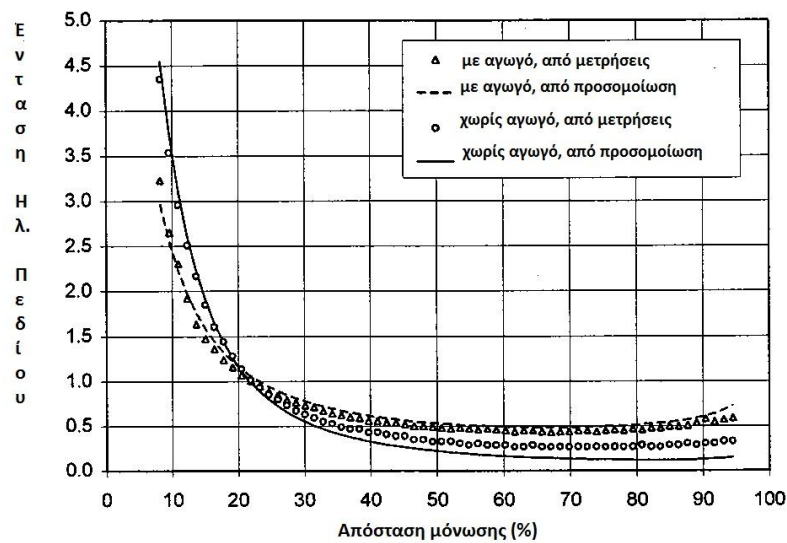
Πέραν του κατά πόσον μια προσομοίωση ανταποκρίνεται ή όχι σε ρεαλιστικές συνθήκες τόσο σε επίπεδο πληρότητας του μοντέλου, όσο και σε επίπεδο περιβαλλοντικών συνθηκών έκθεσής του, εκείνο που τελικά αποτιμάται είναι εάν τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη βοήθεια κάποιου λογισμικού (το οποίο κάνει εφαρμογή ορισμένης αριθμητικής μεθόδου) συγκλίνουν ή όχι με τις μετρηθείσες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών που καταγράφηκαν ύστερα απ' τη διεξαγωγή ενός πειράματος. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατό να αποφασιστεί η εγκυρότητα ή μη της εφαρμοζόμενης αριθμητικής μεθόδου.

Τυχόν αποκλίσεις μεταξύ προσομοιοθέντων και μετρηθέντων αποτελεσμάτων, ενδεχομένως να οφείλονται, αφ' ενός μεν σε κάποια είδους εξιδανίκευση, απ' την πλευρά του λογισμικού, αφ' ετέρου δε σε κάποιο σφάλμα μέτρησης (οφειλόμενο είτε σε αδυναμία του παρατηρητή είτε σε συστηματικό σφάλμα προερχόμενο απ' την προβλεπόμενη ακρίβεια των οργάνων μέτρησης).

Προκειμένου να επαληθευτούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών, χρησιμοποιήθηκε στο άρθρο [41] ένας δοκιμαστικός μονωτήρας για τη μέτρηση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος αυτού. Το μετρητικό σύστημα έκανε χρήση ενός ανιχνευτή πεδίου⁵, ο οποίος βρισκόταν τοποθετημένος πάνω σ' ένα κινητό μέρος, απ' όπου μετρούσε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος μιας ευθείας 76 mm περίπου μακριά από τον άξονα του υπό δοκιμή μονωτήρα. Ένα επιπλέον σύστημα μικροεπεξεργαστή κατέγραφε τα μετρούμενα δεδομένα.

Η διεξαγωγή της εν λόγω δοκιμής έγινε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων της εταιρίας Brass στο Οχάιο. Πρόκειται για το συνθετικό μονωτήρα του σχήματος 3.12, ο οποίος τέθηκε σε I-διάταξη και αναρτήθηκε από γειωμένο μεταλλικό δικτύωμα διαστάσεων 4.8 m x 1.2 m, το οποίο αναπαριστούσε το παράθυρο του πυλώνα. Ένα συνδεδεμένο «πιάτο» ενώθηκε με το ενεργό άκρο του μονωτήρα, στο οποίο συνδέθηκε με τη σειρά του ένα διπλός αγωγός μήκους 9 m, διαμέτρου ζεύγους αγωγών ίσης προς 457 mm και διαμέτρου έκαστου αγωγού ίσης προς 32 mm. Ο αγωγός αυτός βρισκόταν 3.6 m πάνω απ' το έδαφος. Η κατανομή της διαμήκους συνιστώσας της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του μονωτήρα μετρήθηκε, αρχικά παρουσία του αγωγού και στη συνέχεια χωρίς αυτόν και το συνδεδεμένο πιάτο. Τόσο τα αποτελέσματα μέτρησης, όσο και εκείνα της προσομοίωσης (η οποία υλοποιήθηκε με χρήση της BEM) φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Η συμφωνία υπολογισθέντων και μετρηθέντων αποτελεσμάτων κρίνεται ικανοποιητική [41].

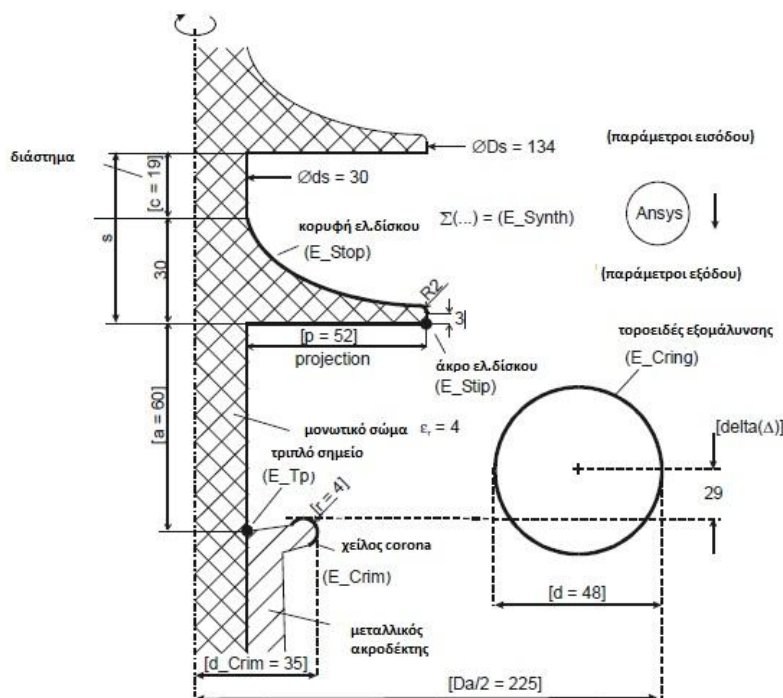
⁵ Αναγράφεται ως «field probe».



Σχήμα 3.64: Η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (% της εφαρμοζόμενης τάσης ανά μονάδα μήκους) κατά μήκος του μονωτήρα, όπως μετρήθηκε με τη βοήθεια δοκιμαστικού μονωτήρα, απ' τη μια, και υπολογίστηκε με προσομοιώσεις σε Η/Υ, από την άλλη [41].

Αλλά και στην εργασία [50] έγιναν δισδιάστατες και τρισδιάστατες προσομοιώσεις ενός συνθετικού μονωτήρα 420 kV με τη βοήθεια της εμπορικά διαθέσιμης έκδοσης 5.7[®] του λογισμικού ANSYS, το οποίο κάνει εφαρμογή της FEM, και στη συνέχεια μετρήθηκε η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος συνθετικού μονωτήρα με σκοπό την επικύρωση των υπολογισθέντων αποτελεσμάτων.

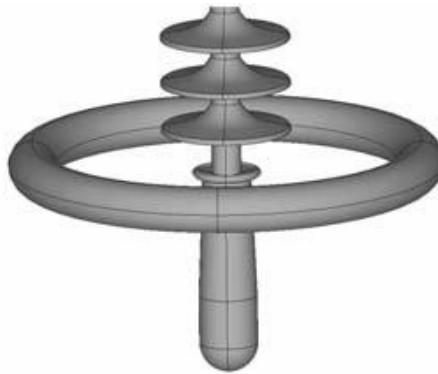
Τμήμα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με τις παραμέτρους αυτού φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.65: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, παράμετροι & ορισμοί [50].

Το εφαρμοζόμενο μοντέλο αποτελείται από περίπου 40000 στοιχεία. Κάθε στοιχείο έχει έναν μονάχα βαθμό ελευθερίας ο οποίος εκπροσωπείται απ' το ηλεκτρικό δυναμικό φ . Οι εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου E_x, E_y, E_z υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του ANSYS® από τις κλίσεις του δυναμικού. Τα γεωμετρικά δεδομένα, η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ή αλλιώς επιτρεπτικότητα) ϵ_r , η αγωγιμότητα κ των υλικών (μέταλλο, μονωτικά υλικά, αέρας) και οι οριακές συνθήκες $\varphi_{x,y}$ (τιμές δυναμικού στα μεταλλικά μέρη) συνιστούν τις παραμέτρους εισόδου. Πραγματοποιήθηκε στατική και αρμονική ανάλυση για τη συχνότητα των 50 Hz. Τα ληφθέντα πεδιακά αποτελέσματα αφορούν στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στην προαναφερθείσα συχνότητα. Αξίζει να σημειωθεί πως το εν λόγω μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό ηλεκτρικών πεδίων, καθοριζόμενων τόσο από επιτρεπτότητες, όσο και από αγωγιμότητες.

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τη λειψοειδής από τις επιλεγμένες παραμέτρους εισόδου γεωμετρία του μοντέλου. Το μήκος του μονωτήρα είναι $h_1 = 3030 \text{ mm}$. Οι παράμετροι του μοντέλου και το εύρος διακύμανσής τους συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

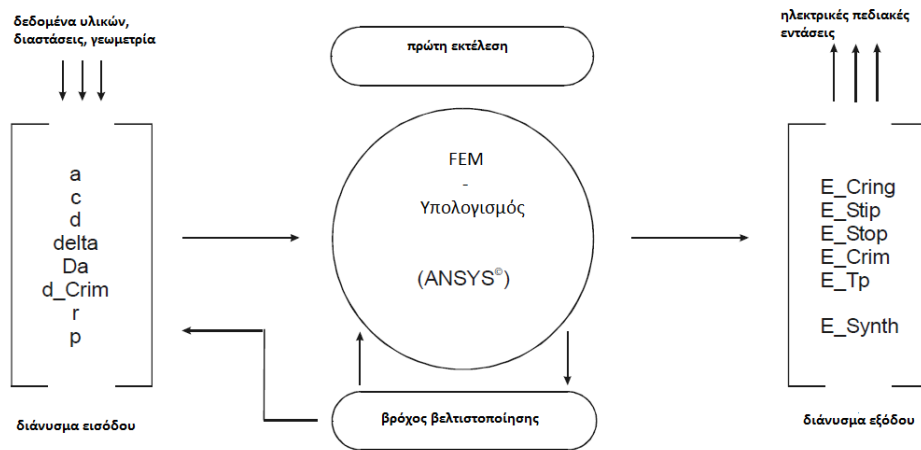


Σχήμα 3.66: Τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων συνθετικού μονωτήρα (ενεργό άκρο) με τοροειδές εξομάλυνσης (450 mm/48 mm) [50].

παράμετρος	Τιμή [mm]	Εύρος βελτιστοπ. [mm]	κλασματική διόρθωση [αρχή, τέλος]
a	60	[8 – 60]	[10, 60]
c	19	[5 – 100]	18 fixed
D _a	450	[250 – 600]	[350, 600]
d	48	[20 – 90]	[20, 90]
d_Crim	35	[35 – 75]	[35, 75]
p projection	52	[30 – 65]	40 fixed
r	4	[2 – 10]	[2, 8]
Δ (delta)	29	[14 – 100]	[14, 90]

Πίνακας 3.6: Παράμετροι μοντέλου (ο ορισμός τους φαίνεται στο σχήμα 3.65) [50].

Στο ακόλουθο σχήμα περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία υπολογισμού με πεπερασμένα στοιχεία. Για **μία και μόνο εκτέλεση της λειτουργίας υπολογισμών**, το διάνυσμα εξόδου λαμβάνεται άμεσα από τους επεξεργαστές του ANSYS®. Στη **λειτουργία βρόχου βελτιστοποίησης**, το διάνυσμα εισόδου τροποποιείται μέσα στο βρόχο, έως ότου το διάνυσμα εξόδου προσεγγίσει μια βελτιστοποιημένη τιμή.

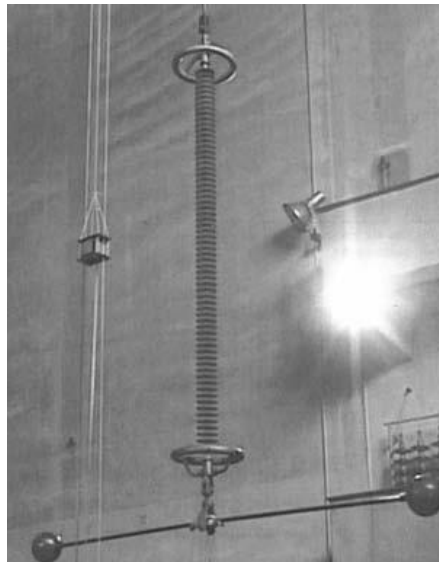


Σχήμα 3.67: Διαδικασία υπολογισμού [50].

Για τη βελτιστοποίηση των ληφθέντων αποτελεσμάτων, μια «σύνθετη» ηλεκτρική πεδιακή ένταση E_Synth ορίζεται ως το άθροισμα [50]:

$$E_Synth = E_Tp + E_Crim + E_Stop + E_STip + E_Cring \quad (3.10)$$

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή, προκειμένου να επαληθευτούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

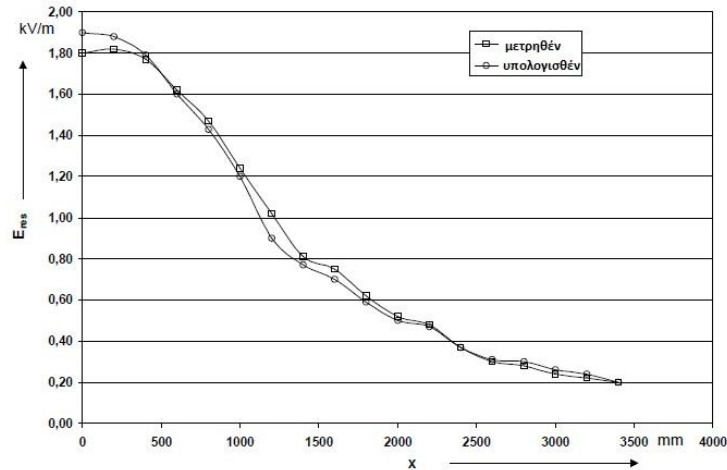


Σχήμα 3.68: Διάταξη δοκιμής για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου με τη βοήθεια ενός χωρητικού E-πεδίου ανιχνευτή (το κουτί στην αριστερή πλευρά του σχήματος) [50].

Η διάταξη του μονωτήρα είναι εξοπλισμένη με ένα συνθετικό μονωτήρα τύπου CS160kN-30/65 (134) 3030 και με δύο τοροειδή εξομάλυνσης ($D_s=450/d=48$ mm, βλέπε σχήμα 3.65), ένα στο γειωμένο και ένα στο άκρο Υ.Τ.. Το παράθυρο και ο βραχίονας του πυλώνα καθώς και ο αγωγός προσομοιώθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60383 [56]. Μια ac τάση βιομηχανικής συχνότητας (50 Hz) rms τιμής 10 kV εφαρμόστηκε στο ενεργό άκρο. Το συνολικό μήκος της διάταξης από το βραχίονα του πυλώνα έως τον αγωγό ήταν 3570 mm. Οι πεδιακές εντάσεις κατά μήκος του άξονα

των x (τοροειδές βάσης στα $x=315$ mm, τοροειδές κορυφής στα $x=3285$ mm) μετρήθηκαν με τη βοήθεια ενός ανεξάρτητου E-πεδίου ανιχνευτή (E-field probe, πρόκειται για το κυβικό κουτί στο παραπάνω σχήμα) σε μια απόσταση 1000 mm. Η μετρηθείσα ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ελήφθη ως το γεωμετρικό άθροισμα E_{res} των E_x , E_y και E_z (rms τιμές).

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E_{res} κατά μήκος μιας απόστασης 1000 mm παράλληλα με τον άξονα του μονωτήρα, που προέκυψε τόσο απ' τις μετρήσεις, όσο και απ' τους υπολογισμούς, φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.69: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_{res} κατά μήκος μιας απόστασης 1000 mm παράλληλα με τον άξονα του μονωτήρα (μετρηθέντα και υπολογισθέντα, βάσει της FEM, αποτελέσματα) [50].

Τα διαγράμματα του παραπάνω σχήματος φανερώνουν μια εξαιρετική σύγκλιση μεταξύ υπολογισμού και μέτρησης και επιβεβαιώνουν ότι το άκρο Υ.Τ. καταπονείται πολύ περισσότερο από το γειωμένο άκρο, κάτι που ασφαλώς ήταν αναμενόμενο. Επαληθεύεται επιπλέον ότι η κατανομή του δυναμικού

$$\varphi = \int_s \vec{E} \cdot \vec{ds} \quad (3.11)$$

κατά μήκος του άξονα- x προσεγγίζει μια μη-γραμμική χαρακτηριστική για τους συνθετικούς μονωτήρες [50].

Τέλος, στο άρθρο [49] παρουσιάζεται ο συνδυασμός υπολογισμού και μέτρησης της κατανομής της τάσης κατά μήκος συνθετικών μονωτήρων γραμμής μεταφοράς 1000 kV AC και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται ένας συνθετικός μονωτήρας ο οποίος θεωρείται σε ξηρές και καθαρές συνθήκες και μοντελοποιείται με τη βοήθεια της FEM (σύμφωνα με την τεχνική του υπο-μοντέλου, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην υποενότητα 3.2.2). Τα τρισδιάστατα μοντέλα που κατασκευάζονται λαμβάνουν υπόψη τους τα τοροειδή εξομάλυνσης, τους αγωγούς και το βραχίονα του πυλώνα, ενώ για λόγους σύγκρισης, τα δεδομένα προσομοίωσης «μεταφέρονται» αυτούσια σε κάποιο υπαίθριο εξωτερικό χώρο του Ινστιτούτου Έρευνας Υψηλών Τάσεων στην πόλη Wuhan της Κίνας (WHVRI).

Ο μονωτήρας που χρησιμοποιείται είναι τύπου FXBW-1000/210-9750 και τα λεπτομερή γεωμετρικά και λοιπά χαρακτηριστικά του παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 3.3.2 της παρούσας εργασίας.

Ο μετρητικός εξοπλισμός περιλαμβάνει μια ειδική συσκευή μέτρησης της κατανομής της τάσης, την οποία διαχειρίζεται ένας μετρητικός εργάτης με έναν βραχίονα μήκους 5 m. Κατά τη μέθοδο μέτρησης χρησιμοποιείται ένα λεπτό φύλλο χαλκού, το οποίο είναι κυκλικά συσφιγμένο και δεμένο στο κυρίως σώμα του μονωτήρα, στο μέσον της απόστασης μεταξύ δύο ελαστομερών δίσκων. Η διαφορά δυναμικού κάθε δύο γειτονικών χάλκινων φύλλων μετράται δύο φορές: μία με κατεύθυνση απ' το άκρο Υ.Τ. προς το γειωμένο άκρο και μία δεύτερη με την αντίστροφη κατεύθυνση. Η μέση τιμή των δύο αποτελεί την «τάση αντοχής⁶» του ενός δίσκου και του περικλειόμενου πυρήνα της ράβδου (ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες) του μονωτήρα. Το μετρητικό σύστημα μαζί με όλα τα συμπαρομαρτούντα αυτού φαίνεται στις εικόνες του παρακάτω σχήματος.



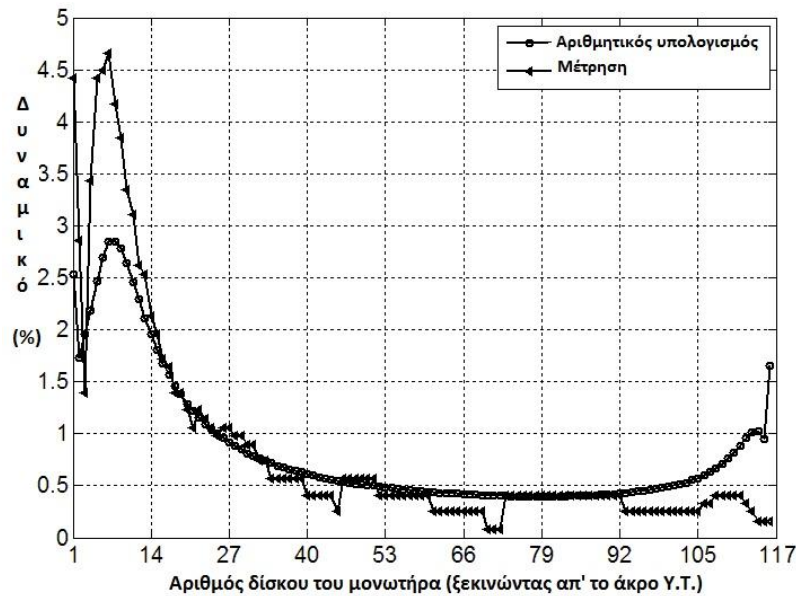
Σχήμα 3.70: Εξοπλισμός και μέθοδος μέτρησης [49].

Η μέτρηση τόσο στον πρώτο, όσο και στον τελευταίο δίσκο του μονωτήρα περικλείει, πέραν του πυρήνα της ράβδου, και τους μεταλλικούς ακροδέκτες των γειωμένου και Υ.Τ. άκρων. Για το λόγο αυτό η κατανομή της τάσης γύρω απ' αυτούς τους δύο δίσκους (πρώτο και τελευταίο) εμφανίζεται σχετικά ανυψωμένη.

Οι κατανομές της τάσης κατά μήκος των ελαστομερών δίσκων του μονωτήρα, όπως προέκυψαν τόσο απ' τις προσομοιώσεις, όσο κι από τις μετρήσεις, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Όπως φαίνεται απ' αυτό, οι δύο σειρές αποτελεσμάτων είναι σχεδόν ίδιες στο μέσον του μονωτήρα: αν και το παρατηρούμενο σφάλμα φαίνεται σχετικά μεγάλο σε ορισμένους δίσκους, οι δύο γραφικές τείνουν να έχουν την ίδια μορφή. Ωστόσο, η απόκλιση πειράματος και προσομοίωσης στις περιοχές μερικών δίσκων κοντά στο γειωμένο άκρο και στο άκρο Υ.Τ. είναι πολύ μεγάλη και δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή, ιδιαίτερα στους δίσκους που βρίσκονται στο ύψος των τοροειδών εξομάλυνσης. Τα τόσο μεγάλα μετρητικά σφάλματα ενδεχομένως να οφείλονται στο ότι ο αισθητήρας μέτρησης (probe) βρισκόταν πολύ κοντά στα τοροειδή εξομάλυνσης, επομένως ήταν έντονη η επίδραση των

⁶ Αναγράφεται ως «withstand voltage value».

τοπικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην περιοχή αυτή. Μια άλλη πιθανή αιτία της μη αναμενόμενης απόκλισης θα μπορούσε να είναι το γεγονός ότι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δίσκους είναι μικρή, επομένως ο αισθητήρας δεν είναι εύκολο να συνδεθεί, μέσω του μετρητικού εργάτη, με τα χάλκινα φύλλα που αφορούν στους παρακείμενους στα τορριειδή εξομάλυνσης δίσκους [49].



Σχήμα 3.71: Κατανομή της τάσης των αριθμητικά υπολογισθέντων και πειραματικά μετρηθέντων αποτελεσμάτων κατά μήκος του μονωτήρα [49].

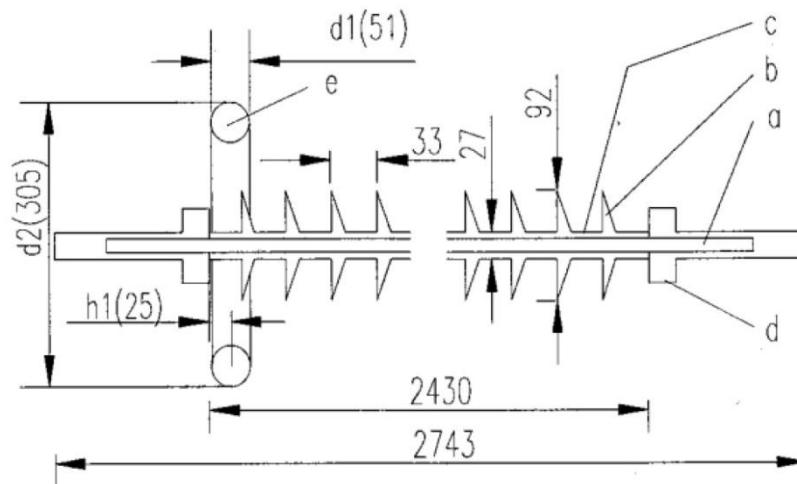
Προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. με το πρόγραμμα Opera-3d

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά οι προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ. που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Opera-3d. Η γεωμετρία και το πλέγμα κάθε μοντέλου κατασκευάζονται με τη βοήθεια του Μοντελοποιητή (modeler), ενώ χάρη στο Μετ-Επεξεργαστή (Post-Processor) λαμβάνονται οι επιθυμητές γραφικές παραστάσεις για την ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

Οι προσομοιώσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες-σειρές:

❖ Προσομοιώσεις μοντέλων βασισμένων στο μονωτήρα 345 kV του άρθρου [41], του οποίου η απλοποιημένη γεωμετρία παρουσιάζεται ξανά για λόγους διευκόλυνσης στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4.1: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις συνθετικού μονωτήρα που αποτελεί τη βάση για την πρώτη σειρά προσομοιώσεων: (a) ράβδος ενισχυμένη με υαλώδεις ίνες, (b) πολυμερείς ελαστομερείς δίσκοι (ή αλλιώς sheds, 72 το πλήθος), (c) πολυμερές περίβλημα, (d) μεταλλικός ακροδέκτης και (e) τοροειδές εξομάλυνσης [41, 53].

Η κατασκευαστική πορεία των προσομοιώσεων αυτών προσιδιάζει με εκείνη που παρουσιάστηκε στο 3^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας: με αφητηρία το απλούστερο δυνατό μοντέλο (προσομοίωση του απομονωμένου μονωτήρα, όπως φαίνεται εν προκειμένω στο παραπάνω σχήμα) προστίθενται σταδιακά οι διάφοροι παράγοντες που καθιστούν ολοένα και ρεαλιστικότερες

τις συνθήκες προσομοίωσης, εισάγοντας ταυτόχρονα περεταίρω πολυπλοκότητα και αυξάνοντας τον υπολογιστικό φόρτο και χρόνο. Εκείνο που εξετάζεται και αποτιμάται κάθε φορά είναι κατά πόσον η εκάστοτε προσθήκη επηρεάζει σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα (την κατανομή δηλαδή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού), ώστε να μπορεί κανείς να αποφανθεί αν αξίζει ή όχι τον κόπο το επιπλέον υπολογιστικό βάρος.

❖ Από την προαναφερθείσα κατασκευαστική πορεία προέκυψε ένα τελικό μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπόψη του τόσο την επίδραση των αγωγών φάσης, όσο και τη διάταξη τμήματος του πυλώνα από τον οποίον αναρτάται ο μονωτήρας. Θεωρώντας αυτό το μοντέλο ως πλήρες, προσομοιώνονται στη συνέχεια μοντέλα μονωτήρων 150 kV και 400 kV, τα σχέδια των οποίων ελήφθησαν από τη ΔΕΗ. Ορισμένα από αυτά αφορούν σε συνθετικούς μονωτήρες που χρησιμοποιούνται ήδη στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς. Αξίζει να σημειωθεί εδώ η πρακτική που ακολουθείται, σε σχέση με το ζήτημα της χρήσης τους: στο ηπειρωτικό διασυνδεδεμένο σύστημα δεν υπάρχουν γραμμές που να αποτελούνται στο σύνολό τους από συνθετικούς μονωτήρες. Σε τμήματα γραμμών όπου παρατηρείται έντονη ρύπανση (παράκτιες ή βιομηχανικές περιοχές) οι προϋπάρχοντες κεραμικοί μονωτήρες, οι οποίοι έχουν υποστεί ολοκληρωτική φθορά και ευθύνονται για τυχόν σφάλματα, αντικαθίστανται από συνθετικούς.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωμένα ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των συνθετικών μονωτήρων που προσομοιώνονται στην παρούσα εργασία.

Κωδικός αριθμός σχεδίου	Ονομαστική τάση λειτουργίας [kV]	Αριθμός ελαστομερών δίσκων	Διάμετρος ελαστομερών δίσκων [mm]	Μήκος ερπυσμού [mm]	Μήκος μεταξύ ακροδεκτών [mm]	Μήκος μονωτικού μέρους [mm]	Εξωτερική διάμετρος τοροειδούς/διάμετρος σωλήνα [mm]
280511-001	150	36	134	4765	1524	1309	330/30
138206-290	170	32/31 (μεγάλοι/μικροί)	115/85	5708	1901	1747	330/30
303000306	420	75	140	10350	3230	2928	498/48
303000290	420	94	140	13080	4080	3778	498/48

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά συνθετικών μονωτήρων 150 και 400 kV, όπως αυτά ελήφθησαν από σχέδια της ΔΕΗ.

Τα τοροειδή εξομάλυνσης που χρησιμοποιούνται και αναφέρονται στον πίνακα δεν υπήρχαν στα σχέδια και οι διαστάσεις τους ελήφθησαν ως ενδεικτικές τιμές, με βάση τοροειδή που χρησιμοποιήθηκαν σε κοντινά επίπεδα τάσης, όπως εκείνα των άρθρων [50], [52] και [54], όπου προσομοιώθηκαν συνθετικοί μονωτήρες 420 kV, 500 kV και 154 kV, αντίστοιχα. Στις προσομοιώσεις τοποθετούνται δύο τοροειδή σε κάθε μονωτήρα, ένα στο γειωμένο και ένα στο άκρο Υ.Τ.. Ως κατάλληλο σημείο τοποθέτησής τους θεωρείται το ύψος απ' όπου ξεκινά κάθε φορά το αμιγώς μονωτικό μέρος του μονωτήρα (αρχή σιλικονούχου περιβλήματος).

Ιδιότητες υλικών

Στα μοντέλα και των δύο ομάδων προσομοιώσεων δίνονται παρόμοιες ιδιότητες υλικών από το πεδίο Model → Set Material Properties. Πιο συγκεκριμένα, η σχετική διηλεκτρική σταθερά της ρητινούχου, ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες, ράβδου (reinforced fibreglass resin rod) τίθεται ίση προς 7.2 σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το σιλικονούχο περίβλημα

(κατασκευασμένο από SIR) είναι 4.5 για το μοντέλο του [41] και 4.3 για τα μοντέλα των 150 kV και 400 kV.

Η ανάλυση που πραγματοποιείται με τη βοήθεια του συγκεκριμένου λογισμικού είναι αμιγώς ηλεκτροστατική (επιλύτης Tosca, electrostatic analysis). Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα επιλύει την εξίσωση Laplace:

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

Έτσι, δε λαμβάνει υπόψη του οποιαδήποτε κίνηση φορτίων (άρα και ενδεχόμενο ρεύμα διαρροής), επομένως το μόνο που «αντιλαμβάνεται» είναι η ύπαρξη ή μη αγώγιμων επιφανειών. Για το λόγο αυτό η ειδική αγωγιμότητα τίθεται ίση προς 1.0 σε όλα τα μεταλλικά μέρη (ακροδέκτες, τοροειδή εξομάλυνσης, αγωγοί, τμήμα πυλώνα) και 0 στα υπόλοιπα (πυρήνας και περίβλημα). Για τον ίδιο λόγο δεν έχει κανένα νόημα η εκχώρηση εξαιρετικά υψηλής τιμής επιτρεπτότητας στα μέταλλα (που έχουν θεωρητικά άπειρη σχετική διηλεκτρική σταθερά), αφού ο διαχωρισμός τους από τα μη μέταλλα γίνεται μέσω της αγωγιμότητας. Έτσι, για λόγους διαφοροποίησης και μόνο από τα υπόλοιπα υλικά, η σχετική διηλεκτρική σταθερά των αγώγιμων μερών τίθεται ίση προς 2, χωρίς αυτή η ρύθμιση να ανταποκρίνεται σε οποιαδήποτε φυσική ερμηνεία.

Τέλος, η σχετική διηλεκτρική σταθερά και η ειδική αγωγιμότητα για τον αέρα είναι 1.0 και 0 από προεπιλογή (by default).

Οι τιμές που αφορούν στις ιδιότητες των προσομοιοθέντων υλικών φαίνονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Υλικό	Σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)	Ειδική αγωγιμότητα (σ)
Εποξική Ρητίνη με Υαλώδεις Ίνες (Epoxy Resin with Fibreglass)	7.2	0
Σιλικονούχο Καουτσούκ (Silicone Rubber, SIR)	4.5 ή 4.3	0
Μέταλλο	2.0	1.0
Αέρας	1.0	0

Πίνακας 4.2: Τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς και της ειδικής αγωγιμότητας των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται.

Οριακές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το λογισμικό που χρησιμοποιείται (Tosca) υλοποιεί ηλεκτροστατική επίλυση. Από μια άποψη το γεγονός αυτό δεν ανταποκρίνεται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας υπό βιομηχανική συχνότητα, όπου τα φυσικά μεγέθη τα οποία υπεισέρχονται (ηλεκτρική τάση και ηλεκτρικό πεδίο) είναι εναλλασσόμενα, ούτε λαμβάνεται υπόψη το ρεύμα διαρροής που αναπτύσσεται υπό φυσιολογικές συνθήκες στην επιφάνεια του μονωτήρα. Εντούτοις, η ηλεκτροστατική θεώρηση αποτελεί τη χείριστη περίπτωση από πεδιακής σκοπιάς, υπό την προϋπόθεση ότι στις επιφάνειες των μεταλλικών μερών τίθενται οι μέγιστες τιμές των εναλλασσόμενων μεγεθών. Εξάλλου, εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η εκτίμηση της χείριστης πεδιακής κατανομής σε περιοχές πολύ κοντά στην επιφάνεια του μονωτήρα, αφού οι υψηλές τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι αυτές που ευθύνονται για την πρόκληση

δυσμενών καταστάσεων, φαινομένων ή σφαλμάτων επί του μονωτήρα, όπως είναι οι στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις (διεθνώς γνωστές ως corona), η επιφανειακή δραστηριότητα πάνω στην επιφάνειά του ή τελικά η υπερπήδηση αυτού.

Έτσι:

✚ Στις επιφάνειες των αγωγών, των ακροδεκτών Υ.Τ. και των αντίστοιχων τοροειδών εξομάλυνσης τίθεται δυναμικό ίσο προς 1 kV για την περίπτωση του μονωτήρα του άρθρου [41], όπου θεωρήθηκε καταπόνηση υπό τάση δοκιμής.

✚ Στις επιφάνειες των αγωγών, των ακροδεκτών Υ.Τ. και των αντίστοιχων τοροειδών εξομάλυνσης τίθενται δυναμικά ίσα προς $(150/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ kV ή $(400/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ kV, ανάλογα με το συνθετικό μονωτήρα που προσομοιώνεται κάθε φορά.

✚ Στις επιφάνειες των γειωμένων ακροδεκτών, των αντίστοιχων τοροειδών εξομάλυνσης και των τμημάτων του πυλώνα (στις περιπτώσεις που αυτά μοντελοποιούνται) τίθεται δυναμικό ίσο με το μηδέν.

✚ Θεωρώντας ότι το δυναμικό μηδενίζεται στο άπειρο, αυτό τίθεται ίσο με το μηδέν στις εξωτερικές επιφάνειες του παραλληλεπίπεδου που αναπαριστά τον άπειρο χώρο (περιοχή γύρω απ' τη διάταξη ή αλλιώς «background»).

Ακολουθεί η παρουσίαση των προσομοιώσεων των συνθετικών μονωτήρων, όπως υλοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Opera-3d. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι τόσο το μοντέλο του άρθρου [41], όσο και τα μοντέλα των 150 kV και 400 kV δεν σχεδιάζονται εξ' αρχής στο πρόγραμμα Opera-3d: μεταφέρονται από ήδη κατασκευασμένα δισδιάστατα μοντέλα, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα Opera-2d, και, χάρη στην αξονική συμμετρία που παρουσιάζουν, κατασκευάζονται άμεσα, μέσω περιστροφής γύρω από τον άξονα συμμετρίας τους.

4.2 Συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης 345 kV του άρθρου [41]

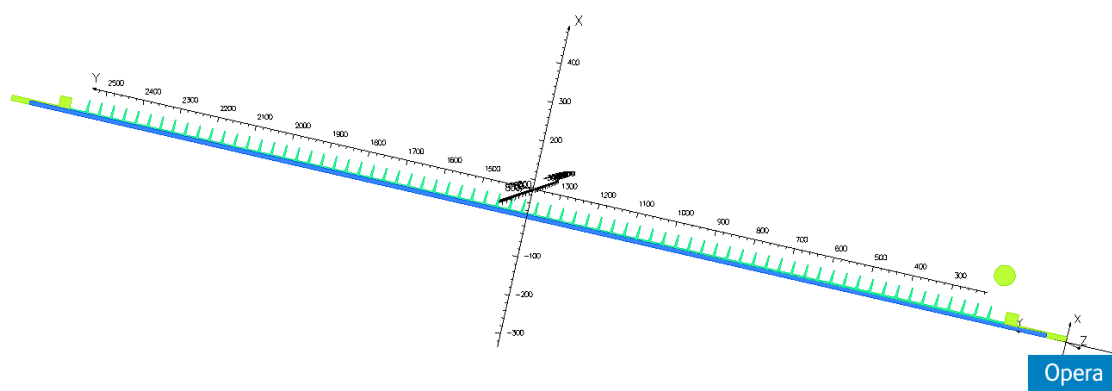
Ο συνθετικός μονωτήρας του σχήματος 4.1 μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε στο άρθρο [41] με χρήση λογισμικού που κάνει εφαρμογή της μεθόδου των οριακών στοιχείων (Boundary Element Method, BEM), ενώ ο ίδιος μονωτήρας υποβλήθηκε σε πειραματικές μετρήσεις, απ' όπου προέκυψαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Έτσι, οι προσομοιώσεις κρίθηκαν σχετικά ακριβείς και αντιπροσωπευτικές και επαληθεύτηκε η αριθμητική μέθοδος υπολογισμού.

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνεται το μοντέλο του σχήματος 4.1 με την εξής λογική πορεία: αρχικά μοντελοποιείται και προσομοιώνεται απομονωμένος ο συνθετικός μονωτήρας, όπως ακριβώς φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Στη συνέχεια, προστίθενται σταδιακά επιπλέον στοιχεία και διατάξεις, ως την κατασκευή ενός τελικού μοντέλου που θεωρείται «πλήρες». Στην προσέγγιση αυτή δε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των άλλων δύο φάσεων του 3φ συστήματος μεταφοράς· ως «πλήρες» θεωρείται το μοντέλο με μία απομονωμένη φάση, μαζί με το εμπλεκόμενο κομμάτι του πυλώνα.

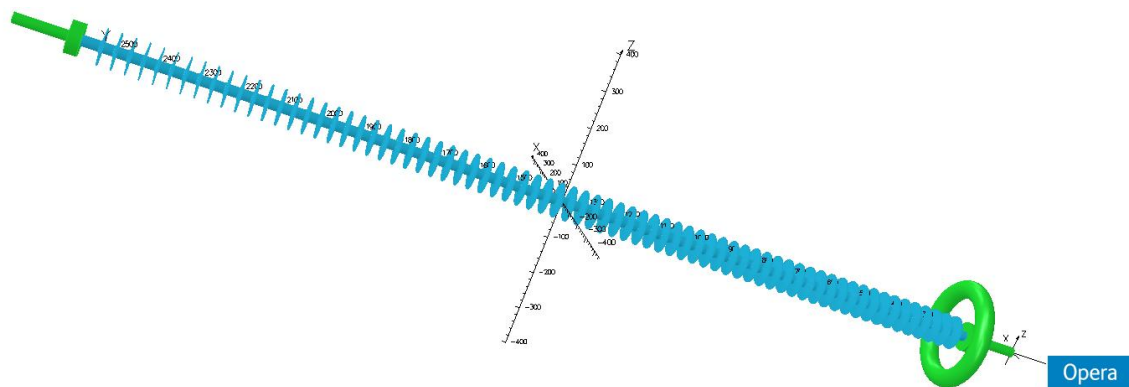
4.2.1 Μοντέλο απομονωμένου μονωτήρα

4.2.1.1 Επίδραση της αύξησης του background στα ληφθέντα αποτελέσματα

Ο απομονωμένος μονωτήρας, όπως κατασκευάστηκε στο Μοντελοποιητή, φαίνεται στο σχήμα 4.3, χωρίς κανένα στρώμα αέρα, χωρίς το background και χωρίς το πλέγμα. Αρχικά εικονίζεται το δισδιάστατο μοντέλο του μονωτήρα, όπως ελήφθη σε μορφή αρχείου *.or2 από την υποψήφια διδάκτορα του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. Ελένη Νικολοπούλου (το οποίο προσομοιώθηκε και δημοσιεύτηκε στο άρθρο [53]) και ακολούθως φαίνεται το τρισδιάστατο μοντέλο που προέκυψε εκ περιστροφής. Σε όλα τα μοντέλα, τόσο εδώ, όσο και παρακάτω, ο μονωτήρας τοποθετείται κατά μήκος του άξονα-γ (ο οποίος λαμβάνεται ως κατακόρυφος), κάθετα στο επίπεδο-χz.

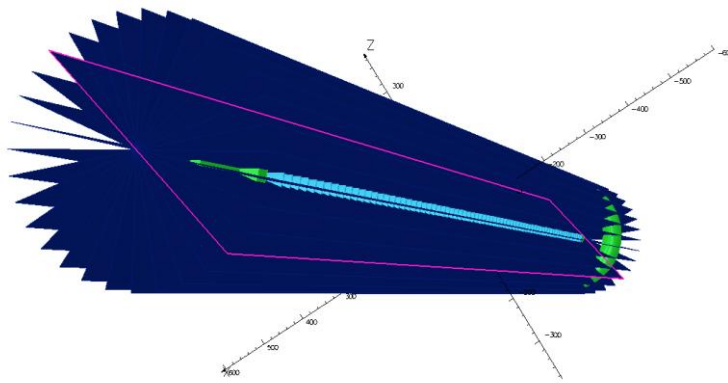


Σχήμα 4.2: Το δισδιάστατο μοντέλο του μονωτήρα του σχήματος 4.1 κατά την εισαγωγή του στο Μοντελοποιητή του Opera-3d.



Σχήμα 4.3: Το τρισδιάστατο μοντέλο όπως προέκυψε εκ περιστροφής χάρη στην αξονική συμμετρία που παρουσιάζει το μοντέλο και στη δυνατότητα που παρέχεται από το Opera-3d.

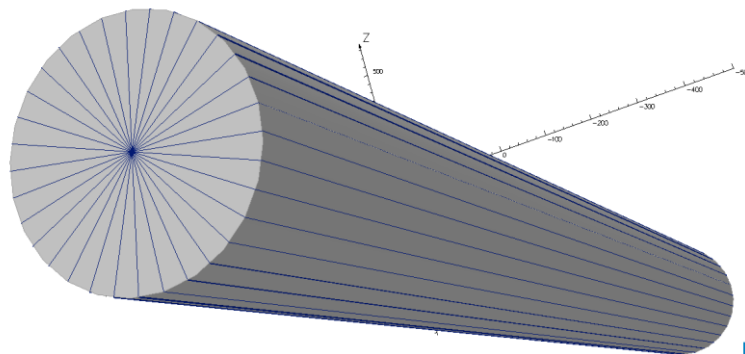
Οι μεγάλες μπλε επιφάνειες που φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα λέγονται «sheets»: δεν έχουν καμία φυσική σημασία, εντούτοις κατατέμνουν το χώρο σε «φέτες» και διευκολύνουν την κατασκευή του πλέγματος όγκου του μοντέλου, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο μοντελοποίησης (η τεχνική «διαίρει και βασιλεύει» αποτελεί θεμέλιο λίθο της Επιστήμης των Υπολογιστών, επομένως δαπανάται πολύ λιγότερος χρόνος CPU όταν η προς εκτέλεση εργασία –εν προκειμένω η κατασκευή του πλέγματος- είναι χωρισμένη σε επιμέρους τμήματα).



Opera

Σχήμα 4.4: Ο μονωτήρας με τα sheets.

Προκειμένου να ληφθούν κατά το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα στην περιοχή του αέρα κοντά στο μονωτήρα, εισάγεται -εκτός του background- ένας κύλινδρος αέρα ακτίνας 160 mm και ύψους 3043 mm, με σχετικά μικρό μέγεθος στοιχείων, ώστε να προκύψει πυκνότερο πλέγμα, σε σύγκριση με τον «άπειρο» χώρο. Με τον τρόπο αυτό δίνεται έμφαση σε μια περιοχή ενδιαφέροντος αρκετά κοντά στο υπό μελέτη μοντέλο, ενώ ο υπόλοιπος χώρος πληρώνεται με αραιότερο πλέγμα, αφού δεν ενδιαφέρει η πεδιακή κατανομή μακριά από το μονωτήρα. Το μοντέλο με τον «κυλινδρικό αέρα» φαίνεται παρακάτω.



Opera

Σχήμα 4.5: Πλήρωση του μοντέλου με «κυλινδρικό αέρα» υψηλής – σχέση με το background- πυκνότητας πλέγματος.

Το μοντέλο του σχήματος 4.5 παρουσιάζει συμμετρία $\frac{1}{4}$, αρκεί επομένως να κατασκευαστεί το πλέγμα και ακολούθως να πραγματοποιηθεί ηλεκτροστατική επίλυση μονάχα για το $\frac{1}{4}$ αυτού. Ως εκ τούτου, το background, στο οποίο θα τοποθετηθεί, θα είναι κι αυτό το $\frac{1}{4}$ του συνολικού background. Ποιες όμως πρέπει να είναι οι διαστάσεις του τελευταίου, έτσι ώστε το δυναμικό στο «άπειρο», δηλαδή στις εξωτερικές επιφάνειες του ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, να μην αλλοιώνει τα εξαγόμενα αποτελέσματα;

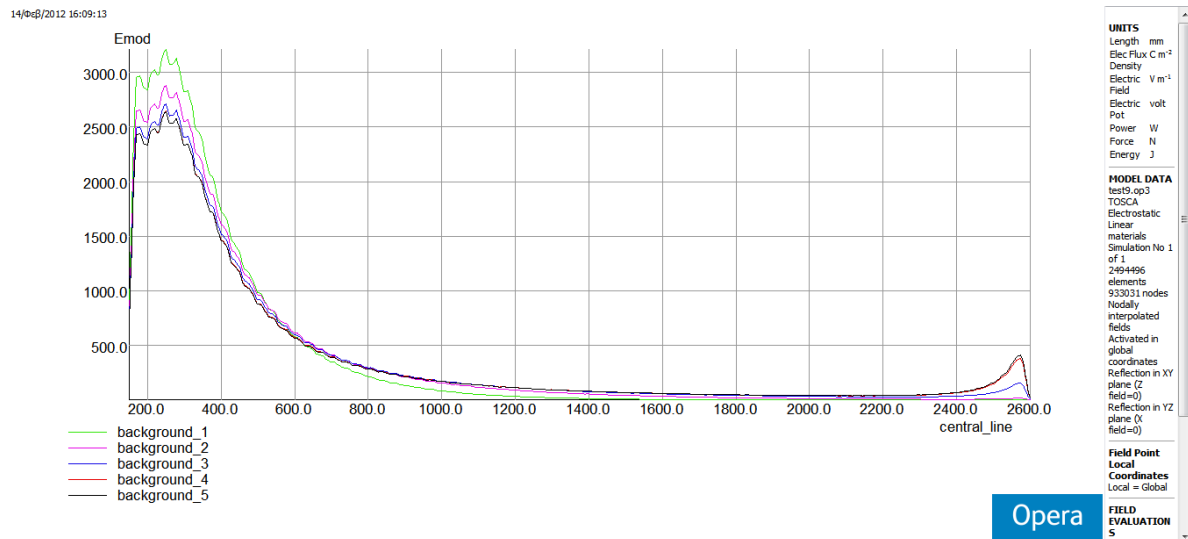
Η αναπαράσταση του άπειρου χώρου αποτελεί εγγενή περιορισμό της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM), όπως έχει τονιστεί και στο 2^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο περιορισμός αυτός, γίνεται μια σειρά από προσομοιώσεις όπου συγκρίνεται κάθε φορά η πεδιακή κατανομή και η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα, αυξανόμενου του background. Η αύξηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω συντελεστών κλιμάκωσης (scale factors) κάθε διάστασης του εξωτερικού κυλίνδρου του μοντέλου. Οι 5

συνδυασμοί συντελεστών κλιμάκωσης που εισάγονται για τις x , y , z διαστάσεις του εξωτερικού κυλίνδρου του μοντέλου φαίνονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα.

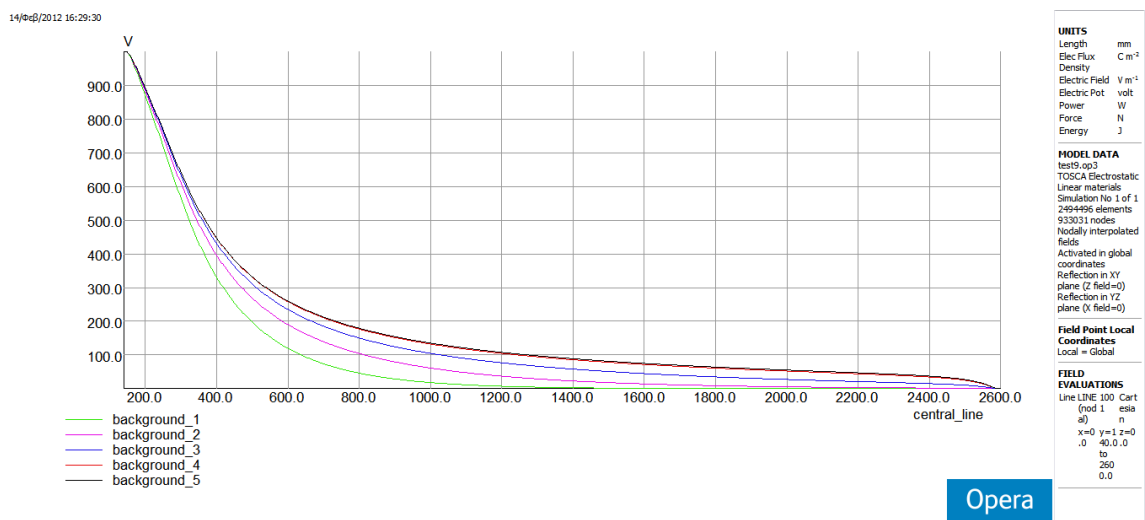
Αριθμός του υπό δοκιμή background	Συντελεστές κλιμάκωσης κατά x , y , z διάσταση αντίστοιχα
1	3, 3, 3
2	6, 3, 6
3	14, 4, 14
4	80, 5, 80
5	80, 10, 80

Πίνακας 4.3: Συντελεστές κλιμάκωσης του εκάστοτε background.

Τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών αυτών προσομοιώσεων φαίνονται συνοπτικά στα διαγράμματα των παρακάτω σχημάτων.



Σχήμα 4.6: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για πέντε διαφορετικά background.



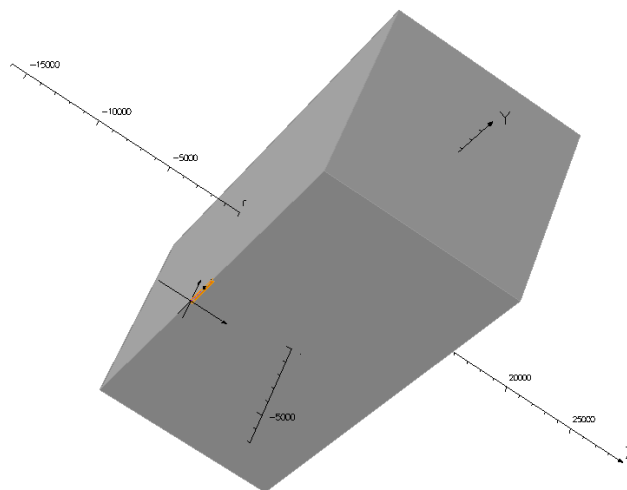
Σχήμα 4.7: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για πέντε διαφορετικά background.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα του σχήματος 4.6, η τοποθέτηση του μοντέλου σε ένα σχετικά μικρών διαστάσεων background έχει ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση του πεδίου κοντά στο άκρο Υ.Τ. και στο γειωμένο άκρο, αντίστοιχα. Εντούτοις, από μια αύξηση και πέρα (background_4 προς background_5) η επίδραση στην πεδιακή κατανομή είναι ανεπαίσθητη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο άκρο Υ.Τ. είναι εντελώς ανύπαρκτη: η κόκκινη γραφική έχει καλυφθεί πλήρως από τη μαύρη.

Πανομοιότυπη είναι και η πρόοδος της κατανομής του δυναμικού, αυξανόμενου του background: όσο μεγαλύτερο γίνεται, τόσο πιο ομοιόμορφη γίνεται αυτή. Μάλιστα, όπως και στην περίπτωση των πεδιακών κατανομών, η διαφορά μεταξύ της επόμενης από την προηγούμενη τείνει να εξαντληθεί: και εδώ κοντά στο άκρο Υ.Τ. η κόκκινη γραφική φαίνεται να έχει κρυφτεί εντελώς κάτω από τη μαύρη. Επομένως, ως αποδεκτό λαμβάνεται το background_5.

Στα μοντέλα που θα ακολουθήσουν δεν εξετάζεται κάθε φορά η επίδραση του παράγοντα αυτού, αλλά τίθεται εξ' αρχής ένα επαρκώς μεγάλο background, ώστε να μην αλλοιώνονται τα τελικά αποτελέσματα και να μελετάται η καθαρή επίδραση άλλων κατασκευαστικών παραμέτρων.

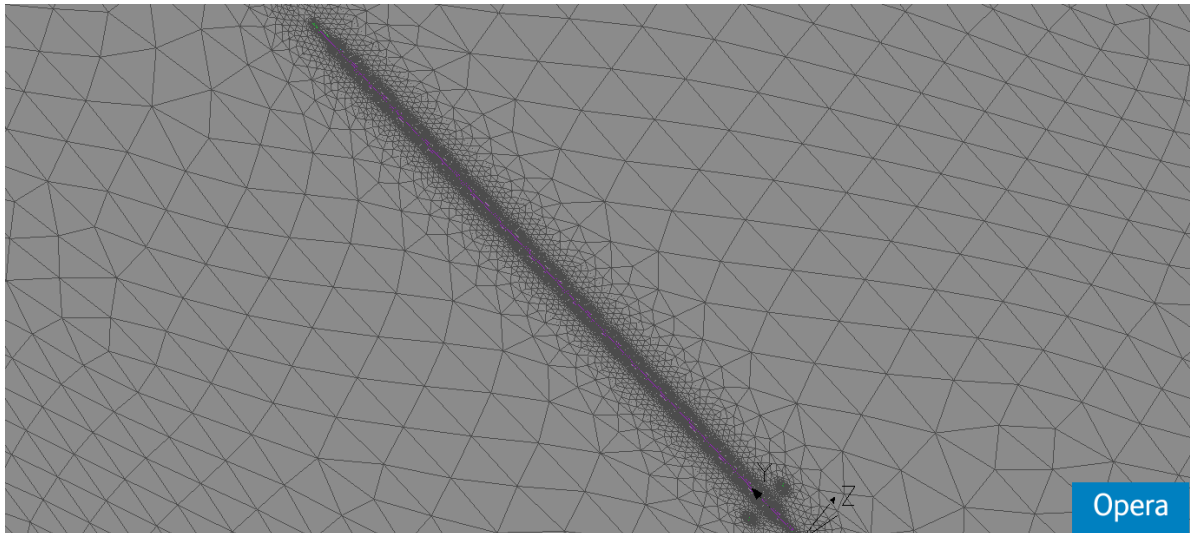
Το μοντέλο με το τελικό background για τον απομονωμένο μονωτήρα φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Opera

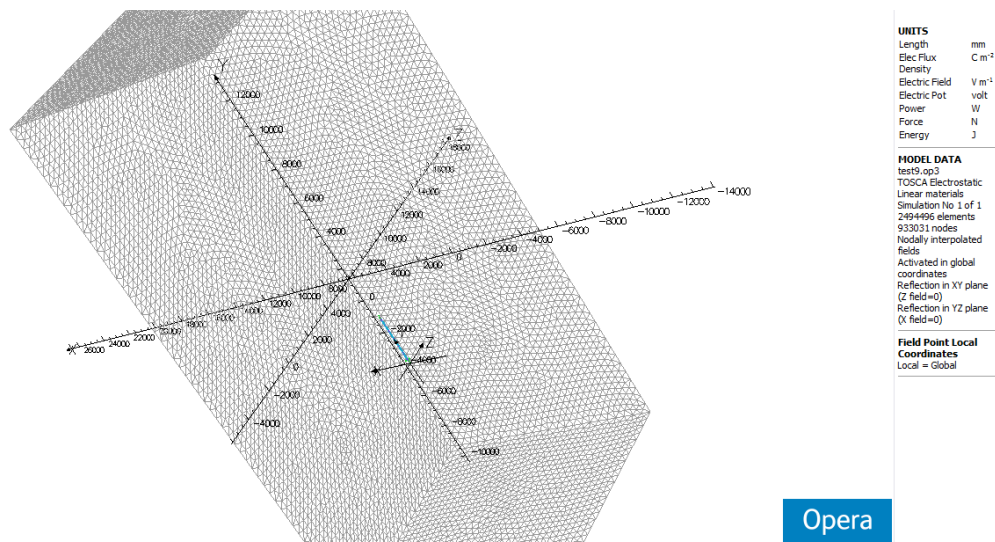
Σχήμα 4.8: Το μοντέλο του απλοποιημένου μονωτήρα, όπως φαίνεται μακροσκοπικά και κατά ¼ μαζί με το τελικό background. Η επισημασμένη με πορτοκαλί χρώμα περιοχή είναι το τμήμα του «κυλινδρικού αέρα».

Στη συνέχεια, εικονίζεται το μοντέλο του μονωτήρα στο Μοντελοποιητή, έπειτα από την κατασκευή του πλέγματος. Εύκολα μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαφορά στην πυκνότητα του πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος, απ' τη μια, και στον υπόλοιπο «άπειρο» χώρο, απ' την άλλη.



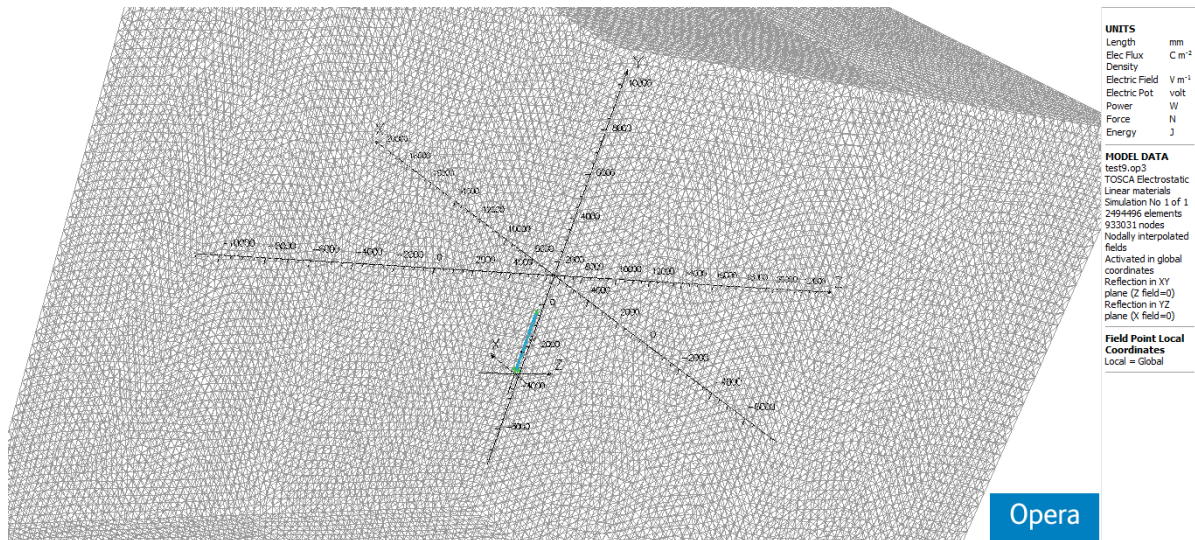
Σχήμα 4.9: Ο μονωτήρας με τον «κυλινδρικό αέρα» και τμήμα του background, μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας του πλέγματος, τόσο στις διάφορες επιφάνειες, όσο και στο συνολικό όγκο του μοντέλου.

Ακολουθεί η εικόνα του μοντέλου στο Μετ-Επεξεργαστή:



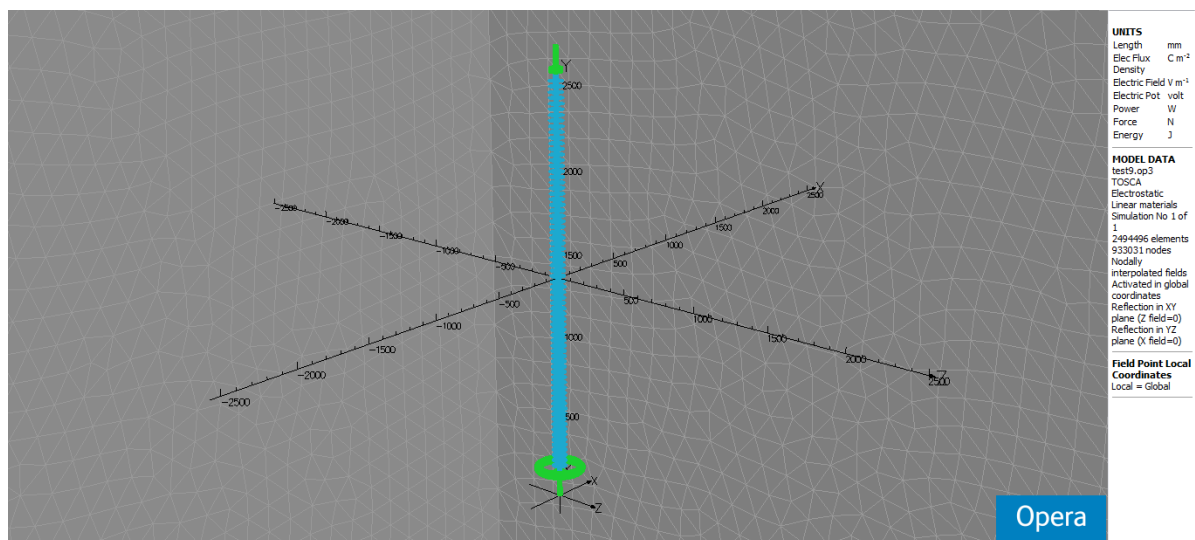
Σχήμα 4.10: Εικόνα του μοντέλου από το Μετ-Επεξεργαστή με την 1/4 συμμετρία του μοντέλου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πάλι το μοντέλο στο Μετ-Επεξεργαστή, με αποκατεστημένη αυτή τη φορά την πλήρη γεωμετρία:



Σχήμα 4.11: Εικόνα του μοντέλου από τον Μετ-Επεξεργαστή με την πλήρη γεωμετρία του μοντέλου.

