



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

**Πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης  
με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ευφροσύνη-Μαρία Ν. Γράλιστα

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Μάρτιος 2015





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

**Πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης  
με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων**

189

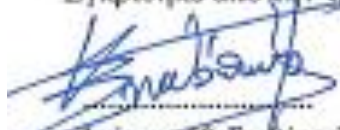
**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**


Ευφροσύνη-Μαρία Ν. Γράλιστα

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Μαρτίου 2015.

  
.....  
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

  
.....  
Φραγκίσκος Β. Τσαπλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

  
.....  
Ιωάννης Φ. Γκίονος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2015

.....

Ευφροσύνη-Μαρία Ν. Γράλιστα

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

Copyright © Ευφροσύνη-Μαρία Γράλιστα, 2015

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.



Ένωσα ήρθε κι έσκυψε  
πάνω απ' το λίκνο μου  
ίδια η μνήμη γινάμενη παρόν  
τη φωνή πήρε των δέντρων, των κυμάτων  
«Έντολή σου» είπε «αυτός ο κόσμος  
και γραμμένος μες στα σπλάχνα σου είναι  
Διάβασε και προσπάθησε  
και πολέμησε» είπε  
«Ο καθείς και τα όπλα του» είπε  
Και τα χέρια του άπλωσε όπως κάνει  
νέος δόκιμος Θεός για να πλάσει μαζί αλγηδόνα κι  
ευφροσύνη

Το Άξιον Εστί  
Οδυσσέας Ελύτης



## Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου πλησίον συνθετικών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Οι σχετικές προσομοιώσεις διενεργήθηκαν σε διδιάστατα μοντέλα συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου Opera-2d. Τα προαναφερθέντα μοντέλα σχεδιάστηκαν βασισμένα σε υπάρχουσες δημοσιευμένες εργασίες αλλά και σε σχέδια συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης, τα οποία παραχωρήθηκαν από τη ΔΕΗ στη συγγραφέα.

Η εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων απαιτεί την ύπαρξη κλειστής γεωμετρίας για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο σε ένα πρόβλημα όπως το παρόν, έγινε η παραδοχή ότι σε μεγάλες αποστάσεις από το μονωτήρα το δυναμικό είναι ίσο με μηδέν. Οι τελικές αποστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από διαδοχικές προσομοιώσεις σε ένα μοντέλο και τα αποτελέσματα αναλυτικά παρουσιάζονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Μια ακόμα παραδοχή, η οποία στοχεύει στην απλοποίηση του προς μελέτη μοντέλου και απορρέει από την εκ περιστροφής συμμετρία των μονωτήρων, αποτέλεσε η σχεδίαση μόνο της τομής που ορίζουν τα επίπεδα  $x=0$  και  $y=0$ . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιγράφουν ικανοποιητικά την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου πλησίον του εκάστοτε μονωτήρα, σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία και τα θεωρητικά προβλεπόμενα.

### Λέξεις-κλειδιά

Υψηλή Τάση, Συνθετικοί Μονωτήρες, Προσομοίωση, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Ηλεκτρικό Πεδίο.

## **Abstract**

The scope of this diploma thesis has been examining the possibility of using the Finite Element Method in calculating the electric field stress in the vicinity of high voltage composite insulators. Simulations were conducted on two-dimensional models of composite suspension insulators using the computational package Opera-2d. The aforementioned models were based on existing published papers and insulator designs given to the writer by the Public Power Corporation.

In order to implement the Finite Element Method a configuration with closed boundaries is required, so that the boundary conditions can be defined. In the current problem, the assumption that the potential at long distances from the insulator is zero was made. The exact magnitudes of these boundaries were the result of successive simulations on the most complex models of insulators and are discussed in detail on the relevant chapter. Furthermore, by taking advantage of the rotational symmetry of insulators, only the intersection defined by planes  $x = 0$  and  $y = 0$  was designed, thus simplifying the model. The final results of the simulations were satisfactory in describing the field stress around composite insulators, according to prior works and theoretical expectations.

### **Keywords**

High Voltage, Composite Insulators, Simulation, Finite Element Method, Electric Field.

# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Περιεχόμενα</b> .....	<b>iii</b>
<b>Πρόλογος</b> .....	<b>1</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b>	
<b>1.1. Γενικά</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2. Οι μονωτήρες στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας</b> .....	<b>5</b>
1.2.1. Κατηγορίες μονωτήρων .....	5
1.2.2. Ιστορική αναδρομή .....	6
1.2.3. Υλικά μονωτήρων .....	7
1.2.3.1. Κεραμικά υλικά.....	9
1.2.3.2. Πολυμερή .....	10
<b>1.3. Συνθετικοί μονωτήρες</b> .....	<b>11</b>
1.3.1. Γενικά.....	11
1.3.2. Υλικά κατασκευής .....	12
1.3.2.1. Πολυμερικό περίβλημα .....	12
1.3.2.2. Πυρήνας.....	19
1.3.2.3. Μεταλλικοί τερματισμοί .....	21
1.3.3. Ρύπανση, γήρανση και υπερπήδηση συνθετικών μονωτήρων .....	23
1.3.4. Εμπειρία από τη χρήση συνθετικών μονωτήρων .....	26
1.3.4.1. Σύγκριση με προγενέστερες τεχνολογίες μονωτήρων.....	26
1.3.4.2. Διεθνής εμπειρία από τη χρήση συνθετικών μονωτήρων .....	27
<b>Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο</b>	
<b>2.1. Το ηλεκτρικό πεδίο</b> .....	<b>31</b>
2.1.1. Ένταση ηλεκτρικού πεδίου .....	31
2.1.2. Εφαρμογή των εξισώσεων Maxwell στην περιγραφή του οριζοντιώδη ηλεκτροστατικού πεδίου .....	33
2.1.3. Διαμορφώσεις του ηλεκτρικού πεδίου και οι επιπτώσεις τους στα διηλεκτρικά.....	34
<b>2.2. Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων</b> .....	<b>37</b>
2.2.1. Γενικά.....	37
2.2.2. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων .....	38
<b>Κεφάλαιο 3: Εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων στην πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης</b>	
<b>3.1 Γενικά</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2 Εφαρμογή ολοκληρωτικών μεθόδων</b> .....	<b>46</b>

3.2.1	Εφαρμογή της μεθόδου των επιφανειακών τμημάτων (BEM) .....	46
3.2.1.1	Προσομοιώσεις μονωτήρων απουσία ρύπανσης και υγρασίας .....	46
3.2.1.2	Προσομοιώσεις μονωτήρων με καθαρές υγρές επιφάνειες .....	57
3.2.1.3	Προσομοιώσεις μονωτήρων με υγρές και ρυπασμένες επιφάνειες .....	59
3.2.2	Συνδυασμός της μεθόδου BEM με τις μεθόδους CSM και MoM .....	61
<b>3.3</b>	<b>Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων .....</b>	<b>68</b>
3.3.1	Γενικά.....	68
3.3.2	Προσομοιώσεις μονωτήρων υπό ιδανικές συνθήκες .....	69
3.3.3	Προσομοιώσεις μονωτήρων υπό συνθήκες βροχής και ρύπανσης .....	71
3.3.4	Βελτιστοποίηση χαρακτηριστικών.....	78
3.3.5	Η μέθοδος κατάτμησης του χωρίου (Domain Decomposition Method).....	81

## **Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις και αποτελέσματα**

<b>4.1.</b>	<b>Το πρόγραμμα OPERA .....</b>	<b>85</b>
4.1.1.	Γενικά.....	85
4.1.2.	Προ-επεξεργασία.....	86
4.1.3.	Ανάλυση.....	87
4.1.4.	Μετ-επεξεργασία.....	88
<b>4.2.</b>	<b>Προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων .....</b>	<b>89</b>
4.2.1.	Γενικά.....	89
4.2.2.	Χαρακτηριστικά των μοντέλων .....	89
4.2.2.1.	Σχέδια των μονωτήρων .....	89
4.2.2.2.	Ιδιότητες των υλικών.....	96
4.2.2.3.	Καθορισμός του μεγέθους του υποβάθρου (background) .....	97
4.2.2.4.	Πλέγμα γύρω από τους μονωτήρες.....	103
4.2.3.	Αποτελέσματα προσομοιώσεων στο μοντέλο της εργασίας [32] .....	106
4.2.3.1.	Επιβεβαίωση της ορθότητας της μεθόδου FEM.....	106
4.2.3.2.	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων επίλυσης OPERA-2d/ST και OPERA-2d/AC .....	107
4.2.3.3.	Αποτελέσματα προσομοιώσεων υπό συνθήκες ρύπανσης .....	110
4.2.4.	Προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ και Υ.Υ.Τ. του ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας .....	112
4.2.4.1.	Γενικά.....	112
4.2.4.2.	Συνθετικοί μονωτήρες Υ.Τ. (150kV) .....	112
4.2.4.2.1.	Κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μέσα και γύρω από το μονωτήρα.....	112
4.2.4.2.2.	Επίδραση του τοροειδούς στην κατανομή της πεδιακής καταπόνησης.....	122
4.2.4.2.3.	Σύγκριση της πεδιακής κατανομής μεταξύ συνθετικών μονωτήρων 150kV με διαφορετικές διαμορφώσεις πτερυγίων .....	127
4.2.4.2.4.	Επίδραση της απόστασης του τελευταίου πτερυγίου από το υπό τάση άκρο στην κατανομή του πεδίου .....	131
4.2.4.3.	Συνθετικοί μονωτήρες Υ.Υ.Τ. (400kV) .....	132
4.2.4.3.1.	Κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μέσα και γύρω από το μονωτήρα.....	132

## **Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προοπτικές**

<b>5.1.</b>	<b>Γενικά.....</b>	<b>141</b>
-------------	--------------------	------------

<b>5.2. Πορεία των προσομοιώσεων και συμπεράσματα.....</b>	<b>141</b>
<b>5.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσομοιώσεων σε δύο διαστάσεις .. .....</b>	<b>145</b>
<b>5.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....</b>	<b>146</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>149</b>
<b>Κατάλογος σχημάτων .....</b>	<b>155</b>
<b>Κατάλογος πινάκων .....</b>	<b>167</b>





# Πρόλογος

Το παρόν κείμενο αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Ευφροσύνης-Μαρίας Ν. Γράλιστα, για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής υπήρξε η μελέτη της πεδιακής κατανομής πλησίον συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Method-FEM*).

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας. Αρχικά δίνονται γενικές πληροφορίες για τη χρήση των μονωτήρων, την ιστορική εξέλιξη των διαφόρων τεχνολογιών, ενώ παρουσιάζονται συνοπτικά οι ιδιότητες των κύριων υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κατασκευή τους (κεραμικά και πολυμερή). Στη συνέχεια επιχειρείται μία πιο εκτενής περιγραφή της τεχνολογίας των συνθετικών μονωτήρων. Αυτή περιλαμβάνει την παρουσίαση των διαφόρων υλικών κατασκευής που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς, την περιγραφή των μηχανισμών που επιδρούν στην απόδοσή τους (ρύπανση, γήρανση, υπερπήδηση) και τη σύγκριση με τη συμβατική τεχνολογία των κεραμικών μονωτήρων. Τέλος, γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση της διεθνούς εμπειρίας από τη χρήση τους.

Ακολουθεί, στο δεύτερο κεφάλαιο, το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Η πρώτη ενότητα του κεφαλαίου περιλαμβάνει τις εξισώσεις περιγραφής του ηλεκτρικού πεδίου, την εφαρμογή των εξισώσεων του Maxwell στο ημιστατικό ηλεκτρικό πεδίο και μία σύντομη παρουσίαση των διαφόρων πεδιακών διαμορφώσεων και της επίδρασής τους στα υπό καταπόνηση διηλεκτρικά. Στη δεύτερη ενότητα γίνεται αναφορά στις διάφορες αριθμητικές μεθόδους επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών πεδίων που προκύπτουν στην πράξη και δεν είναι δυνατό να επιλυθούν αναλυτικά. Εκτενέστερη ανάλυση γίνεται για τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που αφορά στον αριθμητικό υπολογισμό του πεδίου στο χώρο γύρω και μέσα σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης. Αρχικά γίνεται διερεύνηση της εφαρμογής των ολοκληρωτικών μεθόδων υπολογισμού και ειδικότερα της Μεθόδου των Επιφανειακών Τμημάτων (*Boundary Element Method-BEM*). Παρουσιάζονται επίσης και δύο εργασίες οι οποίες περιλαμβάνουν συνδυασμό της μεθόδου BEM με τις Μεθόδους των Ισοδυνάμων Φορτίων (*Charge Simulation Method-CSM*) και των Ροπών (*Method of Moments*). Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παλαιότερων δημοσιευμένων εργασιών σχετικών με την εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων στον υπολογισμό του ζητούμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Στη συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε μοντέλα συνθετικών μονωτήρων με τη χρήση του προγράμματος OPERA-2d της εταιρείας Vector Fields. Μετά από μία σύντομη εισαγωγή στα

χαρακτηριστικά του προγράμματος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο μοντέλο συνθετικού μονωτήρα δημοσιευμένης εργασίας, με στόχο να επαληθευτεί η ορθότητα της χρήσης της μεθόδου FEM στο πρόβλημα της πεδιακής κατανομής γύρω από συνθετικό μονωτήρα ανάρτησης. Ακολουθούν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων σε συνθετικούς μονωτήρες του ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μοντέλα αυτών των προσομοιώσεων βασίστηκαν σε σχέδια μονωτήρων που έλαβε η γράφουσα από τη ΔΕΗ.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική έρευνα και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, αναφορικά με τα πλεονεκτήματα και τη βιωσιμότητα της χρήσης των συνθετικών μονωτήρων. Επίσης, γίνονται προτάσεις για πιθανές μελλοντικές εργασίες, ώστε το υπολογιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να ανταποκρίνεται όσο το δυνατό στις πραγματικές συνθήκες.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο Καθηγητή Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή τη διπλωματική εργασία και για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή εξέτασης της εργασίας αυτής. Για τον ίδιο λόγο και για τη συμβολή του στη διόρθωση της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη για την καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας και την άμεση ανταπόκρισή της σε κάθε απορία μου.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κ. Ελένη Νικολοπούλου για την εξαιρετική συνεργασία μας και τη βοήθειά της όποτε τη χρειάστηκα, καθώς και όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για το άψογο κλίμα συνεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Καθοριστικής σημασίας στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας υπήρξε η παραχώρηση των σχεδίων των συνθετικών μονωτήρων στα οποία βασίστηκαν τα μοντέλα των προσομοιώσεων από τη Δ.Ε.Η.. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Μπέη, Προϊστάμενο του Τεχνικού Τομέα στη Δ.Ε.Η. Βόλου. Χάρη στη μεσολάβησή του ήρθα σε επαφή με στελέχη της Γενικής Διεύθυνσης Μεταφοράς, που πολύ ευγενικά μου παραχώρησαν σχέδια, σχετική βιβλιογραφία και συμβουλές. Για τον ίδιο λόγο θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Αλέξανδρο Μότσιο, Τομεάρχη Κεντρικής Ελλάδας της Διεύθυνσης Συστήματος Μεταφοράς (Δ.Σ.Μ.). Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Μαυρόματο, Τομεάρχη Ισχυρών Ρευμάτων της Δ.Σ.Μ., την κ. Παναγιώτα Αλεξοπούλου, Τομεάρχη Προγραμματισμού Συντήρησης της Δ.Σ.Μ., την Υποτομεάρχη κ. Παναγιώτα Τσεχελίδου και τον κύριο Αλέξανδρο Μαθιουλάκη για την ευγενική παραχώρηση σχεδίων και προτύπων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου Νικόλαο και Ευαγγελία και την αδερφή μου Χριστίνα, για την αμέριστη συμπαράσταση και τη βοήθειά τους, υλική και άυλη σε κάθε μου βήμα. Χάρη στην υποστήριξη και την

αγάπη τους έχω καταφέρει πολλά και κάθε μέρα μου δίνουν δύναμη να προσπαθώ ακόμα περισσότερο, γι' αυτό τους αφιερώνω αυτή την εργασία.



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1. Γενικά

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής και οι ανέσεις που απολαμβάνουν οι ανεπτυγμένες κοινωνίες βασίζονται στην αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό προϋποθέτει αναρίθμητες εργατοώρες για τη συντήρηση, επισκευή και λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.). Τα τελευταία αποτελούνται από εξοπλισμό και υποδομές μεγάλης αξίας και πολυπλοκότητας, όπως οι υδροστρόβιλοι, οι μετασχηματιστές και οι γραμμές μεταφοράς. Είναι λοιπόν παραπάνω από προφανής η ανάγκη προστασίας των εγκαταστάσεων, των μηχανημάτων και κυρίως των ανθρώπων που εργάζονται ή κατοικούν κοντά σε χώρους που περιλαμβάνονται στα Σ.Η.Ε., για παράδειγμα κοντά σε μετασχηματιστές 20kV/400V, που είναι συνήθεις στο αστικό περιβάλλον.

Η απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων του εξοπλισμού από τα μη ηλεκτροφόρα επιτυγχάνεται με τη χρήση μονωτήρων.[1] Πιο συγκεκριμένα, οι μονωτήρες χρησιμοποιούνται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις για να στηρίζουν, να διαχωρίζουν και να εμπεριέχουν του αγωγούς που βρίσκονται υπό τάση.[2] Το ακόλουθο παράδειγμα είναι ενδεικτικό της σημασίας της σωστής επιλογής και της ορθής λειτουργίας των μονωτήρων: μία ηλεκτρική εκκένωση διάρκειας ενός τετάρτου του δευτερολέπτου σε μία βιομηχανία χάρτου έχει ως αποτέλεσμα διακοπή της λειτουργίας της μονάδας και βλάβη του εξοπλισμού με κόστος έως και \$50000.[3]

### 1.2. Οι μονωτήρες στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 1.2.1. Κατηγορίες μονωτήρων

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, οι μονωτήρες αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των ηλεκτρικών δικτύων ανά τον κόσμο. Ο ρόλος τους είναι διττός: πρέπει να καλύπτουν και ηλεκτρικές και μηχανικές ανάγκες. Οι μηχανικές καταπονήσεις που υφίστανται οι μονωτήρες κατά τη διάρκεια ζωής τους περιλαμβάνουν τάσεις εφελκυσμού, θλίψη ή κάμψη, ανάλογα με τη θέση του δικτύου όπου είναι τοποθετημένοι και τον προσανατολισμό τους. Υπό συνθήκες σφάλματος, οι μηχανικές καταπονήσεις επιδεινώνονται.[2]

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους οι μονωτήρες διακρίνονται σε:

*Μονωτήρες ανάρτησης (suspension type insulators)*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς και αποτελούνται από απλή ή διπλή

σειρά δίσκων, σε μορφή αλυσίδας, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής.

*Μονωτήρες στήριξης (post type insulators)*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών υψηλής τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες γραμμής μεταφοράς και σε μονωτήρες υποσταθμών.

*Μονωτήρες γραμμής*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται από γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 70kV.

*Μονωτήρες διέλευσης (bushings)*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την έξοδο των αγωγών από τους μετασχηματιστές ή και τις συσκευές, καθώς επίσης και για τη διέλευση μέσω διαχωρισμάτων.[1]

Σημαντικός παράγοντας που υπεισέρχεται στην επιλογή του κατάλληλου τύπου μονωτήρα είναι η επιφανειακή ρύπανση, με ρύπους όπως το θαλασσινό αλάτι (NaCl) σε παράκτιες περιοχές ή παραπροϊόντα βιομηχανιών, όπως άνθρακα, τσιμέντο, αδιάλυτα άλατα (π.χ. CaCl). Παρουσία υγρασίας (βροχή, πάχνη) δημιουργείται στην επιφάνεια του μονωτήρα ένα λεπτό αγωγίμο στρώμα, το οποίο σε συνδυασμό με την εφαρμοζόμενη τάση ευθύνεται για την εμφάνιση ρεύματος διαρροής. Το ρεύμα αυτό δίνει έναυση σε έρπουσες εκκενώσεις στην επιφάνεια του μονωτήρα, οι οποίες, αν δε διακοπούν, οδηγούν στην υπερπήδησή του.

Λύση στο πρόβλημα των ερπουσών εκκενώσεων αποτελεί η κυματοειδής διαμόρφωση της επιφάνειας των μονωτήρων, η οποία εξασφαλίζει τη διακοπή του αγωγίμου υδατινού στρώματος και την αύξηση του μήκους ερπυσμού. Το μήκος ερπυσμού (*leakage distance*) ορίζεται ως η *συντομότερη διαδρομή επί της επιφάνειας του μονωτήρα ανάμεσα στα δύο μεταλλικά άκρα του (μήκος της εξωτερικής ημιπεριμέτρου του μονωτικού υλικού σε επίπεδο τομής διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα)*, διαδρομή που ακολουθούν οι έρπουσες εκκενώσεις.[4]

Ανάλογα με το επίπεδο ρύπανσης της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση, επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος μονωτήρα από τις εξής κατηγορίες:

*Μονωτήρες 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 μόλυνση 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.[1]

### **1.2.2. Ιστορική αναδρομή**

Οι μονωτήρες είναι κατά πολύ γηραιότεροι της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τηλεγραφικοί μονωτήρες χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1835 και είχαν φτάσει σε ένα προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης μέχρι το 1878, ενώ η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε το 1882. Επρόκειτο για μια γραμμή 1343 V DC μικρού μήκους από το Miesbach στο Μόναχο, στο πλαίσιο της Ηλεκτρικής Έκθεσης του Μόναχου.

Με τη βαθμιαία μετάβαση σε υψηλότερα επίπεδα τάσεων και την έναρξη χρήσης της πυρηνικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού, το κόστος της απώλειας

ισχύος και των ζημιών που μπορεί να προκύψουν λόγω της υπερπήδησης των μονωτήρων αυξήθηκε δραματικά. Μεγάλη προσοχή έπρεπε να δοθεί στη βελτίωση της απόδοσης των μονωτήρων υπό συνθήκες ρύπανσης. Επόμενη αυτής της αυξημένης προσοχής προς την αξιοπιστία του συστήματος ήταν η ανάπτυξη ανθεκτικών δισκοειδών μονωτήρων με μεγάλο μήκος ερπυσμού και όψη που θα τους επέτρεπε να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά στις εναέριες γραμμές.

Μόλις στη δεκαετία του '60, μετά την παραδοχή ότι η «συμπεριφορά» των μονωτήρων μπορούσε να προβλεφθεί από εργαστηριακές δοκιμές, έγιναν οι πρώτες επιστημονικές μετρήσεις και πειράματα σε διαφορετικές μορφές μονωτήρων που βρίσκονταν σε χρήση. Η πρώτη δοκιμή ήταν το τεστ ομίχλης αλάτων (*Salt Fog Test*), λόγω των αποτελεσμάτων του οποίου εγκαταλείφθηκαν αμέσως πολλά «φантаχτερά» σχέδια, ανάμεσα σε αυτά σχέδια με ελικοειδώς διατεταγμένους δίσκους, τα οποία είχαν σχεδιαστεί με λανθασμένες προσδοκίες και μη έγκυρα τεστ, όπως αυτό της τεχνητής βροχής. Την ίδια περίοδο εισήχθη ο τύπος μονωτήρα με ανθεκτική επίστρωση (ή σταθεροποιημένος μονωτήρας), ο οποίος απέδωσε εξαιρετικά τόσο σε συνθήκες τεχνητής όσο και πραγματικής ρύπανσης. Προβλήματα διάβρωσης έχουν περιορίσει τη χρήση του από τότε.

Με συνεχώς αυξανόμενα επίπεδα τάσεων και πολύκλωνους αγωγούς, τα μηχανικά φορτία που καταπονούν τους μονωτήρες στις εναέριες γραμμές εκτοξεύτηκαν πάνω από τους σαράντα τόνους. Πολλαπλές σειρές μονωτήρων χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλη κλίμακα, στη Μεγάλη Βρετανία για παράδειγμα, αλλά είχαν το μειονέκτημα της άσχημης εμφάνισης και της μηχανικής πολυπλοκότητας. Οι μονωτήρες σκληρυμένης υάλου, οι οποίοι πρωτοχρησιμοποιήθηκαν το 1935, προσέφεραν αισθητή βελτίωση, λόγω της μεγαλύτερης αντοχής τους και του μεγέθους του εξοπλισμού, αλλά στερούνταν της δυνατότητας να φέρουν τους 100 τόνους που απαιτούνταν για λειτουργία γραμμών χιλιάδων Volt. Στο σημείο αυτό, λύση δόθηκε με τη χρήση των πολυμερικών (συνθετικών) μονωτήρων, στους οποίους χρησιμοποιούνται ινώδη σύνθετα υλικά, τα οποία αντέχουν μεγάλες τάσεις, σε σχέση με το βάρος και το μέγεθός τους.[2]

### 1.2.3. Υλικά μονωτήρων

Τα τρία κύρια στοιχεία που απαρτίζουν έναν μονωτήρα είναι τα εξής: το διηλεκτρικό, οι τερματισμοί, οι οποίοι ενώνουν το διηλεκτρικό με τον εξοπλισμό και τα διάμεσα υλικά, όπως τσιμέντα, λιπαντικά και βαφές.[2]

Διηλεκτρικά (μη αγωγία ή μονωτικά) ονομάζονται τα υλικά τα οποία επιτρέπουν την ύπαρξη ηλεκτροστατικών και μαγνητικών γραμμών πεδίου μέσα από τον όγκο τους, δε διαρρέονται όμως από ρεύμα. Στην πράξη βέβαια δεν υπάρχει διηλεκτρικό το οποίο να μη διαρρέεται από ρεύμα ή να μην εμφανίζει την παραμικρή συγκέντρωση φορτίου. Τα ρεύματα επαγωγής διαμέσου των διηλεκτρικών εξαρτώνται κυρίως από τη σχετική επιτρεπτότητα,  $\epsilon_r$  και τη μορφή και το πλάτος της εφαρμοζόμενης τάσης. Πριν καταστεί δυνατή η μέτρηση ρευμάτων της τάξης των  $\mu\text{A}$ ,  $\text{nA}$  και  $\mu\text{A}$ , τα ηλεκτρικώς μονωτικά υλικά θεωρούνταν εντελώς μη αγωγία, γι' αυτό και ονομάστηκαν διηλεκτρικά.[5]

Τα διηλεκτρικά των μονωτήρων που απαντώνται σήμερα στις εναέριες γραμμές και στους υποσταθμούς των κατά τύπους δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας είναι είτε κεραμικά (πορσελάνη, γυαλί), που είναι και τα πιο διαδεδομένα, είτε πολυμερή (EPDM, silicone rubber) τα οποία περικλείουν έναν ινώδη πυρήνα, ο οποίος φέρει το βάρος του αγωγού. Η τελευταία κατηγορία μονωτήρων αποτελεί τους *συνθετικούς μονωτήρες (composite insulators)*. Το πυρίτιο (Si) αποτελεί το κυρίως επαναλαμβανόμενο άτομο στην περίπτωση των κεραμικών και ο άνθρακας (C) στην περίπτωση των πολυμερών.

Συνοπτικά, κάποιες από τις ιδιότητες των υλικών αυτών παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 1.1):

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες υλικών κατασκευής μονωτήρων.[2]

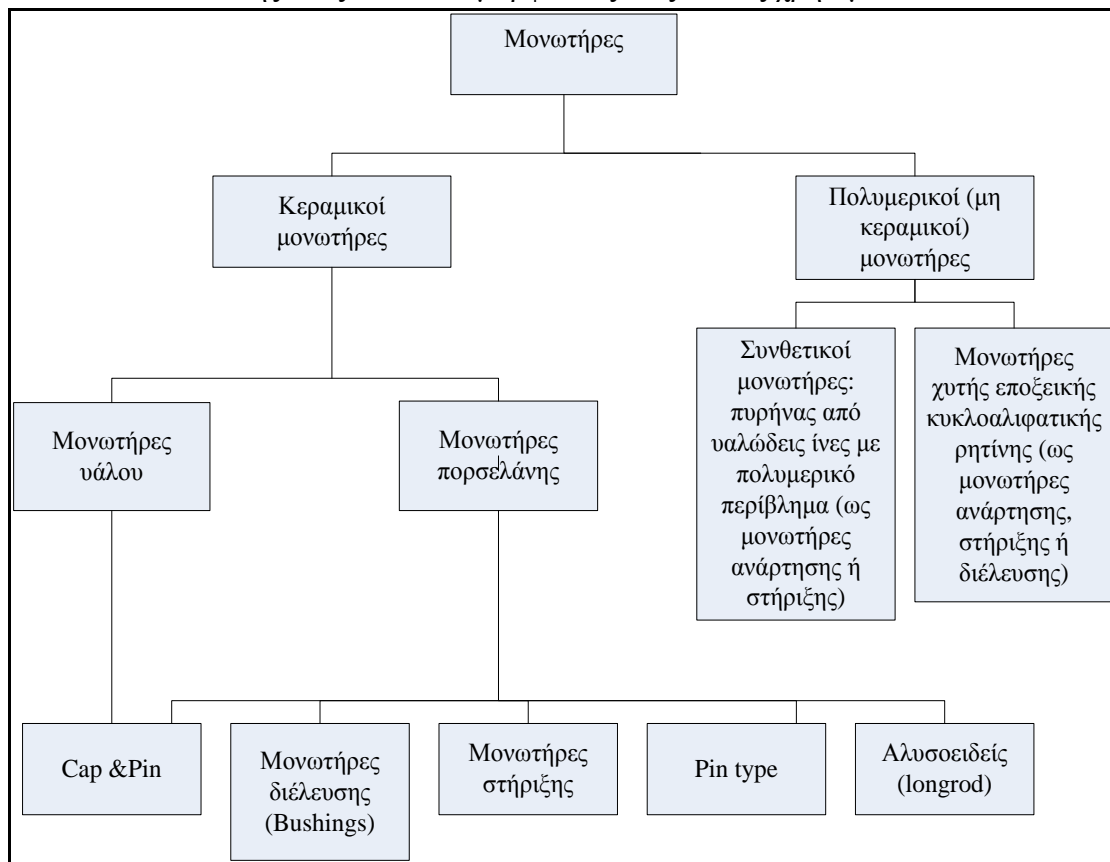
Ιδιότητα	Υαλώδης Πορσελάνη	Σκληρυμένο γυαλί	Πολυμερή	Υαλώδεις ίνες συνδεδεμένες με ρητίνη (RBGF)
Πυκνότητα ( $g/cm$ )	2,3-3,9	2,5	0,9-2,5	2,1-2,2
Τάση εφελκυσμού ( $MPa$ )	30-100	100-120	20-35	1300-1600
Συντελεστής εφελκυσμού ( $GPa$ )	240-820	210-300	80-170	700-750
Αντοχή σε θλίψη ( $MPa$ )	50-100	72	0,6-16	43-60
Θερμική αγωγιμότητα ( $W/mK$ )	1-4	1	0,17-0,9	0,2-1,2
Διασταλτικότητα ( $20-100^{\circ}C$ ) ( $(\times 10^6)/K$ )	3,5-9,1	8-9,5	45-200	7,5-20
Επιτρεπτότητα (50-60 Hz) ( $\alpha \epsilon \rho \alpha \varsigma = 1$ )	5-7,5	7,3	2,3-5,5	2,5-6,5
Εφαπτομένη απωλειών (50-60Hz) ( $\times 10^{-3}$ )	20-40	15-50	0,1-5	5-20
Πεδιακή αντοχή ( $kV/mm$ )	10-20	>25	>25	3-20
Ειδική αντίσταση ( $\Omega cm$ )	$10^{11}-10^{13}$	$10^{12}$	$10^{15}-10^{17}$	$10^{11}-10^{14}$

Υπάρχει η απαίτηση από τα διηλεκτρικά να διατηρούν την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού χωρίς να αστοχήσουν. Επίσης, πρέπει να ανθίστανται σε καταπονήσεις κρουστικών τάσεων που προκύπτουν από κεραυνούς ή χειρισμούς διακοπών του δικτύου χωρίς να διασπώνται. Επειδή οι επιφάνειες τους θα είναι πάντα, στην πράξη, ηλεκτρικά αγωγίμες λόγω της υγρασίας και των επικαθήμενων ρύπων, είναι απαραίτητη μια διαχρονική ανθεκτικότητα στις επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις, τα ηλεκτροχημικά προϊόντα και τη διάβρωση. [6]



Σύμφωνα με τα δεδομένα που περιέχει ο Πίνακας 1.1, το πιο κοινώς χρησιμοποιούμενο διηλεκτρικό, η πορσελάνη, παρουσιάζει μικρή πεδιακή αντοχή. Αυτή η αδυναμία προκαλεί έκπληξη αλλά στην πραγματικότητα δεν αποτελεί λόγο ανησυχίας. Ακόμα και στους μονωτήρες ανάρτησης, όπου η διηλεκτρική καταπόνηση είναι μεγαλύτερη από ότι σε άλλους τύπους μονωτήρων, σπάνια εμφανίζονται πεδιακές εντάσεις μεγαλύτερες από λίγα kV/mm. Η αποτυχία υπό τάση βιομηχανικής συχνότητας ήταν συχνή στους πρώτους μονωτήρες, όπου το διηλεκτρικό ήταν πορώδες και καταπονούνταν από μεγάλα μηχανικά φορτία. Σήμερα είναι ένα σπάνιο φαινόμενο, προκύπτει μόνο αν έχει προηγηθεί φθορά λόγω διάβρωσης ή λόγω θερμικής και μηχανικής καταπόνησης. [2]

Στο Σχήμα 1-1 παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες μονωτήρων, ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους και οι διαμορφώσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται:



Σχήμα 1-1: Κατηγορίες μονωτήρων [7]

### 1.2.3.1. Κεραμικά υλικά

Τα κεραμικά υλικά είναι ενώσεις μεταξύ μεταλλικών και μη μεταλλικών στοιχείων και συχνά είναι οξείδια, νιτρίδια και καρβίδια. Το μεγάλο εύρος υλικών που υπεισέρχονται σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνει κεραμικά που αποτελούνται από ορυκτούς αργίλους, τσιμεντοκονιάματα και υάλους. Τα υλικά αυτά είναι χαρακτηριστικοί μονωτές της μετάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος και της θερμότητας και είναι πιο ανθεκτικά από τα μέταλλα και τα πολυμερή σε υψηλές θερμοκρασίες και δριμύ περιβάλλον. Ως προς τη μηχανική τους αντοχή, τα κεραμικά είναι σκληρά, αλλά πολύ εύθραυστα.

Όπως προαναφέρθηκε, τα κεραμικά που χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά στους μονωτήρες αποτελούνται κυρίως από πυρίτιο (Si) και οξυγόνο (O), τα δύο πιο διαδεδομένα στοιχεία στο φλοιό της γης. Από χημική άποψη, το πιο απλό πυριτικό υλικό είναι το διοξείδιο του πυριτίου, ή αλλιώς *πυριτία* (*silica*,  $SiO_2$ ). Ως προς τη δομή, είναι ένα τρισδιάστατο δίκτυο που αποτελείται από τετράεδρα, στο κέντρο των οποίων βρίσκεται ένα άτομο πυριτίου και στις κορυφές ένα άτομο οξυγόνου. Τα άτομα του οξυγόνου των κορυφών είναι κοινά για γειτονικά τετράεδρα.

Εάν τα τετράεδρα αυτά είναι στοιχισμένα με κανονικό και ομοιόμορφο τρόπο δημιουργείται μια κρυσταλλική δομή. Υπάρχουν τρεις κύριες πολυμορφικές κρυσταλλικές δομές της *silica*: ο χαλαζίας, ο κριστοβαλίτης και ο τριδυμίτης. Η *silica* μπορεί επίσης να υπάρχει σαν ένα μη κρυσταλλικό στερεό, την ύαλο (ή γυαλί), με ψηλό βαθμό ατομικής τυχαιότητας, η οποία είναι χαρακτηριστική της υγρής φάσης. Το υλικό αυτό ονομάζεται *τηγμένη ή υαλώδης silica* (*fused silica*). [8]

Όταν στις παραπάνω δομές προστεθούν και άλλα στοιχεία προκύπτει ένας μεγάλος αριθμός αλάτων, κρυσταλλικής ή άμορφης δομής. 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 ηλεκτρικό 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 είναι πάντα άμορφα υλικά (υαλώδης κατάσταση).

Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου-οξυγόνου (Si-O), οι οποίοι συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν ως αποτέλεσμα υψηλό σημείο τήξης, μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο της κατασκευής) και υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα. Η ύπαρξη των ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια συμβάλλει επίσης στην αύξηση της επιφανειακής ελεύθερης ενέργειας (*surface tension*). Πρόκειται για τη θερμοδυναμική ιδιότητα που καθορίζει τη συνάφεια (ή δύναμη συνάφειας) των επιφανειακών προσμίξεων και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες διαβρέχονται και ρυπαίνονται εύκολα. [6]

### 1.2.3.2. Πολυμερή

Τα πολυμερή είναι υλικά αποτελούμενα από μακρομόρια υψηλού μοριακού βάρους. Τα μακρομόρια συνίστανται σε δύο ή περισσότερες δομικές μονάδες, τα μονομερή, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς σε πολύπλοκες δομές. Οι επιμέρους μονάδες αυτές μπορεί να αποτελούνται από μεμονωμένα άτομα ή χημικές ομάδες, τα οποία επαναλαμβάνονται περιοδικά. Για την παρασκευή ενός πολυμερούς απαιτείται η αντίδραση μεταξύ τουλάχιστον δύο μονομερών, υπό κατάλληλες συνθήκες. Σε περίπτωση που η αντίδραση πολυμερισμού περιλαμβάνει διαφορετικά μονομερή, το προκύπτον υλικό καλείται συμπολυμερές. Τα ομοπολυμερή δε χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή μονωτήρων. Αντίθετα, προτιμώνται συμπολυμερή και μεταλλικά πληρωτικά υλικά,

προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. [2, 5]

Τα πρώτα πολυμερικά μονωτικά υλικά δεν είχαν την αναμενόμενη διάρκεια ζωής των σαράντα ετών που απαιτείται από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Η αποτυχία των υλικών αυτών οφειλόταν στην κακή απόδοσή τους υπό την επίδραση της υπερϊώδους ακτινοβολίας, του σχισίματος και της υδρόλυσης. Παρόλα αυτά, με την πρόοδο της επιστήμης των υλικών η χρήση πολυμερικών υλικών υψηλής απόδοσης στη μόνωση εγκαταστάσεων ισχύος ακολουθεί ανοδική πορεία τα τελευταία πενήντα χρόνια, στους μονωτήρες, τα υπόγεια καλώδια κ.α..

Η πυκνότητα των πολυμερών είναι κατά πολύ χαμηλότερη των κεραμικών. Επομένως, τα πολυμερή εξαρτήματα είναι πιο ελαφριά και άρα πιο εύκολα στο χειρισμό και την εγκατάσταση. Το χαμηλό βάρος επιτρέπει επίσης την κατασκευή ελαφρύτερων και φθηνότερων υποδομών (π.χ. πυλώνων). Τα πολυμερή, σε αντίθεση με τα κεραμικά υλικά, εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές επιφανειακής ελεύθερης ενέργειας, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την υδροφοβικότητα των πολυμερικών επιφανειών των μονωτήρων. Στην περίπτωση αυτών των επιφανειών, το νερό σχηματίζει μεμονωμένες σταγόνες αντί για ένα συνεχές στρώμα. Ως εκ τούτου, οι υδατοδιαλυτοί ρύποι δε σχηματίζουν αγωγίμο υδάτινο στρώμα αλλά διακριτές αγωγίμες περιοχές. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα διαρροής είναι χαμηλότερο και οδηγεί στο σχηματισμό ξηρών ζωνών, συμβάλλοντας στην αύξηση της τάσης υπερπήδησης του μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης. [5]

### 1.3. Συνθετικοί μονωτήρες

#### 1.3.1. Γενικά

Οι συνθετικοί μονωτήρες (*composite insulators*) αναφέρονται στη βιβλιογραφία πολύ συχνά ως πολυμερικοί (*polymer*) ή μη κεραμικοί (*nonceramic insulators – NCI*).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 στις Η.Π.Α. η ανάγκη αύξησης του επιπέδου τάσης των γραμμών μεταφοράς υπήρξε η αφετηρία για την ανάπτυξη ενός νέου τύπου μονωτήρα ανάρτησης, με μειωμένο βάρος και βελτιωμένα ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Ανέτειλε έτσι η εποχή των συνθετικών μονωτήρων, αν και έπρεπε να περάσουν ακόμα είκοσι χρόνια σχεδόν, μέχρι τη δεκαετία του 1970, για να καθιερωθεί η σχετική τεχνολογία ως βιώσιμη εναλλακτική στους μονωτήρες πορσελάνης και υάλου. Σε αυτό συνέβαλλε αποφασιστικά η πρόοδος που συντελέστηκε στους τομείς των ινωδών υλικών και των πολυμερών. Συγκεκριμένα, η ικανοποιητική μονωτική συμπεριφορά της σιλίκονης (*silicone*) υπό συνθήκες ρύπανσης και η αντοχή των συνθετικών μονωτήρων σε φορτία κρούσης κατά τη χρήση τους αποτέλεσαν επιχειρήματα τα οποία έπεισαν αρκετούς από τους αρχικούς επικριτές.

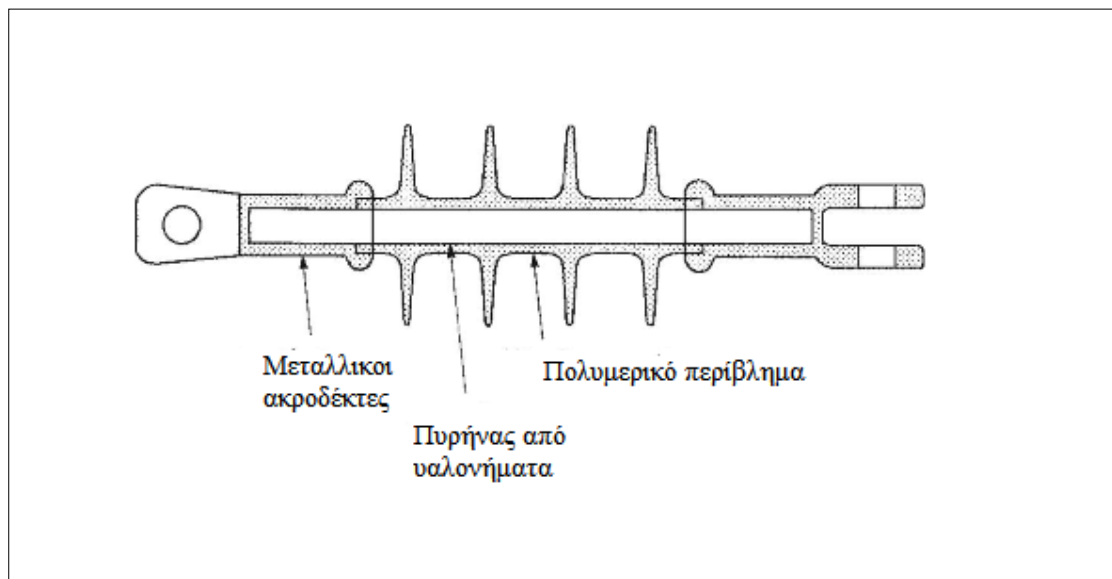
Ένας συνθετικός μονωτήρας συντίθεται σε τρία μέρη:

- Έναν κυλινδρικό πυρήνα, αποτελούμενο από ίνες υάλου σε μήτρα πολυεστερικής ή εποξειδικής ρητίνης (Resin Bonded Glass Fiber-RBGF), ο οποίος έχει υψηλή μηχανική αντοχή. Στους μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης οι ίνες είναι αξονικά

τοποθετημένες μέσα στη μήτρα. Στους μονωτήρες διέλευσης οι ίνες περιελίσσονται, έτσι ώστε να δημιουργείται ένας γυάλινος σωλήνας.

- Ένα πολυμερικό περίβλημα με πτυχώσεις (περυγία – sheds), το οποίο προστατεύει τον πυρήνα από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις και εξασφαλίζει το κατάλληλο μήκος ερπυσμού και ηλεκτρική μόνωση. Το περίβλημα μπορεί να σχηματίζεται είτε με απευθείας χύτευση είτε με προσάρτηση των περυγίων ξεχωριστά το καθένα πάνω στον ινώδη πυρήνα. Στην τελευταία περίπτωση μπορεί να παρεμβάλλεται ένα ενδιάμεσο πολυμερικό περίβλημα.
- Μεταλλικούς ακροδέκτες σε καθένα από τα δύο άκρα, ώστε να επιτυγχάνεται η σύνδεση του μονωτήρα είτε με μια δομή υποστήριξης (π.χ. με έναν πυλώνα), είτε με έναν αγωγό, με ένα στοιχείο του εξοπλισμού (π.χ. έναν μετασχηματιστή) ή με έναν άλλο μονωτήρα.

Τα επιμέρους τμήματα ενός συνθετικού μονωτήρα φαίνονται παρακάτω, στο Σχήμα 1-2. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δίδεται κατά το σχεδιασμό, την επιλογή υλικών και την κατασκευή στις διεπιφάνειες μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων, καθώς εκεί υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να παρουσιαστούν προβλήματα μηχανικής ή ηλεκτρικής φύσης. Τέτοιες διεπιφάνειες είναι οι εξής: μεταξύ των ινών υάλου και ρητίνης, μεταξύ των σωματιδίων των πληρωτικών υλικών και του πολυμερούς, μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματος, μεταξύ των διαφορετικών μερών του περιβλήματος και μεταξύ πυρήνα, περιβλήματος και μεταλλικών τερματισμών. [9-12]



Σχήμα 1-2: Απλοποιημένο σχέδιο συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης. [10]

### 1.3.2. Υλικά κατασκευής

#### 1.3.2.1. Πολυμερικό περίβλημα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από το 1975 και έπειτα άρχισε η κατασκευή συνθετικών μονωτήρων για χρήση σε γραμμές μεταφοράς στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Για την κατασκευή του πολυμερικού περιβλήματος χρησιμοποιήθηκε μια πληθώρα υλικών. Οι εταιρείες Ceraver (Γαλλία-1975), Ohio

Brass (Η.Π.Α.-1976), Sediver (Η.Π.Α.-1977) και Lapp (Η.Π.Α.-1980) χρησιμοποίησαν ελαστικό συμπολυμερούς αιθυλενίου-προπυλενίου (*ethylene propylene rubber-EPR*) για το σκοπό αυτό. Το υλικό SIR (*ελαστικό σιλικόνης-silicone rubber*) χρησιμοποιήθηκε από τις εταιρείες Rosenthal (Γερμανία-1976) και Reliable (Η.Π.Α.-1983). Στο Ηνωμένο Βασίλειο η εταιρεία Transmission Development (1977) έδωσε στην αγορά συνθετικούς μονωτήρες από κυκλοαλειφατική εποξειδική ρητίνη.[13]

Το πολυμερικό περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων πρέπει να προστατεύει τον ινώδη πυρήνα από την υγρασία και ταυτόχρονα να εξασφαλίζει το κατάλληλο μήκος ερπυσμού, το βέλτιστο αεροδυναμικό προφίλ, ώστε να μη διευκολύνεται η επικάλυψη ρύπων και να μη συγκρατεί το νερό (βρόχινο ή λόγω πάχνης ή ομίχλης). Παράλληλα, δεν πρέπει να εμφανίζει αγώγιμες ζώνες λόγω διάβρωσης του πολυμερούς (*αυλάκωση, tracking*), πρέπει να ανθίσταται στις καιρικές συνθήκες χωρίς αναίτια απώλεια των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων και να μη διαβρώνεται γρήγορα. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να αντέχει φορτία, στατικά και δυναμικά, αλλά και θερμοκρασίες από -40 έως 120°C. [2]

#### *i. Εποξειδικές ρητίνες*

Ρητίνες είναι η κατηγορία των στερεών ή ρευστών υλικών που προέρχονται από εκκρίσεις φυτών (φυσικές ρητίνες) ή από τη χημική επεξεργασία ανόργανων υλικών. Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούν την κατηγορία των ρητινών που στα συστατικά τους περιέχουν μια εποξειδική ομάδα ανά μόριο (ένα άτομο οξυγόνου που ενώνεται με δύο άτομα άνθρακα, τα οποία είναι ήδη συνδεδεμένα με κάποιο τρόπο). Οι εποξειδικές ρητίνες είναι διαλυτά, θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους. Για την επίτευξη ενός πιο ελαστικού υλικού γίνεται ανάμιξη της ρητίνης με σκληρυντικά και επιταχυντικά υλικά, πληρωτικά μέσα και χρωστικές. [5]

Η χρήση εποξειδικών ρητινών στην κατασκευή πολυμερικών περιβλημάτων εγκαινιάστηκε το 1959 με το μονωτήρα GEPOL της εταιρείας General Electric, στον οποίο χρησιμοποιήθηκε εύκαμπτη εποξειδική ρητίνη (bisphenol-A). Ο μονωτήρας αυτός χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα στη Βόρεια Αμερική μέχρι το 1973 και αλλού μέχρι το 1983, οπότε και αποσύρθηκε από την αγορά. Τα προβλήματα υδρόλυσης (Σχήμα 1-3), διάβρωσης και αυλάκωσης (*tracking*) και οι συνεπαγόμενες βλάβες κατέστησαν ακατάλληλους τους μονωτήρες αυτούς για εξωτερικούς χώρους και η χρήση τους εγκαταλείφθηκε. [12]



Σχήμα 1-3: Υδρόλυση του περιβλήματος εποξειδικής ρητίνης στο μονωτήρα GEPOL [12]

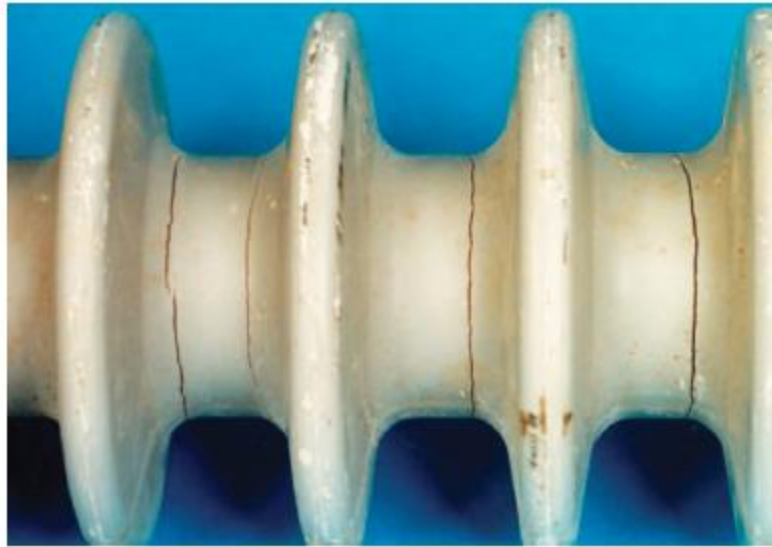
Κυκλοαλειφατική εποξειδική ρητίνη χρησιμοποιήθηκε από την εταιρεία Transmission Development Limited. Η κατασκευή αυτών των μονωτήρων έγινε με τη μέθοδο της χύτευσης ως ένα κομμάτι (*one-piece casting*) για εξαλειφθούν τα προβλήματα από τη μέθοδο της προσάρτησης καθενός πτερυγίου ξεχωριστά πάνω στην πυρήνα. Επίσης δόθηκε κλίση στα πτερύγια έτσι ώστε να διευκολύνεται η απορροή του νερού από την επιφάνεια του μονωτήρα (Σχήμα 1-4). Ωστόσο, επειδή χρησιμοποιήθηκε πυριτία ως πληρωτικό μέσο για αποφυγή της αυλάκωσης, η έκθεση των μονωτήρων σε υπεριώδεις ακτινοβολίες είχε ως αποτέλεσμα επιφανειακή καταστροφή της ρητίνης και δημιουργία ενός στρώματος πυριτίας. Η διαδικασία αυτή, κατά την οποία μέρη του πληρωτικού μέσου εμφανίζονται στην επιφάνεια του πολυμερικού περιβλήματος δημιουργώντας μια τραχειά επιφάνεια σκόνης ονομάζεται γυψοποίηση (*chalking*) και ήταν πρόβλημα για τη χρήση αυτών των μονωτήρων.[11, 12]



Σχήμα 1-4: Πτερύγια (sheds) με κλίση σε μονωτήρα ανάρτησης από κυκλοαλειφατική ρητίνη [12]

Εξίσου αποθαρρυντική αποδείχθηκε και η εμπειρία από τη χρήση μονωτήρων γραμμικής αλειφατικής εποξειδικής ρητίνης. Στο αρχικό σχέδιο, υπό την εμπορική

ονομασία Eroxilator I, τα πτερύγια του περιβλήματος συνδέονταν το ένα δίπλα στο άλλο απευθείας στη ράβδο του πυρήνα, αφήνοντας μια εμφανή ‘ραφή’ στην επιφάνεια. Η ρητίνη αυτή, η οποία δεν περιείχε πληρωτικά μέσα, εκτός του ότι ήταν επιρρεπής σε αυλάκωση, ήταν και εύφλεκτη. Επίσης, λόγω παραμενουσών τάσεων στη ρητίνη κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσης, αναπτύσσονταν ρωγμές στην περιφέρεια του περιβλήματος, ανάμεσα στα πτερύγια. Με την προσθήκη του πληρωτικού μέσου ATH (υδροξείδιο του αλουμινίου) αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της διάβρωσης, όπως φάνηκε από τη χρήση του νέου μονωτήρα (εμπορική ονομασία Eroxilator II) σε περιβάλλοντα με αυξημένα επίπεδα ρύπανσης. Ωστόσο το πρόβλημα των ρωγμών επέμεινε, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-5.[12]

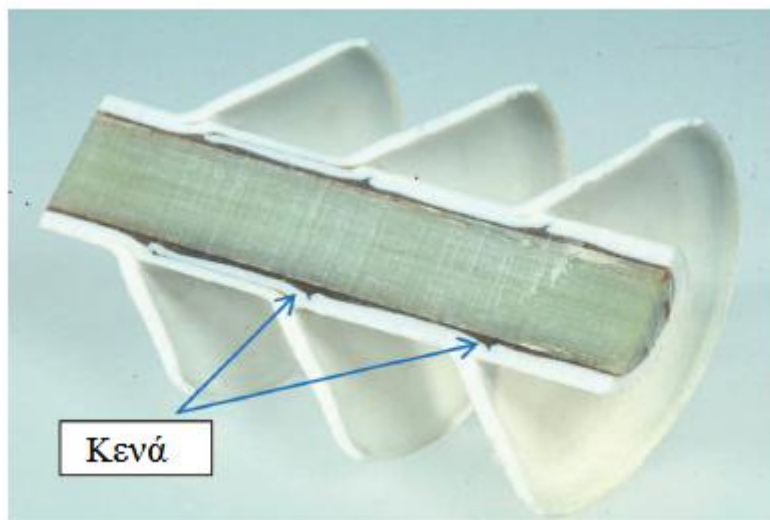


Σχήμα 1-5: Ρωγμές στην επιφάνεια του μονωτήρα Eroxilator II [12]

## ii. Τεφλόν

Μονωτήρες με περίβλημα από τεφλόν κατασκευάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 60 και διατέθηκαν προς χρήση πρώτα σε σιδηροδρομικές γραμμές και έπειτα στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατασκευή του περιβλήματος γινόταν ανά μεμονωμένα shed ή συστάδες shed, τα οποία διαμορφώνονταν σε καλούπια υπό υδροστατική πίεση και έπειτα αναρτώνταν στον πυρήνα με τη χρήση κυκλοαλειφατικής ρητίνης. Παρά την ικανοποιητική απόδοση των μονωτήρων αυτών υπό συνθήκες υγρασίας και ρύπανσης, τα αποτελέσματα από τη χρήση τους ήταν καταστροφικά, λόγω κενών που δημιουργούνταν ανάμεσα στο περίβλημα και τον πυρήνα κατά τη συναρμολόγηση (Σχήμα 1-6). Η δυσκολία αντιμετώπισης αυτής της ατέλειας είχε ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της χρήσης των μονωτήρων αυτής της τεχνολογίας στους σιδηροδρόμους, ώσπου και εκεί τελικά αντικαταστάθηκαν με μονωτήρες περιβλήματος από SIR. [12]





Σχήμα 1-6: Σχέδιο μονωτήρα ανάρτησης με περίβλημα από τεφλόν.[12]

### iii. Ελαστικό σιλικόνης (SIR)

Το ελαστικό (ελαστομερές) σιλικόνης παρασκευάζεται από την απευθείας αντίδραση του χλωρομεθανίου ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ) και του πυριτίου (Si). Ένα από τα προϊόντα αυτής της αντίδρασης δεν είναι σταθερό και συμπυκνώνεται σχηματίζοντας ένα μείγμα από πολύ-διμεθυλο-σιλοξάνες χαμηλού μοριακού βάρους, οι οποίες παρουσία καταλυτών πολυμερίζονται. Σε αυτό το στάδιο το ελαστικό σιλικόνης είναι έτοιμο για σύνθεση (*compounding*). Το τελικό υλικό, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μονωτήρων, αποτελείται από:

- το αρχικό ελαστομερές (πολυμερές βάσης),
- παράγοντες βουλκανισμού, για την επίτευξη της σταυροδέσμησης (*cross-linking*) μεταξύ των αλυσίδων που εξασφαλίζει τη σταθερότητα του υλικού,
- ουσίες που επιδρούν στους ήδη σχηματισμένους σταυροδεσμούς και στους παράγοντες βουλκανισμού, προστατεύοντας τους κατά τη διαδικασία της σταυροδέσμησης (*coagents*),
- ουσίες που επιβραδύνουν την υποβάθμιση του πολυμερούς λόγω οξυγόνου, όζοντος, ζέστης και φωτός (*antidegradants*),
- ουσίες που στοχεύουν στην διευκόλυνση της επεξεργασίας του πολυμερούς (π.χ. αφαίρεση από καλούπι) (*processing aids*),
- πληρωτικά μέσα (*fillers*), η χρήση των οποίων στοχεύει στη βελτίωση της αντοχής στον εφελκυσμό και το σχίσσιμο, της ελαστικότητας και της αντίστασης στη εκτράχυνση της επιφάνειας, ενώ πληρωτικά μέσα όπως το ATH συμβάλλουν επίσης στην υψηλή αντοχή σε διάβρωση λόγω ηλεκτρικών εκκενώσεων και μειώνουν τον κίνδυνο ανάφλεξης του υλικού,
- παράγοντες συνάφειας, που είναι απαραίτητοι ώστε να δημιουργηθεί χημικός δεσμός μεταξύ ελαστομερούς και πληρωτικού μέσου (*coupling agents*),
- διαλύτες και υλικά ειδικού σκοπού, ανάλογα με τη χρήση στην οποία προορίζεται το πολυμερές (π.χ. αντιμυκητιασικά, χρωστικές). [14]



Τα ελαστομερή σιλικόνης που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μονωτήρων για χρήση σε εναέριες γραμμές είναι κυρίως RTV (*room temperature vulcanized*), LSR (*liquid silicone rubber*) και HTV (*high temperature vulcanized*). Μετά από χρόνια εμπειρίας έχει αποδειχθεί ότι για χρήση σε εναέριες γραμμές, σε επίπεδα τάσης της τάξης των εκατοντάδων kV, το HTV SIR, ενισχυμένο με ATH, έχει μακράν την καλύτερη απόδοση. Το RTV SIR βρίσκει εφαρμογή σε μονωτήρες υποσταθμών, με αρκετή επιτυχία σε συνθήκες ρύπανσης. Στις μέρες μας, το 95% των μονωτήρων κατασκευάζονται με περίβλημα από HTV SIR. [10, 15]

Στο SIR η ενέργεια δεσμού μεταξύ Si-O είναι  $1,76 \times 10^{-19}$  J (106 kJ/mol ή 1,1eV) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μεταξύ C-C στο EPDM ( $1,42 \times 10^{-19}$  ή 85kJ ή 0,882 eV). Έτσι προκύπτει ότι το SIR έχει μεγαλύτερη αντοχή από ότι το EPDM στην υπεριώδη ακτινοβολία και στη θερμότητα που παράγεται από τόξα που εκδηλώνονται λόγω του σχηματισμού ξηρών ζωνών. Μετά από εκτεταμένη έκθεση μια επιφάνειας από SIR σε έντονες εκκενώσεις σχηματίζεται ένα στρώμα πυριτίας ( $\text{SiO}_2$ ), το οποίο δεν είναι αγωγίμο, ενώ στο EPDM το στρώμα που προκύπτει αποτελείται από άνθρακα, ο οποίος είναι αγωγίμος. [13]

Σημαντικό πλεονέκτημα των πολυμερών έναντι των κεραμικών υλικών για την κατασκευή μονωτήρων αποτελεί η υδροφοβικότητα των πολυμερικών επιφανειών. Στην περίπτωση του SIR, αν και υπό συνθήκες έντονης διαβροχής το πλεονέκτημα αυτό χάνεται, η υδροφοβικότητα επανέρχεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-7. Αυτό οφείλεται στη μεταφορά σιλοξανίων (δομικών ομάδων Si-O-Si) από τον όγκο του υλικού στην επιφάνεια του, τα οποία εγκλωβίζουν τους ρύπους και καλύπτουν τυχόν υδρόφιλες περιοχές. [16]



α

β

Σχήμα 1-7: Υδροφοβικότητα SIR (α) καθαρού μονωτήρα [15] και (β) ρυπασμένου μονωτήρα με άλατα [16].

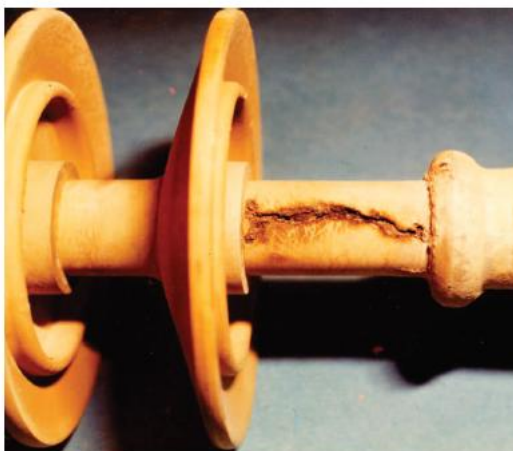
*iv. Συμπολυμερή αιθυλενίου-προπυλενίου*

Τα συμπολυμερή αιθυλενίου-προπυλενίου περιλαμβάνουν τα ελαστικά συμπολυμερούς αιθυλενίου-προπυλενίου (*Ethylene Propylene Rubber-EPR*) και συμπολυμερούς αιθυλενίου προπυλενίου αλκαδιενίου (*Ethylene Propylene Diene Monomer-EPDM*). Τα υλικά αυτά προκύπτουν όταν τα μονομερή αιθυλένιο, προπυλένιο, στην περίπτωση του EPDM και αλκαδιένιο, παρουσία καταλύτη πολυμερίζονται σε θερμοκρασία δωματίου. Όπως και στο SIR, το τελικό προϊόν προκύπτει ως μίγμα διαφόρων συστατικών που σκοπό έχουν να βελτιώσουν τις ιδιότητες του, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. [14]

Τα ελαστικά αυτά και ιδιαίτερα το EPDM, έχουν εξαιρετικές ιδιότητες λόγω του κορεσμένου δεσμού C-C, εφάμιλλες με αυτές του ελαστικού σιλικόνης (SIR). Αποτελούν μια πιο οικονομική εναλλακτική στους μονωτήρες από SIR, ωστόσο μακροπρόθεσμα υστερούν ως προς την αντοχή τους στη διάβρωση και τις υπεριώδεις ακτινοβολίες. Προκειμένου να εκμεταλλευτούν την εξαιρετική υδρόφοβη συμπεριφορά του SIR και τις μηχανικές ιδιότητες του EPDM πολλές εταιρείες ανέπτυξαν μίγματα (κράματα) SIR-EPDM, τα οποία συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δύο αυτών τεχνολογιών.[12, 14]

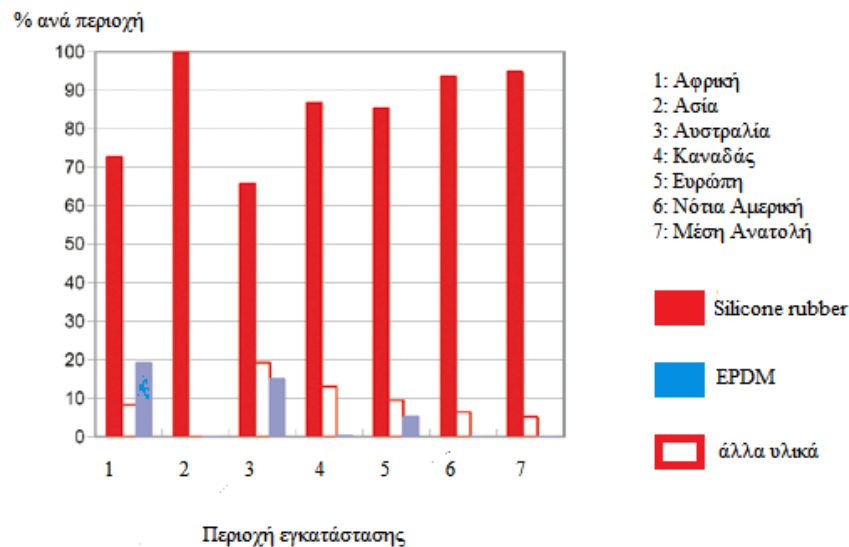
*v. Θερμοπλαστικά πολυμερή (TPE)*

Τα θερμοπλαστικά πολυμερή (*thermoplast polymers-TPE*) γίνονται μαλακότερα όταν θερμαίνονται (και κατά περίπτωση υγροποιούνται) και σκληραίνουν όταν ψύχονται. Χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά περιβλημάτων συνθετικών μονωτήρων λόγω της ευκολίας στην κατεργασία τους για το σχηματισμό των περιβλημάτων και στη συνεπαγόμενη μείωση του κόστους κατασκευής. Ωστόσο εμφάνιζαν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης (Σχήμα 1-8) και ήταν εξαιρετικά εύφλεκτα. Έτσι, πολλές φορές οι ηλεκτρικές εκκενώσεις λόγω υπερπήδησης είχαν ως αποτέλεσμα ανάφλεξη του περιβλήματος, πτώση του φλεγόμενου υλικού και πυρκαγιές. Δεν προκαλεί λοιπόν καμία έκπληξη το γεγονός ότι η σχετική τεχνολογία γρήγορα εγκαταλείφθηκε. [8, 12]



Σχήμα 1-8: Διάβρωση περιβλήματος από θερμοπλαστικό πολυμερές.[12]

Η εμπειρία από τη χρήση των προαναφερθεισών τεχνολογιών για την κατασκευή πολυμερικών περιβλημάτων οδήγησε στην επικράτηση των ελαστομερών (SIR, EPDM και κραμάτων τους) έναντι των υπολοίπων. Μάλιστα, σύμφωνα με έρευνα της CIGRE Working Group B2.03, η οποία δημοσιεύτηκε το 2000, διεθνώς προτιμάται η χρήση του SIR για εφαρμογές υψηλών τάσεων, με το EPDM και τα υπόλοιπα υλικά να διαδραματίζουν λιγότερο σημαντικό ρόλο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-9. [12, 15]



Σχήμα 1-9: Υλικά πολυμερικών περιβλημάτων συνθετικών μονωτήρων (>100kV) [15]

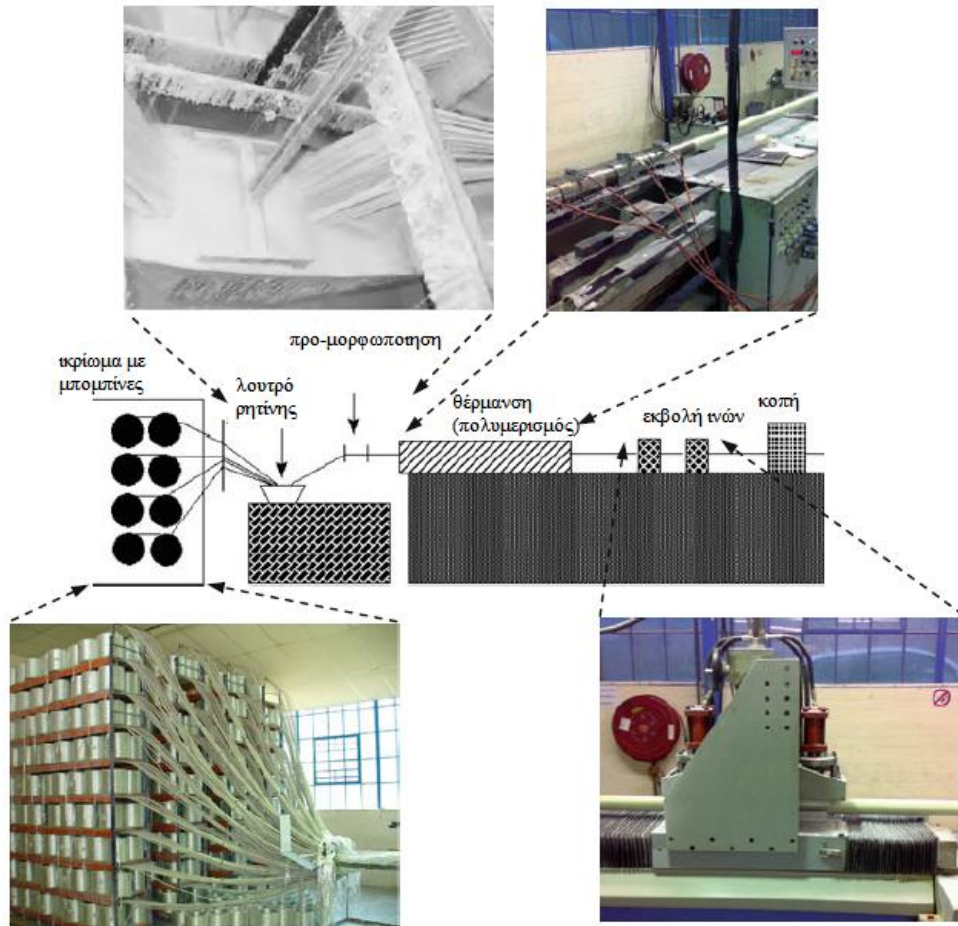
### 1.3.2.2. Πυρήνας

Ο πυρήνας στους συνθετικούς μονωτήρες έχει τη διπλή λειτουργία της μόνωσης και της αντοχής στις μηχανικές καταπονήσεις λόγω φορτίων. Ο ράβδος των μονωτήρων συμπαγούς πυρήνα (στήριξης, ανάρτησης) αποτελούνται από αξονικά διατεταγμένες ίνες υάλου ενισχυμένες με ρητίνη. Το 70-75% του βάρους του πυρήνα οφείλεται στις ίνες. Σε μία τυπική ράβδο διαμέτρου 20 mm μπορεί να περιέχονται πάνω από ένα εκατομμύριο ίνες, η καθεμία με διάμετρο 10 μm. Οι ίνες εξάγονται από τήγμα γυαλιού ως μεμονωμένες γυάλινες κλωστές και τυλίγονται απευθείας χωρίς συστροφή σε μπομπίνες.

Το γυαλί από το οποίο προέρχονται οι ίνες μπορεί να είναι είτε γυαλί τύπου E (βοριοπυριτικό γυαλί με προσμίξεις οξειδίου του ασβεστίου, οξειδίου του αλουμινίου και χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκαλικά) είτε γυαλί τύπου ECR (γυαλί τύπου E το οποίο δεν περιέχει οξείδιο του βορίου και είναι ανθεκτικό στη διάβρωση (*Corrosion Resistant, CR*)). Για τη μήτρα ρητίνης χρησιμοποιείται εποξειδική ρητίνη, βινυλεστερική ρητίνη, ακόρεστη πολυεστερική ρητίνη ή κάποιος συνδυασμός τους.

Ο πυρήνας κατασκευάζεται με τη μέθοδο της εξόκλησης (*pultrusion*), η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 1-10. Οι ίνες, από το ικρίωμα στο οποίο είναι τοποθετημένες οι μπομπίνες οδηγούνται στο λουτρό ρητίνης. Το επόμενο βήμα στοχεύει στην αφαίρεση της περιττής ρητίνης, η οποία στο στάδιο της θέρμανσης

πολυμερίζεται. Στο επόμενο στάδιο γίνεται η εκβολή του πολυμερούς και στο τέλος η κοπή των επιμέρους ράβδων. Η ταχύτητα της εξόλκησης εξαρτάται από τη διάμετρο της ράβδου. Μικρότερη διάμετρος σημαίνει μεγαλύτερη ταχύτητα επειδή γίνεται χρήση πολλαπλών τμημάτων θέρμανσης για την ταυτόχρονη κατασκευή τριών ή περισσότερων ράβδων. Στο Σχήμα 1-11 φαίνονται ινώδεις ράβδοι διαφόρων διαστάσεων. [2, 9, 12]



Σχήμα 1-10: Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας της εξόλκησης.[9]



Σχήμα 1-11: Πυρήνες RBGF διαφόρων διαστάσεων. [15]

Η κατασκευή του πυρήνα των μονωτήρων διέλευσης, όπου οι ίνες σχηματίζουν σωλήνα γίνεται με τη μέθοδο της υγρής περιέλιξης (*wet/ filament winding process*). Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με τη μέθοδο της εξόλκησης, μόνο που εδώ οι ίνες μετά την εξαγωγή τους από το λουτρό ρητίνης περιελίσσονται γύρω από έναν πυρήνα, ο οποίος ονομάζεται αδράχτι (*mandrel*). Με τον τρόπο αυτό οι ίνες δε συμπιέζονται,



όπως συμβαίνει στην εξόλκηση κατά το στάδιο της θέρμανσης. Η μήτρα ρητίνης πολυμερίζεται μετά από αρκετά στάδια σε φούρνο με κυκλοφορία αέρα. Για μονωτήρες που χρησιμοποιούνται μέσα σε μονωτικά υλικά, όπως το λάδι ή το SF<sub>6</sub>, χρησιμοποιείται η μέθοδος της στεγνής περιέλιξης (*dry winding*), όπου οι ίνες περιελίσσονται πριν το λουτρό ρητίνης.[9]

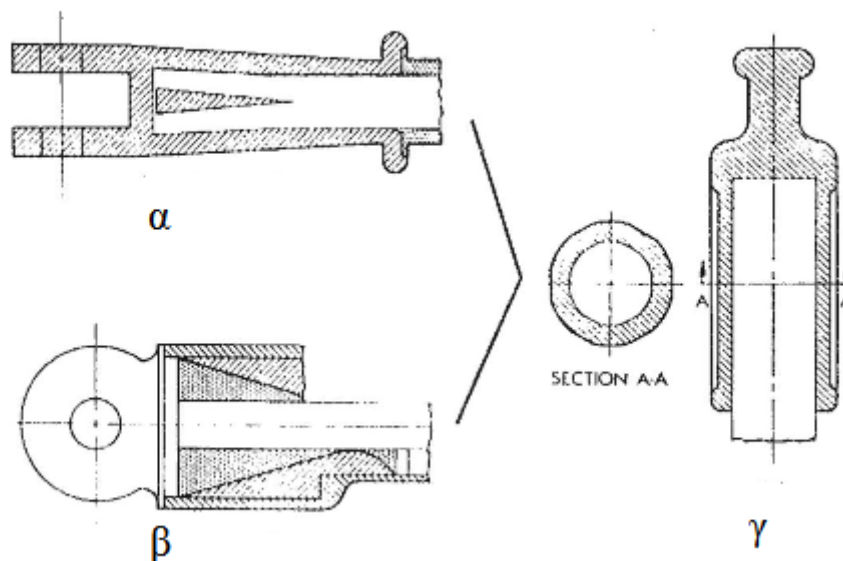
Για την κατασκευή μονωτήρων υψηλής τάσης (μεταφοράς) προτιμάται η χρήση εποξειδικής ή βινυλεστερικής ρητίνης, ενώ για χαμηλότερα επίπεδα τάσης (διανομή) χρησιμοποιείται πολυεστερική ρητίνη. Για μονωτήρες κενού πυρήνα επιλέγεται εποξειδική ρητίνη. Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων έχει ως αποτέλεσμα όξινα παραπροϊόντα, με pH ≤ 3. Το γυαλί τύπου ECR εμφανίζει μεγάλη αντοχή σε αυτές τις συνθήκες, για το λόγο αυτό προτιμάται για μονωτήρες ανάρτησης, ειδικά σε υψηλότερα επίπεδα τάσης. Για pH με τιμές 4-12 δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά στην απόδοση των γυαλιών τύπου E και ECR, γι' αυτό και στους πυρήνες τύπου σωλήνα (μονωτήρες κενού πυρήνα), όπου δεν έχει παρατηρηθεί ψαθυρή θραύση, χρησιμοποιούνται ίνες από γυαλί τύπου E. [9]

### 1.3.2.3. Μεταλλικοί τερματισμοί

Για την προσάρτηση των μονωτήρων στα υπόλοιπα στοιχεία του εξοπλισμού (για παράδειγμα μετασχηματιστές, πυλώνες, αγωγούς) χρησιμοποιούνται μεταλλικά εξαρτήματα ή τερματισμοί (*end fittings*). Ανάλογα με τη χρήση των μονωτήρων (ανάρτησης, στήριξης κ.α.) επιλέγονται τα κατάλληλα σχέδια και υλικά τα οποία εξασφαλίζουν μηχανική αντοχή και αντοχή στη διάβρωση. Το σχήμα των τερματισμών πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να περιορίζεται η εμφάνιση στεμματοειδών εκκενώσεων (*corona discharges*) στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου-πολυμερούς. Η εμφάνιση αυτών των εκκενώσεων έχει ως αποτέλεσμα το πολυμερές να γίνεται εύθρυπτο και μπορεί να διαρραγεί, με αποτέλεσμα κατάρρευση του μονωτήρα λόγω εισχώρησης υγρασίας στον πυρήνα. Στα πιο πρόσφατα σχέδια οι μεταλλικοί ακροδέκτες περιλαμβάνουν δακτυλίους στεγανοποίησης από σιλικόνη (*O-rings*) οι οποίοι είναι κολλημένοι πάνω στον πυρήνα, ώστε να αποφεύγεται η εισχώρηση υγρασίας. [13]

Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι μεταλλικοί ακροδέκτες είναι κυρίως χυτό, σφυρηλατημένο ή μηχανικά κατεργασμένο αλουμίνιο, ελατός σίδηρος, χυτό ή σφυρηλατημένο ατσάλι. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε μονωτήρες κενού πυρήνα (μονωτήρες διέλευσης), σε μονωτήρες που εγκαθίστανται στα σιδηροδρομικά δίκτυα και στις περισσότερες εφαρμογές. Στους μονωτήρες που βρίσκονται υπό εφελκυστική τάση (μονωτήρες ανάρτησης) και σε φορτία άνω των 70 kN προτιμάται το σφυρηλατημένο ατσάλι, ενώ σε μικρότερα φορτία χυτό ατσάλι.[9, 12]

Για την προσάρτηση των μεταλλικών τερματισμών στον πυρήνα των μονωτήρων έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 1-12 και είναι οι εξής: με τη χρήση σφήνας (*wedged*), με συγκόλληση (*glued*) και με συμπίεση του μετάλλου στον πυρήνα (*swaged*). Η τελευταία μέθοδος είναι και η προτιμότερη, έχοντας αντικαταστήσει τις άλλες δύο για λόγους που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 1-12: Χρήση σφήνας (α), συγκόλλησης (β) και σύνδεσης με συμπίεση (*swaged*) (γ) για την προσάρτηση του μεταλλικού ακροδέκτη στον πυρήνα του μονωτήρα.[12]

Η χρήση σφήνας εισήχθη από την εταιρεία Rosenthal και θεωρήθηκε πρωτότυπη γιατί δεν απαιτούσε ειδικό εξοπλισμό για την προσάρτηση του μετάλλου στη ράβδο. Μια μεταλλική σφήνα τοποθετούνταν στο άκρο του πυρήνα, στο οποίο για το λόγο αυτό είχαν προηγουμένως γίνει μικρές εγκοπές. Στη συνέχεια γινόταν εφαρμογή του μεταλλικού ακροδέκτη. Με την πίεση για να έρθει το μέταλλο στη θέση του η σφήνα εισχωρούσε στο υλικό του πυρήνα, το οποίο εκτεινόταν προς τα έξω, σφηνώνοντας μέσα στην υποδοχή του ακροδέκτη. Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη συναρμογή των επιμέρους εξαρτημάτων εφαρμοζόταν πίεση στο μέταλλο και τέλος τοποθετούνταν και δακτύλιος στεγανοποίησης από ελαστικό σιλικόνης (*SIR*). Σύντομα παρατηρήθηκαν προβλήματα με αυτή τη μέθοδο, λόγω γλιστρήματος του πυρήνα που είχε ως αποτέλεσμα διάρρηξη της σφράγισης (Σχήμα 1-13). Η συνεπαγόμενη έλλειψη στεγανοποίησης του εσωτερικού είχε ως αποτέλεσμα υγρασία και όξινα παραπροϊόντα των εκκενώσεων corona να προκαλούν ψαθυρή θραύση (*θρυμματισμό, brittle fracture*) στον πυρήνα, βλάβη η οποία παρατηρήθηκε σε διαφορετικές χώρες που χρησιμοποιούσαν μονωτήρες αυτής της τεχνολογίας. Παρά τις τροποποιήσεις που έγιναν ώστε να περιορίζεται η κίνηση του πυρήνα, η μέθοδος αυτή τελικά εγκαταλείφθηκε.



