



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία-Αναστασία Ν. Μαρούλη

**Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

**Επιβλέποντες :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη  
Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π.  
Χρήστος- Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης  
Υπ. Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβρης 2021

---





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Μέσης Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία-Αναστασία Ν. Μαρούλη

**Καθηγητής :** Ιωάννης Φ. Γκόνος

**Επιβλέποντες :** Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Χρήστος- Χριστόδουλος Αθ. Κοκάλης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Πάυλος Γεωργιλάκης

Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 20

.....  
Γεωργία-Αναστασία Ν. Μαρούλη

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

Copyright © Γεωργία-Αναστασία Ν. Μαρούλη, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου



## **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη με σκοπό την προσομοίωση του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από συνθετικούς μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές γραμμές μέσης τάσης. Οι προσομοιώσεις αυτές, πραγματοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος COMSOL Multiphysics 5.2, στο οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Τα τρισδιάστατα (3D) μοντέλα μονωτήρων που εξετάστηκαν αναφέρονταν σε έναν μονωτήρα τύπου ανάρτησης και έναν τύπου γραμμής, ενώ για την επίτευξη κλειστής γεωμετρίας, έγινε η παραδοχή ότι σε μεγάλες αποστάσεις από το μονωτήρα το δυναμικό είναι ίσο με μηδέν. Επιπλέον, μελετήθηκαν περιπτώσεις μονωτήρων με σταγονίδια και σκισίματα στα κυάθιά τους, καθώς και μονωτήρες χωρίς κυάθια. Τα αποτελέσματα της εκάστοτε προσομοίωσης περιέγραψαν ικανοποιητικά την κατανομή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για κάθε περίπτωση, επιβεβαιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τη σχετική βιβλιογραφία και τις αντίστοιχες θεωρητικές μελέτες.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ηλεκτρική Ενέργεια, Μέση Τάση, Συνθετικοί Μονωτήρες, Κατανομή Ηλεκτρικού Πεδίου, Comsol, Προσομοίωση, Κατανομή Δυναμικού

## ***Abstract***

The present diploma thesis was conducted in order to simulate the electric field around composite insulators used in medium voltage lines. These simulations were performed using the COMSOL Multiphysics 5.2 program, in which the finite element method was applied. The three-dimensional (3D) models of insulators examined referred to a suspension insulator and a line-post insulator, while to achieve a closed geometry, it was assumed that at long distances from the insulator the potential is equal to zero. In addition, cases of insulators with droplets and cuts in their sheds were studied, as well as insulators without sheds. The results of the respective simulations satisfactorily described the distribution of voltage and electric field for each case, largely confirming the relevant literature and the corresponding theoretical studies.

**Keywords:** Electric Energy, Medium Voltage, Composite Insulators, Electric Field Distribution, Comsol, Simulation, Potential Distribution





# Περιεχόμενα

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>12</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>13</b>
1.1 ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	13
1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ .....	13
1.2.1 Μονωτήρες Ακίδων (Pin).....	14
1.2.2 Μονωτήρες Γραμμής (Post) .....	15
1.2.3 Μονωτήρες Ανάρτησης (Suspension) .....	15
1.2.4 Μονωτήρες τύπου Strain.....	16
1.2.5 Μονωτήρες τύπου Shackle .....	17
1.2.6 Μονωτήρες τύπου Stay .....	18
1.2.7 Άλλοι μονωτήρες .....	18
1.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	19
1.3.1 Πορσελάνη.....	20
1.3.2 Γυαλί .....	20
1.3.3 Πολυμερή.....	22
1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	23
1.5 ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΙ ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ .....	24
1.5.1 Πυρήνας.....	24
1.5.2 Πολυμερικό Περιβλήμα .....	24
1.5.3 Ακροδέκτες .....	28
1.6 ΓΗΡΑΝΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ .....	29
1.6.1 Ρύπανση.....	29
1.6.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες .....	30
1.6.3 Φαινόμενα Corona-Flashover.....	31
<b>2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b> .....	<b>33</b>
2.1 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ .....	33
2.1.1 Εισαγωγικές Έννοιες .....	33
2.1.2 Διηλεκτρικά υλικά.....	35
2.1.3 Νόμοι του Maxwell .....	36
2.1.4 Διαμορφώσεις του ηλεκτρικού πεδίου και οι επιπτώσεις τους στα διηλεκτρικά.....	39
2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	43
2.2.1 Διαφορικές αριθμητικές μέθοδοι.....	43
2.2.2 Ολοκληρωτικές αριθμητικές μέθοδοι .....	51

<b>3</b>	<b>ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL ΚΑΙ Η ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ</b>	<b>53</b>
3.1	Το ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL .....	53
3.1.1	Γενικά.....	53
3.1.2	Χρήση.....	54
3.1.3	Λειτουργία .....	56
3.2	ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ .....	59
3.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΣΩ COMSOL .....	62
3.3.1	Γεωμετρία .....	62
3.3.2	Υλικά .....	65
3.3.3	Οριακές Συνθήκες.....	68
3.3.4	Πλέγμα.....	70
3.3.5	Μελέτη.....	71
<b>4</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>72</b>
4.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	72
4.2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΥΒΟΥ.....	76
4.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ .....	78
4.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΜΕ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ .....	84
4.5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ .....	89
4.6	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΚΛΑΣΕΩΝ ΥΔΡΟΦΟΒΙΚΟΤΗΤΑΣ 2,4 ΚΑΙ 6.....	94
<b>5</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>109</b>
5.1	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ .....	109
5.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΜΕ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ .....	110
5.3	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ .....	117
5.4	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ ΜΕ ΣΤΑΓΟΝΕΣ .....	123
5.5	ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....	129
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>131</b>
	<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>135</b>
	<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>	<b>142</b>
	<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....</b>	<b>143</b>



# **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη από τη φοιτήτρια Μαρούλη Γεωργία-Αναστασία, 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 μέσης τάσης με χρήση του λογισμικού Comsol Multiphysics και την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αποτελεί μια εισαγωγή στους μονωτήρες, αφού παρουσιάζονται οι κατηγορίες τους, τα υλικά κατασκευής τους, η ιστορική αναδρομή τους, καθώς και οι παράγοντες γήρανσής τους. Ιδιαίτερη επισήμανση γίνεται στους συνθετικούς μονωτήρες, καθώς αποτελούν το αντικείμενο της ακόλουθης μελέτης. Κατόπιν έπεται το κεφάλαιο 2, στο οποίο αναλύεται η θεωρητική προσέγγιση της πεδιακής ανάλυσης. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων του ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή το πρόγραμμα που επιλέχτηκε, οι μονωτήρες που μοντελοποιήθηκαν καθώς και τα βήματα που ακολουθήθηκαν. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όλων των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο, πραγματοποιείται ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο Καθηγητή κ.Ιωάννη Φ Γκόνο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή τη διπλωματική εργασία. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ.Φραγκίσκο Β. Τοπαλή και κ. Παύλο Γεωργιάκη για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή εξέτασης της εργασίας αυτής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη για την ιδιαίτερη συμβολή της στην εκπόνηση της εργασίας αυτής, αφού μου προσέφερε καθοδήγηση σε κάθε βήμα μου, καθώς και μια άμεση ανταπόκριση σε κάθε ζήτημα και απορία που προέκυψε. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Χρήστο- Χριστόδουλο Αθ. Κοκάλη, για την εξαιρετική συνεργασία μας και τη σημαντική βοήθειά του όποτε τον χρειάστηκα.

# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Μονωτήρες στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα θεμελιώδες συστατικό της σύγχρονης κοινωνίας και η προσφορά της έχει άμεσο αντίκτυπο στην κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη μιας χώρας. Η ποιότητα της ζωής και της εργασίας του καθενός εξαρτάται πλήρως από μια αξιόπιστη, άφθονη, προσιτή και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας [1]. Για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται ένα σύνολο εγκαταστάσεων και μέσων που ονομάζεται Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) [2]. Πρωταρχικό μέλημα των εγκαταστάσεων αυτών είναι η προστασία τόσο των μηχανημάτων όσο και του εργατικού δυναμικού γύρω από αυτά.

Προκειμένου, λοιπόν, να απομονωθούν τα ηλεκτροφόρα στοιχεία μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα χρησιμοποιούνται υλικά τα οποία ονομάζονται μονωτήρες [3]. Οι μονωτήρες πέραν της ηλεκτρικής μόνωσης, εξασφαλίζουν και μηχανική υποστήριξη (ανάρτηση, στήριξη, τάνυση), ρυθμίζοντας έτσι τις αποστάσεις μεταξύ αγωγών καθώς και μεταξύ αγωγών και γης [4]. Αυτή η λειτουργία είναι εξίσου σημαντική καθώς οι αποστάσεις αυτές οφείλουν να είναι τέτοιες ώστε να μη δίνεται η δυνατότητα στους αγωγούς να προσεγγίζουν ο ένας τον άλλων σε περιπτώσεις ταλάντωσης λόγω ανέμου, και έτσι να αποφεύγονται διασπάσεις της μόνωσης και σπινθήρες [2].

### *1.2 Κατηγοριοποίηση*

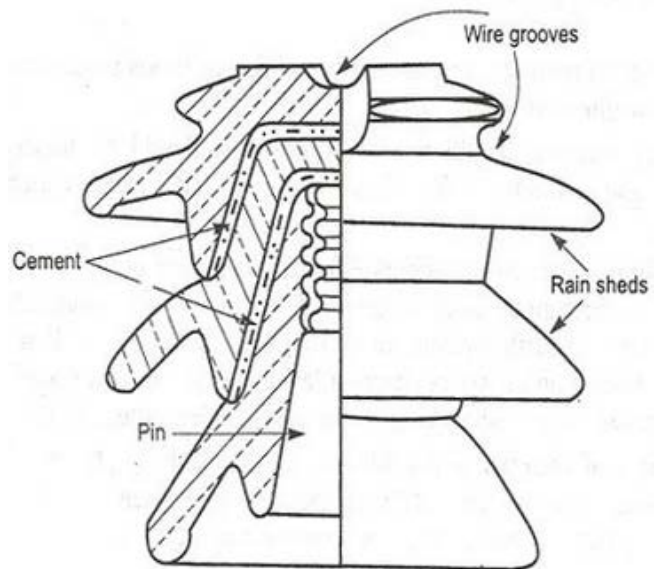
Υπάρχουν διάφοροι τύποι μονωτήρων που χρησιμοποιούνται ως προστασία στις γραμμές μεταφοράς. Οι βασικότεροι από αυτούς είναι οι μονωτήρες ακίδων, γραμμής, ανάρτησης, strain, shackle και stay οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω[5].

### 1.2.1 Μονωτήρες Ακίδων (Pin)

Ο μονωτήρας ακίδων ή περόνης στηρίζεται πάνω σε έναν κοχλία που ασφαρίζεται στον εγκάρσιο βραχίονα των δομών στήριξης (τραβέρσα). Ο αγωγός συνδέεται με τον μονωτήρα στην επάνω αυλάκωση, όπως φαίνεται στα σχήματα Σχήμα 1-1 και Σχήμα 1-2 [7]. Αυτοί οι μονωτήρες χρησιμοποιούνται στη διανομή ηλεκτρικής σε τάσεις έως 33 kV. Ωστόσο ένας μονωτήρας μονής ακίδας χρησιμοποιείται για τη μετάδοση τάσεων έως 11 kV. Για υψηλότερες τάσεις απαιτούνται μονωτήρες ακίδων δύο, τριών ή τεσσάρων τεμαχίων [8]. Για τάση λειτουργίας υψηλότερη των 33 kV, οι μονωτήρες τύπου περόνης καθίστανται πολύ ογκώδεις και ως εκ τούτου μη οικονομικοί[5].



Σχήμα 1-1: Μονωτήρας Ακίδων [6]



Σχήμα 1-2: Σχέδιο Μονωτήρα Ακίδων [7]

### 1.2.2 Μονωτήρες Γραμμής (Post)

Ο μονωτήρας γραμμής είναι ένα ενιαίο κομμάτι πορσελάνης (Σχήμα 1-3) [6], το οποίο χρησιμοποιείται σε εναέριες γραμμές διανομής μέσης τάσης με σκοπό τη στερέωση αγωγών σε σώματα πυλώνων. Εμφανίζεται σε συστήματα διανομής εντός πόλεων και συνήθως εγκαθίστανται σε μεταλλικές, ξύλινες και από μπετόν κατασκευές για να υποστηρίξουν οριζόντια ή κάθετα αγωγούς γραμμής [8]. Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 1-1, στον οποίο γίνεται σύγκριση χαρακτηριστικών των μονωτήρων αυτών με τους μονωτήρες ακίδων που παρουσιάστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 1-3 : Μονωτήρας Γραμμής  
[6]

Μονωτήρας Ακίδων	Μονωτήρας Γραμμής
Χρησιμοποιείται γενικά σε συστήματα έως 33kV	Είναι κατάλληλο για χαμηλότερη αλλά και για υψηλότερη τάση
Ο αγωγός στερεώνεται στο πάνω μέρος του μονωτή	Ο αγωγός στερεώνεται στο πάνω μέρος του μονωτή με τη βοήθεια του σφιγκτήρα σύνδεσης
Δύο μονωτές δεν μπορούν να στερεωθούν μαζί για εφαρμογή υψηλότερης τάσης	Δύο ή περισσότεροι μονωτές μπορούν να στερεωθούν το ένα πάνω στο άλλο για εφαρμογή υψηλότερης τάσης
Μεταλλική διάταξη στερέωσης παρέχεται μόνο στο κάτω άκρο του μονωτή	Μεταλλική διάταξη στερέωσης παρέχεται τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω άκρο του μονωτή

Πίνακας 1-1 : Σύγκριση Μονωτήρα Ακίδων και Μονωτήρα Γραμμής [9]

### 1.2.3 Μονωτήρες Ανάρτησης (Suspension)

Οι μονωτήρες τύπου ανάρτησης αποτελούνται από έναν αριθμό δίσκων πορσελάνης που συνδέονται με μεταλλικούς συνδέσμους σχηματίζοντας μια εύκαμπτη αλυσίδα ή μια χορδή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-4[7]. Ο αγωγός είναι αναρτημένος στο

κάτω άκρο του νήματος και το άλλο άκρο στερεώνεται στον εγκάρσιο βραχίονα του πυλώνα. Κάθε μονάδα ή δίσκος έχει σχεδιαστεί για χαμηλή τάση, συνήθως 11 kV, και ο κατάλληλος αριθμός δίσκων, ανάλογα με την τάση λειτουργίας, συνδέονται σε σειρά, ώστε να καταστεί κατάλληλος για υψηλότερες τάσεις [8].

Κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου μονωτήρων είναι τα εξής:



**Σχήμα 1-4 :**  
**Σχέδιο Μονωτήρα**  
**Ανάρτησης**

- ✓ Είναι φθηνότεροι από τους μονωτήρες τύπου ακίδων για τάσεις άνω των 33 kV.
- ✓ Εάν κάποιος δίσκος έχει υποστεί ζημιά, μπορεί να αντικατασταθεί μεμονωμένα χωρίς να αχρηστευτεί όλος το μονωτήρας.
- ✓ Υπάρχει ευελιξία στη διάταξη ανάρτησης ,αφού η σύνδεση στο σταυρό του βραχίονα είναι τέτοια ώστε ο μονωτήρας να κινείται ελεύθερα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.
- ✓ Σε περίπτωση αυξημένης ζήτησης στη γραμμή μεταφοράς, η πρόσθετη μόνωση που απαιτείται για την ανυψωμένη τάση μπορεί εύκολα να ληφθεί στη διάταξη ανάρτησης προσθέτοντας τον επιθυμητό αριθμό δίσκων.
- ✓ Οι μονωτήρες τύπου ανάρτησης χρησιμοποιούνται γενικά με χαλύβδινους πυλώνες. Καθώς οι αγωγοί κινούνται κάτω από τη γειωμένη διασταύρωση του πυλώνα, η διάταξη παρέχει μερική προστασία από κεραυνούς [5].

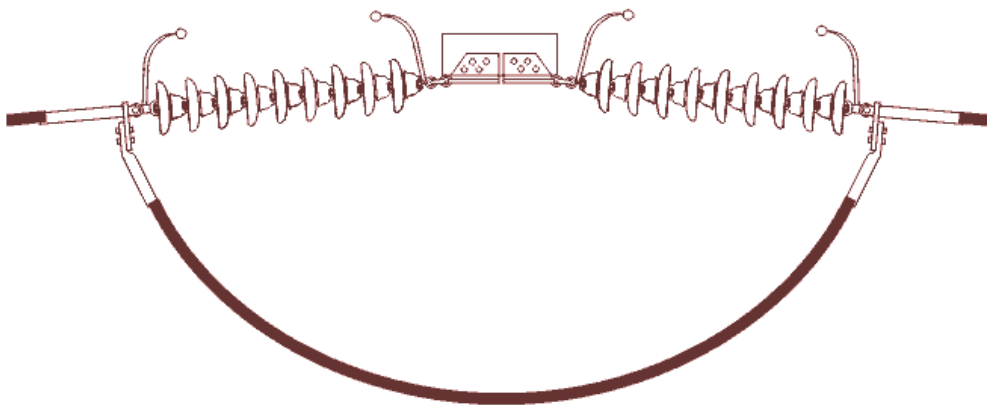
#### **1.2.4 Μονωτήρες τύπου Strain**

Ένας μονωτήρας τύπου strain, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 1-5, είναι σχεδιασμένος για το χειρισμό μηχανικών τάσεων σε γωνιακές θέσεις όπου υπάρχει αλλαγή στην κατεύθυνση της γραμμής ή στο σημείο τερματισμού της γραμμής. Επιπλέον σε περιπτώσεις όπου μια μονή συστοιχία πολλών κυαθίων δεν επαρκεί για τη λήψη του φορτίου, δύο ή περισσότερες συστοιχίες μπορούν να τοποθετηθούν παράλληλα για υψηλότερες τάσεις αγωγού, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 1-6 [8] .





**Σχήμα 1-5 : Μονωτήρας τύπου Strain [10]**



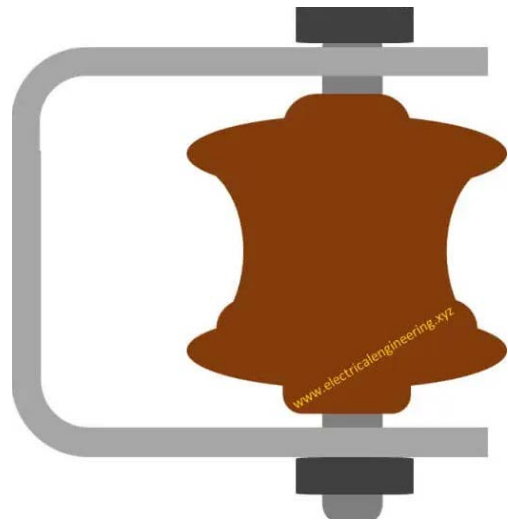
**Σχήμα 1-6 : Σχέδιο δύο παράλληλων συστοιχιών μονωτήρα τύπου Strain [9]**

### **1.2.5 Μονωτήρες τύπου Shackle**

Οι μονωτήρες τύπου shackle γενικά αναπτύσσονται σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οριζόντιες ή κατακόρυφες θέσεις. Όπως και οι μονωτήρες τύπου strain, αναπτύσσονται επίσης σε καμπύλες ή σε αλλαγή κατεύθυνσης γραμμής και σε ακροδέκτες [8]. Ο αγωγός στερεώνεται στον μονωτήρα μέσω ενός μαλακού σύρματος [6]. Το σχήμα τους φαίνεται στα σχήματα 1-7 και 1-8.



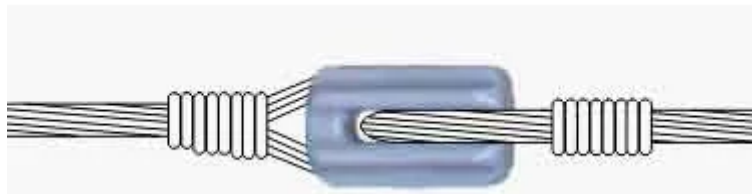
**Σχήμα 1-7 : Σχέδιο Μονωτήρα τύπου Shackle [10]**



**Σχήμα 1-8 : Σχέδιο Μονωτήρα τύπου Shackle [6]**

### **1.2.6 Μονωτήρες τύπου Stay**

Πρόκειται για ορθογώνιο μονωτήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-9 , διαθέσιμο σε μικρό μέγεθος , ο οποίος εμφανίζεται σε χαμηλές τάσεις μεταξύ του αγωγού γραμμής και της γείωσης [10].



**Σχήμα 1-9 : Σχέδιο Stay Μονωτήρα [9]**

### **1.2.7 Άλλοι μονωτήρες**

Πέραν των προαναφερθέντων μονωτήρων υπάρχουν ακόμα οι εξής:

- ♦ Μονωτήρας τύπου Disc, ο οποίος χρησιμοποιείται σε μεσαία και χαμηλά μολυσμένα περιβάλλοντα [10] .
- ♦ Μονωτήρας τύπου Cap and pin , ο οποίος χρησιμοποιείται γενικά στη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή από 15kV έως 735kV [11].

- ♦ Μονωτήρας κοίλου πυρήνα (Hallow), ο οποίος χρησιμοποιείται για τη στήριξη μετασχηματιστών ρεύματος και τάσης, δακτυλίων καλωδίων, στηριγμάτων διακόπτη κυκλώματος με κεντρικές ράβδους λειτουργίας, υποστηριγμάτων απομονωτή κ.λπ. [8].
- ♦ Μονωτήρας μακράς ράβδου (Long Rod), ο οποίος πρόκειται για πορσελάνινη ράβδο που περιλαμβάνει υπόστεγο και εξωτερικά μεταλλικά εξαρτήματα και χρησιμοποιείται τόσο σε σημεία έντασης όσο και σε σημεία ανάρτησης [10].

### 1.3 Υλικά Κατασκευής

Ένας μονωτήρας απαρτίζεται από τρία βασικά μέρη. Αυτά είναι το διηλεκτρικό, οι ακροδέκτες μεταξύ διηλεκτρικού και μηχανικού τμήματος και τα ενδιάμεσα υλικά, όπως τσιμέντο, λιπαντικά και βαφές. Το διηλεκτρικό ενός μονωτήρα πρέπει να συγκρατεί την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού για αρκετές δεκαετίες χωρίς βλάβη, καθώς και να ανταπεξέρχεται σε κρουστικές τάσεις από αστραπές [12]. Το υλικό που χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό σε έναν μονωτήρα θα πρέπει δηλαδή να έχει τις εξής ιδιότητες :

- ✓ Να είναι μηχανικά ισχυρό ώστε να μεταφέρει την τάση (μηχανική) και το βάρος των αγωγών.
- ✓ Να έχει πολύ υψηλή διηλεκτρική αντοχή για να αντέχει την ηλεκτρική τάση των συστημάτων μετάδοσης.
- ✓ Να διαθέτει υψηλή αντίσταση μόνωσης για να αποτρέψει το ρεύμα διαρροής στη γη.
- ✓ Να είναι απαλλαγμένο από ανεπιθύμητες ακαθαρσίες.
- ✓ Να μην είναι πορώδες.
- ✓ Να μην επιτρέπει την είσοδο της υγρασίας ή των αερίων στην επιφάνεια του ηλεκτρικού μονωτή.
- ✓ Να έχει φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες που δεν επηρεάζονται από την αλλαγή θερμοκρασίας [13] .

Με βάση τα παραπάνω, το διηλεκτρικό του μονωτήρα μπορεί να είναι είτε κεραμικό, δηλαδή πορσελάνη ή γυαλί, είτε συνθετικό δηλαδή από πολυμερή [3]. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τετρασθενή άτομα, πυριτίου στην περίπτωση κεραμικών και άνθρακα στα πολυμερή, τα οποία έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν εκτεταμένες δομές [12].

### 1.3.1 Πορσελάνη

Η πορσελάνη είναι το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται για μόνωση. Πρόκειται για πυριτικό αργίλιο, το οποίο αναμιγνύεται με πλαστική καολίνη, φέλνσπα και χαλαζία, ώστε να προκύψει το τελικό σκληρό μονωτικό υλικό. Το υλικό αυτό πρέπει να είναι αρκετά γυαλισμένο ώστε να μην είναι δυνατή η συγκέντρωση νερού πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα, ενώ δεν πρέπει να είναι πορώδες και να φθαρεί η διηλεκτρική του ικανότητα. Τέλος η πορσελάνη πρέπει να απαλλάσσεται από ακαθαρσίες και φυσαλίδες αέρα που μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες της μόνωσής της [13], [14]. Οι βασικότερες από τις ιδιότητές της αυτές φαίνονται στον Πίνακα 1-2.

Ιδιότητα	Τιμή
Ηλεκτρική Αντοχή	60 kV/cm
Αντοχή σε θλίψη	70.000 Kg/cm <sup>2</sup>
Αντοχή σε εφελκυσμό	500 Kg/cm <sup>2</sup>

**Πίνακας 1-2 : Ιδιότητες Κεραμικού Μονωτήρα [13]**

### 1.3.2 Γυαλί

Ένα ακόμα υλικό μονωτήρα δημοφιλές στα συστήματα μετάδοσης και διανομής ενέργειας αποτελεί το γυαλί. Η δημιουργία του απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες προκειμένου να αναμιχθούν διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων του ασβέστη και του χαλαζία, καθώς και μια απότομη ψύξη στο καλούπι. Αυτή η ενέργεια προκαλεί τη σύσφιξη του γυαλιού, ώστε να προκύψει ο γυάλινος μονωτήρας. Βασικά πλεονεκτήματά του αποτελούν τα εξής:

- + Έχει πολύ υψηλή διηλεκτρική αντοχή.
- + Έχει υψηλότερη αντοχή στη θραύση απ' ό,τι τα κεραμικά και η μηχανική αντοχή του σε θλίψη είναι 1,5 φορές υψηλότερη από την κεραμική.

- + Έχει πολύ υψηλότερη ηλεκτρική αντίσταση από αυτή των κεραμικών μονωτήρων.
- + Έχει μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής και χαμηλή σχετική παραμόρφωση.
- + Κατά τη διαδικασία κατασκευής του οποιαδήποτε ρωγμή ή τρύπα εμφανιστεί , είναι ανιχνεύσιμη.
- + Λόγω της διαφάνειάς του οι ακτίνες του ήλιου το διαπερνούν χωρίς να το υπερθερμαίνουν .
- + Λόγω των ανεπηρέαστων από τη γήρανση ιδιοτήτων του γυαλιού, ο μονωτήρας έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.
- + Είναι οικονομικότερο ως υλικό απ' ότι η πορσελάνη.

Ωστόσο ο μονωτήρας αυτός μπορεί να εμφανίσει τα εξής ελαττώματα :

- Η συσσωρευμένη υγρασία στην επιφάνεια του γυαλιού διευκολύνει την εναπόθεση σκόνης πάνω της καθώς και την διέλευσή της ως ρεύμα διαρροής του συστήματος.
- Για υψηλότερες τάσεις το σχήμα του δε μπορεί να είναι ακανόνιστο , καθώς στην ψύξη θα προκληθούν εσωτερικά στελέχη.
- Μια ισχυρή πρόσκρουση μπορεί να οδηγήσει σε θραύση του μονωτήρα.
- Το γυαλί απορροφά τη ρύπανση ευκολότερα από άλλους τύπους μονωτήρων [13], [14].

Οι ιδιότητες του γυάλινου μονωτήρα φαίνονται στον Πίνακα 1-3 παρακάτω.

Ιδιότητα	Τιμή
Ηλεκτρική Αντοχή	140 kV/cm
Αντοχή σε θλίψη	10.000 Kg/cm <sup>2</sup>
Αντοχή σε εφελκυσμό	35.000 Kg/cm <sup>2</sup>

**Πίνακας 1-3 : Ιδιότητες γυάλινου μονωτήρα [13]**

### 1.3.3 Πολυμερή

Όσον αφορά τα πολυμερή, με τον όρο αυτό αναφερόμαστε σε χημικές ενώσεις με μεγάλα μόρια, τα μακρομόρια, που σχηματίζονται από τη σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων που λέγονται "μονομερή" [15]. Τα πλεονεκτήματα στη χρήση των μονωτήρων από πολυμερή είναι τα εξής :

- + Έχουν μικρότερο βάρος από τους κεραμικούς , λόγω της χαμηλής πυκνότητας των πολυμερών υλικών.
- + Το βάρος τους τους καθιστά ευκολότερους στη χρήση, καθώς απαιτούνται ελαφρύτερες και λιγότερο ακριβές δομές για την στήριξή τους.
- + Έχουν γρηγορότερη παραγωγική διαδικασία ενώ με κατάλληλες προσμίξεις βελτιώνονται οι ιδιότητές τους [16].
- + Έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό σε σύγκριση με τους πορσελάνινους, ενώ λόγω της ευκαμψίας τους έχουν ελάχιστη πιθανότητα θραύσης.
- + Η υδρόφοβη φύση τους οδηγεί σε μειωμένη επιφανειακή ρύπανση και ακολούθως σε μειωμένη ροή ρεύματος διαρροής [13].

Ωστόσο σημαντικά μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό κόστος πρώτων υλών των πολυμερών , καθώς και η μειωμένη μηχανική αντοχή λόγω της έλλειψης δυσκαμψίας [16].

Στον Πίνακα 1-4 αναγράφονται κάποιες ιδιότητες και για τα τρία υλικά που προαναφέρθηκαν.

	Υαλώδες πορσελάνη	Σκληρυμένο γυαλί	Πολυμερές
Πυκνότητα [g/cm]	2.3 – 3.9	2.5	0.9 – 2.5
Αντοχή σε εφελκυσμό [Mpa]	30 – 100	100 – 120	20 – 35
Αντοχή σε θλίψη [Mpa]	240 – 820	210 – 300	80 – 170
Συντελεστής εφελκυσμού [Gra]	50 – 100	7.2	0.6 – 16
Θερμική αγωγιμότητα [W/m K]	1 – 4	1.0	0.17 – 0.9
Διασταλτικότητα			

(20 – 100°C) [10 <sup>-6</sup> / K]	3.5 – 9.1	8.0 – 9.5	45 – 200
Διηλεκτρική σταθερά (50 – 60 Hz)	5.0 – 7.5	7.3	2.3 – 5.5
Εφαπτομένη απωλειών (50 – 60 Hz) [10 <sup>-3</sup> ]	20 – 40	15 – 50	0.1 – 5.0
Πεδιακή αντοχή [kV/mm]	10 – 20	>25	>25
Ειδική αντίσταση [Ω cm]	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>17</sup>

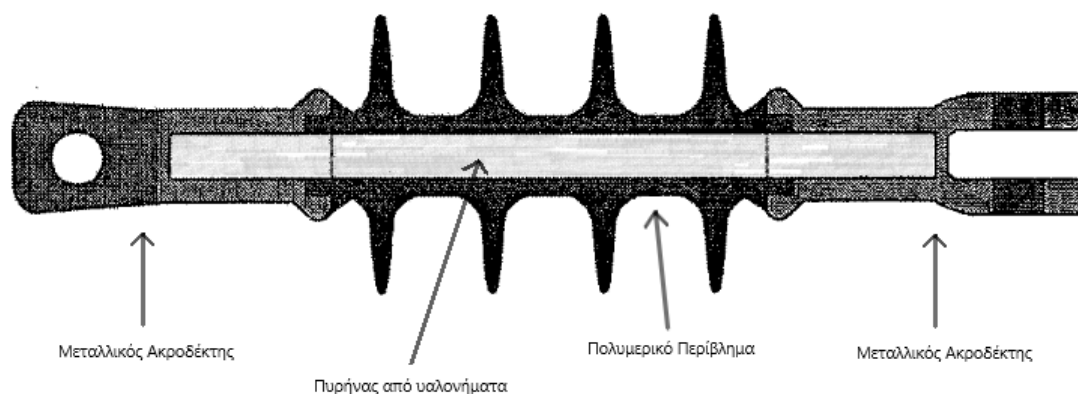
**Πίνακας 1-4 : Ιδιότητες Υλικών Διηλεκτρικού [12]**

## ***1.4 Ιστορική Αναδρομή***

Οι μονωτήρες εμφανίστηκαν πρώτη φορά κοντά στο 1835 σε γραμμές τηλεγράφων, πολύ πριν ξεκινήσει η μεταφορά ισχύος, καθώς η απευθείας σύνδεση καλωδίων σε ξύλινους στύλους αποδείχτηκε ελαττωματική, ειδικά κατά τη διάρκεια υγρού καιρού. Οι πρώτοι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλες ποσότητες ήταν από γυαλί και είχαν μια μη σπειρωμένη τρύπα. Ωστόσο η φυσική συστολή και η διαστολή των συρμάτων που συνδέονται με αυτούς τους μονωτήρες, οδηγούσαν στην απομάκρυνσή τους από τις ακίδες τους, απαιτώντας χειροκίνητη επανατοποθέτηση. Οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν κεραμικούς μονωτήρες ήταν στο Ηνωμένο Βασίλειο τις δεκαετίες 1840 με 1870. Με βάση αυτούς τους πρώτους μονωτήρες ξεκίνησε και η δημιουργία κεραμικών μονωτήρων λαδιού για τις πρώτες γραμμές μεταφοράς το 1886. Ωστόσο οι ηλεκτρικές και μηχανικές καταπονήσεις στις οποίες έπρεπε να αντισταθούν οι μονωτήρες στις ηλεκτρικές γραμμές ήταν πολύ μεγαλύτερες σε σύγκριση με εκείνες του τηλεγράφου. Αυτό ανέδειξε την ανάγκη για εξέλιξη του σχεδιασμού και της κατασκευής μεθόδου των μονωτήρων. Τα πρώτα μη κεραμικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως μόνωση ήταν το 1963, φέρνοντας στο προσκήνιο τα πολυμερή και την υψηλή απόδοσή τους έναντι των κεραμικών. Στα τέλη του 1970 και στις αρχές του 1980, οι μονωτές πολυμερών χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως ειδικά σχέδια για ακραίες εφαρμογές με υψηλό κόστος. Ωστόσο λόγω της ανθεκτικότητάς τους σε περιβάλλοντα με ρύπανση και σε βανδαλισμούς καθώς και στην εύκολη χρήση τους, κέρδισαν δημοτικότητα παγκοσμίως και πυροδότησαν μια σειρά βελτιώσεων στην κατασκευή και τον σχεδιασμό τους που οδήγησαν στους πολυμερείς μονωτήρες που συναντάμε σήμερα. Έτσι από το υψηλής ποιότητας μονωτικό, το πολυμερές έγινε το χαμηλότερου κόστους υλικό, συγκριτικά με πορσελάνη ή γυαλί [12], [17], [18].

## 1.5 Συνθετικοί Μονωτήρες

Ένας πολυμερικός μονωτήρας, ή αλλιώς μη-κεραμικός, αποτελείται από τρία μέρη: τον πυρήνα, τα μεταλλικά εξαρτήματα ως άκρα και ένα περίβλημα για τη σύνδεση των δύο προηγούμενων (Σχήμα 1-10). Καθώς απαρτίζεται από πολλά μέρη ονομάζεται και συνθετικός [13].



Σχήμα 1-10 : Σχέδιο Συνθετικού Μονωτήρα Ανάρτησης [19]

### 1.5.1 Πυρήνας

Για τους μονωτήρες ανάρτησης και γραμμής που είναι οι πιο συνήθεις, ο πυρήνας αποτελεί ένα σχήμα ράβδου από ίνες γυαλιού που συνδέονται με οργανική ευθυγραμμισμένη ρητίνη. Σε άλλους μονωτήρες ο πυρήνας εμφανίζεται ως περιστρεφόμενος σωλήνας από υαλοβάμβακα. Σε κάθε περίπτωση το γυαλί που χρησιμοποιείται είναι είτε τύπου E είτε τύπου ECR (corrosion-resistant E). Το πρώτο είναι ένα βοριοπυριτικό γυαλί χαμηλού αλκαλικού ασβέστη-αλουμινίου, ενώ το δεύτερο διαφέρει στο ότι δεν περιέχει οξείδιο του βορίου και έτσι είναι πιο ανθεκτικό στη διάβρωση. Η ρητίνη αποτελείται από πολυεστέρα, εποξικό ή βινυλεστέρα και η ράβδος σχηματίζεται με τη μέθοδο του πολλαπλασιασμού (pultrusion method) [19], [20].

### 1.5.2 Πολυμερικό Περίβλημα

Σε κάθε μονωτήρα, ο πυρήνας με τα μεταλλικά άκρα χωρίς κάποια προστασία γύρω του είναι ακατάλληλος για εξωτερικές εφαρμογές υψηλής τάσης, λόγω μόλυνσης, υγρασίας και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων. Το περίβλημα, λοιπόν, έχει τέτοιο σχήμα και υλικό ώστε να προστατεύει τον πυρήνα από επιδράσεις υγρασίας και τάσης.



Με τα χρόνια δοκιμάστηκαν διάφορα υλικά για την κατασκευή του , τα οποία αναλύονται παρακάτω.

#### ❖ Εποξειδική Ρητίνη

Η εποξειδική (ή εποξική) ρητίνη εμφανίστηκε το 1959, ωστόσο λόγω ελαττωματικής συμπεριφοράς επικράτησε η ρητίνη κυκλοαλειφατικού τύπου με ένα ενυδατωμένο πληρωτικό αλουμινίου. Χρησιμοποιείται σε μονωτήρες διανομής έως 69kV και μόνο σε κανονικούς περιβάλλοντες χώρους, αφού σε εξωτερικά περιβάλλοντα με ρύπανση έχει μη ικανοποιητική απόδοση (Σχήμα 1-11, Σχήμα 1-12) [19], [20].



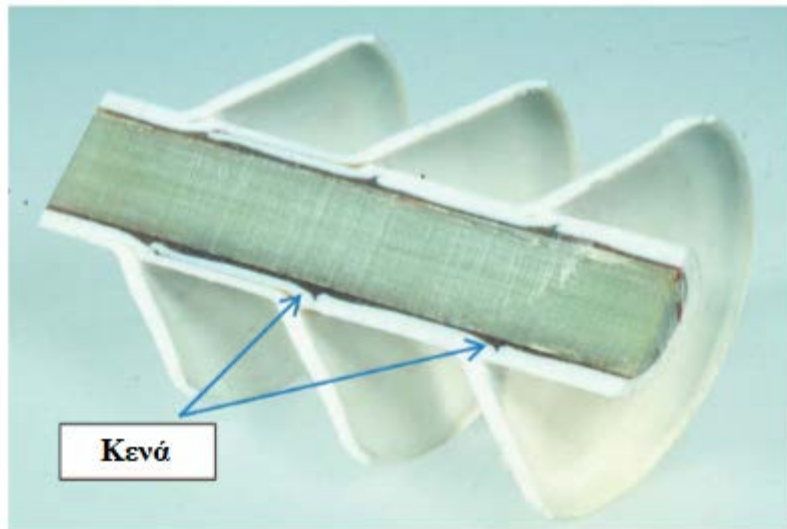
**Σχήμα 1-11 : Υδρόλυση εποξικού περιβλήματος [20]**



**Σχήμα 1-12: Περιφερειακές Ρωγμές Εποξικού Περιβλήματος [20]**

#### ❖ Teflon

Στη δεκαετία του 1960 ξεκίνησε η χρήση μονωτήρων με περίβλημα από κόκκους τεφλόν, οι οποίοι μορφοποιήθηκαν υπό υδροστατική πίεση και κολλήθηκαν μεταξύ τους και επάνω σε πυρήνα από ίνες γυαλιού χρησιμοποιώντας κυκλοαλειφατική εποξική ρητίνη. Ωστόσο η κατασκευαστική δυσκολία στην πρόληψη κενών μεταξύ του πυρήνα και του περιβλήματός του (Σχήμα 1-13), οδήγησαν στην αντικατάσταση του υλικού αυτού από σιλικόνη.



**Σχήμα 1-13 : Κενά μεταξύ πυρήνα και περιβλήματος από Teflon [20]**

❖ Σιλικόνη

Το 1967 μια γερμανική εταιρεία εφάρμοσε στους μονωτήρες περίβλημα σιλικόνης , δύο τμημάτων, που σχηματιζόταν από χύτευση του περιβλήματος σε μια ράβδο από υαλοβάμβακα , σχηματίζοντας έτσι ένα πλήρως συνδεδεμένο περίβλημα. Παρά την υψηλή του απόδοση, λόγω της υδροφοβίας που παρουσίαζε το υλικό αυτό, η οποία γίνεται εμφανής στο Σχήμα 1-14 , παρατηρήθηκε ένα πρόβλημα διάβρωσης (tracking and erosion). Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με χρήση σιλικόνης με πρόσμιξη τριένυδρης αλουμίνιας (Alumina Trihydrate-ATH).



**Σχήμα 1-14 : Υδροφοβία Περιβλήματος Σιλικόνης [21]**

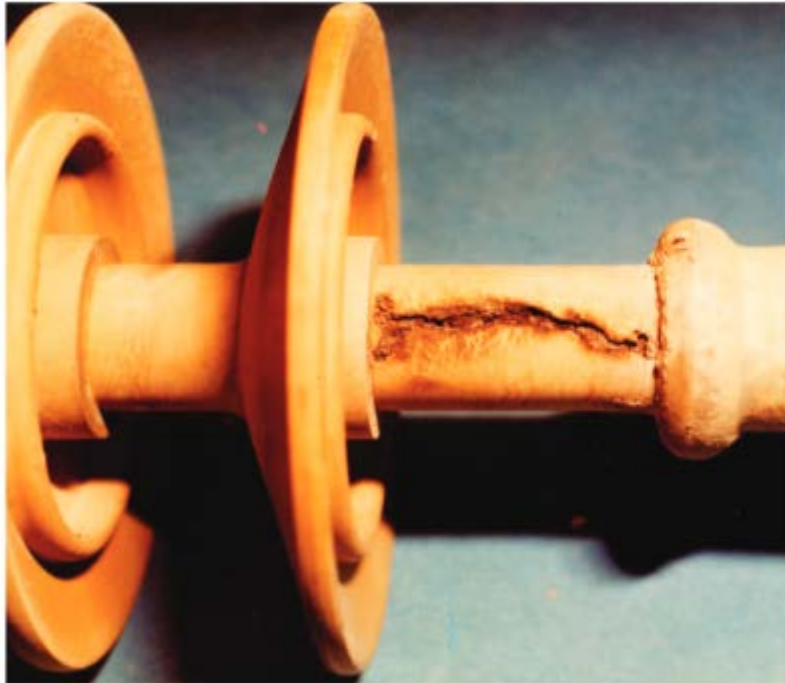
- ❖ Μονομερές αιθυλενοπροπυλενοδιενίου (Ehylene Propylene Diene Monomer – EPDM)

Το υψηλό κόστος του υλικού της σιλικόνης οδήγησε στην εμφάνιση μονωτήρων που αποτελούνταν από ατομικά χυτά περιβλήματα φτιαγμένα από ένα ελαστικό μονομερές αιθυλενίου προπυλενίου. Αργότερα, το υλικό άλλαξε σε μονομερές αιθυλενοπροπυλενοδιενίου και ακόμη αργότερα σε μείγμα EPDM και σιλικόνης.

- ❖ Θερμοπλαστικό Ελαστομερές (Thermoplastic Elastomer-TPE)

Τέλος, ήρθε στο προσκήνιο ένα υλικό με ακόμα πιο μειωμένο κόστος κεφαλαίου εξοπλισμού, λόγω του χαμηλού κόστους εξοπλισμού χύτευσης, το θερμοπλαστικό

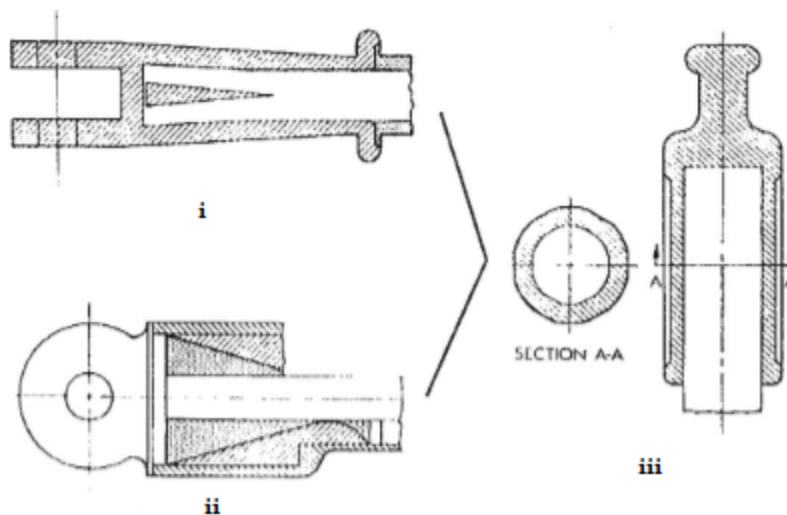
ελαστομερές. Ωστόσο το TPE αποδείχτηκε ευπαθές στη διάβρωση (Σχήμα 1-15), καθώς και εύφλεκτο, αφού το τόξο ισχύος οδηγούσε σε φλεγόμενα περιβλήματα που έλιωναν και έπεφταν στο έδαφος, με επακόλουθες πυρκαγιές σε πράσινες περιοχές. Το γεγονός αυτό κατέστησε τη χρήση του υλικού βραχύχρονη.



**Σχήμα 1-15 : Διάβρωση Περιβλήματος από Θερμοπλαστικό Ελαστομερές [20]**

### **1.5.3 Ακροδέκτες**

Οι ακροδέκτες του μονωτήρα χρησιμοποιούνται για τη στερέωσή του στη δομή στήριξης και στον εναέριο αγωγό. Η κατασκευή τους γίνεται με χυτό, σφυρήλατο ή κατεργασμένο αλουμίνιο, ελατό σίδηρο ή σφυρήλατο χάλυβα. Για την ενσωμάτωση των μεταλλικών άκρων με τον πυρήνα χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα ώστε να αναπτυχθεί η απαραίτητη μηχανική αντοχή. Σε αυτά τα μέσα ανήκουν η σύνδεση με συμπίεση, η συγκόλληση και η χρήση μεταλλικής σφήνας (Σχήμα 1-16). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σήμερα είναι η συμπίεση και η συγκόλληση [19], [20].



**Σχήμα 1-16 : Χρήση σφήνας (i), συγκόλλησης (ii) και σύνδεσης με συμπίεση (swaged) (iii) για την προσάρτηση του μεταλλικού ακροδέκτη στον πυρήνα του μονωτήρα [20]**

## **1.6 Γήρανση Μονωτήρων**

Όπως προαναφέρθηκε , κύριος στόχος ενός μονωτήρα πέραν της στήριξης των αγωγών, αποτελεί η απομόνωση της τάσης από την γη, γεγονός που απαιτεί άριστες μονωτικές ιδιότητες. Ωστόσο με τη μακρόχρονη χρήση οι ιδιότητες αυτές του υλικού σταδιακά υποβαθμίζονται [22].

### **1.6.1 Ρύπανση**

Ο βασικότερος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες αυτές είναι η ρύπανση από τον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο, δηλαδή η επικάλυψη οποιασδήποτε ακαθαρσίας που αιωρείται στην ατμόσφαιρα ή θαλάσσιας άλμης (καθαλάτωση) στην επιφάνειά των μονωτήρων (Σχήμα 1-17). Ένα είδος ρύπανσης είναι η βιομηχανική, η οποία αφορά στερεά κατάλοιπα που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα από βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δηλαδή χημικά όπως διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ), οξυγόνο ( $O_2$ ), όζον ( $O_3$ ) και διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ). Εξίσου σημαντική ρύπανση αποτελεί και η θαλάσσια , η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι άνεμοι που πνέουν με φορά από την θάλασσα προς την ξηρά μεταφέρουν έως μεγάλη απόσταση , μικρά σταγονίδια θαλασσινού νερού, τα οποία επικάθονται πάνω στους μονωτήρες των ηλεκτρικών δικτύων. Στη συνέχεια με την εξάτμιση του νερού παραμένουν στην επιφάνεια ποσότητες αλατιού υποβιβάζοντας την απόδοση του μονωτήρα [22].



**Σχήμα 1-17 : Ρύπανση Μονωτήρα [23]**

### **1.6.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες**

Πέραν της ρύπανσης, το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από πληθώρα επιβλαβών για τους μονωτήρες χαρακτηριστικών. Τέτοια είναι η θερμοκρασία είτε είναι υψηλή είτε χαμηλή (Σχήμα 1-18), η υγρασία, ο αέρας που με τη δύναμή του προκαλεί μηχανικές καταπονήσεις, οι υπεριώδεις ακτινοβολίες του φωτός, η σκόνη, η βροχή (Σχήμα 1-19) και οι κατακρημνίσεις [24], [25].



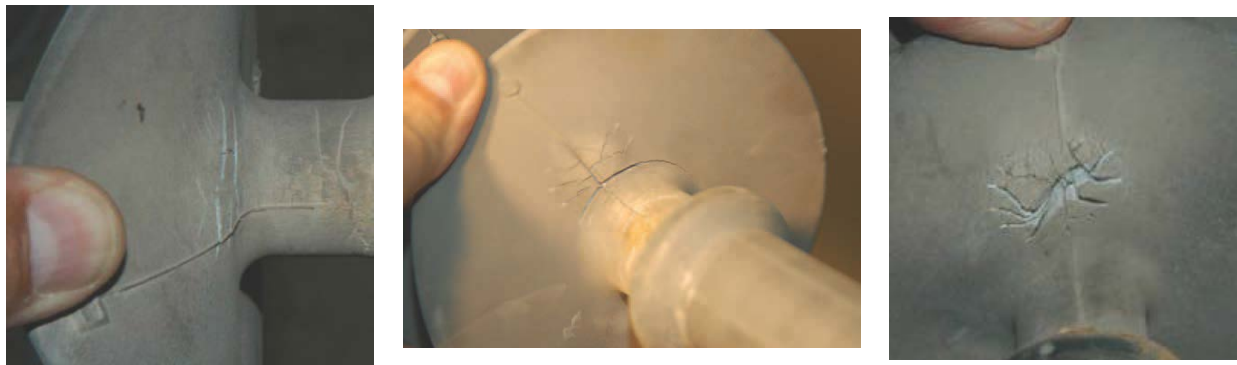
**Σχήμα 1-18 : Πάγος σε Μονωτήρα [23]**



**Σχήμα 1-19 : Βροχή σε Μονωτήρα [23]**



Επιπλέον, συχνά στους μονωτήρες παρατηρούνται σχισμές και σπασίματα, τα οποία μπορεί να προκληθούν τόσο από φυσικούς παράγοντες (Σχήμα 1-20), όσο και από μάσημα ή νύχι ζωντανών οργανισμών (πουλιά ή τρωκτικά) (Σχήμα 1-21) [26].



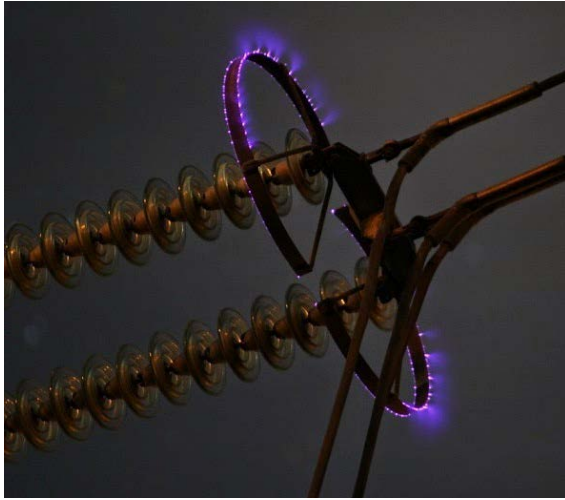
**Σχήμα 1-20 : Σχισμένος Μονωτήρας [26]**



**Σχήμα 1-21 : Φαγωμένος Μονωτήρας [26]**

### **1.6.3 Φαινόμενα Corona-Flashover**

Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο σχηματισμό μιας υδάτινης, αλλά και αγωγίμης στρώσης επάνω στο μονωτήρα, η οποία συνεπάγεται πτώσεις τάσεως, ιδίως στα κενά αέρα επί της επιφάνειας. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο διαμέσου αυτών των κενών είναι αρκετά υψηλό, τότε προκαλούνται εκκενώσεις corona που εκδηλώνονται με τη μορφή φωτεινών διακλαδισμένων νηματίων που αναπτύσσονται από μια κοινή ρίζα (το “στέλεχος”). Παρόμοια διαδικασία αποτελεί η υπερπήδηση (flashover) κατά την οποία, μεγάλη τιμή τάσης στα άκρα του μονωτήρα προκαλεί εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου γύρω του, ως αποτέλεσμα των εκκενώσεων στην επιφάνειά του και της διάσπασης στρωμάτων του αέρα γύρω του (Σχήμα 1-22) [24], [25].



(α)



(β)

**Σχήμα 1-22: (α) Φαινόμενο Corona [27] , (β) Φαινόμενο Υπερπήδησης [28]**



# 2

## Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Το Ηλεκτρικό Πεδίο

#### 2.1.1 Εισαγωγικές Έννοιες

Προκειμένου να αναλύσουμε την ηλεκτρική συμπεριφορά των μονωτήρων κρίνεται αναγκαία η κατανόηση της έννοιας του ηλεκτρικού πεδίου. Άλλωστε η μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων είναι απαραίτητη κατά τη φάση του σχεδιασμού των μονωτήρων. Όπως γνωρίζουμε, κάθε φορτίο ασκεί δύναμη σε κάθε άλλο φορτίο. Έτσι λοιπόν και ένα ηλεκτρικό φορτίο ασκεί δύναμη σε κάθε άλλο ηλεκτρικό φορτίο που θα βρεθεί στο χώρο γύρω από αυτό. Ηλεκτρικό πεδίο, ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο όταν βρεθεί ηλεκτρικό φορτίο δέχεται ηλεκτροστατική δύναμη. Η έννοια του ηλεκτρικού πεδίου εισήχθη από το Μ. Faraday και μπορεί να περιγραφεί από τις εξής χωροχρονικές διανυσματικές συναρτήσεις :

- Την ένταση  $E(r,t)$  του ηλεκτρικού πεδίου : φυσικό διανυσματικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του μέτρου της δύναμης που ασκείται σε φορτίο  $q$  που βρίσκεται σ' αυτό το σημείο προς το φορτίο αυτό και κατεύθυνση την κατεύθυνση της δύναμης, αν αυτή ασκείται σε θετικό φορτίο. Η μονάδα μέτρησης της έντασης είναι  $\frac{V}{m}$ .
- Την διηλεκτρική μετατόπιση  $D(r,t)$  του ηλεκτρικού πεδίου με μονάδα μέτρησης  $\frac{C}{m^2}$

Για συνήθη ( ισότροπα, γραμμικά, ακαριαίας απόκρισης) υλικά ισχύει

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

### Εξίσωση 2-1 : Σχέση Διηλεκτρικής Μετατόπισης με Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου

όπου η διαπερατότητα είναι  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ , με  $\epsilon_r$  : σχετική διαπερατότητα του διηλεκτρικού και  $\epsilon_0$  : διαπερατότητα στο κενό ( $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ).