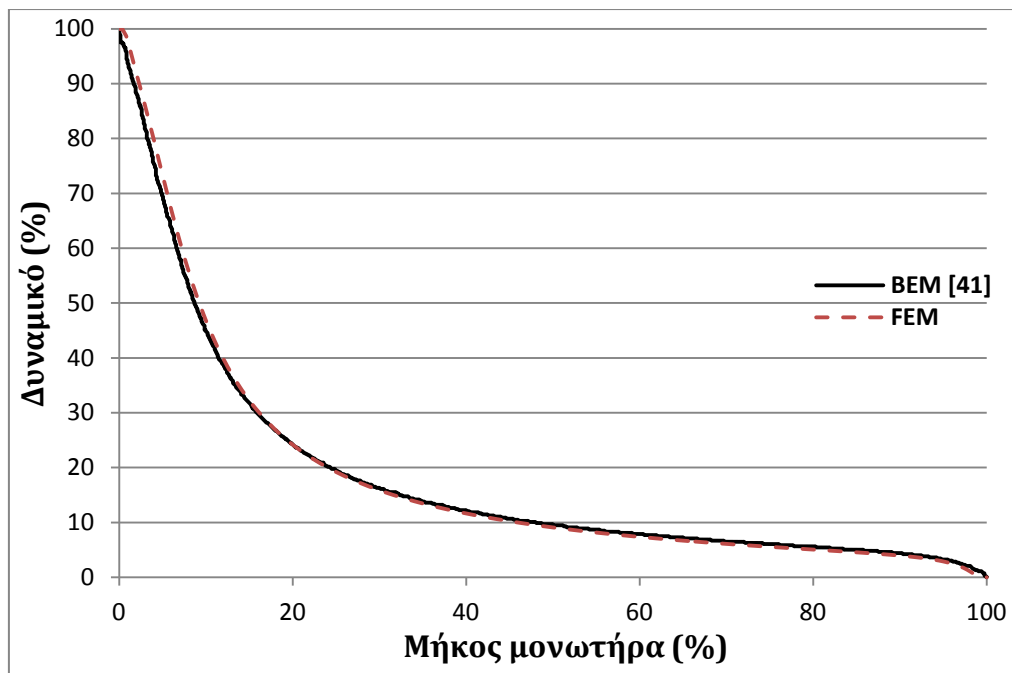
Εστιάζοντας (κάνοντας zoom) στην παραπάνω εικόνα, μπορεί κανείς να δει πιο καθαρά το μονωτήρα στο Μετ-Επεξεργαστή:



Σχήμα 4.12: Εικόνα του μονωτήρα στο Μετ-Επεξεργαστή.

4.2.1.2 Επαλήθευση της χρησιμοποιούμενης αριθμητικής μεθόδου

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, το πρόγραμμα Opera-3d κάνει επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, εφαρμόζοντας τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Προκειμένου να επικυρωθεί η χρησιμοποιούμενη αριθμητική αυτή μέθοδος και να υπάρξει μια αναφορά για την αξιοπιστία των παραγόμενων αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα, όπως προέκυψε από τον επιλύτη Tosca του Opera-3d για το παραπάνω μοντέλο, με την αντίστοιχη κατανομή που παρουσιάζεται στο άρθρο [41]. Οι γραφικές παραστάσεις των δύο αυτών κατανομών παρουσιάζονται σε κοινό σύστημα αξόνων: ο κατακόρυφος άξονας αφορά σε % τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης, ενώ ο οριζόντιος σε % τιμές της απόστασης μόνωσης.



Σχήμα 4.13: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της απόστασης μόνωσης στον άξονα του μονωτήρα με εφαρμογή των δύο διαφορετικών αριθμητικών μεθόδων.

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα, εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι υπάρχει αρκετά ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων που προήλθαν από τις δύο διαφορετικές μεθόδους. Πρέπει να σημειωθεί εντούτοις ότι η κατανομή της BEM αφορούσε σε απλοποιημένο συνθετικό μονωτήρα, χωρίς καθόλου ελαστομερείς δίσκους· αντίθετα, κατά την εφαρμογή της FEM λαμβάνεται υπόψη ολόκληρος ο μονωτήρας, με όλους τους ελαστομερείς δίσκους. Επομένως, είναι πολύ πιθανό η μικρή απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των δύο γραφικών παραστάσεων να οφείλεται στο γεγονός αυτό.

Δεν θα είχε νόημα η παράθεση για αντιπαραβολή του πλήθους των στοιχείων και των κόμβων που αποτελούν το πλέγμα σε κάθε περίπτωση αριθμητικής εφαρμογής: αφ' ενός μεν διότι το λογισμικό που υλοποιούσε τη BEM στο άρθρο [41] αφορούσε σε επίλυση δύο διαστάσεων στο συγκεκριμένο διάγραμμα, ενώ το Opera-3d κάνει τρισδιάστατη επίλυση, αφ' ετέρου διότι οι δύο μέθοδοι είναι εντελώς διαφορετικής φιλοσοφίας, από τη σκοπιά τόσο της μοντελοποίησης, όσο και της επίλυσης. Εκείνο που αναμένεται από την εφαρμογή της BEM, λόγω του ότι συνίσταται για την επίλυση «ανοικτών» προβλημάτων, είναι να προκύψει σημαντικά μικρότερος αριθμός κόμβων και στοιχείων, σε σχέση με τη FEM, ενώ με εφαρμογή της τελευταίας παράγονται πολλά περισσότερα στοιχεία και κόμβοι, αφού το πρόγραμμα επίλυσης είναι «αναγκασμένο» να αναπαραστήσει τον άπειρο χώρο μέσω ενός τεράστιου background, ώστε να προκύψουν λογικά αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά, όπως έχει τονιστεί και στο 2^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, η εφαρμογή της BEM έχει ως συνέπεια να δαπανάται πολύ περισσότερος χρόνος κατά τη φάση της επίλυσης, ενώ με την εφαρμογή της FEM εξοικονομείται σημαντικός υπολογιστικός χρόνος.

Καταλήγοντας, η FEM μπορεί κάλλιστα να αντικαταστήσει τη BEM, χωρίς να προκύψει σημαντική διαφοροποίηση στα τελικά αποτελέσματα. Ωστόσο, θα ήταν επιπόλαιο αν κάποια απ' τις δύο χαρακτηριζόταν πανάκεια, αφού η επίλυση ενός ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος με αριθμητικό τρόπο εξαρτάται άμεσα από το είδος και τη φύση του ίδιου του προβλήματος, από τα αποτελέσματα που επιθυμεί κάποιος να εξαγάγει και από τον τρόπο προσέγγισης και εφαρμογής της όποιας αριθμητικής μεθόδου.

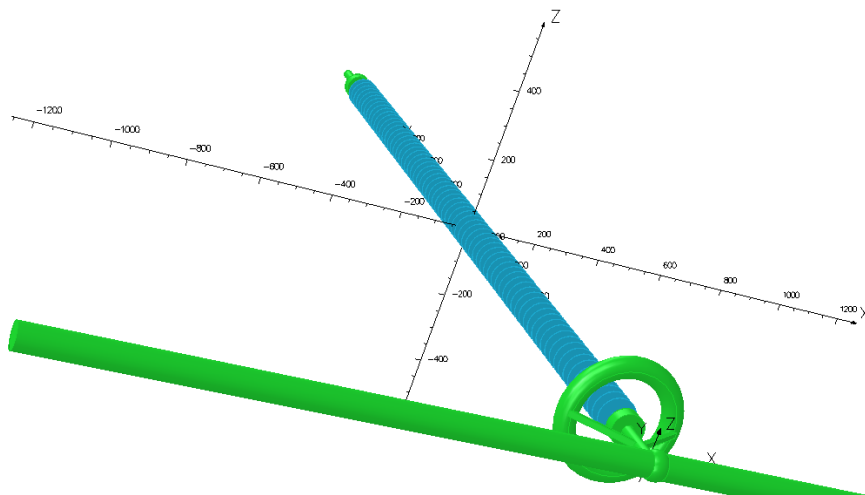
4.2.2 Επίδραση του αγωγού στα τελικά αποτελέσματα

Όπως επισημαίνεται και στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, η παρουσία του αγωγού στο υπό μελέτη μοντέλο επηρεάζει σημαντικά την κατανομή τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού. Η επίδραση αυτή είναι το αντικείμενο της υποενότητας 4.2.2, στα πλαίσια κατασκευής του τελικού μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης 345 kV του άρθρου [41]. Σημειώνεται εδώ ότι, απ' τη μια, αποτελεί προτέρημα του τρισδιάστατου λογισμικού η δυνατότητα προσομοίωσης του αγωγού -δυνατότητα η οποία λόγω έλλειψης αξονικής συμμετρίας του μοντέλου με αγωγό δεν παρέχεται σε δισδιάστατο λογισμικό-, από την άλλη, αυτομάτως χάνεται η κατά ¼ συμμετρία των μοντέλων απ' το σημείο αυτό και πέρα, επομένως οι χρόνοι κατασκευής πλέγματος και επίλυσης του πεδίου αυξάνονται σημαντικά. Έτσι, όλα τα παρακάτω μοντέλα κατασκευάζονται και προσομοιώνονται αξιοποιώντας την ½ συμμετρία που παρουσιάζουν.

Πόσο όμως επηρεάζονται οι κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού από το είδος (απλός ή διπλός) και το μήκος του αγωγού φάσης; Οι παράμετροι αυτές εξετάζονται στα εδάφια που ακολουθούν. Σε κάθε περίπτωση, ο αγωγός θεωρείται καθαρός και λείος: μοντελοποιείται μέσω ενός κυλίνδρου, ορισμένου μήκους και διαμέτρου.

4.2.2.1 Προσθήκη απλού αγωγού μήκους 1x το συνολικό μήκος του μονωτήρα

Αρχικά προστίθεται ένας αγωγός με μήκος όσο το ολικό μήκος του μονωτήρα. Η διάμετρος του αγωγού αυτού είναι $d=60$ mm και θεωρείται ότι συνδέεται με τον ακροδέκτη Υ.Τ. του μονωτήρα μέσω ενός σφαιρικού τμήματος. Επιπλέον, έχουν προστεθεί δύο βραχίονες στήριξης του τοροειδούς εξομάλυνσης. Η εικόνα που φαίνεται στο Μοντελοποιητή, χωρίς τα sheets και τον αέρα, φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

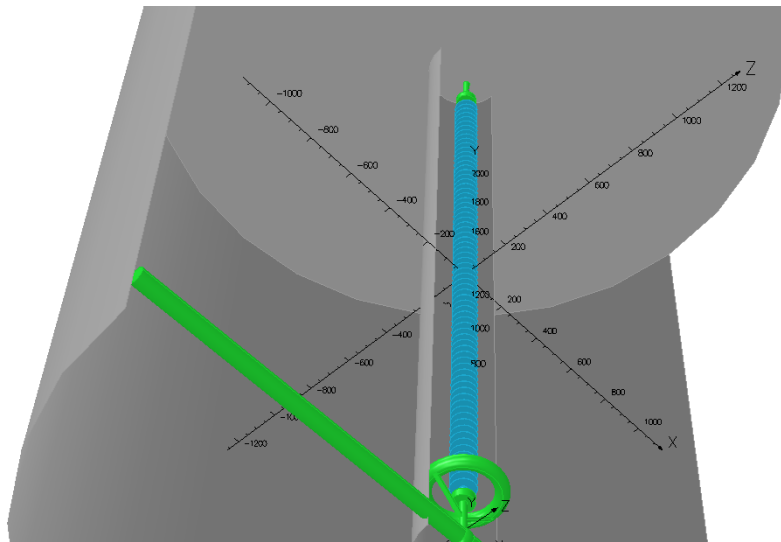


Σχήμα 4.14: Ο μονωτήρας μετά την προσθήκη απλού αγωγού 1x.

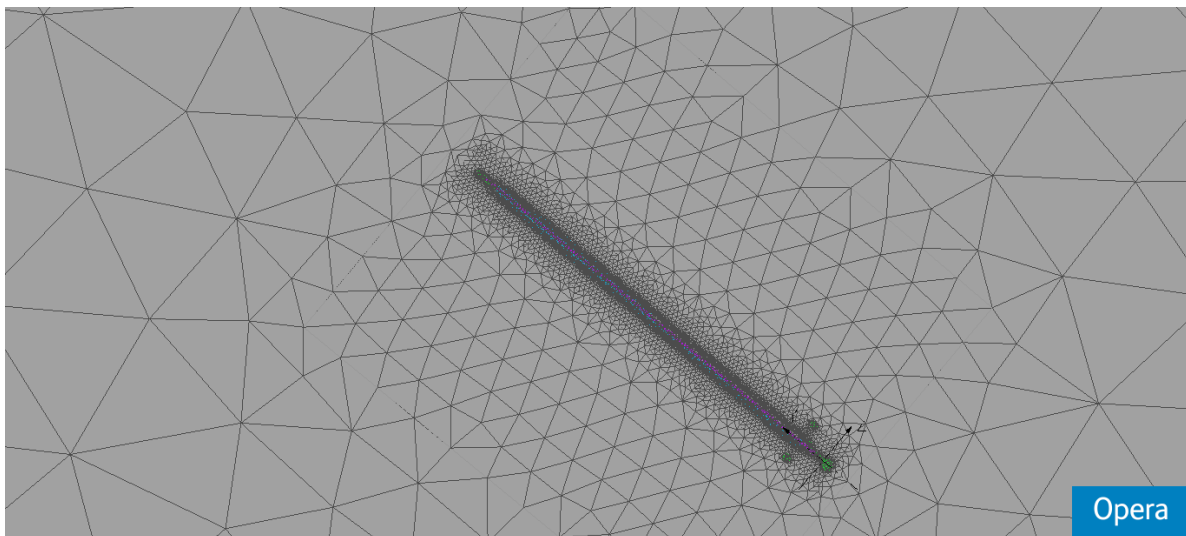
Opera

Καθώς αυξάνεται το μέγεθος του υπό μελέτη μοντέλου, ανακύπτει η ανάγκη για νέα κατάτμηση του χώρου και εισαγωγή ενδιάμεσου χωρίου αέρα, μεταξύ της περιοχής αυξημένου ενδιαφέροντος εγγύς του μονωτήρα και του εξωτερικού background, μακριά από τον αγωγό. Έτσι, πέραν της αύξησης των διαστάσεων των sheets, προστίθεται και ένας επιπλέον «κυλινδρικός αέρας», του οποίου η διάμετρος και το ύψος μόλις που υπερβαίνουν τα συνολικά μήκη αγωγού και μονωτήρα,

αντίστοιχα. Η πυκνότητα δε του πλέγματος στον ενδιάμεσο αυτό κύλινδρο κυμαίνεται μεταξύ εκείνης του εσωτερικότερου κυλίνδρου και αυτής του εξωτερικού background. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η διάταξη του μονωτήρα με τον αγωγό στο Μοντελοποιητή, μαζί με τους δύο κυλίνδρους αέρα, καθώς και λεπτομέρεια του μοντέλου ύστερα απ' την ολοκλήρωση του πλέγματος.

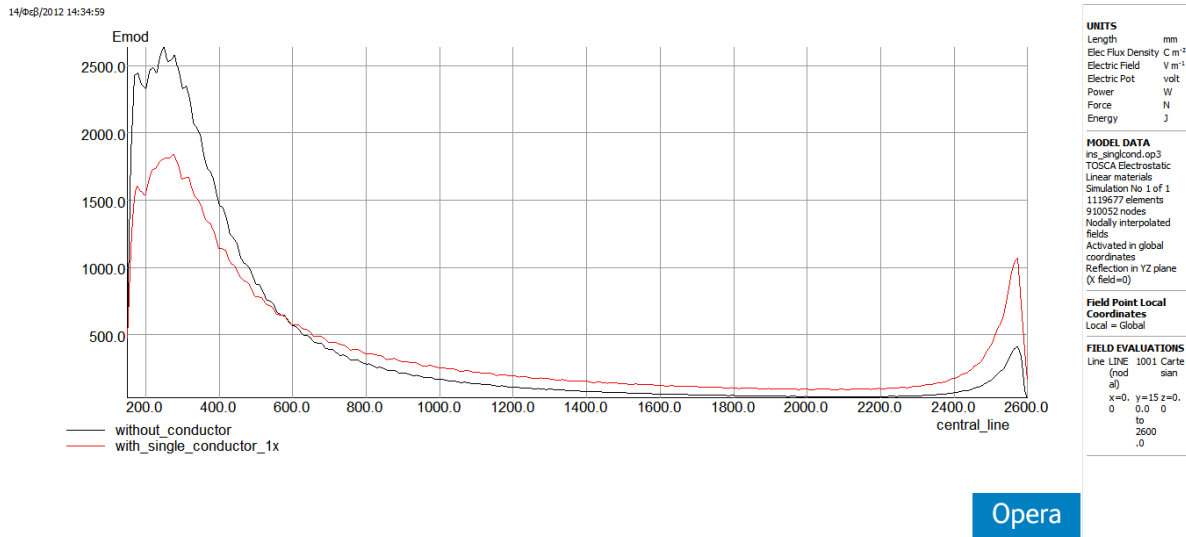


Σχήμα 4.15: Εικόνα του μοντέλου με τους δύο κυλίνδρους αέρα, εγγύς και μακρύτερα από το μονωτήρα.

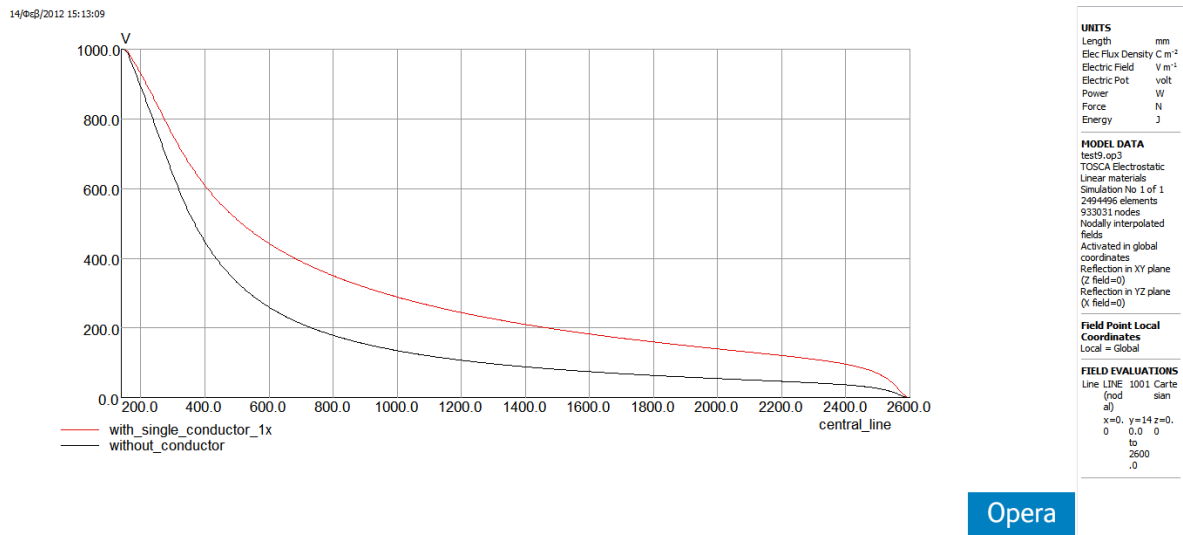


Σχήμα 4.16: Λεπτομέρεια της κάθετης τομής του μοντέλου όπου διακρίνονται οι τρεις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος του χώρου στις αντίστοιχες περιοχές αέρα.

Η προσθήκη του απλού αγωγού 1x επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού γύρω από το μονωτήρα. Η επιρροή αυτή καταδεικνύεται στα ακόλουθα διαγράμματα, στα οποία παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες τα αποτελέσματα ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα.



Σχήμα 4.17: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα χωρίς (μαύρη γραφική) και με απλό αγωγό 1x (κόκκινη γραφική).



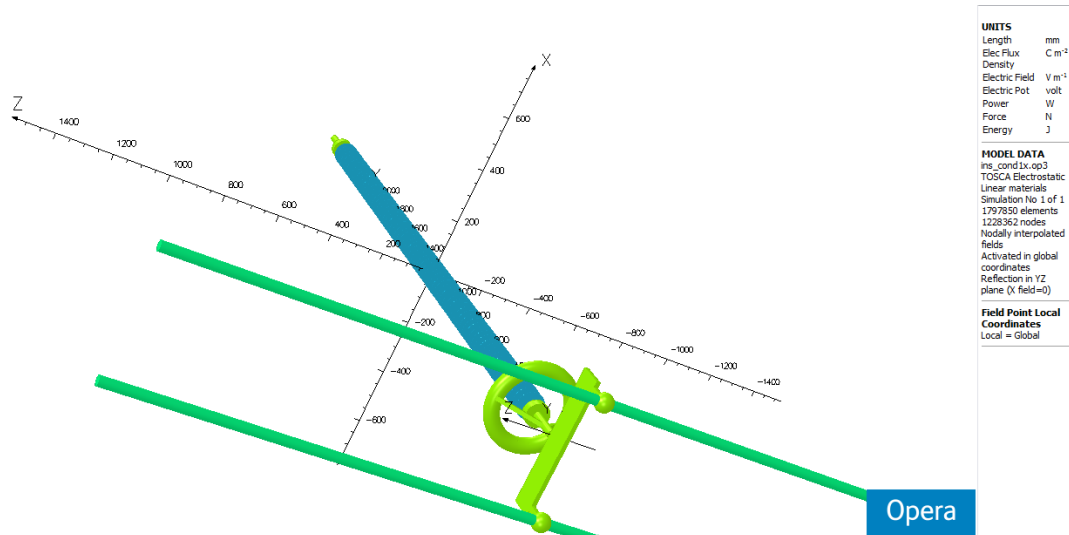
Σχήμα 4.18: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα χωρίς (μαύρη γραφική) και με απλό αγωγό 1x (κόκκινη γραφική).

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τα δύο παραπάνω σχήματα, τόσο η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και εκείνη του δυναμικού τείνουν να γίνουν πιο ομοιόμορφες μετά την προσθήκη απλού αγωγού 1x το μήκος του μονωτήρα. Ωστόσο, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, ενώ η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο άκρο Υ.Τ. μειώνεται, η αντίστοιχη κορυφή κοντά στο γειωμένο άκρο δείχνει να αυξάνει, όντας μάλιστα περισσότερο οξυμμένη.

4.2.2.2 Προσθήκη διπλού αγωγού μήκους 1x το συνολικό μήκος του μονωτήρα

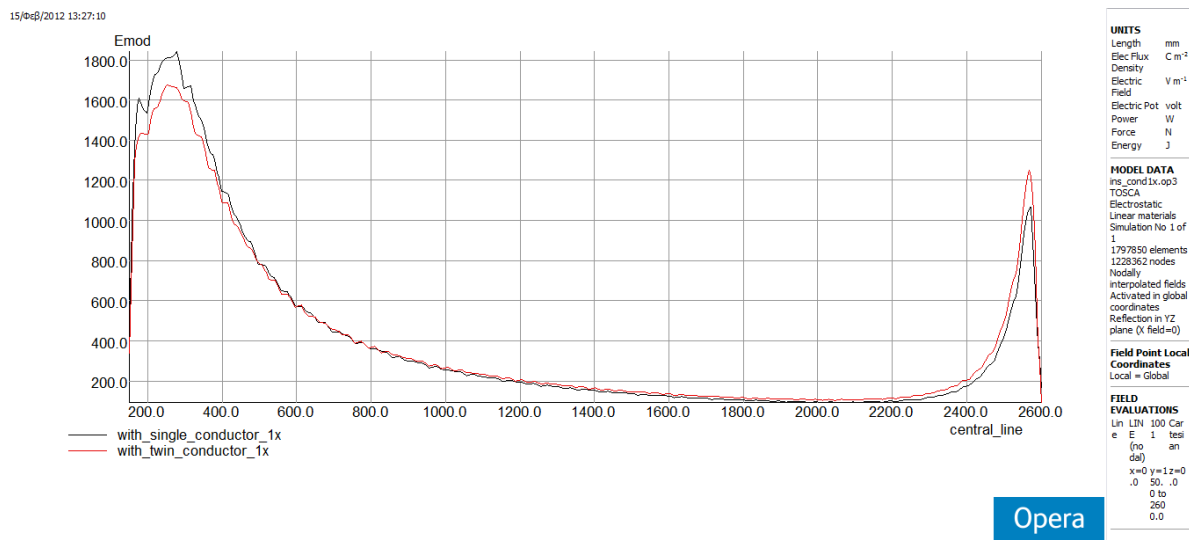
Στο άρθρο [41] αναρτήθηκε από τον υπό μελέτη συνθετικό μονωτήρα διπλός αγωγός. Κάθε αγωγός είχε διάμετρο 32 mm, ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο αγωγών ήταν 457 mm. Βάσει αυτών των διαστάσεων, κατασκευάζεται, με τη βοήθεια του μοντελοποιητή, ένα απλοποιημένο συνδετικό «πιάτο» (yoke plate) σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου και στην κάτω επιφάνεια αυτού ενώνονται τα δύο σφαιρικά τμήματα, μέσω των οποίων συνδέονται εν τέλει οι δύο αγωγοί. Η

λογική κατάτμησης του χώρου με κυλίνδρους αέρα είναι η ίδια, όπως εφαρμόστηκε και στην περίπτωση του απλού αγωγού. Η εικόνα που λαμβάνεται από το Μετ-Επεξεργαστή, έχοντας αποκρύψει το εξωτερικό background και αποκαταστήσει την πλήρη συμμετρία του μοντέλου, είναι η ακόλουθη:

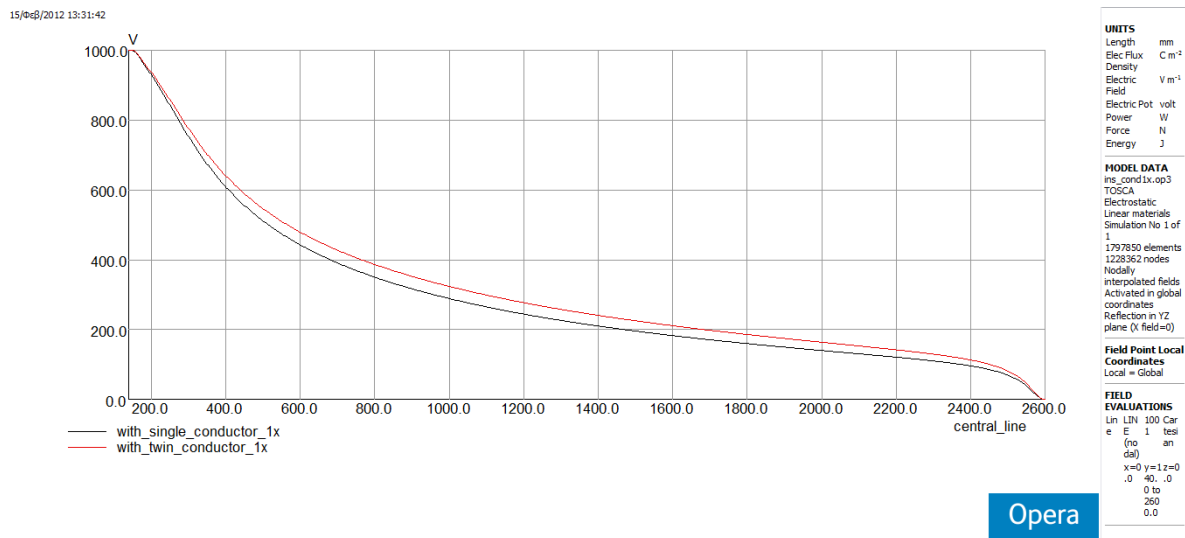


Σχήμα 4.19: Εικόνα του μονωτήρα με το διπλό αγωγό 1x το συνολικό μήκος του πρώτου, όπως προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή.

Η επίδραση του διπλού αγωγού στις κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα, στα οποία γίνεται σύγκριση με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της επίδρασης απλού αγωγού.



Σχήμα 4.20: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα με απλό (μαύρη γραφική) και με διπλό αγωγό 1x (κόκκινη γραφική).



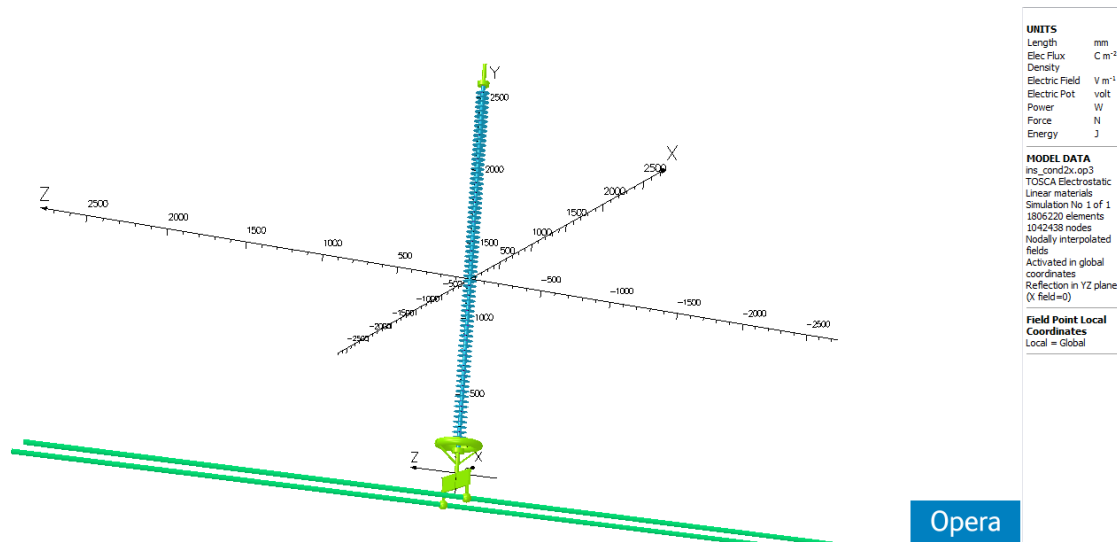
Σχήμα 4.21: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα με απλό (μαύρη γραφική) και με διπλό αγωγό 1x (κόκκινη γραφική).

Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει από τα παραπάνω σχήματα, οι κατανομές τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού τείνουν να γίνουν πιο ομοιόμορφες με την προσθήκη του διπλού αγωγού. Η εξέλιξη αυτή δικαιολογείται και θεωρείται μάλλον αναμενόμενη, αφού ο λόγος που υπαγορεύει την εγκατάσταση πολλαπλών αγωγών δεν είναι άλλος από τη μείωση της πεδιακής έντασης στις επιφάνειες και στην περιοχή πλησίον αυτών: είναι η «κλασική» πρακτική που εφαρμόζεται για την αντιμετώπιση του φαινομένου corona. Η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο άκρο Υ.Τ. δείχνει να μειώνεται ελαφρώς, ενώ και πάλι η αντίστοιχη τιμή κοντά στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα φαίνεται αυξημένη.

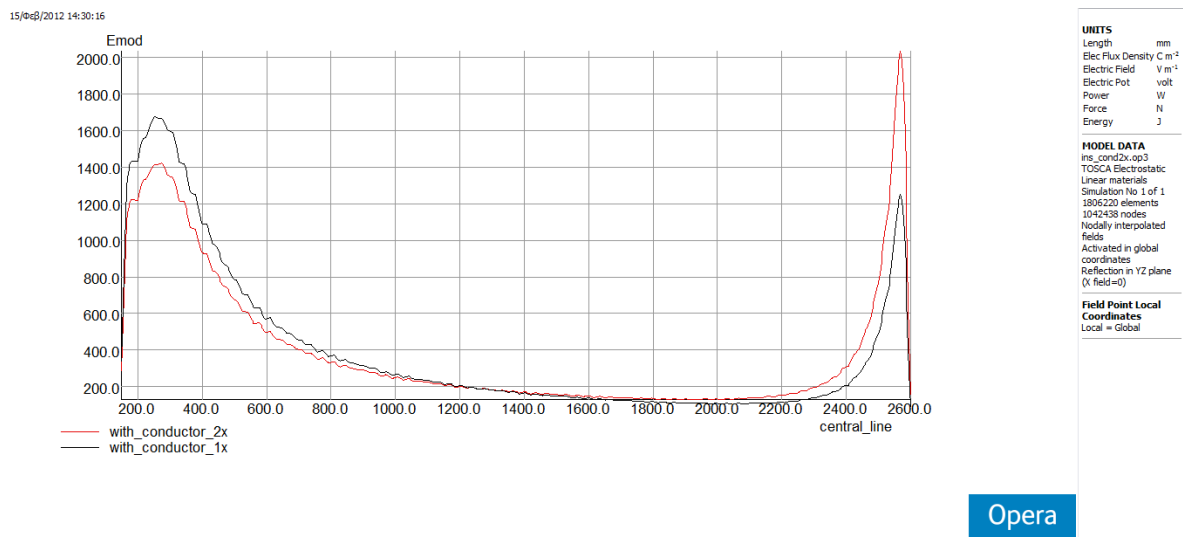
4.2.2.3 Προσθήκη διπλού αγωγού μήκους 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα

Στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας επισημάνθηκε το ζήτημα της επίδρασης του μήκους του αγωγού στα τελικά αποτελέσματα, με αναφορά στο άρθρο [41]. Για την ανάδειξη της επιρροής αυτής της παραμέτρου στις κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού προσομοιώνεται το μοντέλο του σχήματος 4.19 με διπλάσιο μήκος αγωγών. Η εικόνα του μοντέλου στο Μετ-Επεξεργαστή, έχοντας αποκρύψει το εξωτερικό background και αποκαταστήσει την πλήρη συμμετρία του μοντέλου, φαίνεται στο σχήμα 4.22. Τα διαγράμματα των τιμών της πεδιακής έντασης και του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τις δύο περιπτώσεις μήκους των αγωγών (1x και 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα) παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες παρακάτω, στα σχήματα 4.23 και 4.24.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.24, ο διπλασιασμός του μήκους του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα η κατανομή του δυναμικού να εξομαλύνεται ακόμα περισσότερο και η τάση να μοιράζεται με πιο ομοιόμορφο τρόπο κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα. Ωστόσο, στο σχήμα 4.23 παρατηρείται ένα μάλλον παράδοξο γεγονός: ενώ η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο άκρο Υ.Τ. μειώνεται περεταίρω σε σύγκριση με το μήκος 1x του αγωγού, η αντίστοιχη τιμή κοντά στο γειωμένο άκρο αυξάνεται σε υπερβολικά μεγάλο βαθμό, αδικαιολόγητο και μη εξηγήσιμο, εν πρώτοις, από φυσικής σκοπιάς.



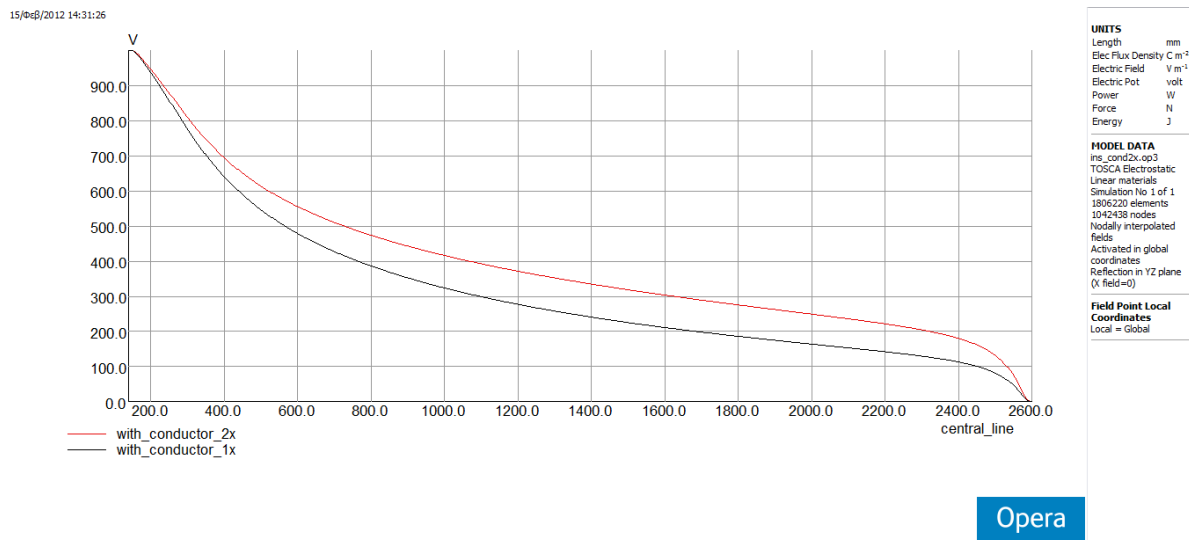
Σχήμα 4.22: Εικόνα του μονωτήρα με το διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος αυτού, όπως προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή.



Σχήμα 4.23: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα με διπλό αγωγό 1x (μαύρη γραφική) και 2x (κόκκινη γραφική).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστούν δύο σημαντικά ζητήματα που ανακύπτουν:

✚ Ενώ έχει μοντελοποιηθεί και προσομοιωθεί σε αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο το ενεργό άκρο της διάταξης, με το διπλό αγωγό φάσης 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα, δεν έχει γίνει η αντίστοιχη πρόοδος στο γειωμένο άκρο αυτής, όπου σε όλα τα μέχρι τώρα μοντέλα λαμβάνεται υπόψη μονάχα ο ακροδέκτης του μονωτήρα. Στην πραγματικότητα, ο μονωτήρας αναρτάται από κάποιο πυλώνα και το μεταλλικό δικτύωμα του τελευταίου σίγουρα επηρεάζει την πεδιακή ένταση πλησίον του γειωμένου άκρου, επομένως αναμένεται ο αντίκτυπος αυτός και στα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.24: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα με διπλό αγωγό 1x (μαύρη γραφική) και 2x (κόκκινη γραφική).

✚ Τα έως τώρα μοντελοποιημένα και προσομοιωμένα μοντέλα έχουν λάβει υπόψη τους το συνθετικό μονωτήρα του σχήματος 4.1, δηλαδή το μονωτήρα με ένα μόνο τοροειδές εξομάλυνσης κοντά στο άκρο Υ.Τ. αυτού. Εντούτοις, όπως έχει αναφερθεί και στο 2^ο Κεφάλαιο, η κατανομή της τάσης κατά μήκος συνθετικών μονωτήρων είναι αρκετά πιο ανομοιομορφη και μη γραμμική, σε σύγκριση με την αντίστοιχη στους κεραμικούς. Αυτό οφείλεται στις μεταλλικές ενθέσεις που υπάρχουν μεταξύ των δισκοειδών μονωτήρων που συναποτελούν την αλυσσο (χαλύβδινα καλύμματα -caps- και πείροι -rip-), οπότε το δυναμικό μειώνεται με βηματικό τρόπο, καθώς βαίνουμε από το ενεργό προς το γειωμένο άκρο, και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζει μια αμυδρή αύξηση στο γειωμένο δισκοειδή μονωτήρα, χωρίς να ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή του μονωτήρα Υ.Τ.. Έτσι, προβάλλει επιτακτική η ανάγκη τοποθέτησης τοροειδούς εξομάλυνσης τόσο στο άκρο Υ.Τ., όσο και στο γειωμένο άκρο του συνθετικού μονωτήρα.

Και οι δύο παραπάνω επισημάνσεις πηγάζουν απ' την ίδια φυσική ερμηνεία: η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών κοντά στο γειωμένο άκρο του συνθετικού μονωτήρα (χωρίς τοροειδές και διάταξη πυλώνα) θα είναι ασφαλώς πολύ υψηλότερη από την αντίστοιχη στην περιοχή κοντά στο άκρο Υ.Τ., όπου, λόγω του διπλού αγωγού, του συνδετικού πιάτου και του εγκατεστημένου τοροειδούς, η συνολική επιφάνεια απ' την οποία ξεκινούν είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από εκείνη στο γειωμένο ακροδέκτη του μονωτήρα. Μ' αυτό το σκεπτικό δικαιολογείται το παράδοξο του σχήματος 4.23.

Στη συνέχεια μοντελοποιείται η επίδραση του μεταλλικού στελέχους τμήματος του πυλώνα. Κατ' αυτό τον τρόπο, τίθενται ρεαλιστικότερες συνθήκες προσομοίωσης και, όπως θα φανεί και στα εξαγόμενα αποτελέσματα, προκύπτει σημαντική μείωση της αιχμής της κόκκινης γραφικής παράστασης του σχήματος 4.23.

4.2.3 Επίδραση τμήματος του πυλώνα στα τελικά αποτελέσματα

Το τελευταίο στάδιο κατά την κατασκευαστική διαδρομή του πλήρους μοντέλου είναι η αναπαράσταση του τμήματος του πυλώνα από το οποίο αναρτάται ο συνθετικός μονωτήρας. Το τμήμα αυτό αφορά σε πλευρική φάση, ενώ οι διαστάσεις για το δικτύωμά του λαμβάνονται με

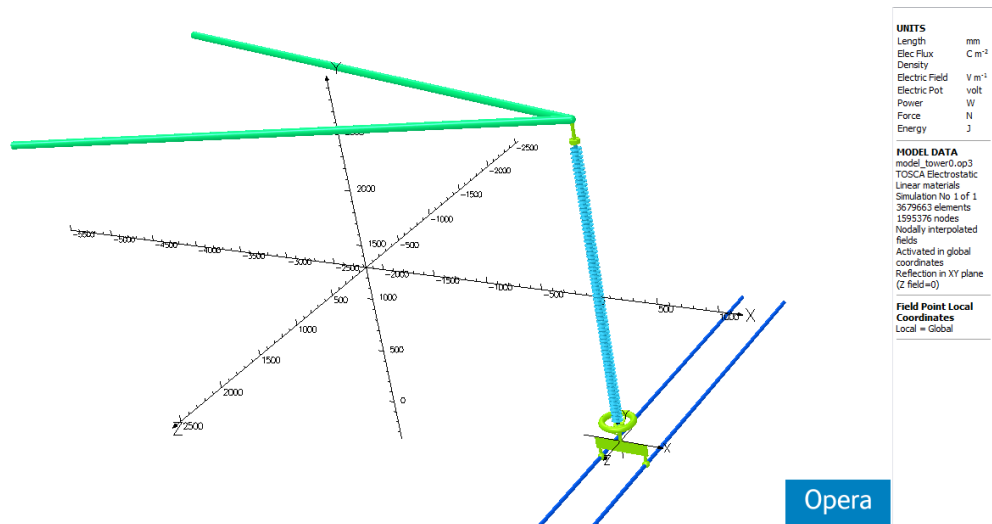
βάση την απλοποιημένη γεωμετρία του πυλώνα, όπως αυτός παρουσιάστηκε στο άρθρο [41] (βλ. σχήμα 3.25 στην παρούσα εργασία). Εξετάζονται δε τρεις κατασκευαστικές εκδοχές: α) μια εξαιρετικά απλοποιημένη διάταξη, β) μια μετρίου βαθμού απλοποιημένη και γ) η ακριβής διάταξη του τμήματος του πυλώνα. Για το υπόλοιπο μέρος του μοντέλου (μονωτήρας και φάση) λαμβάνεται ο συνθετικός μονωτήρας με το διπλό αγωγό 2x, όπως ακριβώς προσομοιώθηκε στην υποενότητα 4.2.2.3.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί η βασική ιδέα χάρη στην οποία κατόρθωσε να προσομοιωθεί ένα τόσο μεγάλων διαστάσεων μοντέλο και να επιλυθεί το πεδίο σ' αυτό από μια αριθμητική μέθοδο που προορίζεται, κατά κανόνα, για επίλυση «κλειστών» προβλημάτων.

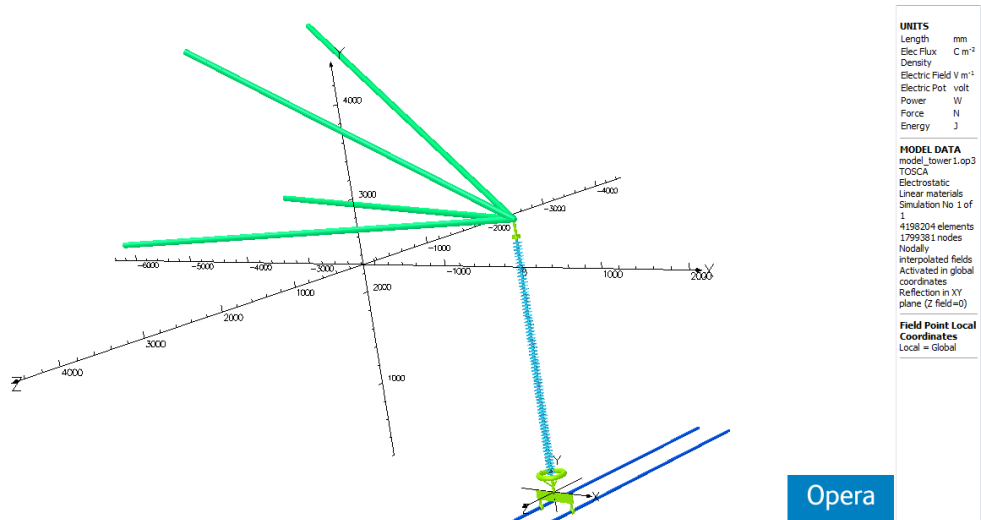
Όπως έχει αναφερθεί και πρωθύστερα, εκείνο που ενδιαφέρει είναι η εύρεση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού με την καλύτερη, κατά το δυνατόν, ακρίβεια στις περιοχές πλησίον του μονωτήρα. Ορίζεται έτσι μια περιοχή μέγιστου ενδιαφέροντος στον «πυρήνα» του πλήρους μοντέλου, ενώ για τις πιο απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν επιδιώκεται υψηλή ακρίβεια, το πλέγμα γίνεται αραιότερο. Αυτή η λογική εφαρμόζεται, όπως έχει αναφερθεί, στους κυλίνδρους αέρα, ο οποίος υποτίθεται ότι περιβάλλει το μονωτήρα.

Τι συμβαίνει όμως όταν υπεισέρχονται μεγάλων διαστάσεων γεωμετρικά σχήματα, όπως ο μεγάλου μήκους διπλός αγωγός ή, ακόμη χειρότερα, το τμήμα του πυλώνα από τον οποίο πρόκειται να αναρτηθεί ο μονωτήρας; Αν όλα τα σώματα είχαν τον ίδιο βαθμό πυκνότητας πλέγματος, τότε θα ήταν αδύνατο να δημιουργηθεί το πλέγμα του πλήρους μοντέλου, λόγω υπερβολικά μεγάλου πλήθους στοιχείων και ανεπάρκειας υπολογιστικών πόρων (CPU και ιδιαίτερα μνήμης). Από την άλλη, αν κατασκευαζόταν ένα αραιό πλέγμα σε όλη την έκταση του μοντέλου, η ακρίβεια δεν θα ήταν η καλύτερη δυνατή στην περιοχή μέγιστου ενδιαφέροντος και τα συμπεράσματα που θα προέκυπταν θα ήταν επισφαλής. Έτσι, υλοποιώντας στην πράξη την τεχνική του «διαίρει και βασίλευε», τόσο ο πυλώνας, όσο και ο αγωγός φάσης, κατατέμνονται σε δύο επιμέρους σώματα, ώστε να δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης διαφορετικού μεγέθους στοιχείων. Δηλαδή τα σώματα αυτά «σπάνε» επί της ουσίας σε δύο τμήματα, τα οποία απλά εφάπτονται, χωρίς να επικαλύπτει το ένα το άλλο. Επιτυγχάνεται κατ' αυτόν τον τρόπο η διαφοροποίηση της πυκνότητας πλέγματος, ανάλογα με το βαθμό ενδιαφέροντος της εκάστοτε περιοχής, και συγχρόνως διασφαλίζεται η ισχύς των όποιων επιφανειακών συνθηκών σε όλη την έκταση των σωμάτων. Με λίγα λόγια, δεν μας απασχολεί τι γίνεται σε κάποιο τμήμα του αγωγού ή του πυλώνα, 2 ή 3 μέτρα μακριά απ' το μονωτήρα, αλλά η επίδραση του σώματος υπό τάση ή υπό δυναμικό γης, αντίστοιχα, στην πεδιακή κατανομή πλησίον του μονωτήρα.

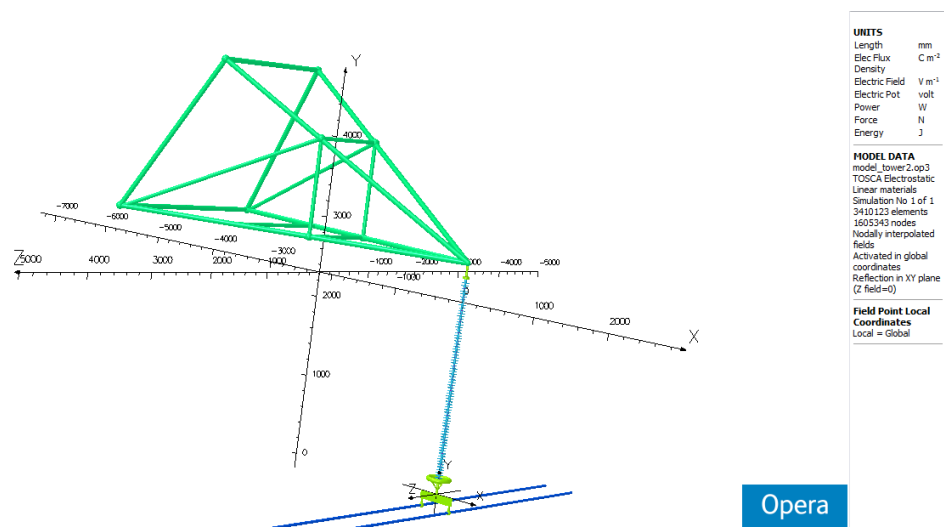
Ακολουθούν οι εικόνες των τριών κατασκευαστικών εκδοχών, με βάση το βαθμό απλοποίησής τους, όπως προκύπτουν από το Μετ-Επεξεργαστή (σχήματα 4.25, 4.26 και 4.27). Εκείνο που εξετάζεται στη συνέχεια είναι αν και κατά πόσον επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα καθεμιά από τις διατάξεις των σχημάτων 4.25, 4.26 και 4.27. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται ακολούθως, στα σχήματα 4.28 και 4.29, τα διαγράμματα κατανομών ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα τόσο για τα παραπάνω μοντέλα, όσο και για το μοντέλο χωρίς πυλώνα της υποενότητας 4.2.2.3.



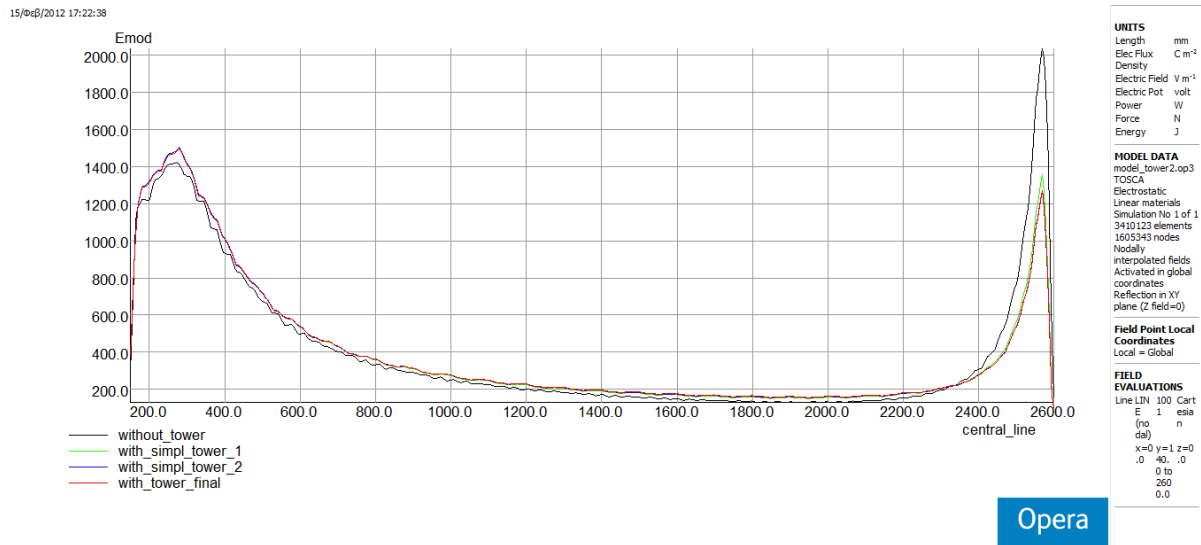
Σχήμα 4.25: Εικόνα του μονωτήρα με το διπλό αγωγό φάσης και μια εξαιρετικά απλοποιημένη διάταξη τμήματος του πυλώνα, όπως προκύπτει απ' το Μετ-Επεξεργαστή.



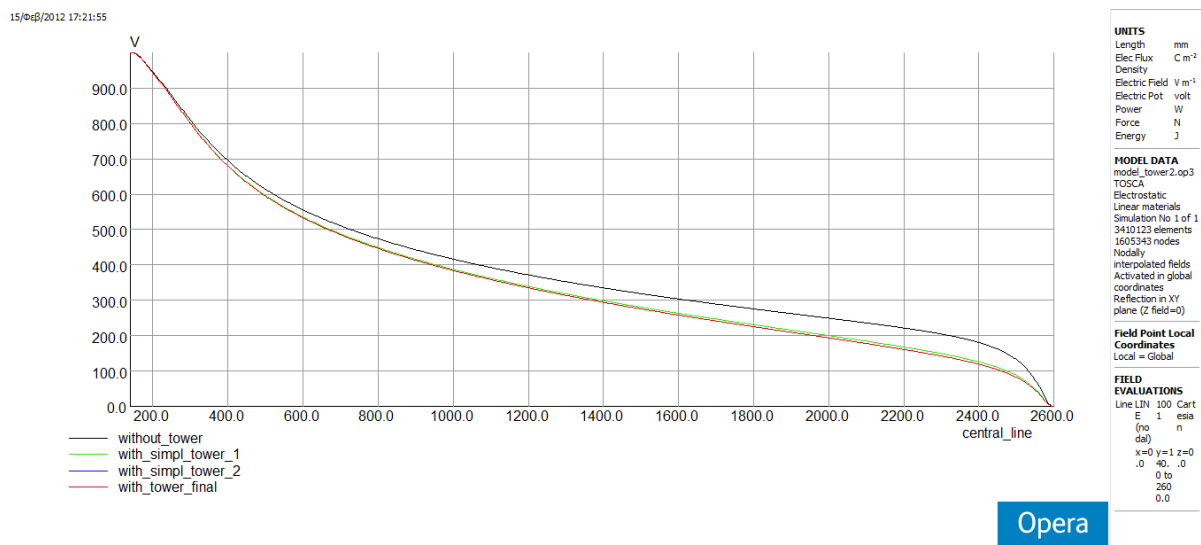
Σχήμα 4.26: Εικόνα του μονωτήρα με το διπλό αγωγό φάσης και μετρίου βαθμού απλοποιημένη διάταξη τμήματος του πυλώνα, όπως προκύπτει απ' το Μετ-Επεξεργαστή.



Σχήμα 4.27: Εικόνα του μονωτήρα με το διπλό αγωγό φάσης και την ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα, όπως προκύπτει απ' το Μετ-Επεξεργαστή.



Σχήμα 4.28: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα χωρίς (μαύρη γραφική), με εξαιρετικά απλοποιημένη (πράσινη γραφική), με μετρίου βαθμού απλοποιημένη (μπλε γραφική) και με την ακριβή (κόκκινη γραφική) διάταξη τμήματος του πυλώνα.



Σχήμα 4.29: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα χωρίς (μαύρη γραφική), με εξαιρετικά απλοποιημένη (πράσινη γραφική), με μετρίου βαθμού απλοποιημένη (μπλε γραφική) και με την ακριβή (κόκκινη γραφική) διάταξη τμήματος του πυλώνα.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, επιβεβαιώνεται η επίδραση του πυλώνα τόσο στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα. Ειδικότερα, από το σχήμα 4.28 φαίνεται να έχει μετριαστεί αρκετά η κορυφή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα, ενώ από το σχήμα 4.29 η κλίση της καμπύλης δυναμικού δείχνει να γίνεται λιγότερο κάθετη προς το άκρο αυτό.

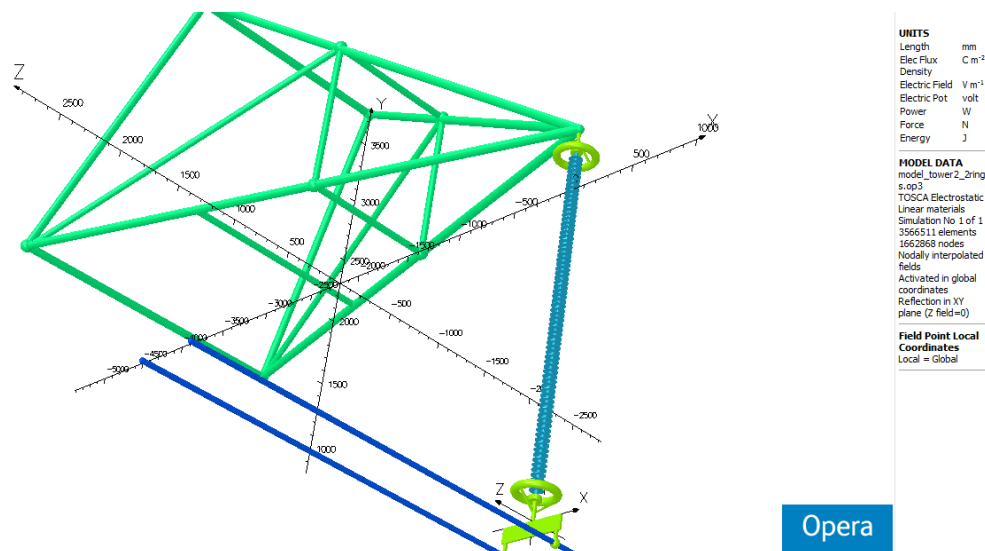
Αξίζει ωστόσο να επισημανθεί ο βαθμός που καθεμιά διάταξη επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα: από το μοντέλο χωρίς προς το μοντέλο με εξαιρετικά απλοποιημένη διάταξη τμήματος του πυλώνα παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση, ιδιαίτερα στο γειωμένο άκρο (μαύρη προς πράσινη γραφική). Μια μικρότερης κλίμακας μεν, ορατή δε διαφοροποίηση εντοπίζεται κατά τη μετάβαση από την εξαιρετικά προς τη μετρίου βαθμού απλοποιημένη (πράσινη προς μπλε

γραφική), ενώ με την ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα (κόκκινη γραφική παράσταση) δεν παρατηρείται καμία απόκλιση και γι' αυτό το λόγο η μπλε γραφική έχει καλυφθεί πλήρως απ' την κόκκινη στα διαγράμματα κατανομών τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού.

4.2.4 Βελτίωση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού με προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο

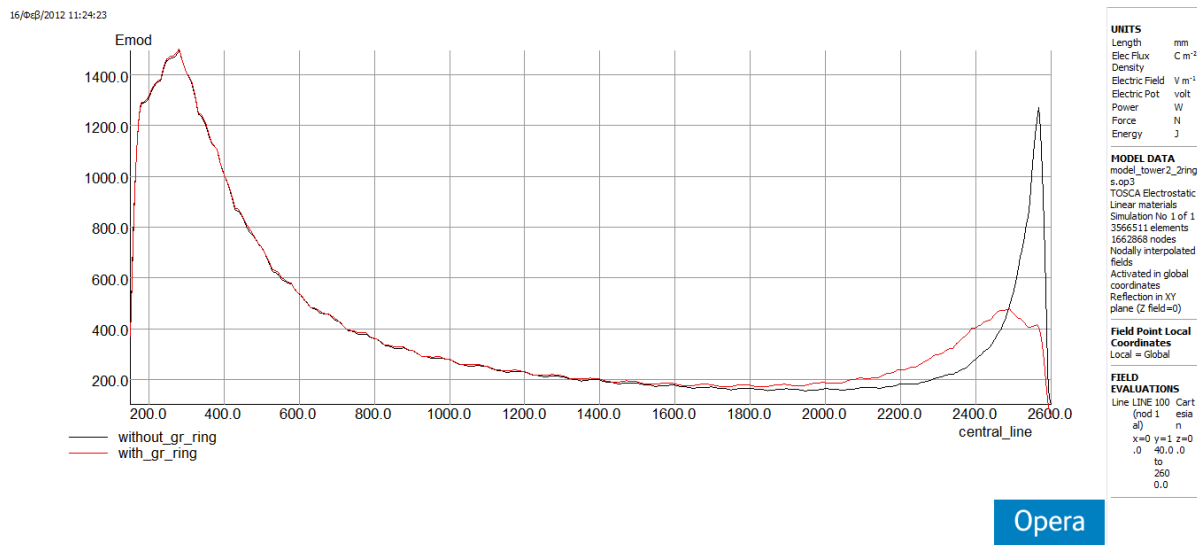
Αν και με την προσθήκη τμήματος του πυλώνα το υπό μελέτη μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα προσεγγίζει περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες έκθεσης και λειτουργίας του τελευταίου, εντούτοις η υψηλή τιμή της μέγιστης πεδιακής έντασης στο γειωμένο άκρο παραμένει και μάλιστα όντας ιδιαίτερα οξυμένη. Η κατάσταση αυτή στο γειωμένο άκρο είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει φαινόμενο corona σε αυτό ή άλλου είδους επιφανειακή δραστηριότητα που ενδεχομένως να βλάψει την ποιότητα του σιλικονούχου περιβλήματος και των δίσκων, συμβάλλοντας στη γήρανση του υλικού. Έτσι, αν δεν διορθωθεί η κατανομή αυτή, αφ' ενός μεν αυξάνει η πιθανότητα υπερπήδησης του μονωτήρα, ιδιαίτερα αν συντρέχουν και συνθήκες έντονης ρύπανσης (οπότε υψηλές τιμές πεδιακής έντασης συνεπάγονται μείωση της υδροφοβικότητας της επιφάνειας), αφ' ετέρου μειώνεται σημαντικά η διάρκεια ζωής του λόγω χημικής υποβάθμισης του υλικού.

Θεωρώντας ως πλήρες το μοντέλο με την ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 4.2.3, προστίθεται για όλους τους παραπάνω λόγους ένα τοροειδές εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα, ίδιων διαστάσεων με εκείνο στο ενεργό άκρο. Το ύψος τοποθέτησής του καθορίζεται έτσι, ώστε να καλύπτεται η επιφάνεια του σιλικονούχου περιβλήματος κοντά στο γειωμένο ακροδέκτη από την αρχή της, όπως ακριβώς έγινε και με το τοροειδές εξομάλυνσης του άκρου Υ.Τ. (βλ.. σχήμα 4.1). Η εικόνα που λαμβάνεται από το Μετ-Επεξεργαστή φαίνεται παρακάτω.

