Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

"ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ"



Επιβλέπων Καθηγητής: ΨΩΜΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
Σπουδαστής: ΣΚΛΑΒΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΑΜ: 31127

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ - 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ όλους όσους με βοήθησαν στην εργασία αυτή όπως τον εισηγητή μου κ. Κων/νο Ψωμόπουλο Επικ. Καθηγητή για την παροχή στοιχείων και πηγών πληροφόρησης καθώς και το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για την παροχή πληροφοριών πάνω στους υπολογισμούς των μονωτήρων στις Υψηλές Τάσεις και το φωτογραφικό υλικό του εργαστηρίου που βοήθησαν για την ολοκλήρωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες ..... **i**
Περιεχόμενα ..... **ii**
Λίστα σχημάτων ..... **iv**
Λίστα πινάκων ..... **vi**
Summary ..... **vii**
Πρόλογος **1**
1 ο Κεφάλαιο "Γενικά περι Υψηλών Τάσεων" **2**
1.1 Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων 2
1.2 Εξέλιξη των Υψηλών Τάσεων και λόγοι επικράτησης αυτών 2
1.3 Προβλήματα από την χρήση Υψηλών Τάσεων 4
1.4 Διάκενα Αέρος 5
2 ο Κεφάλαιο " Ηλεκτροστατικό Πεδίο " **6**
2.1 Ηλεκτροστατικό Πεδίο 6
2.2 Μέθοδοι Υπολογισμού Ηλεκτροστατικών Πεδίων 9
3 ο Κεφάλαιο " Ηλεκτρικά Πεδία στις Διατάξεις Υψηλών Τάσεων " **11**
3.1 Μέθοδοι Υπολογισμού των Ηλεκτρικών Πεδίων στις Διατάξεις Υψηλών Τάσεων 11
3.1.1 Μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου 12
3.1.1.1 Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων των Rasolonjanahary Krahenbuhl και Nicolas *12*
3.1.1.2 Η μέθοδος προσομοίωσης φορτίου των Chakravorti και Mukherjee *14*
3.1.1.3 Η μέθοδος διαφορικών εξισώσεων των Skopec, Wankowiez και Sikorski *16*
3.1.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων 17
3.1.2.1 Η μέθοδος των Asenjo Morales και Valdenegro *17*
3.1.2.2 Μια απλοποίηση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων από τον Imre Sebestyen *19*
3.2 Σταθερό (Συνεχές) Ηλεκτρικό Πεδίο 21
3.3 Ημιτονοειδές Ηλεκτρικό Πεδίο 22
4 ο Κεφάλαιο " Μονωτήρες Υψηλών Τάσεων " **24**
4.1 Γενικά στοιχεία για τους μονωτήρες 24
4.1.1 Χρησιμότητα των μονωτήρων 24
4.1.1.1 Ιδιότητες των μονωτήρων *24*
4.1.2 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τη θέση τους στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς 30
4.1.3 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους 33
4.2 Υλικά για την κατασκευή μονωτήρων 34
4.2.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών 34
4.2.2 Ιδιότητες πορσελάνης 35
4.2.3 Ιδιότητες σκληρυμένου γυαλιού 36
4.2.4 Ιδιότητες πολυμερών 36
4.2.5 Ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες μονωτικών διηλεκτρικών 37
4.3 Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης στα μονωτικά υλικά 38
4.3.1 Σημασία αποφυγής της αστοχίας των μονωτήρων 38
4.3.2 Αγωγιμότητα όγκου και επιφανειακή αγωγιμότητα 38
4.3.3 Η ηλεκτρική διάσπαση 39
4.4 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες 41
4.5 Μορφές ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων 42
4.5.1 Ανάλυση του φαινομένου 42
4.5.2 Θαλάσσια Ρύπανση 42
4.5.3 Βιομηχανική Ρύπανση 44
4.6 Ρύπανση – Παράγοντας αύξησης της επιφανειακής αγωγιμότητας 46

4.6.1 Επίδραση της υγρασίας σε συνδυασμό με ρύπανση 46
4.6.2 Ρύπανση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση 46
4.7 Το φαινόμενο της υπερπήδησης – Φυσική ερμηνεία 47
4.7.1 Σχηματισμός «ξηρών ζωνών»....47
4.7.2 Υπερπήδηση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση....48
4.8 Τεχνικές αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ρύπανσης 48
4.9 Αρχές σχεδίασης του μονωτήρα.... 49
5 ο Κεφάλαιο "Υπολογισμός του Ηλεκτρικού Πεδίου σε Μονωτήρες Τασεων με χρήση Υπολογιστικών Εργαλείων" 51
5.1 Αριθμητικές μέθοδοι 51
5.2 Προσομοιώσεις μονωτήρων με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων 52
5.3 Αριθμητική επίλυση του ηλεκτροστατικού πεδίου με τον υπολογιστή 75
5.3.1 Γενικές παρατηρήσεις 75
5.3.2 Περιγραφή της μεθόδου των διαδοχικών διαφορών 75
5.3.3 Τύπος διαγωνίων....78
5.3.4 Τύπος συμμετρίας....78
5.3.5 Τύπος ορίου περιοχής....79
5.3.6 Τύπος διηλεκτρικής σταθεράς 79
5.3.7 Μείωση των διαστάσεων του πλέγματος 80
5.3.8 Παράδειγμα Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου με την Βοήθεια του Liza 81
Βιβλιογραφία....95
Παράρτημα 1....98
Παράρτημα 2....115

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ ακίδας και πλάκας……7
Σχήμα 3.1 Το προτεινόμενο μοντέλο του ρυπασμένου μονωτήρα..... 12
Σχήμα 3.2 Καθορισμός των Ψ1 και Ψ2 13
Σχήμα 3.3 Η διάταξη μονωτήρα σε μια κυλινδρικά συμμετρική διάταξη..... 17
Σχήμα 3.4 Τριγωνικό στοιχείο k..... 18
Σχήμα 3.5 Διαίρεση του πεδίου D σε δύο υποπεδία D1 και D2 20
Σχήμα 3.6 Σχηματικά η υπόθεση της εργασίας του Sebestyen..... 20
Σχήμα 4.1 Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης 26
Σχήμα 4.2 Μονωτήρας τύπου pin..... 27
Σχήμα 4.6 Σύνθετος πολυμερής μονωτήρας 29
Σχήμα 4.7 Γυάλινοι μονωτήρες σε διάταξη ιστού..... 30
Σχήμα 4.8 Γυάλινοι μονωτήρες σε διάταξη ιστού..... 31
Σχήμα 4.9 Πορσελάνινοι μονωτήρες στηρίξεως ζυγών 66kV 31
Σχήμα 4.10 Γυάλινοι μονωτήρες σε διάταξη λάμδα..... 32
Σχήμα 4.11 Γυάλινοι μονωτήρες σε πυλώνες διέλευσης..... 32
Σχήμα 4.12 Πορσελάνινοι μονωτήρες τύπου ομίχλης 150 kV..... 33
Σχήμα 4.13 Γυάλινοι μονωτήρες κανονικού τύπου..... 34
Σχήμα 4.14 Πορσελάνινοι μονωτήρες κανονικού τύπου..... 34
Σχήμα 4.15 Πορσελάνινοι μονωτήρες σε πυλώνες 35
Σχήμα 4.16 Γυάλινοι μονωτήρες σε τερματικούς πυλώνες 36
Σχήμα 4.17 Γυάλινοι μονωτήρες σε πυλώνα αεροδρομίου 37
Σχήμα 4.18 Η μεταβολή της έντασης του ρεύματος σε ένα μονωτικό υλικό, σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση, μέχρι την ηλεκτρική διάσπαση..... 39
Σχήμα 4.19 Διάφορες μορφές ηλεκτρικών εκκενώσεων σε αέρια σώματα, ανάλογα με την πίεση του αερίου, τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων, την ένταση του πεδίου…….40
Σχήμα 4.20 Η απώλεια της μονωτικής δράσης ενός στερεού μονωτικού μπορεί να γίνει με ηλεκτρική διάσπαση του υλικού ή με υπερπήδηση που εκδηλώνεται με ρεύμα ερπυσμού και με διάσπαση στον αέρα…….42
Σχήμα 4.21 Γύαλινος ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας κανονικού τύπου 400 kV αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες..... 43
Σχήμα 4.22 Ρυπασμένος πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης 400 kV, αποτελούμενος από δεκαέξι (16) δισκοειδείς μονωτήρες..... 44
Σχήμα 4.23 Ρυπασμένος πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου κανονικού 400 kV, αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες..... 45
Σχήμα 5.1 Υγρός μονωτήρας (a) πριν την εκφόρτιση και (β) κατά την εκφόρτιση..... 53
Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση των κατηγοριών ύγρανσης..... 56
Σχήμα 5.3 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας. τύπου ομίχλης. αποτελούμενος από
Σχήμα 5.3 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης αποτελούμενος απο δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες..... 58
Σχήμα 5.4 Καθαρός πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας τύπου ομίχλης αποτελούμενος από δεκαέξι (16) δισκοειδείς μονωτήρες,..... 59
Σχήμα 5.5 Επίδραση της ύπαρξης ή μη του αγωγού στην ένταση του πεδίου. 61
Σχήμα 5.6 Φαινόμενο Corona λόγω (α) σταγόνων νερού και (β) ξηρής ζώνης..... 63
Σχήμα 5.7 Το σπάσιμο μονωτήρα τύπου-R 64

Σχήμα 5.8 Ηλεκτρική διάβρωση πολυμερούς μονωτήρα σε γραμμή μεταφοράς 330 kV 65
Σχήμα 5.9 Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις ενός μη-κεραμεικού μονωτήρα:(a) πυρήνας (b) ελαστομερείς δίσκοι (c) περίβλημα από πολυμερές υλικό (d) ηλεκτρόδιο γείωσης και (e) τοροειδές (grading ring). 66
Σχήμα 5.10 Γυάλινοι μονωτήρες σε κατεβατά. 67
Σχήμα 5.11 Σύγκριση της κατανομής της τάσης σε κεραμεκούς και μη-κεραμεικούς μονωτήρες 68
Σχήμα 5.12 Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα χωρίς τοροειδές... 68
Σχήμα 5.13 Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα με τοροειδές..... 69
Σχήμα 5.14 Μέθοδος Buzz. 70
Σχήμα 5.15 Κατεύθυνση λήψης των αξονικών μετρήσεων. 71
Σχήμα 5.16 Κατεύθυνση λήψης των ακτινικών μετρήσεων. 72
Σχήμα 5.17 Μοντέλο χωρητικοτήτων πορσελάνινου μονωτήρα 74
Σχήμα 5.18 Ορθογώνιο πλέγμα διαδοχικών σημείων σε ίσες αποστάσεις h μεταξύ τους, προς
Σχήμα 5.19 Προς εφαρμογή της μεθόδου των διαδοχικών διαφορών..... 76
Σχήμα 5.20 Προς εξαγωγή των τύπων υπολογισμού των δυναμικών σε όρια περιοχών……79
Σχήμα 5.21 Προς διατύπωσης του τύπου των δυναμικών στη γειτονία της οριακής επιφάνειας μεταξύ δύο διηλεκτρικών……...80
Σχήμα 5.22 Προς εκλέπτυνση του πλέγματος σημείων των οποίων υπολογίζεται το δυναμικό……...81

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 8
Πίνακας 4.1 38
Πίνακας 5.1 85

SUMMARY

Purpose of this work is to study the distribution of the electric field developed in transmission line insulators under the influence or not pollution.

The first chapter, which is introducing of the work is a brief reference to the high voltages developments and problems arising from their use

The second chapter sets out the key features of the electrostatic field and describes the methods for calculating electrostatic fields.

The third chapter follows a review of some important studies on the numerical methods for calculating the electric field to the provisions of insulators. These studies fall into two categories depending on the type of analytical methods used. In the first category are the finite elements and finite differences methods, while in the second simulation category electric charge and boundary elements methonds.

The fourth chapter summarizes the types of insulators which can be found in electrical installations, and the main fields of application. Also, refer to conditions under which it is possible to lead to failure of the provisions of insulators, while indicating the phenomenon of skipping as the major mechanism for loss of insulating properties of the latter. Furthermore, an analysis of the pollutions impact and method to reduce this impact can be found.

The fifth chapter follows an introduction to numerical methods, which solve problems of distribution potential and electric field. Is an overview of some important studies on the numerical calculation methods, using various software packages, the electric field to the provisions of insulators. In addition, some experimental studies, which calculated the maximum stress resistance in insulators under pollution conditions and ice.

Keywords: Electric Field, High Voltage Insulators, Liza Finite Element Technologies (Liza-fet)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται σε μονωτήρες γραμμών μεταφοράς υπό την επίδραση ή όχι ρύπανσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί εισαγωγή της εργασία, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις υψηλές τάσεις την εξέλιξη τους και τα προβλήματα που προκύπτουν από την χρήση τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εκτίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, και περιγράφονται οι μέθοδοι υπολογισμού ηλεκτροστατικών πεδίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο ακολουθεί μια ανασκόπηση ορισμένων σημαντικών μελετών σχετικών με τις αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου σε διατάξεις μονωτήρων. Οι μελέτες αυτές διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το είδος των αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, ενώ στη δεύτερη οι μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου και οι μέθοδοι συνοριακών στοιχείων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα είδη των μονωτήρων που μπορεί κανείς να συναντήσει στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές, καθώς και τα κυριότερα πεδία εφαρμογής τους. Ακόμα, γίνεται αναφορά στις συνθήκες, κάτω από τις οποίες είναι δυνατό να οδηγηθούν σε αστοχία οι διατάξεις των μονωτήρων, ενώ υποδεικνύεται το φαινόμενο της υπερπήδησης ως ο σημαντικότερος μηχανισμός απώλειας της μονωτικής ιδιότητας των τελευταίων. Επιπλέον, αναλύεται η επίδραση του φαινομένου της ρύπανσης ως παράγοντας που μπορεί να ευνοήσει την υπερπήδηση και προτείνονται τρόποι αντιμετώπισής του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο ακολουθεί μια εισαγωγή στις αριθμητικές μεθόδους, με τις οποίες επιλύονται προβλήματα κατανομής δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου. Γίνεται μια ανασκόπηση ορισμένων σημαντικών μελετών σχετικών με τις αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού, με χρήση διαφόρων πακέτων λογισμικού, του ηλεκτρικού πεδίου σε διατάξεις μονωτήρων. Επιπλέον, παρουσιάζονται κάποιες πειραματικές μελέτες, στις οποίες υπολογίζεται η μέγιστη τάση αντοχής σε μονωτήρες υπό συνθήκες ρύπανσης και πάγου.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό Πεδίο, Μονωτήρες Υψηλών Τάσεων, Υπερπήδηση, σχεδιασμός μονωτήρων, Liza Finite Element Technologies (Liza-fet) .

1^{Ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ

"ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ"

1.1 Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων

Η τεχνολογία των υψηλών τάσεων έχει αναπτυχθεί κυρίως εξ αιτίας της ανάγκης μεταφοράς με τον πιο οικονομικό τρόπο μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σε μεγάλες αποστάσεις. Υπάρχουν όμως και εφαρμογές Υ.Τ. σε πληθώρα άλλων περιπτώσεων που δεν σχετίζονται με την μεταφορά ενέργειας. Γι' αυτό οι εφαρμογές των Υ.Τ. χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στις ενεργειακές και στη μη ενεργειακές.

Οι ενεργειακές εφαρμογές σήμερα περιλαμβάνουν επιπλέον της μεταφοράς και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως υψηλή τάση, σύμφωνα με του κανονισμούς I.E.C. ορίζεται κάθε τάση μεγαλύτερη από 1000V. Συνηθίζεται όμως τάσεις μεταξύ 10 – 30 KV να θεωρούνται μέσης τάσεις ενώ τάσεις άνω των 275KV θεωρούνται υπερυψηλές τάσεις.

Οι μη ενεργειακές εφαρμογές συνήθως απαιτούν συνεχή τάση. Τέτοιες εφαρμογές είναι σε επιστήμες του περιβάλλοντος με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, στην ιατρική χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ακτίνων Χ καθώς και για τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια. Η νεότερη ηλεκτρονική χρησιμοποιεί Υ.Τ. στην τεχνική εμφύτευσης ιόντων σε ημιαγωγούς, επίσης στους παλμογράφους στις τηλεοράσεις και στους καθόδους σωλήνες. Ανέκαθεν όμως οι Υ.Τ. χρησιμοποιούνται σε radar και στους ασυρμάτους αλλά και στους ηλεκτρικούς σιδηροδρόμους καθώς και στους αναφλεκτήρες (μπουζί) των αυτοκινήτων στους βενζινοκινητήρες.

1.2 Εξέλιξη των Υψηλών Τάσεων και λόγοι επικράτησης αυτών

Όπως προαναφέρθηκε οι Υ.Τ. εξελίχτηκαν και αναπτύχθηκαν λόγω της χρησιμοποίησης αυτών σε ενεργειακές εφαρμογές, κυρίως για λόγους οικονομικούς, με σκοπό την μείωση των απωλειών. Για να γίνει αυτό καλύτερα κατανοητό θα χρειαστεί να αναφερθεί ο τύπος που δίνει τις απώλειες Joule Pj σε ένα τριφασικό σύστημα μεταφοράς, οποίος είναι:

$$P_j = 3I^2 rl \qquad (1.1)$$

Όπου I η ενεργός τιμή της εντάσεως ανά φάση r η αντίσταση γραμμής ανά km μήκους και φάση, και l το μήκος γραμμής.

Και επειδή η ένταση σε σχέση με τη συνολική P είναι :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\phi} \tag{1.1}$$

Όπου U η ενεργός τιμή της πολικής τάσεως και cosφ ο συντελεστής ισχύος. Αντικαθιστώντας στην 1.1 το ρεύμα I θα έχουμε:

$$P_j = \frac{P^2 rl}{(U\cos\phi)^2} \tag{1.3}$$

Οπότε γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι απώλειες είναι αντίστροφα ανάλογες προς το τετράγωνο της πολική τάσεως της γραμμής. Επί πλέον από την εξίσωση 1.3 φαίνεται ότι η ανάγκη για μεταφορά υπό υψηλή τάση γίνεται τόσο πιο απαραίτητη όσο μεγαλύτερη είναι η μεταφερόμενη ενέργεια και όσο μακρύτερη είναι γραμμή.

Πέρα από το θέμα της οικονομική λειτουργίας μια γραμμής τίθεται και θέμα ευστάθειας αυτής. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ο όρος **φόρτιση κρουστικής αντίστασης** ή αλλιώς **φυσική ισχύς.** Η φυσική ισχύς είναι η ισχύς την οποία αποδίδει η γραμμή σε ένα καθαρά ωμικό φορτίο ίσο με την κρουστική της αντίσταση. Η φυσική ισχύς μας δίνει μια πρώτη εκτίμηση στο πόσο μπορούμε να φορτίσουμε τη γραμμή και η οποία είναι μικρότερη από την $P_{max.}$ Η P_{max} είναι 1.5 έως 2 φορές μεγαλύτερη από την φυσική ισχύ. Η φυσική ισχύς δίνεται από τον τύπο:

$$P_{\Phi KA} = \frac{U^2}{Z_0} \tag{1.4}$$

Όπου Z_0 η κρουστική αντίσταση της γραμμής. Έτσι και πάλι προκύπτει ότι για μεγαλύτερη μεταφερόμενη ισχύ απαιτείται και υψηλότερη τάση.

Τέλος ένας άλλος λόγος χρησιμοποίησης Υ.Τ. είναι ότι σημειώνεται μικρότερη πτώση τάσης σε γραμμές μεγάλου μήκους, όπου, η πτώση τάσεως δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\Delta U}{U} = \left[\left(\frac{P^2}{P_{\Phi KA}^2} - 1\right) 19.72\left(\frac{1}{\lambda}\right)\right] \tag{1.5}$$

Όπου λ το μήκος κύματος (περίπου 6000km). Και από την εξίσωση φαίνεται ότι η ύπαρξη υψηλότερης τάσης, άρα και μεγαλύτερης φυσικής ισχύος, συνεπάγεται και μικρότερη πτώση τάσεως κατά μήκος της γραμμής.

Όλα τα προηγούμενα σε συνδυασμό με την τεράστια αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας μας οδηγούν στο να εξελιχτεί στο μέγιστο δυνατό το επίπεδο τάσεως λειτουργίας των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλών εναλλασσομένων τάσεων (H.V.A.C).

Η πρώτη μεγάλη γραμμή με υψηλή τάση 10kV κατασκευάστηκε στο Λονδίνο το 1890 και είχε μήκος 45km. έτσι από το 1910 λειτουργούσαν γραμμές τάξεως μεγέθους 100kV, ενώ από το 1940 υπήρχαν σε χρήση γραμμές των 380kV. Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 60 είχαμε τεράστια άλματα στην εξέλιξη των Υ.Τ. αφού υπήρξε μεταφορά σε αποστάσεις των 1000km, ισχύων της τάξης του 1GW με τάσεις μέχρι και 800kV. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν, για το άμεσο μέλλον, ανάγκες μεταφοράς ισχύος 10GW, που γι' αυτές θα χρειαστούν τάσεις πάνω από 1000kV. Σε αυτά τα επίπεδα τάσεων υπάρχουν δυσεπίλυτα προβλήματα που όμως οι μηχανικοί ελπίζουν ότι στο μέλλον θα αντιμετωπιστούν.

Όσον αφορά την μορφή των τάσεων σήμερα ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται συστήματα A.C. τα οποία επικράτησαν λόγω της μεγάλης δυνατότητας που έχουν αυτά να μετασχηματίζονται. Τα τελευταία όμως χρόνια η μεταφορά υπό συνεχείς υψηλές τάσεις H.V.D.C., λόγο και της μεγάλης εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος, έχει γίνει τεχνολογικά δυνατή. Έτσι και αυτές κερδίζουν σιγά σιγά έδαφος. Δεν παύει ωστόσο η ανύψωση και ο υποβιβασμός στην αρχή και στο τέλος της γραμμής να γίνονται σε A.C. από μετασχηματιστές και η μεταφορά να γίνεται σε D.C..Τα πλεονεκτήματα των γραμμών H.V.D.C. είναι ότι χρησιμοποιούν δυο καλώδια αντί των τριών που έχουν οι τριφασικές γραμμές H.V.A.C., έτσι μειώνεται το κόστος, επιπλέον η απουσία των χωρητικών ρευμάτων φορτίσεως κάνει περιττή τη χρήση αντιδράσεων αντισταθμίσεως. Ενώ το μεγαλύτερο μειονέκτημα των γραμμών H.V.D.C. είναι το υψηλότερο κόστος των σταθμών μετατροπής A.C. – D.C. και αντιστρόφως και η συνεπαγόμενη μεγάλη δυσκολία απομάστευσης ενέργειας σε ενδιάμεσα σημεία.

1.3 Προβλήματα από την χρήση Υψηλών Τάσεων

Οι τάσεις που προαναφέρθηκαν είναι οι τάσεις λειτουργίας των γραμμών ή και εγκαταστάσεων. Δεν αρκεί όμως οι μονώσεις να υπολογιστούν από την τάση λειτουργίας και αυτό γιατί συχνά εμφανίζονται στις εγκαταστάσεις, για διαφόρους λόγους, διάφορες υπερτάσεις. Έτσι, μετά από πειραματικές παρατηρήσεις ομαδοποιήθηκαν οι μορφές των ηλεκτρικών καταπονήσεων, που εμφανίζονται σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση, ώστε να μπορούν να παράγονται τάσεις αντίστοιχες με τις πραγματικές. Οι κυριότεροι τύποι υπερτάσεων είναι οι εξής:

1. **Υπερτάσεις από χειρισμούς ή εσωτερικές υπερτάσεις.** Αυτές εμφανίζονται στα δίκτυα ως οδεύοντα κύματα και οφείλονται στους διάφορους χειρισμούς ή σε σφάλματα. Συνήθως έχουν τη μορφή αποσβεννύμενης ταλαντώσεως με μέγιστο εύρος, για καλά προστατευόμενες γραμμές, ως 3 pu της τάσεως λειτουργίας. Αν όμως δεν υπάρχει η κατάλληλη προστασία μπορούν να φτάσουν και τα 7 pu. Οι υπερτάσεις από χειρισμούς αποτελούν τις πιο επικίνδυνες μορφές υπερτάσεων για δίκτυα e.h.v. ενώ για τα u.h.v. δεν έχουν καταφέρει οι μηχανικού ακόμα να τις αντιμετωπίσουν.

2. **Υπερτάσεις από κεραυνούς ή εξωτερικές υπερτάσεις.** Και αυτές εμφανίζονται ως οδεύοντα κύματα είναι μονόφορες και προκαλούνται είτε με απ' ευθείας πτώση κεραυνού πάνω στις γραμμές μεταφοράς όποτε έχουν εύρος μέχρι και 20000kV, είτε λόγο δευτερογενών υπερπηδήσεων όποτε δεν υπερβαίνουν συνήθως τις μερικές εκατοντάδες kV. Τέτοιες υπερτάσεις αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο για δίκτυα μέχρι 400kV.

3. **Υπερτάσεις από υπερπηδήσεις.** Αυτές εμφανίζονται κατά τις διασπάσεις των μονώσεων ανάμεσα σε δύο κυκλώματα διαφορετικής τάσεως οπότε το κύκλωμα με την χαμηλότερη τάση βρίσκεται ξαφνικά υπό τάση μεγαλύτερη από την τάση λειτουργίας του. Τέτοιες υπερτάσεις συναντάμε κυρίως στους μετασχηματιστές.

1.4 Διάκενα Αέρος

Η μόνωση ανάμεσα σε δύο στοιχεία ενός συστήματος που βρίσκονται σε διαφορετικές τάσεις ή μεταξύ ενός στοιχείου και της γης επιτυγχάνεται με την παρεμβολή ενός μονωτικού υλικού. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι οποιοδήποτε μη αγώγιμο υλικό, όπως είναι το λάδι, το γυαλί, ένα συνθετικό υλικό, ένα αέριο ή ο ατμοσφαιρικός αέρας. Η χρησιμοποίηση του ατμοσφαιρικού σαν μονωτικό υλικό είναι από τις πιο ενδιαφέρουσες εφ' όσον ο αέρας σαν υλικό έχει μηδενικό κόστος.

Ο αέρας ήταν το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε σαν μονωτικό σε ηλεκτρικές εφαρμογές. Το σπουδαιότερο πλεονέκτημα του, εκτός από το μηδενικό του κόστος, είναι ότι αποτελεί επανορθούμενη μόνωση. Μετά από μια διάσπαση δηλαδή, ανακτά πλήρως τις ιδιότητες του, σε αντίθεση με άλλα σύγχρονα μονωτικά υλικά. Το βασικό μειονέκτημα του είναι ότι διατάξεις με μόνωση αέρα έχουν μεγάλες διαστάσεις σε σχέση με διατάξεις που χρησιμοποιούν άλλα μονωτικά υλικά.

Τα πλεονεκτήματα όμως που παρουσιάζει έναντι των υπόλοιπων μονωτικών υλικών συντελούν στην ευρεία χρησιμοποίηση του, ακόμα και σήμερα σαν μονωτικό υλικό και μονό αν υπάρχουν λόγοι περιορισμένου χώρου, λειτουργικοί, αισθητικοί ή οικονομικοί χρησιμοποιούνται άλλα υλικά.

Για τη διαμόρφωση της μόνωσης αέρα πρέπει να είναι γνωστή η συμπεριφορά του αέρα σε ηλεκτρικές καταπονήσεις. Η επιστημονική διερεύνηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του αέρα άρχισε πολύ νωρίς με τις βασικές έρευνες των Townsend, Raether, Loeb, Meek και άλλων ερευνητών. Παρά τις εκτεταμένες θεωρητικές γνώσεις που αποκτήθηκαν από αυτές τις έρευνες μέχρι σήμερα, σε πολύ λίγες περιπτώσεις είναι δυνατή η πρόβλεψη της τάσης διάσπασης ενός μονωτικού διακένου όταν υπόκειται σε καταπονήσεις που εμφανίζονται υπό συνθήκες λειτουργίας.

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε και μια ημιεμπειρική τεχνική για τον υπολογισμό των αναγκών για τη μόνωση αποστάσεων. Η τεχνική αυτή συνιστάται στη διαμόρφωση κανόνων με τους οποίους εργαστηριακά αποτελέσματα μπορούν να επεκταθούν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Επειδή η ηλεκτρική διάσπαση ενός μονωτικού διακένου αέρα είναι στατικό φαινόμενο, η τάση διάσπασης ενός διακένου μπορεί να περιγραφεί με κάποια μέση τιμή, κάποια τυπική απόκλιση και κάποιο νόμο της θεωρίας πιθανοτήτων που το διέπει. Στα εργαστήρια συνήθως μελετώνται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα μονωτικό διάκενο διασπάται. Το ίδιο διάκενο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση έτσι ώστε να μην διασπάται. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας εργαστηριακές τιμές τάσεων διάσπασης με κανόνες της στατιστικής και της θεωρίας πιθανοτήτων. Για να καθορίσουμε την τάση αντοχής ενός διακένου αέρα, ενώ γνωρίζουμε την τάση διάσπασης του, θα πρέπει να γνωρίζουμε την στατική κατανομή που ακολουθεί η τάση διάσπασης του διακένου αυτού.

Στα εργαστήρια υψηλών τάσεων γίνονται δοκιμές σε ομοιογενή ή ανομοιογενή διάκενα διαφόρων μεγεθών με σκοπό την μελέτη της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του αέρα. Οι δοκιμές αυτές γίνονται με την χρήση γεννητριών υψηλής τάσεως και τα διάκενα καταπονούνται με συνεχείς εναλλασσόμενες και κρουστικές τάσεις, που αντιστοιχούν σε καταπονήσεις που εφαρμόζονται στα δίκτυα από υπερτάσεις, κατά την λειτουργία τους.

2^{Ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ

" ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ "

2.1 Ηλεκτροστατικό Πεδίο

*Ορισμός :*Ηλεκτρικό πεδίο είναι ο χώρος μέσα στον οποίο εάν τοποθετηθεί ένα φορτισμένο σωματίδιο θα ασκηθεί επάνω του δύναμη. Το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο του φορτίου και της έντασης του πεδίου.

Ένταση $\vec{E}$ σε ένα σημείο του ηλεκτρικού πεδίου, ονομάζουμε το διανυσματικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του μέτρου της δύναμης που ασκείται σε φορτίο q που βρίσκεται σε αυτό το σημείο προς το φορτίο αυτό και κατεύθυνση την κατεύθυνση της δύναμης, αν αυτή ασκείται σε θετικό φορτίο. Δηλαδή η ένταση σε ένα σημείο έχει την εξής κατεύθυνση: Διεύθυνση την ευθεία που ενώνει τα δύο σημειακά φορτία και φορά προς το φορτίο-πηγή αν είναι αρνητικό, αλλιώς την ίδια διεύθυνση και αντίθετη φορά. Αυτό συμβαίνει γιατί το δοκιμαστικό φορτίο θεωρείται μικρό και θετικό. Έτσι βλέπουμε ότι η ένταση έχει το πλεονέκτημα να είναι ανεξάρτητη του δοκιμαστικού φορτίου, αλλά διατηρεί το μειονέκτημα του διανύσματος. Αν αντικαταστήσουμε στον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου τον τύπο με τον οποίο υπολογίζουμε τη δύναμη, έχουμε:

$$\vec{E} = \frac{F}{|q_2|} \Leftrightarrow \vec{E} = \frac{k\frac{|q_1|\times|q_2|}{r^2}}{q_2} \Leftrightarrow \vec{E} = k\frac{|q_1|}{r^2} \tag{2.1}$$

Εάν έχουμε πολλά φορτία-πηγές, τότε το ηλεκτρικό πεδίο στο τυχαίο σημείο R θα είναι

$$\vec{E}(R) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{r_i^2}r_i \tag{2.2}$$

Ο παραπάνω ορισμός αφορά το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από έναν αριθμό σημειακών φορτίων. Μερικές φορές πρέπει να μελετήσουμε τις συνεχείς κατανομές φορτίου, όπως για παράδειγμα μια σφαίρα με φορτίο που είναι κατανεμημένο στην επιφάνειά της, ή ένας κύλινδρος με κατανεμημένο το φορτίο στο εσωτερικό του.

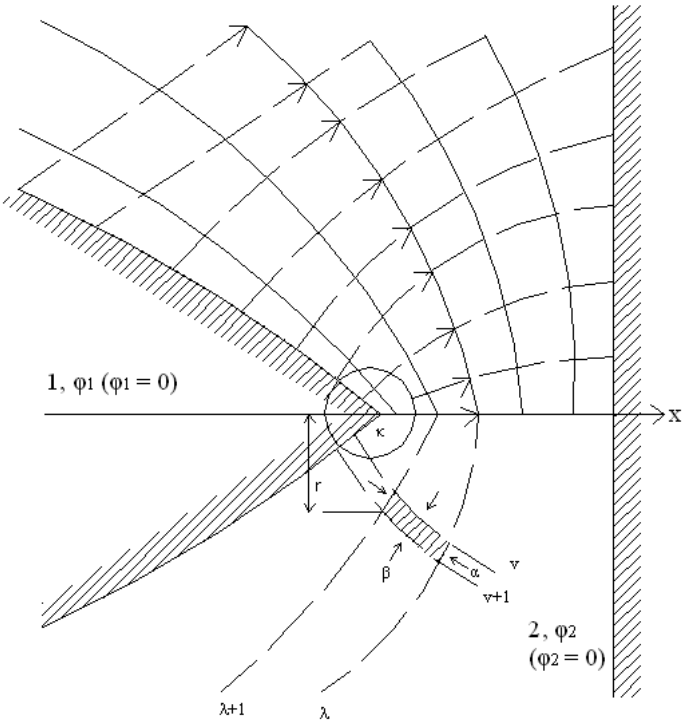
Στην περίπτωση αυτή, το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$\vec{E}(R) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_v \frac{r}{r^2}\rho\mathrm{dt} \tag{2.3}$$

όπου με ρ συμβολίζεται η χωρική πυκνότητα φορτίου, και στο ολοκλήρωμα χρησιμοποιούμε όλο τον όγκο στον οποίο εμπεριέχεται το φορτίο. Επειδή δεν μπορούμε να αντιληφθούμε απ' ευθείας το ηλεκτρικό πεδίο με τις αισθήσεις μας, χρησιμοποιούμε τις δυναμικές γραμμές. Οι δυναμικές γραμμές είναι φανταστικές γραμμές που σχεδιάζουμε σε μία περιοχή του χώρου έτσι ώστε σε κάθε σημείο, το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου να εφάπτεται σε αυτές.

Οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές δείχνουν την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου $\vec{E}$ σε κάθε σημείο. Απομακρύνονται από τα θετικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά. Η πυκνότητά τους είναι ανάλογη του $\vec{E}$, δηλαδή η ένταση του πεδίου έχει μεγαλύτερο μέτρο εκεί που οι δυναμικές γραμμές είναι πυκνότερες. Σε κάθε σημείο, το ηλεκτρικό πεδίο έχει μία μόνο κατεύθυνση, οπότε από κάθε σημείο περνάει μία μόνο δυναμική γραμμή. Οι δυναμικές γραμμές, δηλαδή, δεν τέμνονται ποτέ.

Στο Σχήμα 2.1 σχεδιάσαμε το ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ μια μεταλλικής ακίδος (ηλεκτρόδιο 1)και μιας μεταλλικής επίπεδης πλάκας (ηλεκτρόδιο 2) και σε αυτά τα δυο ηλεκτρόδια έχουμε διαφορά δυναμικού $U_{12} = \varphi_1-\varphi_2 =U$ (έστω, ότι $\varphi_1 =U$ και $\varphi_2 = 0$, οπότε $\varphi_1-\varphi_2 =U$).



Σχήμα 2.1 Ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ ακίδας και πλάκας.
1ακίδα και 2 πλάκα
- ισοδυναμικές επιφάνειες
-- δυναμικές γραμμές

Οι δυναμικές γραμμές της πεδιακής εντάσεως $\vec{E}$ βρίσκονται σε τυχαία θέση. Οι δυναμικές γραμμές είναι κάθετες προς τις ισοδύναμες επιφάνειες του ηλεκτρικού πεδίου, και έχουν κατεύθυνση από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα δυναμικά. Το ηλεκτρικό φορτίο κάθε ηλεκτροδίου βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του, η οποία αποτελεί την επιφάνεια του ηλεκτρικού πεδίου, και έχει δυναμικό ίσο με το δυναμικό του θεωρούμενου ηλεκτροδίου. Εάν έχουμε ροή ηλεκτρικών φορτίων μέσα από το ηλεκτρόδιο δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα, θα έχουμε και μεταβολή του δυναμικού. Έτσι οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που φεύγουν ή καταλήγουν στα ηλεκτρόδια, είναι κάθετες στην εξωτερική επιφάνεια του ηλεκτροδίου, ενώ αυτό δεν ισχύει όταν έχουμε ηλεκτρικό ρεύμα εντός των ηλεκτροδίων διότι

έχουμε μεταφορά του δυναμικού σε όλο το μήκος του ηλεκτροδίου. Συγγραμικό και ανάλογο προς το διάνυσμα της πεδιακής εντάσεως Ε σε τυχούσα θέση του πεδίου είναι το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατοπίσεως $\vec{D}$:

$$\vec{D} = \varepsilon \ \vec{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \ \vec{E} \qquad (2.4)$$

Όπου είναι ε και ε_r η απόλυτη και η σχετική διηλεκτρική σταθερά του χώρου (μονωτικού υλικού) στη θεωρημένη θέση και :

$$\varepsilon_0 = 8{,}845 \ \frac{pF}{m} = 8{,}845 \times 10^{-12} \ \frac{F}{m} \qquad (2.5)$$

είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού χώρου.

Υλικό	**ε_r**	**Υλικό**	**ε_r**
Βακελίτης	3,5…8,2	Έλαιο μετασχηματιστών	2,0…2,5
Ηλεκτρον	2,2…2,9	Πορσελάνη	4,5…6,0
Παραφίνη	1,7…2,3	Pertinax	4,8…5,4
Αέρας (κανονικών συνθηκών)	1,000594	Plexiglas	2,6…3,4
Υγρός αέρας	1,5	Πυρόλιθος(Quarz)	4,3…4,7
Υαλός	2…16	Styroflex	2,5
Σκληρό ελαστικό	3,0…5,0	Στεατίτης	6,4
Ξύλο	2,5…5,5	Condensa	40…80
Ξυρός χάρτης	1,8…2,6	Glimmer	4,0…8,0
Συνδυασμός χάρτου – αέρος (μόνωση καλωδίου)	1,6…2,0	Presspan	2,5…3,4
Συνδυασμός χάρτου – ελαίου (μόνωση καλωδίου)	3,0…4,5	Schellack	2,7…3,8
Απεσταγμένο ύδωρ	81	Mikanit	4,0…6,0
Πάγος	2,0…3,0	Cellon	3,5…7,0

Πίνακας 2.1
Σχετική διηλεκτρική σταθερά ε_r διαφόρων μονωτικών υλικών

Στον Πίνακα 2.1 δίδονται οι τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς ε_r διαφόρων μονωτικών υλικών. Παρατηρούμε ότι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του αέρα ελάχιστα διαφέρει από τη μονάδα, συνεπώς μπορεί να πούμε ότι ε = ε_0 .Ακόμη μπορούμε να παρατηρήσουμε μεγάλη διηλεκτρική σταθερά στο αποσταγμένο νερό και στο ρευστό Condensa, το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως ως διηλεκτρικό υλικό στους πυκνωτές. Γνωρίζουμε ότι τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές έχουν διηλεκτρική σταθερά μεγαλύτερη του αέρα (ή του κενού). Επίσης γνωρίζουμε ότι η χωρητικότητα είναι ανάλογη προς τη διηλεκτρική σταθερά.). Επομένως όσο μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά έχουμε σε ένα μονωτικό υλικό, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η χωρητικότητα σε ένα πυκνωτή.

Στα διανυσματικά μεγέθη $\vec{D}$ και $\vec{E}$ μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η επίδραση της διηλεκτρικής σταθεράς στα δυναμικά των ηλεκτροδίων πάνω σε μια διάταξη μεταβάλλεται

όταν έχουμε σταθερές τάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το διάνυσμα $\vec{E}$ της πεδιακής εντάσεως σε τυχαία θέση στο χώρο παραμένει σταθερό, ενώ η διηλεκτρική μετατόπιση μεταβάλλεται ανάλογα προς τη μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς ε. Αν θεωρήσουμε τις δυναμικές γραμμές του πεδίου ως δυναμικές γραμμές του διανύσματος $\vec{D}$, τότε αυτές οι γραμμές ονομάζονται «γραμμές διηλεκτρικής μετατοπίσεως» ή «γραμμές ροής». Γνωρίζοντας ότι η πυκνότητα των γραμμών είναι ανάλογη προς το διάνυσμα της μετατόπισης $\vec{D}$, τότε όταν θα έχουμε αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς ε και θα έχουμε συμπύκνωση των γραμμών, ενώ όταν θα έχουμε μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς ε θα έχουμε αραίωση των γραμμών ροής. Ταυτόχρονα το ηλεκτρικό φορτίο που βρίσκεται στα ηλεκτρόδια μεταβάλλεται ανάλογα με την μεταβολή που θα έχει η διηλεκτρική σταθερά. Εάν, παραμείνουν σταθερά τα ηλεκτρικά φορτία στα ηλεκτρόδια, τότε έχουμε μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς ε στο χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ενώ η διηλεκτρική μετατόπιση του διανύσματος $\vec{D}$ που βρίσκεται σε τυχαία θέση στο χώρο θα παραμείνει αμετάβλητη, επομένως οι γραμμές ροής θα παραμείνουν σταθερές. Όμως θα έχουμε μεταβολή της τιμής της πεδιακής εντάσεως στην τυχαία θέση στο χώρο, καθώς θα έχουμε μεταβολή και στα δυναμικά των ηλεκτροδίων.

Για να μεταβάλουμε τη διηλεκτρική σταθερά, θα πρέπει να αντικαταστήσουμε το υλικό, που έχουμε μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επομένως εφόσον έχουμε αντικαταστήσει το διηλεκτρικό σε ολόκληρο το χώρο, ή σε τμήματα του χώρου, τα οποία αποτελούν σωλήνες ροής του πεδίου. Αλλιώς θα έχουμε διαθλάσεις στις γραμμές διηλεκτρικής μετατόπισης με αποτέλεσμα να έχουμε παραμόρφωσης του αρχικού ηλεκτροστατικού πεδίου. Από τεχνικής πλευράς των υψηλών τάσεων μας ενδιαφέρει η κατανομή του δυναμικού του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων σε συνδυασμό και με την εμφάνιση της μέγιστης πεδιακής έντασης στον χώρο. Επομένως αν σε μία τυχαία δυναμική γραμμή η πεδιακή ένταση παραμένει σταθερή, οπότε τότε σταθερή θα παραμείνει και η ανά μονάδα μήκους διαφορά δυναμικού τότε η κατανομή αύτη είναι ομοιόμορφη. Παρόμοια περίπτωση έχουμε στην περίπτωση του ομοιογενούς πεδίου επιπέδων, παραλλήλων ηλεκτροδίων. Όμως αν δεν έχουμε ομοιομορφία, η πεδιακή ένταση κατά μήκος μια δυναμικής γραμμής μεταβάλλεται και γίνεται μέγιστη, με αποτέλεσμα οι ισοδυναμικές επιφάνειες κατά μήκος μιας δυναμικής γραμμής να πλησιάζουν περισσότερο η μια την άλλη.

2.2 Μέθοδοι Υπολογισμού Ηλεκτροστατικών Πεδίων

Σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο σε τυχαία θέση (x,y,z,) στο χώρο, θα είναι γνωστή ή πεδιακή ένταση $\vec{E}$ (x,y,z,) (κατά μέτρο και κατεύθυνση) ή το δυναμικό φ (x,y,z,).

Επειδή τα φ και $\vec{E}$ συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση :

$$\vec{E} = -grad\varphi \qquad (2.6)$$

η γνώση του ενός από τα δυο μεγέθη μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το άλλο. Δηλαδή αν είναι γνωστή η πεδιακή ένταση $\vec{E}$, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό φ με προσέγγιση μιας σταθεράς.

Η αναλυτική επίλυση πεδίου δηλαδή έκφραση των στοιχείων $\vec{E}$ ή φ σε τυχαία θέση στο πεδίο είναι δυναμική σε λίγες περιπτώσεις πεδίων συγκεκριμένα στις εξής :

α) Όταν το πεδίο δημιουργείται από ηλεκτρικά φορτία (σημειακά, επιφανειακά ή χωρικά), συγκεκριμένης τιμής σε τυχαία θέση στο χώρο του πεδίου. Στην περίπτωση αυτή είναι σε μια θέση x,y,z και μπορεί να γίνει η ανάλυση της πεδιακής έντασης $\vec{E}$ ή του δυναμικού φ, το οποίο είναι σημειακό ηλεκτρικό φορτίο.

β) Όταν τα ηλεκτρόδια του πεδίου έχουν τέτοια μορφή και η διάταξη τους στο χώρο είναι τέτοια, ώστε να μπορούμε να έχουμε συγκεκριμένες συμμετρίες του πεδίου, μπορούμε να κάνουμε την επίλυση του πεδίου.

3^{Ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ

" ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΣΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ "

3.1 Μέθοδοι Υπολογισμού των Ηλεκτρικών Πεδίων στις Διατάξεις Υψηλών Τάσεων

Έχει μεγάλη σημασία σε συνθήκες υψηλών τάσεων πάνω σε μονωτήρες να μπορούμε να προσδιορίσουμε την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό τους, στην επιφάνεια, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή που τα περιβάλλει. Γνωρίζουμε, ότι υπάρχουν δυο κατηγορίες αριθμητικών μεθόδων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού πεδίου.

Στην πρώτη κατηγορία αριθμητικών μεθόδων βλέπουμε ότι περιλαμβάνει μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και μεθόδους πεπερασμένων διαφορών. Ένα μειονέκτημα που έχουμε σε αυτήν την κατηγορία είναι ότι για να γίνει η ανάλυση του ηλεκτρικού πεδίου χωρίς οριακή συνθήκη θα χρειαστούμε ένα μεγάλο πλήθος γραμμών πλέγματος για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο. Αυτός είναι και ο λόγος που εφαρμόζονται, κυρίως, σε διατάξεις με οριακές συνθήκες, όπως είναι οι μετασχηματιστές ισχύος ή οι ηλεκτρικές μηχανές έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου.

Στην δεύτερη κατηγορία των αριθμητικών μεθόδων έχουμε τη μέθοδο προσομοίωσης φορτίου και μέθοδο προσομοίωσης επιφανειακού φορτίου . Στη μέθοδο προσομοίωσης φορτίου, κατανέμονται εικονικά φορτία στο όγκο. Στη μέθοδο προσομοίωσης επιφανειακού φορτίου, τα φορτία τοποθετούνται σε επιφάνειες με όρια καθώς και στις κοινές επιφάνειες διαφορετικών υλικών, ενώ οι πηγές των φορτίων αρχικοποιούνται σύμφωνα με τις οριακές συνθήκες. Οι δύο αυτές μέθοδοι προτιμούνται σε περιπτώσεις όπου έχουμε «ανοιχτά» όρια αφού δεν χρειάζεται να κατασκευάσουμε πλέγμα για το χώρο.

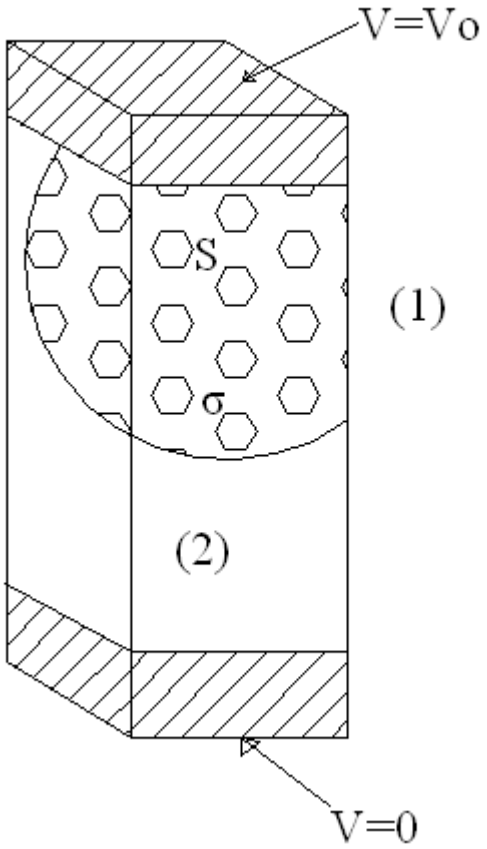
Συγκρίνοντας τις διαφορετικές αριθμητικές μεθόδους βλέπουμε ότι η πρώτη κατηγορία υπερτερεί λόγω χαμηλότερης πολυπλοκότητας και με αποτέλεσμα να χρειαζόμαστε μικρότερη χρονική διάρκεια για την μοντελοποίηση, ωστόσο, περισσότερο χρόνο απαιτείται για τους υπολογισμούς. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η γεωμετρική ανάλυση της διάταξης είναι εκείνη που καθορίζει το ποια από τις μεθόδους απαιτεί το λιγότερο χρόνο και είναι, συνεπώς, η πιο συμφέρουσα.

3.1.1 Μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου

3.1.1.1 Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων των Rasolonjanahary Krahenbuhl και Nicolas

Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων είναι μια ολοκληρωμένη μέθοδο διαφορικών εξισώσεων πάνω στην οποία μπορούμε να μελετήσουμε τη γεωμετρία και τη ρύπανση σε μονωτήρες. Βασικό πλεονέκτημα στη μεθόδου αυτή είναι ότι έχουμε λιγότερους αγνώστους σε σχέση με τις υπόλοιπες αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης πεδίων (μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών, μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδοι προσομοίωσης φορτίου).

Σύμφωνα με το μοντέλο των τριών ερευνητών Rasolonjanahary Krahenbuhl και Nicolas ο μονωτήρας υπό ρύπανση μπορεί να προσομοιωθεί όπως στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Το προτεινόμενο μοντέλο του ρυπασμένου μονωτήρα

Στο μοντέλο αυτό διακρίνονται δύο περιοχές του χώρου στο εσωτερικό των οποίων η πυκνότητα φορτίου θεωρείται μηδενική: την περιοχή του αέρα (Ω_1) με σχετική επιτρεπτότητα $\varepsilon_{r1}=1$ και την περιοχή που καλύπτεται από το μονωτικό υλικό (Ω_2) με σχετική επιτρεπτότητα ε_{r2}. Η ρυπασμένη επιφάνεια του μονωτήρα θεωρείται ότι έχει επιφανειακή αγωγιμότητα σ_s.

Έστω, ότι Σ είναι το σύνορο του χώρου στον οποίο ορίζεται ένα πεδίο Ω και ε_r είναι η σχετική επιτρεπτότητα στο εσωτερικό του. Αν n είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που αντιστοιχεί

σε στοιχειώδη επιφάνεια $d\Sigma$ (με φορά προς τα έξω), τότε ορίζεται η μεταβλητή ποσότητα

$$\Psi = \varepsilon_{\text{r}} \cdot \frac{\partial V}{\partial n} \tag{3.1}$$

όπου V είναι το δυναμικό στο σύνορο Σ.

Ύστερα από τον ορισμό της μεταβλητής Ψ, η ανάλυση προχωράει ως εξής:

Για την περιοχή του αέρα, που έχει σύνορο το S1, εφαρμόζοντας το θεώρημα Green προκύπτει η σχέση:

$$c \cdot V = -\int_{S1}\left(V\frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\varepsilon_{r1}} G \cdot \psi_1 \right) ds \tag{3.2}$$

όπου V: το δυναμικό σε τυχαίο σημείο αυτής περιοχής αυτής, G: είναι ο τελεστής Green και c: μια μεταβλητή που δίνεται από τη σχέση

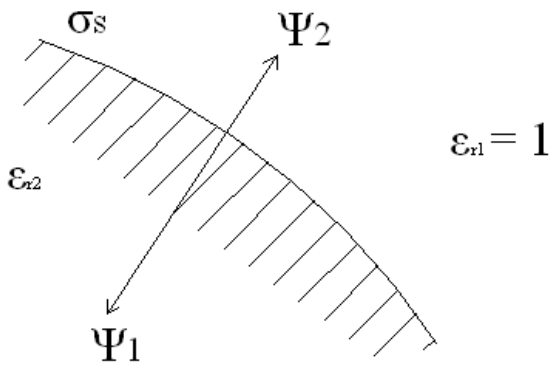
$$c = \frac{A}{4 \cdot \pi} \tag{3.3}$$

με A να είναι η γωνία υπό την οποία το τυχαίο σημείο με δυναμικό V «βλέπει» την προσανατολισμένη επιφάνεια S_1.

Για την περιοχή του μονωτικού υλικού, που έχει σύνορο το S_2, ισχύει:

$$c \cdot V = -\int_{S2}\left(V\frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\varepsilon_{r2}} G \cdot \psi_2 \right) ds \tag{3.4}$$

Στις σχέσεις (3.2) και (3.4) Ψ_1 και Ψ_2 είναι οι τιμές που παίρνει η μεταβλητή Ψ στις περιοχές του αέρα και του μονωτικού υλικού αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2 Καθορισμός των Ψ1 και Ψ2

Στις περιοχές που δεν υπάρχει ρύπανση τότε ισχύει ότι: $\Psi_1+\Psi_2=0$. Ωστόσο, συνδέοντας το μονωτήρα με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης και λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη ηλεκτρικού ρεύματος στην επιφάνεια του όπου υπάρχει ρύπανση οι Rasolonjanahary, Krahenbuhl και Nicolas καταλήγουν στην εξίσωση:

$$\int_S(\sigma_S \cdot grad_S w \cdot grad_S V)ds - \int_{\Gamma 1}(\sigma_S \cdot w \cdot \frac{\partial V}{\partial v})ds + j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \int_S(w \cdot \Theta)ds = 0 \qquad (3.5)$$

όπου ε_0 είναι η επιτρεπτότητα του κενού χώρου, ω είναι η κυκλική συχνότητα της πηγής (και ισχύει $\frac{\partial}{\partial t} = j \cdot \omega$ με $j = \sqrt{-1}$),
w είναι ένας κατάλληλος τελεστής βάρους και $\Theta=\Psi_1+\Psi_2$.

Πλέον, το σύστημα των εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν είναι οι εξισώσεις (3.2), (3.4) και (3.5).

Η διαδικασία συνεχίζεται διαιρώντας τα διαφορετικά όρια S_1 και S_2 σε πεπερασμένα στοιχεία και τα αντιστοιχίζουμε για κάθε πεπερασμένο στοιχείο τις τιμές V_i, Ψ_i, Θ_i στις μεταβλητές V, $\Psi=\Psi_1$ και Θ ως εξής:

$V=\Sigma\alpha_i Vi$

$\Psi=\Sigma\alpha_i \Psi i$

$\Theta=\Sigma\alpha_i \Theta_i$,

όπου α_i: είναι οι τελεστές αντιστοίχισης.

Έπειτα από την ανάλυση και τη συναρμολόγηση παίρνουμε ένα σύστημα σύνθετων γραμμικών εξισώσεων το οποίο μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια της μεθόδου Gauss.

3.1.1.2 Η μέθοδος προσομοίωσης φορτίου των Chakravorti και Mukherjee

Σύμφωνα με την μέθοδο προσομοίωσης φορτίου, κατά του Chakravorti και Mukhejee μελετήθηκε η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου πάνω έναν πορσελάνινο μονωτήρα στήριξης τύπου "post-type". Έτσι λόγω της σφαιρικής συμμετρίας που παρουσιάζει η διάταξη του μονωτήρα, το κάθε ηλεκτρόδιο, όπως και η επιφάνεια της πορσελάνης και ο αέρας, μπορεί να γίνει προσομοίωση αυτών από ένα φανταστικό σύνολο φορτισμένων δακτυλίων. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές που παίρνει το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο της διάταξης.

Εφαρμόζοντας εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας στο μονωτήρα, και με την βοήθεια των οριακών συνθηκών μπορούμε να περιγράψουμε την κατανομή του πεδίου και στην συνέχειας να υπολογίσουμε το δυναμικό του. Πραγματικά, σε κάθε σημείο της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, το δυναμικό θα πρέπει να έχει τιμή ίση με εκείνη που εφαρμόζεται στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο, ενώ συνεχής θα πρέπει να είναι η τιμή του στην κοινή επιφάνεια πορσελάνης και αέρα.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης του φορτίου στην επιφάνεια αυτή θα πρέπει, επίσης, να ισχύει (τα μεγέθη είναι εκφρασμένα σε μιγαδικούς αριθμούς):

$$\overline{D_{nD}}(\quad) - \overline{D_{nA}}(\quad) = \overline{\sigma}(\quad) \qquad (3.6)$$

όπου: D_n είναι η κάθετη συνιστώσα της πυκνότητας ηλεκτρικής ροής, ενώ οι δείκτες D και A αναφέρονται, αντίστοιχα, στην πορσελάνη και στον αέρα..
Γνωρίζουμε ότι η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου (σ) είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο ως προς την επιφανειακή ειδική αντίσταση (ρs) και την κυκλική συχνότητα (ω).

Στην περίπτωση της τάσης βιομηχανικής συχνότητας, προκύπτει μία σειρά από συμπεράσματα:

α) Μεταβάλλοντας την επιφανειακή ειδική αντίσταση (ρ_s) σε ένα εύρος από 10^8 έως 10^{11} Ω, η επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή των οριακών συνθηκών μας δείχνει ότι το πεδίο γύρω από το μονωτήρα είναι χωρητικό όταν το σ είναι χαμηλό (άρα το ρ_s υψηλό) και ωμικό στην αντίθετη περίπτωση.

β) Στις περιπτώσεις οπού η ένταση του πεδίου αυξάνεται στην επιφάνεια του μονωτήρα, οι Chakravorti και Mukherjee διαπίστωσαν ότι τα μέτρα του διανύσματος της έντασης (E_R) καθώς και της κάθετης συνιστώσας του (E_n) παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους όταν το πεδίο είναι ωμικό. Ενώ, η εφαπτόμενη συνιστώσα της έντασης (E_t) εμφανίζει τις μέγιστες τιμές της στο χωρητικό πεδίο.

γ) Σε μια ρυπασμένη επιφάνεια που δημιουργείται μια ξηρή περιοχή,έχουμε υπερβολικά μεγάλες τιμές της έντασης στα άκρα της. Μάλιστα, όσο πιο πλατιά είναι η ξηρή αυτή περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας και τόσο πιο χαμηλές είναι οι εντάσεις στα άκρα της. Τέλος, όσον αφορά στην επίδραση που ασκεί η δημιουργία πολλών ξηρών περιοχών στην κατανομή του πεδίου, διαπιστώνεται ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι χαμηλότερη των αυτών ξηρών περιοχών σε σχέση με την μία μεμονωμένη ξηρή περιοχή. Με άλλα λόγια, η ταυτόχρονη εμφάνιση πολλών ξηρών περιοχών στην επιφάνεια ενός μονωτήρα είναι λιγότερο επιβλαβής από ότι η ύπαρξη μόνο μίας.