Εκτός από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, πολλές φορές είναι χρήσιμος ο υπολογισμός του ηλεκτροστατικού δυναμικού  $\Phi$ . Γενικά το ηλεκτρικό δυναμικό σε ένα σημείο A είναι η δυναμική (ηλεκτρική) ενέργεια ανά μονάδα φορτίου στο σημείο αυτό. Ισχύει

$$\Phi_A = \frac{W_{eA}}{q}$$

### Εξίσωση 2-2 : Ηλεκτρικό Δυναμικό

Το  $\Phi$  είναι μια βαθμωτή συνάρτηση των συντεταγμένων και ικανοποιεί τη σχέση

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi$$

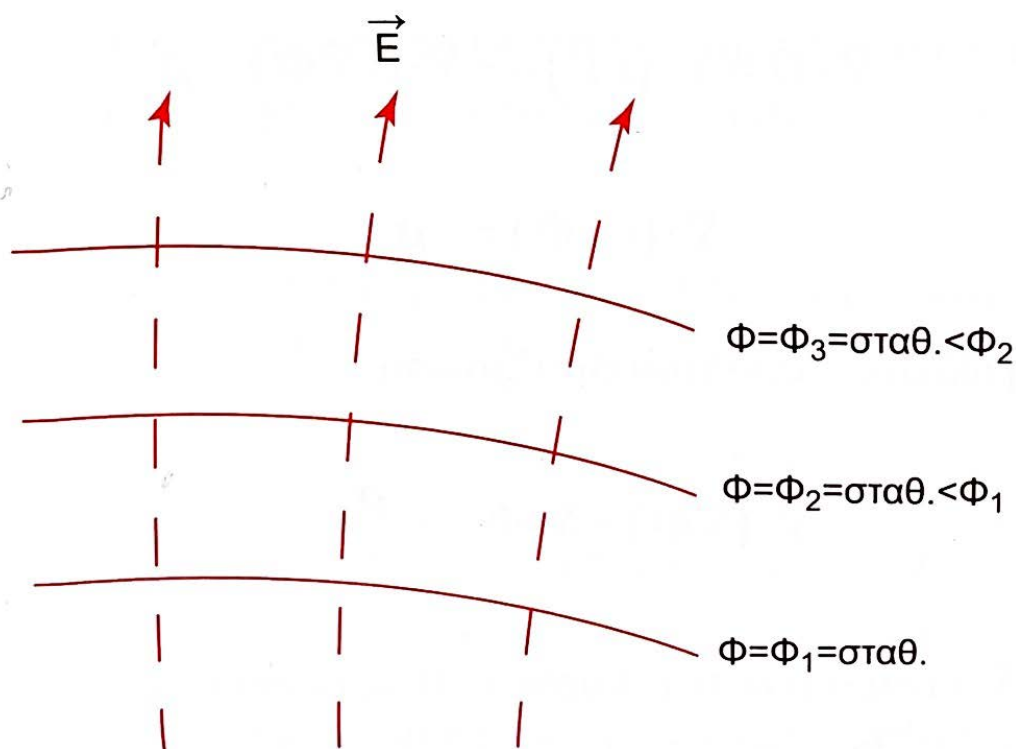
### Εξίσωση 2-3 : Σχέση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου με Ηλεκτρικό Δυναμικό

Το αρνητικό πρόσημο στην Εξίσωση 2-3, δείχνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο έχει φορά προς την κατεύθυνση ελάττωσης του δυναμικού. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων A και B ονομάζεται ηλεκτρική τάση και συμβολίζεται με  $V_{AB}$ . Ισχύει  $V_{AB} = \Phi_A - \Phi_B$ . Η ηλεκτρική τάση μεταξύ των δύο σημείων A και B είναι δηλαδή με βάση τον ορισμό του δυναμικού, η διαφορά των δυναμικών ενεργειών αυτών των σημείων ανά μονάδα φορτίου. Η τάση δεν εξαρτάται από την διαδρομή που απαιτείται για να μεταβούμε από το σημείο στο A και στο B, αλλά μόνο από τα τελικά σημεία A και B. Το πεδίο όπου γίνεται αυτό ονομάζεται συντηρητικό. Αυτό φαίνεται από τον υπολογισμό του παρακάτω επικαμπύλιου ολοκληρώματος:

$$\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_A^B \nabla\Phi \cdot d\vec{l} = - \int_A^B d\Phi = \Phi_A - \Phi_B = V_{AB}$$

### Εξίσωση 2-4 : Επικαμπύλιο Ολοκλήρωμα Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου

Το δυναμικό ορίζεται με την προσέγγιση μιας σταθεράς και συνεπώς για να το καθορίσουμε μονοσήμαντα στο χώρο, απαιτείται ο προσδιορισμός ενός σημείου αναφοράς. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων με σταθερό δυναμικό ονομάζεται ισοδυναμική επιφάνεια. Σε μια ισοδυναμική επιφάνεια το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi$  είναι κάθετο προς την επιφάνεια με φορά από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο δυναμικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1 .



Σχήμα 2-1 : Ισοδυναμικές Επιφάνειες

Από την Εξίσωση 2-3 όταν  $\Phi = \text{σταθερό}$  τότε  $\vec{E} = 0$ . Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος είναι ισοδυναμικός. Στο εσωτερικό των αγωγών σε ηλεκτροστατικά πεδία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ισούται με μηδέν. Συνεπώς, αυτοί οι χώροι που καταλαμβάνουν οι αγωγοί σε ηλεκτροστατικά πεδία είναι ισοδυναμικοί [29].

### 2.1.2 Διηλεκτρικά υλικά

Το διηλεκτρικό υλικό είναι ένας μονωτής που έχει την ιδιότητα να πολώνει τα ηλεκτρικά φορτία του, όταν τοποθετείται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο [30]. Τα διηλεκτρικά υλικά δεν έχουν ελεύθερα ηλεκτρικά φορτία. Για αυτό το λόγο δεν επιτρέπουν την διέλευση ηλεκτρικών ρευμάτων. Σε σχέση με τους υπόλοιπους μονωτές, τα διηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν σε σημαντικό βαθμό το φαινόμενο της πόλωσης. Συγκεκριμένα, αυτά συνίστανται από μόρια που αποτελούνται από θετικά και αρνητικά φορτία (ιόντα, πυρήνες, ηλεκτρόνια). Όταν ένα εξωτερικό πεδίο ασκεί δυνάμεις στα φορτία ,προκαλεί μετατοπίσεις (μικροσκοπικές) των φορτίων δημιουργώντας ηλεκτρικά δίπολα. Όλα αυτά τα ηλεκτρικά δίπολα μεταβάλλουν το

πεδίο, λόγω της παρουσίας του διηλεκτρικού υλικού, τόσο στο εσωτερικό του υλικού, όσο και στο εξωτερικό του. Οι λόγοι που ευθύνονται για την διπολική συμπεριφορά των διηλεκτρικών υλικών είναι οι εξής:

➤ Ηλεκτρονική Πόλωση

Το ηλεκτρονικό νέφος κάθε ατόμου μετακινείται σχετικά με τον πυρήνα του λόγω της επίδρασης του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια διπολική ροπή.

➤ Ιοντική Πόλωση

Από τη στιγμή που τα μόρια αποτελούνται από ιόντα, αυτά σαν φορτισμένα σωματίδια μετακινούνται όταν επιβάλλεται ηλεκτρικό πεδίο και έτσι δημιουργούν διπολική ροπή.

➤ Πόλωση Προσανατολισμού

Τα μόρια του υλικού δημιουργούν μια διάταξη που παρουσιάζει διπολική ροπή. Αυτές οι διπολικές ροπές κατανέμονται με τυχαίο τρόπο. Αν όμως επιβληθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλείται μερικός προσανατολισμός των διπολικών ροπών.

### 2.1.3 *Νόμοι του Maxwell*

Η ένταση  $E$  ηλεκτρικού πεδίου και η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μπορούν μαζί με τις ποσότητες της χωρικής πυκνότητας  $\rho$  και  $J$ , να περιγράψουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο κενό. Για αυτό το λόγο είναι και τα θεμελιώδη μεγέθη του ηλεκτρομαγνητισμού. Όταν όμως το πεδίο βρίσκεται μέσα σε διάφορα υλικά, τότε πλεονεκτεί η χρήση των πεδιακών μεγεθών της πυκνότητας ηλεκτρικής ροής  $D$  και της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Τα διανυσματικά μεγέθη  $E, D, B$  και  $H$  συνδέονται μεταξύ τους μέσω των εξισώσεων του Maxwell. Ο Maxwell το 1873 στην εργασία του "Electricity and Magnetism" συνέδεσε όλα τα παραπάνω μεγέθη σε 4 εξισώσεις. Με αυτές τις εξισώσεις όχι μόνο ερμήνευσε όλα τα πειραματικά δεδομένα της εποχής του, αλλά προέβλεψε την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, υπολόγισε την ταχύτητα του φωτός, και ερμήνευσε την διάδοση του φωτός σαν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα [31]. Οι εξισώσεις του Maxwell σε ολοκληρωτική μορφή είναι:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \right)$$

**Εξίσωση 2-5 : Νόμος Faraday**

όπου το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$  πάνω σε μια κλειστή καμπύλη C ονομάζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \int \vec{D} \cdot d\vec{S} \right)$$

**Εξίσωση 2-6 : Νόμος Ampere**

όπου το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$  πάνω σε μια κλειστή καμπύλη C ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int \rho \cdot dV$$

**Εξίσωση 2-7 : Νόμος Gauss**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

**Εξίσωση 2-8 : Ανυπαρξία Μαγνητικών Μονοπόλων**

Οι παραπάνω εξισώσεις συμπληρώνονται από την εξίσωση συνέχειας

$$\oint \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \int \rho \cdot dV \right) = 0$$

**Εξίσωση 2-9 : Νόμος Διατήρησης Φορτίου**

Οι εξισώσεις του Maxwell σε διαφορική μορφή γράφονται ως εξής:

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

**Εξίσωση 2-10 : Νόμος Faraday**

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

**Εξίσωση 2-11 : Νόμος Ampere**

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

**Εξίσωση 2-12 : Νόμος Gauss**

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

**Εξίσωση 2-13 : Ανυπαρξία μαγνητικών μονοπόλων**

Ομοίως η εξίσωση συνέχειας σε διαφορική μορφή γράφεται ως εξής:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

**Εξίσωση 2-14 : Νόμος Διατήρησης Φορτίου**

Από το νόμο του Gauss και από την Εξίσωση 2-1 έχουμε:

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

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot (\epsilon (-\vec{\nabla}\Phi)) = \rho$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot (\epsilon (\vec{\nabla}\Phi)) = -\rho$$

Σε ομογενή υλικά όπου το  $\epsilon$  είναι σταθερό η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

**Εξίσωση 2-15 : Εξίσωση Poisson**

Αν  $\rho=0$  τότε:

$$\nabla^2 \Phi = 0$$

**Εξίσωση 2-16 : Εξίσωση Laplace**

#### **2.1.4 Διαμορφώσεις του ηλεκτρικού πεδίου και οι επιπτώσεις τους στα**

##### **διηλεκτρικά**

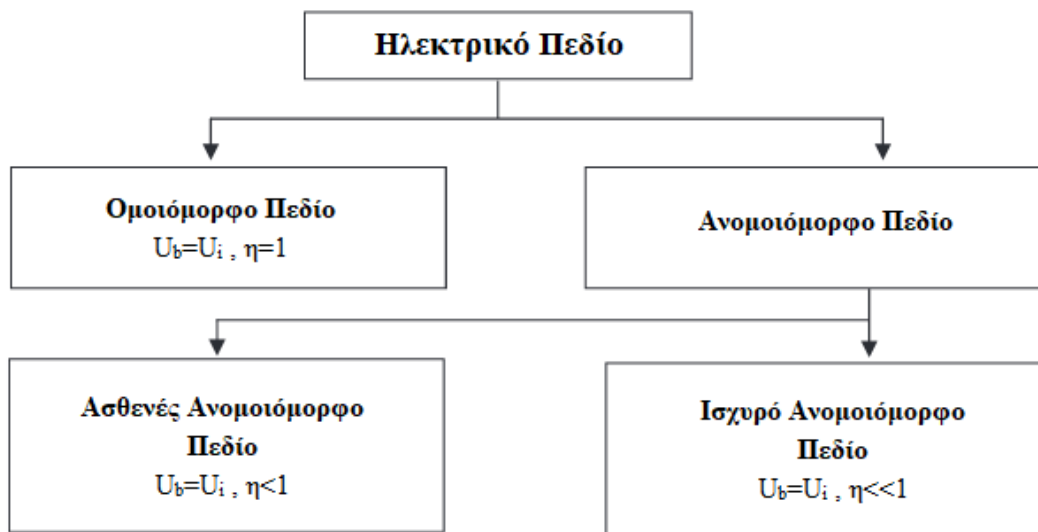
Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ουσιαστικά μια παράμετρος που καθορίζει την ένταση της ηλεκτρικής καταπόνησης που υφίσταται το διηλεκτρικό. Με τον όρο ηλεκτρική αντοχή ενός διηλεκτρικού εννοούμε ποιοτικά την μέγιστη ηλεκτρική καταπόνηση που μπορεί να αντέξει πριν διασπαστεί εντελώς. Από την άλλη, ο ποσοτικός ορισμός του όρου αυτού δεν είναι τόσο εύκολος. Αυτό οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως η σύνθεση του διηλεκτρικού, η παρουσία προσμίξεων, η θερμοκρασία, η πίεση, η διαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου (το σχήμα των ηλεκτροδίων, το μέγεθος, την απόσταση και το υλικό κατασκευής τους), το υλικό των ηλεκτροδίων και η διάρκεια, η μέγιστη τιμή και η κυματομορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Προκειμένου να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των διηλεκτρικών, οι μηχανισμοί διάσπασης της μόνωσης και η επίδραση των παραπάνω παραγόντων στη διάσπαση είναι ένα σημαντικό πεδίο μελέτης και έρευνας.

Ανάλογα και με τη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων, εφαρμόζοντας την κατάλληλη τάση εμφανίζεται μεγάλη αύξηση της έντασης του πεδίου σε μία ή περισσότερες περιοχές στο εσωτερικό του διηλεκτρικού. Στις περιοχές αυτές το υλικό υφίσταται μεγάλη καταπόνηση και εκδήλωση μερικών εκκενώσεων ( partial discharges ), σε σημείο ώστε τοπικά να παρατηρηθεί απώλεια των μονωτικών ιδιοτήτων του. Αποτέλεσμα των εκκενώσεων αυτών είναι η μερική διάσπαση του διηλεκτρικού (partial breakdown). Η τιμή της τάσης, που παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο, ονομάζεται τάση έναυσης μερικής διάσπασης. Μερική διάσπαση παρατηρείται σε όλα τα διηλεκτρικά υπό συνθήκες ανομοιομορφου 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 παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 2-2.



**Σχήμα 2-2: Ταξινόμηση Μερικής Διάσπασης (Partial Breakdown-PB) [32]**

Τα ηλεκτρικά πεδία μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες: στα ομοιόμορφα (uniform) και τα ανομοιόμορφα (nonuniform) πεδία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3.



**Σχήμα 2-3: Ταξινόμηση Ηλεκτρικών πεδίων [32]**

Σε ένα ομοιόμορφο πεδίο, το δυναμικό είναι γραμμικά κατανεμημένο. Μια ένδειξη του πόσο ομοιόμορφο είναι ένα πεδίο είναι ο βαθμός ομοιομορφίας  $\eta$ , ο οποίος ορίζεται στην Εξίσωση 2-17.

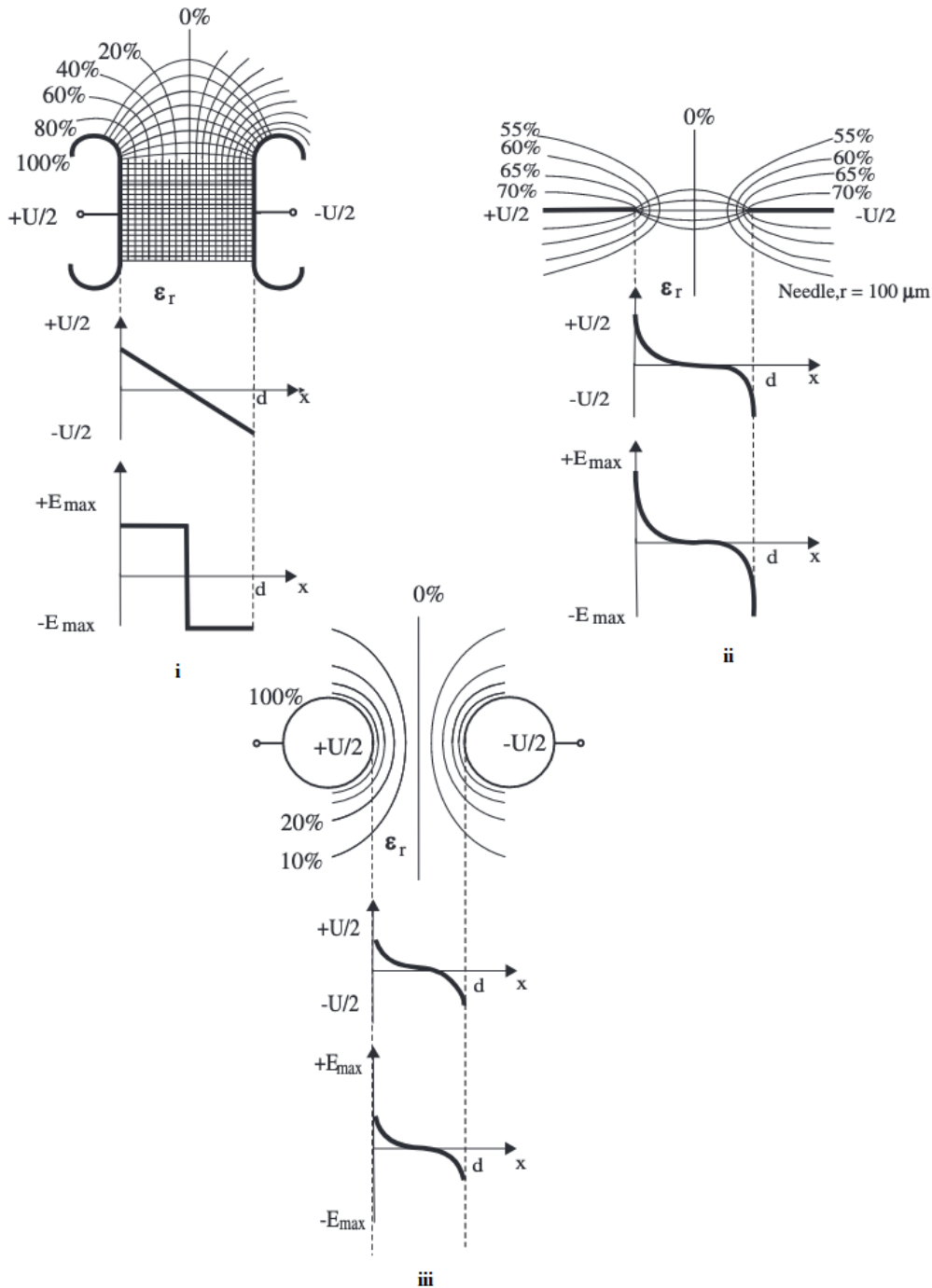
$$\eta = \frac{\hat{E}_{mean}}{\hat{E}_{max}} = \frac{\hat{V}}{d \cdot \hat{E}_{max}}$$

**Εξίσωση 2-17 : Βαθμός Ομοιομορφίας**



όπου  $\hat{E}_{mean}, \hat{E}_{max}$  είναι οι κορυφές της μέσης και της μέγιστης πεδιακής έντασης αντίστοιχα, και  $\hat{V}$  η μέγιστη τιμή της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, τα οποία βρίσκονται σε απόσταση  $d$  το ένα από το άλλο.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-3 ισχύει  $0 \leq \eta \leq 1$ , όπου η ισότητα  $\eta = 1$  ισχύει για ομοιόμορφα πεδία. Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζονται κάποιες διαμορφώσεις ηλεκτροδίων και το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει σε κάθε περίπτωση. Ειδικότερα στο Σχήμα 2-4 (i) το πεδίο είναι ομοιόμορφο. Στην περίπτωση αυτή, το δυναμικό είναι γραμμικά κατανομημένο, όπως αναφέραμε προηγουμένως, και η διάσπαση της μόνωσης γίνεται χωρίς να έχουν εκδηλωθεί προηγουμένως μερικές εκκενώσεις. Στο Σχήμα 2-4 (ii) το πεδίο είναι ασθενώς ανομοιόμορφο και έχει σχηματιστεί μεταξύ δύο σφαιρών. Σε αυτά, όπως και στα ομοιόμορφα, η διάσπαση της μόνωσης γίνεται χωρίς να έχουν εκδηλωθεί προηγουμένως μερικές εκκενώσεις. Έτσι η τάση έναυσης μερικών εκκενώσεων  $V_i$  ισούται με την τάση διάσπασης,  $V_b$ . Τέλος στο Σχήμα 2-4 (iii) παρατηρούμε την περίπτωση του ανομοιόμορφου πεδίου. Η περίπτωση αυτή είναι 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.



**Σχήμα 2-4: Διαμορφώσεις Ηλεκτρικού πεδίου- (i) Ομοιόμορφο πεδίο ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, (ii) Ασθενώς ανομοιόμορφο πεδίο ανάμεσα σε δύο σφαίρες, (iii) Ανομοιόμορφο πεδίο ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια [32]**

Για πιο οικονομική και βέλτιστη χρήση του εξοπλισμού θα πρέπει να επιδιώκεται ο περιορισμός της εκδήλωσης ανομοιόμορφων πεδίων. Αυτό είναι εφικτό να γίνει με την κατάλληλη διαμόρφωση των ηλεκτροδίων. Είναι επιθυμητό να αποφεύγονται αιχμηρά σημεία στην επιφάνεια, καθώς οδηγούν σε τοπική αύξηση της πεδιακής έντασης, καθιστώντας το διηλεκτρικό στην περιοχή αυτή επιρρεπές στη διάσπαση. Άλλωστε

αξιοσημείωτο είναι ότι οι αιχμές που είναι αποτέλεσμα της κατεργασίας των μετάλλων μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές στο πεδίο, ειδικά όταν πρόκειται για μικρά διάκενα. Για αυτό το λόγο είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν συμμετρικά, ομαλά και μεγάλα ηλεκτρόδια. Για ομοιόμορφη κατανομή του πεδίου χρησιμοποιούνται χωρητικές διατάξεις στη μόνωση των μονωτήρων διέλευσης, μετασχηματιστών, και τερματισμών καλωδίων. Οι διατάξεις αυτές είναι ηλεκτρόδια κατάλληλου σχήματος (π.χ. τοροειδή) τα οποία λειτουργούν ως ισοδυναμικές επιφάνειες (floating screens) [32].

## 2.2 Αριθμητικές μέθοδοι

Πολλές φορές η αναλυτική επίλυση προβλημάτων εύρεσης ηλεκτρικού πεδίου καθίσταται αδύνατη, λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας που αυτά παρουσιάζουν είτε λόγω της γεωμετρίας τους. Έτσι δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός της αναλυτικής έκφρασης της συνάρτησης δυναμικού  $\Phi(x,y,z)$  επιλύοντας απλά την εξίσωση Laplace ή Poisson, ή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E(x,y,z)$  μέσω των εξισώσεων του Maxwell. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να καταφεύγουμε στην χρήση αριθμητικών μεθόδων για την επίλυσή τους. Διατάξεις με σύνθετη γεωμετρία είναι και οι μονωτήρες λόγω των χαρακτηριστικών τους όπως το τοροειδές εξομάλυνσης, ο αγωγός φάσης ή η διαμόρφωση του πυλώνα μαζί με τις άλλες δύο φάσεις. Για αυτό, για τον υπολογισμό του πεδίου στους μονωτήρες καταφεύγουμε σε αριθμητικές μεθόδους [33], [34] .

Γενικότερα, η αριθμητική ανάλυση χρονολογείται από την εποχή των Βαβυλώνιων (2000 π.χ) , ενώ έως σήμερα έχει κάνει τεράστια πρόοδο. Δραστηριοποιείται σε τομείς όπως η πληροφορική, η παρεμβολή, η παρέκταση, και η παλινδρόμηση, η επίλυση εξισώσεων και συστημάτων εξισώσεων, η θερμική ανάλυση και ο υπολογισμός ηλεκτρικών πεδίων. Ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματά της ήταν η συμβολή των αριθμητικών μεθόδων στην επίλυση γραμμικών και μη, μερικών διαφορικών εξισώσεων. Οι ιλιγγιώδεις ρυθμοί ανάπτυξης της θεωρίας υπολογισμού και της τεχνολογίας επιτρέπουν πλέον την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και σαν αποτέλεσμα καθιστούν αποδεκτή τη χρήση διάφορων αριθμητικών μεθόδων για την λύση δυσεπίλυτων προβλημάτων.

Οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες:

- Διαφορικές αριθμητικές μέθοδοι
- Ολοκληρωτικές αριθμητικές μέθοδοι

### 2.2.1 Διαφορικές αριθμητικές μέθοδοι

Αυτή η κατηγορία αριθμητικών μεθόδων μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για κλειστά προβλήματα, δηλαδή για προβλήματα με περιορισμένες

οριακές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο θα έχει σαφώς καθορισμένα όρια και θα είναι πεπερασμένο. Στην αριθμητική ανάλυση δύο από τις σημαντικότερες διαφορικές μεθόδους είναι η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method – FDM) και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method– FEM) [32].

#### ❖ Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FDM) αποτελεί μια κατηγορία αριθμητικών τεχνικών για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων με προσέγγιση παραγώγων με πεπερασμένες διαφορές. Αυτές μετατρέπουν τις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (ODE) ή τις μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDE), οι οποίες μπορεί να είναι μη γραμμικές, σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν με τεχνικές άλγεβρας πινάκων. Οι σύγχρονοι υπολογιστές έχουν πλέον την δυνατότητα να εκτελέσουν αποτελεσματικά αυτούς τους γραμμικούς υπολογισμούς άλγεβρας, πράγμα που μαζί με τη σχετική ευκολία εφαρμογής τους, οδήγησε στην ευρεία χρήση του FDM στη σύγχρονη αριθμητική ανάλυση [35].

#### ❖ Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Όσον αφορά τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, πρόκειται για μια κατηγορία αριθμητικών τεχνικών που χρησιμοποιείτε για την επίλυση προβλημάτων φυσικής και εφαρμοσμένων επιστημών και μηχανικής. Μπορεί να εφαρμοσθεί για την ανάλυση κατασκευών, τη μηχανική των ρευστών, τη μετάδοση θερμότητας, τον ηλεκτρομαγνητισμό και άλλα [36]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο χώρος στον οποίο εκτείνεται το πεδίο θεωρείται ότι αποτελείται από πολλά μικρά στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων. Βασική ιδέα της αποτελεί η μετατροπή διαφορικών εξισώσεων σε ολοκληρωτική μορφή και στη συνέχεια η εφαρμογή προσεγγίσεων. Οι εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη στους κόμβους του συστήματος προκύπτουν, συνήθως, μέσα από διαδικασίες ελαχιστοποίησης κάποιων ενεργειακών εκφράσεων (συναρτησιακών) που περιλαμβάνουν τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη. Παρακάτω αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα ηλεκτροστατικό πρόβλημα.

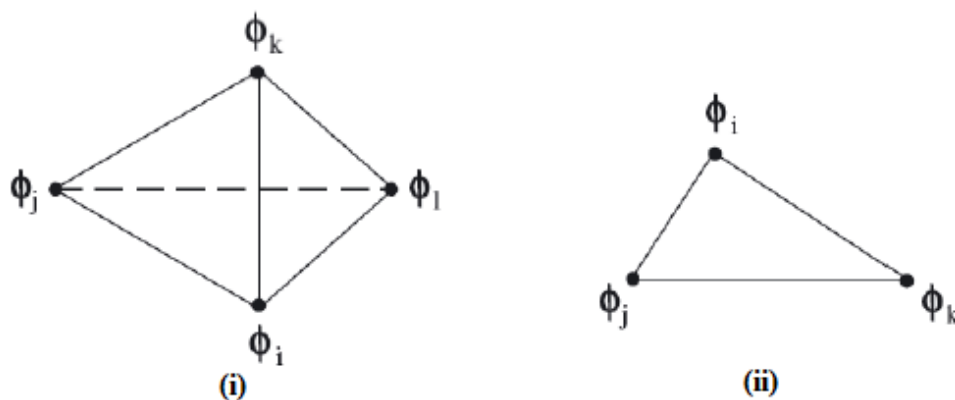
Η συνάρτηση δυναμικού  $\Phi(x,y)$  που όπως είδαμε παραπάνω να ικανοποιεί την Εξίσωση 2-16, ελαχιστοποιεί το συναρτησιακό

$$W = \frac{1}{2} \int \varepsilon (\nabla^2 \Phi) dV$$

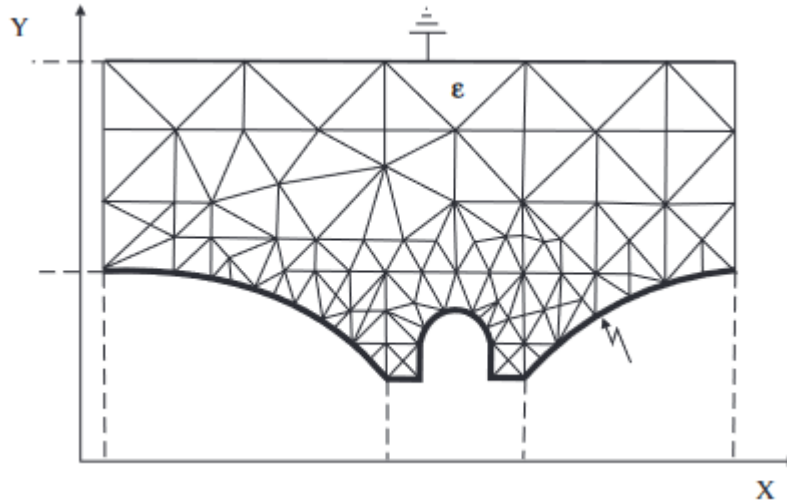
**Εξίσωση 2-18 : Ενέργεια Ηλεκτρικού Πεδίου σε όγκο V**

,όπου δηλώνει την ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου που βρίσκεται αποθηκευμένη σε όγκο  $V$  του διηλεκτρικού.

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου, την οποία αναλύουμε, βασίζεται στον χωρισμό του χώρου σε έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών στοιχείων, στα οποία αντιστοιχίζονται κάποια μεγέθη του πεδίου, όπως το δυναμικό. Ο απλούστερος χωρισμός του χώρου είναι σε τετράεδρα, ενώ ενός δισδιάστατου προβλήματος είναι σε τρίγωνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Ο προσανατολισμός και το μέγεθος των εκάστοτε στοιχείων ανάλογα με την περίπτωση είναι ανομοιόμορφος μέσα στο πλέγμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ελάχιστη, η περιοχή χωρίζεται σε διακριτά στοιχεία μεγαλύτερου μεγέθους, ενώ οι κρίσιμες περιοχές καλύπτονται με πεπερασμένα στοιχεία μικρότερων διαστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6. Η χρήση στοιχείων άλλου σχήματος (π.χ. παραλληλογράμμων), δεν συνηθίζεται ιδιαίτερα παρόλο που είναι επιτρεπτή, λόγω της απλότητας των σχέσεων που προκύπτουν κατά τη χρήση των τριγωνικών στοιχείων και της ευκολίας με την οποία αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον προγραμματισμό σ' έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.



**Σχήμα 2-5 : Πεπερασμένα Στοιχεία: (i) Τετράεδρο, (ii) Τρίγωνο [32]**



**Σχήμα 2-6 : Υπολογισμός πεδίου δύο διαστάσεων με FEM χρησιμοποιώντας τριγωνικά διακριτά στοιχεία [32]**

Ύστερα από τη διακριτοποίηση της περιοχής του πεδίου σε πολλά τριγωνικά στοιχεία, ακολουθεί ο καθορισμός του προσεγγιστικού τρόπου μεταβολής της συνάρτησης δυναμικού σε κάθε τριγωνικό στοιχείο, με την προϋπόθεση ότι η συνάρτηση  $W = \frac{1}{2} \int \varepsilon (\nabla^2 \Phi) dV$  πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Η μεταβολή του δυναμικού σε κάθε στοιχείο μπορεί να είναι οποιαδήποτε, συνήθως όμως χρησιμοποιούνται απλές γραμμικές προσεγγιστικές εκφράσεις. Στο Σχήμα 2-7 φαίνεται ένα κομμάτι του πεδίου που μας ενδιαφέρει. Η ανάλυση θα γίνει για δισδιάστατο πρόβλημα και επιπλέον θεωρούμε ότι η κατανομή του δυναμικού ως προς τον άξονα z δε μεταβάλλεται. Συνεπώς ισχύει

$$W = \frac{z}{2} \iint \varepsilon (\nabla^2 \Phi) dS$$

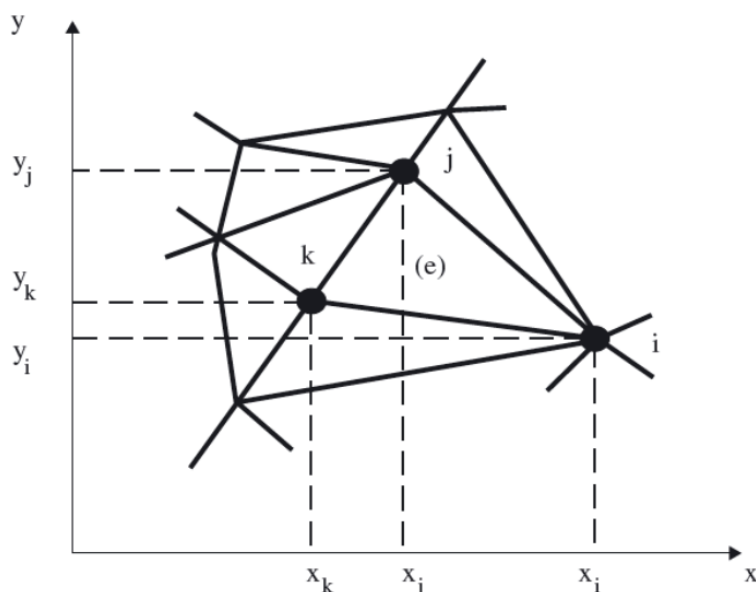
**Εξίσωση 2-19 : Ενέργεια Ηλεκτρικού Πεδίου σε επιφάνεια S**

Για το τριγωνικό στοιχείο με κόμβους i , j και k πρέπει να υπολογιστούν οι συναρτήσεις βάσης της κατανομής  $\Phi(x, y)$  . Θεωρούμε ότι η συνάρτηση δυναμικού  $\Phi(x,y)$  μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\Phi(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y$$

**Εξίσωση 2-20 : Γραμμική Έκφραση Συνάρτησης Δυναμικού**

Η χρήση πολυωνύμων ανώτερης τάξης για μεγαλύτερη ακρίβεια είναι να μην εφικτή αλλά έτσι αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η πολυπλοκότητα και οι χρονικές απαιτήσεις χωρίς να προκύπτουν πάντα τα επιθυμητά αποτελέσματα.



**Σχήμα 2-7 : Τμήμα διαστάτου πεδίου, χωρισμένου σε ανόμοια τριγωνικά στοιχεία στο επίπεδο x-y [32]**

Για τους τρεις κόμβους i, j, k του Σχήμα 2-7 , τα άγνωστα δυναμικά στα σημεία  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$ ,  $(x_k, y_k)$  δίνονται από τις εξής εξισώσεις:

$$\Phi_i(x, y) = a_1 + a_2x_i + a_3y_i$$

$$\Phi_j(x, y) = a_1 + a_2x_j + a_3y_j$$

$$\Phi_k(x, y) = a_1 + a_2x_k + a_3y_k$$

### **Εξίσωση 2-21 : Εξισώσεις Άγνωστων Δυναμικών**

Από τη λύση του συστήματος των παραπάνω εξισώσεων προκύπτουν οι τιμές των σταθερών  $a_1, a_2, a_3$ :

$$a_1 = \frac{1}{2\Delta_e} [(x_j y_k - x_k y_j) \Phi_i + (x_k y_i - x_i y_k) \Phi_j + (x_i y_j - x_j y_i) \Phi_k]$$

$$a_2 = \frac{1}{2\Delta_e} [(y_j - y_k) \Phi_i + (y_k - y_i) \Phi_j + (y_i - y_j) \Phi_k]$$

$$a_3 = \frac{1}{2\Delta_e} [(x_k - x_j)\Phi_i + (x_i - x_k)\Phi_j + (x_j - x_i)\Phi_k]$$

### Εξίσωση 2-22 : Τιμές σταθερών

Και  $\Delta_e = \frac{1}{2} [(x_j y_k - x_k y_j) + (x_k y_i - x_i y_k) + (x_i y_j - x_j y_i)]$  η επιφάνεια του στοιχείου e.

Αν αντικαταστήσουμε τα  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  στην Εξίσωση 2-20 προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για το δυναμικό  $\Phi(x, y)$ :

$$\Phi(x, y) = \frac{1}{2\Delta_e} [(a_{1i} + a_{2i}x + a_{3i}y)\Phi_i + (a_{1j} + a_{2j}x + a_{3j}y)\Phi_j + (a_{1k} + a_{2k}x + a_{3k}y)\Phi_k]$$

### Εξίσωση 2-23 : Εξίσωση Δυναμικού

όπου:

$$\alpha_{1i} = (x_j y_k - x_k y_j)$$

$$\alpha_{2i} = (y_j - y_k)$$

$$\alpha_{3i} = (x_k - x_j)$$

ενώ οι εκφράσεις των υπόλοιπων σταθερών  $\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \alpha_{3j}, \alpha_{1k}, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}$  προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις με κυκλική εναλλαγή των δεικτών i,j,k .

Στην συνέχεια παραγωγίζουμε την Εξίσωση 2-20 και έτσι έχουμε

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \alpha_2 \text{ και } \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \alpha_3$$

### Εξίσωση 2-24 : Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις

Προκειμένου να γίνει ελαχιστοποίηση της ενέργεια στην υπό εξέταση περιοχή πρέπει πρώτα να γνωρίζουμε την ενέργεια στο στοιχείο e. Από την Εξίσωση 2-19 έχουμε :

$$W_e = \frac{z}{2} \iint \varepsilon (\nabla^2 \Phi) dS = \frac{z}{2} \iint \varepsilon \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) dx dy$$



$$W_{\Delta e} = \frac{W_e}{2} = \frac{1}{2} \Delta_e \varepsilon \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right)$$

### Εξίσωση 2-25 : Ενέργεια Ηλεκτρικού Πεδίου στο στοιχείο e

Η παράγωγος της ενέργειας  $W_{\Delta e}$  είναι σε μητρική μορφή:

$$\frac{\partial W_{\Delta e}}{\partial \Phi_e} = \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} a_{2i}^2 + a_{3i}^2 & a_{2i}a_{2j} + a_{3i}a_{3j} & a_{2i}a_{2k} + a_{3i}a_{3k} \\ a_{2j}a_{2i} + a_{3j}a_{3i} & a_{2j}^2 + a_{3j}^2 & a_{2j}a_{2k} + a_{3j}a_{3k} \\ a_{2k}a_{2i} + a_{3k}a_{3i} & a_{2k}a_{2j} + a_{3k}a_{3j} & a_{2k}^2 + a_{3k}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \\ \Phi_k \end{bmatrix} =$$

$$\frac{\varepsilon}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \\ \Phi_k \end{bmatrix} = \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} [S][\Phi]$$

### Εξίσωση 2-26 : Παράγωγος Ενέργειας Ηλεκτρικού Πεδίου στο στοιχείο e

όπου ο πίνακας  $[S]$  ονομάζεται πίνακας ακαμψίας (stiffness matrix) ή πίνακας αγωγιμότητας.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια σε όλο το χώρο των δοθέντων στοιχείων πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \{\Phi\}} = 0$$

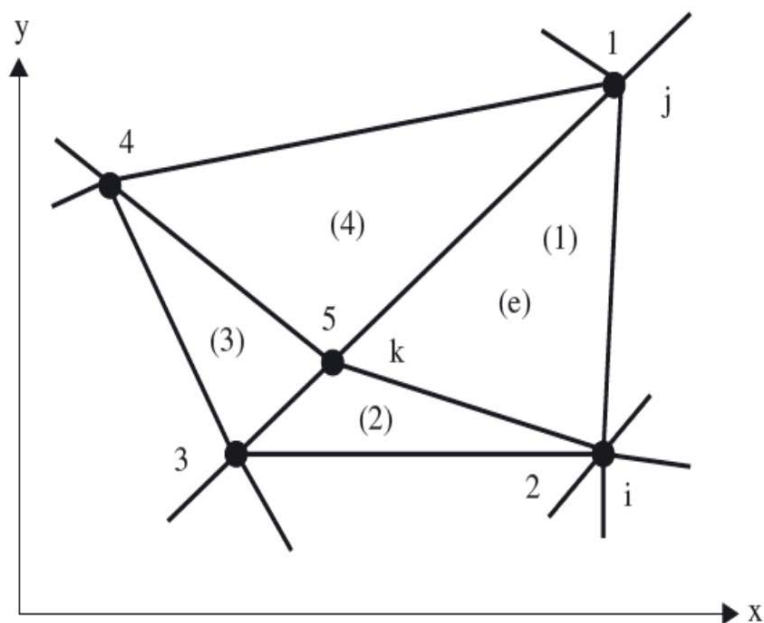
### Εξίσωση 2-27 : Συνθήκη Ελαχιστοποίησης Ενέργειας

όπου  $W_{\Delta}$  είναι η ενέργεια του πεδίου στο χώρο που μας ενδιαφέρει και με  $\{\Phi\} = (\Phi_i, \Phi_j, \Phi_k)$  το διάνυσμα των δυναμικών στους κόμβους i,j,k.

Μέχρι στιγμής δεν έχουμε λάβει υπόψη τα στοιχεία που συνορεύουν με το στοιχείο (e). 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. Με  $\Phi_1, \dots, \Phi_5$  συμβολίζουμε τα δυναμικά στους κόμβους 1 έως 5. Με εφαρμογή της παραπάνω σχέσης για το σύνολο των στοιχείων 1 έως 4 έχουμε:

$$\frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \Phi_5} = 0$$

όπου  $W_{\Delta}$  είναι η ενέργεια του πεδίου στο χώρο των τεσσάρων στοιχείων.



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

Γενικά ισχύει:

$$\frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \Phi} = \frac{\varepsilon}{4\Delta_e} [S][\Phi] = 0$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \end{bmatrix} = 0$$

### Εξίσωση 2-28 : Σχέση Ελαχιστοποίησης

Η παραπάνω σχέση με χρήση της μήτρας ακαμψίας για τον κόμβο 5 γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial W_{\Delta}}{\partial \Phi_5} = 0$$

$$\Rightarrow S_{15}\Phi_1 + S_{25}\Phi_2 + S_{35}\Phi_3 + S_{45}\Phi_4 + S_{55}\Phi_5 = 0$$

### Εξίσωση 2-29 : Σχέση Ελαχιστοποίησης για τον κόμβο 5

Άρα το δυναμικό  $\Phi_5$  μπορεί να βρεθεί εάν τα δυναμικά  $\Phi_1$  έως  $\Phi_4$  είναι γνωστά. Όμως από την στιγμή που οι κόμβοι 1 έως 4 είναι μέρη ενός ευρύτερου δικτύου στοιχείων στο πλέγμα, για κάθε άγνωστο δυναμικό πρέπει να επιλυθεί μία αντίστοιχη εξίσωση ελαχιστοποίησης. Αυτές οι εξισώσεις προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος της Εξίσωσης 2-28 [32].

#### 2.2.2 Ολοκληρωτικές αριθμητικές μέθοδοι

Αυτή η κατηγορία αριθμητικών μεθόδων μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ανοικτά προβλήματα, δηλαδή για προβλήματα με ανοικτές οριακές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο δεν θα έχει σαφώς καθορισμένα όρια και θα εκτείνεται μέχρι το άπειρο. Δύο από τις σημαντικότερες ολοκληρωτικές αριθμητικές μεθόδους είναι η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων, γνωστή και ως «μέθοδος προσομοίωσης φορτίου» (Charge Simulation Method, CSM) και η μέθοδος των επιφανειακών τμημάτων, γνωστή και ως «μέθοδος των οριακών στοιχείων» (Boundary Element Method, BEM).

##### ❖ Μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων

Η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων είναι ουσιαστικά μία μέθοδος ειδώλων, όπου όμως τα φορτία-είδωλα είναι προσεγγιστικά. Συγκεκριμένα τα επιφανειακά φορτία των ηλεκτροδίων αντικαθίστανται από έναν αριθμό διακεκριμένων ιδεατών φορτίων στο εσωτερικό των ηλεκτροδίων, κατάλληλα επιλεγμένα ώστε το δυναμικό που προκύπτει σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας αυτής να συμφωνεί με την ήδη γνωστή τιμή. Τα ιδεατά φορτία μπορούν να είναι: σημειακά, γραμμικά ή δακτυλιοειδή. Η μέθοδος των ισοδυνάμων φορτίων παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα:

- + Το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να εκτείνεται μέχρι το άπειρο
- + Για κάθε επιφάνεια ηλεκτροδίου βρίσκεται η κατάλληλη διάταξη ισοδύναμων φορτίων
- + Η πεδιακή ένταση υπολογίζεται επακριβώς

- + Εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίων
- + Εφαρμόζεται και σε ηλεκτρόδια που είναι σε ελεύθερο δυναμικό
- + Εφαρμόζεται και όταν υπάρχουν δύο διηλεκτρικά
- + Απαιτεί λίγο χρόνο και μνήμη στο Η/Υ [37]

#### ❖ Μέθοδος των επιφανειακών τμημάτων

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. Τα φορτία τοποθετούνται στις διαχωριστικές επιφάνειες και στις κοινές επιφάνειες διαφορετικών υλικών, ενώ οι πηγές των φορτίων αρχικοποιούνται με τις οριακές συνθήκες που είναι γνωστές εκ των προτέρων [33], [34].

#### ❖ Υβριδική Μέθοδος

Επιπρόσθετα με τα παραπάνω έχει αναπτυχθεί και η υβριδική μέθοδος η οποία είναι ένας συνδυασμός των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και των ισοδυνάμων φορτίων (CSM). Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- + Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να υπολογιστούν πεδία μέχρι το άπειρο
- + Εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε αριθμό διηλεκτρικών
- + Εφαρμόζεται σε μη τέλεια μονωτικά υλικά
- + Απαιτείται λίγος υπολογιστικός χρόνος [37]

# 3

## *Το πρόγραμμα Comsol και η προεργασία των προσομοιώσεων*

### *3.1 Το πρόγραμμα Comsol*



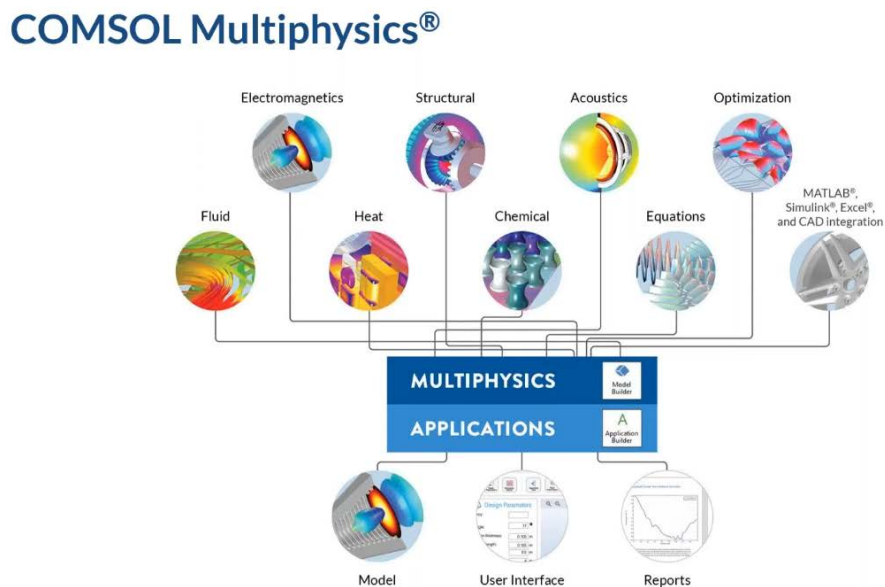
**Σχήμα 3-1 : Comsol Multiphysics [38]**

#### *3.1.1 Γενικά*

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων πολλαπλής πλατφόρμας, καθώς και ένα λογισμικό επίλυσης και προσομοίωσης πολυφυσικής. Επιτρέπει συμβατικές διεπαφές χρήστη με βάση τη φυσική και συζευγμένα συστήματα μερικών διαφορικών εξισώσεων [39]. Αυτό το λογισμικό μαθηματικής μοντελοποίησης ξεκίνησε το 1986 και έως σήμερα προσφέρει εύχρηστες λύσεις σε προβλήματα μηχανικής και φυσικής [40].

### 3.1.2 Χρήση

Ως προς τη χρήση του το πρόγραμμα Comsol αποτελείται από δύο βήματα, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-2. Αρχικά ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει ένα μοντέλο φυσικής (model builder), το οποίο στη συνέχεια θα το εφαρμόσει σε μια προσομοίωση (application builder).



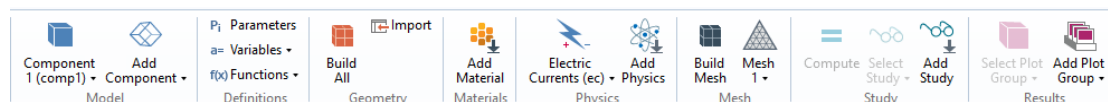
Σχήμα 3-2: Comsol-Model and Application builder [41]

Το πρόγραμμα αυτό παρέχει μια πληθώρα προϊόντων (Ηλεκτρομαγνητικά, Θερμικά, Χημικά, Μηχανικά κλπ.), τα οποία παρατίθενται στο Σχήμα 3-3 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προσομοίωση φαινομένων, τόσο μόνα τους όσο και σε συνδυασμό, μέσω της μελέτης πολλαπλών αλληλεπιδρώντων φυσικών ιδιοτήτων αφού στην πραγματικότητα κάθε πρόβλημα αποτελεί πρόβλημα πολλαπλών φυσικών φαινομένων.



Σχήμα 3-3 : Comsol - Προϊόντα [41]

Αναλυτικότερα τα βήματα για την εκτέλεση μιας προσομοίωσης (Σχήμα 3-4) είναι τα εξής:



Σχήμα 3-4: Βήματα Εκτέλεσης Προσομοίωσης

1. Ρύθμιση περιβάλλοντος μοντέλου
2. Δημιουργία γεωμετρικών αντικειμένων
3. Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών
4. Ορισμός φυσικών οριακών συνθηκών
5. Δημιουργία πλέγματος
6. Εκτέλεση προσομοίωσης
7. Αποθήκευση αποτελεσμάτων[41]

### 3.1.3 Λειτουργία

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η συμπεριφορά ενός συστήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω διαφορικών εξισώσεων. Ειδικότερα οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (PDE) μπορούν να περιγράψουν τις αλλαγές ενός συστήματος σε περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές. Δηλαδή αν έχουμε ένα σύστημα σε χρόνο  $t$  και χώρο  $(x,y,z)$ , ένα PDE μπορεί να εκτιμήσει αριθμητικά τη λύση μετά από μια μικρή αλλαγή στο χρόνο και τις θέσεις. Με την ίδια λογική, η επίλυση τέτοιων εξισώσεων μπορεί να προβλέψει τα αποτελέσματα ενός πειράματος ή τη διαδικασία ενός φυσικού φαινομένου.

Κάποιες μαθηματικές έννοιες που αξίζουν να αναφερθούν, για να κατανοήσουμε βαθύτερα τα παραπάνω, ακολουθούν στη συνέχεια. Αρχικά η απόκλιση ενός διανύσματος,  $J$ , παίρνει το άθροισμα των αλλαγών του διανυσματικού πεδίου στις διαφορετικές κατευθύνσεις ως εξής:

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z}$$

#### Εξίσωση 3-1 : Απόκλιση Διανύσματος $J$

Εάν η ροή μιας φυσικής ποσότητας διατηρείται, τότε το άθροισμα των αλλαγών προς όλες τις κατευθύνσεις είναι μηδέν, έτσι ώστε το  $F$  να είναι μηδέν στην παρακάτω εξίσωση:

$$\nabla \cdot J = F$$

#### Εξίσωση 3-2 : Εξίσωση ροής φυσικής ποσότητας $J$

Αυτή η εξίσωση προήλθε με διαισθητικό τρόπο από τον Gauss. Πήρε το άθροισμα των ροών σε μια επιφάνεια που περικλείει έναν όγκο και το εξισορρόπησε με το ογκομετρικό άθροισμα των πηγών ( $F$ ). Αφήνοντας τον όγκο να πλησιάσει το μηδέν δίνει τη διαφορική εξίσωση. Αυτή η παράγωγη αναφέρεται ως θεώρημα του Gauss ή θεώρημα απόκλισης.

Ας υποθέσουμε ότι το  $J$  αντιπροσωπεύει την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος. Εάν η απόκλιση του διανύσματος πυκνότητας ρεύματος είναι μηδενική, τότε η μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος προς μία κατεύθυνση εξισορροπείται με αλλαγές στις άλλες κατευθύνσεις σε κάθε σημείο του χώρου, έτσι ώστε το ηλεκτρικό φορτίο να διατηρείται σε κάθε σημείο.

Ο στροβιλισμός ενός διανύσματος περιγράφει την περιστροφή ενός τρισδιάστατου διανυσματικού πεδίου. Ορίζεται ως εξής :

$$\nabla \times J = \left( \frac{\partial J_z}{\partial y} - \frac{\partial J_y}{\partial z}, \frac{\partial J_x}{\partial z} - \frac{\partial J_z}{\partial x}, \frac{\partial J_y}{\partial x} - \frac{\partial J_x}{\partial y} \right)$$

#### Εξίσωση 3-3 : Στροβιλισμός Διανύσματος $J$



Ο στροβιλισμός ενός διανύσματος χρησιμοποιείται και στις εξισώσεις του Maxwell. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον νόμο του Faraday για την επαγωγή, όπου ο στροβιλισμός του ηλεκτρικού πεδίου, λόγω μιας χρονικής αλλαγής στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής, μπορεί να εκφραστεί από την Εξίσωση 2-10.

Η κλίση είναι ένα διάνυσμα του οποίου οι συνιστώσες δίνουν την κλίση, για παράδειγμα, ενός κλιμακωτού πεδίου σε διαφορετικές κατευθύνσεις [42]:

$$\nabla\Phi = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}, \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)$$

### **Εξίσωση 3-4 : Κλίση Διανύσματος $\Phi$**

Στην περίπτωση που το ρεύμα είναι σταθερό ( DC ) τότε η Εξίσωση 2-14 γράφεται ως εξής:

$$\nabla \cdot J = 0 \text{ και } \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$$

### **Εξίσωση 3-5 : Σύστημα Εξισώσεων για σταθερό ρεύμα**

Τα υλικά, όπου η πυκνότητα ρεύματος είναι ανάλογη με το ηλεκτρικό πεδίο περιγράφονται με τη συνταγματική εξίσωση γνωστή ως νόμος του Ohm:

$$J = \sigma E$$

### **Εξίσωση 3-6 : Νόμος του Ohm**

όπου  $\sigma$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα που ορίζεται ως εξής:

$$\sigma = \mu nq$$

### **Εξίσωση 3-7 : Ηλεκτρική Αγωγιμότητα**

όπου τα  $\mu$ ,  $n$ ,  $q$  δηλώνουν την κινητικότητα, την πυκνότητα αριθμού και τη φόρτιση των φορέων φορτίου, αντίστοιχα [43]. Η ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  έχει μονάδες  $\frac{1}{\Omega m}$ . Ο όρος  $\rho = \frac{1}{\sigma}$  είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού (με μονάδα  $\Omega m$ ) [44].

Σε ανισοτροπικά υλικά η αγωγιμότητα είναι ένας 3x3 τανιστής

$$\sigma_r = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

### **Εξίσωση 3-8 : Ηλεκτρική Αγωγιμότητα σε Ανισοτροπικά Υλικά**

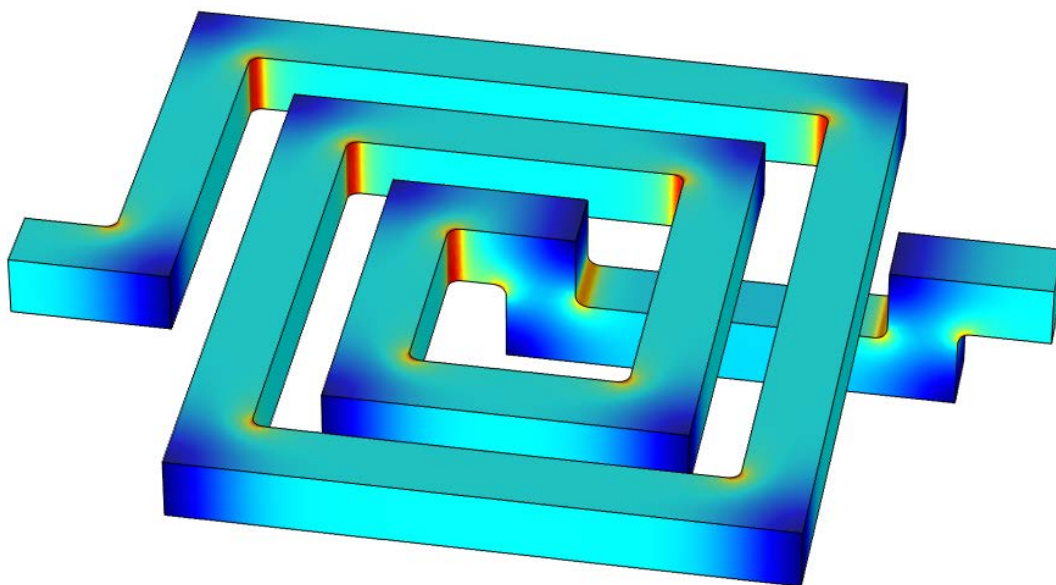
Αυτό σημαίνει ότι για ορισμένα υλικά, το πεδίο και το διάνυσμα πυκνότητας ρεύματος μπορεί να μην είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένα [43]. Γενικώς σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα με αγώγιμες περιοχές ο όρος  $J$  που υπάρχει στις εξισώσεις Maxwell είναι

άθροισμα δύο όρων.  $J = J_s + J_c$  όπου  $J_s$  είναι η χωρική πυκνότητα των επιβαλλόμενων πηγών που είναι ανεξάρτητες του περιβάλλοντος και  $J_c$  η επαγόμενη πυκνότητα ρεύματος λόγω του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [44]. Ο νόμος του Ohm εφαρμόζεται συνήθως για καλούς αγωγούς, όπως μέταλλα, όπου το ρεύμα μεταφέρεται κυρίως από ηλεκτρόνια. Για ημιαγώγιμα υλικών, ο νόμος του Ohm μπορεί να μην είναι επαρκής και χρειάζονται πιο προηγμένα μοντέλα. Χρησιμοποιώντας το ηλεκτρικό δυναμικό, η θεμελιώδης εξίσωση για σταθερά ρεύματα σε ένα υλικό που περιγράφεται από το νόμο του Ohm γίνεται

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0$$

### Εξίσωση 3-9 : Νόμος του Ohm για ημιαγώγιμα υλικά

Στο Σχήμα 3-5 απεικονίζεται η πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια ενός σπειροειδή επαγωγέα, στον οποίο εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυο άκρων του. Το μπλε και το κόκκινο αντιπροσωπεύουν τιμές χαμηλού και υψηλού μεγέθους, αντίστοιχα. Το γεγονός ότι η τάση του ρεύματος ακολουθεί τη συντομότερη διαδρομή, γίνεται ορατό στις κόκκινες περιοχές των εσωτερικών γωνιών της κατασκευής.



