



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

**Μελέτη κατανομής δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου  
σε καθοδικά αλεξικέραυνα**

Διπλωματική Εργασία

**Ελευθέριος Χ. Χρίστου**

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέποντες: Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη  
Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Αθήνα, Ιούνιος 2009



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

**Μελέτη κατανομής δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου  
σε καθοδικά αλεξικέραυνα**

Διπλωματική Εργασία

**Ελευθέριος Χ. Χρίστου**

Εγκρίθηκε από την πενταμελή εξεταστική επιτροπή την.....Ιουνίου 2009

.....  
Ι. Α. Σταθόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Π.Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φ.Β. Τοπαλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2009

.....

Ελευθέριος Χ. Χρίστου

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π., Υποψήφιος Διδάκτωρ

Copyright © Ελευθέριος Χ. Χρίστου, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Πρόλογος

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται ευρέως για την προστασία έναντι υπερτάσεων. Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης είναι σημαντική, καθώς το τμήμα που βρίσκεται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης καταπονείται περισσότερο. Η μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου μέσω κατάλληλου υπολογιστικού πακέτου και ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής του δυναμικού, μπορεί να συνεισφέρει στον πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό των καθοδικών αλεξικεραυνών. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ηλεκτρικό πεδίο και την κατανομή το δυναμικού σε ένα αλεξικέραυνο είναι η γεωμετρία των μερών που απαρτίζουν το αλεξικέραυνο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών.

Αναλυτικά :

Στο **πρώτο κεφάλαιο** περιγράφεται το φαινόμενο του κεραυνού και παρουσιάζονται οι κίνδυνοι οι οποίοι πηγάζουν από αυτόν.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μία εκτενής παρουσίαση του καθοδικού αλεξικέραυνου ως μέσο προστασίας από υπερτάσεις.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται μία ανασκόπηση του προτύπου IEC 60099-4 και των κυριότερων σχετικών εργασιών των τελευταίων ετών.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** γίνεται περιγραφή της λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου πεδιακής ανάλυσης Opera-2d V10.0. Περιγράφονται οι αλγόριθμοι λειτουργίας του, ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εντολές που αντιστοιχούν στις επί μέρους λειτουργίες.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιγράφονται οι εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών.

Στο **έκτο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η προσομοίωση του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, με τη χρήση του προγράμματος PC OPERA-2d και συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές με αυτές της προσομοίωσης. Επίσης, γίνεται η ίδια προσομοίωση, στο ίδιο αλεξικέραυνο, προσθέτοντας κάποια ρύπανση στα πτερύγια, σπάζοντας κάποια πτερύγια και δημιουργώντας κάποια ανομοιομορφία σε αυτά. Ακολουθώς, ερευνάται η ομοιομορφία του δυναμικού, τροποποιώντας το σχήμα του βαρίστορ στο εσωτερικό του αλεξικέραυνου.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** επισημαίνονται τα συμπεράσματα τα οποία προήλθαν από τις εργαστηριακές αυτές διαδικασίες και την προσομοίωση στο PC OPERA-2d, γίνεται μία γενικότερη εκτίμηση των αποτελεσμάτων και προτείνεται περαιτέρω μελέτη των δοκιμών αυτών.

Τέλος, σε αυτό το σημείο νιώθω την υποχρέωση να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα:

Στον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη την οποία έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην κ. Κονταργύρη Βασιλική, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π., για την καθοδήγησή της καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής, και την συνεχή αρωγή της, τόσο στα πειράματα, όσο στην εκμάθηση του προγράμματος PC-Opera.

Στον κ. Χρήστο Αθ. Χριστοδούλου, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Ε.Μ.Π. και Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη καθοδήγησή και ουσιαστική βοήθεια του, τον χρόνο τον οποίο διέθεσε και την άψογη συνεργασία την οποία είχαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Στους κ. Χρήστο Ηλία και Γιάννακα Άρη για την τεχνική υποστήριξη και βοήθεια κατά την διεξαγωγή των δοκιμών.

Τέλος, στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη και κατανόηση την οποία μου παρείχε κατά την πενταετή φοίτησή μου στο Ε.Μ.Π.

Ελευθέριος Χρίστου

Ιούνιος 2009

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1: Ο Κεραυνός .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ιστορική Αναδρομή .....	1
1.2 Μηχανισμός Δημιουργίας.....	1
1.3 Κατηγορίες Κεραυνικών Εκκενώσεων.....	3
1.4 Στάδια Εκκένωσης .....	4
1.5 Τα Είδη του Κεραυνού .....	6
1.6 Ο Σφαιρικός Κεραυνός .....	9
1.7 Χαρακτηριστικά του Κεραυνού.....	9
1.8 Κεραυνική Στάθμη-Ισοκεραυνική Καμπύλη .....	10
1.9 Κίνδυνοι οι οποίοι πηγάζουν από τον Κεραυνό .....	11
1.10 Κεραυνικά Πλήγματα σε Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής.....	13
<b>Κεφάλαιο 2: Αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης .....</b>	<b>15</b>
2.1 Εισαγωγή .....	15
2.2 Αλεξικέραυνα με διάκενα .....	16
2.3 Αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα.....	21
<b>Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....</b>	<b>30</b>
3.1 Ανασκόπηση του προτύπου IEC 60099-4 “Metal-oxide surge arrester without gaps for a.c systems”.....	30
3.1.1 Εισαγωγή .....	30
3.1.2 Μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου .....	30
3.1.3 Μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών .....	31
3.1.4 Υπολογιστική διαδικασία .....	31
3.1.4.1 Ανάλυση της χωρητικότητας των μη γραμμικών αντιστάσεων	31
3.1.4.2 Ανάλυση χωρητικότητας και αντίστασης των μη γραμμικών αντιστάσεων .....	32
3.1.5 Παραδείγματα υπολογισμών .....	33
3.1.5.1 Μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου και των οριακών συνθηκών.....	34
3.1.5.2 Επιδράσεις των ωμικών αντιστάσεων στις μη γραμμικές αντιστάσεις .....	35
3.1.6 Αποτελέσματα και συμπεράσματα από τους υπολογισμούς του ηλεκτρικού πεδίου .....	35
3.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	36
<b>Κεφάλαιο 4: ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PC OPERA 2d.....</b>	<b>46</b>
4.1 Εισαγωγή .....	46
4.2 Πρόγραμμα ανάλυσης .....	47
4.3 Φιλοσοφία του προγράμματος .....	50
4.3.1 Μοντέλο στο OPERA – 2d .....	50
4.3.2 Προ-επεξεργασία (pre-processing) .....	51

4.3.3 Ανάλυση .....	58
4.3.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing).....	59
4.4 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων .....	60
4.4.1 Γενική Μεθοδολογία .....	62
4.4.2 Δυδιάστατα Προβλήματα .....	66
4.4.3 Αναλυτική Μεθοδολογία .....	69
4.4.4 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων .....	73
4.4.5 Συναρτήσεις λάθους .....	74
4.5 Συνοριακές συνθήκες .....	74
4.6 Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιεί το PC OPERA-2d.....	77
4.6.1 Μαγνητοστατική και δινορρεύματα .....	77
4.6.2 Ηλεκτροστατική .....	78
4.7 Στατική Ανάλυση .....	79
4.7.1 Οι εξισώσεις που επιλύονται .....	79
4.7.2 Προετοιμασία για επίλυση με το OPERA-2d/St .....	80
4.7.3 Επίλυση προβλήματος με το OPERA-2d/St .....	81
<b>Κεφάλαιο 5: Πειραματική διάταξη και Εργαστηριακές δοκιμές.....</b>	<b>82</b>
5.1 Σκοπός και Βασικές αρχές των μετρήσεων .....	82
5.2 Εξεταζόμενο δοκίμιο .....	83
5.3 Συνδεσμολογία .....	84
5.3.1 Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου .....	86
5.4 Μετρήσεις .....	88
<b>Κεφάλαιο 6: Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου και κατανομής δυναμικού με το πρόγραμμα PC OPERA .....</b>	<b>118</b>
6.1 Εισαγωγή της γεωμετρίας στο PC OPERA-2d .....	118
6.2 Δημιουργία πλέγματος .....	119
6.3 Υπολογισμός Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου .....	120
6.4 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε τροποποιημένα αλεξικέρανα .....	127
6.4.1 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε ρυπασμένο αλεξικέρανο .....	128
6.4.2 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέρανο με ανομοιόμορφα πτερύγια .....	133
6.4.3 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέρανο με σπασμένα πτερύγια .....	137
6.4.4 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέρανο με ανομοιόμορφο βαρίστορ .....	142
6.5 Συμπεράσματα – Επέκταση .....	160
<b>Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα, παρατηρήσεις και επόμενη μέρα .....</b>	<b>162</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Περιγραφή πεδιομέτρου και αισθητήρα (probe) 163</b>	



## Περίληψη

Τα αλεξικέραυνα προσφέρουν προστασία έναντι των εξωτερικών και εσωτερικών υπερτάσεων. Ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα στην λειτουργία των αλεξικέραυνων, είναι η ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ, με αποτέλεσμα τα τμήματα που είναι κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης να καταπονούνται περισσότερο. Η μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου μέσω κατάλληλου υπολογιστικού πακέτου και ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής του δυναμικού, μπορεί να συνεισφέρει στον πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό των καθοδικών αλεξικεραυνών. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ηλεκτρικό πεδίο και την κατανομή του δυναμικού σε ένα αλεξικέραυνο είναι η γεωμετρία των μερών που απαρτίζουν το αλεξικέραυνο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών.

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο και σύγκριση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με το πρόγραμμα PC OPERA-2d. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας των μερών του αλεξικέραυνου και κυρίως του βαρίστορ στην κατανομή του δυναμικού, πραγματοποιήσαμε κάποιες σχεδιαστικές αλλαγές στο βαρίστορ και τις υλοποιήσαμε στο PC OPERA-2d, με στόχο μια πιο ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ. Τέλος, μελετήσαμε την αλλαγή στην κατανομή του δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου, όταν στο αρχικό αλεξικέραυνο υπάρχει κάποια ρύπανση, ανομοιόμορφα πτερύγια ή σπασμένα πτερύγια.

### Λέξεις κλειδιά

Αλεξικέραυνο, μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ), ηλεκτρικό πεδίο, κατανομή δυναμικού, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

# Κεφάλαιο 1

## Ο Κεραυνός

### 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Από τα παλαιά χρόνια φαινόμενα ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού όπως ο κεραυνός προκαλούσαν τόσο το δέος όσο και τον θαυμασμό του ανθρώπου απέναντι στη φύση. Η άγνοια και η μη δυνατότητα ερμηνείας τους οδηγούσε συχνά στην απόδοσή τους σε υπερφυσικές δυνάμεις. Τις περισσότερες φορές, μάλιστα ο άνθρωπος αδυνατώντας να τα εξηγήσει τα θεωρούσε θεϊκά σημάδια και οιωνούς με τα οποία η εκάστοτε θεότητα φανέρωνε είτε την αγανάκτηση είτε την ικανοποίησή της για τα ανθρώπινα έργα. Χαρακτηριστικό άλλωστε παράδειγμα αποτελεί η αρχαία Ελλάδα. Ειδικότερα, κατά την ελληνική μυθολογία ο κεραυνός θεωρείται αποκλειστικό προνόμιο του Δία το οποίο απέκτησε ως δώρο από τους Κύκλωπες. Με αυτόν, ο πατέρας των θεών απειλεί τους εχθρούς του και τον στέλνει στη γη για να ευεργετήσει τους αγαθούς ή για να τιμωρήσει τους υβριστές και τους άδικους. Σημαντικές, παράλληλα αναφορές στα φαινόμενα του κεραυνού και της αστραπής συναντά κανείς τόσο στο έργο του Έλληνα συγγραφέα Πλουτάρχου ( 50 - 120 μ.Χ. ) όσο και σε αυτό του Γάλλου αστρονόμου Φλαμμαρίονα (Camille Flammarion 1846-1936). Ένας Αμερικάνος, προγενέστερος του Φλαμμαρίονα ωστόσο ήταν αυτός ο οποίος κατάφερε να απομυθοποιήσει τον κεραυνό, αποκλείοντας παράλληλα κάθε θεοκεντρική θεωρία που αφορούσε την ερμηνεία του ως φυσικό φαινόμενο: Ο Φραγκλίνος (Benjamin Franklin 1706-1790). Ο διαπρεπής αυτός φυσικός και πολιτικός κατάφερε να αποδείξει ότι ο κεραυνός δεν είναι παρά μία ηλεκτρική εκκένωση. Με την απόδειξή του αυτή προσπάθησε να εξαλείψει κάθε ίχνος θεοκεντρισμού από την εξήγησή του κεραυνού.

### 1.2 Μηχανισμός Δημιουργίας

Στη σημερινή εποχή πλέον οι κεραυνοί έχουν πάψει να αποτελούν μυστήριο καθώς ο μηχανισμός δημιουργίας του γίνεται όλο και πιο κατανοητός χωρίς ωστόσο να έχει

επιτευχθεί πλήρως η αποσαφήνισή του. Οι κεραυνοί συνοδεύονται τόσο από φωτεινά φαινόμενα (τις αστραπές) όσο και από ηχητικά (τις βροντές). Δημιουργούνται συνήθως σε σύννεφα τύπου σωρειτομελανία (cumulonimbus), χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η εμφάνισή τους σε σύννεφα τύπου μελανόστρωμα (nimbostratus), σε χιονοθύελλες, κονιορτοθύελλες, σε νέφη τα οποία συνοδεύουν την έκρηξη ενός ηφαιστείου αλλά ακόμη και σε καθαρό ουρανό.

Οι κεραυνοί δημιουργούνται λόγω του διαχωρισμού φορτίου σε ένα νέφος. Ο διαχωρισμός αυτός δημιουργεί με τη σειρά του μία ηλεκτρική φόρτιση στην συγκεκριμένη περιοχή της ατμόσφαιρας, η οποία όταν αυξηθεί σημαντικά, προκαλεί την διάσπαση του ατμοσφαιρικού αέρα από τα ηλεκτρικά πεδία, τα οποία συνδέονται με τη φόρτιση αυτή, προκαλώντας κατά αυτόν τον τρόπο την εμφάνιση του φαινομένου του κεραυνού.

Κατά τη διάρκεια μία καταιγίδας δηλαδή λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός φορτίου σε ένα νέφος [1], γεγονός το οποίο δίνει στο νέφος τη δομή ενός ηλεκτρικού διπόλου. Ειδικότερα, θετικά φορτία κινούνται προς το ανώτερο τμήμα του νέφους παρουσιάζοντας έτσι το τελευταίο στο κάτω μέρος του ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας (κυμαινόμενο από δεκάδες ως εκατοντάδες Cb) και στο πάνω μέρος του ένα φορτίο θετικής πολικότητας. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει συμφωνία σχετικά με το μηχανισμό αυτό δημιουργίας του φορτίου. Δύο αποτελούν ωστόσο τις επικρατούσες θεωρίες: Αυτή του Wilson και αυτή του Simpson [1]. Η πρώτη βασίζεται στην παραδοχή ότι στην ατμόσφαιρα υπάρχουν πολυάριθμα ιόντα στα οποία προσκολλώνται σταγονίδια και σκόνη και πέφτουν στη γη. Η θεωρία του Simpson αντιθέτως ερμηνεύει τον διαχωρισμό ως αποτέλεσμα της ύπαρξης ανοδικών ρευμάτων στη ατμόσφαιρα τα οποία οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στη ατμόσφαιρα. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο έχει παρατηρηθεί ότι ο παραπάνω διαχωρισμός πραγματοποιείται από μερικά ως τριάντα λεπτά ενώ τόσο η πυκνότητα όσο και η διασπορά των φορτίων μέσα σε ένα νέφος μεταβάλλονται διαρκώς.



