



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

**Προσομοίωση της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου συνθετικών
μονωτήρων με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ερμής Γ. Ο. Κατσαΐτης Βασιλείου

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, Νοέμβριος 2021



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

**Προσομοίωση της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου συνθετικών
μονωτήρων με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ερμής Γ. Ο. Κατσαΐτης Βασιλείου

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Νοεμβρίου 2021.

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Παύλος Σ. Γεωργιλάκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

.....

Ερμής Γ. Ο. Κατσαΐτης Βασιλείου

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

Copyright © Ερμής Γ. Ο. Κατσαΐτης Βασιλείου, 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.

*Αφιερώνεται στον παππού και τη γιαγιά μου,
Δημήτρη και Ροδάνθη*

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου σε συνθετικούς μονωτήρες, ώστε να μελετηθούν οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στα υπό εξέταση δοκίμια. Για τον σκοπό αυτόν, σχεδιάστηκαν και επιλύθηκαν τέσσερα μοντέλα προσομοίωσης της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου σε ένα σετ πέντε δοκιμίων, με χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα με δοκίμια που σχεδιάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60587 και δύο μοντέλα με δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια συνθετικών μονωτήρων στήριξης των 24kV, με στόχο τη μελέτη της επίδρασης που έχει στα αποτελέσματα η χρήση δοκιμίων διαφορετικής γεωμετρίας. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων που σχεδιάστηκαν για κάθε τύπο δοκιμίου είναι η διαδρομή που ακολουθεί το ρυπαντικό υγρό στην επιφάνεια των υπό εξέταση δοκιμίων. Έτσι, μελετάται παράλληλα και η μεταβολή των αποτελεσμάτων που οφείλεται στη διαφορά αυτή. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σχολιάζονται οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων. Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα και γίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο μέλλον.

Λέξεις – κλειδιά: Συνθετικοί μονωτήρες, δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου, προσομοίωση, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, COMSOL Multiphysics, IEC 60587, ηλεκτρικό δυναμικό, ηλεκτρικό πεδίο

Abstract

The purpose of this thesis is to simulate the inclined plane test on composite insulators, in order to study the distributions of electric potential and electric field on the test specimens. For this purpose, four models of the inclined plane test on a set of five specimens were designed and solved, using the COMSOL Multiphysics software. Specifically, two models with specimens designed according to IEC 60587 standard and two models with specimens from bisected sheds of 24kV composite post insulators were created, in order to study the effect that the use of specimens of different geometry has on the results. The only difference between the two models designed for each specimen type is the path followed by the contaminant on the test specimens' surface. Thus, the variation in the results due to this difference is also studied at the same time. Subsequently, the results are presented with comments on the differences between the models. Finally, conclusions are drawn and some suggestions are made for further research in the future.

Keywords: Composite insulators, inclined plane test, simulation, finite element method, COMSOL Multiphysics, IEC 60587, electric potential, electric field

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π, για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και για τις πολύ εύστοχες παρατηρήσεις και προτάσεις του.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά την κα. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, Ε.ΔΙ.Π του Ε.Μ.Π και τον υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π κ. Χρήστο – Χριστόδουλο Αθ. Κοκάλη, για τη στήριξη, την καθοδήγηση και τον πολύτιμο προσωπικό χρόνο που μου αφιέρωσαν σε όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για το άριστο κλίμα συνεργασίας που υπήρχε μεταξύ μας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στην κοπέλα μου, που είναι πάντα δίπλα μου και που με την αμέριστη υποστήριξη, ενθάρρυνση και εμπιστοσύνη τους συνέβαλλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	8
Περιεχόμενα.....	9
Πρόλογος.....	11
Κεφάλαιο 1: Μονωτήρες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	13
1.2 Κατηγοριοποίηση μονωτήρων	16
1.2.1 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους.....	17
1.2.2 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον χώρο χρήσης τους	19
1.3 Υλικά κατασκευής μονωτήρων.....	19
1.3.1 Κεραμικοί μονωτήρες.....	20
1.3.1.1 Μονωτήρες πορσελάνης	20
1.3.1.2 Μονωτήρες υάλου.....	21
1.3.2 Συνθετικοί μονωτήρες	23
Κεφάλαιο 2: Καταπονήσεις, γήρανση και τεχνικές ελέγχου σε πολυμερείς και συνθετικούς μονωτήρες	27
2.1 Καταπονήσεις και μηχανισμοί γήρανσης υπαίθριων μονωτήρων	27
2.1.1 Παράγοντες περιβαλλοντικών καταπονήσεων	28
2.1.2 Ρύπανση μονωτήρων και ηλεκτρικές καταπονήσεις.....	30
2.1.2.1 Φαινόμενο Corona	33
2.2 Μέθοδοι ελέγχου και εργαστηριακές δοκιμές για συνθετικούς μονωτήρες	34
2.2.1 Τεχνικές ελέγχου στο πεδίο	34

2.2.2 Εργαστηριακές τεχνικές ελέγχου.....	36
2.2.2.1 Τεχνικές ανάλυσης ιδιοτήτων του υλικού	36
2.2.2.2 Τεχνικές ανάλυσης φυσικών ιδιοτήτων	37
2.2.2.3 Τεχνικές ανάλυσης ηλεκτρικών ιδιοτήτων	38
2.2.2.3.1 Πρότυπο IEC 60587	38
2.2.2.3.2 Προσομοιώσεις δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου – Βιβλιογραφική ανασκόπηση	41
Κεφάλαιο 3: Το λογισμικό COMSOL Multiphysics.....	45
3.1 Εισαγωγή.....	45
3.2 Περιβάλλον και ροή σχεδίασης.....	45
3.2.1 Ορισμός του Model Wizard.....	46
3.2.2 Σχεδίαση στο Model Builder	49
3.2.2.1 Ορισμός παραμέτρων.....	49
3.2.2.2 Σχεδίαση γεωμετρίας	50
3.2.2.3 Ορισμός των υλικών	57
3.2.2.4 Εισαγωγή πακέτων φυσικής	61
3.2.2.4.1 Το πακέτο φυσικής Electric Currents (ec)	62
3.2.2.5 Ορισμός πλέγματος.....	65
3.2.2.6 Ορισμός μελέτης – τρόπου επίλυσης.....	71
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	74
4.1 Λήψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	74
4.2 Αποτελέσματα μοντέλων με δοκίμια κατά IEC 60587	76
4.3 Αποτελέσματα μοντέλων με δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια συνθετικών μονωτήρων	101
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	123
5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων	123
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	127
Βιβλιογραφία	129

Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των κατανομών του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου σε δοκίμια από συνθετικούς μονωτήρες που υπόκεινται σε δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου. Η μελέτη διενεργείται μέσω προσομοιώσεων της δοκιμής, στις οποίες χρησιμοποιούνται είτε δοκίμια με τα χαρακτηριστικά που ορίζονται στο πρότυπο IEC 60587, είτε δοκίμια που προέρχονται απευθείας από τους μονωτήρες (διχοτομημένα κυάθια συνθετικών μονωτήρων στήριξης), όπως συμβαίνει πολύ συχνά και στις εργαστηριακές δοκιμές του κεκλιμένου επιπέδου. Με τον τρόπο αυτόν, η συγκεκριμένη εργασία εξετάζει τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου όχι μόνο ως δοκιμή στο υλικό, αλλά και ως δοκιμή απευθείας στο τελικό προϊόν, δηλαδή στους μονωτήρες, ενώ αποτελεί και ένα πρώτο βήμα για περαιτέρω μελέτη και πειραματική διερεύνηση με στόχο την καλύτερη κατανόηση και τη βελτίωση, πιθανώς, της δοκιμής αυτής για συνθετικούς μονωτήρες.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια ιστορική αναδρομή σχετικά με την εξέλιξη των μονωτήρων, παρουσιάζονται οι κυριότερες κατηγορίες και οι τύποι μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά χαρακτηριστικά και ο τρόπος κατασκευής των κεραμικών και των συνθετικών μονωτήρων.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά σε κάποια τεχνικά ζητήματα γύρω από τους συνθετικούς μονωτήρες και τους μονωτήρες πολυμερών υλικών γενικότερα, που χρησιμοποιούνται σε εξωτερικές εγκαταστάσεις. Αρχικά, γίνεται λόγος για τις καταπονήσεις που δέχονται οι μονωτήρες κατά τη λειτουργία τους και για τους μηχανισμούς γήρανσης των πολυμερών υλικών από τα οποία αποτελούνται. Επίσης, περιγράφεται ο μηχανισμός ρύπανσης των μονωτήρων και οι επιπτώσεις του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι πιο συνήθεις τεχνικές ελέγχου και μέθοδοι αξιολόγησης για συνθετικούς μονωτήρες. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου βάσει του προτύπου IEC 60587 και γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με προσομοιώσεις της συγκεκριμένης δοκιμής.

Το Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει μια περιγραφή του λογισμικού COMSOL Multiphysics, όπου αναφέρονται οι δυνατότητες του προγράμματος και η διαδικασία σχεδίασης ενός μοντέλου προσομοίωσης. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται λεπτομερώς κάθε

βήμα που ακολουθήθηκε για τη σχεδίαση και επίλυση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων στο λογισμικό COMSOL Multiphysics και γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις (κατανομές ηλεκτρικού δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου), που εκτελέστηκαν με τα μοντέλα του Κεφαλαίου 3. Παράλληλα, στο κεφάλαιο αυτό υπάρχουν παρατηρήσεις, σχολιασμοί και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για κάθε μοντέλο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα και τις συγκρίσεις του Κεφαλαίου 4 για τις κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στα δοκίμια και τελικά παρατίθενται μερικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο μέλλον, με αφορμή την παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 1: Μονωτήρες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

1.1 Εισαγωγή

Οι μονωτήρες αποτελούν βασικό μέρος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Πρόκειται για διατάξεις από στερεά μονωτικά υλικά, των οποίων ο ρόλος είναι να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς υπό υψηλή τάση [1]. Στην πράξη, οι μονωτήρες έχουν διπλή λειτουργία, αφού πρέπει να εξασφαλίζουν την ακεραιότητα του συστήματος τόσο από ηλεκτρικές όσο και από μηχανικές καταπονήσεις [2].

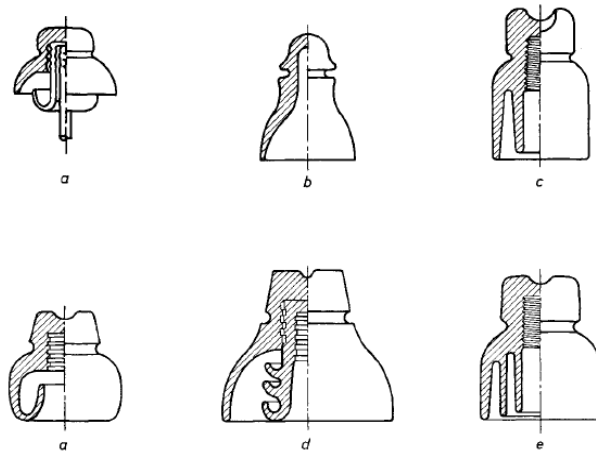
Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι, σε πολλές περιπτώσεις, εκτεθειμένα σε έντονα καιρικά φαινόμενα και ρύπανση. Έτσι, κατά τη σχεδίαση των μονωτήρων απαιτούνται υψηλές προδιαγραφές κατασκευής, ιδιαίτερα όσον αφορά την αξιοπιστία σε βάθος χρόνου που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργική ασφάλεια και αποδοτικότητα του συστήματος [2, 3].

1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Η χρήση μονωτήρων ξεκίνησε αρκετά χρόνια πριν από την ανάπτυξη της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πρώτοι μονωτήρες εμφανίστηκαν γύρω στα τέλη της δεκαετίας του 1790 και ήταν κατασκευασμένοι από υλικά όπως το ξύλο, το τσιμέντο ή το γυαλί [4]. Το πεδίο εφαρμογής τους ήταν αρχικά τα τηλεγραφικά δίκτυα, ενώ αργότερα παραλλαγές τους χρησιμοποιήθηκαν και για τις ανάγκες της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τηλεγραφικοί μονωτήρες (Εικόνα 1.1), όπως έχουν ονομαστεί, είχαν φτάσει σε ένα αρκετά προχωρημένο στάδιο εξέλιξης μέχρι το 1878, ενώ η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπήκε σε λειτουργία το 1882. Ήταν μια γραμμή μικρού μήκους, που συνέδεε το Miesbach με το Μόναχο με συνεχή τάση 1343V. Τα επόμενα σημαντικά βήματα έγιναν το 1886 και το 1891 από τον C.E.L Brown. Ο Brown κατασκεύασε γραμμές μεταφοράς έως 25kV, στις οποίες χρησιμοποίησε μονωτήρες ελαίου (oil-bath insulators) [1].

Η εξέλιξη στον τομέα της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνεχίστηκε τα επόμενα χρόνια με ραγδαίους ρυθμούς. Έως το 1910 είχαν κατασκευαστεί και ξεκινήσει

τη λειτουργία τους γραμμές μεταφοράς έως και 66kV στην Ευρώπη, ενώ υπάρχουν αναφορές και για γραμμές μεταφοράς των 140kV, το 1912, στη Βόρεια Αμερική (Michigan) [1]. Μέχρι το τέλος του 20^{ου} αιώνα, η τάση υπό την οποία λειτουργούσαν οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αυξανόταν συνεχώς, φτάνοντας την τάξη των

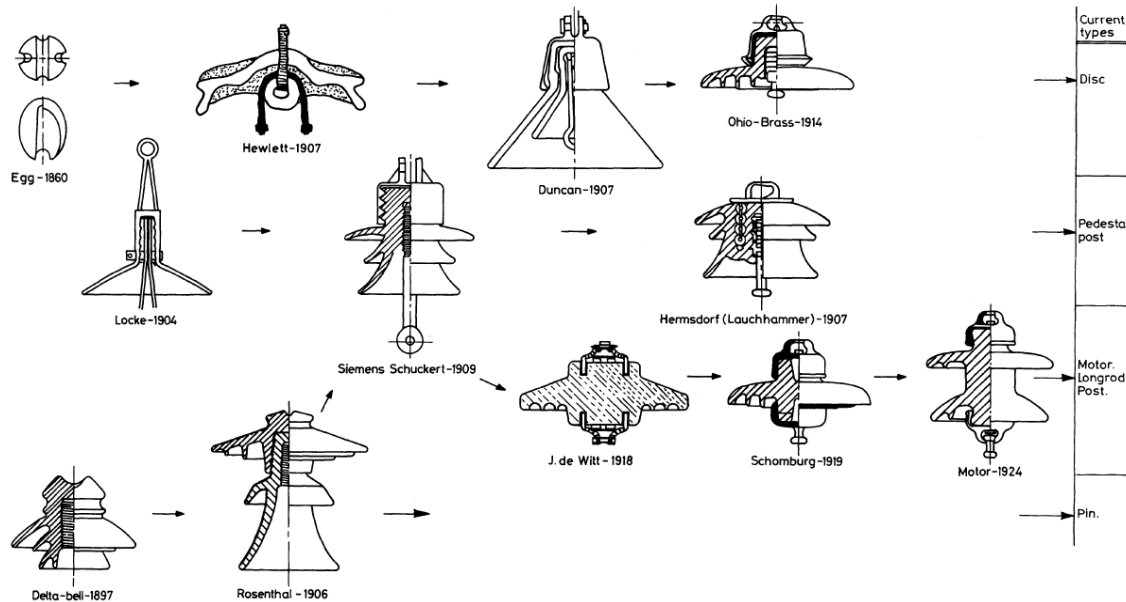


Εικόνα 1.1 Τηλεγραφικοί μονωτήρες και παραλλαγές τους, που χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [1]

MV [2], ενώ παράλληλα μεγάλωνε και το μέγεθός τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι μονωτήρες να υπόκεινται σε όλο και μεγαλύτερες ηλεκτρικές και μηχανικές καταπονήσεις [1]. Οι τηλεγραφικοί μονωτήρες είχαν σχεδιαστεί για να λειτουργούν υπό χαμηλές τάσεις, ενώ παράλληλα είχαν σχετικά χαμηλή αξιοπιστία [4]. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη για ανάπτυξη μονωτήρων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (μέγεθος, σχήμα, υλικό κατασκευής κλπ.), που θα ήταν ικανοί να ανταπεξέλθουν στις αυξημένες απαιτήσεις των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 1.2) [1].

Οι πρώτοι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ήταν «απόγονοι» των τηλεγραφικών μονωτήρων, κατασκευασμένοι κυρίως από γυαλί ή πορσελάνη αλλά και από πολυμερή, όπως ο εβονίτης και το εμποτισμένο ξύλο. Το 1903 στις Η.Π.Α χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά μεταλλικά καλύμματα για μονωτήρες. Αυτά επέτρεψαν τη δημιουργία στοιβάδων από μονωτήρες, που είχαν σημαντικά αυξημένη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και διευκόλυναν τη στήριξη των γραμμών μεταφοράς. Με την χρήση, όμως, όλο και μεγαλύτερων επιπέδων τάσης και την εμφάνιση των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ο πρώτος το 1954 στην Ε.Σ.Σ.Δ [5]), το κόστος της απώλειας ισχύος και των ζημιών από αστοχίες σε μονωτήρες αυξήθηκε δραματικά. Για τον λόγο αυτόν, δινόταν στην πορεία μεγαλύτερη

έμφαση στην αξιόπιστη λειτουργία των μονωτήρων, ειδικά κάτω από συνθήκες ρύπανσης. Έτσι, αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ανθεκτικών δισκοειδών μονωτήρων, όπως οι δισκοειδείς μονωτήρες σκληρυμένης υάλου το 1935 στο Ηνωμένο Βασίλειο.



Εικόνα 1.2 Εξέλιξη των μονωτήρων [1]

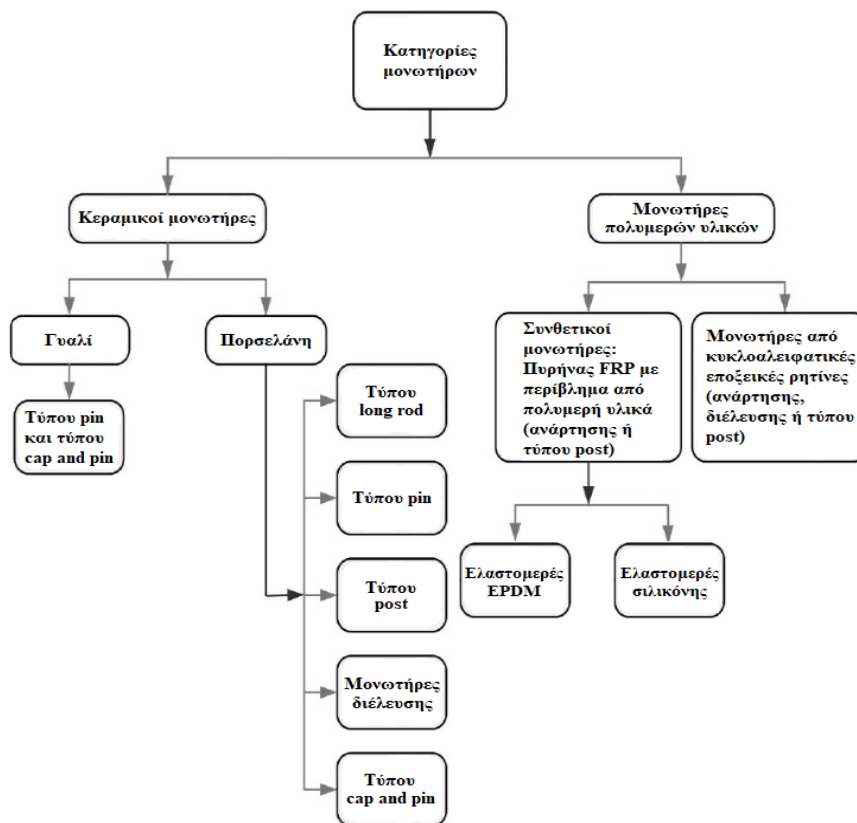
Αυτοί, αν και είχαν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή, δεν επαρκούσαν για γραμμές μεταφοράς εκατομμυρίων Volt. Αργότερα, κοντά στο 1962, έγιναν οι πρώτες εργαστηριακές δοκιμές για συστηματικότερη μελέτη της τεχνολογίας των μονωτήρων. Κατά την ίδια περίοδο εφευρέθηκε ο μονωτήρας με ανθεκτική επικάλυψη, που είχε πολύ καλή επίδοση σε συνθήκες τόσο τεχνητής όσο και πραγματικής ρύπανσης [1]. Οι κεραμικοί και οι γυάλινοι μονωτήρες επικράτησαν στον τομέα της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, οπότε οι συνθετικοί μονωτήρες άρχισαν να κερδίζουν έδαφος [4].

Οι συνθετικοί μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά για ηλεκτρική μόνωση, από τα μέσα της δεκαετίας του 1940 έως τις αρχές της δεκαετίας του 1960 περίπου, ήταν κατασκευασμένοι από δισφαινόλη και κυκλοαλειφατικές εποξεικές ρητίνες. Όπως γρήγορα αποδείχτηκε, όμως, αυτά τα αρχικά μοντέλα ήταν ακατάλληλα για εξωτερική χρήση [6]. Στην πορεία εφευρέθηκαν μονωτήρες με περίβλημα από πορσελάνη, που υποστηριζόταν από έναν συνθετικό πυρήνα με ενίσχυση υαλονημάτων, για χρήση σε γραμμές μέσης τάσης. Στα χρόνια που ακολούθησαν συντελέστηκε σημαντική πρόοδος στους τομείς των πολυμερών υλικών και των υλικών με ενίσχυση

ινών, από τα οποία αποτελούνται το περίβλημα και ο πυρήνας των συνθετικών μονωτήρων αντίστοιχα [3]. Έτσι, γύρω στο 1970, έκανε την εμφάνισή της στο εμπόριο η πρώτη γενιά συνθετικών μονωτήρων για γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης [6]. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των συνθετικών μονωτήρων, όπως το μικρό τους βάρος και το γεγονός ότι δεν σπάζουν από προσκρούσεις αντικειμένων (π.χ. κλαδιών), οδήγησαν σε ευρεία αποδοχή από τους χειριστές των δικτύων. Οι κατασκευαστές συνέχισαν να βελτιώνουν την επίδοση των συνθετικών μονωτήρων, μέσω μακροχρόνιων δοκιμών και από κοινού έρευνας, οπότε παρουσιάστηκε και η δεύτερη γενιά συνθετικών μονωτήρων. Τελικά, έφτασαν οι συνθετικοί μονωτήρες τρίτης γενιάς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται και σήμερα, που έχουν υψηλή αξιοπιστία και εκτιμώμενο χρόνο ζωής πάνω από 50 έτη [3].

1.2 Κατηγοριοποίηση μονωτήρων

Οι διάφοροι τύποι μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους. Μια ταξινόμηση των βασικότερων τύπων μονωτήρων φαίνεται στην Εικόνα 1.3:



Εικόνα 1.3 Ταξινόμηση των βασικότερων τύπων μονωτήρων [20]

1.2.1 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας οι μονωτήρες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- «Μονωτήρες ανάρτησης», που χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση γραμμών μεταφοράς υψηλής ή μέσης τάσης (Εικόνα 1.4) και αποτελούνται από μία ή δύο σειρές δισκοειδών μονωτήρων, διατεταγμένων σε μορφή αλύσου. Το πλήθος των δισκοειδών μονωτήρων σε μια διάταξη αλύσου εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής και από την διηλεκτρική αντοχή κάθε δισκοειδούς μονωτήρα [7].
 - Τύπου “cap and pin”: Οι μονωτήρες αυτού του τύπου κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί και συνδέονται μεταξύ τους μέσω μεταλλικών καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins) για τον σχηματισμό της αλυσοειδούς διάταξης. Οι πείροι και τα καλύμματα στερεώνονται επάνω στο κεραμικό κέλυφος με τσιμέντο. Οι μονωτήρες “cap and pin”, λόγω του σχήματός τους, παρουσιάζουν μεγάλη μηχανική αντοχή έναντι εφελκυστικών δυνάμεων [8].
 - Τύπου “long rod”: Οι μονωτήρες ανάρτησης αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1920 στη Γερμανία, ως μια εναλλακτική των “cap and pin” μονωτήρων και για χρήση σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες [3]. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως, σε αντίθεση με τους “cap and pin” μονωτήρες, μεταλλικά μέρη υπάρχουν μόνο στα άκρα τους [8]. Κατασκευάζονται από πορσελάνη ή πολυμερή υλικά. Οι συνθετικοί μονωτήρες “long rod”, σε αντίθεση με τους πορσελάνινους, είναι δυνατόν να έχουν ενιαίο άξονα και μήκος έως και 20 μέτρα [3].



Εικόνα 1.4 Μονωτήρας τύπου “cap and pin” από πορσελάνη (αριστερά) και συνθετικός μονωτήρας τύπου “long rod” (δεξιά) [9]

- «Μονωτήρες στήριξης», που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη αγωγών υψηλής ή μέσης τάσης (Εικόνα 1.5) σε γραμμές μεταφοράς ή διανομής και σε υποσταθμούς

για την προστασία εξοπλισμού [7, 9].

- Τύπου “post”:
 - Μονωτήρες γραμμής μεταφοράς (τύπου “line post”): Είναι οι post μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε γραμμές μεταφοράς και διανομής. Για γραμμές μεταφοράς η ονομαστική τους τάση είναι συνήθως πάνω από $69kV$, ενώ για γραμμές διανομής έως $35kV$. Μπορούν να εγκατασταθούν κάθετα ή οριζόντια και βελτιώνουν την αισθητική της γραμμής, αφού μειώνουν σημαντικά τον απαιτούμενο χώρο για την ανάρτησή της [3].
 - Μονωτήρες υποσταθμών (τύπου “station post”): Είναι οι post μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε υποσταθμούς υψηλής ή μέσης τάσης για την προστασία ζυγών, μετασχηματιστών, διακοπών και άλλων συναφών διατάξεων [3, 9]. - Τύπου “pin”:
- Αυτός ο τύπος μονωτήρων είχε χρησιμοποιηθεί αρχικά για εφαρμογές τηλεφωνικών γραμμών και αλεξικέραυνων. Στην πορεία εξελίχθηκε και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα σε γραμμές διανομής έως $33kV$ [8, 10]. Η λογική σχεδίασής τους είναι παρόμοια με αυτή των cap and pin μονωτήρων. Είναι κατασκευασμένοι από πορσελάνη ή γυαλί και στερεώνονται απευθείας πάνω στους πυλώνες (αντί να αναρτώνται). Οι αγωγοί τυλίγονται γύρω από τον μονωτήρα ή στερεώνονται σε ειδικές αυλακώσεις, ώστε να παραμένουν στη θέση τους [10].



Εικόνα 1.5 Πορσελάνινοι μονωτήρες τύπου “line post” (αριστερά), τύπου “station post” (κέντρο) και τύπου “pin” (δεξιά) [9]

- «Μονωτήρες διέλευσης», που χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές ή άλλες συσκευές, με σκοπό την αποφυγή της επαφής μεταξύ των δύο (Εικόνα 1.6). Χρησιμοποιούνται, επίσης, για τη διέλευση αγωγών εγκάρσιως μέσω χωρισμάτων (π.χ. τοίχων) [7]. Συνήθως κατασκευάζονται από πορσελάνη, αλλά υπάρχουν και μονωτήρες διέλευσης από πολυμερή υλικά.



Εικόνα 1.6 Διάφοροι μονωτήρες διέλευσης από πολυμερή υλικά [11]

1.2.2 Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον χώρο χρήσης τους

Ανάλογα με τον χώρο στον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, οι μονωτήρες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες [7]:

- «Μονωτήρες ομίχλης», που χρησιμοποιούνται όπου επικρατούν συνθήκες έντονης φυσικής ή βιομηχανικής ρύπανσης. Η διαμόρφωση της εξωτερικής τους επιφάνειας είναι τέτοια, ώστε να έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού, το οποίο ορίζεται ως η συντομότερη οδός στην επιφάνεια του μονωτήρα που συνδέει τα δύο μεταλλικά άκρα του [12], αλλά και προστασία έναντι επικάλυψης ακαθαρσιών (π.χ. περιττώματα πτηνών).
- «Μονωτήρες κανονικού τύπου», που χρησιμοποιούνται σε σύνηθες περιβάλλον και έχουν μικρότερο μήκος ερπυσμού από τους μονωτήρες ομίχλης.
- «Μονωτήρες εσωτερικού τύπου», που χρησιμοποιούνται σε εσωτερικές εγκαταστάσεις.

1.3 Υλικά κατασκευής μονωτήρων

Τα κύρια διηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονωτήρων είναι τα κεραμικά (πορσελάνη ή γυαλί) και τα πολυμερή (ή συνθετικά). Και

τα δύο αποτελούνται από τετρασθενή άτομα, πυρίτιο στην περίπτωση των κεραμικών και άνθρακα στα πολυμερή, τα οποία έχουν την ικανότητα σχηματισμού μεγάλων μοριακών δομών. Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ τους έχει να κάνει με την ευστάθεια των δεσμών που σχηματίζουν με άλλα στοιχεία [1].

1.3.1 Κεραμικοί μονωτήρες

Τα κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους μονωτήρες, δηλαδή η πορσελάνη και το γυαλί, αποτελούνται κυρίως από πυριτικά άλατα. Τα τελευταία είναι ανόργανες χημικές ενώσεις από πυρίτιο και οξυγόνο με κρυσταλλική δομή, όπως ο χαλαζίας ή μη κρυσταλλική δομή, όπως το συντετηγμένο διοξείδιο του πυριτίου. Η προσθήκη προσμίξεων άλλων στοιχείων και συγκεκριμένα οξειδίων σε αυτά, δημιουργεί ένα τεράστιο εύρος κεραμικών υλικών με βάση τα πυριτικά άλατα [1].

Οι ηλεκτροστατικοί δεσμοί μεταξύ πυριτίου και οξυγόνου είναι ισχυροί και ως συνέπεια τα κεραμικά υλικά έχουν υψηλό σημείο τήξης, σημαντική μηχανική αντοχή αλλά και ευθραυστότητα. Ακόμη, τα κεραμικά υλικά έχουν μεγάλη τιμή ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας, μιας θερμοδυναμικής ποσότητας που καθορίζει τη δύναμη προσκόλλησης σε ρύπους. Έτσι, οι κεραμικοί μονωτήρες είναι αρκετά επιρρεπείς στην επικάλυψη υγρασίας και ρύπων στην επιφάνειά τους [1].

1.3.1.1 Μονωτήρες πορσελάνης

Η πορσελάνη είναι κεραμικό υλικό που αποτελείται τυπικά από περίπου 50% αργίλους, 25% χαλαζία ή αλουμίνα και 25% άστριο. Οι άργιλοι είναι ένας συνδυασμός ένυδρων αργιλούχων πυριτικών αλάτων μίας ή περισσότερων κρυσταλλικών μορφών, με ποικίλες ποσοστώσεις αλουμίνας (Al_2O_3) και διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) [2]. Ο χαλαζίας είναι χημικά καθαρό διοξείδιο του πυριτίου, ενώ οι άστριοι είναι μια ομάδα αλκαλιούχων τεκτοπυριτικών ορυκτών με χημική σύσταση $XO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, όπου το X είναι κάλιο ή νάτριο [1, 2]. Μερικές από τις βασικότερες ιδιότητες της πορσελάνης φαίνονται παρακάτω [2]:

- Πυκνότητα: $\approx 2.5 \text{ g/cm}^3$
- Εφελκυστική τάση (εξαρτάται από τη σύσταση της πορσελάνης): 40 – 80 MPa
- Αγωγιμότητα της τάξης των: 10^{-11} S/m

- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C , 50Hz): 6 – 7
- Διηλεκτρική αντοχή: 200 kV/cm
- Μέγιστη θερμοκρασία ασφαλούς λειτουργίας: $\approx 160^{\circ}\text{C}$
- Θερμική αγωγιμότητα: $\approx 1 - 4\text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Συντελεστής διασποράς $\tan\delta$ (50Hz): 0.01 – 0.03

Για την παρασκευή πορσελάνινων μονωτήρων όλα τα συστατικά αναμειγνύονται και στη συνέχεια αλέθονται, ώστε να προκύψει σκόνη με το επιθυμητό μέγεθος κόκκων. Στην υγρή μέθοδο μορφοποίησης, που είναι και αυτή που χρησιμοποιείται στους μονωτήρες πορσελάνης [1], η σκόνη αναμειγνύεται με νερό και το προϊόν που προκύπτει φιλτράρεται για να απομακρυνθούν ξένα σωματίδια [2]. Η τελική μορφή των μονωτήρων προκύπτει μέσω μιας ακολουθίας διαδικασιών (υγρή χύτευση, ξήρανση, προ-έψηση, μηχανική κατεργασία, επισφάλτωση, πυροσυσσωμάτωση, φινίρισμα) [13, 14], κατά τις οποίες αφαιρείται μεγάλο ποσοστό της υγρασίας, βελτιώνεται η μηχανική αντοχή και καθορίζεται το επιθυμητό σχήμα των μονωτήρων [15]. Στη συνέχεια, οι μονωτήρες κόβονται στο κατάλληλο μέγεθος και λειαίνονται [14]. Τέλος, γίνεται η ενσωμάτωση των μεταλλικών ακροδεκτών με τσιμέντο. Συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για τους ακροδέκτες είναι ο ελατός ή ο όλκιμος χυτοσίδηρος και ο χάλυβας [2].

Τα μηχανικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων μονωτήρων εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως η περιεκτικότητα των συστατικών της πορσελάνης, η εσωτερική μικροδομή του τελικού προϊόντος (δηλ. το μέγεθος και η πυκνότητα των κρυστάλλων, των πόρων και των ξένων σωματιδίων στην πορσελάνη), η ύπαρξη ή μη εσωτερικών μικρο-ρωγμών κ.ά. [1, 15]. Πάντως, σε γενικές γραμμές, οι μονωτήρες πορσελάνης είναι ανθεκτικοί έναντι καταπονήσεων από περιβαλλοντικούς παράγοντες και διάβρωσης λόγω ρευμάτων διαρροής. Από την άλλη, είναι εύθραυστοι και μπορεί να υποστούν ρωγμές ή διάτρηση στο εσωτερικό τους, για τον εντοπισμό των οποίων απαιτούνται εξειδικευμένες τεχνικές [2].

1.3.1.2 Μονωτήρες υάλου

Το γυαλί που χρησιμοποιείται στους μονωτήρες υάλου είναι το λεγόμενο γυαλί νατρασβέστου (soda lime glass), η πιο συνηθισμένη μορφή γυαλιού. Αποτελείται, κατά κύριο λόγο, από ένα κράμα διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2), οξειδίου του ασβεστίου

(CaO), άστριου χημικής σύστασης $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$, δολομίτη ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), οξειδίου του νατρίου (Na_2O) και θεικού νατρίου (Na_2SO_4) [1, 2]. Το SiO_2 προμηθεύεται συνήθως σε μορφή σκόνης χαλαζία, ενώ τα Na_2O και CaO προστίθενται ως ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3) και ασβεστόλιθος, που έχει ως κυρίαρχο συστατικό το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) [15]. Άλλες βελτιωτικές προσμίξεις που χρησιμοποιούνται συχνά περιέχουν κάλιο ή βάριο [1]. Η διαφορά του γυαλιού συγκριτικά με την πορσελάνη έγκειται κυρίως στη μέθοδο επεξεργασίας, παρά στη σύστασή του [2].

Για την παρασκευή μονωτήρων υάλου, όλα τα συστατικά αναμειγνύονται και στη συνέχεια θερμαίνονται σε κατάλληλους φούρνους και υψηλές θερμοκρασίες έως και 1500°C . Η εύπλαστη μάζα που προκύπτει μπαίνει σε καλούπι για να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα και αναθερμαίνεται, ώστε να έχει ενιαία θερμοκρασία σε όλο τον όγκο της [1]. Στη συνέχεια, ψύχεται με γρήγορο ρυθμό σε θερμοκρασία δωματίου από ρεύματα ψυχρού αέρα ή εμβάπτιση σε λάδι [2, 15]. Λόγω της γρήγορης ψύξης, η επιφάνεια των μονωτήρων ψύχεται ταχύτερα από το εσωτερικό τους, δημιουργώντας έτσι ένα σκληρό επιφανειακό στρώμα. Το εσωτερικό, που συνεχίζει να ψύχεται όντας εύπλαστο ακόμη, τείνει να συσταλεί, «τραβώντας» την εξωτερική επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί προς τα μέσα [15]. Το αποτέλεσμα της παραπάνω επεξεργασίας είναι το λεγόμενο θερμικά σκληρυμένο γυαλί (tempered glass), το οποίο είναι πολύ πιο ανθεκτικό από το απλό ανοπτημένο γυαλί [1]. Μερικές από τις βασικότερες ιδιότητες του θερμικά σκληρυμένου γυαλιού φαίνονται παρακάτω [2]:

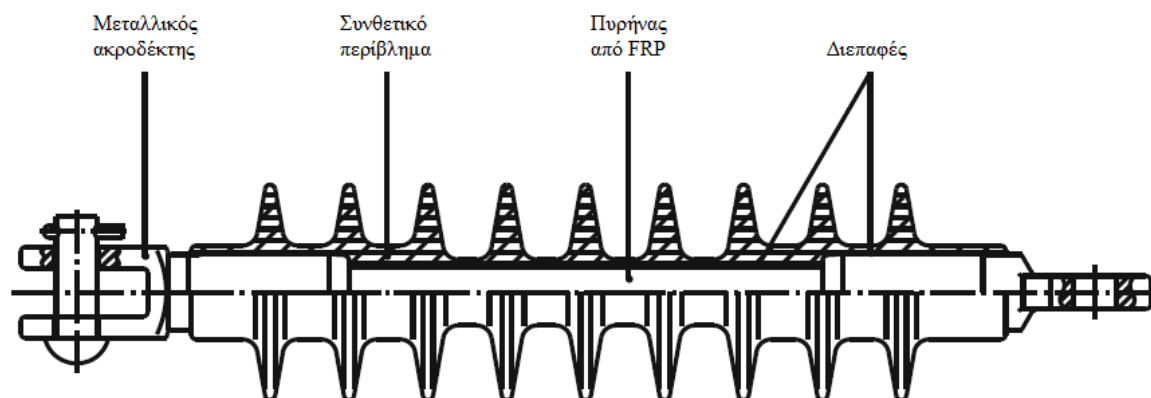
- Πυκνότητα: $\approx 2.5 \text{ g/cm}^3$
- Εφελκυστική τάση: $100 - 120 \text{ MPa}$
- Αγωγιμότητα της τάξης των: 10^{-11} S/m
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C , 50Hz): ≈ 7
- Διηλεκτρική αντοχή: Ελαφρώς υψηλότερη από την πορσελάνη (200 kV/cm)
- Μέγιστη θερμοκρασία ασφαλούς λειτουργίας: Ελαφρώς χαμηλότερη από την πορσελάνη αν και μπορεί να φτάνει και αρκετά χαμηλά (έως και 110°C)
- Θερμική αγωγιμότητα: $\approx 1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Συντελεστής διασποράς $\tan\delta$ (50Hz): έως και 0.06

Θετικά χαρακτηριστικά των μονωτήρων υάλου είναι η υψηλή διηλεκτρική αντοχή, η αντοχή σε διάτρηση και η ευκολία εντοπισμού ρωγμών και ατελειών με οπτική επιθεώρηση, σε αντίθεση με τους μονωτήρες πορσελάνης. Από την άλλη, οι γυάλινοι

μονωτήρες είναι επιρρεπείς στη διάβρωση από ρεύματα διαρροής, ενώ συχνά γίνονται στόχος βανδαλισμού [2].

1.3.2 Συνθετικοί μονωτήρες

Οι συνθετικοί μονωτήρες αποτελούνται από τρία κύρια μέρη, τον πυρήνα, το περίβλημα και τους μεταλλικούς ακροδέκτες (Εικόνα 1.7). Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος κυρίως από συνθετικές ρητίνες με ενίσχυση υαλονημάτων (Fiber Reinforced Plastic – FRP) και έχει μεγάλη μηχανική αντοχή για να μπορεί να υποστηρίξει εξωτερικά φορτία [3]. Το περίβλημα αποτελείται από πολυμερή υλικά, που συνήθως περιέχουν διάφορες προσμίξεις και σκοπός του είναι να παρέχει επιπλέον ηλεκτρική μόνωση και προστασία από αντίξοες καιρικές συνθήκες [2, 16]. Τέλος, οι μεταλλικοί ακροδέκτες ενσωματώνονται σε οποιοδήποτε από τα δύο άκρα των μονωτήρων, είναι κατασκευασμένοι από ελατό ή όλκιμο χυτοσίδηρο, χάλυβα ή αλουμίνιο και μέσω αυτών γίνεται η προσάρτηση των μονωτήρων [3, 16].



Εικόνα 1.7 Σχέδιο συνθετικού μονωτήρα, όπου φαίνονται τα κύρια μέρη του [3]

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος κατασκευής για τους πυρήνες των συνθετικών μονωτήρων, λόγω του χαμηλού κόστους της και της υψηλής παραγωγικότητας, είναι η μέθοδος εξόλκευσης (pultrusion process) [3]. Μέσω της διαδικασίας αυτής, οι ίνες του πυρήνα εμβαπτίζονται σε μια δεξαμενή με συνθετική ρητίνη. Έπειτα, περνάνε από ένα σύστημα που προ-καθορίζει τη διάταξή τους (ώστε να είναι ισοκατανεμημένες και παράλληλες με τον διαμήκη άξονα του πυρήνα) και απομακρύνει την περισσευούμενη ρητίνη. Στη συνέχεια, οι εμποτισμένες ίνες οδηγούνται σε κατάλληλα εκμαγεία, όπου λαμβάνει χώρα θερμική επεξεργασία για την στερεοποίηση της ρητίνης και ο πυρήνας

αποκτάει την τελική του σύσταση (Εικόνα 1.8). Τέλος, οι πυρήνες, που έχουν μορφή συνεχών ράβδων, κόβονται στο επιθυμητό μέγεθος [3, 17].

Τα υαλονήματα του πυρήνα είναι επικαλυμμένα με ένα προστατευτικό στρώμα από σιλανόλες, πάχους της τάξης των $200nm$, το οποίο έχει παράλληλα συγκολλητικό ρόλο και βελτιώνει την ενσωμάτωσή τους στη μήτρα της ρητίνης [3]. Ορισμένοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν υαλονήματα τύπου E-glass ή E-CR-glass για να πετύχουν αυξημένη μηχανική αντοχή των πυρήνων [3, 18]. Το E-glass είναι αλούμινο-βόριο-πυριτικό γυαλί με ποσοστό αλκαλίων κάτω του 1% και το E-CR-glass είναι E-glass χωρίς βόριο, κατάλληλα τροποποιημένο ώστε να έχει υψηλή αντοχή στη διάβρωση [19]. Για τη μήτρα ρητίνης του πυρήνα χρησιμοποιούνται συνήθως εποξεικές ρητίνες με προσθήκη διαφόρων καταλυτών και ανόργανων προσμίξεων, ώστε να μειωθεί η ευθραυστότητα και να αυξηθούν το ιξώδες και η θερμική αγωγιμότητα. Άλλα είδη ρητινών που χρησιμοποιούνται είναι οι ρητίνες βινυλεστέρα και οι ρητίνες ακόρεστου πολυεστέρα, οι οποίες είναι μεν φθηνότερες, αποδίδουν δε χειρότερα από τις εποξεικές σε θέματα μηχανικής, θερμικής και χημικής αντοχής [3].

Αφού κατασκευαστεί ο πυρήνας, επικαλύπτεται με ένα στρώμα ελαστομερούς σιλικόνης που έχει υποστεί βουλκανισμό σε υψηλή θερμοκρασία (High Temperature Vulcanized Silicone Rubber – HTV SIR) και το οποίο δημιουργεί χημικό δεσμό με τον πυρήνα [2]. Οι μεταλλικοί ακροδέκτες (Εικόνα 1.8) ενσωματώνονται στα άκρα του πυρήνα των μονωτήρων πριν από το περίβλημα και οι διεπαφές τους με το προστατευτικό στρώμα του σφραγίζονται κατάλληλα για την αποφυγή διείσδυσης νερού, ενώ σε ορισμένες εφαρμογές για δίκτυα διανομής, το περίβλημα τους επικαλύπτει. Η ενσωμάτωση γίνεται με διαφορετικές τεχνικές όπως σφήνωση και έπειτα συγκόλληση με εποξεική ρητίνη, ελεγχόμενη σφυρηλάτηση και συμπίεση ή πτύχωση με περιμετρική συμπίεση, ανάλογα με το υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί για τους ακροδέκτες [18].

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων είναι τα ελαστομερή σιλικόνης ή αιθυλενίου-προπενίου και τα μονομερή αιθυλενίου-προπενίου ή αιθυλενίου-προπενίου-διενίου (Ethylene Propylene Diene Monomer – EPDM) [2, 17]. Αυτό που χρησιμοποιείται συχνότερα, όμως, είναι το ελαστομερές σιλικόνης (SIR) [17]. Το SIR διατίθεται στην αγορά σε τρεις μορφές, όλες βασισμένες στο πολυμερές πολυδιμεθυλοξάνη (Polydimethylsiloxane – PDMS). Ο παράγοντας διαφοροποίησης είναι η διαδικασία του βουλκανισμού, δηλαδή του μηχανισμού

ανάπτυξης δεσμών μεταξύ των μακρομορίων. Οι τρεις αυτές μορφές είναι το RTV SIR (Room Temperature Vulcanized SIR – Βουλκανισμός σε θερμοκρασία δωματίου), το LSR (Liquid Silicone Rubber – Βουλκανισμός σε θερμοκρασία 150°C - 200°C) και το



Εικόνα 1.8 FRP πυρήνες συνθετικών μονωτήρων σε διαφορετικά μεγέθη (αριστερά) και τυπικά σχέδια μεταλλικών ακροδεκτών (δεξιά) [22]

HTV SIR (High Temperature Vulcanized SIR – Βουλκανισμός σε υψηλή θερμοκρασία >200°C και πίεση). Το RTV SIR χρησιμοποιείται για επικάλυψη κεραμικών μονωτήρων, ενώ οι άλλες δύο μορφές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συνθετικών μονωτήρων, με το HTV SIR να είναι αυτό που προτιμάται συχνότερα (περισσότερο από το 90% των μονωτήρων για εφαρμογές άνω των 123kV [3]) [21].

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την κατασκευή του περιβλήματος από HTV SIR, που περιλαμβάνουν χύτευση σε ένα ή περισσότερα βήματα μέσα σε ειδικά διαμορφωμένα εκμαγεία, στο κέντρο των οποίων έχει τοποθετηθεί ο πυρήνας και στη συνέχεια βουλκανισμό υπό υψηλή θερμοκρασία και πίεση (>1500bar). Τα κυάθια του περιβλήματος μπορούν να παράγονται ταυτόχρονα ή ξεχωριστά και αναλόγως με τη διαδικασία που ακολουθείται, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί περίβλημα με διαφορετικά μεγέθη κυαθίων [3].

Το SIR έχει εξαιρετικές επιδόσεις σε θέματα θερμικής σταθερότητας, ηλεκτρικής μόνωσης, υδροφοβικότητας και αντοχής σε UV ακτινοβολία. Από την άλλη, μπορεί να υποστεί μόνιμη παραμόρφωση από τη δημιουργία αγωγίμων καναλιών στην επιφάνειά του (tracking), λόγω απανθράκωσης της τελευταίας από σχηματισμό ηλεκτρικών τόξων (arcing) και έχει σχετικά αυξημένο κόστος. Το EPDM, που είναι το δεύτερο σε εύρος χρήσης υλικό για περιβλήματα συνθετικών μονωτήρων, είναι φθηνότερο από το SIR και έχει μεγάλη αντοχή σε μηχανικά φορτία και μηχανισμούς tracking. Σε ορισμένες

περιπτώσεις γίνεται μίξη των δύο υλικών, ώστε να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα του καθενός στο τελικό προϊόν [23]. Μερικές βασικές ιδιότητες του SIR είναι οι εξής [2, 15]:

- Πυκνότητα: $\approx 1.5 \text{ g/cm}^3$
- Θερμοκρασία υαλοποίησης: -120°C , δηλαδή το υλικό διατηρεί τις ελαστικές του ιδιότητες έως και πολύ χαμηλή θερμοκρασία
- Αγωγιμότητα της τάξης των: 10^{-12} S/m
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά (25°C , 50Hz): ≈ 4
- Διηλεκτρική αντοχή (50Hz): $160 - 200 \text{ kV/cm}$
- Μέγιστη θερμοκρασία ασφαλούς λειτουργίας: $\approx 350^\circ\text{C}$
- Θερμική αγωγιμότητα: $\approx 0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Συντελεστής διασποράς $\tan\delta$ (50Hz): $0.02 - 0.03$

Οι παραπάνω τιμές, όπως και αυτές που αναφέρθηκαν για το γυαλί και την πορσελάνη νωρίτερα, είναι οι ιδιότητες των υλικών. Συνεπώς, τιμές όπως η μέγιστη θερμοκρασία ασφαλούς λειτουργίας δε μπορούν να χαρακτηρίσουν έναν μονωτήρα. Για έναν μονωτήρα η αντίστοιχη θερμοκρασία εξαρτάται από την παραγωγική διαδικασία και το σύνολο των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του.

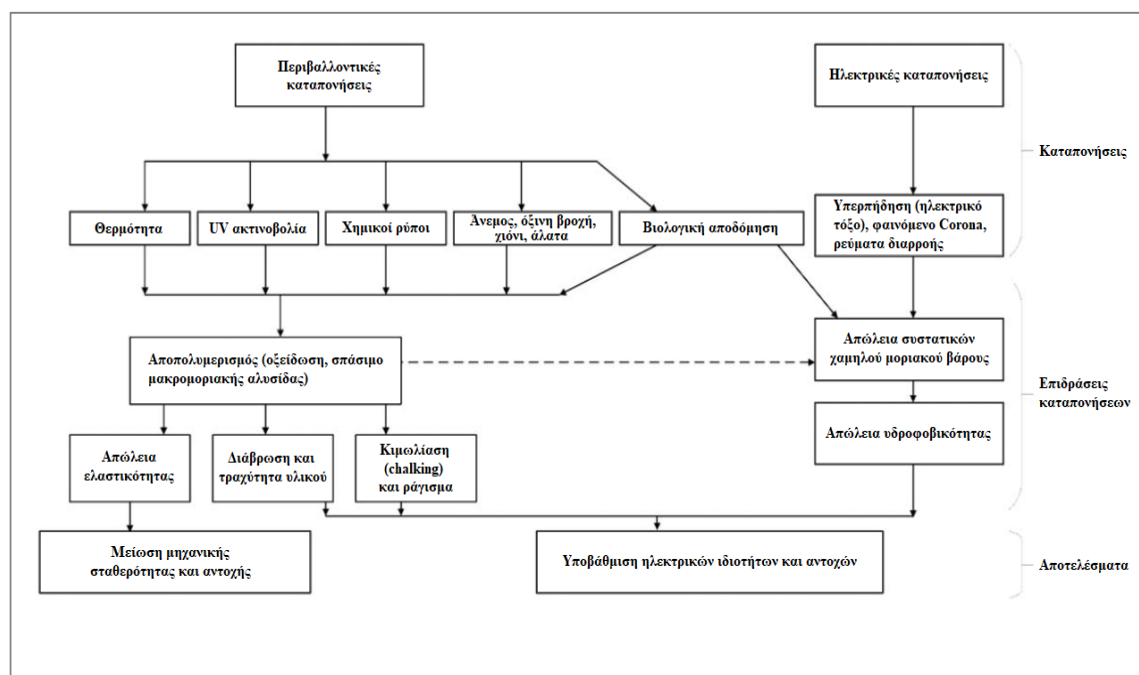
Το περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων, εκτός του SIR, περιέχει προσμίξεις άλλων υλικών και ανόργανων ενώσεων που βελτιώνουν τις θερμικές, μηχανικές, μονωτικές και αντιδιαβρωτικές ιδιότητές του, οι οποίες φθίνουν έντονα με τον χρόνο, ειδικά σε περιβάλλον με αντίξοες καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η προσθήκη άνυδρης αλουμίνας (Al_2O_3) ή SiO_2 βελτιώνει την αντοχή έναντι διάβρωσης και μηχανισμών tracking, καθώς και τη θερμική αγωγιμότητα. Το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) και το τιτανικό βάριο (BaTiO_3) αυξάνουν τη θερμική σταθερότητα και τη σχετική διηλεκτρική σταθερά, ενώ το CaCO_3 λειτουργεί ως επιβραδυντικό φλόγας, βελτιώνοντας παράλληλα την υδροφοβικότητα [20]. Μια από τις συνηθέστερες βελτιωτικές προσμίξεις που χρησιμοποιούνται είναι η ένυδρη αλουμίνα ($\text{ATH} - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), λόγω του ότι είναι σχεδόν πάντα εφικτό να προστεθεί στο υλικό του περιβλήματος στην απαιτούμενη περιεκτικότητα. Η προσθήκη ATH βελτιώνει αισθητά την αντοχή του SIR σε μηχανισμούς γήρανσης όπως το tracking. Επίσης, λειτουργεί ως επιβραδυντικό φλόγας, αφού σε θερμοκρασίες $180^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ αποσυντίθεται σε αλουμίνα απελευθερώνοντας το νερό που υπάρχει στη δομή της [3].

Κεφάλαιο 2: Καταπονήσεις, γήρανση και τεχνικές ελέγχου σε πολυμερείς και συνθετικούς μονωτήρες

2.1 Καταπονήσεις και μηχανισμοί γήρανσης υπαίθριων μονωτήρων

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί κλπ.) είναι υπαίθριες. Κατά συνέπεια, οι μονωτήρες που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις αυτές υπόκεινται σε καταπονήσεις, εκτός των μηχανικών (υποστήριξη μηχανικών φορτίων, π.χ. γραμμών μεταφοράς) και των ηλεκτρικών (μερικές εκκενώσεις, υπερπήδηση κ.ά.), που οφείλονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ο άνεμος, η βροχή, η ηλιακή ακτινοβολία, οι χημικοί ή άλλοι ρύποι κ.ά. [24, 25].

Η ρύπανση των μονωτήρων και οι καταπονήσεις που δέχονται οδηγούν στη γήρανσή τους. Γήρανση ονομάζεται η μακροχρόνια, μη αναστρέψιμη αλλαγή στις ηλεκτρικές, μονωτικές, θερμικές και μορφολογικές ιδιότητες των υλικών των μονωτήρων λόγω της επίδρασης των διαφόρων καταπονήσεων [20, 24]. Μια σχηματοποίηση των καταπονήσεων και των βασικότερων επιδράσεών τους στους μονωτήρες φαίνεται στην Εικόνα 2.1:



Εικόνα 2.1 Διάφοροι τύποι καταπονήσεων και η επίδρασή τους στις ιδιότητες πολυμερών και συνθετικών μονωτήρων [25, 26]

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE Std 943-1986 [27], οι μηχανισμοί γήρανσης των μονωτήρων χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Θερμική γήρανση
- Ηλεκτρική γήρανση
- Περιβαλλοντική γήρανση
- Μηχανική γήρανση

2.1.1 Παράγοντες περιβαλλοντικών καταπονήσεων

Οι μεγάλες αντοχές των μονωτήρων πολυμερών υλικών έναντι μηχανικών φορτίων και καιρικών φαινομένων, προκύπτουν από το μεγάλο μοριακό βάρος και το «δέσιμο» των μακρομοριακών αλυσίδων των πολυμερών. Ο αποπολυμερισμός, δηλαδή η διάσπαση των μακρομορίων, οδηγεί σε μείωση του μοριακού βάρους και υποβάθμιση των ιδιοτήτων των μονωτήρων όπως απώλεια της υδροφοβικότητας, αποχρωματισμός, ράγισμα κ.ά. Η επιδείνωση των ιδιοτήτων αυτών και η γήρανση, τελικώς, των μονωτήρων, οφείλεται μεταξύ άλλων και σε περιβαλλοντικούς παράγοντες [24, 26]. Κάποιοι από τους κυριότερους παράγοντες αυτούς είναι οι εξής:

Βιολογική αποδόμηση [26]:

Οι πολυμερείς μονωτήρες και το πολυμερές περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων αποτελούνται από οργανικές ενώσεις. Ως εκ τούτου, είναι δυνατή η ανάπτυξη μικροοργανισμών στην επιφάνειά τους. Οι μικροοργανισμοί εγκαθίστανται στην επιφάνεια των μονωτήρων σε μορφή βιο-φιλμ (Biofilms) και επιβιώνουν καταναλώνοντας νερό και θρεπτικά συστατικά από το περιβάλλον ή και από το ίδιο το υλικό των μονωτήρων. Οι πιο συνήθεις μικροοργανισμοί που έχουν βρεθεί σε υπαίθριους μονωτήρες είναι τα φύκη, οι μύκητες και οι λειχήνες.