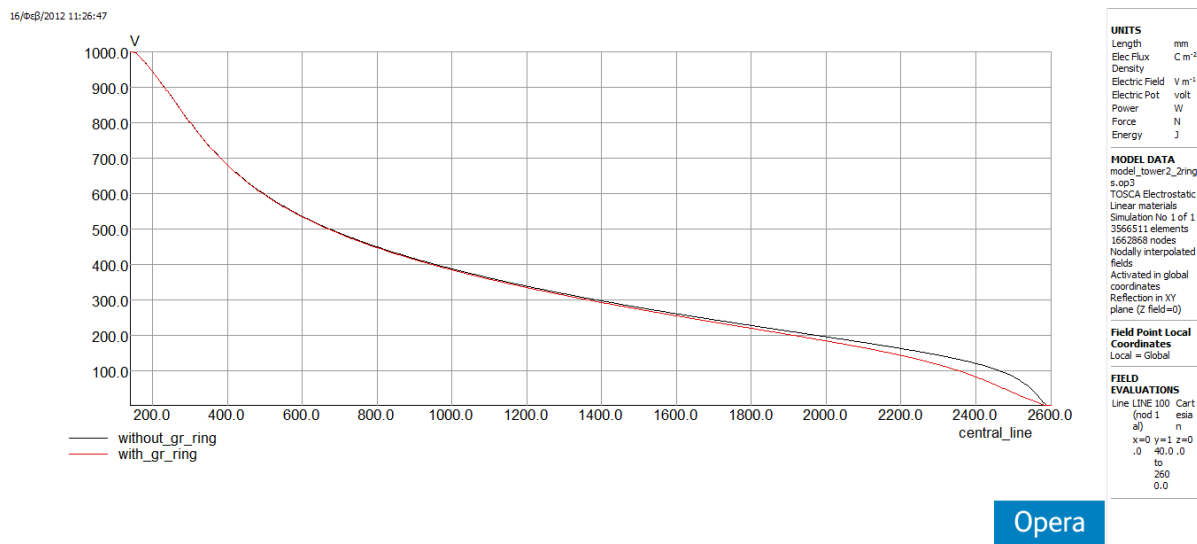


Σχήμα 4.30: Εικόνα του μονωτήρα με την ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα και τον αγωγό φάσης έπειτα από την προσθήκη του δεύτερου τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο, όπως προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή.

Στα διαγράμματα των ακόλουθων σχημάτων καταδεικνύεται σαφέστατα η βελτίωση που επέρχεται στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού, λόγω προσθήκης τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο.



Σχήμα 4.31: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα χωρίς (μαύρη γραφική) και με (κόκκινη γραφική) τορσιδές εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα.



Σχήμα 4.32: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα χωρίς (μαύρη γραφική) και με (κόκκινη γραφική) τορσιδές εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα.

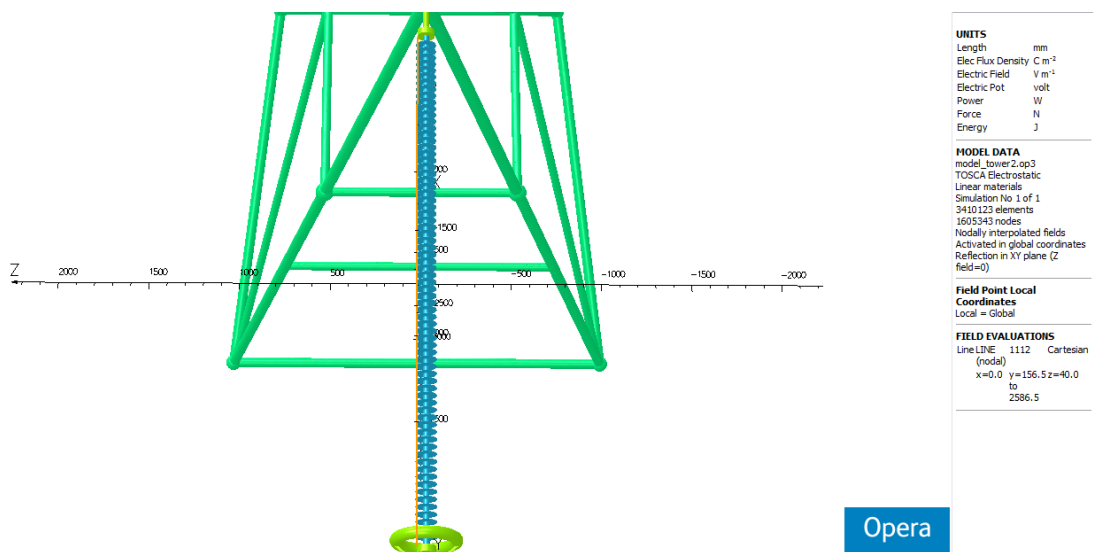
4.2.5 Σύγκριση των επιδράσεων των επιμέρους παραμέτρων στα τελικά αποτελέσματα

Πέραν της μετάβασης απ' την προηγούμενη στην επόμενη κατανομή ύστερα απ' την προσθήκη ενός επιπλέον παράγοντα επίδρασης στο ηλεκτρικό πεδίο και το δυναμικό, κρίνεται σκόπιμο να σχεδιαστούν σε κοινούς άξονες τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις παραπάνω υποενοότητες. Ο λόγος για τη συνοπτική αυτή σύγκριση είναι η απόκτηση μιας πιο σφαιρικής εικόνας, σχετικά με το βαθμό που κάθε παράμετρος επηρεάζει τις κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού.

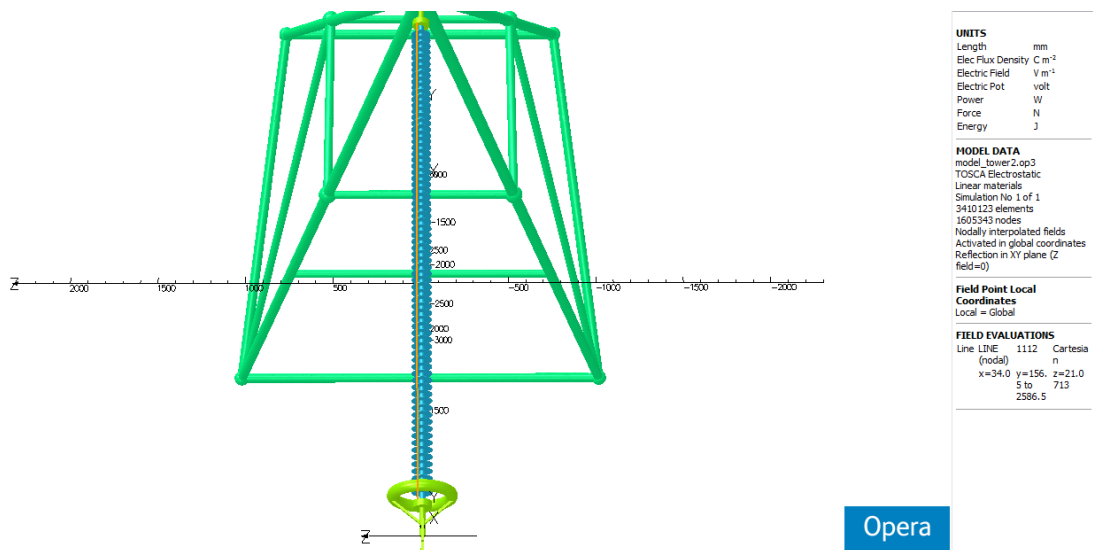
Οι κατανομές που σχεδιάζονται αφορούν σε κάθε «τελικό» μοντέλο που προκύπτει από τη μελέτη της εκάστοτε παραμέτρου, ενώ τα ενδιάμεσα μοντέλα παραλείπονται, προκειμένου αφ' ενός τα διαγράμματα να έχουν ικανοποιητική ευκρίνεια, αφ' ετέρου να αναδειχθεί κάθε παράγοντας στη ρεαλιστικότερη -κατά το δυνατόν- εκδοχή του. Έτσι, σχεδιάζονται οι κατανομές των

μοντέλων α) με απομονωμένο το συνθετικό μονωτήρα, β) με διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα, γ) με διπλό αγωγό 2x και την ακριβή διάταξη του πυλώνα και δ) με προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του πλήρους μοντέλου.

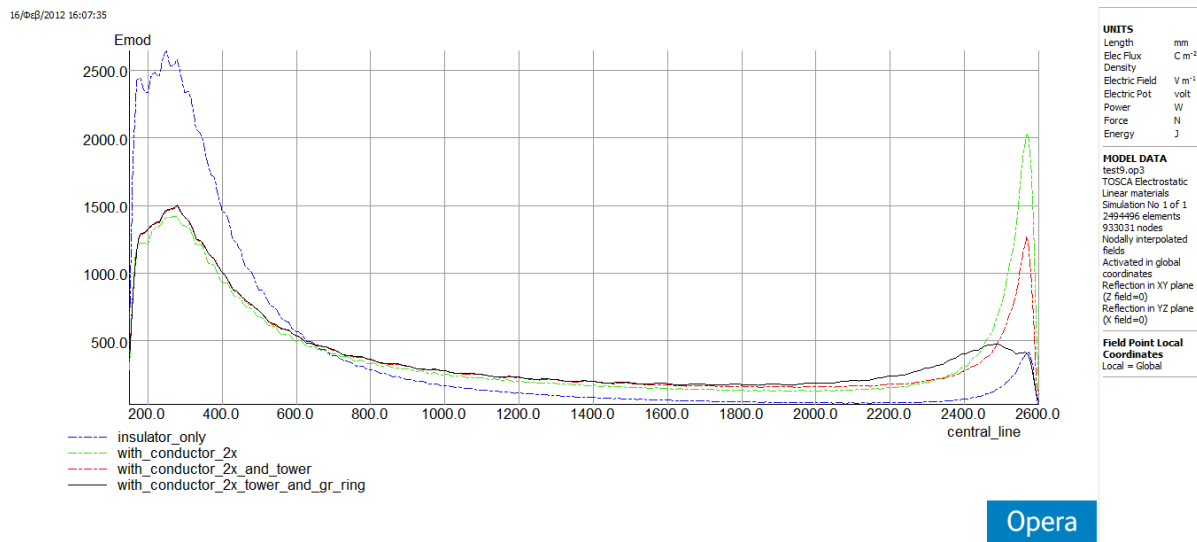
Εκτός από τις κατανομές κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα, εκτίθενται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά μήκος των δύο κατακόρυφων ευθειών $x=0$ mm, $z=40$ mm και $x=34$ mm, $z=21.0713$ mm (υπενθυμίζεται ότι ως κατακόρυφος έχει ληφθεί ο άξονας-γ), οι οποίες διέρχονται μέσα από τους ελαστομερείς δίσκους και ανήκουν, κατά προσέγγιση, στον ίδιο κύλινδρο $x^2 + z^2 = 40^2$. Αρχικά, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα τμήματα των ευθειών αυτών κατά μήκος του αμιγώς μονωτικού μέρους του μονωτήρα (χωρίς τα μέρη των ακροδεκτών) για το μοντέλο με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη του πυλώνα και ακολουθούν τα διαγράμματα κατανομών ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού, όπως προκύπτουν από το Μετ-Επεξεργαστή.



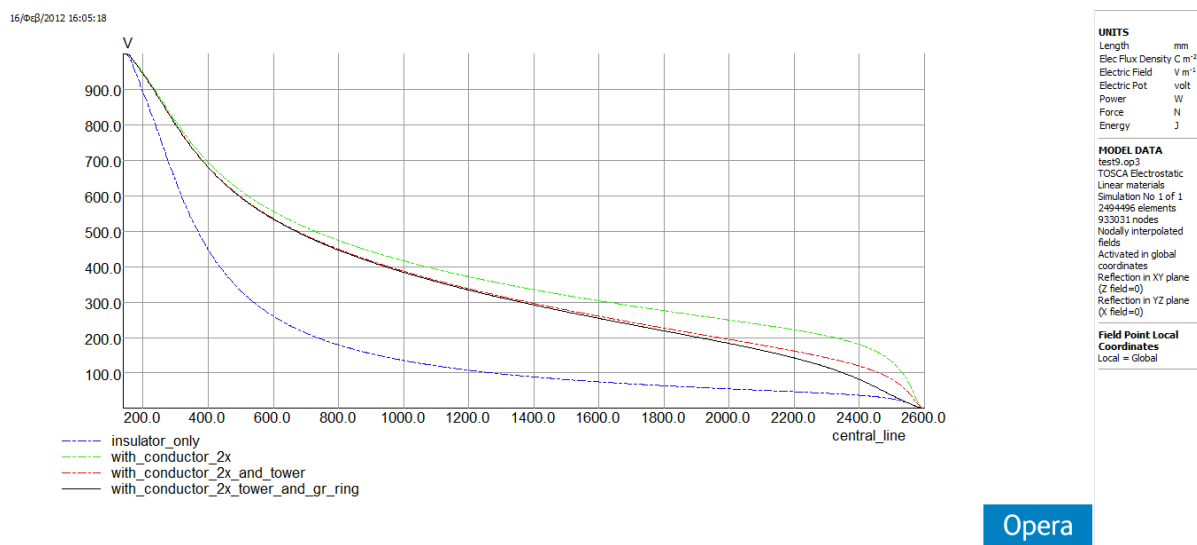
Σχήμα 4.33: Εικόνα τμήματος του μοντέλου με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη του πυλώνα, όπου φαίνεται η ευθεία $x=0$, $z=40$ η οποία «τρυπάει» τους ελαστομερείς δίσκους, όπως προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή.



Σχήμα 4.34: Εικόνα τμήματος του μοντέλου με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη του πυλώνα, όπου φαίνεται η ευθεία $x=34$, $z=21.0713$ η οποία «τρυπάει» τους ελαστομερείς δίσκους, όπως προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή.



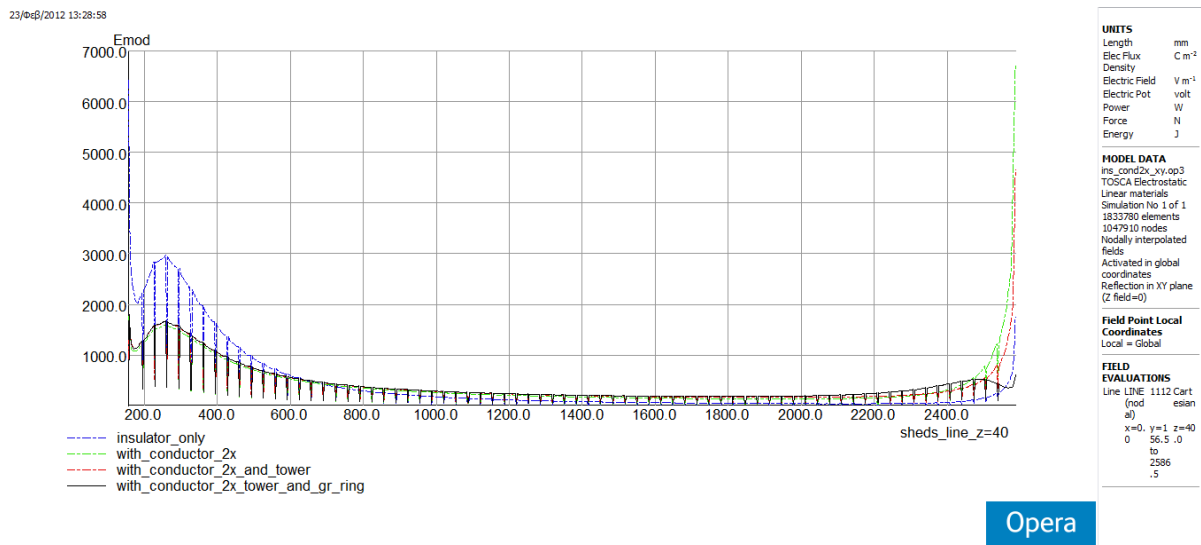
Σχήμα 4.35: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα του απομονωμένου μονωτήρα (μπλε διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα (πράσινη διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα (κόκκινη διακεκομμένη) και με προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του πλήρους μοντέλου (μαύρη συνεχής γραφική παράσταση).



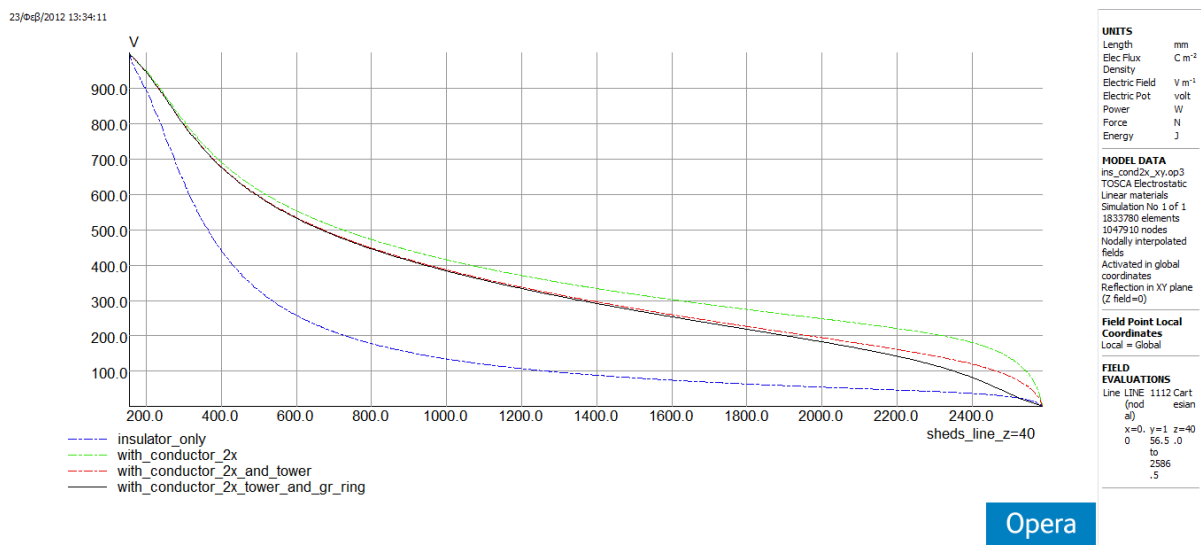
Σχήμα 4.36: Κατανομή της δυναμικής κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα για τα μοντέλα του απομονωμένου μονωτήρα (μπλε διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα (πράσινη διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα (κόκκινη διακεκομμένη) και με προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του πλήρους μοντέλου (μαύρη συνεχής γραφική παράσταση).

Όπως μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει από το σχήμα 4.35, η προσθήκη του διπλού αγωγού 2x αυξάνει σε παράλογο μεγάλο βαθμό την τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο γειωμένο άκρο (η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης στο γειωμένο άκρο υπερβαίνει την αντίστοιχη τιμή κοντά στο άκρο Υ.Τ.), ενώ με την παρουσία τμήματος του πυλώνα η κατανομή δείχνει ρεαλιστικότερη. Εντούτοις, και σ' αυτήν την περίπτωση (κόκκινη διακεκομμένη γραφική παράσταση) αναδεικνύεται η αναγκαιότητα τοποθέτησης επιπλέον τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο. Η αναγκαιότητα αυτή επιβεβαιώνεται από την μαύρη συνεχή γραφική παράσταση του σχήματος 4.35, η οποία αποτελεί και την πλέον ομοιόμορφη πεδιακή κατανομή.

Αντίστοιχα είναι και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα (σχήμα 4.36): είναι φανερή η κατάληξη στην ομαλότερη κατανομή δυναμικού μέσω της σταδιακής μετάβασης από την μπλε προς την μαύρη γραφική παράσταση.



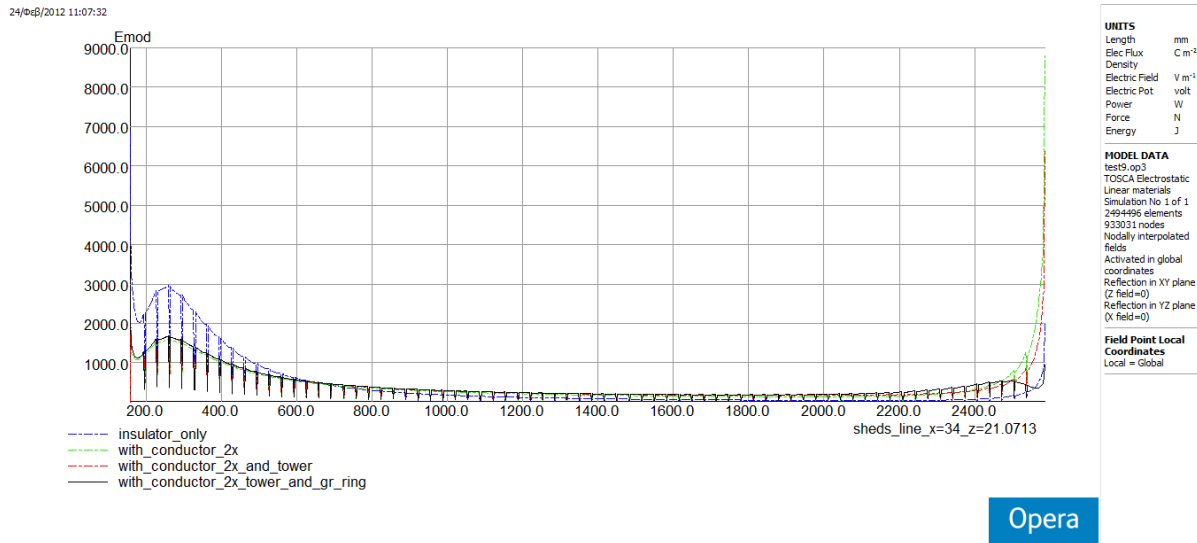
Σχήμα 4.37: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας $x=0$, $z=40$ για τα μοντέλα του απομονωμένου μονωτήρα (μπλε διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα (πράσινη διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα (κόκκινη διακεκομμένη) και με προσθήκη τορροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του πλήρους μοντέλου (μαύρη συνεχής γραφική παράσταση).



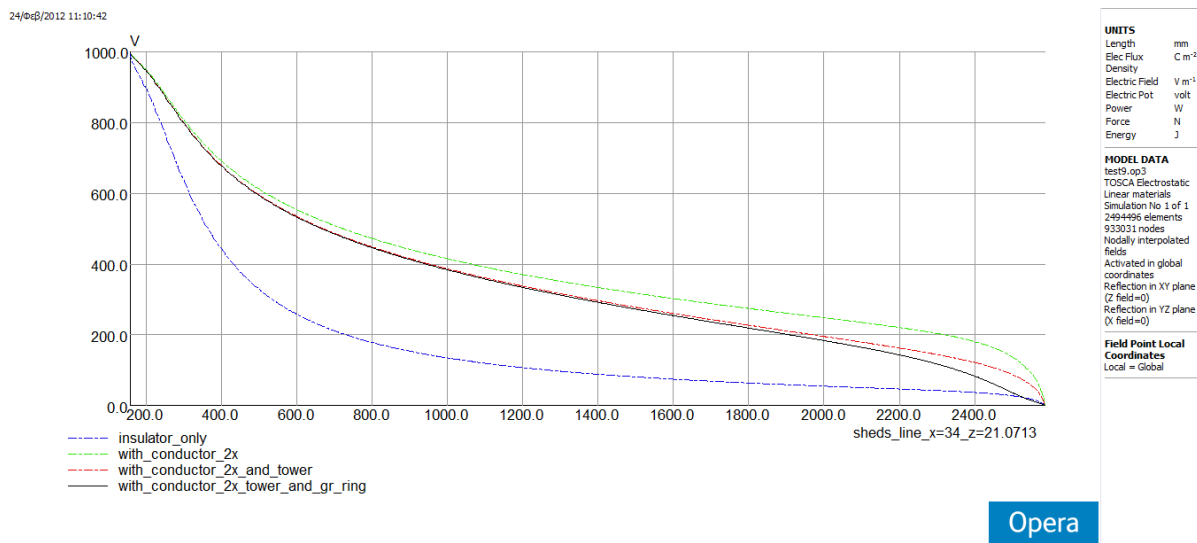
Σχήμα 4.38: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της ευθείας $x=0$, $z=40$ για τα μοντέλα του απομονωμένου μονωτήρα (μπλε διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα (πράσινη διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα (κόκκινη διακεκομμένη) και με προσθήκη τορροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του πλήρους μοντέλου (μαύρη συνεχής γραφική παράσταση).

Στα σχήματα 4.37 και 4.39 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των κατακόρυφων ευθειών $x=0$ mm, $z=40$ mm και $x=34$ mm, $z=21.0713$ mm. Η εικόνα των διαγραμμάτων παρουσιάζει, σε γενικές γραμμές, την ίδια μορφή με τα διαγράμματα κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα που ελήφθησαν παραπάνω: και εδώ η υψηλότερη τιμή της μέγιστης πεδιακής έντασης καταγράφεται στο γειωμένο άκρο του μοντέλου με διπλό αγωγό 2x, όπου η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης στο γειωμένο άκρο ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή του άκρου Υ.Τ.,

ενώ αρκετά υψηλά επίπεδα του ίδιου μεγέθους σημειώνονται και στην περίπτωση του πλήρους μοντέλου (με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη πυλώνα).



Σχήμα 4.39: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας $x=34$, $z=21.0713$ για τα μοντέλα του απομονωμένου μονωτήρα (μπλε διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα (πράσινη διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα (κόκκινη διακεκομμένη) και με προσθήκη τορροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του πλήρους μοντέλου (μαύρη συνεχής γραφική παράσταση).

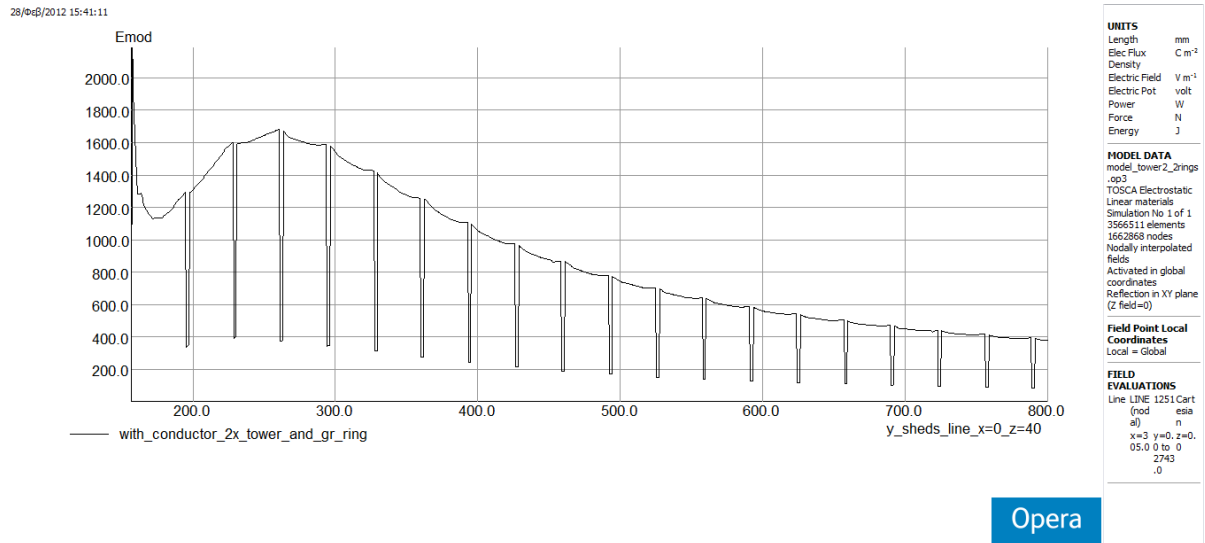


Σχήμα 4.40: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της ευθείας $x=34$, $z=21.0713$ για τα μοντέλα του απομονωμένου μονωτήρα (μπλε διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα (πράσινη διακεκομμένη), με διπλό αγωγό 2x και ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα (κόκκινη διακεκομμένη) και με προσθήκη τορροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο του πλήρους μοντέλου (μαύρη συνεχής γραφική παράσταση).

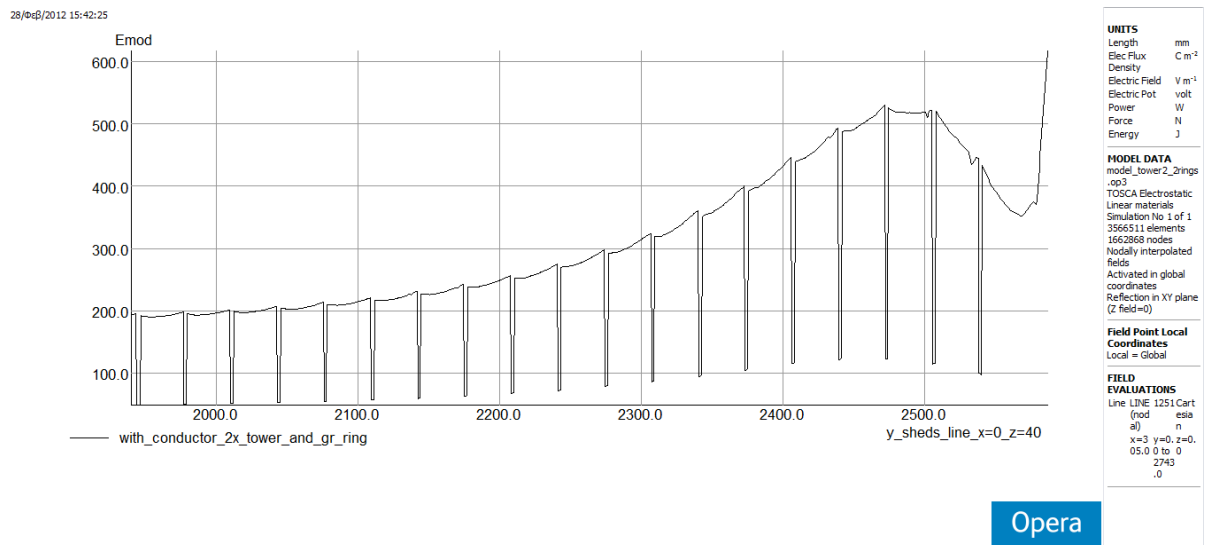
Η κατάσταση αυτή εξομαλύνεται έπειτα απ' την προσθήκη τορροειδούς στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα (μαύρη συνεχής γραφική).

Ωστόσο, η μεγάλη διαφοροποίηση σε σχέση με τα διαγράμματα κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα έγκειται στις απότομες «βυθίσεις» της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα σημεία που η γραμμή διαπερνά τους ελαστομερείς δίσκους. Ο συνολικός αριθμός των βυθίσεων αυτών συμπίπτει με τον αριθμό των δίσκων του μονωτήρα (72). Λεπτομερέστερη απεικόνισή τους φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν, όπου εστιάζεται το ενδιαφέρον στους πρώτους και στους

τελευταίους 19 δίσκους του πλήρους μοντέλου, μετά την προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο.



Σχήμα 4.41: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας $x=0, z=40$ για τους πρώτους 19 δίσκους του πλήρους μοντέλου, έπειτα απ' την προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο.



Σχήμα 4.42: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας $x=0, z=40$ για τους τελευταίους 19 δίσκους του πλήρους μοντέλου, έπειτα απ' την προσθήκη τοροειδούς εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο.

Οι ακαριαίες αυτές μεταβολές είναι σαφώς αναμενόμενες και οφείλονται στη διαφορά της επιτρεπτότητας μεταξύ των δύο υλικών που έρχονται σε επαφή: απ' τη μια το σιλικονούχο καουτσούκ (SIR, $\epsilon_r=4.5$), από το οποίο είναι κατασκευασμένοι δίσκοι και περίβλημα, κι από την άλλη ο ατμοσφαιρικός αέρας ($\epsilon_r=1.0$ από προεπιλογή) που περιβάλλει το μονωτήρα. Σύμφωνα με τη σχέση

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4.2)$$

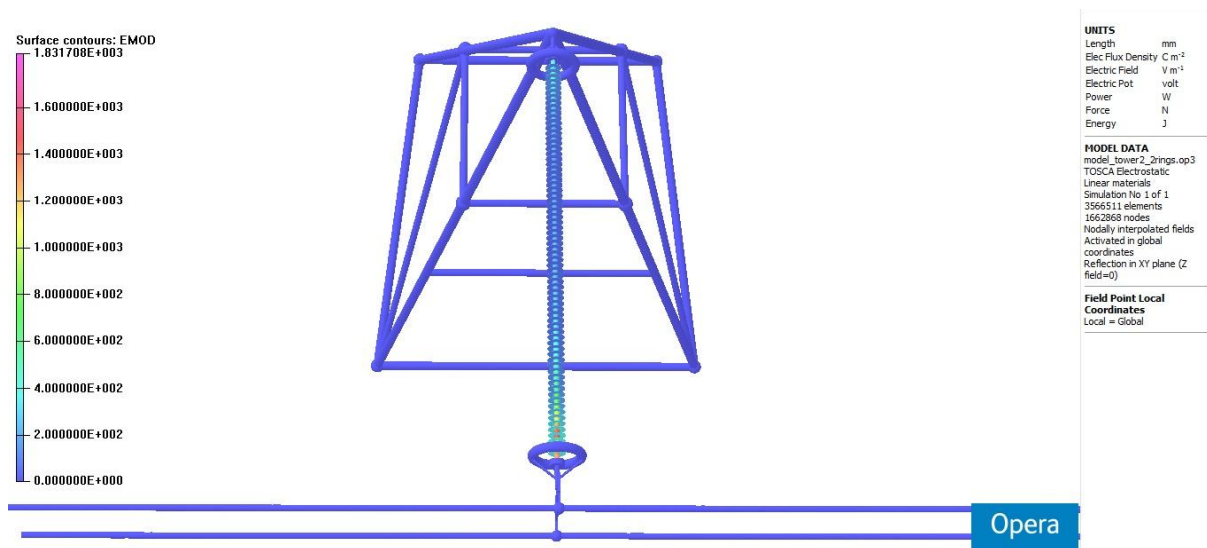
η πεδιακή ένταση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τη διηλεκτρική σταθερά του μέσου, επομένως σε περιοχές με μεγαλύτερη ϵ_r (όπως είναι το SIR, συγκριτικά με τον αέρα) το ηλεκτρικό

πεδίο μειώνεται και, λόγω της ύπαρξης διαχωριστικής επιφάνειας αέρα-SIR, η μείωση αυτή είναι ακαριαία.

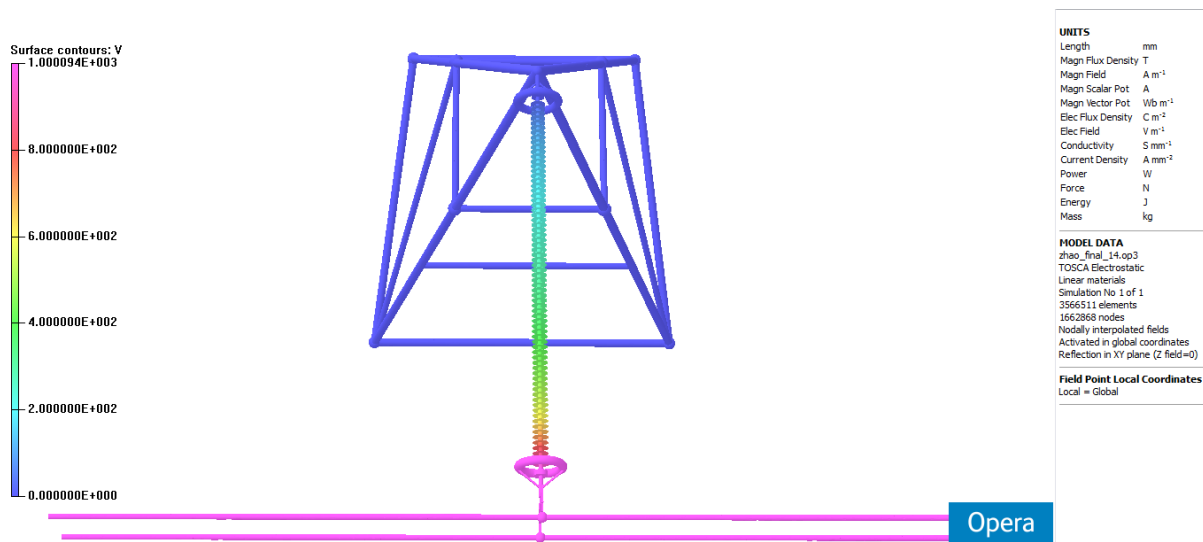
4.2.6 Πλήρες (τελικό) μοντέλο του άρθρου [41]

Θεωρώντας ως πλήρες ή τελικό το μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης, με το διπλό αγωγό 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα, τα δύο τοροειδή εξομάλυνση (ένα σε κάθε άκρο) και την ακριβή διάταξη τμήματος του πυλώνα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού σε περιοχές τόσο κοντά στο μονωτήρα, όσο και μακριά από αυτόν.

Στα σχήματα 4.43 και 4.44 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα.



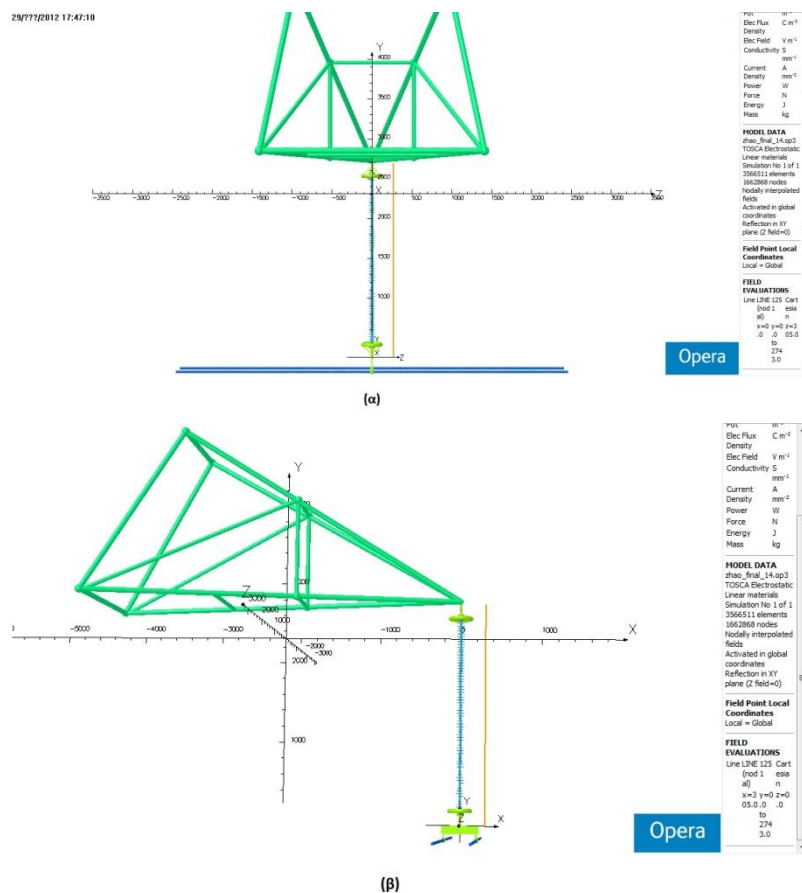
Σχήμα 4.43: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $E_{mod} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41].



Σχήμα 4.44: Κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41].

Όπως επιβεβαιώνεται και από τις επιφανειακές κατανομές σχημάτων αυτών, το ηλεκτρικό πεδίο μεγιστοποιείται σε μια περιοχή λίγο μετά το τοροειδές εξομάλυνσης του άκρου Υ.Τ., ενώ παρατηρείται σημαντική ανύψωση της πεδιακής έντασης καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο ακροδέκτη. Για το λόγο αυτό θεωρείται αυτονόητη η τοποθέτηση τοροειδούς εξομάλυνσης τόσο στο ενεργό, όσο και στο γειωμένο άκρο της διάταξης. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μηδενίζεται στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών του μοντέλου, όπως προφανώς αναμενόταν. Όσον αφορά στο δυναμικό, αυτό δείχνει να μειώνεται κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, με κατεύθυνση από τον αγωγό προς το γειωμένο πυλώνα, κάτι που ασφαλώς ήταν αναμενόμενο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα, καθένα από τα οποία εμπεριέχει τέσσερις γραφικές παραστάσεις, στις οποίες απεικονίζονται οι κατανομές τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων ευθειών. Εκείνο που εξετάζεται είναι η μορφή των κατανομών καθώς αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα. Έτσι, λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων: μία για την απομάκρυνση από το μονωτήρα, παράλληλα με τον αγωγό φάσης (άρα και με τον άξονα-z), και μία δεύτερη για την απομάκρυνση τόσο απ' τον αγωγό, όσο και απ' το μονωτήρα (παράλληλα δηλαδή με τον άξονα-x).



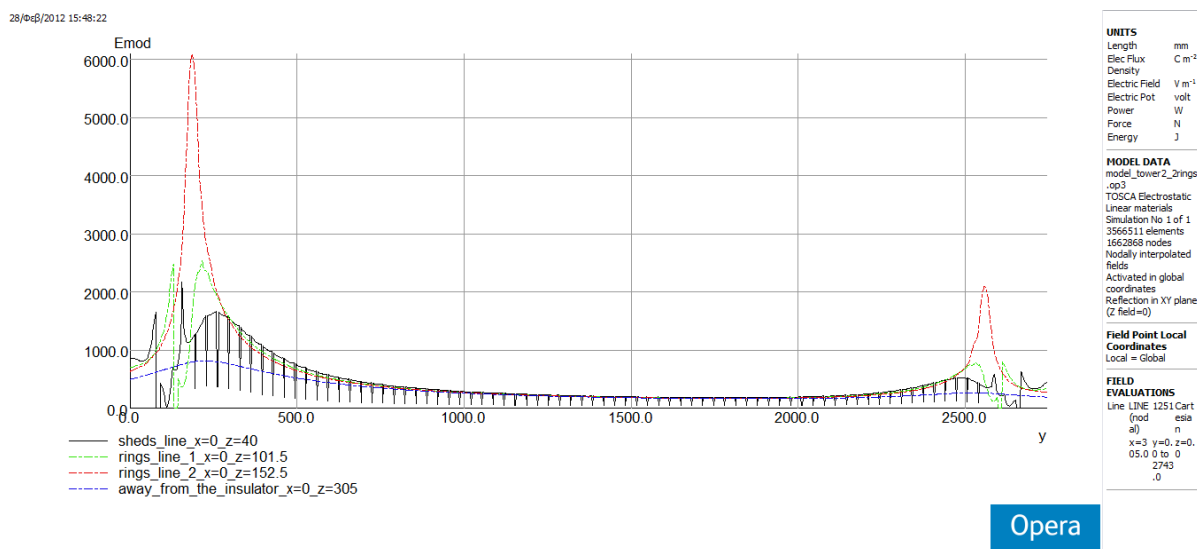
Σχήμα 4.45: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

Οι διάφορες ευθείες γραμμές, κατά μήκος των οποίων λαμβάνονται οι κατανομές, θεωρούνται ως οι τομές των αντίστοιχων επιπέδων και συμβολίζονται με τα αντίστοιχα ζεύγη συντεταγμένων. Υπενθυμίζεται ότι ως οριζόντιο επίπεδο έχει ληφθεί το επίπεδο-xz, ενώ ο μονωτήρας βρίσκεται παράλληλα με τον κατακόρυφο άξονα-y. Έτσι, απεικονίζονται οι κατανομές κατά μήκος των ευθειών ($x=0 \text{ mm}$, $z=40 \text{ mm}$), ($x=0 \text{ mm}$, $z=101.5 \text{ mm}$), ($x=0 \text{ mm}$, $z=152.5 \text{ mm}$), ($x=0 \text{ mm}$, $z=305 \text{ mm}$)

και των ευθειών ($x=40$ mm, $z=0$ mm), ($x=101.5$ mm, $z=0$ mm), ($x=152.5$ mm, $z=0$ mm), ($x=305$ mm, $z=0$ mm), παράλληλα και κάθετα προς τον αγωγό, αντίστοιχα. Οι ευθείες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων (x ή z) ίση προς 40 mm «τρυπούν» κάθετα τους ελαστομερείς δίσκους, εκείνες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 101.5 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εσωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης, οι άλλες με 152.5 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εξωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης και οι τελευταίες με 305 mm βρίσκονται αρκετά μακριά απ' τη διάταξη του μονωτήρα.

Ο τρόπος λήψης των γραφημάτων αυτών φαίνεται, παρουσιάζοντας ενδεικτικά δύο ευθείες, στο παραπάνω σχήμα. Το σχήμα 4.45 (α) αφορά στην πρώτη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $x=0$ mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη- z , άρα και η απόσταση απ' το συνθετικό μονωτήρα. Απ' την άλλη, το σχήμα 4.45 (β) αφορά στη δεύτερη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $z=0$ mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη- x , οπότε απομακρύνονται τόσο από το μονωτήρα, όσο και απ' το διπλό αγωγό.

Ακολουθούν τα γραφήματα της πρώτης σειράς, τα οποία σχετίζονται με το σχήμα 4.45 (α).



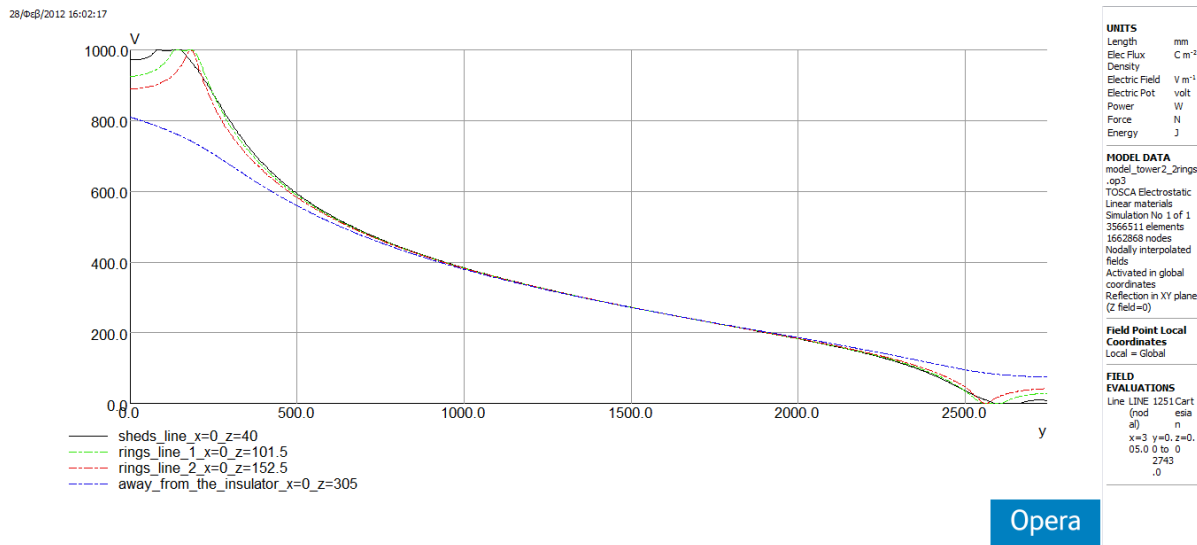
Σχήμα 4.46: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.45 (α).

Όπως εύκολα μπορεί κανείς να παρατηρήσει, παρ' όλο που κατά μήκος των ελαστομερών δίσκων του μονωτήρα η κατανομή διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και είναι αρκετά ομοιόμορφη, εντούτοις η κατάσταση διαφοροποιείται σιγά-σιγά καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή αυτή, με αποκορύφωμα τη γραμμή $x=0$ mm, $z=152.5$ mm η οποία διέρχεται εξ' επαφής από τις εξωτερικές επιφάνειες των δύο τοροειδών εξομάλυνσης. Παρουσιάζονται δύο πολύ απότομες κορυφές (κόκκινη γραφική στο σχήμα 4.46). Η μία απ' αυτές είναι αρκετά υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή της έντασης κατά μήκος της ευθείας που «τρυπά» τους δίσκους, περίπου τριπλάσια.

Παρόμοιας τάξης μεγέθους ήταν η διαφορά πεδιακής έντασης επιφάνειας του τοροειδούς και περιβλήματος του μονωτήρα και στα άρθρα [52] και [54], τα οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο 3^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας (υποενότητα 3.3.4). Ειδικότερα, στο άρθρο [52] η σχέση μεταξύ της μέγιστης πεδιακής έντασης της επιφάνειας του μεγάλου τοροειδούς και εκείνης του μονωτήρα ήταν περίπου 4:1.

Η εικόνα αυτή θεωρείται αναμενόμενη, αφού επιβεβαιώνεται ο ρόλος που διαδραματίζουν στην όλη διάταξη τα τοροειδή εξομάλυνσης: αφ' ενός εξομαλύνουν και αμβλύνουν σημαντικά την

πεδική κατανομή στην περιοχή εγγύς του μονωτικού υλικού του μονωτήρα, αφ' ετέρου επωμίζονται τα ίδια το «βάρος» της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 4.47: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.45 (α).

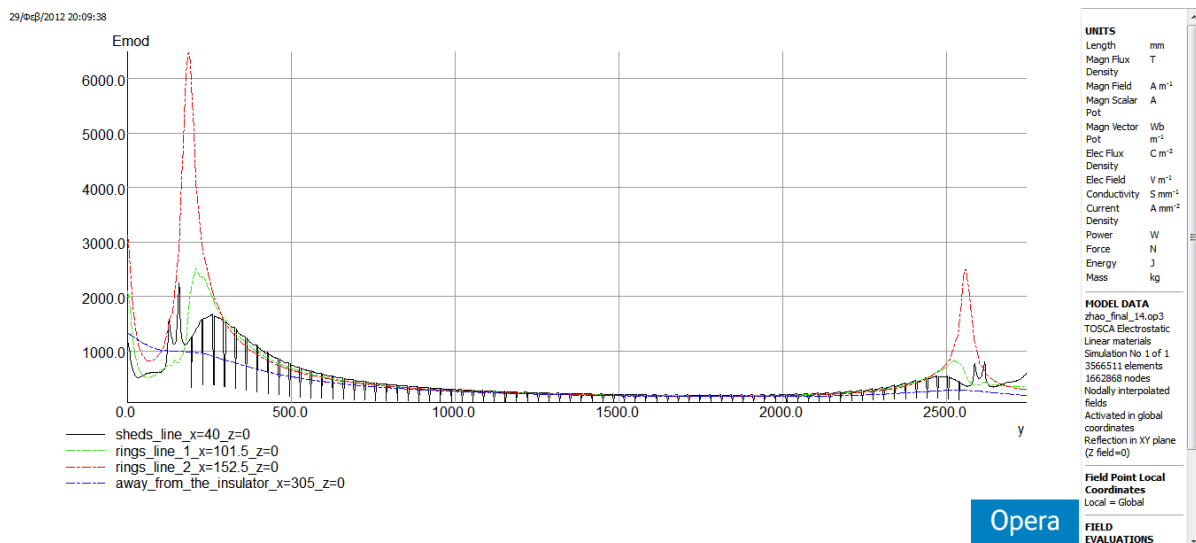
Κατ' αυτόν τον τρόπο, το σιλικονούχο περίβλημα και οι ελαστομερείς δίσκοι υποφέρουν πολύ λιγότερο από δυσμενή και ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως η επιφανειακή δραστηριότητα και οι «στεμματοειδείς» φωτεινές μερικές εκκενώσεις (corona) και επιμηκύνεται σημαντικά η απόδοση και η διάρκεια ζωής του συνθετικού μονωτήρα, μια και τα εν λόγω φαινόμενα αποτελούν σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα γήρανσης, όπως αναλύθηκε διεξοδικά στην υποενότητα 1.6.1 της παρούσας εργασίας.

Ακόμη, κρίνοντας από ποιοτική και φυσική σκοπιά το ζήτημα, η επιφάνεια των τοροειδών (τόσο η εσωτερική, όσο και η εξωτερική) δεν είναι τίποτε άλλο από μια διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφορετικών υλικών μέσων, τα οποία μάλιστα έχουν εντελώς διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες: απ' τη μια το μέταλλο, με επιτρεπτότητα $\epsilon_r=2$ και αγωγιμότητα $\sigma=1$, απ' την άλλη ο αέρας με επιτρεπτότητα $\epsilon_r=1$ και αγωγιμότητα $\sigma=0$. Οι τιμές αυτές δικαιολογήθηκαν στην υποενότητα 4.1. Επομένως, κατά τη μετάβαση απ' το ένα μέσο στο άλλο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αναμένεται να παρουσιάζει αιχμή, σύμφωνα με τη σχέση (4.2).

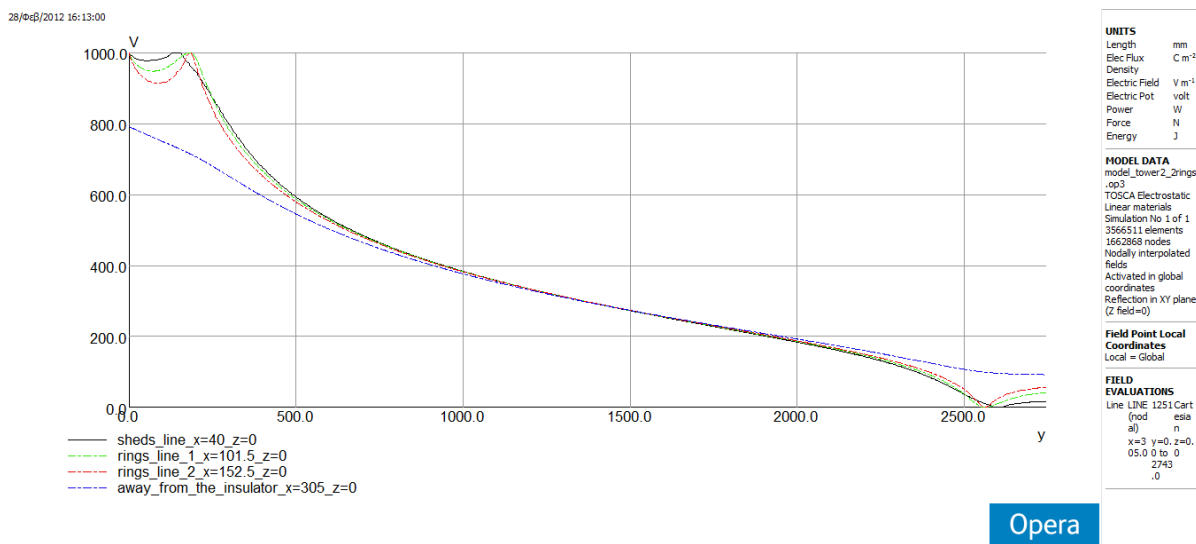
Πρέπει επιπλέον να σημειωθεί ότι, πέραν των συνηθών «βυθίσεων» της μαύρης γραφικής παράστασης (η οποία αντιπροσωπεύει την ευθεία που «τρυπά» τους δίσκους), οι οποίες δικαιολογήθηκαν μέσω της σχέσης (4.2) στην υποενότητα 4.2.5, παρουσιάζονται δύο ακόμη βυθίσεις της έντασης τόσο στη μαύρη, όσο και στην πράσινη γραφική παράσταση. Μάλιστα, οι βυθίσεις αυτές δείχνουν να μηδενίζουν για μια πολύ μικρή απόσταση το ηλεκτρικό πεδίο, ενώ ακολουθεί ακαριαία επαναφορά αυτού. Ο μηδενισμός αυτός εξηγείται από την ύπαρξη των στηριγμάτων των δύο τοροειδών, τα οποία βρίσκονται κατά μήκος του άξονα-z.

Όσον αφορά στο σχήμα 4.47, είναι φανερό πως όσο οι γραμμές βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν τα δύο τοροειδή, οι κατανομές κατά μήκος αυτών είναι αρκετά πανομοιότυπες μεταξύ τους και απλά μετατοπίζεται λίγο το σημείο μεγίστου, λόγω της κλίσης των στηριγμάτων των τοροειδών. Από την άλλη, μόλις αυξηθεί σημαντικά η απόσταση από το μονωτήρα, έξω από τα τοροειδή, η κατανομή της τάσης γίνεται πολύ πιο ομοιόμορφη και τα μέγιστα επίπεδα αυτής μειώνονται ορατά (μπλε γραφική παράσταση).

Ακολουθούν τα γραφήματα της δεύτερης σειράς, τα οποία σχετίζονται με το σχήμα 4.45 (β).



Σχήμα 4.48: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.45 (β).



Σχήμα 4.49: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.45 (β).

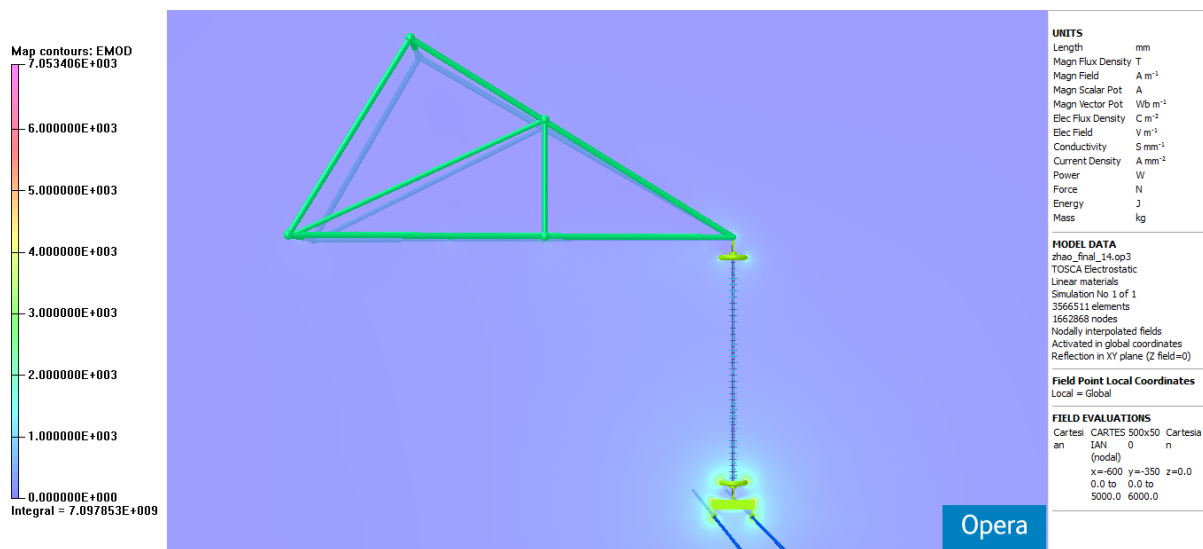
Ισχύουν τα ίδια με τα σχήματα 4.46, 4.47, ωστόσο παρατηρείται μια μικρή διαφορά: τόσο στη μαύρη, όσο και στην πράσινη γραφική δεν εμφανίζονται πια οι δύο επιπλέον βυθίσεις της πεδιακής έντασης, αφού δεν παρεμβάλλονται στηρίγματα κατά μήκος του άξονα-x.

Ακολουθεί η παρουσίαση ενός επιπέδου-xy (κατακόρυφος θεωρείται ο άξονας-y), επί του οποίου απεικονίζονται με δύο τρόπους η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και με τρεις τρόπους το δυναμικό.

Στο σχήμα 4.50 φαίνεται η πεδιακή ένταση μέσω χρωματισμένων περιοχών, ενώ στο σχήμα 4.51 απεικονίζεται το ιστόγραμμα το οποίο δείχνει την κατανομή της πεδιακής έντασης στο εσωτερικό και στην περιοχή γύρω απ' το συνθετικό μονωτήρα. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει, με την απομάκρυνση από το ενεργό και βαίνοντας προς το γειωμένο άκρο, η ένταση μειώνεται. Εντούτοις, τόσο στο γειωμένο τοροειδές, όσο και στη σύνδεση του ακροδέκτη με τον πυλώνα

παρατηρείται μια σημαντική, τοπική αύξηση του πεδίου. Γενικότερα, η πεδιακή ένταση παρουσιάζει αιχμές στις διεπιφάνειες μεταξύ των υλικών που εμφανίζουν πολύ διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες: πρόκειται για τις εξωτερικές επιφάνειες όλων των αγωγίμων (μεταλλικών) μερών, δηλαδή των τοροειδών εξομάλυνσης και του συνδετικού πιάτου που ενώνει τους δύο υποαγωγούς. Οι αιχμές αυτές προσεγγίζουν εξαιρετικά υψηλές τιμές κοντά στο άκρο Υ.Τ. της διάταξης, όπως άλλωστε αναμένεται.

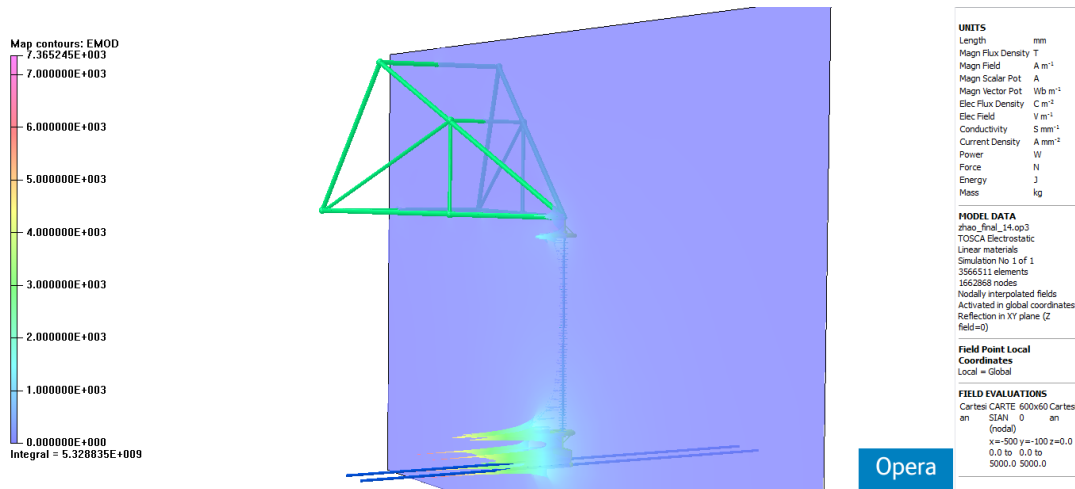
Στο σχήμα 4.52 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών, στο σχήμα 4.53 καταγράφονται ορισμένες ισοδυναμικές γραμμές και, τέλος, στο σχήμα 4.54 απεικονίζεται το ιστόγραμμα που δείχνει την κατανομή του δυναμικού τόσο στο εσωτερικό, όσο και στην περιοχή γύρω από το συνθετικό μονωτήρα. Και τα τρία διαγράμματα επιβεβαιώνουν εκείνο που ήταν αναμενόμενο: ακριβώς πάνω και σε μια περιοχή πολύ κοντά στο άκρο Υ.Τ. το δυναμικό ανέρχεται στα 1000 V, ενώ σταδιακά μειώνεται, καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο άκρο. Από το ιστόγραμμα δε του σχήματος 4.54 επιβεβαιώνεται η εικόνα της ανομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα.



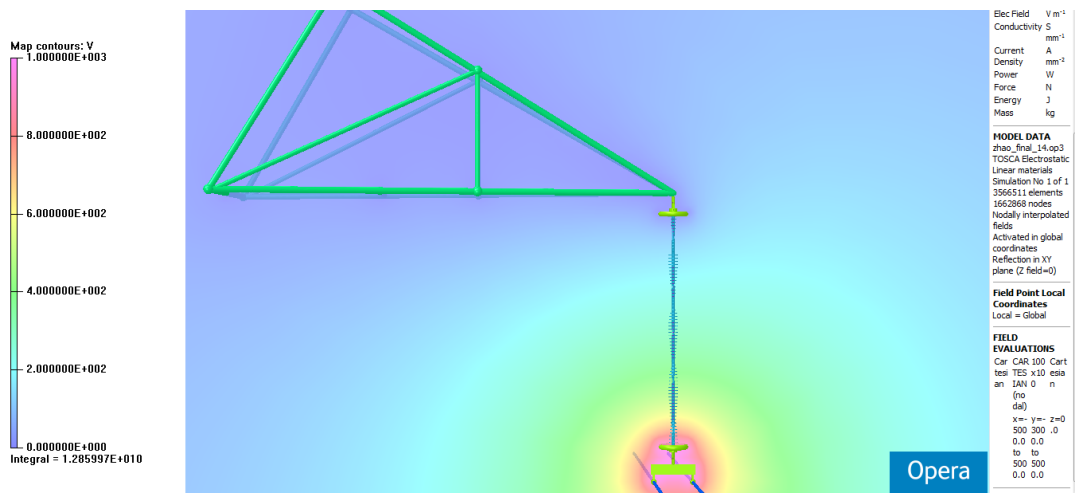
Σχήμα 4.50: Χάρτης ζωνών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41].