Στις κρουστικές τάσεις, έχουμε παρόμοια συμπεράσματα με εκείνα των τάσεων της βιομηχανικής συχνότητας. Στην περίπτωση των τυπικών κρουστικών τάσεων το πεδίο είναι χωρητικό για τιμές της επιφανειακής ειδικής αντίστασης (ρ_s) μεγαλύτερες των 10^8 Ω, ενώ το ίδιο είναι ωμικό για $\rho_s < 10^4$ Ω. Το πεδίο χαρακτηρίζεται ως χωρητικό – ωμικό για ενδιάμεσες τιμές της ειδικής αντίστασης ρ_s. Στην περίπτωση των κεραυνικών κρουστικών τάσεων οι αλλαγές της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου από χωρητικό σε χωρητικό – ωμικό και, στη συνέχεια, σε ωμικό πραγματοποιούνται για τιμές της επιφανειακής ειδικής αντίστασης 10^6 και 10^{10} Ω αντίστοιχα.

Η επίδραση στης μερικής ρύπανσης,και των ξηρών περιοχών η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι σχεδόν η ίδια σε σχέση με εκείνη που χρησιμοποιούμε στις τάσεις βιομηχανικής συχνότητας. Έτσι, λοιπόν,στις κρουστικές τάσεις, όσο πιο κοντά βρίσκεται η ρύπανση στα ηλεκτρόδια της διάταξης, τόσο περισσότερο βλαβερή μπορεί να είναι για τη μονωτική απόδοση του μονωτήρα δηλαδή τόσο πιο ισχυρό μπορεί να είναι το ενδεχόμενο να δημιουργηθεί υπερπήδηση στην επιφάνεια του μονωτήρα.

Μια άλλη διαφορά ανάμεσα στην τυπική κρουστική τάση και στην κεραυνική κρουστική τάση είναι η ένταση ρύπανσης της τάξης του $\rho_s = 10^7\ \Omega$, το πεδίο είναι σχεδόν ωμικό για την πρώτη περίπτωση, ενώ σχεδόν χωρητικό για τη δεύτερη. Με άλλα λόγια, η τυπική κρουστική τάση είναι πιο βλαβερή για το ρυπασμένο μονωτήρα, σε σχέση με την κεραυνική κρουστική τάση. Ακόμη, για σχετικά χαμηλή ένταση ρύπανσης, το πεδίο είναι σχεδόν ωμικό όταν βρίσκεται σε τάσεις βιομηχανικής συχνότητας, ενώ είναι σχεδόν χωρητικό και για τις δύο κρουστικές τάσεις. Επομένως για ένα μονωτήρα που έχει ρύπανση στην επιφάνεια του οι τάσεις της βιομηχανικής συχνότητας μπορεί να είναι βλαβερές.

3.1.1.3 Η μέθοδος διαφορικών εξισώσεων των Skopec, Wankowiez και Sikorski

Για να μελετήσουμε την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου που σε μια διάταξη μονωτήρα, εφαρμόζεται η μέθοδος του προσδιορισμού του ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια του μονωτήρα μεταξύ του υλικού του μονωτήρα και της ρύπανσης του μονωτήρα και μεταξύ της ρύπανσης του και του αέρα. Ως τόσο υπάρχει ένα μειονέκτημα ότι αν εφαρμόσουμε οριακών συνθηκών Laplace στις επιφάνειες αυτές θα οδηγηθούμε σε μια σειρά από πολυάριθμες εξισώσεις. Οι Skopec, Wankowicz και Sikorski στο πρόβλημα των πολυάριθμων εξισώσεων υποστήριξαν ότι η θεώρηση δύο τέτοιων επιφανειών δεν είναι απαραίτητη αν δεχτούμε την ύπαρξη ενός λεπτού ομοιογενούς στρώματος σταθερού πάχους h. Με τον τρόπο αυτό το μαθηματικό μοντέλο απλοποιείται παρά πολύ.

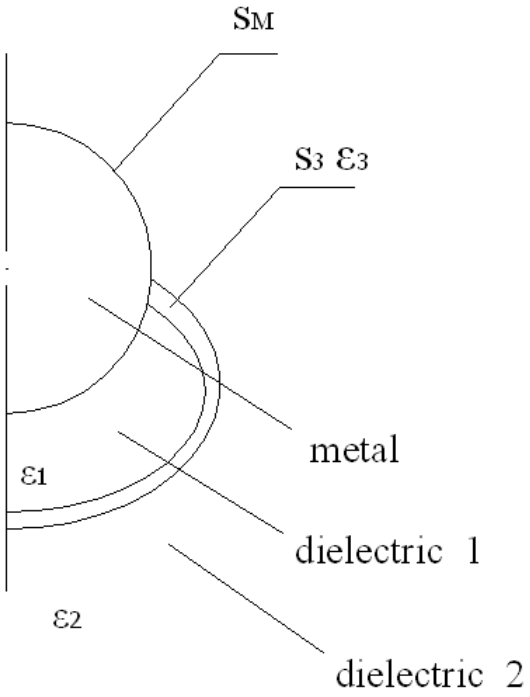
Στην μέθοδο διαφορικών εξισώσεων ο μονωτήρας προσομοιώνεται από μια κυλινδρικά συμμετρική μονωτική διάταξη. Η διάταξη, που φαίνεται στο σχήμα 3.3, αποτελείται από μια μεταλλική σφαίρα επιφάνειας S_M (και η οποία φέρει δυναμικό Φ_{met}), από μια περιοχή του χώρου που καλύπτεται από μονωτικό υλικό και από ένα λεπτό στρώμα ρύπανσης, πάχους h που καλύπτει την εξωτερική επιφάνεια της τελευταίας (S_3).

Οι σταθερές ε_1 , ε_2 και ε_3 είναι οι σχετικές επιτρεπτότητες του διηλεκτρικού, του αέρα και της ρύπανσης αντίστοιχα.
Για να μπορέσει να προσδιοριστεί η κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στο μονωτήρα, η επιφάνεια του συστήματος διαιρέθηκε σε k_{max} στήλες και l_{max} σειρές. Με τον τρόπο αυτό σχηματίστηκε ένα πλέγμα από $k_{max} \bullet l_{max}$ στοιχειώδεις επιφάνειες πάνω στις οποίες, εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες, προκύπτει μια σειρά από εξισώσεις. Έτσι αν αθροίσουμε τις τελευταίες κατά μέλη παίρνουμε δυο βασικές εξισώσεις για την ένταση και το δυναμικό σε κάθε σημείο της επιφάνειας της διάταξης:

$$\Phi_{mn} = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \sum_{k=1,l=1}^{k_{\max},l_{\max}} \frac{q_{slk}}{r_{lk}} \Delta S_{lk} + \frac{R_{mn} q_{smn}}{2\varepsilon_0} \qquad (3.7)$$

Και

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \sum_{k=1,l=1}^{k_{\max},l_{\max}} \frac{q_{slk} \cdot \overrightarrow{r_{1lk}}}{r_{lk}^3} \Delta S_{lk} + \frac{q_{smn}}{2\varepsilon_0} \cdot \vec{n} \qquad (3.8)$$



Σχήμα 3.3 Η διάταξη μονωτήρα σε μια κυλινδρικά συμμετρική διάταξη

όπου q_{slk}: η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου για τη στοιχειώδη επιφάνεια ΔS_{lk}
και ισχύει ότι: $k \neq n$, $l \neq m$, ενώ $\Delta S_{mn}=\pi R_{mn}^{\ 2}$

Έτσι μπορούμε να δούμε ότι η πυκνότητα της επιφάνειας του μονωτήρα σε στοιχειώδεις επιφάνειες ΔS επηρεάζει την ακρίβεια των υπολογισμών. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των επιφανειών, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια που έχουμε στα αποτελέσματα μας.

3.1.2 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων

3.1.2.1 Η μέθοδος των Asenjo Morales και Valdenegro

Στην μέθοδο των Asenjo Morales και Valdenegro προσδιορίζουμε το ηλεκτρικό πεδίο σε μια σειρά από μονωτικά συστήματα με κυλινδρική συμμετρία. Η μέθοδος αυτή έχουμε τα αποτελέσματα στις περιπτώσεις που η επιφανειακή αγωγιμότητα σε όλα τα ενδιάμεσα διηλεκτρικά υλικά ενός μονωτικού συστήματος είναι αρκετά μικρότερη ή μεγαλύτερη από το γινόμενο της γωνιακής συχνότητας (δηλαδή: $\sigma >> \omega\varepsilon$ ή $\sigma >> \omega\varepsilon$)είναι πολύ ικανοποιητικά.
Με την μέθοδο αυτή μπορούμε να υπολογίσουν το ηλεκτρικό πεδίο, στις περιπτώσεις, όμως, που τα παραπάνω δυο μεγέθη βρίσκονται σε κοντινές περιοχές τιμών.

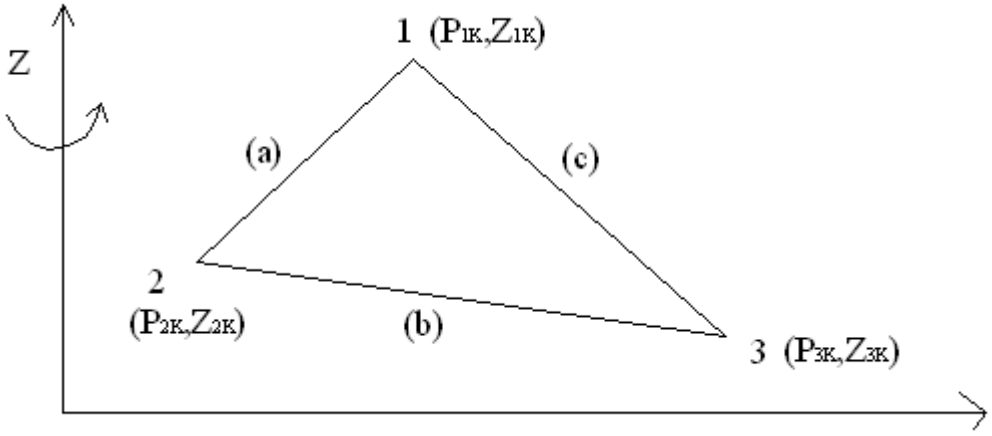
Είναι δύσκολη η ακρίβεια του προσδιορισμού του ηλεκτρικού πεδίου με εξισώσεις Laplace, που να ικανοποιεί τις κανονικές οριακές συνθήκες καθώς και τις «συμπληρωματικές» οριακές συνθήκες. Παράδειγμα σε κάθε σημείο της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, το δυναμικό θα πρέπει να έχει τιμή ίση με εκείνη που εφαρμόζεται στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο. Οι τελευταίες είναι εκείνες που αφορούν στη διατήρηση των εφαπτομένων συνιστωσών του διανύσματος $\vec{E}$, καθώς και των κάθετων συνιστωσών του $\vec{D}$ κατά μήκος της κοινής επιφάνειας μονωτικού υλικού και αέρα (αρχή διατήρησης φορτίου).

Στη μελέτη αυτή των αριθμητικών υπολογισμών προτείνεται η αντικατάσταση της επιτρεπτότητας με μια μιγαδική παράσταση που σαν πραγματικό μέρος έχει την επιφανειακή αγωγιμότητα και σαν φανταστικό το γινόμενο της κυκλικής συχνότητας με την επιτρεπτότητα ($\sigma+i\omega\varepsilon$). Εκείνο που αλλάζει σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι το δυναμικό εμφανίζεται ως ένας μιγαδικός αριθμός και όχι ως πραγματικός.

Πιο συγκεκριμένα, για τα σημεία που δεν ανήκουν στις κοινές επιφάνειες των διηλεκτρικών υλικών στη διάταξη αυτή θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση Laplace:

$$\nabla^2\phi = 0 \qquad (3.9)$$

Ακόμα, για τα σημεία αυτά θα πρέπει να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες, όπως και οι συμπληρωματικές οριακές συνθήκες. Με βάση αυτά, μπορούμε να κάνουμε προσέγγιση του ηλεκτρικού πεδίου θεωρώντας τη μιγαδική συνάρτηση δυναμικού ϕ , να ικανοποιεί την εξίσωση Laplace, καθώς και τις οριακές συνθήκες. Για να υπολογιστεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων σε μια διάταξη με κυλινδρική συμμετρία θεωρείται ένα κυλινδρικό επίπεδο και ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων με άξονες ρ και z ,όπου z είναι ο άξονας συμμετρίας της διάταξης. Η διάταξη αποτυπώνεται στο κυλινδρικό επίπεδο, η περιοχή που μας ενδιαφέρει υποδιαιρείται σε απλά τριγωνικά στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Τριγωνικό στοιχείο k

Θεωρείται ότι στα εσωτερικά σημεία κάθε τριγωνικού στοιχείου, το δυναμικό μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$\phi = \mathrm{A} + \mathrm{B}\cdot\rho + \mathrm{C}\cdot\mathrm{z} \qquad (3.10)$$

Στην διάταξη που μελετάται είναι ένας μονωτήρας υπό ρύπανση, είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες επισημάνσεις. Έτσι, δ είναι το πάχος του ημιαγώγιμου στρώματος ρύπανσης και σ είναι η αγωγιμότητα όγκου, τότε η επιφανειακή αγωγιμότητα του στρώματος ρύπανσης είναι:

$$\sigma_s = \delta\varsigma$$

Μάλιστα, επειδή $\delta\rightarrow 0$ και $\sigma\rightarrow\infty$, το σ_s παραμένει πεπερασμένο.

Στις πλευρές *α, b* και *c* του τριγωνικού στοιχείου οι επιφανειακές αγωγιμότητες είναι αντίστοιχα: $\sigma_{s\alpha}$, σ_{sb}, σ_{sc}. Επίσης, η τιμή του δυναμικού στο σημείο της μια γωνία του τριγώνου στον κόμβο 1 συνδέεται με τις αντίστοιχες τιμές των άλλων δυο κόμβων 2 και 3 με τη σχέση:

$$\sum_{\Omega_1} \left(C_{1k} + D_{ak} + D_{ck} \right) \phi_{1k} + \sum_{\Omega_1} \left(C_{2k} - D_{ak} \right) \phi_{2k} + \sum_{\Omega_1} \left(C_{3k} - D_{ck} \right) = 0 \qquad (3.11)$$

όπου *k*: ο αριθμός όλων των τριγωνικών στοιχείων στα οποία ανήκει ο κόμβος 1 και Ω_1: η περιοχή του κυλινδρικού επιπέδου που περιέχει τα τελευταία. Οι συντελεστές *C, D* εξαρτώνται από μια σειρά από μεγέθη, όπως είναι οι τιμές της αγωγιμότητας και της επιτρεπτότητας που εμφανίζουν τα τριγωνικά στοιχεία στην επιφάνεια και στις πλευρές τους.

Όταν, συγκρίνοντας το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων με το πραγματικό τρισδιάστατο πρόβλημα, στη μια πλευρά ενός στοιχειώδους τριγώνου δεν αντιστοιχεί ημιαγώγιμη επιφάνεια, τότε, για την πλευρά αυτή θα πρέπει να τεθεί:

$$\sigma_s=0$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (3.11) σε όλα τα τριγωνικά στοιχεία, προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$AV=U \qquad (3.12)$$

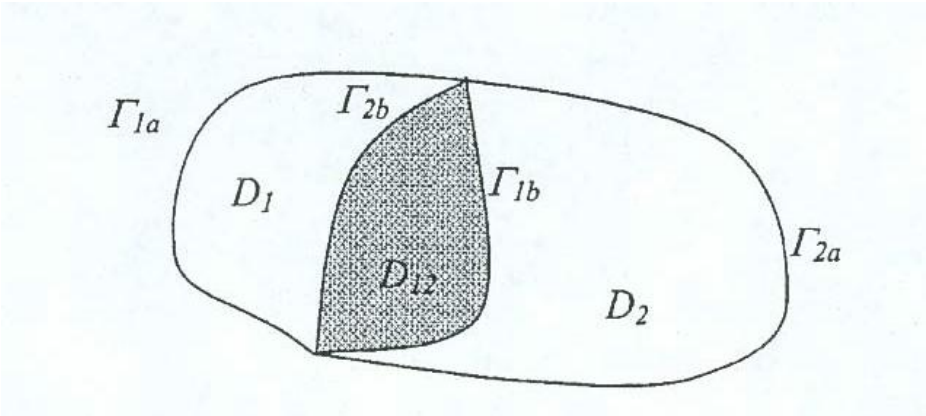
όπου *A*: η μήτρα συντελεστών του συστήματος,
V: το διάνυσμα των αγνώστων φ και
U: ένα διάνυσμα γνωστών δυναμικών, το οποίο εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες.
Επειδή ορισμένοι από τους συντελεστές της μήτρας *A* είναι μιγαδικοί, τα στοιχεία του *V* είναι, γενικά, μιγαδικοί αριθμοί, παρότι τα στοιχεία του *U* είναι πραγματικοί.

Με βάση τη μέθοδο ανάλυσης των πεπερασμένων τριγωνικών στοιχείων είναι δυνατή η επίλυση του συστήματος εξισώσεων που περιγράφεται στη σχέση (3.12) με ακρίβεια αποτελεσμάτων που υπερβαίνει το 99%.

3.1.2.2 Μια απλοποίηση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων από τον Imre Sebestyen

Στη μέθοδο υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου ο Sebestyen διατύπωσε σοβαρές επιφυλάξεις όσον αφορά στην αποτελεσματικότητα των μεθόδων προσομοίωσης φορτίου ακόμα και για περιπτώσεις όπως είναι εκείνες των «ανοιχτών οριακών συνθηκών». Έτσι, δεν χρησιμοποιεί μια τέτοια μέθοδο για να υπολογιστεί το ηλεκτρικό πεδίο που βρίσκεται στην επιφάνεια και στο εσωτερικό μονωτήρων πάνω σε γραμμές μεταφοράς από πυλώνες υψηλής τάσης. Θα προτιμήσει μια παραλλαγή της κλασικής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων Schwartz με βάση την οποία το πρόβλημα μπορεί να απλοποιηθεί αρκετά.

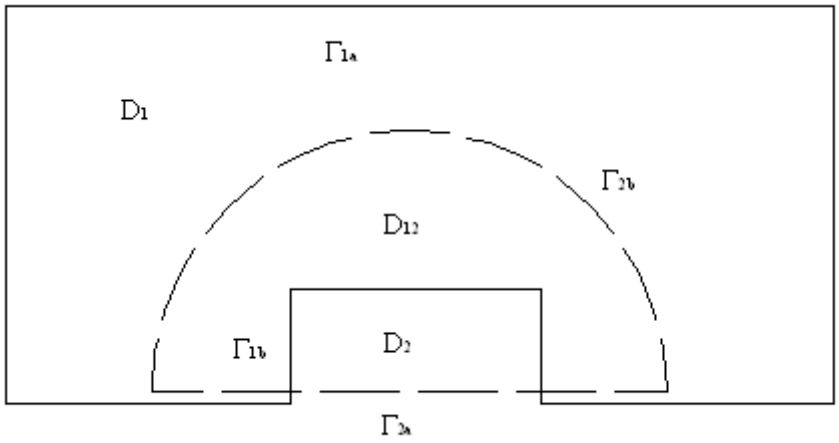
Σε γενικές γραμμές το μαθηματικό μοντέλο της μεθόδου Schwartz, στο οποίο βασίζεται η μελέτη του Sebestyen, έχει ως εξής:
Γίνεται ανάλυση του πεδίου (έστω D_a) και υποδιαιρείται σε δυο πεδία. D_1 και D_2 που αλληλεπικαλύπτονται στην περιοχή D_{12}, όπως φαίνονται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Διαίρεση του πεδίου D σε δύο υποπεδία D1 και D2

Η περιοχή D_α έχει σαν σύνορο την ένωση των Γ_{1a} και Γ_{2a}, όπου οι οριακές συνθήκες θεωρούνται γνωστές. Τα πεδία D_1 και D_2 έχουν σαν σύνορο την ένωση των Γ_{1a} και Γ_{1b} και την ένωση των Γ_{2a} και Γ_{2b} αντίστοιχα. Η μέθοδος Schwartz για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιεί οριακές συνθήκες για το Γ_{1a} και υποθέτοντας αυθαίρετα επιλεγμένες συνθήκες για το Γ_{1b} για το πεδίο D_1. Μετά από αυτό, το πρόβλημα οριακών τιμών για πεδίο D_2 επιλύεται χρησιμοποιώντας τις δοσμένες οριακές συνθήκες για το Γ_{2a} και αντικαθιστώντας την τιμή του πεδίου που υπολογίσαμε στο πρώτο βήμα για το σύνορο Γ_{2b}. Αυτή η διαδικασία εναλλαγής επαναλαμβάνεται έως ότου φτάσουμε την απαιτούμενη ακρίβεια.

Επομένως γίνεται η υπόθεση ότι το μοντέλο της διάταξης στο «οικουμενικό» πεδίο $D_1 \cup D_{12}$ είναι το μοντέλο «μεγάλης κλίμακας» του όλου προβλήματος (βλ. σχήμα 3.6)



Σχήμα 3.6 Σχηματικά η υπόθεση της εργασίας του Sebestyen

Η περιοχή $D_2 \cup D_{12}$, χαρακτηρίζεται ως «τοπικό πεδίο», γι' αυτό το λόγο πρέπει να είναι ακριβής η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου,. Οι δύο αυτές περιοχές ($D_1 \cup D_{12}$ και $D_2 \cup D_{12}$) βρίσκονται η μια πάνω στην άλλη κατά μήκος του D_{12} («επικαλυπτόμενο πεδίο»).

Αυτή η επαναληπτική διαδικασία ξεκινά με την αρχικοποίηση των οριακών τιμών κατά μήκος των συνόρων Γ_{1b} και Γ_{2b}. Αντί δηλαδή να δοθούν τυχαίες τιμές, η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο πλέγμα για το εσωτερικό του «τοπικού πεδίου». Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να μειώσουμε τις επαναλήψεις που θα πρέπει να γίνουν προκειμένου να ληφθούν οι αρχικές οριακές συνθήκες για τα Γ_{1b} και Γ_{2b}.

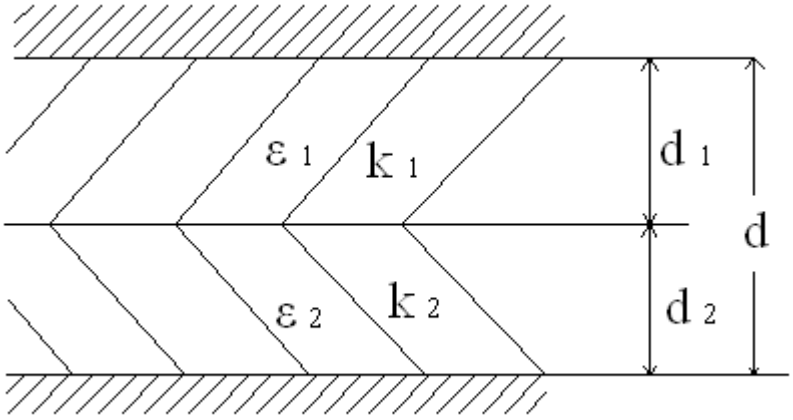
3.2 Σταθερό (Συνεχές) Ηλεκτρικό Πεδίο

Έστω ότι το διάκενο d μεταξύ δύο μεταλλικών πλακών, απείρου μήκους, με πάχη d_1 και d_2 των δύο μονωτικών υλικών με διηλεκτρική σταθερά και ειδικής αγωγιμότητα αντιστοίχα ε_1 , κ_1 και ε_2 , κ_2 (Σχήμα 3.7). Αν επιβάλουμε συνεχή τάση U μεταξύ των ηλεκτροδίων, η κατανομή της τάσεως αυτής στις τάσεις $U_{\alpha 1}$ και $U_{\alpha 2}$ θα γίνει με βάση τις διηλεκτρικές σταθερές ε_1 , ε_2 όποτε θα έχουμε:

$$U_{\alpha 1} = E_{\alpha 1}\, d_1,\ U_{\alpha 2} = E_{\alpha 2}\, d_2 \tag{3.13}$$

με

$$E_{\alpha 1} = D_\alpha / \varepsilon_1\ ,\ E_{\alpha 2} = D_\alpha / \varepsilon_2 \tag{3.14}$$



Σχήμα 3.7 Προς υπολογισμό της κατανομής της τάσεως μεταξύ δυο μη τέλειων μονωτικών υλικών

όπου είναι D_α η κοινή διηλεκτρική μετατόπιση στα δύο μονωτικά. Άρα προκύπτει :

$$\frac{U_{\alpha 1}}{\mathrm{U}_{\alpha 1}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \tag{3.15}$$

Στη συνέχεια όμως, μετά την αποκατάσταση συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων, η κατανομή της τάσεως («τελική κατανομή», δείκτης τ) θα γίνει βάσει των ειδικών αγωγιμοτήτων κ_1 και κ_2:

$$\frac{U_{r1}}{U_{r2}} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \tag{3.16}$$

Η αρχική και τελική κατανομή της τάσεως θα συμπίπτουν μόνο εφόσον είναι :

$$\frac{\varepsilon_1}{\kappa_1} = \frac{\varepsilon_2}{\kappa_2} \tag{3.17}$$

Μετά την αποκατάσταση της τελική κατανομής της τάσεως, οι διηλεκτρικές ,μετατοπίσεις $D_{\tau 1}$ και $D_{\tau 2}$ στα μονωτικά υλικά θα είναι :

$$D_{\tau 1} = \varepsilon_1 \mathrm{E}_{\tau 1} = \varepsilon_1 \frac{U_{\tau 1}}{d_1} \quad \kappa\alpha\iota \quad D_{\tau 2} = \varepsilon_2 \frac{U_{\tau 2}}{d_2} \tag{3.18}$$

Συνεπώς θα είναι

$$D_{\tau 2} = D_{\tau 1} \frac{\varepsilon_2 \kappa_1}{\varepsilon_1 \kappa_2} \tag{3.19}$$

Παρατηρούμε ότι είναι $D_{\tau 1} \neq D_{\tau 2}$. Αυτό καθίσταται δυνατό με την εμφάνιση στην οριακή επιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών (λόγω μεταφοράς από τα ηλεκτρόδια), ανά μονάδα της επιφάνειας αυτής, του ηλεκτρικού φορτίου:

$$D_{\tau 2} - D_{\tau 1} = U \frac{\varepsilon_1 \kappa_2 - \varepsilon_2 \kappa_1}{d_1 \kappa_2 + d_2 \kappa_1} \tag{3.20}$$

Τα μεγέθη κ και ε δεν παραμένουν σταθερά, αλλά μεταβάλλονται παράδειγμα με τη θερμοκρασία. Εάν, λόγω των απωλειών Joule, έχουμε θέρμανση των δύο υλικών αυτό που εμφανίζει τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας ανά μονάδα όγκου θα θερμανθεί περισσότερο. Επειδή εδώ, με αύξηση της θερμοκρασίας, η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας κ είναι μεγαλύτερη της διηλεκτρικής σταθεράς ε , η κατανομή της τάσεως μεταβάλλεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το αρχικά περισσότερο θερμαινόμενο υλικό να θερμαίνεται στη συνέχεια λιγότερο, ενώ ταυτόχρονα μεγαλώνει η θερμοκρασία του άλλου υλικού. Επομένως έτσι καταφέρνουμε μια σταθεροποίηση της κατανομής της τάσεως στα δύο υλικά δηλαδή μια ισορροπία.

3.3 Ημιτονοειδές Ηλεκτρικό Πεδίο

Εάν τα μονωτικά υλικά στη διάταξη του Σχήμα 3.1 ήταν με μηδενικές αγωγιμότητες, η διάταξη αυτή υπό εναλλασσόμενη (ημιτονοειδή) τάση U στα δύο υλικά μεταξύ τους με την ίδια πυκνότητα ρεύματος θα ήταν :

$$G_1 = i\omega\varepsilon_1 \mathrm{E}_1 = i\omega\varepsilon_1 \frac{U_1}{d_1} = G_2 = i\omega\varepsilon_2 \mathrm{E}_2 = i\omega\varepsilon_2 \frac{U_2}{d_2} \tag{3.21}$$

ω : είναι η κυκλική συχνότητα της ημιτονοειδούς τάσεως

Υπό τις συνθήκες αυτές , οι μικρές τάσεις U_1 και U_2 θα ήταν σε φάση και σε φάση προς την τάση U επομένως :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \tag{3.22}$$

Όσος δηλαδή και υπό συνεχή τάση.
Εάν όμως τα μονωτικά υλικά εμφανίζουν και αγωγιμότητες (κ_1, $\kappa_2 \neq 0$), η προηγούμενη κατανομή θα ισχύει μόνο η αρχική κατανομή της τάσεως. Στη συνέχεια αποκαθίσταται μια νέα κατανομή τάσης κατά την οποία οι ίσες μεταξύ τους πυκνότητες ρεύματος θα είναι :

$$G_1 = \frac{U_1}{d_1} \cdot (\kappa_1 + i\omega\varepsilon_1) = G_2 = \frac{U_2}{d_2} \cdot (\kappa_2 + i\omega\varepsilon_2) \tag{3.23}$$

Οι μερικές τάσεις δεν είναι πλέον σε φάση. Θέτοντας λοιπόν έχουμε :

$$\lambda_1 = \frac{\kappa_1}{\omega\varepsilon_1} \text{ και } \lambda_2 = \frac{\kappa_2}{\omega\varepsilon_2}$$

Και λαμβάνοντας υπόψη και τη σχέση $\frac{U_1}{U_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2}$ προκύπτει :

$$\frac{U_{\tau 1}}{U_{\tau 2}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{\lambda_2 + i}{\lambda_1 + i} = \frac{U_{a1}}{U_{a2}} \cdot \frac{\lambda_2 + i}{\lambda_1 + i} \tag{3.24}$$

Όπου *α* είναι η αρχική και η τελική κατανομή.
Οι κατανομές αυτές θα είναι οι ίδιες εάν και εδώ ισχύει η συνθήκη :

$$\frac{\kappa_1}{\varepsilon_1} = \frac{\kappa_2}{\varepsilon_2} \tag{3.25}$$

Για το λόγο των μέτρων των μερικών τάσεων προκύπτει :

$$\frac{U_{\tau 1}}{U_{\tau 2}} = \frac{U_{a1}}{U_{a2}} \cdot \sqrt{\frac{1+\lambda_2^2}{1+\lambda_1^2}} = k \cdot \frac{U_{a1}}{U_{a2}} \tag{3.26}$$

Όπου:

$$k = \sqrt{\frac{1+\lambda_2^2}{1+\lambda_1^2}} \tag{3.27}$$

είναι ο «συντελεστής μεγεθύνσεως».

4^{Ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ

" ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ "

4.1 Γενικά στοιχεία για τους μονωτήρες

4.1.1 Χρησιμότητα των μονωτήρων

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για να απομονώνουν τα ηλεκτροφόρα στοιχεία μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα . Πιο συγκεκριμένα τους βρίσκουμε στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να στηρίζουν ή να διαχωρίζουν ρευματοφόρους αγωγούς .

Ανάλογα με το υλικό που έχουν κατασκευαστεί οι μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις πάνω από 20 kV διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: σε κεραμικούς (από πορσελάνη ή γυαλί) και σε συνθετικούς (από πολυμερή υλικά).

4.1.1.1 Ιδιότητες των μονωτήρων

Η αξιοπιστία είναι η σημαντικότερη ιδιότητα ενός μονωτήρα. Η μεγαλύτερη αστοχία σε έναν μονωτήρα γραμμής συμβαίνει όταν αυτός σπάσει μηχανικά και «κοπεί» η γραμμή. Ακόμα κι αν αυτό συμβεί, οι μονωτήρες στους άλλους πυλώνες θα πρέπει να μπορούν όχι μόνο να αντέχουν το επιπλέον φορτίο, αλλά και να αντέξουν τη μηχανική καταπόνηση που θα τους γίνεται. Για να μην έχουμε τέτοια προβλήματα στη γραμμή, οι μονωτήρες πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι. Επιπλέον, οι μηχανικές ιδιότητες των μονωτήρων έχουν μεγαλύτερη σημασία σε περιοχές με υψηλή σεισμική δραστηριότητα.

Η μεγάλη διαφορά μεταξύ των πολυμερών και κεραμικών μονωτήρων βρίσκεται στη σταθερότητα. Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (όπως πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα υψηλό το σημείο τήξεως,και με μεγαλύτερη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο) και υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα.Έτσι, αν συγκρίνουμε τις βασικές ιδιότητες των μονωτήρων,θα δούμε ότι οι πολυμερής μονωτήρες με ίνες γυαλιού είναι πιο ελαστικοί με αποτέλεσμα να πλεονεκτούν απέναντι στους στερεούς – εύθραυστους κεραμικούς μονωτήρες.

Ένας δεύτερος τύπος αστοχίας είναι η υπερπήδηση, που μπορεί να έχει δημιουργηθεί από υπερτάσεις ή ρύπανση του μονωτήρα. Καθώς γνωρίζουμε ότι οι μονωτήρες είναι πιο φτηνοί σε κόστος από τα υπόλοιπα στοιχεία ενός συστήματος ενέργειας, μερικές φορές μπορούμε να επιτρέπουμε επιφανειακές εκκενώσεις στο μονωτήρα για να προστατευτεί ένας πιο ακριβός εξοπλισμός από μια πολύ μεγάλη υπέρταση. Ο μονωτήρας πρέπει βέβαια σ' αυτήν την περίπτωση να ανθίσταται. Γι' αυτού του είδους τις καταπονήσεις, το μήκος τόξου στο μονωτήρα είναι η πιο σημαντική παράμετρος. Από την άλλη, μια αστοχία λόγω υπερπήδησης

που οφείλεται λόγο ρύπανσης του μονωτήρα σχετίζεται κυρίως με το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα και τις επιφανειακές του ιδιότητες.

Η ύπαρξη ισχυρών ηλεκτροστατικών χημικών δεσμών στην επιφάνεια των κεραμικών μονωτήρων βοηθάει την αύξηση της ελεύθερης ενέργειας, δηλαδή της θερμοδυναμικής ιδιότητας που καθορίζει τη δύναμη των προσμίξεων στην επιφάνεια, και αποτελεί την κύρια αιτία για την οποία οι κεραμικοί μονωτήρες υγραίνονται και ρυπαίνονται εύκολα. Αντίθετα, οι δεσμοί των μορίων των πολυμερών είναι ασθενείς με συνέπεια να μην παρατηρείται έντονη επιφανειακή ρύπανση τόση όση στους κεραμικούς μονωτήρες.

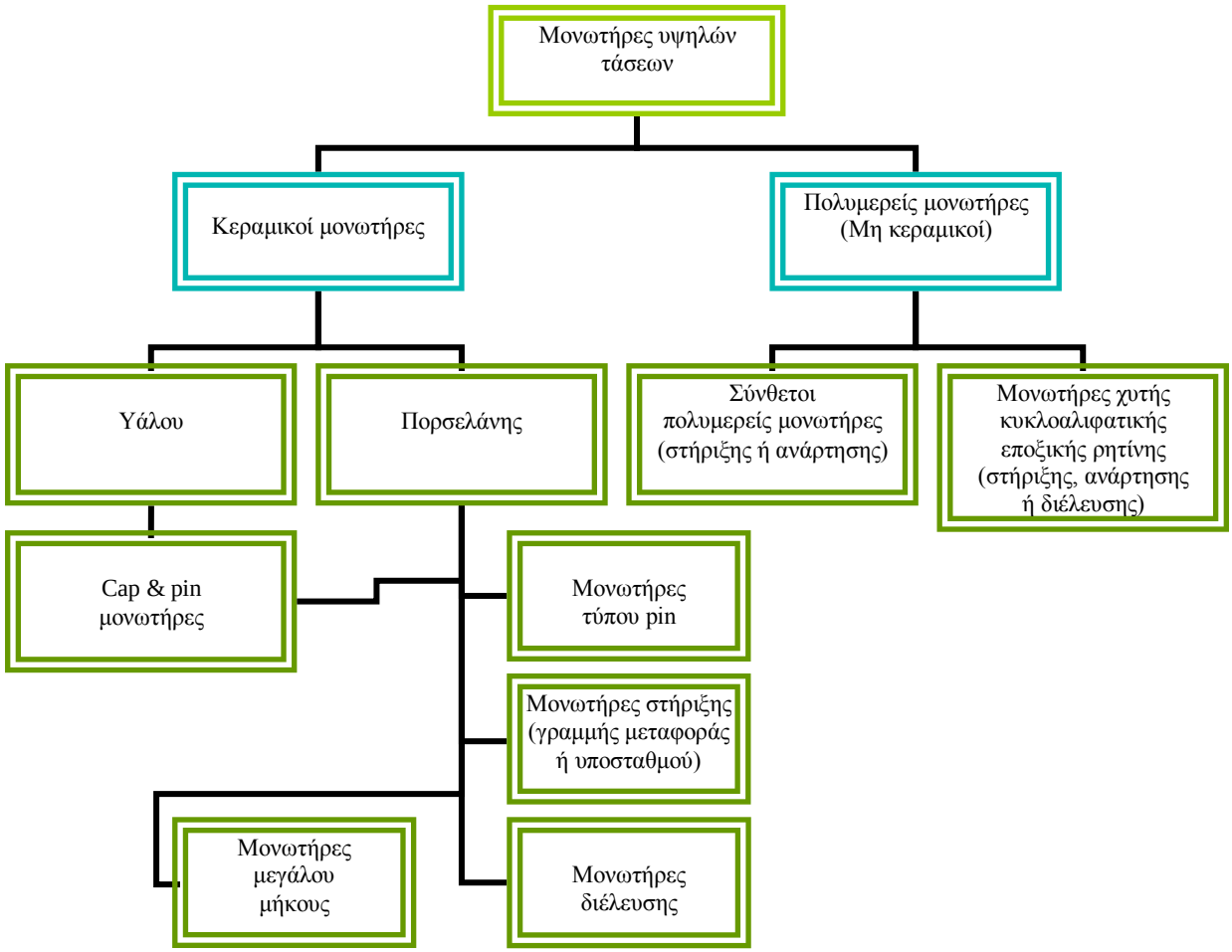
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πολυμερών μονωτήρων είναι οι πολύ χαμηλές τιμές της ελεύθερης ενέργειας της επιφάνειας τους. Θερμοδυναμικά, το εξωτερικό περίβλημα των ατόμων υδρογόνου που είναι συνδεδεμένα με τα άτομα του άνθρακα, παρέχει τη δυνατότητα στους πολυμερείς μονωτήρες να αντέχουν στην υγρασία και την ατμοσφαιρική ρύπανση πολύ περισσότερο απ' ότι οι κεραμικοί μονωτήρες. Λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή στις διασπάσεις λόγω ρύπανσης, οι μονωτήρες με προστατευτικά καλύμματα σιλικόνης αποδεικνύεται ότι υπερτερούν έναντι των παραδοσιακών μονωτήρων από πορσελάνη και γυαλί. Επομένως βλέπουμε ότι οι πολυμερείς μονωτήρες είναι ιδανικοί να τους χρησιμοποιούμε ως εξωτερικούς μονωτήρες. Όμως, οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι τέτοιες που οδηγούν στη διάβρωση της επιφάνειας του πολυμερούς. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην απώλεια των άριστων επιφανειακών ιδιοτήτων. Οι διαβρωτικές διαδικασίες συμβάλλουν σε μια μη αναστρέψιμη και χρονικά εξαρτώμενη φθορά.

Όλοι οι πολυμερείς μονωτήρες αποσυντίθενται σε θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών, ενώ επίσης υπόκεινται σε φωτόλυση, δηλαδή καταστρέφονται οι επιφανειακοί χημικοί δεσμοί από την πρόσπτωση της υπεριώδους ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να αντιδράσουν κατά τη λειτουργία τους με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, προκαλώντας επιφανειακές ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των πολυμερών μονωτήρων είναι ότι το βασικό στοιχείο τους είναι ο άνθρακας, με αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις να έχουμε ένα καλό ηλεκτρικό αγωγό. Η πιθανή διάσπαση της επιφάνειας τους , ιδιαίτερα από τις μερικές εκκενώσεις, αυξάνει τοπικά τη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τελικά αγώγιμες επιφανειακές με αποτέλεσμα να έχουμε επιφανειακή διάσπαση και δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών, και στο τέλος να καταστρέφεται ο μονωτήρας μας.

Για να μην έχουμε τόση μεγάλη περιβαλλοντική φθορά στον μονωτήρα μπορεί να την μειώσουμε με τη χρήση υλικών που προστατεύουν από τη θερμοκρασία τον μονωτήρα μας, όπως είναι το ATH (aluminum tri hydrate) ή αντιοξειδωτικών. Στους μονωτήρες υψηλών τάσεων ο κυριότερος λόγος που χρησιμοποιούμε ATH (ATH-filler) είναι η ιδιότητά του να μειώνει την θερμοκρασία στην επιφάνεια τους στις περιπτώσεις που έχουμε τόξο, μέσω της διάσπασής του σε οξείδιο του αλουμινίου και νερό που ακολουθείται από εξάτμιση του νερού. Όσον αφορά τους κεραμικούς μονωτήρες,καλό είναι να εκμεταλλευόμαστε τις καλές ιδιότητες τους, και ταυτόχρονα να μπορούμε να μειώσουμε τη επιφανειακή υγρότητα τους και την ανεπιθύμητη έλξη ρύπων.

Τύποι μονωτήρων

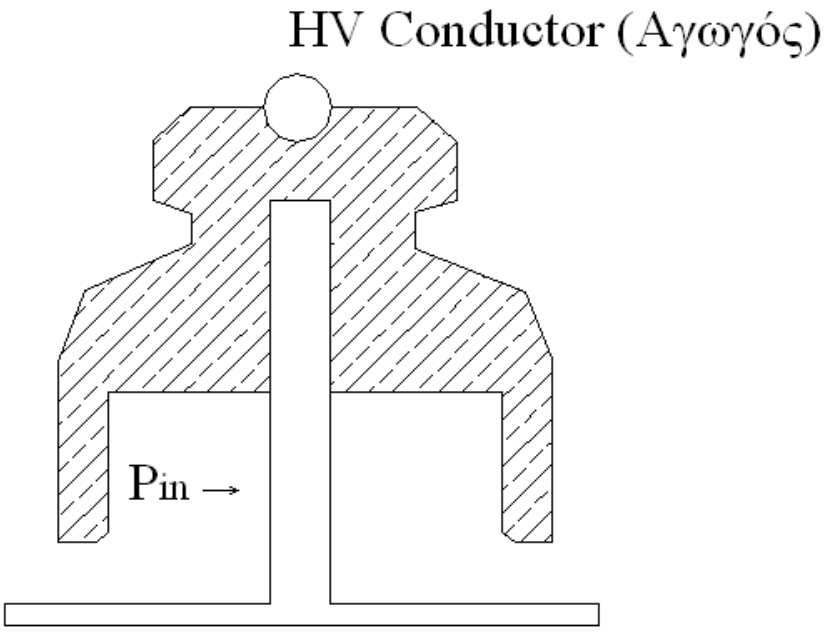
Είναι γνωστό ότι τόσο το υλικό, όσο και το γεωμετρικό σχέδιο των μονωτήρων παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο για τις μονωτικές τους επιδόσεις, καθώς επηρεάζει τον αυτοκαθαρισμό τους από τη βροχή, αλλά και την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.
Μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων σύμφωνα με το υλικό και το σχήμα τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1, ενώ στη συνέχεια αναλύουμε τις βασικές κατηγορίες μονωτήρων.



Σχήμα 4.1 Κατάταξη των μονωτήρων υψηλής τάσης

Μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin (porcelain pin type insulators)

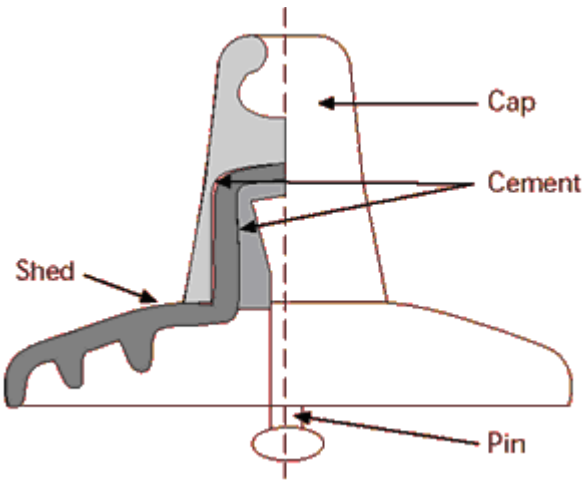
Αυτός ο τύπος μονωτήρων χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις τηλεφωνικές γραμμές και τα αλεξικέραυνα, ενώ στη συνέχεια τροποποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές παραλλαγές του είναι ακόμα σε χρήση στα συστήματα μέσης τάσης. Ο μονωτήρας αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Μονωτήρας τύπου pin

Μονωτήρες τύπου cap & pin (cap and pin insulators)

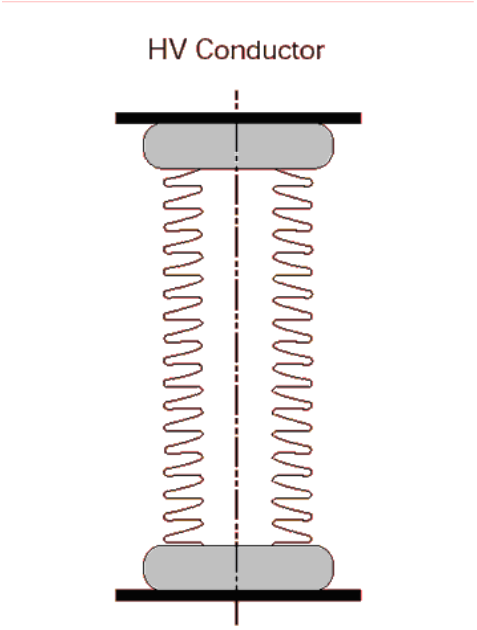
Αυτοί κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί και είναι βασισμένοι στις ίδιες κατασκευαστικές αρχές με τους μονωτήρες τύπου pin. Ένας αριθμός τέτοιων μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins) σχηματίζοντας μια αλυσίδα μονωτήρων. Αυτές οι αλυσίδες χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Τα καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο. Οι κωνικές μορφές τους μπορούν να μας εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή. Στους μονωτήρες τύπου pin και τύπου cap & 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. Επομένως η πορσελάνη ή το γυαλί μπορεί να διατρηθεί 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.



Σχήμα 4.3 Μονωτήρας τύπου cap and pin

Μονωτήρες στήριξης (post type insulators)

Αυτοί οι μονωτήρες αποτελούνται από ένα 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 στηρίξουν τον αγωγό υψηλής τάσης και τοποθετούνται στις βάσεις ή στους εγκάρσιους βραχίονες των γραμμών μεταφοράς . Στους μονωτήρες αυτούς η συντομότερη απόσταση μέσω της πορσελάνης υπερβαίνει το 50% της συντομότερης απόστασης μέσω του αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ένας μονωτήρας τύπου post εικονίζεται στο Σχήμα 4.4.



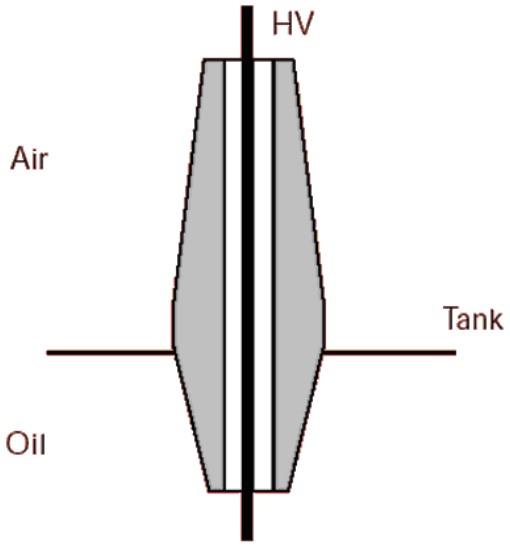
Σχήμα 4.4 Μονωτήρας τύπου post

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.

Μονωτήρες διέλευσης (bushings)

Οι μονωτήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για να μονώσουν τους αγωγούς των ακροδεκτών υψηλής τάσης κυρίως μετασχηματιστών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5. Συνήθως οι μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται από πορσελάνη.

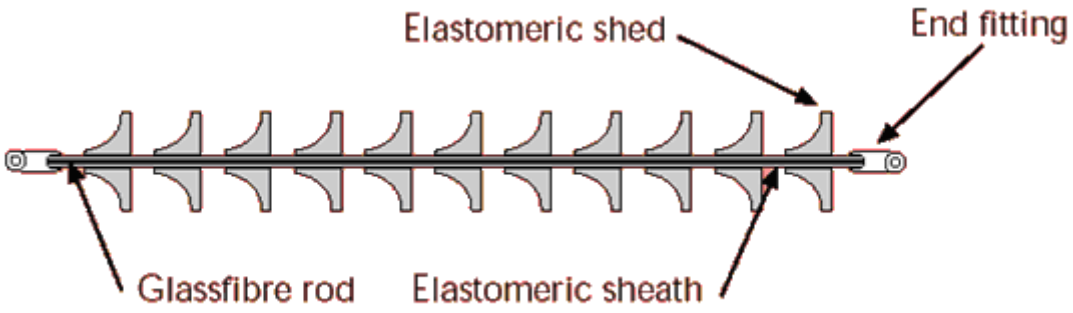


Σχήμα 4.5 Μονωτήρας διέλευσης

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 πυρήνας ρητίνης ενισχυμένος με ίνες γυαλιού, ο οποίος παρέχει μηχανική αντοχή, ενώ ταυτόχρονα έχει μεγάλη αντίσταση κατά την ηλεκτρική καταπόνηση. Ένα ελαστομερές περίβλημα για να προστατεύει τον πυρήνα από τις καιρικές συνθήκες. Οι ελαστομερείς δίσκοι, έχουν σκοπό την αύξηση του μήκους ερπυσμού τους, ώστε να μπορεί να αντιστέκεται ο μονωτήρας στις εντάσεις που επικρατούν στο σύστημα. Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το σιλικονούχο καουτσούκ και το αιθυλένιο-προπυλένιο-διένιο μονομερές καουτσούκ.

Οι μεταλλικοί ακροδέκτες αυτών των μονωτήρων 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. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων πολυμερών μονωτήρων είναι η μείωση βάρους μέχρι και 90% σε σύγκριση με τους αντίστοιχους κεραμικούς.



Σχήμα 4.6 Σύνθετος πολυμερής μονωτήρας

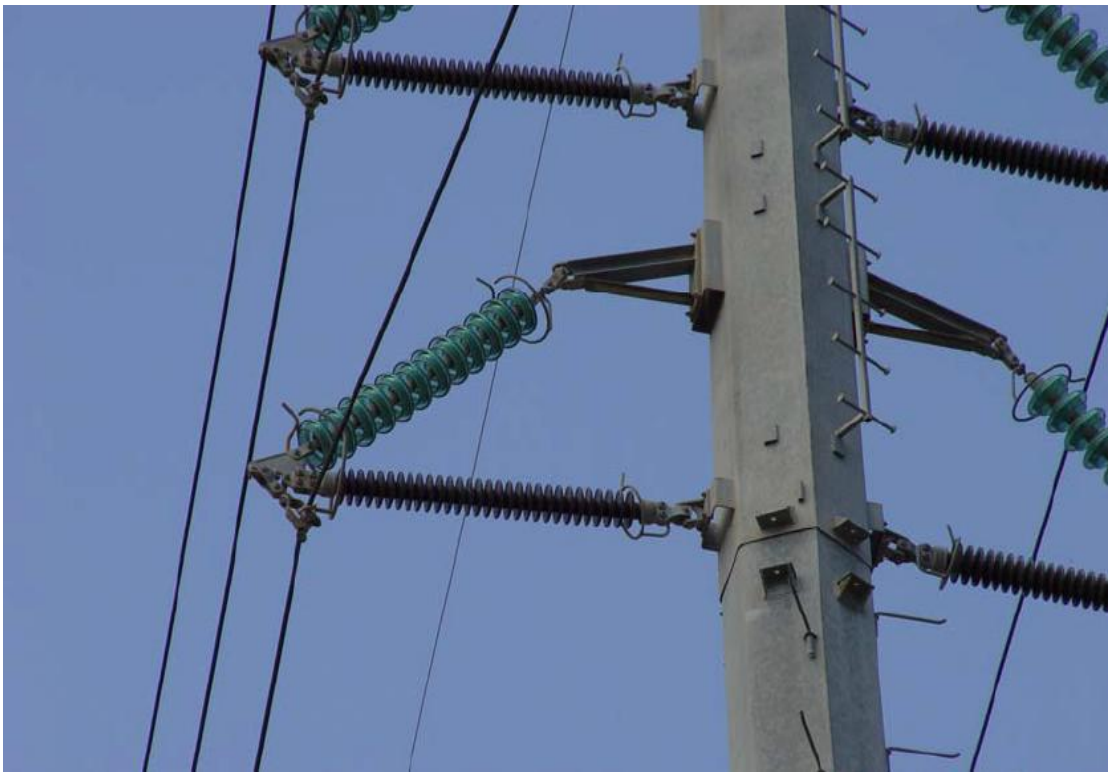
Μονωτήρες κυκλοαλιφατικής εποξικής ρητίνης (Cyclo-alifatic epoxy resin insulators)

Η κυκλοαλιφατική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστούν μονωτήρες παρόμοιοι με τους πορσελάνης και τύπου line post για διανομή των τάσεων. Σε περιβάλλον με κακές καιρικές συνθήκες οι επιφάνειες των μονωτήρων αυτών γίνονται τραχιές, γεγονός που μπορεί να έχει επιπτώσεις στην αξιοπιστία του μονωτήρα, αν δεν ληφθεί υπόψη.

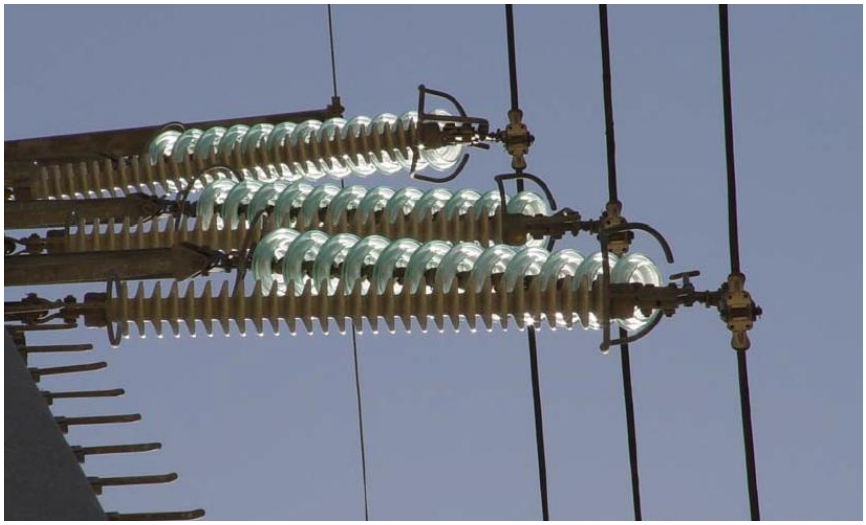
4.1.2 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τη θέση τους στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς

Στους πυλώνες που συνδέουν τις γραμμές μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας συναντάμε τους εξής τύπους μονωτήρων ανάλογα με την εγκατάσταση,τρόπο σύνδεσης και τον προορισμό τους:

Μονωτήρες ανάρτησης. Αυτοί οι μονωτήρες χρησιμεύουν στις περιπτώσεις που η γραμμή κρέμεται από το μονωτήρα. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και αποτελούνται από μια ή δύο σειρές δισκοειδών μονωτήρων, ο ένας πάνω στον άλλο σε μορφή αλυσίδας. Το πόσοι μονωτήρες θα βρίσκονται σε αυτή τη διάταξη εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής, αλλά και από τη διηλεκτρική αντοχή που εμφανίζει ο κάθε μονωτήρας από αυτούς .

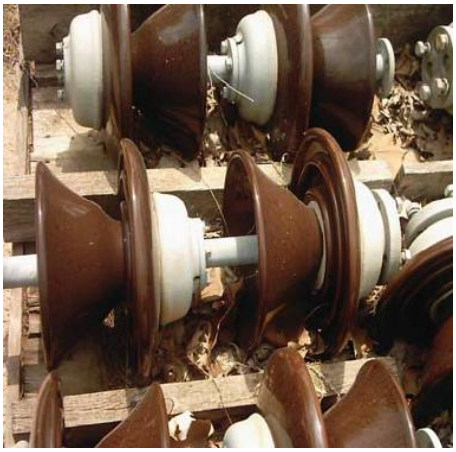


Σχήμα 4.7 Γυάλινοι μονωτήρες σε διάταξη ιστού



Σχήμα 4.8 Γυάλινοι μονωτήρες σε διάταξη ιστού.

Μονωτήρες στήριξης. Σε αυτήν την περίπτωση η γραμμή στηρίζεται πάνω στο μονωτήρα. Οι μονωτήρες στήριξης (*post type insulators)* χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών υψηλής τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες γραμμής μεταφοράς και σε μονωτήρες υποσταθμών.





Σχήμα 4.9 Πορσελάνινοι μονωτήρες στηρίξεως ζυγών 66kV

Μονωτήρες γραμμής. Έτσι καλούνται οι μονωτήρες που χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 70 kV.



Σχήμα 4.10 Γυάλινοι μονωτήρες σε διάταξη λάμδα

Μονωτήρες διέλευσης. Οι μονωτήρες διέλευσης συνήθως τους χρησιμοποιούμε όταν η γραμμή πρέπει να περνάει μέσα από το μονωτήρα και ταυτόχρονα να στηρίζεται σε αυτόν. Χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές ή άλλες συσκευές και για τη διέλευση αγωγών εγκαρσίως μέσω χωρισμάτων (τοίχων κ.α.).



Σχήμα 4.11 Γυάλινοι μονωτήρες σε πυλώνες διέλευσης

4.1.3 Είδη μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους

Ανάλογα με τους χώρους χρήσης τους και, κατ' επέκταση, τον ειδικό τρόπο σχεδίασής τους, έχουμε τους εξής τύπους μονωτήρων :

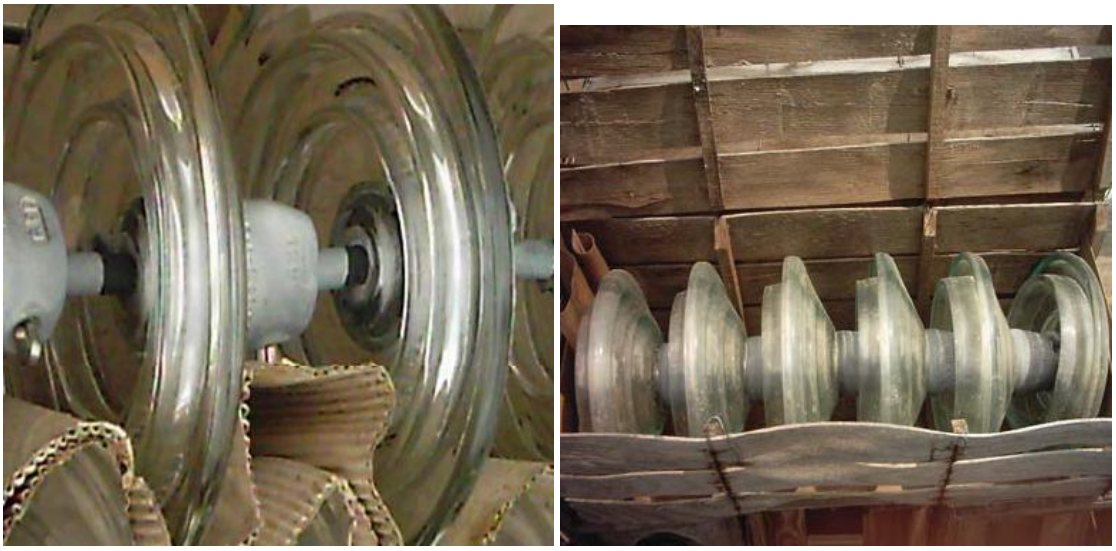
Τύπου ομίχλης Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες έντονης ρύπανσης (συνήθως, κοντά σε βιομηχανικές ή παραθαλάσσιες περιοχές). Οι μονωτήρες αυτοί έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού και τέτοια διαμόρφωση της εξωτερικής επιφάνειας, ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή προστασία απέναντι στους περιβαντολογικούς ρύπους πάνω στην επιφάνεια τους.



