



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

Γήρανση Μονωτήρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Β. Αλεξοπούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα : Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Αθήνα, Μάρτιος 2006



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

133

Γήρανση Μονωτήρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Β. Αλεξοπούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα : Βασιλική Θ. Κονταργύρη

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ^η Μαρτίου 2006.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2006

Ειρήνη Β. Αλεξοπούλου

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

Πτυχιούχος Χημικός Α.Π.Θ.

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στον πατέρα μου,

Βασίλη Α. Αλεξόπουλο,

Διπλωματούχο Μηχανολόγο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π.

Πλησιάζοντας με δέος το κατώφλι της Σχολής από την οποία ο πατέρας μου αποφοίτησε το έτος 1959, με εφόδια τη δύναμη της θέλησης και την αγάπη του για τη γνώση.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλου και της κ. Βασιλικής Θ. Κονταργύρη, Υποψήφια Διδάκτορα Μηχανικό και Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η χρήση των πολυμερών ως υλικά μονωτήρων σε σύγκριση με τα κεραμικά, η θεώρηση των συνθηκών εκείνων που επηρεάζουν την απόδοση κατά τη λειτουργία και τη χρήση τους και των παραγόντων με τους οποίους επιλέγονται τα πολυμερή υλικά ως μονωτικά υλικά εξωτερικού χώρου. Εξετάζεται η αντοχή των μονωτήρων στη διάρκεια των χρόνων της χρησιμοποίησής τους σε εξωτερικό περιβάλλον υπό συνθήκες ρύπανσης και άλλων καταπονήσεων μηχανικών ή θερμικών που οφείλονται είτε στις συνθήκες λειτουργίας, είτε στις καιρικές συνθήκες.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά σε γενικά στοιχεία σχετικά με τους μονωτήρες. Αναλύονται τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι μονωτήρες και επιχειρείται μία κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων μονωτήρων. Στο ίδιο κεφάλαιο αναλύεται η ρύπανση, η οποία επικάθεται στην επιφάνεια των μονωτήρων και αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει τη διηλεκτρική συμπεριφορά τους. Παρουσιάζεται το φαινόμενο της υπερπήδησης, δηλαδή της γεφύρωσης με ηλεκτρικό τόξο ενός μονωτήρα. Αναλύονται οι παράγοντες που οδηγούν στο φαινόμενο της υπερπήδησης τόσο σε μονωτήρες πορσελάνης, όσο και σε πολυμερείς μονωτήρες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η ιδιότητα της υδροφοβικότητας που χαρακτηρίζει τους πολυμερείς μονωτήρες. Παρουσιάζονται τα κριτήρια κατάταξης της υδροφοβικότητας μονωτήρων και αναλύεται η εκδήλωση του φαινομένου corona παρουσία σταγόνων ύδατος σύμφωνα με άρθρα δημοσιευμένα στη διεθνή βιβλιογραφία. Μελετάται η επίδραση της γωνίας επαφής, του μεγέθους, του σχήματος και της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας ύδατος στην τιμή της πεδιακής έντασης στην περιοχή του περιβλήματος και στην περιοχή του δίσκου

μονωτήρα, όπως επίσης και της επίδρασης της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος και της παρουσίας πολλών σταγόνων ύδατος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο από δημοσιεύσεις άλλων ερευνητών χρησιμοποιούνται στο κεφάλαιο 5 για τον έλεγχο της ακρίβειας των προσομοιώσεων της πεδιακής έντασης που ελήφθησαν με το πρόγραμμα προσομοίωσης PC OPERA 3D για τη γεωμετρία του μοντέλου μονωτήρα - σταγόνας ύδατος.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσία επιλεγμένων άρθρων που έχουν δημοσιευτεί γύρω από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των πολυμερών υλικών, από τα οποία κατασκευάζονται οι συνθετικοί μονωτήρες και οι οποίες προσδίδουν σε αυτούς την αντοχή σε θερμική γήρανση, στην υπεριώδη ακτινοβολία, σε ρεύματα ερπυσμού, την αντίσταση έναντι της διάβρωσης της επιφάνειας τους σε εξωτερικό περιβάλλον με ρύπανση, και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τους υπό συνθήκες λειτουργίας σε εξωτερικό χώρο. Εκτιμάται η απόδοση των συνθετικών μονωτήρων σε σύγκριση με τους κεραμικούς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθεται μέρος των λειτουργιών και των εργαλείων του υπολογιστικού προγράμματος πεδιακής ανάλυσης PC OPERA 3D V10.5 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση των περιοχών του περιβλήματος και του δίσκου μονωτήρα παρουσία σταγόνων ύδατος. Παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εντολές που αντιστοιχούν στις επί μέρους λειτουργίες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η προσομοίωση συνθετικού μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ στο πρόγραμμα PC OPERA 3D και με το ίδιο πρόγραμμα αναλύονται βασικά χαρακτηριστικά της κατανομής του ανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο του περιβλήματος και στο επίπεδο του δίσκου του συνθετικού μονωτήρα μετά την εναπόθεση σ' αυτά σταγόνων ύδατος, ενώ λαμβάνονται και διαγράμματα ισοδυναμικών γραμμών και γραμμών ίσης έντασης ηλεκτρικού πεδίου.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των προσομοιώσεων του πέμπτου κεφαλαίου με τα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία. Από τη σύγκριση αυτή καταδεικνύεται η ακρίβεια των προσομοιώσεων.

Σ' αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, που μου παρείχε τη δυνατότητα να εκπονήσω τη διπλωματική εργασία στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και να εξοικειωθώ με τη χρήση προγράμματος για την ανάλυση του ηλεκτρικού πεδίου, την επιβλέπουσα της εργασίας, Υποψήφια Διδάκτορα και Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, κ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη, που με τη συγκέντρωση πληροφοριακού υλικού και την παροχή των απαιτούμενων μέσων και γνώσεων συνετέλεσε ουσιαστικά στην κατανόηση από πλευράς μου και ανάπτυξη των θεμάτων της εργασίας. Επίσης, την ευχαριστώ για την παραχώρηση της εγκεκριμένης από τον Μάρτιο του 2005 ενδιάμεσης κρίσης της με θέμα «Ρύπανση Μονωτήρων» που αποτέλεσε πολύτιμο οδηγό και αναφορά κατά την εξέλιξη της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον Διδάκτορα Μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, για την παρουσία του στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και την άμεση ανταπόκριση και διευκόλυνσή μου σε περίπτωση ανάγκης κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και στα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, τους υποψήφιους διδάκτορες και τους τελειόφοιτους της Σχολής με τους οποίους μοιράστηκα το χώρο του Εργαστηρίου ή είχα τη δυνατότητα να συζητήσω το θέμα της παρούσας εργασίας κατά τη διάρκεια των ετών 2005-06.

Στην οικογένεια μου οφείλω τη δικαίωση μακροχρόνιας προσπάθειας σπουδών και θα ήθελα να βρεθώ στη θέση να τους το ανταποδώσω με την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής των κεραμικών και των συνθετικών μονωτήρων. Ειδικότερα εξετάζεται η γήρανση των συνθετικών μονωτήρων από σιλικονούχα πολυμερή με κύριο παράγοντα επιβάρυνσης την απώλεια της υδροφοβικότητας σε συνθήκες ηλεκτρικής καταπόνησης λόγω ηλεκτρικών εκκενώσεων, εκκενώσεων corona κ.λ.π. γύρω από σταγόνες ύδατος που επικάθονται στην επιφάνεια των μη κεραμικών μονωτήρων χρήσεως εξωτερικού χώρου.

Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος πεδιακής ανάλυσης Opera 3D V10.5 προσομοιώνονται οι περιοχές του περιβλήματος και του δίσκου ενός συνθετικού μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ μετά την εναπόθεση σε αυτές τις περιοχές σταγόνων ύδατος. Στην ανάλυση, προσομοιώνεται, ένα επίπεδο φύλλο από υδρόφοβο σιλικονούχο καουτσούκ με μία ή περισσότερες διακριτές σταγόνες ύδατος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για να μελετηθεί η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου πλησίον των σταγόνων ύδατος στις δύο περιοχές του μονωτήρα. Το ένα ηλεκτρόδιο φορτίζεται (100 Volts) και το άλλο είναι γειωμένο.

Σκοπός της προσομοίωσης είναι να διερευνηθούν οι παράμετροι που επιδρούν στην αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παρουσία σταγόνων ύδατος στις δύο περιοχές της επιφάνειας του μονωτήρα. Εξετάζεται το αποτέλεσμα της επίδρασης των διαστάσεων των ηλεκτροδίων, το μέγεθος και η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας ύδατος, η απόσταση μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος και η παρουσία πολλών διακριτών σταγόνων ύδατος.

Τα πολυμερή υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των συνθετικών μονωτήρων θα υποστούν γήρανση με το χρόνο. Στη διάρκεια της χρησιμοποίησής τους είναι σημαντικό να μην αστοχήσουν ή να μην επιτρέψουν ηλεκτρική υπερπήδηση που είναι το αποτέλεσμα της εμφάνισης υψηλών τιμών της έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε ορισμένα τμήματα της επιφάνειας του μονωτήρα.

Τέλος, τα αποτελέσματα που ελήφθησαν συγκρίνονται με αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού του πεδίου σύμφωνα με δημοσιευμένη ερευνητική εργασία.

Λέξεις Κλειδιά: Γήρανση, συνθετικός μονωτήρας, σιλικονούχο καουτσούκ, τάξη υδροφοβικότητας, εκκενώσεις corona σταγόνων ύδατος, υπερπήδηση, ηλεκτρικό πεδίο συνθετικών μονωτήρων, προσομοίωση, αστοχία υλικού, σιλικονούχα ελαστομερή, ρύπανση, αντοχή στη διάβρωση, αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, πρόσθετα, πληρωτικά υλικά, διάρκεια ζωής

Abstract

This diploma thesis investigates the properties which can play an important role in long term performance and life expectancy of ceramic and composite insulators. The aging of non ceramic silicone rubber insulators is especially studied. The loss of their hydrophobicity due to electrical stresses, water drop corona etc is pointed out as an important parameter that affects performance of silicone polymer used as an outdoor insulator.

By using the field analysis computational software Opera 3D V10.5 the sheath and the shed regions of a non ceramic silicone rubber insulator are simulated. For the simulation of both regions of the insulator a flat hydrophobic silicone rubber sheet with one or more discrete water droplets is placed between two electrodes in order to study the electric field enhancement around the water droplets. One electrode is energized (e.g., 100 Volts), the other one is grounded.

The simulation aims to investigate the main features that result in the electric field enhancement due to the presence of the water droplets on the sheath and the shed regions of the insulator surface. The effect of the electrodes dimensions, water droplet size, the relative permittivity of water droplet, the distance between adjacent water droplets and the presence of more than two discrete water droplets is studied.

All polymers used in the manufacturing of composite insulators will age over time but what is important is that they do not permit an electrical flashover which is a result of high values of electric field localized on some parts of the insulator surface.

Finally, the results occurring by the simulations are given in comparison with corresponding values which had been brought to light by research according to other analytical methods of electric field calculations.

Key words: Aging, composite insulator, silicone rubber, hydrophobicity classification, water drops corona discharges, flashover, electric field of composite insulator, simulation, material failure, silicone elastomer, pollution, erosion resistance, UV stability, additives, fillers, life expectancy

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Ιστορική αναδρομή	1
1.3 Βασικοί ορισμοί	3
1.4 Υλικά των μονωτήρων	9
1.4.1 Κεραμικά Υλικά	9
1.4.2 Πολυμερή υλικά	10
1.4.3 Σύγκριση ιδιοτήτων μονωτικών υλικών	10
1.4.4 Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών	14
1.5 Κατηγορίες μονωτήρων	15
1.6 Ρύπανση	19
1.7 Το φαινόμενο της υπερπήδησης (flashover)	22
1.7.1 Παράγοντες που ευνοούν τη διαδικασία της υπερπήδησης	23
1.7.2 Μηχανισμοί υπερπήδησης	23
1.7.3 Τρόποι μετριασμού του φαινομένου της υπερπήδησης	27
1.8 Η ηλεκτρική διάσπαση	28
1.9 Οι διάφορες μορφές ηλεκτρικών εκκενώσεων	29
1.10 Μέθοδοι επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων	30
1.10.1 Το πρόγραμμα Opera 3D	31

Κεφάλαιο 2: Η ιδιότητα της υδροφοβικότητας

Μελέτη ηλεκτρικού πεδίου παρουσία ύδατος στην υδρόφοβη

επιφάνεια μη κεραμικού μονωτήρα **33**

2.1 Κατάταξη υδροφοβικότητας μη κεραμικών μονωτήρων	33
2.1.1 Κατάταξη υδροφοβικότητας σύμφωνα με τον STRI Guide, 1992	33
2.1.2 Υστέρηση γωνίας επαφής	38
2.1.3 Φόρμα φύλλου ελέγχου σύμφωνα με τον STRI Guide, 1992	39
2.1.4 Κατάταξη υδροφοβικότητας σύμφωνα με το πρότυπο IEC/TS 62073	40

2.2	Εκδήλωση εκκενώσεων corona παρουσία σταγόνων ύδατος και η δυναμική συμπεριφορά στην επιφάνεια των μη κεραμικών μονωτήρων _____	42
2.3	Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ με μία σταγόνα ύδατος _____	50
2.3.1	Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής του περιβλήματος _____	51
2.3.2	Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής του δίσκου _____	56
2.4	Επίδραση της γωνίας επαφής, του μεγέθους, του σχήματος και της αγωγιμότητας της σταγόνας ύδατος στην πεδιακή ένταση _____	59
2.4.1	Επίδραση της γωνίας επαφής της σταγόνας ύδατος _____	59
2.4.2	Επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος _____	61
2.4.3	Επίδραση του σχήματος της σταγόνας ύδατος _____	62
2.4.4	Το αποτέλεσμα της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος _____	64
2.4.5	Επίδραση της αγωγιμότητας της σταγόνας ύδατος _____	65

Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση - Γήρανση συνθετικών μονωτήρων και εκτίμηση της απόδοσης των συνθετικών μονωτήρων σε σύγκριση με τους κεραμικούς μονωτήρες _____

3.1	Εισαγωγή _____	66
3.1.1	Οπτική αναγνώριση αλλοιώσεων / φθορών σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης _____	67
3.1.2	Οπτική αναγνώριση ζημιών / βλαβών σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης _____	69
3.1.3	Οπτική αναγνώριση αστοχίας μονωτήρα _____	73
3.2	Συνθετικοί μονωτήρες από σιλικόνη _____	74
3.2.1	Η ικανότητα της ανάκτησης της υδροφοβικότητας _____	75
3.2.1.1	Συνθήκες ηλεκτρικών εκκενώσεων ή άλλων καταπονήσεων _____	77
3.2.1.2	Συνθήκες ρύπανσης _____	79
3.2.2	Μεταφορά της υδρόφοβης συμπεριφοράς _____	80
3.2.3	Ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Θωράκιση έναντι της ρύπανσης _____	82
3.2.4	Αντοχή στις καιρικές συνθήκες _____	83
3.2.5	Μηχανικές ιδιότητες _____	83

3.3	Υπολογισμός κατανομής δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου συνθετικών μονωτήρων σε συνθήκες ξηρασίας και υγρασίας _____	83
3.3.1	Απόσταση μεταξύ του πρώτου δίσκου και του άκρου του μονωτήρα στο οποίο καταλήγει η γραμμή μεταφοράς _____	84
3.3.2	Διάστημα μεταξύ γειτονικών δίσκων μονωτήρα _____	85
3.3.3	Γεωμετρία του δίσκου _____	85
3.3.4	Συνθήκες υγρασίας _____	86
3.4	Ηλεκτρική συμπεριφορά κεραμικών μονωτήρων σε πραγματικές συνθήκες ρύπανσης και υγρασίας _____	88
3.5	Αποτέλεσμα της επίδρασης των εκκενώσεων corona σε μη κεραμικούς μονωτήρες από σιλικονούχο καουτσούκ _____	89
3.6	Υποβάθμιση συνθετικών μονωτήρων λόγω καιρικών συνθηκών και τρόποι βελτίωσης της απόδοσης και της διάρκειας ζωής _____	91
3.7	Εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός συνθετικού μονωτήρα _____	93
3.8	Κριτήρια τέλους διάρκειας ζωής πολυμερών μονωτήρων _____	93
3.9	Συντελεστές απόδοσης συνθετικών μονωτήρων _____	95
Κεφάλαιο 4: Το πρόγραμμα PC OPERA-3d _____		96
4.1	Εισαγωγή _____	96
4.2	Πρόγραμμα ανάλυσης με τη χρησιμοποίηση του μοντελοποιητή _____	96
4.3	Φτιάχνοντας τη γεωμετρία _____	97
4.4	Ελέγχοντας την εικόνα _____	98
4.5	Ιδιότητες του αντικειμένου _____	99
4.6	Φτιάχνοντας νέα σώματα στο αντικείμενο ελέγχου _____	99
4.7	Δημιουργώντας αντίγραφα _____	102
4.8	Επιλέγοντας οντότητες και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες _____	102
4.9	Διαφάνεια αντικειμένου _____	103
4.10	Δημιουργώντας έναν όγκο πίσω από το αντικείμενο _____	104
4.11	Δημιουργώντας ένα απλό μοντέλο _____	106
4.12	Δημιουργώντας το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων _____	107
4.13	Προετοιμάζοντας το μοντέλο για την ανάλυση _____	108
4.14	Μετ' επεξεργαστής _____	111

**Κεφάλαιο 5: Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από
σταγόνες ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος και του
δίσκου ενός συνθετικού μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ** **114**

5.1	Εισαγωγή _____	114
5.2	Προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος _____	115
5.2.1	Επίδραση των διαστάσεων των ηλεκτροδίων στη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	120
5.2.2	Επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	122
5.2.3	Επίδραση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας στη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	126
5.2.4	Το αποτέλεσμα της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος στην κατανομή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου _____	129
5.3	Προσομοίωση της περιοχής του δίσκου _____	139
5.3.1	Επίδραση των διαστάσεων των ηλεκτροδίων στη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	142
5.3.2	Επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	145
5.3.3	Το αποτέλεσμα της παρουσίας πολλών σταγόνων ύδατος στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου _____	146
5.3.4	Το αποτέλεσμα της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος στην κατανομή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου _____	149

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Η επόμενη μέρα _____ **151**

Βιβλιογραφία _____ **155**

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [1] και χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η σχεδίαση της γεωμετρίας, το υλικό κατασκευής των μονωτήρων, ο τύπος της χρησιμοποίησής τους και το κόστος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην τελική επιλογή των μονωτήρων ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους.

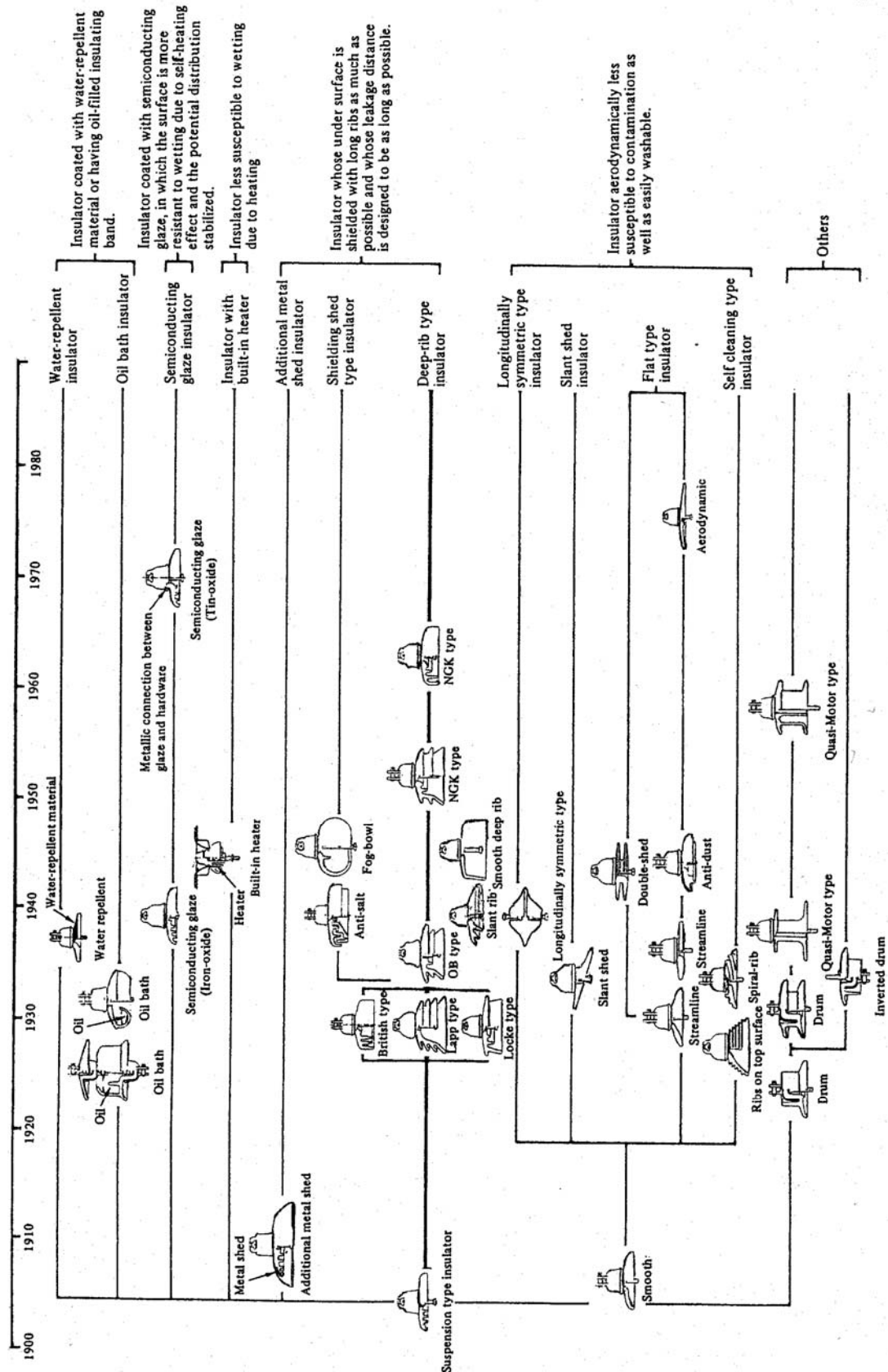
1.2 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτοι μονωτήρες χρονολογούνται από το έτος 1835 στα δίκτυα τηλεγράφων. Το έτος 1882 χρησιμοποιούνται σε δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας όταν τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς τάσης (1343V) που συνέδεε το Miesbach με το Μόναχο [2, 3].

Από τότε οι μονωτήρες τροποποιούνται ως προς τα υλικά κατασκευής τους, το σχήμα τους, την ανάγκη εφαρμογής υψηλότερων τάσεων, τη βελτίωση της απόδοσής τους σε συνθήκες ρύπανσης (Σχήμα 1.1). Αναπτύχθηκαν οι δισκοειδείς μονωτήρες στους υποσταθμούς και στις εναέριας γραμμές μεταφοράς.

Λίγο πριν το 1962 διαπιστώθηκε ότι η απόδοση των μονωτήρων μπορεί να προβλεφθεί από εργαστηριακές δοκιμές και έτσι η γεωμετρία και ο όγκος τους είναι δυνατό να εξεταστούν επιστημονικά. Η σημαντικότερη δοκιμή ήταν η δοκιμή λειτουργίας σε περιβάλλον ομίχλης και αλάτων βάσει της οποίας απορρίφθηκαν

αρκετά παράδοξα σχήματα μονωτήρων. Η συγκεκριμένη δοκιμή τυποποιήθηκε το 1975 με το πρότυπο IEC 507, κατόπιν μακροχρόνιας έρευνας [4].



Σχήμα 1.1: Χρονολογική κατάταξη των κανόνων σχεδιασμού των μονωτήρων με στόχο την αποφυγή εναπόθεσης ρύπανσης [5].

Οι πρώτοι μονωτήρες από πολυμερές υλικό και συγκεκριμένα από εποξική ρητίνη [6] κατασκευάστηκαν για εγκατάσταση σε εξωτερικό περιβάλλον μετά το 1960 στις Ηνωμένες Πολιτείες, αλλά αστόχησαν σε σύντομο χρονικό διάστημα. Λίγα χρόνια αργότερα οι κατασκευαστές εισήγαγαν σε γενικές γραμμές τη μορφή που παρουσιάζουν σήμερα οι πολυμερείς μονωτήρες.

Με την έρευνα σήμερα γίνονται προσπάθειες να επιλυθούν προβλήματα αξιοπιστίας ώστε να καλυφθούν επιτυχώς οι απαιτήσεις μεταφοράς υψηλής ή υπερυψηλής τάσης καθώς και συνεχούς τάσης

1.3 Βασικοί ορισμοί

Μονωτικά υλικά ή διηλεκτρικά: Είναι τα υλικά στα οποία όλοι οι φορείς (ηλεκτρόνια) είναι πλήρως και σταθερά δεσμευμένα στα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος και μια συνηθισμένη προσφορά ενέργειας δεν μπορεί να δημιουργήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια.. Συνεπώς τα υλικά αυτά δεν είναι αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος [7].

Μονωτήρες δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας: Είναι εξαρτήματα των γραμμών μεταφοράς, αποτελούμενα κυρίως από μονωτικό υλικό, τα οποία χρησιμοποιούνται για να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν αγωγούς τάσης.

Μήκος ερπυσμού (L): Είναι η συντομότερη διαδρομή επί της επιφανείας του μονωτήρα ανάμεσα σε δύο μεταλλικά άκρα του (μήκος της εξωτερικής ημιπεριμέτρου του μονωτικού υλικού σε επίπεδο τομής διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας του μονωτήρα [1].

Ειδικό μήκος ερπυσμού (L_s): Είναι το ολικό μήκος ερπυσμού ενός μονωτήρα διαιρεμένο με το γινόμενο της rms τιμής της τάσης επί $\sqrt{3}$. Συνήθως εκφράζεται σε mm/kV [8].

Συντελεστής μορφής (F): Καθορίζεται από τις διαστάσεις του μονωτήρα. Προκειμένου να προσδιοριστεί γραφικά, σχεδιάζεται η αντίστροφη τιμή της περιφέρειας του μονωτήρα ($1/p$) συναρτήσει του μερικού μήκους ερπυσμού (l) υπολογιζόμενο από το τέλος του μονωτήρα μέχρι το μετρούμενο σημείο. Ο

συντελεστής μορφής δίνεται από το εμβαδόν κάτω από τη σχηματιζόμενη καμπύλη και υπολογίζεται από τη σχέση [8]:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{p(l)} \quad (1.1)$$

Αν $D(l)$ είναι η διάμετρος του μονωτήρα, τότε η σχέση 1.1 τροποποιείται ως εξής [9]:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{\pi \cdot D(l)} \quad (1.2)$$

Αλμυρότητα: Η συγκέντρωση άλατος σε διάλυμα προερχόμενο από νερό βρύσης, εκφρασμένο σε ποσότητα άλατος διαιρεμένη με τον όγκο του διαλύματος. Συνήθως εκφράζεται σε kg/m^3 [8].

Στρώμα ρύπανσης: Είναι ένα αγωγίμο ηλεκτρολυτικό στρώμα στην επιφάνεια του μονωτήρα, το οποίο αποτελείται από άλατα και αδρανή υλικά [8].

Αγωγιμότητα στρώματος: Η αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή μορφής. Συνήθως εκφράζεται σε μS [8].

Πυκνότητα επικάλυψης άλατος (salt deposit density – SDD): Η ποσότητα άλατος που εναποτίθεται σε δεδομένη επιφάνεια του μονωτήρα (μεταλλικά μέρη και υλικά σύνδεσης δεν πρέπει να συμπεριλαμβάνονται σε αυτή την επιφάνεια) διαιρεμένη με το εμβαδόν της επιφάνειας. Συνήθως εκφράζεται σε mg/cm^2 [8].

Ισοδύναμη πυκνότητα επικάλυψης άλατος (equivalent salt deposit density – ESDD): Είναι η ισοδύναμη ποσότητα εναποθέματος σε mg NaCl ανά cm^2 στην επιφάνεια ενός μονωτήρα, η οποία έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με το πραγματικό εναπόθεμα διαλυμένο στην ίδια ποσότητα νερού [10].

Διαβρεξιμότητα (wettability): Είναι η ικανότητα μίας επιφάνειας να υγρανθεί από ένα υγρό (π.χ. νερό) [11].

Υδροφοβικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με χαμηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδρόφοβη επιφάνεια έχει χαμηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να απωθεί το νερό [11].

Υδροφιλικότητα: Χαρακτηρίζει μία επιφάνεια με υψηλό βαθμό διαβρεξιμότητας. Μία υδρόφιλη επιφάνεια έχει υψηλή επιφανειακή τάση με αποτέλεσμα να υγραίνεται

από το νερό, το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα πάνω στην επιφάνεια [11].

Ιξωδοελαστική συμπεριφορά πολυμερών υλικών: Τα πολυμερή όταν βρίσκονται στην ελαστομερή κατάσταση παρουσιάζουν κάτω από την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων ιξωδοελαστική συμπεριφορά, η οποία είναι ένας συνδυασμός της ελαστικής συμπεριφοράς των στερεών σωμάτων και της νευτώνειας συμπεριφοράς των ρευστών.

Η γνώση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς και γενικότερα της μηχανικής συμπεριφοράς των πολυμερών παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον κυρίως για τους παρακάτω λόγους:

α) Κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας ενός προϊόντος από πολυμερικό υλικό, αυτό συνήθως δέχεται την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων (π.χ. εφελκυστικών για την παραγωγή ινών ή θλιπτικών για την παραγωγή διαφόρων πλαστικών αντικειμένων με συμπίεση). Αν γνωρίζουμε τη συμπεριφορά του πολυμερούς, είναι δυνατή η ρύθμιση των συνθηκών (θερμοκρασία, χρόνος, πίεση κ.α.) ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση ελαττωμάτων στο τελικό προϊόν. Επίσης είναι δυνατή η ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγική διαδικασία του προϊόντος, όπως π.χ.: απαιτούμενο μέγεθος εγκατάστασης, κατανάλωση ενέργειας, με στόχο τη μείωση του κόστους παραγωγής [12].

β) Το προϊόν που θα παραχθεί συνήθως δέχεται την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων κατά τη χρησιμοποίησή του. Αν λοιπόν γνωρίζουμε τη μηχανική συμπεριφορά των πολυμερών γίνεται σωστότερη επιλογή του πιο κατάλληλου, ώστε να ικανοποιούνται καλύτερα οι απαιτήσεις των ιδιοτήτων που πρέπει να έχει το τελικό προϊόν. Σε πολλές εφαρμογές απαιτούνται πολυμερή που δεν παραμορφώνονται εύκολα και παρουσιάζουν σταθερότητα διαστάσεων όταν βρεθούν κάτω από τη μακρόχρονη επίδραση εξωτερικών δυνάμεων.

Τα πολυμερή γενικά κάτω από συνθήκες μηχανικής φόρτισης συμπεριφέρονται ως:

α) Ελαστικά στερεά β) Ιξωδοελαστικά γ) Ρευστά

Ως ελαστικά στερεά συμπεριφέρονται όταν βρίσκονται σε θερμοκρασίες που είναι κάτω από τη θερμοκρασία T_g (θερμοκρασία υαλώδους κατάστασης) στην περίπτωση των άμορφων και ημικρυσταλλικών πολυμερών (υαλώδης κατάσταση), ή κάτω από τη θερμοκρασία T_m (θερμοκρασία σημείου τήξης) στην περίπτωση των

κρυσταλλικών. Στην περιοχή αυτή των θερμοκρασιών, όπου παρατηρούνται μόνο δονήσεις των ομοιοπολικών δεσμών των μακρομορίων η επίδραση εξωτερικών δυνάμεων προκαλεί ελαστικές παραμορφώσεις (επιμήκυνση, κάμψη) των δεσμών, με αποτέλεσμα το πολυμερές να συμπεριφέρεται όπως ένα ελατήριο [12].

Σ' ένα ελατήριο εάν εφαρμοστεί μία δύναμη F θα προκαλέσει μία ελαστική παραμόρφωση ως αποτέλεσμα του εφελκυσμού. Το μέγεθος της παραμόρφωσης είναι ανάλογο προς την τάση που εφαρμόζεται, όπως ορίζεται από το νόμο του Hooke (νόμος ελαστικών στερεών):

$$\sigma = E \gamma \quad (1.3)$$

όπου σ είναι η τάση που εφαρμόζεται (Δύναμη / Επιφάνεια S), E είναι το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό ή μέτρο του Young, και γ είναι η ανηγμένη επιμήκυνση του ελατηρίου ($\Delta l/l_0$), όπου Δl η επιμήκυνση και l_0 το μήκος του ελατηρίου στην κατάσταση ισορροπίας και πριν την εφαρμογή της σταθερής δύναμης F .

Όταν απομακρυνθεί η εξωτερική δύναμη, το ελατήριο επανέρχεται ακριβώς στην αρχική του θέση (ελαστική συμπεριφορά).

Στην περίπτωση των πολυμερών κάτω από την επίδραση μιας σταθερής τάσης αυτά παρουσιάζουν μια ορισμένη ελαστική παραμόρφωση ανεξάρτητη από το χρόνο η οποία εξαφανίζεται όταν πάψει να επενεργεί η δύναμη.

Ως ιξωδοελαστικά συμπεριφέρονται τα άμορφα και ημικρυσταλλικά πολυμερή όταν βρίσκονται στην ελαστομερή κατάσταση, δηλαδή σε θερμοκρασίες μεταξύ T_g και T_f , ή T_g και T_m αντίστοιχα.

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά, η οποία πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρείται μόνο στα πολυμερή, είναι ένας αρκετά πολύπλοκος συνδυασμός της μηχανικής συμπεριφοράς των ελαστικών στερεών και των νευτώνειων ρευστών.

Ως ρευστά τέλος τα πολυμερή συμπεριφέρονται όταν βρίσκονται στην ιξώδη κατάσταση, σε θερμοκρασίες δηλαδή πάνω από τη θερμοκρασία ροής T_f ή το σημείο τήξης T_m και κάτω από την επίδραση εξωτερικής δύναμης είτε ακολουθούν το νόμο του Νεύτωνα (Νευτώνεια ρευστά) ή αποκλίνουν απ' αυτόν (μη Νευτώνεια ρευστά).

Στην πρώτη περίπτωση η επίδραση σταθερής διατμητικής τάσης προκαλεί μη αντιστρεπτή παραμόρφωση του ρευστού (ροή) όπως ορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = n\dot{\gamma} \text{ (νόμος του Νεύτωνα)} \quad (1.4)$$

όπου σ είναι η διατμητική τάση, n είναι το ιξώδες, $\dot{\gamma}$ ο ρυθμός διάτμησης.

Εδώ, σε αντίθεση [12] με τα ελαστικά στερεά, η τάση που εφαρμόζεται είναι ανάλογη του χρόνου φόρτισης

$$\sigma = n \gamma t \quad (1.5)$$

Υαλώδης κατάσταση ($T < T_g$ ή T_m): Ως ελαστικά στερεά συμπεριφέρονται τα πολυμερή όταν βρίσκονται σε θερμοκρασίες που είναι κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους κατάστασης T_g στην περίπτωση των άμορφων και ημικρυσταλλικών πολυμερών, ή κάτω από τη θερμοκρασία του σημείου τήξης T_m στην περίπτωση των κρυσταλλικών [12].

Ελαστομερής κατάσταση ($T_g < T < T_g + 30^\circ\text{C}$ και $T_g + 30^\circ\text{C} < T < T_f$ ή T_m): Ως ιξωδοελαστικά συμπεριφέρονται τα άμορφα και ημικρυσταλλικά πολυμερή όταν βρίσκονται στην ελαστομερή κατάσταση, δηλαδή σε θερμοκρασίες μεταξύ T_g και θερμοκρασίας ροής T_f , ή T_g και σημείου τήξης T_m αντίστοιχα. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά, η οποία πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρείται μόνο στα πολυμερή, είναι ένας αρκετά πολύπλοκος συνδυασμός της μηχανικής συμπεριφοράς των ελαστικών στερεών και των νευτώνειων ρευστών [12].

Ιξώδης κατάσταση ($T > T_f$ ή T_m): Ως ρευστά συμπεριφέρονται τα πολυμερή όταν βρίσκονται στην ιξώδη κατάσταση, σε θερμοκρασίες δηλαδή πάνω από τη θερμοκρασία ροής T_f ή το σημείο τήξης T_m και κάτω από την επίδραση εξωτερικής δύναμης είτε ακολουθούν το νόμο του Νεύτωνα (Νευτώνεια ρευστά) ή αποκλίνουν από αυτόν (μη Νευτώνεια ρευστά) [12].

Ελαστομερή: Ελαστομερή ή ελαστικά είναι τα πολυμερή εκείνα που με την εφαρμογή μικρής εφελκυστικής δύναμης, δίνουν μεγάλη σχετικά αντιστρεπτή παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή (έκταση) κυμαίνεται συνήθως από 100-500% και μερικές φορές φθάνει στο 1000%. Οι όροι ελαστομερές (elastomer) και ελαστικό (rubber) χρησιμοποιούνται σήμερα χωρίς καμία διάκριση. Δε θα πρέπει όμως να συγχέονται τα ελαστομερή με τα ελαστικά στερεά. (νόμος του Hooke) [12].

Ένα πολυμερές για να συμπεριφερθεί ως ελαστομερές θα πρέπει να βρεθεί σε μια θερμοκρασία τέτοια που να κείται μεταξύ της θερμοκρασίας T_g και T_m . Θα πρέπει το πολυμερές να έχει χαμηλή θερμοκρασία T_g , χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του

περιβάλλοντος, ώστε στη θερμοκρασία περιβάλλοντος να συμπεριφέρεται ως ελαστομερές ενώ συγχρόνως η παρουσία στη δομή σταυροδεσμών να μην επιτρέπουν την ολίσθηση των μακρομορίων κατά τη μακρόχρονη εφαρμογή μιας τάσης [12].

Συνδετικό Μέσο: Είναι ενώσεις που το μόριό τους διαθέτει δύο δραστικά άκρα με τα οποία μπορούν να συνδεθούν σταθερά δύο τελείως διαφορετικά υλικά, όπως για παράδειγμα, το πληρωτικό ή ενισχυτικό μέσο με το πολυμερές [12].

Πληρωτικά υλικά: Ως πληρωτικά υλικά χαρακτηρίζονται τα αδρανή εκείνα υλικά, ανόργανα και οργανικά, που όταν προσθέτονται σ' ένα πολυμερές αυξάνουν την αντοχή και μειώνουν το κόστος παραγωγής. Τα ανόργανα πληρωτικά υλικά προτιμούνται σε σχέση με τα οργανικά, όταν επιδιώκεται η βελτίωση της αντίστασης στη θέρμανση, την υγρασία, τον ηλεκτρισμό και τα χημικά αντιδραστήρια. Επίσης προσδίδουν στο τελικό προϊόν σταθερότητα διαστάσεων. Ενσωματώνονται στο πολυμερές για τη μείωση της πυκνότητας με συνέπεια τη μείωση του κόστους του τελικού προϊόντος [12].

Ενισχυτικά Μέσα: Ενισχυτικά μέσα είναι τα υλικά που προσθέτονται στα πολυμερή αποκλειστικά για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων [12].

Σταθεροποιητές: Τα πολυμερή κάτω από την επίδραση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου, της θερμότητας, του ηλιακού φωτός ή εξωτερικών διατμητικών δυνάμεων αποικοδομούνται. Για να αποφευχθεί η αποικοδόμηση αυτή χρησιμοποιούνται ορισμένα πρόσθετα που ονομάζονται γενικά σταθεροποιητές. Οι σταθεροποιητές ανάλογα με τον τρόπο δράσης τους διακρίνονται σε γενικές γραμμές σε τρεις κατηγορίες: αντιοξειδωτικά, απορροφητές υπεριώδους ακτινοβολίας και πρόσθετα για την προστασία από τη θερμότητα [12].

Πλαστικοποιητές: Είναι ενώσεις στερεές ή υγρές, οι οποίες όταν προσθέτονται σε σκληρά πολυμερή τα μετατρέπουν σε εύκαμπτα μαλακά και ακατέργαστα. Η δράση τους οφείλεται στη μείωση των διαμοριακών δυνάμεων που υπάρχουν μεταξύ των μακρομορίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της ευκαμψίας και τη μείωση της θερμοκρασίας T_g και T_f του πολυμερούς, ώστε στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος το πολυμερές να βρίσκεται περίπου στην ελαστομερή κατάσταση [12].

Άλλα πρόσθετα: Επιβραδυντές καύσης (αλογονούχες κυρίως ενώσεις που προστατεύουν τα πολυμερή από τη φωτιά), αντιστατικά (υγροσκοπικές ενώσεις που απορροφούν την ατμοσφαιρική υγρασία και δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα νερού

που εξουδετερώνει το στατικό ηλεκτρισμό), χρωστικές (πιγμένα ανόργανα ή οργανικά με τα οποία επιτυγχάνεται η εύκολη βαφή των πολυμερών που γίνεται σ' όλη τη μάζα τους), συντηρητικά (ενώσεις προστατευτικές των επικαλυπτικών από μικροοργανισμούς) [12].

Βουλκανισμός: Αποτελεί συνήθως το τελευταίο στάδιο παραγωγής ενός πολυμερούς υλικού μαζί με τη μορφοποίηση του. Με το βουλκανισμό (δημιουργία σταυροδεσμών μεταξύ γραμμικών μορίων, συνήθως σε ποσοστό 1:100 επαναλαμβανόμενες μονάδες) βελτιώνεται η μηχανική αντοχή και η ελαστικότητα και διευρύνεται επίσης η περιοχή θερμοκρασιών που διατηρείται η ελαστικότητα, ενώ μειώνεται η ευαισθησία στους διαλύτες [12].

EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer): Ο τύπος των ακόρεστων τριπολυμερών αιθυλενίου - προπυλενίου - διενίου (EPDM) με τον οποίο παράγονται και προσφέρονται στο εμπόριο τα ελαστικά αιθυλενίου - προπυλενίου γνωστά και ως πολυολεφινικά ελαστικά [12].

1.4 Υλικά των μονωτήρων

Τα τρία βασικά μέρη των μονωτήρων είναι το διηλεκτρικό (πορσελάνη, γυαλί, πολυμερές υλικό), οι ακροδέκτες, που συνδέουν το διηλεκτρικό με την υπόλοιπη μηχανολογική δομή, και τα ενδιάμεσα υλικά στο εσωτερικό του μονωτήρα, όπως τσιμέντο ή λιπαντικά [1, 2].

1.4.1 Κεραμικά υλικά

Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο μονωτικό στις διατάξεις των μονωτήρων είναι από κεραμικά υλικά (πορσελάνη ή γυαλί). Το SiO_2 είναι στερεό και τήκεται σε υψηλή θερμοκρασία (1700°C). Στα κεραμικά υλικά κάθε άτομο Si ενώνεται με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα άτομα οξυγόνου. Τα άτομα αυτά του οξυγόνου είναι τετραεδρικά διατεταγμένα γύρω από κάθε άτομο Si και κάθε άτομο οξυγόνου ενώνεται, επιπλέον, με δύο άτομα Si με ομοιοπολικό, επίσης δεσμό. Η διάταξη αυτή των δεσμών, επεκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο πλέγμα του SiO_2 , με αποτέλεσμα το υλικό να έχει μεγάλη σκληρότητα, υψηλό σημείο τήξεως, κακή αγωγιμότητα και ελάχιστη διαλυτότητα [13]. Το σχηματιζόμενο υλικό είναι είτε ένα κρυσταλλικό ορυκτό, ο χαλαζίας, η δομή του οποίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία

και αποτελείται από κανονικά τετράεδρα Si-O, ή μια άμορφη κατάσταση, που είναι γνωστή με την ονομασία “fuzed silica”. Όταν προστεθούν και άλλα στοιχεία στις δύο δομές που προαναφέρθηκαν, δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός πυριτικών αλάτων, κρυσταλλικής ή άμορφης δομής. Η πορσελάνη αποτελείται από ένα υαλώδες πλέγμα (άμορφη δομή) που περιλαμβάνει κρυστάλλους διαφορετικών ειδών και κόκκους από τα αρχικά συστατικά των ορυκτών, ορισμένα από τα οποία έχουν διαλυθεί μερικώς. Το γυαλί, στην ιδανική περίπτωση, είναι ένα μίγμα πυριτικών αλάτων υαλώδους μορφής χωρίς προσμείξεις και ακαθαρσίες. Στην πράξη όμως, πάντα εμπεριέχονται παγιδευμένες φυσαλίδες αερίων και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό τα οποία εισάγουν ατέλειες στη δομή του υλικού. Οι μονωτήρες πορσελάνης κατασκευάζονται πάντα από άμορφα υλικά (υαλώδης κατάσταση).

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

1.4.2 Πολυμερή υλικά

Ο άνθρακας ενώνεται με άνθρακα, όπως επίσης και με υδρογόνο, οξυγόνο και πολλά άλλα στοιχεία, για το σχηματισμό αλυσίδων και δακτυλίων που μπορούν να συνδέονται σταυροειδώς σε πολύπλοκες δομές σχηματίζοντας μακρομόρια. Τα καθαρά πολυμερή αποτελούνται από ένα επαναλήψιμο βασικό είδος μορίων, και είναι απαλλαγμένα από ξένες ουσίες. Αυτά, σπάνια χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μονωτήρων, καθώς η τακτική παγκοσμίως είναι να χρησιμοποιούνται συμπολυμερή και ορυκτά πληρωτικά μέσα για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των παραγομένων προϊόντων.

1.4.3. Σύγκριση ιδιοτήτων μονωτικών υλικών

Κεραμικά Υλικά

Τη μεγάλη πλειονότητα των μονώσεων εγκατεστημένων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που άμεσα εκτίθενται στο περιβάλλον συνιστά η πορσελάνη η οποία έχει πάνω από 100 χρόνια ιστορίας στη χρήση της. Το υλικό αυτό απέδειξε ότι ανθίσταται στην περιβαλλοντική γήρανση και δικαίως κάτι τέτοιο υποστηρίζεται,

χρησιμοποιείται δε σ' ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Από τη φύση της η πορσελάνη είναι ευμεγέθης, ογκώδης και βαριά, σπάει δε κατά τη χρήση, τη μεταφορά ή από βανδαλισμό. Υπόκειται επίσης σε υπερπήδηση σε μολυσμένο περιβάλλον. Παρά τα πολλά προτερήματα της πορσελάνης η αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας βάλλεται [15].

Χημική σταθερότητα, μηχανική αντοχή: Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου - οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξεως, τη μεγάλη μηχανική αντοχή και τέλος την υψηλή αντίσταση στη διάβρωση από χημικά μέσα.

Χαμηλό Κόστος πρώτης ύλης: Οι κύριες πρώτες ύλες της πορσελάνης όπως ο άργιλος (πηλός), και ο χαλαζίας είναι σχετικά φθηνές και σε εύκολη διάθεση [15].

Διαβρεξιμότητα και επικάλυψη ρύπανσης: Η ύπαρξη των ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών κοντά στην επιφάνεια συμβάλλουν στην αύξηση της ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή της θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη συνάφεια ή δύναμη συνάφειας των επιφανειακών προσμείξεων, και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα. Καθώς μέρος του ύδατος διαλύει τους αγωγίμους ρυπαντές μειώνοντας τη συνολική επιφανειακή αντίσταση του μονωτήρα, σχηματίζεται μία συνεχής διαδρομή από ηλεκτρολύτη, και δημιουργούνται συνθήκες για την εκδήλωση ηλεκτρικής υπερπήδησης [15].

Παραγωγική Διαδικασία και χρόνος επεξεργασίας: Το στάδιο της παραγωγής πορσελάνης περικλείει πολλά βήματα. Για μεγαλύτερα καλύμματα, απαιτούνται μεγάλα διαστήματα ώστε να μειωθεί το περιεχόμενο σε νερό του πυρήνα προτού σχηματοποιηθεί και πυρωθεί [15].

Σπάσιμο: Τα κεραμικά είναι πολύ εύθραυστα. Αυτό σημαίνει ότι εύκολα σπάνε κατά τη διαχείρισή τους, τη μεταφορά ή την εγκατάσταση. Ο βανδαλισμός είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που συνεισφέρει στη μηχανική καταπόνηση. Είναι πλέον κοινή πρακτική να περιλαμβάνεται μία ρωγμή ή ένας παράγοντας απώλειας όταν αγοράζονται μονωτήρες από πορσελάνη για την εγκατάστασή τους σε γραμμές μεταφοράς. Οι ατέλειες αυτές του κεραμικού μονωτήρα προσθέτουν στο κόστος του [15].

Βάρος: Η πολύ πυκνή φύση των κεραμικών καταδεικνύει ότι τα κομμάτια από πορσελάνη είναι πολύ πυκνά. Αυτό σημαίνει ότι είναι δύσκολη η μεταφορά τους και

απαιτεί τη χρήση γερανών ή και άλλων ενισχυτικών δομών. Το μεγάλο μέγεθος και το βάρος των προϊόντων πορσελάνης συνήθως επιβάλλει κατ' ελάχιστον ακριβή και χρονοβόρα μέσα μεταφοράς που ελαχιστοποιούν το κόστος. Έτσι η μεταφορά μέσω ναυσιπλοΐας και η αποστολή εμπορευμάτων δια θαλάσσης ή άλλες περισσότερο οικονομικές μέθοδους παρατείνουν το χρόνο διανομής και παράδοσης τους [15].

Πολυμερή υλικά

Μειωμένη επιφανειακή ρύπανση, υδροφοβικότητα: Οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση εξαιτίας και των εξαιρετικά χαμηλών τιμών της ελεύθερης επιφανειακής ενέργειας. Το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου, που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στα πολυμερή να ανθίστανται στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση περισσότερο από ότι τα κεραμικά υλικά. Τα πολυμερή υλικά είναι υδρόφοβα από τη φύση τους. Η διατήρηση των υδρόφοβων ιδιοτήτων τους κατά την έκθεσή τους είναι ένα επιθυμητό γνώρισμα. Το νερό στην επιφάνεια υδρόφοβων υλικών σχηματίζει σταγόνες με αποτέλεσμα οι ρυπαντές να διαλύονται από τις σταγόνες νερού που δεν έχουν συνενωθεί και το αγωγίμο μέρος να μην είναι συνεχές. Αυτές οι συνθήκες έχουν σαν αποτέλεσμα τη μειωμένη ροή ρεύματος διαρροής και την πιθανότητα σχηματισμού ξηρών ζωνών που με τη σειρά τους απαιτούν την εφαρμογή υψηλότερης τάσης για να προκληθεί υπερπήδηση. Σε σύγκριση με την πορσελάνη, μερικά πολυμερή υλικά έχουν συνήθως μεγαλύτερη αντοχή στην υπερπήδηση ακόμα και γηρασμένα [15].

Χαμηλό βάρος: Η πυκνότητα των πολυμερών υλικών είναι πολύ χαμηλότερη των κεραμικών και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία σημαντική μείωση στο βάρος των προϊόντων. Η διαφορά βάρους αυξάνει με την κατηγορία των τάσεων. Εξαρτήματα από πολυμερή δεν απαιτούν γερανούς ή άλλα ανυψωτικά για χρήση ή εγκατάσταση. Το μειωμένο βάρος επίσης επιτρέπει τη χρήση ελαφρύτερων και λιγότερο ακριβών δομών και υποστηρικτικών διατάξεων. Το μικρότερο μέγεθος και βάρος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ναύλων (μεταφορά με πλοίο) σε σχέση με τ' αντίστοιχα για εξαρτήματα από πορσελάνη. Οι πολυμερείς μονωτήρες υπερτερούν όταν χρησιμοποιούνται σε πυκνές αστικές περιοχές και έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να τοποθετηθούν και σε στενές διαδρομές περιορισμένου χώρου. Οι μη κεραμικοί μονωτήρες προσφέρουν υψηλή αντοχή αναλογικά ως προς το βάρος τους, που επιτρέπει μεγαλύτερα ανοίγματα, λιγότερο ακριβείς δομές, και βελτιωμένο

αισθητικό αποτέλεσμα. Οι πολυμερείς μονωτήρες είναι κατάλληλοι για τη χρήση τους σε γραμμές μεταφοράς που έχουν μειωμένη ένταση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [15].

Διαδικασία παραγωγής και τρόποι βελτίωσης της απόδοσης και της διάρκειας ζωής: Η διαδικασία παραγωγής πολυμερών μονωτήρων είναι βραχύτερη από εκείνη της πορσελάνης, παρ' ότι χρησιμοποιούνται εκτενώς πρόσθετα στις κατάλληλες συγκεντρώσεις ώστε να ενισχύονται οι ιδιότητες των πολυμερών υλικών. Σε αυτά περιλαμβάνονται αντιοξειδωτικά, πλαστικοποιητές, χρωστικές ουσίες, άλλα μέσα βοηθητικά, καταλύτες, παρεμποδιστές ανάφλεξης, απορροφητές υπεριώδους ακτινοβολίας, αντιδιαβρωτικά. Σε πολλές των περιπτώσεων είναι τα πρόσθετα και τα πληρωτικά υλικά που τόσο όλα μαζί όσο και ανεξάρτητα το καθένα επηρεάζουν την ολική απόδοση του υλικού [15].

Χημική και φωτοχημική προσβολή: Όμως, όλα τα πολυμερή αποσυντίθεται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, υπόκεινται σε φωτο-οξείδωση, δηλαδή σε καταστροφή των επιφανειακών χημικών δεσμών τους από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας και είναι πιθανόν να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο προκαλώντας επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών, πηγάζει από το γεγονός ότι το βασικό στοιχείο τους, ο άνθρακας, αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις έναν καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή προσβολή της επιφανείας, ιδιαίτερα από τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία και δημιουργεί τελικά αγωγίμες επιφανειακές οδούς που είναι δυνατό να οδηγήσουν σε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, οπότε τελικά καταστρέφεται ο μονωτήρας [15, 16].

Υψηλό κόστος πρώτων υλών: Το κόστος των πρώτων υλών των πολυμερών είναι υψηλότερο από εκείνο της πορσελάνης. Πληρωτικά υλικά και πρόσθετα αναμιγνύονται με το βασικό πολυμερές υλικό όχι μόνον για να μειώσουν το κόστος αλλά και για ν' αυξήσουν την απόδοση και να διευκολύνουν τη διαδικασία παραγωγής. Το κύριο υλικό μπορεί να αποτελέσει στην % κλίμακα το 20%-80% κατά βάρος του τελικού υλικού [15].

Μειωμένη μηχανική αντοχή: Οι πολυμερείς μονωτήρες συνήθως δεν είναι ούτε δύσκαμπτοι ούτε μπορούν να υποστηριχτούν από μόνοι τους. Όπου απαιτείται

μηχανική αντοχή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κεραμικοί πυρήνες, ενισχυμένοι με σωληνώσεις και στρώματα, τα οποία είναι καλυμμένα από το πολυμερές υλικό, για την αντοχή στις καιρικές συνθήκες όπως εφαρμόζεται σε μικτούς (υβριδικούς) μονωτήρες από πορσελάνη και πολυμερές υλικό [15].

1.4.4 Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών

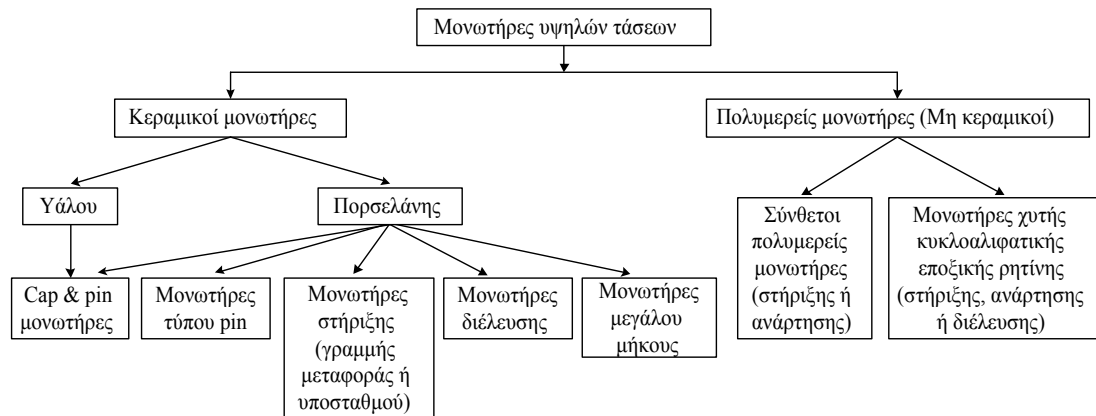
Οι κυριότερες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών [2].

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

1.5 Κατηγορίες μονωτήρων

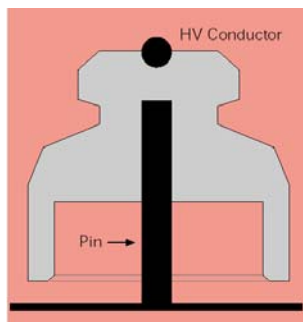
Οι κατασκευές των μονωτήρων υψηλής τάσης ακολουθούν ηλεκτρολογικές, μηχανολογικές, περιβαλλοντικές προδιαγραφές, διαφέρουν ως προς το υλικό ή το σχήμα τους και κατατάσσονται όπως αναλυτικά περιγράφεται παρακάτω και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 [17].



Σχήμα 1.2: Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης

Μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin (porcelain pin type insulators)

Χρησιμοποιήθηκαν στις τηλεφωνικές γραμμές και τα αλεξικέραυνα. Στη συνέχεια τροποποιήθηκαν για να χρησιμοποιηθούν στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές παραλλαγές του τύπου pin είναι ακόμα σε χρήση στα συστήματα μέσης τάσης. Ο μονωτήρας αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3.

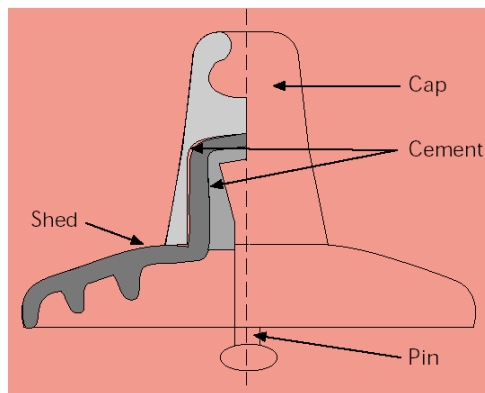


Σχήμα 1.3: Μονωτήρας τύπου pin.

Μονωτήρες τύπου cap and pin (cap and pin insulators)

Το υλικό κατασκευής τους είναι από πορσελάνη ή γυαλί και δεν διαφέρουν κατά

πολύ από το μονωτήρα τύπου pin. Ένας αριθμός τέτοιων μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pin) σχηματίζοντας μια αλυσίδα μονωτήρων. Χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς με τη μορφή αλυσίδων μονωτήρων. Τα καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο. Οι κωνικές μορφές των συναρμολογήσεων εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή κατά την άσκηση δυνάμεων εφελκυσμού. Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται ένας τυπικός δισκοειδής μονωτήρας cap and pin. Στους μονωτήρες τύπου pin και τύπου cap and pin η συντομότερη απόσταση μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων μέσω της πορσελάνης ή του γυαλιού είναι λιγότερη από το 50% της συντομότερης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσω του αέρα. Συνεπώς, η πορσελάνη ή το γυαλί μπορεί να διατηρηθεί κατόπιν μεγάλης ηλεκτρικής καταπόνησης. Η διαδικασία κατασκευής των μονωτήρων υάλου περιλαμβάνει τη θερμική ψύξη, που εξασφαλίζει ότι οι γυάλινοι δίσκοι θρυμματίζονται σε περίπτωση διάτρησης, οπότε ο ελαττωματικός δίσκος είναι εμφανής. Βέβαια σε τέτοια περίπτωση η μηχανική ικανότητα του μονωτήρα παραμένει άθικτη.



Σχήμα 1.4: Μονωτήρας τύπου cap and pin.

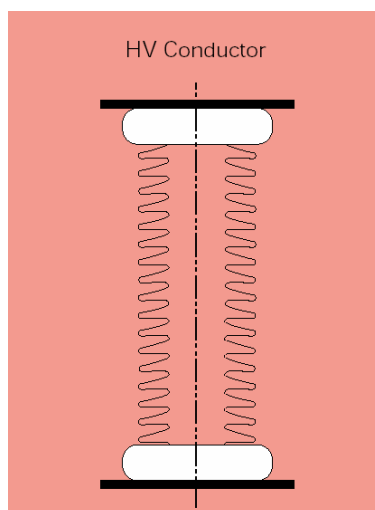
Μονωτήρες στήριξης (post type insulators)

Αποτελούνται από έναν συμπαγή κύλινδρο πορσελάνης, με κυματοειδείς πτυχές για να αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, και από μεταλλικά ηλεκτρόδια σε κάθε άκρη. Οι μονωτήρες στήριξης έχουν μεγάλο μήκος. Χρησιμοποιούνται οριζόντια ή κάθετα για να στηρίζουν τον αγωγό υψηλής τάσης και τοποθετούνται στις βάσεις ή στους εγκάρσιους βραχίονες των γραμμών μεταφοράς (line post insulators). Επιπλέον, οι

μονωτήρες στήριξης χρησιμοποιούνται ευρέως σε υποσταθμούς (station post insulators). Στους μονωτήρες αυτούς η συντομότερη απόσταση μέσω της πορσελάνης υπερβαίνει το 50% της συντομότερης απόστασης μέσω του αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων, οπότε δεν διαρρηγνύονται εύκολα. Ένας μονωτήρας τύπου post εικονίζεται στο σχήμα 1.5.

Μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους (longrod insulators)

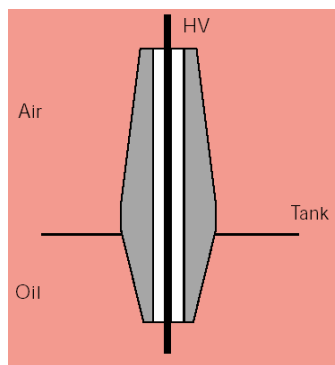
Οι μονωτήρες μεγάλου μήκους είναι παρόμοιοι με τους μονωτήρες στήριξης, αλλά είναι ελαφρύτεροι, λεπτότεροι και χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης.



Σχήμα 1.5: Μονωτήρας τύπου post.

Μονωτήρες διέλευσης (bushings)

Οι μονωτήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να μονώσουν τους αγωγούς των ακροδεκτών υψηλής τάσης κυρίως μετασχηματιστών ή άλλων διατάξεων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6. Συνήθως, οι μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται από πορσελάνη.



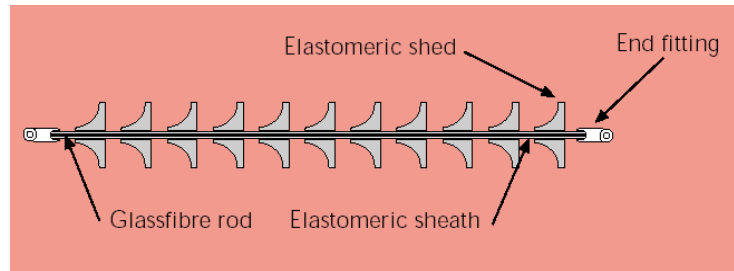
Σχήμα 1.6: Μονωτήρας διέλευσης.

Σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες (composite polymeric insulators)

Αυτοί οι μονωτήρες είναι παρόμοιοι με τους πορσελάνινους μονωτήρες μεγάλου μήκους ως προς το σχήμα, αλλά διαφέρουν ως προς τα υλικά κατασκευής, τα οποία είναι τα εξής:

- Ένας πυρήνα ρητίνης ενισχυμένο με υαλώδεις ίνες (glass fibre), ο οποίος παρέχει μηχανική αντοχή, ενώ ταυτόχρονα ανθίσταται και στην ηλεκτρική καταπόνηση.
- Ένα ελαστομερές περίβλημα (sheath/housing) για να προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες.
- Ελαστομερείς δίσκοι (sheds), οι οποίοι αποσκοπούν στην αύξηση του μήκους ερπυσμού, ώστε να ανθίσταται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα. Δύο ευρέως χρησιμοποιημένα υλικά είναι το σιλικονούχο καουτσούκ (silicone rubber) και του ακόρεστου πολυμερούς αιθυλενίου - προπυλενίου - διενίου (ethylene propylene diene monomer -EDPM).

Ένας τυπικός μονωτήρας αυτού του τύπου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7. Οι μεταλλικοί ακροδέκτες είναι συνήθως στερεωμένοι πάνω στην εξωτερική πλευρά της ράβδου του πυρήνα και τα συγκεκριμένα σημεία επαφής μεταξύ του ελαστομερούς και των ακροδεκτών είναι πολύ σημαντικά. Οι δοκιμές που εξασφαλίζουν την ποιότητα των σύνθετων μονωτήρων περιλαμβάνονται στο IEC 1109 [18]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90% σε σύγκριση με τους αντίστοιχους κεραμικούς.



Σχήμα 1.7: Σύνθετος πολυμερής μονωτήρας.

Μονωτήρες κυκλοαλιφατικής εποξικής ρητίνης (Cyclo-aliphatic epoxy resin insulators)

Η κυκλοαλιφατική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χυτευτούν μονωτήρες παρόμοιοι με αυτούς από πορσελάνη και τύπου line post για διανομή των τάσεων. Σε περιβάλλον με κακές καιρικές συνθήκες οι επιφάνειες των μονωτήρων αυτών γίνονται τραχιές.

1.6 Ρύπανση

Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μονωτική ικανότητα των μονωτικών υλικών, σε περίπτωση που είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό χώρο, είναι η ρύπανση. Με τον όρο ρύπανση προσδιορίζεται η επικάλυψη ακαθαρσιών που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα ή θαλάσσιας άλμης (καθαλάτωση) στην επιφάνεια τους. Η ρύπανση στην επιφάνεια ενός μονωτικού υλικού μπορεί να είναι είτε θαλάσσια, είτε βιομηχανική.

Θαλάσσια ρύπανση: Εμφανίζεται σε μονωτήρες που βρίσκονται σε παραθαλάσσια περιοχή. Οι άνεμοι μεταφέρουν θαλασσινό νερό που υπό τη μορφή καταιωνισμένου νερού επικάθεται στην επιφάνεια τους και σχηματίζεται ένα λεπτό υγρό αλατούχο επίστρωμα.

Βιομηχανική ρύπανση: Εμφανίζεται σε μονωτήρες που βρίσκονται σε βιομηχανική περιοχή και προέρχεται από τα στερεά κατάλοιπα των βιομηχανιών που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα.

Η συνύπαρξη ρύπανσης (θαλάσσιας, βιομηχανικής ή συνδυασμού των προαναφερθέντων) και δροσιάς, ομίχλης ή σιγανής βροχής αποτελεί δυσμενέστατη

συνθήκη λειτουργίας των μονωτικών υλικών και μπορεί να υποβιβάσει τη μονωτική τους ικανότητα σε μεγάλο βαθμό (40% έως 80%) με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου [1].

Συνεπώς η παρατεταμένη ξηρασία, η περιβαλλοντική ρύπανση καθώς και τα ακραία καιρικά φαινόμενα μεταβάλλουν τη συμπεριφορά των μονωτικών υλικών που εκτίθενται σε αυτές με αποτέλεσμα να χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης.

Στο πρότυπο IEC 815/1986 [19], γίνεται κατηγοριοποίηση των περιοχών ανάλογα με το ποσοστό ρύπανσης, και έχουν καθοριστεί ποιοτικά τέσσερα επίπεδα ρύπανσης. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα επίπεδα ρύπανσης και για καθένα από αυτά περιγράφονται κατά προσέγγιση μερικές τυπικές περιοχές.

Πίνακας 1.2: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815 [19].

Επίπεδο ρύπανσης	Παράδειγμα τυπικού περιβάλλοντος
I. Ελαφριά	- Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης. - Περιοχές με μικρή πυκνότητα βιομηχανιών ή κατοικιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. - Αγροτικές περιοχές. - Ορεινές περιοχές. Όλες αυτές οι περιοχές πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 10km με 20km από τη θάλασσα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε ανέμους κατ' ευθείαν από τη θάλασσα.
II. Μεσαία	- Περιοχές με βιομηχανίες, οι οποίες δεν παράγουν ιδιαίτερα ρυπασμένο καπνό, και/ή με μέση πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης. - Περιοχές με υψηλή πυκνότητα κατοικιών και/ή βιομηχανιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. - Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους από τη θάλασσα, αλλά όχι πολύ κοντά στην ακτή (τουλάχιστον σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων ανάλογα με τη μορφολογία της παράκτιας περιοχής και τις συνθήκες ανέμου).

III. Βαριά	• Περιοχές με υψηλή πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με υψηλή πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης, οι οποίες παράγουν ρύπανση. • Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή κάθε περιοχή που εκτίθεται σε σχετικά ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα.
IV. Πολύ βαριά	• Περιοχές περιορισμένης έκτασης εκτεθειμένες σε αγωγή σκόνη και βιομηχανικό καπνό προκαλώντας αγωγίμες εναποθέσεις σημαντικού πάχους. • Περιοχές περιορισμένης έκτασης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε ακτή και εκτίθενται σε ψεκασμό θαλασσινού νερού ή σε πολύ δυνατό και ρυπασμένο αέρα από τη θάλασσα. • Περιοχές ερήμου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έλλειψη βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι και υποβάλλονται σε κανονική συμπίκνωση.

Για κάθε επίπεδο ρύπανσης που περιγράφεται στον Πίνακα 2.1, το αντίστοιχο ελάχιστο ονομαστικό ειδικό μήκος ερπυσμού (minimal nominal specific creepage distance), μετρούμενο σε mm/kV (πολική τάση) της υψηλότερης εφαρμοζόμενης τάσης στο μονωτήρα δίνεται στον Πίνακα 1.3 [19].

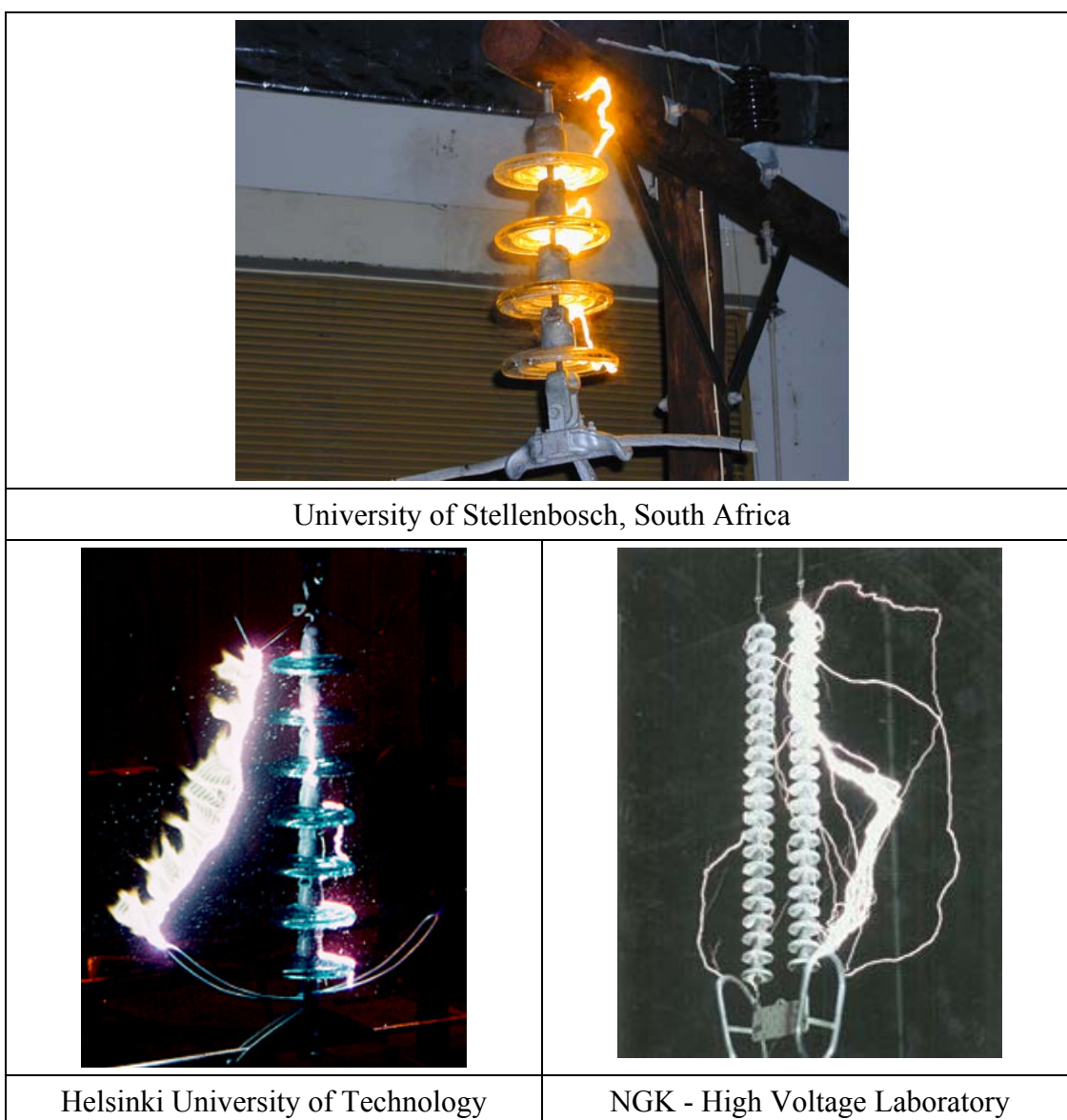
Πίνακας 1.3: Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού συναρτήσει του επιπέδου ρύπανσης.

Επίπεδο ρύπανσης	Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού [mm/kV]
I. Ελαφριά	16
II. Μεσαία	20
III. Βαριά	25
IV. Πολύ βαριά	31

1.7 Το φαινόμενο της υπερπήδησης (flashover)

Το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται στο φαινόμενο της υπερπήδησης οδεύει διαμέσου του διακένου από αέρα μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα.

Χαρακτηριστικές φωτογραφίες του φαινομένου της υπερπήδησης προερχόμενες από ιστοσελίδες Εργαστηρίων Υψηλών Τάσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Φωτογραφίες στις οποίες φαίνεται το φαινόμενο της υπερπήδησης.

Το φαινόμενο της υπερπήδησης αποδίδεται στα παρακάτω δύο αίτια:

α) εντοπισμένη αφυδάτωση ενός στρώματος ηλεκτρολύτη αυξάνει τις ασυνέχειες στο αγωγίμο στρώμα - γνωστές ως ξηρές ζώνες - κατά μήκος των οποίων παράγονται ηλεκτρικές τάσεις (stresses) που επαρκούν για να ιονιστεί ο αέρας.

β) τα τόξα σε ένα αέριο, από τη στιγμή που δημιουργούνται μπορούν εύκολα να επεκταθούν χωρίς εξασθένιση με σχετικά αργή απομάκρυνση των άκρων μεταξύ των οποίων εμφανίζονται [2].

Το τεχνικό πρόβλημα είναι ότι η επιφανειακή αγωγιμότητα που προκαλεί την υπερπήδηση παραμένει, ακόμα κι όταν το τόξο έχει εξαλειφθεί από τη λειτουργία της προστασίας, γεγονός που επιτρέπει να ακολουθήσουν κι άλλες υπερπήδησεις.

1.7.1 Παράγοντες που ευνοούν τη διαδικασία της υπερπήδησης

Παράγοντες που ευνοούν την ηλεκτρική διάσπαση στα μονωτικά υλικά κατά την εκδήλωση του φαινομένου της υπερπήδησης είναι οι παρακάτω [2]:

1. Η πτώση σχεδόν καθαρού νερού, όπως σταγόνες, βροχή ή ομίχλη, σε ένα μονωτήρα, πάνω στον οποίο βρίσκεται ποσότητα ρύπανσης που περιλαμβάνει διαλυτά ιονικά στοιχεία, όπως το κοινό αλάτι.
2. Η εναπόθεση σταγονιδίων θαλάσσιας ή βιομηχανικής ομίχλης, ή άλλου συνδυασμού νερού και ηλεκτρολύτη.
3. Η συγκέντρωση παγετού, παγετώδους ομίχλης ή πάγου στη βρώμικη επιφάνεια ενός μονωτήρα. Τότε, τα ιοντικά συστατικά των ρύπων ενεργούν ώστε να μειώσουν το σημείο ψύξης του νερού κι έτσι επιτρέπουν την ύπαρξη υγρού διαλύματος στο σημείο επαφής των δύο επιφανειών.
4. Η ένταξη ενός κυκλώματος που περιέχει υγρούς και βρώμικους μονωτήρες
5. Η δημιουργία μιας προσωρινής υπέρτασης, ή μιας μεταβατικής αιχμής, σε ένα μονωτήρα υγρό, βρώμικο και πιθανόν ήδη ενεργοποιημένο.

1.7.2 Μηχανισμοί υπερπήδησης

Μονωτήρες πορσελάνης

Τα βασικά στάδια της διαδικασίας της υπερπήδησης λόγω ρύπανσης σε πορσελάνινους μονωτήρες είναι τα εξής [15]:

1. Εναπόθεση ρύπανσης. Σκόνη ή και άλλα αγωγιμα σωματίδια εναποτίθενται στην επιφάνεια του μονωτήρα από τον αέρα.
2. Υγρανση της επιφάνειας. Σε συνθήκες υγρασίας, δροσιάς, ομίχλης ή βροχής υγραίνεται η επιφάνεια στην οποία έχει επικαθήσει κάποιο στρώμα ρύπανσης. Δημιουργούνται ηλεκτρολύτες σχεδόν κατά μήκος του μονωτήρα και η επιφανειακή αντίσταση μειώνεται. Ένα υπολογίσιμο ρεύμα διαρροής κυκλοφορεί.
3. Θερμότητα (ωμική). Το ρεύμα διαρροής που κυκλοφορεί προκαλεί μείωση στην αντίσταση, αύξηση του ρεύματος μέχρι ο ηλεκτρολύτης να αποκτήσει αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας στην αντίσταση. Με τη συσσώρευση θερμικής ενέργειας (I^2R), προκαλείται εξάτμιση νερού και αύξηση του βαθμού ξηρότητας.
4. Σχηματισμός ξηρής ζώνης. Οι περιοχές της επιφάνειας με τη μεγαλύτερη διαφεύγουσα ισχύ ξηραίνονται πρώτα. Η γεωμετρία του μονωτήρα παίζει ρόλο, καθώς η πυκνότητα ρεύματος τείνει να συγκεντρωθεί σε περιοχές με τα μικρότερα τμήματα, στα οποία η ξήρανση επιταχύνεται. Η ξήρανση αυξάνει τη διαφυγή ισχύος, επειδή αυξάνει την ειδική αντίσταση και οδηγεί σε ασταθείς συνθήκες. Καθώς οι ξηρές ζώνες είναι απομονωμένες, η επιφανειακή δραστηριότητα συνεχίζεται μέσα στην περιοχή της ζώνης.
5. Μερικές εκκενώσεις και υπερπήδηση. Εάν η εκκένωση ξηρής ζώνης επεκταθεί στην εναπομένουσα υγρή επιφάνεια του μονωτήρα τότε εκδηλώνεται το φαινόμενο της υπερπήδησης. Οι μερικές εκκενώσεις εξαλείφονται λίγο πριν το μηδενισμό της τάσης. Εάν, παρ' όλα αυτά, η τιμή της τάσης και του ρεύματος διαρροής είναι αρκετά υψηλή, οι εκκενώσεις μπορεί να επεκταθούν σε ολόκληρο το μήκος του μονωτικού και να αρχίσει το φαινόμενο της υπερπήδησης. Η ορατή δραστηριότητα στην επιφάνεια δεν σημαίνει πάντα ότι θα συμβεί υπερπήδηση, καθώς το ρεύμα διαρροής μπορεί να εξαλειφθεί εάν υπάρχει ανεπαρκής διαφεύγουσα ισχύς.

Εάν ένας από τους παραπάνω μηχανισμούς διακοπεί και δεν επιτραπεί λόγω των συνθηκών να συνεχιστούν οι παραπάνω μηχανισμοί διαδοχικά τότε δεν θα εκδηλωθεί και το φαινόμενο της υπερπήδησης. Με το πλύσιμο, το οποίο μπορεί να συμβεί για παράδειγμα λόγω βροχής, θα μειωθεί η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Η

δε παρουσία του ήλιου μειώνει την υγρασία. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δυνατό να παρατηρηθούν ξηρές ζώνες, οι οποίες όμως δεν θα οδηγήσουν σε υπερπήδηση γιατί ο μηχανισμός θα έχει διακοπεί.

Πολυμερείς μονωτήρες

Η ανάλυση εργαστηριακών δεδομένων και η βιβλιογραφική έρευνα οδηγούν σε αρκετά συμπληρωματικά στάδια στη διαδικασία της υπερπήδησης ενός υδροφοβου πολυμερούς μονωτήρα σε σχέση με τα στάδια που προαναφέρθηκαν για το φαινόμενο της υπερπήδησης σε πορσελάνινους μονωτήρες [15].

1. Εναπόθεση ρύπανσης. Πραγματοποιείται με την ίδια διαδικασία όπως στους μονωτήρες πορσελάνης.
2. Υγρανση. Μεγάλη υγρασία, δροσιά, ομίχλη ή ασθενής βροχή υγραίνουν την επιφάνεια σχηματίζοντας σταγονίδια εξαιτίας των **υδροφοβικών** ιδιοτήτων του υλικού. Τα σταγονίδια κυλούν εξαιτίας της βαρύτητας. Όταν η βαρύτητα δεν είναι ικανή να ενισχύσει την κίνηση των σταγονιδίων, τότε αυτά παραμένουν διαχωρισμένα στις θέσεις τους. Άλατα και/ή αγωγήμη ρύπανση διαλύονται στις σταγόνες νερού αυξάνοντας την αγωγιμότητα του υγρού.
3. Σχηματισμός αγωγήμου στρώματος. Η παραμένουσα ξηρή επιφάνεια ρύπανσης σταδιακά υγραίνεται μέσω της μετακίνησης σταγονιδίων. Αυτό σχηματίζει ένα αγωγήμο στρώμα ισχυρά ωμικής συμπεριφοράς με αποτέλεσμα το ρεύμα διαρροής να μεταβάλλεται από χωρητικό σε ωμικό.
4. Θερμότητα (ωμική). Πραγματοποιείται με την ίδια διαδικασία όπως στους μονωτήρες πορσελάνης.
5. Επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου σε υδροφοβική επιφάνεια. Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί την ένωση των σταγονιδίων, που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, σε μία μεγάλη σταγόνα νηματοειδούς μορφής. Ο μηχανισμός της υπερπήδησης διαρκεί περισσότερο σε μία **υδροφοβική** επιφάνεια εξαιτίας του χρόνου που απαιτείται για να σχηματιστεί μία αγωγήμη διαδρομή με νηματοειδείς σταγόνες. Επίσης, το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να έχει ικανή τιμή ώστε να σχηματιστούν οι νηματοειδείς σταγόνες.
6. Μερικές εκκενώσεις σε υδροφοβικές επιφάνειες. Οι νηματοειδείς σταγόνες μειώνουν την απόσταση μεταξύ των άκρων του μονωτικού αυξάνοντας το

ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των γειτονικών νηματοειδών σταγόνων. Όταν η τάση αποκτήσει κατάλληλη τιμή τότε μπορεί να συμβούν επιφανειακές εκκενώσεις.

7. Εξασθένιση της υδροφοβικότητας. Οι εκκενώσεις καταστρέφουν ένα λεπτό στρώμα πολυμερούς γύρω από τα σταγονίδια και μειώνουν την υδροφοβικότητα περιστρέφοντας ή σπάζοντας τις πολυμερείς αλυσίδες. Η απώλεια ή η εξασθένιση της επιφανειακής υδροφοβικότητας έχει ως αποτέλεσμα την εξάπλωση των σταγόνων και τον σχηματισμό ενός συνεχούς αγωγίμου υμενίου επιτρέποντας την ροή του ρεύματος διαρροής.
8. Σχηματισμός ξηρής ζώνης. Οι ξηρές ζώνες σχηματίζονται όπως και στους μονωτήρες πορσελάνης. Η προκύπτουσα δραστηριότητα προκαλεί επιφανειακή διάβρωση, της οποίας ο ρυθμός εξαρτάται από τον τρόπο σχηματισμού του συγκεκριμένου υλικού, και συμβάλλει στη γήρανση.
9. Αποκατάσταση της υδροφοβικότητας. Η διαδικασία αποκατάστασης εξαρτάται από το υλικό, τον τρόπο σχηματισμού του, τον σχεδιασμό του μονωτήρα και το περιβάλλον.
10. Επανάληψη του κύκλου γήρανσης. Η επανάληψη του κύκλου γήρανσης προκαλεί επιπλέον ύγρανση και πιθανόν διάβρωση της επιφάνειας, φαινόμενα τα οποία ενισχύονται από χημικές αντιδράσεις και τοπική άνοδο της θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια εκκένωσης η θερμοκρασία σε κάποια σημεία μπορεί να φθάσει τους 400°C.
11. Υπερπήδηση. Η υπερπήδηση, συνεπώς, μπορεί να συμβεί ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως σε μονωτήρες πορσελάνης εάν η επιφάνεια γίνει υδρόφιλη.

Οι **υδρόφοβες** επιφάνειες αντιστέκονται περισσότερο στη ροή του ρεύματος διαρροής από τις υδρόφιλες επιφάνειες και απαιτούν υψηλότερο ρεύμα διαρροής και αντίστοιχη έκλυση ενέργειας προκειμένου να ξεκινήσει υπερπήδηση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι πολυμερείς μονωτήρες παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση υπερπήδησης από τους μονωτήρες πορσελάνης. Όπως αναφέρθηκε και στους πορσελάνινους μονωτήρες, όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί πρέπει να συμβούν διαδοχικά για να οδηγήσουν σε υπερπήδηση. Εάν η διαδικασία διακοπεί, για παράδειγμα λόγω επανάκτησης της επιφανειακής **υδροφοβικότητας**, η υπερπήδηση δεν λαμβάνει χώρα.

1.7.3 Τρόποι μετριασμού του φαινομένου της υπερπήδησης

Μονωτήρες πορσελάνης

Οι χρήστες λαμβάνουν αρκετά μέτρα ώστε να μειώσουν τη συχνότητα των υπερπηδήσεων σε πορσελάνινους μονωτήρες. Αυτά είναι [15]:

1. Επέκταση του μήκους. Πολυμερείς δίσκοι εγκαθίστανται ακριβώς πάνω από τους δίσκους του πορσελάνινου μονωτήρα προκειμένου να αυξηθεί το μήκος ερπυσμού και να προστεθεί η ιδιότητα της **υδροφοβικότητας**.
2. Πλύσιμο. Οι μονωτήρες είναι δυνατό να πλυθούν, είτε εντός λειτουργίας, είτε εκτός λειτουργίας, με τη χρήση νερού υπό υψηλή πίεση. Επειδή, όμως, το πλύσιμο των μονωτήρων αποτελεί μία δαπανηρή διαδικασία πρέπει να πραγματοποιείται κατόπιν σωστού προγραμματισμού.
3. Πολύπλοκο σχήμα του μονωτικού υλικού. Είναι διαθέσιμοι μονωτήρες, με υψηλότερο κόστος, οι οποίοι λόγω του σχήματός τους αντιστέκονται στην εναπόθεση ρύπανσης.
4. Επιφανειακές επιστρώσεις. Γράσο ή πολυμερής επίστρωση εφαρμόζεται στην πορσελάνη προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητές της υπό συνθήκες ρύπανσης. Η βελτίωση των ιδιοτήτων της και η διάρκεια μέχρι να απαιτηθεί επανάληψη της επίστρωσης εξαρτώνται από την ποιότητα του επιστρώματος, την εφαρμογή του και τις τοπικές συνθήκες ρύπανσης.
5. Υάλωση. Μία μη αγωγίμη ή ημιαγωγίμη υάλωση διατηρεί μία μεγάλη περιοχή της επιφάνειας ξηρή κατά τη διάρκεια της φυσικής ύγρανσης. Σε αυτούς του μονωτήρες, όμως, διαρκή ρεύματα διαρροής οδηγούν σε μεγάλες απώλειες ισχύος. Η φθορά της υάλωσης και η έκλυση θερμότητας είναι, επίσης, μεγάλα προβλήματα αυτών των μονωτήρων.

Πολυμερείς μονωτήρες

Στα πολυμερή υλικά σπάνια χρησιμοποιούνται πρόσθετα μέτρα για την αποφυγή υπερπηδήσεων. Απαιτείται, όμως, ιδιαίτερη προσοχή κατά τη δημιουργία του υλικού και το σχεδιασμό του μονωτήρα [19, 20].

Τα πολυμερή μονωτικά υλικά είναι απαραίτητο να έχουν δύο αμυντικούς μηχανισμούς κατά της ρύπανσης και κατ' επέκταση της δημιουργίας υπερπηδήσεων.

Αυτοί είναι:

1. Έλεγχος του ρεύματος διαρροής. Επειδή είναι πιθανό να συμβεί φθορά του υλικού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ένας αμυντικός μηχανισμός είναι ο περιορισμός του ρεύματος διαρροής. Εάν το ρεύμα διαρροής δεν έχει ικανή τιμή, ώστε να προκαλέσει ξήρανση του ηλεκτρολύτη και δημιουργία ξηρών ζωνών, τότε ο μηχανισμός της υπερπήδησης δεν μπορεί να εξελιχθεί. Το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί, τόσο με την επιλογή του κατάλληλου υλικού, όσο και με τον κατάλληλο σχεδιασμό του μονωτήρα.
2. Αντοχή στη διάβρωση. Τα πολυμερή υλικά δεν θα πρέπει να υφίστανται σημαντική διάβρωση κατά τη διάρκεια περιόδων, κατά τις οποίες η επιφανειακή δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει απώλεια της υδροφοβικότητας. Ειδικά, υλικά, που έχουν την τάση να ανακτούν την υδροφοβικότητα τους, πρέπει να αντέχουν περιόδους επιφανειακής δραστηριότητας χωρίς να υφίστανται σημαντική διάβρωση. Ένα πολυμερές υλικό, το οποίο δεν έχει καλή αντοχή στη διάβρωση, δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε περιοχή με έντονη ρύπανση γιατί θα οδηγηθεί σε πρόωρη βλάβη. Ένα υλικό με μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, ακόμα κι αν χάσει την υδροφοβικότητά του, υπερτερεί ενός υλικού, το οποίο μπορεί να επανακτήσει την υδροφοβικότητά του, αλλά έχει μικρή αντοχή στη διάβρωση.

1.8 Η ηλεκτρική διάσπαση

Ως αποτέλεσμα της ύπαρξης κάποιου βαθμού ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα μονωτικά υλικά, εμφανίζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο εσωτερικό τους. Αρχικά υπάρχει μια περιοχή όπου η ένταση του ρεύματος παρουσιάζει μια σχετικά μικρή τιμή – περίπου ανάλογη προς την τάση – και η οποία, κυρίως οφείλεται στα λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και στις προσμίξεις του μονωτικού σώματος. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιοχή κόρου, όπου η ένταση του ρεύματος διατηρείται περίπου σταθερή, διότι το πλήθος των φορέων μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος που εκπέπονται από τα ηλεκτρόδια ή που δημιουργεί το πεδίο ιονίζοντας τα συστατικά του σώματος αντισταθμίζεται περίπου από το πλήθος τους που εξουδετερώνονται στα ηλεκτρόδια (οι φορείς δια μέσου του σώματος στο οποίο επιβάλλεται τάση κατευθύνονται από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο όπου και εξουδετερώνονται λόγω αντίθετου φορτίου). Η περιοχή αυτή των τάσεων ονομάζεται και περιοχή ιονισμού. Τέλος, με την αύξηση

της τάσης πέρα από μία κρίσιμη τιμή V_δ , που ονομάζεται τάση διάσπασης, η ένταση του ρεύματος αυξάνει απότομα και γίνεται ανεξέλεγκτη. Εμφανίζεται δηλαδή, το φαινόμενο της ηλεκτρικής (ή διηλεκτρικής) διάσπασης του μονωτικού [21].

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

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

Η πεδιακή ένταση E_δ , στην οποία αντιστοιχεί η τάση διάσπασης V_δ , ονομάζεται διηλεκτρική αντοχή. Δηλαδή [21]:

$$E_\delta = \frac{V_\delta}{d} \quad (1.6)$$

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

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

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

1.9 Οι διάφορες μορφές ηλεκτρικών εκκενώσεων

Οι διάφορες μορφές ηλεκτρικών εκκενώσεων σε αέρια σώματα, ανάλογα με την πίεση του αερίου, τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων, την ένταση του πεδίου κ.λ.π.

παρατίθενται παρακάτω:

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

Στην περιοχή της κάθε εκκένωσης μειώνεται η πεδιακή ένταση και αναστέλλεται έτσι ο σχηματισμός γειτονικών θυσάνων.

Σε καθαρό και λείο αγωγό εμφανίζεται μία φωτεινή αίγλη για μία τιμή της τάσεως ενδεικνύμενης τιμής U_i , η οποία καλείται «τάση ενάρξεως».

Σε ακάθαρμο αγωγό εμφανίζονται θύσανοι. Όταν η τάση του αγωγού φθάσει την τιμή U_i , οι θυσανοειδείς εκκενώσεις γίνονται συνεχείς και καλύπτουν τον αγωγό υπό μορφή φωτεινής αίγλης. Ταυτόχρονα με την εμφάνιση της αίγλης αρχίζει ν' αυξάνει και η χωρητικότητα του αγωγού προς τη γη, γιατί αυξάνει η φαινόμενη διάμετρός του. Τόσο η αίγλη όσο και οι θύσανοι ενισχύονται με την αύξηση της τάσεως, προκαλούν απώλειες ισχύος και, εάν οι εν λόγω εκκενώσεις είναι συστηματικές και μεγάλης έντασης, μπορούν να προκαλέσουν τη διάβρωση του αγωγού, λόγω σχηματισμού οξειδίων στην επιφάνειά του [22].

1.10 Μέθοδοι επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων

Για την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων έχουν δημιουργηθεί δύο κατηγορίες μεθόδων, οι οποίες είναι οι εξής [23, 24]:

- Οι αναλυτικές μέθοδοι
- Οι αριθμητικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν ταχύτατη επίλυση και ακριβή αποτελέσματα, αλλά η εφαρμογή τους γίνεται εξαιρετικά δύσκολη σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σε μη γραμμικά υλικά. Οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν μεν να εφαρμοστούν σε πολύπλοκα προβλήματα, αλλά υπεισέρχονται ανακρίβειες στις λύσεις, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά προκειμένου να μην οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Οι αριθμητικές μέθοδοι χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- Πεπερασμένες διαφορές

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Άμεση κατάστρωση	Περιορισμός πλέγματος
Πολύπλοκες γεωμετρίες	Έντονο επιδερμικό φαινόμενο
Μη γραμμικότητα	Ανοικτά όρια

- Πεπερασμένα στοιχεία

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πολύπλοκες γεωμετρίες	Έντονο επιδερμικό φαινόμενο
Μη γραμμικότητα	Ανοικτά όρια

- Οριακά στοιχεία

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πολύπλοκες γεωμετρίες	Μη γραμμικότητα
Ανοικτά όρια	Γεμάτοι πίνακες
Μία διάσταση λιγότερη	

1.10.1 Το πρόγραμμα OPERA-3d

Το OPERA-3d [25] είναι μια ακολουθία προγραμμάτων ανάλυσης τρισδιάστατων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα προγράμματα χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να λύσουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πεδίων.

Λόγω της απαίτησης πολλών πληροφοριών πριν γίνει η ανάλυση, η εισαγωγή δεδομένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν ισχυρό αμφίδρομο προ-επεξεργαστή. Το φυσικό μοντέλο μπορεί να περιγραφεί σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές συντεταγμένες. Χρησιμοποιώντας τη γραφική αμφίδρομη διαδικασία στα πλαίσια της προ-επεξεργασίας, η προς μοντελοποίηση επιφάνεια/χώρος διαιρείται σε μια συνεχή ομάδα τριγωνικών/τετραεδρικών στοιχείων. Όταν ετοιμαστεί το μοντέλο, η λύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο τύπο ανάλυσης. Το πρόγραμμα ανάλυσης υπολογίζει τη σωστή λύση, περιλαμβάνοντας μη γραμμικά φαινόμενα αν αυτά έχουν μοντελοποιηθεί. Το αποτέλεσμα τότε μπορεί

να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας έναν “έξυπνο και ευέλικτο” μετ-επεξεργαστή. Τα αριθμητικά σφάλματα, λόγω του κακού προσδιορισμού του πλέγματος, αναλύονται και αυτά ώστε το πλέγμα να βελτιωθεί και να επιτύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 2

Η ιδιότητα της υδροφοβικότητας

Μελέτη ηλεκτρικού πεδίου παρουσία ύδατος στην υδρόφοβη επιφάνεια μη κεραμικού μονωτήρα

2.1 Κατάταξη υδροφοβικότητας μη κεραμικών μονωτήρων

Η υδροφοβικότητα περιγράφει την ικανότητα της διαβρεξιμότητας μίας επιφάνειας. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των πολυμερών μονωτήρων είναι η υδρόφοβη επιφάνειά τους. Για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία [26-30] πολλοί είναι αυτοί που έχουν ασχοληθεί με την ιδιότητα της υδροφοβικότητας.

2.1.1 Κατάταξη υδροφοβικότητας σύμφωνα με τον STRI, “Hydrophobicity Classification Guide”, 1995 [31]

Το 1992 [31] δημιουργήθηκε ένας οδηγός κατάταξης των πολυμερών μονωτήρων ανάλογα με το ποσοστό υδροφοβικότητας που παρουσιάζουν.

Σύμφωνα με τον παραπάνω οδηγό κατάταξης της υδροφοβικότητας, η υπεροχή στην απόδοση σε ηλεκτρικό πεδίο των συνθετικών μονωτήρων και των επικαλυμμένων με χημικά μονωτήρων (π.χ. με ρητίνες) προέρχεται από την υδροφοβικότητα των επιφανειών τους (απόθεση του ύδατος). Η υδροφοβικότητα θα μεταβληθεί με το χρόνο λόγω της έκθεσης στο εξωτερικό περιβάλλον και των μερικών εκκενώσεων (corona).

Έχουν οριστεί επτά κατηγορίες υδροφοβικότητας (Hydrophobicity Classification 1-7). Η κατηγορία 1 αντιστοιχεί σε μία εντελώς υδρόφοβη (υδρο-απωθητική) επιφάνεια και η κατηγορία 7 σε μία τελείως υδρόφιλη (με ευκολία διαβροχής) επιφάνεια.

Αυτές οι τάξεις παρέχουν μία τιμή της κατάστασης διαβροχής μιας επιφάνειας και είναι ιδιαίτερες κατάλληλες για έναν γρήγορο και εύκολο έλεγχο των μονωτήρων σε ηλεκτρικό πεδίο.

Απαιτούμενος εξοπλισμός

Ο μοναδικός εξοπλισμός που απαιτείται είναι ένα κοινό μπουκάλι ψεκασμού το οποίο μπορεί να παράγει την ομίχλη από ύδωρ (σχήμα 2.1). Το μπουκάλι ψεκασμού γεμίζεται με νερό βρύσης. Όμως το νερό δεν θα πρέπει να περιέχει χημικά ή απορρυπαντικά, τασενεργές ουσίες, οργανικούς διαλύτες.

Συμπληρωματικός εξοπλισμός που δύναται να βοηθήσει την κατάταξη είναι ένας μεγενθυντικός φακός, μία λάμπα και μία μετρητική ταινία.



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα κατάλληλου δοχείου ψεκασμού για τον έλεγχο.

Μεθοδολογία δοκιμής

Η ελεγχόμενη περιοχή πρέπει να είναι 50-100 cm². Εάν αυτή η απαίτηση δεν πληρείται τότε πρέπει να αναφερθεί στο φύλλο ελέγχου.

Ψεκάζεται μία έως δύο φορές εντός δευτερολέπτου από μία απόσταση των 25 ± 10 cm. Ο ψεκασμός συνεχίζεται για 20 έως 30 δευτερόλεπτα. Η κατάταξη σε κάποια κατηγορία υδροφοβικότητας θα πρέπει να αποδοθεί μέσα σε 10 δευτερόλεπτα μετά την ολοκλήρωση του ψεκασμού.

Κριτήρια

Η πραγματική εμφάνιση από πλευράς διαβροχής επάνω στο μονωτήρα θα πρέπει να προσδιοριστεί με μία από τις επτά κατηγορίες υδροφοβικότητας (HC), που είναι μία τιμή από το ένα έως το επτά. Τα κριτήρια για τις διαφορετικές κατηγορίες δίνονται στον πίνακα 2.1. Χαρακτηριστικές φωτογραφίες των επιφανειών με διαφορετικές ιδιότητες διαβρεξιμότητας φαίνονται στην επόμενη σελίδα.

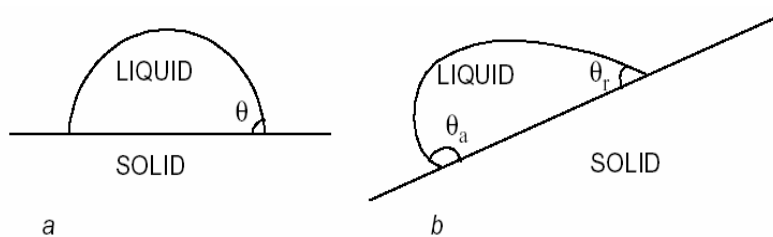
Πίνακας 2.1: Κριτήρια κατάταξης υδροφοβικότητας (HC)

HC	Περιγραφή
1	Μόνον ευδιάκριτες σταγόνες σχηματίζονται. $\theta_r=80^\circ$ ή και μεγαλύτερη για την πλειοψηφία των σταγόνων.
2	Μόνον ευδιάκριτες σταγόνες σχηματίζονται. $50^\circ<\theta_r<80^\circ$ για την πλειοψηφία των σταγόνων.
3	Μόνον ευδιάκριτες σταγόνες σχηματίζονται. $20^\circ<\theta_r<50^\circ$ για την πλειοψηφία των σταγόνων. Συνήθως δεν έχουν πλέον σφαιρικό σχήμα.
4	Τόσο ευδιάκριτες σταγόνες όσο και υγρά ίχνη από υδάτινες οδούς παρατηρούνται (περίπου $\theta_r=0^\circ$). Τελείως υγρές περιοχές $<2\text{cm}^2$. Όλα τα παραπάνω μαζί καλύπτουν $<90\%$ της εξεταζόμενης περιοχής.
5	Κάποιες τελείως υγρές περιοχές $>2\text{cm}^2$, καλύπτουν $<90\%$ της εξεταζόμενης περιοχής.
6	Υγρές περιοχές καλύπτουν $>90\%$ της εξεταζόμενης περιοχής, λίγες περιοχές που δεν έχουν διαβραχεί (σταγόνες/ίχνη) παρατηρούνται ακόμη.
7	Ένα συνεχές υδάτινο υμένιο παρατηρείται σ' ολόκληρη την εξεταζόμενη περιοχή.

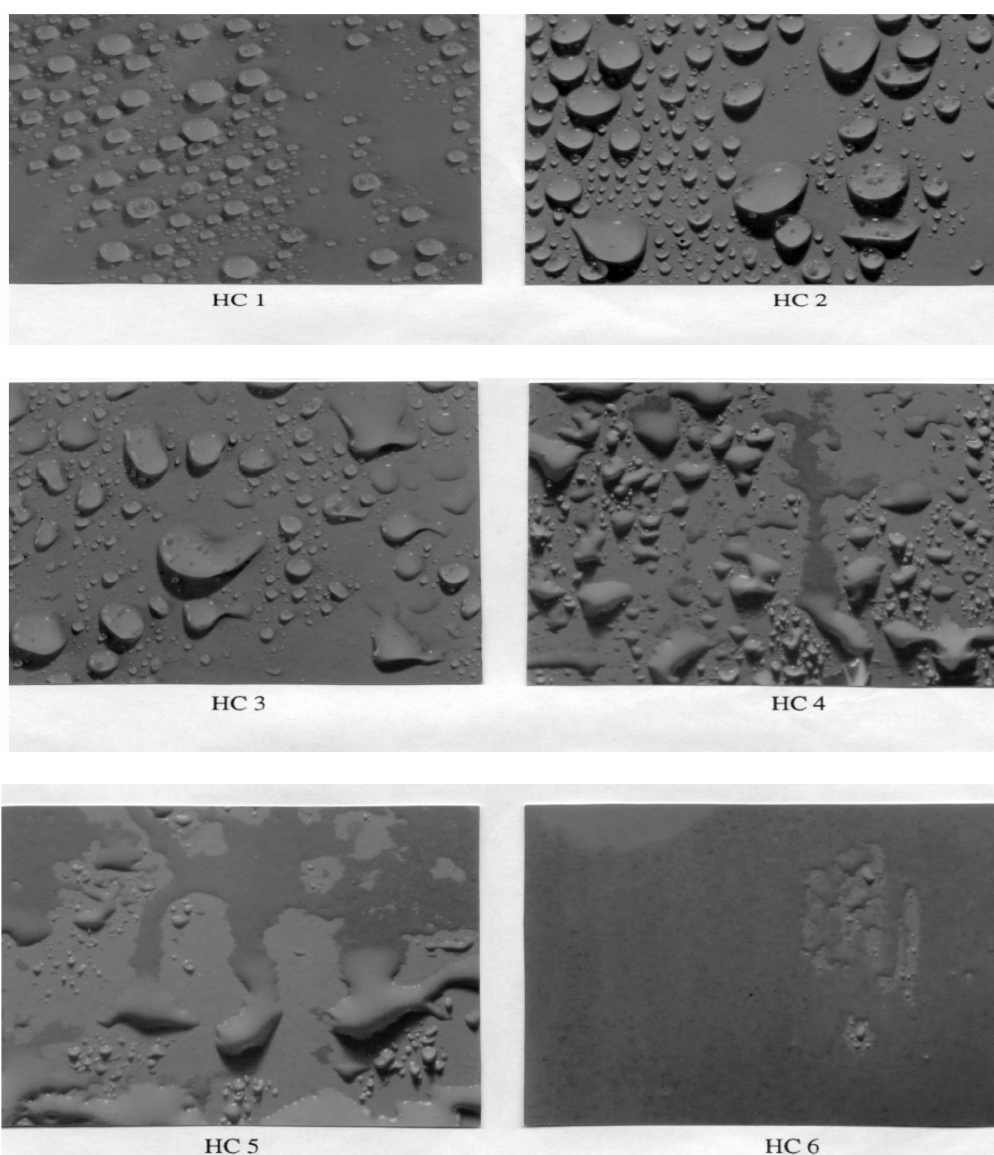
Επίσης η γωνία επαφής (θ) μεταξύ των σταγόνων ύδατος και της επιφάνειας πρέπει να συνυπολογίζεται. Η γωνία επαφής προσδιορίζεται στο σχήμα 2.2. Στο σχήμα 2.2 υπάρχουν δύο διαφορετικές γωνίες επαφής, η αύξουσα (advancing) γωνία επαφής (θ_a) και η φθίνουσα (receding) γωνία επαφής (θ_r). Με μία σταγόνα παρουσιάζονται αυτές οι γωνίες επάνω σε μία επιφάνεια υπό κλίση (σχήμα 2.2).

Η φθίνουσα γωνία είναι πιο σημαντική όταν πρέπει να εκτιμηθούν οι ιδιότητες της

διαβρεξιμότητας ενός μονωτήρος. Η γωνία κλίσης της επιφάνειας επηρεάζει τη γωνία θ_r αλλά δεν συνηθίζεται να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μέτρηση.



Σχήμα 2.2: (α) οριζόντιο επίπεδο, (β) επίπεδο υπό κλίση, όπου θ_a = αύξουσα γωνία, θ_r = φθίνουσα γωνία



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικά Παραδείγματα επιφανειών με τάξεις υδροφοβικότητας από 1 έως 6 (φυσικό μέγεθος)

Στη συνέχεια παρατίθεται το φύλλο ελέγχου όπως θα πρέπει να συντάσσεται σύμφωνα με τον οδηγό STRI, “Hydrophobicity Classification Guide”, 1992 [31].

Φύλλο Ελέγχου

Το φύλλο ελέγχου θα πρέπει να περιλαμβάνει τις παρακάτω πληροφορίες:

1. Γενικές πληροφορίες.

- Τοποθεσία, σταθμός, γραμμή.
- Ημερομηνία και χρόνος της κατάταξης
- Καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, άνεμος, καθίζηση)
- Τελέσθη από

2. Αντικείμενο ελέγχου

- Τύπος μονωτήρα
- Ταυτότητα (αριθμός αντικειμένου, θέση)
- Τάση
- Ημερομηνία εγκατάστασης ή εφαρμογή επικάλυψης (είδος επικάλυψης)
- Γωνίες

3. Κατηγορία υδροφοβικότητας

- Κατηγορία υδροφοβικότητας για διάφορες θέσεις (αριθμός δίσκου): κατά μήκος του μονωτήρα (για μονωτήρες με πολλούς δίσκους μπορούν να ελεγχθούν μόνον ορισμένοι δίσκοι επάνω, στη μέση και στο κάτω μέρος του μονωτήρα), κατά μήκος της επιφάνειας σε κάθε διαδοχή δίσκων (ψηλά, χαμηλά, πυρήνας, μεγάλος δίσκος, μικρός δίσκος, κ.λ.π.).
- Διαφορές (εάν υπάρχουν) γύρω από την περίμετρο του μονωτήρα.

Το σχέδιο του φύλλου ελέγχου δίνεται στη παράγραφο 2.1.3 [31].

Η κατάταξη της υδροφοβικότητας είναι πολύ δύσκολο να διεξαχθεί σε περιοχές με υψηλούς ανέμους. Εάν παρουσιάζονται τέτοιου είδους δυσκολίες ή άλλες, αυτές θα πρέπει ν' αναφέρονται στο φύλλο ελέγχου.

Η φόρμα του φύλλου ελέγχου είναι προτιμότερο να είναι σχεδιασμένη και τοποθετημένη στο χώρο που θα διεξαχθεί ο έλεγχος ώστε να είναι ευκολότερη η εγγραφή των παρατηρήσεων κατά τη διάρκεια του ελέγχου.

2.1.2 Υστέρηση γωνίας επαφής

Οι πραγματικές επιφάνειες είναι συνήθως τραχείς και κατά τη σύστασή τους ετερογενείς. Μια υγρή σταγόνα η οποία επικάθεται σε μια τέτοια επιφάνεια μπορεί να μείνει σε μία σταθερή ισορροπία (χαμηλή ελεύθερη ενέργεια), ή σε μία μεταβατική ισορροπία (μεταξύ δύο γειτονικών ενεργειακών καταστάσεων). Η γωνία ισορροπίας θ_e αντιστοιχεί στην κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας για το σύστημα. Σε μία ιδανικά λεία και συνθετικά ομογενή επιφάνεια, η γωνία επαφής στην ισορροπία είναι η εσωτερική γωνία επαφής θ_0 . Η εσωτερική γωνία επαφής σχετίζεται με διάφορες διεπιφανειακές τάσεις σύμφωνα και με την εξίσωση Young (2.1):

$$\gamma_{LV} \cos \theta_0 = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (2.1)$$

όπου γ_{LV} είναι η επιφανειακή τάση του υγρού σε ισορροπία με τον κεκορεσμένο ατμό του, γ_{SV} η επιφανειακή τάση του στερεού σε ισορροπία με τον κεκορεσμένο ατμό του υγρού και γ_{SL} είναι η διεπιφανειακή τάση μεταξύ στερεού και υγρού.

Η γωνία επαφής στο σημείο ισορροπίας επάνω σε μία τραχιά επιφάνεια ή σε μία ετερογενή επιφάνεια συχνά δεν μπορεί να παρατηρηθεί πειραματικά. Αντίθετα, το σύστημα συχνά βρίσκεται σε μία μεταβατική κατάσταση, παρουσιάζοντας μία μεταβατική γωνία επαφής. Σε αυτήν την περίπτωση οι γωνίες, αύξουσα και φθίνουσα, είναι διαφορετικές, και η διαφορά τους είναι γνωστή ως υστέρηση. Η διαφορά ($\theta_a - \theta_r$) δίνει το μέγεθος της υστέρησης. Η υστέρηση της γωνίας επαφής αυξάνεται με την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας και της ανομοιογένειάς της.

Θεωρείται έστω μία σταγόνα υγρού να έχει μία σταθερή γωνία επαφής επάνω σ' ένα οριζόντιο επίπεδο επιφάνειας. Εάν η επιφάνεια είναι ιδανικά λεία και ομογενής, τότε η προσθήκη μικρού όγκου υγρού στη σταγόνα θα προκαλέσει τη μετακίνηση του μετώπου της σταγόνας και θα προκύψει η ίδια γωνία επαφής. Αφαίρεση μικρού όγκου υγρού από τη σταγόνα θα προκαλέσει την υποχώρηση του μετώπου της σταγόνας, αλλά η ίδια γωνία επαφής θα προκύψει ξανά.

Από την άλλη πλευρά, εάν η επιφάνεια είναι τραχιά ή ετερογενής, προσθήκη υγρού θα προκαλέσει αύξηση του μεγέθους της σταγόνας χωρίς τη μετακίνηση της

περιφέρειάς του, και η γωνία επαφής θα γίνει μεγαλύτερη. Όταν προστίθεται επαρκής ποσότητα υγρού, η σταγόνα μπορεί ξαφνικά να μετακινηθεί. Η γωνία κατά την έναρξη αυτής της ξαφνικής μετακίνησης είναι η μέγιστη αύξουσα γωνία επαφής. Αφαίρεση υγρού μειώνει τη σφαιρικότητα της σταγόνας, την ισοπεδώνει σχεδόν, χωρίς και πάλι να μετακινείται η περιφέρεια της, και η γωνία επαφής γίνεται μικρότερη. Όταν αφαιρείται ικανή ποσότητα υγρού, το μέτωπο της σταγόνας ξαφνικά συστέλλεται (εάν όχι στην τιμή $\theta_r=0$). Η γωνία κατά την έναρξη της ξαφνικής συστολής είναι η ελάχιστη φθίνουσα γωνία επαφής. Στο εργαστήριο, η υδροφοβικότητα μπορεί να διερευνηθεί με την προσθήκη ή την αφαίρεση υγρού από τη σταγόνα επάνω σε μία οριζόντια επιφάνεια και τη μέτρηση των τιμών μεγίστου και ελαχίστου της αύξουσας και της φθίνουσας γωνίας.

Τόσο η αύξουσα όσο και η φθίνουσα γωνία μπορούν να μετρηθούν σε μία σταγόνα όταν η επιφάνεια είναι υπό κλίση. Τότε οι γωνίες επαφής σχετίζονται με τη γωνία του κεκλιμένου επιπέδου (2.2):

$$mg \sin \alpha = L\gamma(\cos \theta_a - \cos \theta_r) \quad (2.2)$$

όπου m είναι η μάζα της σταγόνας, g ο συντελεστής επιτάχυνσης της βαρύτητας, α η γωνία της κλίσης του επιπέδου, L το μήκος της σταγόνας και γ η επιφανειακή τάση του υγρού. Η γωνία θ_a και θ_r στην οποία η σταγόνα ξεκινά να κυλά προς τα κάτω του κεκλιμένου επιπέδου είναι και η μέγιστη αύξουσα και η ελάχιστη φθίνουσα γωνία, αντίστοιχα. Παρ' όλ' αυτά εάν δεν υπάρχει υστέρηση, η σταγόνα θα κυλήσει μέχρι το σημείο του επιπέδου με τη μικρότερη κλίση [31].

2.1.3 Φόρμα φύλλου ελέγχου σύμφωνα με τον STRI Guide, 1992

Τοποθεσία.....Ημερομηνία: Διάρκεια:.....

Τύπος Μονωτήρα.....Ταυτότητα.....Γωνία.....

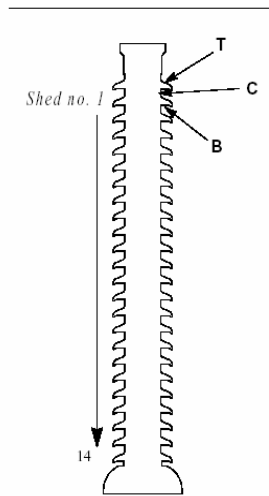
Τάση συστήματος.....Ημερομηνία εγκατάστασης

Καιρικές συνθήκες: θερμοκρασίαάνεμος καθίζηση

Σχόλια:.....

Χορηγήθηκε από:

Hydrophobicity Classification (HC)			
Shed (no.)	Position		
	T	B	C
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			



2.1.4 Κατάταξη της υδροφοβικότητας σύμφωνα με το πρότυπο

IEC/TS 62073

Η κατάταξη των μονωτήρων σύμφωνα με τον οδηγό STRI “Hydrophobicity Classification Guide”, 1992 [31], υιοθετήθηκε και από το πρότυπο IEC/TS 62073 [11]. Στο ανωτέρω πρότυπο περιγράφονται τρεις μέθοδοι μέτρησης της υδροφοβικότητας, οι οποίες διαφέρουν ως προς την ακρίβεια, την απλότητα και το μέγεθος της μετρούμενης επιφάνειας εφαρμογής. Οι μέθοδοι αυτές είναι οι εξής:

1. Μέθοδος μέτρησης της γωνίας επαφής.

Η μέθοδος μέτρησης της γωνίας επαφής στηρίζεται στην εκτίμηση της γωνίας επαφής που σχηματίζεται μεταξύ της άκρης μια σταγόνας νερού και της επιφάνειας ενός υγρού υλικού. Η γωνία επαφής εξαρτάται σημαντικά από την τραχύτητα της επιφάνειας, συνεπώς οι γωνίες επαφής που μετρώνται σε ρυπασμένες επιφάνειες μπορεί να διαφέρουν από τις γωνίες επαφής που μετρούνται σε λείες, καθαρές και επίπεδες επιφάνειες. Η μέτρηση της γωνίας γίνεται συνήθως με τη χρήση μεγενθυντικής συσκευής, η οποία διαθέτει βαθμονομημένο γωνιόμετρο, στερεωμένης σε ένα πλαίσιο με μία σύριγγα για εφαρμογή του σταγονιδίου στο υπό εξέταση δοκίμιο. Ένας άλλος τρόπος μέτρησης της γωνίας περιλαμβάνει μεγένθυση του σταγονιδίου με χρήση ενός προβολέα (πίσω από το σταγονίδιο) και προβολή της εικόνας του σταγονιδίου πάνω σε βαθμονομημένο υπόβαθρο. Για να αποκτηθεί μια

καλή ένδειξη της ικανότητας ύγρανσης του μονωτήρα πρέπει να διεξαχθούν πολλές μετρήσεις της εφαιπτομένης γωνίας σε διαφορετικές περιοχές κατά μήκος και γύρω από το μονωτήρα. Μικρές ή μηδενικές αποκλίσεις γωνιών σε όλες τις μετρούμενες περιοχές προσδιορίζουν ένα μονωτήρα που υγραίνεται εύκολα, ειδικά αν οι αρχικές γωνίες είναι μικρές ή μηδενικές. Αντίθετα μεγάλη μείωση γωνιών δείχνει ότι ο μονωτήρας είναι υδροφοβικός.

2. Μέθοδος μέτρησης επιφανειακής τάσης.

Ο προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης ενός μονωτήρα βασίζεται στο γεγονός ότι σταγόνες από διαφορετικά υγρά οργανικά μίγματα έχουν διαφορετική ικανότητα ύγρανσης της επιφάνειας του μονωτήρα. Κάθε ίχνος ενεργών προσμίξεων στο υγρό αντιδραστήριο ή στην επιφάνεια μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Είναι, ωστόσο, σημαντικό η επιφάνεια που θα εξεταστεί να μην αγγίζεται, κατά τη διάρκεια του ελέγχου όλος ο εξοπλισμός να είναι καθαρός και η διαύγεια του αντιδραστηρίου να είναι προσεχτικά ελεγμένη. Ειδικά αυτή η μέθοδος απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό υγρών, τα οποία να καλύπτουν ένα πλατύτερο εύρος επιφανειακής έντασης, για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε υδρόφοβους και υδρόφιλους μονωτήρες. Σε επιφάνειες ρυπασμένων μονωτήρων μπορεί να υπάρξουν περιορισμοί στη χρησιμοποίηση αυτής της μεθόδου, καθώς είναι δυνατό να αλληλεπιδράσουν οι ρυπαντές και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση. Θεωρείται ότι το μίγμα υγραίνει την επιφάνεια του μονωτήρα όταν αυτή παραμένει άθικτη, καθώς καλύπτεται συνεχώς από υγρό για τουλάχιστον 2sec. Η συρρίκνωση της περιφέρειας του υγρού καλύμματος δεν σημαίνει έλλειψη ύγρανσης. Μόνο η διάσπαση σε σταγονίδια μέσα σε 2sec σημαίνει έλλειψη ύγρανσης.

3. Μέθοδος ψεκασμού.