Κοινός τόπος όλων των ανωτέρω παρατηρήσεων δεν είναι άλλος από τη μη-γραμμική κατανομή της τάσης κατά μήκος των συνθετικών μονωτήρων. Όπως έχει διατυπωθεί και σε άλλες εργασίες [8, 11, 12, 13, 17] η κατανομή της τάσης στο εσωτερικό κεραμικών μονωτήρων παρουσιάζει μια πιο γραμμική συμπεριφορά: λόγω ύπαρξης των ενδιάμεσων μεταλλικών σπλισμών κάθε δισκοειδούς μονωτήρα, η μείωση του δυναμικού είναι βηματική. Αντίθετα, στους μη-κεραμικούς μονωτήρες δεν υφίστανται μεταλλικοί σπλισμοί και το δυναμικό μειώνεται περισσότερο απότομα.

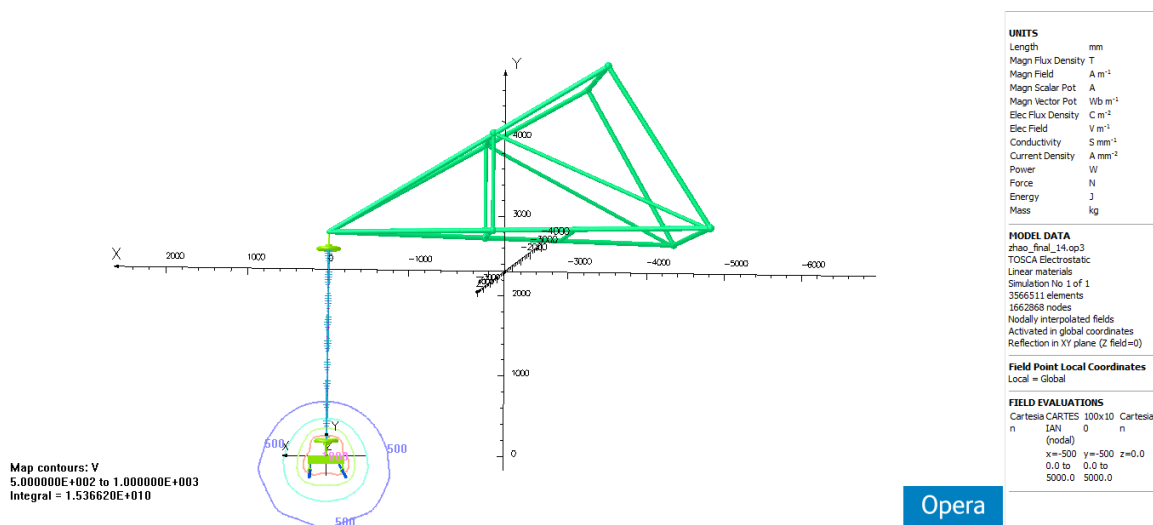
Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί μια, εκ πρώτης όψευς, παράδοξη εικόνα του σχήματος 4.53: η ισοδυναμική γραμμή των 500 V, αν και βρίσκεται σχετικά μακριά από το άκρο Υ.Τ., όπου παρατηρήθηκαν οι απότομες μεταβολές της πεδιακής έντασης στη διεπιφάνεια των διαφόρων υλικών, εντούτοις σχηματίζει αιχμές σε ορισμένα σημεία. Οι αιχμές αυτές δεν επιδέχονται κάποια φυσική ερμηνεία και ο λόγος που προκαλούνται έχει να κάνει με τη μείωση της πυκνότητας του πλέγματος, καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή πολύ κοντά στο μονωτήρα, που έχει ως άμεση συνέπεια αντίστοιχη μείωση στην ακρίβεια των εξαγόμενων από την προσομοίωση αποτελεσμάτων.



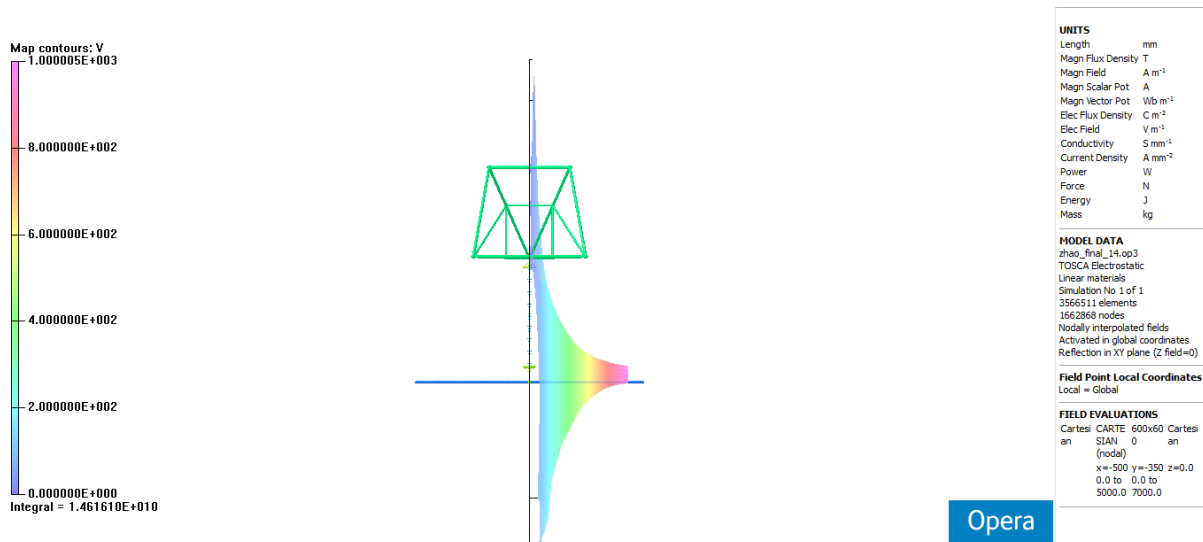
Σχήμα 4.51: Ιστόγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41].



Σχήμα 4.52: Χάρτης ζωνών του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41].



Σχήμα 4.53: Ισοδυναμικές γραμμές στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41].



Σχήμα 4.54: Ιστόγραμμα του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41].

4.3 Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης ελληνικού συστήματος μεταφοράς

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις τεσσάρων συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ., τα σχέδια των οποίων ελήφθησαν από τη Δ.Ε.Η. και είτε χρησιμοποιούνται ήδη στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς είτε επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάστηκαν συγκεντρωμένα στον πίνακα 4.1, ενώ οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται βασίζονται στο τελικό ή πλήρες μοντέλο της υποενότητας 4.2.6, δηλαδή οι μονωτήρες θεωρούνται αναρτημένοι από ένα τμήμα του πυλώνα και στον ακροδέκτη Υ.Τ. συνδέεται αγωγός 2x το συνολικό μήκος του μονωτήρα, είτε απλός είτε διπλός, ανάλογα με το επίπεδο τάσης. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αγωγών (διάμετρος και πολλαπλότητα) λαμβάνονται από την εργασία [57]. Επιπλέον, σύμφωνα και πάλι με την υποενότητα 4.2.6, τοποθετούνται δύο τοροειδή εξομάλυνσης, ένα στο ενεργό και ένα στο γειωμένο άκρο κάθε διάταξης. Οι διαστάσεις των τοροειδών φαίνονται επίσης στον πίνακα 4.1.

Ακολουθεί η παρουσίαση των προσομοιώσεων, όπως αυτές υλοποιούνται με τη βοήθεια του προγράμματος Opera-3d.

4.3.1 Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης 150 kV

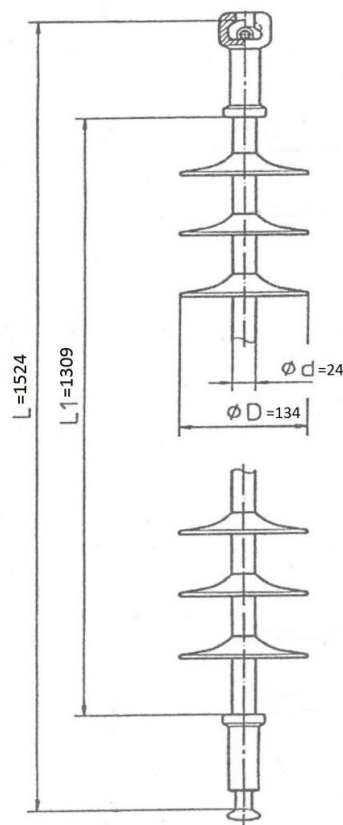
Οι δύο συνθετικοί μονωτήρες των 150 kV, των οποίων οι προσομοιώσεις παρουσιάζονται παρακάτω, φέρουν στον ακροδέκτη Υ.Τ. απλό αγωγό, ο οποίος θεωρείται ως αγωγός κάποιας πλευρικής φάσης, ενώ οι ίδιοι αναρτώνται από τμήμα της διάταξης πυλώνα, το οποίο συνδέεται με το γειωμένο ακροδέκτη αυτών.

Το μήκος του αγωγού λαμβάνεται ίσο προς το διπλάσιο του συνολικού μήκους του εκάστοτε μονωτήρα και η διάμετρός του είναι ίση προς 25.15 mm. Το τμήμα του πυλώνα που χρησιμοποιείται είναι όμοιο με εκείνο της ενότητας 4.2.6, με τη διαφορά ότι έχει υποστεί σμίκρυνση τέτοια, ώστε η μεγαλύτερη διάστασή του να συμφωνεί με εκείνη στα σχέδια των πύργων γραμμών μεταφοράς 150 kV απλού κυκλώματος της εργασίας [57].

Τα δύο τοροειδή εξομάλυνσης, τα οποία χρησιμοποιούνται σε κάθε μοντέλο, έχουν εξωτερική διάμετρο ίση με 330 mm, ενώ το διαμέτρημα του σωλήνα αυτών ανέρχεται στα 30 mm. Οι εν λόγω διαστάσεις ελήφθησαν από το άρθρο [54].

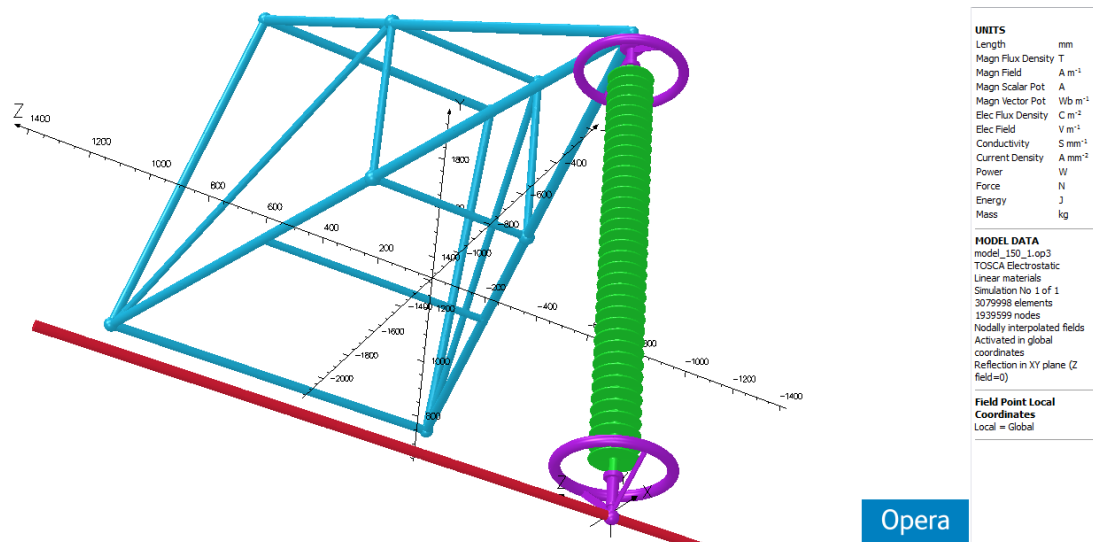
4.3.1.1 Συνθετικός μονωτήρας δίσκων ίσης διαμέτρου 150 kV

Ο πρώτος μονωτήρας που παρουσιάζεται είναι ένας συνθετικός μονωτήρας 150 kV, συνολικού μήκους $L=1524$ mm. Το μήκος ερπυσμού είναι 4765 mm, ενώ το αμιγώς μονωτικό τμήμα έχει μήκος $L_1=1309$ mm. Ο μονωτήρας αποτελείται από 36 ελαστομερείς δίσκους, καθένας εκ των οποίων έχει διάμετρο ίση προς $D=134$ mm και το βήμα τους είναι 35 mm. Η διάμετρος του σιλικονούχου περιβλήματος είναι $d=24$ mm και εκείνη της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες εποξικής ράβδου 18 mm. Η γεωμετρία του μονωτήρα με τα βασικότερα χαρακτηριστικά του φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



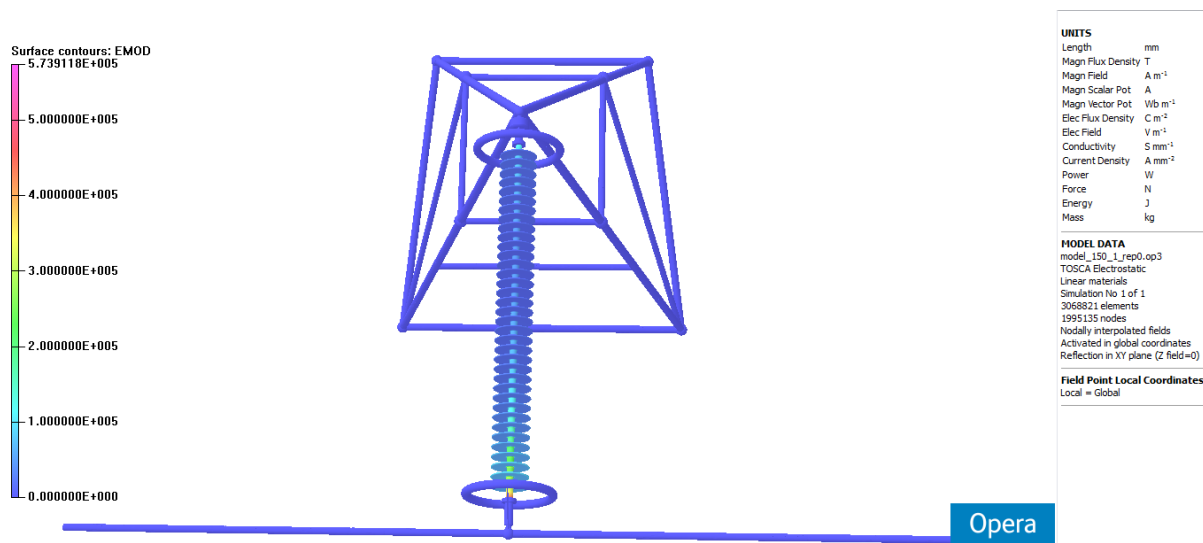
Σχήμα 4.55: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις συνθετικού μονωτήρα 150 kV, ο οποίος αποτελείται από δίσκους ίσης διαμέτρου.

Η εικόνα του μοντέλου, όπως αυτό προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αφού αποκαταστάθηκε η πλήρης συμμετρία και αφαιρέθηκε το background που αναπαριστά τον «άπειρων» διαστάσεων χώρο.



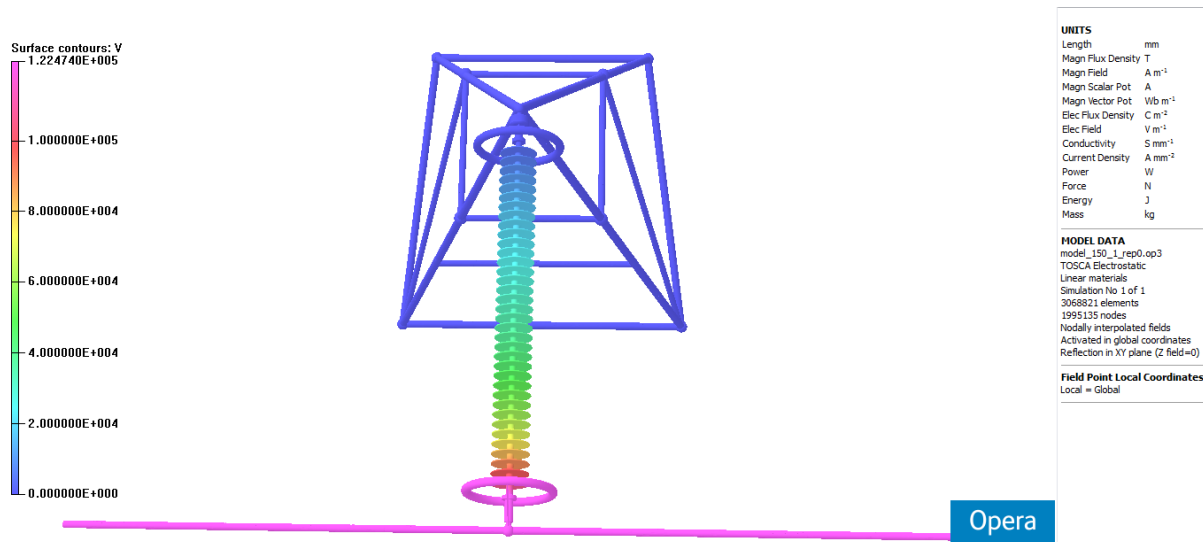
Σχήμα 4.56: Εικόνα του μοντέλου από το Μετ-Επεξεργαστή.

Στα σχήματα 4.57 και 4.58 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα. Όπως επιβεβαιώνεται από τις επιφανειακές κατανομές σχημάτων αυτών, το ηλεκτρικό πεδίο μεγιστοποιείται σε μια περιοχή του περιβλήματος λίγο μετά το τοροειδές εξομάλυνσης του άκρου Υ.Τ., ενώ παρατηρείται κάποια ανύψωση της πεδιακής έντασης καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο ακροδέκτη. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μηδενίζεται στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών του μοντέλου, όπως προφανώς αναμενόταν.



Σχήμα 4.57: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $E_{mod} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με ίσης διαμέτρου δίσκους.

Όσον αφορά στο δυναμικό, αυτό δείχνει να μειώνεται κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, με κατεύθυνση από τον αγωγό προς το γειωμένο πυλώνα, κάτι που ασφαλώς ήταν αναμενόμενο.

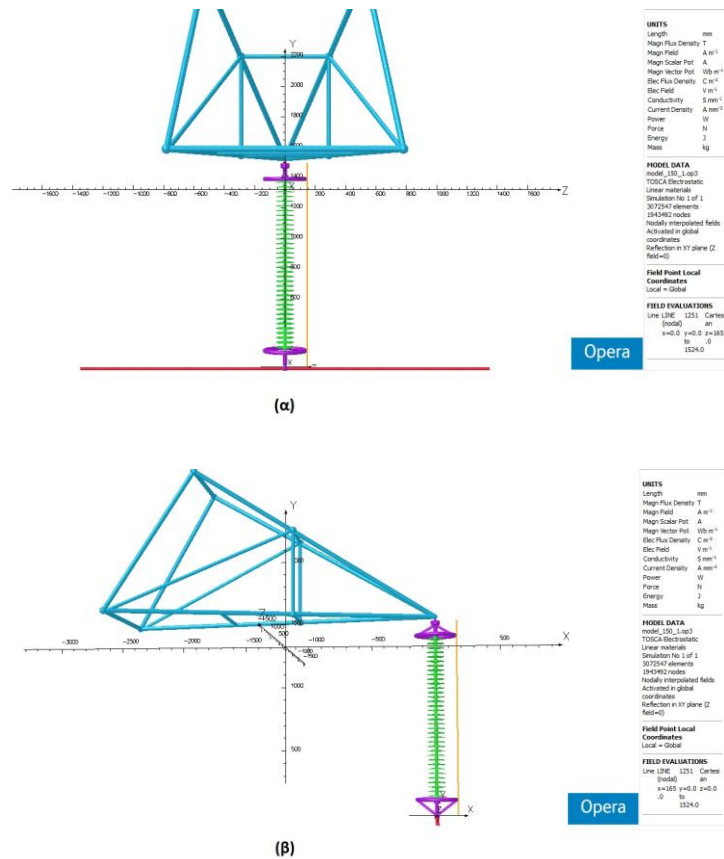


Σχήμα 4.58: Κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με ίσης διαμέτρου δίσκους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα, καθένα από τα οποία εμπεριέχει γραφικές παραστάσεις, στις οποίες απεικονίζονται οι κατανομές τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού κατά μήκος διαφορετικών κατακόρυφων ευθειών. Όπως και στην υποενότητα 4.2.6, εξετάζεται η μορφή των κατανομών καθώς αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα. Έτσι, λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων: μία για την παράλληλη με τον αγωγό (άρα και με τον άξονα-z) απομάκρυνση απ' το μονωτήρα και μία δεύτερη για την απομάκρυνση τόσο απ' τον αγωγό, όσο και απ' το μονωτήρα (παράλληλα δηλαδή με τον άξονα-x).

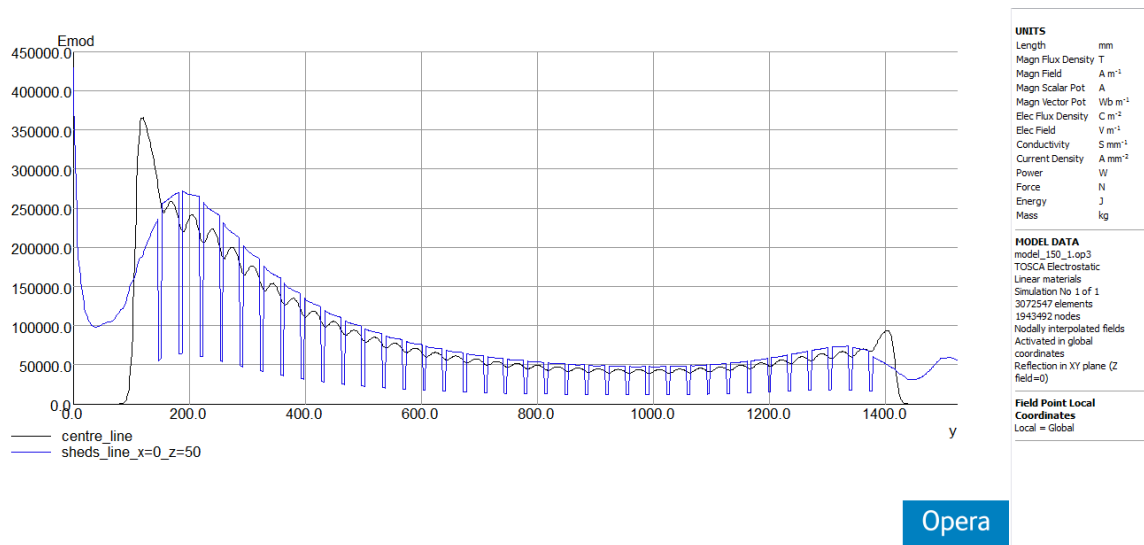
Οι διάφορες ευθείες γραμμές, κατά μήκος των οποίων λαμβάνονται οι κατανομές, θεωρούνται ως οι τομές των αντίστοιχων επιπέδων και συμβολίζονται με τα αντίστοιχα ζεύγη συντεταγμένων. Υπενθυμίζεται ότι ως οριζόντιο επίπεδο έχει ληφθεί το επίπεδο-xz, ενώ ο μονωτήρας βρίσκεται παράλληλα με τον κατακόρυφο άξονα-y. Έτσι, απεικονίζονται οι κατανομές κατά μήκος των ευθειών ($x=0$ mm, $z=50$ mm), ($x=0$ mm, $z=135$ mm), ($x=0$ mm, $z=165$ mm), ($x=0$ mm, $z=330$ mm) και των ευθειών ($x=50$ mm, $z=0$ mm), ($x=135$ mm, $z=0$ mm), ($x=165$ mm, $z=0$ mm), ($x=330$ mm, $z=0$ mm), παράλληλα και κάθετα προς τον αγωγό, αντίστοιχα. Οι ευθείες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 50 mm «τρυπούν» κάθετα τους ελαστομερείς δίσκους, εκείνες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 135 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εσωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης, οι άλλες με 165 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εξωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης και οι τελευταίες με 330 mm βρίσκονται αρκετά μακριά απ' τη διάταξη του μονωτήρα.

Ο τρόπος λήψης των γραφημάτων αυτών φαίνεται, παρουσιάζοντας ενδεικτικά δύο ευθείες, στο ακόλουθο σχήμα. Το σχήμα 4.59 (α) αφορά στην πρώτη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $x=0$ mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη-z, άρα και η απόσταση απ' το συνθετικό μονωτήρα. Απ' την άλλη, το σχήμα 4.59 (β) αφορά στη δεύτερη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $z=0$ mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη-x, οπότε απομακρύνονται τόσο από το μονωτήρα, όσο και απ' τον αγωγό.



Σχήμα 4.59: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

Πριν την παρουσίαση των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, εκτίθεται σε κοινούς άξονες η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου τόσο κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα, όσο και κατά μήκος της ευθείας $x=0$ mm, $z=50$ mm, η οποία διέρχεται μέσα από τους δίσκους (βλέπε παρακάτω σχήμα).



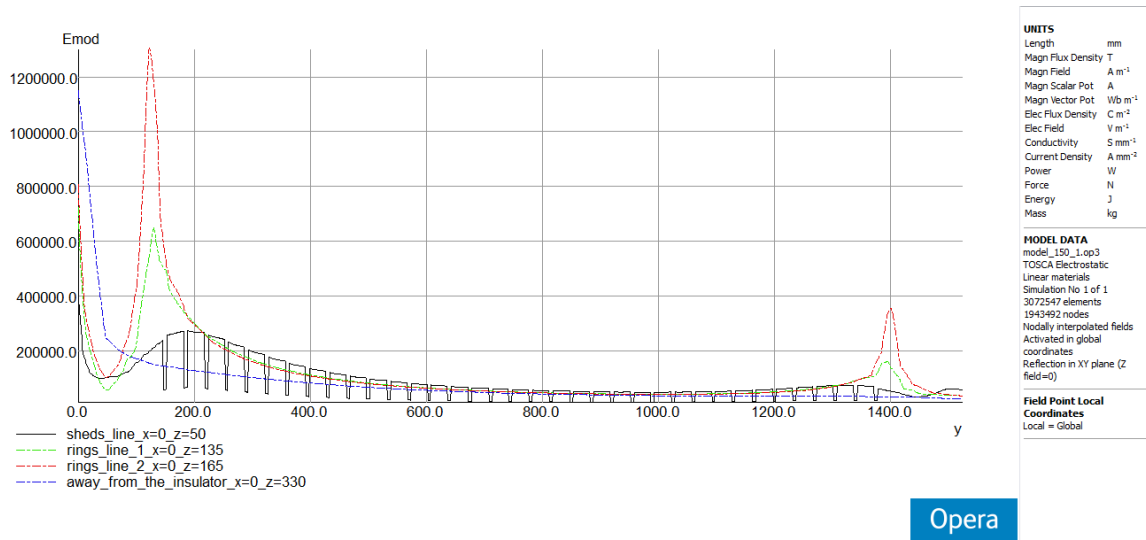
Σχήμα 4.60: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα (μαύρη γραφική) και της κατακόρυφης ευθείας γραμμής ($x=0$, $z=50$) (μπλε γραφική).

Ο λόγος για την ξεχωριστή αυτή παρουσίαση έχει να κάνει αφ' ενός με το διαφορετικό επίπεδο τιμών της πεδιακής έντασης στις διάφορες περιοχές γύρω απ' το μονωτήρα, αφ' ετέρου με το γεγονός ότι εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η πεδιακή κατανομή πολύ κοντά σ' αυτόν, επομένως η ανάγκη για υψηλή ακρίβεια φαντάζει επιτακτικότερη κατά μήκος των δύο προαναφερθέντων γραμμών. Για τον ίδιο λόγο εξάλλου, το πλέγμα στην περιοχή πλησίον του μονωτήρα διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα, επομένως η υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με τις πιο απομακρυσμένες περιοχές είναι αναμενόμενη.

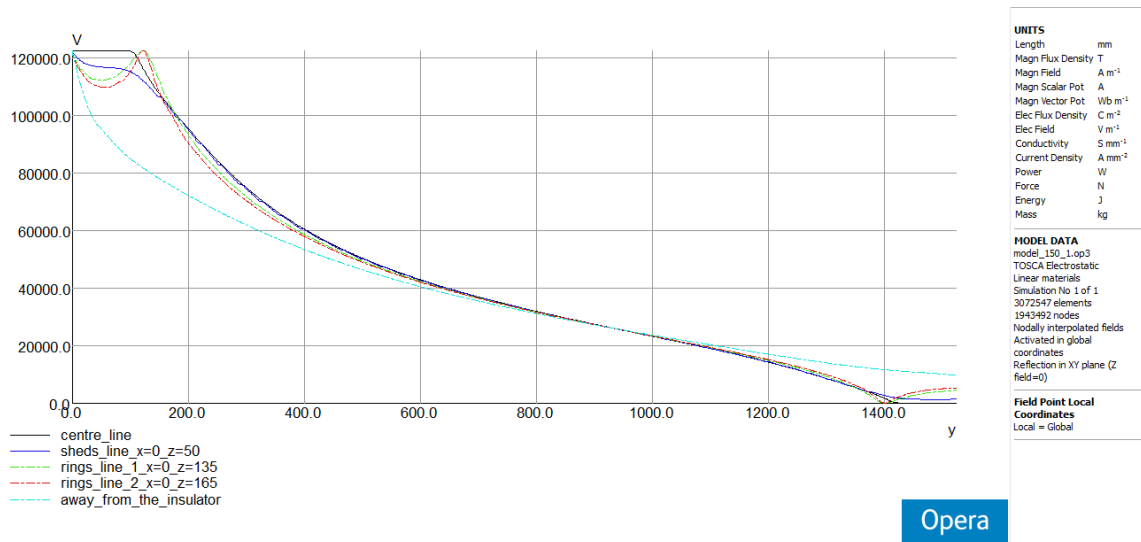
Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από το παραπάνω σχήμα, η πεδιακή ένταση κατά μήκος των δύο κατακόρυφων ευθειών παρουσιάζει εμφανή κυμάτωση, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη των ελαστομερών δίσκων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στα σημεία του άξονα στα οποία η ένταση της μαύρης γραφικής αυξομειώνεται με χαρακτηριστικά ομαλό τρόπο, η ένταση της μπλε γραφικής καταγράφει ακαριαίες αυξομειώσεις. Οι «βυθίσεις» αυτές, ο αριθμός των οποίων ισούται με το πλήθος των δίσκων του μονωτήρα (36), εξηγούνται με τη βοήθεια της σχέσης (4.2) και των αντίστοιχων σχολιασμών που αφορούσαν στο συνθετικό μονωτήρα των 345 kV του άρθρου [41].

Ακολουθεί η πρώτη σειρά διαγραμμάτων των κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.59 (α).

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.61 και 4.62, διαπιστώνει κανείς ότι, παρά την ομοιομορφία και τα χαμηλά επίπεδα στα οποία διατηρείται η πεδιακή κατανομή κατά μήκος των ελαστομερών δίσκων του μονωτήρα, εντούτοις η κατάσταση διαφοροποιείται σιγά-σιγά καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή αυτή, με αποκορύφωμα τη γραμμή $x=0$ mm, $z=165$ mm, η οποία διέρχεται εφαπτομενικά από τις εξωτερικές επιφάνειες των δύο τοροειδών εξομάλυνσης. Παρουσιάζονται δύο πολύ απότομες κορυφές (κόκκινη γραφική στο σχήμα 4.61). Η μία απ' αυτές είναι αρκετά υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή της έντασης κατά μήκος της ευθείας που «τρυπά» τους δίσκους, περίπου τετραπλάσια· κατ' αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνονται όσα σημειώθηκαν στην υποενοότητα 4.2.6, στο αντίστοιχο εδάφιο (βλέπε σχήμα 4.46 και σχολιασμό αυτού).



Σχήμα 4.61: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.59 (α).



Σχήμα 4.62: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα και τεσσάρων ακόμη διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.59 (α).

Όσον αφορά στις κατανομές του δυναμικού του σχήματος 4.62, είναι φανερό πως όσο οι γραμμές βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν τα δύο τοροειδή, οι κατανομές κατά μήκος αυτών είναι αρκετά πανομοιότυπες μεταξύ τους, με κάποιες μικρές διαφορές στις περιοχές πλησίον των δύο άκρων (ενεργού και γειωμένου) της διάταξης. Από την άλλη, μόλις αυξηθεί σημαντικά η απόσταση από το μονωτήρα, έξω από τα τοροειδή, η κατανομή της τάσης γίνεται πολύ πιο ομοιόμορφη και τα μέγιστα επίπεδα αυτής μειώνονται ορατά (γαλάζια γραφική παράσταση).

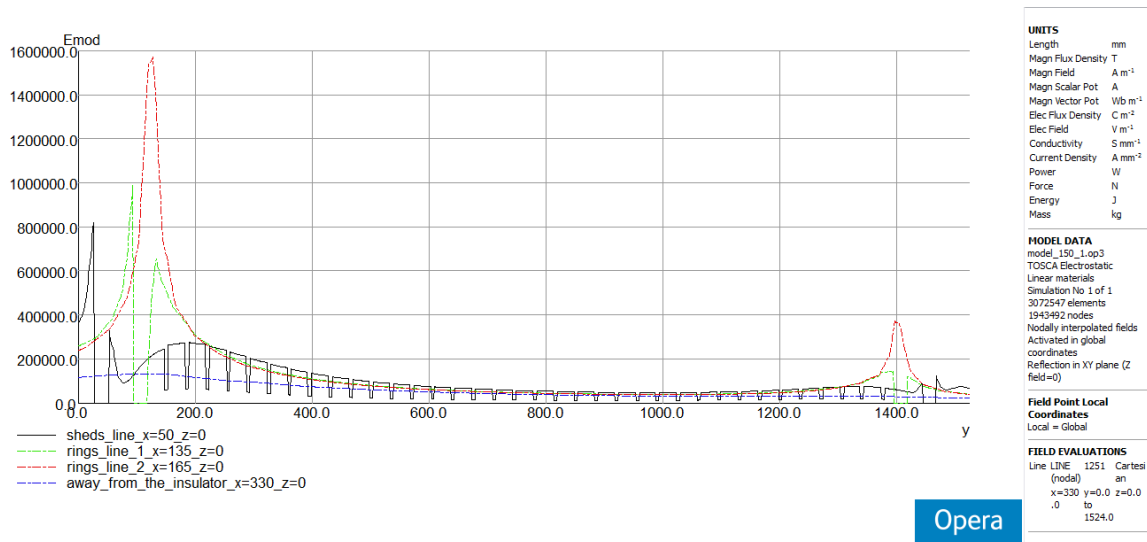
Ωστόσο, δεν θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι, κατά την απομάκρυνση από τις πλησίον του μονωτήρα περιοχές, οι γραφικές παραστάσεις γίνονται ολοένα και πιο «χονδροειδείς»· με άλλα λόγια, παρατηρείται στα εξαγόμενα αποτελέσματα μια μείωση της ακρίβειας, καθώς η απόσταση από το μονωτήρα αυξάνει. Χαρακτηριστικές είναι οι γωνίες της πεδιακής έντασης κοντά στα άκρο Υ.Τ. της πράσινης και της κόκκινης γραφικής παράστασης, καθώς και η, μικρότερης οξύτητας, αιχμή της μπλε γραφικής του σχήματος 4.61. Η μείωση αυτή της ακρίβειας οφείλεται, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες υποενότητες του κεφαλαίου, στην αραιώση του πλέγματος μακριά από το μονωτήρα, λόγω των εγγενών περιορισμών που παρουσιάζει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) κατά την επίλυση ανοικτών προβλημάτων.

Ακολουθεί η δεύτερη σειρά διαγραμμάτων των κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.59 (β).

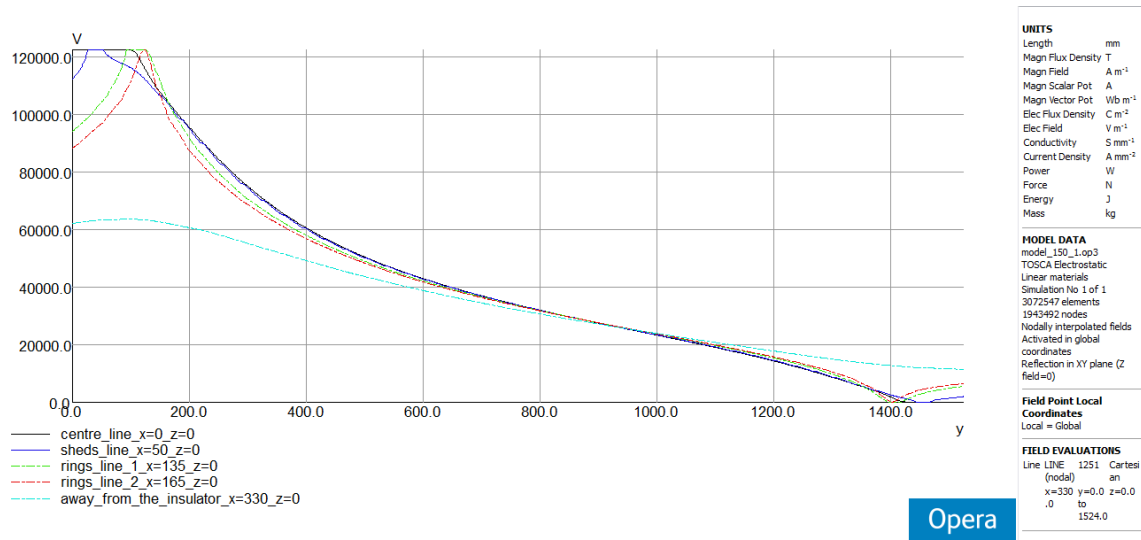
Για τα σχήματα 4.63 και 4.64 ισχύουν τα όσα σχολιάστηκαν και στα σχήματα 4.61 και 4.62, με δύο επιπλέον επισημάνσεις. Πρώτον, τα επίπεδα τιμών της πεδιακής έντασης εμφανίζονται ελαφρώς επαυξημένα στην περίπτωση λήψης κατανομών σύμφωνα με το σχήμα 4.59 (β). Η μικρή – αλλά ορατή– αυτή ανύψωση ανέρχεται σε ποσοστό της τάξης του 20%, όσον αφορά στη μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης κατά μήκος των ευθειών ($x=0 \text{ mm}$, $z=165 \text{ mm}$), ($x=165 \text{ mm}$, $z=0 \text{ mm}$) και εν πρώτοις φαίνεται παράδοξη. Το σημείο μεγίστου, το οποίο προσδιορίζεται μεταξύ των θέσεων $y=122 \text{ mm}$ και $y=124 \text{ mm}$ και για τις δύο ευθείες, κινείται στον κύκλο $x^2 + z^2 = 165^2$, $y \cong 123 \text{ mm}$ και θα περίμενε κανείς ότι θα καταπονείται περισσότερο όταν διέρχεται πιο κοντά από τον αγωγό, δηλαδή στο σημείο ($x=0 \text{ mm}$, $z=165 \text{ mm}$, $y=123 \text{ mm}$), οπότε η κάθετη απόσταση από τον αγωγό ελαχιστοποιείται. Εντούτοις, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Μια εξήγηση, περισσότερο μαθηματική και λιγότερο φυσική, βασίζεται στη σχέση ηλεκτροστατικού πεδίου και δυναμικού. Σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (4.3)$$

η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E λαμβάνει υψηλότερες τιμές στα σημεία που το δυναμικό V παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση. Κατά μήκος της ευθείας ($x=0$ mm, $z=165$ mm) το δυναμικό δεν προλαβαίνει να πέσει αρκετά, αφού το σημεία $x = 0, z = 165, y \in (0, 123)$ (σε mm) βρίσκονται μεταξύ αγωγού και τοροειδούς εξομόλυνσης, επιφάνειες οι οποίες βρίσκονται αμφοτέρως υπό δυναμικό $(150/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ kV $\cong 122.474$ kV.



Σχήμα 4.63: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.59 (β).



Σχήμα 4.64: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα και τεσσάρων ακόμη διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.59 (β).

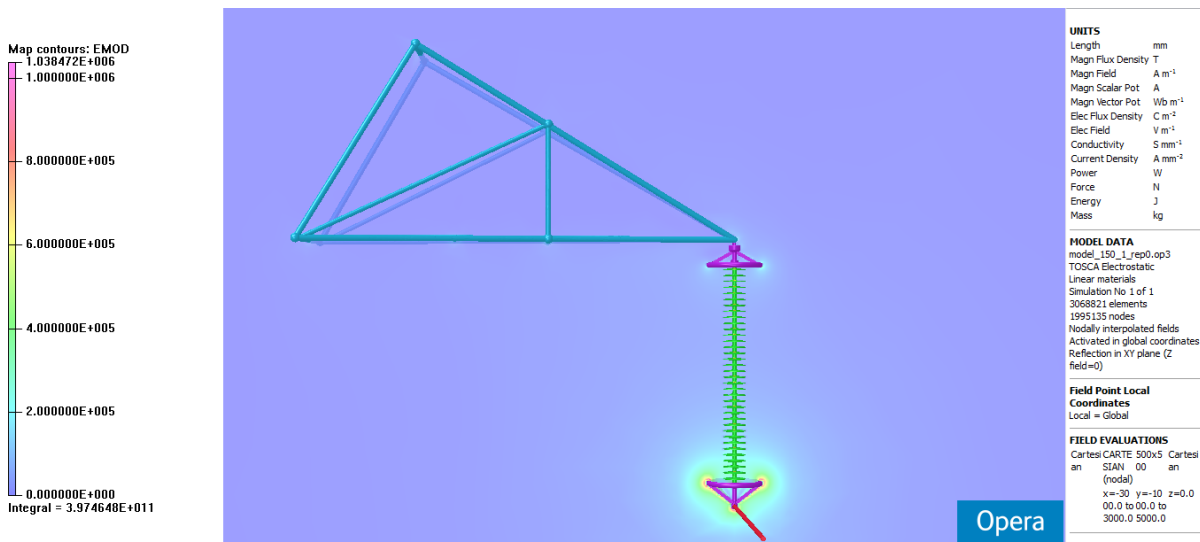
Αντίθετα, τα σημεία $x = 165, z = 0, y \in (0, 123)$ (σε mm) βρίσκονται πλησίον μεν της επιφάνειας του τοροειδούς του άκρου Υ.Τ., μακριά δε από τον αγωγό, επομένως το δυναμικό αυξάνεται περισσότερο απότομα κατά τη διαδρομή αυτή και η αυξημένη αυτή κλίση διατηρείται για περισσότερα σημεία. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από τις κατανομές δυναμικού των

σχημάτων 4.62 και 4.64 (κόκκινη γραφική παράσταση). Με άλλα λόγια, η παράδοση αυτή εικόνα δικαιολογείται από την επίδραση του τοροειδούς εξομάλυνσης στα τελικά αποτελέσματα. Πράγματι, οι τιμές της πεδιακής έντασης που λαμβάνονται, με τη βοήθεια του προγράμματος, σε σημεία αρκετά μακριά από τη διάταξη, είναι υψηλότερες όταν τα σημεία αυτά βρίσκονται πλησιέστερα στον αγωγό Υ.Τ..

Δεύτερον, στη μαύρη και την πράσινη γραφική παράσταση του σχήματος 4.63 παρατηρούνται δύο επιπλέον βυθίσεις της πεδιακής έντασης, μία προς το ενεργό και μία προς το γειωμένο άκρο κάθε κατανομής. Οι βυθίσεις αυτές, που δεν παρατηρήθηκαν στο σχήμα 4.61, οφείλονται στην ύπαρξη των μεταλλικών στηριγμάτων των δύο τοροειδών, τα οποία βρίσκονται παράλληλα με τον άξονα- x και παρεμβάλλονται στις κατανομές που λαμβάνονται σύμφωνα με το σχήμα 4.59 (β). Όπως είναι αναμενόμενο, το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό αγωγίμων επιφανειών, μηδενίζεται.

Ακολουθεί η παρουσίαση ενός επιπέδου- xy (κατακόρυφος θεωρείται ο άξονας- y), επί του οποίου απεικονίζονται με δύο τρόπους η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και με τρεις τρόπους το δυναμικό.

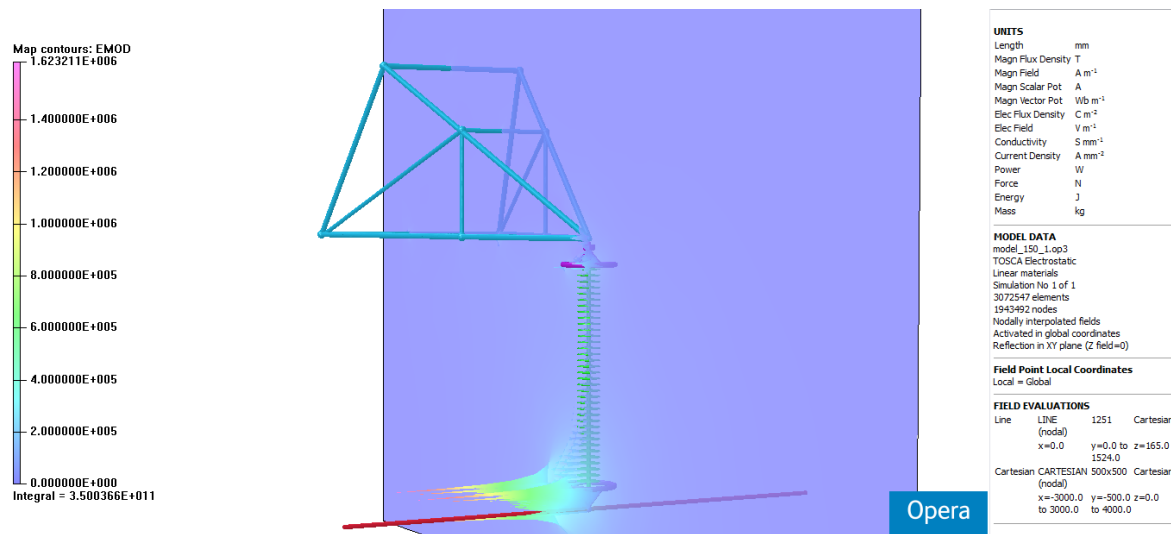
Στο σχήμα 4.65 φαίνεται η πεδιακή ένταση μέσω χρωματισμένων περιοχών, ενώ στο σχήμα 4.66 απεικονίζεται το ιστόγραμμα το οποίο δείχνει την κατανομή της πεδιακής έντασης στο εσωτερικό και στην περιοχή γύρω απ' το συνθετικό μονωτήρα. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει, με την απομάκρυνση από το ενεργό και προς το γειωμένο άκρο, η ένταση μειώνεται σε γενικές γραμμές. Εντούτοις, τόσο στο γειωμένο τοροειδές, όσο και στη σύνδεση του ακροδέκτη με τον πυλώνα παρατηρείται μια σημαντική, τοπική αύξηση του πεδίου. Γενικότερα, η πεδιακή ένταση παρουσιάζει αιχμές στις διεπιφάνειες μεταξύ των υλικών που εμφανίζουν πολύ διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες: πρόκειται για τις εξωτερικές επιφάνειες όλων των αγωγίμων (μεταλλικών) μερών, δηλαδή των τοροειδών εξομάλυνσης και του συνδετικού σφαιρικού τμήματος που ενώνει αγωγό και ακροδέκτη Υ.Τ.. Οι αιχμές αυτές προσεγγίζουν εξαιρετικά υψηλές τιμές κοντά στο άκρο Υ.Τ. της διάταξης, όπως άλλωστε αναμένεται.



Σχήμα 4.65: Χάρτης ζωνών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο- xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με ίσης διαμέτρου δίσκους.

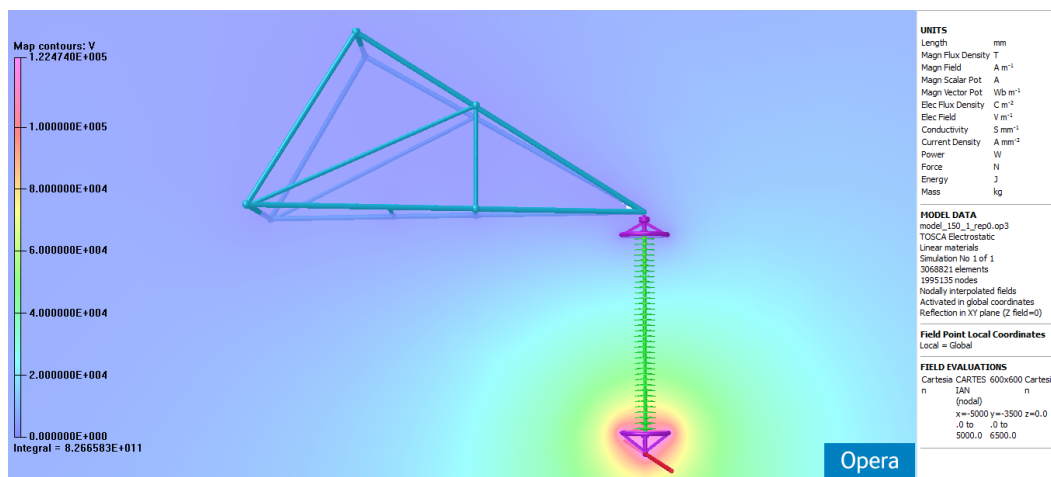
Στο σχήμα 4.67 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών, στο σχήμα 4.68 καταγράφονται ορισμένες ισοδυναμικές γραμμές και, τέλος, στο σχήμα 4.69 απεικονίζεται το

ιστόγραμμα που δείχνει την κατανομή του δυναμικού τόσο στο εσωτερικό, όσο και στην περιοχή γύρω από το συνθετικό μονωτήρα.



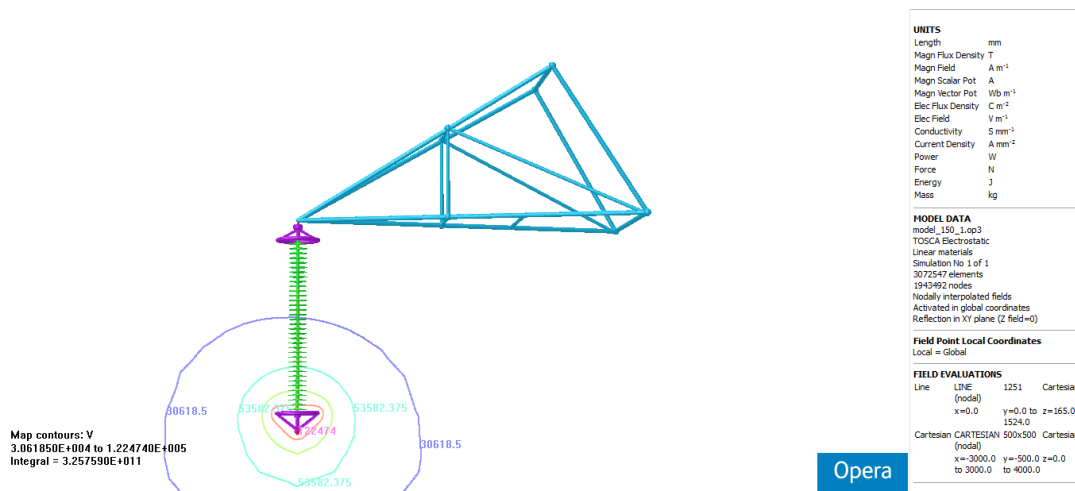
Σχήμα 4.66: Ιστόγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με ίσης διαμέτρου δίσκους.

Και τα τρία διαγράμματα επιβεβαιώνουν εκείνο που ήταν αναμενόμενο: ακριβώς πάνω και σε μια περιοχή πολύ κοντά στο άκρο Υ.Τ. το δυναμικό ανέρχεται στα 122474 V, ενώ σταδιακά μειώνεται, καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο άκρο. Από το ιστόγραμμα δε του σχήματος 4.69 επιβεβαιώνεται η εικόνα της ανομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα.

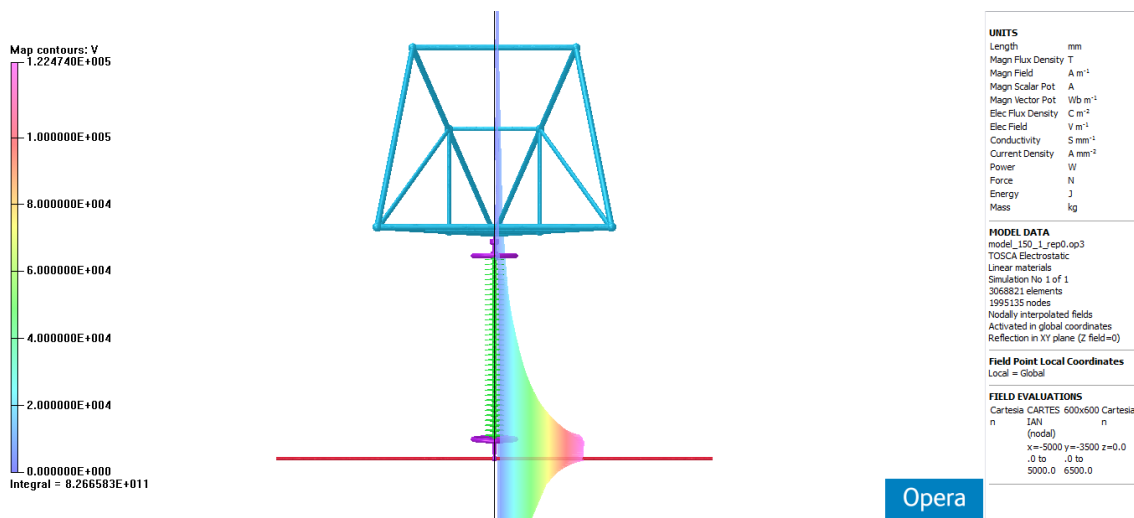


Σχήμα 4.67: Χάρτης ζωνών του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με ίσης διαμέτρου δίσκους.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί και εδώ, όπως και στην υποενότητα 4.2.6, η μορφή των ισοδυναμικών γραμμών του σχήματος 4.68: όσο αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα, σχηματίζονται αιχμές σε ορισμένα σημεία. Οι αιχμές αυτές οφείλονται στη μείωση της πυκνότητας του πλέγματος, που έχει ως άμεση συνέπεια αντίστοιχη μείωση στην ακρίβεια των εξαγόμενων από την προσομοίωση αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.68: Ισοδυναμικές γραμμές στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με ίσης διαμέτρου δίσκους.

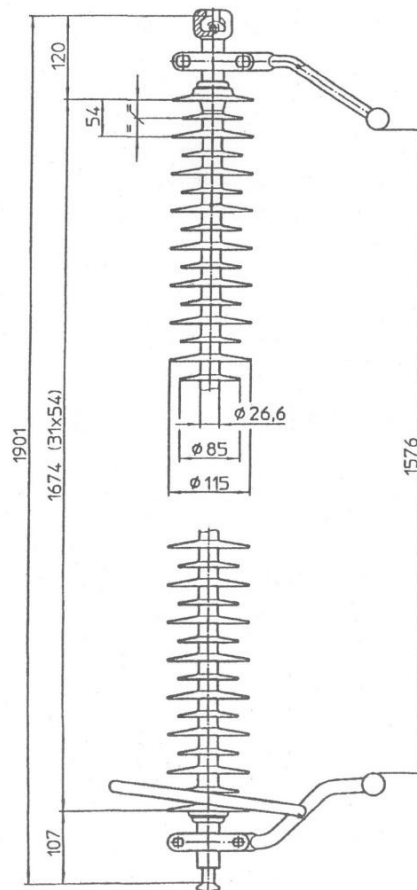


Σχήμα 4.69: Ιστογράμμο του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με ίσης διαμέτρου δίσκους.

4.3.1.2 Συνθετικός μονωτήρας δίσκων διαφορετικής διαμέτρου 150 kV

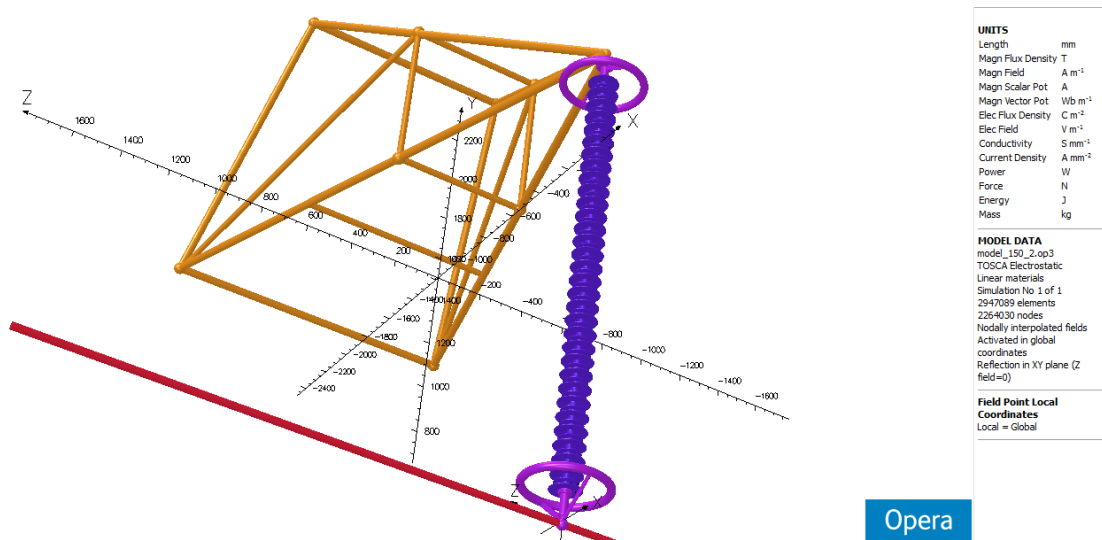
Ο δεύτερος μονωτήρας που παρουσιάζεται είναι ένας συνθετικός μονωτήρας 150 kV, η γεωμετρία του οποίου μαζί με τα βασικότερα χαρακτηριστικά του φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.

Το συνολικό μήκος του μονωτήρα είναι 1901 mm, το μήκος ερπυσμού του ανέρχεται στα 5708 mm, ενώ το αμιγώς μονωτικό τμήμα έχει μήκος 1747 mm. Ο μονωτήρας αποτελείται από 32 μεγάλους και 31 μικρούς ελαστομερείς δίσκους, εκ των οποίων οι μεγάλοι έχουν διάμετρο ίση προς 115 mm και οι μικροί έχουν αντίστοιχη τιμή στα 85 mm, ενώ το βήμα κάθε μεταξύ τους συνδυασμού (μικρού και μεγάλου δίσκου μαζί) ανέρχεται στα 54 mm. Η διάμετρος του σιλικονούχου περιβλήματος είναι $d=26.6$ mm και εκείνη της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες εποξικής ράβδου 20 mm.



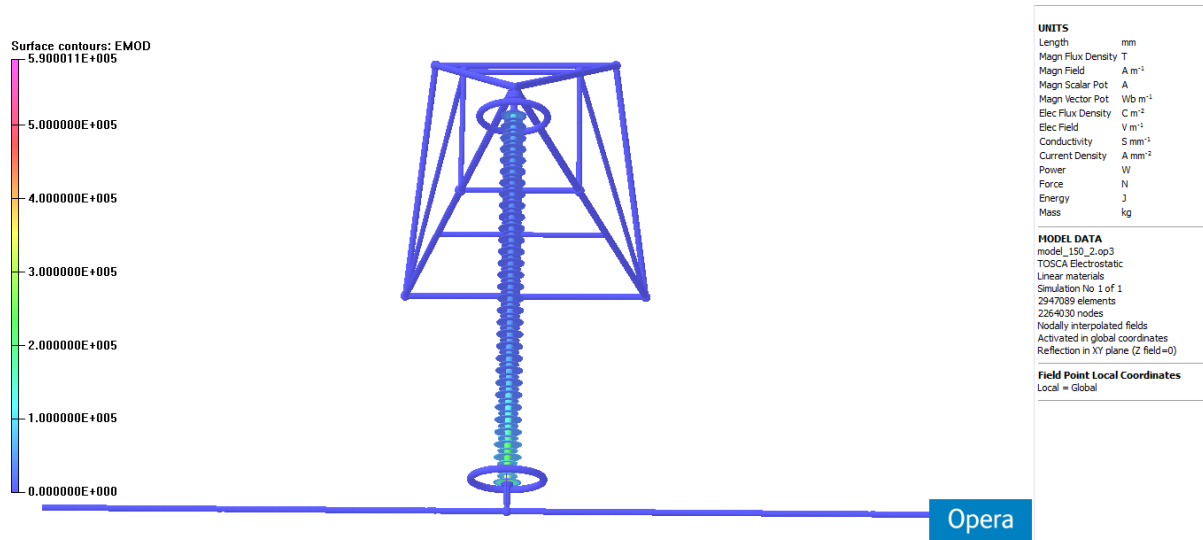
Σχήμα 4.70: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις συνθετικού μονωτήρα 150 kV, ο οποίος αποτελείται από δίσκους διαφορετικής διαμέτρου.

Η εικόνα του μοντέλου, όπως αυτό προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αφού αποκαταστάθηκε η πλήρης συμμετρία και αφαιρέθηκε το background που αναπαριστά τον «άπειρων» διαστάσεων χώρο.

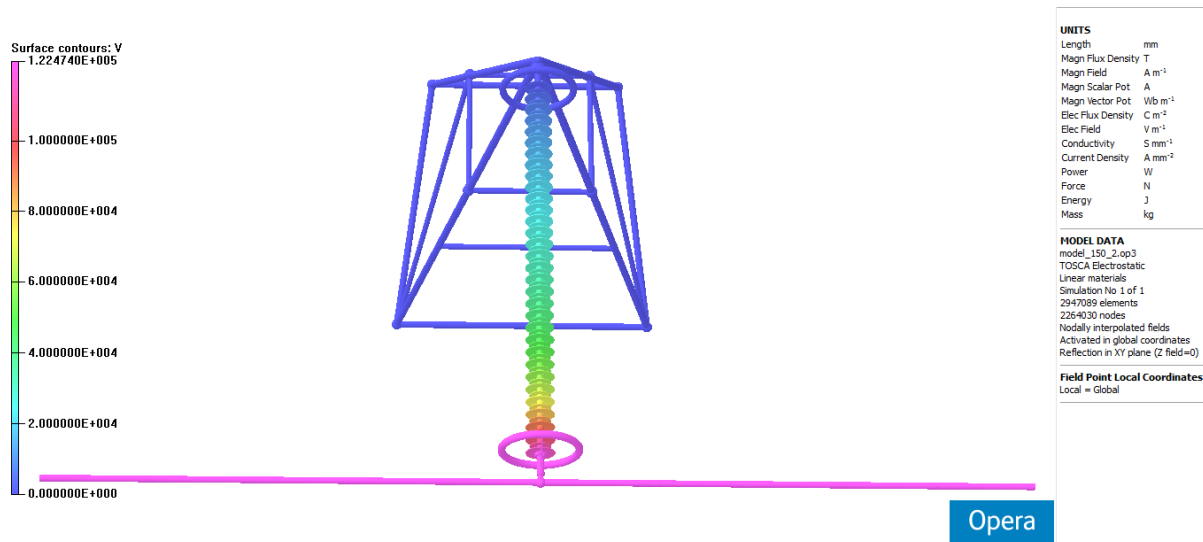


Σχήμα 4.71: Εικόνα του μοντέλου από το Μετ-Επεξεργαστή.