*Σχήμα 1.1: Φωτογραφία με κεραυνικά πλήγματα*

### **1.3 Κατηγορίες Κεραυνικών Εκκενώσεων**

Τρεις είναι οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι κεραυνικές εκκενώσεις: Από ένα σύννεφο προς το έδαφος ή και αντίστροφα, ανάμεσα σε διαφορετικά σύννεφα (διανεφικές εκκενώσεις) και μέσα στο ίδιο το σύννεφο (ενδονεφικές εκκενώσεις).

Η πρώτη κατηγορία αποτελεί την πιο κατανοητή χωρίς ωστόσο να είναι και η πιο συνηθισμένη. Οι κεραυνοί αυτού του είδους παρατηρούνται κοντά στην αρνητικά φορτισμένη περιοχή του νέφους και εμφανίζονται, όταν το επιτόπιο ηλεκτρικό πεδίο προσεγγίζει την τιμή κατά την οποία προκαλείται ιονισμός του ατμοσφαιρικού αέρα (η οποία ισούται περίπου με  $30 \text{ kV/cm}$ ). Όταν το πεδίο αυτό βρίσκεται πλησίον του νέφους έχουμε κατερχόμενη κεραυνική εκκένωση ενώ όταν βρίσκεται πλησίον του εδάφους έχουμε ανερχόμενη [1].

Η δεύτερη κατηγορία η οποία αποτελεί και την πιο σπάνια λαμβάνει χώρα σε ύψος μεταξύ 1 και 12 km, ενώ χαρακτηρίζεται και από το μεγάλο σε μήκος της κεραυνικού τόξου.

Τέλος, οι κεραυνικές εκκενώσεις οι οποίες πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους αποτελούν και τη συνηθέστερη μορφή. Η εν λόγω εκκένωση γίνεται μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου θετικά και αρνητικά φορτισμένου χωρίου ενώ η τιμή του ρεύματός της κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες ως χίλια Amperes [1]. Κατά τη διάρκεια επίσης της εκκένωσης το σύννεφο παρουσιάζει μία συνεχή φωτεινότητα της τάξεως των 0,2 sec με μερικούς παλμούς μεγαλύτερης λαμπρότητας διάρκειας 1 msec.

#### **1.4 Στάδια Εκκένωσης**

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό τα παραπάνω διαφορετικά είδη κεραυνικών εκκενώσεων παρουσιάζουν και διαφορετικά στάδια εκκένωσης. Κατά το πρώτο στάδιο ανάπτυξης ενός κεραυνού μεταξύ νέφους και εδάφους παρατηρείται μία αμυδρή φωτεινή διαδικασία σε εξέλιξη με κανονικά διακριτά βήματα μήκους 50 ή 100 m και με διαστήματα παύσεως μεταξύ των βημάτων που διαρκούν μερικές δεκάδες msec [1], η οποία κατεβαίνει προς το έδαφος (ή ανεβαίνει από αυτό) με τη μορφή διακλάδωσης (κλιμακωτός οδηγός). Ο κλιμακωτός αυτός οδηγός διαδίδεται με μέση ταχύτητα περί τα 105 m/sec μεταφέροντας ρεύμα της τάξεως των 100 Amperes. Καθώς ο οδηγός αυτός πλησιάζει στο έδαφος επάγεται εκεί ένα αντίθετο φορτίο. Όταν το φορτίο αυτό αυξηθεί μέχρι κάποια συγκεκριμένη τιμή και καθώς το ρεύμα μεταξύ του προπορευόμενου τμήματος του κεραυνού και του σημείου όπου θα πέσει ο κεραυνός αυξάνεται σημειώνεται μία εκφόρτιση προς τα πάνω με αφετηρία το σημείο αυτό του εδάφους για να συναντήσει τον κλιμακωτό οδηγό σε ύψος πενήντα περίπου μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Όταν πραγματοποιηθεί αυτή η «συνάντηση» η επιστρέφουσα εκκένωση αρχίζει από το έδαφος προς το νέφος. Το πλήγμα αυτό (στο ρεύμα του οποίου μάλιστα οφείλονται και τα καταστροφικά αποτελέσματα των κεραυνών) κινείται με ταχύτητα ίση περίπου με  $5 \times 10^7$  m/sec, το ρεύμα του κυμαίνεται από λίγα ως 250 kA

και η θερμοκρασία εντός του διαύλου (κατά μήκος του οποίου κινείται η επιφόρτιση) της τάξεως των 150000-200000C [1]. Στη συνέχεια, τη στιγμή αυτή το αρνητικό φορτίο του σύννεφου ουδετεροποιείται από το επαγόμενο στο έδαφος θετικό φορτίο και γίνεται και αντιληπτό το φαινόμενο από το ανθρώπινο μάτι. Η επιστρέφουσα αυτή εκκένωση δύναται να συνοδεύεται και από άλλες δευτερεύουσες εκκενώσεις οι οποίες πλέον ξεκινούν όχι με κλιμακωτό οδηγό αλλά με την εμφάνιση ενός φωτεινού βέλους, μήκους 50 περίπου μέτρων, που διαδίδεται στον δίαυλο της επιστρέφουσας εκκένωσης προς τα κάτω. Με ταχύτητα 106 m/sec, ο βελοειδής οδηγός μεταφέρει ένα ρεύμα της τάξης των 1.000 Amperes προς το έδαφος. Ξανά μια φορτισμένη περιοχή στο σύννεφο βραχυκυκλώνεται προς το έδαφος και εμφανίζεται μια επιστρέφουσα εκκένωση. Η ακολουθία αυτή, βελοειδής οδηγός-επιστρέφουσα εκκένωση, σημειώνεται συνήθως τρεις με τέσσερις φορές, παρ'όλο που έχει αναφερθεί και κεραυνός που είχε 26 επιμέρους εκκενώσεις και είχε διάρκεια δύο δευτερολέπτων. Όταν ένας κεραυνός αποτελείται από περισσότερες της μιας εκκενώσεις, οι επόμενες (δεύτερη, τρίτη κλπ) επιστρέφουσες εκκενώσεις αντλούν φορτία από διαδοχικά υψηλότερα κέντρα φορτίου στα σύννεφα τύπου σωρειτομελανία.

Κατά τη φάση ροής επιστρέφουσας εκκένωσης καταναλώνεται μέσα στον δίαυλο του κεραυνού ενέργεια ίση με 105 J/m. Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε ενέργεια διάσπασης, ιοντισμού, διέγερσης και κινητική των μορίων, σε ενέργεια εκτόνωσης του διαύλου και σε ακτινοβολία. Οι φασματοσκοπικές μετρήσεις αποκαλύπτουν ότι τα μόρια του αέρα, κυρίως το άζωτο, το οξυγόνο και οι υδρατμοί, διασπώνται στα αντίστοιχα άτομα και ότι από κάθε άτομο απομακρύνεται κατά μέσο όρο ένα ηλεκτρόνιο. Η μετατροπή των μορίων του αέρα σε απλά ιοντισμένο πλάσμα σημειώνεται μέσα σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Στον χρόνο αυτό, η θερμοκρασία του πλάσματος είναι τουλάχιστον 30.000 K και η πίεσή του μεγαλύτερη από 10 atm. Η υψηλή αυτή πίεση ξεπερνά κατά πολύ την πίεση του περιβάλλοντος. Ο δίαυλος της επιστρέφουσας εκκένωσης εκτονώνεται με υπερηχητική ταχύτητα και το κρουστικό κύμα μετατρέπεται σε ηχητικό, στη βροντή που ακούμε. Υπολογίζεται ότι το 1% της ενέργειας καταναλώνεται στα μόρια και λιγότερο από 1% εκπέμπεται ως ακτινοβολία στην ορατή

και την υπέρυθρη περιοχή. Συνεπώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας πιθανότατα μετατρέπεται σε ενέργεια εκτόνωσης του διαύλου, μια διαδικασία που δεν διαρκεί περισσότερο από 10-20 εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου.



Σχήμα 1.2: Κεραυνός μεταξύ νέφους και εδάφους [2]

Στην περίπτωση των ενδονεφικών εκκενώσεων η εκκένωση ξεκινά με έναν οδηγό που διαδίδεται ανάμεσα σε κέντρα φορτίου. Η εμφάνιση παλμών λαμπρότητας υποδηλώνει την ύπαρξη μικρότερων εκκενώσεων επιστροφής, καθώς ο οδηγός φτάνει σε θύλακες φορτίου. Η ταχύτητα διάδοσης της εκκένωσης είναι της τάξεως των 104 m/sec ενώ το ρεύμα της μερικές χιλιάδες Amperes.

## 1.5 Τα Είδη του Κεραυνού

Οι κεραυνικές εκκενώσεις διαχωρίστηκαν παραπάνω με βάση μια επιστημονική ταξινόμηση. Και πριν όμως γίνουν γνωστές οι συνιστώσες ενός κεραυνού, οι άνθρωποι είχαν επινοήσει δικές τους μεθόδους για την ταξινόμηση των κεραυνών. Οι ονομασίες γραμμική, διάχυτη, ραβδωτή, ταινιωτή, θερμική, κροκοειδής, θερμή και ψυχρή εξηγούνται σε σχέση με τους κεραυνούς οι οποίοι είτε πέφτουν στο έδαφος είτε ξεσπούν μέσα στα σύννεφα.

Η διχαλωτή αστραπή συνδέεται με τους κεραυνούς που εμφανίζουν πολλούς κλάδους και πέφτουν από τα σύννεφα προς το έδαφος. Η "διχάλα" είναι ακριβώς η εκτενής πολυδιακλάδωση που δημιουργείται από πολυάριθμους κλιμακωτούς οδηγούς που κινούνται προς τη διεύθυνση του εδάφους, ώσπου ένας από αυτούς να έλθει τυχαία σε επαφή με το έδαφος. Οι κλιμακωτοί οδηγοί που δεν φτάνουν στο έδαφος γίνονται κλάδοι της πρώτης επιστρέφουσας εκκένωσης. Αν υπάρχουν πολύ λίγοι κλάδοι, η αστραπή είναι γνωστή ως ραβδωτή.

Μια εκκένωση που ξεσπά μέσα σ' ένα σύννεφο (ενδονεφικός κεραυνός) είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος κεραυνού και συνήθως φωτίζει το σύννεφο χωρίς ο διάυλος να γίνεται ορατός. Το σύννεφο δίνει τότε την εντύπωση ενός λευκού σεντονιού, απ' όπου και η ονομασία διάχυτος κεραυνός [3].

Ο θερμικός κεραυνός είναι ένα είδος μακρινής εκκένωσης από σύννεφο προς το έδαφος, που ξεσπά τα ζεστά καλοκαιρινά βράδια και έχει ένα χαρακτηριστικό κόκκινο ή πορτοκαλί χρώμα.

Οι αστραπές εκπέμπουν φως σε όλα τα χρώματα του ορατού φάσματος (από τη μπλε ακτινοβολία που έχει το ελάχιστο μήκος κύματος, ως την κόκκινη που έχει το μέγιστο). Το μπλε φως σκεδάζεται πιο πολύ από το κόκκινο, γεγονός το οποίο έχει ως



αποτέλεσμα το κόκκινο φως να φτάνει σε πιο μακρινούς παρατηρητές, στους οποίους έτσι δίνεται η εντύπωση ότι ο κεραυνός είναι κόκκινος.

Ο θερμός και ο ψυχρός κεραυνός συνδέονται με την παρατήρηση ότι άλλοι κεραυνοί προκαλούν φωτιές στα δάση και άλλοι όχι. Παρόλο που η φύση του υλικού που πλήττεται από τον κεραυνό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για το αν θα προκληθεί φωτιά ή όχι, τα χαρακτηριστικά του ρεύματος επιστροφής της επιστρέφουσας εκκένωσης είναι πιο σημαντικά. Οι κεραυνοί που περιλαμβάνουν εκκενώσεις με συνεχές ρεύμα μερικών εκατοντάδων Amperes και διαρκούν χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά τη φάση του υψηλού ρεύματος έχει αποδειχθεί ότι δύναται να προκαλέσουν πυρκαγιές στα δάση και χαρακτηρίζονται κατά συνέπεια ως θερμοί. Οι κεραυνοί χωρίς συνεχές ρεύμα που πέφτουν σε δέντρα προξενούν, συνήθως, μόνο καταστροφές, όπως μία έκρηξη, και είναι γνωστοί ως ψυχροί κεραυνοί.

Μερικές σπάνιες μορφές κεραυνών περιλαμβάνουν αστραπές με μορφή ταινίας ή κομπολογιού (κροκοειδής κεραυνός). Οι κεραυνοί αυτοί είναι μια μορφή εκκενώσεων που ξεσπούν από ένα σύννεφο προς το έδαφος. Αν ένας κεραυνός συνίσταται από διαδοχικές εκκενώσεις και σε διεύθυνση κάθετη προς τη γραμμή παρατήρησης φυσάει δυνατός άνεμος, ο διάυλος εκτονώνεται προς τα πλάγια και οι διαδοχικές εκκενώσεις μετατοπίζονται. Λόγω της αδράνειας του αμφιβληστροειδούς χιτώνα του ματιού, το οποίο διατηρεί για κάποιον επιπλέον χρόνο το είδωλο, η λάμψη εμφανίζεται σαν μια ταινία που αποτελείται από αρκετές εκκενώσεις.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να καταγραφεί και φωτογραφικά με αργή κίνησης μιας μηχανής, από τη μια πλευρά ως την άλλη, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ένας αργός διαχωρισμός των επιμέρους εκκενώσεων ενός κεραυνού. Αυτός άλλωστε ήταν και ο τρόπος με τον οποίο, στην πραγματικότητα, πρωτοαναγνωρίστηκαν οι επιμέρους εκκενώσεις γύρω στο 1900. Κροκοειδής κεραυνός έχει φωτογραφηθεί σε αρκετές περιπτώσεις. Η κύρια φωτεινότητα της αστραπής σπάει σε φωτεινά τμήματα ή "χάντρες",

καθώς η ένταση του φωτός του διαύλου ελαττώνεται. Η χρονικά αυξανόμενη φωτεινότητα της "χάντρας" μπορεί να οφείλεται σε τμήματα του διαύλου που παρατηρούνται το ένα πίσω από το άλλο ή σε τμήματα που έχουν από μόνα τους μεγαλύτερη διάμετρο και κατά συνέπεια αργούν περισσότερο να ψυχθούν [3].

## 1.6 Ο Σφαιρικός Κεραυνός

Η πιο σπάνια ωστόσο και μυστηριώδης μορφή κεραυνού είναι ο σφαιρικός ή σφαιροειδής κεραυνός, που αποτελείται από φλεγόμενη σφαίρα, η οποία εμφανίζεται κατά τη διάρκεια καταιγίδας και κοντά συνήθως σε μέρος όπου έπεσε ένας κεραυνός. Ο εν λόγω κεραυνός κινείται με οριζόντια ταχύτητα από 1-2 m/sec , έχει τη μορφή φωτεινής σφαίρας διαμέτρου από 10-100 cm [2], το χρώμα της μοιάζει με αυτό της φλόγας, έχει χρόνο ζωής μερικών δευτερολέπτων και ενδέχεται να συνοδεύεται και από ένα είδους σφυρίγματος. Ορισμένοι από τους σφαιρικούς κεραυνούς εξαφανίζονται αθόρυβα ενώ άλλοι προκαλούν μία έκρηξη η οποία δύναται να προκαλέσει και περιορισμένης εκτάσεως ζημιές. Οι θεωρίες για τον σφαιροειδή κεραυνό μπορούν να ταξινομηθούν σ' εκείνες που προτείνουν μια εξωτερική πηγή ενέργειας και σ' εκείνες που προτείνουν μια εσωτερική πηγή ενέργειας. Καμιά από τις θεωρίες ωστόσο δεν κατάφερε να εξηγήσει την κινητικότητα της φωτεινής σφαίρας ή τον λόγο για τον οποίον αυτή δεν υπερυψώνεται, όπως θεωρητικά θα έπρεπε να συμβαίνει σε θερμό πλάσμα αερίου που βρίσκεται σε ισορροπία από την άποψη της πίεσης. Καμιά αυθεντική φωτογραφία σφαιροειδούς κεραυνού δεν έχει δημοσιευθεί μέχρι σήμερα γεγονός το οποίο δημιουργεί εύλογες αμφιβολίες σχετικά με την ύπαρξη ή όχι του φαινομένου αυτού, έχει όμως αφιερωθεί ερευνητική προσπάθεια στο φαινόμενο αυτό χωρίς ωστόσο κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα.