Η ανάπτυξη μικροοργανισμών στην επιφάνεια συνθετικών και πολυμερών μονωτήρων μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στις ιδιότητες και στη λειτουργία τους. Μερικές από τις σημαντικότερες επιδράσεις είναι η «απόκρυψη» της υδροφοβικότητας ή η αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας λόγω της ύπαρξης του βιο-φιλμ, ο αποχρωματισμός και η διάβρωση του περιβλήματος. Επίσης, η ανάδυση προσμίξεων και

υλικών πλήρωσης (fillers) που περιέχονται στο περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων αποτελεί πηγή θρεπτικών συστατικών για τους μικροοργανισμούς. Η ελάττωση των στοιχείων αυτών μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της μηχανικής αντοχής και της σταθερότητας των μονωτήρων.

Χημικοί ρύποι [26]:

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) συναντάται συχνά στον αέρα περιοχών με βαριά βιομηχανική δραστηριότητα. Επικάθεται στην επιφάνεια των μονωτήρων δημιουργώντας ένα στρώμα και μπορεί να οδηγήσει στην υπερπήδησή τους (flashover). Το οξυγόνο επίσης αποτελεί παράγοντα ρύπανσης, επειδή ευνοεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Δύο ακόμη χημικοί ρύποι που επιταχύνουν τη γήρανση των μονωτήρων είναι το όζον και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), που παράγονται από το φαινόμενο Corona (βλ. §2.1.2.1) γύρω από τις γραμμές μεταφοράς. Το όζον είναι γενικότερα καταστροφικό για πολλά υλικά όπως και για τους μονωτήρες, ενώ το NO_2 αντιδρά με νερό προς σχηματισμό νιτρικού οξέος (HNO_3) που διαβρώνει την επιφάνειά τους.

Υπεριώδης ακτινοβολία:

Από το ηλιακό φως που φτάνει στη γη, πιο επιβλαβές για τα πολυμερή υλικά είναι αυτό που βρίσκεται στο εύρος μηκών κύματος από 270nm έως 320nm (υπεριώδης ακτινοβολία). Αυτό αποτελεί κάτι λιγότερο από το 5% της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Άλλες πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας, που επηρεάζουν τους μονωτήρες, είναι το φαινόμενο Corona (βλ. §2.1.2.1) και οι εκκενώσεις ξηράς ζώνης (dry-band arcing), στις οποίες θα αναφερθούμε και παρακάτω [26]. Τα πολυμερή υλικά είναι επίσης ευαίσθητα σε ακτίνες X και ακτίνες γ [28].

Η απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας επιταχύνει τη γήρανση των μονωτήρων, αφού μπορεί να προκαλέσει μείωση της υδροφοβικότητας και αλλοίωση/διάβρωση του περιβλήματος (αποχρωματισμός, σκίσιμο, ράγισμα, κιμωλίαση κλπ.), ειδικά κάτω από συνθήκες αυξημένης υγρασίας. Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση και το μήκος κύματος του φωτός [26]. Η διάβρωση λαμβάνει χώρα μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων που προκαλούνται από την υπεριώδη ακτινοβολία και σπάζουν τις μακρομοριακές αλυσίδες [28].

Θερμότητα [28]:

Όλα τα πολυμερή υλικά υφίστανται θερμική γήρανση κάτω από συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ή έντονων διακυμάνσεών της. Η θερμική γήρανση των πολυμερών υλικών των μονωτήρων είναι καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά των υλικών αυτών σε περιπτώσεις πυρκαγιών.

2.1.2 Ρύπανση μονωτήρων και ηλεκτρικές καταπονήσεις

Το πρόβλημα της ρύπανσης των μονωτήρων αποτελεί τη συνηθέστερη αιτία σφαλμάτων σε υπαίθριες εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων. Η ρύπανση προκαλείται από τη συγκέντρωση στην επιφάνεια των μονωτήρων, από τον άνεμο ή άλλους μηχανισμούς (όξινη βροχή κ.ά.), ρύπων, που έχουν ή μπορούν να αποκτήσουν ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι ρύποι επικάθονται στην επιφάνεια των μονωτήρων σε μορφή φιλμ, επιτρέποντας τη ροή ρεύματος (ρεύμα διαρροής) και οδηγώντας μέχρι και στην υπερπήδησή τους (flashover) [29].

Σύμφωνα με το πρότυπο 60815-1 της IEC [30], υπάρχουν οι εξής δύο βασικοί τύποι ρύπανσης που μπορούν να οδηγήσουν σε υπερπήδηση:

- Ρύπανση τύπου A: Αφορά στέρεους ρύπους με κάποιο μη διαλυτό συστατικό, που μπορούν να γίνουν αγωγά μετά από ύγρανση. Χαρακτηρίζεται από τη μέτρηση ισοδύναμης ποσότητας επικάλυψης αλάτων (ESDD – Equivalent Salt Deposit Density) ή τη μέτρηση πυκνότητας μη διαλυτών επικαθίσεων (NSDD – Non Soluble Deposit Density). Συναντάται συνήθως στην ενδοχώρα, στην έρημο ή σε περιοχές με βιομηχανική ρύπανση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η άμμος, η σκόνη και ο άργιλος.
- Ρύπανση τύπου B: Αφορά υγρούς ρύπους ηλεκτρολυτών με ελάχιστα ή καθόλου μη διαλυτά στοιχεία. Χαρακτηρίζεται από μετρήσεις αγωγιμότητας ή ρεύματος διαρροής. Συναντάται συνήθως σε παράκτιες περιοχές, ενώ χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το αλατόνερο, τα χημικά εκνεφώματα (π.χ. από ψεκασμό καλλιεργειών) και η όξινη βροχή.

Ακόμα, σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο, το επίπεδο ρύπανσης μιας περιοχής χωρίζεται σε πέντε κατηγορίες: πολύ ελαφριά, ελαφριά, μεσαία, βαριά και πολύ βαριά.

Ο μηχανισμός του φαινομένου της ρύπανσης χωρίζεται σε στάδια. Αρχικά, ρύποι (Εικόνα 2.2) συγκεντρώνονται στην επιφάνεια των μονωτήρων από τον άνεμο, από όξινη βροχή, ακόμα και από εναπόθεση περιττωμάτων πτηνών. Υπάρχουν πολλών ειδών ρύποι, αλλά αυτό που ενδιαφέρει σε ό,τι αφορά τη ρύπανση των μονωτήρων είναι η

Ρύποι		Κατάσταση	Πηγή
Μεταλλεύματα	Σιδηροπυρίτης FeS_2 , μαγνητίτης Fe_3O_4	Ενεργός, δεν απαιτεί διάλυση	Ορυχεία και σχετικές βιομηχανίες
Αέρια σε κατάσταση διαλύματος	SO_2 , H_2S , NH_3	Ενεργός, είναι ήδη σε διάλυση	Όξινη βροχή
Ιοντικά άλατα	NaCl , Na_2CO_3 , MgCl_2 , CaSO_4	Ενεργός, απαιτεί διάλυση	Θάλασσα, έρημος κτλ
Περιττώματα πουλιών		Ενεργός, δεν απαιτεί διάλυση	Περιοχές διέλευσης μεγάλων πουλιών
Στάχτη		Συμπεριφέρεται ανάλογα με την πηγή	
Πηλός		Αδρανής	

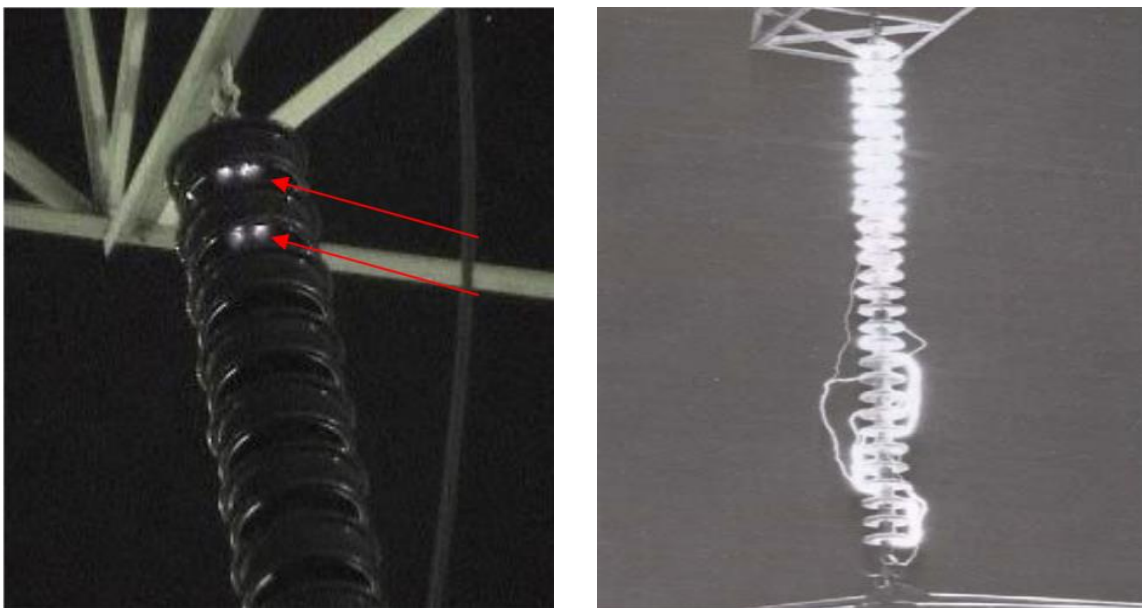
Εικόνα 2.2 Τυπικά παραδείγματα ρύπων [29]

επιφανειακή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έτσι, οι ρύποι διακρίνονται σε ενεργούς και αδρανείς, δηλαδή σε αυτούς που είναι ήδη αγώγιμοι ή μπορούν να αποκτήσουν αγωγιμότητα μετά από διάλυση σε νερό και σε αυτούς που δεν είναι αγώγιμοι [29]. Στη συνέχεια, η επιφάνεια πρέπει να υγρανθεί ώστε τα συσσωρευμένα άλατα ή/και οι ενεργοί ρύποι να διαλυθούν, δημιουργώντας ένα στρώμα αγώγιμου ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Η ύγρανση είναι δυνατή μέσω ομίχλης, υψηλής υγρασίας, ελαφριάς βροχόπτωσης κλπ. [28, 29].

Αφού δημιουργηθεί το αγώγιμο στρώμα ρύπων, δεδομένης της εφαρμοζόμενης τάσης, είναι δυνατή η ροή ρεύματος (ρεύμα διαρροής). Το ρεύμα αυτό προκαλεί συσσώρευση θερμικής ενέργειας, που οδηγεί σε εξάτμιση νερού (ξήρανση). Σε αυτό το στάδιο, λοιπόν, παρατηρείται η ταυτόχρονη εξέλιξη δύο μηχανισμών με αντίροπη δράση (ύγρανση – ξήρανση). Λόγω αυτού, αλλά και της γεωμετρίας των μονωτήρων, υπάρχει μια ανομοιόμορφη κατανομή της επιφανειακής αγωγιμότητας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία «μονοπατιών» αυξημένης πυκνότητας ρεύματος. Στα

«μονοπάτια» αυτά η ξήρανση επιταχύνεται δημιουργώντας ξηρές ζώνες (dry bands) και η επιφάνεια των μονωτήρων μπορεί να θεωρηθεί ως μια ομάδα ωμικών αντιστάσεων σε σειρά, των οποίων η τιμή είναι συνάρτηση της θέσης τους [28, 29].

Η κατάσταση αυτή οδηγεί στην ανακατανομή της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα, η οποία εξαρτάται από τις περιοχές υψηλής αντίστασης (ξηρές ζώνες). Πλέον, η καταπόνηση των υπό τάση μονωτήρων εστιάζεται κυρίως κατά μήκος των ξηρών ζωνών, που έχουν αυξημένη αντίσταση. Όταν η τάση αποκτήσει κατάλληλη τιμή, η οποία υπερβαίνει την αντοχή του αέρα που περιβάλλει τον μονωτήρα, συμβαίνουν επιφανειακές (μερικές) εκκενώσεις στις ξηρές ζώνες (Εικόνα 2.3). Οι εκκενώσεις ξηράς ζώνης (dry-



Εικόνα 2.3 Εκκενώσεις ξηράς ζώνης (αριστερά) και υπερπήδηση (δεξιά) μονωτήρα πορσελάνης [29]

band arcing), αν η τιμή της τάσης και του ρεύματος διαρροής είναι αρκετά υψηλή, είναι δυνατόν να επεκταθούν σε ολόκληρο το μήκος του μονωτικού οδηγώντας στην υπερπήδησή του, δηλαδή στη γεφύρωση των άκρων του με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει στον αέρα (Εικόνα 2.3) [28, 29].

Όλα τα παραπάνω περί ρύπανσης ισχύουν τόσο για κεραμικούς, όσο και για πολυμερείς ή συνθετικούς μονωτήρες. Στους δυο τελευταίους, όμως, ο μηχανισμός ρύπανσης είναι πιο σύνθετος, λόγω των υδροφοβικών ιδιοτήτων των υλικών τους. Κατά την ύγρανση, σχηματίζονται αρχικά σταγονίδια στην επιφάνειά τους. Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο επιδρά στην υδροφοβική επιφάνεια, προκαλώντας ένωση γειτονικών

σταγονιδίων. Έτσι, σχηματίζονται μεγάλες σταγόνες νηματοειδούς μορφής που μειώνουν την απόσταση μεταξύ των άκρων του μονωτικού, αυξάνοντας το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ γειτονικών νηματοειδών σταγόνων [28].

Κάτω από τις συνθήκες αυτές και όταν η τάση αποκτήσει κατάλληλη τιμή, συμβαίνουν επιφανειακές εκκενώσεις (φαινόμενο Corona, βλ. §2.1.2.1), οι οποίες οδηγούν σε αποπολυμερισμό ενός λεπτού στρώματος της επιφάνειας και τελικά σε εξασθένηση της υδροφοβικότητας. Ως συνέπεια, οι σταγόνες εξαπλώνονται σχηματίζοντας ένα συνεχές αγωγίμο στρώμα. Ο μηχανισμός ρύπανσης μπορεί να συνεχίσει από το στάδιο αυτό έως ότου γίνει υπερπήδηση, μόνο που στα πολυμερή υλικά είναι δυνατή η ολική ή μερική αποκατάσταση της υδροφοβικότητας. Στην περίπτωση αυτή, ο μηχανισμός διακόπτεται και γίνεται επανάληψη του κύκλου γήρανσης, που προκαλεί επιπλέον ύγρανση και, πιθανόν, διάβρωση της επιφάνειας [28].

2.1.2.1 Φαινόμενο Corona

Το φαινόμενο Corona εκδηλώνεται όταν υπάρχει τοπική αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των μονωτήρων ή των αγωγών σε γραμμές μεταφοράς [25], η οποία πάνω από τα $15kV/cm$ περίπου, προκαλεί διάσπαση του ατμοσφαιρικού αέρα [26]. Όπως περιγράψαμε και στο μηχανισμό ρύπανσης παραπάνω (βλ. §2.1.2), στην υδροφοβική επιφάνεια των πολυμερών και συνθετικών μονωτήρων είναι δυνατόν να σχηματιστούν μεγάλες σταγόνες νηματοειδούς μορφής που αυξάνουν τοπικά το ηλεκτρικό πεδίο. Η εκδήλωση του φαινομένου εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η πυκνότητα και η υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, η πηγή της ύγρανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων (δηλ. αν προκλήθηκε από βροχή, δροσιά ή ομίχλη) και η γεωμετρία του μονωτήρα [26].

Οι εκκενώσεις Corona υποβάλλουν τους μονωτήρες σε ηλεκτρικές καταπονήσεις και χημική διάβρωση, επειδή παράγουν υπεριώδη ακτινοβολία, θερμότητα και αέρια υποπροϊόντα όπως όζον και NO_2 [26]. Όπως είδαμε επίσης, προκαλούν ελάττωση της υδροφοβικότητας, οδηγώντας στη δημιουργία ξηρών ζωνών και τελικά πιθανής υπερπήδησης του μονωτήρα. Τέλος, οι εκκενώσεις Corona έχουν και άλλες ανεπιθύμητες επιδράσεις όπως απώλειες ενέργειας, πρόκληση ηχητικού θορύβου και παρεμβολές σε ραδιοτηλεοπτικά σήματα [26].

2.2 Μέθοδοι ελέγχου και εργαστηριακές δοκιμές για συνθετικούς μονωτήρες

Η αξιολόγηση της κατάστασης και του επιπέδου γήρανσης των υπαίθριων μονωτήρων γίνεται με χρήση διάφορων τεχνικών, είτε επιτόπου στο πεδίο, είτε στο εργαστήριο κάτω από κατάλληλα διαμορφωμένες συνθήκες [31]. Οι τεχνικές αυτές και ειδικά οι εργαστηριακές δοκιμές που χρησιμοποιούν πιο προηγμένες μεθόδους αξιολόγησης, έχουν ως κυριότερους στόχους τη διερεύνηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς των μονωτήρων σε διαφορετικές καταπονήσεις και στάδια γήρανσης, τη μελέτη της αλληλεπίδρασης διαφορετικών συνθηκών και τη διενέργεια συγκριτικών μελετών διαφορετικών υλικών και γεωμετριών. Επίσης, ελέγχεται η αντοχή των μονωτήρων σε σημαντικές καταπονήσεις και γίνεται εκτίμηση του εναπομείναντος χρόνου ζωής τους [31, 32].

2.2.1 Τεχνικές ελέγχου στο πεδίο

Οι τεχνικές αυτές (field techniques) περιλαμβάνουν επιθεώρηση και μετρήσεις στο πεδίο. Στην πλειονότητά τους είναι μακροσκοπικού χαρακτήρα, δηλαδή δεν παρέχουν πληροφορίες για ελαττώματα στη μικροδομή των μονωτήρων, και είναι μη καταστροφικές. Η οπτική επιθεώρηση και ο προσδιορισμός της κλάσης υδροφοβικότητας είναι οι πιο συνήθεις τεχνικές για συνθετικούς μονωτήρες στο πεδίο [31].

Οπτική επιθεώρηση [31]:

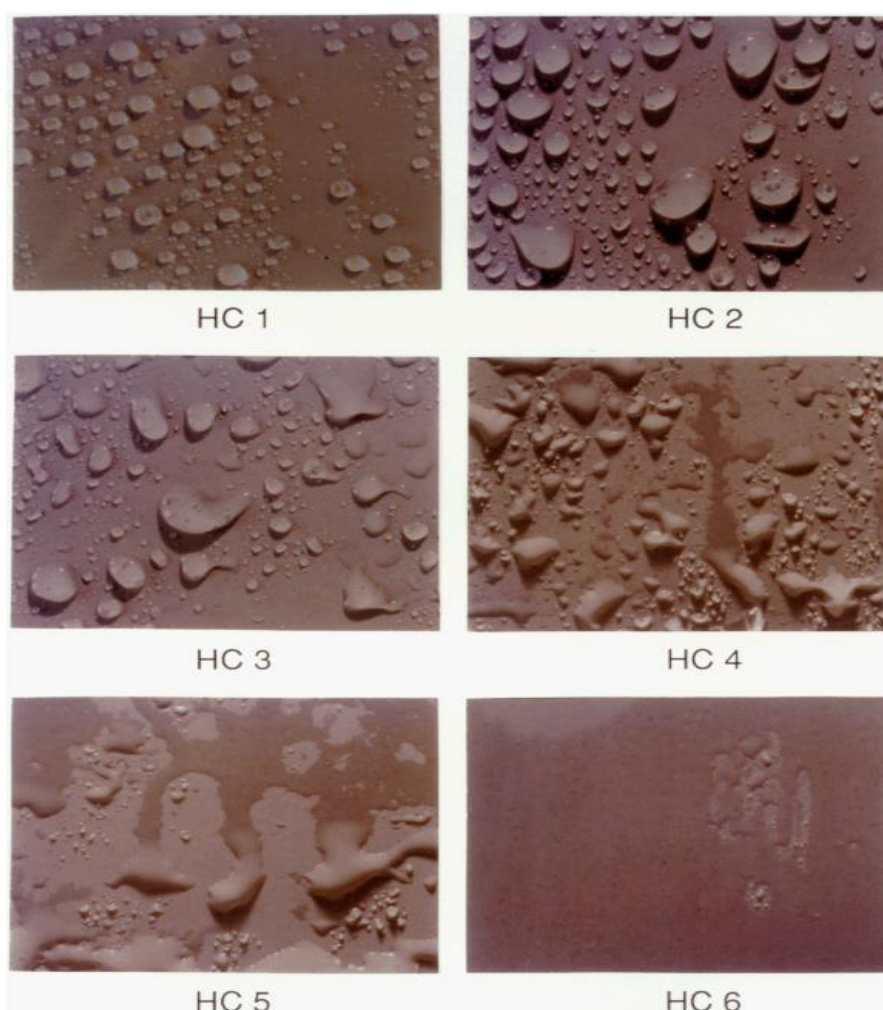
Κατά την οπτική επιθεώρηση γίνεται διεξοδικός έλεγχος όλων των τμημάτων του μονωτήρα (πολυμερές περίβλημα, μεταλλικοί ακροδέκτες κλπ.), ώστε να εντοπιστούν ατέλειες και εμφανή σημάδια γήρανσης. Συχνά, είναι απαραίτητη η χρήση κιαλιών, τηλεσκοπίου ή φακού (όταν δεν υπάρχει επαρκής φωτισμός) για τον ακριβή εντοπισμό των προβλημάτων. Η οπτική επιθεώρηση μπορεί να γίνει και με άλλα μέσα όπως με ελικόπτερο, με γερανό ή και σκαφαλώνοντας στον πυλώνα στήριξης, που αν και διευκολύνουν τον έλεγχο είναι αρκετά πιο ακριβά και χρονοβόρα.

Επιπλέον, κατά την επιθεώρηση γίνεται χρήση κάμερας ή άλλου μέσου καταγραφής για λήψη φωτογραφιών και βίντεο, με σκοπό την περαιτέρω μελέτη και τη σύγκριση με μελλοντικούς ελέγχους. Έτσι, διευκολύνεται ο προσδιορισμός του ρυθμού γήρανσης των μονωτήρων. Επειδή η οπτική επιθεώρηση εστιάζει στην εξωτερική

επιφάνεια των μονωτήρων, συνδυάζεται με τεχνικές επιθεώρησης υπέρυθρης και υπεριώδους ακτινοβολίας, μέσω των οποίων εντοπίζονται υψηλά ρεύματα διαρροής, ηλεκτρικές εκκενώσεις και ενδείξεις προβλημάτων στον πυρήνα των μονωτήρων.

Προσδιορισμός κλάσης υδροφοβικότητας:

Οι όροι υδροφοβικότητα και υδροφιλικότητα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις ιδιότητες διαβροχής μιας επιφάνειας από νερό, δηλαδή τη συμπεριφορά της όταν έρχεται σε επαφή με νερό. Μια υδροφοβική επιφάνεια είναι υδατοαπωθητική και το νερό επικάθεται πάνω της σε μορφή σταγονιδίων, ενώ μια υδροφιλική επιφάνεια διαβρέχεται εξ ολοκλήρου όταν έρθει σε επαφή με νερό [33]. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC/TS 62073 [33] υπάρχουν 7 κλάσεις υδροφοβικότητας (Εικόνα 2.4), με την κλάση 7 να αντιπροσωπεύει μια πλήρως διαβρεγμένη επιφάνεια.



Εικόνα 2.4 Τυπικές φωτογραφίες κλάσης υδροφοβικότητας (HC) από 1 έως 6. HC 7: πλήρως διαβρεγμένη επιφάνεια [36]

Παραδοσιακά, ο προσδιορισμός της υδροφοβικότητας στην επιφάνεια υλικών γίνεται με μέτρηση της γωνίας επαφής των σταγονιδίων. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνταν αρχικά για τον σκοπό αυτόν απαιτούσαν εργαστηριακές συνθήκες [34]. Έτσι, το 1992 αναπτύχθηκε ο οδηγός STRI 92/1 [35] (και αργότερα, το 2005, ο STRI 3 [36] που περιέγραφε γενικότερα την επιθεώρηση συνθετικών μονωτήρων στο πεδίο), ο οποίος στη συνέχεια υιοθετήθηκε από το πρότυπο IEC/TS 62073 [33] και περιέγραφε μια μέθοδο προσδιορισμού της κλάσης υδροφοβικότητας που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και εκτός εργαστηρίου, τη μέθοδο ψεκασμού (spray method). Το μειονέκτημα της μεθόδου ψεκασμού είναι ότι η ακρίβειά της εξαρτάται από την κρίση του ατόμου που την εκτελεί, αφού γίνεται σύγκριση των σταγονιδίων με φωτογραφίες όπου φαίνεται η τυπική μορφή των σταγονιδίων κάθε κλάσης (Εικόνα 2.4) [34]. Από την άλλη, είναι μια εύκολη και γρήγορη μέθοδος προσδιορισμού της υδροφοβικότητας [31].

2.2.2 Εργαστηριακές τεχνικές ελέγχου

Οι εργαστηριακές δοκιμές περιλαμβάνουν πιο προηγμένες τεχνικές ελέγχου από την επιτόπου επιθεώρηση, χρειάζονται ειδικό εξοπλισμό και λαμβάνουν χώρα σε κανονικοποιημένες συνθήκες. Είναι κυρίως μικροσκοπικού χαρακτήρα και συνήθως καταστροφικές, αφού απαιτούν εξαγωγή μικρών τμημάτων από τα υλικά των μονωτήρων. Συνήθως, εκτελούνται μετά τον έλεγχο στο πεδίο ως ένα πιο προχωρημένο στάδιο διάγνωσης και αξιολόγησης του επιπέδου γήρανσης των μονωτήρων, λαμβάνοντας υπόψη το υψηλότερο κόστος και την αυξημένη πολυπλοκότητά τους. Οι εργαστηριακές δοκιμές περιλαμβάνουν μεθόδους ανάλυσης ηλεκτρικών ιδιοτήτων, φυσικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων υλικών των μονωτήρων [31].

2.2.2.1 Τεχνικές ανάλυσης ιδιοτήτων του υλικού

Οι ιδιότητες των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται οι μονωτήρες, εξαρτώνται από τα συστατικά τους στοιχεία. Αυτό που ενδιαφέρει περισσότερο στους συνθετικούς μονωτήρες, είναι το πολυμερές περίβλημα και οι επιπτώσεις των διαφόρων μηχανισμών γήρανσης σε αυτό [31]. Με τις τεχνικές ανάλυσης υλικών ελέγχεται η χημική σύσταση του πολυμερούς, μετριέται η μοριακή μάζα και προσδιορίζεται η τοπολογία των υλικών (βελτιωτικές προσμίξεις, καταλύτες κλπ.) μέσα στο περίβλημα. Έτσι, είναι δυνατόν να εντοπιστούν μικρορωγμές, τραχύτητα σε μικροσκοπικό επίπεδο,

πολύ λεπτά ή διαφανή στρώματα ρύπανσης και διάβρωση στο πολυμερές περίβλημα [26].

Μερικές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι η φασματοσκοπία υπερύθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR – Fourier Transform Infrared Spectroscopy), η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM – Scanning Electron Microscopy), η φωτοηλεκτρονική φασματοσκοπία ακτίνων X (XPS – X-ray Photoelectron Spectroscopy), η φασματοσκοπία διασποράς ενέργειας ακτίνων X (EDX – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), η φασματοσκοπία μαζών δευτερογενούς ιόντος (SIMS – Secondary Ion Mass Spectroscopy), η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA – Thermogravimetric Analysis), διάφορες τεχνικές χρωματογραφίας, καθώς και άλλες υπό εξέλιξη τεχνικές όπως η φασματοσκοπία του laser επαγόμενου φθορισμού (LIF – Laser Induced Fluorescence) που αποσκοπεί στον απομακρυσμένο εντοπισμό βιολογικής ρύπανσης [26, 31].

2.2.2.2 Τεχνικές ανάλυσης φυσικών ιδιοτήτων

Η κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι μονωτήρες που έχουν υποστεί γήρανση, εξαρτάται από τις φυσικές τους ιδιότητες και συγκεκριμένα από την υδροφοβικότητα. Η απώλεια της υδροφοβικότητας είναι πιθανή ένδειξη γήρανσης του πολυμερούς περιβλήματος των συνθετικών μονωτήρων [31]. Για τον προσδιορισμό της κλάσης υδροφοβικότητας αναφέρονται δύο μέθοδοι στο πρότυπο IEC/TS 62073 [33], εκτός της μεθόδου ψεκασμού που μπορεί να εφαρμοστεί και στο πεδίο. Η μέθοδος μέτρησης γωνίας επαφής (contact angle method) και η μέθοδος μέτρησης επιφανειακής τάσης (surface tension method).

Εκτός από την υδροφοβικότητα είναι δυνατόν να ελεγχθούν και άλλες φυσικές ιδιότητες του περιβλήματος, όπως η αντοχή έναντι χημικής διάβρωσης ή διείσδυσης νερού, η σκληρότητα και η τραχύτητα, η αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία και η ευφλεκτότητα σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στον οδηγό 481 [37] της Cigre [31].

2.2.2.3 Τεχνικές ανάλυσης ηλεκτρικών ιδιοτήτων

Υπάρχουν αρκετά εθνικά και διεθνή πρότυπα, τα οποία δίνουν κατευθυντήριες γραμμές ή ορίζουν δοκιμές και τεχνικές ανάλυσης ηλεκτρικών ιδιοτήτων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνθετικούς μονωτήρες [38-47]. Κάποια από αυτά, έχουν ως στόχο την αναπαραγωγή των συνθηκών που ενεργοποιούν τους μηχανισμούς γήρανσης των μονωτήρων και εκτελούνται σε κλειστό εργαστηριακό χώρο, που είναι και το πιο σύνηθες για εργαστηριακές δοκιμές. Υπάρχουν, όμως, και δοκιμές που γίνονται σε υπαίθρια εργαστήρια, συνήθως με τη συνεργασία των διαχειριστών του δικτύου. Τα στεγασμένα εργαστήρια προσφέρουν τυποποιημένες εγκαταστάσεις και εξοπλισμό, απουσία θορύβου στις μετρήσεις και γρήγορη αξιολόγηση των μονωτικών υλικών μέσω μεθόδων επιταχυνόμενης γήρανσης. Από την άλλη, στα υπαίθρια εργαστήρια είναι δυνατή η μελέτη των μηχανισμών γήρανσης σε πραγματικό χρόνο, με το τίμημα του σημαντικά μεγαλύτερου κόστους και της μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας [31].

Οι κυριότερες δοκιμές για συνθετικούς μονωτήρες περιλαμβάνουν τη δοκιμή σε θάλαμο υδατονέφωσης – άλατος 1000 ωρών (1000 hour salt-fog test) [38, 39, 47], τη δοκιμή τροχού για tracking (tracking wheel test) [46, 47], τη δοκιμή 5000 ωρών πολλαπλών καταπονήσεων (5000 hour multiple stress test) [46, 47] και τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου (IPT – inclined plane test) [40-42]. Η δοκιμή σκόνης/ομίχλης [43] και η δοκιμή περιστρεφόμενου τροχού [45], μπορούν επίσης να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες [31]. Τέλος, το πρότυπο IEC 60343 [44] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της αντοχής των συνθετικών μονωτήρων έναντι του φαινομένου Corona (βλ. §2.1.2.1) και της έκθεσης σε όζον [31].

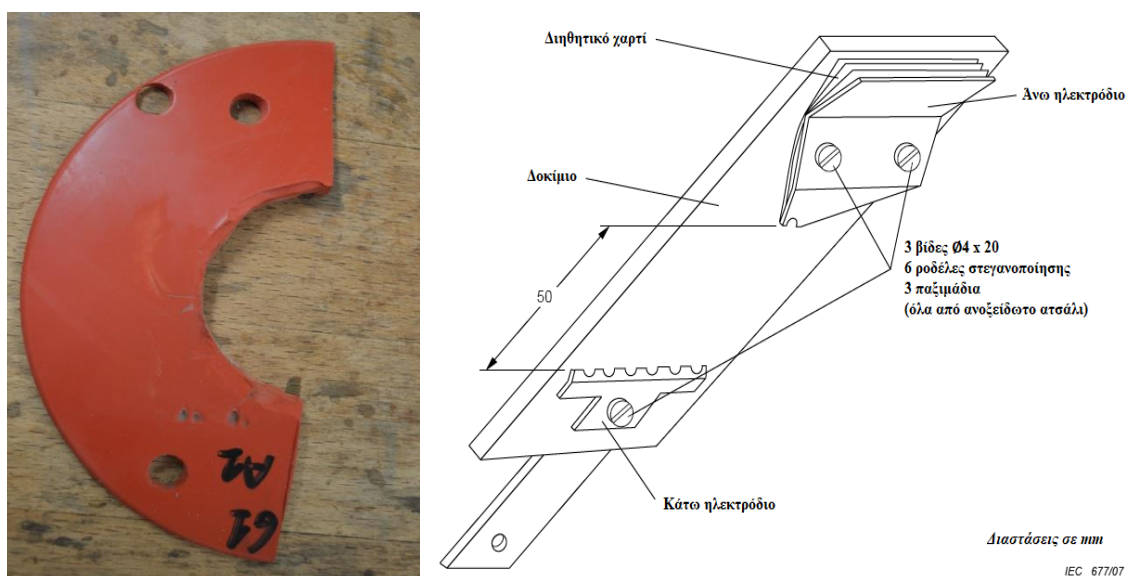
2.2.2.3.1 Πρότυπο IEC 60587

Το πρότυπο IEC 60587 [41] περιγράφει δύο μεθόδους για την αξιολόγηση υλικών ηλεκτρικής μόνωσης κάτω από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες και σε συχνότητες λειτουργίας 45Hz – 65Hz, μέσω αξιολόγησης της αντίστασης στη διάβρωση (erosion) και στη δημιουργία αγωγίμων καναλιών άνθρακα (tracking). Για τον σκοπό αυτόν, γίνεται χρήση κατάλληλου ρυπαντικού υγρού, που διατρέχει τοποθετημένα υπό κλίση δοκίμια. Εξού και το όνομα «δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου». Στην πρώτη μέθοδο (constant tracking voltage), που εφαρμόζεται και συχνότερα λόγω του ότι δεν απαιτεί συνεχή

επίβλεψη, επιβάλλεται συνεχώς τάση ορισμένου επιπέδου στα δοκίμια. Στη δεύτερη μέθοδο (stepwise tracking voltage) η επιβολή της τάσης γίνεται βηματικά.

Σύμφωνα με το πρότυπο [41], τα δοκίμια πρέπει να έχουν σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου, διαστάσεων τουλάχιστον 50mm x 120mm και προτεινόμενου πάχους 6mm. Οι κατασκευαστές μονωτήρων έχουν τη δυνατότητα να παραγάγουν δοκίμια αυτής της μορφής από το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για το περίβλημα των συνθετικών μονωτήρων. Λόγω, όμως, του δισκοειδούς σχήματος των κυαθίων των συνθετικών μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα, δεν είναι πάντα εφικτή η λήψη δείγματος με τα χαρακτηριστικά αυτά (σχήμα, διαστάσεις) από το περίβλημα. Στην πράξη, σε εργαστηριακές δοκιμές και έρευνες χρησιμοποιούνται κάποιες φορές κυάθια του περιβλήματος, που έχουν αφαιρεθεί και κοπεί στη μέση (Εικόνα 2.5).

Κατά την προετοιμασία, γίνονται τρύπες στα δοκίμια για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων. Έπειτα, τα δοκίμια καθαρίζονται με κατάλληλο διαλύτη (π.χ. ισοπροπυλική αλκοόλη – C_3H_8O) για την απομάκρυνση επικαθίσεων και εν συνεχεία ξεπλένονται με απεσταγμένο νερό. Τα ηλεκτρόδια έχουν συγκεκριμένο σχήμα και διαστάσεις και είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο ατσάλι. Το ρυπαντικό υγρό είναι ένα αγωγίμο διάλυμα (αντίστασης $3.95\Omega m \pm 0.05\Omega m$ στους $23^\circ C \pm 1^\circ C$) συγκεκριμένης σύνθεσης, το οποίο αφήνεται να διατρέξει την επιφάνεια του δοκιμίου μέσω ενός κατάλληλα διπλωμένου διηθητικού χαρτιού, που τοποθετείται μεταξύ του δοκιμίου και του ηλεκτροδίου υψηλού δυναμικού (Εικόνα 2.5). Στην ουσία πρόκειται για απεσταγμένο ή απιονισμένο νερό με



Εικόνα 2.5 Δοκίμιο από διχοτομημένο κυάθιο συνθετικού μονωτήρα (αριστερά). Τοποθέτηση εξαρτημάτων επάνω σε δοκίμιο κατά IEC 60587 (δεξιά) [41]

μικρά ποσοστά ανάμειξης άλλων στοιχείων, όπως χλωριούχο αμμώνιο (NH_4Cl) και ισο-οκτυλ-φαινοξυ-πολυαιθοξυ-αιθανόλη, ένα μη ιονικό διαβρεκτικό προϊόν.

Μετά την προετοιμασία και τη συναρμολόγηση των διαφόρων εξαρτημάτων, τα δοκίμια τοποθετούνται μέσα σε ειδικό θάλαμο υπό κλίση $45^\circ \pm 2^\circ$, στηριζόμενα σε κατάλληλες πλαστικές βάσεις. Κάθε δοκιμή γίνεται σε ένα σετ πέντε τουλάχιστον δοκιμίων. Ο θάλαμος πρέπει να έχει ήπιο εξαερισμό, ώστε να απομακρύνονται ο παραγόμενος ατμός και τα αέρια προϊόντα από την αποσύνθεση του υλικού, χωρίς παράλληλα να επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα της δοκιμής (Εικόνα 2.6). Αφού γίνει η τοποθέτηση, το ρυπαντικό υγρό αφήνεται να κυλίσει για τουλάχιστον δέκα λεπτά, ώστε να δημιουργηθεί μια σταθερή και ομοιόμορφη ροή. Η ροή πρέπει να έχει συγκεκριμένο ρυθμό (flow rate), που υποδεικνύεται στο πρότυπο [41] και εξαρτάται από την τάση που πρόκειται να εφαρμοστεί. Το υγρό πρέπει να ρέει από την οπή του πάνω ηλεκτροδίου προς το κάτω ηλεκτρόδιο και όχι από τα πλάγια ή το πάνω μέρος του διηθητικού χαρτιού.



Εικόνα 2.6 Θάλαμος δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου

Όταν πλέον ρυθμιστεί η ροή του ρυπαντικού υγρού, ξεκινάει η εφαρμογή της τάσης μέσω κατάλληλης διάταξης που περιγράφεται στο πρότυπο [41]. Το κάτω ηλεκτρόδιο και ο θάλαμος δοκιμής είναι γειωμένα, ενώ το άνω ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε υψηλό δυναμικό. Στην πρώτη μέθοδο εφαρμόζεται τάση $1kV - 6kV$ (προτεινόμενες τιμές: $2.5kV$, $3.5kV$ ή $4.5kV$) μεταξύ των ηλεκτροδίων για έξι ώρες. Στη δεύτερη μέθοδο η εφαρμογή της τάσης γίνεται σε βήματα, διάρκειας μίας ώρας. Η τάση έναρξης πρέπει να είναι πολλαπλάσιο των $250V$ και στη συνέχεια, ανά μία ώρα, η τάση αυξάνεται κατά $250V$. Με την αύξηση της τάσης στη δεύτερη μέθοδο, πρέπει να αυξάνονται ταυτόχρονα ο ρυθμός ροής του ρυπαντικού υγρού και η τιμή της αντίστασης μέσω της οποίας συνδέονται τα ηλεκτρόδια στο κύκλωμα τροφοδοσίας, σύμφωνα με τις οδηγίες του προτύπου [41]. Τα κριτήρια για τον τερματισμό της δοκιμής είναι δύο:

- Κριτήριο A: Η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το δοκίμιο ξεπερνάει τα $60mA$ για τουλάχιστον $2sec$ ή το δοκίμιο τρυπάει λόγω έντονης διάβρωσης ή γίνεται ανάφλεξη του δοκιμίου.
- Κριτήριο B: Το αγώγιμο κανάλι άνθρακα (track) που δημιουργείται, φτάνει σε απόσταση $25mm$ από το κάτω ηλεκτρόδιο ή το δοκίμιο τρυπάει λόγω έντονης διάβρωσης ή γίνεται ανάφλεξη του δοκιμίου.

Αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή συντάσσεται αναφορά, στην οποία αναγράφονται πληροφορίες σχετικά με τη δοκιμή (π.χ. λεπτομέρειες για τα δοκίμια και την προετοιμασία, η μέθοδος και το κριτήριο τερματισμού που χρησιμοποιήθηκαν κλπ.) και τα δοκίμια κατατάσσονται σε κλάσεις, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που ορίζεται στο πρότυπο [41].

2.2.2.3.2 Προσομοιώσεις δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές σχετικά με τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου. Αρκετοί ερευνητές επιχειρούν, προσομοιώνοντας τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου μέσω εξειδικευμένων λογισμικών, να αποκτήσουν μια πληρέστερη εικόνα των μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκειά της και των παραγόντων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

Οι F. L. Muhamedin *et al.* [48], μέσω του λογισμικού QuickField που χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (finite element method – FEM),

δημιούργησαν μια προσομοίωση της δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60587 [41]. Στο άρθρο τους [48], μελετήθηκε η επίδραση του ρυθμού ροής του ρυπαντικού υγρού και της επιβαλλόμενης τάσης, στην πυκνότητα του ρεύματος διαρροής και στο ηλεκτρικό πεδίο πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το υλικό κατασκευής του δοκιμίου υποτέθηκε ότι ήταν ένα μείγμα γραμμικού πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (linear low-density polyethylene – LLDPE) και φυσικού ελαστομερούς (natural rubber – NR). Τα αποτελέσματα έδειξαν πως λόγω της ανομοιόμορφης διαδρομής του ρυπαντικού υγρού από το πάνω στο κάτω ηλεκτρόδιο, κάτι που συμβαίνει και στην πραγματικότητα, ανομοιόμορφη ήταν και η ηλεκτρική καταπόνηση στην επιφάνεια του δοκιμίου. Οι υψηλότερες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου παρατηρήθηκαν στο χείλος του ρυπαντικού υγρού και στα σημεία όπου η διαδρομή του ήταν στενότερη. Τέλος, φάνηκε πως η αύξηση του ρυθμού ροής του ρυπαντικού υγρού και της επιβαλλόμενης τάσης, συνεισφέρει στην αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος και της τιμής του ηλεκτρικού πεδίου.

Οι F. L. Muhamedin *et al.* [49], κάνοντας χρήση του ίδιου λογισμικού (QuickField), μελέτησαν την επίδραση που έχουν διαφορετικά ποσοστά προσθήκης SiO₂ στο ίδιο μείγμα LLDPE – NR με το [48], στην πυκνότητα του ρεύματος διαρροής και στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Ακόμη, εξετάστηκαν οι ίδιοι παράγοντες με το [48], αλλά για δύο διαφορετικές διαδρομές του ρυπαντικού υγρού. Τα συμπεράσματα ήταν ότι η διαδρομή του ρυπαντικού υγρού επηρεάζει την κατανομή τόσο του ρεύματος διαρροής όσο και του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του δοκιμίου. Επιπλέον, έδειξαν πως τα δείγματα που περιείχαν προσμίξεις SiO₂ είχαν υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση και στο tracking, αφού εμφάνιζαν μικρότερες τιμές πυκνότητας ρεύματος και ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνειά τους.

Οι M. T. Nazir *et al.* [50] χρησιμοποίησαν το λογισμικό FEM ANSYS Maxwell 2017.1, για να προσδιορίσουν την κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια ενός δοκιμίου από EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) με προσθήκη νιτριδίου του βορίου (BN). Από την προσομοίωση, βρήκαν ότι το ρυπαντικό υγρό παραμόρφωνε σημαντικά την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτός ήταν και ένας από τους παράγοντες που οδήγησαν στην εμφάνιση εκκενώσεων ξηράς ζώνης στο πειραματικό μέρος. Το ηλεκτρικό πεδίο είχε μεγαλύτερη τιμή στα σημεία όπου η διαδρομή του υγρού ήταν στενότερη και στο σύνορο μεταξύ δοκιμίου και ρυπαντικού υγρού, ενώ το δυναμικό ήταν ομοιόμορφα κατανομημένο κατά μήκος του δοκιμίου,

μειούμενο από πάνω προς τα κάτω. Μία ακόμη προσομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, αυτή τη φορά για δοκίμια από RTV SIR, έγινε από τους A. M. D. Gomez *et al.* [51] με χρήση του προγράμματος ElecNet. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης, το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του δοκιμίου γινόταν ισχυρότερο.

Οι N. N. M. Shariff και M. Kamarol [52] ερεύνησαν την επίδραση που ασκεί η ύπαρξη μιας ξηράς ζώνης (βλ. §2.1.2), κατά μήκος του δοκιμίου και κοντά στο κάτω ηλεκτρόδιο, σε δοκίμιο από μείξη SIR και EPDM με διαφορετικές προσμίξεις αλουμίνας. Βασιζόμενοι στη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου του προτύπου IEC 60587 [41], δημιούργησαν μοντέλα με χρήση του λογισμικού FEM COMSOL Multiphysics 5.2a, με διαφορετικά ποσοστά αλουμίνας στο υλικό και διαφορετικά μήκη ξηρών ζωνών. Οι ξηρές ζώνες αναπαραστάθηκαν ως απουσία ρυπαντικού υγρού σε ένα τμήμα κατά μήκος του δοκιμίου. Οι υψηλότερες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου παρατηρήθηκαν στα «δόντια» του κάτω ηλεκτροδίου και στο σύνορο μεταξύ ρυπαντικού υγρού και ξηράς ζώνης, ενώ οι χαμηλότερες στην περίπτωση που δεν υπήρχε ξηρή ζώνη. Ακόμη, το ηλεκτρικό πεδίο ήταν ισχυρότερο για μικρότερα μήκη ξηράς ζώνης. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε πως μεγαλύτερα ποσοστά αλουμίνας στο μείγμα SIR – EPDM, είχαν ως αποτέλεσμα μικρότερο ηλεκτρικό πεδίο στο σύνορο μεταξύ ρυπαντικού υγρού και ξηράς ζώνης, αλλά μεγαλύτερο πεδίο στο κάτω ηλεκτρόδιο. Τέλος, ελέγχθηκε αν η ένταση της ρύπανσης, που αναπαρίσταται μέσω της αγωγιμότητας του ρυπαντικού υγρού, επηρεάζει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και βρέθηκε πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα, επίδραση.

Οι S. Gubanski *et al.* [53], εξέτασαν την περίπτωση ύπαρξης μεταλλικών αγωγίμων ελαττωμάτων (internal metallic/conductive defects) στη διεπαφή πυρήνα – SIR περιβλήματος συνθετικών μονωτήρων. Δημιούργησαν μοντέλα προσομοίωσης FEM, με βάση τα πρότυπα IEC 60587 [41] και ASTM 2303 [42], δοκιμίων με τέτοια εσωτερικά ελαττώματα. Στα αποτελέσματα φάνηκε πως το ελάττωμα αλλοίωσε σημαντικά το ηλεκτρικό πεδίο στη γύρω περιοχή, όμως, το ηλεκτρικό πεδίο και οι ηλεκτρικές καταπονήσεις ήταν αυξημένα και στον ευρύτερο όγκο του υλικού. Το συμπέρασμά τους ήταν πως η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου μείωνε την αντοχή του υλικού έναντι tracking, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο για την ανάπτυξη του φαινομένου. Μια υπόθεση που έκαναν για την αιτιολόγηση του μηχανισμού αυτού, ήταν πως το ενισχυμένο τοπικά ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για τη συγκέντρωση των επιφανειακών

εκκενώσεων στο συγκεκριμένο σημείο του περιβλήματος, διατηρώντας τες παράλληλα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Οι M. Pradhan *et al.* [54], χρησιμοποιώντας το λογισμικό FEM COMSOL Multiphysics, προσομοίωσαν την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ τριών αγώγιμων σταγονιδίων στην επιφάνεια δοκιμίων SIR με προσθήκη οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) και άλλων βελτιωτικών προσμίξεων, κατά τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ακόμα και μεγάλα ποσοστά ZnO στο υλικό δε βελτίωναν ιδιαίτερα την αντοχή έναντι tracking. Η κατάσταση βελτιωνόταν με προσθήκη ένυδρης αλουμίνας (ATH) σε συγκεκριμένο ποσοστό. Εξετάζοντας και την κατανομή της θερμοκρασίας στον όγκο του δοκιμίου, βρήκαν πως με κατάλληλη επιλογή των ιδιοτήτων του υλικού, η αύξησή της κατά τη δοκιμή μπορεί να γίνει αμελητέα.

Με τη συνεχόμενη βελτίωση των υπολογιστικών συστημάτων και των λογισμικών προσομοίωσης, παρατηρείται όλο και συχνότερη χρήση τους σε πολλούς ερευνητικούς και επιστημονικούς τομείς. Έτσι και στον τομέα των μονωτικών υλικών, χρησιμοποιούνται προγράμματα για ανάλυση πολλών περιπτώσεων και δοκιμών με πολλαπλούς παράγοντες επίδρασης. Με χρήση κατάλληλων λογισμικών και προσεκτική σχεδίαση των διατάξεων, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μικροσκοπικό επίπεδο ή και στο εσωτερικό των υλικών, αλλά και λεπτομέρειες που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των διαφόρων μηχανισμών και των επιδράσεών τους.

Κεφάλαιο 3: Το λογισμικό COMSOL Multiphysics

3.1 Εισαγωγή

Το πακέτο λογισμικού COMSOL Multiphysics είναι ένα διαδραστικό περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων από διάφορους κλάδους επιστημών. Παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης μοντέλων που αφορούν τους κλάδους της ηλεκτρολογίας, της χημείας, της θερμοδυναμικής, της ροής υγρών κ.ά., καθώς και τη δυνατότητα σύζευξης δύο ή περισσότερων πακέτων φυσικής (physics interfaces) για πολύπλευρη ανάλυση μοντέλων που αφορούν περισσότερους του ενός κλάδους. Η επίλυση των μοντέλων βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Με τη μέθοδο αυτή, ο χώρος σχεδίασης χωρίζεται σε διακριτά τμήματα και στη συνέχεια γίνεται προσεγγιστικά ο υπολογισμός και η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το μοντέλο [55].

Το COMSOL Multiphysics (έκδοση 5.2) χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία για την επίλυση τεσσάρων 3D μοντέλων προσομοίωσης της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου σε συνθετικούς μονωτήρες. Όλα τα μοντέλα αποτελούνται από πέντε υπό εξέταση δοκίμια, το ρυπαντικό υγρό που διατρέχει την επιφάνειά τους, τα ηλεκτρόδια και τον αέρα που τα περιβάλλει στον θάλαμο δοκιμής (βλ. §2.2.2.3.1). Δύο από τα μοντέλα αφορούν δοκίμια σχεδιασμένα με βάση το πρότυπο IEC 60587 [41], ενώ τα άλλα δύο αφορούν δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια του περιβλήματος συνθετικών μονωτήρων στήριξης (Εικόνα 2.5). Τέλος, για καθεμία από τις δύο μορφές δοκιμίων σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικές διαδρομές ροής του ρυπαντικού υγρού στην επιφάνειά τους.

3.2 Περιβάλλον και ροή σχεδίασης

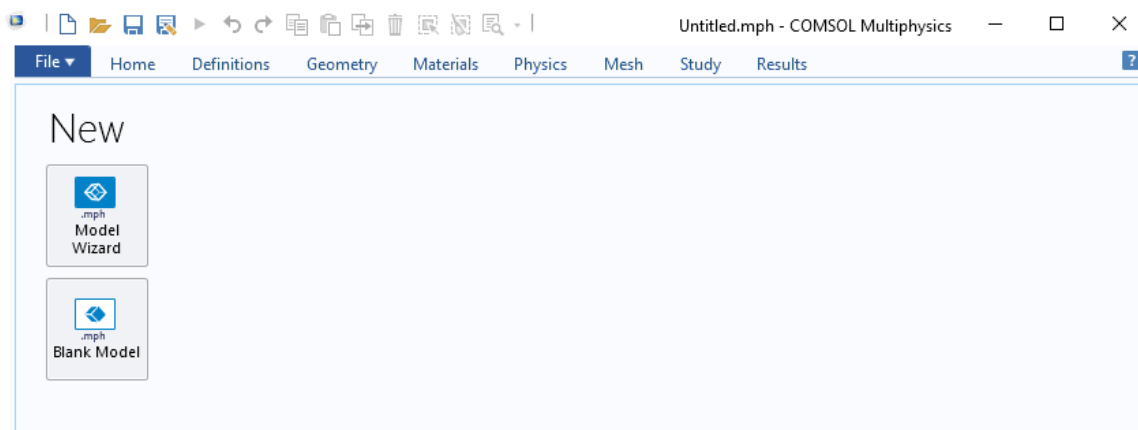
Για να σχεδιαστεί και να επιλυθεί επιτυχώς ένα μοντέλο στο COMSOL Multiphysics, θα πρέπει ο χρήστης να ακολουθήσει την προβλεπόμενη ροή σχεδίασης που αποτελείται από τα παρακάτω βήματα [55]:

- Δημιουργία κενού μοντέλου (Blank Model) ή εναλλακτικά ορισμός του Model Wizard (βλ. §3.2.1)
- Εισαγωγή καθολικών ορισμών (Global Definitions)

- Εισαγωγή τοπικών ορισμών (Definitions)
- Σχεδίαση της γεωμετρίας (Geometry)
- Ορισμός των υλικών (Materials)
- Εισαγωγή πακέτων φυσικής (Physics)
- Ορισμός πλέγματος (Mesh)
- Ορισμός μελέτης – τρόπου επίλυσης (Study)

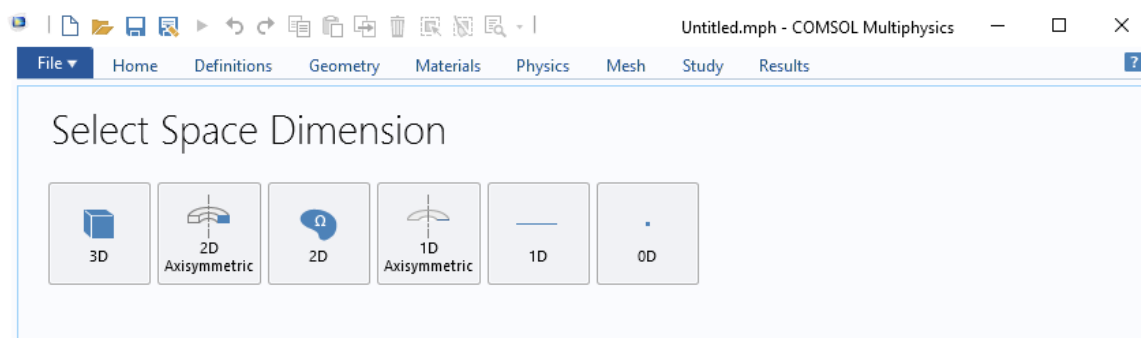
3.2.1 Ορισμός του Model Wizard

Αφού εκτελεστεί το πρόγραμμα comsol.exe, ο χρήστης καλείται να επιλέξει μεταξύ της δημιουργίας ενός κενού μοντέλου (“Blank Model”) και του “Model Wizard” (Εικόνα 3.1). Το Model Wizard είναι ένας οδηγός που βοηθάει τον χρήστη να σχεδιάσει ένα νέο μοντέλο, ορίζοντας εξ’ αρχής κάποια από τα απαραίτητα χαρακτηριστικά (πλήθος διαστάσεων μοντέλου, πακέτα φυσικής, τρόπος επίλυσης) [55]. Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε το Model Wizard.