Σχήμα 3-5 : Πυκνότητα ρεύματος σε επιφάνεια επαγωγέα [43]

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μεγέθη  $E$ ,  $J$  μπορούμε να ορίσουμε την απώλεια ισχύος. Για έναν όγκο  $V$ , η απώλεια ισχύος ως προς τις ποσότητες πεδίου είναι:

$$P = \int_V J \cdot E dV$$

### Εξίσωση 3-10 : Απώλεια Ισχύος

όπου η χωρική πυκνότητα ισχύος ορίζεται ως εξής:

$$w_e = J \cdot E$$

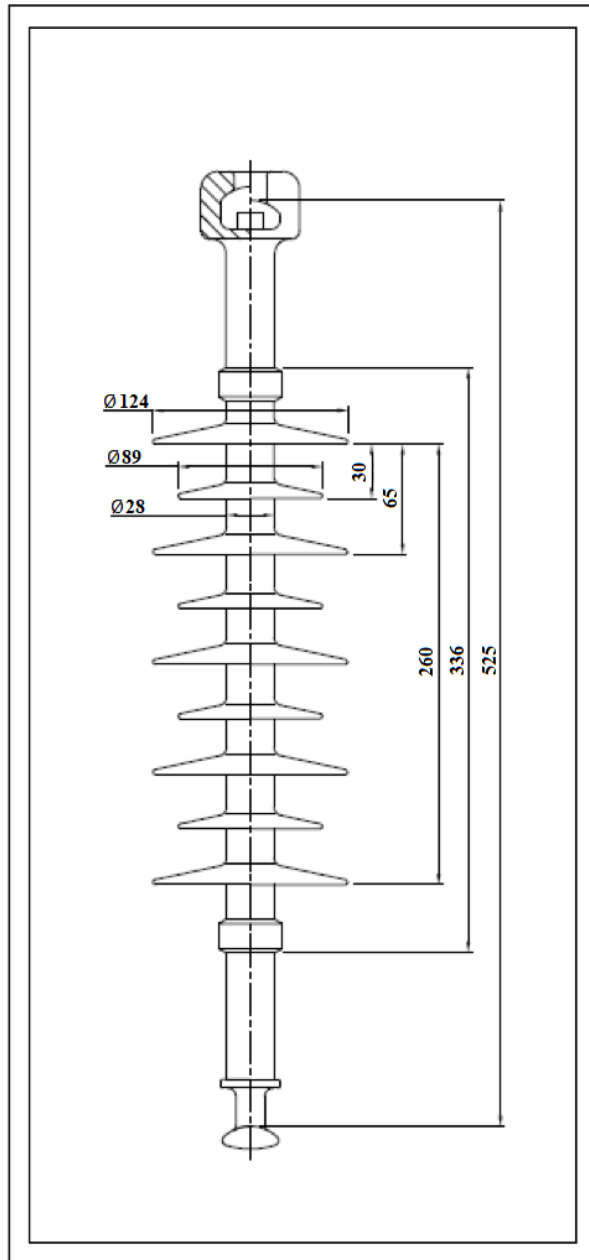
### Εξίσωση 3-11 : Χωρική Πυκνότητα Ισχύος

Σε έναν αγωγό, αυτή η ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα και αναφέρεται ως αντίσταση ή ωμική απώλεια [43].

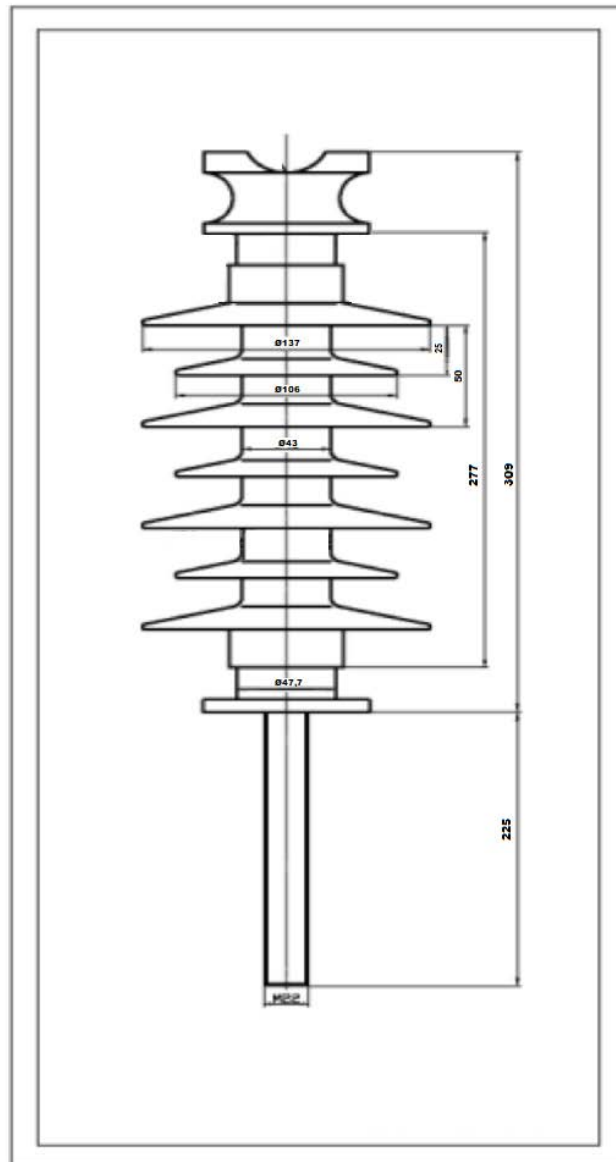
Τις παραπάνω αναλυτικές μεθόδους τις εκμεταλλεύεται το COMSOL προκειμένου να λύσει προβλήματα Διαφορικών Εξισώσεων. Ωστόσο, πολλά από αυτά τα προβλήματα, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας που παρουσιάζουν, δεν μπορούν να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Για αυτό το πρόγραμμα αυτό, μπορεί να κατασκευάσει μια προσέγγιση των εξισώσεων, βασισμένη τυπικά σε διαφορετικούς τύπους διακριτοποιήσεων. Αυτές οι μέθοδοι διακριτοποίησης προσεγγίζουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις με εξισώσεις αριθμητικών μοντέλων, οι οποίες μπορούν να λυθούν χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Η λύση των εξισώσεων του αριθμητικού μοντέλου είναι, με τη σειρά της, μια προσέγγιση της πραγματικής λύσης των PDE. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τέτοιων προσεγγίσεων [45]. Οποιοδήποτε συνεχές αντικείμενο έχει άπειρους βαθμούς ελευθερίας (DOF), καθιστά αδύνατη την επίλυση χρησιμοποιώντας υπολογισμούς με το χέρι. Έτσι στο FEM, το COMSOL δημιουργεί ένα πλέγμα που χωρίζει το αντικείμενο σε έναν διακριτό αριθμό στοιχείων για τα οποία μπορεί να υπολογιστεί η λύση. Στη συνέχεια, τα δεδομένα παρεμβάλλονται σε ολόκληρο το αντικείμενο. Συνήθως, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του πλέγματος, τόσο πιο ακριβής είναι η λύση, καθώς τα σχέδια δειγματίζονται καλύτερα στους φυσικούς τομείς. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια, τόσο μεγαλύτερες γίνονται οι προσομοιώσεις και επεκτείνονται έτσι οι χρόνοι επίλυσης. Παρ' όλ' αυτά δεν έχει νόημα να ξοδεύει κανείς αρκετές ώρες τρέχοντας μια προσομοίωση με πυκνό πλέγμα, εάν ένα πιο αραιό πλέγμα δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, λοιπόν, χρησιμοποιείται ευρέως από το COSMOL προκειμένου να λυθούν προβλήματα Διαφορικών Εξισώσεων σε σχήματα που έχουν πολύπλοκη γεωμετρία [46].

## 3.2 Μονωτήρες Προσομοιώσεων

Όπως προαναφέρθηκε, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου, γύρω από συνθετικούς μονωτήρες μέσης τάσης. Οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο: ένας τύπου ανάρτησης (suspension insulator) και ένας τύπου γραμμής (line-post insulator). Τα σχέδια των μονωτήρων αυτών με τις διαστάσεις τους (mm), δόθηκαν από τη ΔΕΔΔΗΕ και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-6 και στο Σχήμα 3-7.



Σχήμα 3-6 : Σχέδιο Συνθετικού Μονωτήρα Ανάρτησης



**Σχήμα 3-7 : Σχέδιο Συνθετικού Μονωτήρα Γραμμής**

Τα υλικά των δύο μονωτήρων περιλαμβάνουν τα εξής:

- Σιλικονούχο καουτσούκ με πρόσμιξη τριένυδρης αλουμίνα (Silicone Rubber Aluminium - Trihydrate (ATH)), για το περίβλημα του μονωτήρα
- Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (Glass Fiber-Reinforced Plastic - FRP) , για τον πυρήνα του μονωτήρα
- Γαλβανισμένο ατσάλι (Galvanized Steel) , για τους ακροδέκτες
- Αέρα, για την γύρω περιοχή

Απαραίτητες ιδιότητες των παραπάνω υλικών για τις προσομοιώσεις του ηλεκτρικού πεδίου αποτελούν η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  και η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ , οι τιμές των οποίων φαίνονται στον

Πίνακας 3-1.

Υλικό	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα $\sigma$ [S/m]	Διηλεκτρική Σταθερά $\epsilon_r$ [1]
Αέρας	$10^{-13}$	1
Silicone Rubber ATH	$10^{-12}$	3,7
Galvanized Steel	$1,33 \cdot 10^6$	1
FRP	$10^{-14}$	5,2

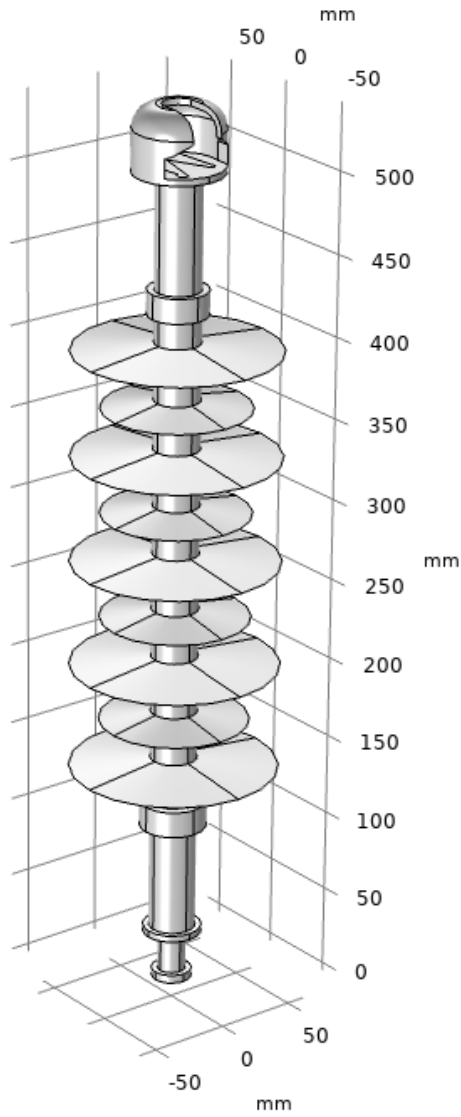
Πίνακας 3-1 : Ιδιότητες Υλικών Μονωτήρων

### 3.3 Διαδικασία Μετρήσεων μέσω Comsol

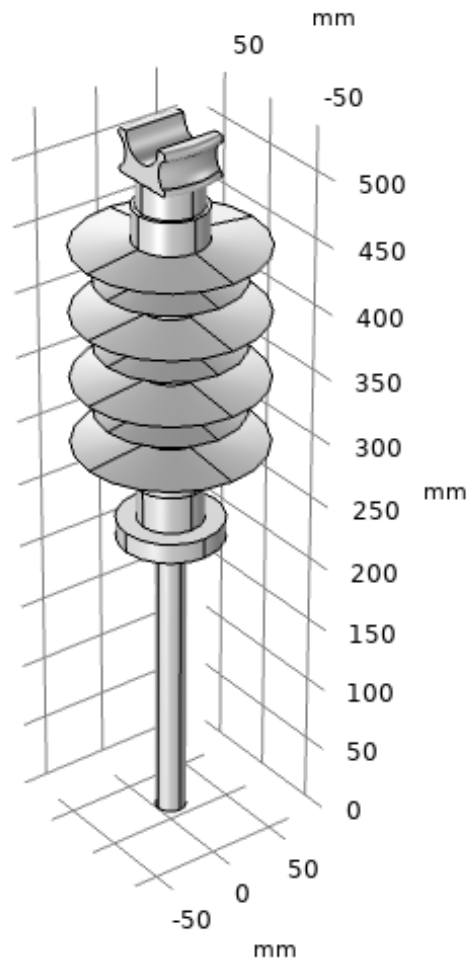
Η διαδικασία των μετρήσεων εκτελέστηκε με τα βήματα που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.1.3 τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

#### 3.3.1 Γεωμετρία

Για τη δημιουργία των δύο μοντέλων σχεδιάστηκαν οι γεωμετρίες των σχημάτων Σχήμα 3-8 και Σχήμα 3-9.



**Σχήμα 3-8 : Γεωμετρία Συνθετικού Μονωτήρα Ανάρτησης**

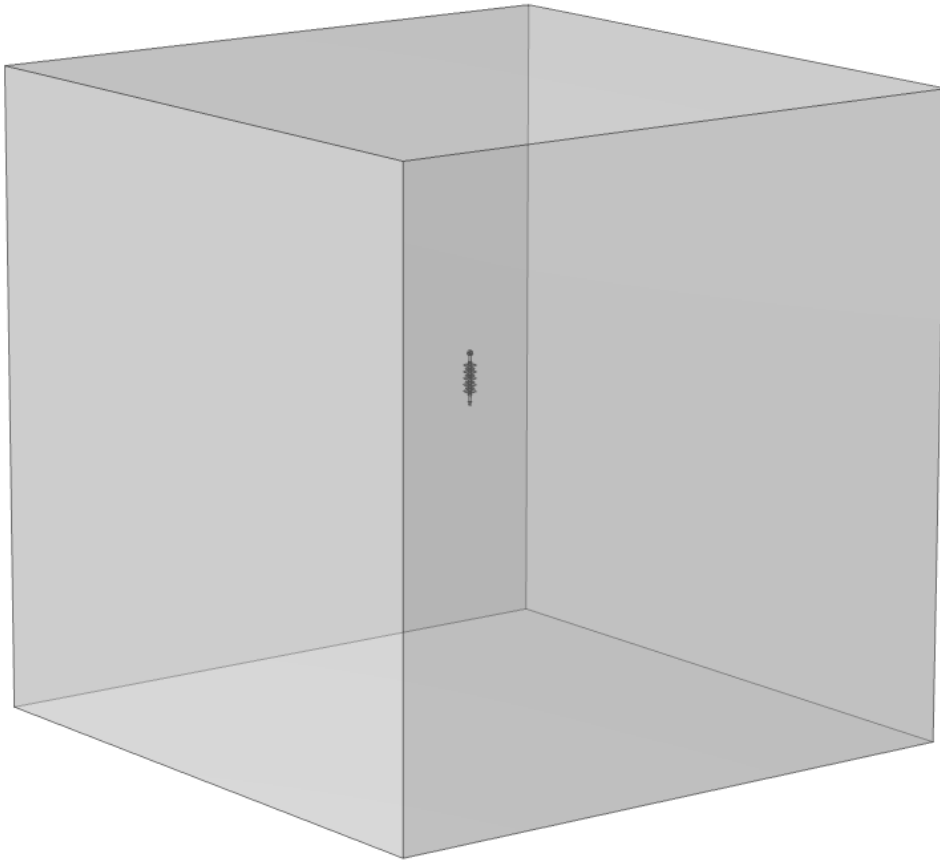


**Σχήμα 3-9 : Γεωμετρία Συνθετικού Μονωτήρα Γραμμής**

Προκειμένου να προσομοιωθεί το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το μονωτήρα, χρειάστηκε να προστεθεί στο εξωτερικό του, μια γεωμετρία σε σχήμα κύβου, η οποία αναπαριστά το χώρο στον οποίο βρίσκεται ο μονωτήρας (Σχήμα 3-10). Οι διαστάσεις του κύβου αυτού επιλέχτηκαν ως εξής: Κάθε πλευρά του κύβου θα έπρεπε να απέχει από το μονωτήρα απόσταση τουλάχιστον ίση με 5 φορές τη μεγαλύτερη πλευρά του μονωτήρα, ώστε να μην επηρεάζει το πεδίο του ( η απόδειξή της παραδοχής αυτής παρατίθεται στην υποενότητα 4.2 ). Επομένως αφού το ύψος των μονωτήρων ήταν 545mm και 532mm για τον μονωτήρα ανάρτησης και το μονωτήρα γραμμής αντίστοιχα και με δεδομένο ότι το κέντρο του κύκλου ταυτίστηκε με το κάτω άκρο του μονωτήρα, η απόσταση μιας πλευράς του κύβου από το κέντρο θα έπρεπε να είναι :

- ♦ για το μονωτήρα ανάρτησης:  $541 + 5 \cdot 541 = 3.246 \text{ mm}$ . Άρα ως μήκος πλευράς επιλέχτηκε η τιμή 6.492mm.
- ♦ για το μονωτήρα γραμμής:  $532 + 5 \cdot 532 = 3.192 \text{ mm}$ . Άρα ως μήκος πλευράς επιλέχτηκε η τιμή 6.384mm.

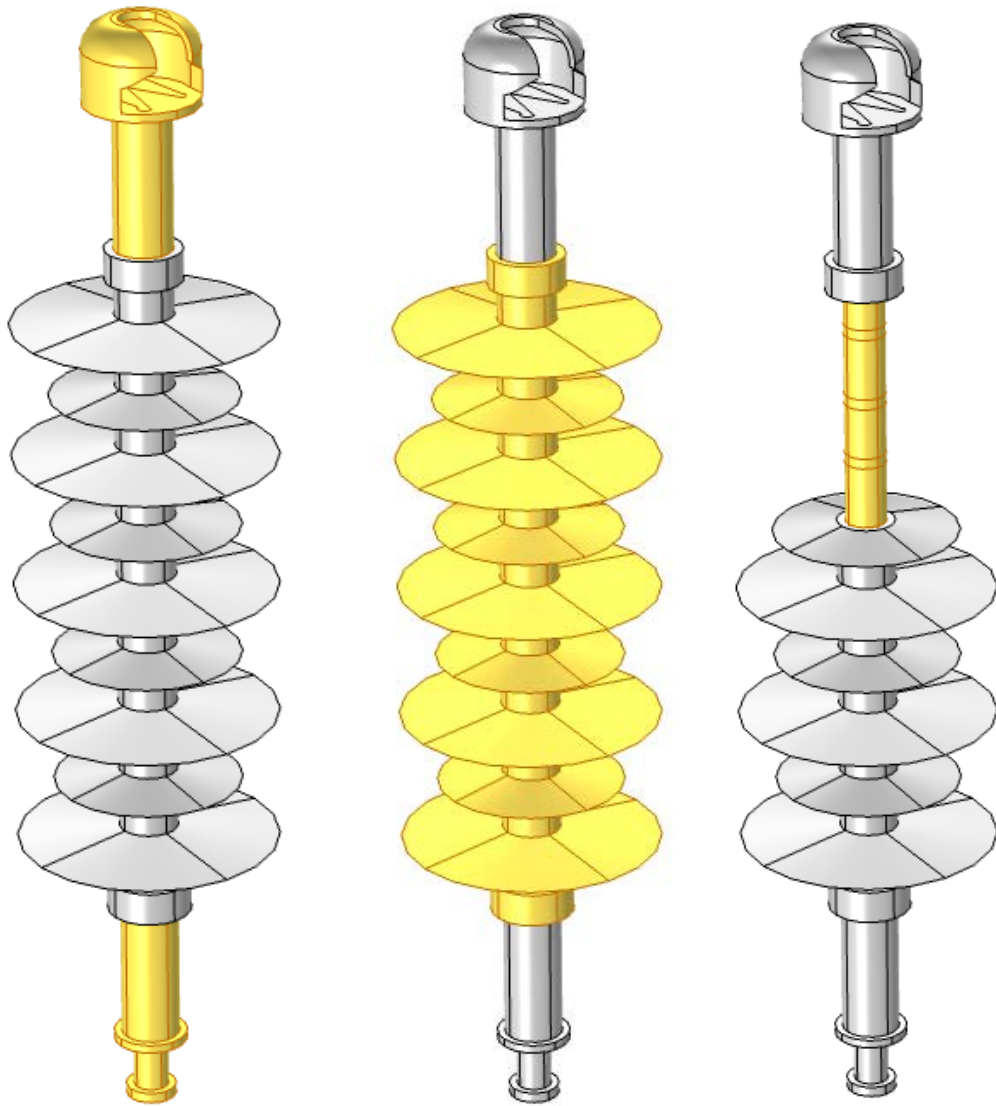




**Σχήμα 3-10 : Εξωτερικός κύβος**

### **3.3.2 Υλικά**

Έπειτα από τη γεωμετρική κατασκευή των μοντέλων των μονωτήρων ακολούθησε η τοποθέτηση των υλικών που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3-1. Στα άκρα του μονωτήρα χρησιμοποιήθηκε γαλβανισμένο ατσάλι, στα κιάτια σιλικονούχο καουτσούκ με πρόσμιξη τριένυδρης αλουμίνας και στον εσωτερικό κύλινδρο πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11. Για τον κύβο εκτός του μονωτήρα χρησιμοποιήθηκε αέρας (Σχήμα 3-12). Όμοια έγινε η τοποθέτηση υλικών στον δεύτερο μονωτήρα, όπως παρουσιάζονται στα σχήματα Σχήμα 3-13 και Σχήμα 3-14.

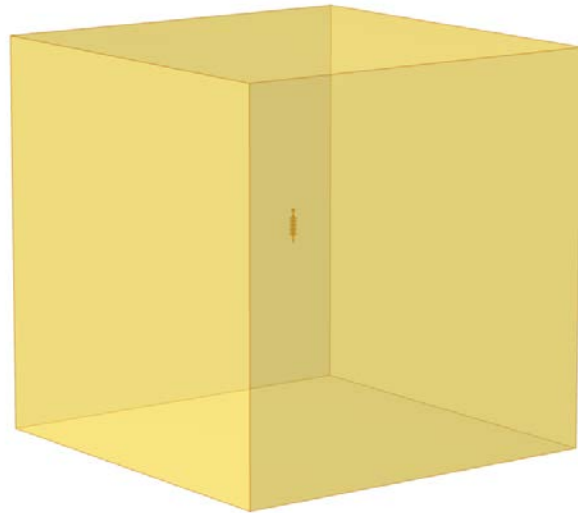


(i)

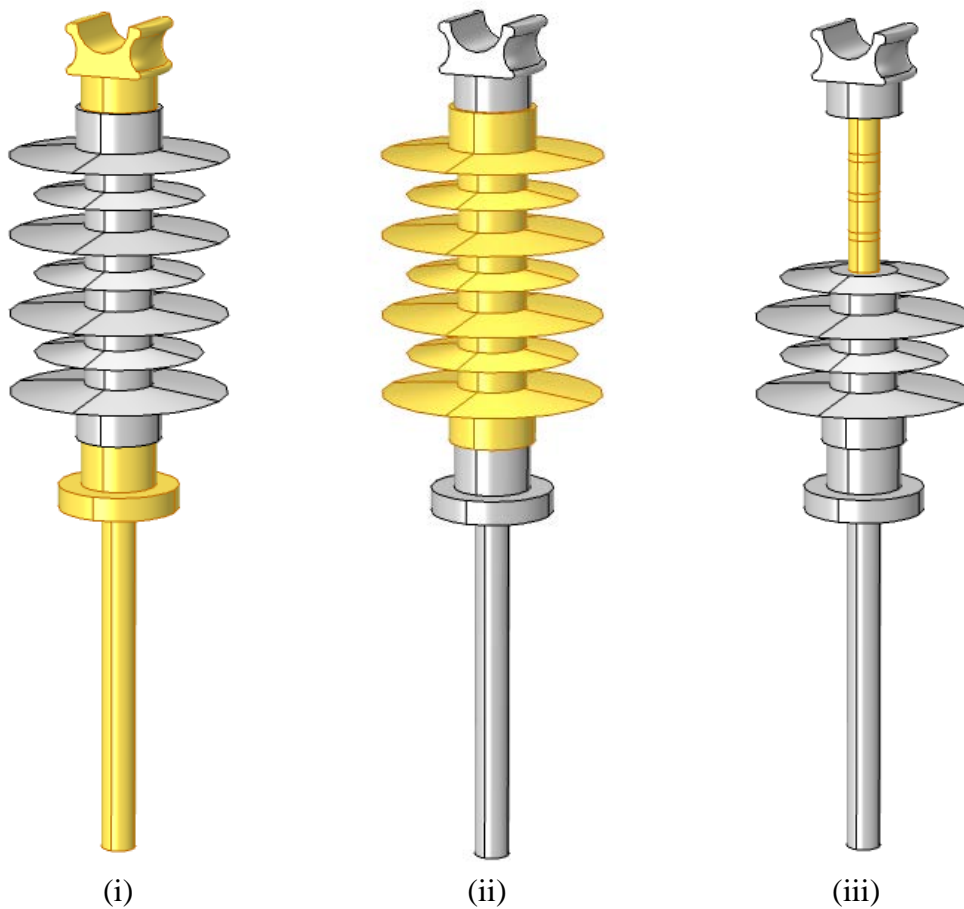
(ii)

(iii)

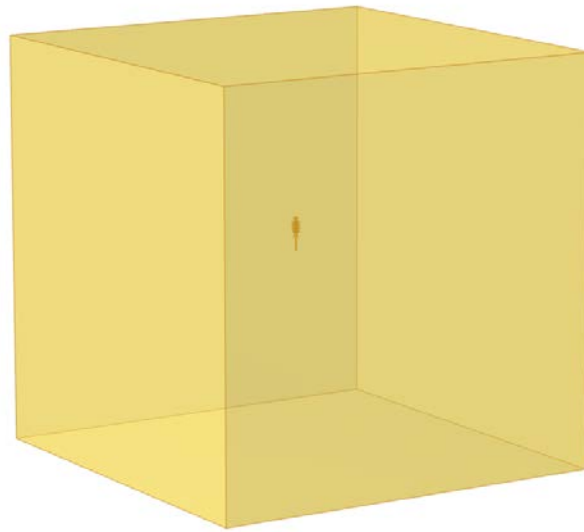
**Σχήμα 3-11 : Τοποθέτηση υλικών (i) στα άκρα , (ii) στα κιάθια και (iii) στον εσωτερικό κύλινδρο μονωτήρα ανάρτησης**



**Σχήμα 3-12 : Τοποθέτηση υλικού στον εξωτερικό κύβο από το μονωτήρα ανάρτησης**



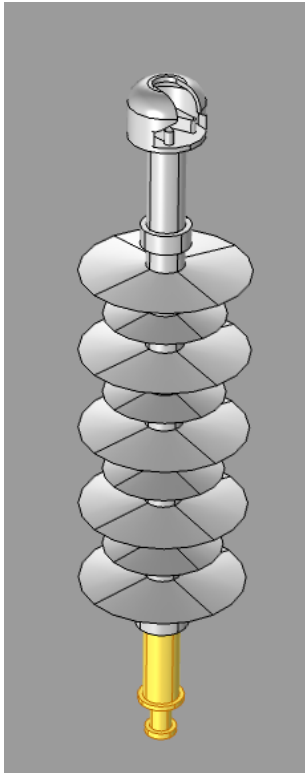
**Σχήμα 3-13 : Τοποθέτηση υλικών (i) στα άκρα , (ii) στα κιάθια και (iii) στον εσωτερικό κύλινδρο μονωτήρα γραμμής**



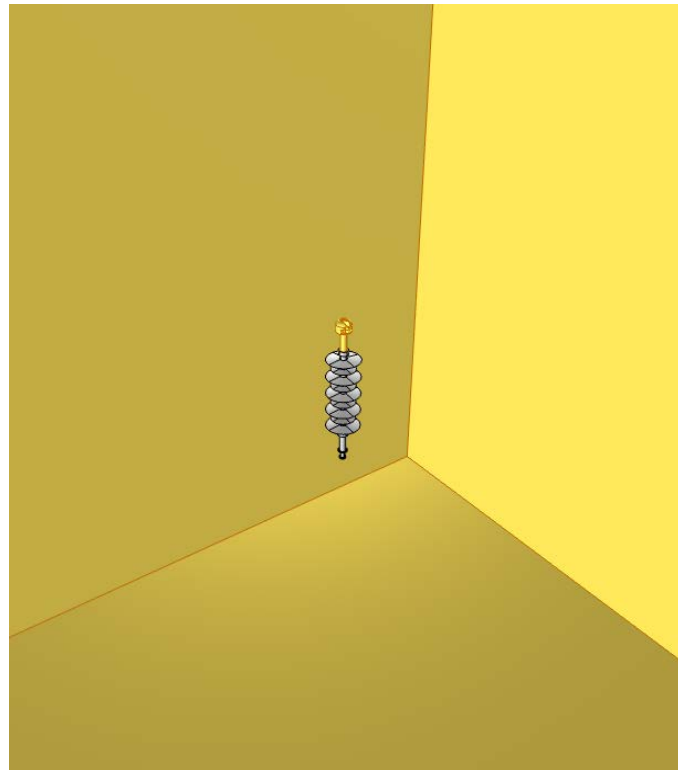
**Σχήμα 3-14 : Τοποθέτηση υλικού στον εξωτερικό κύβο από το μονωτήρα γραμμής**

### **3.3.3 Οριακές Συνθήκες**

Στη συνέχεια, ακολούθησε η εφαρμογή της μέση τάσης στο ένα άκρο του μονωτήρα, καθώς και η τοποθέτηση γείωσης στο άλλο άκρο του και στην επιφάνεια του εξωτερικού κύβου, αφού ο κύβος αντιπροσωπεύει το άπειρο με δυναμικό μηδέν (Σχήμα 3-15). Ομοίως συνέβη και για το μονωτήρα γραμμής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-16.

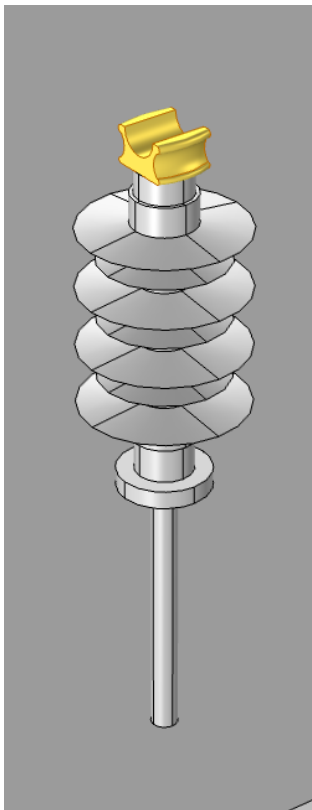


(i)

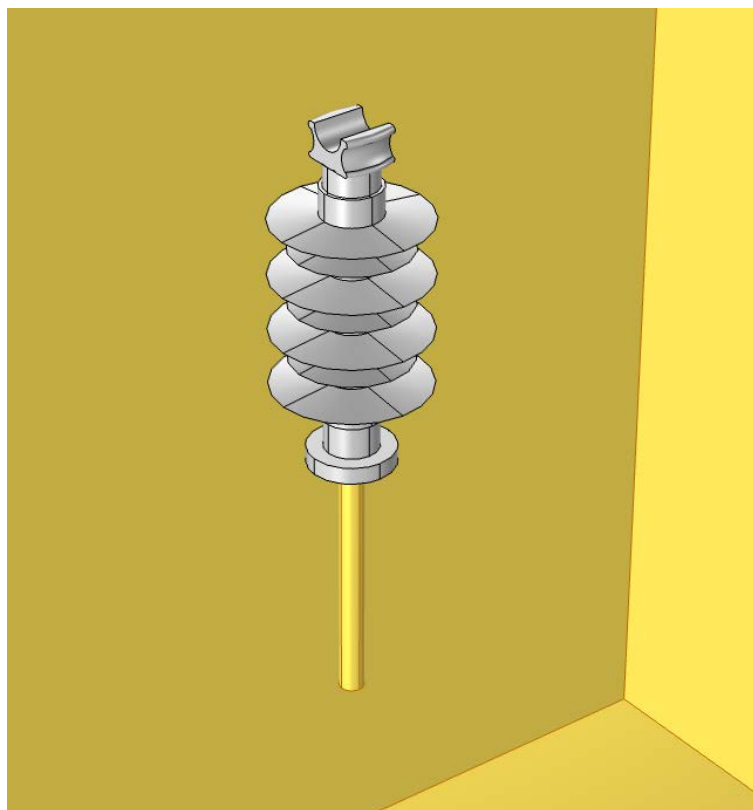


(ii)

**Σχήμα 3-15 : Εφαρμογή (i) τάσης και (ii) γείωσης στο μονωτήρα ανάρτησης**



(i)

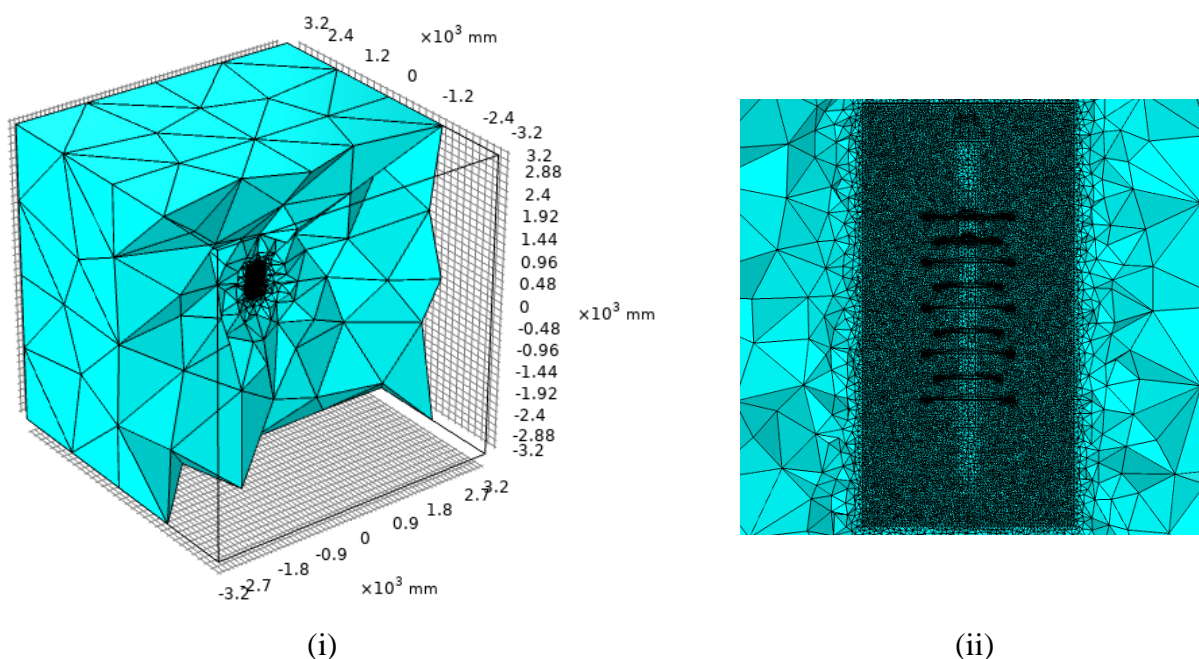


(ii)

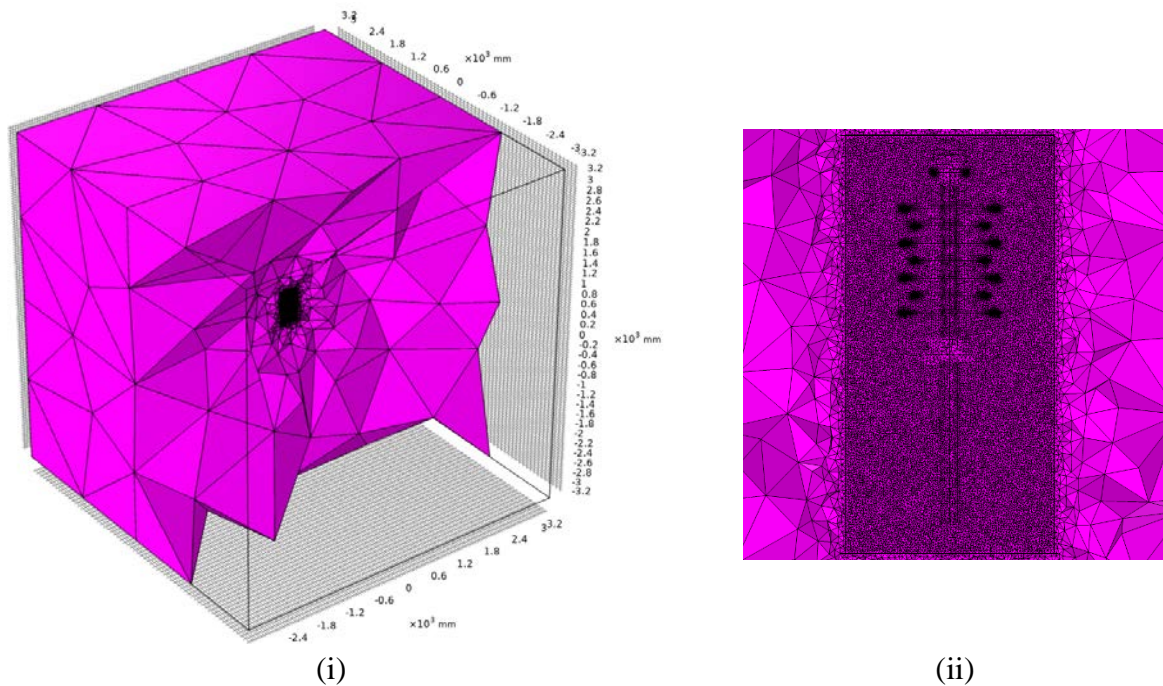
**Σχήμα 3-16 : Εφαρμογή (i) τάσης και (ii) γείωσης στο μονωτήρα γραμμής**

### 3.3.4 Πλέγμα

Ένα ακόμα βήμα για την ολοκλήρωση των προεργασιών των μετρήσεων αποτέλεσε η δημιουργία πλέγματος. Γενικότερα το πλέγμα που χρησιμοποιείται σε κάθε μοντέλο έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στον τρόπο επίλυσης, διότι αυτό ορίζει πως θα διαιρεθεί η γεωμετρία και με τι σχήμα, καθώς και το μέγεθος, την πυκνότητα και τον αριθμό των στοιχείων της γεωμετρίας. Κατόπιν, από τα στοιχεία αυτά εξαρτώνται ο χρόνος για την επίλυση του μοντέλου, ο όγκος μνήμης για τον υπολογισμό του προβλήματος, ο τρόπος παρεμβολής της λύσης μεταξύ των κόμβων και η ακρίβεια της λύσης [47]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η γεωμετρία διαιρέθηκε σε τετράεδρα στοιχεία, τα οποία είχαν μικρότερο μέγεθος στο μονωτήρα, όπου μας ενδιαφέρει η ύπαρξη μεγαλύτερης ακρίβειας και μεγαλύτερου μεγέθους εκτός του μονωτήρα. Για να γίνει πυκνότερη και η περιοχή κοντά στο μονωτήρα, χρησιμοποιήθηκε ένας ακόμα κύβος με διαστάσεις 300x300x600mm και με υλικό τον αέρα γύρω από το μονωτήρα και στα δύο μοντέλα. Αυτή η μεταβολή πυκνότητας του πλέγματος που επετεύχθη με τον επιπλέον κύβο, γίνεται ξεκάθαρα στα σχήματα Σχήμα 3-17 και Σχήμα 3-18.



Σχήμα 3-17 : (i) Πλέγμα Γεωμετρίας (ii) Πλέγμα κοντά στο μονωτήρα ανάρτησης



**Σχήμα 3-18 : (i) Πλέγμα Γεωμετρίας (ii) Πλέγμα κοντά στο μονωτήρα γραμμής**

### 3.3.5 Μελέτη

Τέλος, σειρά είχε η επιλογή του επιλύτη, ο οποίος λεγόταν “Electric Current”. Πρόκειται για μια διεπαφή ηλεκτρικών ρευμάτων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κατανομών ηλεκτρικού πεδίου, ρεύματος και δυναμικού σε αγωγία μέσα υπό συνθήκες όπου τα επαγωγικά φαινόμενα είναι αμελητέα. Η μελέτη του μοντέλου λεγόταν “Stationary”, δηλαδή χρησιμοποιούσε το γεγονός ότι οι μεταβλητές πεδίου δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Με αυτό ως τελευταίο βήμα προχωρήσαμε στη διεξαγωγή της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της οποίας θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 4. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε υπολογιστή με επεξεργαστή 24 πυρήνων χρονισμένοι στα 4,20 GHz και μνήμη 32 GB. Ο χρόνος των προσομοιώσεων κυμάνθηκε από 2 έως 6 λεπτά ανάλογα με τη γεωμετρία που είχε το κάθε μοντέλο.

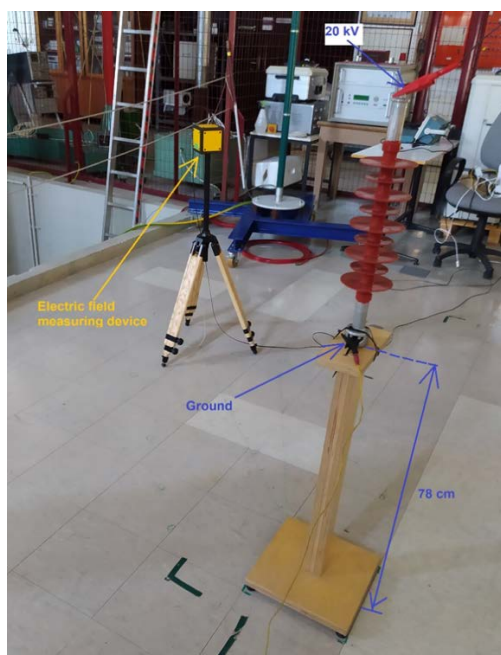


# 4

## Προσομοιώσεις και Αποτελέσματα

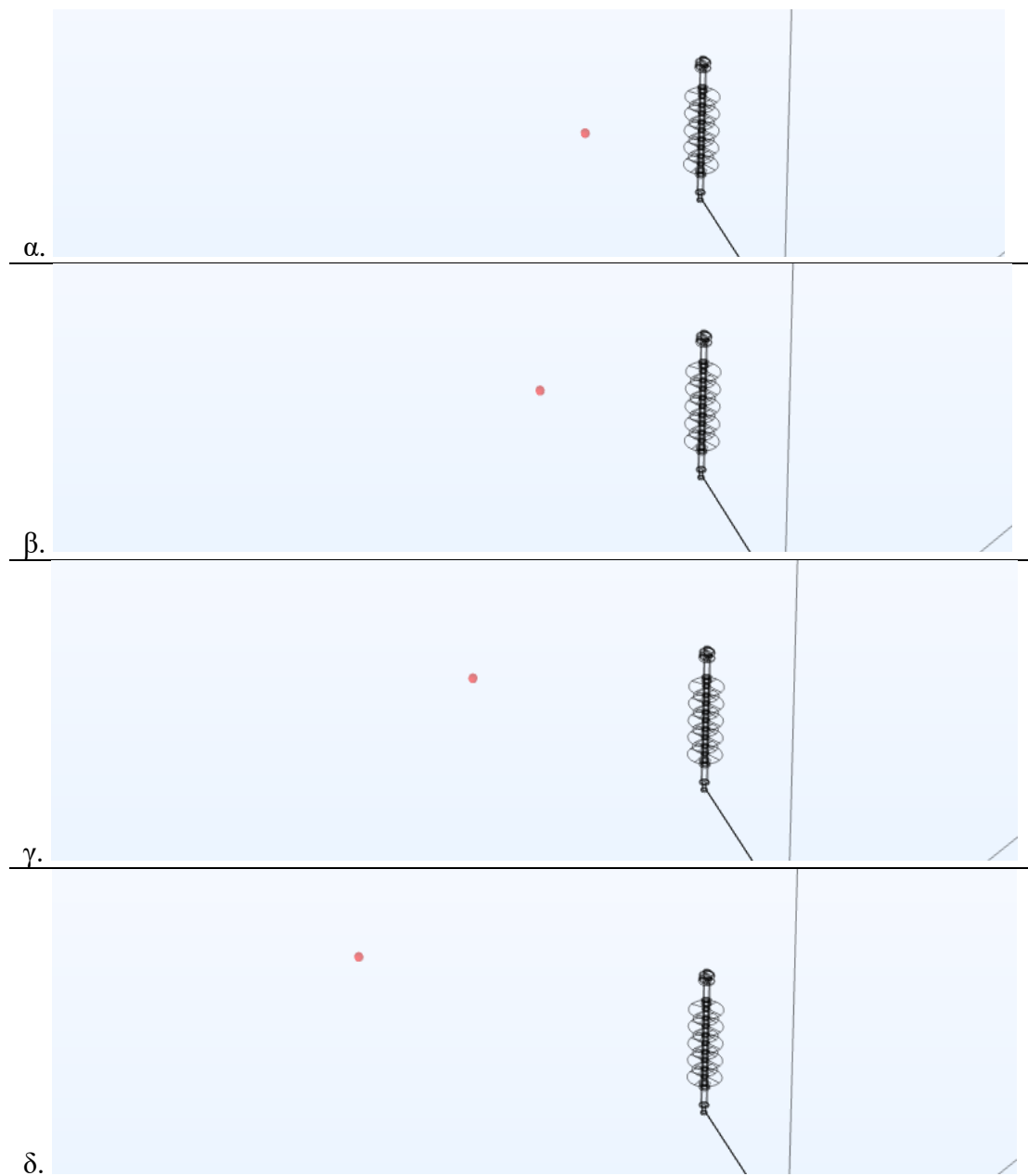
### 4.1 Σύγκριση προσομοιώσεων με εργαστηριακές μετρήσεις

Προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία του προγράμματος του Comsol, διεξήχθησαν μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων της σχολής ΗΜΜΥ, οι οποίες συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ειδικότερα οι εργαστηριακές μετρήσεις αφορούσαν τον μονωτήρα ανάρτησης, ενώ η εφαρμοζόμενη τάση ήταν 20kV. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-1, οι μετρήσεις ελήφθησαν από τη συσκευή μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου (electric field measuring device), η οποία τοποθετήθηκε σε ύψος 250, 350 και 460 mm από το γειωμένο άκρο του μονωτήρα, και σε απόσταση 500,700,1000 και 1500 mm από αυτόν (για κάθε ένα από τα τρία ύψη). Τα αντίστοιχα σημεία μετρήθηκαν και στην προσομοίωση, μερικά εκ των οποίων φαίνονται ενδεικτικά στο Σχήμα 4-2. Ο κύβος γύρω από το μονωτήρα είχε ως διαστάσεις τιμές παρόμοιες με το χώρο του εργαστηρίου (δηλαδή 5.326mm ύψος, 8.013mm πλάτος και 4.500mm μήκος), η τάση που εφαρμόστηκε ήταν 20kV (πολική) ενώ το καλώδιο της τάσης ήταν 3m. Ολόκληρη η γεωμετρία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-3 .

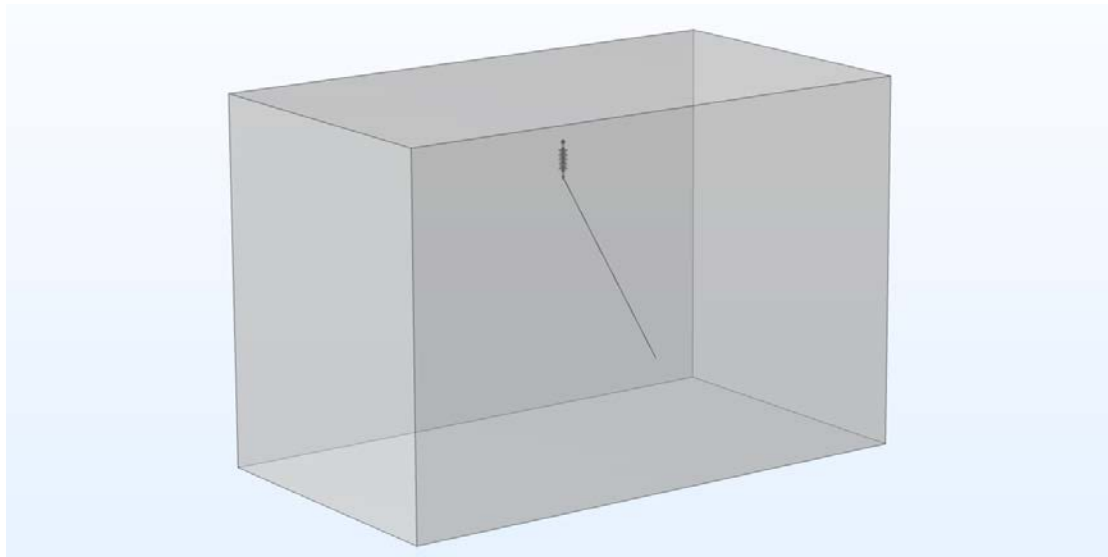


Σχήμα 4-1 : Διάταξη Εργαστηρίου





**Σχήμα 4-2 : Σημεία μετρήσεων ύψους 460mm από το γειωμένο μέρος του μονωτήρα και απόστασης α.500, β.700, γ.1000 και δ.1500 mm από αυτόν**

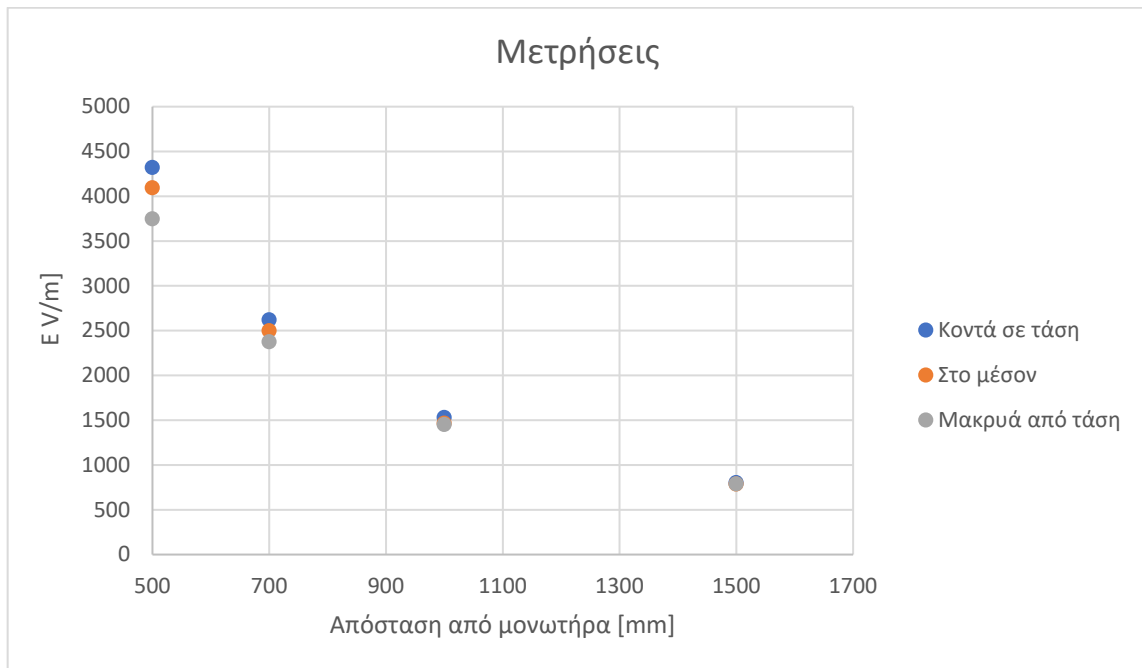


**Σχήμα 4-3 : Γεωμετρία προσομοίωσης Μετρήσεων Εργαστηρίου**

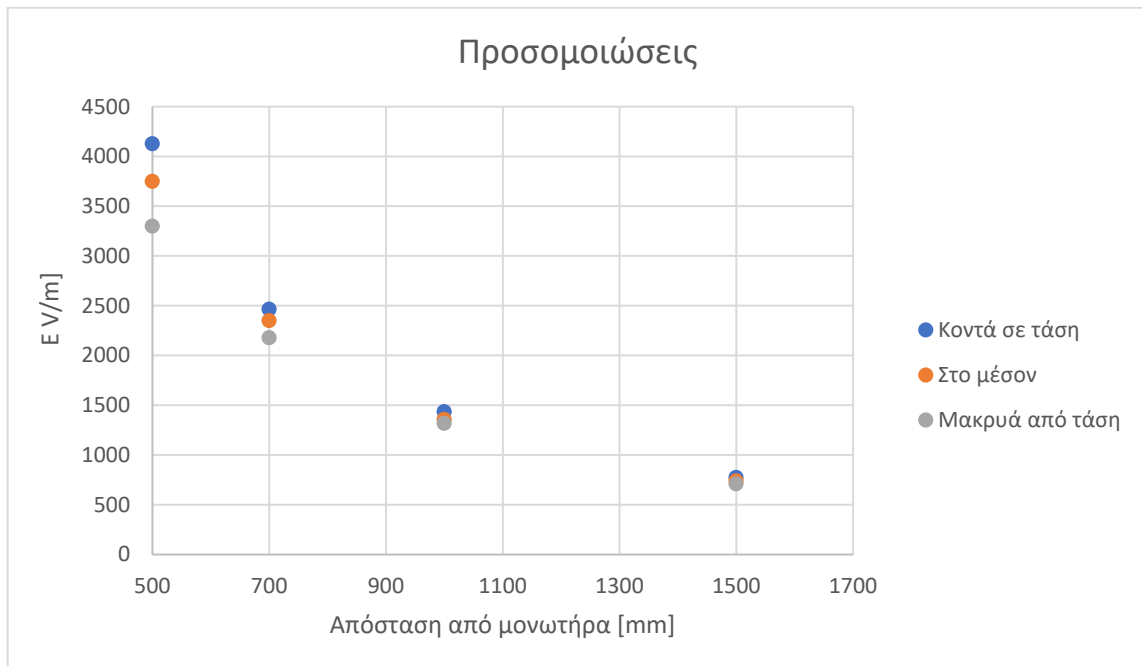
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του εργαστηρίου και των αντίστοιχων προσομοιώσεων παρατίθενται στον Πίνακα 4-1.