## 1.7 Χαρακτηριστικά του Κεραυνού

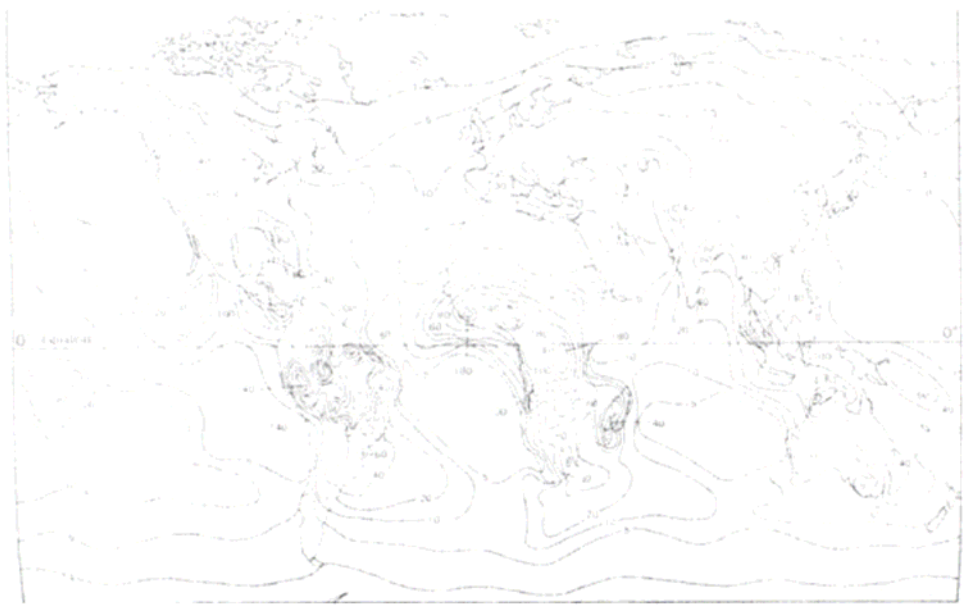
Ο κεραυνός ως ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από 4 παραμέτρους οι οποίες μάλιστα μπορούν να επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα τόσο στις ανθρώπινες ζωές όσο και στις τεχνικές εγκαταστάσεις:

- Η μέγιστη τιμή ρεύματος ( $i_{max}$ ): Η μέγιστη τιμή είναι αυτή η οποία προκαλεί τόσο την υπερπήδηση μονωτήρων όσο και την καταστροφή των μονωτικών υλικών καθώς ανυψώνεται το δυναμικό του σημείου όπου έπεσε ο κεραυνός [1].
- Η μέγιστη κλίση του ρεύματος του κεραυνού [  $(di/dt)_{max}$  ]: Η εν λόγω κλίση προσδιορίζει τις τάσεις λογικών κυκλωμάτων ή κυκλωμάτων στοιχείων συστημάτων πλοήγησης αεροσκαφών και γενικότερα όλα τα είδη επαγωγικών πτώσεων τάσης [1].
- Το μεταφερόμενο φορτίο  $(\int_0^{\infty} i(t) dt)$  : Αποτελεί το μέτρο της ενέργειας του κεραυνού προς μεταλλικές επιφάνειες όπως και αυτό της διάχυσης του μεταβατικού ηλεκτρικού πεδίου μέσω μεταλλικών κλωβών [1]. Φαινόμενα όπως η τοπική τήξη και διάτρηση μετάλλων προκαλείται συνήθως από το μεταφερόμενο φορτίο του κεραυνού.
- Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος  $(\int_0^{\infty} i^2(t) dt)$  : Αποτελεί ποσό ανάλογο με την ενέργεια της κεραυνικής εκκένωσης και δύναται να προκαλέσει θερμικά φαινόμενα (όπως η έναυση εύφλεκτων υγρών ή αερίων) [1].

## 1.8 Κεραυνική Στάθμη-Ισοκεραυνική Καμπύλη

Μία περιοχή χαρακτηρίζεται από την κεραυνική στάθμη (γνωστή και ως κεραυνικό επίπεδο). Η στάθμη αυτή ορίζεται ως το πλήθος των ημερών κατά τις οποίες παρατηρείται καταιγίδα στην συγκεκριμένη περιοχή (ή αλλιώς γίνονται αντιληπτές

κεραυνικές εκκενώσεις μέσω του χαρακτηριστικού θορύβου της βροντής στην περιοχή αυτή), ορισμός βέβαια αρκετά υποκειμενικός ο οποίος μάλιστα αγνοεί και την ποικιλία και σοβαρότητα των θυελλών [1]. Μέσω του παραπάνω κριτηρίου έχουμε την δυνατότητα να κατατάξουμε τις διάφορες περιοχές. Ενώνοντας λοιπόν τις περιοχές ενός χάρτη οι οποίες παρουσιάζουν το ίδιο κεραυνικό επίπεδο προκύπτει μία ισοκεραυνική καμπύλη. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ισοκεραυνικές καμπύλες όλης της υφελίου.



*Σχήμα 1.3: Οι Ισοκεραυνικές Καμπύλες της Υφελίου [1]*

Με τη βοήθεια του μέσου αριθμού των ημερών κατά τις οποίες γίνεται αντιληπτός ένας κεραυνός σε μία περιοχή (T) δίνεται ο αριθμός των κεραυνών ανά μονάδα επιφάνειας και ανά έτος στην συγκεκριμένη περιοχή ( $N_s$ ):

$$N_s = T / 7 \text{ κεραυνοί/km}^2 \text{ έτος} \quad (1.1)$$

Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί ότι η τιμή του  $N_s$  επηρεάζεται τόσο από την φύση της θύελλας όσο και από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής (στις ορεινές περιοχές ειδικότερα παρατηρούνται περισσότεροι κεραυνοί από ότι στις πεδινές).

## 1.9 Κίνδυνοι οι οποίοι πηγάζουν από τον Κεραυνό

Εκτός από τις εξωτερικές υπερτάσεις, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω, με τις δυσάρεστες συνέπειές τους στις γραμμές μεταφοράς αλλά και στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις γενικότερα ο κεραυνός μπορεί να γίνει αιτία σημαντικών καταστροφών και να οδηγήσει ακόμα και στην απώλεια της ανθρώπινης ζωής. Οι κεραυνοί που πλήττουν απευθείας ανθρώπους προκαλούν συνήθως τον θάνατο και προξενούν τους περισσότερους θανάτους από οποιοδήποτε άλλο μετεωρολογικό φαινόμενο. Οι πτώσεις ωστόσο κεραυνών απευθείας σε έναν άνθρωπο δεν είναι και κατ' ανάγκη θανατηφόρες, αν εφαρμοστούν σε αυτόν έγκαιρα μαλάξεις καρδιάς και παρατεταμένη τεχνητή αναπνοή [5]. Και αυτό διότι ένα άτομο το οποίο πλήττεται από κεραυνό χάνει τις αισθήσεις του και διακόπτεται η λειτουργία της καρδιάς και της αναπνοής του. Η πιθανή ανάρρωση ωστόσο μπορεί να είναι και πλήρης εκτός από πιθανές βλάβες στην όραση και στην ακοή του ατόμου.

Οι σημαντικότερες υλικές καταστροφές προκαλούνται από τα χτυπήματα του κεραυνού σε επίγεια αντικείμενα τα οποία δεν έχουν καλές ηλεκτρογειώσεις. Ο κεραυνός συχνά διαπερνάει το υλικό σχηματίζοντας έτσι στενούς αγωγούς, στους οποίους τείνει το ρεύμα του κεραυνού ενώ ένα μέρος του υλικού εξατμίζεται κατά την έκρηξη καθώς στους αγωγούς αυτούς δημιουργείται πολύ υψηλή θερμοκρασία. Τα παραπάνω καταλήγουν στο διαμελισμό του αντικειμένου που πλήττεται από κεραυνό και στην ανάφλεξη των στοιχείων του [1]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δυνατότητα ενός κεραυνού αρχικά να διαμελίσει και στη συνέχεια να εκσφεντονίσει κομμάτια βράχων των οποίων το βάρος προσεγγίζει τους 5 τόνους. Παράλληλα, είναι δυνατόν να εμφανιστούν μεγάλες διαφορές δυναμικών και ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ διάφορων αντικειμένων στο εσωτερικό της κατασκευής τους οι οποίες δύναται να προκαλέσουν πυρκαγιές.

Μεγάλα δένδρα, υψηλά κτίρια, καπνοδόχοι, σκάφη που πλέουν στη θάλασσα, ακόμη και κολυμβητές, αποτελούν σημεία έλξης των κεραυνών. Συχνά τα θύματα δεν πλήττονται άμεσα από τον κεραυνό, αλλά από τα ισχυρά επαγωγικά ρεύματα που δημιουργούνται στην περιοχή πτώσης του. Βασικοί κανόνες αποφυγής της κεραυνοπληξίας αποτελούν

τόσο η απομάκρυνση από υψηλά και μεμονωμένα αντικείμενα, όπως δένδρα, την ώρα της καταιγίδας όσο και η αποφυγή επαφής με μεταλλικά αντικείμενα [3].



*Σχήμα 1.4: Φωτογραφία με κεραυνό που πλήττει δέντρο*

### **1.10 Κεραυνικά Πλήγματα σε Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής**

Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσίασαν μία συνεχή και αλματώδη ανάπτυξη κατά τον 20ο αιώνα. Εμφανίστηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα οπότε και έκαναν την εμφάνισή τους και οι πρώτες εφαρμογές του ηλεκτρισμού. Στη σημερινή πλέον εποχή, οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτουν το σύνολο των κατοικημένων περιοχών εξασφαλίζοντας έτσι την ηλεκτροδότηση του συνόλου των καταναλωτών. Την τελευταία ωστόσο δεκαετία η σημαντική ανάπτυξη των

τηλεπικοινωνιακών μέσων σε συνδυασμό με την ανάγκη αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιφέρουν αναπόφευκτα την ανάγκη για ορισμένες επιθυμητές αλλαγές στην τεχνική της μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση των καταναλωτών σε συνδυασμό με την πληρέστερη εκμετάλλευση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Στη χώρα μας το σύνολο του συστήματος παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας ανήκει στην Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Ένα σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να διακριθεί στα παρακάτω τμήματα:

- Τους σταθμούς παραγωγής, όπου και παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.
- Τα δίκτυα μεταφοράς, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η σύνδεση των σταθμών παραγωγής μεταξύ τους και η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας πλησίον των κέντρων κατανάλωσης (YYT, YT).
- Τα δίκτυα διανομής, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές (MT, XT).

## Κεφάλαιο 2

### Αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης

#### 2.1 Εισαγωγή

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών μεταφοράς και διανομής και των υποσταθμών από υπερτάσεις. Είναι συσκευές οι οποίες επιτρέπουν τη διόδο του ηλεκτρισμού προς τη γη σε περιπτώσεις υπέρτασης, ενώ στην κανονική λειτουργία δεν άγουν σχεδόν καθόλου. Τα αλεξικέραυνα μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν διακόπτες οι οποίοι κλείνουν στιγμιαίως σε περίπτωση υπέρτασης και δημιουργούν μια αγώγιμη δίοδο προς τη γη, διοχετεύοντας την υπέρταση μακριά από τις προς προστασία συσκευές. Βασικές, λοιπόν, ιδιότητες ενός αλεξικέραυνου είναι [7,8]:

- Να μην άγει κατά την κανονική τάση λειτουργίας (στην πραγματικότητα υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής της τάξεως του 1 mA).
- Να αρχίσει να άγει μόλις εμφανισθεί μια υπέρταση.
- Να διακόπτει αμέσως τη λειτουργία του μόλις παρέλθει η υπέρταση.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αλεξικέραυνων (με ή χωρίς διάκενα) οι οποίοι λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο: παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση της τάξης των  $M\Omega$  σε κανονική λειτουργία, ενώ σε περίπτωση υπέρτασης η αντίσταση μειώνεται σε μερικά  $\Omega$ . Παλαιότερα, αλεξικέραυνα με διάκενα σε σειρά με μη γραμμικές αντιστάσεις ήταν ευρέως διαδεδομένα, σήμερα όμως δίνουν τη θέση τους σε αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα, τα οποία αποτελούνται από μη γραμμικές αντιστάσεις οξειδίου του ψευδαργύρου ( $ZnO$ ).



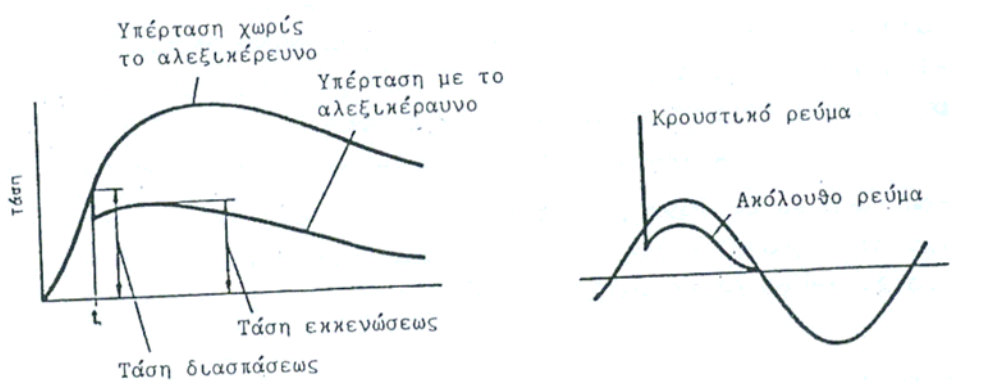
## 2.2 Αλεξικέραυνα με διάκενα

Αυτού του τύπου τα αλεξικέραυνα αποτελούνται από σειρά διακένων σε σειρά μια μη γραμμική αντίσταση, περικλειόμενα σε κατάλληλο μονωτικό περίβλημα. Τα διάκενα, τα οποία πρέπει να έχουν όσο γίνεται περισσότερο ομοιογενές πεδίο, ούτως ώστε η τάση διάσπασης τους αν είναι ανεξάρτητη από την κλίση του μετώπου της κρουστικής τάσης-διασπώνται όταν η υπέρταση υπερβεί μια ορισμένη τιμή, συνδέοντας τον αγωγό υψηλής τάσης με τη γη. Μόλις παρέλθει η υπέρταση, το τόξο δεν μπορεί να συντηρηθεί υπό την κανονική τάση λειτουργίας λόγω της μη γραμμικής αντίστασης. Οι μη γραμμικές αντιστάσεις στα αλεξικέραυνα με διάκενα είναι συνήθως από ανθρακοπυρίτιο (SiC), ενώ η χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος, που εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του υλικού, το συνεκτικό υλικό και τον τρόπο κατασκευής τους, είναι της μορφής:

$$I = kU^a \quad (2.1)$$

όπου  $k$  και  $a$  συντελεστές.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του αλεξικέραυνου όταν φθάσει σε αυτό μια υπέρταση. Μετά τη διάσπαση των διακένων, το ακόλουθο ρεύμα περιορίζεται από τις μη γραμμικές αντιστάσεις, ώστε μόλις η τιμή του γίνει μηδενική να διακόπτεται[7-10].