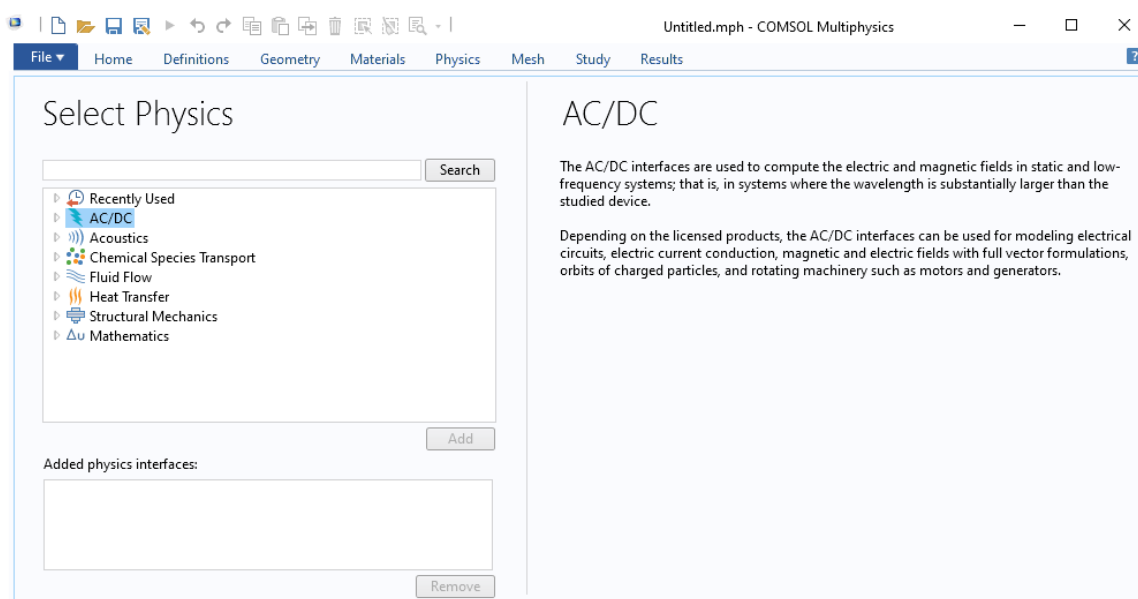
Εικόνα 3.1 Αρχική οθόνη του COMSOL Multiphysics για δημιουργία νέου μοντέλου

Μετά την επιλογή του Model Wizard, ο χρήστης καλείται να επιλέξει το πλήθος των διαστάσεων για το μοντέλο. Οι διαθέσιμες επιλογές φαίνονται στην Εικόνα 3.2. Στη

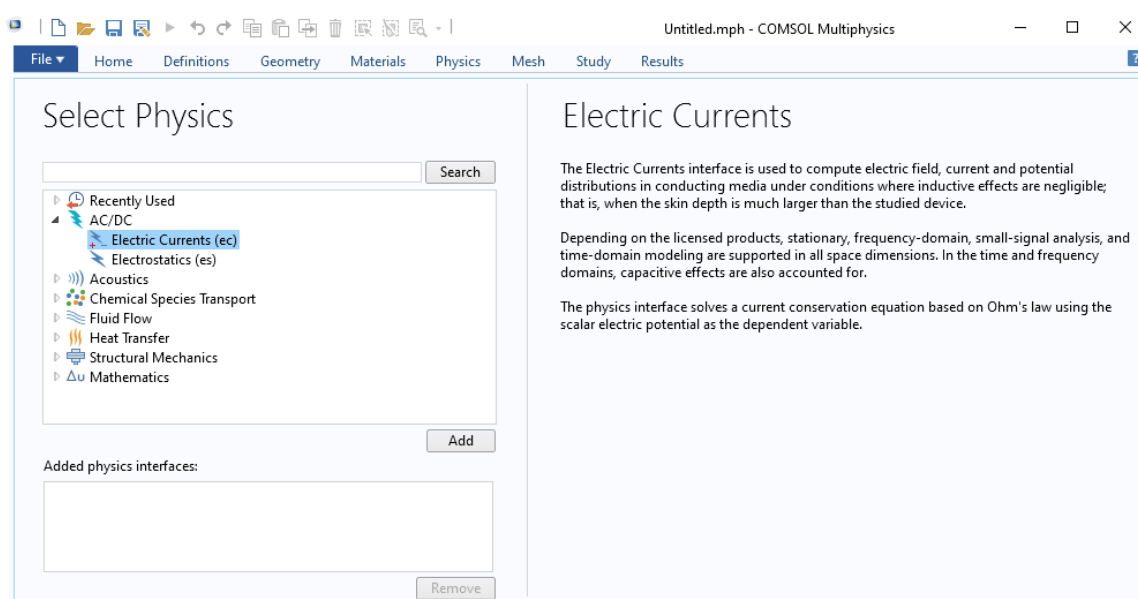


Εικόνα 3.2 Επιλογές πλήθους διαστάσεων

συγκεκριμένη εργασία, όλα τα μοντέλα είναι τρισδιάστατα (3D) και επομένως επιλέχθηκε το “3D”. Έπειτα, πρέπει να γίνει επιλογή των πακέτων φυσικής που θα χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό του προβλήματος και την επίλυση των μοντέλων [55]. Για τα μοντέλα μας επιλέχθηκε από τον κλάδο “AC/DC” (Εικόνα 3.3) το πακέτο “Electric Currents” (Εικόνα 3.4), ώστε να μελετηθούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (κατανομή δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου) των δοκιμίων, λαμβάνοντας υπόψη τη ροή ρεύματος στη διάταξη. Στον κλάδο AC/DC και συγκεκριμένα στο πακέτο φυσικής Electric Currents θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια (βλ. §3.2.2.4.1).

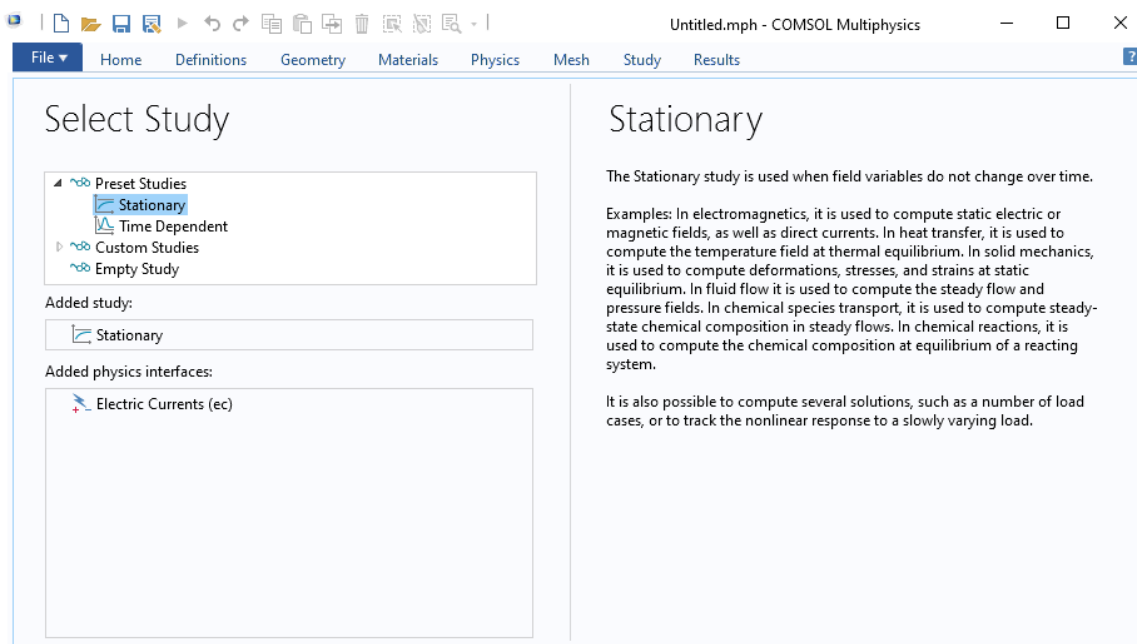


Εικόνα 3.3 Επιλογή κλάδου φυσικής



Εικόνα 3.4 Επιλογή πακέτου φυσικής

Τελευταίο βήμα του Model Wizard είναι η επιλογή της μελέτης, δηλαδή του τρόπου επίλυσης του μοντέλου, ανάλογα με τα πακέτα φυσικής που έχουν επιλεγεί [55]. Κατά τη δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου τα δοκίμια και τα ηλεκτρόδια αλλοιώνονται σημαντικά, διαδικασία που είναι δύσκολο να προσομοιωθεί με ακρίβεια. Έτσι, επιλέξαμε να επικεντρωθούμε στη μελέτη ενός στιγμιότυπου κατά το αρχικό στάδιο της δοκιμής, στο οποίο η εφαρμοζόμενη τάση έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της και να εξετάσουμε εκεί την κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου, ώστε να εντοπιστούν οι περιοχές όπου τα δοκίμια δέχονται τη μεγαλύτερη καταπόνηση. Στο σημείο αυτό σημειώνουμε, πως σε κανένα από τα μοντέλα δεν έγινε προσομοίωση του συστήματος εξαερισμού της διάταξης και των αερίων που δημιουργούνται εντός του θαλάμου δοκιμής από την εξάτμιση του ρυπαντικού υγρού και τη διάβρωση των δοκιμίων. Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε η μελέτη “Stationary” (Εικόνα 3.5).



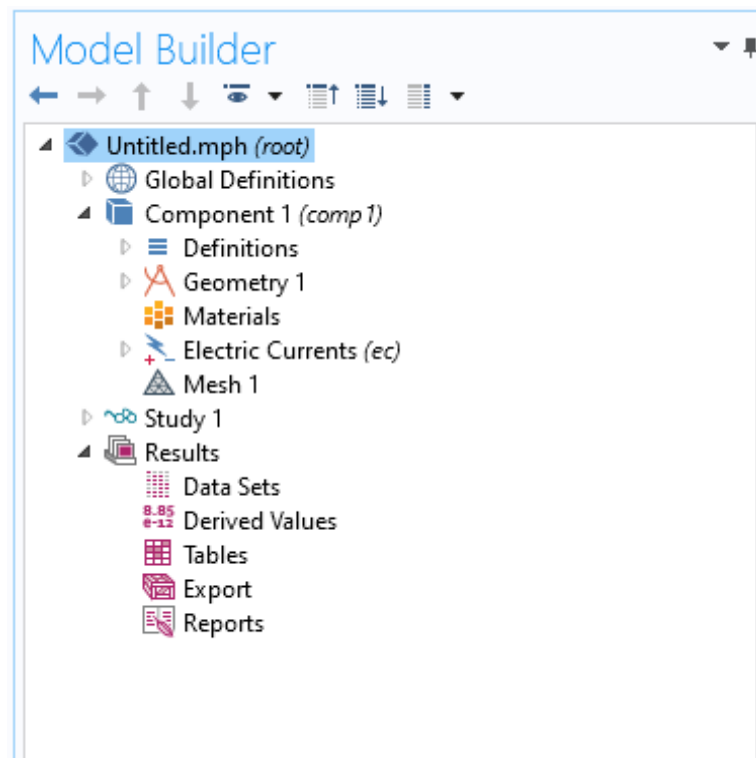
Εικόνα 3.5 Επιλογή μελέτης

Μετά τον ορισμό του Model Wizard ο χρήστης οδηγείται στον κύριο χώρο σχεδίασης, ο οποίος αποτελείται από δύο βασικά παράθυρα, το Model Builder μέσω του οποίου ελέγχεται όλη η διαδικασία σχεδίασης και το Graphics όπου αναπαρίστανται γραφικά η γεωμετρία, το πλέγμα και τα αποτελέσματα [55].

3.2.2 Σχεδίαση στο Model Builder

Το παράθυρο Model Builder (Εικόνα 3.6) αποτελείται από ένα «δέντρο» με κλάδους που περιέχουν όλα τα απαραίτητα εργαλεία και τις λειτουργίες για τη σχεδίαση και επίλυση των μοντέλων. Οι τέσσερις βασικοί κλάδοι του Model Builder είναι οι εξής [55]:

- Global Definitions (ορισμός καθολικών παραμέτρων, μεταβλητών κλπ.)
- Component (ορισμός γεωμετρίας, υλικών, πακέτων φυσικής και πλέγματος)
- Study (επιλογή τρόπου επίλυσης)
- Results (Επεξεργασία και εμφάνιση αποτελεσμάτων)



Εικόνα 3.6 Το παράθυρο Model Builder

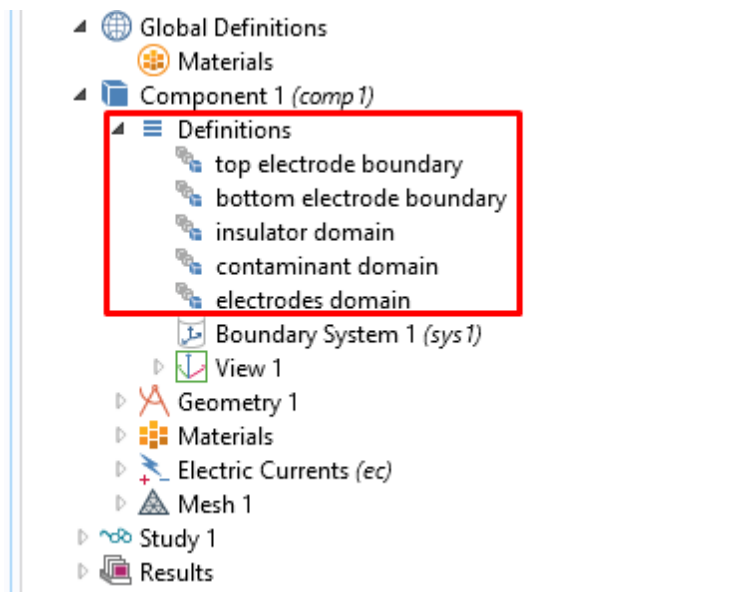
Κάθε βασικός κλάδος (branch) έχει υποκλάδους (subbranches), μέσω των οποίων γίνεται πιο στοχευμένος έλεγχος του μοντέλου. Επίσης, κάθε υποκλάδος μπορεί να έχει επιπλέον κόμβους και έτσι δημιουργείται μια δενδροειδής δομή που διευκολύνει τη σχεδίαση [55].

3.2.2.1 Ορισμός παραμέτρων

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, πατώντας «δεξί κλικ» στον κλάδο Global Definitions, να ορίσει παραμέτρους, μεταβλητές, συναρτήσεις, περιορισμούς, υλικά κ.ά.

που διέπουν ολόκληρο το μοντέλο (όλα τα Components). Παρόμοια, πατώντας «δεξί κλικ» στον υποκλάδο Definitions ενός Component ή επιλέγοντας “Definitions” από τη γραμμή εργαλείων στο πάνω μέρος του προγράμματος (Εικόνα 3.8), υπάρχει η δυνατότητα ορισμού μεταβλητών, συναρτήσεων, probes, ομαδοποιήσεων στοιχείων (selections) κ.ά. σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή μόνο για το συγκεκριμένο Component [55].

Στην παρούσα εργασία κάθε μοντέλο αποτελείται από ένα μόνο Component που εμπεριέχει ολόκληρη τη διάταξη και έτσι δε χρειάστηκε να οριστούν μεταβλητές ή παράμετροι σε καθολικό επίπεδο. Σε τοπικό επίπεδο ορίστηκαν ομαδοποιήσεις στοιχείων, δηλαδή επιλογές συγκεκριμένων τμημάτων του μοντέλου (domains, boundaries, edges, points), προς διευκόλυνση της διαδικασίας σχεδίασης. Έτσι, ορίστηκαν επιλογές (selections) για τα domains (όγκος) των δοκιμίων, του ρυπαντικού υγρού και των ηλεκτροδίων καθώς και επιλογές για τα boundaries (επιφάνεια) των πάνω και των κάτω ηλεκτροδίων (Εικόνα 3.7). Οι επιλογές αυτές απλουστεύουν, όπως θα δούμε, τον ορισμό των ιδιοτήτων και των συνοριακών συνθηκών σε κάθε τμήμα του μοντέλου.

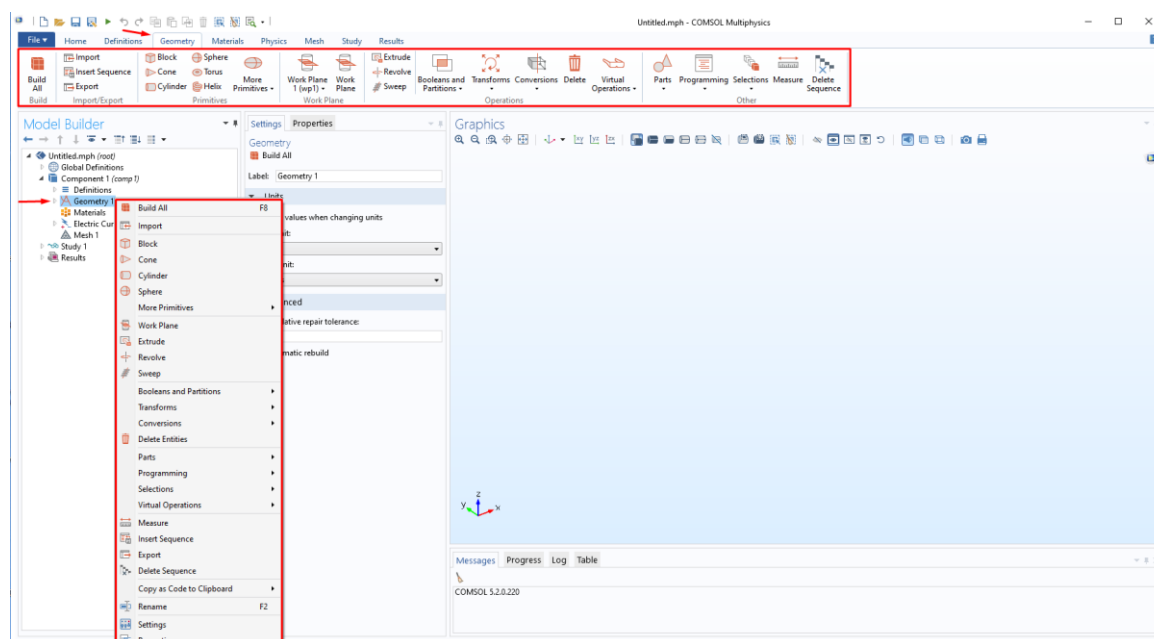


Εικόνα 3.7 Τοπικοί ορισμοί για τα μοντέλα

3.2.2.2 Σχεδίαση γεωμετρίας

Στον υποκλάδο Geometry του Component ορίζεται από τον χρήστη η γεωμετρία του μοντέλου. Το λογισμικό δίνει επίσης τη δυνατότητα εισαγωγής της γεωμετρίας από άλλα προγράμματα σχεδίασης (π.χ. AutoCAD). Η σχεδίαση της γεωμετρίας γίνεται με

απλά σχήματα και συνδυασμό ή επεξεργασία αυτών με κατάλληλες εντολές (ένωση, μετακίνηση, αντιγραφή, διαφορά κ.ά.). Ο χρήστης έχει πρόσβαση σε όλα τα απαραίτητα εργαλεία σχεδίασης, είτε επιλέγοντας “Geometry” στη γραμμή εργαλείων που βρίσκεται στο πάνω μέρος του προγράμματος, είτε πατώντας «δεξί κλικ» στον υποκλάδο Geometry (Εικόνα 3.8) [55].

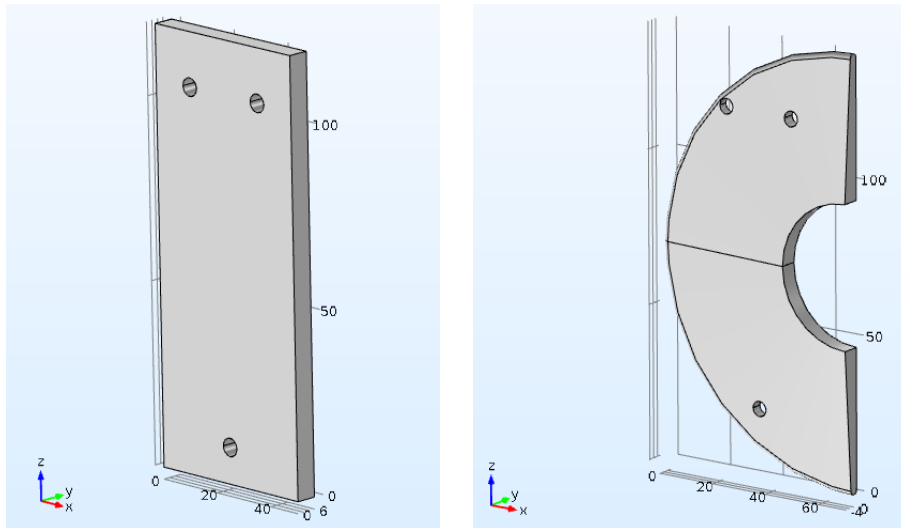


Εικόνα 3.8 Εργαλεία σχεδίασης γεωμετρίας. Διακρίνονται επίσης η γραμμή εργαλείων και τα παράθυρα Model Builder, Settings, Properties και Graphics

Όποτε επιλέγεται κάποιος κλάδος ή υποκλάδος από το Model Builder, εμφανίζονται στα παράθυρα Settings και Properties (στα δεξιά του παραθύρου Model Builder) ρυθμίσεις και ιδιότητες που τον αφορούν. Στο παράθυρο Graphics αναπαρίσταται γραφικά το μοντέλο (γεωμετρία, πλέγμα, αποτελέσματα) και δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη, μέσω των επιλογών στο πάνω μέρος του παραθύρου, να ελέγχει και να επεξεργάζεται το μοντέλο από διαφορετικές οπτικές γωνίες, έχοντας καλύτερη εποπτεία της διαδικασίας σχεδίασης (Εικόνα 3.8) [55].

Η γεωμετρία και των τεσσάρων μοντέλων που δημιουργήθηκαν για την παρούσα εργασία αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη, τα δοκίμια, το ρυπαντικό υγρό, τα ηλεκτρόδια και τον περιβάλλοντα αέρα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μορφές δοκιμίων (Εικόνα 3.9), μία με βάση το πρότυπο IEC 60587 [41] και μια βασισμένη σε εργαστηριακή δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου, με διχοτομημένα κυάθια συνθετικών μονωτήρων στήριξης των 24kV (Εικόνα 3.16). Το ρυπαντικό υγρό σχεδιάστηκε ως στερεό (με κατάλληλες ιδιότητες, βλ. §3.2.2.3) στην επιφάνεια των δοκιμίων, το οποίο

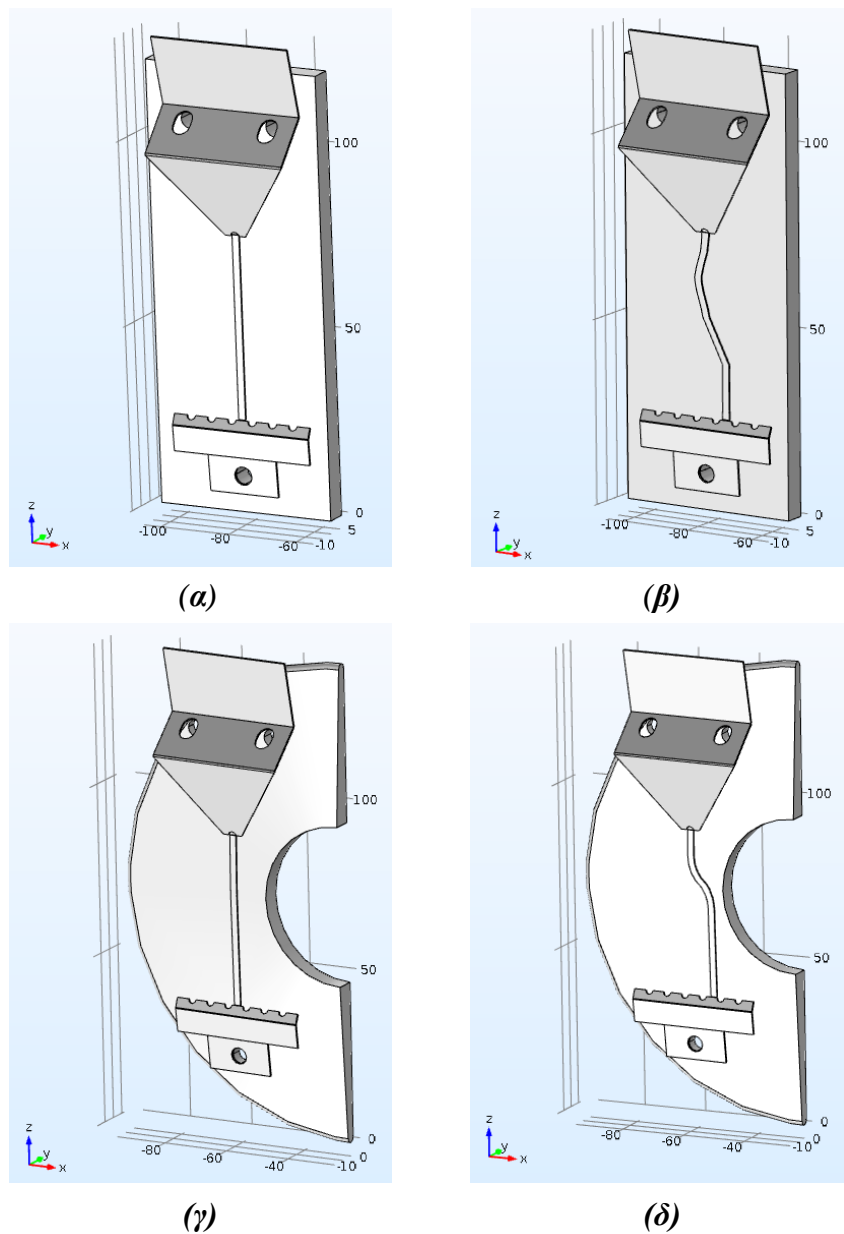
ξεκινάει από το πάνω ηλεκτρόδιο και καταλήγει στο κάτω. Για να μελετηθεί η επίδραση της διαδρομής του ρυπαντικού υγρού μεταξύ των ηλεκτροδίων στα αποτελέσματα, σχεδιάστηκαν για κάθε μορφή δοκιμίου δύο μοντέλα με διαφορετικές διαδρομές για το ρυπαντικό υγρό (Εικόνα 3.10). Τα ηλεκτρόδια είναι κοινά για όλα τα μοντέλα και τα δοκίμια και σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου IEC 60587 [41] (Εικόνα 3.11). Τέλος, η περιοχή του αέρα που περιβάλλει τη διάταξη σχεδιάστηκε με δύο ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Ένα εξωτερικά, που αντιστοιχεί στον χώρο του θαλάμου δοκιμής μέσα στον οποίο βρίσκεται ολόκληρη η διάταξη και ένα εσωτερικά, μικρότερων διαστάσεων, που περιβάλλει τα δοκίμια (Εικόνες 3.12 – 3.15). Ο εσωτερικός χώρος χρησιμοποιήθηκε για να έχουμε πυκνότερο πλέγμα στην περιοχή κοντά στα δοκίμια (και κατά συνέπεια πιο ακριβή αποτελέσματα), χωρίς μεγάλη αύξηση των απαιτούμενων υπολογιστικών πόρων (βλ. §3.2.2.5).



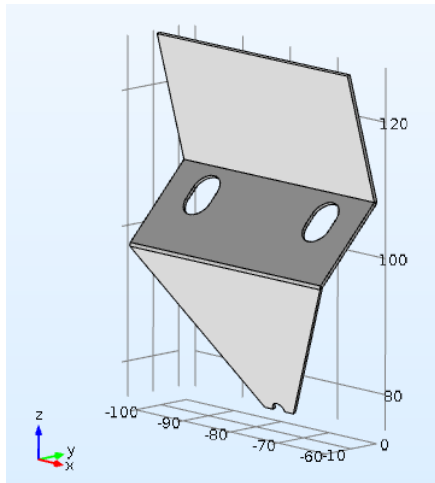
Εικόνα 3.9 Δοκίμιο με βάση το πρότυπο IEC 60587 [41] (αριστερά) και δοκίμιο από διχοτομημένο κυάθιο συνθετικού μονωτήρα (δεξιά)

Τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν με βάση το πρότυπο IEC 60587 [41] είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα μήκους 120mm (άξονας z), πλάτους 50mm (άξονας x) και πάχους 6mm (άξονας y). Τα δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια του περιβλήματος συνθετικών μονωτήρων στήριξης είναι ημιδίσκοι, από το κέντρο των οποίων έχει αποκοπεί το τμήμα (ημιδίσκος ακτίνας 23.5mm και πάχους 6mm) όπου βρισκόταν ο πυρήνας των μονωτήρων πριν την αφαίρεση των κυαθίων. Οι ημιδίσκοι έχουν ακτίνα 70.5mm και μεταβλητό πάχος, 3mm στην εξωτερική περιφέρεια και 6mm στην εσωτερική. Ακόμη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.9, έχουν σχεδιαστεί και οι οπές (ακτίνας 2.5mm) στις οποίες βιδώνονται τα ηλεκτρόδια.

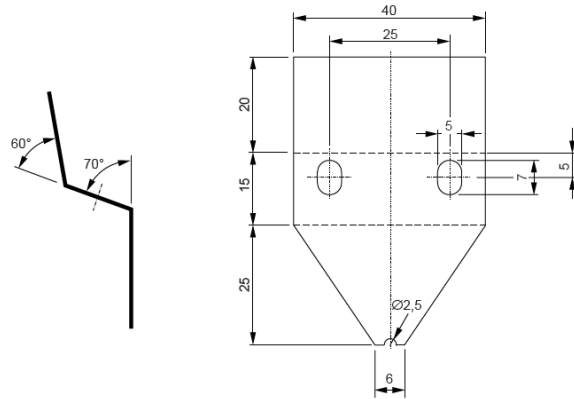
Το ρυπαντικό υγρό, σε όλα τα μοντέλα, εφάπτεται στην επιφάνεια των δοκιμίων και ξεκινάει από την οπή του πάνω ηλεκτροδίου, καταλήγοντας στο κάτω ηλεκτρόδιο. Σε κάθε περίπτωση, το πλάτος (άξονας x) και το πάχος (άξονας y) του ρυπαντικού υγρού είναι ίσα με 2mm και 0.4mm αντίστοιχα και επιλέχθηκαν εμπειρικά. Για κάθε μορφή δοκιμίου σχεδιάστηκαν δύο μοντέλα. Στο ένα η διαδρομή του ρυπαντικού υγρού ακολουθεί μια νοητή ευθεία μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, ενώ στο άλλο η διαδρομή είναι ακανόνιστη, έτσι ώστε να αναπαριστά με πιο ρεαλιστικό τρόπο την εργαστηριακή δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10 Ευθεία (α) και ακανόνιστη (β) διαδρομή ρυπαντικού υγρού για τα μοντέλα με δοκίμια κατά IEC 60587 [41]. Ευθεία (γ) και ακανόνιστη (δ) διαδρομή ρυπαντικού υγρού για τα μοντέλα με δοκίμια από διχοτομημένα κιάθια συνθετικών μονωτήρων στήριξης.



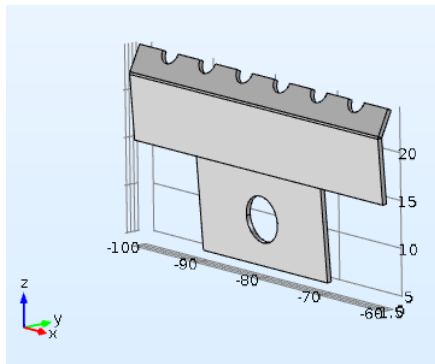
(α)



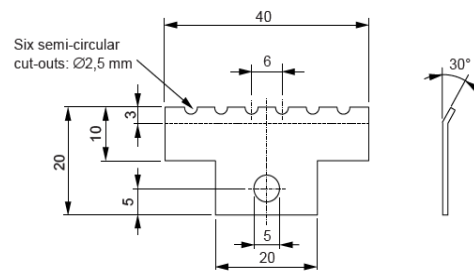
IEC 675/07

Dimensions in millimetres

Top electrode, stainless steel 0,5 mm thick



(γ)



IEC 676/07

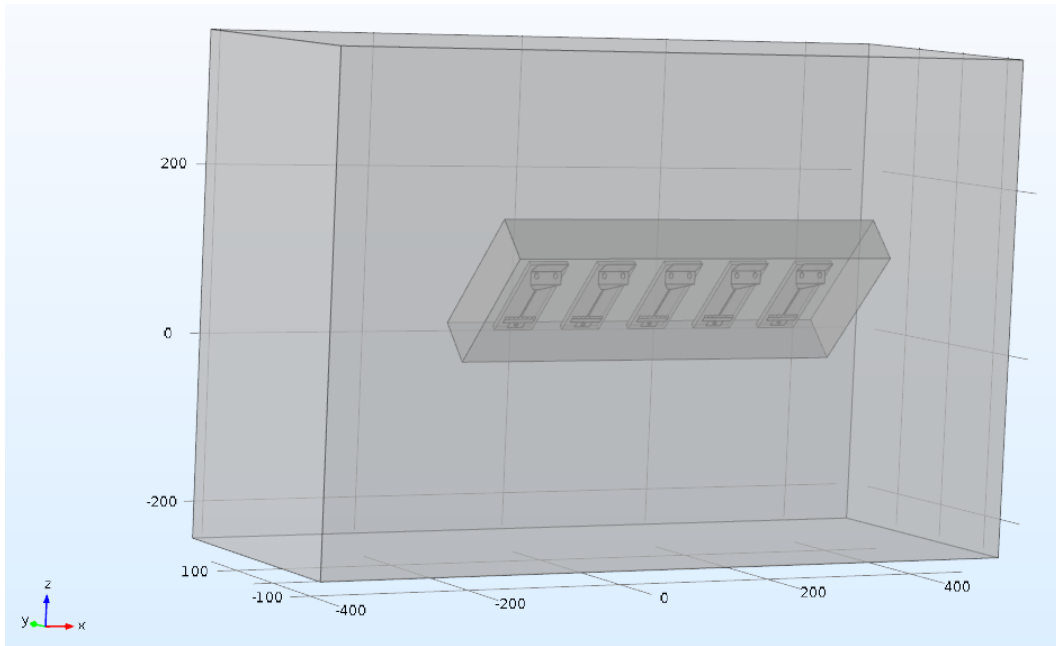
Dimensions in millimetres

Bottom electrode, stainless steel 0,5 mm thick

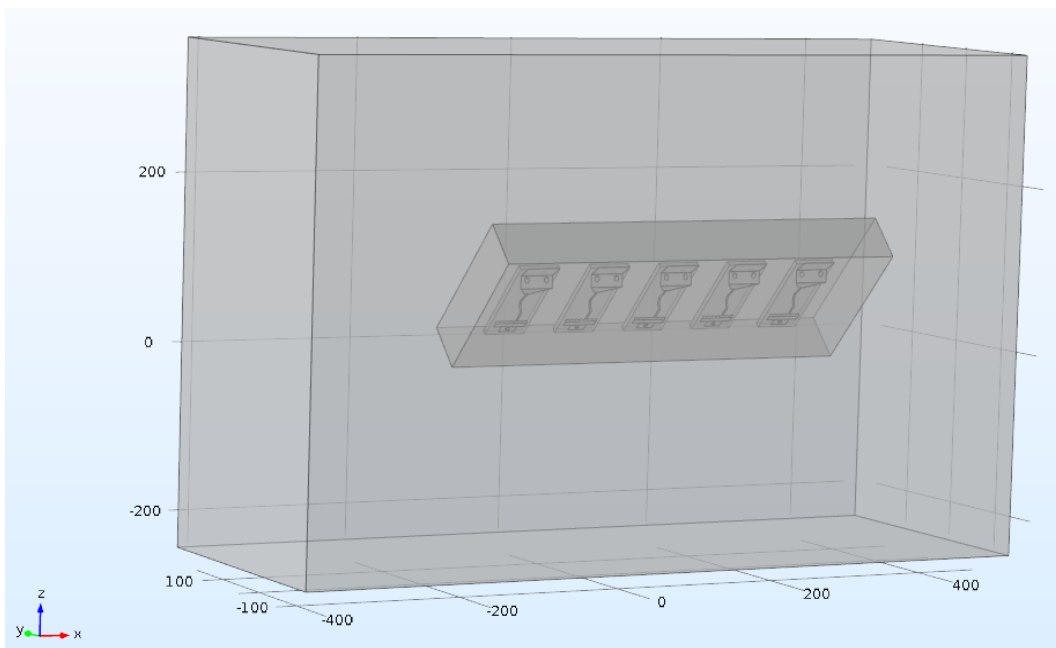
Εικόνα 3.11 Άνω ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού (α) και προδιαγραφές σχεδιάσής του (β) [41]. Κάτω γειωμένο ηλεκτρόδιο (γ) και προδιαγραφές σχεδιάσής του (δ) [41].

Η πλήρης γεωμετρία και των τεσσάρων μοντέλων φαίνεται στις Εικόνες 3.12 – 3.15. Διακρίνονται σε κάθε περίπτωση τα πέντε υπό εξέταση δοκίμια, το ρυπαντικό υγρό στην επιφάνειά τους, τα ηλεκτρόδια και τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα που αναπαριστούν τον περιβάλλοντα αέρα. Το εξωτερικό είναι διαστάσεων $900\text{mm} \times 350\text{mm} \times 600\text{mm}$ (βασίστηκε σε πραγματικό θάλαμο δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου, βλ. Εικόνα 2.6) και το εσωτερικό διαστάσεων $500\text{mm} \times 60\text{mm} \times 190\text{mm}$. Τόσο τα δοκίμια όσο και το εσωτερικό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, έχουν περιστραφεί ώστε να βρίσκονται υπό κλίση 45° , όπως ορίζει το πρότυπο IEC 60587 [41].

Σημειώνουμε, πως σε όλα τα μοντέλα η θέση του σετ των δοκιμίων μέσα στον θάλαμο δοκιμής (εξωτερική περιοχή αέρα) και η απόσταση μεταξύ των δοκιμίων σε κάθε σετ επιλέχθηκαν με βάση την εργαστηριακή δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου, η διάταξη της οποίας φαίνεται στην Εικόνα 3.16. Κατά την εργαστηριακή δοκιμή, το σετ των δοκιμίων



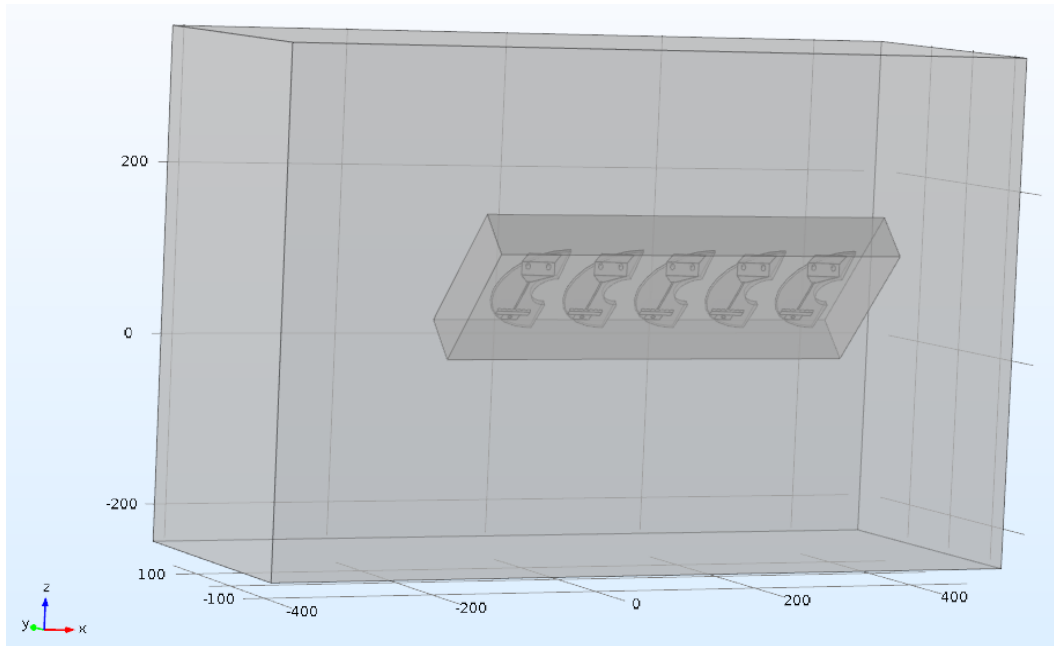
Εικόνα 3.12 Πλήρης γεωμετρία μοντέλου με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ευθεία διαδρομή ρυπαντικού υγρού



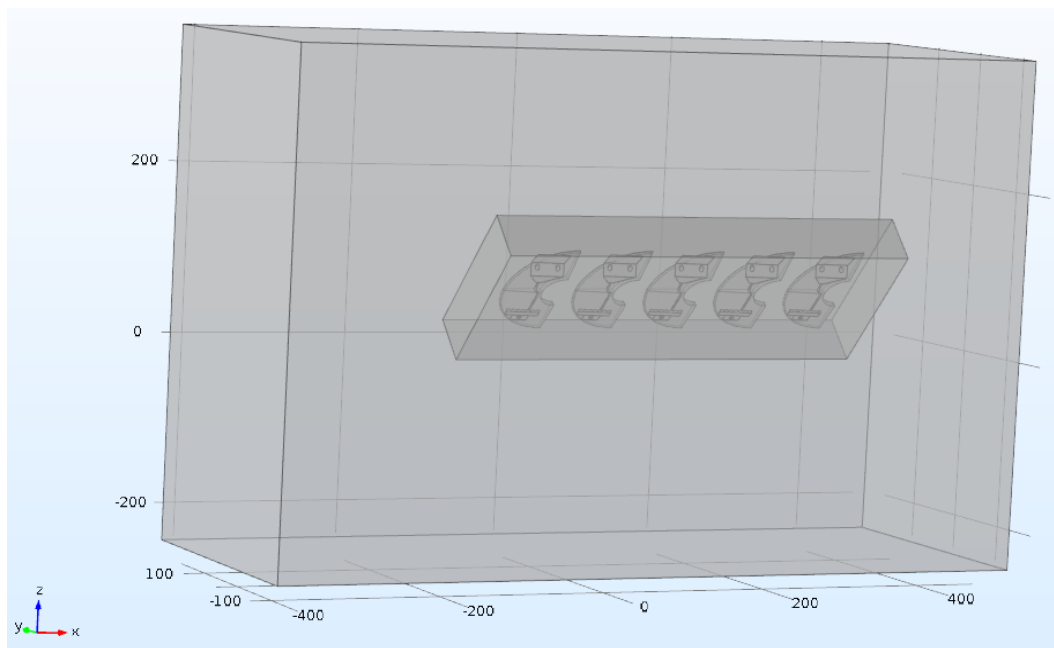
Εικόνα 3.13 Πλήρης γεωμετρία μοντέλου με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού

είναι τοποθετημένο πιο κοντά στη δεξιά πλευρά του θαλάμου δοκιμής και όχι στο κέντρο του (Εικόνα 3.16). Ακόμη, τα δοκίμια είναι τοποθετημένα στο κέντρο κατάλληλων πλαστικών βάσεων στήριξης (πλάτους 80mm σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60587 [41]) που απέχουν μεταξύ τους 10mm , οι οποίες δεν έχουν συμπεριληφθεί στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας. Έτσι, η απόσταση (άξονας x) μεταξύ των δοκιμίων ενός σετ,

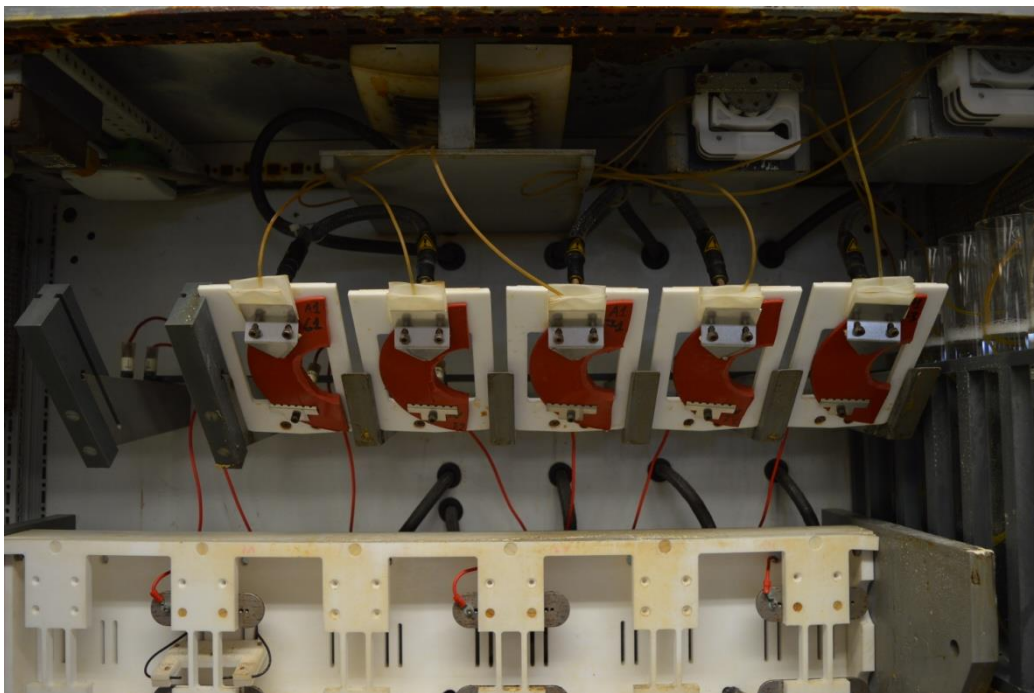
προκύπτει ίση με 40mm για τα μοντέλα με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ίση με 19.5mm για τα μοντέλα με δοκίμια από διχοτόμηση κυαθίων. Η διαφορά των αποστάσεων οφείλεται στο διαφορετικό πλάτος (άξονας x) που έχουν οι δύο διαφορετικοί τύποι δοκιμίων. Επίσης, στην περίπτωση των μοντέλων με δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια τα ηλεκτρόδια έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να «ακολουθούν», κατά το δυνατόν, την κλίση της επιφάνειας των δοκιμίων.



Εικόνα 3.14 Πλήρης γεωμετρία μοντέλου με δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια και ευθεία διαδρομή ρυπαντικού υγρού



Εικόνα 3.15 Πλήρης γεωμετρία μοντέλου με δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού



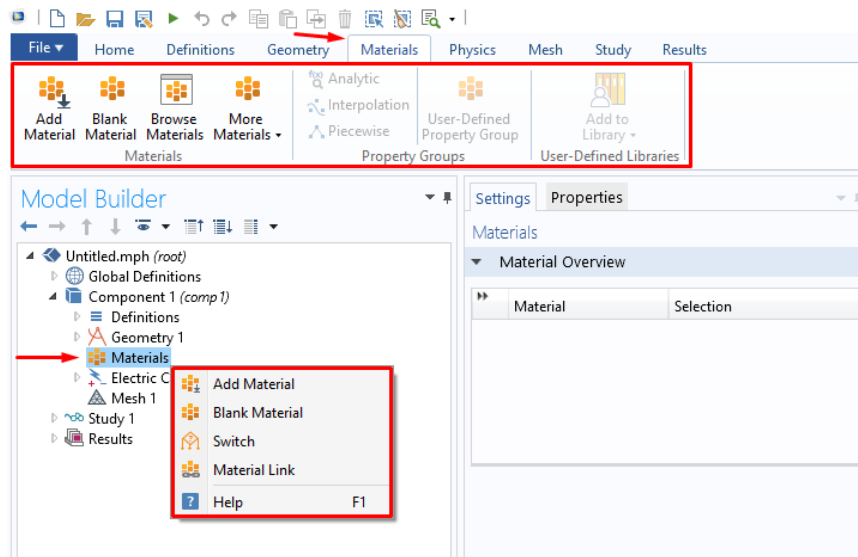
Εικόνα 3.16 Χωροταξία δοκιμών στον θάλαμο δοκιμής της εργαστηριακής δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου, στην οποία βασίστηκαν ορισμένα χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων

3.2.2.3 Ορισμός των υλικών

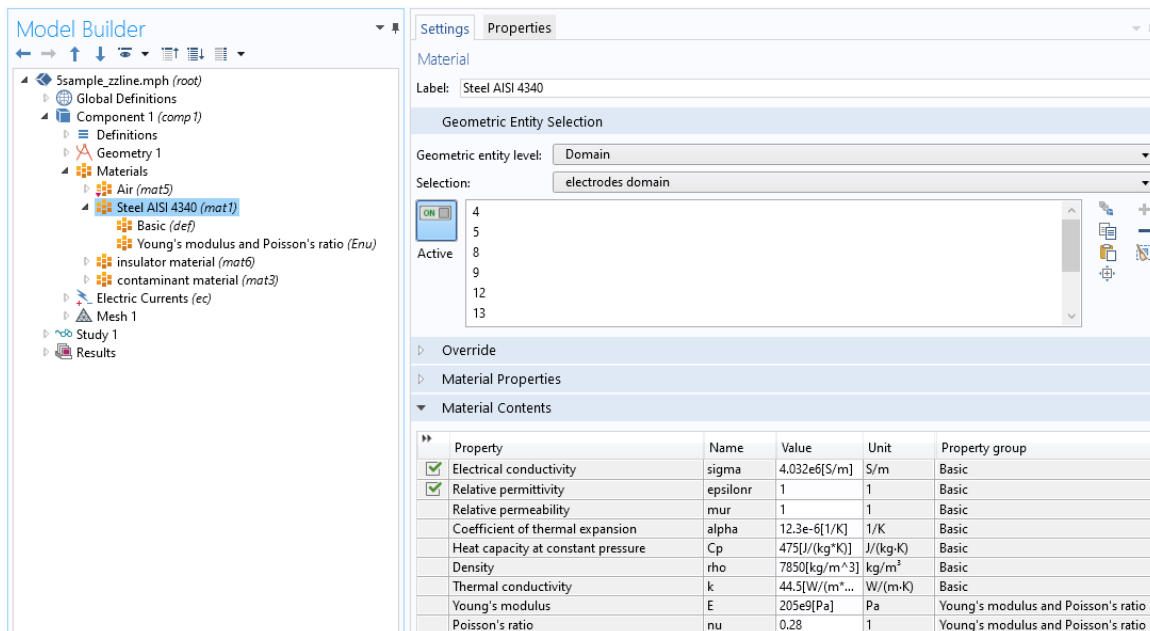
Στον υποκλάδο Materials του Component ορίζονται από τον χρήστη τα υλικά που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα του μοντέλου και οι ιδιότητές τους. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαλέξει κάποιο έτοιμο υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών που διαθέτει το λογισμικό, με πάνω από 2500 υλικά ή να ορίσει ένα νέο υλικό (“Blank Material”) με συγκεκριμένες ιδιότητες. Η προσθήκη υλικών μπορεί να γίνει είτε από τη γραμμή εργαλείων επιλέγοντας “Materials” → “Add Material” ή “Blank Material”, είτε με τον ίδιο τρόπο κάνοντας «δεξί κλικ» στον υποκλάδο Materials του Component (Εικόνα 3.17) [55].

Στην περίπτωση προσθήκης Blank Material πρέπει να οριστούν υποχρεωτικά κάποιες ιδιότητες, ανάλογα με το πακέτο φυσικής που έχει επιλεγεί, για να γίνει επιτυχώς η επίλυση του μοντέλου. Για τη μελέτη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που ενδιαφέρει στη συγκεκριμένη εργασία και έχοντας επιλέξει το πακέτο φυσικής “Electric Currents”, πρέπει απαραίτητως να οριστούν η σχετική επιτρεπτότητα (ϵ_r – relative permittivity) και η ειδική αγωγιμότητα (σ – electrical conductivity) των υλικών [55]. Για τα μοντέλα μας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα υλικά. Το “Steel AISI 4340” από τη βιβλιοθήκη υλικών του

COMSOL Multiphysics για τα ηλεκτρόδια (Εικόνα 3.18) και τρία Blank Materials, στα οποία ορίσαμε τα μεγέθη ϵ_r και σ , για τα δοκίμια, το ρυπαντικό υγρό και τον αέρα (Εικόνες 3.19 – 3.21). Οι ιδιότητες των δοκιμίων και του ρυπαντικού υγρού προέκυψαν από την εργαστηριακή δοκιμή στην οποία βασιστήκαμε για τη σχεδίαση, ενώ οι ιδιότητες για τον αέρα επιλέχθηκαν βάσει της αντίστοιχης βιβλιογραφίας [48], [49], [51].



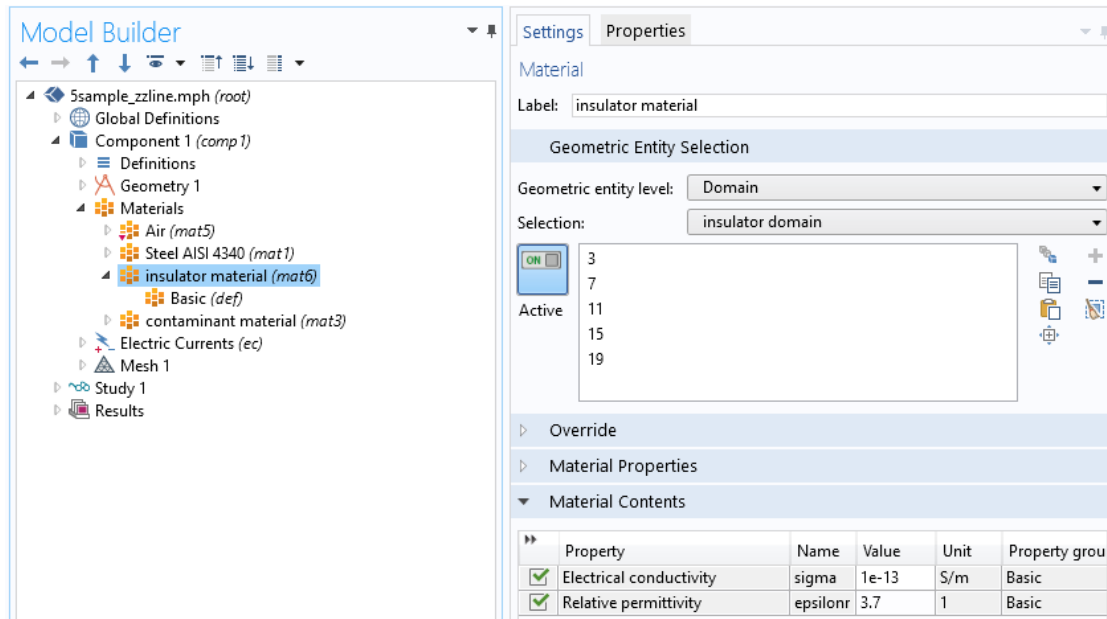
Εικόνα 3.17 Προσθήκη υλικών στο μοντέλο



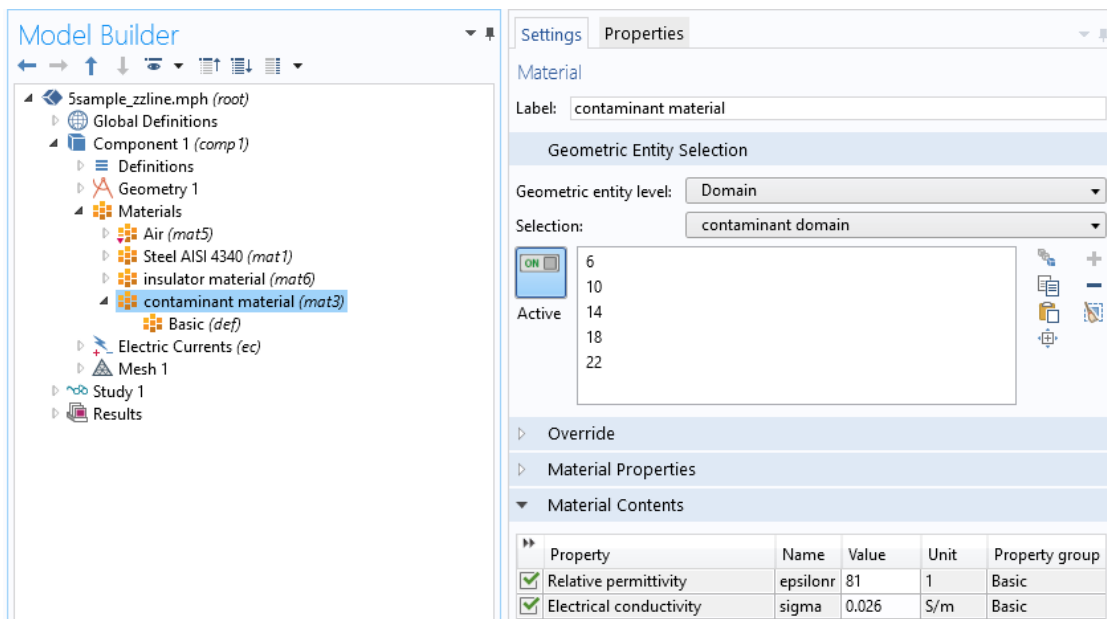
Εικόνα 3.18 Ιδιότητες (δεξιά κάτω) του υλικού Steel AISI 4340 που χρησιμοποιήθηκε για τα ηλεκτρόδια

Αφού επιλεγθεί το επιθυμητό υλικό, η αντιστοίχιση με κάποιο τμήμα του μοντέλου γίνεται μέσω του παραθύρου Settings που αντιστοιχεί στο υλικό. Στο “Geometric Entity Selection” επιλέγεται μέσω του “Geometric entity level” αν το υλικό

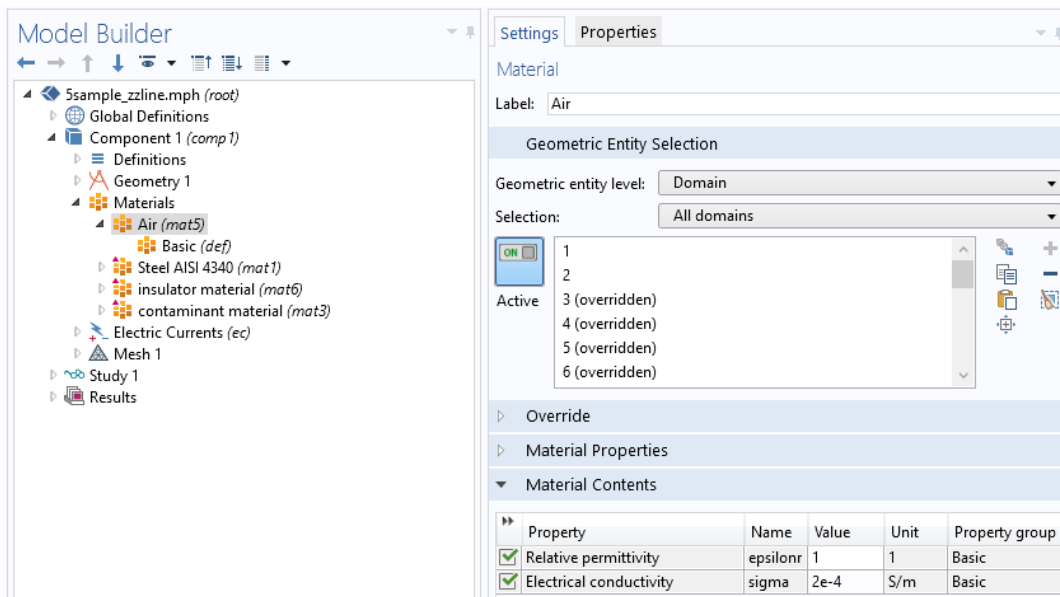
αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο όγκο (domain), επιφάνεια (boundary), ακμή (edge) ή σημείο (point), ενώ μέσω του “Selection” ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αντιστοιχίσει το υλικό με κάποια ομαδοποίηση στοιχείων, που είχε νωρίτερα ορίσει στον υποκλάδο Definitions του Component [55]. Οι παραπάνω λειτουργίες φαίνονται στις Εικόνες 3.18 – 3.21, όπου ως παράδειγμα έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο δοκιμών κατά IEC 60587 [41] με ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού (τα ίδια ισχύουν και για τα υπόλοιπα μοντέλα).