Σχήμα 4.12 Πορσελάνινοι μονωτήρες τύπου ομίχλης 150 kV

Κανονικού τύπου Αυτοί χρησιμοποιούνται σε σύνηθες περιβάλλον και έχουν μικρότερο μήκος ερπυσμού.





Σχήμα 4.13 Γυάλινοι μονωτήρες κανονικού τύπου



Σχήμα 4.14 Πορσελάνινοι μονωτήρες κανονικού τύπου.

Εσωτερικού τύπου Οι μονωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους – κυρίως σε κλειστούς υποσταθμούς.

4.2 Υλικά για την κατασκευή μονωτήρων

4.2.1 Γενικά περί μονωτικών υλικών

Οι μονωτές χαρακτηρίζονται ως τα υλικά που δεν εμφανίζουν καθόλου ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν βρίσκονται σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος (συνήθως θεωρούνται ως χαμηλές οι τάσεις που δεν ξεπερνούν τα 1000V). Η δυνατότητα τους να είναι μη ηλεκτρικά αγώγιμα μας εγγυάται στο γεγονός ότι δεν επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από το εσωτερικό τους (σε αντίθεση π.χ. με τα μέταλλα). Πραγματικά, στη χημική τους σύσταση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής και, σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές, τα σωματίδια από τα οποία

αποτελούνται δε μπορούν να διασπασθούν εύκολα σε φορτισμένα ιόντα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερα ιόντα από τα οποία αποτελούνται είναι κατά κανόνα δυσκίνητα, είτε στο ότι η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών που αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους είναι μεγάλη, είτε, ακόμα, στο ότι τα μόρια τους παρουσιάζουν ιδιαίτερη σταθερότητα.
Στην πραγματικότητα, βέβαια, είναι πρακτικά αναπόφευκτό κατά την διάσπαση να μην δημιουργηθεί ένας μικρός αριθμός φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, ο γενικός κανόνας είναι πως, χάρη στην μη ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίζουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων διαμέσου της μάζας τους και για να διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων**.**

4.2.2 Ιδιότητες πορσελάνης

Το σύνηθες μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται στις διατάξεις των μονωτήρων είναι η πορσελάνη. Γενικά, οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξης, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο) και, τέλος, υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα.

Σαν βασικότερο μειονέκτημα της πορσελάνης θα μπορούσε να πούμε είναι η δυσκολία και το υψηλό κόστος βιομηχανικής παρασκευής της σε συμπαγή τεμάχια με πάχος μεγαλύτερο από 2cm. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μονωτήρες πορσελάνης μέσης και υψηλής τάσης κατασκευάζονται συνήθως από περισσότερα τεμάχια που συγκολλούνται με τσιμέντο. Τέλος, ένα ακόμα σοβαρό μειονέκτημα της πορσελάνης, είναι το ότι η πορσελάνη μπορεί να υποστεί διάτρηση εσωτερικά χωρίς καμία εξωτερική ένδειξη με αποτέλεσμα ο βαθμός της βλάβης να μην είναι γνωστός προς εμάς μέχρι την ολική καταστροφή του.



Σχήμα 4.15 Πορσελάνινοι μονωτήρες σε πυλώνες

4.2.3 Ιδιότητες σκληρυμένου γυαλιού

Οι πρώτες ύλες που, συνήθως, χρησιμοποιούνται για την παρασκευή γυαλιού σα μονωτικό υλικό είναι το πυρίτιο (περίπου σε ποσοστό 57%), ο ασβεστόλιθος (9%), το άνυδρο ανθρακικό νάτριο (14%) κ.α..



Σχήμα 4.16 Γυάλινοι μονωτήρες σε τερματικούς πυλώνες

Η μεγάλη μηχανική αντοχή του σκληρυμένου γυαλιού σε σχέση με την πορσελάνη μας επιτρέπει τη χρησιμοποίηση λεπτότερων δακτυλίων στις διατάξεις των δισκοειδών μονωτήρων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται σημαντικά το μήκος του ερπυσμού, ενώ, η ονομαστική τάση λειτουργίας του μονωτήρα μπορεί να αυξηθεί σε ποσοστό μέχρι και 40%.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μονωτήρων γυαλιού είναι το ότι έχουν την ιδιότητα να αποθηκεύουν ενέργεια όταν οι τελευταίοι βρίσκονται σε μηχανικές καταπονήσεις. Όταν αυτή η ενέργεια απελευθερωθεί, κατά την μηχανική κρούση ή ύστερα από την διάβρωση ενός στρώματος, τότε ολόκληρο ο μονωτήρας διασπάται σε πολύ μικρά κομμάτια, τα οποία εκτοξεύονται με μεγάλη δύναμη. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο δεν χρησιμοποιείται κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

Ακόμή μπορούμε να δούμε η βιομηχανική εφαρμογή του μονωτήρα από γυαλί είναι περισσότερο περιορισμένο από εκείνο του μονωτήρα πορσελάνης. Στις ηλεκτρολογικές εφαρμογές η χρήση του γυαλιού, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση, το χρησιμοποιούμε κυρίως στους μονωτήρες τύπου “cap and pin” (ανάρτησης) ή σε στύλους στήριξης σιδηροδρομικών δικτύων και σε στύλους πολλαπλών κώνων που αποτελούνται από διατάξεις δισκοειδούς μορφής .

4.2.4 Ιδιότητες πολυμερών

Ελαφρύτερα, αλλά και πολύ ανθεκτικά στις μηχανικές καταπονήσεις,είναι τα μονωτικά υλικά των πολυμερών μονωτήρων. Από τα υλικά αυτά τα πιο γνωστά, λόγω του χαμηλού τους κόστους, είναι οι θερμοπλαστικές εποξειδικές ρητίνες,απλά χρησιμοποιούνται κυρίως σε εσωτερικούς χώρους λόγω του ότι μπορεί να αλλοιωθεί η χημική τους σύστασης υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (φωτόλυση). Μια άλλη ποιότητα πλαστικού, είναι οι κυκλοαλειφατικές ρητίνες, παρουσιάζουν αντοχή στη φωτόλυση και μπορεί να αντικαταστήσει μελλοντικά την πορσελάνη και το γυαλί στην κατασκευή των μονωτήρων.

Εξάλλου, μια άλλη σημαντική κατηγορία συνθετικών μονωτικών είναι οι ελαστομερείς ρητίνες σιλικόνης, οι οποίες αντέχουν στην καύση και δεν έχουν μόνιμες βλάβες από τον ερπυσμό και τις μερικές εκκενώσεις (όπως οι οργανικές ρητίνες) αφού αποτελούνται από σκελετό από πυρίτιο και περιέχουν πολύ λίγο άνθρακα στη χημική τους σύσταση.

Η πιο συχνή εφαρμογή των συνθετικών μονωτήρων είναι η χρησιμοποίησή τους για την ανάρτηση ή στήριξη των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στις γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται μεγάλες δέσμες αγωγών προκειμένου να περιοριστούν οι ηλεκτρικές απώλειες, οπότε τα μηχανικά φορτία είναι πολύ μεγαλύτερα από εκείνα που έχουν τη δυνατότητα να φέρουν οι συνήθεις μονωτήρες ανάρτησης γυαλιού ή πορσελάνης. Πραγματικά, οι συνθετικοί μονωτήρες πολύ δύσκολα προσβάλλονται από τις συνήθεις ηλεκτρικές βλάβες και επιδράσεις χειρισμού, ενώ μπορούν να συγκρατήσουν φορτίο που υπερβαίνει τους 100 τόνους.



Σχήμα 4.17 Γυάλινοι μονωτήρες σε πυλώνα αεροδρομίου

4.2.5 Ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες μονωτικών διηλεκτρικών

Η πορσελάνη, το μονωτικό γυαλί και τα πολυμερή υλικά αποτελούν, λοιπόν, τα διηλεκτρικά υλικά που βρίσκουμε σε μια διάταξη μονωτήρα. Εκτός από την ικανότητα να διατηρούν την διαφορά δυναμικού για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να παρουσιάσουν αστοχία, τα υλικά αυτά έχουν μηχανικές ιδιότητες τέτοιες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάρτηση ή στήριξη μιας σειράς στοιχείων ηλεκτρολογικού εξοπλισμού όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς. Στον πίνακα που ακολουθεί μπορεί κανείς να δει τις κυριότερες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών.

Πίνακας 4.1Ιδιότητες των μονωτικών διηλεκτρικών

Ιδιότητα	**Μονάδα**	**Υαλώδης πορσελάνη**	**Σκληρυμένο γυαλί**	**Πολυμερές**	**RBGF**
Πυκνότητα	g/cm	2.3-3.9	2.5	0.9-2.5	2.1-2.2
Αντοχή σε εφελκυσμό	Mpa lb/in^2 ($x10^3$)	30-100 4.0-14.0	100-120 14.5-17.4	20-35 3.0-13	1300-1600 190-230
Αντοχή σε θλίψη	Mpa $lb/in^2(x10^3)$	240-820 34-120	210-300 30-40	80-170 11-24	700-750 100-107
Συντελεστής εφελκυσμού	Gpa $lb/in^2(x10^3)$	50-100 7-14	7.2 10.1	0.6-16 0.1-2	43-60 6.0-8.0
Θερμική αγωγιμότητα	W/m ^oK	1-4	1.0	0.17-09	0.2-12
Διασταλτικότητα (20-100 ^0C)	$(x10^{-6})/^oK$	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)	$(x10^{-3})$	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}

4.3 Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διάσπασης στα μονωτικά υλικά

4.3.1 Σημασία αποφυγής της αστοχίας των μονωτήρων

Όπως έχουμε αναφέρει, οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται προκειμένου να μην έχουμε διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ηλεκτρικές συσκευές καθώς και η απώλεια ενέργειας στις διατάξεις διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της δημιουργίας αγώγιμου δρόμου ανάμεσα στις γραμμές μεταφοράς. Ενδεχόμενη αστοχία των μονωτήρων, δηλαδή προσωρινή ή μόνιμη απώλεια της μονωτικής τους ικανότητας, εμφανίζεται, με ποσοστό από 0.1 έως 1‰ ετησίως, αυτό μπορεί να προκαλέσει βλάβες στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό καθώς και στη λειτουργία των δικτύων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μελέτη των φαινομένων της διάσπασης, αλλά και της υπερπήδησης του μονωτήρα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή.

4.3.2 Αγωγιμότητα όγκου και επιφανειακή αγωγιμότητα

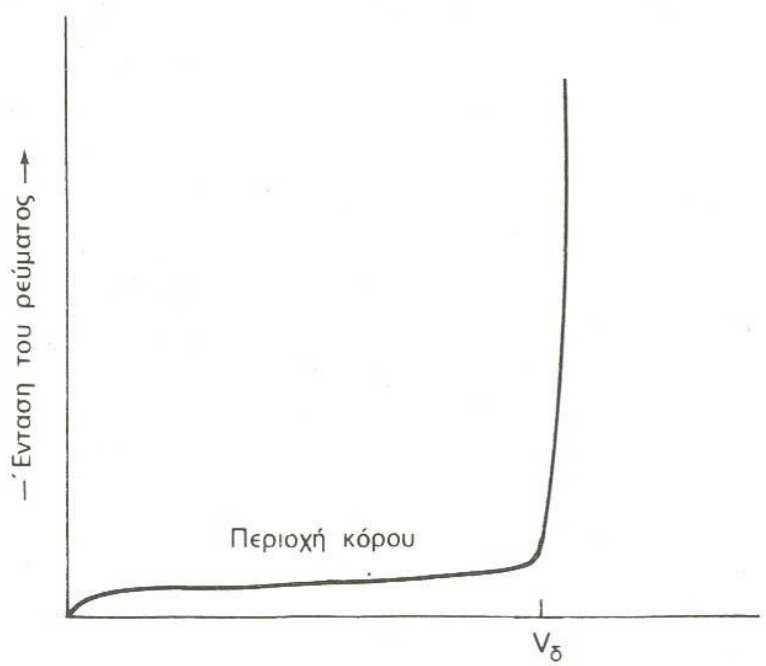
Όπως έχει αναφερθεί, η εμφάνιση ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά είναι αναπόφευκτη λόγω των προσμίξεων στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μια ιδιομορφία. Δηλαδή, εκτός από την αγωγιμότητα μέσου της μάζας τους, εκδηλώνεται και μια επιφανειακή αγωγιμότητα. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο. Για διάκριση, οι αντίστοιχες ειδικές αγωγιμότητες ονομάζονται ειδική αγωγιμότητα όγκου η πρώτη (σ) και ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα η δεύτερη (σ_ε).

Στα περισσότερα μονωτικά υλικά η αγωγιμότητα όγκου είναι πολύ μικρή και, έτσι, η επιφανειακή τους αγωγιμότητα είναι πολύ σημαντική, ιδίως όταν ευνοείται από το γεωμετρικό τους σχήμα.

Το ρεύμα που δημιουργεί η επιφανειακή αγωγιμότητα των στερεών μονωτικών ονομάζεται ρεύμα ερπυσμού διότι σέρνεται πάνω στην επιφάνειά τους. Τα ρεύματα ερπυσμού είναι σχετικά σταθερά όταν οι συνθήκες δεν μεταβάλλονται. Η κατανομή, όμως, της πυκνότητας των ρευμάτων αυτών δεν είναι ομοιόμορφη διότι μπορεί να έχουμε διαρροή στην επιφάνεια ή ρωγμές των μονωτήρων.

4.3.3 Η ηλεκτρική διάσπαση

Ως αποτέλεσμα της ύπαρξης κάποιου βαθμού ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα μονωτικά υλικά, εμφανίζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο εσωτερικό τους. Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μορφή των καμπυλών μεταβολής της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τη μάζα ενός αέριου, υγρού ή στερεού μονωτικού σώματος σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση.

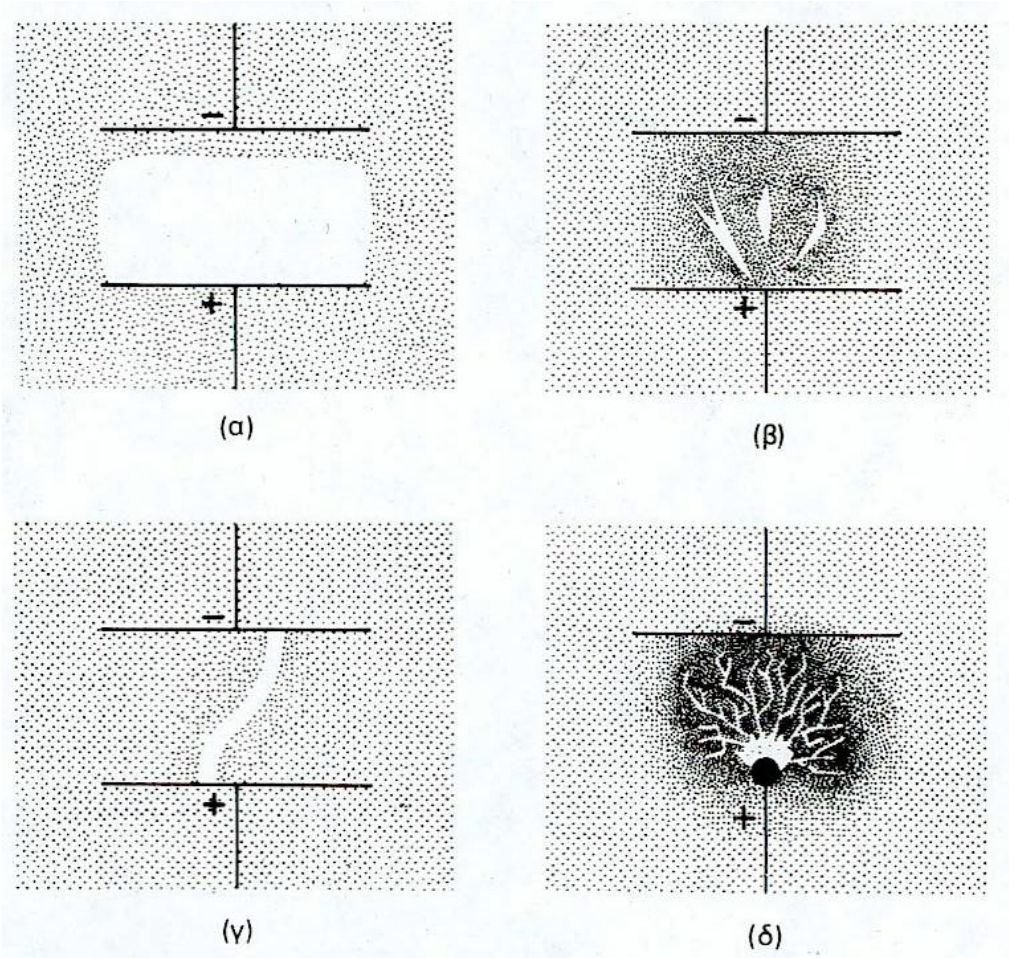


Σχήμα 4.18 Η μεταβολή της έντασης του ρεύματος σε ένα μονωτικό υλικό, σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση, μέχρι την ηλεκτρική διάσπαση

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 εκπέμπονται από τα ηλεκτρόδια ή που δημιουργεί το πεδίο ιονίζοντας τα συστατικά του σώματος αντισταθμίζεται περίπου από το πλήθος τους που εξουδετερώνεται 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 μια 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.

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



Σχήμα 4.19 Διάφορες μορφές ηλεκτρικών εκκενώσεων σε αέρια σώματα, ανάλογα με την πίεση του αερίου, τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων, την ένταση του πεδίου κλπ.
(α) Εκκένωση αίγλης,
(β) Εκκένωση θυσάνου σε μορφή σπινθήρα,
(γ) Εκκένωση τόξου,
(δ) Στεμματόμορφη εκκένωση(κορώνα)

Ειδικότερα, στα στερεά μονωτικά υλικά όταν έχουμε ηλεκτρική διάσπαση παρατηρούμε διάτρηση του σώματος. Δηλαδή, η μεγάλη θερμοκρασία που δημιουργεί η διέλευση του ρεύματος της διάσπασης προκαλεί τοπικά την τήξη, καύση ή εξαέρωση του υλικού και έχει σαν αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια λεπτή τρύπας στο σώμα κατά μήκος του πεδίου. Επομένως έχουμε καταστροφή του υλικού και μόνιμη απώλεια της μόνωσης του. Αντίθετα, στα αέρια και υγρά μονωτικά η διάσπαση δεν προκαλεί σοβαρή μόνιμη βλάβη αφού αν μειωθεί η τάση μπορούμε να έχουμε αποκατάσταση των μονωτικών συνθηκών. Η πεδιακή ένταση E_δ, στην οποία αντιστοιχεί η τάση διάσπασης V_δ, ονομάζεται διηλεκτρική αντοχή.

Δηλαδή:

$$E_{\delta} = \frac{V_{\delta}}{d} \tag{4.1}$$

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 ιδιότητας
Γνωρίζουμε ότι η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών σωμάτων είναι ένα φυσικό μέγεθος το οποίο εξαρτάται από μια σειρά από παράγοντες, όπως είναι το υλικό και το σχήμα των ηλεκτροδίων, ο ρυθμός αύξησης της επιβαλλόμενης τάσης, η μηχανική καταπόνηση του σώματος κ.ά.

4.4 Απώλεια μονωτικής ικανότητας στους μονωτήρες

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ηλεκτρική διάσπαση στα στερεά μονωτικά υλικά που βρίσκονται σε ατμοσφαιρικό αέρα. Τέτοιες διατάξεις είναι και οι μονωτήρες, στους οποίους απώλεια της μόνωσης μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

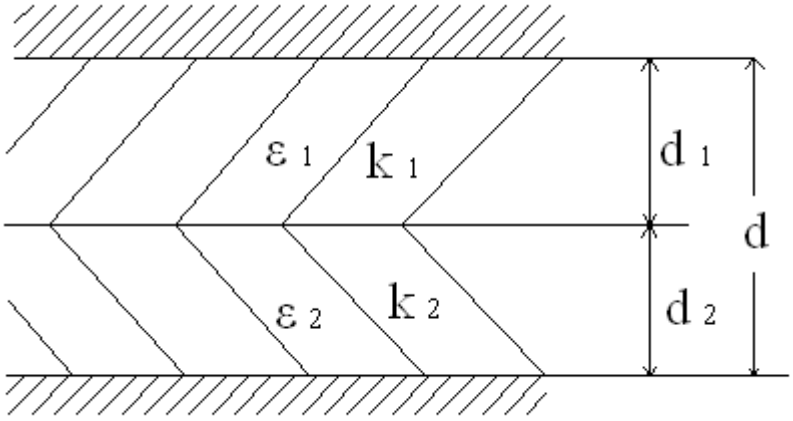
Α) Ο πρώτος είναι η κανονική ηλεκτρική διάσπαση του μονωτήρα (διάτρηση) και η εκκένωση ρεύματος δια μέσου της μάζας του, φαινόμενο που, όπως είδαμε και πιο πάνω, δημιουργείται όταν η διαφορά δυναμικού ξεπεράσει την τάση διάσπασης του υλικού.Η διάτρηση του μονωτήρα είναι ένα εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο, αφού, η ειδική αγωγιμότητα όγκου του μονωτικού υλικού είναι πολύ μικρότερη της ειδικής επιφανειακής αγωγιμότητάς του. Έτσι, οι ηλεκτρικές εκκενώσεις πραγματοποιούνται στην επιφάνεια του μονωτήρα ή μέσω διάσπασης του αέρα γύρω από αυτήν, παρά διαμέσου του υλικού του. Διάτρηση, βέβαια, μπορεί να γίνει και μέσα σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, εφόσον, όμως, η τάση που δημιουργείται είναι κρουστική, μεγάλης τιμής και μεγάλης κλίσεως μετώπου.

Β) Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να έχουμε απώλεια της μόνωσης σε μια διάταξη μονωτήρα είναι η ανάπτυξη ενός ισχυρού ρεύματος ερπυσμού πάνω στην επιφάνεια του. Το ρεύμα ερπυσμού μπορεί να επεκταθεί σε όλο το μήκος της επιφάνειας του μονωτικού ή, σε διάφορα μέρη της που συνδέονται με μικρά ηλεκτρικά τόξα. Μάλιστα, κατά την υπερπήδηση τα ηλεκτρικά αυτά τόξα έρχονται σε επαφή με το στερεό μονωτικό καθορίζοντας, ταυτόχρονα, κατά ένα ποσοστό τουλάχιστο 50% την διέλευση νέου ηλεκτρικού τόξου. Για αυτό το λόγο, εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή κερατίδια με τα οποία "υποδεικνύεται" στο ηλεκτρικό τόξο η οδός διέλευσής του, μακριά από το στερεό μονωτικό.

Γ) Ο τρίτος τρόπος είναι όταν μεταξύ των δύο ακρότατων σημείων του μονωτήρα που επιβάλλεται τάση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, γίνεται υπερπήδηση του μονωτήρα, δηλαδή γεφύρωση του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα με ηλεκτρικό τόξο που οδεύει διαμέσου του αέρα .

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η υπερπήδηση δημιουργείται λόγω επιφανειακών εκκενώσεων, ερπυσμού επί της επιφάνειας του μονωτήρα, και λόγω διασπάσεως των στρωμάτων αέρα. Γι' αυτό το λόγο τα δύο τελευταία φαινόμενα αντιμετωπίζονται με τον ίδιο

τρόπο. Εδώ μπορούμε να αναφέρουμε το γεγονός ότι, τα πιο συνήθη φαινόμενα είναι η υπερπήδηση των μονωτήρων από επιφανειακό ρεύμα ερπυσμού ή μέσω εναέριου ηλεκτρικού τόξου. Η εξήγηση είναι απλή στο ότι το σώμα του μονωτήρα έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα και από το υλικό στην επιφάνειά του. Έτσι, τα τελευταία αποτελούν πιο εύκολο αγώγιμο δρόμο διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 4.20 Η απώλεια της μονωτικής δράσης ενός στερεού μονωτικού μπορεί να γίνει με ηλεκτρική διάσπαση του υλικού ή με υπερπήδηση που εκδηλώνεται με ρεύμα ερπυσμού και με διάσπαση στον αέρα

4.5 Μορφές ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων

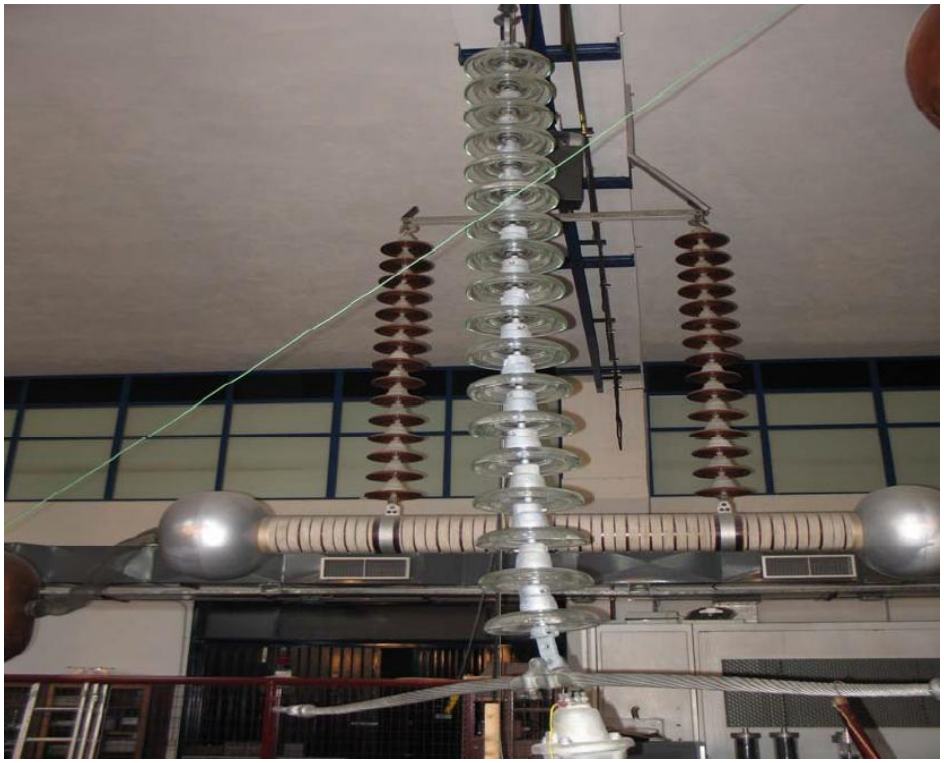
4.5.1 Ανάλυση του φαινομένου

Ο όρος ρύπανση για τους μονωτήρες των δικτύων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται στην δημιουργία ακαθαρσιών ή δημιουργία ρύπων σε ολόκληρη την επιφάνειά τους.

Γενικά, οι μορφές της ρύπανσης μονωτήρων μπορούν να ταξινομηθούν σε αρκετές κατηγορίες, όπως: θαλάσσια ρύπανση, βιομηχανική ρύπανση, μικτή ρύπανση (που είναι το αποτέλεσμα της συνύπαρξης των δύο παραπάνω μορφών) ή, ακόμα, και ερημική ρύπανση – μορφή ρύπανσης που συναντάται σε περιοχές ερήμου που πολλές φορές οι επικαθήσεις περιέχουν αλάτι (η τελευταία, αυτή, μορφή δεν υπάρχει στη χώρα μας). Από αυτές, πιο σημαντικές είναι η θαλάσσια και η βιομηχανική ρύπανση.

4.5.2 Θαλάσσια Ρύπανση

Είναι η βασικότερη μορφή ρύπανσης στη χώρα μας, όπως και σε πολλές άλλες μεσογειακές χώρες, λόγω της μεγάλης ακτογραμμής αλλά και του γεγονότος ότι τόσο μεγάλα αστικά κέντρα, όσο και τα βιομηχανικά συγκροτήματα είναι κατά κανόνα συγκεντρωμένα κοντά στις ακτές.



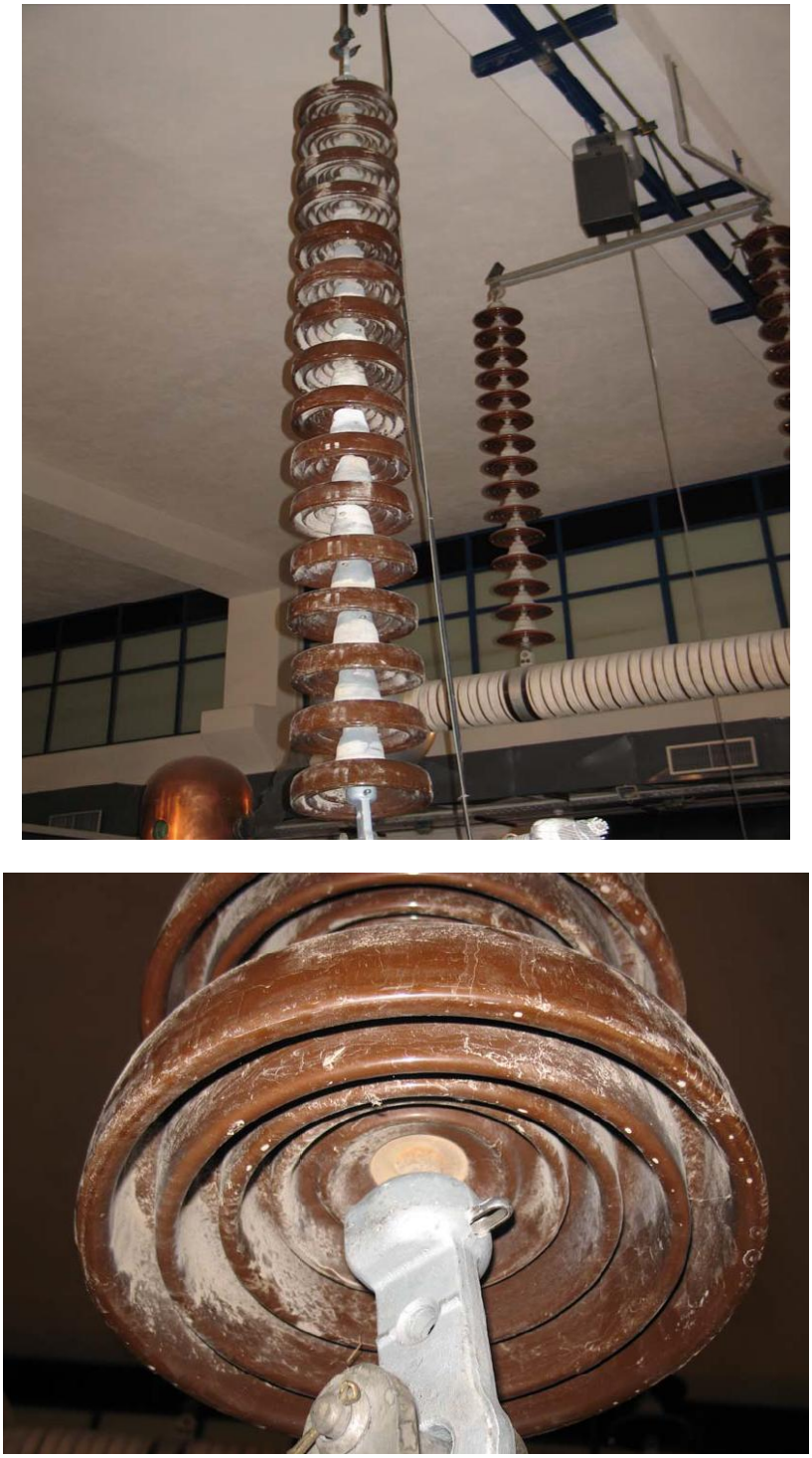


Σχήμα 4.21 Γυάλινος ρυπασμένος αλυσοειδής μονωτήρας, κανονικού τύπου 400 kV αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες

Το φαινόμενο της θαλάσσιας ρύπανσης δεν παρουσιάζεται, όμως, μόνο σε παραθαλάσσιες περιοχές. Μπορεί, επίσης, να εμφανιστεί και στην ενδοχώρα, σε περιοχές που βρίσκονται σε μικρές ή ακόμα και σε σημαντικές αποστάσεις από ακτές στις οποίες η παραλία είναι ανοικτή και επικρατούν σφοδροί άνεμοι με κατεύθυνση από τη θάλασσα προς τις μεσόγειες περιοχές σε συνδυασμό και με άλλες ειδικές περιβαλλοντολογικές συνθήκες, θερμοκρασίας, ανέμου, υγρασίας κλπ.

4.5.3 Βιομηχανική Ρύπανση

Η μορφή αυτή της ρύπανσης οφείλεται σε απόβλητα βιομηχανικών συγκροτημάτων που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα, χωρίς προηγουμένως να έχουν υποστεί χημικές διεργασίες καθαρισμού.



Σχήμα 4.22 Ρυπασμένος πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης 400 kV, αποτελούμενος από δεκαέξι (16) δισκοειδείς μονωτήρες

Η προέλευση των αποβλήτων αυτών μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις μορφές της βιομηχανικής δραστηριότητας (χημική ή μεταλλουργική βιομηχανία, τσιμεντοβιομηχανία κ.λ.π.) και κάθονται σε ολόκληρη την επιφάνεια των μονωτήρων, δημιουργώντας, έτσι, ένα στερεό λεπτό επίστρωμα.



Σχήμα 4.23 Ρυπασμένος πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου κανονικού 400 kV, αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες

Πέρα, όμως, από τη βιομηχανική και τη θαλάσσια ρύπανση, στις μεγάλες πόλεις παρουσιάζεται το φαινόμενο της ρύπανσης των μονωτήρων λόγω των καυσαερίων, τόσο των αυτοκινήτων, όσο και των κεντρικών θερμάνσεων των κτιρίων.

4.6 Ρύπανση – Παράγοντας αύξησης της επιφανειακής αγωγιμότητας

Εξαιτίας της ρύπανσης η αγωγιμότητα που παρουσιάζει στην επιφάνειά του το μονωτικό υλικό της διάταξης του μονωτήρα είναι δυνατόν, να αυξηθεί αρκετά. Εκτός από τις διάφορες ακαθαρσίες (αδρανής ορυκτή ύλη, ηλεκτρικά αγώγιμη σκόνη, διαλυτά άλατα στο νερό κ. α.) που, όπως είδαμε πριν, κάθονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, τα ιόντα που συγκεντρώνονται σ' αυτήν, και τα οποία θα προκαλέσουν την αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας, είναι δυνατό να προέρχονται και από την ίδια τη χημική δομή των στερεών αυτών (όπως π.χ. τα ιόντα νατρίου του κοινού γυαλιού).

4.6.1 Επίδραση της υγρασίας σε συνδυασμό με ρύπανση

Γενικά, το στρώμα της ρύπανσης, οφείλεται σε σωματίδια και ουσίες που κάθονται στην επιφάνεια του μονωτήρα, το στρώμα αυτό δεν είναι από μόνο του ιδιαίτερα αγώγιμο.Δηλαδή, όταν εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού στα μεταλλικά άκρα ενός μονωτήρα του οποίου η επιφάνεια είναι ξηρή, τότε, το αγώγιμο στρώμα ρύπανσης διαρρέεται από ένα ρεύμα πολύ μικρής έντασης (που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο). Ωστόσο, αν στην επιφάνεια του μονωτήρα έχουμε υγρασία (λόγω ομίχλης, πάχνης κ.α.), τότε, το στρώμα αυτό γίνεται ιδιαίτερα αγώγιμο και μπορεί μεταβάλλει και να μεγαλώσει το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του μονωτήρα. Συγκεκριμένα, όταν η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερη από 70 – 80%, τότε η επιφανειακή αγωγιμότητα των μονωτικών σωμάτων έχει πολύ μεγάλες τιμές. Το κοινό γυαλί, για παράδειγμα, έχει σε ξηρή ατμόσφαιρα (με σχετική υγρασία περίπου 20%) ασήμαντη επιφανειακή αγωγιμότητα της τάξης του 10^{-13} Ω^{-1}. Σε υγρασία, όμως, της τάξης του 70% η επιφανειακή αγωγιμότητα του γυαλιού ανεβαίνει στο 10^{-11} Ω^{-1} όταν η επιφάνειά του είναι καθαρή και στο 10^{-8} Ω^{-1} περίπου όταν είναι ακάθαρτη, δηλαδή 100.000 φορές μεγαλύτερη από του καθαρού γυαλιού σε καθαρή ατμόσφαιρα.
Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα επιφανειακό ρεύμα ερπυσμού αρκετά ισχυρότερο από εκείνο που διαρρέει την ξηρή επιφάνεια.Παρατηρούμε, λοιπόν, πως η συνύπαρξη ακαθαρσιών και ομίχλης αποτελούν δύσκολη συνθήκη λειτουργίας των μονωτήρων. Έχει, μάλιστα, διαπιστωθεί ότι ο συνδυασμός υγρασίας και ρύπανσης μπορεί να μειώσει τη μονωτική ικανότητα των μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς σε ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 40% και 80% **.**

Βέβαια, η προδιάθεση του μονωτικού υλικού να διαβρέχεται από την υγρασία και να ευνοεί, έτσι, το σχηματισμό του λεπτού επιφανειακού αγώγιμου στρώματος. η *υγροσκοπικότητα***,** δηλαδή η τάση να απορροφάται υγρασία από το περιβάλλον.

4.6.2 Ρύπανση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση

Γνωρίζουμε ότι όταν στα άκρα των μονωτήρων εφαρμόζεται συνεχής τάση, τότε, λόγω της ηλεκτροστατικής έλξης που ασκείται, οι ρύποι που κάθονται πάνω στην επιφάνεια τους είναι πολύ εντονότερη τους απ' ό,τι όταν η τάση είναι εναλλασσόμενη. Το 1957, οι Gertsik, Korsunter και Nikolski σε πειράματα που έκαναν μέσα σε κλειστό χώρο παρατήρησαν πως οι μονωτήρες που λειτουργούσαν σε d.c. τάση είχαν διπλάσια ποσότητα ρύπανσης στην επιφάνειά τους απ' ό,τι οι μονωτήρες που λειτουργούσαν υπό τάση a.c.. Στη συνέχεια, όμως, διαπίστωσαν ότι οι μονωτήρες που έχουν καλυφθεί με τεχνητή ρύπανση έτσι ώστε να έχουν την ίδια πυκνότητα ρύπανσης στην επιφάνειά τους, παρουσιάζεται πολύ μικρή διαφορά ανάμεσα στη θετική d.c., στην αρνητική d.c. και στη μέγιστη a.c. τιμή της τάσης υπερπήδησης. Δηλαδή, κύρια αιτία για την αύξηση αστοχίας των μονωτήρων υπό συνεχή τάση είναι η επιπλέον ποσότητα ρύπανσης που κάθεται στην επιφάνεια τους**..**

Σε δοκιμές που έγιναν σε ανοιχτό περιβάλλον διαπιστώθηκε ότι η ρύπανση που βρίσκεται στην επιφάνεια του μονωτήρα δεν είναι τόσο έντονη λόγω του ανέμου που βοηθάει στον καθαρισμό της επιφάνειας του μονωτήρα. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν έδειξαν ότι, στους d.c. μονωτήρες δημιουργείται ένα πολύ πιο αγώγιμο στρώμα ρύπανσης . Το 1960 οι Forrest, Lambeth και Oakeshot υπολόγισαν ότι το μήκος υπερπήδησης των μονωτήρων στους οποίους εφαρμόζεται συνεχής τάση είναι μεγαλύτερο κατά 30% απ' ό,τι το μήκος των μονωτήρων εναλλασσόμενης τάσης, ενώ ο Lambeth ανέβασε το ποσοστό αυτό σε 60% 6 χρόνια αργότερα**.**

4.7 Το φαινόμενο της υπερπήδησης – Φυσική ερμηνεία

4.7.1 Σχηματισμός «ξηρών ζωνών»

Η ανάπτυξη του φαινομένου της υπερπήδησης,οπού επιδρούν διαφορετικοί παράγοντες ρύπανση, υγρασία, διαφορά δυναμικού στα άκρα του μονωτήρα, ένταση πεδίου κατά μήκος της επιφάνειάς του μονωτήρα μπορεί να περιγραφεί με τα εξής βήματα:
Η ρυπασμένη επιφάνεια του μονωτήρα αρχίζει να γίνεται αγώγιμη, καθώς η υγρασία κάθεται πάνω στα ευδιάλυτα συσσωρευμένα άλατα (π.χ. NaCl, $MgCl_2$).Σ' αυτήν την περίπτωση, σε περιοχές της επιφάνειας του μονωτικού υλικού η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται τοπικά, με αποτέλεσμα να διασπάται ο αέρας όταν η τιμή της έντασης υπερβεί την διηλεκτρική αντοχή (electric strength) του μονωτήρα. Οι διασπάσεις αυτές μετατρέπονται σε εκκενώσεις με μορφή ηλεκτρικού τόξου που «γεφυρώνει» μέσου του αέρα, περιοχές της επιφάνειας του μονωτήρα. Οι εκκενώσεις αυτές διατηρούνται λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το ρυπαρό τμήμα της επιφάνειας. Ταυτόχρονα, λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του μονωτήρα όπου καταλήγουν τα ηλεκτρικά τόξα - αλλά και στα γειτονικά τους σημεία – το στρώμα της ρύπανσης ξηραίνεται με αποτέλεσμα να έχουμε εξάτμιση της υγρασίας και μετατρέπεται σε «μη αγώγιμο» με αποτέλεσμα την δημιουργία «ξηρών ζωνών». Προκειμένου η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος να συνεχιστεί θα πρέπει οι εναέριες εκκενώσεις να μετατοπιστούν κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα μέχρις ότου το τελευταίο να συναντήσει κάποιο τμήμα του στρώματος της ρύπανσης στο οποίο να υπάρχει υγρασία. Με αυτόν τον τρόπο οι εκκενώσεις μπορούν να επιμηκυνθούν και, να έχουμε υπερπήδηση του μονωτικού υλικού στην περίπτωση που γίνει δυνατό να καλύψουν όλο το μήκος του δηλαδή όταν η εκκένωση «ξεκινάει» από το ένα ηλεκτρόδιο της διάταξης και «καταλήγει» στο άλλο παρακάμπτοντας το μονωτικό υλικό.

Στο σημείο αυτό μπούμε να πούμε ότι η δημιουργία ξηρών ζωνών εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μονωτήρα και όχι από το είδος του (κοινός, ομίχλης κλπ.). Υπάρχει, ένα βασικό ερώτημα πότε μπορεί η επιμήκυνση των ηλεκτρικών τόξων να οδηγήσει σε υπερπήδηση του μονωτήρα και πότε όχι. Πάνω στο ερώτημα αυτό, το 1957 ο Shkuropat σε μια εργασία του διατύπωσε ένα κριτήριο για μπορέσει να εξηγήσει το φαινόμενο της επιμήκυνσης των ηλεκτρικών τόξων που δημιουργούνται στην επιφάνεια του μονωτήρα. Το κριτήριο αυτό, στηρίζεται στο ότι η εκκένωση τείνει να μετακινηθεί προς το σημείο εκείνο στο οποίο ο βαθμός κατανάλωσης ενέργειας είναι μέγιστος. Έτσι, θεωρώντας δεδομένη τη σχέση ανάμεσα στην τάση στα άκρα του μονωτήρα και του ρεύματος που τον διαρρέει, αλλά και το ότι η αντίσταση που παρουσιάζει το στρώμα υγρής ρύπανσης ελαττώνεται όσο αυξάνει το μήκος της εκκένωσης, μπορεί να υπολογιστεί μια τιμή του ρεύματος. Σε περίπτωση που το ρεύμα υπερβεί την τιμή αυτή, τότε η ισχύς που παίρνουμε από την τροφοδοσία αυξάνεται με το μήκος της εκκένωσης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η ισχύς μειώνεται με το μήκος της εκκένωσης. Έτσι, αν x είναι το μήκος της εκκένωσης, μετακίνηση της εκκένωσης θα συμβεί όταν:

$$\frac{dP}{dx} > 0 \tag{4.2}$$

Αν η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της διάταξης είναι σταθερή, τότε η (4.2) απλοποιείται:

$$\frac{di}{dx} > 0 \tag{4.3}$$

Ο σχέσεις (4.2) και (4.3) μπορούν να βρουν εφαρμογή και στην περίπτωση που η διάταξη του μονωτήρα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση.

Ένα ακόμη ερώτημα, που μελέτησαν οι Rizk και Nguyen είναι η σχέση που ανάμεσα των ηλεκτρικών τόξων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ενός μονωτήρα και των «ξηρών ζωνών» που δημιουργούνται συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα ενώ αρχικά ο αριθμός των τόξων σε σειρά (έστω m) είναι ο ίδιος με εκείνον των ξηρών ζωνών (έστω m_d), καθώς τα τόξα γεφυρώνουν τη διαδρομή ερπυσμού του μονωτήρα, ο αριθμός τους μειώνεται σιγά ,σιγά μέχρι να παραμείνει ένα, σε συνθήκες πλήρους υπερπήδησης.

Κατά τη διάρκεια της διάδοσης (propagation) των εκκενώσεων αν θεωρηθεί πως ο αριθμός των τόξων μειώνεται κατά Δm όταν γεφυρωθεί μια απόσταση Δx, τότε επιλύνοντας μια σειρά εξισώσεων προκύπτει ότι:

$$m = m_d^{1\frac{x}{L}} \tag{4.4}$$

όπου *x*: το μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα που έχει γεφυρωθεί από το τόξο και *L*: το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα.

4.7.2 Υπερπήδηση σε συνεχή και εναλλασσόμενη τάση

Όταν εφαρμόσουμε τάση σταθερού μέτρου στα άκρα ενός μονωτήρα παρατηρούμε μια αύξηση του μήκους των τόξων των ηλεκτρικών εκκενώσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του μονωτικού υλικού. Στην περίπτωση που το μήκος αυτό υπερβεί μια κρίσιμη τιμή ,συνήθως τα 2/3 της διαδρομής υπερπήδησης, παρατηρούμε το φαινομένου της ολικής υπερπήδησης.

Στην εναλλασσόμενη τάση το φαινόμενο της υπερπήδησης είναι πιο πολύπλοκο. Εδώ, το μήκος των τόξων της ηλεκτρικής εκκένωσης αυξομειώνεται ανάλογα με την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το κύριο σώμα της αναπτύσσεται όταν το μέτρο της τάσης πλησιάσει τη μέγιστη τιμή του**.**

4.8 Τεχνικές αντιμετώπισης των επιπτώσεων της ρύπανσης

Όπως είδαμε το φαινόμενο της ρύπανσης όσον αφορά στη διατήρηση της μονωτικής ικανότητας μιας διάταξης μονωτήρα είναι εξαιρετικά σημαντική. Γι'αυτό το λόγο η ρύπανση, συμπεριφέρεται σαν ένας μεταβλητός - μη γραμμικός αντιστάτης, δηλαδή είναι το μέσο μέσα από το οποίο μεταφέρεται ηλεκτρικό φορτίο όταν εφαρμοστεί τάση στα άκρα του μονωτήρα. Με το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα διαρροής μπούμε να έχουμε την δημιουργία μερικών

εκκενώσεων, η αύξηση των οποίων μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την υπερπήδηση του μονωτήρα, δηλαδή να έχουμε πλήρη καταστροφή της μονωτικής ικανότητάς του μονωτήρα όταν καιρικές συνθήκες μας το επιτρέπουν.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ρύπανσης οι επικρατέστερες μέθοδοι είναι οι εξής :

Επιλογή κατάλληλου μήκους ερπυσμού

Έχει αποδειχθεί ότι η τιμή της τάσης υπερπήδησης είναι ανάλογη του μήκους ερπυσμού. Έτσι, για συγκεκριμένες τιμές ρύπανσης, μπορούμε να προσδιορίσουμε το ελάχιστο μήκος ερπυσμού που απαγορεύει τη δημιουργία τόξου.

Χρησιμοποίηση ημιαγώγιμων μονωτήρων

Με τη χρησιμοποίηση ημιαγώγιμων μονωτήρων περιορίζεται η δυνατότητα δημιουργίας μερικών εκκενώσεων κατά μήκος των ξηρών ζωνών, γιατί μειώνεται έτσι η ειδική αντίσταση που παρουσιάζουν οι τελευταίες ζώνες του μονωτήρα, και μειώνεται και η τάση που αναπτύσσεται σε αυτές.

Γρασάρισμα μονωτήρων

Η κάλυψη του μονωτήρα με σιλικονούχο ή πετρελαϊκό γράσο είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται προκειμένου να μπορέσουν απορροφηθούν από την επιφάνειά του τα συστατικά της ρύπανσης (όπως π.χ. το NaCl).

Πλύσιμο μονωτήρων

Το πλύσιμο των μονωτήρων γίνεται τακτικά με εκτόξευση νερού υπό πίεση, έτσι ώστε να απομακρυνθούν από την επιφάνεια του μονωτήρα μικροσωματίδια ή εστίες ρύπανσης.

4.9 Αρχές σχεδίασης του μονωτήρα

Η σωστή λειτουργία του μονωτήρα (δηλαδή η αποφυγή δημιουργίας τόξων)καθορίζεται από τη γεωμετρία του διηλεκτρικού και από τη θέση λειτουργίας του μονωτήρα (κατακόρυφος, κεκλιμένη ή οριζόντια) καθώς και τις ιδιότητες που έχει στην επιφάνεια του, όπως είναι η τραχύτητα ή η υδροφοβία δηλαδή η ικανότητα της επιφάνειας να μπορεί να απωθεί το νερό.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, λοιπόν, οι αρχές που πρέπει να ακολουθήσουμε για το σχεδιασμό μιας διάταξης μονωτήρα είναι οι ακόλουθες:

Μεγιστοποίηση της διαδρομής ερπυσμού.
Γνωρίσουμε ότι η αντοχή των μονωτήρων σε βροχή είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή τους σε συνθήκες ξηρασίας. Θα ήταν, πολύ μικρότερη αν οι μονωτήρες είχαν κυματοειδή διαμόρφωση της κάτω επιφάνειάς τους, έτσι εξασφαλίζεται ένα μέρος της συνολικής τους επιφάνειάς να μην βρέχεται, ενώ, παράλληλα, σταματάει τη συνέχεια του αγώγιμου υδάτινου στρώματος. Εκτός απ’ αυτό, όμως, η κυμάτωση που έχουμε στην κάτω επιφάνεια των μονωτήρων μας αυξάνει το μήκος ερπυσμού. Η μεγιστοποίηση της διαδρομής ερπυσμού πρέπει, να γίνεται σχεδιαστικά χωρίς να καταστρέφεται η αεροδυναμική της επιφάνειας. Το τελευταίο μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα προκειμένου να αποφύγουμε την τοποθέτηση με τον

άνεμο αιωρούμενων κόκκων και σταγονιδίων στην πάνω επιφάνεια του μονωτήρα, κάτι που αποτελεί και το σημαντικότερο μηχανισμό ρύπανσης.

Υποβοήθηση της αφύγρανσης των επιφανειών.
Αυτό μπορεί να γίνει αποφεύγοντας τις οριζόντιες και επίπεδες επιφάνειες.

Διατήρηση της ταχύτητας του ανέμου κοντά στο μονωτικό.
Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει διότι, κατά τη σχεδίαση στις περιοχές στροβιλισμού έχει σαν αποτέλεσμα την τοποθέτηση των ρύπων στα ελικοειδή τμήματα της επιφάνειας των μονωτήρων με τους μικροκυκλώνες να δημιουργούνται τοπικά.

Αύξηση της επιφανειακής αντίστασης.
Με κατάλληλη σχεδίαση και επεξεργασία του μονωτικού υλικού μπορούμε να εξασφαλίσουμε την ομοιόμορφη διάσπαση των στρωμάτων υγρασίας σε μεμονωμένα σταγονίδια. Με τον τρόπο αυτό οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του μονωτήρα μπορούν να μειωθούν.

Παρά τις γενικές σχεδιαστικές αρχές που παραθέσαμε, τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί ότι «ιδανικό» σχήμα μονωτήρα δεν υπάρχει, αφού η απόδοση εξαρτάται από την περιεκτικότητα της επιφάνειάς του σε υγρασία. Οι συνέπειες αυτής της αρχής, ότι το ιδανικό σχήμα εξαρτάται από το ποσοστό υγρασίας είναι ευρείες και επεκτείνονται μέχρι την εγκυρότητα των τεχνητών δοκιμών και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αντιμετώπισης της επιφανειακής διάσπασης.

5^{Ο} ΚΕΦΑΛΑΙΟ

"ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ"

5.1 Αριθμητικές μέθοδοι

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου με εξισώσεις Laplace, Poisson, Διαχύσεως, Maxwell και Helmholtz, καθώς και συνθήκες Coulomb και Lorentz μπούμε να αναλύσουμε τα προβλήματα χωρίς τους περιορισμούς που έχουμε στις αναλυτικές τεχνικές. Το πλεονέκτημα ότι οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να επιλύουν προβλήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες και μη γραμμικά μέσα έχει σαν αποτέλεσμα ότι δεν πετυχαίνουν την εύρεση της ακριβούς λύσης του προβλήματος, αλλά μιας προσεγγιστικής λύσης, η οποία με την κατάλληλη χρήση των μεθόδων μπούμε να έχουμε την επιθυμητή ακρίβεια. Η διαφορά αυτή προκύπτει, διότι δεν επιλύεται το πρόβλημα όπως εκφράζεται από τις διαφορικές εξισώσεις του πεδίου, αλλά επιλύεται κάποιο αντίστοιχο πρόβλημα. Έτσι, δεν υπολογίζουμε την άγνωστη ποσότητα σε όλα τα σημεία του πεδίου, αλλά σε ένα αριθμό επιλεγμένων σημείων (κόμβων). Με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων οι διαφορικές εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με αγνώστους τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους που έχουμε επιλέξει. Με την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων βρίσκουμε την προσεγγιστική λύση. Η τιμή του δυναμικού για τα υπόλοιπα σημεία του χώρου ανάγεται με τη βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής. Επομένως, η επιλογή της αριθμητικής επίλυσης ενός προβλήματος αποτελεί το συμβιβασμό δύο παραγόντων:

1) Την εκλογή αρκετών κόμβων ώστε τα αποτελέσματα να έχουν την ακρίβεια που θέλουμε και
2) Την εκλογή λίγων κόμβων, ώστε το σύστημα εξισώσεων που θα προκύψει να επιλυθεί σε λίγο χρόνο από ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη γεωμετρία των μονωτήρων, τις αριθμητικές μεθόδους τις προτιμάμε για την επίλυση των προβλημάτων κατανομής δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη αριθμητικών μεθόδων, χρησιμοποιώντας είτε διαφορικές είτε ολοκληρωτικές εξισώσεις. Η πρώτη μέθοδος με τις διαφορικές εξισώσεις είναι γνωστή σαν προσέγγιση «πεδίου» ή σαν βασική μέθοδος και η δεύτερη είναι γνωστή σαν μέθοδος οριακών στοιχείων. Οι βασικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, που εφαρμόζονται κυρίως σε περιοχές με συγκεκριμένες συνθήκες, όπως σε προβλήματα μετασχηματιστών. Η δεύτερη μέθοδος είναι η μέθοδος των οριακών στοιχείων και περιλαμβάνει τη μέθοδο προσομοίωσης φορτίου και τη

μέθοδο των οριακών στοιχείων, όπου εφαρμόζονται σε προβλήματα ανοιχτών ορίων, όπως είναι οι γραμμές μεταφοράς .

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα πακέτα λογισμικού για την προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων στηριζόμενα σε αριθμητικές μεθόδους.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ως η βασική αριθμητική μέθοδος υπολογισμού για την ανάλυση ποσοτήτων και για το καλύτερο σχεδιασμό των προβλημάτων που αφορούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η μέθοδος αυτή είναι η βάση διαφόρων εξελιγμένων και πρακτικών υπολογιστικών πακέτων λογισμικού.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στηρίζεται στην αρχή της μεταβολής. Δηλαδή μεταφέρει το μαθηματικό μοντέλο της διαφορικής εξίσωσης, και το πρόβλημα οριακών τιμών, σε ένα πρόβλημα μεταβολής το οποίο μετατρέπεται σε οριακό πρόβλημα συναρτήσεων μέσω των μεθόδων της ανάλυσης, της παρεμβολής και της μετάδοσης. Τέλος, το πρόβλημα αλλάζει σε μερικές αλγεβρικές εξισώσεις και έτσι, η αριθμητική λύση μπορεί εύκολα να αποκτηθεί. Το κλειδί της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η ανάλυση και η παρεμβολή.

5.2 Προσομοιώσεις μονωτήρων με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, το οποίο είναι για την αριθμητική επίλυση μεγάλου αριθμού μηχανικών προβλημάτων. Βλέπουμε αυτά τα προβλήματα να περιλαμβάνουν δυναμική ανάλυση δομής και μεταφορά θερμότητας και προβλήματα ρευστών, καθώς και ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. Μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται πάρα πολλά είδη πολυμερών μονωτήρων ανάρτησης για γραμμές 35-500kV. Γι'αυτό, δίνουμε πλέον μεγάλη έμφαση στο καλύτερο σχέδιο των μονωτήρων με στόχο να μειώσουμε τις αστοχίες τους.

Η απόδοση ενός πολυμερούς μονωτήρα σε συνθήκες ρύπανσης και υγρασίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του υλικού και από την εξωτερική μόνωση. Ακόμα, η υδροφοβικότητα της επιφάνειας του μονωτήρα δηλαδή η υγρασία στην επιφάνεια τού μπορεί να μειωθεί λόγω της ηλεκτρικής καταπόνησης και της επίδρασης του περιβάλλοντος. Σε αυτή την περίπτωση, η εξωτερική μόνωση επηρεάζει όχι μόνο την απόδοση του μονωτήρα υπό συνθήκες ρύπανσης και υγρασίας, αλλά και τη γήρανση του εξωτερικού μονωτικού υλικού.

Μέσω του λογισμικού ANSYS έχει γίνει ανάλυση της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού των μονωτήρων σε συγκεκριμένο μήκος για διαφορετική διάμετρο των δίσκων και για διαφορετικές γωνίες ανάρτησης.

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση και ανάλυση έχουν ως εξής:

Α) Η κατανομή του δυναμικού σε έναν πολυμερή μονωτήρα επηρεάζεται από τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά.

Β) Η αλλαγή της απόστασης των δίσκων μεταξύ τους μπορεί να επηρεάσει την τάση υπερπήδησης του μονωτήρα.