Στα σχήματα 4.72 και 4.73 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα. Όπως επιβεβαιώνεται από τις επιφανειακές κατανομές σχημάτων αυτών, το ηλεκτρικό πεδίο μεγιστοποιείται σε μια περιοχή του περιβλήματος λίγο μετά το τοροειδές εξομάλυνσης του άκρου Υ.Τ., ενώ παρατηρείται κάποια ανύψωση της πεδιακής έντασης καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο ακροδέκτη. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μηδενίζεται στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών του μοντέλου, όπως προφανώς αναμενόταν.



Σχήμα 4.72: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $E_{mod} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.



Σχήμα 4.73: Κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.

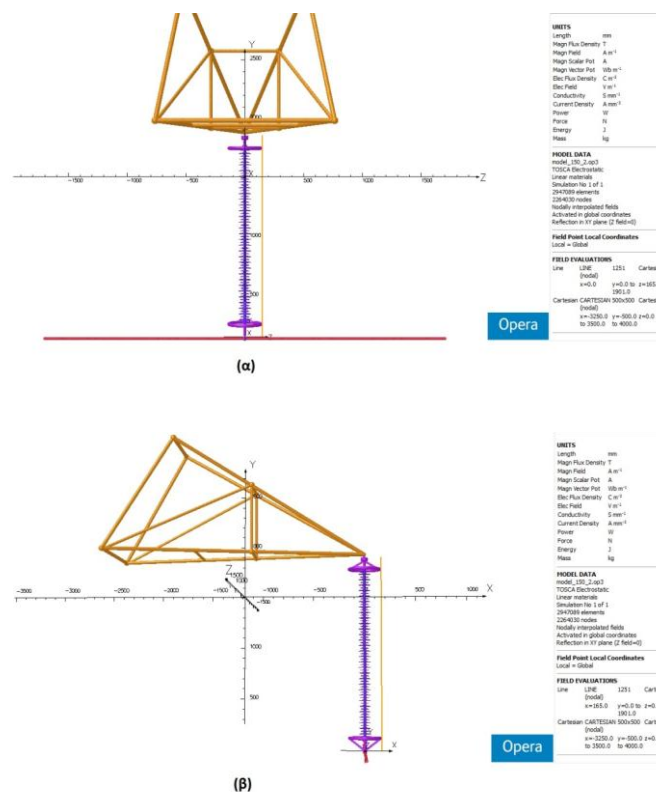
Όσον αφορά στο δυναμικό, αυτό δείχνει να μειώνεται κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, με κατεύθυνση από τον αγωγό προς το γειωμένο πυλώνα, κάτι που ασφαλώς ήταν αναμενόμενο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα, καθένα από τα οποία εμπεριέχει γραφικές παραστάσεις, στις οποίες απεικονίζονται οι κατανομές τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο

και του δυναμικού κατά μήκος διαφορετικών κατακόρυφων ευθειών. Όπως και στις υποενότητες 4.2.6 και 4.3.1.1, εξετάζεται η μορφή των κατανομών καθώς αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα. Έτσι, λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων: μία για την παράλληλη με τον αγωγό (άρα και με τον άξονα-z) απομάκρυνση απ' το μονωτήρα και μία δεύτερη για την απομάκρυνση τόσο απ' τον αγωγό, όσο και απ' το μονωτήρα (παράλληλα δηλαδή με τον άξονα-x).

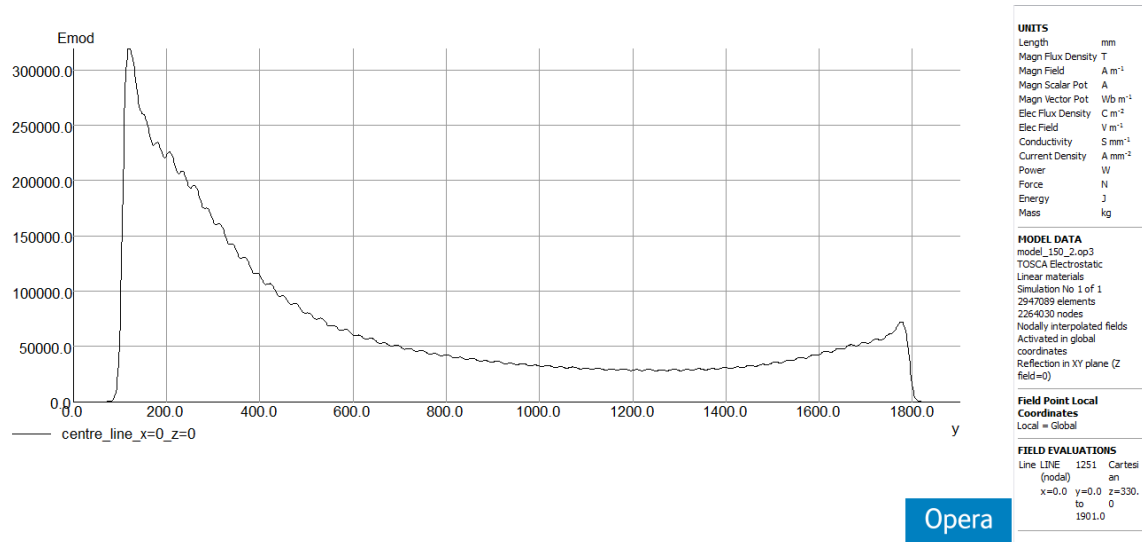
Οι διάφορες ευθείες γραμμές, κατά μήκος των οποίων λαμβάνονται οι κατανομές, θεωρούνται ως οι τομές των αντίστοιχων επιπέδων και συμβολίζονται με τα αντίστοιχα ζεύγη συντεταγμένων. Υπενθυμίζεται ότι ως οριζόντιο επίπεδο έχει ληφθεί το επίπεδο-xz, ενώ ο μονωτήρας βρίσκεται παράλληλα με τον κατακόρυφο άξονα-y. Έτσι, απεικονίζονται οι κατανομές κατά μήκος των ευθειών $(x=0 \text{ mm}, z=57 \text{ mm})$, $(x=0 \text{ mm}, z=135 \text{ mm})$, $(x=0 \text{ mm}, z=165 \text{ mm})$, $(x=0 \text{ mm}, z=330 \text{ mm})$ και των ευθειών $(x=57 \text{ mm}, z=0 \text{ mm})$, $(x=135 \text{ mm}, z=0 \text{ mm})$, $(x=165 \text{ mm}, z=0 \text{ mm})$, $(x=330 \text{ mm}, z=0 \text{ mm})$, παράλληλα και κάθετα προς τον αγωγό, αντίστοιχα. Οι ευθείες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 57 mm «τρυπούν» κάθετα τους μεγάλους ελαστομερείς δίσκους, εκείνες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 135 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εσωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης, οι άλλες με 165 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εξωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης και οι τελευταίες με 330 mm βρίσκονται αρκετά μακριά απ' τη διάταξη του μονωτήρα.

Ο τρόπος λήψης των γραφημάτων αυτών φαίνεται, παρουσιάζοντας ενδεικτικά δύο ευθείες, στο ακόλουθο σχήμα. Το σχήμα 4.74 (α) αφορά στην πρώτη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $x=0 \text{ mm}$ και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη-z, άρα και η απόσταση απ' το συνθετικό μονωτήρα. Απ' την άλλη, το σχήμα 4.74 (β) αφορά στη δεύτερη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $z=0 \text{ mm}$ και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη-x, οπότε απομακρύνονται τόσο από το μονωτήρα, όσο και απ' τον αγωγό.

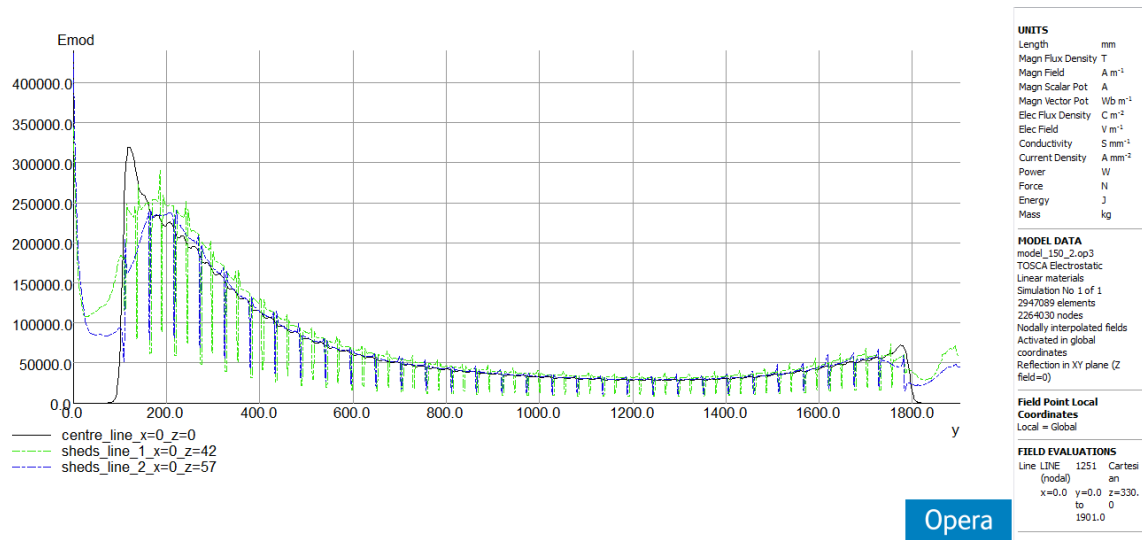


Σχήμα 4.74: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

Πριν την παρουσίαση των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, εκτίθενται δύο επιπλέον διαγράμματα. Στο πρώτο (βλέπε σχήμα 4.75) απεικονίζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα (άξονας-γ, ισοδύναμα ($x=0, z=0$)). Στο δεύτερο (βλέπε σχήμα 4.76) παρουσιάζεται σε κοινούς άξονες η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου τόσο κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα, όσο και κατά μήκος των δύο κατακόρυφων ευθειών ($x=0 \text{ mm}, z=42 \text{ mm}$) και ($x=0 \text{ mm}, z=57 \text{ mm}$), οι οποίες διέρχονται μέσα από τους δίσκους.



Σχήμα 4.75: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα.



Σχήμα 4.76: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα (μαύρη γραφική), της κατακόρυφης ευθείας ($x=0, z=42$) (πράσινη γραφική) και της κατακόρυφης ευθείας ($x=0, z=57$) (μπλε γραφική).

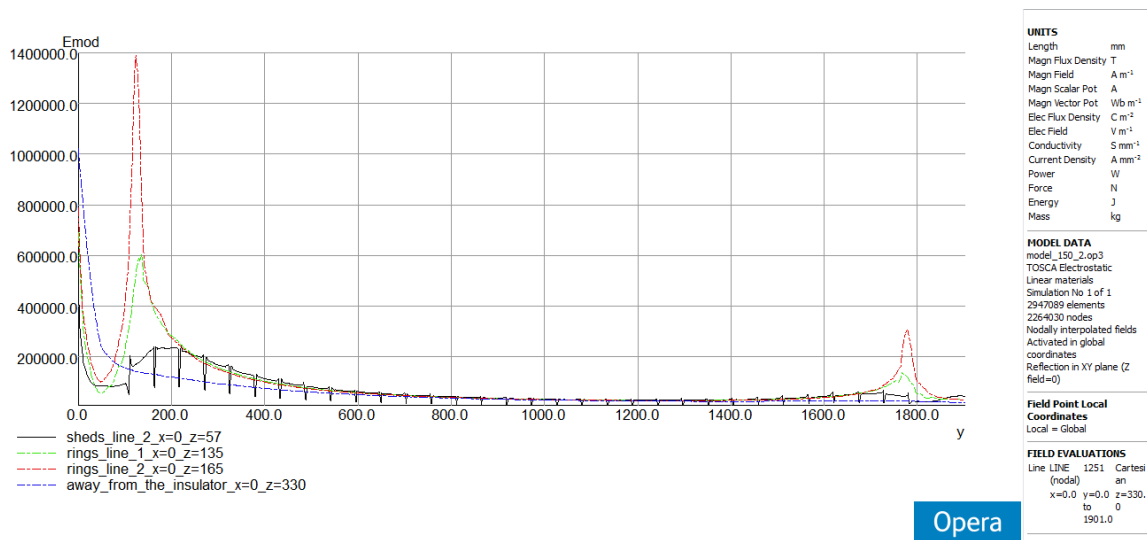
Ο λόγος για την ξεχωριστή αυτή παρουσίαση έχει να κάνει αφ' ενός με το διαφορετικό επίπεδο τιμών της πεδιακής έντασης στις διάφορες περιοχές γύρω απ' το μονωτήρα, αφ' ετέρου με το γεγονός ότι εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η πεδιακή κατανομή πολύ κοντά σ' αυτόν, επομένως η ανάγκη για υψηλή ακρίβεια φαντάζει επιτακτικότερη κατά μήκος των τριών προαναφερθέντων γραμμών. Για τον ίδιο λόγο εξάλλου, το πλέγμα στην περιοχή πλησίον του

μονωτήρα διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα, επομένως η υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με τις πιο απομακρυσμένες περιοχές είναι αναμενόμενη.

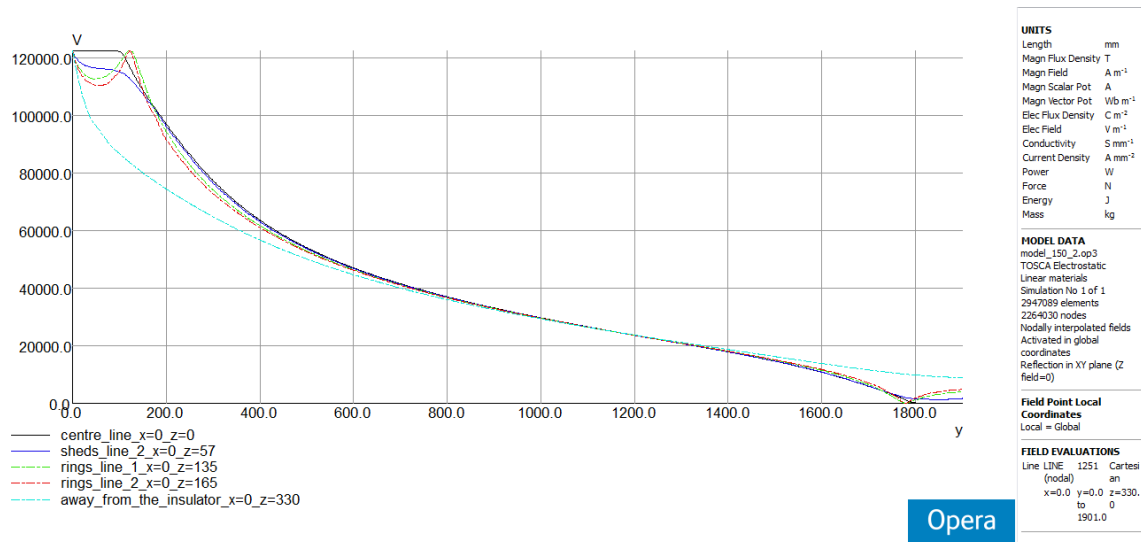
Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει από το σχήμα 4.75, η πεδιακή ένταση κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα εμφανίζει κάποια κυμάτωση, βαίνοντας μειούμενη απ' το ενεργό προς το γειωμένο άκρο, με κάποια μικρή –αλλά ορατή– ανύψωση στο τελευταίο. Η προαναφερθείσα κυμάτωση οφείλεται, όπως και στην περίπτωση του συνθετικού μονωτήρα 150 kV με ίσης διαμέτρου δίσκους, στην επίδραση της γεωμετρίας των ελαστομερών δίσκων στην πεδιακή κατανομή κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα.

Στο σχήμα 4.76 μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη μορφή της πεδιακής κατανομής κατά μήκος δύο κατακόρυφων ευθειών, η πρώτη εκ των οποίων (πράσινη γραφική) διέρχεται τόσο από τους μεγάλους, όσο και από τους μικρούς, η δε δεύτερη (μπλε γραφική) διέρχεται μονάχα απ' τους μεγάλους ελαστομερείς δίσκους του μονωτήρα. Η διαφοροποίηση αυτή είναι προφανής: αρκεί να κανείς να μετρήσει τον αριθμό των βυθίσεων κάθε πεδιακής κατανομής, προκειμένου να βγάλει συμπέρασμα για το πλήθος των δίσκων που «τρυπά» η αντίστοιχη κατακόρυφη ευθεία. Αξιοσημείωτο είναι ότι κατά μήκος τόσο της πράσινης, όσο και της μπλε γραφικής εμφανίζονται έντονες αιχμές· μάλιστα, οι αιχμές της πράσινης βρίσκονται στο μέσον των αιχμών της μπλε γραφικής. Το γεγονός αυτό, το οποίο δεν παρατηρήθηκε στην περίπτωση του συνθετικού μονωτήρα 150 kV με ίσης διαμέτρου δίσκους (βλέπε σχήμα 4.60), οφείλεται στις αποστάσεις από το μονωτήρα των 2 κατακόρυφων ευθειών, κατά μήκος των οποίων λαμβάνονται οι κατανομές: 42 mm για την πράσινη και 57 mm για την μπλε, δηλαδή πολύ κοντά στο χείλος των μικρών και των μεγάλων δίσκων, αντίστοιχα. Έτσι, οι ευθείες αυτές «αγγίζουν» τις σιλικονούχες πτυχώσεις του συνθετικού μονωτήρα, όπου η μετάβαση απ' το ένα υλικό στο άλλο (απ' το SIR στον αέρα και τούμπαλιν) προκαλεί έντονες αυξομειώσεις της πεδιακής έντασης, λόγω της διαφοροποίησης της επιτρεπτότητας ϵ (βλέπε σχέση (4.2)).

Ακολουθεί η πρώτη σειρά διαγραμμάτων των κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.74 (α).



Σχήμα 4.77: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.74 (α).



Σχήμα 4.78: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα και τεσσάρων ακόμη διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.74 (α).

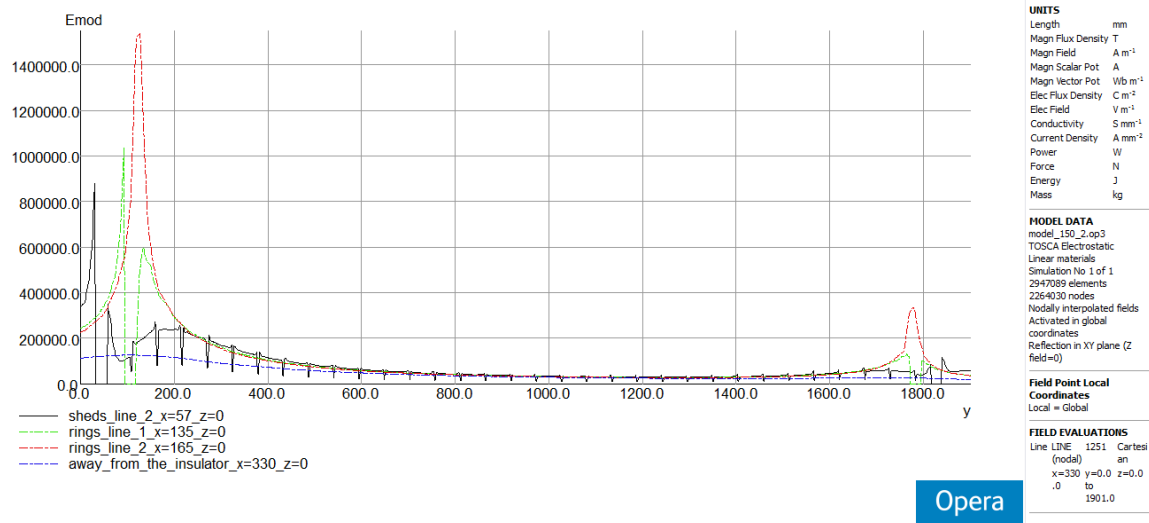
Παρατηρώντας το σχήμα 4.77, διαπιστώνει κανείς ότι η πεδιακή κατανομή κατά μήκος των ελαστομερών δίσκων του μονωτήρα διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα και φαίνεται να είναι αρκετά ομοιόμορφη. Ωστόσο, η κατάσταση διαφοροποιείται σιγά-σιγά καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή αυτή, με αποκορύφωμα τη γραμμή $x=0$ mm, $z=165$ mm, η οποία διέρχεται εφαπτομενικά από τις εξωτερικές επιφάνειες των δύο τοροειδών εξομάλυνσης. Παρουσιάζονται δύο πολύ απότομες κορυφές (κόκκινη γραφική στο σχήμα 4.77). Η μία απ' αυτές είναι αρκετά υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή της έντασης κατά μήκος της ευθείας που «τρυπά» τους δίσκους, περίπου πενταπλάσια· κατ' αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνονται όσα σημειώθηκαν στην υποενότητα 4.2.6, στο αντίστοιχο εδάφιο (βλέπε σχήμα 4.46 και σχολιασμό αυτού).

Όσον αφορά στις κατανομές του δυναμικού του σχήματος 4.78, είναι φανερό πως όσο οι γραμμές βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν τα δύο τοροειδή, οι κατανομές κατά μήκος αυτών είναι αρκετά πανομοιότυπες μεταξύ τους, με κάποιες μικρές διαφορές στις περιοχές πλησίον των δύο άκρων (ενεργού και γειωμένου) της διάταξης. Από την άλλη, μόλις αυξηθεί σημαντικά η απόσταση από το μονωτήρα, έξω από τα τοροειδή, η κατανομή της τάσης γίνεται πολύ πιο ομοιόμορφη και τα μέγιστα επίπεδα αυτής μειώνονται ορατά (γαλάζια γραφική παράσταση).

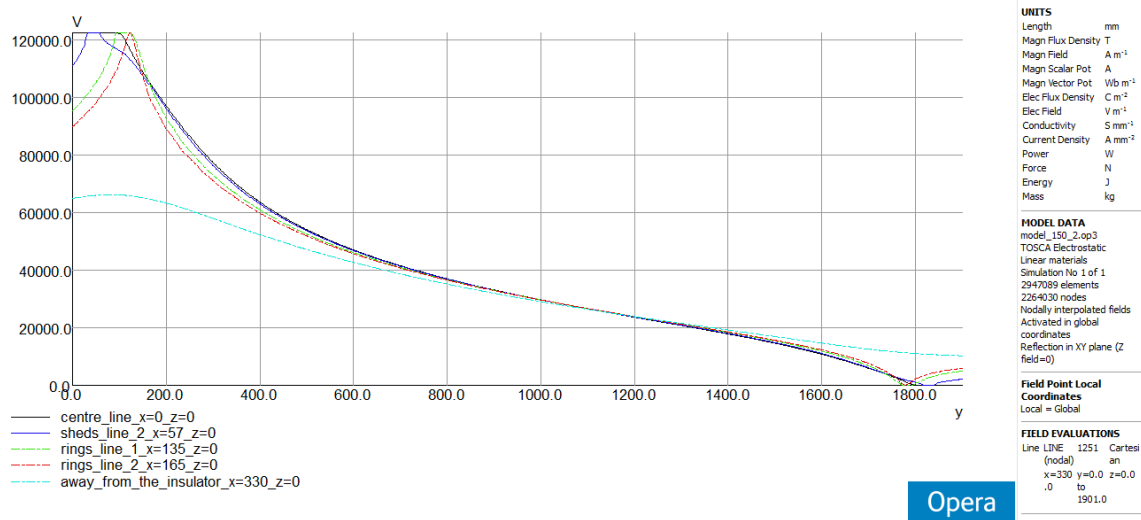
Στα σχήματα 4.79 και 4.80 φαίνεται η δεύτερη σειρά διαγραμμάτων κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.74 (β). Για τα σχήματα αυτά ισχύουν τα όσα σχολιάστηκαν στα σχήματα 4.77 και 4.78, με τις δύο επιπλέον επισημάνσεις που έγιναν στην υποενότητα 4.3.1.1, στα σχήματα 4.63, 4.64.

Ακολουθεί η παρουσίαση ενός επιπέδου-xy (κατακόρυφος θεωρείται ο άξονας-y), επί του οποίου απεικονίζονται με δύο τρόπους η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και με τρεις τρόπους το δυναμικό. Στο σχήμα 4.81 φαίνεται η πεδιακή ένταση μέσω χρωματισμένων περιοχών, ενώ στο σχήμα 4.82 απεικονίζεται το ισόγραμμα το οποίο δείχνει την κατανομή της πεδιακής έντασης στο εσωτερικό και στην περιοχή γύρω απ' το συνθετικό μονωτήρα. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει, με την απομάκρυνση από το ενεργό και προς το γειωμένο άκρο, η ένταση μειώνεται σε γενικές γραμμές. Εντούτοις, στο γειωμένο τοροειδές παρατηρείται μια σημαντική, τοπική αύξηση του πεδίου. Γενικότερα, η πεδιακή ένταση παρουσιάζει αιχμές στις διεπιφάνειες μεταξύ των υλικών που εμφανίζουν πολύ διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες: πρόκειται για τις εξωτερικές επιφάνειες όλων των αγώγιμων (μεταλλικών) μερών, δηλαδή των τοροειδών εξομάλυνσης και του

συνδεδετικού σφαιρικού τμήματος που ενώνει αγωγό και ακροδέκτη Υ.Τ.. Οι αιχμές αυτές προσεγγίζουν εξαιρετικά υψηλές τιμές κοντά στο άκρο Υ.Τ. της διάταξης, όπως άλλωστε αναμένεται.



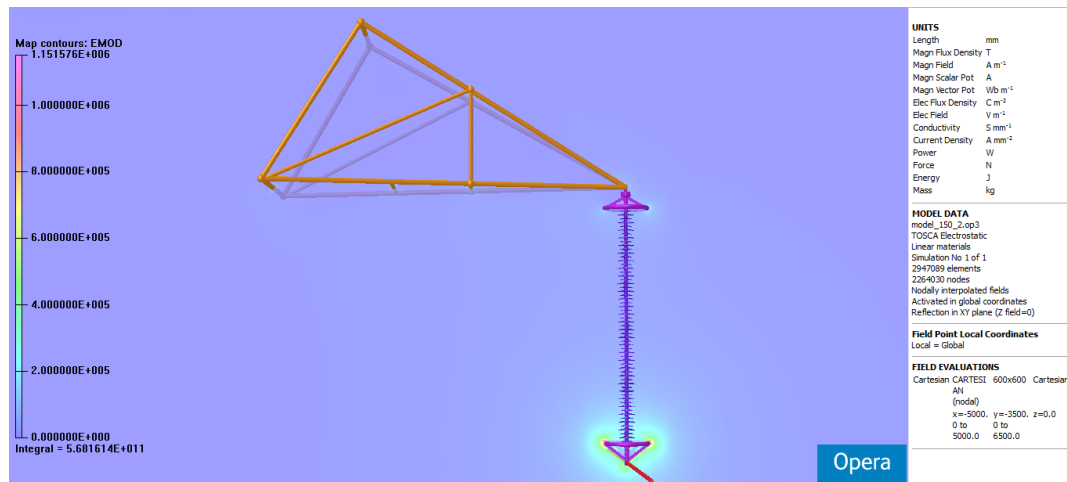
Σχήμα 4.79: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.74 (β).



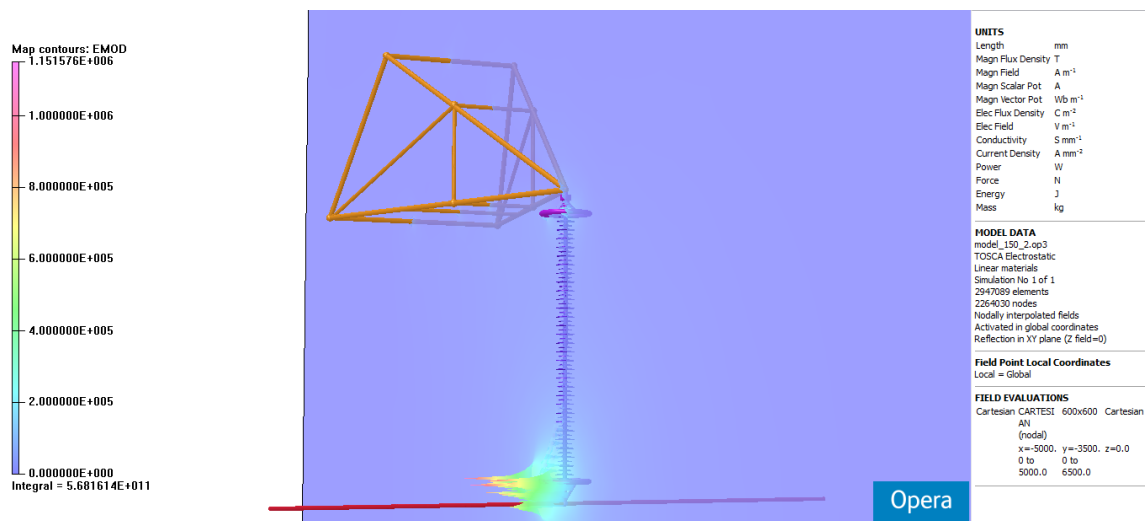
Σχήμα 4.80: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα και τεσσάρων ακόμη διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.74 (β).

Στο σχήμα 4.83 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών, στο σχήμα 4.84 καταγράφονται ορισμένες ισοδυναμικές γραμμές και, τέλος, στο σχήμα 4.85 απεικονίζεται το ιστόγραμμα που δείχνει την κατανομή του δυναμικού τόσο στο εσωτερικό, όσο και στην περιοχή γύρω από το συνθετικό μονωτήρα.

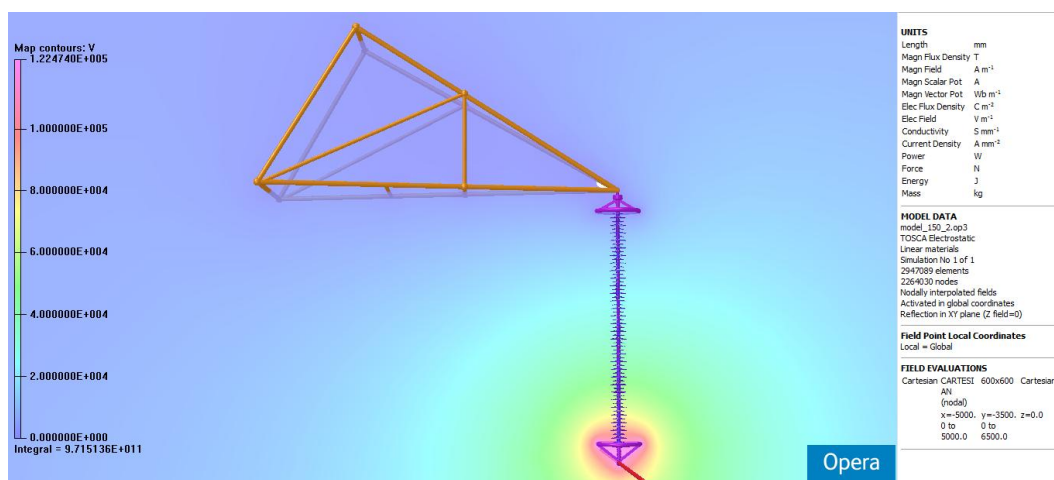
Και τα τρία διαγράμματα επιβεβαιώνουν εκείνο που ήταν αναμενόμενο: ακριβώς πάνω και σε μια περιοχή πολύ κοντά στο άκρο Υ.Τ. το δυναμικό ανέρχεται στα 122474 V, ενώ σταδιακά μειώνεται, καθώς βαινουμε προς το γειωμένο άκρο. Από το ιστόγραμμα δε του σχήματος 4.85 επιβεβαιώνεται η εικόνα της ανομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα.



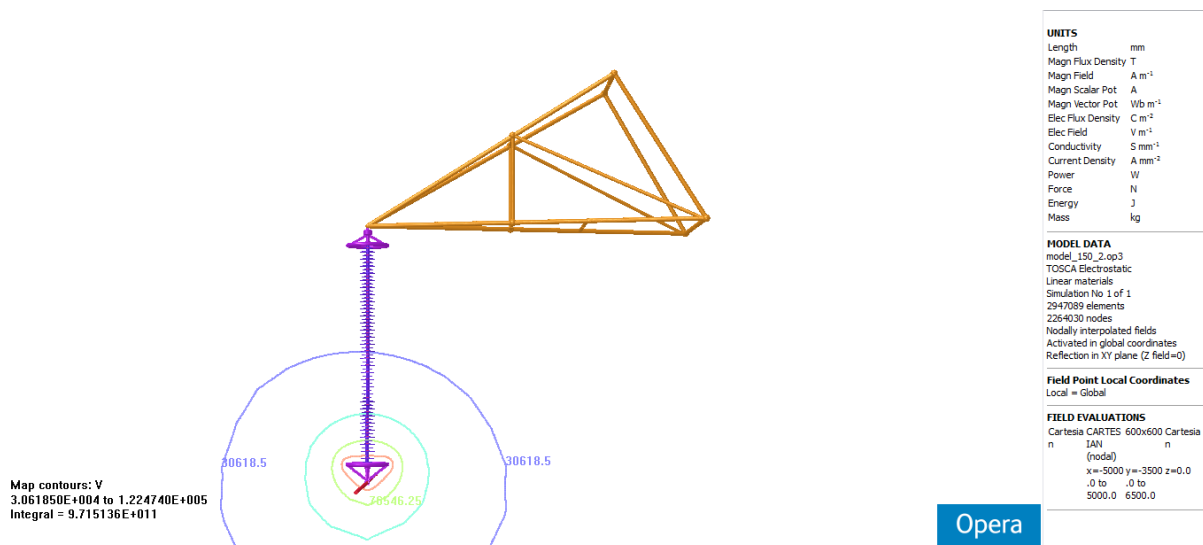
Σχήμα 4.81: Χάρτης ζωνών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.



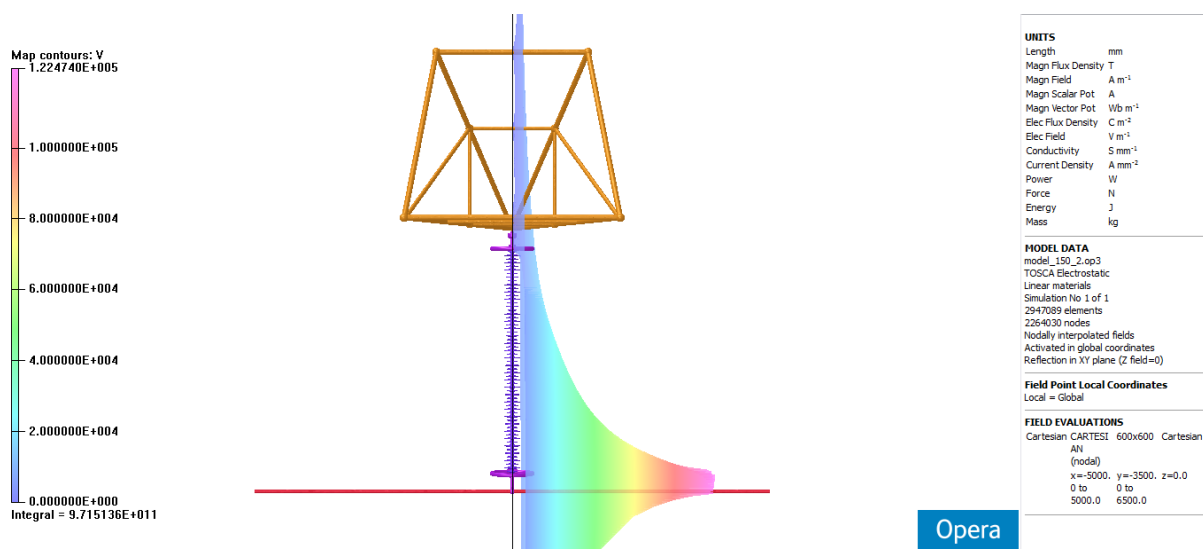
Σχήμα 4.82: Ιστογράμμο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.



Σχήμα 4.83: Χάρτης ζωνών του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.



Σχήμα 4.84: Ισοδυναμικές γραμμές στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.



Σχήμα 4.85: Ιστογράμμα του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα 150 kV, με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί, όπως και σε προηγούμενες υποενότητες, η μορφή των ισοδυναμικών γραμμών του σχήματος 4.84: όσο αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα, σχηματίζονται αιχμές σε ορισμένα σημεία. Οι αιχμές αυτές οφείλονται στη μείωση της πυκνότητας του πλέγματος, που έχει ως άμεση συνέπεια αντίστοιχη μείωση στην ακρίβεια των εξαγόμενων από την προσομοίωση αποτελεσμάτων.

4.3.1.3 Συγκριτικές γραφικές μεταξύ των δύο συνθετικών μονωτήρων 150 kV

Ακολουθούν οι συγκριτικές γραφικές παραστάσεις για τις κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού των δύο συνθετικών μονωτήρων 150 kV που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Λαμβάνονται οι κατανομές κατά μήκος δύο διαφορετικών κατακόρυφων ευθειών, μία για κάθε μοντέλο. Οι

ευθείες αυτές είναι παράλληλες με τον άξονα του μονωτήρα, σύμφωνα με τα σχήματα 4.59 (α) και 4.74 (α), και διέρχονται εφαπτομενικά απ' το χείλος των ελαστομερών δίσκων κάθε μονωτήρα. Η ευθεία γραμμή που αφορά στο μονωτήρα με ίσης διαμέτρου δίσκους είναι η ($x=0$ mm, $z=67$ mm), ενώ εκείνη που αφορά στο μονωτήρα με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους είναι η ($x=0$ mm, $z=57.5$ mm) και διέρχεται απ' το χείλος των μεγάλων δίσκων του μονωτήρα.

Οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τους δύο μονωτήρες 150 kV εκτίθενται ακολούθως σε κοινούς άξονες. Η πεδιακή ένταση αφ' ενός εξαρτάται εξ' ορισμού απ' την απόσταση, αφ' ετέρου αποτελεί το κρίσιμο εκείνο μέγεθος το οποίο ευθύνεται για την πρόκληση ανεπιθύμητων και δυσμενών φαινομένων, όπως η αυξημένη επιφανειακή δραστηριότητα, οι «στεμματοειδείς» φωτεινές μερικές εκκενώσεις (corona) και η υπερπήδηση του μονωτήρα. Για τους λόγους αυτούς δεν πραγματοποιείται καμία αναγωγή ούτε στον οριζόντιο ούτε στον κατακόρυφο άξονα και οι θεωρούμενες φυσικές μονάδες είναι σε [mm] και [V/m], αντίστοιχα.

Όσον αφορά στις κατανομές του δυναμικού, έχει νόημα η αναγωγή του οριζόντιου άξονα σε [%] τιμές του αξονικού μήκους κάθε μονωτήρα, προκειμένου να καταδειχθεί ο βαθμός ομοιομορφίας κάθε περίπτωσης.

Επομένως, καθίσταται μ' αυτό τον τρόπο εφικτή η συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε κοινούς άξονες. Σε κάθε διάγραμμα, η κόκκινη συνεχής γραφική (insulator 1) αντιπροσωπεύει το συνθετικό μονωτήρα με ίσης διαμέτρου δίσκους και η μπλε διακεκομμένη γραφική (insulator 2) το συνθετικό μονωτήρα με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους.

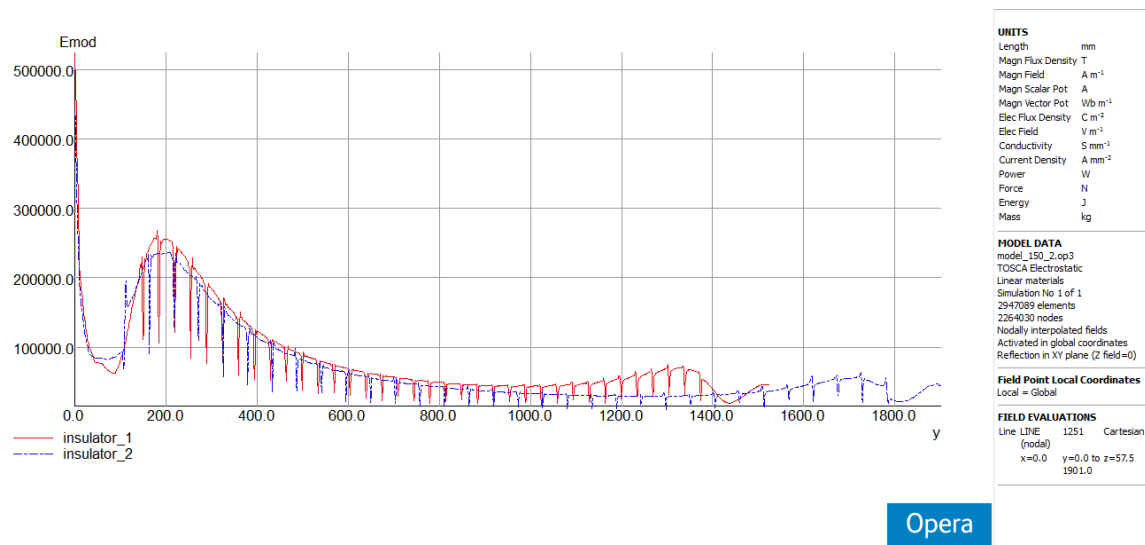
Από το σχήμα 4.86, φαίνεται ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των κατακόρυφων ευθειών παρουσιάζει απότομες βυθίσεις εκεί που οι γραμμές «γλείφουν» τους ελαστομερείς δίσκους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σιλικονούχο καουτσούκ (SIR), από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι δίσκοι, έχει μεγαλύτερη σχετική διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με τον περιβάλλοντα αέρα (4.3 έναντι 1.0), οπότε η πεδιακή ένταση μειώνεται, καθώς η γραμμή διέρχεται μέσα από το μονωτικό αυτό υλικό (σχέση (4.2)). Επιπλέον, όπως φαίνεται απ' το ίδιο σχήμα, η κατανομή της πεδιακής έντασης για το μονωτήρα με δίσκους ίσης διαμέτρου τερματίζει νωρίτερα, απ' ότι εκείνη για το μονωτήρα με δίσκους διαφορετικής διαμέτρου (κόκκινη έναντι μπλε γραφικής παράστασης), λόγω του μικρότερου συνολικού μήκους του μονωτήρα αυτού (1524 mm έναντι 1901 mm).

Η εικόνα των πεδιακών κατανομών του σχήματος 4.86 υποδεικνύει ότι χαμηλότερα επίπεδα τιμών πεδιακής έντασης και περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζει ο συνθετικός μονωτήρας με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους. Πράγματι, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας γραμμής ($x=0$ mm, $z=57.5$ mm) παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές σχεδόν καθ' όλο το μήκος της (insulator 2-μπλε διακεκομμένη γραφική), σε σύγκριση με την πεδιακή ένταση κατά μήκος της ευθείας γραμμής ($x=0$ mm, $z=67$ mm) (insulator 1-κόκκινη συνεχής γραφική).

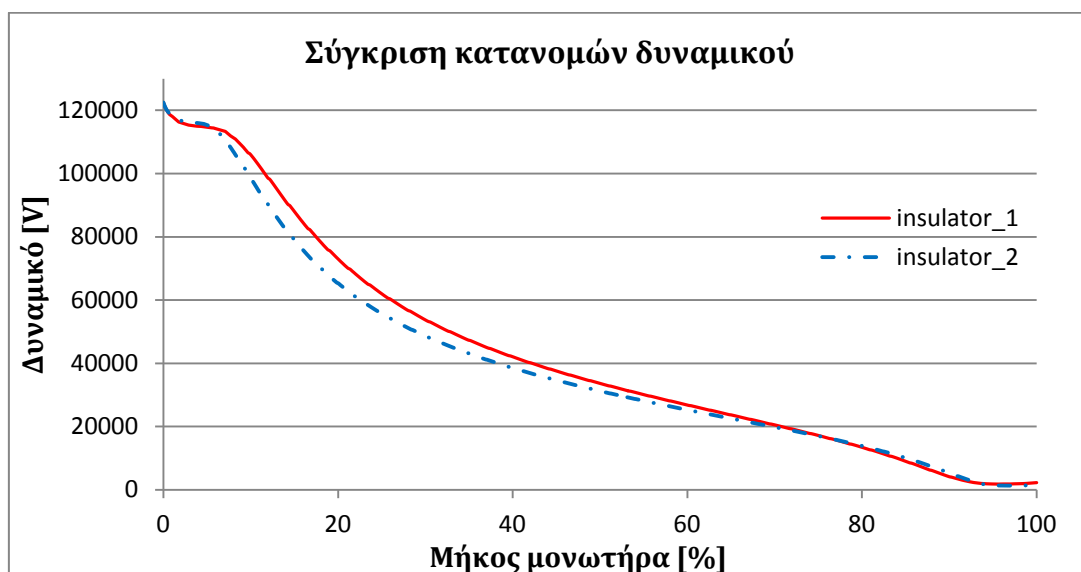
Εντούτοις, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς απ' σχήμα 4.87, η εικόνα δείχνει να αλλάζει στην περίπτωση των κατανομών δυναμικού και δεν εξάγονται ποιοτικά αντίστοιχα συμπεράσματα. Πράγματι, από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους είναι περισσότερο ανομοιόμορφη, σε σχέση με την αντίστοιχη του μονωτήρα με ίσης διαμέτρου δίσκους.

Η εικόνα αυτή δείχνει, με μια πρώτη ματιά, αντιφατική, αφού θα περίμενε κανείς ότι η ανομοιομορφία της κατανομής του δυναμικού θα ακολουθείτο και στην περίπτωση της πεδιακής έντασης με την ίδια σειρά, δηλαδή με την εμφάνιση κάποιας κορυφής στην μπλε διακεκομμένη

γραφική παράσταση, η οποία θα υπερέβαινε την αντίστοιχη κορυφή της κόκκινης συνεχούς γραφικής παράστασης. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει.



Σχήμα 4.86: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των κατακόρυφων ευθειών ($x=0, z=67$) (κόκκινη συνεχής γραφική) και ($x=0, z=57.5$) (μπλε διακεκομμένη γραφική παράσταση), οι οποίες διέρχονται από το χείλος των ελαστομερών δίσκων κάθε συνθετικού μονωτήρα.



Σχήμα 4.87: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των κατακόρυφων ευθειών ($x=0, z=67$) (κόκκινη συνεχής γραφική) και ($x=0, z=57.5$) (μπλε διακεκομμένη γραφική παράσταση), οι οποίες διέρχονται από το χείλος των ελαστομερών δίσκων κάθε συνθετικού μονωτήρα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθούν δύο σημαντικές παρατηρήσεις, με τη βοήθεια των οποίων εξηγείται η αντίφαση των παραπάνω διαγραμμάτων:

✚ Πρώτον, στην περίπτωση κατά την οποία το μήκος ανάρτησης από το γειωμένο πυλώνα αυξάνει, ο λόγος των παράσιτων χωρητικότητων ως προς γη και ως προς τον αγωγό Υ.Τ. αναμένεται να αυξηθεί. Γενικά, όσο αυξάνει ο λόγος C_e/C_h (όπου C_e η παράσιτη ως προς γη χωρητικότητα και C_h η παράσιτη ως προς τον αγωγό φάσης χωρητικότητα), τόσο περισσότερο ανομοιόμορφη τείνει να γίνει η κατανομή του δυναμικού. Ο όρος C_e αποτελείται από δύο συνιστώσες: την παράσιτη

χωρητικότητα ως προς τον πυλώνα και την παράσιτη χωρητικότητα ως προς το γειωμένο επίπεδο. Η δεύτερη είναι αυτή που κυριαρχεί στον όρο C_e . Ωστόσο, αύξηση του μήκους του μονωτήρα δεν αλλάζει επί της ουσίας τον όρο αυτό, αφού η απόσταση από το γειωμένο επίπεδο, άρα και η παράσιτη ως προς αυτό χωρητικότητα, παραμένει πρακτικά η ίδια. Αντίθετα, ο όρος C_h μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση του μήκους του μονωτήρα. Πράγματι, η απόσταση από τον αγωγό Υ.Τ. αυξάνεται αρκετά στην περίπτωση του μονωτήρα μεγαλύτερου μήκους, οπότε η παράσιτη χωρητικότητα C_h μειώνεται αισθητά και ο λόγος C_e/C_h γίνεται μεγαλύτερος. Επομένως, στην περίπτωση μεγαλύτερου μήκους μονωτήρα αναμένεται κατανομή δυναμικού, η οποία να παρουσιάζει εντονότερη ανομοιομορφία.

✚ Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρία και τις διαστάσεις του υπό μελέτη μοντέλου.

Με βάση τις δύο παραπάνω επισημάνσεις, δικαιολογείται η περισσότερο ανομοιομορφή κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους (μπλε διακεκομμένη γραφική). Εντούτοις, η αύξηση του μήκους του, σε σχέση με τον πρώτο μονωτήρα, δεν είναι και τόσο αξιόλογη. Επιπλέον, το μεγαλύτερο πλήθος δίσκων (άρα και μεγαλύτερο μήκος ερπυσμού), η διαφορετική διάμετρος αυτών, καθώς και η διαφορετική απόσταση μεταξύ των μεγαλύτερων δίσκων, καθιστούν τη γεωμετρία του μονωτήρα αυτού πολύ διαφορετική από εκείνη του μονωτήρα με ίσης διαμέτρου δίσκους, επομένως η εικόνα των πεδιακών κατανομών αναμένεται να διαφοροποιείται από τις κατανομές του δυναμικού.

4.3.2 Συνθετικοί μονωτήρες ανάρτησης 400 kV

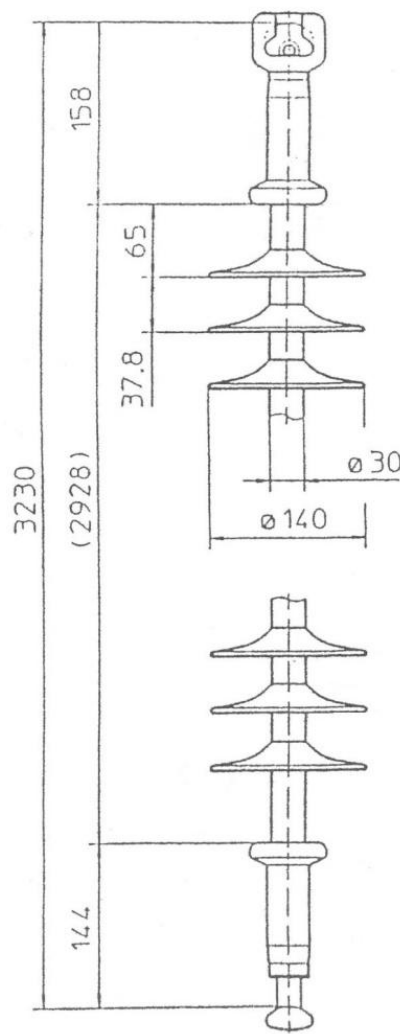
Οι δύο συνθετικοί μονωτήρες των 400 kV, των οποίων οι προσομοιώσεις παρουσιάζονται παρακάτω, χρησιμοποιούνται σε κάποιο από τα υπάρχοντα ελληνικά συστήματα μεταφοράς των 400 kV. Στον ακροδέκτη Υ.Τ. αυτών τοποθετείται συνδετικό πιάτο με διπλό αγωγό, ο οποίος αναπαριστά κάποια πλευρική φάση, ενώ ο γειωμένος ακροδέκτης τους συνδέεται με τμήμα διάταξης πυλώνα.

Το μήκος του διπλού αγωγού λαμβάνεται ίσο προς το διπλάσιο του συνολικού μήκους του εκάστοτε μονωτήρα, η διάμετρος δε κάθε επιμέρους αγωγού είναι ίση προς 30.42 mm. Η απόσταση μεταξύ των δύο αγωγών είναι 400 mm και το τμήμα του πυλώνα που χρησιμοποιείται είναι ίδιο με εκείνο της ενότητας 4.2.6, θεωρώντας ότι η μετάβαση από τα 345 kV στα 400 kV δεν επιφέρει αξιόλογες μεταβολές στις αποστάσεις μόνωσης των γραμμών, άρα και στις αντίστοιχες διαμορφώσεις των πυλώνων. Τα δύο τοροειδή εξομάλυνσης, τα οποία χρησιμοποιούνται σε κάθε μοντέλο, έχουν εξωτερική διάμετρο ίση με 498 mm, ενώ το διαμέτρημα του σωλήνα αυτών ανέρχεται στα 48 mm.

Οι δύο συνθετικοί μονωτήρες των 400 kV που προσομοιώνονται είναι πανομοιότυποι: διαθέτουν δίσκους ίδιας διαμέτρου και ακροδέκτες ίδιων διαστάσεων. Διαφέρουν ως προς το πλήθος των δίσκων και τα συνακόλουθα μήκη ερπυσμού. Προκειμένου να διακρίνονται τα δύο μοντέλα στην παρούσα εργασία, κατηγοριοποιούνται ως «μικρού μήκους» και «μεγάλου μήκους».

4.3.2.1 Συνθετικός μονωτήρας «μικρού μήκους» 400 kV

Το πρώτο μοντέλο των 400 kV που παρουσιάζεται αφορά σε έναν συνθετικό μονωτήρα συνολικού μήκους 3230 mm. Το μήκος ερπυσμού του είναι 10350 mm, ενώ το αμιγώς μονωτικό τμήμα έχει μήκος 2928 mm. Ο μονωτήρας αποτελείται από 75 ελαστομερείς δίσκους, καθένας εκ των οποίων έχει διάμετρο ίση προς 140 mm και το βήμα τους είναι 37.8 mm. Η διάμετρος του σιλικονούχου περιβλήματος είναι 30 mm και εκείνη της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες εποξικής ράβδου 20 mm. Η γεωμετρία του μονωτήρα με τα βασικότερα χαρακτηριστικά του φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

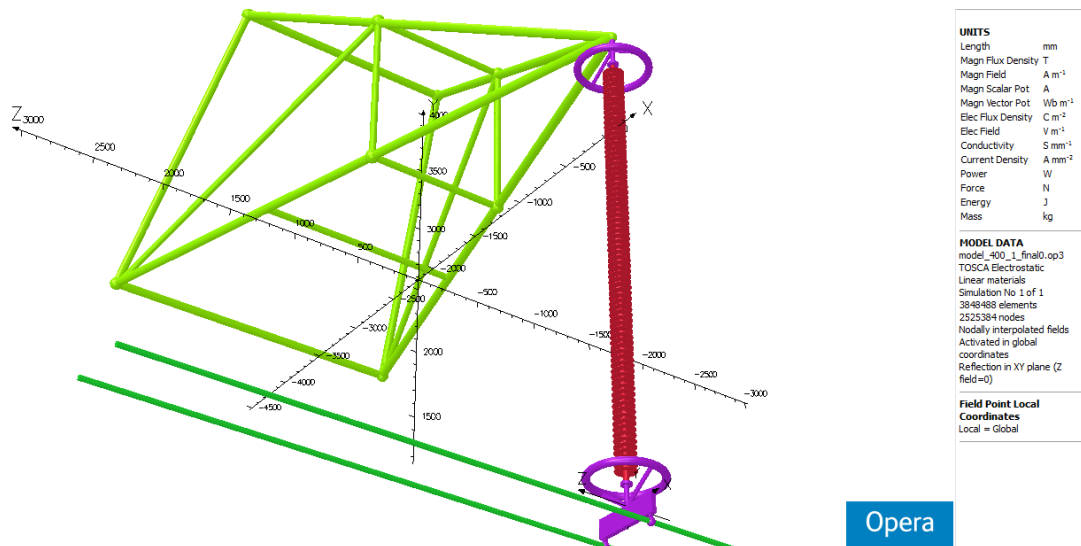


Σχήμα 4.88: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400 kV.

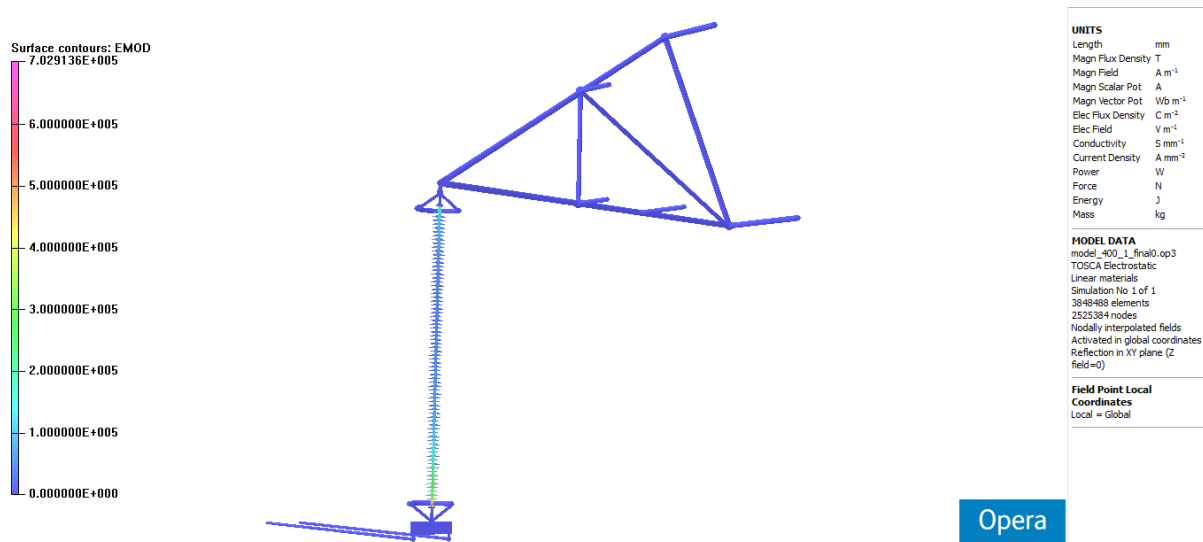
Η εικόνα του μοντέλου, όπως αυτό προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αφού αποκαταστάθηκε η πλήρης συμμετρία και αφαιρέθηκε το background που αναπαριστά τον «άπειρων» διαστάσεων χώρο.

Στα σχήματα 4.90 και 4.91 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα. Οι κατανομές αυτές παρουσιάζονται για την $\frac{1}{2}$ γεωμετρία μόνο του μοντέλου. Ο λόγος για τη μορφή της παρουσίασης αυτής αφ' ενός πηγάζει

απ' την πολυπλοκότητα και το μέγεθος του μοντέλου, το οποίο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τα έως τώρα παρουσιασθέντα, αφ' ετέρου έχει να κάνει και με τα όρια των δυνατοτήτων του προγράμματος προσομοίωσης, καθώς και τους υπολογιστικούς «φραγμούς» του ίδιου του Η/Υ στον οποίο υλοποιούνται όλες οι προσομοιώσεις. Οι προδιαγραφές και οι ιδιότητες τόσο του λειτουργικού συστήματος, όσο και του CPU και της μνήμης αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.89: Εικόνα του μοντέλου από το Μετ-Επεξεργαστή.

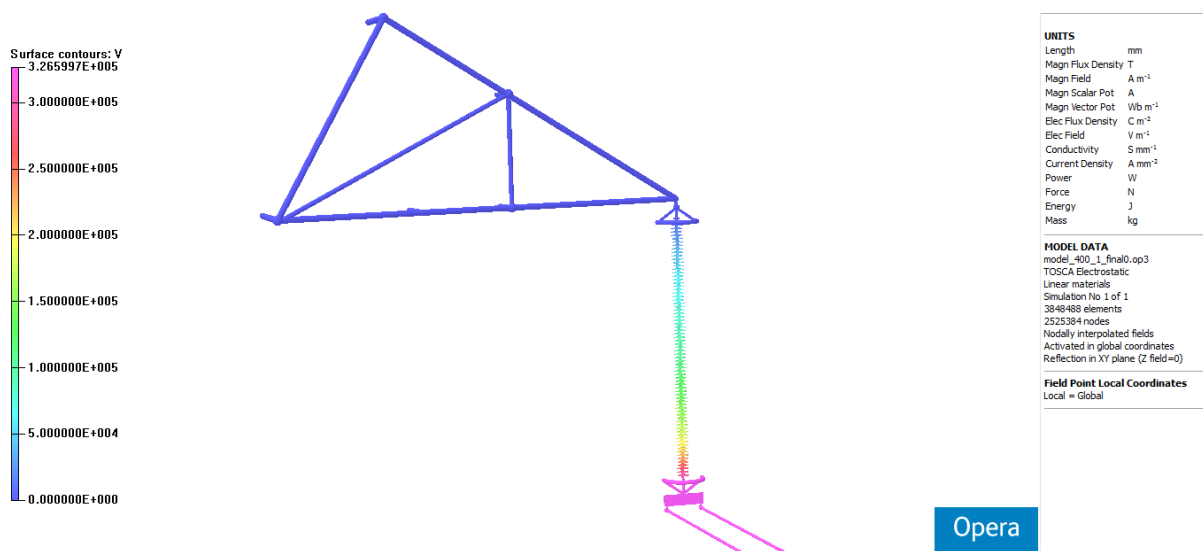


Σχήμα 4.90: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $E_{mod} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ στην επιφάνεια του ½ μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400 kV.

Όπως επιβεβαιώνεται από την επιφανειακή κατανομή του σχήματος 4.90, το ηλεκτρικό πεδίο μεγιστοποιείται σε μια περιοχή του περιβλήματος λίγο μετά το τοροειδές εξομάλυνσης του άκρου Υ.Τ., ενώ παρατηρείται κάποια ανύψωση της πεδιακής έντασης καθώς βαινουμε προς το γειωμένο ακροδέκτη. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μηδενίζεται στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών του μοντέλου, όπως προφανώς αναμενόταν.

Όσον αφορά στο δυναμικό (βλέπε σχήμα 4.91), αυτό δείχνει να μειώνεται κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, με κατεύθυνση από τον αγωγό προς το γειωμένο πυλώνα, κάτι που ασφαλώς ήταν αναμενόμενο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα, καθένα από τα οποία εμπεριέχει γραφικές παραστάσεις, στις οποίες απεικονίζονται οι κατανομές τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού κατά μήκος διαφορετικών κατακόρυφων ευθειών. Όπως και στην υποενότητα 4.2.6, καθώς και στις υποενότητες 4.3.1.1 και 4.3.1.2, οι οποίες αφορούσαν στα μοντέλα των 150 kV, εξετάζεται η μορφή των κατανομών καθώς αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα. Έτσι, λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων: μία για την παράλληλη με τον αγωγό (άρα και με τον άξονα-z) απομάκρυνση απ' το μονωτήρα και μία δεύτερη για την απομάκρυνση τόσο απ' τον αγωγό, όσο και απ' το μονωτήρα (παράλληλα δηλαδή με τον άξονα-x).