Εικόνα 3.19 Ιδιότητες (δεξιά κάτω) του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια (*insulator material*)

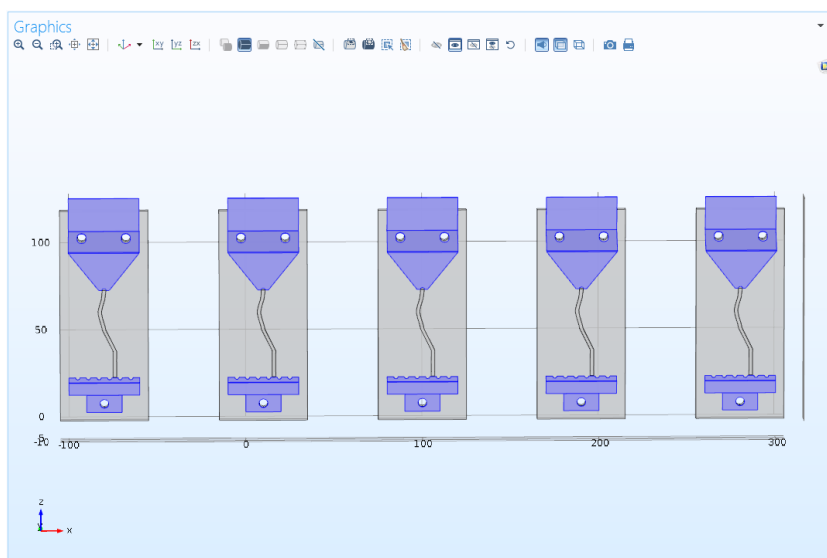


Εικόνα 3.20 Ιδιότητες (δεξιά κάτω) του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για το ρυπαντικό υγρό (*contaminant material*)



Εικόνα 3.21 Ιδιότητες (δεξιά κάτω) του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τον αέρα (Air)

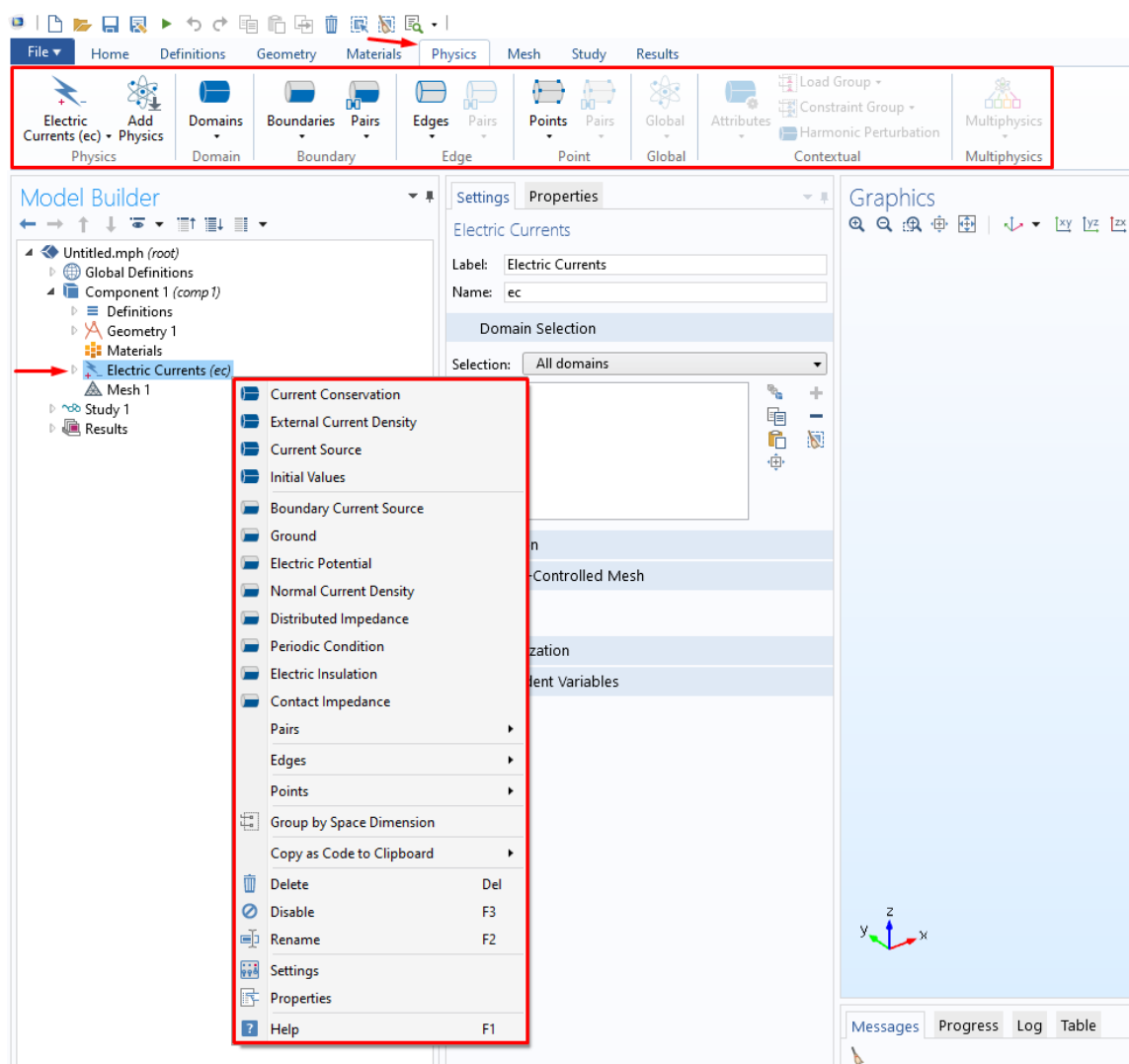
Οι περιοχές του μοντέλου που επιλέγονται προς αντιστοίχιση με κάποιο υλικό, επισημαίνονται με διαφορετικό χρώμα στο παράθυρο Graphics (Εικόνα 3.22). Σε περίπτωση που κάποια περιοχή αντιστοιχιστεί σε περισσότερα από ένα υλικά, υπερισχύει αυτό που ορίστηκε τελευταίο. Για παράδειγμα, στα μοντέλα αντιστοιχίσαμε αρχικά τον αέρα με όλη τη διάταξη (Εικόνα 3.21, “Geometric Entity Selection” → “Selection” → “All domains”). Έπειτα, ορίζοντας τις περιοχές των υπόλοιπων υλικών, η επιλογή του αέρα αναιρέθηκε (εμφανίζεται η ένδειξη “overridden” στις εν λόγω περιοχές) και υπερίσχυαν τα νέα υλικά.



Εικόνα 3.22 Επισημάνση με μωβ χρώμα της περιοχής των ηλεκτροδίων, που επιλέχθηκαν για αντιστοίχιση με το υλικό Steel AISI 4340

3.2.2.4 Εισαγωγή πακέτων φυσικής

Κατά τον ορισμό του Model Wizard τα επιθυμητά πακέτα φυσικής εισάγονται εξ' αρχής στο μοντέλο. Αν όμως έχει επιλεγεί η δημιουργία ενός Blank Model ή αν ο χρήστης επιθυμεί να προσθέσει επιπλέον πακέτα φυσικής, μπορεί να το κάνει επιλέγοντας “Physics” → “Add Physics” από τη γραμμή εργαλείων. Πατώντας «δεξί κλικ» στο πακέτο φυσικής από το Model Builder ή επιλέγοντας “Physics” από τη γραμμή εργαλείων, ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί το πακέτο ορίζοντας οριακές συνθήκες, αρχικές τιμές κλπ. ή να το αφαιρέσει από το μοντέλο (Εικόνα 3.23). Τα πακέτα φυσικής εμφανίζονται κάτω από τον υποκλάδο Materials του Component [55].



Εικόνα 3.23 Εισαγωγή και επεξεργασία πακέτων φυσικής

3.2.2.4.1 Το πακέτο φυσικής *Electric Currents* (ec)

Το πακέτο φυσικής *Electric Currents* είναι μέρος του κλάδου φυσικής AC/DC, ο οποίος περιέχει κι άλλα πακέτα (“*Electrostatics*” & “*Magnetic Fields*”) για προσομοιώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε στατικά ή χαμηλών συχνοτήτων συστήματα. Το πακέτο *Electric Currents* χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κατανομών ηλεκτρικού πεδίου, ρεύματος και δυναμικού σε αγωγή μέσα [55].

Οι τρεις βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το πακέτο *Electric Currents* για την επίλυση των μοντέλων σε σταθερή κατάσταση ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$) είναι οι εξής [55]:

- $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e$ (γενικευμένος νόμος του Ohm)
- $\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_j$ (γενικευμένη εξίσωση συνέχειας – αρχή διατήρησης του φορτίου)
- $\mathbf{E} = -\nabla V$ (σχέση ηλεκτρικού πεδίου – δυναμικού)

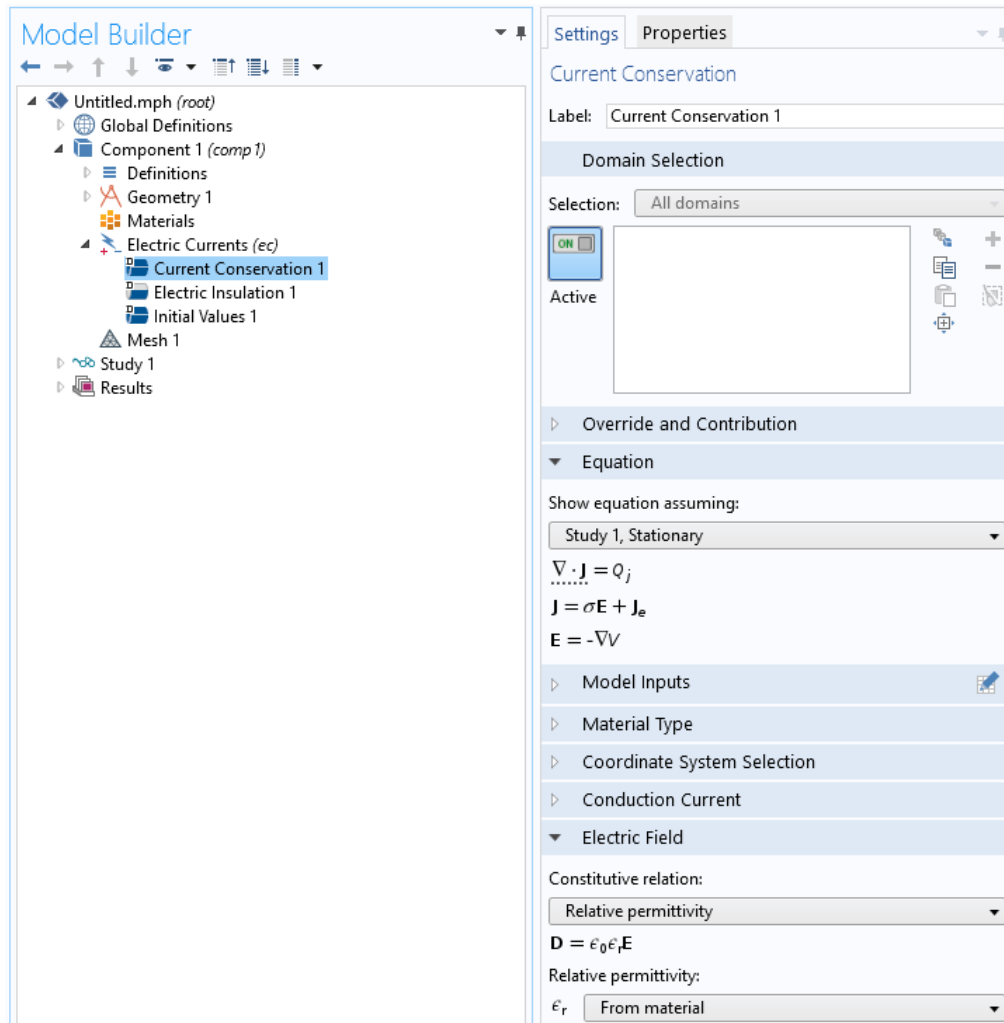
όπου: \mathbf{J} η χωρική πυκνότητα ρεύματος $\left[\frac{A}{m^2}\right]$, σ η ειδική αγωγιμότητα $\left[\frac{S}{m}\right]$, \mathbf{E} η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου $\left[\frac{V}{m}\right]$, \mathbf{J}_e εξωτερικά παραγόμενη χωρική πυκνότητα ρεύματος $\left[\frac{A}{m^2}\right]$, Q_j πηγή ρεύματος $\left[\frac{A}{m^2}\right]$ και V το ηλεκτρικό δυναμικό [V].

Κατά την επίλυση των μοντέλων με το πακέτο *Electric Currents*, το ηλεκτρικό δυναμικό (V) χρησιμοποιείται ως εξαρτημένη μεταβλητή. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσθέσει κόμβους στον υποκλάδο *Electric Currents* που δημιουργείται και να ορίσει εκεί συνοριακές συνθήκες, περιορισμούς και τιμές για το ηλεκτρικό δυναμικό. Κατά την εισαγωγή του πακέτου, προστίθενται εξ’ αρχής στον υποκλάδο *Electric Currents* οι εξής τρεις προεπιλεγμένοι κόμβοι [55]:

- Current Conservation (Εικόνα 3.24): Περιέχει τις τρεις βασικές εξισώσεις για την επίλυση του μοντέλου, καθώς και την καταστατική εξίσωση $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$, όπου \mathbf{D} η διηλεκτρική μετατόπιση, $\epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m}\right]$ η διηλεκτρική σταθερά του κενού και ϵ_r η σχετική επιτρεπτότητα του υλικού.
- Electric Insulation (Εικόνα 3.25): Περιέχει τις προεπιλεγμένες συνοριακές συνθήκες, οι οποίες εφαρμόζονται εξωτερικά στα σύνορα του μοντέλου (στα μοντέλα που δημιουργήσαμε το σύνορο είναι η επιφάνεια της εξωτερικής περιοχής του αέρα) και εκφράζονται μέσω της σχέσης $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$, όπου \mathbf{n} το

μοναδιαίο διάνυσμα που είναι κάθετο στο σύνορο και J η χωρική πυκνότητα ρεύματος $\left[\frac{A}{m^2}\right]$.

- **Initial Values (Εικόνα 3.26):** Περιέχει τις αρχικές τιμές για το δυναμικό. Οι τιμές αυτές χρησιμεύουν ως αρχικές συνθήκες για ανάλυση μεταβατικών φαινομένων στο πεδίο του χρόνου (transient analysis) ή αρχικές εκτιμήσεις για μη γραμμικούς επιλύτες (non-linear solvers).

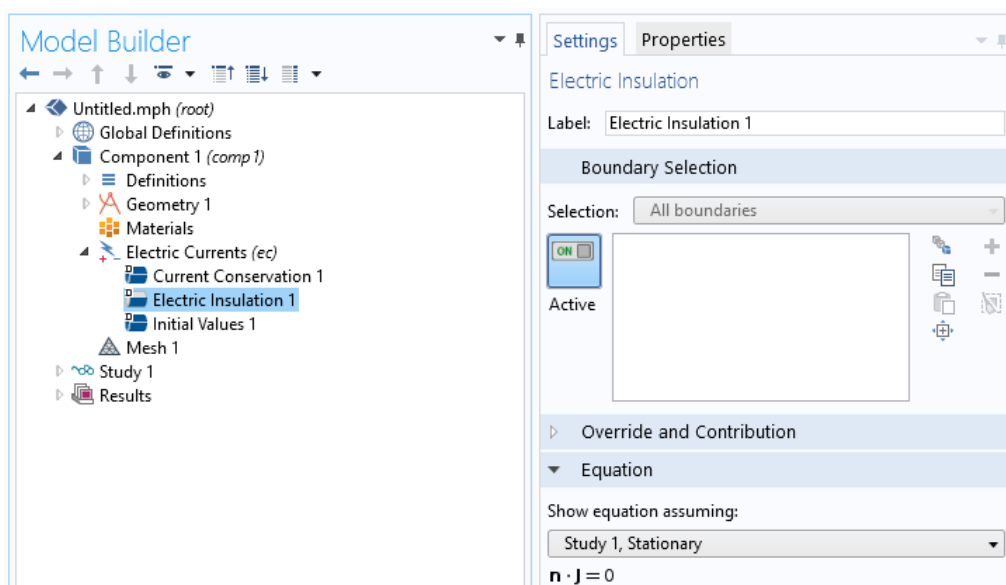


Εικόνα 3.24 Κόμβος “Current Conservation”

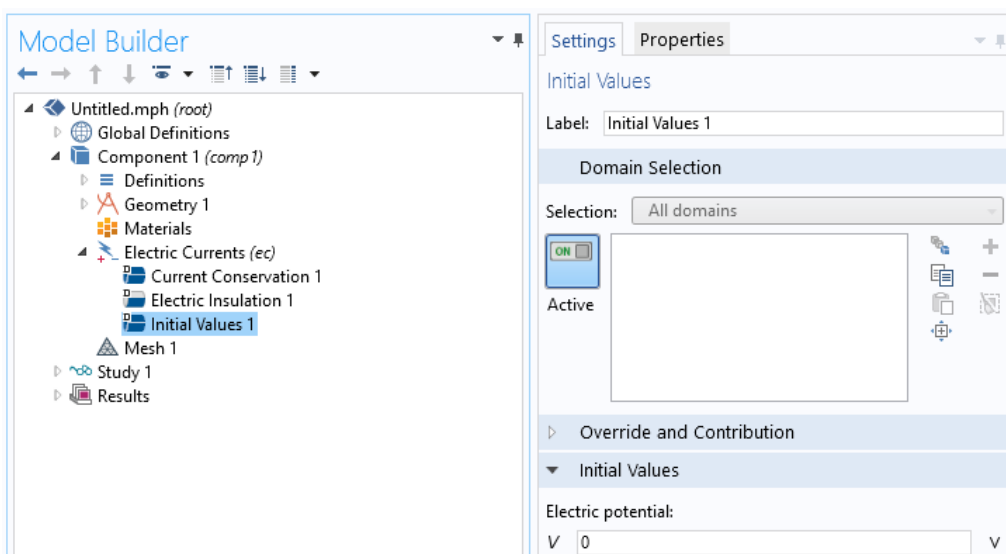
Εκτός των τριών αυτών κόμβων, για την παρούσα εργασία, χρειάζεται να προσθέσουμε επιπλέον κόμβους για να ορίσουμε την τιμή του δυναμικού σε συγκεκριμένες περιοχές του μοντέλου. Τα κάτω ηλεκτρόδια όλων των δοκιμίων και ο θάλαμος δοκιμής είναι γειωμένα, ενώ τα άνω ηλεκτρόδια βρίσκονται σε υψηλό δυναμικό (βλ. §2.2.2.3.1).

Για τη γείωση των κάτω ηλεκτροδίων προσθέτουμε τον κόμβο “Ground” (εφαρμόζει μηδενικό δυναμικό στις περιοχές που επιλέγονται) και τον αντιστοιχίζουμε με

τα κάτω ηλεκτρόδια. Προσθέτουμε επίσης δύο κόμβους “Electric Potential”. Στον έναν αντιστοιχίζουμε τα άνω ηλεκτρόδια και το άνω επιφανειακό σύνορο του ρυπαντικού υγρού, εφαρμόζοντας δυναμικό $V = 4.5kV$, ενώ στον άλλο αντιστοιχίζουμε την επιφάνεια της εξωτερικής περιοχής του αέρα (υποθέτοντας ότι στο σύνορο αυτό υπάρχει ο γειωμένος θάλαμος δοκιμής) και το κάτω επιφανειακό σύνορο του ρυπαντικού υγρού, εφαρμόζοντας δυναμικό $V = 0$. Ο λόγος που συμπεριλάβαμε τα άνω και κάτω επιφανειακά σύνορα του ρυπαντικού υγρού στις οριακές συνθήκες, είναι πως ενώ στην πραγματικότητα το ρυπαντικό υγρό έρχεται σε επαφή με τα ηλεκτρόδια, αυτό δε συμβαίνει στα μοντέλα μας προς αποφυγή αλληλοεπικαλύψεων μεταξύ των περιοχών, οι

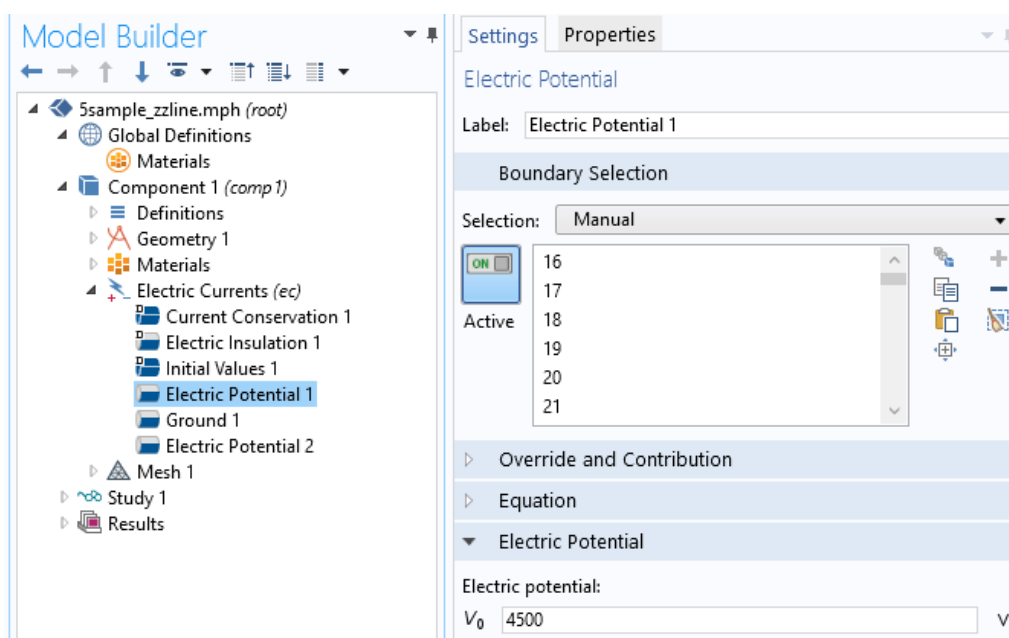


Εικόνα 3.25 Κόμβος “Electric Insulation”



Εικόνα 3.26 Κόμβος “Initial Values”

οποίες επηρεάζουν με αρνητικό τρόπο το δημιουργούμενο πλέγμα. Η αντιστοίχιση των περιοχών με τους κόμβους (Εικόνα 3.27) γίνεται από το παράθυρο Settings, επιλέγοντας “Boundary Selection” → “Selection” και ορίζοντας τις επιθυμητές περιοχές (κατά αντίστοιχο τρόπο με την περίπτωση ορισμού των υλικών, βλ. §3.2.2.3).



Εικόνα 3.27 Στο παράθυρο Model Builder φαίνονται οι κόμβοι “Electric Potential 1,2” και “Ground 1” που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό της τιμής του δυναμικού σε συγκεκριμένες περιοχές των μοντέλων, ενώ στο παράθυρο Settings διακρίνονται οι ιδιότητες του κόμβου “Electric Potential 1”

3.2.2.5 Ορισμός πλέγματος

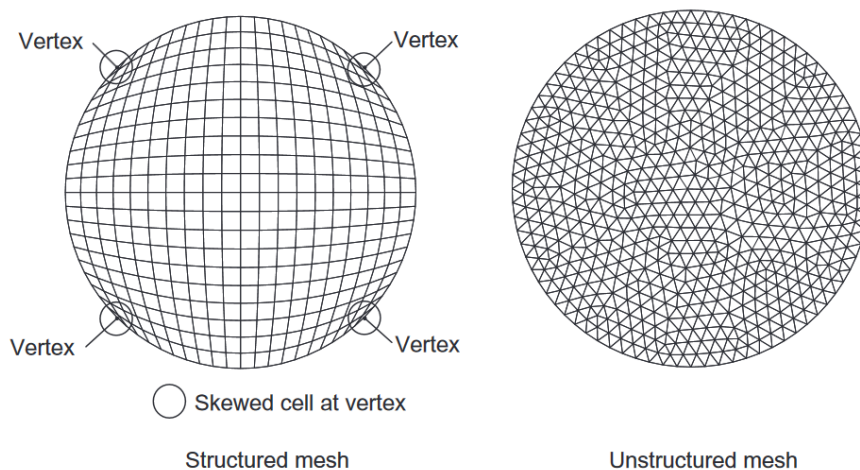
Το πλέγμα (Mesh) χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση του συνεχούς γεωμετρικού χώρου ενός μοντέλου σε στοιχεία μικρού μεγέθους από απλά σχήματα (mesh elements). Το COMSOL Multiphysics για την πλεγματοποίηση (meshing) τρισδιάστατων μοντέλων χρησιμοποιεί τετράεδρα, εξάεδρα, πρίσματα και πυραμίδες για τον κύριο όγκο του μοντέλου και τρίγωνα ή τετράπλευρα για τα σύνορα της γεωμετρίας. Για τις ακμές και τις κορυφές στο μοντέλο, χρησιμοποιούνται στοιχεία ακμών (edge elements) και στοιχεία κορυφών (vertex elements) αντίστοιχα [55].

Το δημιουργούμενο πλέγμα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να αναπαριστά τη γεωμετρία του μοντέλου με ακρίβεια και να οδηγεί σε επαρκώς ακριβή αποτελέσματα, χωρίς παράλληλα να αυξάνει υπερβολικά τον απαιτούμενο χρόνο προσομοίωσης και τους υπολογιστικούς πόρους. Γενικά, ένα πυκνότερο πλέγμα οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια

στα αποτελέσματα, απαιτεί, όμως, περισσότερους υπολογιστικούς πόρους και μεγαλύτερη διάρκεια προσομοίωσης [55]. Κάποιες κατευθυντήριες γραμμές που θα πρέπει να λάβει υπόψη του ο χρήστης για τη δημιουργία του πλέγματος είναι οι εξής:

- Συστήνεται η επίλυση να γίνεται αρχικά σε σχετικά αραιό πλέγμα. Στη συνέχεια ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει πυκνότερο πλέγμα, ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της προσομοίωσης.
- Στις σημαντικότερες περιοχές της γεωμετρίας, δηλαδή στις περιοχές όπου πρόκειται να γίνει λήψη αποτελεσμάτων ή όπου αναμένονται έντονες μεταβολές των μεγεθών, θα πρέπει το πλέγμα να είναι πυκνότερο.
- Η απότομη μεταβολή στο μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος σε γειτονικές περιοχές (π.χ. στις διεπαφές αντικειμένων) θα πρέπει να αποφεύγεται.

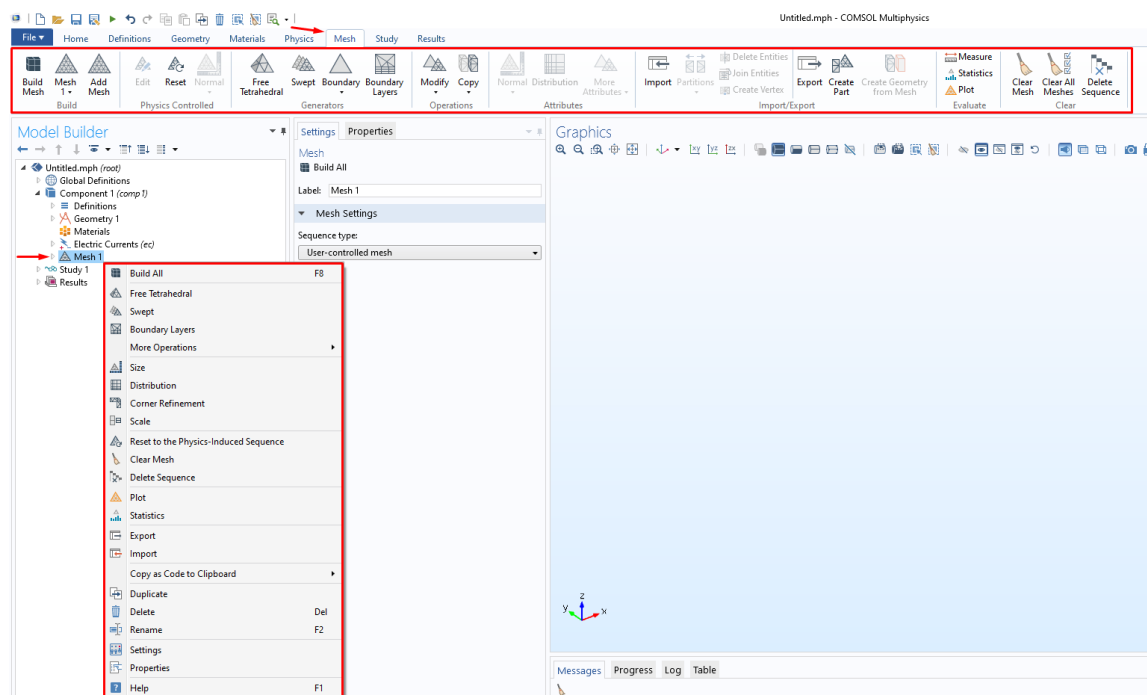
Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες πλεγμάτων, τα δομημένα (structured) και τα αδόμητα (unstructured) πλέγματα (Εικόνα 3.28). Στα δομημένα πλέγματα όλοι οι κόμβοι στον εσωτερικό χώρο του πλέγματος γειτνιάζουν με τον ίδιο αριθμό στοιχείων, κάτι που δεν ισχύει στα αδόμητα πλέγματα. Κατά τη σχεδίαση του πλέγματος στο COMSOL Multiphysics παράγεται αδόμητο πλέγμα, όμως υπάρχει η δυνατότητα μέσω συγκεκριμένων εντολών (“Swept”, “Boundary Layers”) να δημιουργηθεί πλέγμα με πιο δομημένη μορφή [55]. Αν και το αδόμητο πλέγμα αυξάνει τις απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους, αναπαριστά με μεγαλύτερη ακρίβεια το μοντέλο.



Εικόνα 3.28 Δομημένο (αριστερά) και αδόμητο (δεξιά) πλέγμα [56]

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα παραγωγής πλέγματος είτε αυτόματα, με βάση τη γεωμετρία και το πακέτο φυσικής που έχει επιλεγεί (Physics-controlled mesh), είτε καθορισμένο από τον χρήστη (User-controlled mesh). Ο ορισμός και η επεξεργασία του

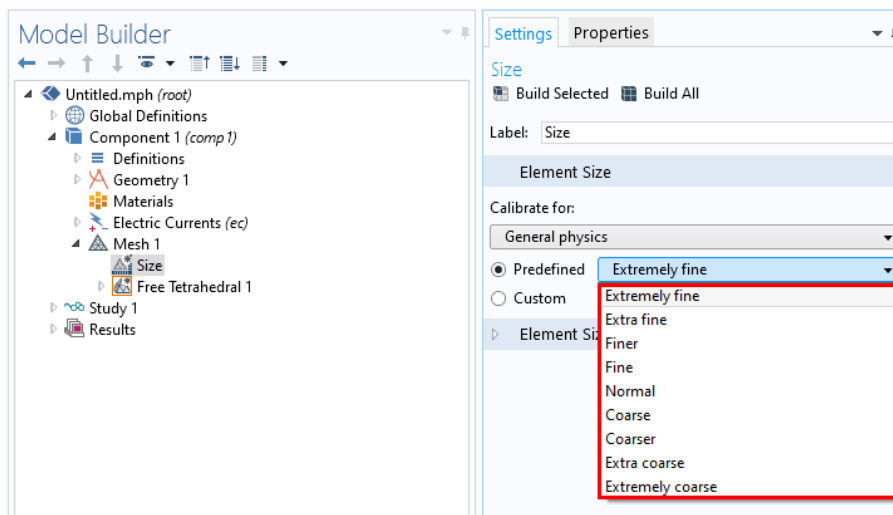
πλέγματος γίνεται πατώντας «δεξί κλικ» στον υποκλάδο Mesh του Component ή επιλέγοντας “Mesh” από τη γραμμή εργαλείων (Εικόνα 3.29). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει πλέγμα διαφορετικών ιδιοτήτων για κάθε περιοχή του μοντέλου ή ακόμα και να δημιουργήσει διαφορετικά πλέγματα (προσθέτοντας επιπλέον κόμβους Mesh), επιλέγοντας κάθε φορά ένα από αυτά για την επίλυση [55].



Εικόνα 3.29 Ορισμός και επεξεργασία του πλέγματος

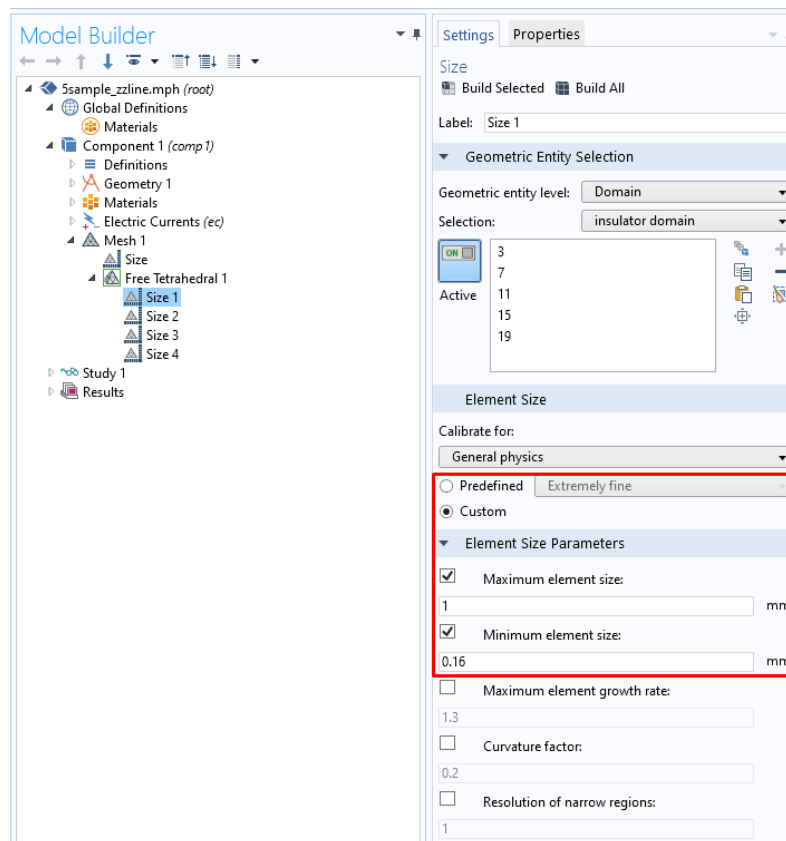
Για τα μοντέλα της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας για κάθε περιοχή. Αρχικά, επιλέξαμε από το παράθυρο Settings του υποκλάδου Mesh, “Sequence type” → “User-controlled mesh”. Μετά την επιλογή αυτή εμφανίζονται στον υποκλάδο Mesh οι κόμβοι “Size” και “Free Tetrahedral”. Από τον κόμβο “Size” ορίζεται το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος για όλο το μοντέλο, μέσω κάποιων προκαθορισμένων επιλογών που ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει αν χρειαστεί (Εικόνα 3.30). Για να οριστούν διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος για κάθε περιοχή του μοντέλου, πρέπει να προστεθούν στον κόμβο Free Tetrahedral επιπλέον κόμβοι Size («δεξί κλικ» → “Size”), οι οποίοι μπορούν να αντιστοιχιστούν με συγκεκριμένες περιοχές [55].

Για την εξωτερική περιοχή του αέρα και τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκε αραιό (Coarse) πλέγμα, καθώς δεν αποτελούν περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Για τα δοκίμια, το ρυπαντικό υγρό και την εσωτερική περιοχή του αέρα επιλέξαμε πολύ πυκνό πλέγμα (Extremely fine), το οποίο πυκνώσαμε περαιτέρω για κάθε περιοχή, μειώνοντας



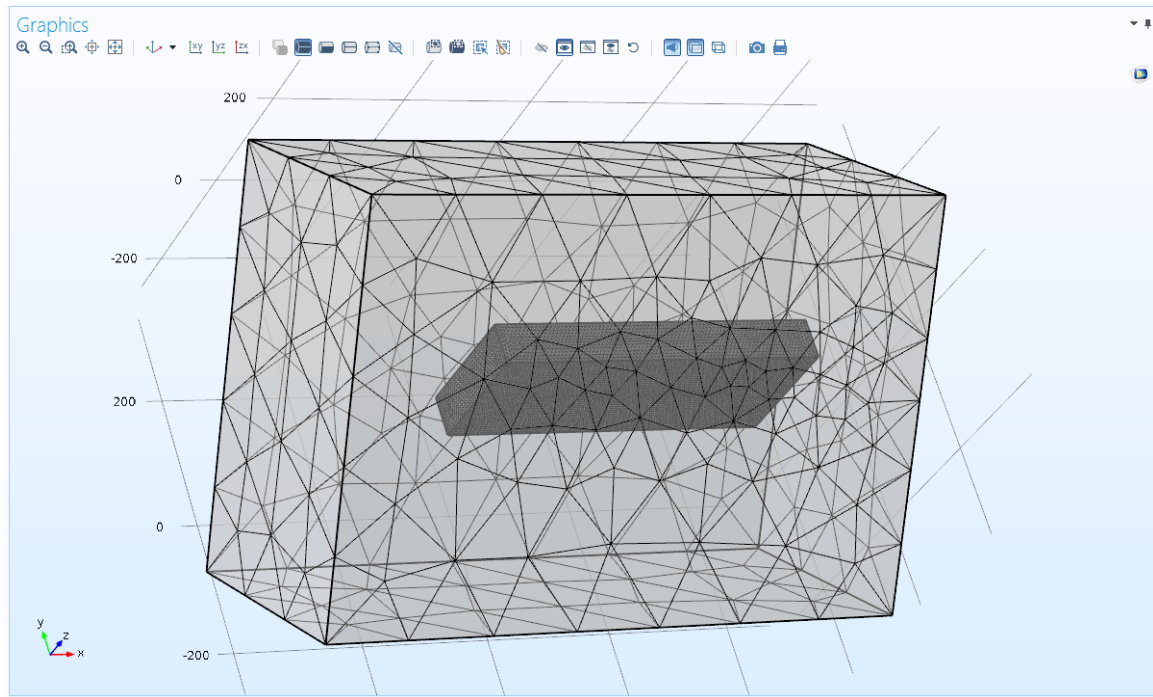
Εικόνα 3.30 Προκαθορισμένες επιλογές για το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος, από “Extremely fine” (πολύ πυκνό πλέγμα) έως “Extremely coarse” (πολύ αραιό πλέγμα)

τις τιμές Maximum/Minimum element size από το παράθυρο “Settings” → “Element Size Parameters” κάθε κόμβου Size (Εικόνα 3.31). Το λογισμικό προσαρμόζει αυτόματα το πλέγμα, ώστε τα στοιχεία στα όρια μεταξύ περιοχών με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος να έχουν το ίδιο μέγεθος [55].

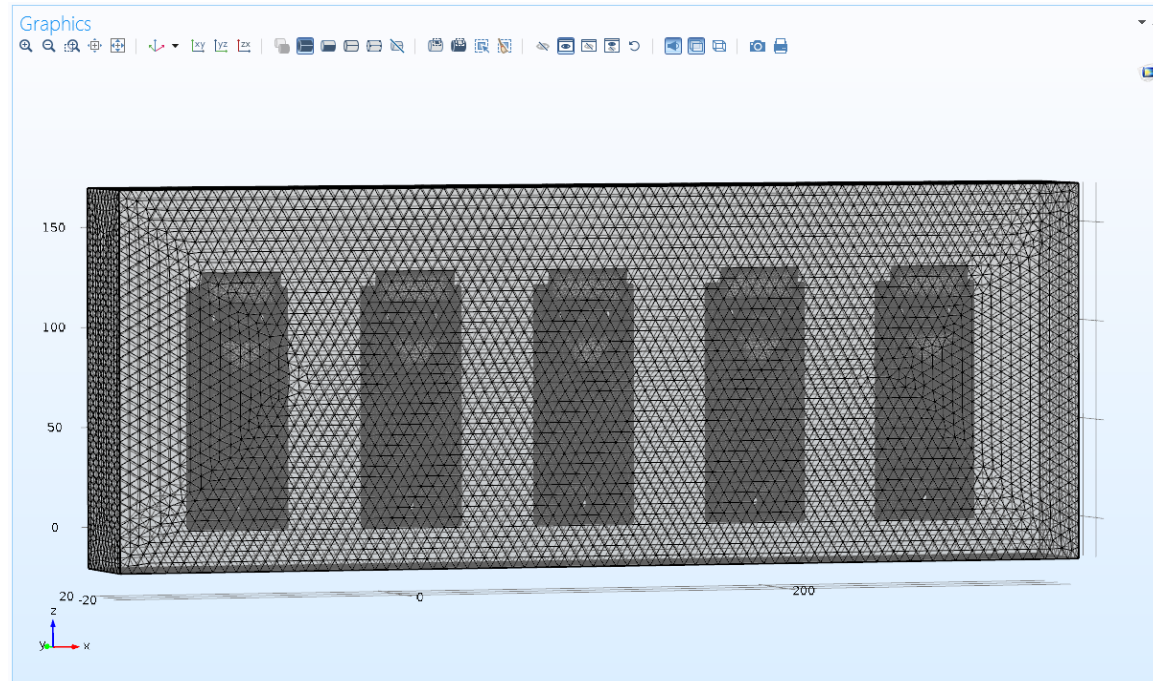


Εικόνα 3.31 Ρύθμιση μεγέθους των στοιχείων του πλέγματος

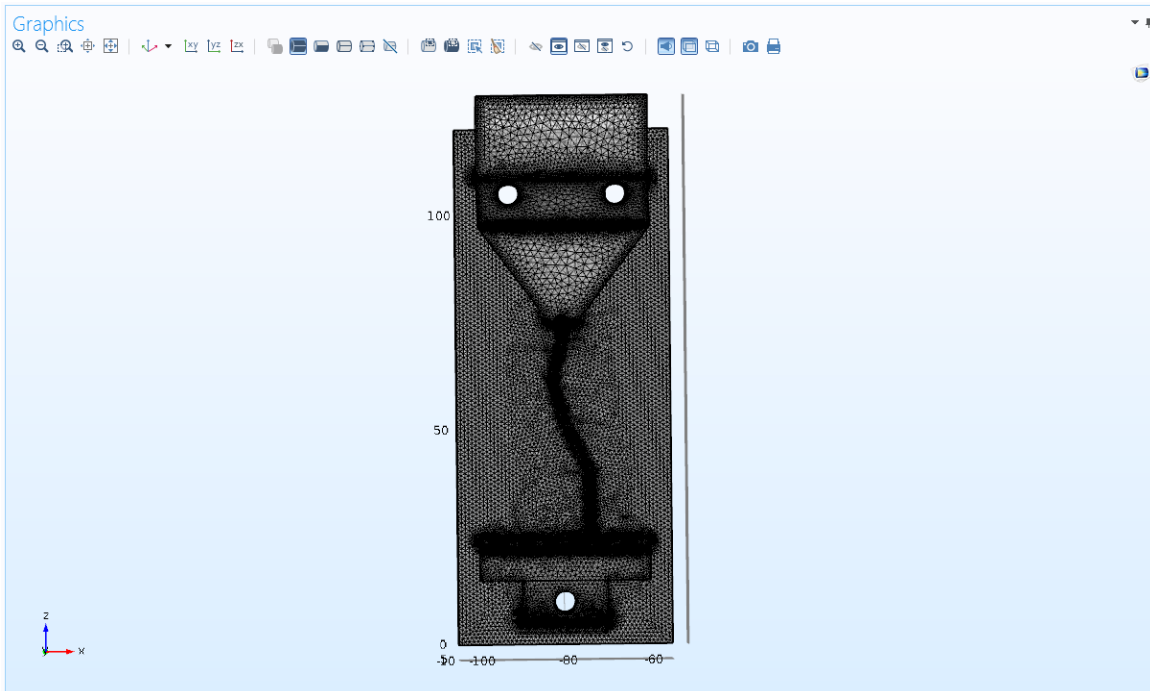
Οι διαφορές στην πυκνότητα μεταξύ των πλεγμάτων κάθε περιοχής φαίνονται στις Εικόνες 3.32 έως 3.35, για το μοντέλο δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού. Η ίδια λογική για τον ορισμό του πλέγματος ακολουθήθηκε και στα υπόλοιπα μοντέλα.



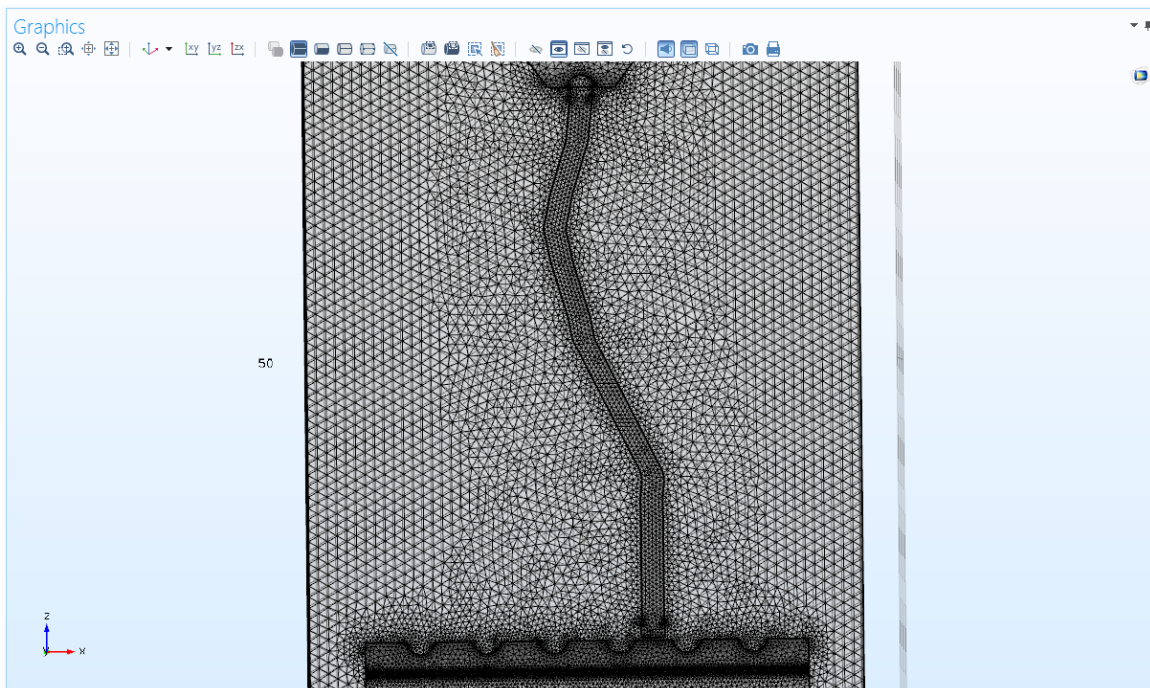
Εικόνα 3.32 Πλέγματα εξωτερικής και εσωτερικής περιοχής αέρα για το μοντέλο με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού



Εικόνα 3.33 Πλέγματα εσωτερικής περιοχής αέρα και διάταξης δοκιμίων για το μοντέλο με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού



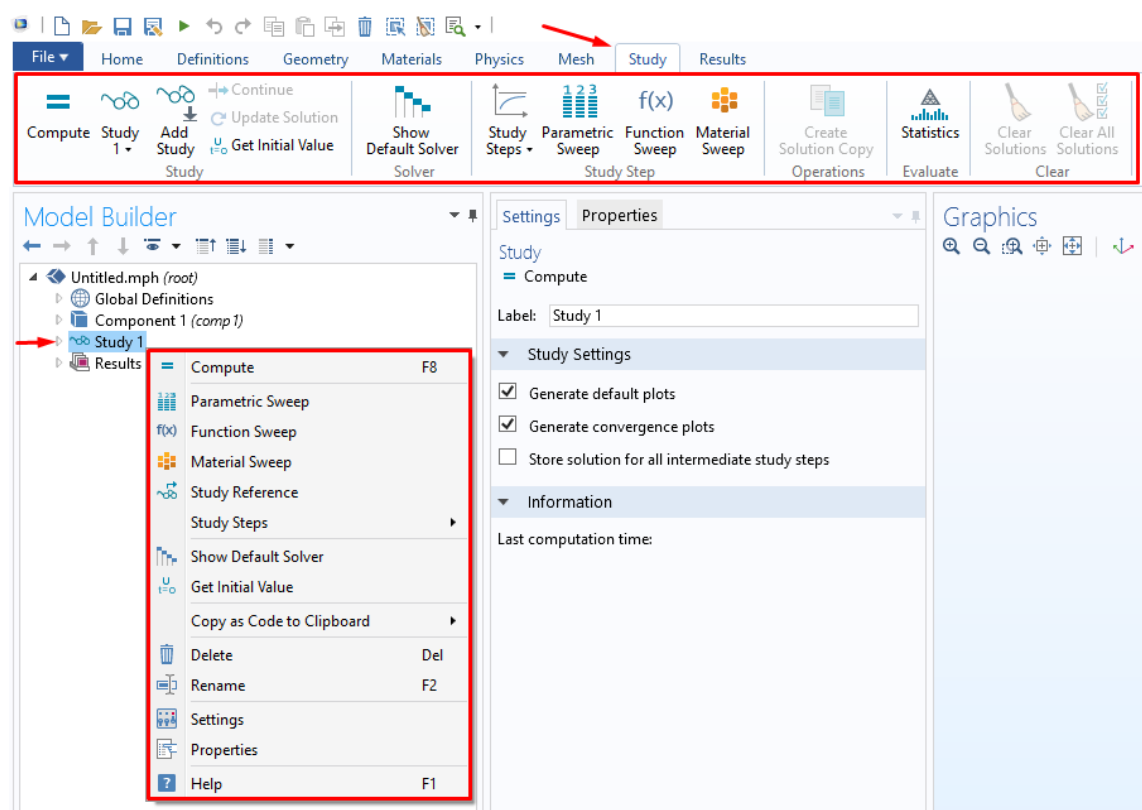
Εικόνα 3.34 Πλέγματα ηλεκτροδίων, δοκιμίου και ρυπαντικού υγρού για το μοντέλο με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού



Εικόνα 3.35 Πλέγματα κοντά στην περιοχή του ρυπαντικού υγρού για το μοντέλο με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού

3.2.2.6 Ορισμός μελέτης – τρόπου επίλυσης

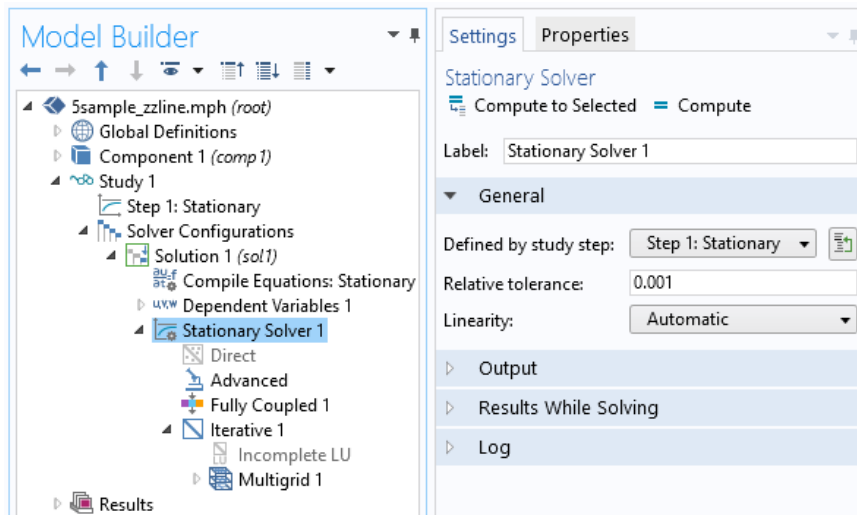
Η μελέτη (Study) που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για το μοντέλο επιλέγεται, όπως είδαμε, κατά τον ορισμό του Model Wizard. Παρ' όλα αυτά, όπως και στην περίπτωση των πακέτων φυσικής, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποια άλλη μελέτη ή να τροποποιήσει αυτή που έχει επιλεγεί, πατώντας «δεξί κλικ» στον κλάδο Study ή επιλέγοντας “Study” από τη γραμμή εργαλείων (Εικόνα 3.36). Στον κλάδο Study εμπεριέχονται υποκλάδοι και κόμβοι, στους οποίους ορίζονται όλες οι ιδιότητες σχετικά με τον τρόπο επίλυσης του μοντέλου [55].



Εικόνα 3.36 Προσθήκη και επεξεργασία μελέτης – τρόπου επίλυσης

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μελέτη “Stationary” και αυτόματα το λογισμικό προσέθεσε στον αντίστοιχο υποκλάδο τον κόμβο “Stationary Solver”, απ’ όπου ρυθμίζονται τα χαρακτηριστικά του επιλύτη (Εικόνα 3.37). Επιλέγοντας από το παράθυρο Settings του συγκεκριμένου επιλύτη “General” → “Linearity” → “Automatic”, το λογισμικό εντοπίζει αυτόματα αν το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με γραμμικό ή μη γραμμικό τρόπο και επιλέγει την πιο κατάλληλη μέθοδο επίλυσης [55].

Η επίλυση των μοντέλων βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM – Finite Element Method). Με τη FEM παράγονται εξισώσεις, που μπορούν να επιλυθούν



Εικόνα 3.37 Επιλογή και επεξεργασία επιλύτη

με αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες αποτελούν προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (ΜΔΕ) που περιγράφουν το μοντέλο. Για παράδειγμα, αν η συνάρτηση u είναι εξαρτημένη μεταβλητή σε μια ΜΔΕ (όπως το ηλεκτρικό δυναμικό), τότε μπορεί να προσεγγιστεί από μια συνάρτηση u_h χρησιμοποιώντας γραμμικούς συνδυασμούς συναρτήσεων βάσης, δηλαδή:

$$u \approx u_h = \sum_i u_i \psi_i$$

όπου ψ_i οι συναρτήσεις βάσεις και u_i οι συντελεστές των συναρτήσεων που προσεγγίζουν την u με την u_h . Η προσέγγιση των ΜΔΕ, οι οποίες στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους, επιτυγχάνεται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται διακριτοποίηση, κατά την οποία ο συνεχής γεωμετρικός χώρος του μοντέλου χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα [57].

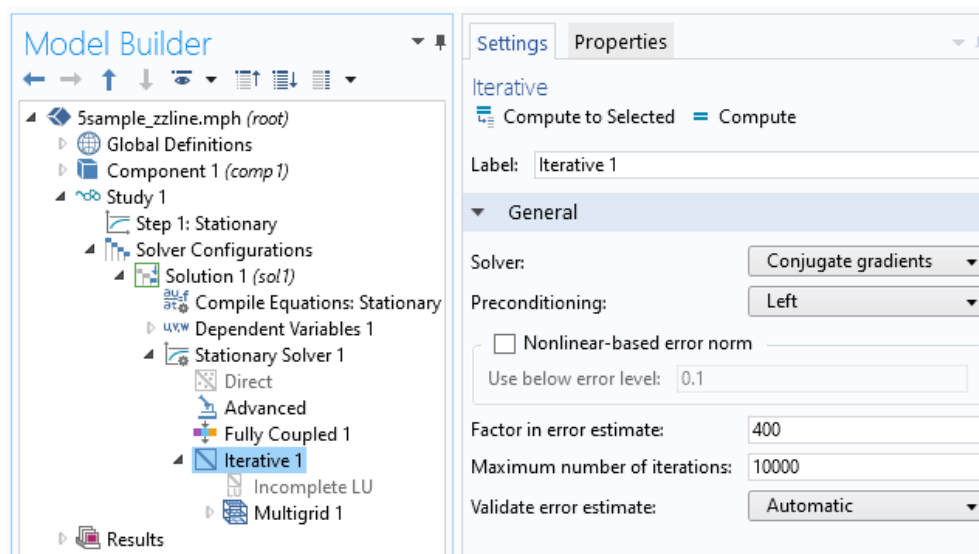
Αφού γίνει η διακριτοποίηση και επιβληθούν οι συνοριακές συνθήκες, λαμβάνεται ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων (πεπερασμένου αριθμού n) της μορφής:

$$\mathbf{A} \mathbf{u}_h = \mathbf{b}$$

όπου \mathbf{u}_h το διάνυσμα των αγνώστων $\mathbf{u}_h = \{u_1, \dots, u_i, \dots, u_n\}$, \mathbf{A} μία $n \times n$ μήτρα που περιέχει τους συντελεστές του u_i σε κάθε εξίσωση (ονομάζεται και *μήτρα ακαμψίας*) και \mathbf{b} ένα διάνυσμα μήκους n . Το σύστημα εξισώσεων που προκύπτει μπορεί να είναι γραμμικό ή μη γραμμικό [57]. Για τα μοντέλα της παρούσας εργασίας προκύπτει γραμμικό σύστημα εξισώσεων.