Η μέθοδος αυτή η οποία και αποκαλείται και μέθοδος για την ταξινόμηση της υδροφοβικότητας αναπτύχθηκε από το Σουηδικό Ερευνητικό Ινστιτούτο Διανομής (STRI) και τους Gubanski και Hartings. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο ποσοστό ύγρανσης που επιτρέπει η επιφάνεια ενός μονωτήρα μετά από έκθεση αυτής σε ένα λεπτό στρώμα νερού για μικρό χρονικό διάστημα. Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι μια συσκευή που μπορεί να παράγει ψιλή ομίχλη, όπως ένα συνηθισμένο μπουκάλι ψεκασμού. Το μπουκάλι ψεκασμού γεμίζεται με νερό. Το νερό δεν πρέπει να περιέχει καθόλου ακαθαρσίες που μπορεί να επηρεάσουν την επιφανειακή τάση

του νερού, όπως απορρυπαντικά, διαλυτικά κ.α. Η περιοχή ελέγχου πρέπει να είναι περίπου από 50cm² ως 100cm². Η αναλογία μεταξύ μήκους και βάθους της εξεταζόμενης περιοχής δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1:3. Ο ψεκασμός πραγματοποιείται από μια απόσταση 25 ± 10 cm, χρησιμοποιείται ποσότητα νερού μεταξύ 10ml και 30ml και διαρκεί χρονικό διάστημα 20 έως 30sec. Οι μετρήσεις της υδροφοβικότητας πραγματοποιούνται μέσα σε 10sec μετά την ολοκλήρωση του ψεκασμού. Η εμφάνιση της επιφάνειας του μονωτήρα μετά από την έκθεση αυτού σε υγρασία πρέπει να αξιολογηθεί και να ταξινομηθεί σε μία από τις επτά κατηγορίες ύγρυνσης (wettability class). Τα κριτήρια για την ταξινόμηση των διαβρεγμένων επιφανειών είναι οπτικά και λαμβάνουν υπόψη τις δύο παραμέτρους: α) το σχήμα των σταγόνων και β) το επί της εκατό τμήμα της επιφάνειας που έχει υγρανθεί. Τα κριτήρια αυτά έχουν αναφερθεί στον Πίνακα 2.1.

Σημειώνεται ότι η αβεβαιότητα στην οπτική εκτίμηση δεν είναι συνήθως μεγαλύτερη από ± 1 της τάξεως ύγρυνσης. Στο δε σχήμα 2.3 έχουν παρουσιαστεί τυπικές φωτογραφίες επιφανειών με διαφορετικές τάξεις ύγρυνσης.

2.2 Εκδήλωση εκκενώσεων corona παρουσία σταγόνων ύδατος και η δυναμική συμπεριφορά πάνω στην επιφάνεια των μη κεραμικών μονωτήρων.

Οι σταγόνες ύδατος αυξάνουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια των μονωτήρων εξαιτίας της υψηλής επιτρεπτότητας. Οι επιφανειακές εκκενώσεις corona εξαιτίας των σταγόνων ύδατος επιταχύνουν τη γήρανση του πολυμερούς υλικού από το οποίο αποτελείται ο δίσκος του μονωτήρα και καταστρέφουν τοπικά την υδροφοβικότητα, με αποτέλεσμα την εξάπλωση του ύδατος και τη συνένωση των γειτονικών σταγόνων ύδατος. Η απώλεια της υδροφοβικότητας έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας υγρής περιοχής, που εισάγει ένα μερικό βραχυκύκλωμα κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα. Κατά συνέπεια μειώνεται η αντίσταση που περιορίζει το ρεύμα και παρέχει τη γέφυρα για τη δημιουργία τόξου.

Τα φαινόμενα εκκένωσης corona από τις σταγόνες ύδατος έχουν λάβει σημαντική προσοχή και διερευνώνται σε πρόσφατες δημοσιεύσεις σύμφωνα με την εργασία του W. Que [32].

Οι Philips, Childs και Schneider ερεύνησαν τη στάθμη έναρξης του φαινομένου corona για τις σταγόνες ύδατος στην περιοχή του πυρήνα και στην περιοχή των δίσκων σε μη κεραμικούς μονωτήρες με μικρής κλίμακας πειράματα. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια υπολογίστηκε από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων στην περιοχή του περιβλήματος μονωτήρα ελεύθερης από σταγόνες ύδατος. Αυτή η ένταση ηλεκτρικού πεδίου αναφέρεται ως E-πεδίο.

Για την περιοχή του περιβλήματος του πυρήνα, μία απλή σταγόνα ύδατος, τοποθετήθηκε στο κέντρο της περιοχής του περιβλήματος τμήματος μονωτήρα. Το ηλεκτρικό πεδίο αυξήθηκε στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Για σταγόνες ύδατος με όγκους από 10 έως 100 μl , οι τιμές του εφαρμοσμένου E-πεδίου για την έναρξη του φαινομένου corona βρέθηκαν μεταξύ 0,56 και 0,44 kV/mm για το υλικό από σιλικονούχο καουτσούκ και με τιμή γωνίας επαφής 88° . Το εφαρμοσμένο E-πεδίο που απαιτείτο για την έναρξη του φαινομένου corona έβαινε μειούμενο καθώς αυξανόταν το μέγεθος της σταγόνας ύδατος από 10 σε 80 μl και παρέμενε το ίδιο μεταξύ 80 έως 100 μl .

Για την περιοχή του δίσκου, μία απλή σταγόνα ύδατος εναποτέθηκε στην επιφάνεια του δίσκου ενός μη κεραμικού μονωτήρα. Για σταγόνες ύδατος με όγκους από 65 έως 125 μl , η μέση τιμή του εφαρμοσμένου E-πεδίου κατά την οποία ξεκίνησε το φαινόμενο corona ήταν μεταξύ 0,86 έως 0,96 kV/mm.

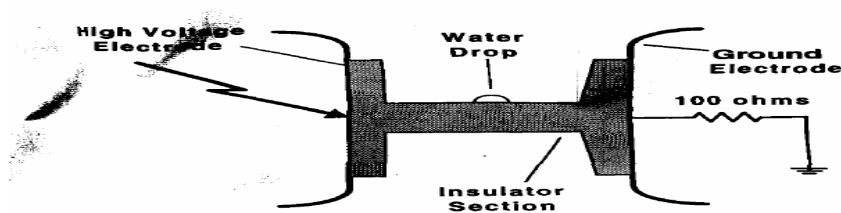
Χρησιμοποιήθηκαν έλεγχοι με επιτάχυνση του ρυθμού της γήρανσης, με σκοπό να προσομοιωθούν το ειδικό κλίμα και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. περιβάλλον ισχυρής καθαλάτωσης) στις οποίες οι μη κεραμικοί μονωτήρες είχαν τοποθετηθεί ή προορίζονταν να τοποθετηθούν [33].

Η εκδήλωση των εκκενώσεων corona από τις σταγόνες ύδατος θεωρήθηκε ο κύριος μηχανισμός της γήρανσης που παρατηρήθηκε στους μη κεραμικούς μονωτήρες (NCI) υπό τάση 500KV σε ελέγχους με επιταχυνόμενη γήρανση. Τα χαρακτηριστικά του φαινομένου corona των σταγόνων ύδατος στους NCI SiR καθώς και η επίδραση

της δράσης του φαινομένου corona των σταγόνων ύδατος, εξετάστηκαν από τους Philips, Childs και Schneider [33].

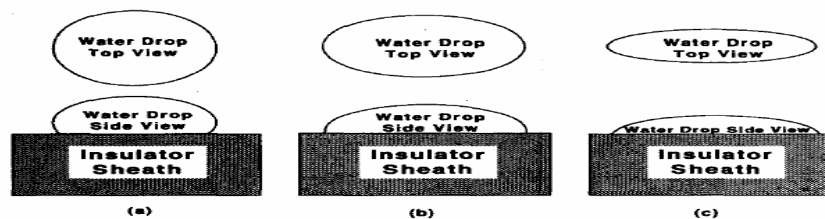
Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για να διερευνηθεί η έναρξη του φαινομένου corona σταγόνων ύδατος επάνω στην επιφάνεια των περιοχών του περιβλήματος ενός μη κεραμικού μονωτήρα NCI φαίνεται στο σχήμα 2.4. Το τμήμα του μονωτήρα που εξετάστηκε ήταν από ένα νέο μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ των 500KV.

Η τάση στα ηλεκτρόδια εφαρμόστηκε σε στάδια και οι αλλαγές στο σχήμα της σταγόνας παρατηρήθηκαν χρησιμοποιώντας μία κάμερα και ένα βίντεο εγγραφής. Η τιμή ενάρξεως του φαινομένου corona προσδιορίστηκε μετρώντας τα ρεύματα εκφόρτισης μέσω μιας αντίστασης των 100Ω συνδεδεμένη από την πλευρά του ηλεκτροδίου γείωσης. Οι εκκενώσεις corona παρατηρήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν ενισχυτή εικόνας [33].



Σχήμα 2.4: Διάταξη για την παρατήρηση των εκκενώσεων corona από σταγόνες ύδατος επάνω στην περιοχή του περιβλήματος ενός μη κεραμικού μονωτήρα [33]

Η επιμήκυνση της σταγόνας ύδατος με όγκο των 20μl περιγράφεται παρακάτω και φαίνεται στο σχήμα 2.5. Η τάση αυξάνεται από μηδέν μέχρι την έναρξη του φαινομένου corona. Φαίνεται από το σχήμα 2.5(α) ότι η γωνία επαφής είναι αρχικά αμβλεία εξαιτίας της υδροφοβικότητας της επιφάνειας του περιβλήματος.



Σχήμα 2.5: Μεταβολή του σχήματος σταγόνας ύδατος επάνω στο περίβλημα ενός μη κεραμικού μονωτήρα με την εφαρμογή (α) 0kV/mm, (β) 0.57 kV/mm, (γ) 0,68 kV/mm

Καθώς το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο (E-field) αυξάνεται από 0 σε 0,5 kV/mm σε βήματα των 0,02 kV/mm, καμία σημαντική αλλαγή στη μορφή της σταγόνας δεν παρατηρείται (σχήμα 2.5 (α)). Παρ' όλ' αυτά μόλις το πεδίο αυξάνεται στην τιμή των 0,58 kV/mm, απότομα η σταγόνα αλλάζει σχήμα (σχήμα 2.5 (β)). Η επιμήκυνση της αποδίδεται στις ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Αυξανόμενου του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου στα 0,66 kV/mm, μικρή επιμήκυνση της σταγόνας παρατηρείται, αλλά όχι πλέον απότομες μεταβολές. Στην τιμή των 0,68kV/mm η σταγόνα απότομα παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.5 (γ) και καταγράφονται ρεύματα εκφόρτισης.

Τα ρεύματα αυτά εκφόρτισης οφείλονται στην έναρξη των εκκενώσεων corona. Αυξάνοντας περισσότερο το εφαρμοζόμενο πεδίο, λαμβάνονται και μεγαλύτερα ρεύματα εκφόρτισης. Στο σχήμα 2.6 φαίνονται οι εκκενώσεις corona μιας απλής σταγόνας των 20μl σ' ένα εφαρμοζόμενο πεδίο των 0,6 kV/mm. Φαίνεται ότι οι εκκενώσεις corona από μία σταγόνα στο μέσο του περιβλήματος εκτείνονται στην δεξιά πλευρά του δίσκου.

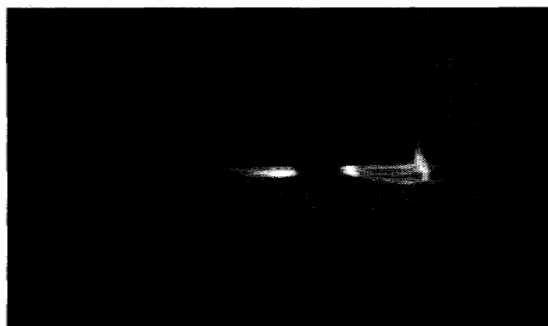
Μόλις το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο (E-field) μειώνεται στο μηδέν, η σταγόνα δεν επαναποκτά το σχήμα της αλλά παραμένει επιμήκης. Οι μεταβολές στο σχήμα της σταγόνας σημειώνονται σε ορισμένες τιμές δυναμικού, με τη σταγόνα να χάνει απότομα το σχήμα της και να διαφέρει πολύ από το αρχικό αποτύπωμα της. Αυτό που παρατηρείται είναι διαφορετικό από την επιμήκυνση των σταγόνων ύδατος που αιωρούνται από τους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς, όπου οι σταγόνες βαθμιαία επιμηκύνονται καθώς το πεδίο αυξάνεται επανακτώντας όμως το σχήμα τους μόλις το πεδίο μετακινείται [33].

Παρ' ότι περιγράφεται παραπάνω η δυναμική ενός ειδικού μεγέθους σταγόνας, σταγόνες ύδατος με όγκο από 10 μl έως 100 μl αντιμετωπίστηκαν ενιαία στα πειράματα, και για κάθε μέγεθος προσδιορίστηκε η έναρξη του φαινομένου. Για κάθε σταγόνα οποιουδήποτε όγκου ισχύει η ίδια δυναμική που περιγράφεται παραπάνω. Η κυριότερη διαφορά είναι η τιμή του επιφανειακού ηλεκτρικού πεδίου (E-field), στην οποία συμβαίνει και η μετάπτωση του σχήματός της. Συνεπώς η διαπλάτυνση των σταγόνων ύδατος παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην έναρξη του μηχανισμού των εκκενώσεων corona καθώς η απότομη επιμήκυνση της σταγόνας από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ηλεκτρικού

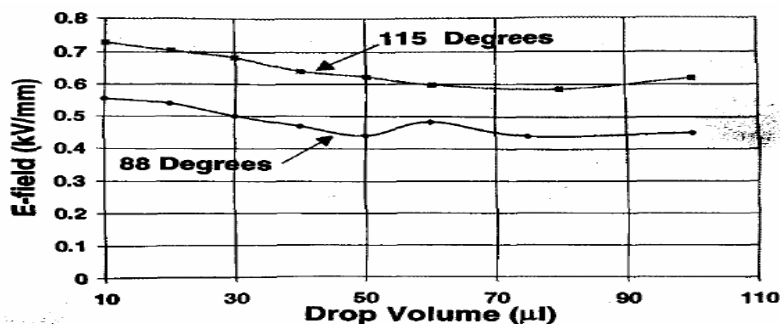
πεδίου (E-field) στα άκρα της σταγόνας, που ακολούθως προκαλεί τις εκκενώσεις corona.

Τα επίπεδα έναρξης των εκκενώσεων corona για δύο υλικά από σιλικονούχο καουτσούκ με διαφορετικό βαθμό υδροφοβικότητας, (π.χ. με γωνίες επαφής της τάξης των 88° και των 115°) μετρήθηκαν σαν συνάρτηση του όγκου της σταγόνας χρησιμοποιώντας τη διάταξη του σχήματος 2.4. Στο σχήμα 2.7 έχουν προσδιοριστεί οι τιμές έναρξης του φαινομένου corona για ένα φάσμα σταγόνων ύδατος με όγκους από 10 έως 100 μl για τα δύο διαφορετικά υλικά. Είναι φανερό ότι το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο (E-field) που απαιτείται για την έναρξη του φαινομένου corona μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος της σταγόνας ύδατος από 10 σε 80 μl . Καμία ουσιαστική διαφορά δεν παρατηρείται στις τιμές έναρξης του ηλεκτρικού πεδίου (E-field) όταν ο όγκος της σταγόνας είναι μεταξύ 80 και 100 μl .

Η παραπάνω συμπεριφορά δικαιολογείται από το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερες σε μέγεθος είναι οι σταγόνες ύδατος τόσο πιο εύκολα διαπλατώνονται από την εφαρμογή των ηλεκτρικών πεδίων (E-fields) απ' ότι οι μικρότερες σε μέγεθος σταγόνες, και οι μεγαλύτερες σταγόνες οδηγούν τελικά και σε μεγαλύτερη ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου (E-field), όπως έχει ήδη αποδειχθεί σε πρωτότερη δημοσιευμένη μελέτη για τις σταγόνες ύδατος που αιωρούνται από αγωγούς γραμμών μεταφοράς [33].



Σχήμα 2.6: Εκκενώσεις corona που παρατηρούνται γύρω από μία σταγόνα ύδατος 20 μl με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου τιμής 0,6 kV/mm



Σχήμα 2.7: Μέση τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου έναρξης εκκενώσεων corona σε συνάρτηση με το μέγεθος της σταγόνας ύδατος για δύο υλικά από σιλικονούχο καουτσούκ τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικές υδροφοβικές ιδιότητες (έχουν διαφορετικές τιμές γωνίες επαφής).

Οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου έναρξης του φαινομένου corona για σταγόνες ύδατος επάνω στην επιφάνεια ενός δίσκου μη κεραμικού μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ καταγράφηκαν με τη χρησιμοποίηση μίας διάταξης παρόμοιας με του σχήματος 2.4. Οι τιμές έναρξης των εκκενώσεων corona προσδιορίστηκαν μόνο για ένα είδος υλικού από σιλικονούχο καουτσούκ (γωνία επαφής 88°). Καταγράφηκαν οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου (E-field) για σταγόνες ύδατος με όγκους μεταξύ 50 και 125 μl.

Για σταγόνες ύδατος με όγκους από 65 έως 125 μl, η μέση τιμή του ηλεκτρικού πεδίου (E-field) παρέμεινε μεταξύ 0,86 και 0,96 kV/mm. Για σταγόνες με όγκο μικρότερο των 60μl, η τιμή του E-πεδίου ήταν μεγαλύτερη από 1 kV/mm.

Για σταγόνες ύδατος με όγκο μικρότερο των 65μl, φάνηκε ότι όσο μικρότερη είναι η σταγόνα, τόσο μεγαλύτερη τιμή E-πεδίου πρέπει να εφαρμοστεί μέχρι να ξεκινήσουν οι εκκενώσεις corona. Για σταγόνες ύδατος με όγκο μεγαλύτερο από 65 μl, η τιμή του E-πεδίου έναρξης του φαινομένου παρέμεινε στα ίδια επίπεδα, προσομοιάζοντας στη τάση αυτή με την περίπτωση των σταγόνων ύδατος που αιωρούνται από αγωγούς.

Η παρουσία των σταγόνων ύδατος στους μη κεραμικούς μονωτήρες από σιλικονούχο καουτσούκ θα οδηγήσουν στην έναρξη του φαινομένου corona εάν η εφαρμοζόμενη επιφανειακή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβεί μία συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου. Η τιμή αυτή κατωφλίου εξαρτάται από: (α) τον όγκο

της σταγόνας, (β) την υδροφοβικότητα της επιφάνειας του υλικού από σιλικονούχο καουτσούκ, (γ) τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Για υλικά από σιλικονούχο καουτσούκ με γωνίες επαφής τιμής 88° και 115° , οι τιμές κατωφλίου κείτονται μεταξύ 0,44 και 0,72 kV/mm, αντίστοιχα για απλές σταγόνες στην επιφάνεια του περιβλήματος ενός μη κεραμικού μονωτήρα. Το μέγεθος το σταγόνων που εξετάστηκαν κυμαινόταν από 10 έως 100 μl .

Παρατηρώντας το φαινόμενο corona μίας απλής σταγόνας ύδατος στο μέσο του περιβλήματος γίνεται φανερό ότι οι εκκενώσεις corona εκτείνονται προς το μέρος του δίσκου. Μεγάλες τιμές ηλεκτρικού πεδίου στη διεπιφάνεια αέρα και περιβλήματος ή δίσκου αποδίδεται στη διαφορετική επιτρεπτότητα του σιλικονούχου καουτσούκ και του αέρα [33].

Οι Lopes, Jayaram και Cherney μελέτησαν τη μερική εκκένωση από τις σταγόνες ύδατος επάνω σε μία μονωτική επιφάνεια από σιλικονούχο καουτσούκ. Κατέληξαν ότι οι υπολογιζόμενες μέσες τιμές του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου κατά τις οποίες εκκινεί και το φαινόμενο corona είναι 5,2 kV_{rms}/cm και 4,2 kV_{rms}/cm για κάθε σταγόνα ύδατος με όγκο της τάξεως των 30 και 80 μl , αντίστοιχα. Δεδομένου ότι το φαινόμενο corona εκκινεί όταν το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο γύρω από τις σταγόνες ύδατος προσεγγίσει την κρίσιμη τιμή ιονισμού του αέρα που είναι 20,4 kV_{rms}/cm για τις υπάρχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες, οι μέσοι παράγοντες ενίσχυσης ελήφθησαν από 3,9 έως 4,8 για μία σταγόνα με όγκο που κυμαινόταν από 30 σε 80 μl .

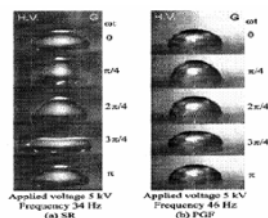
Οι εκκενώσεις μεταξύ των σταγόνων ύδατος μελετήθηκαν προσεκτικά από τους Blackmore και Birtwhistle. Οι παραπάνω διαπίστωσαν ότι οι εκκενώσεις μεταξύ ηλεκτροδίων σταγόνων ύδατος προκάλεσαν τοπικά την απώλεια της υδροφοβικότητας του πολυμερούς υλικού. Ο συνδυασμός της υψηλής θερμοκρασίας της εκκένωσης και του ιονισμένου περιβάλλοντος του αέρα από υδρατμούς οδήγησε στην απώλεια της υδροφοβικότητας. Ο ρυθμός απώλειας της υδροφοβικότητας βρέθηκε να εξαρτάται από την αγωγιμότητα των σταγόνων ύδατος και τη γωνία επαφής. Σε υψηλή αγωγιμότητα και χαμηλή τιμή γωνίας επαφής χρειάστηκε ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι την απώλεια της υδροφοβικότητας του πολυμερούς υλικού.

Η συμπεριφορά των σταγόνων ύδατος επάνω σε υδρόφοβη μονωτική επιφάνεια κάτω από την επίδραση χαμηλής συχνότητας εναλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου ac επίσης διερευνήθηκε από πληθώρα μελετητών.

Οι Keim και Koenig μελέτησαν τη συμπεριφορά μιας απλής σταγόνας ύδατος σε διάφορες ογκομετρικές ποσότητες υπό την εφαρμογή εναλασσόμενης τάσης ηλεκτρικού πεδίου. Οι παραπάνω παρατήρησαν ότι οι σταγόνες ύδατος ταλαντώνονταν με μετακίνηση τους επάνω-κάτω, οι δε σταγόνες που είχαν υψηλή τάση δόνησης παρουσίασαν γωνίες επαφής που διέφεραν μεταξύ τους κατά 30 βαθμούς.

Οι Krivda και Birtwhistle παρατήρησαν ότι όταν μία σταγόνα ύδατος όγκου 40 μl εναποτίθεται επάνω σε επιφάνεια υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου εντάσεως 0,68 kVrms/mm, παρατηρείται μία σημαντική παραμόρφωση της σταγόνας ύδατος η οποία προεκτείνεται και συστέλλεται κατά την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Η διάμετρος της σταγόνας ύδατος μεταβαλλόταν ανάλογα με τις μέγιστες τιμές του δυναμικού από 6,4 mm κατά τον κύκλο των θετικών τιμών σε 4,3 mm κατά τον κύκλο των αρνητικών τιμών του δυναμικού.

Οι Yamada, Sugimoto και Higashiyama εξέτασαν πειραματικά τα φαινόμενα συντονισμού μιας απλής σταγόνας ύδατος που είχε εναποτεθεί πάνω σ' ένα υδρόφοβο φύλλο υπό την επίδραση ηλεκτρικού εναλασσόμενου ac πεδίου. Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται ο χρόνος κατά τον οποίο εξελίσσεται η παραμόρφωση των 10 μl της σταγόνας ύδατος που έχει εναποτεθεί σ' ένα φύλλο από σιλικονούχο καουτσούκ SiR στη μία περίπτωση και σ' ένα φύλλο από ένα άλλο είδος πολυμερούς υλικού από PGF κατά τη διάρκεια μιας ημιπεριόδου (μεταξύ $\omega t=0$ και π) του εναλασσόμενου ac πεδίου.



Σχήμα 2.8: Συμπεριφορά μιας σταγόνας ύδατος 10 μl που έχει εναποτεθεί επάνω σ' ένα φύλλο από SiR και από PGF.

2.3 Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ με μία σταγόνα ύδατος

Στην ερευνητική εργασία του W. Que [32] γίνεται υπολογισμός της πεδιακής έντασης γύρω από σταγόνες ύδατος σε περιοχές ενός μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ του οποίου η υδροφοβικότητα χαρακτηρίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ψεκασμού του προτύπου IEC/TS 62073 [11]. Τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας του W. Que [32] που αφορούν στην προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρα παρουσία σταγόνων ύδατος θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και η ανάλυση από τα παραπάνω θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 5.

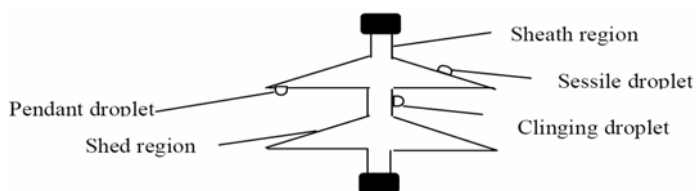
Η παρουσία σταγόνων ύδατος επηρεάζει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού (Electric Field and Voltage Distribution) στην επιφάνεια ενός μη κεραμικού μονωτήρα. Ποικίλλες κατανομές των σταγόνων ύδατος στην επιφάνεια ενός μη κεραμικού μονωτήρα οδήγησαν σε διαφορετικά ηλεκτρικά πεδία και με διαφορετικές κατανομές δυναμικού.

Με την υπόθεση ότι ο μονωτήρας ανάρτησης είναι κατακόρυφος, υπάρχουν διακριτές σταγόνες ύδατος επάνω στους δίσκους, προσκολλημένες σταγόνες ύδατος επάνω στην κατακόρυφη επιφάνεια του πολυμερούς περιβλήματος του μονωτήρα και αιωρούμενες σταγόνες ύδατος κάτω από τους δίσκους όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9. Η επιφάνεια του δίσκου του μονωτήρα είναι σχεδόν παράλληλη με τις ισοδυναμικές γραμμές. Η επιφάνεια του περιβλήματος είναι σχεδόν κατακόρυφη προς τις ισοδυναμικές γραμμές.

Στο πρώτο στάδιο, δύο απλά μοντέλα χρησιμοποιούνται προκειμένου να μελετηθούν τα κύρια χαρακτηριστικά της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τις σταγόνες ύδατος. Και στα δύο μοντέλα προσομοιώνεται, ένα επίπεδο φύλλο από υδρόφοβο σιλικονούχο καουτσούκ με μία διακριτή σταγόνα ύδατος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για να μελετηθεί η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου πλησίον των σταγόνων ύδατος. Το ένα ηλεκτρόδιο φορτίζεται (π.χ., 100 Volts) και το άλλο είναι γειωμένο. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται θεωρεί επίσης ως δεδομένη τη γείωση σε κάποιο απομακρυσμένο σημείο. Κάτι τέτοιο είναι

ισοδύναμο με τη διεξαγωγή ενός πειράματος σ' ένα εργαστήριο υψηλών τάσεων με το δάπεδο, την οροφή και τους τοίχους γειωμένους.

Προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή του περιβλήματος, θεωρούνται δύο ηλεκτρόδια μαζί με ένα φύλλο από απλό σιλικονούχο καουτσούκ (Silicone Rubber) τοποθετημένο ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια που είναι κάθετα προς αυτό, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.10. Προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή του δίσκου, το φύλλο από SiR τοποθετείται παράλληλα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17. Τ' αποτελέσματα της γωνίας επαφής, του μεγέθους, του σχήματος και της αγωγιμότητας μίας σταγόνας ύδατος στην αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου διερευνώνται με τη χρησιμοποίηση των δύο αυτών μοντέλων [32].



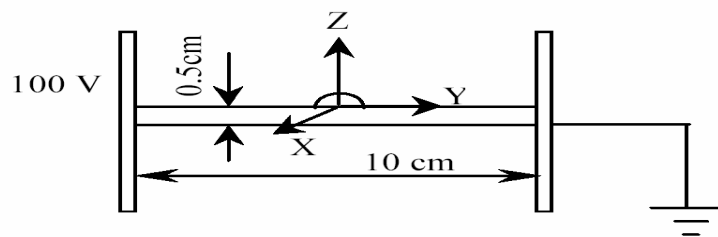
Σχήμα 2.9: Τρία είδη σταγόνων ύδατος επάνω σ' έναν κατακόρυφο μονωτήρα ανάρτησης.

2.3.1 Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής του περιβλήματος

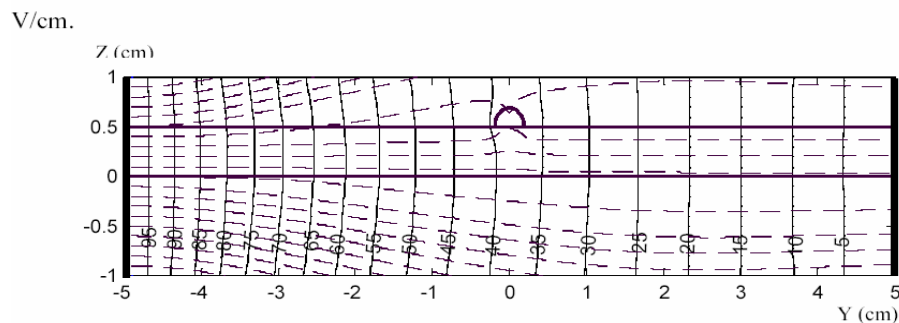
Προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή του περιβλήματος ενός μονωτήρα, υποτίθενται δύο ηλεκτρόδια μαζί μ' ένα απλό φύλλο από SiR. Το μέγεθος του φύλλου από SiR είναι $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ με πάχος 0.5 cm . Η διηλεκτρική σταθερά του υλικού από SiR που χρησιμοποιείται και στους υπολογισμούς είναι 4.3. Τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε απόσταση 10 cm το ένα από το άλλο. Η απόσταση του φύλλου από SiR φαίνεται στο σχήμα 2.10· το φύλλο από SiR είναι στο διάστημα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή του περιβλήματος. Το φορτισμένο ηλεκτρόδιο βρίσκεται στην αριστερή πλευρά και το γειωμένο ηλεκτρόδιο βρίσκεται στη δεξιά πλευρά. Το εφαρμοζόμενο δυναμικό είναι 100 V , που σημαίνει ότι ο μέσος όρος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι $100/10=10\text{ V/cm}$. Οι διευθύνσεις x , y , z προσδιορίζονται όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.10.

Μία σταγόνα ύδατος σχήματος ημισφαιρίου υποτίθεται ότι βρίσκεται στο ενδιάμεσο του διαστήματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Η διάμετρος της σταγόνας ύδατος είναι 4mm και το ύψος της είναι 2 mm. Η διηλεκτρική σταθερά της σταγόνας ύδατος είναι 80 και η αγωγιμότητα της θεωρείται μηδενική.

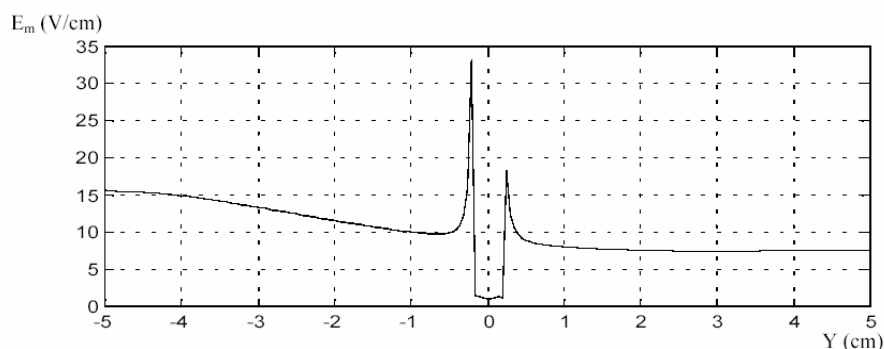
Για την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος, στο σχήμα 2.11 φαίνονται οι ισοδυναμικές γραμμές όταν μία απλή σταγόνα ύδατος είναι στο κέντρο της επιφάνειας. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας του φύλλου επίσης υπολογίζεται και φαίνεται στο σχήμα 2.12. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ενισχύεται στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού φύλλου στην τιμή των 32.9 V/cm.



Σχήμα 2.10: Πειραματική διάταξη για την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος

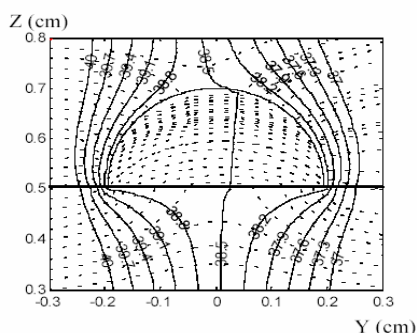


Σχήμα 2.11: Γραμμές ισοδυναμικές και γραμμές ηλεκτρικού πεδίου για την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος.



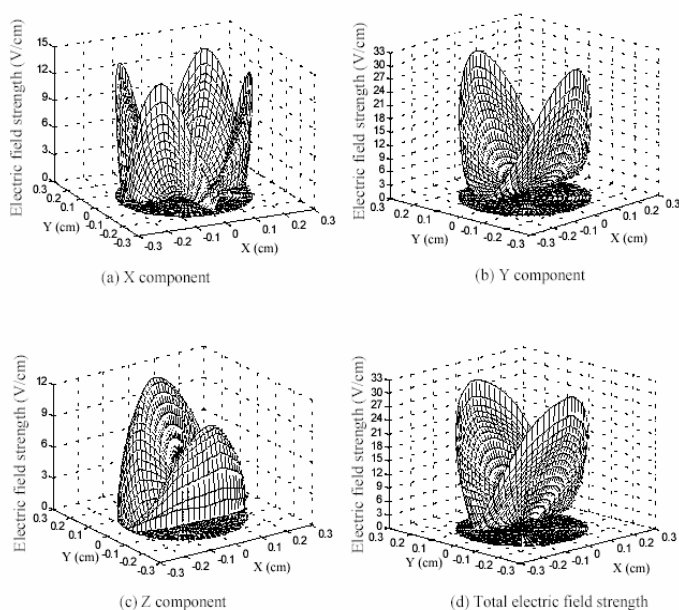
Σχήμα 2.12: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της επιφάνειας ενός φύλλου από SiR για την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος.

Μία μεγενθυμένη εικόνα των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τη σταγόνα ύδατος που είναι τοποθετημένη επάνω στο φύλλο από SiR προσομοιώνει την περιοχή του περιβλήματος και φαίνεται στο σχήμα 2.13. Οι συνεχόμενες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις ισοδυναμικές γραμμές· οι διακεκομμένες γραμμές χρησιμοποιούνται για την απόδοση των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου. Από το σχήμα 2.13 φαίνεται ότι η παρουσία σταγόνας ύδατος προκαλεί σημαντική παραμόρφωση στο σχήμα των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου που βρίσκονται σε γειτνίαση με τη σταγόνα ύδατος. Για την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σημαντικά αυξημένη στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού φύλλου.



Σχήμα 2.13: Ισοδυναμικές γραμμές και γραμμές ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μία σταγόνα ύδατος επάνω στην επιφάνεια του περιβλήματος.

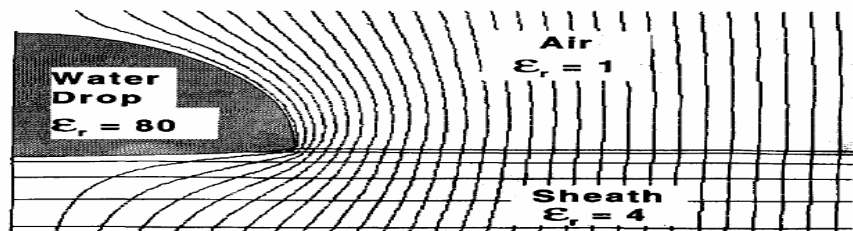
Το μέγεθος και η φορά του διανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλονται κατά μήκος της επιφάνειας της σταγόνας ύδατος. Προκειμένου να παρακολουθηθούν αυτές οι μεταβολές, διάφορες ποσότητες μπορούν να ελεγχθούν, για παράδειγμα οι x , y , ή z διευθύνσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ή το μέτρο του ανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Οι x , y , z , συντεταγμένες και το μέτρο της έντασης επάνω στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14 (a), (b), (c), (d), αντίστοιχα. Κάθε σημείο επάνω στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος περιγράφεται με τρεις συντεταγμένες (x , y , z). Στην πραγματικότητα η τέταρτη διάσταση θα ήταν απαραίτητη προκειμένου να δείξει την κατανομή του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Προκειμένου να είναι δυνατή η εμφάνιση της κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια των σταγόνων ύδατος χρησιμοποιώντας ένα 3D γράφημα, το σημείο της επιφάνειας αναπαρίσταται με τις (x,y) συντεταγμένες του μόνον. Με άλλα λόγια, όλα τα σημεία επάνω στην επιφάνεια των σταγόνων ύδατος αναπαρίστανται με την προβολή τους επάνω σ' ένα (x,y) επίπεδο. Τότε η z διάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να δείξει τα μέτρα του ανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ή τις παραμέτρους του σε οποιοδήποτε άλλο σημείο επάνω στην επιφάνεια των σταγόνων ύδατος.



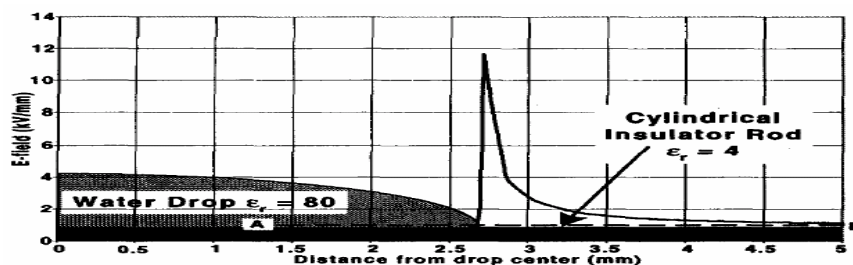
Σχήμα 2.14: Παράμετροι του ανύσματος και μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος.

Για μία σταγόνα ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με εφαρμογή δυναμικού τιμής 100 V, είναι 32.9 V/cm επάνω στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος, στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Ο παράγοντας ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι 3.29, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην άκρη της σταγόνας ύδατος και της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται άνευ της σταγόνας ύδατος. Η y διάσταση του ανύσματος της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι η κυρίαρχη παράμετρος, όπως άλλωστε αναμένεται [32].

Με υπολογισμούς του ηλεκτρικού πεδίου και μικρής κλίμακας πειράματα οι A.J. Philips, D.J. Childs και H.M. Schneider εξετάζουν την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες περιοχές του περιβλήματος του μονωτήρα και τα αποτελέσματα των ισοδυναμικών γραμμών και των τιμών του ηλεκτρικού πεδίου φαίνονται στα σχήματα 2.15 και 2.16. Η διάταξη του σχήματος 2.4 προσομοιώθηκε με λογισμικό τρισδιάστατης έκδοσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να προσδιοριστεί η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου (E-field) [33].



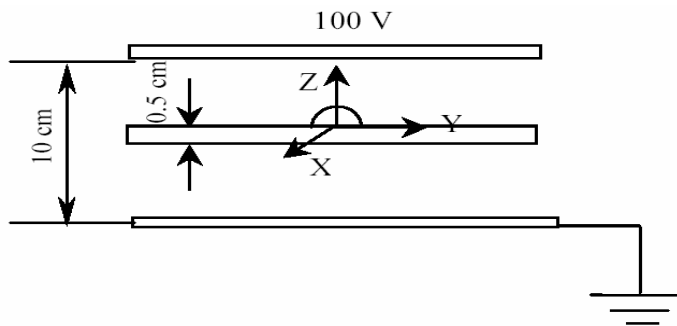
Σχήμα 2.15: Ισοδυναμικές γραμμές γύρω από το ημισφαίριο σταγόνας ύδατος επάνω σε μη κεραμικό μονωτήρα με την εφαρμογή ομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου



Σχήμα 2.16: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της γραμμής A-B σε προσομοίωση του περιβλήματος ενός μη κεραμικού μονωτήρα με μία σταγόνα ύδατος με ελαιοειδές σχήμα όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου απουσία της σταγόνας ύδατος είναι 1 V/mm

2.3.2 Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής του δίσκου

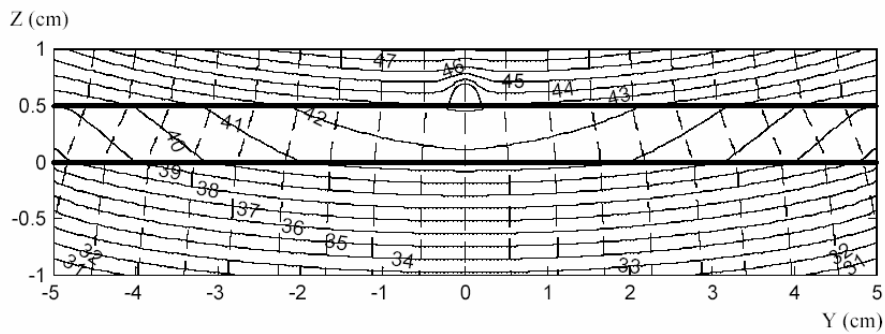
Προκειμένου ν' αναπαρασταθεί η περιοχή του δίσκου του μονωτήρα, θεωρούνται δύο ηλεκτρόδια μαζί μ' ένα απλό φύλλο από SiR. Τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε απόσταση 10 cm μεταξύ τους. Το φύλλο από SiR τοποθετείται σε θέση παράλληλη μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή του δίσκου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.17. Το επάνω ηλεκτρόδιο είναι φορτισμένο και το κάτω ηλεκτρόδιο είναι γειωμένο. Το δυναμικό που εφαρμόζεται είναι 100 V, που σημαίνει ότι η μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι $100/10=10$ V/cm. Οι x, y, z κατευθύνσεις προσδιορίζονται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17.



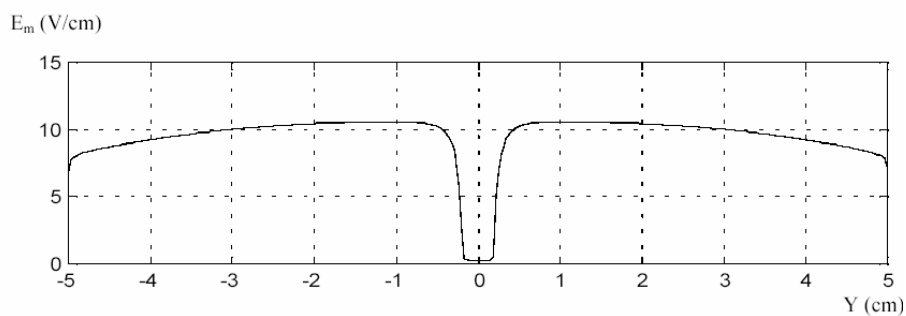
Σχήμα 2.17: Πειραματική διάταξη για την προσομοίωση της περιοχής του δίσκου.

Μία σταγόνα ύδατος σε σχήμα ημισφαιρίου θεωρείται στο μέσο διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η διάμετρος της σταγόνας ύδατος είναι 4mm και το ύψος της είναι 2 mm. Η διηλεκτρική σταθερά του νερού είναι 80 και η αγωγιμότητα του θεωρείται μηδενική.

Για την προσομοίωση της περιοχής του δίσκου, στο σχήμα 2.18 φαίνονται οι ισοδυναμικές γραμμές με μία απλή σταγόνα ύδατος στο κέντρο της επιφάνειας. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του φύλλου επίσης υπολογίζεται και φαίνεται στο σχήμα 2.19. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει αυξηθεί στην κορυφή της σταγόνας ύδατος. Ο λόγος για την αλλαγή του μέτρου της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου στο σχήμα 2.19 είναι αποτέλεσμα της γραμμής υπολογισμού που διέρχεται μέσω του ύδατος που έχει διηλεκτρική σταθερά ίση με 80.



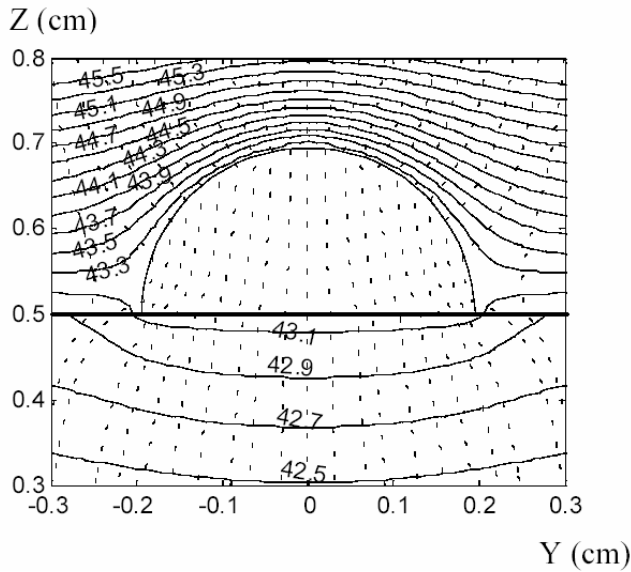
Σχήμα 2.18: Ισοδυναμικές γραμμές και γραμμές ηλεκτρικού πεδίου κατά την προσομοίωση της περιοχής του δίσκου.



Σχήμα 2.19: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του φύλλου από SiR κατά την προσομοίωση της περιοχής του δίσκου.

Η μεγενθυμένη εικόνα των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τη σταγόνα ύδατος που εναποτίθεται σ' ένα φύλλο από SiR προσομοιώνοντας την περιοχή του δίσκου φαίνεται στο σχήμα 2.20.

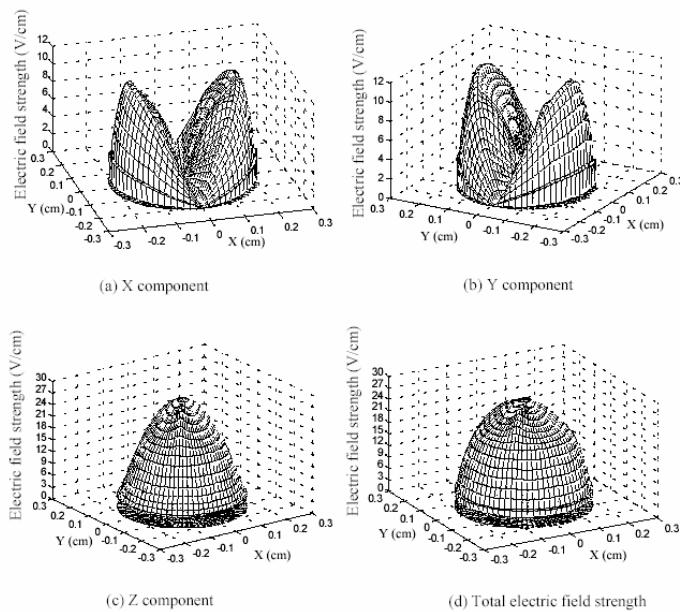
Οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν τα ισοδυναμικά περιγράμματα· οι διακεκομμένες γραμμές χρησιμοποιούνται για τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Είναι φανερό από το σχήμα 2.20 ότι η παρουσία σταγόνας ύδατος προκαλεί σημαντική παραμόρφωση στο σχηματισμό των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου στην εγγύτερη περιοχή της σταγόνας ύδατος. Για την προσομοίωση της περιοχής του δίσκου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται στην κορυφή της σταγόνας ύδατος.



Σχήμα 2.20: Ισοδυναμικές γραμμές και γραμμές ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μία σταγόνα ύδατος επάνω στην επιφάνεια του δίσκου.

Οι x , y , z παράμετροι και το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος φαίνονται στο σχήμα 2.21 (a), (b), (c), (d), αντίστοιχα. Παρόμοια προς την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος, όλα τα σημεία στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος αναπαρίστανται από την προβολή τους στο (x,y) επίπεδο. Τότε η z διάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να δείξει τα μέτρα του ανύσματος της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου ή τις παραμέτρους του σε κάθε σημείο στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος.

Για μία σταγόνα ύδατος στην περιοχή του δίσκου, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με εφαρμογή δυναμικού τιμής 100 V, είναι 27.6 V/cm επάνω στην κορυφή της σταγόνας ύδατος. Ο παράγοντας ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι 2.76. Η z παράμετρος του ανύσματος της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι η κυρίαρχη παράμετρος, όπως αναμενόταν [32].



Σχήμα 2.21: Παράμετροι του ανύσματος της εντάσεως και μέτρο της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια μιας σταγόνας ύδατος στην επιφάνεια του δίσκου.

2.4 Επίδραση της γωνίας επαφής, του μεγέθους, του σχήματος και της αγωγιμότητας της σταγόνας ύδατος

2.4.1 Επίδραση της γωνίας επαφής της σταγόνας ύδατος

Για μία σταγόνα στην περιοχή του περιβλήματος, η υψηλότερη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού φύλλου. Είναι πρακτικού ενδιαφέροντος να γνωρίζουμε την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες γωνίες επαφής της σταγόνας ύδατος. Για μία σταγόνα στην περιοχή του δίσκου, η υψηλότερη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι στην κορυφή της σταγόνας ύδατος, και όχι στη συμβολή μεταξύ της σταγόνας ύδατος και του μονωτικού φύλλου. Η επίδραση της γωνίας επαφής δεν είναι σημαντική. Έτσι θεωρείται η σταγόνα μόνο στην περιοχή του περιβλήματος.

Κάτω από διαφορετικές βαθμίδες υδροφοβικότητας της επιφάνειας του φύλλου από SiR, η γωνία επαφής της σταγόνας ύδατος ποικίλλει. Τέσσερις χαρακτηριστικές τιμές της γωνίας επαφής θεωρούνται για λόγους συγκρίσεως, οι οποίες είναι 120, 90, 60, και 30 βαθμούς. Προκειμένου ν' αποφευχθεί η επίδραση στην αύξηση του

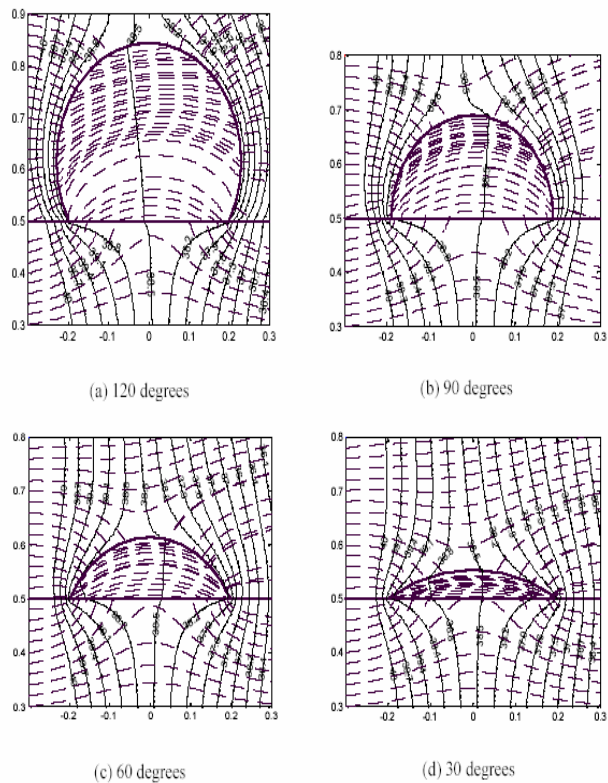
ηλεκτρικού πεδίου εξαιτίας της κύμανσης του μεγέθους της σταγόνας ύδατος, η περιοχή επαφής μεταξύ της σταγόνας ύδατος και του φύλλου από SiR γι' αυτές τις τέσσερις περιπτώσεις διατηρείται σταθερή. Η περιοχή επαφής σ' αυτή τη μελέτη προσδιορίζεται από έναν κύκλο διαμέτρου 4mm. Η διηλεκτρική σταθερά της σταγόνας ύδατος είναι 80 και η αγωγιμότητα θεωρείται μηδενική.

Οι μεγενθυμένες εικόνες των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τη σταγόνα ύδατος για αυτές τις τέσσερις περιπτώσεις φαίνονται στο σχήμα 2.22. Η σταγόνα ύδατος τοποθετείται επάνω σ' ένα φύλλο από SiR για την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος. Οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν τις ισοδυναμικές γραμμές· οι διακεκομμένες γραμμές χρησιμοποιούνται για την απόδοση των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου. Είναι προφανές από το σχήμα 2.22 ότι η σταγόνα ύδατος με μεγαλύτερη γωνία επαφής προκαλεί μεγαλύτερη παραμόρφωση στο σχήμα των ισοδυναμικών γραμμών. Οι μέγιστες τιμές της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια της σταγόνας ύδατος με διάφορες τιμές γωνίας επαφής δίνονται στον πίνακα 2.2. Η σχέση μεταξύ του παράγοντα αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου και της γωνίας επαφής φαίνεται στο σχήμα 2.23.

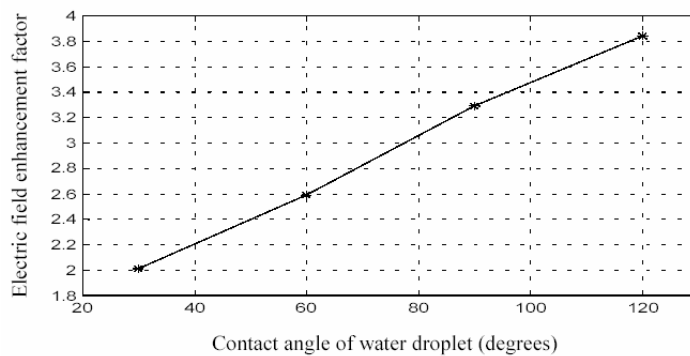
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο παράγοντας ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία επαφής. Η σχέση μεταξύ τους είναι σχεδόν γραμμική. Παρ' ότι στην πραγματικότητα, το σχήμα της σταγόνας ύδατος στην κατακόρυφη περιοχή του περιβλήματος μπορεί να μην είναι σφαιρικό, τ' αποτελέσματα μπορούν παρ' όλ' αυτά να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εκτιμηθεί η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου για τη σταγόνα ύδατος με την ίδια προοδευτικά αυξανόμενη γωνία επαφής. Ο λόγος περιγράφεται εξονυχιστικά στο κεφάλαιο 2.4.3 [32].

Πίνακας 2.2: Οι παράγοντες αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια μίας σταγόνας ύδατος με διαφορετικές γωνίες επαφής.

Contact angle, degrees	120	90	60	30
Maximum electric field strength, V/cm	38.4	32.9	25.9	20.1



Σχήμα 2.22: Ισοδυναμικές γραμμές και γραμμές ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μία σταγόνα ύδατος στην επιφάνεια του περιβλήματος με διαφορετικές γωνίες επαφής.

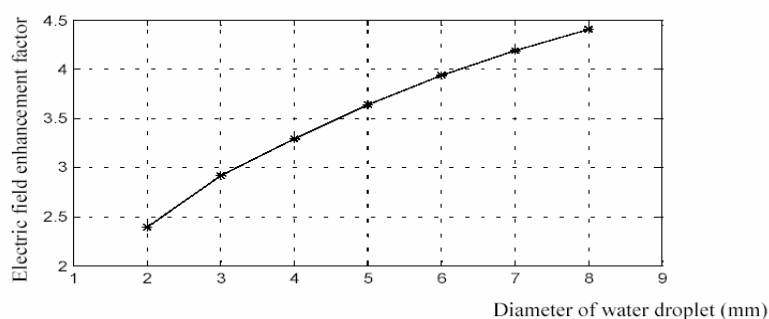


Σχήμα 2.23: Ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου για μία σταγόνα ύδατος με διαφορετικές γωνίες επαφής στην περιοχή του περιβλήματος.

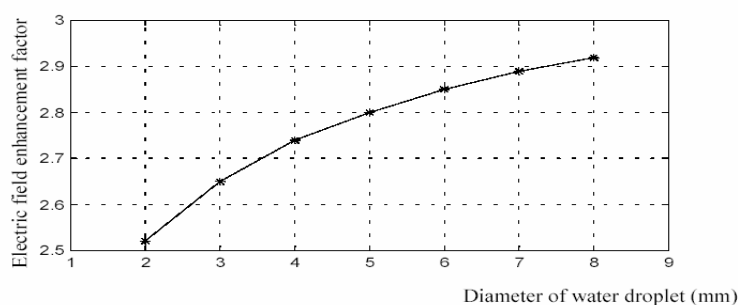
2.4.2 Επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος

Τα αποτελέσματα της επίδρασης του παράγοντα αύξησης της έντασης ηλεκτρικού πεδίου εξαιτίας της ύπαρξης ποικίλων μεγεθών της σταγόνας ύδατος επίσης διερευνώνται. Μία χαρακτηριστική σταγόνα ύδατος έχει σχήμα ημισφαιρίου. Οι

διάμετροι των χαρακτηριστικών σταγόνων ύδατος σε αυτή τη μελέτη είναι μεταξύ 2 και 8 mm. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος της σταγόνας ύδατος είναι μεταξύ 2 και 134μl. Οι παράγοντες αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου για μία σταγόνα ύδατος μελετώνται με διαφορετικές διαμέτρους στην περιοχή του περιβλήματος και στην περιοχή του δίσκου. Τ' αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 2.24 και 2.25. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η σταγόνα ύδατος, τόσο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας αύξησης. Για μία σταγόνα στην περιοχή του περιβλήματος, το αποτέλεσμα της επίδρασης του μεγέθους της σταγόνας ύδατος επάνω στον παράγοντα αύξησης είναι πιο σημαντική απ' ότι στην περιοχή του δίσκου [32].



Σχήμα 2.24: Ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου για μία σταγόνα ύδατος διαφορετικής διαμέτρου στην περιοχή του περιβλήματος.

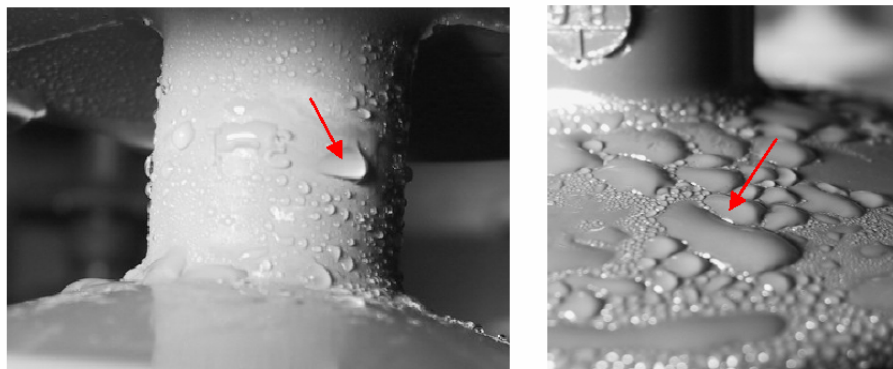


Σχήμα 2.25: Ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου για μία σταγόνα ύδατος διαφορετικής διαμέτρου στην περιοχή του δίσκου.

2.4.3 Η επίδραση του σχήματος της σταγόνας ύδατος

Στηριζόμενοι στα εργαστηριακά αποτελέσματα και τις μελέτες διαφόρων άλλων ερευνητών, το σχήμα μιας σταγόνας ύδατος δεν είναι πάντα ημισφαιρίου και μεταβάλλεται κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Προκειμένου να μελετηθούν τ'

αποτελέσματα της επίδρασης του σχήματος των σταγόνων ύδατος, δύο εικόνες για διαφορετικά σχήματα σταγόνων ύδατος φαίνονται στο σχήμα 2.20.



(a) Water droplets on the sheath region

(b) Water droplets on the shed region

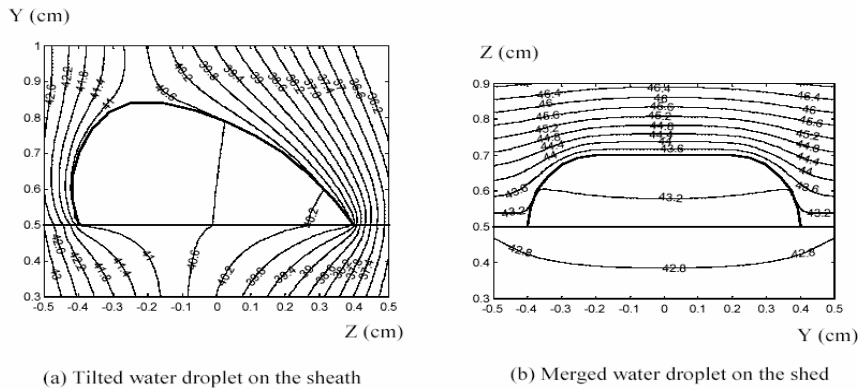
Σχήμα 2.26: Σχήμα των σταγόνων ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος και στην περιοχή του δίσκου.

Όσο μεγαλύτερη είναι η σταγόνα ύδατος, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να μεταβληθεί το σχήμα της. Δύο χαρακτηριστικά σχήματα των σταγόνων ύδατος θεωρούνται με το ίδιο πλάτος αναφοράς των 8mm επάνω στην περιοχή του περιβλήματος. Το σχήμα της μίας σταγόνας δείχνει τη σταγόνα ύδατος επάνω στην περιοχή του περιβλήματος (σημειώνεται μ' ένα βέλος στο σχήμα 2.26 (α)). Το σχήμα της δεύτερης σταγόνας αναπαριστάει το σχήμα δύο σταγόνων ύδατος που έχουν συνενωθεί επάνω στην περιοχή του δίσκου (σημειώνεται με ένα βέλος στο σχήμα 2.26(β)).