Σχήμα 1-13: Διάρρηξη της σφράγισης σε μονωτήρα της εταιρείας Rosenthal, στον οποίο έχει εφαρμοστεί η μέθοδος της σφήνας για σύνδεση ακροδεκτών-πυρήνα.[12]

Η μέθοδος της συγκόλλησης περιλάμβανε την πλήρωση μια σφηνοειδούς κοιλότητας στο εσωτερικό του μεταλλικού ακροδέκτη με εποξειδική ρητίνη, η οποία προσκολλάται στη ράβδο σχηματίζοντας μια μηχανική σφήνα. Παρά τις αρχικές ενθαρρυντικές ενδείξεις, η μηχανική φόρτιση του πυρήνα οδήγησε σε περιστατικά αποσύνδεσης διηλεκτρικού-ακροδεκτών. Οι μονωτήρες αυτής της τεχνολογίας ήταν κατάλληλοι για γραμμές διανομής αλλά όχι για γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και έτσι, παρά κάποιες προσπάθειες βελτίωσης του σχεδιασμού, και αυτή η μέθοδος εγκαταλείφθηκε.

Η μέθοδος που αντικατέστησε τις παραπάνω είναι αυτή της περίσφιξης του μεταλλικού ακροδέκτη στον πυρήνα (*swaging*). Όταν η περίσφιξη είναι ομοιόμορφη στην περιφέρεια του μετάλλου επιτυγχάνεται η βέλτιστη συναρμογή των επιμέρους τμημάτων, φτάνοντας στη μέγιστη αντοχή θραύσης ανά μονάδα επιφάνειας του πυρήνα. Στις μέρες μας αυτή είναι η μέθοδος που προτιμάται από τους κατασκευαστές συνθετικών μονωτήρων.[12]

### 1.3.3. Ρύπανση, γήρανση και υπερπήδηση συνθετικών μονωτήρων

Από τη στιγμή της εγκατάστασης των συνθετικών μονωτήρων, είτε σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς χώρους, υφίστανται διάφορες λειτουργικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις χρόνο ζωής και στην απόδοσή τους. Η αντοχή των πολυμερών οφείλεται στη διαπλοκή (*entanglement*) των πολυμερικών αλυσίδων. Η επιδείνωση της απόδοσης τους οφείλεται στον αποπολυμερισμό των μακρομορίων και μπορεί να προκληθεί από παράγοντες όπως: βιολογική καταστροφή, χημική ρύπανση, περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Βιολογική καταστροφή προκαλείται από το σχηματισμό ενός «βιοφίλμ» από βρύα, λειχήνες ή φύκη, τα οποία εκμεταλλεύονται το οργανικό υπόστρωμα που παρέχει το περίβλημα. Αν δεν απομακρυνθούν έγκαιρα, συμβάλλουν στη διάβρωση, τον αποχρωματισμό, τη ρύπανση και τη διαβροχή της επιφάνειας, ενώ δυσχεραίνουν την αποστράγγιση του νερού, μετά από βροχόπτωση ή χιονόπτωση. Η απομάκρυνσή τους προϋποθέτει τον καθαρισμό του μονωτήρα με διαλυτικά όπως ακετόνη, τολουόλιο, τριχλωροαιθυλένιο ή 2-προπανόλη. Η χρήση κατάλληλων πληρωτικών μέσων (*fillers*) μπορεί να χρησιμοποιηθεί προληπτικά. Στους παράγοντες βιολογικής καταστροφής μπορούν να προστεθούν επίσης και οι ακαθαρσίες πτηνών: ενδεικτικά, μέχρι το τέλος του 2006 στην Κίνα καταγράφηκαν 250 περιστατικά υπερπήδησης συνθετικών μονωτήρων λόγω ακαθαρσιών, ποσοστό 28% επί των συνολικών. [15, 17, 18]

Στη γήρανση των επιφανειών των συνθετικών μονωτήρων συμβάλλουν επίσης περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμότητα και η περιρρέουσα ατμοσφαιρική υγρασία. Η βλάβη που προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία (*photo oxidization*) οδηγεί στο σχηματισμό μικρο-ρωγμών στο πολυμερικό περίβλημα, επιτρέποντας την εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό και συνεπαγόμενη κατάρρευση του μονωτήρα λόγω διάβρωσης και μερικών εκκενώσεων στον πυρήνα. [17]

Από την πλευρά της χημικής ρύπανσης, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ρύπων που επικάθονται στην επιφάνεια των μονωτήρων, κάποιοι εκ των οποίων είναι διαλυτοί και κάποιοι αδιάλυτοι στο νερό. Οι μονωτήρες που είναι εγκατεστημένοι σε

παράκτιες περιοχές συνήθως επιβαρύνονται με διαλυτούς ρύπους, κυρίως NaCl (χλωριούχο νάτριο). Οι μονωτήρες που βρίσκονται κοντά σε βιομηχανίες τσιμέντου ή χαρτοβιομηχανίες ρυπαίνονται με σημαντικές ποσότητες μη διαλυτών ρύπων, όπως CaCl<sub>2</sub>, άνθρακα και σκόνη τσιμέντου. Για να ποσοτικοποιηθούν οι επιφανειακοί ρύποι, οι διαλυτοί ρύποι εκφράζονται ως *ισοδύναμη πυκνότητα εναποτιθέμενου άλατος (Equivalent Salt Deposit Density-ESDD)*, δηλαδή *mg NaCl ανά εμβαδό επιφάνειας*. Οι μη διαλυτοί ρύποι εκφράζονται ως *πυκνότητα μη διαλυτών επικαθίσεων (Non-Soluble Deposit Density-NSDD)*, δηλαδή *mg καολίνη ανά εμβαδό επιφάνειας*.

Εκτός από τις προαναφερθείσες πηγές, τα άλατα που χρησιμοποιούνται για το ξεπάγωμα δρόμων και πεζοδρομίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα συνεισφέρουν στο πρόβλημα της ρύπανσης. Διάφορα άλατα χρησιμοποιούνται για το ξεπάγωμα των δρόμων, όπως NaCl, CaCl<sub>2</sub>, KCl, CMA (*Calcium Magnesium Acetate*) και MgCl<sub>2</sub>. Από αυτά, τα πιο κοινώς χρησιμοποιούμενα άλατα είναι τα NaCl και CaCl<sub>2</sub>. Προσεγγιστικά, κάθε χρόνο χρησιμοποιούνται περίπου 15 εκατομμύρια τόνοι αλάτων στις Η.Π.Α. και 5 εκατομμύρια στον Καναδά. Τα άλατα αυτά τείνουν να επικάθονται στις επιφάνειες των μονωτήρων λόγω των ανέμων και της κίνησης των οχημάτων. [3] Για λόγους τυποποίησης, έχουν θεσπιστεί τέσσερα επίπεδα ρύπανσης και το ελάχιστο ενδεικνυόμενο μήκος ερπυσμού που αντιστοιχεί στο καθένα (Πίνακας 1.2):

Πίνακας 1.2: Χαρακτηρισμός επιπέδων ρύπανσης κατά IEC και μήκος ερπυσμού.[19]

Επίπεδο ρύπανσης	Παραδείγματα αντιπροσωπευτικών περιοχών	Ελάχιστο μήκος ερπυσμού (mm/kV)
I - Ελαφριά	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και μικρή πυκνότητα κατοικιών που διαθέτουν καυστήρες</li> <li>- Περιοχές με μικρή πυκνότητα βιομηχανιών ή κατοικιών, οι οποίες υφίστανται ανέμους ή/και συχνές βροχοπτώσεις</li> <li>- Αγροτικές περιοχές</li> <li>- Ορεινές περιοχές</li> </ul> <p>Οι περιοχές αυτές θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10-20 km από τη θάλασσα και να μην εκτίθενται σε ανέμους από αυτή.</p>	16
II - Μεσαία	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Περιοχές με βιομηχανίες που δεν παράγουν ιδιαίτερα επιβαρυντικούς αέριους ρύπους και με μεσαία πυκνότητα κατοικιών που διαθέτουν καυστήρα</li> <li>- Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα κατοικιών και/ή βιομηχανιών που όμως υφίστανται συχνά ανέμους και/ή βροχοπτώσεις</li> <li>- Περιοχές εκτεθειμένες σε θαλάσσιους ανέμους αλλά όχι πολύ κοντά στην ακτή</li> </ul>	20
III - Βαριά	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με μεγάλη πυκνότητα καυστήρων</li> <li>- Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή σε κάθε περίπτωση εκτεθειμένες σε σχετικά ισχυρούς ανέμους από αυτή</li> </ul>	25
IV - Πολύ βαριά	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Περιοχές μέτρια έκτασης, εκτεθειμένες σε αγωγίμους ρύπους και βιομηχανικό καπνό που δημιουργεί αγωγίμες επικαθίσεις μεγάλου πάχους</li> <li>- Περιοχές μέτριας έκτασης, πολύ κοντά στις ακτές και εκτεθειμένες στον αφρό των κυμάτων ή πολύ ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα</li> <li>- Ερημικές περιοχές, χωρίς βροχόπτωση για μεγάλες περιόδους, εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι σε μεγάλες συγκεντρώσεις</li> </ul>	31



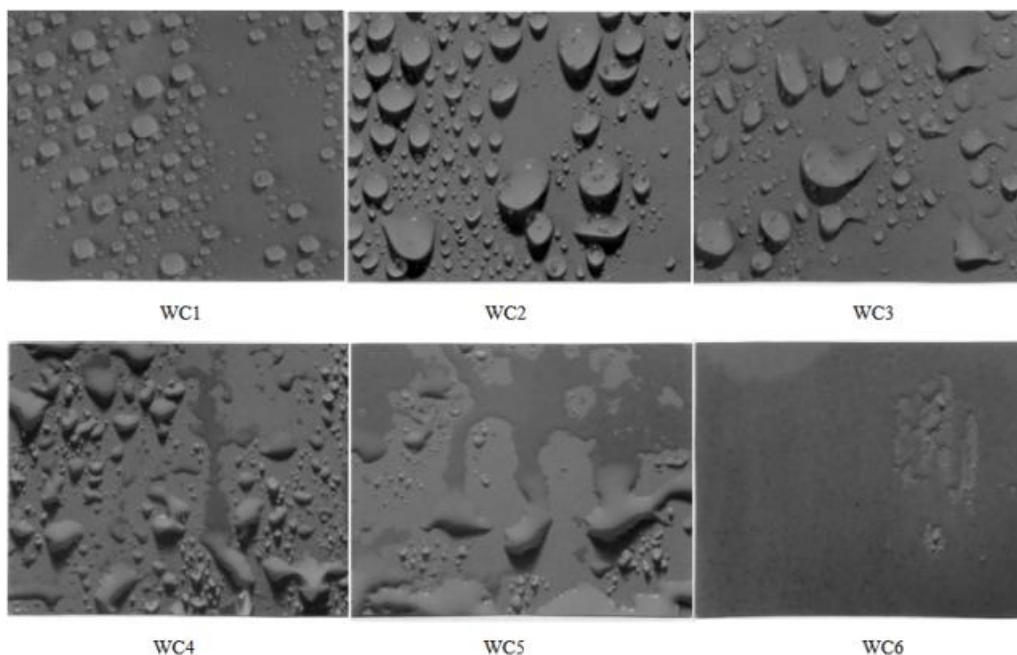
Υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες υγρασίας, όπως ασθενή βροχόπτωση ή ομίχλη, το στρώμα ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα διαβρέχεται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρεύματος διαρροής. Η ροή αυτού του ρεύματος παράγει θερμότητα, λόγω της οποίας η υγρασία στην επιφάνεια του μονωτήρα εξατμίζεται. Η εξάτμιση οδηγεί στο σχηματισμό «ξηρών ζωνών». Οι ξηρές ζώνες τείνουν να σχηματίζονται στα σημεία της επιφάνειας του μονωτήρα όπου η διάμετρος είναι μικρότερη, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας ρεύματος. Γύρω από της ξηρές ζώνες αναπτύσσεται έντονη πεδιακή καταπόνηση, επειδή η επιφανειακή αντίσταση τους είναι μεγαλύτερη από αυτή του αγωγίμου φιλμ ρύπων. Αυτό προκαλεί μερική εκκένωση στην περιοχή πλησίον της ξηρής ζώνης. Αν μπροστά από το τόξο η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγάλη, η εκκένωση συνεχίζεται μέχρι να γεφυρώσει όλο το μονωτήρα (*υπερπήδηση-flashover*). Η υπερπήδηση προκαλεί την εκδήλωση τόξου ισχύος, το οποίο οδηγεί σε διακοπή της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο μονωτήρα, μόνιμες ή παροδικές. [3]

Η υδροφοβικότητα της επιφάνειας των συνθετικών μονωτήρων δεν επιτρέπει τη δημιουργία συνεχούς φιλμ στην επιφάνεια του μονωτήρα και οδηγεί σε περιορισμό του ρεύματος διαρροής και υψηλότερη τάση υπερπήδησης, σε σχέση με έναν κεραμικό μονωτήρα. Ειδικά στο SIR, εφόσον το στρώμα της ρύπανσης δεν έχει μεγάλο πάχος, η υδροφοβικότητα μεταφέρεται στην επιφάνεια των ρύπων. Ο μηχανισμός αυτός, σε συνδυασμό με την προσωρινή απώλεια της υδροφοβικότητας υπό συνθήκες συνεχούς διαβροχής (για παράδειγμα έντονη βροχόπτωση), η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση ρεύματος διαρροής καταπονούν το υλικό και συντείνουν στη γήρανση του και στη σταδιακή απώλεια της υδροφοβικότητας, κάτι που δεν είναι επιθυμητό. Ωστόσο, ακόμα και το γηρασμένο SIR, το οποίο εμφανίζει τάση υπερπήδησης 16% μικρότερη του ακέραιου υλικού, αποδίδει καλύτερα από το γηρασμένο EPDM και τη γηρασμένη πορσελάνη. [3, 12]

Για την αξιολόγηση της υδροφοβικότητας ή μη των επιφανειών των συνθετικών μονωτήρων καθ' όλη τη διάρκεια της «ζωής» τους, έχουν τυποποιηθεί επτά επίπεδα διαβροχής (*Wettability Classes-WC*), τα οποία φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 1.3) και αναλυτικά στο Σχήμα 1-14.

Πίνακας 1.3: Επίπεδα διαβροχής (WC) κατά IEC.[20]

WC	Περιγραφή
1	Σχηματίζονται μόνο διακριτές σταγόνες. Το σχήμα τους, ιδωμένο κάθετα προς την επιφάνεια είναι σχεδόν κυκλικό.
2	Σχηματίζονται μόνο διακριτές σταγόνες. Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας καλύπτεται από σταγόνες που αν ιδωθούν κάθετα ως προς την επιφάνεια ξεφεύγουν λίγο από το κυκλικό σχήμα.
3	Σχηματίζονται μόνο διακριτές σταγόνες. Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας καλύπτεται από σταγόνες ακανόνιστου σχήματος.
4	Παρατηρούνται σταγόνες και αυλάκια νερού. Τα αυλάκια καλύπτουν λιγότερο από το 10% της επιφάνειας.
5	Παρατηρούνται σταγόνες και αυλάκια νερού. Τα αυλάκια καλύπτουν περισσότερο από το 10% αλλά λιγότερο από το 90% της επιφάνειας.
6	Περισσότερο από 90% (αλλά όχι 100%) της επιφάνειας καλύπτεται από αυλάκια. (Παρατηρούνται ακόμα στεγνές περιοχές.)
7	Ένα συνεχές στρώμα νερού καλύπτει όλη την προς παρατήρηση επιφάνεια.

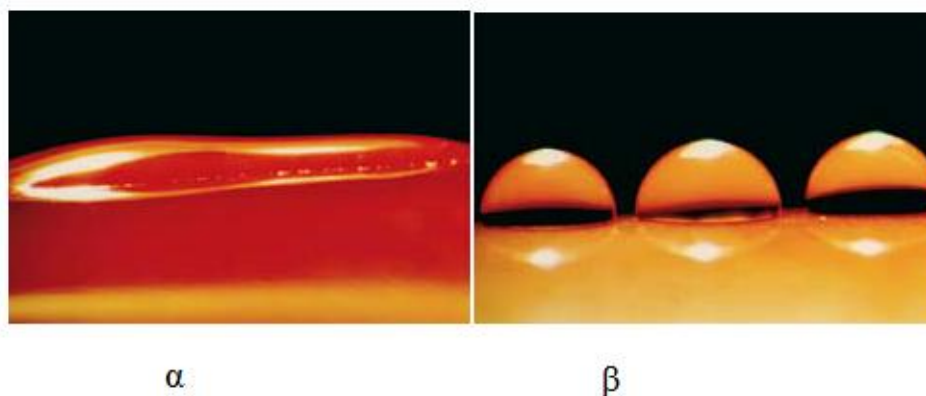


Σχήμα 1-14: Επίπεδα διαβροχής επιφανειών.[19]

### 1.3.4. Εμπειρία από τη χρήση συνθετικών μονωτήρων

#### 1.3.4.1. Σύγκριση με προγενέστερες τεχνολογίες μονωτήρων

Η υδροφοβικότητα των πολυμερικών επιφανειών των συνθετικών μονωτήρων έναντι της υδρόφιλης φύσης των κεραμικών (πορσελάνινων και γυάλινων) (Σχήμα 1-15) έχει ήδη περιγραφεί παραπάνω. Η εμπειρία από τη χρήση των συνθετικών μονωτήρων αποδεικνύει το πλεονέκτημα της χρήσης τους σε περιοχές με περιορισμένες βροχοπτώσεις και συνθήκες ρύπανσης, χωρίς να πρέπει να προηγηθεί πλύσιμο ή λίπανση της επιφάνειας. Εκτός από τη μείωση των απαιτήσεων συντήρησης (έκπλυση με νερό), ο συνεπαγόμενος σχηματισμός ξηρών ζωνών έχει ως αποτέλεσμα, εκτός από την αύξηση της τάσης υπερπήδησης, τη μείωση του ρεύματος διαρροής, με συνεπαγόμενη μείωση των απωλειών της γραμμής. [15, 21]



Σχήμα 1-15: Υδρόφιλη (α) και υδρόφοβη (β) επιφάνεια. [15]

Επιπλέον, η αντοχή των συνθετικών μονωτήρων στην κρούση και το χαμηλό τους βάρος διευκολύνουν τη μεταφορά και την ανάρτησή τους και επιτρέπουν την

κατασκευή μικρότερων πυλώνων. Ενδεικτικά, οι συμβατικοί μονωτήρες αποτελούν το 20% του συνολικού βάρους που καλείται να σηκώσει ο πυλώνας, ενώ οι συνθετικοί μονωτήρες είναι κατά 90% ελαφρύτεροι. Επίσης, λόγω του πιο λεπτού προφίλ τους, αποτελούν δύσκολο στόχο βανδαλισμού, κάτι που αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα για γραμμές που βρίσκονται εγκατεστημένες σε εμπόλεμες ζώνες. Το χαμηλό βάρος των συνθετικών μονωτήρων τους καθιστά κατάλληλους και για χρήση στα σιδηροδρομικά δίκτυα, επειδή ελαχιστοποιείται η εμφάνιση ανεπιθύμητων δονήσεων, ειδικά όσο αυξάνονται οι ταχύτητες των συρμών. [9, 22]

Παρά τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση των συνθετικών μονωτήρων, υπάρχουν ακόμα σημεία που οι συμβατικές τεχνολογίες υπερτερούν. Ένα από αυτά είναι η απουσία εργαλείων ελέγχου για βλάβες υπό τάση των συνθετικών μονωτήρων.

Είναι γνωστό πως στους πορσελάνινους μονωτήρες οι εσωτερικές ρωγμές επεκτείνονται μέχρι την επιφάνεια χωρίς να είναι ορατές στον εξωτερικό παρατηρητή. Υπάρχουν διαθέσιμα εργαλεία εντοπισμού αυτών των ατελειών όταν ο μονωτήρας είναι υπό τάση, ειδικά σε ξηρές καιρικές συνθήκες, οπότε και είναι πιο πιθανό να πραγματοποιηθούν εργασίες συντήρησης. Στους μονωτήρες υάλου οι ατέλειες είναι ορατές με γυμνό μάτι. Μονάδες με εσωτερικές ατέλειες αποκλείονται ήδη από τη γραμμή παραγωγής και η ζημιά λόγω βανδαλισμού ή λόγω εσωκλειόμενων ατελειών (εγκλείσματα ή ατέλειες μπορούν να οδηγήσουν σε σπάσιμο στα πρώτα στάδια της ζωής του μονωτήρα) είναι ορατή λόγω απουσίας των κυαθίων από την αλυσίδα, δεν υπάρχει μεγάλο περιθώριο αμφιβολιών. Όσον αφορά στους συνθετικούς μονωτήρες, η τεχνολογία εντοπισμού ελαττωματικών μονάδων είναι ακόμα σε εμβρυικό στάδιο. Αυτή τη στιγμή βασιζόμαστε κυρίως στην οπτική επιθεώρηση αυτών των μονωτήρων, μέθοδος που κάθε άλλο παρά επαρκής είναι. [12, 23]

Πιθανά σημεία ανησυχίας για τη μακροπρόθεσμη απόδοση των συνθετικών μονωτήρων είναι η γήρανση του πολυμερικού περιβλήματος, λόγω της οργανικής του φύσης, καθώς και το φαινόμενο κατάρρευσης του μονωτήρα λόγω ψαθυρής θραύσης του ινώδους πυρήνα, χωρίς καμία προηγούμενη ένδειξη.[12]

#### **1.3.4.2. Διεθνής εμπειρία από τη χρήση συνθετικών μονωτήρων**

Η είσοδος των συνθετικών μονωτήρων στην αγορά, περίπου σαράντα χρόνια πριν, έγινε δεκτή θερμά από τις εταιρείες του κλάδου στις Η.Π.Α., οι οποίες γρήγορα υιοθέτησαν τη σχετική τεχνολογία. Το 1969 εγκαταστάθηκε η πρώτη γραμμή με συνθετικούς μονωτήρες SIR στη Γερμανία, η οποία εξακολουθεί να λειτουργεί καλά. Σήμερα υπάρχει σχετική εμπειρία παγκοσμίως, στην Κίνα (από τις αρχές της δεκαετίας του 90), τη Νότιο Αφρική, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, τη Νέα Ζηλανδία, τον Καναδά, τις Η.Π.Α., την Αίγυπτο, τη Μαλαισία και φυσικά την Ευρώπη. [21, 23]

Η εταιρεία *Northwestern Energy (Sioux Falls, South Dakota, U.S.)* χρησιμοποιεί συνθετικούς μονωτήρες εδώ και τουλάχιστον τριάντα χρόνια. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα εκτεταμένη στις γραμμές μεταφοράς με επίπεδα τάσης από 161 έως 69 kV (161, 115, 100 kV). Συνθετικοί μονωτήρες χρησιμοποιούνται επίσης και στο σύστημα

των 230kV, το οποίο κατασκευάστηκε αρχικά με πορσελάνινους μονωτήρες, για αντικατάσταση παλαιότερων μονάδων και για κατασκευή νέων γραμμών.

Η εμπειρία της εταιρείας Pacific Gas & Electric Co (*San Francisco, California*) με συνθετικούς μονωτήρες σε γραμμές των 500kV σε παράκτιες περιοχές δεν είχε ενθαρρυντικά αποτελέσματα, αφού σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίστηκαν βλάβες αμέσως μετά την εγκατάστασή τους. Η χρήση τους σε αυτό το επίπεδο τάσης περιορίστηκε σε περιοχές που έχουν παρατηρηθεί συχνά βανδαλισμοί, ενώ η εταιρεία διερευνά το πως θα μπορούσε να επεκταθεί. Αντίθετα, σε επίπεδα τάσης από τα 230 kV και χαμηλότερα, οι συνθετικοί μονωτήρες είναι πολύ πιο διαδεδομένοι, τόσο σε παράκτιες περιοχές που επιβαρύνονται με αλμύρα, τόσο και στα ενδότερα, σε χαμηλότερα επίπεδα ρύπανσης (IEC Level 1).

Η εταιρεία Bonneville Power Administration (*Portland, Oregon, U.S.*) διαθέτει και διαχειρίζεται γραμμές οι οποίες διασχίζουν τις εξής πολιτείες: Oregon, Idaho, Washington, Montana, Wyoming, Utah, Nevada και California. Στο δίκτυο των 500 kV, το οποίο μετράει πάνω από τριανταπέντε χρόνια ζωής, σε περιοχές όπου οι βανδαλισμοί είναι συχνό φαινόμενο, η αντικατάσταση των κατεστραμμένων πορσελάνινων και γυάλινων μονωτήρων, αλλά και η κατασκευή νέων γραμμών, γίνονται αποκλειστικά με συνθετικούς μονωτήρες. Το ίδιο συμβαίνει και σε περιοχές με βαριά μόλυνση. Στο δίκτυο των 230 kV, το οποίο διαθέτει ως επί το πλείστον πορσελάνινους μονωτήρες, έχει κατασκευαστεί μια γραμμή περίπου εκατό χιλιομέτρων με συνθετικούς μονωτήρες.

Στο δίκτυο των 345 kV της εταιρείας Oklahoma Gas and Electric Co (*Oklahoma City, Oklahoma, U.S.*) το 80% των μονωτήρων είναι πορσελάνης και το υπόλοιπο 20% συνθετικοί. Η περιοχή που εξυπηρετεί χαρακτηρίζεται από χαμηλά επίπεδα ρύπανσης (IEC Level 1). Συνθετικοί μονωτήρες χρησιμοποιούνται στη μεταφορά και διανομή εκτεταμένα και σχεδόν αποκλειστικά, από το 1995 και μετά, στην αντικατάσταση και κατασκευή νέων γραμμών.[23]

Το 1984, σε σαρανταοχτώ χιλιόμετρα της γραμμής 500 kV hvdc Pacific Intertie, οι συμβατικοί μονωτήρες αντικαταστάθηκαν από συνθετικούς μονωτήρες SIR, μια κίνηση που απέβη σε καλό. Για συνθετικούς μονωτήρες, αυτό είναι το πιο μακροχρόνιο παράδειγμα χρήσης τους σε σύστημα hvdc (*υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος*) σε αυτό το επίπεδο τάσης. Πριν την αλλαγή, η πλύση των μονωτήρων της γραμμής έπρεπε να γίνεται ανελλιπώς κάθε εξήντα μέρες. Με τους συνθετικούς μονωτήρες από SIR βουλκανισμένου σε υψηλές θερμοκρασίες (*HTV SIR*) δεν υπάρχει τέτοια ανάγκη.

Μετά από δεκατέσσερα χρόνια λειτουργίας στις γραμμές των 735 kV της εταιρείας Hydro Quebec, οι συνθετικοί μονωτήρες με περιβλήματα SIR δεν παρουσίασαν ορατές φθορές, παρά τη σημαντική ρύπανση των επιφανειών. Λόγω αυτής της εξαιρετικής τους ιδιότητας μόνωσης σε περιοχές με ρύπανση, οι συγκεκριμένοι μονωτήρες χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για την αντικατάσταση των συμβατικών μονωτήρων στους οποίους έχει συμβεί υπερπήδηση ή έχουν παρουσιάσει άλλες βλάβες.

Στο Abu Dhabi οι συνθετικοί μονωτήρες (HTV SIR) εγκαταστάθηκαν στην πρώτη γραμμή 400 kV που κατασκευάστηκε στη χώρα. Λόγω των καιρικών συνθηκών που

επικρατούν στην περιοχή του Κόλπου, πρέπει να δίδεται προσοχή στους κινδύνους εμφάνισης εκκενώσεων λόγω ρύπανσης των γραμμών υψηλής τάσης. Οι συμβατικοί μονωτήρες απαιτούν να γίνεται πλύση της επιφάνειάς τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα, κάτι το οποίο είναι δύσκολο και οικονομικά ασύμφορο για μια περιοχή με ερημικό κλίμα. Η καλύτερη λύση είναι η επιλογή συνθετικών μονωτήρων.

Το 1977 μια γραμμή στη Γερμανία αναβαθμίστηκε από τα 245kV στα 420kV, χωρίς να αλλάξουν οι διαστάσεις των πυλώνων. Αυτό κατέστη δυνατό από τη χρήση συνθετικών μονωτήρων SIR σε μια νέα διαμόρφωση, το λεγόμενο ασύμμετρο V-string. Στην περίπτωση αυτή οι συνθετικοί μονωτήρες μεγάλου μήκους χρησίμευσαν ως ανάρτησης, ενώ τη θλιπτική τάση προς τον πυλώνα φέρουν πορσελάνινοι μονωτήρες μεγάλου μήκους. Η γραμμή λειτουργεί καλά. [21]

Στην Ελλάδα η πρώτη εφαρμογή συνθετικών μονωτήρων έγινε στο Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης το 1976, Οι μονωτήρες από Τεφλόν, ιταλικής κατασκευής, εγκαταστάθηκαν στη γραμμή 150 kV (Λινοπεράματα-Ιεράπετρα), η οποία αντιμετώπιζε σοβαρά προβλήματα ρύπανσης. Η συμπεριφορά τους κρίνεται ως αρκετά ικανοποιητική, αφού μέχρι το 2002 που αντικαταστάθηκαν από μονωτήρες SIR στο πλαίσιο αναβάθμισης της γραμμής σε διπλό κύκλωμα, δεν καταγράφηκε ούτε μία υπερπήδηση. Εμφάνισαν όμως προβλήματα μηχανικής αντοχής, λόγω ψαθυρής θραύσης του πυρήνα ως αποτέλεσμα της εισροής υγρασίας, με συνεπαγόμενη πτώση του αγωγού Υ.Τ. στο έδαφος. [24]

Στην Κίνα, οι νεοανεγερθείσες γραμμές μεταφοράς 1000 kV AC και  $\pm 800$  kV DC (Σχήμα 1-16) διέρχονται από αχανείς εκτάσεις με διαφορετικά επίπεδα ρύπανσης. Για το λόγο αυτό η χρήση συνθετικών μονωτήρων είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος μόνωσης, ώστε να επιτευχθούν μικρότερα ύψη πυλώνων, άρα και χαμηλότερο κόστος κατασκευής. Επίσης, παρέχει μακροπρόθεσμα οφέλη, μειώνοντας την ανάγκη για εργασίες συντήρησης (για παράδειγμα την αποσύνδεση γραμμών για τον καθαρισμό μονωτήρων) ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα του συστήματος. Κάθε χρόνο περίπου 2,9 εκατομμύρια μονωτήρες εγκαθίστανται στις εναέριες γραμμές μεταφοράς στην Κίνα. [25]



α



β

Σχήμα 1-16: Συνθετικοί μονωτήρες εγκατεστημένοι στην Κίνα, σε εναέριες γραμμές μεταφοράς 1000kV AC (α) και  $\pm 800$ kV DC (β).[25]



## Κεφάλαιο 2

### Θεωρητικό υπόβαθρο

#### 2.1. Το ηλεκτρικό πεδίο

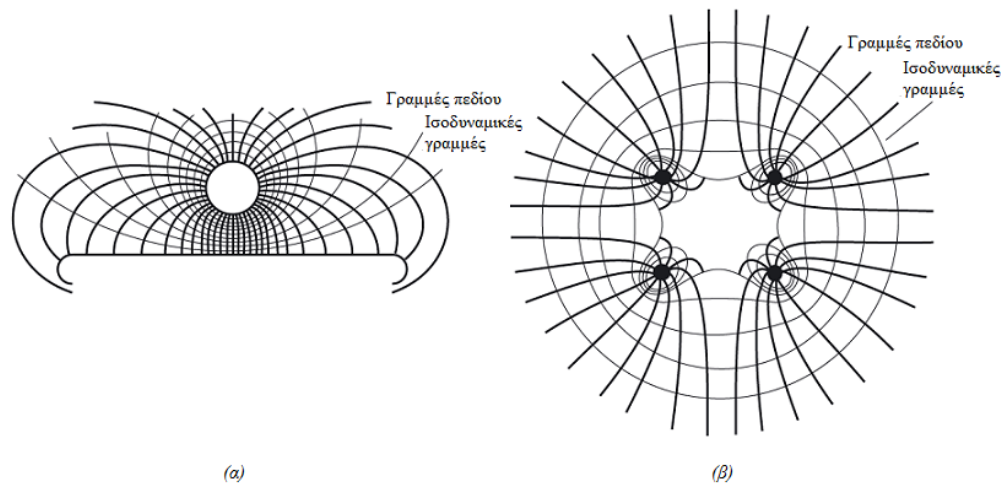
##### 2.1.1. Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Για το βέλτιστο σχεδιασμό μόνωσης, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια και ικανοποιητική λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού, είναι σημαντική η κατανόηση της έννοιας της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται λόγω του δυναμικού που εφαρμόζεται σε ένα σώμα και καταπονεί τη μόνωση (διηλεκτρικό). Η παράμετρος που καθορίζει την ένταση της ηλεκτρικής καταπόνησης που υφίσταται το διηλεκτρικό είναι γνωστή ως *ένταση ηλεκτρικού πεδίου*. Η επίδοση ενός διηλεκτρικού είναι αλληλένδετη με τη διαμόρφωση και το μέγεθος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με το οποίο καταπονείται.

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, όπου υπάρχει μεγάλη κινητικότητα φορέων, σε όλα τα διηλεκτρικά μπορεί να θεωρηθεί ότι το φορτίο είναι στατικό, όταν εφαρμόζεται σ' αυτά στατικό δυναμικό. Το πεδίο που παράγεται από το στατικό φορτίο ή τη συνεχή τάση είναι γνωστό ως *ηλεκτροστατικό πεδίο*, ενώ το πεδίο που παράγεται από εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας ονομάζεται *ημιστατικό ηλεκτρικό πεδίο*. Και για τα δύο πεδία γίνεται συνήθως η παραδοχή ότι δεν περιλαμβάνουν συσσώρευση χωρικού φορτίου και η ανάλυσή τους δεν επηρεάζεται από την κίνηση των φορέων του φορτίου. Αυτά τα πεδία είναι γνωστά και ως *συντηρητικά ή αστρόβιλα*.

Σύμφωνα με τον Faraday, ο χώρος γύρω από έναν μαγνήτη είναι γεμάτος με "γραμμές μαγνητικής δύναμης". Ομοίως, ο χώρος γύρω από ένα ηλεκτρισμένο αντικείμενο μπορεί να θεωρηθεί ότι περιλαμβάνει "γραμμές ηλεκτρικής δύναμης". Για τον Faraday, οι γραμμές αυτές αποτελούν μηχανικές δομές στο περιβάλλον μέσο (το διηλεκτρικό) και μπορούν να ασκούν δύναμη σε ένα αντικείμενο που βρίσκεται στην εμβέλειά τους. Δύο τυπικές διαμορφώσεις πεδίου φαίνονται στο Σχήμα 2-1. Και στις δύο περιπτώσεις δε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της γης στη διαμόρφωση του πεδίου.

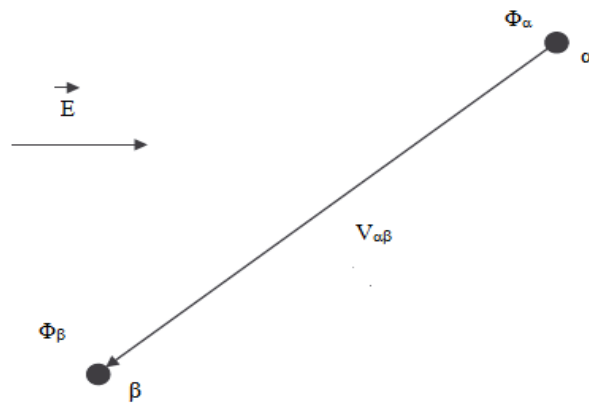
Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται ως η ηλεκτροστατική δύναμη  $F$  που ασκείται ανά μονάδα θετικού φορτίου δοκιμής  $q$ , το οποίο βρίσκεται σε ένα σημείο  $p$  εντός του διηλεκτρικού. Συμβολίζεται με το γράμμα  $E$  με μονάδα N/C (*Newtons/Coulomb*). Επειδή μονάδα μέτρησης του δυναμικού είναι τα Volts (V), που ισοδυναμεί με J/C (*Joules/Coulomb*) ή Nm/C (*Newton-meter/Coulomb*), μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι πολύ πιο πρακτικές μονάδες V/m (*Volts/meter*), kV/cm (*kilovolts/centimeter*) ή και kV/mm (*kilovolts/millimeter*).



Σχήμα 2-1: Διαμορφώσεις ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα σε σφαιρικό και επίπεδο ηλεκτρόδιο (α) και ανάμεσα στους αγωγούς μιας τετράκλωνης γραμμής μεταφοράς.[5]

Η διαφορά δυναμικού  $V_{\alpha\beta}$  μεταξύ δύο σημείων α και β (τα οποία βρίσκονται εντός πεδίου έντασης  $\vec{E}$  και έχουν βαθμωτά δυναμικά  $\varphi_\alpha$  και  $\varphi_\beta$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2, ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να μετακινηθεί ένα μοναδιαίο θετικό φορτίο από το β στο α (εξίσωση 2.1):

$$V_{\alpha\beta} = -\int_{\beta}^{\alpha} \vec{E} \cdot d\vec{x} = (\varphi_\alpha - \varphi_\beta) \quad 2.1$$



Σχήμα 2-2: Πεδίο μεταξύ των σημείων α,β. [5]

Η ποσότητα  $V_{\alpha\beta}$  έχει θετική τιμή για μετακίνηση θετικού μοναδιαίου φορτίου από το σημείο β στο α. Το μέγεθος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, επομένως, ισοδυναμεί με το ρυθμό μεταβολής του δυναμικού ανάλογα με την απόσταση αβ. Για τη μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου ισχύει:

$$\left. \frac{dU_{\alpha\beta}}{dx} \right|_{\max} = -\left| \vec{E} \right|_{\max} \quad 2.2$$

Προκύπτει επίσης:

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad 2.3$$



### 2.1.2. Εφαρμογή των εξισώσεων Maxwell στην περιγραφή του οριζοντιώδη ηλεκτροστατικού πεδίου

Η περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σύμφωνα με το Maxwell γίνεται με τη χρήση τεσσάρων εξισώσεων, οι οποίες συσχετίζουν μεταξύ τους τις πέντε διανυσματικές ποσότητες του πεδίου: την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,  $\vec{E}$ , την ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $\vec{H}$ , την πυκνότητα ηλεκτρικής ροής,  $\vec{D}$ , την πυκνότητα μαγνητικής ροής,  $\vec{B}$  και την πυκνότητα ρεύματος,  $\vec{J}$ . Σε διαφορική μορφή, οι εξισώσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{ή} \quad \nabla \times \vec{H} = \kappa \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 2.4$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 2.5$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad 2.6$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad 2.7$$

όπου με  $\kappa$  συμβολίζεται η ειδική αγωγιμότητα, με  $\varepsilon$  η επιτρεπτότητα και με  $\rho$  η χωρική πυκνότητα φορτίου του διηλεκτρικού.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το πεδίο που προκαλείται από εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας θεωρείται ως οριζοντιώδη ηλεκτροστατικό, δηλαδή αστρόβιλο χωρίς συγκέντρωση φορτίου. Άρα οι χρονοεξαρτώμενοι όροι των παραπάνω εξισώσεων, η ειδική αγωγιμότητα και η συγκέντρωση φορτίου  $\rho$  μπορούν να αγνοηθούν. Για την περιγραφή στατικών και ημιστατικών ηλεκτρικών πεδίων αρκούν οι εξισώσεις 2.5 και 2.7, οι οποίες πλέον απλοποιούνται ως εξής:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad 2.8$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad 2.9$$

Ας σημειωθεί εδώ ότι η εξίσωση 2.3,  $\vec{E} = -\nabla \varphi$ , προκύπτει από την εξίσωση 2.8.

Η τέταρτη εξίσωση του Maxwell (2.7) υποδηλώνει ότι η ύπαρξη ηλεκτρικής ροής διαμέσου μιας επιφάνειας οφείλεται στη συγκέντρωση φορτίου  $\rho$ . Αν  $\rho = 0$  τότε η ροή που εξέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια  $\vec{A}$  είναι ίση με αυτή που εισέρχεται. Στη γενική περίπτωση που  $\rho \neq 0$ , το συνολικό φορτίο που περικλείει η επιφάνεια δίνεται από τη σχέση 2.10:

$$\int_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = q \quad 2.10$$

Από τη σχέση των επιφανειακών και των χωρικών ολοκληρωμάτων προκύπτει:

$$\int_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \nabla \cdot \vec{D} \cdot dV \quad 2.11$$

και από τις σχέσεις 2.7 και 2.11 οδηγούμαστε στη σχέση:

$$\int_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \nabla \cdot \vec{D} \cdot dV = q \quad 2.12$$

Η πυκνότητα ηλεκτρικής ροής,  $\vec{D}$ , συνδέεται μέσω της διαπερατότητας,  $\varepsilon$ , με την ένταση  $\vec{E}$  του ηλεκτρικού πεδίου με τη σχέση:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad 2.13$$

όπου  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ . Με  $\varepsilon_r$  συμβολίζεται η σχετική επιτρεπτότητα, μία αδιάστατη ποσότητα που εξαρτάται από το υλικό και τη φυσική του κατάσταση, ενώ η ποσότητα  $\varepsilon_0$  αντιστοιχεί στη επιτρεπτότητα του κενού και ισούται με  $8,855 \cdot 10^{-12} \text{ As / (Vm)}$ . Από τις εξισώσεις 2.7 και 2.13 προκύπτει:

$$\nabla(\varepsilon \vec{E}) = \rho \quad 2.14$$

και από τις εξισώσεις 2.3 και 2.14:

$$\nabla \{ \varepsilon (-\nabla \varphi) \} = \rho \quad \text{ή} \quad \nabla^2 \varphi = \Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad 2.15$$

Η εξίσωση 2.15 είναι γνωστή ως εξίσωση Poisson για το δυναμικό και για  $\rho = 0$  γράφεται:

$$\nabla^2 \varphi = \Delta \varphi = 0 \quad 2.16$$

Η εξίσωση 2.16 αποτελεί την εξίσωση δυναμικού Laplace για το δυναμικό ενός πεδίου που δεν περιλαμβάνει συγκέντρωση φορτίου (ηλεκτροστατικό ή ιωνεί ηλεκτροστατικό, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα).

Η επίλυση της εξίσωσης Laplace (2.15) μπορεί να γίνει αναλυτικά μόνο στην περίπτωση απλών γεωμετριών, όπου είναι ήδη γνωστή η σχέση μεταξύ των  $\rho$  και  $\vec{E}$ . Ομοίως, αναλυτική επίλυση της εξίσωσης Poisson μπορεί να γίνει μόνο στην περίπτωση απλών γεωμετριών. Για τις διαμορφώσεις των ηλεκτροδίων και των διηλεκτρικών που συναντώνται στην πράξη χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι για την προσομοίωση του πεδίου.[5]

### 2.1.3. Διαμορφώσεις του ηλεκτρικού πεδίου και οι επιπτώσεις τους στα διηλεκτρικά

Ο ποιοτικός ορισμός της ηλεκτρικής αντοχής ενός διηλεκτρικού είναι η *μέγιστη ηλεκτρική καταπόνηση που μπορεί να αντέξει πριν διαρραγεί ολοκληρωτικά*. Ο ποσοτικός ορισμός της βέβαια είναι πιο δύσκολος, λόγω του σημαντικού αριθμού παραγόντων που υπεισέρχονται στη διάσπαση ενός διηλεκτρικού, όπως η σύνθεση του διηλεκτρικού υλικού, η παρουσία ανεπιθύμητων προσμίξεων και ατελειών, η πίεση, η θερμοκρασία, η διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου (το σχήμα των ηλεκτροδίων, το μέγεθος, την απόσταση και το υλικό κατασκευής τους) και τη διάρκεια, μέγιστη τιμή και κυματομορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο βιομηχανικής συχνότητας (ημιστατικό πεδίο) η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής καταπόνησης προκύπτει στη μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (όχι στην ενεργό τιμή της).

Με την εφαρμογή κατάλληλης τάσης εμφανίζεται μεγάλη αύξηση της έντασης του πεδίου σε μία ή περισσότερες περιοχές στο εσωτερικό του διηλεκτρικού, ανάλογα και με τη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων. Στις περιοχές αυτές το υλικό υφίσταται μεγάλη καταπόνηση, σε σημείο ώστε τοπικά να παρατηρηθεί απώλεια των μονωτικών ιδιοτήτων του. Στα σημεία αυτά παρατηρείται εκδήλωση *μερικών εκκενώσεων (partial discharges)*, που οδηγεί σε *μερική διάσπαση (partial breakdown)* του διηλεκτρικού.

Η τιμή της τάσης, στην οποία παρατηρείται η εκδήλωση του παραπάνω φαινομένου είναι γνωστή ως *τάση έναυσης μερικής διάσπασης*,  $V_i$  (*partial breakdown inception voltage*). Μερική διάσπαση παρατηρείται σε όλα τα διηλεκτρικά υπό συνθήκες ανομοιόμορφου πεδίου. Όταν η μερική διάσπαση παρατηρείται σε ένα ελεύθερο ηλεκτρόδιο το οποίο περιβάλλεται από αέριο διηλεκτρικό πρόκειται για το φαινόμενο *Corona*. Μέσα στον όγκο ενός στερεού ή υγρού διηλεκτρικού το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *εσωτερική διάσπαση* (*internal breakdown*) ενώ στην επιφάνεια ως *επιφανειακή διάσπαση* (*surface breakdown*) ή *tracking*.

Τα ηλεκτρικά πεδία που καταπονούν τον εξοπλισμό μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες: στα ομοιόμορφα (*uniform*) και τα ανομοιόμορφα (*nonuniform*) πεδία. Η ομοιομορφία ενός πεδίου ποσοτικοποιείται με τη χρήση του βαθμού ομοιομορφίας  $\eta$  ως εξής:

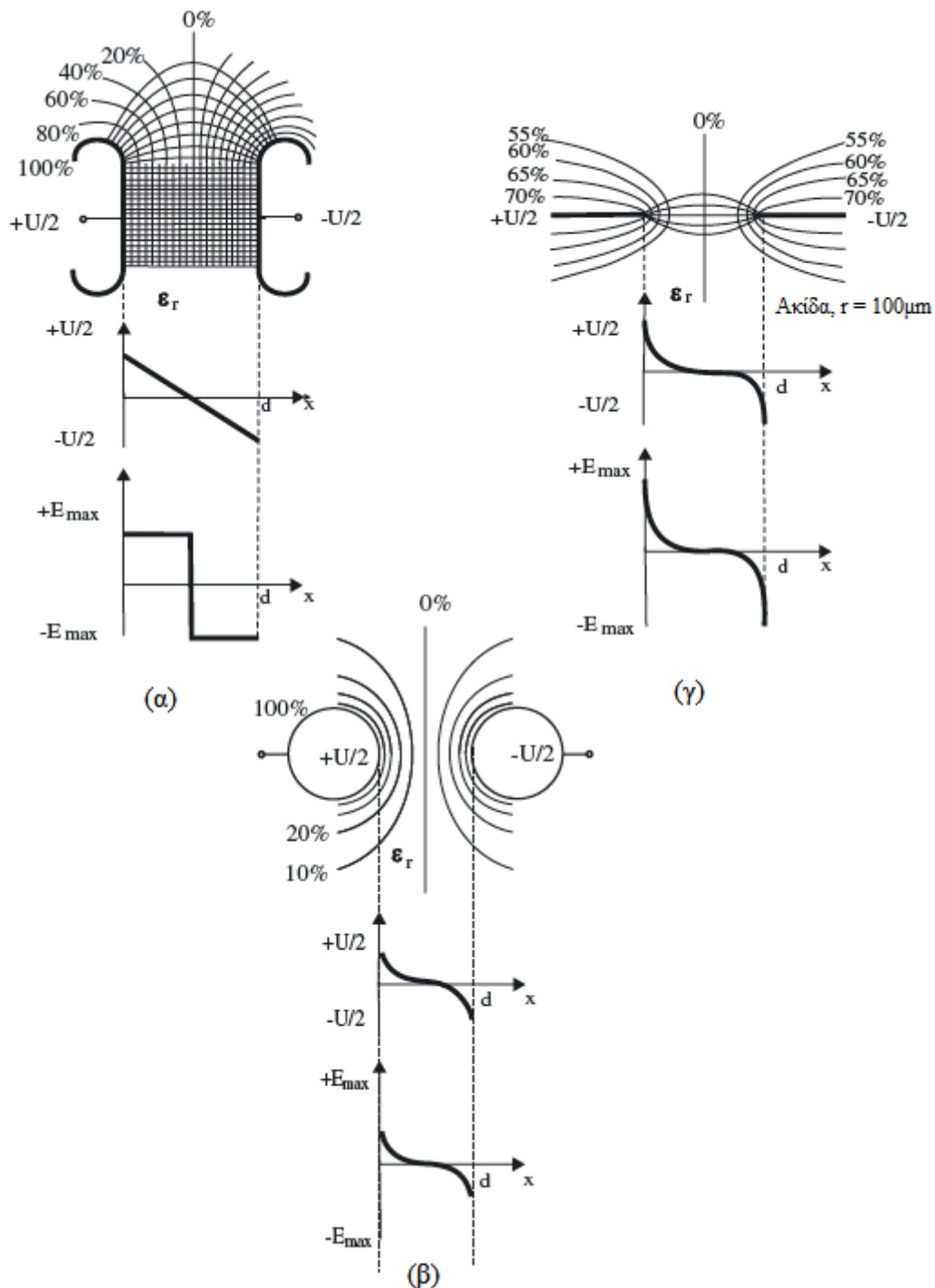
$$\eta = \frac{\hat{E}_{mean}}{\hat{E}_{max}} = \frac{\hat{V}}{d} \cdot \frac{1}{\hat{E}_{max}} \quad \text{ή} \quad \hat{V} = \hat{E}_{max} \cdot \eta \cdot d \quad 2.17$$

όπου  $\hat{E}_{mean}$ ,  $\hat{E}_{max}$  είναι οι κορυφές της μέσης και της μέγιστης πεδιακής έντασης αντίστοιχα. Με  $\hat{V}$  συμβολίζεται η μέγιστη τιμή της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, τα οποία βρίσκονται σε απόσταση  $d$  το ένα από το άλλο. Για τις τιμές του συντελεστή  $\eta$  ισχύει:  $0 \leq \eta \leq 1$ .

Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζονται κάποιες αντιπροσωπευτικές διαμορφώσεις ηλεκτροδίων και το προκύπτον ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση του ομοιόμορφου πεδίου (Σχήμα 2-3(α)), το δυναμικό είναι γραμμικά κατανομημένο και η όποια διάσπαση της μόνωσης γίνεται χωρίς προηγούμενη εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι προφανώς ίσος με 1. Ομοίως και στα ασθενώς ανομοιόμορφα πεδία (Σχήμα 2-3(β)), η τάση έναυσης μερικών εκκενώσεων,  $V_i$  είναι ίση με την τάση διάσπασης,  $V_b$ . Τα ασθενώς ανομοιόμορφα πεδία χαρακτηρίζονται από τιμές του συντελεστή ομοιομορφίας λίγο μικρότερες από 1 και αναπτύσσονται μεταξύ ηλεκτροδίων που είναι διαμορφωμένα ως ομοαξονικοί κύλινδροι και ομόκεντρες ή γειτονικές σφαίρες. Η περίπτωση των ανομοιόμορφων πεδίων (Σχήμα 2-3(γ)) είναι η χειρότερη, από πλευράς καταπόνησης του εξοπλισμού και η πιο συχνή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα διηλεκτρικό που καταπονείται από ένα τέτοιο πεδίο πριν τη διάσπαση υφίσταται μερικές εκκενώσεις, οι οποίες επιβαρύνουν το υλικό.

Για τη βέλτιστη και πιο οικονομική χρήση του εξοπλισμού θα πρέπει να επιδιώκεται ο περιορισμός της εκδήλωσης ανομοιόμορφων πεδίων. Αυτό είναι δυνατό να γίνει με την κατάλληλη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων. Αιχμηρά σημεία στην επιφάνεια, απότομες γωνίες κ.α. οδηγούν σε τοπική αύξηση της πεδιακής έντασης, καθιστώντας το διηλεκτρικό στην περιοχή αυτή επιρρεπές στη διάσπαση. Για το λόγο αυτό στα ηλεκτρόδια για εφαρμογές υψηλών τάσεων δίνονται σχήματα σφαιρικά ή δακτυλιοειδή, με ομαλές και μεγάλες επιφάνειες. Σε μονωτήρες διέλευσης, μετασχηματιστές, και τερματισμούς καλωδίων η μόνωση ενισχύεται με χωρητικές διατάξεις, ώστε να επιτευχθεί πιο ομοιόμορφη κατανομή του πεδίου. Οι

διατάξεις αυτές είναι ηλεκτρόδια κατάλληλου σχήματος (π.χ. τοροειδή) τα οποία λειτουργούν ως ισοδυναμικές επιφάνειες (*floating screens*).



Σχήμα 2-3: Διαμόρφωση (α) ομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, (β) ασθενώς ανομοιόμορφου πεδίου ανάμεσα σε δύο σφαίρες και (γ) ανομοιόμορφου πεδίου ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια-ακίδες. [5]

Εμπειρικός κανόνας για τον έλεγχο της πεδιακής καταπόνησης του εξοπλισμού υψηλής τάσης είναι να αποφεύγονται όσο είναι δυνατό οι αιχμές γι' αυτό προτιμώνται συμμετρικά, ομαλά και μεγάλα ηλεκτρόδια. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ακόμα και αιχμές που είναι αποτέλεσμα της κατεργασίας των μετάλλων μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές στο πεδίο, ειδικά όταν πρόκειται για μικρά διάκενα. Επίσης,

πιθανές μικρορωγμές στα διηλεκτρικά υπό την επίδραση του πεδίου μπορούν να επεκταθούν, προκαλώντας με τη σειρά τους τοπική αύξηση της πεδιακής έντασης.[5]

## 2.2. Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων

### 2.2.1. Γενικά

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων χρονολογείται ήδη στη εποχή του Gauss (1777-1855) και του Boltzmann (1844-1906), ενώ ιδιαίτερα μεγάλο ενδιαφέρον δόθηκε κατά τη δεκαετία του 1940 στην εφαρμογή τους για τον υπολογισμό γραμμικών και μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Πλέον απαντώνται στη δομική ανάλυση κατασκευών, στη θερμική ανάλυση, τη ρευστομηχανική και τον υπολογισμό ηλεκτρικών πεδίων. Η ανάπτυξη των σχετικών υπολογιστικών τεχνικών αποτελεί μια συνεχή και κοπιώδη διαδικασία. Σε αυτό συνέβαλε η αλματώδης πρόοδος στους τομείς της θεωρίας υπολογισμού και του υλικού υπολογιστών, που πλέον επιτρέπει την περαιτέρω διερεύνηση για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος υπολογισμού και την αποδοτική εφαρμογή ήδη γνωστών αριθμητικών μεθόδων.[5, 26]

Οι διάφορες αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων κερδίζουν διαρκώς έδαφος, αφού τα ηλεκτρικά πεδία που ενδιαφέρουν στην πράξη το μηχανικό παρουσιάζουν τέτοια γεωμετρία ώστε να μην είναι δυνατό να βρεθεί αναλυτική έκφραση της συνάρτησης δυναμικού  $\varphi = \varphi(x, y, z)$ , προερχόμενη από ακριβή επίλυση της εξίσωσης του Laplace (2.16) ή του Poisson (2.15), και της πεδιακής έντασης  $E = E(x, y, z)$ . Οι μέθοδοι αυτές κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις διαφορικές και τις ολοκληρωτικές.[4]

Στις διαφορικές μεθόδους ανήκουν η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών ή μέθοδος των διαδοχικών επαναλήψεων (*Finite Difference Method*) και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method-FEM*). Περιορισμός στην εφαρμογή μια διαφορικής αριθμητικής μεθόδου είναι η απαίτηση το ηλεκτρικό πεδίο να έχει καθορισμένα όρια και να μην εκτείνεται μέχρι το άπειρο, ωστόσο μπορεί να αρθεί με τη χρήση άπειρων στοιχείων (*infinite elements*) ή τεχνητών συνόρων (*ballooning*).[4, 26]

Τα άπειρα (*infinite*) στοιχεία αποτελούν επέκταση των πεπερασμένων (*finite*) και τροποποιούνται έτσι ώστε να φθίνουν, καθώς μία διάσταση τείνει στο άπειρο. Αυτό επιτυγχάνεται τροποποιώντας τον πίνακα ακαμψίας (*stiffness matrix*) της μεθόδου με την εισαγωγή μία φθίνουσας συνάρτησης (*decaying function*) στη συνάρτηση μορφής (*shape function*). Με τη μέθοδο του τεχνητού συνόρου (*ballooning*) δημιουργείται ένα διαβαθμισμένο πλέγμα από το υπό εξέταση πρόβλημα. Η διαβάθμιση συνίσταται στο να είναι πιο πυκνό το πλέγμα κοντά στις περιοχές όπου απαιτείται μέγιστη ακρίβεια, ενώ όσο απομακρυνόμαστε το μέγεθος των στοιχείων αυξάνεται, μέχρι το ορισμένο σύνоро.[27, 28]

Στις ολοκληρωτικές μεθόδους ανήκουν οι εξής: η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων (*Charge Simulation Method-CSM*) και η μέθοδος επιφανειακών τμημάτων (*Boundary Element Method-BEM*). Οι ολοκληρωτικές μέθοδοι μπορούν να

εφαρμοστούν τόσο σε προβλήματα κλειστής γεωμετρίας όσο και σε ηλεκτρικά πεδία που εκτείνονται μέχρι το άπειρο.[4]

Η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων είναι ουσιαστικά μία μέθοδος ειδώλων, όπου όμως τα φορτία-είδωλα είναι προσεγγιστικά. Ένας αριθμός φορτίων, τα οποία βρίσκονται έξω από την περιοχή που μας ενδιαφέρει, δίνει έναυση σε ηλεκτρικό πεδίο εκεί. Με άλλα λόγια, για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου το φορτίο που βρίσκεται κατανεμημένο στην επιφάνεια του υλικού αντικαθίσταται από υποθετικά φορτία τοποθετημένα στο εσωτερικό του ηλεκτροδίου, κατάλληλα επιλεγμένα ώστε το προκύπτον δυναμικό σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας αυτής να συμφωνεί με την ήδη γνωστή τιμή. Η μέθοδος των επιφανειακών τμημάτων χρησιμοποιείται για διαμορφώσεις ηλεκτροδίων όπου η μία διάσταση είναι πολύ μικρή σε σχέση με τις υπόλοιπες, περιπτώσεις για τις οποίες δεν ενδείκνυται η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων. Στην περίπτωση αυτή η επιφάνεια του ηλεκτροδίου χωρίζεται σε τμήματα, στα οποία αντιστοιχεί από ένα ιδεατό φορτίο, έτσι ώστε το προκύπτον δυναμικό σε συγκεκριμένα σημεία να συμφωνεί με τη γνωστή τιμή, όπως και πριν.[4, 26, 29]

Επιπρόσθετα στις παραπάνω έχει αναπτυχθεί η υβριδική μέθοδος, η οποία συνδυάζει τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη μέθοδο των ισοδυνάμων φορτίων για τον υπολογισμό πεδίων με άπειρα σύνορα. Άλλες μέθοδοι που βρίσκουν εφαρμογή στον αριθμητικό υπολογισμό ηλεκτρικών πεδίων είναι οι μέθοδοι Monte-Carlo, η ανάλυση με διακριτό μετασχηματισμό Fourier (*Fast Fourier Transform-FFT*), η ανάλυση με χρήση fractal κ.α.. [4, 26, 30]

### 2.2.2. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη μετατροπή διαφορικών εξισώσεων σε ολοκληρωτική μορφή και έπειτα στην εφαρμογή προσεγγίσεων. Ένας τρόπος μετατροπής είναι η εύρεση μίας συνάρτησης η οποία ελαχιστοποιεί το ολοκλήρωμα της ενέργειας. Η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου που βρίσκεται αποθηκευμένη σε όγκο  $V$  του διηλεκτρικού δίνεται από τη σχέση:

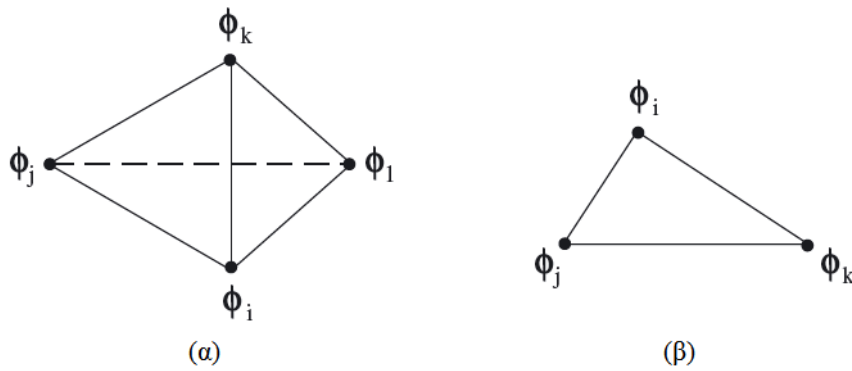
$$W = \int_V \frac{1}{2} \epsilon (\nabla \phi)^2 dV \quad 2.18$$

η οποία προκύπτει επιλύοντας τη βασική εξίσωση του δυναμικού (2.3). Για τον αριθμητικό υπολογισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου θα πρέπει το δυναμικό  $\phi$  να ελαχιστοποιεί την ενέργεια που περικλείεται σε όγκο  $V$ .

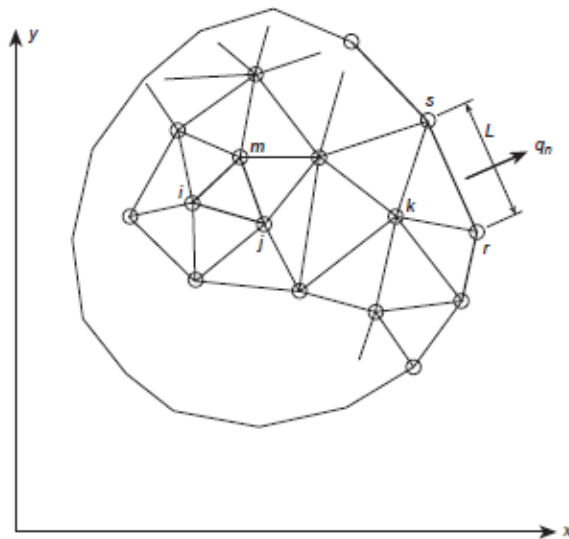
Η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει το χωρισμό του χώρου ανάμεσα στα ηλεκτρόδια σε έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών στοιχείων, στα οποία αντιστοιχίζονται κάποια μεγέθη του πεδίου, για παράδειγμα το δυναμικό. Στους κόμβους και τα στοιχεία του πλέγματος αντιστοιχούν ακέραιοι αριθμοί. Το σχήμα των διακριτών στοιχείων επιλέγεται να είναι τριγωνικό για διδιάστατα προβλήματα (Σχήμα 2-4(β), Σχήμα 2-5), ενώ για τρισδιάστατες διαμορφώσεις ο χώρος διαμοιράζεται σε τετράεδρα (Σχήμα 2-4(α)).

Το μέγεθος και ο προσανατολισμός των τριγώνων, όπως και των τετραέδρων, κατανέμονται ανομοιόμορφα στο πλέγμα. Στις περιοχές όπου η ένταση του

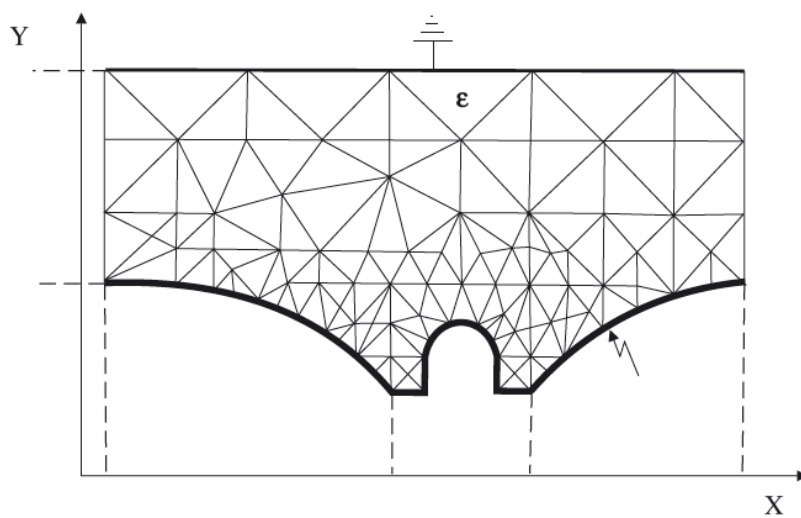
ηλεκτρικού πεδίου είναι μέγιστη, η περιοχή χωρίζεται σε διακριτά στοιχεία μικρότερου μεγέθους (Σχήμα 2-6).



Σχήμα 2-4: Πεπερασμένα στοιχεία: τετραεδρικό (α) και τριγωνικό (β) [5]



Σχήμα 2-5: Χωρισμός μίας περιοχής δύο διαστάσεων σε τριγωνικά στοιχεία. [31]



Σχήμα 2-6: Δημιουργία πλέγματος για τον υπολογισμό πεδίου με τη μέθοδο FEM [5]

Έστω ηλεκτροστατικό πεδίο σε χώρο όπου δεν υπάρχει συγκέντρωση φορτίου, το οποίο εκδηλώνεται σε ισοτροπικό διηλεκτρικό ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια. Τότε το δυναμικό  $\varphi$ , το οποίο διέπει η εξίσωση Laplace (2.16), καθορίζεται από τα σύνορα, δηλαδή από τις επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Η εξίσωση 2.18 σε καρτεσιανές συντεταγμένες γράφεται ως εξής:

$$W = \iiint_V \left[ \frac{1}{2} \varepsilon \left\{ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right\} \right] dx dy dz \quad 2.19$$

Εάν θεωρήσουμε ότι η κατανομή του δυναμικού ως προς τον άξονα  $z$  δε μεταβάλλεται ( $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$ ) τότε η εξίσωση 2.18 γράφεται:  $W_A = \int_A \frac{1}{2} \varepsilon (\nabla \varphi)^2 dA$  και η ενέργεια του πεδίου πλέον υπολογίζεται ως εξής:

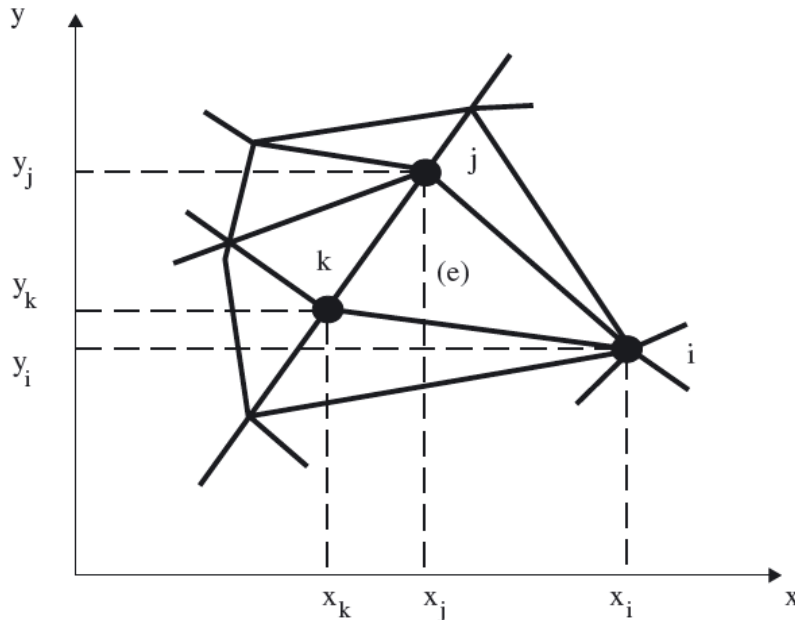
$$W = z \cdot \iint_A \left[ \frac{1}{2} \varepsilon \left\{ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right\} \right] dx dy \quad 2.20$$

Η ποσότητα  $W/z$  μας δίνει την πυκνότητα ενέργειας ανά στοιχειώδη επιφάνεια  $dA$ .

Στο Σχήμα 2-7 φαίνεται τμήμα του πεδίου που μας ενδιαφέρει. Για το τριγωνικό στοιχείο με κόμβους  $i, j$  και  $k$  πρέπει να υπολογιστούν οι συναρτήσεις βάσης της κατανομής  $\varphi(x, y)$ . Θεωρώντας γραμμική εξάρτηση του  $\varphi$  από τα  $x$  και  $y$  η προσέγγιση γίνεται με πολυώνυμα πρώτου βαθμού ως εξής:

$$\varphi(x, y) = \varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad 2.21$$

Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυώνυμα μεγαλύτερου βαθμού ( $\varphi(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 xy + \alpha_6 y^2 + \alpha_7 x^3 + \alpha_8 x^2 y + \alpha_9 xy^2 + \alpha_{10} y^3$ ), ωστόσο έτσι αυξάνονται οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και η πολυπλοκότητα της ανάλυσης, χωρίς ανάλογη αύξηση της ακρίβειας.



Σχήμα 2-7: Τμήμα διδιάστατου πεδίου, χωρισμένου σε ανόμοια τριγωνικά στοιχεία στο επίπεδο x-y.[5]



Η εξίσωση 2.21 ουσιαστικά δηλώνει ότι στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου το δυναμικό είναι γραμμικά καταναμημένο και η ένταση του πεδίου σταθερή. Για το στοιχείο (e) (Σχήμα 2-7) τα άγνωστα δυναμικά στους κόμβους  $i$ ,  $j$  και  $k$  δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned}\varphi_i &= \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i \\ \varphi_j &= \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j \\ \varphi_k &= \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k\end{aligned}\quad 2.22$$

Οι συντελεστές  $a_1, a_2$  και  $a_3$  προσδιορίζονται με τον κανόνα του Crammer ως εξής:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{1}{2\Delta_e} (\alpha_i \varphi_i + \alpha_j \varphi_j + \alpha_k \varphi_k) \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2\Delta_e} (\beta_i \varphi_i + \beta_j \varphi_j + \beta_k \varphi_k) \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2\Delta_e} (\gamma_i \varphi_i + \gamma_j \varphi_j + \gamma_k \varphi_k)\end{aligned}\quad 2.23$$

όπου:

$$\begin{aligned}\alpha_i &= x_j y_k - x_k y_j & \beta_i &= y_j - y_k & \gamma_i &= x_k - x_j \\ \alpha_j &= x_k y_i - x_i y_k, & \beta_j &= y_k - y_i, & \gamma_j &= x_i - x_k & \text{και } 2\Delta_e &= \alpha_i + \alpha_j + \alpha_k = \beta_i \gamma_j - \beta_j \gamma_i \\ \alpha_k &= x_i y_j - x_j y_i & \beta_k &= y_i - y_j & \gamma_k &= x_j - x_i\end{aligned}$$

Η ποσότητα  $\Delta_e$  αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του στοιχείου (e).

Παραγωγίζοντας την εξίσωση 2.21 προκύπτουν οι μερικές παράγωγοι της  $\varphi$ :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \alpha_2 = f(\varphi_i, \varphi_j, \varphi_k) \quad \text{και} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \alpha_3 = f(\varphi_i, \varphi_j, \varphi_k) \quad 2.24$$

Για να ελαχιστοποιείται η ενέργεια στην υπό εξέταση περιοχή πρέπει πρώτα να γνωρίζουμε την ενέργεια στο στοιχείο (e). Από την εξίσωση 2.20 προκύπτει:

$$W_{\Delta_e} = \frac{W_e}{z} = \frac{1}{2} \Delta_e \varepsilon \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right]_e \quad 2.25$$

Η παράγωγος της ενέργειας  $W_{\Delta_e}$  υπολογίζεται ως προς  $\varphi_i$  με τη χρήση των σχέσεων 2.23, 2.24 και 2.25 και προκύπτει:

$$\begin{aligned}\frac{\partial W_{\Delta_e}}{\partial \varphi_i} &= \frac{1}{2} \Delta_e \varepsilon \left( 2\alpha_2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \varphi_i} + 2\alpha_3 \frac{\partial \alpha_3}{\partial \varphi_i} \right) \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon (\alpha_2 \beta_i + \alpha_3 \gamma_i) \\ &= \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} [(\beta_i^2 + \gamma_i^2) \varphi_i + (\beta_i \beta_j + \gamma_i \gamma_j) \varphi_j + (\beta_i \beta_k + \gamma_i \gamma_k) \varphi_k]\end{aligned}\quad 2.26$$

Ομοίως υπολογίζονται οι παράγωγοι ως προς  $\varphi_j$  και  $\varphi_k$ . Οι τρεις εξισώσεις που προκύπτουν γράφονται σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial W_{\Delta e}}{\partial \varphi_e} &= \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} \begin{pmatrix} (\beta_i^2 + \gamma_i^2) & (\beta_i\beta_j + \gamma_i\gamma_j) & (\beta_i\beta_k + \gamma_i\gamma_k) \\ (\beta_j\beta_i + \gamma_j\gamma_i) & (\beta_j^2 + \gamma_j^2) & (\beta_j\beta_k + \gamma_j\gamma_k) \\ (\beta_k\beta_i + \gamma_k\gamma_i) & (\beta_k\beta_j + \gamma_k\gamma_j) & (\beta_k^2 + \gamma_k^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_i \\ \varphi_j \\ \varphi_k \end{pmatrix} \\
 &= \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} \begin{pmatrix} (h_{11})_e & (h_{12})_e & (h_{13})_e \\ (h_{21})_e & (h_{22})_e & (h_{23})_e \\ (h_{31})_e & (h_{32})_e & (h_{33})_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_i \\ \varphi_j \\ \varphi_k \end{pmatrix} \\
 &= [h]_e \{\varphi\}_e
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

Ο πίνακας  $[h]_e$  είναι γνωστός και ως πίνακας ακαμψίας (*stiffness matrix*).

Η ενέργεια  $W_{\Delta e}$  που περικλείει κάθε μεμονωμένο στοιχείο εξαρτάται από τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους,  $(\varphi_i, \varphi_j, \varphi_k)$ . Η σχέση που ελαχιστοποιεί την ενέργεια σε όλο το χώρο των δοθέντων στοιχείων είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \{\varphi\}} = 0 \tag{2.28}$$

όπου με  $W_{\Delta}$  συμβολίζεται η ενέργεια του πεδίου στον δοθέντα χώρο και με  $\{\varphi\}$  το διάνυσμα των δυναμικών στους κόμβους.

Έως τώρα δεν έχουμε λάβει υπόψη τα στοιχεία που γειτνιάζουν με το στοιχείο (e) (Σχήμα 2-7). Έστω ότι στον κόμβο k του στοιχείου αυτού δίνεται ο αριθμός 5, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-8. Τα τριγωνικά στοιχεία (1), (2), (3) και (4) μοιράζονται αυτό τον κόμβο. Οι κόμβοι γύρω του αριθμούνται από 1 έως 4. Για το συγκεκριμένο σύνολο στοιχείων με εφαρμογή της σχέσης 2.28 έχουμε:

$$\frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \varphi_5} = 0 \tag{2.29}$$

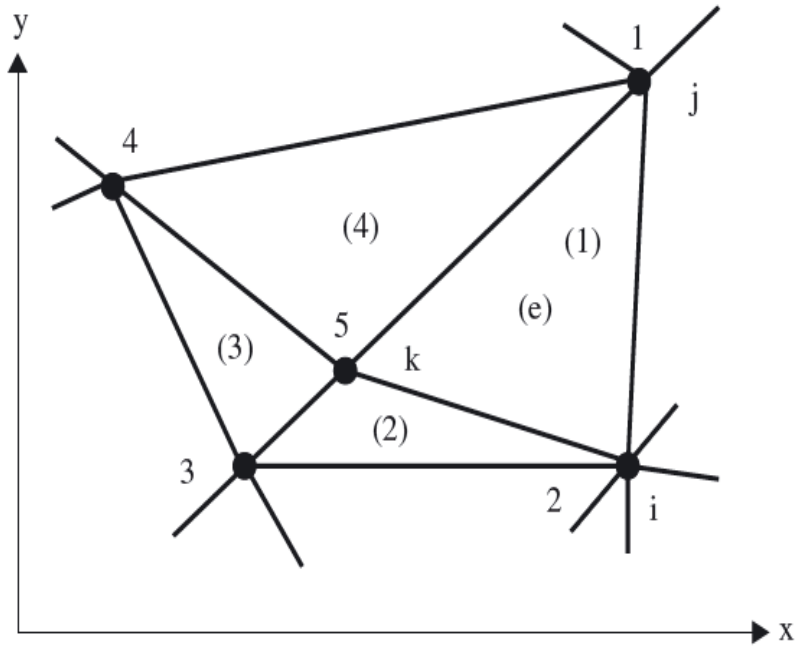
όπου  $W_{\Delta}$  είναι η ενέργεια του πεδίου στο χώρο των τεσσάρων στοιχείων και με  $\varphi_1 \dots \varphi_5$  τα δυναμικά στους κόμβους 1 έως 5.