Ύψος από το έδαφος [mm]	Ύψος από το γειωμένο άκρο [mm]	Απόσταση από το μονωτήρα [mm]	E (Μέτρηση) [V/m]	E' (Προσομοίωση) [V/m]	Σφάλμα [%]
1240	460	500	4320,0	4126,6	-4,5
		700	2619,0	2464,2	-5,9
		1000	1529,0	1435,5	-6,1
		1500	802,6	773,8	-3,6
1130	350	500	4093,0	3749,1	-8,4
		700	2498,0	2350,6	-5,9
		1000	1465,0	1356,7	-7,4
		1500	785,9	739,5	-5,9
1030	250	500	3747,0	3299,6	-11,9
		700	2374,0	2178,3	-8,2
		1000	1450,0	1317,7	-9,1
		1500	788,5	709,7	-10,0

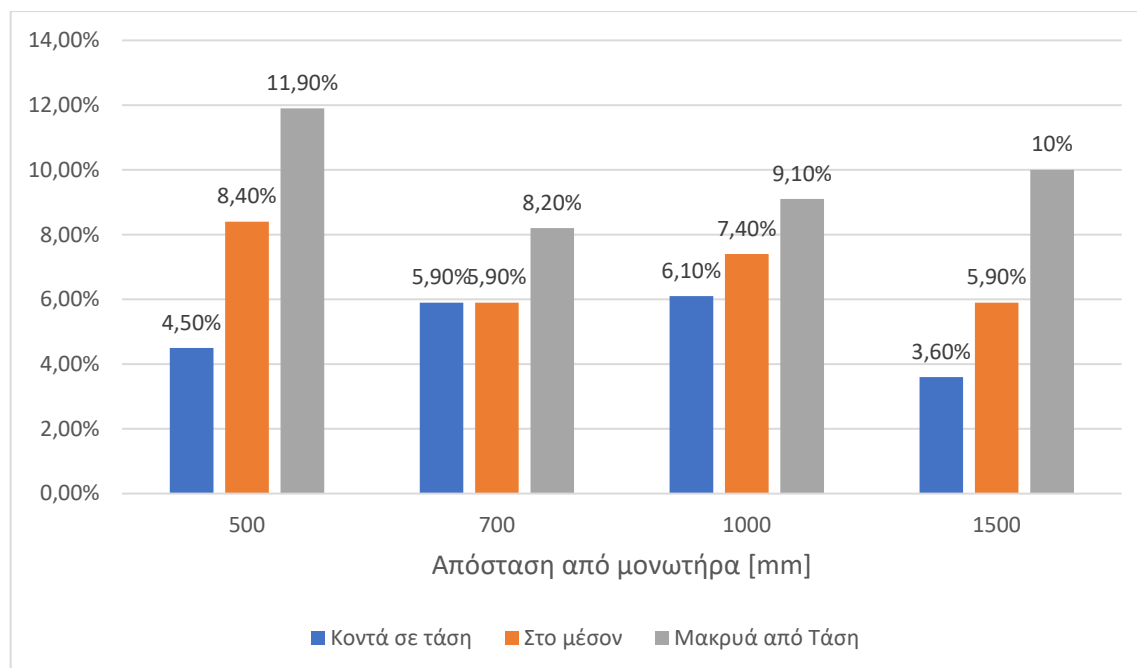
**Πίνακας 4-1 : Σύγκριση μετρήσεων και προσομοιώσεων**



**Σχήμα 4-4 : Μέτρηση έντασης συναρτήσει της απόστασης από το μονωτήρα**



**Σχήμα 4-5 : Προσομοίωση έντασης συναρτήσει της απόστασης από το μονωτήρα**



**Σχήμα 4-6 : Σφάλμα προσομοιώσεων - μετρήσεων**

Στα σχήματα Σχήμα 4-4 και Σχήμα 4-5, παρουσιάζεται η μορφή που ακολουθούν οι καμπύλες, κατά τις πραγματικές μετρήσεις και κατά τις προσομοιώσεις, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 4-1. Παρατηρούμε πως οι τιμές των προσομοιώσεων είναι κοντά σε αυτές των μετρήσεων, με το μεγαλύτερο σφάλμα να έχει την τιμή 11,9% όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6. Επιπλέον από το σχήμα αυτό, παρατηρούμε πως οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες όταν αναφερόμαστε στις τιμές της έντασης κοντά στην εφαρμοζόμενη τάση, από αυτές κοντά στη γείωση. Οι αποκλίσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στις συνθήκες του εργαστηρίου, όπως τα αντικείμενα που επηρέασαν το χώρο των μετρήσεων κατά τη διεξαγωγή τους, καθώς και η τοποθέτηση της γείωσης και του καλωδίου τάσης.

## 4.2 Επιλογή διάστασης εξωτερικού κύβου

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, για την εκτέλεση των προσομοιώσεων ήταν απαραίτητη η προσθήκη εξωτερικού κύβου, για την αναπαράσταση του χώρου γύρω από τους μονωτήρες. Για την επιλογή των διαστάσεων του κύβου, Έγινε χρήση του μονωτήρα ανάρτησης, του οποίου το ένα άκρο επιλέχθηκε ως κέντρο του κύβου. Η μεγαλύτερη πλευρά του συγκεκριμένου μονωτήρα είχε μήκος 541mm. Επομένως η πλευρά του κάθε κύβου είχε την εξής τιμή :

- ♦ 1<sup>ος</sup> Κύβος:  $2 \cdot (541 + 3 \cdot 541) = 4.328 \text{ mm}$
- ♦ 2<sup>ος</sup> Κύβος:  $2 \cdot (541 + 4 \cdot 541) = 5.410 \text{ mm}$
- ♦ 3<sup>ος</sup> Κύβος:  $2 \cdot (541 + 5 \cdot 541) = 6.492 \text{ mm}$
- ♦ 4<sup>ος</sup> Κύβος:  $2 \cdot (541 + 6 \cdot 541) = 7.574 \text{ mm}$
- ♦ 5<sup>ος</sup> Κύβος:  $2 \cdot (541 + 7 \cdot 541) = 8.656 \text{ mm}$

♦ 6<sup>ος</sup> Κύβος:  $2*(541 + 8*541) = 9.738 \text{ mm}$

Αφού έγιναν οι προσομοιώσεις με τους παραπάνω κύβους, συλλέχθηκαν κάποιες τιμές έντασης πεδίου σε κάποια σημεία του χώρου (ίδια για κάθε προσομοίωση), οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2 . Η επιλογή του κύβου βασίστηκε στο γεγονός πως δε θα έπρεπε να επηρεάζονται οι τιμές του πεδίου από το μηδενικό δυναμικό στην επιφάνειά του. Για να επιτευχθεί αυτό, για κάθε κύβο υπολογίστηκε η διαφορά των τιμών έντασης από αυτές του προηγούμενου κύβου ( $E_{τελ} - E_{αρχ} [V/m]$ ), μέχρι το αποτέλεσμα να είναι μικρότερο του 1% της αρχικής τιμής. Δηλαδή έπρεπε να ικανοποιείται η συνθήκη Εξίσωση 4-1:

$$E_{τελ} - E_{αρχ} < 1\% E_{αρχ}$$

$$\frac{E_{τελ} - E_{αρχ}}{E_{αρχ}} < 1\%$$

#### Εξίσωση 4-1 : Ικανή Συνθήκη

1 <sup>ος</sup> Κύβος: E[V/m]	2 <sup>ος</sup> Κύβος: E[V/m]	3 <sup>ος</sup> Κύβος: E[V/m]	4 <sup>ος</sup> Κύβος: E[V/m]	5 <sup>ος</sup> Κύβος: E[V/m]	6 <sup>ος</sup> Κύβος: E[V/m]	Σφάλμα 1 <sup>ου</sup> -2 <sup>ου</sup> [%]	Σφάλμα 2 <sup>ου</sup> -3 <sup>ου</sup> [%]	Σφάλμα 3 <sup>ου</sup> -4 <sup>ου</sup> [%]	Σφάλμα 4 <sup>ου</sup> -5 <sup>ου</sup> [%]	Σφάλμα 5 <sup>ου</sup> -6 <sup>ου</sup> [%]
2092,75	2125,80	2147,78	2163,13	2174,94	2183,70	1,58	1,03	0,71	0,55	0,40
2084,11	2117,13	2139,11	2154,44	2166,24	2175,00	1,58	1,04	0,72	0,55	0,40
2044,26	2077,18	2099,08	2114,37	2126,13	2134,86	1,61	1,05	0,73	0,56	0,41
2024,96	2057,82	2079,69	2094,96	2106,70	2115,41	1,62	1,06	0,73	0,56	0,41
2019,33	2052,18	2074,04	2089,30	2101,03	2109,74	1,63	1,07	0,74	0,56	0,41
2000,86	2033,65	2055,47	2070,71	2082,42	2091,12	1,64	1,07	0,74	0,57	0,42
1955,70	1988,34	2010,07	2025,23	2036,90	2045,56	1,67	1,09	0,75	0,58	0,43
1949,84	1982,47	2004,18	2019,33	2030,99	2039,64	1,67	1,10	0,76	0,58	0,43
1933,93	1966,50	1988,17	2003,29	2014,93	2023,57	1,68	1,10	0,76	0,58	0,43
1929,89	1962,44	1984,11	1999,22	2010,86	2019,49	1,69	1,10	0,76	0,58	0,43
1909,55	1942,03	1963,64	1978,72	1990,33	1998,95	1,70	1,11	0,77	0,59	0,43
1907,11	1939,58	1961,18	1976,26	1987,87	1996,48	1,70	1,11	0,77	0,59	0,43
1876,05	1908,40	1929,92	1944,94	1956,50	1965,09	1,72	1,13	0,78	0,59	0,44
1859,68	1891,96	1913,44	1928,43	1939,96	1948,53	1,74	1,14	0,78	0,60	0,44
1849,15	1881,38	1902,83	1917,79	1929,31	1937,87	1,74	1,14	0,79	0,60	0,44
1839,36	1871,55	1892,97	1907,91	1919,41	1927,96	1,75	1,14	0,79	0,60	0,45
1831,87	1864,02	1885,42	1900,34	1911,84	1920,37	1,76	1,15	0,79	0,60	0,45
1829,83	1861,98	1883,37	1898,29	1909,78	1918,31	1,76	1,15	0,79	0,61	0,45
1813,21	1845,28	1866,62	1881,50	1892,96	1901,47	1,77	1,16	0,80	0,61	0,45
1801,25	1833,26	1854,56	1869,42	1880,86	1889,35	1,78	1,16	0,80	0,61	0,45
1799,41	1831,41	1852,70	1867,56	1879,00	1887,49	1,78	1,16	0,80	0,61	0,45
1794,82	1826,80	1848,08	1862,92	1874,35	1882,84	1,78	1,16	0,80	0,61	0,45
1755,63	1787,40	1808,54	1823,29	1834,65	1843,08	1,81	1,18	0,82	0,62	0,46

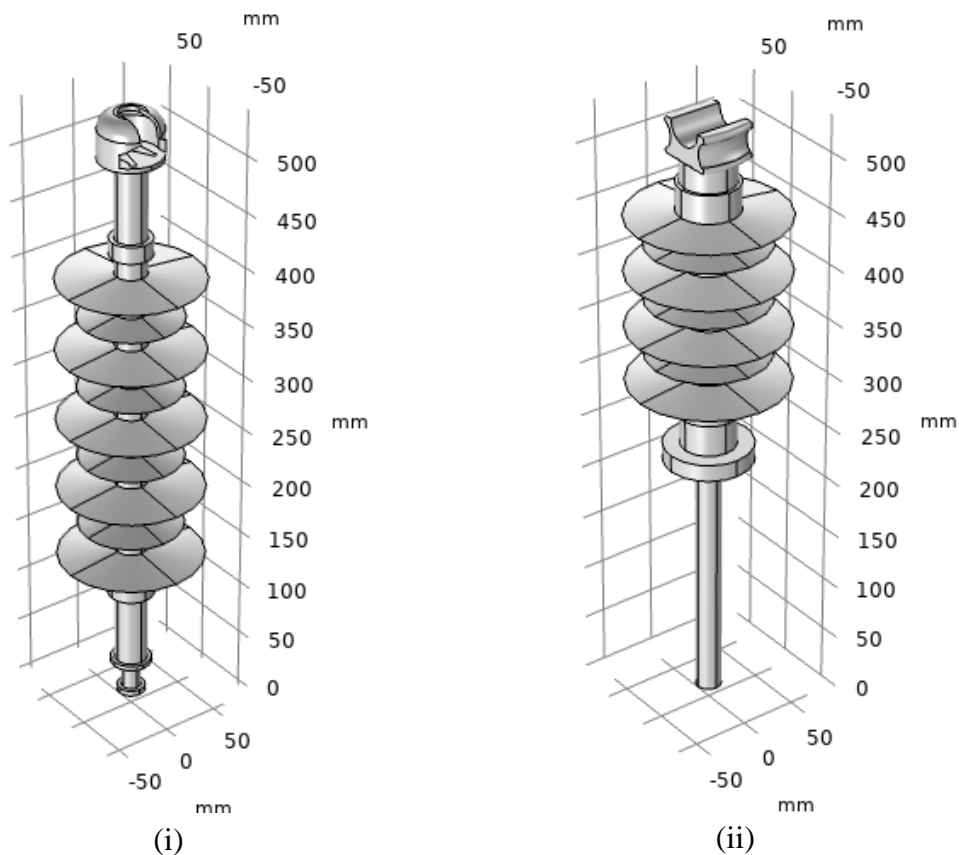
1741,02	1772,72	1793,80	1808,51	1819,84	1828,26	1,82	1,19	0,82	0,63	0,46
1738,42	1770,10	1791,18	1805,88	1817,20	1825,61	1,82	1,19	0,82	0,63	0,46
1734,18	1765,83	1786,89	1801,59	1812,90	1821,30	1,83	1,19	0,82	0,63	0,46
1716,30	1747,85	1768,85	1783,49	1794,77	1803,14	1,84	1,20	0,83	0,63	0,47
1692,02	1723,43	1744,32	1758,89	1770,12	1778,46	1,86	1,21	0,84	0,64	0,47
1682,62	1713,96	1734,82	1749,36	1760,57	1768,89	1,86	1,22	0,84	0,64	0,47

**Πίνακας 4-2 : Σύγκριση τιμών έντασης πεδίου για 6 κύβους**

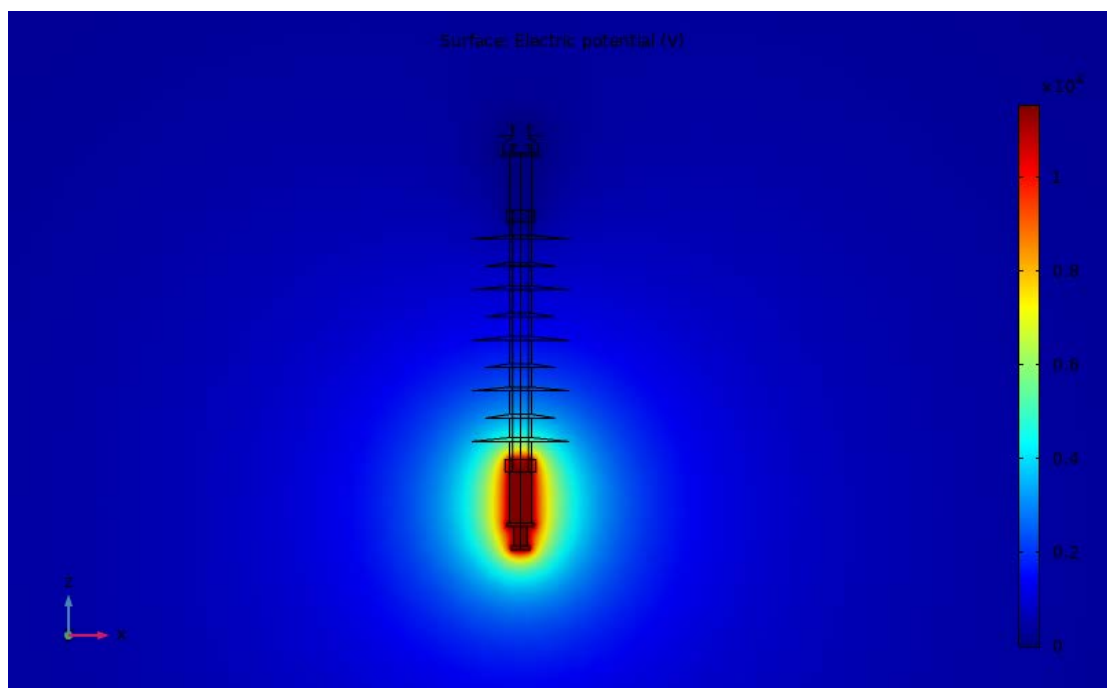
Από τον Πίνακα 4-2, γίνεται εμφανές πως από τον 3<sup>ο</sup> κύβο και μετά, οι τιμές αλλάζουν λιγότερο από 1 %, γεγονός που καθιστά τον κύβο με πλευρά 6.492 mm κατάλληλο για τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια.

### 4.3 Προσομοίωση πεδίου μονωτήρων

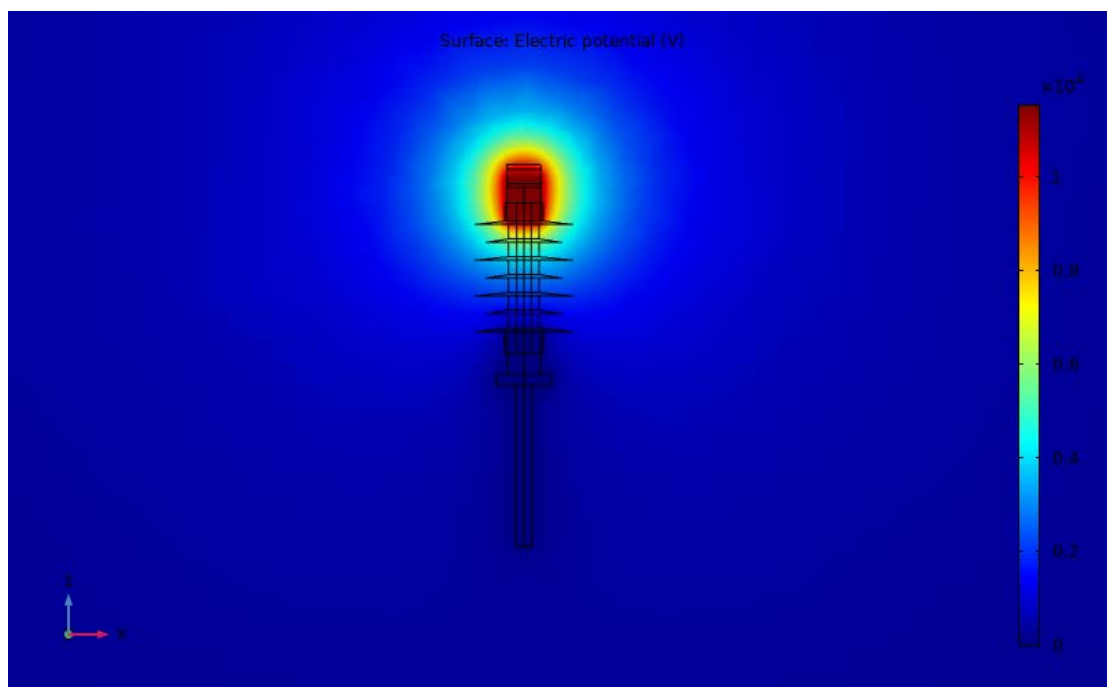
Αφού επιλέξαμε τις διαστάσεις του εξωτερικού κύβου, ακολούθησε προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον κάθε μονωτήρα όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-7 . Για πιο σωστή προσομοίωση της πραγματικότητας, η μέση τάση που χρησιμοποιήθηκε είχε την τιμή της φασικής τάσης, δηλαδή  $20\text{kV} * \sqrt{3} = 11,55\text{kV}$ . Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζεται στα σχήματα Σχήμα 4-8 και Σχήμα 4-9, για του μονωτήρες ανάρτησης και γραμμής αντίστοιχα.



**Σχήμα 4-7 : Προσομοίωση Μονωτήρα (i) Ανάρτησης , (ii) Γραμμής**



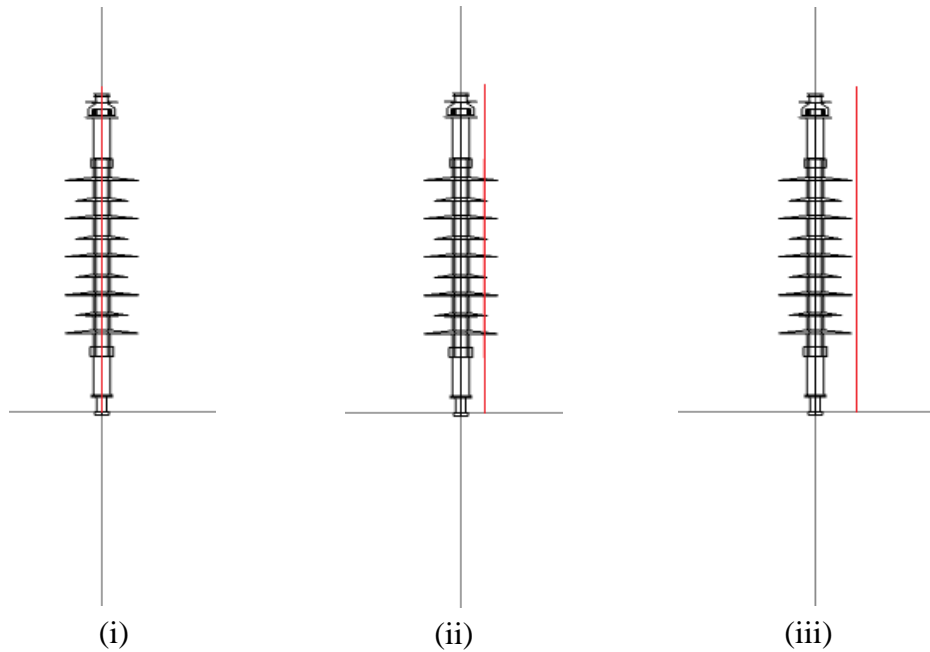
**Σχήμα 4-8 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης**



**Σχήμα 4-9 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής**

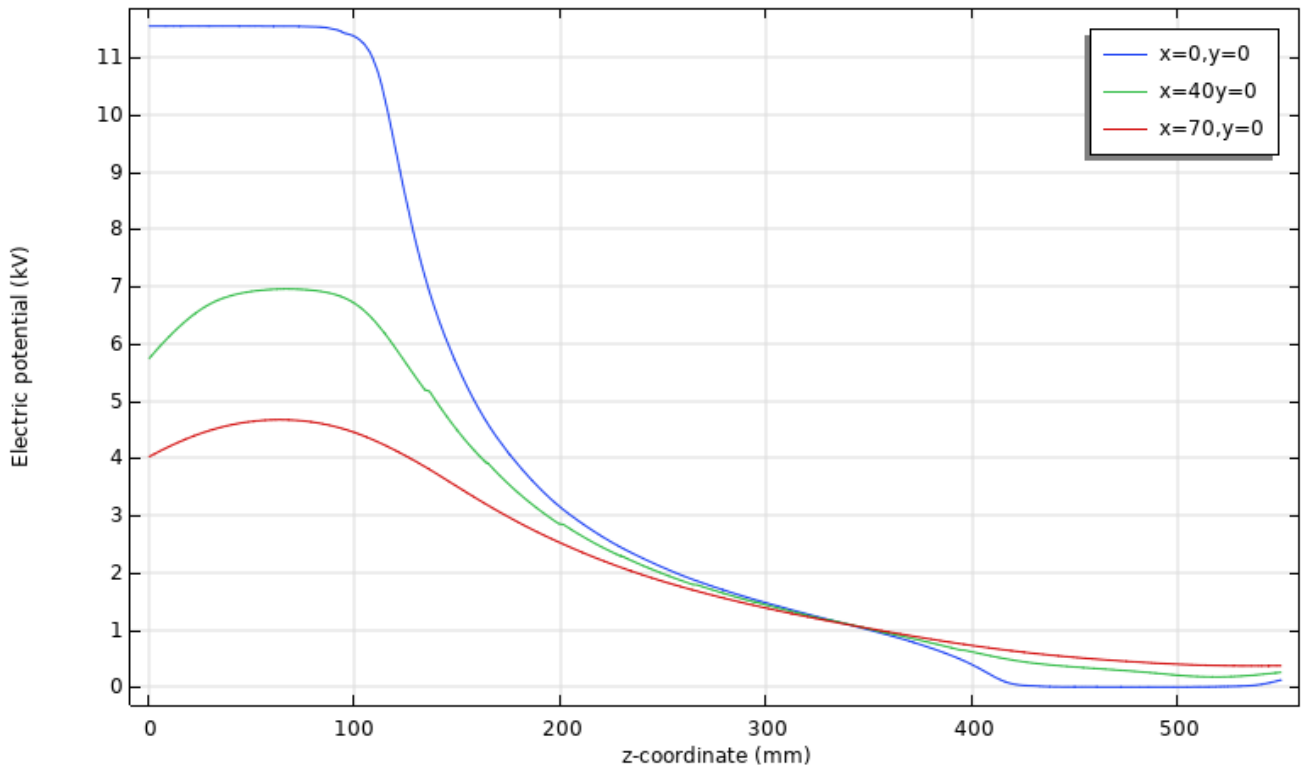
Για τη βαθύτερη κατανόηση του ηλεκτρικού πεδίου, προσομοιώθηκε η ηλεκτρική τάση και η ένταση του πεδίου κατά μήκος του άξονα z μέσα στο μονωτήρα ανάρτησης, στα

κυάθια και εκτός του μονωτήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-10. Σε αντίστοιχες γραμμές υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις η ηλεκτρική τάση και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο μονωτήρα γραμμής (Σχήμα 4-13). Η γραφική παράσταση της κατανομής δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των τριών αυτών γραμμών εμφανίζεται στα σχήματα 4-11, 4-12 και 4-14,4-15 για τους δύο μονωτήρες.

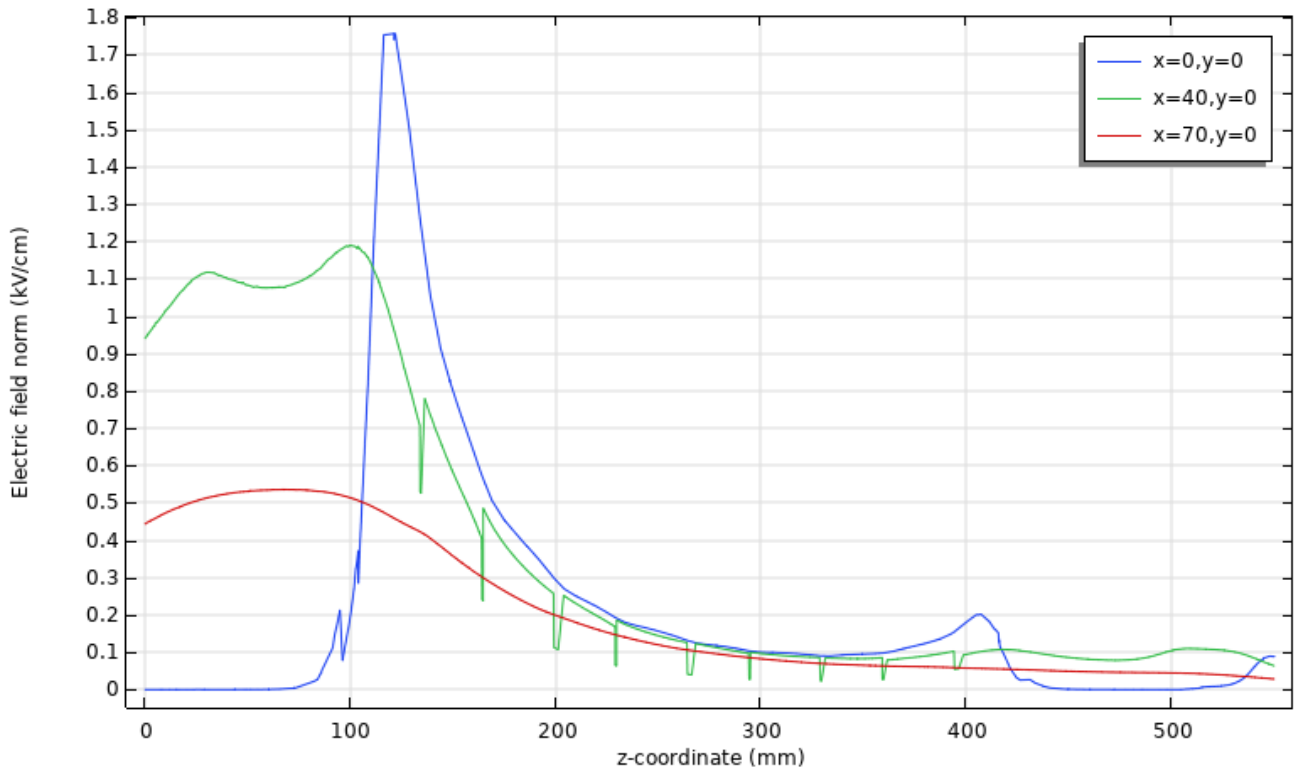


**Σχήμα 4-10 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Ανάρτησης (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=70, y=0$**

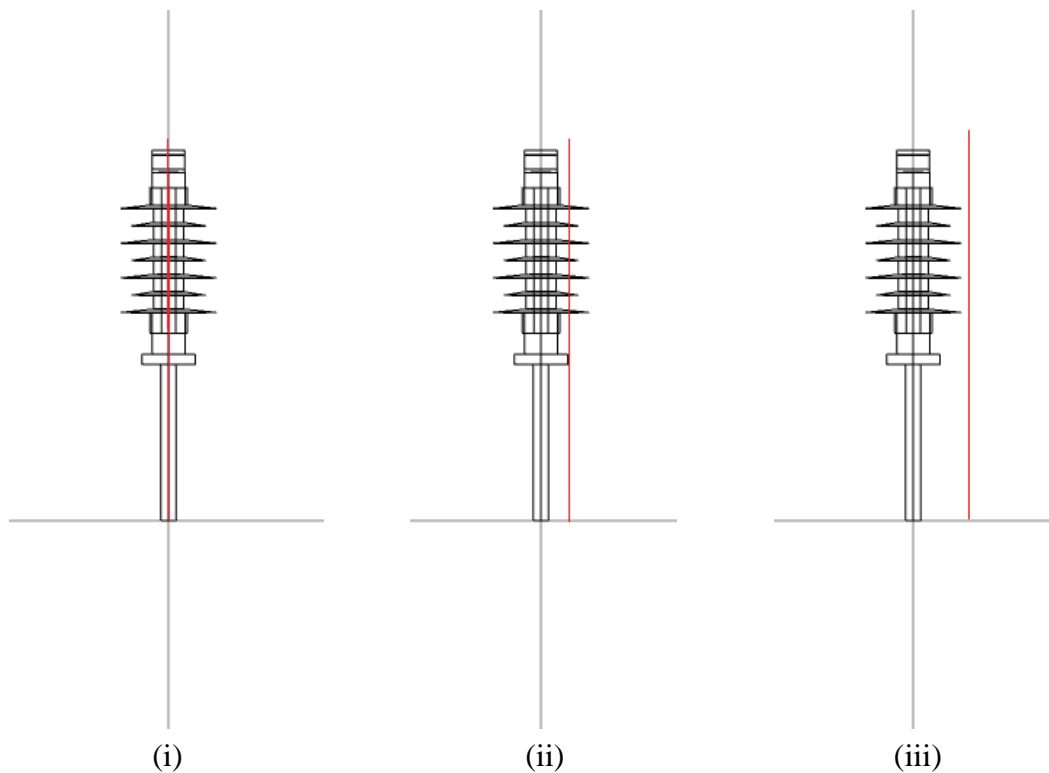




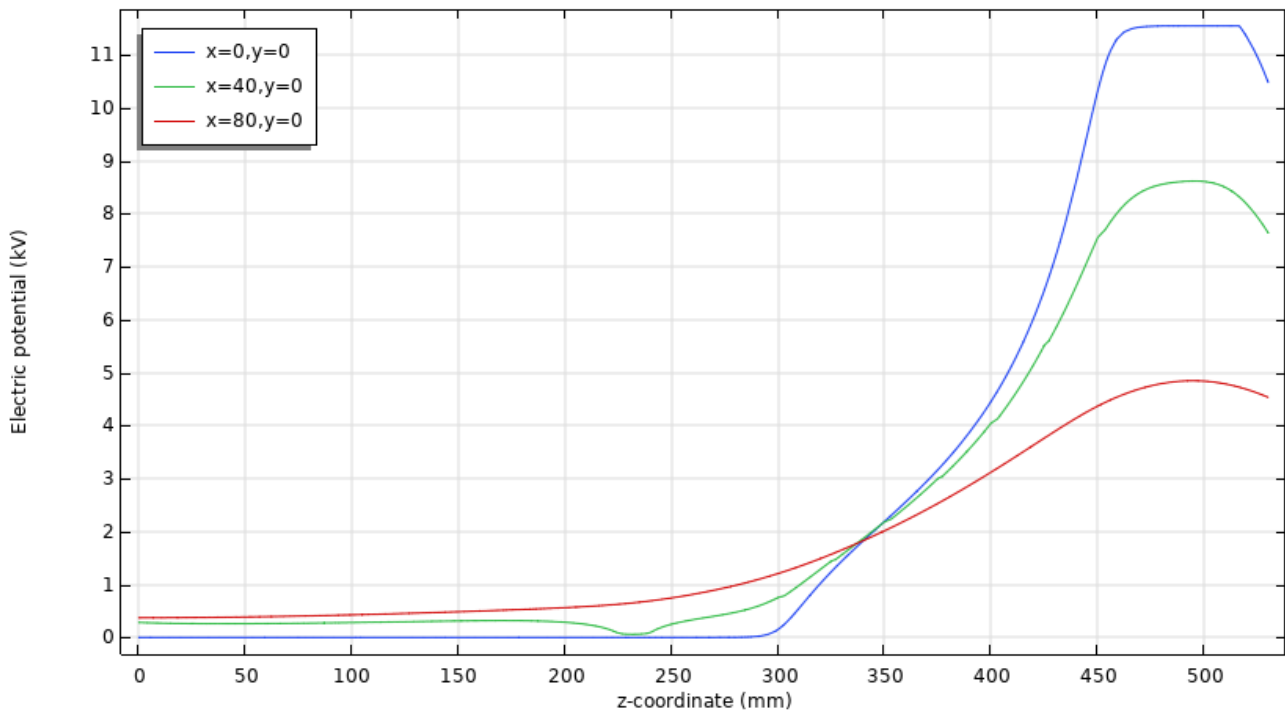
Σχήμα 4-11 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Κατά Μήκος Άξονα z



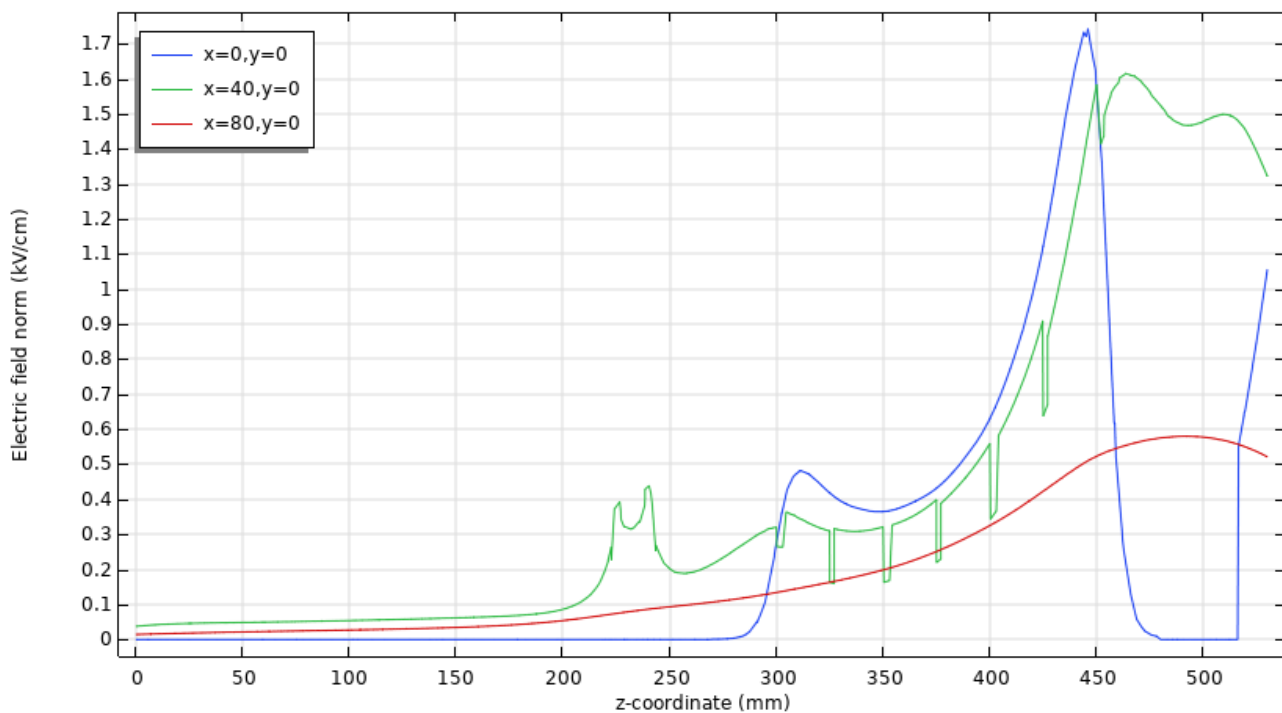
Σχήμα 4-12 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης Κατά Μήκος Άξονα z



**Σχήμα 4-13 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Γραμμής (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=80, y=0$**



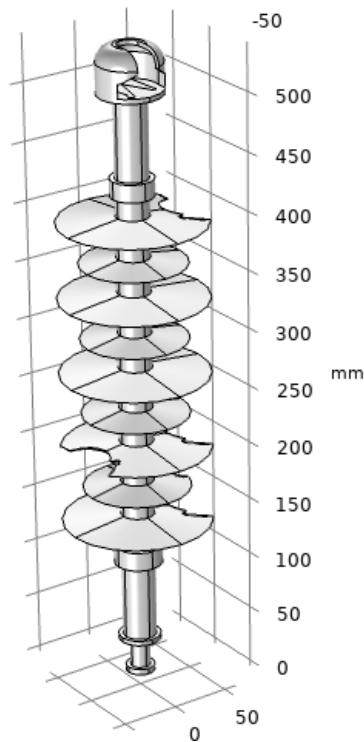
**Σχήμα 4-14 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Κατά Μήκος Άξονα z**



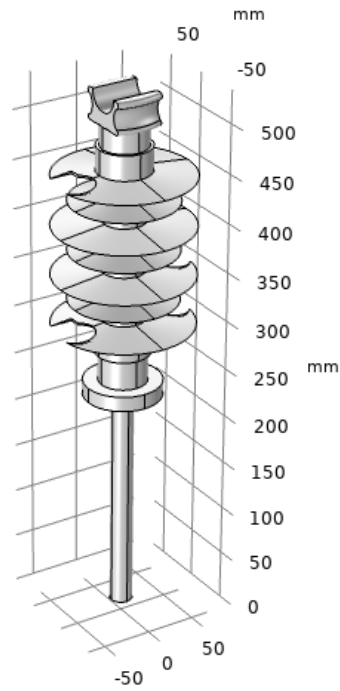
**Σχήμα 4-15 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής Κατά Μήκος Άξονα z**

#### 4.4 Προσομοίωση πεδίου μονωτήρων με κομμένα κιάθια

Ένας εξωτερικός παράγοντας που λήφθηκε υπόψιν για την επόμενη προσομοίωση, ήταν το σχίσσιμο των κυαθίων του μονωτήρα από κάποιον ζωντανό οργανισμό (π.χ. πτηνό) ή από καταπόνηση, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.6.2. Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-16 για τον πρώτο μονωτήρα και στο Σχήμα 4-17 για το δεύτερο.

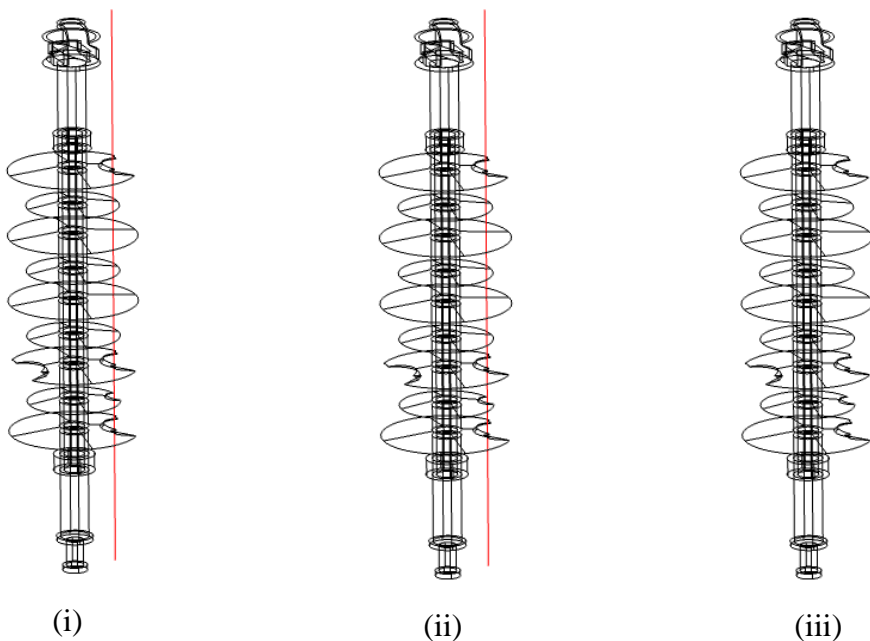


Σχήμα 4-16 : Γεωμετρία Κομμένου Μονωτήρα Ανάρτησης

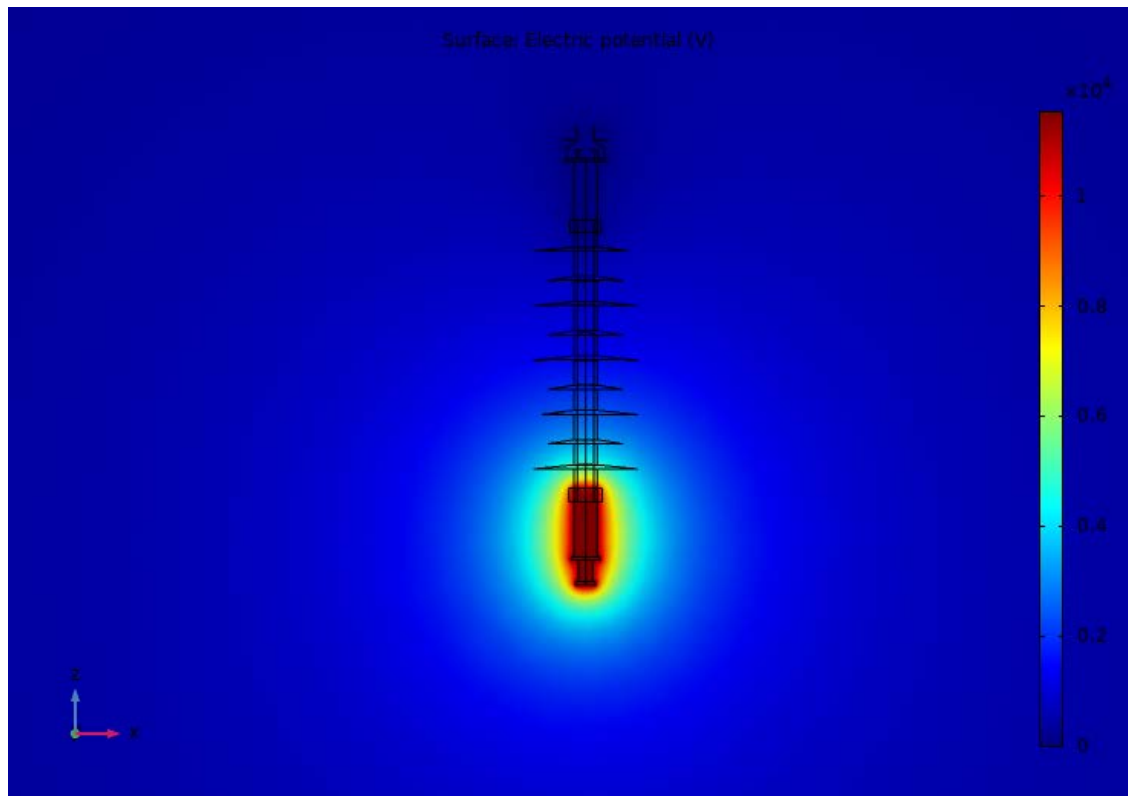


**Σχήμα 4-17 : Γεωμετρία Κομμένου Μονωτήρα Γραμμής**

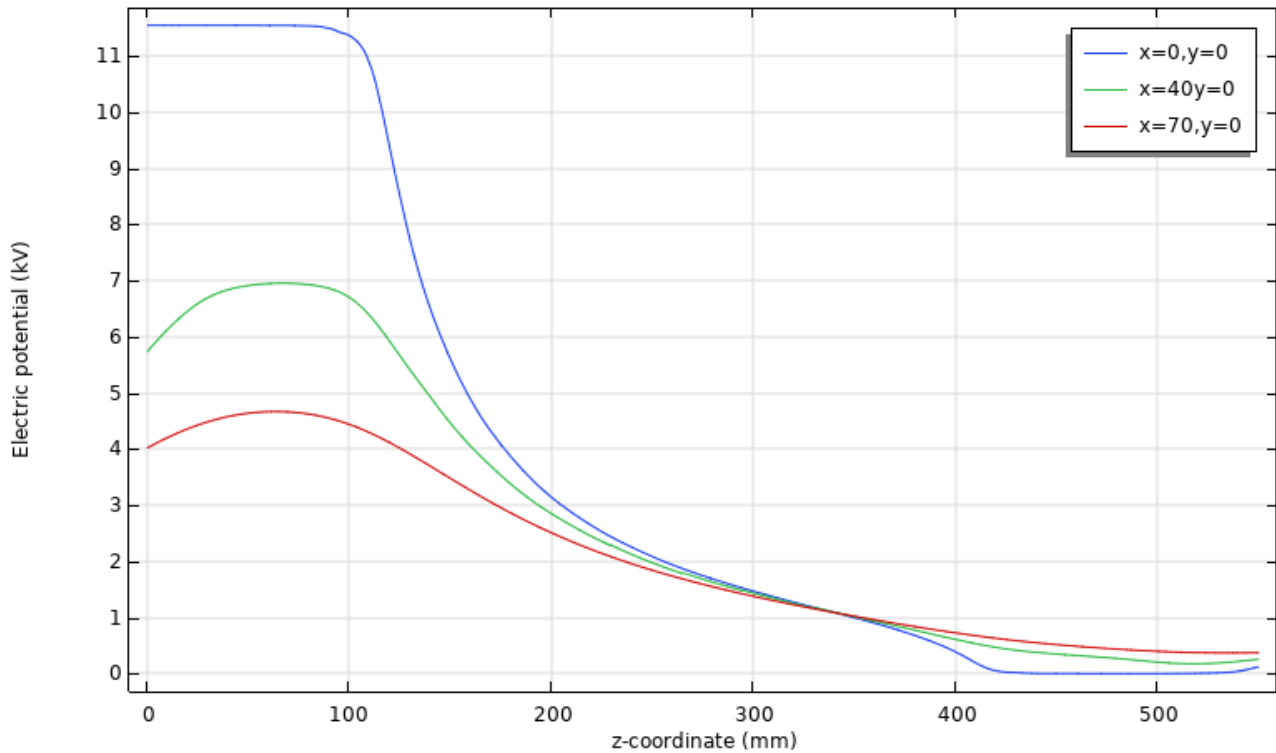
Οι γραμμές μέτρησης της ηλεκτρικής τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και τα αποτελέσματα αυτά για το μονωτήρα ανάρτησης παρουσιάζονται στα σχήματα 4-18 έως 4-21 για το μονωτήρα ανάρτησης και 4-22 έως 4-25 για το μονωτήρα γραμμής.



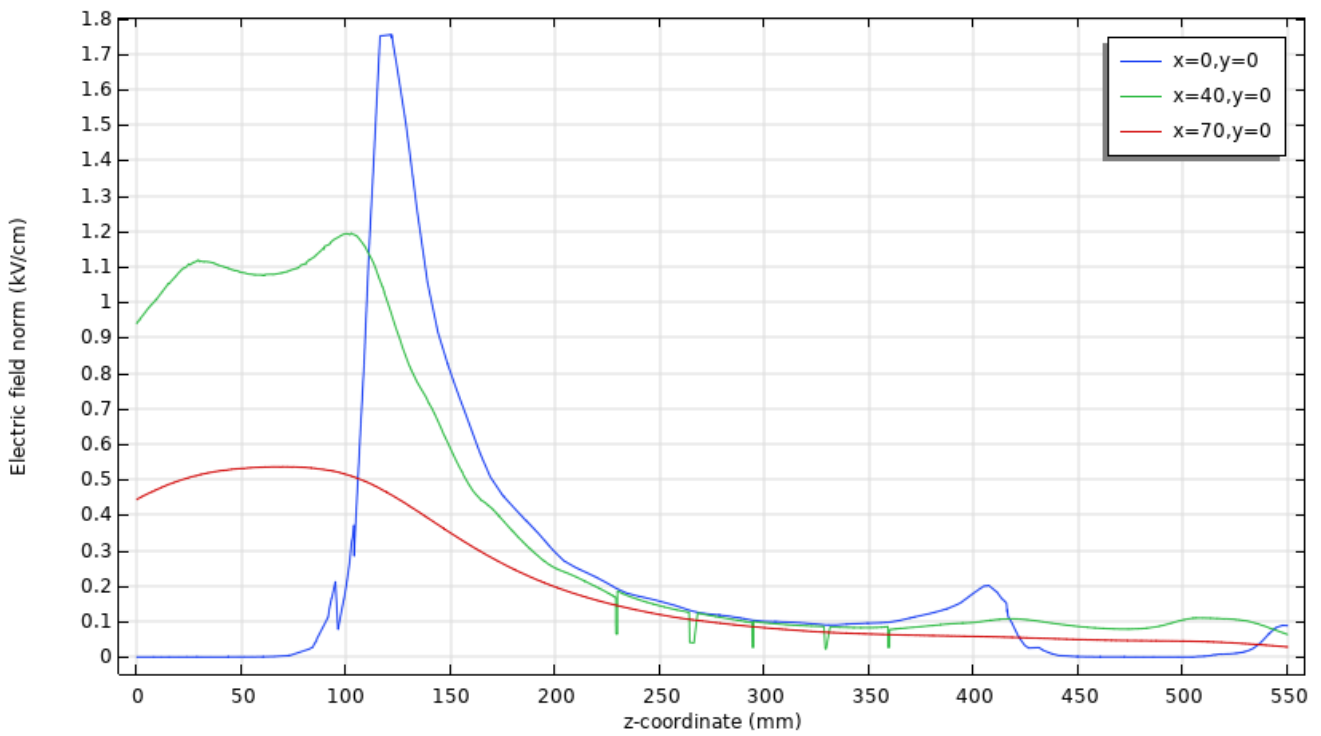
**Σχήμα 4-18 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Κομμένο Μονωτήρα Ανάρτησης (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=70, y=0$**



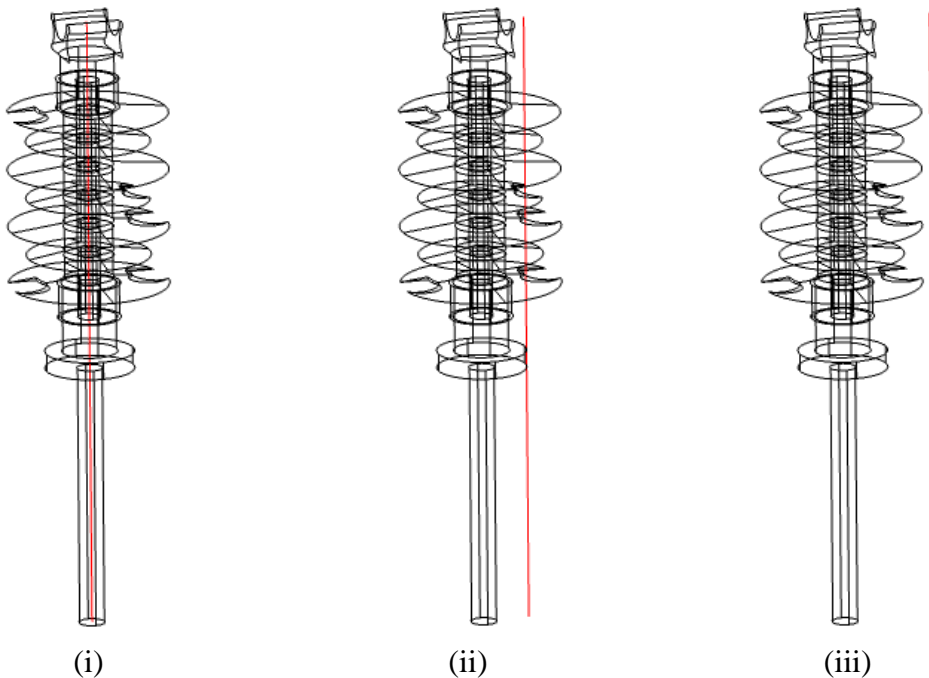
Σχήμα 4-19 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με Κομμένα Κράθια



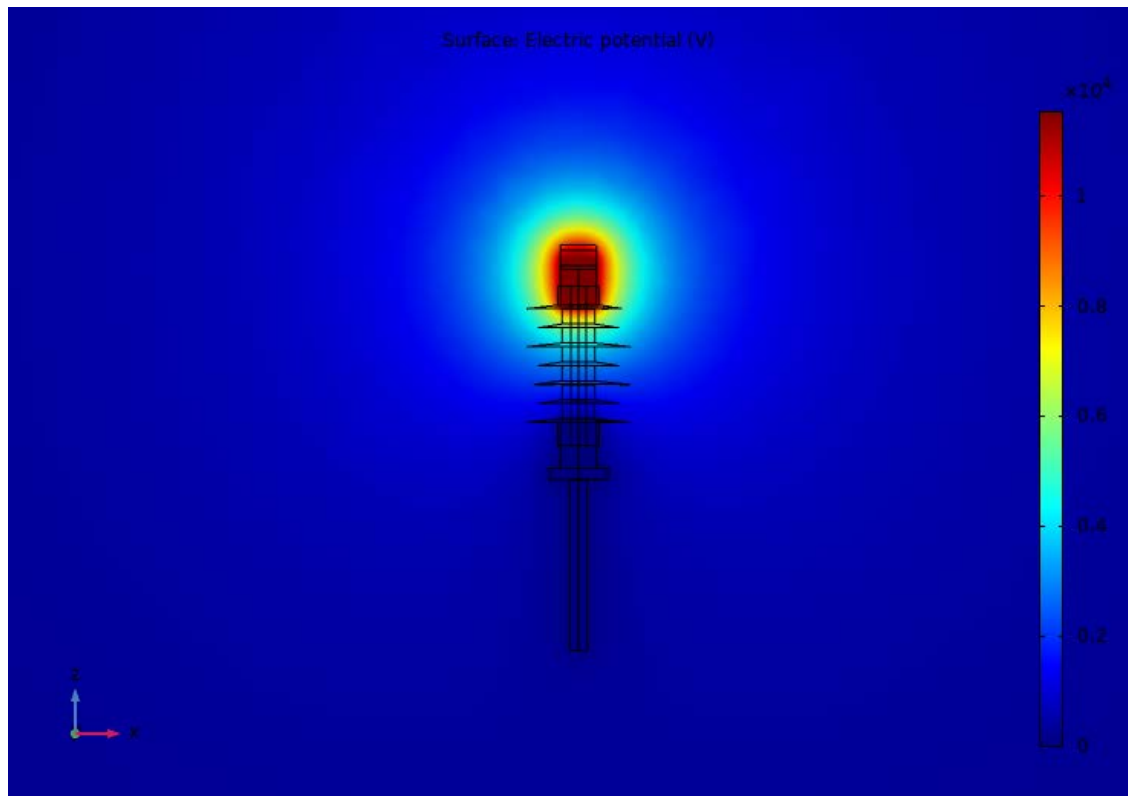
Σχήμα 4-20 : Κατανομή Δυναμικού Κομμένου Μονωτήρα Ανάρτησης



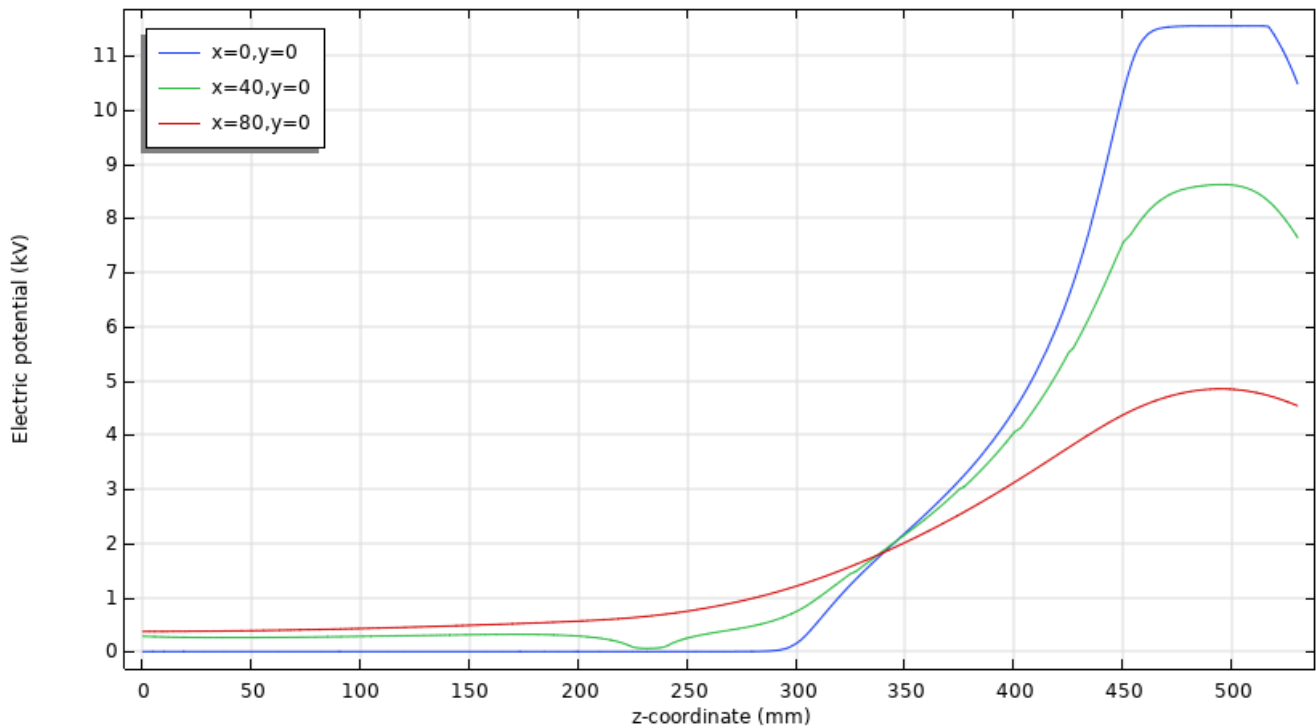
**Σχήμα 4-21 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Κομμένου Μονωτήρα Ανάρτησης**