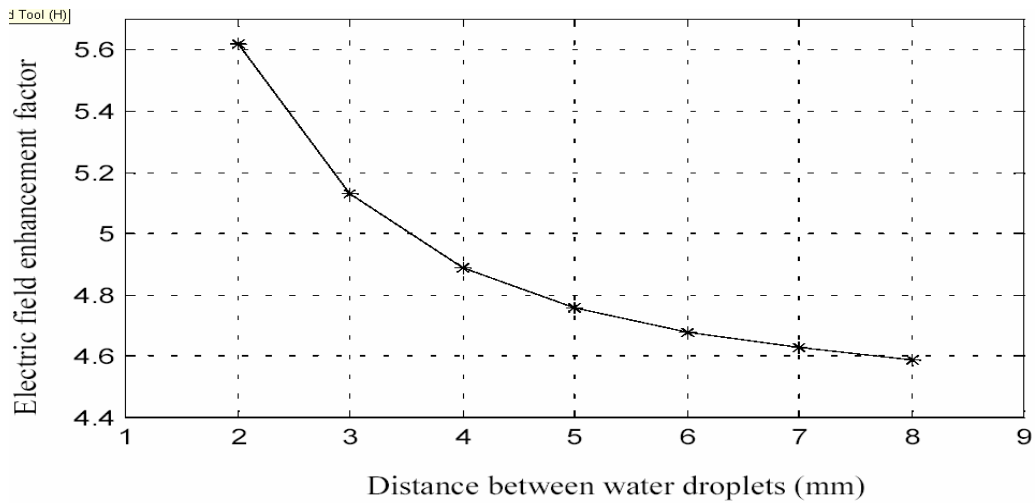
Τ' αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στο Σχήμα 2.27. Θα πρέπει να περιστραφεί προς τ' αριστερά κατά 90° προκειμένου να δούμε την πραγματική θέση της παραμορφωμένης σταγόνας ύδατος στο κατακόρυφο περίβλημα. Η μέγιστη τιμή της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου για την περίπτωση (α) είναι στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου είναι 4,13 για την περίπτωση (α).

Θεωρώντας ότι ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου για τη σταγόνα ύδατος (διαμέτρου 8mm) πάνω στο περίβλημα και σε σχήμα ημισφαιρίου ότι είναι 4.41, τ' αποτελέσματα εξαιτίας της διαφοράς του σχήματος δεν είναι σημαντικά.

Η μέγιστη τιμή της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου για την περίπτωση (β) είναι στην κορυφή της επιφάνειας της σταγόνας ύδατος. Ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου για την περίπτωση (β) είναι 2.55. Θεωρώντας ότι ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου για τη σταγόνα ύδατος (διαμέτρου 4mm) σε σχήμα ημισφαιρίου επάνω στο περίβλημα είναι 2.76, τ' αποτελέσματα της επίδρασης διαφορετικού σχήματος δεν είναι σημαντικά [32].



ύδατος μπορεί να αγνοηθεί εάν η απόσταση μεταξύ δύο σταγόνων ύδατος είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της σταγόνας ύδατος [32].



Σχήμα 2.28: Το αποτέλεσμα της επίδρασης της απόστασης μεταξύ των σταγόνων ύδατος στην αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου για την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος.

2.4.5 Η επίδραση της αγωγιμότητας της σταγόνας ύδατος

Η αγωγιμότητα των σταγόνων ύδατος επίσης επηρεάζει την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου. Εάν θεωρηθούν μαζί η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα της σταγόνας ύδατος, ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια τροποποιείται. Μία σταγόνα ύδατος σε σχήμα ημισφαιρίου και διαμέτρου 4mm χρησιμοποιείται προκειμένου να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα της αγωγιμότητας της σταγόνας ύδατος. Η διηλεκτρική σταθερά παραμένει 80. Μία χαρακτηριστική τιμή της αγωγιμότητας θεωρείται για σκοπούς σύγκρισης, ως 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλεται από 3.29 σε 3.55 για μία σταγόνα ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος και από 2.76 σε 3.17 για μία σταγόνα ύδατος στην περιοχή του δίσκου. Αυξάνοντας την αγωγιμότητα από 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ σε 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, δεν μεταβάλλεται ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου [32].

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική ανασκόπηση –

Γήρανση συνθετικών μονωτήρων και εκτίμηση της απόδοσης των συνθετικών μονωτήρων σε σύγκριση με τους κεραμικούς μονωτήρες

3.1 Εισαγωγή

Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των συνθετικών μονωτήρων είναι η πιο σημαντική αλλά και η πιο αβέβαιη παράμετρος που αντιμετωπίζουν τόσο οι χρήστες όσο και οι κατασκευαστές. Τα σχέδια των μονωτήρων τρίτης γενιάς (τέλη 1980 έως τέλη 1990) τα οποία είναι σήμερα σε χρήση, αναμένεται να παρουσιάσουν ανώτερη απόδοση από τα σχέδια μονωτήρων πρώτης και δεύτερης γενιάς τα οποία αρχικώς χρησιμοποιήθηκαν τη δεκαετία 1970 και 1980 αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα πολυμερή υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των συνθετικών μονωτήρων θα υποστούν γήρανση με το χρόνο, αλλά αυτό που είναι σημαντικό στη διάρκεια της χρησιμοποίησης τους είναι να μην αστοχήσουν ή να μην επιτρέψουν ηλεκτρική υπερπήδηση. Ο μηχανισμός γήρανσης των συνθετικών μονωτήρων καθορίζεται από τον τύπο του πολυμερούς υλικού, το ποσοστό των πληρωτικών μέσων που προστίθενται, το έτος κατασκευής, την ποιότητα, το σχέδιο μονωτήρα, τις συνθήκες λειτουργίας και ηλεκτρικής καταπόνησης, τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας, τις συνθήκες εγκατάστασης, χειρισμού, κ.λ.π.

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

3.1.1 Οπτική αναγνώριση αλλοιώσεων / φθορών σε συνθετικούς μονωτήρες ανάρτησης

Αλλοίωση: Με τον όρο αλλοίωση προσδιορίζεται η κατασκευαστική ή επιφανειακή γήρανση, η οποία εμφανίζεται στους συνθετικούς μονωτήρες ως άμεσο αποτέλεσμα της έκθεσής τους στο περιβάλλον λειτουργίας, την ηλεκτρική καταπόνηση, τις μηχανικές φορτίσεις ή και τον απρόσεκτο χειρισμό. Το είδος αυτό της γήρανσης δεν αναμένεται να προκαλέσει τη μείωση της απόδοσης ή και της διάρκειας ζωής του μονωτήρα. Με την αλλοίωση δεν μειώνεται σημαντικά το πάχος του περιβλήματος από πολυμερές υλικό, το οποίο αποτρέπει την είσοδο της υγρασίας στον πυρήνα του μονωτήρα και δεν μειώνεται το μήκος ερπυσμού περισσότερο από το 10% [34].

Κρητιδική μορφή: Μετατροπή της επιφάνειας του μονωτήρα σε πορώδη και εύθριπτη εξαιτίας της έκθεσης στο περιβάλλον των υλικών πλήρωσης του καλύμματος [34].



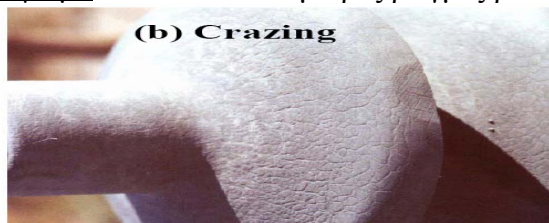
Σχήμα 3.1: Αλλοίωση στην περιοχή των δίσκων του μονωτήρα

Αλλαγή χρώματος: Αλλαγή στο χρώμα του υλικού του μονωτήρα [34].



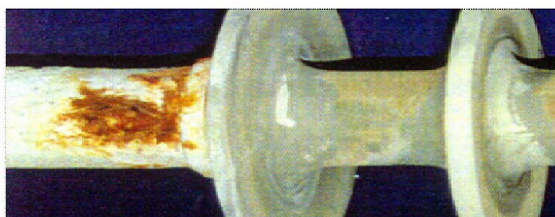
Σχήμα 3.2: Αλλοίωση στην περιοχή των δίσκων με μεταβολή του χρώματος που επικαλύπτει το μονωτήρα.

Ράγισμα: Συνίσταται σε μικρές ρωγμές βάθους περίπου 0,01 έως 0,1 mm [34].



Σχήμα 3.3: Αλλοίωση στην περιοχή των δίσκων λόγω της εμφάνισης ραγισμάτων.

Οξείδωση: Χημική προσβολή από την έκθεση του υλικού στο περιβάλλον (σκουριά) [34].



Σχήμα 3.4: Αλλοίωση στην περιοχή του μεταλλικού άκρου του μονωτήρα

Διαρροή λιπαντικού υλικού: Διαφυγή λιπαντικού υλικού από τη διεπιφάνεια μεταξύ δίσκου / περιβλήματος ή περιβλήματος / περιβλήματος (π.χ. των συνδετικών δακτυλίων) επάνω στην επιφάνεια του περιβλήματος ή του δίσκου [34].



Σχήμα 3.5: Αλλοίωση στη διεπιφάνεια μεταξύ δίσκου και περιβλήματος του μονωτήρα

Φωτοχημική προσβολή: Μη αντιστρέψιμη αποικοδόμηση της επιφάνειας του μονωτήρα από την απώλεια υλικού σε βάθος 1 mm. Παρατηρείται ομοιόμορφα στο μονωτήρα είτε εντοπισμένα σε μία περιοχή του [34].



Σχήμα 3.6: Αλλοίωση στο περίβλημα / άτρακτο του μονωτήρα

Μικρή αποσυναρμολόγηση: Αποσυναρμολόγηση προκύπτει μεταξύ διαφορετικών μερών του μονωτήρα και μπορεί να θεωρηθεί ως αλλοίωση και όχι ως βλάβη στον μονωτήρα (μείωση στο μήκος ερπυσμού λιγότερη από 10%, ή μείωση στο πάχος του πολυμερούς περιβλήματος λιγότερη από 1mm) [34].

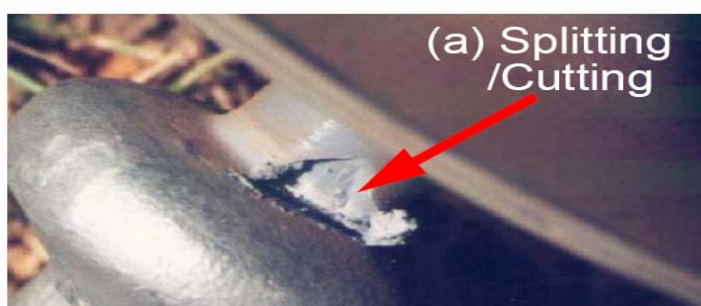


Σχήμα 3.7: Αλλοίωση στη διεπιφάνεια μεταξύ δίσκου και περιβλήματος του μονωτήρα

3.1.2 Οπτική αναγνώριση ζημιών / βλαβών σε συνθετικούς μονωτήρες

Βλάβη: Με τον όρο βλάβη προσδιορίζονται οι μεταβολές στο συνθετικό μονωτήρα που είναι το αποτέλεσμα φθορών ή σειράς αλλοιώσεων ή και εξωτερικών επιδράσεων που περιλαμβάνει απρόσεκτους χειρισμούς. Από τις ζημιές αναμένεται να υπάρχουν επιπτώσεις στην απόδοση ή και τη διάρκεια ζωής του μονωτήρα [34].

Έκθεση πυρήνα μονωτήρα: Απευθείας επαφή του πυρήνα του μονωτήρα με το εξωτερικό περιβάλλον (εξαιτίας διαβρώσεως, ραγισμάτων, ρωγμών ή απρόσεκτων χειρισμών) [34].

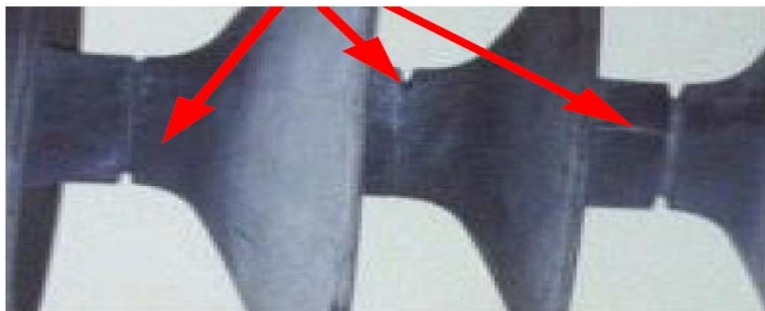


Σχήμα 3.8: Βλάβη στον πυρήνα του μονωτήρα λόγω έκθεσης του σε εξωτερικό περιβάλλον από θραύση / τομή εξαρτημάτων του



Σχήμα 3.9: Βλάβη στον πυρήνα του μονωτήρα λόγω έκθεσης του σε εξωτερικό περιβάλλον από θραύση / τομή του πολυμερούς περιβλήματος.

Σπάσιμο: Πλήρης διαχωρισμός διαφορετικών μερών ενός συνθετικού μονωτήρα, ο οποίος μειώνει δραστικά το μήκος ερπυσμού (περισσότερο από 10%) ή το πάχος του υλικού που εμποδίζει την είσοδο της υγρασίας στον πυρήνα εσωτερικά του μονωτήρα (περισσότερο από 1 mm) [34].



Σχήμα 3.10: Βλάβη στο πολυμερές περίβλημα εξαιτίας της μη συναρμογής των διαφορετικών μερών του μονωτήρα.

Διάβρωση: Μη αντιστρέψιμη αποσύνθεση της επιφάνειας μονωτήρα, η οποία προκύπτει με σημαντική απώλεια υλικού και προκαλεί δραστική μείωση του πάχους του πολυμερούς περιβλήματος που παρεμποδίζει την είσοδο της υγρασίας στον πυρήνα του μονωτήρα (περισσότερο από 1 mm). Παρατηρείται ομοιόμορφα στο μονωτήρα είτε εντοπισμένα σε μία περιοχή του [34].



Σχήμα 3.11: Βλάβη στο πολυμερές περίβλημα εξαιτίας της διαβρώσεως

Αποφλοίωση: Αποκόλληση του παρεμβύσματος από το άκρο του μονωτήρα. Η βλάβη θεωρείται όταν το σφράγισμα ανοίξει σε βάθος περισσότερο του 1 cm [34].



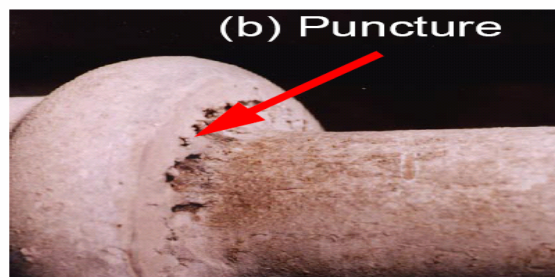
Σχήμα 3.12: Βλάβη στη διεπιφάνεια μεταξύ του πολυμερούς περιβλήματος και της εσοχής του (σφράγισμα) λόγω αποκόλλησής του.

Βλάβη ηλεκτρικού τόξου: Βλάβη η οποία προκύπτει από την υψηλή τιμή του ρεύματος και της θερμοκρασίας στο μεταλλικό άκρο του μονωτήρα μετά από υπερπήδηση [34].

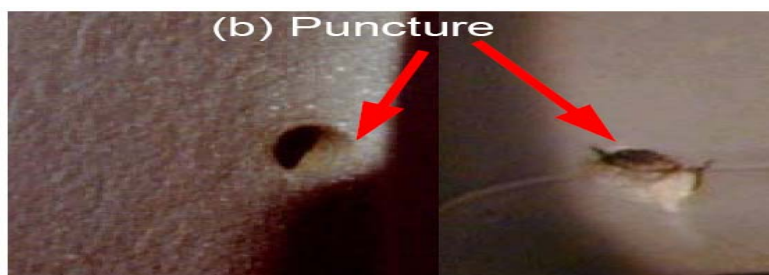


Σχήμα 3.13: Βλάβη στο μεταλλικό άκρο του μονωτήρα.

Διάτρηση: Δημιουργία οπής στο περίβλημα του μονωτήρα ή στο δίσκο [34].

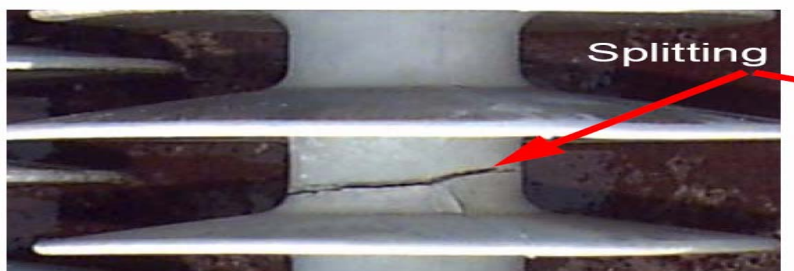


Σχήμα 3.14: Βλάβη στη διεπιφάνεια μεταξύ του πολυμερούς περιβλήματος και της εσοχής του (σφράγισμα) λόγω διάτρησης.



Σχήμα 3.15: Βλάβη στο περίβλημα του μονωτήρα λόγω διάτρησης

Σπάσιμο / Σχίσσιμο: Σπάσιμο, σχίσσιμο ή ράγισμα που ενδέχεται να προκύψει στο πολυμερές κάλυμμα (περιβλήματος ή δίσκου) και να προκαλέσει μετακίνηση υλικού και ουσιαστική μείωση του μήκους ερπυσμού (περισσότερο από 10%) ή του πάχους του πολυμερούς περιβλήματος που παρεμποδίζει την είσοδο υγρασίας στον πυρήνα του μονωτήρα (περισσότερο από 1 mm) [34].



Σχήμα 3.16: Βλάβη στο περίβλημα μονωτήρα από σπάσιμο

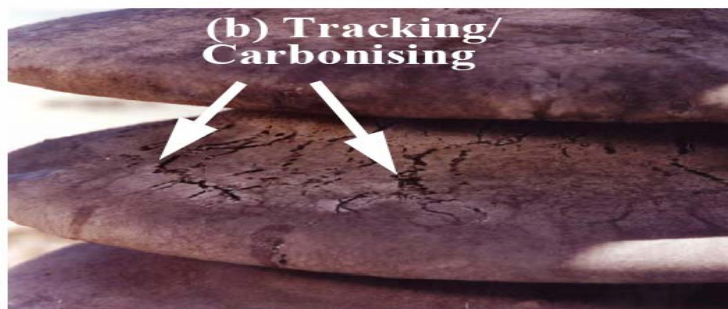


Σχήμα 3.17: Βλάβη στους δίσκους μονωτήρα με μείωση του μήκους ερπυσμού >10% από σπάσιμο

Απανθράκωση: Μη αντιστρέψιμη αποσύνθεση της επιφάνειας του μονωτικού υλικού με το σχηματισμό αγωγίμων οδών (carbon tracks) που παραμένουν αγωγίμες ακόμα και απουσία υγρασίας [34].



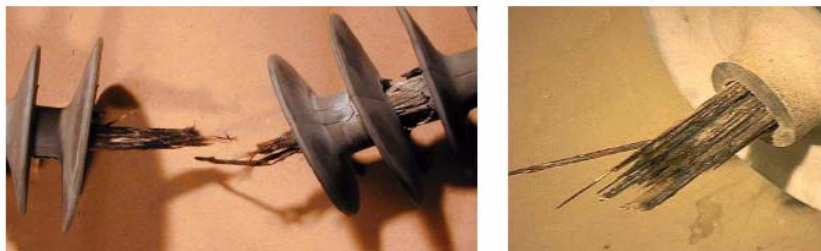
Σχήμα 3.18: Βλάβη στο περίβλημα μονωτήρα από αποσύνθεση της επιφάνειάς του



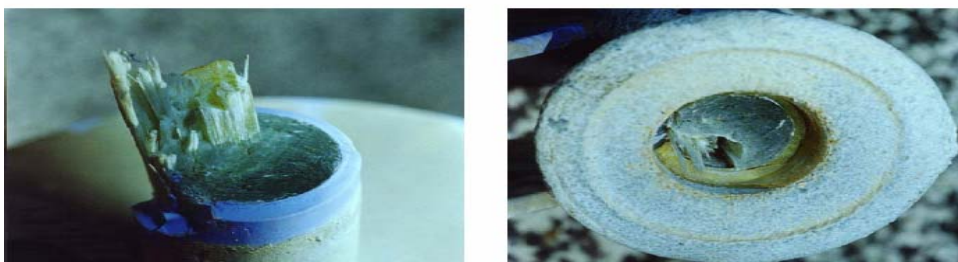
Σχήμα 3.19: Βλάβη στους δίσκους μονωτήρα από αποσύνθεση της επιφάνειάς τους

3.1.3 Οπτική αναγνώριση αστοχίας μονωτήρα

Μηχανική αστοχία: Σπάσιμο του πυρήνα των μονωτήρων έτσι ώστε να μην είναι πλέον δυνατό να υποστηρίξουν το μηχανικό φορτίο [34].



Σχήμα 3.20: Μηχανική αστοχία πυρήνα από ίνες υάλου που δεν οφείλεται σε θραύση αλλά είναι αποτέλεσμα βλάβης στον πυρήνα του μονωτήρα από διάβρωση και απανθράκωση του υλικού.



Σχήμα 3.21: Μηχανική αστοχία πυρήνα μονωτήρα από ίνες σκληρυμένης υάλου

Ηλεκτρική αστοχία: Μόνιμη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτήρα μετά από εκδήλωση του φαινομένου της υπερπήδησης ώστε να μην είναι πλέον δυνατόν ο μονωτήρας να διατηρήσει τις διαφορές δυναμικού της εγκατάστασης [34].

3.2 Συνθετικοί μονωτήρες από σιλικόνη

Στη βιβλιογραφία, έχουν γίνει πολλές παρατηρήσεις για τη σιλικόνη χωρίς όμως να υπάρχει πραγματική κατανόηση της χημείας ή της δομής. Ο όρος «σιλικόνη» αναφέρεται σ' ένα πολυμερές που αποτελείται από ένα ανόργανο δεσμό μεταξύ πυριτίου και οξυγόνου. Η πιο γνωστή σιλικόνη είναι το πολυδιμεθυλο-σιλοξάνιο (PDMS), που έχει σαν κύριο δεσμό τον δεσμό μεταξύ πυριτίου και οξυγόνου και επίσης περιέχει δύο μεθυλικές ομάδες ανά μονάδα μονομερούς.

Η παραπάνω ομάδα έχει συνδεθεί με έναν αριθμό n παρόμοιων μονάδων σχηματίζοντας την αλυσίδα του πολυμερούς και ο δείκτης n μπορεί να είναι σε χιλιάδες. Άλλες πλευρικές ομάδες υδρογονανθράκων εκτός από τις μεθυλικές που συχνά αναγνωρίζονται στις αλυσίδες των πολυσιλοξανίων είναι η αιθυλική, η φαινυλική και η βίνυλο ομάδα. Υπάρχουν ακόμη κι άλλοι τύποι παράπλευρων ομάδων (όπως φθορίου που σχηματίζει φθορο-σιλικόνες ή υδρογόνου όπως στις μόνο υποκατεστημένες σιλικόνες), αλλά ο δεσμός Si-O είναι το κλειδί ώστε ν' αποκαλούνται σιλικόνες. Έτσι με τη σημαντική παρουσία των ανθρακικών ομάδων, η αντίληψη ότι η σιλικόνη είναι αποκλειστικά ανόργανη δεν είναι αληθής. Αυτή η χημική σύνθεση και η θέση του δεσμού κατά μήκος της αλυσίδας της σιλοξάνης θα καθορίσουν πολλές από τις ιδιότητες του υλικού. Το μήκος και η κατανομή της έκτασης των πολυμερών κυμαίνεται σε διάφορα επίπεδα και επιπλέον συνεισφέρει στις συνολικές ιδιότητες της «σιλικόνης» που επιλέγεται και χρησιμοποιείται.

Για το σχηματισμό ενός ελαστομερούς από σιλικόνη θα πρέπει να συνενωθούν οι αλυσίδες του πολυμερούς με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί δίκτυο σταυροδεσμών που να έχει ελαστικές ιδιότητες (π.χ. να επανέλθει στην ίδια μορφή μετά από έκτασή του). Οι βινυλο-ομάδες και άλλες χημικά ενεργές ομάδες είναι επίσης παρούσες σαν πλευρικές ομάδες ή τερματικές ομάδες. Αυτές οι ομάδες επιτρέπουν το σχηματισμό των σταυροδεσμών κατά τη χημική αντίδραση (πολλές από αυτές τις ομάδες περιέχουν πολλαπλά άτομα άνθρακα). Τα πολυμερή μπορούν να συνενωθούν κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης είτε από τ' άκρα ή από διάφορα τμήματα της αλυσίδας σχηματίζοντας σταυροδεσμό. Η φύση και ο τύπος του σταυροδεσμού εξαρτάται από τις χημικά ενεργές ομάδες, τα μέσα για τη δημιουργία σταυροδεσμών, τους παρεμποδιστές, και καταλύτες. Πριν το σχηματισμό των σταυροδεσμών, το υλικό χαρακτηρίζεται ως «κόμμι σιλικόνης». Μετά τη δημιουργία

των σταυροδεσμών, χαρακτηρίζεται ως «ελαστομερές σιλικόνης» ή ελαστικό σιλικόνης. Τα ελαστομερή από σιλικόνη συνήθως περιέχουν σίλικα (γυαλί ή χαλαζίας) ως ενισχυτικά μέσα των μηχανικών ιδιοτήτων του σιλικονούχου πολυμερούς. Η σίλικα διαθέτει χημικά ενεργές ομάδες οι οποίες συνδέονται στο πολυμερές από σιλικόνη και επιδρούν στην ισχύ, τη σκληρότητα, την ανθεκτικότητα, και σε άλλες φυσικές ιδιότητες. Άλλα πληρωτικά μέσα, όπως η σίλικα σε αυξημένο ποσοστό προστίθενται για να μειωθεί το κόστος. Αυτού του είδους τα πληρωτικά μέσα χαρακτηρίζονται ως «μη ενισχυτικά μέσα». Κι άλλα πληρωτικά υλικά που περιλαμβάνονται επιδρούν στις ιδιότητες του προϊόντος κατά την κατεργασία του και τη μορφοποίηση του σε καλούπι, όπως στην αντίσταση στη διάβρωση, στη βελτίωση της απόδοσης στις καιρικές συνθήκες, το χρώμα. Αυτού του είδους τα πληρωτικά που επιλέγονται πρέπει να πληρούν δύο κύρια κριτήρια: 1) μακροπρόθεσμη σταθερότητα κάτω από συνθήκες λειτουργίας και 2) χημική αδράνεια σε άλλα συστατικά κατά το σχηματισμό έτσι ώστε η σιλικόνη να διατηρεί τη λειτουργικότητά της στη διάρκεια του χρόνου.

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

Τα πολυμερή από σιλικόνη έχουν τόσο προτερήματα όσο και μειονεκτήματα. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων τα οποία αξιοποιούνται σε εφαρμογές μονωτικών εξωτερικής χρήσης είναι η υδροφοβικότητα, και η ανάκτηση της υδροφοβικότητας σε περίπτωση απώλειας, η αντοχή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, η δυνατότητα κατεργασίας και η ελαστικότητα ως μηχανική ιδιότητα. Οι περιορισμοί που τίθενται περιλαμβάνουν υψηλά κόστη πρώτων υλών, η μαλακή υφή, η σχετικά χαμηλή μηχανική αντοχή [35].

3.2.1 Η ικανότητα της ανάκτησης της υδροφοβικότητας

Η ιδιότητα της σιλικόνης να ανακτά την υδροφοβικότητά της σε περίπτωση απώλειας έχει εκτενώς αναφερθεί στη βιβλιογραφία ως ένα στοιχείο κλειδί στη χρήση της σε εφαρμογές μονωτήρων εξωτερικού χώρου. Η χαμηλή επιφανειακή

ενέργεια της σιλικόνης έχει ως αποτέλεσμα την πολύ καλή υδροφοβικότητα η οποία οδηγεί στην εκδήλωση ιδιαίτερα χαμηλού ρεύματος διαρροής σε συνθήκες ύγρανσης και ρύπανσης. Σε μια υδροφοβική επιφάνεια το νερό σχηματίζει σταγόνες και δεν υγραίνει εντελώς την επιφάνεια όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2. Κάτι τέτοιο μειώνει το ρεύμα διαρροής και την πιθανότητα σχηματισμού ξηρών ζωνών που οδηγούν σε υψηλές τάσεις υπερπήδησης. Οι οργανικές ομάδες που συγκεντρώνονται γύρω από τον άξονα του δεσμού πυριτίου - οξυγόνου είναι ουσιαστικά υπεύθυνες για την υδροφοβικότητα της σιλικόνης, που είναι παρόμοια σε πολλά οργανικά συμπολυμερή πολυολεφίνης. Δεδομένα δοκιμών πεδίου σε προϊόντα του ομίλου της Raychem με σιλικονούχα ελαστομερή και καλύμματα από συμπολυμερή πολυολεφίνης παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλά ρεύματα διαρροής σε σχέση με ελέγχους από κεραμικά και άλλα πολυμερή προϊόντα. Η ιδιότητα της σιλικόνης της ανάκτησης της υδροφοβικότητας αποδίδεται στην ελαστικότητα του δεσμού μεταξύ πυριτίου και οξυγόνου και στην παρουσία των ευκίνητων και ελεύθερων αλυσίδων πυριτίου. Εργαστηριακές μελέτες έδειξαν ότι ισχυρή ρύπανση με ταυτόχρονη ύγρανση παρήγαγε τόξο στην επιφάνεια που κατέστρεψε την επιφανειακή υδροφοβικότητα προκαλώντας αυξημένο ρεύμα διαρροής. Παρ' όλ' αυτά η επιφάνεια επανακτά την υδροφοβικότητά της μετά από ένα διάστημα ξηρασίας και απαλλαγής από τις συνθήκες που προκάλεσαν το ηλεκτρικό τόξο για 10 έως 12 ώρες. Η ανάκτηση της επιφανειακής υδροφοβικότητας αποδίδεται στη διασπορά των ευκίνητων αλυσίδων πολυμερούς χαμηλού μοριακού βάρους (LMW) από το κύριο σώμα προς την επιφάνεια και την περιστροφή των υδροφιλικών ομάδων μακριά από την επιφάνεια [35].

Η επιφανειακή υδροφοβικότητα μπορεί να εκτιμηθεί στο εργαστήριο με τον προσδιορισμό της γωνίας επαφής μιας σταγόνας απιονισμένου ύδατος πάνω σε κάποια επιφάνεια υλικού όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2. Η ανάκτηση της υδροφοβικότητας μετά από την επίδραση εκκενώσεων corona επάνω στην επιφάνεια του πολυμερούς μονωτικού, μετράται με τον προσδιορισμό στη συνέχεια των τιμών από τις προκύπτουσες γωνίες επαφής ως συνάρτηση του χρόνου.

Το αποτέλεσμα της εξέτασης τεμαχίων από πέντε σιλικονούχες ενώσεις που περιείχαν το ίδιο σιλικονούχο ελαστομερές απέδειξε ότι το υλικό αυτό διαθέτει εξαιρετική υδροφοβικότητα καθώς όλα τα παραπάνω πέντε τεμάχια ανέκτησαν την

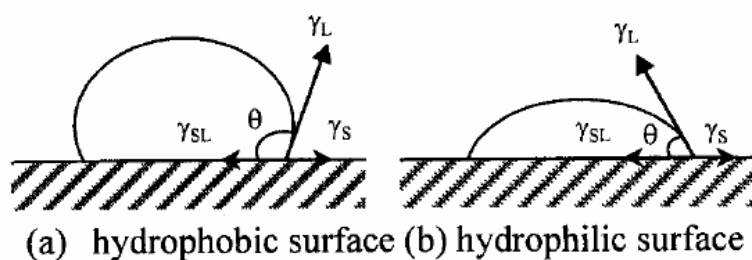
υδροφοβικότητά τους εντός 8 ωρών μετά από την επίδραση του τόξου. Ένα από τα πέντε τεμάχια ήταν από μία εμπορικά διαθέσιμη σιλικονούχο ένωση που παρότι είχε υψηλή περιεκτικότητα στον υγροσκοπικό τριυδρίτη AlO_3 δεν επέδειξε καλύτερη τάση ανάκτησης της υδροφοβικότητας από τα τεμάχια των σιλικονούχων ενώσεων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Σε επιφάνειες οι οποίες εκτίθενται σε μεγαλύτερης διάρκειας εκκενώσεις corona, π.χ: 150sec., η ανάκτηση επίσης επιτυγχάνεται και είναι δυνατή μετά από διάστημα 24 ωρών.

3.2.1.1 Συνθήκες ηλεκτρικών εκκενώσεων ή άλλων καταπονήσεων

Γενικότερα, όσο χαμηλότερη είναι η ελεύθερη ενέργεια και μεγαλύτερη η γωνία επαφής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η υδροφοβικότητα του υλικού. Η γωνία επαφής και η επιφανειακή ελεύθερη ενέργεια ενός στερεού υλικού συνδέονται ποσοτικά μέσω της εξίσωσης Young όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας:

$$\gamma_s = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta \quad (2.1)$$

όπου θ είναι η στατική γωνία επαφής για ένα δείγμα που είναι οριζόντια τοποθετημένο, και γ_s , γ_L και γ_{SL} είναι η επιφανειακή ελεύθερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στερεού, υγρού, και διεπιφάνειας στερεού-υγρού, αντίστοιχα. Στο σχήμα παρουσιάζονται τα διανύσματα γ_s , γ_L και γ_{SL} τόσο σε επιφάνεια υδρόφοβου υλικού όσο και υδρόφιλου υλικού [36].



Σχήμα 3.22: (α) υδρόφοβη επιφάνεια (β) υδρόφιλη επιφάνεια

Παρουσίαση των διανυσμάτων γ_s , γ_L και γ_{SL}

Για παράδειγμα, το διάνυσμα γ_s σε επιφάνεια με υψηλή ελεύθερη ενέργεια, όπως για παράδειγμα η επιφάνεια μετάλλου, γυαλιού και πορσελάνης έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή απ' ότι το αντίστοιχο διάνυσμα στη σιλικόνη και στο EPDM πολυμερές. Οι σταγόνες ύδατος βαθμιαία θα εξαπλωθούν και η γωνία επαφής σταδιακά θα μειωθεί

μέχρις ότου το άθροισμα $\gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta$ εξισωθεί με την τιμή του γ_S όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22 (β) στην υδρόφιλη επιφάνεια.

Αντίθετα, στην επιφάνεια από σιλικονούχο καουστούκ και EPDM, η τιμή του γ_S είναι μικρότερη από την τιμή του γ_{SL} . Η σταγόνα ύδατος συστέλλεται από μόνη της και η γωνία επαφής θ αυξάνεται με αποτέλεσμα να μεταβληθεί η κατεύθυνση προβολής του διανύσματος γ_L μέχρις ότου το άθροισμα γ_S και $|\gamma_L \cos \theta|$ να εξισωθεί με την τιμή γ_{SL} όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22 (α).

Όπως έχει αναφερθεί ένας υδρόφοβος μονωτήρας ανθίσταται περισσότερο στη ρύπανση απ' ότi ένας υδρόφιλος μονωτήρας.

Μετά από την εκδήλωση εκκενώσεων corona παρατηρήθηκε αύξηση στη διαβρεξιμότητα της επιφάνειας, την οποία όμως το υλικό ανέκτησε μετά από 166 ώρες [36].



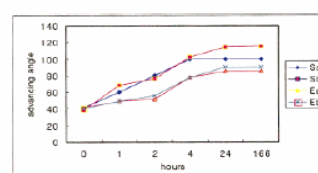
Σχήμα 3.23: (α) υδρόφοβη επιφάνεια πριν την έναρξη του φαινομένου corona, (β) αύξηση διαβρεξιμότητας μετά την εκδήλωση των εκκενώσεων corona (γ) ανάκτηση της υδροφοβικότητας

Αυτά τα φαινόμενα που παρατηρούνται στο σχήμα 3.23 έχουν άμεση σχέση με την ενέργεια της επιφάνειας. Όσο χαμηλότερη είναι η ενέργεια της επιφάνειας, τόσο μεγαλύτερη είναι η υδροφοβικότητα. Η ικανότητα της ανάκτησης της υδροφοβικότητας των πολυμερών αποδόθηκε στη διάχυση και κινητικότητα των αλυσίδων του πολυμερούς χαμηλού μοριακού βάρους (LMW). Οι αλυσίδες αυτές

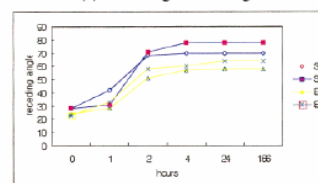
φέρουν τις ισχυρά υδρόφοβες μεθυλικές ομάδες ($-\text{CH}_3$) οι οποίες μετακινούνται από το εσωτερικό του πολυμερούς προς την επιφάνειά του προσδίδοντας και πάλι στο υλικό υδρόφοβες ιδιότητες. Επίσης λόγω της ευκινησίας των πολυμερών αλυσίδων αυτές έχουν την τάση να προσανατολίζονται ξανά στην αρχική τους κατάσταση, η οποία είναι μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας [36].

Η ικανότητα της ανάκτησης της υδροφοβικότητας εξετάστηκε στα δύο πολυμερή δηλαδή στο σιλικονούχο καουτσούκ και στο EPDM και βρέθηκε ότι το σιλικονούχο καουτσούκ διαθέτει μεγαλύτερη ικανότητα ανάκτησης της υδροφοβικότητας απ' ότι το EPDM, γεγονός που αποδόθηκε απ' ευθείας στη διάχυση των αλυσίδων μικρού μοριακού βάρους από το εσωτερικό του σιλικονούχου πολυμερούς στην επιφάνεια του. Αυτά τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι σιλικόνες αναμένεται να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής απ' ότι το EPDM [36].

Item	Silicones		EPDMs	
	Sa	Sb	Ea	Eb
Gum	100	100	100	100
Alumina trihydrate	130	130	130	130
Silica	30	30	30	30
LMW polydimethylsiloxane		4		
Paraffin oil				4
Peroxide	3	3	3	3



(a) advancing contact angle



(b) receding contact angle

Πίνακας 3.1: Τα εξεταζόμενα πολυμερή στη μελέτη των J.K. Kim, I.H. Kim [36]

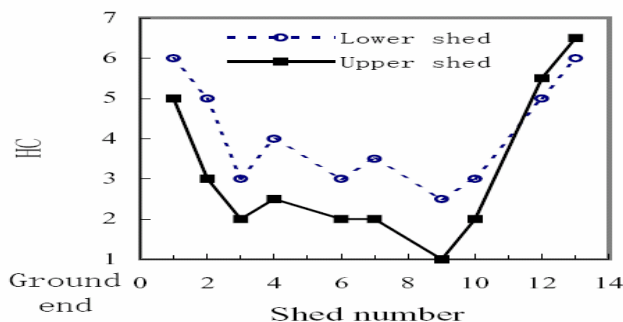
Σχήμα 3.24: Ικανότητα ανάκτησης της υδροφοβικότητας των πολυμερών

Στο σχήμα 3.24 μετρήθηκαν οι γωνίες επαφής (α) αύξουσα και (β) φθίνουσα προκειμένου να προσδιοριστεί η ικανότητα ανάκτησης της υδροφοβικότητας μετά από την εκδήλωση εκκενώσεων corona στα εξεταζόμενα δείγματα πολυμερών [36].

3.2.1.2 Συνθήκες ρύπανσης

Η ιδιότητα της υδροφοβικότητας και η ικανότητα ανάκτησής της σε συνθήκες ρύπανσης αποδείχθηκε ότι οφείλεται σε μια διαδικασία προσρόφησης είτε φυσικής είτε χημικής των αλυσίδων χαμηλού μοριακού βάρους από το στρώμα ρύπανσης [37].

Γενικά η χαμηλή επιφάνεια των δίσκων συσσωρεύει περισσότερη ρύπανση απ' ότι η επάνω επιφάνεια τους με αποτέλεσμα αυτές οι περιοχές να εμφανίζουν μόνιμη απώλεια της υδροφοβικότητας τους και γενικά περιορισμένη υδροφοβικότητα. Όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απώλεια της υδροφοβικότητας εντοπίζεται στις περιοχές ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου [37].

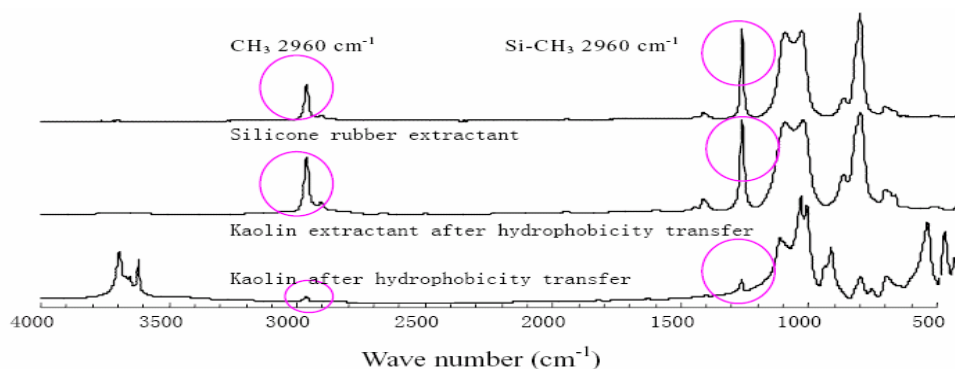


Σχήμα 3.25: Τυπική κατανομή υδροφοβικότητας ενός συνθετικού μονωτήρα σε λειτουργία

3.2.2 Μεταφορά της υδρόφοβης συμπεριφοράς

Στον κύριο όγκο του σιλικονούχου καουτσούκ, ενυπάρχουν μικρές ποσότητες από τις υψηλά ευκίνητες αλυσίδες χαμηλού μοριακού βάρους. Με φασματοσκοπική ανάλυση FTIR ταυτοποιήθηκε μία ομόλογη ένωση πολυδιμεθυλο-σιλοξανίου (PDMS) σύμφωνα με το σχήμα 3.26, που αποτελεί και την ένωση χαμηλού μοριακού βάρους [37].

Οι υδρόφιλοι ρυπαντές που επικάθονται στην επιφάνεια του σιλικονούχου καουτσούκ βαθμιαίως αποκτούν υδρόφοβες ιδιότητες με μια διαδικασία που αποκαλείται μεταφορά της υδροφοβικότητας. Με φασματοσκοπική ανάλυση των ρυπαντών ταυτοποιήθηκαν ίχνη ριζών μεθυλίου. Και πάλι με τη βοήθεια της φασματοσκοπικής ανάλυσης διαπιστώνεται ότι το φάσμα των υδρόφοβων ρυπαντών πολύ λίγο διαφέρει από το φάσμα των ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26: Φάσμα εκχυλίσματος καολίνης και σιλικονούχου καουτσούκ

Εάν απομακρυνθούν οι ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους από το σιλικονούχο καουτσούκ, π.χ. με εκχύλιση με εξάνιο, η ιδιότητα της μεταφοράς της υδροφοβικότητας μειώνεται χαρακτηριστικά.

Παρατηρήθηκε ταχύτερη μεταφορά της υδροφοβικότητας στο άλας πυριτικού αλεύρου (kieselghr) απ' ότι στο άλας από καολίνη (kieselguhr>Tonoko>>kaolin). Τα οξείδια μετάλλων, όπως και το τσιμέντο μπορούν να αποκτήσουν υδροφοβικότητα εξαιτίας αυτής της ιδιότητας της μεταφοράς. Μόνο τα ανόργανα άλατα δεν δύνανται να αποκτήσουν υδροφοβικότητα όσο και εάν παραμείνουν σε επιφάνεια από σιλικονούχο πολυμερές.

Η μετατροπή των ρυπαντών από υδρόφιλα σε υδρόφοβα γίνεται κυρίως μέσω της διαδικασίας της προσρόφησης των ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους στους ρυπαντές.

Στην επιφάνεια της καολίνης ενυπάρχουν μεγάλες ποσότητες υδρόφιλων ομάδων όπως OH-, Si-O, Al-OH και άλλες ελεύθερες ρίζες και γι' αυτό η ιδιότητα της μεταφοράς της υδροφοβικότητας γίνεται αργά. Τα δε ανόργανα άλατα που έχουν ισχυρή συγγένεια με το νερό αποτρέπουν οποιαδήποτε πιθανότητα προσρόφησης των ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους. Προφανώς η δυνατότητα να μεταφέρεται η υδροφοβικότητα στους ρυπαντές έχει άμεση σχέση με τη χημική συγγένεια των ρυπαντών με το νερό.

Στη φυσική ή χημική προσρόφηση των αλυσίδων χαμηλού μοριακού βάρους από το στρώμα ρύπανσης αποδόθηκε η δυνατότητα των πολυμερών να μεταφέρουν την υδρόφοβη συμπεριφορά τους στους ρυπαντές [37].

3.2.3 Ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Θωράκιση έναντι της ρύπανσης

Μερικά σιλικονούχα πολυμερή είναι περισσότερα ανθεκτικά από άλλα κατά την έκθεσή τους σε συνθήκες δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου στην επιφάνειά τους και η αντίστοιχη αντοχή του υλικού εξαρτάται σημαντικά από τα συστατικά που συνθέτουν τις πλευρικές ομάδες και τους σταυροδεσμούς του πολυμερούς. Π.χ. στα πολυδιμεθυλο-σιλοξάνια όπου το Si συνδέεται με δύο άτομα άνθρακα τουλάχιστον δημιουργούνται σχηματισμοί που ενισχύουν την ανθεκτικότητα του υλικού ενόσω τοπικά αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες ($>1000^{\circ}\text{C}$).

Ένα από τα πρόσθετα που ενισχύουν την ανθεκτικότητα του σιλικονούχου καουτσούκ κατά την έκθεσή του σε ηλεκτρικές εκκενώσεις είναι ο τριυδρίτης Αργιλίου (Alumina Trihydrate ATH) που όμως πρέπει να προστεθεί σε κατάλληλη συγκέντρωση διότι έχει παρατηρηθεί ότι η μεγαλύτερη συγκέντρωση από την απαιτούμενη προκαλεί απώλεια της διηλεκτρικής αντοχής, η δε μικρότερη συγκέντρωσή του δεν προσδίδει στο υλικό την αντίστοιχη ανθεκτικότητα στη διάβρωση από ηλεκτρολυτικούς ρυπαντές.

Στο περιβάλλον όπου λειτουργούν οι μονωτήρες περίοδοι ξηρασίας ή μικρής διάρκειας περίοδοι υγρασίας ή βροχής διαδέχονται παρατεταμένες περιόδους ρύπανσης και ξηρασίας. Είναι επομένως απαραίτητο να μελετάται όχι μόνον η ιδιότητα της υδροφοβικότητας των πολυμερών υλικών και η δυνατότητα ανάκτησης της μετά από διαστήματα απώλειας της αλλά και η αντοχή τους στη διάβρωση. Ένα πολυμερές υλικό με φτωχή ανθεκτικότητα στη διάβρωση εφόσον έχει υποστεί απώλεια της υδροφοβικότητας σε συνθήκες ρύπανσης είναι δυνατό να καταστραφεί ολοσχερώς. Δύο μέθοδοι, η ASTM D2303 και η IEC 587 (TERT) έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση των ιδιοτήτων της ανθεκτικότητας στη διάβρωση και στη ρύπανση [35].

Η διάβρωση που προκύπτει σε υλικό από σιλικονούχο καουτσούκ είναι αποτέλεσμα φαινομένων θερμικής αποικοδόμησης σε συνθήκες π.χ. δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου οπότε και αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες ή έκθεσης σε υψηλής έντασης ακτινοβολία. Π.χ. κατά την αποικοδόμηση του πολυδιμεθυλο-σιλοξανίου (PDMS) για την οποία απαιτούνται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 250°C , εμφανίζεται η σίλικα στο διαβρωμένο μονωτήρα με τη μορφή λευκής σκόνης [33]. Η χημική προσβολή που οδηγεί στην αποικοδόμηση του σιλικονούχου πολυμερούς (PDMS)

περιλαμβάνει την υδρόλυση των δεσμών Si-O στις αλυσίδες του πολυμερούς, τη διάσπαση των σταυροδεσμών, την οξείδωση των παράπλευρων υδρογονανθρακικών ομάδων. Παρ' όλ' αυτά η γήρανση (χημική αλλοίωση - διάβρωση) είναι αποτέλεσμα τόσο της θερμοκρασίας όσο και της παρουσίας οξέων [33].

3.2.4 Αντοχή στις καιρικές συνθήκες

Παρ' ότι γενικώς ο δεσμός μεταξύ πυριτίου και οξυγόνου δεν διασπάται από την υπεριώδη ακτινοβολία και επειδή το πολυμερές υλικό δεν αποτελείται μόνον από τους παραπάνω δεσμούς, πρέπει να προστίθενται στα τελικά προϊόντα οι απορροφητές υπεριώδους ακτινοβολίας πάντα στις κατάλληλες συγκεντρώσεις. Οι δύο μέθοδοι είναι η ASTM D2565 και η ASTM G90. Ο σχηματισμός του τελικού πολυμερούς προϊόντος που επιλέγεται να παρασκευαστεί εξαρτάται και από το είδος της ρύπανσης στην οποία θα εκτεθεί (όξινο, βασικό περιβάλλον κ.λ.π.) [35].

3.2.5 Μηχανικές ιδιότητες

Το τελικό προϊόν θα πρέπει να διαθέτει αποδεκτή δυσκαμψία και αντοχή στη διάτρηση. Το γεγονός ότι οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών υλικών παραμένουν σταθερές σ' ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών ακόμη και στις συνθήκες λειτουργίας από -55°C έως 230°C είναι σημαντικό τους πλεονέκτημα. Όμως επειδή οι ιδιότητες εξαρτώνται από τα πληρωτικά και ενισχυτικά μέσα που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει τα πολυμερή υλικά να υποβάλλονται για παράδειγμα στον έλεγχο IEC 216 της θερμικής αντοχής τους [35].

3.3 Υπολογισμός κατανομής δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου συνθετικών μονωτήρων σε συνθήκες ξηρασίας και υγρασίας

Οι W. Que, S.A. Sedo [38] χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα COULOMB, τρισδιάστατης ανάλυσης ηλεκτρικού πεδίου υπολόγισαν την κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε στεγνούς και βρεγμένους συνθετικούς μονωτήρες. Το ηλεκτρικό πεδίο παραμορφώνεται από την παρουσία των σταγόνων ύδατος στην επιφάνεια των μονωτήρων. Οι περιπτώσεις των

βρεγμένων μονωτήρων που αναλύθηκαν βασίστηκαν σε ορισμένα στάδια της ταξινόμησης της υδροφοβικότητας σύμφωνα με το πρότυπο IEC/TS 62073 [11].

Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τους συνθετικούς μονωτήρες είναι παράγοντας που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στη γεωμετρία του μονωτήρα.

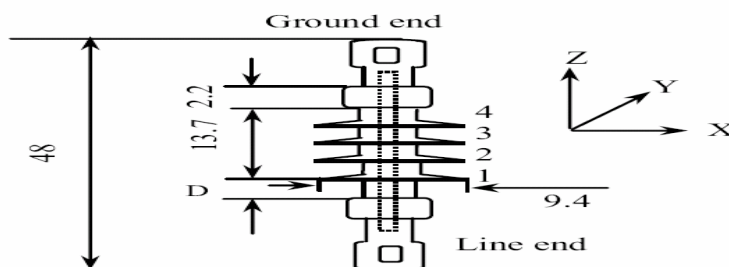
Το ηλεκτρικό πεδίο ενισχύεται στην επιφάνεια του μονωτήρα παρουσία των σταγόνων ύδατος. Εάν η τιμή της έντασης του επιφανειακού ηλεκτρικού πεδίου υπερβεί π.χ. την τιμή κατωφλίου $0,5-0,7 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{mm}$ τότε μπορούν να προκύψουν εκκενώσεις corona μεταξύ των σταγόνων ύδατος που στη συνέχεια ενδέχεται να καταστρέψουν την υδροφοβικότητα της επιφάνειας του πολυμερούς υλικού.

Επίσης η υψηλή θερμοκρασία αυτών των εκκενώσεων προκαλεί τη θερμική αποικοδόμηση του πολυμερούς υλικού επιταχύνοντας τη γήρανσή του (απανθράκωση, διάβρωση) αυξάνοντας τον κίνδυνο υπερπήδησης του μη κεραμικού μονωτήρα.

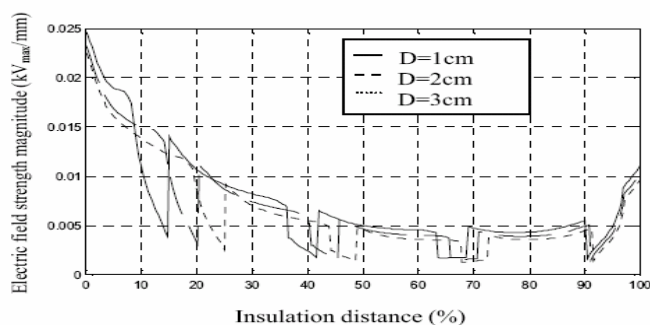
Οι σχεδιαστικοί παράμετροι που μελετώνται και που καθορίζουν την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού είναι: η απόσταση μεταξύ του πρώτου δίσκου και του άκρου του μονωτήρα όπου καταλήγει ο αγωγός (απόσταση D στο σχήμα 3.27), η απόσταση μεταξύ των δίσκων και η γεωμετρία του δίσκου.

3.3.1 Απόσταση μεταξύ του πρώτου δίσκου και του άκρου του μονωτήρα στο οποίο καταλήγει η γραμμή μεταφοράς

Στο Σχήμα 3.28 διαφαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση D , τόσο μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου [38].



Σχήμα 3.27: Γεωμετρία και διαστάσεις ενός μονωτήρα τεσσάρων δίσκων

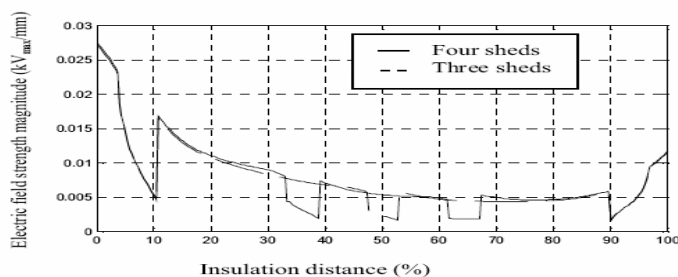


Σχήμα 3.28: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του περιβλήματος μονωτήρα για διάφορες D-αποστάσεις σε συνάρτηση με την % απόσταση

3.3.2 Διάστημα μεταξύ γειτονικών δίσκων μονωτήρα

Διατηρώντας την απόσταση του πρώτου δίσκου από το άκρο του μονωτήρα σταθερή, χρησιμοποιείται ένας μονωτήρας με τέσσερις δίσκους και διάστημα μεταξύ δίσκων 4 cm και ένας μονωτήρας με τρεις δίσκους και διάστημα μεταξύ δίσκων 6 cm. Αυτή η απόσταση μεταξύ των δίσκων του μονωτήρα αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την απόδοση μονωτήρων σε συνθήκες υγρασίας και ρύπανσης [38].

Το σύνηθες διάστημα μεταξύ διαδοχικών δίσκων μονωτήρα στη βιομηχανία είναι 3,5 cm.



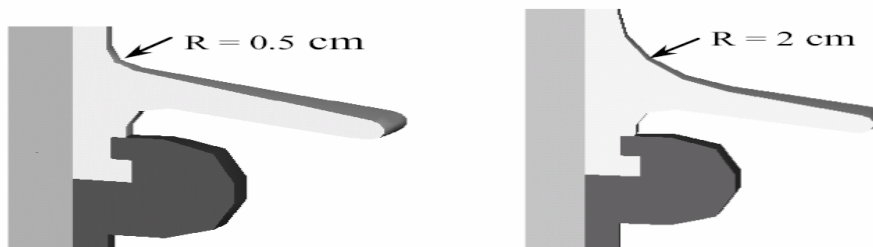
Σχήμα 3.29: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια περιβλήματος μονωτήρα σε συνάρτηση με την % απόσταση για δύο διαφορετικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών δίσκων

3.3.3 Γεωμετρία του δίσκου

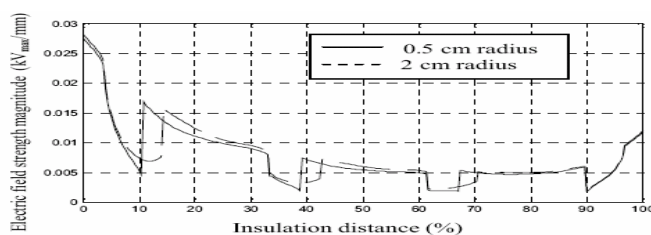
Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σημαντικά υψηλότερη στη διεπιφάνεια μεταξύ περιβλήματος και δίσκου. Γι' αυτό και εξετάζεται η επίδραση της ακτίνας

που περιβάλλει την περιοχή περιβλήματος / δίσκου στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου των αντίστοιχων μονωτήρων.

Μεγαλύτερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζεται για μεγαλύτερη περιβαλλόμενη ακτίνα της διεπιφάνειας περιβλήματος / δίσκου [38].



Σχήμα 3.30: Διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας δίσκου με αλλαγή στην τιμή της ακτίνας που περιβάλλει την επιφάνεια περιβλήματος / δίσκου

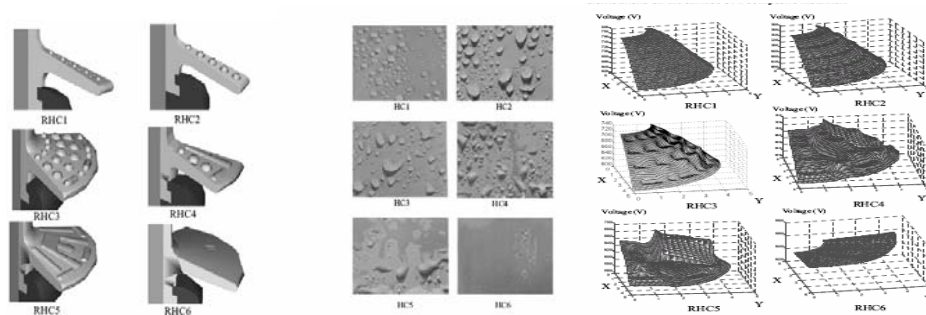


Σχήμα 3.31: Μέγεθος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του περιβλήματος μονωτήρα σε συνάρτηση με την % απόσταση του μονωτήρα για δύο διαφορετικές τιμές περιβαλλόμενων ακτίνων την επιφάνεια περιβλήματος/ δίσκου

3.3.4 Συνθήκες υγρασίας

Υποτίθεται ότι σε συνθήκες βροχόπτωσης οι σταγόνες ύδατος βρίσκονται μόνο στην επάνω επιφάνεια των δίσκων και όχι στην κατακόρυφη επιφάνεια του περιβλήματος και στις κάτω επιφάνειες των δίσκων, που παραμένουν στεγνές εφόσον δεν είναι εκτεθειμένες στη βροχή.

Έξι περιπτώσεις μη κεραμικών μονωτήρων με επιφάνειες να καλύπτονται από σταγόνες ύδατος το σχήμα των οποίων καθορίζει και την τάξη της υδροφοβικότητας του αντίστοιχου μονωτήρα σύμφωνα με το πρότυπο IEC/TS 62073 [11] φαίνονται στο σχήμα 3.32.



Σχήμα 3.32: Έξι μοντέλα από τις αντίστοιχες τάξεις υδροφοβικότητας [11] για τον υπολογισμό της κατανομής του δυναμικού στην επιφάνεια του πρώτου δίσκου βρεγμένου μη κεραμικού μονωτήρα

Από το σχήμα 3.32 διαφαίνεται ότι όσο η διάμετρος των σταγόνων ύδατος είναι μικρότερη από 2 mm, το αποτέλεσμα της επίδρασης των σταγόνων ύδατος στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να αγνοηθεί [38].

Επίσης όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των σταγόνων ύδατος, τόσο επηρεάζεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του δίσκου. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου παραμορφώνεται σημαντικά από το υδάτινο υμένιο που έχει δημιουργηθεί με συνένωση σταγόνων ύδατος. Αποτέλεσμα είναι να υπάρχει η διαφορά του δυναμικού μεταξύ των γειτονικών σταγόνων ύδατος και του υδάτινου στρώματος [38].

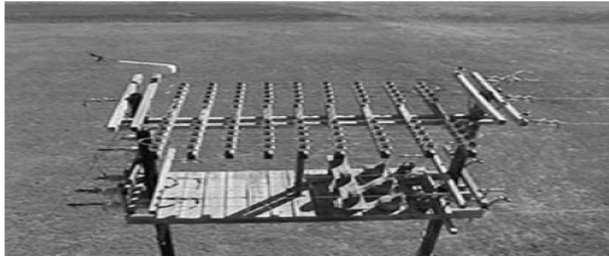
Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζει την υψηλότερη τιμή στα σημεία συμβολής των σταγόνων ύδατος, του μονωτικού υλικού και του αέρα και συνήθως εμφανίζει μία αύξηση από την αρχική απουσία σταγόνων ύδατος της τάξεως 2,5-4 φορές. Όταν αριθμός των σταγόνων ύδατος γίνει μεγαλύτερος τότε ο συντελεστής ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι 4-8 φορές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου απουσία σταγόνων ύδατος [37].