Εφαρμόζοντας τη σχέση 2.27 σε καθένα από τα τέσσερα αυτά στοιχεία για τον κόμβο 5 προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \varphi_5} &= [(h_{ik})_1 \varphi_2 + (h_{jk})_1 \varphi_1 + (h_{kk})_1 \varphi_5 \\
 &\quad + (h_{ik})_2 \varphi_3 + (h_{jk})_2 \varphi_2 + (h_{kk})_2 \varphi_5 \\
 &\quad + (h_{ik})_3 \varphi_4 + (h_{jk})_3 \varphi_3 + (h_{kk})_3 \varphi_5 \\
 &\quad + (h_{ik})_4 \varphi_1 + (h_{jk})_4 \varphi_4 + (h_{kk})_4 \varphi_5] \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

ή εναλλακτικά:

$$H_{15}\varphi_1 + H_{25}\varphi_2 + H_{35}\varphi_3 + H_{45}\varphi_4 + H_{55}\varphi_5 = 0 \tag{2.31}$$



Σχήμα 2-8: Σύνδεση του κόμβου 5 (κόμβος k στο Σχήμα 2-7) με τους κόμβους των τριγωνικών στοιχείων (1) έως (4). [5]

Επομένως, το δυναμικό  $\varphi_5$  μπορεί να υπολογιστεί εάν τα δυναμικά  $\varphi_1$  έως  $\varphi_4$  είναι γνωστά. Όμως οι κόμβοι 1 έως 4 είναι τμήματα ενός ευρύτερου δικτύου στοιχείων στο πλέγμα. Έτσι, για κάθε άγνωστο δυναμικό πρέπει να επιλυθεί μία αντίστοιχη εξίσωση. Για ένα σύστημα όπου ισχύει η εξίσωση Laplace (2.16) η λύση γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial W}{\partial \{\varphi\}} = 0 = [H]\{\varphi\} \quad 2.32$$

αντιπροσωπεύοντας όλο το σύνολο των εξισώσεων ελαχιστοποίησης.[5]

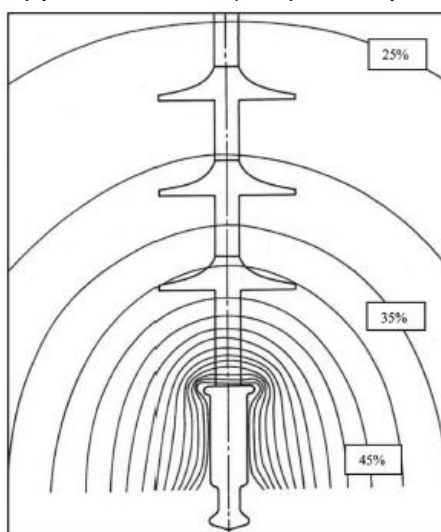


## Κεφάλαιο 3

# Εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων στην πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης

### 3.1 Γενικά

Η κατανομή του δυναμικού γύρω από τους συμβατικούς πορσελάνινους αλυσοειδείς μονωτήρες διαμορφώνεται από τις επιμέρους χωρητικότητες του κάθε κυαθίου και από τις παράσιτες χωρητικότητες που εμφανίζονται λόγω της ύπαρξης του αγωγού και του πυλώνα.[32-35] Από την άλλη, οι συνθετικοί μονωτήρες αποτελούν συνεχείς κατασκευές, χωρίς μεταλλικά τμήματα ανάμεσα στο γειωμένο και το υπό τάση άκρο. Για το λόγο αυτό η κατανομή του δυναμικού είναι ανάλογη με αυτή της γεωμετρίας ηλεκτροδίων ακίδας-πλάκας, τροποποιημένη κατά μήκος του περιβλήματος λόγω της επιτρεπτότητας του υλικού (Σχήμα 3-1). Η πεδιακή ένταση στο υπό τάση άκρο είναι ιδιαίτερα μεγάλη και ανάλογα με τη διαμόρφωση του πυλώνα το ίδιο μπορεί να συμβαίνει και στο γειωμένο άκρο.[12]



Σχήμα 3-1: Ισοδυναμικές γραμμές στο υπό τάση άκρο συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης 230kV.[12]

Από τα παραπάνω είναι φανερή η ανάγκη χρήσης διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου, κυρίως τοροειδών (*grading rings*), ώστε να μειώνεται η πιθανότητα εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων και κατ' επέκταση οι καταστροφικές επιπτώσεις τους. Η επιλογή των διαστάσεων και της θέσης τοποθέτησης των διατάξεων αυτών διευκολύνεται από τη διεξαγωγή προσομοιώσεων σε μοντέλα μονωτήρων, όπου αναπαράγονται, στο μέτρο του δυνατού, οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (ρύπανση, υγρασία, επίδραση των αγωγών και του πυλώνα κ.α.). Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται ανασκόπηση της χρήσης των διαφόρων αριθμητικών μεθόδων, των μοντέλων που προτείνονται και των αποτελεσμάτων αυτών.

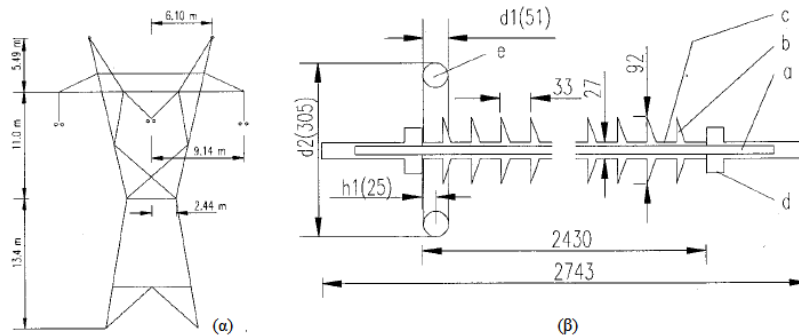
## 3.2 Εφαρμογή ολοκληρωτικών μεθόδων

### 3.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου των επιφανειακών τμημάτων (BEM)

#### 3.2.1.1 Προσομοιώσεις μονωτήρων απουσία ρύπανσης και υγρασίας

Η ανάλυση των ηλεκτρικών πεδίων με τη χρήση της μεθόδου των οριακών στοιχείων (Boundary Element Method, BEM) είναι μια συχνή πρακτική. Η μέθοδος BEM, όπως και η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων (Charge Simulation Method, CSM), έχει το πλεονέκτημα της χρήσης σε προβλήματα με ανοιχτά σύνορα, άρα προσφέρεται για την περίπτωση των πεδίων που δημιουργούνται γύρω από έναν συνθετικό μονωτήρα.

Το 2000 δημοσιεύτηκαν από τους T. Zhao και M. G. Gomer [36] τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με τη μέθοδο BEM σε τριφασική γραμμή μεταφοράς 345kV. Το μοντέλο περιελάμβανε τον πυλώνα, τους αγωγούς της γραμμής και συνθετικούς μονωτήρες, δύο ζεύγη σε διάταξη I (*I-string*) και ένα ζεύγος σε V (*V-string*) (Σχήμα 3-2(α)). Στόχος της μελέτης ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των αγωγών, του πυλώνα και των διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου στην κατανομή του δυναμικού και της έντασης του πεδίου γύρω από τους μονωτήρες.



Σχήμα 3-2: Απλοποιημένο σχέδιο (α) του πλήρους μοντέλου και (β) του μονωτήρα [36]

Για την επίλυση της εξίσωσης Poisson (2.15) και τον ακόλουθο υπολογισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (2.3) χρησιμοποιήθηκαν οι εξής σχέσεις που απορρέουν από τη μέθοδο BEM:

- Για σημειακή πηγή στο χώρο το πεδίο έχει ακτινική συνιστώσα στην διεύθυνση που ενώνει την πηγή με το σημείο παρατήρησης. Αν το δυναμικό στο άπειρο θεωρηθεί μηδενικό, αν το μέσο είναι γραμμικό και ιστροπικό και υπάρχουν περισσότερες από μία σημειακές πηγές, το δυναμικό δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_p = \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_k}\right) \quad 3.1$$

όπου  $\varphi_p$  είναι το δυναμικό στο σημείο παρατήρησης,  $n$  ο αριθμός των σημειακών πηγών,  $r_k$  η απόσταση από την πηγή και  $q_k$  το φορτίο της πηγής  $k$ .

- Ομοίως για επιφανειακό ή χωρικό φορτίο το δυναμικό δίνεται από τις σχέσεις:

$$\varphi_s = \int_s \frac{\sigma_s + \sigma_{es}}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_s}\right) ds \quad 3.2$$

$$\varphi_v = \int_v \frac{\sigma_v}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_v}\right) dv \quad 3.3$$

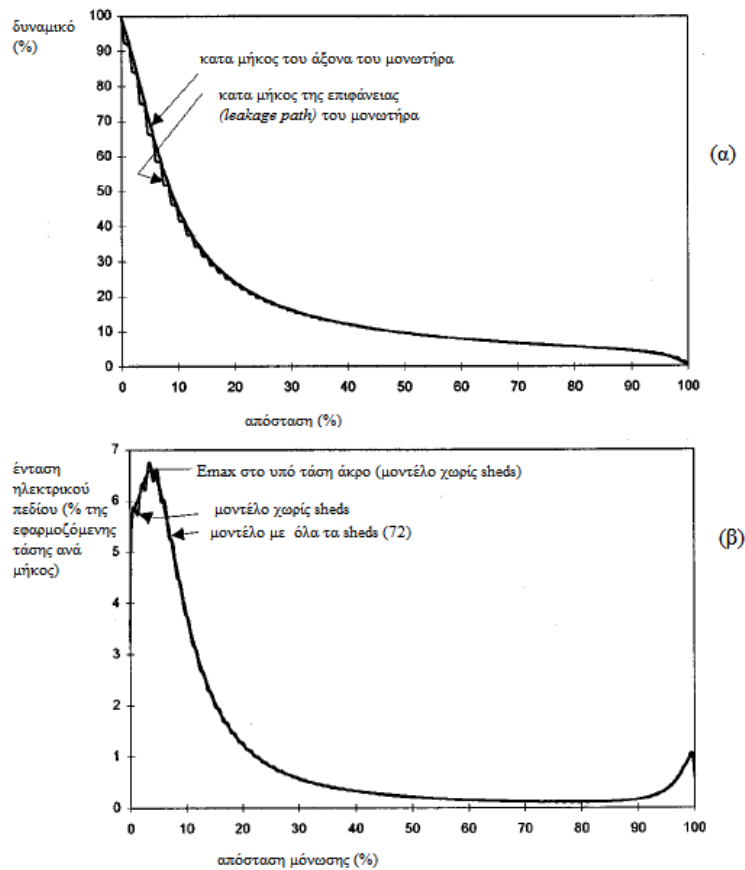
όπου  $\varphi_s$  και  $\varphi_v$  είναι τα δυναμικά στα σημεία παρατήρησης,  $s$  η επιφάνεια της επιφανειακής πηγής,  $v$  ο όγκος της χωρικής πηγής,  $r_s$  και  $r_v$  οι αποστάσεις από το σημείο παρατήρησης,  $\sigma_s$  και  $\sigma_v$  η επιφανειακή και χωρική πυκνότητα των φορτίων αντίστοιχα και  $\sigma_{es}$  η ισοδύναμη επιφανειακή πυκνότητα που τοποθετείται στις οριακές επιφάνειες και στις διεπιφάνειες των διαφόρων μέσων.

Για επαλήθευση των αποτελεσμάτων της μεθόδου έγιναν στην αρχή δοκιμαστικές προσομοιώσεις σε διδιάστατο και τρισδιάστατο απλοποιημένο μοντέλο του μονωτήρα που φαίνεται στο Σχήμα 3-2(β). Για τον ίδιο λόγο υπολογίστηκε και η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του τοροειδούς εξομάλυνσης με τον ίδιο τρόπο. Και στις δύο περιπτώσεις προσομοιώσεων τα αποτελέσματα μεταξύ διδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων προέκυψαν σε εξαιρετική συμφωνία μεταξύ τους, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα της μεθόδου.

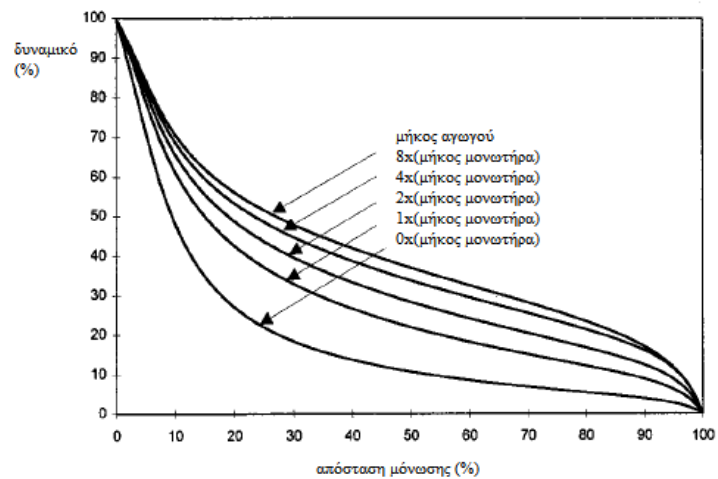
Επόμενο βήμα αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης που έχει στη διαμόρφωση του πεδίου ο αριθμός των περυγίων του μονωτήρα (Σχήμα 3-2(β)), τα οποία περιλαμβάνονται στο μοντέλο, σε μια προσπάθεια περαιτέρω απλοποίησης της γεωμετρίας και περιορισμού του υπολογιστικού χρόνου. Στο Σχήμα 3-3 φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Είναι ξεκάθαρη η συμφωνία των γραφικών παραστάσεων, τόσο για την κατανομή του δυναμικού (Σχήμα 3-3(α)) όσο και για την κατανομή της πεδιακής έντασης (Σχήμα 3-3(β)).

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του αγωγού στα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιλέχθηκε η περίπτωση των μονωτήρων σε διαμόρφωση I που βρίσκονται εκατέρωθεν του πυλώνα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4, η παράλειψη του αγωγού οδηγεί σε πιο απότομη μεταβολή του δυναμικού κατά μήκος του κεντρικού άξονα του μονωτήρα. Αυξάνοντας το μήκος του αγωγού στο μοντέλο, παρατηρείται ομαλοποίηση της καμπύλης, σαν να δημιουργείται από τον αγωγό μία «πεδιακή ασπίδα» γύρω από το μονωτήρα. Για το λόγο αυτό η παράλειψη του αγωγού κατά τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση γύρω από μονωτήρες υψηλής τάσης εισάγει σημαντικό σφάλμα στους υπολογισμούς. Η μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που υπολογίστηκε αυξάνοντας το μήκος του αγωγού σύμφωνα με το Σχήμα 3-4 ήταν της τάξης του 0,74 (μήκος αγωγού ίσο με το μήκος του μονωτήρα), 0,65 (μήκος αγωγού ίσο με δύο φορές το μήκος του μονωτήρα), 0,59 (μήκος αγωγού ίσο με τέσσερις φορές το μήκος του μονωτήρα) και 0,55 (μήκος αγωγού ίσο με οχτώ φορές το μήκος του μονωτήρα). Για τις περαιτέρω προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε αγωγός με μήκος οχταπλάσιο του μήκους του μονωτήρα.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση που έχει η κατασκευαστική διαμόρφωση του πυλώνα στην πεδιακή καταπόνηση των μονωτήρων, αυτή τη φορά για τα I-strings και για τα V-strings της γραμμής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3-5. Προέκυψε ότι η δυσμενέστερη περίπτωση αφορά σε μονωτήρες σε διάταξη V, οι οποίοι περιβάλλονται από μονωμένη μεταλλική κατασκευή, δηλαδή βρίσκονται στο «παράθυρο» του πυλώνα και αναρτούν το μεσαίο αγωγό της γραμμής.



Σχήμα 3-3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων σε μοντέλα μονωτήρα με πτερύγια και χωρίς [36]



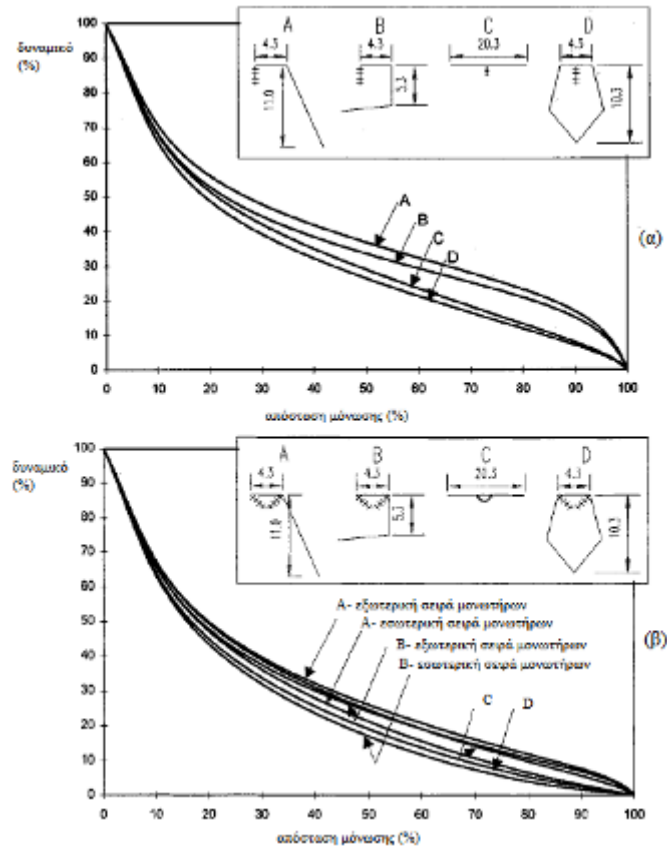
Σχήμα 3-4: Επίδραση του μήκους του αγωγού στην κατανομή του δυναμικού [36]

Τέλος εξετάστηκε βέλτιστη χρήση του τοροειδούς εξομάλυνσης (πάχος δακτυλίου, ακτίνα, απόσταση από το μονωτήρα). Προέκυψε ότι μετακίνηση του τοροειδούς άνω των 2,5cm από το υπό τάση προς το γειωμένο άκρο του μονωτήρα δε συνέβαλλε πλέον στη μείωση της πεδιακής έντασης. Αντίθετα, είχε το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα να μειώνεται η απόσταση μόνωσης, με επακόλουθη μείωση της τάσης υπερπήδησης. Η ακτίνα του δακτυλίου επίσης επηρεάζει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Η αύξηση της διαμέτρου αυτής οδηγεί σε ελάχιστο την ένταση του πεδίου. Πέρα από το σημείο του ελαχίστου, η ένταση του πεδίου αυξάνεται εκ

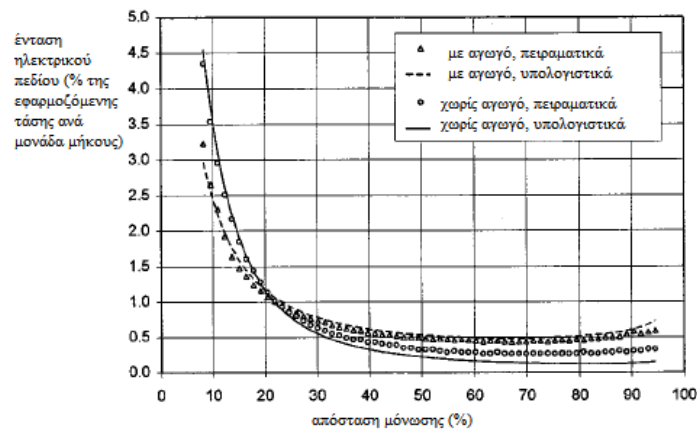


νέου. Σχετικά με το πάχος του δακτυλίου, διαπιστώθηκε ότι η μεταβολή του δεν επηρέαζε δραστικά την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μονωτήρα, είχε όμως επίπτωση στην εκδήλωση εκκενώσεων corona στην επιφάνεια του τοροειδούς. Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι T. Doshi et al. στην εργασία [37], η οποία δημοσιεύτηκε το 2011.

Για την επιβεβαίωση των παραπάνω αποτελεσμάτων πειραματικά διεξήχθησαν μετρήσεις σε κατασκευή όμοια με το Σχήμα 3-2(α) στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων της εταιρείας Ohio Brass. Τα αποτελέσματα των δοκιμών και των προσομοιώσεων φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 3-6) και είναι σε συμφωνία μεταξύ τους. [36]

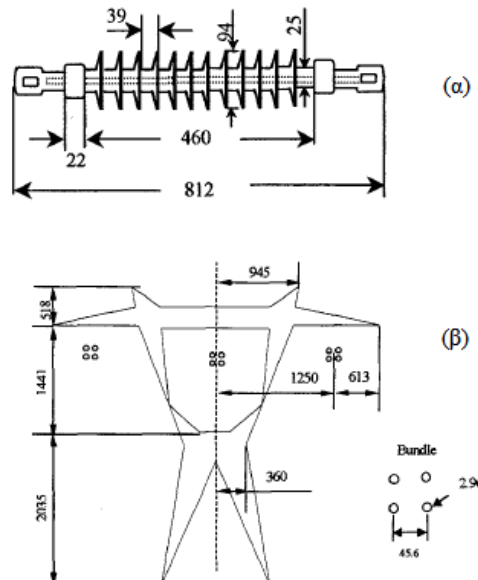


Σχήμα 3-5: Επίδραση του πυλώνα στην κατανομή του δυναμικού. [36]



Σχήμα 3-6: Παρουσίαση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. [36]

Στη δεύτερη εργασία [38] που παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα οι W. Que και S. A. Sebo δημοσίευσαν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με το υπολογιστικό πακέτο Coulomb, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο BEM. Οι προσομοιώσεις αφορούσαν συνθετικό μονωτήρα 34,5kV και τριφασική γραμμή μεταφοράς 765kV (Σχήμα 3-7).



Σχήμα 3-7: Απλοποιημένο σχέδιο (α) μονωτήρα 34,5kV (διαστάσεις σε mm) και (β) πυλώνα γραμμής 765kV με τέσσερις αγωγούς ανά φάση (διαστάσεις σε cm) [38]

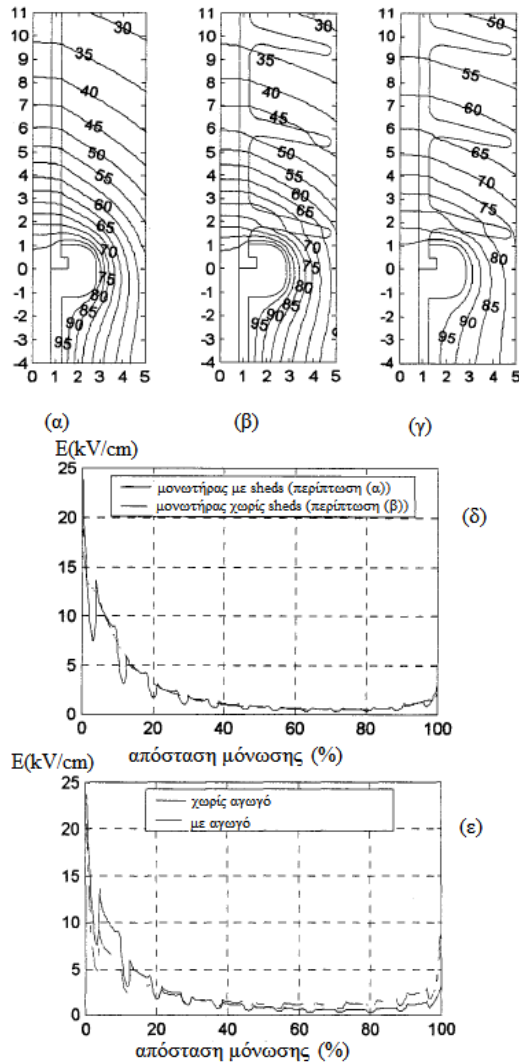
Στην περίπτωση του συνθετικού μονωτήρα 34,5kV (Σχήμα 3-7(α)) οι προσομοιώσεις έγιναν για να διαπιστωθεί η δυνατότητα παράλειψης των πτερυγίων του πολυμερικού περιβλήματος κατά τη μοντελοποίηση, ώστε να απλοποιείται η τελική διάταξη. Πράγματι, όπως και πριν δεν παρατηρείται υπολογισιμη μεταβολή στην κατανομή του δυναμικού και της πεδιακής έντασης, αν παραλειφθούν τα sheds (Σχήμα 3-8(α,β,δ)). Στον ίδιο μονωτήρα, με την προσθήκη αγωγού μήκος τριών μέτρων παρατηρήθηκε μείωση της υπολογιζόμενης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου πλησίον του άκρου υψηλής τάσης, επιβεβαιώνοντας και τα ευρήματα της εργασίας [36] (Σχήμα 3-8(β,γ,ε)). Επιπλέον, παρατηρείται πως η παρουσία του αγωγού συνδέεται με αύξηση της έντασης του πεδίου στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα (Σχήμα 3-8(ε)).

Για την προσομοίωση του τρισδιάστατου πλήρους μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η απλοποίηση που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αγνοήθηκαν οι αγωγοί προστασίας και το μήκος των αγωγών της γραμμής τέθηκε ίσο με εξήντα μέτρα. Το μήκος των μονωτήρων (σε διάταξη I και V) είναι 5,7m, η διάμετρος του τοροειδούς 50cm και η διατομή του 10cm. Για τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η προσομοίωση και των τριών φάσεων αρχικά θεωρήθηκε ότι υπάρχει μόνο ο κεντρικός αγωγός, που είναι και η πιο δυσμενής περίπτωση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Έπειτα ο υπολογισμός συμπεριέλαβε και τις τρεις φάσεις, με δυναμικά -50V, 100V και 50V. Εξετάστηκαν διατάξεις μονωτήρων σε I και V-string και προέκυψαν τα παρακάτω:

- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο κρίσιμο σημείο της τριπλής ένωσης (μέταλλο, πολυμερές περίβλημα, αέρας) για διάταξη I είναι 16% μεγαλύτερη όταν λαμβάνονται υπόψη και οι τρεις φάσεις απ' ό,τι όταν γίνεται προσομοίωση για μονοφασικό σύστημα.

- Το προαναφερθέν συμπέρασμα ισχύει και για τη διάταξη V, μόνο που η μεταβολή είναι 6%.

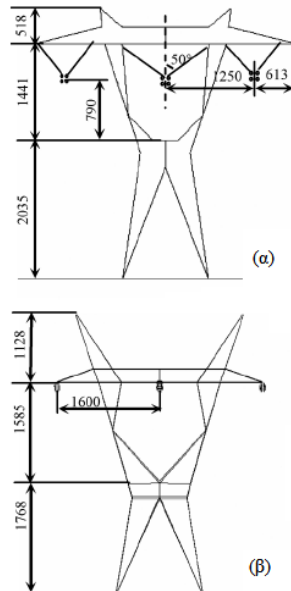
Αποδεικνύεται λοιπόν ότι για να εξασφαλίζεται πληρότητα και ακρίβεια στις προσομοιώσεις η επίδραση των αγωγών και των τριών φάσεων δε θα πρέπει να αγνοείται. Διαφορετικά εισάγεται υπολογίσιμο σφάλμα στους υπολογισμούς.[38]



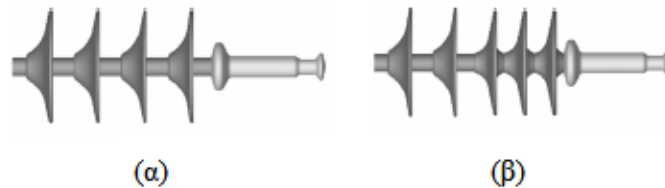
Σχήμα 3-8: Ισοδυναμικές γραμμές (α,β,γ) και κατανομή πεδιακής έντασης (δ,ε) για (α) απλοποιημένο μονωτήρα, (β) πλήρες μονωτήρα χωρίς αγωγό και (γ) πλήρες μονωτήρα με αγωγό [38]

Το 2007 δημοσιεύτηκε η εργασία [39], στην οποία γίνεται χρήση της απλοποίησης του μονωτήρα που προτάθηκε στην εργασία [38]. Για τις προσομοιώσεις σε διάφορους τύπους πυλώνα (Σχήμα 3-9), χρησιμοποιήθηκαν οι δύο τύποι συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης που φαίνονται στο Σχήμα 3-10. Ο πρώτος (Σχήμα 3-10(α)) είναι ένας τυπικός συνθετικός μονωτήρας. Ο δεύτερος (Σχήμα 3-10(β)) είναι ένας συνθετικός μονωτήρας που διαθέτει 12 συνεπτυγμένα πτερύγια (*stacked sheds*) στη

πλευρά υψηλής τάσης και 3 στο γειωμένο άκρο, ενώ τα υπόλοιπα είναι διατεταγμένα κανονικά. Το σχέδιο αυτό στοχεύει στον περιορισμό του εκτεθειμένου υλικού που καλύπτει τον πυρήνα (*sheath*) και στην αύξηση του μήκος ερπυσμού στις περιοχές που εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές πεδιακής έντασης, ώστε να περιορίζεται το ρεύμα διαρροής και η γήρανση του περιβλήματος λόγω μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3-9: (α) Πυλώνας ανάρτησης και (β) τερματικός πυλώνας (διαστάσεις σε cm)[39]



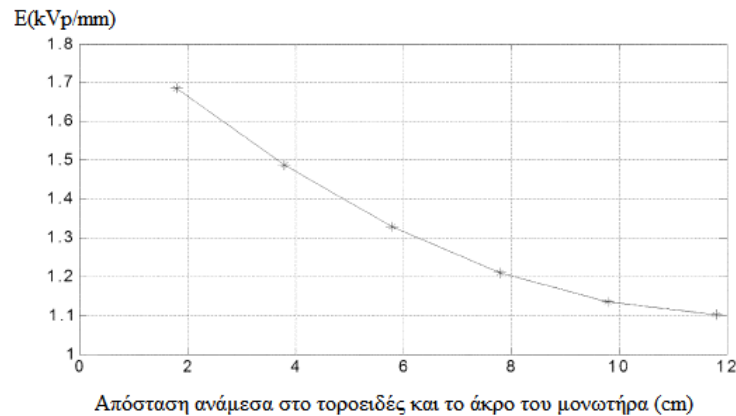
Σχήμα 3-10: Τύποι μονωτήρων στους οποίους βασίστηκαν οι προσομοιώσεις.[39]

Στο πλαίσιο των προσομοιώσεων εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- i. Πυλώνας ανάρτησης με συμβατικούς συνθετικούς μονωτήρες
- ii. Πυλώνας ανάρτησης με συνθετικούς μονωτήρες με συνεπτυγμένα πτερύγια
- iii. Τερματικός πυλώνας με συμβατικούς συνθετικούς μονωτήρες

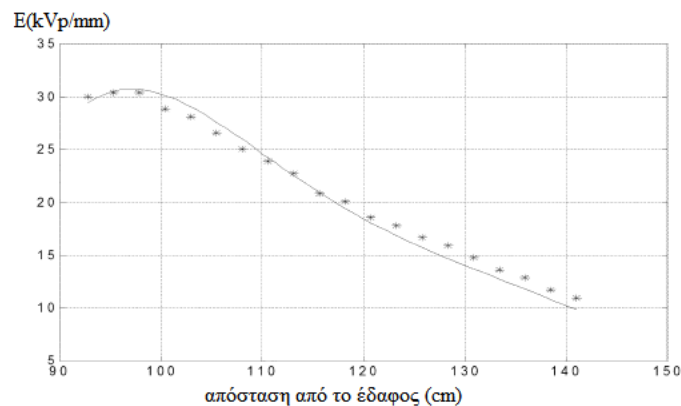
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των περιπτώσεων i και ii βλέπουμε ότι στην περίπτωση ii η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην επιφάνεια του μονωτήρα, κοντά στο υπό τάση άκρο, διατηρείται σε επίπεδα χαμηλότερα των  $0,45\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$  ( $0,64\text{kV}_p/\text{mm}$ ), που είναι το κατώφλι έναυσης εκκενώσεων corona. Επιπλέον, υπολογίζοντας την πεδιακή ένταση πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα, παρατηρείται ότι ανάμεσα στα πτερύγια υπάρχει μόνο ένα σημείο στο οποίο η τιμή της είναι αυξημένη, σε αντίθεση με την περίπτωση i όπου τα σημεία αυτά είναι δύο. Να σημειωθεί εδώ ότι για τις δύο αυτές περιπτώσεις οι μονωτήρες απλοποιήθηκαν ώστε να περιλαμβάνουν μόνο 15 πτερύγια σε κάθε πλευρά, τα υπόλοιπα παραλείφθηκαν. Η προσομοίωση iii επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα για την επιρροή του μεταλλικού εξοπλισμού στη διαμόρφωση του πεδίου. Η τιμή της πεδιακής έντασης στο σημείο τριπλής ένωσης υπολογίστηκε ίση με  $0,89\text{kV}_p/\text{mm}$ .

Σε επόμενο βήμα εξετάστηκε η επίδραση της απόστασης του τοροειδούς από τα άκρα του μονωτήρα [39]. Τα συμπεράσματα είναι και εδώ ίδια με της προηγούμενης εργασίας [38]: όσο αυξάνεται η απόσταση από το άκρο του μονωτήρα η ένταση του πεδίου μειώνεται, ωστόσο ταυτόχρονα μειώνεται και η απόσταση μόνωσης. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3-11, από τα 10cm και έπειτα η ένταση μειώνεται με μικρότερο ρυθμό. Άρα, περαιτέρω μετακίνηση του τοροειδούς δεν είναι απαραίτητη.



Σχήμα 3-11: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο τριπλής ένωσης ανάλογα με τη θέση του τοροειδούς εξομάλυνσης.[39]

Για επαλήθευση της μεθόδου διενεργήθηκαν δοκιμές στο μονωτήρα που φαίνεται στο Σχήμα 3-7(α) στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Arizona State University. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε αντιπαραβολή με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στο Σχήμα 3-12. Η καλή συμφωνία πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων επιβεβαιώνει την ορθότητα των προσομοιώσεων. Οι αναντιστοιχίες που παρατηρούνται οφείλονται στην ευαισθησία του μετρητικού οργάνου και στην παρουσία διαφόρων άλλων εξαρτημάτων κοντά στο χώρο μέτρησης (π.χ. το σύστημα ανάρτησης του μονωτήρα).[39]



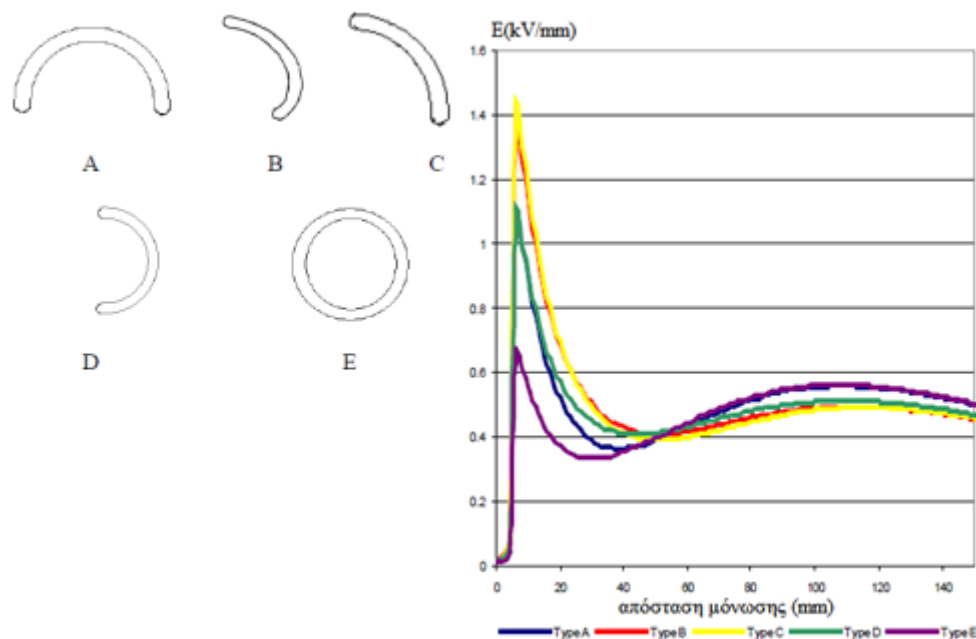
Σχήμα 3-12: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος στεγνού μονωτήρα μετά από εργαστηριακές μετρήσεις (\*) και μετά από προσομοίωση (-).[39]

Η επίδραση των διατάξεων εξομάλυνσης του πεδίου και των μεταλλικών τερματισμών των μονωτήρων στη διαμόρφωση του πεδίου είναι το αντικείμενο της εργασίας [40] των B. Vancia et al., η οποία δημοσιεύτηκε το 2005. Οι συγγραφείς

εκμεταλλεύτηκαν την απλοποίηση που εισήγαγαν οι εργασίες [36] και [38], λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα 8-10 πρώτα πτερύγια του μονωτήρα.

Τα συμπεράσματα που αφορούν στην αλληλεξάρτηση της θέσης του τοροειδούς με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου επιβεβαιώνουν όσα έχουν ήδη περιγραφεί παραπάνω. Ποσοτικά, προέκυψε ότι μετακίνηση του τοροειδούς κατά 1%-4% της συνολικής απόστασης μόνωσης από το άκρο του μονωτήρα έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση των τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου πλησίον του άκρου υψηλής τάσης. Περαιτέρω μετακίνηση οδηγεί ξανά σε αύξηση των τιμών της πεδιακής έντασης, ενώ συμβάλλει στη μείωση της απόστασης μόνωσης. Αντίθετα, η αλλαγή της διαμέτρου του τοροειδούς αποδείχτηκε ότι δεν έχει σημαντική συμβολή στη διαμόρφωση του πεδίου: ενώ μικρότερη διάμετρος προκαλεί μείωση της τιμής της πεδιακής έντασης κοντά στο τοροειδές, ευθύνεται επίσης για αυξημένες τιμές μακριά από αυτό.

Επόμενο βήμα των προσομοιώσεων αποτέλεσε η σύγκριση μεταξύ διαφόρων διαμορφώσεων τοροειδών εξομάλυνσης. Οι τομές των εξαρτημάτων που εξετάστηκαν φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 3-13. Οι διαμορφώσεις A-C αποτελούν σχέδια διατάξεων που χρησιμοποιούνται στην πράξη, ενώ οι διαμορφώσεις D, E είναι θεωρητικές και χρησιμοποιούνται για σύγκριση. Στο Σχήμα 3-13 φαίνονται οι κατανομές του πεδίου για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα σχέδια. Αποδεικνύεται ότι τα σχέδια A και E, τα οποία περιβάλλουν με περισσότερο μέταλλο το μονωτήρα οδηγούν σε μείωση των τιμών της πεδιακής έντασης.



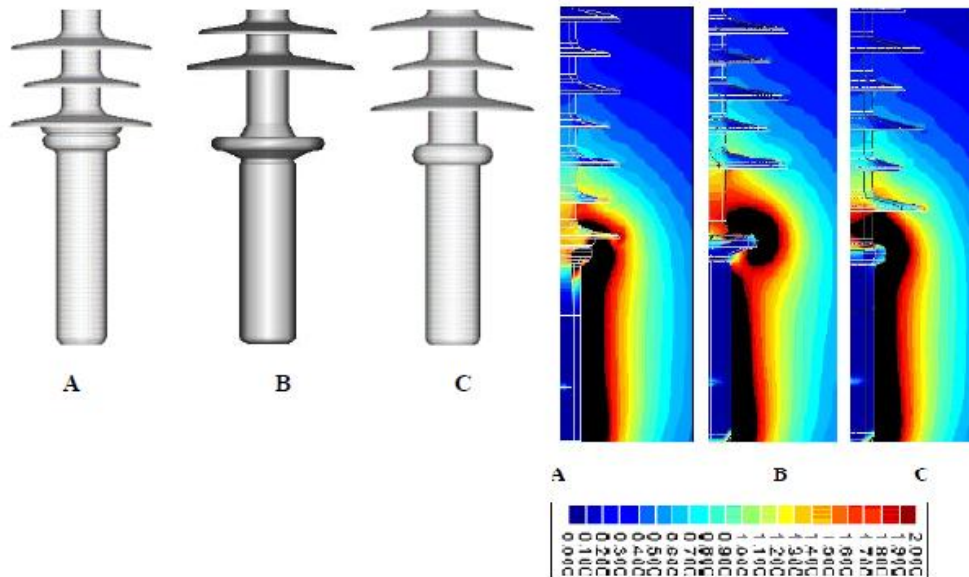
Σχήμα 3-13: Κατανομή πεδίου κοντά στο υπό τάση άκρο για διάφορες διαμορφώσεις διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου.[40]

Τέλος, για τις διαμορφώσεις των μεταλλικών τερματισμών που φαίνονται στο Σχήμα 3-14 φαίνεται ότι χαμηλότερες τιμές πεδιακής έντασης προκύπτουν για την περίπτωση A, όπου το τελευταίο<sup>1</sup> πτερύγιο είναι προσαρτημένο ακριβώς πάνω στο

<sup>1</sup> Σνηθίζεται η αρίθμηση των πτερυγίων να ξεκινάει από την πλευρά του πυλώνα.

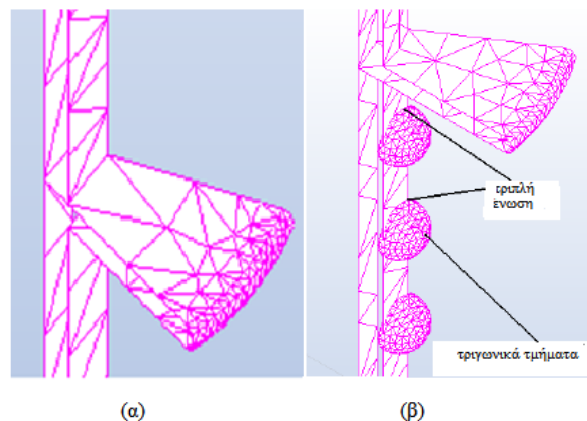


μέταλλο. Η μέγιστη τιμή της έντασης που παρατηρείται είναι 2kV/mm, ενώ στην περίπτωση B, όπου το μεταλλικό περίγραμμα δρα ως μικρό τοροειδές η μέγιστη τιμή της είναι 2,4kV/mm. Χειρότερη είναι η περίπτωση C, με παρατηρούμενη τιμή  $E=4,3\text{kV/mm}$ .



Σχήμα 3-14: Διαμορφώσεις μεταλλικών τερματισμών και προκύπτον ηλεκτρικό πεδίο.[40]

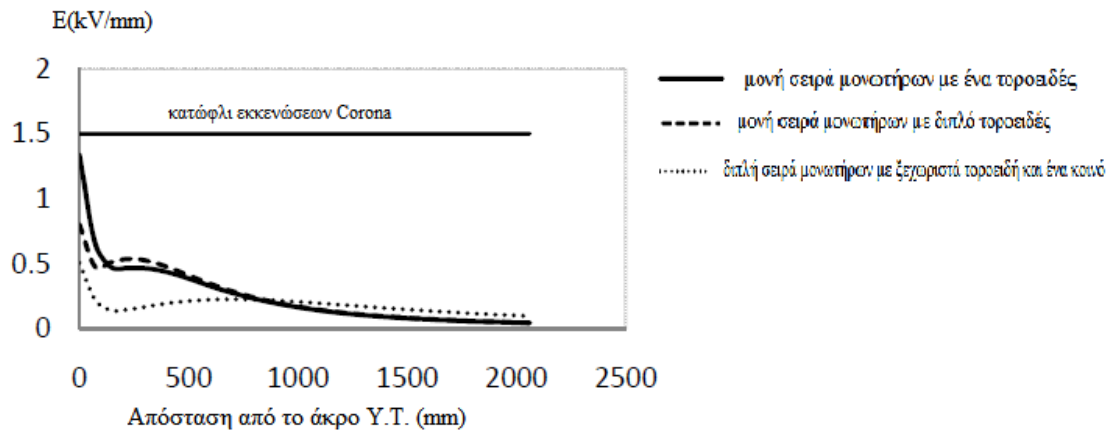
Η εργασία [37] των T. Doshi et al., η οποία δημοσιεύτηκε το 2011, παρουσιάζει τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με το πρόγραμμα COULOMB 8.0, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο BEM, σε μοντέλα μονωτήρων με στεγνή και υγρή επιφάνεια. Ενδεχόμενη ρύπανση αγνοήθηκε, ενώ εφαρμόστηκε και η απλοποίηση των πτερυγίων που παρουσιάστηκε παραπάνω. Για την εφαρμογή της μεθόδου BEM επιλέχθηκαν τριγωνικά επιφανειακά τμήματα αντί για τετράεδρα, ενώ λόγω της εκ περιστροφής συμμετρίας των μονωτήρων (απουσία άλλων δομών, όπως αγωγοί) οι προσομοιώσεις για στεγνές και υγρές επιφάνειες έγιναν σε τομές  $30^\circ$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-15. Παρακάτω ακολουθούν τα συμπεράσματα που αφορούν σε στεγνούς και καθαρούς μονωτήρες, τα σχετικά με υγρασία παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.2.1.2.



Σχήμα 3-15: Τομή  $30^\circ$  του περιβλήματος (α) στεγνού και (β) υγρού μονωτήρα[37]

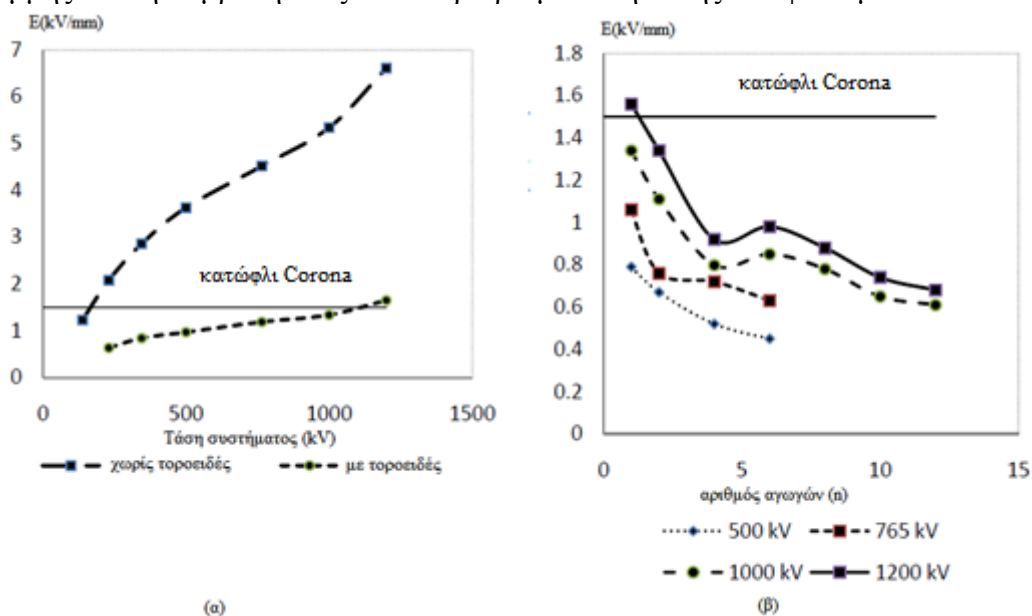
Τα συμπεράσματα των συγγραφέων σχετικά με τις πιθανές διαμορφώσεις του τοροειδούς εξομάλυνσης πεδίου ήδη αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, επειδή σε μεγάλα επίπεδα τάσης είναι συνήθης η χρήση πολλαπλών μονωτήρων, που ο καθένας

διαθέτει δικά του τοροειδή στο κάθε άκρο, ενώ υπάρχει ένα επιπλέον κοινό τοροειδές στο άκρο υψηλής τάσης, διενεργήθηκαν προσομοιώσεις που επιβεβαιώνουν την ανάγκη χρήσης πολλαπλών διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου (Σχήμα 3-16).



Σχήμα 3-16: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου για διπλή και μονή σειρά μονωτήρων σε γραμμή Υ.Υ.Τ. 1000kV [37]

Η ανάγκη χρήσης διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου όσο αυξάνεται το επίπεδο τάσης φαίνεται και από το Σχήμα 3-17(α), στο οποίο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα προσομοιώσεων σε επίπεδα τάσης από 138 έως 1200kV. Στο Σχήμα 3-17(β) φαίνονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για την επίδραση πολλαπλών αγωγών στη διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου, επιβεβαιώνοντας τα συμπεράσματα άλλων εργασιών για την «πεδιακή ασπίδα» των αγωγών στους μονωτήρες της γραμμής και τη συμβολή τους στον περιορισμό εκδήλωσης του φαινομένου Corona.

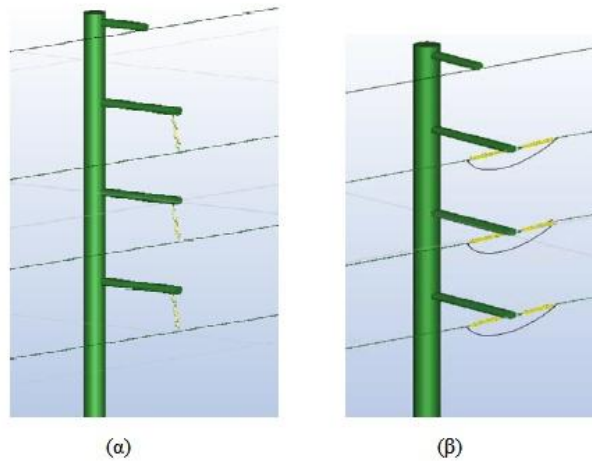


Σχήμα 3-17: (α) Μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για διάφορα επίπεδα τάσης, με ή χωρίς χρήση τοροειδών και (β) μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του αριθμού των αγωγών ανά φάση υπό στεγνές συνθήκες [37]

Τέλος, για τις διαμορφώσεις πυλώνων που φαίνονται στο Σχήμα 3-18 και από υπολογισμούς που έγιναν για διάφορα επίπεδα τάσης παρατηρήθηκε ότι τη



μεγαλύτερη πεδιακή καταπόνηση υφίστανται οι μονωτήρες στους τερματικούς (*dead end*) πυλώνες, σύμφωνα και με τα δεδομένα που περιλαμβάνει ο Πίνακας 3.1. [37]



Σχήμα 3-18: Μοντέλα πυλώνων: (α) ανάρτησης και (β) τερματικός [37]

Πίνακας 3.1: Σύγκριση της μέγιστης τιμής του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους πυλώνων για διάφορα επίπεδα τάσης [37]

Τάση (kV)	$E_{\max}$ κατά μήκος μονωτήρα (kV/mm)		Ποσοστιαία διαφορά στο ηλ/κό πεδίο
	Πυλώνας ανάρτησης	Τερματικός πυλώνας	
138	1,32	1,45	11%
230	2,21	2,63	19%
345	2,65	3,35	26%
500	2,5	3,24	30%

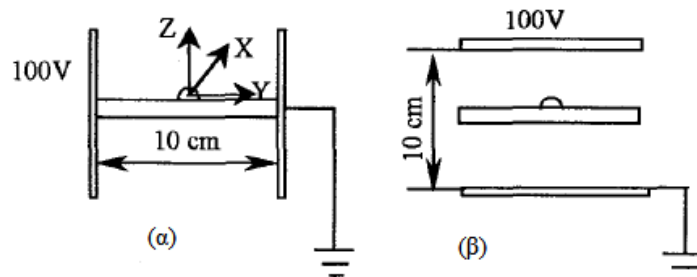
### 3.2.1.2 Προσομοιώσεις μονωτήρων με καθαρές υγρές επιφάνειες.

Η επίδραση της ύπαρξης σταγόνων ύδατος σε καθαρή επιφάνεια συνθετικού μονωτήρα υψηλής τάσης είναι το αντικείμενο της εργασίας [41] των W. Que και S. A. Sebo, η οποία δημοσιεύτηκε το 2001. Η μελέτη αυτή καθίσταται αναγκαία για τους εξής λόγους:

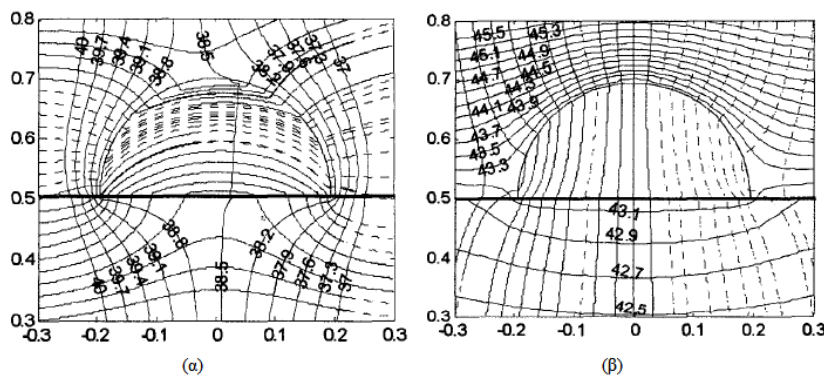
- Λόγω της μεγάλης επιτρεπτότητας και αγωγιμότητας οι σταγόνες νερού προκαλούν τοπική αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα.
- Οι επιφανειακές εκκενώσεις corona λόγω υγρασίας έχουν κατώφλι έναυσης 0,5-0,7kV/mm [42] και συμβάλλουν στη γήρανση του πολυμερούς περιβλήματος.
- Οι εκκενώσεις corona προκαλούν παροδική απώλεια της ιδιότητας της υδροφοβικότητας στην επιφάνεια του συνθετικού μονωτήρα, προκαλώντας τη δημιουργία ενός συνεχούς στρώματος νερού αντί για διακριτές σταγόνες, επιτρέποντας τη συνεχή ροή ρεύματος διαρροής.

Πρώτο βήμα της μελέτης αποτελεί η μοντελοποίηση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μία σταγόνα νερού. Για σταγόνα στην κατακόρυφη επιφάνεια θεωρήθηκε μοντέλο σταγόνας σε επιφάνεια SIR ανάμεσα σε δύο κατακόρυφα, παράλληλα μεταξύ τους ηλεκτρόδια, όπως στο Σχήμα 3-19(α). Ομοίως, μοντελοποιήθηκε και σταγόνα σε πτερύγιο, μόνο που αυτή τη φορά τα ηλεκτρόδια

είναι οριζόντια (Σχήμα 3-19(β)). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στο Σχήμα 3-20. Η παρουσία σταγόνων στην κάθετη επιφάνεια του πολυμερούς περιβλήματος προκαλεί αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο τριπλής ένωσης μεταξύ πολυμερούς περιβλήματος, υγρού και αέρα (Σχήμα 3-20(α)). Στην περίπτωση του περυγίου, οι γραμμές του πεδίου πυκνώνουν στο πάνω μέρος της σταγόνας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-20(β).



Σχήμα 3-19: Μοντελοποίηση σταγόνας ύδατος (α) στο περίβλημα (*sheath*) και (β) στο περύγιο συνθετικού μονωτήρα [41]

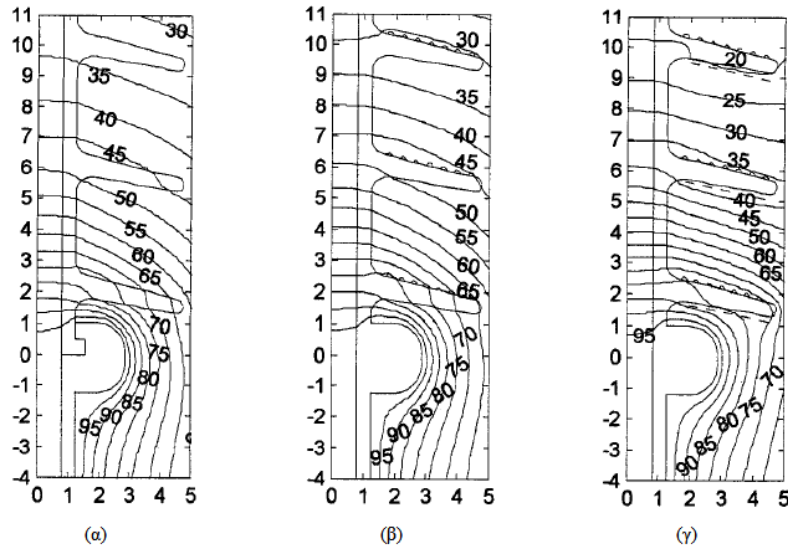


Σχήμα 3-20: Ισοδυναμικές γραμμές και γραμμές πεδίου σε σταγόνα ύδατος (α) στο περίβλημα (*sheath*) και (β) σε περύγιο συνθετικού μονωτήρα [41]

Στη συνέχεια έγιναν προσομοιώσεις σε μοντέλο συνθετικού μονωτήρα με τέσσερα περύγια για τις εξής τρεις περιπτώσεις: μοντέλο στεγνού και καθαρού μονωτήρα, μοντέλο βροχής και μοντέλο ομίχλης. Στο μοντέλο βροχής μοντελοποιήθηκαν επτά σταγόνες ανά  $10^\circ$  περυγίου, συνολικά 1008 ημισφαιρικές σταγόνες διαμέτρου 2mm στην επιφάνεια των τεσσάρων περυγίων. Το κάτω μέρος των περυγίων και το κάθετο τμήμα του περιβλήματος θεωρήθηκε στεγνό. Το μοντέλο ομίχλης περιλαμβάνει σταγόνες, όπως στο μοντέλο βροχής, και ένα συνεχές στρώμα νερού στο κάτω μέρος των περυγίων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3-21.

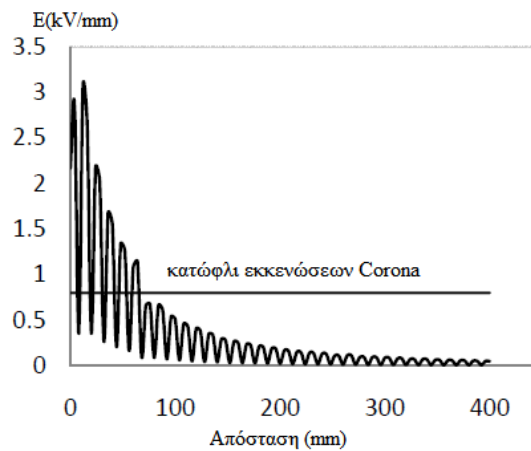
Στο Σχήμα 3-21(α) παρουσιάζεται η ανομοιόμορφη κατανομή του πεδίου που αναμένεται για έναν καθαρό, στεγνό συνθετικό μονωτήρα, σύμφωνα και με όσα έχουν ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.1. Στο μοντέλο βροχής (Σχήμα 3-21(β)) παρατηρείται ελαφριά μείωση της τιμής του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο σημείο τριπλής ένωσης μεταξύ μετάλλου, πολυμερούς περιβλήματος και αέρα. Η παρουσία των σταγόνων νερού στην άνω επιφάνεια των περυγίων εξομαλύνει την κατανομή της έντασης σε σχέση με το στεγνό μονωτήρα, όμως οδηγεί σε τοπική αύξησή της στη βάση των σταγόνων, με τις συνέπειες που περιγράφηκαν παραπάνω. Στο μοντέλο ομίχλης (Σχήμα 3-21(γ)) παρατηρείται έντονη πεδιακή καταπόνηση στις στεγνές

περιοχές του περιβλήματος, ενώ και η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο τριπλής ένωσης είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ότι στην περίπτωση του στεγνού μονωτήρα. [41]



Σχήμα 3-21: Ισοδυναμικές γραμμές για (α) μοντέλο στεγνού μονωτήρα, (β) μοντέλο βροχής και (γ) ομίχλης [41]

Η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος συνθετικού μονωτήρα 230kV υπό συνθήκες υγρασίας, μοντελοποιημένου σύμφωνα με το Σχήμα 3-15(β), όπως δημοσιεύτηκε στην εργασία [37], φαίνεται στο Σχήμα 3-22.

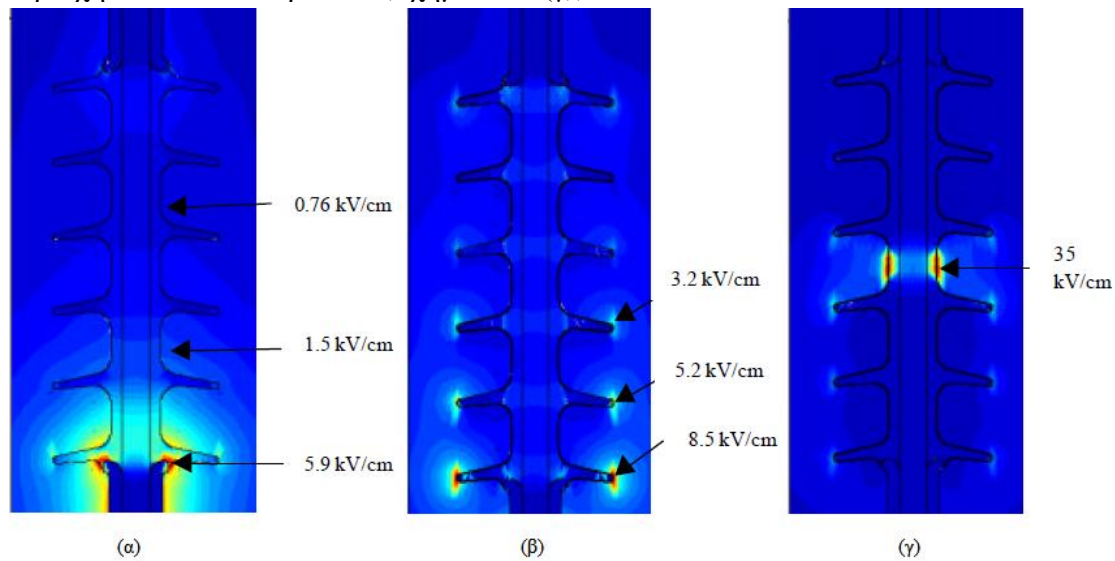


Σχήμα 3-22: Πεδιακή κατανομή κατά μήκος συνθετικού μονωτήρα 230kV υπό συνθήκες υγρασίας [37]

### 3.2.1.3 Προσομοιώσεις μονωτήρων με υγρές και ρυπασμένες επιφάνειες

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2.1.1 αφορούν σε μονωτήρες με καθαρές και στεγνές επιφάνειες, δηλαδή σε ιδανικές συνθήκες, οι οποίες δε συναντώνται ούτε και σε κλειστούς χώρους, πόσο μάλλον στις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Οι εργασίες της παραγράφου 3.2.1.2 εξετάζουν την επίδραση των σταγόνων νερού, όμως και πάλι γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχουν αγώγιοι ρύποι στην επιφάνεια του μονωτήρα. Η παρακάτω εργασία [43] αναφέρεται σε προσομοιώσεις μονωτήρων με ρυπασμένες επιφάνειες.

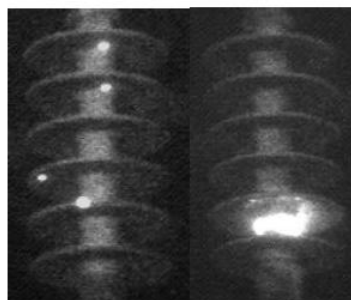
Στο Σχήμα 3-23 φαίνονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων για καθαρό μονωτήρα (Σχήμα 3-23(α)), για μονωτήρα καλυμμένο με στρώμα μέτριας ρύπανσης (Σχήμα 3-23(β)) και για μονωτήρα καλυμμένο με στρώμα ρύπανσης, εκτός από μία περιοχή 1cm στο κέντρο του (Σχήμα 3-23(γ)).



Σχήμα 3-23: Πεδιακή κατανομή γύρω από (α) στεγνό και καθαρό μονωτήρα, (β) ρυπασμένο μονωτήρα και (γ) μονωτήρα με ξηρή ζώνη [43]

Στην περίπτωση του καθαρού μονωτήρα η περιοχή που καταπονείται από μεγαλύτερη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κοντά στο υπό τάση άκρο, ωστόσο οι τιμές είναι αρκετά χαμηλές, με μέγιστη τα 0,58kV/mm. Στη περίπτωση του ομοιόμορφου στρώματος ρύπανσης παρατηρείται έντονη πεδιακή καταπόνηση στα άκρα των πτερυγίων, με μέγιστη τιμή 0,85kV/mm κοντά στο άκρο Υ.Τ.. Η χειρότερη περίπτωση είναι αυτή της ξηρής ζώνης, όπου υπολογίστηκε μέγιστη πεδιακή καταπόνηση 3,5kV/mm, μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη απ' ότι στις άλλες δύο περιπτώσεις.

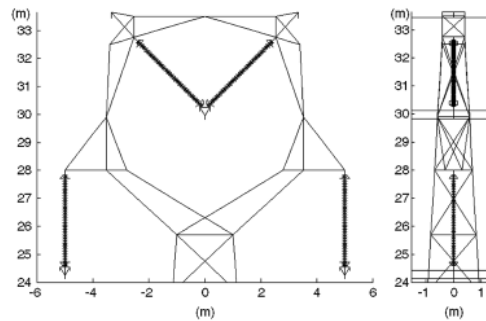
Η μετάθεση των περιοχών μέγιστης πεδιακής καταπόνησης μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το αγωγίμο στρώμα ρύπανσης δρα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνει την κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του μονωτήρα. Έτσι, μεγαλύτερες τιμές δυναμικού μετατίθενται προς το γειωμένο άκρο του μονωτήρα, προκαλώντας αύξηση των τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε σημεία με μικρή ακτίνα καμπυλότητας, προκαλώντας εκδήλωση του φαινομένου Corona σε αυτές τις περιοχές (Σχήμα 3-24).[43]



Σχήμα 3-24: Εκδήλωση του φαινομένου Corona λόγω σταγονιδίων νερού (αριστερά) και λόγω ξηρής ζώνης (δεξιά) [43]

### 3.2.2 Συνδυασμός της μεθόδου BEM με τις μεθόδους CSM και MoM

Για την πεδιακή ανάλυση των συνθετικών μονωτήρων μιας γραμμής μεταφοράς 330kV χρησιμοποιήθηκε από τους Bo Zhang et al. [44] ένας συνδυασμός των μεθόδων οριακών στοιχείων (BEM) και των ισοδυνάμων φορτίων (CSM). Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της μεθόδου BEM αφορά στους μονωτήρες της γραμμής και της μεθόδου CSM στον πυλώνα και τους αγωγούς. Στο Σχήμα 3-25 φαίνεται το σχέδιο της διάταξης, σύμφωνα με την οποία έγιναν οι προσομοιώσεις.



Σχήμα 3-25: Σχέδιο του πυλώνα, των μονωτήρων και των αγωγών τριφασικής γραμμής 330kV [44]

Επιλέχθηκε ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων επειδή η μέθοδος CSM, παρά το γεγονός ότι είναι πολύ αποδοτική για τον υπολογισμό του πεδίου που οφείλεται στον πυλώνα και τους αγωγούς της γραμμής, στερείται αποτελεσματικότητας στην προσομοίωση σύνθετων ετερογενών μέσων, όπως είναι ένας συνθετικός μονωτήρας. Τα αντίθετα ισχύουν για τη μέθοδο BEM. Ο συνδυασμός αυτός εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου για την προσομοίωση ενός σύνθετου μοντέλου, που περιλαμβάνει δομές μεγέθους της τάξης του  $10^1$  (πυλώνας) έως και της τάξης του  $10^{-3}$  (πάχος πετυργίων συνθετικού μονωτήρα).

Η προτεινόμενη μέθοδος είναι η εξής: ο πυλώνας, οι αγωγοί και οι αγωγοί προστασίας χωρίζονται σε μικρά κομμάτια. Ταυτόχρονα, οι επιφάνειες των μονωτήρων χωρίζονται σε επιφανειακά τμήματα, έστω  $N$  κομμάτια και  $M$  επιφανειακά τμήματα. Τίθεται ως άγνωστη ποσότητα σε κάθε ένα από τα  $N$  κομμάτια ένα γραμμικό φορτίο, ενώ σε κάθε ένα από τα  $M$  επιφανειακά τμήματα ένα επιφανειακό φορτίο.

Η εφαρμογή της μεθόδου CSM δίνει τις παρακάτω εξισώσεις, λαμβάνοντας υπόψη και τα επιφανειακά φορτία:

$$\begin{pmatrix} A_{NxN} & B_{NxM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{Nx1} \\ \eta_{Mx1} \end{pmatrix} = \varphi_{Nx1} \quad 3.4$$

όπου  $\tau$  είναι το διάνυσμα των γραμμικών πυκνοτήτων φορτίου των κομματιών  $N$ ,  $\eta$  είναι το διάνυσμα των επιφανειακών πυκνοτήτων φορτίου των επιφανειακών τμημάτων  $M$  και  $\varphi$  το διάνυσμα των δυναμικών των κομματιών. Αν το κομμάτι  $i$  είναι τμήμα του πυλώνα ή των αγωγών προστασίας, τότε είναι  $\varphi_i = 0$ . Αν το κομμάτι  $i$  ανήκει σε κάποιο από τους αγωγούς, τότε το  $\varphi_i$  ισούται με το δυναμικό του αγωγού.

Ο πίνακας  $A$  περιέχει τους συντελεστές των κομματιών, οι οποίοι δίνονται από τη σχέση:

$$A_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \int_{L_j} \frac{dL}{|\vec{r}_i^s - \vec{r}|} - \int_{L_j'} \frac{dL'}{|\vec{r}_i^s - \vec{r}'|} \right) \quad 3.5$$

όπου τα  $L_j$  και  $L_j'$  αντιπροσωπεύουν το κομμάτι  $j$  και το κατοπτρικό του,  $\vec{r}$  και  $\vec{r}'$  είναι οι συντεταγμένες του αρχικού και του κατοπτρικού φορτίου αντίστοιχα και  $\vec{r}_i^s$  οι συντεταγμένες ενός κεντρικού σημείου στην επιφάνεια του κομματιού  $i$ .

Ο πίνακας  $B$  είναι ο πίνακας των συντελεστών της μεθόδου BEM:

$$B_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \int_{\Delta S_j} \frac{dS}{|\vec{r}_i^s - \vec{r}|} - \int_{\Delta S_j'} \frac{dS'}{|\vec{r}_i^s - \vec{r}'|} \right) \quad 3.6$$

όπου  $\Delta S$  και  $\Delta S'$  είναι οι επιφάνειες του επιφανειακού τμήματος  $j$  και του κατοπτρικού του.

Από την εφαρμογή της μεθόδου BEM για το στοιχείο  $j$  πρέπει να ικανοποιείται η εξής εξίσωση:

$$\frac{\eta_{ij}}{2\epsilon_0} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_c}{\epsilon_0 + \epsilon_c} \vec{n}_j \cdot \vec{E}_j^c = 0 \quad 3.7$$

όπου  $\epsilon_c$  είναι η επιτρεπτότητα του μονωτήρα,  $\vec{n}_j$  η κατεύθυνση του επιφανειακού τμήματος  $j$  και  $\vec{E}_j^c$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο τμήμα  $j$ , η οποία προκαλείται από τα φορτία των άλλων τμημάτων, τα φορτία των γραμμών και τις εικόνες όλων των φορτίων. Το σύνολο των εξισώσεων για όλα τα επιφανειακά τμήματα δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$(C_{M \times N} D_{M \times M}) \begin{pmatrix} \tau_{Nx1} \\ \eta_{M \times 1} \end{pmatrix} = 0 \quad 3.8$$

Για τον πίνακα συντελεστών  $C$  των κομματιών της μεθόδου CSM ισχύει:

$$C_{ij} = \frac{1}{2\pi} \frac{\epsilon_0 - \epsilon_c}{\epsilon_0 + \epsilon_c} \left( \int_{L_j} \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}) \vec{n}_i dL}{|\vec{r}_i - \vec{r}|^3} - \int_{L_j'} \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}') \vec{n}_i dL'}{|\vec{r}_i - \vec{r}'|^3} \right) \quad 3.9$$

όπου  $\vec{r}_i$  είναι η συντεταγμένη του κέντρου του επιφανειακού στοιχείου  $i$ . Για τον πίνακα  $D$  της μεθόδου BEM ισχύει:

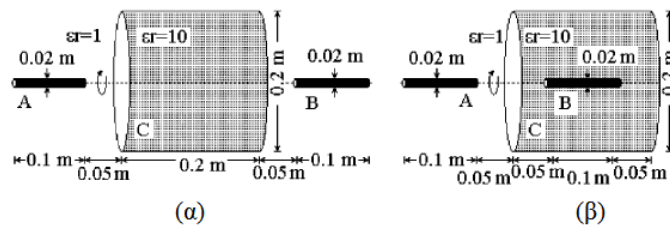
$$D_{ij} = \frac{1}{2\pi} \frac{\epsilon_0 - \epsilon_c}{\epsilon_0 + \epsilon_c} \left( \int_{\Delta S_j} \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}) \vec{n}_i dS}{|\vec{r}_i - \vec{r}|^3} - \int_{\Delta S_j'} \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}') \vec{n}_i dS'}{|\vec{r}_i - \vec{r}'|^3} \right), \quad i \neq j \quad 3.10$$

$$D_{ii} = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{\epsilon_0 - \epsilon_c}{\epsilon_0 + \epsilon_c} \int_{\Delta S_j'} \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}') \vec{n}_i dS'}{|\vec{r}_i - \vec{r}'|^3}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.4 και 3.8 προκύπτει το τελικό σελ εξισώσεων, από το οποίο μπορούν να υπολογιστούν τα γραμμικά και τα επιφανειακά φορτία και με τη σειρά τους το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στους μονωτήρες και στον πυλώνα.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής επαληθεύονται με δύο τρόπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει τον υπολογισμό των χωρητικοτήτων μεταξύ των δύο αγωγών που

φαίνονται στο Σχήμα 3-26 με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και με το συνδυασμό των μεθόδων BEM και CSM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3.2) και επιβεβαιώνουν συμφωνία μεταξύ των δύο μεθόδων.

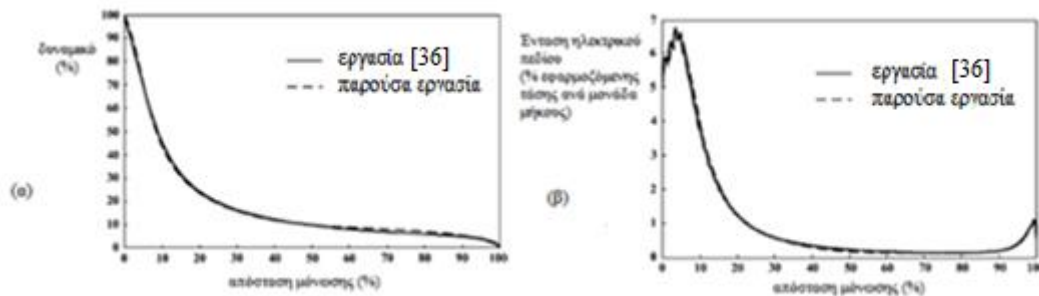


Σχήμα 3-26: Διάταξη επιβεβαίωσης μεθόδου [44]

Πίνακας 3.2: Χωρητικότητες μεταξύ των αγωγών του παραπάνω σχήματος [44]

Διάταξη		Χωρητικότητα (pF)		Σφάλμα (%)
		Παρούσα εργασία [40]	FEM	
Σχήμα 3-26(α)	C (με διηλεκτρικό)	1,513	1,491	1,48
	C (χωρίς διηλεκτρικό)	1,568	1,567	1,40
Σχήμα 3-26(β)	C (με διηλεκτρικό)	1,640	1,613	1,67
	C (χωρίς διηλεκτρικό)	2,832	2,789	1,57

Ο δεύτερος τρόπος επαλήθευσης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων του υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα που χρησιμοποιήθηκε από τους συγγραφείς του άρθρου [36], το οποίο παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.1.1. Στο Σχήμα 3-27 φαίνονται στους ίδιους άξονες οι γραφικές παραστάσεις της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο του μονωτήρα. Η εξαιρετική συμφωνία των αποτελεσμάτων είναι ακόμα μια απόδειξη της ορθότητας της μεθόδου συνδυασμού BEM και CSM.

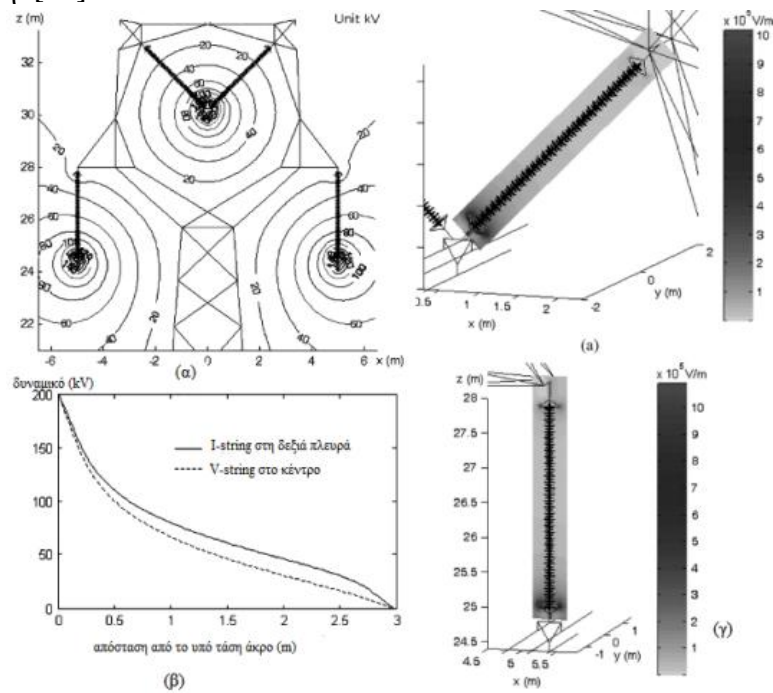


Σχήμα 3-27: Κατανομή δυναμικού (α) και έντασης ηλεκτρικού πεδίου (β) σύμφωνα με την παρούσα εργασία και την εργασία [36]. [44]

Οι προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν με τη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω στη διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 3-25 επιβεβαιώνουν την επίδραση που έχουν οι μεταλλικές δομές που περιβάλλουν το μονωτήρα (πυλώνας, αγωγοί) στη διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 3-28(α)). Επιπλέον, επιβεβαιώνεται ότι η καταπόνηση που δέχονται οι μονωτήρες σε διάταξη V, από τους οποίους αναρτάται ο μεσαίος αγωγός, είναι πιο έντονη από αυτή στους μονωτήρες που βρίσκονται στις δύο άκρες του πυλώνα (Σχήμα 3-28(β)). Τέλος, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η χρήση του τοροειδούς



εξομάλυνσης πεδίου «μεταφέρει» τα σημεία όπου η ένταση του πεδίου είναι μέγιστη στην επιφάνειά του αντί για την περιοχή του μεταλλικού άκρου του μονωτήρα (Σχήμα 3-28(γ)), όπου η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων μπορεί να αποβεί καταστροφική. [44]



Σχήμα 3-28: Αποτελέσματα προσομοιώσεων [44]

Για την ίδια διάταξη (Σχήμα 3-25) προτάθηκε το 2006 άλλη μία μέθοδος επίλυσης, συνδυάζοντας τη μέθοδο BEM με τη μέθοδο των ροπών (*Method of Moments-MoM*).[45]

Στην περίπτωση αυτή η μέθοδος BEM εφαρμόζεται όπως και πριν, χωρίζοντας τις επιφάνειες των μονωτήρων σε τμήματα, στα οποία ανατίθεται ένα επιφανειακό φορτίο. Η MoM συνίσταται στο χωρισμό όλων των υπόλοιπων στοιχείων της γεωμετρίας (πυλώνας, αγωγοί, διατάξεις εξομάλυνσης πεδίου) σε κομμάτια, στα οποία αυτή τη φορά θεωρείται ότι υπάρχει μία άγνωστη ποσότητα ρεύματος διαρροής. Έστω  $N$  κομμάτια και  $M$  επιφανειακά τμήματα, όπως και πριν.