Για την επίλυση συστημάτων γραμμικών εξισώσεων της μορφής $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ (λύση: $\mathbf{x}_{solution} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$) χρησιμοποιούνται δύο βασικές κατηγορίες αλγορίθμων, οι άμεσοι (direct) και οι επαναληπτικοί (iterative). Οι άμεσοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί το COMSOL Multiphysics είναι οι MUMPS, PARDISO και SPOOLES, οι οποίοι βασίζονται στη μέθοδο παραγοντοποίησης LU. Οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών προσεγγίσεων επίλυσης, οι οποίες είναι παρόμοιες με τη μέθοδο συζυγών κλίσεων (conjugate gradient method). Σε αντίθεση με τους άμεσους αλγόριθμους, οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι προσεγγίζουν τη λύση σταδιακά και όχι σε ένα μεγάλο υπολογιστικό βήμα, καταναλώνοντας σημαντικά λιγότερους υπολογιστικούς πόρους και συγκλίνουν όταν το εκτιμώμενο (σχετικό) σφάλμα πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή [58].

Για τα μοντέλα στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε από το λογισμικό επαναληπτικός αλγόριθμος, βασισμένος στη μέθοδο συζυγών κλίσεων (σύγκλιση για σχετικό σφάλμα μικρότερο από 0.001, βλ. Εικόνα 3.37 → “Relative tolerance”), ως ο καταλληλότερος για την επίλυση (Εικόνα 3.38).



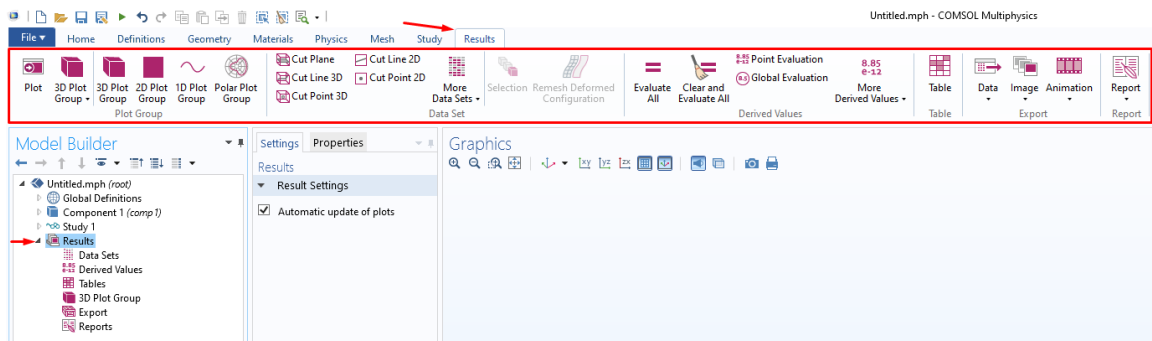
Εικόνα 3.38 Επαναληπτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση των μοντέλων

Μετά τον ορισμό της μεθόδου επίλυσης το στάδιο της σχεδίασης έχει ολοκληρωθεί και ο χρήστης μπορεί να «τρέξει» την προσομοίωση, επιλέγοντας “Compute” στον υποκλάδο Study (Εικόνα 3.36). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, στα οποία θα αναφερθούμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, εμφανίζονται στο παράθυρο Graphics και η επεξεργασία τους γίνεται στον κλάδο Results του Model Builder [55].

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων

4.1 Λήψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Αφού «τρέξει» η προσομοίωση στο COMSOL Multiphysics, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εξαγάγει και να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα, είτε επιλέγοντας “Results” από τη γραμμή εργαλείων, είτε πατώντας «δεξί κλικ» στον κλάδο Results ή σε κάποιον από τους υποκλάδους του (Εικόνα 4.1) [55].



Εικόνα 4.1 Λήψη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Για την καλύτερη οργάνωση της διαδικασίας ο κλάδος Results διαθέτει τους εξής υποκλάδους (Εικόνα 4.1) [55]:

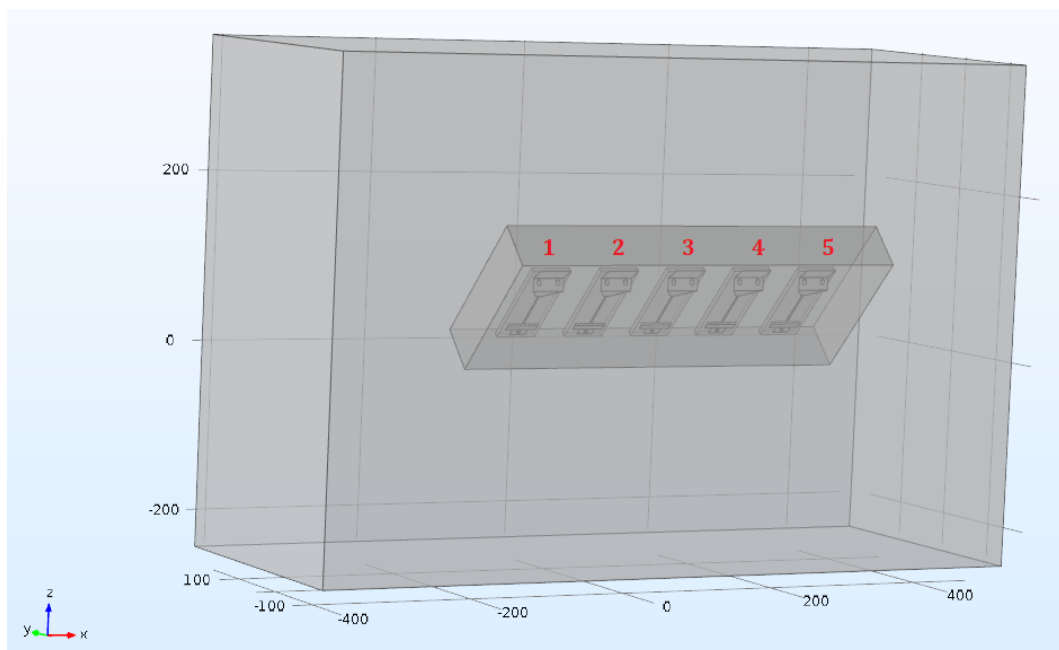
- **Data Sets:** Περιέχει όλα τα δεδομένα από τα οποία αποτελείται η λύση της προσομοίωσης. Με αυτά, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν πολλές διαφορετικές μορφές γραφημάτων και απεικονίσεων που αναπαρίστανται γραφικά στο παράθυρο Graphics. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένων μόνο δεδομένων, για την περίπτωση που είναι επιθυμητό να εξεταστούν μόνο κάποια από τα τμήματα του μοντέλου.
- **Derived Values – Tables:** Στον υποκλάδο Derived Values ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει διάφορα μεγέθη, εφαρμόζοντας κατάλληλους μαθηματικούς τελεστές στις εξαρτημένες μεταβλητές. Τα μεγέθη αυτά αποθηκεύονται σε πίνακες στον υποκλάδο Tables, όπου είναι αποθηκευμένοι και όλοι οι υπόλοιποι πίνακες δεδομένων που έχουν οριστεί.
- **Plot Groups and Plots:** Τα Plot Groups είναι ομάδες γραφημάτων (plots) που απεικονίζονται ταυτόχρονα στο παράθυρο Graphics. Για κάθε νέο Plot Group που ορίζεται δημιουργείται ένας υποκλάδος στον κλάδο Results, ανάλογα με τον

τύπου του Plot Group (3D, 2D, 1D, Polar κλπ.). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ διάφορων τύπων γραφημάτων όπως γραφικές παραστάσεις, διαγράμματα γραμμών ροής, ισοσταθμικές καμπύλες ή επιφάνειες, γραφήματα επιφάνειας ή όγκου κ.ά.

- Export: Από τον συγκεκριμένο υποκλάδο είναι δυνατή η εξαγωγή δεδομένων, εικόνων και animations (κινούμενων γραφημάτων) σε διάφορους τύπους αρχείων (PNG, JPEG, GIF κλπ.).
- Reports: Από εδώ ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει αναφορές σε αρχεία μορφής HTML ή Microsoft® Word, τα οποία περιέχουν ρυθμίσεις, επιλογές, σχόλια, γραφήματα και άλλες πληροφορίες για το μοντέλο.

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη των κατανομών του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην επιφάνεια των δοκιμίων και κυρίως στο τμήμα μεταξύ των ηλεκτροδίων, όπου ρέει το ρυπαντικό υγρό. Έτσι, ορίστηκαν γραφήματα επιφάνειας (Surface plots) για την απεικόνιση των κατανομών αυτών στην επιφάνεια των δοκιμίων, καθώς και γραφικές παραστάσεις (Graphs) των δύο μεγεθών κατά μήκος ευθύγραμμων τμημάτων (Cut lines) σε επιλεγμένα τμήματα του μοντέλου.

Σε κάθε μοντέλο τα δοκίμια έχουν αριθμηθεί από τα αριστερά προς τα δεξιά (από την οπτική ενός εξωτερικού παρατηρητή), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

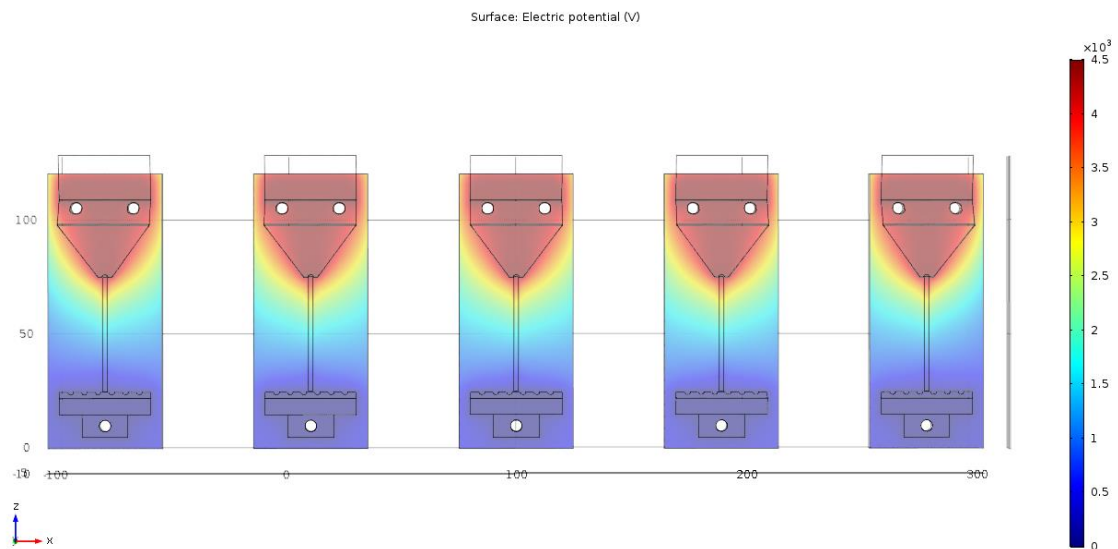


Εικόνα 4.2 Παράδειγμα αρίθμησης δοκιμίων για τις ανάγκες της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, στο μοντέλο δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού

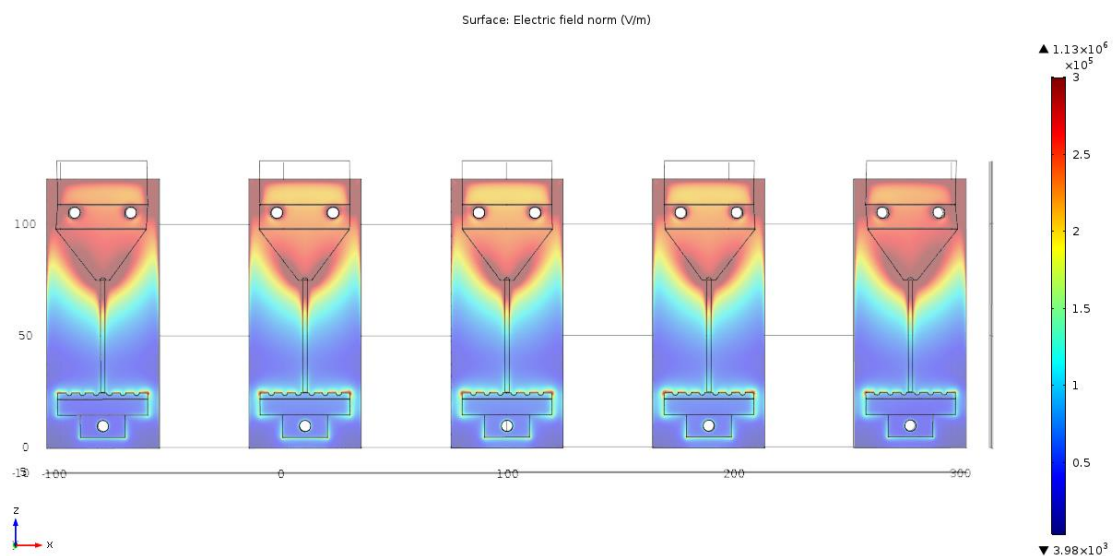
4.2 Αποτελέσματα μοντέλων με δοκίμια κατά IEC 60587

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν από κοινού, σε μορφή γραφημάτων, τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων (ευθεία και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού) με δοκίμια που σχεδιάστηκαν με βάση το πρότυπο IEC 60587 [41] (βλ. §3.2.2.2).

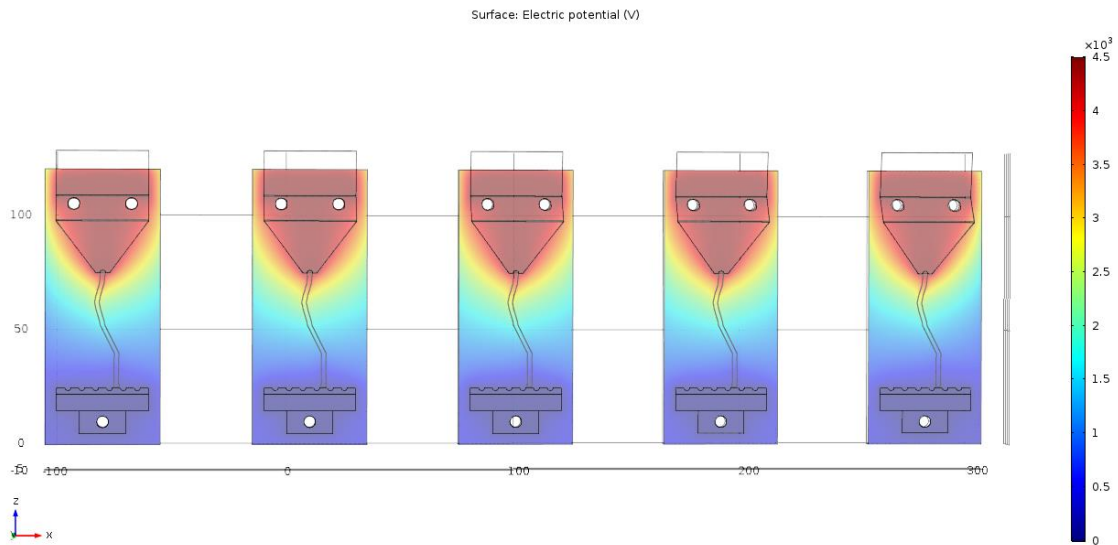
Αρχικά, παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων (Σχήματα 4.1 – 4.4).



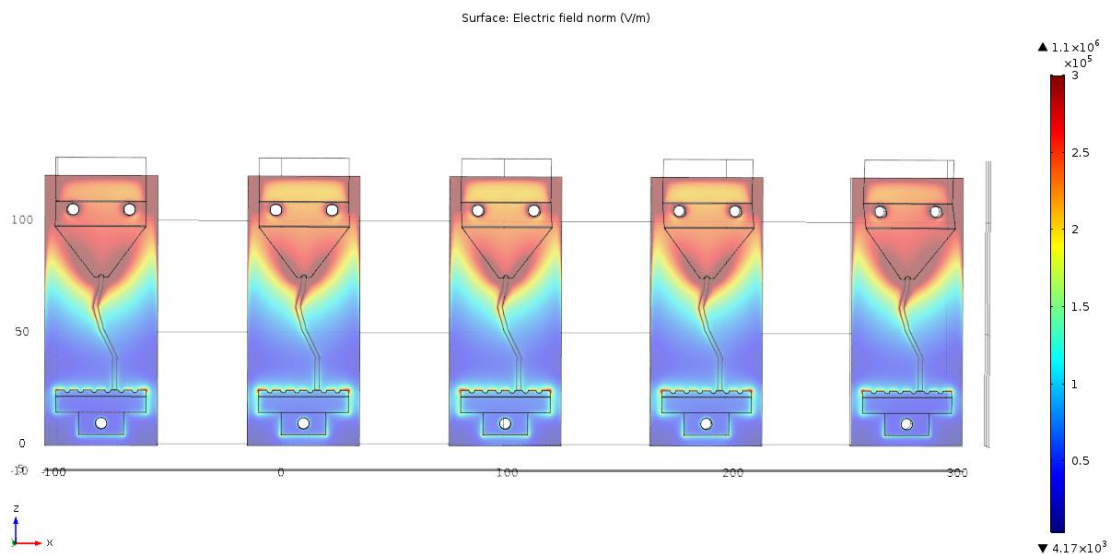
Σχήμα 4.1 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.2 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού



Σχήμα 4.3 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



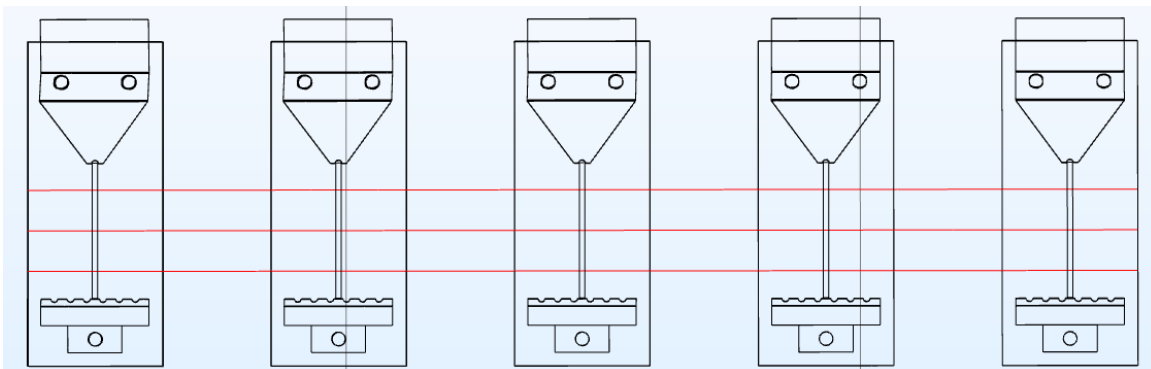
Σχήμα 4.4 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού το ηλεκτρικό δυναμικό (Σχήματα 4.1 και 4.3) είναι μέγιστο στην περιοχή του ηλεκτροδίου υψηλού δυναμικού και μειώνεται σταδιακά όσο πλησιάζουμε προς το κάτω (γειωμένο) ηλεκτρόδιο, όπως αναμενόταν. Το ηλεκτρικό πεδίο (Σχήματα 4.2 και 4.4) λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές στην περιοχή του ηλεκτροδίου υψηλού δυναμικού σε σχέση με την υπόλοιπη επιφάνεια των

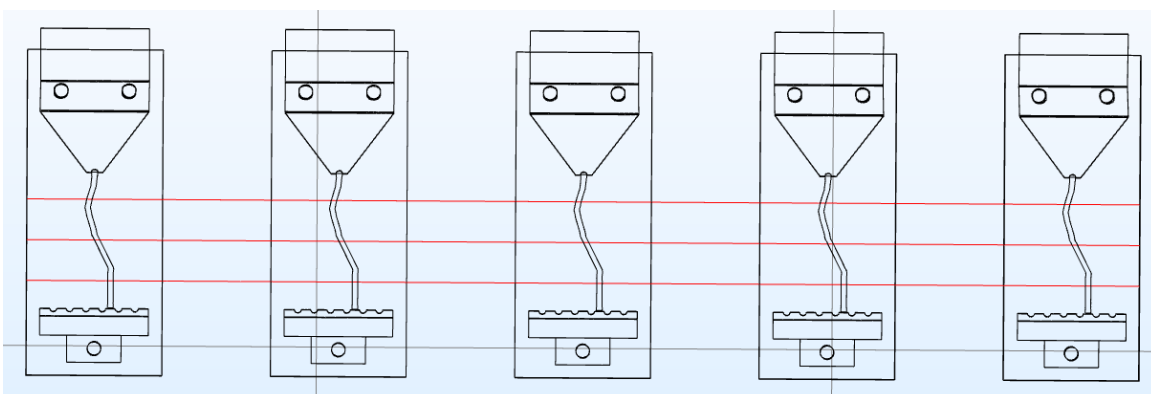
δοκιμίων. Ταυτόχρονα, όσον αφορά την περιοχή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων κάθε δοκιμίου, παρατηρούνται τοπικές αυξήσεις του ηλεκτρικού πεδίου στις αιχμές («μύτες») των ηλεκτροδίων, στα σύνορα μεταξύ δοκιμίων και αέρα και κατά μήκος της διαδρομής του ρυπαντικού υγρού, ιδιαίτερος στα όρια αυτής.

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις για τα δύο μοντέλα. Σε κάθε γραφική παράσταση φαίνεται το μέτρο του μετρούμενου μεγέθους κατά μήκος ενός ευθυγράμμου τμήματος (Cut line).

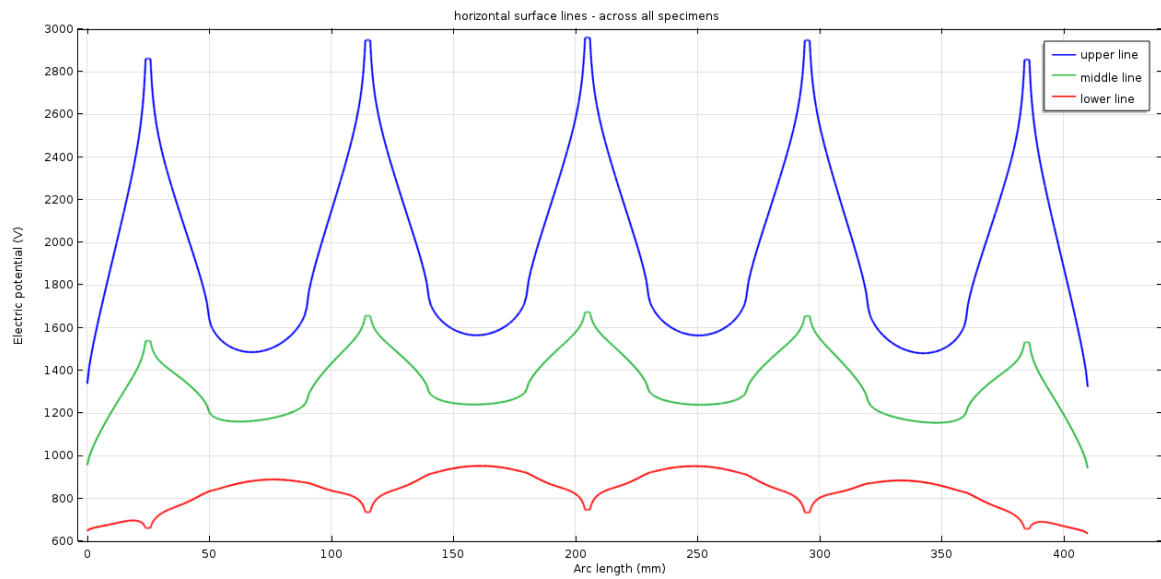
Στα Σχήματα 4.5 – 4.8 φαίνονται οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος τριών οριζόντιων Cut lines που ορίσαμε επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων (Εικόνες 4.3 και 4.4), οι οποίες διασχίζουν όλη τη διάταξη των δοκιμίων στον άξονα x. Η μεσαία Cut line (middle line) περνάει από το μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ($z = 50mm$), ενώ οι άλλες δύο απέχουν από τη μεσαία $15mm$ ($z = 65mm$, upper line και $z = 35mm$, lower line).



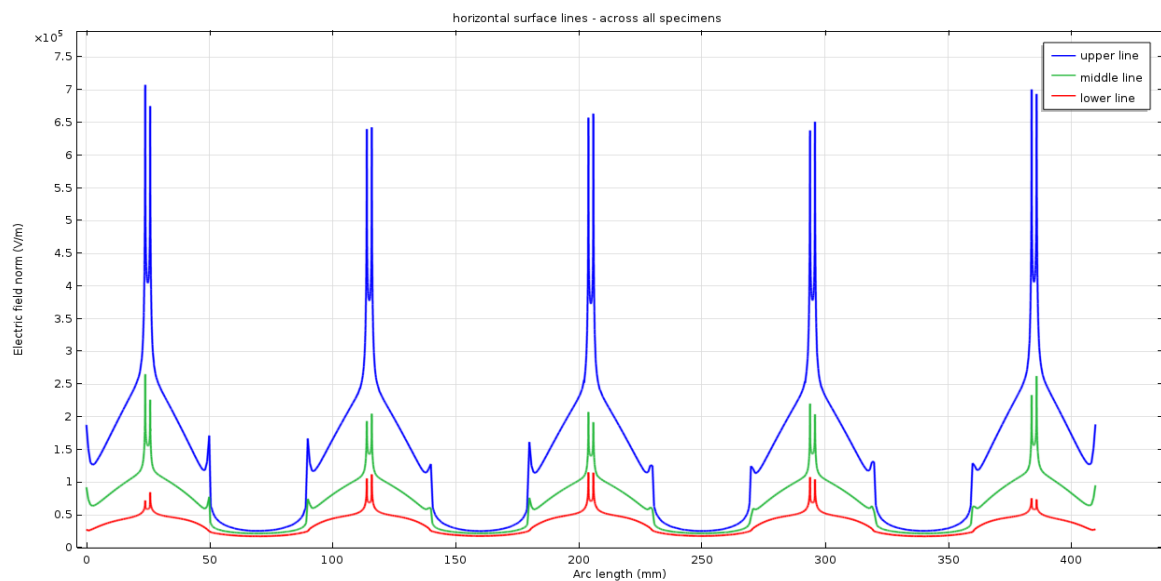
Εικόνα 4.3 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και στον αέρα (στις θέσεις $z = 65mm$, $z = 50mm$ και $z = 35mm$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.5 και 4.6



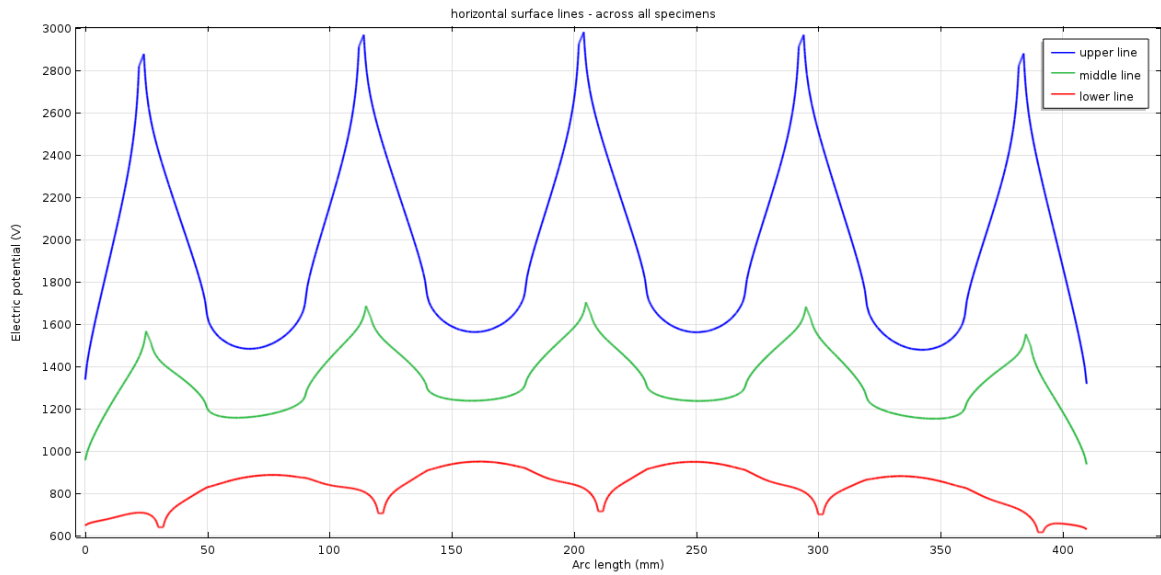
Εικόνα 4.4 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και στον αέρα (στις θέσεις $z = 65mm$, $z = 50mm$ και $z = 35mm$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.7 και 4.8



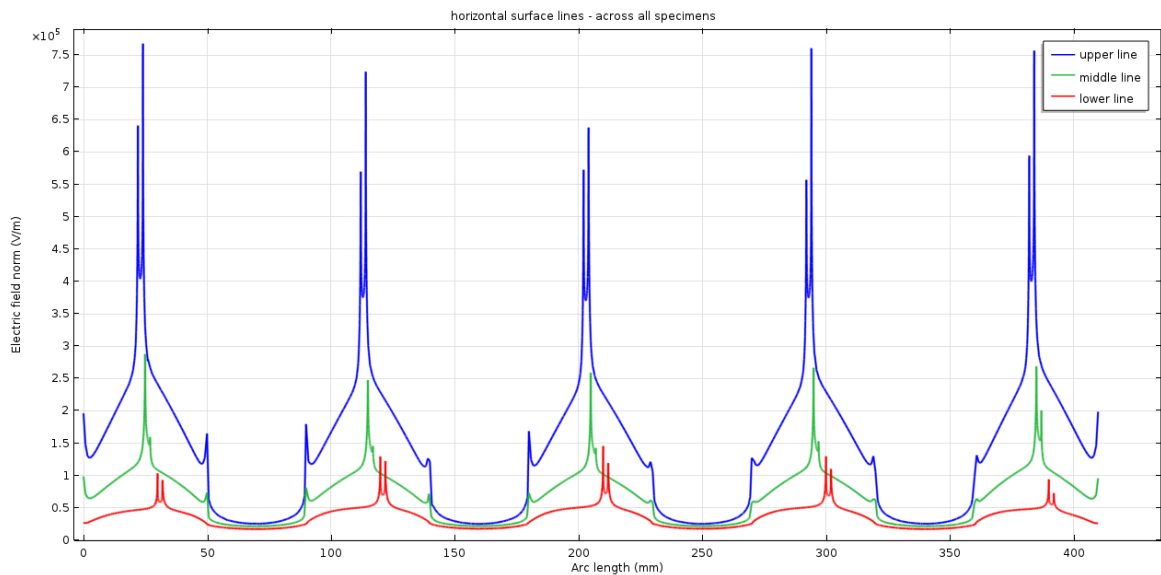
Σχήμα 4.5 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και στον αέρα, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.3, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.6 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και στον αέρα, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.3, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.7 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και στον αέρα, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.4, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



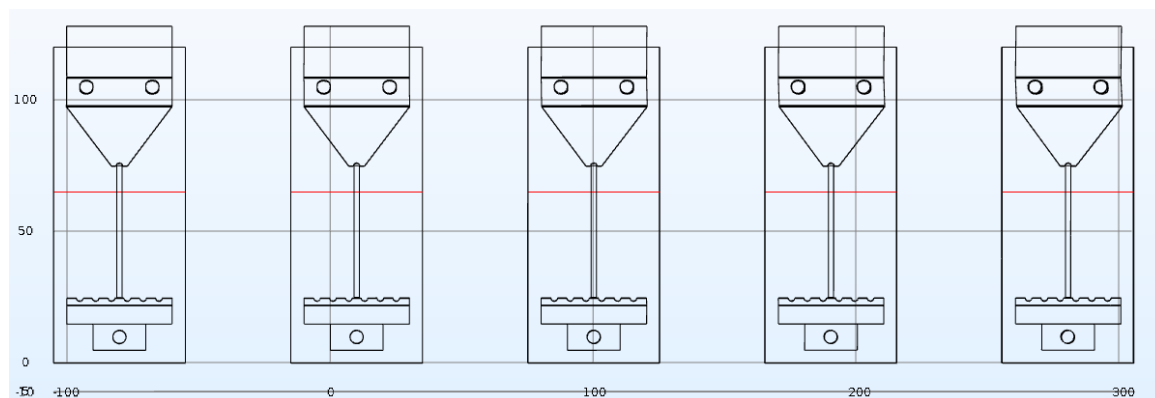
Σχήμα 4.8 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] και στον αέρα, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.4, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Το ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος των upper και middle lines και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού (Σχήματα 4.5 και 4.7), γίνεται μέγιστο στην περιοχή της επιφάνειας των δοκιμίων όπου βρίσκεται το ρυπαντικό υγρό και μειώνεται

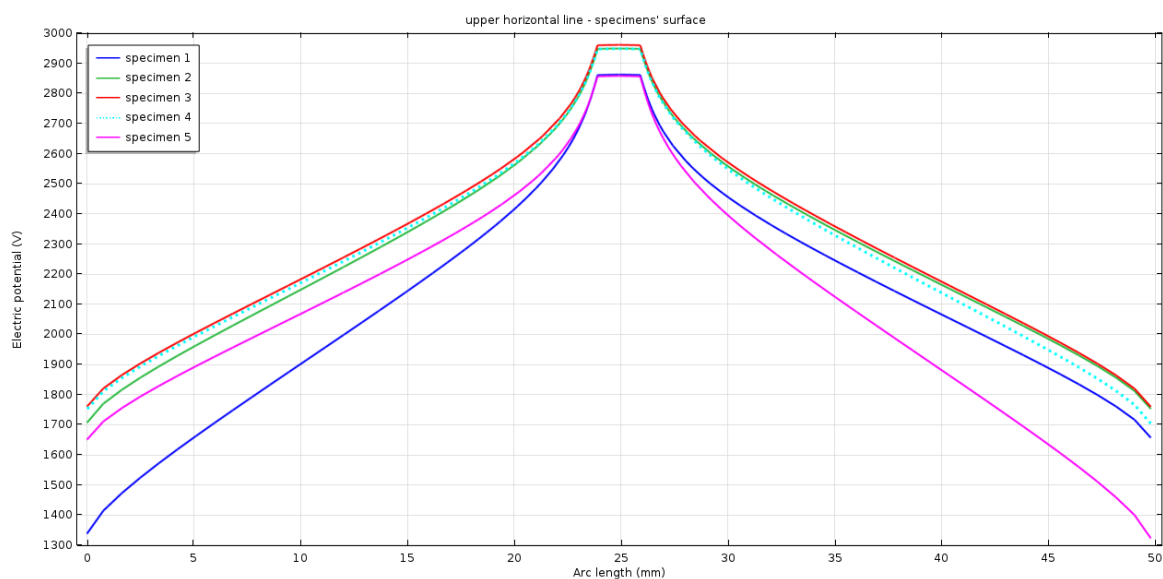
καθώς πλησιάζουμε προς τα σύνορα μεταξύ δοκιμίων και αέρα. Το αντίθετο συμβαίνει κατά μήκος της lower line, που βρίσκεται πιο κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Επίσης, παρατηρούμε πως το δυναμικό λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές στα τρία μεσαία δοκίμια (δοκίμια 2, 3 και 4) σε σχέση με τα δύο ακριανά (δοκίμια 1 και 5) και στις τρεις Cut lines.

Και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού το ηλεκτρικό πεδίο (Σχήματα 4.6 και 4.8) παρουσιάζει σημαντική αύξηση στην περιοχή όπου βρίσκεται το ρυπαντικό υγρό και ιδιαίτερα στα όρια αυτής, κατά μήκος και των τριών Cut lines. Οι μεγαλύτερες τιμές του πεδίου εντοπίζονται κατά μήκος της upper line που βρίσκεται πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού και οι μικρότερες κατά μήκος της lower line που βρίσκεται πιο κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο, ενώ ενδιάμεσες είναι οι τιμές που λαμβάνει το πεδίο κατά μήκος της middle line. Ακόμη, παρατηρούμε τοπική αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου στα σύνορα δοκιμίων – αέρα κατά μήκος των upper και middle lines, κάτι που δε συμβαίνει κατά μήκος της lower line. Τέλος, το ηλεκτρικό πεδίο είναι αυξημένο στα δοκίμια 1 και 5 σε σχέση με τα τρία μεσαία δοκίμια (δοκίμια 2, 3 και 4) στις upper και middle lines, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στη lower line.

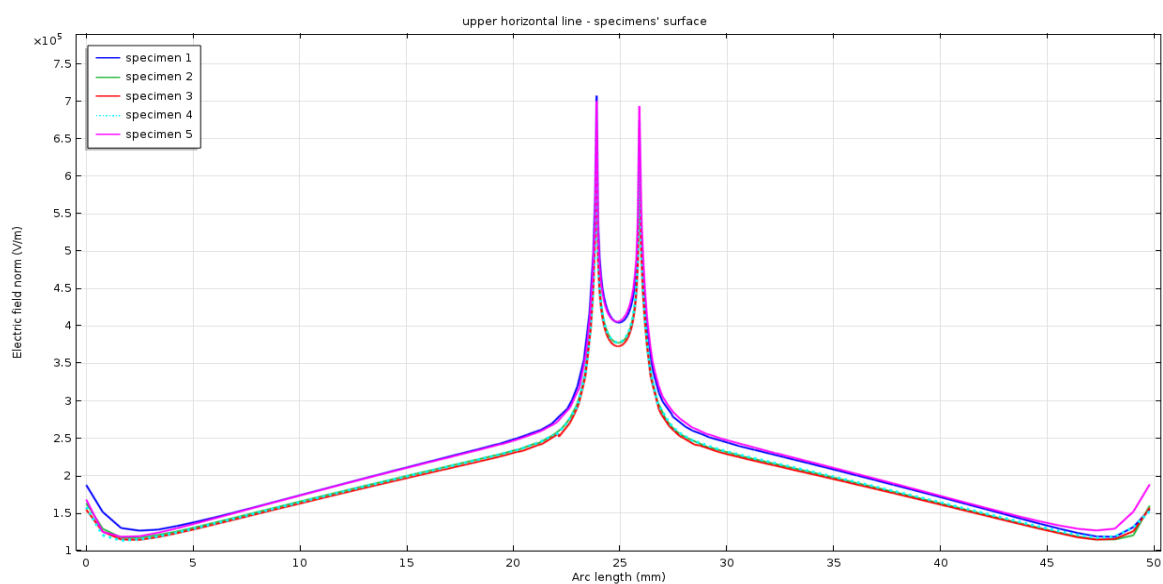
Για να είναι πιο ευδιάκριτες οι διαφορές στα μετρούμενα μεγέθη μεταξύ των δοκιμίων κάθε μοντέλου, ορίσαμε για κάθε δοκίμιο τρεις οριζόντιες Cut lines στις ίδιες θέσεις στον άξονα z ($z = 65\text{mm}$, $z = 50\text{mm}$ και $z = 35\text{mm}$) με αυτές που φαίνονται στις Εικόνες 4.3 και 4.4, οι οποίες περιορίζονται στην επιφάνεια των δοκιμίων και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα σε κοινή γραφική παράσταση για καθεμία. Πρώτα, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις από τις οριζόντιες Cut lines που βρίσκονται σε ύψος $z = 65\text{mm}$ (upper lines) επάνω στην επιφάνεια κάθε δοκιμίου (Εικόνες 4.5 και 4.6).



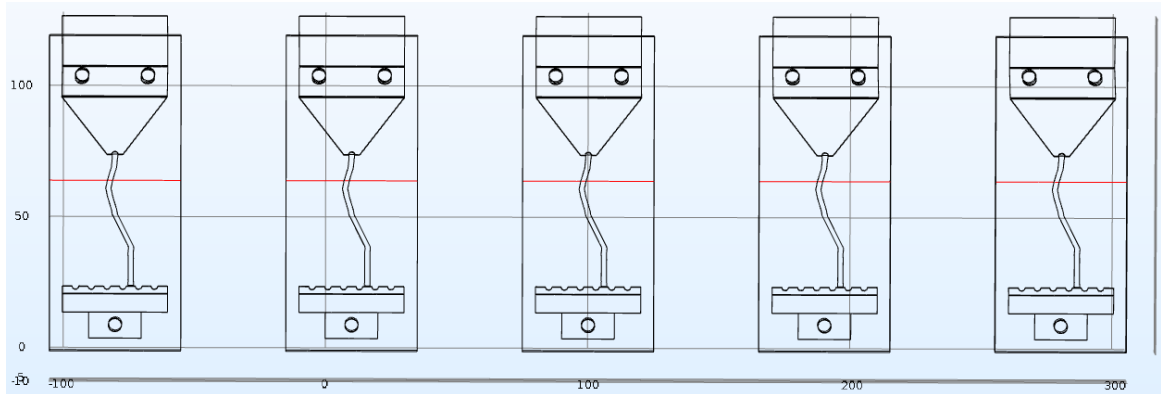
Εικόνα 4.5 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (στη θέση $z = 65\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.9 και 4.10



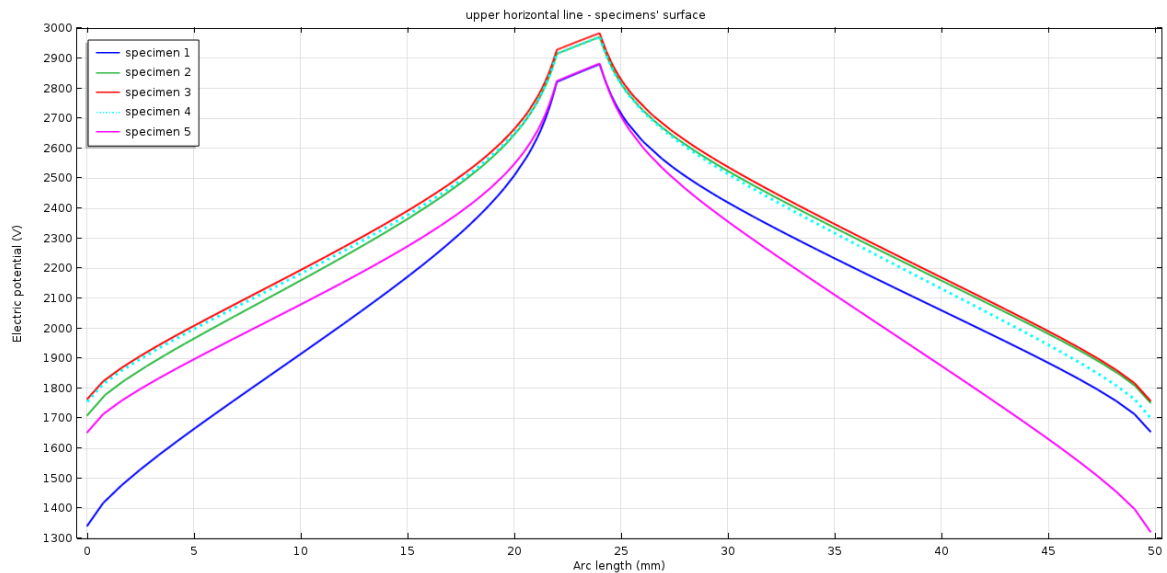
Σχήμα 4.9 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.5, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



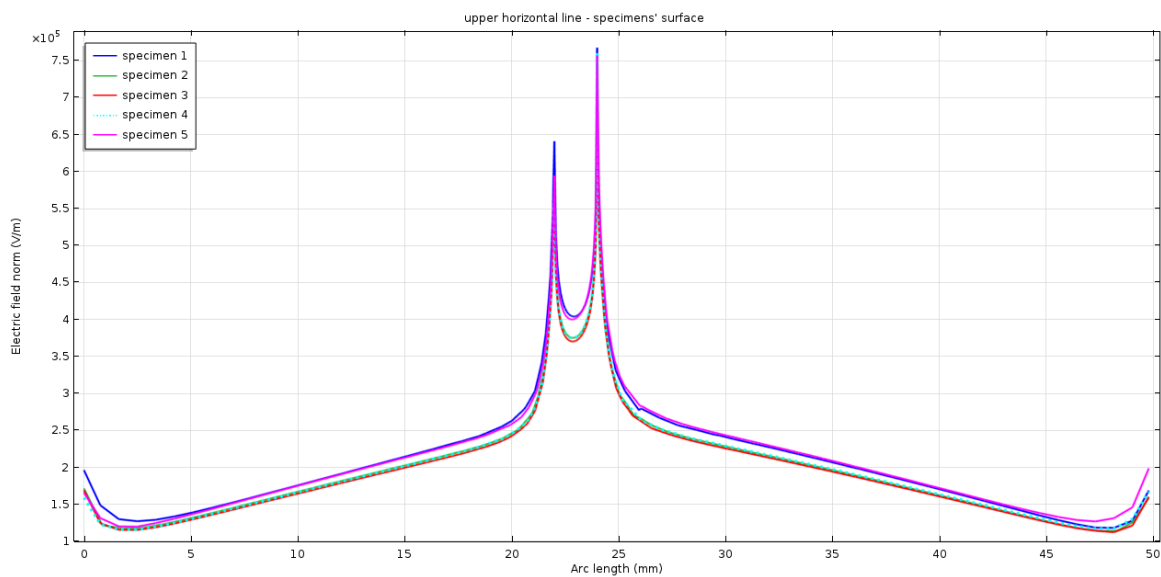
Σχήμα 4.10 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.5, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Εικόνα 4.6 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (στη θέση $z = 65\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.11 και 4.12



Σχήμα 4.11 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.6, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.12 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.6, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

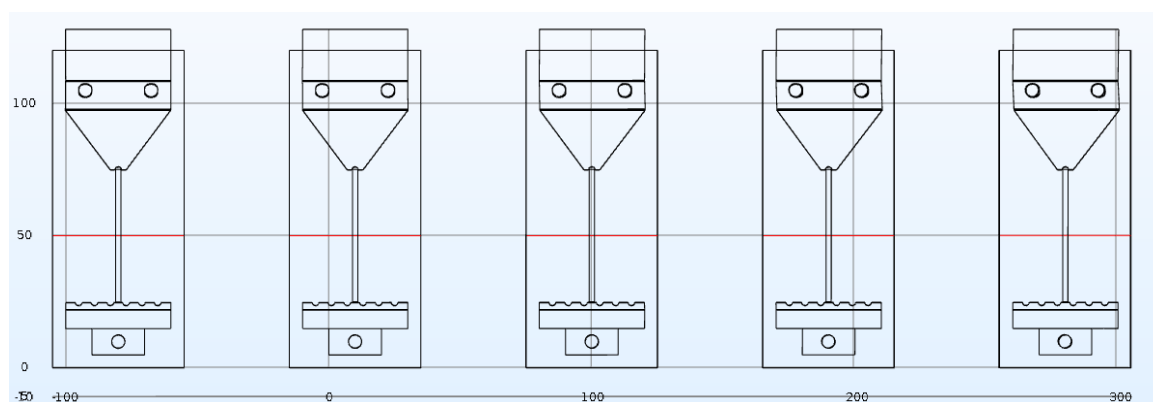
Οι παρατηρήσεις που έγιναν για το ηλεκτρικό δυναμικό στα Σχήματα 4.5 και 4.7 επιβεβαιώνονται και από τα Σχήματα 4.9 και 4.11 και μάλιστα βλέπουμε πως οι μεγαλύτερες τιμές δυναμικού εντοπίζονται στο μεσαίο δοκίμιο (δοκίμιο 3) και για τις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού. Ακόμη, η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων, δεξιά και αριστερά του ρυπαντικού υγρού, δεν είναι συμμετρική στα δοκίμια 1 και 5 αλλά ούτε και στα δοκίμια 2 και 4 σε μικρότερο βαθμό. Συγκεκριμένα, φαίνεται πως το δυναμικό είναι αυξημένο στην πλευρά (εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού) που έχει περισσότερα γειτονικά δοκίμια. Για παράδειγμα, το δοκίμιο 1 έχει τέσσερα γειτονικά δοκίμια δεξιά του και κανένα στα αριστερά του, οπότε το δυναμικό είναι υψηλότερο στο τμήμα της επιφάνειας του δοκιμίου 1 που βρίσκεται δεξιά του ρυπαντικού υγρού. Τέλος, παρατηρούμε πως στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού το δυναμικό στο δεξί όριο του ρυπαντικού υγρού είναι υψηλότερο σε σχέση με το δυναμικό στο αριστερό όριο. Αυτό, οφείλεται στο ότι η Cut line δεν διαπερνά κάθετα τις ακμές του ρυπαντικού υγρού, με αποτέλεσμα τα σημεία στα οποία το τέμνει να μην ισαπέχουν από το πάνω άκρο του.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν για το ηλεκτρικό πεδίο στα Σχήματα 4.6 και 4.8 επιβεβαιώνονται και από τα Σχήματα 4.10 και 4.12. Και στα δύο μοντέλα οι μικρότερες

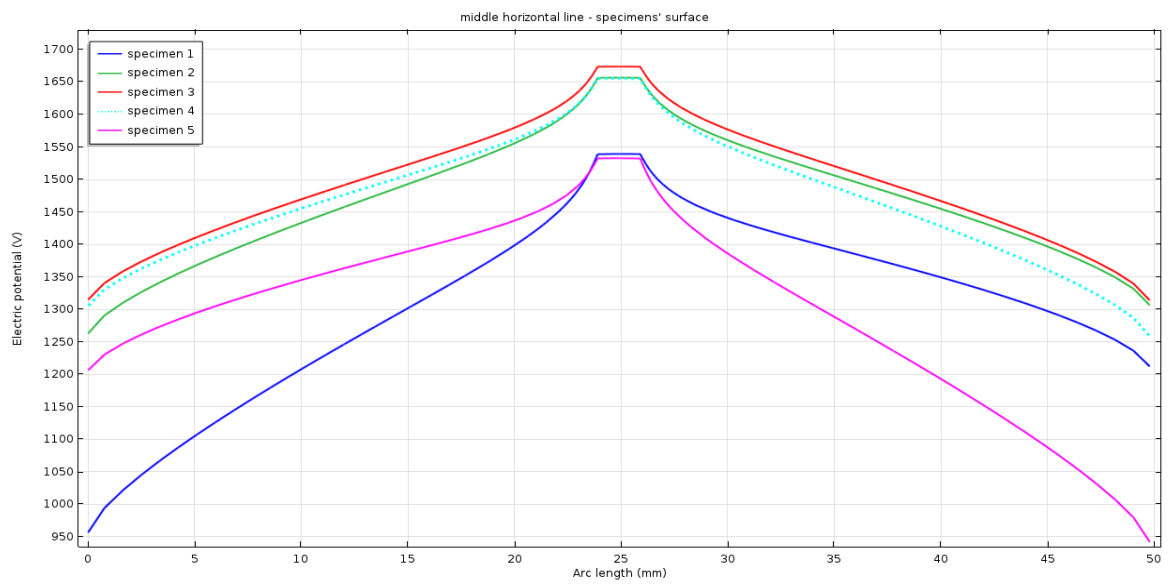
τιμές του ηλεκτρικού πεδίου εντοπίζονται στο μεσαίο δοκίμιο (δοκίμιο 3), με μικρή διαφορά σε σχέση με τα δοκίμια 2 και 4. Η ασυμμετρία που παρατηρήθηκε στην κατανομή του δυναμικού, εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού, εντοπίζεται και στο ηλεκτρικό πεδίο σε αρκετά μικρότερο βαθμό και κυρίως στα δοκίμια 1 και 5. Η ασυμμετρία γίνεται εντονότερη κοντά στα σύνορα των δοκιμίων με τον αέρα, ενώ σε αντίθεση με το δυναμικό, το ηλεκτρικό πεδίο είναι αυξημένο στην πλευρά που έχει τα λιγότερα γειτονικά δοκίμια (αριστερά του ρυπαντικού υγρού για τα δοκίμια 1 και 2 και δεξιά του ρυπαντικού υγρού για τα δοκίμια 4 και 5). Τέλος, παρατηρούμε πως ενώ στην περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού οι τιμές του πεδίου στα όρια του ρυπαντικού υγρού είναι πολύ κοντά, αυτό δεν ισχύει όταν η διαδρομή είναι ακανόνιστη. Στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού παρατηρείται σε όλα τα δοκίμια αυξημένη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο δεξί όριο του ρυπαντικού υγρού, όπως συμβαίνει και με το δυναμικό.

Όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω, οι τιμές των κορυφών του ηλεκτρικού πεδίου στα όρια του ρυπαντικού υγρού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του πλέγματος των μοντέλων (βλ. Σχήμα 4.29). Έτσι, αποφεύγουμε να κάνουμε συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων στα σημεία αυτά και αντ' αυτού συγκρίνουμε τις τιμές του πεδίου στο τμήμα μεταξύ των ορίων του ρυπαντικού υγρού, όπου στην προκειμένη περίπτωση (Σχήματα 4.10 και 4.12) δεν παρατηρούνται διαφορές.

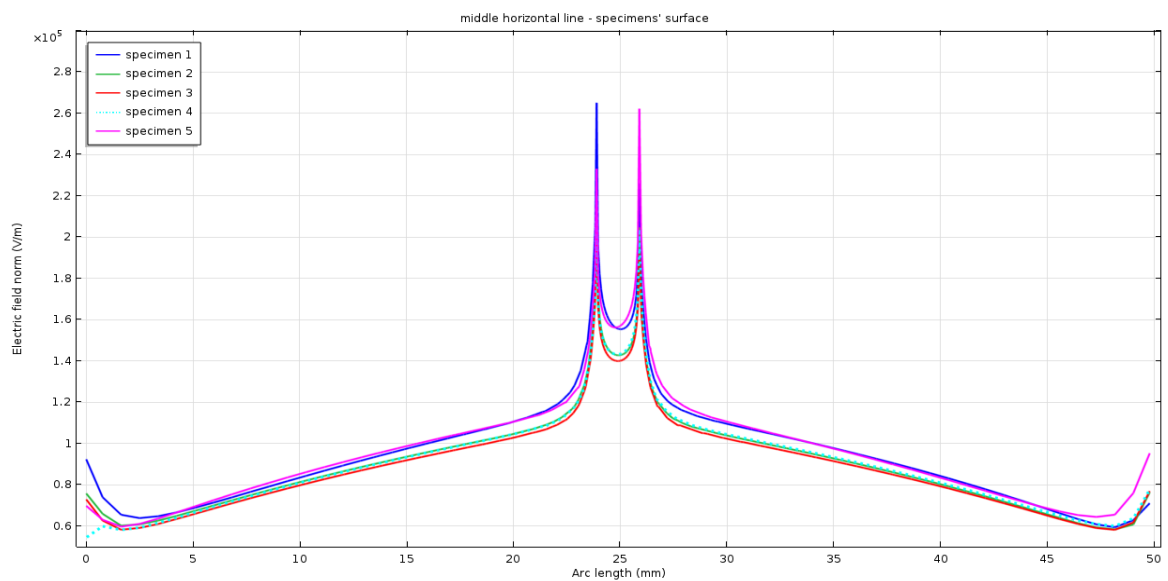
Συνεχίζοντας, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις από τις οριζόντιες Cut lines που βρίσκονται σε ύψος $z = 50\text{mm}$ (middle lines) επάνω στην επιφάνεια κάθε δοκιμίου (Εικόνες 4.7 και 4.8).