Σχήμα 2.1: Αρχή λειτουργίας αλεξικέραυνου και διακοπή ακόλουθου ρεύματος

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των αλεξικέραυνων είναι [11]:

α. Ονομαστική τάση: Είναι η μέγιστη τάση (rms) στη συχνότητα λειτουργίας του αλεξικέραυνου, στην οποία το αλεξικέραυνο μπορεί να διακόψει με βεβαιότητα το ακόλουθο ρεύμα. Η τάση αυτή πρέπει, αν μείνει μονίμως τα άκρα του αλεξικέραυνου, να μην επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του.

β. Κρουστική Τάση Διασπάσεως

Μετωπική: Είναι η τάση διασπάσεως του αλεξικέραυνου, που συμβαίνει στο μέτωπο του κρουστικού κύματος (δηλαδή προ της κορυφής).

Η κλίση του μετώπου κατά IEC είναι 100 kV/μsec για κάθε 12 kV της ονομαστικής τάσης του αλεξικέραυνου, αλλά όχι παραπάνω από 1200 kV/μsec (π.χ. για 21 kV η κλίση είναι  $21/12100 = 175$  kV/μsec).

Κρουστική 100%: Είναι η κορυφή της ελάχιστης τάσης κρουστικού κύματος ορισμένης μορφής (κατά IEC 1,2/50 μsec), για την οποία όσες φορές κι αν επιβληθεί έχουμε διάσπαση του αλεξικέραυνου.

Κρουστική 50% (κρίσιμη): Είναι η κορυφή της τάσης κρουστικού κύματος (1,2/50 μsec) που όταν επιβληθεί επανειλημμένως θα προκαλέσει διάσπαση του αλεξικέραυνου στο 50% των περιπτώσεων.

Για κάθε σημείο της καμπύλης τάσης διάσπασης του αλεξικέραυνου-χρόνου (βλέπε σχήμα 2.4), τετμημένη είναι η διάρκεια από την αρχή της επιβολής της τάσης μέχρι της διάσπασης του αλεξικέραυνου και τεταγμένη η τάση διάσπασης προκειμένου για μετωπική διάσπαση ή η κορυφή της τάσης που επιβάλλεται προκειμένου για διάσπαση στη ουρά του κύματος.

γ. Τάση εκκενώσεως ή παραμένουσα τάση: Είναι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του αλεξικέραυνου μετά τη διάσπασή του, κατά τη διάρκεια της εκκενώσεως του ρεύματος (μορφής 8/20  $\mu\text{sec}$ ).

δ. Τάση διάσπασης Β.Σ. (50 Hz) : Είναι η ενδεικνυμένη τιμή της ελαχίστης τάσης Β.Σ. που προκαλεί διάσπαση του αλεξικέραυνου, όταν και όσες φορές κι αν επιβληθεί στα άκρα του.

ε. Ρεύμα εκκενώσεως : Το κρουστικό ρεύμα που διέρχεται από το αλεξικέραυνο κατά την εκκένωσή του.

ζ. Ονομαστικό ρεύμα εκκενώσεως: Το ρεύμα εκκενώσεως ορισμένης μορφής (8x20  $\mu\text{sec}$ ), που μπορεί να εκκενώσει το αλεξικέραυνο, χωρίς η τάση στα άκρα του να υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση εκκενώσεως (παραμένουσα).

Η ένταση αυτή ορίζει την κλάση του αλεξικέραυνου. Το αλεξικέραυνο πρέπει να μπορεί να εκκενώνει το ονομαστικό ρεύμα εκκενώσεως, σε αριθμό (φορές) και συχνότητα, που ορίζονται από την προδιαγραφή του.

στ. Κρουστικό ρεύμα εκκενώσεως: Είναι η μέγιστη τιμή (κορυφή) κρουστικού ρεύματος μορφής 4/10  $\mu\text{sec}$ , που μπορεί να εκκενώνει το αλεξικέραυνο.

η. Ακόλουθο ρεύμα: Το ρεύμα 50 Hz που διέρχεται από το αλεξικέραυνο μετά την εκκένωση του κρουστικού ρεύματος.

Υπάρχουν δύο τύποι διακένων: Τα συμβατικά ή παθητικά διάκενα και τα ενεργητικά διάκενα.

Ένα συγκρότημα με παθητικά διάκενα αποτελείται από ηλεκτρόδια χωρισμένα με τα τεμάχια στεατίτου και με μη γραμμικές αντιστάσεις κατανομής μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στα διάκενα αυτά υπάρχει επίσης μία διάταξη προιοντισμού ούτως

ώστε να επιτυγχάνεται συγκεκριμένη στάθμη τάσης διάσπασης (χωρίς δηλαδή μεγάλη διασπορά) και χαμηλή στάθμη προστασίας. Σκοπός των αντιστάσεων κατανομής (grading resistors) είναι η ομοιόμορφη κατανομή της τάσης κατά μήκος των διακένων κατά τη διάρκεια σχετικώς βραδέως μεταβαλλόμενων υπερτάσεων. Για ταχέως μεταβαλλόμενες υπερτάσεις την ομοιόμορφη κατανομή εξασφαλίζουν πυκνωτές κατανομής (grading capacitors) παράλληλοι προς τις αντιστάσεις αυτές και τα διάκενα. Έτσι η τάση διάσπασης στην βιομηχανική συχνότητα και σε υπερτάσεις χειρισμών εξαρτάται κυρίως από τις αντιστάσεις κατανομής ενώ η τάση διάσπασης σε ταχέως μεταβαλλόμενες υπερτάσεις ατμοσφαιρικής προελεύσεως εξαρτάται από τις χωρητικότητες κατανομής του αλεξικέραυνου [7-12].

Ένα συγκρότημα με ενεργητικά διάκενα αποτελείται από ηλεκτρόδια στερεωμένα πάνω σε μονωτικούς δίσκους οι οποίοι φέρνουν και αντίσταση στο τόξο. Εν σειρά με τα ηλεκτρόδια αυτά και τους δίσκους υπάρχει ένα πηνίο το οποίο δημιουργεί ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο με την βοήθεια του οποίου το τόξο μετακινείται προς ένα στενό θάλαμο σβέσεως όπου και επιμηκύνεται περίπου 100 φορές. Η επιμήκυνση αυτή του τόξου δημιουργεί μεγάλη πτώση τάσης κατά μήκος των διακένων και βελτίωση στις συνθήκες εκκαθάρισεως του ακόλουθου ρεύματος. Έτσι τα κυριότερα προσόντα των αλεξικέραυνων με ενεργά διάκενα είναι:

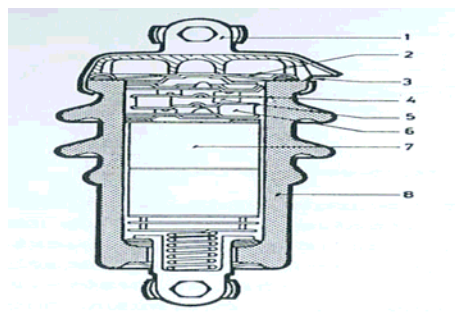
- Καλύτερη προστασία χωρίς να έχουμε σημαντική αύξηση της ισχύος του ακόλουθου ρεύματος.
- Καλύτερη δυνατότητα σφραγίσεως.
- Δυνατότητα απορροφήσεως μεγαλύτερης διάρκειας εκκενώσεως.

Τα αλεξικέραυνα με ενεργά διάκενα χρησιμοποιούνται για δίκτυο ονομαστικών τάσεων μεγαλύτερων από 200 kV για τα οποία οι σχετικές στάθμες μόνωσης είναι χαμηλές και η στάθμη προστασίας σε υπερτάσεις χειρισμών είναι επίσης χαμηλή [7-12].

Εκτός από τις μη γραμμικές αντιστάσεις κατανομής της τάσης που βρίσκονται παράλληλα με κάθε διάκενο έχουμε και εν σειρά με τα διάκενα μία μη γραμμική αντίσταση (είτε μία ανά διάκενο είτε μία συνολική για όλο το αλεξικέραυνο) από ανθρακούχο πυρίτιο SiC). Η αντίσταση αυτή, που καλείται και αντίσταση βαλβίδας εξαρτάται από την τάση. Έτσι τυπικά αναφέρεται εδώ ότι με διπλασιασμό του ρεύματος η τάσης στα άκρα της αντίστασης αυξάνεται μόνο κατά 10-15%. Με άλλα λόγια η αντίσταση πέφτει σημαντικά ενώ το ρεύμα αυξάνει. Έτσι το ρεύμα της ατμοσφαιρικής εκκενώσεως περνάει χωρίς αν δημιουργήσει τάση επικίνδυνη για τον εξοπλισμό [7-12].

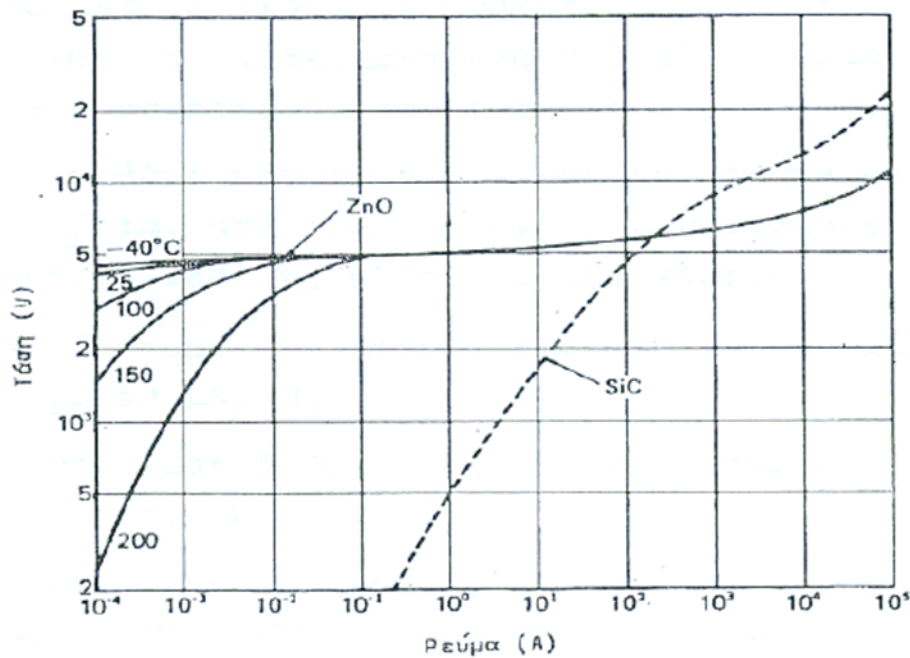
Σε μία λίγο διαφορετική κατασκευή δεν υπάρχει πηνίο για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου που θα επιμηκύνει το τόξο αλλά η διαμόρφωση των ηλεκτροδίων είναι τέτοια ώστε το ίδιο το ρεύμα του τόξου να δημιουργεί το απαραίτητο για το σκοπό αυτόν μαγνητικό πεδίο [7-12].

Τα περισσότερα αλεξικέραυνα έχουν μία ανακουφιστική διάταξη πίεσεως (pressure relief arrangement) με την οποία αποφεύγεται η βίαιη καταστροφή τους σε περίπτωση που το αλεξικέραυνο δεν σφραγίζει. Η φιλοσοφία της διάταξης αυτής είναι ότι σε μία τέτοια περίπτωση θα πρέπει η διάσπαση να μεταφέρεται το ταχύτερο δυνατόν εκτός του αλεξικέραυνου. Η δημιουργούμενη στον εσωτερικό χώρο υπερπίεση παραμορφώνει τον δίσκο και έτσι τα ιονισμένα αέρια εξέρχονται προκαλώντας εξωτερική διάσπαση λόγω του ιονισμού τους [7].



*Σχήμα 2.2: Αλεξικέραυνο με παθητικά διάκενα και αντίσταση βαλβίδας (1. Ανω βραχίονας, 2. Διάφραγμα και ανακουφιστική διάταξη υπερπίεσης, 3. Άνοιγμα διαφυγής αερίων, 4. Ηλεκτρόδιο διακένου, 5. Διαχωριστικό στεατίτου, 6, 7. Αντίσταση βαλβίδας, 8. Πορσελίνη)*

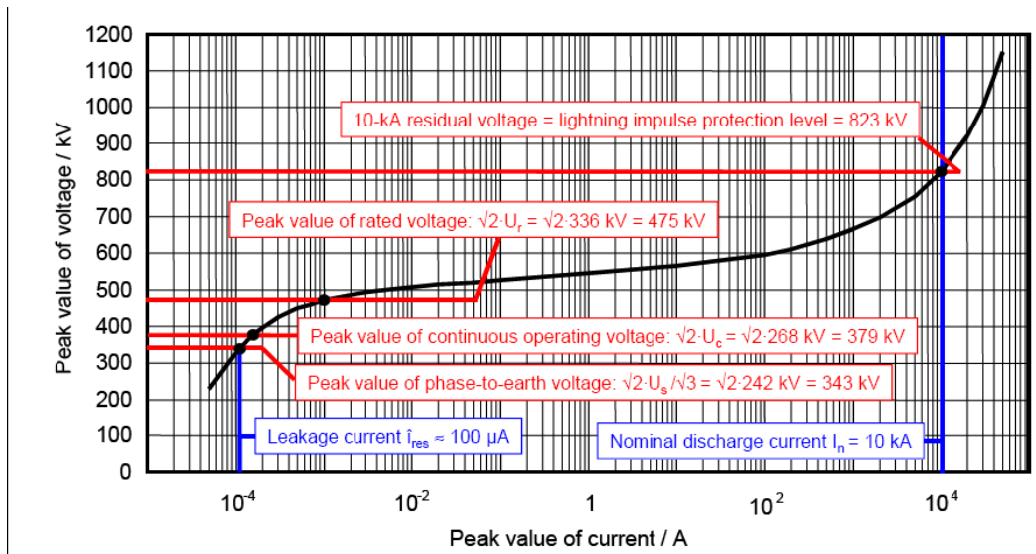
Εκτός από το ανθρακούχο πυρίτιο (SiC) που χρησιμοποιείται πάνω από 25 χρόνια σαν το βασικό υλικό για τις μη γραμμικές αντιστάσεις των αλεξικέραυνων, χρησιμοποιήθηκε κατά την δεκαετία 1970-80 και το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) το οποίο σε σύγκριση με το SiC παρουσιάζει πολύ πιο έντονη γραμμικότητα όπως φαίνεται και στο Σχ.2.3. Τα αλεξικέραυνα με ZnO έχουν χαμηλότερη και ακριβέστερα προσδιορισμένη στάθμη προστασίας και για το λόγο αυτό έχουν αντικαταστήσει τα αλεξικέραυνα με SiC.



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές τάσης - ρεύματος [1]

### 2.3 Αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα

Τα τελευταία χρόνια τα αλεξικέραυνα με διάκενα αντικαθίστανται με αυτά χωρίς διάκενα, τα οποία αποτελούνται από μη γραμμικές αντιστάσεις κατασκευασμένες από οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), το οποίο συνιστά σημαντική βελτίωση έναντι του SiC, καθώς η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος είναι σχεδόν επίπεδη και μη γραμμική και καλύπτει περίπου 8 δεκάδες (Σχ.2.4). Αυτή ακριβώς η έντονη μη γραμμικότητα είναι αυτή που καθιστά την κατασκευή αλεξικέραυνου χωρίς διάκενα [10].