Στα  $N$  κομμάτια το δυναμικό της εσωτερικής επιφάνειας θα πρέπει να είναι ίδιο με αυτό της εξωτερικής επιφάνειας. Η διαφορά δυναμικού στην εσωτερική επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi^i = Z^s I^i \quad 3.11$$

όπου

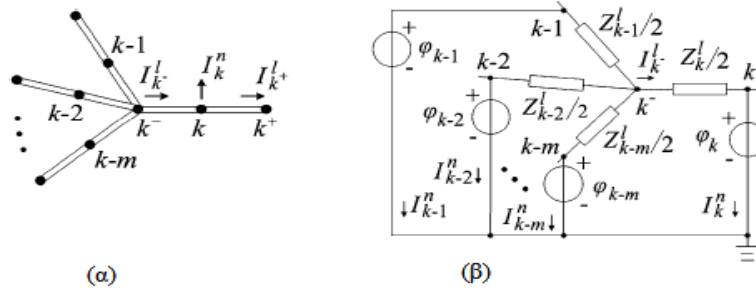
$$Z^s = l(j\omega L + Z^c) \quad 3.12$$

$Z^s$  είναι η αυτεπαγωγή του κομματιού,  $L$  και  $Z^c$  είναι η εξωτερική επαγωγή και η εσωτερική εμπέδηση αντίστοιχα του αγωγού μοναδιαίου μήκους. Το δυναμικό στην εξωτερική επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi^e = \sum_{i=1}^N Z_i I_i^n + \sum_{j=1}^M A_j q_j \quad 3.13$$



όπου  $I_i^n$  είναι το ρεύμα διαρροής από το κομμάτι  $i$ ,  $Z_i I_i^n$  είναι το δυναμικό που προκαλείται από το κομμάτι  $i$  όταν μοναδιαίο ρεύμα διαρρέει το κομμάτι ως προς το κατοπτρικό φορτίο (*ground image*),  $q_j$  είναι το επιφανειακό φορτίο στο επιφανειακό στοιχείο  $j$  και το  $A_j$  ισούται με το δυναμικό που προκαλείται από το επιφανειακό στοιχείο που περιέχει μοναδιαίο φορτίο. Επομένως ο πυλώνας, τα τοροειδή, οι αγωγοί φάσης και οι αγωγοί προστασίας των γραμμών μεταφοράς μπορούν να θεωρηθούν ως ένα δίκτυο αντιστάσεων, με τα δυναμικά των κομματιών ως πηγές (Σχήμα 3-29(α)).



Σχήμα 3-29: (α) Τμήμα δικτύου αντιστάσεων και (β) ισοδύναμο κύκλωμα [45]

Έστω ότι το ρεύμα κατά μήκος ενός κομματιού συγκεντρώνεται στον άξονα και το ρεύμα διαρροής του κομματιού ρέει από το κεντρικό σημείο του. Για το κομμάτι  $k$ , σύμφωνα με το

Σχήμα 3-29 (α) το ρεύμα διαρροής  $I_k^n$  εκφράζεται ως εξής:

$$I_k^n = I_{k^-}^l - I_{k^+}^l \quad 3.14$$

όπου  $I_{k^-}^l$  και  $I_{k^+}^l$  τα διαμήκη ρεύματα στα σημεία  $k^-$  και  $k^+$  αντίστοιχα. Από το ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήμα 3-29(β)) και σύμφωνα με τη θεωρία ισχύει:

$$I_{k^-}^l = \frac{1}{Z_{k,k^-}^s} \cdot \frac{\sum_{j=0}^m \frac{\varphi_{k-j} - \varphi_k}{Z_{k-j,k^-}^s}}{\sum_{j=0}^m \frac{1}{Z_{k-j,k^-}^s}} \quad 3.15$$

όπου  $\varphi_{k-j}$  είναι το βαθμωτό δυναμικό στο κεντρικό σημείο του κομματιού  $k-j$  και  $Z_{k-j,k^-}^s$  η εμπέδηση μεταξύ του κεντρικού σημείου  $k-j$  και του τελικού σημείου  $k^-$ .

Ομοίως υπολογίζεται και το  $I_{k^+}^l$ .

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.13 και 3.15 και αντικαθιστώντας στην 3.14 την 3.15, η εξίσωση 3.14 θα περιέχει μόνο ρεύματα διαρροής και επιφανειακά φορτία, επομένως έχουμε την εξής σχέση:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{k,i} I_i^n + \sum_{i=1}^N b_{k,i} q_i = 0 \quad 3.16$$

όπου τα  $\alpha_{k,i}$  και  $b_{k,i}$  είναι συντελεστές.

Αν το κομμάτι  $k$  είναι η πηγή τάσης, σύμφωνα με την 3.13 η αντίστοιχη εξίσωση θα είναι:

$$\sum_{i=1}^N Z_{k,i} I_i^n + \sum_{i=1}^N A_{k,j} q_j = U_k \quad 3.17$$

Για κάθε κομμάτι υπάρχει μία αντίστοιχη εξίσωση. Για όλα τα κομμάτια προκύπτουν  $N$  εξισώσεις με  $N$  ρεύματα διαρροής και  $M$  επιφανειακά φορτία ως αγνώστους:

$$[A_{11NxN} A_{12NxM}] \begin{bmatrix} I_{Nx1}^n \\ q_{Mx1} \end{bmatrix} = U_{Nx1}^s \quad 3.18$$

όπου  $A_{11}$  είναι ο πίνακας συντελεστών των κομματιών,  $A_{12}$  ο πίνακας συντελεστών των επιφανειακών τμημάτων,  $I_{Nx1}^n$  ο πίνακας των ρευμάτων διαρροής των κομματιών,  $q_{Mx1}$  ο πίνακας των επιφανειακών φορτίων των επιφανειακών τμημάτων και  $U_{Nx1}^s$  ο πίνακας-στήλη των πηγών τάσης. Αν το  $i$ -οστό κομμάτι έχει πηγή τάσης, τότε αυτή είναι η  $i$ -οστή τιμή του  $U_{Nx1}^s$ , αλλιώς είναι μηδέν.

Είδαμε ήδη ότι για την πλήρη μοντελοποίηση τμήματος μίας γραμμής μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία οι μέθοδοι BEM και CSM. Η χρήση της μεθόδου MoM αντί της CSM έχει το πλεονέκτημα ότι η πρώτη λαμβάνει υπόψη, εκτός από την επιτρεπτότητα, την αντίσταση των μέσων, χρησιμοποιώντας τη μιγαδική αντίσταση ( $\rho' = \frac{1}{\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon} = \frac{\rho}{1 + j\omega\varepsilon\rho}$ ) και τα ρεύματα διαρροής ως

αγνώστους. Επομένως, η μέθοδος MoM επιτρέπει τον υπολογισμό εναλλασσόμενων πεδίων και τη συμπίληψη και των τριών φάσεων. Με τη χρήση της μιγαδικής αντίστασης οι MoM και CSM δίνουν τα ίδια αποτελέσματα.

Για τα επιφανειακά τμήματα, η μέθοδος BEM για το  $j$ -οστό στοιχείο δίνει:

$$\frac{q_j}{2\varepsilon_0} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_c}{\varepsilon_0 + \varepsilon_c} \vec{n}_j \cdot \vec{E}_j^e = 0 \quad 3.19$$

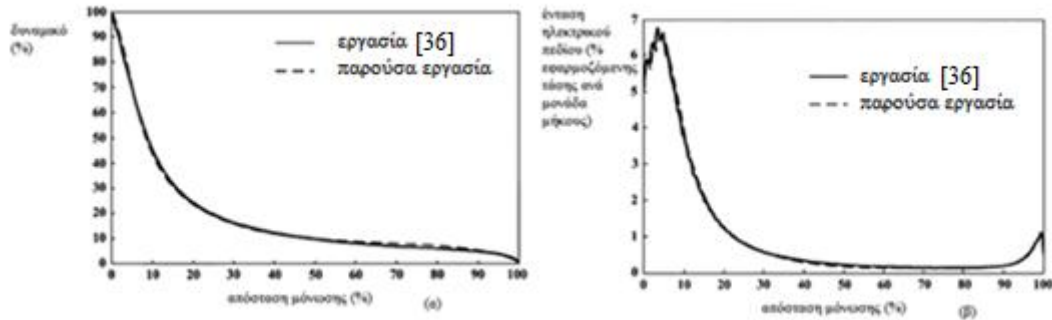
όπου  $\varepsilon_c$  είναι η επιτρεπτότητα του μονωτήρα,  $\vec{n}_j$  η κατεύθυνση του επιφανειακού τμήματος  $j$  και  $\vec{E}_j^e$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο τμήμα  $j$ , η οποία προκαλείται από τα φορτία των άλλων τμημάτων, το κατοπτρικό φορτίο του  $q_j$  και το ρεύμα διαρροής στα κομμάτια. Το σύνολο των εξισώσεων για τα επιφανειακά τμήματα φαίνεται παρακάτω:

$$[A_{21MxN} A_{22MxM}] \begin{bmatrix} I_{Nx1}^n \\ q_{Mx1} \end{bmatrix} = 0 \quad 3.20$$

όπου  $A_{21MxN}$  είναι ο πίνακας συντελεστών των κομματιών και  $A_{22MxM}$  ο πίνακας συντελεστών των επιφανειακών τμημάτων. Συνδυάζοντας τις 3.20 και 3.18 προκύπτει το τελικό σει εξισώσεων, από το οποίο μπορούν να υπολογιστούν το ηλεκτρικό πεδίο και το δυναμικό γύρω από τους μονωτήρες και τους πυλώνες.

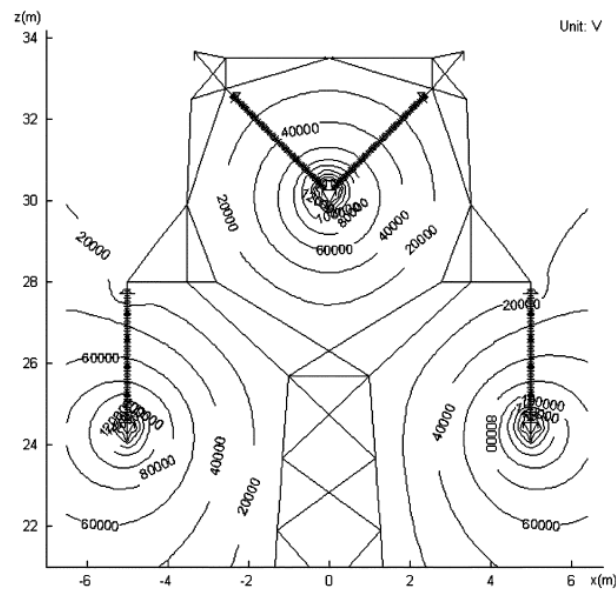
Η επιβεβαίωση της ορθότητας της μεθόδου γίνεται ακριβώς όπως και στην περίπτωση της εργασίας [40] και τα σχετικά διαγράμματα φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 3-30). Η συμφωνία των γραφικών παραστάσεων, εκτός από απόδειξη της ορθότητας των αποτελεσμάτων της μεθόδου που μόλις περιγράφηκε, καταδεικνύει

και την ασήμαντη συμβολή των περυγίων στη διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου, δικαιολογώντας την απλοποίηση που εισήγαγαν οι συγγραφείς της εργασίας [36]. Στην παρούσα εργασία οι μονωτήρες εξετάζονται με όλα τα περυγιά τους.



Σχήμα 3-30: Κατανομή δυναμικού (α) και έντασης ηλεκτρικού πεδίου (β) στον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα [45]

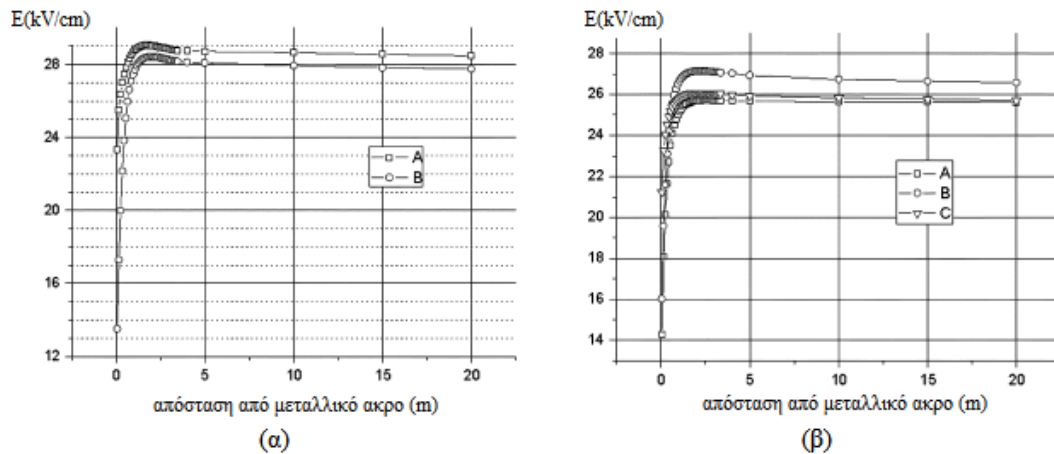
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στη γραμμή μεταφοράς 330kV (Σχήμα 3-25) φαίνονται στο Σχήμα 3-31. Φαίνεται και εδώ ότι η παρουσία των μονωτήρων δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την κατανομή του δυναμικού, λόγω του μικρού μεγέθους τους σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία του εξοπλισμού.



Σχήμα 3-31: Κατανομή δυναμικού γύρω από τα στοιχεία του μοντέλου [45]

Όσον αφορά στους τρεις αγωγούς της κάθε φάσης, τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω, στο Σχήμα 3-32. Οι μέγιστες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από τους μεταλλικούς τερματισμούς: λόγω της επίδρασης των τοροειδών και των λοιπών μεταλλικών εξαρτημάτων παρατηρείται εξομάλυνση του πεδίου στις περιοχές των αγωγών που βρίσκονται κοντά στους μονωτήρες. Επίσης, παρατηρείται ότι για τρεις αγωγούς ανά φάση, διατεταγμένους στις κορυφές ισοπλεύρου τριγώνου, με δύο αγωγούς πάνω και έναν αγωγό κάτω, όταν πρόκειται για τη μεσαία φάση την πιο έντονη καταπόνηση υφίσταται ο κάτω αγωγός (Σχήμα 3-32(α)). Αυτό εξηγείται από την απόσταση του αγωγού από τα τοροειδή και το μεταλλικό άκρο του μονωτήρα. Στην περίπτωση των πλαϊνών φάσεων, ο αγωγός που

βρίσκεται στο πάνω μέρος της δέσμης, αλλά από την εξωτερική πλευρά, εμφανίζει τη μεγαλύτερη πεδιακή καταπόνηση, ενώ οι δύο άλλοι αγωγοί υφίστανται συγκρίσιμες τιμές πεδιακής έντασης, λόγω της εγκύτητάς τους στη μεταλλική κατασκευή του πυλώνα (Σχήμα 3-32(β)). Τέλος, συγκρίνοντας τις μέγιστες τιμές μεταξύ των (α) και (β) επιβεβαιώνεται για άλλη μια φορά ότι η χειρότερη περίπτωση πεδιακής καταπόνησης αφορά στη μεσαία φάση, η οποία διέρχεται από το «παράθυρο» του πυλώνα. [45]



Σχήμα 3-32: Μέγιστες τιμές πεδιακής έντασης στην επιφάνειες των αγωγών κοντά στον πυλώνα (α) για τη μεσαία φάση, όπου A είναι ο κάτω αγωγός και B ένας από τους δύο πάνω αγωγούς και (β) για την πλαϊνή φάση, όπου A είναι ο πάνω αγωγός που δεν είναι δίπλα στον πυλώνα, B ο πάνω αγωγός δίπλα στον πυλώνα και C ο κάτω αγωγός. [45]

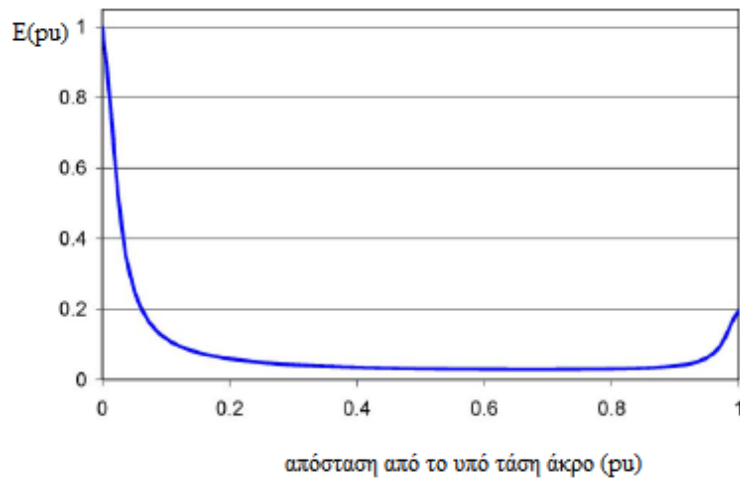
### 3.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

#### 3.3.1 Γενικά

Το 2008 δημοσιεύτηκε από την IEEE Taskforce on Electric Fields and Composite Insulators η εργασία [46], η οποία πραγματεύεται την πεδιακή κατανομή που τυπικά αναπτύσσεται γύρω από συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης σε γραμμές μεταφοράς A.C.. Παρουσιάζονται οι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου και οι κρίσιμες περιοχές που ενδιαφέρουν τους κατασκευαστές και τις εταιρείες διαχείρισης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, όπου βρίσκονται εγκατεστημένοι συνθετικοί μονωτήρες. Τα συμπεράσματά τους βρίσκονται σε απόλυτη συμφωνία με τα όσα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.2, η οποία αφορά σε προσομοιώσεις με ολοκληρωτικές μεθόδους, αλλά και στα συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται στις επόμενες παραγράφους. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) και στην εφαρμογή της στον αριθμητικό υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου στην εγγύς περιοχή των συνθετικών μονωτήρων των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενδεικτικά, οι συγγραφείς του άρθρου [46] παραθέτουν το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο προέκυψε από προσομοίωση τρισδιάστατου μοντέλου συνθετικού μονωτήρα 115kV σε διάταξη I (*I-string*) με τη μέθοδο FEM. Στο Σχήμα 3-33 παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη κατανομή της πεδιακής έντασης στο κέντρο του πυρήνα κατά μήκος του μονωτήρα, ο οποίος δε διαθέτει τοροειδές εξομάλυνσης πεδίου. Η

κατανομή αυτή είναι σύμφωνη με τα θεωρητικά αναμενόμενα (ενότητα 3.1): η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές στην πλευρά Υ.Τ., ενώ μικρή αύξηση παρατηρείται και στο γειωμένο άκρο, λόγω της ύπαρξης του πυλώνα. [46]



Σχήμα 3-33: Κανονικοποιημένη κατανομή της πεδιακής έντασης στον άξονα συμμετρίας συνθετικού μονωτήρα 115kV σε διαμόρφωση I. [46]

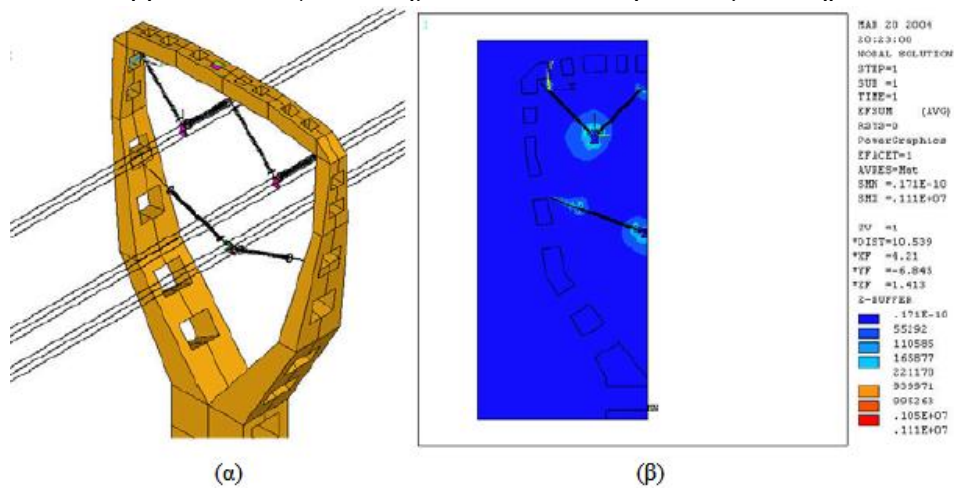
Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται εργασίες οι οποίες εφαρμόζουν τη μέθοδο FEM για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου υπό ιδανικές συνθήκες αλλά και υπό συνθήκες διαβροχής και ρύπανσης, καθώς και για τη βελτιστοποίηση παραμέτρων της γεωμετρίας των μονωτήρων και διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου.

### 3.3.2 Προσομοιώσεις μονωτήρων υπό ιδανικές συνθήκες

Η κατασκευή συνεπτυγμένων γραμμών (*compacted lines*) είναι μία λύση η οποία κερδίζει έδαφος με τα ολοένα αυξανόμενα επίπεδα τάσης στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χωρών που εμφανίζουν αυξανόμενες ανάγκες ισχύος λόγω αλματώδους βιομηχανικής ανάπτυξης, όπως η Κίνα. Οι πυλώνες των γραμμών αυτών, στους οποίους βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή οι συνθετικοί μονωτήρες, έχουν το πλεονέκτημα των μικρότερων διατάσεων, άρα απαιτούν μικρότερες ζώνες διέλευσης και έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης. Ταυτόχρονα όμως, λόγω εγγύτητας των αγωγών των φάσεων η πεδιακή καταπόνηση του εξοπλισμού είναι πιο έντονη. [47]

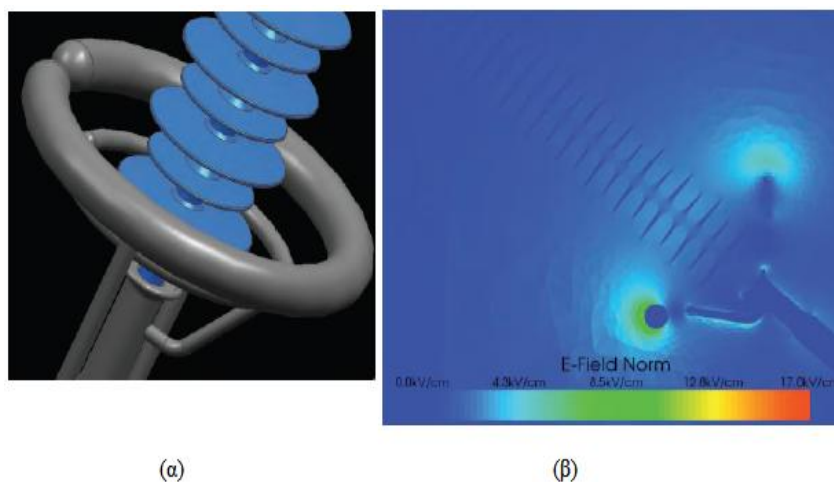
Το 2005 στο XIVth International Symposium on High Voltage Engineering παρουσιάστηκε η εργασία [48], στην οποία εξετάζεται με τη μέθοδο FEM η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες συνεπτυγμένης γραμμής μεταφοράς 330kV. Η διαμόρφωση του πλήρους μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 3-34. Όπως φαίνεται, οι τρεις φάσεις του απλού κυκλώματος είναι αναρτημένες από μονωτήρες σε διάταξη V και διέρχονται όλες από το παράθυρο του πυλώνα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-34(β) η εντονότερη πεδιακή καταπόνηση εντοπίζεται στα υπό τάση άκρα των μονωτήρων, ενώ αυξημένη είναι και η πεδιακή ένταση στο γειωμένο άκρο των μονωτήρων της κάτω φάσης. Επιπλέον, οι υπολογισμοί δείχνουν ότι η

μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης εκδηλώνεται στην εξωτερική επιφάνεια των τοροειδών που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε κάθε άκρο των μονωτήρων.



Σχήμα 3-34: (α) Μοντέλο πυλώνα συνεπτυγμένης γραμμής 330kV και (β) πεδιακή καταπόνηση των μονωτήρων [48]

Στην εργασία [49], η οποία δημοσιεύτηκε το 2010, οι συγγραφείς επιχειρούν τη μοντελοποίηση γραμμής Υ.Υ.Τ. 420kV και τον αριθμητικό προσδιορισμό των τιμών του ηλεκτρικού πεδίου στα κρίσιμα σημεία της γεωμετρίας. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της διάταξης αυτής είναι η χρήση διπλών δακτυλίων για την εξομάλυνση του πεδίου σε κάθε άκρο του μονωτήρα (Σχήμα 3-35(α)). Το πιο μικρό τοροειδές χρησιμεύει στην εξομάλυνση του πεδίου κοντά στο σημείο τριπλής ένωσης, ενώ το μεγαλύτερο, εξωτερικό τοροειδές παρέχει ευρύτερη ομαλοποίηση του πεδίου στο άκρο του μονωτήρα. Η επίδραση των δύο αυτών διατάξεων είναι εμφανής στο Σχήμα 3-35(β), όπου φαίνεται καθαρά πως οι μεγαλύτερες τιμές του πεδίου εκδηλώνονται πλέον στην επιφάνεια του μεγάλου τοροειδούς. Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που προέκυψαν για το περίβλημα, το μέταλλο των τερματισμών και το σημείο τριπλής ένωσης παραμένουν κάτω από τα όρια που έχει προτείνει το EPRI [50]: στην επιφάνεια του πολυμερούς περιβλήματος η μέγιστη τιμή είναι 0,28kV/mm, ενώ το όριο τίθεται στα 0,4kV/mm. Ακόμα χαμηλότερη είναι η τιμή στο σημείο τριπλής ένωσης, λόγω της ύπαρξης των συνδυασμένων τοροειδών. [49]



Σχήμα 3-35: (α) Μοντελοποίηση του άκρου Υ.Τ. και (β) πεδιακή κατανομή στο άκρο αυτό [49]

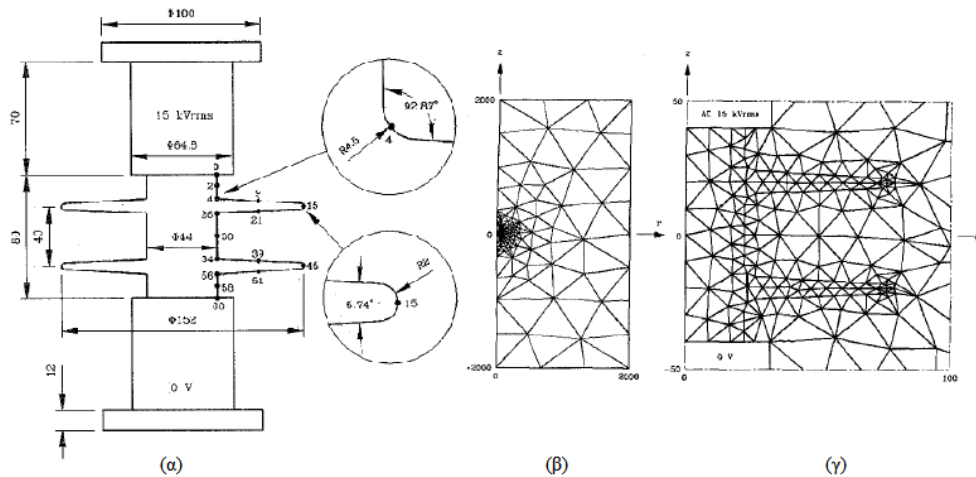


### 3.3.3 Προσομοιώσεις μονωτήρων υπό συνθήκες βροχής και ρύπανσης

Η δυνατότητα προσομοίωσης ρυπασμένων επιφανειών συνθετικών μονωτήρων είναι το αντικείμενο διερεύνησης της εργασίας [51]. Για την εφαρμογή της μεθόδου FEM στο μοντέλο συνθετικού μονωτήρα στήριξης 15kV (Σχήμα 3-36(α)), η εξίσωση της ενέργειας 2.19 τροποποιείται ως εξής, ώστε να λαμβάνει υπόψη το επιφανειακό αγωγιμο στρώμα ρύπανσης:

$$\dot{X}(\dot{\phi}) = \int 2\pi r(\sigma\delta)(\nabla\dot{\phi}_0)^2 dt + i \iint 2\pi\omega\epsilon\left\{\left(\frac{\partial\dot{\phi}}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial\dot{\phi}}{\partial z}\right)^2\right\} r dr dz \quad 3.21$$

όπου  $\dot{\phi}$  είναι το δυναμικό σε σημείο P(r,z),  $\sigma$  (S/m) η αγωγιμότητα και  $\delta$ (m) το πάχος του στρώματος ρύπων. Το στρώμα των ρύπων θεωρείται ότι είναι πολύ λεπτό και για να μην προκληθεί ανισορροπία στις διαστάσεις των στοιχείων του πλέγματος η ποσότητα  $\sigma\delta$  θεωρείται ότι είναι μία ενιαία παράμετρος, η επιφανειακή αγωγιμότητα (με μονάδα S).



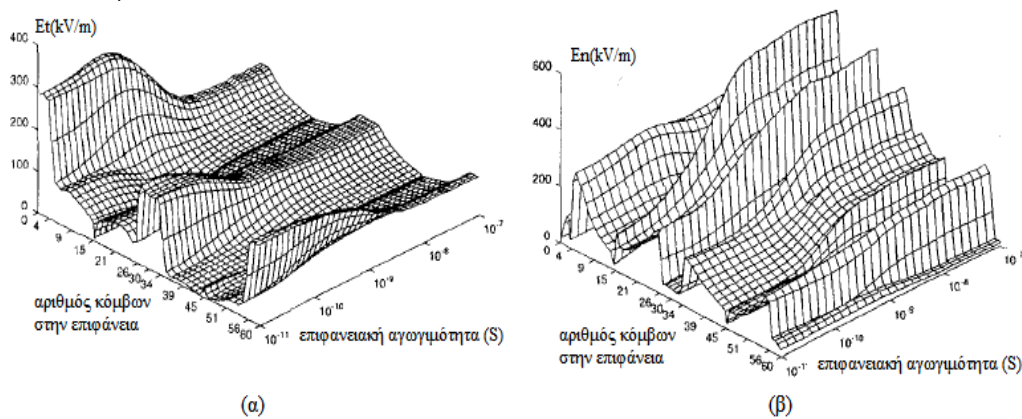
Σχήμα 3-36: (α) Μοντέλο συνθετικού μονωτήρα στήριξης 15kV και διακριτοποίηση του χώρου (β) γύρω από το μονωτήρα και (γ) πλησίον αυτού(διαστάσεις σε mm) [51]

Η εφαρμογή της μεθόδου FEM προϋποθέτει γνωστές οριακές συνθήκες. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε ένα πρόβλημα ανοιχτών συνόρων, όπως το παρόν, οι συγγραφείς θεώρησαν ένα τεχνητό όριο στο οποίο το δυναμικό μηδενίζεται. Στο Σχήμα 3-36(β) φαίνονται οι διαστάσεις του χώρου αυτού, καθώς και η διαφορά στη διακριτοποίηση, όσο αυξάνεται η απόσταση από το μονωτήρα. Για λόγους οικονομίας υπολογιστικών πόρων και χρόνου επιλέγεται πυκνό πλέγμα μέσα και κοντά στο μονωτήρα (Σχήμα 3-36(γ)), αφού αυτές είναι οι κρίσιμες περιοχές, ενώ κοντά στα τεχνητά όρια το πλήθος των στοιχείων μειώνεται. Ο καθορισμός του πλέγματος έγινε έτσι ώστε τυχούσα μεταβολή του πλήθους των στοιχείων κατά 100% να μην παρέχει πάνω από 1% βελτίωση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι για ένα ομοιόμορφο στρώμα ρύπων, όσο μεταβάλλεται η επιφανειακή αγωγιμότητα, το πεδίο αλλάζει από χωρητικό σε ωμικό. Για το συγκεκριμένο μοντέλο οι τιμές αυτές είναι μεταξύ  $10^{-10}$  και  $10^{-8}$ S. Στο διάστημα αυτό το πεδίο εμφανίζει ωμική -χωρητική συμπεριφορά και η κατανομή του επηρεάζεται από την επιφανειακή αγωγιμότητα (στρώμα ρύπανσης). Για επιφανειακή αγωγιμότητα μεγαλύτερη από  $10^{-8}$ S το πεδίο είναι ωμικό. Στην

περίπτωση αυτή το δυναμικό κατανέμεται ανάλογα με την επιφανειακή αγωγιμότητα και περαιτέρω αύξησή της δεν έχει επίδραση στην κατανομή.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την εφαπτομενική και την κάθετη συνιστώσα του πεδίου φαίνονται στο Σχήμα 3-37. Βλέπουμε ότι ο πυρήνας του μονωτήρα εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές της εφαπτομενικής συνιστώσας του πεδίου,  $E_t$ , ειδικά για μεγαλύτερες τιμές επιφανειακής αγωγιμότητας. Το εφαπτομενικό πεδίο παραμένει σταθερό για  $\sigma\delta > 10^{-9} S$ , ενώ παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία όταν  $\sigma\delta \leq 10^{-10} S$ , λόγω της μικρής διαμέτρου του πυρήνα. Η κάθετη συνιστώσα του πεδίου,  $E_n$ , εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές πάνω στα πτερύγια παρά στο εσωτερικό του μονωτήρα, ενώ για τιμές  $\sigma\delta$  που αντιστοιχούν σε ωμικό πεδίο είναι σημαντικά αυξημένες απ' ότι για χωρητικό πεδίο. Η μέγιστη τιμή της κάθετης συνιστώσας του πεδίου που υπολογίστηκε στην άκρη του τελευταίου πτερυγίου είναι ίση με  $563,5 \text{ kV/m}$  για  $\sigma\delta = 10^{-7} S$ .



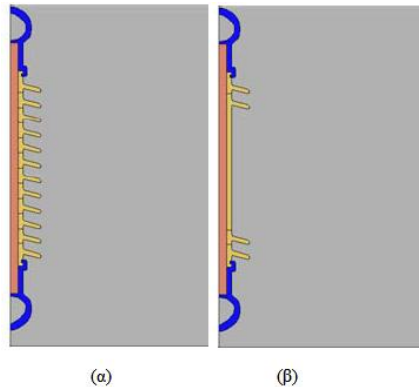
Σχήμα 3-37: Κατανομή (α) της εφαπτομενικής και (β) της κάθετης συνιστώσας του πεδίου [51]

Συνοψίζοντας, οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι υπό συνθήκες μειωμένης ρύπανσης, παρά τις αυξημένες τιμές του  $E_t$  στην επιφάνεια του μονωτήρα, το ρεύμα διαρροής είναι περιορισμένο λόγω υψηλής επιφανειακής αντίστασης. Αντίθετα, υπό αυξημένη ρύπανση η συνιστώσα  $E_n$  είναι αυτή που εμφανίζει αυξημένες τιμές στις άκρες των πτερυγίων, με αποτέλεσμα την έναυση μερικών εκκενώσεων ή φαινομένου corona. Το αυξημένο ρεύμα διαρροής, που προκαλείται από τις αυξημένες τιμές επιφανειακής αγωγιμότητας μπορεί να προκαλέσει αρκετή θερμότητα για το σχηματισμό ξηρών ζωνών, οι οποίες προκαλούν παραμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου και ενδεχομένως υπερπήδηση του μονωτήρα. [51]

Στην εργασία [52], που δημοσιεύτηκε το 2004, οι συγγραφείς προτείνουν την εφαρμογή της μεθόδου FEM στον υπολογισμό της πεδιακής καταπόνησης ρυπασμένων συνθετικών μονωτήρων, σε σύγκριση με την αντίστοιχη των καθαρών. Επιπλέον, διερευνάται η δυνατότητα απλοποίησης του μοντέλου με την αφαίρεση κάποιων από τα ενδιάμεσα πτερύγια, όπως σε προηγούμενες εργασίες. Τα μοντέλα μελετώνται σε δύο διαστάσεις, παραλείποντας την επίδραση των αγωγών της γραμμής ή του πυλώνα και με χρήση της αξονικής συμμετρίας των μονωτήρων. Οι προσομοιώσεις έγιναν με το υπολογιστικό πακέτο OPERA-2d.



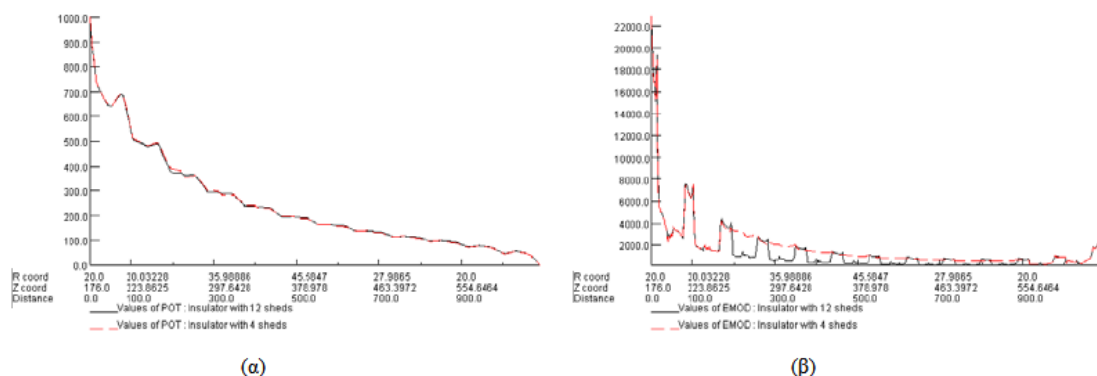
Το πρώτο σετ προσομοιώσεων αφορά σε συνθετικό μονωτήρα 34,5kV με δώδεκα πτερύγια. Για απλοποίηση των υπολογισμών αφαιρέθηκαν τα ενδιάμεσα πτερύγια και διατηρήθηκαν μόνο δύο σε κάθε άκρο (Σχήμα 3-38).



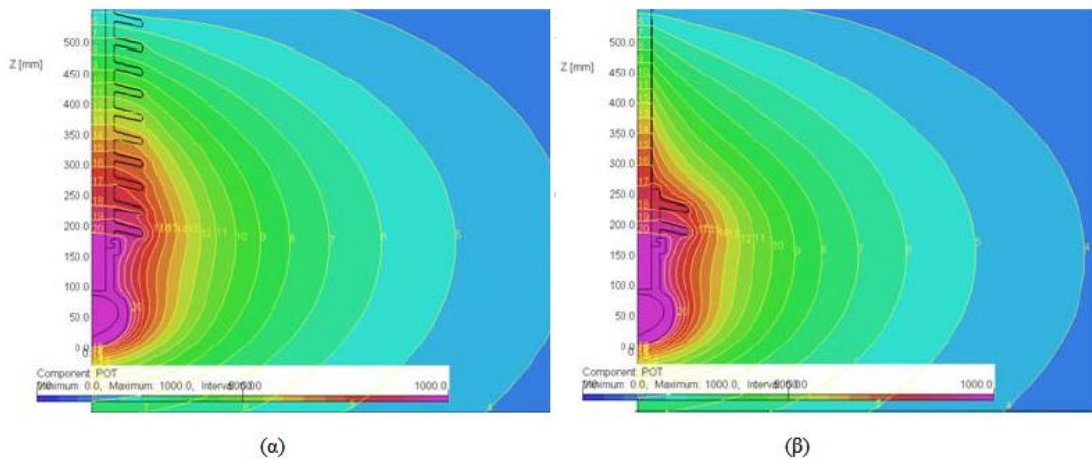
Σχήμα 3-38: (α) Πλήρες και (β) απλοποιημένο μοντέλο συνθετικού μονωτήρα 34,5kV [52]

Θεωρώντας δυναμικό 1kV στο υπό τάση άκρο προέκυψαν οι γραφικές παραστάσεις για την κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα (μήκος ερπυσμού) και για τις δύο περιπτώσεις (Σχήμα 3-39). Παρατηρείται εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων: στην περίπτωση του δυναμικού (Σχήμα 3-39(α)) οι κατανομές ταυτίζονται. Στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου, παρά τη μικρή αναντιστοιχία που παρατηρείται στις περιοχές όπου έχουν παραλειφθεί τα πτερύγια, οι μέγιστες τιμές είναι οι ίδιες.

Στη συνέχεια των προσομοιώσεων θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα λεπτό στρώμα ρύπανσης στην επιφάνεια του μονωτήρα, αγωγιμότητας 40μS. Για το απλοποιημένο μοντέλο, στις περιοχές απ' όπου παραλείφθηκαν τα πτερύγια, το πάχος του στρώματος αυτού θεωρήθηκε διπλάσιο απ' ότι στα πτερύγια που διατηρήθηκαν. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την κατανομή του δυναμικού κοντά στο υπό τάση άκρο φαίνονται στο Σχήμα 3-40. Είναι εμφανής η διαφορά των δύο κατανομών, κάτι που καταδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης της εφαρμογής αυτής της μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό της πεδιακής καταπόνησης σε συνθετικούς μονωτήρες.

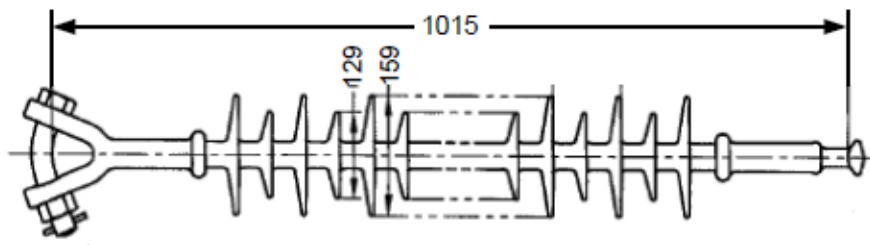


Σχήμα 3-39: Κατανομή (α) του δυναμικού (σε V) και (β) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (V/m) στην επιφάνεια του μονωτήρα. Με μαύρο σημειώνεται η γραφική παράσταση που αφορά στο πλήρες μοντέλο και με κόκκινο στο απλοποιημένο. [52]

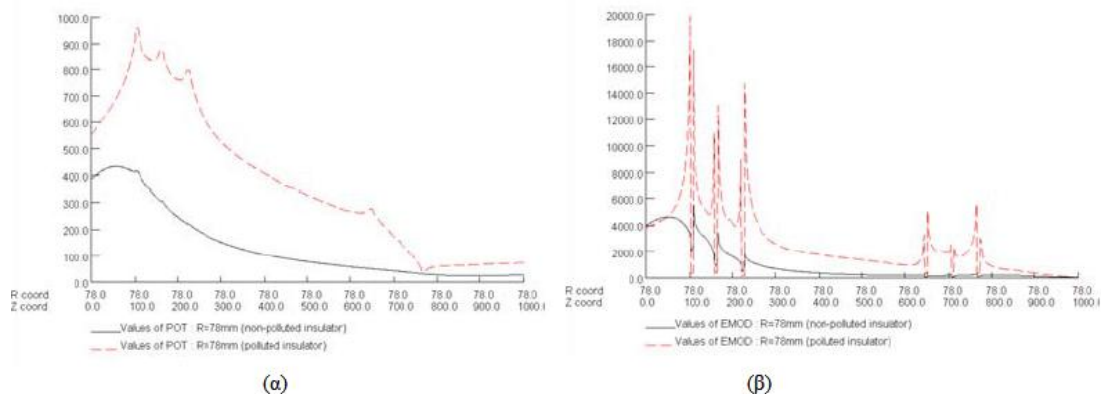


Σχήμα 3-40: Κατανομή του δυναμικού (V) κοντά στο υπό τάση άκρο ρυπασμένου μονωτήρα, (α) πλήρες και (β) απλοποιημένο μοντέλο. [52]

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η κατανομή του πεδίου γύρω από συνθετικό μονωτήρα 69kV με εικοσιένα πτερύγια, το μοντέλο του οποίου απλοποιήθηκε ώστε να περιλαμβάνει δέκα πτερύγια, πέντε σε κάθε πλευρά (Σχήμα 3-41). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, οι οποίες διενεργήθηκαν υπό ιδανικές συνθήκες και υπό συνθήκες ρύπανσης, σύμφωνα με τις παραδοχές που περιγράφηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-42. Επιβεβαιώνονται για άλλη μία φορά η ανομοιομορφία του ηλεκτρικού πεδίου και οι αυξημένη πεδιακή καταπόνηση του υπό τάση άκρου, αλλά και η εξαιρετικά δυσμενής επίδραση της ρύπανσης στη διαμόρφωση του πεδίου. [52]



Σχήμα 3-41: Απλοποιημένο σχέδιο συνθετικού μονωτήρα 69kV (μονάδες: mm) [52]



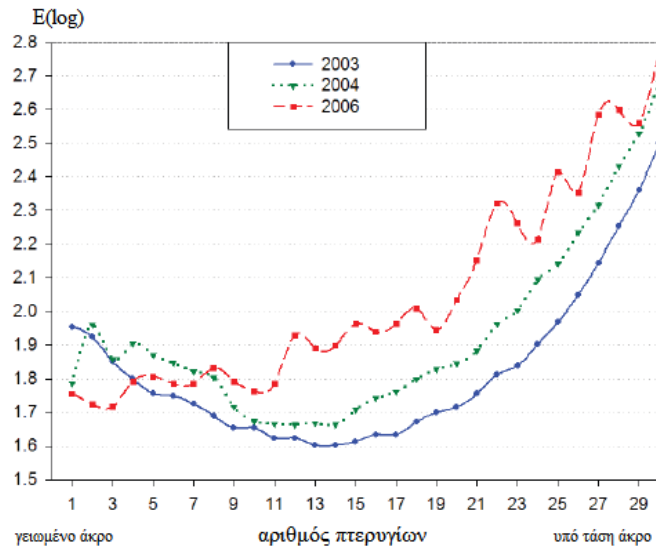
Σχήμα 3-42: Κατανομή (α) δυναμικού και (β) έντασης ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα για ιδανικές συνθήκες (μαύρη γραφική) και ρύπανση (κόκκινη γραφική) [52]

Το 2009 δημοσιεύτηκε από τους I. Ramirez et al. η εργασία [53], η οποία αφορά στον προσδιορισμό των παραγόντων που οδήγησαν σε αποτυχία συνθετικών μονωτήρων εγκατεστημένων σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στο Μεξικό, σε περιοχές με έντονα προβλήματα ρύπανσης. Μεταξύ άλλων μεθόδων (οπτική παρατήρηση, μέτρηση ESSD και NSSD, προσδιορισμός ρεύματος διαρροής) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες υπό τάση οι οποίοι εγκαταστάθηκαν το 1995 και προσομοιώσεις της πεδιακής κατανομής στους ίδιους μονωτήρες υπό ιδανικές συνθήκες και υπό συνθήκες ρύπανσης.

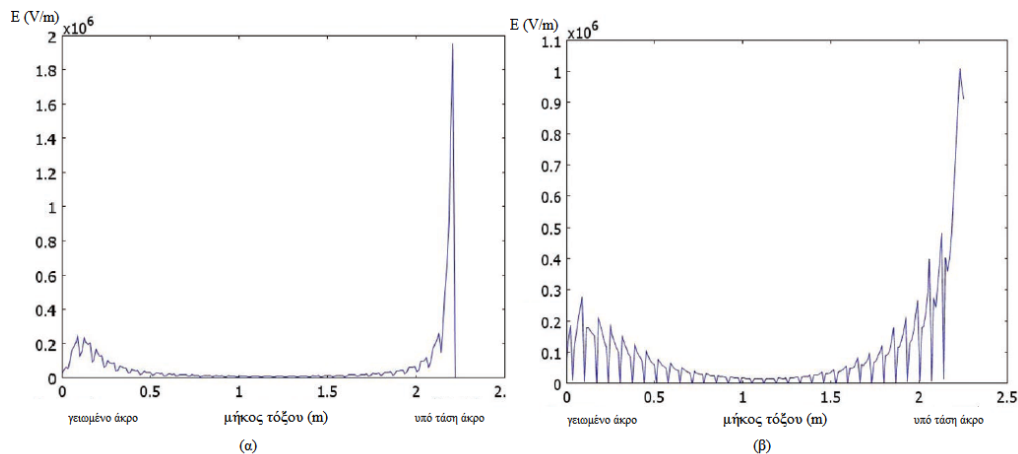
Οι μετρήσεις έγιναν κατά τα έτη 2003, 2004 και 2006. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 3-43. Το 2003, μετά από οκτώ χρόνια λειτουργίας η καμπύλη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι σχετικά ομαλή, ενώ η οπτική επιθεώρηση κατέδειξε σημάδια διάβρωσης του πολυμερούς περιβλήματος, τα οποία όμως αξιολογήθηκαν ως μη σημαντικά. Οι διαταραχές στην κατανομή στο υπό τάση άκρο που παρατηρήθηκαν το 2004 επιβεβαίωσαν την επέκταση της διάβρωσης, ωστόσο οι μονωτήρες κρίθηκαν εκ νέου κατάλληλοι. Μετά από δύο χρόνια, σύμφωνα με την αντίστοιχη γραφική παράσταση, η κατανομή του πεδίου είναι εμφανώς διαταραγμένη, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την οπτική επιθεώρηση. Η διάβρωση πλέον ήταν τόσο εκτεταμένη που είχε αποκαλυφθεί τμήμα του ινώδους πυρήνα. Οι μονωτήρες αυτοί αντικαταστάθηκαν.

Στη συνέχεια της μελέτης οι συγγραφείς, με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου COMSOL Multiphysics που βασίζεται στη μέθοδο FEM, προχώρησαν σε προσομοιώσεις του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μοντέλα των παραπάνω μονωτήρων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-44. Η κατανομή για τις ιδανικές συνθήκες (Σχήμα 3-44(α)) είναι η αναμενόμενη και ομοιάζει με την πειραματική καμπύλη που αντιστοιχεί στο έτος 2003, όπου η επιφάνεια του μονωτήρα βρισκόταν σε καλή κατάσταση. Στο Σχήμα 3-44(β) θεωρήθηκε στρώμα ρύπανσης με αγωγιμότητα  $10^{-6}$ S/m. Παρατηρείται εν μέρει μείωση της μέγιστης τιμής του πεδίου, λόγω της αγωγιμότητας που εισήχθη στο μοντέλο, ωστόσο η καμπύλη πλέον μοιάζει με την κόκκινη καμπύλη στο Σχήμα 3-43. Οι τιμές της πεδιακής έντασης κοντά σε κάθε πτερύγιο είναι πλέον αυξημένες και μια τέτοια κατανομή του πεδίου είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα οδηγήσει σε βλάβες και στην ανάγκη αντικατάστασης των μονωτήρων ή των διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου.

Αποδεικνύεται έτσι πόσο σημαντική είναι η δυνατότητα προσδιορισμού του πεδίου, είτε με μετρήσεις, είτε υπολογιστικά, για την αξιολόγηση του εξοπλισμού σε κρίσιμα σημεία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, γίνεται εμφανές ότι οι προσομοιώσεις μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των υπευθύνων, συμβάλλοντας στην αύξηση της αξιοπιστίας αλλά και στη μείωση του κόστους και της επικινδυνότητας (αφού η μέτρηση του πεδίου απαιτεί χειρισμό του μετρητικού εξοπλισμού από εναερίτη). [53]



Σχήμα 3-43: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στα πρώτα τριάντα περυσία συνθετικού μονωτήρα μετά από χρόνια λειτουργίας υπό συνθήκες ρύπανσης [53]

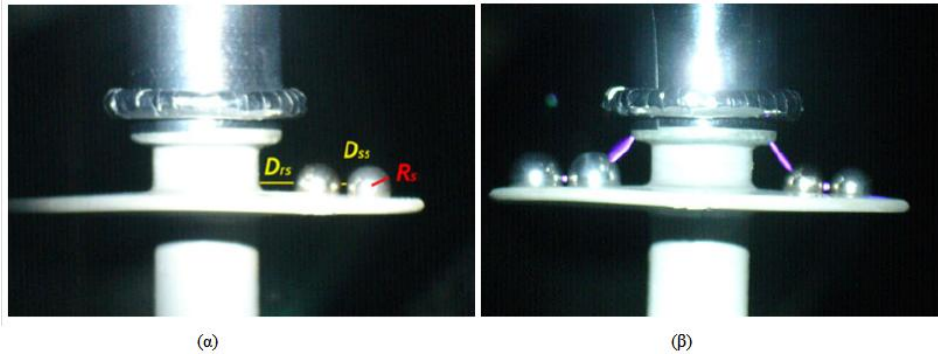


Σχήμα 3-44: Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου υπό ιδανικές συνθήκες (α) και υπό συνθήκες ρύπανσης (β) σε απόσταση 0,5mm από το περίβλημα του μονωτήρα [53]

Στην εργασία [54] οι συγγραφείς συνδυάζουν πειραματικά ευρήματα με προσομοιώσεις βασισμένες στη μέθοδο FEM για τον προσδιορισμό του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια συνθετικών μονωτήρων όπου υπάρχουν σταγόνες νερού. Η πειραματική διάταξη χρησιμοποιείται ώστε να προσδιοριστούν οι συνθήκες διαβροχής, οι οποίες οδηγούν στην εκδήλωση φαινομένου Corona. Τα ευρήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για τον υπολογισμό της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με τη χρήση του λογισμικού FEMM.

Για τη διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε συνθετικός μονωτήρας 13,8kV με τέσσερα περυσία. Για την προσομοίωση των σταγόνων νερού χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα αλουμινένια ημισφαίρια, τα δύο με ακτίνα 0,53cm και τα άλλα δύο με ακτίνα 0,41cm. Η χρήση των μεταλλικών ημισφαιρίων για την αναπαράσταση διαφορετικών συνθηκών διαβροχής είναι αρκετά ακριβής, γιατί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό τους είναι ίση με μηδέν, όπως και στο εσωτερικό των σταγόνων νερού. Οι μεταλλικές σταγόνες τοποθετήθηκαν ανά δύο στην επιφάνεια του τελευταίου περυσίου του μονωτήρα (Σχήμα 3-45(α)) και για

διαφορετικές διαμορφώσεις και αυξανόμενα επίπεδα τάσης προέκυψε ο Πίνακας 3.3, όπου φαίνονται οι τιμές του δυναμικού για το οποίο εκδηλώνεται φαινόμενο corona στην επιφάνεια του μονωτήρα (Σχήμα 3-45(β)).

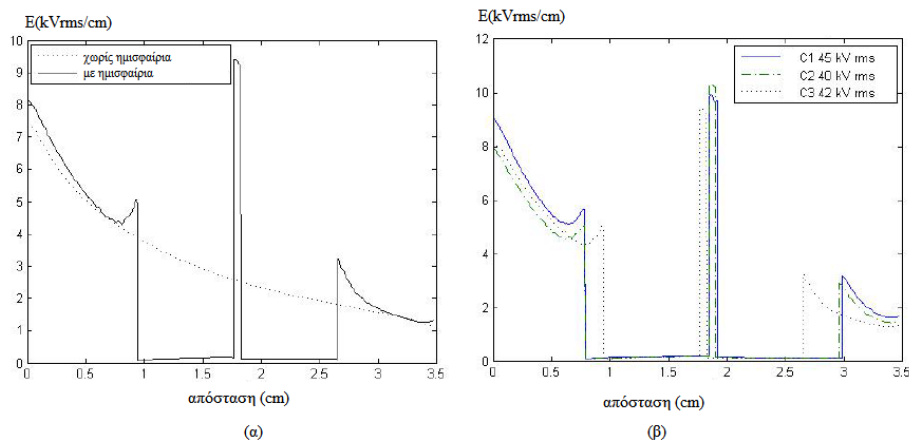


Σχήμα 3-45: (α) Λεπτομέρεια πειραματικής διάταξης και (β) εκδήλωση φαινομένου Corona (45kV εφαρμοζόμενη τάση) [54]

Πίνακας 3.3: Τάση έναυσης Corona για διαφορετικά διάκενα μεταξύ των σφαιρών [54]

Περιπτώσεις	Διάκενο			Τάση έναυσης corona (rms)	
	$D_{ss}$	$D_{rs}$	$R_s$	$V_{ss}$ (Corona μεταξύ σφαιρών)	$V_{rs}$ (Corona μεταξύ μεταλλικού άκρου και πρώτης σφαίρας)
C1	0,075cm	0,8cm	0,53cm	45kV	-
C2	0,06cm	0,8cm	0,53cm	40kV	42kV
C3	0,06cm	0,95cm	0,41cm	42kV	45kV

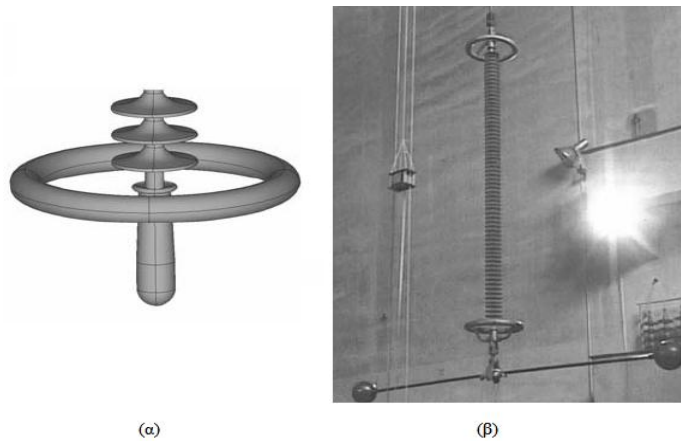
Για τις τρεις περιπτώσεις (C1, C2, C3) η κατανομή της πεδιακής έντασης που υπολογίστηκε αριθμητικά φαίνεται στο Σχήμα 3-46. Στο (α) φαίνεται ξεκάθαρα η ενίσχυση της ανομοιομορφίας του πεδίου λόγω της ύπαρξης των σταγόνων. Στο (β) παρατηρείται ελαφριά μετατόπιση των γραφικών παραστάσεων, λόγω των διαφορετικών γεωμετρικών δεδομένων (Πίνακας 3.3). Σε κάθε περίπτωση όμως οι τιμές του πεδίου σε διαφέρουν πάνω από 1kV/cm μεταξύ τους, ενώ στο σύνολό τους παραμένουν πάνω από το όριο έναυσης εκκενώσεων Corona (4,5kV/cm). [54]



Σχήμα 3-46: Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στις «μεταλλικές σταγόνες» (α) για τάση 42kVrms (με ή χωρίς σταγόνες) και (β) για τις επιμέρους περιπτώσεις παρουσία σταγόνων [54]

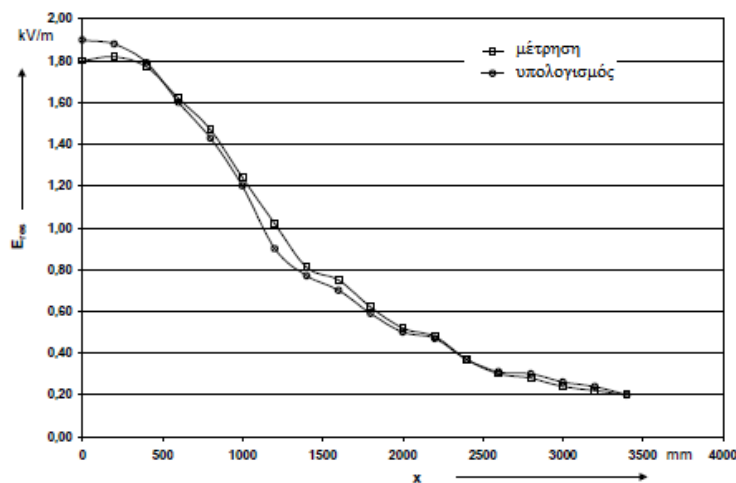
### 3.3.4 Βελτιστοποίηση χαρακτηριστικών

Στην εργασία [55], η οποία δημοσιεύτηκε το 2002, οι συγγραφείς προέβησαν σε υπολογισμό της πεδιακής κατανομής και στη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών συνθετικών μονωτήρων 420kV (Σχήμα 3-47(α)). Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το εμπορικά διαθέσιμο πρόγραμμα ANSYS 5.7. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώθηκαν μετά και τη διεξαγωγή μετρήσεων σε διάταξη ανάρτησης μονωτήρων 420kV σε εργαστήριο υψηλών τάσεων (Σχήμα 3-47(β)).



Σχήμα 3-47: (α) Τρισδιάστατο μοντέλο του μονωτήρα 420kV (άκρο υψηλής τάσης και τοροειδές εξομάλυνσης πεδίου) και (β) διάταξη εργαστηρίου [55]

Η προσομοίωση στο πλήρες μοντέλο του συνθετικού μονωτήρα και οι εργαστηριακές μετρήσεις με τη βοήθεια χωρητικού αισθητήρα (*capacitive probe*) απέδωσαν αποτελέσματα τα οποία βρίσκονται σε εξαιρετική συμφωνία μεταξύ τους, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3-48. Επιβεβαιώνεται έτσι η ορθότητα της χρήσης της μεθόδου FEM. Επιπλέον, αποδεικνύεται για άλλη μία φορά ότι οι περιοχές πλησίον του άκρου υψηλής τάσης υφίστανται τη χειρότερη πεδιακή καταπόνηση, άρα εκεί πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη σημασία, λόγω κινδύνου εκδήλωσης φαινομένου Corona, παρεμβολών RF από τα μεταλλικά μέρη και μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα 3-48: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα σε απόσταση 1m από αυτόν (κατόπιν μέτρησης και υπολογισμού με FEM)[55]



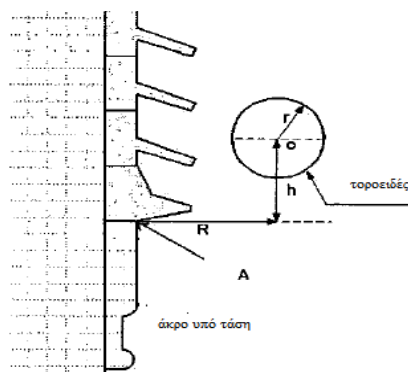
Επόμενο βήμα των συγγραφέων αποτέλεσε η εξέταση της επίδρασης των εξής παραγόντων στη διαμόρφωση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου:

- i. Απόσταση του τελευταίου περυγίου από το μεταλλικό τερματισμό (πλευρά υψηλής τάσης)- a
- ii. Απόσταση μεταξύ γειτονικών περυγίων- c
- iii. Σχέση μεταξύ απόστασης και προβολής (*overhang*) των περυγίων- s/p
- iv. Παράμετροι του τοροειδούς: προβολή πάνω από το μεταλλικό άκρο- Δ, ακτίνα- D<sub>a</sub>, ακτίνα σωλήνα- d)

Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζονται από το πρότυπο IEC60815 [19].

Οι προσομοιώσεις αυτές, οι οποίες έγιναν με στόχο τη βελτιστοποίηση του προφίλ ενός συνθετικού μονωτήρα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τη μεγαλύτερη και πιο κρίσιμη επίδραση στη διαμόρφωση του πεδίου έχουν οι παράμετροι του τοροειδούς. Τα χαρακτηριστικά που αφορούν στο πολυμερές περίβλημα και στα περύγια ειδικότερα ασκούν αμελητέα επιρροή, αν και επιβεβαιώθηκαν ότι τα όρια τα οποία θέτει το IEC60815 είναι τα βέλτιστα. Τέλος, οι προσομοιώσεις κατέδειξαν ως βέλτιστο σχεδιασμό τοροειδούς για επίπεδο τάσης 420kV ακτίνα D<sub>a</sub> ίση με 350mm και d ίση με 90 mm και προβολή Δ ίση με 90mm. Το τελευταίο συμπέρασμα συμφωνεί με τα ευρήματα της εργασίας [36] που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2.1.1. [55]

Άλλη μία εργασία πάνω στη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου με τη χρήση της μεθόδου FEM δημοσιεύτηκε το 2004 από τους W. Sima et al. [56] Οι συγγραφείς, με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου FEMLAB, εξέτασαν την επίδραση που έχει η μεταβολή των παραμέτρων του τοροειδούς (ακτίνα δακτυλίου- R, ακτίνα σωλήνα- r, απόσταση από μεταλλικό ακροδέκτη- h) στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο τριπλής ένωσης, A (Σχήμα 3-49).



Σχήμα 3-49: Γεωμετρία του συνθετικού μονωτήρα με τοροειδές, όπως χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις [56]

Η βελτιστοποίηση που επιχειρείται σε αυτή την εργασία βασίζεται στον υπολογισμό της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου έτσι ώστε αυτή να διατηρείται κάτω από το όριο εκδήλωσης εκκενώσεων Corona ( $2,2\text{kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ ). Με παραμέτρους εισόδου γεωμετρικά δεδομένα, ιδιότητες υλικών και οριακές συνθήκες το πρόγραμμα, χρησιμοποιώντας συναρτήσεις βελτιστοποίησης του MATLAB, ελαχιστοποιεί την εξίσωση:

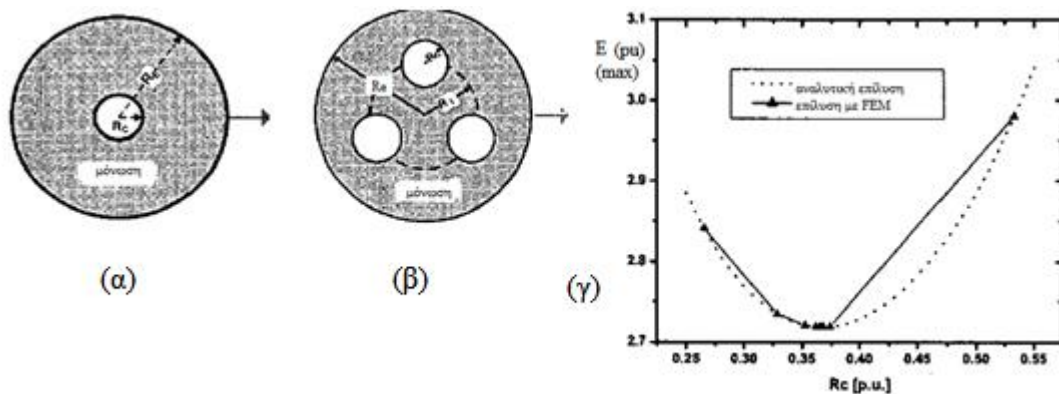
$$-\nabla \cdot ((\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r / T) \nabla V - J_e) = \rho_0 / T \quad 3.22$$

η οποία ισοδυναμεί με την εξίσωση Laplace (2.15) εάν οι ποσότητες  $\rho_0$ ,  $\sigma$  και  $J_e$  θεωρηθούν αμελητέες ή μηδέν, ενώ  $T = \frac{1}{2\pi f}$ , όπου  $f = 60\text{Hz}$  (για τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας).

Για επιβεβαίωση η μέθοδος εφαρμόστηκε πρώτα σε δύο προβλήματα, για ένα εκ των οποίων είναι γνωστή η αναλυτική λύση, ενώ για το άλλο είναι ήδη γνωστές οι βέλτιστες τιμές. Το πρώτο πρόβλημα περιλαμβάνει ένα ομοαξονικό μονοφασικό καλώδιο (Σχήμα 3-50(α)), όπου η σχέση που συνδέει τη μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου με τις ακτίνες  $R_E, R_C$  είναι η εξής:  $E_{\max} = \frac{V}{R_C \ln(\frac{R_E}{R_C})}$ . Κανονικοποιώντας με

$$E_{\max} = \frac{V}{R_C \ln(\frac{R_E}{R_C})}$$

$R_E = 1\text{pu}$  και  $V = 1\text{pu}$  προκύπτουν οι γραφικές που φαίνονται στο Σχήμα 3-50(γ). Η συμφωνία τους επιβεβαιώνει τη μέθοδο. Ομοίως για το τριφασικό καλώδιο (Σχήμα 3-50(β)), όπου είναι ήδη γνωστές οι τιμές της βελτιστοποίησης τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν την ορθότητα της μεθόδου.



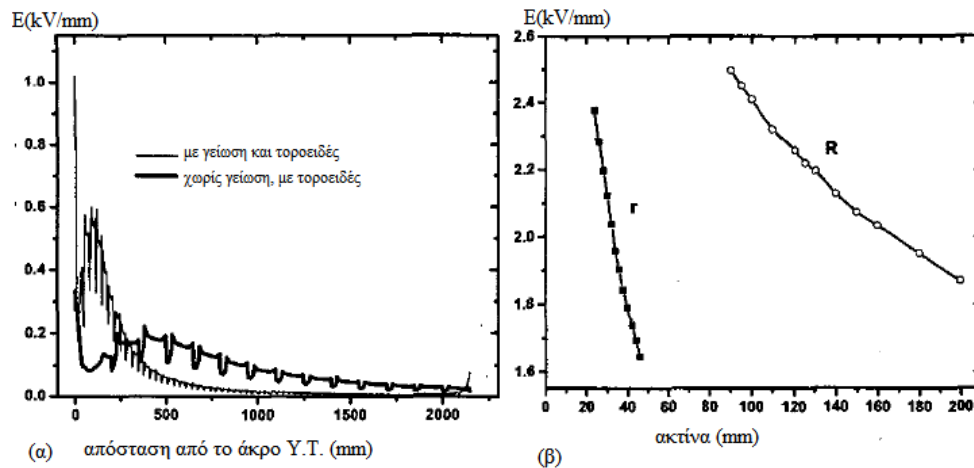
Σχήμα 3-50: Ομοαξονικά καλώδια: (α) μονοφασικό και (β) τριφασικό και (γ) σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για την περίπτωση (α) [56]

Το πρώτο στάδιο των προσομοιώσεων στο μοντέλο του μονωτήρα (Σχήμα 3-49) συνίσταται στην εξέταση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του τοροειδούς στην τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη σημείο τριπλής ένωσης, A, αγνοώντας προς το παρόν της επίδραση της γείωσης (το πεδίο γύρω από το μονωτήρα είναι σχεδόν ομοιογενές). Προέκυψε ότι η τιμή αυτή μειώνεται όσο αυξάνεται η ακτίνα  $r$  του σωλήνα, αυξάνεται για κάποιες τιμές της ακτίνας  $R$ , ενώ επηρεάζεται και από το ύψος  $h$ . Οι βέλτιστες τιμές που υπολογίστηκαν για συνθετικό μονωτήρα 230kV είναι οι εξής:  $R=90\text{mm}$ ,  $h=23\text{mm}$ ,  $r=24\text{mm}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της γείωσης και διατηρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τοροειδούς που προέκυψαν παραπάνω προκύπτει ότι, παρότι η κατανομή είναι πολύ πιο ανομοιόμορφη, η μέγιστη τιμή της πεδιακής καταπόνησης κοντά στο μονωτήρα είναι κάτω από το όριο έναυσης εκκενώσεων Corona (Σχήμα 3-51(α)). Αντίθετα, στην επιφάνεια του τοροειδούς η τιμή αυτή είναι 2,5kV/mm, πάνω από το όριο. Περαιτέρω διερεύνηση φανερώνει τη σχέση της ακτίνας του σωλήνα,  $r$  και της ακτίνας του δακτυλίου,  $R$ , με την πεδιακή ένταση στην επιφάνεια του τοροειδούς (Σχήμα 3-51(β)). Οι τιμές που προκύπτουν τελικά είναι:  $R=100\text{mm}$ ,



$h=30\text{mm}$ ,  $r=38\text{mm}$  και οι τιμές του πεδίου είναι:  $0,59\text{kV/mm}$  στο μονωτήρα και  $1,84\text{kV/mm}$  στο τοροειδές. [56]



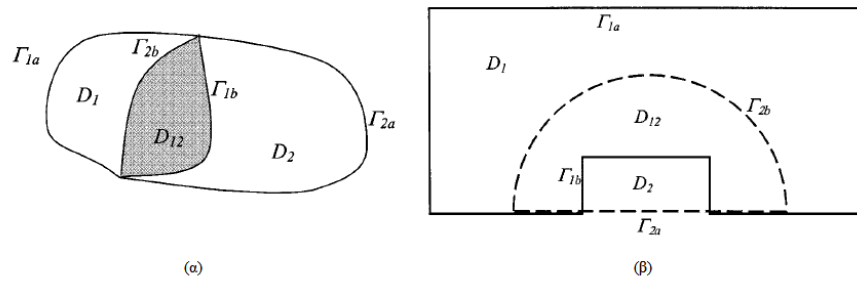
Σχήμα 3-51: (α) Κατανομή πεδιακής έντασης με/χωρίς γείωση και (β) επίδραση γεωμετρικών χαρακτηριστικών στο πεδίο στην επιφάνεια του τοροειδούς [56]

### 3.3.5 Η μέθοδος κατάτμησης του χωρίου (Domain Decomposition Method)

Η μεθοδολογία υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από συνθετικούς μονωτήρες Υ.Τ. με πεπερασμένα στοιχεία που παρουσιάζεται στην εργασία [57], η οποία δημοσιεύτηκε το 2002, βασίζεται στη μέθοδο κατάτμησης του χωρίου (*domain decomposition method*). Η μέθοδος αυτή συνίσταται στη μετατροπή ενός ευρύτερου προβλήματος σε μικρότερα και διαχειρίσιμα προβλήματα.

Η γενική ιδέα είναι η εξής: Το προς ανάλυση χωρίο  $D_a$  χωρίζεται σε υποχωρία, έστω  $D_1$  και  $D_2$ , τα οποία αλληλεπικαλύπτονται στην περιοχή  $D_{12}$  (Σχήμα 3-52(α)). Το  $D_a$  οριοθετείται από τα  $\Gamma_{1a} \cup \Gamma_{2a}$ , όπου οι οριακές συνθήκες είναι γνωστές. Τα υποχωρία  $D_1$  και  $D_2$  έχουν όρια τα  $\Gamma_{1a} \cup \Gamma_{1b}$  και  $\Gamma_{2a} \cup \Gamma_{2b}$  αντίστοιχα. Η επίλυση ξεκινά με τη λύση του προβλήματος συνοριακών τιμών για το υποχωρίο  $D_1$  με εφαρμογή των γνωστών οριακών συνθηκών για το  $\Gamma_{1a}$  και θεωρώντας αυθαίρετες τιμές για το  $\Gamma_{1b}$ . Έπειτα, επιλύεται το πρόβλημα συνοριακών τιμών για το υποχωρίο  $D_2$ , με γνωστές τις οριακές συνθήκες για το  $\Gamma_{2a}$  και χρησιμοποιώντας την πεδιακή τιμή που υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα για το  $\Gamma_{2b}$ . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

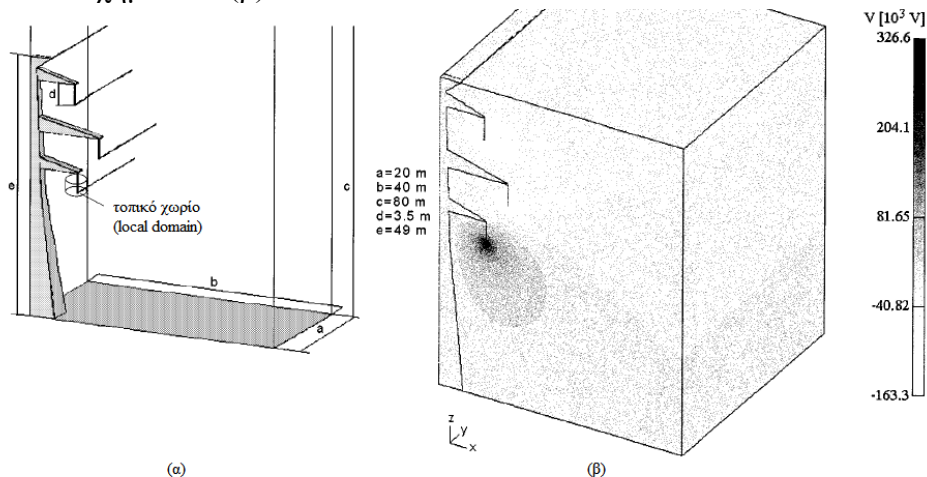
Στην εργασία αυτή η προαναφερθείσα διαδικασία τροποποιήθηκε. Σύμφωνα με το Σχήμα 3-52(β), θεωρήθηκε ότι το μοντέλο της δομής στο χωρίο  $D_1 \cup D_{12}$  είναι το μεγάλης κλίμακας μοντέλο όλου του προβλήματος (*καθολικό χωρίο-global domain*), ενώ το υποχωρίο  $D_2 \cup D_{12}$  περιλαμβάνει το υποπρόβλημα όπου μας ενδιαφέρει να βρεθεί η πεδιακή κατανομή (*τοπικό χωρίο-local domain*). Τα χωρία αυτά συμπίπτουν στο  $D_{12}$  (*mortar domain*) (Σχήμα 3-52(β)). Γενικά, τα πλέγματα των πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι συνδεδεμένα στα σύνορα  $\Gamma_{1b}$  και  $\Gamma_{2b}$ .



Σχήμα 3-52: (α) Χωρισμός του προς ανάλυση χωρίου σε υποχωρία και (β) χωρισμός χωρίου σε καθολικά (*global*) και τοπικά (*local*) χωρία [57]

Η τροποποιημένη επαναληπτική μέθοδος ξεκινά με την επίλυση του προβλήματος συνοριακών τιμών για όλο το χωρίο  $D_a = D_1 \cup D_{12} \cup D_2$ , με το αρχικό πλέγμα να ενώνεται εκατέρωθεν των επιμέρους συνόρων, αλλά με εξαιρετικά απλοποιημένη τη δομή που περιλαμβάνεται. Το βήμα αυτό αποσκοπεί στον υπολογισμό των αρχικών οριακών συνθηκών για τα  $\Gamma_{1b}$  και  $\Gamma_{2b}$ , αντί για τη χρήση αυθαίρετων τιμών. Μετά την αρχικοποίηση, το πρόβλημα μπορεί να λυθεί επαναληπτικά με διαφορετικό πλέγμα σε κάθε υποχωρίο. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά ο αριθμός επαναλήψεων.

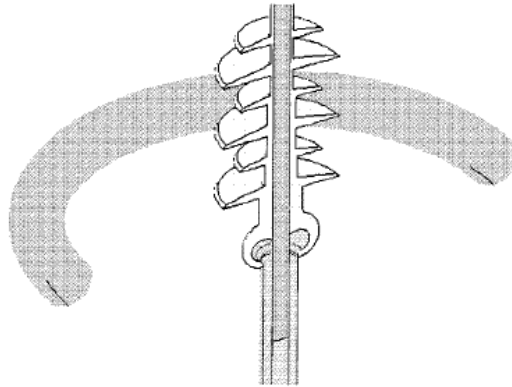
Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αποδεικνύεται με τη χρήση της για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε συνθετικούς μονωτήρες σε γραμμές μεταφοράς 400kV. Το χωρίο επίλυσης αποτελείται από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το οποίο περιλαμβάνει τον πυλώνα, τους μονωτήρες και τους αγωγούς φάσης και προστασίας (Σχήμα 3-53(α)). Οι μονωτήρες μοντελοποιούνται παραλείποντας το πολυμερές περίβλημά τους, ως ράβδοι διηλεκτρικού με ισοδύναμη επιτρεπτότητα. Λόγω συμμετρίας εξετάζεται μόνο η τομή του μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-53(β)



Σχήμα 3-53: (α)Καθολικό (*global*) χωρίο και (β)κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του [57]

Το τοπικό χωρίο περικλείεται από μία κυλινδρική επιφάνεια ακτίνας 1m. Η περιοχή επικάλυψης συνίσταται σε ένα παραλληλεπίπεδο μέσα στον κύλινδρο. Η τομή των χωρίων αυτών μοιάζει με το Σχήμα 3-52(β). Στην περίπτωση του τοπικού

χωρίου, ο μονωτήρας πλέον μοντελοποιείται πλήρως, με το περίβλημα και τα περυσία του (Σχήμα 3-54).