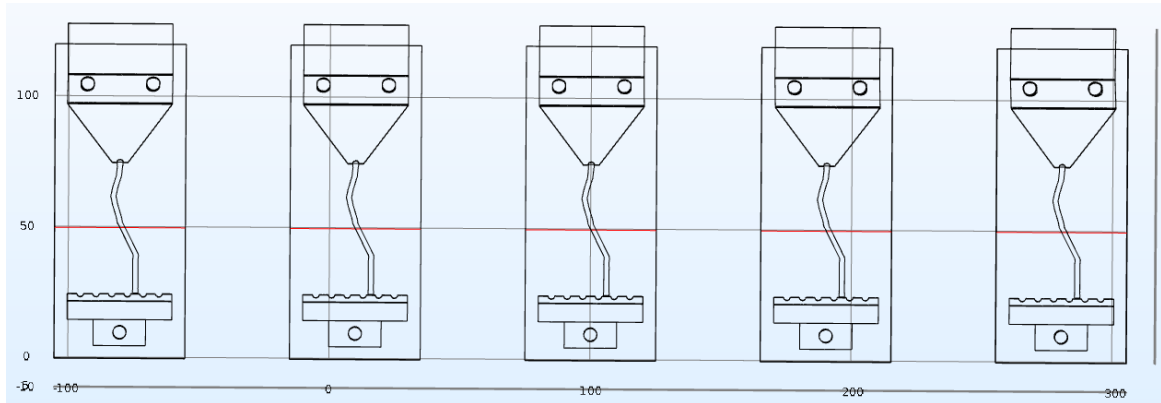
Εικόνα 4.7 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (στη θέση $z = 50\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.13 και 4.14



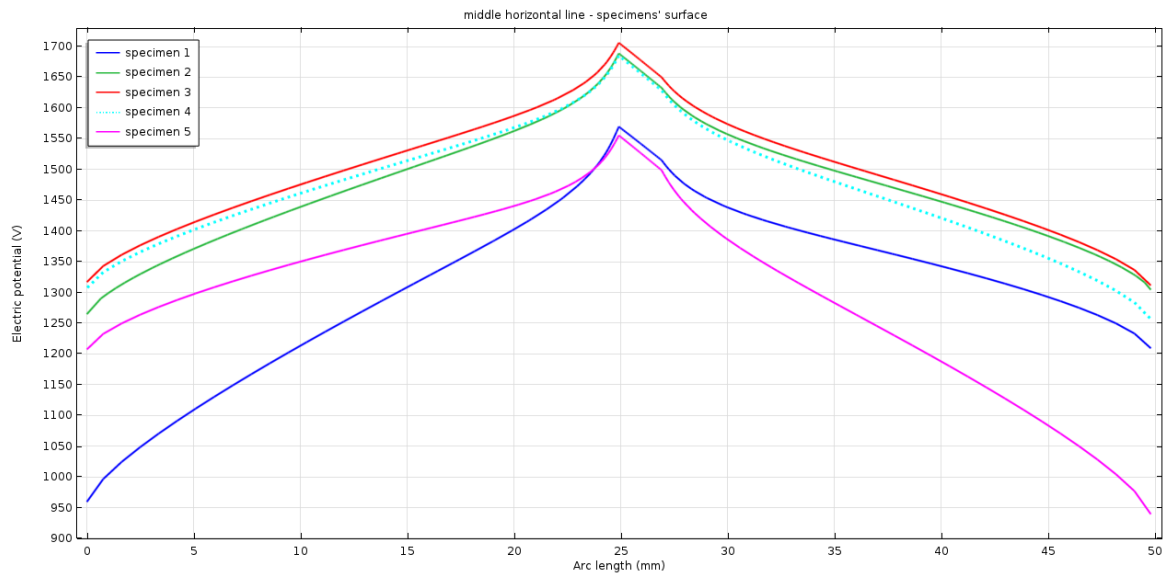
Σχήμα 4.13 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.7, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



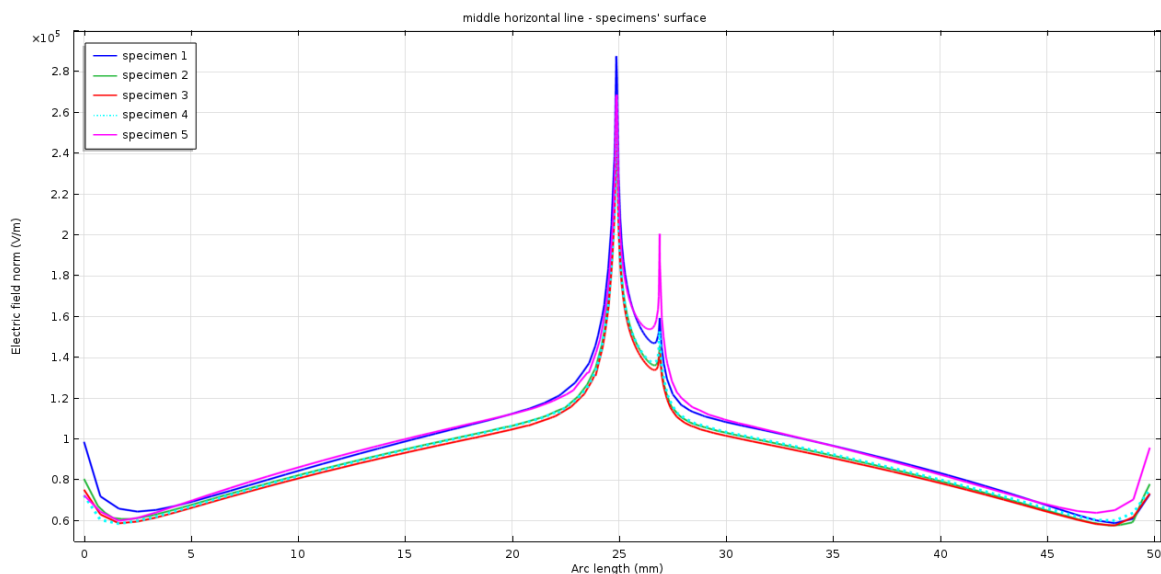
Σχήμα 4.14 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.7, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Εικόνα 4.8 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (στη θέση $z = 50\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.15 και 4.16



Σχήμα 4.15 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.8, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.16 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.8, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

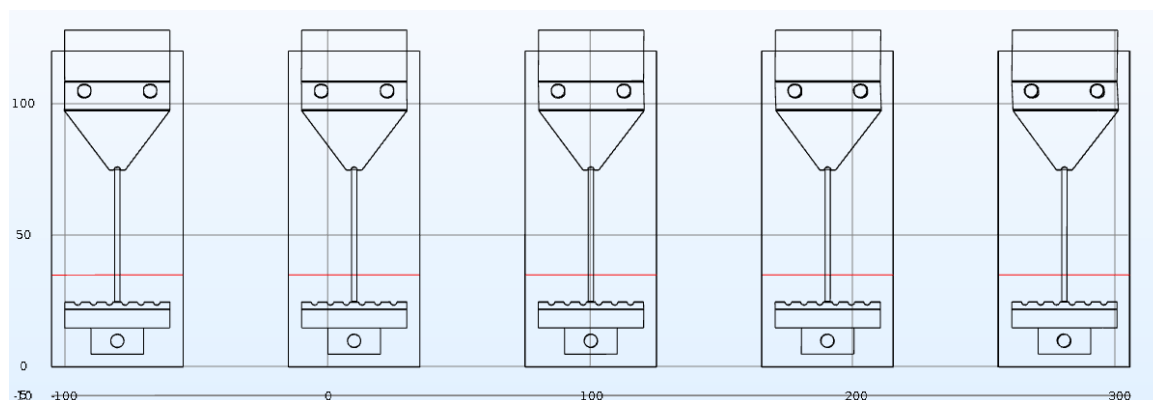
Οι περισσότερες από τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά μήκος των upper lines (Σχήματα 4.9 – 4.12) ισχύουν και για τις middle lines (Σχήματα 4.13 – 4.16), όπου βέβαια οι τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου είναι μικρότερες, αφού η απόσταση από το ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού είναι μεγαλύτερη.

Μια διαφορά που παρατηρούμε είναι ότι στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού (Σχήματα 4.15 και 4.16), οι μέγιστες τιμές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου εντοπίζονται στο αριστερό και όχι στο δεξί όριο του ρυπαντικού υγρού. Αυτό συμβαίνει διότι στο ύψος των middle lines η πορεία του ρυπαντικού υγρού είναι διαφορετική σε σχέση με τις upper lines, ενώ και πάλι η Cut line δε διαπερνά κάθετα τις ακμές του.

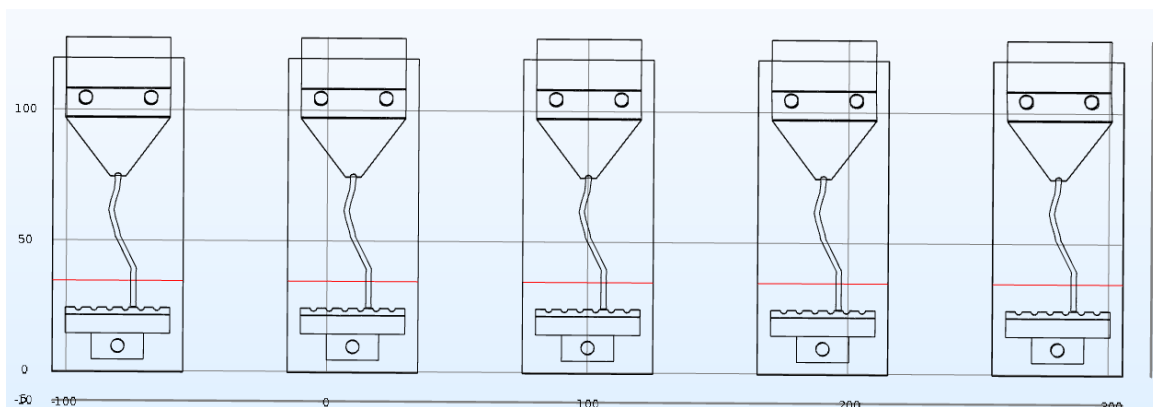
Ακόμη, εξετάζοντας τις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 4.14 για τα δοκίμια 1 και 5, βλέπουμε πως η ασυμμετρία που είχαμε παρατηρήσει κατά μήκος των upper lines υφίσταται και εδώ, και μάλιστα είναι ορατή και στα όρια του ρυπαντικού υγρού. Η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή, είναι αυξημένη στο όριο του ρυπαντικού υγρού που απέχει περισσότερο από τα γειτονικά δοκίμια (αριστερό όριο ρυπαντικού υγρού στο δοκίμιο 1 και δεξί όριο στο δοκίμιο 5). Η ασυμμετρία αυτή υφίσταται και στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού (Σχήμα 4.16), παρ' όλο που, για

τους λόγους που προαναφέραμε, η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου εντοπίζεται στο αριστερό όριο του ρυπαντικού υγρού τόσο στο δοκίμιο 1 όσο και στο δοκίμιο 5. Συγκρίνοντας τις γραφικές παραστάσεις των δοκιμίων 1 και 5 στο Σχήμα 4.16, βλέπουμε πως στο αριστερό όριο του ρυπαντικού υγρού η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου είναι υψηλότερη στο δοκίμιο 1, ενώ στο δεξιό όριο του ρυπαντικού υγρού το πεδίο είναι μεγαλύτερο στο δοκίμιο 5. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ορίων του ρυπαντικού υγρού λαμβάνει μικρότερες τιμές στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής, κυρίως στα δοκίμια 1 και 5.

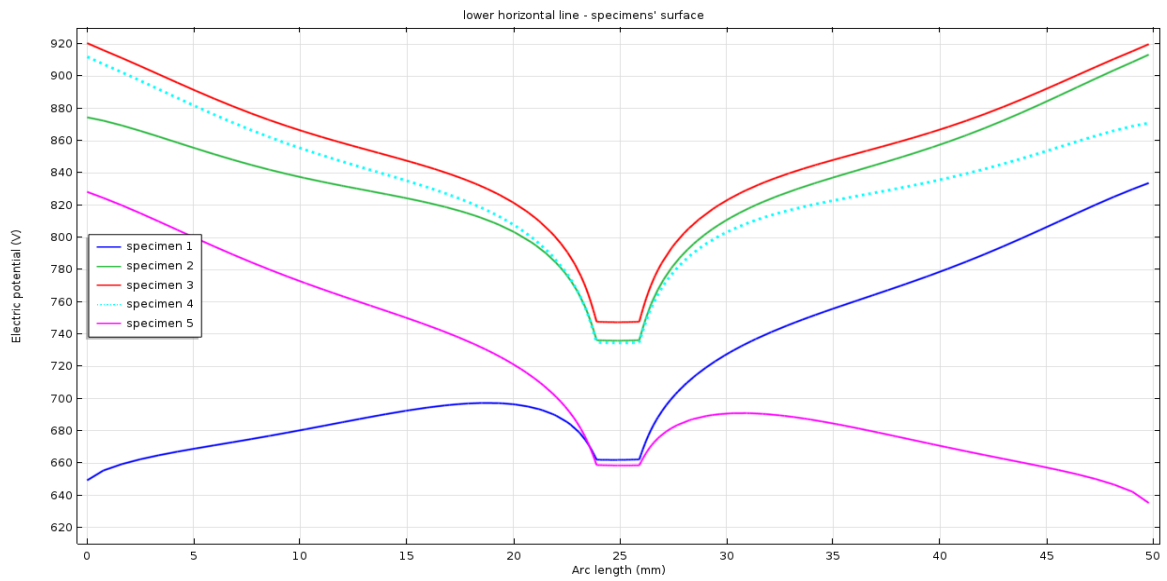
Τέλος, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις από τις οριζόντιες Cut lines που βρίσκονται σε ύψος $z = 35\text{mm}$ (lower lines) επάνω στην επιφάνεια κάθε δοκιμίου (Εικόνες 4.9 και 4.10).



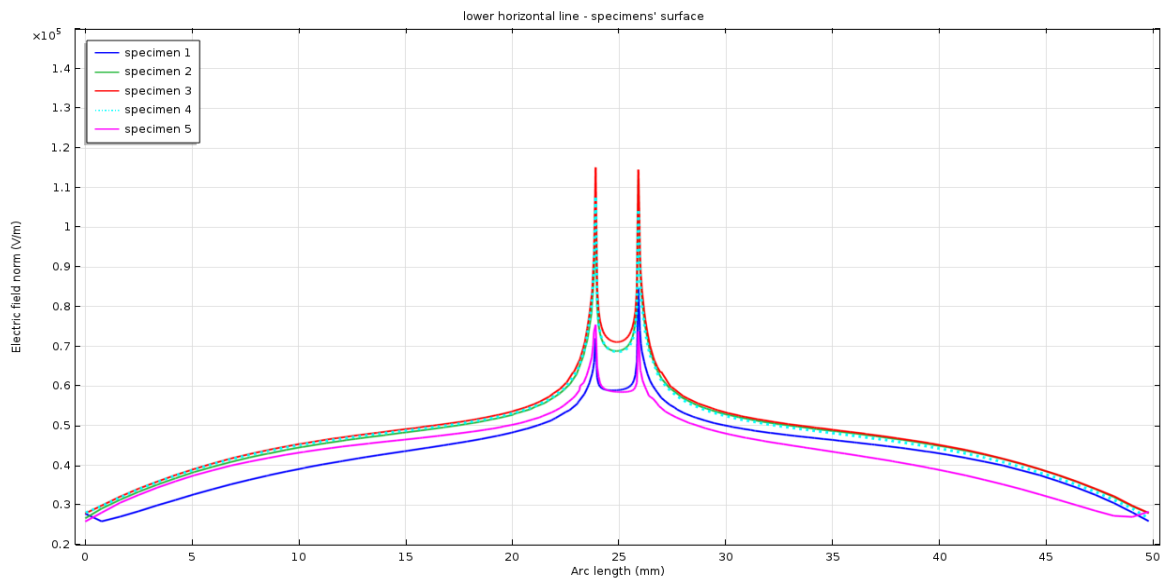
Εικόνα 4.9 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (στη θέση $z = 35\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.17 και 4.18



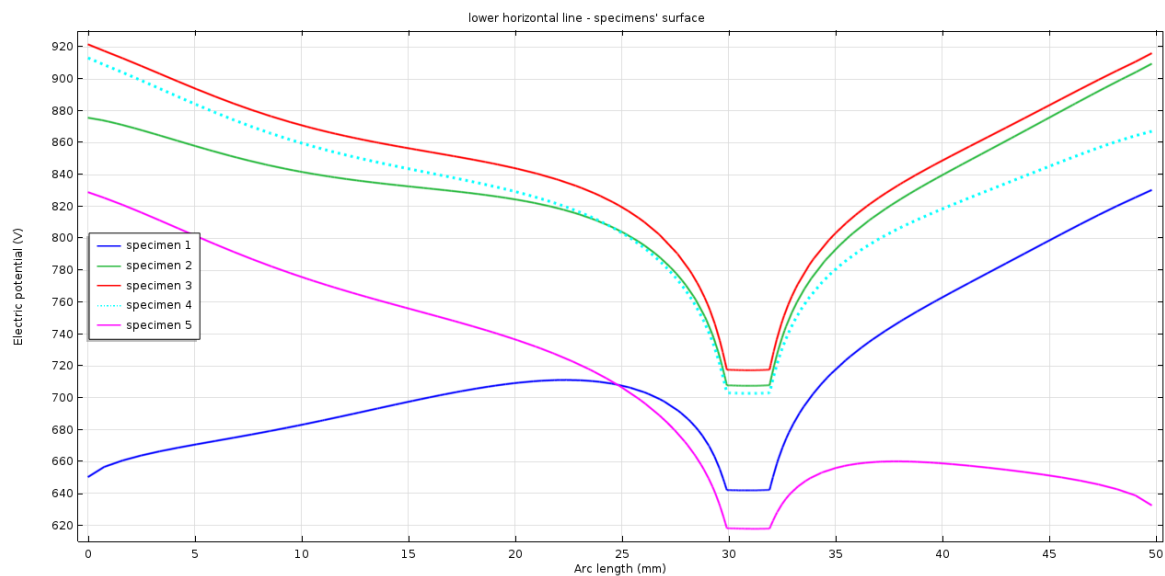
Εικόνα 4.10 Οριζόντιες Cut lines επάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (στη θέση $z = 35\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.19 και 4.20



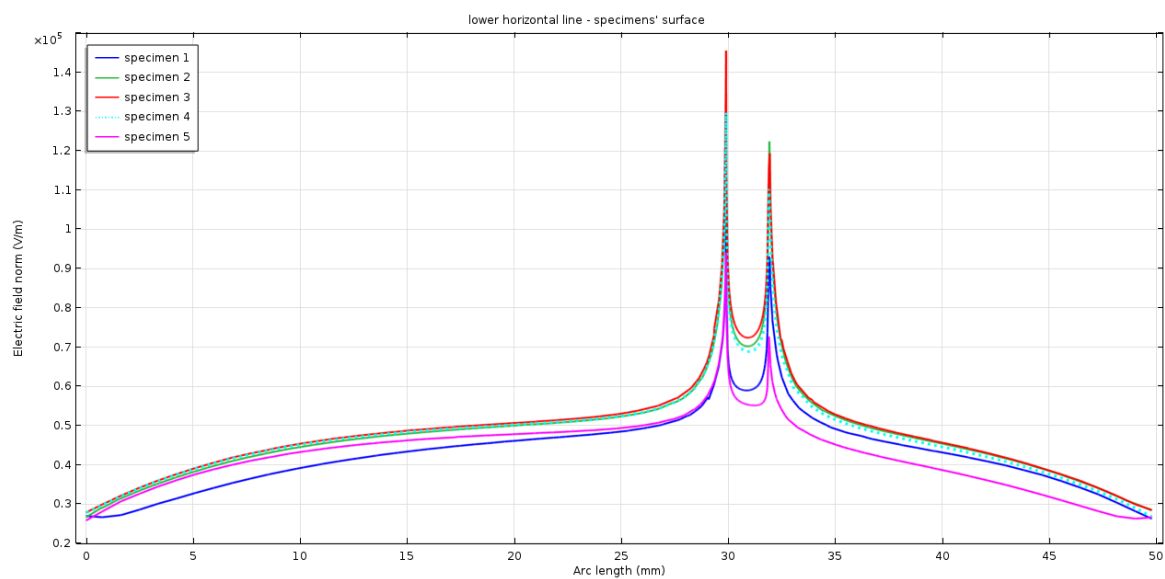
Σχήμα 4.17 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.9, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.18 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.9, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.19 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.10, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.20 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.10, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Οι παρατηρήσεις που έγιναν στα Σχήματα 4.5 – 4.8 για το ηλεκτρικό δυναμικό και το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος των lower lines, επιβεβαιώνονται και από τα Σχήματα 4.17 – 4.20. Για τις διαφορές στην κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ των

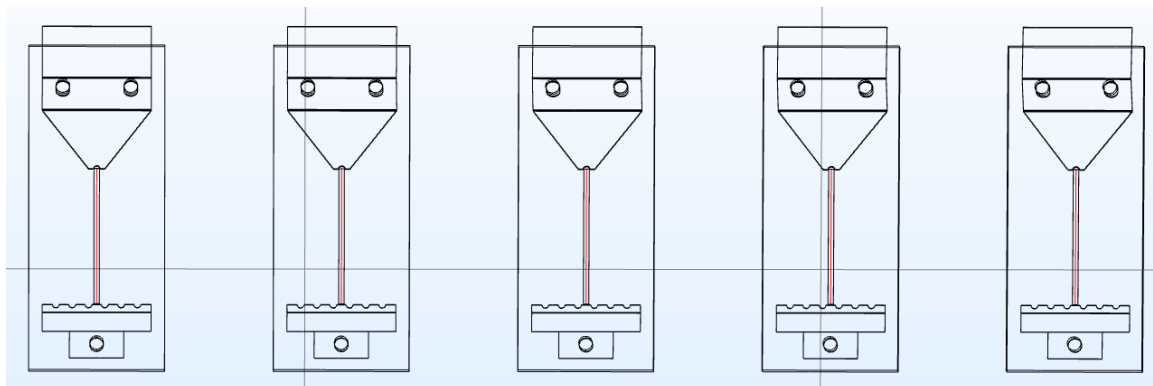
δοκιμίων στις lower lines (Σχήματα 4.17 και 4.19), ισχύει ό,τι και κατά μήκος των upper και middle lines, ενώ οι τιμές που λαμβάνει το δυναμικό είναι ακόμα μικρότερες, αφού η απόσταση από το ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού έχει αυξηθεί.

Ένα επιπλέον σχόλιο σχετικά με το ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος των lower lines, έχει να κάνει με την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού (Σχήμα 4.17). Ενώ θα αναμέναμε τα αποτελέσματα μεταξύ των δοκιμίων 1 και 5 να είναι αντισυμμετρικά (δηλαδή οι τιμές που λαμβάνει το δυναμικό αριστερά του ρυπαντικού υγρού στο δοκίμιο 1 να είναι ίδιες με τις τιμές δεξιά του ρυπαντικού υγρού στο δοκίμιο 5 και αντίστροφα), κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Συγκεκριμένα, το δυναμικό στο δοκίμιο 5 λαμβάνει μικρότερες τιμές, κατά μερικά *Volts*, καθ' όλο το μήκος της lower line (το ίδιο παρατηρούμε αμυδρά και στα Σχήματα 4.9 και 4.13). Η παραπάνω παρατήρηση ισχύει και για τα δοκίμια 2 και 4 σε μικρότερο βαθμό και έχει να κάνει με το γεγονός ότι το σετ δοκιμίων δεν είναι τοποθετημένο στο κέντρο του γειωμένου θαλάμου δοκιμής, αλλά πιο κοντά στη δεξιά πλευρά του (βλ. §3.2.2.2). Οι διαφορές αυτές στο δυναμικό γίνονται εντονότερες στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού, λόγω των διαφορετικών αποστάσεων του υγρού σε κάθε δοκίμιο από τα γειτονικά δοκίμια.

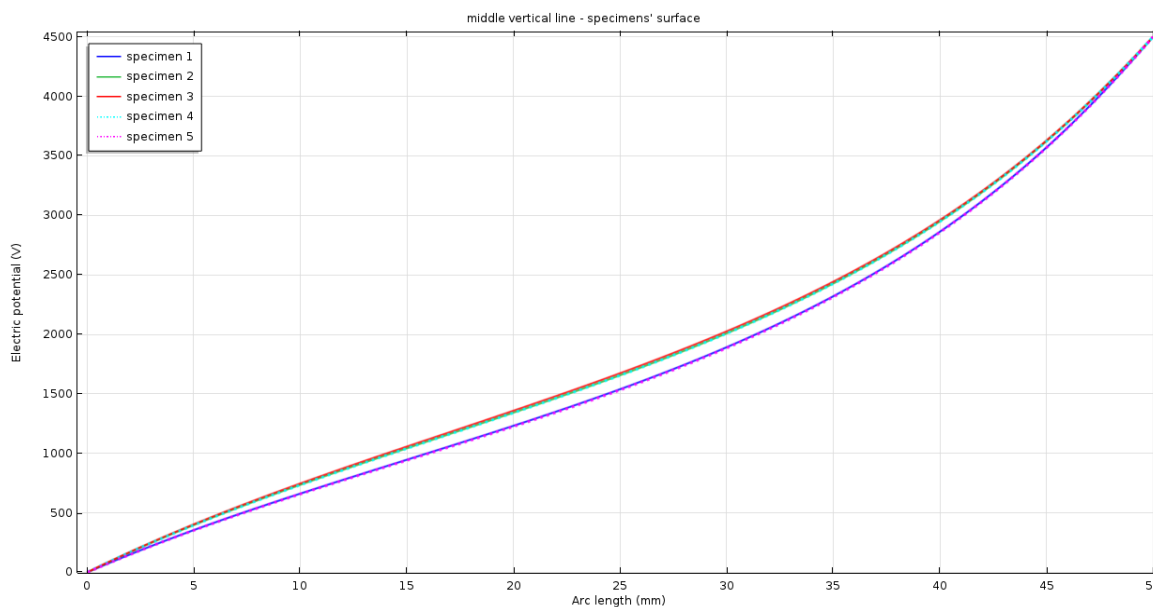
Το ηλεκτρικό πεδίο (Σχήματα 4.18 και 4.20) μεγιστοποιείται και πάλι στα όρια του ρυπαντικού υγρού (συγκεκριμένα για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού στο αριστερό όριο), ενώ δεν παρατηρείται αύξησή του στα σύνορα δοκιμίων – αέρα. Η ασυμμετρία που παρατηρήθηκε κατά μήκος των upper και middle lines υφίσταται και στις lower lines, αλλά είναι αντεστραμμένη. Δηλαδή, το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια των δοκιμίων αυξάνεται, όσο η απόσταση από τα γειτονικά δοκίμια ελαττώνεται. Τέλος, βλέπουμε πως η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ορίων του ρυπαντικού υγρού κάθε δοκιμίου, δεν παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Εξαιρείται το δοκίμιο 5, στο οποίο παρατηρούμε μια μικρή μείωση στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού.

Το μέσο των δοκιμίων στον άξονα x αποτελεί περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, τόσο επειδή το άνω ηλεκτρόδιο εστιάζει εκεί το υψηλό δυναμικό (λόγω της γεωμετρίας του), όσο και λόγω της ύπαρξης του ρυπαντικού υγρού στην περιοχή αυτή. Για να μελετηθούν οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο των δοκιμίων, ορίστηκαν κατακόρυφες Cut lines στο μέσο της επιφάνειας των δοκιμίων στον άξονα x , οι οποίες καλύπτουν όλη την απόσταση μεταξύ των δύο

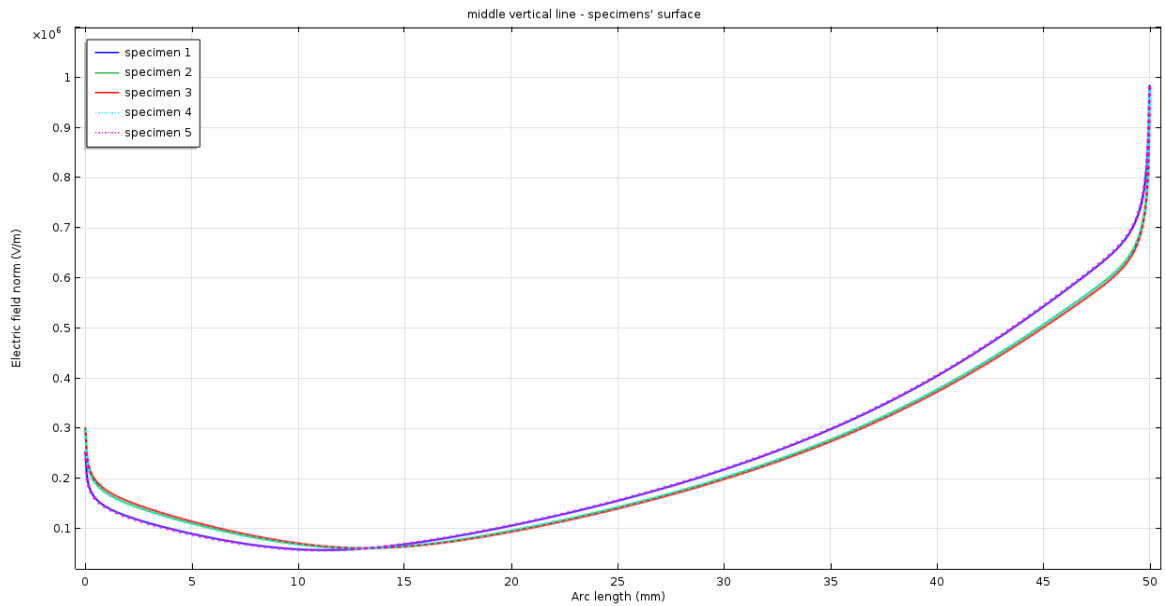
ηλεκτροδίων (Εικόνες 4.11 και 4.12). Οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.21 – 4.24.



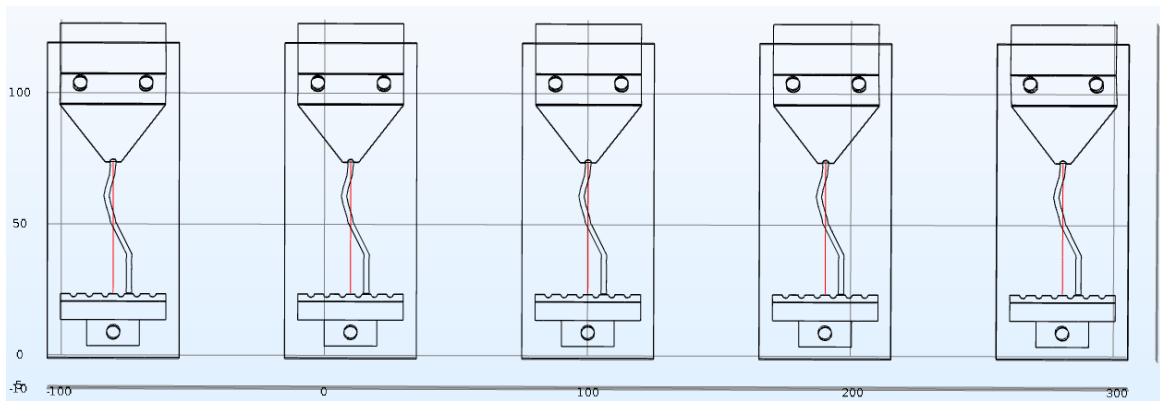
Εικόνα 4.11 Κατακόρυφες Cut lines στο μέσο της επιφάνειας των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] στον άξονα x , που καλύπτουν όλη την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.21 και 4.22



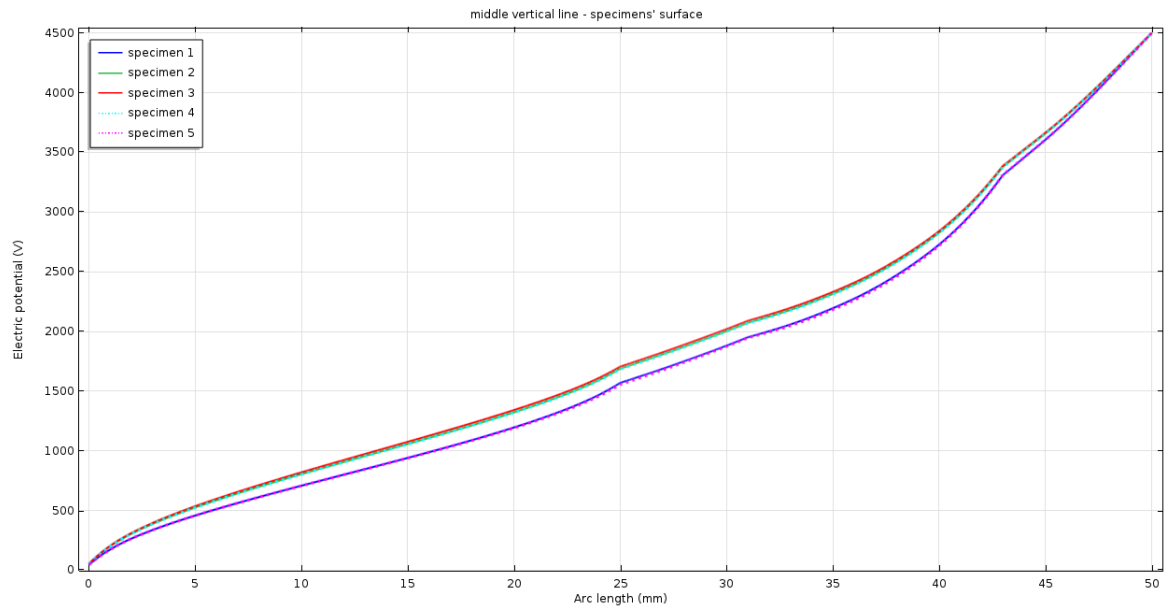
Σχήμα 4.21 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.11, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



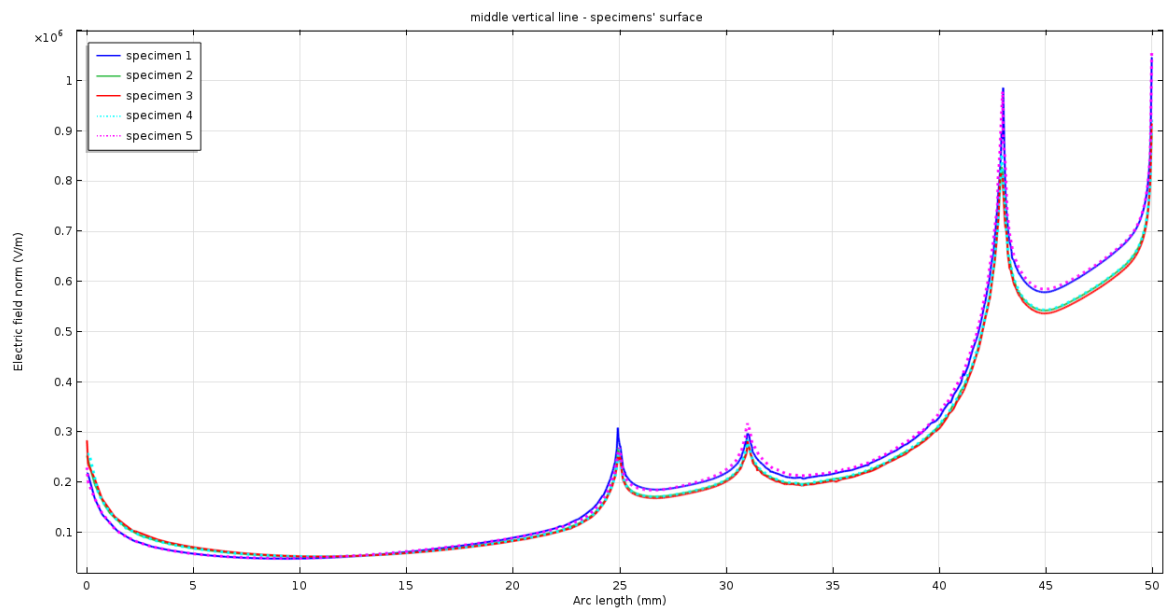
Σχήμα 4.22 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμών κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.11, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Εικόνα 4.12 Κατακόρυφες Cut lines στο μέσο της επιφάνειας των δοκιμών κατά IEC 60587 [41] στον άξονα x, που καλύπτουν όλη την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.23 και 4.24



Σχήμα 4.23 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.12, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



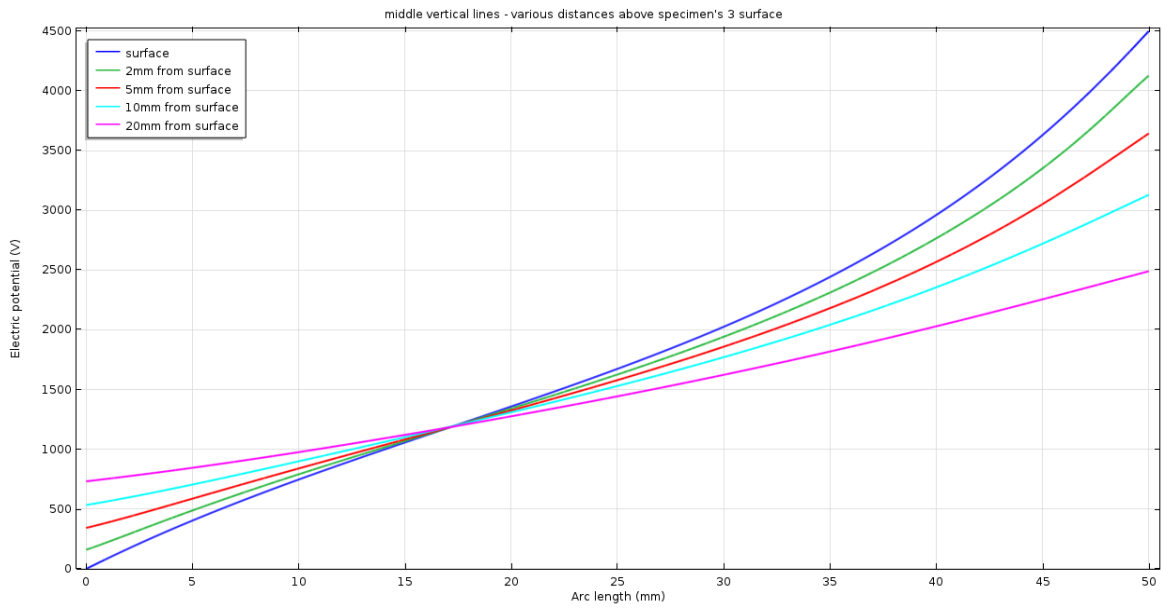
Σχήμα 4.24 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.12, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Βλέπουμε πως και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής του ρυπαντικού υγρού, η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού (Σχήματα 4.21 και 4.23) επιβεβαιώνει τις

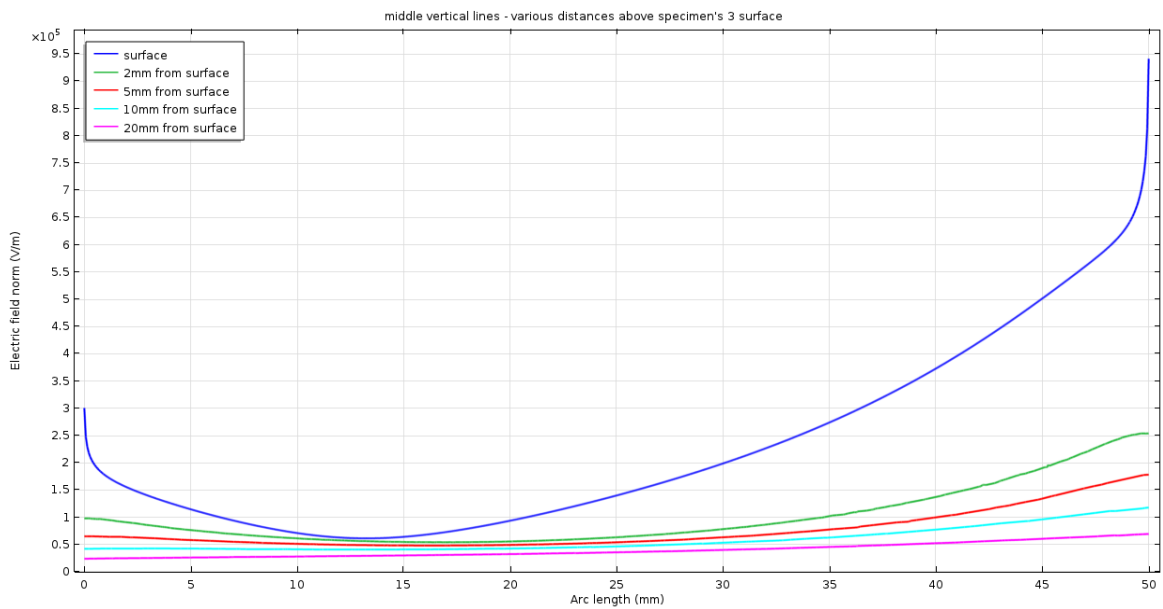
παρατηρήσεις που έγιναν σε όλα τα προηγούμενα διαγράμματα ηλεκτρικού δυναμικού, αφού, καθ' όλο το μήκος των κατακόρυφων Cut lines στην επιφάνεια των δοκιμίων, οι τιμές που λαμβάνει το δυναμικό στα δοκίμια 1 και 5 είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές στα τρία μεσαία δοκίμια (δοκίμια 2, 3 και 4).

Παράλληλα, επιβεβαιώνονται και οι παρατηρήσεις μας σχετικά με το ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο είναι υψηλότερο στα δοκίμια 1 και 5 σε σχέση με τα δοκίμια 2, 3 και 4, από ένα σημείο στην επιφάνεια των δοκιμίων και πάνω και μικρότερο από το ίδιο σημείο και κάτω. Μάλιστα, από τα Σχήματα 4.22 και 4.24, παρατηρούμε πως το σημείο όπου γίνεται η συγκεκριμένη εναλλαγή στο μέσο της επιφάνειας των δοκιμίων, βρίσκεται σε απόσταση περίπου 13mm (στον άξονα z) από το γειωμένο ηλεκτρόδιο. Στα Σχήματα 4.22 και 4.24 φαίνονται και οι τοπικές αυξήσεις του ηλεκτρικού πεδίου στα σημεία όπου οι κατακόρυφες Cut lines συναντούν τα όρια του ρυπαντικού υγρού. Στην περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού οι αυξήσεις αυτές εντοπίζονται μόνο στο άνω και κάτω όριο του υγρού, καθώς το υπόλοιπο τμήμα των Cut lines βρίσκεται εξ' ολοκλήρου στη διεπιφάνεια δοκιμίων – ρυπαντικού υγρού και δε διαπερνά τα πλαϊνά όρια του υγρού.

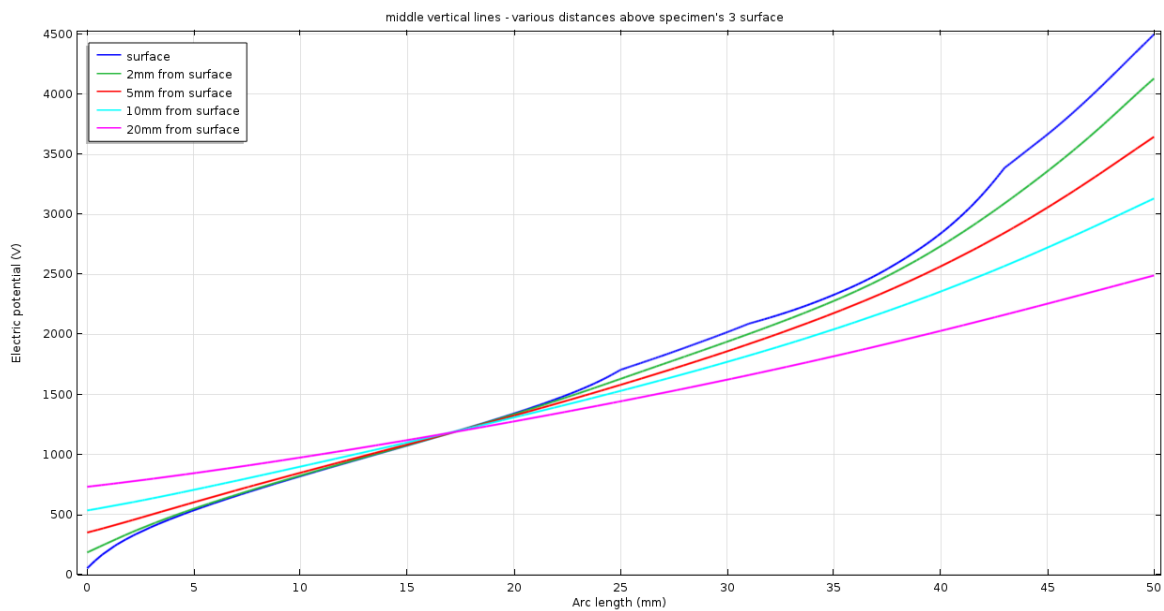
Τέλος, θα εξετάσουμε πώς μεταβάλλονται οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου, όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια των δοκιμίων. Για τον σκοπό αυτόν, ορίζουμε κατακόρυφες Cut lines όμοιες με αυτές που φαίνονται στις Εικόνες 4.11 και 4.12, όμως, μόνο στο μεσαίο δοκίμιο (δοκίμιο 3) και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνειά του. Το δοκίμιο 3 επιλέχθηκε στην περίπτωση αυτή, διότι βρίσκεται στη θέση του σετ των δοκιμίων με τη μεγαλύτερη συμμετρία (κέντρο διάταξης δοκιμίων) ως προς τις αποστάσεις από τα γειτονικά δοκίμια και ως εκ τούτου θεωρούμε πως είναι το καταλληλότερο για την εξαγωγή αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων. Οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.25 – 4.28.



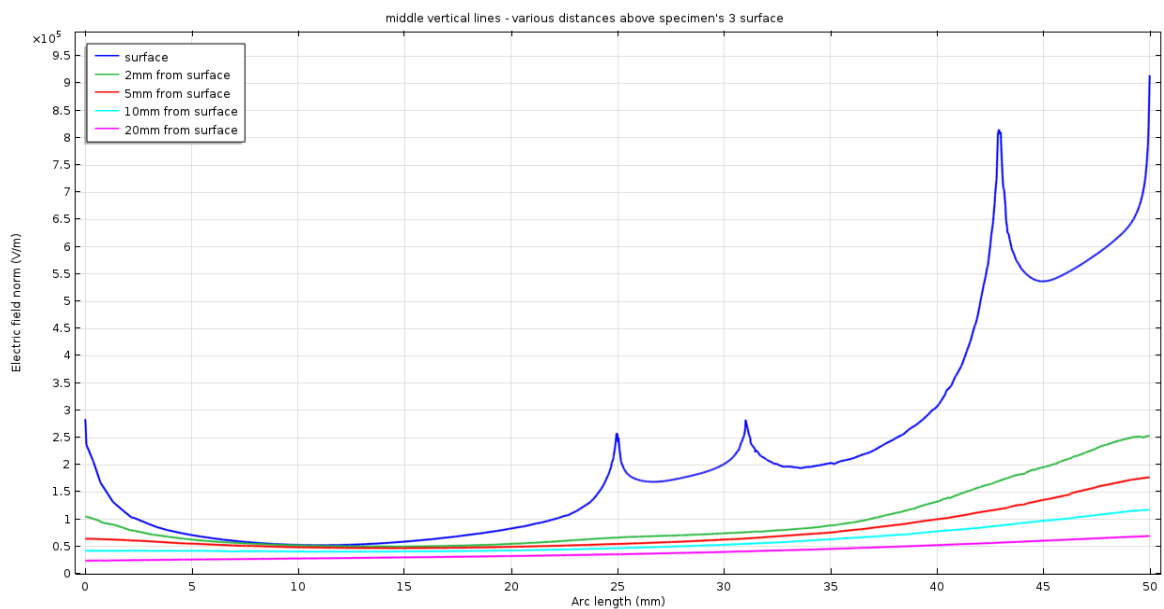
Σχήμα 4.25 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο μέσο του δοκιμίου 3 (κατά IEC 60587 [41]) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.26 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο του δοκιμίου 3 (κατά IEC 60587 [41]) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.27 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο μέσο του δοκιμίου 3 (κατά IEC 60587 [41]) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού



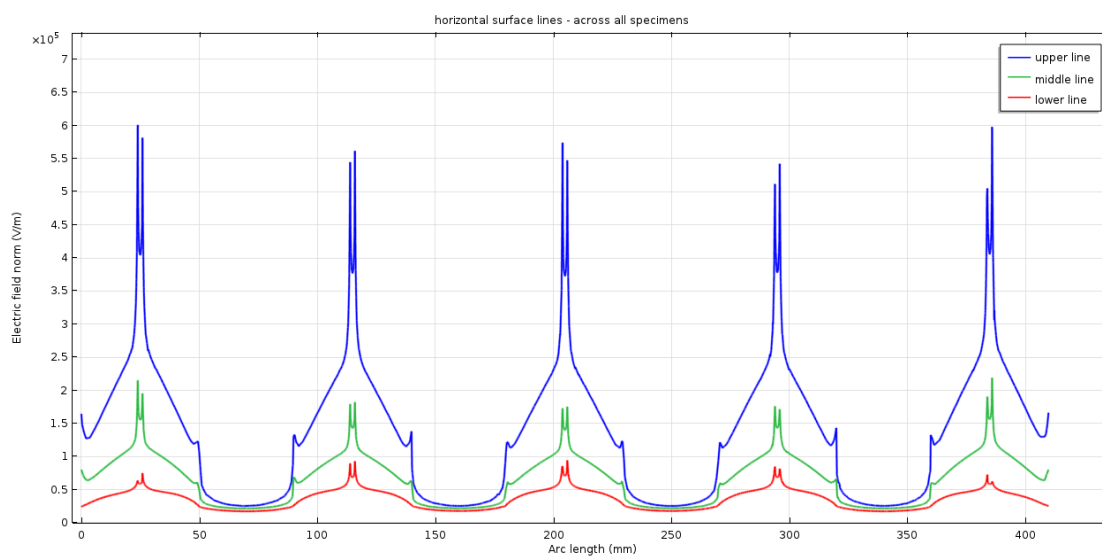
Σχήμα 4.28 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο του δοκιμίου 3 (κατά IEC 60587 [41]) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού το ηλεκτρικό δυναμικό (Σχήματα 4.25 και 4.27) μειώνεται όσο η απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου

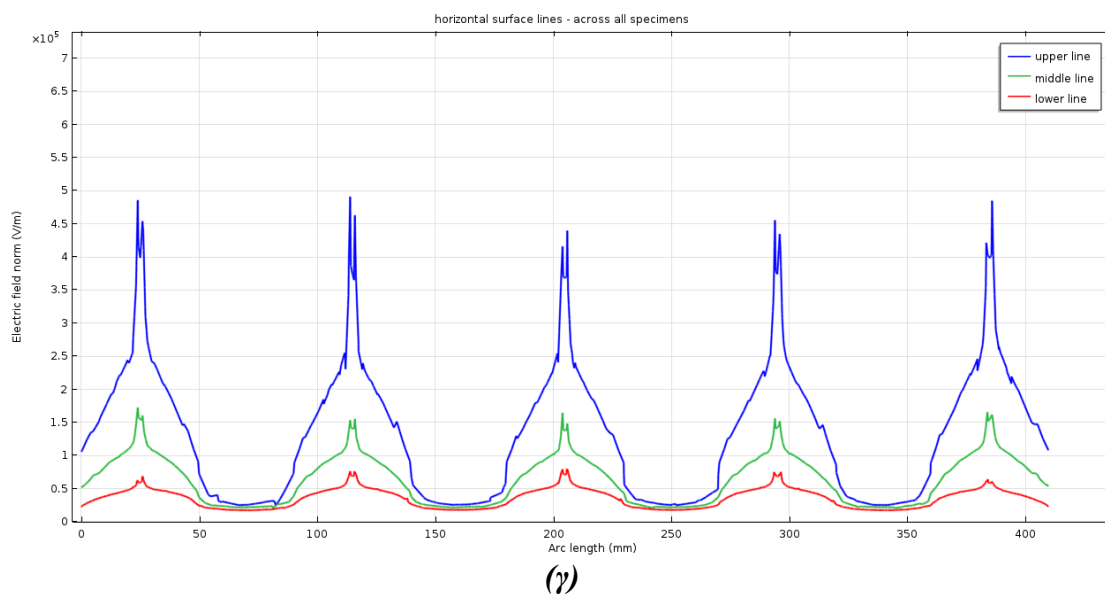
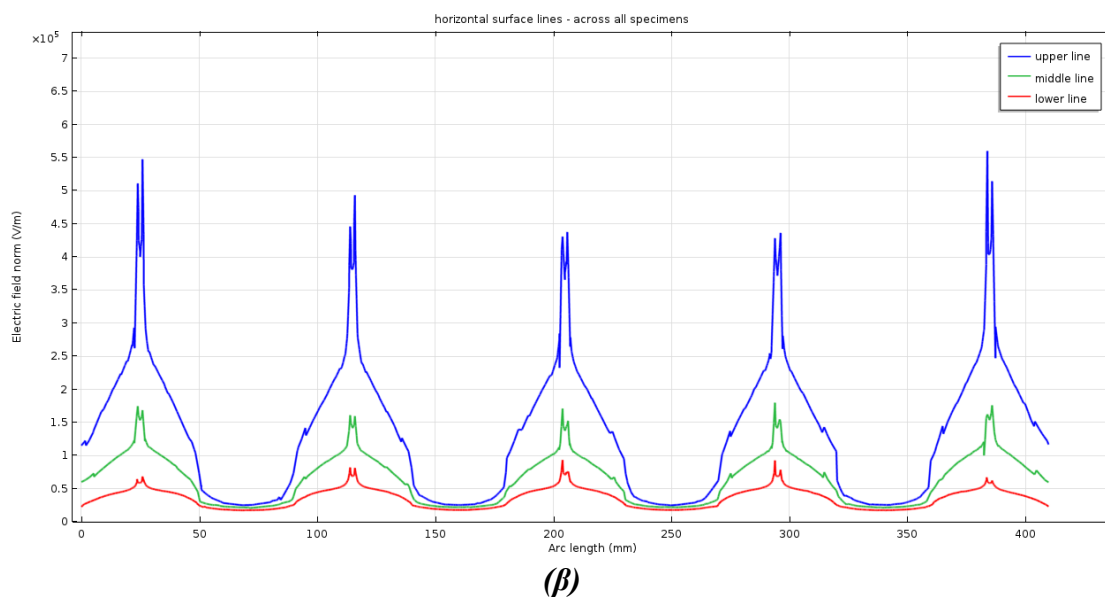
αυξάνεται, από το σημείο που απέχει από το γειωμένο ηλεκτρόδιο περίπου 17mm (στον άξονα z) και πάνω, ενώ αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται από το ίδιο σημείο και κάτω. Αυτό συμβαίνει, διότι όσο απομακρυνόμαστε (προς τον αέρα) από την επιφάνεια του δοκιμίου, η συνεισφορά κάθε ηλεκτροδίου στον καθορισμό της τιμής του δυναμικού ελαττώνεται. Δηλαδή, όσο απομακρυνόμαστε (προς τον αέρα) από την περιοχή του ηλεκτροδίου υψηλού δυναμικού (όπου το δυναμικό είναι μέγιστο) το δυναμικό μειώνεται και αντιστοίχως, όσο απομακρυνόμαστε από την περιοχή του γειωμένου ηλεκτροδίου (όπου το δυναμικό είναι ίσο με μηδέν) το δυναμικό αυξάνεται. Πρακτικά, αυτό που παρατηρούμε είναι πως το δυναμικό τείνει να σταθεροποιηθεί (κατά μήκος της Cut line στο μέσο των δοκιμίων), όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του δοκιμίου.

Το ηλεκτρικό πεδίο (Σχήματα 4.26 και 4.28), επίσης ελαττώνεται και τείνει να σταθεροποιηθεί (στον αέρα δεν παρατηρούνται τοπικές αυξήσεις του πεδίου στα όρια του ρυπαντικού υγρού), όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του δοκιμίου.

Κλείνοντας τη συγκεκριμένη ενότητα, σημειώνουμε πως οι τιμές των κορυφών που παρατηρούνται στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, σε όλα τα γραφήματα ηλεκτρικού πεδίου που παρουσιάστηκαν, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του πλέγματος των μοντέλων. Ενδεικτικά, παραθέτουμε στα Σχήματα 4.29α έως 4.29γ, απεικονίσεις του Σχήματος 4.6 που προκύπτουν με χρήση τριών πλεγμάτων, τα οποία είναι πιο αραιά από το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε τελικώς για τα μοντέλα. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται με σειρά φθίνουσας πυκνότητας πλέγματος, δηλαδή το πλέγμα από το οποίο προκύπτει το Σχήμα 4.29α είναι το πυκνότερο, ενώ το πλέγμα από το οποίο προκύπτει το Σχήμα 4.29γ το αραιότερο.



(α)



Σχήμα 4.29 Απεικονίσεις του Σχήματος 4.6 που προκύπτουν με χρήση τριών αραιότερων πλεγμάτων. Για την πυκνότητα των πλεγμάτων ισχύει $(\alpha) > (\beta) > (\gamma)$.