**Σχήμα 4-22 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Κομμένο Μονωτήρα Γραμμής (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=70, y=0$**

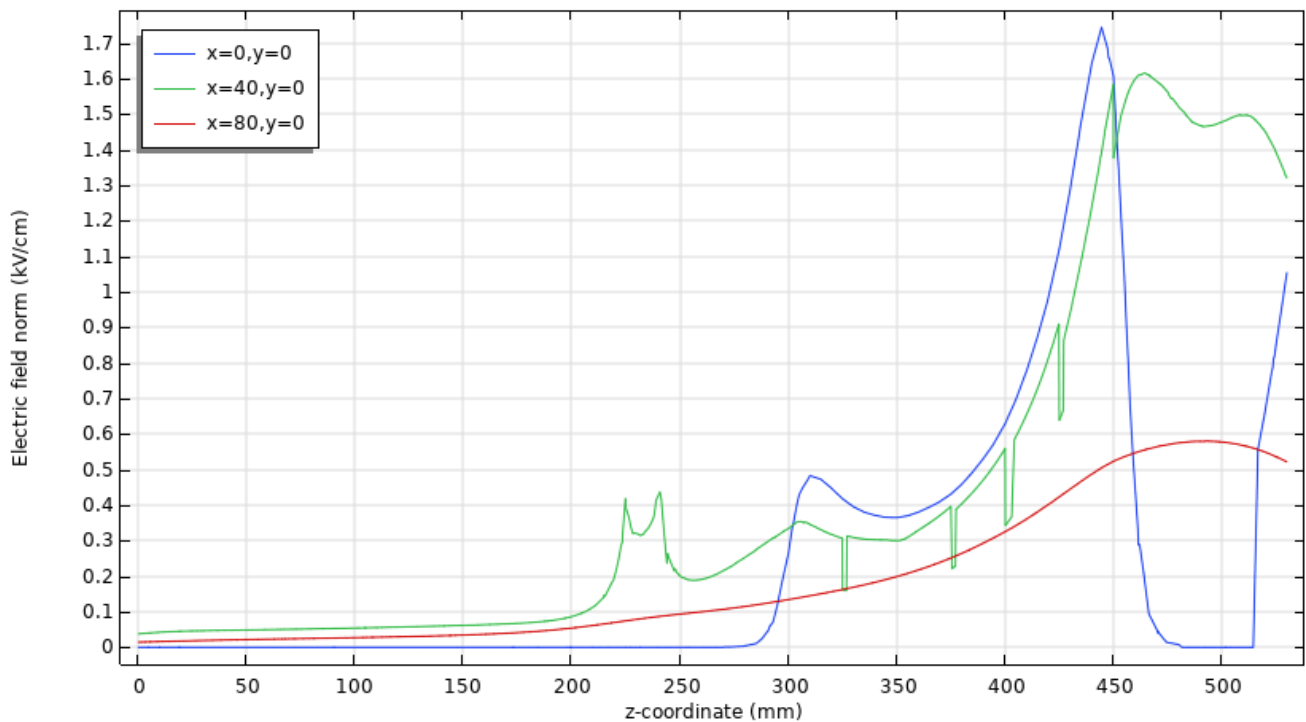


Σχήμα 4-23 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με Κομμένα Κράθια



Σχήμα 4-24 : Κατανομή Δυναμικού Κομμένου Μονωτήρα Γραμμής

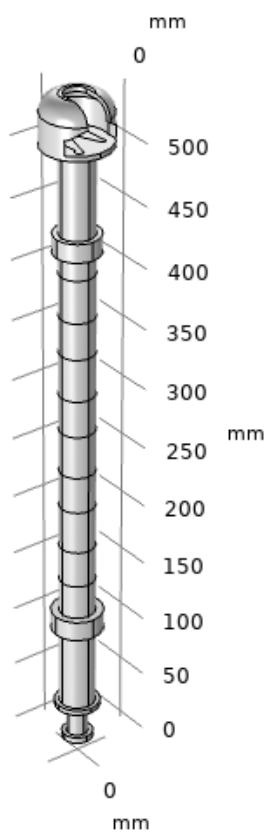




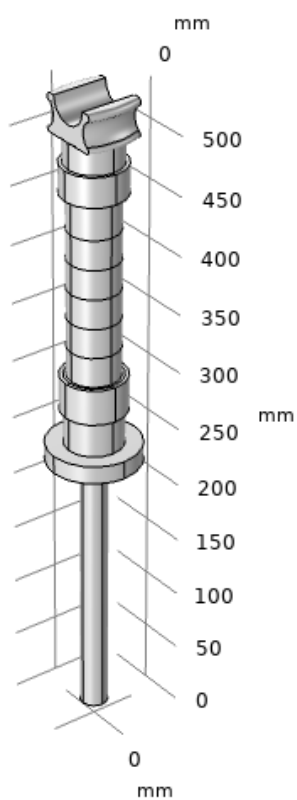
Σχήμα 4-25 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Κομμένου Μονωτήρα Γραμμής

#### 4.5 Προσομοίωση πεδίου μονωτήρων χωρίς κυάθια

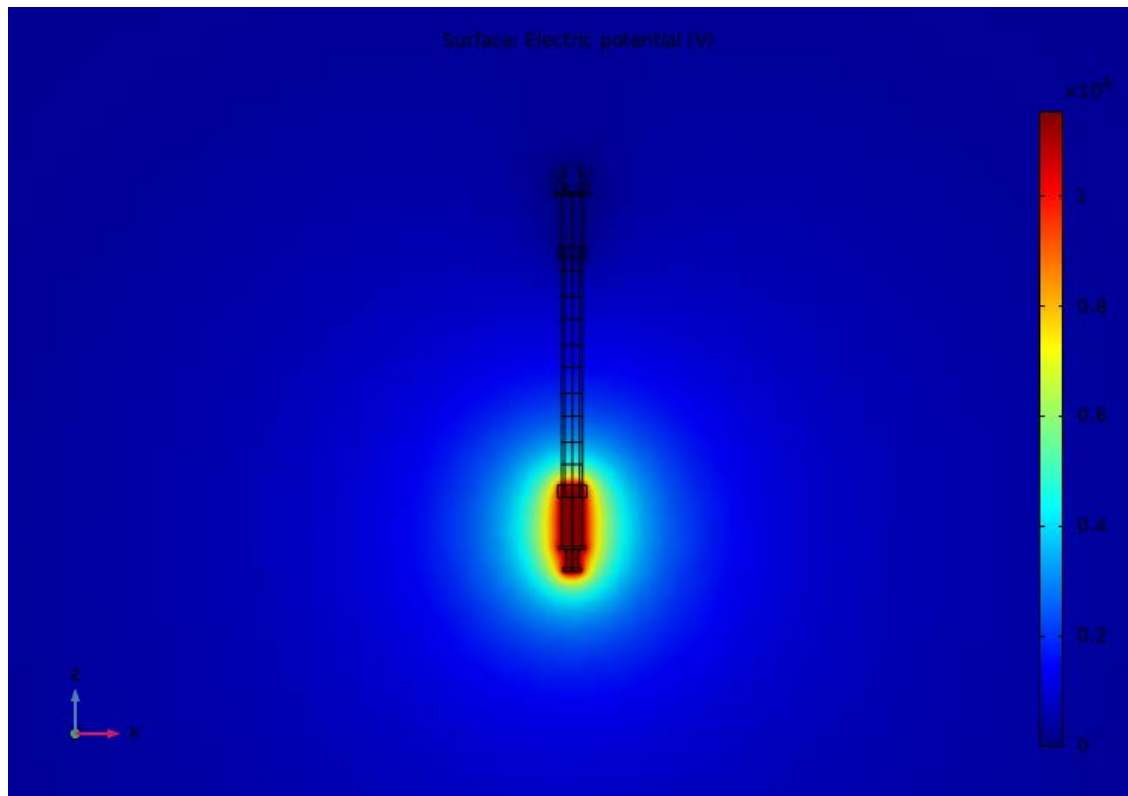
Επιπλέον, εκτελέστηκε προσομοίωση πεδίου σε μονωτήρα άνευ κυαθίων, όπως φαίνεται στα σχήματα 4-26 και 4-27. Μετρήθηκαν οι γραμμές των σχημάτων 4-10 και 4-13. Τα αποτελέσματα αυτά για τους δύο μονωτήρες παρουσιάζονται στα σχήματα Σχήμα 4-28 έως Σχήμα 4-33.



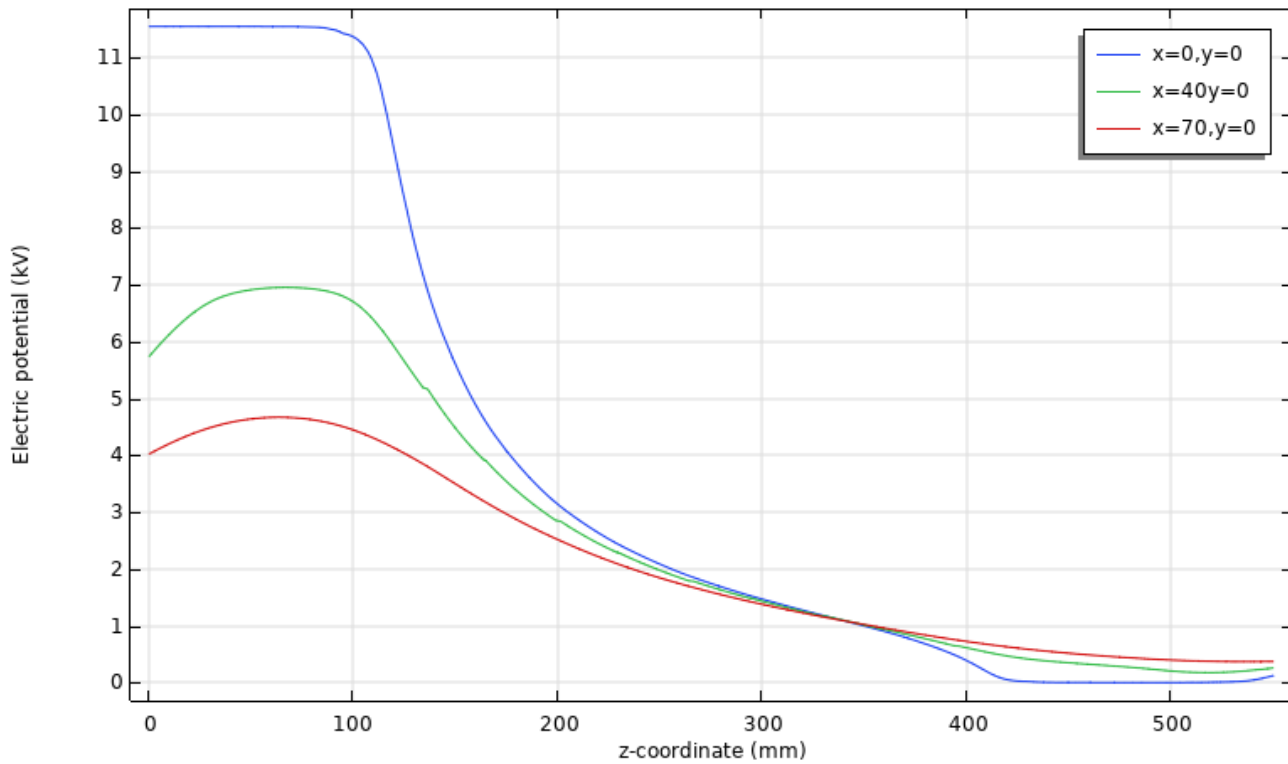
**Σχήμα 4-26 : Μονωτήρας Ανάρτησης Χωρίς Κυάθια**



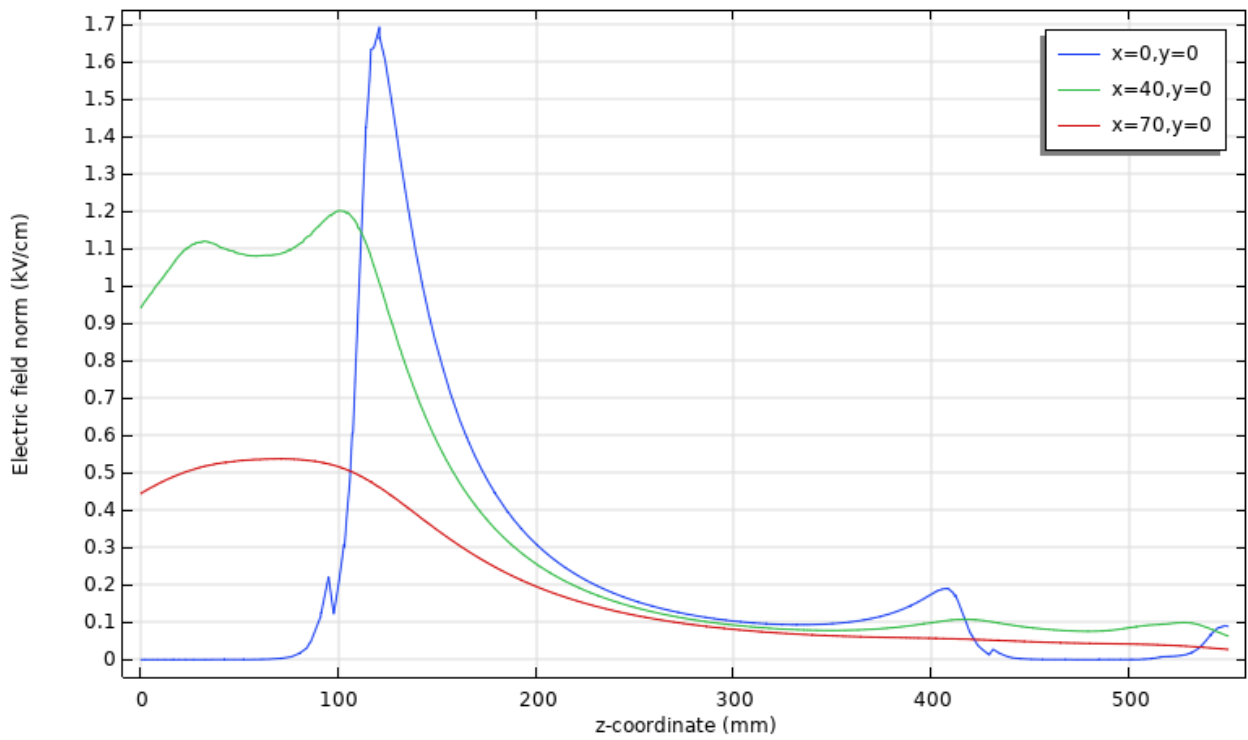
**Σχήμα 4-27 : Μονωτήρας Γραμμής Χωρίς Κυάθια**



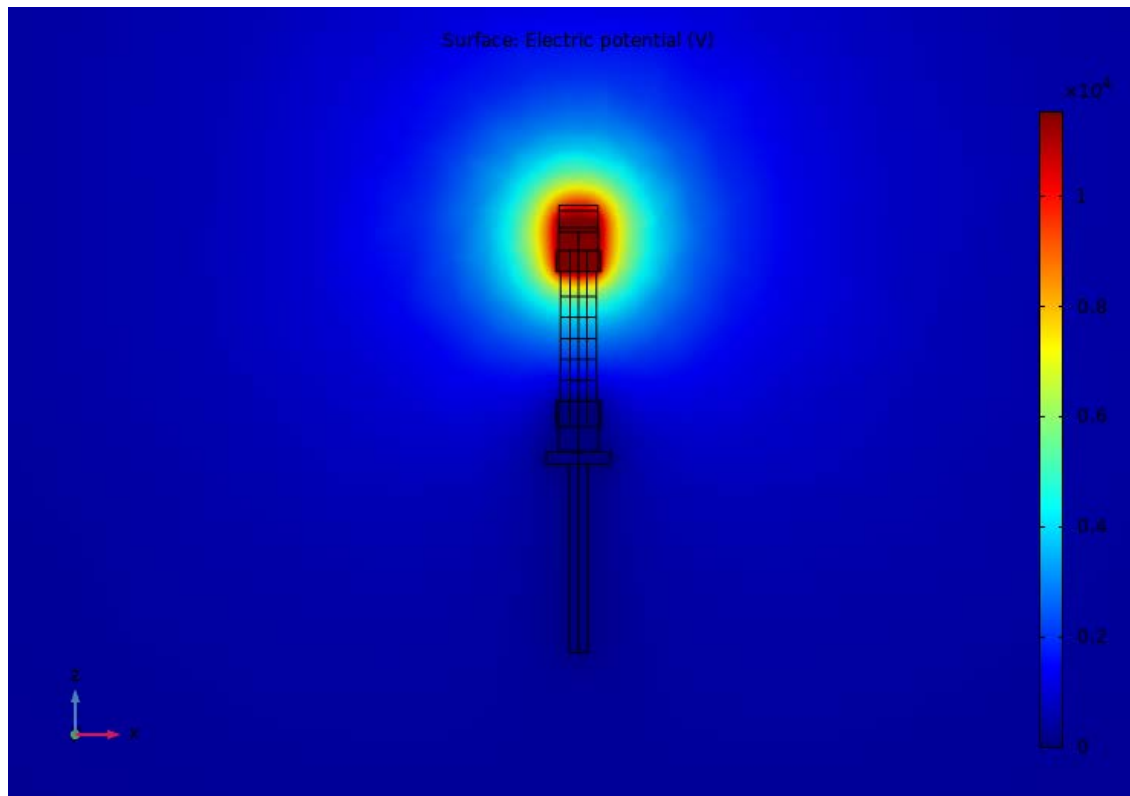
Σχήμα 4-28 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Χωρίς Κυάθια



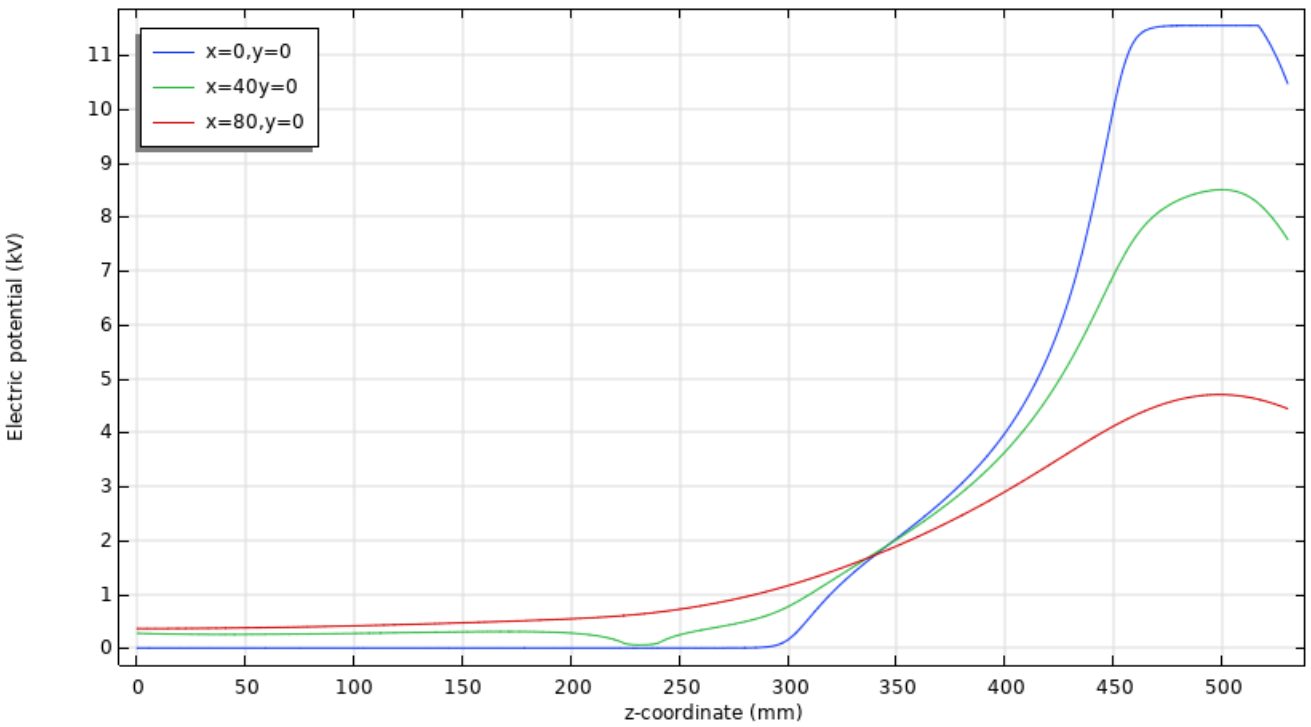
Σχήμα 4-29 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Χωρίς Κυάθια



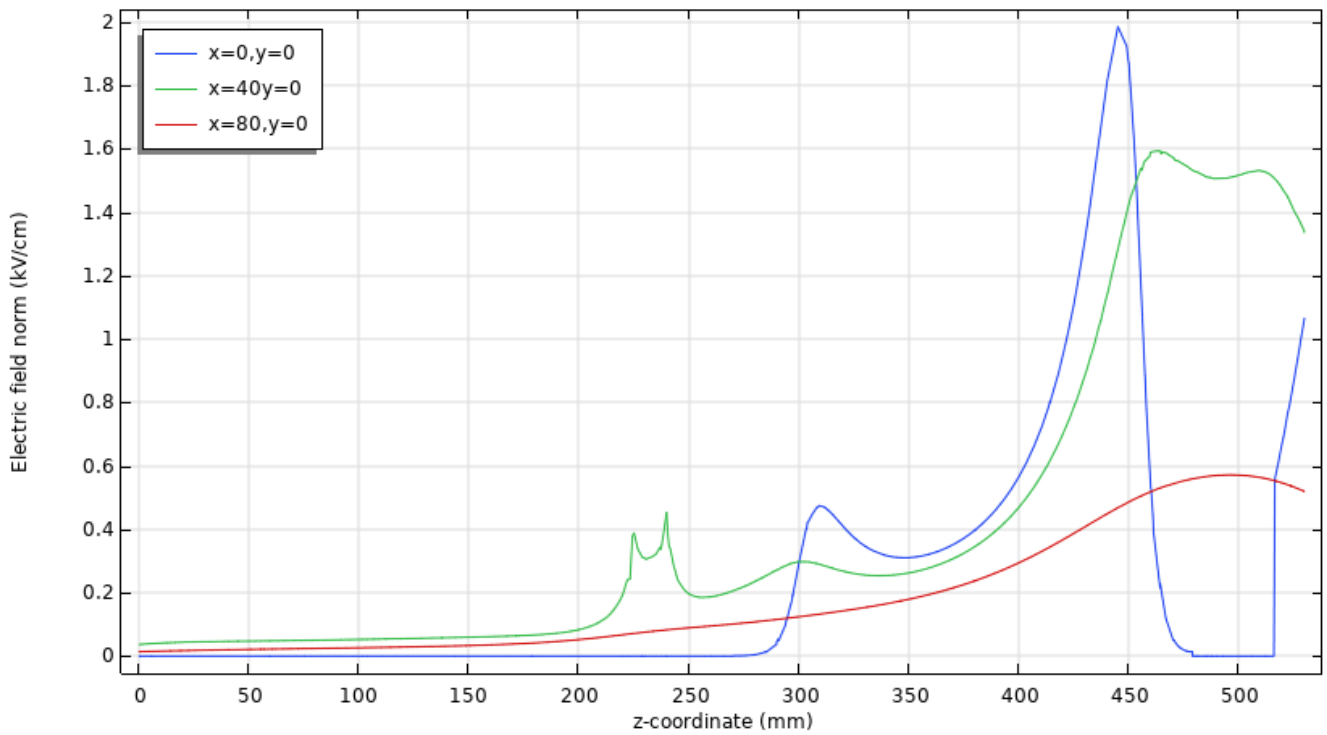
**Σχήμα 4-30 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης Χωρίς Κυάθια**



**Σχήμα 4-31 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Χωρίς Κυάθια**



**Σχήμα 4-32 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Χωρίς Κυάθια**

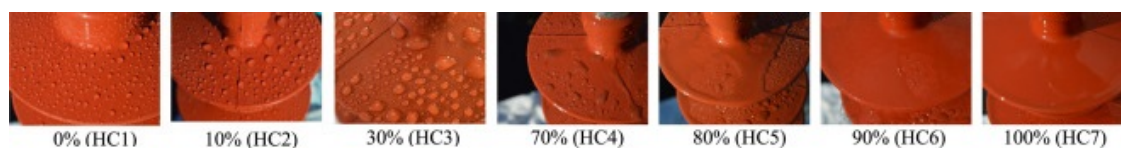


**Σχήμα 4-33 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής Χωρίς Κυάθια**

## 4.6 Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρων κλάσεων

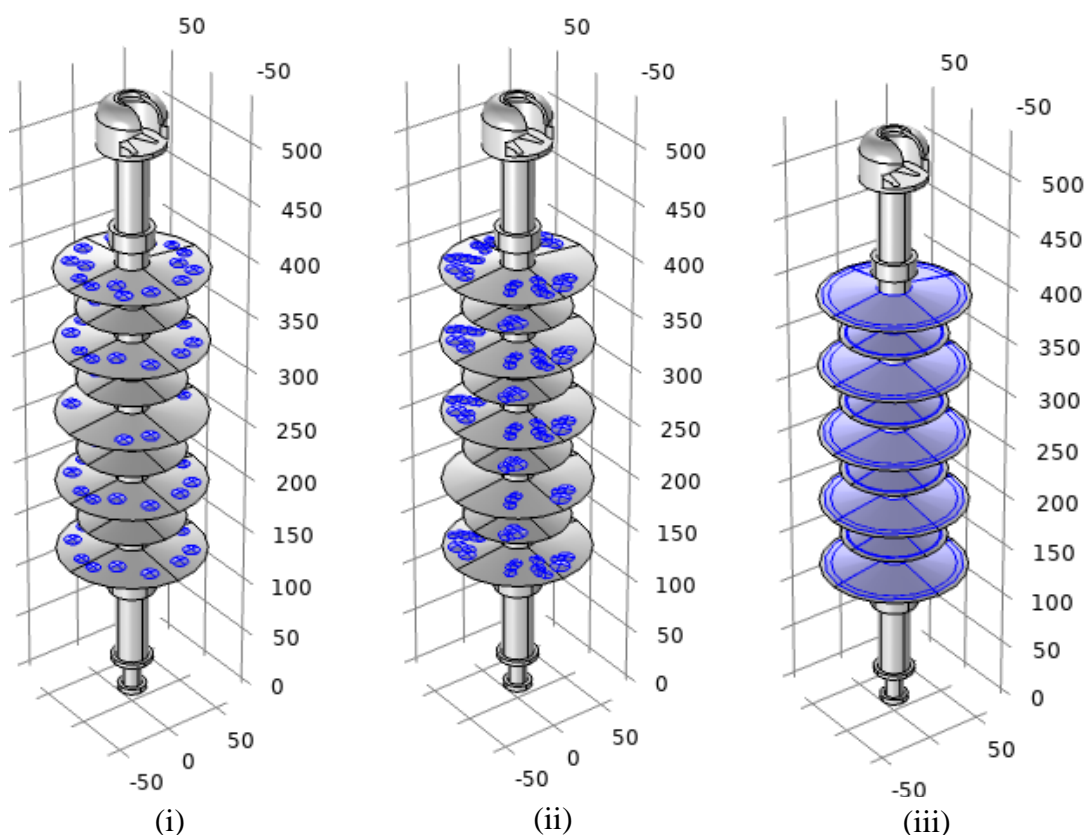
### υδροφοβικότητας 2,4 και 6

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, βασικός εξωτερικός παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία των μονωτήρων είναι το νερό, είτε προκύπτει από βροχή είτε από υγρασία. Το περίβλημα σιλικόνης δίνει τη δυνατότητα στους μονωτήρες να περιορίζουν το σχηματισμό στρώματος νερού στην επιφάνεια του μονωτήρα. Ωστόσο ανάλογα με τη γήρανση που έχει υποστεί ο κάθε μονωτήρας, μεταβάλλεται και η ιδιότητά του αυτή, δημιουργώντας τις περιπτώσεις κλάσης υδροφοβίας του Σχήμα 4-34 [48].

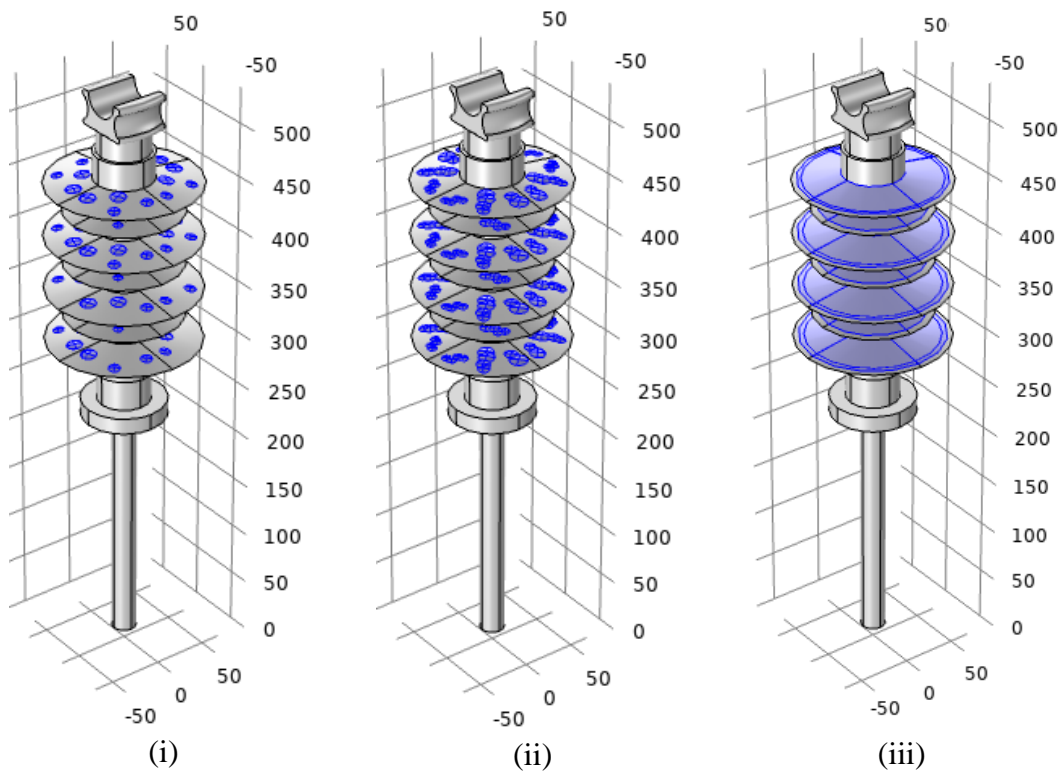


Σχήμα 4-34 : Κλάσεις υδροφοβικότητας (Hydrophobicity Class - HC) [49]

Με γνώμονα τα παραπάνω, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για τρεις από τις παραπάνω κλάσεις σε κάθε μονωτήρα. Επιλέχτηκαν οι κλάσεις 2,4 και7, οι οποίες παρουσιάζονται στα σχήματα 4-35 και 4-36. Το υλικό για τις σταγόνες είχε ως ιδιότητες τις τιμές του Πίνακα 4-3.



Σχήμα 4-35 : Προσομοίωση Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσεων (i)2, (ii)4 και (iii)7

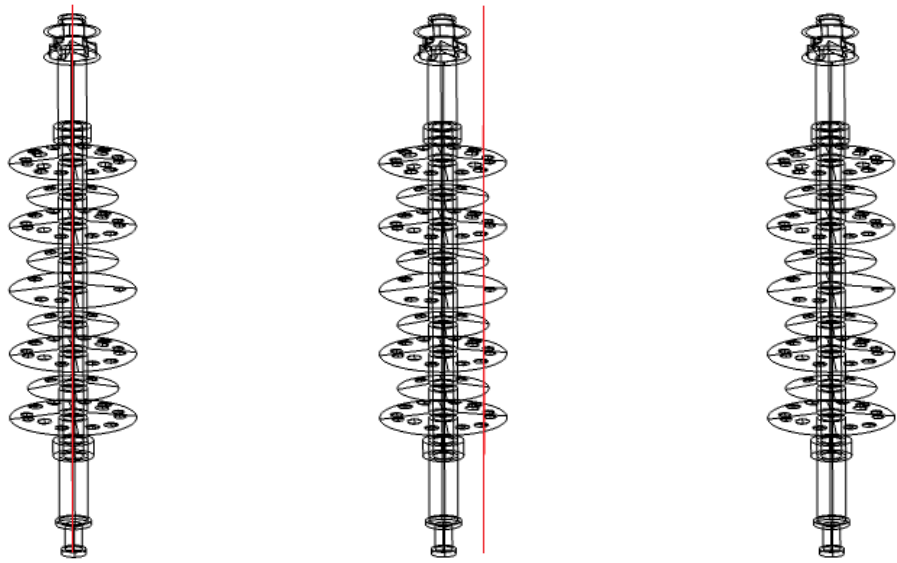


**Σχήμα 4-36 Προσομοίωση Μονωτήρα Γραμμής Κλάσεων (i)2, (ii)4 και (iii)7**

Υλικό	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα $\sigma$ [S/m]	Διηλεκτρική Σταθερά $\epsilon_r$ [1]
H <sub>2</sub> O	5	80

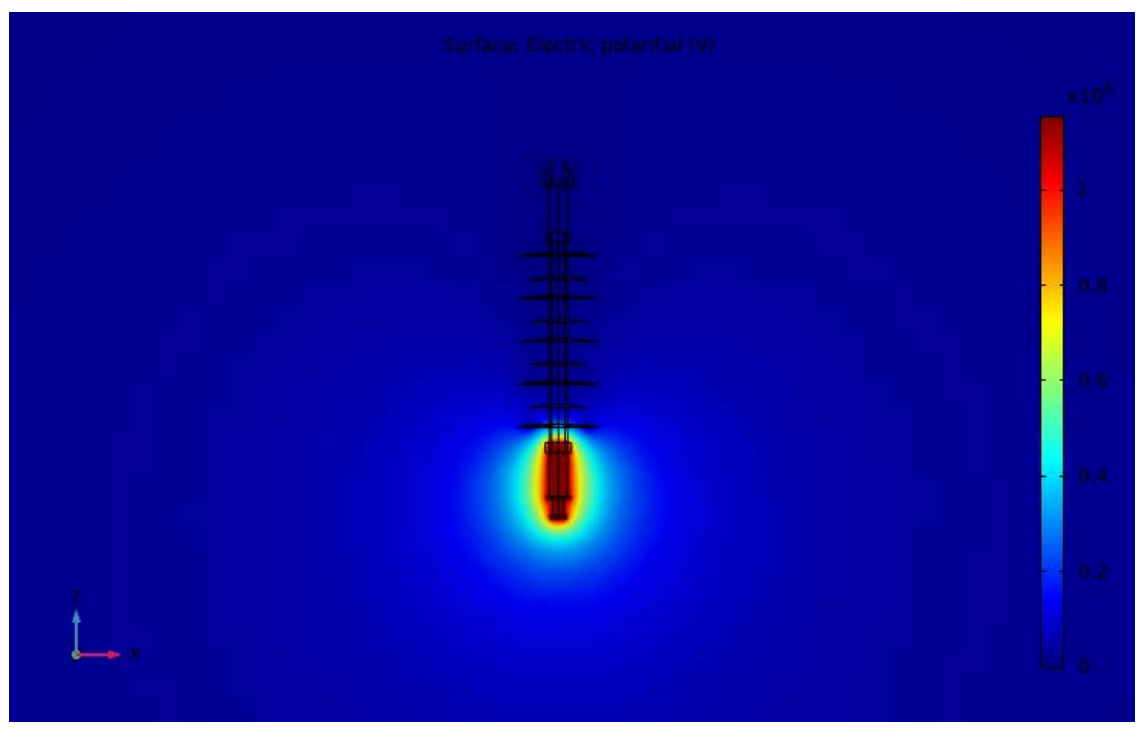
**Πίνακας 4-3 : Ιδιότητες Υλικού Σταγόνων [50]**

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αφορούσαν όπως και στην προηγούμενη ενότητα την κατανομή του δυναμικού γύρω από το μονωτήρα, καθώς και την ηλεκτρική τάση και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε γραμμές κατά μήκος του μονωτήρα μέσα του, στα κυάθιά του και γύρω από αυτόν. Για τον πρώτο μονωτήρα, οι γραμμές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-37 για την κλάση 2, στο Σχήμα 4-41 για την κλάση 4 και στο Σχήμα 4-45 για την κλάση 7. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις του δυναμικού και της έντασης εμφανίζονται στα σχήματα 4-38, 4-39 και 4-40 (κλάση 2), 4-42, 4-43 και 4-44 (κλάση 4), 4-46, 4-47 και 4-48 (κλάση 7).



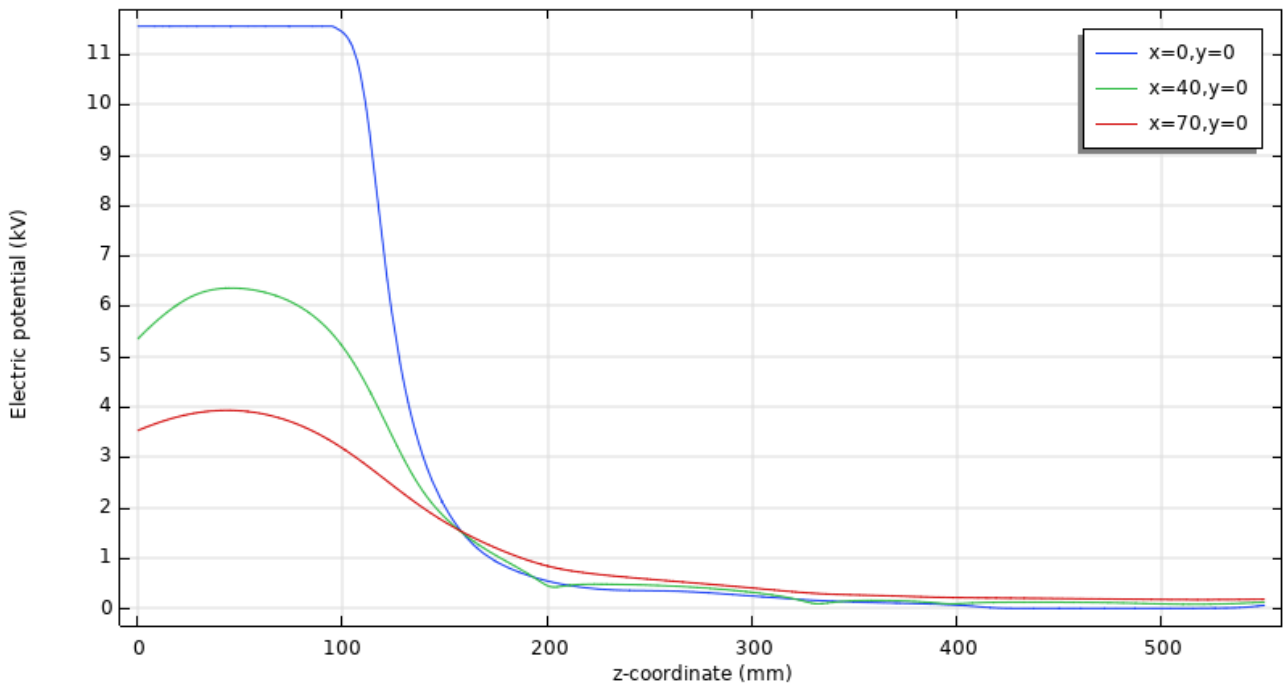
(i) (ii) (iii)

Σχήμα 4-37 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 2 (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=70, y=0$

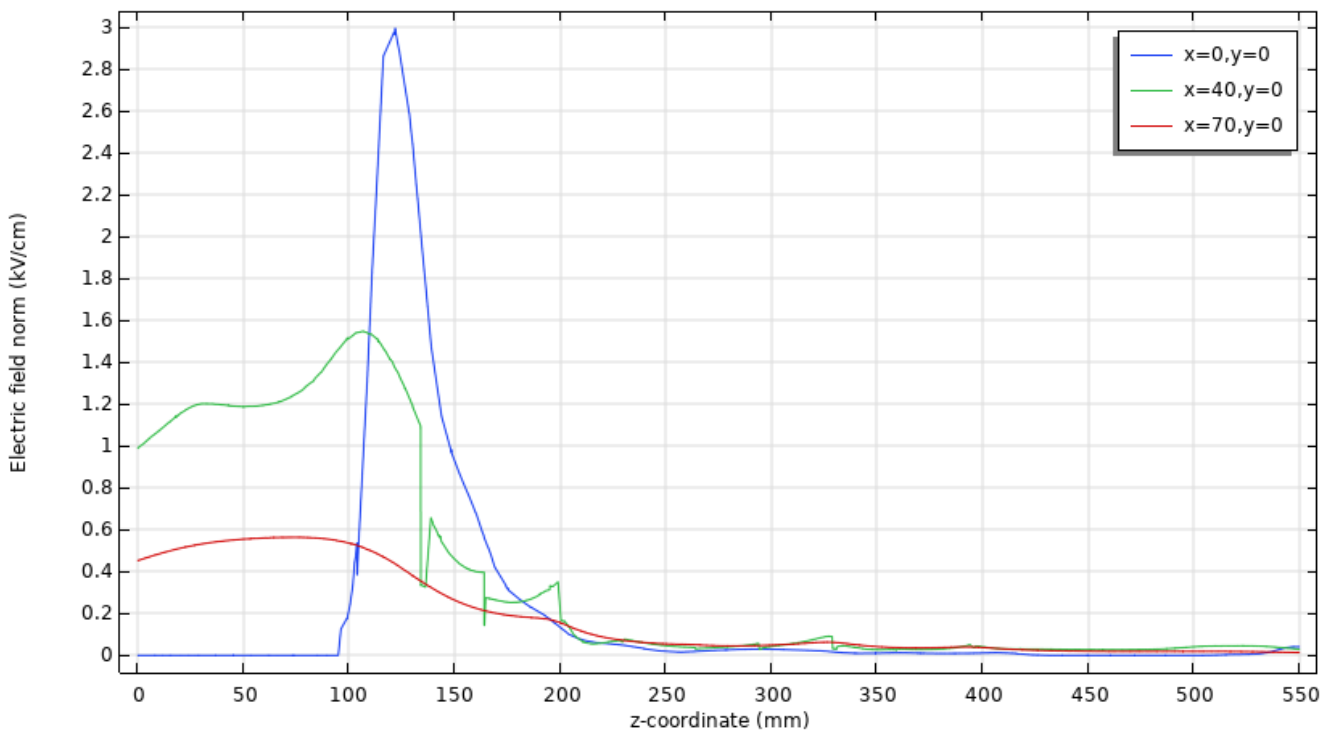


Σχήμα 4-38 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 2

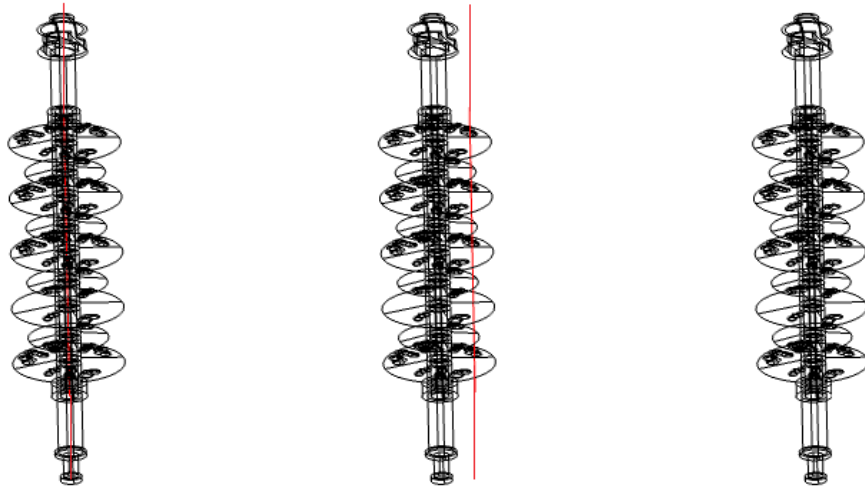




**Σχήμα 4-39 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 2**



**Σχήμα 4-40 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 2**

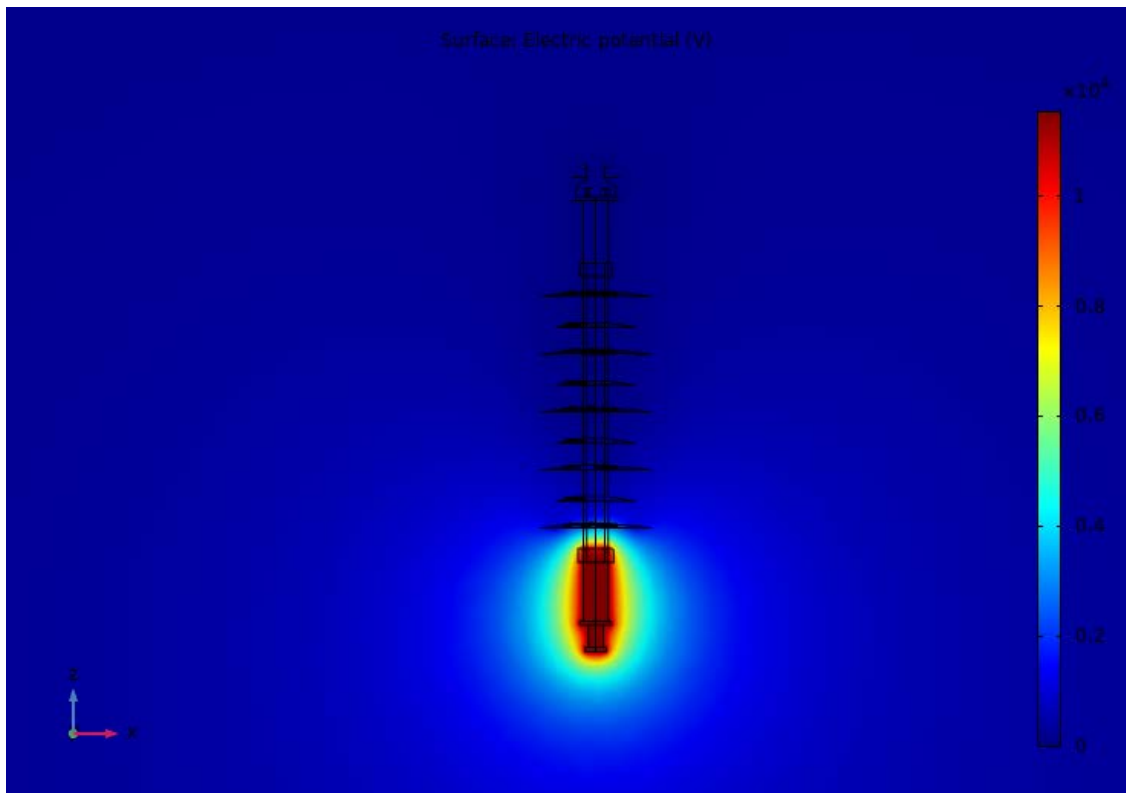


(i)

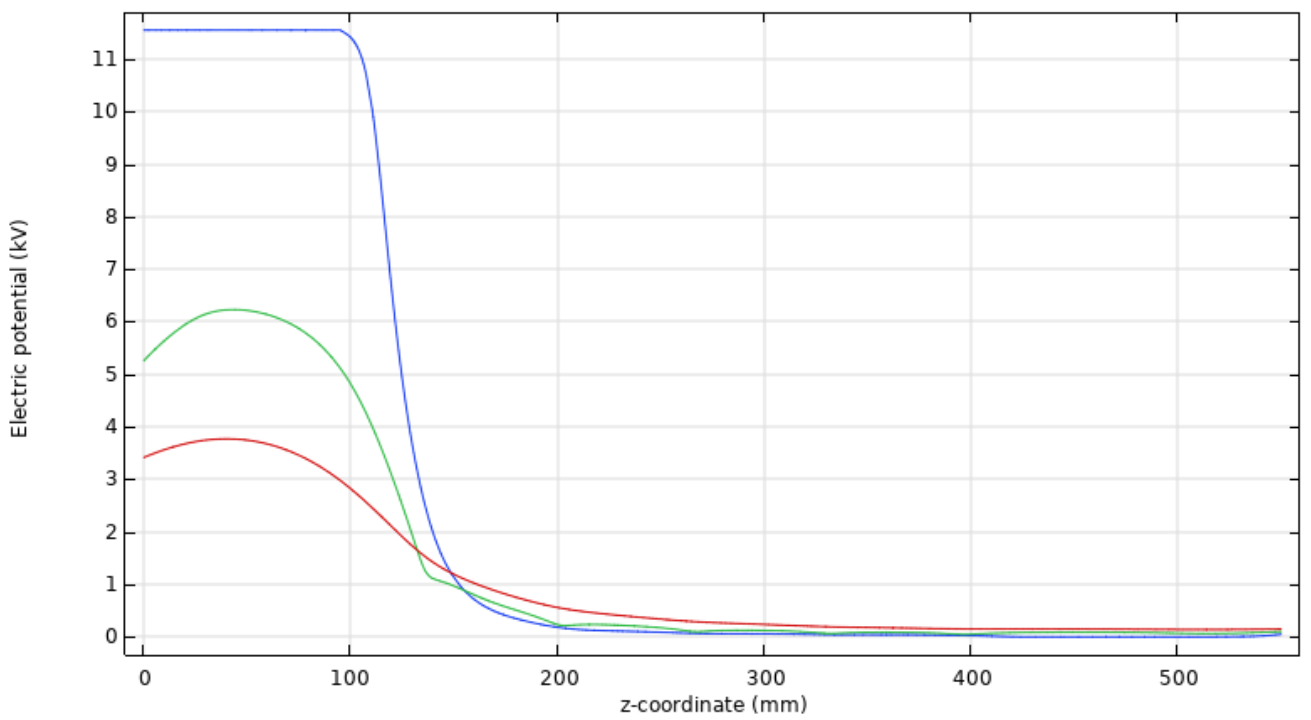
(ii)

(iii)

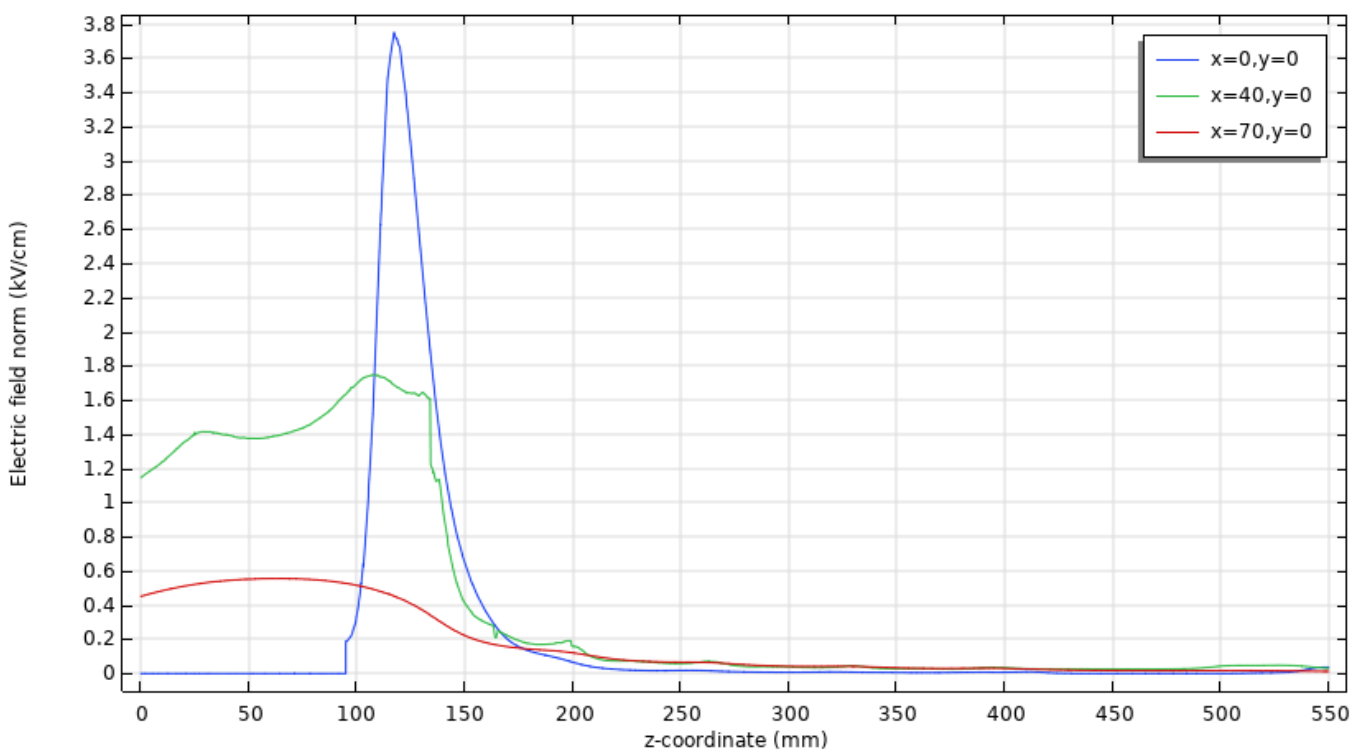
**Σχήμα 4-41 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 4 (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=70, y=0$**



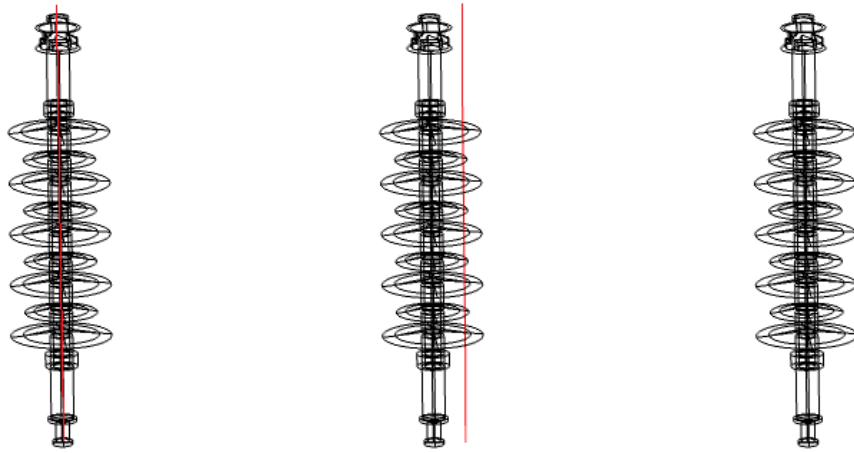
**Σχήμα 4-42 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 4**



**Σχήμα 4-43 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 4**



**Σχήμα 4-44 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 4**

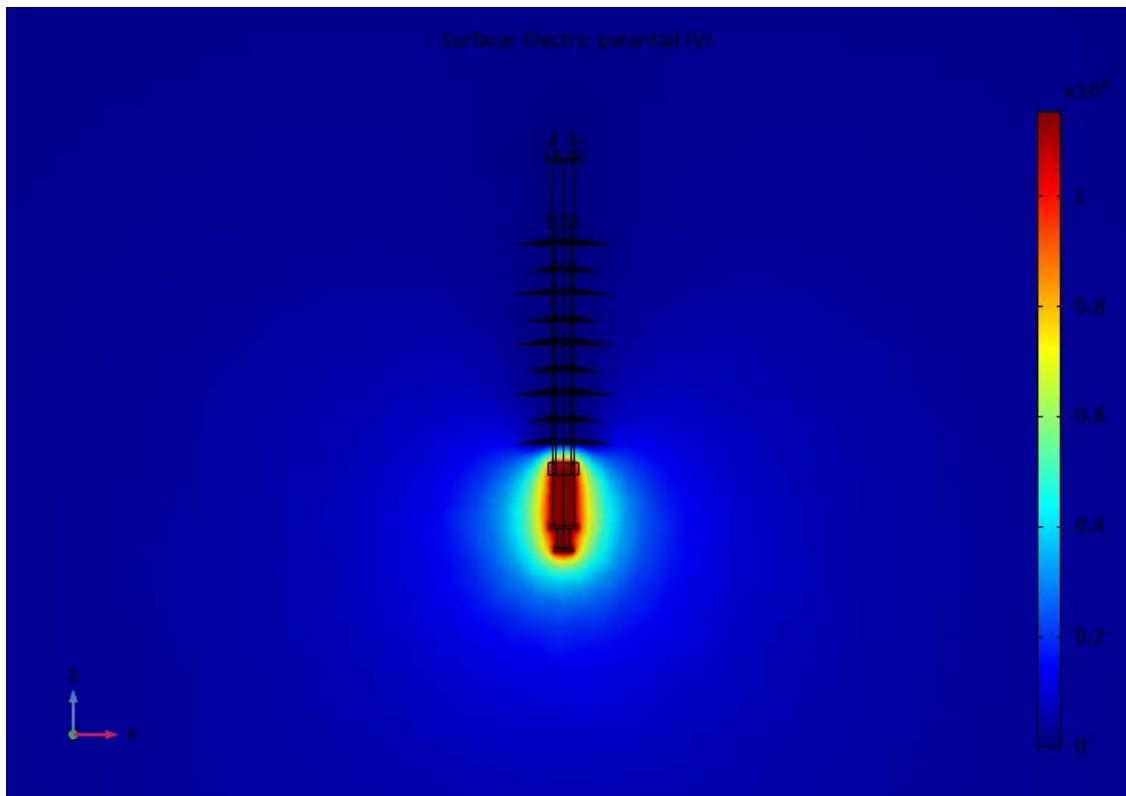


(i)