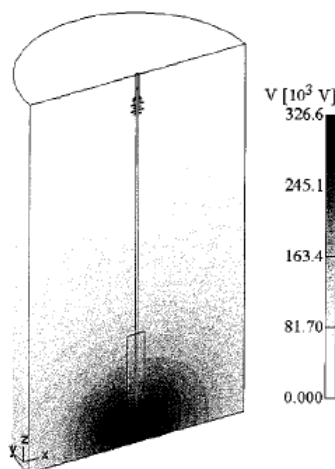


Σχήμα 3-54: Λεπτομέρεια του μονωτήρα με τοροειδές εξομάλυνσης [57]

Η κατανομή του δυναμικού στο σύνορο του τοπικού χωρίου ( $\Gamma_{2a}$  και  $\Gamma_{2b}$ ) ορίζεται σε κόμβους πεπερασμένων στοιχείων κοντά στο όριο. Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί με βάση την κατανομή δυναμικού του καθολικού χωρίου, που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι ο εξής: Αρχικά, εντοπίζονται οι πραγματικές συντεταγμένες των κόμβων στο τοπικό χωρίο,  $x_{kl}(n_{li})$ . Έπειτα, οι συντεταγμένες αυτές μετασχηματίζονται ως προς το καθολικό χωρίο. Με τη χρήση αυτών των συντεταγμένων ( $x_{kg}$ ), πρέπει να βρεθεί το πεπερασμένο στοιχείο ( $g_j$ ) που περιέχει το σημείο  $x_{kg}$  στο καθολικό χωρίο. Αφού βρεθεί το  $g_j$ , το δυναμικό  $\varphi_{kg}$  υπολογίζεται με τη χρήση κομβικών δυναμικών και συναρτήσεων μορφής. Η τιμή αυτή πλέον ανατίθεται στον κόμβο του συνόρου του τοπικού χωρίου. Η επαναληπτική μέθοδος σταματά όταν ισχύει:

$$\varphi_{err} = \text{Max} \left( \left| \frac{\varphi_{\kappa}^{(i)} - \varphi_{\kappa}^{(i-1)}}{\varphi_{\kappa}^{(i-1)}} \right| \right) < \text{err} \quad 3.23$$

Η κατανομή που προκύπτει για το μονωτήρα (τοπικό χωρίο) φαίνεται στο Σχήμα 3-55.



Σχήμα 3-55: Κατανομή δυναμικού στο τοπικό χωρίο [57]



## Κεφάλαιο 4

### Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

#### 4.1. Το πρόγραμμα OPERA

##### 4.1.1. Γενικά

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας διενεργήθηκαν προσομοιώσεις την πεδιακής κατανομής αφ' ενός σε θεωρητικό μοντέλο ήδη δημοσιευμένης εργασίας, αφ' ετέρου σε μοντέλα συνθετικών μονωτήρων των εναέριων γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης του ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 14R1 (32-bit) του λογισμικού OPERA 2-d, της εταιρείας Vector Fields Software. Οι προσομοιώσεις έγιναν σε φορητό υπολογιστή (laptop) Fujitsu AMILO με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά υπολογιστή στον οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις

Λειτουργικό σύστημα	Windows 7 Professional
Τύπος λειτουργικού συστήματος	64-bit
Επεξεργαστής	Intel® Core™2 Duo CPU P7450 @2.13GHz 2.13GHz
Μνήμη RAM	6,00 GB
Κάρτα γραφικών	NVIDIA GeForce GT 240M

Το Opera 2-d (*Operating environment for Electromagnetic Research Analysis-Λειτουργικό Περιβάλλον για Ηλεκτρομαγνητική Έρευνα και Ανάλυση*) είναι μια σουίτα προγραμμάτων που αφορούν στην ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε δύο διαστάσεις. Περιλαμβάνει επίσης προγράμματα για ανάλυση των θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων που προκύπτουν λόγω των εφαρμοζόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τη φύση αυτών των πεδίων χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνουν την εξίσωση του Poisson, την εξίσωση Helmholtz, την εξίσωση διάχυσης κ.α. και η επίλυσή τους αποτελεί βασικό κομμάτι του σχεδιασμού στις εφαρμογές των στατικών μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων και των χρονομεταβλητών μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων (σε χαμηλές συχνότητες).

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (*FEM*). Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που απαιτούνται προκειμένου να γίνει η ανάλυση του υπό εξέταση συστήματος, η εισαγωγή τους γίνεται μέσω ενός ισχυρού διαδραστικού προ-επεξεργαστή (*pre-processor*). Μέσω του παρεχόμενου γραφικού περιβάλλοντος το μοντέλο, το οποίο μπορεί να περιγράφεται είτε σε

καρτεσιανές είτε σε κυλινδρικές πολικές (*αξονοσυμμετρικές- axi-symmetric*) συντεταγμένες, χωρίζεται σε ένα σύνολο (*πλέγμα-mesh*) επιμέρους τριγωνικών στοιχείων. Όταν ολοκληρωθεί η προετοιμασία του μοντέλου γίνεται ο υπολογισμός της λύσης με τη χρήση του επιλεγμένου προγράμματος ανάλυσης. Η λύση προσδιορίζεται μέσω διαδοχικών επαναλήψεων, λαμβάνοντας υπόψη τις μη γραμμικότητες του μοντέλου, εφόσον υπάρχουν και έχουν προσδιοριστεί κατά την προετοιμασία (προ-επεξεργασία). Όταν ολοκληρωθεί η επίλυση, ο χρήστης αποκτά πρόσβαση στα αποτελέσματα μέσω του μετ-επεξεργαστή (*post-processor*). Μέσω του μετ-επεξεργαστή υπάρχει η δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων (δυναμικό, ρεύμα, ένταση μαγνητικού/ηλεκτρικού πεδίου, δύναμη, θερμοκρασία κ.α.). Επίσης γίνεται και υπολογισμός των σφαλμάτων που προκύπτουν λόγω της προσεγγιστικής φύσης της λύσης, ώστε ο χρήστης να προβεί στις κατάλληλες διορθώσεις που θα εξασφαλίσουν την επιθυμητή ακρίβεια.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως η επίλυση ενός μοντελοποιημένου συστήματος με το Opera-2d αποτελείται από τρεις φάσεις: την προετοιμασία των δεδομένων (προ-επεξεργασία), την ανάλυσή τους και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων (μετ-επεξεργασία). Η εκκίνηση των προγραμμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε μία από αυτές της φάσεις γίνεται μέσω του φυλλομετρητή Opera Manager. Παρακάτω επιχειρείται μια αναλυτικότερη παρουσίαση των αρχών που διέπουν τη λειτουργία του Opera.[58, 59]

#### 4.1.2. Προ-επεξεργασία

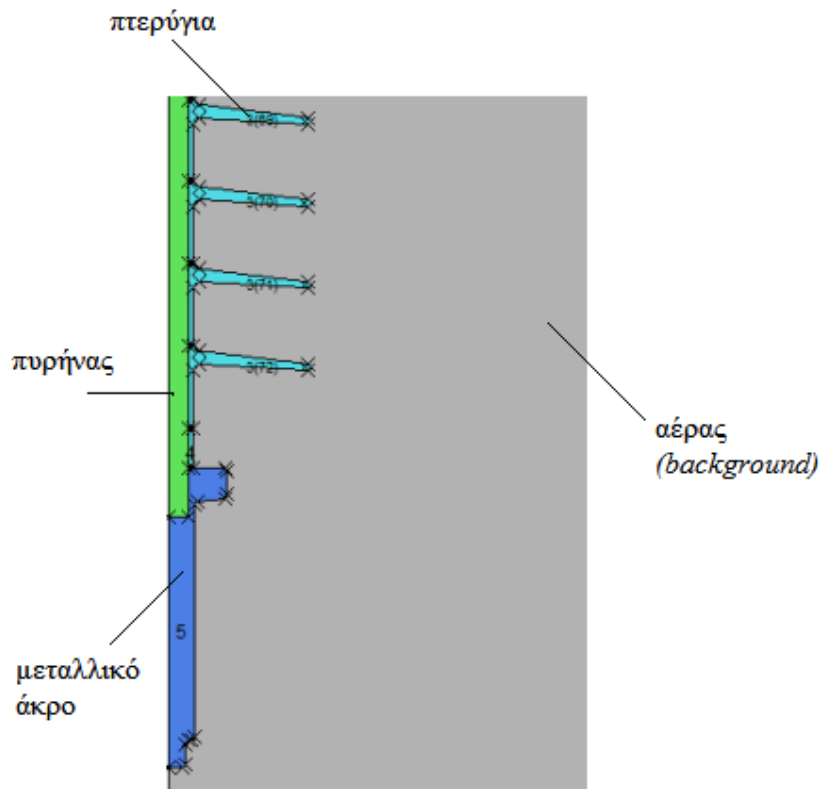
Ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρομαγνητικών συσκευών μπορούν να αναπαρασταθούν μέσω ενός διδιάστατου μοντέλου, εφόσον εμπίπτουν σε κάποια από τις παρακάτω κατηγορίες:

- συμμετρικά εκ περιστροφής: δεν υπάρχει συνιστώσα του πεδίου στην οριζόντια διεύθυνση και η κατανομή του πεδίου είναι η ίδια για κάθε αξονική τομή.
- μακριά ως προς μία διάσταση, με ομοιόμορφη τομή κατά μήκος της. Στις διατάξεις αυτές είναι δεκτή η παραδοχή ότι στο μεγαλύτερο μέρος του μήκους η κατανομή του πεδίου στο εσωτερικό δεν αλλάζει και δεν υπάρχει συνιστώσα παράλληλη ως προς τον μεγάλο άξονα.

Η γεωμετρία της προς ανάλυση διάταξης στο Opera-2d στον προ-(και στο μετ-) επεξεργαστή παρουσιάζεται ως ένα σύνολο πολυγωνικών περιοχών στο διδιάστατο επίπεδο. Μία περιοχή αποτελεί το υπόβαθρο (*background*), η οποία καλύπτει όλο το χώρο που καταλαμβάνει το μοντέλο. Οι υπόλοιπες περιοχές αποτελούνται από μη επικαλυπτόμενα πολύγωνα, τα οποία ορίζουν τα υπόλοιπα υλικά του μοντέλου. Για παράδειγμα, στο μοντέλο ενός συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης οι επιμέρους περιοχές είναι οι εξής (Σχήμα 4-1):

- ο χώρος γύρω από το μονωτήρα (αέρας)
- οι μεταλλικοί τερματισμοί
- το πολυμερικό περίβλημα με τα πτερύγια και
- ο πυρήνας.

Για κάθε περιοχή η κατασκευή που πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα. Οι περιοχές μπορεί να είναι τετράπλευρα ή, στη γενική περίπτωση, πολύγωνα. Το πλέγμα στο εσωτερικό των τετραπλεύρων κατασκευάζεται με διαίρεση του χώρου σε μοναδιαία τετράγωνα, επομένως στην περίπτωση αυτή αποτελεί μία απλή και προβλέψιμη διαδικασία. Στην περίπτωση των πολυγώνων, η κατασκευή του πλέγματος γίνεται με εφαρμογή της τριγωνοποίησης Delauney. Όπου είναι απαραίτητο γίνεται προσθήκη κόμβων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται μεγέθη στοιχείων, τα οποία μεταβάλλονται ομαλά κατά μήκος των περιοχών, αλλά και σχημάτων που ομοιάζουν κατά το δυνατό με ισόπλευρα τρίγωνα. [58]



Σχήμα 4-1: Τμήμα μοντέλου συνθετικού μονωτήρα 400kV

#### 4.1.3. Ανάλυση

Αφού ξεκινήσει η ανάλυση, δεν απαιτείται περαιτέρω παρέμβαση από το χρήστη. Το πρόγραμμα «παράγει» έγγραφα τα οποία περιέχουν αντίγραφα των δεδομένων και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθώς και αρχεία καταγραφής. Η σουίτα Opera-2d περιλαμβάνει διαφορετικά προγράμματα ανάλυσης, τα οποία διαβάζουν τα αρχεία που προκύπτουν από τον προ- και το μετ- επεξεργαστή, και με τη σειρά τους δημιουργούν αρχεία αποτελεσμάτων. Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι ρουτίνες OPERA-2d/ST (*Static Field Analysis Program- πρόγραμμα ανάλυσης στατικού πεδίου*) και OPERA-2d/AC (*Steady-state ac Analysis Program- πρόγραμμα ανάλυσης εναλλασσόμενου πεδίου στη μόνιμη κατάσταση*). Άλλα προγράμματα αφορούν σε μεταβατική ανάλυση (OPERA-2d/TR), ανάλυση μαγνήτισης (OPERA-2d/DM) κ.α.. Συμπληρωματικά ως προς τα

προαναφερθέντα, υπάρχει και η επιλογή Lossy Dielectric (Opera-2d/LD), η οποία επιτρέπει τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς διατάξεων οι οποίες αποτελούνται από υλικά με αγώγιμες και διηλεκτρικές ιδιότητες, όπως συμβαίνει στις διατάξεις μόνωσης.

Η επίλυση με τον OPERA-2d/ST solver, δηλαδή η επίλυση του στατικού ή ημιστατικού πεδίου περιλαμβάνει αρχικά την επίλυση του προβλήματος ροής ρεύματος, τα αποτελέσματα του οποίου χρησιμοποιούνται 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 πυκνότητα της ηλεκτρικής ροής  $\vec{D}$  με την πυκνότητα φορτίου  $\rho$  έχουν ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, ωστόσο θα επαναληφθούν και εδώ:  $\vec{E} = -\nabla V$  (2.3) και  $\nabla \vec{D} = \rho$  (2.7). Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.3 και 2.7 προκύπτει η εξίσωση Poisson για την περιγραφή του ηλεκτροστατικού δυναμικού με τη χρήση της διηλεκτρικής σταθεράς (επιτρεπτότητας)  $\epsilon$ :  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  (2.13) ή ισοδύναμα:  $\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho$  (2.15). Το λογισμικό καθορίζει εάν το μοντέλο περιέχει υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα, έτσι ώστε να επιλύσει την ακόλουθη εξίσωση ροής ρεύματος, επιπρόσθετα με την εξίσωση Poisson:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad 4.1$$

όπου με  $\sigma$  συμβολίζεται η αγωγιμότητα και με  $\vec{J}$  η πυκνότητα ρεύματος:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad 4.2$$

Σε χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα (αρμονική ανάλυση ac) θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν επαγωγικά ρεύματα, το πρόγραμμα επιλύει την εξίσωση:

$$\nabla \cdot \epsilon_c \nabla V = 0 \quad 4.3$$

για την οποία ισχύει:

$$\epsilon_c = \epsilon_0 \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega} \quad 4.4$$

όπου  $\epsilon_c$  είναι η μιγαδική επιτρεπτότητα,  $\epsilon_r$  είναι η σχετική επιτρεπτότητα,  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά (επιτρεπτότητα) του κενού,  $\omega = 2\pi f$  η γωνιακή συχνότητα και  $f$  η συχνότητα (στην περίπτωση αυτής της εργασίας  $f = 50\text{Hz}$ ).[58-60]

#### 4.1.4. Μετ-επεξεργασία

Ο προ- και μετ- επεξεργαστής (Opera-2d/PP) μπορεί να διαβάσει τα αρχεία αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα προγράμματα ανάλυσης, να παρουσιάσει και να επεξεργαστεί τις λύσεις. Τα αποτελέσματα συνίστανται στις κομβικές τιμές του δυναμικού και στις τιμές της πυκνότητας ρεύματος, πυκνότητας φορτίου, επιτρεπτότητας ή διαπερατότητας σε κάθε στοιχείο. Κάθε ποσότητα που περιγράφει το πεδίο (δυναμικό, ένταση, πυκνότητα ροής, πυκνότητα ρεύματος κ.α.) μπορεί να αναπαρασταθεί είτε ως σημειακές τιμές, είτε ως κατανομή κατά μήκος μίας ευθείας, είτε ως διάγραμμα περιοχών (*contour plot*). Περαιτέρω επεξεργασία μπορεί να αποτελεί η ολοκλήρωση κατά μήκος γραμμών ή σε περιοχές για τον υπολογισμό δυνάμεων, ενεργειών κ.α..[58]



## 4.2. Προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων

### 4.2.1. Γενικά

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας υπήρξε η μελέτη της πεδιακής κατανομής συνθετικών μονωτήρων Υψηλής Τάσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (*FEM*).

Όπως ήδη έχει αναφερθεί παραπάνω, η μέθοδος *FEM* δεν ενδείκνυται για εφαρμογή σε προβλήματα ανοιχτών συνόρων, όπως το παρόν. Για την άρση αυτού του περιορισμού και σύμφωνα και με τα όσα έχουμε ήδη αναφέρει στο δεύτερο κεφάλαιο, επελέγη η «τεχνητή» οριοθέτηση του χώρου γύρω από το μοντέλο προς προσομοίωση και ο ορισμός του δυναμικού στο σύνορο ίσο με μηδέν. Οι διαστάσεις του περιβάλλοντος χώρου δεν επελέγησαν αυθαίρετα. Αντίθετα, αυτές προσδιορίστηκαν μετά από διαδοχικές προσομοιώσεις στο μοντέλο με τα περισσότερα πτερύγια. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται παρακάτω, στην παράγραφο 4.2.2.

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η θεμελίωση της ορθότητας της μεθόδου. Αυτό επιτεύχθηκε χάρη στη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του μοντέλου της εργασίας [36] με *FEM* με τα αποτελέσματα των ίδιων των συγγραφέων, τα οποία προέκυψαν με τη μέθοδο *BEM*. Ήδη τα αποτελέσματα αυτά έχουν αναλυθεί στην παράγραφο 3.2.1.1. Στο ίδιο μοντέλο, μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων επίλυσης *OPERA-2d/ST* και *OPERA-2d/AC*, διαπιστώθηκε η καταλληλότητα χρήσης του δεύτερου επιλύτη (*solver*) έναντι του πρώτου για την περιγραφή του ηλεκτρικού πεδίου που οφείλεται σε τάση βιομηχανικής συχνότητας στη μόνιμη κατάσταση. Τέλος, με τη χρήση του *OPERA-2d/AC* διενεργήθηκαν προσομοιώσεις για ρυπασμένο μονωτήρα. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν το αντικείμενο της ενότητας 4.2.3.

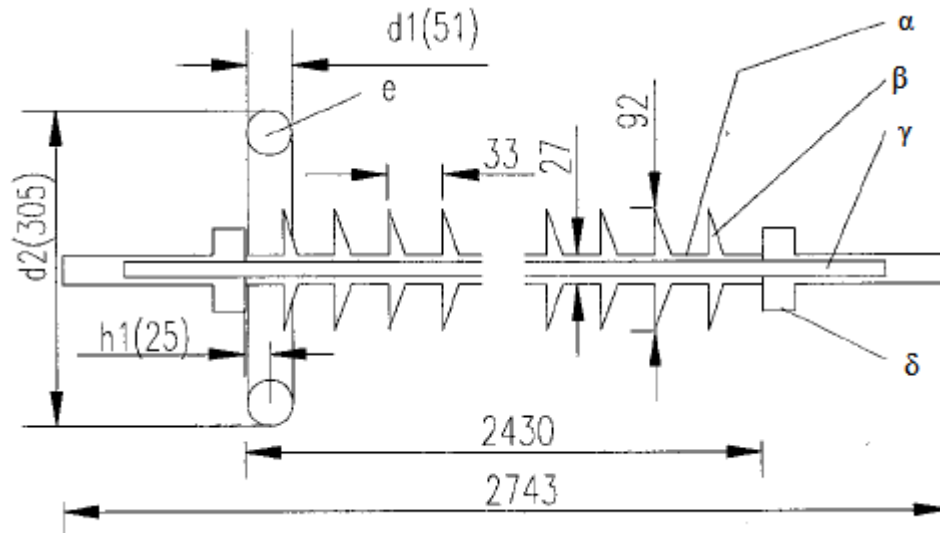
Έχοντας πλέον θεμελιώσει τη μέθοδο και το πρόγραμμα επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί, το επόμενο βήμα αποτελούν οι προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης του ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μοντέλα προέκυψαν από σχέδια μονωτήρων που παραχωρήθηκαν στη συγγραφέα από τη ΔΕΗ. Έγιναν προσομοιώσεις για εννιά μονωτήρες, πέντε με προδιαγραφές για χρήση σε επίπεδο τάσης 150kV και τέσσερις για 400kV, υπό ιδανικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην ενότητα 4.2.4.

### 4.2.2. Χαρακτηριστικά των μοντέλων

#### 4.2.2.1. Σχέδια των μονωτήρων

Συνολικά δέκα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Ένα από αυτά τα μοντέλα αποτελεί ο μονωτήρας 345kV, στο απλοποιημένο σχέδιο του οποίου βασίστηκαν οι προσομοιώσεις της εργασίας [36] και το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-2(β). Για λόγους πληρότητας και διευκόλυνσης του αναγνώστη το ίδιο σχέδιο φαίνεται πιο λεπτομερώς στο Σχήμα 4-2. Ο μονωτήρας αυτός διαθέτει 72

πτερύγια ίδιου μεγέθους και η συνολική απόσταση μόνωσης του αντιστοιχεί σε 2,43m. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο μονωτήρα αυτό, τα οποία παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2.3, ανακοινώθηκαν στο XVII International Symposium on High Voltage Engineering τον Αύγουστο του 2011 από την υποψήφια διδάκτορα κα Ελένη Νικολοπούλου. [60]



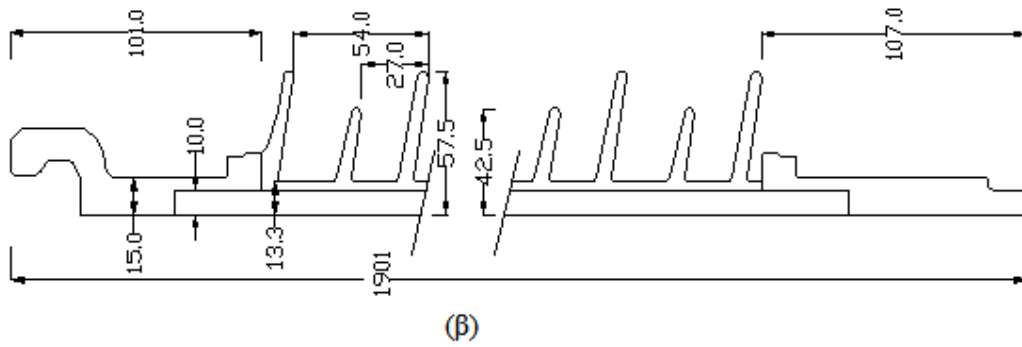
Σχήμα 4-2: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις (σε mm) του μονωτήρα 345kV: (α) ράβδος από υαλονήματα, (β) πτερύγια από πολυμερές, (γ) πολυμερές περίβλημα, (δ) μεταλλικός τερματισμός [36]

Οι επόμενες προσομοιώσεις έγιναν σε μονωτήρες του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποια από σχέδια στα οποία βασίστηκαν τα μοντέλα αυτά αποτελούν σχέδια μονωτήρων που χρησιμοποιούνται σποραδικά στον ελληνικό χώρο για αντικατάσταση κατεστραμμένων μονωτήρων, κυρίως σε περιοχές με επιβαρυνμένο περιβάλλον. Τέτοιες περιοχές είναι είτε παράκτιες με σοβαρά προβλήματα λόγω καθαλάτωσης (όπως στην Κρήτη, όπου λειτουργεί γραμμή εξ' ολοκλήρου με συνθετικούς μονωτήρες) είτε κοντά σε λατομεία ή βιομηχανίες.

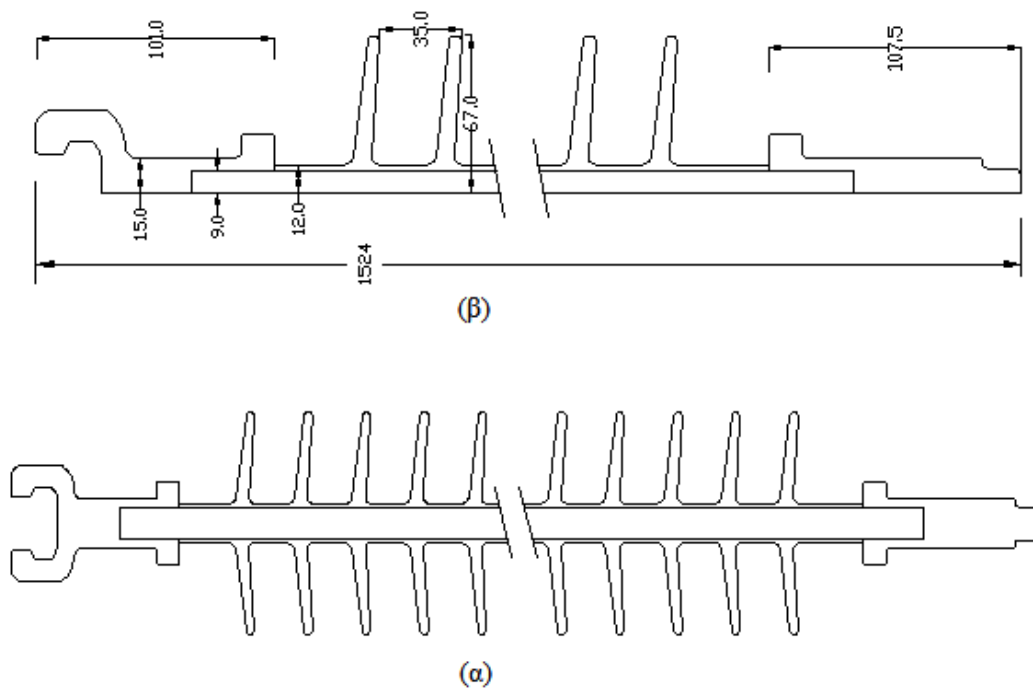
Οι μονωτήρες επιπέδου τάσης 150kV που συμπεριλαμβάνονται στην εργασία φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 4-3 ως Σχήμα 4-7), ενώ τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά των μονωτήρων 150kV του ελληνικού δικτύου μεταφοράς

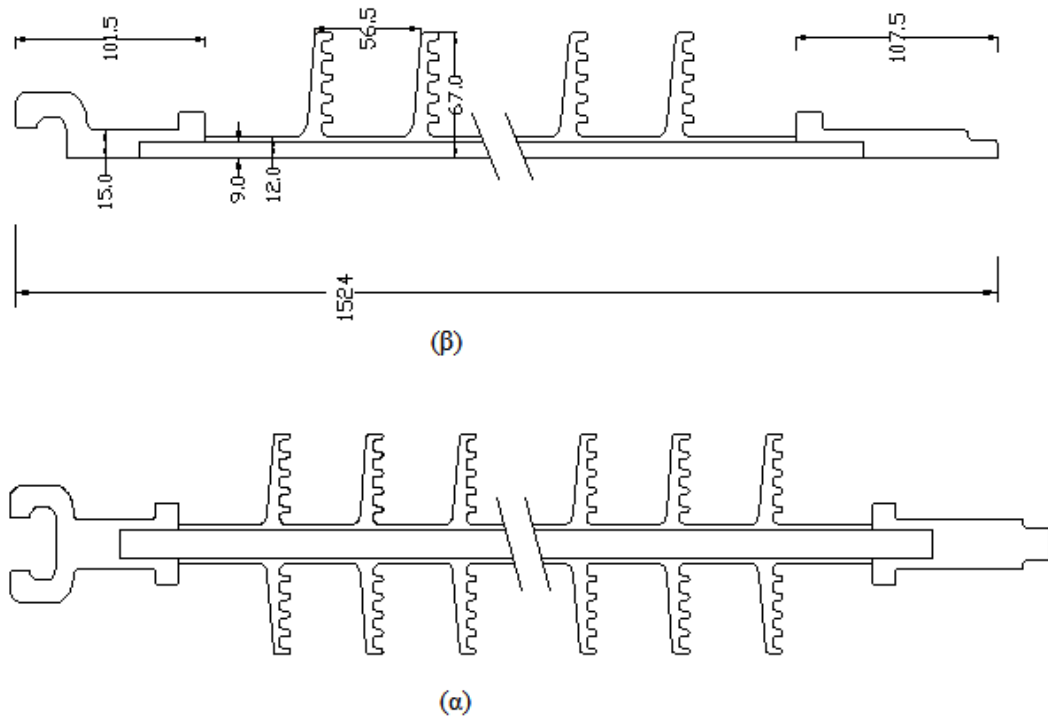
Μονωτήρας	Απόσταση μόνωσης (mm)	Μήκος ερπυσμού (mm)	Αριθμός πτερυγίων	Διάμετρος πτερυγίων (mm)	Κατασκευαστής
1 (Σχήμα 4-3)	1693	5708	32/31	115/85	Pfisterer Sefag AG
2 (Σχήμα 4-4)	1309	4765	36	134	Pfisterer Sefag AG
3 (Σχήμα 4-5)	1309	4719	22	134	Pfisterer Sefag AG
4 (Σχήμα 4-6)	1894	6255	26/25	140/104	Bonomi
5 (Σχήμα 4-7)	1390,4	5828	26/25	137/119	Sediver



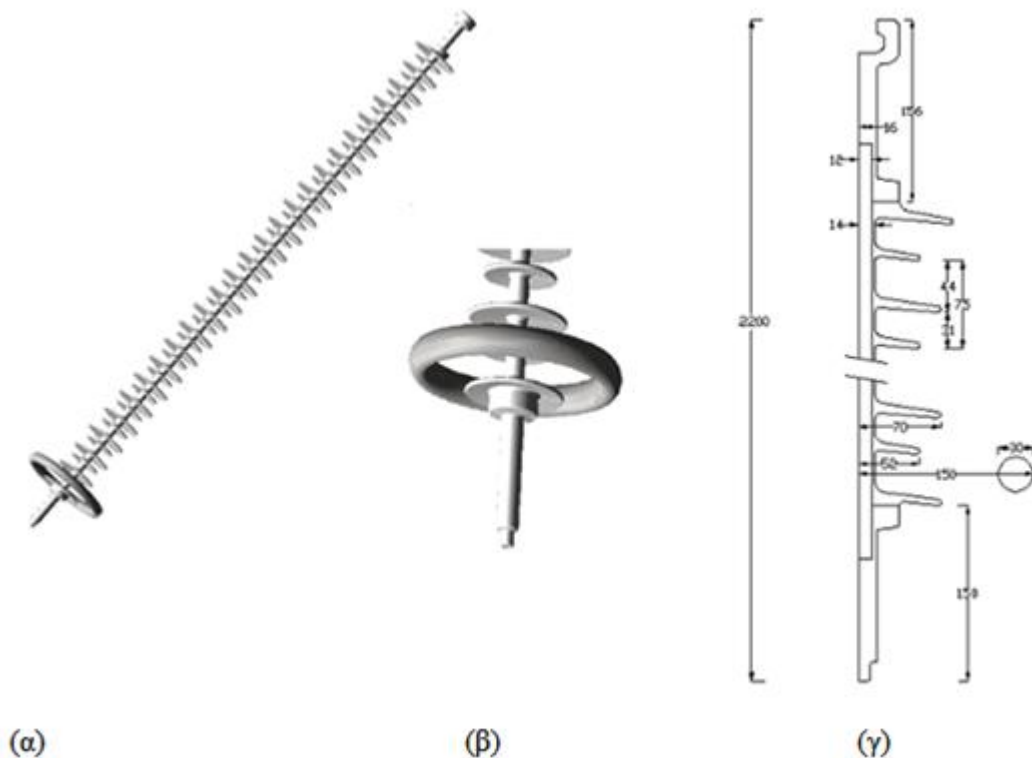
Σχήμα 4-3: Μονωτήρας 1: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm



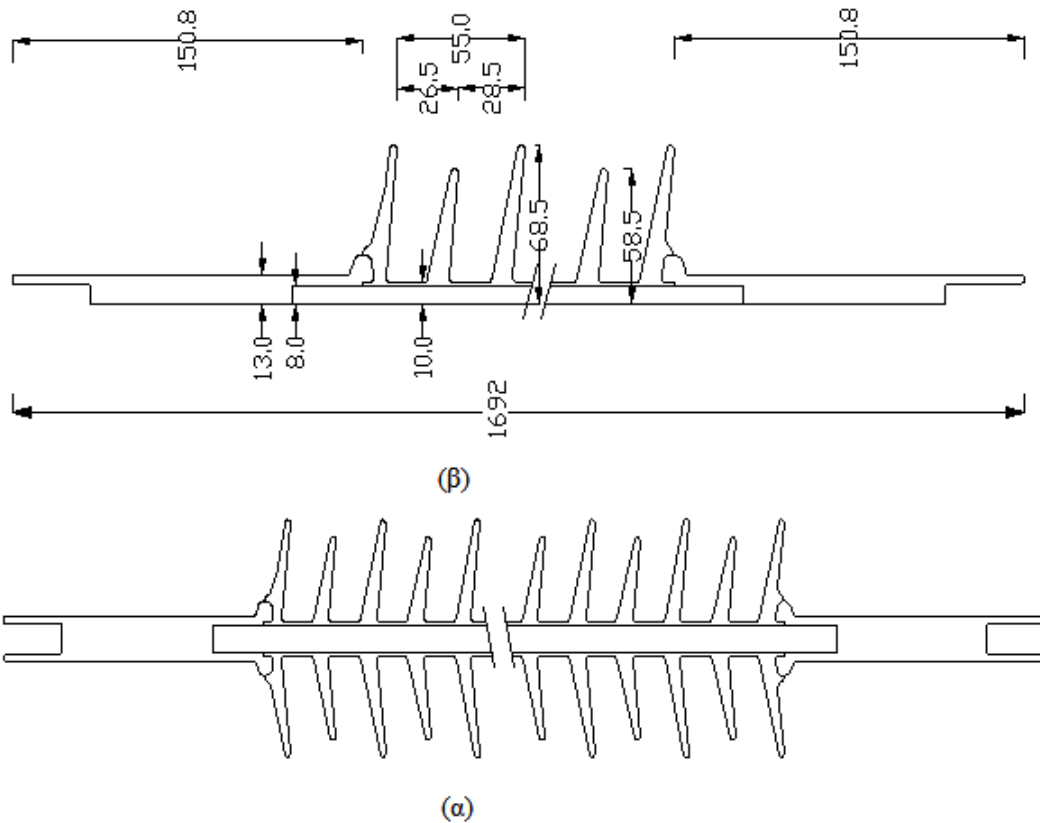
Σχήμα 4-4: Μονωτήρας 2: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm



Σχήμα 4-5: Μονωτήρας 3: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm



Σχήμα 4-6: Μονωτήρας 4: (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του μονωτήρα με το τοροειδές, (β) λεπτομέρεια του υπό τάση άκρου και (γ) τομή του μονωτήρα ως προς τα επίπεδα  $x=0$  και  $y=0$ , με τις διαστάσεις σε mm. Οι τρισδιάστατες αναπαραστάσεις των σχημάτων (α) και (β) προέκυψαν περιστρέφοντας κατά  $360^\circ$  το σχέδιο του σχήματος (γ). Για το λόγο αυτό δε φαίνονται τα εξαρτήματα προσάρτησής τους στο μονωτήρα, ωστόσο συμπεριλήφθηκαν για να γίνει πιο ξεκάθαρη η θέση του τοροειδούς.



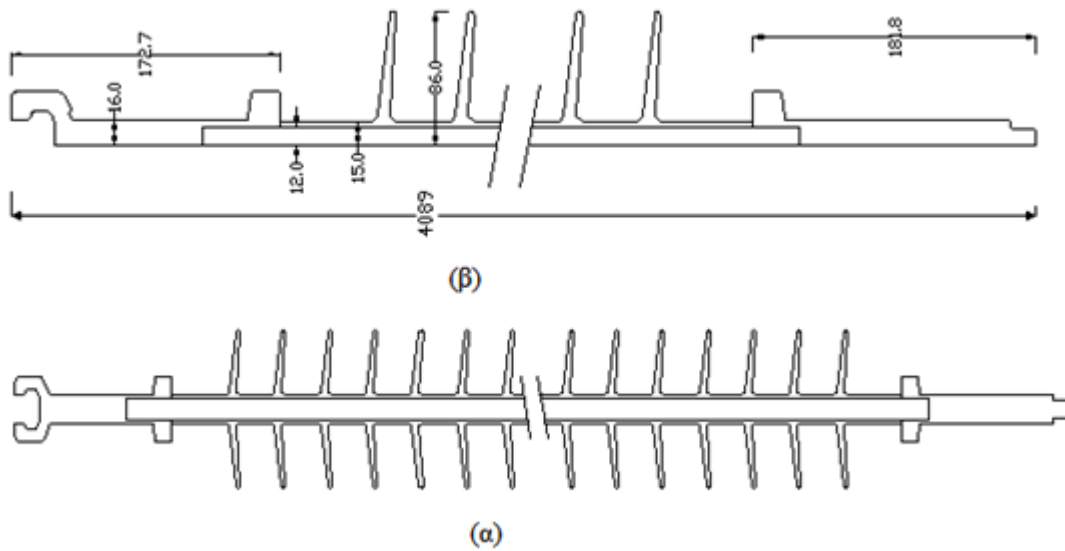
Σχήμα 4-7: Μονωτήρας 5: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm

Τα παραπάνω σχήματα προέκυψαν χρησιμοποιώντας την εντολή Export to Autocad, η οποία είναι διαθέσιμη μέσω του μενού της επιφάνειας εργασίας του προγράμματος Opera. Η επεξεργασία με το πρόγραμμα Autocad κρίθηκε απαραίτητη, έτσι ώστε να αναπαρασταθούν με ακρίβεια οι λεπτομέρειες των μοντέλων και οι διαστάσεις τους.

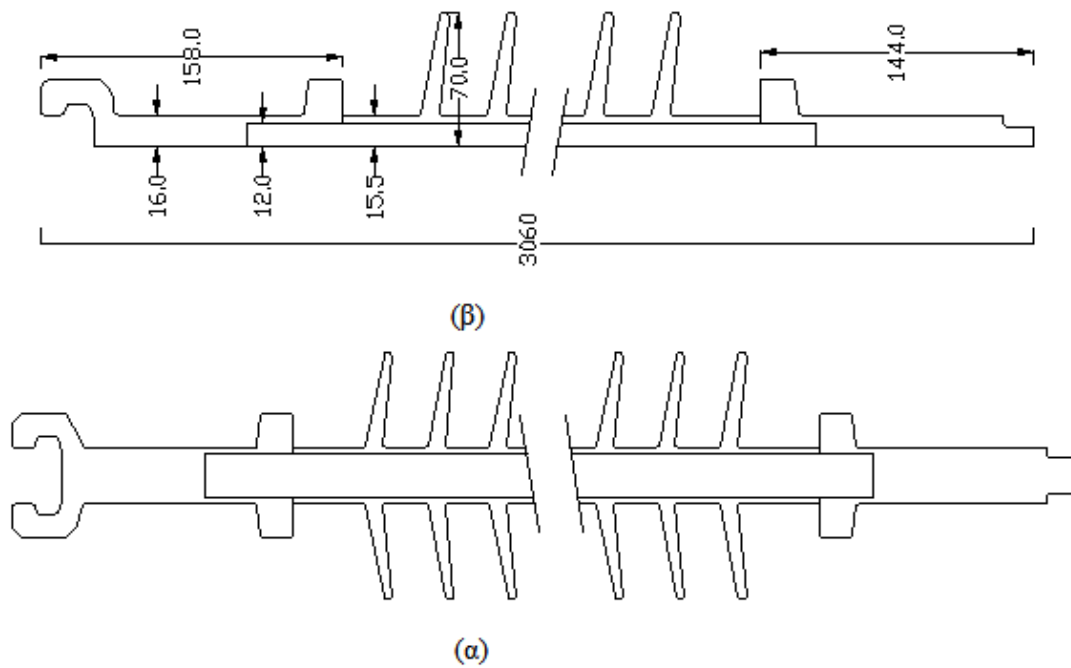
Τέλος, έγιναν προσομοιώσεις και σε τέσσερις μονωτήρες υπερυψηλής τάσης (400kV), οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 4-8 ως Σχήμα 4-11), ενώ ο Πίνακας 4.3 περιέχει τα χαρακτηριστικά τους. Και οι τέσσερις αυτοί μονωτήρες κατασκευάζονται από την εταιρεία Pfisterer Sefag AG.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά των μονωτήρων 400kV του ελληνικού δικτύου μεταφοράς

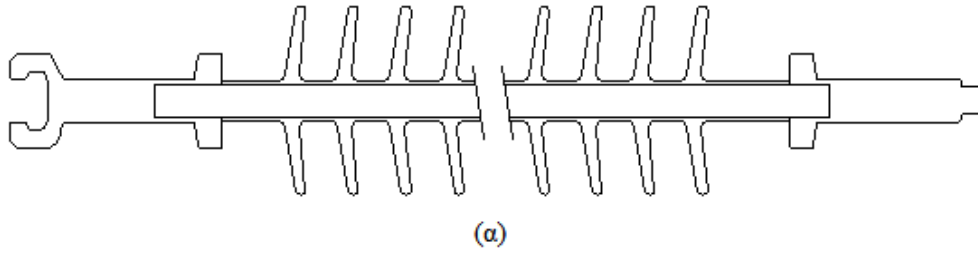
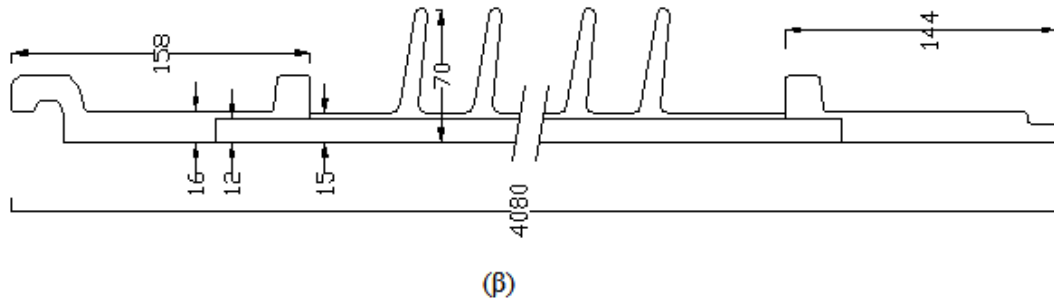
Μονωτήρας	Απόσταση μόνωσης (mm)	Μήκος ερπυσμού (mm)	Αριθμός πτερυγίων	Διάμετρος πτερυγίων (mm)
6 (Σχήμα 4-8)	3734,5	13309	73	172
7 (Σχήμα 4-9)	2758	10150	77	140
8 (Σχήμα 4-10)	3778	13080	94	140
9 (Σχήμα 4-11)	3048	10350	75	140



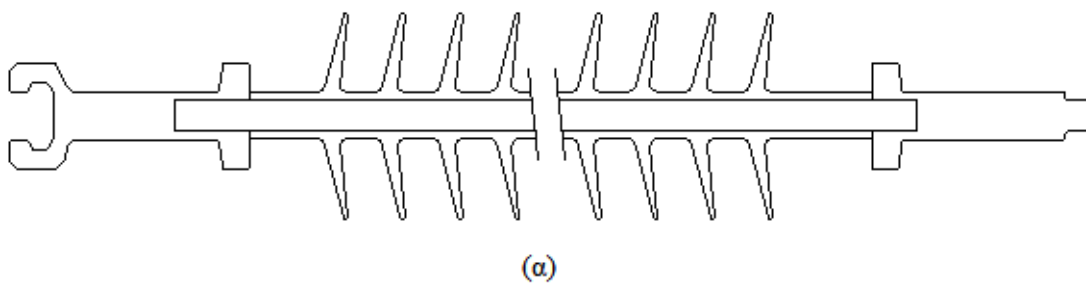
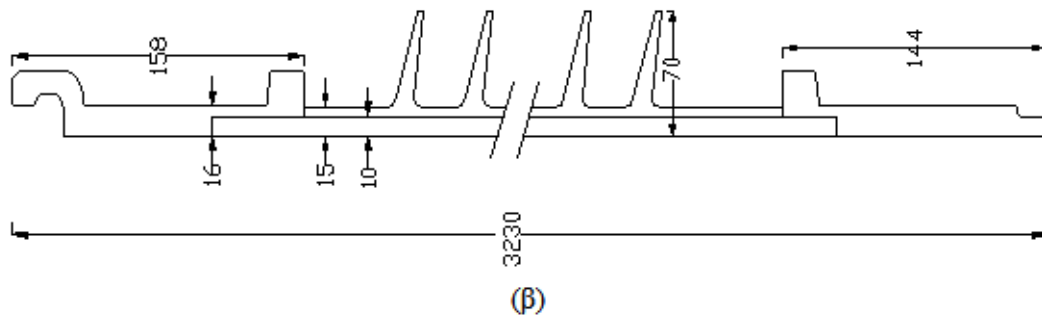
Σχήμα 4-8: Μονωτήρας 6: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm



Σχήμα 4-9: Μονωτήρας 7: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm



Σχήμα 4-10: Μονωτήρας 8: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm

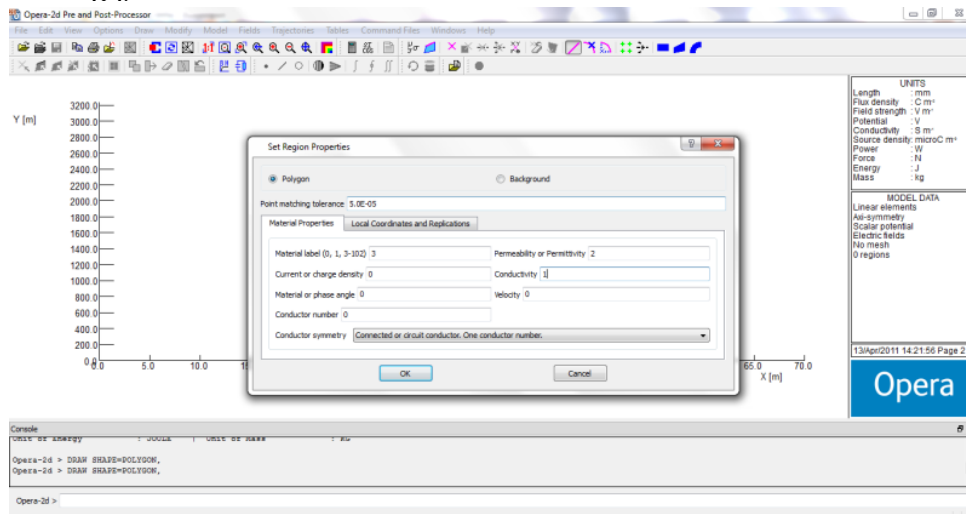


Σχήμα 4-11: Μονωτήρας 9: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm

Οι παραπάνω μονωτήρες (Σχήμα 4-3 έως Σχήμα 4-11) αποτελούνται από πολυμερές περίβλημα από HTV SIR. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από ίνες γυαλιού ECR σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης και οι μεταλλικοί τερματισμοί από σφυρήλατο χάλυβα.

#### 4.2.2.2. Ιδιότητες των υλικών

Από τις εξισώσεις 4.1 έως 4.4 προκύπτει ότι είναι απαραίτητος ο καθορισμός των ιδιοτήτων των υλικών (αγωγιμότητα, επιτρεπτότητα) από τα οποία αποτελούνται τα μοντέλα των προσομοιώσεων. Ο ορισμός των ιδιοτήτων αυτών γίνεται μέσα από την καρτέλα Set Region Properties του προεπεξεργαστή του OPERA (Σχήμα 4-12).



Σχήμα 4-12: Η καρτέλα Set Region Properties, στην οποία φαίνονται οι ιδιότητες του μεταλλικού τερματισμού

Η επιτρεπτότητα του πολυμερικού περιβλήματος για το μονωτήρα της δημοσίευσης [36] (Σχήμα 4-2) τίθεται ίση με 4,5. Για τους μονωτήρες του ελληνικού συστήματος μεταφοράς (Σχήμα 4-3 έως Σχήμα 4-11), λόγω απουσίας πιο συγκεκριμένων στοιχείων από τους κατασκευαστές, η τιμή της επιτρεπτότητας για το πολυμερές του περιβλήματος τέθηκε, σύμφωνα με τις εργασίες [38, 39, 41], ίση με 4,3. Για τον ινώδη πυρήνα, τόσο στην εργασία [36] όσο και στην εργασία [38, 39, 41] η τιμή της επιτρεπτότητας του δίνεται ίση με 7,2. Έτσι, για όλους τους μονωτήρες αυτή είναι η τιμή που χρησιμοποιήθηκε. Για τον περιβάλλοντα χώρο (αέρας) η τιμή της επιτρεπτότητας τίθεται ίση με 1, ενώ για τους μεταλλικούς τερματισμούς ίση με 2. Η τιμή που αντιστοιχεί στα μεταλλικά εξαρτήματα της διάταξης προέκυψε «αυθαίρετα». Ο λόγος εξηγείται παρακάτω.

Σύμφωνα με τη θεωρία, η σχετική επιτρεπτότητα είναι μία αδιάστατη ποσότητα η οποία χαρακτηρίζει κυρίως τα διηλεκτρικά. Συνήθως είναι μιγαδικός αριθμός και περιγράφεται από τη γενική σχέση:

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) + i\varepsilon_r''(\omega) \quad 4.5$$

Ενώ η σχέση 4.4 περιγράφει τα διηλεκτρικά τα οποία εμφανίζουν απώλειες λόγω ρευμάτων επαγωγής, τα μέταλλα θεωρείται ότι έχουν επιτρεπτότητα πραγματική και ίση με 1. [61, 62] Στην συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης λοιπόν, για να διαφοροποιηθούν τα μεταλλικά εξαρτήματα από τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου η τιμή της επιτρεπτότητας τέθηκε ίση με 2.

Για την ηλεκτροστατική επίλυση των μοντέλων, με το πρόγραμμα OPERA-2d/ST δε λαμβάνονται υπόψη τυχόν επαγόμενα ρεύματα στα μη μεταλλικά μέρη



του μοντέλου (πυρήνας, πολυμερές), επομένως η ειδική αγωγιμότητα  $\sigma(S/m)$  τέθηκε γι'αυτά ίση με 0. Ομοίως τέθηκε και για τον αέρα. Για τα μεταλλικά εξαρτήματα, αφού αποτελούν τις μόνες αγωγίμες επιφάνειες, η τιμή αυτή είναι ίση με 1.

Στην περίπτωση της ac ανάλυσης (OPERA-2d/AC), η οποία περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πεδιακή καταπόνηση των μονωτήρων υπό υψηλή τάση βιομηχανικής συχνότητας, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυρήνα και του πολυμερούς περιβλήματος έλαβαν μη μηδενικές τιμές. Συγκεκριμένα, σύμφωνα και με τα δεδομένα που περιέχει ο Πίνακας 1.1, η ειδική αγωγιμότητα για τον πυρήνα τέθηκε ίση με  $10^{-14}$ , ενώ για το περίβλημα  $10^{-17}$ , τιμές που είναι κατά πολύ μικρότερες από την αγωγιμότητα του μετάλλου (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4: Τιμές της επιτρεπτότητας,  $\epsilon$ , και της ειδικής αγωγιμότητας,  $\sigma$  των επιμέρους στοιχείων των μοντέλων

	Επιτρεπτότητα ( $\epsilon$ )		Ειδική αγωγιμότητα, $\sigma$ (S/m) (για όλα τα μοντέλα)	
	Μοντέλο εργασίας [36]	Μοντέλα ΔΕΗ	OPERA-2d/ST	OPERA-2d/AC
Αέρας	1	1	0	0
Πυρήνας	7,2	7,2	0	$10^{-14}$
Περίβλημα	4,5	4,3	0	$10^{-17}$
Μέταλλο	2	2	1	1

#### 4.2.2.3. Καθορισμός του μεγέθους του υποβάθρου (background)

Ένας από τους περιορισμούς που εισάγει η χρήση της μεθόδου FEM για τον προσδιορισμό της πεδιακής κατανομής σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης αποτελεί η απαίτηση για την ύπαρξη ενός κλειστού συνόρου γύρω από τη γεωμετρία προς εξέταση. Επειδή κάτι τέτοιο δεν υφίσταται στην πραγματικότητα και επειδή το να αγνοηθεί ο αέρας που περιβάλλει τη διάταξη, είναι απαραίτητος ο ορισμός ενός τεχνητού συνόρου, οι συντεταγμένες του οποίου δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Για τον προσδιορισμό του υποβάθρου αυτού στη συγκεκριμένη εργασία έγιναν διαδοχικές προσομοιώσεις στον πιο πολύπλοκο μονωτήρα. Επιλέχθηκε ο μονωτήρας 8, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-10. Ο μονωτήρας αυτός έχει συνολικό μήκος 4080mm και διαθέτει 94 πτερύγια (sheds). Πρόκειται για έναν από τους μεγαλύτερους μονωτήρες (ο αμέσως μεγαλύτερος έχει μήκος 4089mm) και διαθέτει τα περισσότερα πτερύγια, γεγονός το οποίο αυξάνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Οι διαστάσεις του μονωτήρα κατά μήκος των δύο αξόνων (μήκος και πλάτος) διαφέρουν μεταξύ τους κατά δύο τάξεις μεγέθους (4080mm έναντι 70mm). Με αφετηρία αυτή τη λεπτομέρεια, το πρώτο βήμα για τον καθορισμό του background είναι ο καθορισμός του σχήματος: θα πρέπει να είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, με τη μεγάλη του διάσταση κατά μήκος της μεγάλης διάστασης του μονωτήρα.

Το επόμενο βήμα αφορά τον αρχικό προσδιορισμό των διαστάσεων. Έχοντας τοποθετήσει το κατώτατο άκρο του σχεδίου του μονωτήρα στην αρχή των αξόνων, η πρώτη συντεταγμένη του background ορίζεται ως (0,-30000), θεωρήθηκε δηλαδή ότι το πεδίο τριάντα μέτρα κάτω από το μονωτήρα μηδενίζεται. Η επιλογή της απόστασης αυτής δεν έγινε τυχαία, αντίθετα αποτελεί το ανώτερο ύψος ανάρτησης των μονωτήρων στις γραμμές μεταφοράς Υ.Υ.Τ. του ηλεκτρικού συστήματος. Επίσης, σύμφωνα με την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε.) η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κάτω από αγωγούς γραμμών μεταφοράς Υ.Υ.Τ. (400kV) είναι 5000V/m (ισοδύναμα  $5 \times 10^{-3}$  kV/mm) σε ύψος 1,5m από το έδαφος. Άρα είναι ασφαλές το συμπέρασμα ότι κοντά στην επιφάνεια του εδάφους το ηλεκτρικό πεδίο μηδενίζεται. [63, 64]

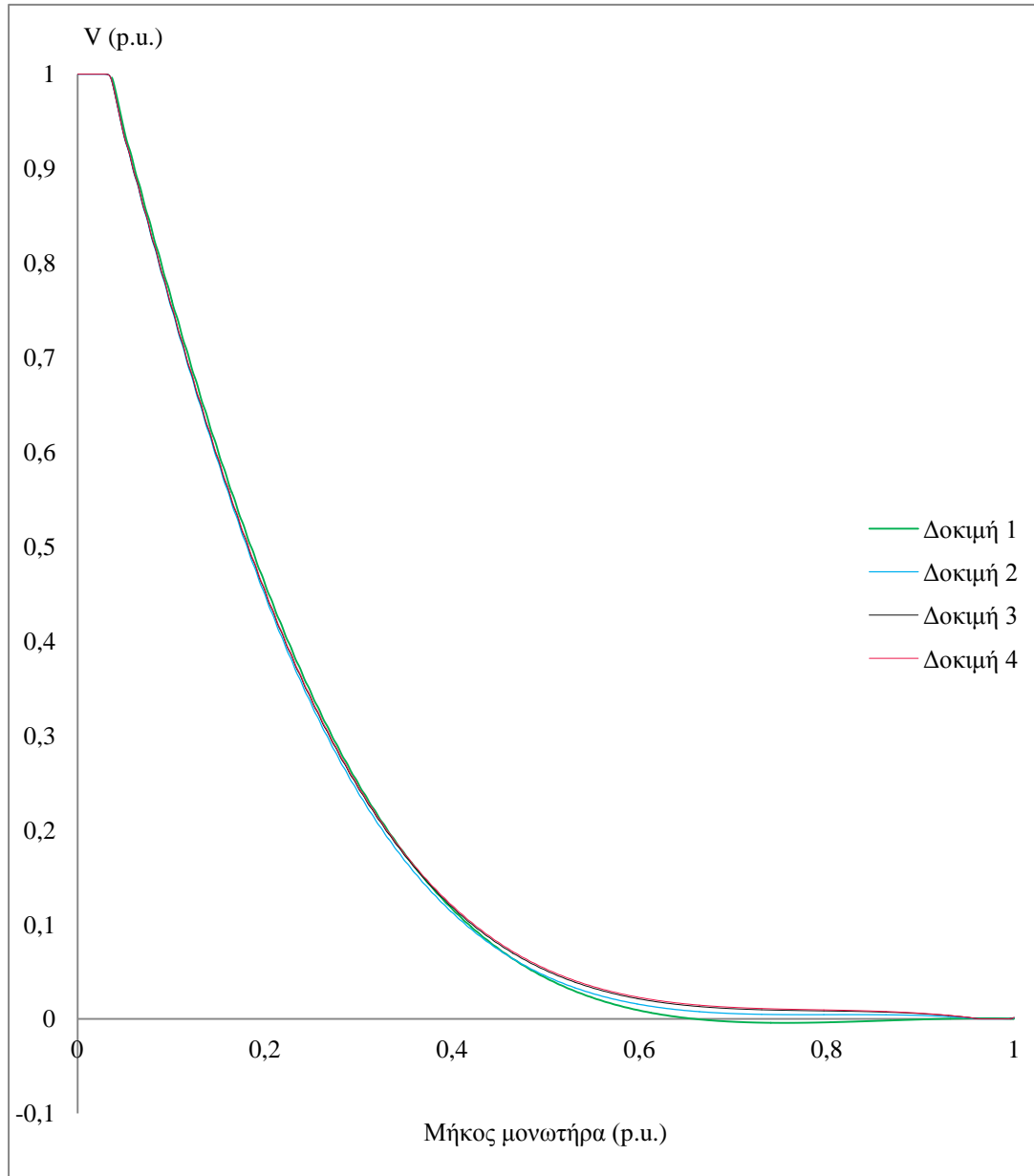
Για τον καθορισμό των υπολοίπων διαστάσεων του περιβάλλοντος χώρου έγιναν διαδοχικές δοκιμές, έτσι ώστε να καταλήξουμε στο background το οποίο δε θα επηρέαζε την κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό και γύρω από το μονωτήρα. Αρχικά θεωρήθηκε απόσταση 5000mm στον οριζόντιο άξονα και απόσταση 60000mm στον κάθετο άξονα (και οι δύο αποστάσεις μετρημένες από την αρχή των αξόνων). Ουσιαστικά ο μονωτήρας πλέον περικλείεται από ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, οι κορυφές των πλευρών του οποίου έχουν τις εξής συντεταγμένες: (0,-30000), (5000, -30000), (5000, 60000) και (0,60000). Η κατανομή του δυναμικού στο κέντρο του μονωτήρα και κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τις άκρες των πτερυγίων φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 4-13 και Σχήμα 4-14).

Προφανώς δε γίνεται να εξαχθεί συμπέρασμα για το μέγεθος του υποβάθρου μόνο από μία δοκιμή. Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση η ύπαρξη αρνητικών τιμών του δυναμικού, όπως φαίνεται από τις κατανομές των προαναφερθέντων σχημάτων, είναι ένδειξη ότι απαιτείται αύξηση των διαστάσεων του χώρου, στα όρια του οποίου θεωρούμε το δυναμικό μηδενίζεται. Έτσι, η επόμενη δοκιμή γίνεται για background με τις εξής συντεταγμένες κορυφών: (0,-30000), (10000,-30000), (10000, 120000) και (0,120000). Παρατηρούμε ότι η απόσταση 30000mm, η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο ύψος ανάρτησης, διατηρείται σταθερή. Η παραδοχή αυτή έχει φυσική σημασία, αφού ιδανικά θα πρέπει το ηλεκτρικό πεδίο να μηδενίζεται στην επιφάνεια του εδάφους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις νέες διαστάσεις φαίνεται επίσης παρακάτω (Σχήμα 4-13 και Σχήμα 4-14).

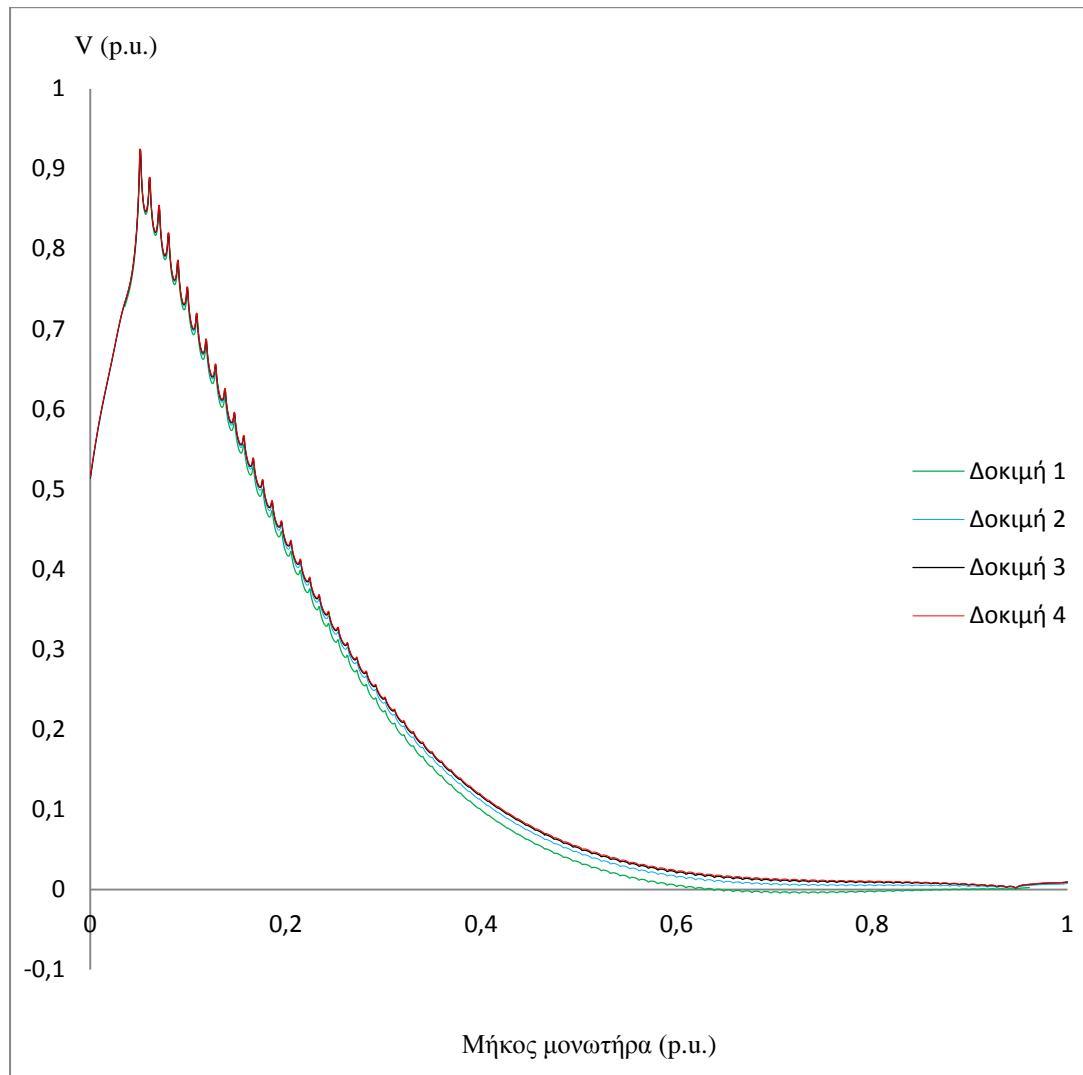
Ακολουθούν άλλες δύο προσομοιώσεις, τετραπλασιάζοντας και εξαπλασιάζοντας την τετμημένη και τη θετική τεταγμένη της πρώτης δοκιμής. Συνοπτικά οι συντεταγμένες της κάθε δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 4.5). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκεντρωτικά για την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα φαίνονται στο Σχήμα 4-13. Παρατηρείται ότι στη δεύτερη δοκιμή δεν προκύπτουν πλέον αρνητικές τιμές του δυναμικού, ενώ για την τρίτη και τέταρτη δοκιμή οι γραφικές παραστάσεις συμπύκνουν. Τα ίδια συμπεράσματα εξάγονται και από το Σχήμα 4-14, όπου φαίνονται συγκεντρωτικά οι κατανομές του δυναμικού στα άκρα των πτερυγίων για κάθε δοκιμή.

Πίνακας 4.5: Συντεταγμένες των κορυφών και συντελεστές αύξησης της τετμημένης και της θετικής τεταγμένης του υποβάθρου (background) (σε mm)

Αριθμός δοκιμής	Συντεταγμένες (mm)				Αύξηση
1	(0,-30000)	(5000,-30000)	(5000,60000)	(0,60000)	-
2	(0,-30000)	(10000,-30000)	(10000,120000)	(0,120000)	x2
3	(0,-30000)	(20000,-30000)	(20000,240000)	(0,240000)	x4
4	(0,-30000)	(30000,-30000)	(30000,360000)	(0,360000)	x6



Σχήμα 4-13: Κανονικοποιημένη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background



Σχήμα 4-14: Κανονικοποιημένη κατανομή του δυναμικού στα άκρα των περυγίων του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background

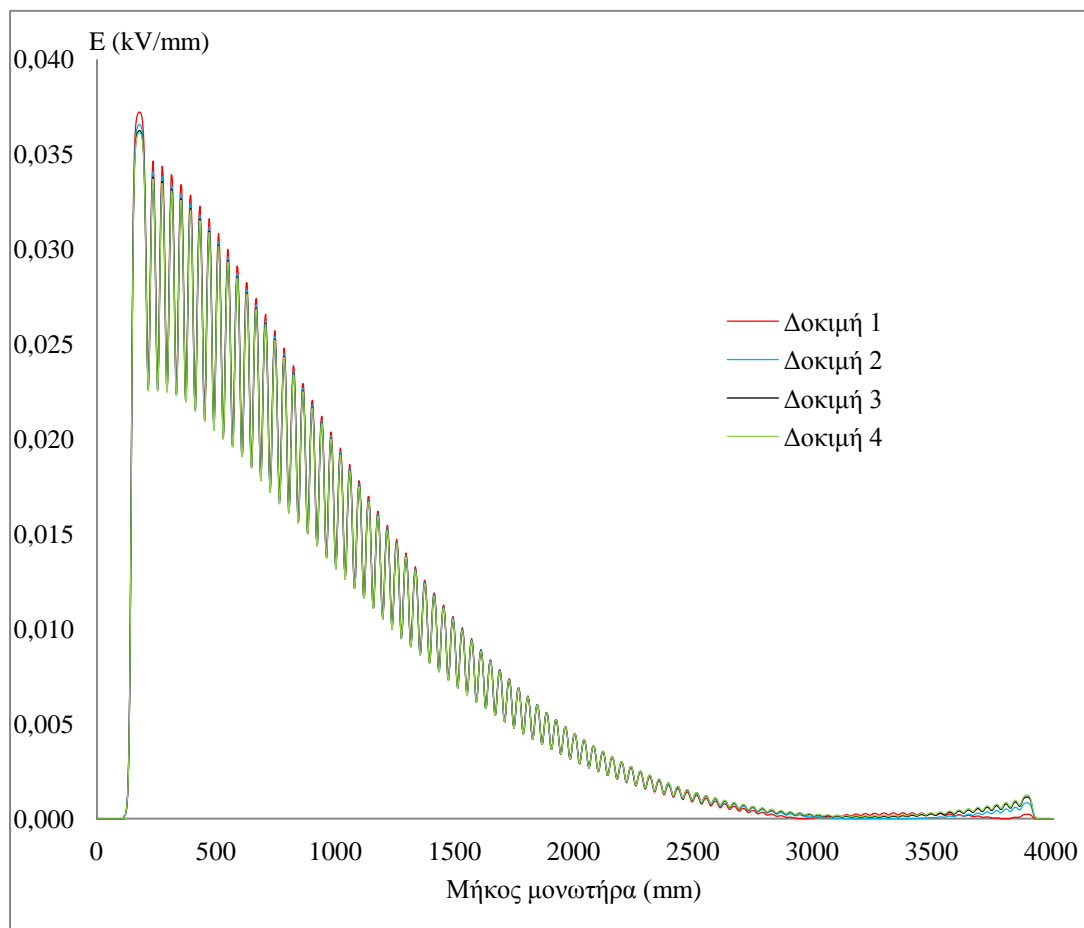
Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, προκύπτει ότι οποιαδήποτε αύξηση του background πέρα από το ορθογώνιο με κορυφές (0,-30000), (20000, -30000), (20000, 240000) και (0,240000) δεν επηρεάζει την κατανομή του δυναμικού. Άρα αυτό το ορθογώνιο αποτελεί τον περιβάλλοντα χώρο που απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Οι οριακές συνθήκες τίθενται ίσες με μηδέν ( $V=0$  Volts) κατά μήκος των πλευρών ανάμεσα στις κορυφές (0,-30000) και (20000, -30000), (20000, -30000) και (20000, 240000), (20000, 240000) και (0,240000). Όλες οι συντεταγμένες και οι διαστάσεις είναι μετρημένες σε mm.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ο λόγος για τον οποίο το μήκος και το πλάτος του υποβάθρου δεν διαφέρουν κατά δύο τάξεις μεγέθους (όπως συμβαίνει με τις διαστάσεις του μονωτήρα). Αντίθετα, η διαφορά τους είναι μίας τάξης μεγέθους ( $270000^2$ mm έναντι 20000mm). Η επιλογή αυτή έγινε ώστε τα όρια του υποβάθρου να έχουν φυσική σημασία, χωρίς όμως να γίνεται πιο πολύπλοκο το

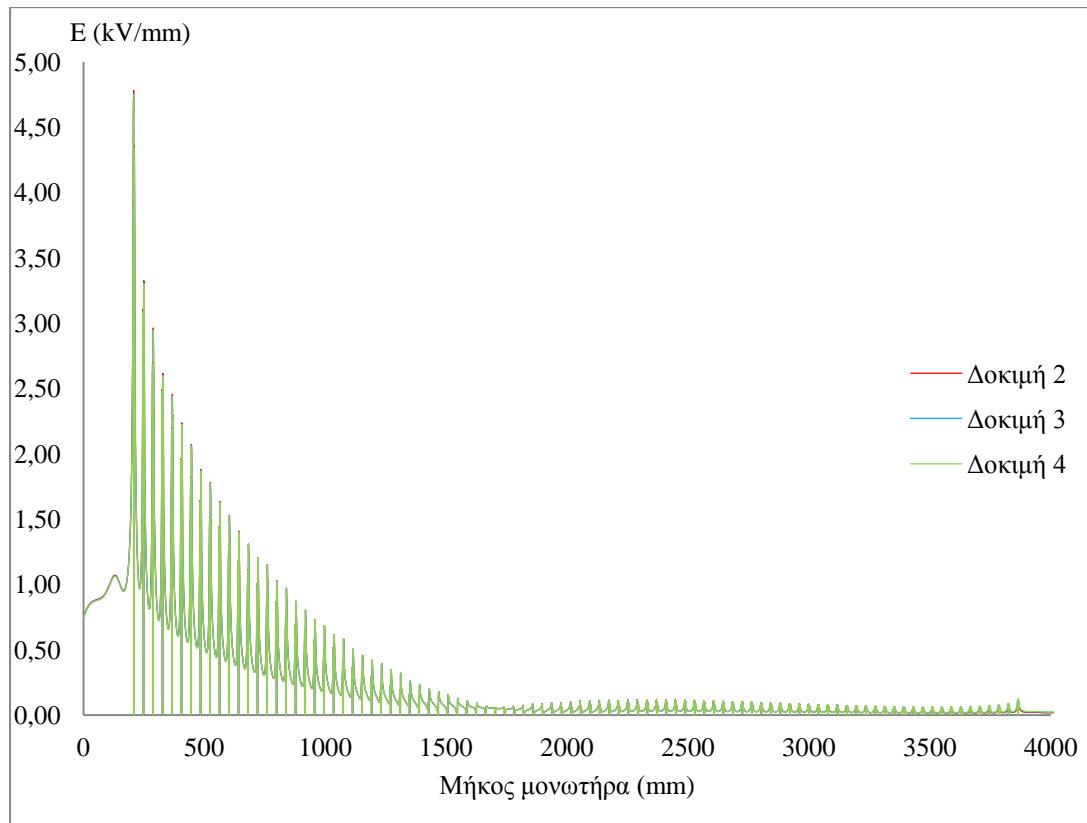
<sup>2</sup> 230000mm +30000mm

τελικό μοντέλο. Πράγματι, αν έπρεπε να τηρηθεί η διαφορά των δύο τάξεων μεγέθους θα έπρεπε η θετική τεταγμένη να τεθεί ίση με 970000mm τουλάχιστον, με επακόλουθη αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων στοιχείων για διακριτοποίηση του χώρου, σε βάρος των κρίσιμων σημείων, όπως οι άκρες των πτερυγίων, οι διεπιφάνειες των υλικών του μονωτήρα ή το σημείο τριπλής σύνδεσης.

Η επιλογή των προαναφερθεισών διαστάσεων του υποβάθρου επιβεβαιώνεται και από τις κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, οι οποίες παρατίθενται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 4-15 και στο Σχήμα 4-16. Στο Σχήμα 4-15 παρουσιάζονται οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του υπό εξέταση μονωτήρα (Σχήμα 4-10) για καθεμία από τις δοκιμές. Παρατηρούμε και εδώ πως οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από τα δεδομένα της τρίτης και της τέταρτης δοκιμής βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία μεταξύ τους. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των άκρων των πτερυγίων του μονωτήρα, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4-16. Οι γραφικές παραστάσεις που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα των δοκιμών 2, 3 και 4 συμπίπτουν, επιβεβαιώνοντας την ορθή επιλογή των διαστάσεων του υποβάθρου.

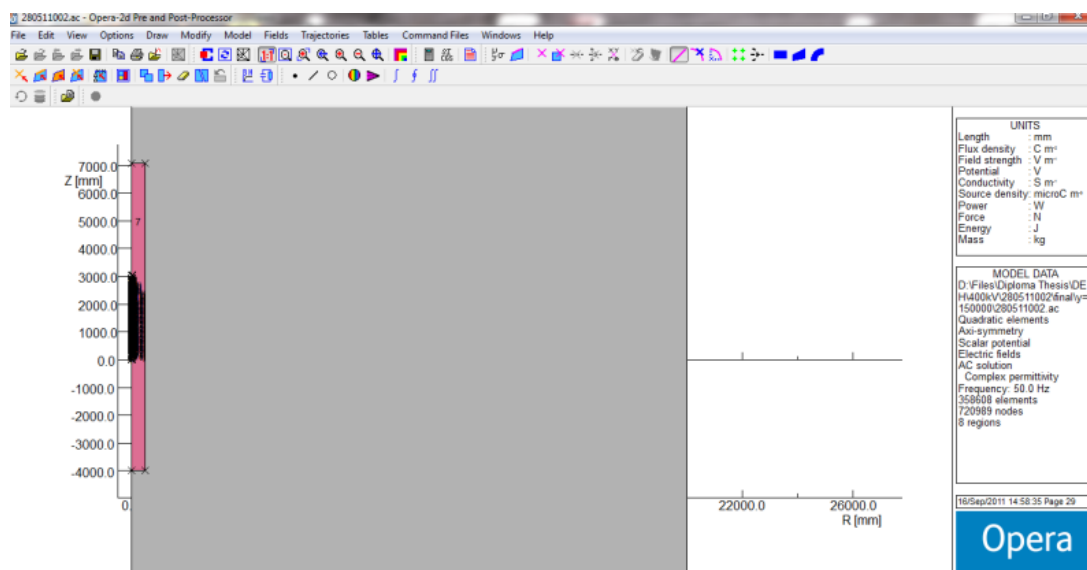


Σχήμα 4-15: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background



Σχήμα 4-16: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των περυγίων του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background

Η τελική εικόνα της επιφάνειας εργασίας του προ-επεξεργαστή, η οποία περιλαμβάνει το μονωτήρα (μονωτήρας 7, Σχήμα 4-9) και το background φαίνεται στο Σχήμα 4-17. Με γκριζό χρώμα φαίνεται το background, ενώ η μαύρη περιοχή κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα είναι ο μονωτήρας. Το ροζ ορθογώνιο αποτελεί μέρος του υποβάθρου και χρησιμεύει για να επιτυγχάνεται πυκνότερο πλέγμα κοντά στο μονωτήρα, όπως θα εξηγηθεί στην παράγραφο 4.2.2.4.



Σχήμα 4-17: Τμήμα του background γύρω από το μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9), όπου φαίνεται η οριζόντια διάσταση (20000mm)

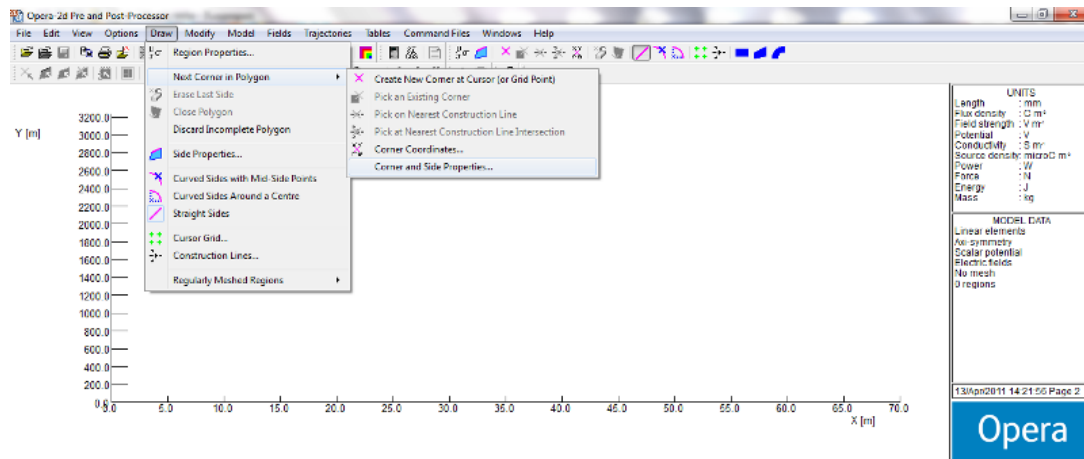
#### 4.2.2.4. Πλέγμα γύρω από τους μονωτήρες

Η διακριτοποίηση του χώρου μέσα και γύρω από τους μονωτήρες είναι το πρώτο και πιο σημαντικό βήμα για την εφαρμογή της μεθόδου FEM. Στις κρίσιμες περιοχές, δηλαδή στις διεπιφάνειες των υλικών και στα άκρα του εξοπλισμού, όπου είναι πιο πιθανό να εκδηλωθούν μεγαλύτερες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται προσπάθεια να είναι το πλέγμα όσο πιο πυκνό γίνεται, σύμφωνα και με τα όρια του προγράμματος. [65] Οι προδιαγραφές του προγράμματος OPERA, στην έκδοση των 32-bit που χρησιμοποιήθηκε, αναφορικά με το μέγιστο αριθμό στοιχείων φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 4.6).