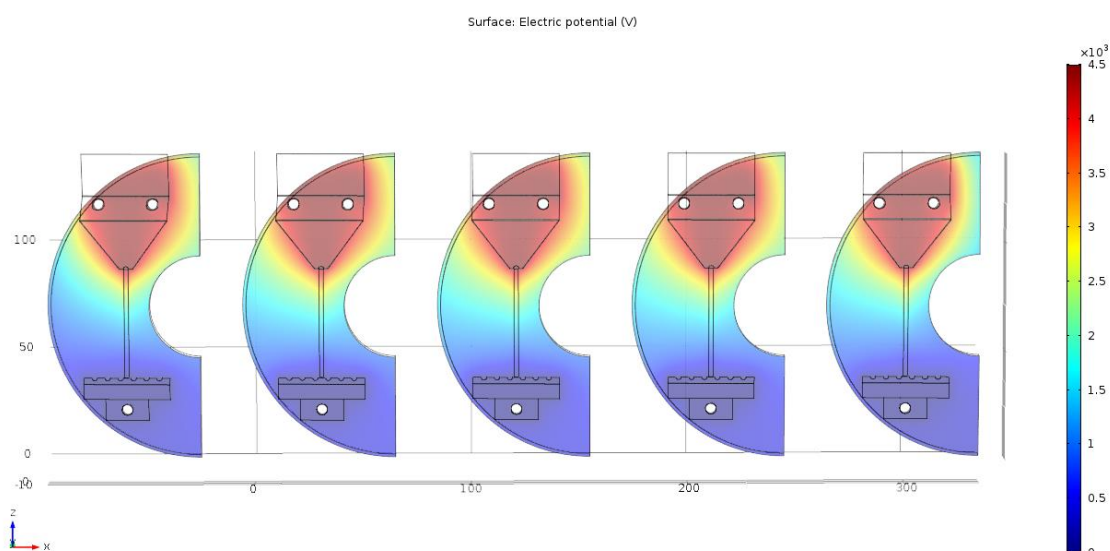
Όπως φαίνεται, οι τιμές των κορυφών που εμφανίζονται στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, αλλά και η ποιότητα των γραφικών παραστάσεων συνολικά, μειώνονται καθώς η πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου πλέγματος μικραίνει. Για τα μοντέλα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε όσο το δυνατόν πυκνότερο πλέγμα επέτρεπαν οι δυνατότητες του υλικού (hardware) του υπολογιστή στον οποίο «έτρεξαν» οι προσομοιώσεις (32GB RAM). Παρ' όλα αυτά, είναι πολύ πιθανό η χρήση πυκνότερου πλέγματος να οδηγήσει σε υψηλότερες μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου, από αυτές που παρατηρούνται στη συγκεκριμένη εργασία. Σημειώνουμε, τέλος, πως ο μέσος συνολικός χρόνος προσομοίωσης (simulation time) ανά μοντέλο ήταν περίπου 25min.

4.3 Αποτελέσματα μοντέλων με δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια συνθετικών μονωτήρων

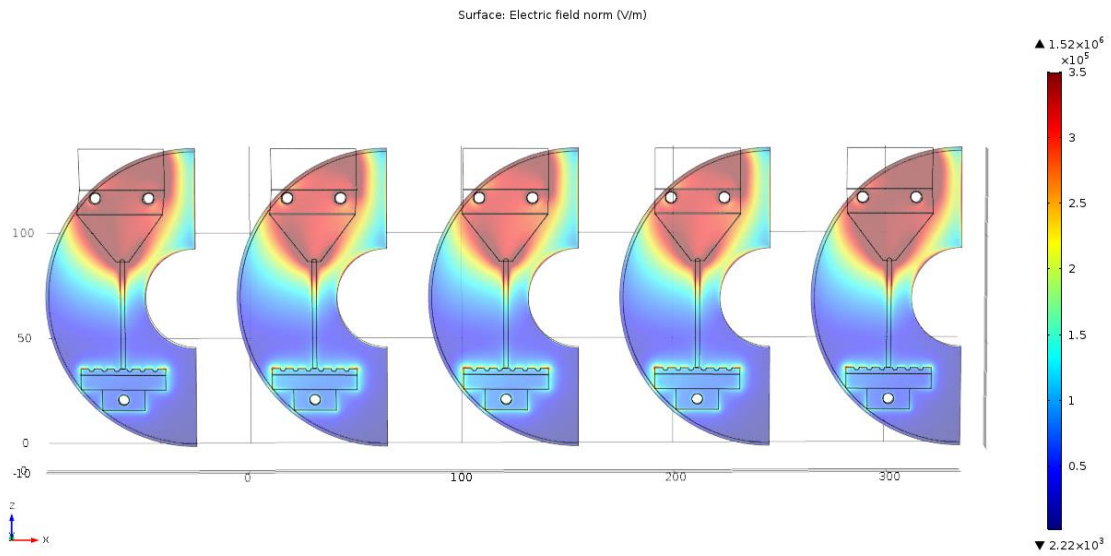
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν από κοινού, σε μορφή γραφημάτων, τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων (ευθεία και ακανόνιστη διαδρομή ρυπαντικού υγρού) με δοκίμια από διχοτομημένα κυάθια συνθετικών μονωτήρων στήριξης των 24kV (βλ. §3.2.2.2), που σχεδιάστηκαν με βάση την εργαστηριακή δοκιμή του κεκλιμένου επιπέδου (inclined plane test – Εικόνα 3.16).

Λόγω της ιδιόμορφης γεωμετρίας των δοκιμίων στα συγκεκριμένα μοντέλα (ημιδίσκοι μεταβλητού πάχους), δεν ήταν εφικτό να οριστούν ευθύγραμμα τμήματα (Cut lines) για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων στην επιφάνεια των δοκιμίων. Έτσι, όλες οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη ενότητα έχουν προκύψει από Cut lines που βρίσκονται εξ' ολοκλήρου στον αέρα, αλλά σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια των δοκιμίων.

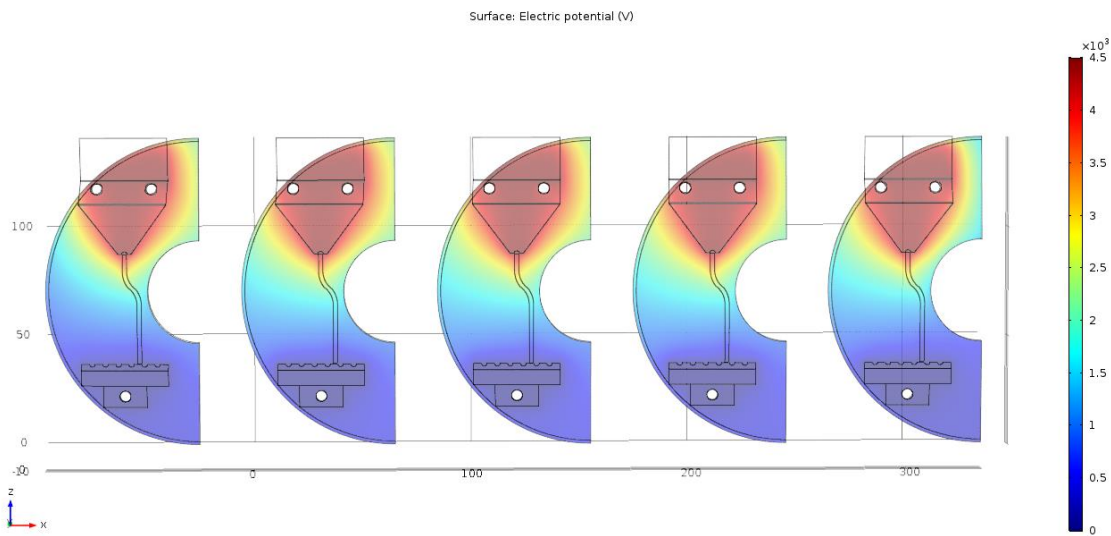
Αρχικά, παρουσιάζονται τα γραφήματα των κατανομών του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων (Σχήματα 4.30 – 4.33).



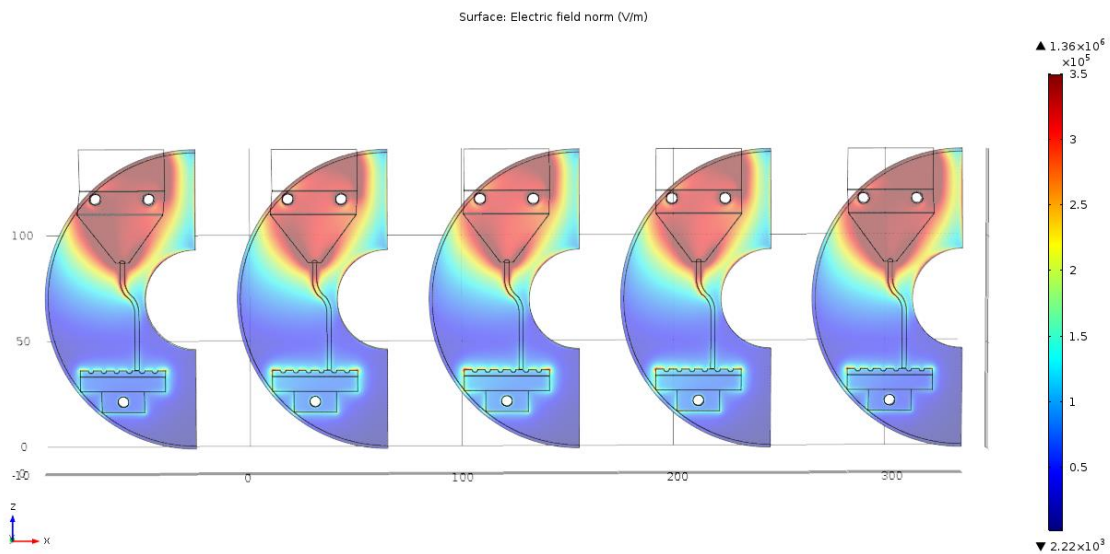
Σχήμα 4.30 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.31 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.32 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



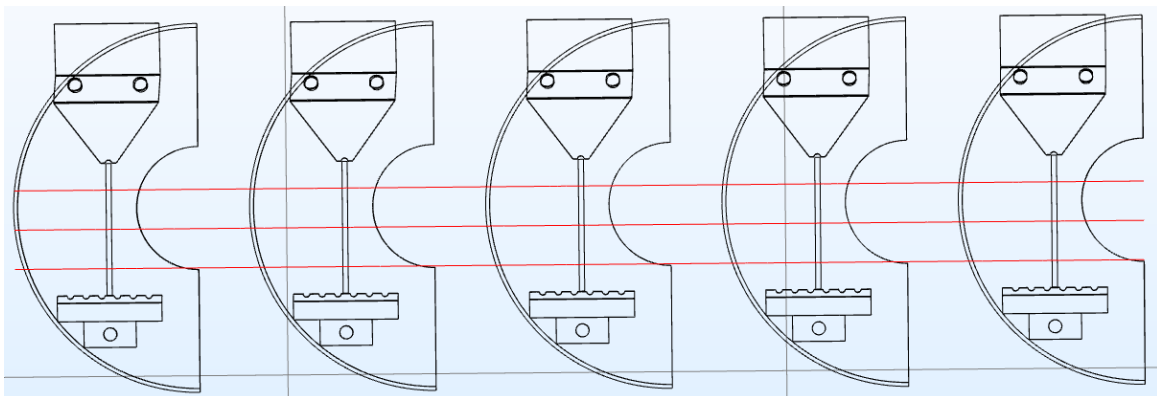
Σχήμα 4.33 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.30 – 4.33, οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια είναι αντίστοιχες με αυτές που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση των μοντέλων με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] (Σχήματα 4.1 – 4.4). Στην παρούσα περίπτωση, βέβαια, λόγω της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στην επιφάνεια των δοκιμίων (βρίσκονται πιο κοντά στη δεξιά πλευρά, όπου έχει γίνει η τομή των κυαθίων και όχι στο μέσο τους), βλέπουμε πως στο δεξί σύνορο των δοκιμίων οι τιμές του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο αριστερό σύνορο (εξωτερική περιφέρεια ημιδίσκων). Συγκεκριμένα, παρατηρούμε και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήματα 4.31 και 4.33) στην εσωτερική περιφέρεια των δοκιμίων, όπου βρισκόταν ο πυρήνας των συνθετικών μονωτήρων πριν την αφαίρεση των κυαθίων.

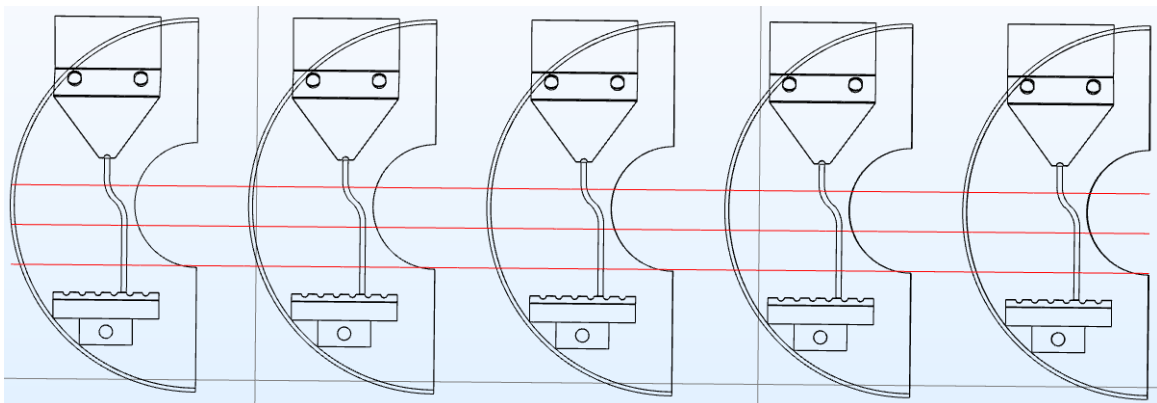
Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν για τα δύο μοντέλα σε αντιστοιχία, κατά το δυνατόν, με τις γραφικές παραστάσεις που παρουσιάστηκαν στην §4.2 (λαμβάνοντας υπόψη, δηλαδή, την ιδιομορφία της γεωμετρίας των δοκιμίων της παρούσας ενότητας).

Στα Σχήματα 4.34 – 4.37 φαίνονται οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου, κατά μήκος τριών οριζόντιων Cut lines που ορίσαμε σε

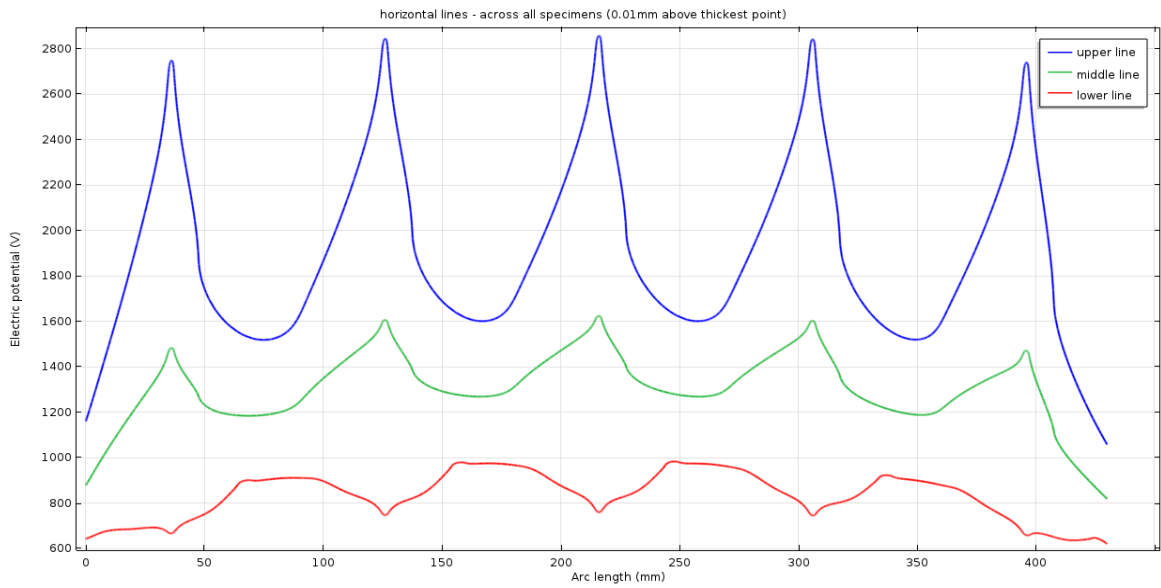
απόσταση 0.01mm από το πιο παχύ σημείο των δοκιμίων (το πάχος των δοκιμίων γίνεται μέγιστο στα σημεία όπου έχει γίνει η τομή των κυαθίων), οι οποίες διασχίζουν όλη τη διάταξη των δοκιμίων στον άξονα x (Εικόνες 4.13 και 4.14). Η μεσαία Cut line (middle line) περνάει από το μέσο της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων ($z = 62.65\text{mm}$), ενώ οι άλλες δύο απέχουν από τη μεσαία 15mm ($z = 77.65\text{mm}$, upper line και $z = 47.65\text{mm}$, lower line), σε αντιστοιχία με αυτές που ορίστηκαν στην περίπτωση των μοντέλων με δοκίμια κατά IEC 60587 [41].



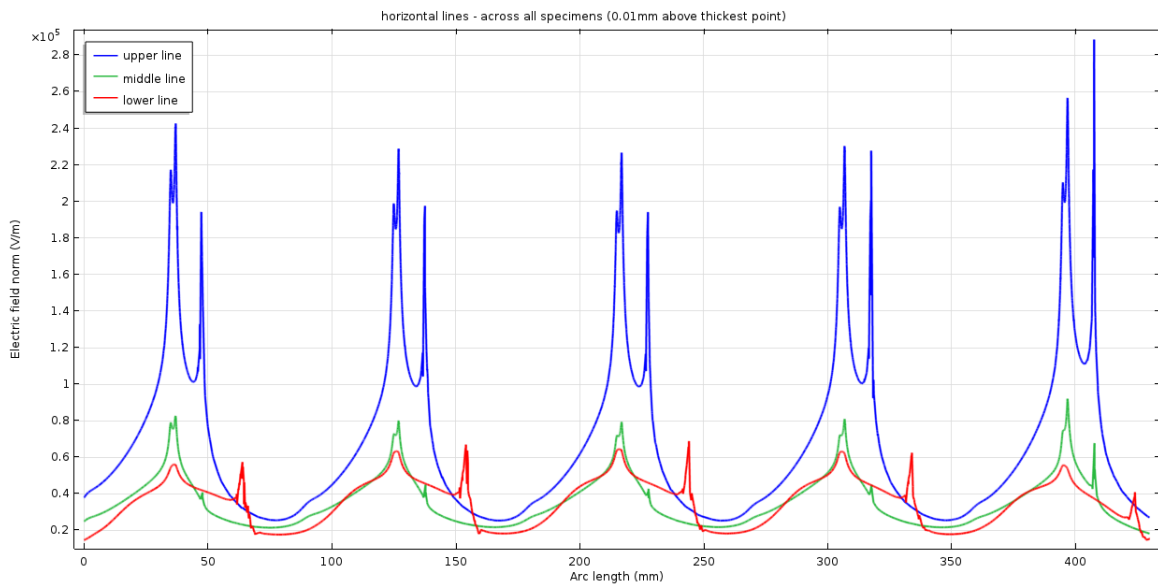
Εικόνα 4.13 Οριζόντιες Cut lines σε απόσταση 0.01mm πάνω από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια (στις θέσεις $z = 77.65\text{mm}$, $z = 62.65\text{mm}$ και $z = 47.65\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.34 και 4.35



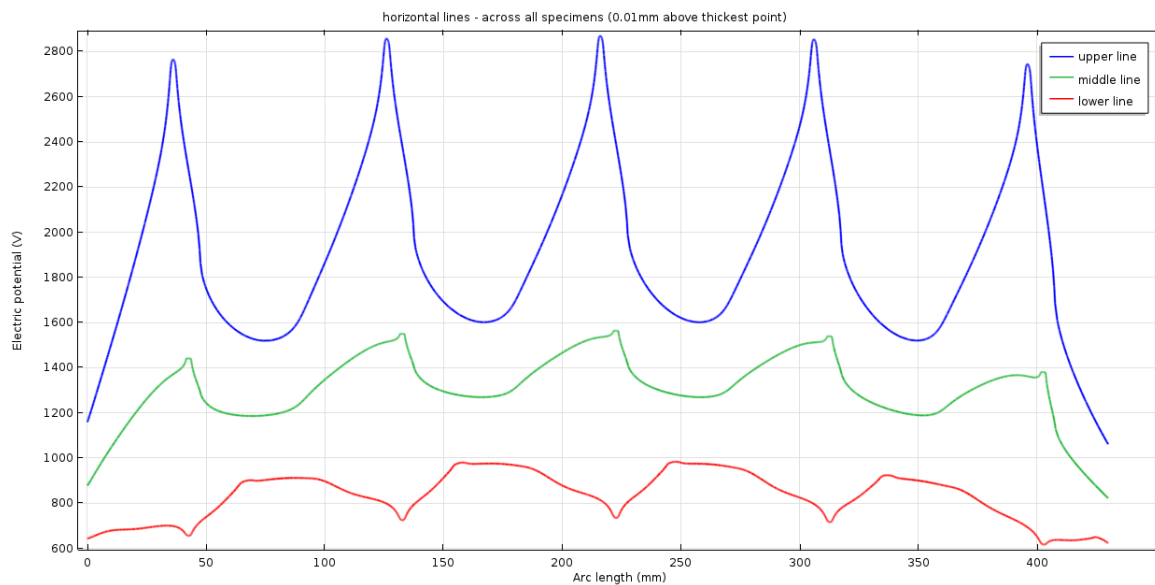
Εικόνα 4.14 Οριζόντιες Cut lines σε απόσταση 0.01mm πάνω από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια (στις θέσεις $z = 77.65\text{mm}$, $z = 62.65\text{mm}$ και $z = 47.65\text{mm}$), από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.36 και 4.37



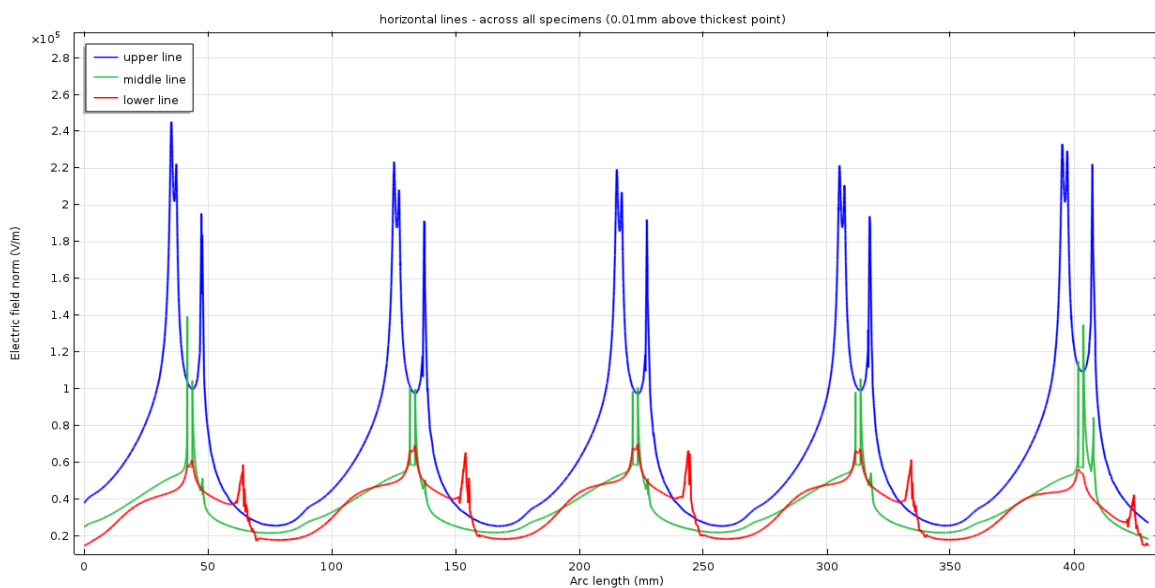
Σχήμα 4.34 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση 0.01mm πάνω από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων από διχοτομημένα κνάθια, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.13, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.35 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση 0.01mm πάνω από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων από διχοτομημένα κνάθια, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.13, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.36 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση 0.01mm πάνω από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.14, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



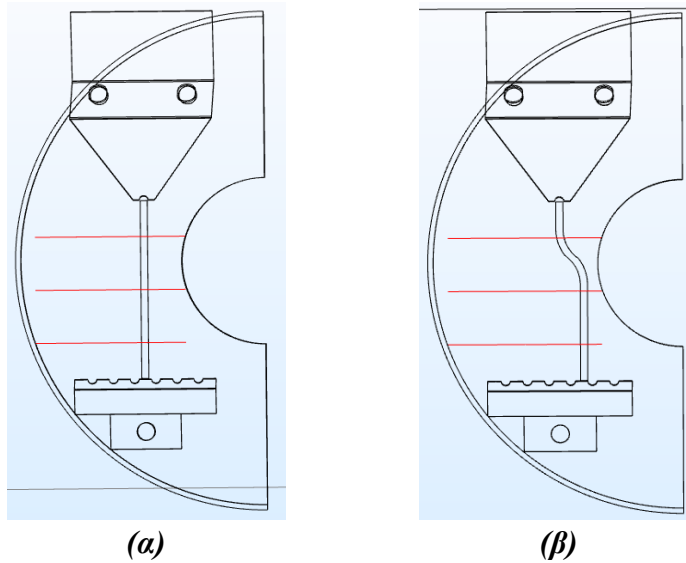
Σχήμα 4.37 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση 0.01mm πάνω από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των τριών οριζόντιων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.14, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Οι παρατηρήσεις για το ηλεκτρικό δυναμικό που έγιναν στα Σχήματα 4.5 και 4.7 της §4.2, ισχύουν και για τα μοντέλα της παρούσας ενότητας (Σχήματα 4.34 και 4.36). Όσον αφορά το ηλεκτρικό πεδίο στην περίπτωση δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια,

που φαίνεται στα Σχήματα 4.35 και 4.37, παρατηρούμε πως και πάλι υφίσταται τοπική αύξησή του στην περιοχή του ρυπαντικού υγρού και ιδιαίτερα στα όρια αυτής. Όπως και στα μοντέλα της §4.2, το πεδίο είναι μεγαλύτερο στα δοκίμια 1 και 5 σε σχέση με τα τρία μεσαία δοκίμια (δοκίμια 2, 3 και 4) στις upper και middle lines, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στη lower line. Σε αντίθεση με την περίπτωση δοκιμίων κατά IEC 60587 [41], το πεδίο αυξάνεται στο δεξί σύνορο δοκιμίων – αέρα, αλλά όχι στο αριστερό. Αυτό οφείλεται στο ότι τόσο τα ηλεκτρόδια όσο και το ρυπαντικό υγρό, βρίσκονται πιο κοντά, όπως εξηγήσαμε, στη δεξιά πλευρά των δοκιμίων. Τέλος, παρατηρούμε πως κατά μήκος της middle line, το πεδίο στα όρια του ρυπαντικού υγρού λαμβάνει αρκετά υψηλές τιμές στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής, στην οποία το ρυπαντικό υγρό στο ύψος της middle line είναι μετατοπισμένο προς το δεξί σύνορο των δοκιμίων.

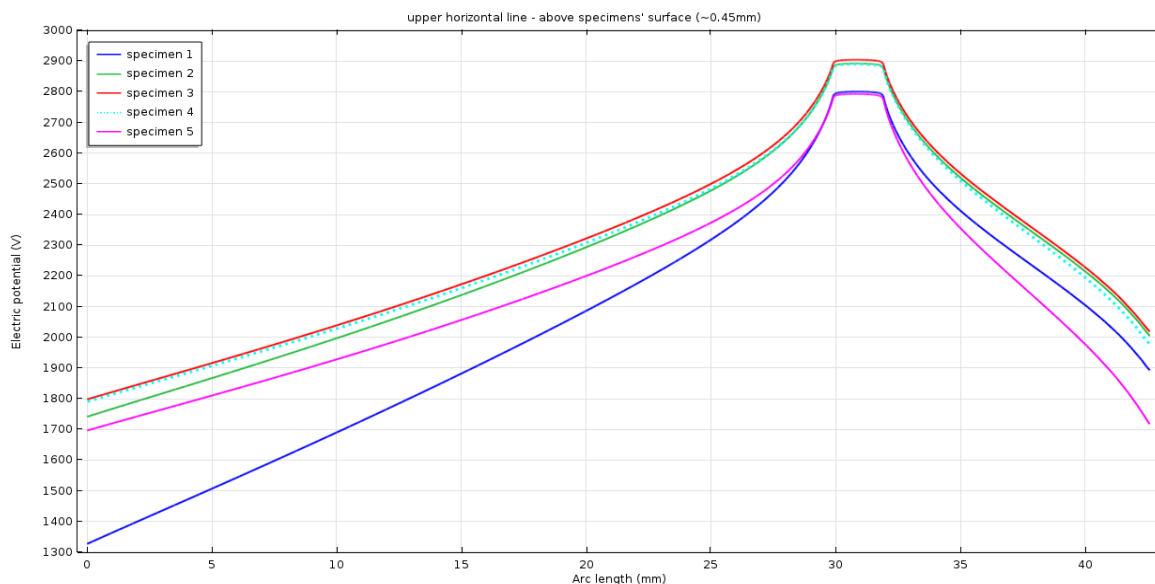
Κατά μήκος των upper και lower lines στα Σχήματα 4.35 και 4.37 φαίνεται η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο δεξί σύνορο δοκιμίων – αέρα να είναι αρκετά υψηλή (μεγαλύτερη σε κάποιες περιπτώσεις και από την τιμή του πεδίου στα όρια του ρυπαντικού υγρού). Αυτό δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αλλά έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι τρεις Cut lines (Εικόνες 4.13 και 4.14) δεν ισαπέχουν από την επιφάνεια των δοκιμίων. Οι Cut lines ορίστηκαν έτσι, ώστε να απέχουν 0.01mm από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων, αλλά λόγω του μεταβλητού πάχους των τελευταίων απέχουν 3.01mm από την εξωτερική περιφέρειά τους, όπου το πάχος γίνεται ελάχιστο. Για τον λόγο αυτόν, τα Σχήματα 4.34 – 4.37 παρουσιάζονται κυρίως για την ποιοτική μελέτη των κατανομών του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου, αλλά και για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμίων κάθε μοντέλου.

Συνεχίζοντας, θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις κατά μήκος τριών οριζόντιων Cut lines σε κάθε δοκίμιο, που ορίσαμε στις ίδιες θέσεις στον άξονα z ($z = 77.65\text{mm}$, $z = 62.65\text{mm}$ και $z = 47.65\text{mm}$) με αυτές που φαίνονται στις Εικόνες 4.13 και 4.14, οι οποίες περιορίζονται στην περιοχή του αέρα που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων. Οι συγκεκριμένες Cut lines (Εικόνα 4.15) ορίστηκαν έτσι, ώστε να απέχουν πρακτικά σε όλο τους το μήκος περίπου 0.45mm από την επιφάνεια των δοκιμίων. Σημειώνουμε πως οι τρεις Cut lines (Εικόνα 4.15) έχουν ίσα μήκη και είναι στοιχισμένες η μία κάτω από την άλλη.

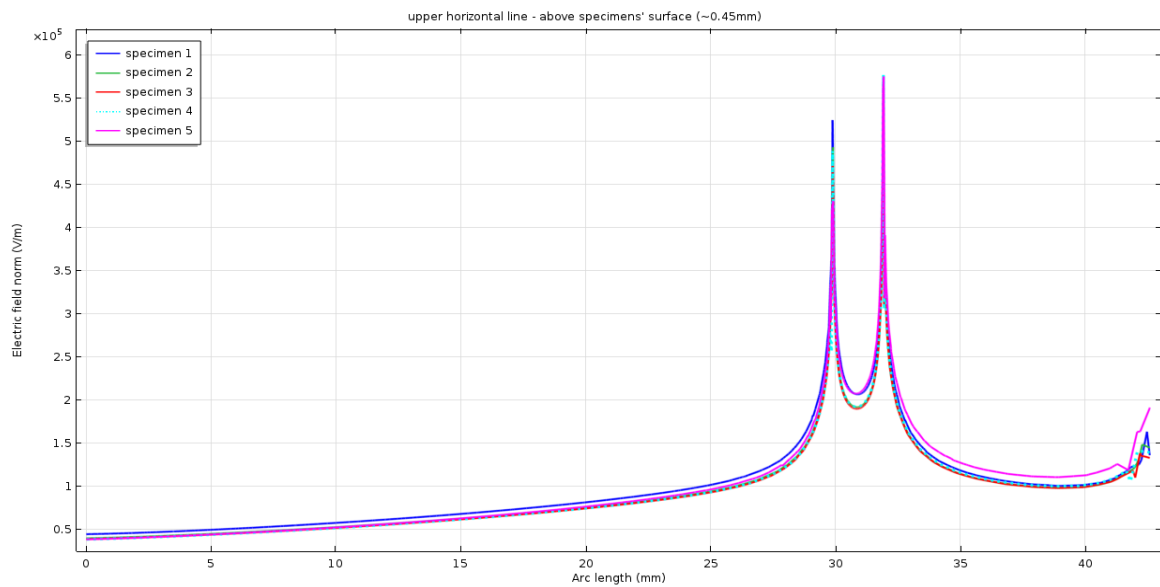


Εικόνα 4.15 Οριζόντιες Cut lines $\sim 0.45\text{mm}$ από την επιφάνεια των δοκιμών από διχοτομημένα κιάθια (στις θέσεις $z = 77.65\text{mm}$, $z = 62.65\text{mm}$ και $z = 47.65\text{mm}$), για την περίπτωση ευθείας (α) και ακανόνιστης (β) διαδρομής ρυπαντικού υγρού, από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.38 – 4.49

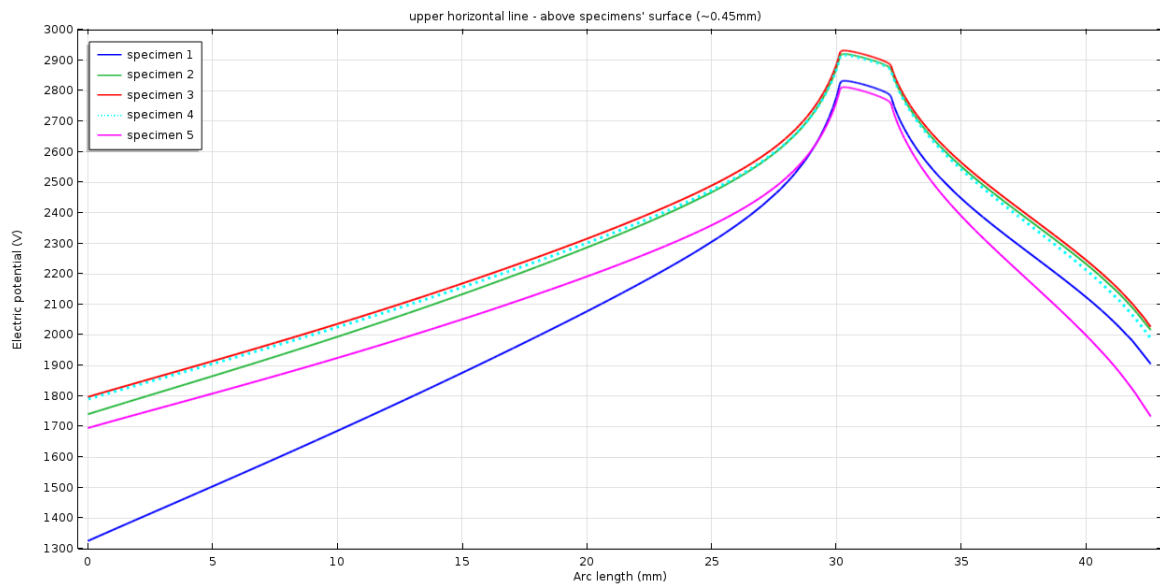
Πρώτα, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις από τις οριζόντιες Cut lines που βρίσκονται στη θέση $z = 77.65\text{mm}$ (upper lines).



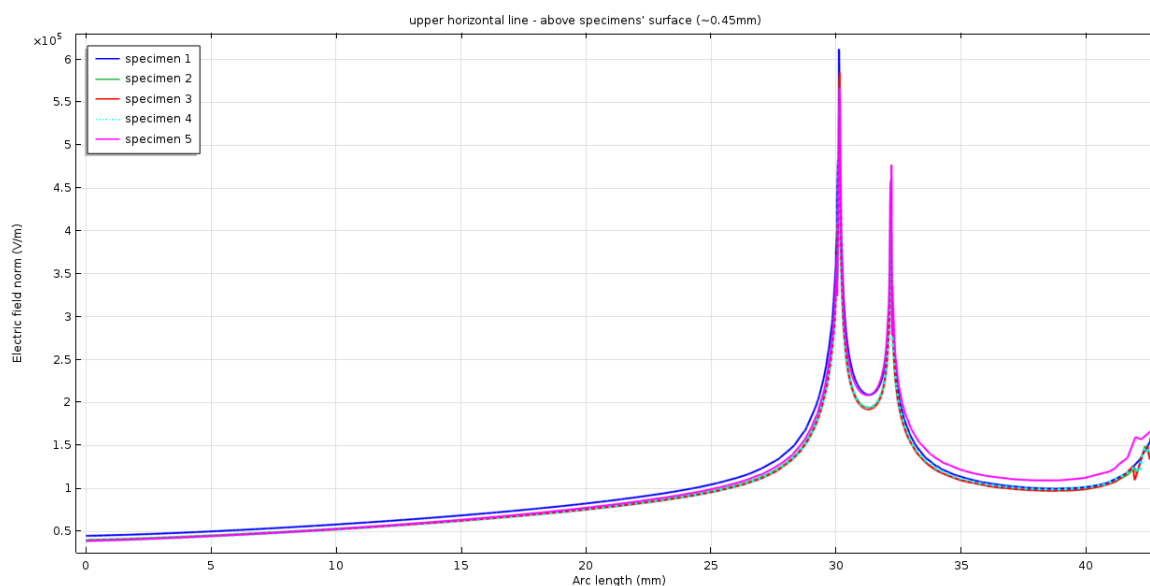
Σχήμα 4.38 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμών από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 77.65\text{mm}$ (upper lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15α, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.39 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 77.65\text{mm}$ (upper lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15α, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.40 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 77.65\text{mm}$ (upper lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15β, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



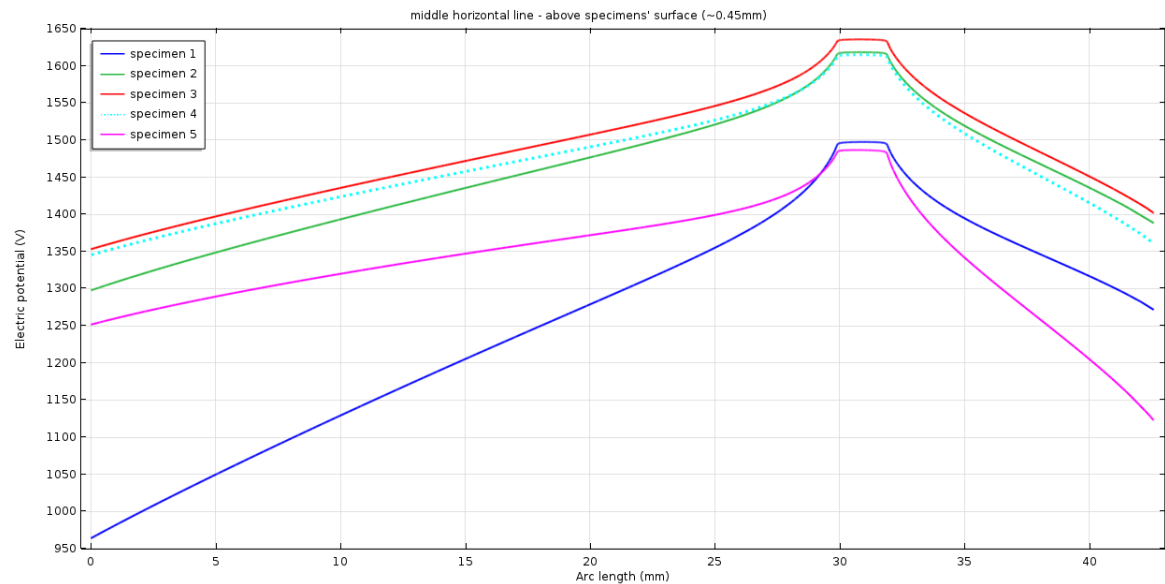
Σχήμα 4.41 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 77.65\text{mm}$ (upper lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15β, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού που φαίνεται στα Σχήματα 4.38 και 4.40, είναι αντίστοιχη με αυτή που παρατηρήθηκε στην περίπτωση των μοντέλων της §4.2 (Σχήματα 4.9 και 4.11), με τη διαφορά ότι, τώρα, οι τιμές στο δεξί σύνορο δοκιμίων – αέρα είναι υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο αριστερό, λόγω της θέσης των ηλεκτροδίων στην επιφάνεια των δοκιμίων.

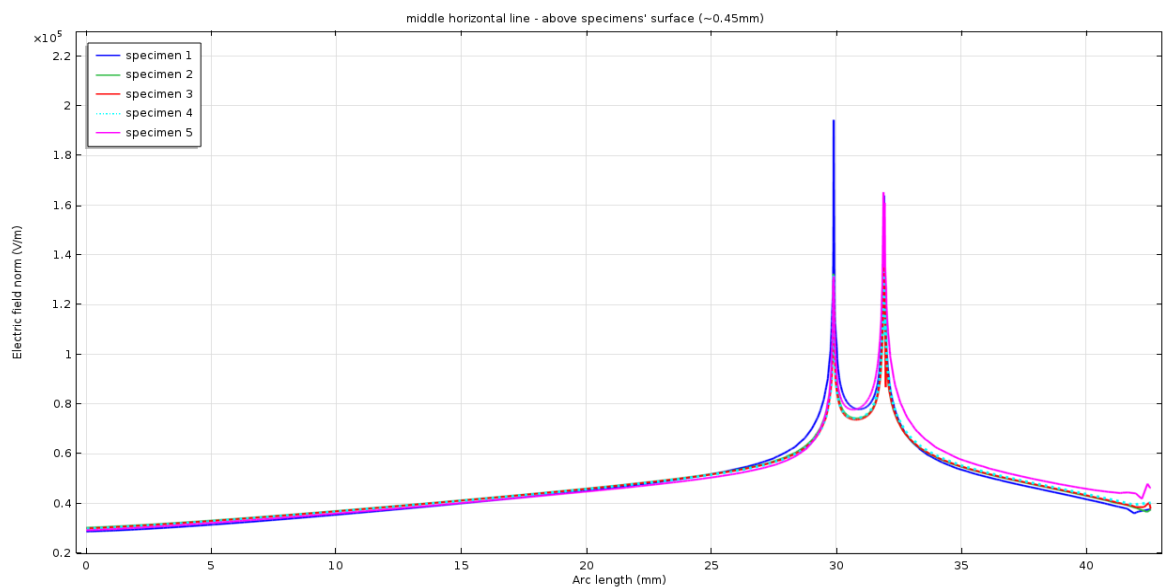
Οι ελάχιστες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήματα 4.39 και 4.41) εντοπίζονται στο μεσαίο δοκίμιο (δοκίμιο 3), με μικρή διαφορά σε σχέση με τα δοκίμια 2 και 4, όπως και στα μοντέλα της §4.2 (Σχήματα 4.10 και 4.12). Η ασυμμετρία που περιγράψαμε στην §4.2 υφίσταται και στην περίπτωση δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, δηλαδή το πεδίο είναι αυξημένο στην πλευρά κάθε δοκιμίου (εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού) που έχει τα λιγότερα γειτονικά δοκίμια. Παράλληλα, το πεδίο είναι υψηλότερο στο δεξί σύνορο των δοκιμίων σε σχέση με το αριστερό, όπως και το δυναμικό. Μάλιστα, στο αριστερό σύνορο δοκιμίων – αέρα δεν παρατηρούμε καν αύξηση του πεδίου, σε αντίθεση με την αντίστοιχη περίπτωση της §4.2. Ακόμη, βλέπουμε πως στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού η τιμή του πεδίου, αλλά και του δυναμικού, είναι υψηλότερη στο αριστερό όριο του ρυπαντικού υγρού. Αυτό, οφείλεται στην καμπή του ρυπαντικού υγρού που συναντά η Cut line στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής.

Τέλος, όπως και στην §4.2, δεν παρατηρείται διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα, όσον αφορά τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ορίων του ρυπαντικού υγρού.

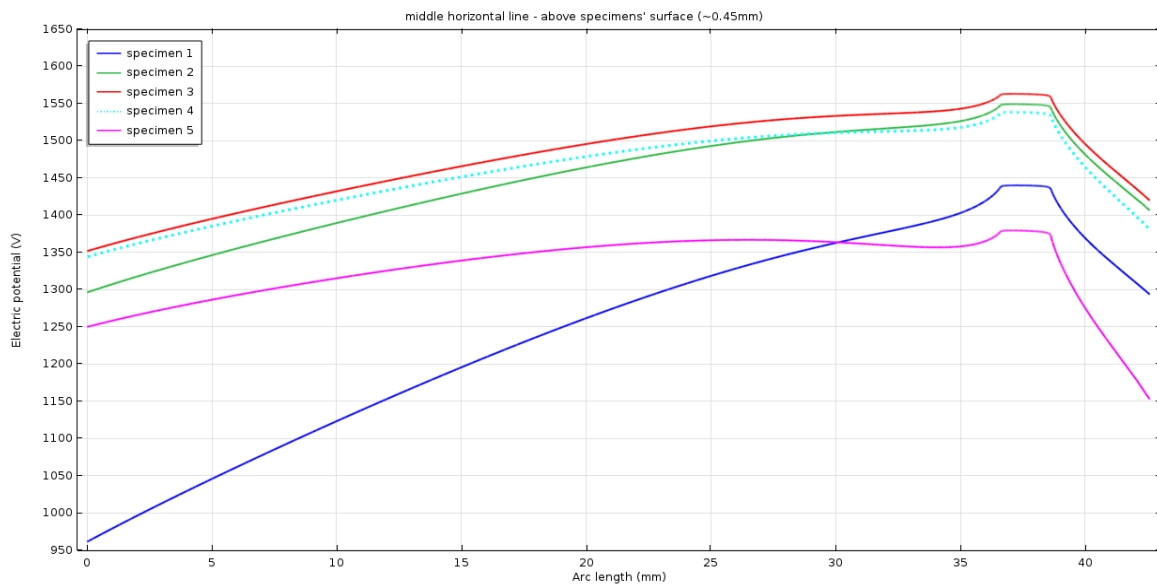
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις από τις οριζόντιες Cut lines που βρίσκονται στη θέση $z = 62.65\text{mm}$ (middle lines).



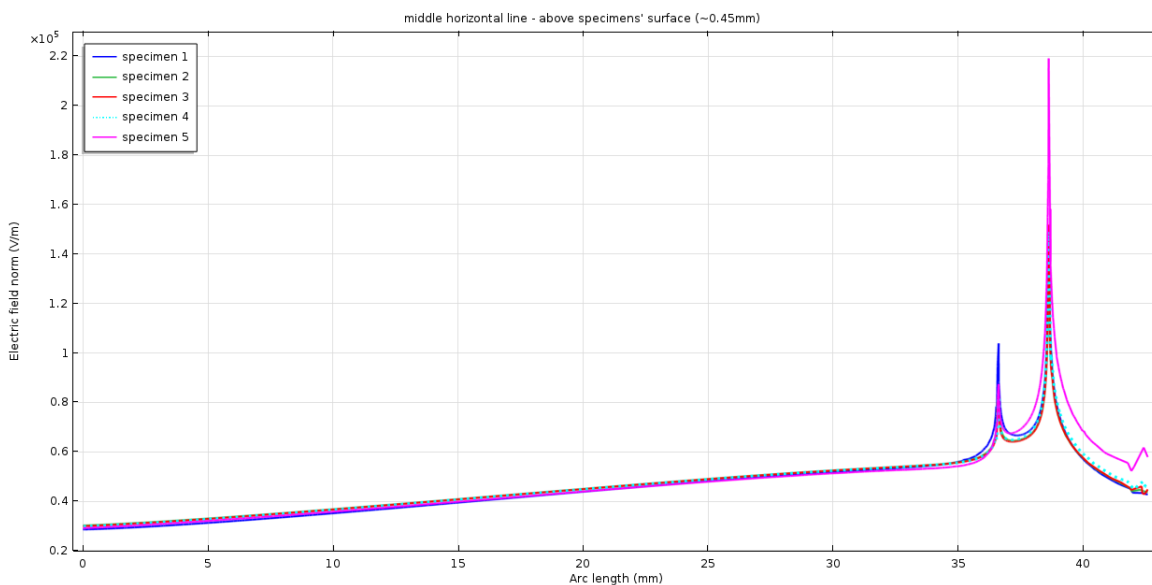
Σχήμα 4.42 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κνάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 62.65\text{mm}$ (middle lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15α, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.43 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κνάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 62.65\text{mm}$ (middle lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15α, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.44 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 62.65\text{mm}$ (middle lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15β, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

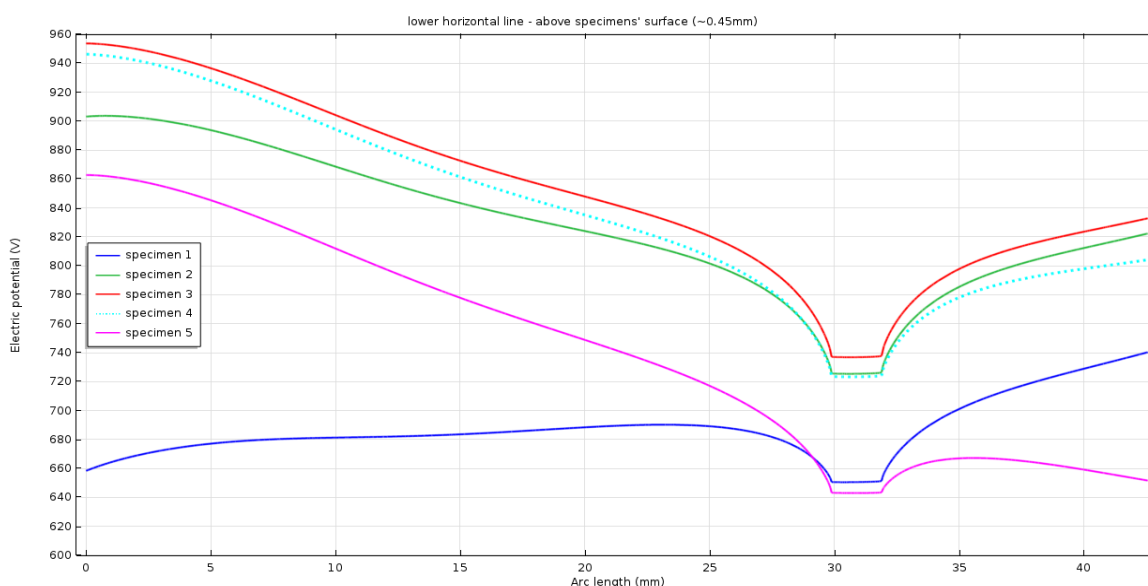


Σχήμα 4.45 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 62.65\text{mm}$ (middle lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15β, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

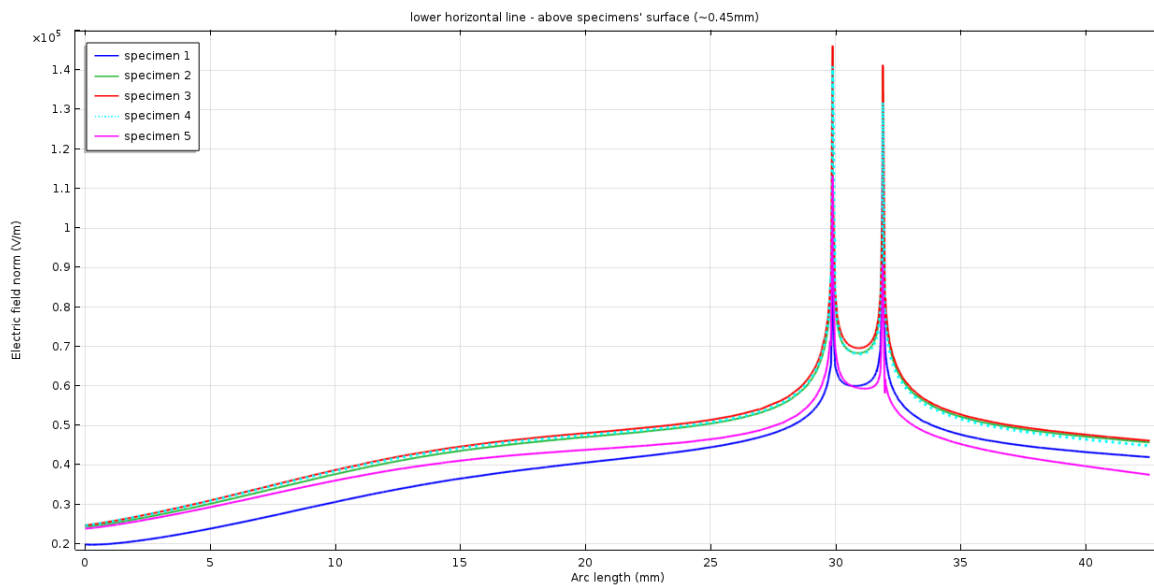
Το ηλεκτρικό δυναμικό (Σχήματα 4.42 και 4.44) κατανέμεται στις middle lines κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (Σχήματα 4.13 και 4.15), λαμβάνοντας υπόψη τις επιπλέον παρατηρήσεις που έγιναν στα Σχήματα 4.38 και

4.40. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού (Σχήμα 4.43) είναι επίσης αντίστοιχη με την περίπτωση δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] (Σχήμα 4.14). Μια διαφορά που παρατηρούμε, είναι πως η μέγιστη τιμή του πεδίου στο αριστερό όριο του ρυπαντικού υγρού στο δοκίμιο 1 είναι υψηλότερη από τη μέγιστη τιμή του πεδίου στο δεξί όριο του ρυπαντικού υγρού στο δοκίμιο 5. Η διαφορά αυτή οφείλεται, πιθανώς, στο ότι το ρυπαντικό υγρό δε βρίσκεται στο μέσο των δοκιμίων στον άξονα x, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της §4.2. Επίσης, στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού παρατηρούμε πως το ηλεκτρικό πεδίο (Σχήμα 4.45) είναι σημαντικά μεγαλύτερο στο δεξί όριο του ρυπαντικού υγρού σε σχέση με το αριστερό, ειδικά στο δοκίμιο 5, παρ' όλο που η middle line είναι κάθετη στις ακμές του ρυπαντικού υγρού. Η αύξηση αυτή οφείλεται, πιθανώς, στη μικρή απόσταση του ρυπαντικού υγρού στο ύψος της middle line από το δεξί σύνορο των δοκιμίων. Τέλος, βλέπουμε πως σε όλα τα δοκίμια, το ηλεκτρικό πεδίο στο τμήμα μεταξύ των ορίων του ρυπαντικού υγρού είναι μειωμένο στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής, όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση της §4.2. Η μείωση αυτή οφείλεται, πιθανώς, στη σημαντική απόκλιση που εντοπίζεται μεταξύ των τιμών του πεδίου στα όρια του ρυπαντικού υγρού για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής.

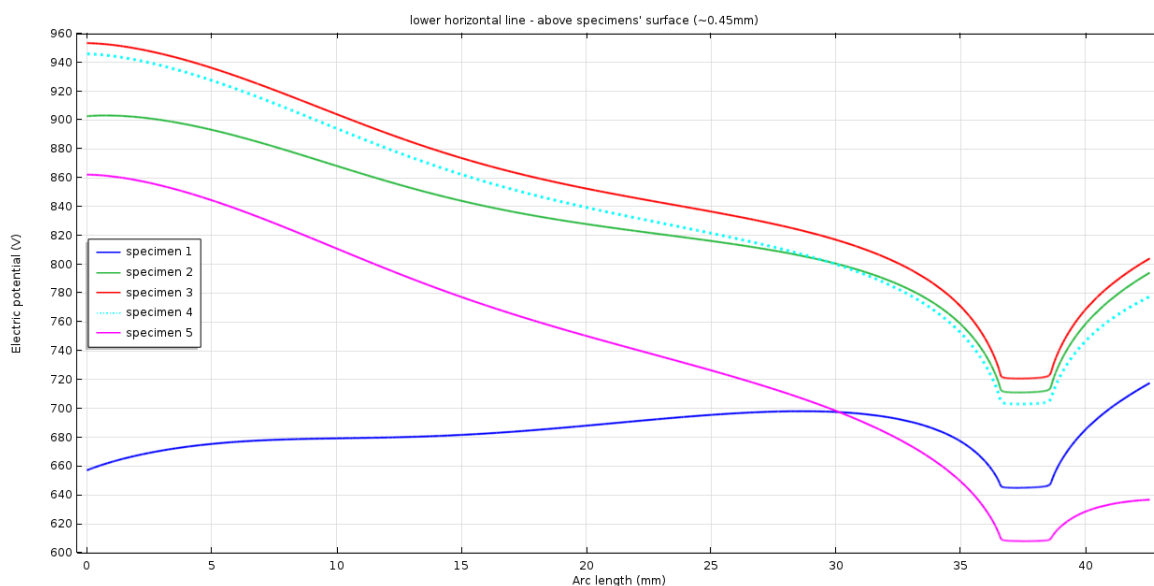
Τέλος, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις από τις οριζόντιες Cut lines που βρίσκονται στη θέση $z = 47.65\text{mm}$ (lower lines).