	Dry Case (kV/mm)	Case RHC1 Enh. Fac.	Case RHC2 Enh. Fac.	Case RHC3 Enh. Fac.	Case RHC4 Enh. Fac.	Case RHC5 Enh. Fac.	Case RHC6 Enh. Fac.
Triple junction point	0.028	0.9	1.0	1.2	1.4	1.8	1.7
Top of the first shed	0.017	2.4	2.3	2.1	3.7	4	1.4
Under the first shed	0.026	0.9	1.0	1.1	1.2	1.6	1.4

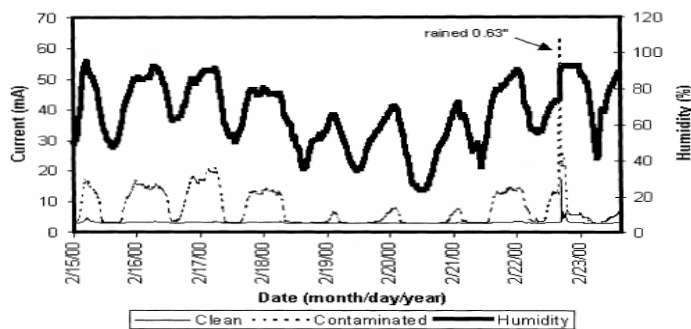
Πίνακας 3.2: Συντελεστές ενίσχυσης ηλεκτρικού πεδίου για τις έξι τάξεις υδροφοβικότητας σε διάφορες θέσεις της επιφάνειας του μονωτήρα [38]

3.4 Ηλεκτρική συμπεριφορά κεραμικών μονωτήρων σε πραγματικές συνθήκες ρύπανσης και υγρασίας

Οι C.S. Richards, C.L. Benner, K.L. Butler-Purry, B. Don Russell [39] εξέτασαν την ηλεκτρική συμπεριφορά κεραμικών μονωτήρων υπό πραγματικές συνθήκες ρύπανσης και υγρασίας.



Σχήμα 3.33: Πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.34: Συμπεριφορά των καθαρών και των μολυσμένων με ρύπανση κεραμικών μονωτήρων (Clean Fog Test of the IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing)

Σε χαμηλά επίπεδα υγρασίας (π.χ., <50%) οι μολυσμένοι με ρύπανση μονωτήρες είναι στεγνοί, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αρκετή υγρασία να ενωθεί με τους ρυπαντές ώστε να μειωθεί στη συνέχεια η επιφανειακή αγωγιμότητα και να δημιουργηθεί ρεύμα διαρροής στην επιφάνεια των μονωτήρων. Έτσι, οι διαφορές δεν είναι παρατηρήσιμες μεταξύ της ηλεκτρικής δραστηριότητας των μολυσμένων με ρύπανση μονωτήρων και των καθαρών μονωτήρων που διαρρέονται από χωρητικό ρεύμα.

Σε επίπεδα υγρασίας υψηλότερα από 50%, παρατηρήθηκε αύξηση του rms ρεύματος στους μονωτήρες που είχαν επιβάρυνση ρύπανσης σε αντίθεση με τους καθαρούς μονωτήρες στους οποίους δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή στη συμπεριφορά. Αυτή η αύξηση του ρεύματος διαρροής με ωμική συμπεριφορά αλλά και με στοιχεία

μεταβατικά ηλεκτρικού τόξου αποδόθηκε στις σταγόνες της υγρασίας και στην παρουσία του υγροσκοπικού NaCl στην επιφάνεια του μονωτήρα μετά από την έκθεση του σε ακτινοβολία υψηλής συχνότητας. Τέλος το rms ρεύμα διαρροής αυξήθηκε απότομα τόσο στους μολυσμένους όσο και στους καθαρούς μονωτήρες κατά τη διάρκεια ισχυρής βροχόπτωσης [39].

3.5 Αποτέλεσμα της επίδρασης των εκκενώσεων corona σε μη κεραμικούς μονωτήρες από σιλικονούχο καουτσούκ

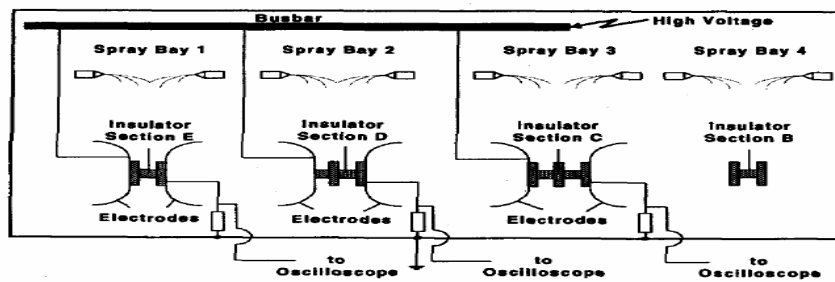
Σταγόνες ύδατος στην επιφάνεια του περιβλήματος ενός μη κεραμικού μονωτήρα μπορούν να παράγουν εκκενώσεις corona όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.

Το μέγεθος της επιφανειακής έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που είναι απαραίτητο προκειμένου να προκαλέσει την έναρξη των εκκενώσεων corona είναι συνάρτηση τόσο του μεγέθους της σταγόνας όσο και της υδροφοβικότητας της επιφάνειας. Οι εκκενώσεις corona από σταγόνες ύδατος έχουν σαν αποτέλεσμα την προσωρινή μεταβολή των υδροφοβικών ιδιοτήτων του υλικού από σιλικονούχο καουτσούκ. Η απώλεια της υδροφοβικότητας είναι ανάλογη του μεγέθους του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Σε πειράματα ελέγχου αντοχής συνθετικών μονωτήρων εκτιμήθηκε ότι το αποτέλεσμα των εκκενώσεων corona προκαλεί μόνο κάποια ελάχιστα ραγίσματα στην επιφάνεια του σιλικονούχου καουτσούκ και ίσως κάποιον αποχρωματισμό, αλλά δεν συνεισφέρει σχεδόν καθόλου στη διάβρωσή του [37].

Η τιμή έναρξης και το μέγεθος των εκκενώσεων corona από σταγόνες ύδατος είναι συνάρτηση του εφαρμοζόμενου επιφανειακού ηλεκτρικού πεδίου. Οι A.J. Philips, D.J. Childs και H.M. Schneider εξετάζουν την απώλεια των υδροφοβικών ιδιοτήτων των υλικών εξαιτίας της δραστηριότητας των εκκενώσεων corona [33] σε πέντε διαφορετικά τμήματα ενός μονωτήρα.

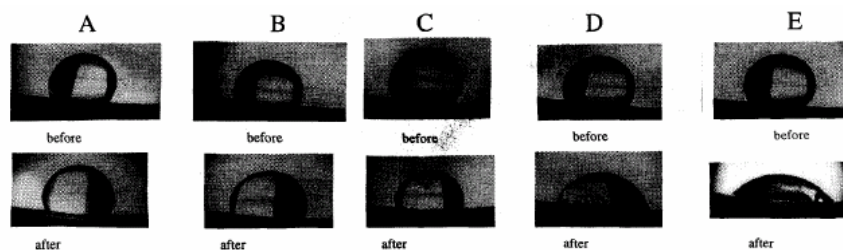
Αποδείχθηκε ότι στα παραπροϊόντα της δραστηριότητας των εκκενώσεων corona περιλαμβάνεται το νιτρικό οξύ και το όζον, που ενδεχομένως να συμβάλλουν στη χημική προσβολή του σιλικονούχου καουτσούκ. Πιθανώς τα σχηματιζόμενα αυτά παραπροϊόντα των εκκενώσεων corona από σταγόνες ύδατος είναι η κύρια αιτία της αποικοδόμησης του υλικού [33].



Σχήμα 3.35: Θάλαμος ψεκασμού και επίδρασης ηλεκτρικού πεδίου σε πέντε τμήματα μονωτήρα

Πίνακας 3.3: Τιμές rms ηλεκτρικού πεδίου στη μέση του περιβλήματος μονωτήρα για τα πέντε δείγματα που εξετάστηκαν.

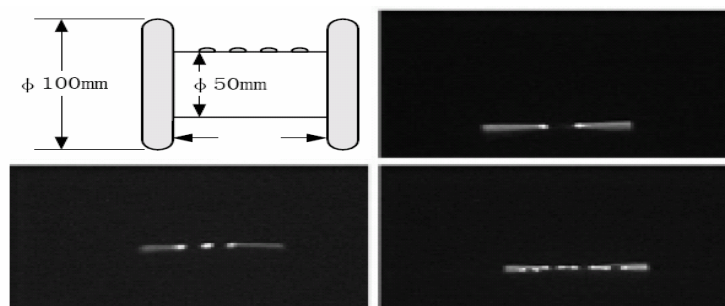
Sample	A	B	C	D	E
E-field Magnitude (kV/mm)	0	0	0.29	0.43	0.55
Wetting	No	Yes	Yes	Yes	Yes



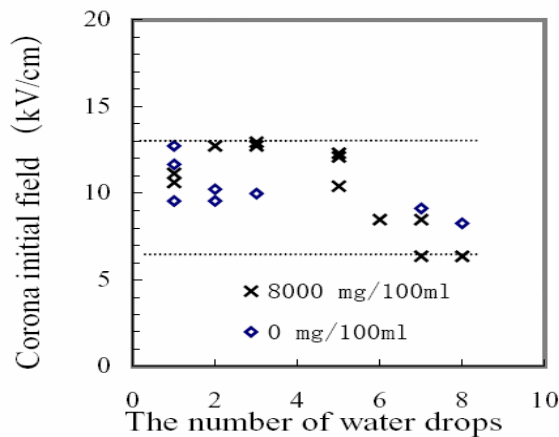
Σχήμα 3.36: Φωτογραφίες σταγόνων ύδατος όγκου 10μl για κάθε ένα από τα πέντε δείγματα πριν και μετά από την έκθεσή τους στο ψεκασμό και στο ηλεκτρικό πεδίο.

Στο τμήμα E του μονωτήρα που είχε ψεκαστεί με νερό και εκτεθεί σε μεγαλύτερης έντασης ηλεκτρικό πεδίο παρατηρούμε τη μεταβολή της υδροφοβικότητας από τη σημαντική μεταβολή της γωνίας επαφής της σταγόνας πριν και μετά τον έλεγχο [33].

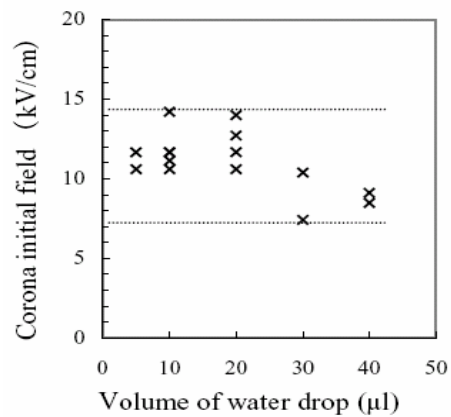
Η έναρξη των εκκενώσεων corona στην περίπτωση πολλών σταγόνων ύδατος φαίνεται στο σχήμα 3.38.



Σχήμα 3.37: Μοντέλο μονωτήρα που προσομοιώθηκε για τον προσδιορισμό των τιμών έναρξης εκκενώσεων corona με περισσότερες από μία σταγόνες ύδατος



Σχήμα 3.38: Πολλές σταγόνες ύδατος



Σχήμα 3.39: Μια σταγόνα ύδατος

Οι εκκενώσεις corona αρχικά παρατηρούνται στο σημείο συμβολής αέρα, υγρού, στερεού. Όλες οι σταγόνες ύδατος είναι διατεταγμένες σε μία οριζόντια γραμμή κατά την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και σε ίσες αποστάσεις. Όταν ο αριθμός των σταγόνων ύδατος είναι μεγαλύτερος από 5-6, η τιμή έναρξης του φαινομένου corona μειώνεται απότομα [37].

Στην περίπτωση μίας σταγόνας ύδατος με διαφορετικό όγκο (σχήμα 3.39), η τιμή έναρξης του φαινομένου corona μειώνεται απότομα με την αύξηση του όγκου.

Το ηλεκτρικό πεδίο ενισχύεται ισχυρώς στη εγγύτερη περιοχή των σταγόνων ύδατος. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο τριπλό σημείο συμβολής μεταξύ αέρα, υγρού και στερεού και ο συντελεστής ενίσχυσης είναι περίπου 2,5~4 φορές μεγαλύτερος της αρχικής τιμής. Εάν αυξηθεί ο αριθμός των σταγόνων ύδατος, τότε ο συντελεστής ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι περίπου 4~8 φορές της αρχικής τιμής [33].

3.6 Υποβάθμιση συνθετικών μονωτήρων λόγω καιρικών συνθηκών και τρόποι βελτίωσης της απόδοσης και της διάρκειας ζωής

Τα πολυμερή υλικά έχουν ασθενέστερους δεσμούς απ' ότι η πορσελάνη (ομοιοπολικοί σε αντίθεση προς ιοντικούς), που σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια των χρόνων που είναι σε χρήση μπορούν να μεταβληθούν από τις πολλαπλές τάσεις που ασκούνται κατά τη χρήση και τη λειτουργία [35]. Με την κατάλληλη επεξεργασία των υλικών και του προορισμού των προϊόντων, τα πολυμερή μονωτικά υλικά παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και επιθυμητή διάρκεια ζωής [35]. Ένας συνδυασμός

βέλτιστων συνθηκών σχεδιασμού και παραγωγής πρέπει να υλοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση και διάρκεια ζωής για μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας. Αυτό προϋποθέτει ότι ο επιστήμονας των υλικών θα σχεδιάσει το πολυμερές υλικό με τα κατάλληλα πρόσθετα στις απαραίτητες συγκεντρώσεις χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μεθόδους ανάμιξης. Ο σχεδιαστής του προϊόντος πρέπει να λάβει υπόψη του τις ιδιότητες του μέχρι την εφαρμογή του. Πρέπει να συνυπολογιστούν οι συνθήκες παραγωγής ώστε να μην αποσυντίθεται το προϊόν κατά την παραγωγή του.

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

Η δομή των πολυμερών υλικών όπως οι εύκαμπτοι δεσμοί, η ευκινησία των μακρών αλυσίδων, παρέχουν πολλά από τα εγγενή πλεονεκτήματα των πολυμερών. Παρ' όλ' αυτά, καθώς όλα τα πολυμερή υλικά είναι οργανικά, συνεχόμενη καταπόνηση κατά τη χρήση τους οδηγεί σε απώλεια των ιδιοτήτων επάνω στην επιφάνεια του υλικού και των χαρακτηριστικών της αντίστασης έναντι στη ρύπανση, εκτός εάν ενισχύονται με κατάλληλα πρόσθετα και σχέδιο καλύμματος που περιορίζει το ρεύμα διαρροής. Η αναγνώριση των παραπάνω σε συνδυασμό με την απόκτηση εμπειρίας στην επιστήμη των υλικών οδηγεί στο σχεδιασμό προϊόντων με αποδεδειγμένα υψηλά επίπεδα απόδοσης σε πληθώρα εφαρμογών.

Καταπονήσεις λόγω της λειτουργίας, όπως το φαινόμενο corona, η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία ή χημική προσβολή, προκαλούν χημικές αντιδράσεις στην

επιφάνεια του πολυμερούς υλικού. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ο σχηματισμός υδρόφιλων ομάδων που επιτρέπουν στην επιφάνεια να υγρανθεί, και να επιτρέψει τη ροή αυξημένου ρεύματος διαρροής. Ένα υλικό που υφίσταται μείωση της υδροφοβικότητας, δεν σημαίνει ότι χάνει και την αντοχή του έναντι της διάβρωσης σε συνθήκες υγρασίας. Παρ' όλ' αυτά η διατήρηση της υδροφοβικότητας είναι εξαιρετικά επιθυμητή. Εάν η υδροφοβικότητα μειωθεί, το προϊόν δεν πρέπει να υποστεί σημαντικά ρεύματα διαρροής που θα οδηγήσουν στο σχηματισμό ξηρών ζωνών [35].

3.7 Εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός συνθετικού μονωτήρα

Ένας γρήγορος έλεγχος που χρησιμοποιείται συχνά για να προβλέψει τη διάρκεια ζωής προϊόντος δεν είναι πάντα και κατατοπιστικός και γι' αυτό κάποιος πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός στη διεξαγωγή τέτοιων ελέγχων καθώς οι συνθήκες συνήθως δεν μπορούν να επισπευθούν και μπορούν να προκύψουν άτυπες καταπονήσεις ή αστοχίες. Το δείγμα δεν πρέπει να υπόκειται σε μηχανισμούς που δεν προκύπτουν κατά τη λειτουργία. Μία συνηθισμένη τακτική που επικυρώνει το χρόνο ζωής είναι η υποβολή των δειγμάτων σε ελέγχους εφαρμογής υπερυψηλής τάσης [20]. Η εξίσωση 2.2 χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής.

Προβλεπόμενη διάρκεια ζωής =

$$\text{Διάρκεια ελέγχου} * \left(\frac{\text{Εφαρμοζόμενη τάση (kV)}}{\text{Ονομαστική τάση λειτουργίας (kV)}} \right)^n \quad (3.2)$$

όπου n: εκθέτης που αντιπροσωπεύει τον παράγοντα επιτάχυνσης του ελέγχου εφαρμογής τάσης

3.8 Κριτήρια τέλους διάρκειας ζωής πολυμερών μονωτήρων

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

Για τα πολυμερή υλικά, τα κριτήρια του τέλους ζωής καθορίζονται από τον τεχνικό ανάπτυξης των υλικών ως ένα ελάχιστο συνδυασμό φυσικών ιδιοτήτων που είναι επιθυμητό να παρουσιάζουν τα πολυμερή υλικά σε εφαρμογές χρήσης εξωτερικού

χώρου, μετά από γήρανση πραγματικού χρόνου ή μετά από τεχνητά επιβαλλόμενη (accelerated) γήρανση. Για τα πολυμερή υλικά, η τάση εφελκυσμού και η επιμήκυνση είναι δύο συνήθεις ιδιότητες που μελετώνται συχνά και εξετάζονται κατά το στάδιο εφαρμογής του προϊόντος. Κατά την ανάπτυξη των υλικών στον όμιλο Raychem, η τάση και η επιμήκυνση συνήθως μετρώνται μετά από τη διεξαγωγή ελέγχων στη συγκράτηση ρυπαντών και στην αντοχή στη διάβρωση (TERT), τη γρήγορη έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία είτε φυσική είτε εργαστηριακή, και τη θερμική γήρανση. Επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής μπορούν να βρεθούν θεωρώντας ένα χαρακτηριστικό πολυμερές υλικό [20].

Ο προσδιορισμός της γήρανσης ενός υλικού λόγω έκθεσης σε θερμότητα προβλέπεται με τη μέθοδο Arrhenius, στην οποία τα κριτήρια του τέλους του χρόνου ζωής καθορίζονται από γρήγορη θερμική γήρανση και τα δεδομένα που συγκεντρώνονται ανάγονται σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας και σε ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας [20].

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

3.9 Συντελεστές απόδοσης συνθετικών μονωτήρων

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι συντελεστές απόδοσης των μονωτήρων από πολυμερή υλικά, οι παράγοντες που τους επηρεάζουν και ο τρόπος βελτίωσης τους [20].

Πίνακας 3.4: Συντελεστές απόδοσης πολυμερών υλικών

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

Το πρόγραμμα PC Opera-3d

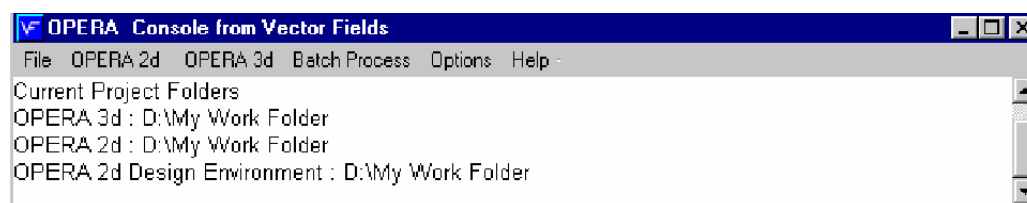
4.1 Εισαγωγή

Για τη δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου χρησιμοποιείται ο μοντελοποιητής (modeler) του OPERA-3d. Με το μοντελοποιητή είναι δυνατόν να μειωθεί το μέγεθος του προβλήματος που πρόκειται να διερευνηθεί εκμεταλλευόμενοι τη συμμετρία πριν τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων [25].

Η ανάλυση ξεκινά επιλέγοντας τα κατάλληλα χαρακτηριστικά του υλικού και στη συνέχεια με τη βοήθεια του μετ-επεξεργαστή (post processor) παράγονται τα επιθυμητά αποτελέσματα [25].

4.2 Πρόγραμμα ανάλυσης με τη χρησιμοποίηση του μοντελοποιητή

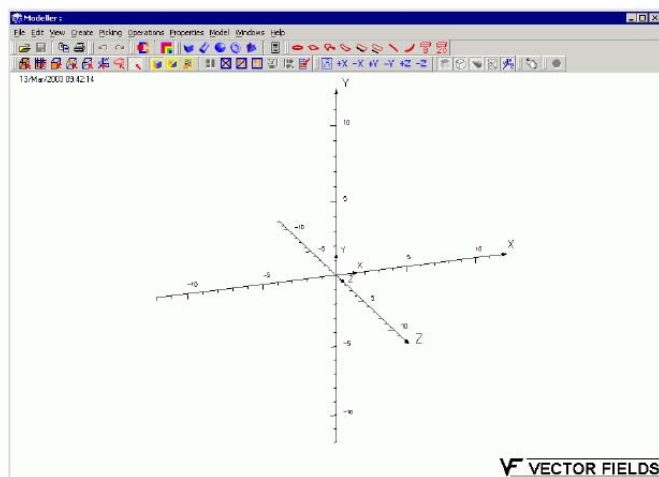
Το πρόγραμμα του μοντελοποιητή ξεκινά από το OPERA Console window, πατώντας το εικονίδιο VF του συστήματος. Τότε εμφανίζεται στην οθόνη το παρακάτω menubar.



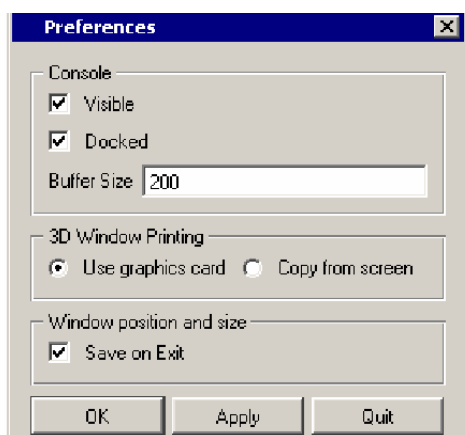
Σχήμα 4.1: Opera Console from Vector Fields

Μόλις επιλεγεί ο μοντελοποιητής, εμφανίζονται για το χρήστη οι τρεις 3D άξονες (σχήμα 4.2). Μια σειρά από πλήκτρα είναι διαθέσιμα στο πάνω μέρος της οθόνης για τον εύκολο έλεγχο του μοντελοποιητή. Τα πλήκτρα αντιστοιχούν σε εικονίδια που εκτελούν μια σειρά από λειτουργίες.

Για την εισαγωγή δεδομένων από το πληκτρολόγιο επιλέγεται **Preferences**, από το **Windows** menu και συμπληρώνεται το εικονίδιο διαλόγου που εμφανίζεται.



Σχήμα 4.2: Η οθόνη που εμφανίζεται αρχικά χρησιμοποιώντας Microsoft Windows.



Σχήμα 4.3: Εικονίδιο διαλόγου για τον ορισμό του Console Window.

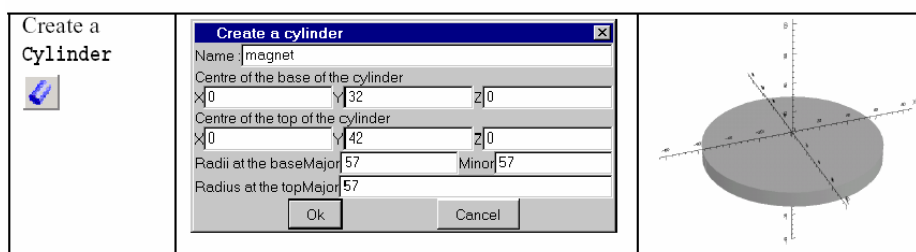
Αλλα σημαντικά στοιχεία για τον χρήστη είναι οι λειτουργίες **Undo** και **Redo**. Αυτές επιτρέπουν στο χρήστη να επιστρέφει το μοντελοποιητή σε κάθε σημείο της ιστορίας του για παράδειγμα για τη διόρθωση λανθασμένης οδηγίας ή για τη δημιουργία μιας πληθώρας εκδοχών ενός βασικού μοντέλου [25].

4.3 Φτιάχνοντας τη γεωμετρία

Αρχικά εισάγουμε τα χαρακτηριστικά στοιχεία της γεωμετρίας του αντικειμένου που

εξετάζεται. Επιλέγεται το επίπεδο συμμετρίας του αντικειμένου για παράδειγμα υποτίθεται ότι είναι στον $Y = 0$ cm. Οι γεωμετρικές οντότητες μπορούν να δημιουργηθούν από το μοντελοποιητή είτε με την επιλογή του κατάλληλου εικονιδίου είτε εισάγοντας μία εντολή από το πληκτρολόγιο.

Για τη δημιουργία ενός αντικειμένου π.χ ενός κυλίνδρου επιλέγουμε το εικονίδιο από τη μπάρα των εργαλείων (toolbar). Τότε εμφανίζεται ένα εικονίδιο διαλόγου προκειμένου να οριστεί ο κύλινδρος. Υπάρχουν πολλές δυνατότητες για τη δημιουργία διαφόρων σχημάτων, κώνων, ελλειπτικών κυλίνδρων. Εισάγοντας τα στοιχεία του κυλίνδρου στο εικονίδιο διαλόγου και πατώντας **Enter** ή **OK** παράγεται ο παρακάτω δίσκος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4 [25].



Σχήμα 4.4: Εικονίδιο διαλόγου για τον ορισμό αντικειμένου εργασίας.

4.4 Ελέγχοντας την εικόνα

Το αντικείμενο που δημιουργούμε είναι δυνατό να παρατηρηθεί από πολλές πλευρές με τη μετακίνηση επάνω στο γράφημα και κρατώντας το αριστερό κουμπί του ποντικιού πατημένο. Μ' αυτόν τον τρόπο περιστρέφεται η εικόνα του αντικειμένου. Στην περίπτωση που κρατηθεί πατημένο το δεξί κουμπί του ποντικιού και μετακινηθεί το ποντίκι, τότε μετατίθεται το αντικείμενο ακόμη και προς το κέντρο της οθόνης. Με την επιλογή του ποντικιού ως εικονίδιο από την οθόνη υπάρχει και η δυνατότητα να φανεί εξ' ολοκλήρου και το εσωτερικό του αντικειμένου.

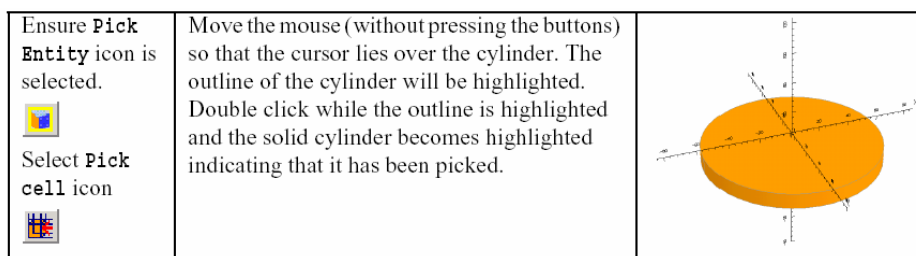
Σε περίπτωση που ο χρήστης τροποποιήσει με τέτοιον τρόπο την εικόνα ώστε να είναι δύσκολο να επιστρέψει στην αρχική γεωμετρία, τότε επιλέγεται το εικονίδιο **Initial View** από τη μπάρα των εργαλείων.

Με αυτήν την εντολή προσαρμόζεται η εικόνα με τέτοιον τρόπο ώστε να είναι ορατή όλη η γεωμετρία. Υπάρχουν κι άλλα εικονίδια από τη μπάρα των εργαλείων που

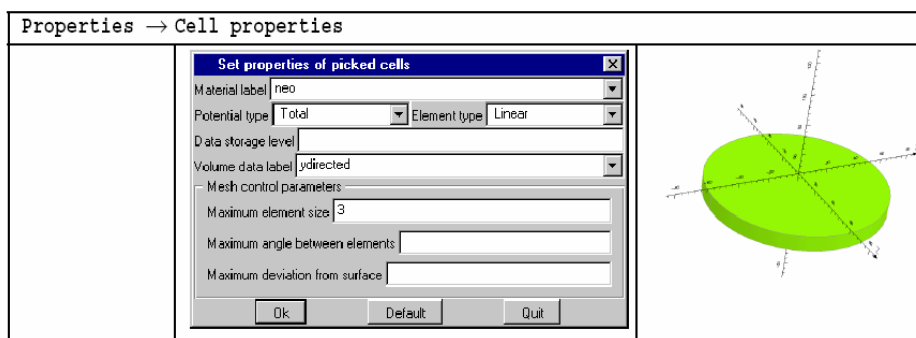
ελέγχουν την εικόνα. Επίσης, είναι δυνατό να μετακινηθούν οι άξονες. Κι αυτές οι λειτουργίες είναι δυνατό να εφαρμοστούν από το **View** menu [25].

4.5 Ιδιότητες του αντικειμένου

Ορίζονται οι ιδιότητες του αντικειμένου (π.χ. του κυλίνδρου) χρησιμοποιώντας το εικονίδιο της επιλογής οντότητας (Pick entity), στη συνέχεια το εικονίδιο της επιλογής κυττάρου (Pick cell) και τέλος είναι δυνατό να οριστούν οι ιδιότητες του επιλεγμένης οντότητας από το menu που βρίσκεται στο επάνω μέρος της οθόνης [19].



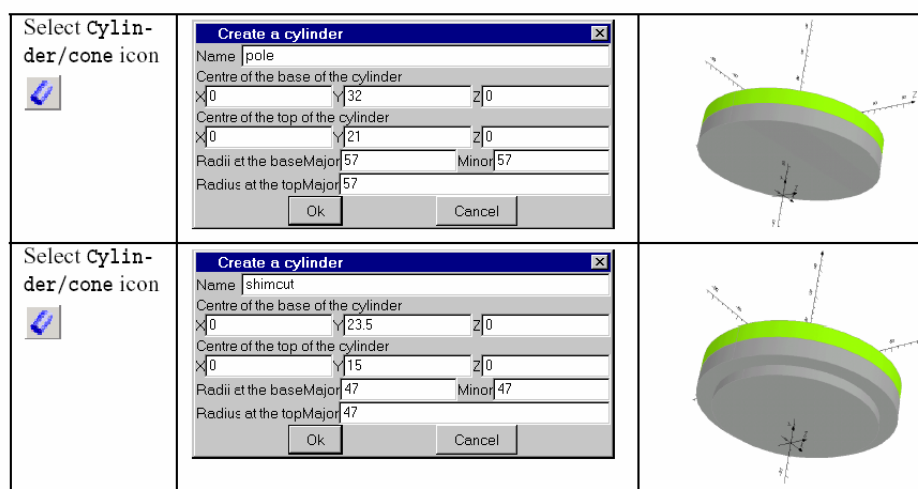
Σχήμα 4.5: Εικονίδιο επιλογής οντότητας και επιλογής κυττάρου



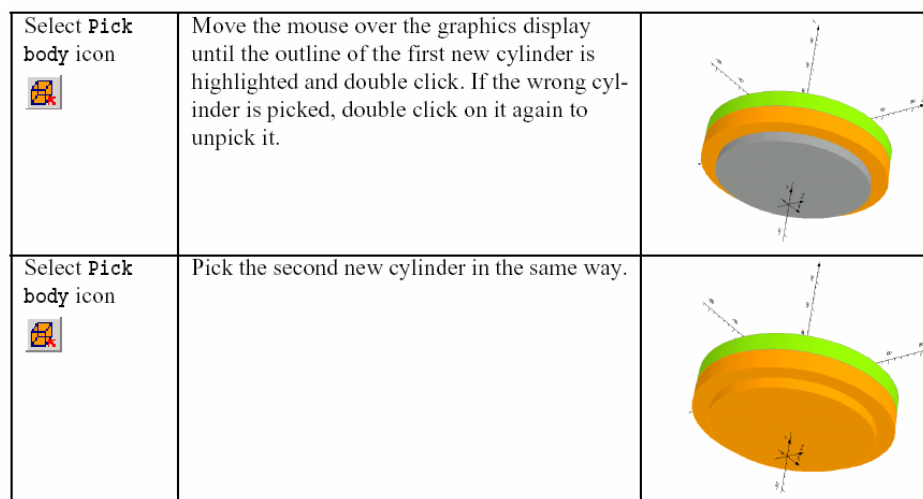
Σχήμα 4.6: Εικονίδιο καθορισμού των ιδιοτήτων του υλικού του κυττάρου

4.6 Φτιάχνοντας νέα σώματα στο αντικείμενο ελέγχου

Επιλέγοντας το εικονίδιο δημιουργίας αντικειμένου και εισάγοντας τις διαστάσεις φτιάχνουμε ένα νέο σώμα από αντικείμενα.

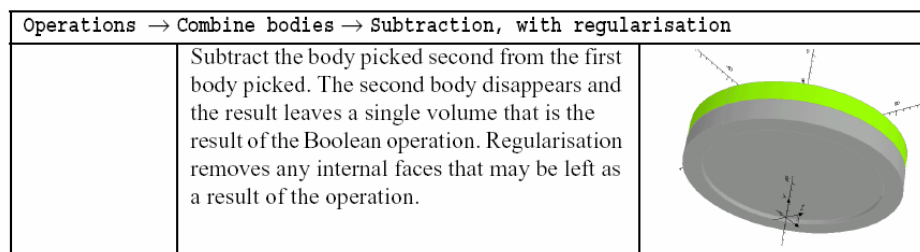


Σχήμα 4.7: Εικονίδιο δημιουργίας αντικειμένου.

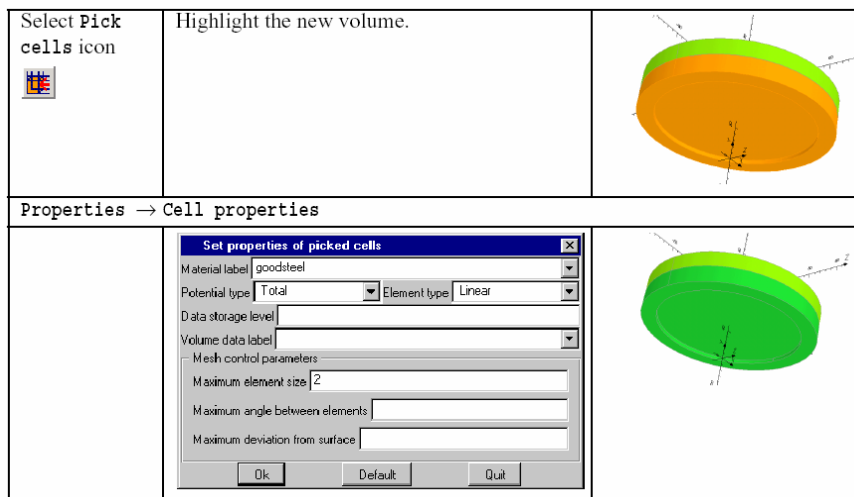


Σχήμα 4.8: Εικονίδιο επιλογής του σώματος που θ' αφαιρεθεί από το μοντέλο.

Από το αντικείμενο που έχει δημιουργηθεί μπορεί να γίνει αφαίρεση ενός μέρους με την ακόλουθη διαδικασία.

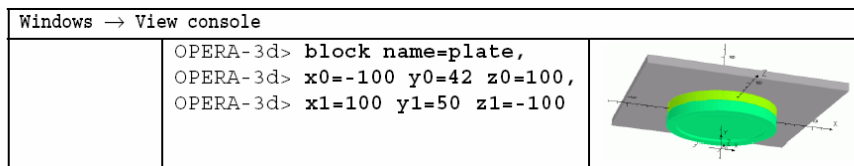


Σχήμα 4.9: Λειτουργίες που επιλέγονται από το menubar για τη δημιουργία εσοχής στο αντικείμενο.

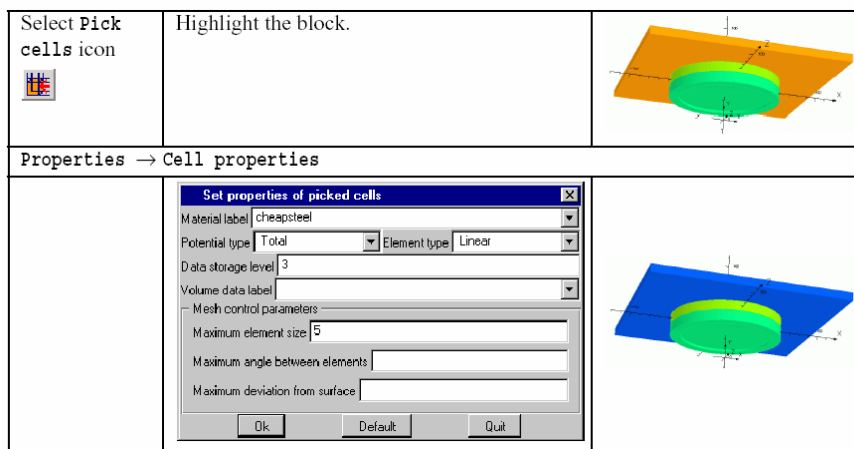


Σχήμα 4.10: Εικονίδιο καθορισμού των ιδιοτήτων του υλικού του επιλεγμένου σώματος.

Με την εισαγωγή δεδομένων από το πληκτρολόγιο και συγκεκριμένα από το **OPERA-3d>** prompt που επιλέγεται από τη μπάρα εργαλείων: **Windows → Preferences → Visible** εμφανίζεται το μοντέλο στην οθόνη. Στο παρακάτω παράδειγμα κατασκευάζεται ακόμη ένα πλαίσιο για το οποίο δίνονται οι διαστάσεις του και το όνομά του από την επιλογή **Windows → View Console**.



Σχήμα 4.11: Εικονίδιο δημιουργίας νέου σώματος στο αντικείμενο.

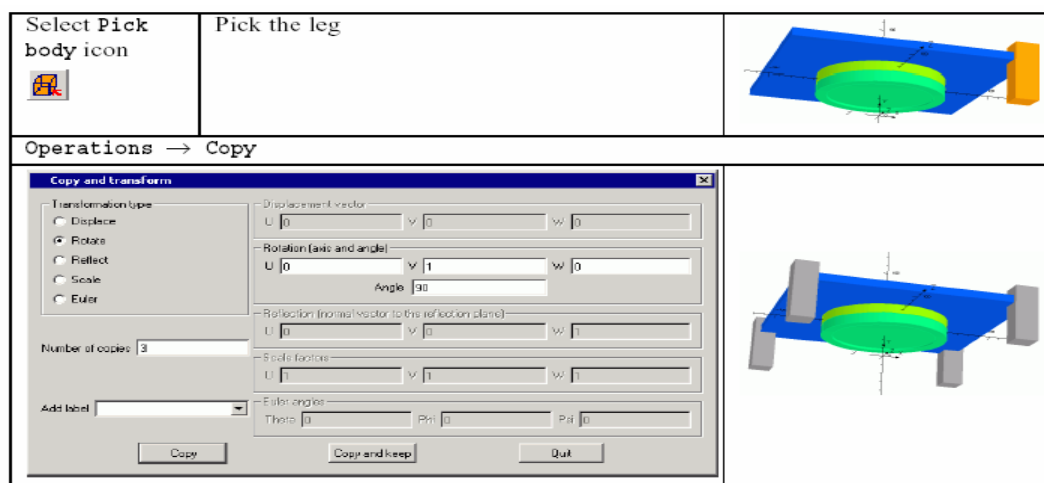


Σχήμα 4.12: Λειτουργία καθορισμού των ιδιοτήτων του επιλεγμένου σώματος.

Το επίπεδο της αποθήκευσης δεδομένων (**Data storage level**) ρυθμίζεται να είναι υψηλότερο απ' ό τι ήταν στο πρώτο σώμα. Όταν αργότερα το επίπεδο θα συνδυαστεί με το υπόβαθρο για τη δημιουργία του συνολικού όγκου του αντικειμένου τότε με συνάρτηση Boolean, το κομμάτι με την υψηλότερη τιμή αποθήκευσης δεδομένων θα καθορίσει τις ιδιότητες που το συνολικό σώμα θα διατηρήσει [25].

4.7 Δημιουργώντας αντίγραφα

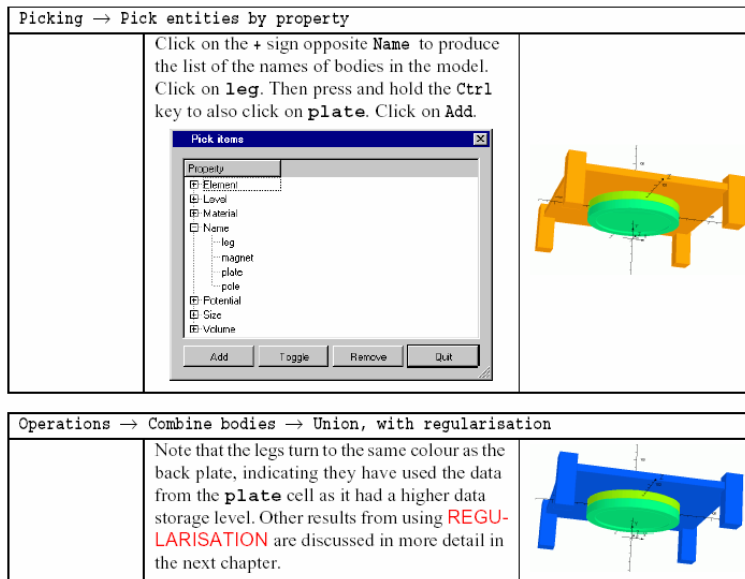
Αντίγραφα ενός μέρους του αντικειμένου μπορούν να δημιουργηθούν με περιστροφή γύρω από τον άξονα Y. Η αντιγραφή είναι μία λειτουργία (**Operation**) που μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σ' ένα ολόκληρο σώμα αντικειμένου. Από το menu επιλέγεται η λειτουργία της αντιγραφής [25].



Σχήμα 4.13: Λειτουργία δημιουργίας όμοιων τμημάτων στο επιλεγμένο αντικείμενο.

4.8 Επιλέγοντας οντότητες και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες

Ξεχωριστά σώματα μπορούν να επιλεγούν χρησιμοποιώντας το menu **Picking** ή το εικονίδιο **Pick by property** [25].

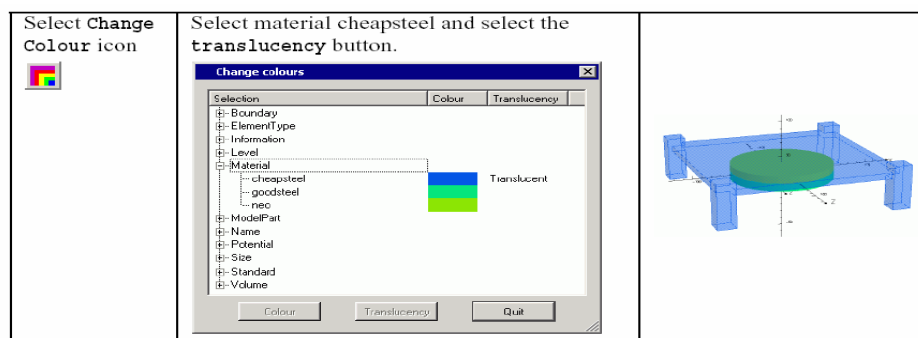


Σχήμα 4.14: Λειτουργία για τον καθορισμό ενιαίων ιδιοτήτων σε όμοιες οντότητες.

4.9 Διαφάνεια αντικειμένου

Προκειμένου να βελτιωθεί η εικόνα του αντικειμένου, είναι μερικές φορές χρήσιμο να δημιουργηθεί ένας όγκος διαφανής. Στο παράδειγμα που παρατίθεται το επίπεδο μπορεί να γίνει διαφανές ώστε να διακρίνονται οι δύο κύλινδροι του αντικειμένου.

Τ' αντικείμενα είναι προτιμότερο να επιλέγονται με βάση το υλικό τους απ' ό,τι τ' όνομά τους.



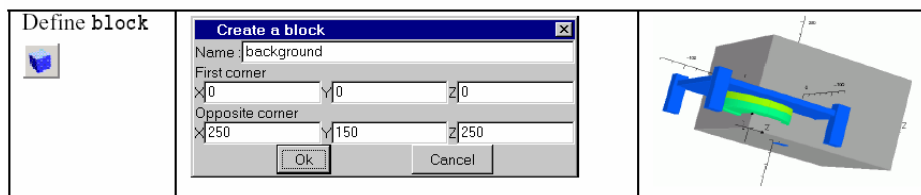
Σχήμα 4.15: Εικονίδιο επιλογής χρωμάτων σε διαφορετικά υλικά από τα οποία συνίσταται το αντικείμενο.

Μόνο ένα χρώμα από το αντικείμενο μπορεί να είναι διαφανές σε κάθε ιδιαίτερη στιγμή. Επιλέγοντας κάποιο άλλο χρώμα αυτόματα μετατρέπει το χρώμα που ήταν πριν διαφανές σε θαμπό [25].

4.10 Δημιουργώντας έναν όγκο πίσω από το αντικείμενο

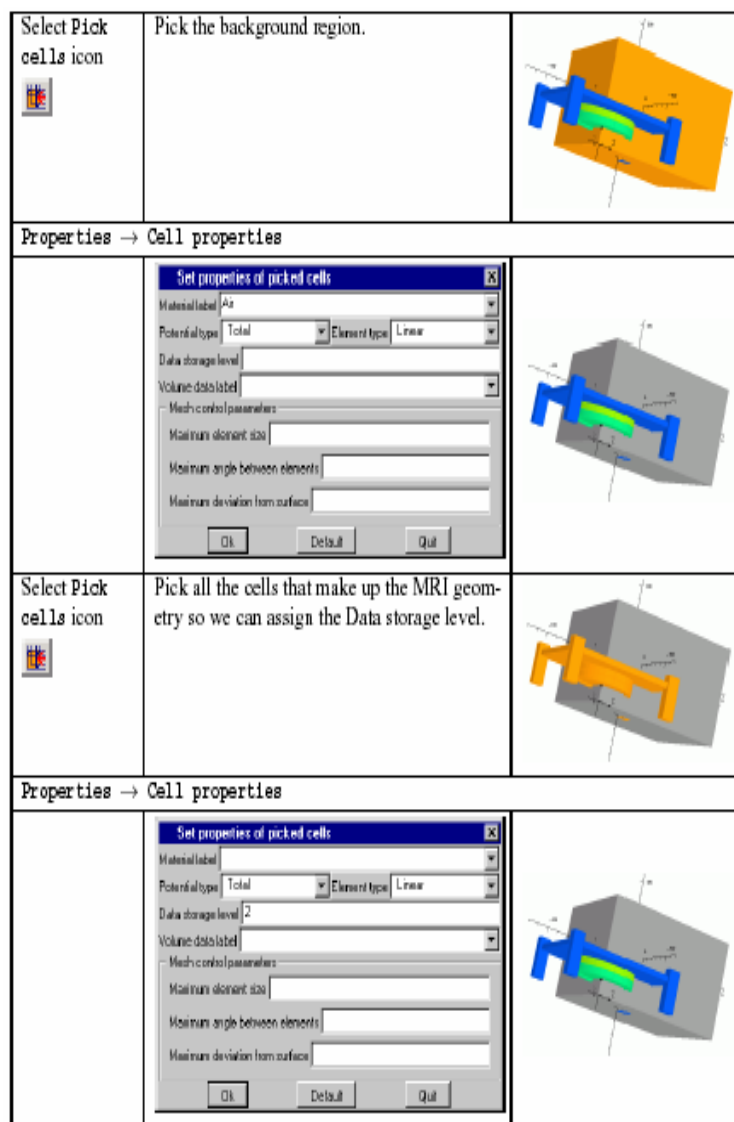
Στα προηγούμενα βήματα προσδιορίστηκε η γεωμετρία του αντικειμένου. Παρ' ολ' αυτά το ηλεκτρικό πεδίο θα πρέπει να προσδιοριστεί σ' όλον το χώρο. Ο ελεύθερος χώρος που περικλείει το μοντέλο που εξετάζεται πρέπει επίσης να περιληφθεί σαν ένα μέρος του μοντέλου. Στην πραγματικότητα, ο κενός αυτός χώρος επεκτείνεται στο άπειρο. Παρ' ολ' αυτά σ' ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ο ελεύθερος χώρος τερματίζεται σε μια απόσταση από την περιοχή που εξετάζεται, και με τέτοιον τρόπο που να μην επηρεάζεται η ακρίβεια των υπολογισμών. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο ελεύθερος χώρος θα τερματιστεί στα 250 cm από το κέντρο του πρώτου κυλίνδρου στο οριζόντιο επίπεδο που ορίζεται από τις διευθύνσεις (X και Z) και στα 150 cm κατά την κατακόρυφη (Y) διεύθυνση.

Εκμεταλλεζόμενοι δε τη συμμετρία του μοντέλου για το συγκεκριμένο παράδειγμα μόνο 1/8 ολόκληρου του κυλίνδρου μπορεί να επιλυθεί λόγω της συμμετρίας. Το μέρος αυτό του μοντέλου θα δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας έναν όγκο στο υπόβαθρο που θα προσδιορίσει τις εξωτερικές συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Κάθε μοντέλο που θ' αναλυθεί μπορεί να περιέχει μόνο ένα μοντέλο στο υπόβαθρο. Κάθε άλλο μέρος της γεωμετρίας που επεκτείνεται πίσω από το υπόβαθρο αυτόματα δεν συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση.



Σχήμα 4.16: Εικονίδιο που επιλέγεται για τη δημιουργία του περιβάλλοντος χώρου του εξεταζόμενου αντικειμένου.

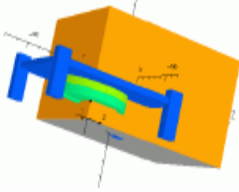
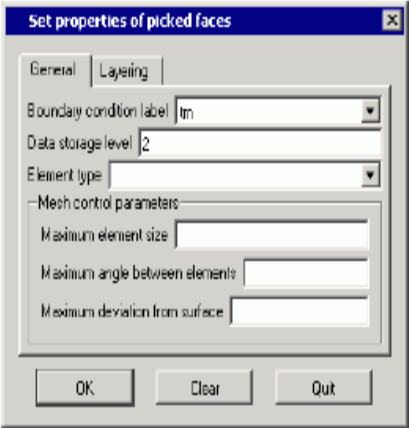
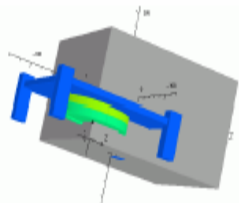
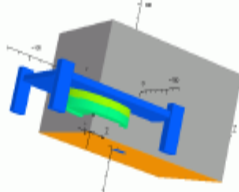
Στη συνέχεια ορίζονται οι ιδιότητες αυτού του κενού χώρου στο υπόβαθρο του αντικειμένου.



Σχήμα 4.17: Λειτουργία προσδιορισμού ιδιοτήτων (επίπεδο αποθήκευσης δεδομένων) επιλεγμένου υπόβαθρου και επιλεγμένου αντικειμένου.

Συνοριακές συνθήκες

Ο τελικός προσδιορισμός των δεδομένων γίνεται πριν δημιουργηθεί το μοντέλο με την προσθήκη των συνοριακών συνθηκών στον όγκο του κενού χώρου στο υπόβαθρο. Όπως ορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού, οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται με την απόδοση ενός τίτλου (ή λογικού ονόματος) στην όψη του μοντέλου. Ο τίτλος αυτός στη συνέχεια συνδέεται με τις πραγματικές συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν το ίδιο μοντέλο πρέπει ν' αναλυθεί με διαφορετικές συνοριακές συνθήκες. Π.χ στην ηλεκτροστατική ανάλυση.

Select Pick faces icon 	Pick the XY and YZ planes of the background volume. The outlines of the faces will be highlighted to indicate which face will be picked. On these two planes the magnetic field will be entirely tangential.	
Properties → Face properties		
	The label, tm , chosen reflects that a TANGENTIAL MAGNETIC boundary condition will be applied later. 	
Select Pick faces icon 	Pick the ZX plane on the background volume.	

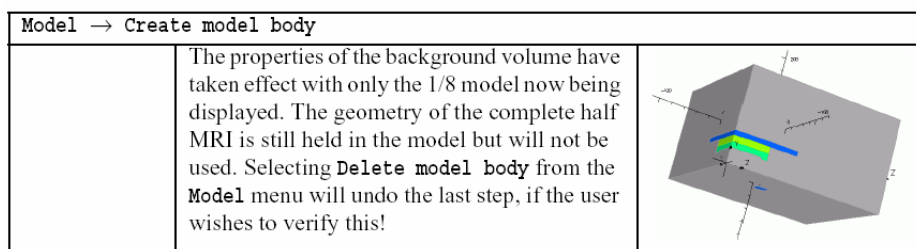
Σχήμα 4.18: Λειτουργία καθορισμού των συνοριακών συνθηκών σε επιλεγμένες επιφάνειες ηλεκτροστατικής ανάλυσης.

Το μοντέλο μπορεί στο παρόν στάδιο ν' αποθηκευτεί επιλέγοντας το εικονίδιο **Save**. Ένα οποιοδήποτε όνομα μπορεί να δοθεί και το μοντέλο ν' αποθηκευτεί χωρίς να αναπροσδιορίζεται το όνομα του αρχείου [25].

4.11 Δημιουργώντας ένα απλό μοντέλο

Πριν γίνει η δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, το μοντέλο μετατρέπεται σ' ένα αντικείμενο επιλέγοντας καταλλήλως κάθε σώμα.

Μόλις επιλεγεί η λειτουργία δημιουργίας του αντικειμένου του μοντέλου, το μέρος του μοντέλου που έχει υψηλότερο επίπεδο αποθήκευσης δεδομένων εμφανίζεται τότε στην οθόνη [25].

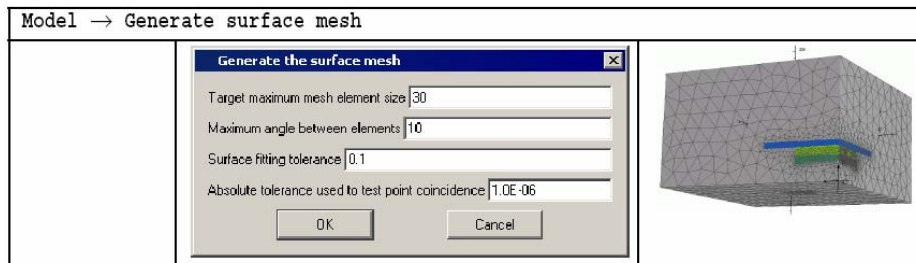


Σχήμα 4.19: Λειτουργία δημιουργίας του αντικειμένου του μοντέλου.

4.12 Δημιουργώντας το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

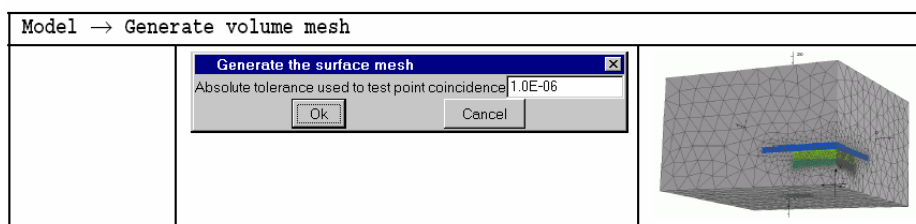
Πλέγμα στην επιφάνεια

Η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων τελείται σε δύο στάδια. Όλες οι επιφάνειες του μοντέλου αρχικά καλύπτονται με πλέγμα από τρίγωνα. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τις εσωτερικές επιφάνειες μεταξύ των όγκων του μοντέλου. Μόλις το επιφανειακό πλέγμα έχει δημιουργηθεί, μπορεί να δημιουργηθεί το πλέγμα του όγκου.



Σχήμα 4.20: Λειτουργία δημιουργίας πλέγματος στην επιφάνεια του μοντέλου.

Ο χρόνος που θα πάρει αυτή η διαδικασία εξαρτάται από την ταχύτητα του επεξεργαστή. Εάν ο χρήστης ξεκινήσει τη διαδικασία της δημιουργίας του πλέγματος με λανθασμένες παραμέτρους, η διαδικασία μπορεί να διακοπεί με το εικονίδιο της ακύρωσης.



Σχήμα 4.21: Λειτουργία δημιουργίας πλέγματος στον όγκο του μοντέλου.

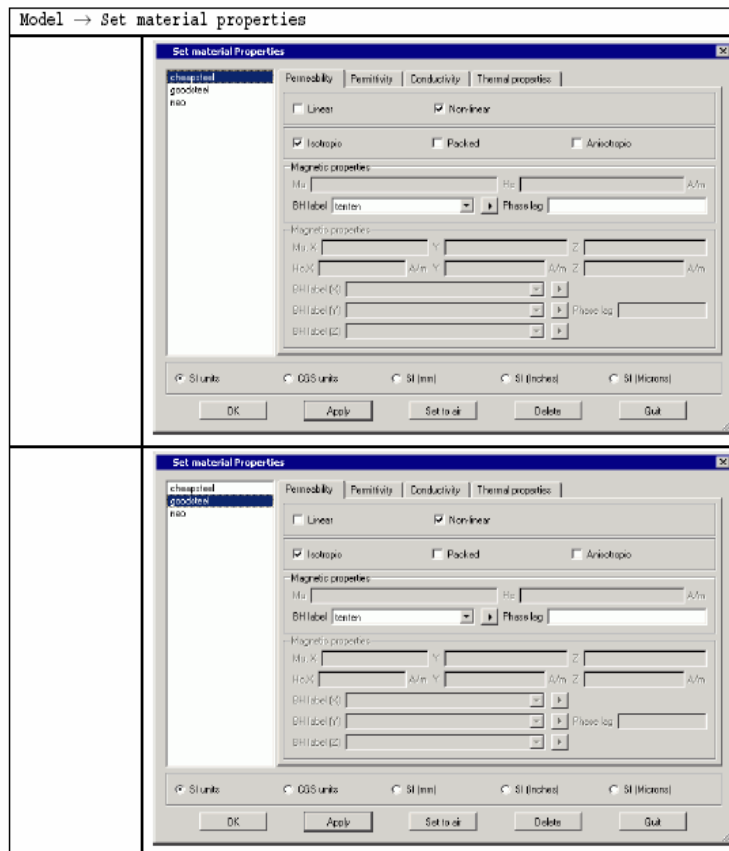
Το πλέγμα ενός όγκου είναι πάνω από 250,000 στοιχεία και πάνω από 43,500 κόμβους - ο ακριβής αριθμός θα εξαρτηθεί από το computer hardware του χρήστη. Κάθε σώμα γίνεται εμφανές, όταν ολοκληρώνεται η δημιουργία του πλέγματος [25].

4.13 Προετοιμάζοντας το μοντέλο για την ανάλυση

Το μοντέλο είναι τώρα έτοιμο ν' αναλυθεί. Πρώτα καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες με τη φυσική τους σημασία, οι πραγματικές ιδιότητες και ο προσανατολισμός του μοντέλου στο πεδίο.

Ορίζοντας τις ιδιότητες του υλικού

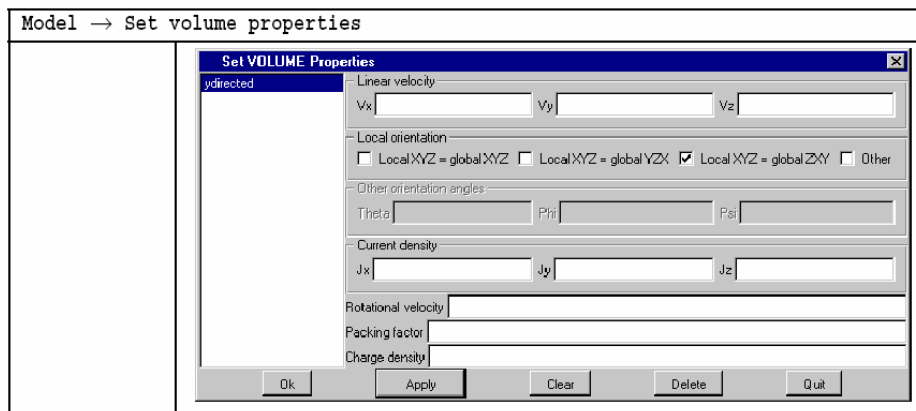
Οι ιδιότητες του υλικού προσδιορίζονται με τον ίδιο τρόπο που προσδιορίζονται οι συνοριακές συνθήκες. Στην ανάλυση του συγκεκριμένου παραδείγματος θα δοθούν τα ίδια χαρακτηριστικά και για τους δύο κυλίνδρους. Θα καθορισθεί η επιτρεπτότητα των υλικών. Τα υλικά αντιμετωπίζονται ως ισοτροπικά. Σε κάθε υλικό αποδίδεται μία ονομασία όταν ορίζονται οι ιδιότητες του σώματος (Cell properties).



Σχήμα 4.22: Λειτουργία καθορισμού των ιδιοτήτων του υλικού.

Ορίζοντας τις ιδιότητες του όγκου

Επόμενη κίνηση είναι να προσδιοριστεί η κατεύθυνση του πεδίου.