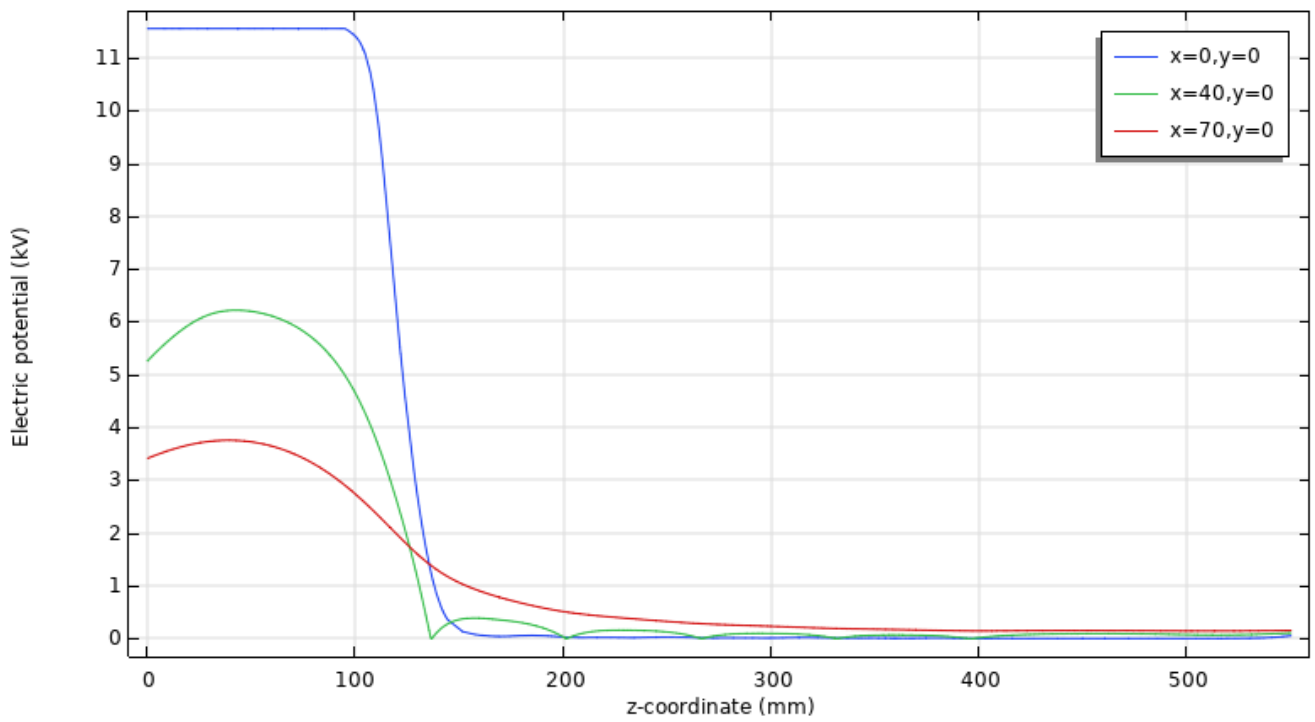
(ii)

(iii)

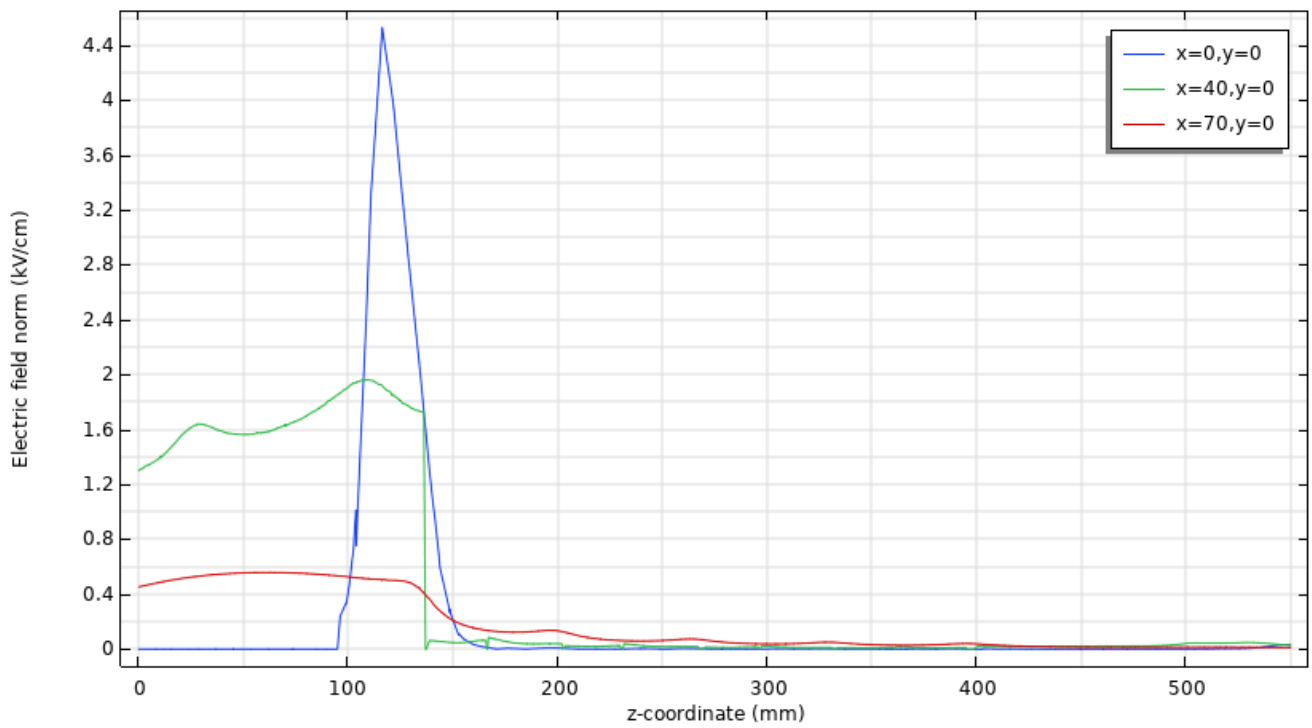
**Σχήμα 4-45 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 7 (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=70, y=0$**



**Σχήμα 4-46 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 7**

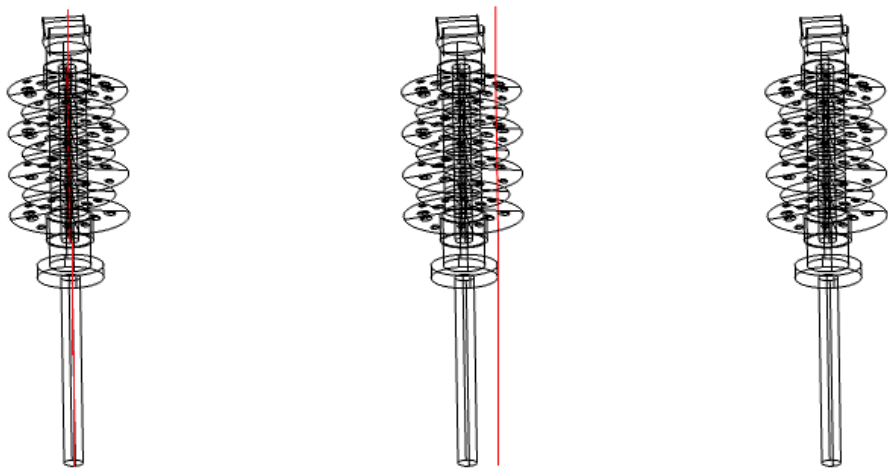


**Σχήμα 4-47 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 7**



**Σχήμα 4-48 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης Κλάσης 7**

Για το μονωτήρα γραμμής, οι γραμμές παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-49 για την κλάση 2, στο Σχήμα 4-53 για την κλάση 4 και στο Σχήμα 4-57 για την κλάση 7. Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της τάσης και της έντασης εμφανίζονται στα σχήματα Σχήμα 4-50, Σχήμα 4-51 και Σχήμα 4-52 (κλάση 2), Σχήμα 4-54, Σχήμα 4-55 και Σχήμα 4-56 (κλάση 4), και Σχήμα 4-58, Σχήμα 4-59 και Σχήμα 4-60 (κλάση 7).

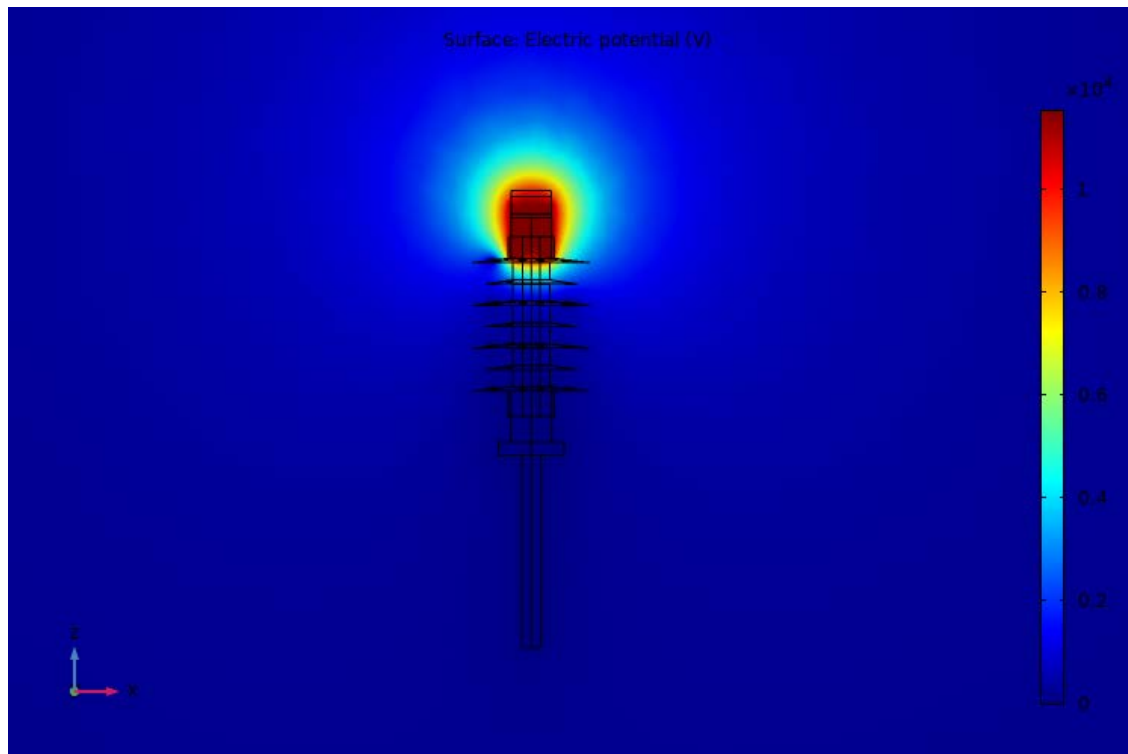


(i)

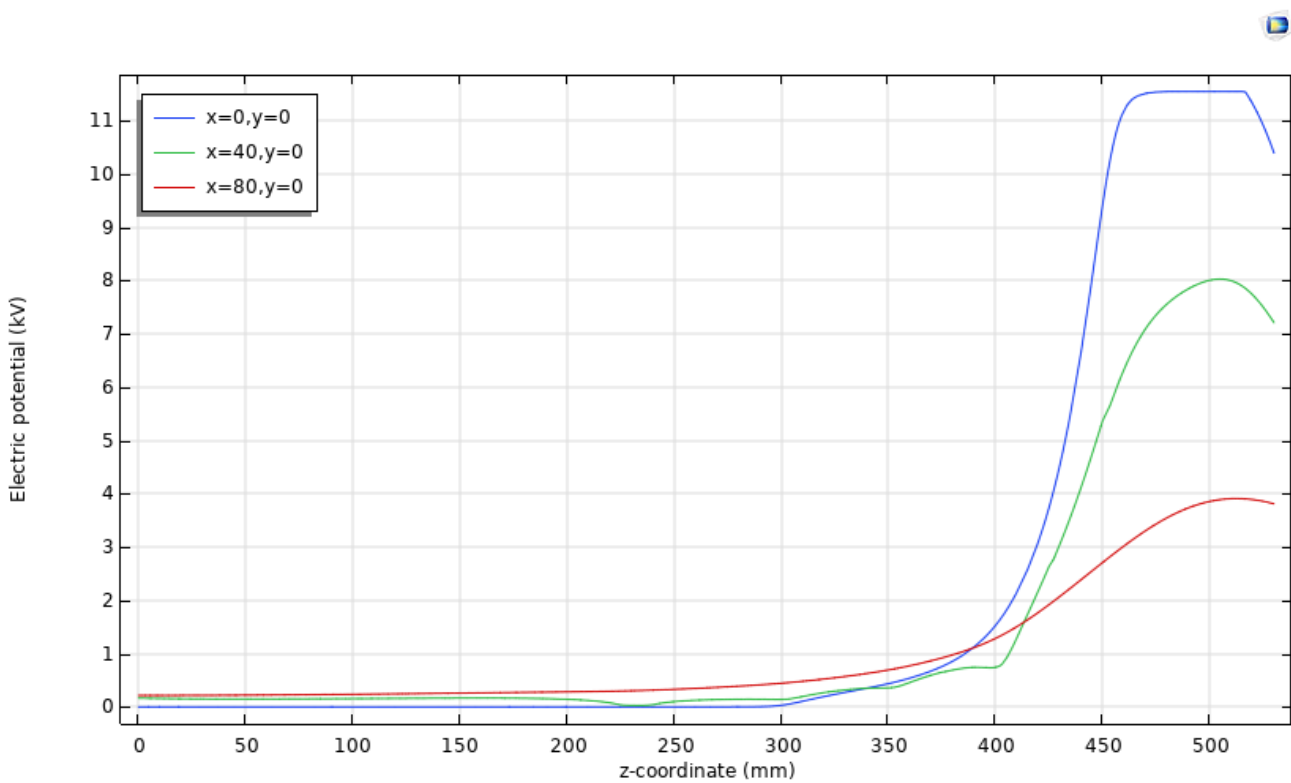
(ii)

(iii)

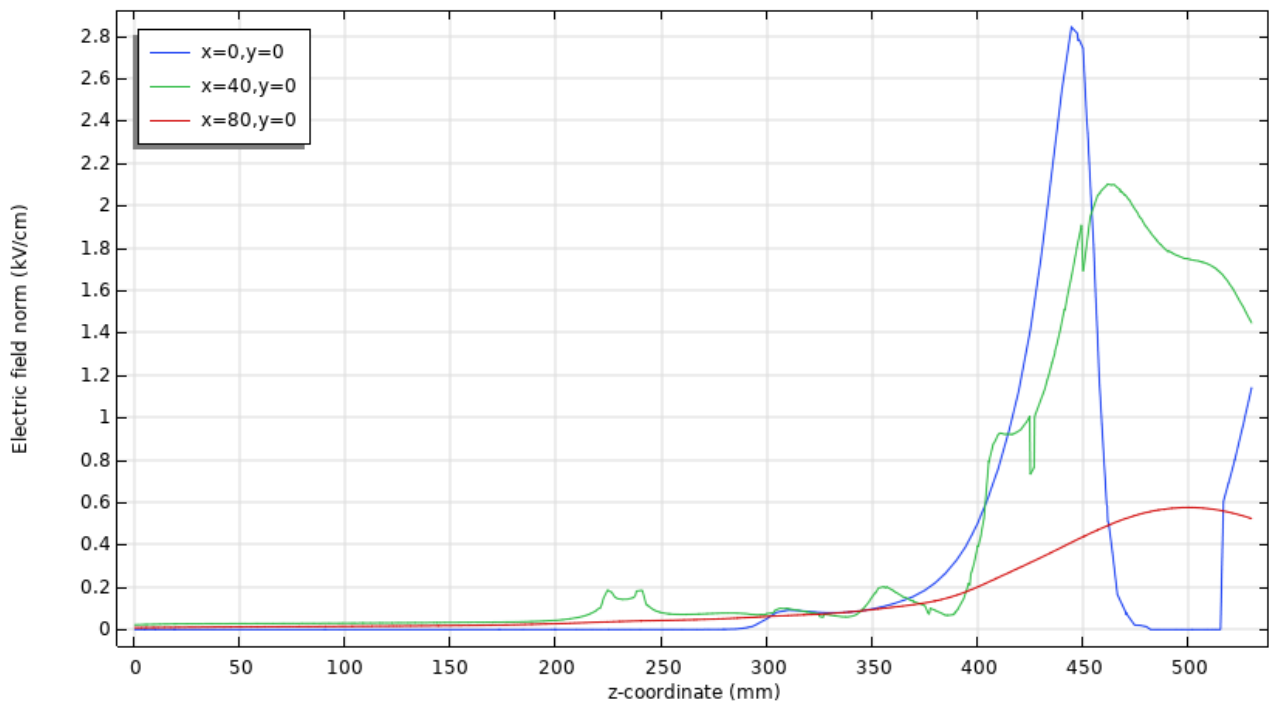
**Σχήμα 4-49 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 2 (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=80, y=0$**



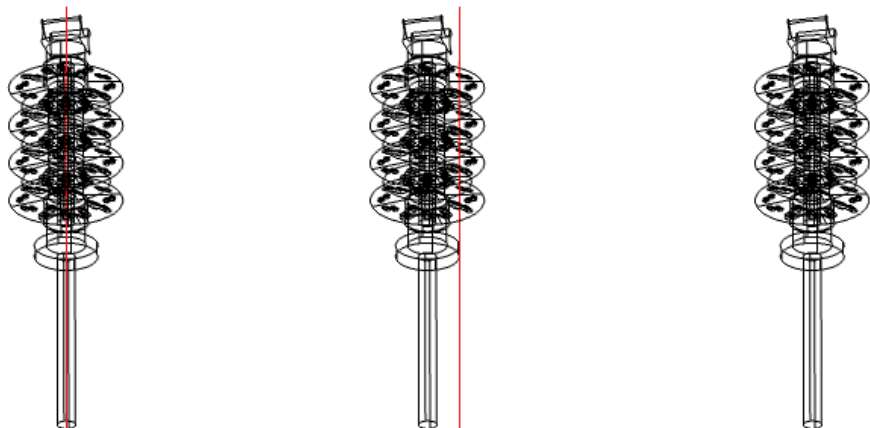
Σχήμα 4-50 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 2



Σχήμα 4-51 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 2



Σχήμα 4-52 Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 2



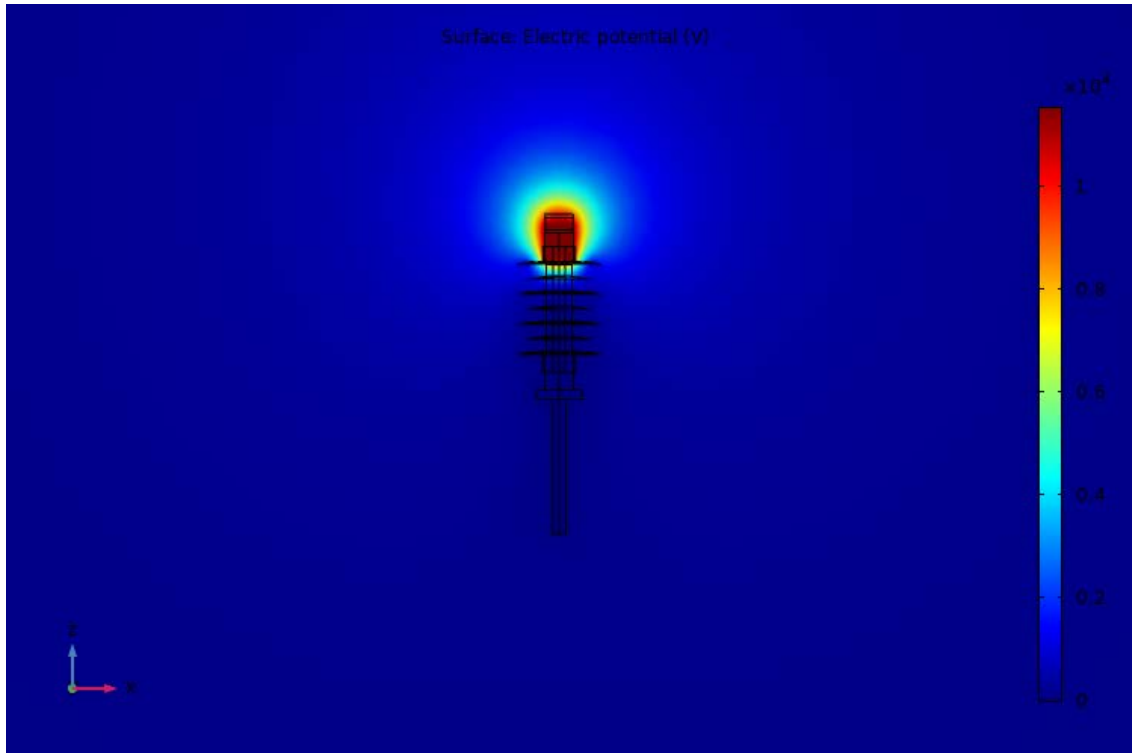
(i)

(ii)

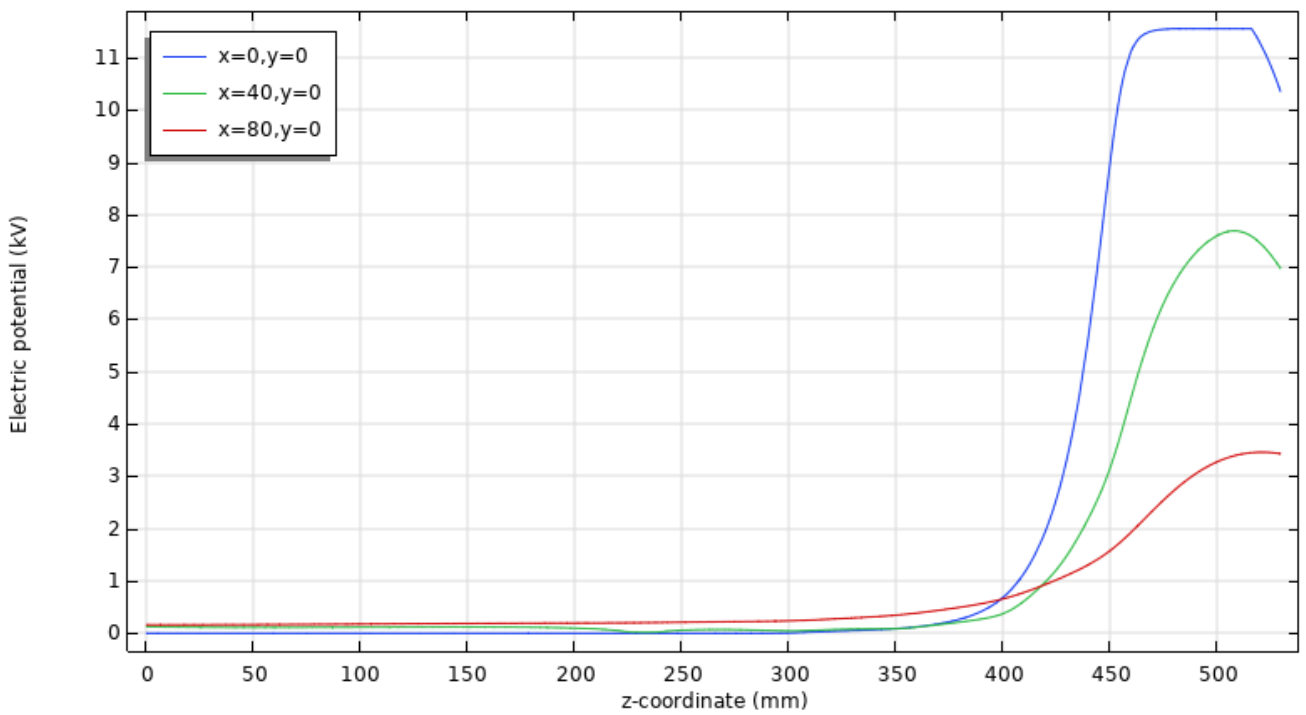
(iii)

Σχήμα 4-53 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 4 (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=80, y=0$

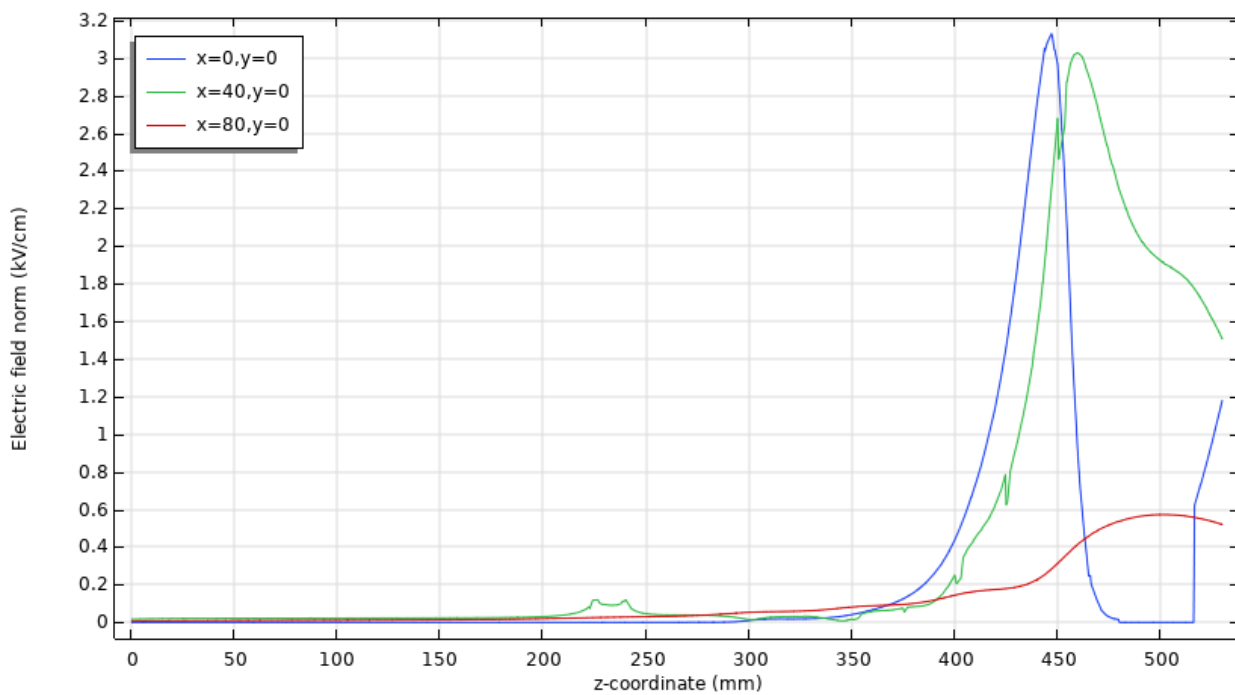




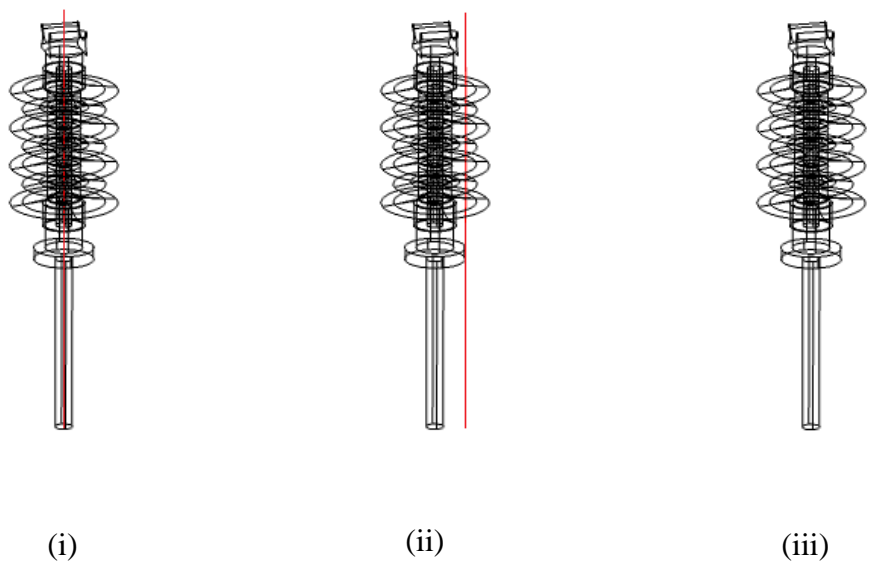
Σχήμα 4-54 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 4



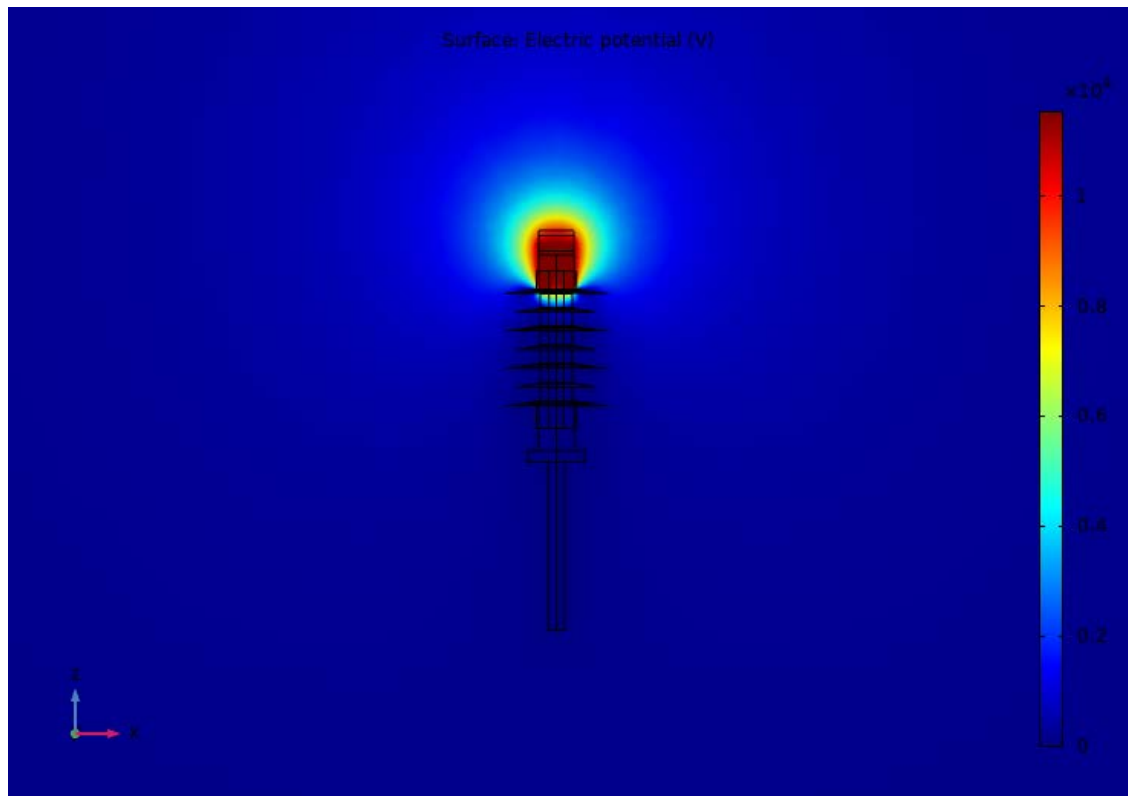
Σχήμα 4-55 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 4



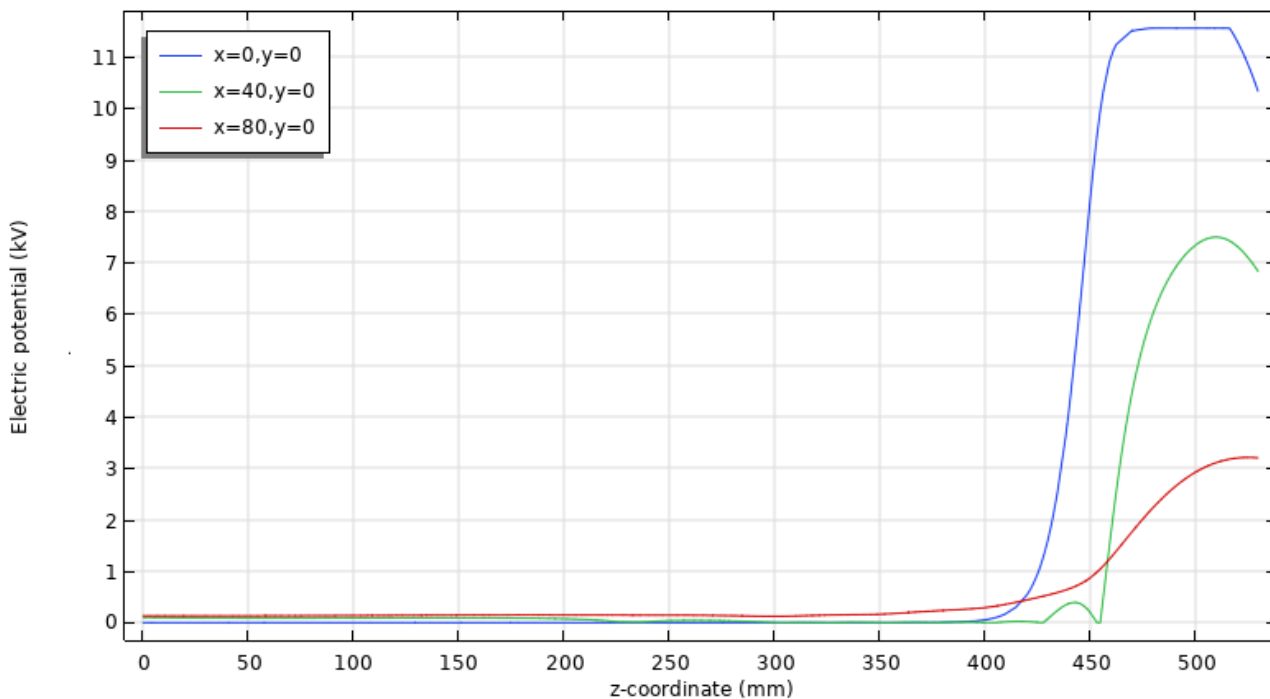
**Σχήμα 4-56 Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 4**



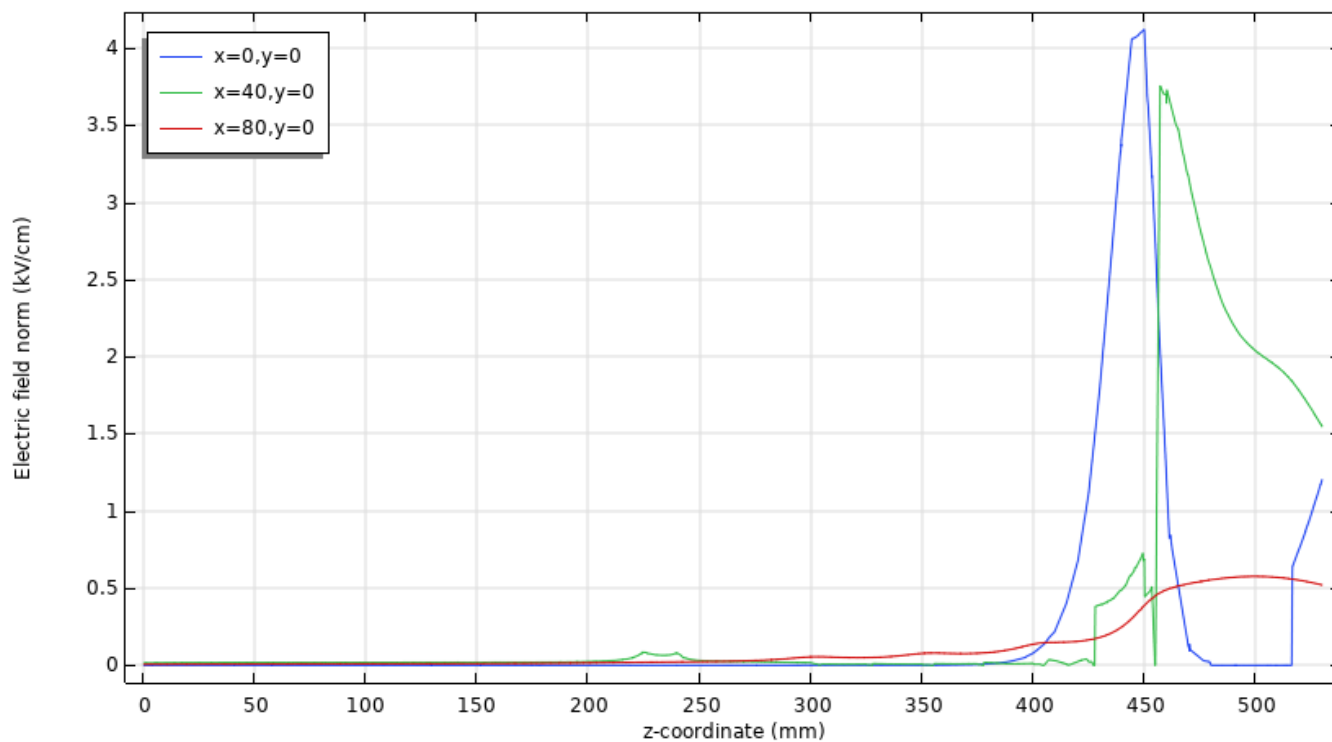
**Σχήμα 4-57 : Γραμμές Μέτρησης Δυναμικού και Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 7 (i)  $x=0, y=0$ , (ii)  $x=40, y=0$ , (iii)  $x=80, y=0$**



Σχήμα 4-58 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 7



Σχήμα 4-59 : Κατανομή Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 7



**Σχήμα 4-60 : Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής Κλάσης 7**

# 5

## *Ανάλυση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα*

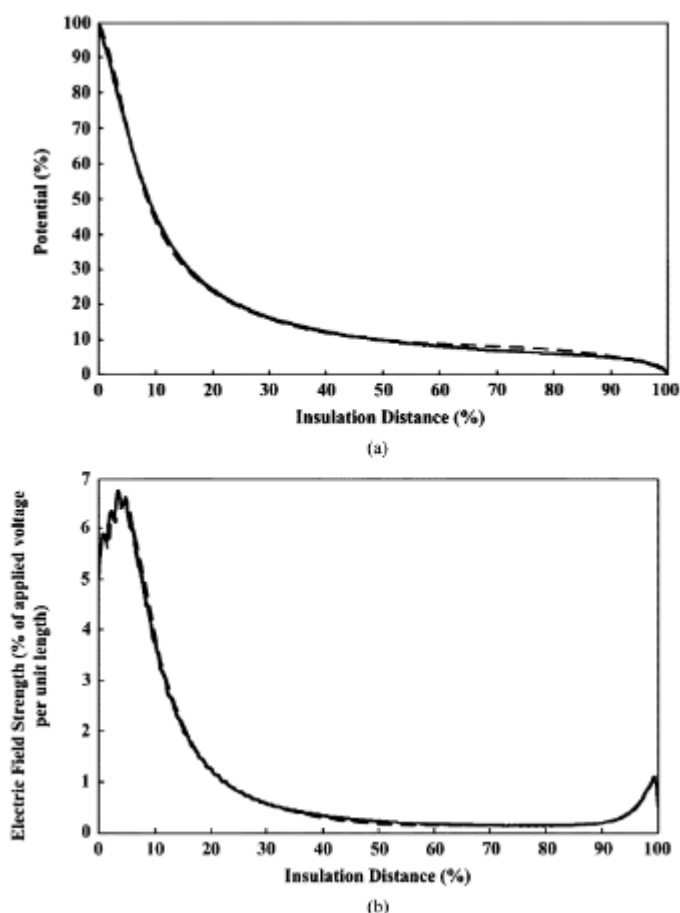
Η εικονική προσομοίωση φυσικής χρησιμοποιεί μια διεπαφή εικονικής πραγματικότητας που συνδυάζει ένα τρισδιάστατο μοντέλο πραγματικού αντικειμένου και μια εικονική απεικόνιση καταστάσεων με διαδραστικό τρόπο [51]. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των επιστημών, αφού επιτυγχάνει αριθμητική επίλυση προβλημάτων, στα οποία η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων είναι δύσκολη ή και ακατόρθωτη. Ταυτόχρονα συνδυάζει υψηλή ακρίβεια, με εξοικονόμηση χρόνου και εξοπλισμού, αφού τα υπό μελέτη μοντέλα και οι συνθήκες έκθεσης και λειτουργίας τους αναπαρίστανται σε κάποιο υπολογιστικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι πραγματικές συνθήκες δεν μπορούν πάντα να μοντελοποιηθούν πλήρως, με αποτέλεσμα την ύπαρξη σφαλμάτων μεταξύ πραγματικότητας και προσομοίωσης [33],[34].

Στη συγκεκριμένη εργασία, για τη δημιουργία εικονικής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Comsol Multiphysics, προκειμένου να μελετηθεί η κατανομή τόσο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και του δυναμικού στο εσωτερικό και σε περιοχές πλησίον των συνθετικών μονωτήρων μέσης. Αναλύοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών, τα οποία παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4, προκύπτουν παρατηρήσεις και συμπεράσματα, τα οποία ακολουθούν στη συνέχεια.

### *5.1 Ηλεκτρικό Πεδίο Μονωτήρων*

Οι πρώτες προσομοιώσεις για τους δύο μονωτήρες, δείχνουν την κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού γύρω τους ( Σχήμα 4-8, Σχήμα 4-9), το οποίο έχει τιμή 11,55kV στο ένα άκρο τους και εξασθενεί όσο απομακρύνεται από αυτό έως ότου μηδενιστεί. Αντίστοιχα αποτελέσματα για την τάση προκύπτουν από τα σχήματα 4-11 και 4-14 . Όσο για την ένταση του πεδίου, λαμβάνοντας υπόψιν τη γραμμή που διαπερνά κατά μήκος τον κάθε μονωτήρα (Σχήμα 4-12 και Σχήμα 4-15), είναι μηδενική στα σημεία όπου έχουμε σταθερή τάση ενώ μεταβάλλεται στα υπόλοιπα. Επιπλέον, και στους δύο μονωτήρες έχει μέγιστη τιμή στα σημεία που έχουμε αλλαγή υλικού από το σίδηρο των 11,55kV στο μονωτικό. Τα παραπάνω εξηγούνται από την Εξίσωση 2-3, αφού η παράγωγος σταθερής

τιμής έχει ως αποτέλεσμα μηδέν, ενώ όσο γρηγορότερα μεταβάλλεται ένα μέγεθος, τόσο περισσότερο αυξάνεται η παράγωγός του. Αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται σε σχετική βιβλιογραφία [52]. Από τις άλλες δύο γραμμές, συμπεραίνουμε πως όσο απομακρυνόμαστε από το μονωτήρα, τόσο πιο ομαλά μεταβάλλονται τα μεγέθη, καθώς δεν είναι τόσο αισθητή η επιβαλλόμενη τάση και η αλλαγή από υλικό σε υλικό.

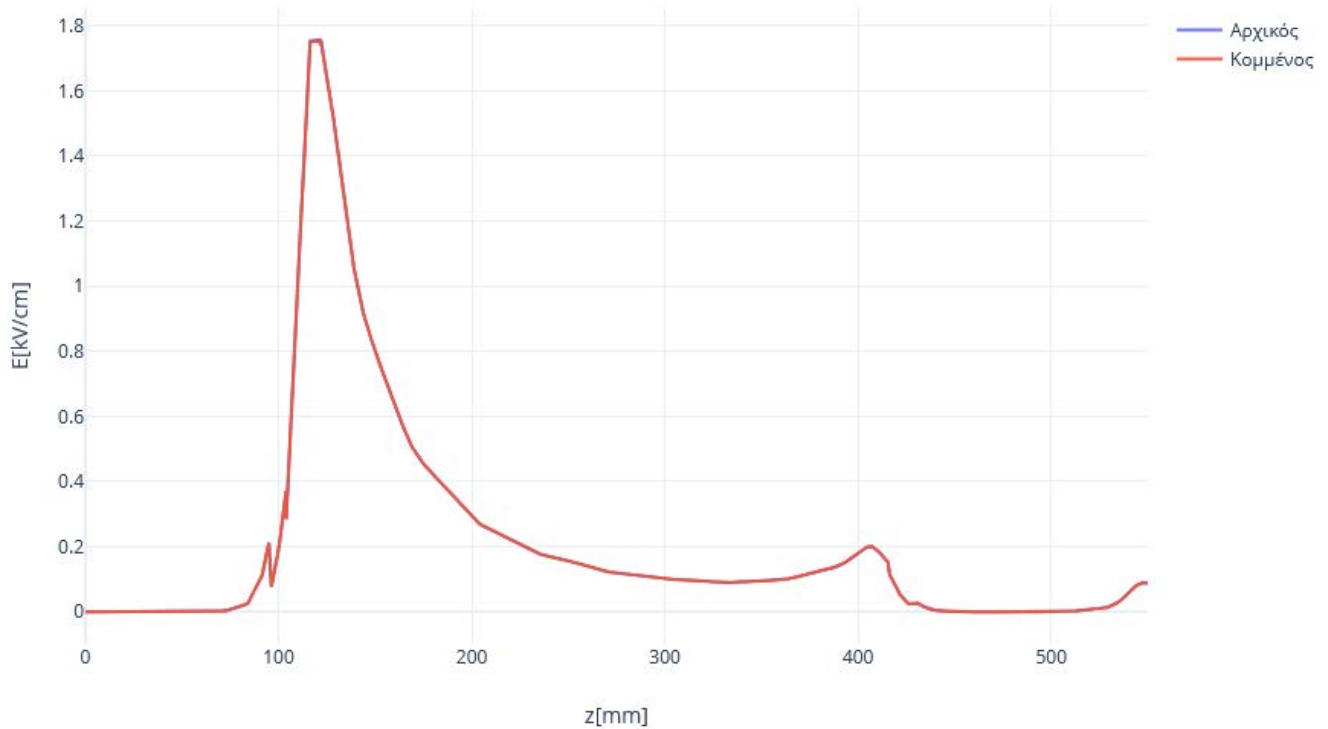


**Σχήμα 5-1 : Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της ράβδου μη κεραμικού μονωτήρα. (α) Κατανομή δυναμικού. (β) Κατανομή έντασης ηλεκτρικού πεδίου [52]**

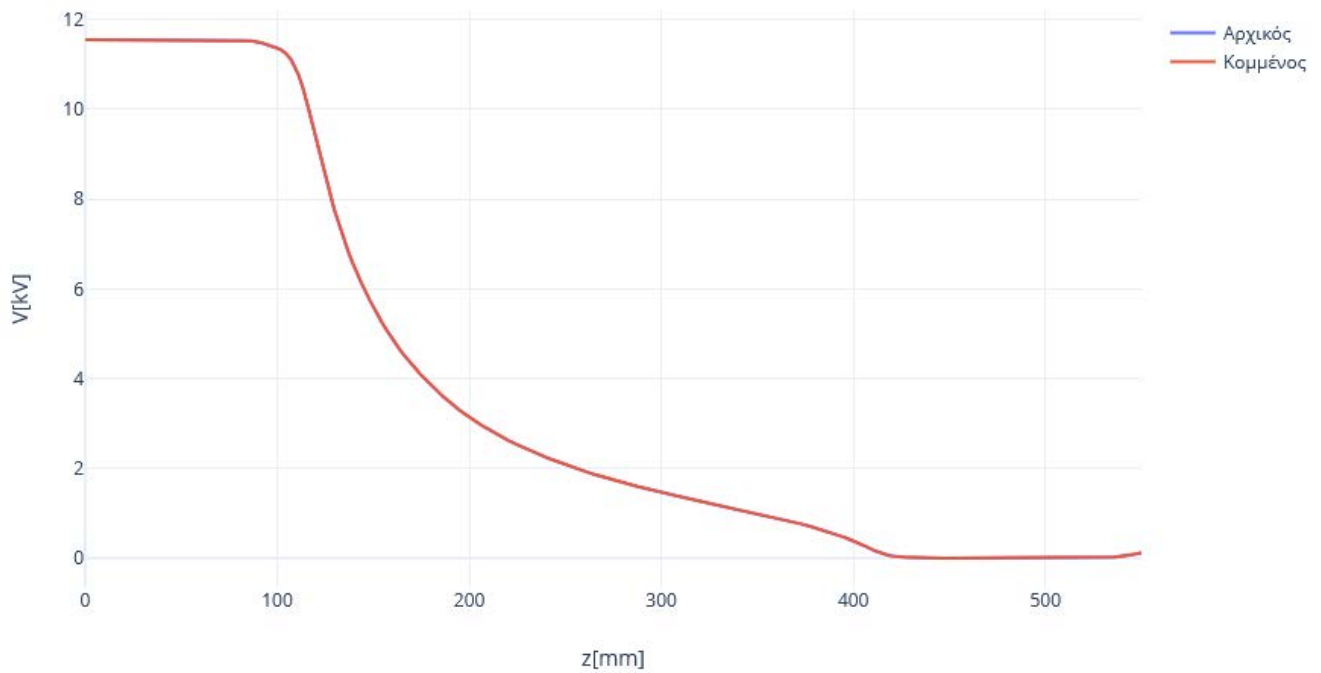
## **5.2 Ηλεκτρικό Πεδίο Μονωτήρων με κομμένα κυάθια**

Οι γραφικές που εξετάζουμε στη συνέχεια, αφορούν μονωτήρες με σπασίματα ή σκισίματα, λόγω καταπονήσεων από ζωικούς οργανισμούς ή άλλους παράγοντες (όπως διάβρωση). Συγκρίνοντας πάλι τις τιμές της έντασης και τάσης του αρχικού μονωτήρα με αυτές του φαγωμένου μονωτήρα στα σχήματα 5-2 έως 5-13, γίνεται αντιληπτό πως οι τιμές δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις στην κατανομή δυναμικού. Ωστόσο αποκλίσεις εμφανίζονται μόνο στις γραφικές παραστάσεις της έντασης που αφορούν τη γραμμή που διέρχεται από τα κυάθια (Σχήμα 5-4, Σχήμα 5-10). Παρατηρούμε πως στον αρχικό μονωτήρα η ένταση παρουσιάζει απότομες μειώσεις της έντασης στα σημεία που

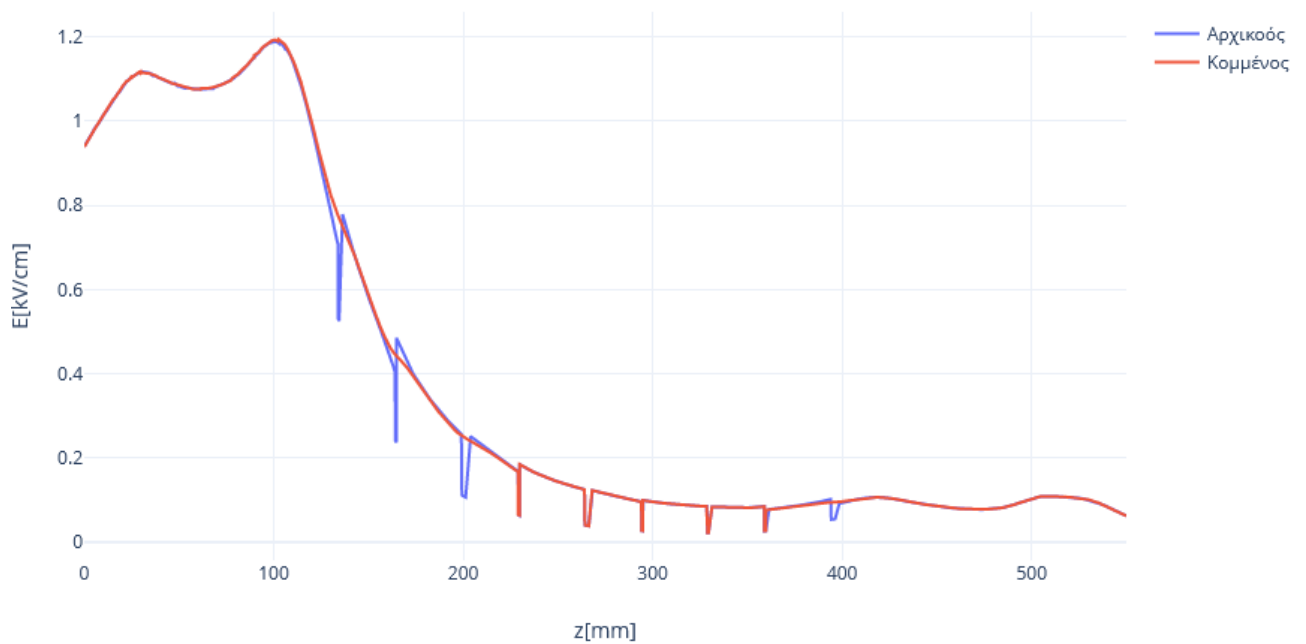
εμφανίζονται τα κυάθια. Αντιθέτως, η ένταση του κομμένου μονωτήρα συνεχίζει να μειώνεται ομοιόμορφα στα σημεία που είναι τα κομμένα κυάθια, καθώς δεν αλλάζει υλικό, και το πολυμερές είναι καλύτερο μονωτικό και παρουσιάζει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά.