Γ) Η αύξηση της διαμέτρου των δίσκων και της γωνίας ανάρτησης προκαλεί χειρότερη κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στους δίσκους που βρίσκονται κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

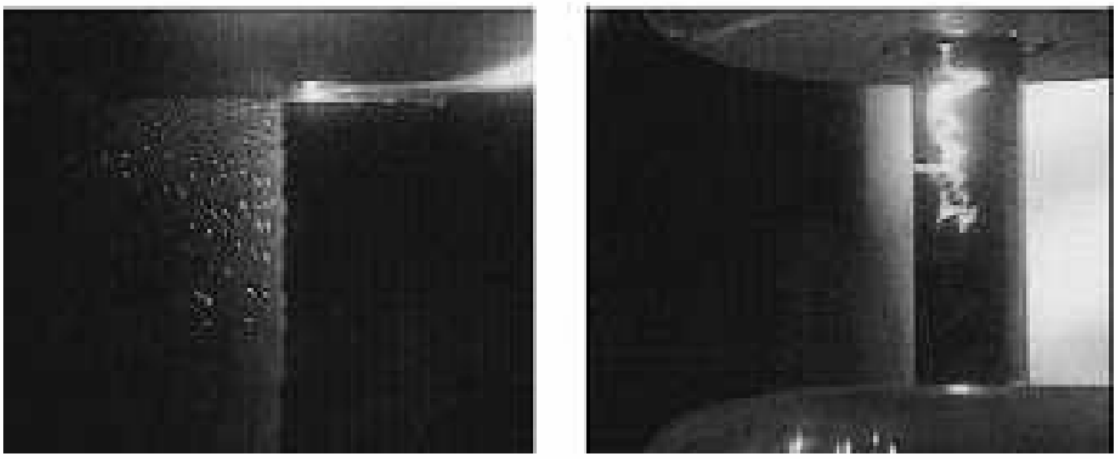
Δ) Οι πολυμερείς μονωτήρες έχουν καλύτερη επιφανειακή κατανομή του δυναμικού όταν οι δίσκοι έχουν περίμετρο περίπου 120 mm και απόσταση μεταξύ των δίσκων κοντά στα 50 mm.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των σταγονιδίων σε επιφάνειες πολυμερών μονωτήρων υπό την επίδραση πεδίου υψηλής τάσης είναι ένα απαιτητικό έργο. Το πρώτο βήμα είναι υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της διηλεκτρικής μετατόπισης. Με αποτέλεσμα την μέτρηση των σταγονιδίων, έχει σαν αποτέλεσμα την η αύξηση στην πίεση της καμπυλότητας να προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη διηλεκτρική μετατόπισης, καθώς αυξάνεται η τάση.

Η γήρανση των υλικών έχει μεγάλη σημασία σε εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων. Περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως η υγρασία ή η επιφανειακή ρύπανση σε έναν μονωτήρα υψηλής τάσης, έχουν ως αποτέλεσμα να χάνει τις μονωτικές του ιδιότητες, που μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές εκκενώσεις, οι οποίες μετά από μεγάλα διαστήματα μπορούν να επιταχύνουν τη γήρανση του μονωτήρα υψηλής τάσης.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, πρώτα διεξάγονται προσομοιώσεις που συνεχίζονται παράλληλα με πειράματα έχοντας ως στόχο να πραγματοποιηθούν οι αναλυτικές προσομοιώσεις των ηλεκτρικών διαδικασιών που είναι υπεύθυνες για τη γήρανση των υλικών.

Σε ένα στεγνό και καθαρό διηλεκτρικό υλικό, όπως η εποξεική ρυτίνη που χρησιμοποιείται σε μονωτήρες υψηλής τάσεως, μπορεί να εφαρμοστεί το ηλεκτροστατικό μοντέλο. Δηλαδή κατά την παρουσία αγώγιμης ρύπανσης,το ηλεκτρικό πεδίο με την επίλυση της εξίσωσης ροής ρεύματος λαμβάνει χώρα κάτω από μια κρίσιμη τάση U_k, το ηλεκτροστατικό πεδίο του αφόρτιστου χώρου επικρατεί. Το διηλεκτρικό μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τέλειος μονωτήρας χωρίς χωρικά φορτία. Αλλά αν η τάση υπερβεί τη U_k, το μονωτικό υλικό χάνει τις μονωτικές του ιδιότητες και γίνεται ο φορέας της εκφόρτισης,με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας αγώγιμος δρόμος κατά μήκος του μονωτήρα. Η ένωση ξεχωριστών σταγονιδίων σε υγρούς μονωτήρες, επιτρέπει σε αυτόν να φθάσει στην τάση εκφόρτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1 Υγρός μονωτήρας (α) πριν την εκφόρτιση και (β) κατά την εκφόρτιση

Οι ηλεκτρο - ημιστατικές εξισώσεις δίνουν μια προσέγγιση για πεδία χαμηλών συχνοτήτων, στα οποία δεν υπάρχουν δινορρεύματα, ενώ η επίδραση του ρεύματος μετατόπισης παίζει σημαντικό ρόλο.

Από τα παραπάνω, η τελική μορφή της εξίσωσης του Maxwell είναι μια εξίσωση διαφοράς:

$$\text{div}((i\omega\varepsilon+k)\text{grad}\varphi) = \text{div}(\vec{J}_L + \vec{J}_E), \quad \text{όπου } \vec{J} = \vec{J}_L + \vec{J}_E$$

Κατόπιν, τις βασικές εξισώσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών μπορούμε να τις μοντελοποιήσουμε. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα μιγαδικό γραμμικό σύστημα από εξισώσεις. Ο πίνακας του συστήματος είναι συμμετρικός μιγαδικός. Για την επίλυση του μιγαδικού συστήματος χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι επανάληψης.

Τα αποτελέσματα μπορούμε να τα πάρουμε από την προσομοίωση τρισδιάστατων πολυμερών μονωτήρων που πάνω τους έχουν σταγονίδια νερού. Με την προσομοίωση αυτή προκύπτει η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα, καθώς και η πυκνότητα της δύναμης γύρω από ένα σταγονίδιο νερού.

Λαμβάνοντας υπ'όψιν στην προσομοίωση η παραμόρφωση του σταγονιδίου όταν εκτίθεται στην υψηλή τάση, θα πρέπει να παρατηρηθούν οι κινήσεις των σταγονιδίων. Από τα πειράματα μπούμε να παρατηρήσουμε ότι μειώνεται το ύψος και αυξάνεται η διαμέτρος του σταγονιδίου, καθώς αυξάνεται η τάση.

Στην υπερπήδηση μη-κεραμεικών μονωτήρων υπό συνθήκες βροχής μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μια εκκένωση γεφυρώνει τους δίσκους και ότι δε χρησιμοποιείται αποτελεσματικά το μήκος ερπυσμού κατά μήκος της επιφάνειας των μονωτήρων.

Στην υπερπήδηση μη-κεραμεικών μονωτήρων με τεχνητή ρύπανση σε δοκιμές ομίχλης μπούμε να παρατηρήσουμε ότι οι εκκενώσεις σε έναν πλήρως ρυπασμένο μονωτήρα ακολουθούν το μήκος ερπυσμού κατά μήκος της επιφάνειας του μονωτήρα.

Στην επιφάνεια του μη-κεραμεικού μονωτήρα όταν έχουμε σταγονίδια και ρυπασμένα στρώματα αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Τα σταγονίδια νερού παίζουν σημαντικό ρόλο στην υπερπήδηση λόγω ρύπανσης και στη γήρανση μη-κεραμεικών μονωτήρων:

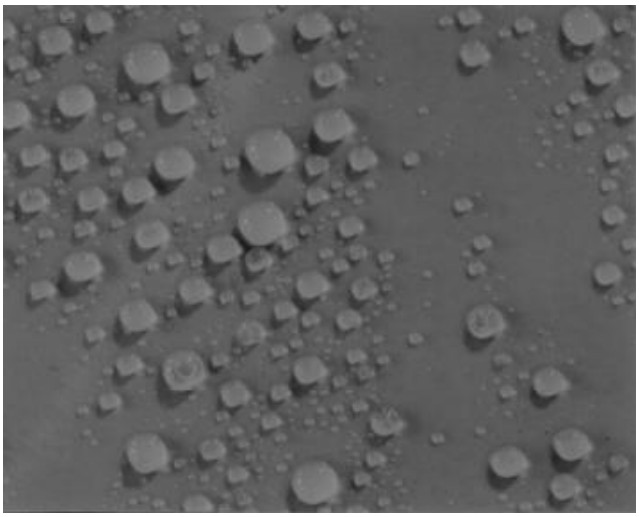
Γνωρίζουμε ότι τα σταγονίδια αυξάνουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μονωτήρα, λόγω της υψηλής αγωγιμότητάς που έχουν.

Οι επιφανειακές εκκενώσεις Corona, λόγω των σταγονιδίων, προκαλούν γήρανση του μονωτικού υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένος ο μονωτήρας.

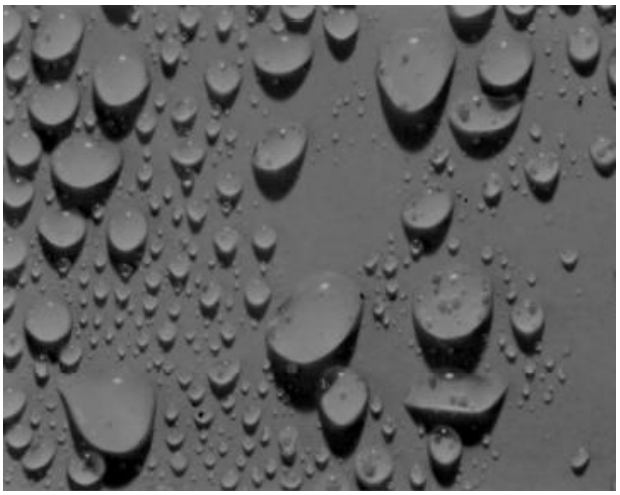
Η εκκένωση Corona καταστρέφει τοπικά την υδροφοβικότητα του υλικού, προκαλώντας τα γειτονικά σταγονίδια νερού να ενώνονται.

Τα κριτήρια για την ταξινόμηση των υγρών επιφανειών είναι οπτικά και λαμβάνουν υπόψη τους δύο παραμέτρους:
α) το σχήμα των σταγόνων και
β) το επί της εκατό τμήμα της επιφάνειας που έχει υγρανθεί.

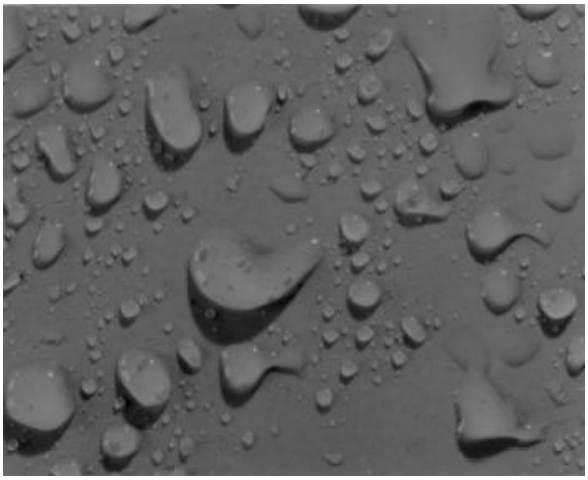
Η επιφάνεια που ανήκει στην πρώτη κατηγορία είναι η πιο υδρόφοβη επιφάνεια, ενώ η επιφάνεια που ανήκει στην έβδομη κατηγορία είναι η πιο υδρόφιλη επιφάνεια. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τυπικές φωτογραφίες επιφανειών με διαφορετικές κατηγορίες υγρασίας, σύμφωνα με το πρότυπο IEC TS 62073.



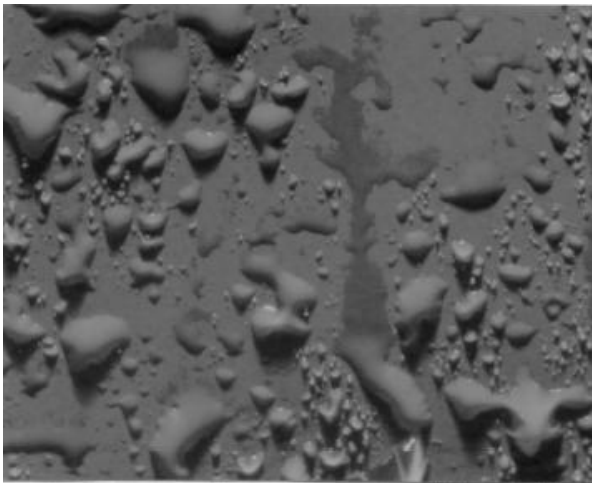
Κατηγορία 1



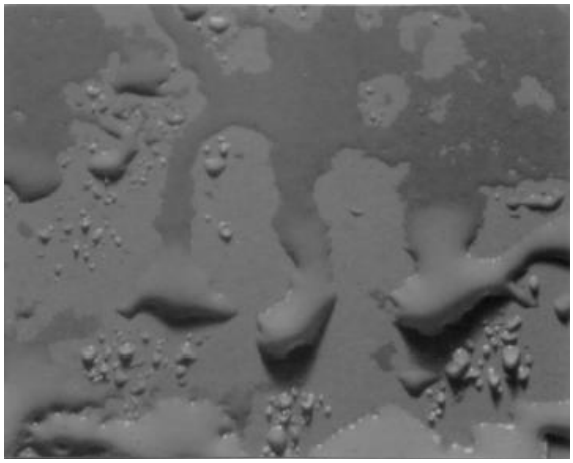
Κατηγορία 2



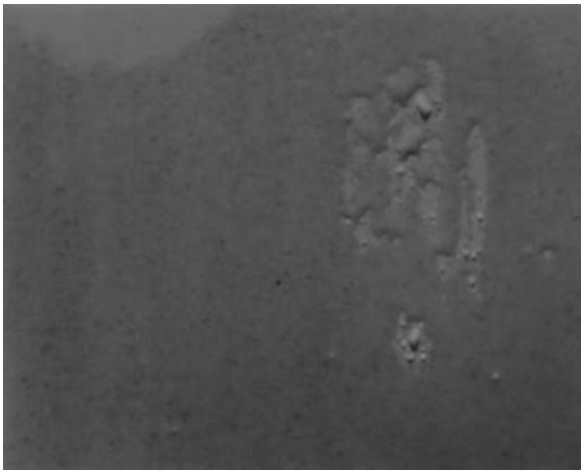
Κατηγορία 3



Κατηγορία 4



Κατηγορία 5



Κατηγορία 6

Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση των κατηγοριών ύγρανσης.

Η μέθοδος των οριακών στοιχείων επιτρέπει την ανάλυση ενός προβλήματος χρησιμοποιώντας κόμβους που βρίσκονται μόνο στα σύνορα μεταξύ δύο υλικών. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε μετασχηματίζοντας κατάλληλα την ολοκληρωτική εξίσωση. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εισάγει μια σχεδόν διάσταση λιγότερο σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, δηλαδή τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή μας οδηγεί σε συστήματα εξισώσεων με πίνακες σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους που δημιουργούν συστήματα με πίνακες «περιοχών» και συναντάμε δυσκολίες στην αναπαράσταση μη γραμμικών υλικών.

Αν μελετήσουμε την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από ένα σταγονίδιο νερού, και χρησιμοποιήσουμε μια επίπεδη επιφάνεια από σιλικονούχο καουτσούκ με ένα σταγονίδιο νερού ημισφαιρικού σχήματος μπορούμε να μελετήσουμε την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή γύρω από το σταγονίδιο.

Αν θεωρήσουμε ένα κατακόρυφο μονωτήρα, βλέπουμε ότι υπάρχουν σταγονίδια νερού τόσο στο περίβλημα όσο και στους δίσκους. Η επιφάνεια του δίσκου είναι σχεδόν παράλληλη στις ισοδυναμικές γραμμές, ενώ η επιφάνεια του περιβλήματος κάθετη σε αυτές.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι το σταγονιδίο προκαλεί μια διαταραχή στη διαμόρφωση των ισοδυναμικών γραμμών και των γραμμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή γύρω από το σταγονίδιο.

Από την προσομοίωση της περιοχής του περιβλήματος παρατηρούμε ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται στην επιφάνεια μεταξύ του σταγονιδίου, του αέρα και του μονωτικού υλικού. Στο σημείο της επιφάνειας του σταγονιδίου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παίρνει τη μέγιστη τιμή της.

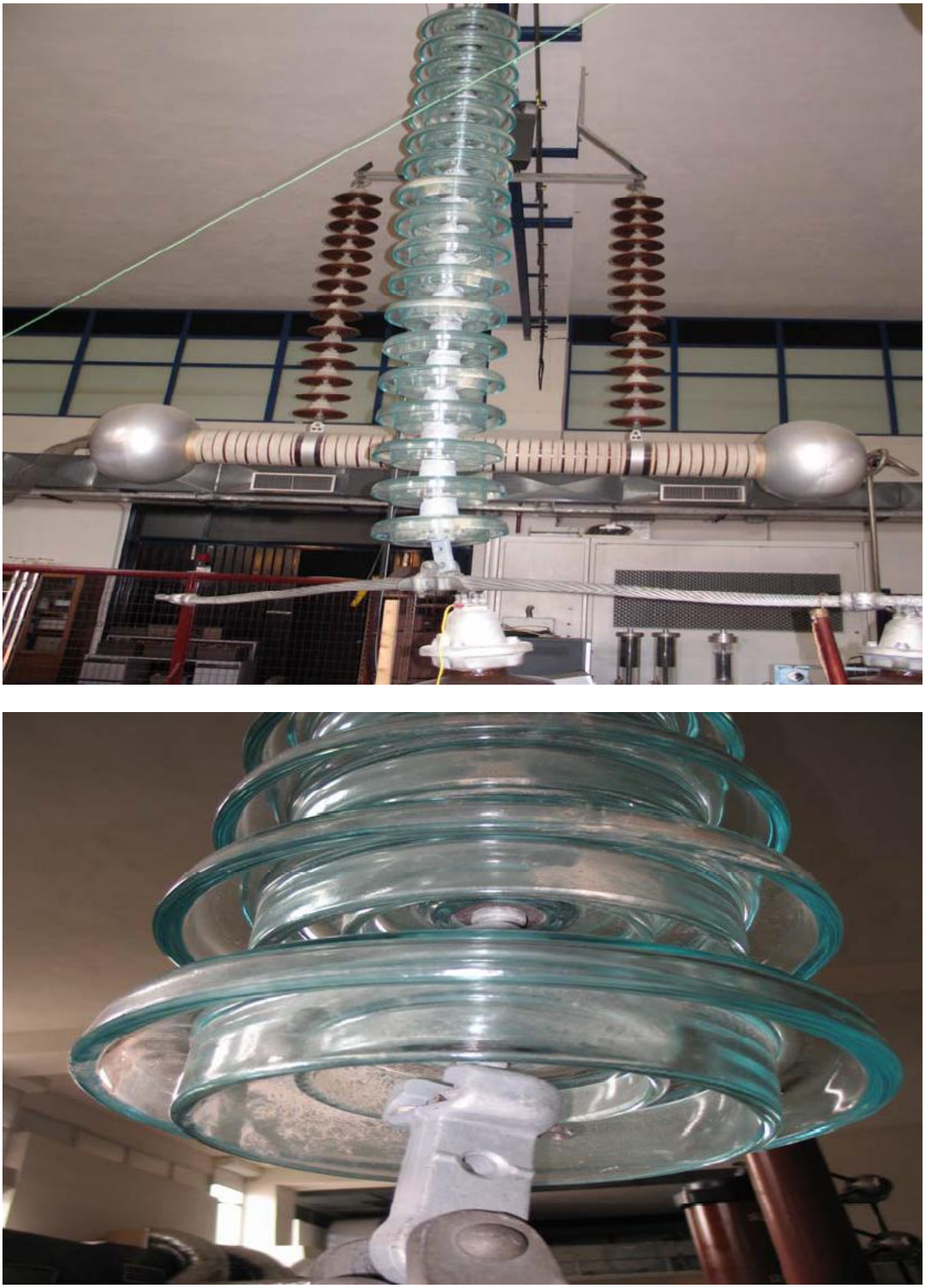
Από την προσομοίωση της περιοχής του δίσκου παρατηρούμε ότι τα κατά μήκος της επιφάνειας του σταγονιδίου το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αλλάζει κατά μέτρο και διεύθυνση. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παίρνει τη μέγιστη τιμή της στην κορυφή όμως του σταγονιδίου.

Για την ανάλυση της κατανομής του δυναμικού κάτω από συνθήκες βροχής και ομίχλης χρησιμοποιείται ένας μικρός μονωτήρας τεσσάρων μόνο δίσκων. Για να προσομοιώσουμε συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, χρησιμοποιούμε τα εξής μοντέλα:

Στεγνό και καθαρό μοντέλο: ο μονωτήρας έχει την ιδανική μορφή του μη-κεραμεικού μονωτήρα

Το μοντέλο «βροχής»: Θεωρούμε ότι υπάρχουν 252 σταγονίδια σε κάθε δίσκο του μονωτήρα. Η διάμετρος των ημισφαιρικών σταγονιδίων είναι 2 mm. Τα σταγονίδια έχουν διηλεκτρική σταθερά ίση με 80 και αγωγιμότητα ίση με 50 μS/cm. Η επιφάνεια του περιβλήματος (sheath) και η εσωτερική επιφάνεια (undersides) των δίσκων είναι στεγνές.

Το μοντέλο «ομίχλης»: Η διαφορά του μοντέλου αυτού από το μοντέλο «βροχής» είναι ότι σε αυτό το μοντέλο οι εσωτερικές επιφάνειες των δίσκων είναι καλυμμένες από ένα συνεχές στρώμα νερού. Εδώ, τα σταγονίδια έχουν διηλεκτρική σταθερά ίση με 80 και αγωγιμότητα ίση με 250 μS/cm.



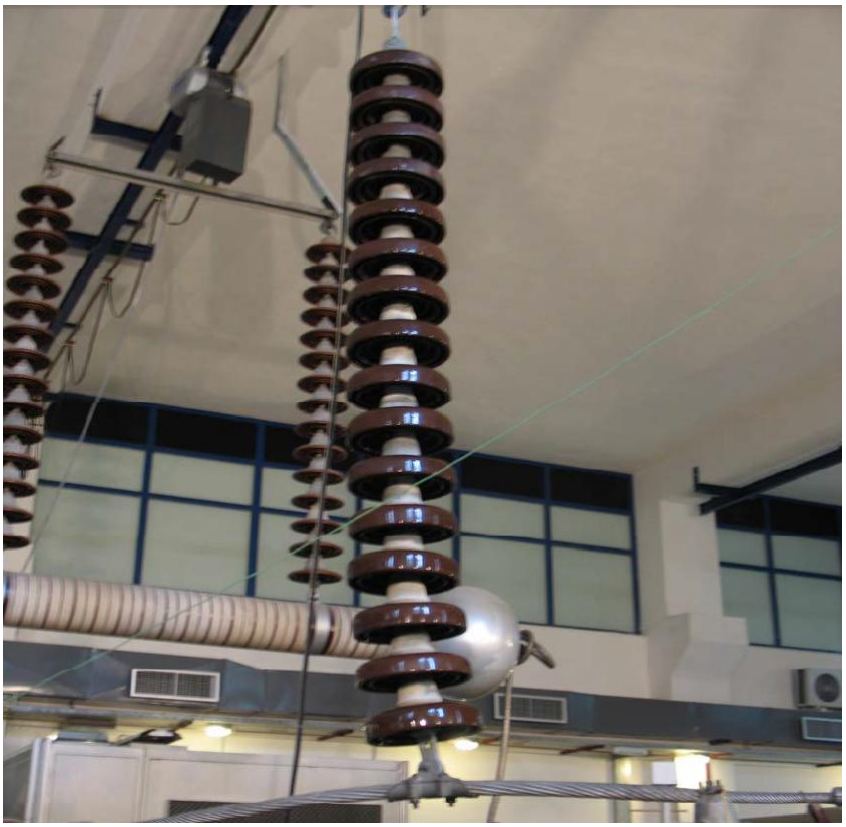
Σχήμα 5.3 Γυάλινος αλυσοειδής μονωτήρας. τύπου ομίχλης. αποτελούμενος από δεκαοκτώ (18) δισκοειδείς μονωτήρες

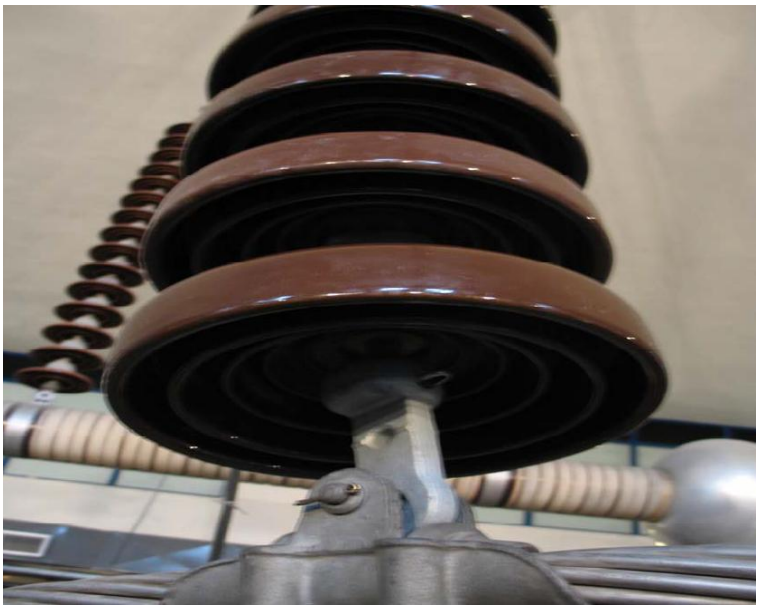
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις είναι ότι:

Α) Στην περίπτωση του μοντέλου «βροχής» παρατηρούμε ότι έχουμε ομοιόμορφη κατανομή του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου σε σχέση με την κατανομή στο στεγνό και καθαρό μοντέλο. Φυσικά, η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή γύρω από κάθε σταγονίδιο

αυξάνεται. Επομένως, η δύναμη του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου γύρω από την περιοχή σύνδεσης θα είναι λίγο μικρότερη από ό,τι στο στεγνό και καθαρό μοντέλο.

Β) Στην περίπτωση του μοντέλου «ομίχλης», παρατηρούμε ότι στις στεγνές περιοχές κατά μήκος του μονωτήρα έχουν το μεγαλύτερο μέρος της τάσης. Η συνολική δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της κάτω περιοχής του μονωτήρα, η οποία βρίσκεται κοντά στο ηλεκτροδίου υψηλής τάσης, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ό,τι στο στεγνό και καθαρό μοντέλο.





Σχήμα 5.4 Καθαρός πορσελάνινος αλυσοειδής μονωτήρας, τύπου ομίχλης, αποτελούμενος από δεκαέξι (16) δισκοειδείς μονωτήρες,

Επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα σταγονίδια νερού που βρίσκονται στην επιφάνεια του μονωτήρα μεταβάλλουν το ηλεκτρικό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να πούμε ότι προκαλούν τη δημιουργία επιφανειακών εκκενώσεων με αποτέλεσμα να καταστρέφουν την υδροφοβικότητα των μονωτήρων από σιλικόνη και εποξεική ρητίνη.

Για να βρεθεί η σχέση μεταξύ των μερικών εκκενώσεων και των σταγονιδίων νερού και η επίδραση τους στις υδροφοβικές ιδιότητες της επιφάνειας των πολυμερών μονωτήρων, έγιναν δύο είδη εργαστηριακών πειραμάτων. Το πρώτο εργαστηριακό πείραμα αφορούσε το ηλεκτρικό πεδίο στο δίσκο, που είναι κάθετο στην επιφάνειά του και το δεύτερο εργαστηριακό πείραμα αφορούσε το ηλεκτρικό πεδίο στο περίβλημα, το οποίο είναι εφαπτόμενο σε αυτό.

Στο πρώτο πείραμα, δεν μπορούσαν να βρεθούν οι μερικές εκκενώσεις στο δοκίμιο που προσομοίωνε τον δίσκο, παρά μόνο πριν γίνει η κατάρρευση. Ενώ στο δεύτερο πείραμα, τα σταγονίδια κατευθύνονται κατά μήκος της επιφάνειας, όταν αυτή βρίσκεται υπό τάση. Αυτή η παραμόρφωση των σταγονιδίων παραμένει και όταν πια το δοκίμιο δε βρίσκεται υπό τάση. Εάν αυξήσουμε την τάση, οι μερικές εκκενώσεις μπορεί να είναι ανιχνεύσιμες.

Έχει παρατηρηθεί ότι όταν η τάση φθάσει σε κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο, τα σταγονίδια αρχίζουν να δημιουργούνται στην επιφάνειά τους κάποια μεταβαλλόμενα σχήματα.Αν αυξήσουμε την τάση παρατηρούμε ότι τα σταγονίδια διαιρούνται σε μικρότερα. Η ψηφιακή κάμερα που χρησιμοποιήθηκε κατάφερε μόνο κατά τύχη να φωτογραφίσει τις ταλαντωτικές κινήσεις των σταγονιδίων και το «σκάσιμό» τους, καθώς και τη δημιουργία καναλιού κατάρρευσης στο δοκίμιο.

Από τα πειράματα διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των μερικών εκκενώσεων στην επιφάνεια του πολυμερούς μονωτήρα και της υδροφοβικότητας της επιφάνειας. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι από προσομοίωση σε υπολογιστή η ένταση του πεδίου στην περίπτωση του δίσκου παίρνει πολύ μεγάλη τιμή στην κορυφή του σταγονιδίου. Ενώ, στη δεύτερη περίπτωση με το περίβλημα, η μεγαλύτερη τιμή του πεδίου βρίσκεται όταν το σταγονίδιο έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του περιβλήματος.

Οι Weiguo Que et al. χρησιμοποίησαν το τρισδιάστατο πρόγραμμα COULOMB. Θεώρησαν μια γεωμετρία που περιλαμβάνει πυλώνα με τριφασική γραμμή μεταφοράς 765 kV, ώστε να υπολογιστεί η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων. Ερεύνησαν τα αποτελέσματα της παρουσίας των αγώγιμων γραμμών μεταφοράς και της διέγερσης των τριών φάσεων αντί για μίας πάνω στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού.

Πολύ σημαντικός μπορούμε να πούμε είναι ο έλεγχος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μη-κεραμεικούς μονωτήρες. Υψηλή ένταση σε ένα ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο Corona γύρω από τους μονωτήρες και μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή των υλικών της επιφάνειας του μονωτήρα. Όταν οι μη-κεραμεικοί μονωτήρες τοποθετούνται σε τριφασική γραμμή μεταφοράς, οι γραμμές μεταφοράς, η διαμόρφωση του πυλώνα και οι άλλες δύο φάσεις του τριφασικού συστήματος μπορούν να επηρεάσουν το ηλεκτρικό πεδίο και το δυναμικό στην περιοχή των μονωτήρων. Για να μπορέσουμε να αναλύσουμε το ηλεκτρικό πεδίο και το δυναμικό ενός μονωτήρα σε λειτουργία, καλο είναι να μελετηθεί πρακτικά. Για να ελεγχθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το σχήμα των μεταλλικών άκρων των πολυμερών μονωτήρων πρέπει να σχεδιαστεί πολύ προσεκτικά.

Αναλύονται οι επιδράσεις του πυρήνα από ίνες γυαλιού, του πολυμερούς περιβλήματος και των ελαστομερών δίσκων, καθώς και της αγώγιμης γραμμής μεταφοράς πάνω στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού γύρω από ένα μονωτήρα. Η επίδραση των άλλων

δύο φάσεων του τριφασικού συστήματος υπολογίζονται σε μονωτήρες τοποθετημένους τόσο σε I-διάταξη όσο και σε V-διάταξη ενός πυλώνα 765 kV.

Για να μπορέσουμε να το υπολογίσουμε χρησιμοποιούμε ένα τυπικός μη-κεραμεικός μονωτήρας 34.5 kV. Με στόχο να μειώσουμε το χρόνο υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού. Για να μπορέσουμε να αποφασίσουμε ποιό χαρακτηριστικό της γεωμετρίας μπορούμε να παραλείψουμε έχοντας τη λιγότερη επίδραση κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού κατά μήκος των μονωτήρων, χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς ο μονωτήρας 34.5 kV.

Έτσι, για τη διαδικασία της αντιπαραβολής, χρησιμοποιούνται τέσσερα μοντέλα:

Α) μόνο δύο ηλεκτρόδια,

Β) τα δύο ηλεκτρόδια και ο πυρήνας,

Γ) τα δύο ηλεκτρόδια, ο πυρήνας και το περίβλημα, χωρίς τους δίσκους και

Δ) ο «πλήρης» μονωτήρας των 34.5 kV. Στο άκρο της γραμμής εφαρμόζεται τάση 100 V, ενώ στο άλλο (γειωμένο) άκρο μηδενική τάση.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι δίσκοι του μονωτήρα μπορούν να μην ληφθούν υπόψιν κατά την προσομοίωση, χωρίς να χάνεται η ακρίβεια της κατανομής του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο «πλήρης» μονωτήρας των 34.5 kV. Στο άκρο της γραμμής εφαρμόζεται τάση 100 V, ενώ στο άλλο (γειωμένο) άκρο μηδενική τάση η μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατά 4% μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της περίπτωσης **(Γ)** . Θα μπορούσαμε να προσομοιώσουμε ένα πέμπτο μοντέλο με λίγους δίσκους, το οποίο θα έχουμε πιο καλά αποτελέσματα. Ο αριθμός των δίσκων καθορίζεται από την επιθυμητή ακρίβεια και τις δοκιμές.

Η επίδραση της γραμμής μεταφοράς στις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού μελετήθηκε προσθέτοντας στο μοντέλο του μονωτήρα έναν αγωγό μήκους 3m, ο οποίος προσομοιώνει τη γραμμή μεταφοράς. Ο μονωτήρας αναρτάται από το κέντρο μίας γειωμένης επιφάνειας 1.6m*0.4m. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι η μονάδα του αγωγού μειώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο άκρο του μονωτήρα από το οποίο αναρτάται η γραμμή, αλλά αυξάνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο γειωμένο άκρο του μονωτήρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3.

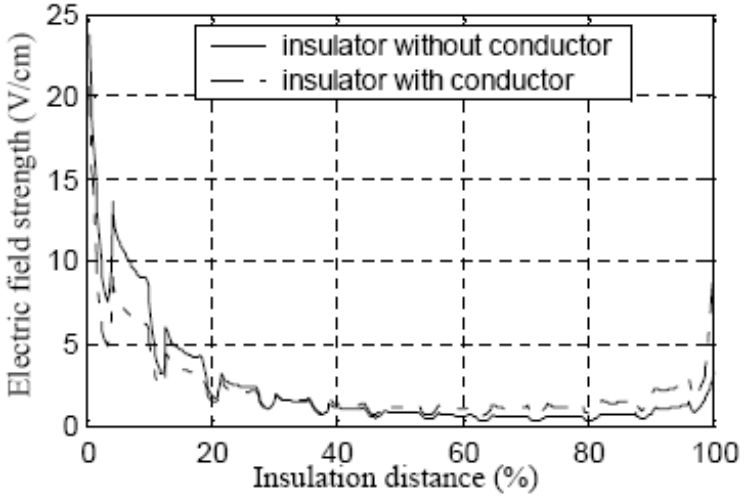


Figure 4. Electric field strength magnitude along the insulation distance at the surface of the sheath.

Σχήμα 5.5 Επίδραση της ύπαρξης ή μη του αγωγού στην ένταση του πεδίου.

Η επίδραση των άλλων δύο φάσεων του τριφασικού συστήματος ερευνήθηκαν για I- και V-διάταξη των μονωτήρων. Ο αγωγός της κεντρικής φάσης βρίσκεται μέσα στην κεντρική γραμμή του πυλώνα. Αυτή είναι η χειρότερη περίπτωση κατά τη μελέτη των κατανομών του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βλέπουμε ότι η μεγαλύτερη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο της τριπλής σύνδεσης στο μεταλλικό άκρο κοντά στον αγωγό υψηλής τάσης, του δίσκου και του αέρα είναι περίπου 16% μεγαλύτερη για I και 6% μεγαλύτερη για V στην τριφασική διέγερση, συγκρινόμενη με την περίπτωση μονοφασικής διέγερσης.

Γνωρίζουμε ότι σε έναν πολυμερή μονωτήρα το 10% των δίσκων που βρίσκονται πιο κοντά στο άκρο που είναι συνδεδεμένη η γραμμή, συγκρατούν ένα 30-35% της εφαρμοζόμενης τάσης. Αντίθετα, το 10% περίπου των δίσκων που βρίσκονται κοντά στο γειωμένο άκρο συγκρατούν το 10-15% της εφαρμοζόμενης τάσης.

Οι διαστάσεις των μονωτήρων πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε αποφύγουμε την υπερπήδηση, ακόμα και όταν εφαρμοστεί στην γραμμή μας η μεγαλύτερη υπέρταση. Λόγω της θέσης της γραμμής και σχήματος του μονωτήρα, η κατανομή της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα δεν είναι ομοιόμορφη. Αυτό έχει αναλυθεί θεωρητικά χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες μας είναι χρήσιμες όταν ο μονωτήρας είναι καλυμμένος από ένα αγώγιμο στρώμα ρύπανσης. Οι W.L. Vosloo et al. χρησιμοποιείται ένα δισδιάστατο πακέτο προσομοίωσης, το ELECTRO, που εφαρμόζει τη μέθοδο οριακών στοιχείων και μπορεί να λύσει συμμετρικά προβλήματα εκ περιστροφής.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, τοποθετήσαμε στο μονωτήρα το στρώμα ρύπανσης, όπου αυτό χρειαζόταν. Λόγω του ότι πρέπει να έχουμε συμμετρία εκ περιστροφής, δεν ήταν δυνατόν να κατασκευαστεί η αγώγιμη γραμμή. Αντίθετα κατασκευαστικέ ένα σφαιρικό ηλεκτρόδιο. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις:

Α) ένας καθαρός μονωτήρας από σιλικονούχο καουτσούκ,

Β) ο ίδιος μονωτήρας καλυμμένος με ομοιόμορφο στρώμα μέτριας ρύπανσης,

Γ) ο μονωτήρας ολοκληρωτικά καλυμμένος από στρώμα ρύπανσης, εξαιρουμένης μιας καθαρής ζώνης 1 cm στο κέντρο του μονωτήρα στην επιφάνεια του περιβλήματος .

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με δύο τρόπους: με ισοδυναμικές γραμμές και με γραμμές ίσης έντασης του πεδίου και παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

Στην περίπτωση **(Α)** παρατηρούμε ότι οι ηλεκτρικές καταπονήσεις, δηλαδή οι τιμές της τάσης και της έντασης, είναι πολύ μεγάλες στην περιοχή γύρω από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης του καθαρού μονωτήρα.

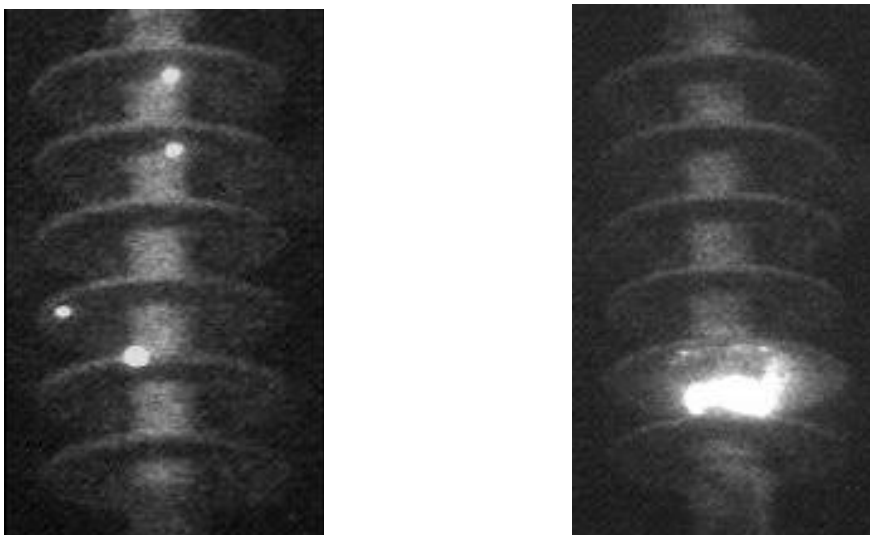
Στην περίπτωση **(Β)** παρατηρείται η τάση να κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του ρυπασμένου μονωτήρα από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης προς το γειωμένο ηλεκτρόδιο. Από την άλλη, οι γραμμές ίσης έντασης μας παρουσιάζουν ότι οι περιφέρειες των δίσκων ,που βρίσκονται κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης, καταπονούνται περισσότερο από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Στην περίπτωση **(Γ)** παρατηρούμε ότι η τάση μεταφέρεται από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης προς την ξηρή περιοχή και το δυναμικό της γης μεταφέρεται από το γειωμένο ηλεκτρόδιο προς την ξηρή ζώνη. Γι'αυτό και έχουμε πολύ μεγάλη τάση στην ξηρή περιοχή. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από μετρήσεις πεδίου που έγιναν σε μονωτήρες δοκιμής, με τη βοήθεια ηλεκτροστατικού βολτομέτρου. Από τις γραμμές ίσης έντασης φαίνεται ότι οι ηλεκτρικές καταπονήσεις είναι τόσο μεγάλες στην ξηρή περιοχή στην οποία η ένταση του πεδίου που μετρήθηκε μπορεί να προκαλέσει διάσπαση του αέρα γύρω από το μονωτήρα, καθώς και εκκενώσεις στην επιφάνεια του μονωτήρα.

Από τις προσομοιώσεις που κάναμε μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όταν ρυπαίνεται η επιφάνεια ενός μονωτήρα, οι ηλεκτρικές καταπονήσεις μπορούν να συμβούν σε οποιοδήποτε μέρος του μονωτήρα και όχι μόνο πολύ κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

Παρατηρούμε ακόμη ότι η παρουσία ενός ρυπασμένου στρώματος τείνει να γραμμικοποιεί την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του μονωτήρα.

Το φαινόμενο Corona ξεκινά από το γεγονός ότι η γραμμικοποίηση της κατανομής της τάσης μεταφέρετε στα υψηλότερα δυναμικά προς το κέντρο του μονωτήρα, καθώς και το ότι η επιφάνεια του μονωτήρα είναι αγώγιμη, αυτό μας οδηγεί σε υψηλές τιμές πεδίου.Το φαινόμενο αυτό μεγαλώνει όταν υπάρχουν αγώγιμα σταγονίδια στις περιφέρειες των δίσκων. Αυτό παρατηρήθηκε με τη χρήση μιας κάμερας ευαίσθητης σε UV-ακτινοβολία, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.



(α) *(β)*

Σχήμα 5.6 Φαινόμενο Corona λόγω (α) σταγόνων νερού και (β) ξηρής ζώνης.

Το φαινόμενο Corona λόγω υγρασίας παρατηρείται πιο συχνά σε μονωτήρες από σιλικονούχο καουτσούκ παρά σε άλλους τύπους μονωτήρων (σιλικονούχο καουτσούκ: 16%, πορσελάνη καλυμμένη με σιλικονούχο καουτσούκ (SR coated porcelain): 20%, καουτσούκ τύπου EPDM (ethylene propylene diene monomer): 13%, πορσελάνη: 13% και κυκλοαλιφατική ρητίνη: 12%).

Οι Dang ZhenPing et al. μέτρησαν τις κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο είδη πολυμερών μονωτήρων τύπου long-rod 500 kV και υπολόγισαν την κατανομή του πεδίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Εξέτασαν μονωτήρες τύπου R, στους οποίους το μέγεθος όλων των δίσκων είναι ίδιο και μονωτήρες τύπου S, στους οποίους το μέγεθος των δίσκων είναι ανομοιόμορφο. Πραγματοποίησαν πειράματα για την αντοχή των υλικών των δίσκων και των περιβλημάτων σε “tracking” και διάβρωση.

Από την έρευνα αυτή συμπεραίνουμε ότι για να σπάσει ο πολυμερής μονωτήρας οποίος είναι κατασκευασμένος από σιλικονούχο καουτσούκ πρέπει να έχει διάβρωση στην επιφάνεια του. Ο εσωτερικός πυρήνας εκτέθηκε στον αέρα και έσπασε λόγω του φαινομένου Corona. Οι λόγοι για τους οποίους έχουμε γήρανση του μονωτήρα είναι ότι κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου εξωτερικά είναι ασύμμετρη, καθώς λόγο της ύπαρξης ρύπων και υγρασίας που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Ο λόγος για τη γήρανση του μονωτήρα εσωτερικά είναι η

χαμηλή αντοχή των υλικών των δίσκων και των περιβλημάτων σε "tracking" και η ηλεκτρική διάβρωση.

Η χωρητικότητα του πολυμερούς μονωτήρα είναι μικρότερη από αυτή των πορσελάνινων και γυάλινων μονωτήρων τύπου cap και pin. Επομένως, η κατανεμημένη χωρητικότητα είναι σχετικά μεγάλη και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ασύμμετρη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους πολυμερείς μονωτήρες υψηλής τάσης. Η έκθεση του περιβλήματος και των δίσκων ενός μονωτήρα σε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο συχνά προκαλεί γήρανση στο μονωτήρα, καθώς και το φαινόμενο Corona, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε υπερπήδηση και σπάσιμο του μονωτήρα, επηρεάζοντας σοβαρά την ασφάλεια κατά τη λειτουργία της γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης.

« Από το 2002 έως το 2003 έσπασαν κάποιοι πολυμερείς μονωτήρες τύπου longrod 500kV, τόσο τύπου-R όσο και τύπου-S στην ανατολική Κίνα». Συγκεκριμένα, στην ομάδα των μονωτήρων τύπου-S κάποιοι μονωτήρες έσπασαν και στους υπόλοιπους παρατηρήθηκαν φαινόμενα ηλεκτρικής διάβρωσης. Στην ομάδα των μονωτήρων τύπου-R, ένας μονωτήρας έσπασε όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.7 Το σπάσιμο μονωτήρα τύπου-R.

Το υλικό των δίσκων και των περιβλημάτων των μονωτήρων τύπου-R είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό, το σιλικονούχο HTV (High Temperature Vulcanising), ενώ το αντίστοιχο υλικό στους μονωτήρες τύπου-S είναι το LSR (Lidding Sealing Resin) από ρητίνη. Στις γραμμές και στους πυλώνες, στους οποίους χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο τύποι μονωτήρων, είχαν ίδια χαρακτηριστικά.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε ότι το ηλεκτρικό πεδίο και στους δύο τύπους μονωτήρων παραμορφώνεται στην περιοχή κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης, αλλά και κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Επιπλέον, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μερικές φορές μεγαλύτερη γύρω από τα δύο αυτά ηλεκτρόδια τόσο στους κοντινούς δίσκους όσο και στο περίβλημα σε σχέση με την τιμή της έντασης στο μέσο του μονωτήρα. Πιο συγκεκριμένα στους δίσκους του μονωτήρα κατά μήκος του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης παρατηρούμε ότι εφαρμόζεται πολύ υψηλότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου από ό,τι στους άλλους δίσκους του μονωτήρα. Εκεί είναι πιθανότερο να συμβεί πρώτα ηλεκτρική διάβρωση και σπάσιμο του μονωτήρα, όταν αυτός ρυπανθεί πάρα πολύ.

Επιπλέον, έγιναν πειράματα για τον έλεγχο της αντοχής των μονωτήρων σε "tracking" και διάβρωση. Για τον έλεγχο της αντοχής των συστατικών μερών του μονωτήρα,

χρησιμοποιήθηκαν δύο καθαρά δείγματα από κάθε τύπο - το ένα τοποθετήθηκε οριζόντια και το άλλο κάθετα. Το πείραμα έγινε σε συνθήκες ομίχλης με αλάτη. Μετά από 1000 ώρες δοκιμής προέκυψε ότι η ηλεκτρική αντοχή των μονωτήρων τύπου-R είναι πολύ καλύτερη από αυτή των μονωτήρων τύπου-S, παρόλο που η κατανομή του πεδίου των τελευταίων είναι πιο ομαλή από των μονωτήρων τύπου-R. Στο κατακόρυφο δείγμα είχαμε περισσότερο αλάτι, ενώ η επιφάνειά του διαβρώθηκε περισσότερο σε σχέση με το οριζόντιο δείγμα. Περισσότερο αλάτι συγκεντρώθηκε στους ελαστομερείς δίσκους (sheds).

Για να ελέγξουμε την αντοχή του υλικού που είναι κατασκευασμένοι οι δίσκοι των μονωτήρων, πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχα πειράματα, από τα οποία προκύπτει ότι οι μονωτήρες τύπου-R είναι καλύτεροι ως προς την αντοχή τους στη διάβρωση από τους μονωτήρες τύπου-S.

Οι Yu Zhong et al. έδειξαν ότι η συγκέντρωση έντασης κοντά σε σταγονίδια νερού μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία φαινομένου Corona, αλλά και τη δημιουργία ηλεκτρικής διάβρωσης στην επιφάνεια ενός πολυμερούς μονωτήρα. Η διάβρωση στην επιφάνεια (sheath) είναι πιο μεγάλη από ό,τι στους ελαστομερείς δίσκους. Ακόμα, η περιοχή κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης διαβρώνεται περισσότερο από την περιοχή γύρω από το γειωμένο ηλεκτρόδιο του μονωτήρα. Όταν η ρύπανση του μονωτήρα είναι πολύ μεγάλη, η ηλεκτρική διάβρωση επιδεινώνεται.

Η διάβρωση είναι μια διαδικασία, όπου οι ηλεκτρικές, θερμικές και χημικές διαδικασίες είναι οι βασικοί παράγοντας που οδηγεί στη γήρανση των πολυμερών μονωτήρων.



Σχήμα 5.8 Ηλεκτρική διάβρωση πολυμερούς μονωτήρα σε γραμμή μεταφοράς 330 kV

Για το σχεδιασμό μονωτήρων και αγωγών γραμμών μεταφοράς πολύ σημαντικό είναι να γίνεται ο έλεγχος του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από εξοπλισμό υψηλής τάσης. Πιθανές συνέπειες υψηλών τιμών του ηλεκτρικού πεδίου είναι ο θόρυβος, οι μερικές εκκενώσεις και η πρόωρη γήρανση της μόνωσης. Οι Tiebin Zhao et al. ανέλυσαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής ενός δισδιάστατου (**ELECTRO**) και ενός τρισδιάστατου (**COULOMB**) προγράμματος, που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των οριακών στοιχείων, για την ανάλυση του ηλεκτρικού πεδίου με στόχο τον υπολογισμό της κατανομής του πεδίου των μονωτήρων σε στεγνό και καθαρό περιβάλλον. Αναλύθηκε ένας τριφασικός πυλώνας μεταφοράς 345 kV με μη-κεραμεικούς μονωτήρες ανάρτησης, οι δύο σε διάταξη I και ο τρίτος σε διάταξη V, παίρνοντας κάθε φάση μόνη της. Παρατηρούμε ότι οι υπολογισμοί σε μία φάση, με ακριβή γεωμετρική κατασκευή, έχουμε τις περισσότερες περιπτώσεις με ακριβή αποτελέσματα.

Υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να προκαλέσει φαινόμενο Corona στον αέρα που περιβάλλει τους μονωτήρες, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στη γήρανση των πολυμερών (μη-κεραμεικών) υλικών. Οι κατασκευαστές προμηθεύουν στους αγοραστές τοροειδή (grading devices), που τοποθετούνται στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης μαζί με τους μονωτήρες,

σε εφαρμογές υψηλών τάσεων, για να γίνεται αναδιαμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου και να έχουμε μείωση της έντασης του πεδίου στα άκρα υψηλής τάσης των μονωτήρων. Ελέγχεται η επίδραση των αγωγών, των πυλώνων και των τοροειδών στο πεδίο κατά μήκος καθαρών μη-κεραμεικών μονωτήρων και κατά πόσο μπορούν οι τρεις παράμετροι να εξαλειφθούν κατά την προσομοίωση των μονωτήρων στον υπολογιστή.

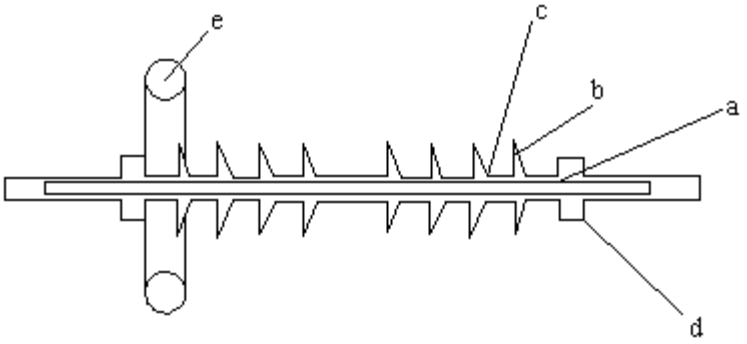
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δύο διαφορετικά προγράμματα, το δισδιάστατο και το τρισδιάστατο, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα συμπίπτουν τόσο πολύ ώστε οι υπολογισμοί που έγιναν σε κάθε πρόγραμμα χωριστά να μας παρέχουν πολύ μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας.

Η κατασκευή του μονωτήρα μόνου του, χωρίς να ληφθεί υπόψην η επίδραση του πυλώνα και των αγωγών, θα έχουμε ανακρίβεια εκτιμήσεις της κατανομής του πεδίου και του δυναμικού για το μονωτήρα όταν αυτός θα βρίσκεται σε λειτουργία. Για να ληφθεί υπόψην η επίδραση των αγωγών και των πυλώνων, πρέπει να γίνουν υπολογισμοί σε τρισδιάστατο περιβάλλον.

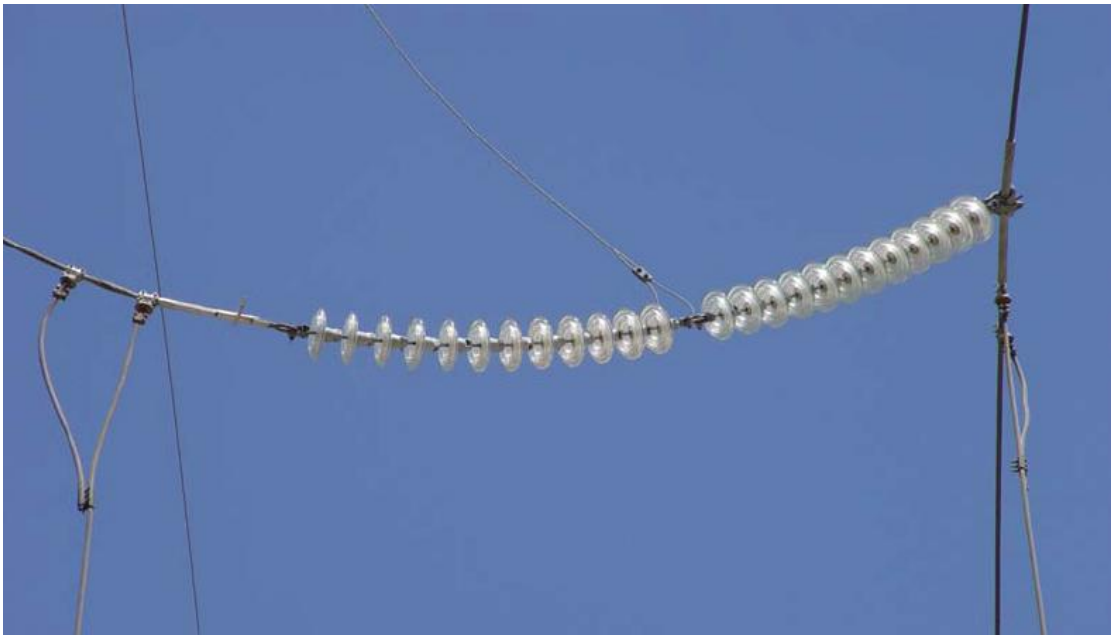
Εάν παραλείψουμε τους ελαστομερείς δίσκους από τη κατασκευή, θα έχουμε ένα πολύ μικρό σφάλμα στους υπολογισμούς της κατανομής του πεδίου κατά μήκος του άξονα του μονωτήρα. Μάλιστα, μια τέτοια απλοποίηση μας βοηθάει να μειώσουμε το χρόνο υπολογισμού.

Εάν οι αγωγοί αγνοηθούν κατά την παρουσίαση της γεωμετρικής τους κατάστασης , τότε από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι έχουμε σε αυτά υπερεκτίμηση της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Παρόλα αυτά, οι αγωγοί μπορούν να κατασκευαστούν, με αρκετή ακρίβεια, έχοντας σχετικά μικρά μήκη (έως 8 φορές το μήκος του μονωτήρα).

Επιπλέον, σημαντικοί παράμετροι για τον καθορισμό της μέγιστης τιμής του πεδίου κατά μήκος του μονωτήρα είναι η κατασκευή του πυλώνα στην περιοχή γύρω από το μονωτήρα, καθώς και η διάμετρος και η θέση του τοροειδούς. Η διάμετρος των αγωγών (tubes) του τοροειδούς έχει μικρή επίδραση στο πεδίο κατά μήκος του μονωτήρα, αλλά είναι σημαντική παράμετρος, γιατί μέσω αυτής ελέγχεται το πεδίο (έλεγχος της έναρξης του φαινομένου Corona) στο ίδιο το τοροειδές. Καθώς το τοροειδές μετακινούνταν από το άκρο υψηλής τάσης προς το γειωμένο άκρο, η ένταση του πεδίου μειωνόταν. Η δομή του τοροειδούς φαίνεται στο σχήμα 5.7:



Σχήμα 5.9 Απλοποιημένη γεωμετρία και διαστάσεις ενός μη-κεραμεικού μονωτήρα:(a) πυρήνας (b) ελαστομερείς δίσκοι (c) περίβλημα από πολυμερές υλικό (d) ηλεκτρόδιο γείωσης και (e) τοροειδές (grading ring).



Σχήμα 5.10 Γυάλινοι μονωτήρες σε κατεβατά.

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από μετρήσεις (δοκιμές) που έγιναν σε έναν μονωτήρα διαθέσιμο στο εμπόριο.

Αποτέλεσμα μιας μελέτης που διενεργήθηκε στο Power Systems Engineering Research Center (PSERC) και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα και την ανάλυση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου, με στόχο τον πιθανό εντοπισμό εσωτερικών ελαττωμάτων σε μη-κεραμεικούς μονωτήρες μέσω της μέτρησης του πεδίου γύρω από το μονωτήρα. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο πακέτο λογισμικού, **COULOMB**. Προσομοιώθηκαν διάφοροι τύποι ελαττωμάτων (defects). Όλοι οι τύποι ελαττωμάτων που προσομοιώθηκαν βρίσκονταν σε κάποια διεπιφάνεια στο μονωτήρα.

Τα συμπεράσματα της έκθεσης έχουν ως εξής:

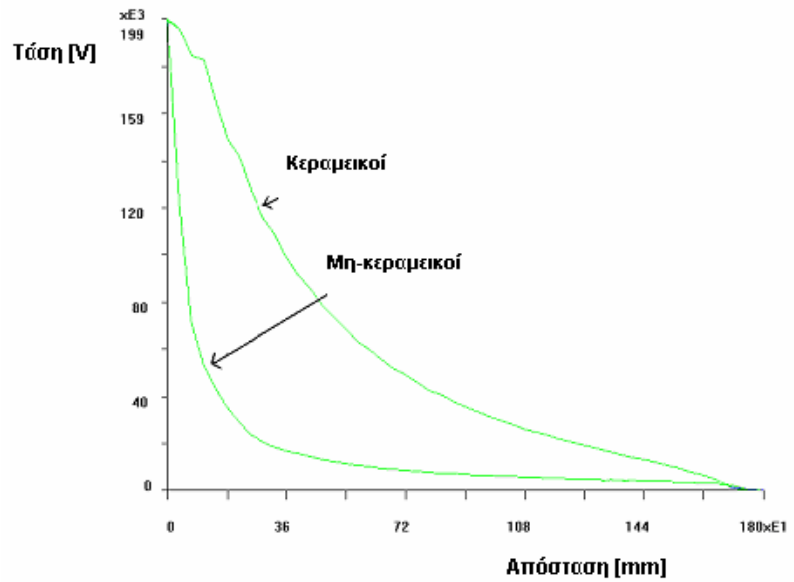
Για να γίνει πιο εύκολα ο εντοπισμός του ελαττώματος εξαρτάται από τη θέση στην οποία βρίσκεται και η πιθανότητα βρεθεί πιο εύκολα είναι, όταν το ελάττωμα βρίσκεται πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

Αυτά τα ελαττώματα που είναι μεγαλύτερα περισσότερο προκαλούν μεγαλύτερες αλλαγές στο πεδίο του μονωτήρα και γι'αυτό το λόγο μπορούμε να τα εντοπίσουμε πιο εύκολα από τα μικρότερα.