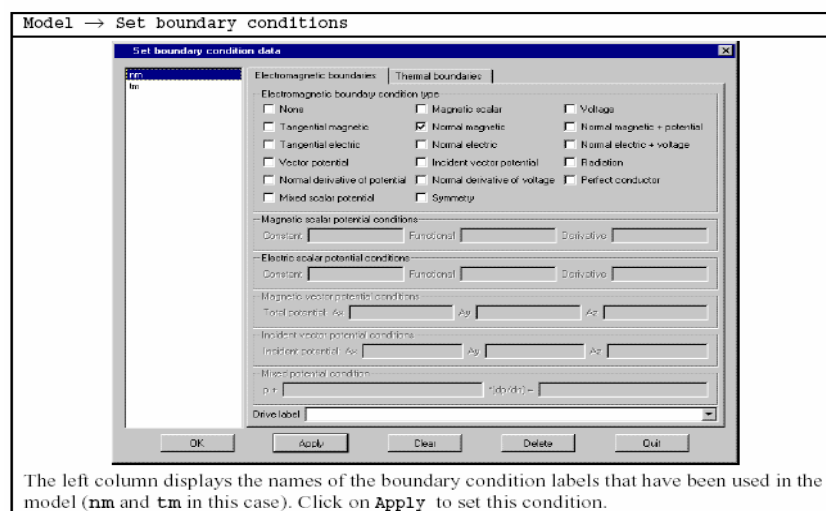
Σχήμα 4.23: Λειτουργία καθορισμού των ιδιοτήτων του όγκου.

Το παραπάνω ισοδυναμεί με την εισαγωγή **Theta=90, Phi=90, Psi=180**.

Τα στοιχεία που εισάγουμε γίνονται δεκτά πατώντας **Ok**.

Ορίζοντας τις συνοριακές συνθήκες

Η τελευταία ενέργεια πριν την εισαγωγή δεδομένων για την ανάλυση είναι να προσδιοριστούν οι συνοριακές συνθήκες.



The left column displays the names of the boundary condition labels that have been used in the model (**nm** and **tm** in this case). Click on **Apply** to set this condition.

Σχήμα 4.24: Λειτουργία προσδιορισμού των συνοριακών συνθηκών.

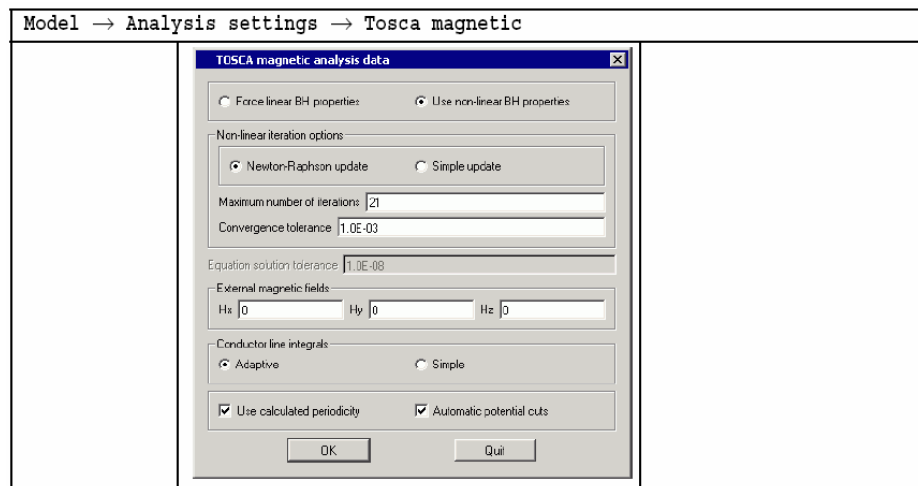
Δημιουργώντας τη βάση δεδομένων της ανάλυσης

Για την ανάλυση της βάσης δεδομένων ακολουθούμε δύο στάδια. Αρχικά, ο χρήστης θέτει τον τύπο του προγράμματος ανάλυσης που θα χρησιμοποιήσει προκειμένου να

επιλυθούν οι εξισώσεις του ηλεκτρικού πεδίου. Το δεύτερο στάδιο είναι η δημιουργία της βάσης δεδομένων.

Ρυθμίσεις της ανάλυσης

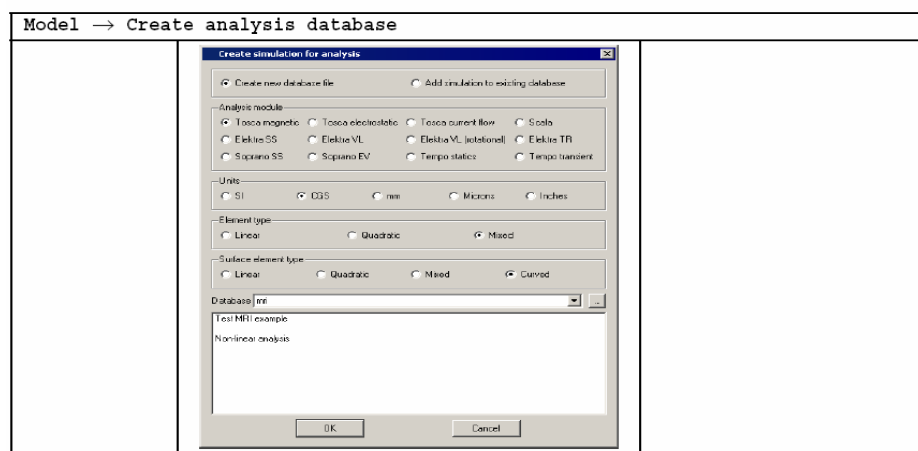
Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης.



Σχήμα 4.25: Λειτουργία καθορισμού του προγράμματος ανάλυσης του ηλεκτρικού πεδίου.

Ανάλυση βάσεως δεδομένων

Το τελικό στάδιο είναι να δημιουργηθεί η βάση δεδομένων. Τα αρχεία της βάσεως δημιουργούνται αυτόματα με extension *.op.3*. Στο παρακάτω χώρο, ο χρήστης μπορεί να εισάγει έναν τίτλο για να περιγράψει το περιεχόμενο της βάσης δεδομένων.



Σχήμα 4.26: Λειτουργία ανάλυσης της βάσεως δεδομένων.

Αποθήκευση του μοντέλου

Το μοντέλο αποθηκεύεται ως αρχείο .orc. Το μοντέλο μπορεί ν' αποθηκευτεί οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του από το menu:

File → Save as new model data

Είναι επίσης εφικτό ν' αποθηκευτεί το μοντέλο επίσης με το πλέγμα χρησιμοποιώντας τη λειτουργία: **Save model with mesh** που επίσης ανευρίσκεται από το **File** menu.

Τέλος κλείνουμε το μοντελοποιητή χρησιμοποιώντας το menu:

File → Exit

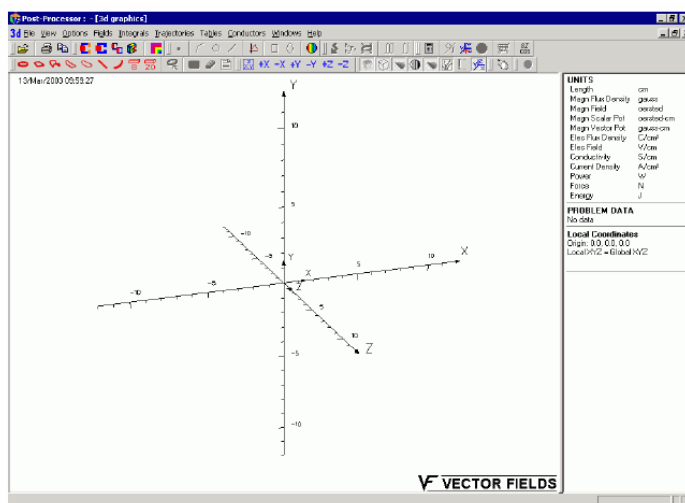
Πρόγραμμα της ανάλυσης

Για Microsoft Windows Platforms μετά την έξοδο από το μοντελοποιητή, ο χρήστης χρησιμοποιεί ξανά την κονσόλα του OPERA (Console window). Ο χρήστης επιλέγει τότε το πρόγραμμα της ανάλυσης, π.χ.: (TOSCA) και στην οθόνη φαίνεται η πρόοδος της ανάλυσης [25].

4.14 Μετ' επεξεργαστής

Για Microsoft Windows Platforms επιλέγεται από το **OPERA Console window**, ο μετ- επεξεργαστής του **OPERA-3d** menu.

Όταν ο επιλεγθεί ο μετ' επεξεργαστής εμφανίζεται στην οθόνη το παρακάτω σχήμα:

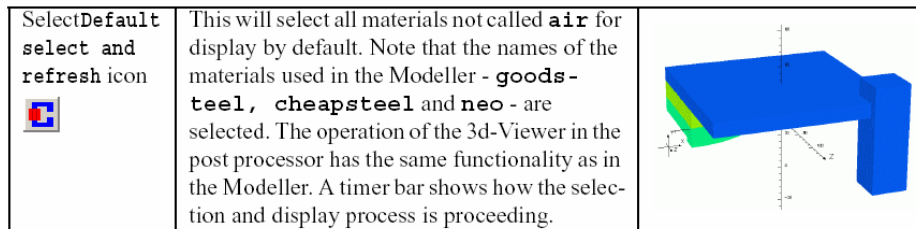


Σχήμα 4.27: Η οθόνη που εμφανίζεται αρχικά χρησιμοποιώντας Microsoft Windows.

Ο μετ' επεξεργαστής έχει παρόμοια στοιχεία στο μενού όπως και ο μοντελοποιητής.

Εμφάνιση του μοντέλου

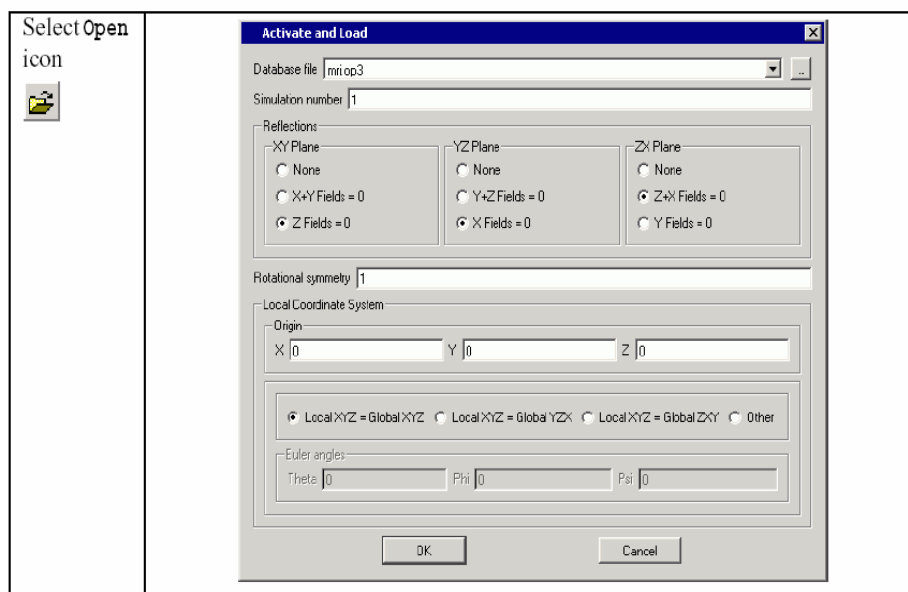
Επιλέγονται όλα τα υλικά που δεν έχουν την ονομασία **air**.



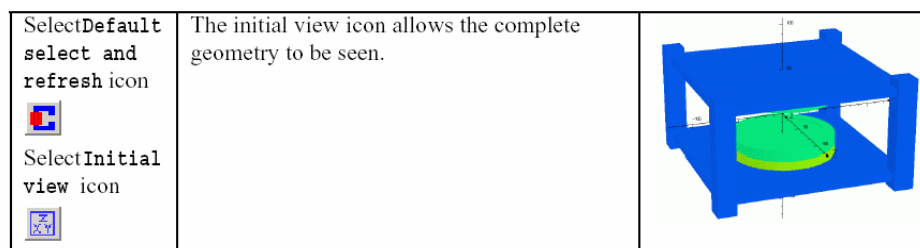
Σχήμα 4.28: Εικονίδιο επιλογής στον post-processor.

Δημιουργώντας αντίγραφο του μοντέλου εκμεταλλευόμενοι τη συμμετρία

Μόνο ένα μέρος του κενού χώρου επιλύεται από το πρόγραμμα TOSCA εξαιτίας της συμμετρίας. Ο μετ' επεξεργαστής επιτρέπει στον χρήστη ν' αναπαράγει το μοντέλο έτσι ώστε να γίνουν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί από τον μετ' επεξεργαστή, οι οποίοι και θα πρέπει να πληρούν τις συνοριακές συνθήκες που έχουν οριστεί στο μοντελοποιητή.



Σχήμα 4.29: Εικονίδιο φόρτωσης του αρχείου από το μοντελοποιητή και ενεργοποίησης του ως αρχείο της ανάλυσης βάσεως δεδομένων.



Σχήμα 4.30: Εικονίδιο επαναφοράς της εικόνας του μοντέλου στην αρχική.

Μετ' επεξεργαστής

Η εκκίνηση γίνεται από το OPERA-3d post processor. Αρχικά ενεργοποιείται και φορτώνεται το αρχείο με το γεωμετρικό μοντέλο είτε εισάγοντας το όνομα του αρχείου, είτε εντοπίζοντας το αρχείο με τη δυνατότητα επιλογής που εμφανίζεται όπως φαίνεται και στο εικονίδιο 4.29.

Εφαρμογή της προσομοίωσης TOSCA

Σε εφαρμογές συστημάτων με λειτουργικό σύστημα windows επιλέγεται από το Opera-3d menu: interactive solution.

Στη συνέχεια επιλέγεται ο επιλύτης TOSCA και το αρχείο που έχει αποθηκευτεί ως speaker.op3. Ακολούθως με την επιλογή Ok ξεκινά η ανάλυση και το υπολογιστικό κομμάτι του προγράμματος προχωρεί [25].

Κεφάλαιο 5

Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από σταγόνες ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος και του δίσκου ενός συνθετικού μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ

5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο ηλεκτροστατικός επιλύτης TOSCA του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA 3D για την ανάλυση ενός μοντέλου που προσομοιώνει το επίπεδο του περιβλήματος ενός μονωτήρα ανάρτησης από σιλικονούχο καουτσούκ πριν και μετά την εναπόθεση μιας σταγόνας ύδατος, όπως επίσης και την προσομοίωση του επιπέδου του δίσκου του μονωτήρα με εφαρμογή των ίδιων συνθηκών. Το μοντέλο προσομοιάζει σ' έναν επίπεδο πυκνωτή. Το μοντέλο σχεδιάζεται με το μοντελοποιητή και αναλύεται με το πρόγραμμα TOSCA πριν να εξεταστούν τ' αποτελέσματα με το μετ' επεξεργαστή.

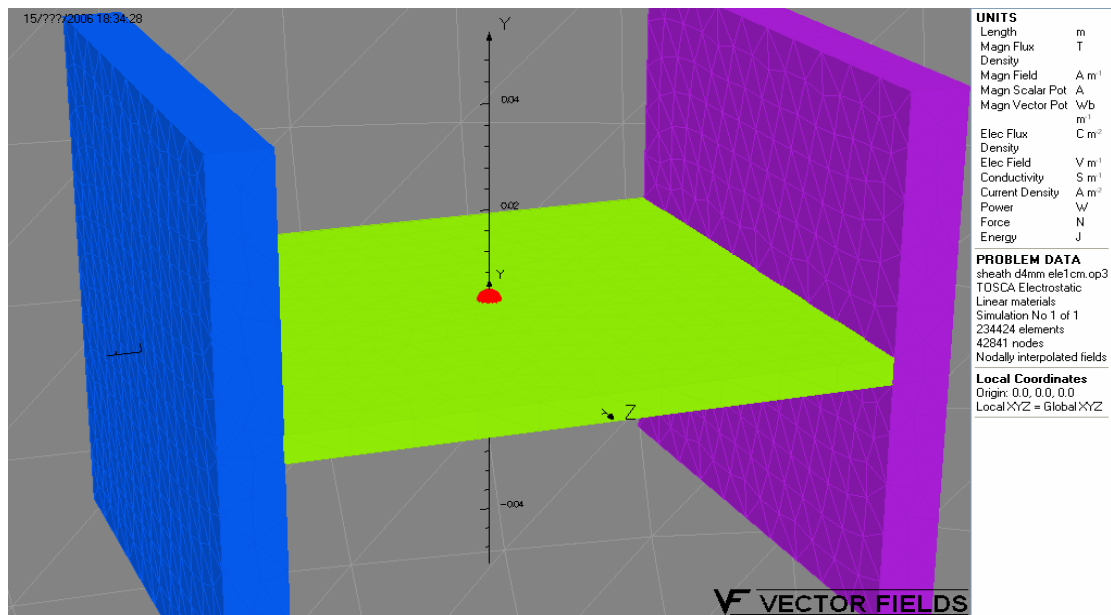
Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του γεωμετρικού μοντέλου και του περιβάλλοντος αέρος. Εφαρμόζεται τάση στα ηλεκτρόδια μεταξύ των οποίων υπάρχει το μέρος του μονωτήρα που εξετάζουμε και μετά την εφαρμογή της φόρτισης δημιουργείται η βάση δεδομένων η οποία επιλύεται στη συνέχεια από το πρόγραμμα.

Στη δεύτερη φάση το μοντέλο φορτώνεται στο μετ' επεξεργαστή και παρουσιάζονται τ' αποτελέσματα υπολογισμού της πεδιακής έντασης, ενώ λαμβάνονται και διαγράμματα ισοδυναμικών γραμμών και γραμμών ηλεκτρικού πεδίου.

5.2 Προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος

Προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή του περιβλήματος ενός μονωτήρα, υποτίθενται δύο ηλεκτρόδια μαζί μ' ένα απλό φύλλο από SiR. Το μέγεθος του φύλλου από SiR είναι $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ με πάχος 0.5 cm . Η διηλεκτρική σταθερά του υλικού από SiR που χρησιμοποιείται και στους υπολογισμούς είναι 4.3. Μία σταγόνα ύδατος σχήματος ημισφαιρίου υποτίθεται ότι βρίσκεται στο ενδιάμεσο του διαστήματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Η διάμετρος της σταγόνας ύδατος είναι 4 mm και το ύψος της είναι 2 mm . Η διηλεκτρική σταθερά της σταγόνας ύδατος είναι 80 και η αγωγιμότητα της θεωρείται μηδενική.

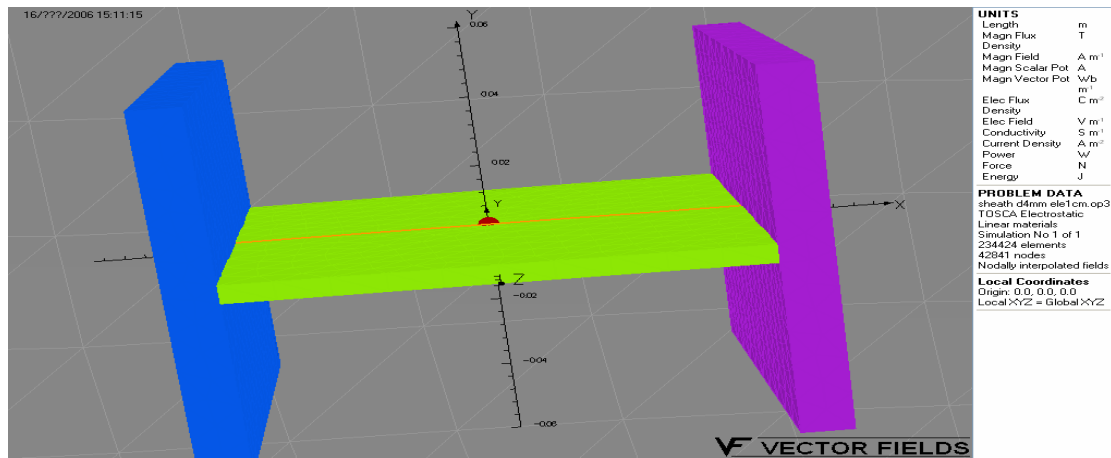
Τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε απόσταση 10 cm το ένα από το άλλο. Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς και οι διαστάσεις του μονωτικού φύλλου και της σταγόνας έχουν ληφθεί ίδιες με εκείνες του μοντέλου που αναφέρεται στην παράγραφο 2.3.1 στο σχήμα 2.10 της παρούσας εργασίας [32]. Με μια σειρά από λειτουργίες σχηματίζεται η γεωμετρία, δηλαδή το απαιτούμενο σχήμα του μοντέλου που φαίνεται στο σχήμα 5.1 και στη συνέχεια προστίθεται το μοντέλο σε μια περιοχή αέρα που περικλείει τελικά το μοντέλο.



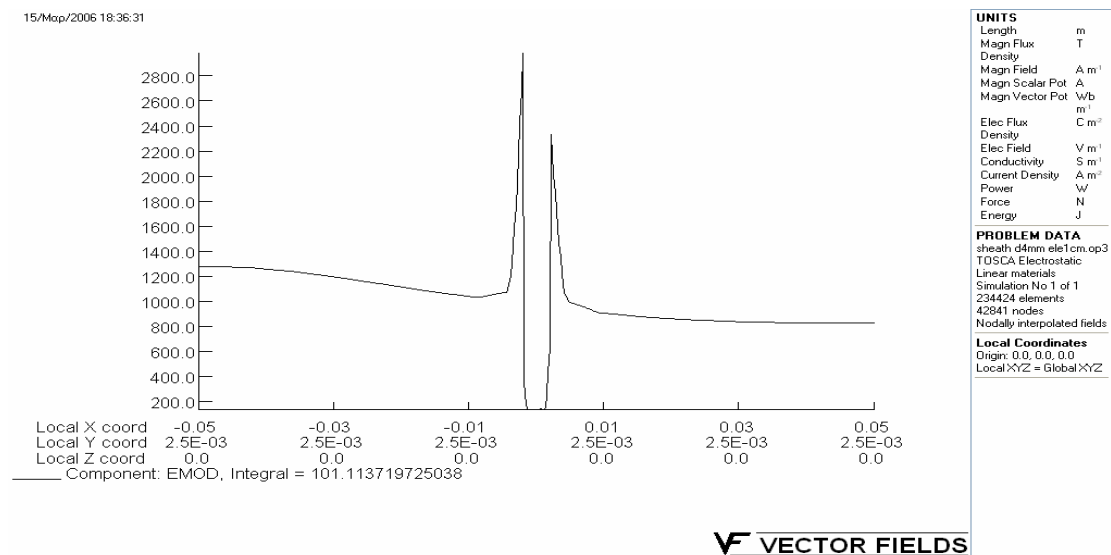
Σχήμα 5.1: Γεωμετρία του μοντέλου προσομοίωσης της περιοχής του περιβλήματος του μονωτήρα με μία σταγόνα ύδατος όπου οι διαστάσεις ηλεκτροδίων είναι $xx'=0.01$, $yy'=0.1$, $zz'=0.1\text{m}$

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το μοντέλο των επίπεδων ηλεκτροδίων με το οποίο προσομοιώνεται το επίπεδο του περιβλήματος του μονωτήρα. Προσδιορίζονται οι συνοριακές συνθήκες επάνω στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ως εξής: στο αριστερό ηλεκτρόδιο έχει εφαρμοστεί δυναμικό τάσεως 100V, ενώ το δεξιό ηλεκτρόδιο είναι γειωμένο. Ο μέσος όρος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι $100/10=10$ V/cm. Οι διευθύνσεις x, y, z προσδιορίζονται όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1.

Στο σχήμα 5.2 σχεδιάζεται η γραμμή κατά μήκος της οποίας θα υπολογιστεί από το πρόγραμμα PC OPERA 3D η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.



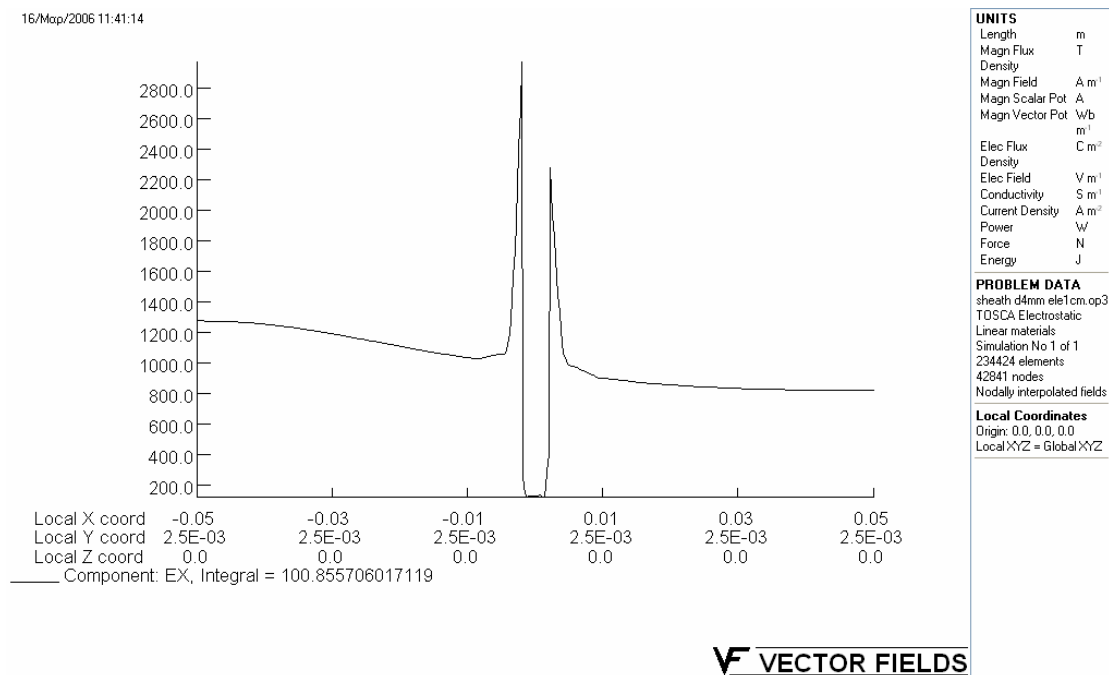
Σχήμα 5.2: Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου στην ευθεία ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0$ m)



Σχήμα 5.3: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$ m, $y=0.0025$ m, $z=0$ m) επάνω στην επιφάνεια του μονωτικού φύλλου και δια μέσου της σταγόνας ύδατος.

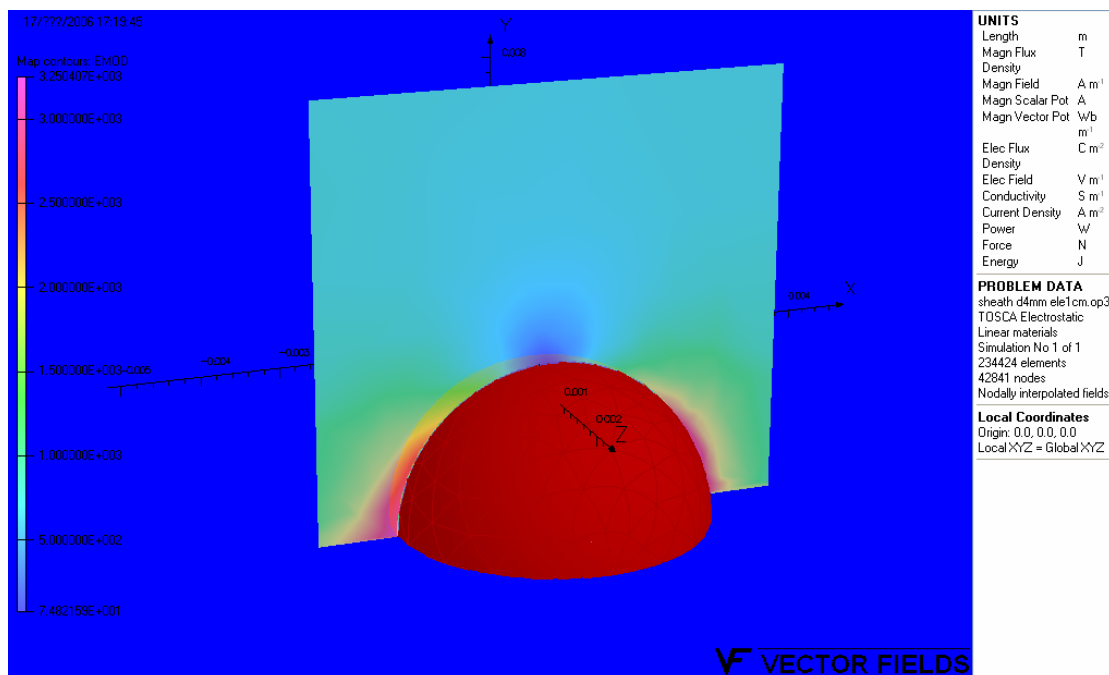
Παρατηρούμε από το σχήμα 5.3 ότι η πεδιακή ένταση εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της στο σημείο ($x=-0.002$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) δηλαδή στη συμβολή των επιφανειών του μονωτικού φύλλου, της σταγόνας ύδατος και του αέρα και σε θέση επί της σταγόνας που είναι από την πλευρά του φορτισμένου ηλεκτροδίου. Από το πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $E_{\max}=2983\text{ V/m}$ στη θέση $x=-0.002$, $y=0.0025$, $z=0\text{mm}$.

Στη συνέχεια αναζητούμε τη συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που συνεισφέρει περισσότερο στη μέγιστη τιμή και λαμβάνουμε το παρακάτω γράφημα του σχήματος 5.4. Στο σχήμα 5.4 δίνεται η κατά τη διεύθυνση x συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που είναι η κυρίαρχη παράμετρος, μεγαλύτερη και από τις συνιστώσες E_y , E_z και η τιμή της υπολογίζεται στη θέση $x=-0.002$, $y=0.0025$, $z=0\text{mm}$, $E_{x_{\max}}=2974\text{ V/m}$.

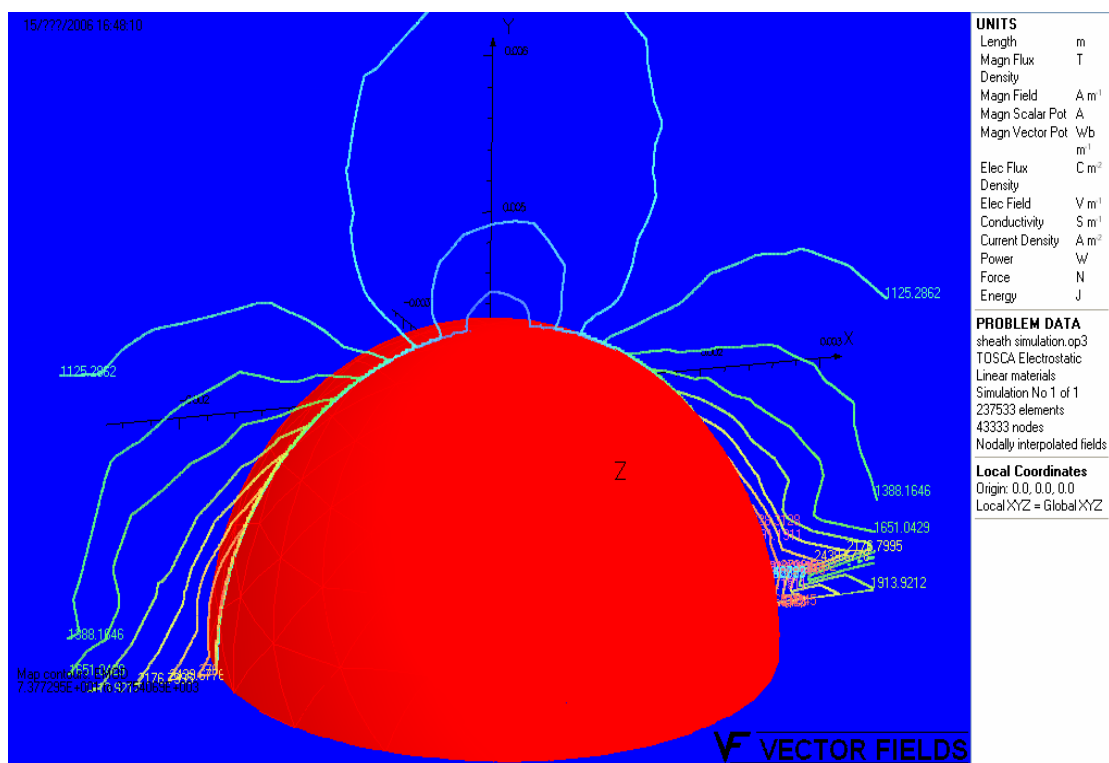


Σχήμα 5.4: Γράφημα της κυρίαρχης συνιστώσας E_x κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05\text{m}$, $y=0.0025\text{m}$, $z=0\text{m}$) επάνω στην επιφάνεια του μονωτικού φύλλου και δια μέσου της σταγόνας ύδατος.

Κατόπιν λαμβάνουμε στην επιφάνεια $0.003 < x < 0.003$, $-0.003 < y < 0.008$, $z=0\text{m}$, την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ζώνες, τις γραμμές ηλεκτρικού πεδίου και τις ισοδυναμικές γραμμές που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5, 5.6 και 5.7, 5.8 αντίστοιχα.

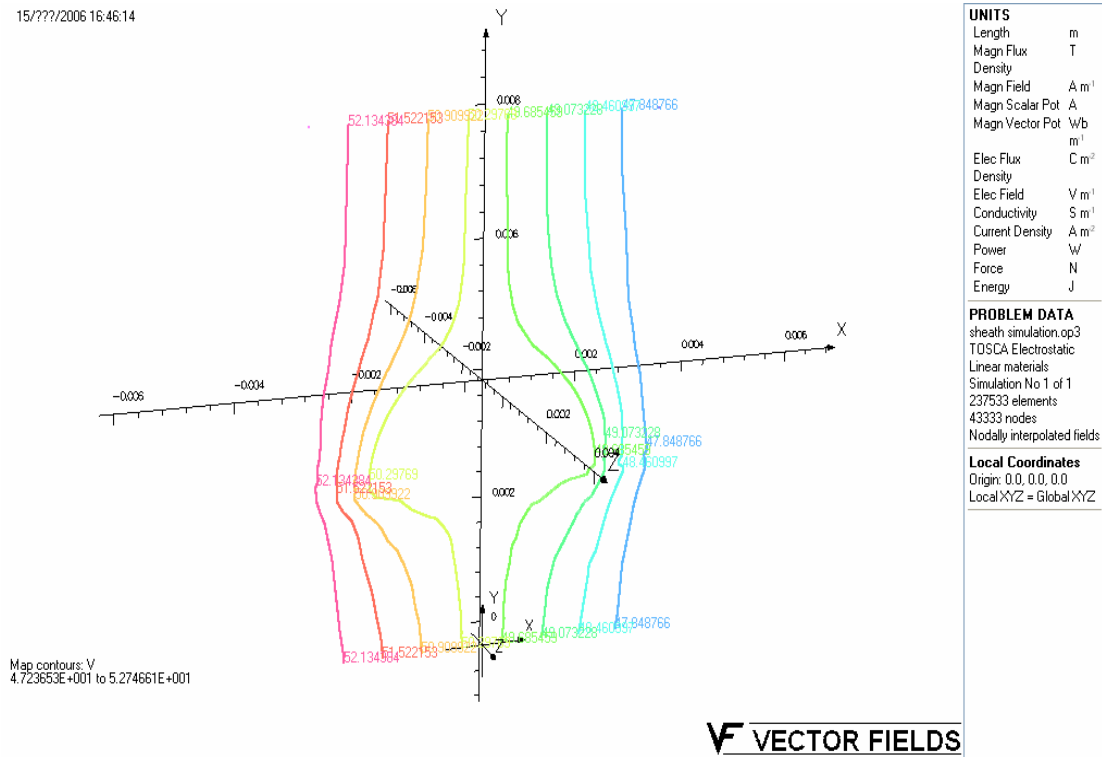


Σχήμα 5.5: Υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια: $-0.003 < x < 0.003$, $0 < y < 0.008$, $z=0\text{m}$

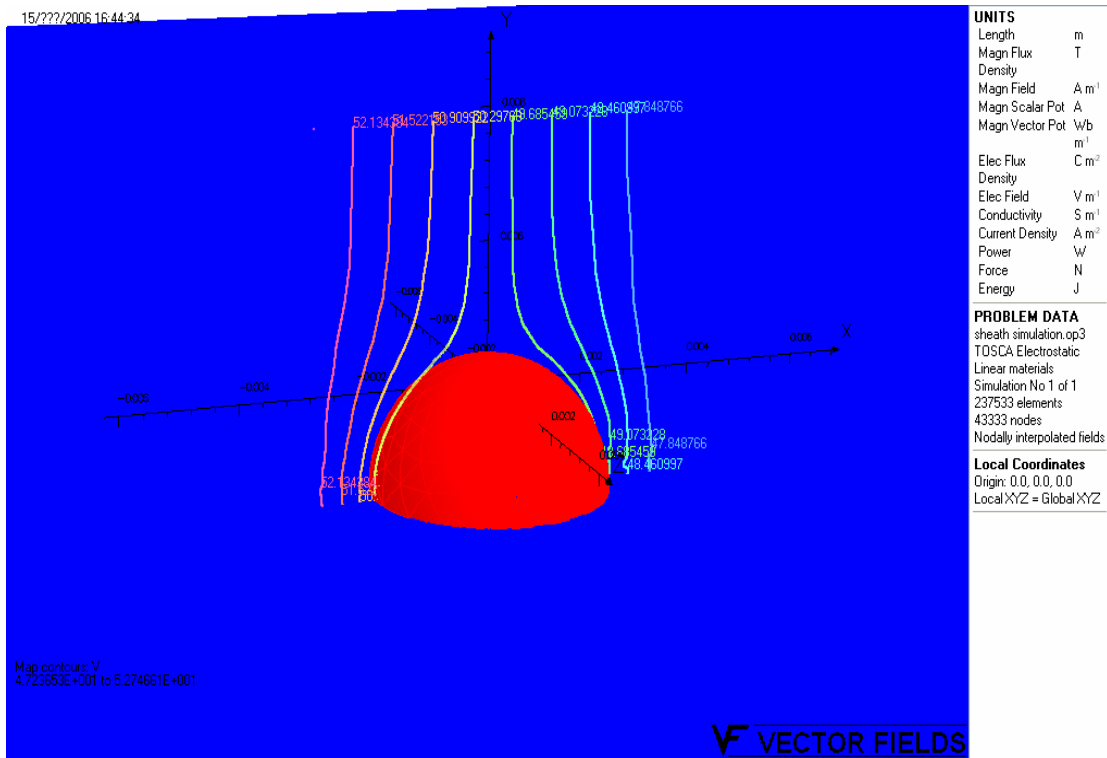


Σχήμα 5.6: Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια: $-0.003 < x < 0.003$, $0 < y < 0.008$, $z=0\text{m}$

15/???/2006 16:46:14



Σχήμα 5.7: Ισοδυναμικές γραμμές στην επιφάνεια: $-0.003 < x < 0.003$, $0 < y < 0.008$, $z=0\text{m}$



Σχήμα 5.8: Ισοδυναμικές γραμμές στην επιφάνεια: $-0.003 < x < 0.003$, $0 < y < 0.008$, $z=0\text{m}$

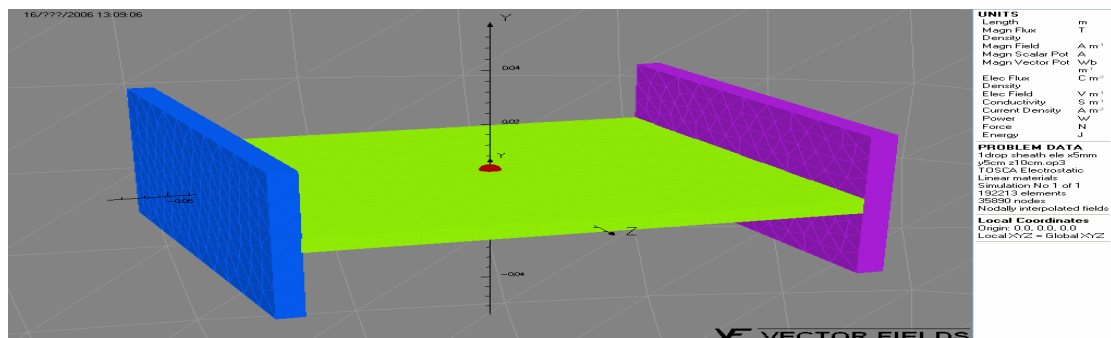
Σύμφωνα με την εργασία του W.Que [32], για μία σταγόνα ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με εφαρμογή δυναμικού τιμής 100 V, είναι $E_{\max} = 3290 \text{ V/m}$, στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Στην παρούσα εργασία με εφαρμογή δυναμικού τιμής 100 V υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της έντασης $E_{\max} = 2983 \text{ V/m}$, και πάλι στη διεπιφάνεια μεταξύ της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Επιβεβαιώνεται ακόμη στην παρούσα εργασία, όπως και στην εργασία του W. Que, ότι η x διάσταση (κατά τους άξονες του μοντέλου στο πρόγραμμα OPERA 3D) του ανύσματος της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι η κυρίαρχη παράμετρος. Παρατηρείται επομένως απόκλιση της τάξεως:

$$\frac{3290 \text{ V/m} - 2983 \text{ V/m}}{3290 \text{ V/m}} * 100\% = 9,3\%$$

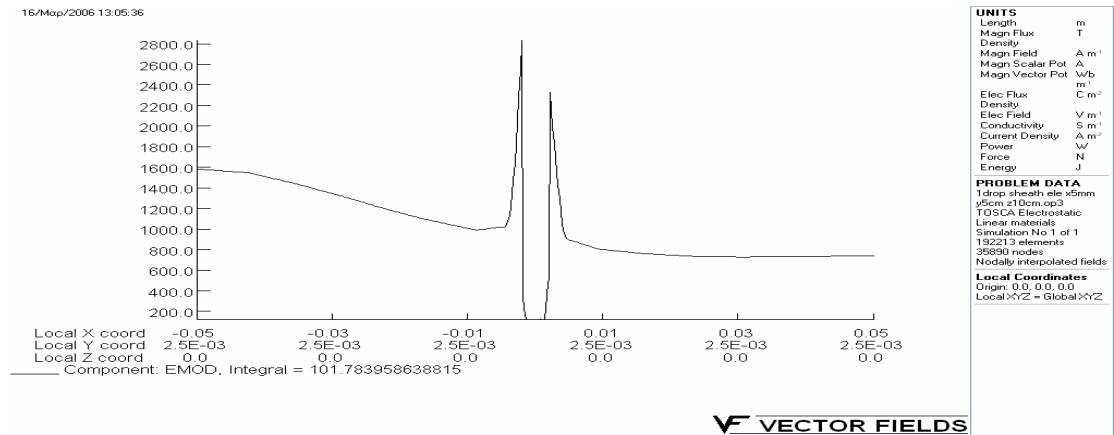
5.2.1 Επίδραση των διαστάσεων των ηλεκτροδίων στη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Κατά την εξαγωγή των γραφημάτων με το πρόγραμμα προσομοίωσης OPERA 3D παρατηρήθηκε ότι η υπολογιζόμενη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη θέση $x = -0.002$, $y = 0.0025$, $z = 0 \text{ m}$ εξαρτάται από τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων μεταξύ των οποίων τοποθετείται το μονωτικό φύλλο και εφαρμόζεται η διαφορά δυναμικού.

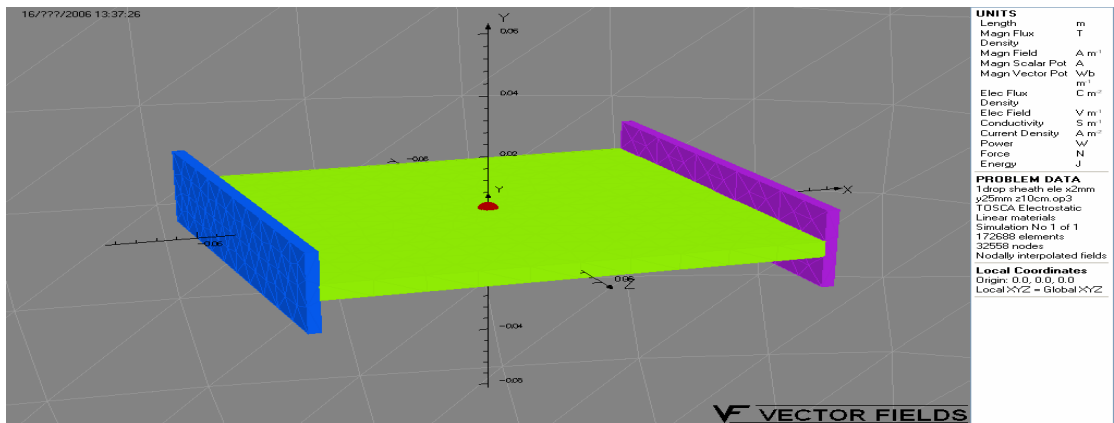
Συγκεκριμένα στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές μέγιστης πεδιακής έντασης που ελήφθησαν από τα μοντέλα των σχημάτων 5.1, 5.9 και 5.11.



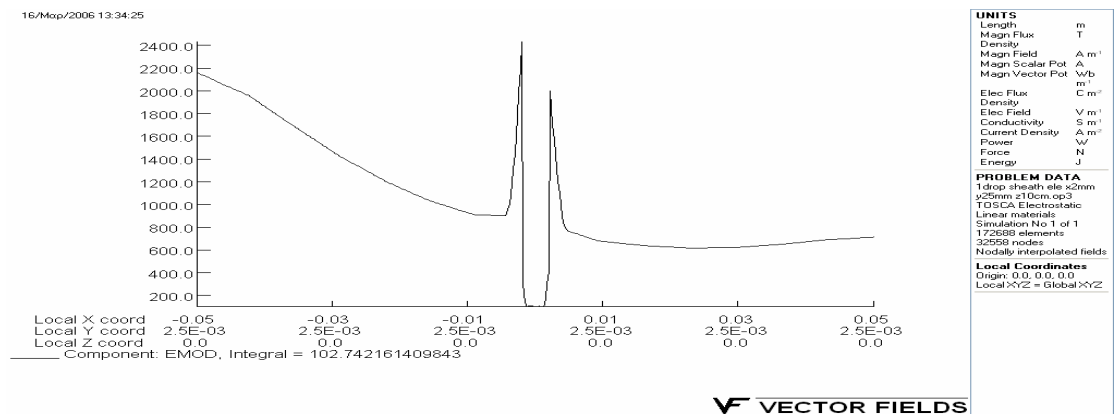
Σχήμα 5.9: Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου στην ευθεία ($-0.05 < x < 0.05 \text{ m}$, $y = 0.0025 \text{ m}$, $z = 0 \text{ m}$) όπου οι διαστάσεις ηλεκτροδίων είναι $xx' = 0.005$, $yy' = 0.05$, $zz' = 0.1 \text{ m}$



Σχήμα 5.10: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y = 0.0025$, $z = 0$) του μοντέλου του σχήματος 5.9 ($x = -0.002$, $y = 0.0025$, $z = 0$ m) $E_{\max} = 2832$ V/m



Σχήμα 5.11: Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου στην ευθεία ($-0.05 < x < 0.05$, $y = 0.0025$, $z = 0$ m) όπου οι διαστάσεις ηλεκτροδίων είναι $xx' = 0.0025$, $yy' = 0.025$, $zz' = 0.1$ m



Σχήμα 5.12: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y = 0.0025$, $z = 0$ m) του μοντέλου του σχήματος 5.10 ($x = -0.002$, $y = 0.0025$, $z = 0$ m) $E_{\max} = 2432$ V/m

Πίνακας 5.1 Τιμές μέγιστης έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων

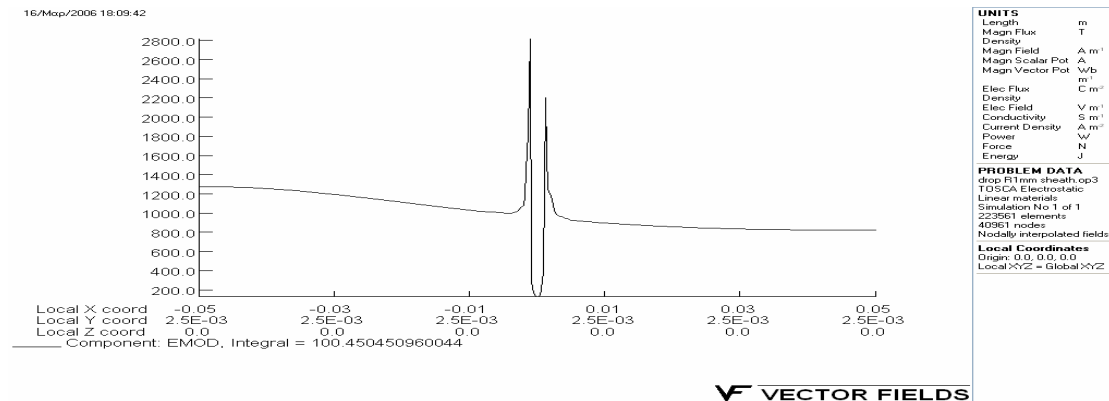
Διαστάσεις ηλεκτροδίων (m)	Μέγιστη τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου, $E_{\max}$ [V/m]
$xx'=0.01, yy'=0.1, zz'=0.1$	2983
$xx'=0.005, yy'=0.05, zz'=0.1$	2832
$xx'=0.0025, yy'=0.025, zz'=0.1$	2432

5.2.2 Επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στην αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

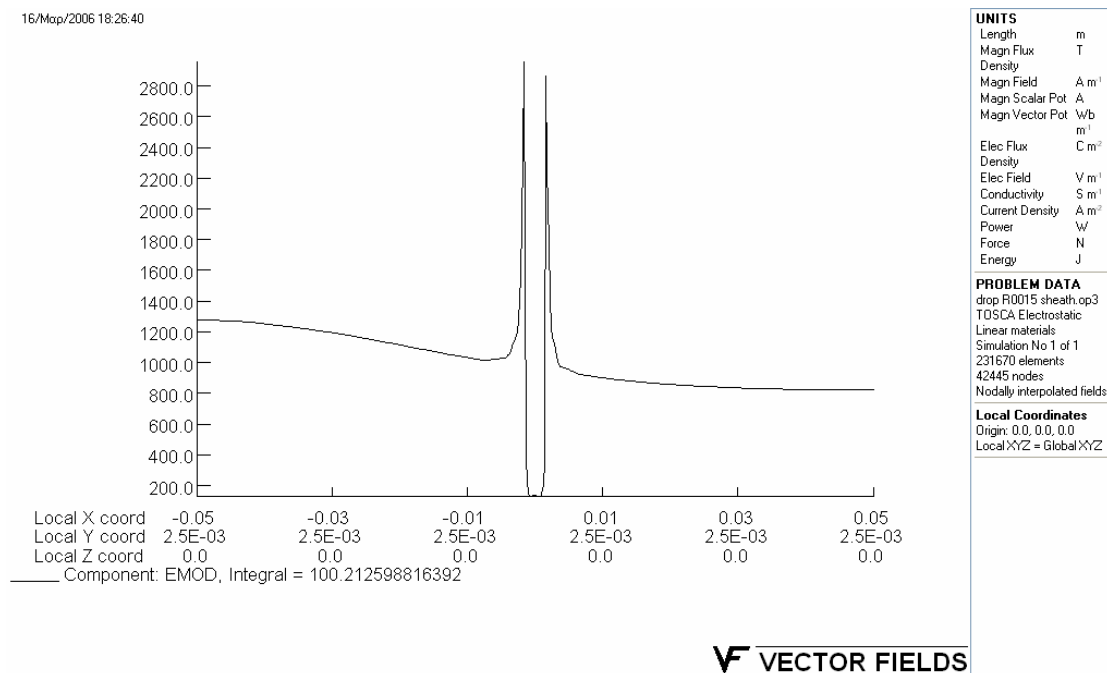
Μελετάται η επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στην αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του περιβλήματος. Οι διάμετροι των χαρακτηριστικών σταγόνων ύδατος σε αυτή τη μελέτη κυμαίνονται από 2 έως και 8 mm.

Στον πίνακα 5.2 συνοψίζονται τ' αποτελέσματα που ελήφθησαν από το πρόγραμμα OPERA 3D για διάφορες διαμέτρους σταγόνας ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος. Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις στην περιοχή του περιβλήματος του μονωτήρα είναι αυτό του σχήματος 5.1.

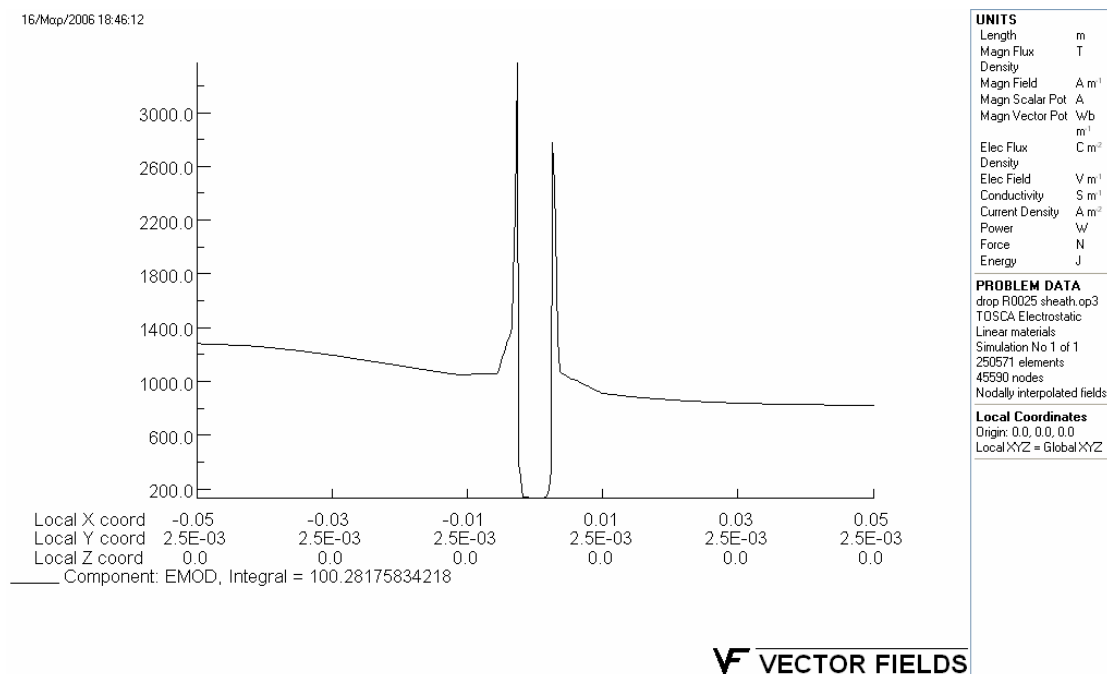
Στα σχήματα 5.13 έως και 5.18. δίνονται τ' αντίστοιχα γραφήματα κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που ελήφθησαν από το πρόγραμμα OPERA 3D για τις διάφορες διαμέτρους σταγόνας ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος του μονωτήρα.



Σχήμα 5.13: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0$ m) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.002$ m ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0$ m $E_{\max}=2816$ V/m)

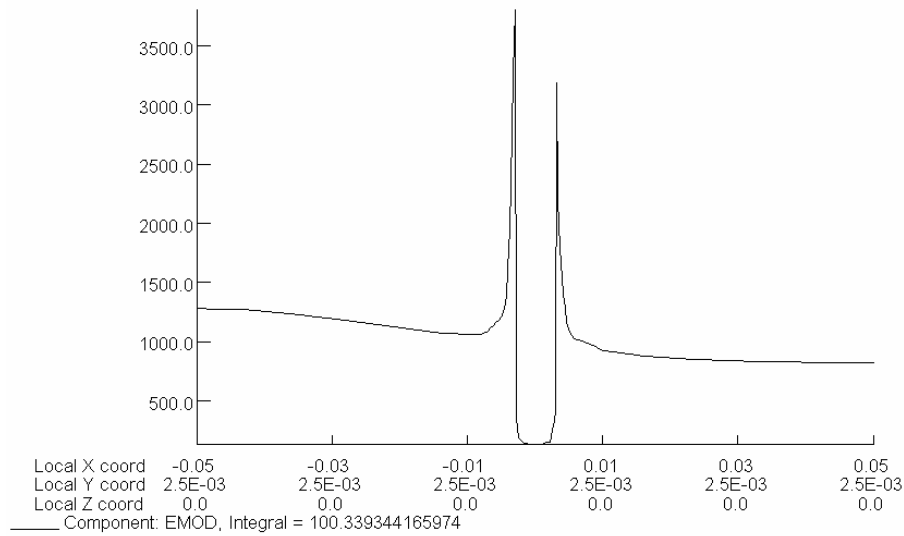


Σχήμα 5.14: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.003\text{m}$ ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=2957\text{ V/m}$)



Σχήμα 5.15: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.005\text{m}$ ($x=-0.0026$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=3371\text{ V/m}$)

16/Map/2006 17:07:17



UNITS	
Length	m
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A m ⁻¹
Magn Scalar Pot	A
Magn Vector Pot	Wb m ⁻¹
Elec Flux	C m ⁻²
Density	
Elec Field	V m ⁻¹
Conductivity	S m ⁻¹
Current Density	A m ⁻²
Power	W
Force	N
Energy	J

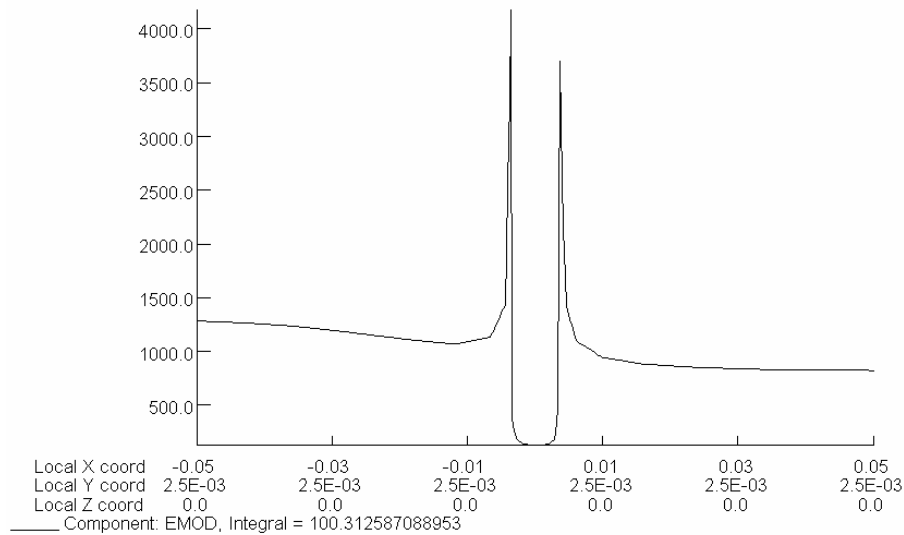
PROBLEM DATA
 1drop R3mm sheath.op3
 TOSCA Electrostatic
 Linear materials
 Simulation No 1 of 1
 23369 elements
 42954 nodes
 Nodally interpolated fields

Local Coordinates
 Origin: 0.0, 0.0, 0.0
 Local XYZ = Global XYZ

VECTOR FIELDS

Σχήμα 5.16: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.006\text{m}$ ($x=-0.003$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=3805\text{ V/m}$)

16/Map/2006 17:29:19



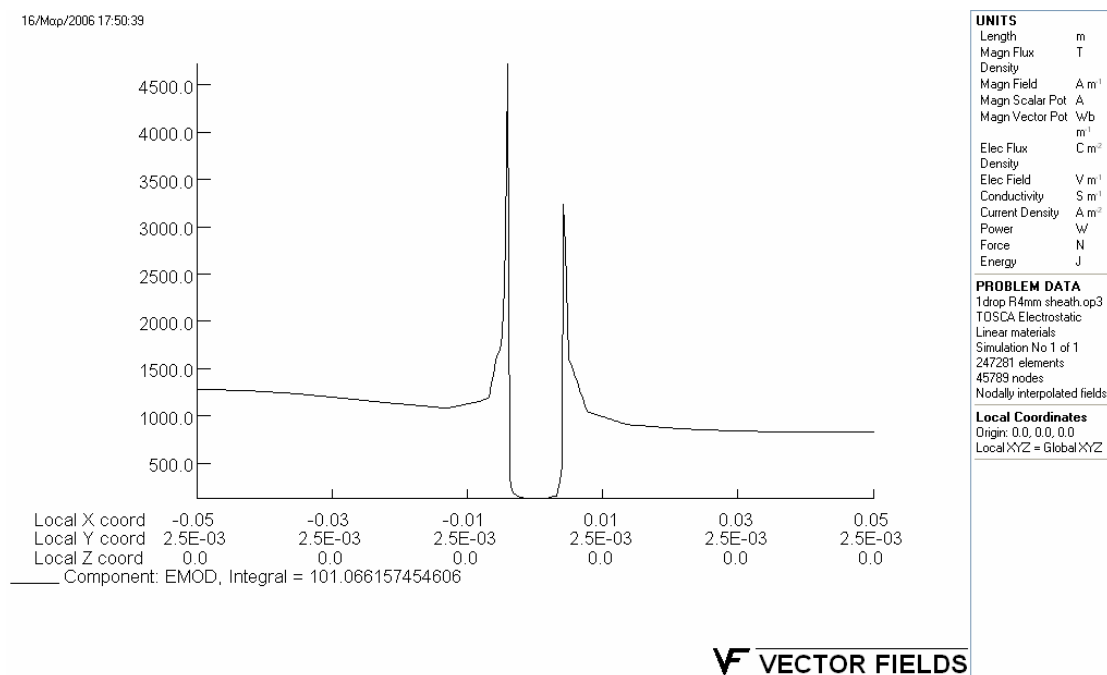
UNITS	
Length	m
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A m ⁻¹
Magn Scalar Pot	A
Magn Vector Pot	Wb m ⁻¹
Elec Flux	C m ⁻²
Density	
Elec Field	V m ⁻¹
Conductivity	S m ⁻¹
Current Density	A m ⁻²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA
 1drop R0035mm sheath.op3
 TOSCA Electrostatic
 Linear materials
 Simulation No 1 of 1
 233746 elements
 43224 nodes
 Nodally interpolated fields

Local Coordinates
 Origin: 0.0, 0.0, 0.0
 Local XYZ = Global XYZ

VECTOR FIELDS

Σχήμα 5.17: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.007\text{m}$ ($x=-0.0036$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=4177\text{ V/m}$)



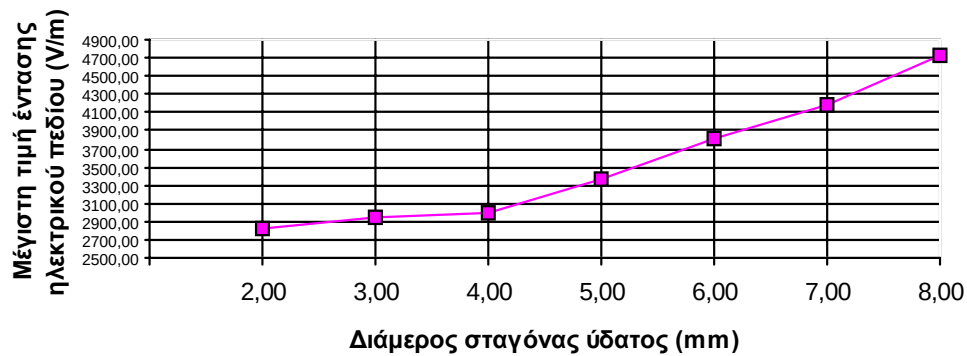
Σχήμα 5.18: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.008\text{m}$ ($x=-0.004$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=4723\text{ V/m}$)

Πίνακας 5.2: Τιμές μεγίστης έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με τη διάμετρο της σταγόνας ύδατος

α/α	Διάμετρος [m]	Συντεταγμένη x	$E_{\max}$ [V/m]
1	0.002	-0.001	2816
2	0.003	-0.0016	2957
3	0.004	-0.002	2983
4	0.005	-0.0026	3371
5	0.006	-0.003	3805
6	0.007	-0.0036	4177
7	0.008	-0.004	4723

Οι τιμές του πίνακα 5.2 της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με τη διάμετρο της σταγόνας ύδατος αποδίδονται στο γράφημα του σχήματος 5.19.