**Σχήμα 5-2 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κομμένα κυάθια για  $x=0,y=0$**

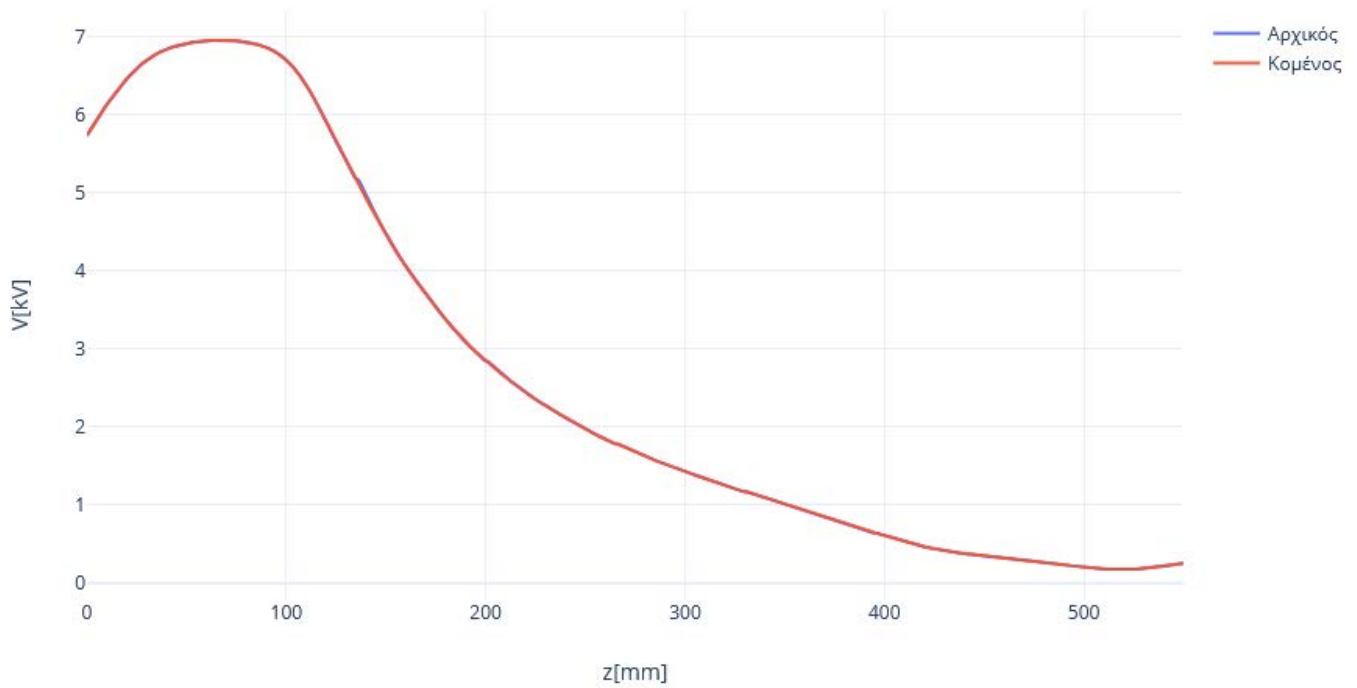


**Σχήμα 5-3 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κομμένα κιάθια για  $x=0, y=0$**

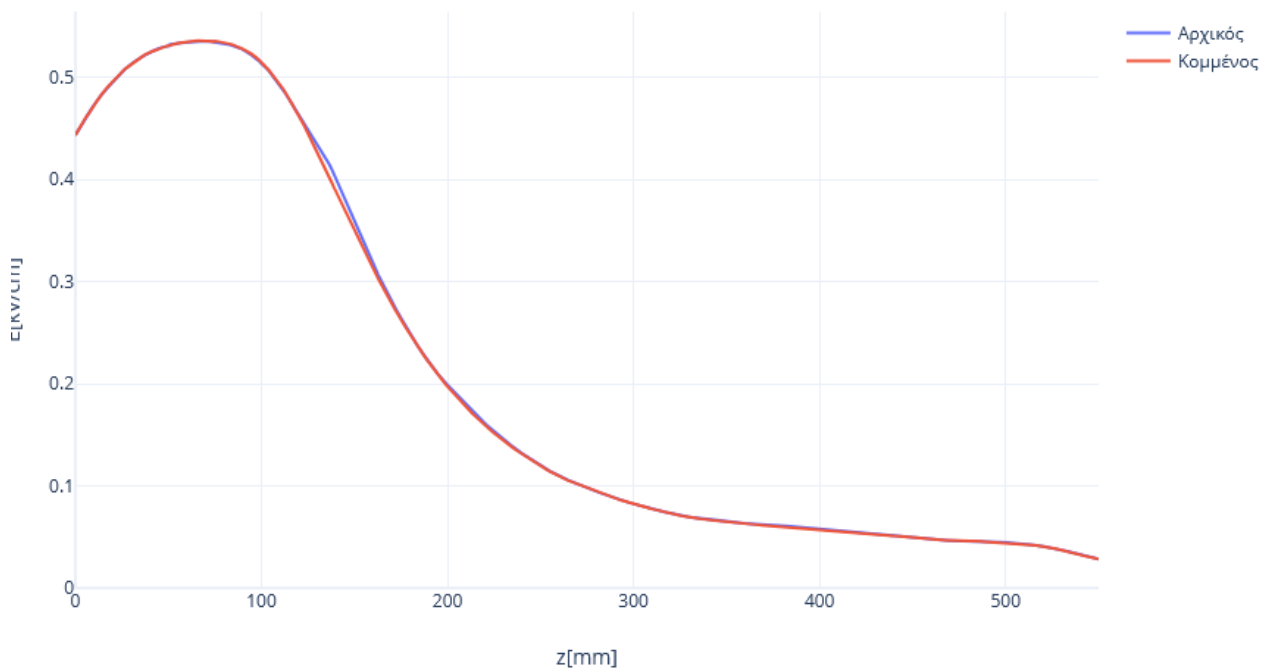


**Σχήμα 5-4 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κομμένα κιάθια για  $x=40, y=0$**

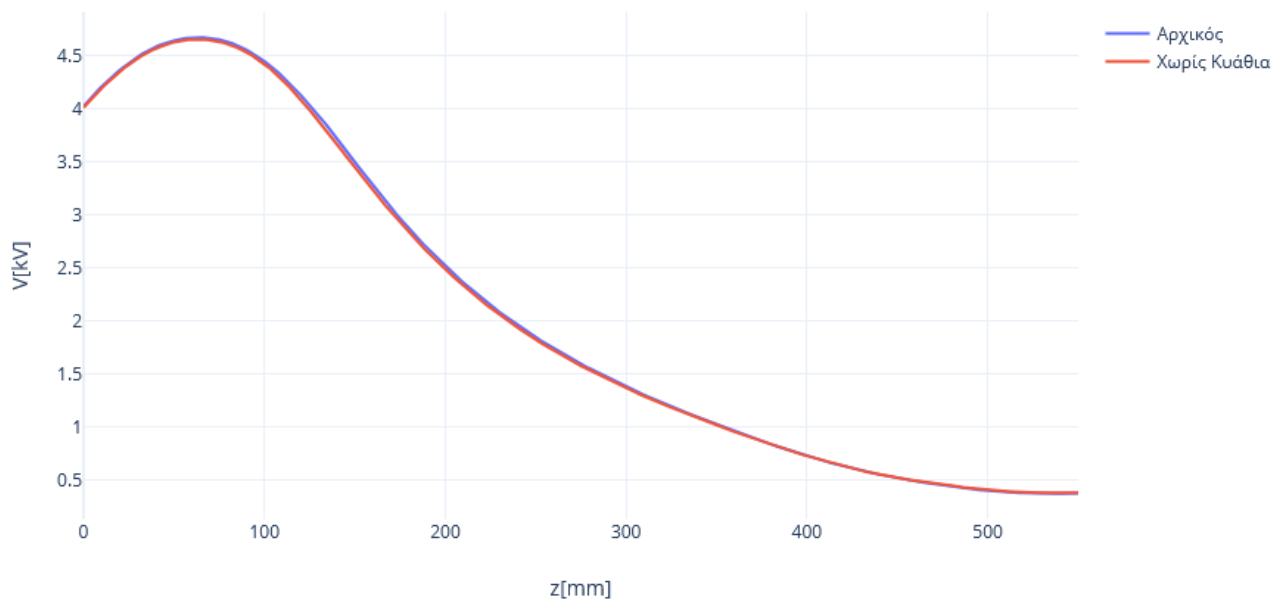




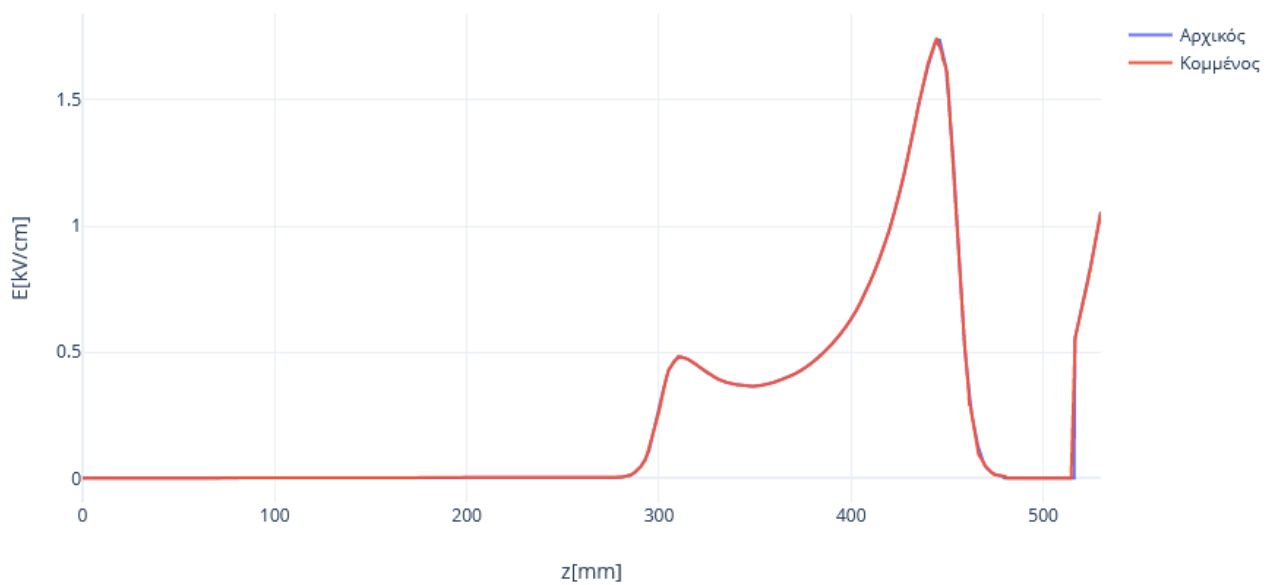
**Σχήμα 5-5 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κομμένα κυάθια για  $x=40,y=0$**



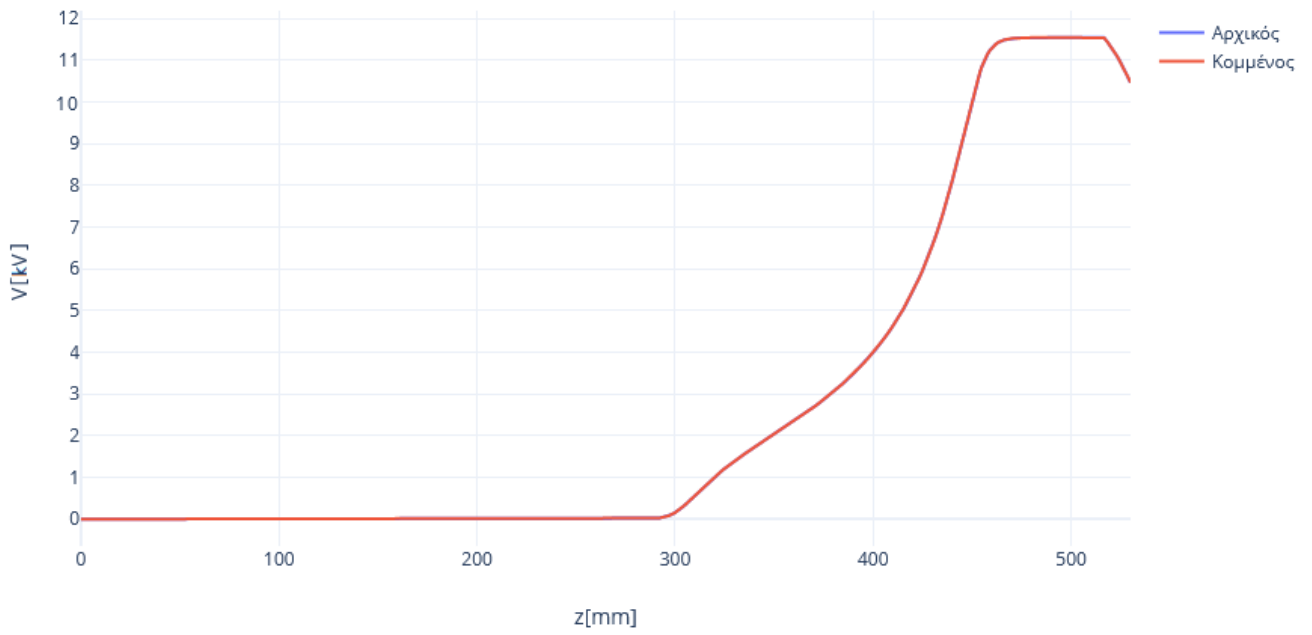
**Σχήμα 5-6 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κομμένα κυάθια για  $x=70,y=0$**



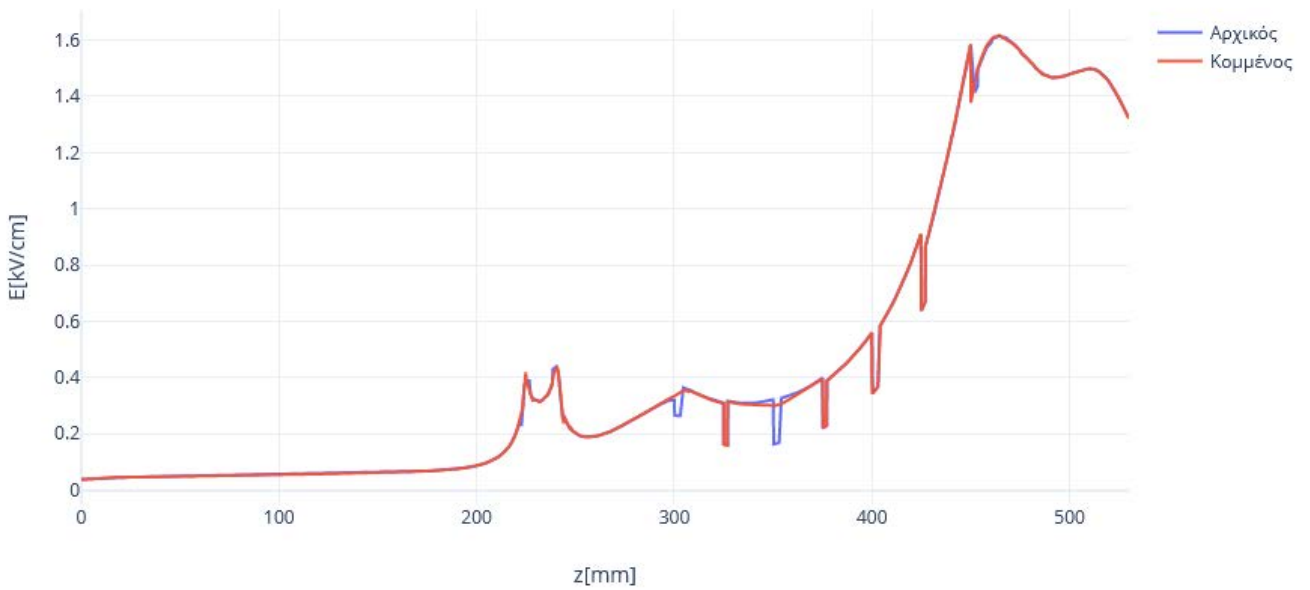
**Σχήμα 5-7 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κομμένα κυάθια για  $x=70,y=0$**



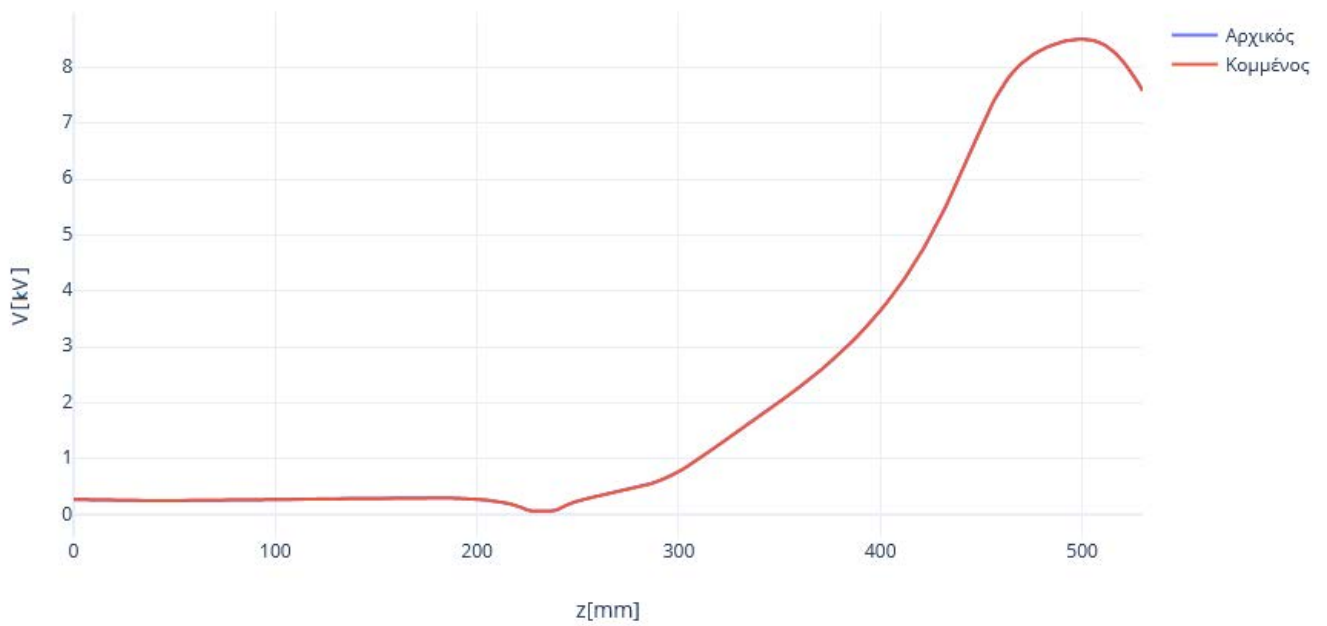
**Σχήμα 5-8 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κομμένα κυάθια για  $x=0,y=0$**



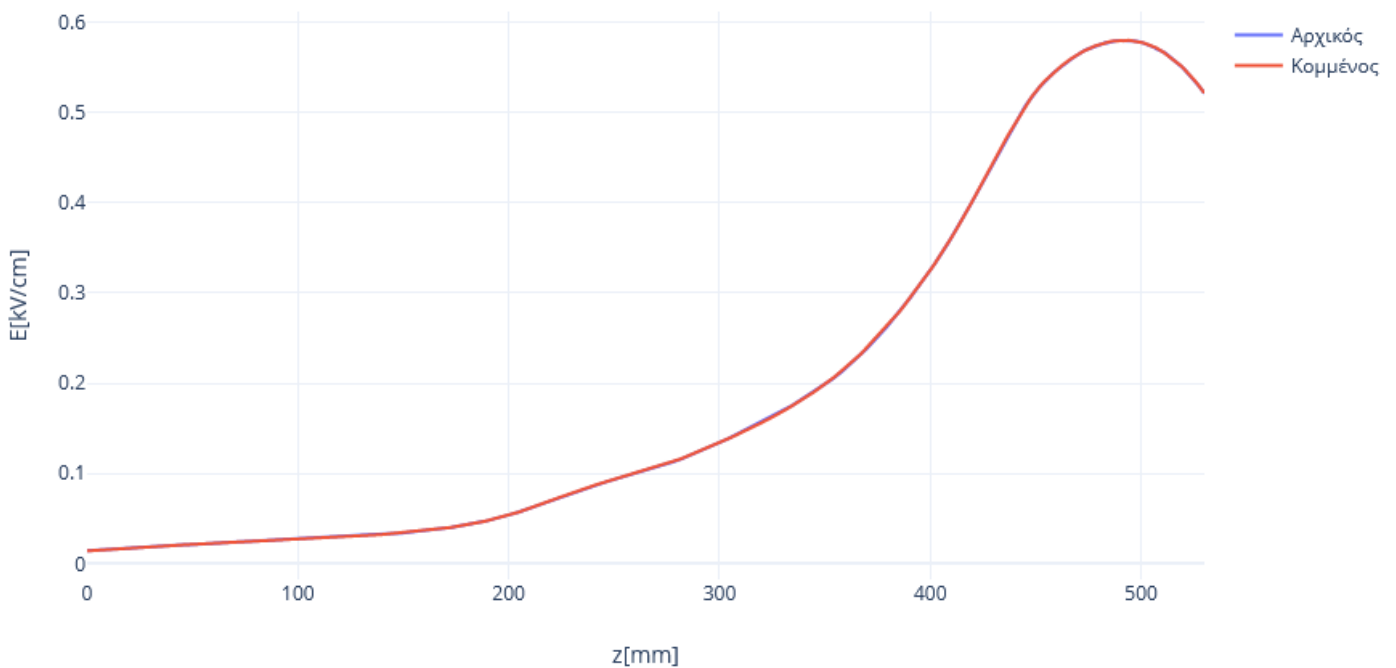
**Σχήμα 5-9 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κομμένα κιάθια για  $x=0,y=0$**



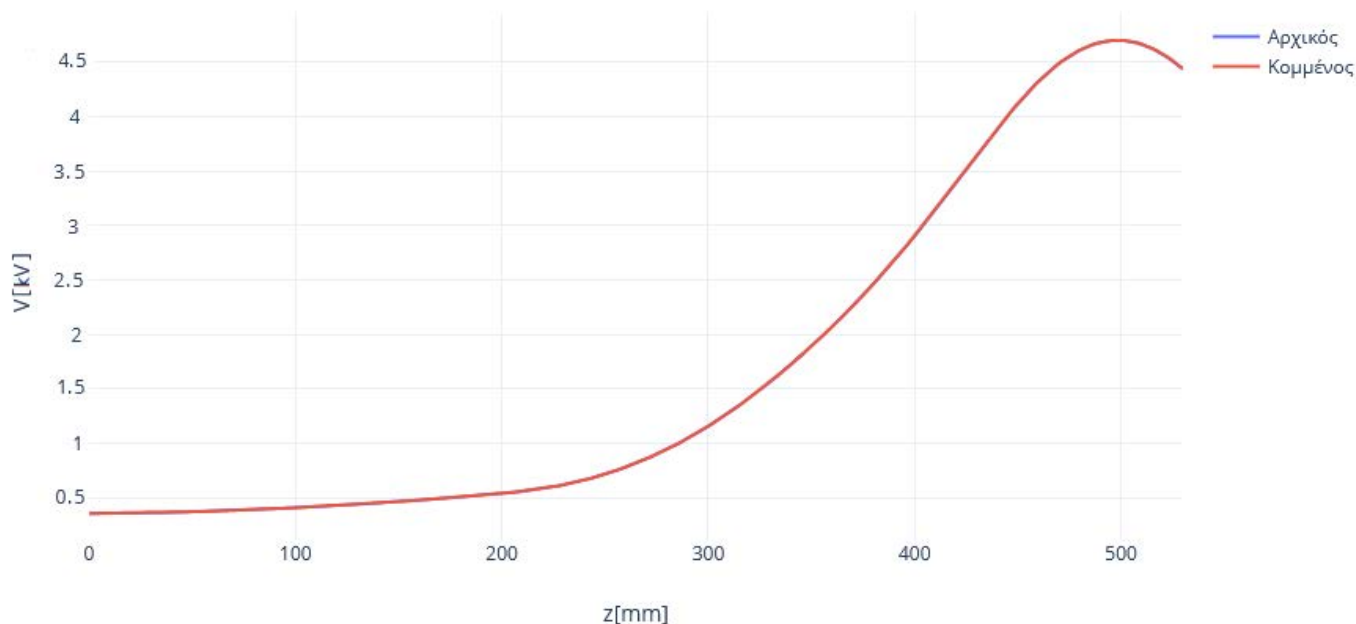
**Σχήμα 5-10 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κομμένα κιάθια για  $x=40,y=0$**



**Σχήμα 5-11 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κομμένα κιάθια για  $x=40, y=0$**



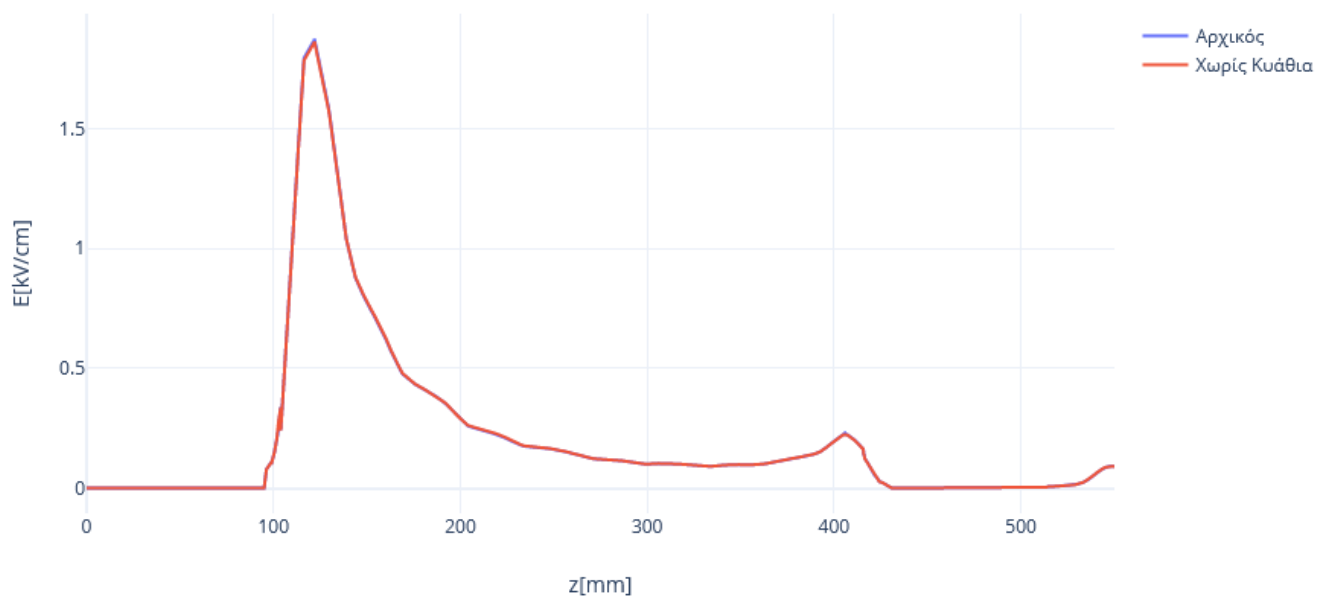
**Σχήμα 5-12 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κομμένα κιάθια για  $x=80, y=0$**



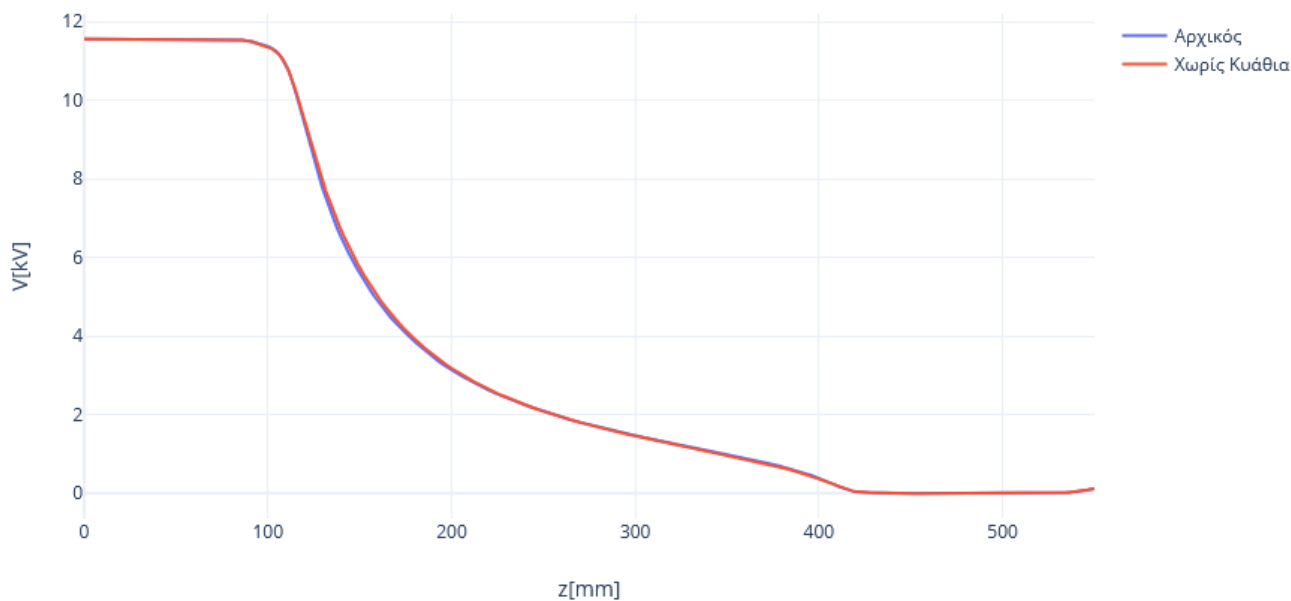
**Σχήμα 5-13 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κομμένα κιάθια για  $x=80, y=0$**

### 5.3 Ηλεκτρικό Πεδίο Μονωτήρων χωρίς κιάθια

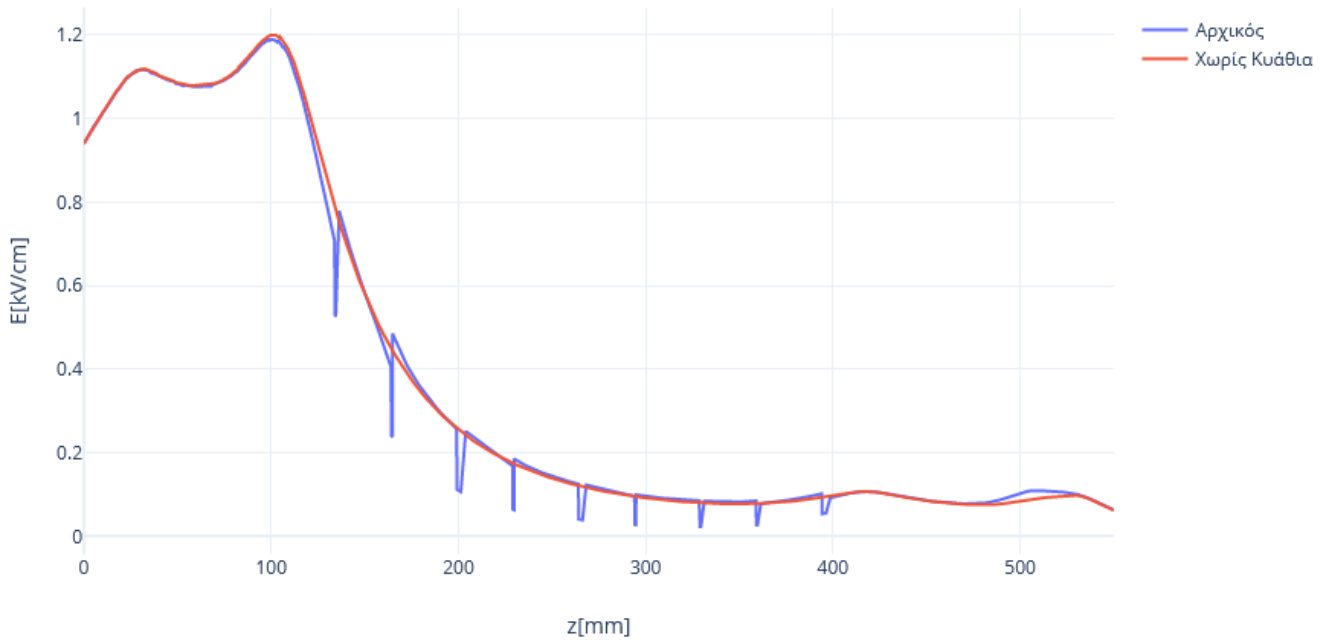
Τα κιάθια σε ένα μονωτήρα χρησιμεύουν στο να του προσδίδουν κάποια χαρακτηριστικά όπως ικανότητα απόρριψης νερού, προστασία κατά της σκόνης κ.α. Φυσικά σε όλα αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι περιορισμοί κατασκευής και οι απαιτήσεις ηλεκτρικής απόδοσης και ελάχιστου βάρους. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, τα κιάθια έχουν σχεδιαστεί όπως εμφανίστηκαν στα σχήματα της ενότητας 1.2 [53]. Ωστόσο, η κατανομή της τάσης και της έντασης του πεδίου που δημιουργείται γύρω από έναν μονωτήρα δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τα κιάθια αυτά, γεγονός που φαίνεται έντονα στα σχήματα 5-14 έως 5-25, όπου εμφανίζεται η ταύτιση των εν λόγω γραφικών. Σημαντικές αποκλίσεις παρατηρούνται στα σχήματα 5-16 και 5-22, στα οποία, όπως και στην προηγούμενη ενότητα, η γραμμή που συναντά τα κιάθια εμφανίζει βυθίσεις στην ένταση, ενώ η γραμμή που παραμένει στο υλικό του αέρα, εμφανίζει μια ομοιόμορφη αλλαγή της έντασης κατά μήκος του μονωτήρα. Επιπλέον στο Σχήμα 5-20, η μέγιστη τιμή έντασης του πεδίου στο μονωτήρα χωρίς κιάθια είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του αρχικού μονωτήρα, το οποίο ίσως οφείλεται στο ότι ο μονωτήρας γραμμής έχει μικρότερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, σε σχέση με τον μονωτήρα ανάρτησης και αφαιρώντας τα κιάθιά του, το μήκος ερπισμού μικραίνει ακόμα περισσότερο, οπότε η ένταση αυξάνεται.



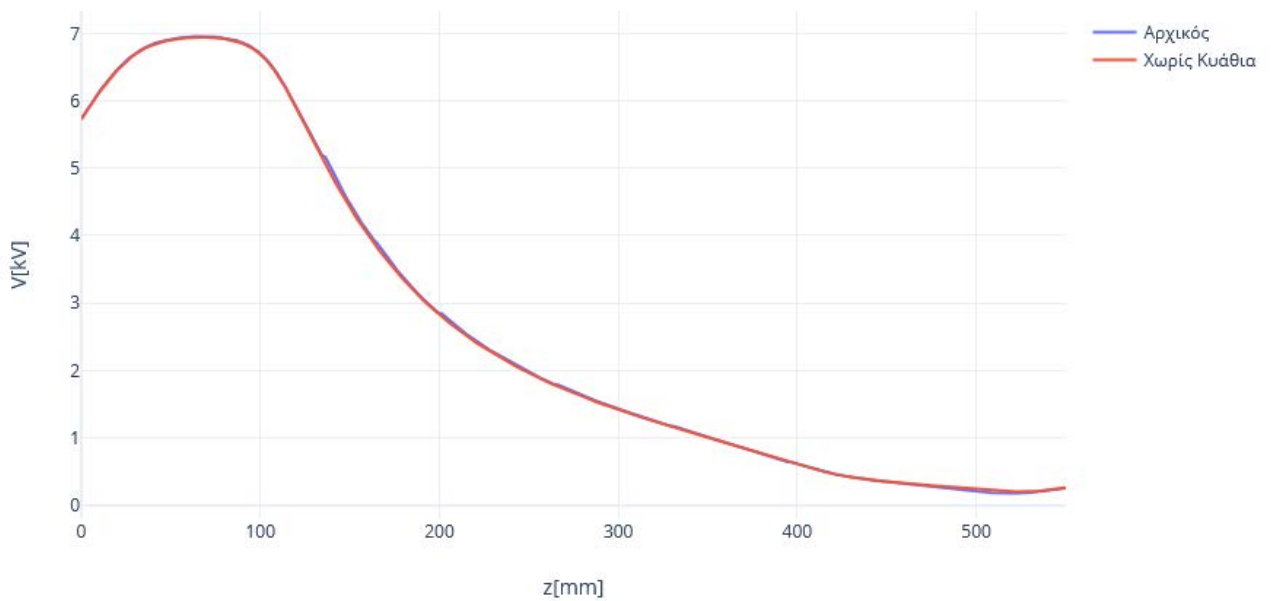
**Σχήμα 5-14 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κυάθια για  $x=0, y=0$**



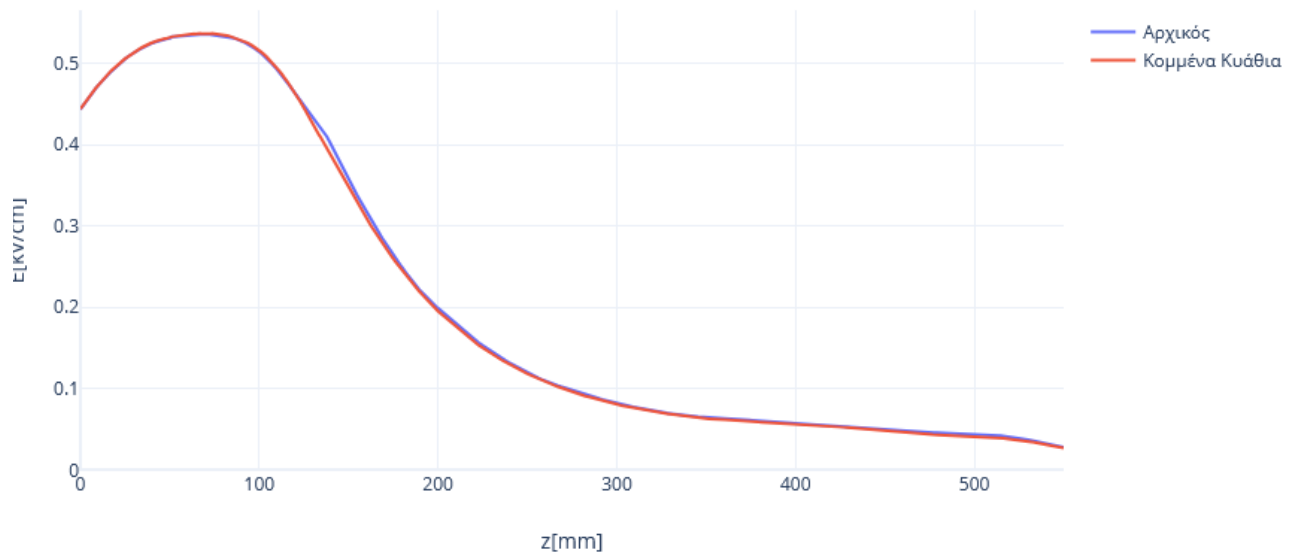
**Σχήμα 5-15 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κυάθια για  $x=0, y=0$**



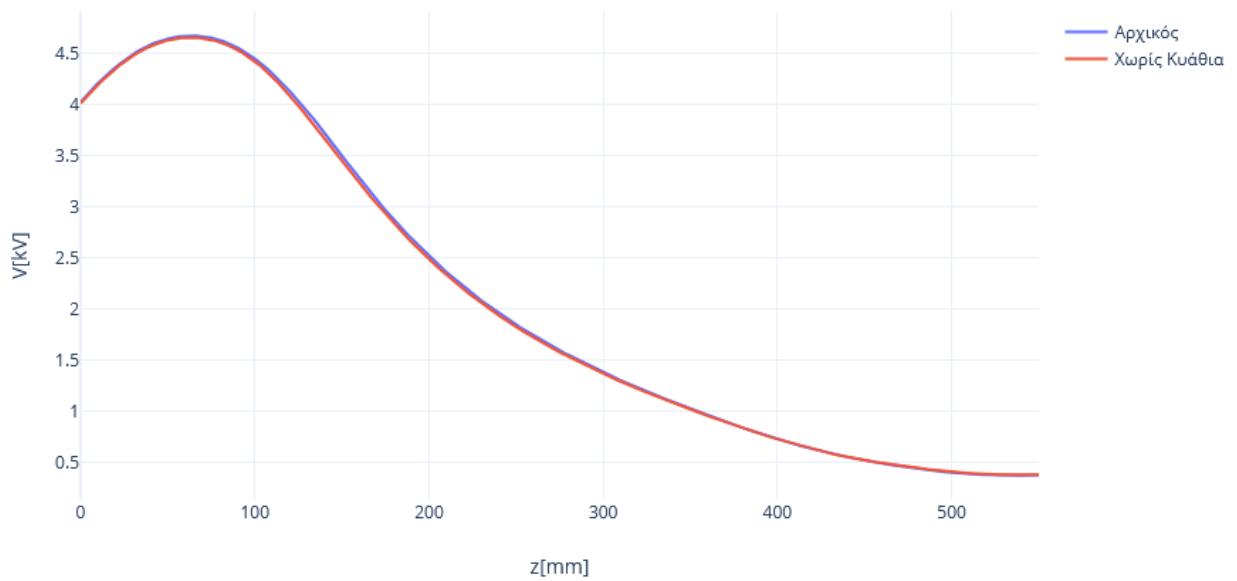
**Σχήμα 5-16 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κυάθια για  $x=40, y=0$**



**Σχήμα 5-17 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κυάθια για  $x=40, y=0$**

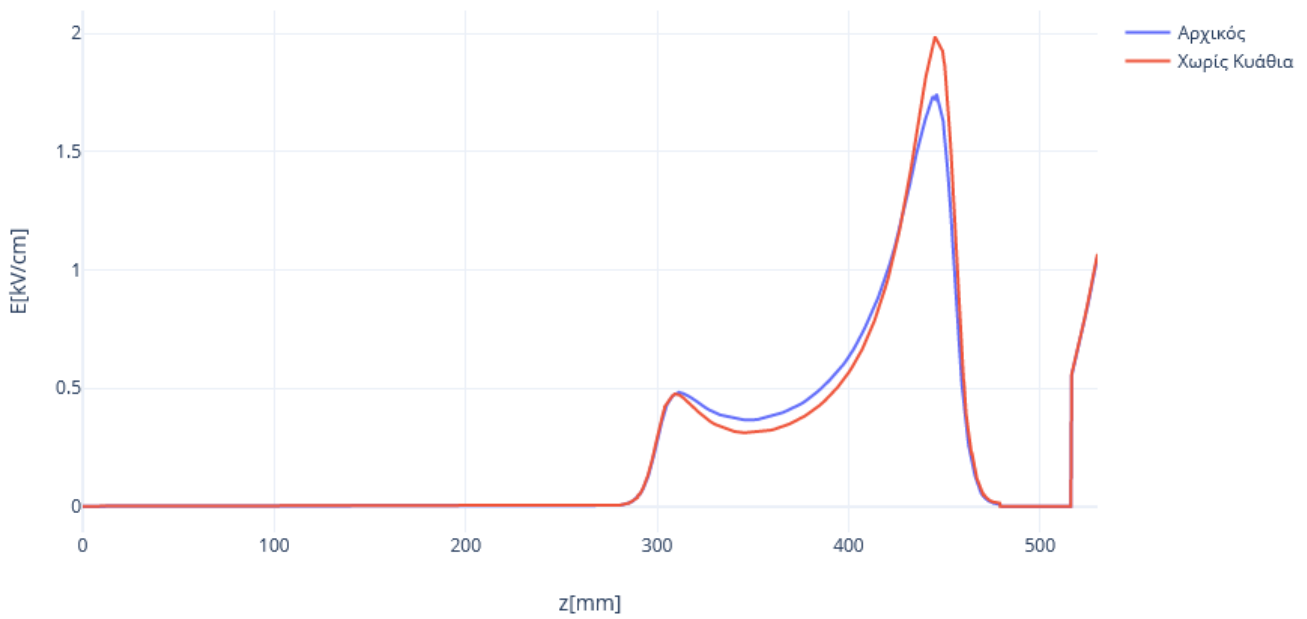


**Σχήμα 5-18 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κυάθια για  $x=70, y=0$**

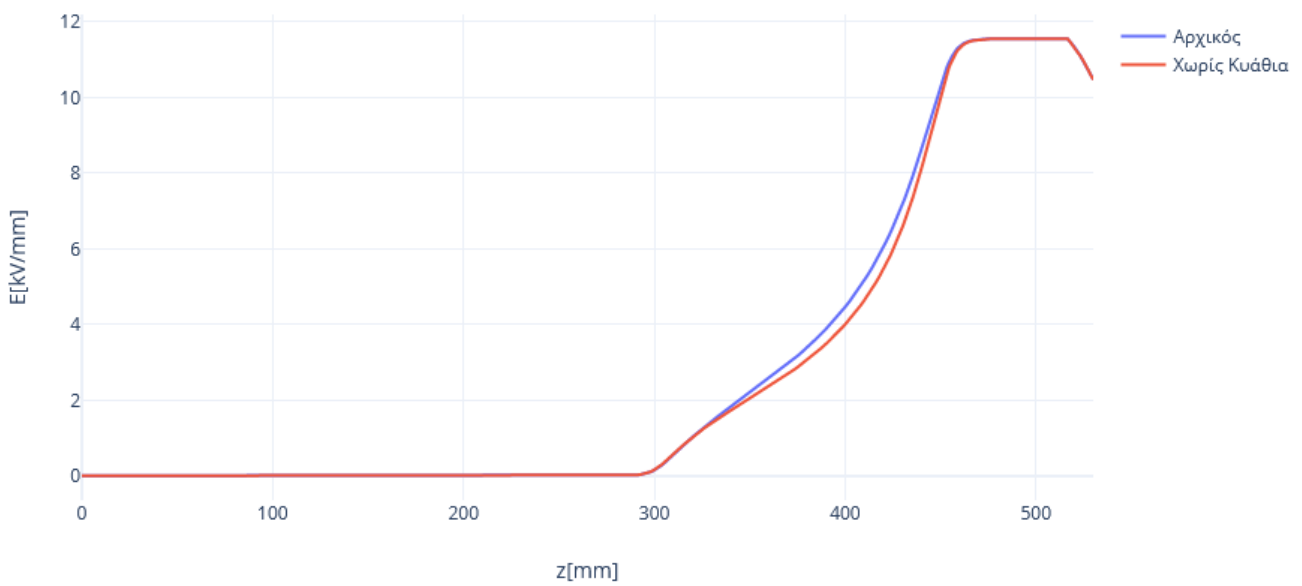


**Σχήμα 5-19 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς κυάθια για  $x=70, y=0$**

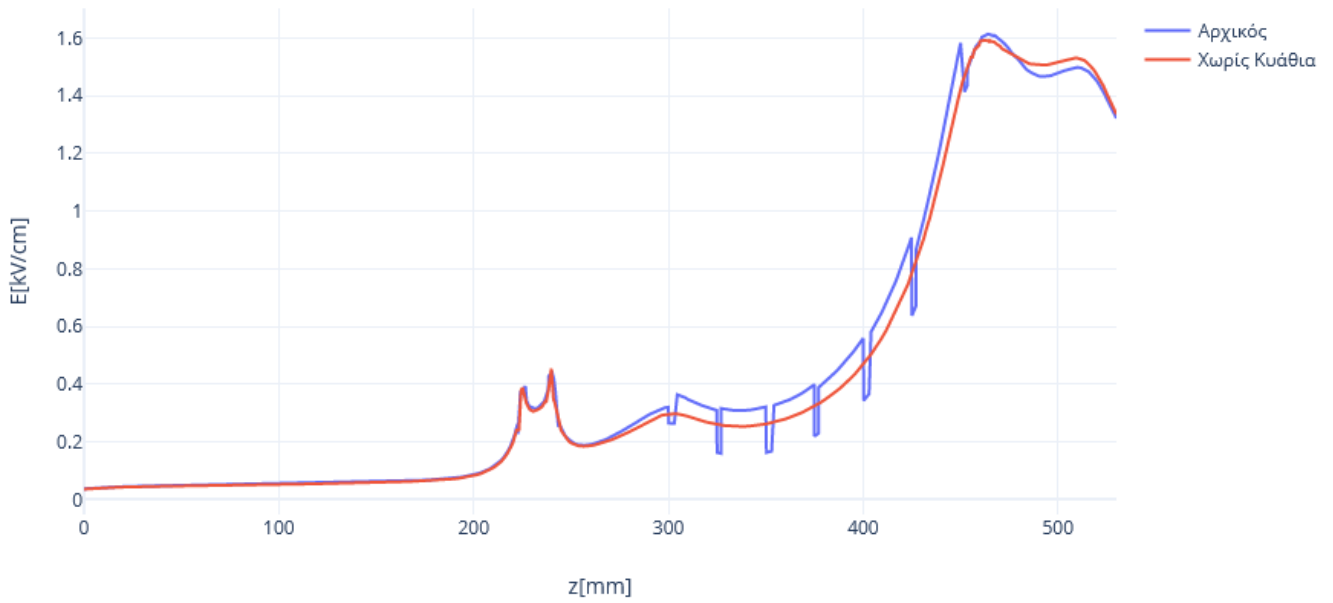




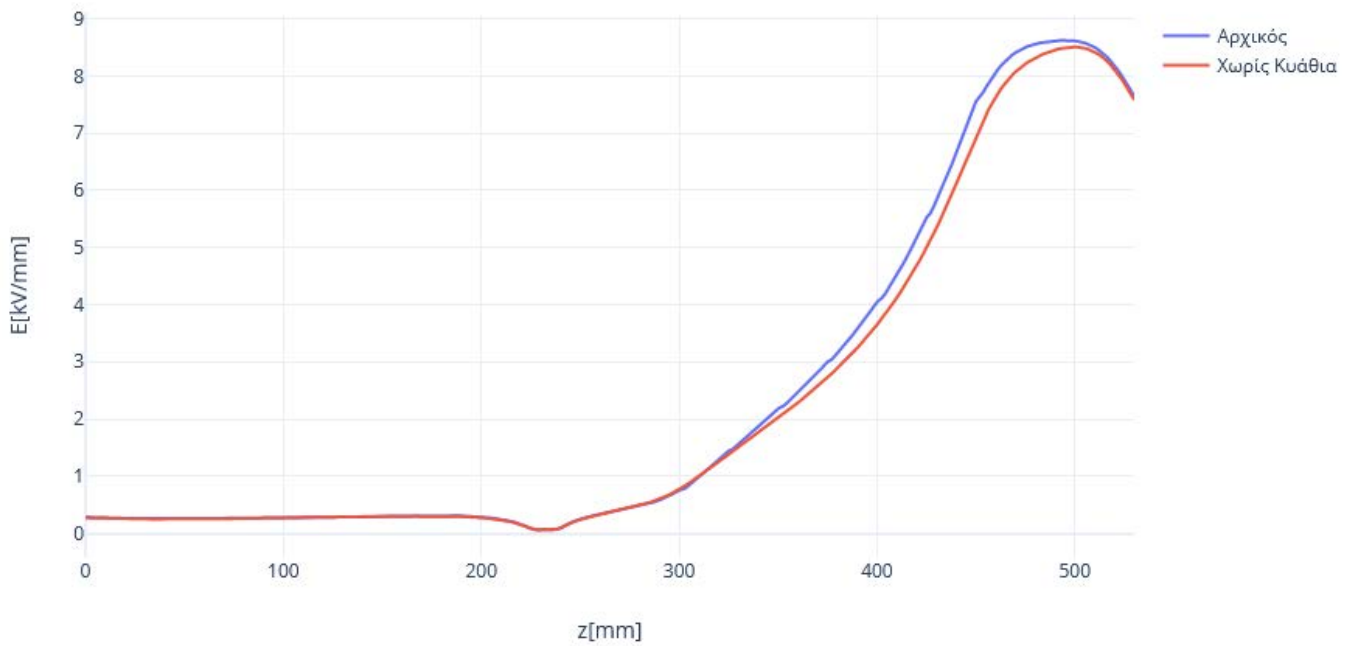
**Σχήμα 5-20 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κυάθια για  $x=0,y=0$**



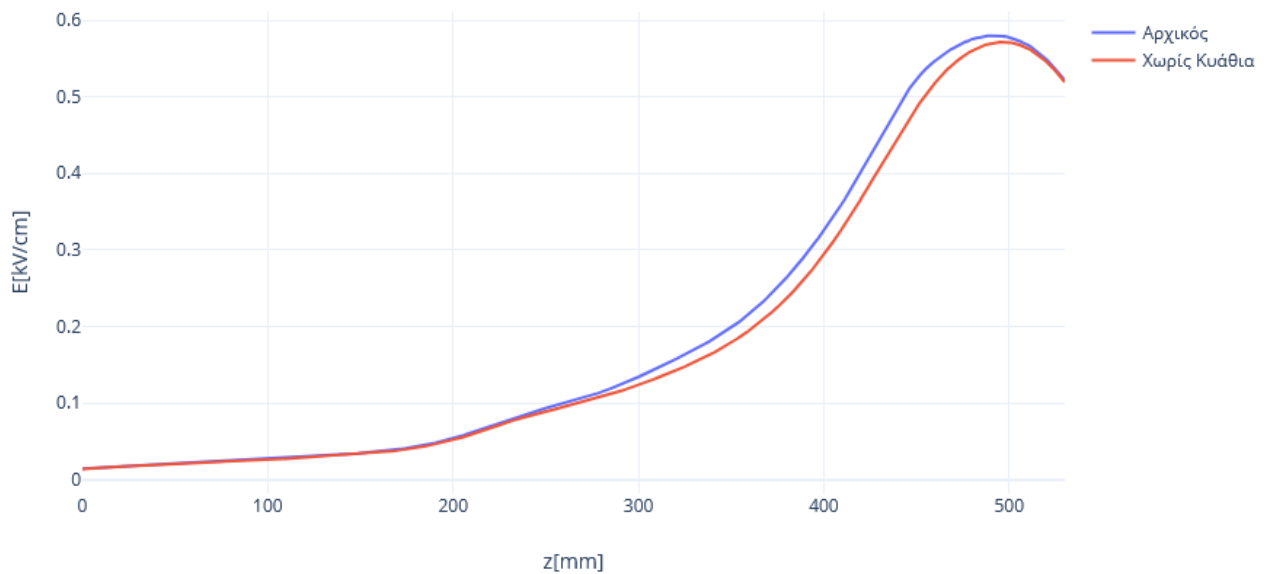
**Σχήμα 5-21 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κυάθια για  $x=0,y=0$**



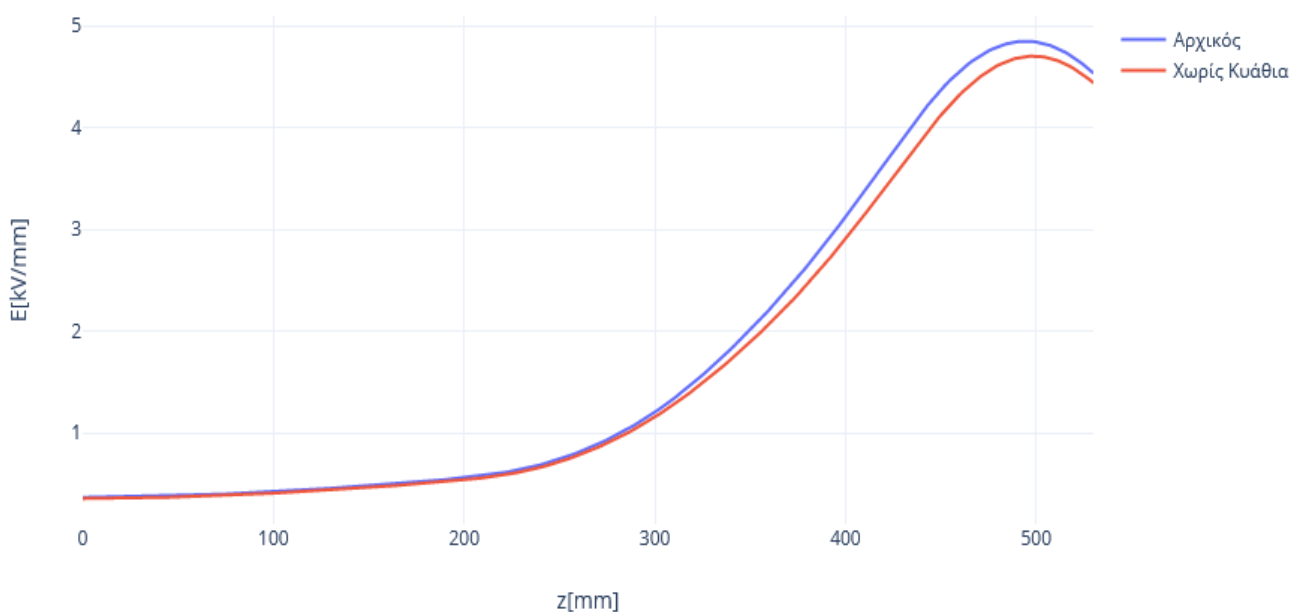
**Σχήμα 5-22 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κυάθια για  $x=40, y=0$**



**Σχήμα 5-23 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κυάθια για  $x=40, y=0$**



**Σχήμα 5-24 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κυάθια για  $x=80,y=0$**



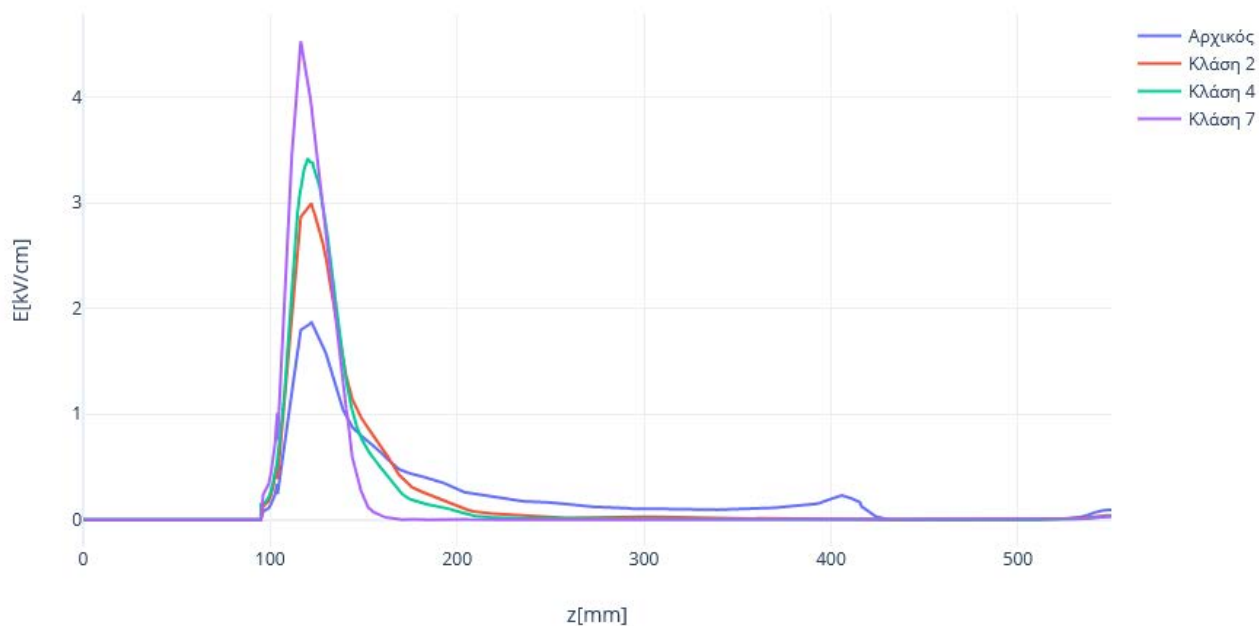
**Σχήμα 5-25 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς κυάθια για  $x=80,y=0$**

## 5.4 Ηλεκτρικό Πεδίο Μονωτήρων με σταγόνες

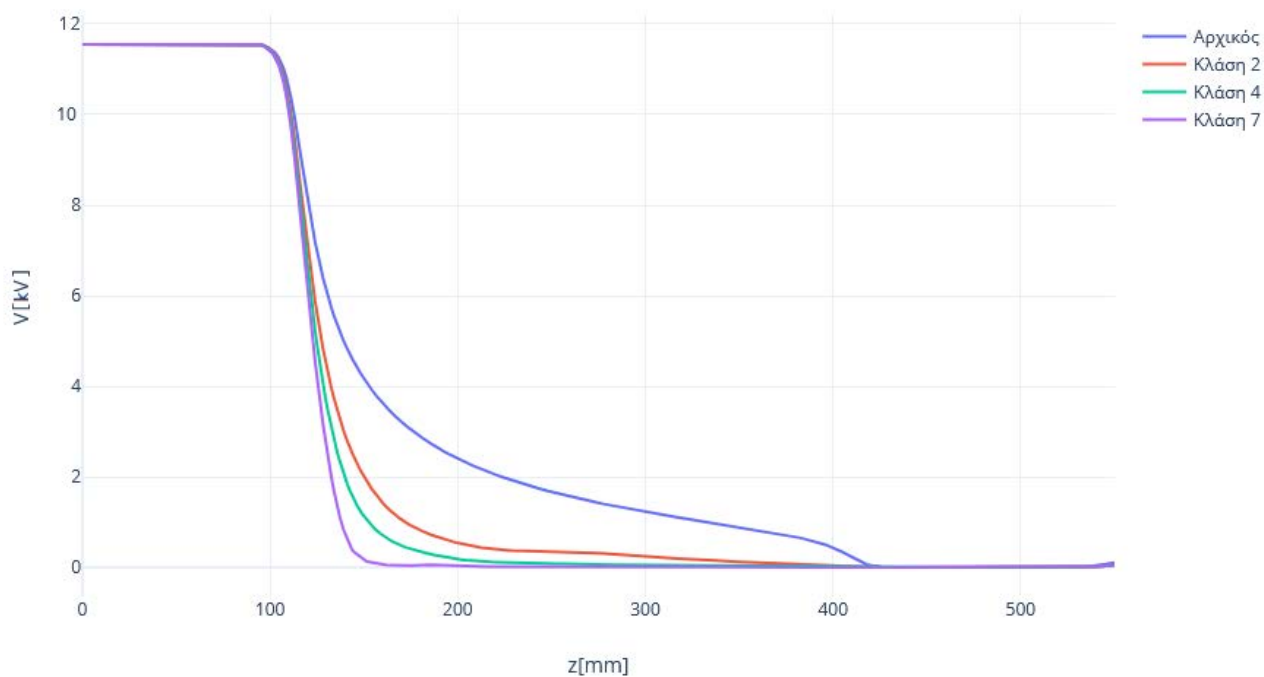
Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 1.6.2, το νερό πάνω σε έναν μονωτήρα είναι ένας ανεπιθύμητος παράγοντας, αφού υγραίνει την επιφάνεια, στην οποία έχει επικαθήσει κάποιο στρώμα ρύπανσης. Έτσι, δημιουργούνται ηλεκτρολύτες κατά μήκος του

μονωτήρα, μειώνοντας την επιφανειακή του αντίσταση και επιτρέποντας την κυκλοφορία ενός υπολογίσιμου ρεύματος διαρροής, το οποίο διευκολύνει τις μερικές εκκενώσεις και το φαινόμενο υπερπήδησης. Αυτά ακολούθως οδηγούν σε απώλεια των μονωτικών ιδιοτήτων του διηλεκτρικού. Ωστόσο, στην επιφάνεια υδρόφοβων υλικών, όπως είναι οι συνθετικοί μονωτήρες από πολυμερή, σχηματίζονται μικρές σταγόνες, οι οποίες διαλύουν τις ρυπαντές εμποδίζοντας τη συνένωσή τους και τη δημιουργία ενός συνεχούς αγωγίμου μέρους. Αυτές οι συνθήκες έχουν σαν αποτέλεσμα τη μειωμένη ροή ρεύματος διαρροής και την πιθανότητα σχηματισμού ξηρών ζωνών που με τη σειρά τους απαιτούν την εφαρμογή υψηλότερης τάσης για να προκληθεί υπερπήδηση [54]. Όσο η κλάση υδροφοβίας αυξάνεται, τόσο το διηλεκτρικό χάνει την ικανότητα του να σχηματίζει μικρές σταγόνες. Επομένως από τις τρεις κλάσεις μονωτήρων που μελετήθηκαν, αναμένονται καλύτερα αποτελέσματα στις περιπτώσεις όπου το νερό έχει τη μορφή μικρών σταγόνων και δεν καλύπτει όλη την επιφάνειά τους, δηλαδή στις μικρότερες κλάσεις. Από τις γραφικές της έντασης λόγω της υψηλής διαπερατότητας των σταγονιδίων, αναμένεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα να είναι υψηλότερη από αυτή της περίπτωσης του στεγνού μονωτήρα [55].