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος ενός αλεξικέραυνου χωρίς διάκενα [8]

Σε τάση κανονικής λειτουργίας το ρεύμα διαρροής περιορίζεται σε κάποια mA, ενώ μπορεί να διακόπτει κρουστικές τάσεις με ρεύματα πολλών kA. Το ρεύμα που ρέει δια της μη γραμμικής αντίστασης είναι αμελητέο για κάθε τάση μικρότερη μιας ορισμένη τιμής  $V_l$  (που μπορεί να είναι η κανονική τάση λειτουργίας του δικτύου), εάν όμως εμφανιστεί στα άκρα του αλεξικέραυνου μια τάση μεγαλύτερη με αναμενόμενο εύρος τιμής υψηλότερο μιας τιμής  $V_m > V_l$ , ρέει δια αυτού μεγάλο ρεύμα έτσι ώστε η τάση να περιορισθεί κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες στην τιμή  $V_m$  [10,13-14].

Τα πλεονεκτήματα των αλεξικέραυνων αυτών είναι η απλή τους κατασκευή, η μη γραμμική σχέση τάσης ρεύματος για μια μεγάλη περιοχή τιμών καθώς και η απουσία διακένων τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν πολύ απότομο μέτωπο μείωσης της τάσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία επικίνδυνων καταπονήσεων. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι η συνεχής ροή ρεύματος βιομηχανική συχνότητας και κατά συνέπεια η απώλεια ισχύος.

Η μη γραμμική αντίσταση συνίσταται από ZnO με μικρές προσμίξεις και άλλων οξειδίων, όπως Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, Cr<sub>3</sub>O<sub>3</sub> και Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Οι πρώτες κατασκευές από οξείδιο του

ψευδαργύρου τοποθετούνταν σε κεραμικό περίβλημα, όπου τα στοιχεία του βαρίστορ περιβάλλονταν από μονωτικό αέριο και οι καταλήξεις τους σφραγίζονταν με δακτυλίους από καουτσούκ. Με την πάροδο του χρόνου όμως οι δακτύλιοι φθείρονταν με αποτέλεσμα την είσοδο υγρασίας στην όλη κατασκευή. Κατά τη δεκαετία του 80 άρχισαν να χρησιμοποιούνται περιβλήματα από πολυμερή υλικά (όπως το καουτσούκ σιλικόνης). Τέτοια υλικά, τα οποία είναι κατάλληλα και για περιοχές με μεγάλη ατμοσφαιρική ρύπανση, προσφέρουν ελαφρύτερες κατασκευές, βελτιωμένη μηχανική αντοχή και αύξηση της τάσης υπερπήδησης σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη ρύπανση[10].

Τα κυριότερα μεγέθη που ενδιαφέρουν σε ένα αλεξικέραυνο είναι [15]:

α. Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας (Maximum Continuous Operating Voltage- $U_c$ ): Είναι η μέγιστη ενεργός τιμή της τάσης που μπορεί να εφαρμόζεται διαρκώς στα άκρα του αλεξικέραυνου. Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κανονική τάση του δικτύου. ( $U_c = 1.05-1.1U$ )

β. Ονομαστική τάση (Rated Voltage- $U_r$ ): Είναι η μέγιστη ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα του αλεξικέραυνου, για την οποία το αλεξικέραυνο συνεχίζει να λειτουργεί σωστά για προσωρινές υπερτάσεις (10-100sec). Η ονομαστική τάση είναι 1,25 φορές τη μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας:  $U_r = 1.25U_c$ .

γ. Παραμένουσα τάση ( $U_{res}$ ): Είναι η τάση στα άκρα του αλεξικέραυνου κατά την εφαρμογή κρουστικών ρευμάτων.

δ. Βασική κρουστική τάση μονώσεως (Lightning Impulse Protective Level): Είναι η τάση στα άκρα του αλεξικέραυνου όταν διέρχεται δι' αυτού το ονομαστικό ρεύμα εκφορτίσεως.

ε. Ενέργεια αντοχής (Thermal energy absorption capability): Είναι η μέγιστη τιμή της εγχυόμενης ενέργειας στο αλεξικέραυνο, μετά την οποία το αλεξικέραυνο επανέρχεται στην κανονική θερμοκρασία λειτουργίας.



Στα Σχήματα 2.4 και 2.5 φαίνεται η τομή ενός αλεξικέραυνου, βασικά στοιχεία του οποίου η μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ) από οξειδία του ψευδαργύρου, το μονωτικό περίβλημα από πολυμερές υλικό, ένα ενδιάμεσο υαλώδες υλικό και τα ηλεκτρόδια σύνδεσης με την υψηλή τάση και τη γη. Λόγω της ανομοιομορφίας του δυναμικού στο εσωτερικό του βαρίστορ (η οποία καταπονεί θερμικά το τμήμα του βαρίστορ που βρίσκεται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης) τοποθετούνται, ιδίως στα αλεξικέραυνα 150kV και 400kV, κατάλληλα τοροειδή (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.4: Τομή αλεξικέραυνου [16]



Σχήμα 2.5: Τομή αλεξικέραυνου [13]

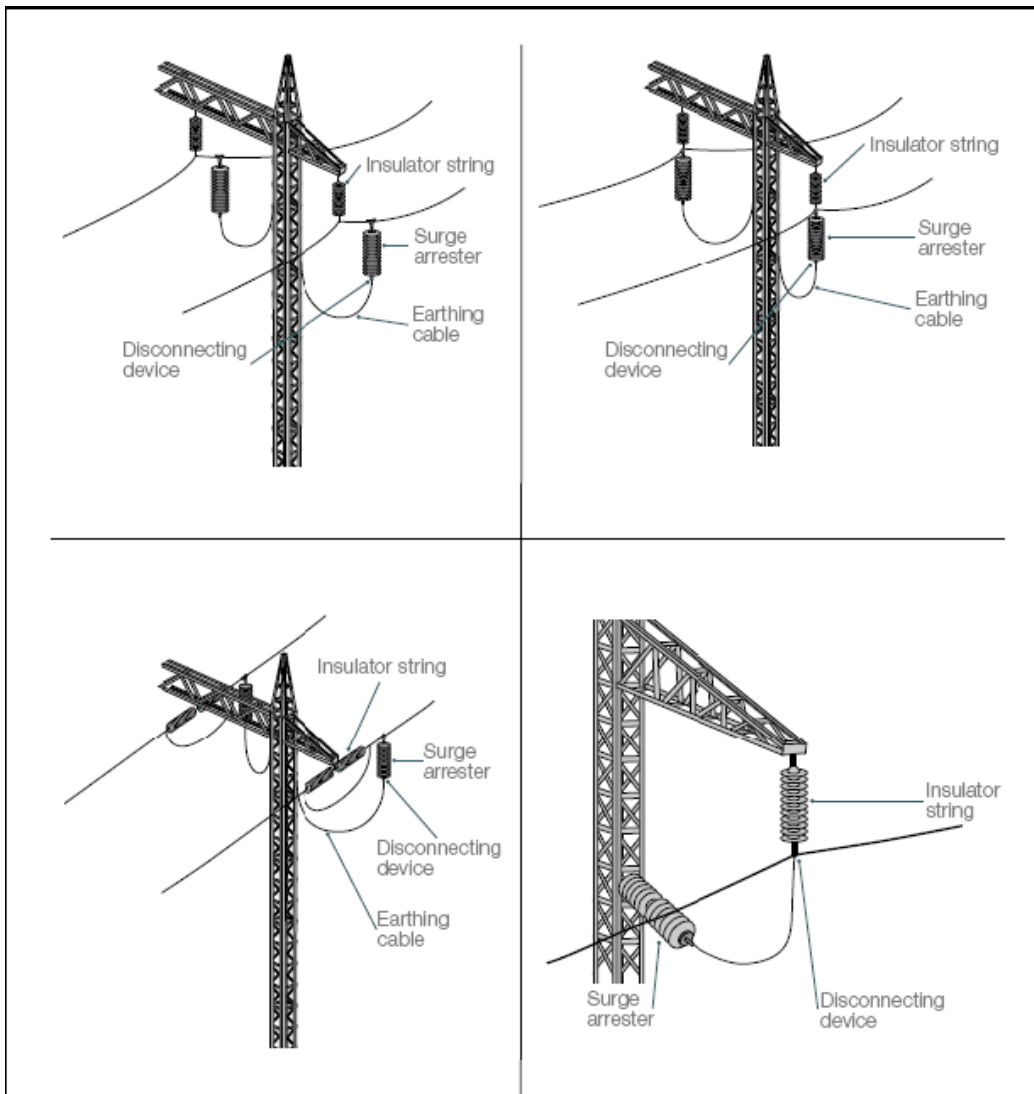


Σχήμα.2.6: Αλεξικέραυνα 400kV και 150kV με τοροειδή [7]

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών υψηλής και μέσης τάσης καθώς και των μετασχηματιστών, τόσο για απευθείας όσο και για επαγόμενα κεραυνικά πλήγματα. Τοποθετούνται μεταξύ φάσης και γης (Σχήματα 2.7 και 2.8) και είναι ιδιαίτερα αναγκαία στην περίπτωση υψηλών αντιστάσεων γείωσης.



*Σχήμα 2.7: Αλεξικέραυνα σε γραμμή μεταφοράς [13]*



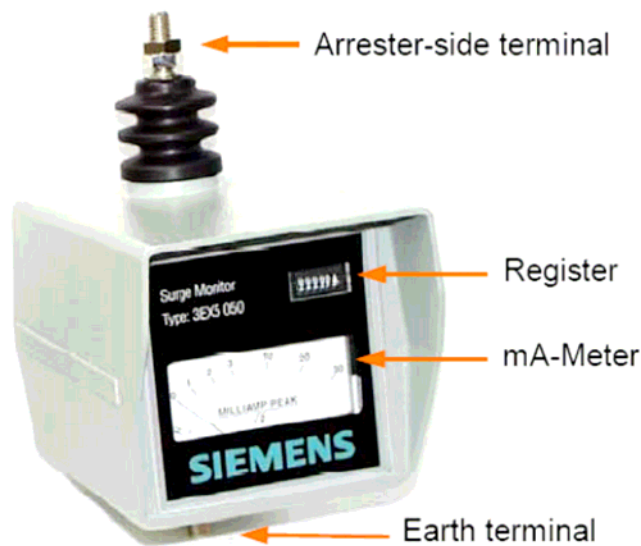
Σχήμα 2.8: Τρόποι τοποθέτησης αλεξικέρανων σε πλώνες γραμμών μεταφοράς [14]

Εξοπλισμός που συνοδεύει συνήθως τα αλεξικέρανα είναι ο μετρητής υπερτάσεων, η συσκευή αποσύνδεσης και ο μετρητής του ρεύματος διαρροής. Οι μετρητές υπερτάσεων (Σχήμα 2.9) συνδέονται εν σειρά με το αλεξικέρανο και καταγράφουν με ηλεκτρομηχανικό ή ηλεκτρονικό τρόπο πόσες φορές λειτούργησε το αλεξικέρανο.



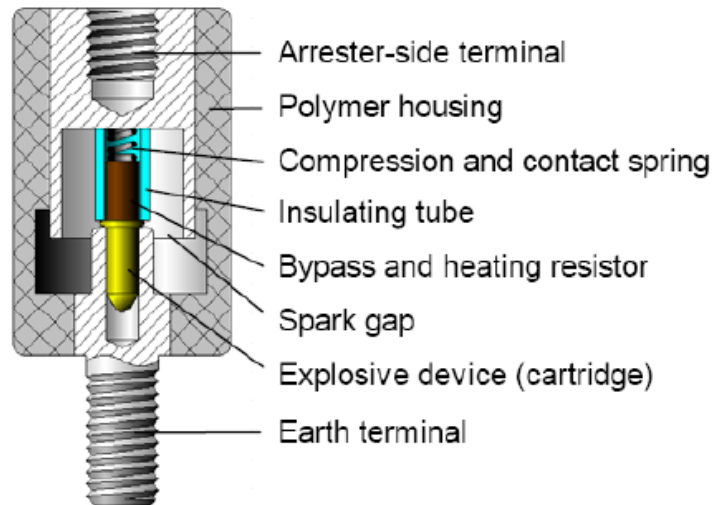
Σχήμα 2.9: Μετρητής Υπερτάσεων [12]

Ο μετρητής του ρεύματος διαρροής συνδέεται σε σειρά με το αλεξικέραυνο και μετράει το ολικό ρεύμα διαρροής. Η ένδειξη αυτή ωστόσο δεν έχει μεγάλη πρακτική αξία, αφού αυτό που ενδιαφέρει είναι η ωμική συνιστώσα του ρεύματος διαρροής.



Σχήμα 2.10: Μετρητής ρεύματος διαρροής [14]

Η συσκευή αποσύνδεσης (Σχήμα 2.11) αποσυνδέει το αλεξικέραυνο από το σύστημα σε περίπτωση υπερφόρτισης ή πιθανής καταστροφής του. Στην περίπτωση αυτή την περίπτωση η γραμμή μένει απροστάτευτη από υπερτάσεις. Τυπική αρχή λειτουργίας της συσκευής αποσύνδεσης είναι ένας εκρηκτικός μηχανισμός ενεργοποιούμενος από το ρεύμα διαρροής.



Σχήμα 2.11: Συσκευή αποσύνδεσης [14]

Τα αλεξικέραυνα έχουν μεγάλη σημασία καλή λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και διανομής, για αυτό θα πρέπει να είναι σε καλή κατάσταση και να λειτουργούν αξιόπιστα τόσο υπό κανονικές συνθήκες όσο και σε μεταβατικά φαινόμενα. Οι πιο συνηθισμένες αστοχίες σε αλεξικέραυνα όλων των τύπων είναι [17]:

- Εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του αλεξικέραυνου.
- Μερικές εκκενώσεις στο εσωτερικό, εξαιτίας κακής επαφής μεταξύ των δίσκων του βαρίστορ).
- Καταστροφή ή ρύπανση του εξωτερικού περιβλήματος.

- Μηχανικές – θερμικές καταπονήσεις και καταστροφή ή αλλοίωση της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος μετά από διέλευση ισχυρού ρεύματος.

Είναι φανερό ότι απαιτείται συχνή οπτική επιθεώρηση και διεξαγωγή κατάλληλων δοκιμών για τον έλεγχο της κατάστασης των αλεξικέραυνων, εάν δηλαδή μπορούν να λειτουργούν και προστατεύουν αποτελεσματικά τη γραμμή σε περίπτωση υπέρτασης. Οι δοκιμές και οι έλεγχοι που προβλέπονται για τα αλεξικέραυνα μελετώνται στα οικεία κεφάλαια.

## Κεφάλαιο 3

### Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

#### 3.1 Ανασκόπηση του προτύπου IEC 60099-4

##### 3.1.1 Εισαγωγή

Η κατανομή της τάσης στα καθοδικά αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα επηρεάζεται πολύ από την χωρητικότητα και την αντίσταση των μη γραμμικών αντιστάσεων (βαρίστορ), καθώς και από την παράσιτη χωρητικότητα των βαρίστορ ως προς τη γη [18]. Η ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ, η οποία έχει ως αποτέλεσμα το τμήμα του βαρίστορ που βρίσκεται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης να καταπονείται περισσότερο, μπορεί να προσδιοριστεί από διάφορα λογισμικά πακέτα υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών εξαρτώνται από τις οριακές συνθήκες και την αναπαράσταση των αλεξικεραύνων.

Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσονται οδηγίες και παραδοχές για την απλοποίηση της γεωμετρίας του αλεξικέραυνου, απλοποιημένες αναπαραστάσεις των οριακών συνθηκών για τριφασική εγκατάσταση, οι δύο διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού, και διάφορα παραδείγματα υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων για την εγκατάσταση ενός τυπικού αλεξικέραυνου.

##### 3.1.2 Μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου

Λαμβάνοντας υπόψη το ρόλο των παράσιτων χωρητικοτήτων στην κατανομή του πεδίου, η μοντελοποίηση ενός καθοδικού αλεξικέραυνου διέπεται από τις παρακάτω αρχές:

- Η στήλη της μη γραμμικής αντίστασης πρέπει να αναπαρίσταται ακριβώς ως έχει, δηλαδή από όσους επιμέρους δίσκους αποτελείται και όχι ως μία ενιαία στήλη.

- Η μόνωση αναπαρίσταται ως ένας κύλινδρος με συγκεκριμένο πάχος και διηλεκτρική σταθερά. Τα περύγια θα μπορούσαν να παραλειφθούν, καθώς δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανομή του δυναμικού.
- Το υλικό μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος (συνήθως υαλώδες υλικό) και των μη γραμμικών αντιστάσεων θα πρέπει να μοντελοποιηθεί με τις πραγματικές του διαστάσεις και την διηλεκτρική του σταθερά.
- Τα ηλεκτρόδια αναπαρίσταται ως κύλινδρος με διάμετρο ίση με τη μέγιστη διάμετρο του πραγματικού ηλεκτροδίου.

### **3.1.3 Μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών**

Για μία τυπική τριφασική υπαίθρια εγκατάσταση αλεξικέραυτου, π.χ. σε υποσταθμούς, οι οριακές συνθήκες καθορίζονται από τις αποστάσεις από γειωμένα στοιχεία και γειτονικές φάσεις [18]. Προκειμένου για προσομοίωση σε δύο διαστάσεις, το αλεξικέραυτο μοντελοποιείται στο κέντρο ενός γειωμένου κυλίνδρου με ακτίνα, καθορισμένη από την ελάχιστη απόσταση φάσης-γης. Το ύψος του γειωμένου κυλίνδρου θα πρέπει να είναι 1,5 φορές το συνολικό ύψος του αλεξικέραυτου και της βάσης.

### **3.1.4 Υπολογιστική διαδικασία**

Οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν με δύο διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με το πως αναπαρίστανται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μη γραμμικών αντιστάσεων. Ο πρώτος, προβλέπει την αναπαράσταση μόνο της χωρητικότητας και δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα απ' ότι ο δεύτερος, ο οποίος προβλέπει αναπαράσταση χωρητικότητας και αντίστασης [18].

#### *3.1.4.1 Αναπαράσταση της χωρητικότητας των μη γραμμικών αντιστάσεων*

Σ' αυτήν την περίπτωση, οι μη γραμμικές αντιστάσεις αναπαριστώνται μόνο από τις χωρητικότητές τους, παραλείποντας την επίδραση των ωμικών αντιστάσεων.

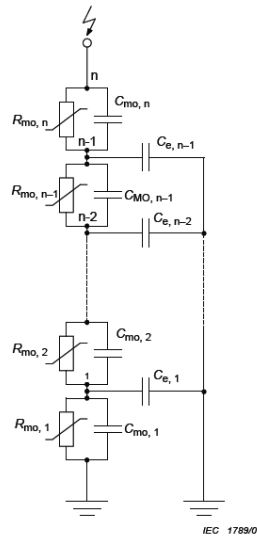


### 3.1.4.2 Ανάλυση χωρητικότητας και ωμικής αντίστασης των μη γραμμικών αντιστάσεων

Οι μη γραμμικές αντιστάσεις αναπαριστώνται από την χωρητικότητα τους παράλληλα με την ωμική αντίστασή τους.

Η παράσιτη ως προς γη χωρητικότητα καθορίζεται μέσω υπολογισμού του χωρητικού ηλεκτρικού πεδίου, και σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της αντίστασης, υπολογίζεται η κατανομή της τάσης με διάφορα εργαλεία ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Γενικά, απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία λόγω της εξάρτησης της αντίστασης από την θερμοκρασία.. Ωστόσο, χρησιμοποιείται μια λογική προσέγγιση που είναι στους 20°C.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.1) παρουσιάζεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός αλεξικέραυνου, που με κατάλληλο πρόγραμμα ανάλυσης-επίλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή της τάσης, λαμβάνοντας υπόψη τις ωμικές και χωρητικές επιδράσεις. Στο σχήμα 3.1 διακρίνονται οι μη γραμμικές αντιστάσεις, εν παραλλήλω με τις χωρητικότητες του βαρίστορ, καθώς και οι παράσιτες χωρητικότητες ως προς γη.



Σχήμα 3.1: Ισοδύναμο κύκλωμα αλεξικέραυνου

Οι παράσιτες χωρητικότητες μπορεί να υπολογιστούν με τον τύπο (3.1) :

$$C_{\sigma,x} = \frac{(U_{x+1} - U_x) \cdot C_{MO,x+1} - (U_x - U_{x-1}) \cdot C_{MO,x}}{U_x} \quad (x=1,2,\dots,n-1) \quad (3.1)$$

Όπου,

$U_x$  = η τάση στον κόμβο x,

$C_{MO,x}$  = η χωρητικότητα στο τμήμα x,

$C_{\sigma,x}$  = η παράσιτη χωρητικότητα προς γη στον κόμβο x,

$R_{mo,x}$  = η ρυθμιζόμενη αντίσταση του τμήματος x,

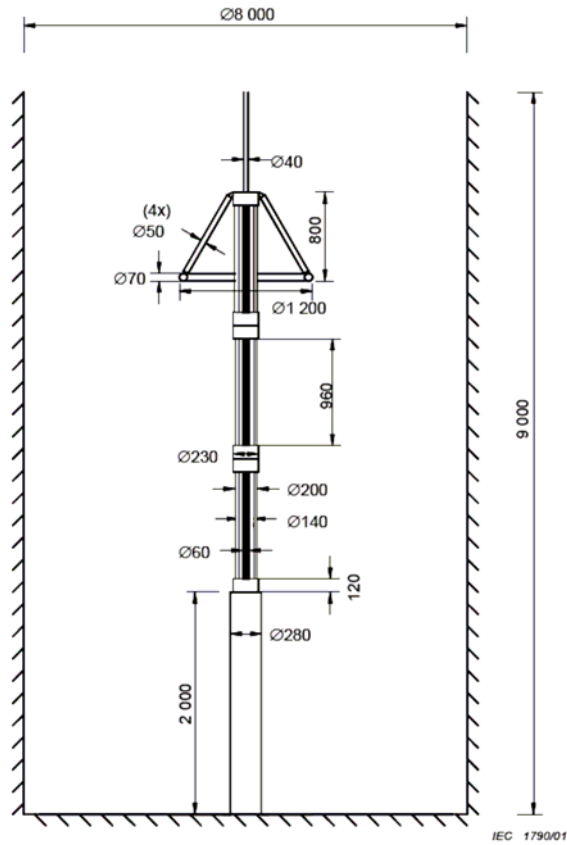
n = ο αριθμός των τμημάτων.

### 3.1.5 Παραδείγματα υπολογισμών

Υπάρχουν δύο μέθοδοι υπολογισμού της κατανομής της τάσης για ένα τυπικό αλεξικέραυνο μετάλλου-οξειδίου του μετάλλου :

- Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) που χρησιμοποιείται για διδιάστατους υπολογισμούς και
- Η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method) που χρησιμοποιείται και για διδιάστατους και για τρισδιάστατους υπολογισμούς.

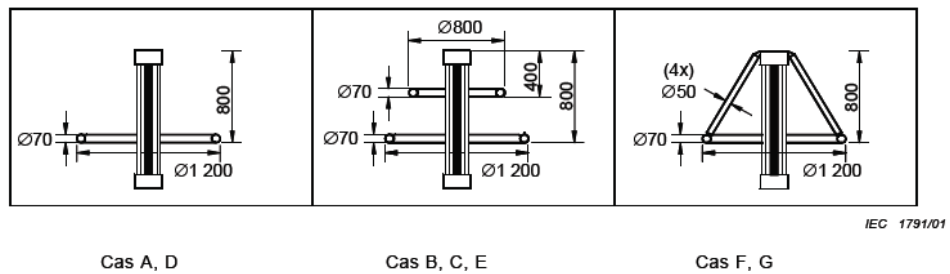
Οι πιο πάνω μέθοδοι υπολογισμού χρησιμοποιούν και τις δύο αναπαραστάσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω στην υπολογιστική διαδικασία. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς είναι ένα τυπικό αλεξικέραυνο με μόνωση από πορσελάνη (σχήμα 3.2) [18].



Σχήμα 3.2 : Απλοποιημένο μοντέλο αλεξικέραυνου με πολλά τμήματα

3.1.5.1 Μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου και των οριακών συνθηκών

Οι απλοποιήσεις στην μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου έγιναν σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στο σχήμα 3.3 φαίνονται διαφορετικές αναπαραστάσεις των τοροειδών.



Σχήμα 3.3 : Διαφορετικές αναπαραστάσεις τοροειδών

Η διηλεκτρική σταθερά για τη στήλη των μη γραμμικών αντιστάσεων επιλέχθηκε ίση με 800, ενώ της πορσελάνινης μόνωσης ίση με 5.

### 3.1.5.2 Επιδράσεις των ωμικών αντιστάσεων στις μη γραμμικές αντιστάσεις

Λόγω του ότι οι αντιστάσεις είναι μη γραμμικές, πρέπει να αντιστοιχίσουμε τους υπολογισμούς της χωρητικότητας και των ωμικών αντιστάσεων σε ένα δεδομένο επίπεδο τάσης. Για τους υπολογισμούς, υποτέθηκε ότι  $U_c = 333\text{kV r.m.s}(471\text{ kV peak})$  και συχνότητα 50 Hz.

### 3.1.6 Αποτελέσματα και συμπεράσματα από τους υπολογισμούς του ηλεκτρικού πεδίου

Τα αποτελέσματα για την μέγιστη καταπόνηση τάσης σε κάθε τμήμα φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα, όπου είναι μέσος όρος αποτελεσμάτων FEM και BEM με διάφορα υπολογιστικά πακέτα.

Μοντέλο Αλεξικέρανου	Μέγιστη Καταπόνηση		
	Άνω Μονάδα	Μεσαία Μονάδα	Κάτω Μονάδα
	%/m	%/m	%/m
<b>Διδιάστατοι Υπολογισμοί</b>			
Ένας τοροειδής	50	39	26
Δύο τοροειδή	44	40	27
<b>Τρισδιάστατοι Υπολογισμοί</b>			
Ένας τοροειδής	50	37	27
Δύο τοροειδή	43	38	28

Πίνακας 3.1: Μέγιστη καταπόνηση τάσης σε κάθε τμήμα

Η καταπόνηση εκφράζεται σε ποσοστό  $U_c$  ανά μέτρο του μήκους της στήλης του βαρίστορ. Γενικά, οι υπολογισμοί στον διδιάστατο χώρο φέρουν παρόμοια αποτελέσματα με τον τρισδιάστατο χώρο. Όμως στον τρισδιάστατο χώρο η υπολογισμοί είναι πιο χρονοβόροι.

### 3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες ερευνητικές εργασίες για την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού, σε καθοδικά αλεξικέραυνα, οι οποίες έγιναν σε διάφορα πανεπιστήμια σε όλο τον κόσμο. Στο Shahid Abbaspour (PWUT) University of Technology, έγινε μια μελέτη της έντασης ηλεκτρικού πεδίου στα αλεξικέραυνα από ZnO με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [19]. Στην παρούσα μελέτη, έχει μελετηθεί το ηλεκτρικό πεδίο σε διαφορετικά είδη αλεξικεραύνων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό της COMSOL Multiphysics. Η προσομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου, βοηθάει τον κατασκευαστή να γνωρίζει και να υπολογίζει τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την μέγιστη ένταση του πεδίου στο αλεξικέραυνο, αποφεύγοντας πολύ υψηλές τιμές μέσα και έξω από αυτό, που έχουν ως αποτέλεσμα τη σταδιακή γήρανση και καταστροφή του αλεξικεραύνου.



Σχήμα 3.4: Αλεξικέραυνα με περίβλημα πορσελάνης

Το ηλεκτρικό δυναμικό καθορίζεται από την σχέση  $E = -\nabla V$ . Συνδυάζοντας την με την εξίσωση  $D = \epsilon_0 E + P$  (3.2) και την εξίσωση της συνέχειας, προκύπτει η εξίσωση Poisson  $-\nabla(\epsilon_0 \cdot \nabla V - P) = \rho$  (3.3).

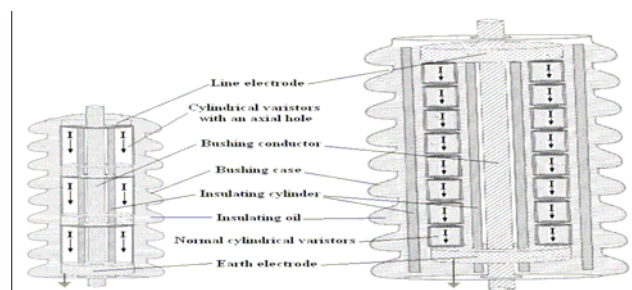
Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την διατύπωση και ανάλυση του πιο πάνω προβλήματος είναι οι εξής :

- Σε μία διαχωριστική επιφάνεια  $n_2(D_1 - D_2) = \rho_s$  (3.4) και όταν δεν υπάρχουν φορτία  $-n \cdot (D_1 - D_2) = 0$  (3.5)
- $n \cdot D = n \cdot D_0$  (3.6)
- $n \cdot (D_1 - D_2) = \rho_s$  (3.7) και όταν δεν υπάρχουν φορτία,  $n \cdot D = 0$  (3.8)
- $V=V_0$  (3.9), που στην περίπτωση μας είναι η τάση στο πάνω μέρος του αλεξικέρανου
- Στη γη  $V=0$  (3.10), που σημαίνει ότι το δυναμικό είναι μηδέν στο κάτω μέρος του αλεξικέρανου

Στην ίδια έρευνα, μελετήθηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου [19], καταλήγοντας, ότι η γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής παίζουν ρόλο στον στις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής της τάσης