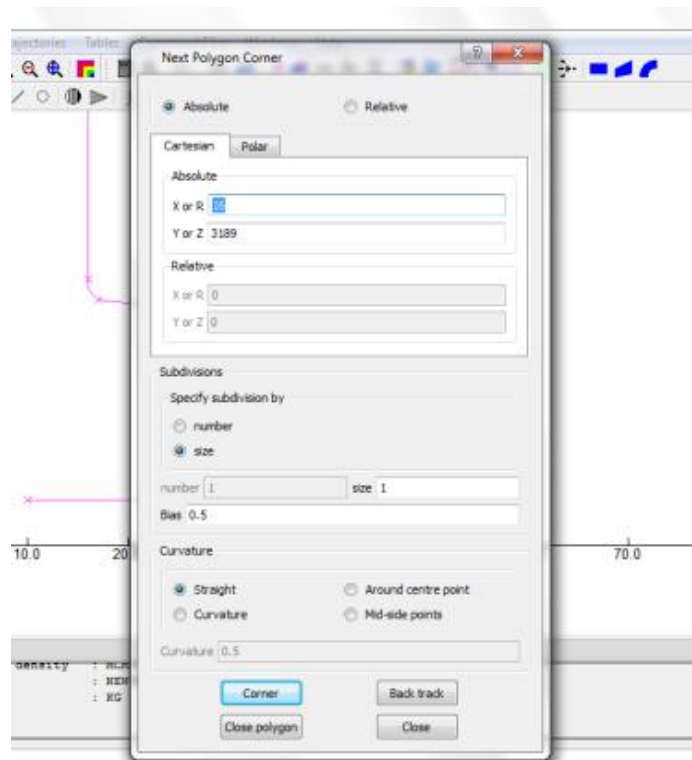
Πίνακας 4.6: Όρια προγράμματος OPERA-2d (32-bit) [59]

<b>Μέγιστος αριθμός:</b>	
στοιχείων	750000
κόμβων	1687500
υποδιαιρέσεων σε μία πλευρά μίας περιοχής	999
υποδιαιρέσεων σε όλες τις πλευρές μίας περιοχής	10000

Η διαίρεση μίας περιοχής σε στοιχεία αρχίζει με τον ορισμό των υποδιαιρέσεων του περιγράμματός της, κατά τη διαδικασία σχεδίασης. Αυτό γίνεται με την επιλογή Draw → Next Corner in Polygon → Corner and Side Properties (Σχήμα 4-18) από το μενού της διεπιφάνειας του προεπεξεργαστή. Στην καρτέλα που ανοίγει (Σχήμα 4-19), μαζί με τις συντεταγμένες κάθε σημείου ορίζεται ο τρόπος με τον οποίο κάθε τμήμα θα διαιρεθεί. Υπάρχει η επιλογή αυτό να γίνει αυτόματα, ανάλογα με το μήκος, ή απευθείας από το χρήστη, ορίζοντας τον αριθμό των υποδιαιρέσεων. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα μέσω της επιλογής bias (πόλωση) το πλέγμα να γίνεται πιο πυκνό κατά μήκος του περιγράμματος, κοντά στα σημεία που επιθυμεί ο χρήστης.

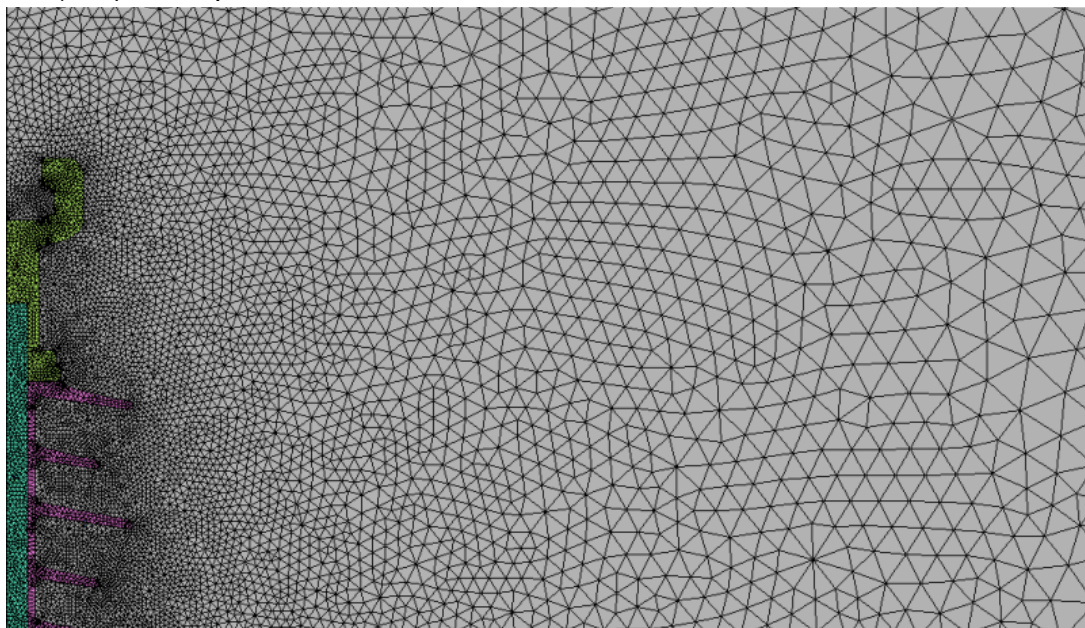


Σχήμα 4-18: Μενού της διεπιφάνειας (interface) του προεπεξεργαστή για την κατασκευή του περιγράμματος κάθε περιοχής και τον ορισμό των κόμβων του πλέγματος



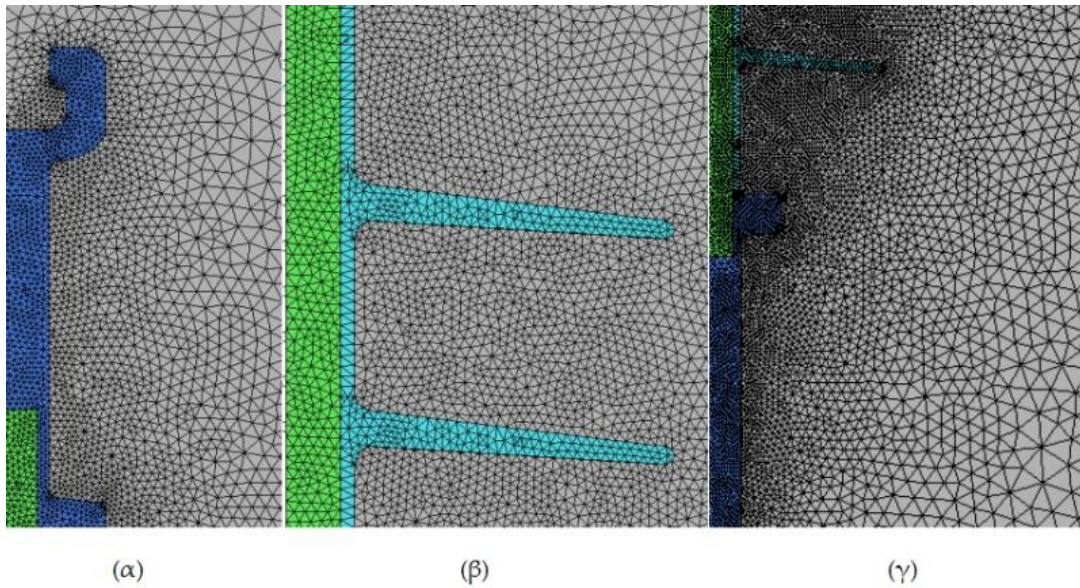
Σχήμα 4-19: Η καρτέλα Next Polygon Corner, στην οποία γίνεται ο καθορισμός των υποδιαιρέσεων των επιμέρους επιφανειακών τμημάτων κάθε περιοχής

Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-20 και Σχήμα 4-21) φαίνεται το πλέγμα στις περιοχές γύρω και μέσα από κάποιους από τους μονωτήρες που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2.2.1. Στο Σχήμα 4-20 φαίνεται το πλέγμα γύρω από το μοντέλο του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3). Είναι εμφανές ότι το πλέγμα είναι πιο πυκνό και τα στοιχεία πιο μικρά όσο μικρότερη είναι η απόσταση από το μονωτήρα. Με χρήση της επιλογής bias επιτεύχθηκε να πυκνώνει το πλέγμα στον κάθετο άξονα κοντά στο γειωμένο άκρο.



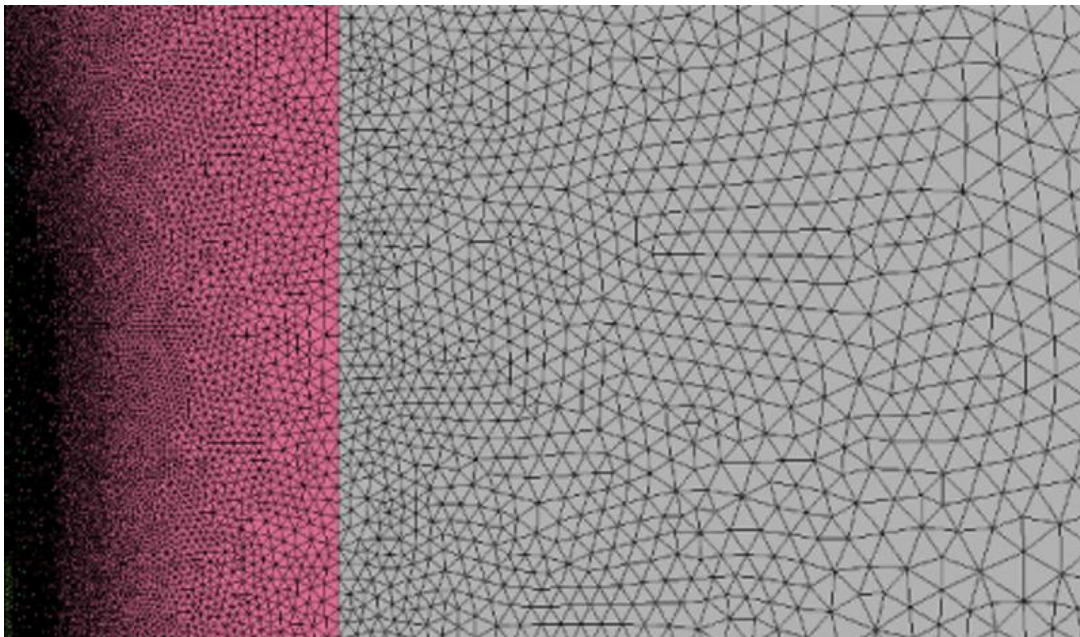
Σχήμα 4-20: Το πλέγμα στην περιοχή γύρω από το μονωτήρα 1 (150kV) (Σχήμα 4-3)





Σχήμα 4-21: Το πλέγμα γύρω από (α) το γειωμένο άκρο, (β) την περιοχή του πολυμερούς περιβλήματος και (γ) το υπό τάση άκρο του μονωτήρα 6 (400kV) (Σχήμα 4-8)

Στα πιο πολύπλοκα μοντέλα (κυρίως σε αυτά των μονωτήρων 400kV), όπου εύκολα υπερβαίνεται ο μέγιστος αριθμός στοιχείων ανά περιοχή στην προσπάθεια να πυκνώσει το πλέγμα στο μονωτήρα, κατασκευάζεται μία νέα περιοχή γύρω από το μονωτήρα. Η περιοχή αυτή ουσιαστικά είναι μία υποπεριοχή του υποβάθρου, με τις ίδιες ιδιότητες, χωρίς όμως οριακές συνθήκες στα όριά της και με πολύ μικρότερο μέγεθος. Η υποπεριοχή αυτή φαίνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 4-17. Οι διαστάσεις της είναι (για το συγκεκριμένο μονωτήρα) 11000 x 500 (mm). Γενικά, στα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκε, η υποπεριοχή σχεδιάστηκε ώστε να εκτείνεται 4000mm εκατέρωθεν των μεταλλικών άκρων στον κάθετο άξονα και 500mm στον οριζόντιο άξονα. Στο Σχήμα 4-22 φαίνεται το πλέγμα εκατέρωθεν του συνόρου της υποπεριοχής.



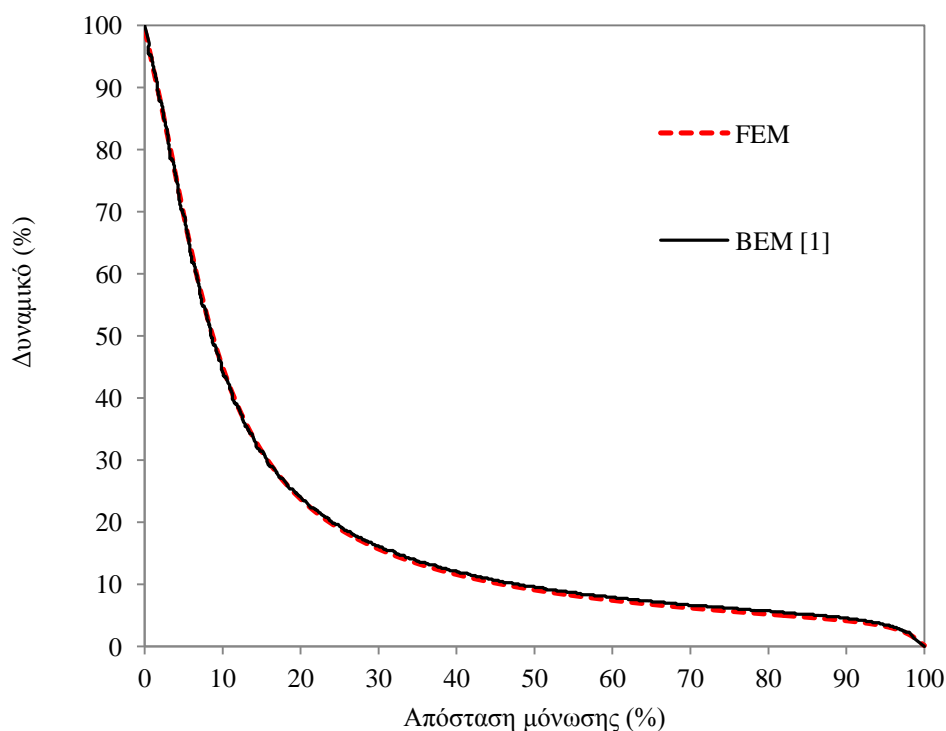
Σχήμα 4-22: Πλέγμα εκατέρωθεν της υποπεριοχής στο μοντέλο του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9)

### 4.2.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων στο μοντέλο της εργασίας [36]

#### 4.2.3.1. Επιβεβαίωση της ορθότητας της μεθόδου FEM

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα κλειστών συνόρων. Η εφαρμογή της στο πρόβλημα της πεδιακής κατανομής των συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης προϋποθέτει τον αυθαίρετο ορισμό μίας περιοχής, στα όρια της οποίας το δυναμικό μηδενίζεται, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 4.2.2.3. Έχοντας λοιπόν προσδιορίσει το μέγεθος αυτής της περιοχής, το επόμενο βήμα είναι η επιβεβαίωση της ορθότητας της εφαρμογής της μεθόδου FEM κατ' αυτό τον τρόπο.

Η επιβεβαίωση αυτή έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της εργασίας [36], στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος BEM στο μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 4-2, με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων στο ίδιο μοντέλο με τη ρουτίνα OPERA-2d/ST, η οποία επιλύει τις εξισώσεις του στατικού και του ημιστατικού ηλεκτρικού πεδίου. Ο Πίνακας 4.4 περιέχει τις ιδιότητες των επιμέρους τμημάτων του μονωτήρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κοινή γραφική παράσταση στο Σχήμα 4-23.



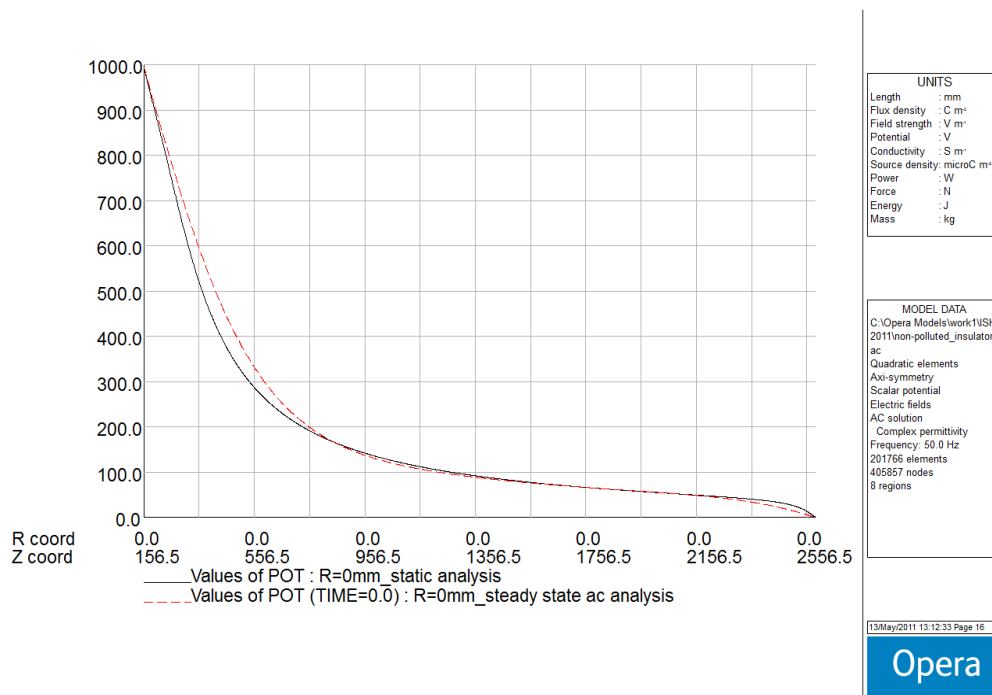
Σχήμα 4-23: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μοντέλου του μονωτήρα της εργασίας [36], μετά από προσομοιώσεις με τις μεθόδους FEM και BEM

Είναι εμφανής η εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι σε αντίθεση με το μοντέλο της εργασίας [36], όπου ο μονωτήρας έχει σχεδιαστεί παραλείποντας ένα μεγάλο μέρος των ενδιάμεσων πτερυγίων του, οι προσομοιώσεις με FEM έγιναν στο πλήρες μοντέλο του μονωτήρα. [60]

### 4.2.3.2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων επίλυσης OPERA-2d/ST και OPERA-2d/AC

Έχοντας πλέον εξασφαλίσει την ορθότητα της εφαρμογής της μεθόδου FEM στην πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων ανάρτησης, το επόμενο βήμα είναι η εύρεση του κατάλληλου επιλυτικού προγράμματος (*solver*). Στόχος είναι να επιβεβαιωθεί ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων περιγράφουν με τον πιο ακριβή τρόπο τις πραγματικές λειτουργικές συνθήκες που καταπονούν τους συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης υψηλής τάσης.

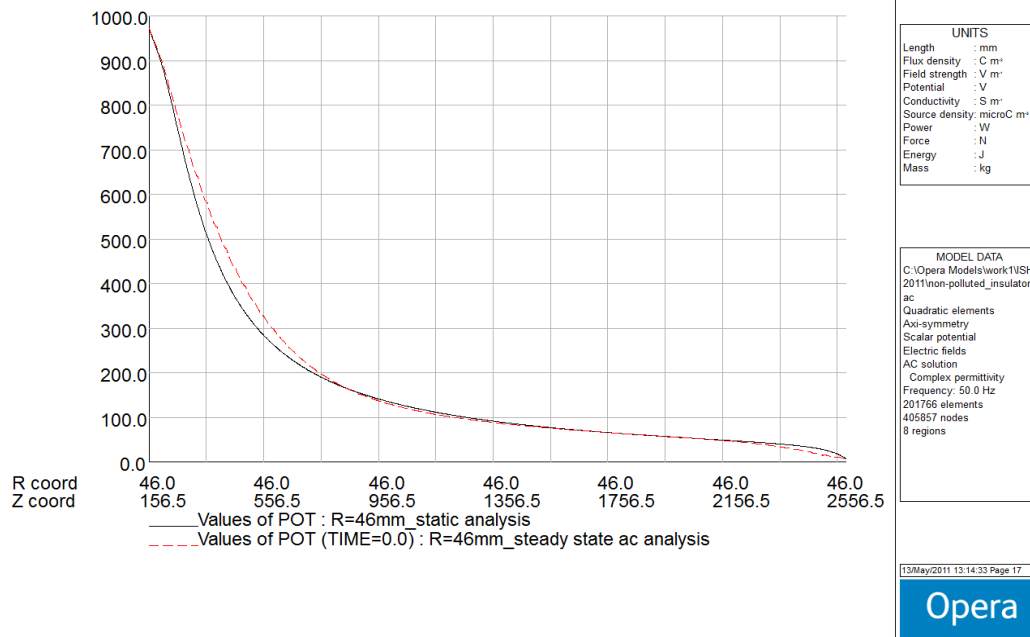
Αρχικά έγιναν προσομοιώσεις με τη χρήση της ρουτίνας OPERA-2d/ST, η οποία, όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 4.1.3, επιλύει το πρόβλημα του ημιστατικού πεδίου. Στη συνέχεια οι προσομοιώσεις έγιναν και με τη χρήση του solver OPERA-2d/AC, επιλύοντας αυτή τη φορά το πρόβλημα του εναλλασσόμενου πεδίου συχνότητας 50Hz. Η τιμή του δυναμικού στο υπό τάση άκρο του μονωτήρα τέθηκε ίση με 1kV. Από τις προσομοιώσεις αυτές προέκυψαν οι κατανομές του δυναμικού (POT σε Volts) και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (EMOD<sup>3</sup> σε Volts/m) στο κέντρο και κατά μήκος των πτερυγίων του μονωτήρα. Οι κατανομές αυτές φαίνονται σε κοινούς άξονες στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-24 έως Σχήμα 4-27).



Σχήμα 4-24: Κατανομή του δυναμικού (POT) κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης

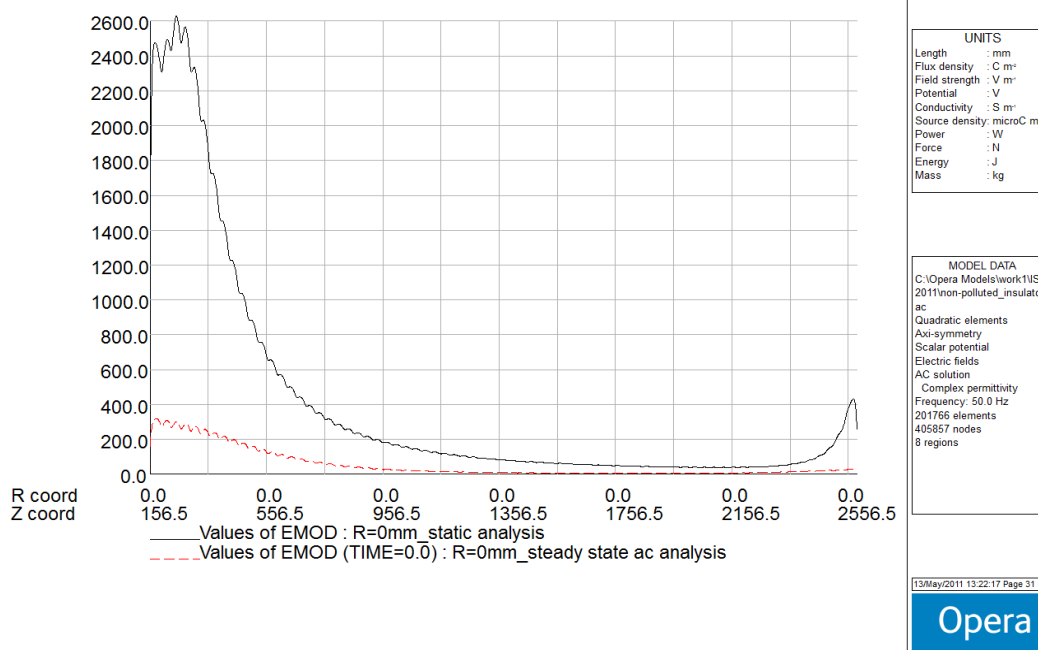
<sup>3</sup> Η υπολογιζόμενη μεταβλητή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου EMOD προκύπτει ως συνισταμένη της ακτινικής ( $E_r$ ) και της κάθετης ( $E_z$ ) συνιστώσας του πεδίου, ως εξής:

$$EMOD = \sqrt{E_r^2 + E_z^2}$$



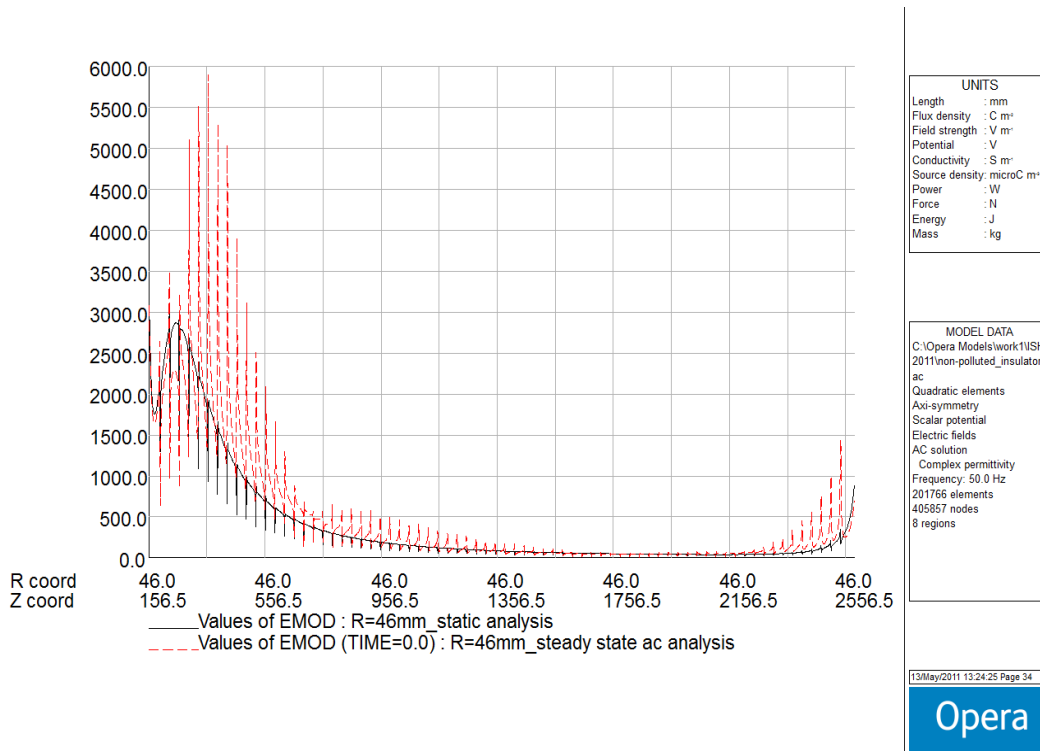
Σχήμα 4-25: Κατανομή του δυναμικού (POT) κατά μήκος των άκρων των περυγίων του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης

Από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 4-24 και Σχήμα 4-25) φαίνεται ότι οι κατανομές του δυναμικού (στο κέντρο του μονωτήρα και κατά μήκος των άκρων των περυγίων) που προκύπτουν για κάθε ένα από τα επιλυτικά προγράμματα βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους. Ωστόσο παρακάτω θα δούμε πως η συμφωνία αυτή δεν επιβεβαιώνεται για την περίπτωση των κατανομών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 4-26: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (EMOD) κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης





Σχήμα 4-27: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (EMOD) κατά μήκος των άκρων των περυγίων του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης

Πράγματι, όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 4-26 και Σχήμα 4-27) παρατηρείται σημαντική απόκλιση μεταξύ των κατανομών που προκύπτουν από τη χρήση των δύο διαφορετικών επιλυτών (*solvers*). Είναι σαφές ότι και για τις δύο μεθόδους προσομοίωσης η πεδιακή καταπόνηση είναι πολύ πιο έντονη στα κατά μήκος των άκρων των περυγίων του μονωτήρα, λόγω της διεπιφάνειας μεταξύ πολυμερούς και αέρα. Ωστόσο, συγκρίνοντας τις γραφικές παραστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4-26 με αυτές στο Σχήμα 4-27 παρατηρείται το εξής: οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο του μονωτήρα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με τον επιλύτη OPERA-2d/ST είναι σημαντικά αυξημένες, σε σχέση με αυτές που προκύπτουν στην ίδια περιοχή μετά από χρήση του OPERA-2d/AC. Αντίθετα, στα άκρα των περυγίων οι τιμές που προκύπτουν με τη χρήση του OPERA-2d/ST είναι σημαντικά μειωμένες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν με τον OPERA-2d/AC. Μάλιστα κινούνται στα επίπεδα των τιμών της έντασης του πεδίου που εμφανίζονται στο κέντρο του μονωτήρα.

Βλέπουμε λοιπόν ότι, εκτός από την πλήρη ασυμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση αυτών των δύο επιλυτών, η ανάλυση με τη χρήση του OPERA-2d/ST υπερεκτιμά τις τιμές της πεδιακής έντασης στο εσωτερικό του μονωτήρα και τις υποεκτιμά στα άκρα των περυγίων, σε πλήρη αντίθεση με τα αποτελέσματα που αναμένονται, με βάση τη θεωρία και τη σχετική βιβλιογραφία. Αντίθετα η προσομοίωση με τη χρήση του OPERA-2d/AC οδηγεί σε αποτελέσματα που απεικονίζουν πιο ρεαλιστικά την πεδιακή καταπόνηση, με πολύ μικρές τιμές στο εσωτερικό του μονωτήρα, που είναι και το επιθυμητό και αυξημένες κατά μήκος των άκρων των περυγίων.

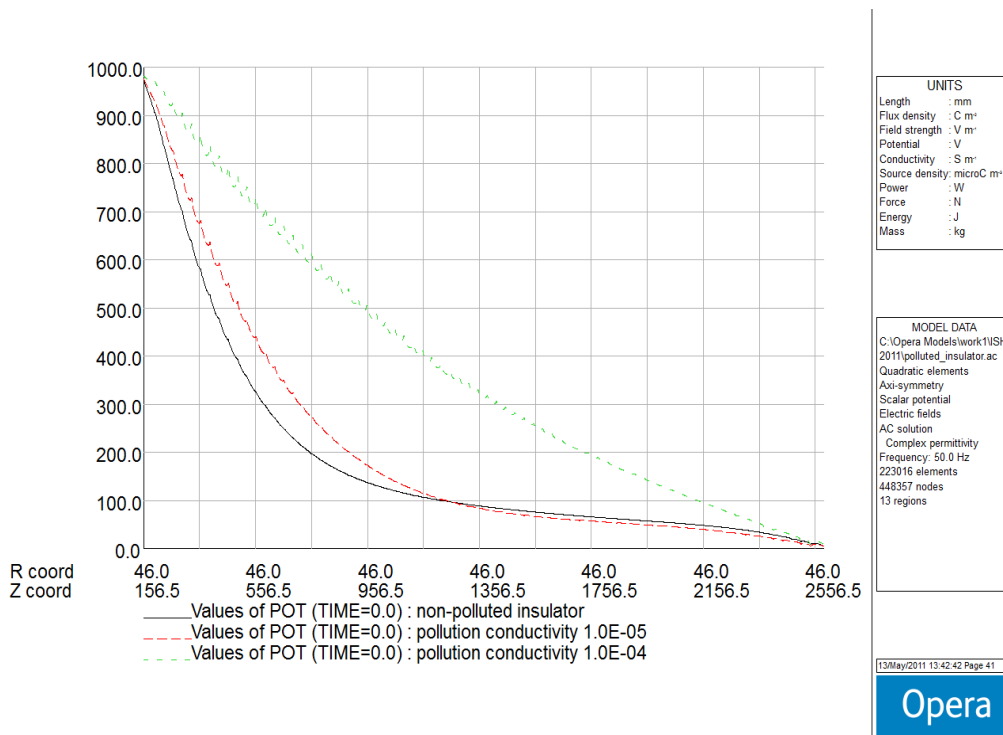
Έτσι, παρότι η προσομοίωση του εναλλασσόμενου πεδίου απαιτεί πέντε φορές περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθεί, σε σχέση με την προσομοίωση του ημιστατικού πεδίου, είναι προτιμότερη η χρήση της, αφού τα αποτελέσματά της είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα.

#### 4.2.3.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων υπό συνθήκες ρύπανσης

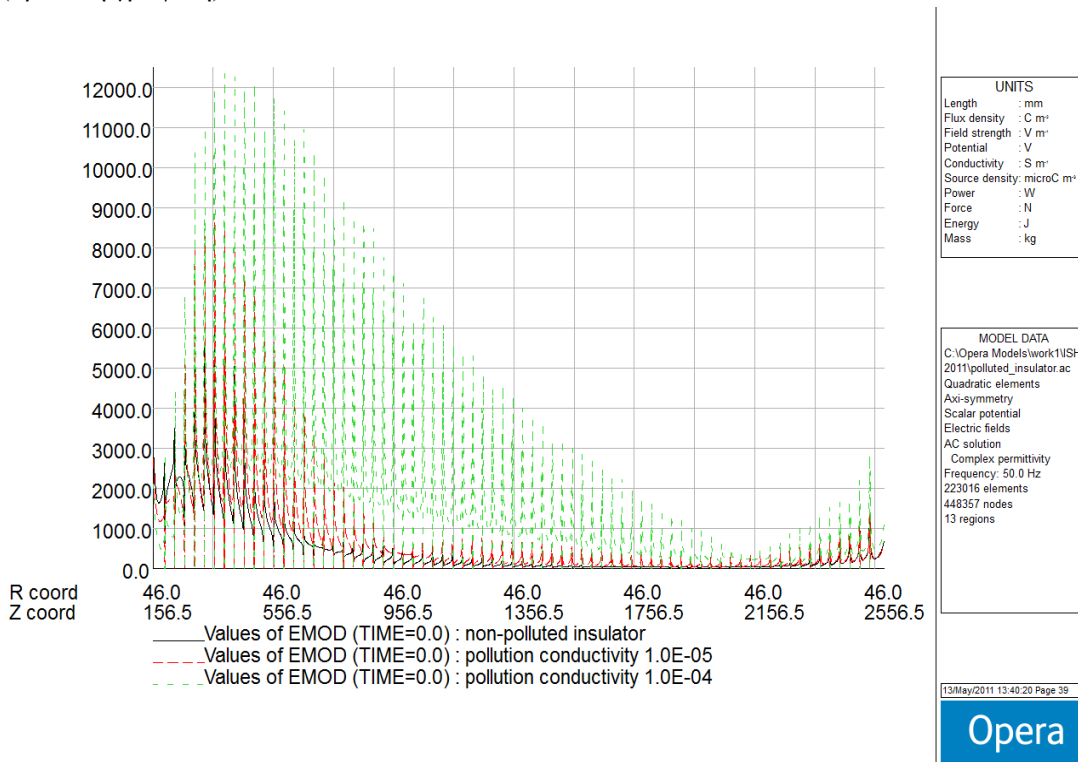
Όλοι οι μονωτήρες που βρίσκονται εγκατεστημένοι στα κατά τόπους δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας υφίστανται διάφορες λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που έχουν ως αποτέλεσμα την επικάλυψη ρύπων στην επιφάνειά τους. Στην πλειονότητά τους οι ρύποι αυτοί δεν αποτελούν πρόβλημα υπό στεγνές συνθήκες, ωστόσο υπό συνθήκες διαβροχής η αυξημένη αγωγιμότητα του υδατικού διαλύματος των ρύπων μπορεί να επιδεινώσει την πεδιακή καταπόνηση του εξοπλισμού, οδηγώντας σε μερικές εκκενώσεις και στη χειρότερη περίπτωση σε υπερπήδηση των μονωτήρων. Πιο αναλυτικά το θέμα της ρύπανσης των μονωτήρων παρουσιάστηκε στην παράγραφο 1.3.3.

Για την προσομοίωση των ρυπασμένων επιφανειών στην περίπτωση του συγκεκριμένου μονωτήρα χρησιμοποιήθηκε το εξής μοντέλο: η ρύπανση θεωρείται βαριά στις άνω επιφάνειες των πτερυγίων και στην κάθετη όψη του περιβλήματος μεταξύ των πτερυγίων, ενώ στο κάτω μέρος των πτερυγίων η ρύπανση θεωρείται μέτρια. Η διαφορά στην ένταση της ρύπανσης μοντελοποιείται μεταβάλλοντας το πάχος του στρώματος ρύπανσης. Έτσι, στη βαριά ρύπανση αντιστοιχεί στρώμα πάχους  $\delta = 10^{-3} \text{ m}$ , ενώ στη μεσαία ρύπανση στρώμα πάχους  $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Η αγωγιμότητα των ρύπων θεωρείται ίδια σε όλες τις περιοχές και επιλέγεται να έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτή του περιβλήματος, έτσι ώστε να προσομοιώνει την αυξημένη ροή ρεύματος στην επιφάνεια του μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης.

Η προσομοίωση του ρυπασμένου μονωτήρα έγινε με τη χρήση του επιλυτικού προγράμματος OPERA-2d/AC, το οποίο λαμβάνει υπόψη την υψηλή τιμή της επιφανειακής αγωγιμότητας. Η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των πτερυγίων για τις περιπτώσεις του καθαρού μονωτήρα και του ρυπασμένου μονωτήρα με αγωγιμότητα ρύπων  $\sigma = 10^{-5} \text{ S/m}$  στην πρώτη περίπτωση και  $\sigma = 10^{-4} \text{ S/m}$  στη δεύτερη φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 4-28 και Σχήμα 4-29). Είναι εμφανές ότι η πεδιακή καταπόνηση αυξάνεται, όσο αυξάνεται η αγωγιμότητα των ρύπων, με συνεπαγόμενη αύξηση της πιθανότητας υπερπήδησης.



Σχήμα 4-28: Κατανομή του δυναμικού (POT) κατά μήκος των περυγίων του μονωτήρα για καθαρή εξωτερική επιφάνεια (μαύρη γραφική), για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-5} \text{ S/m}$  (κόκκινη γραφική) και για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-4} \text{ S/m}$  (πράσινη γραφική)



Σχήμα 4-29: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (EMOD) κατά μήκος των περυγίων του μονωτήρα για καθαρή εξωτερική επιφάνεια (μαύρη γραφική), για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-5} \text{ S/m}$  (κόκκινη γραφική) και για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-4} \text{ S/m}$  (πράσινη γραφική)

## 4.2.4. Προσομοιώσεις συνθετικών μονωτήρων Υ.Τ και Υ.Υ.Τ. του ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

### 4.2.4.1. Γενικά

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν σε μοντέλα βασισμένα στα σχέδια των μονωτήρων Υ.Τ. (150kV) και Υ.Υ.Τ. (400kV) του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σχέδια αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.2.1 (Σχήμα 4-3 ως και Σχήμα 4-11). Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει θεωρώντας ιδανικές συνθήκες, δηλαδή μονωτήρες με καθαρές και στεγνές επιφάνειες.

Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών που ισχύουν για τον περιβάλλοντα χώρο έχουν ήδη περιγραφεί στην παράγραφο 4.2.2.3. Για τα μεταλλικά άκρα ισχύουν τα εξής:

- Προφανώς στο γειωμένο άκρο το δυναμικό τίθεται ίσο με 0V .
- Στο υπό τάση άκρο, για την περίπτωση των μονωτήρων Υ.Τ. (150kV) το δυναμικό τέθηκε ίσο με  $150000/\sqrt{3} = 87000\text{V}$  (φασική rms τιμή). Ομοίως για τους μονωτήρες Υ.Υ.Τ. (400kV) το δυναμικό τέθηκε ίσο με  $400000/\sqrt{3} = 230000\text{V}$  (φασική rms τιμή).

Τέλος, στα διαγράμματα που ακολουθούν ο αναγνώστης θα παρατηρήσει πως τα αποτελέσματα που παρατίθενται δεν "ξεκινάνε" από την αρχή του υπό τάση άκρου (δηλαδή από το κατώτερο σημείο του μονωτήρα). Αντίθετα, για την κατασκευή των περισσότερων διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που αντιστοιχούν στην απόσταση μόνωσης μεταξύ των δύο μεταλλικών άκρων, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι τιμές που αφορούν σε αυτά.

Τέλος, στα διαγράμματα που ακολουθούν ο αναγνώστης θα παρατηρήσει πως τα αποτελέσματα που παρατίθενται δεν "ξεκινάνε" από την αρχή του υπό τάση άκρου (δηλαδή από το κατώτερο σημείο του μονωτήρα). Αντίθετα, για την κατασκευή των περισσότερων διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που αντιστοιχούν στην απόσταση μόνωσης μεταξύ των δύο μεταλλικών άκρων, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι τιμές που αφορούν σε αυτά.

Η εξήγηση είναι η εξής: στην περίπτωση του δυναμικού προφανώς δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στην τιμή του σε κανένα σημείο κατά μήκος του μετάλλου. Στην περίπτωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, στο εσωτερικό των μεταλλικών εξαρτημάτων η τιμή της είναι προφανώς μηδενική, λόγω του φαινομένου της ηλεκτρικής χαλάρωσης [66]. Είναι φανερό ότι η συμπερίληψη των τιμών των περιοχών αυτών θα είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σταθερών τιμών στην αρχή και στο τέλος των γραφικών παραστάσεων. Ταυτόχρονα θα μειωνόταν ο αριθμός των τιμών που αντιστοιχούν στην απόσταση μόνωσης και είναι αυτές που έχουν ουσιαστικό ενδιαφέρον. Έτσι, αποφασίστηκε οι τιμές που αφορούν στους μεταλλικούς τερματισμούς να μη συμπεριλαμβάνονται κατά τη χάραξη των κατανομών του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

### 4.2.4.2. Συνθετικοί μονωτήρες Υ.Τ. (150kV)

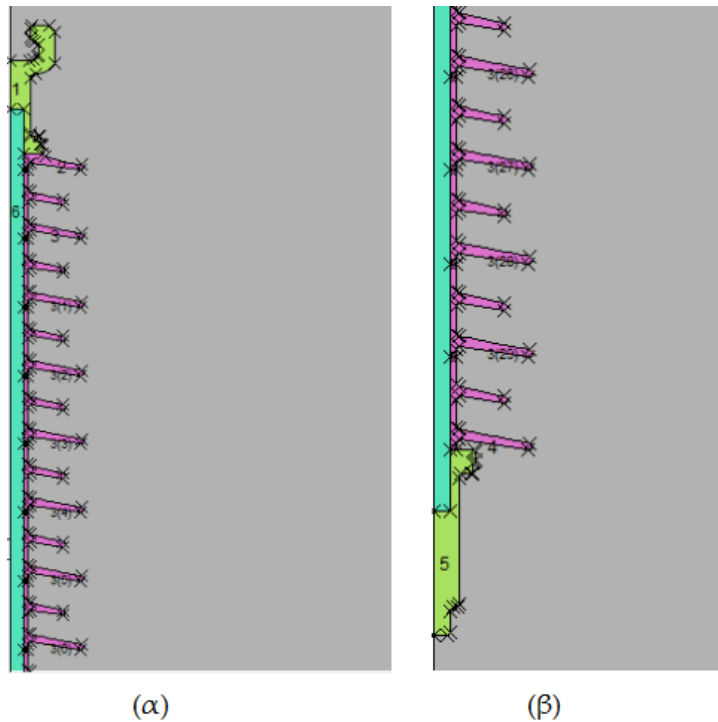
#### 4.2.4.2.1. Κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μέσα και γύρω από το μονωτήρα

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η κατανομή δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μέσα και γύρω από συνθετικό μονωτήρα ανάρτησης Υ.Τ. (150kV) του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

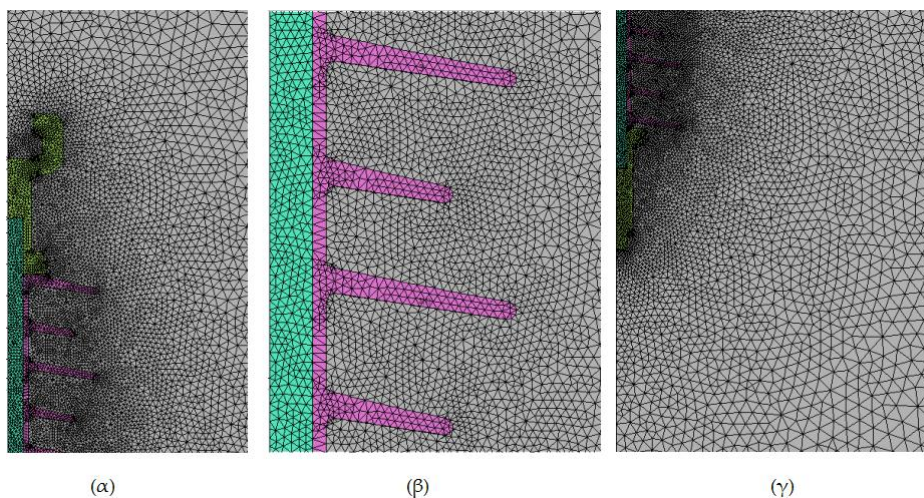


Επιλέχθηκε ο μονωτήρας 1 (Σχήμα 4-3), λεπτομέρειες του μοντέλου του οποίου φαίνονται στο Σχήμα 4-30 και του πλέγματος στο Σχήμα 4-31.

Ο μονωτήρας αυτός έχει συνολικό μήκος 1901mm (μαζί με τους μεταλλικούς τερματισμούς, απόσταση μόνωσης 1693mm και μήκος ερπυσμού 5708mm. Διαθέτει 32 πτερύγια ακτίνας 57,5mm και 31 πτερύγια ακτίνας 42,5mm τα οποία εναλλάσσονται μεταξύ τους. Η ράβδος του πυρήνα από ίνες γυαλιού ECR έχει ακτίνα 10mm, ενώ η ακτίνα του πολυμερούς περιβλήματος που περιβάλλει τον πυρήνα είναι 13,3mm. Το βάρος του είναι 10kg. Μονωτήρες αυτού του τύπου βρίσκονται εγκατεστημένοι στη γραμμή μεταφοράς Αθρινόλακκος-Σύστημα, στο νομό Λασιθίου, στην Κρήτη.

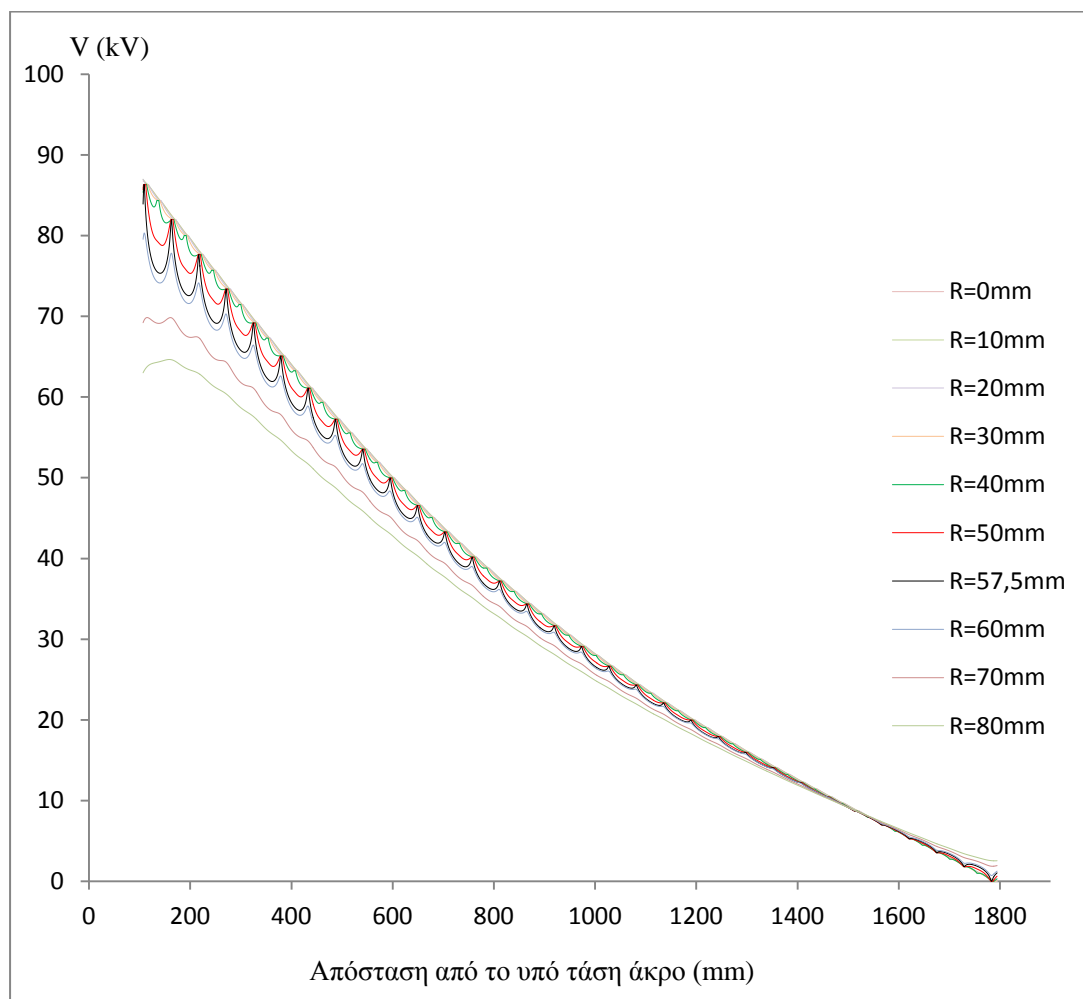


Σχήμα 4-30: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3)



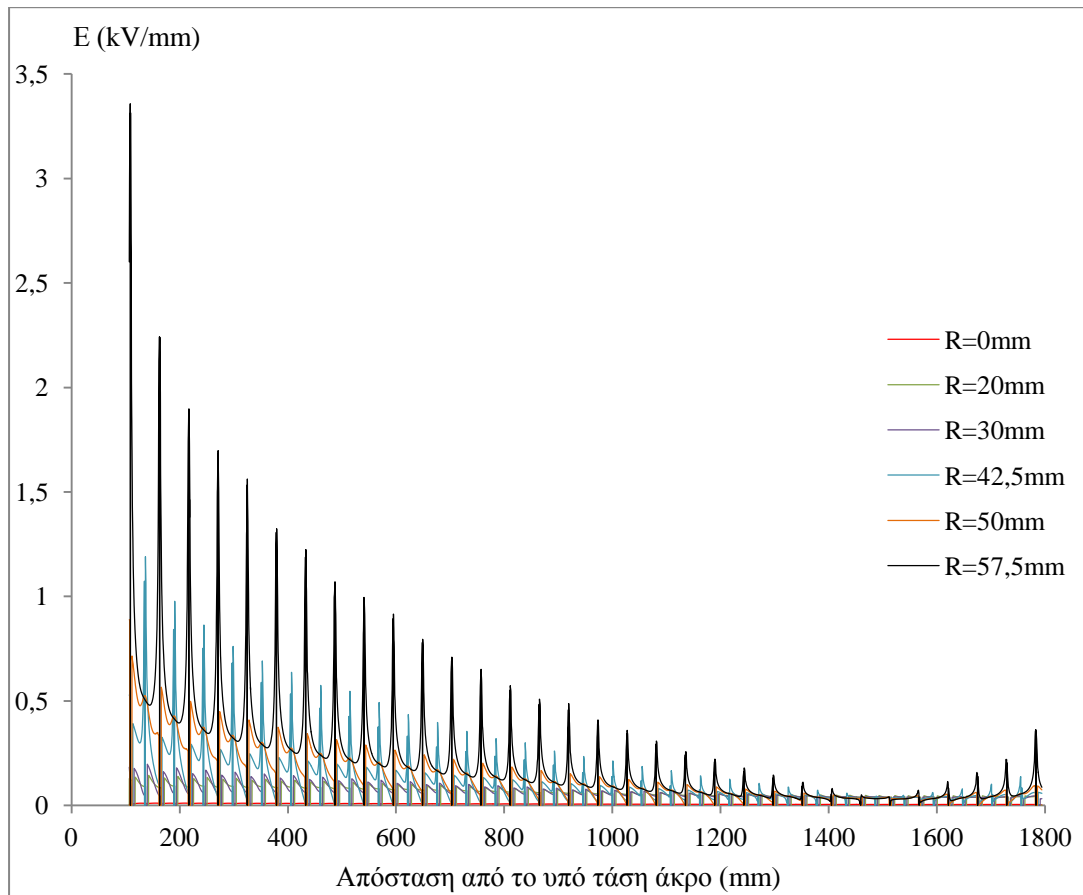
Σχήμα 4-31: Λεπτομέρειες του πλέγματος γύρω από (α) το γειωμένο άκρο, (β) το εσωτερικό και τα πτερύγια και (γ) το υπό τάση άκρο του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3)

Στο Σχήμα 4-31 φαίνονται σε κοινή γραφική παράσταση οι κατανομές του δυναμικού, από το κέντρο του μονωτήρα (άξονας συμμετρίας) μέχρι το εξωτερικό του (απόσταση 80mm από το κέντρο). Παρατηρούμε ότι η κατανομή του δυναμικού είναι χωρητική, δηλαδή διαμορφώνεται από τη χωρητικότητα του μονωτήρα και από τις παράσιτες χωρητικότητες. Ξεκινώντας από το κέντρο του μονωτήρα και πλησιάζοντας προς το εξωτερικό του, οι τιμές του δυναμικού ακολουθούν πτωτική πορεία, ενώ πλησιάζοντας τα πτερύγια παρατηρούνται πτυχώσεις που οφείλονται στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές ιδιότητες (αέρα και πολυμερές). Απομακρυνόμενοι από το μονωτήρα, οι γραφικές τείνουν να ομαλοποιηθούν.



Σχήμα 4-32: Κατανομή του δυναμικού σε διάφορες αποστάσεις από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3) ( $R=0\text{mm}$ ). Η απόσταση  $R=57,5\text{mm}$  αντιστοιχεί στην ευθεία που ενώνει τις άκρες των πτερυγίων του μονωτήρα.

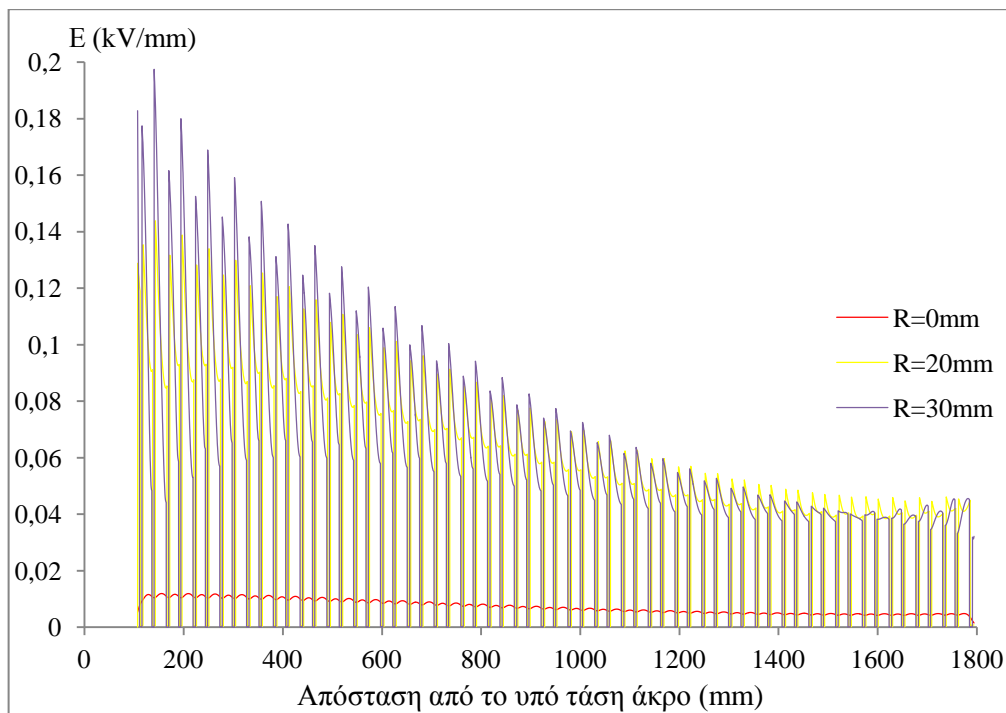
Η επίδραση της ύπαρξης των πτερυγίων και της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ πολυμερούς και αέρα είναι πολύ πιο εμφανής στην περίπτωση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-33 ως Σχήμα 4-36) παρουσιάζονται οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μέσα και έξω από το μονωτήρα.



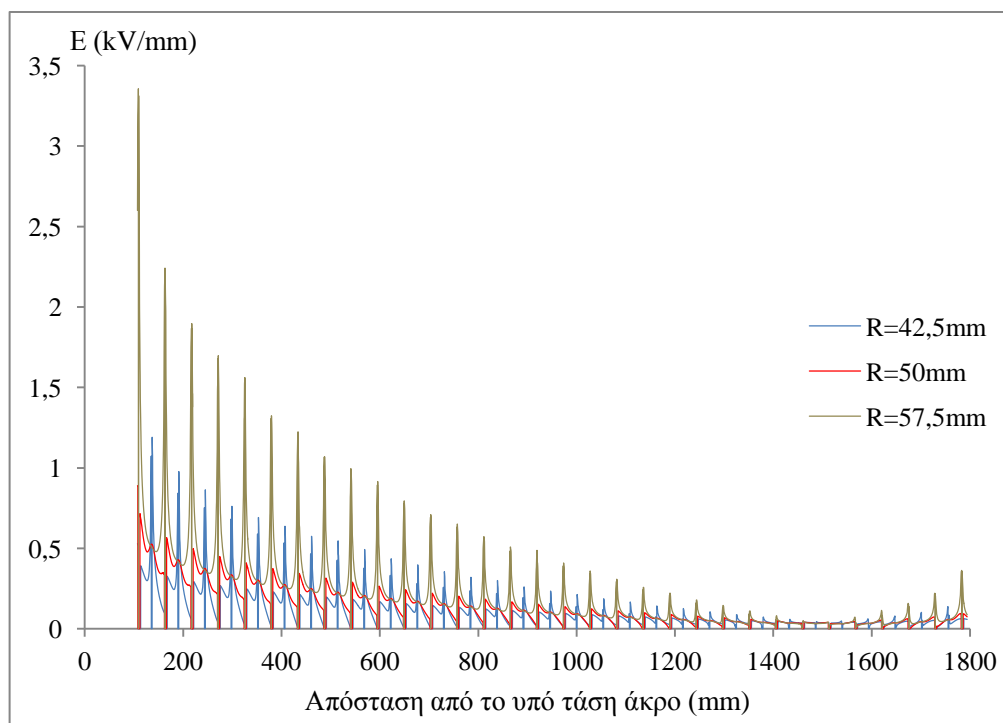
Σχήμα 4-33: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3), κατά μήκος κάθετων γραμμών από το κέντρο του ως τα άκρα των πτερυγίων με τη μεγαλύτερη διάμετρο ( $R=57,5\text{mm}$ )

Στο Σχήμα 4-33 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα, μέχρι το άκρο των πτερυγίων με τη μεγαλύτερη ακτίνα ( $57,5\text{mm}$ ). Είναι εμφανές ότι όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο η πεδιακή καταπόνηση αυξάνεται, ενώ στο εσωτερικό του μονωτήρα διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Για να γίνει πιο ξεκάθαρη η μεταβολή στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, τα δεδομένα του παραπάνω σχήματος φαίνονται ξεχωριστά στο Σχήμα 4-34 και στο Σχήμα 4-35.

Στο Σχήμα 4-34 παρουσιάζονται οι κατανομές της πεδιακής έντασης στο κέντρο του μονωτήρα και σε απόσταση  $20\text{mm}$  και  $30\text{mm}$  από αυτό. Στο κέντρο του μονωτήρα οι τιμές της έντασης του πεδίου διατηρούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, κάτω από τα  $0,02\text{kV/mm}$ . Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο και επιθυμητό, καθώς η αντίθετη περίπτωση, δηλαδή η αυξημένη πεδιακή καταπόνηση στο εσωτερικό της ράβδου από υαλονήματα έχει καταστροφικές συνέπειες. Στα  $20\text{mm}$  οι τιμές διατηρούνται κάτω από τα  $0,15\text{kV/mm}$ , ενώ παρατηρούνται έντονες αιχμές στη γραφική παράσταση. Οι αιχμές αυτές οφείλονται στην ύπαρξη των πτερυγίων και στην εναλλαγή μεταξύ των υλικών (πολυμερούς και αέρα). Στα  $30\text{mm}$  η πεδιακή καταπόνηση αυξάνεται, ωστόσο διατηρείται ακόμη σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από τα  $0,2\text{kV/mm}$ .



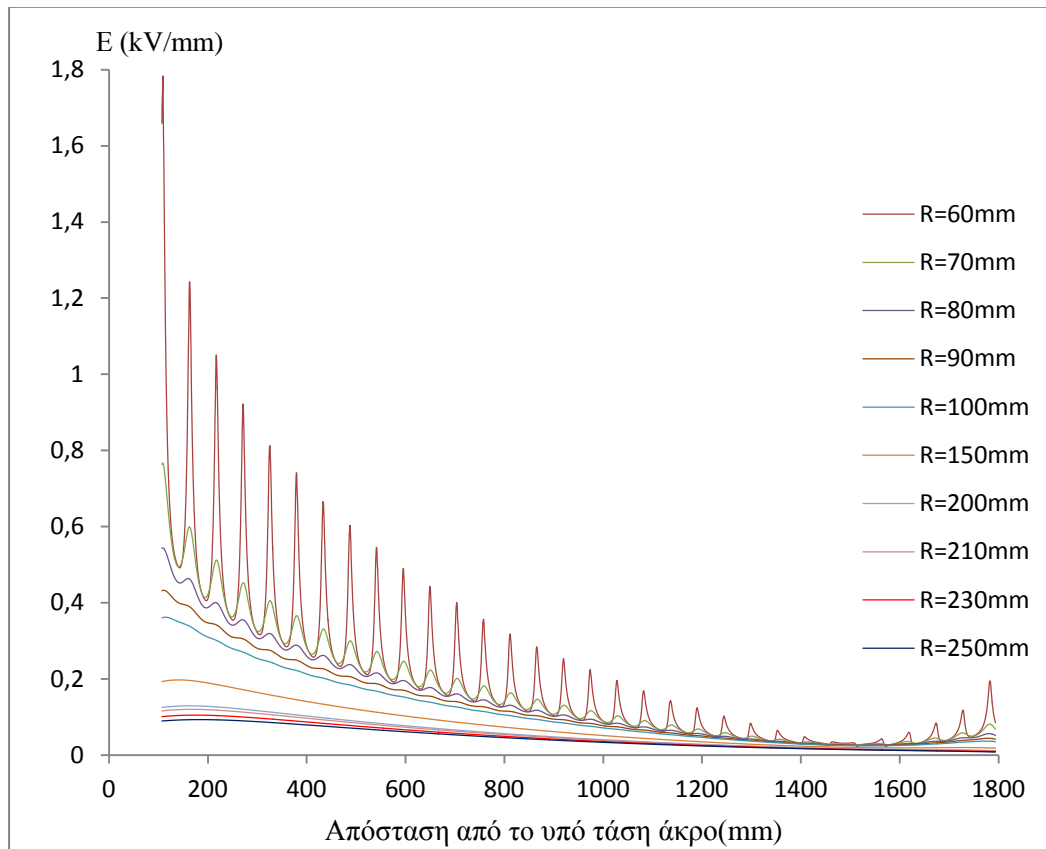
Σχήμα 4-34: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3), κατά μήκος κάθετων γραμμών από το κέντρο του ως 12,5mm πριν την άκρη των πτερυγίων με τη μικρότερη διάμετρο ( $R=42,5\text{mm}$ )



Σχήμα 4-35: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στα μικρότερα ( $R=42,5\text{mm}$ ) και τα μεγαλύτερα ( $R=57,5\text{mm}$ ) πτερύγια του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3)

Στο Σχήμα 4-35 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο ανάμεσα στα άκρα των πτερυγίων με τη μικρότερη ( $42,5\text{mm}$ ) και τη μεγαλύτερη ( $57,5\text{mm}$ ) ακτίνα. Στα  $42,5\text{mm}$  οι τιμές της έντασης του πεδίου είναι αυξημένες, με μέγιστη τιμή τα  $1,19\text{kV/mm}$ . Σε ίση απόσταση από τα άκρα των μικρών και των μεγάλων πτερυγίων ( $50\text{mm}$ ) η πεδιακή ένταση

διατηρείται κάτω από 1kV/mm ενώ παρατηρούνται αιχμές οι οποίες αντιστοιχούν στις θέσεις των άκρων των πτερυγίων. Η χειρότερη περίπτωση πεδιακής καταπόνησης αφορά στα άκρα των πτερυγίων με τη μεγαλύτερη ακτίνα (57,5mm). Η μέγιστη τιμή της έντασης του πεδίου που παρατηρείται στην περιοχή αυτή είναι 3,36kV/mm. Όσο απομακρυνόμαστε από το υπό τάση άκρο οι τιμές της πεδιακής έντασης μειώνονται. Αυτό αλλάζει κοντά στο γειωμένο άκρο, όπου λόγω της ύπαρξης του μετάλλου παρατηρείται μία ελαφριά αύξηση της πεδιακής έντασης, ωστόσο οι τιμές διατηρούνται κάτω από τα 0,4kV/mm.



Σχήμα 4-36: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο έξω από το μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3)

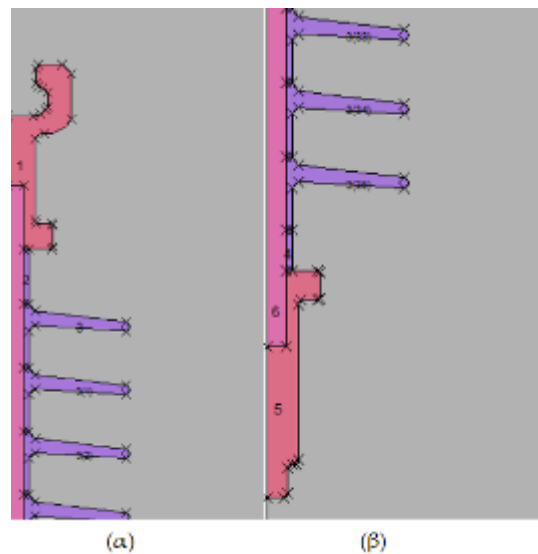
Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4-36) παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού στο χώρο έξω από το μονωτήρα. Στα 60mm (2,5mm από τα άκρα των πτερυγίων) η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης είναι 1,78kV/mm, σχεδόν στο μισό της μέγιστης πεδιακής έντασης που εκδηλώνεται στα 57,5mm, ενώ η κατανομή εξακολουθεί να εμφανίζει τις αιχμές που αντιστοιχούν στις άκρες των πτερυγίων. Όσο αυξάνεται η απόσταση, η μείωση της πεδιακής έντασης είναι ραγδαία, ενώ οι καμπύλες τείνουν να εξομαλυνθούν. Από τα 150mm και μετά η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει κάτω από 0,2kV/mm.

Η παραπάνω "εικόνα" της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από ένα μονωτήρα ανάρτησης 150kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4).

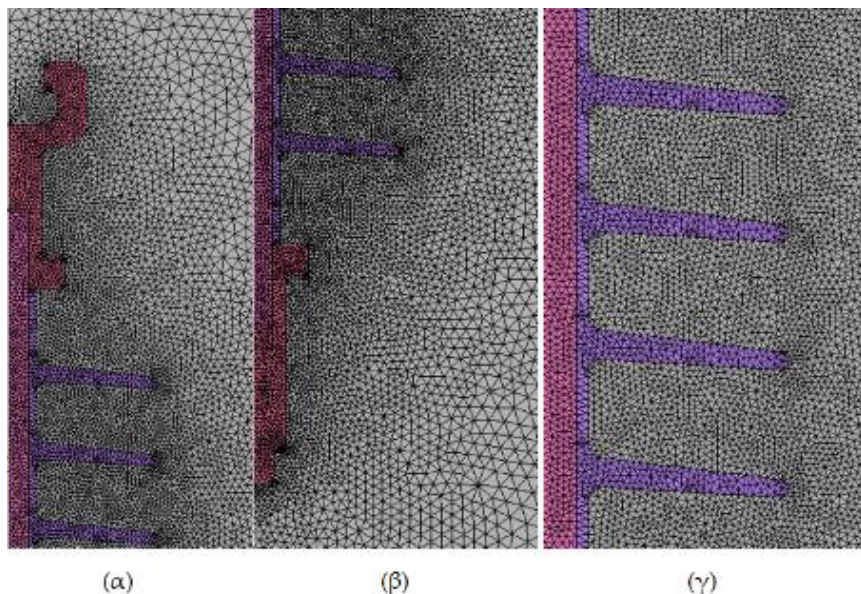


Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τμήματα του μοντέλου, όπως σχεδιάστηκαν στον προεπεξεργαστή του OPERA-2d (Σχήμα 4-37) και το πλέγμα σε διάφορες περιοχές του μοντέλου (Σχήμα 4-38). Ο μονωτήρας αυτός διαθέτει 36 πτερύγια ίδιας ακτίνας (67mm), απόσταση μόνωσης 1309mm, μήκος ερπυσμού 4765mm και συνολικό μήκος 1524mm. Το βάρος του είναι 6,7kg.

Σε σχέση με τον προηγούμενο μονωτήρα που εξετάστηκε, στο συγκεκριμένο τα πτερύγια είναι πιο αραιά διατεταγμένα, ενώ έχουν και μικρότερη κλίση. Επίσης, οι αποστάσεις του πρώτου και του τελευταίου πτερυγίου από τους μεταλλικούς τερματισμούς είναι μεγαλύτερες, γεγονός που σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [40] επηρεάζει της πεδιακή καταπόνηση στο σημείο τριπλής ένωσης. Η αλληλεπίδραση αυτή εξετάζεται παρακάτω, στην παράγραφο 4.2.4.2.4.

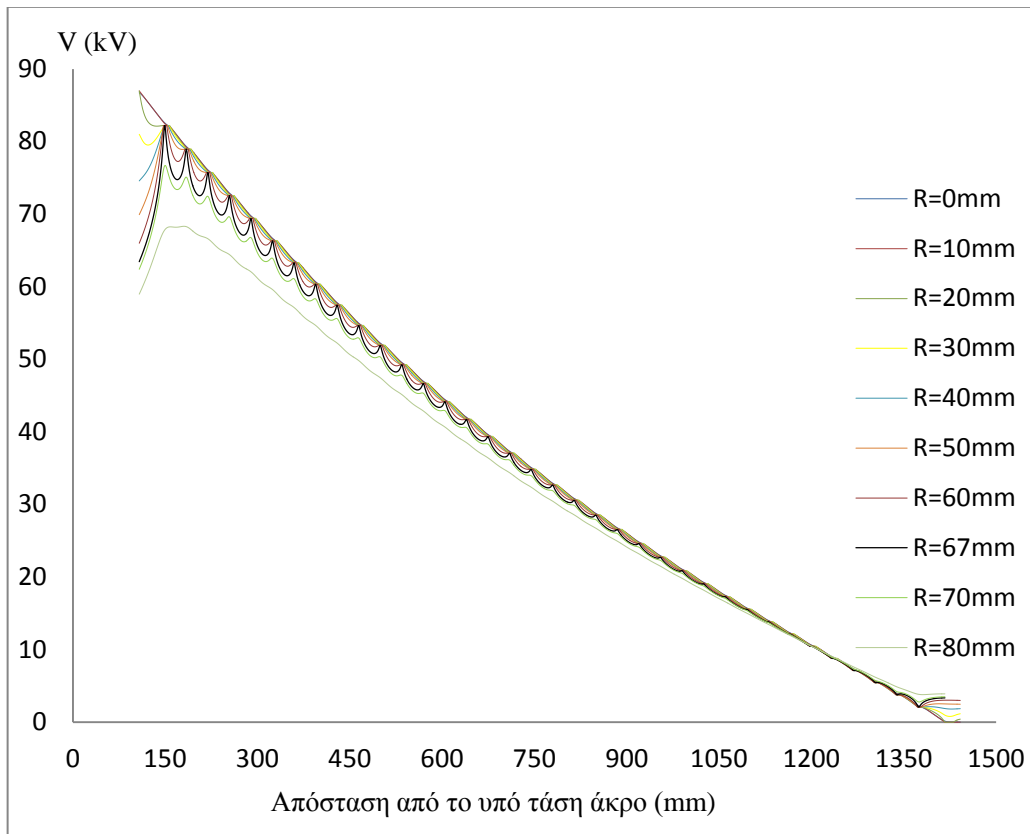


Σχήμα 4-37: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4)



Σχήμα 4-38: Λεπτομέρειες του πλέγματος γύρω από (α) το γειωμένο άκρο, (β) το υπό τάση άκρο και (γ) το εσωτερικό και τα πτερύγια του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4)

Από τα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 4-39 ως Σχήμα 4-42) βλέπουμε ότι οι κατανομές του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο γύρω από το μονωτήρα 2 είναι αντίστοιχες με αυτές που προέκυψαν για το μονωτήρα 1. Η κατανομή του δυναμικού (Σχήμα 4-39) είναι χωρητική, όπως αναμενόταν. Οι καμπύλες των επιμέρους κατανομών, όσο πλησιάζουμε από το εσωτερικό προς τα άκρα των πτερυγίων εμφανίζουν αιχμές που ακολουθούν τις θέσεις των πτερυγίων, ενώ οι τιμές μειώνονται. Στο εξωτερικό η μείωση των τιμών είναι πιο έντονη, ενώ οι καμπύλες εξομαλύνονται γρήγορα.



Σχήμα 4-39: Κατανομή του δυναμικού σε διάφορες αποστάσεις από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4) ( $R=0\text{mm}$ ). Η απόσταση  $R=67\text{mm}$  αντιστοιχεί στην ευθεία που ενώνει τις άκρες των πτερυγίων του μονωτήρα.

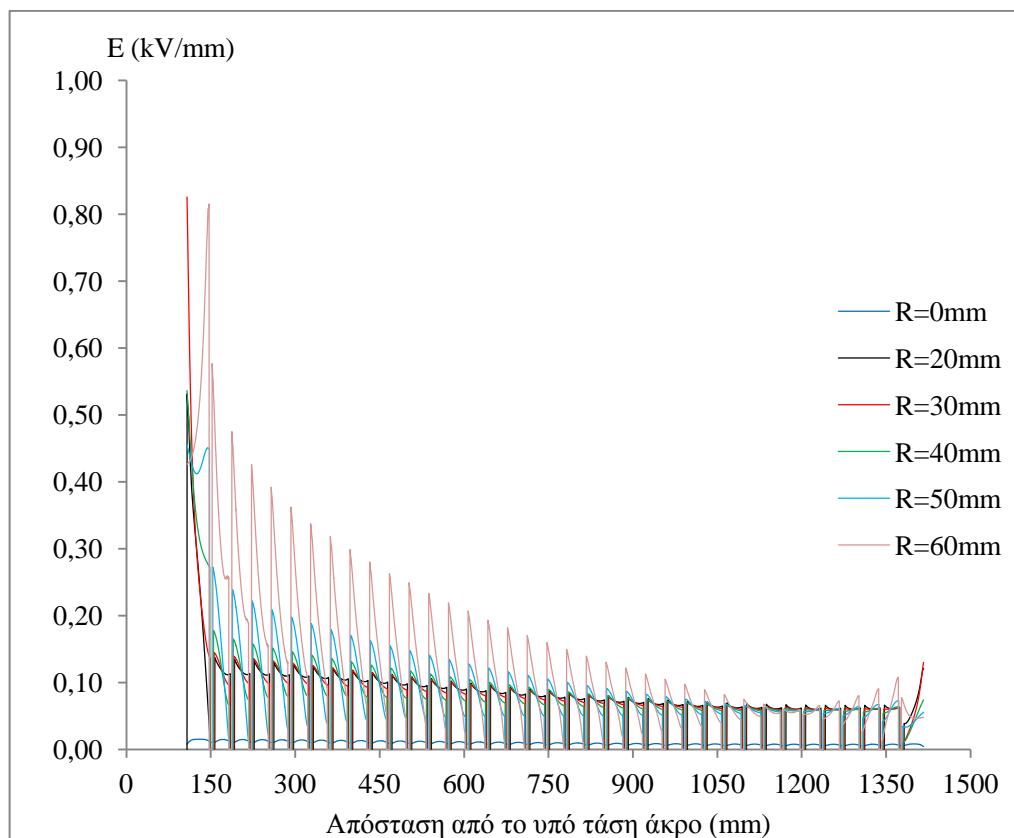
Στα ίδια συμπεράσματα με πριν οδηγούμαστε και στην περίπτωση της κατανομής της πεδιακής έντασης (Σχήμα 4-40). Στο κέντρο του μονωτήρα η πεδιακή ένταση είναι σχεδόν μηδενική, ενώ αυξάνεται καθώς πλησιάζουμε στα άκρα των πτερυγίων, ωστόσο οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου διατηρούνται κάτω από τα  $0,85\text{kV/mm}$ .

Και εδώ η χειρότερη περίπτωση πεδιακής καταπόνησης αφορά στα άκρα των πτερυγίων (Σχήμα 4-41). Η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης ανέρχεται στα  $2,58\text{kV/mm}$ . Πλησιάζοντας προς το γειωμένο άκρο η πεδιακή ένταση μειώνεται ραγδαία, ενώ κοντά σε αυτό παρατηρείται μία μικρή ανύψωση, χωρίς όμως οι τιμές να ξεπερνούν τα  $0,5\text{kV/mm}$ .