Η αλλαγή που παρατηρείται στην τιμή του πεδίου εξαρτάται από τον τύπο του ελαττώματος. Όσο δηλαδή περισσότερο αγώγιμο είναι το ελάττωμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα να το εντοπίσουμε.

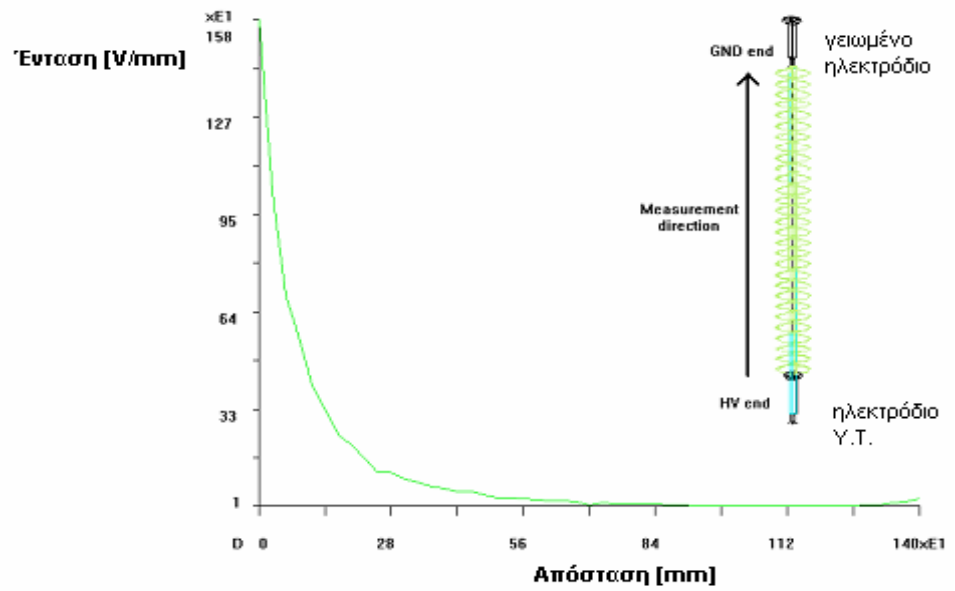
Η πιθανότητα εντοπισμού των ελαττωμάτων αυξάνει αν ληφθούν ακτινικές (radial) μετρήσεις, αντί των παραδοσιακών αξονικών (axial) μετρήσεων. Ο τρόπος λήψης αυτών των μετρήσεων παρουσιάζεται παρακάτω.

Στους κεραμεικούς μονωτήρες η κατανομή της τάσης είναι σχετικά γραμμικότερη λόγω των ενδιάμεσων μεταλλικών μερών. Το υλικό τους δε φθείρεται από το φαινόμενο Corona. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το φαινόμενο Corona να μην αποτελεί τόσο σοβαρή απειλή για τους κεραμεικούς μονωτήρες. Παρόλα αυτά, στους μη-κεραμεικούς μονωτήρες η κατανομή της τάσης είναι ανομοιόμορφη, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, οδηγεί στη δημιουργία φαινομένου Corona. Τα τοροειδή (corona rings) χρησιμοποιούνται σε μη-κεραμεικούς μονωτήρες για τάσεις άνω των 230 kV, με στόχο τη μείωση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.

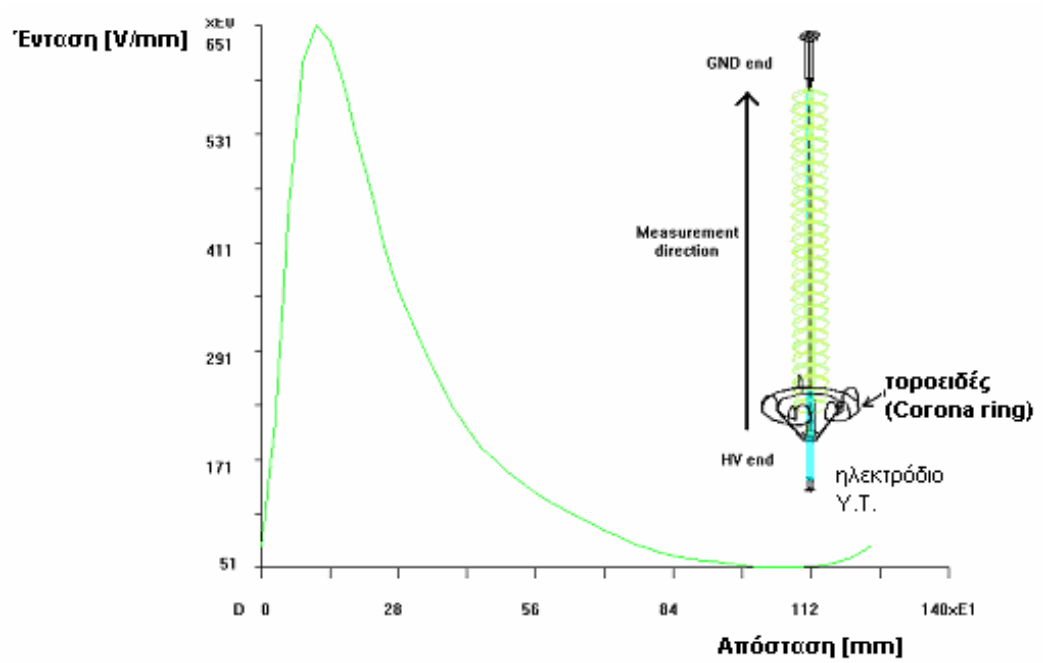


Σχήμα 5.11 Σύγκριση της κατανομής της τάσης σε κεραμεκούς και μη-κεραμεικούς μονωτήρες

Από τα παρακάτω σχήματα είναι προφανές ότι για μονωτήρες με τοροειδές, η μέγιστη ένταση του πεδίου μειώνεται σημαντικά και η κατανομή του πεδίου γίνεται πιο ομοιόμορφη σε σχέση με τους μονωτήρες χωρίς τοροειδές:



Σχήμα 5.12 Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα χωρίς τοροειδές.



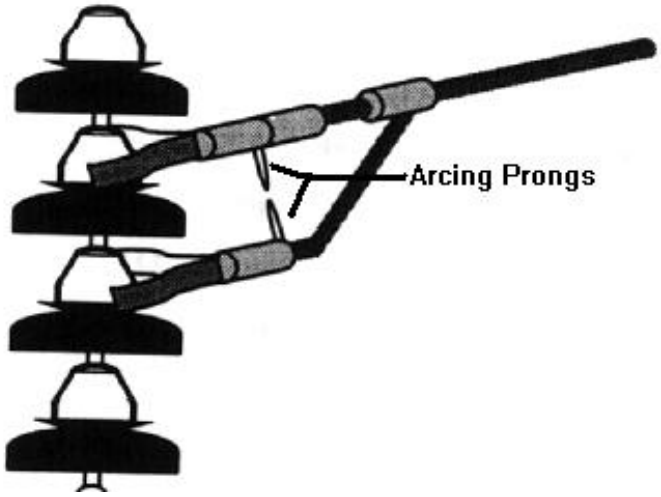
Σχήμα 5.13 Κατανομή του πεδίου κατά μήκος μη-κεραμεικού μονωτήρα με τοροειδές

Συστήματα υψηλότερων τάσεων απαιτούν μεγαλύτερες διαστάσεις για τα τοροειδή.

Καλό είναι με διάφορες μεθόδους να γίνεται η αναγνώριση των ελαττωματικών μονωτήρων έγκαιρα και να γίνεται η αντικατάστασή τους, πριν συμβεί κάποια αστοχία στο σύστημα. Η πιο αποδοτική μέθοδος για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων των μονωτήρων είναι η μέθοδος του ηλεκτρικού πεδίου, γιατί μέσω αυτής εντοπίζονται ελαττώματα στο εσωτερικό του μονωτήρα. Τα ελαττώματα μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή στις ιδιότητες των υλικών με αποτέλεσμα να έχουμε αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο. Παρόλα αυτά, κάποια ελαττώματα δεν εντοπίζονται μέσω αυτής της μεθόδου, γιατί δεν εμφανίζουν κάποια σημαντική αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο που να μπορεί να εντοπιστεί.

Κατόπιν λεπτομερούς έρευνας, έγινε αντιληπτό ότι δεν υπάρχει κάποια μέθοδος που να μπορεί αποτελεσματικά να εντοπίζει όλα τα ελαττώματα στους μονωτήρες. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον εντοπισμό των ελαττωμάτων είναι οι εξής:

Η μέθοδος στηριζόμενη σε ακουστικό θόρυβο (Buzz Method), που εφαρμόζεται μόνο σε πορσελάνινους μονωτήρες, λόγω των μεταλλικών μερών που υπάρχουν σε αυτούς. Πάνω στα μεταλλικά μέρη τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ένας υγιής μονωτήρας θα προκαλέσει τη δημιουργία ενός τόξου μεταξύ των δύο ακίδων (prongs), με αποτέλεσμα να παράγει έναν θόρυβο. Αντίθετα, ένας ελαττωματικός δίσκος δε θα έχει αρκετό δυναμικό για να δημιουργήσει ένα τέτοιο τόξο.



Σχήμα 5.14 Μέθοδος Buzz.

Στη μέθοδος αντίστασης την χρησιμοποιούμε σε κεραμικούς και σε μη-κεραμικούς μονωτήρες οπού γίνεται η μέτρηση με μονωσιόμετρο (megger) υψηλής τάσης. Στην περίπτωση που μπορεί να έχουμε χαμηλή αντίσταση σε κάποιο σημείο του μονωτήρα καταλαβαίνουμε ότι υπάρχει κάποιο ελάττωμα. Την μέθοδος αυτή την χρησιμοποιούμαι κυρίως για ελαττώματα που μπορεί να έχουμε στην επιφανεί του μονωτήρα και για μεγάλα αγώγιμα ελαττώματα στο εσωτερικό του μονωτήρα.

Μετρήσεις διηλεκτρικού ρεύματος (dielectric current measurements).
Όταν έχουμε υψηλά ρεύματα στο μονωτήρα τότε έχουμε την παρουσία ελαττωμάτων. Την μέθοδο αυτή την χρησιμοποιούμε για βρίσκουμε μόνο μεγάλα ελαττώματα και στα δύο είδη μονωτήρων.

Η μέθοδος της μερικής εκκένωσης, γίνεται μόνο σε κλωβό Faraday,διότι προκαλεί μεγάλο θόρυβο. Οι εκκενώσεις σε έναν υγιή μονωτήρα είναι πολύ λίγες αρκετά μικρές των pico coulombs. Μεγαλύτερες εκκενώσεις μπορούμε να παρατηρήσουμε όταν έχουμε μεγάλη πεδιακή ένταση και φαινομένο Corona.

Μετρήσεις RIV (Radio Influence Voltage).
Στην μέθοδος αυτή μπορούμε να πούμε ότι δεν είναι πολύ αξιόπιστη, γιατί δεν μπορεί να που έχουμε σφάλμα όταν γίνεται το φαινόμενο Corona.

Δοκιμές θέρμανσης μονωτήρων (Heating tests/Time withstand).
Την μέθοδο αυτή την χρησιμοποιούμε και στα δύο είδη μονωτήρων. Παρατηρούμε ότι στα άκρα των μονωτήρων εφαρμόζεται για λίγα λεπτά τάση υπερπήδησης 80% . Μετά τις δοκιμές που γίνονται στους μονωτήρες αν παρατηρήσουμε σημεία με υψηλή θερμοκρασία (hot spots) αυτό σημαίνει ότι έχουμε ελαττώματα στον μονωτήρα.

Δοκιμή αντίστασης σε κρουστική τάση που προσομοιώνει κεραυνική τάση (Dry lightning impulse withstand tests).
Αυτή η μέθοδος πραγματοποιείται σε εργαστήριο και την εφαρμόζουμε και στα δύο είδη μονωτήρων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εφαρμογή κρουστικής τάσης της μορφής 1,2/50 μs και στον έλεγχο της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα. Ένας υγιής μονωτήρας θα έχει μια γραμμική αύξηση της τάσης για 1,2 μs, που θα ακολουθήσει μια εκθετικά μικρή τάση για 50 μs. Η παρουσία βραχυκυκλώματος θα οδηγήσει σε κατάρρευση της τάσης.

Η μέθοδος που βασίζεται στη μέτρηση της θερμοκρασίας των μονωτήρων (Infrared Thermography), την χρησιμοποιούμε για να βρούμε τα ελαττώματα και στους δύο τύπους μονωτήρων. Η κατανομή της θερμοκρασίας του υπό δοκιμή μονωτήρα την συγκρίνουμε με αυτή ενός υγιούς μονωτήρα και έτσι μπορούμε να διαπιστώσουμε εάν ο υπό δοκιμή μονωτήρας έχει κάποιο ελάττωμα.

Η πιο γνωστή μέθοδος για να βρούμε ελαττώματα σε κεραμικούς και μη-κεραμικούς μονωτήρες είναι η μέθοδος του ηλεκτρικού πεδίου. Σε αυτή τη μέθοδο, συγκρίνουμε τις τιμές του πεδίου που βρίσκονται στην επιφάνεια του υπό δοκιμή μονωτήρα με τις τιμές του πεδίου σε έναν υγιή μονωτήρα. Αν παρατηρήσουμε αλλαγές στις τιμές των πεδίων τότε έχουμε ελαττώματα στον υπό δοκιμή μονωτήρα.

Σημειώθηκαν πολλοί τύποι ελαττωμάτων που μπορεί να συμβούν σε έναν πολυμερή (μη-κεραμεικό) μονωτήρα. Οι διάφοροι τύποι ελαττωμάτων, που είναι δύσκολο να τους εντοπίσουμε, ενσωματώνονται στο «υγιές» μοντέλο του μονωτήρα και προσομοιώνονται. Ακόμη πρέπει να σημειώσουμε ότι το μέγεθος, η θέση και η αγωγιμότητα τέτοιων ελαττωμάτων ποικίλλουν. Σημειώνονται οι τιμές του πεδίου σε περιοχές κοντά στο ελάττωμα κατά μήκος του αισθητήρα (probe). Μετά, αυτές οι τιμές συγκρίνονται με τις τιμές που πήραμε στις υγιούς μονωτήρες. Οι πιο ευαίσθητοι αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου έχουν ευαισθησία για τιμές πεδίου άνω των 2 kV/m. Άρα,τα ελαττώματα που προκαλούν μια διαφορά των 2 kV/m και πάνω θεωρούνται ανιχνεύσιμα, ενώ τα άλλα θεωρούνται μη ανιχνεύσιμα με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να τα εντοπίσουμε.

Καταγραφικά και αναλύθηκαν τα ελαττώματα που βρίσκονταν μεταξύ δύο (single shed defect), τριών (two shed defect) και τεσσάρων (three shed defect) διαδοχικών ελαστομερών δίσκων. Όλα τα ελαττώματα βρίσκονταν στη επιφάνεια του πυρήνα-περιβλήματος και ήταν:

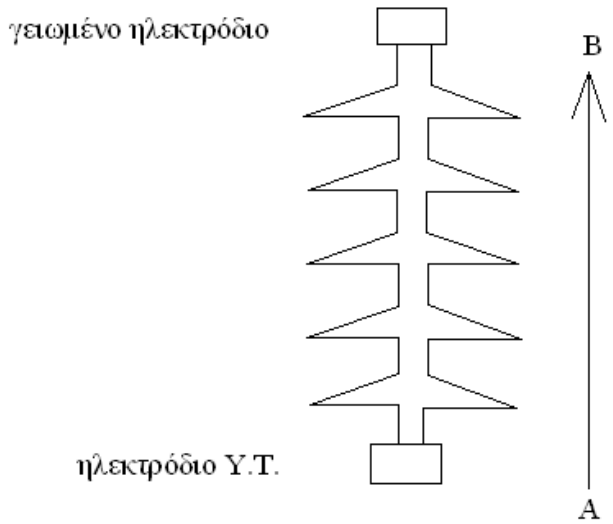
α) Εξ ολοκλήρου αγώγιμη ατέλεια

β) Ύπαρξη νερού(conductive water defect)

γ) Κενό αέρος(air void defect).

Έγιναν δύο είδη μετρήσεων σε έναν μη-κεραμεικό μονωτήρα (NCI) με 20 δίσκους: οι αξονικές μετρήσεις πεδίου και οι ακτινικές μετρήσεις πεδίου.

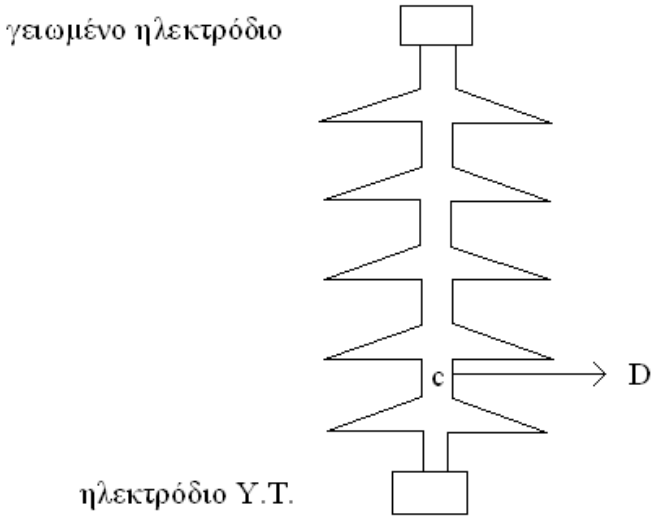
Α) Στο πρώτο είδος, οι πεδιακές μετρήσεις στο μονωτήρα γίνονται κατά μήκος του άξονα και της επιφάνειας των δίσκων, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 5.12:



Σχήμα 5.15 Κατεύθυνση λήψης των αξονικών μετρήσεων.

Η "ατέλεια" τοποθετείται σε διαφορετικές θέσεις (σε διαφορετικούς δίσκους) και μετακινείται ξεκινώντας από το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης προς το ηλεκτρόδιο γείωσης. Δίπλα στους αριθμημένους δίσκους σημειώνεται η διαφορά στις τιμές μεταξύ του υγιούς και του μη-υγιούς μονωτήρα. Εάν αυτή είναι πάνω από 2 kV/m, τότε είναι ανιχνεύσιμη και μπορούμε να την εντοπίσουμε.

Β) Στο δεύτερο είδος, οι πεδιακές μετρήσεις έγιναν ακτινικά, κατά μήκος του μονοπατιού CD, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, για διαφορετικές ατέλειες και θέσεις αυτών



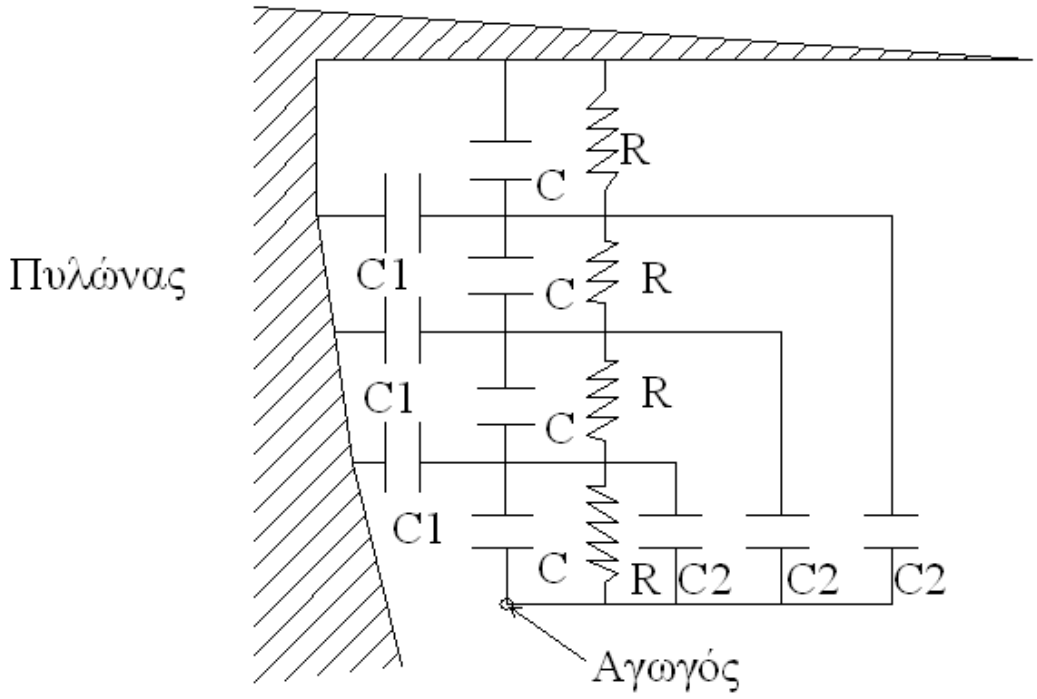
Σχήμα 5.16 Κατεύθυνση λήψης των ακτινικών μετρήσεων.

Από τις μετρήσεις που έγιναν, αποδείχθηκε τελικά ότι η πιθανότητα εντοπισμού των ατελειών σε ένα μη-κεραμεικό μονωτήρα με είκοσι δίσκους, ο οποίος χρησιμοποιείται σε γραμμή μεταφοράς 345 kV, αυξάνεται, εάν διενεργηθούν ακτινικές μετρήσεις αντί για αξονικές. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.1 και είναι φανερό ότι με την ακτινική μέθοδο, ο αριθμός των δίσκων, στους οποίους η ατέλεια είναι ανιχνεύσιμη, είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με την αξονική μέθοδο.

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αξονικής και ακτινικής μεθόδου

	Τύπος Ατέλειας	Αξονική μέθοδος		Ακτινική μέθοδος	
		Ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους	Μη Ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους	Ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους	Μη Ανιχνεύσιμη ατέλεια στους δίσκους
Ατέλεια μεταξύ δύο δίσκων	**Εξ ολοκλήρου αγώγιμη**	1,7-20	8-19	1-20	καμία
	Ύπαρξη νερού	1-8	9-20	1-10 , 12-20	11
	Κενό αέρος	1-8	9-20	1-7 , 19-20	8-18
Ατέλεια μεταξύ τριών δίσκων	**Εξ ολοκλήρου αγώγιμη**	1-12 , 20	13-19	1-20	καμία
	Ύπαρξη νερού	1-6 , 20	7-19	1-6, 8,10,11, 13,14,15,16, 19,20	7,9,12,17,18
	Κενό αέρος	1-7	8-20	1-8, 19, 20	9-18
Ατέλεια μεταξύ τεσσάρων δίσκων	**Εξ ολοκλήρου αγώγιμη**	1-17,20	18,19	1-20	καμία
	Ύπαρξη νερού	1-7	8-20	1-7, 10,11,15,17	8,912-14,16,18
	Κενό αέρος	1-7	8-20	1-8 ,19,20	9-18

Το μοντέλο χωρητικοτήτων ενός πορσελάνινου μονωτήρα το παρουσίασε ο Kapal Sharma. Το μοντέλο αυτο φαίνεται στο σχήμα 5.14 και μας απεικονίζει την κατανομή της χωρητικότητας σε έναν πορσελάνινο μονωτήρα που αποτελείται ενδεικτικά από τέσσερεις δίσκους.



Σχήμα 5.17 Μοντέλο χωρητικοτήτων πορσελάνινου μονωτήρα

Ισοδύναμη χωρητικότητα πορσελάνινου μονωτήρα = $C_{eq}+C_{1eq}+C_{2eq}$ όπου:

C_{eq} η ισοδύναμη αντίσταση των χωρητικοτήτων C στο μονωτήρα

C_{1eq} η ισοδύναμη αντίσταση των χωρητικοτήτων C_1 στο μονωτήρα

C_{2eq} η ισοδύναμη αντίσταση των χωρητικοτήτων C_2 στο μονωτήρα

C χωρητικότητα του ενός δίσκου

C_1 παράσιτη χωρητικότητα του μονωτήρα προς γη

C_2 παράσιτη χωρητικότητα του μονωτήρα προς τη γραμμή (αγωγός)

R αντίσταση ερπυσμού, η οποία εξαρτάται από την παρουσία στρώματος ρύπανσης στις επιφάνειες του μονωτήρα και μεταβάλλεται σημαντικά κάτω από συνθήκες βροχής ή ομίχλης.

Παρατηρούμε ότι λόγω της χωρητικότητας που υπάρχει μεταξύ του μονωτήρα, του αγωγού και του πυλώνα, η κατανομή της τάσης κατά μήκος του μονωτήρα δεν είναι ομοιόμορφη. Και μπορούμε να συμπεράνουμε ότι περισσότερο καταπονείται το κομμάτι του μονωτήρα που βρίσκεται πιο κοντά στον αγωγό.

5.3 Αριθμητική επίλυση του ηλεκτροστατικού πεδίου με τον υπολογιστή

5.3.1 Γενικές παρατηρήσεις

Σε έναν υπολογιστή για την λύση ενός πεδίου είναι μία καθαρά αριθμητική επίλυση. Με τον υπολογιστή μπορεί να γίνει η εκτέλεση αριθμητικών πράξεων και η εξαγωγή αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Έχουμε την δυνατότητα να μπορούμε να διαμορφώσουμε την αριθμητική επίλυση ενός προβλήματος με τον υπολογιστή ως εξής : Διατυπώνουμε μια σειρά σχέσεων, που συνδέουν τα δεδομένα του προβλήματος με ενδιάμεσα ή με τα τελικά αποτελέσματα. Επομένως για μία δεδομένη είσοδο, με εκτέλεση του αντίστοιχου προγράμματος, προκύπτει μία έξοδος, δηλαδή μία σειρά αποτελεσμάτων, που αντιστοιχούν προς τη δεδομένη είσοδο.

Εάν κάνουμε αντιστοίχιση εισόδου-εξόδου,υπό προϋποθέσεις μπορούμε να έχουμε και τη εξαγωγή ή επιβεβαίωση ενός φυσικού νόμου ή κάποιων φυσικών μεγεθών σχετίζονται μεταξύ τους . Έστω ότι, χρησιμοποιούμε ένα πρόγραμμα που υπολογίζει το ηλεκτρικό πεδίο μίας ορισμένης διατάξεως ηλεκτροδίων, με διάφορες τιμές εισόδου για μεταβλητές Α, Β, Γ κλπ, προκύπτει ότι μια έξοδος Χ είναι η ίδια πάντοτε συνάρτηση Χ=f (Α), του μεγέθους Α, έστω ότι είναι Χ=2,609 Α2 + 10,072 Α + 0,8902.

Υπάρχει μια σειρά μεθόδων, που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την αριθμητική λυση του ηλεκτροστατικού πεδίου, αυτή είναι η μέθοδος διαδοχικών διαφορών, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων. Οι μέθοδοι αυτές είναι εφαρμόσιμες όχι μόνο στο ηλεκτροστατικό πεδίο αλλά και σε άλλες περιοχές της Φυσικής. Για να χρησιμοποιήσουμε την πιο κατάλληλη μέθοδο όταν θα θέλουμε να λύσουμε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους:

- Από την ακρίβεια των υπολογισμών, που εξασφαλίζεται από αυτήν.

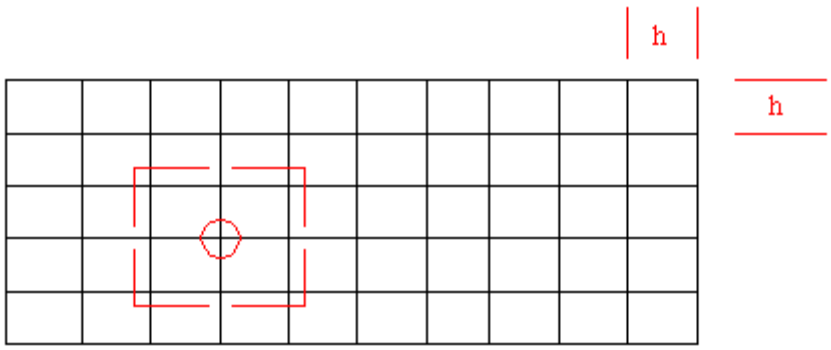
- Από την ταχύτητα εφαρμογής της, δηλαδή από τον απαιτούμενο χρόνο, για την ολοκλήρωση της εφαρμογής της.

- Από τα αναγκαία χαρακτηριστικά του υπολογιστή (διαθέσιμη μνήμη, ταχύτητα λειτουργίας κλπ) για την εφαρμογή της μεθόδου σε μια συγκεκριμένη περίπτωση. Σημειώνεται ότι, παλαιότερα, οι υπολογιστές δεν επαρκούσαν για μία γρήγορη και ακριβή εφαρμογή ορισμένων μεθόδων, όπως σήμερα.

Εμείς θα περιορισθούμε σε δύο από τις μεθόδους υπολογισμού πεδίων, της μεθόδου διαδοχικών διαφορών και της μεθόδου των ισοδύναμων φορτίων. Στη δεύτερη μέθοδο την χρησιμοποιούμε περισσότερο διότι,έχουμε πιο γρήγορη εφαρμογή και ακρίβεια αποτελεσμάτων. Η εφαρμογή της δεν εμφανίζει ιδιαίτερα προβλήματα.

5.3.2 Περιγραφή της μεθόδου των διαδοχικών διαφορών

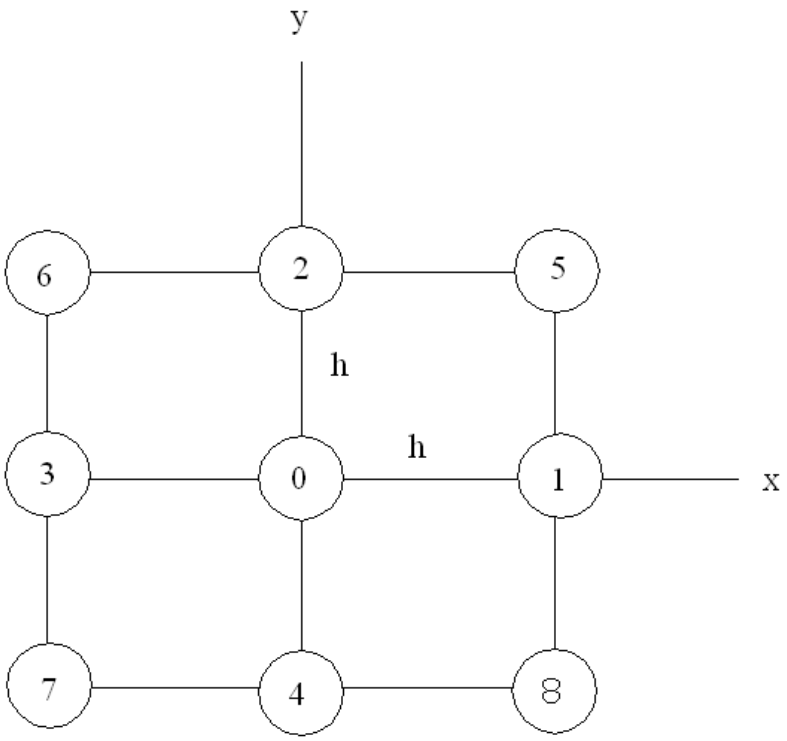
Στη μέθοδος των διαδοχικών διαφορών χρησιμοποιούμε διαφορικές εξισώσεις Laplace.
Την μέθοδο αυτή θα την αναπτύξουμε στο επίπεδο, αλλά μπορούμε να την χρησιμοποιήσουμε και σε τρισδιάστατο περιβάλλον.
Στην μέθοδο αυτή, θεωρούμε στο επίπεδο ηλεκτροστατικό πεδίο, ένα ορθογώνιο πλέγμα διαδοχικών σημείων που απέχουν μεταξύ τους κατά h .



Σχήμα 5.18 Ορθογώνιο πλέγμα διαδοχικών σημείων σε ίσες αποστάσεις h μεταξύ τους, προς εφαρμογή της μεθόδου των διαδοχικών διαφορών.

Αν θεωρήσουμε ένα τυχαίο σημείο του πλέγματος π.χ. το σημειούμενο με κύκλο, μπορούμε να παρατηρούμε ότι αυτό περιβάλλεται από 8 άλλα σημεία, όπως δείχνεται στο σχήμα από το τετράγωνο με διακεκομμένη γραμμή. Θα εξετάσουμε τυχαίο σημείο, έστω 0, και τα 8 σημεία 1,2,…8, που το περιβάλλουν. Τα σημεία αυτά τα παρουσιάζουμε στο σχήμα 5.15.

Εάν είναι φ_0 το δυναμικό του σημείου 0 και φ_1, φ_2 , φ_3 , φ_4 τα δυναμικά των αντίστοιχων σημείων 1,2,3,4 που το περιβάλλουν, μπορούμε να εκφράσουμε το δυναμικό φ_0 , μέσω των τμημάτων μέχρι και δεύτερου βαθμού σειρών Taylor, συναρτήσει καθενός από τα δυναμικά φ_1, φ_2 , φ_3 , φ_4 τα οποία έστω ότι είναι γνωστά. Δίνοντας τη γενική έκφραση της σειράς Taylor και γράφοντας την απλοποιούμε τις μερικές παραγώγους των δυναμικών με το σύμβολο φ του δυναμικού και δείκτες που δείχνουν τις παραγώγους. Παράδειγμα :



Σχήμα 5.19 Προς εφαρμογή της εξισώσεως Laplace σε ένα τετράγωνο.

$$\frac{\partial\phi}{\partial x}\to\phi_x\ ,\ \frac{\partial\phi}{\partial y}\to\phi_y\ ,\ \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\to\phi_{xx}\ ,\ \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}\to\phi_{yy}\ ,\ \frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial y}\to\phi_{xy}$$ κ.ο.κ

Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, αν είναι δεδομένο το δυναμικό φο στη θέση έστω (xo,yo) μπορεί να διατυπωθεί το δυναμικό φ σε μια γειτονική θέση (x,y) με τη βοήθεια της εξής σειράς Taylor :

$$\phi(\mathrm{x},\mathrm{y})=\varphi_0+\frac{1}{1!}\left[(x-x_0)\phi_x(x_0,y_0)+(y-y_0)\phi_y(x_0,y_0)\right]+$$
$$+\frac{1}{2!}\left[(x-x_0)^2\phi_{xx}(x_0,y_0)+2(x-x_0)(y-y_0)\phi_{xy}(x_0,y_0)+(y-y_0)^2\phi_{yy}(x_0,y_0)\right]+\ldots \quad (5.1)$$

Εφαρμόζουμε ήδη την προηγούμενη σχέση προς έκφραση των δυναμικών φ1, φ2 , φ3 , φ4 , ξεκινώντας κάθε μια φορά από το σημείο 0 και μετακινούμενοι είτε οριζοντίως είτε κατακορύφως, ανάλογα με τη θέση του σημείου προορισμού σε σχέση με το σημείο αφετηρίας. Έχουμε λοιπόν :

$$\phi_1=\phi_0+h\phi_x+0+\frac{1}{2}(h^2\phi_{xx}+0+0) \quad (5.2)$$

$$\phi_2=\phi_0+0+h\phi_y+\frac{1}{2}(0+0+h^2\phi_{yy}) \quad (5.3)$$

$$\phi_3=\phi_0-h\phi_x+0+\frac{1}{2}(h^2\phi_{xx}+0+0) \quad (5.4)$$

$$\phi_4=\phi_0+0-h\phi_y+\frac{1}{2}(0+0+h^2\phi_{yy}) \quad (5.5)$$

αθροίζοντας τις προηγούμενες κατά μέλη και λαμβάνοντας υπόψη ότι, σύμφωνα με την εξίσωση Laplace είναι :

$$\Delta\phi=\phi_{xx}+\phi_{yy}=0 \quad (5.6)$$

λαμβάνουμε τελικώς :

$$\phi_0=\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4}\phi_i \quad (5.7)$$

Η προηγούμενη σχέση είναι γνωστή ως ο «τύπος του τετραγώνου».

Παρατηρούμε ότι, αν γνωρίζουμε τα 4 δυναμικά των σημείων που περιβάλλουν κάποιο άλλο σημείο, μπορούμε να βρούμε το δυναμικό του τελευταίου. Την συγκεκριμένη μέθοδο την χρησιμοποιούμε με τον εξής τρόπο: Ξεκινάμε από σημεία που γνωρίζουμε τα δυναμικά τους. Με αφετηρία αυτό, υπολογίζουμε τα δυναμικά των γειτονικών σημείων και συνεχίζουμε τον

υπολογισμό, μέχρι να φθάσουμε είτε σε άλλα σημεία με επίσης γνωστά δυναμικά, είτε στα σημεία, από τα οποία ξεκίνησε ο υπολογισμός. Και στη μια και στην άλλη περίπτωση, τα δυναμικά των τελευταίων σημείων θα πρέπει να είναι για παράδειγμα τα γνωστά δυναμικά των ηλεκτροδίων, ή θα πρέπει να είναι αυτά που επιλέξαμε αρχικά, όταν ξεκινήσαμε τον υπολογισμό. Αν αυτό δε συμβαίνει, θα πρέπει να διορθώσουμε τις αρχικές επιλογές μας και να επαναλάβουμε τον υπολογισμό. Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να συνεχισθεί, μέχρι οι τιμές που υπολογίζουμε να ταυτίζονται (να βρίσκονται εντός των ορίων του επιτρεπόμενου σφάλματος) με τις τιμές που έχουν δοθεί αρχικά ή που έχουμε επιλέξει,στην αρχή του υπολογισμού.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε, ότι ο τύπος του τετραγώνου δεν είναι ο μόνος τύπος, για να υπολογίσουμε τα ηλεκτρικά πεδία σε διαφορετικές περιπτώσεις. Υπάρχουν και άλλοι τύποι, που μας βοηθούν στον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου, τους οποίους τους αναφέρουμε παρακάτω.

5.3.3 Τύπος διαγωνίων

Όπως στον τύπο του τετραγώνου μπορούμε να υπολογίσουμε τον τύπο διαγωνίων, που συνδέει το δυναμικό το σημείο 0 με τα δυναμικά των διαγώνιων σημείων 5…8.

$$\phi_0 = \frac{1}{4}\sum_{i=5}^{8}\phi_i \tag{5.8}$$

5.3.4 Τύπος συμμετρίας

Εάν υπάρχει συμμετρία ως προς τον άξονα των x θα είναι $\varphi_2 = \varphi_4$ και :

$$\phi_0 = \frac{1}{4}(\phi_1 + \phi_3 + 2\phi_2) \tag{5.9}$$

Εάν υπάρχει συμμετρία ως προς τον άξονα των y θα είναι $\varphi_1 = \varphi_3$ και :

$$\phi_0 = \frac{1}{4}(\phi_2 + \phi_4 + 2\phi_1) \tag{5.10}$$

Εάν υπάρχει συμμετρία ως προς τη διαγώνιο 5 – 0 – 7, θα είναι $\varphi_1 = \varphi_2, \varphi_3 = \varphi_4$ και :

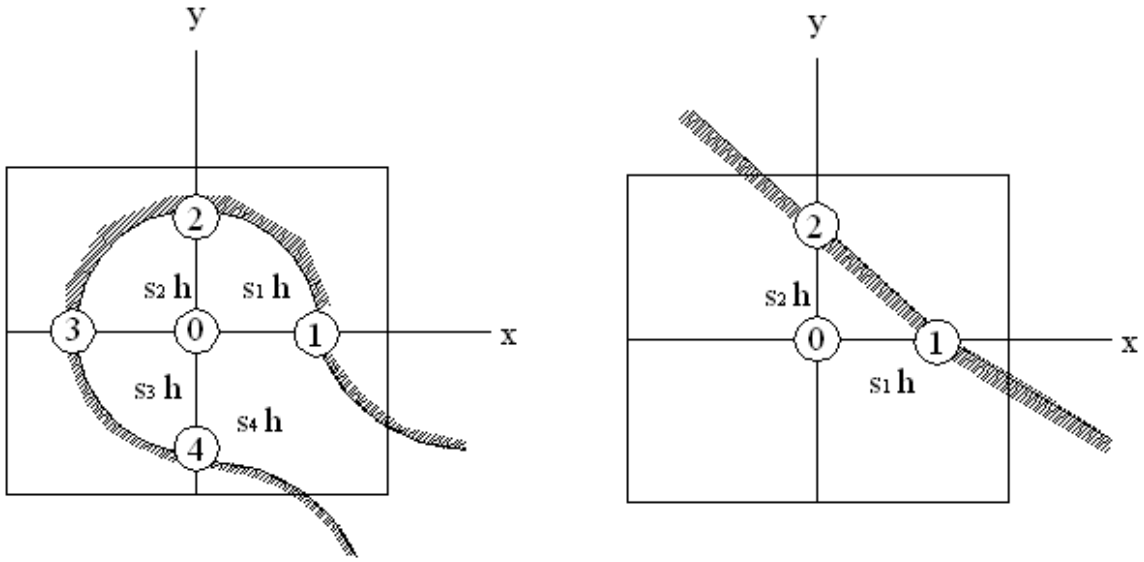
$$\phi_0 = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_4) \tag{5.11}$$

Εάν υπάρχει συμμετρία ως προς τη διαγώνιο 6 – 0 – 8, θα είναι $\varphi_3 = \varphi_2, \varphi_1 = \varphi_4$ και :

$$\phi_0 = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2) \tag{5.12}$$

5.3.5 Τύπος ορίου περιοχής

Όταν τα σημεία μας βρίσκονται στο όριο μιας περιοχής, ενδέχεται να μην είναι οι αποστάσεις μεταξύ τους ίσες προς την ενιαία απόσταση h αλλά να είναι τμήμα sh αυτής με $0 \leq s \leq 1$. Στο αριστερό από τα δύο σχήματα, στο Σχήμα 5.17 , και τα 4 σημεία 1,2,3,4 εμφανίζουν το χαρακτηριστικό αυτό. Εδώ ισχύει :



Σχήμα 5.20 Προς εξαγωγή των τύπων υπολογισμού των δυναμικών σε όρια περιοχών

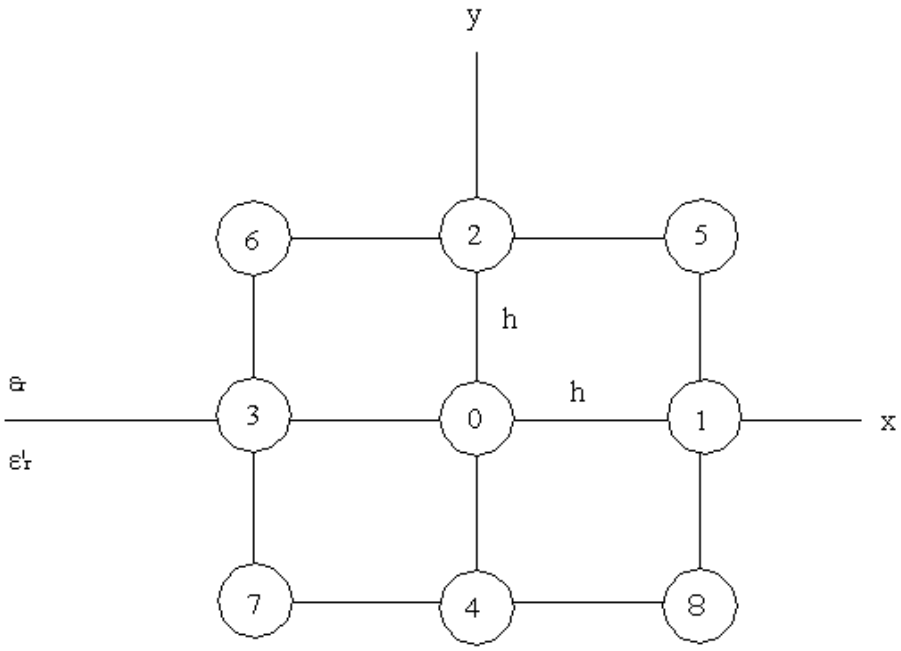
$$\phi_0 = \frac{\dfrac{1}{s_1+s_3}\left(\dfrac{\phi_1}{s_1}+\dfrac{\phi_3}{s_3}\right)+\dfrac{1}{s_2+s_4}\left(\dfrac{\phi_2}{s_2}+\dfrac{\phi_4}{s_4}\right)}{\dfrac{1}{s_1+s_3}+\dfrac{1}{s_2+s_4}} \qquad (5.13)$$

Από την σχέση αυτή, για s1= s2= s3= s4=1, προκύπτει ο τύπος του τετραγώνου. Εξ άλλου, στην ειδική περίπτωση του δεξιού από τα Σχήματα 5.17 ισχύει :

$$\phi_0 = \frac{\dfrac{1}{s_1+1}\left(\dfrac{\phi_1}{s_1}+\phi_3\right)+\dfrac{1}{s_2+1}\left(\dfrac{\phi_2}{s_2}+\phi_4\right)}{\dfrac{1}{s_1}+\dfrac{1}{s_2}} \qquad (5.14)$$

5.3.6 Τύπος διηλεκτρικής σταθεράς

Αν ο τύπος του τετραγώνου πρέπει να εφαρμοσθεί σε οριακή επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών υλικών, σχετικών διηλεκτρικών σταθερών εr και ε΄r τότε έχουμε :



Σχήμα 5.21 Προς διατύπωσης του τύπου των δυναμικών στη γειτονία της οριακής επιφάνειας μεταξύ δύο διηλεκτρικών.

Τύπος τετραγώνου :

$$\phi_0 = \frac{1}{4}\left[\phi_1 + \phi_3 + \frac{2}{1+\frac{\varepsilon'_r}{\varepsilon_r}}\left(\phi_2 + \frac{\varepsilon'_r}{\varepsilon_r}\phi_4\right)\right] \qquad (5.15)$$

Τύπος διαγωνίων :

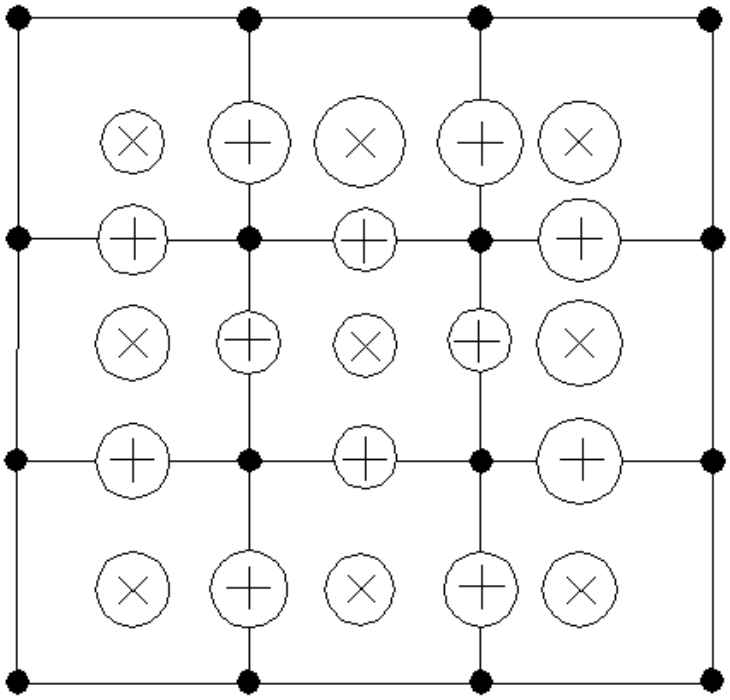
$$\phi_0 = \frac{1}{2\left(1+\frac{\varepsilon'_r}{\varepsilon_r}\right)}\left[\phi_5 + \phi_6 + \frac{\varepsilon'_r}{\varepsilon_r}\phi_7 + \phi_8\right] \qquad (5.16)$$

Για ε΄r = εr λαμβάνουμε τις κανονικές σχέσεις τετραγώνου και διαγωνίων.

5.3.7 Μείωση των διαστάσεων του πλέγματος

Αν σε μία περιοχή του πεδίου, θέλουμε να γίνει πιο λεπτομερής υπολογισμός του δυναμικού, τότε μπορούμε να μειώσουμε τις διαστάσεις του πλέγματος των σημείων, των οποίων υπολογίζεται το δυναμικό.
Έστω ότι στο Σχήμα 5.19, είναι γνωστά τα δυναμικά στους κόμβους του πλέγματος στα σημεία που χαρακτηρίζονται με • .Τότε εάν εφαρμόσουμε τον τύπο των διαγωνίων, μπορούμε να βρούμε τα δυναμικά στα κέντρα των διαδοχικών τετραγώνων του πλέγματος δηλαδή στα σημεία που χαρακτηρίζονται με $\otimes$, δηλαδή σε 9 επί πλέον σημεία στο σχήμα.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε τα νέα αυτά σημεία και εφαρμόζοντας τον τύπο του τετραγώνου, υπολογίζουμε τα δυναμικά στα σημεία που χαρακτηρίζονται με ⊕ και που είναι άλλα 12. Έτσι έχουμε, στην περιοχή του σχήματος, μείωση στο μισό την απόσταση του πλέγματος, πράγμα που μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το δυναμικό με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Σχήμα 5.22 Προς εκλέπτυνση του πλέγματος σημείων των οποίων υπολογίζεται το δυναμικό.

- σημεία με δεδομένο δυναμικό
- ⊗ σημεία των οποίων το δυναμικό υπολογίζεται με το τύπο διαγωνίων
- ⊕ σημεία των οποίων το δυναμικό υπολογίζεται με τον τύπο του τετραγώνου

5.3.8 Παράδειγμα Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου με την Βοήθεια του Liza

Το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ δύο πλακών. Οι πλάκες είναι 0,005 m μεταξύ τους με τον αέρα σε-μεταξύ και διαφορά δυναμικού 1.5V.

Η αναμενόμενη Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου,

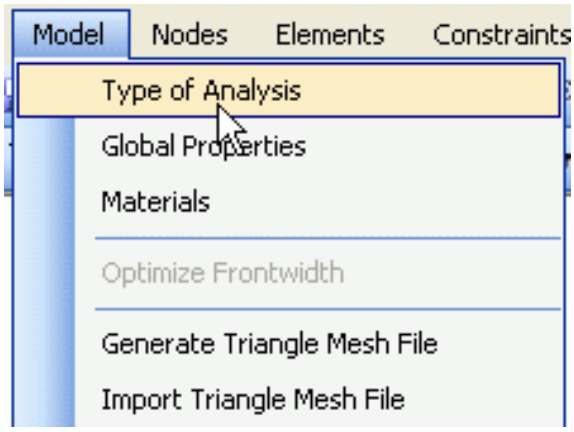
E = διαφορά δυναμικού / απόσταση μεταξύ πλακών

E = 1,5 / 0.005 = 300 V / m

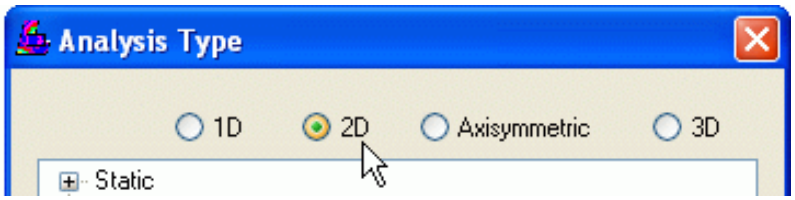
Επίλυση στο Liza

<u>Βήμα 1</u> Επιλέγουμε την ανάλυση

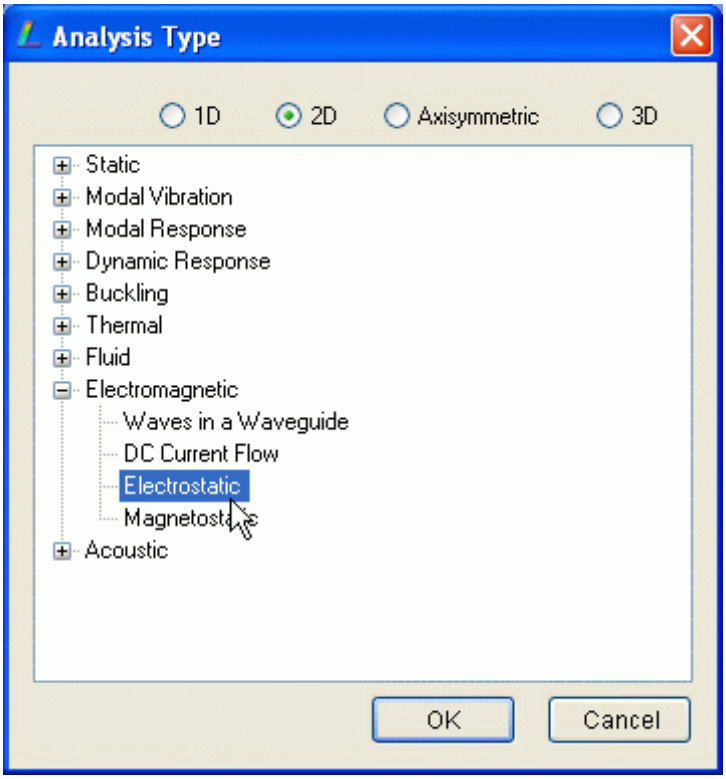
Από το μενού «model» επιλέγουμε το «type of analysis»



Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται, πρώτα καθορίζουμε ότι αυτό που πρόκειται να είναι σε 2D ανάλυση.



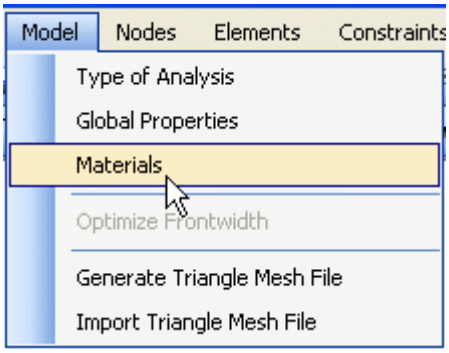
Ο κατάλογος των τύπων ανάλυσης θα ενημερωθεί ώστε να αντικατοπτρίζει τις παραπάνω επιλογές. Τώρα, επιλέγουμε το «electrostatic» επιλογή υπό τον τίτλο «electromagnetic».



Κάνουμε κλικ στο "Ok" για να βγούμε από το παράθυρο.

<u>Βήμα 2</u> Ιδιότητες υλικών

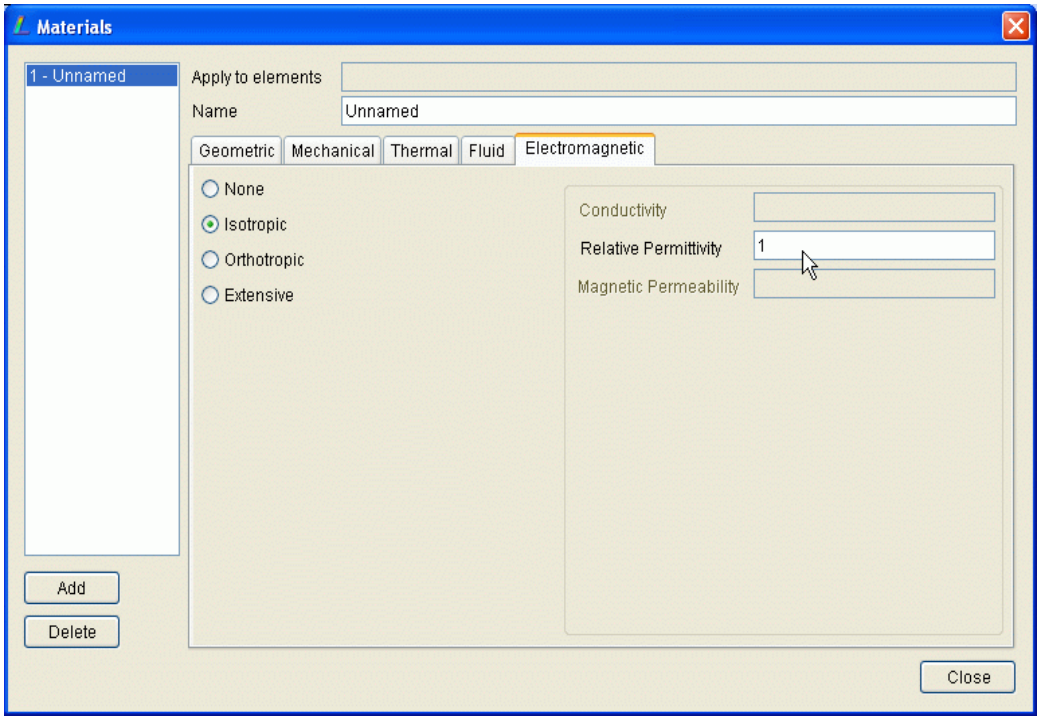
Ορισμός υλικού σε αυτό το βήμα, αργότερα θα σχετίζεται με στοιχεία που πρόκειται να δημιουργηθεί. Πατάμε την εντολή «materials» από το μενού «model»



Κάνουμε κλικ στο κουμπί «add» στην κάτω αριστερή γωνία του διαλόγου που εμφανίζεται



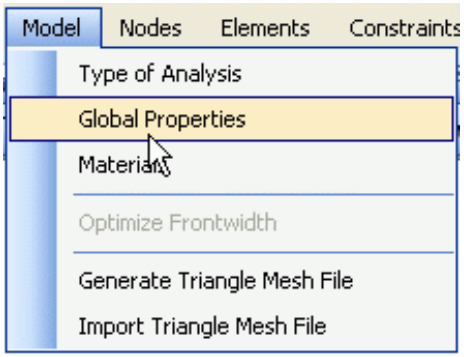
Στην ηλεκτρομαγνητική καρτέλα, επιλέγουμε «isotropic» και εισάγουμε τη σχετική διηλεκτρική για τον αέρα.



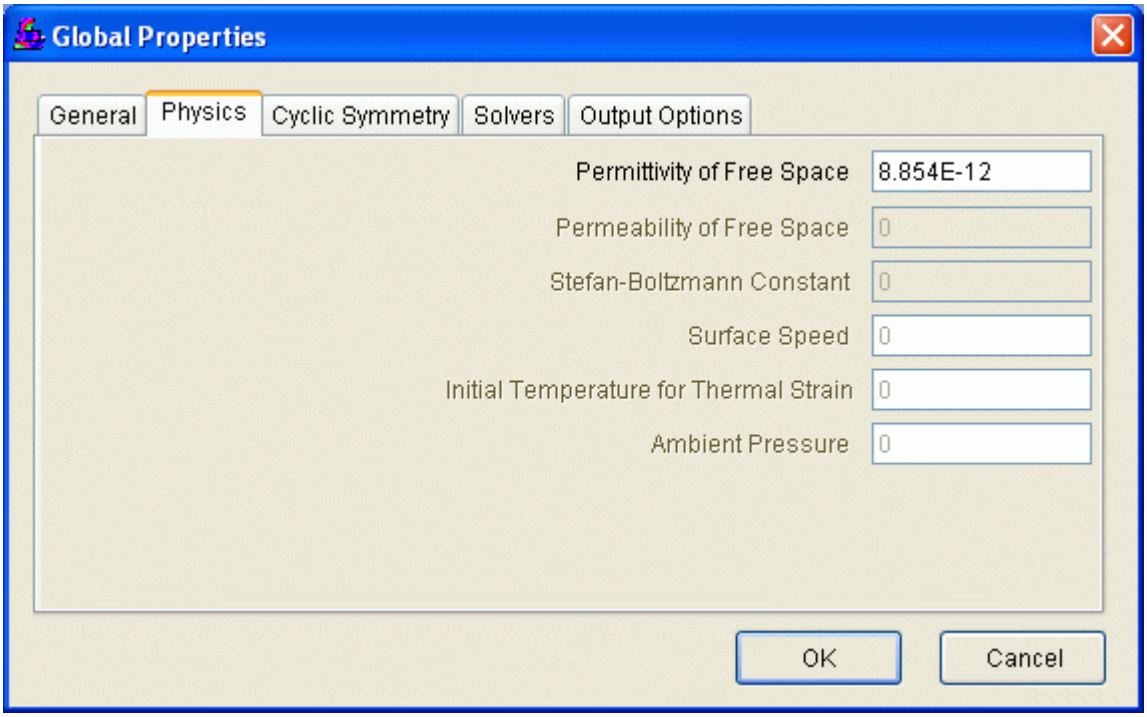
Κάνουμε κλικ στο κουμπί «Close» για να βγούμε από το παράθυρο.