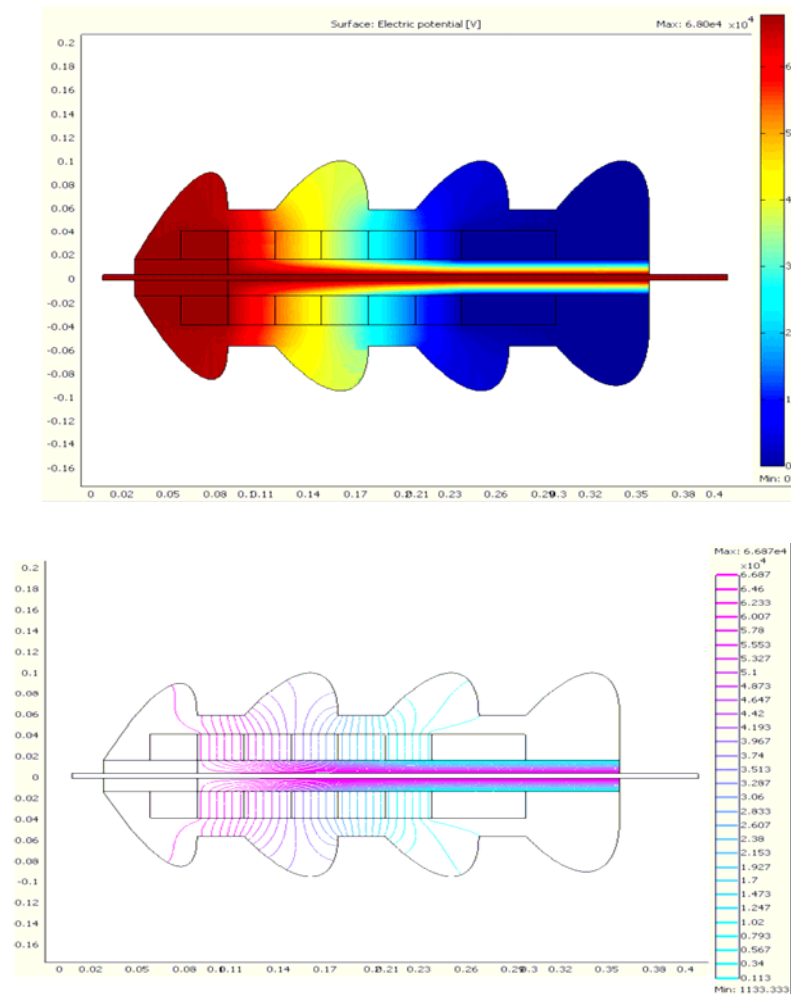
Στο [20] αναλύονται αλεξικέρανα εμβαπτισμένα με έλαια, τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετική θερμική ευστάθεια. Τα αλεξικέρανα αυτού του είδους έχουν τα εξής προτερήματα [20] :

- Καλύτερη έκλυση θερμότητας
- Μεγαλύτερη αντοχή στην ατμοσφαιρική ρύπανση
- Αποφυγή οξειδωσης των επαφών των βαρίστορ με τα ηλεκτρόδια



Σχήμα 3.5 : Δύο πιθανοί σχεδιασμοί αλεξικεραάνων: μέσης τάσης(αριστερά) και υψηλής τάσης(δεξιά) με χρήση λαδιού

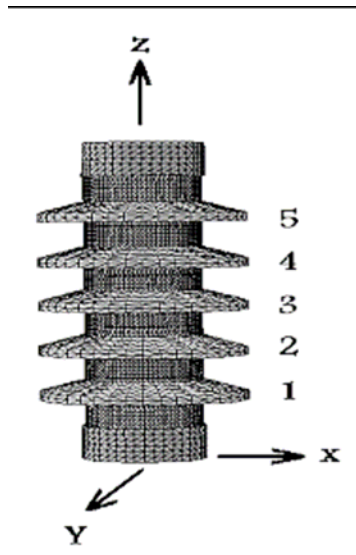
Πιο κάτω φαίνεται μία ανάλυση του ηλεκτρικού πεδίου για αυτού του τύπου τα αλεξικέρανα (σχήμα 3.6):



*Σχήμα 3.6: Ηλεκτρικό πεδίο και ισοδυναμικές γραμμές σ' ένα αλεξικέρανο μέσης τάσης του τύπου του σχήματος (αριστερά).*

Στο [21] παρουσιάζεται μια μελέτη κατανομής τάσης και ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέρανο ZnO 21 kV με και χωρίς σπασμένα πτερύγια με το PC-Opera 8.7, από τους B. Vahidi, R. Shariati Nassab, J. Sh. Moghani, S. H. Hosseinian. Όπως αναφέρθηκε και πριν, η τάση σ' ένα αλεξικέρανο επηρεάζεται από την γεωμετρία των μερών που απαρτίζουν το αλεξικέρανο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών που συμμετέχουν. Οι προηγούμενες έρευνες όμως δεν μελετούσαν την εξάρτηση από την κατανομή της τάσης σε θέση του σπασμένου πτερυγίου[22]. Το

αλεξικέρανο που μελετήθηκε αποτελείται από πέντε μπλοκ από ZnO και η παραμένουσα τάση του για ρεύμα 10 kA είναι 58 kV.

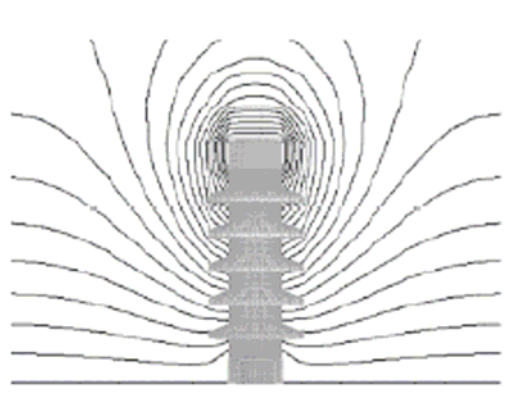


Σχήμα 3.7: Αλεξικέρανο προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα από την πιο πάνω μελέτη ήταν :

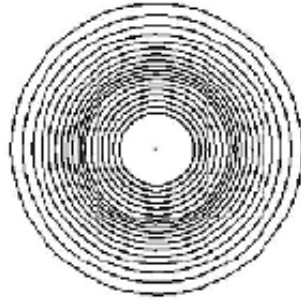
α) Αλεξικέρανο χωρίς σπασμένα πτερύγια

Στα πιο κάτω σχήματα φαίνονται οι ισοδυναμικές επιφάνειες του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχα (σχήμα 3.8,3.9,3.10), οι οποίες είναι συμμετρικές λόγω του ότι η διαμόρφωση του αλεξικέρανου ήταν κι αυτή συμμετρική [21].



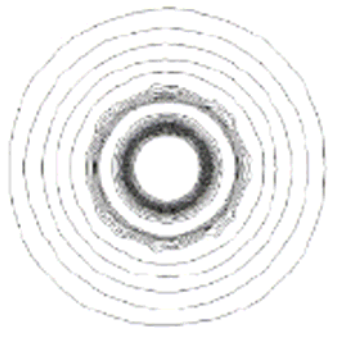
Σχήμα 3.8: Ισοδυναμικές γραμμές γύρω από το αλεξικέρανο προσομοίωσης





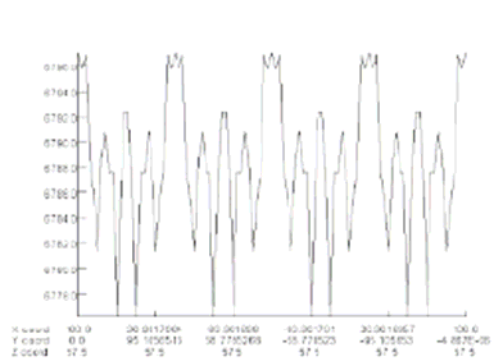
Σχήμα 3.9 : Δυναμικές γραμμές γύρω από τον άξονα του αλεξικέρανου για

$$Z=57.5 \text{ mm}$$

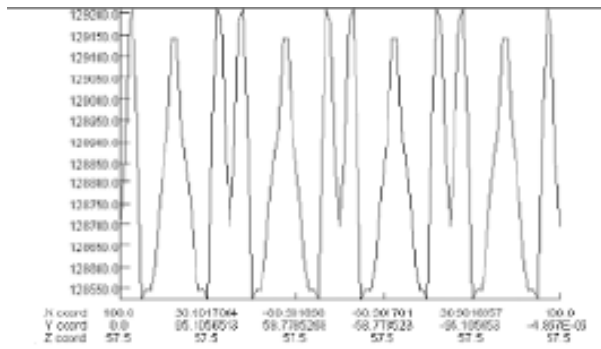


Σχήμα 3.10: Γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον άξονα του αλεξικέρανου για  $Z=57.5 \text{ mm}$

Τα παρακάτω σχήματα(σχήμα 3.11,3.12) δείχνουν τα διαγράμματα του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου σε ακτίνα 100mm για  $Z=57,5 \text{ mm}$ .



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα τάσης γύρω από τον άξονα του αλεξικέρανου για  $R=100 \text{ mm}$  and  $Z= 57.5 \text{ mm}$



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον άξονα του αλεξικέρανου για  $R=100\text{ mm}$  and  $Z=57.5\text{ mm}$

β) Αλεξικέρανο με σπασμένα πτερύγια

Για την διερεύνηση της επίδρασης των σπασμένων πτερυγίων στο δυναμικό και στο ηλεκτρικό πεδίο, έσπασαν διάφορα πτερύγια και υπολογίστηκαν οι τιμές του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου για κάθε περίπτωση, οι οποίες φαίνονται στους πιο κάτω πίνακες [21].

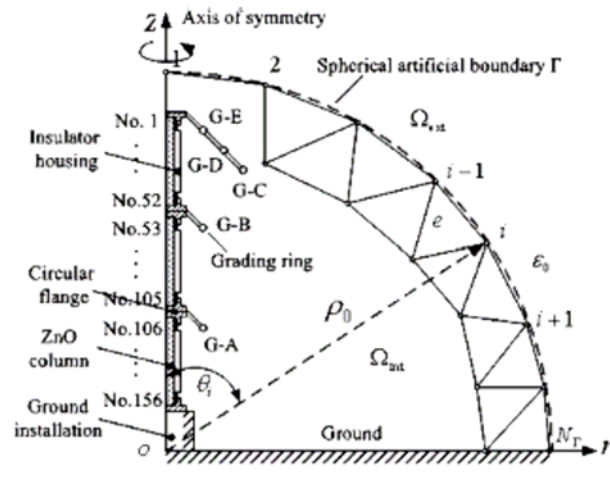
Σπασμένο Πτερύγιο	$V_{12}$	$V_{23}$	$V_{34}$	$V_{45}$
1	3.2~5.2	0	-0.5~1.64	0
2	2~17.8	-6.8~9.7	-0.8~2.4	0~5.3
3	0~1	3.8~17.5	17~35.4	-25.5~5.5
4	0~1	-2.7~2.5	6~38.6	-35~28.6
5	0	-1~2	-4~3.8	9.6~100

Πίνακας 3.2: Κατανομή τάσης(επι τοις εκατό) για αλεξικέρανο με σπασμένα πτερύγια σε σύγκριση με την κανονική περίπτωση

<b>Σπασμένο Πτερύγιο</b>	<b>V<sub>12</sub></b>	<b>V<sub>23</sub></b>	<b>V<sub>34</sub></b>	<b>V<sub>45</sub></b>
1 και 2	-3~21	-20~-3	-4.3	-4.5
1 και 3	-2	-3~37	-35~-4	-4.3~-3
1 και 4	-3~-1	-5~-3	-4.3~60	-41~-4.5
1 και 5	-2~0	-8~-4	-6~4.3	-4.3~-203
2 και 3	-3~18	-3.5~18	-45~-28	-4.2~-4
2 και 4	-3~18	-34~-3.5	-4.3~60	-38~-4.5
2 και 5	-3~18	-33.2~-3.5	-6~4.3	-1.4~201.7
3 και 4	-3~0	1~36	-1.6~19	-1.3~68
3 και 5	-2~0	1~36	-1.6	1~97
4 και 5	-5	-7.5~-3.5	-3~62	-4.3~33

*Πίνακας 3.3 : Κατανομή τάσης (επι τοις εκατό) για αλεξικέραυνο με σπασμένα πτερύγια σε σύγκριση με την κανονική περίπτωση*

Μια μελέτη για τον υπολογισμό της κατανομής δυναμικού ενός αλεξικέραυνου υψηλής τάσης με μια ημι-αναλυτική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων έγινε από τον S.J.Han από το πανεπιστήμιο School of Science, Xidian University, Xi'an, China, και τους S.Q.Gu, J.L.He, J.S.Yuan από το Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China[23]. Η κατανομή του δυναμικού στη στήλη των ZnO βαρίστορ μέσα στο αλεξικέραυνο δεν είναι ομοιόμορφη. Για την ανάλυση της κατανομής αυτής χρησιμοποιούνται η Finite Element Method(FEM) και η Charge simulation Method(CSM) [24-26]. Στην εν λόγω εργασία η μέθοδος επεκτείνεται για να λύσει προβλήματα ηλεκτροστατικού πεδίου αξονικής συμμετρίας. Στο πιο κάτω σχήμα (σχήμα 3.13) φαίνεται ένα μοντέλο καθοδικού αλεξικεράυνου υψηλής τάσης με αξονική συμμετρία.



Σχήμα 3.13 : Μοντέλο αλεξικέρανου υψηλής τάσης με αξονική συμμετρία

Χωρίζουμε την περιοχή που εκτείνεται στο άπειρο  $\Omega_{\infty}$ , σε  $\Omega_{int}$  και  $\Omega_{ext}$  που αναφέρονται στην εσωτερική και εξωτερική περιοχή αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις που σχετίζονται με τις περιοχές αυτές περιέχονται σε μία εξίσωση :

$$F(\varphi) = F_{int}(\varphi) + F_{ext}(\varphi) \quad (3.11)$$

Όπου

$$F_{int}(\varphi) = F_{int}(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N\sigma}) = \frac{1}{2} \varphi^T K_{\varphi} \quad (3.12),$$

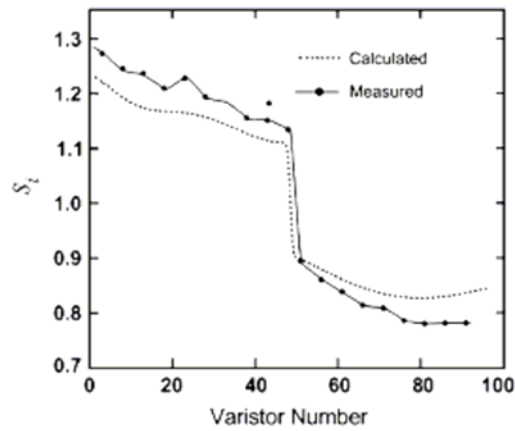
$$F_{ext}(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N\Gamma}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N\Gamma} \sum_{j=1}^{N\Gamma} t_{ij} \varphi_i \varphi_j \quad (3.13)$$

Έτσι, συνδυάζοντας αυτές τις εξισώσεις καταλήγουμε στην πιο κάτω εξίσωση

$$(K+T)\varphi=0 \quad (3.14).$$

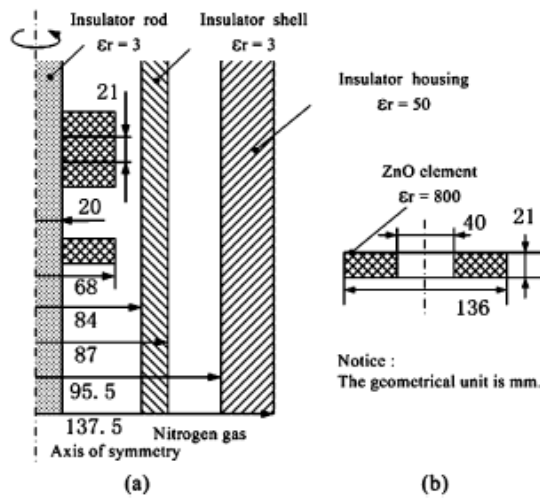
Αυτή είναι η εξίσωση της ημι-αναλυτικής FEM και πριν λυθεί θα πρέπει να τεθούν κάποιιοι περιορισμοί. Το επιφανειακό δυναμικό των G-C, G-D, G-E τίθεται ως η τιμή της τάσης του συστήματος. Η πάνω και η κάτω επιφάνεια των βαρίστορ καθώς και τα G-A, G-B συμπεριφέρονται σαν μετακινούμενα ηλεκτρόδια. Ο γενικός πίνακας στο αριστερό μέρος της εξίσωσης είναι εν μέρει αραιός (για τα σημεία της εσωτερικής περιοχής) και εν μέρη πυκνός (για τα σημεία στη μισή περιοχή των ορίων), αλλά είναι συμμετρικός [23].

Αν συγκρίνουμε τα πειραματικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα θα δούμε πως υπάρχουν σφάλματα έως και 3%, όπως φαίνεται και στο πιο σχήμα 3.14.