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης στην περίπτωση του μονωτήρα 2 είναι χαμηλότερη από την περίπτωση του μονωτήρα 1, όπου η μέγιστη

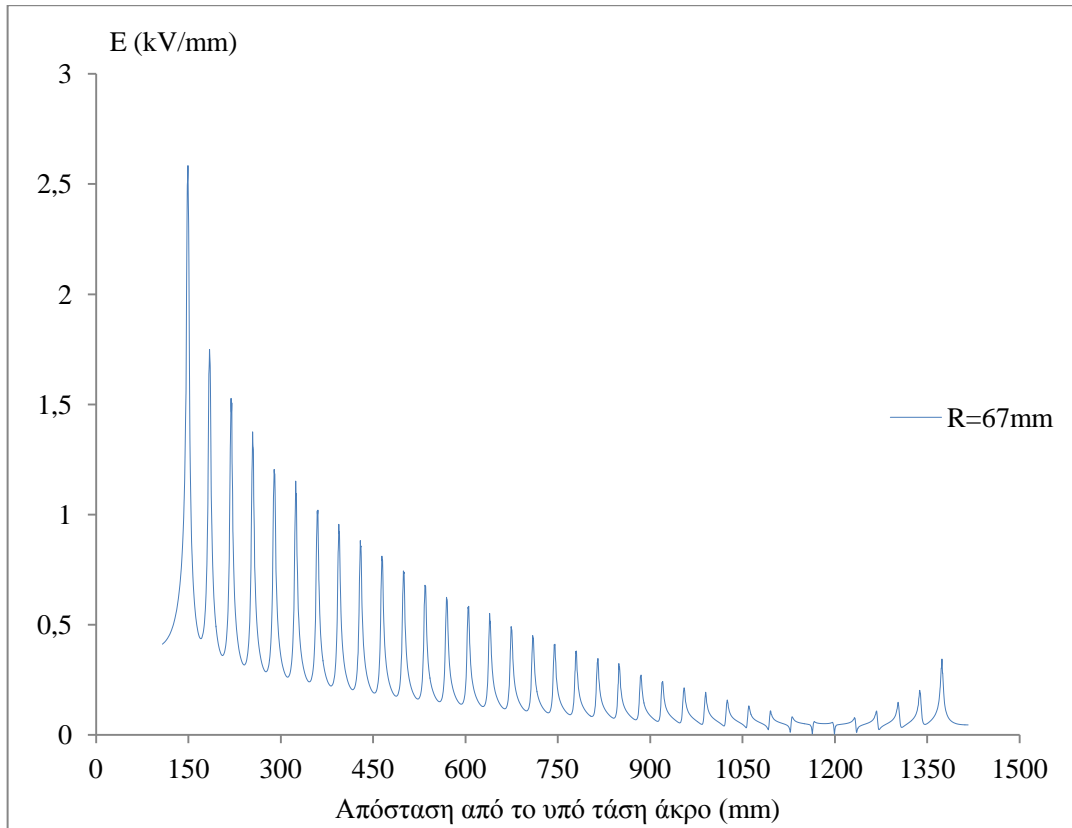
τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι 3,36kV/mm. Η διαφορά αυτή εξηγείται από τη διαφορά στην απόσταση του τελευταίου περυγίου από το μεταλλικό άκρο. Στην περίπτωση του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3) το περυγίο έχει ακτίνα 57,5mm και το κατώτερο άκρο του βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με το υπό τάση άκρο. Στην περίπτωση του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4) το τελευταίο περυγίο έχει ακτίνα 67mm και το άκρο του απέχει 39mm από το υπό τάση άκρο στον κάθετο άξονα. Η απόσταση αυτή συμβάλλει στη μείωση της πεδιακής έντασης στο άκρο του τελευταίου περυγίου σε σχέση με άλλα σχέδια μονωτήρων, ωστόσο η τιμή αυτή (2,58kV.mm) παραμένει εξαιρετικά υψηλή, αυξάνοντας τον κίνδυνο υπερπήδησης, αν διαμορφωθούν οι κατάλληλες συνθήκες (π.χ. υγρασία).

Στο εξωτερικό του μονωτήρα η εικόνα είναι ανάλογη με τα προηγούμενα συμπεράσματα (Σχήμα 4-42). Σε απόσταση 3mm από τα άκρα των περυγίων η κατανομή της πεδιακής έντασης πέφτει κάτω από τα 1,4kV/mm, με μέγιστη τιμή τα 1,35kV/mm, ενώ οι αιχμές στην κατανομή επιμένουν, λόγω εγγύτητας στα άκρα των περυγίων. Όσο αυξάνεται η απόσταση οι κατανομές ομαλοποιούνται και οι τιμές της έντασης μειώνονται, έτσι ώστε μετά τα 150mm να παραμένουν κάτω από τα 0,2kV/mm.

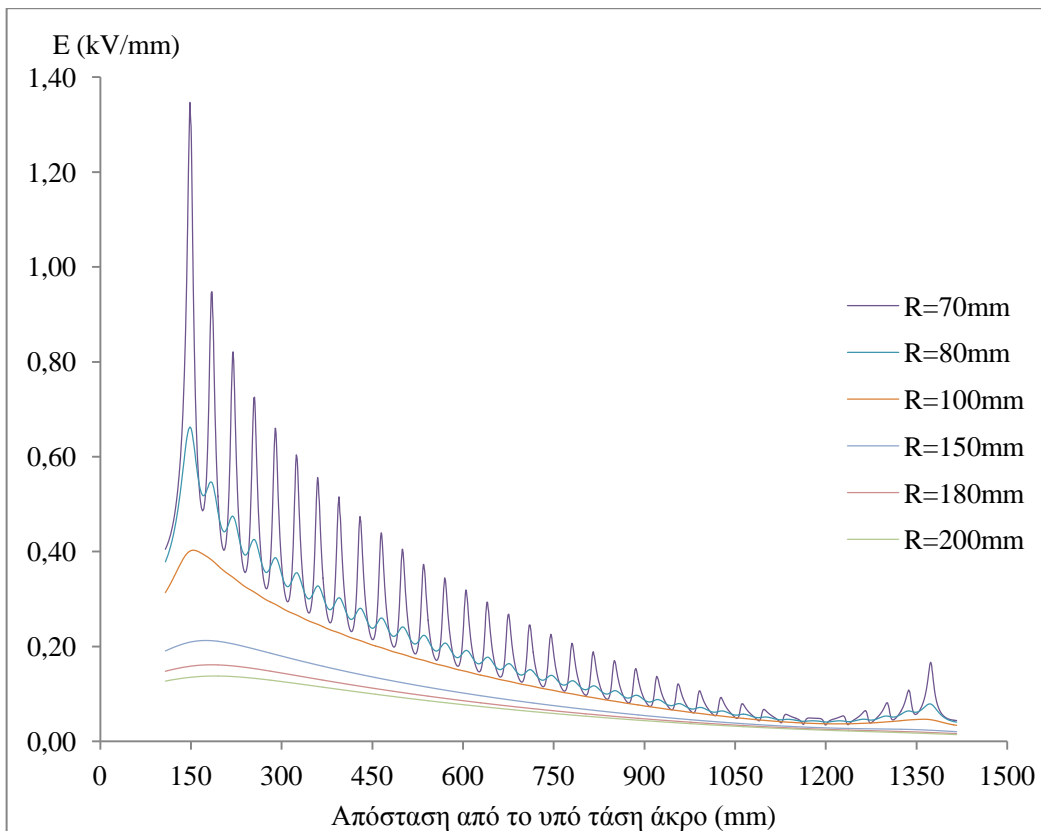


Σχήμα 4-40: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-3), κατά μήκος κάθετων γραμμών από το κέντρο του ως 7mm πριν τις άκρες των περυγίων





Σχήμα 4-41: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των περυγίων του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4) ( $R=67\text{mm}$ )



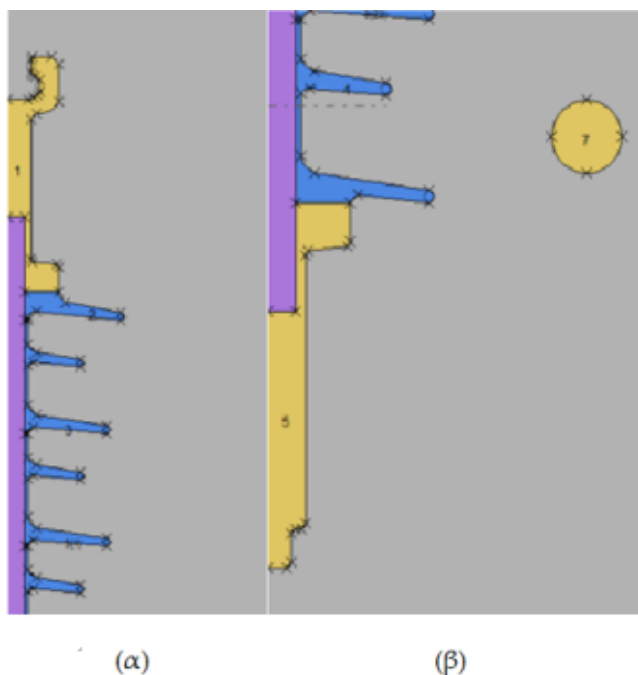
Σχήμα 4-42: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο έξω από το μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4)

#### 4.2.4.2.2. Επίδραση του τοροειδούς στην κατανομή της πεδιακής καταπόνησης

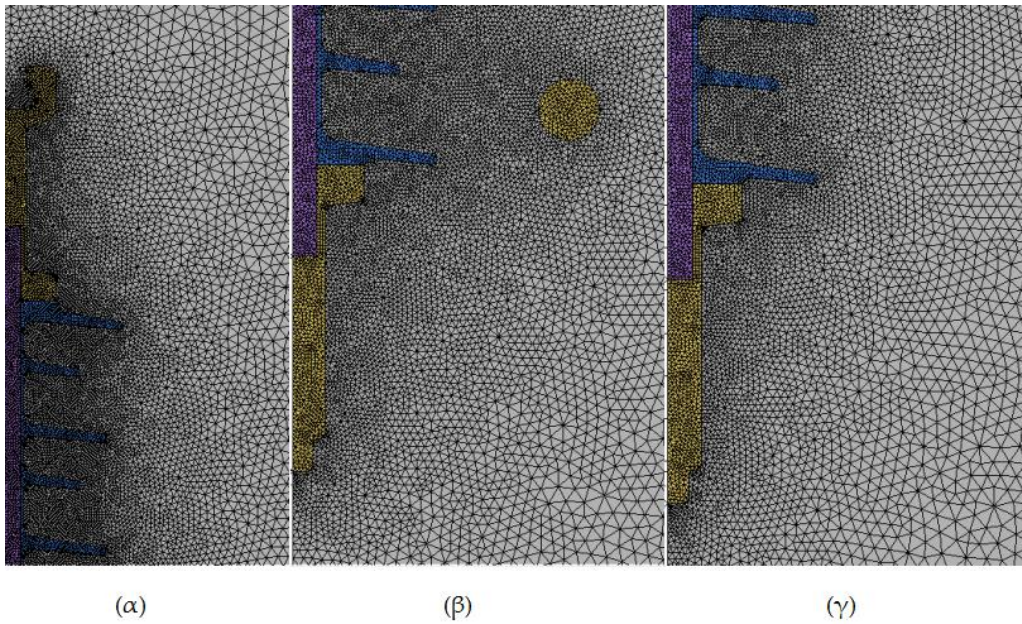
Η χρήση τοροειδών για τη μείωση της πεδιακής καταπόνησης στις κρίσιμες περιοχές κοντά στους μεταλλικούς τερματισμούς (και κυρίως στο υπό τάση άκρο) είναι μία ευρέως διαδεδομένη πρακτική παγκοσμίως. Αποτελέσματα προσομοιώσεων σε μοντέλα συνθετικών μονωτήρων απουσία και παρουσία τοροειδούς παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Στις παρακάτω γραμμές καταγράφονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων σε μοντέλο μονωτήρα 150kV, το μηχανολογικό σχέδιο του οποίου, όπως λήφθηκε από τη Δ.Ε.Η., περιλαμβάνει την εγκατάσταση τοροειδούς κοντά στο υπό τάση άκρο.

Ο εν λόγω μονωτήρας (μονωτήρας 4) παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Σχήμα 4-6, στη σελίδα 92. Το συνολικό του μήκος είναι 2200mm, η απόσταση μόνωσης 1894mm και το μήκος ερπυσμού 6255mm. Διαθέτει συνολικά 51 πτερύγια, 26 με ακτίνα 70mm και 25 με ακτίνα 52mm. Το βάρος του είναι 13,3kg. Ο σωλήνας του τοροειδούς έχει διάμετρο 30mm, η εξωτερική διάμετρος του τοροειδούς είναι 300mm και τοποθετείται "ανάμεσα" στο τελευταίο και στο προτελευταίο πτερύγιο, στην πλευρά του υπό τάση άκρου. Οι οριακές συνθήκες για το τοροειδές είναι οι ίδιες με αυτές του υπό τάση άκρου, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 4.2.4.1, στη σελίδα 112.

Στο Σχήμα 4-43 φαίνονται τμήματα του μοντέλου του μονωτήρα 4, συγκεκριμένα το γειωμένο (α) και το υπό τάση (β) άκρο. Στο τελευταίο φαίνεται και η τομή του τοροειδούς, καθώς και το βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα που χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση του. Στο Σχήμα 4-44 φαίνεται το πλέγμα γύρω από αυτές τις περιοχές. Είναι φανερό πως η παρουσία του τοροειδούς επηρεάζει τη διαμόρφωση του πλέγματος, αφού πλέον τα στοιχεία πρέπει να είναι πιο πυκνά σε όλο το χώρο κοντά στο τοροειδές και όχι μόνο κοντά στα πτερύγια του μονωτήρα.

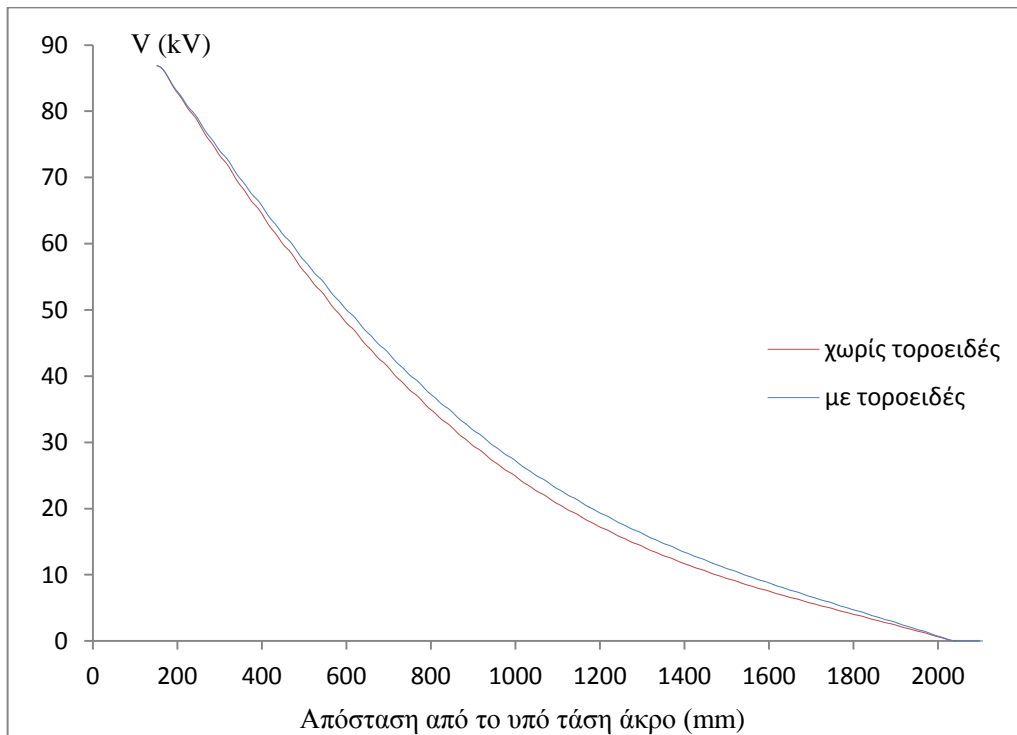


Σχήμα 4-43: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6)



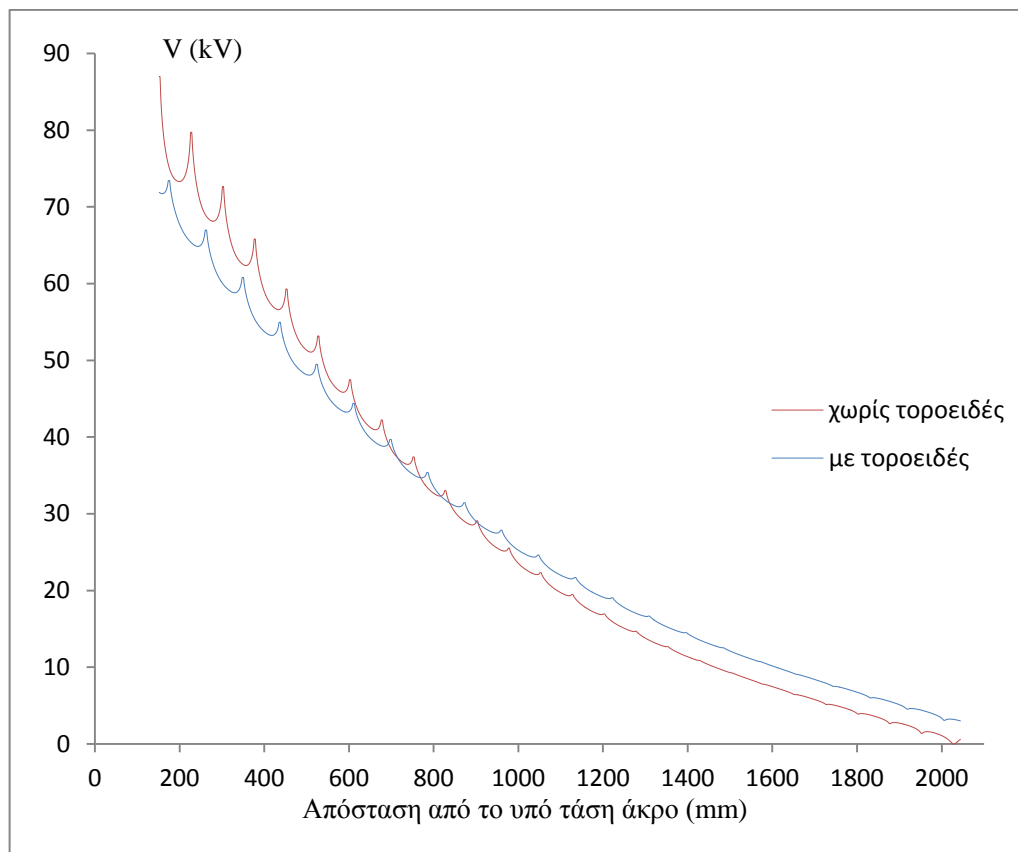
Σχήμα 4-44: Το πλέγμα μέσα και γύρω από το μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) στην περιοχή (α) του γειωμένου άκρου και του υπό τάση άκρου (β) παρουσία και (γ) απουσία τοροειδούς

Η παρουσία του τοροειδούς κοντά στο υπό τάση άκρο εισάγει μία παράσιτη χωρητικότητα, η οποία τείνει να ομαλοποιήσει την κατανομή του δυναμικού. Αυτό γίνεται φανερό από τα παρακάτω σχήματα. Στο Σχήμα 4-45 φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στο κέντρο του μονωτήρα υπό εξέταση. Οι δύο γραφικές παραστάσεις, που αντιστοιχούν στην απουσία (κόκκινη) και την παρουσία (μπλε) τοροειδούς, συμπίπτουν στην αρχή και στο τέλος τους, ωστόσο στο κέντρο η μπλε γραφική εμφανίζει μικρότερη κλίση.



Σχήμα 4-45: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς

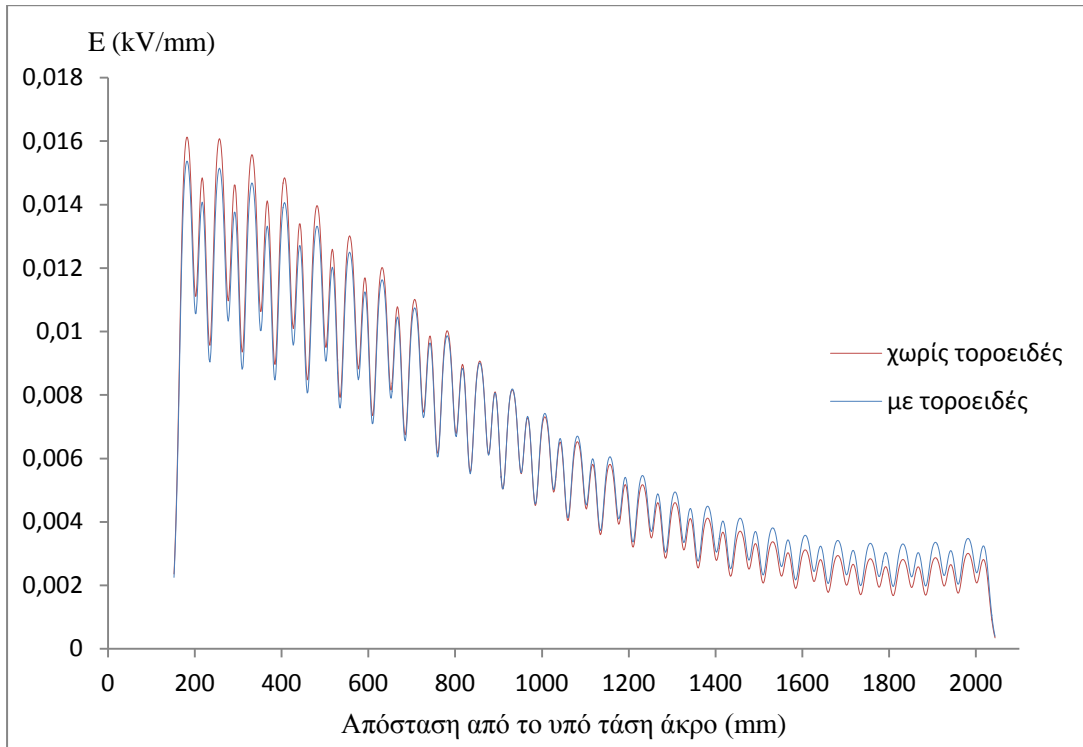
Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος των άκρων των πτερυγίων με τη μεγαλύτερη ακτίνα (70mm), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-46. Μάλιστα, λόγω της νέας διαχωριστικής επιφάνειας που εισάγεται με το τοροειδές η γραφική παράσταση που αντιστοιχεί στην παρουσία τοροειδούς παρουσιάζει λιγότερες αιχμές.



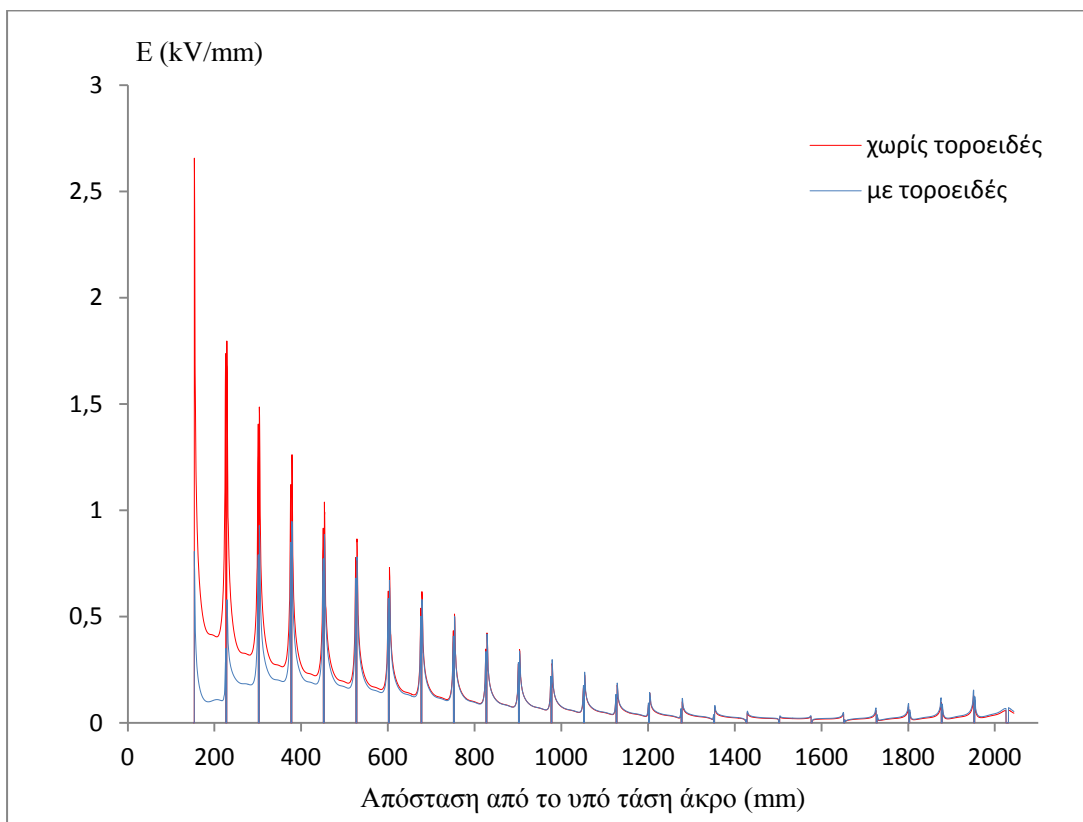
Σχήμα 4-46: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των άκρων των μεγαλύτερων πτερυγίων ( $R=70\text{mm}$ ) του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς

Το πλεονέκτημα που προκύπτει από τη χρήση τοροειδούς για τη μείωση της πεδιακής καταπόνησης του εξοπλισμού γίνεται πιο ξεκάθαρο εξετάζοντας την επίδρασή του στην κατανομή της πεδιακής έντασης στις περιοχές ενδιαφέροντος. Μία μικρή μείωση της πεδιακής καταπόνησης είναι φανερή από την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο του μονωτήρα (Σχήμα 4-47). Ωστόσο η πραγματική επίδραση φαίνεται στο εξωτερικό του μονωτήρα και συγκεκριμένα κατά μήκος των μεγαλύτερων πτερυγίων (Σχήμα 4-47).

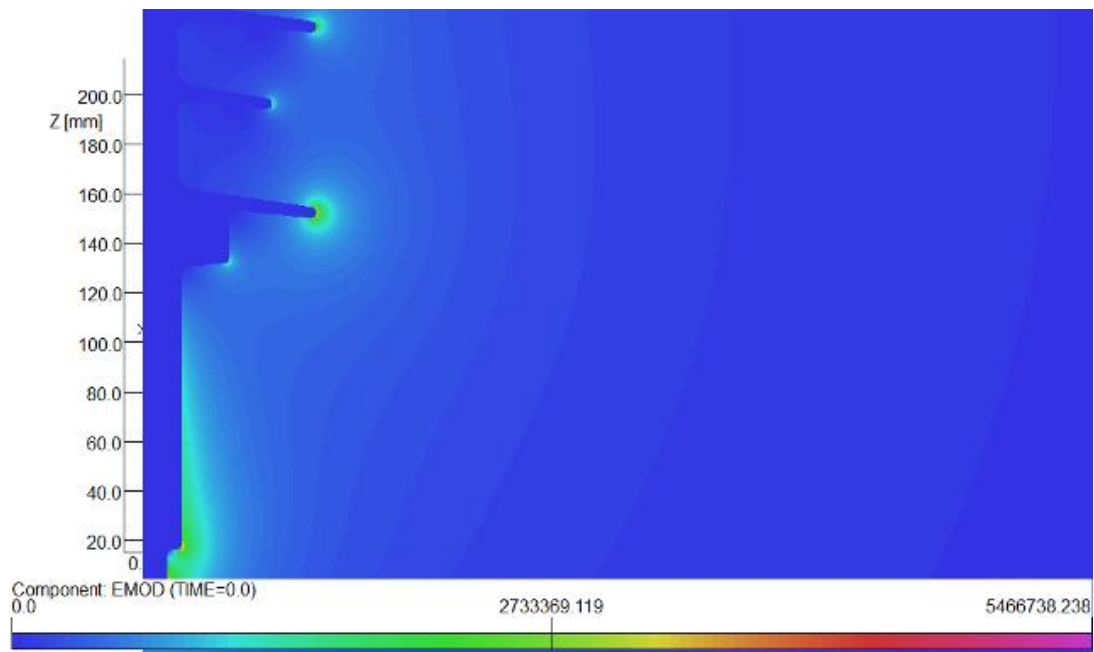
Πράγματι, κοντά στο υπό τάση άκρο, όταν δεν υπάρχει εγκατεστημένη καμία διάταξη εξομάλυνσης πεδίου, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι  $2,66\text{kV/mm}$  και εκδηλώνεται στην άκρη του τελευταίου πτερυγίου. Με τη χρήση του τοροειδούς παρατηρείται σημαντική πτώση των τιμών του πεδίου, οι οποίες παραμένουν κάτω από το  $1\text{kV/mm}$ . Συγκεκριμένα, πλέον η μέγιστη τιμή παρατηρείται κοντά στο έβδομο πτερύγιο (τέταρτο πτερύγιο με ακτίνα 70mm) και ισούται με  $0,95\text{kV/mm}$ . Μικρή ανύψωση παρατηρείται κοντά στο γειωμένο άκρο, όπως αναμενόταν και από τη βιβλιογραφία, είναι όμως αμελητέα.



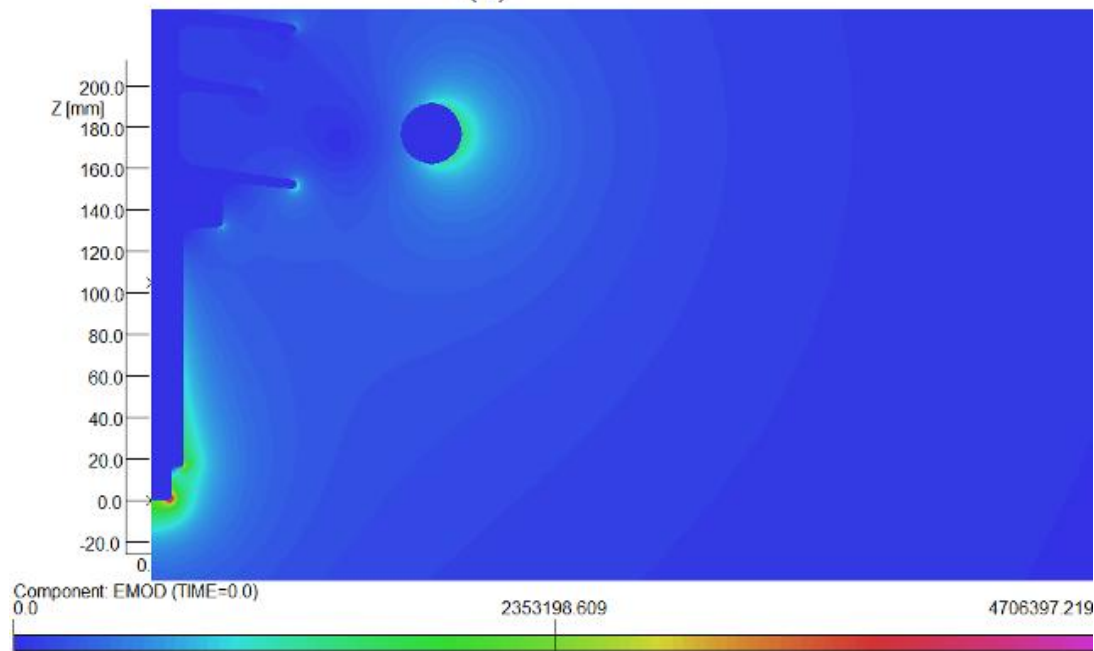
Σχήμα 4-47: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς



Σχήμα 4-48: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς



(α)



(β)

Σχήμα 4-49: Απεικόνιση της κατανομής της πεδιακής έντασης στην περιοχή του υπό τάση άκρου του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) (α) απουσία και (β) παρουσία τοροειδούς

Στο Σχήμα 4-49 που φαίνεται παραπάνω απεικονίζεται αναλυτικά η επίδραση του τοροειδούς στην κατανομή του πεδίου. Όπως είναι αναμενόμενο στις αιχμές του μεταλλικού άκρου αναπτύσσονται ιδιαίτερα μεγάλες τιμές πεδιακής έντασης, όπως όμως φαίνεται από τις κλίμακες των σχημάτων (α) και (β) η παρουσία του τοροειδούς οδηγεί σε μείωση της μέγιστης τιμής κατά 0,7kV/mm περίπου. Στην περιοχή των περυγίων, όπως είδαμε και στο Σχήμα 4-48 η μείωση είναι ξεκάθαρη.

Ουσιαστικά το τοροειδές "μεταφέρει" την πεδιακή καταπόνηση στην εξωτερική του επιφάνεια, δημιουργώντας μία "πεδιακή ασπίδα" κοντά στην περιοχή

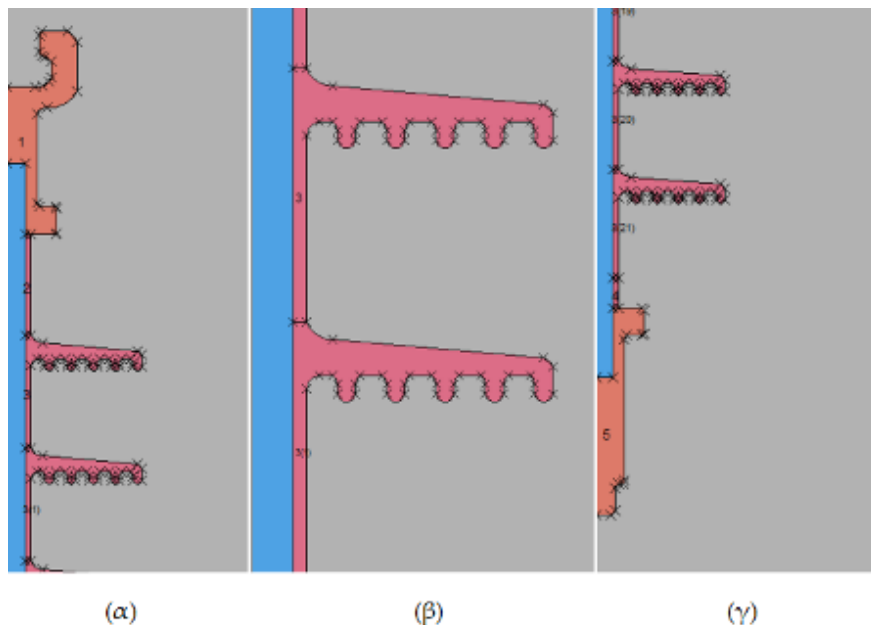


εγκατάστασής του. Η χρήση του μειώνει την πεδιακή καταπόνηση, επιβραδύνοντας τη γήρανση του υλικού που προκύπτει από την εκδήλωση εκκενώσεων Corona και μειώνοντας τον κίνδυνο υπερπήδησης.

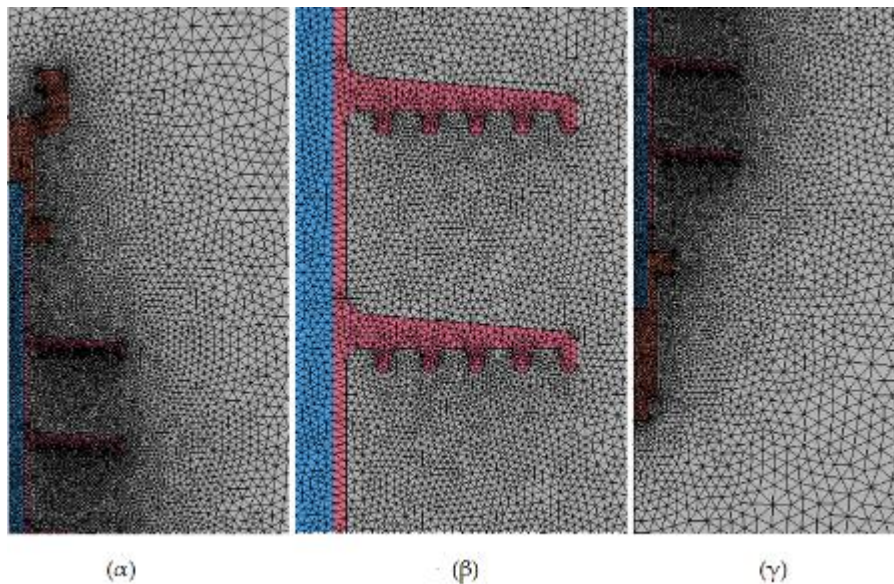
#### 4.2.4.2.3. Σύγκριση της πεδιακής κατανομής μεταξύ συνθετικών μονωτήρων 150kV με διαφορετικές διαμορφώσεις πτερυγίων

Στην παράγραφο 4.2.4.2.1 περιγράφηκε αναλυτικά η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4). Σύμφωνα με τα σχέδια που λήφθηκαν από τη Δ.Ε.Η. η κατασκευάστρια εταιρεία διαθέτει ένα εναλλακτικό σχέδιο μονωτήρα, με ίδια απόσταση μόνωσης και διάμετρο πτερυγίων (1309mm και 67mm), μήκος ερπυσμού που διαφέρει πολύ λίγο (4719mm έναντι 4765mm) αλλά με μικρότερο αριθμό πτερυγίων (22 έναντι 36). Διαφέρουν επίσης και ως προς το βάρος, με το μονωτήρα 3 να ζυγίζει 5,1kg έναντι 6,7kg, γεγονός που είναι ωστόσο αναμενόμενο, λόγω του μικρότερου αριθμού πτερυγίων.

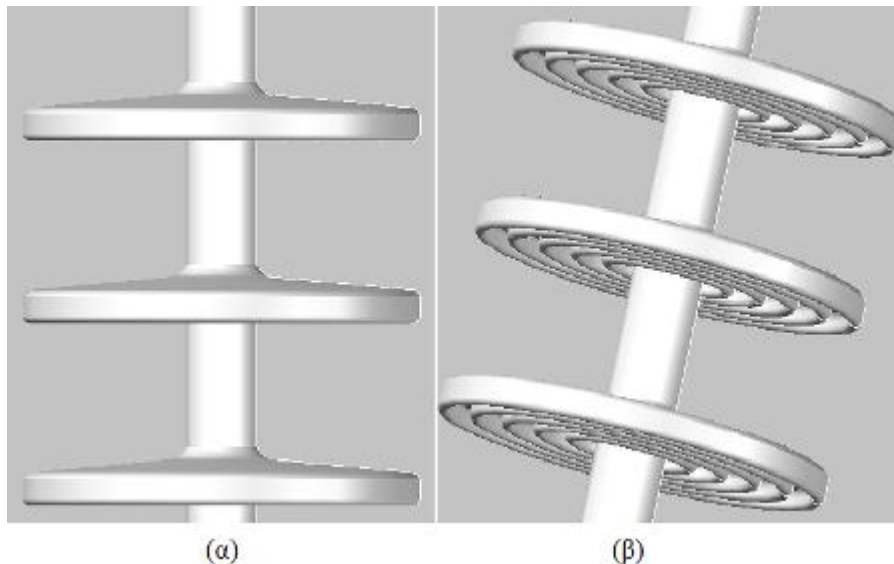
Πρόκειται για το μονωτήρα 3, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-5. Ο μονωτήρας αυτός διαθέτει πτερύγια με κυματοειδή διαμόρφωση, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητικό μήκος ερπυσμού με μικρότερο αριθμό πτερυγίων. Παρακάτω, στο Σχήμα 4-50, φαίνονται τμήματα του μοντέλου, όπως σχεδιάστηκαν στον προεπεξεργαστή. Στο Σχήμα 4-51 φαίνεται το πλέγμα γύρω από το μονωτήρα. Είναι παραπάνω από προφανές (και αναμενόμενο) ότι το πλέγμα επιλέχθηκε να είναι ιδιαίτερα πυκνό στην περιοχή των πτυχώσεων, ώστε να διαπιστωθεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η επίδρασή τους στη διαμόρφωση του πεδίου. Στο Σχήμα 4-52 φαίνονται σε τρεις διαστάσεις λεπτομέρειες των πτερυγίων και κυρίως των πτυχώσεων, οι οποίες προσομοιάζουν αυτές των πορσελάνινων και γυάλινων μονωτήρων.



Σχήμα 4-50: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου άκρου, (β) των πτερυγίων και (γ) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 3 (Σχήμα 4-5)



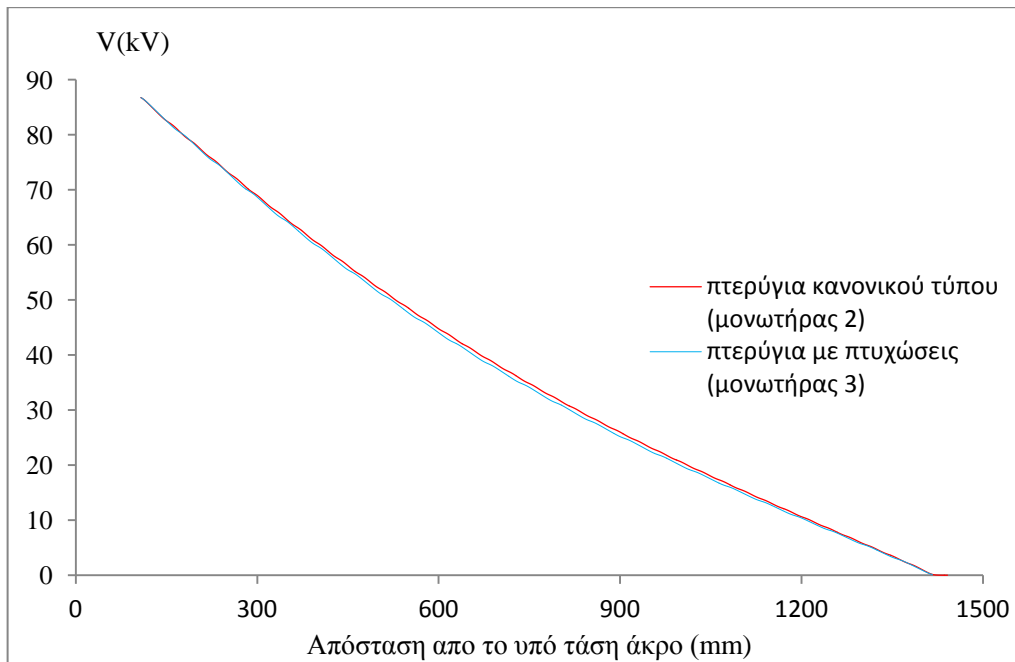
Σχήμα 4-51: Λεπτομέρειες του πλέγματος κοντά (α) στο γειωμένο άκρο, (β) στα περυγία και (γ) στο υπό τάση άκρο του μονωτήρα 3 (Σχήμα 4-5)



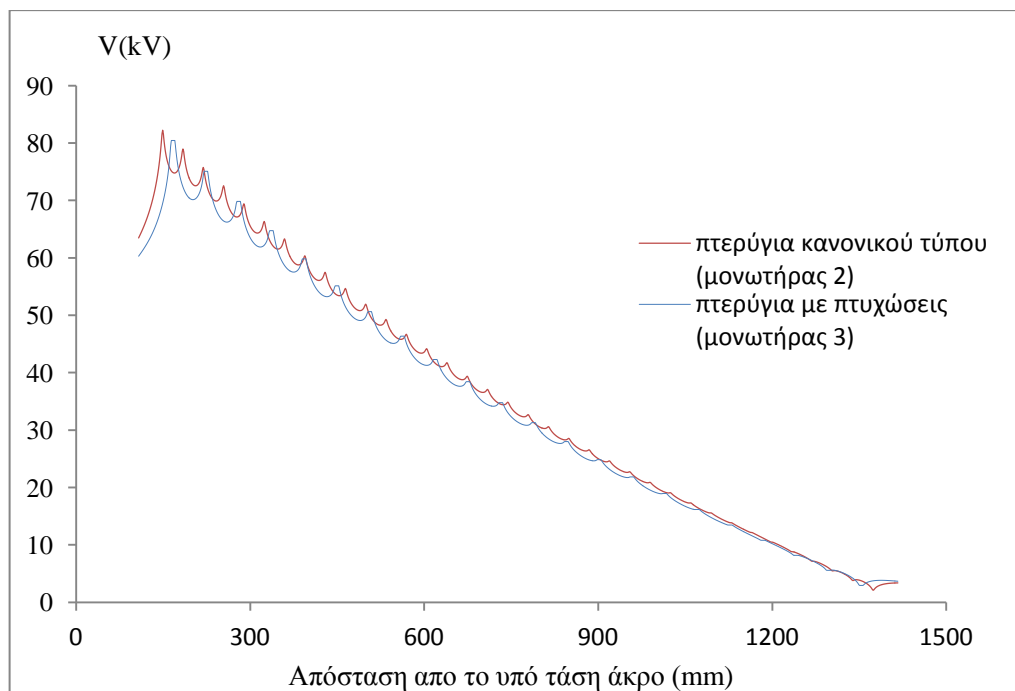
Σχήμα 4-52: Τρισδιάστατη απεικόνιση (α) των περυγίων και (β) των πτυχώσεων των περυγίων του μονωτήρα 3 (Σχήμα 4-5)

Η κυματοειδής διαμόρφωση των περυγίων του μονωτήρα 3 έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των περυγίων και μεγαλύτερη απόσταση του τελευταίου περυγίου από το υπό τάση άκρο. Το γεγονός αυτό αποτελεί πλεονέκτημα για τη χρήση του μονωτήρα υπό συνθήκες έντονης διαβροχής: η μεγάλη αυτή απόσταση αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τη γεφύρωση διαδοχικών περυγίων σε συνθήκες έντονης βροχόπτωσης ή πάγου, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της πιθανότητας υπερπήδησης. Επίσης, λόγω των πεπλατυσμένων ακμών και της αυξημένης απόστασης του τελευταίου περυγίου από το υπό τάση άκρο (56,5mm στον κάθετο άξονα) αναμένονται χαμηλότερες τιμές του πεδίου σε σχέση με το μονωτήρα 2. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-53 ως Σχήμα 4-56) εξετάζονται οι κατανομές του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν ευσταθεί το τελευταίο συμπέρασμα.



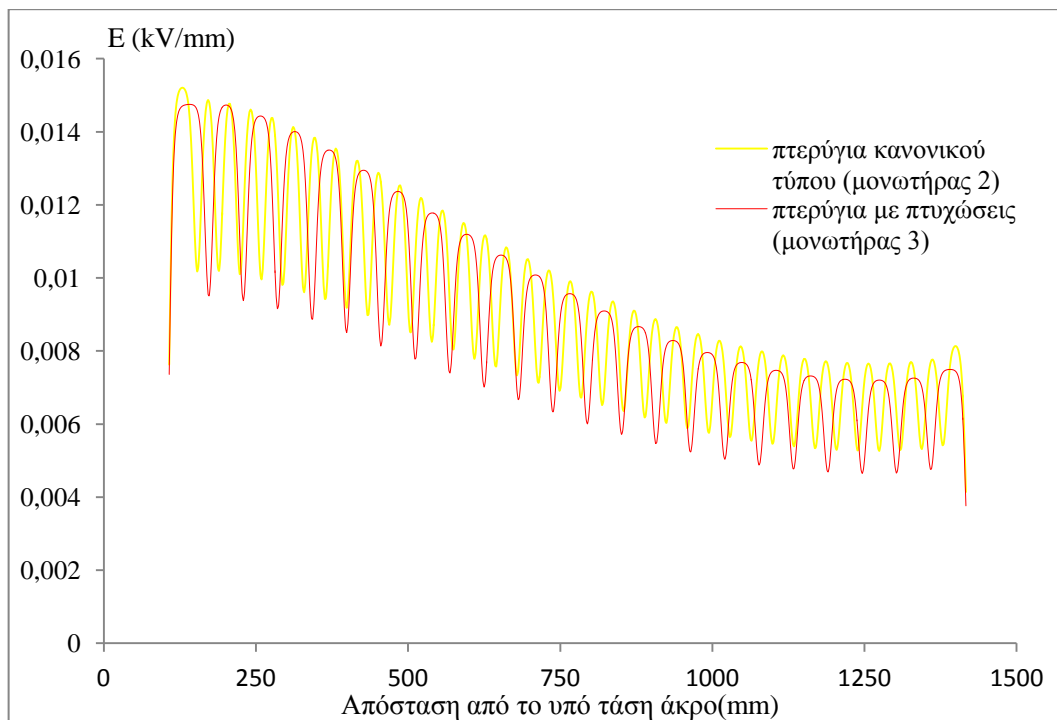


Σχήμα 4-53: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) ( $R=0\text{mm}$ )

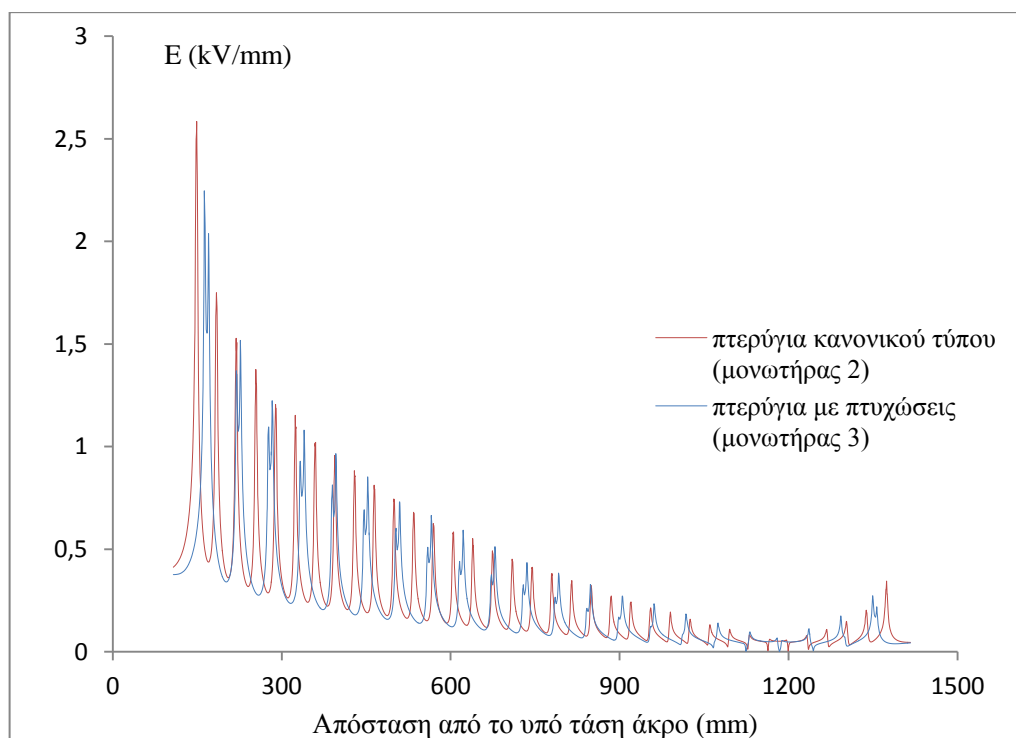


Σχήμα 4-54: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των πτερυγίων των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) ( $R=67\text{mm}$ )

Στα δύο παραπάνω σχήματα (Σχήμα 4-53 και Σχήμα 4-54) φαίνονται οι κατανομές του δυναμικού στο κέντρο και κατά μήκος των άκρων των πτερυγίων των μονωτήρων 2 (Σχήμα 4-4) και 3 (Σχήμα 4-5) ( $R=0\text{mm}$  και  $R=67\text{mm}$  και στις δύο περιπτώσεις). Ουσιαστική διαφορά στις κατανομές δεν παρατηρείται. Στο Σχήμα 4-54 παρατηρεί κανείς ότι οι αιχμές της κατανομής του μονωτήρα 3 είναι πιο ομαλές, λόγω του πεπλατυσμένου προφίλ των άκρων των πτερυγίων, ενώ οι τιμές του δυναμικού για τον ίδιο μονωτήρα είναι λίγο μικρότερες.



Σχήμα 4-55: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) ( $R=0\text{mm}$ )



Σχήμα 4-56: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των πτερυγίων των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) ( $R=67\text{mm}$ )

Οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τους δύο μονωτήρες φαίνονται στο Σχήμα 4-55 (κέντρο των μονωτήρων) και στο Σχήμα 4-56 (άκρα των πτερυγίων). Η μείωση της έντασης και η ομαλότητα των αιχμών είναι εμφανείς στο Σχήμα 4-55, ωστόσο από το Σχήμα 4-56 μπορούν να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η μέγιστη πεδιακή καταπόνηση στην περίπτωση του μονωτήρα 2 είναι 2,58kV/mm, ενώ στην περίπτωση του μονωτήρα 3 η τιμή αυτή είναι 2,25kV/mm

4.2.4.2.4. Επίδραση της απόστασης του τελευταίου πτερυγίου από το υπό τάση άκρο στην κατανομή του πεδίου

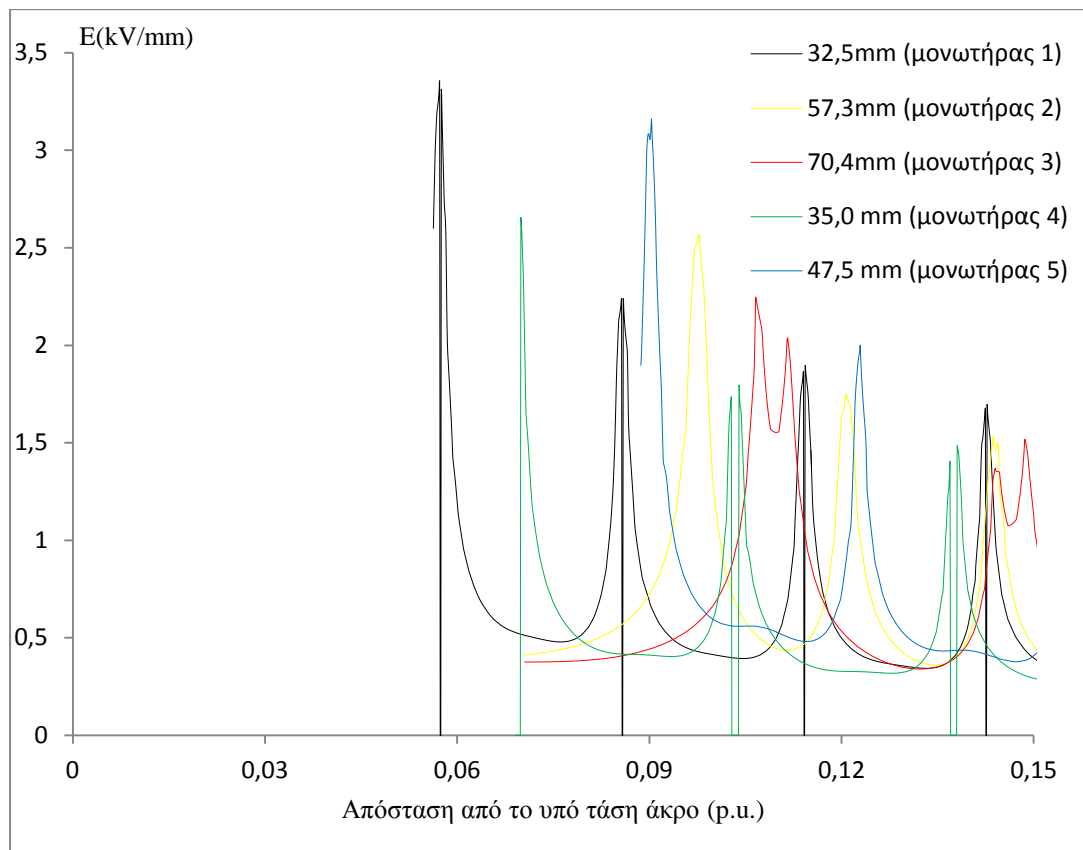
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας [40], η απόσταση του τελευταίου πτερυγίου έχει αντίκτυπο στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μονωτήρα. Μετά από προσομοιώσεις που έγιναν στα μοντέλα των μονωτήρων 150kV (Σχήμα 4-3 ως Σχήμα 4-7) προέκυψε ο Πίνακας 4.7, στον οποίο φαίνονται οι αποστάσεις των άκρων των πτερυγίων από το υπό τάση άκρο, καθώς και η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που παρατηρείται κατά μήκος των άκρων των πτερυγίων κάθε μονωτήρα.

Βλέπουμε ότι για τους μονωτήρες 1, 4, και 5, όπου το τελευταίο πτερύγιο είναι προσαρτημένο απευθείας πάνω στο μεταλλικό τερματισμό, οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου είναι 3,36kV/mm, 2,66kV/mm και 3,16kV/mm αντίστοιχα. Για τους μονωτήρας 2 και 3, στους οποίους μεταξύ μετάλλου και τελευταίου πτερυγίου υπάρχει απόσταση, οι τιμές αυτές είναι 2,58kV/mm και 2,25kV/mm αντίστοιχα, εμφανώς μειωμένες. Στο Σχήμα 4-57 φαίνεται και σχηματικά η μεταβολή αυτή. Είναι λοιπόν εμφανές ότι η απόσταση του τελευταίου πτερυγίου από το μεταλλικό υπό τάση άκρο επηρεάζει την πεδιακή καταπόνηση κατά μήκος των πτερυγίων ενός συνθετικού μονωτήρα.

Ωστόσο, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4-49(α), η απευθείας προσάρτηση του πτερυγίου πάνω στο μέταλλο συμβάλει δραστικά στη μείωση της πεδιακής καταπόνησης στο σημείο τριπλής σύνδεσης. Στην περίπτωση αυτή, η οποία αφορά στο μονωτήρα 4, οι τιμές του πεδίου στο σημείο αυτό είναι σχεδόν μηδενικές, ενώ η πεδιακή καταπόνηση "συγκεντρώνεται" στο άκρο του τελευταίου πτερυγίου. Όπως ήδη διαπιστώθηκε στην παράγραφο 4.2.4.2.2, σελ. 122, η τοποθέτηση τοροειδούς συμβάλει στη μείωση της πεδιακής καταπόνησης τόσο στο σημείο ένωσης μετάλλου- πολυμερούς όσο και στα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα.

Πίνακας 4.7: Αποστάσεις του άκρου του τελευταίου πτερυγίου των μονωτήρων 1-5 (Σχήμα 4-3 ως Σχήμα 4-7) και μέγιστες τιμές της πεδιακής έντασης σε αυτούς

Μονωτήρας	Οριζόντια απόσταση τελευταίου πτερυγίου από το υπό τάση άκρο (mm)	Κάθετη απόσταση τελευταίου πτερυγίου από το υπό τάση άκρο (mm)	Απόσταση τελευταίου πτερυγίου από το υπό τάση άκρο (mm)	$E_{max}$ (kV/mm)
1 (Σχήμα 4-3)	32,5	0	32,5	3,36
2 (Σχήμα 4-4)	42	39	57,3	2,58
3 (Σχήμα 4-5)	42	56,5	70,4	2,25
4 (Σχήμα 4-6)	35	0	35	2,66
5 (Σχήμα 4-7)	47,5	0	47,5	3,16



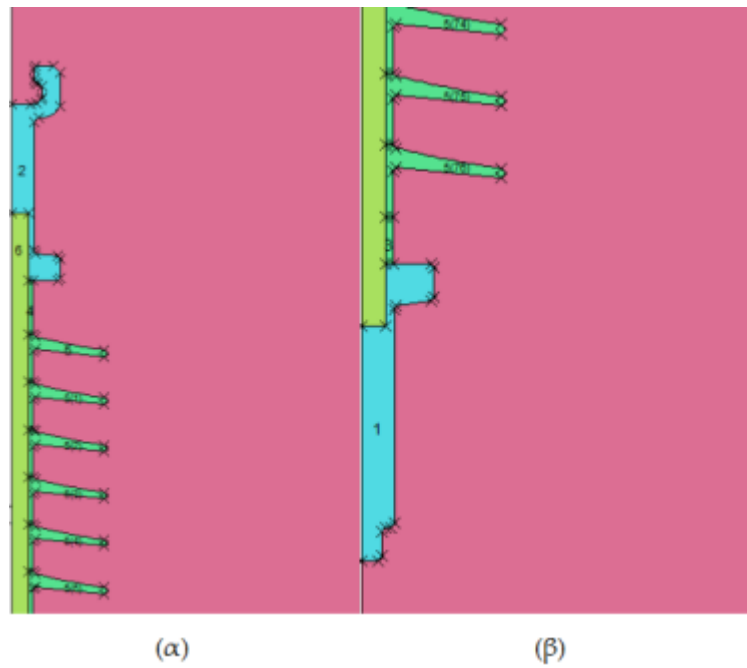
Σχήμα 4-57: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο 15% του μήκους των μονωτήρων 1-5 (Σχήμα 4-3 ως Σχήμα 4-7)

#### 4.2.4.3. Συνθετικοί μονωτήρες Υ.Υ.Τ. (400kV)

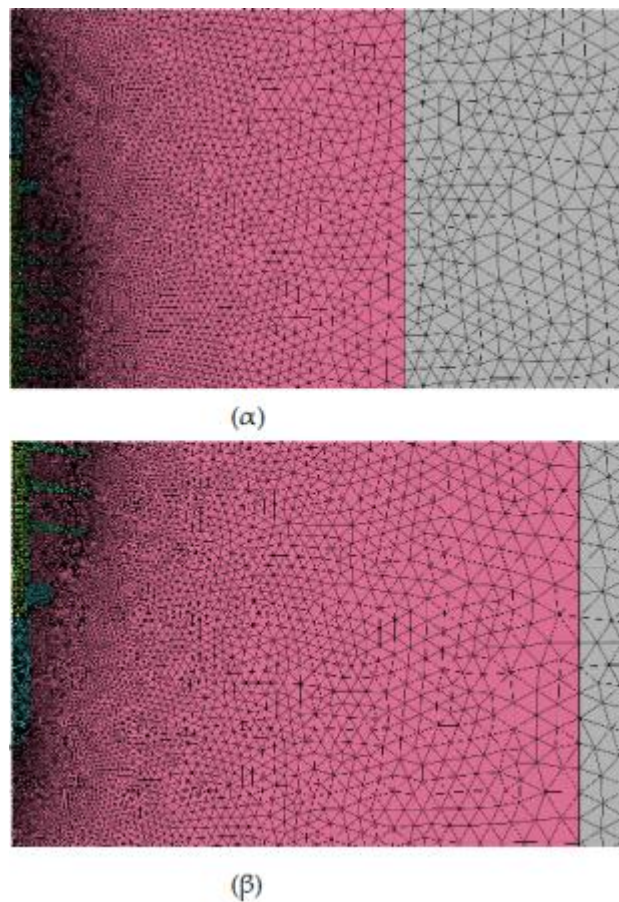
##### 4.2.4.3.1. Κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μέσα και γύρω από το μονωτήρα

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε συνθετικούς μονωτήρες Υ.Υ.Τ. του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το επίπεδο τάσης (400kV) οι μονωτήρες απαιτείται να εξασφαλίζουν μεγαλύτερο μήκος μόνωσης και μήκος ερπυσμού σε σχέση με τα 150kV. Ενδεικτικά, ο μονωτήρας 7 (Σχήμα 4-9), του οποίου η κατανομή δυναμικού και πεδιακής έντασης εξετάζονται παρακάτω, έχει μήκος 3060mm, μήκος ερπυσμού 10150mm, 77 πτερύγια με ακτίνα 70mm, ενώ το βάρος του είναι 15,1kg.

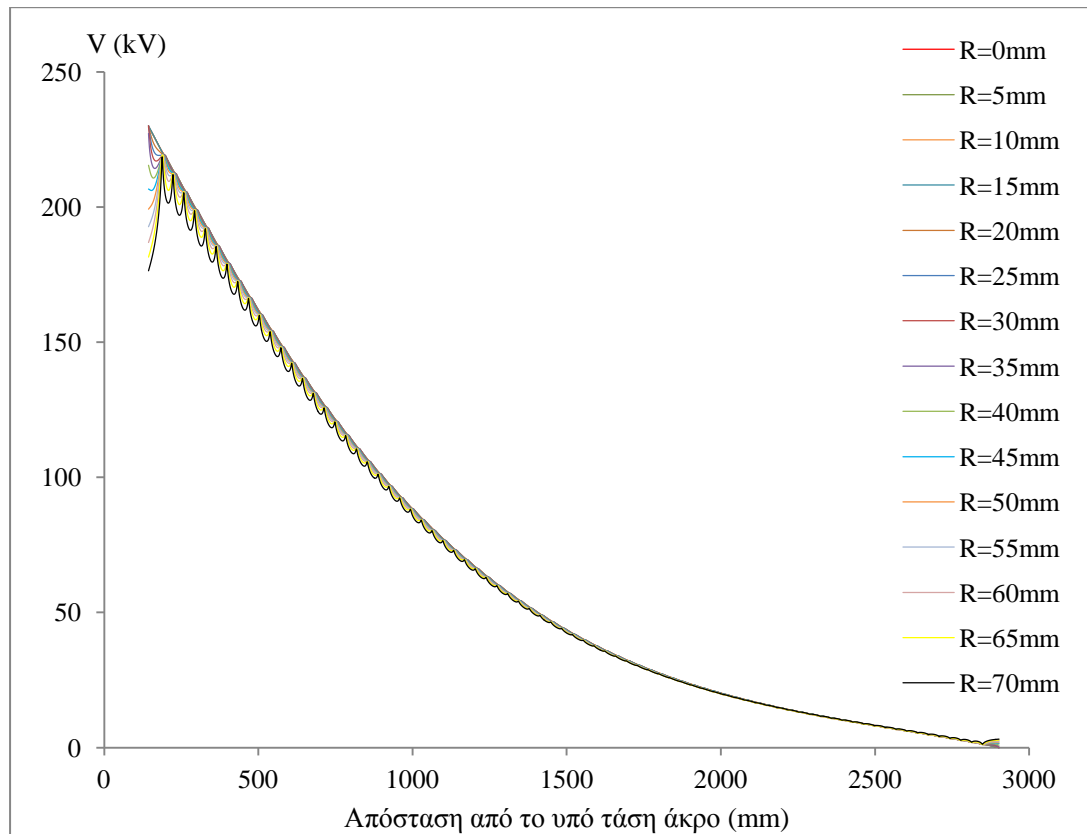
Στο Σχήμα 4-58 και στο Σχήμα 4-59 φαίνονται λεπτομέρειες του μοντέλου και του πλέγματος στα διάφορα σημεία του, όπως προέκυψαν στον προ- και μετεπεξεργαστή του προγράμματος OPERA-2d. Στο Σχήμα 4-59 είναι εμφανής η χρήση της υποπεριοχής του υποβάθρου, η αναγκαιότητα της οποίας περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.2.4, σελ. 103. Στη συνέχεια (Σχήμα 4-60) παρουσιάζεται αναλυτικά η κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του μονωτήρα, ενώ στο Σχήμα 4-61 φαίνονται σε κοινή γραφική παράσταση οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο και στα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα.



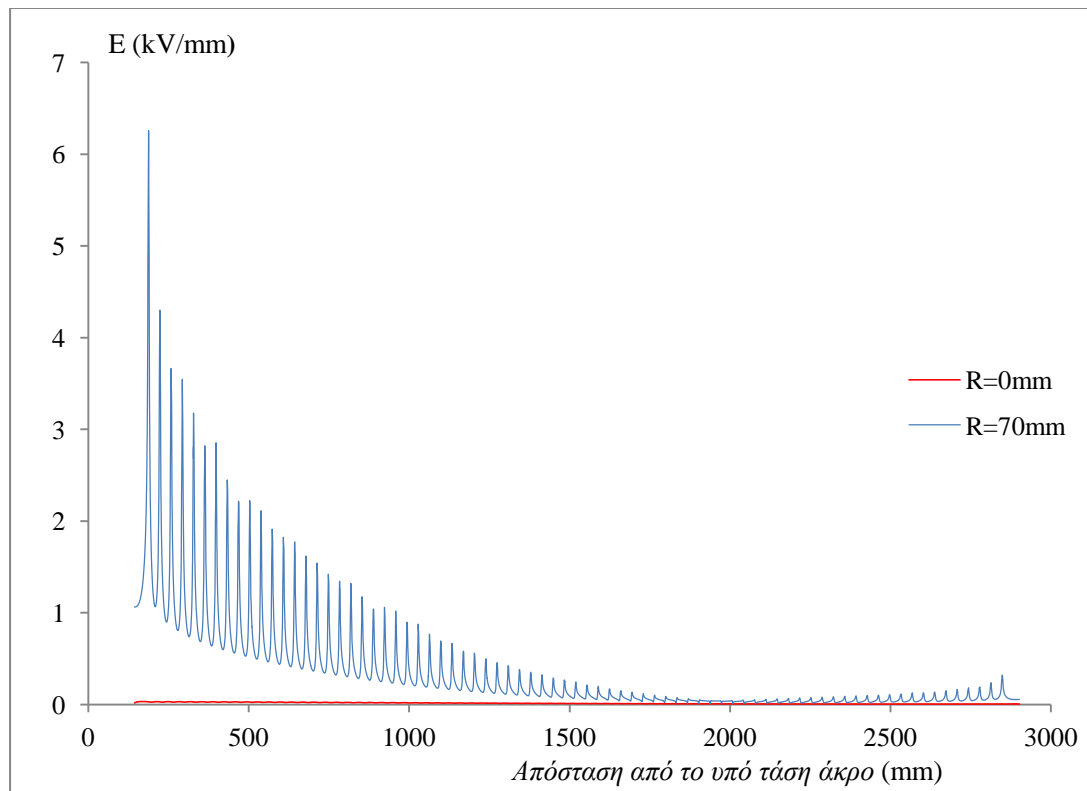
Σχήμα 4-58: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9)



Σχήμα 4-59: Λεπτομέρειες του πλέγματος κοντά (α) στο γειωμένο και (β) στο υπό τάση άκρο του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9). Είναι εμφανής η χρήση υποπεριοχής για τον καλύτερο έλεγχο του πλέγματος



Σχήμα 4-60: Κατανομή του δυναμικού από το κέντρο του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9) από το κέντρο του ανά 5mm ως τα άκρα των πτερυγίων (R=70mm)

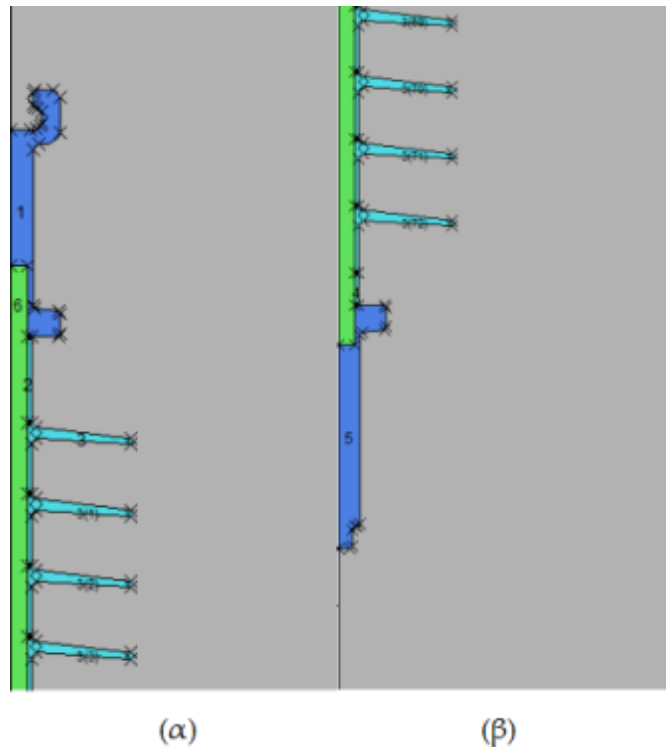


Σχήμα 4-61: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο (κόκκινη γραφική) και στα άκρα των πτερυγίων (μπλε γραφική) (R=70mm) του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-60 η κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του μονωτήρα είναι χωρητική, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Όπως και στην περίπτωση των μονωτήρων 150kV που εξετάστηκαν προηγούμενα, η κατανομή του δυναμικού στον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα είναι μία ομαλή καμπύλη η οποία εκκινεί από τα 230kV και καταλήγει στα 0kV του γειωμένου άκρου. Όσο πλησιάζουμε στα άκρα του μονωτήρα οι καμπύλες εμφανίζουν πτυχώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στα άκρα των πτερυγίων. Σύμφωνα με τα δεδομένα του προαναφερθέντος σχήματος, οι καμπύλες των κατανομών ανά 5mm στο εσωτερικό του μονωτήρα διαφοροποιούνται κυρίως κοντά στο υπό τάση άκρο, όπου οι πτυχώσεις είναι πιο έντονες. Όσο πλησιάζουμε στο γειωμένο άκρο οι καμπύλες συμπιπτον.

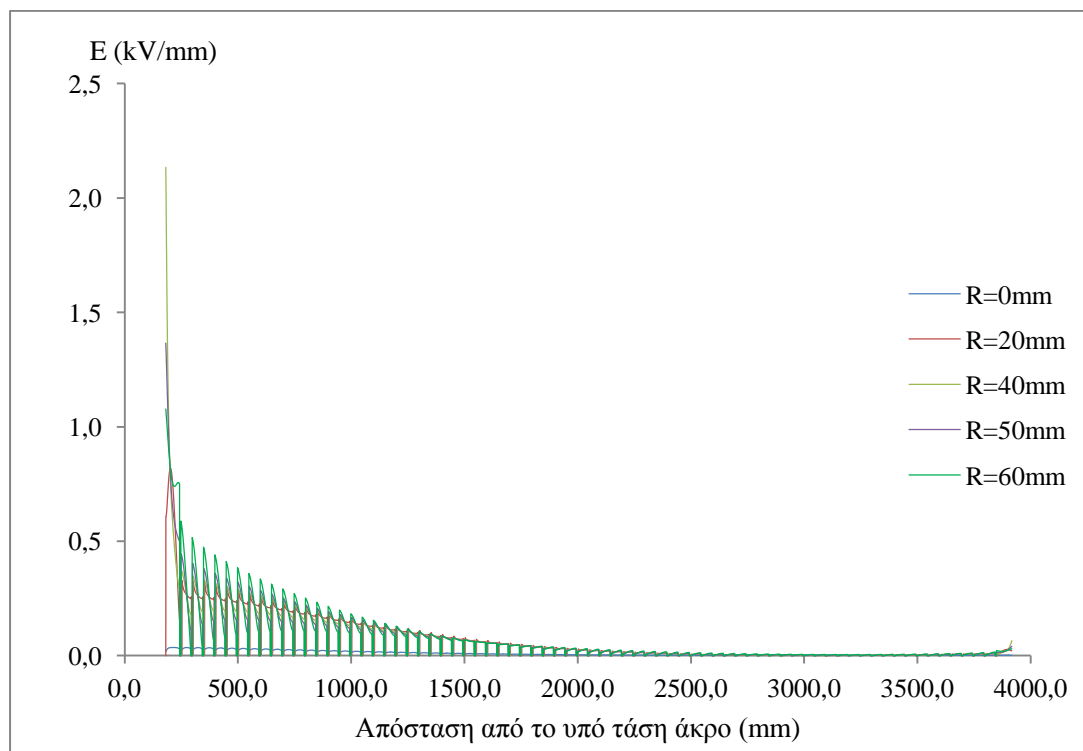
Οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο και στα άκρα του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9) φαίνονται σε κοινούς άξονες στο Σχήμα 4-61. Στο κέντρο του μονωτήρα οι τιμές της πεδιακής έντασης διατηρείται κοντά στο μηδέν, όπως είναι επιθυμητό και αναμενόμενο. Η χειρότερη περίπτωση καταπόνησης αφορά στα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα ( $R=70\text{mm}$ ), όπου η κατανομή είναι ιδιαίτερα ανομοιομορφη, με μέγιστη τιμή τα  $6,26\text{kV/mm}$  στο άκρο του τελευταίου πτερυγίου.

Η ανομοιομορφία της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εξετάζεται ενδελεχώς, για το εσωτερικό και το εξωτερικό, στην περίπτωση του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8), λεπτομέρειες του μοντέλου του οποίου φαίνονται στο Σχήμα 4-62. Το πλέγμα του συγκεκριμένου μοντέλου έχει ήδη παρουσιαστεί στο Σχήμα 4-21, σελ. 105. Δείγματα αυτού του τύπου μονωτήρα βρίσκονται εγκατεστημένα στη γραμμή μεταφοράς 400kV Παλλήνη-Λαύριο. Ο μονωτήρας αυτός έχει μήκος ερπυσμού 13309mm, μήκος 4089mm, 73 πτερύγια με ακτίνα 86mm, ενώ ζυγίζει 23,3kg.



Σχήμα 4-62: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8)

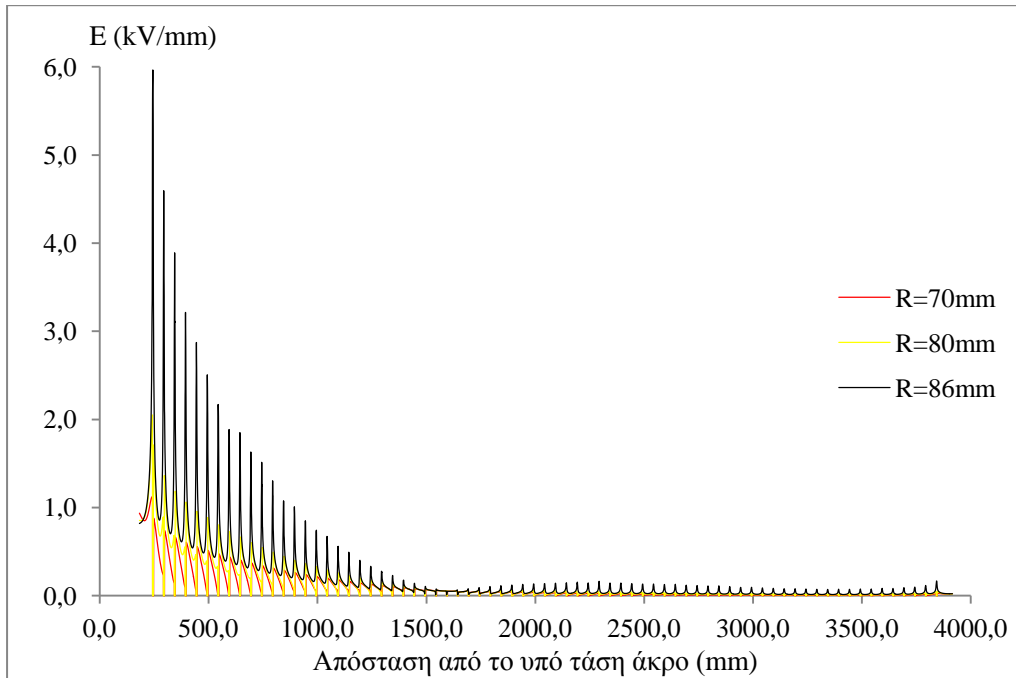
Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 4-63 ως Σχήμα 4-65) φαίνονται αναλυτικά οι κατανομές της έντασης στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8). Στο κέντρο του μονωτήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-63, η πεδιακή καταπόνηση είναι μηδενική. Όσο πλησιάζουμε προς το εξωτερικό οι τιμές της έντασης αυξάνουν. Μέχρι τα 60mm οι τιμές διατηρούνται κοντά στο 1kV/mm, με αιχμές κοντά στο υπό τάση άκρο, ιδιαίτερα σε απόσταση 40mm που αντιστοιχεί στην περιοχή του σημείου τριπλής σύνδεσης. Είναι φανερό πως η πεδιακή καταπόνηση είναι ιδιαίτερα αυξημένη, σε σχέση με τους μονωτήρες 150kV, με την τιμή 2,1kV/mm να υπερβαίνει κατά πολύ το όριο ασφαλείας των 0,4kV/mm που θεωρείται ασφαλής για το σημείο ένωσης μετάλλου-πολυμερούς. [50]



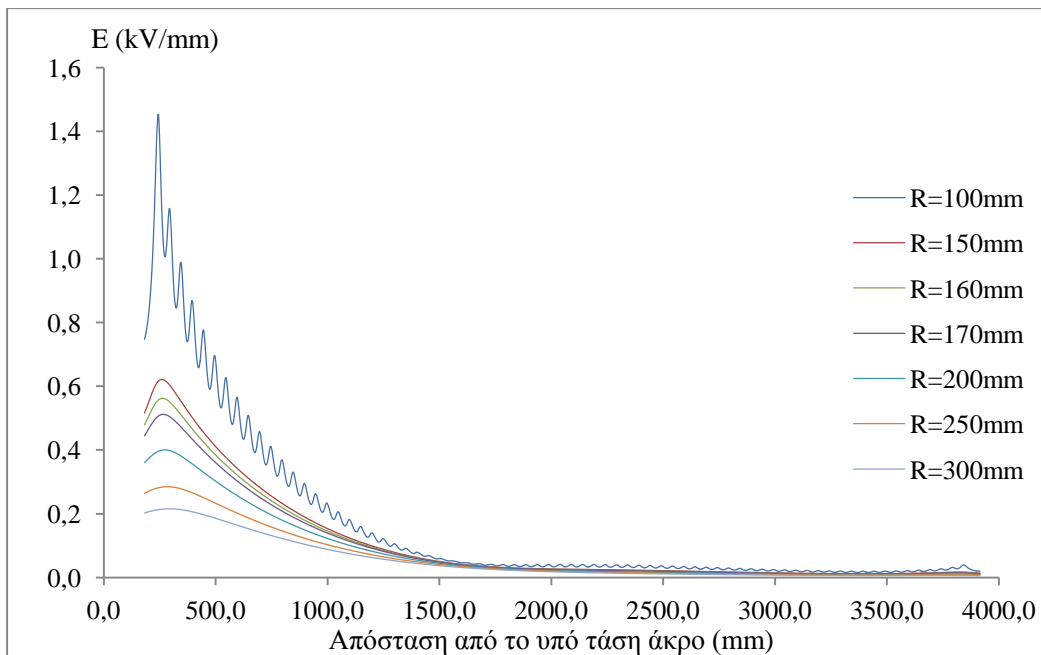
Σχήμα 4-63: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8)

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4-64) φαίνεται η κατανομή στα πτερύγια του μονωτήρα, σε ακτίνες 70mm, 80mm και 86mm (άκρα του μονωτήρα). Στα 70mm η πεδιακή ένταση παραμένει κάτω από το 1kV/mm. Στα 80mm παρατηρείται αύξηση των τιμών του πεδίου κοντά στο υπό τάση άκρο, με μέγιστη τιμή τα 2,05kV/mm, ωστόσο η αμέσως επόμενη αιχμή διατηρείται κάτω από το 1kV/mm. Η χειρότερη περίπτωση καταπόνησης αφορά στα άκρα των πτερυγίων, όπου εκδηλώνεται μέγιστη τιμή στο άκρο του τελευταίου πτερυγίου ίση με 5,99kV/mm. Η ισχυρή πεδιακή καταπόνηση διατηρείται στο πρώτο τρίτο του μονωτήρα, μέχρι τα 1500mm του μήκους του, ενώ στη συνέχεια οι τιμές είναι μειωμένες, κάτω από τα 0,5kV/mm. Μία μικρή αιχμή εκδηλώνεται κοντά στο γειωμένο άκρο, ωστόσο είναι αμελητέα. Είναι φανερό η ανάγκη χρήσης διατάξεων εξομάλυνσης του πεδίου κοντά στο υπό τάση άκρο.