<u>Βήμα 3 Δημιουργία κόμβων</u>

Επιλέγουμε από το μενού model την επιλογή «global properties»

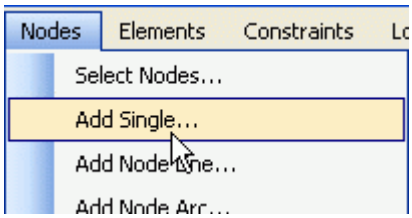


Στην καρτέλα «physics», εισάγουμε 8.854E-12 για τη διηλεκτρική του ελεύθερου χώρου



Κάνουμε κλικ στο "Ok" για να βγούμε από το παράθυρο.

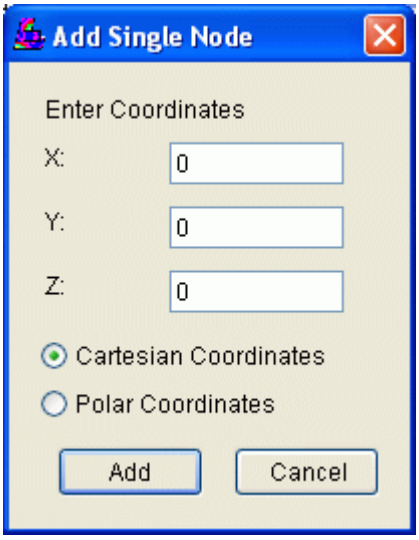
Επιλέγουμε το «add single» από το μενού κόμβους – nodes.



ή



Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται εισάγουμε τις ακόλουθες συντεταγμένες:

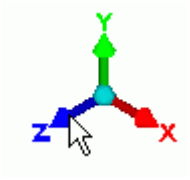


Κάνουμε κλικ στο κουμπί «add – (προσθέτω)». Δημιουργούμε περισσότερους κόμβους με τις ακόλουθες συντεταγμένες.

0,015, 0, 0
0,015, 0,005, 0
0, 0,005, 0

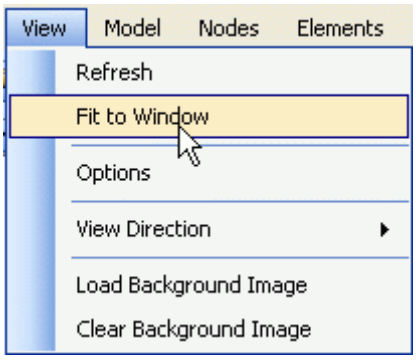
Κάνουμε κλικ στο «Cancel - (άκυρο)» για να βγούμε από το παράθυρο.

Για να δούμε το παράλληλο επίπεδο XY για την παρακολούθηση της οθόνης, επιλέγουμε



ή 

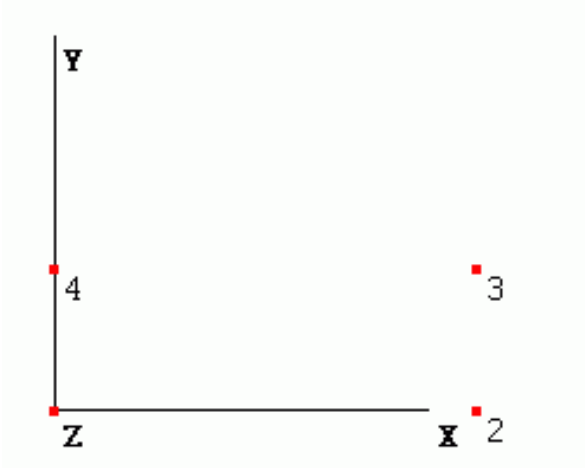
Για να αλλάξουμε το μέγεθος του για να συμπληρώσουμε τη χρήση οθόνη πατάμε από την γραμμή μενού «View – (Προβολή)» και επιλέγουμε «Fit to Window – (Προσαρμογή στο παράθυρο)».



ή 

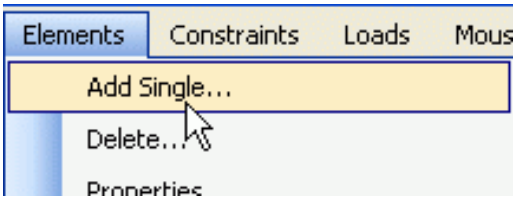
Για να δούμε τον κόμβο αριθμούς επιλέγουμε «Options – (Επιλογές)» από το μενού «View – (Προβολή)» επιλέγουμε το check-box για το «node numbers – (αριθμούς κόμβους)».

Το μοντέλο θα εμφανιστεί ως εξής :



<u>Βήμα 4 Δημιουργία ενός στοιχείου</u>

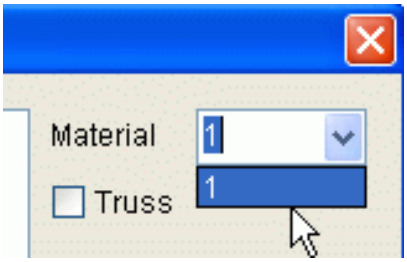
Επιλέγουμε από το μενού Elements την επιλογή «Add Single»



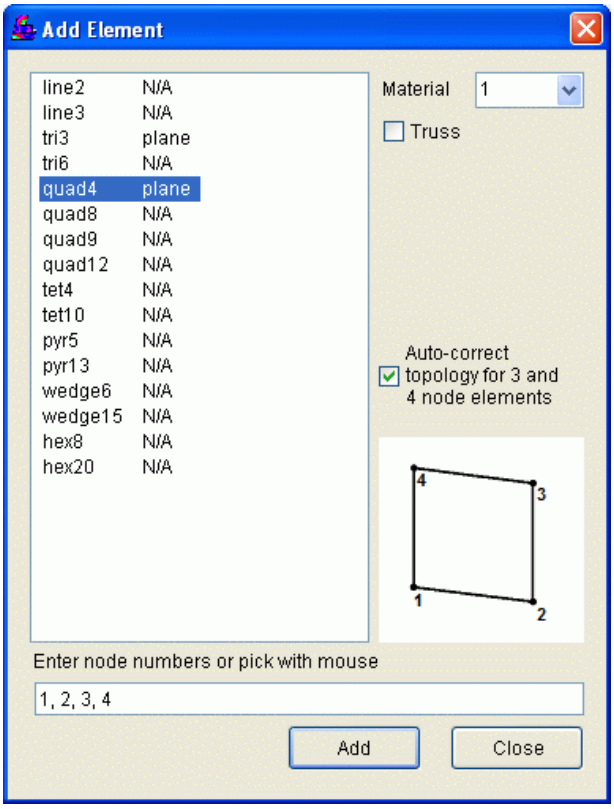
ή



Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται, επιλέγουμε το στοιχείο «quad4 plane» και βεβαιωνόμαστε ότι το υλικό που σχετίζεται με το στοιχείο που δημιουργείται είναι η ύλη 1.

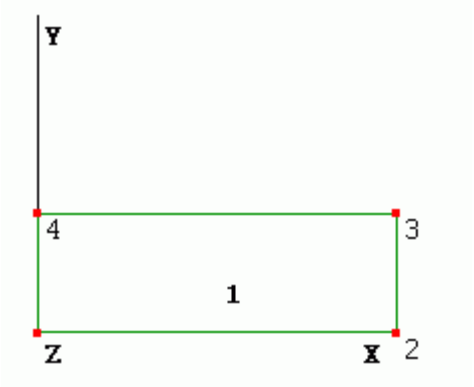


Εισάγουμε τους αριθμούς 1,2,3,4 για τους κόμβους.

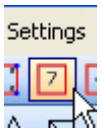


Κάνουμε κλικ στην επιλογή «Add – Προσθήκη» για να δημιουργήσουμε το στοιχείο, και μετά «Close» για να βγούμε από το παράθυρο.

Για να εμφανίσουμε τον αριθμό στοιχείο, στο παράθυρο διαλόγου επιλογές επιλέγουμε το «elements numbers»



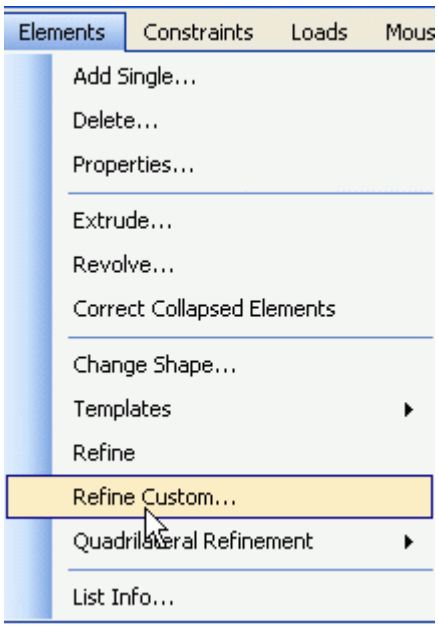
ή



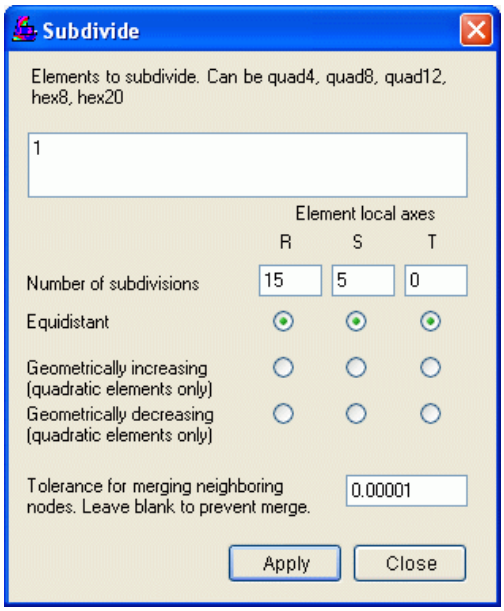
<u>Βήμα 5 Υποδιαιρώντας το στοιχείο</u>

Ένα μόνο στοιχείο που είναι πολύ χοντρό ,θα χωριστεί σε μικρότερα στοιχεία με μεγαλύτερη ακρίβεια λαμβάνονται υπόψη τις διακυμάνσεις της δομής.

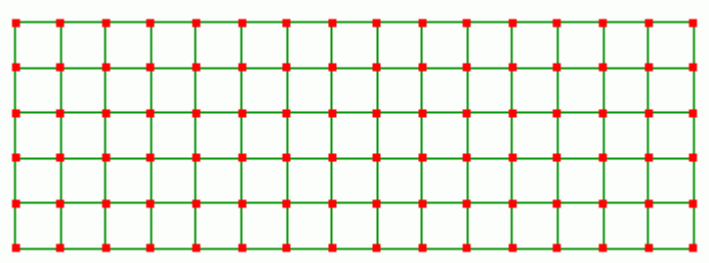
Επιλέγουμε από το μενού Elements «refine custom»



Στο παράθυρο διαλόγου πληκτρολογούμε τον αριθμό των κάθετων διαιρέσεων 15, οριζόντιων τμημάτων 5 και αριθμός στοιχείου είναι 1. Όλες οι εργασίες δημιουργίας πλέγματος δημιουργούν αντίγραφο κόμβων που πρέπει να εξαλειφθούν είτε τώρα είτε αργότερα. Για να εξαλείψουμε διπλούς κόμβους σε αυτό το βήμα, μια αυθαίρετη μικρή αξία των 0,00001 έχει χρησιμοποιηθεί. Αυτή είναι η ακτίνα μέσα στην οποία κάθε κόμβος που βρέθηκε θα συγχωνευθεί σε ένα ενιαίο κόμβο.



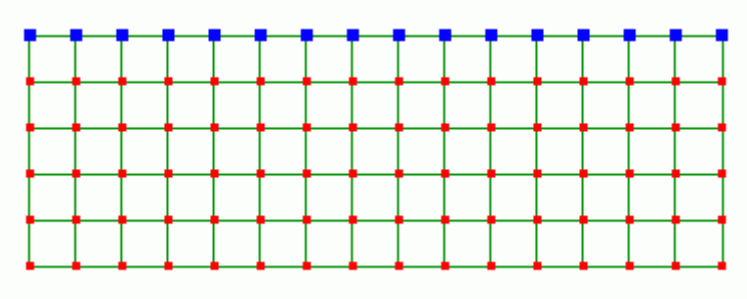
Κάνουμε κλικ στο «Apply – Εφαρμογή» για να δημιουργήσουμε το πλέγμα.



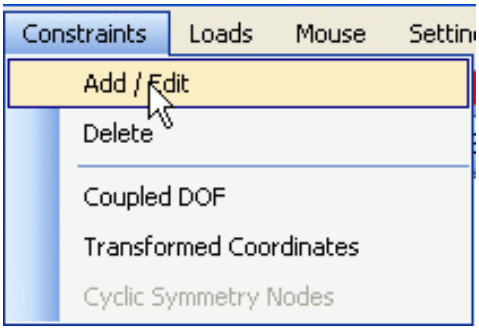
Οι αριθμοί των κόμβων και τα σημεία έχουν απενεργοποιηθεί για να βελτιώσει τη σαφήνεια.

Βήμα 6 Καθορισμός η διαφορά δυναμικού

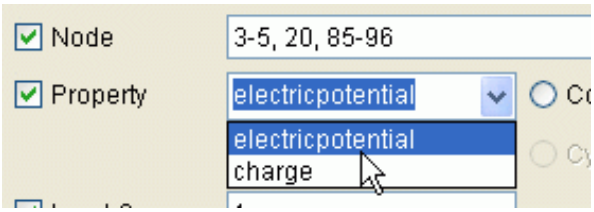
Το άνω άκρο έχει ένα δυναμικό της τάξης του 1,5 V. Σύρουμε το ποντίκι πάνω από τους κόμβους στο πάνω χείλος, ώστε να γίνει επιλογή.



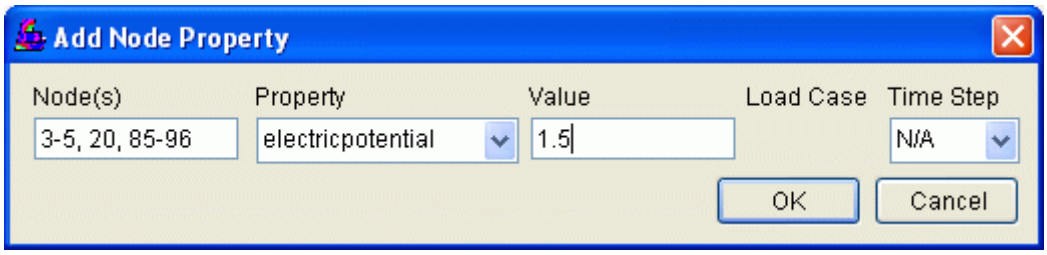
Επιλέγουμε «Add / Edit - Προσθήκη / Επεξεργασία» από το μενού περιορισμούς - constraints.



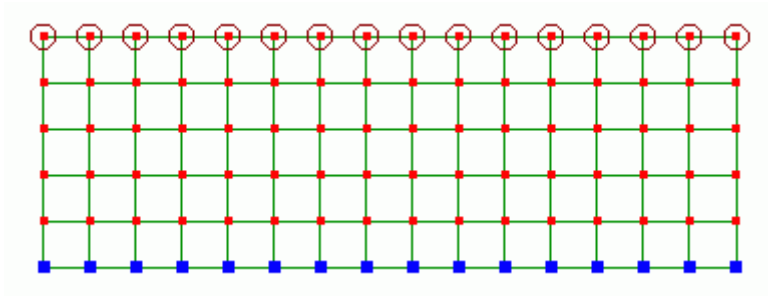
Επιλέγουμε «electricpotential»από την αναπτυσσόμενη λίστα.



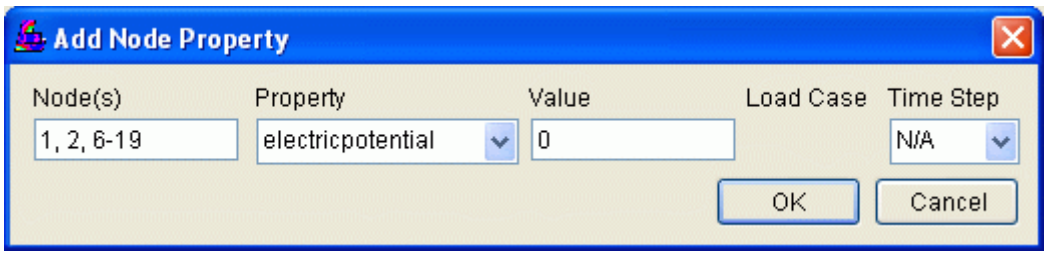
Κάνουμε κλικ στο κουμπί «Add –Προσθήκη». Στο παράθυρο διαλόγου, εισάγουμε την τιμή της διαφοράς δυναμικού.

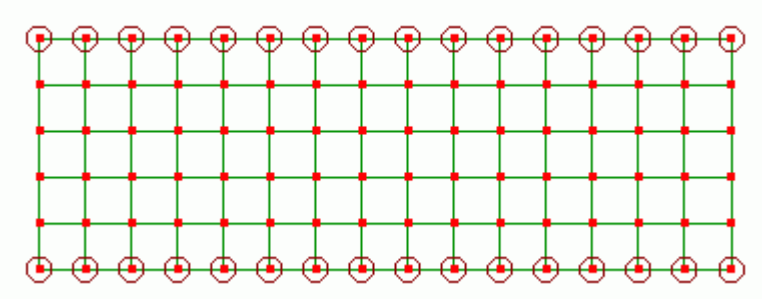


Κάνουμε κλικ στο «OK» για να βγούμε από το παράθυρο. Και μετά πατάμε «Close». Επιλέγουμε τους κόμβους στο κάτω άκρο.



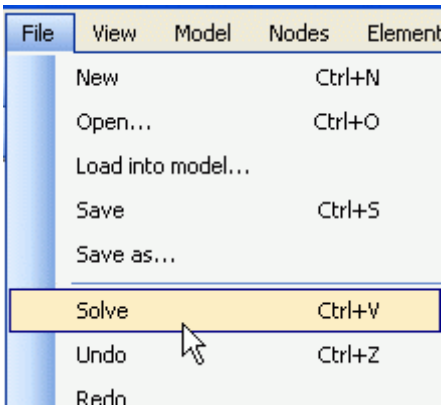
Επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα, αλλά αυτή τη φορά στη διαφορά δυναμικού βάζουμε 0.



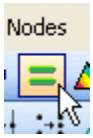


Βήμα 7 Εκτέλεση του solver

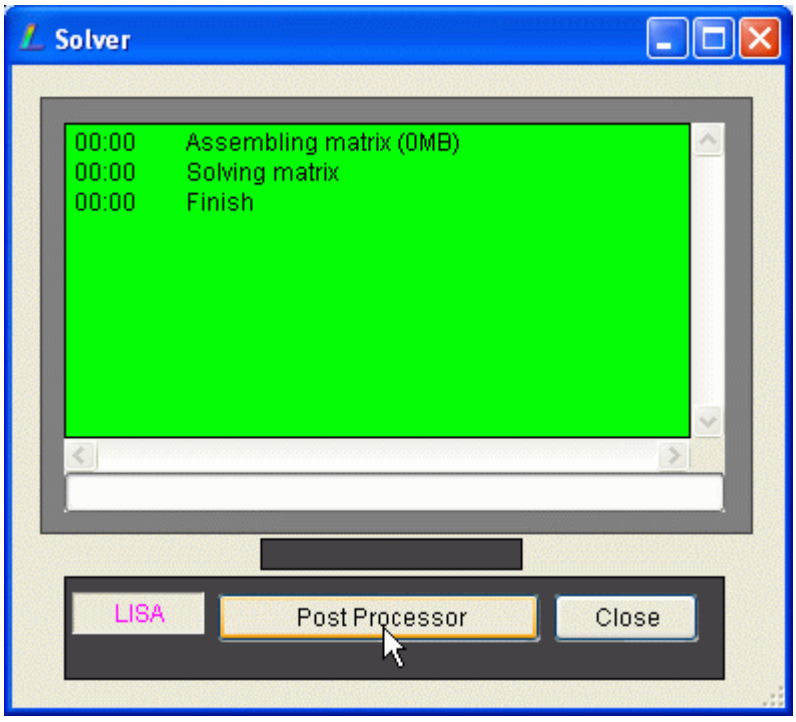
Για την επίλυση του μοντέλου, επιλέγουμε «solve – λύση» από το μενού αρχείο – File .



ή



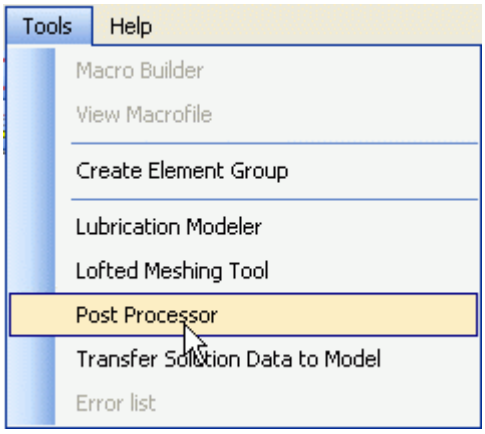
Μετά το τέλος της λύσης, κάνουμε κλικ στο κουμπί «Post Pocessor – επεξεργαστή».



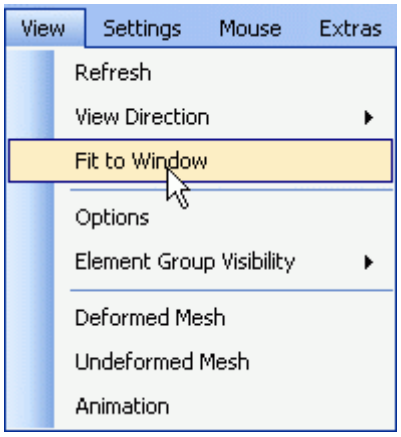
Πριν προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στο ίδιο αρχείο με τα δεδομένα του μοντέλου.

Βήμα 8 Έλεγχος των αποτελεσμάτων των αναλύσεων

Αν ο «Post Pocessor – επεξεργαστή» δεν εμφανίζεται ήδη, τότε από το μενού εργαλεία – tools τον επιλέγουμε.



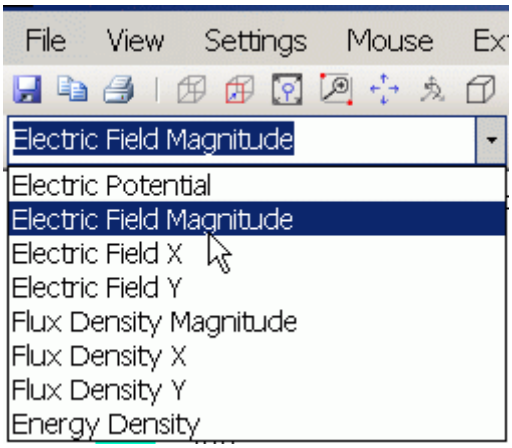
Για να γεμίσουμε την οθόνη με το μοντέλο επιλέγουμε από το μενού View , «Fit to Windows».

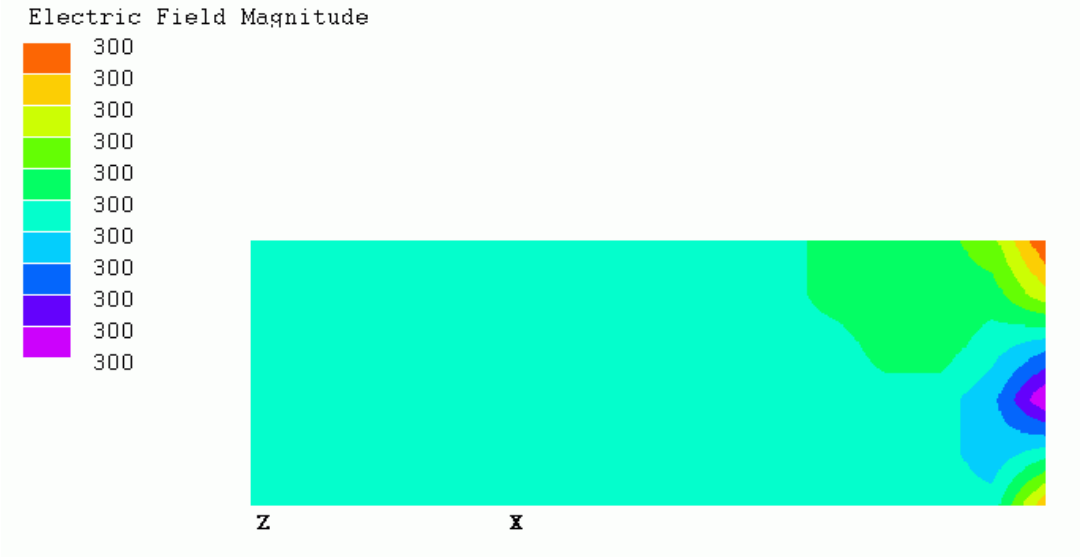


ή



Από την αναπτυσσόμενη λίστα επιλέγουμε «electric field magnitube - ηλεκτρικό μέγεθος πεδίου».





Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η υπολογιζόμενη αξία είναι η αναμενόμενη 300 V / m.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Π. Κούκου Καθ. Εφαρμογών - Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων έτους 2003-2004.

[2] Παναγιώτη Ν. Νικολοπούλου – Υψηλές Τάσεις Τόμος Α Έκδοση 2η Αθήνα 1993.

[3] Αθανασόπουλος "Πεδιακή κατανομή πλησίον αλυσοειδών μονωτήρων - Πειραματική μελέτη" – Ε.Μ.Π. 2006.

[4] Tiebin Zhao, Michael G. Comber, "Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulatorsconsidering the effects of conductorsand trnsmition towers", IEEE Transactions on power delivery, vol 15, no. 1, January 2000.

[5] J. L. Rasolonjanahary, L. Krahenbuhl, A. Nicolas, "Computation of electric fields and potential on polluted insulators using a boundary element method", IEEE Transactions on magnetics, vol. 28, no. 2, March 1992. Q. S. Huang, "Applications nouvelles de la methode des equationsintegrales de frontiere en electrotechnique", These E.C.L., 1987

[6] P. Auriol, Q. S Huang, L Krahenbuhl, "Numerical simulation of the conducting surface of high voltage insulating systems in 3D", IEEE Transactions on magnetics, vol. 24, no. 1, August 1987.

[7] S. Chakravorti and P. K. Mukherjee, "Power frequency and impulse field calculation around a HV insulator with uniform or nonuniform surface pollution", IEEE Transactions on electrical insulation, vol. 28, no. 1, February 1993.

[8] Skopec, J. G. Wankowicz, B. Sikorski, "Electric field calculation for an axially-symmetric insulator with surface contamination", IEEE Transactions on dielecrtics and electrical insulation, vol. 1, no. 2, April 1994

[9] E. Asenjo S., N. Morales O., A. Valdenegro E., "Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method", IEEE Transactions on dielecrtics and electrical insulation, vol. 4, no. 1, Febr. 1997.

[10] E. Asenjo S., N. Morales O. "Low frequency complex fields in polluted insulators", IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 17, no. 3, pp. 262 –268, June 1982.

[11] Imre Sebestyen, "Electric field calculation for HV insulators using domaindecomposition method", IEEE Transactions on magnetics, vol. 38, no. 2., March 2002.

[12] Ι. Α. Σταθόπουλος, "Υψηλές Τάσεις Ι", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα

[13] J. S. T. Looms, "Insulators for High Voltages", Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.

[14] Tomas Gustavsson: "Outdoor Aging of Silicone Rubber Formulations in Coastal Environment", Licentiate thesis. Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Technical report No. 353L, June 2000

[15] Κ. Θ. Δέρβος: «Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων», Αθήνα 2001

[16] Weiguo Que and Stephen A. Sebo, "Discussions of possible simplifications for the electric field and voltage distribution calculations along composite insulators", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003.

[17] Κ. Καγκαράκης, "Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.

[18] Ιωσήφ Σιουκιούρογλου, "Διηλεκτρική Συμπεριφορά Ρυπασμένων Μονωτήρων", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 1995.

[19] L.L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of discharges on polluted insulation", proc. IEE vol. 110, No. 7, July 1963.

[20] R. Wilkins, "Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films", proc. IEE Vol. 116, No. 3, March 1969.

[21] K. Gertsik, A. V. Korsunter and N. K. Nikolski, "The effect of fouling on insulators for HVDC overhead lines", Direct Current, 1957.

[22] N. Hylten-Cavallius, S. Annestrand, H. Wilth and V. Madzarevic "Insulation requirements, corona losses and corona radio interference for HVDC lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-83, 1964.

[23] J. S. Forrest, P. J. Lambeth, D. F. Oakeshott, "Research on the performance of high voltage insulators in polluted atmospheres", proc. IEE, 1960, 107, A.

[24] P. J. Lambeth, "Pollution performance of HVDC outdoor insulators", IEE Conf. Publ. 22, 1966.

[25] P. I. Shkuropat, "Development of a discharge on a wet insulator surface with DC", Leningrad Polytechnic Inst., 1957.

[26] Farouk Rizk and D. H. Nguyen, "Digital simulation of source-insulator interaction in HVDC pollution tests", IEEE Transactions on power delivery, vol. 3, no. 1, January 1988.

[27] Guan Zhicheng and Zhang Renyu, “Calculation of DC and AC flashover voltage of polluted insulators”, IEEE Transactions on electrical insulation, vol. 25, no. 4, August 1990.

[28] http://www.lisa-fet.com/ (Lisa 7.7.0 version)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

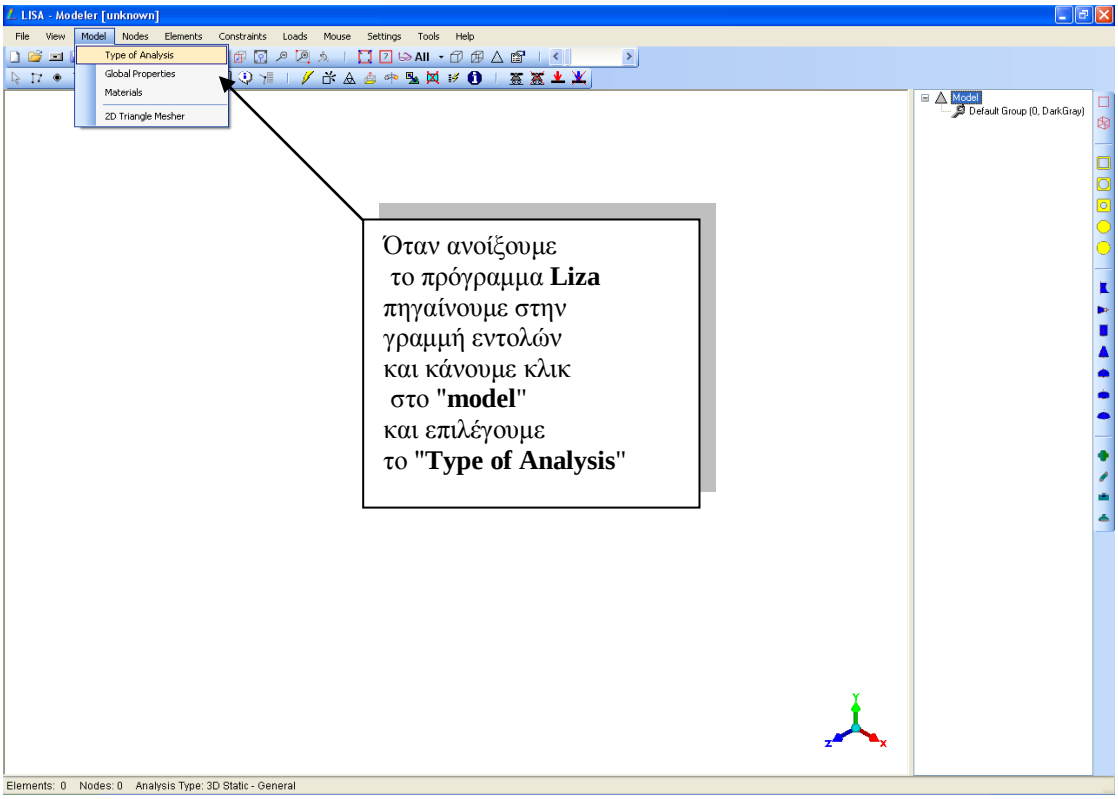
Το πρόγραμμα Liza μπορούμε να το βρούμε και να το κατεβάσουμε (download) στον υπολογιστή μας στην σελίδα www.liza-fet.com. Αφού κατεβάσουμε το πρόγραμμα στον υπολογιστή μας και για να μπορούμε να τρέξουμε το πρόγραμμα μας ο υπολογιστής θα πρέπει απαραίτητα να έχει τουλάχιστον τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

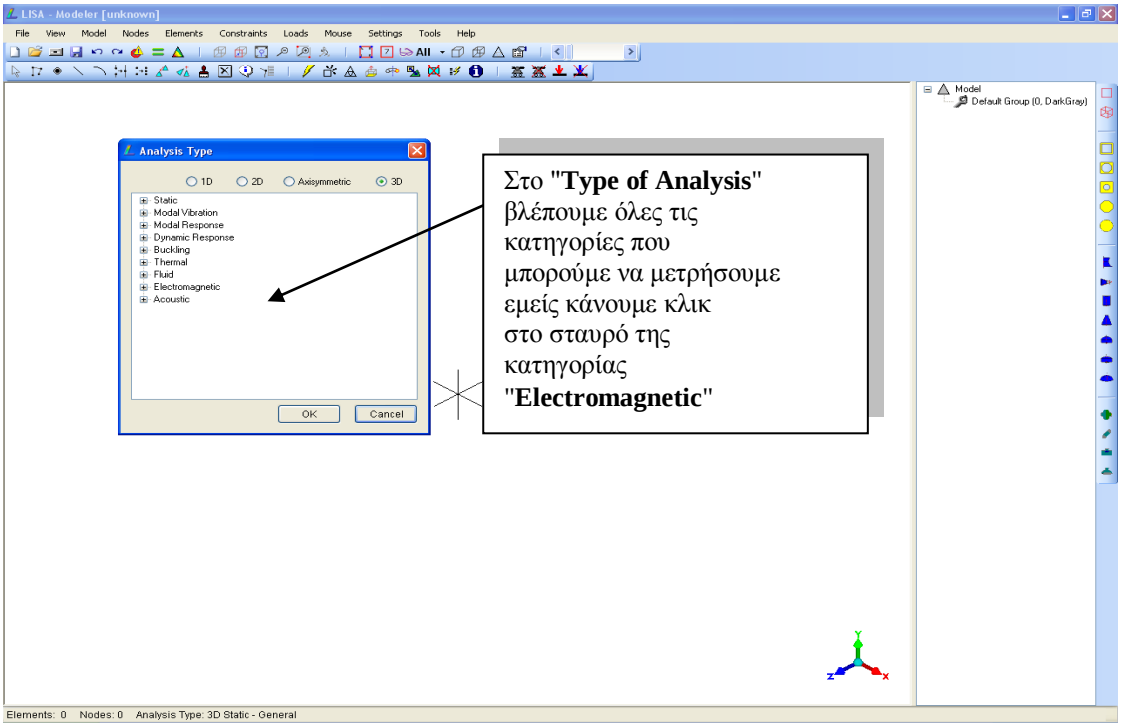
α) Λειτουργικό Windows XP, Windows Vista ή Windows 7 (32/64 bit)

β) Κάρτα γραφικών που να υποστηρίζει το Shader Model 1.1 ή νεότερη έκδοση

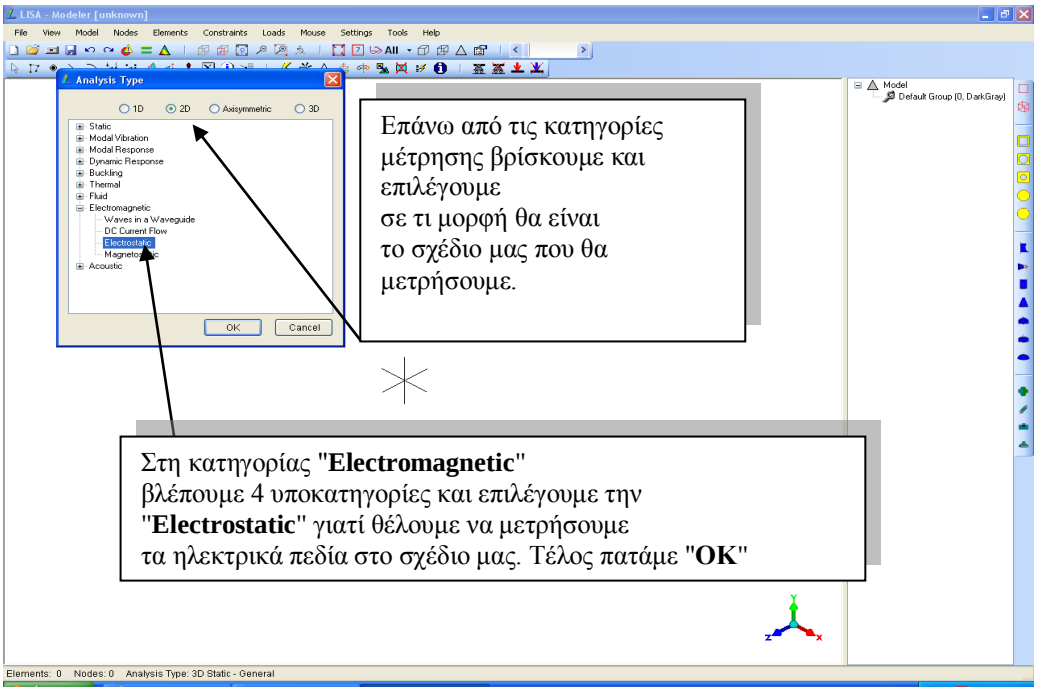
γ) Microsoft. Net 2,0 και 3,1 XNA. Εάν αυτά τα δύο δεν υπάρχουν στον υπολογιστή μας το πρόγραμμα εγκατάστασης θα τα κατεβάσει μέσω internet εφόσον απαιτείται στο υπολογιστή μας.

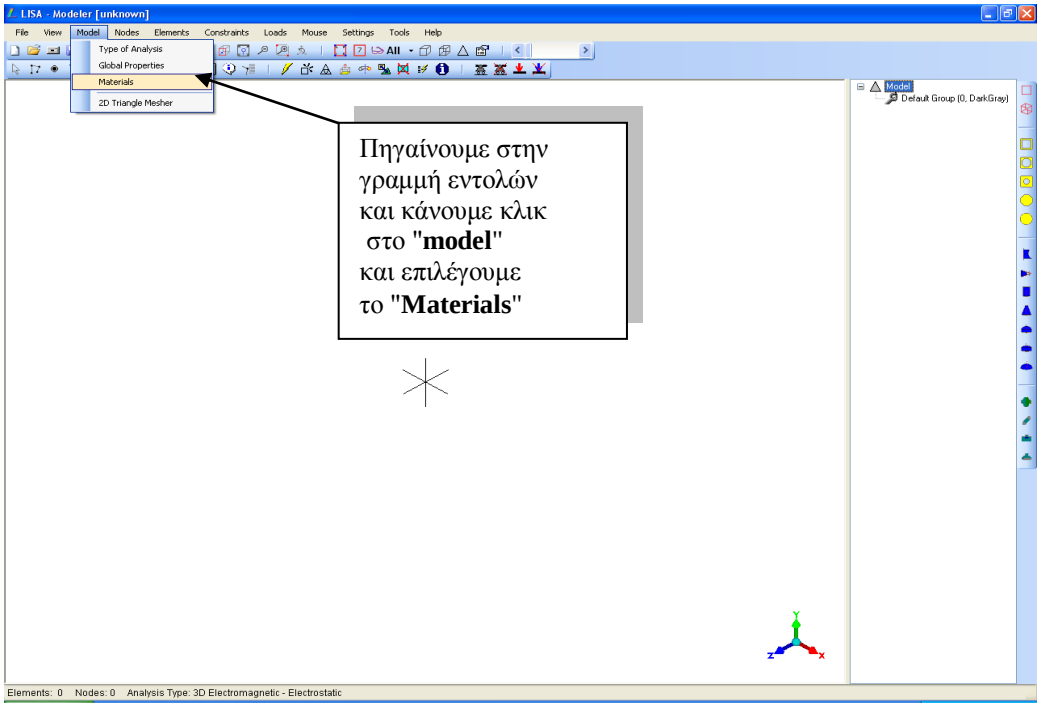
Μόλις το πρόγραμμα το κατεβάσουμε (download) στον υπολογιστή μας και έχουμε τα απαραίτητα χαρακτηριστικά τότε το εγκαθιστούμε (setup). Επομένως μόλις το εγκαταστήσουμε και ανοίξουμε – τρέξουμε το πρόγραμμα Liza για να κάνουμε τους υπολογισμού μας η πρώτη εικόνα είναι η παρακάτω.

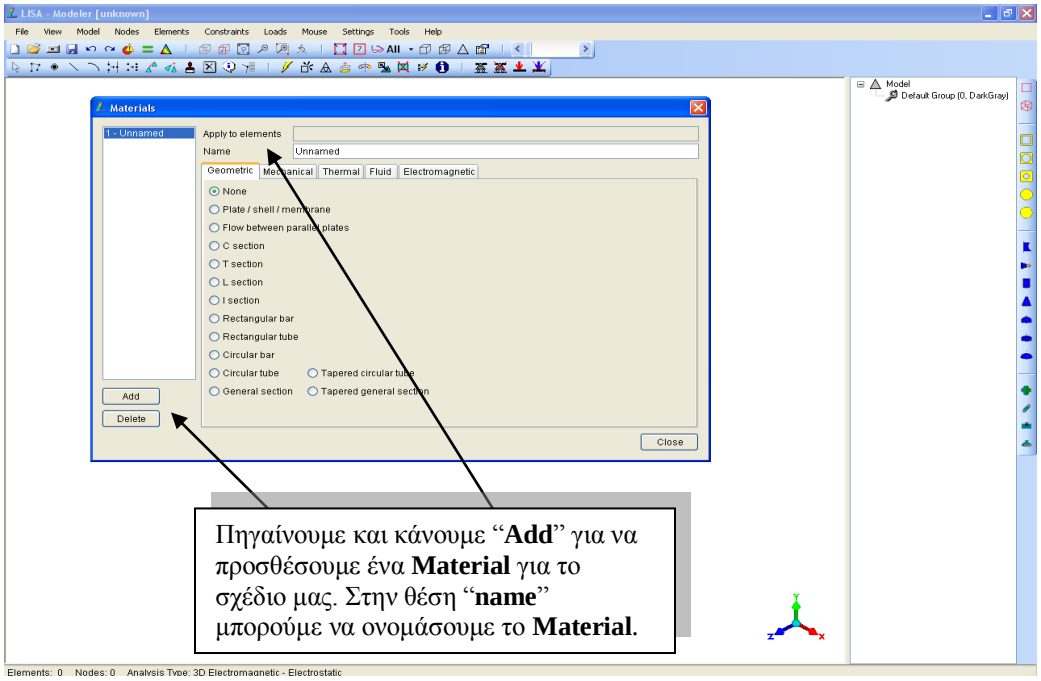


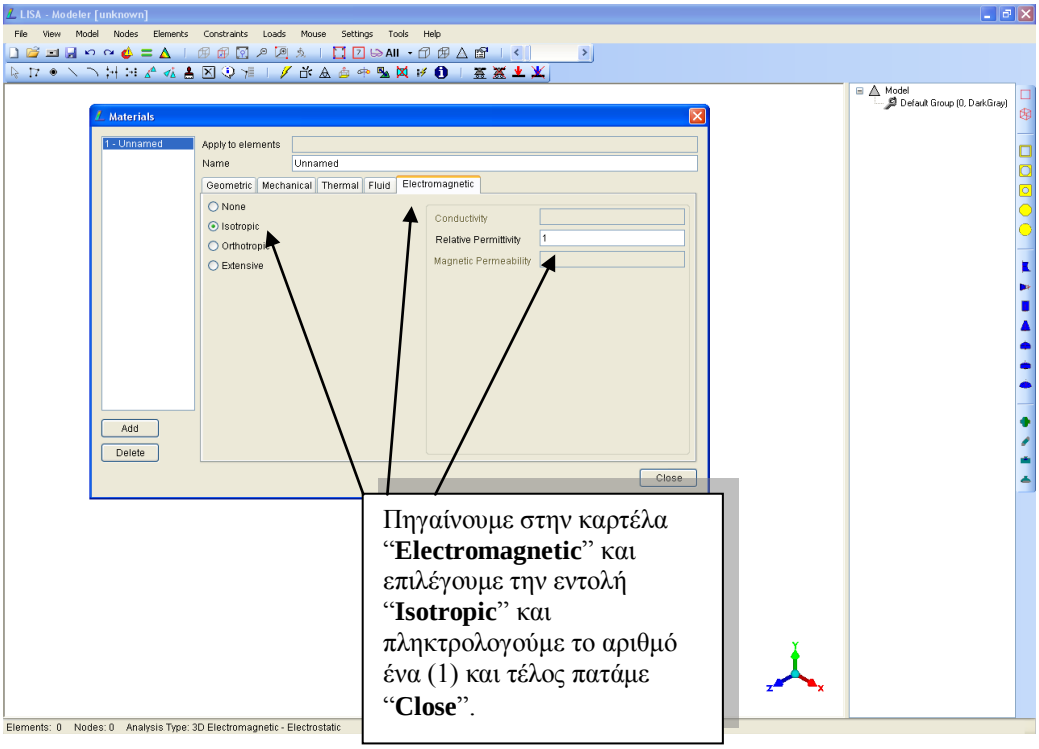


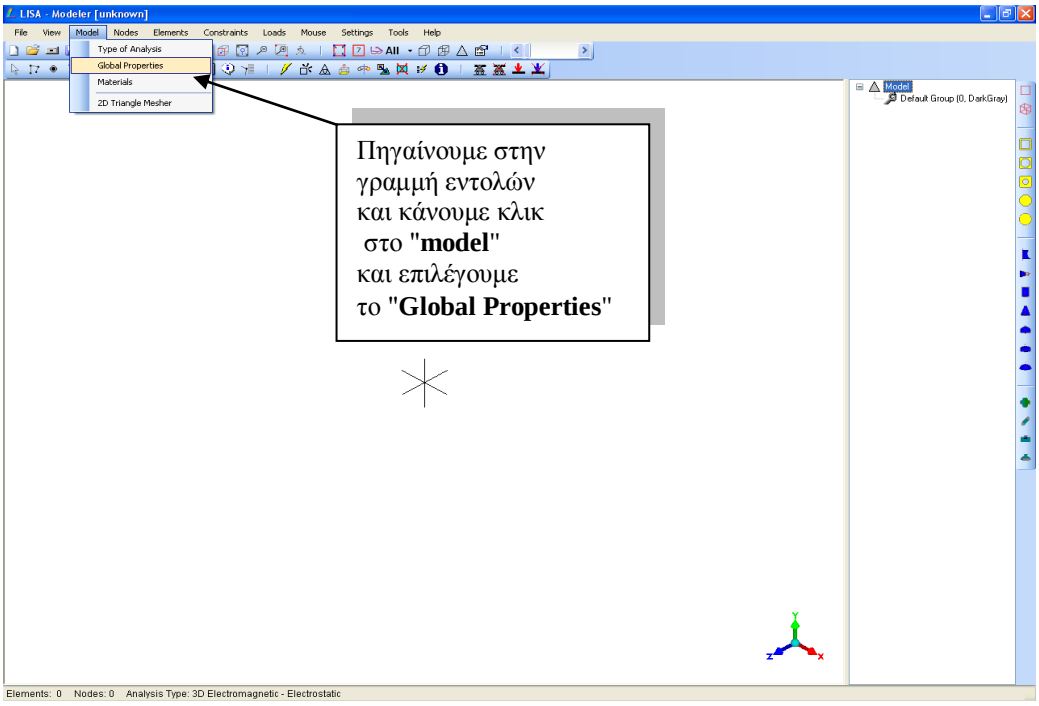
Πριν ξεκινήσουμε να σχεδιάζουμε το σχήμα το οποίο θα υπολογίσουμε το αυτό θα πρέπει να επιλέξουμε πιο πεδίο θέλουμε να υπολογίσουμε. Εμείς συγκεκριμένα θέλουμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο γιαυτό και επιλέγουμε από την κατηγορία Electromagnetic την υποκατηγορία Electrostatic.

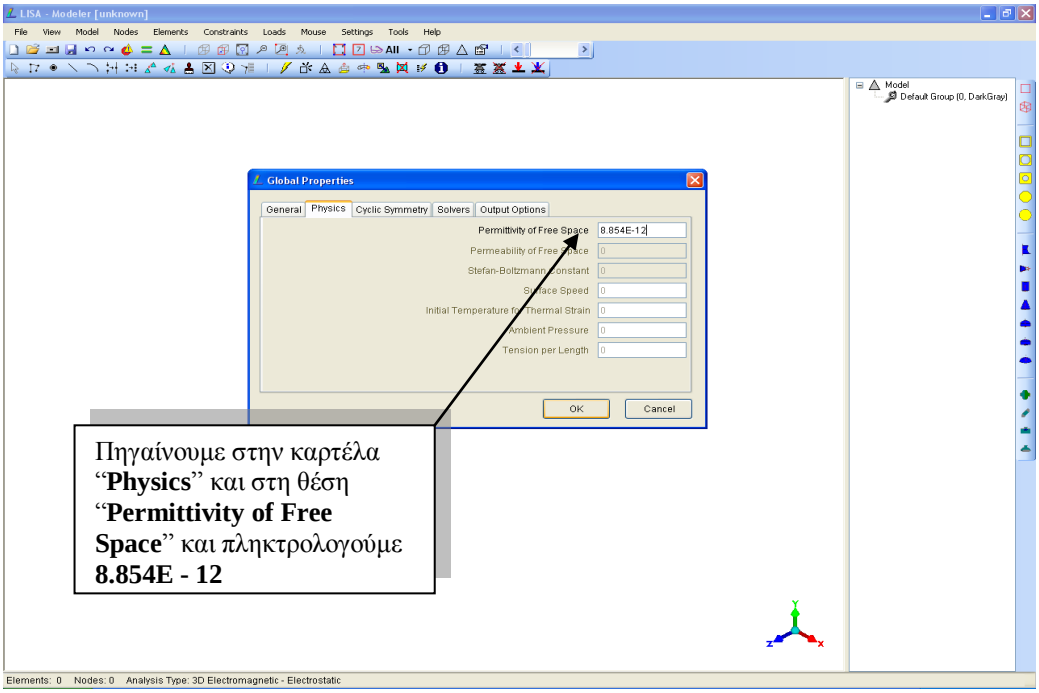


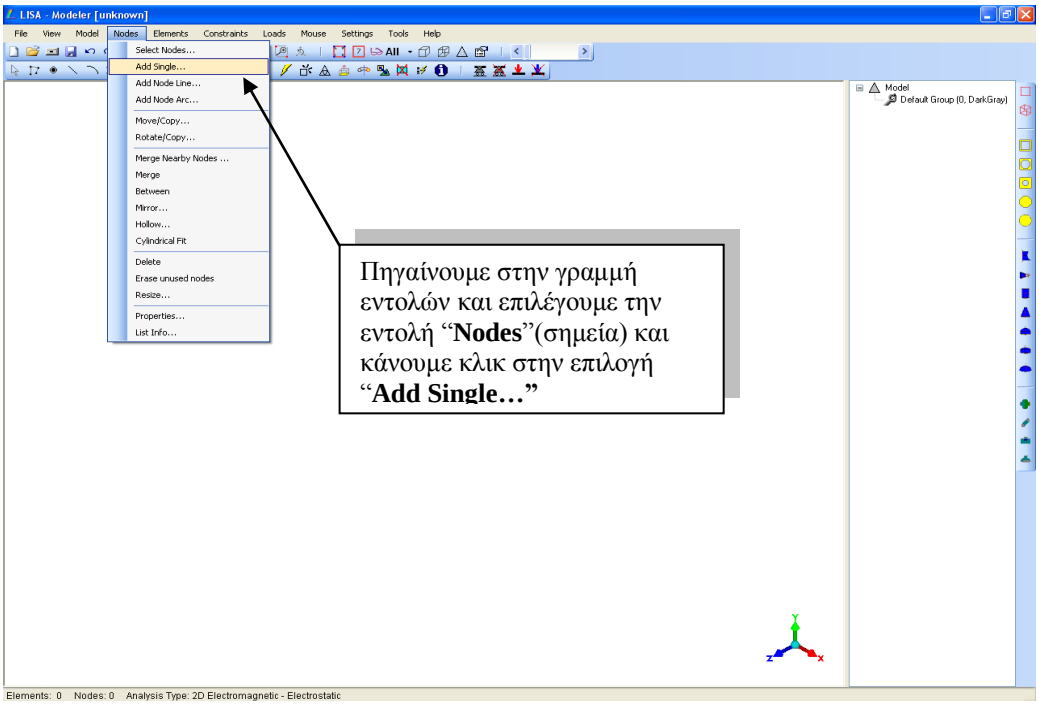

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Type of Analysis
Global Properties
Materials
2D Triangle Mesher
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών και κάνουμε κλικ στο "model" και επιλέγουμε το "Materials"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

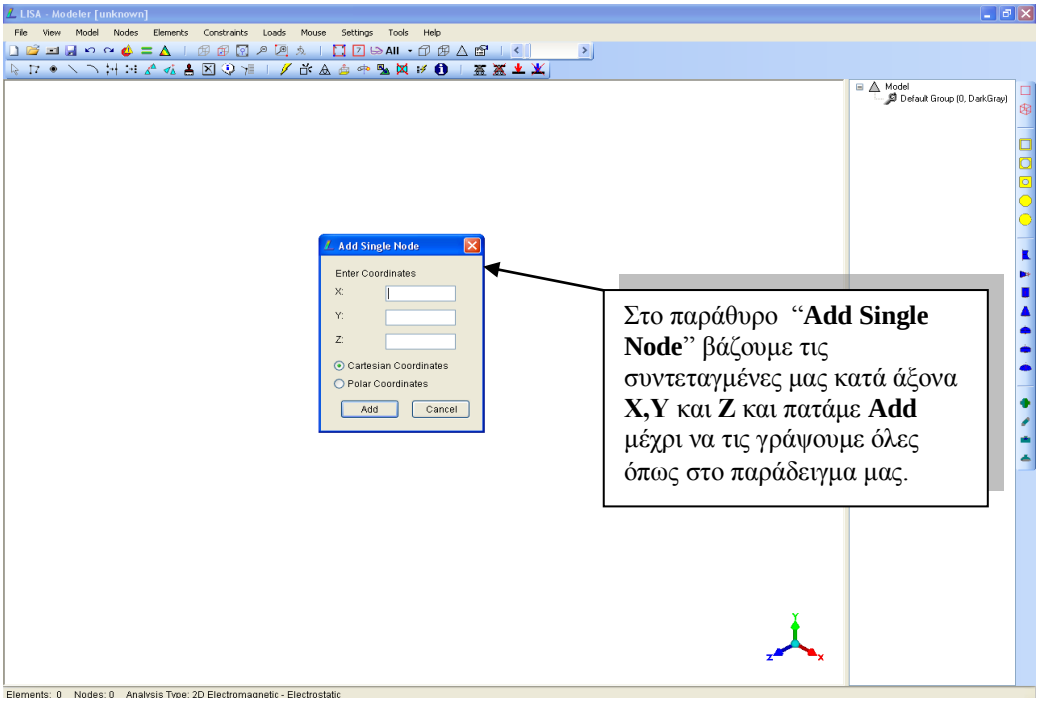

LISA - Modeler [unknown]
Materials
1 - Unnamed
Apply to elements
Name
Unnamed
Geometric
Mechanical
Thermal
Fluid
Electromagnetic
None
Plate / shell / membrane
Flow between parallel plates
C section
T section
L section
I section
Rectangular bar
Rectangular tube
Circular bar
Circular tube
Tapered circular tube
General section
Tapered general section
Add
Delete
Close
Πηγαίνουμε και κάνουμε "Add" για να προσθέσουμε ένα Material για το σχέδιο μας. Στην θέση "name" μπορούμε να ονομάσουμε το Material.
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic


LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Materials
1 - Unnamed
Apply to elements
Name
Unnamed
Geometric Mechanical Thermal Fluid Electromagnetic
None
Isotropic
Orthotropic
Extensive
Conductivity
Relative Permittivity
1
Magnetic Permeability
Add
Delete
Close
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην καρτέλα "Electromagnetic" και επιλέγουμε την εντολή "Isotropic" και πληκτρολογούμε το αριθμό ένα (1) και τέλος πατάμε "Close".
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

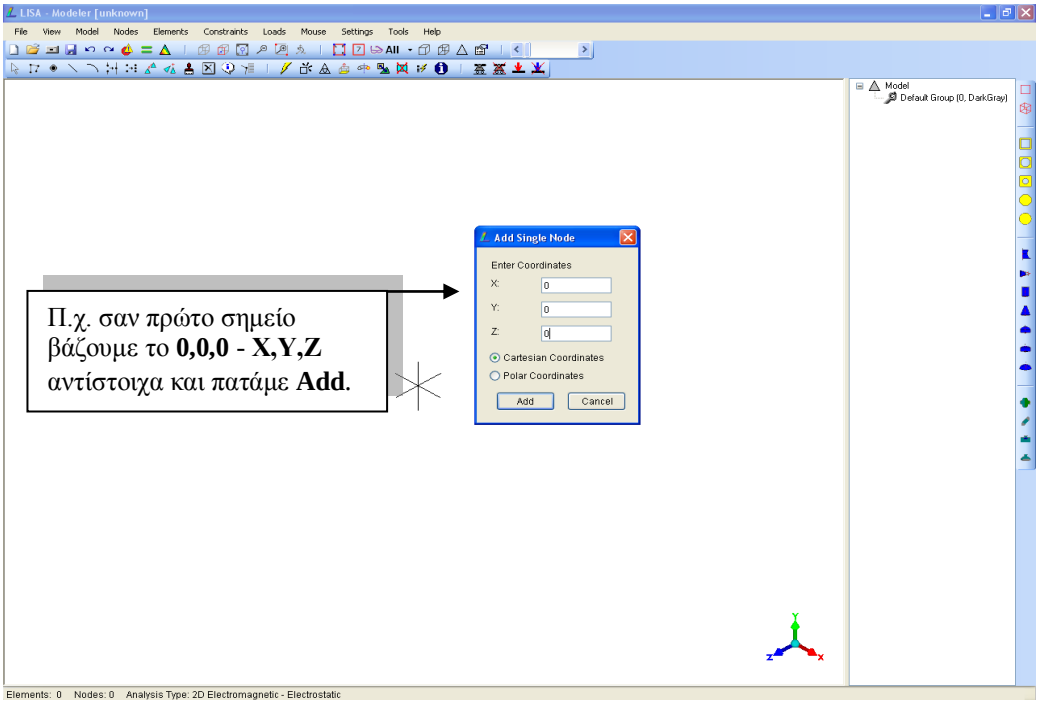

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Type of Analysis
Global Properties
Materials
2D Triangle Mesher
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών και κάνουμε κλικ στο "model" και επιλέγουμε το "Global Properties"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