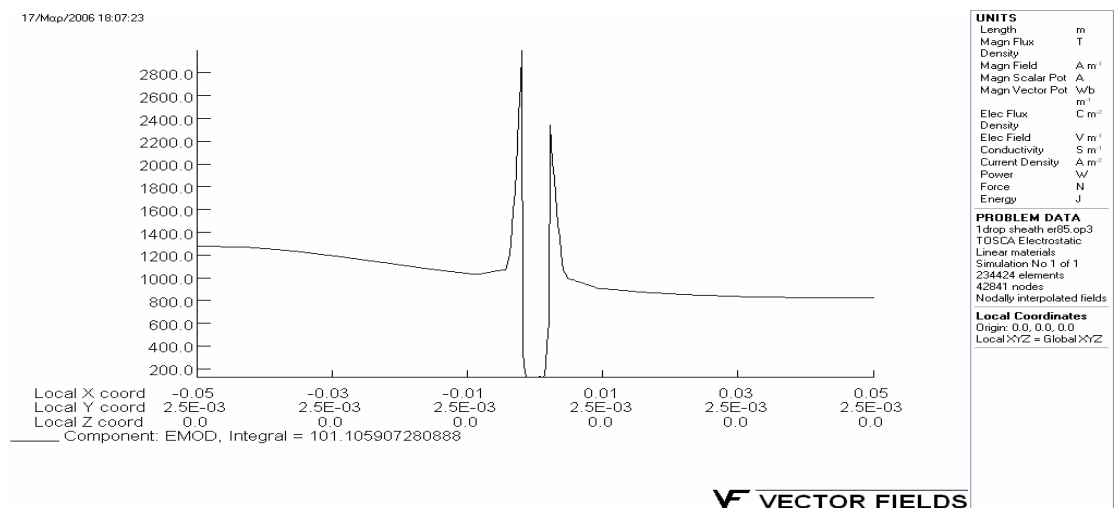
Επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στην αύξηση της μεγίστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου



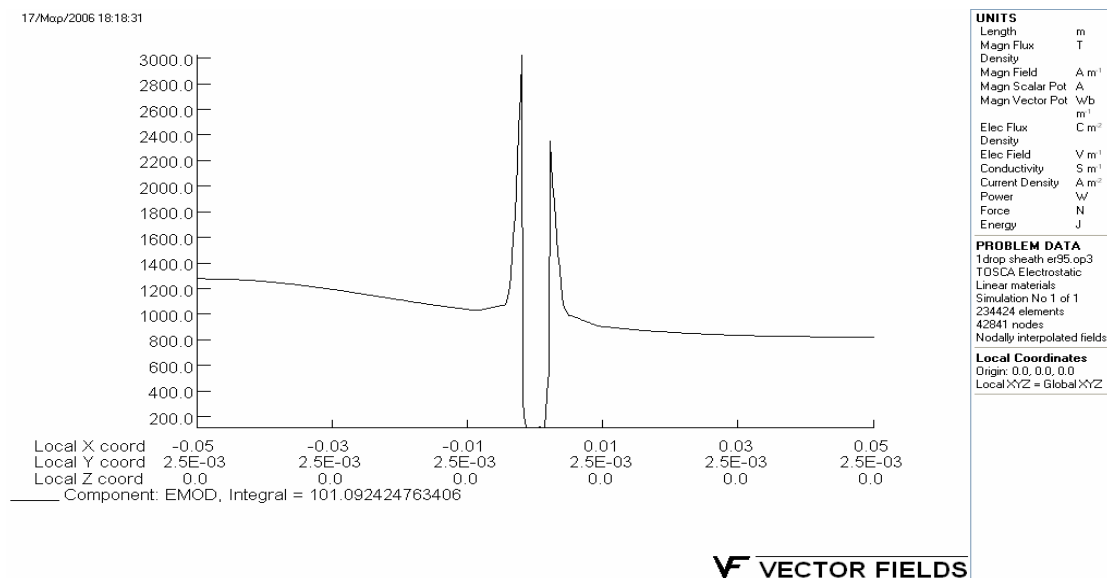
Σχήμα 5.19: Γράφημα της μεγίστης έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με τη διάμετρο της σταγόνας ύδατος

5.2.3 Επίδραση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας

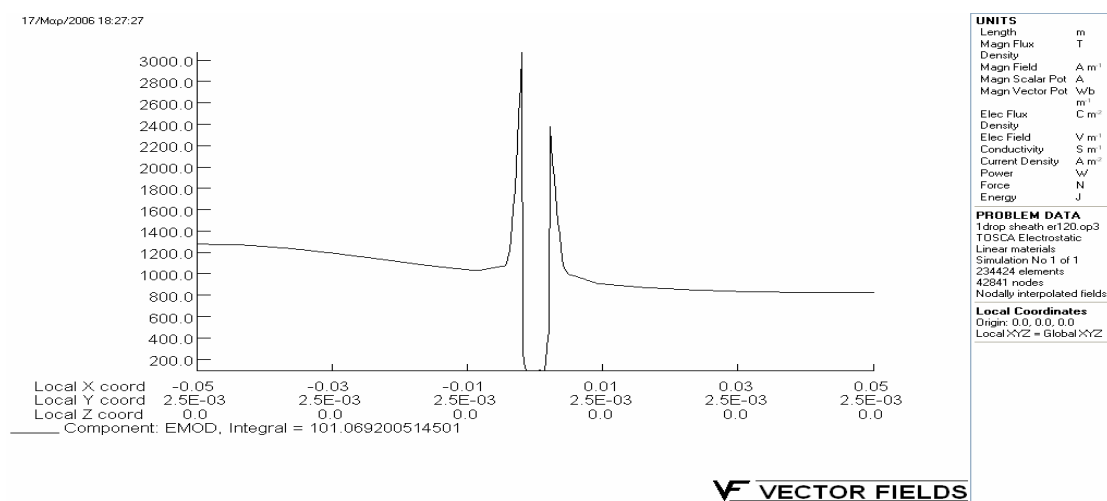
Η αγωγιμότητα των σταγόνων ύδατος επίσης επηρεάζει την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου. Εάν θεωρηθούν μαζί η διηλεκτρική σταθερά και η αγωγιμότητα της σταγόνας ύδατος, ο παράγοντας αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου επάνω στην επιφάνεια τροποποιείται. Μία σταγόνα ύδατος σε σχήμα ημισφαιρίου και διαμέτρου 4mm χρησιμοποιείται προκειμένου να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα της αγωγιμότητας της σταγόνας ύδατος. Η διηλεκτρική σταθερά αυξάνεται από 80 έως 160.



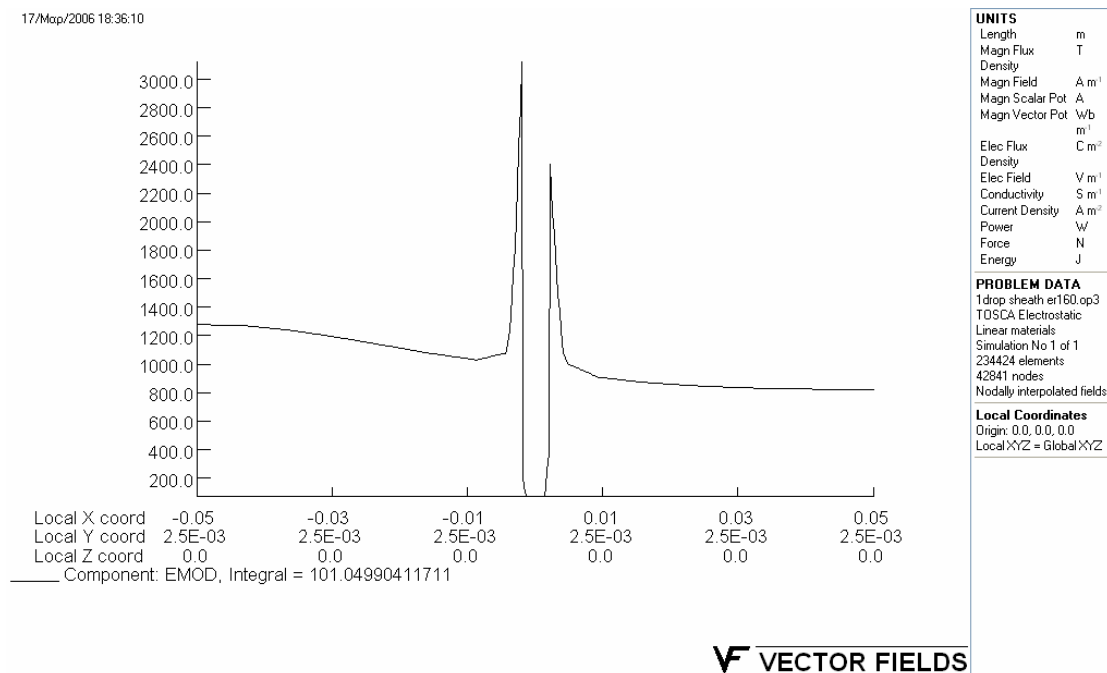
Σχήμα 5.20: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0m$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.004m$ και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r=85$ ($x=-0.002$, $y=0.0025$, $z=0m$ $E_{max}=2998$ V/m)



Σχήμα 5.21: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0m$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.004m$ και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r=95$ ($x=-0.002$, $y=0.0025$, $z=0m$ $E_{max}=3024$ V/m)



Σχήμα 5.22: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0m$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.004m$ και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r=120$ ($x=-0.002$, $y=0.0025$, $z=0m$ $E_{max}=3072$ V/m)



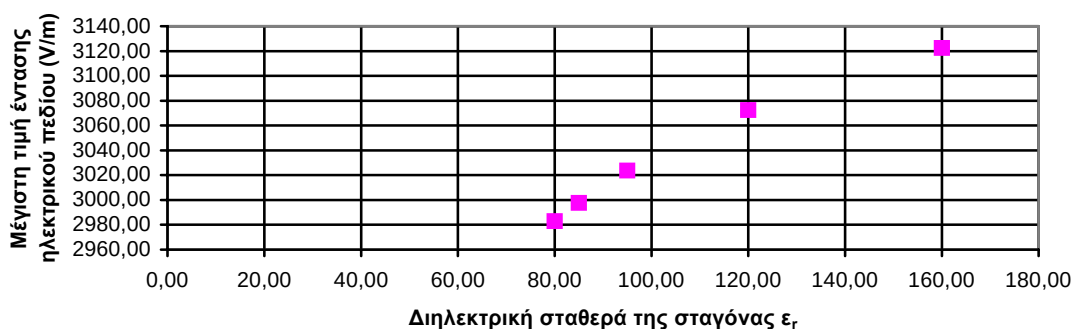
Σχήμα 5.23: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.004\text{m}$ και διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r=120$ ($x=-0.002$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=3123\text{ V/m}$)

Πίνακας 5.3

α/α	Διηλεκτρική σταθερά ϵ_r	% αύξηση ϵ_r από την 1 ^η μέτρηση	$E_{\max}$ [V/m]	% αύξηση $E_{\max}$ από την 1 ^η μέτρηση
1	80		2983	
2	85	6,25	2998	0,5
3	95	18,75	3024	1,4
4	120	50	3072	3,0
5	160	100	3122	4,7

Οι τιμές του πίνακα 5.3 της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με τη διηλεκτρική σταθερά της σταγόνας αποδίδονται στο σχήμα 5.24.

Επίδραση της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας στην αύξηση της μεγίστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

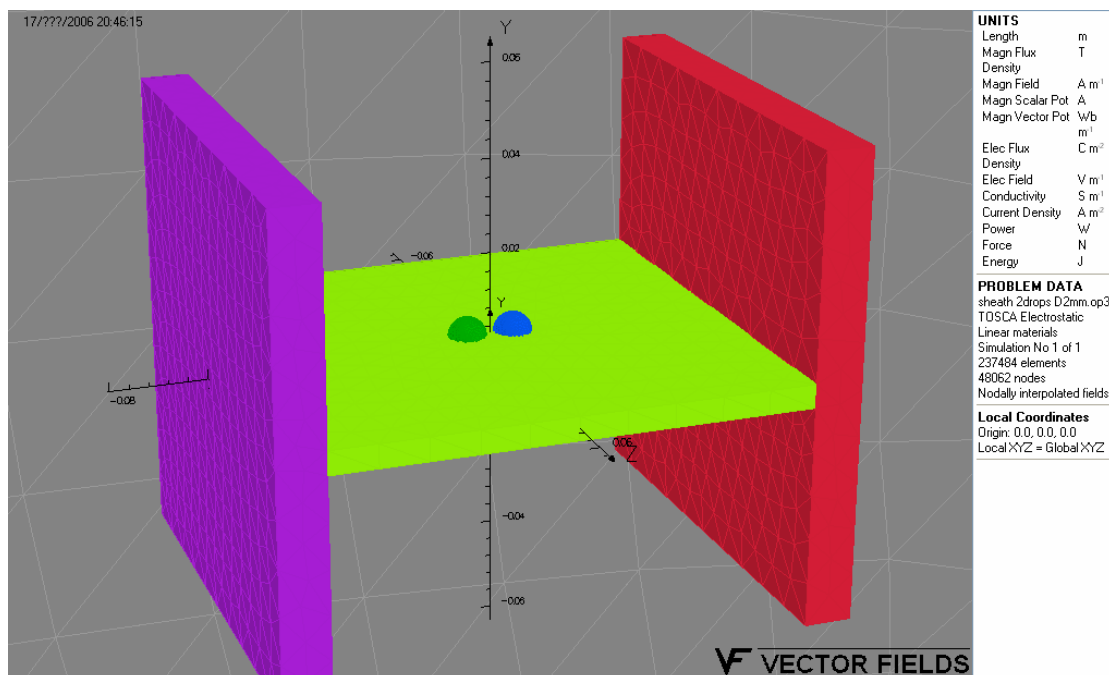


Σχήμα 5.24: Αύξηση της μεγίστης τιμής έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με την αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας

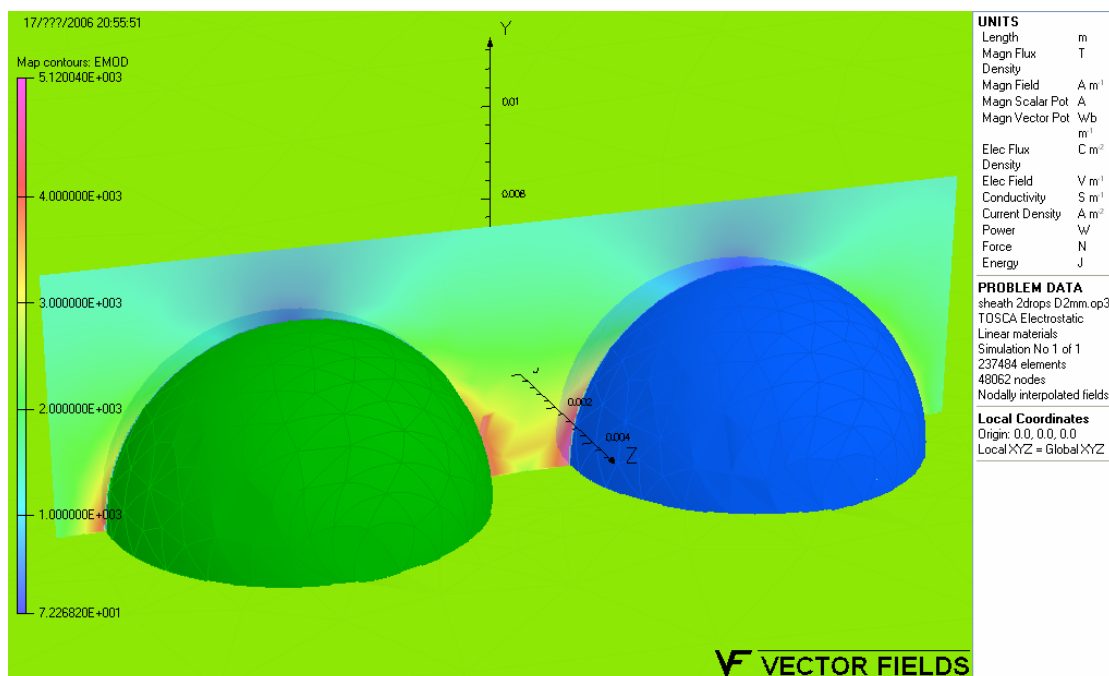
5.2.4 Το αποτέλεσμα της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος

Το ηλεκτρικό πεδίο παραμορφώνεται από την παρουσία των σταγόνων ύδατος στην επιφάνεια των μονωτήρων. Για σταγόνες ύδατος επάνω στην περιοχή του περιβλήματος, το αποτέλεσμα της ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου εξαιτίας των πολλαπλών σταγόνων ύδατος επίσης εξετάζεται με ένα ζεύγος σταγόνων ύδατος διαμέτρου 8mm και σχήματος ημισφαιρίου. Η απόσταση μεταξύ τους κυμαίνεται από 2mm σε 8 mm.

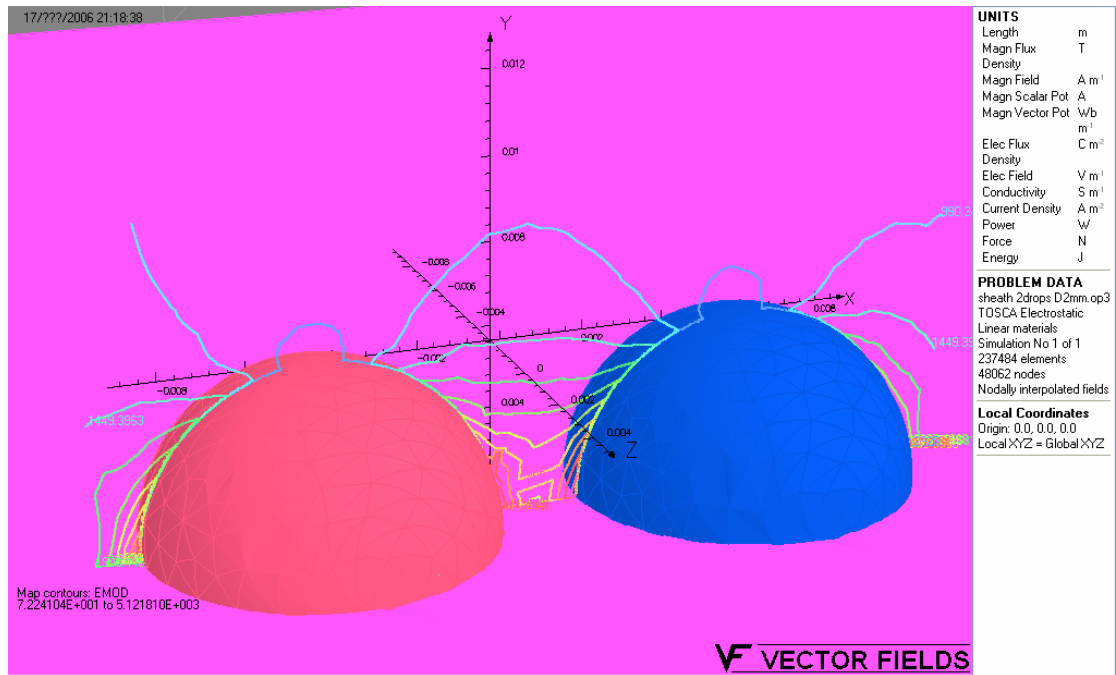
Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το μοντέλο των ηλεκτροδίων και του περιβλήματος μονωτήρα του σχήματος 5.1. Η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού από σιλικονούχο καουτσούκ θεωρείται ίση με 4,3 και των σταγόνων ύδατος ίση με 80. Η αγωγιμότητα των σταγόνων ύδατος θεωρείται μηδενική. Οι δύο σταγόνες ισαπέχουν από το μέσο του διαστήματος του μονωτικού υλικού από τα ηλεκτρόδια.



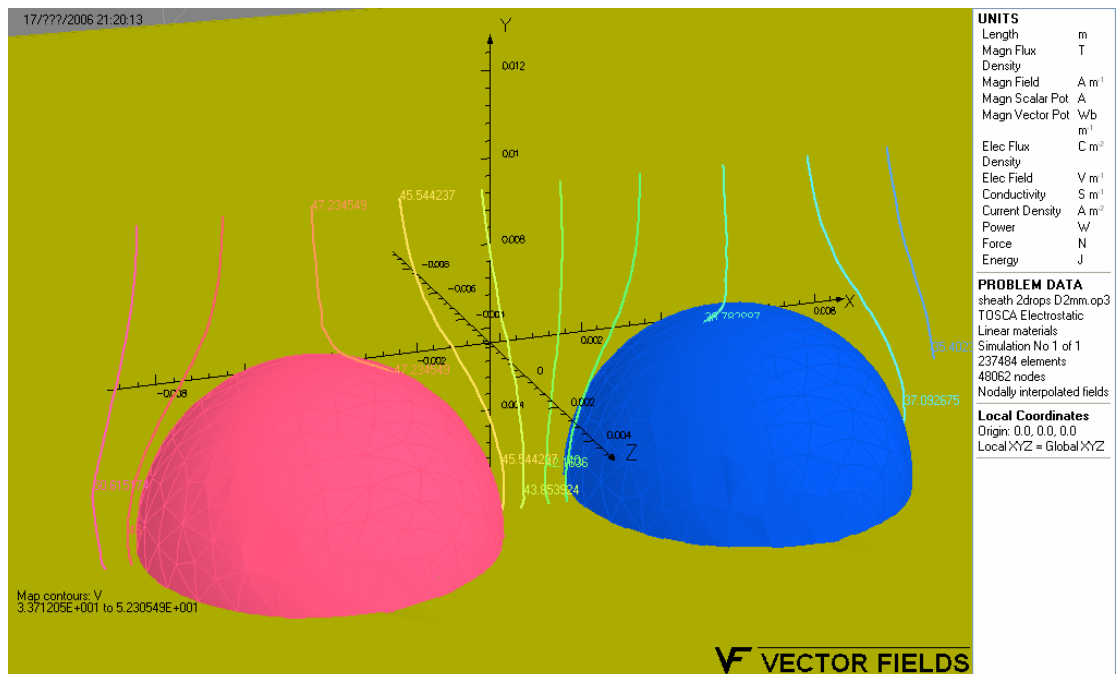
Σχήμα 5.25: Γεωμετρία του μοντέλου προσομοίωσης της περιοχής του περιβλήματος μονωτήρα όπως του σχήματος 5.1 αλλά με δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ που έχουν μεταξύ τους απόσταση $D=2\text{mm}$



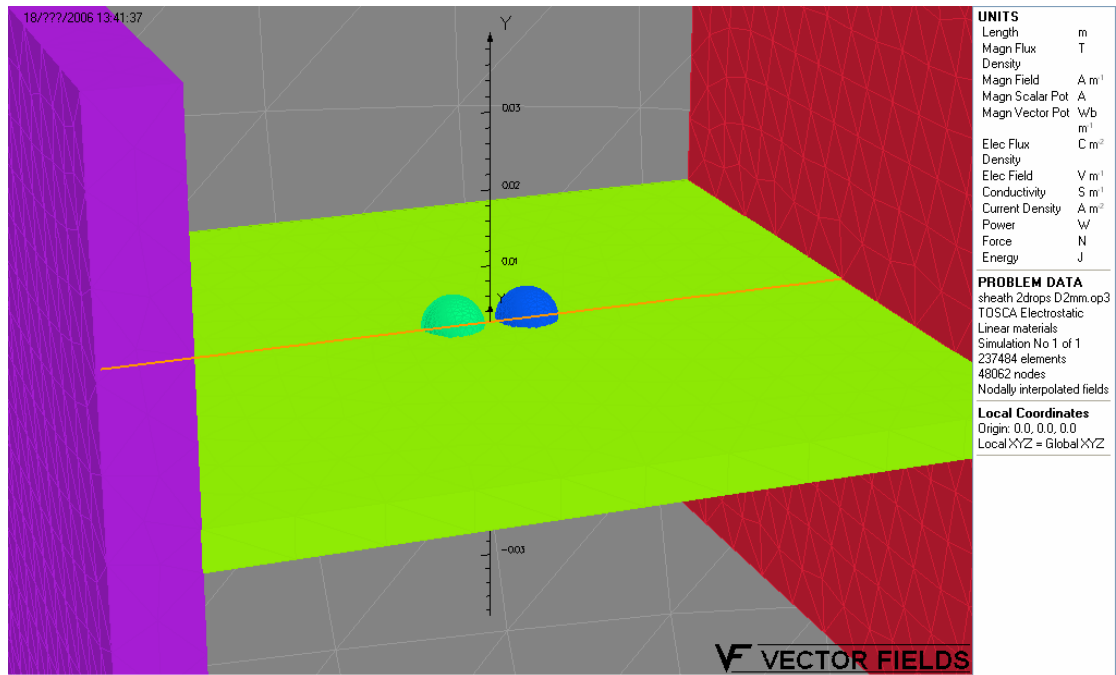
Σχήμα 5.26: Υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια - $0.01 < x < 0.01$, $-0.003 < y < 0.008$, $z=0\text{m}$ για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.002\text{m}$



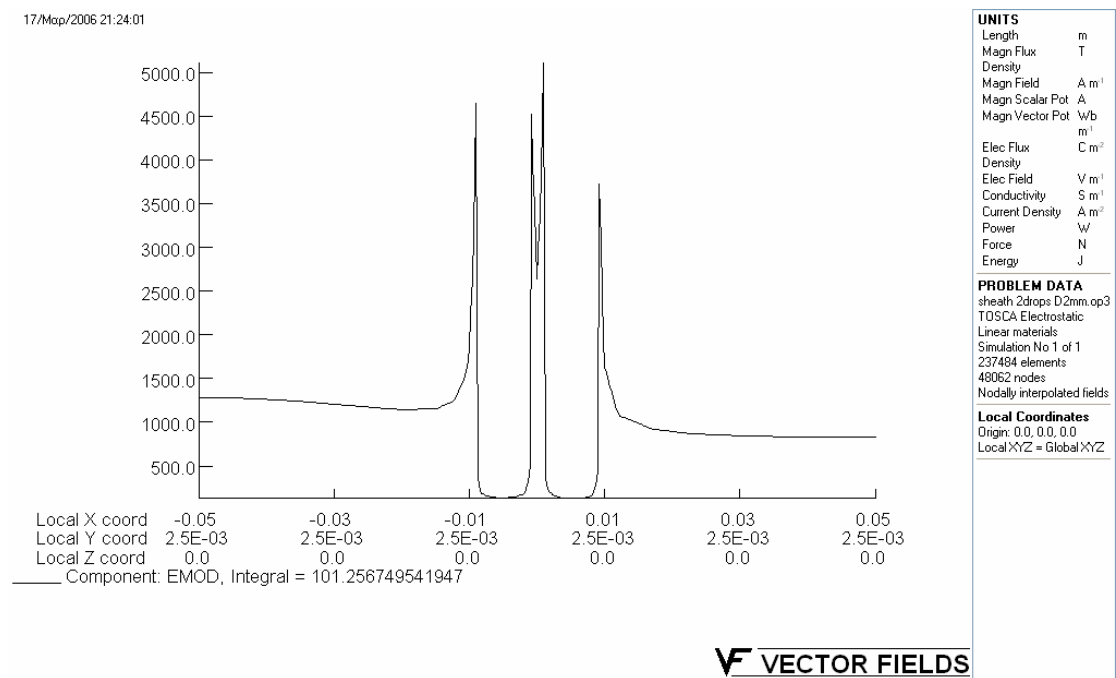
Σχήμα 5.27: Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια: $-0.01 < x < 0.01$, $-0.01 < y < 0.01$, $z=0\text{m}$ για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.002\text{m}$



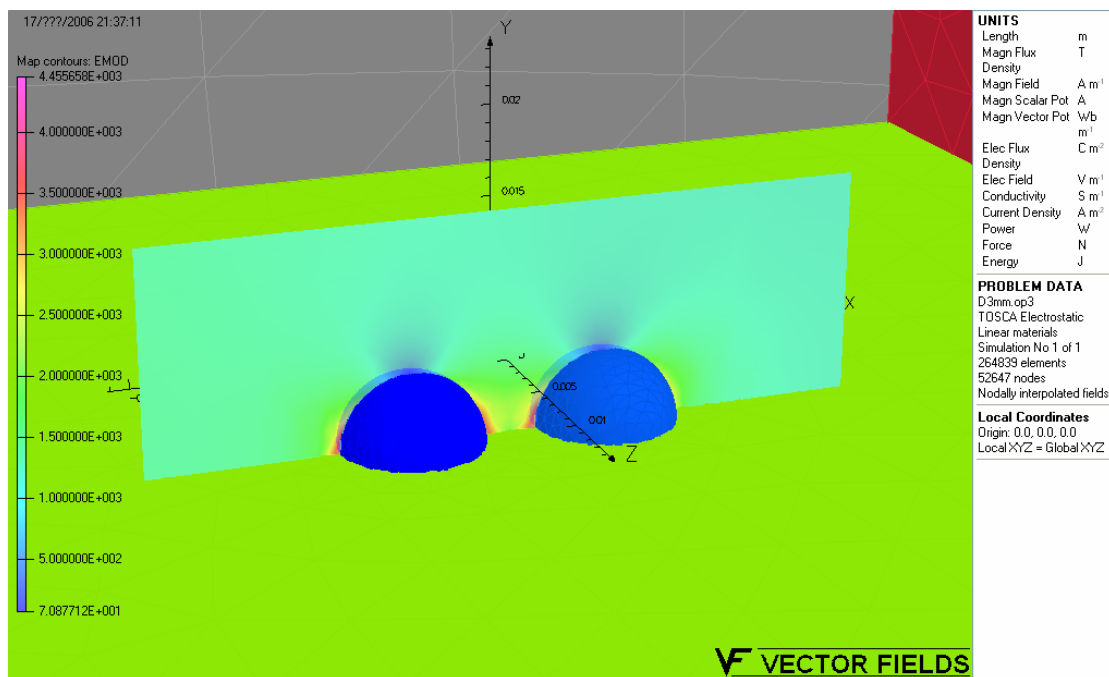
Σχήμα 5.28: Ισοδυναμικές γραμμές για δύο σταγόνες ύδατος στην επιφάνεια - $0.01 < x < 0.01$, $-0.01 < y < 0.01$, $z=0\text{m}$ για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.002\text{m}$



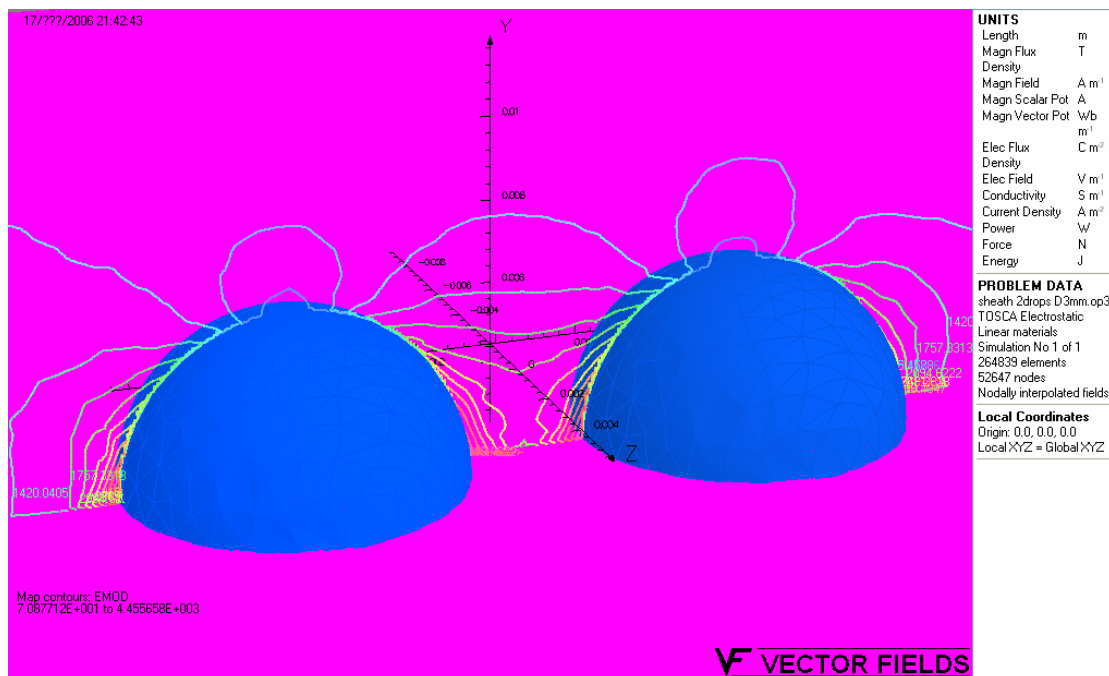
Σχήμα 5.29: Υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην ευθεία: $-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.002\text{m}$



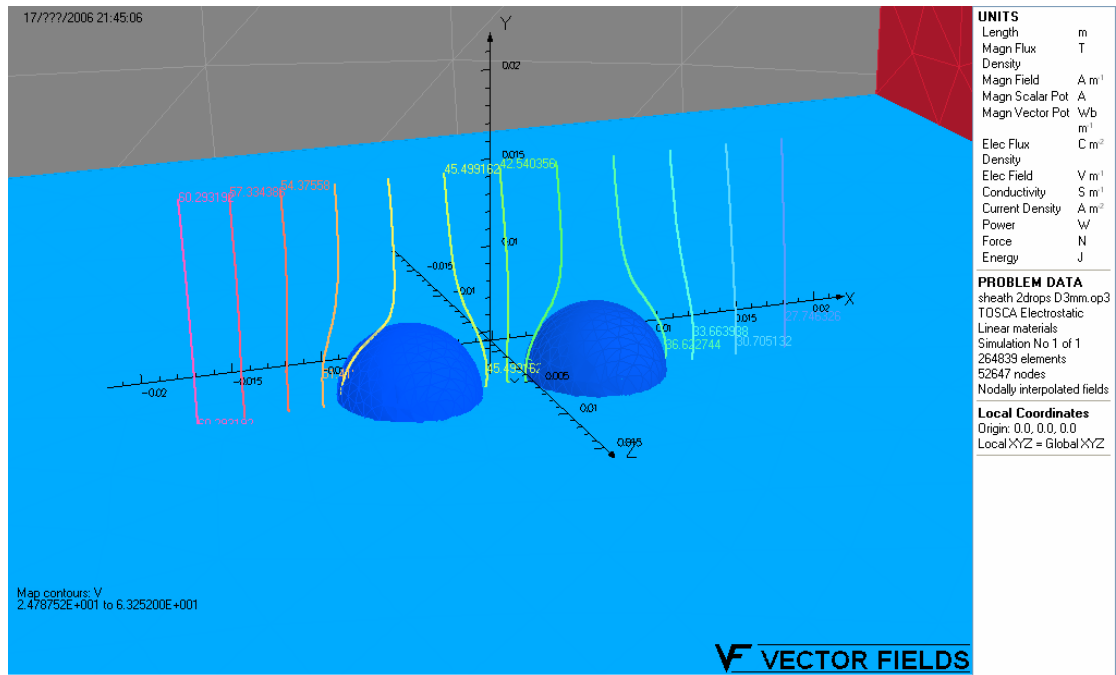
Σχήμα 5.30: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.002\text{m}$ ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\text{max}}=3024\text{ V/m}$), ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E=2641\text{ V/m}$)



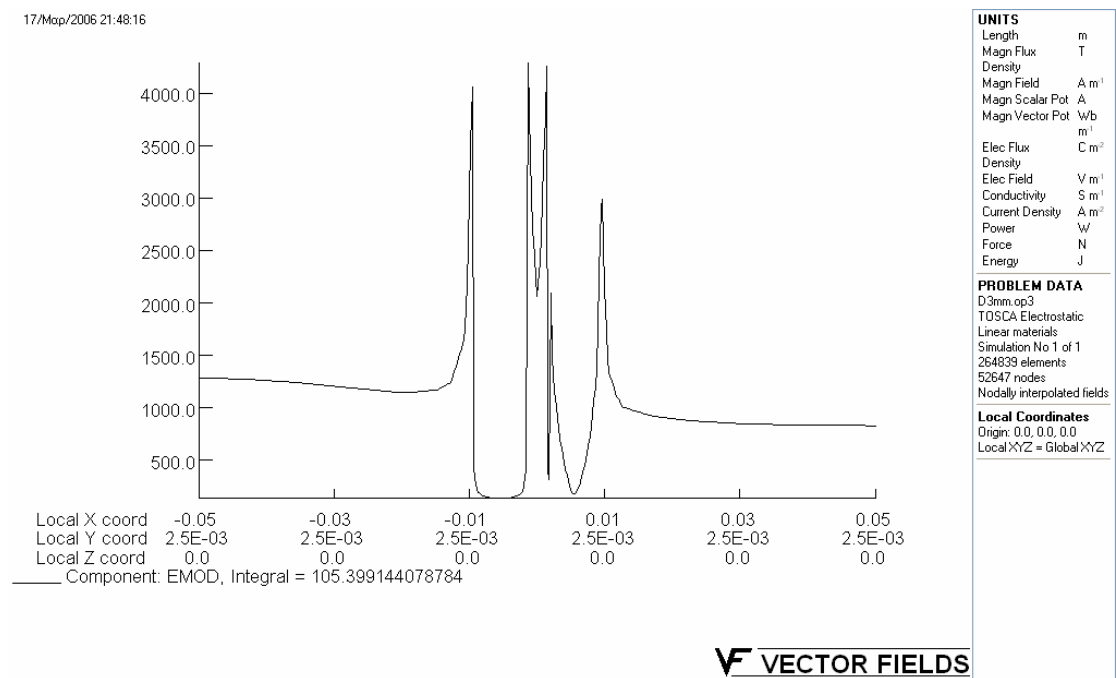
Σχήμα 5.31: Υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια - $0.02 < x < 0.02$, $-0.015 < y < 0.015$, $z=0\text{m}$ για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.003\text{m}$



Σχήμα 5.32: Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια: $-0.02 < x < 0.02$, $-0.015 < y < 0.015$, $z=0\text{m}$ για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.003\text{m}$

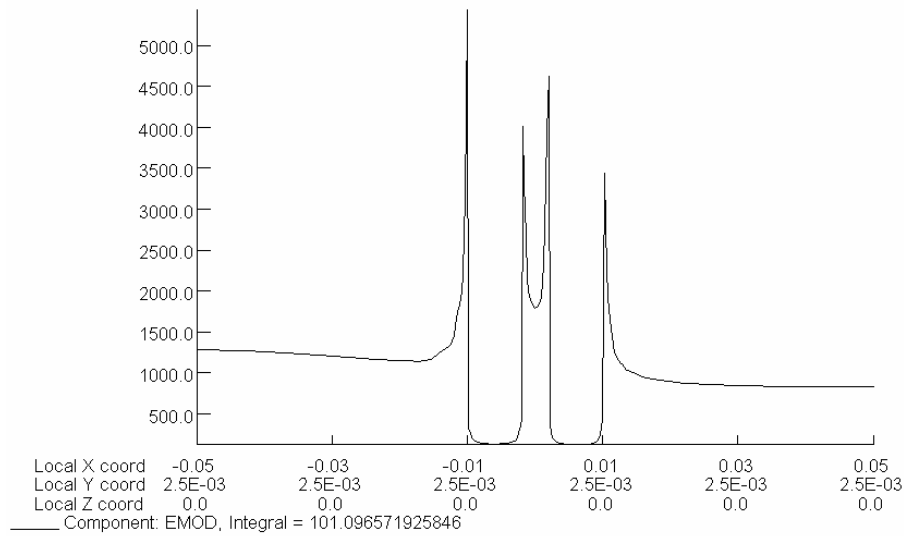


Σχήμα 5.33: Ισοδυναμικές γραμμές στην επιφάνεια: $-0.02 < x < 0.02$, $-0.015 < y < 0.015$, $z=0\text{m}$ για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.003\text{m}$



Σχήμα 5.34: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05\text{m}$, $y=0.0025\text{m}$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους $D=0.003\text{m}$ ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E_{\text{max}}=4289\text{ V/m}$), ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E=2060\text{ V/m}$)

18/Map/2006 18:01:56



UNITS	
Length	m
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A m ⁻¹
Magn Scalar Pot	A
Magn Vector Pot	Wb m ⁻¹
Elec Flux	C m ⁻²
Density	
Elec Field	V m ⁻¹
Conductivity	S m ⁻¹
Current Density	A m ⁻²
Power	W
Force	N
Energy	J

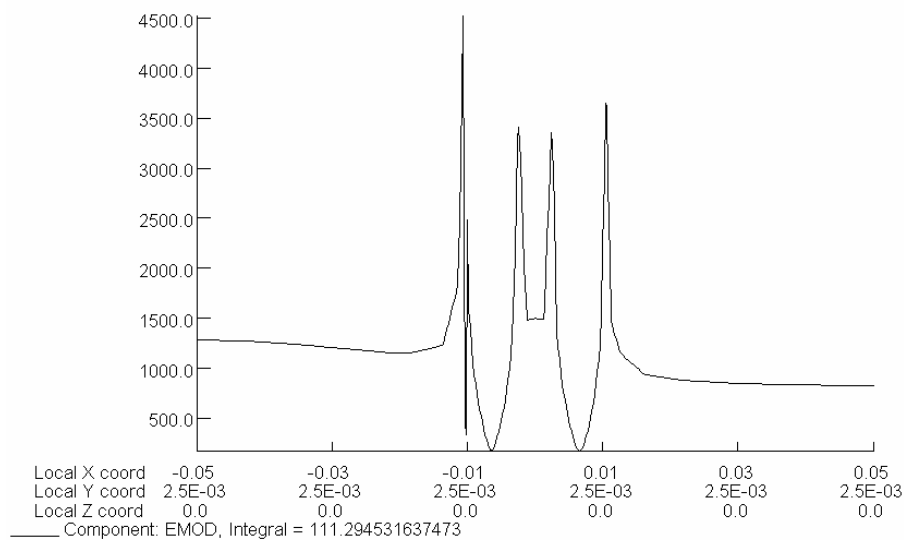
PROBLEM DATA
 D4mm2drop.op3
 TOSCA Electrostatic
 Linear materials
 Simulation No 1 of 1
 256000 elements
 51425 nodes
 Nodally interpolated fields

Local Coordinates
 Origin: 0.0, 0.0, 0.0
 Local XYZ = Global XYZ

VECTOR FIELDS

Σχήμα: 5.35: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$ m, $y=0.0025$ m, $z=0$ m) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8$ mm με απόσταση μεταξύ τους $D=0.004$ m ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0$ m) $E_{\max}=5437$ V/m), ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0$ E=1788 V/m)

18/Map/2006 20:54:23



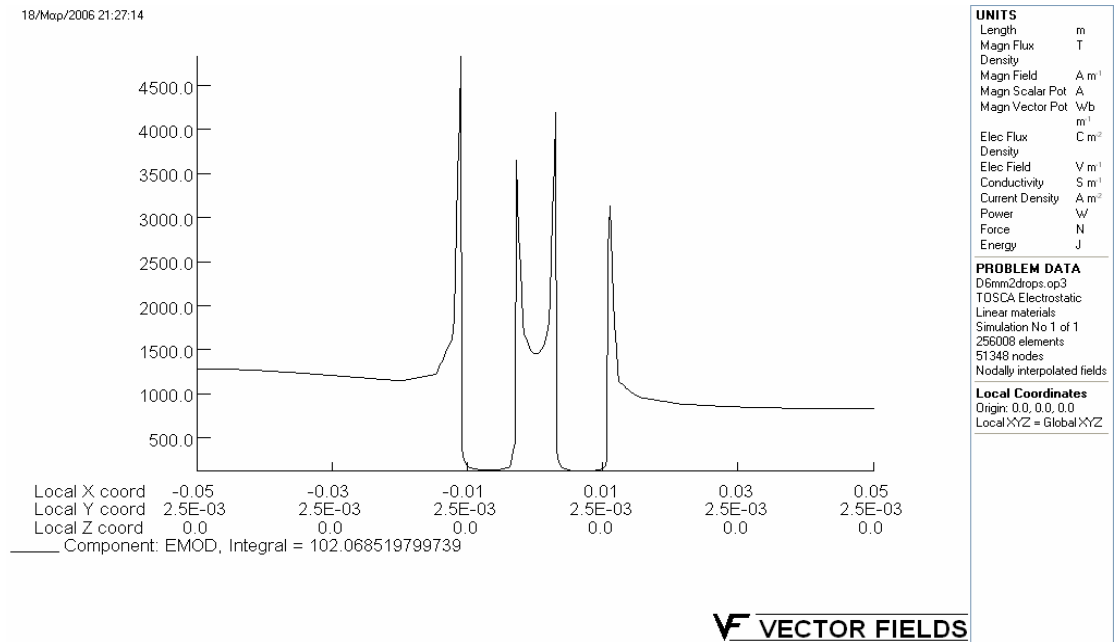
UNITS	
Length	m
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A m ⁻¹
Magn Scalar Pot	A
Magn Vector Pot	Wb m ⁻¹
Elec Flux	C m ⁻²
Density	
Elec Field	V m ⁻¹
Conductivity	S m ⁻¹
Current Density	A m ⁻²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA
 D5mm2drops.op3
 TOSCA Electrostatic
 Linear materials
 Simulation No 1 of 1
 286174 elements
 56333 nodes
 Nodally interpolated fields

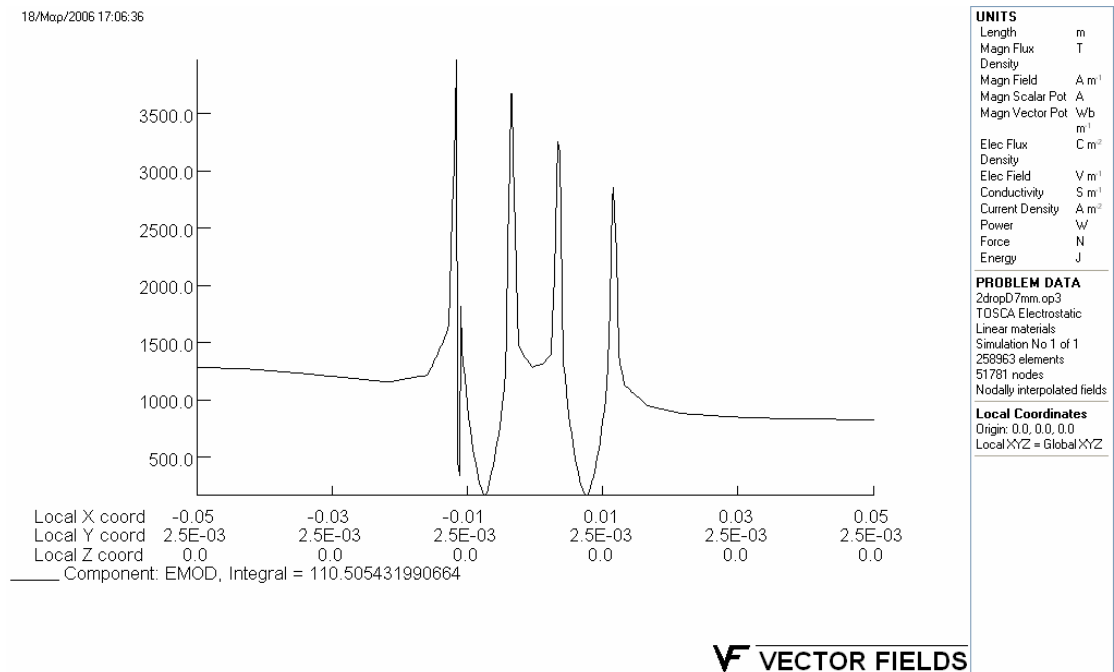
Local Coordinates
 Origin: 0.0, 0.0, 0.0
 Local XYZ = Global XYZ

VECTOR FIELDS

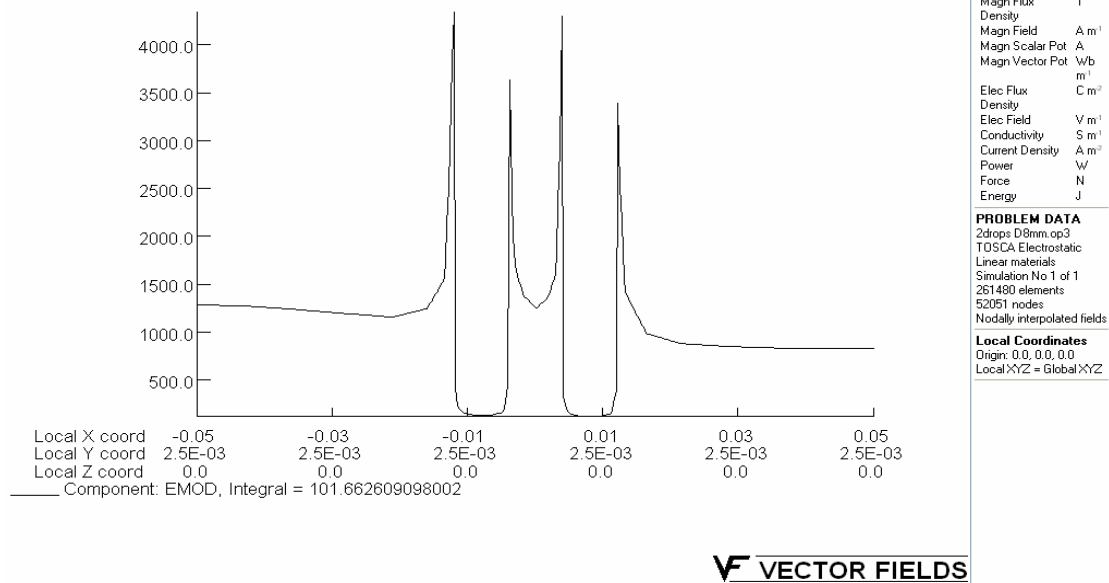
Σχήμα: 5.36: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$ m, $y=0.0025$ m, $z=0$ m) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8$ mm με απόσταση μεταξύ τους $D=0.005$ m ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0$ m) $E_{\max}=4524$ V/m), ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0$ E=1499 V/m)



Σχήμα: 5.37: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$ m, $z=0$ m) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8$ mm με απόσταση μεταξύ τους $D=0.006$ m ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0$ m $E_{\max}=4831$ V/m), ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0$ m $E=1453$ V/m)



Σχήμα: 5.38: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0025$, $z=0$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8$ mm με απόσταση μεταξύ τους $D=0.007$ m ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0$ m $E_{\max}=4189$ V/m), ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0$ m $E=1357$ V/m)



Σχήμα: 5.39: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05\text{m}$, $y=0.0025\text{m}$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ με απόσταση μεταξύ τους **$D=0.008\text{m}$** ($x=0.001$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ **$E_{\max}=4344\text{ V/m}$**), ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$ $E=1263\text{ V/m}$)

Το ηλεκτρικό πεδίο ενισχύεται στην επιφάνεια του μονωτήρα παρουσία των σταγόνων ύδατος.

Η απόσταση μεταξύ των δύο σταγόνων μεταβάλλεται στις μετρήσεις από $D=2\text{mm}$ έως $D=8\text{mm}$. Εξετάζεται η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του σημείου ($x=0$, $y=0.0025$, $z=0\text{m}$) που ισαπέχει από τα κέντρα των δύο σταγόνων και κείται στο μέσο της μεταξύ τους απόστασης. Παρατηρούμε ότι όσο κοντύτερα είναι οι δύο σταγόνες τόσο πιο ενισχυμένο είναι το πεδίο σε εκείνο το σημείο.

Παρατηρούμε ακόμη ότι όσο η διάμετρος των σταγόνων d είναι μεγαλύτερη από τη μεταξύ τους απόσταση D , οι τιμές της μεγίστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζονται στη διεπιφάνεια του μονωτικού υλικού, της σταγόνας ύδατος και του αέρα και στα σημεία που βρίσκονται ανάμεσα στις δύο σταγόνες. Μόλις η απόσταση των δύο σταγόνων γίνει ίση ή και μεγαλύτερη από τη διάμετρο τους η μέγιστη τιμή της έντασης εμφανίζεται στη διεπιφάνεια του μονωτικού υλικού, του αέρα και της σταγόνας ύδατος που βρίσκεται από την πλευρά του φορτισμένου ηλεκτροδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται όταν η απόσταση D μεταξύ των δύο σταγόνων ύδατος γίνει μεγαλύτερη από τη διάμετρό τους d . Η επιρροή της μίας σταγόνας ύδατος στην

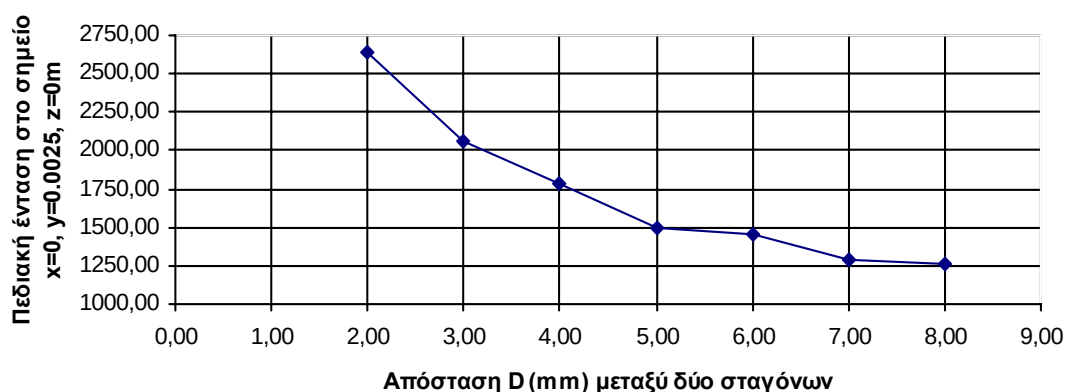
άλλη μπορεί να αγνοηθεί όταν η μεταξύ τους απόσταση γίνει μεγαλύτερη από τη διάμετρο τους όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4 και δίνονται στο γράφημα του σχήματος 5.40.

Η δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή η μέγιστη τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου σημειώνεται όταν η απόσταση μεταξύ των σταγόνων ύδατος είναι ίση με τη διάμετρο των σταγόνων ($D=d$). Τότε, στη διεπιφάνεια του μονωτικού φύλλου, του αέρα και της σταγόνας ύδατος από την πλευρά του φορτισμένου ηλεκτροδίου ($x=-0.01, y=0.0025, z=0$) είναι $E_{\max}=5437 \text{ V/m}$

Πίνακας 5.4: Υπολογισμός της τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο με συντεταγμένες $x=0, y=0.0025, z=0\text{m}$ από το οποίο ισαπέχουν οι δύο σταγόνες διαμέτρου $d=8\text{mm}$.

α/α	Απόσταση μεταξύ σταγόνων D [mm]	Τιμή έντασης στο σημείο $x=0, y=0.0025, z=0\text{m}$
1	2	2641
2	3	2059
3	4	1788
4	5	1499
5	6	1453
6	7	1294
7	8	1265

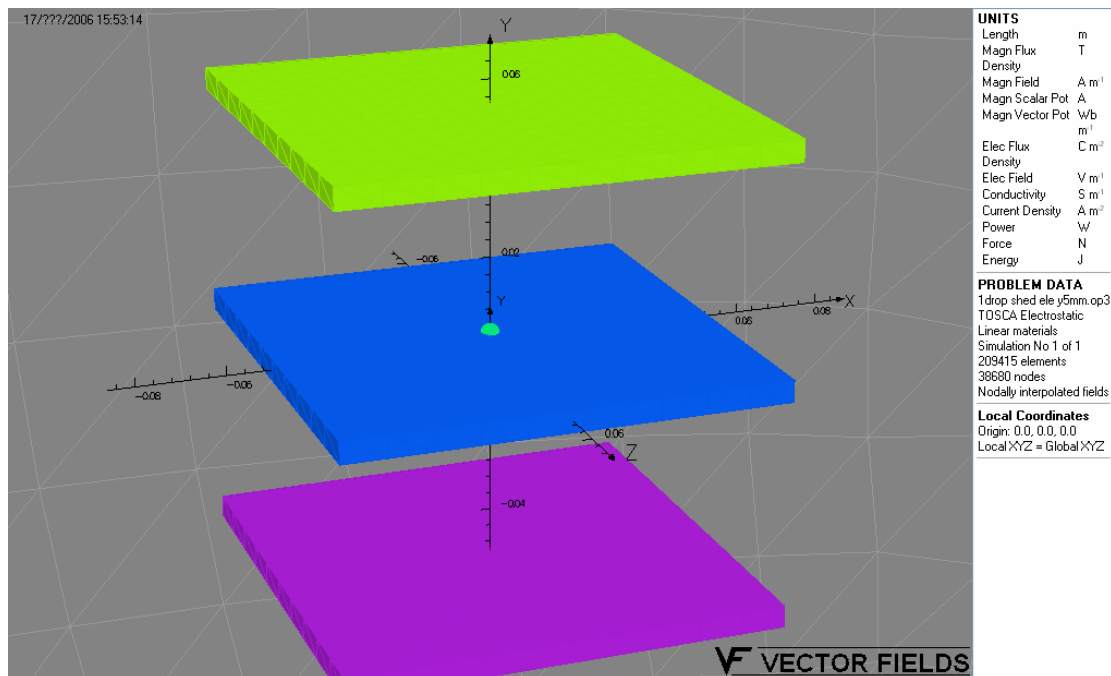
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο ($x=0, y=0.0025, z=0\text{m}$) σε συνάρτηση με την απόσταση D μεταξύ δύο σταγόνων



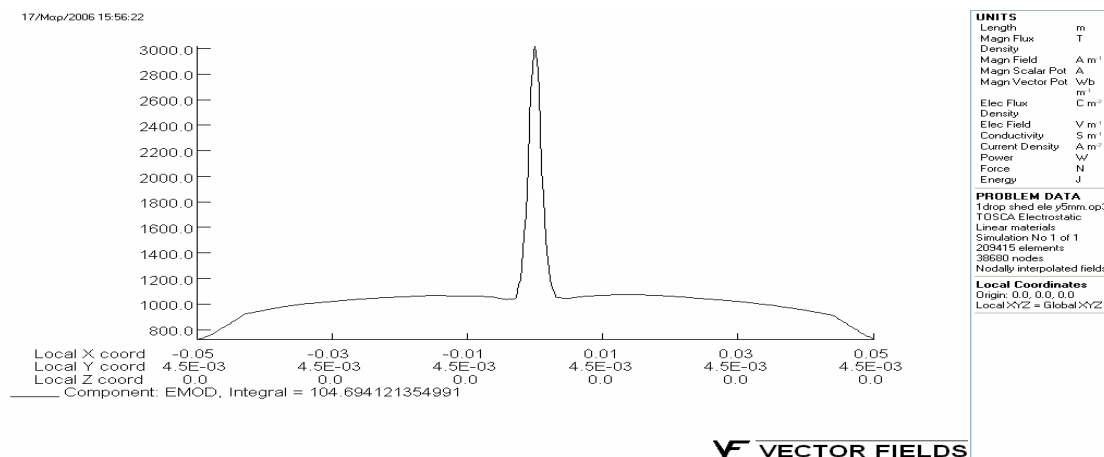
Σχήμα 5.40: Μείωση της πεδιακής έντασης με την αύξηση της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος

5.3 Προσομοίωση της περιοχής του δίσκου

Προκειμένου ν' αναπαρασταθεί η περιοχή του δίσκου του μονωτήρα, θεωρούνται δύο ηλεκτρόδια μαζί μ' ένα απλό φύλλο από SiR. Τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε απόσταση 10 cm μεταξύ τους. Το φύλλο από SiR τοποθετείται σε θέση παράλληλη μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή του δίσκου όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.41. Το επάνω ηλεκτρόδιο είναι φορτισμένο και το κάτω ηλεκτρόδιο είναι γειωμένο. Το δυναμικό που εφαρμόζεται είναι 100 V, που σημαίνει ότι η μέση τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι $100/10=10$ V/cm. Οι x, y, z κατευθύνσεις προσδιορίζονται επίσης στο σχήμα 5.41. Μία σταγόνα ύδατος σε σχήμα ημισφαιρίου θεωρείται στο μέσο διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η διάμετρος της σταγόνας ύδατος είναι 4mm, το ύψος της είναι 2 mm. Η διηλεκτρική σταθερά του νερού είναι 80, η αγωγιμότητα του θεωρείται μηδενική. Τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε απόσταση 10 cm το ένα από το άλλο. Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς και οι διαστάσεις του μονωτικού φύλλου και της σταγόνας έχουν ληφθεί ίδιες με εκείνες του μοντέλου που αναφέρεται στην παράγραφο 2.3.2 στο σχήμα 2.17 της παρούσας εργασίας [32].