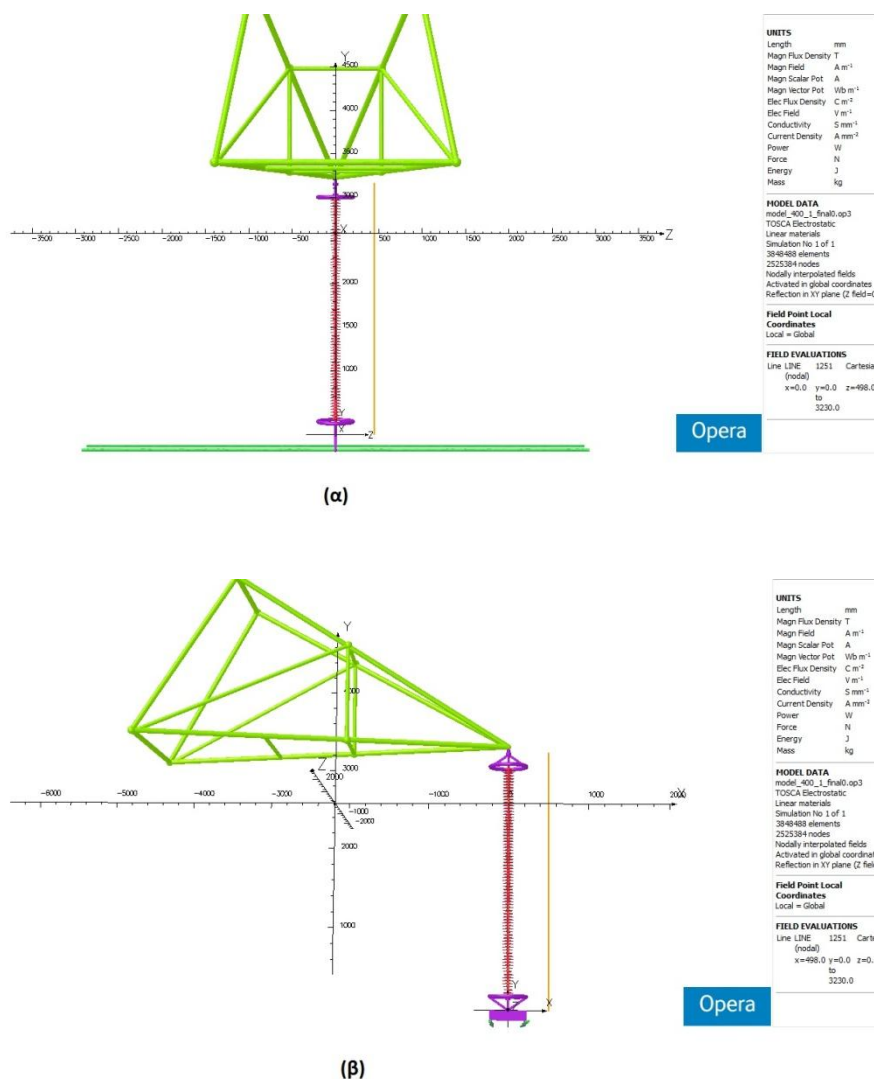
Σχήμα 4.91: Κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του ½ μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400 kV.

Οι διάφορες ευθείες γραμμές, κατά μήκος των οποίων λαμβάνονται οι κατανομές, θεωρούνται ως οι τομές των αντίστοιχων επιπέδων και συμβολίζονται με τα αντίστοιχα ζεύγη συντεταγμένων. Υπενθυμίζεται ότι ως οριζόντιο επίπεδο έχει ληφθεί το επίπεδο-xz, ενώ ο μονωτήρας βρίσκεται παράλληλα με τον κατακόρυφο άξονα-y. Έτσι, απεικονίζονται οι κατανομές κατά μήκος των ευθειών (x=0 mm, z=60 mm), (x=0 mm, z=201 mm), (x=0 mm, z=249 mm), (x=0 mm, z=498 mm) και των ευθειών (x=60 mm, z=0 mm), (x=201 mm, z=0 mm), (x=249 mm, z=0 mm), (x=498 mm, z=0 mm), παράλληλα και κάθετα προς τον αγωγό, αντίστοιχα. Οι ευθείες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 60 mm «τρυπούν» κάθετα τους ελαστομερείς δίσκους, εκείνες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 201 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εσωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης, οι άλλες με 249 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εξωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης και οι τελευταίες με 498 mm βρίσκονται αρκετά μακριά απ' τη διάταξη του μονωτήρα.

Ο τρόπος λήψης των γραφημάτων αυτών φαίνεται, παρουσιάζοντας ενδεικτικά δύο ευθείες, στο ακόλουθο σχήμα. Το σχήμα 4.92 (α) αφορά στην πρώτη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά x=0 mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη-z, άρα και η απόσταση απ' το συνθετικό μονωτήρα. Απ' την άλλη, το σχήμα 4.92 (β) αφορά στη δεύτερη σειρά γραφημάτων, στα

οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $z=0$ mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη- x , οπότε απομακρύνονται τόσο από το μονωτήρα, όσο και απ' τον αγωγό.

Πριν την παρουσίαση των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων, εκτίθεται σε κοινούς άξονες η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου τόσο κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα, όσο και κατά μήκος της ευθείας $x=0$ mm, $z=60$ mm, η οποία διέρχεται μέσα από τους δίσκους (βλέπε σχήμα 4.93). Ο λόγος για την ξεχωριστή αυτή παρουσίαση έχει να κάνει αφ' ενός με το διαφορετικό επίπεδο τιμών της πεδιακής έντασης στις διάφορες περιοχές γύρω απ' το μονωτήρα, αφ' ετέρου με το γεγονός ότι εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η πεδιακή κατανομή πολύ κοντά σ' αυτόν, επομένως η ανάγκη για υψηλή ακρίβεια φαντάζει επιτακτικότερη κατά μήκος των δύο προαναφερθέντων γραμμών. Για τον ίδιο λόγο εξάλλου, το πλέγμα στην περιοχή πλησίον του μονωτήρα διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα, επομένως η υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με τις πιο απομακρυσμένες περιοχές είναι αναμενόμενη.

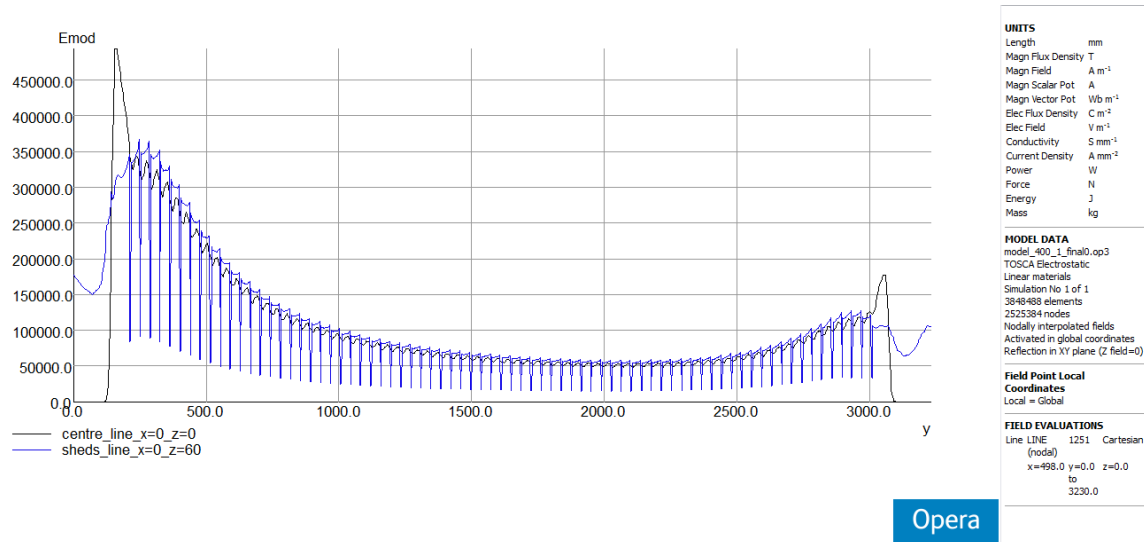


Σχήμα 4.92: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

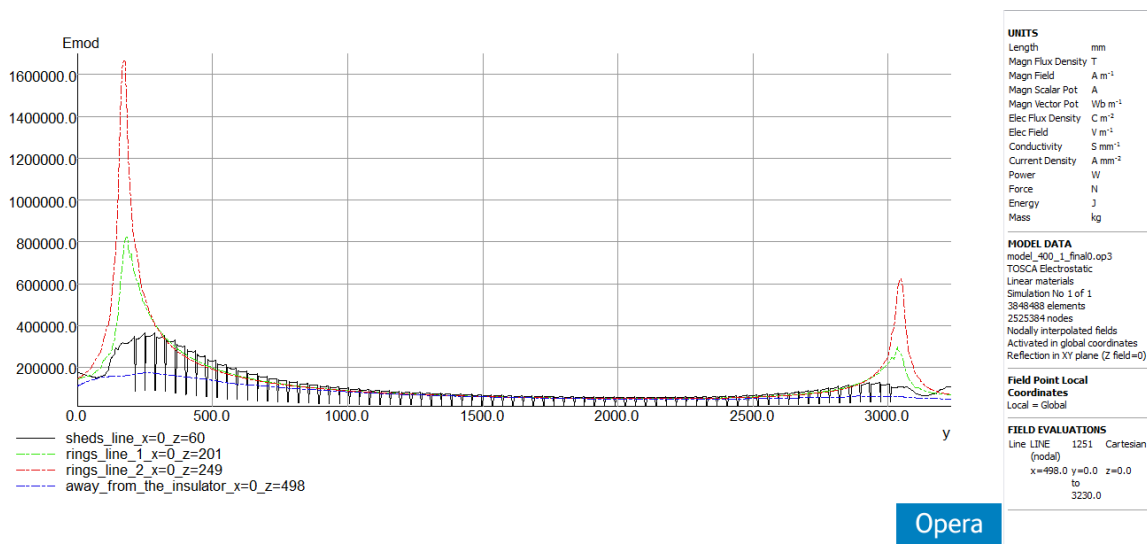
Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από το σχήμα 4.93, η πεδιακή ένταση κατά μήκος των δύο κατακόρυφων ευθειών παρουσιάζει εμφανή κυμάτωση, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη των ελαστομερών δίσκων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στα σημεία του άξονα στα οποία η ένταση

της μαύρης γραφικής αυξομειώνεται με χαρακτηριστικά ομαλό τρόπο, η ένταση της μπλε γραφικής καταγράφει ακαριαίες αυξομειώσεις. Οι «βυθίσεις» αυτές, ο αριθμός των οποίων ισούται με το πλήθος των δίσκων του μονωτήρα (75), εξηγούνται με τη βοήθεια της σχέσης (4.2) και των αντίστοιχων σχολιασμών που αφορούσαν στο συνθετικό μονωτήρα των 345 kV του άρθρου [41].

Στα σχήματα 4.94 και 4.95 παρουσιάζεται η πρώτη σειρά διαγραμμάτων των κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.92 (α).



Σχήμα 4.93: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα (μαύρη γραφική) και της κατακόρυφης ευθείας γραμμής ($x=0, z=60$) (μπλε γραφική).

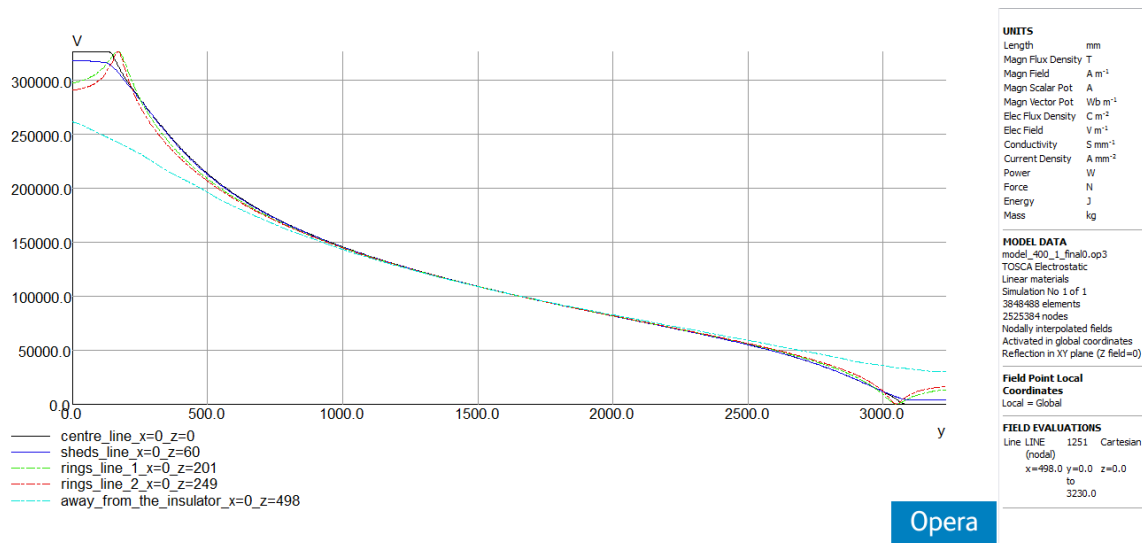


Σχήμα 4.94: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.92 (α).

Παρατηρώντας το σχήμα 4.94 διαπιστώνει κανείς ότι, παρά την ομοιομορφία και τα χαμηλά επίπεδα στα οποία διατηρείται η πεδιακή κατανομή κατά μήκος των ελαστομερών δίσκων του μονωτήρα, εντούτοις η κατάσταση διαφοροποιείται σιγά-σιγά καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή αυτή, με αποκορύφωμα τη γραμμή $x=0, z=249$ mm, η οποία διέρχεται εφάπτομενικά από τις εξωτερικές επιφάνειες των δύο τορρειδών εξομάλυνσης. Παρουσιάζονται δύο πολύ

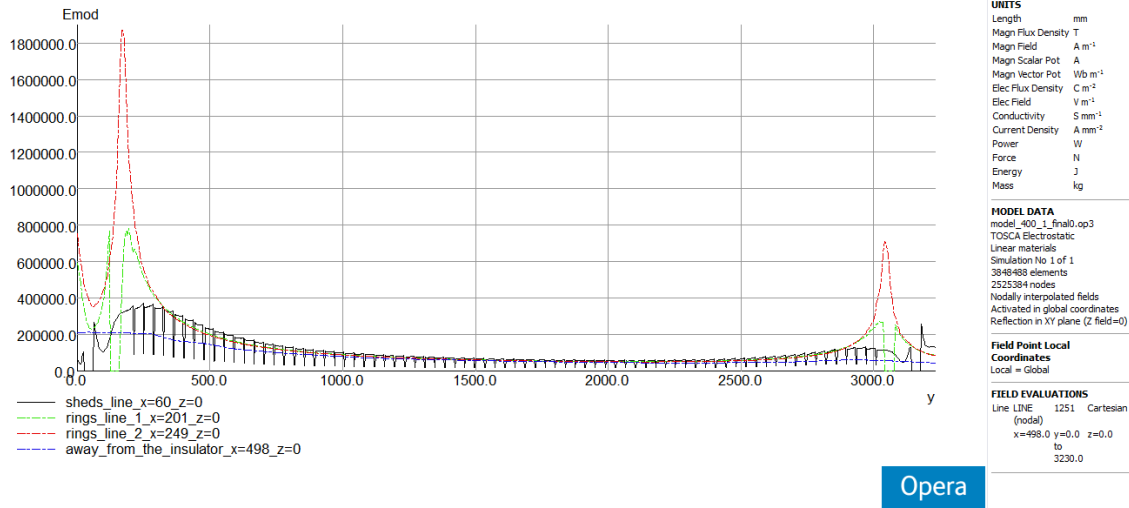
απότομες κορυφές (κόκκινη γραφική στο σχήμα 4.94). Η μία απ' αυτές είναι αρκετά υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή της έντασης κατά μήκος της ευθείας που «τρυπά» τους δίσκους, περίπου τετραπλάσια· κατ' αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνονται όσα σημειώθηκαν στην υποενότητα 4.2.6, στο αντίστοιχο εδάφιο (βλέπε σχήμα 4.46 και σχολιασμό αυτού).

Όσον αφορά στις κατανομές του δυναμικού του σχήματος 4.95, είναι φανερό πως όσο οι γραμμές βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν τα δύο τοροειδή, οι κατανομές κατά μήκος αυτών είναι αρκετά πανομοιότυπες μεταξύ τους, με κάποιες μικρές διαφορές στις περιοχές πλησίον των δύο άκρων (ενεργού και γειωμένου) της διάταξης. Από την άλλη, μόλις αυξηθεί σημαντικά η απόσταση από το μονωτήρα, έξω από τα τοροειδή, η κατανομή της τάσης γίνεται πολύ πιο ομοιόμορφη και τα μέγιστα επίπεδα αυτής μειώνονται ορατά (γαλάζια γραφική παράσταση).



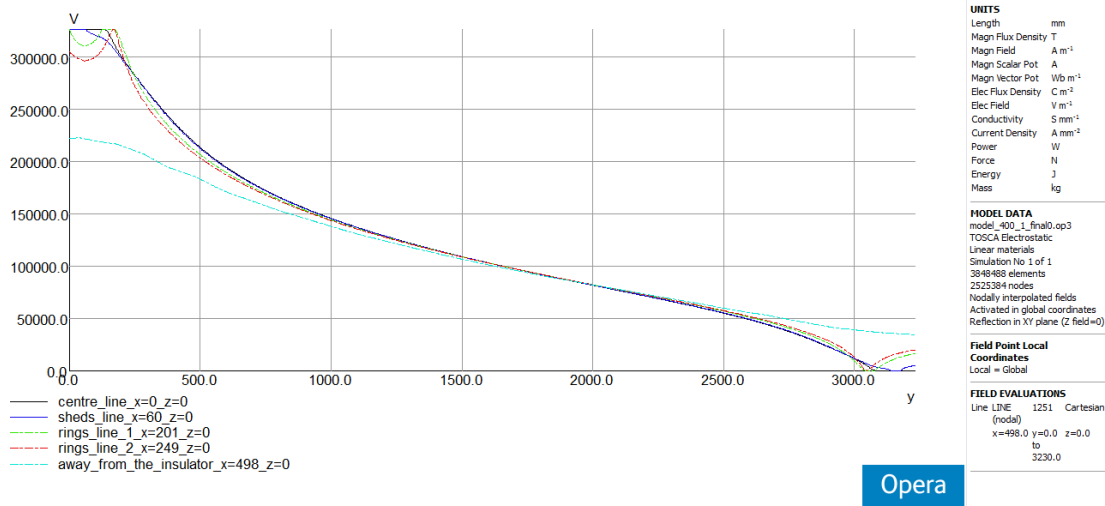
Σχήμα 4.95: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα και τεσσάρων ακόμη διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.92 (α).

Στα σχήματα 4.96, 4.97 παρουσιάζεται η δεύτερη σειρά διαγραμμάτων των κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.92 (β). Για τα σχήματα ισχύουν τα όσα σχολιάστηκαν στα σχήματα 4.94 και 4.95, με τις δύο επιπλέον επισημάνσεις που έγιναν στην υποενότητα 4.3.1.1, στα σχήματα 4.63, 4.64.

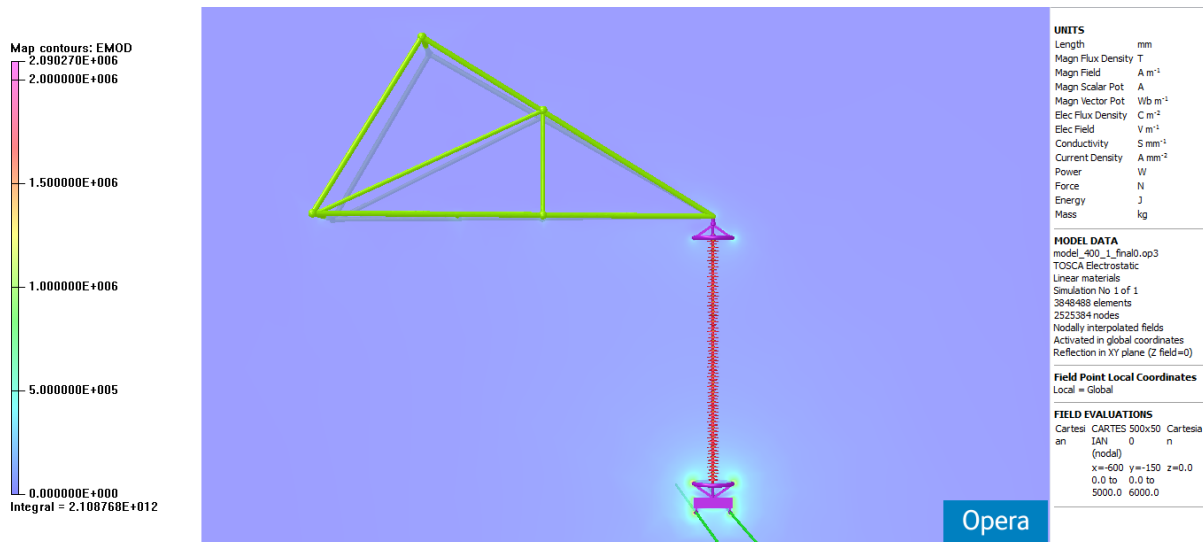


Σχήμα 4.96: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.92 (β).

Στη συνέχεια, απεικονίζονται πάνω σ' ένα επίπεδο-xy (κατακόρυφος θεωρείται ο άξονας-y) η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό, με δύο και τρεις τρόπους, αντίστοιχα.

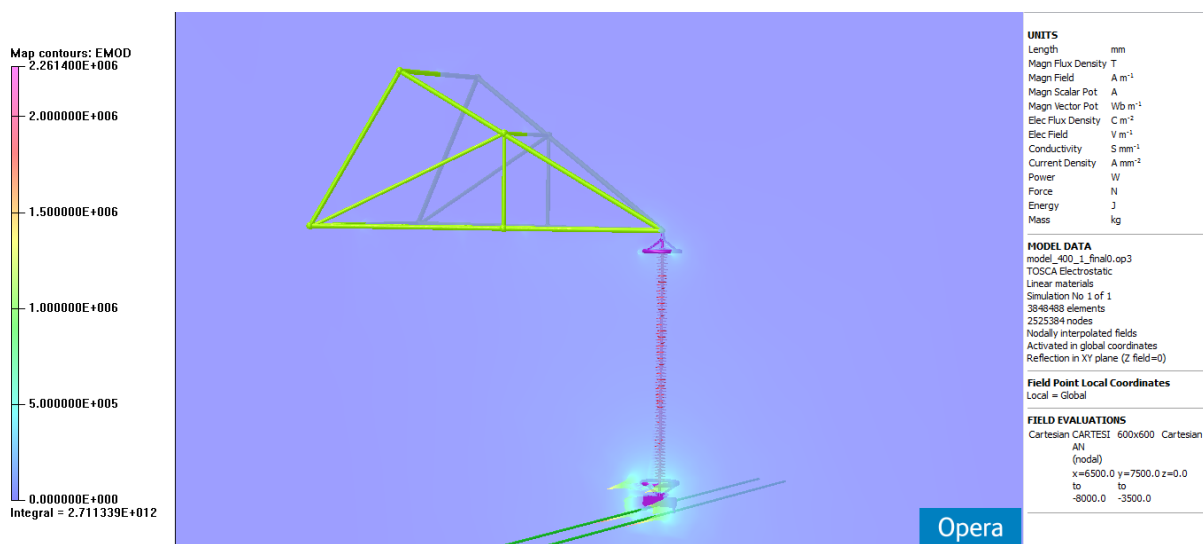


Σχήμα 4.97: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα και τεσσάρων ακόμη διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.92 (β).

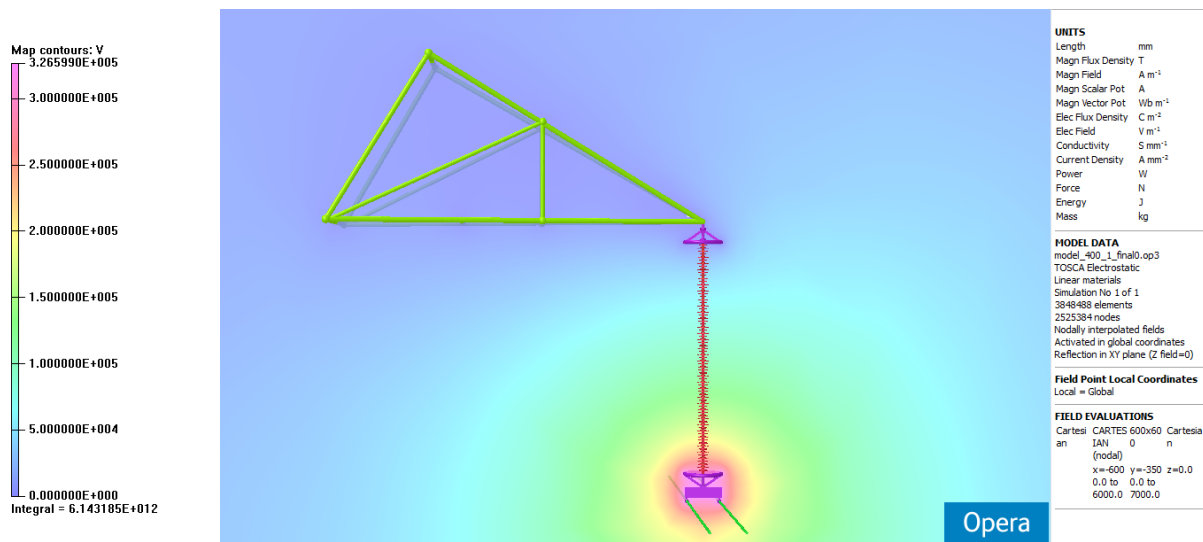


Σχήμα 4.98: Χάρτης ζωνών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400kV.

Στο σχήμα 4.98 φαίνεται η πεδιακή ένταση μέσω χρωματισμένων περιοχών, ενώ στο σχήμα 4.99 απεικονίζεται το ιστόγραμμα το οποίο δείχνει την κατανομή της πεδιακής έντασης στο εσωτερικό και στην περιοχή γύρω απ' το συνθετικό μονωτήρα. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει, με την απομάκρυνση από το ενεργό και προς το γειωμένο άκρο, η ένταση μειώνεται σε γενικές γραμμές. Εντούτοις, στο γειωμένο τοροειδές παρατηρείται μια σημαντική, τοπική αύξηση του πεδίου. Γενικότερα, η πεδιακή ένταση παρουσιάζει αιχμές στις διεπιφάνειες μεταξύ των υλικών που εμφανίζουν πολύ διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες: πρόκειται για τις εξωτερικές επιφάνειες όλων των αγωγίμων (μεταλλικών) μερών, δηλαδή των τοροειδών εξομάλυνσης και του συνδετικού πιάτου που ενώνει τους δύο αγωγούς. Οι αιχμές αυτές προσεγγίζουν εξαιρετικά υψηλές τιμές κοντά στο άκρο Υ.Τ. της διάταξης, όπως άλλωστε αναμένεται.



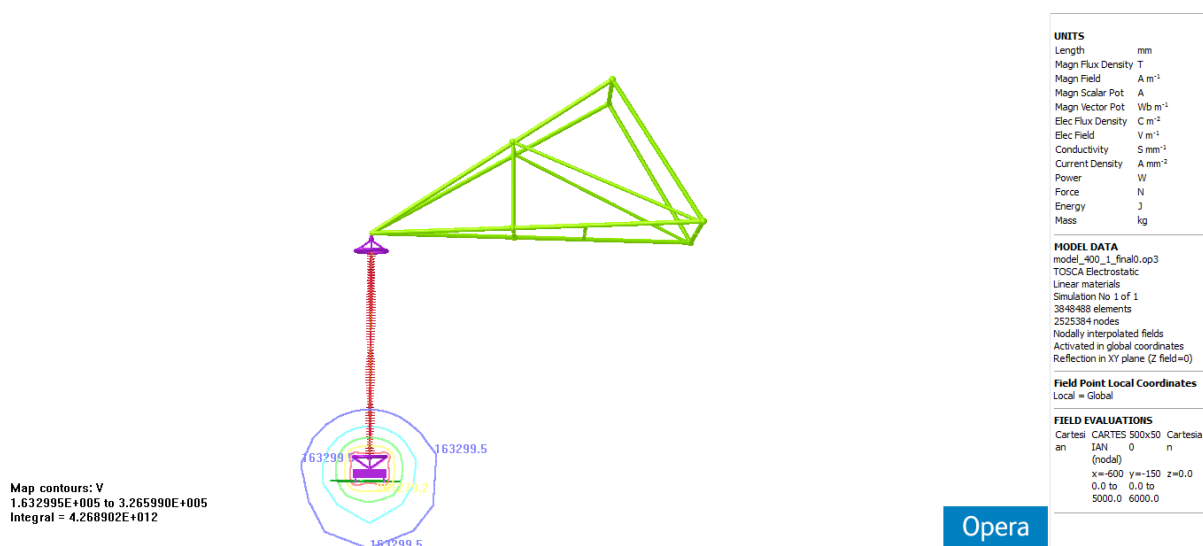
Σχήμα 4.99: Ιστόγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400kV.



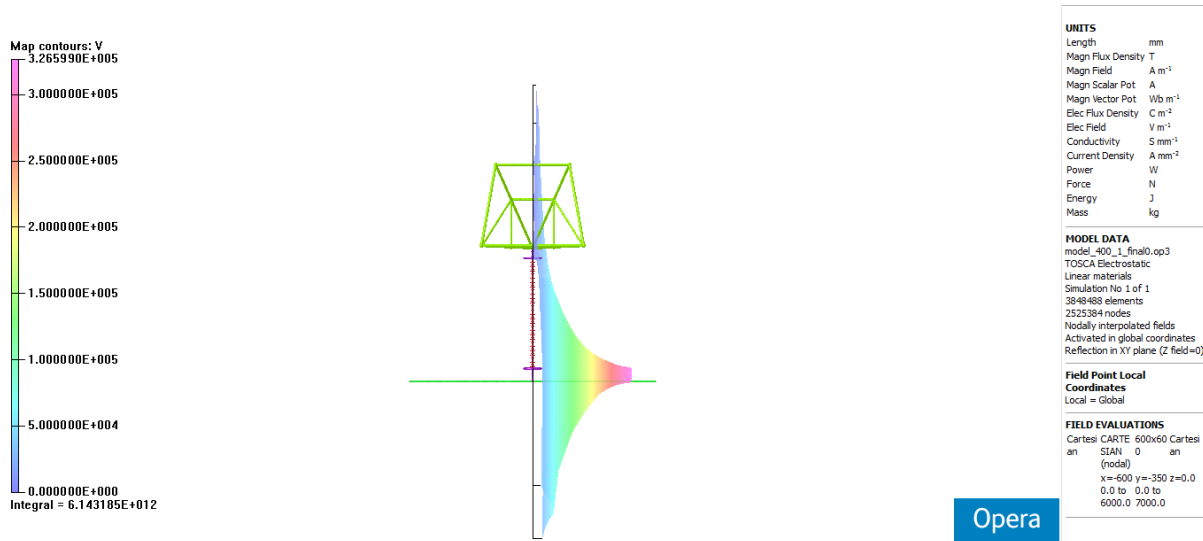
Σχήμα 4.100: Χάρτης ζωνών του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400kV.

Στο σχήμα 4.100 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών, στο σχήμα 4.101 καταγράφονται ορισμένες ισοδυναμικές γραμμές και, τέλος, στο σχήμα 4.102 απεικονίζεται το ιστόγραμμα που δείχνει την κατανομή του δυναμικού τόσο στο εσωτερικό, όσο και στην περιοχή γύρω από το συνθετικό μονωτήρα. Και τα τρία διαγράμματα επιβεβαιώνουν εκείνο που ήταν αναμενόμενο: ακριβώς πάνω και σε μια περιοχή πολύ κοντά στο άκρο Υ.Τ. το δυναμικό ανέρχεται στα 326599 V, ενώ σταδιακά μειώνεται, καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο άκρο. Από το ιστόγραμμα δε του σχήματος 4.102 επιβεβαιώνεται η εικόνα της ανομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί, όπως και σε προηγούμενες υποενότητες, η μορφή των ισοδυναμικών γραμμών του σχήματος 4.101: όσο αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα, σχηματίζονται αιχμές σε ορισμένα σημεία (δύο τελευταίες ισοδυναμικές γραμμές). Οι αιχμές αυτές οφείλονται στη μείωση της πυκνότητας του πλέγματος, που έχει ως άμεση συνέπεια αντίστοιχη μείωση στην ακρίβεια των εξαγόμενων από την προσομοίωση αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.101: Ισοδυναμικές γραμμές στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400kV.

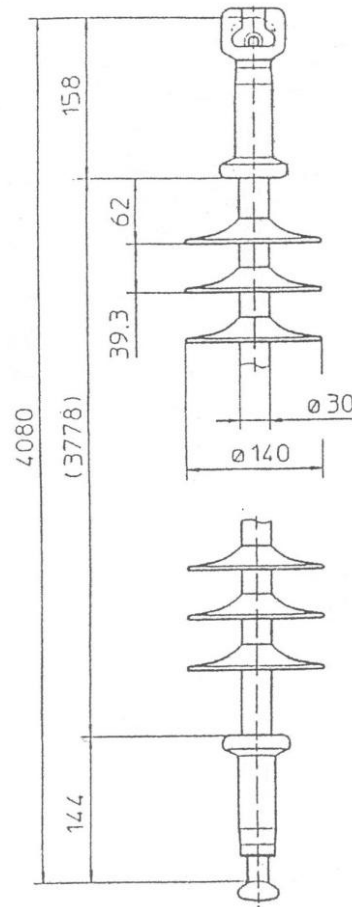


Σχήμα 4.102: Ιστόγραμμα του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μικρού μήκους» 400kV.

4.3.2.2 Συνθετικός μονωτήρας «μεγάλου μήκους» 400 kV

Το δεύτερο μοντέλο των 400 kV που παρουσιάζεται αφορά σε έναν συνθετικό μονωτήρα συνολικού μήκους 4080 mm. Το μήκος ερπυσμού του είναι 13080 mm, ενώ το αμιγώς μονωτικό τμήμα έχει μήκος 3778 mm. Ο μονωτήρας αποτελείται από 94 ελαστομερείς δίσκους, καθένας εκ των οποίων έχει διάμετρο ίση προς 140 mm και το βήμα τους είναι 39.3 mm. Η διάμετρος του σιλικονούχου περιβλήματος είναι 30 mm και εκείνη της ενισχυμένης με υαλώδεις ίνες εποξικής ράβδου 24 mm. Η γεωμετρία του μονωτήρα με τα βασικότερα χαρακτηριστικά του φαίνεται στο σχήμα 4.103.

Η εικόνα του μοντέλου, όπως αυτό προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή, φαίνεται στο σχήμα 4.104, αφού αποκαταστάθηκε η πλήρης συμμετρία και αφαιρέθηκε το background που αναπαριστά τον «άπειρων» διαστάσεων χώρο.

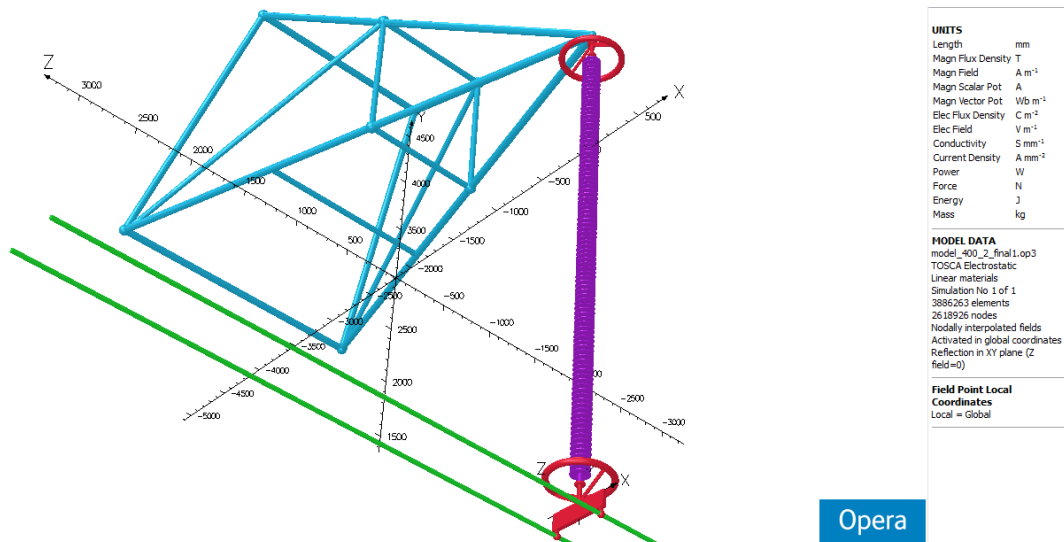


Σχήμα 4.103: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400 kV.

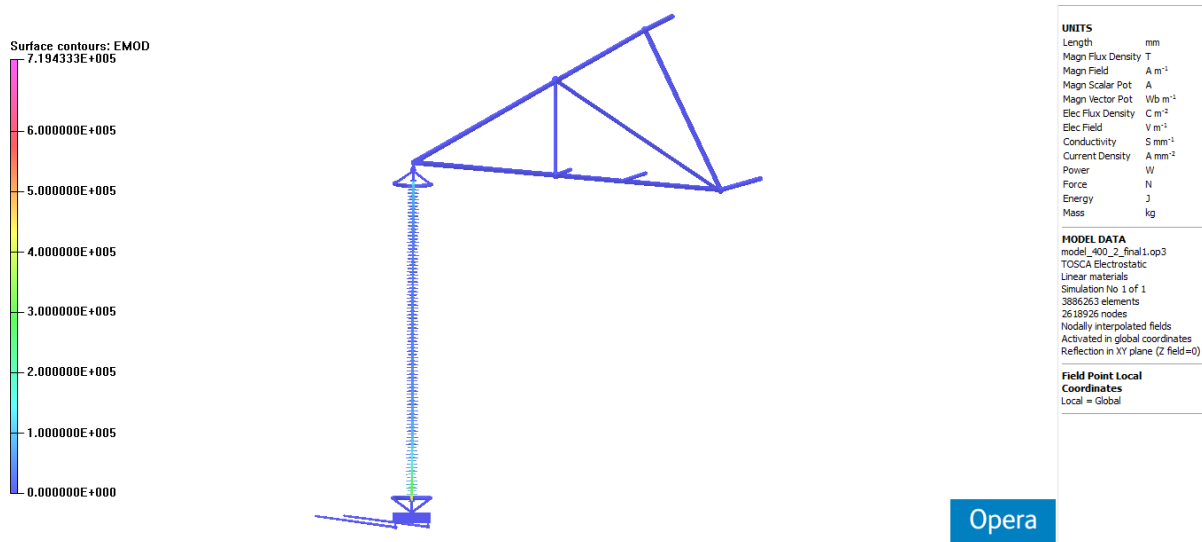
Στα σχήματα 4.105 και 4.106 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα. Οι κατανομές αυτές παρουσιάζονται για την ½ γεωμετρία μόνο του μοντέλου. Ο λόγος για τη μορφή της παρουσίασης αυτής αφ' ενός πηγάζει απ' την πολυπλοκότητα και το μέγεθος του μοντέλου, το οποίο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τα έως τώρα παρουσιασθέντα, αφ' ετέρου έχει να κάνει και με τα όρια των δυνατοτήτων του προγράμματος προσομοίωσης, καθώς και τους υπολογιστικούς «φραγμούς» του ίδιου του Η/Υ στον οποίο υλοποιούνται όλες οι προσομοιώσεις. Οι προδιαγραφές και οι ιδιότητες τόσο του λειτουργικού συστήματος, όσο και του CPU και της μνήμης αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Όπως επιβεβαιώνεται από τις επιφανειακές κατανομές σχημάτων αυτών, το ηλεκτρικό πεδίο μεγιστοποιείται σε μια περιοχή του περιβλήματος λίγο μετά το τοροειδές εξομαλυνσης του άκρου Υ.Τ., ενώ παρατηρείται κάποια ανύψωση της πεδιακής έντασης καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο ακροδέκτη. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μηδενίζεται στο εσωτερικό όλων των αγωγίμων μερών του μοντέλου, όπως προφανώς αναμενόταν.

Όσον αφορά στο δυναμικό, αυτό δείχνει να μειώνεται κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα, με κατεύθυνση από τον αγωγό προς το γειωμένο πυλώνα, κάτι που ασφαλώς ήταν αναμενόμενο.



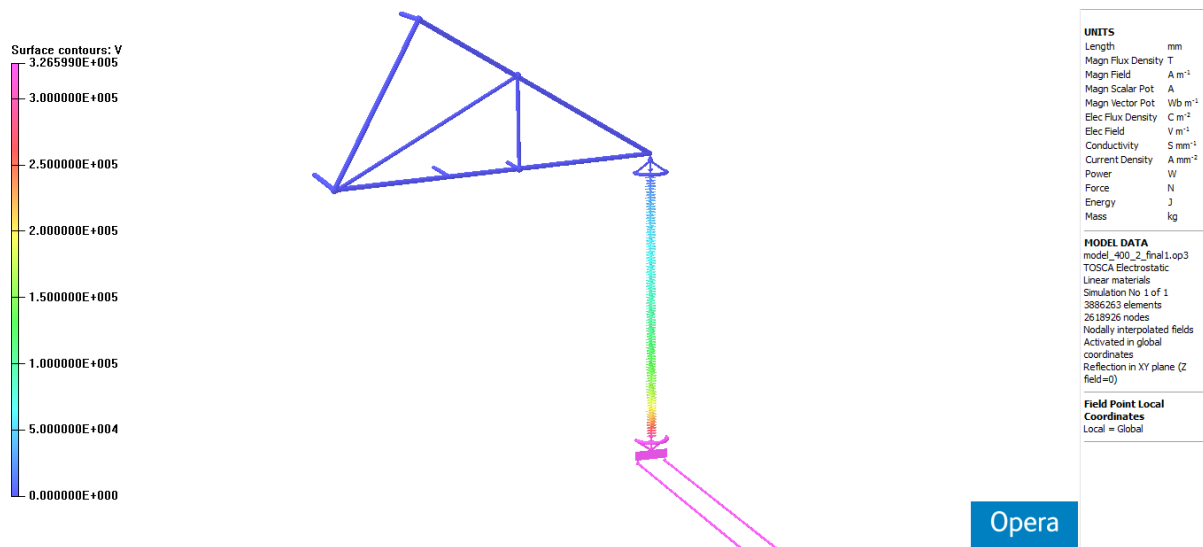
Σχήμα 4.104: Εικόνα του μοντέλου από το Μετ-Επεξεργαστή.



Σχήμα 4.105: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $E_{mod} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ στην επιφάνεια του ½ μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400 kV.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα, καθένα από τα οποία εμπεριέχει γραφικές παραστάσεις, στις οποίες απεικονίζονται οι κατανομές τόσο του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού κατά μήκος διαφορετικών κατακόρυφων ευθειών. Όπως και στις παραπάνω υποενότητες, εξετάζεται η μορφή των κατανομών καθώς αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα. Έτσι, λαμβάνονται δύο σειρές γραφημάτων: μία για την παράλληλη με τον αγωγό (άρα και με τον άξονα-z) απομάκρυνση απ' το μονωτήρα και μία δεύτερη για την απομάκρυνση τόσο απ' τον αγωγό, όσο και απ' το μονωτήρα (παράλληλα δηλαδή με τον άξονα-x).

Οι διάφορες ευθείες γραμμές, κατά μήκος των οποίων λαμβάνονται οι κατανομές, θεωρούνται ως οι τομές των αντίστοιχων επιπέδων και συμβολίζονται με τα αντίστοιχα ζεύγη συντεταγμένων. Υπενθυμίζεται ότι ως οριζόντιο επίπεδο έχει ληφθεί το επίπεδο-xz, ενώ ο μονωτήρας βρίσκεται παράλληλα με τον κατακόρυφο άξονα-y. Έτσι, απεικονίζονται οι κατανομές κατά μήκος των ευθειών (x=0 mm, z=60 mm), (x=0 mm, z=201 mm), (x=0 mm, z=249 mm), (x=0 mm, z=498 mm) και των ευθειών (x=60 mm, z=0 mm), (x=201 mm, z=0 mm), (x=249 mm, z=0 mm), (x=498 mm, z=0 mm),



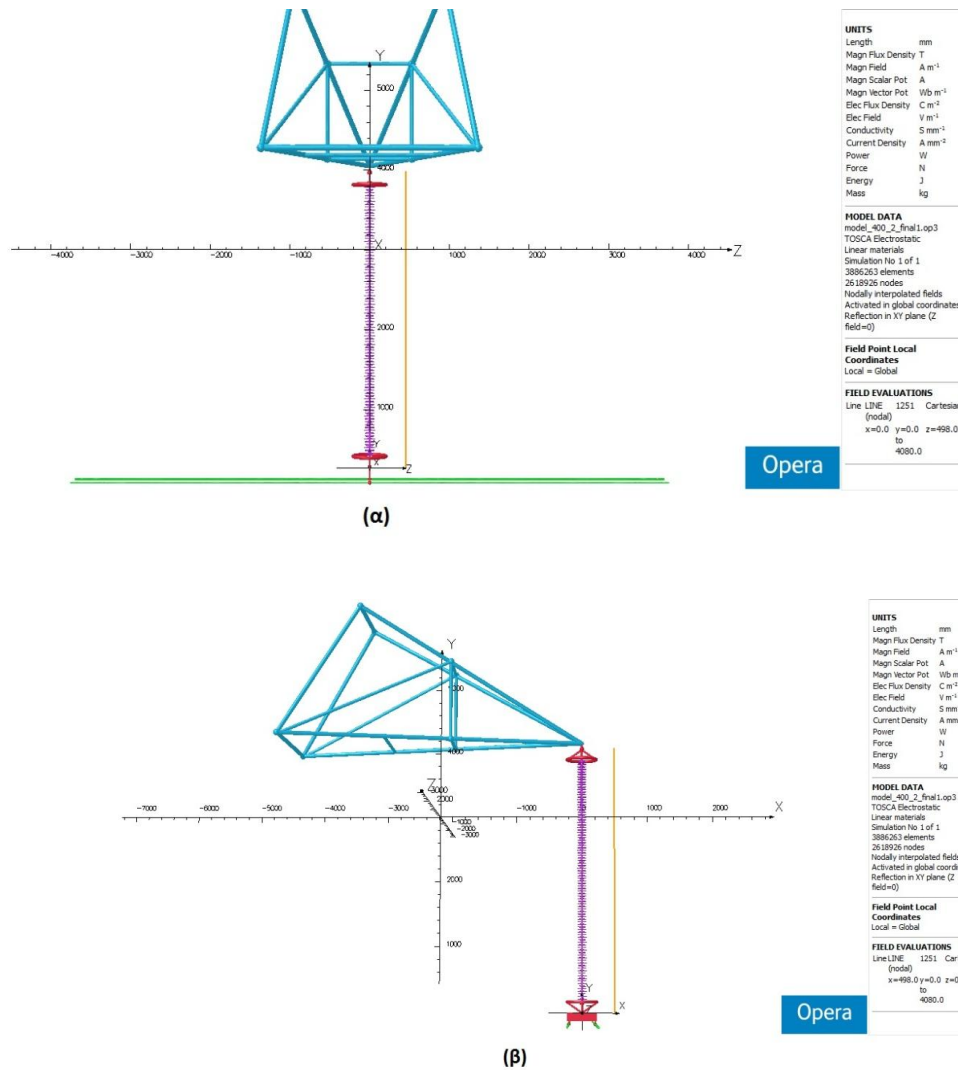
Σχήμα 4.106: Κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του ½ μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400 kV.

παράλληλα και κάθετα προς τον αγωγό, αντίστοιχα. Οι ευθείες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 60 mm «τρυπούν» κάθετα τους ελαστομερείς δίσκους, εκείνες με κάποια εκ των δύο συντεταγμένων ίση προς 201 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εσωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης, οι άλλες με 249 mm διέρχονται εξ' επαφής με την εξωτερική επιφάνεια των τοροειδών εξομάλυνσης και οι τελευταίες με 498 mm βρίσκονται αρκετά μακριά απ' τη διάταξη του μονωτήρα.

Ο τρόπος λήψης των γραφημάτων αυτών φαίνεται, παρουσιάζοντας ενδεικτικά δύο ευθείες, στο παρακάτω σχήμα. Το σχήμα 4.107 (α) αφορά στην πρώτη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $x=0$ mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη- z , άρα και η απόσταση απ' το συνθετικό μονωτήρα. Απ' την άλλη, το σχήμα 4.107 (β) αφορά στη δεύτερη σειρά γραφημάτων, στα οποία οι γραμμές έχουν σταθερά $z=0$ mm και αυξάνεται σταδιακά η συντεταγμένη- x , οπότε απομακρύνονται τόσο από το μονωτήρα, όσο και απ' τον αγωγό.

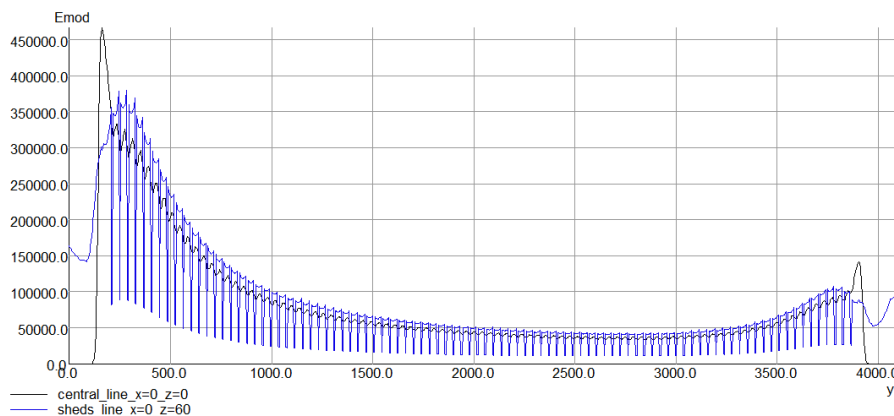
Πριν την παρουσίαση των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων, εκτίθεται σε κοινούς άξονες η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου τόσο κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα, όσο και κατά μήκος της ευθείας $x=0$ mm, $z=60$ mm, η οποία διέρχεται μέσα από τους δίσκους (βλέπε σχήμα 4.108). Οι λόγοι για την ξεχωριστή αυτή παρουσίαση είναι οι ίδιοι, όπως στις υποενότητες 4.3.2.1, 4.3.1.1 και έχουν να κάνουν με την εστίαση του ενδιαφέροντος σε μια περιοχή αρκετά κοντά στην υπό μελέτη διάταξη, καθώς και με τα συνακόλουθα «επίπεδα ακρίβειας» που προκύπτουν, λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν οι υπολογιστικοί πόροι, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες του προγράμματος.

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από το σχήμα 4.108, η πεδιακή ένταση κατά μήκος των δύο κατακόρυφων ευθειών παρουσιάζει εμφανή κυμάτωση, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη των ελαστομερών δίσκων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μαύρη γραφική «παρακολουθεί» με ομαλό τρόπο τις ακαριαίες αυξομειώσεις που καταγράφει η μπλε γραφική παράσταση. Οι «βυθίσεις» αυτές, ο αριθμός των οποίων ισούται με το πλήθος των δίσκων του μονωτήρα (94), εξηγούνται με τη βοήθεια της σχέσης (4.2) και των αντίστοιχων σχολιασμών που αφορούσαν στο συνθετικό μονωτήρα των 345 kV του άρθρου [41].



Σχήμα 4.107: Παρουσίαση των δύο τρόπων λήψης των γραφικών παραστάσεων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η πρώτη σειρά διαγραμμάτων των κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.107 (α). Παρατηρώντας τα σχήματα 4.109 και 4.110, διαπιστώνει κανείς ότι, παρά την ομοιομορφία και τα χαμηλά επίπεδα στα οποία διατηρείται η πεδιακή κατανομή κατά μήκος των ελαστομερών δίσκων του μονωτήρα, εντούτοις η κατάσταση διαφοροποιείται σιγά-σιγά καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή αυτή, με αποκορύφωμα τη γραμμή $x=0$ mm, $z=249$ mm, η οποία διέρχεται επαπτομενικά από τις εξωτερικές επιφάνειες των δύο τοροειδών εξομάλυνσης. Παρουσιάζονται δύο πολύ απότομες κορυφές (κόκκινη γραφική στο σχήμα 4.109). Η μία απ' αυτές είναι αρκετά υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή της έντασης κατά μήκος της ευθείας που «τρυπά» τους δίσκους, περίπου τετραπλάσια· κατ' αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνονται όσα σημειώθηκαν στην υποενότητα 4.2.6, στο αντίστοιχο εδάφιο (βλέπε σχήμα 4.46 και σχολιασμό αυτού).



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

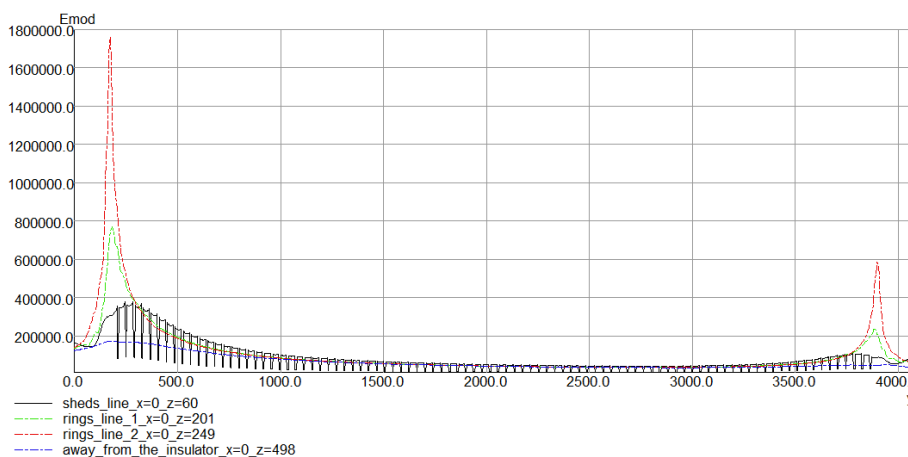
MODEL DATA	
model_400_2_final1.op3	
TOSCA Electrostatic	
Linear materials	
Simulation No 1 of 1	
3886263 elements	
2618926 nodes	
Nodally interpolated fields	
Activated in global coordinates	
Reflection in XY plane (Z field=0)	

Field Point Local Coordinates	
Local = Global	

FIELD EVALUATIONS	
Line LINE	1251 Cartesian
(nodal)	
x=0.0	y=0.0 to z=248.0
	to
	4080.0

Opera

Σχήμα 4.108: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα (μαύρη γραφική) και της κατακόρυφης ευθείας γραμμής (x=0, z=60) (μπλε γραφική).



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

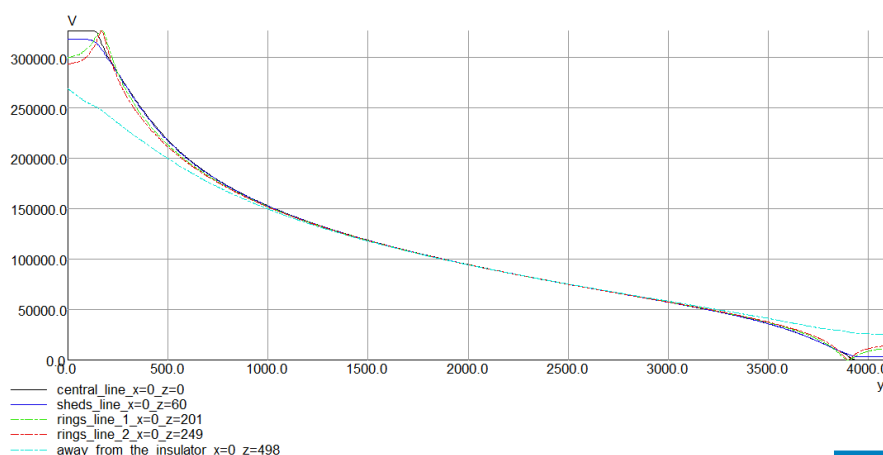
MODEL DATA	
model_400_2_final1.op3	
TOSCA Electrostatic	
Linear materials	
Simulation No 1 of 1	
3886263 elements	
2618926 nodes	
Nodally interpolated fields	
Activated in global coordinates	
Reflection in XY plane (Z field=0)	

Field Point Local Coordinates	
Local = Global	

FIELD EVALUATIONS	
Line LINE	1251 Cartesian
(nodal)	
x=0.0	y=0.0 to z=248.0
	to
	4080.0

Opera

Σχήμα 4.109: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.107 (α).



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

MODEL DATA	
model_400_2_final1.op3	
TOSCA Electrostatic	
Linear materials	
Simulation No 1 of 1	
3886263 elements	
2618926 nodes	
Nodally interpolated fields	
Activated in global coordinates	
Reflection in XY plane (Z field=0)	

Field Point Local Coordinates	
Local = Global	

FIELD EVALUATIONS	
Line LINE	1251 Cartesian
(nodal)	
x=0.0	y=0.0 to z=248.0
	to
	4080.0

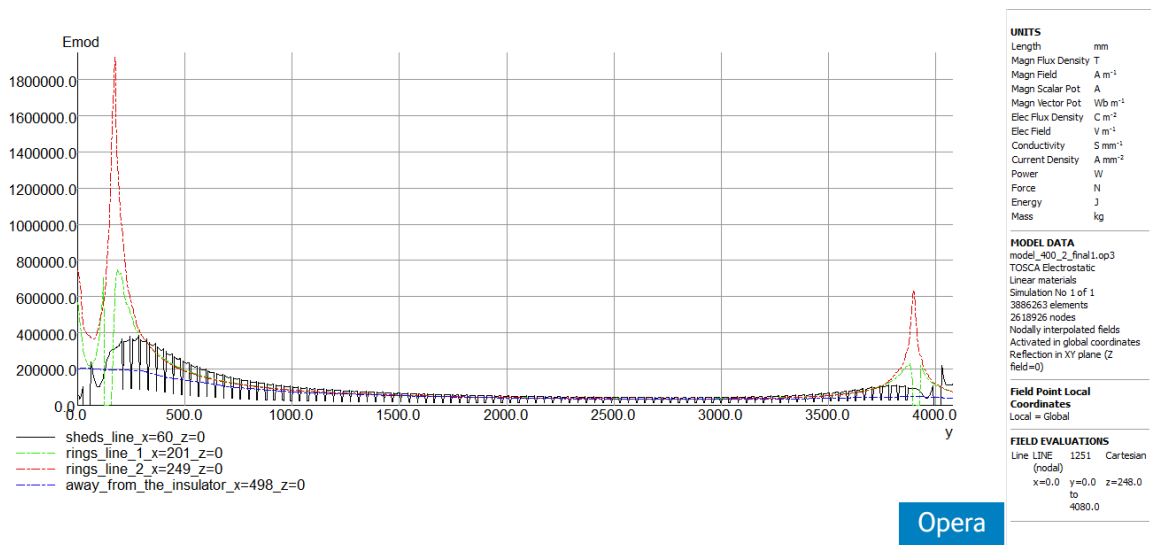
Opera

Σχήμα 4.110: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.107 (α).

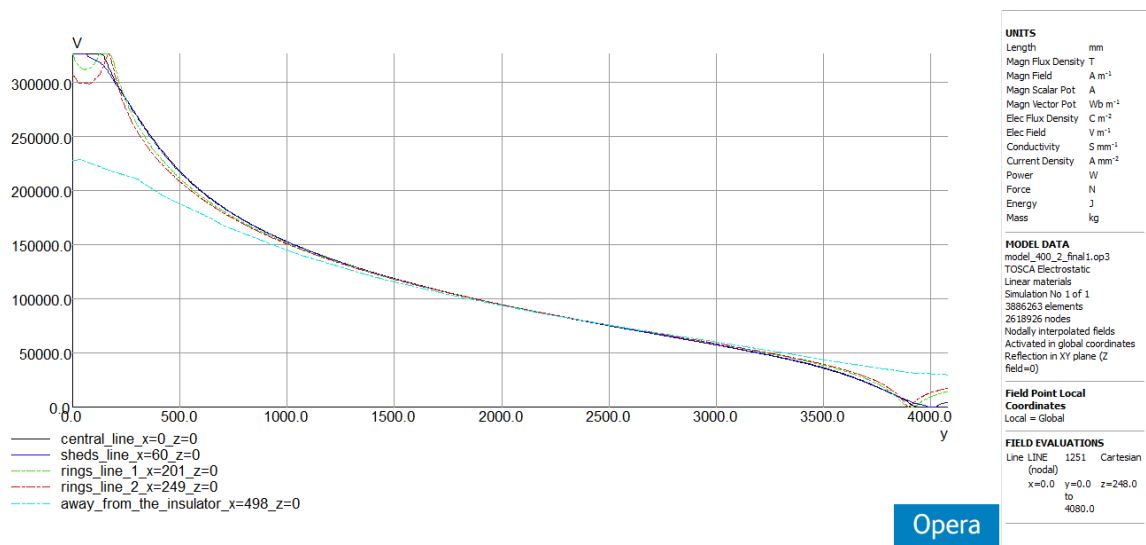
Όσον αφορά στις κατανομές του δυναμικού του σχήματος 4.110, είναι φανερό πως όσο οι γραμμές βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν τα δύο τοροειδή, οι κατανομές κατά μήκος αυτών είναι αρκετά πανομοιότυπες μεταξύ τους, με κάποιες μικρές διαφορές στις περιοχές πλησίον των δύο άκρων (ενεργού και γειωμένου) της διάταξης. Από την άλλη, μόλις αυξηθεί σημαντικά η απόσταση από το μονωτήρα, έξω από τα τοροειδή, η κατανομή της τάσης γίνεται πολύ πιο ομοιόμορφη και τα μέγιστα επίπεδα αυτής μειώνονται ορατά (γαλάζια γραφική παράσταση).

Ακολουθεί η δεύτερη σειρά διαγραμμάτων των κατανομών πεδιακής έντασης και δυναμικού, τα οποία λαμβάνονται σύμφωνα με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 4.107 (β).

Ισχύουν τα όσα σχολιάστηκαν στα σχήματα 4.109 και 4.110, με τις δύο επιπλέον επισημάνσεις που έγιναν στην υποενότητα 4.3.1.1, στα σχήματα 4.63, 4.64.



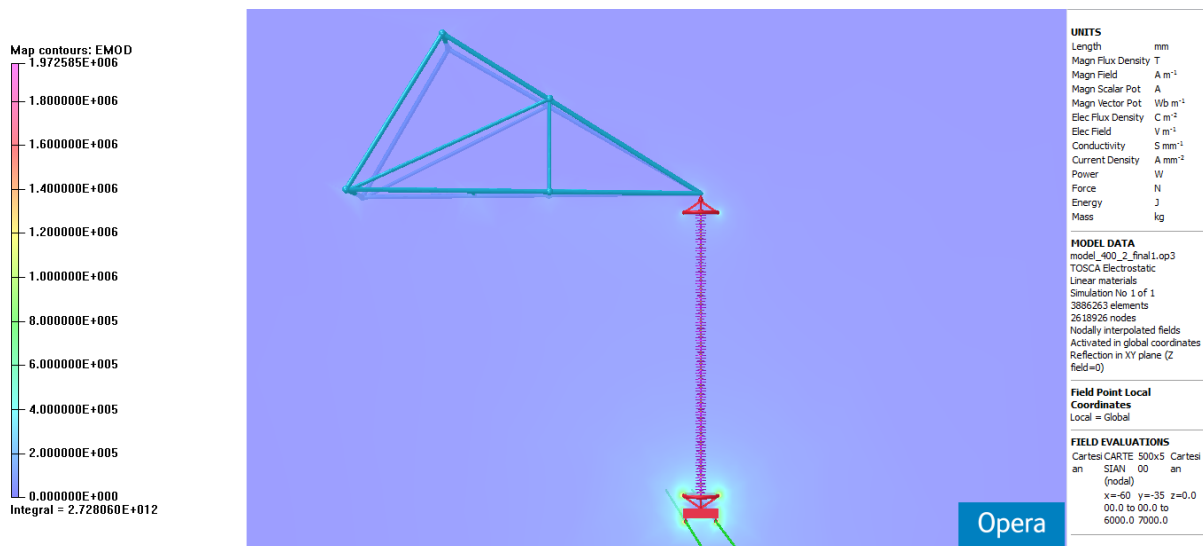
Σχήμα 4.111: Σύγκριση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.107 (β).