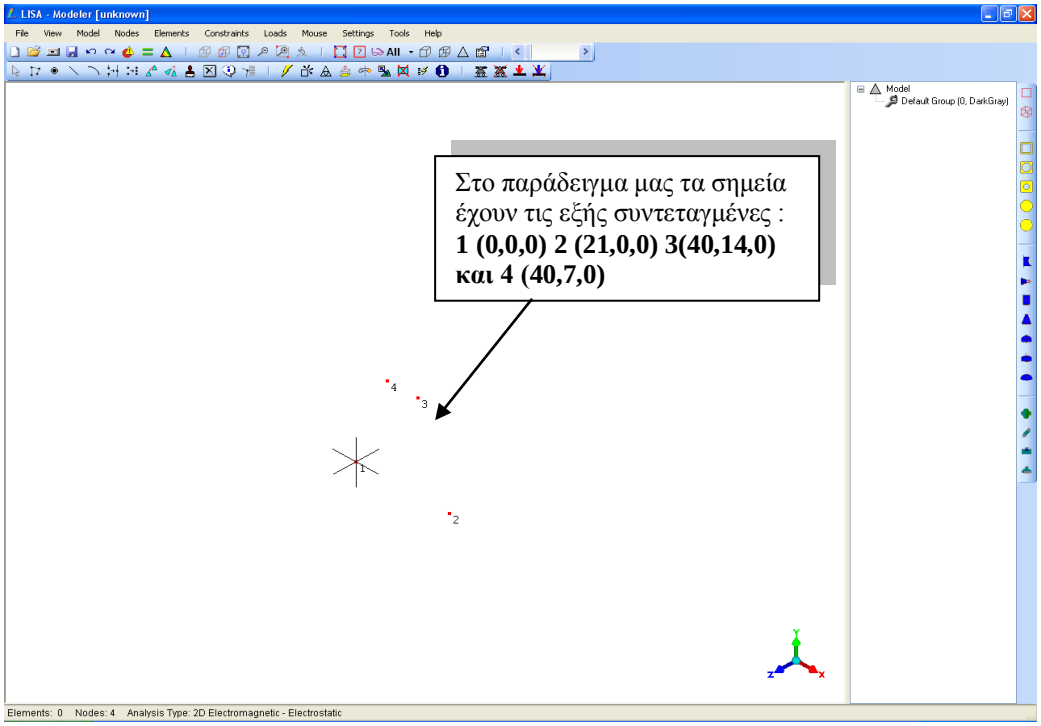

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (0, DarkGray)
Global Properties
General Physics Cyclic Symmetry Solvers Output Options
Permittivity of Free Space 8.854E-12
Permeability of Free Space
Stefan-Boltzmann Constant
Surface Speed
Initial Temperature for Thermal Strain
Ambient Pressure
Tension per Length
OK Cancel
Πηγαίνουμε στην καρτέλα "Physics" και στη θέση "Permittivity of Free Space" και πληκτρολογούμε 8.854E - 12
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

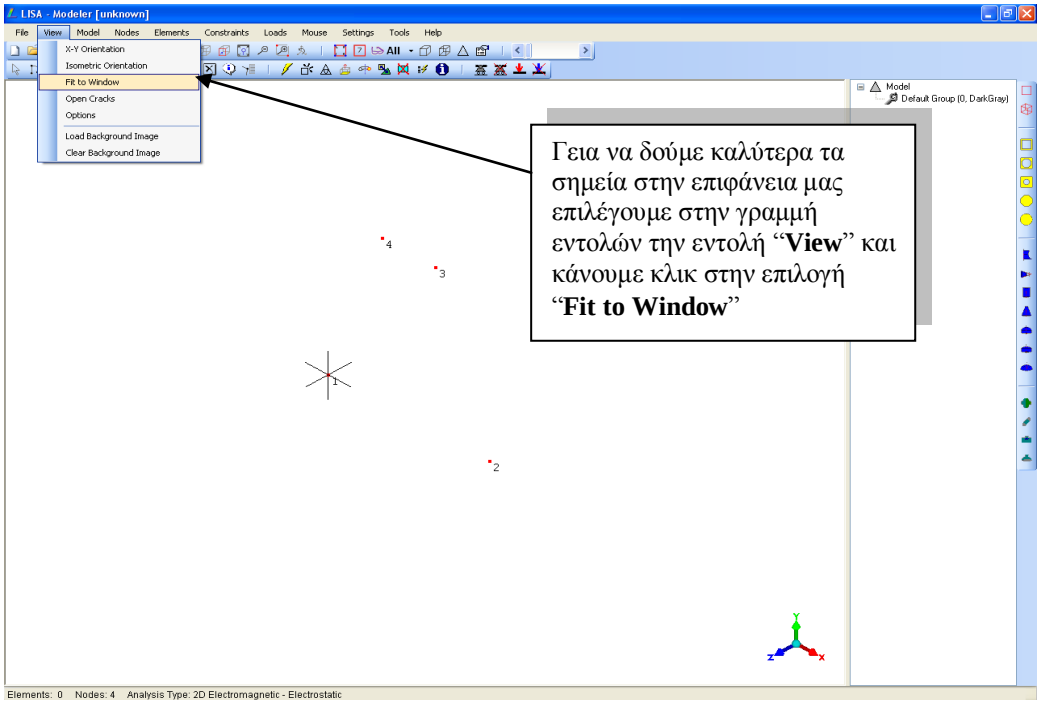

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Select Nodes...
Add Single...
Add Node Line...
Add Node Arc...
Move/Copy...
Rotate/Copy...
Merge Nearby Nodes ...
Merge
Between
Mirror...
Hollow...
Cylindrical Fit
Delete
Erase unused nodes
Resize...
Properties...
List Info...
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών και επιλέγουμε την εντολή "Nodes"(σημεία) και κάνουμε κλικ στην επιλογή "Add Single…"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

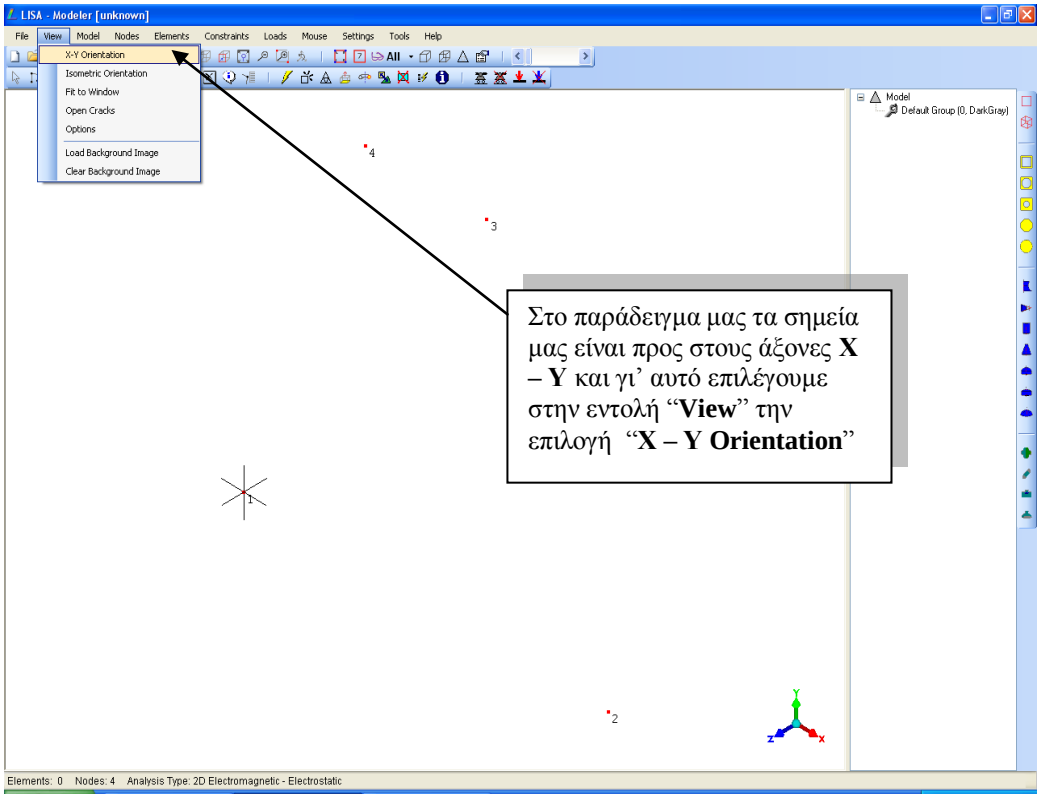


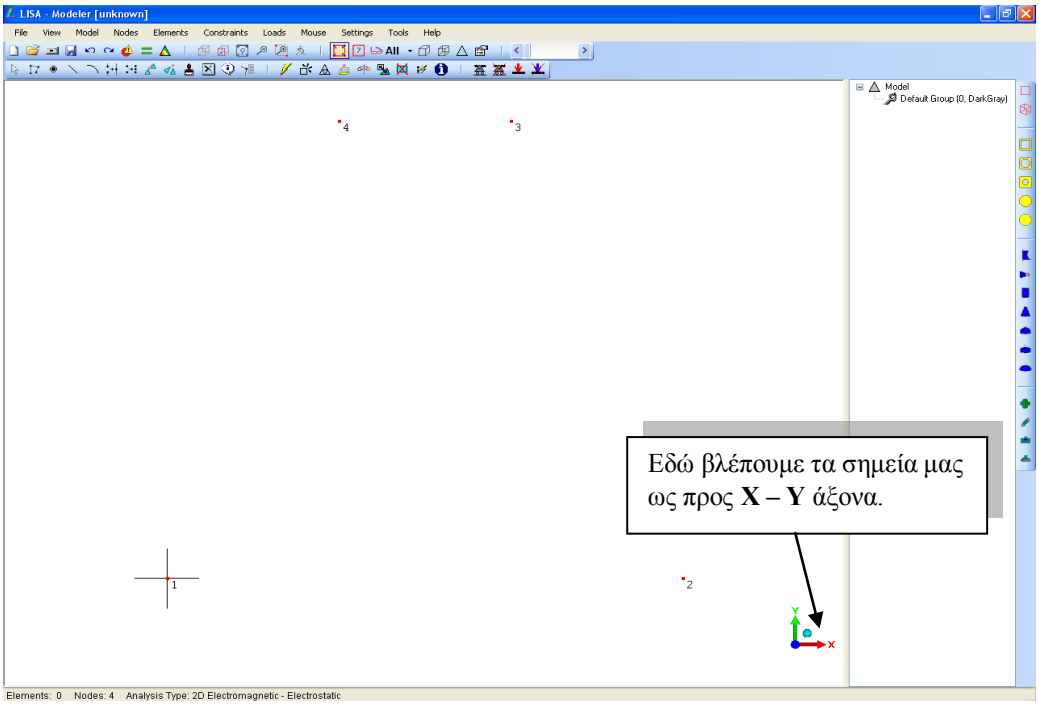
Σε αυτό το σημείο δίνουμε τις συντεταγμένες (x , y, z) και σχεδιάζεται το σχήμα που επιθυμούμε.

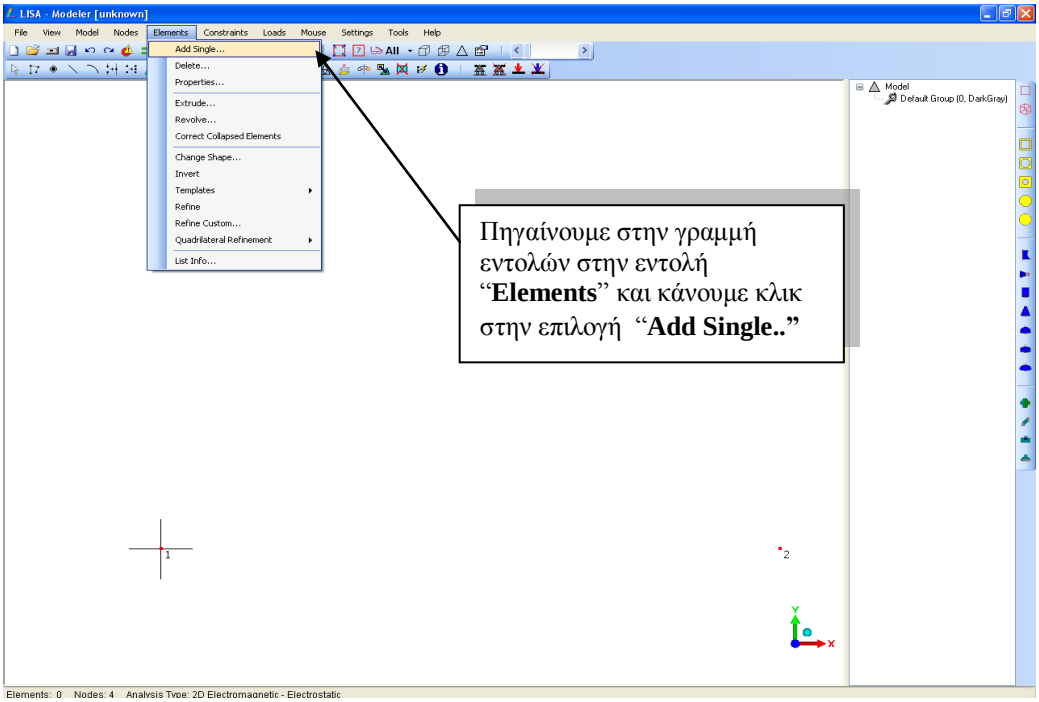


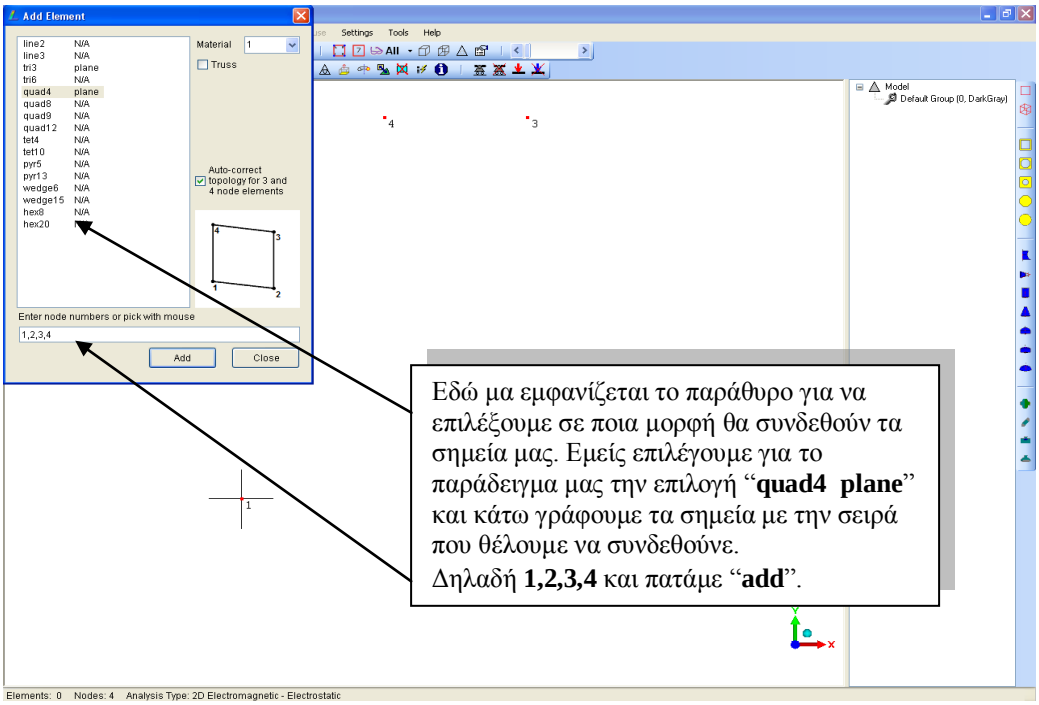

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (0, DarkGray)
Στο παράδειγμα μας τα σημεία έχουν τις εξής συντεταγμένες : **1 (0,0,0) 2 (21,0,0) 3(40,14,0) και 4 (40,7,0)**
4
3
1
2
Elements: 0 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

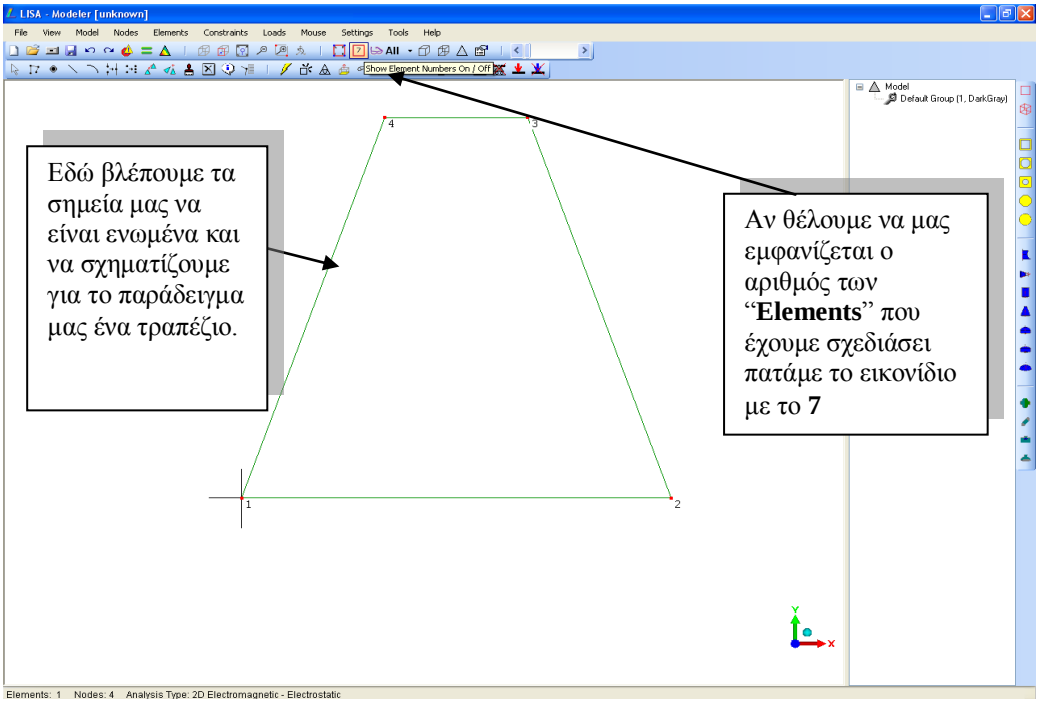

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
X-Y Orientation
Isometric Orientation
Fit to Window
Open Cracks
Options
Load Background Image
Clear Background Image
Model
Default Group (0, DarkGray)
Γεια να δούμε καλύτερα τα σημεία στην επιφάνεια μας επιλέγουμε στην γραμμή εντολών την εντολή "**View**" και κάνουμε κλικ στην επιλογή "**Fit to Window**"
4
3
1
2
Elements: 0 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

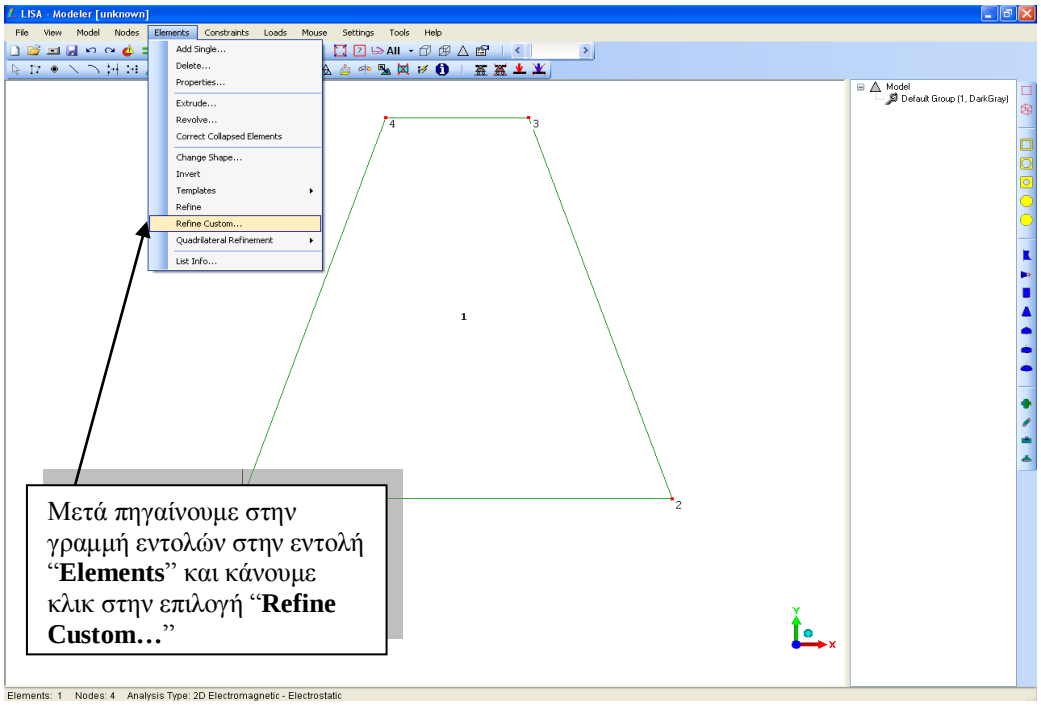

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
X-Y Orientation
Isometric Orientation
Fit to Window
Open Cracks
Options
Load Background Image
Clear Background Image
Model
Default Group (0, DarkGray)
Στο παράδειγμα μας τα σημεία μας είναι προς στους άξονες **X – Y** και γι' αυτό επιλέγουμε στην εντολή "**View**" την επιλογή "**X – Y Orientation**"
Elements: 0 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

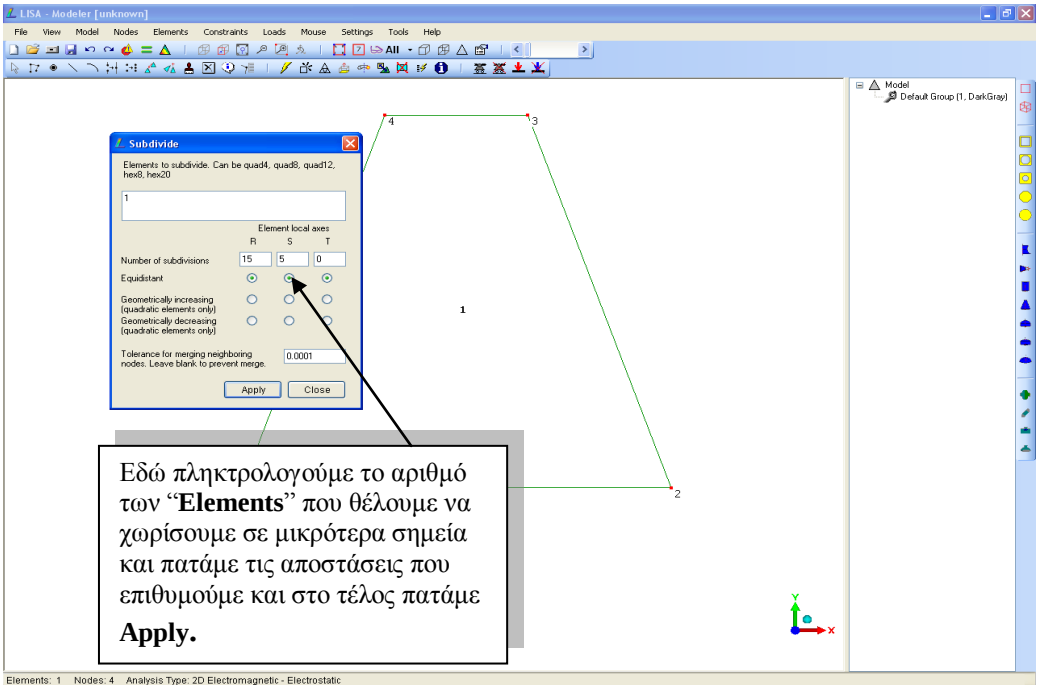

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (0, DarkGray)
Εδώ βλέπουμε τα σημεία μας ως προς **X – Y** άξονα.
Elements: 0 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic


LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Add Single...
Delete...
Properties...
Extrude...
Revolve...
Correct Collapsed Elements
Change Shape...
Invert
Templates
Refine
Refine Custom...
Quadrilateral Refinement
List Info...
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών στην εντολή "Elements" και κάνουμε κλικ στην επιλογή "Add Single.."
Elements: 0 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

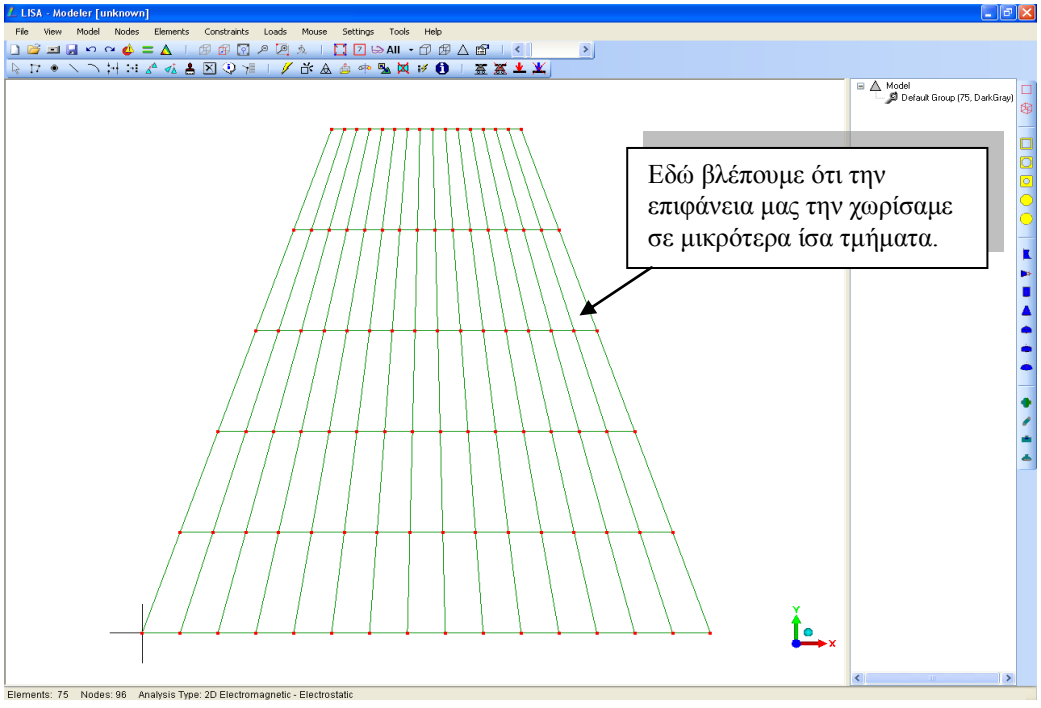

Add Element
line2 N/A
line3 N/A
tri3 plane
tri6 N/A
quad4 plane
quad8 N/A
quad9 N/A
quad12 N/A
tet4 N/A
tet10 N/A
pyr5 N/A
pyr13 N/A
wedge6 N/A
wedge15 N/A
hex8 N/A
hex20 N/A
Material 1
Truss
Auto-correct topology for 3 and 4 node elements
Enter node numbers or pick with mouse
1,2,3,4
Add
Close
Εδώ μα εμφανίζεται το παράθυρο για να επιλέξουμε σε ποια μορφή θα συνδεθούν τα σημεία μας. Εμείς επιλέγουμε για το παράδειγμα μας την επιλογή "quad4 plane" και κάτω γράφουμε τα σημεία με την σειρά που θέλουμε να συνδεθούνε.
Δηλαδή 1,2,3,4 και πατάμε "add".
Elements: 0 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic


LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Show Element Numbers On / Off
Model
Default Group (1, DarkGray)
Εδώ βλέπουμε τα σημεία μας να είναι ενωμένα και να σχηματίζουμε για το παράδειγμα μας ένα τραπέζιο.
Αν θέλουμε να μας εμφανίζεται ο αριθμός των "Elements" που έχουμε σχεδιάσει πατάμε το εικονίδιο με το 7
1
2
3
4
Elements: 1 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

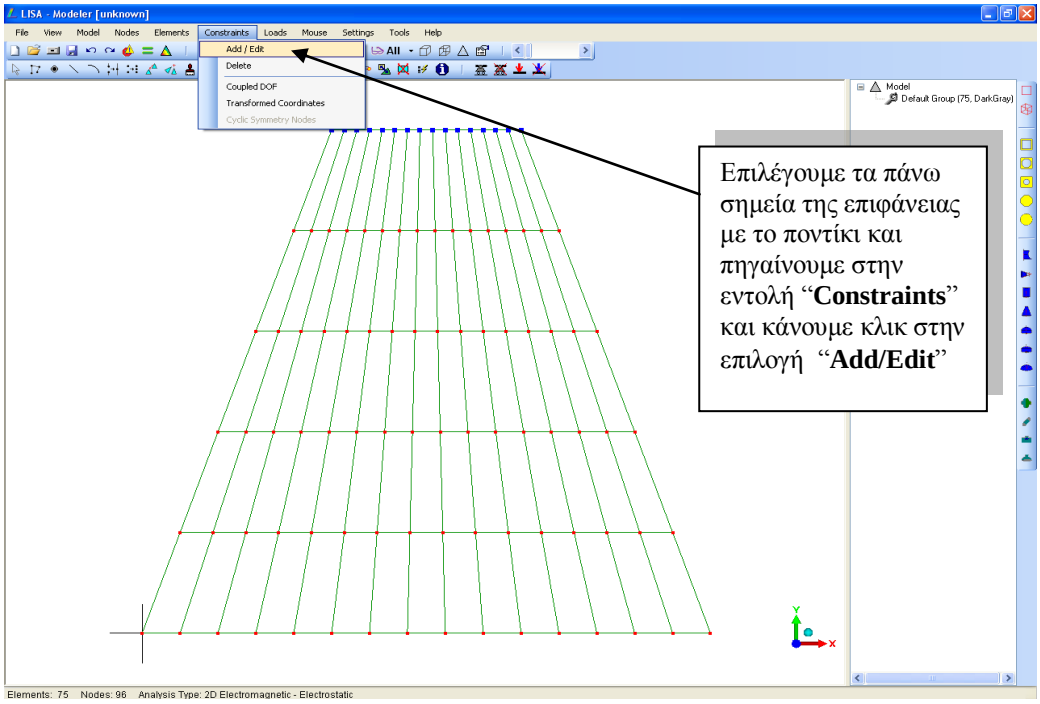

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Add Single...
Delete...
Properties...
Extrude...
Revolve...
Correct Collapsed Elements
Change Shape...
Invert
Templates
Refine
Refine Custom...
Quadrilateral Refinement
List Info...
Model
Default Group (1, DarkGray)
Μετά πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών στην εντολή "Elements" και κάνουμε κλικ στην επιλογή "Refine Custom…"
1
2
3
4
Elements: 1 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic



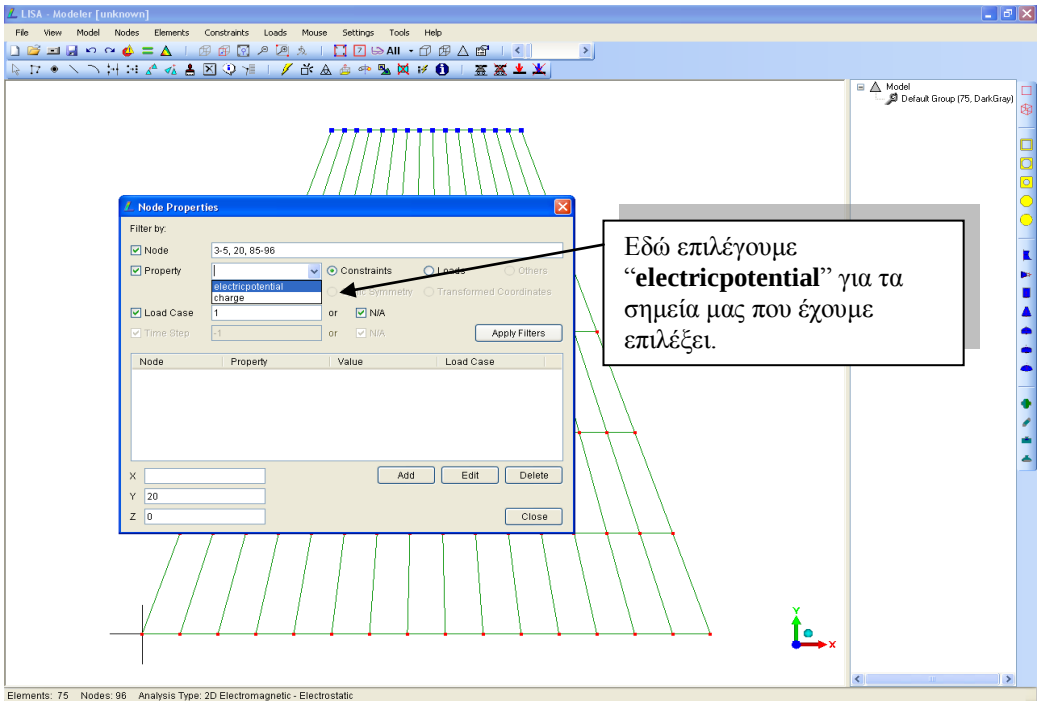
Εδώ πληκτρολογούμε το αριθμό των "**Elements**" που θέλουμε να χωρίσουμε σε μικρότερα σημεία και πατάμε τις αποστάσεις που επιθυμούμε και στο τέλος πατάμε **Apply.**

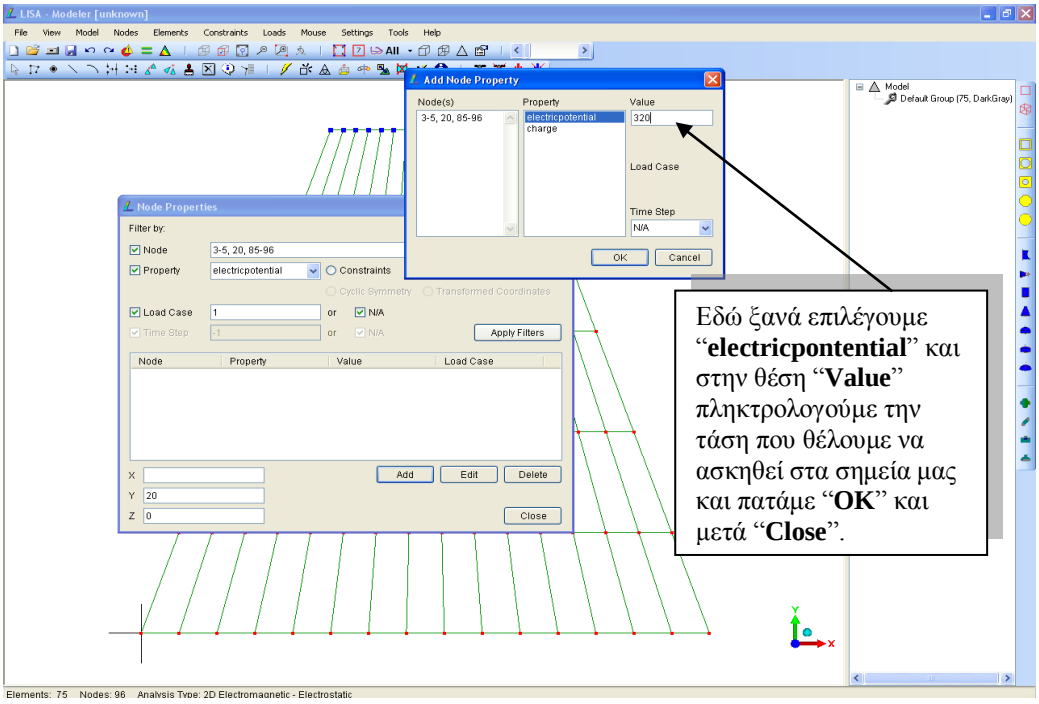


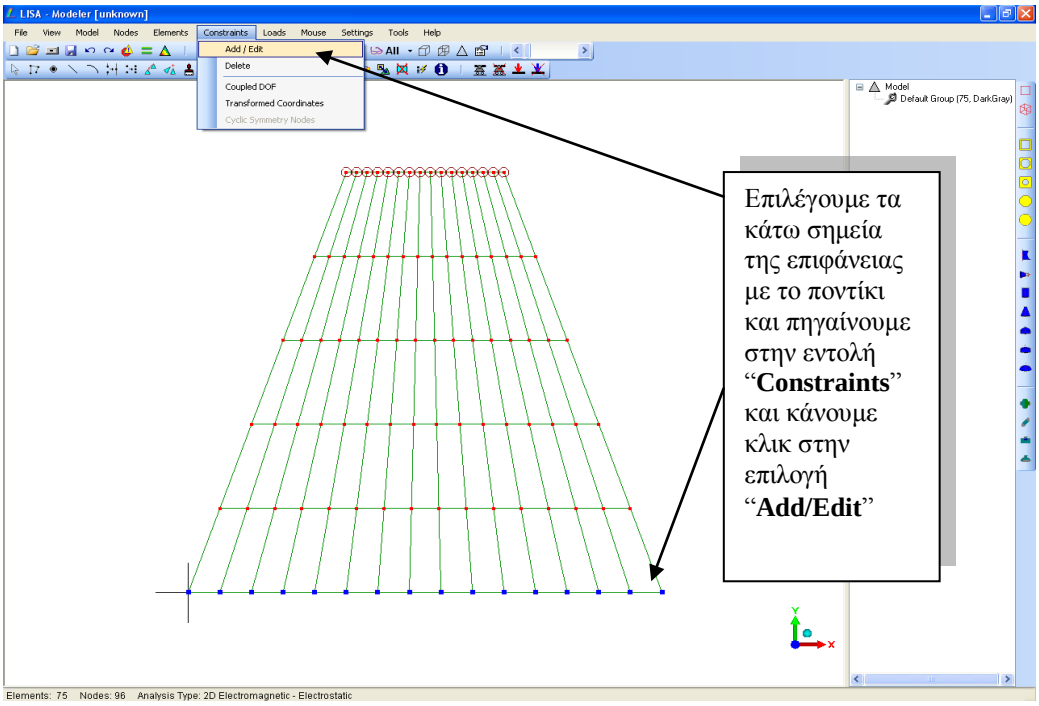
Εδώ βλέπουμε ότι την επιφάνεια μας την χωρίσαμε σε μικρότερα ίσα τμήματα.

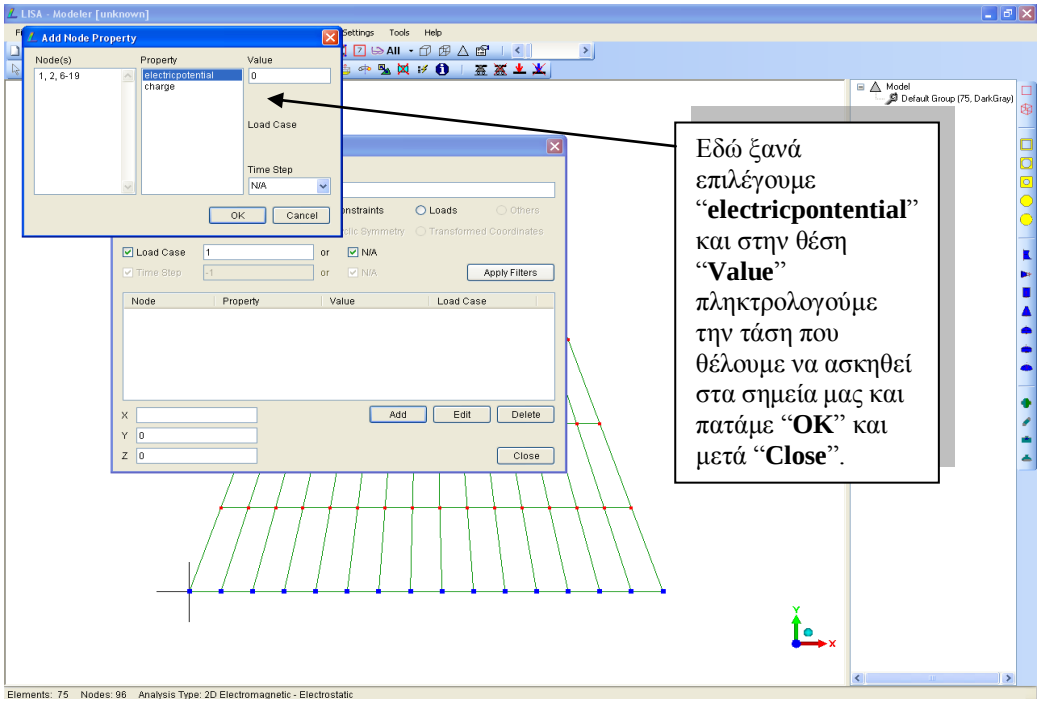


Στα σημεία αυτά που έχουμε επιλέξει βάζουμε την μεγαλύτερη τάση που μπορεί να ασκηθεί σε αυτά.

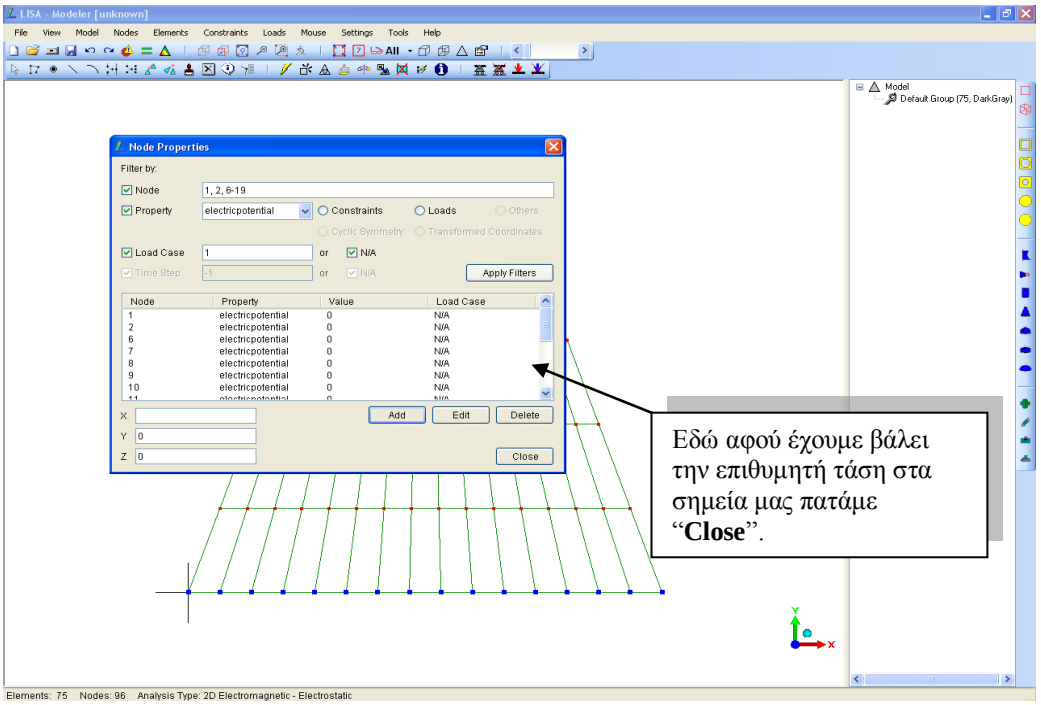



LISA - Modeler [unknown]
Add Node Property
Node(s)
Property
Value
3-5, 20, 85-96
electricpotential
charge
320
Load Case
Time Step
N/A
OK
Cancel
Node Properties
Filter by:
Node
3-5, 20, 85-96
Property
electricpotential
Constraints
Cyclic Symmetry
Transformed Coordinates
Load Case
1
or
N/A
Time Step
-1
or
N/A
Apply Filters
Node
Property
Value
Load Case
X
Y
20
Z
0
Add
Edit
Delete
Close
Model
Default Group (75, DarkGray)
Εδώ ξανά επιλέγουμε "electricpontential" και στην θέση "Value" πληκτρολογούμε την τάση που θέλουμε να ασκηθεί στα σημεία μας και πατάμε "OK" και μετά "Close".
Elements: 75 Nodes: 96 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

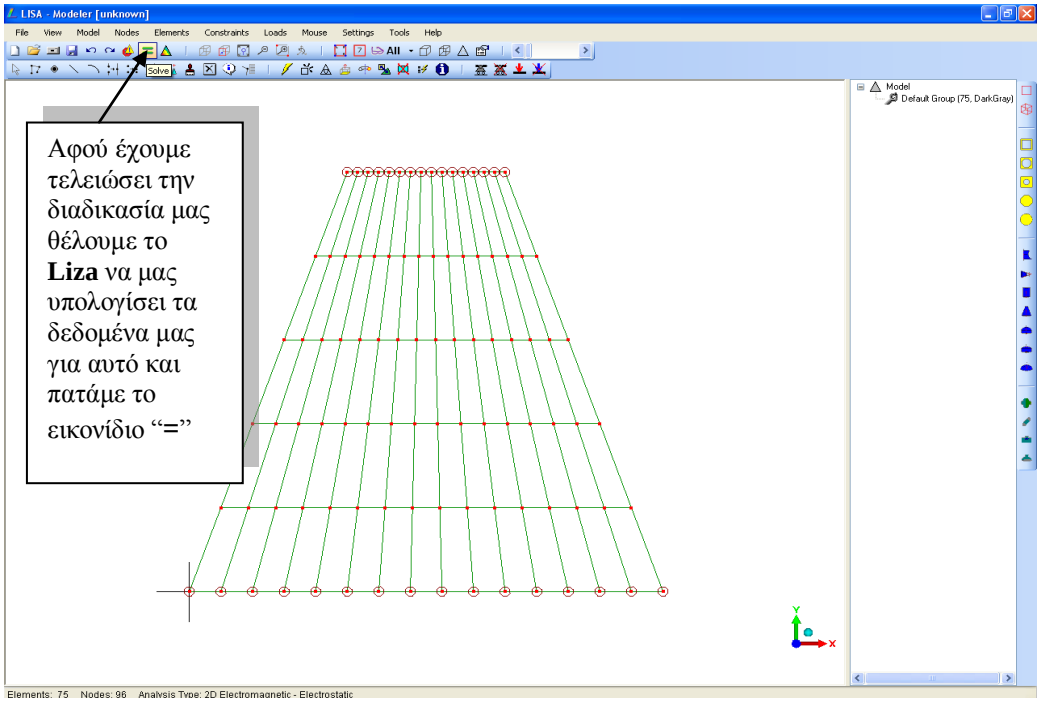

LISA - Modeler [unknown]
File
View
Model
Nodes
Elements
Constraints
Loads
Mouse
Settings
Tools
Help
Add / Edit
Delete
Coupled DOF
Transformed Coordinates
Cyclic Symmetry Nodes
Model
Default Group (75, DarkGray)
Επιλέγουμε τα κάτω σημεία της επιφάνειας με το ποντίκι και πηγαίνουμε στην εντολή "Constraints" και κάνουμε κλικ στην επιλογή "Add/Edit"
Elements: 75 Nodes: 96 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

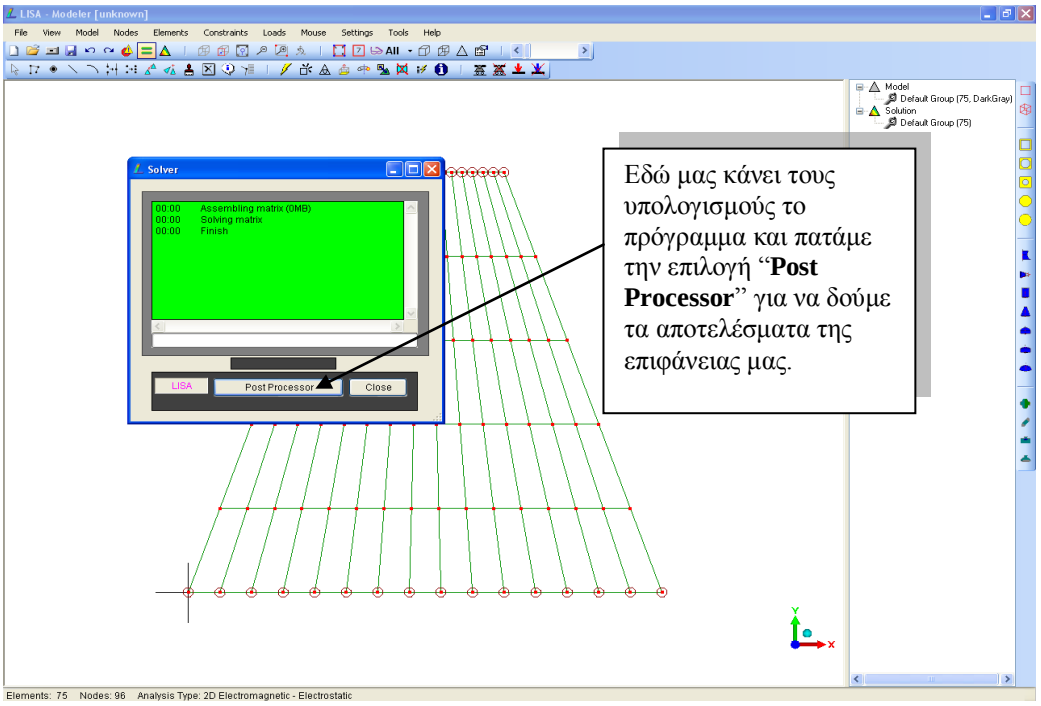


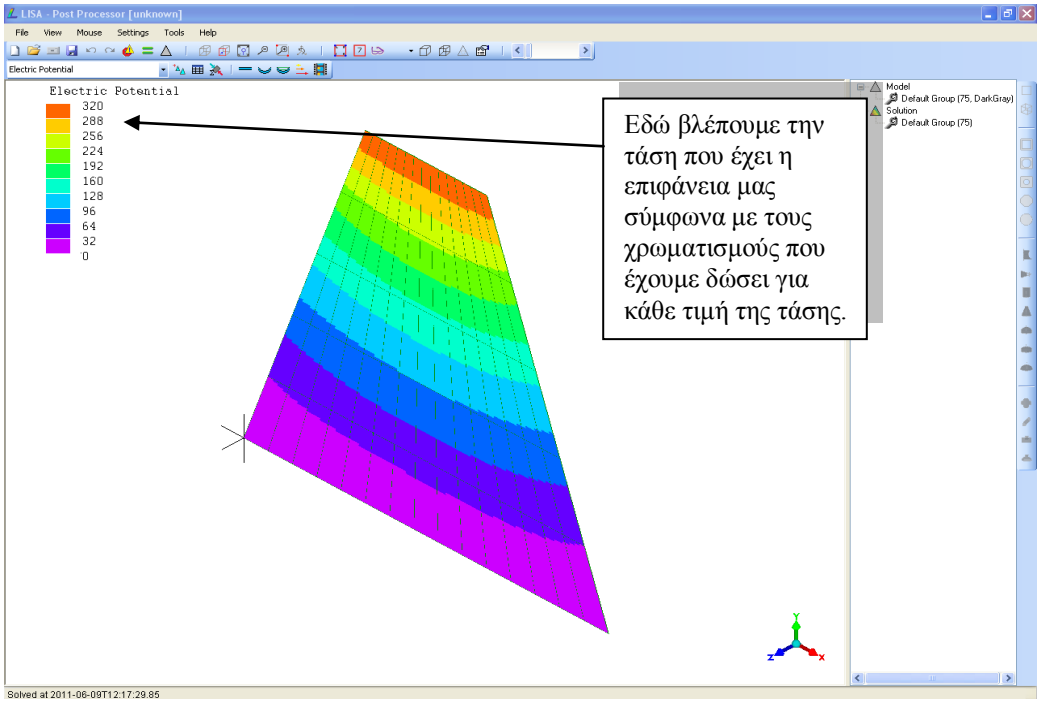
Εδώ ξανά επιλέγουμε "**electricpontential**" και στην θέση "**Value**" πληκτρολογούμε την τάση που θέλουμε να ασκηθεί στα σημεία μας και πατάμε "**OK**" και μετά "**Close**".

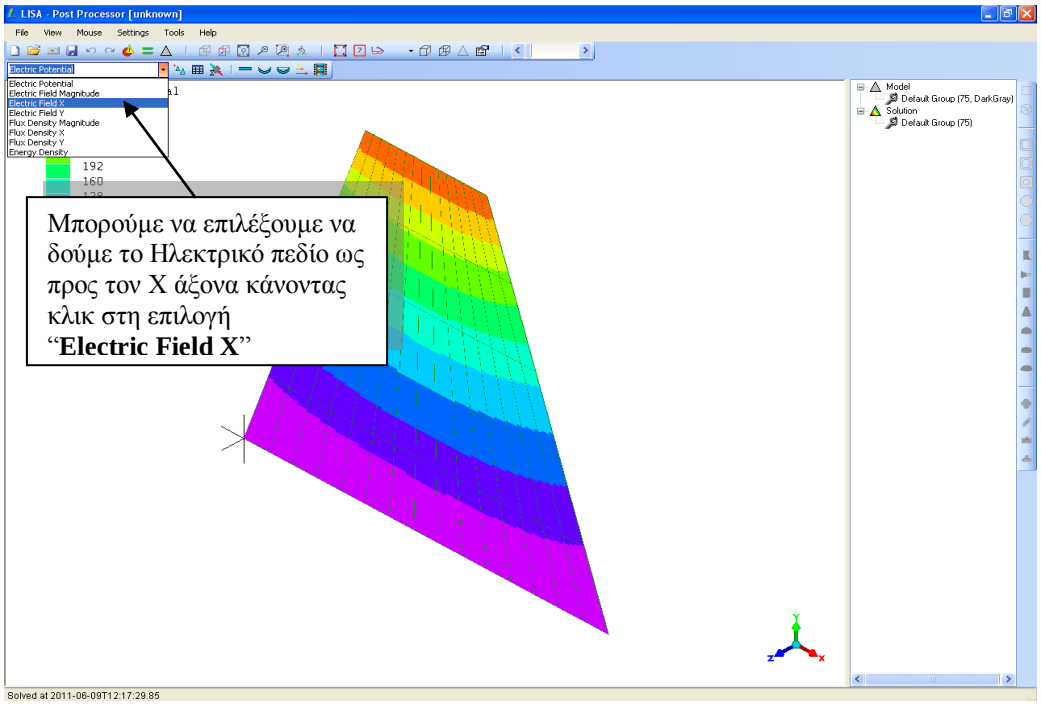


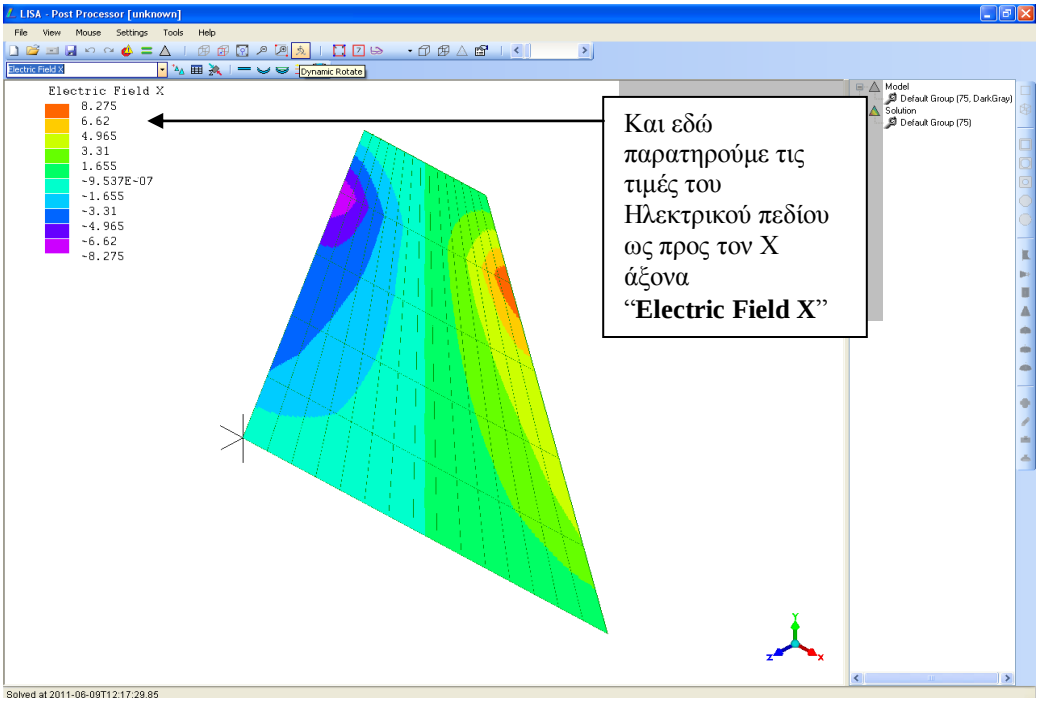
Εδώ αφού έχουμε βάλει την επιθυμητή τάση στα σημεία μας πατάμε "**Close**".


LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Solve
Model
Default Group (75, DarkGray)
Αφού έχουμε τελειώσει την διαδικασία μας θέλουμε το **Liza** να μας υπολογίσει τα δεδομένα μας για αυτό και πατάμε το εικονίδιο "="
Elements: 75 Nodes: 96 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic


LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (75, DarkGray)
Solution
Default Group (75)
Solver
00:00 Assembling matrix (0MB)
00:00 Solving matrix
00:00 Finish
LISA
Post Processor
Close
Εδώ μας κάνει τους υπολογισμούς το πρόγραμμα και πατάμε την επιλογή "**Post Processor**" για να δούμε τα αποτελέσματα της επιφάνειας μας.
Elements: 75 Nodes: 96 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

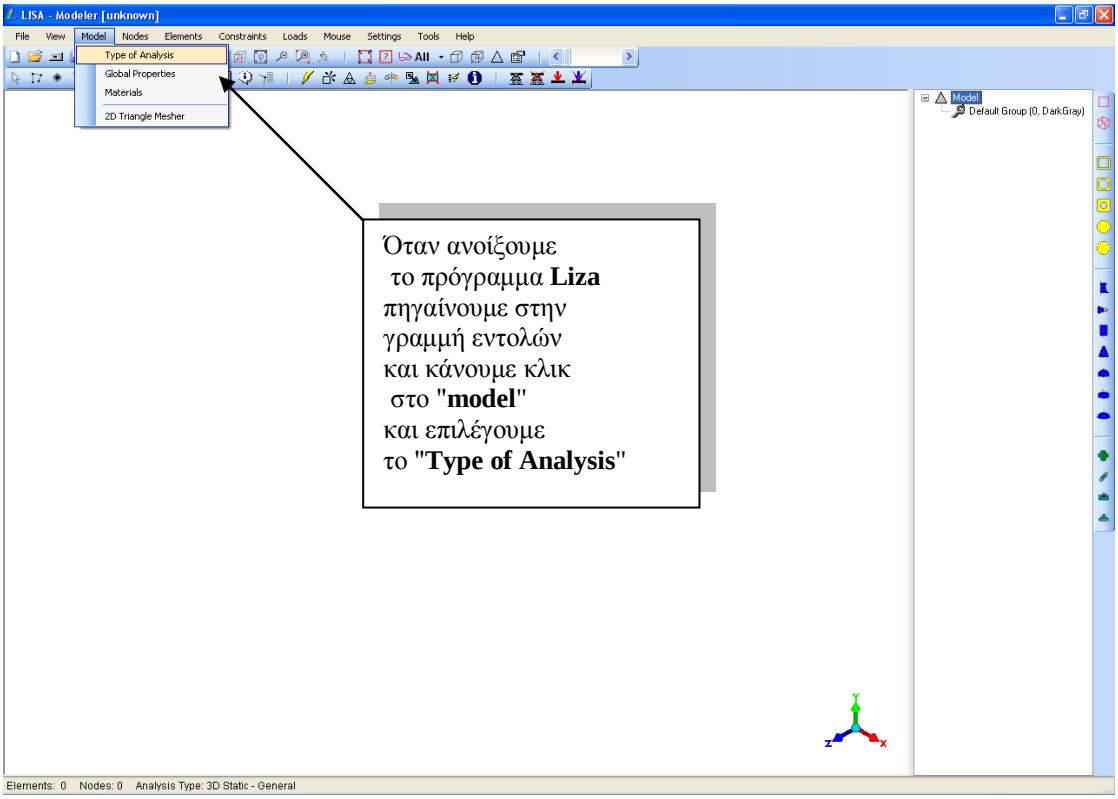

LISA - Post Processor [unknown]
File View Mouse Settings Tools Help
Electric Potential
Electric Potential
320
288
256
224
192
160
128
96
64
32
0
Model
Default Group (75, DarkGray)
Solution
Default Group (75)
Εδώ βλέπουμε την τάση που έχει η επιφάνεια μας σύμφωνα με τους χρωματισμούς που έχουμε δώσει για κάθε τιμή της τάσης.
Solved at 2011-06-09T12:17:29.85

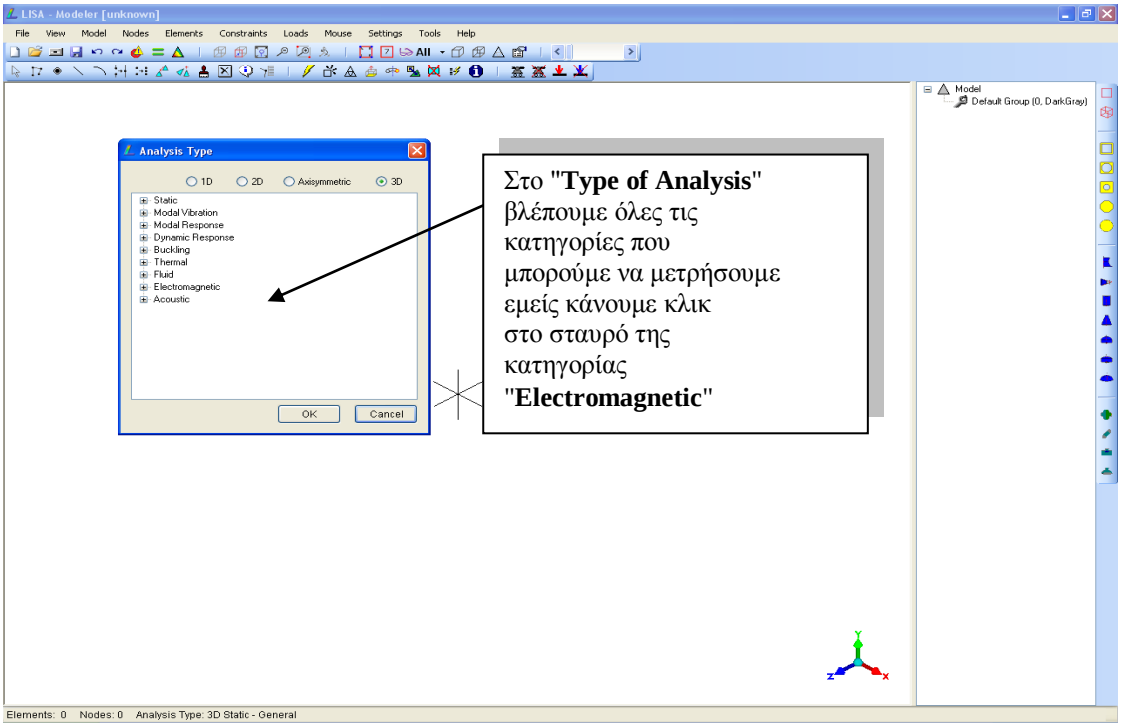

LISA - Post Processor [unknown]
File View Mouse Settings Tools Help
Electric Potential
Electric Potential
Electric Field Magnitude
Electric Field X
Electric Field Y
Flux Density Magnitude
Flux Density X
Flux Density Y
Energy Density
192
160
Model
Default Group (75, DarkGray)
Solution
Default Group (75)
Μπορούμε να επιλέξουμε να δούμε το Ηλεκτρικό πεδίο ως προς τον X άξονα κάνοντας κλικ στη επιλογή "Electric Field X"
Solved at 2011-06-09T12:17:29.85

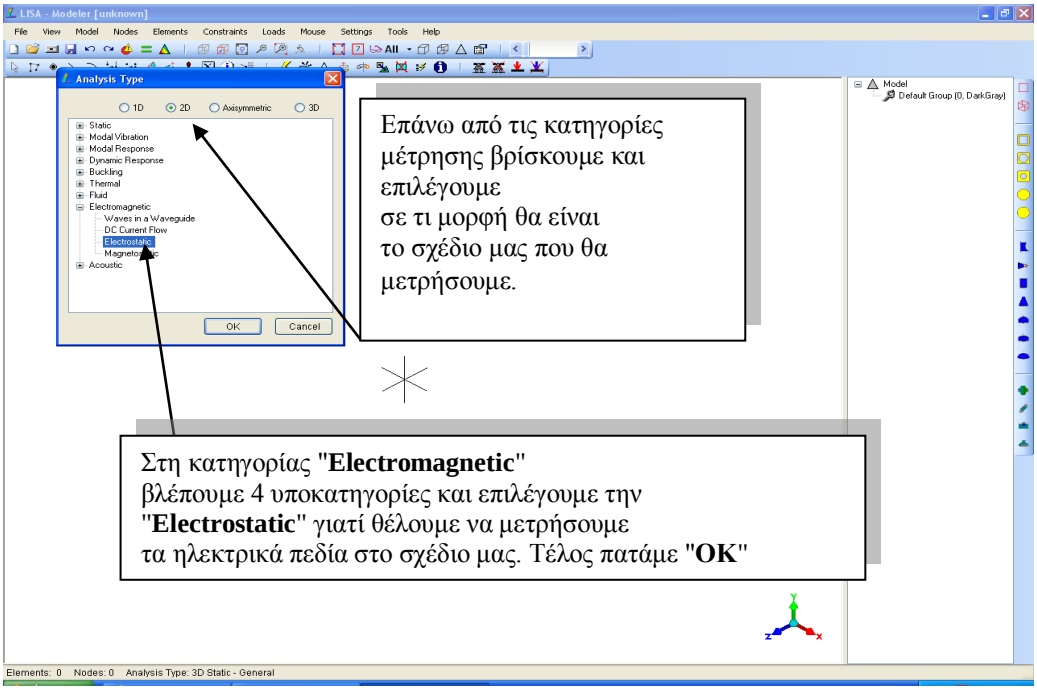


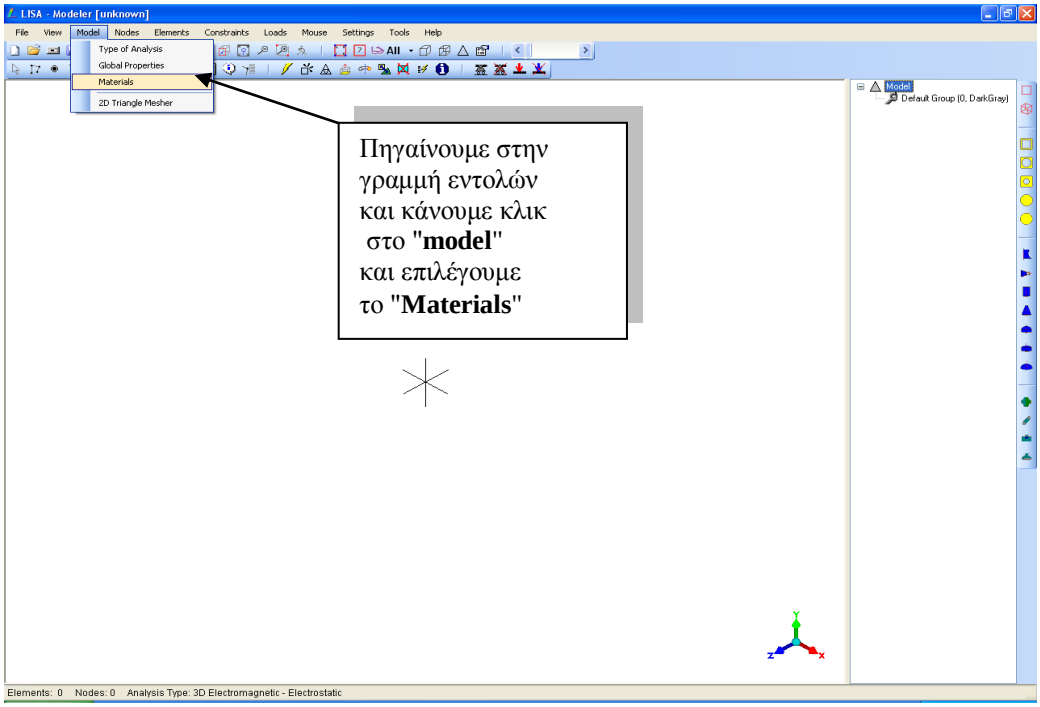
Όταν τελειώσουμε και μας υπολογίσει το πρόγραμμα το πεδίο που επιθυμούμε βλέπουμε πάνω στο σχήμα μας χρωματικές διατάξεις οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές που έχουμε αριστερά μας.

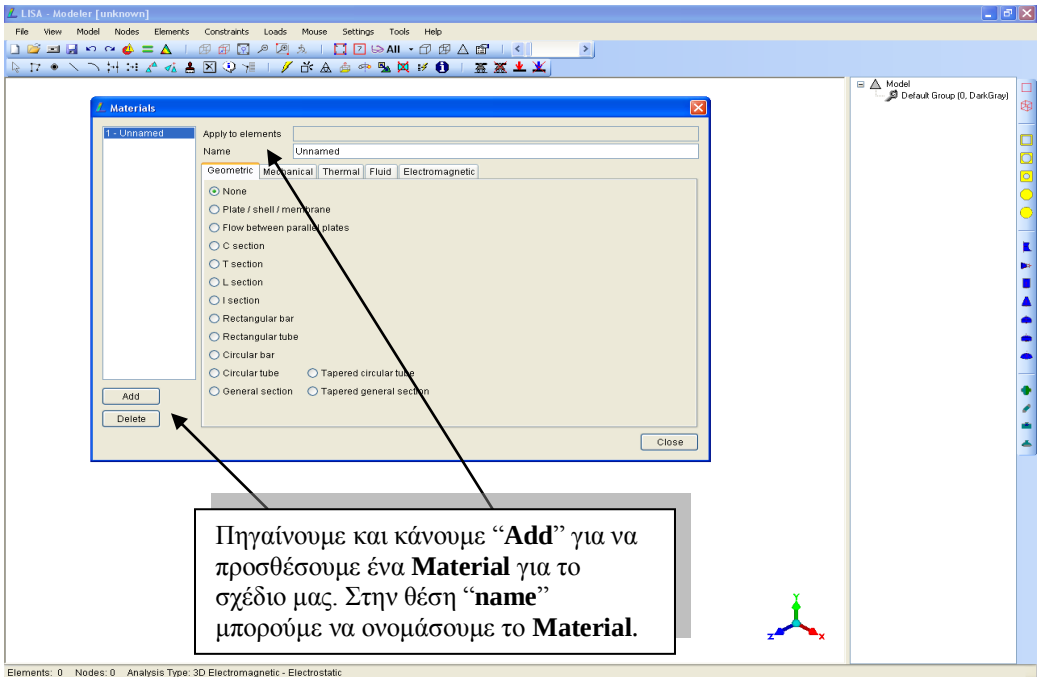
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

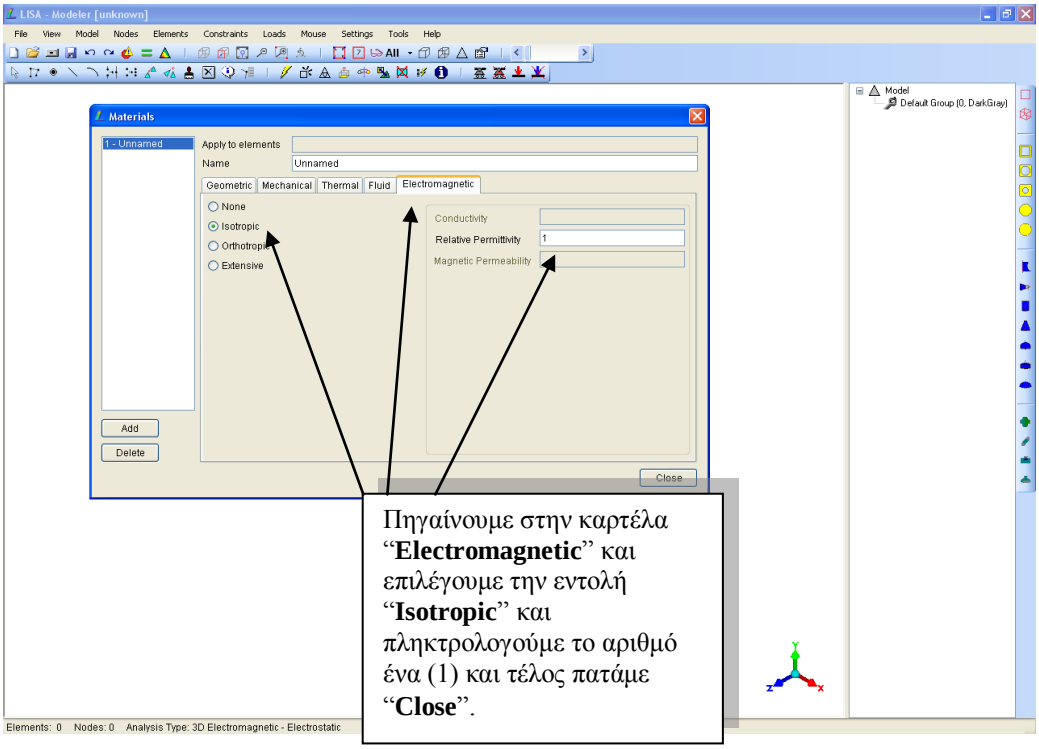

LISA - Modeler [unknown]
File
View
Model
Nodes
Elements
Constraints
Loads
Mouse
Settings
Tools
Help
Type of Analysis
Global Properties
Materials
2D Triangle Mesher
All
Model
Default Group (0, DarkGray)
Όταν ανοίξουμε
το πρόγραμμα Liza
πηγαίνουμε στην
γραμμή εντολών
και κάνουμε κλικ
στο "model"
και επιλέγουμε
το "Type of Analysis"
Y
Z
X
Elements: 0
Nodes: 0
Analysis Type: 3D Static - General

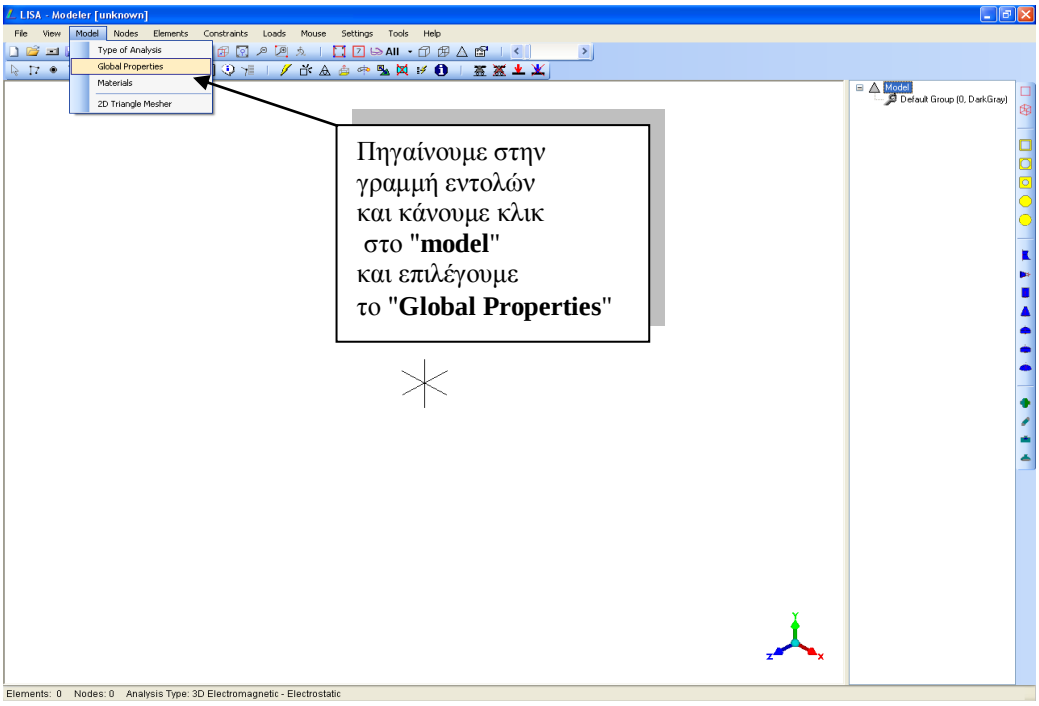

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Analysis Type
1D 2D Axisymmetric 3D
Static
Modal Vibration
Modal Response
Dynamic Response
Buckling
Thermal
Fluid
Electromagnetic
Acoustic
OK
Cancel
Model
Default Group (0, DarkGray)
Στο "Type of Analysis" βλέπουμε όλες τις κατηγορίες που μπορούμε να μετρήσουμε εμείς κάνουμε κλικ στο σταυρό της κατηγορίας "Electromagnetic"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Static - General

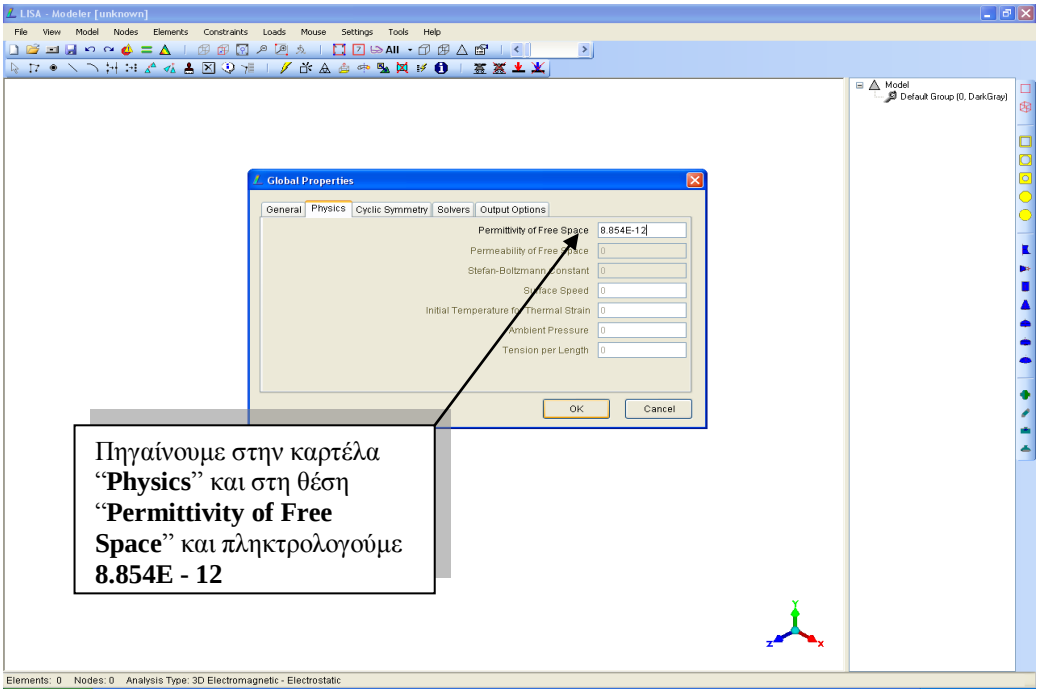

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Analysis Type
1D 2D Axisymmetric 3D
Static
Modal Vibration
Modal Response
Dynamic Response
Buckling
Thermal
Fluid
Electromagnetic
Waves in a Waveguide
DC Current Flow
Electrostatic
Acoustic
OK
Cancel
Model
Default Group (0, DarkGray)
Επάνω από τις κατηγορίες μέτρησης βρίσκουμε και επιλέγουμε σε τι μορφή θα είναι το σχέδιο μας που θα μετρήσουμε.
Στη κατηγορίας "Electromagnetic" βλέπουμε 4 υποκατηγορίες και επιλέγουμε την "Electrostatic" γιατί θέλουμε να μετρήσουμε τα ηλεκτρικά πεδία στο σχέδιο μας. Τέλος πατάμε "OK"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Static - General

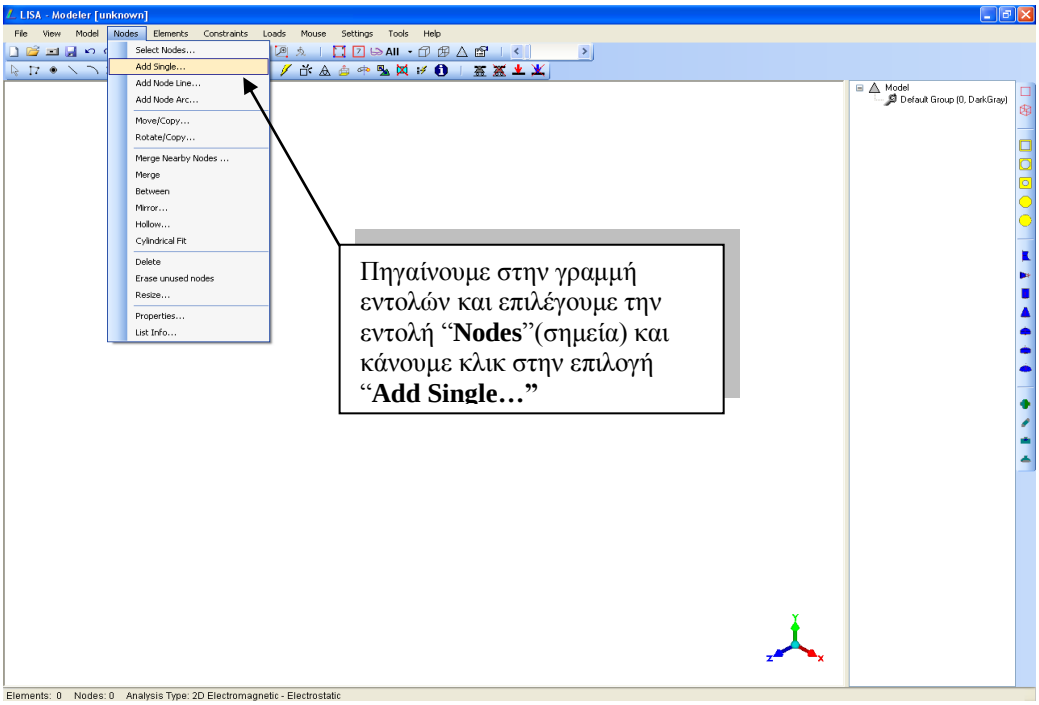

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Type of Analysis
Global Properties
Materials
2D Triangle Mesher
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών και κάνουμε κλικ στο "**model**" και επιλέγουμε το "**Materials**"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

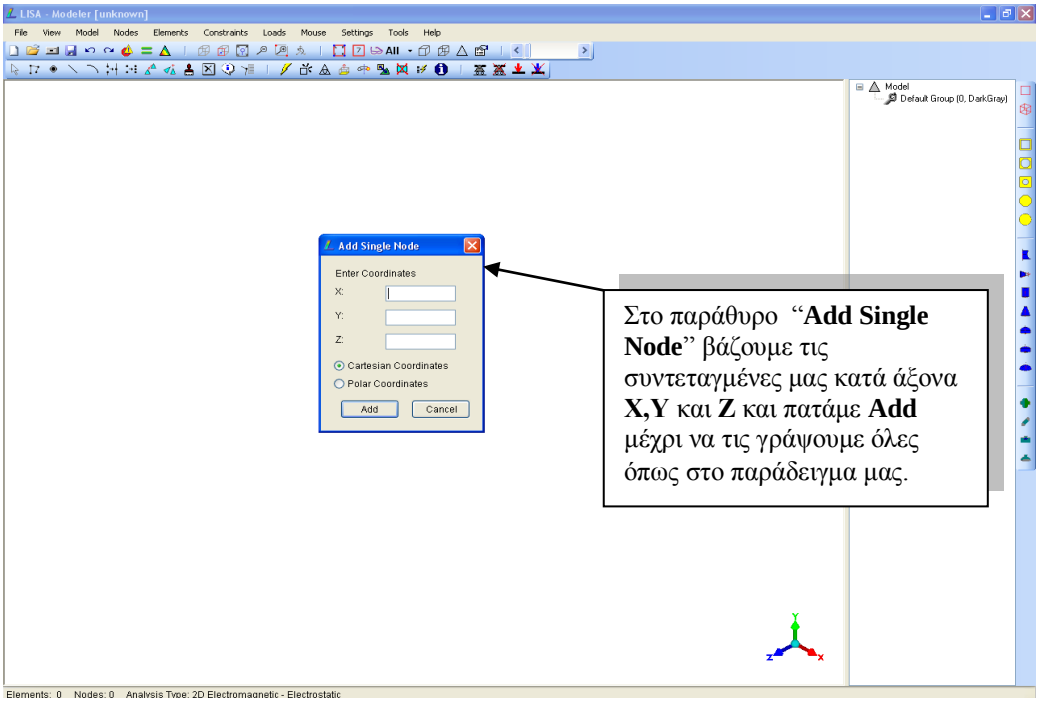

LISA - Modeler [unknown]
Materials
1 - Unnamed
Apply to elements
Name
Unnamed
Geometric
Mechanical
Thermal
Fluid
Electromagnetic
None
Plate / shell / membrane
Flow between parallel plates
C section
T section
L section
I section
Rectangular bar
Rectangular tube
Circular bar
Circular tube
Tapered circular tube
General section
Tapered general section
Add
Delete
Close
Πηγαίνουμε και κάνουμε "**Add**" για να προσθέσουμε ένα **Material** για το σχέδιο μας. Στην θέση "**name**" μπορούμε να ονομάσουμε το **Material**.
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

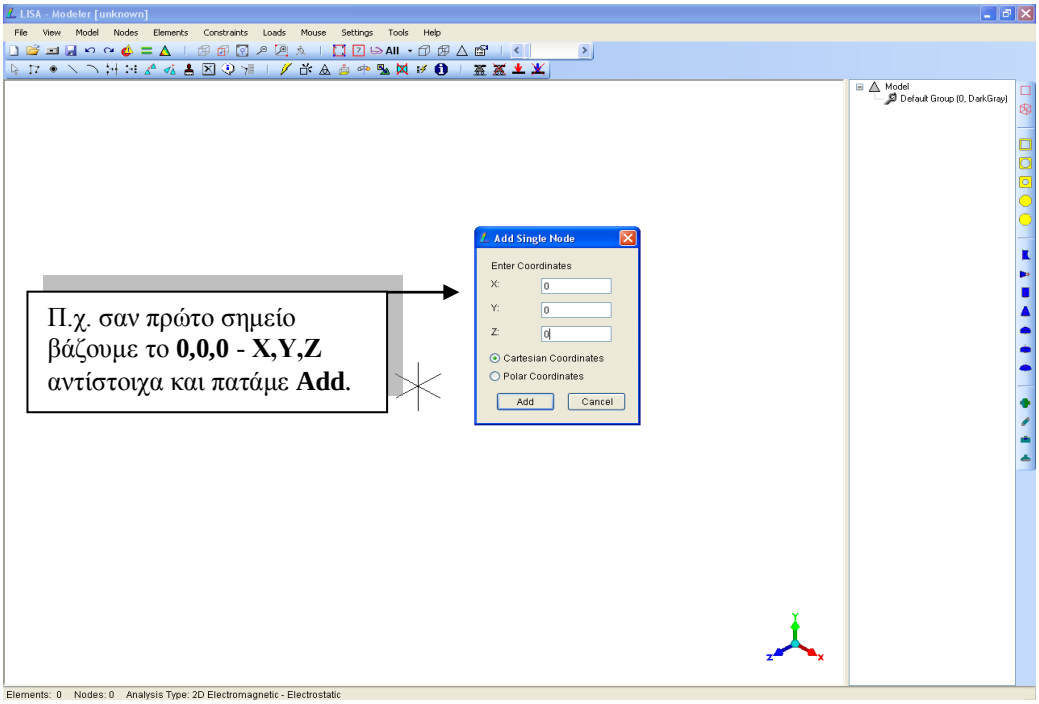

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Materials
1 - Unnamed
Apply to elements
Name
Unnamed
Geometric Mechanical Thermal Fluid Electromagnetic
None
Isotropic
Orthotropic
Extensive
Conductivity
Relative Permittivity
1
Magnetic Permeability
Add
Delete
Close
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην καρτέλα "Electromagnetic" και επιλέγουμε την εντολή "Isotropic" και πληκτρολογούμε το αριθμό ένα (1) και τέλος πατάμε "Close".
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

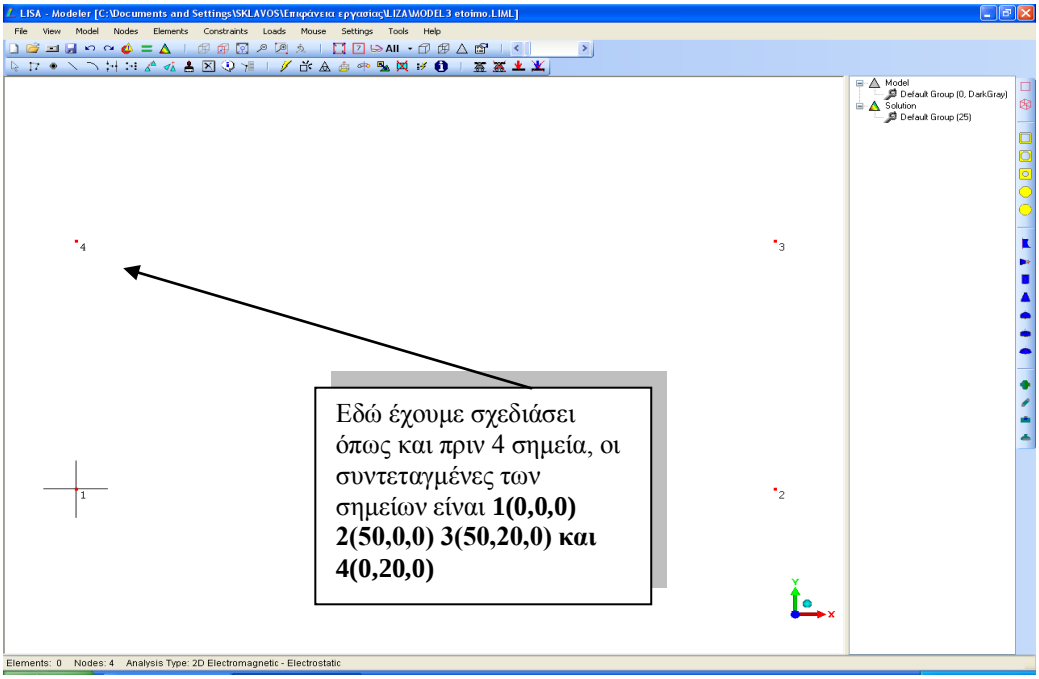

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Type of Analysis
Global Properties
Materials
2D Triangle Mesher
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών και κάνουμε κλικ στο "model" και επιλέγουμε το "Global Properties"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

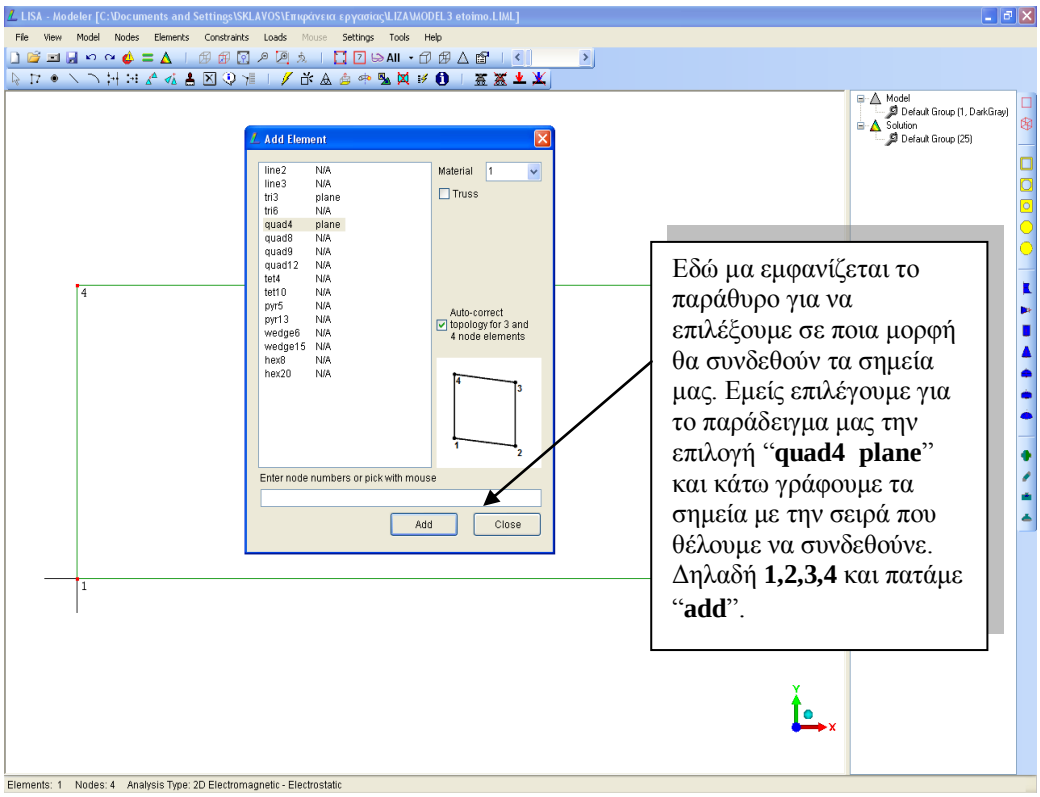

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (0, DarkGray)
Global Properties
General Physics Cyclic Symmetry Solvers Output Options
Permittivity of Free Space
8.854E-12
Permeability of Free Space
Stefan-Boltzmann Constant
Surface Speed
Initial Temperature for Thermal Strain
Ambient Pressure
Tension per Length
OK
Cancel
Πηγαίνουμε στην καρτέλα "Physics" και στη θέση "Permittivity of Free Space" και πληκτρολογούμε 8.854E - 12
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 3D Electromagnetic - Electrostatic

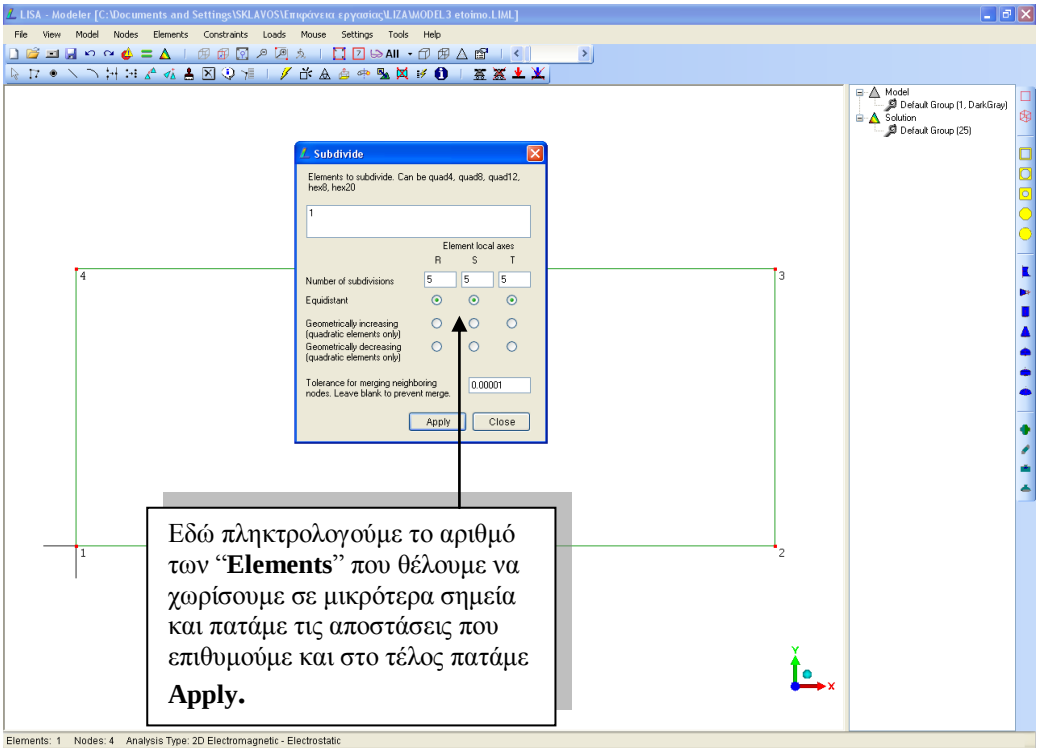

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Select Nodes...
Add Single...
Add Node Line...
Add Node Arc...
Move/Copy...
Rotate/Copy...
Merge Nearby Nodes ...
Merge
Between
Mirror...
Hollow...
Cylindrical Fit
Delete
Erase unused nodes
Resize...
Properties...
List Info...
Model
Default Group (0, DarkGray)
Πηγαίνουμε στην γραμμή εντολών και επιλέγουμε την εντολή "Nodes"(σημεία) και κάνουμε κλικ στην επιλογή "Add Single…"
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

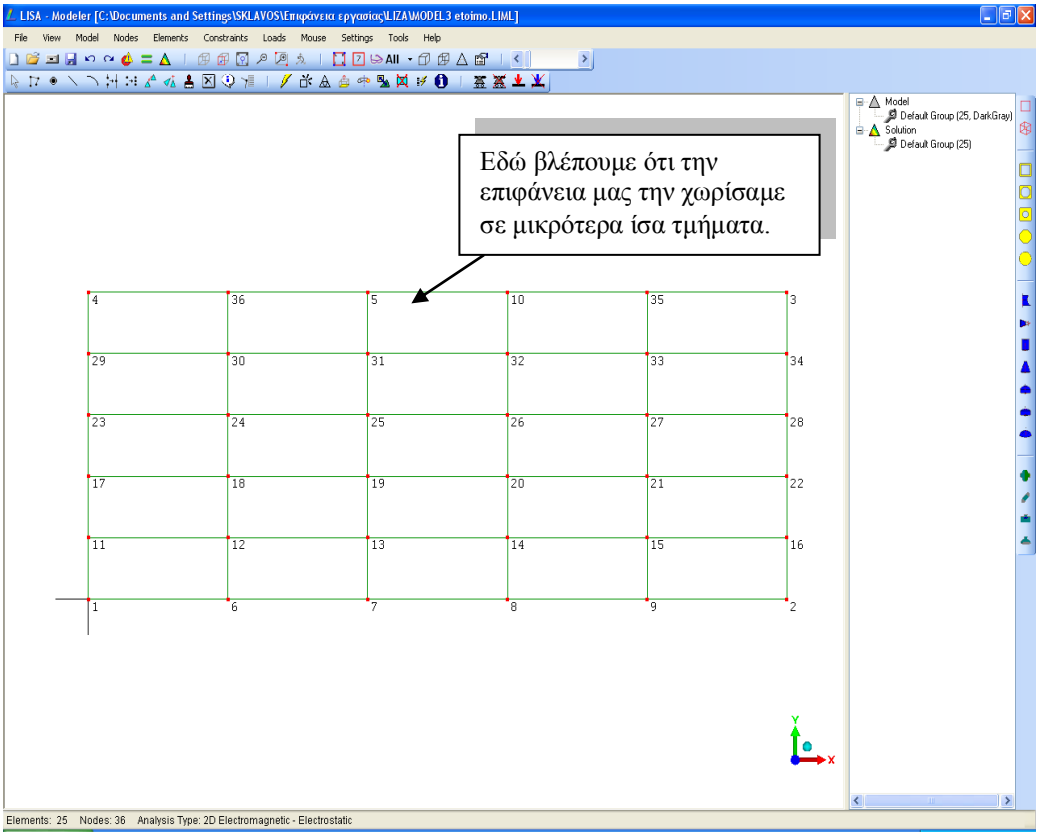

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (0, DarkGray)
Add Single Node
Enter Coordinates
X:
Y:
Z:
Cartesian Coordinates
Polar Coordinates
Add
Cancel
Στο παράθυρο "Add Single Node" βάζουμε τις συντεταγμένες μας κατά άξονα X,Y και Z και πατάμε Add μέχρι να τις γράψουμε όλες όπως στο παράδειγμα μας.
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

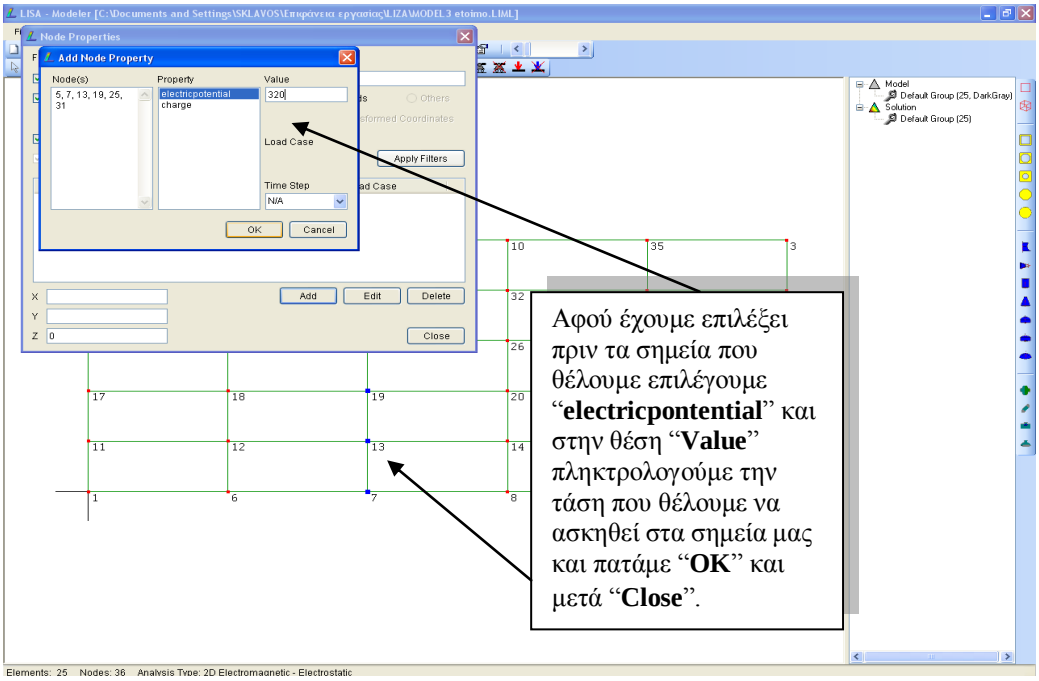

LISA - Modeler [unknown]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (0, DarkGray)
Π.χ. σαν πρώτο σημείο βάζουμε το 0,0,0 - X,Y,Z αντίστοιχα και πατάμε Add.
Add Single Node
Enter Coordinates
X: 0
Y: 0
Z: 0
Cartesian Coordinates
Polar Coordinates
Add
Cancel
Elements: 0 Nodes: 0 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

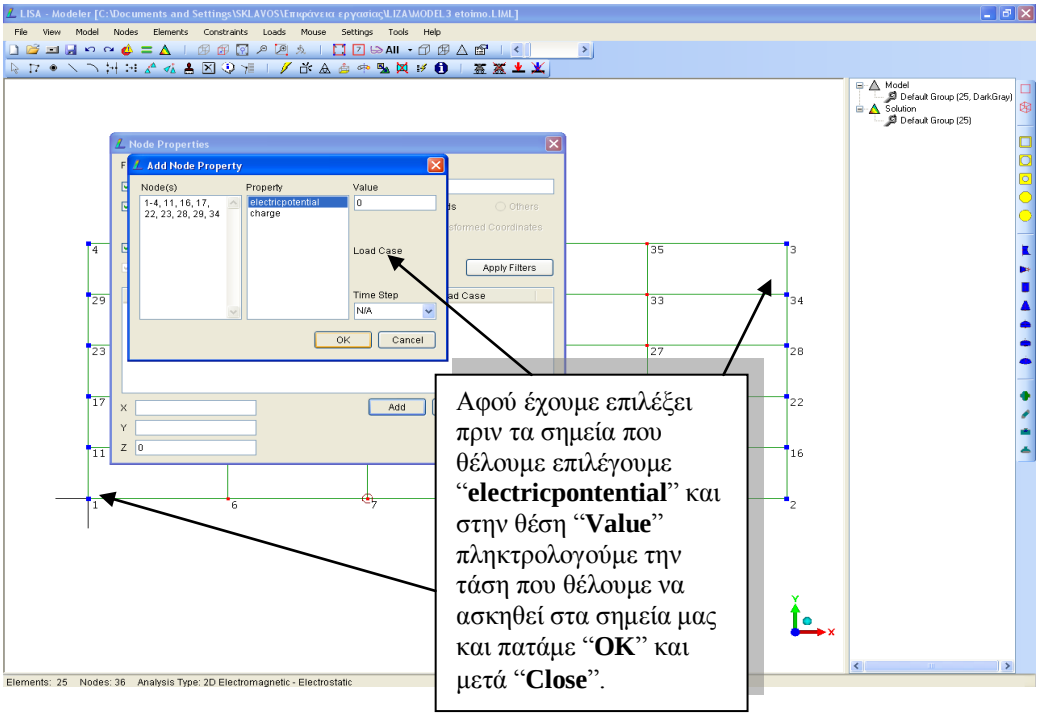

LISA - Modeler [C:\Documents and Settings\SKLAVOS\Επιφάνεια εργασίας\LIZA\MODEL3 etoimo.LIML]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (0, DarkGray)
Solution
Default Group (25)
4
3
1
2
Εδώ έχουμε σχεδιάσει όπως και πριν 4 σημεία, οι συντεταγμένες των σημείων είναι 1(0,0,0) 2(50,0,0) 3(50,20,0) και 4(0,20,0)
Elements: 0 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

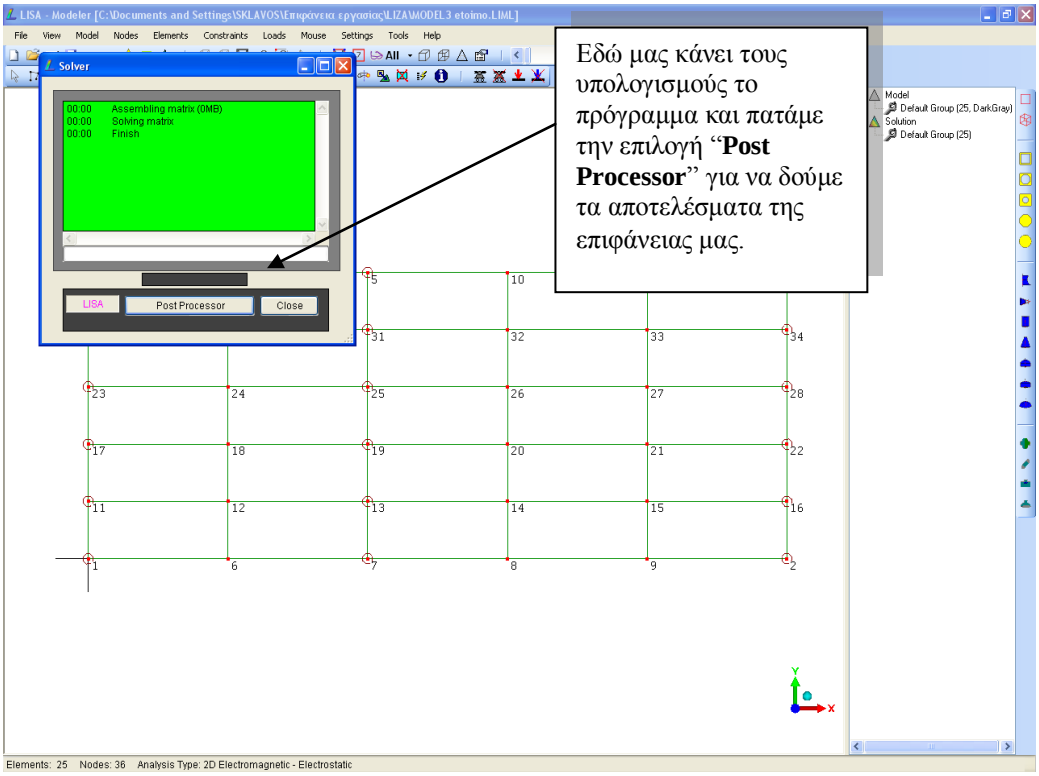

LISA - Modeler [C:\Documents and Settings\SKLAVOS\Επιφάνεια εργασίας\LIZA\MODEL3 etoimo.LIML]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (1, DarkGray)
Solution
Default Group (25)
Add Element
line2 N/A
line3 N/A
tri3 plane
tri6 N/A
quad4 plane
quad8 N/A
quad9 N/A
quad12 N/A
tet4 N/A
tet10 N/A
pyr5 N/A
pyr13 N/A
wedge6 N/A
wedge15 N/A
hex8 N/A
hex20 N/A
Material 1
Truss
Auto-correct topology for 3 and 4 node elements
Enter node numbers or pick with mouse
Add
Close
Εδώ μα εμφανίζεται το παράθυρο για να επιλέξουμε σε ποια μορφή θα συνδεθούν τα σημεία μας. Εμείς επιλέγουμε για το παράδειγμα μας την επιλογή "quad4 plane" και κάτω γράφουμε τα σημεία με την σειρά που θέλουμε να συνδεθούνε. Δηλαδή 1,2,3,4 και πατάμε "add".
Elements: 1 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

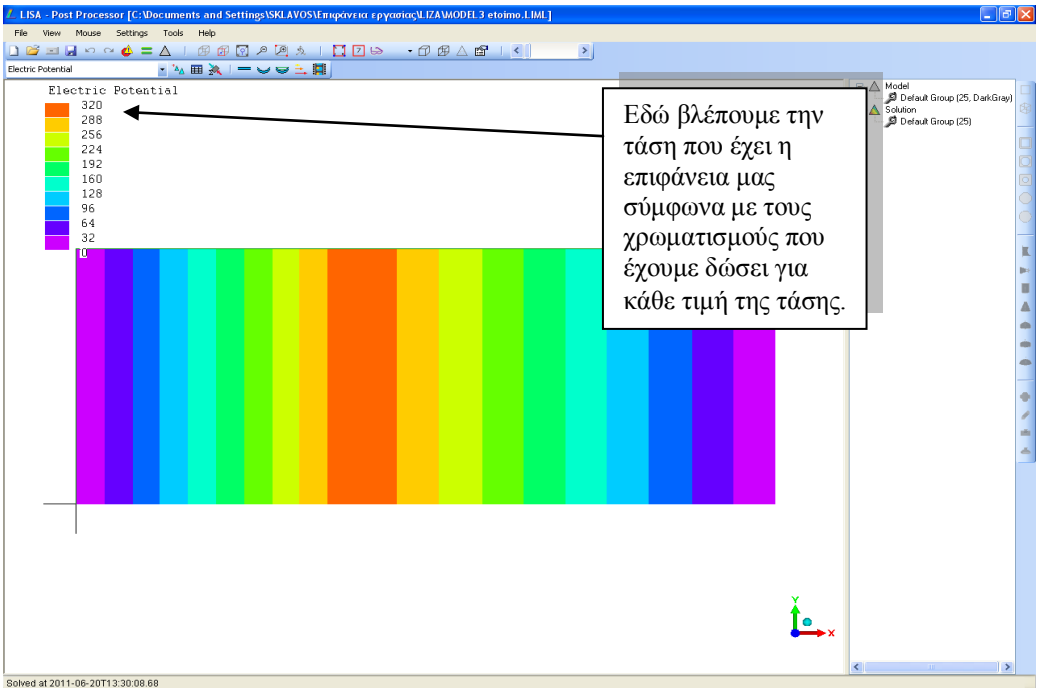

LISA - Modeler [C:\Documents and Settings\SKLAVOS\Επιφάνεια εργασίας\LIZA\MODEL3 etoimo.LIML]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Subdivide
Elements to subdivide. Can be quad4, quad8, quad12, hex8, hex20
1
Element local axes
R S T
Number of subdivisions 5 5 5
Equidistant
Geometrically increasing (quadratic elements only)
Geometrically decreasing (quadratic elements only)
Tolerance for merging neighboring nodes. Leave blank to prevent merge.
0.00001
Apply
Close
Model
Default Group (1, DarkGray)
Solution
Default Group (25)
4
3
1
2
Εδώ πληκτρολογούμε το αριθμό των "Elements" που θέλουμε να χωρίσουμε σε μικρότερα σημεία και πατάμε τις αποστάσεις που επιθυμούμε και στο τέλος πατάμε Apply.
Elements: 1 Nodes: 4 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic

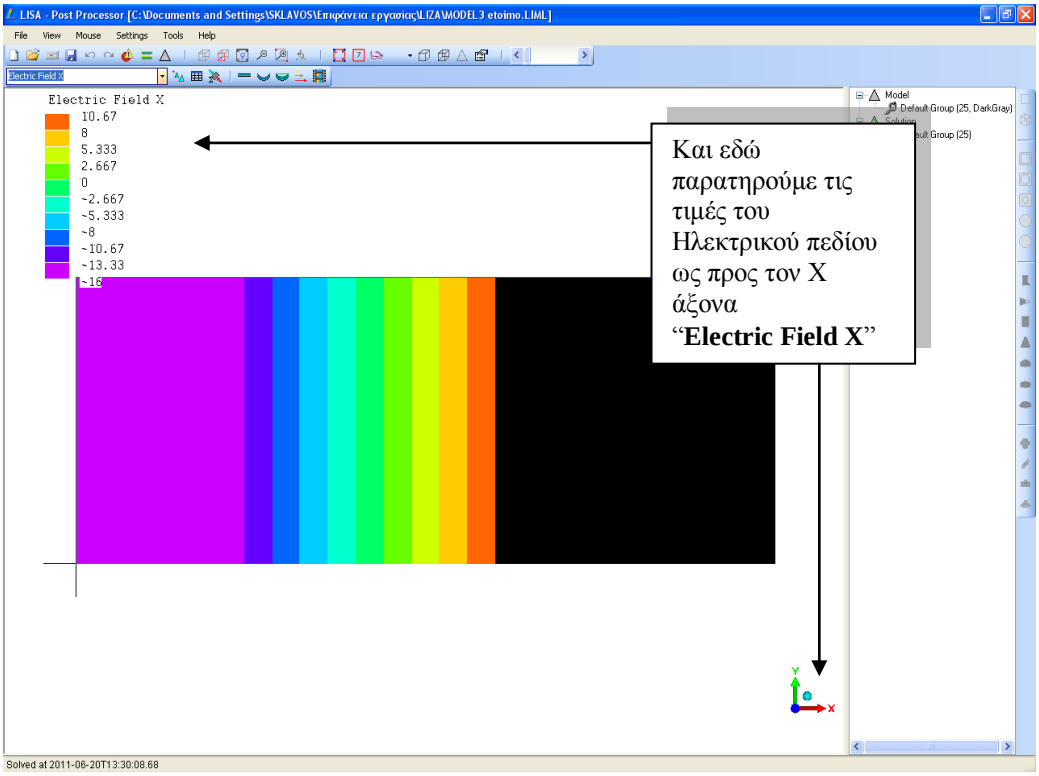

LISA - Modeler [C:\Documents and Settings\SKLAVOS\Επιφάνεια εργασίας\LIZA\MODEL3 etoimo.LIML]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Model
Default Group (25, DarkGray)
Solution
Default Group (25)
Εδώ βλέπουμε ότι την επιφάνεια μας την χωρίσαμε σε μικρότερα ίσα τμήματα.
4 36 5 10 35 3
29 30 31 32 33 34
23 24 25 26 27 28
17 18 19 20 21 22
11 12 13 14 15 16
1 6 7 8 9 2
Elements: 25 Nodes: 36 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic


Node Properties
Add Node Property
Node(s)
5, 7, 13, 19, 25, 31
Property
electricpotential
charge
Value
320
Load Case
Time Step
N/A
Apply Filters
OK
Cancel
Add
Edit
Delete
Close
Model
Default Group [25, DarkGray]
Solution
Default Group [25]
Αφού έχουμε επιλέξει πριν τα σημεία που θέλουμε επιλέγουμε "**electricpontential**" και στην θέση "**Value**" πληκτρολογούμε την τάση που θέλουμε να ασκηθεί στα σημεία μας και πατάμε "**OK**" και μετά "**Close**".
Elements: 25 Nodes: 36 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic


File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Node Properties
Add Node Property
Node(s)
1-4, 11, 16, 17, 22, 23, 28, 29, 34
Property
electricpotential
charge
Value
0
Load Case
Time Step
N/A
Apply Filters
OK
Cancel
Add
Model
Default Group [25, DarkGray]
Solution
Default Group [25]
Αφού έχουμε επιλέξει πριν τα σημεία που θέλουμε επιλέγουμε "**electricpontential**" και στην θέση "**Value**" πληκτρολογούμε την τάση που θέλουμε να ασκηθεί στα σημεία μας και πατάμε "**OK**" και μετά "**Close**".
Elements: 25 Nodes: 36 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic


LISA - Modeler [C:\Documents and Settings\SKLAVOS\Επιφάνεια εργασίας\LIZA\MODEL3 etoimo.LIML]
File View Model Nodes Elements Constraints Loads Mouse Settings Tools Help
Solver
00:00 Assembling matrix (0MB)
00:00 Solving matrix
00:00 Finish
LISA
Post Processor
Close
Εδώ μας κάνει τους υπολογισμούς το πρόγραμμα και πατάμε την επιλογή "Post Processor" για να δούμε τα αποτελέσματα της επιφάνειας μας.
Model
Default Group (25, DarkGray)
Solution
Default Group (25)
Elements: 25 Nodes: 36 Analysis Type: 2D Electromagnetic - Electrostatic


LISA - Post Processor [C:\Documents and Settings\SKLAVOS\Επιφάνεια εργασίας\LIZA\MODEL3 etoimo.LIML]
File View Mouse Settings Tools Help
Electric Potential
Electric Potential
320
288
256
224
192
160
128
96
64
32
0
Εδώ βλέπουμε την τάση που έχει η επιφάνεια μας σύμφωνα με τους χρωματισμούς που έχουμε δώσει για κάθε τιμή της τάσης.
Model
Default Group (25, DarkGray)
Solution
Default Group (25)
Solved at 2011-06-20T13:30:08.68


LISA - Post Processor [C:\Documents and Settings\SKLAVOS\Επιφάνεια εργασίας\LIZA\MODEL3 etoimo.LIML]
File View Mouse Settings Tools Help
Electric Field X
Electric Field X
10.67
8
5.333
2.667
0
-2.667
-5.333
-8
-10.67
-13.33
-16
Model
Default Group (25, DarkGray)
Default Group (25)
Και εδώ παρατηρούμε τις τιμές του Ηλεκτρικού πεδίου ως προς τον X άξονα "Electric Field X"
Y
X
Solved at 2011-06-20T13:30:08.68

ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ - 2012