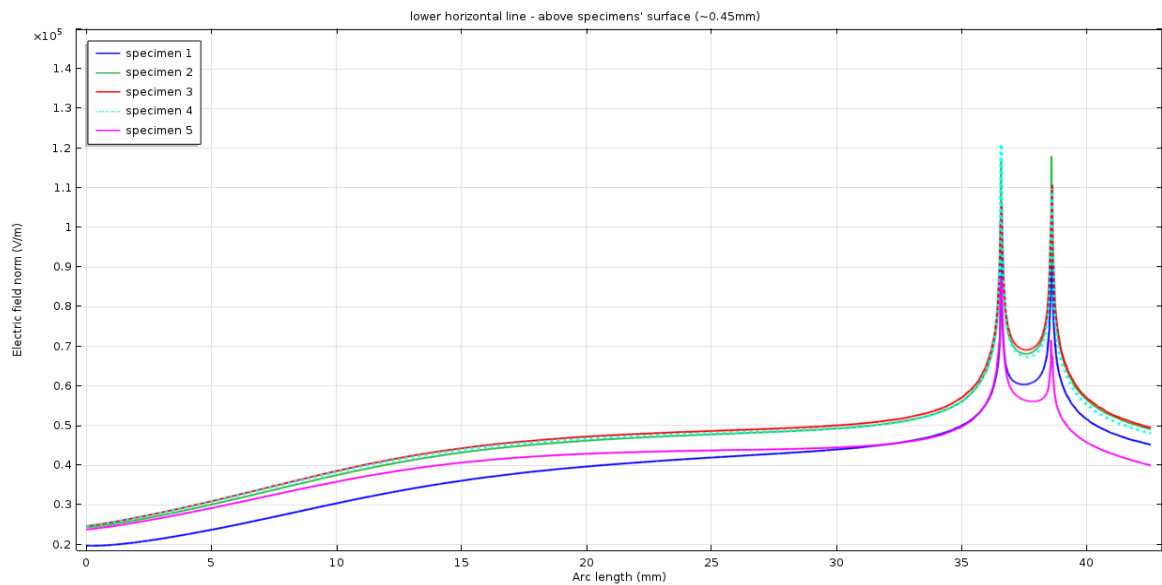
Σχήμα 4.46 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 47.65\text{mm}$ (lower lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15α, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.47 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμών από διχοτομημένα κνάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 47.65\text{mm}$ (lower lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15α, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



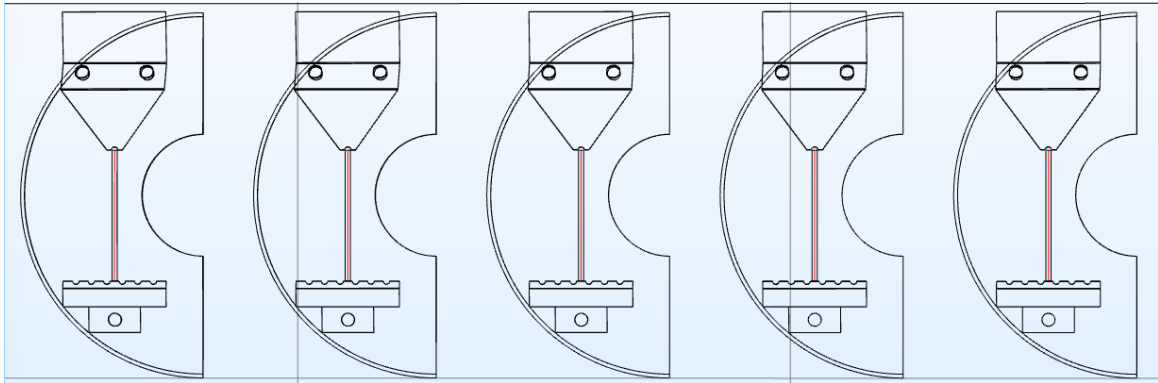
Σχήμα 4.48 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμών από διχοτομημένα κνάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 47.65\text{mm}$ (lower lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15β, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



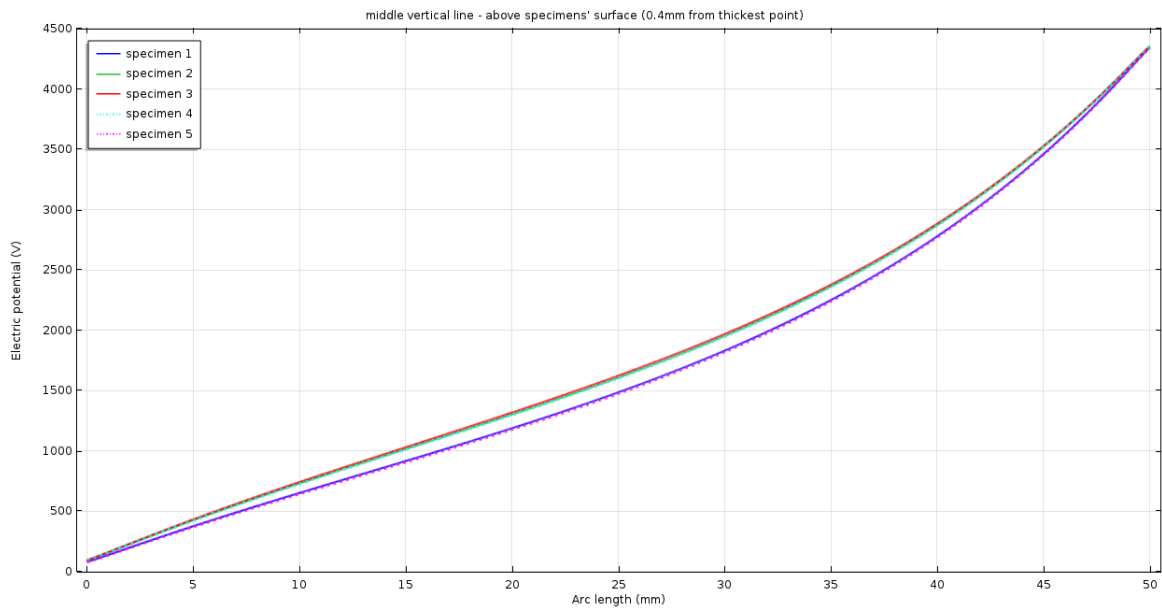
Σχήμα 4.49 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση $\sim 0.45\text{mm}$ πάνω από την επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των οριζόντιων Cut lines στη θέση $z = 47.65\text{mm}$ (lower lines) που φαίνονται στην Εικόνα 4.15β, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Κατά μήκος των lower lines οι κατανομές του δυναμικού και του πεδίου (Σχήματα 4.46 – 4.49) είναι σχεδόν απόλυτα αντίστοιχες με αυτές που παρατηρήθηκαν στην §4.2 (Σχήματα 4.17 – 4.20), λαμβάνοντας υπόψη και τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά μήκος των upper και middle lines στην παρούσα ενότητα. Παράλληλα, βλέπουμε πως και πάλι στο δοκίμιο 5, υπάρχει μια μικρή μείωση της τιμής του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ορίων του ρυπαντικού υγρού στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής.

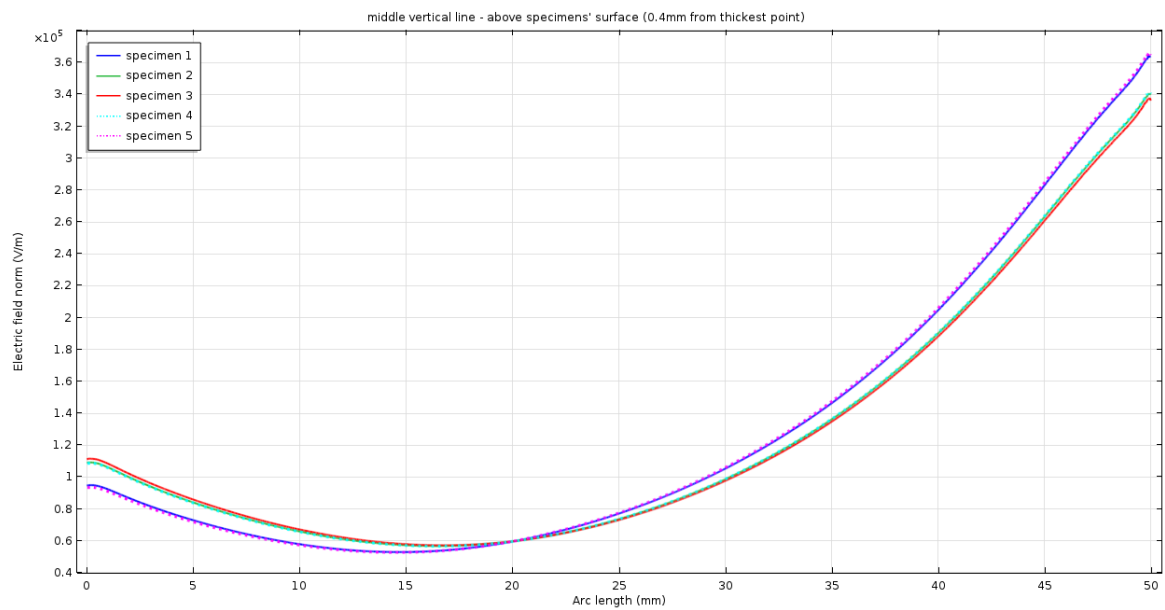
Προχωρώντας, θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν κατά μήκος κατακόρυφων Cut lines, σε αναλογία με την §4.2. Για τα μοντέλα με δοκίμια από διχοτομημένα κιάθια, ορίστηκαν κατακόρυφες Cut lines στο μέσο των ηλεκτροδίων στον άξονα x (Εικόνες 4.16 και 4.17). Οι Cut lines αυτές καλύπτουν όλη την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και απέχουν περίπου 0.4mm από το παχύτερο σημείο των δοκιμίων, το οποίο βρίσκεται στη θέση $z = 70.5\text{mm}$ (μέσο των δοκιμίων στον άξονα z). Όπως και οι οριζόντιες Cut lines που φαίνονται στις Εικόνες 4.13 και 4.14, οι κατακόρυφες Cut lines (Εικόνες 4.16 και 4.17) δεν ισαπέχουν από την επιφάνεια των δοκιμίων. Κατά συνέπεια, τα προκύπτοντα σχήματα (Σχήματα 4.50 – 4.53) παρουσιάζονται κυρίως για την ποιοτική μελέτη των κατανομών του δυναμικού και του πεδίου, αλλά και για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμίων κάθε μοντέλου.



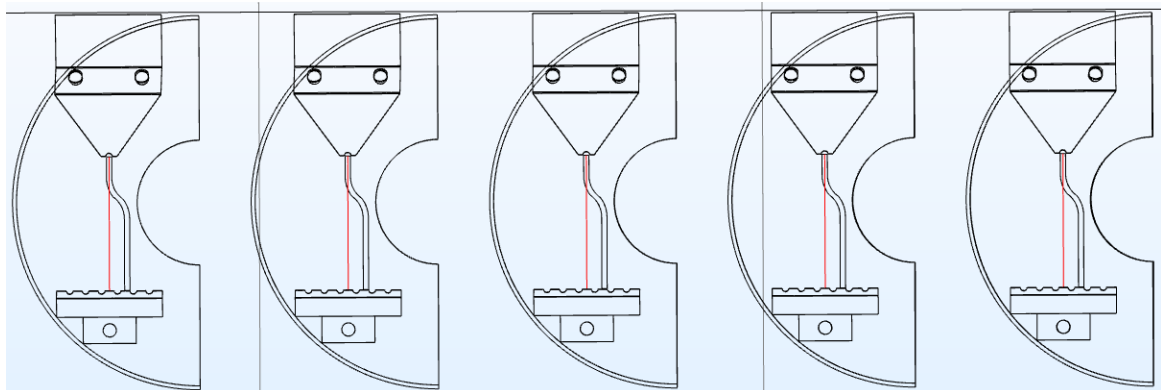
Εικόνα 4.16 Κατακόρυφες Cut lines στο μέσο των ηλεκτροδίων στον άξονα x , που απέχουν $\sim 0.4\text{mm}$ από το παχύτερο σημείο ($z = 70.5\text{mm}$) των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, καλύπτοντας όλη την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.50 και 4.51



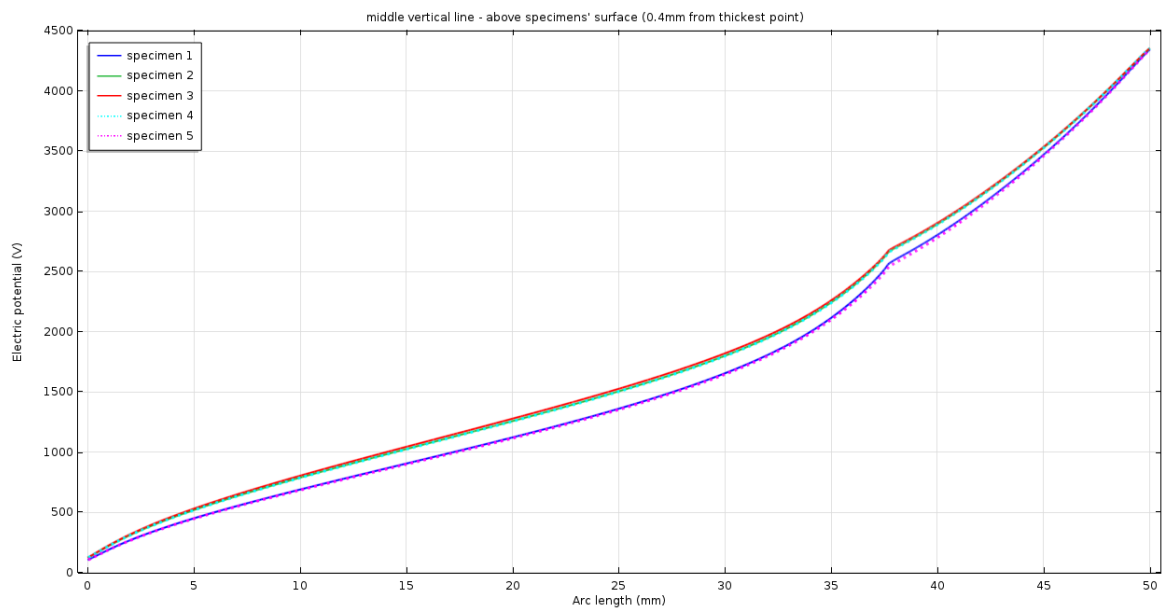
Σχήμα 4.50 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού κοντά στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.16, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



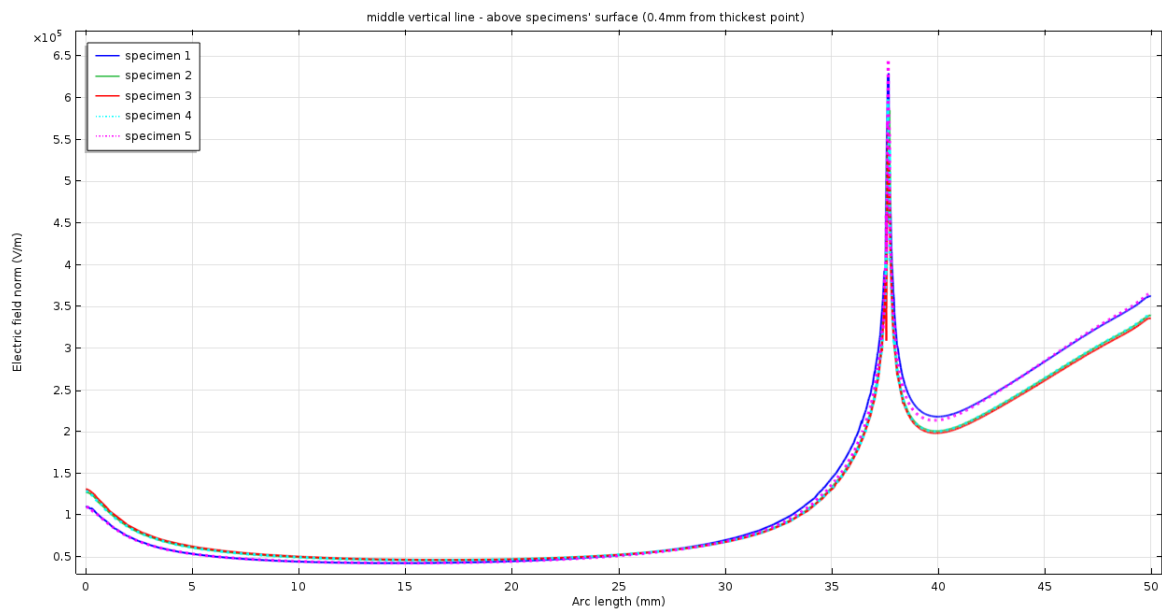
Σχήμα 4.51 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.16, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Εικόνα 4.17 Κατακόρυφες Cut lines στο μέσο των ηλεκτροδίων στον άξονα x, που απέχουν ~0.4mm από το παχύτερο σημείο ($z = 70.5\text{mm}$) των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, καλύπτοντας όλη την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και από τις οποίες προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 4.52 και 4.53



Σχήμα 4.52 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού κοντά στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.17, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

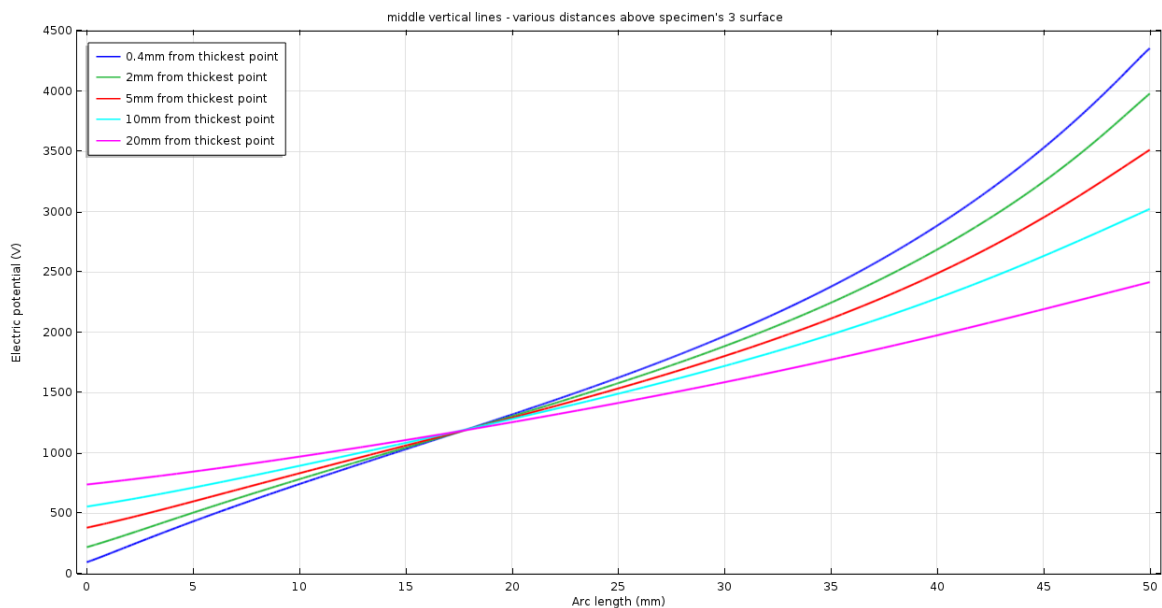


Σχήμα 4.53 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κιάθια, κατά μήκος των κατακόρυφων Cut lines που φαίνονται στην Εικόνα 4.17, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

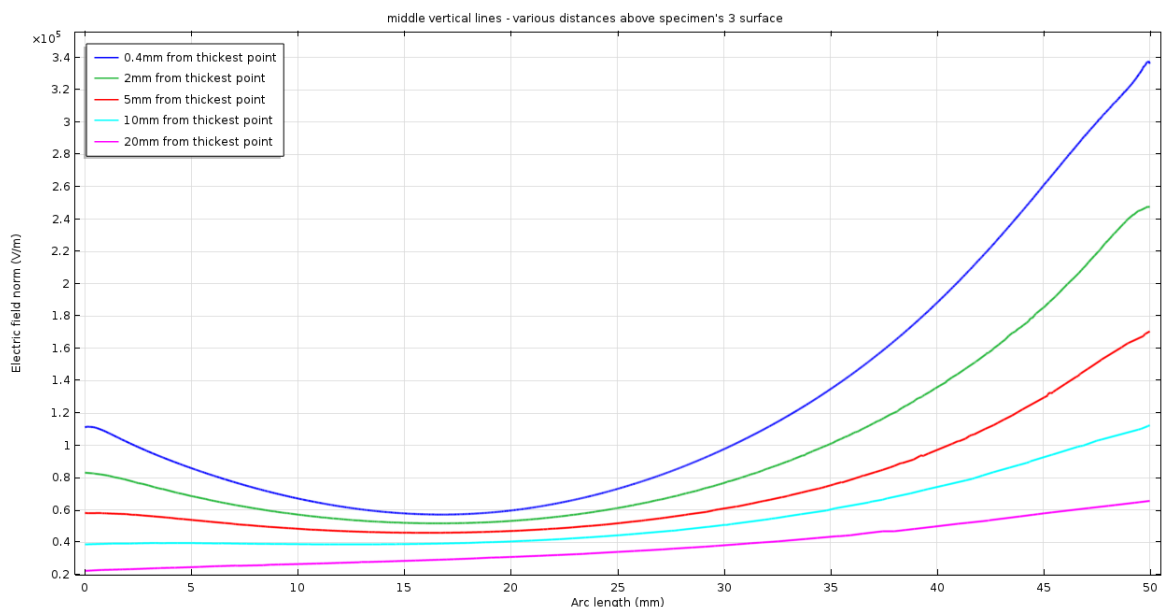
Και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού το ηλεκτρικό δυναμικό (Σχήματα 4.50 και 4.52) είναι μικρότερο στα δοκίμια 1 και 5 σε σχέση με τα δοκίμια 2, 3

και 4 σε όλο το μήκος των κατακόρυφων Cut lines, όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση της §4.2 (Σχήματα 4.21 και 4.23). Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήματα 4.51 και 4.53) είναι αντίστοιχη με αυτή που παρατηρήθηκε στα μοντέλα της §4.2 (Σχήματα 4.22 και 4.24). Στα Σχήματα 4.51 και 4.53, όμως, δεν παρατηρούνται οι απότομες αυξήσεις του πεδίου στα άνω και κάτω όρια του ρυπαντικού υγρού, καθώς οι κατακόρυφες Cut lines βρίσκονται εξ' ολοκλήρου στον αέρα και σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια των δοκιμίων. Είναι ορατή, βέβαια, η σημαντική αύξηση του πεδίου στο όριο του ρυπαντικού υγρού για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής (Σχήμα 4.53). Ακόμη, παρατηρούμε πως το σημείο στο οποίο το ηλεκτρικό πεδίο στα δοκίμια 1 και 5 γίνεται μεγαλύτερο από το πεδίο στα δοκίμια 2, 3 και 4, βρίσκεται σε απόσταση περίπου 20mm από το κάτω ηλεκτρόδιο (στον άξονα z) για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού και σε απόσταση περίπου 25mm για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής. Η διαφορά αυτή έχει να κάνει με το γεγονός ότι στη δεύτερη περίπτωση η Cut line δε βρίσκεται πάνω από το ρυπαντικό υγρό, λόγω της μετατόπισης του τελευταίου προς το δεξί σύνορο των δοκιμίων.

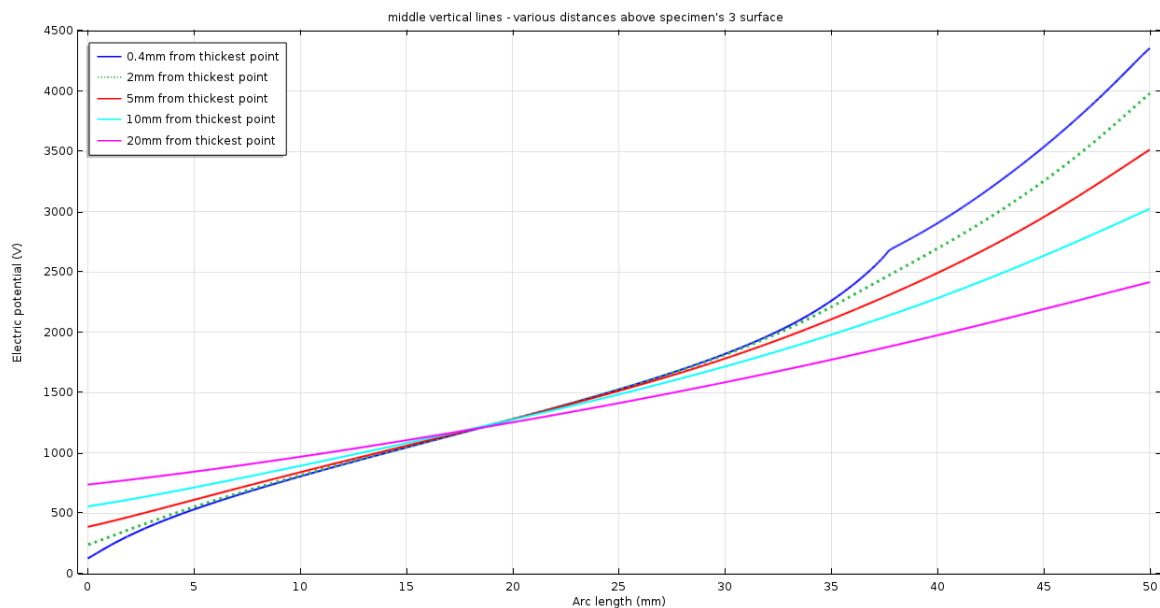
Τέλος, θα εξετάσουμε πώς μεταβάλλονται οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου, όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια των δοκιμίων. Για τον σκοπό αυτόν, ορίζουμε κατακόρυφες Cut lines όμοιες με αυτές που φαίνονται στις Εικόνες 4.16 και 4.17, μόνο, όμως, στο δοκίμιο 3 και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνειά του. Το δοκίμιο 3 επιλέχθηκε στην περίπτωση αυτή, όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση της §4.2, διότι βρίσκεται στη θέση του σετ των δοκιμίων με τη μεγαλύτερη συμμετρία (κέντρο διάταξης δοκιμίων) ως προς τις αποστάσεις από τα γειτονικά δοκίμια και ως εκ τούτου θεωρούμε πως είναι το καταλληλότερο για την εξαγωγή αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων. Οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.54 – 4.57.



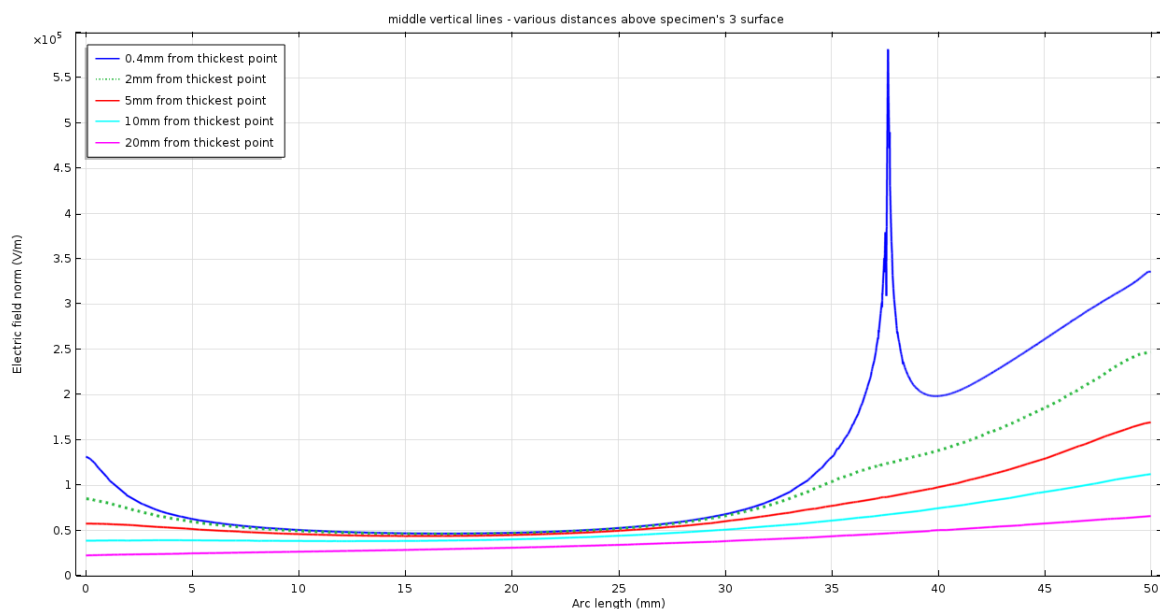
Σχήμα 4.54 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο μέσο των ηλεκτροδίων του δοκιμίου 3 (από διχοτομημένο κιάθιο) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.55 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο των ηλεκτροδίων του δοκιμίου 3 (από διχοτομημένο κιάθιο) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ευθείας διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.56 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο μέσο των ηλεκτροδίων του δοκιμίου 3 (από διχοτομημένο κιάθιο) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού



Σχήμα 4.57 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο των ηλεκτροδίων του δοκιμίου 3 (από διχοτομημένο κιάθιο) στον άξονα x , από το κάτω έως το άνω ηλεκτρόδιο και σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του δοκιμίου, για την περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού

Σημειώνουμε, πως στα υπομνήματα των Σχημάτων 4.54 – 4.57 αναγράφονται οι αποστάσεις κάθε κατακόρυφης Cut line από το παχύτερο, κατά μήκος της, σημείο του

δοκιμίου ($z = 70.5mm$). Και στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού το δυναμικό (Σχήματα 4.54 και 4.56) μειώνεται όσο η απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου αυξάνεται, από το σημείο που απέχει από το γειωμένο ηλεκτρόδιο περίπου $18mm$ στον άξονα z και πάνω, ενώ αντίστοιχη αύξηση παρατηρείται από το ίδιο σημείο και κάτω, σε αντιστοιχία με την περίπτωση της §4.2 (Σχήματα 4.25 και 4.27). Το ηλεκτρικό πεδίο (Σχήματα 4.55 και 4.57) ελαττώνεται και τείνει να σταθεροποιηθεί, όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του δοκιμίου και στα δύο μοντέλα, κατ' αντιστοιχία με τα μοντέλα της §4.2 (Σχήματα 4.26 και 4.28).

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου σε δοκίμια από συνθετικούς μονωτήρες, που υπόκεινται σε δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου. Για τον σκοπό αυτόν, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου μέσω του λογισμικού COMSOL Multiphysics (έκδοση 5.2). Συνολικά δημιουργήθηκαν τέσσερα μοντέλα, ώστε να εξεταστεί παράλληλα η επίδραση που έχει η χρήση δοκιμίων διαφορετικής γεωμετρίας και η μεταβολή της διαδρομής του ρυπαντικού υγρού στα αποτελέσματα (βλ. §3.2.2.2). Κάθε μοντέλο αποτελείται από ένα σετ πέντε υπό εξέταση δοκιμίων, όπως ορίζει το πρότυπο IEC 60587 [41]. Τα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, συνοψίζονται παρακάτω.

Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού

Και στα τέσσερα μοντέλα το ηλεκτρικό δυναμικό στα δοκίμια «εστιάζεται» στην περιοχή όπου ρέει το ρυπαντικό υγρό, λόγω της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων. Δηλαδή, από ένα σημείο στην επιφάνεια των δοκιμίων και πάνω (προς το ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού), το δυναμικό στην περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων κάθε δοκιμίου μεγιστοποιείται στην περιοχή του ρυπαντικού υγρού και μειώνεται καθώς πλησιάζουμε προς τα πλαϊνά σύνορα των δοκιμίων, ενώ το αντίθετο συμβαίνει από το ίδιο σημείο και κάτω (προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο). Κατά συνέπεια, η διαδρομή του ρυπαντικού υγρού παίζει καίριο ρόλο στον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται το δυναμικό στην επιφάνεια των δοκιμίων.

Επίσης, παρατηρήθηκε πως το δυναμικό στα τρία μεσαία δοκίμια (δοκίμια 2, 3 και 4) είναι υψηλότερο σε σχέση με το δυναμικό στα δύο ακριανά (δοκίμια 1 και 5), σε όλα τα μοντέλα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην απόσταση κάθε δοκιμίου από τα ηλεκτρόδια υψηλού δυναμικού των υπόλοιπων δοκιμίων. Δηλαδή, όσο λιγότερο απέχει κάποιο δοκίμιο από τα υπόλοιπα τέσσερα ηλεκτρόδια υψηλού δυναμικού, τόσο ισχυρότερη η συνεισφορά των τελευταίων στην αύξηση του δυναμικού στην επιφάνεια

του δοκιμίου. Για παράδειγμα, το δοκίμιο 3, στο οποίο παρατηρήθηκε το υψηλότερο δυναμικό, βρίσκεται στο μέσο του σετ και γειτνιάζει με δύο ηλεκτρόδια υψηλού δυναμικού σε κάθε πλευρά του. Επομένως, καταλήγουμε στο ότι η θέση των δοκιμίων στο υπό εξέταση σετ επηρεάζει την τιμή του δυναμικού στην επιφάνειά τους, με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται μεταξύ των δύο ακριανών και των υπόλοιπων δοκιμίων.

Μια ακόμη παρατήρηση που έγινε σε όλα τα μοντέλα, έχει να κάνει με την τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού στις πλευρές εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού σε κάθε δοκίμιο. Συγκεκριμένα, το δυναμικό ενισχύεται στην πλευρά (εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού) που γειτνιάζει με τα περισσότερα δοκίμια ή σωστότερα με τα περισσότερα ηλεκτρόδια υψηλού δυναμικού. Ενώ, το αν τελικά η τιμή του δυναμικού στην πλευρά αυτή είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στην άλλη πλευρά του δοκιμίου, εξαρτάται και από την απόσταση του ρυπαντικού υγρού από τα πλαϊνά σύνορα του δοκιμίου, όπου παρατηρείται η ελάχιστη τιμή δυναμικού κατά πλάτος των δοκιμίων. Το συμπέρασμα είναι ότι η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στην επιφάνεια κάθε δοκιμίου δεν είναι συμμετρική εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού. Η εντονότερη ασυμμετρία παρατηρείται στα δύο ακριανά δοκίμια για όλα τα μοντέλα.

Τέλος, παρατηρήθηκε και μια μικρή διαφορά στην τιμή του δυναμικού μεταξύ των δοκιμίων 4 και 5 και των αντιδιαμετρικών τους στο σετ (δοκίμια 2 και 1 αντίστοιχα), η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το σετ των δοκιμίων δεν είναι τοποθετημένο στο κέντρο του θαλάμου δοκιμής, αλλά πλησιέστερα στη δεξιά πλευρά του (βλ. §3.2.2.2). Συγκεκριμένα, το δυναμικό είναι ελαφρώς μειωμένο στα δοκίμια 4 και 5 σε σχέση με τα δοκίμια 2 και 1. Η διαφορά αυτή υφίσταται σε όλα τα μοντέλα, αλλά μπορεί να αποδοθεί στην αιτία που αναφέραμε μόνο εξετάζοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με δοκίμια κατά IEC 60587 [41] και ευθεία διαδρομή ρυπαντικού υγρού, καθώς αυτό είναι το μόνο μοντέλο όπου τα αντιδιαμετρικά δοκίμια στο σετ (1 – 5 και 2 – 4) είναι απολύτως συμμετρικά, με μόνη εξαίρεση την απόστασή τους από τα γειωμένα σύνορα του θαλάμου δοκιμής. Πάντως, η διαφορά που παρατηρήθηκε είναι πολύ μικρή και κατά συνέπεια συμπεραίνουμε πως η θέση του σετ των δοκιμίων μέσα στο θάλαμο δοκιμής δεν έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της δοκιμής κεκλιμένου επιπέδου.

Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου

Και στα τέσσερα μοντέλα παρατηρήθηκαν τοπικές αυξήσεις του ηλεκτρικού πεδίου στις αιχμές («μύτες») των ηλεκτροδίων, στα σύνορα δοκιμίων – αέρα και στην περιοχή του ρυπαντικού υγρού, ιδιαίτερα στα όρια αυτής. Η πιο σημαντική αύξηση σε κάθε περίπτωση εντοπίζεται στα όρια της περιοχής του ρυπαντικού υγρού, όπου το ηλεκτρικό πεδίο μεγιστοποιείται.

Όσον αφορά την τιμή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ορίων του ρυπαντικού υγρού, στην πλειονότητα των περιπτώσεων δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο διαφορετικές διαδρομές του τελευταίου στην επιφάνεια των δοκιμίων. Εξάιρεση αποτελούν τα αποτελέσματα κατά μήκος των (οριζόντιων) middle lines, όπου παρατηρήθηκε και για τους δύο τύπους δοκιμίων μειωμένο ηλεκτρικό πεδίο στην περίπτωση ακανόνιστης διαδρομής ρυπαντικού υγρού (Σχήματα 4.16 και 4.45) σε σχέση με την ευθεία διαδρομή (Σχήματα 4.14 και 4.43 αντίστοιχα). Η ίδια παρατήρηση έγινε και στο δοκίμιο 5 κατά μήκος των lower lines (Σχήματα 4.20 και 4.49). Με βάση τα παραπάνω, δεν προκύπτει με σιγουριά κάποιο συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση της διαδρομής του ρυπαντικού υγρού στην τιμή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ορίων του υγρού, αν και συνολικά δε φαίνεται να επιδρά σημαντικά.

Παράλληλα, λόγω της ευαισθησίας των τιμών του ηλεκτρικού πεδίου στα όρια του ρυπαντικού υγρού από την πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου πλέγματος, στην οποία αναφερθήκαμε στην §4.2, δε μπορούμε να αποφανθούμε ούτε για τυχόν διαφορές της τιμής του ηλεκτρικού πεδίου στα όρια του υγρού ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις διαδρομής ρυπαντικού υγρού. Παρ' όλα αυτά, η διαδρομή του ρυπαντικού υγρού είναι καθοριστικής σημασίας για την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, αφού η θέση του ρυπαντικού υγρού στην επιφάνεια των δοκιμίων προσδιορίζει τα σημεία μεγιστοποίησης του πεδίου.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως σε όλα τα μοντέλα το ηλεκτρικό πεδίο λαμβάνει υψηλότερες τιμές στα δύο ακριανά δοκίμια (δοκίμια 1 και 5) σε σχέση με τα τρία μεσαία (δοκίμια 2, 3 και 4), από ένα σημείο στην επιφάνεια των δοκιμίων και πάνω (προς το ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού). Ενώ, από το ίδιο σημείο και κάτω (προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο) το πεδίο είναι υψηλότερο στα τρία μεσαία δοκίμια. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις αντίστοιχες διαφορές που παρατηρήθηκαν στην κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού και προκύπτει λόγω των διαφορετικών αποστάσεων κάθε δοκιμίου από τα

υπόλοιπα τέσσερα γειτονικά του δοκίμια. Άρα, όπως και για το δυναμικό, η θέση των δοκιμίων στο υπό εξέταση σετ επηρεάζει την τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνειά τους, με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται μεταξύ των δύο ακριανών και των υπόλοιπων δοκιμίων.

Στις εργαστηριακές δοκιμές κεκλιμένου επιπέδου μια ποσότητα ρυπαντικού υγρού συσσωρεύεται στα κάτω (γειωμένα) ηλεκτρόδια, καθώς το υγρό ρέει στην επιφάνεια των δοκιμίων. Μάλιστα, το αγωγίμο κανάλι άνθρακα που δημιουργείται κατά τη δοκιμή (φαινόμενο tracking), ξεκινάει από το γειωμένο ηλεκτρόδιο και επεκτείνεται σταδιακά προς το πάνω μέρος των δοκιμίων. Η συσσώρευση ρυπαντικού υγρού στα γειωμένα ηλεκτρόδια των δοκιμίων σε συνδυασμό με τις αυξημένες τιμές ηλεκτρικού πεδίου που παρατηρήθηκαν στα τρία μεσαία δοκίμια κοντά στην περιοχή των γειωμένων ηλεκτροδίων (από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας), οδηγούν πιθανώς σε εντονότερη καταπόνηση ή και μεγαλύτερη πιθανότητα αποτυχίας (τερματισμού) της δοκιμής, π.χ. ανάφλεξη ή τρύπημα (βλ. §2.2.2.3.1), στα δοκίμια αυτά.

Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ασυμμετρία στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού, όπως και στο ηλεκτρικό δυναμικό αλλά σε μικρότερο βαθμό, η οποία είναι εντονότερη στα δύο ακριανά δοκίμια (δοκίμια 1 και 5). Από ένα σημείο στην επιφάνεια των δοκιμίων και πάνω (προς το ηλεκτρόδιο υψηλού δυναμικού) το πεδίο είναι αυξημένο στην πλευρά (εκατέρωθεν του ρυπαντικού υγρού) που απέχει περισσότερο από τα γειτονικά δοκίμια. Το αντίθετο συμβαίνει από το ίδιο σημείο και κάτω (προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο). Οι διαφορές στην τιμή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αντιδιαμετρικών δοκιμίων στο σετ, λόγω της θέσης του σετ στο θάλαμο δοκιμής, είναι πρακτικά αμελητέες όπως και στην περίπτωση του δυναμικού.

Κλείνοντας την παρούσα ενότητα, πρέπει να επισημάνουμε πως δεν είναι εφικτή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο τύπων δοκιμίων, καθώς στην περίπτωση των δοκιμίων κατά IEC 60587 [41] οι Cut lines που ορίστηκαν εφάπτονται στην επιφάνεια των δοκιμίων, ενώ στην περίπτωση των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια βρίσκονται στον αέρα (σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια των δοκιμίων). Βέβαια, μπορούμε να συγκρίνουμε ποιοτικά τα αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν να συγκρίνουμε τις περιοχές των μοντέλων στις οποίες εντοπίζονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των μετρούμενων μεγεθών ή τις διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δοκιμίων σε κάθε σετ κλπ.

Αναφορικά, λοιπόν, με την επίδραση που έχει η γεωμετρία των χρησιμοποιούμενων δοκιμίων στα αποτελέσματα, προκύπτουν τα εξής. Και για τους δύο τύπους δοκιμίων οι περιοχές μεγιστοποίησης/ελαχιστοποίησης των μετρούμενων μεγεθών καθώς και οι διαφορές μεταξύ των δοκιμίων στο σετ συμπίπτουν. Βέβαια, στην περίπτωση των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια τα ηλεκτρόδια και το ρυπαντικό υγρό βρίσκονται, όπως εξηγήσαμε, πλησιέστερα στο δεξί σύνορο δοκιμίων – αέρα. Αυτό οδηγεί σε διαφορετική κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των δοκιμίων αυτών, σε σχέση με την περίπτωση δοκιμίων κατά IEC 60587 [41]. Μάλιστα, παρατηρήθηκε πως το ηλεκτρικό πεδίο υφίσταται σημαντική αύξηση, όταν το ρυπαντικό υγρό βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την εσωτερική περιφέρεια των δοκιμίων (βλ. Σχήμα 4.45). Επίσης, αν και δεν έχει να κάνει με τα αποτελέσματα, σημειώνουμε πως λόγω της κλίσης που έχει η επιφάνεια των δοκιμίων από διχοτομημένα κυάθια είναι στην πράξη δύσκολο να επιτευχθεί ροή ρυπαντικού υγρού σε ευθεία γραμμή, με όποιες συνέπειες έχει αυτό στην κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα μοντέλα προσομοίωσης που σχεδιάστηκαν για την παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν εκτός των δοκιμίων που ορίζονται στο πρότυπο IEC 60587 και δοκίμια τα οποία προέρχονται απευθείας από τους μονωτήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (διχοτομημένα κυάθια συνθετικών μονωτήρων στήριξης). Έτσι, η δοκιμή κεκλιμένου επιπέδου εξετάζεται όχι μόνο ως δοκιμή στο υλικό, αλλά και ως δοκιμή απευθείας στο τελικό προϊόν, δηλαδή στους ίδιους τους μονωτήρες.

Στις εργαστηριακές δοκιμές κεκλιμένου επιπέδου σε συνθετικούς μονωτήρες είναι αρκετά συχνή η χρήση διχοτομημένων κυαθίων ως δοκιμίων. Κατά συνέπεια, η συγκεκριμένη εργασία έχει και μια πιο πρακτική διάσταση, αποτελώντας ένα πρώτο βήμα προς την καλύτερη κατανόηση και τη βελτίωση, πιθανώς, της δοκιμής αυτής για συνθετικούς μονωτήρες. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και πειραματική διερεύνηση στο μέλλον, με αφορμή την παρούσα εργασία:

- Επέκταση των μοντέλων προσομοίωσης ώστε να είναι ακόμα πιο ρεαλιστικά, π.χ. με προσθήκη των πλαστικών βάσεων στήριξης για τα δοκίμια ή/και του υπόλοιπου εξοπλισμού που χρησιμοποιείται κατά τη δοκιμή.

- Μεταβολή των ιδιοτήτων στα υλικά των μοντέλων (δοκίμια, ρυπαντικό υγρό, αέρας) ή/και χρήση επιπέδου τάσεων διαφορετικής τιμής, σύμφωνα με τις οριζόμενες τιμές τάσης στο πρότυπο IEC 60587 [41] (βλ. §2.2.2.3.1) και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της παρούσας εργασίας.
- Μελέτη στο πεδίο του χρόνου (για μικρό χρονικό διάστημα) με εφαρμογή εναλλασσόμενης (AC) τάσης, ώστε να εξεταστεί η μεταβολή στις κατανομές του ηλεκτρικού δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου, λόγω της αλλαγής πολικότητας της τάσης.
- Χρήση πυκνότερου πλέγματος για τα μοντέλα (απαιτείται υπολογιστής με μνήμη RAM χωρητικότητας μεγαλύτερης από 32GB) με σκοπό τον ακριβέστερο υπολογισμό των μέγιστων τιμών του ηλεκτρικού πεδίου.
- Σύζευξη του πακέτου φυσικής “Electric Currents” με το πακέτο “Heat Transfer in Solids” στο COMSOL Multiphysics, για την παράλληλη μελέτη της ηλεκτρικής και της θερμικής συμπεριφοράς των δοκιμίων.
- Εξακρίβωση των αποτελεσμάτων σχετικά με τις αυξημένες τιμές ηλεκτρικού πεδίου που παρατηρήθηκαν στα τρία μεσαία δοκίμια του σετ (κοντά στα γειωμένα ηλεκτρόδια), μέσω πειραματικών δοκιμών. Από τις δοκιμές αυτές, οι οποίες θα πρέπει να πραγματοποιηθούν κάτω από εργαστηριακές συνθήκες και με απολύτως όμοια δοκίμια (ως προς τις διαστάσεις και την ποσόστωση των υλικών κατασκευής), μπορεί έμμεσα να ελεγχθεί το αν η καταπόνηση που δέχονται τα τρία μεσαία δοκίμια είναι μεγαλύτερη από αυτή που δέχονται τα δύο ακριανά. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει μέσω στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, που θα προκύψουν μετρώντας τις διαστάσεις του αγωγίμου καναλιού άνθρακα (tracking path) που δημιουργείται σε κάθε δοκίμιο, καθώς και το ποσοστό των δοκιμίων στα οποία η δοκιμή τερματίζεται και βρίσκονται σε κάποια από τις τρεις μεσαίες θέσεις του σετ.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Looms, *Insulators for High Voltages*. Stevenage, England: Institution of Engineering and Technology, 1988.
- [2] F. Rizk and G. N. Trinh, *High Voltage Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [3] K. O. Papailiou and F. Schmuck, *Silicone composite insulators: Materials, designs, applications*, 2013th ed. Berlin, Germany: Springer, 2012.
- [4] A. E. Schwalm, “Insulators 101,” in *IEEE PES T&D 2010*, 2010.
- [5] Wikipedia contributors. (2021, Jul. 10). *Nuclear power*, *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuclear_power&oldid=1032886436. [Πρόσβαση: 17 Ιουλίου 2021]
- [6] J. F. Hall, “History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 376-385, Jan 1993.
- [7] I. A. Σταθόπουλος, *Υψηλές τάσεις I. Ζωγράφου*: Εκδόσεις Συμμεών, 1997.
- [8] J. P. Holtzhausen, “High voltage insulators,” IDC [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://pdf4pro.com/view/high-voltage-insulators-idc-online-4a010.html>. [Πρόσβαση: 20 Ιουλίου 2021].
- [9] *Electrical insulator, transmission line insulator manufacturer – Jinyong* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.hbjinyong.com/insulator/>. [Πρόσβαση: 20 Ιουλίου 2021].
- [10] Wikipedia contributors. (2020, Apr. 4). *Pin insulator*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pin_insulator&oldid=948980222. [Πρόσβαση: 20 Ιουλίου 2021].

- [11] *Epoxy resin bushing and insulators made by KINTO* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://trends.directindustry.com/kinto-electric-co-ltd/project-39984-143990.html>. [Πρόσβαση: 23 Ιουλίου 2021].
- [12] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ. *Συμπληρωματικές σημειώσεις υψηλών τάσεων*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2018.
- [13] Α. Τσετσέκου. «Μορφοποίηση των κεραμικών υλικών,» [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: http://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1075/document/Presentation_Processing_%D4%F3%E5%F4%F3%DD%EA%EF%F5.pdf. [Πρόσβαση: 27 Ιουλίου 2021].
- [14] A. Raj. “Manufacturing process of porcelain insulators,” [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.slideshare.net/AnandRaj53/manufacturing-process-of-porcelain-insulators>. [Πρόσβαση: 27 Ιουλίου 2021].
- [15] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2010.
- [16] *American National Standard for Composite Insulators — Transmission Suspension Type*, ANSI/NEMA C29.12-2020, 2020.
- [17] R. Taherian, “Application of polymer-based composites,” in *Electrical Conductivity in Polymer-Based Composites: Experiments, Modelling and Applications*. Elsevier, 2019, pp. 131–181.
- [18] L. L. Grigsby, Ed., *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.
- [19] I. Kravchenko, “E-CR glass fibre for high-performance composites,” *JEC composites*, no. 16, pp. 104–106, 2005.
- [20] H. Khan, M. Amin and A. Ahmad, “Characteristics of silicone composites for high voltage insulations,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 56, no. 1, pp. 91–123, 2018.
- [21] Κ. Σιδεράκης, Δ. Πυλαρινός, Ε. Θαλασσινάκης, Ι. Βιτέλλας και Ε. Πυργιώτη, «Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνθετικών μονωτήρων HTV SIR και κεραμικών μονωτήρων με επικάλυψη από RTV SIR στον παράκτιο σταθμό δοκιμής

μονωτήρων της ΔΕΗ/ΔΔΝ,» στη Σύνοδο “Αθήνα 2011” της Ελληνικής Επιτροπής Cigre, Αθήνα, 2011.

- [22] PFISTERER, “Technical facts SILCOSIL® Silicone Insulators,” PFISTERER SEFAG, Lucerne, Switzerland, 2019 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://www.pfisterer.com/fileadmin/pfisterer/downloads_en/Silcosil-Silicone-Insulators-AI-EN.pdf. [Πρόσβαση: 07 Αυγούστου 2021]
- [23] V. Vijayakumar, “Dielectric Properties of Compatibilised EPDM/Silicone rubber Nanocomposites,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 7, no. 6, pp. 54–61, 2017.
- [24] M. Amin, M. Akbar, and M. Khan, “Aging investigations of polymeric insulators: Overview and bibliography,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 23, no. 4, pp. 44–50, 2007.
- [25] M. Akbar, R. Ullah and S. Alam, “Aging of silicone rubber-based composite insulators under multi-stressed conditions: an overview,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 10, p. 102003, 2019.
- [26] M. Amin and M. Salman, “Aging of polymeric insulators (an overview),” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 93–116, 2006.
- [27] *IEEE Guide for Aging Mechanisms and Diagnostic Procedures in Evaluating Electrical Insulation Systems*, ANSI/IEEE Std 943, 1986.
- [28] Β. Κονταργύρη, «Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ρυπασμένων μονωτήρων,» Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Ηλεκτρ. Ισχ., Σχολή Ηλεκτρ. Μηχ. και Μηχ. Υπολ., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- [29] Κ. Σιδεράκης, «Διερεύνηση της συμπεριφοράς μονωτήρων πορσελάνης και υλικών RTV SIR σε πραγματικές και εργαστηριακές συνθήκες με μετρήσεις του ρεύματος διαρροής,» Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρ. Μηχ. και Τεχνολ. Υπολ., Πανεπ. Πατρών, Πάτρα, 2006.
- [30] *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles*, IEC/TS 60815-1, 1st ed., 2008.

- [31] N. Mavrikakis, K. Siderakis, D. Pylarinos and E. Koudoumas, “Assessment of field aged composite insulators condition in Crete,” in *9th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe*, Nicosia, Cyprus, 2014, pp. 25-26.
- [32] Δ. Πυλαρινός, «Διερεύνηση συμπεριφοράς μονωτήρων υψηλής τάσης μέσω μετρήσεων του ρεύματος διαρροής,» Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Συστημ. Ηλεκτρ. Εν., Τμήμα Ηλεκτρ. Μηχ. και Τεχνολ. Υπολ., Πανεπ. Πατρών, Πάτρα, 2012.
- [33] *Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces*, IEC/TS 62073, 1st ed., 2003.
- [34] S. M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson and H. Hillborg, “Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 5, pp. 1065–1080, 2007.
- [35] *Hydrophobicity Classification Guide*, STRI Guide 92/1, 1992 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: http://212.85.76.103/wwwpublic/STRI_Guide_1_92_1.pdf. [Πρόσβαση: 21 Αυγούστου 2021].
- [36] *Composite Insulator Status Program: Field inspection of composite line insulators*, STRI Guide 3, 2005 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: http://212.85.76.103/wwwpublic/STRI_Guide_3_05.pdf. [Πρόσβαση: 21 Αυγούστου 2021].
- [37] CIGRE Technical Brochure no. 481, “Guide for the Assessment of Composite Insulators in the Laboratory after their Removal from Service,” W.G. B2.21, 2011.
- [38] *Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria*, IEC 61109, 1st ed., 1992.
- [39] *Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria*, IEC 61109, 2nd ed., 2008.

- [40] *Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion of electrical insulating materials used under severe ambient conditions*, IEC 587, 2nd ed., 1984.
- [41] *Electrical insulating materials used under severe ambient conditions – Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion*, IEC 60587, 3rd ed., 2007.
- [42] *Standard Test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials*, ASTM D2303-13, 2013.
- [43] *Standard Test Method for Dust-and-Fog Tracking and Erosion Resistance of Electrical Insulating Materials*, ASTM D2132-19, 2019.
- [44] *Recommended test methods for determining the relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharges*, IEC 60343, 2nd ed., 1991.
- [45] *Electrical insulating materials – Method to evaluate the resistance to tracking and erosion – Rotating wheel dip test*, IEC 61302, 1st ed., 1995.
- [46] *HV polymeric insulators for indoor and outdoor use tracking and erosion testing by wheel test and 5000h test*, IEC/TR 62730, 1st ed., 2012.
- [47] *Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage > 1000 V – General definitions, test methods and acceptance criteria*, IEC 62217, 1st ed., 2005.
- [48] F. L. Muhamedin, M. A. M. Piah, N. A. Othman and N. Ahmed Algeelani, “Effect of contaminant flow-rate and applied voltage on the current density and electric field of polymer tracking test,” *Int. J. Electr. Comput. Eng. (IJECE)*, vol. 6, no. 2, pp. 819–826, 2016.
- [49] F. L. Muhamedin, M. A. M. Piah and N. A. Othman, “Modelling on tracking test condition of polymer nanocomposite using finite element simulation,” *TELKOMNIKA*, vol. 13, no. 4, pp. 1194–1203, 2015.
- [50] M. T. Nazir *et al.*, “Simulation and experimental investigation on carbonized tracking failure of EPDM/BN-based electrical insulation,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 3, p. 582, 2020.

- [51] A. M. D. Gomez, A. B. R. Mathersa and N. Vasudev, “Experimental and simulation studies on room temperature vulcanization (RTV) silicone material under inclined plane tracking and erosion test,” in *2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, 2017.
- [52] N. N. M. Shariff and M. Kamarol, “Electric field analysis along pin-plane electrodes near the contaminated dielectric surface using FEM,” in *TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference*, 2017.
- [53] S. Gubanski, J. Andersson, H. Hillborg and R. Saldivar, “Tracking on Insulator Surfaces in Presence of Conductive Defects within Housing to Core Interface,” *Insulator News & Market Report*, vol. 17, no. 2, pp. 74–79, 2009.
- [54] M. Pradhan, H. Greijer, G. Eriksson and M. Unge, “Functional behaviors of electric field grading composite materials,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 768–778, 2016.
- [55] COMSOL. *COMSOL Multiphysics Reference Manual* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf. [Πρόσβαση: 21 Σεπτεμβρίου 2021].
- [56] J. Tu, G.-H. Yeoh and C. Liu, “CFD mesh generation: A practical guideline,” in *Computational Fluid Dynamics*, Elsevier, 2018, pp. 125–154.
- [57] “Detailed explanation of the finite element method (FEM),” *Comsol.com* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method?parent=physics-pdes-numerical-042-62>. [Πρόσβαση: 30 Σεπτεμβρίου 2021].
- [58] W. Frei. (2013, Nov. 11). “Solutions to linear systems of equations: Direct and iterative solvers,” *Comsol.com* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/>. [Πρόσβαση: 30 Σεπτεμβρίου 2021].
- [59] Wikipedia contributors. (2021, Jul. 29). “LU decomposition,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=LU_decomposition&oldid=1036068485.
[Πρόσβαση: 30 Σεπτεμβρίου 2021].

- [60] Wikipedia contributors. (2021, Sep. 12). “Conjugate gradient method,” *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Conjugate_gradient_method&oldid=1043940413. [Πρόσβαση: 30 Σεπτεμβρίου 2021].