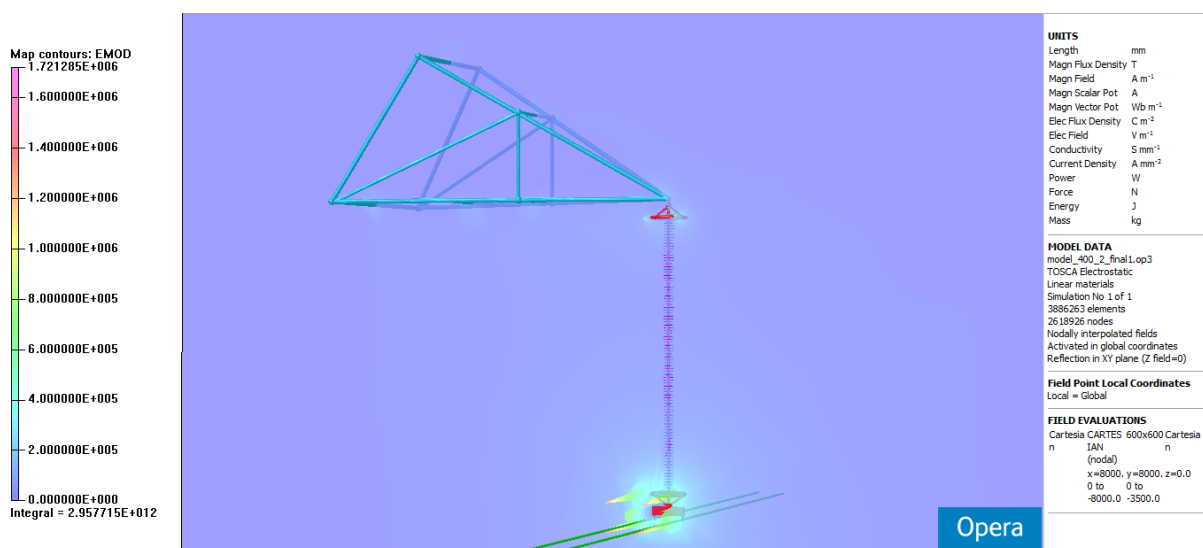
Σχήμα 4.112: Σύγκριση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τεσσάρων διαφορετικών κατακόρυφων γραμμών, παράλληλων με το μονωτήρα, σύμφωνα με το σχήμα 4.107 (β).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα επίπεδο-xy (κατακόρυφος θεωρείται ο άξονας-z), επί του οποίου απεικονίζονται με δύο τρόπους η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και με τρεις τρόπους το δυναμικό.

Στο σχήμα 4.113 φαίνεται η πεδιακή ένταση μέσω χρωματισμένων περιοχών, ενώ στο σχήμα 4.114 απεικονίζεται το ιστόγραμμα το οποίο δείχνει την κατανομή της πεδιακής έντασης στο εσωτερικό και στην περιοχή γύρω απ' το συνθετικό μονωτήρα. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διαπιστώσει, με την απομάκρυνση από το ενεργό και προς το γειωμένο άκρο, η ένταση μειώνεται σε γενικές γραμμές. Εντούτοις, στο γειωμένο τοροειδές παρατηρείται μια σημαντική, τοπική αύξηση του πεδίου. Γενικότερα, η πεδιακή ένταση παρουσιάζει αιχμές στις διεπιφάνειες μεταξύ των υλικών που εμφανίζουν πολύ διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες: πρόκειται για τις εξωτερικές επιφάνειες όλων των αγωγίμων (μεταλλικών) μερών, δηλαδή των τοροειδών εξομόλυνσης και του συνδετικού πιάτου που ενώνει τους δύο υπο-αγωγούς. Οι αιχμές αυτές προσεγγίζουν εξαιρετικά υψηλές τιμές κοντά στο άκρο Υ.Τ. της διάταξης, όπως άλλωστε αναμένεται.

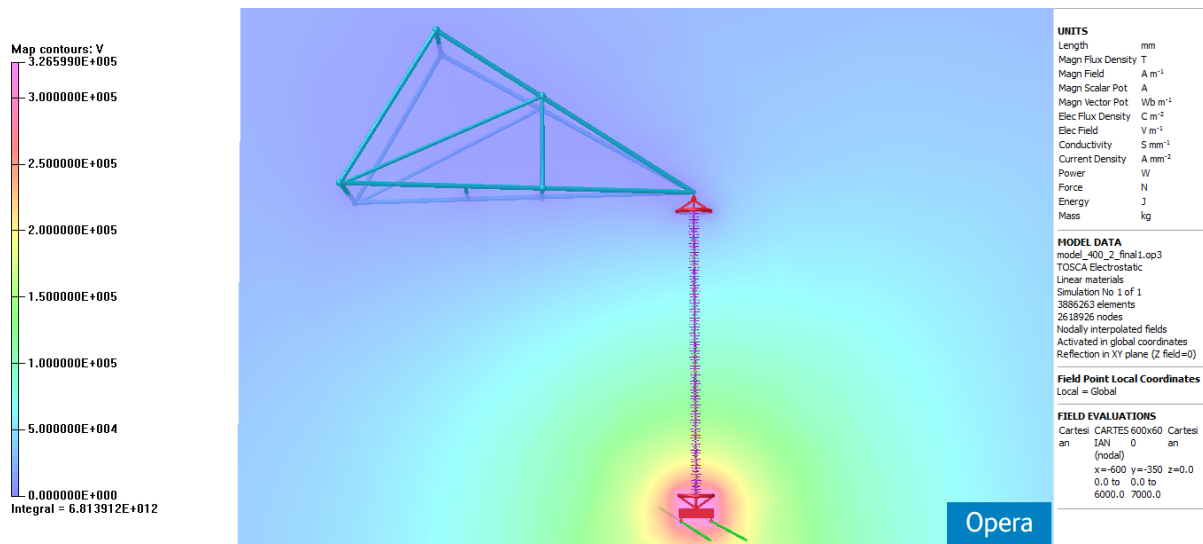


Σχήμα 4.113: Χάρτης ζωνών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400kV.

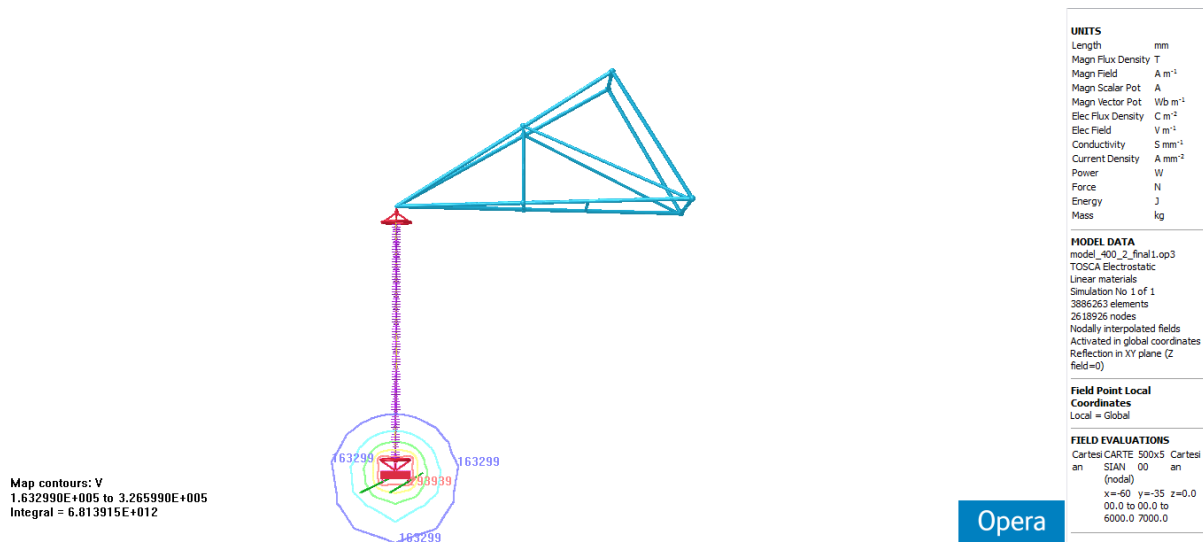


Σχήμα 4.114: Ιστόγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400kV.

Στο σχήμα 4.115 φαίνεται το δυναμικό μέσω χρωματισμένων περιοχών, στο σχήμα 4.116 καταγράφονται ορισμένες ισοδυναμικές γραμμές και, τέλος, στο σχήμα 4.117 απεικονίζεται το ιστόγραμμα που δείχνει την κατανομή του δυναμικού τόσο στο εσωτερικό, όσο και στην περιοχή γύρω από το συνθετικό μονωτήρα. Και τα τρία διαγράμματα επιβεβαιώνουν εκείνο που ήταν αναμενόμενο: ακριβώς πάνω και σε μια περιοχή πολύ κοντά στο άκρο Υ.Τ. το δυναμικό ανέρχεται στα 326599 V, ενώ σταδιακά μειώνεται, καθώς βαίνουμε προς το γειωμένο άκρο. Από το ιστόγραμμα δε του σχήματος 4.117 επιβεβαιώνεται η εικόνα της ανομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα.



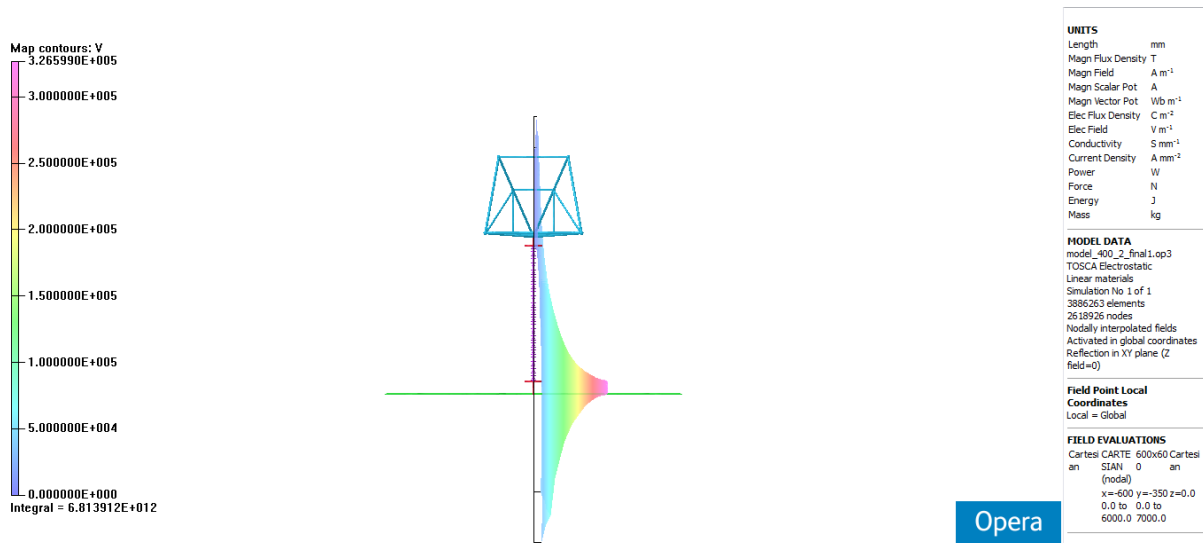
Σχήμα 4.115: Χάρτης ζωνών του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400kV.



Σχήμα 4.116: Ισοδυναμικές γραμμές στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400kV.

Επισημαίνεται και εδώ, όπως και σε προηγούμενες υποενότητες, η μορφή των ισοδυναμικών γραμμών του σχήματος 4.116: όσο αυξάνει η απόσταση από το μονωτήρα, σχηματίζονται αιχμές σε ορισμένα σημεία (τρεις τελευταίες ισοδυναμικές γραμμές). Οι αιχμές αυτές οφείλονται στη μείωση

της πυκνότητας του πλέγματος, που έχει ως άμεση συνέπεια αντίστοιχη μείωση στην ακρίβεια των εξαγόμενων από την προσομοίωση αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.117: Ιστογράμμα του δυναμικού στο επίπεδο-xy γύρω από το πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400kV.

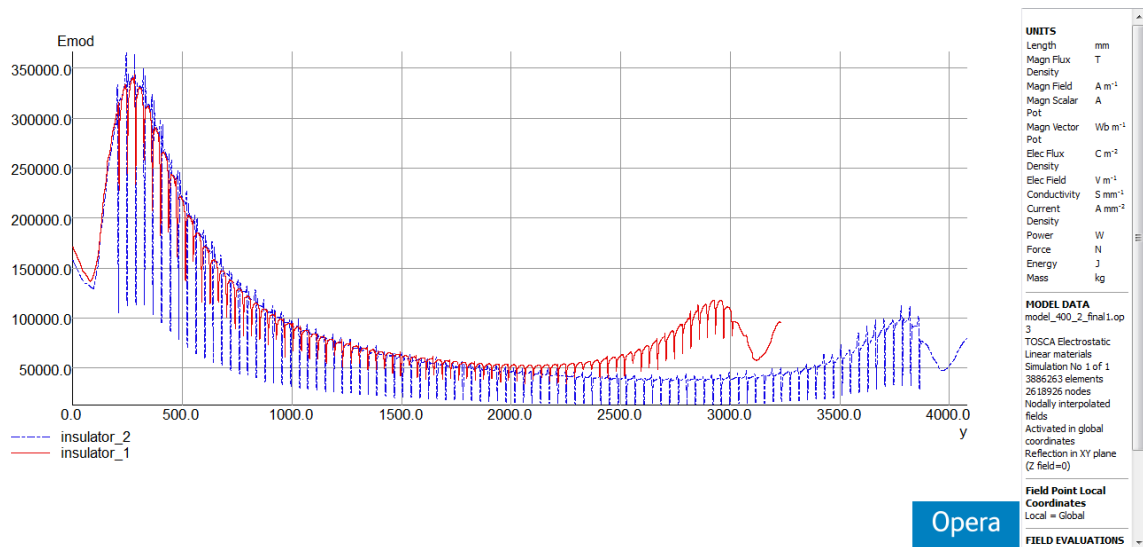
Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμιστεί πως με την προσομοίωση του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» των 400 kV το πρόγραμμα έρχεται στα όριά του. Η παρατήρηση αυτή είναι ασφαλώς στενά συνυφασμένη με τις συνθήκες στις οποίες θεωρούνται όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα, οι οποίες επιλέχθηκε να είναι κοινές για λόγους συγκρισιμότητας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το εύρος των προαναφερθέντων ορίων του λογισμικού, εξαρτάται άμεσα και από τους υπολογιστικούς πόρους του Η/Υ που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των προσομοιώσεων. Έτσι, θα μπορούσε να λάβει κανείς ικανοποιητικότερα αποτελέσματα, από τη σκοπιά της ακρίβειας, είτε προσομοιώνοντας ένα μοντέλο με αρκετά απλοποιημένη διάταξη πυλώνων και απλοποιημένη αναπαράσταση του μονωτήρα (π.χ. με αφαίρεση ενός ικανού αριθμού ελαστομερών δίσκων, όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.3.1 της παρούσας εργασίας) είτε υλοποιώντας τις προσομοιώσεις σε έναν υπολογιστικά ισχυρότερο Η/Υ. Οι προδιαγραφές και οι ιδιότητες τόσο του λειτουργικού συστήματος, όσο και του CPU και της μνήμης του Η/Υ που χρησιμοποιείται εδώ αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

4.3.2.3 Συγκριτικές γραφικές των δύο συνθετικών μονωτήρων 400 kV

Ακολουθούν συγκριτικές γραφικές παραστάσεις για τις κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού των δύο συνθετικών μονωτήρων 400 kV που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Λαμβάνονται οι κατανομές κατά μήκος δύο κατακόρυφων ευθειών, μία για κάθε μοντέλο. Οι ευθείες αυτές είναι παράλληλες με τον άξονα του μονωτήρα, σύμφωνα με τα σχήματα 4.92 (α) και 4.107 (α) και διέρχονται εφαπτομενικά απ' το χείλος των ελαστομερών δίσκων κάθε μονωτήρα, οι οποίοι στην περίπτωση των μοντέλων των 400 kV τυχαίνει να έχουν ίδια διάμετρο. Έτσι, λαμβάνονται οι κατανομές κατά μήκος της ευθείας ($x=0$ mm, $z=70$ mm) και για τους δύο μονωτήρες.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό εμφανίζονται σε [V/m] και [%], αντίστοιχα, για τους ίδιους λόγους που και οι συγκριτικές γραφικές μεταξύ των δύο μοντέλων των 150 kV παρουσιάστηκαν κατ' αυτόν τον τρόπο στην υποενότητα 4.3.1.3.

Επομένως, καθίσταται μ' αυτό τον τρόπο εφικτή η συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε κοινούς άξονες. Σε κάθε διάγραμμα, η κόκκινη συνεχής γραφική (insulator 1) αντιπροσωπεύει το συνθετικό μονωτήρα «μικρού μήκους» και η μπλε διακεκομμένη γραφική (insulator 2) το συνθετικό μονωτήρα «μεγάλου μήκους».



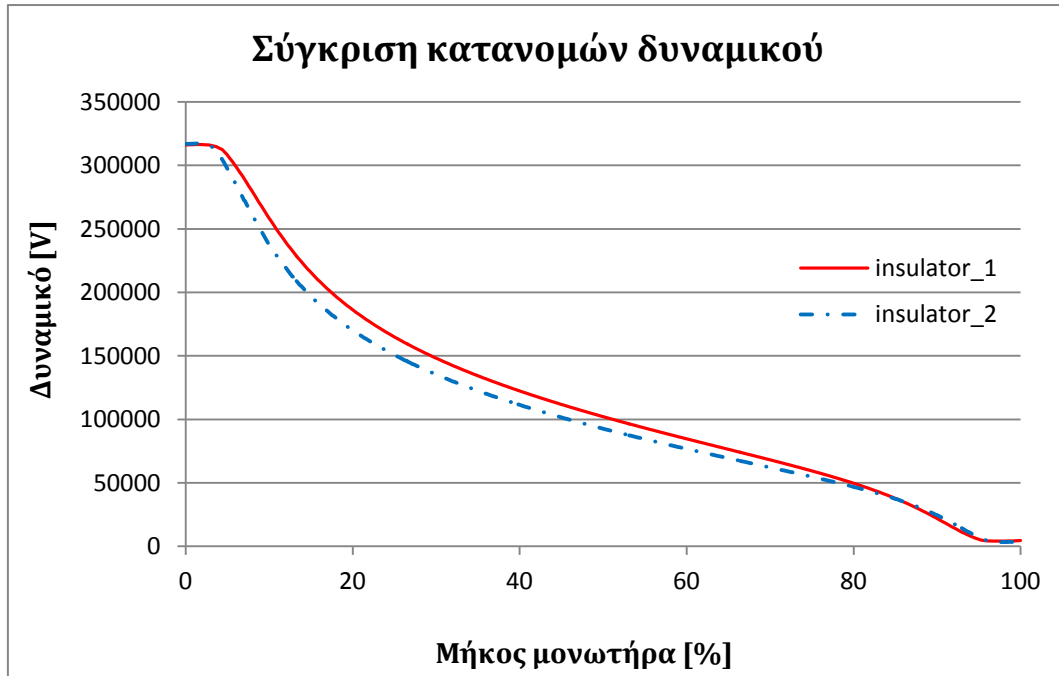
Σχήμα 4.118: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της κατακόρυφης ευθείας γραμμής ($x=0, z=70$), η οποία διέρχεται από το χείλος των ελαστομερών δίσκων κάθε συνθετικού μονωτήρα.

Από το σχήμα 4.118 φαίνεται ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των κατακόρυφων ευθειών, οι οποίες διέρχονται εφαπτομενικά απ' τους δίσκους κάθε μονωτήρα, παρουσιάζουν απότομες βυθίσεις εκεί που οι γραμμές «γλείφουν» τους ελαστομερείς δίσκους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σιλικονούχο καουτσούκ (SIR), από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι δίσκοι, έχει μεγαλύτερη σχετική διηλεκτρική σταθερά σε σχέση με τον περιβάλλοντα αέρα (4.3 έναντι 1.0), οπότε η πεδιακή ένταση μειώνεται, καθώς η γραμμή διέρχεται μέσα από το μονωτικό αυτό υλικό (σχέση (4.2)). Επιπλέον, όπως φαίνεται απ' το ίδιο σχήμα, η κατανομή της πεδιακής έντασης για το μονωτήρα «μικρού μήκους» τερματίζει νωρίτερα, απ' ότι εκείνη για το μονωτήρα «μεγάλου μήκους» (κόκκινη συνεχής έναντι μπλε διακεκομμένης γραφικής παράστασης), λόγω του μικρότερου συνολικού μήκους του μονωτήρα αυτού (3230 mm έναντι 4080 mm).

Όσον αφορά στο διάγραμμα του σχήματος 4.119, το δυναμικό κατά μήκος της κατακόρυφης ευθείας που αγγίζει τους δίσκους κάθε συνθετικού μονωτήρα μειώνεται αρκετά ανομοιόμορφα, με κατεύθυνση απ' το ενεργό προς το γειωμένο άκρο κάθε διάταξης. Το δυναμικό του μονωτήρα «μεγάλου μήκους» δείχνει να μειώνεται περισσότερο απότομα αρχικά (μπλε διακεκομμένη γραφική), εντούτοις στη συνέχεια η μείωσή του ομαλοποιείται· η ομαλοποίηση αυτή γίνεται περισσότερο αισθητή μετά το 50-60% της απόστασης μόνωσης, όπου η μπλε διακεκομμένη γραφική αρχίζει να πλησιάζει την κόκκινη συνεχή, επομένως η κλίση της γίνεται μικρότερη, ενώ ύστερα απ' το 80% περίπου την υπερβαίνει.

Για τα διαγράμματα των σχημάτων 4.118, 4.119 ισχύουν οι δύο επισημάνσεις που σημειώθηκαν στην υποενότητα 4.3.1.3 και αφορούσαν στα δύο μοντέλα των 150 kV. Μάλιστα, στην περίπτωση των μοντέλων των 400 kV, η γεωμετρία των δύο μονωτήρων είναι πανομοιότυπη: διαθέτουν

δίσκους με ίση διάμετρο (140 mm) και παραπλήσιο βήμα (37.8 mm και 39.3 mm). Με βάση τα παραπάνω, δικαιολογούνται οι αιχμές της πεδιακής κατανομής του σχήματος 4.118, καθώς και η περισσότερο ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού του σχήματος 4.119 για το μονωτήρα «μεγάλου μήκους» (μπλε διακεκομμένη γραφική παράσταση).



Σχήμα 4.119: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της κατακόρυφης ευθείας γραμμής ($x=0, z=70$), η οποία διέρχεται από το χείλος των ελαστομερών δίσκων κάθε συνθετικού μονωτήρα.

Έτσι, παρ' όλο που ο συνθετικός μονωτήρας «μεγάλου μήκους» διαθέτει περισσότερους δίσκους (94 έναντι 75 του μονωτήρα «μικρού μήκους») και έχει μεγαλύτερο συνολικό μήκος (μεταξύ ακροδεκτών) και μήκος ερπυσμού, η κατανομή τόσο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού, ιδιαίτερα κοντά στο άκρο Υ.Τ., φαίνεται να είναι κάπως χειρότερη, σε σχέση με το μοντέλο «μικρού μήκους», δεδομένων των υπάρχουσών συνθηκών μοντελοποίησης. Κάποια βελτίωση στο ενεργό άκρο του μονωτήρα αυτού θα μπορούσε να προκύψει είτε αλλάζοντας το ύψος τοποθέτησης του αντίστοιχου τοροειδούς εξομάλυνσης είτε μεταβάλλοντας κάποια εκ των παραμέτρων του, όπως π.χ. η εξωτερική διάμετρος ή/και το διαμέτρημα του σωλήνα αυτού.

4.4 Σχολιασμός της γενικής εικόνας των διαγραμμάτων

Στο σημείο αυτό δεν θα πρέπει να μείνει ασχολίαστη η γενική εικόνα όλων των γραφικών παραστάσεων των πεδιακών κατανομών, τα οποία παρουσιάστηκαν σε όλες τις παραπάνω υποενότητες και αφορούν τόσο στο συνθετικό μονωτήρα ανάρτησης 345 kV του άρθρου [41], όσο και στους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης του ελληνικού συστήματος μεταφοράς 150 kV και 400 kV: πρόκειται κυρίως για τις πράσινες, κόκκινες και μπλε γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 4.46, 4.48, 4.61, 4.63, 4.77, 4.79, 4.94, 4.96, 4.109, 4.111. Καθώς αυξάνει η απόσταση από την περιοχή ενδιαφέροντος, παρουσιάζονται σε αρκετά σημεία οξείες αιχμές, οι οποίες, με μια επιπόλαιη ματιά, υποδηλώνουν ένα εξαιρετικά ανομοιόμορφο πεδίο γύρω από τα σημεία αυτά. Εντούτοις, κάτι τέτοιο δεν αναμένεται από πεδιακής σκοπιάς, αφού μακριά από τους μονωτήρες το ηλεκτρικό πεδίο τείνει να ομαλοποιηθεί, δεδομένου ότι έχει αυξηθεί σημαντικά η απόσταση από

πολύπλοκα γεωμετρικά σώματα και λαμβάνονται κατανομές σε ένα ενιαίο υλικό μέσο, με την αυτή επιτρεπτότητα (εν προκειμένω στον αέρα). Πρόκειται επομένως για μια εικόνα, η οποία αφορά στην απόδοση του προγράμματος και ερμηνεύεται από τη σημαντική μείωση της πυκνότητας του πλέγματος σε περιοχές μακριά από τους μονωτήρες, κάτι που έχει ως άμεση συνέπεια τη σοβαρή «έκπτωση» στην ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και τη λήψη εξαιρετικά «χονδροειδών» γραφικών παραστάσεων.

Επιπλέον, πρέπει να υπογραμμιστεί πως, με την προσομοίωση του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» των 400 kV -ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος απ' όλους όσους προσομοιώθηκαν-, το πρόγραμμα έρχεται στα όριά του. Η παρατήρηση αυτή είναι ασφαλώς στενά συνυφασμένη με τις συνθήκες στις οποίες θεωρούνται όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα, οι οποίες επιλέχθηκε να είναι κοινές για λόγους συγκρισιμότητας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Ακόμη, το εύρος των προαναφερθέντων ορίων του λογισμικού, εξαρτάται άμεσα και από τους υπολογιστικούς πόρους του Η/Υ που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των προσομοιώσεων. Έτσι, θα μπορούσε να λάβει κανείς ικανοποιητικότερα αποτελέσματα, από τη σκοπιά της ακρίβειας, είτε προσομοιώνοντας ένα μοντέλο με αρκετά απλοποιημένη διάταξη πυλώνα και απλοποιημένη αναπαράσταση του μονωτήρα (π.χ. με αφαίρεση ενός ικανού αριθμού ελαστομερών δίσκων, όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.3.1 της παρούσας εργασίας) είτε υλοποιώντας τις προσομοιώσεις σε έναν υπολογιστικά ισχυρότερο Η/Υ. Οι προδιαγραφές και οι ιδιότητες τόσο του λειτουργικού συστήματος, όσο και του CPU και της μνήμης του Η/Υ που χρησιμοποιείται εδώ αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Η «έκπτωση» αυτή στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων επιτράπη, αφ' ενός διότι στόχος της εργασίας είναι η προσομοίωση συνθετικών μονωτήρων υπό τις, κατά το δυνατόν, ρεαλιστικότερες συνθήκες λειτουργίας τους, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις του πυλώνα και του αγωγού φάσης, αφ' ετέρου επειδή είτε έτσι είτε αλλιώς εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο είναι η πεδιακή κατανομή στο εσωτερικό και στην περιοχή πλησίον του κάθε συνθετικού μονωτήρα, δηλαδή εντός του μονωτικού υλικού και στον αέρα που το περιβάλλει. Εξάλλου, η δημιουργία ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως είναι η επιφανειακή δραστηριότητα, το φαινόμενο corona ή η υπερπήδηση του μονωτήρα, έχουν να κάνουν με τα επίπεδα και τη μεταβολή της πεδιακής έντασης είτε επί της εξωτερικής επιφάνειας του μονωτικού υλικού είτε στα σημεία σύνδεσης των διαφόρων υλικών είτε στην περιοχή του αέρα πολύ κοντά στο μονωτήρα. Γι' αυτό το λόγο η ανάλυση του κεφαλαίου αυτού περιορίστηκε σ' αυτά.

Συμπεράσματα – Η επόμενη μέρα

5.1 Γενικά

Βασική επιδίωξη της πεδιακής ανάλυσης ηλεκτρικών συσκευών ή διατάξεων είναι η μελέτη των διαφόρων φυσικών μεγεθών που υπεισέρχονται, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατός ο έλεγχός τους, όπου αυτό απαιτείται. Η μελέτη αυτή μπορεί να γίνει είτε πειραματικά, μέσω δοκιμών και μετρήσεων, είτε με τη βοήθεια προσομοιώσεων, κάνοντας χρήση κάποιου λογισμικού Η/Υ. Πράγματι, χάρη στην ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού και την αλματώδη πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθίστανται εφικτές οι προσομοιώσεις των συσκευών/διατάξεων αυτών, σχεδιάζοντας το επιθυμητό μοντέλο και θέτοντας τις απαραίτητες οριακές συνθήκες. Μεγάλο πλεονέκτημα των προσομοιώσεων αποτελεί ο συνδυασμός υψηλής ακρίβειας και ανταπόκρισης με την πραγματικότητα απ' τη μια, και σημαντικής εξοικονόμησης χρόνου και εξοπλισμού, από την άλλη, αφού τα υπό μελέτη μοντέλα και οι συνθήκες έκθεσης και λειτουργίας τους αναπαρίστανται σε κάποιο υπολογιστικό περιβάλλον.

Η πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων με τη βοήθεια κάποιου υπολογιστικού πακέτου μπορεί να συνεισφέρει αποτελεσματικά στη βελτίωση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στο εσωτερικό και σε περιοχές του αέρα κοντά σ' αυτούς. Κατ' αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν και να μετριαστούν ανεπιθύμητα και δυσμενή φαινόμενα, όπως είναι το αυξημένο ρεύμα διαρροής, οι φωτεινές μερικές εκκενώσεις (φαινόμενο corona) και η υπερπήδηση του συνθετικού μονωτήρα, με αποτέλεσμα τη συνακόλουθη αύξηση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής αυτού. Επομένως, μπορούν να σημειωθούν αξιόλογες βελτιώσεις σε επίπεδο σχεδιασμού, τόσο από την οπτική γωνία της καλύτερης, κατά το δυνατό, μονωτικής συμπεριφοράς, όσο και από τη σκοπιά ελαχιστοποίησης του κόστους κατασκευής και μαζικής παραγωγής τους. Επιπλέον, χάρη στη γνώση των διακυμάνσεων της πεδιακής έντασης και του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα, μπορεί κανείς να εντοπίσει «κρίσιμα» σημεία στη γεωμετρία και τη διάταξη αυτού, ώστε να καθίσταται δυνατή η εκ των προτέρων αναγνώριση πιθανών φθορών, αλλοιώσεων ή ενδεχόμενων βλαβών.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων Υψηλής Τάσης, δηλαδή ο προσδιορισμός της κατανομής τόσο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού στο εσωτερικό και σε περιοχές πλησίον αυτών (των μονωτήρων), μέσω προσομοιώσεων σε Η/Υ. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση του προγράμματος ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης Opera-3d (τα βασικά χαρακτηριστικά του οποίου παρατίθενται στο παράρτημα που ακολουθεί) και συγκεκριμένα του ηλεκτροστατικού επιλύτη Tosca.

5.2 Η πορεία της εργασίας

Αρχικά προσομοιώθηκε ένας συνθετικός μονωτήρας ανάρτησης 345 kV, τα σχέδια του οποίου ελήφθησαν από το άρθρο [41] (βλέπε σχήμα 4.1). Το μοντέλο που προσομοιώθηκε πρώτο ήταν εκείνο του απομονωμένου μονωτήρα. Διερευνήθηκε η επίδραση του εξωτερικού background στα τελικά αποτελέσματα. Δεδομένου ότι το Opera-3d κάνει χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η αναπαράσταση του άπειρων διαστάσεων χώρου έπρεπε να γίνει με πεπερασμένα όρια. Έτσι, πραγματοποιήθηκε μια σταδιακή αύξηση του εξωτερικού background, στις επιφάνειες του οποίου το δυναμικό τέθηκε ίσο με μηδέν, κατ' αναλογία με το γεγονός ότι το δυναμικό θεωρείται ότι μηδενίζεται στο άπειρο. Αποδεκτές θεωρήθηκαν οι διαστάσεις του background, περεταίρω αύξηση των οποίων δεν επέφερε σημαντικές μεταβολές στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Στα υπόλοιπα μοντέλα που ακολούθησαν θεωρήθηκε ένα ικανοποιητικά μεγάλο background, ώστε αυτό να αφήνει ανεπηρέαστες τις κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού.

Καθοριστικής σημασίας για την πορεία της εργασίας ήταν η επαλήθευση της εφαρμοζόμενης αριθμητικής μεθόδου (FEM) και κατ' επέκταση του χρησιμοποιούμενου υπολογιστικού πακέτου (Opera-3d) για το αρχικό μοντέλο, με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων του άρθρου [41], στο οποίο είχε γίνει χρήση διαφορετικής αριθμητικής μεθόδου (μέθοδος των οριακών στοιχείων, BEM). Δεδομένου ότι στο άρθρο αυτό αφ' ενός είχαν πραγματοποιηθεί δοκιμές και μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, αφ' ετέρου οι δοκιμές αυτές είχαν επιβεβαιώσει τις εκεί προσομοιώσεις με αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση, οι προσομοιώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στο 4^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, κρίνονται έγκυρες, με αναφορά την προαναφερθείσα επαλήθευση.

Η λογική που ακολουθήθηκε στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας είχε την ακόλουθη σχεδιαστική εξέλιξη: σταδιακή προσθήκη ενός επιπλέον «παράγοντα πραγματικότητας» και εκτίμηση της επίδρασης στα εξαγόμενα κάθε φορά αποτελέσματα. Έτσι, στο αρχικό μοντέλο του απομονωμένου μονωτήρα προστέθηκαν βαθμιαία ένας απλός αγωγός, ένα συνδεδετικό «πιάτο» με έναν διπλό αγωγό και τέλος ένα τμήμα του πυλώνα. Διερευνήθηκαν οι επιδράσεις τόσο του μήκους του αγωγού, όσο και της εκάστοτε διάταξης πυλώνα. Ειδικότερα, έγιναν προσομοιώσεις για μήκος αγωγού 1x και 2x το συνολικό μήκος (μεταξύ ακροδεκτών) του μονωτήρα και εξετάστηκαν τρία επίπεδα απλοποίησης της διάταξης του πυλώνα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η κατασκευαστική πορεία κατέληξε σε ένα «πλήρες» μοντέλο, το οποίο φάνηκε να ανταποκρίνεται καλύτερα απ' όλα τα προηγούμενα στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συνθετικού μονωτήρα.

Στο πλήρες αυτό μοντέλο προστέθηκε ένα τοροειδές εξομάλυνσης στο γειωμένο άκρο της διάταξης (ίδιων διαστάσεων με το ήδη υπάρχον στο άκρο Υ.Τ.), με σκοπό τη βελτίωση της πεδιακής εικόνας σ' αυτό και τη μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία σχημάτιζε μια οξεία κορυφή. Προέκυψε κατ' αυτόν τον τρόπο το τελικό μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα του άρθρου [41]. Στο τελευταίο αυτό μοντέλο διερευνήθηκαν οι κατανομές ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού κατά μήκος τόσο του άξονα, όσο και διάφορων κατακόρυφων ευθειών, οι οποίες είτε περνούσαν μέσα απ' τους ελαστομερείς δίσκους του μονωτήρα είτε βρίσκονταν σε περιοχή του αέρα, πλησίον αυτού. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν επιφανειακά διαγράμματα και ιστογράμματα, τα οποία έδειχναν με εποπτικό περισσότερο τρόπο την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού πάνω σε ένα επίπεδο, το οποίο ήταν κάθετο προς τον αγωγό φάσης και στο οποίο ανήκε ο άξονας του μονωτήρα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη και ανάλυση βασίζονται στους ακόλουθους δύο άξονες:

➤ Στις διαχωριστικές επιφάνειες δύο υλικών διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων και κατά τη μετάβαση απ' το ένα στο άλλο, παρατηρήθηκαν απότομες μεταβολές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Οι «βυθίσεις» αυτές ερμηνεύτηκαν με τη βοήθεια της σχέσης (4.2), η οποία εκφράζει την εξάρτηση της τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E από το υλικό, το οποίο χαρακτηρίζεται από επιτρεπτότητα ϵ .

➤ Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος τόσο του άξονα του μονωτήρα, όσο και των υπόλοιπων κατακόρυφων ευθειών, ήταν αρκετά ανομοιόμορφη, επιβεβαιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την έντονη μη-γραμμικότητα της τάσης στους συνθετικούς μονωτήρες. Η πεδιακή ένταση δε, ακόμη και στην περίπτωση του τελικού μοντέλου με τα δύο τοροειδή εξομάλυνσης, παρουσίασε σημαντική αύξηση στην περιοχή κοντά στο γειωμένο άκρο. Η εικόνα αυτή δεν εντοπίζεται σε κεραμικούς μονωτήρες, όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει από τις εργασίες [8, 11, 12, 13], όπου η κατανομή του δυναμικού είναι πολύ περισσότερο γραμμική. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απουσία ενδιάμεσων μεταλλικών σπλισμών στους συνθετικούς μονωτήρες, η παρουσία των οποίων ανάγκαζε το δυναμικό το μειώνεται με βηματικό τρόπο στους κεραμικούς.

Με βάση το τελικό ή «πλήρες» μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως και με αναφορά την εγκυρότητα των ληφθέντων αποτελεσμάτων από την επαλήθευση με το άρθρο [41], προσομοιώθηκαν 4 συνθετικοί μονωτήρες που χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς των 150 kV και των 400 kV, τα σχέδια των οποίων ελήφθησαν από τη Δ.Ε.Η. και είτε επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν είτε χρησιμοποιούνται ήδη στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς. Έτσι, παρουσιάστηκαν δύο ειδών μονωτήρες 150 kV, ο πρώτος με ίσης διαμέτρου δίσκους και ο δεύτερος με διαφορετικής διαμέτρου δίσκους και μεγαλύτερο συνολικό μήκος. Και οι δύο αναρτήθηκαν από ένα τμήμα πυλώνα όμοιο, κατ' αναλογία, με εκείνο του μονωτήρα των 345 kV, ενώ συνδέθηκε απλός αγωγός στο άκρο Υ.Τ.. Όσον αφορά στους μονωτήρες των 400 kV, παρουσιάστηκαν δύο πανομοιότυπης γεωμετρίας συνθετικοί μονωτήρες, οι οποίοι είχαν σημαντικά διαφορετικό συνολικό μήκος. Τόσο ο «μικρού», όσο και ο «μεγάλου μήκους» μονωτήρας αναρτήθηκαν από ένα τμήμα πυλώνα ακριβώς ίδιο με εκείνο των 345 kV, ενώ συνδέθηκε διπλός αγωγός στο άκρο Υ.Τ. αυτών. Σε κάθε περίπτωση επιπέδου τάσης, το μήκος του αγωγού φάσης τέθηκε ίσο προς το διπλάσιο του συνολικού μήκους (μεταξύ ακροδεκτών) του εκάστοτε μονωτήρα, ενώ οι διαστάσεις των τοροειδών εξομάλυνσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ενδεικτικές και ελήφθησαν με βάση τις εργασίες [50], [52] και [54].

Πέραν των διαγραμμάτων και των επιφανειακών κατανομών που έγιναν στα μοντέλα αυτά, κατ' αναλογία με το μοντέλο των 345 kV, παρουσιάστηκαν επιπλέον συγκριτικές γραφικές παραστάσεις μεταξύ μονωτήρων του ίδιου επιπέδου τάσης, προκειμένου να αναδειχθεί ο αντίκτυπος της διαφορετικής γεωμετρίας στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού. Το γενικό συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η αύξηση του συνολικού μήκους (μεταξύ ακροδεκτών) του μονωτήρα, συνοδευόμενη από αντίστοιχη αύξηση στο πλήθος των δίσκων και στο μήκος ερπυσμού, είχε ως αποτέλεσμα περισσότερο ανομοιόμορφες κατανομές δυναμικού και υψηλότερες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ιδιαίτερα κοντά στο άκρο Υ.Τ..

Ειδικότερα, όσον αφορά στη σύγκριση των δύο μονωτήρων 150 kV, παρατηρήθηκε αισθητά καλύτερη συμπεριφορά, από πεδιακής σκοπιάς, στο δεύτερο μοντέλο, εκείνο με τους διαφορετικής διαμέτρου δίσκους, η οποία αποδόθηκε κυρίως στη διαφορετική γεωμετρία αυτού, σε σχέση με το μονωτήρα με ίσης διαμέτρου δίσκους.

Όσον αφορά στους μονωτήρες των 400 kV, η μειωμένη τιμή της παράσιτης, ως προς τον αγωγό Υ.Τ., χωρητικότητας στο μοντέλο «μεγάλου μήκους» είχε ως αποτέλεσμα την περισσότερο ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού και την εμφάνιση υψηλότερων μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, κυρίως κοντά στο άκρο Υ.Τ.. Ωστόσο, τα επίπεδα της πεδιακής έντασης πέραν των μέγιστων τιμών, παρουσιάζονταν χαμηλότερα.

5.2.1 Υπολογιστικοί πόροι και μεγέθη

Όλες οι παραπάνω προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα φορητό υπολογιστή, ο οποίος διέθετε λειτουργικό σύστημα Windows 7 Professional 32-bit. Ο επεξεργαστής ήταν της Intel, αποτελείτο από δύο πυρήνες και η συχνότητα του ρολογιού του οριζόταν στα 2.27 GHz, ενώ η διαθέσιμη μνήμη είχε μέγεθος 2.99 GB.

Τα υπολογιστικά μεγέθη που προέκυψαν κατά τη φάση της δημιουργίας του πλέγματος και της αριθμητικής επίλυσης του ηλεκτροστατικού πεδίου για τη δυσμενέστερη περίπτωση προσομοίωσης, η οποία αφορούσε στο μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» των 400 kV, παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

	Πλήθος κόμβων	Πλήθος ακμών	Πλήθος στοιχείων	Πλήθος εξισώσεων	Χρονικό διάστημα [min]
Δημιουργία πλέγματος	2618926	4568703	3886263		06:22
Επίλυση				1701006	15:57

Πίνακας 5.1: Υπολογιστικά μεγέθη που προέκυψαν κατά την προσομοίωση του μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400 kV.

Στο εν λόγω μοντέλο ο μονωτήρας είχε το μεγαλύτερο συνολικό μήκος και διέθετε το μεγαλύτερο πλήθος ελαστομερών δίσκων, σε σχέση με όλα τα προηγούμενα μοντέλα που προσομοιώθηκαν. Έχοντας αυτό ως δεδομένο και λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι οι απαιτήσεις ακρίβειας, επομένως και πυκνότητας πλέγματος, στην περιοχή πλησίον του μονωτήρα διατηρήθηκαν υψηλές, η προσομοίωση αυτή είναι η δυσμενέστερη περίπτωση, συνεπώς τα σχετικά υπολογιστικά μεγέθη του πίνακα φτάνουν το πρόγραμμα «στα όριά του», με διαθέσιμους τους συγκεκριμένους υπολογιστικούς πόρους.

5.3 Προτάσεις & προκλήσεις για επόμενες εργασίες

Στις υποενότητες που έπονται, θίγονται και περιγράφονται, με συνοπτικό τρόπο, ζητήματα σχετικά με τη μελέτη συνθετικών μονωτήρων, τα οποία ανέκυψαν με αφορμή την παρούσα εργασία και θα μπορούσαν να διερευνηθούν στο μέλλον.

5.3.1 Απλοποίηση του μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα

Η θεώρηση ενός απλουστευμένου μοντέλου συνθετικού μονωτήρα δεν αποτελεί καινούρια ιδέα. Έχει εφαρμοστεί και έχει δώσει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως αναλύθηκε και στην υποενότητα 3.3.1 του 3^{ου} Κεφαλαίου της παρούσας εργασίας. Η εν λόγω απλοποίηση αφορά στην αφαίρεση ενός αριθμού δίσκων από το μέσον του μονωτήρα. Αυτό που συμβαίνει πρακτικά είναι η εστίαση του ενδιαφέροντος σε μια ακόμη «στενότερη» περιοχή, δηλαδή κοντά στο ενεργό και το

γειωμένο άκρο της διάταξης μόνο, όπου παρατηρούνται και οι δύο υψηλότερες τιμές της πεδιακής έντασης, όπως φάνηκε στο 4^ο Κεφάλαιο. Ωστόσο, με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται σημαντικός υπολογιστικός χρόνος και όγκος δεδομένων, με τη δυνατότητα παράλληλα αύξησης της επιθυμητής ακρίβειας στις προαναφερθείσες περιοχές, ενώ δε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των μεσαίων δίσκων, η οποία όμως δεν είναι καθοριστικής σημασίας, τουλάχιστον όσον αφορά σε μια ηλεκτροστατική προσέγγιση του προβλήματος.

Με αφορμή την παρούσα εργασία, έγιναν ορισμένες τέτοιες προσομοιώσεις, οι οποίες όμως δεν παρουσιάστηκαν, καθώς δεν αποτελούσαν σκοπό της παρούσας εργασίας. Εντούτοις, αξίζει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα, από άποψη χρόνου δημιουργίας πλέγματος και αριθμητικής επίλυσης του πεδίου, καθώς και από πλευράς συνολικού όγκου δεδομένων ήταν εντυπωσιακά. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» των 400 kV, το οποίο προσομοιώθηκε έπειτα από αφαίρεση του 66% περίπου των δίσκων του. Στο νέο, «απλοποιημένο» μοντέλο που προέκυψε ο μονωτήρας διέθετε 15 δίσκους κοντά στο άκρο Υ.Τ. και 15 δίσκους στο γειωμένο άκρο, ενώ οι απαιτήσεις ακρίβειας, άρα και η πυκνότητα του πλέγματος, διατηρήθηκαν οι ίδιες με προηγούμενες.

Τα υπολογιστικά μεγέθη που προέκυψαν κατά τη φάση της δημιουργίας του πλέγματος και της αριθμητικής επίλυσης του ηλεκτροστατικού πεδίου για το απλοποιημένο μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» των 400 kV, παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

	Πλήθος κόμβων	Πλήθος ακμών	Πλήθος στοιχείων	Πλήθος εξισώσεων	Χρονικό διάστημα [min]
Δημιουργία πλέγματος	1364616	2555513	2172378		03:02
Επίλυση				780512	08:02

Πίνακας 5.2: Υπολογιστικά μεγέθη που προέκυψαν κατά την προσομοίωση του απλοποιημένου μοντέλου του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» 400 kV.

Συγκρίνοντας τους πίνακες 5.1 και 5.2, εύκολα διαπιστώνει κανείς την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και φόρτου που προέκυψε, ύστερα απ' την αφαίρεση ενός σημαντικού πλήθους των ελαστομερών δίσκων από το περίβλημα του συνθετικού μονωτήρα. Ενδεικτικά, το απλοποιημένο μοντέλο διέθετε περίπου 47.89% λιγότερους κόμβους, 44.10% λιγότερα στοιχεία και 54.11% λιγότερες εξισώσεις, ενώ οι χρόνοι που απαιτήθηκαν για τη δημιουργία του πλέγματος και την επίλυση του πεδίου ήταν χοντρικά κατά 50% μειωμένοι.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της υποενότητας, η αφαίρεση ενός σημαντικού αριθμού δίσκων από το περίβλημα του συνθετικού μονωτήρα, δεν επηρεάζει σημαντικά την ηλεκτροστατική θεώρηση του προβλήματος, τουλάχιστον όσον αφορά στις περιοχές ενδιαφέροντος, δηλαδή κοντά στο ενεργό και το γειωμένο άκρο, όπου διατηρήθηκαν οι ελαστομερείς δίσκοι. Ωστόσο, σημαντική μείωση του αριθμού των δίσκων συνεπάγεται εξίσου σημαντική μείωση στο μήκος ερπυσμού του μονωτήρα, επομένως στην περίπτωση που θα λαμβάνεται υπόψη και θα μπορεί να προσομοιωθεί το ρεύμα διαρροής κατά μήκος της επιφάνειάς του, τα εξαγόμενα αποτελέσματα του απλοποιημένου μοντέλου αναμένεται να στερούνται σε μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας και ακρίβειας.

5.3.2 Επίδραση του 3φ συστήματος μεταφοράς και ολόκληρου του πυλώνα

Η ανάλυση και η μελέτη που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αφορούσαν σε μία απομονωμένη πλευρική φάση, καθώς και στο αντίστοιχο τμήμα του πυλώνα, απ' το οποίο θεωρήθηκε ότι αναρτάται κάθε μονωτήρας. Εντούτοις, οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και έκθεσης ενός μονωτήρα περιλαμβάνουν τόσο την πλήρη κατασκευή του πυλώνα, όσο και την επίδραση των άλλων δύο φάσεων, οι οποίες βρίσκονται υπό τάση, αλλά και των αγωγών προστασίας.

Όπως αναδείχθηκε και στην υποενότητα 3.3.3 του 3^{ου} Κεφαλαίου, η διαφοροποίηση που προκύπτει, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπλέον αυτές παραμέτρους, είναι σημαντική. Ιδιαίτερα σοβαρή είναι η καταπόνηση του άκρου Υ.Τ. της μεσαίας φάσης, δεδομένου ότι πρόκειται για πυλώνα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος. Η καταπόνηση αυτή αποτελεί και τη χειρότερη εκ των 3 φάσεων περίπτωση, αφού η πεδιακή ένταση στην περιοχή αυτή δέχεται, εκτός της ίδιας, την επίδραση της ενισχυτικής συμβολής των άλλων δύο πλευρικών φάσεων.

Ένα επιπλέον ζήτημα που ανακύπτει είναι η διάταξη, σύμφωνα με την οποία συνδέονται οι μονωτήρες. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε μια I-διάταξη πλευρικής φάσης, με ένα μόνο μονωτήρα. Εντούτοις, συνηθίζεται στην πράξη η ανάρτηση αγωγών Υ.Τ. από ένα πλήθος δύο ή και περισσότερων παράλληλων μονωτήρων. Από την άλλη, αν πρόκειται για μεσαία φάση, αποτελεί κοινή πρακτική η χρήση μιας V-διάταξης 2 μονωτήρων, μια και η φάση αυτή, όπως αναφέρθηκε, καταπονείται περισσότερο απ' τις άλλες δύο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εικόνα ενός τμήματος του πυλώνα, όπου συνυπάρχουν οι δύο αυτές διατάξεις συνθετικών μονωτήρων.



Σχήμα 5.1: Τμήμα πυλώνα όπου συνυπάρχουν διαφορετικών ειδών διατάξεις μονωτήρων [58].

Στα πλαίσια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), της οποίας κάνει χρήση το πρόγραμμα Opera-3d, και σε συνδυασμό με το άνω όριο των ήδη υπάρχοντων υπολογιστικών πόρων, δεν είναι και τόσο εύκολη υπόθεση η μοντελοποίηση ολόκληρου του πυλώνα, συμπεριλαμβάνοντας τις διατάξεις μονωτήρων των άλλων 2 φάσεων, αν αναλογιστεί κανείς το

«οριακό» σημείο ακρίβειας, στο οποίο κατέληξε η παρούσα εργασία, με το μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα «μεγάλου μήκους» των 400 kV. Εντούτοις, δεν είναι λίγες οι εργασίες εκείνες, στις οποίες προσομοιώνεται ολόκληρος ο πυλώνας, μαζί με το 3φ σύστημα και τους μονωτήρες κάθε φάσης, και χρησιμοποιούν κάποιο λογισμικό που υλοποιεί τη FEM. Αρκετές από αυτές εφαρμόζαν κάποια παραλλαγή της FEM και παρουσιάστηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο, όπως οι [48] και [49], ενώ υπήρχαν άλλες που αναφέρονταν απλά σε εφαρμογή της FEM ως χρησιμοποιούμενης αριθμητικής μεθόδου, όπως η [52]. Στις προσομοιώσεις και των τριών αυτών εργασιών ελήφθη υπόψη η επίδραση του 3φ συστήματος μεταφοράς και η πλήρης διαμόρφωση του πυλώνα.

Μια ιδέα προς υλοποίηση θα μπορούσε να αποτελέσει ο συνδυασμός των υποενοτήτων 5.3, 5.4, δηλαδή η κατασκευή μιας ολοκληρωμένης διάταξης 3φ συστήματος και πυλώνα, στην οποία οι υπάρχοντες συνθετικοί μονωτήρες θα απλοποιούνταν, μέσω αφαίρεσης απ' το μεσαίο τμήμα τους ικανού αριθμού ελαστομερών δίσκων, με σκοπό το τελικό μοντέλο να μπορέσει να προσομοιωθεί, υπό τις υπάρχουσες υπολογιστικές δυνατότητες.

Τέλος, στα πλαίσια αυτής της υποενοτήτας, θα μπορούσαν να δοκιμαστούν διάφορες διαμορφώσεις πυλώνα, είτε απλού είτε πολλαπλού κυκλώματος, προκειμένου να εξεταστούν οι γεωμετρικές πυλώνων που χρησιμοποιούνται στην πράξη και να αξιολογηθούν οι διαφορετικές επιδράσεις αυτών στην πεδιακή κατανομή πλησίον των μονωτήρων.

5.3.3 Συνθήκες θεωρούμενης ηλεκτρικής καταπόνησης

Όπως αναφέρθηκε και στο 4^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιούσαν τον επιλύτη Tosca του λογισμικού Opera-3d, ο οποίος έκανε ηλεκτροστατική επίλυση του προβλήματος. Η ηλεκτροστατική προσέγγιση της πεδιακής ανάλυσης συνθετικών μονωτήρων αποτελεί μεν τη χειρίστη περίπτωση λειτουργίας, δεδομένου ότι ως οριακές συνθήκες τίθενται οι μέγιστες τιμές της τάσης κανονικής λειτουργίας (πλάτος της κυματομορφής της τάσης), εντούτοις σε καμία περίπτωση δεν αντιπροσωπεύουν ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας των μονωτήρων. Η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται υπό Υψηλή Τάση και βιομηχανική συχνότητα (50 ή 60 Hz), επομένως για τη ρεαλιστικότερη προσέγγιση του θέματος θα ήταν προτιμότερος ένας επιλύτης μόνιμης κατάστασης, στον οποίο θα υπήρχε η δυνατότητα ρύθμισης της μορφής της τάσης σε εναλλασσόμενη, με συχνότητα 50 Hz για το ελληνικό σύστημα.

Επιπλέον, πέραν της χειρίστης περίπτωσης ή της μόνιμης κατάστασης, θα ήταν μεγάλης αξίας η προσομοίωση συνθετικών μονωτήρων υπό κρουστική τάση. Η απόδοση των μονωτήρων και η αξιοπιστία τους δοκιμάζεται πολύ όταν αυτοί εκτίθενται σε εξωτερικές ή εσωτερικές υπερτάσεις, όπως π.χ. κάποια κεραυνοπληξία της γραμμής μεταφοράς ή κάποιος χειρισμός ζεύξης/απόζευξης, και η πιθανότητα υπερπήδησής τους είναι αυξημένη στην περίπτωση αυτή. Μικρή αναφορά στο θέμα αυτό έγινε στο 3^ο Κεφάλαιο, μέσω του άρθρου [54].

Ωστόσο, πέρα από τα παραπάνω, ύψιστης σπουδαιότητας θεωρείται η επίλυση του προβλήματος ροής ρεύματος των συνθετικών μονωτήρων, σε συνδυασμό με την ηλεκτροστατική ac επίλυση. Πράγματι, εκείνο που κάνει τους συνθετικούς μονωτήρες να ξεχωρίζουν, σε σχέση με τους κεραμικούς, είναι οι υδρόφοβες ιδιότητες της επιφάνειας του πολυμερούς υλικού του περιβλήματος αυτών και η συνακόλουθη υψηλή αντοχή τους στη ρύπανση. Χάρη στην υδρόφοβη αυτή συμπεριφορά παρουσιάζουν μειωμένο ρεύμα διαρροής και ο μηχανισμός της υπερπήδησης είναι δυσκολότερο να εκδηλωθεί. Για τη μελέτη της επιφανειακής συμπεριφοράς τους δεν είναι αρκετή η απομονωμένη ηλεκτροστατική θεώρηση και η ρύπανση δεν θα είχε νόημα να προσομοιωθεί, αν δεν λαμβανόταν υπόψη το ρεύμα διαρροής κατά μήκος της επιφάνειάς τους.

5.3.4 Έλεγχος και βελτιστοποίηση των παραμέτρων των τοροειδών εξομάλυνσης

Τα τοροειδή εξομάλυνσης που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας είχαν ενδεικτικές διαστάσεις, οι οποίες ελήφθησαν με βάση τα άρθρα [50], [52] και [54].

Ωστόσο, δεν επιχειρήθηκε κάποια βελτιστοποίηση των παραμέτρων τους, όπως είναι το ύψος τοποθέτησης (το οποίο τέθηκε ίσο προς το ύψος στο οποίο αρχίζει το υλικό του περιβλήματος κάθε μονωτήρα), η εξωτερική διάμετρος του δακτυλίου και το διαμέτρημα του σωλήνα. Πιθανόν μια τέτοια διαδικασία να βελτίωνε σημαντικά την πεδιακή κατανομή τόσο στα δύο άκρα της διάταξης (ενεργό και γειωμένο), όσο και στις επιφάνειες των δύο τοροειδών. Στο 4^ο Κεφάλαιο τονίστηκε η σπουδαιότητα τοποθέτησης δύο τοροειδών εξομάλυνσης στους συνθετικούς μονωτήρες, λόγω της εξαιρετικά ανομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού κατά μήκος τους και της σημαντικής ανύψωσης της πεδιακής έντασης στο γειωμένο άκρο αυτών. Έτσι, η ανάγκη ελέγχου και βελτιστοποίησης των παραμέτρων τους κρίνεται επιτακτική.

5.3.5 Επιβεβαίωση προσομοιώσεων με πειραματικές μετρήσεις

Το βασικότερο κίνητρο για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων με τη χρήση κάποιας αριθμητικής μεθόδου είναι η σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και κόστους, αφού μπορεί κανείς σχετικά εύκολα και γρήγορα να διερευνήσει την εικόνα των κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στο εσωτερικό και στην περιοχή γύρω από ηλεκτρικές συσκευές και διατάξεις. Όσον αφορά στους μονωτήρες, καθίσταται εφικτή η μελέτη πολύ διαφορετικών συνθηκών έκθεσης και λειτουργίας αυτών, χωρίς να υπάρχει εξάρτηση από την αλλαγή κάθε φορά του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, απαίτηση που είναι δεδομένη για τη διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών.

Εντούτοις, δεν θα είχε κανένα νόημα η υλοποίηση προσομοιώσεων, αν τα αποτελέσματα που προέκυπταν από αυτές δεν ανταποκρίνονταν σε πραγματικά επίπεδα τιμών ηλεκτρικής καταπόνησης. Στην υποενότητα 4.2.1.2 έγινε επαλήθευση της χρησιμοποιούμενης αριθμητικής μεθόδου (FEM), μέσω της σύγκρισης της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του άξονα του συνθετικού μονωτήρα των 345 kV με το αντίστοιχο διάγραμμα του άρθρου [41], το οποίο είχε εξαχθεί με εφαρμογή της BEM. Στο άρθρο αυτό είχαν παρουσιαστεί πειραματικές μετρήσεις και είχε γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

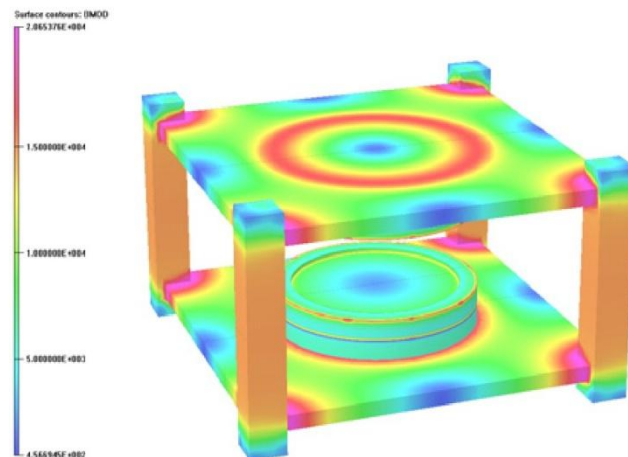
Η μέτρηση του δυναμικού κατά μήκος ενός συνθετικού μονωτήρα αποτελεί μια μάλλον δύσκολη υπόθεση, σε σχέση με την αντίστοιχη διαδικασία σε έναν κεραμικό, αφού δεν υπάρχουν οι μεταλλικοί οπλισμοί, οι οποίοι διευκολύνουν ιδιαίτερα τη μέτρηση της τάσης κατά μήκος αλυσοειδών μονωτήρων (οι οποίοι αποτελούνται από δισκοειδείς κεραμικούς μονωτήρες). Ωστόσο, η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι εφικτή μέσω ενός πεδιομέτρου ή κάποιου άλλου αισθητήρα (probe).

Το υπολογιστικό πακέτο Opera-3d

I. Εισαγωγή

Το Opera-3d (**OP**erating environment for **E**lectromagnetic **R**esearch and **A**nalysis, δηλαδή ένα λειτουργικό περιβάλλον για ηλεκτρομαγνητική έρευνα και ανάλυση) είναι ένα σύστημα προ- και μετ- επεξεργασίας για 8 γνωστά προγράμματα ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, που είναι τα εξής: CARMEN, DEMAG, ELEKTRA, QUENCH, SCALA, SOPRANO, TEMPO και TOSCA. Σ' αυτά προστίθεται και το πρόγραμμα STRESS, το οποίο προσομοιώνει τη μηχανική φόρτιση και παραμόρφωση ενός μοντέλου. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αποτελεί τη βασική μέθοδο που χρησιμοποιείται σε αυτά τα προγράμματα ανάλυσης. Αυτή η ευρέως διαδεδομένη τεχνική για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτεί ειδικές τροποποιήσεις, προκειμένου να εφαρμοστεί σε υπολογισμούς ηλεκτρικού πεδίου. Αυτές οι τροποποιήσεις υποστηρίζονται από τον Μοντελοποιητή (Modeller) και τον Προ-Επεξεργαστή (Pre-Processor) του Opera-3d. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τον καθορισμό σύνθετης γεωμετρίας με αγωγούς και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών συμπεριλαμβανομένων μη-γραμμικών και μη-ισοτροπικών περιγραφών, αλλά και γραφικών παραστάσεων για τον έλεγχο των δεδομένων [59, 60].

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



Σχήμα I-1: Εικόνα της έντασης του μαγνητικού πεδίου B_{mod} στην επιφάνεια ενός μόνιμου μαγνήτη, όπως προκύπτει από το Μετ-Επεξεργαστή [59].

i. Τα υπολογιστικά πακέτα ανάλυσης του Opera-3d

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν 8 πακέτα ανάλυσης, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια:

CARMEN

Το πακέτο αυτό αναλύει μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε γραμμικές και στρεφόμενες μηχανές, παρέχοντας τη δυνατότητα μηχανικής σύνδεσης, προκειμένου να καθίσταται εφικτός ο καθορισμός της ταχύτητας των στρεφόμενων μερών της μηχανής (π.χ. του δρομέα). Το πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε:

- ❖ κινητήρες και γεννήτριες
- ❖ αισθητήρες θέσης

DEMAG

Το πακέτο αυτό υπολογίζει τη μαγνήτιση υλικών μονίμων μαγνητών, η οποία προκύπτει από τρισδιάστατα χρονομεταβλητά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η ανάλυση του συγκεκριμένου υπολογιστικού πακέτου λαμβάνει υπόψη της την επίδραση των δινορρευμάτων στα εξαγόμενα αποτελέσματα.