Σχήμα 4-64: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα πτερύγια του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8), από R=70mm ως τα άκρα τους (R=86mm)

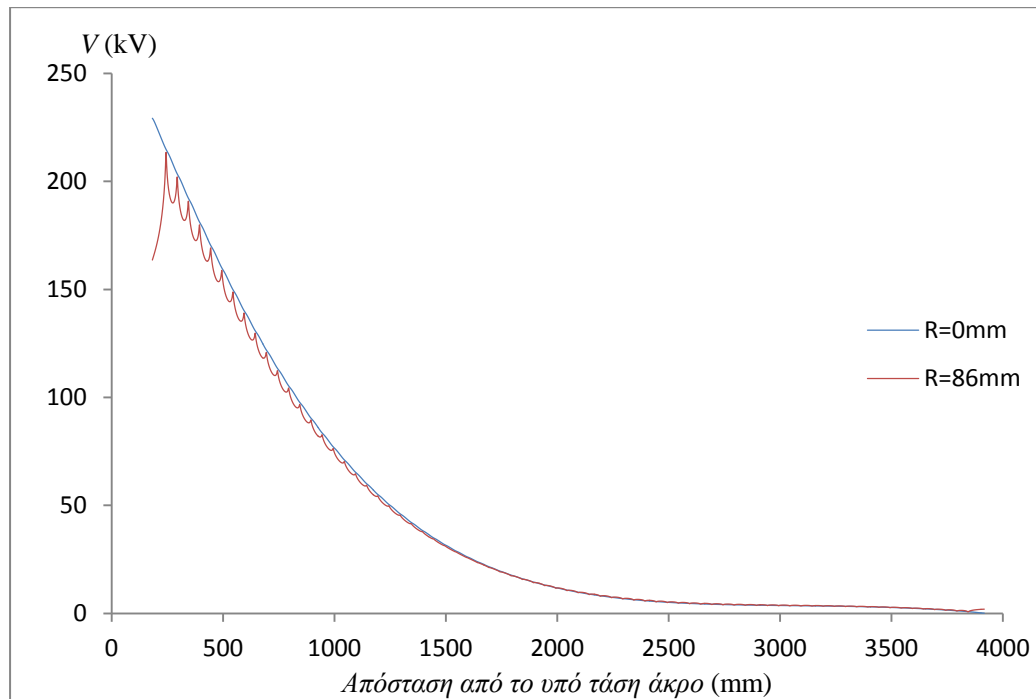


Σχήμα 4-65: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εξωτερικό του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8)

Στο Σχήμα 4-65 παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εξωτερικό του μονωτήρα. Στα 100mm από το κέντρο του (δηλαδή 14mm από τα άκρα των πτερυγίων του) η μέγιστη τιμή διατηρείται κάτω από τα 1,5kV/mm. Όσο αυξάνεται η απόσταση οι τιμές διατηρούνται κάτω από τα 0,8kV/mm, ενώ οι κατανομές ομαλοποιούνται. Σε απόσταση 300mm από το κέντρο του οι τιμές είναι κάτω από 0,2kV/mm. Είναι εμφανές ότι η πεδιακή καταπόνηση διατηρείται

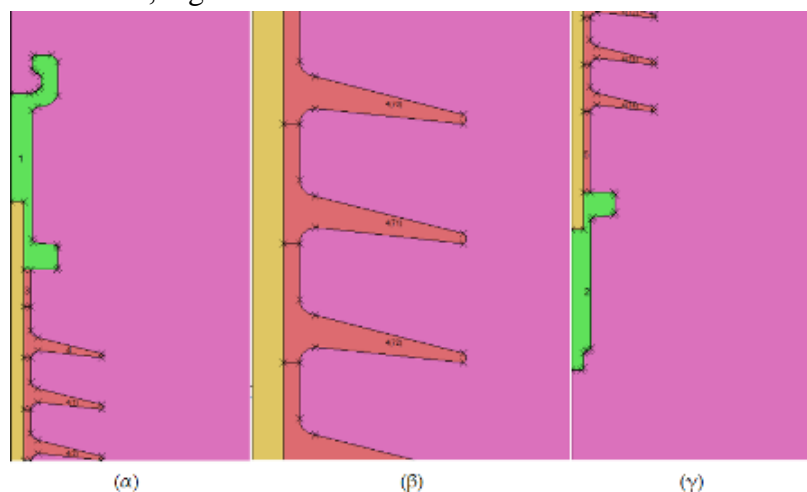
αυξημένη σε μεγαλύτερη απόσταση από το μονωτήρα σε σχέση με του μονωτήρες 150kV/mm.

Τέλος, στο Σχήμα 4-66 φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στο κέντρο και στα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8). Οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις είναι εμφανώς χωρητικές και σύμφωνες με όσα σχολιάστηκαν σχετικά στην περίπτωση του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9).

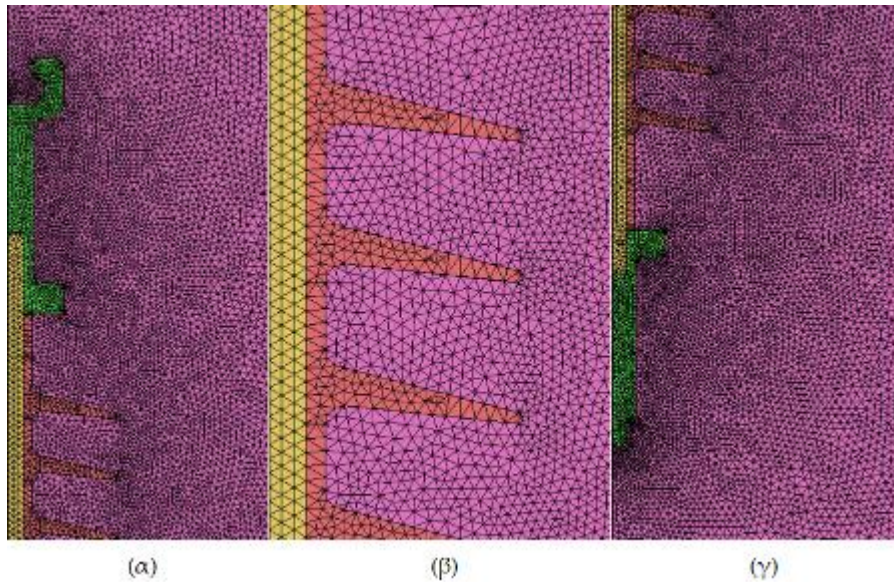


Σχήμα 4-66: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο (μπλε γραφική) και στα άκρα των πτερυγίων (κόκκινη γραφική) ( $R=86\text{mm}$ ) του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8)

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν για του μονωτήρες 6 και 7 είναι εμφανή και στην περίπτωση του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11). Λεπτομέρειες του μοντέλου και του πλέγματος φαίνονται στο Σχήμα 4-67 και στο Σχήμα 4-68. Ο εν λόγω μονωτήρας έχει μήκος 3230mm, μήκος ερπυσμού 10350mm, 75 πτερύγια με ακτίνα 70mm και το βάρος του είναι 16,4kg.

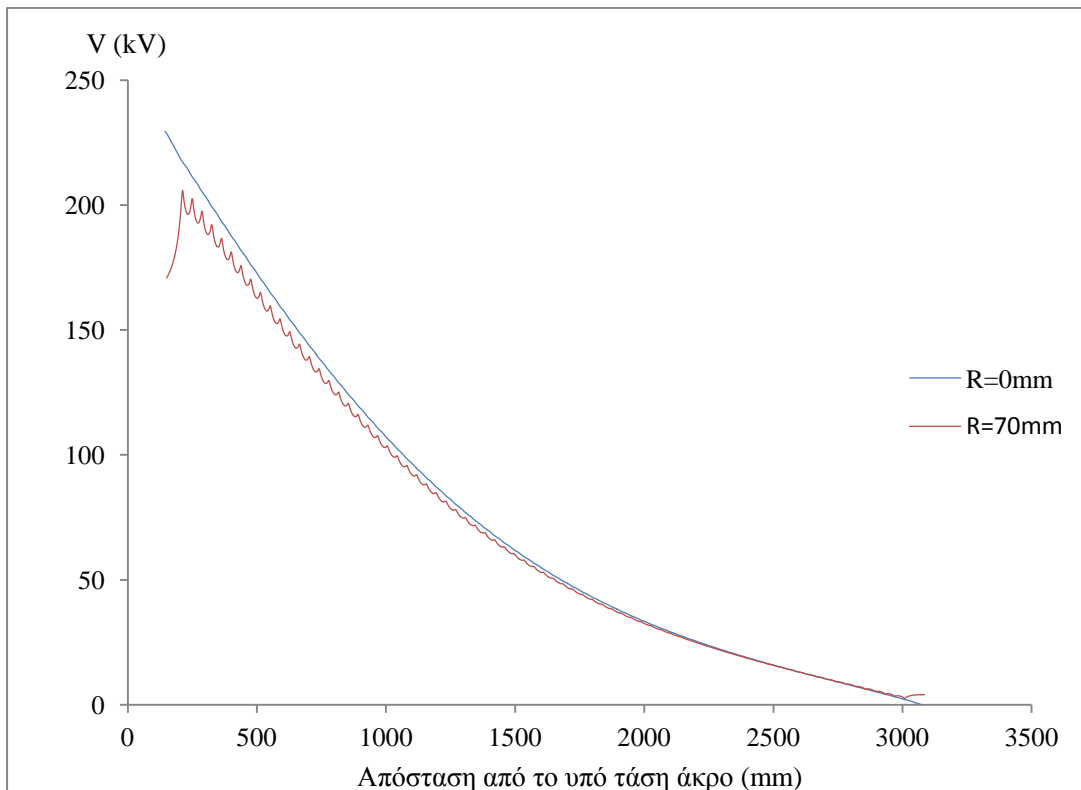


Σχήμα 4-67: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου άκρου, (β) των πτερυγίων και (γ) του υπό τάση άκρου του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11)



Σχήμα 4-68: Λεπτομέρειες του πλέγματος (α) στο γειωμένο άκρο, (β) στα περύγια και (γ) στο υπό τάση άκρο του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11)

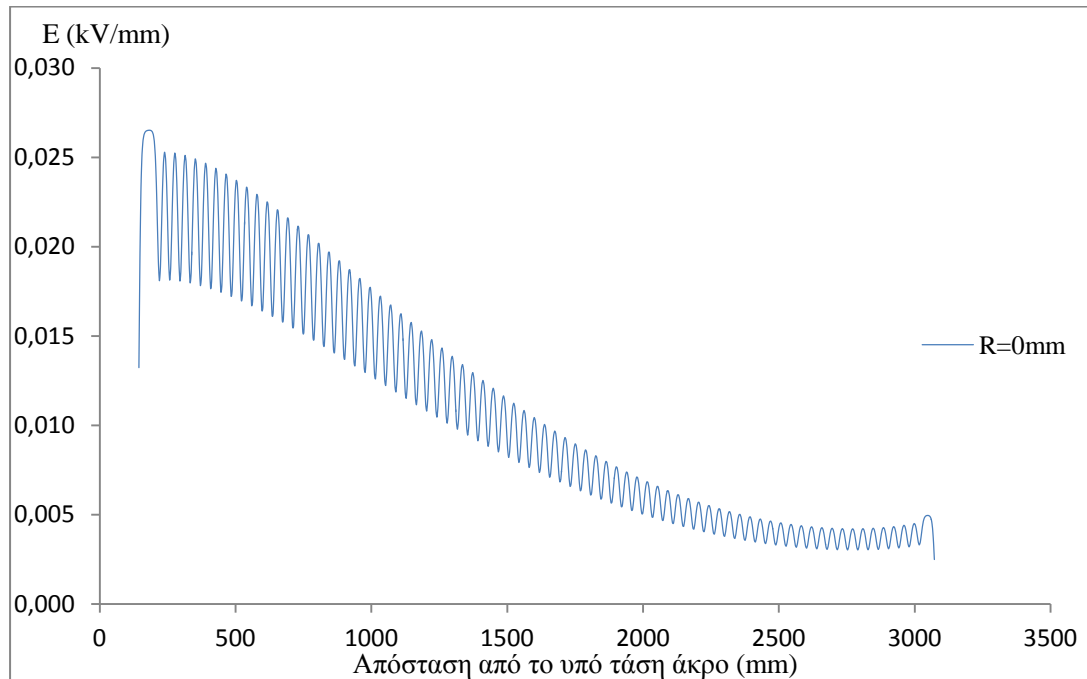
Η κατανομή του δυναμικού στο κέντρο και στα άκρα των περυγίων του μονωτήρα φαίνεται στο Σχήμα 4-70. Είναι εμφανώς χωρητική, ομαλή στο κέντρο ενώ εμφανίζει πτυχώσεις αντίστοιχες με τις θέσεις των περυγίων σε απόσταση 70mm.



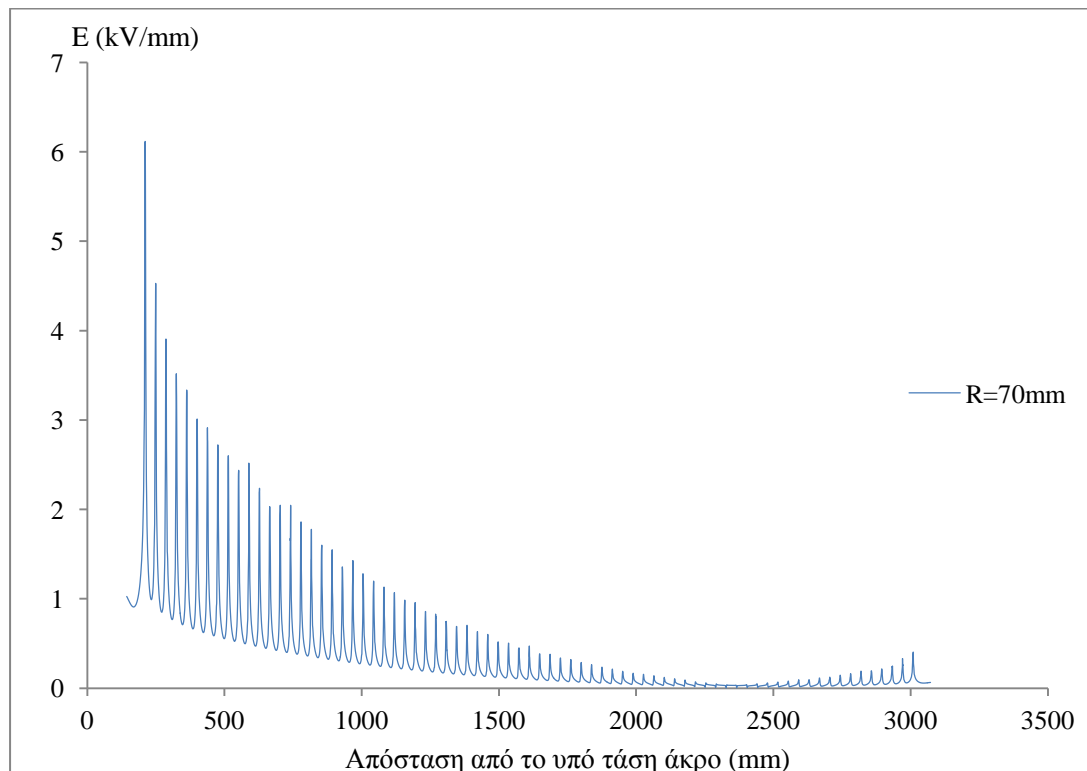
Σχήμα 4-69: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο (μπλε γραφική) και στα άκρα των περυγίων (κόκκινη γραφική) ( $R=70\text{mm}$ ) του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11)

Στο Σχήμα 4-70 φαίνεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11). Οι τιμές του πεδίου διατηρούνται, όπως ήταν

αναμενόμενο, κοντά στο μηδέν, αφού δεν ξεπερνούν τα  $0,03\text{kV/mm}$ . Η πεδιακή καταπόνηση είναι πιο σοβαρή στα άκρα των πτερυγίων, σε απόσταση  $70\text{mm}$  από το κέντρο, όπου σύμφωνα με το Σχήμα 4-71 η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανέρχεται στα  $6,11\text{kV/mm}$  στο άκρο του τελευταίου πτερυγίου.



Σχήμα 4-70: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11)



Σχήμα 4-71: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των πτερυγίων ( $R=70\text{mm}$ ) του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11)

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα και προοπτικές

#### 5.1. Γενικά

Η αριθμητική επίλυση προβλημάτων, στα οποία η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων είναι δύσκολη, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των μηχανικών. Χάρη στην αλματώδη πρόοδο της ηλεκτρονικής και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι πλέον δυνατή η αποδοτική προσομοίωση σύνθετων συστημάτων που προκύπτουν σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, όπως η μηχανική, η ιατρική κ.α..

Πλεονέκτημα της υπολογιστικής μηχανικής αποτελεί η δυνατότητα επίλυσης σύνθετων προβλημάτων χωρίς να απαιτείται η χρήση ακριβού εξοπλισμού και δοκιμίων. Πολύ συχνά μάλιστα οι απαιτούμενες προσομοιώσεις μπορούν να γίνουν σε συμβατικούς προσωπικούς υπολογιστές, χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη υπολογιστική ισχύς.

Η εξοικονόμηση πόρων είναι μία σημαντική παράμετρος, ωστόσο σημαντικότερο ακόμα είναι το γεγονός ότι με την υπολογιστική επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποιείται η έκθεση του εργαστηριακού προσωπικού σε κινδύνους. Το σημείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις όπως τα εργαστήρια υψηλών τάσεων, όπου τα μέτρα ασφαλείας και προφύλαξης του προσωπικού πρέπει να είναι ιδιαίτερα αυξημένα.

Φυσικά οι υπολογιστικές μέθοδοι δεν αποτελούν πανάκεια στην επίλυση δύσκολων προβλημάτων. Οι πραγματικές συνθήκες που διέπουν μία φυσική διεργασία δεν είναι πάντα εύκολο να μοντελοποιηθούν, ενώ οι παραδοχές που απαιτούνται κάποιες φορές εισάγουν σημαντικό σφάλμα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Μολαταύτα, με συνεχή έρευνα και σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων τα εμπόδια αυτά μπορούν να υπερκεραστούν, προς όφελος της επιστημονικής κοινότητας, της βιομηχανίας και τελικά του κοινού.

#### 5.2. Πορεία των προσομοιώσεων και συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται γύρω από συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, η τεχνολογία των συνθετικών μονωτήρων δε μετράει πάνω από μισό αιώνα ζωής. Αντίθετα, οι τεχνολογίες των πορσελάνινων και γυάλινων μονωτήρων χρησιμοποιούνται ήδη από τα τέλη του 19ου αιώνα, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιο εκτεταμένη εμπειρία και συστηματοποιημένη γνώση για την ορθή εφαρμογή τους. Αυτό αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα της χρήσης συνθετικών μονωτήρων, αφού

δεν υπάρχουν ακόμα τυποποιημένες μέθοδοι επισκόπησης της κατάστασής τους υπό συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας αποτελούν ακόμα ένα βήμα στην προσπάθεια που γίνεται για τη μελέτη της πεδιακής καταπόνησης των συνθετικών μονωτήρων υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, η οποία θα συμβάλει και στην εξάπλωση της χρήσης τους.

Το μεγαλύτερο μέρος των προσομοιώσεων έγιναν σε μοντέλα μονωτήρων, τα οποία βασίστηκαν σε μονωτήρες που χρησιμοποιούνται από τη Δ.Ε.Η. στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ κάποιες άλλες βασίστηκαν σε μοντέλο μονωτήρα ήδη δημοσιευμένης εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για:

- το μοντέλο μονωτήρα της εργασίας [36] (Σχήμα 4-2, σελ. 90). Πρόκειται για συνθετικό μονωτήρα ανάρτησης 345 kV.
- πέντε μοντέλα συνθετικών μονωτήρων 150kV (Σχήμα 4-3 έως Σχήμα 4-7, σελ. 91-93), βασισμένα σε σχέδια συνθετικών μονωτήρων 150kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, τα οποία παραχωρήθηκαν από τη Δ.Ε.Η. στη συγγραφέα.
- τέσσερα μοντέλα συνθετικών μονωτήρων 400kV (Σχήμα 4-8 έως Σχήμα 4-11, σελ. 94-95), βασισμένα σε σχέδια συνθετικών μονωτήρων 400kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, τα οποία επίσης παραχωρήθηκαν από τη Δ.Ε.Η. στη συγγραφέα.

Οι προσομοιώσεις έγιναν με την έκδοση 14R1 του προγράμματος OPERA-2d της εταιρείας Vector Fields Software, το οποίο βασίζεται στην εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (F.E.M.). Στο Κεφάλαιο 4 παρατίθενται αναλυτικά τόσο η πορεία των προσομοιώσεων, όσο και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενώ στην παράγραφο αυτή γίνεται μία σύντομη ανακεφαλαίωση και παράθεση των συμπερασμάτων.

Η εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κλειστού συνόρου γύρω από την περιοχή που εξετάζεται. Το πρόβλημα της πεδιακής κατανομής γύρω από τους συνθετικούς μονωτήρες υψηλής τάσης όμως δε διαθέτει τέτοιους περιορισμούς. Είναι λοιπόν απαραίτητος ο ορισμός ενός "τεχνητού συνόρου" γύρω από την προς προσομοίωση διάταξη, τέτοιου ώστε να μην επηρεάζονται τα τελικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων από τη διαμόρφωση και τις συντεταγμένες του. Η τιμή του δυναμικού κατά μήκος αυτού του συνόρου τίθεται ίση με το μηδέν.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να επιτευχθεί αυτό περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.2.3. Ο χώρος γύρω από το μονωτήρα (background) επιλέχθηκε να έχει το σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου, με τη μεγάλη διάστασή του κατά μήκος του άξονα των  $y$ . Εφόσον η κατώτερη γωνία του κάθε μονωτήρα τοποθετήθηκε κατά τη διάρκεια της σχεδίασης στην αρχή των αξόνων (0,0), κατώτερη πλευρά του χώρου αυτού ορίστηκε η ευθεία  $y=-30000$  (mm), σύμφωνα και με το μέγιστο ύψος ανάρτησης των μονωτήρων υψηλής τάσης στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανώτερη και η δεξιά πλευρά προέκυψαν μετά από δοκιμές για διαφορετικές συντεταγμένες των κορυφών, ενώ προφανώς η αριστερή πλευρά είναι ο άξονας  $y$ . Αναλυτικά τις συντεταγμένες των κορυφών περιέχει ο Πίνακας 4.5, σελ. 99.

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο μονωτήρα με τα περισσότερα πτερύγια για τις διαφορετικές συντεταγμένες του περιβάλλοντος χώρου προέκυψαν οι γραφικές παραστάσεις για το δυναμικό (Σχήμα 4-13, σελ. 99 και Σχήμα 4-14, σελ. 100) και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 4-15, σελ. 101, Σχήμα 4-16, σελ. 102). Από τις γραφικές παραστάσεις αυτές προέκυψε ότι η προσέγγιση του background ως ορθογωνίου παραλληλογράμμου με συντεταγμένες κορυφών (0,-30000), (0,240000), (30000,240000) και (30000,-30000) είναι ικανοποιητική, αφού περαιτέρω αύξηση των διαστάσεων δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Κατά μήκος των πλευρών που ορίζονται από τις κορυφές (0,240000) και (30000,240000), (30000,240000) και (30000,-30000) και (30000,-30000) και (0,-30000) το δυναμικό τίθεται ίσο με μηδέν. Μονάδα μέτρησης είναι τα mm.

Το επόμενο βήμα, μετά τον καθορισμό των διαστάσεων του background, αφορά στην επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Αυτό αποτέλεσε το αντικείμενο των πρώτων προσομοιώσεων που έγιναν στο μοντέλο του μονωτήρα της εργασίας [36]. Στη συγκεκριμένη εργασία υπολογίζεται η πεδιακή καταπόνηση συνθετικού μονωτήρα 345kV με τη χρήση της Μεθόδου των Επιφανειακών Τμημάτων (B.E.M.). Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής καθεμιάς από αυτές τις δύο μεθόδους για τον υπολογισμό του δυναμικού στο κέντρο του μονωτήρα προέκυψε το Σχήμα 4-23, σελ. 106. Οι δύο γραφικές που προέκυψαν από τα δεδομένα των προσομοιώσεων ταυτίζονται, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα της εφαρμογής της μεθόδου F.E.M. στον υπολογισμό της πεδιακής κατανομής συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Οι επόμενες προσομοιώσεις στο μονωτήρα της εργασίας [36] αφορούν στον προσδιορισμό του επιλύτη (solver) του OPERA-2d, ο οποίος οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία καλύτερα απεικονίζουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η σύγκριση έγινε μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από προσομοιώσεις με τα επιλυτικά προγράμματα OPERA-2d/AC και OPERA-2d/ST. Από τις γραφικές παραστάσεις (Σχήμα 4-24 έως Σχήμα 4-27, σελ. 107-109) προκύπτει ότι η χρήση του OPERA-2d/AC οδηγεί σε ορθότερα αποτελέσματα, ειδικά στην περίπτωση του υπολογισμού της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου..

Στο ίδιο μοντέλο μονωτήρα έγιναν προσομοιώσεις για την περίπτωση ρυπασμένων επιφανειών. Οι γραφικές παραστάσεις της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των πτερυγίων του μονωτήρα για καθαρή και ρυπασμένη επιφάνεια με στρώμα ρύπων διαφορετικής αγωγιμότητας ( $\sigma=10^{-5}\text{S/m}$  και  $\sigma=10^{-4}\text{S/m}$ ) φαίνονται στο Σχήμα 4-28 και στο Σχήμα 4-29 αντίστοιχα (σελ. 111). Βλέπουμε ότι η πεδιακή καταπόνηση στην επιφάνεια του μονωτήρα αυξάνεται, όταν αυξάνεται η αγωγιμότητα του στρώματος των επικαθήμενων ρύπων, ενώ η κατανομή του δυναμικού, η οποία για καθαρή επιφάνεια είναι χωρητική, γίνεται χωρητική-ωμική. Το τελευταίο είναι ένα συμπέρασμα, το οποίο επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία [51].

Στη συνέχεια έγιναν προσομοιώσεις σε πέντε μοντέλα μονωτήρων 150kV του ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πρώτες προσομοιώσεις

έγιναν στα μοντέλα των μονωτήρων 1 και 2 (Σχήμα 4-3 και Σχήμα 4-4). Μάλιστα ο μονωτήρας 1 αποτελεί τύπο μονωτήρων που χρησιμοποιούνται από τη Δ.Ε.Η. στη γραμμή Αθρινόλακκος-Σύστημα, στο νομό Λασιθίου. Στόχος αυτών των προσομοιώσεων ήταν να διερευνηθεί η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες περιοχές στο εσωτερικό και το εξωτερικό ενός τυπικού συνθετικού μονωτήρα του ελληνικού συστήματος μεταφοράς 150kV. Και για τους δύο μονωτήρες που προαναφέρθηκαν, τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι κοινά και συνοψίζονται παρακάτω:

- Η κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του μονωτήρα διαμορφώνεται από την παράσιτη χωρητικότητα ως προς γη (Σχήμα 4-32, σελ. 114 και Σχήμα 4-39, σελ. 119).

- Η πεδιακή καταπόνηση στο εσωτερικό του μονωτήρα διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. (Σχήμα 4-34, σελ. 116 και Σχήμα 4-40, σελ. 120)

- Όσο πλησιάζουμε προς τα άκρα των πτερυγίων οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνουν, με χειρότερη περίπτωση καταπόνησης τα άκρα των πτερυγίων, ειδικότερα αυτά τα οποία βρίσκονται κοντά στο υπό τάση άκρο. (Σχήμα 4-35, σελ. 116 και Σχήμα 4-41, σελ. 121)

- Οι γραφικές παραστάσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιομορφία, με αιχμές οι οποίες οφείλονται στην εναλλαγή μεταξύ υλικών με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά (πολυμερές-αέρας).

Στο μοντέλο του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) οι προσομοιώσεις που έγιναν είχαν ως στόχο να καταδείξουν την επίδραση της χρήσης τοροειδούς κοντά στο άκρο Υ.Τ.. Σύμφωνα με το Σχήμα 4-48, σελ. 125, η χρήση τοροειδούς στην πλευρά Υ.Τ. οδηγεί σε μείωση της πεδιακής καταπόνησης στην περιοχή αυτή, ενώ συμβάλλει δραστικά και στη μείωση της καταπόνησης στο σημείο τριπλής σύνδεσης, δηλαδή στο σημείο επαφής μετάλλου, πολυμερούς και αέρα (Σχήμα 4-49, σελ. 126).

Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των κατανομών του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τους μονωτήρες 2 (Σχήμα 4-4) και 3 (Σχήμα 4-5), οι οποίοι κατασκευάζονται από την ίδια εταιρεία, με ίδια απόσταση μόνωσης, παραπλήσιο βάρος και μήκος ερπυσμού αλλά με διαφορετική διαμόρφωση πτερυγίων. (Πιο αναλυτικά οι διαστάσεις τους φαίνονται στη σελίδα 90 (Πίνακας 4.2)) Συγκεκριμένα, ενώ ο μονωτήρας 2 διαθέτει συμβατικά πτερύγια με λείες επιφάνειες, στο μονωτήρα 3 η κάτω επιφάνεια των πτερυγίων σχηματίζει πτυχώσεις, ανάλογες με αυτές των πορσελάνινων και γυάλινων μονωτήρων. Γι' αυτό το λόγο ο μονωτήρας 3 διαθέτει λιγότερα πτερύγια σε σχέση με το μονωτήρα 2, άρα και πιο αραιά διατεταγμένα.

Στο Σχήμα 4-56, σελ. 130, φαίνονται σε κοινή γραφική παράσταση οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των άκρων των πτερυγίων των δύο αυτών μονωτήρων. Παρατηρείται ότι κοντά στα μεταλλικά άκρα και ιδιαίτερα στο άκρο Υ.Τ. η πεδιακή καταπόνηση του μονωτήρα 3 είναι μικρότερη, γεγονός που εξηγείται από την απόσταση του τελευταίου πτερυγίου από το υπό τάση άκρο, άλλα και από τη διαμόρφωση των πτερυγίων, τα οποία λόγω των πτυχώσεων είναι πιο πεπλατυσμένα στις άκρες τους, απ' ότι στο μονωτήρα 2.

Η επίδραση της απόστασης του τελευταίου πτερυγίου από το υπό τάση άκρο στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εξετάζεται στη συνέχεια. Στο Σχήμα



4-57, σελ. 132 φαίνονται σε κοινή γραφική παράσταση οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο 15% του μήκος των πέντε μοντέλων μονωτήρων 150kV που προσομοιώθηκαν. Σύμφωνα και με τα δεδομένα που περιέχει ο Πίνακας 4.7, στις περιπτώσεις μονωτήρων όπου το τελευταίο πτερύγιο είναι απευθείας προσαρτημένο πάνω στο υπό τάση άκρο η πεδιακή ένταση στο άκρο του τελευταίου πτερυγίου είναι αυξημένη, ωστόσο στην περίπτωση αυτή η πεδιακή καταπόνηση στο σημείο τριπλής σύνδεσης είναι σημαντικά μειωμένη.

Τέλος έγιναν προσομοιώσεις σε μοντέλα μονωτήρων 400kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Και εδώ η κατανομή του δυναμικού επηρεάζεται από την παράσιτη χωρητικότητα ως προς τη γη (Σχήμα 4-60, σελ. 134, Σχήμα 4-66, σελ. 138 και Σχήμα 4-69, σελ. 139), ενώ οι τιμές της πεδιακής έντασης είναι ιδιαίτερα αυξημένες, ειδικά στα άκρα των πτερυγίων κοντά στο υπό τάση άκρο (Σχήμα 4-61, σελ. 134, Σχήμα 4-64, σελ. 137 και Σχήμα 4-71, σελ. 140). Προφανώς, σε σχέση με τους μονωτήρες των 150kV, όπου οι μέγιστες τιμές της πεδιακής έντασης κυμαίνονται κοντά στα 3kV/mm, εδώ η πεδιακή καταπόνηση είναι πολλαπλάσια, με μέγιστες τιμές να κυμαίνονται κοντά στα 6kV/mm.

### **5.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσομοιώσεων σε δύο διαστάσεις**

Ένα πλήρες μοντέλο τμήματος μίας γραμμής μεταφοράς θα πρέπει να περιλαμβάνει τον πυλώνα, τους μονωτήρες, τους αγωγούς, τις διατάξεις εξομάλυνσης πεδίου και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση των αγωγών και των μονωτήρων. Αλλωστε είναι ήδη γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι η παράλειψη της συμπερίληψης των μεταλλικών διατάξεων που περιβάλλουν το μονωτήρα εισάγει υπολογίσιμο σφάλμα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων [36, 37]. Το σφάλμα αυτό μεταφράζεται σε υπερεκτίμηση των πεδιακών μεγεθών στο υπό τάση άκρο και υποεκτίμηση των αντίστοιχων τιμών στο γειωμένο άκρο. Αυτό συμβαίνει γιατί οι διατάξεις όπως ο πυλώνας και οι αγωγοί επιδρούν στη διαμόρφωση της παράσιτης χωρητικότητας, δημιουργώντας ουσιαστικά μία πεδιακή "ασπίδα" γύρω από το μονωτήρα και μετατοπίζοντας την πεδιακή καταπόνηση προς το γειωμένο άκρο.

Όσα περιγράφονται στην παραπάνω παράγραφο αποτελούν το κύριο μειονέκτημα της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας μοντέλα δύο διαστάσεων. Ο σχεδιασμός σε δύο διαστάσεις ουσιαστικά περιλαμβάνει το σχεδιασμό μίας τομής του υπό εξέταση συστήματος, συνήθως ως προς κάποιο άξονα συμμετρίας, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να γενικευθούν. Είναι προφανές λοιπόν ότι έτσι δεν είναι δυνατό να αναπαρασταθούν όλα τα επιμέρους στοιχεία, όπως ο αγωγός και ο πυλώνας.

Παρόλα αυτά όμως, η προσομοίωση σε δύο διαστάσεις και η απλοποίηση των χρησιμοποιούμενων μοντέλων που μπορεί να επιτευχθεί είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να σχεδιαστεί η τομή του μονωτήρα που ορίζεται από τα επίπεδα  $x=0$  και  $y=0$ . Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο απλοποιήθηκε σημαντικά, αφού θα μπορούσε κανείς να πει ότι σχεδιάστηκε μόνο το ένα τέταρτο του μονωτήρα. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα να διερευνηθεί η ορθότητα της μεθόδου F.E.M., επιλέγοντας ένα αρκετά μεγάλο σύνορο, πέρα από το οποίο το πεδίο

μηδενίζεται (παράγραφος 4.2.2.3). Τα αποτελέσματα ήταν σε πλήρη συμφωνία με αυτά της μεθόδου B.E.M..

Η μείωση στην πολυπλοκότητα του μοντέλου που προκύπτει στις προσομοιώσεις διδιάστατων μοντέλων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν στο υπάρχον μοντέλο πρέπει να εισαχθούν επιμέρους στοιχεία, τα οποία δημιουργούν πρόσθετες διαχωριστικές επιφάνειες και αυξάνουν την πολυπλοκότητα του πλέγματος. Τέτοιες περιπτώσεις προκύπτουν κατά τη μελέτη των ρυπασμένων ή των υγρών επιφανειών των μονωτήρων. Ιδιαίτερα στη μελέτη των υγρών επιφανειών, όπου η ανάγκη για ακρίβεια στις κρίσιμες περιοχές κοντά στις σταγόνες οδηγεί σε πυκνό πλέγμα στα σημεία αυτά, είναι πιθανό να ξεπεραστούν τα όρια των υπολογιστικών προγραμμάτων, ιδιαίτερα αν πρόκειται για 32bit εκδόσεις, που είναι πιο συχνές. Σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο είναι από μόνο του πολύπλοκο, η προσθήκη έστω και λίγων σταγόνων (2-3 σε κάθε πτερύγιο) μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε υπέρβαση των ορίων του προγράμματος, καθιστώντας την προσομοίωση αδύνατη.

Ακόμα ένα πλεονέκτημα των διδιάστατων μοντέλων, αν και λιγότερο σημαντικό από επιστημονικής πλευράς, είναι η ευκολία στη σχεδίαση. Μάλιστα, πολύ συχνά τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να προκύψουν εκ περιστροφής των υπάρχοντων διδιάστατων. Έτσι, αν ήδη υπάρχει ένα διδιάστατο μοντέλο η διαδικασία σχεδίασης του αντίστοιχου τρισδιάστατου μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά.

#### 5.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 μπορούμε να εξάγουμε πολλά χρήσιμα συμπεράσματα για τη "συμπεριφορά" των συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης, τόσο υπό ιδανικές συνθήκες τόσο και υπό συνθήκες ρύπανσης. Μελλοντικά ερευνητικά βήματα θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα παρακάτω:

- ❖ Προσομοίωση μονωτήρων με ρυπασμένες και υγρές επιφάνειες σε δύο διαστάσεις. Ένα πιθανό μοντέλο θα μπορούσε να συμπεριλάβει τις τιμές της επιφανειακής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της εργασίας [60] με σταγόνες νερού στην επιφάνεια των πτερυγίων. Προτείνεται οι προσομοιώσεις να γίνουν σε μοντέλα δύο διαστάσεων ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα των σχεδίων και να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα υπέρβασης των ορίων του προγράμματος.

- ❖ Σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων αυτής της εργασίας με τα αντίστοιχα μοντέλα σε τρεις διαστάσεις, ώστε να διαπιστωθεί ποσοτικά το σφάλμα που εισάγει η παράλειψη του πυλώνα και του αγωγού. Ενδιαφέρον θα είχε και η διερεύνηση της πεδιακής καταπόνησης για διαφορετικές διαμορφώσεις του μονωτήρα (I-string, V-string κ.λπ.). Οι προαναφερθείσες προσομοιώσεις προτείνεται να γίνουν με τη χρήση κάποιου προγράμματος που επιλύει τις εξισώσεις του εναλλασσόμενου πεδίου για το τρισδιάστατο μοντέλο, αντίστοιχο του OPERA-2d/AC.[67]

- ❖ Προσομοίωση ρυπασμένων και υγρών επιφανειών συνθετικών μονωτήρα σε τρεις διαστάσεις, χωρίς να αυξάνεται η πολυπλοκότητα του μοντέλου τόσο ώστε να υπερβαίνονται τα όρια του προγράμματος.

❖ Διερεύνηση της επίδρασης που έχει η εμφάνιση φθορών ("σπάσιμο" των άκρων των πτερυγίων, ρωγμές στο πολυμερικό περίβλημα που αποκαλύπτουν τον πυρήνα από υαλονήματα, μη εμφανείς ρωγμές του πυρήνα, "γλίστρημα" του μονωτήρα από τα μεταλλικά άκρα κ.α.) στο μονωτήρα στην κατανομή πεδιακής καταπόνησης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών μπορούν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη διαγνωστικών εργαλείων, τα οποία είναι χρήσιμα (και απαραίτητα) για τη διάγνωση βλαβών σε ήδη εγκατεστημένους μονωτήρες.

❖ Διερεύνηση της επίδρασης που έχει η ανάκτηση της υδροφοβικότητας της επιφάνειας των συνθετικών μονωτήρων από SIR (μηχανισμός "μετανάστευσης" σιλοξανίων από τον όγκο στην επιφάνεια του υλικού) στη δομή του υλικού και στη συμπεριφορά του υπό συνθήκες έντονης πεδιακής καταπόνησης.

❖ Διενέργεια πειραμάτων στους μονωτήρες, στα σχέδια των οποίων βασίστηκαν τα μοντέλα των προσομοιώσεων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούμε να ελέγξουμε την ορθότητα των τελευταίων.

❖ Χρήση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων (είτε σε συνδυασμό είτε ελλείψει πειραματικών δεδομένων) για την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έρευνα στον τομέα των συνθετικών μονωτήρων.



## Βιβλιογραφία

- [1] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τόμεας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, *Συμπληρωματικές Σημειώσεις για το Μάθημα "Παραγωγή Υψηλών Τάσεων"*. Αθήνα, 2008.
- [2] J. S. T. Looms, *Insulators for High Voltages*: Peregrinus, 1988.
- [3] Ravi S. Gorur, Robert Olsen, Jim Crane, Tom Adams, Jim Gurney, Jim Duxbury, Sreeram Venkataraman, *Prediction of Flashover Voltage of Insulators Using Low Voltage Surface Resistance Measurement*. Tempe, AZ: Power Systems Engineering Research Center, Arizona State University, 2006.
- [4] Ι. Α. Σταθόπουλος, *Υψηλές Τάσεις Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- [5] R. Arora and W. Mosch, *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*: Wiley, 2011.
- [6] Κ. Θ. Δερβος, *Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων*. Αθήνα, 2007.
- [7] J. P. Hottzhausen. High Voltage Insulators. Διαθέσιμο: [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/highvoltage.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/highvoltage.pdf)
- [8] W. D. Callister, *Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών*: Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
- [9] Κ. Ο. Papailiou and F. Schmuck, *Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications*: Springer, 2012.
- [10] E. A. Cherney, "Non-Ceramic insulators-a simple design that requires careful analysis," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 12, pp. 7-15, 1996.
- [11] IEC, "Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V- Definitions, test methods and acceptance criteria," ed, 1992.
- [12] E. A. Cherney, "50 years in the development of polymer suspension-type insulators," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 29, pp. 18-26, 2013.
- [13] R. Hackam, "Outdoor HV composite polymeric insulators," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [14] R. Allen Bernstorff, Randall K. Niedermierr, David S. Winkler. (2000). *Polymer compounds used in high voltage insulators*. Διαθέσιμο: <http://www.hubbellpowersystems.com/literature/insulators/EU1407.pdf>
- [15] Pfisterer. Composite insulators. Διαθέσιμο: [http://www.cablejoints.co.uk/upload/Pfisterer\\_Overhead\\_Line\\_Insulators\\_Silicone\\_Insulators.pdf](http://www.cablejoints.co.uk/upload/Pfisterer_Overhead_Line_Insulators_Silicone_Insulators.pdf)

- [16] S. M. Gubanski, "Modern outdoor insulation - concerns and challenges," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 21, pp. 5-11, 2005.
- [17] M. Amin and M. Salman, "Aging of polymeric insulators (an overview)," *Rev. Adv. Mater. Sci*, vol. 13, pp. 93-116, 2006.
- [18] G. Zhicheng. (2013) Failures of composite insulators in China. *INMR*. Διαθέσιμο: <http://www.inmr.com/2013/10/failures-composite-insulators-china/>
- [19] IEC, "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions," ed, 1986.
- [20] IEC, "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," ed, 2003.
- [21] Anke Schultz, Helmut Sailer. Upgrading overhead lines with composite insulators. *Power Technology International*.
- [22] A. J. Pansini, *Guide to Electrical Power Distribution Systems*: Fairmont Press, 2005.
- [23] Ravi S. Gorur, Dave Shaffer, Wayne Clark. (2005) Utilities share their insulation field experience. *Transmission & Distribution World*. Διαθέσιμο: <http://tdworld.com/overhead-transmission/utilities-share-their-insulator-field-experience>
- [24] Κ. Ι. Σιδεράκης, "Διερεύνηση της συμπεριφοράς μονωτήρων πορσελάνης και υλικών RTV SIR σε πραγματικές και εργαστηριακές συνθήκες με μετρήσεις του ρεύματος διαρροής.," Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2006.
- [25] Su Zhiyi, Yin Yu. (2010) Composite Insulators for applications on UHV AC & DC Transmission Lines. *INMR*. Διαθέσιμο: <http://www.inmr.com/2014/02/composite-insulators-application-uhv-ac-dc-transmission-lines/>
- [26] H. J. Wintle, "Basic physics of insulators," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 27-44, 1990.
- [27] G. R. Buchanan and M. Sallah, "Some simplified methods for infinite elements," *Computational Mechanics*, vol. 6, pp. 167-172, 1990/05/01 1990.
- [28] S. R. H. Hoole, *Finite Elements, Electromagnetics and Design*: Elsevier Science, 1995.
- [29] V. K. Chari and S. J. Salon, *Numerical Methods in Electromagnetism*: Academic Press, 2000.
- [30] I. Ramirez-Vazquez, J. Ruiz-Pinales, J. Salgado-Talavera, "Fractal analysis of nano-reinforced silicone rubber insulators evaluated on a tracking wheel," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 30, pp. 21-27, 2014.

- 
- [31] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method: The basis*: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [32] Λ. Ν. Πλατή, "Υπολογισμός πεδίου σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης," Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- [33] Η. Ε. Γουβαλάρης, "Αναβάθμιση της ποιότητας προσομοίωσης μονωτήρων σε πρόγραμμα πεδιακού υπολογισμού – Εφαρμογή στον υπολογισμό πεδίου σε θέσεις αναρτήσεως γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης," Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- [34] V. T. Kontargyri, L. N. Plati, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string," *Measurement*, vol. 41, pp. 471-480, 2008.
- [35] Vassiliki T. Kontargyri, Ioannis F. Gonos, Ioannis A. Stathopoulos, "Measurement and simulation of the electric field of high voltage suspension insulators," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 19, pp. 509-517, 2009.
- [36] T. Zhao and M. G. Comber, "Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 313-318, 2000.
- [37] T. Doshi, R. S. Gorur, J. Hunt, "Electric field computation of composite line insulators up to 1200 kV AC," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 861-867, 2011.
- [38] W. Que and S. A. Sebo, "Electric field and potential distributions along dry and clean non-ceramic insulators," in *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 2001. Proceedings*, 2001, pp. 437-440.
- [39] Weiguo Que, Stephen A. Sebo, Robert J. Hill, "Practical cases of electric field distribution along dry and clean nonceramic insulators of high-voltage power lines," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1070-1078, 2007.
- [40] B. Vancia, T. K. Saha, T. Gillespie, "Electric Field Modelling of Non-Ceramic High Voltage Insulators," in *Australasian Universities Power Engineering Conference 2005*, 2005, pp. 67-72.
- [41] W. Que and S. Sebo, "Electric field and potential distributions along non-ceramic insulators with water droplets," in *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 2001. Proceedings*, 2001, pp. 441-444.
- [42] A. J. Phillips, D. J. Childs, H. M. Schneider, "Aging of nonceramic insulators due to corona from water drops," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 1081-1089, 1999.
-

- [43] W. L. Vosloo and J. P. Holtzhausen, "The electric field of polluted insulators," in *Africon Conference in Africa, 2002. IEEE AFRICON. 6th*, 2002, pp. 599-602 vol.2.
- [44] Bo Zhang, Jinliang He, Xiang Cui, Shejiao Han, Jun Zou, "Electric field calculation for HV insulators on the head of transmission tower by coupling CSM with BEM," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 543-546, 2006.
- [45] Bo Zhang, Shejiao Han, Jinliang He, Rong Zeng, Puxuan Zhu, "Numerical analysis of electric-field distribution around composite insulator and head of transmission tower," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 959-965, 2006.
- [46] A. J. Phillips, J. Kuffel, A. Baker, J. Burnham, A. Carreira, E. Cherney, W. Chisholm, M. Farzaneh, R. Gemignani, A. Gillespie, T. Grisham, R. Hill, T. Saha, B. Vancia, J. Yu, "Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 823-830, 2008.
- [47] "EPRI Transmission Line Reference Book: 115-345 kV Compact Line Design, The Blue Book," EPRI2008.
- [48] Yu Peng, Peng ZongRen, Cao Li, Liu Peng, Zhu PuXuan, "Finite Element Calculation on Electric Field of Composite Insulator Used in 330kV Compacted Transmission Line," presented at the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 2005.
- [49] D. Stefanini, J. M. Seifert, M. Clemens, D. Weida, "Three dimensional FEM electrical field calculations for EHV composite insulator strings," in *Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2010 IEEE International*, 2010, pp. 238-242.
- [50] A. Phillips, A. Maxwell, C. Engelbrecht, I. Gutman, "Electric Field Limits for the Design of Grading Rings for Composite Line Insulators," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. PP, pp. 1-1, 2014.
- [51] G. Xu and P. McGrath, "Electrical and thermal analysis of polymer insulator under contaminated surface conditions," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 289-298, 1996.
- [52] V. T. Kontargyri, I. F. Gonos, N. C. Ilia, I. A. Stathopoulos, "Simulation of the electric field on composite insulators using the finite elements method," *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, vol. 3, pp. 1318-1322, 2004.
- [53] I. Ramirez, R. Hernandez, G. Montoya, "Diagnostics for nonceramic insulators in harsh environments," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 25, pp. 28-33, 2009.
- [54] A. L. Souza and I. J. da Silva Lopes, "Study of electric field enhancement along polymer insulators under service conditions," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES*, 2010, pp. 759-764.



- 
- [55] 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 " presented at the 39th CIGRE Session, Paris, France, 2002.
- [56] W. Sima, F. P. Espino-Cortes, E. A. Cherney, S. H. Jayaram, "Optimization of corona ring design for long-rod insulators using FEM based computational analysis," in *Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on*, 2004, pp. 480-483.
- [57] I. Sebestyn, "Electric-field calculation for HV insulators using domain-decomposition method," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 1213-1216, 2002.
- [58] Cobham Technical Services, Vector Fields Software "Opera-2d User Guide, Version 14R1," 2011.
- [59] Cobham Technical Services, Vector Fields Software, "Opera-2d Reference Manual, Version 14R1," 2011.
- [60] E. P. Nicolopoulou, E. N. Gralista, V. T. Kontargyri, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Electric field and voltage distribution around composite insulators," presented at the XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, 2011.
- [61] L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan, *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*: Wiley, 2004.
- [62] J. M. Lourtioz, *Photonic Crystals: Towards Nanoscale Photonic Devices*: Springer, 2005.
- [63] Χ. Λάκκα, "Κεραυνική συμπεριφορά εναέριων γραμμών μεταφοράς," Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009.
- [64] "Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία," Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, Αθήνα 2005.
- [65] D. Johns, "Lightning and EMP Protection in Buildings," ed: Computer Simulation Technology.
- [66] Τσαλαμέγκας Ι., Ρουμελιώτης Ι., *ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ Τόμος Α Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα*: Εκδόσεις Τζιόλα, 2011.
- [67] Δ. Ν. Χατζηπέτρος, "Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Υψηλής Τάσης," Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012.
-



## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1-1: Κατηγορίες μονωτήρων [7].....	9
Σχήμα 1-2: Απλοποιημένο σχέδιο συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης. [10].....	12
Σχήμα 1-3: Υδρόλυση του περιβλήματος εποξειδικής ρητίνης στο μονωτήρα GEPOL [12].....	14
Σχήμα 1-4: Πτερύγια (sheds) με κλίση σε μονωτήρα ανάρτησης από κυκλοαλειφατική ρητίνη [12] .....	14
Σχήμα 1-5: Ρωγμές στην επιφάνεια του μονωτήρα Eroxilator II [12] .....	15
Σχήμα 1-6: Σχέδιο μονωτήρα ανάρτησης με περίβλημα από τεφλόν.[12] .....	16
Σχήμα 1-7: Υδροφοβικότητα SIR (α) καθαρού μονωτήρα [15] και (β) ρυπασμένου μονωτήρα με άλατα [16].....	17
Σχήμα 1-8: Διάβρωση περιβλήματος από θερμοπλαστικό πολυμερές.[12].....	18
Σχήμα 1-9: Υλικά πολυμερικών περιβλημάτων συνθετικών μονωτήρων (>100kV) [15].....	19
Σχήμα 1-10: Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας της εξόλκησης.[9] .....	20
Σχήμα 1-11: Πυρήνες RBGF διαφόρων διαστάσεων. [15].....	20
Σχήμα 1-12: Χρήση σφήνας (α), συγκόλλησης (β) και σύνδεσης με συμπίεση (swaged) (γ) για την προσάρτηση του μεταλλικού ακροδέκτη στον πυρήνα του μονωτήρα.[12] .....	22
Σχήμα 1-13: Διάρρηξη της σφράγισης σε μονωτήρα της εταιρείας Rosenthal, στον οποίο έχει εφαρμοστεί η μέθοδος της σφήνας για σύνδεση ακροδεκτών-πυρήνα.[12] .....	22
Σχήμα 1-14: Επίπεδα διαβροχής επιφανειών.[19] .....	26
Σχήμα 1-15: Υδρόφιλη (α) και υδρόφοβη (β) επιφάνεια. [15] .....	26
Σχήμα 1-16: Συνθετικοί μονωτήρες εγκατεστημένοι στην Κίνα, σε εναέριες γραμμές μεταφοράς 1000kV AC (α) και ±800kV DC (β).[25] .....	29

Σχήμα 2-1: Διαμορφώσεις ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα σε σφαιρικό και επίπεδο ηλεκτρόδιο (α) και ανάμεσα στους αγωγούς μιας τετράκλωνης γραμμής μεταφοράς.[5] .....	32
Σχήμα 2-2: Πεδίο μεταξύ των σημείων α,β. [5].....	32
Σχήμα 2-3: Διαμόρφωση (α) ομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, (β) ασθενώς ανομοιόμορφου πεδίου ανάμεσα σε δύο σφαίρες και (γ) ανομοιόμορφου πεδίου ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια-ακίδες. [5].....	36
Σχήμα 2-4: Πεπερασμένα στοιχεία: τετραεδρικό (α) και τριγωνικό (β) [5] .....	39
Σχήμα 2-5: Χωρισμός μίας περιοχής δύο διαστάσεων σε τριγωνικά στοιχεία.[31]	39
Σχήμα 2-6: Δημιουργία πλέγματος για τον υπολογισμό πεδίου με τη μέθοδο FEM [5].....	39
Σχήμα 2-7: Τμήμα διδιάστατου πεδίου, χωρισμένου σε ανόμοια τριγωνικά στοιχεία στο επίπεδο x-y.[5].....	40
Σχήμα 2-8: Σύνδεση του κόμβου 5 (κόμβος k στο Σχήμα 2-7) με τους κόμβους των τριγωνικών στοιχείων (1) έως (4). [5] .....	43
Σχήμα 3-1: Ισοδυναμικές γραμμές στο υπό τάση άκρο συνθετικού μονωτήρα ανάρτησης 230kV.[12] .....	45
Σχήμα 3-2: Απλοποιημένο σχέδιο (α) του πλήρους μοντέλου και (β) του μονωτήρα [36].....	46
Σχήμα 3-3: Αποτελέσματα προσομοιώσεων σε μοντέλα μονωτήρα με πτερύγια και χωρίς [36].....	48
Σχήμα 3-4: Επίδραση του μήκους του αγωγού στην κατανομή του δυναμικού [36] .....	48
Σχήμα 3-5: Επίδραση του πυλώνα στην κατανομή του δυναμικού. [36] .....	49
Σχήμα 3-6: Παρουσίαση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.[36].	49
Σχήμα 3-7: Απλοποιημένο σχέδιο (α) μονωτήρα 34,5kV (διαστάσεις σε mm) και (β) πυλώνα γραμμής 765kV με τέσσερις αγωγούς ανά φάση (διαστάσεις σε cm) [38] .....	50
Σχήμα 3-8: Ισοδυναμικές γραμμές (α,β,γ) και κατανομή πεδιακής έντασης (δ,ε) για (α) απλοποιημένο μονωτήρα, (β) πλήρες μονωτήρα χωρίς αγωγό και (γ) πλήρες μονωτήρα με αγωγό [38] .....	51

Σχήμα 3-9: (α) Πυλώνας ανάρτησης και (β) τερματικός πυλώνας (διαστάσεις σε cm)[39].....	52
Σχήμα 3-10: Τύποι μονωτήρων στους οποίους βασίστηκαν οι προσομοιώσεις.[39] .....	52
Σχήμα 3-11: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο τριπλής ένωσης ανάλογα με τη θέση του τοροειδούς εξομάλυνσης.[39].....	53
Σχήμα 3-12: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος στεγνού μονωτήρα μετά από εργαστηριακές μετρήσεις (*) και μετά από προσομοίωση (-).[39].....	53
Σχήμα 3-13: Κατανομή πεδίου κοντά στο υπό τάση άκρο για διάφορες διαμορφώσεις διατάξεων εξομάλυνσης πεδίου.[40].....	54
Σχήμα 3-14: Διαμορφώσεις μεταλλικών τερματισμών και προκύπτων ηλεκτρικό πεδίο.[40].....	55
Σχήμα 3-15: Τομή 30° του περιβλήματος (α) στεγνού και (β) υγρού μονωτήρα[37] .....	55
Σχήμα 3-16: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου για διπλή και μονή σειρά μονωτήρων σε γραμμή Y.Y.T. 1000kV [37].....	56
Σχήμα 3-17: (α) Μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για διάφορα επίπεδα τάσης, με ή χωρίς χρήση τοροειδών και (β) μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του αριθμού των αγωγών ανά φάση υπό στεγνές συνθήκες [37].....	56
Σχήμα 3-18: Μοντέλα πυλώνων: (α) ανάρτησης και (β) τερματικός [37].....	57
Σχήμα 3-19: Μοντελοποίηση σταγόνας ύδατος (α) στο περίβλημα ( <i>sheath</i> ) και (β) στο πτερύγιο συνθετικού μονωτήρα [41] .....	58
Σχήμα 3-20: Ισοδυναμικές γραμμές και γραμμές πεδίου σε σταγόνα ύδατος (α) στο περίβλημα ( <i>sheath</i> ) και (β) σε πτερύγιο συνθετικού μονωτήρα [41] .....	58
Σχήμα 3-21: Ισοδυναμικές γραμμές για (α) μοντέλο στεγνού μονωτήρα, (β) μοντέλο βροχής και (γ) ομίχλης [41] .....	59
Σχήμα 3-22: Πεδιακή κατανομή κατά μήκος συνθετικού μονωτήρα 230kV υπό συνθήκες υγρασίας [37].....	59
Σχήμα 3-23: Πεδιακή κατανομή γύρω από (α) στεγνό και καθαρό μονωτήρα, (β) ρυπασμένο μονωτήρα και (γ) μονωτήρα με ξηρή ζώνη [43].....	60
Σχήμα 3-24: Εκδήλωση του φαινομένου Corona λόγω σταγονιδίων νερού (αριστερά) και λόγω ξηρής ζώνης (δεξιά) [43] .....	60

Σχήμα 3-25: Σχέδιο του πυλώνα, των μονωτήρων και των αγωγών τριφασικής γραμμής 330kV [44].....	61
Σχήμα 3-26: Διάταξη επιβεβαίωσης μεθόδου [44] .....	63
Σχήμα 3-27: Κατανομή δυναμικού (α) και έντασης ηλεκτρικού πεδίου (β) σύμφωνα με την παρούσα εργασία και την εργασία [36]. [44].....	63
Σχήμα 3-28: Αποτελέσματα προσομοιώσεων [44].....	64
Σχήμα 3-29: (α) Τμήμα δικτύου αντιστάσεων και (β) ισοδύναμο κύκλωμα [45] ..	65
Σχήμα 3-30: Κατανομή δυναμικού (α) και έντασης ηλεκτρικού πεδίου (β) στον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα [45].....	67
Σχήμα 3-31: Κατανομή δυναμικού γύρω από τα στοιχεία του μοντέλου [45] .....	67
Σχήμα 3-32: Μέγιστες τιμές πεδιακής έντασης στην επιφάνειες των αγωγών κοντά στον πυλώνα (α) για τη μεσαία φάση, όπου Α είναι ο κάτω αγωγός και Β ένας από τους δύο πάνω αγωγούς και (β) για την πλαϊνή φάση, όπου Α είναι ο πάνω αγωγός που δεν είναι δίπλα στον πυλώνα, Β ο πάνω αγωγός δίπλα στον πυλώνα και C ο κάτω αγωγός. [45].....	68
Σχήμα 3-33: Κανονικοποιημένη κατανομή της πεδιακής έντασης στον άξονα συμμετρίας συνθετικού μονωτήρα 115kV σε διαμόρφωση I. [46] .....	69
Σχήμα 3-34: (α) Μοντέλο πυλώνα συνεπτυγμένης γραμμής 330kV και (β) πεδιακή καταπόνηση των μονωτήρων [48] .....	70
Σχήμα 3-35: (α) Μοντελοποίηση του άκρου Υ.Τ. και (β) πεδιακή κατανομή στο άκρο αυτό [49].....	70
Σχήμα 3-36: (α) Μοντέλο συνθετικού μονωτήρα στήριξης 15kV και διακριτοποίηση του χώρου (β) γύρω από το μονωτήρα και (γ) πλησίον αυτού (διαστάσεις σε mm) [51].....	71
Σχήμα 3-37: Κατανομή (α) της εφαπτομενικής και (β) της κάθετης συνιστώσας του πεδίου [51].....	72
Σχήμα 3-38: (α) Πλήρες και (β) απλοποιημένο μοντέλο συνθετικού μονωτήρα 34,5kV [52].....	73
Σχήμα 3-39: Κατανομή (α) του δυναμικού (σε V) και (β) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (V/m) στην επιφάνεια του μονωτήρα. Με μαύρο σημειώνεται η γραφική παράσταση που αφορά στο πλήρες μοντέλο και με κόκκινο στο απλοποιημένο. [52].....	73

Σχήμα 3-40: Κατανομή του δυναμικού (V) κοντά στο υπό τάση άκρο ρυπασμένου μονωτήρα, (α) πλήρες και (β) απλοποιημένο μοντέλο. [52] .....	74
Σχήμα 3-41: Απλοποιημένο σχέδιο συνθετικού μονωτήρα 69kV (μονάδες: mm) [52].....	74
Σχήμα 3-42: Κατανομή (α) δυναμικού και (β) έντασης ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα για ιδανικές συνθήκες (μαύρη γραφική) και ρύπανση (κόκκινη γραφική) [52] .....	74
Σχήμα 3-43: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στα πρώτα τριάντα πετύγια συνθετικού μονωτήρα μετά από χρόνια λειτουργίας υπό συνθήκες ρύπανσης [53] .....	76
Σχήμα 3-44: Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου υπό ιδανικές συνθήκες (α) και υπό συνθήκες ρύπανσης (β) σε απόσταση 0,5mm από το περίβλημα του μονωτήρα [53].....	76
Σχήμα 3-45: (α) Λεπτομέρεια πειραματικής διάταξης και (β) εκδήλωση φαινομένου Corona (45kV εφαρμοζόμενη τάση) [54] .....	77
Σχήμα 3-46: Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στις «μεταλλικές σταγόνες» (α) για τάση 42kVrms (με ή χωρίς σταγόνες) και (β) για τις επιμέρους περιπτώσεις παρουσία σταγόνων [54] .....	77
Σχήμα 3-47: (α) Τρισδιάστατο μοντέλο του μονωτήρα 420kV (άκρο υψηλής τάσης και τοροειδές εξομάλυνσης πεδίου) και (β) διάταξη εργαστηρίου [55].....	78
Σχήμα 3-48: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του συνθετικού μονωτήρα σε απόσταση 1m από αυτόν (κατόπιν μέτρησης και υπολογισμού με FEM)[55].....	78
Σχήμα 3-49: Γεωμετρία του συνθετικού μονωτήρα με τοροειδές, όπως χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις [56].....	79
Σχήμα 3-50: Ομοαξονικά καλώδια: (α) μονοφασικό και (β) τριφασικό και (γ) σύγκριση αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων για την περίπτωση (α) [56] 80	
Σχήμα 3-51: (α) Κατανομή πεδιακής έντασης με/χωρίς γείωση και (β) επίδραση γεωμετρικών χαρακτηριστικών στο πεδίο στην επιφάνεια του τοροειδούς [56] .....	81
Σχήμα 3-52: (α) Χωρισμός του προς ανάλυση χωρίου σε υποχωρία και (β) χωρισμός χωρίου σε καθολικά ( <i>global</i> ) και τοπικά ( <i>local</i> ) χωρία [57].....	82
Σχήμα 3-53: (α)Καθολικό ( <i>global</i> ) χωρίο και (β)κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του [57] .....	82
Σχήμα 3-54: Λεπτομέρεια του μονωτήρα με τοροειδές εξομάλυνσης [57].....	83
Σχήμα 3-55: Κατανομή δυναμικού στο τοπικό χωρίο [57].....	83

Σχήμα 4-1: Τμήμα μοντέλου συνθετικού μονωτήρα 400kV .....	87
Σχήμα 4-2: Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις (σε mm) του μονωτήρα 345kV: (α) ράβδος από υαλονήματα, (β) πτερύγια από πολυμερές, (γ) πολυμερές περίβλημα, (δ) μεταλλικός τερματισμός [36] .....	90
Σχήμα 4-3: Μονωτήρας 1: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	91
Σχήμα 4-4: Μονωτήρας 2: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	91
Σχήμα 4-5: Μονωτήρας 3: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	92
Σχήμα 4-6: Μονωτήρας 4: (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του μονωτήρα με το τοροειδές, (β) λεπτομέρεια του υπό τάση άκρου και (γ) τομή του μονωτήρα ως προς τα επίπεδα $x=0$ και $y=0$ , με τις διαστάσεις σε mm. Οι τρισδιάστατες αναπαραστάσεις των σχημάτων (α) και (β) προέκυψαν περιστρέφοντας κατά $360^\circ$ το σχέδιο του σχήματος (γ). Για το λόγο αυτό δε φαίνονται τα εξαρτήματα προσάρτησής τους στο μονωτήρα, ωστόσο συμπεριλήφθηκαν για να γίνει πιο ξεκάθαρη η θέση του τοροειδούς.....	92
Σχήμα 4-7: Μονωτήρας 5: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	93
Σχήμα 4-8: Μονωτήρας 6: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	94
Σχήμα 4-9: Μονωτήρας 7: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	94
Σχήμα 4-10: Μονωτήρας 8: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	95
Σχήμα 4-11: Μονωτήρας 9: (α) Τομή ως προς το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, (β) τομή της εικόνας (α) ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, με τις διαστάσεις σε mm .....	95



Σχήμα 4-12: Η καρτέλα Set Region Properties, στην οποία φαίνονται οι ιδιότητες του μεταλλικού τερματισμού .....	96
Σχήμα 4-13: Κανονικοποιημένη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background.....	99
Σχήμα 4-14: Κανονικοποιημένη κατανομή του δυναμικού στα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background .....	100
Σχήμα 4-15: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background.....	101
Σχήμα 4-16: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα 8 (Σχήμα 4-10) για διαφορετικές διαστάσεις του background.....	102
Σχήμα 4-17: Τμήμα του background γύρω από το μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9), όπου φαίνεται η οριζόντια διάσταση (20000mm) .....	102
Σχήμα 4-18: Μενού της διεπιφάνειας ( <i>interface</i> ) του προεπεξεργαστή για την κατασκευή του περιγράμματος κάθε περιοχής και τον ορισμό των κόμβων του πλέγματος.....	103
Σχήμα 4-19: Η καρτέλα Next Polygon Corner, στην οποία γίνεται ο καθορισμός των υποδιαίρεσεων των επιμέρους επιφανειακών τμημάτων κάθε περιοχής.....	104
Σχήμα 4-20: Το πλέγμα στην περιοχή γύρω από το μονωτήρα 1 (150kV) (Σχήμα 4-3).....	104
Σχήμα 4-21: Το πλέγμα γύρω από (α) το γειωμένο άκρο, (β) την περιοχή του πολυμερούς περιβλήματος και (γ) το υπό τάση άκρο του μονωτήρα 6 (400kV) (Σχήμα 4-8).....	105
Σχήμα 4-22: Πλέγμα εκατέρωθεν της υποπεριοχής στο μοντέλο του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9) .....	105
Σχήμα 4-23: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μοντέλου του μονωτήρα της εργασίας [36], μετά από προσομοιώσεις με τις μεθόδους FEM και BEM .....	106
Σχήμα 4-24: Κατανομή του δυναμικού (POT) κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης .....	107

Σχήμα 4-25: Κατανομή του δυναμικού (POT) κατά μήκος των άκρων των πτερυγίων του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης..... 108

Σχήμα 4-26: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (EMOD) κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης..... 108

Σχήμα 4-27: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (EMOD) κατά μήκος των άκρων των πτερυγίων του μονωτήρα. Με μαύρο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, ενώ με κόκκινο της εναλλασσόμενης..... 109

Σχήμα 4-28: Κατανομή του δυναμικού (POT) κατά μήκος των πτερυγίων του μονωτήρα για καθαρή εξωτερική επιφάνεια (μαύρη γραφική), για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-5} \text{S/m}$  (κόκκινη γραφική) και για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-4} \text{S/m}$  (πράσινη γραφική)..... 111

Σχήμα 4-29: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (EMOD) κατά μήκος των πτερυγίων του μονωτήρα για καθαρή εξωτερική επιφάνεια (μαύρη γραφική), για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-5} \text{S/m}$  (κόκκινη γραφική) και για στρώμα ρύπανσης αγωγιμότητας  $\sigma = 10^{-4} \text{S/m}$  (πράσινη γραφική)..... 111

Σχήμα 4-30: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3)..... 113

Σχήμα 4-31: Λεπτομέρειες του πλέγματος γύρω από (α) το γειωμένο άκρο, (β) το εσωτερικό και τα πτερύγια και (γ) το υπό τάση άκρο του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3) 113

Σχήμα 4-32: Κατανομή του δυναμικού σε διάφορες αποστάσεις από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3) ( $R=0\text{mm}$ ). Η απόσταση  $R=57,5\text{mm}$  αντιστοιχεί στην ευθεία που ενώνει τις άκρες των πτερυγίων του μονωτήρα..... 114

Σχήμα 4-33: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3), κατά μήκος κάθετων γραμμών από το κέντρο του ως τα άκρα των πτερυγίων με τη μεγαλύτερη διάμετρο ( $R=57,5\text{mm}$ )..... 115

Σχήμα 4-34: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3), κατά μήκος κάθετων γραμμών από το κέντρο του ως  $12,5\text{mm}$  πριν την άκρη των πτερυγίων με τη μικρότερη διάμετρο ( $R=42,5\text{mm}$ )..... 116

Σχήμα 4-35: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στα μικρότερα ( $R=42,5\text{mm}$ ) και τα μεγαλύτερα ( $R=57,5\text{mm}$ ) πτερύγια του μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3)..... 116

Σχήμα 4-36: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο έξω από το μονωτήρα 1 (Σχήμα 4-3)..... 117

- Σχήμα 4-37: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4)..... 118
- Σχήμα 4-38: Λεπτομέρειες του πλέγματος γύρω από (α) το γειωμένο άκρο, (β) το υπό τάση άκρο και (γ) το εσωτερικό και τα πτερύγια του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4) 118
- Σχήμα 4-39: Κατανομή του δυναμικού σε διάφορες αποστάσεις από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4) ( $R=0\text{mm}$ ). Η απόσταση  $R=67\text{mm}$  αντιστοιχεί στην ευθεία που ενώνει τις άκρες των πτερυγίων του μονωτήρα..... 119
- Σχήμα 4-40: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-3), κατά μήκος κάθετων γραμμών από το κέντρο του ως 7mm πριν τις άκρες των πτερυγίων ..... 120
- Σχήμα 4-41: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4) ( $R=67\text{mm}$ )..... 121
- Σχήμα 4-42: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο έξω από το μονωτήρα 2 (Σχήμα 4-4)..... 121
- Σχήμα 4-43: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6)..... 122
- Σχήμα 4-44: Το πλέγμα μέσα και γύρω από το μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) στην περιοχή (α) του γειωμένου άκρου και του υπό τάση άκρου (β) παρουσία και (γ) απουσία τοροειδούς ..... 123
- Σχήμα 4-45: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς..... 123
- Σχήμα 4-46: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των άκρων των μεγαλύτερων πτερυγίων ( $R=70\text{mm}$ ) του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς ..... 124
- Σχήμα 4-47: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς..... 125
- Σχήμα 4-48: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τα άκρα των πτερυγίων του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) απουσία (κόκκινη γραφική) και παρουσία (μπλε γραφική) τοροειδούς ..... 125
- Σχήμα 4-49: Απεικόνιση της κατανομής της πεδιακής έντασης στην περιοχή του υπό τάση άκρου του μονωτήρα 4 (Σχήμα 4-6) (α) απουσία και (β) παρουσία τοροειδούς..... 126

Σχήμα 4-50: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου άκρου, (β) των πτερυγίων και (γ) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 3 (Σχήμα 4-5) .....	127
Σχήμα 4-51: Λεπτομέρειες του πλέγματος κοντά (α) στο γειωμένο άκρο, (β) στα πτερύγια και (γ) στο υπό τάση άκρο του μονωτήρα 3 (Σχήμα 4-5) .....	128
Σχήμα 4-52: Τρισδιάστατη απεικόνιση (α) των πτερυγίων και (β) των πτυχώσεων των πτερυγίων του μονωτήρα 3 (Σχήμα 4-5) .....	128
Σχήμα 4-53: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) (R=0mm) .....	129
Σχήμα 4-54: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των πτερυγίων των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) (R=67mm) .....	129
Σχήμα 4-55: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) (R=0mm) .....	130
Σχήμα 4-56: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος των πτερυγίων των μονωτήρων 2 και 3 (Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5) (R=67mm).....	130
Σχήμα 4-57: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο 15% του μήκους των μονωτήρων 1-5 (Σχήμα 4-3 ως Σχήμα 4-7) .....	132
Σχήμα 4-58: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μοντέλου του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9) .....	133
Σχήμα 4-59: Λεπτομέρειες του πλέγματος κοντά (α) στο γειωμένο και (β) στο υπό τάση άκρο του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9). Είναι εμφανής η χρήση υποπεριοχής για τον καλύτερο έλεγχο του πλέγματος.....	133
Σχήμα 4-60: Κατανομή του δυναμικού από το κέντρο του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9) από το κέντρο του ανά 5mm ως τα άκρα των πτερυγίων (R=70mm) .....	134
Σχήμα 4-61: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο (κόκκινη γραφική) και στα άκρα των πτερυγίων (μπλε γραφική) (R=70mm) του μονωτήρα 7 (Σχήμα 4-9) .....	134
Σχήμα 4-62: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου και (β) του υπό τάση άκρου του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8).....	135
Σχήμα 4-63: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8).....	136
Σχήμα 4-64: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα πτερύγια του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8), από R=70mm ως τα άκρα τους (R=86mm) .....	137

---

Σχήμα 4-65: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εξωτερικό του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8).....	137
Σχήμα 4-66: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο (μπλε γραφική) και στα άκρα των πτερυγίων (κόκκινη γραφική) ( $R=86\text{mm}$ ) του μονωτήρα 6 (Σχήμα 4-8).....	138
Σχήμα 4-67: Λεπτομέρειες (α) του γειωμένου άκρου, (β) των πτερυγίων και (γ) του υπό τάση άκρου του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11) .....	138
Σχήμα 4-68: Λεπτομέρειες του πλέγματος (α) στο γειωμένο άκρο, (β) στα πτερύγια και (γ) στο υπό τάση άκρο του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11).....	139
Σχήμα 4-69: Κατανομή του δυναμικού στο κέντρο (μπλε γραφική) και στα άκρα των πτερυγίων (κόκκινη γραφική) ( $R=70\text{mm}$ ) του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11).....	139
Σχήμα 4-70: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11).....	140
Σχήμα 4-71: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των πτερυγίων ( $R=70\text{mm}$ ) του μονωτήρα 9 (Σχήμα 4-11).....	140



## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες υλικών κατασκευής μονωτήρων.[2] .....	8
Πίνακας 1.2: Χαρακτηρισμός επιπέδων ρύπανσης κατά IEC και μήκος ερπυσμού.[19].....	24
Πίνακας 1.3: Επίπεδα διαβροχής (WC) κατά IEC.[20] .....	25
Πίνακας 3.1: Σύγκριση της μέγιστης τιμής του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους πυλώνων για διάφορα επίπεδα τάσης [37] .....	57
Πίνακας 3.2: Χωρητικότητες μεταξύ των αγωγών του παραπάνω σχήματος [44].	63
Πίνακας 3.3: Τάση έναυσης Corona για διαφορετικά διάκενα μεταξύ των σφαιρών [54].....	77
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά υπολογιστή στον οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις .	85
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά των μονωτήρων 150kV του ελληνικού δικτύου μεταφοράς.....	90
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά των μονωτήρων 400kV του ελληνικού δικτύου μεταφοράς.....	93
Πίνακας 4.4: Τιμές της επιτρεπτότητας, $\epsilon_r$ και της ειδικής αγωγιμότητας, $\sigma$ των επιμέρους στοιχείων των μοντέλων .....	97
Πίνακας 4.5: Συντεταγμένες των κορυφών και συντελεστές αύξησης της τετμημένης και της θετικής τεταγμένης του υποβάθρου (background) (σε mm).....	99
Πίνακας 4.6: Όρια προγράμματος OPERA-2d (32-bit) [59] .....	103
Πίνακας 4.7: Αποστάσεις του άκρου του τελευταίου πτερυγίου των μονωτήρων 1-5 (Σχήμα 4-3 ως Σχήμα 4-7) και μέγιστες τιμές της πεδιακή έντασης σε αυτούς.....	131