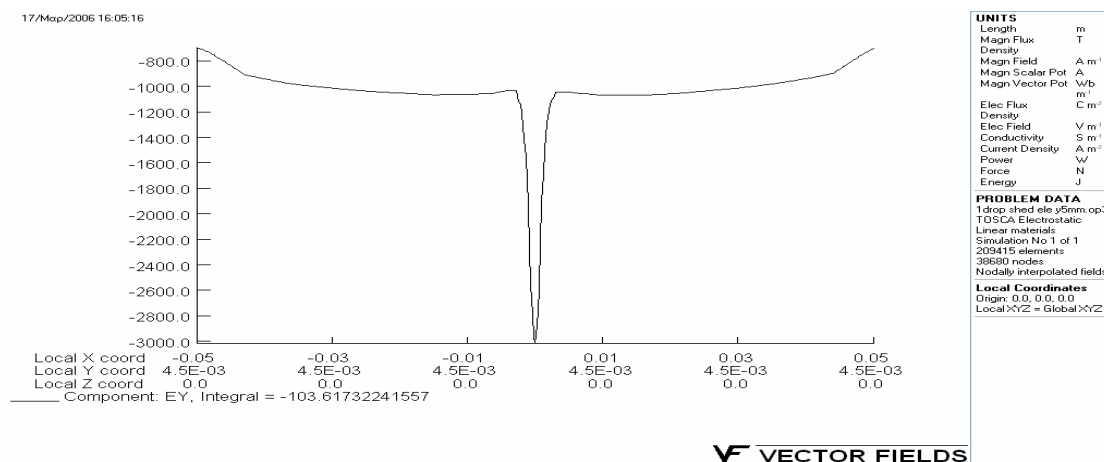
Σχήμα 5.41: Γεωμετρία του μοντέλου προσομοίωσης της περιοχής του δίσκου του μονωτήρα όπου οι διαστάσεις ηλεκτροδίων είναι $xx'=0.1$, $yy'=0.005$, $zz'=0.1$ m



Σχήμα 5.42: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0045$, $z=0\text{m}$) και στην κορυφή της σταγόνας ύδατος ($x=0$, $y=0.0045$, $z=0\text{m}$).

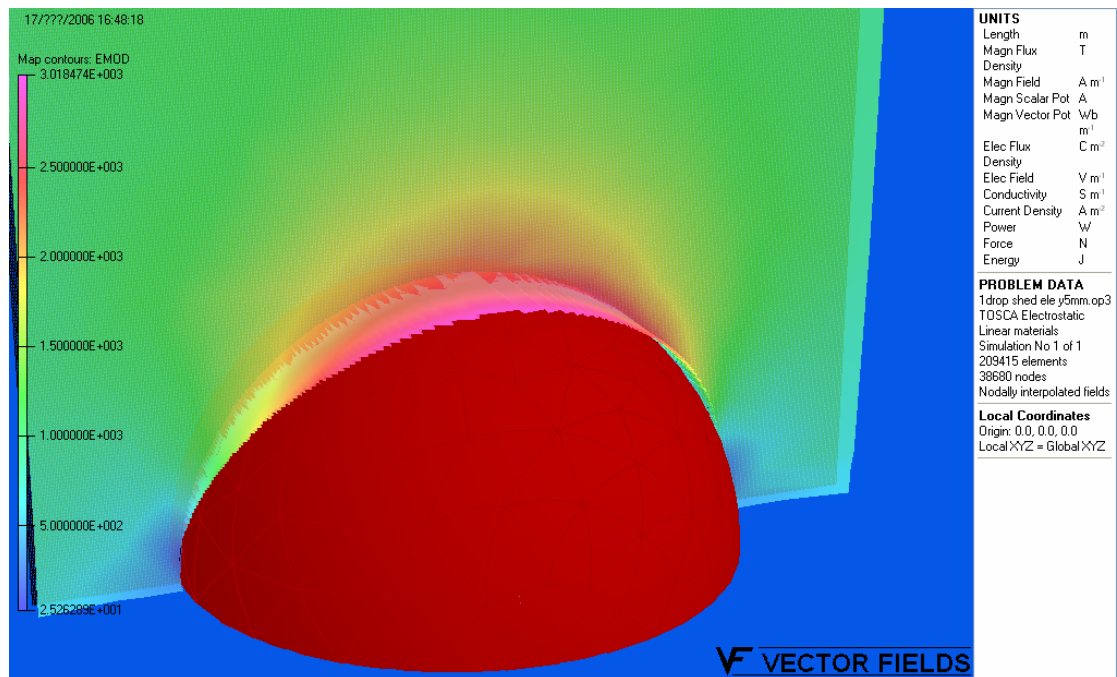
Παρατηρούμε από το σχήμα 5.42 ότι η πεδιακή ένταση εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της στο σημείο ($x=0$, $y=0.0045$, $z=0\text{m}$) δηλαδή στην κορυφή της σταγόνας ύδατος. Από το πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $E_{\max} = 3018 \text{ V/m}$ στη θέση $x=0$, $y=0.0045$, $z=0\text{m}$.

Στη συνέχεια αναζητούμε τη συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που συνεισφέρει περισσότερο στη μέγιστη τιμή και λαμβάνουμε το παρακάτω γράφημα του σχήματος 5.43. Στο σχήμα 5.43 δίνεται η κατά τη διεύθυνση y συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που είναι η κυρίαρχη παράμετρος, μεγαλύτερη και από τις συνιστώσες E_x , E_z και η τιμή της υπολογίζεται στη θέση $x=0$, $y=0.0045$, $z=0\text{m}$, $E_{y\max} = -3018 \text{ V/m}$.

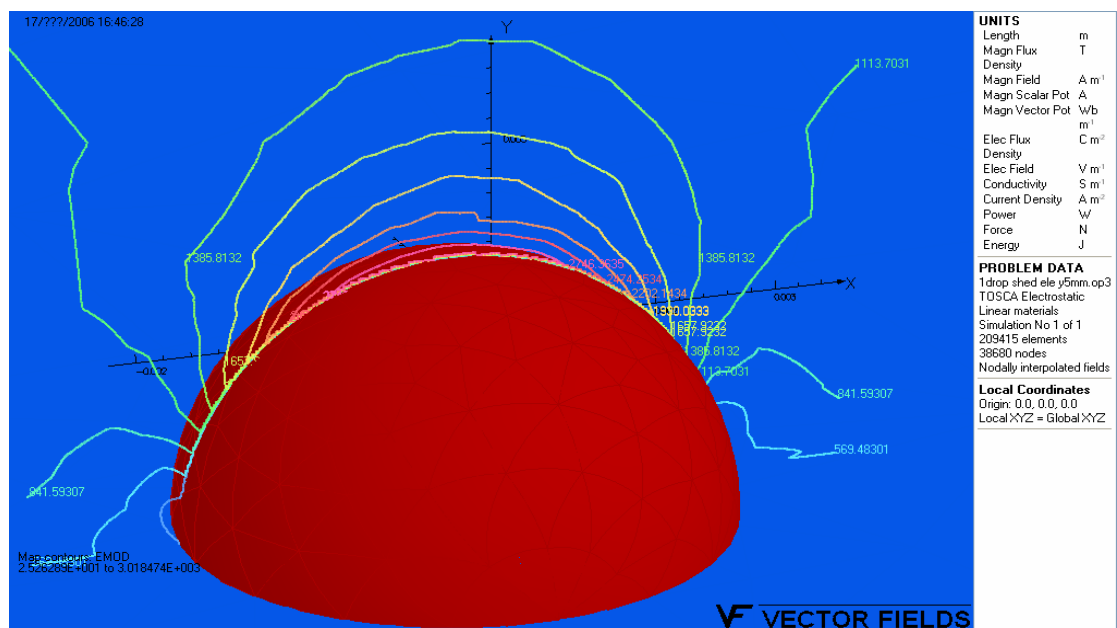


Σχήμα 5.43: Γράφημα της κυρίαρχης συνιστώσας E_y κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0045$, $z=0\text{m}$).

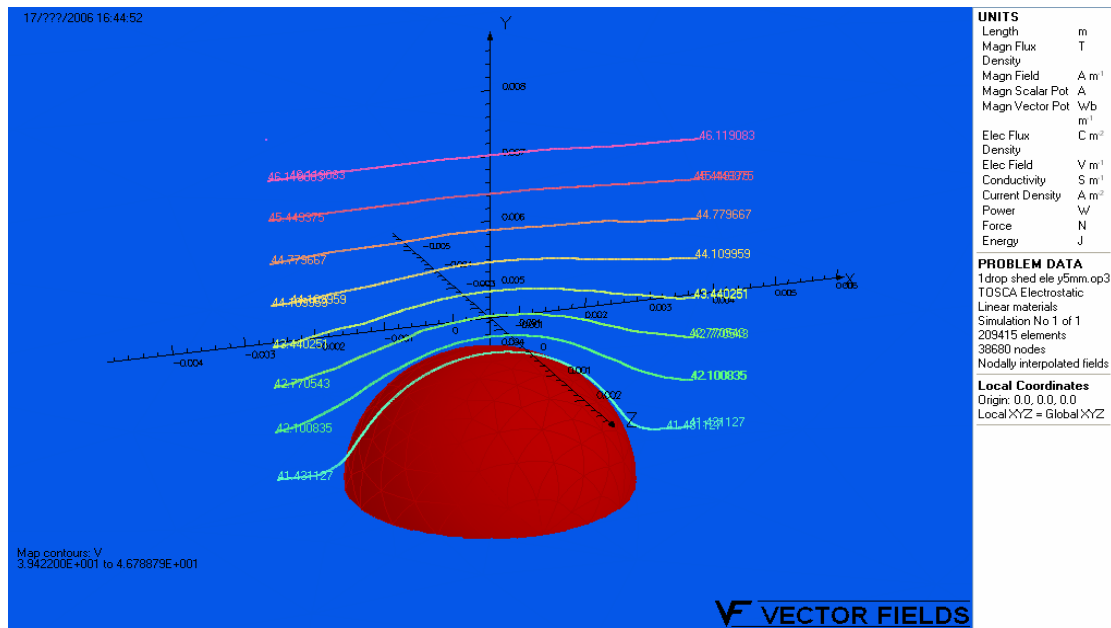
Κατόπιν λαμβάνουμε στην επιφάνεια $0.003 < x < 0.003$, $-0.003 < y < 0.008$, $z=0$, την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ζώνες, τις γραμμές ηλεκτρικού πεδίου και τις ισοδυναμικές γραμμές που παρουσιάζονται αντίστοιχα στα σχήματα 5.44, 5.45 και 5.46.



Σχήμα 5.44: Υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια: $-0.003 < x < 0.003$, $-0.003 < y < 0.008$, $z=0$ m.



Σχήμα 5.45: Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια: $-0.003 < x < 0.003$, $-0.003 < y < 0.008$, $z=0$ m



Σχήμα 5.46: Ισοδυναμικές γραμμές στην επιφάνεια: $-0.003 < x < 0.003$, $-0.003 < y < 0.008$, $z=0\text{m}$

Σύμφωνα με την εργασία του W.Que, [32] για μία σταγόνα ύδατος στην περιοχή του δίσκου, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, με εφαρμογή δυναμικού τιμής 100 V, είναι $E_{\max} = 2760 \text{ V/m}$ επάνω στην κορυφή της σταγόνας ύδατος.

Στην παρούσα εργασία με εφαρμογή δυναμικού τιμής 100 V υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της έντασης $E_{\max} = 3018 \text{ V/m}$, επάνω επίσης στην κορυφή της σταγόνας ύδατος. Επιβεβαιώνεται ακόμη στην παρούσα εργασία, όπως και στην εργασία του W. Que, ότι η y (κατά τους άξονες του μοντέλου στο πρόγραμμα OPERA 3D) παράμετρος του ανύσματος της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι η κυρίαρχη παράμετρος.

Παρατηρείται επομένως απόκλιση της τάξεως:

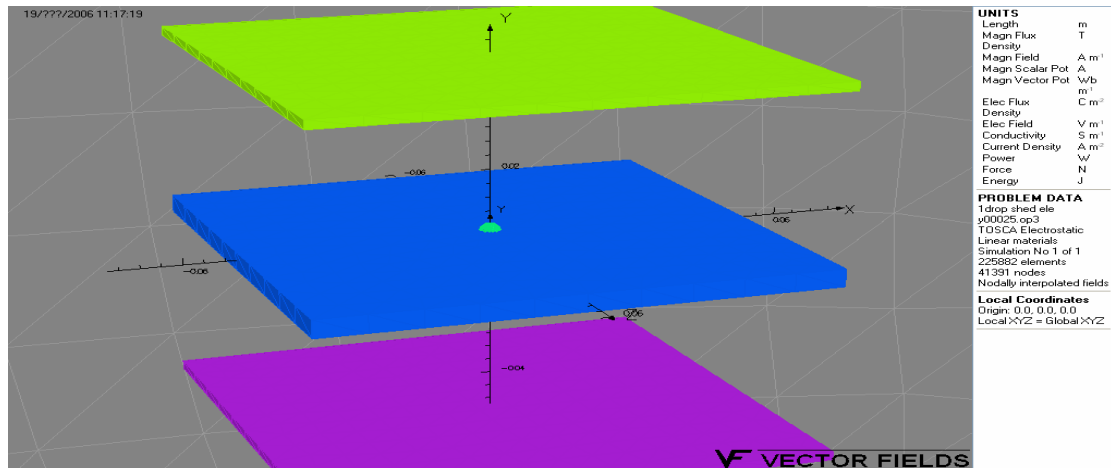
$$\frac{|2760 \text{ V/m} - 3018 \text{ V/m}|}{2760 \text{ V/m}} * 100\% = 9.3\%$$

5.3.1 Επίδραση των διαστάσεων των ηλεκτροδίων στη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

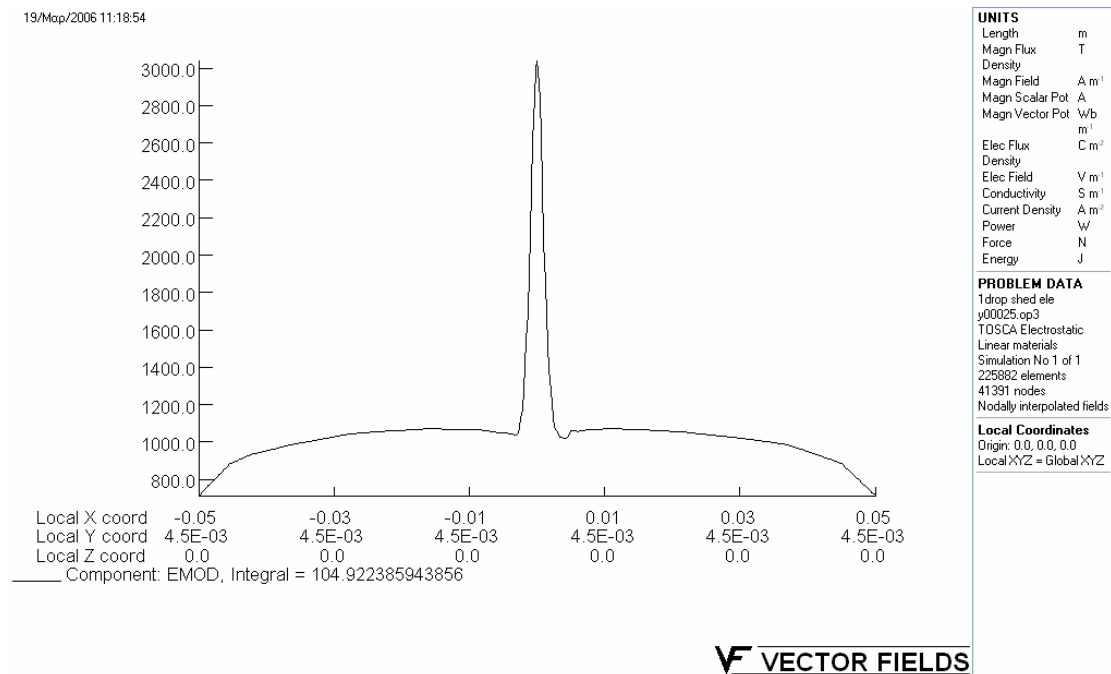
Κατά την εξαγωγή των γραφημάτων με το πρόγραμμα προσομοίωσης OPERA 3D παρατηρήθηκε ότι η υπολογιζόμενη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στη θέση $x=0$, $y=0.0045$, $z=0\text{m}$ εξαρτάται από τις διαστάσεις των

ηλεκτροδίων μεταξύ των οποίων τοποθετείται το μονωτικό φύλλο και εφαρμόζεται η διαφορά δυναμικού.

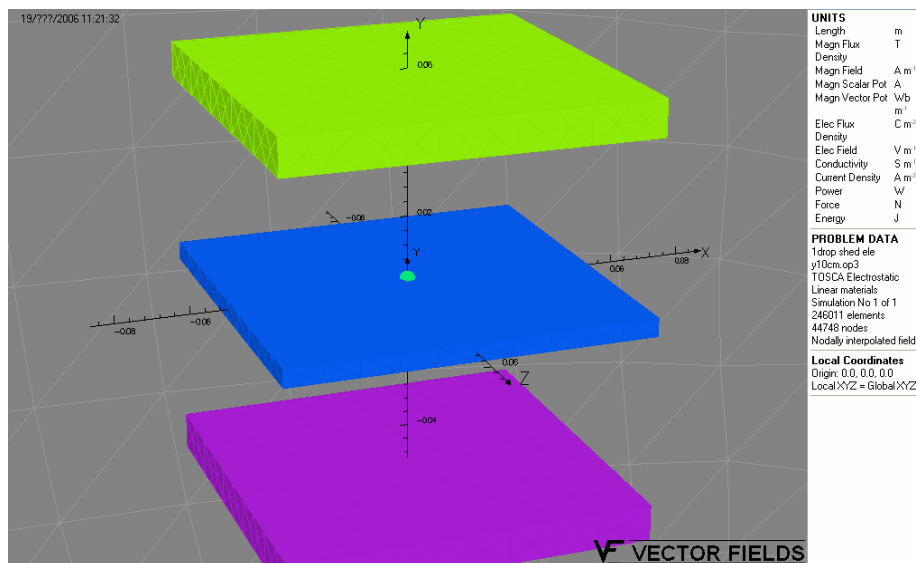
Συγκεκριμένα στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι τιμές μέγιστης πεδιακής έντασης που ελήφθησαν από τα μοντέλα των σχημάτων 5.41, 5.47 και 5.49.



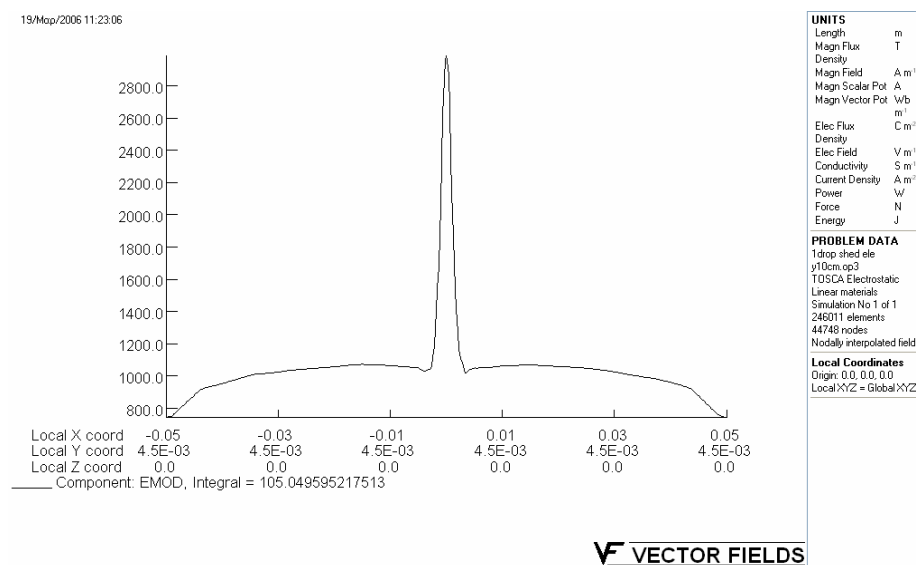
Σχήμα 5.47: Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου στην ευθεία ($-0.05 < x < 0.05$, $y = 0.0025$, $z = 0\text{m}$) όπου οι διαστάσεις ηλεκτροδίων είναι $xx' = 0.1$, $yy' = 0.0025$, $zz' = 0.1\text{m}$



Σχήμα 5.48: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y = 0.0045$, $z = 0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.47 ($x = -0$, $y = 0.0045$, $z = 0$ $E_{\max} = 3039$ V/m



Σχήμα 5.49: Υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην ευθεία $(-0.05 < x < 0.05, y = 0.0045, z = 0\text{m})$ όπου οι διαστάσεις ηλεκτροδίων είναι $xx' = 0.10, yy' = 0.01, zz' = 0.1\text{m}$



Σχήμα 5.50: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας $(-0.05 < x < 0.05, y = 0.0045, z = 0\text{m})$ του μοντέλου του σχήματος 5.49 $(x = 0, y = 0.0045, z = 0\text{m})$ $E_{\max} = 2987 \text{ V/m}$

Πίνακας 5.5 Τιμές μέγιστης έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων

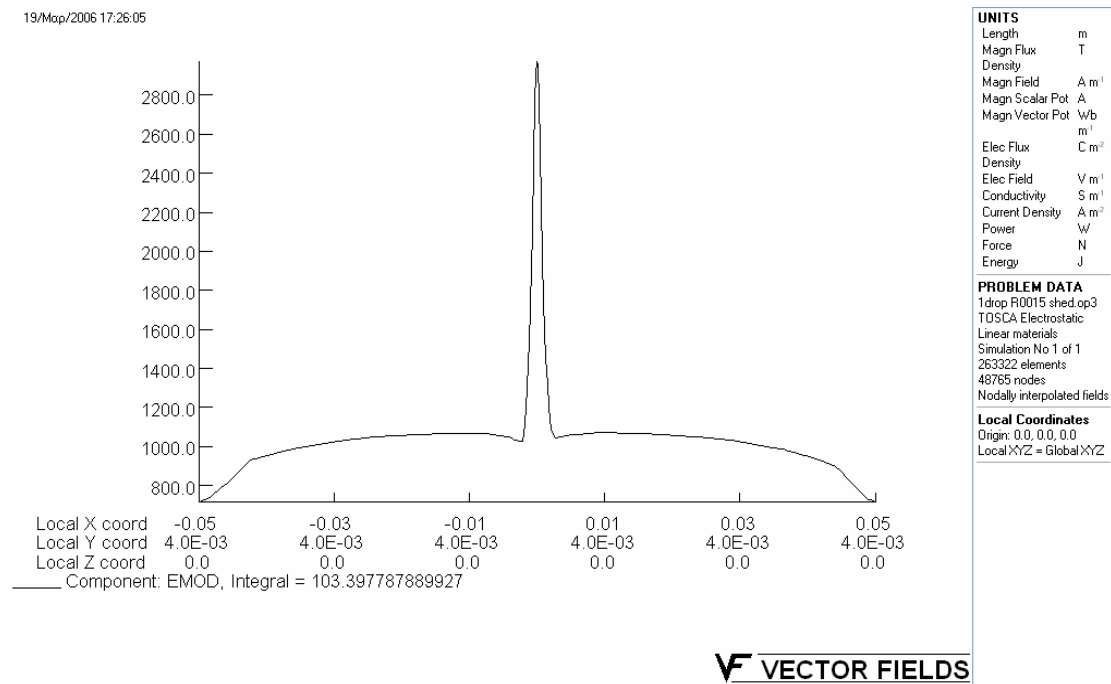
Διαστάσεις ηλεκτροδίων [m]	Μέγιστη τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου, $E_{\max}$ [V/m]
$xx' = 0.1, yy' = 0.01, zz' = 0.1$	2987
$xx' = 0.1, yy' = 0.005, zz' = 0.1$	3018
$xx' = 0.1, yy' = 0.0025, zz' = 0.1$	3039

5.3.2 Επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στην αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

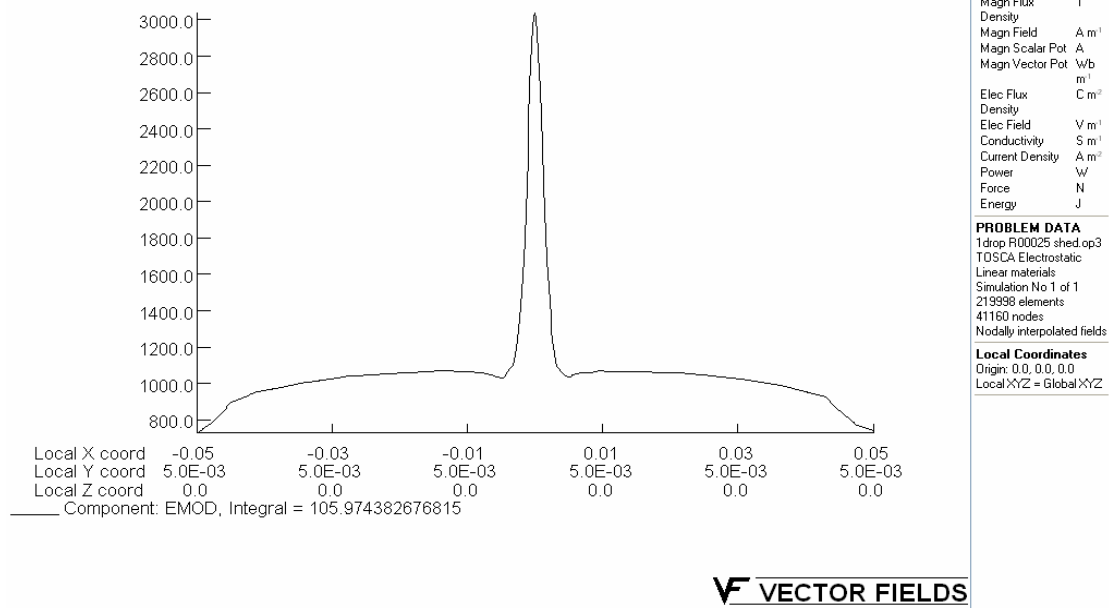
Μελετάται η επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στην αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του δίσκου. Οι διάμετροι των χαρακτηριστικών σταγόνων ύδατος κυμαίνονται από 3 έως και 5 mm.

Στον πίνακα 5.6 συνοψίζονται τ' αποτελέσματα που ελήφθησαν από το πρόγραμμα OPERA 3D για διάφορες διαμέτρους σταγόνας ύδατος στην περιοχή του δίσκου. Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις στην περιοχή του δίσκου του μονωτήρα είναι αυτό του σχήματος 5.41.

Στα σχήματα 5.42, 5.51 και 5.52. δίνονται τ' αντίστοιχα γραφήματα κατανομής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που ελήφθησαν από το πρόγραμμα OPERA 3D για τις διάφορες διαμέτρους σταγόνας ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος του μονωτήρα.



Σχήμα 5.51: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.004$, $z=0\text{m}$) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.003\text{m}$ ($x=0$, $y=0.004$, $z=0\text{m}$ $E_{\text{max}}=2972\text{ V/m}$)



Σχήμα 5.52: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.005$, $z=0$ m) του μοντέλου του σχήματος 5.1 για σταγόνα ύδατος διαμέτρου $d=0.005$ m ($x=0$, $y=0.005$, $z=0$ m $E_{\max}=3038$ V/m)

Πίνακας 5.6: Τιμές μεγίστης έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με τη διάμετρο της σταγόνας ύδατος

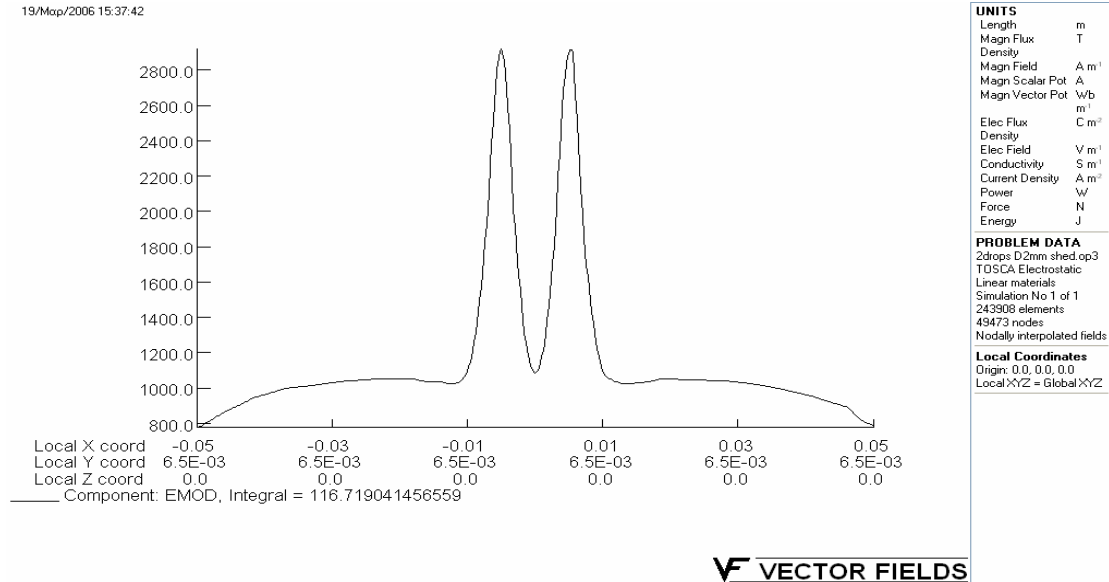
α/α	Διάμετρος [m]	Συντεταγμένη x	$E_{\max}$ [V/m]
1	0,003	-0,0015	2972
2	0,004	-0,002	3018
3	0,005	-0,0025	3037

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.6 φαίνεται ότι δεν παρουσιάζεται σημαντική μείωση στη μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου με τη μείωση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος.

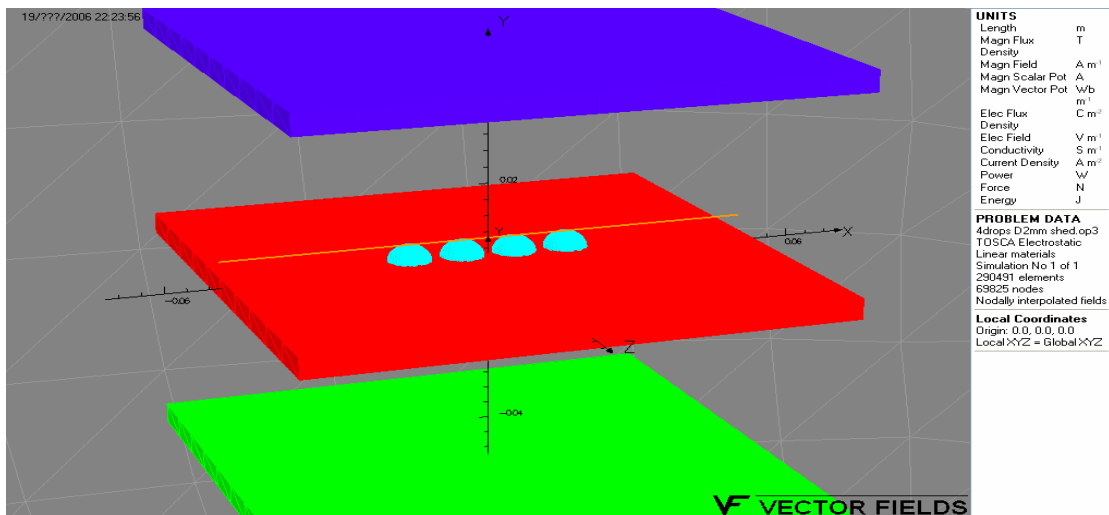
5.3.3 Το αποτέλεσμα της παρουσίας πολλών σταγόνων ύδατος στην κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Το αποτέλεσμα της παρουσίας πολλών σταγόνων ύδατος μελετάται στην επάνω επιφάνεια του δίσκου που είναι περισσότερο εκτεθειμένη στη βροχή σε συνθήκες βροχοπτώσεων κατά τις οποίες συνήθως τόσο η κάτω επιφάνεια του δίσκου όσο και η κατακόρυφη επιφάνεια του περιβλήματος παραμένουν στεγγές.

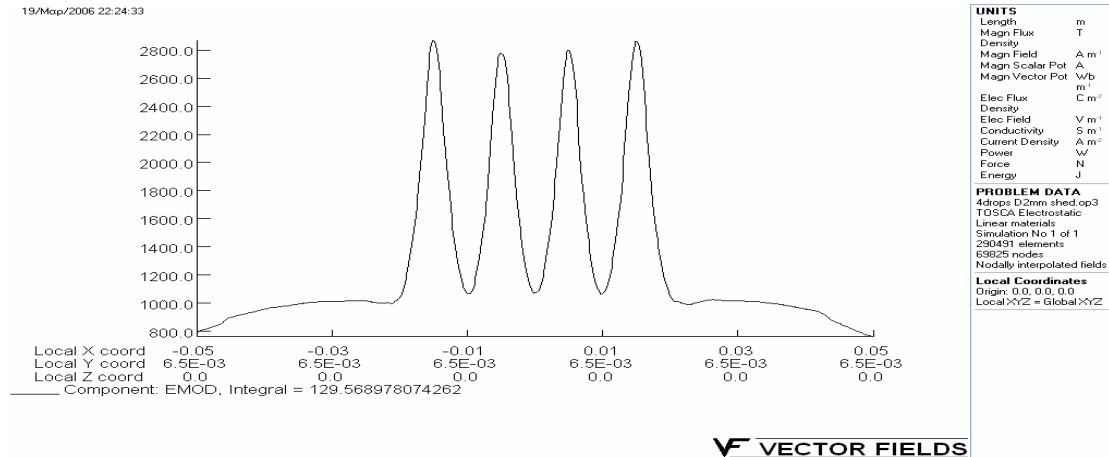
Στα σχήματα 5.53, 5.55 και 5.56 μελετάται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παρουσία δύο, τεσσάρων και έξι αντίστοιχα σταγόνων ύδατος διαμέτρου $d=8\text{ mm}$ που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $D=2\text{ mm}$.



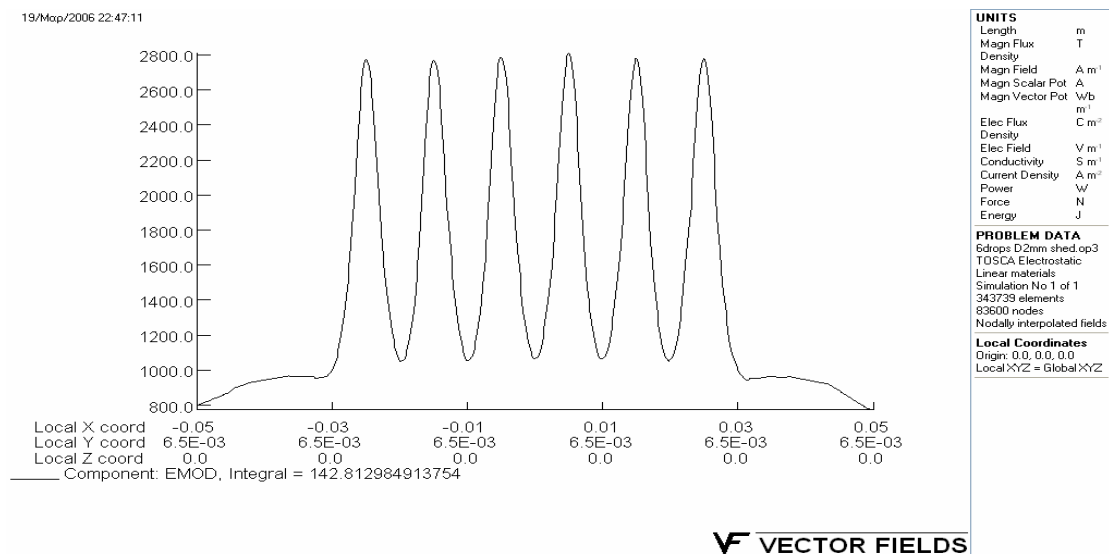
Σχήμα 5.53: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0065$, $z=0\text{ m}$) με το μοντέλο ηλεκτροδίων του σχήματος 5.41 με δύο σταγόνες ύδατος διαμέτρου $d=8\text{ mm}$ που απέχουν μεταξύ του απόσταση $D=2\text{ mm}$ ($x=-0.005$, $y=0.0065$, $z=0\text{ m}$ $E_{\max}=2920\text{ V/m}$) ($x=0$, $y=0.0065$, $z=0\text{ m}$ $E=1085\text{ V/m}$), ($x=0.005$, $y=0.0065$, $z=0\text{ m}$ $E=2894\text{ V/m}$)



Σχήμα 5.54: Υπολογισμός της έντασης ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0065$, $z=0\text{ m}$) παρουσία τεσσάρων σταγόνων ύδατος διαμέτρου $d=8\text{ mm}$ που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $D=2\text{ mm}$.



Σχήμα 5.55: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$) με το μοντέλο ηλεκτροδίων του σχήματος 5.41 παρουσία τεσσάρων σταγόνων ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ που απέχουν μεταξύ του απόσταση $D=2\text{mm}$ ($x=-0.015$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=2867\text{ V/m}$) ($x=-0.005$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2776\text{ V/m}$), ($x=0$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=1073\text{ V/m}$), ($x=0.015$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2798\text{ V/m}$), ($x=0.015$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2863\text{ V/m}$)

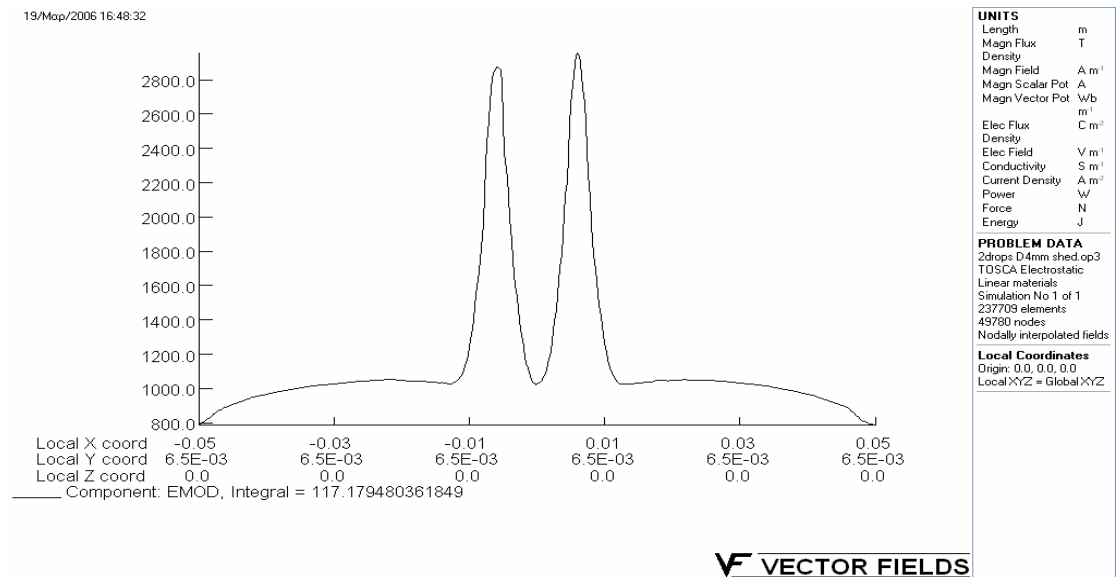


Σχήμα 5.56: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$) με το μοντέλο ηλεκτροδίων του σχήματος 5.41 παρουσία έξι σταγόνων ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ που απέχουν μεταξύ του απόσταση $D=2\text{mm}$ ($x=-0.025$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2772\text{ V/m}$) ($x=-0.015$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2769\text{ V/m}$), ($x=-0.005$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2783\text{ V/m}$), ($x=0$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=1066\text{ V/m}$), ($x=0.005$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=2810\text{ V/m}$), ($x=0.015$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2780\text{ V/m}$), ($x=0.025$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=2780\text{ V/m}$)

5.3.4 Το αποτέλεσμα της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος στην κατανομή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου

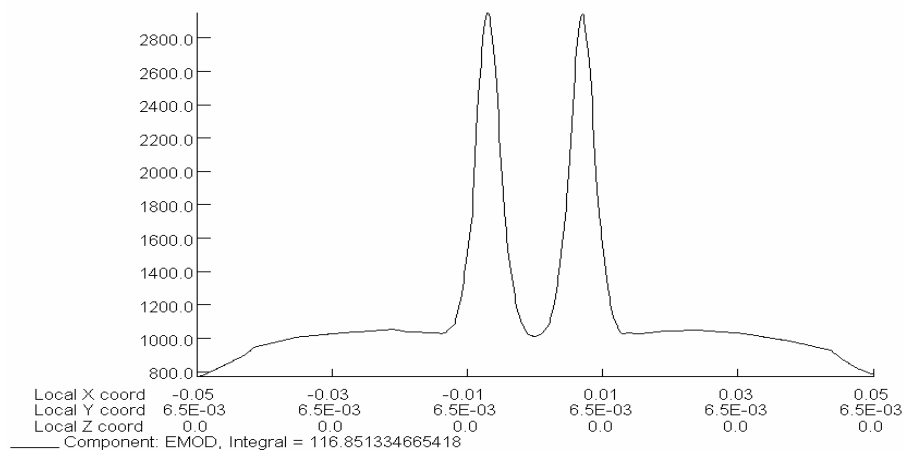
Για σταγόνες ύδατος στην περιοχή του δίσκου του μονωτήρα, το αποτέλεσμα της ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου εξαιτίας των πολλαπλών σταγόνων ύδατος επίσης εξετάζεται με ένα ζεύγος σταγόνων ύδατος διαμέτρου 8mm και σχήματος ημισφαιρίου. Η απόσταση μεταξύ τους κυμαίνεται από 2 mm σε 6 mm.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το μοντέλο των ηλεκτροδίων και του περιβλήματος μονωτήρα του σχήματος 5.41. Η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού από σιλικονούχο καουτσούκ θεωρείται ίση με 4,3 και των σταγόνων ύδατος ίση με 80. Η αγωγιμότητα των σταγόνων ύδατος θεωρείται μηδενική. Οι δύο σταγόνες ισαπέχουν από το μέσο του διαστήματος του μονωτικού υλικού.



Σχήμα 5.57: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0065$, $z=0$ m) με το μοντέλο ηλεκτροδίων του σχήματος 5.41 παρουσία ζεύγους σταγόνων ύδατος διαμέτρου **d=8mm** που απέχουν μεταξύ του απόσταση **D= 4mm** ($x=-0.006$, $y=0.0065$, $z=0$ m **E= 2872 V/m**), ($x=0$ $y=0.0065$, $z=0$ m **E= 1023 V/m**), ($x=0.006$, $y=0.0065$, $z=0$ m **E_{max}= 2957 V/m**)

19/Map/2006 23:05:02



UNITS	
Length	m
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A m ⁻¹
Magn Scalar Pot	A
Magn Vector Pot	Wb
	m ⁻¹
Elec Flux	C m ⁻²
Density	
Elec Field	V m ⁻¹
Conductivity	S m ⁻¹
Current Density	A m ⁻²
Power	W
Force	N
Energy	J
PROBLEM DATA	
2drops D6mm shed.op3	
TOSCA Electrostatic	
Linear materials	
Simulation No 1 of 1	
28286 elements	
55636 nodes	
Nodally interpolated fields	
Local Coordinates	
Origin: 0.0, 0.0, 0.0	
Local XYZ = Global XYZ	

VECTOR FIELDS

Σχήμα 5.58: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της ευθείας ($-0.05 < x < 0.05$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$) με το μοντέλο ηλεκτροδίων του σχήματος 5.41 παρουσία ζεύγους σταγόνων ύδατος διαμέτρου $d=8\text{mm}$ που απέχουν μεταξύ του απόσταση $D=6\text{mm}$ ($x=-0.007$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=2949\text{ V/m}$), ($x=0$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E=1008\text{ V/m}$), ($x=0.007$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ $E_{\max}=2942\text{ V/m}$)

Πίνακας 5.7: Υπολογισμός της τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο με συντεταγμένες $x=0$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$ από το οποίο ισαπέχουν οι δύο σταγόνες διαμέτρου $d=8\text{mm}$.

α/α	Απόσταση μεταξύ σταγόνων D [mm]	Τιμή έντασης στο σημείο ($x=0$, $y=0.0065$, $z=0\text{m}$) [V/m]
1	2	1085
2	4	1023
3	6	1008

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 παρατηρείται μείωση της πεδιακής έντασης με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των σταγόνων.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα – Η επόμενη μέρα

Κατά τη λειτουργία τους, οι μονωτήρες υπόκεινται σε μια σειρά ταυτόχρονων καταπονήσεων που επηρεάζουν μακροπρόθεσμα την απόδοσή τους (χημική προσβολή, βιολογική προσβολή, ρύπανση, ηλεκτρική καταπόνηση, μηχανική καταπόνηση, θερμική καταπόνηση). Οι μηχανισμοί επιφανειακής γήρανσης περιλαμβάνουν την αλλοίωση από διάβρωση, υγρασία, θερμότητα, εκκενώσεις corona, βακτήρια-μύκητες κ.λ.π.

Τα πολυμερή υλικά συνήθως υπερτερούν της πορσελάνης σε περιβάλλον με συνθήκες ρύπανσης, αλλά πρέπει να σχεδιαστούν επαρκώς έτσι ώστε ν' ανθίστανται σ' αυτές τις συνθήκες χωρίς να επιταχύνεται η γήρανση. Η εξαιρετική επίδοση στην επίδραση της ρύπανσης των μη κεραμικών μονωτήρων οφείλεται στην πολύ καλή ιδιότητα της υδρόφοβης επιφάνειας των δίσκων. Οι υδρόφιλοι ρυπαντές που επικάθονται στην επιφάνεια του μονωτήρων από σιλικονούχο καουτσούκ βαθμιαίως αποκτούν υδρόφοβες ιδιότητες με μια διαδικασία που αποκαλείται μεταφορά της υδροφοβικότητας. Στη φυσική ή χημική προσρόφηση των αλυσίδων χαμηλού μοριακού βάρους από το στρώμα ρύπανσης αποδόθηκε η δυνατότητα των πολυμερών μονωτήρων να μεταφέρουν την υδρόφοβη συμπεριφορά τους στους ρυπαντές και να ανακτούν την υδροφοβικότητα της επιφάνειάς τους μετά από περιόδους προσωρινής απώλειας. Μόνιμη απώλεια της υδροφοβικότητας εντοπίζεται στις περιοχές ενίσχυσης του ηλεκτρικού πεδίου. Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ των σταγόνων ύδατος προκαλούν μόνιμη ή προσωρινή απώλεια της υδροφοβικότητας του πολυμερούς υλικού. Ο συνδυασμός της υψηλής θερμοκρασίας της εκκένωσης και του ιονισμένου περιβάλλοντος του αέρα από υδρατμούς επίσης οδηγούν στην απώλεια της υδροφοβικότητας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η στοιχειώδης αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου μίας σταγόνας ύδατος επάνω στην περιοχή του περιβλήματος και στην περιοχή του δίσκου ενός συνθετικού μονωτήρα από σιλικονούχο καουτσούκ. Με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος πεδιακής ανάλυσης Opera 3D V10.5 προσομοιώνεται τόσο η περιοχή του περιβλήματος του μονωτήρα όσο και η περιοχή του δίσκου με το

γεωμετρικό μοντέλο που παρουσιάζεται στη δημοσιευμένη ερευνητική εργασία του W. Que. Τα αποτελέσματα της εργασίας του W. Que ελήφθησαν με το εμπορικά διαθέσιμο πρόγραμμα COULOMB, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ο σκοπός αυτής της επιλογής ήταν να συγκριθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της παρούσας εργασίας και να ελεγχθεί η αξιοπιστία της χρησιμοποιούμενης μεθόδου. Στα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρατηρήθηκαν αποκλίσεις της τάξεως του 9% από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής αναφοράς στον προσδιορισμό της μεγίστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μετά την εναπόθεση σταγόνας ύδατος στην περιοχή του περιβλήματος και του δίσκου του μονωτήρα.

Κατά την εξαγωγή των γραφημάτων με το πρόγραμμα προσομοίωσης Opera 3D V10.5 παρατηρείται ότι η υπολογιζόμενη μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από τις διαστάσεις των ηλεκτροδίων μεταξύ των οποίων τοποθετείται το μονωτικό φύλλο και εφαρμόζεται η διαφορά δυναμικού τόσο στην περιοχή του περιβλήματος όσο και στην περιοχή του δίσκου.

Για μία σταγόνα ύδατος επάνω στην περιοχή του περιβλήματος, η μέγιστη τιμή της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι στο σημείο της συμβολής της σταγόνας ύδατος, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Επιβεβαιώνεται στην παρούσα εργασία, όπως και στην εργασία του W. Que, ότι η x διάσταση (κατά τους άξονες του μοντέλου στο πρόγραμμα OPERA 3D) του ανύσματος της εντάσεως του ηλεκτρικού πεδίου είναι η κυρίαρχη παράμετρος.

Μελετάται η επίδραση του μεγέθους της σταγόνας ύδατος στην αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του περιβλήματος. Οι διάμετροι των χαρακτηριστικών σταγόνων ύδατος κυμαίνονται από 2 έως και 8 mm όποτε και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται κατά 68% από 2816 V/m στην τιμή 4723 V/m αντίστοιχα.

Η επίδραση της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας στην αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του περιβλήματος δεν είναι σημαντική. Συγκεκριμένα για τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς της σταγόνας ύδατος από 80 έως 160 σημειώνεται αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά 4% από 2983 V/m στην τιμή 3123 V/m.

Το αποτέλεσμα της απόστασης μεταξύ παρακείμενων σταγόνων ύδατος μετράται στην περιοχή του περιβλήματος με ένα ζεύγος σταγόνων ύδατος διαμέτρου 8mm και σχήματος ημισφαιρίου των οποίων η απόσταση μεταξύ τους αυξάνεται από 2mm σε 8 mm. Η τιμή της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου καθώς αυξάνεται η απόσταση μειώνεται κατά 52% από 2641 V/m στην τιμή 1265 V/m. Το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται όταν η απόσταση D μεταξύ των δύο σταγόνων ύδατος γίνει μεγαλύτερη από τη διάμετρό τους d . Η επιρροή της μίας σταγόνας ύδατος στην άλλη μπορεί να αγνοηθεί όταν η μεταξύ τους απόσταση γίνει μεγαλύτερη από τη διάμετρό τους.

Παρατηρούμε ακόμη ότι όσο η διάμετρος των σταγόνων d είναι μεγαλύτερη από τη μεταξύ τους απόσταση D , οι τιμές της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζονται στη διεπιφάνεια του μονωτικού υλικού, της σταγόνας ύδατος και του αέρα και στα σημεία που βρίσκονται ανάμεσα στις δύο σταγόνες. Μόλις η απόσταση των δύο σταγόνων γίνει ίση ή και μεγαλύτερη από τη διάμετρό τους η μέγιστη τιμή της έντασης εμφανίζεται στη διεπιφάνεια του μονωτικού υλικού, του αέρα και της σταγόνας ύδατος που βρίσκεται από την πλευρά του φορτισμένου ηλεκτροδίου. Η δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή η μέγιστη τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου σημειώνεται όταν η απόσταση μεταξύ των σταγόνων ύδατος είναι ίση με τη διάμετρο των σταγόνων ($D=d$). Τότε, στη διεπιφάνεια του μονωτικού φύλλου, του αέρα και της σταγόνας ύδατος από την πλευρά του φορτισμένου ηλεκτροδίου είναι $E_{\max}=5437$ V/m.

Για μία σταγόνα ύδατος στην περιοχή του δίσκου, η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι στην κορυφή της σταγόνας ύδατος.

Επιβεβαιώνεται στην παρούσα εργασία, όπως και στην εργασία του W. Que, ότι στην περιοχή του δίσκου η κατά τη διεύθυνση y συνιστώσα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι η κυρίαρχη παράμετρος (κατά τους άξονες του μοντέλου στο πρόγραμμα OPERA 3D).

Η επίδραση του μεγέθους της σταγόνας στην περιοχή του δίσκου δεν είναι τόσο σημαντική στην αύξηση της μέγιστης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (2%) σε σχέση με την περιοχή του περιβλήματος (68%).

Μελετάται επίσης το αποτέλεσμα της παρουσίας πολλών σταγόνων ύδατος στην περιοχή του δίσκου, οπότε και λαμβάνεται τιμή υψηλής έντασης ηλεκτρικού πεδίου στην κορυφή της κάθε σταγόνας.

Ενδιαφέρον θα ήταν σε μελλοντική εργασία να δημιουργηθεί πραγματικό μοντέλο μονωτήρα και να προσομοιωθεί το ηλεκτρικό του πεδίο με το πρόγραμμα OPERA 3D παρουσία σταγόνων ύδατος. Στο πραγματικό μοντέλο μονωτήρα θα μπορούσε να εξεταστεί η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στη διεπιφάνεια περιβλήματος και δίσκου παρουσία σταγόνων ύδατος και σε συνάρτηση με την ακτίνα που περιβάλλει την περιοχή περιβλήματος και την περιοχή του δίσκου, δεδομένου ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σημαντικά υψηλότερη στη διεπιφάνεια μεταξύ περιβλήματος και δίσκου.

Βιβλιογραφία

- [1] I.A. Σταθόπουλος, “Υψηλές Τάσεις Ι”, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα.
- [2] J.S.T. Looms, “Insulators for high voltages”, Peter Peregrinus Ltd., London, Unighted Kingdom, 1990.
- [3] Κ.Θ. Δέρβος, “Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων”, Εκδόσεις Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2001.
- [4] IEC 507, “Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems”, 1975.
- [5] T. Fujimura, “The evolution of porcelain insulator technology in Japan”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 3, May/June 1995, pp. 26-36.
- [6] H.M. Schneider, J.F. Hall, G. Karady, J. Rendowden, “Nonceramic insulators for transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 2214-2221.
- [7] Βασικές έννοιες στερεάς κατάστασης”, Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.ceid.upatras.gr/courses/electron/oldsite/kefalaio1.html>.
- [8] IEC 507, “Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems”, 1991.
- [9] F.V. Topalis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Dielectric behaviour of polluted porcelain insulators”, IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 4, July 2001, pp. 269-274.
- [10] CIGRE Working Group 04 of Study Committee No. 33, “The measurement of site pollution severity and its application to insulator dimensioning for A.C. systems”, Electra No. 64, May 1979, pp. 101-116.
- [11] IEC TS 62073, “Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces”, 2003.
- [12] Α. Κεχαγιόγλου, Γ. Καραγιαννίδη, Ε. Σιδερίδου-Καραγιαννίδου “Χημεία και Τεχνολογία Πολυμερών”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 1992.

- [13] Γ.Ε. Μανουσάκη, Γενική και Ανόργανη Χημεία, Εκδόσεις Αδελφών Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη 1987, pp. 500-501.
- [14] Κ.Ε. Κοντομάρης, Φ.Α. Σουρτζής “Μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μονωτήρων”, Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Υψηλών τάσεων Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005.
- [15] J. Mackevitch, M. Shah, “Polymer Outdoor Insulating Materials Part I: Comparison of Porcelain and Polymer Electrical Insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 3, May/June 1997, pp. 5-12.
- [16] E.L. Leguenza, P.C.N. Scarpa, D.K. Das-Gupta, “Dielectric Behavior of Aged Polyethylene Under UV Radiation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 4, August 2002, pp 507-513.
- [17] J.P. Holtzhausen, “High voltage insulators”, Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.idc-online.com/assets/files/highvoltage.pdf>.
- [18] IEC 1109, “Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V – Definitions, test methods and acceptance criteria”, 1992.
- [19] IEC 815, “Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions”, 1986.
- [20] J. Mackevich, S. Simmons, “Polymer Outdoor Insulating Materials Part II – Material Considerations”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 4, July/August 1997, pp. 10-16.
- [21] Κ. Καγκαράκης, “Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.
- [22] Σημειώσεις εργαστηριακής άσκησης «Απώλειες Corona σε γραμμές υψηλής τάσης», Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Ε.Μ.Π.
- [23] P. P. Silvester, R. L. Ferrari, “Finite elements for electrical engineers”, Third edition, Cambridge University Press, Great Britain, 1996.
- [24] Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος: “Ανάλυση Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας με τη βοήθεια H/Y”.
- [25] Vector Fields, “OPERA-3d User Guide”, Vector Fields Limited, England, February 2004.

- [26] S.H. Kim, E.A. Cherney, R. Hackam, “Hydrophobic behavior of insulators coated with RTV silicone rubber”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, June 1992, pp. 610-622.
- [27] R. Hartings, “The AC-Behavior of a hydrophilic and hydrophobic post insulator during rain”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1584-1592.
- [28] K. Σιδεράκης, E. Θαλασσινάκης, M. Σιδεράς, Δ. Αγορής, “Μηχανισμός ανάκαμψης της επιφανειακής υδροφοβίας λόγω της διάχυσης μορίων χαμηλού μοριακού βάρους σε επικαλύψεις RTV silicone rubber”, Σύνοδος Αθήνα 2003, E.E. CIGRE, Αθήνα, 27-28 Νοεμβρίου 2003.
- [29] S. Wang, X. Liang, Z. Cheng, X. Wang, Z. Li, Y. Zhou, Y. Yin, L. Wang, Z. Guan, “Hydrophobicity changing of silicone rubber insulators in service”, CIGRE Session 2002, Paris, 26-30 August 2002, pp. 15 305.
- [30] K. Ikeda, M. Ito, T. Sanpei, R. Matsuoka, K. Kondo, S. Ito, “Evaluation methods of contamination flashover voltages of hydrophobic polymer insulators”, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [31] STRI Guide, “Hydrophobicity Classification Guide”, 1992.
- [32] W. Que, “Electric Field and Voltage Distributions Dissertation 2002”
- [33] A.J. Philips, D.J. Childs, H.M. Schneider, “Aging of Non-Ceramic Insulators due to Corona from Water Drops”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No. 3, July 1999, pp. 1081-1089.
- [34] STRI Guide, “Guide for Visual Identification of Deterioration & Damages on Suspension Composite Insulators”, 2003.
- [35] S. Simmons, M. Shah, J. Mackevich, R.J. Chang, “Polymer Outdoor Insulating Materials Part III – Silicone Elastomer Considerations”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 5, September/October 1997, pp. 25-32.
- [36] J.K. Kim, I.H. Kim, “Characteristics of Surface Wettability and Hydrophobicity and Recovery Ability of EPDM Rubber and Silicone Rubber for Polymer Insulators”

- [37] S. Wang, X. Liang, Z. Cheng, X. Wang, Z. Li, Y. Zhou, Y. Yin, L. Wang, Z. Guan, "Hydrophobicity changing of silicone rubber insulators in service", CIGRE Session 2002, Paris, 26-30 August 2002, pp. 15 305.
- [38] W. Que, S.A. Sedo, "Typical cases of electric field and voltage distribution calculations along composite insulators under dry and wet conditions", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands, August 2003.
- [39] C.S. Richards, C.L. Benner, K.L. Butler-Purry, B. Don Russell, "Electrical behavior of contaminated distribution insulators exposed to natural wetting", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, April 2003, pp. 551-558.