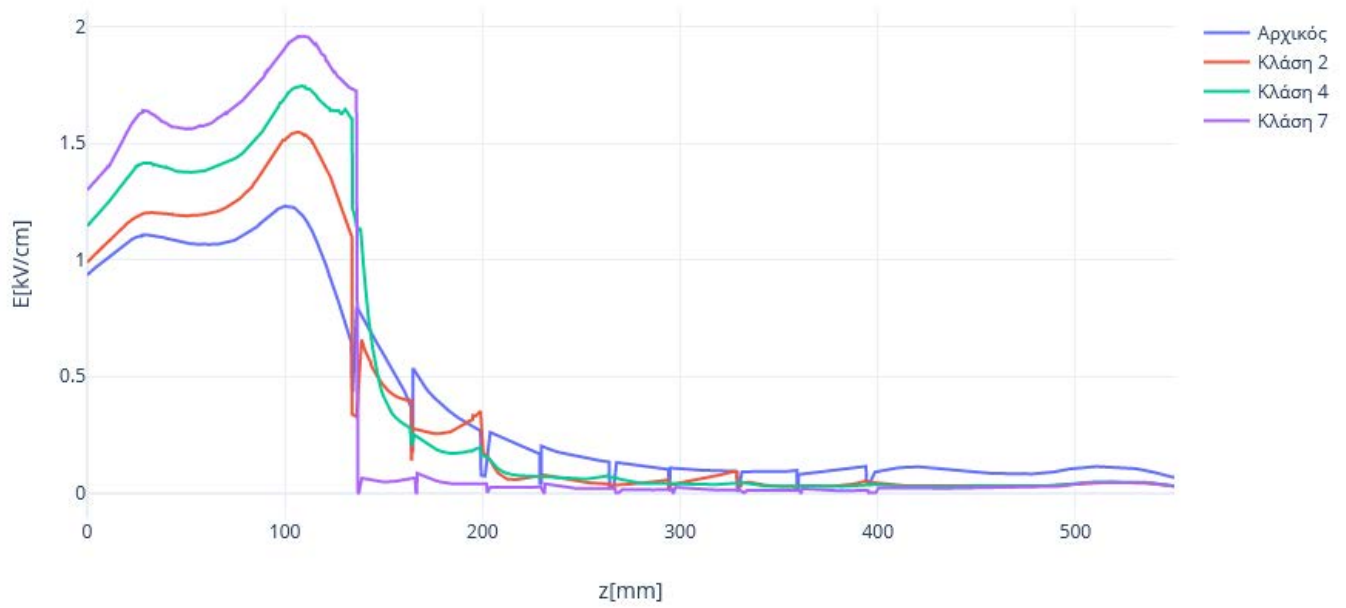
Στα σχήματα Σχήμα 5-26 έως Σχήμα 5-29, πραγματοποιείται σύγκριση των γραφικών παραστάσεων ηλεκτρικής τάσης και έντασης ηλεκτρικού πεδίου των τριών μοντέλων υδροφοβικής κλάσης με αυτές του μοντέλου του αρχικού μονωτήρα ανάρτησης (του Σχήμα 4-7). Αρχικά παρατηρούμε πως η μέγιστη τιμή έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι υψηλότερη, όταν η κλάση υδροφοβίας είναι μεγαλύτερη, γεγονός που συνάδει με τα προαναφερθέντα, καθώς και με σχετική βιβλιογραφία ([56]). Αυτό αναδεικνύεται και από την κλίση των καμπυλών στις γραφικές παραστάσεις των δυναμικών, αφού όσο μεγαλύτερη είναι η κλάση τόσο απότομα μειώνονται οι τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μηδενίζεται πιο γρήγορα το δυναμικό, γεγονός που εξηγεί τον γρηγορότερο μηδενισμό των μεγαλύτερων κλάσεων και στις γραφικές έντασης. Τέλος, ένα ακόμη φαινόμενο που παρατηρείται, είναι πως οι τιμές της έντασης τείνουν να μηδενιστούν στα σημεία όπου η γραμμή ( $x=40,y=0$ ) διαπερνά τα κιάθια, λόγω αλλαγής υλικού. Όμοια είναι και τα αποτελέσματα για το μονωτήρα γραμμής στα σχήματα Σχήμα 5-30 έως Σχήμα 5-33.



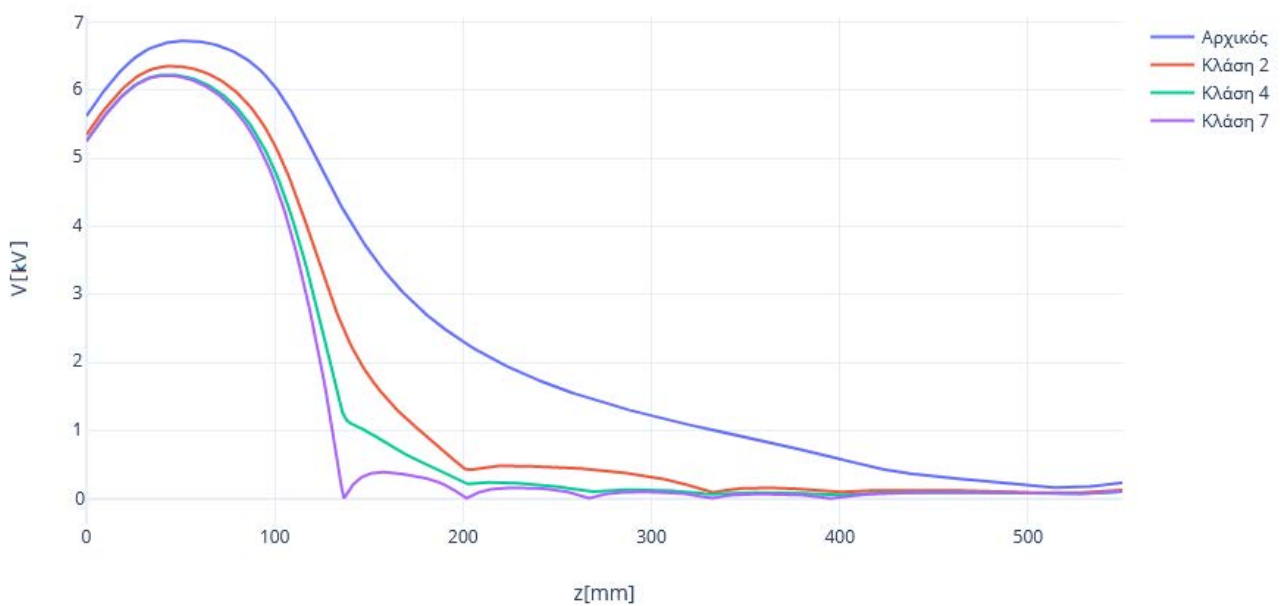
**Σχήμα 5-26 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς σταγόνες για  $x=0,y=0$**



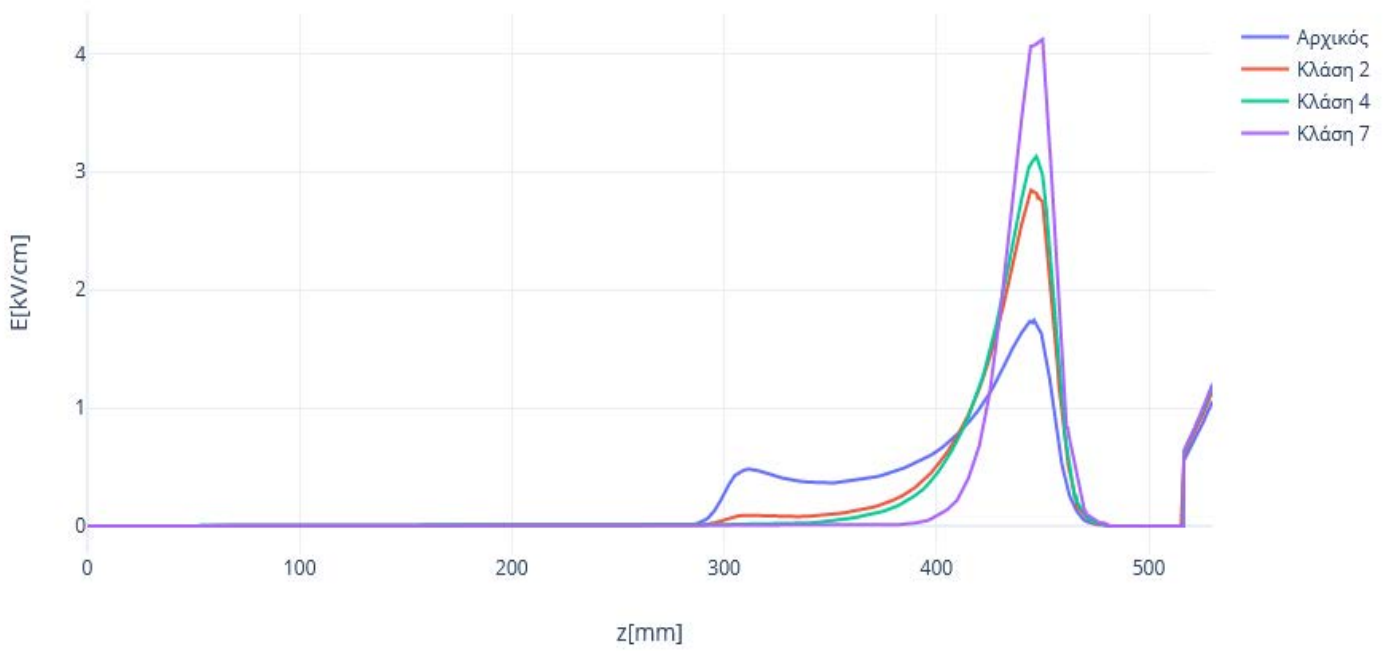
**Σχήμα 5-27 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς σταγόνες για  $x=0,y=0$**



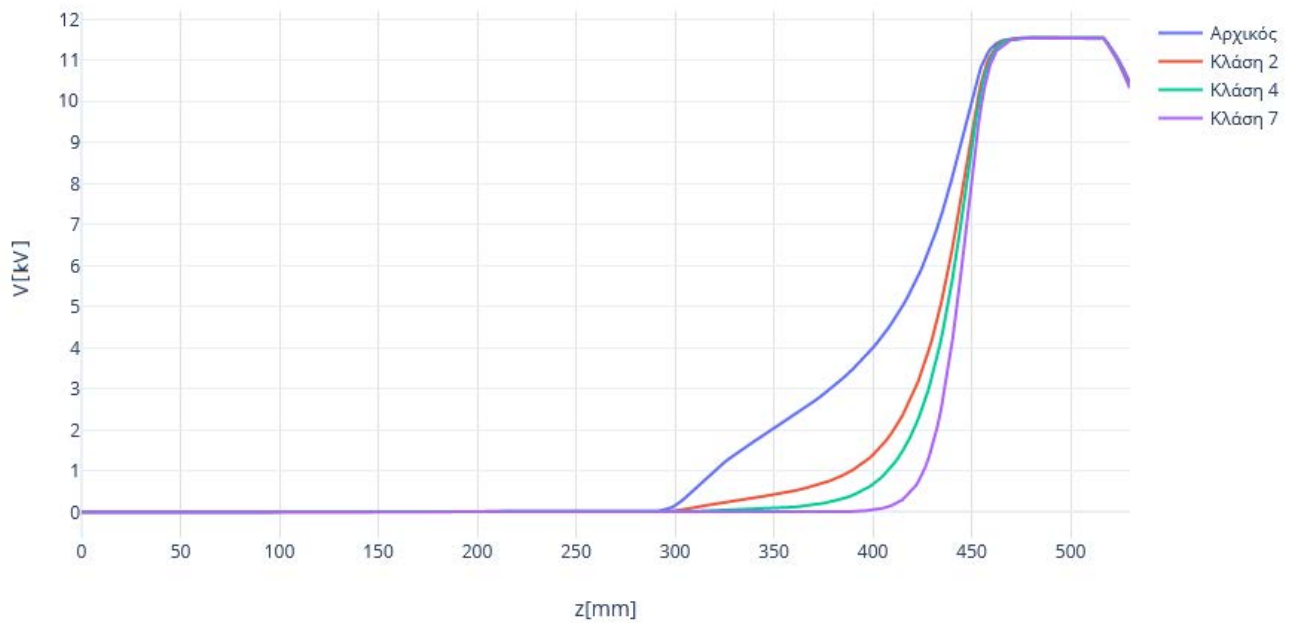
**Σχήμα 5-28 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς σταγόνες για  $x=40, y=0$**



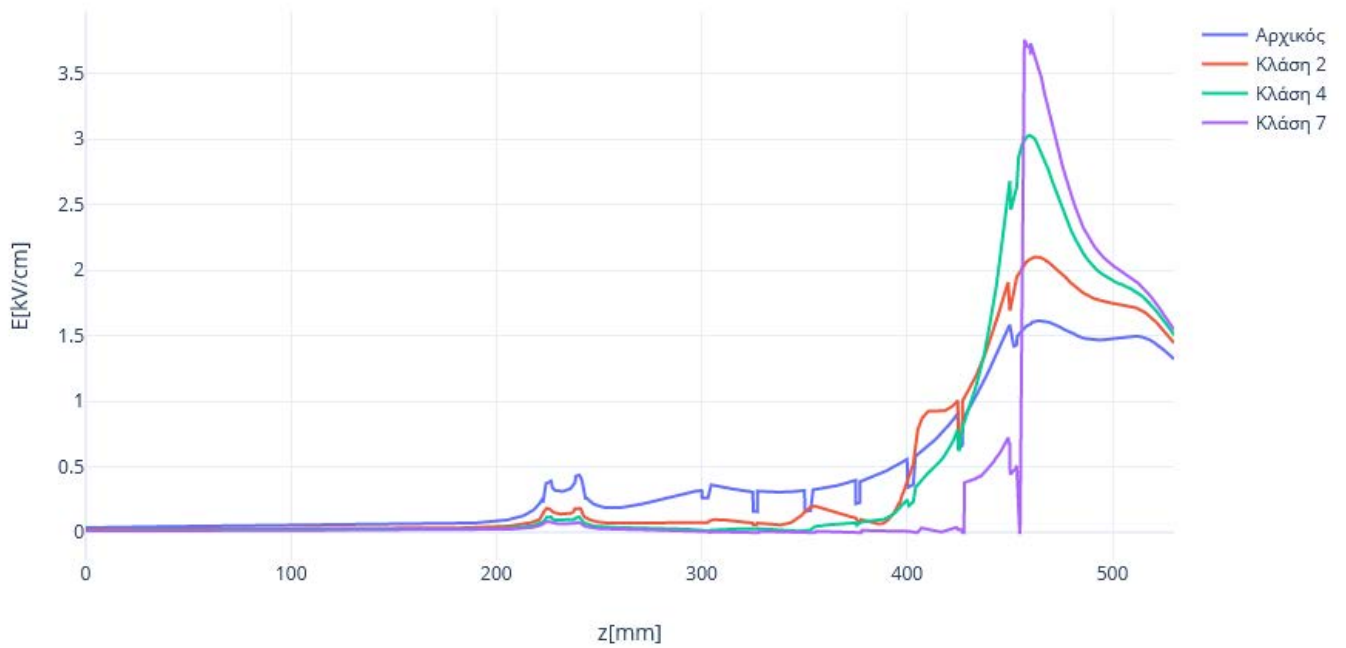
**Σχήμα 5-29 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Ανάρτησης με και χωρίς σταγόνες για  $x=40, y=0$**



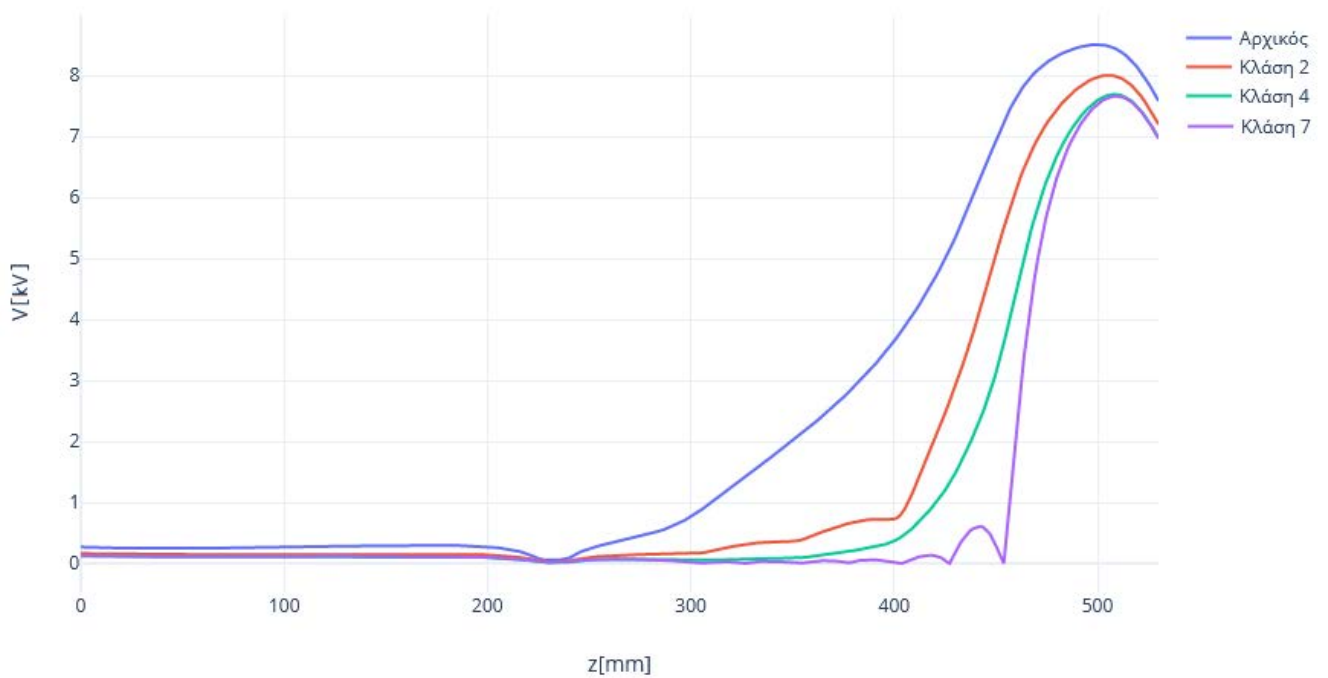
**Σχήμα 5-30 : Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς σταγόνες για  $x=0, y=0$**



**Σχήμα 5-31 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς σταγόνες για  $x=0, y=0$**



**Σχήμα 5-32: Σύγκριση Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς σταγόνες για  $x=40, y=0$**



**Σχήμα 5-33 : Σύγκριση Κατανομής Δυναμικού Μονωτήρα Γραμμής με και χωρίς σταγόνες για  $x=40, y=0$**



## 5.5 Επίλογος

Οι συνθετικοί μονωτήρες, όπως προαναφέρθηκε, προτιμώνται έναντι των κεραμικών μονωτήρων, λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως είναι το χαμηλό τους βάρος, η ευκολία στην εγκατάστασή τους, η υδροφοβία τους, η αντοχή τους στον εφελκυσμό κλπ. Ειδικότερα η υδροφοβία είναι μια ιδιότητα που τους επιτρέπει, σε περιπτώσεις υγρασίας, βροχής κ.α., να διατηρούν ξηρές περιοχές στην επιφάνειά τους, αποτρέποντας το νερό να δημιουργήσει συνεχόμενες υδάτινες επιφάνειες που θα επιφέρουν αγώγιμες περιοχές, ευάλωτες σε ρεύματα διαρροής και φαινόμενα υπερπήδησης. Αυτό έγινε εμφανές στην ενότητα 5.4, όπου όσο πιο έντονα εμφανιζόταν η ιδιότητά τους αυτή, τόσο μικρότερη ήταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Για να διατηρηθεί, ωστόσο, η ιδιότητα αυτή θα πρέπει να τηρούνται κάποια όρια στο ηλεκτρικό πεδίο που εκτείνεται γύρω τους, ώστε να αποτρέπεται η εμφάνιση του φαινομένου corona. Αυτά είναι τα εξής :

- ✓ Όριο έντασης ηλεκτρικού πεδίου στον ακροδέκτη : 18 kV/cm
- ✓ Όριο μέσης έντασης ηλεκτρικού πεδίου : 4,2kV/cm
- ✓ Όριο έντασης στο σημείο ένωσης των τριών υλικών : 3,5 kV/cm [57]

	Μονωτήρας Ανάρτησης	Μονωτήρας Γραμμής
E <sub>max</sub> ακροδέκτη	4,5275kV/cm	4,1198kV/cm
E <sub>max</sub> μέσης τιμής	1,8475kV/cm	2,0987kV/cm
E <sub>max</sub> σημείου ένωσης	3,3188kV/cm	3,1625kV/cm

**Πίνακας 5-1 : Μέγιστες Τιμές Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου**

Με βάση τις γραφικές παραστάσεις της έντασης των γραμμών μέσα στο μονωτήρα και στα κυάθια του (Σχήμα 5-26, Σχήμα 5-28, Σχήμα 5-30 και Σχήμα 5-32), καθώς και τον Πίνακα 5-1, παρατηρούμε πως οι τιμές των προσομοιώσεων δεν ξεπερνούν τα παραπάνω όρια και στους δύο μονωτήρες. Το γεγονός αυτό καθιστά τους μονωτήρες ιδανικούς σε περιβάλλοντα με αυξημένη ρύπανση. Ένα επιπλέον που προκύπτει από τις παραπάνω προσομοιώσεις είναι η δυνατότητά τους να μην επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από καταπονήσεις στα κυάθια. Γενικότερα τα κυάθια συνεισφέρουν στην προστασία του από εξωτερικούς παράγοντες, αλλά και στη μονωτική του ιδιότητα, αφού χωρίς τα κυάθια, μειώνεται το μήκος ερπυσμού και αυξάνεται η μέση τιμή της έντασης με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερο να πραγματοποιηθεί διάσπαση. Επομένως, τα παραπάνω καθιστούν την ύπαρξη κυαθίων αναγκαία για τη λειτουργία ενός μονωτήρα. Περαιτέρω μελέτες που θα μπορούσαν να γίνουν μελλοντικά σχετικά με τους συνθετικούς μονωτήρες είναι οι εξής :

- Σύγκριση αποτελεσμάτων με αντίστοιχους κεραμικούς μονωτήρες.

- Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου συνθετικών μονωτήρων με διαφορετικού πάχους στρώματα ρύπανσης.
- Διενέργεια πειραμάτων στους μονωτήρες, στα σχέδια των οποίων βασίστηκαν τα μοντέλα της παρούσας προσομοίωσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης.
- Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου συνθετικών μονωτήρων με προσθήκη τοροειδούς για την εξομάλυνση του πεδίου.
- Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου συνολικής τριφασικής διάταξης, η οποία περιλαμβάνει τους μονωτήρες, τον πυλώνα και τις γραμμές μεταφοράς.

## Βιβλιογραφία

- [1] A. Gomez-Exposito, A. J. Conejo, and C. Canizares, *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*, Second Edi. 2020.
- [2] Κ. Βουρνάς and Γ. Κωνταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Συμμετρία, 2010.
- [3] Σ. Ε. Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τόμεας Ηλεκτρικής Ισχύος, *Συμπληρωματικές Σημειώσεις ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ*. Αθήνα, 2015.
- [4] Κ. Σιδεράκης, Ε. Θαλασσινάκης, Ν. Μαυρικάκης, and Δ. Πυλαρινός, “Τεχνολογίες μονωτήρων σε υπαίθρια δίκτυα υψηλής τάσης Η περίπτωση της Κρήτης.”
- [5] “Types of Insulators in Transmission Lines | Properties of Insulators.” <https://www.eeeguide.com/types-of-insulators-in-transmission-lines/> (accessed Aug. 19, 2021).
- [6] “Top 5 Types of Insulators Used on Power Transmission and Distribution Lines.” <https://www.electricalengineering.xyz/power-systems/types-of-insulators/> (accessed Aug. 19, 2021).
- [7] “Τύποι ηλεκτρικού μονωτήρα.” <https://illustrationprize.com/el/457-types-of-electrical-insulator.html> (accessed Aug. 19, 2021).
- [8] I. I. Publishing, “Insulator Types - Power Line Magazine.”
- [9] “Types of Insulators in Transmission Lines | Electrical4u.” <https://www.electrical4u.com/types-of-electrical-insulator-overhead-insulator/> (accessed Aug. 19, 2021).
- [10] “Insulators : Different Types, Working with Their Applications.” <https://www.elprocus.com/types-of-insulators-and-their-applications/> (accessed Aug. 19, 2021).
- [11] “Cap and pin insulator and method for making thereof,” Dec. 1991.
- [12] J. S. T. Looms and M. C. Chapman, *Insulators for High Voltages*, vol. 11, no. 6. 1991.
- [13] “Electrical Insulator | Insulating Material | Porcelain Glass Polymer Insulator | Electrical4U.” <https://www.electrical4u.com/electrical-insulator-insulating-material-porcelain-glass-polymer-insulator/> (accessed Aug. 19, 2021).
- [14] R. Taherian, “Application of Polymer-Based Composites: Polymer-Based Composite Insulators,” *Electr. Conduct. Polym. Compos. Exp. Model. Appl.*, pp. 131–181, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-812541-0.00006-9.
- [15] “Πολυμερές - Βικιπαίδεια.” <https://el.wikipedia.org/wiki/Πολυμερές> (accessed Aug. 20, 2021).
- [16] Τσουκανέλη Σοφοκλή, “Αξιολόγηση της γήρανσης συνθετικών μονωτήρων με μεθόδους φασματοσκοπίας.”

- [17] “A Historical Glimpse of Electrical Insulators - Our Stories - News | Maclean-Fogg.” <https://www.macleanfogg.com/a-historical-glimpse-of-electrical-insulators/> (accessed Aug. 21, 2021).
- [18] “Insulator (electrical) - New World Encyclopedia.” [https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Insulator\\_\(electrical\)#Material](https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Insulator_(electrical)#Material) (accessed Aug. 21, 2021).
- [19] E. A. Cherney, “Non-ceramic insulators - A simple design that requires careful analysis,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 12, no. 3, pp. 7–15, May 1996, doi: 10.1109/57.509920.
- [20] E. A. Cherney, “50 years in the development of polymer suspension-type insulators,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 29, no. 3, pp. 18–26, 2013, doi: 10.1109/MEI.2013.6507410.
- [21] “Depositphotos.” <https://depositphotos.com/stock-photos/insulator.html>.
- [22] Η. Ιης Ε. Ο. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, “Ρύπανση μονωτήρων και τρόποι αντιμετώπισης.” [https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post\\_7.html](https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/03/blog-post_7.html) (accessed Aug. 22, 2021).
- [23] E. Csanyi, “Environmental Stresses On External Insulation,” *Electrical Engineering Portal*. .
- [24] Α. Π. Θ. Π. ΣΧΟΛΗ, “ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.”
- [25] Κ. Δ. Γιασαφάκης, “Οπτική Επιθεώρηση , Δοκιμή Υδροφοβικότητας & Μέτρηση Πυκνότητας σε Συνθετικούς Μονωτήρες Μέσης Τάσης ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.”
- [26] EPRI, “Field guide : visual inspection of polymer insulators,” 2006.
- [27] “Corona Discharge – Factors Affecting Corona - Electrical Concepts.” <https://electricalbaba.com/corona-discharge-factors-affecting-corona-2/> (accessed Oct. 29, 2021).
- [28] “Clearance Requirements In EHV AIS Substation You MUST Respect.” <https://electrical-engineering-portal.com/clearance-requirements-ehv-substation> (accessed Oct. 29, 2021).
- [29] Ι. Α. Τσαλαμέγκας, Ιωάννης Λ. Ρουμελιώτης, *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία - Τόμος Β΄*, 2nd ed. 2010.
- [30] “Δηλεκτρικό - Βικιπαίδεια.” <https://el.wikipedia.org/wiki/Δηλεκτρικό> (accessed Aug. 23, 2021).
- [31] Η. Γλύτσης, *Σημειώσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων Β΄*. 2018.
- [32] R. A. E.-H. P. M. A.-M. H. N. W. A. L. S. C. J. Zobrist, *HIGH VOLTAGE AND ELECTRICAL INSULATION ENGINEERING*. .
- [33] Ε.-Μ. Γράλυστα, “Πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ,” 2015.

- [34] Δ. Ν. Χατζηπέτρος, “Πεδιακή Ανάλυση Συνθετικών Μονωτήρων Υψηλής Τάσης - ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ,” 2012.
- [35] “Finite difference method - Wikipedia.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_difference\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference_method) (accessed Aug. 23, 2021).
- [36] Χ. Γεωργίου, “ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΙΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ -Πτυχιακή εργασία,” 2013.
- [37] Ε. Μ. Π. Σ. Η. Μ. & Μ. Υ. Τ. Η. Ι. Ε. Υ. Τάσεων, *ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ(Αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων)*. .
- [38] “COMSOL Multiphysics® Software - Understand, Predict, and Optimize.” <https://www.comsol.nl/comsol-multiphysics> (accessed Aug. 26, 2021).
- [39] “COMSOL Multiphysics - Wikipedia.” [https://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL\\_Multiphysics](https://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics) (accessed Aug. 26, 2021).
- [40] “COMSOL - Software for Multiphysics Simulation.” <https://www.comsol.com/> (accessed Aug. 26, 2021).
- [41] “18-Minute Introduction to COMSOL Multiphysics®.” <https://www.comsol.com/video/18-minute-introduction-to-comsol-multiphysics> (accessed Aug. 26, 2021).
- [42] “Comprehensive Introduction to Physics, PDEs, and Numerical Modeling.” <https://www.comsol.com/multiphysics/introduction-to-physics-pdes-and-numerical-modeling> (accessed Oct. 10, 2021).
- [43] “An Introduction to the Theory of Steady Currents in Electromagnetics.” <https://www.comsol.com/multiphysics/steady-currents?parent=electromagnetics-072-502> (accessed Oct. 12, 2021).
- [44] Η. Γλύτσης, “2ο Σετ Συμπληρωματικών Σημειώσεων Ηλ. Πεδίων Α,” 2018.
- [45] “Detailed Explanation of the Finite Element Method (FEM).” <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method> (accessed Nov. 02, 2021).
- [46] “Meshing in FEA: Introduction to meshing | OnScale.” <https://onscale.com/blog/meshing-in-fea-introduction-to-meshing/> (accessed Nov. 02, 2021).
- [47] “How to Build a Mesh in COMSOL Multiphysics®.” <https://www.comsol.com/learning-center/building-the-mesh-for-a-model-geometry-in-comsol-multiphysics> (accessed Sep. 20, 2021).
- [48] R. Cardoso Buontempo *et al.*, *HYDROPHOBICITY CLASSIFICATION OF DISTRIBUTION SILICONE ARRESTERS BEFORE AND AFTER SOLID LAYER CONTAMINATION*. 2013.
- [49] C. C. A. Kokalis, T. Tasakos, V. T. Kontargyri, G. Siolas, and I. F. Gonos, “Hydrophobicity classification of composite insulators based on convolutional neural networks,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 91, p. 103613, May 2020, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2020.103613.
- [50] “Water conductivity - Lenntech.”

- <https://www.lenntech.com/applications/ultrapure/conductivity/water-conductivity.htm> (accessed Nov. 01, 2021).
- [51] A. Mengistu and G. Kahsay, “The effect of computer simulation used as a teaching aid in students’ understanding in learning the concepts of electric fields and electric forces,” *Latin-American J. Phys. Educ.*, vol. 9, no. 2, p. 3, 2015.
- [52] B. Zhang, S. Han, J. He, R. Zeng, and P. Zhu, “Numerical analysis of electric-field distribution around composite insulator and head of transmission tower,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 2, pp. 959–965, Apr. 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.859293.
- [53] M. Hasan Imam and M. Mir, “Engineering Optimization+A35 SHAPE OPTIMIZATION OF INSULATOR SHEDS,” *SHAPE Optim. Insul. SHEDS, Eng. Optim.*, vol. 25, no. 2, pp. 99–113, 1995, doi: 10.1080/03052159508941257.
- [54] Ειρήνη Β. Αλεξοπούλου, “Γήρανση Μονωτήρων,” ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2006.
- [55] B. Sarang, P. Basappa, V. Lakdawala, and G. Shivaraj, “Electric field computation of water droplets on a model insulator,” *2011 Electr. Insul. Conf. EIC 2011*, no. June, pp. 377–381, 2011, doi: 10.1109/EIC.2011.5996182.
- [56] W. Que, “Electric field and voltage distributions along non-ceramic insulators,” *Ohio State Univ. Thesis*, 2002, [Online]. Available: [https://etd.ohiolink.edu/!etd.send\\_file?accession=osu1037387155&disposition=attachment](https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=osu1037387155&disposition=attachment).
- [57] “Όρια ηλεκτρικού πεδίου για σύνθετους μονωτές: τελευταίας τεχνολογίας και περίληψη πρόσφατων ερευνών.” [https://www-linkedin-com.translate.google/pulse/limits-electric-field-composite-insulators-art-summary-igor-gutman/?\\_x\\_tr\\_sl=auto&\\_x\\_tr\\_tl=el&\\_x\\_tr\\_hl=el](https://www-linkedin-com.translate.google/pulse/limits-electric-field-composite-insulators-art-summary-igor-gutman/?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=el&_x_tr_hl=el) (accessed Dec. 06, 2021).

## Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1-1: ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ ΑΚΙΔΩΝ [6] .....	14
ΣΧΗΜΑ 1-2: ΣΧΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΚΙΔΩΝ [7] .....	14
ΣΧΗΜΑ 1-3 : ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ [6] .....	15
ΣΧΗΜΑ 1-4 : ΣΧΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....	16
ΣΧΗΜΑ 1-5 : ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ STRAIN [10] .....	17
ΣΧΗΜΑ 1-6 : ΣΧΕΔΙΟ ΔΥΟ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΤΥΠΟΥ STRAIN [9] .....	17
ΣΧΗΜΑ 1-7 : ΣΧΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΤΥΠΟΥ SHACKLE [10] .....	18
ΣΧΗΜΑ 1-8 : ΣΧΕΔΙΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΤΥΠΟΥ SHACKLE [6] .....	18
ΣΧΗΜΑ 1-9 : ΣΧΕΔΙΟ STAY ΜΟΝΩΤΗΡΑ [9] .....	18
ΣΧΗΜΑ 1-10 : ΣΧΕΔΙΟ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ [19].....	24
ΣΧΗΜΑ 1-11 : ΥΔΡΟΛΥΣΗ ΕΠΟΞΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ [20].....	25
ΣΧΗΜΑ 1-12: ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ ΡΩΓΜΕΣ ΕΠΟΞΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ [20] .....	25
ΣΧΗΜΑ 1-13 : ΚΕΝΑ ΜΕΤΑΞΥ ΠΥΡΗΝΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΕΦΛΟΝ [20].....	26
ΣΧΗΜΑ 1-14 : ΥΔΡΟΦΟΒΙΑ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ [21] .....	27
ΣΧΗΜΑ 1-15 : ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΕΡΙΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΕΣ [20] ....	28
ΣΧΗΜΑ 1-16 : ΧΡΗΣΗ ΣΦΗΝΑΣ (Ι), ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ (ΙΙ) ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ (SWAGED) (ΙΙΙ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΚΡΟΔΕΚΤΗ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ [20] .....	29
ΣΧΗΜΑ 1-17 : ΡΥΠΑΝΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΑ [23] .....	30
ΣΧΗΜΑ 1-18 : ΠΑΓΟΣ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ [23] .....	30
ΣΧΗΜΑ 1-19 : ΒΡΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ [23] .....	30
ΣΧΗΜΑ 1-20 : ΣΧΙΣΜΕΝΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ [26] .....	31
ΣΧΗΜΑ 1-21 : ΦΑΓΩΜΕΝΟΣ ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ [26] .....	31
ΣΧΗΜΑ 1-22: (Α) ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ CORONA [27] , (Β) ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ [28] .....	32
ΣΧΗΜΑ 2-1 : ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ .....	35
ΣΧΗΜΑ 2-2: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ (PARTIAL BREAKDOWN-PB) [32] .....	40
ΣΧΗΜΑ 2-3: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ [32].....	40
ΣΧΗΜΑ 2-4: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ- (Ι) ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ ΠΕΔΙΟ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΔΥΟ ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΠΛΑΚΕΣ, (ΙΙ) ΑΣΘΕΝΩΣ ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ ΠΕΔΙΟ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΔΥΟ ΣΦΑΙΡΕΣ, (ΙΙΙ) ΑΝΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ ΠΕΔΙΟ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΕ ΔΥΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ [32] .....	42

ΣΧΗΜΑ 2-5 : ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ: (I) ΤΕΤΡΑΕΔΡΟ, (II) ΤΡΙΓΩΝΟ [32].....	45
ΣΧΗΜΑ 2-6 : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΕΔΙΟΥ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕ FEM ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΣ ΤΡΙΓΩΝΙΚΑ ΔΙΑΚΡΙΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ [32].....	46
ΣΧΗΜΑ 2-7 : ΤΜΗΜΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ, ΧΩΡΙΣΜΕΝΟΥ ΣΕ ΑΝΟΜΟΙΑ ΤΡΙΓΩΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ Χ-Υ [32].....	47
ΣΧΗΜΑ 2-8 : ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ 5 (ΚΟΜΒΟΣ Κ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑ 2-7) ΜΕ ΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΤΩΝ ΤΡΙΓΩΝΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (1) ΕΩΣ (4).....	50
ΣΧΗΜΑ 3-1 : COMSOL MULTIPHYSICS [38].....	53
ΣΧΗΜΑ 3-2: COMSOL-MODEL AND APPLICATION BUILDER [41].....	54
ΣΧΗΜΑ 3-3 : COMSOL - ΠΡΟΪΟΝΤΑ [41].....	55
ΣΧΗΜΑ 3-4: ΒΗΜΑΤΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	55
ΣΧΗΜΑ 3-5 : ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΕΠΑΓΩΓΕΑ [43].....	58
ΣΧΗΜΑ 3-6 : ΣΧΕΔΙΟ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	60
ΣΧΗΜΑ 3-7 : ΣΧΕΔΙΟ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ.....	61
ΣΧΗΜΑ 3-8 : ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	63
ΣΧΗΜΑ 3-9 : ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ .....	64
ΣΧΗΜΑ 3-10 : ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΚΥΒΟΣ .....	65
ΣΧΗΜΑ 3-11 : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ (I) ΣΤΑ ΑΚΡΑ , (II) ΣΤΑ ΚΥΑΘΙΑ ΚΑΙ (III) ΣΤΟΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	66
ΣΧΗΜΑ 3-12 : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΥΒΟ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	67
ΣΧΗΜΑ 3-13 : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ (I) ΣΤΑ ΑΚΡΑ , (II) ΣΤΑ ΚΥΑΘΙΑ ΚΑΙ (III) ΣΤΟΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ.....	67
ΣΧΗΜΑ 3-14 : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΟΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΥΒΟ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ .....	68
ΣΧΗΜΑ 3-15 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ (I) ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ (II) ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	69
ΣΧΗΜΑ 3-16 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ (I) ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ (II) ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ .....	69
ΣΧΗΜΑ 3-17 : (I) ΠΛΕΓΜΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (II) ΠΛΕΓΜΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	70
ΣΧΗΜΑ 3-18 : (I) ΠΛΕΓΜΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ (II) ΠΛΕΓΜΑ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ. 71	
ΣΧΗΜΑ 4-1 : ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ .....	72
ΣΧΗΜΑ 4-2 : ΣΗΜΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ 460ΜΜ ΑΠΟ ΤΟ ΓΕΙΩΜΕΝΟ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ Α.500, Β.700, Γ.1000 ΚΑΙ Δ.1500 ΜΜ ΑΠΟ ΑΥΤΟΝ .....	73
ΣΧΗΜΑ 4-3 : ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ .....	74



ΣΧΗΜΑ 4-4 : ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ.....	75
ΣΧΗΜΑ 4-5 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ	75
ΣΧΗΜΑ 4-6 : ΣΦΑΛΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ - ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	76
ΣΧΗΜΑ 4-7 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΑ (Ι) ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ , (ΙΙ) ΓΡΑΜΜΗΣ.....	78
ΣΧΗΜΑ 4-8 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....	79
ΣΧΗΜΑ 4-9 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ .....	79
ΣΧΗΜΑ 4-10 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ (Ι) $x=0, y=0$ , (ΙΙ) $x=40, y=0$ , (ΙΙΙ) $x=70, y=0$ .....	80
ΣΧΗΜΑ 4-11 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΆΞΟΝΑ Z .....	81
ΣΧΗΜΑ 4-12 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΆΞΟΝΑ Z.....	81
ΣΧΗΜΑ 4-13 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ (Ι) $x=0, y=0$ , (ΙΙ) $x=40, y=0$ , (ΙΙΙ) $x=80, y=0$ .....	82
ΣΧΗΜΑ 4-14 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΆΞΟΝΑ Z	83
ΣΧΗΜΑ 4-15 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΆΞΟΝΑ Z .....	83
ΣΧΗΜΑ 4-16 : ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΟΜΜΕΝΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	84
ΣΧΗΜΑ 4-17 : ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΟΜΜΕΝΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ .....	85
ΣΧΗΜΑ 4-18 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΚΟΜΜΕΝΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ (Ι) $x=0, y=0$ , (ΙΙ) $x=40, y=0$ , (ΙΙΙ) $x=70, y=0$ ...	85
ΣΧΗΜΑ 4-19 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ .....	86
ΣΧΗΜΑ 4-20 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΟΜΜΕΝΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....	86
ΣΧΗΜΑ 4-21 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΟΜΜΕΝΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	87
ΣΧΗΜΑ 4-22 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΚΟΜΜΕΝΟ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ (Ι) $x=0, y=0$ , (ΙΙ) $x=40, y=0$ , (ΙΙΙ) $x=70, y=0$ .....	87
ΣΧΗΜΑ 4-23 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ.	88
ΣΧΗΜΑ 4-24 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΟΜΜΕΝΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ.....	88
ΣΧΗΜΑ 4-25 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΟΜΜΕΝΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ .....	89
ΣΧΗΜΑ 4-26 : ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ .....	90
ΣΧΗΜΑ 4-27 : ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ.....	90
ΣΧΗΜΑ 4-28 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ .....	91
ΣΧΗΜΑ 4-29 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ .....	91

ΣΧΗΜΑ 4-30 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ..	92
ΣΧΗΜΑ 4-31 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ.....	92
ΣΧΗΜΑ 4-32 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ.....	93
ΣΧΗΜΑ 4-33 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ .....	93
ΣΧΗΜΑ 4-34 : ΚΛΑΣΕΙΣ ΥΔΡΟΦΟΒΙΚΟΤΗΤΑΣ (HYDROPHOBICITY CLASS - HC) [49] .....	94
ΣΧΗΜΑ 4-35 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΕΩΝ (I)2, (II)4 ΚΑΙ (III)7 ....	94
ΣΧΗΜΑ 4-36 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΕΩΝ (I)2, (II)4 ΚΑΙ (III)7 .....	95
ΣΧΗΜΑ 4-37 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 (I) $x=0, y=0$ , (II) $x=40, y=0$ , (III) $x=70, y=0$ .....	96
ΣΧΗΜΑ 4-38 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 .....	96
ΣΧΗΜΑ 4-39 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 .....	97
ΣΧΗΜΑ 4-40 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 .....	97
ΣΧΗΜΑ 4-41 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4 (I) $x=0, y=0$ , (II) $x=40, y=0$ , (III) $x=70, y=0$ .....	98
ΣΧΗΜΑ 4-42 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4 .....	98
ΣΧΗΜΑ 4-43 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4 .....	99
ΣΧΗΜΑ 4-44 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4 .....	99
ΣΧΗΜΑ 4-45 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7 (I) $x=0, y=0$ , (II) $x=40, y=0$ , (III) $x=70, y=0$ ... ..	100
ΣΧΗΜΑ 4-46 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7 .....	100
ΣΧΗΜΑ 4-47 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7 .....	101
ΣΧΗΜΑ 4-48 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7 .....	101
ΣΧΗΜΑ 4-49 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 (I) $x=0, y=0$ , (II) $x=40, y=0$ , (III) $x=80, y=0$ .....	102
ΣΧΗΜΑ 4-50 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 .....	103
ΣΧΗΜΑ 4-51 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2 .....	103
ΣΧΗΜΑ 4-52 ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 2.....	104
ΣΧΗΜΑ 4-53 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4 (I) $x=0, y=0$ , (II) $x=40, y=0$ , (III) $x=80, y=0$ .....	104
ΣΧΗΜΑ 4-54 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4 .....	105
ΣΧΗΜΑ 4-55 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4 .....	105
ΣΧΗΜΑ 4-56 ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 4.....	106
ΣΧΗΜΑ 4-57 : ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7 (I) $x=0, y=0$ , (II) $x=40, y=0$ , (III) $x=80, y=0$ .....	106

ΣΧΗΜΑ 4-58 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7 .....	107
ΣΧΗΜΑ 4-59 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7 .....	107
ΣΧΗΜΑ 4-60 : ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΛΑΣΗΣ 7.....	108
ΣΧΗΜΑ 5-1 : ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΜΗ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ. (Α) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ. (Β) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ [52] .....	110
ΣΧΗΜΑ 5-2 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0,y=0$ .....	111
ΣΧΗΜΑ 5-3 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0,y=0$ .....	112
ΣΧΗΜΑ 5-4 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40,y=0$ .....	112
ΣΧΗΜΑ 5-5 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40,y=0$ .....	113
ΣΧΗΜΑ 5-6 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=70,y=0$ .....	113
ΣΧΗΜΑ 5-7 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=70,y=0$ .....	114
ΣΧΗΜΑ 5-8 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0,y=0$ .....	114
ΣΧΗΜΑ 5-9 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0,y=0$ .....	115
ΣΧΗΜΑ 5-10 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40,y=0$ .....	115
ΣΧΗΜΑ 5-11 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40,y=0$ .....	116
ΣΧΗΜΑ 5-12 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=80,y=0$ .....	116
ΣΧΗΜΑ 5-13 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΟΜΜΕΝΑ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=80,y=0$ .....	117
ΣΧΗΜΑ 5-14 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0,y=0$ .....	118
ΣΧΗΜΑ 5-15 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0,y=0$ .....	118

ΣΧΗΜΑ 5-16 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40, y=0$ .....	119
ΣΧΗΜΑ 5-17 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40, y=0$ .....	119
ΣΧΗΜΑ 5-18 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=70, y=0$ .....	120
ΣΧΗΜΑ 5-19 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=70, y=0$ .....	120
ΣΧΗΜΑ 5-20 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0, y=0$ .....	121
ΣΧΗΜΑ 5-21 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=0, y=0$ .....	121
ΣΧΗΜΑ 5-22 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40, y=0$ .....	122
ΣΧΗΜΑ 5-23 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=40, y=0$ .....	122
ΣΧΗΜΑ 5-24 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=80, y=0$ .....	123
ΣΧΗΜΑ 5-25 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΚΥΑΘΙΑ ΓΙΑ $x=80, y=0$ .....	123
ΣΧΗΜΑ 5-26 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ $x=0, y=0$ .....	125
ΣΧΗΜΑ 5-27 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ $x=0, y=0$ .....	125
ΣΧΗΜΑ 5-28 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ $x=40, y=0$ .....	126
ΣΧΗΜΑ 5-29 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ $x=40, y=0$ .....	126
ΣΧΗΜΑ 5-30 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ $x=0, y=0$ .....	127
ΣΧΗΜΑ 5-31 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ $x=0, y=0$ .....	127
ΣΧΗΜΑ 5-32 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ $x=40, y=0$ .....	128

ΣΧΗΜΑ 5-33 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ  
ΣΤΑΓΟΝΕΣ ΓΙΑ  $x=40, y=0$  ..... 128

## *Κατάλογος Πινάκων*

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΑΚΙΔΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΓΡΑΜΜΗΣ [9].....	15
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-2 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ [13].....	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-3 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΥΑΛΙΝΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ [13] .....	21
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-4 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ [12].....	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΟΝΩΤΗΡΩΝ .....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΕΝΤΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΓΙΑ 6 ΚΥΒΟΥΣ .....	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΑΓΟΝΩΝ [50] .....	95

## Κατάλογος Εξισώσεων

ΕΙΣΩΣΗ 2-1 : ΣΧΕΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΜΕ ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ..	34
ΕΙΣΩΣΗ 2-2 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ .....	34
ΕΙΣΩΣΗ 2-3 : ΣΧΕΣΗ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ .....	34
ΕΙΣΩΣΗ 2-4 : ΕΠΙΚΑΜΠΥΛΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑ ΈΝΤΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ .....	34
ΕΙΣΩΣΗ 2-5 : ΝΟΜΟΣ FARADAY .....	36
ΕΙΣΩΣΗ 2-6 : ΝΟΜΟΣ AMPERE.....	37
ΕΙΣΩΣΗ 2-7 : ΝΟΜΟΣ GAUSS .....	37
ΕΙΣΩΣΗ 2-8 : ΑΝΥΠΑΡΕΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΟΠΟΛΩΝ .....	37
ΕΙΣΩΣΗ 2-9 : ΝΟΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	37
ΕΙΣΩΣΗ 2-10 : ΝΟΜΟΣ FARADAY .....	37
ΕΙΣΩΣΗ 2-11 : ΝΟΜΟΣ AMPERE.....	37
ΕΙΣΩΣΗ 2-12 : ΝΟΜΟΣ GAUSS .....	38
ΕΙΣΩΣΗ 2-13 : ΑΝΥΠΑΡΕΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΟΠΟΛΩΝ.....	38
ΕΙΣΩΣΗ 2-14 : ΝΟΜΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	38
ΕΙΣΩΣΗ 2-15 : ΕΙΣΩΣΗ POISSON.....	38
ΕΙΣΩΣΗ 2-16 : ΕΙΣΩΣΗ LAPLACE .....	38
ΕΙΣΩΣΗ 2-17 : ΒΑΘΜΟΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ .....	40
ΕΙΣΩΣΗ 2-18 : ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΟΓΚΟ V.....	44
ΕΙΣΩΣΗ 2-19 : ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ S .....	46
ΕΙΣΩΣΗ 2-20 : ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΈΚΦΡΑΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ .....	46
ΕΙΣΩΣΗ 2-21 : ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΆΓΝΩΣΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ.....	47
ΕΙΣΩΣΗ 2-22 : ΤΙΜΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ .....	48
ΕΙΣΩΣΗ 2-23 : ΕΙΣΩΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ .....	48
ΕΙΣΩΣΗ 2-24 : ΜΕΡΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΣΩΣΕΙΣ .....	48
ΕΙΣΩΣΗ 2-25 : ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ E .....	49
ΕΙΣΩΣΗ 2-26 : ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ E .....	49
ΕΙΣΩΣΗ 2-27 : ΣΥΝΘΗΚΗ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	49
ΕΙΣΩΣΗ 2-28 : ΣΧΕΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	50
ΕΙΣΩΣΗ 2-29 : ΣΧΕΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΟΜΒΟ 5 .....	51

ΕΞΙΣΩΣΗ 3-1 : ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ $J$ .....	56
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-2 : ΕΞΙΣΩΣΗ ΡΟΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ $J$ .....	56
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-3 : ΣΤΡΟΒΙΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ $J$ .....	56
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-4 : ΚΛΙΣΗ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ $\Phi$ .....	57
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-5 : ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΟ ΡΕΥΜΑ .....	57
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-6 : ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ.....	57
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-7 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ .....	57
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-8 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΕ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	57
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-9 : ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ ΓΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΑ ΥΛΙΚΑ .....	58
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-10 : ΑΠΩΛΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ .....	58
ΕΞΙΣΩΣΗ 3-11 : ΧΩΡΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ .....	59
ΕΞΙΣΩΣΗ 4-1 : ΙΚΑΝΗ ΣΥΝΘΗΚΗ.....	77