ELEKTRA

Ο επιλύτης αυτός αναλύει χρονοεξαρτώμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, λαμβάνοντας υπόψη του τις επιδράσεις των δινορρευμάτων. Υπάρχουν τρεις δυνατότητες ανάλυσης: η μεταβολή του χρόνου μπορεί να αφορά είτε στη μεταβατική (TRansient, TR) είτε στη μόνιμη ac (Steady State, SS) κατάσταση είτε τα δινορρεύματα μπορούν να συμπεριληφθούν στους κινούμενους αγωγούς με μια ειδική γραμμική ή περιστροφική ταχύτητα, παρουσία ενός στατικού πεδίου (VL). Το στατικό αυτό πεδίο μπορεί να εφαρμοστεί σε καταστάσεις, στις οποίες η κίνηση δεν αλλάζει τη γεωμετρία, π.χ. σε απείρου μήκους ράγες ή σε περιστρεφόμενους δίσκους.

Το υπολογιστικό αυτό πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις μετασχηματιστών ισχύος, καθώς και σε προβλήματα επαγωγής θερμότητας (induction heating).

QUENCH

Το πρόγραμμα αυτό προσομοιώνει τη σβέση υπεραγώγιμων μαγνητών. Μοντελοποιεί μεταβατικά θερμικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, συμπεριλαμβάνοντας θερμές πηγές και μαγνητικά πεδία, τα οποία παράγονται από αγωγούς, οδηγούμενους από χρονομεταβλητά κυκλωματικά ρεύματα.

Το πακέτο αυτό επιλύει τρία συστήματα ταυτόχρονα:

- ❖ Θερμική ανάλυση, η οποία χρησιμοποιεί τη θερμότητα που παράγεται από ρεύματα, υπολογισθέντα από την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, και από κρίσιμα ρεύματα σε υπεραγώγιμα πηνία, τα οποία εξαρτώνται από την τοπική πυκνότητα ροής.
- ❖ ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, η οποία κάνει χρήση αγωγιμοτήτων, οι οποίες μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας και έχουν προσδιοριστεί από τη θερμική ανάλυση, και
- ❖ ρεύματα σε εξωτερικά κυκλώματα.

SCALA

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

Ειδικότερα, ο επιλύτης αυτός υπολογίζει τις τροχιές σωματιδίων, τα οποία θεωρούνται ως διερχόμενα εντός ενός συνδυασμού ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Τα μαγνητικά πεδία είναι δυνατό να παρέχονται:

- ❖ είτε από ρεύματα εντός πηνίων
- ❖ είτε απ' τα ίδια τα σωματίδια
- ❖ είτε από μια χωριστή ανάλυση, η οποία κάνει χρήση κάποιου άλλου προγράμματος ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης (π.χ. TOSCA).

SOPRANO

Το πακέτο αυτό αναλύει ηλεκτρομαγνητικά πεδία υψηλών συχνοτήτων. Παρέχονται δύο επιλογές ανάλυσης: είτε μόνιμη ac κατάσταση είτε εξαγωγή ιδιοτιμών.

TEMPO

Ο επιλύτης αυτός αναλύει μεταβατικά και μόνιμης κατάστασης θερμικά πεδία, τα οποία προκαλούνται ως απόρροια ηλεκτρομαγνητικής θέρμανσης και άλλων εξωτερικών θερμικών πηγών. Οι υπολογισθείσες θερμοκρασίες μπορούν να ανατροφοδοτήσουν την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, προκειμένου να μεταβάλουν τα ιδιότητες του υλικού.

TOSCA

Το υπολογιστικό αυτό πακέτο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των προσομοιώσεων της παρούσα εργασίας, επιλύει τρισδιάστατα, μη-γραμμικά μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά πεδία, καθώς και προβλήματα ροής ρεύματος. Χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια από το λειτουργικό περιβάλλον του Opera-3d, ωστόσο υφίσταται συνεχώς βελτιώσεις, προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια και η αποδοτικότητά του. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται βασίζεται στα συνολικά και στα μειούμενα βαθμωτά δυναμικά.

Συνήθη παραδείγματα εφαρμογής του πακέτου είναι:

- ❖ οι μαγνήτες MRI (Magnetic Resonance Imaging magnets), όπως είναι ο μαγνήτης του σχήματος I-1
- ❖ κινητήρες και γεννήτριες
- ❖ διακόπτες

ii. Τα όρια του προγράμματος

Ο Μοντελοποιητής, τα διάφορα προγράμματα ανάλυσης και ο Μετ-Επεξεργαστής έχουν γραφτεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να επεκταθούν και να προσαρμοστούν, προκειμένου να «φιλοξενήσουν» οποιοδήποτε μέγεθος δεδομένων, μέχρι το ανώτατο όριο που επιτρέπει η εικονική μνήμη (με την έννοια των εναλλαγών θέσεων μνήμης). Ωστόσο, υπάρχουν παράγοντες που περιορίζουν το μέγιστο μέγεθος του προβλήματος, οι πιο σημαντικοί απ' τους οποίους είναι:

- Η μέγιστη διάσταση πίνακα (πλήθος μη-μηδενικών), άνω όριο της οποίας είναι ο αριθμός $2^{31}-2$ (2147483646)
- Το μέγεθος της φυσικής μνήμης το οποίο απαιτείται, προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα υπερβολικής σελιδοποίησης (raging).

Το μεγαλύτερο μοντέλο που έχει δοκιμαστεί με επιτυχία έως σήμερα είναι ένα μοντέλο, στο οποίο έγινε μαγνητοστατική επίλυση με χρήση του πακέτου TOSCA Magnetostatics και διέθετε:

- 148 877 000 στοιχεία
- 149 721 291 κόμβους
- 149 721 290 εξισώσεις
- 2 088 494 663 μη-μηδενικά στον πίνακα.

Το μοντέλο αυτό χρειάστηκε 60 GB μνήμης, προκειμένου να «τρέξει» [60].

Ο Προ-Επεξεργαστής του Opera-3d διαθέτει επίσης κάποια άνω όρια, σχετικά με το μέγιστο πλήθος οντοτήτων που μπορούν να κατασκευαστούν. Τα τρέχοντα όρια [60] φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Όρια του Προ-Επεξεργαστή του Opera-3d	
Οντότητες ⁷ στις εσωτερικές βάσεις δεδομένων	5 000 000
Διαθέσιμοι αγωγοί	απεριόριστοι
Εμφανιζόμενοι αγωγοί	20 000

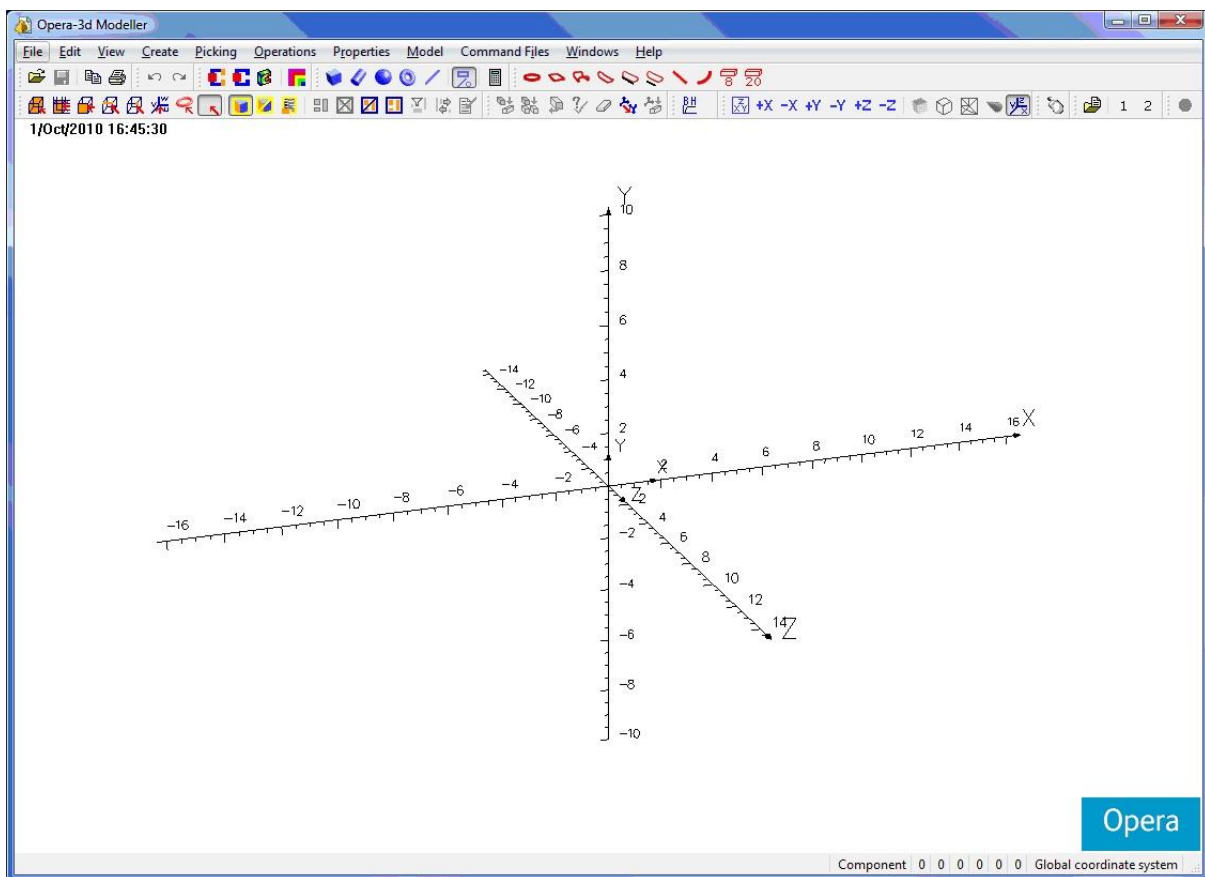
Πίνακας I-1

⁷ Οντότητες (entities) = συνολικός αριθμός σημείων + γραμμών + επιφανειών + όγκων

II. Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d

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

Όταν ξεκινά ο Μοντελοποιητής, εμφανίζονται στην οθόνη, με τη μορφή τρισδιάστατης εικόνας, οι τρεις άξονες (x,y,z), όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα II-1: Η εικόνα που πρωτοεμφανίζει ο Μοντελοποιητής με λειτουργικό σύστημα Windows 7 Professional [59].

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

ι. Τοπολογία στο Μοντελοποιητή

Κελί (Cell)

Ένα κελί αποτελεί έναν κλειστό όγκο του χώρου που περιορίζεται από ένα ή περισσότερα τοιχώματα. Η νοητή γραμμή που ενώνει δύο οποιαδήποτε σημεία μέσα στο κελί δεν τέμνει καμιά επιφάνεια. Οι ιδιότητες του κελιού ανατίθενται σε αυτό από το πεδίο Properties → Cell properties, όπως φαίνεται στο σχήμα II-2

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

✚ Μια ετικέτα υλικού (material label).

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

✚ Τύπο δυναμικού (Potential type).

Οι δυνατές επιλογές είναι TOTAL, REDUCED και VECTOR. Στο TOSCA electrostatics χρησιμοποιείται ο τύπος TOTAL.

✚ Τύπο στοιχείου (Element type).

Μπορεί να είναι γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, ή τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού. Οι αντίστοιχοι όροι στο πρόγραμμα απαντώνται ως LINEAR και QUADRATIC.

✚ Ετικέτα σχετική με τις ιδιότητες του συγκεκριμένου όγκου (Volume properties label).

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

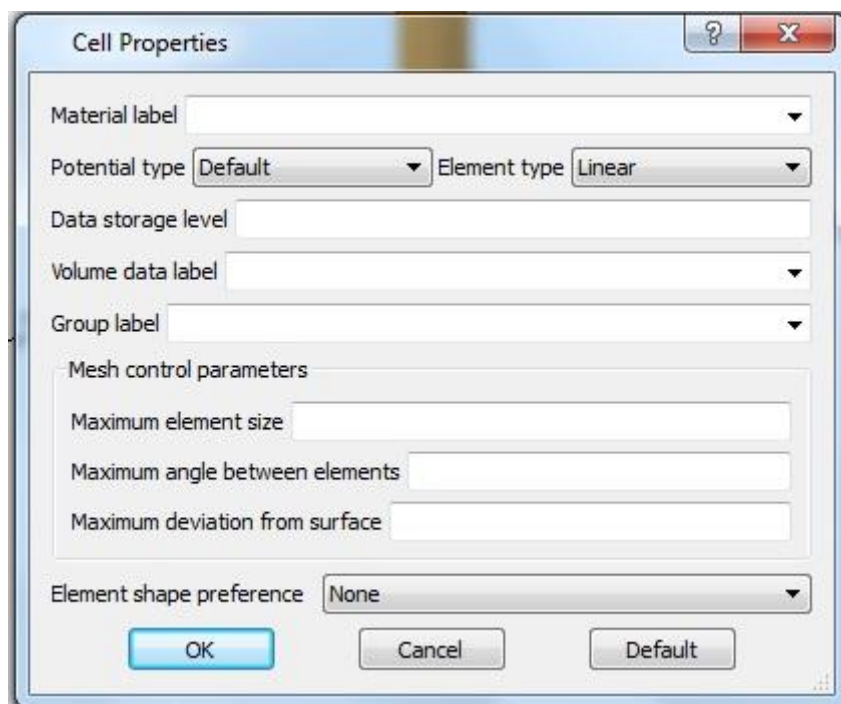
✚ Παραμέτρους σχετικές με το δημιουργούμενο στο κελί πλέγμα (Mesh control parameters).

Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη μέγιστη τιμή πυκνότητας του πλέγματος που δημιουργείται στο κελί.

✚ Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.

Όταν γίνονται πράξεις μεταξύ σωμάτων, τα κελιά που δημιουργούνται σχηματίζονται από το συνδυασμό των αρχικών κελιών. Σε μια τέτοια περίπτωση, δεν είναι ξεκάθαρο ποια από τα αρχικά

δεδομένα θα καθορίσουν τα τελικά δεδομένα του προκύπτοντος κελιού. Το data storage level χρησιμοποιείται για την επίλυση ακριβώς αυτού του προβλήματος, καθώς το τελικό κελί θα αποκτήσει τελικά τις ιδιότητες εκείνου του κελιού με την υψηλότερη τιμή στο πεδίο data storage level. Όταν στο πεδίο αυτό τα αρχικά κελιά έχουν την ίδια τιμή, τότε το αποτέλεσμα είναι αμφίβολο.



Σχήμα II-2: Τρόπος ανάθεσης ιδιοτήτων ενός κελιού [59].

Σώμα (Body)

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

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

Δεδομένα επιφάνειας

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

✚ Ετικέτα συνοριακής συνθήκης (boundary condition label).

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

✚ Τύπο στοιχείου (Element type).

Μπορεί να είναι γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, ή τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού. Οι αντίστοιχοι όροι στο πρόγραμμα απαντώνται ως LINEAR και QUADRATIC.

✚ Παραμέτρους σχετικές με το δημιουργούμενο στην επιφάνεια πλέγμα (Mesh control parameters).

Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη μέγιστη τιμή πυκνότητας του πλέγματος που δημιουργείται στην επιφάνεια.

✚ Διαστρωμάτωση (Layering)

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

✚ Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.

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

Δεδομένα γραμμής

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

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

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

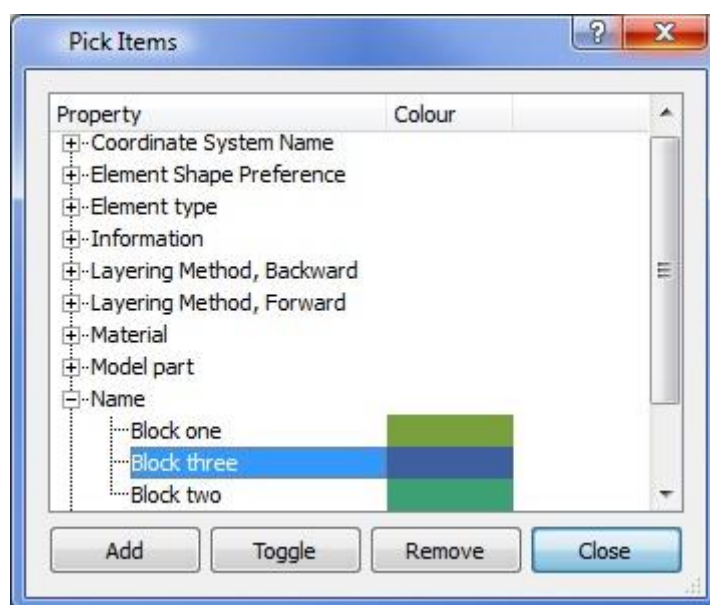
Τα βασικά σχήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, δημιουργούνται κάθε φορά στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων. Μπορούν να οριστούν τοπικά συστήματα συντεταγμένων και ένα από αυτά επιλέγεται να είναι το τρέχον (αυτό στο οποίο εργαζόμαστε) σύστημα. Όλα τα βασικά σχήματα, καθώς και οι μετασχηματισμοί που εφαρμόζονται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

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

Η λειτουργία της αντιγραφής (εντολή Copy) μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα επιλεγμένα σώματα για να δημιουργήσει αντίγραφα των σωμάτων αυτών. Εάν έχει επιλεγεί ένα κελί, αυτό μπορεί να αντιγραφεί μόνο του και η διαδικασία δημιουργεί ένα καινούριο σώμα που περιέχει αυτό το μοναδικό κελί που έχει αντιγραφεί. Στα μοντέλα που προσομοιώθηκαν για παράδειγμα, πρώτα δημιουργήθηκε το τοροειδές εξομάλυνσης του άκρου Υ.Τ. και στη συνέχεια, με την εντολή Copy και με κατάλληλη μετατόπιση (Displace) στον άξονα-γ, δημιουργήθηκε άλλο ένα τοροειδές, στο γειωμένο άκρο της διάταξης αυτή τη φορά.

ii. Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute)

Κάθε οντότητα μπορεί να έχει δεδομένα που αφορούν στις ιδιότητές της. Αυτά τα δεδομένα ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της οντότητας κάθε φορά. Για παράδειγμα, ένα σώμα έχει ένα όνομα που συνδέεται με αυτό, καθώς και μια ομάδα ετικετών που μπορούν να εφαρμοστούν. Ένα κελί έχει μια ετικέτα που υποδεικνύει από τί υλικό είναι φτιαγμένο το κελί (material label), μια ετικέτα όγκου, έναν αριθμό που καθορίζει το μικρότερο μέγεθος του πλέγματος σε αυτό το κελί, καθώς και άλλες ετικέτες. Η εντολή Pick εκμεταλλεύεται αυτά τα χαρακτηριστικά (ιδιότητες) για να αναγνωρίσει τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα μοντέλο, με στόχο την τροποποίηση ή τη θέαση του μοντέλου. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται ο τρόπος που επιλέγεται οποιαδήποτε οντότητα σε ένα μοντέλο.



Σχήμα II-3: Επιλογή οντοτήτων σύμφωνα με τις ιδιότητές τους [59].

iii. Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων

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

- ✓ Παράλληλη τοποθέτηση του αντικειμένου (Translation)
- ✓ Περιστροφή του αντικειμένου γύρω από ένα διάνυσμα (Rotation)
- ✓ Απεικόνιση του ειδώλου ενός σώματος (Reflection)
- ✓ Μεγέθυνση ή σμίκρυνση ενός σώματος υπό κάποια κλίμακα (Scale)

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

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

iv. Δημιουργία σύνθετων σωμάτων

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

- Η εντολή Union, η οποία ενώνει τα σώματα, ώστε το τελικό σώμα να έχει τα χαρακτηριστικά των αρχικών σωμάτων (πριν την ένωση).
- Η εντολή Intersection, κατά την οποία παραμένει στο μοντέλο μόνο ο κοινός όγκος των αρχικών σωμάτων που επιλέχθηκαν.
- Η εντολή Subtraction, όπου αφαιρούνται από το πρώτο σώμα που επιλέχθηκε όσα σώματα επιλέχθηκαν κατόπιν. Δηλαδή, σε αυτή την εντολή παίζει ρόλο η σειρά επιλογής των σωμάτων. Προϋπόθεση αποτελεί, φυσικά, το πρώτο σώμα να έχει κοινό όγκο με τα υπόλοιπα. Η εντολή αυτή χρησιμοποιήθηκε κατά τη σχεδιαστική φάση των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο, στη σύνδεση του αγωγού φάσης με το άκρο Υ.Τ. κάθε συνθετικού μονωτήρα.

- Η εντολή Trim, η οποία αφήνει ανέπαφα όλα τα επιλεγμένα σώματα, εκτός από το πρώτο, του οποίου «κόβει» τις άκρες, έτσι ώστε το σώμα αυτό να μην αλληλεπικαλύπτεται με τα άλλα.
- Η εντολή Cutaway, η οποία αφήνει ανέπαφο το πρώτο επιλεγμένο σώμα και «κόβει» τις άκρες των άλλων σωμάτων, ώστε να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη.

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

v. Ανάγνωση και φόρτωση από άλλα σχεδιαστικά αρχεία (CAD files)

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στη δυνατότητα εισαγωγής cad αρχείων για τη δημιουργία της επιθυμητής γεωμετρίας του μοντέλου. Ειδικότερα, από το πεδίο Create → Insert from File μπορεί κανείς να εισαγάγει δεδομένα από ήδη κατασκευασμένα και αποθηκευμένα σχεδιαστικά αρχεία, είτε τρισδιάστατης μορφής (του Opera ή άλλων τρισδιάστατων υπολογιστικών πακέτων, όπως π.χ. τα CATIA, IGES, Pro-E, SAT, STEP) είτε δισδιάστατης, από το Opera-2d (*.or2).

Πιο συγκεκριμένα, από το πεδίο Create → Insert from File → Opera-2d Data File επιτρέπεται η εισαγωγή στο Μοντελοποιητή δισδιάστατων γεωμετριών από το Opera-2d, δηλαδή προστίθενται σ' αυτόν ένας επιφανειακός «φλοιός», ο οποίος μπορεί να είναι απαλλαγμένος από τις περιοχές αέρα του δισδιάστατου μοντέλου. Η εισαγόμενη δισδιάστατη γεωμετρία αναπαρίσταται ως ένα σύνολο σωμάτων. Ρυθμίζοντας την παράμετρο SWEEPDISTANCE (η τιμή της οποίας είναι 1 από προεπιλογή, by default), είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απόστασης εξώθησης ή, αν πρόκειται για μοντέλα με αξονική συμμετρία, η γωνία περιστροφής τους. Αν η τιμή της παραμέτρου αυτής τεθεί ίση με το μηδέν, η προκύπτουσα γεωμετρία που φαίνεται έχει την εικόνα του προαναφερθέντος επιφανειακού «φλοιού». Αν τεθεί μη μηδενική τιμή, οι εισαγόμενες περιοχές εξωθούνται μέσω της απόστασης ή περιστρέφονται μέσω της γωνίας, αν πρόκειται για αξονικά συμμετρικά μοντέλα, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου.

Κατά τη σχεδίαση όλων των μοντέλων συνθετικών μονωτήρων που προσομοιώθηκαν και παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, αξιοποιήθηκε στο έπακρο η δυνατότητα αυτή του Opera-3d (βλέπε υποενότητα 4.2.1, σχήματα 4.2, 4.3). Όπως αναφέρθηκε, τα δισδιάστατα αρχεία της μορφής *.or2, τα οποία παρουσίαζαν όλα αξονική συμμετρία, είχαν ήδη κατασκευαστεί με τη βοήθεια του Opera-2d και η ρύθμιση της παραμέτρου SWEEPDISTANCE έγινε έτσι, ώστε να αποκαλυφθεί η πλήρης τρισδιάστατη γεωμετρία. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομήθηκε σημαντικός χρόνος, κυρίως όσον αφορά στο στάδιο του σχεδιασμού, ενώ τα τρισδιάστατα μοντέλα που προέκυψαν δεν υπολείπονταν ακρίβειας, σε σχέση με το να είχαν σχεδιαστεί εξ' αρχής στο Μοντελοποιητή του Opera-3d.

vi. Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία πλέγματος

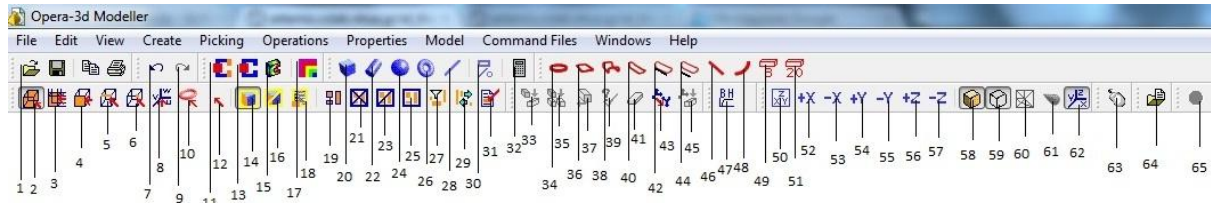
Για τη δημιουργία ενός συνεχούς πλέγματος σε όλο τον όγκο του χώρου που μοντελοποιείται, είναι απαραίτητο να έχει δημιουργηθεί ένα ενιαίο σώμα. Αυτό το σώμα αποτελείται από πολλαπλά κελιά, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Για να γίνει πιο εύκολη η μοντελοποίηση, είναι προτιμότερο να προκύψουν πολλά απλά σώματα, τα οποία να μπορούν εύκολα να μετακινηθούν ή

να τεθούν υπό κάποια επιθυμητή κλίμακα. Για να γίνει η μετάβαση από τα πολλά σώματα σε ένα ενιαίο σώμα, στο οποίο να μπορεί να δημιουργηθεί πλέγμα, χρησιμοποιούμε την εντολή `Create Model Body` από το πεδίο `Model`. Αυτή η εντολή δημιουργεί ένα αντίγραφο για κάθε ένα σώμα του μοντέλου και τα ενώνει, χρησιμοποιώντας μια πράξη (άλγεβρας `Boole`) ένωσης χωρίς κανονικοποίηση, προκειμένου να διασφαλιστεί η διατήρηση των εσωτερικών ιδιοτήτων των υλικών και των συνόρων μεταξύ των υλικών. Το ενιαίο σώμα που σχηματίζεται θα έχει τις ιδιότητες που καθορίζονται από τα συστατικά μέρη του ενιαίου σώματος. Οι ιδιότητες αυτές προσαρμόζονται, όπου αυτό είναι απαραίτητο, για να ληφθούν υπόψη οι αντιθέσεις μεταξύ των υλικών, αξιοποιώντας την τιμή του πεδίου `data storage level`. Το ενιαίο σώμα που έχει σχηματιστεί είναι πλέον έτοιμο για να περάσει στο στάδιο δημιουργίας πλέγματος τόσο στην επιφάνεια, όσο και στον όγκο του. Εάν το μοντέλο δεν είναι σωστό, τότε θα εμφανιστεί κάποιο εικονίδιο στο Μοντελοποιητή κατά τη δημιουργία του πλέγματος, στο οποίο θα αναφέρεται η ύπαρξη κάποιου λάθους στο μοντέλο. Για τη διόρθωση του λάθους, πρέπει καταρχάς να καταργηθεί το ενιαίο σώμα με την εντολή `Delete Model Body` από το πεδίο `Model`. Στη συνέχεια, με την εντολή `Check` από το πεδίο `Operations`, είναι πολύ πιθανό να εντοπιστεί το σφάλμα αυτό, επιλέγοντας κάποιον αριθμό σωμάτων μαζί, για να διαπιστωθεί εάν αυτά αλληλεπικαλύπτονται. Να σημειωθεί ότι το αρχείο του μοντέλου, πριν τη δημιουργία του πλέγματος, είναι της μορφής `*.orc`.

Κατά τη δημιουργία του μοντέλου, για να περιοριστεί ο χώρος του μοντέλου και για να αποτυπώνει η προσομοίωση όσο το δυνατόν καλύτερα το αντίστοιχο πραγματικό μοντέλο, καλό είναι να χρησιμοποιηθεί μια περιοχή αέρα (`background-air`). Κατά την προσομοίωση των μονωτήρων το δυναμικό τέθηκε ίσο με το μηδέν στις εξωτερικές επιφάνειες του `background`, θεωρώντας ότι το δυναμικό στο άπειρο είναι μηδενικό. Οποιοδήποτε σχήμα (κύβος, κύλινδρος, σφαίρα και άλλα) μπορεί να αποτελέσει μια περιοχή αέρα, αρκεί κατά τη δημιουργία του κελιού αυτού να ανατεθεί σε αυτό η ονομασία `background`. Κατά τη μοντελοποίηση της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε `background` σχήματος παραλληλεπίπεδου.

Στο Μοντελοποιητή είναι δυνατή η αυτόματη δημιουργία τετραεδρικού πλέγματος μέσω της εντολής `Generate Surface Mesh` από το πεδίο `Model`. Αντίθετα, στον Προ-Επεξεργαστή είναι δυνατή η δημιουργία τόσο τετραεδρικού όσο και εξαεδρικού πλέγματος. Στην πραγματικότητα, η δημιουργία εξαεδρικών στοιχείων παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια, όσον αφορά στα αποτελέσματα της ανάλυσης, σε σχέση με τα τετραεδρικά στοιχεία. Σε προβλήματα όπου η ακρίβεια είναι πολύ σημαντική, προτιμάται η δημιουργία εξαεδρικού πλέγματος στον Προ-Επεξεργαστή. Όμως, επειδή μας συμφέρει η δημιουργία του μοντέλου στο Μοντελοποιητή, μια λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν να αυξήσουμε τον αριθμό των τετραεδρικών στοιχείων του πλέγματος, μειώνοντας την τιμή του πεδίου `Maximum element size` κατά την κατασκευή των κελιών, στα οποία ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Κατά την εφαρμογή αυτής της εκδοχής, η οποία ήταν εκείνη που ακολουθήθηκε κατά τη μοντελοποίηση όλων των μονωτήρων του 4^{ου} Κεφαλαίου, κατέστη δυνατή η εστίαση σε μια περιοχή ενδιαφέροντος. Φυσικά, η λύση αυτή έχει το μειονέκτημα ότι οδηγεί στην αύξηση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος.

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



Σχήμα II-4: Η γραμμή εργαλείων του Μοντελοποιητή.

- 1: Άνοιγμα ενός ήδη υπάρχοντος αρχείου (load a data file).
- 2: Επιλογή σώματος.
- 3: Επιλογή κελιού.
- 4: Επιλογή επιφάνειας.
- 5: Επιλογή ακμής.
- 6: Επιλογή κόμβου.
- 7: Αναίρεση (undo).
- 8: Χρησιμοποιείται για την επιλογή ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων (Coordinate systems button). Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 14.
- 9: Επανάληψη (redo).
- 10: Χρησιμοποιείται για την επιλογή αγωγών. Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 14.
- 11: Παρέχει τη δυνατότητα για επιλογή οντοτήτων προς εμφάνιση.
- 12: Αναιρεί την επιλογή των κουμπιών 8 και 10.
- 13: Επαναφέρει την προεπιλεγμένη επιλογή προς εμφάνιση.
- 14: Επιλογή οντότητας (pick entity toolbar button). Αυτό το κουμπί πρέπει να είναι πατημένο πριν την επιλογή κάποιας από τις εξής οντότητες: σώμα, κελί, επιφάνεια, ακμή ή κόμβος.
- 15: Ελέγχει την εμφάνιση της γεωμετρίας του μοντέλου (Controls the display of the geometry).
- 16: Πατώντας αυτό το κουμπί και επιλέγοντας κατόπιν κάποιο από τα κουμπιά 2, 3, 4, 5 ή 6, τότε επιλέγοντας μία οντότητα από το μοντέλο, αυτή θα εξαφανιστεί -οπτικώς μόνο- από την οθόνη.
- 17: Δυνατότητα αλλαγής χρώματος των υλικών του μοντέλου.
- 18: Εμφάνιση των ιδιοτήτων που έχουν τεθεί στην επιλεγθείσα οντότητα (Show entity properties).

- 19:Επιλογή όλων των οντοτήτων του τύπου φίλτρου.
- 20:Δημιουργία κύβου ή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.
- 21:Με το πάτημα αυτού του κουμπιού αναιρείται η επιλογή των ήδη επιλεγμένων οντοτήτων (Reset picked entities).
- 22:Δημιουργία κυλίνδρου, κώνου ή ελλειψοειδούς κυλίνδρου.
- 23:Επιλογή αφαίρεσης της επιλεγθείσας οντότητας από τη θέαση του μοντέλου (Hide entity toolbutton).
- 24:Δημιουργία σφαίρας.
- 25:Με αυτή την εντολή, όλες οι κρυμμένες οντότητες γίνονται πάλι ορατές (Unhide entities).
- 26:Δημιουργία τοροειδούς.
- 27:Αφαίρεση από τη λίστα των επιλεγμένων οντοτήτων εκείνων οι οποίες δεν ταιριάζουν με την τρέχουσα ρύθμιση φίλτρου.
- 28:Δημιουργία σύρματος-ακμής.
- 29:Αντικατάσταση των επιλεγμένων οντοτήτων με εκείνες του τρέχοντος τύπου φίλτρου.
- 30:Ρύθμιση/εμφάνιση ενός δισδιάστατου σκαριφήματος δικτύου.
- 31:Επιλογή οντότητας μέσω των ιδιοτήτων της (Pick by property).
- 32:Δημιουργία και επεξεργασία της λίστας αριθμητικών μεταβλητών.
- 33:Μετασχηματισμός ενός ή περισσότερων επιλεγμένων σωμάτων μέσω μετατόπισης, περιστροφής, ανάκλασης ή κλιμάκωσης.
- 34:Δημιουργία σωληνοειδούς αγωγού.
- 35:Αντιγραφή ενός ή περισσότερων επιλεγμένων σωμάτων, κελιών ή ακμών με μετατόπιση, περιστροφή, ανάκλαση ή κλιμάκωση.
- 36:Δημιουργία αγωγών σε σχήμα πίστας.
- 37:Σάρωση μιας ή περισσότερων επιλεγμένων επιφανειών κατά μήκος μιας γραμμής προκειμένου να επεκταθούν ήδη υπάρχοντα ή να δημιουργηθούν νέα σώματα.
- 38:Δημιουργία αγωγού σε σχήμα πλαισίου.

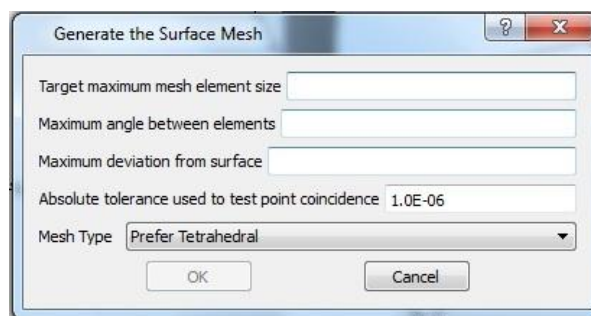
- 39:Έλεγχος της τοπολογίας ενός ή περισσότερων επιλεγμένων σωμάτων.
- 40:Δημιουργία ή τροποποίηση αγωγού ελικοειδούς άκρου.
- 41:Διαγραφή επιλεγμένων οντοτήτων.
- 42:Δημιουργία ή τροποποίηση αγωγού με άκρα σταθερής περιμέτρου (CPE-Constant Perimeter End).
- 43:Μετασχηματισμός τοπικού συστήματος συντεταγμένων.
- 44:Δημιουργία ή τροποποίηση εφαπτομενικού CPE αγωγού.
- 45:Μετακίνηση του τοπικού συστήματος συντεταγμένων στις επιλεγμένες οντότητες.
- 46:Δημιουργία ή τροποποίηση ραβδοειδών αγωγών.
- 47:Αφορά στην διαπερατότητα (permeability μ) κατά τη ρύθμιση ιδιοτήτων του υλικού (Set material properties) σε μαγνητοστατικής φύσεως προβλήματα (Set BH curve properties).
- 48:Δημιουργία ή τροποποίηση τοξοειδών αγωγών.
- 49:Δημιουργία ή τροποποίηση 8-κομβων «τούβλων».
- 50:Με αυτή την εντολή επιστρέφει η αρχική θέαση (initial view) του μοντέλου, ώστε αυτό να φαίνεται ολόκληρο στην οθόνη.
- 51:Δημιουργία ή τροποποίηση 20-κομβων «τούβλων».
- 52:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα-x.
- 53:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα-x.
- 54:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα-y.
- 55:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα-y.
- 56:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα-z.
- 57:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα-z.
- 58-62: Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων κομματιών του μοντέλου.
- 63: Ρυθμίζει τη λειτουργικότητα των κουμπιών του ποντικιού.

64: Με αυτό το κουμπί διαβάζεται ένα αρχείο εντολών εισόδου (*.comi).

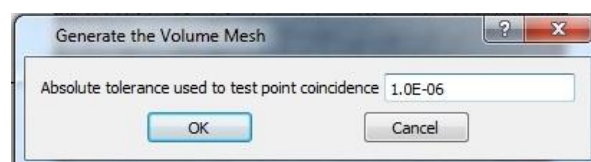
65: Όταν είναι κόκκινο, παρέχεται η δυνατότητα διακοπής και ακύρωσης της τρέχουσας λειτουργίας (π.χ. διακοπή της δημιουργίας του πλέγματος προτού αυτή ολοκληρωθεί) [59, 60].

vii. Δημιουργία του πλέγματος

Η εντολή δημιουργίας του πλέγματος είναι έγκυρη, μόνο αφού έχει δημιουργηθεί το ενιαίο σώμα. Η δημιουργία του πλέγματος είναι μια διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, δημιουργείται το επιφανειακό πλέγμα, χρησιμοποιώντας την εντολή Generate surface mesh από το πεδίο Model. Το μέγεθος του επιφανειακού πλέγματος δημιουργείται από τις πληροφορίες που έχουν δοθεί για κάθε κελί στο πεδίο maximum element size. Το πλέγμα στις επιφάνειες των κελιών δημιουργείται διαδοχικά. Κατά τη δημιουργία του επιφανειακού πλέγματος, το εξωτερικό περίβλημα κάθε επιφάνειας, στην οποία δημιουργείται το πλέγμα, φωτίζεται έντονα με ροζ χρώμα. Για πολύπλοκα μοντέλα, όπως ήταν και οι συνθετικοί μονωτήρες με διπλό αγωγό φάσης και τμήμα πυλώνα που προσομοιώθηκαν, ο χρόνος δημιουργίας του πλέγματος είναι αρκετά μεγάλος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτός ο χρόνος μπορεί να μειωθεί αισθητά, εάν ελαχιστοποιηθεί το παράθυρο του Μοντελοποιητή. Κατόπιν, με την εντολή Generate volume mesh από το πεδίο Model, δημιουργούνται τα τετραεδρικά στοιχεία όγκου στο χώρο του μοντέλου. Η δημιουργία του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου είναι εφικτή, εφόσον υπάρχει έγκυρο επιφανειακό πλέγμα. Μετά και το πέρας της επιτυχούς δημιουργίας του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου, το μοντέλο αποθηκεύεται με την αρχαιακή μορφή *.orcb. Τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του μοντέλου θα καταστρέψουν το πλέγμα. Επίσης, είναι δυνατόν να επανέλθει κανείς σε παλαιότερο πλέγμα με την εντολή Undo, ωστόσο τα πλέγματα πριν από αυτό, θα έχουν διαγραφεί. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα δύο στάδια δημιουργίας του πλέγματος του μοντέλου.



(α)



(β)

Σχήμα II-5: Δημιουργία πλέγματος (α) στην επιφάνεια και (β) στον όγκο του μοντέλου.

viii. Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση

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

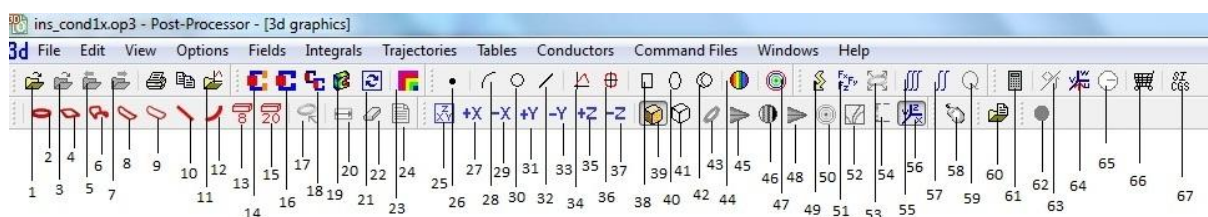
ix. Ανάλυση του μοντέλου

Από το πεδίο Model → Analysis settings επιλέγεται το επιθυμητό πρόγραμμα ανάλυσης. Κατά την προσομοίωση των συνθετικών μονωτήρων της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα επίλυσης Tosca electrostatics. Κατόπιν, δημιουργείται η βάση δεδομένων του μοντέλου από το πεδίο Model → Create analysis database. Σε αυτό το σημείο επιλέγονται οι μονάδες κατασκευής του μοντέλου. Στα μοντέλα των μονωτήρων επιλέχθηκε το πεδίο SI (mm) για μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση. Το μοντέλο, μαζί με το πλέγμα και τις έως τώρα αλλαγές που έχουν γίνει, μπορεί να αποθηκευτεί μέσω της εντολής File → Save model with mesh. Το τελικό στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιείται μέσω του πεδίου Model → Start Analysis.

III. Ο Μετ-Επεξεργαστής του Opera-3d

Μετά το πέρας και της διαδικασίας μοντελοποίησης, η οποία περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, μπορεί απευθείας να ανοίξει το παράθυρο του Μετ-Επεξεργαστή μέσω του Μοντελοποιητή με την εντολή Model → Launch Post Processor, οπότε και εμφανίζεται η εικόνα η εικόνα του προς μελέτη προσομοιωμένου μοντέλου. Το αρχείο αυτό είναι πλέον αποθηκευμένο στο Μετ-Επεξεργαστή υπό τη μορφή *.op3 και μπορεί κανείς να το ανοίξει οποιαδήποτε στιγμή, προκειμένου να λάβει τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου και στην περιοχή γύρω από αυτό. 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 κ.λπ.) μπορεί να εμφανίζεται σε σημεία, (με την εντολή Fields at a point), κατά μήκος γραμμών, (με την εντολή Fields along a line) ή με τη μορφή δυναμικών γραμμών ή χρωματισμένων περιοχών (με την εντολή Contour map).

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



Σχήμα III-1: Η γραμμή εργαλείων του Μετ-Επεξεργαστή.

- 1: Άνοιγμα ενός .or3 αρχείου για λήψη γραφικών και μη αποτελεσμάτων.
- 2: Ορισμός ενός νέου σωληνοειδούς αγωγού.
- 3: Φόρτωση μιας διαφορετικής προσομοίωσης από τη βάση δεδομένων.
- 4: Ορισμός ενός νέου αγωγού σχήματος πίστας.
- 5: Φόρτωση της προηγούμενης προσομοίωσης από τη βάση δεδομένων.
- 6: Ορισμός ενός νέου αγωγού σχήματος πλαισίου.
- 7: Φόρτωση της επόμενης προσομοίωσης από τη βάση δεδομένων.
- 8: Ορισμός ενός νέου αγωγού ελικοειδούς άκρου.
- 9: Ορισμός ενός νέου αγωγού με άκρα σταθερής περιμέτρου (CPE-Constant Perimeter End).
- 10:Ορισμός ενός νέου ραβδοειδούς αγωγού.
- 11:Σχεδιασμός γραφήματος εξωτερικών δεδομένων.
- 12:Ορισμός ενός νέου τοξοειδούς αγωγού.
- 13:Ορισμός ενός νέου 8-κομβου «τούβλου».
- 14:Επιλογή συγκεκριμένων τμημάτων του μοντέλου προς εμφάνιση στην οθόνη του Μετ-Επεξεργαστή (select parts of model to be displayed).
- 15:Ορισμός ενός νέου 20-κομβου «τούβλου».
- 16:Κάνοντας αυτή την επιλογή, στην οθόνη εμφανίζονται όλα τα υλικά του μοντέλου εκτός από τον αέρα (Default select and refresh).
- 17:Εναλλαγή της γραφικής επιλογής των αγωγών.
- 18:Γίνεται μόνο ανανέωση της εικόνας στο Μετ-Επεξεργαστή, χωρίς να γίνει κάποια αλλαγή σε προηγούμενες επιλογές όσον αφορά στην επίδειξη του μοντέλου.
- 19:Η επιλογή αυτή επιτρέπει την απεικόνιση μέσω χρωμάτων της μαγνητικής επαγωγής, της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού ή της διηλεκτρικής μετατόπισης πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου(3d display button).
- 20:Τροποποίηση επιλεγμένων αγωγών.

- 21:Ανανέωση της εικόνας του μοντέλου.
- 22:Διαγραφή επιλεγμένων αγωγών.
- 23:Παρέχει τη δυνατότητα αλλαγής των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.
- 24:Εμφάνιση των δεδομένων των ευρισκόμενων στη λίστα ή όλων των αγωγών, αν η λίστα είναι κενή.
- 25:Επιτρέπει την ολοκληρωμένη θέαση του μοντέλου στην οθόνη (Initial view toolbutton).
- 26:Μέσω αυτής της εντολής, υπολογίζεται απευθείας η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού, της μαγνητικής επαγωγής ή της διηλεκτρικής μετατόπισης σε ένα σημείο με συγκεκριμένες συντεταγμένες οι οποίες καθορίζονται από το χρήστη (Fields at a point).
- 27:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα-x.
- 28:Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός τόξου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες των άκρων και του κέντρου του.
- 29:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα-x.
- 30:Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός κύκλου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες του κέντρου, καθώς και την ακτίνα του.
- 31:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα-y.
- 32:Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής.
- 33:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα-y.
- 34:Μέσω αυτής της επιλογής, η οποία ακολουθείται από τις 26, 28, 30 ή 32, απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος.
- 35:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα-z.
- 36:Μέσω αυτής της επιλογής, η οποία ακολουθείται από τις 26, 28, 30 ή 32, απεικονίζεται σε πολικό διάγραμμα το επιθυμητό μέγεθος.
- 37:Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα-z.
- 38:Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός καρτεσιανού επιπέδου (του οποίου οι συντεταγμένες είναι οι x, y, z), πάνω στο οποίο, με το κουμπί 44 απεικονίζεται το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a cartesian patch).

39-45 (μόνο οι περιπτοιί): Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων τμημάτων του μοντέλου.

45-56 (μόνο οι άρτιοι): Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων τμημάτων του μοντέλου.

40: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός πολικού επιπέδου (του οποίου οι συντεταγμένες είναι οι r , θ , z), πάνω στο οποίο, με το κουμπί 44 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a polar patch).

42: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός σφαιρικού επιπέδου (του οποίου οι συντεταγμένες είναι οι r , θ , ϕ), πάνω στο οποίο, με το κουμπί 44 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a spherical patch).

44: Με αυτή την εντολή απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος πάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, αφού έχει οριστεί πρώτα με τις εντολές 38, 40 ή 42. Το μέγεθος αυτό απεικονίζεται είτε ως χρωματισμένες περιοχές (zone map) είτε ως ιστόγραμμα (histogram) είτε ως γραμμές (lines) (Contour or vector map).

47: Απεικόνιση μιας επιφάνειας πάνω στην οποία η επιλεγμένη πεδιακή συνιστώσα διατηρεί μια σταθερή τιμή (Surface with a Constant Field Value).

49: Παρέχει τη δυνατότητα να υπολογιστούν, μέσω της ολοκλήρωσης του όγκου του μοντέλου, διάφορα παράγωγα μεγέθη της γεωμετρίας, όπως η αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος, οι απώλειες ισχύος και οι δυνάμεις Lorentz (Energy, power and force button).

51: Ολοκλήρωση δυνάμεων σε κάποια επιλεγμένη επιφάνεια (Forces on Selected Surface).

53: Υπολογισμός δυνάμεων Lorentz ή τάσεων σε αγωγούς (Integral over Conductors).

55: Ολοκλήρωση οποιασδήποτε επιθυμητής ποσότητας (μεγέθους) σε οποιονδήποτε όγκο του μοντέλου (υπολογισμός τριπλού ολοκληρώματος).

57: Ολοκλήρωση οποιασδήποτε επιθυμητής ποσότητας (μεγέθους) σε κάποια επιλεγμένη επιφάνεια του μοντέλου (υπολογισμός διπλού ολοκληρώματος).

58: Ρύθμιση της λειτουργικότητας των κουμπιών του ποντικού.

59: Υπολογισμός παράγοντα Q κάποιας κοιλότητας συντονισμού (Cavity Q Factor of a resonant cavity).

60: Με αυτό το κουμπί διαβάζεται ένα αρχείο εντολών εισόδου (*.comi).

61: Δημιουργία και επεξεργασία της λίστας αριθμητικών μεταβλητών.

62: Όταν είναι κόκκινο, παρέχεται η δυνατότητα διακοπής και ακύρωσης της τρέχουσας λειτουργίας (π.χ. διακοπή της δημιουργίας του πλέγματος προτού αυτή ολοκληρωθεί).

63: Ρύθμιση επιλογών οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο υπολογισμού των πεδίων: μέθοδος υπολογισμού (Field Calculation Method).

64: Ρύθμιση επιλογών οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο υπολογισμού των πεδίων: οι θέσεις των πεδιακών σημείων (Field Points Options).

65: Ρύθμιση επιλογών οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο υπολογισμού των πεδίων: η γωνία γύρω από τον ac κύκλο (AC Time).

66: Έλεγχος ποιού σύστημα μεταβλητών είναι διαθέσιμο για τους υπολογισμούς πεδίου.

67: Με αυτή την επιλογή, παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής μονάδων στο Μετ-Επεξεργαστή [59, 60].

IV. Αλγόριθμοι επίλυσης – τι υπάρχει πίσω από τα υπολογιστικά πακέτα

Τα προγράμματα ανάλυσης που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα I-i ενσωματώνουν ορισμένους αλγορίθμους για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τις πλέον σύγχρονες διαδικασίες αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργεί τη βάση για τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα υπολογιστικά πακέτα. Αυτή η τεχνική επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτεί ειδικές βελτιώσεις, ώστε να εφαρμοστεί σε υπολογισμούς ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ο Μοντελοποιητής και ο Προ-Επεξεργαστής του Opera-3d παρέχουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τον καθορισμό σύνθετων γεωμετριών με αγωγούς, τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών, συμπεριλαμβανομένων, λόγου χάρη, της μη-γραμμικότητας και της ανισοτροπικότητας, ενώ ο Μετ-Επεξεργαστής είναι εκείνος που «φροντίζει» για τη γραφική επίδειξη των αποτελεσμάτων.

i. Επιλύτης TOSCA, ανάλυση στατικού πεδίου

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

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

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (\text{IV.1})$$

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

$$\nabla \mathbf{D} = \rho \quad (\text{IV.2})$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (IV.1) και (IV.2) και εισάγοντας τη διηλεκτρική επιτρεπτότητα (ϵ), παίρνουμε τη συνήθη περιγραφή της εξίσωσης Poisson για το ηλεκτρικό δυναμικό:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho \quad (\text{IV.3})$$

όπου

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (\text{IV.4})$$

Μια πανομοιότυπη εξίσωση προκύπτει από τα προβλήματα ροής ρεύματος:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (\text{IV.5})$$

όπου σ η αγωγιμότητα και

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{IV.6})$$

η πυκνότητα ρεύματος.

Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές (οριακές) συνθήκες διαδραματίζουν διπλό ρόλο. Πρώτον, παρέχουν ένα τρόπο μείωσης της αναπαράστασης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα που παρουσιάζουν συμμετρία. Δεύτερον, χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν κατά προσέγγιση το πεδίο σε μεγάλες αποστάσεις από το πρόβλημα.

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

Πίνακας IV-1: Συνοριακές συνθήκες στον επιλύτη TOSCA.

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

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

Στα ηλεκτροστατικά πεδία, θα έχουν προφανώς τεθεί στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων οριακές συνθήκες με συγκεκριμένες τιμές δυναμικού ($V = \text{τιμή}$). Στο αντίστοιχο πρόβλημα ροής ρεύματος, για το οποίο το πρόγραμμα TOSCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μπορεί να φανεί απαραίτητο να τεθούν στις επιφάνειες και μη-μηδενικές παράγωγοι δυναμικού ($\frac{\partial V}{\partial n} = \text{τιμή} \neq 0$), ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των ρευμάτων. Επίσης, είναι διαθέσιμες και μικτές οριακές συνθήκες για τη μοντελοποίηση δυναμικών πόλωσης που παράγονται από τη διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών. Εκτός από αυτές τις περιπτώσεις, οι άλλες οριακές συνθήκες που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα IV-1 θα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Οι συνθήκες που θα εφαρμόζονται αυτόματα, εάν δεν τίθενται άλλες οριακές συνθήκες στις εξωτερικές επιφάνειες, παρουσιάζονται στον Πίνακα IV-2:

Αυτόματα Εφαρμοζόμενες Οριακές Συνθήκες		
Μαγνητικά Πεδία	<i>Συμμετρία πεδίου</i>	<i>Βαθμωτό δυναμικό</i>
Εφαπτομενικό (Tangential Magnetic)	$\mathbf{H} \cdot \mathbf{n} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$
Ηλεκτρικά Πεδία ή Προβλήματα Ροής Ρεύματος	<i>Συμμετρία πεδίου</i>	<i>Βαθμωτό δυναμικό</i>
Εφαπτομενικό (Tangential Electric)	$\mathbf{E} \cdot \mathbf{n} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$

Πίνακας IV-2: Οριακές συνθήκες που τίθενται αυτόματα στις εξωτερικές επιφάνειες.

Βιβλιογραφία

[1] Weiguo Que, «ELECTRIC FIELD AND VOLTAGE DISTRIBUTIONS ALONG NON-CERAMIC INSULATORS», dissertation, The Ohio State University, 2002.

[2] <http://static.howstuffworks.com/gif/power-transmission.gif>

[3] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.

[4] J. S. T. Looms, «Insulators for High Voltages», Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.

[5] Κ.Θ. Δέρβος, «Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων», Εκδόσεις Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2008.

[6] Elizabeth da Silva, «Reliability of Composite Insulators», http://www.supergen-amperes.org/Other%20Information/OHL%20Meeting%2008/Reliability_of_Composite_Insulators_Seminar.pdf

[7] Ι.Α. Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων Έναντι Υπερτάσεων», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.

[8] Δημήτριος Ι. Αθανασόπουλος, «Πεδιακή κατανομή πλησίον αλυσσοειδών μονωτήρων, Πειραματική Μελέτη», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2006.

[9] «Συμπληρωματικές Σημειώσεις Υψηλών Τάσεων», Εκδόσεις Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2011.

[10] <http://www.skm-eleksys.com/2011/01/transmission-line-accessories.html>

[11] Λαμπρινή Ν. Πλατή, «Υπολογισμός πεδίου σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2006.

[12] Αθανάσιος Γ. Δρακωτός «Υπολογισμός παρασίτων χωρητικότητας και παραμέτρων τόξου υπερπήδησης αλυσσοειδών μονωτήρων μέσω γενετικού αλγορίθμου», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2007.

[13] Ηλίας Ε. Γουβαλάρης, «Αναβάθμιση της ποιότητας προσομοίωσης μονωτήρων σε πρόγραμμα πεδιακού υπολογισμού-Εφαρμογή στον υπολογισμό πεδίου σε θέση αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2006.

[14] Ειρήνη Β. Αλεξοπούλου, «Γήρανση Μονωτήρων», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2006.

[15] http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_dioxide

- [16] <http://www.made-in-china.com/showroom/willerwon/product-detailqMwmXcgBSihS/China-Porcelain-Transformer-Bushing-Insulator-20NF-Series-.html>
- [17] Κωνσταντίνος Ε. Κοντομάρης, Φώτιος Α. Σουρτζής, «Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρων», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2005.
- [18] J. Mackevitch, M. Shah, «Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation», IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, May/June 1997, pp. 5-12.
- [19] http://www.alibaba.com/productgs/33410-2455/silicon_rubber_for_manufacturing_composite_insulators.html
- [20] E.L. Leguenza, P.C.N. Scarpa, D.K. Das-Gupta, «Dielectric Behavior of Aged Polyethylene Under UV Radiation», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 4, August 2002, pp 507-513.
- [21] Tomas Gustavsson, «Outdoor Aging of Silicone Rubber Formulations in Coastal Environment», Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Göteborg, Sweden, Technical report No. 353L, June 2000.
- [22] <http://www.fcifurukawa.hu/wp-content/themes/fci/images/sub/01.jpg>
- [23] <http://www.p-wholesale.com/subcat/5/293/power-transmission-transformer-p18.html>
- [24] Muhammad Amin and Muhammad Salman, «Aging of polymeric insulators (an overview)», Department of Electrical Engineering, University of Engineering and Technology, Taxila, Pakistan, 2006
- [25] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao, K. Izumi, Y. Kubota and M. Sakata, «Survey on the Use of Non-ceramic Composite Insulators», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 6 No. 5, October 1999.
- [26] http://xianbushing.en.alibaba.com/productshowimg/250327499-209502450/800kV_400kN_DC_Long_rod_composite_insulator_complete_.html
- [27] <http://knol.google.com/k/overhead-line-insulators#>
- [28] H.M. Ryan, «High voltage engineering and testing», Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom 1994.
- [29] S. Simmons, M. Shah, J. Mackevich, R.J. Chang, «Polymer Outdoor Insulating Materials Part III – Silicone Elastomer Considerations», IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 5, September/October 1997, pp. 25-32.

- [30] K. Eleperuma, T.K. Saha, T. Gillespie, «Electric Field Modeling of Non Ceramic High Voltage Insulators», Australasian Universities Power Engineering Conference, Hobart, Tasmania, Australia, September 2005.
- [31] IEC 815, «Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions», 1986
- [32] Εμμανουήλ Θαλασσινάκης, «Ευλογία για τη ζωή μας, κατάρα για τα ηλεκτρικά δίκτυα», <http://www.patris.gr/articles/64726?PHPSESSID=>
- [33] Κ. Σιδεράκης, Δ. Πυλαρινός, Ε. Θαλασσινάκης, Ι. Βιτέλλας, Ε. Πυργιώτη, «Διερεύνηση της συμπεριφοράς Συνθετικών Μονωτήρων HTV SIR και Κεραμικών Μονωτήρων με Επικάλυψη από RTV SIR στον παράκτιο σταθμό δοκιμής μονωτήρων της ΔΕΗ/ΔΔΝ», Σύνοδος Αθήνα 2011, Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 15-16 Δεκεμβρίου 2011.
- [34] <http://www.flickr.com/photos/mitsacy/page2/>
- [35] <http://galvestondailynews.com/story/241634/>
- [36] http://www.tradekey.com/product_view/id/79349.htm
- [37] J. Mackevich, S. Simmons, «Polymer Outdoor Insulating Materials Part II – Material Considerations», IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 4, July/August 1997, pp. 10-16.
- [38] Βασιλική Θ. Κονταργύρη, «Αιτίες γήρανσης πολυμερών υλικών-Φωτόλυση», Εξαμηνιαία Εργασία, Αθήνα 2003
- [39] STRI Guide, «Guide for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators», 2003.
- [40] R. Gorur, B. Olsen, A. Kroese, F. Cook, S.S. Kumar, «Evaluation of critical components of non-ceramic insulators in service: Role of defective interfaces», Final Project Report, Power Systems Engineering Research Center, PSERC Publication 04-32, August 2004.
- [41] Tiebin Zhao, Michael G. Comber, «Calculation of electric field and potential distribution along non ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers», IEEE Transactions on power delivery, Vol 15, No. 1, January 2000
- [42] Bo Zhang, Jinliang He, Xiang Cui, Shejiao Han, και Jun Zou, «Electric Field Calculation for HV Insulators on the Head of Transmission Tower by Coupling CSM With BEM», IEEE Transactions On Magnetism, Vol. 42, No. 4, April 2006.
- [43] Bo Zhang, Shejiao Han, Jinliang He, Rong Zeng, και Puxuan Zhu, «Numerical Analysis of Electric-Field Distribution Around Composite Insulator and Head of Transmission Tower», IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, No. 2, April 2006.

- [44] Πέτρος Α. Καρύδης, «Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές», διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση http://users.ntua.gr/caridis/methodoi/chapters_pdf.html.
- [45] Χ.Κ. Γιαννακόπουλος, «Η εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method) στην εμβιομηχανική της Σπονδυλικής Στήλης», διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.orthosurgery.gr/dimosieusis/PsEsS.pdf>.
- [46] Α. Μπακόπουλος, Ι. Χρυσοβέργης, «ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΡΙΚΩΝ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ, Πεπερασμένα στοιχεία και διαφορές», Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 2003.
- [47] Θ. Δ. Τσιμπούκης, «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ, Τόμος Ι, Ηλεκτροστατικό Πεδίο», University Studio Press, Εκδόσεις Επιστημονικών Βιβλίων & Περιοδικών, Θεσσαλονίκη 1991, Ανατύπωση 2000.
- [48] Imre Sebestyén, «Electric-Field Calculation for HV Insulators Using Domain Decomposition Method», IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 38, No. 2, March 2002.
- [49] Daochun Huang, Jiangjun Ruan, Yong Chen, Feng Huo, Shifeng Yu και Shoubao Liu, «Calculation and Measurement of Potential and Electric Field Distribution along 1000 kV AC Transmission Line Composite Insulator», International Conference On Electrical Machines and Systems, October 2008.
- [50] U. Schümann, F. Barcikowski, M. Schreiber, H.C. Kärner, J.M. Seifert «FEM Calculation and Measurement of the Electrical Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements», 39th CIGRE Session, Paris, France, August 2002.
- [51] Fan Yadong, Wen Xishan, Deng Wei, Li Xiaoping, «Research on Electric Potential Distributions of Composite Insulators and Glass Insulators by Numerical Simulation», Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006.
- [52] Jing Li, Zongren Peng, Yong Feng, Xiaoyong Fu, Tianxi Xie, «Electric Field Calculation and Grading Ring Optimization of Composite Insulator for 500 kV AC Transmission Lines», International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 2010.
- [53] E. P. Nicolopoulou, E. N. Gralista, V. T. Kontargyri, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, «ELECTRIC FIELD AND VOLTAGE DISTRIBUTION AROUND COMPOSITE INSULATORS», XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August, 2011.
- [54] Can Yildiz, Aydogan Ozdemir, Suat Ilhan, «Electric Field Distributions around Composite Insulators under AC and Impulse Voltages», proceedings of the International Symposium on Modern Electric Power Systems (MEPS), Wroclaw, Poland, September, 2010.
- [55] G. Xu, P. B. Mc Grath: «Electrical and Thermal Analysis of Polymer Insulator under Contaminated Surface Conditions», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 2, pp. 289-298, April 1996.

[56]Publication IEC60383-1/2, «Insulators for Overhead Lines with a Nominal Voltage above 1000 V», 1993.

[57]Πέτρος Ν. Κατωπόδης, «Μηχανική και Διηλεκτρική Αντοχή Πυλώνων Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσης», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2006.

[58] <http://www.hbxhgy.com/eanli.asp>

[59]Cobham Technical Services Vector Fields Software, «Opera-3d User Guide, Version 15», 24 Bankside Kidlington Oxford OX15 1JE, England, 17 November 2011.

[60]Cobham Technical Services Vector Fields Software, «Opera-3d Reference Manual, Version 15», 24 Bankside Kidlington Oxford OX15 1JE, England, 17 November 2011.