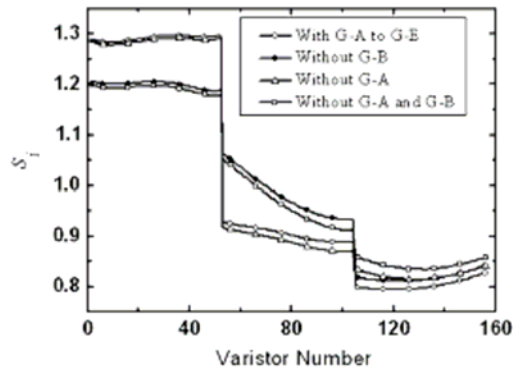


Σχήμα 3.14 : Σύγκριση μεταξύ υπολογισμένων και μετρούμενων δυναμικών σε βαρίστορ ZnO 330 kV

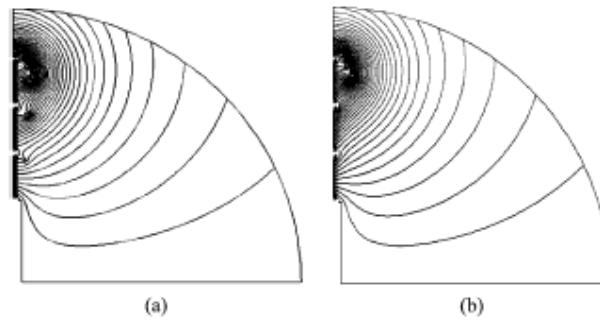
Στα πιο κάτω σχήματα φαίνεται η λεπτομερές διαμόρφωση ενός αλεξικέρανου (Σχήμα 3.15,a,b).



Σχήμα 3.15 : Αναλυτικές πληροφορίες στην στήλη του βαρίστορ ZnO



Σχήμα 3.16 : Επιρροή του G-A και G-B στην κατανομή δυναμικού στην στήλη του βαρίστορ ZnO



Σχήμα 3.17 : Ισοδυναμικές γραμμές με και χωρίς τα G-A και G-B

## Κεφάλαιο 4

### ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PC OPERA-2d

#### 4.1 Εισαγωγή

Το OPERA-2d είναι μια ακολουθία προγραμμάτων ανάλυσης δισδιάστατων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα προγράμματα χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να λύσουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των πεδίων [26]. Αυτές οι εξισώσεις περιλαμβάνουν:

- Εξίσωση Poisson
- Εξίσωση Helmholtz
- Εξίσωση Διάχυσης

Η επίλυση αυτών των εξισώσεων αποτελεί ένα βασικό τμήμα του σχεδιασμού στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Μαγνητοστατική
- Ηλεκτροστατική
- Χρονομεταβλητά μαγνητικά πεδία (χαμηλή συχνότητα )

Η δυνατότητα μοντελοποίησης μη γραμμικών υλικών είναι βασική σε αυτές τις εφαρμογές.

Το λογισμικό χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Λόγω της απαίτησης πολλών πληροφοριών πριν γίνει η ανάλυση, η εισαγωγή δεδομένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν ισχυρό αμφίδρομο προ-επεξεργαστή. Χρησιμοποιώντας τη γραφική αμφίδρομη διαδικασία στα πλαίσια της προ-επεξεργασίας, ο μοντελοποιημένος χώρος διαιρείται σε μια συνεχή ομάδα τριγωνικών στοιχείων. Το φυσικό μοντέλο μπορεί να περιγραφεί σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές συντεταγμένες.

Όταν ετοιμαστεί το μοντέλο, η λύση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο τύπο ανάλυσης. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις για ανάλυση των διαφορετικών τύπων ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης π.χ. στατική και στη μόνιμη κατάσταση. Το πρόγραμμα ανάλυσης καθορίζει τη σωστή λύση, περιλαμβάνοντας μη γραμμικά φαινόμενα αν αυτά έχουν μοντελοποιηθεί.

Το αποτέλεσμα τότε μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας έναν «έξυπνο και ευέλικτο» μετ-επεξεργαστή. Όπως και στην περίπτωση του προ-επεξεργαστή, ο μετ-επεξεργαστής ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την αμφίδρομη επικοινωνία μέσα από έναν κατάλογο με γραφικά. Πολλές μεταβλητές του συστήματος είναι διαθέσιμες για έλεγχο, περιλαμβάνοντας δυναμικά, ρεύματα, πεδία, δυνάμεις και θερμοκρασία. Το πρόσθετο χαρακτηριστικό των μεταβλητών που ορίζονται από το χρήστη επιτρέπει στα αποτελέσματα της επίλυσης να είναι προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα αριθμητικά σφάλματα, λόγω του κακού προσδιορισμού του πλέγματος, αναλύονται και αυτά ώστε το πλέγμα να βελτιωθεί και να επιτύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

## **4.2 Πρόγραμμα ανάλυσης**

Υπάρχουν 7 προγράμματα ανάλυσης στη δισδιάστατη έκδοση του OPERA. Όλα δέχονται δεδομένα προετοιμασμένα από τον προ- και τον μετ-επεξεργαστή και δημιουργούν αρχεία αποτελεσμάτων που μπορούν να διαβαστούν από τον προ- και τον μετ-επεξεργαστή [26].

Τα 7 προγράμματα ανάλυσης είναι:



<i>Στατικά</i>	
ST	Γραμμικά ή μη γραμμικά μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά με ιστροπικά υλικά και μόνιμους μαγνήτες
SP	Ηλεκτροστατικά, περιλαμβάνοντα τις συνέπειες χωρικών φορτίων από δέσμες σωματιδίων
<i>Δινορρεύματα</i>	
AC	Μόνιμης κατάστασης εναλλασσόμενα δινορρεύματα με γραμμικά ή μη γραμμικά υλικά και εξαρτημένες πηγές ρεύματος ή τάσης. Οι επιτρεπτότητες μπορούν να ληφθούν από τα δεδομένα της περιοχής, από μια προηγούμενη ST ή TR λύση, ή να υπολογιστούν από το πεδίο της AC λύσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η επιτρεπτότητα μπορεί να είναι σύνθετη.
TR	Μεταβατικά δινορρεύματα γραμμικά με ή μη γραμμικά υλικά, συνδεδεμένα σε εξωτερικά κυκλώματα.
VL	Δινορρεύματα επαγόμενα από κίνηση σταθερής ταχύτητας ενός τμήματος του μοντέλου λαμβάνοντας υπ' όψη και το υπόλοιπο.
RM	Διαμορφωτής περιστροφικής κίνησης: ένας διαμορφωτής μεταβατικών δινορρευμάτων, επεκτεινόμενος ώστε να περικλείει τις συνέπειες της περιστροφής συμπαγούς σώματος, χρονομεταβλητά ρεύματα και σύνδεση σε εξωτερικά κυκλώματα.
<i>Ανάλυση καταπόνησης</i>	

SA	Ανάλυση καταπόνησης, χρησιμοποιώντας σημειακές δυνάμεις σαν εισόδους ή πυκνότητες δύναμης του σώματος υπολογισμένες από προηγούμενη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.
<i>Θερμική ανάλυση</i>	
TH	Θερμική ανάλυση, χρησιμοποιώντας σημειακές θερμοκρασίες σαν εισόδους και πυκνότητες ισχύος στοιχείων από προηγούμενη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση.
THTR	Μεταβατική έκδοση της θερμικής ανάλυσης.

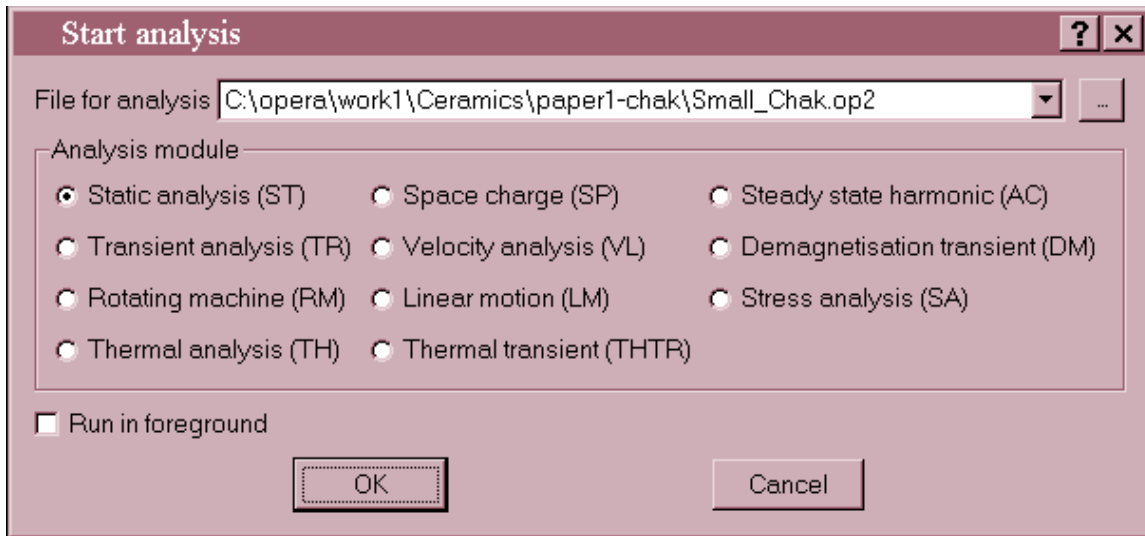
*ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Προγράμματα ανάλυσης PC OPERA*

Υπάρχει επίσης ένα ακόμα χρήσιμο πρόγραμμα:

DXF	Ένα πρόγραμμα που μεταφράζει DXF αρχεία σε OPERA-2d εκτελέσιμα αρχεία εισαγωγής (.comi).
-----	--

*ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 : Πρόγραμμα ανάλυσης PC OPERA*

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ένα εικονίδιο του OPERA-2d στο οποίο διακρίνονται τα διαφορετικά προγράμματα ανάλυσης



Σχήμα 4.1: Τα διαφορετικά προγράμματα ανάλυσης του OPERA-2d

### 4.3 Φιλοσοφία του προγράμματος

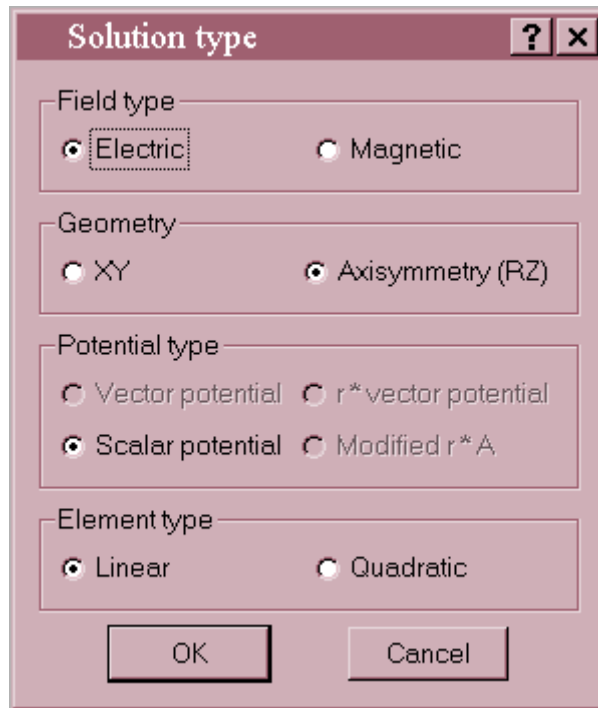
Μια πλήρης λύση προβλήματος με το OPERA-2d αποτελείται από 3 φάσεις: προετοιμασία δεδομένων ή προ-επεξεργασία, ανάλυση και επίδειξη αποτελεσμάτων ή μετ-επεξεργασία [26]. Επειδή ο προ- και ο μετ-επεξεργαστής είναι ένα πρόγραμμα, οποιαδήποτε τροποποίηση στα δεδομένα μπορεί να γίνει αμέσως μετά την μετ-επεξεργασία.

#### 4.3.1 Μοντέλο στο OPERA-2d

Ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων μπορούν να αναπαρασταθούν από δισδιάστατα μοντέλα. Αυτό υποθέτει ότι η διάταξη εμπίπτει σε μια από τις ακόλουθες κατηγορίες [26]:

- μεγάλο μήκος σε μια διεύθυνση, με ομοιόμορφη εγκάρσια διατομή στο μεγαλύτερο μήκος. Σε τέτοιες διατάξεις, μια λογική προσέγγιση είναι να υποθέσουμε ότι για μεγάλο μέρος του μήκους, η κατανομή του πεδίου στη διατομή δεν μεταβάλλεται και ότι δεν υπάρχει συνιστώσα του πεδίου παράλληλα στον διαμήκη άξονα. Στο OPERA-2d, τέτοια μοντέλα έχουν XY συμμετρία.

- συμμετρικό εκ περιστροφής. Δεν υπάρχει γωνιακή συνιστώσα του πεδίου και η κατανομή του πεδίου είναι ίδια για κάθε αξονική τομή. Για να μοντελοποιηθεί μια τέτοια διάταξη επιλέγεται ένα σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.



*Σχήμα 4.2: Με την επιλογή “Axisymmetry” υποδεικνύεται ένα σύστημα κυλινδρικής συμμετρίας*

#### **4.3.2 Προ-επεξεργασία (pre-processing)**

Η γεωμετρία μιας διάταξης που θα αναλυθεί με το OPERA-2d παρουσιάζεται στον προ-και μετ-επεξεργαστή σαν μια ομάδα πολυγωνικών περιοχών στο δισδιάστατο επίπεδο [26].

Τα δεδομένα της κάθε περιοχής εισάγονται με τη γραμμή εντολών **Draw**, ενώ τα εικονίδια που αντιστοιχούν στις εντολές σχεδιασμού των περιοχών (επιλογή σημείων, σχεδιασμός άξονα συντεταγμένων κ.ο.κ.) φαίνονται στο σχήμα 4.3[27]:



Σχήμα 4.3: Η γραμμή εντολών draw για τη σχεδίαση των περιοχών της διάταξης υπό μελέτη

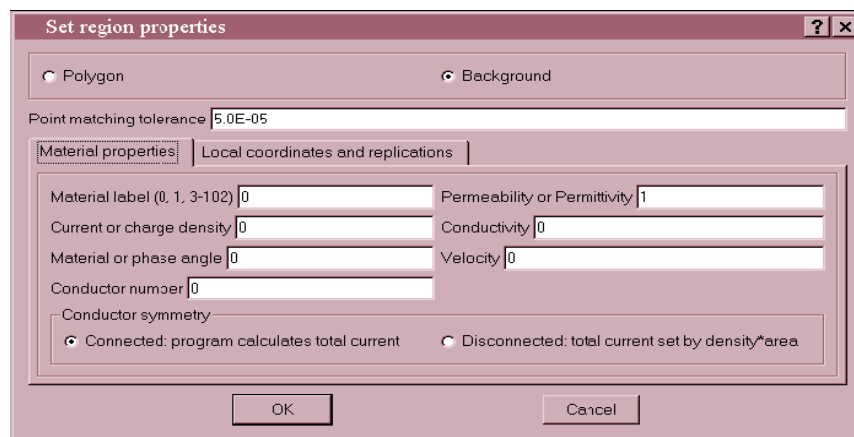
Τα δεδομένα αυτά μπορούν να «μορφοποιηθούν» με τη γραμμή εντολών **Modify**, από την οποία προκύπτει ένα σύνολο επιλογών (μετακίνηση περιοχών, επιλογή ιδιοτήτων πλευρών κ.α.) που φαίνεται στη σειρά εργαλείων του σχήματος 4.4:



Σχήμα 4.4: Η γραμμή εντολών modify

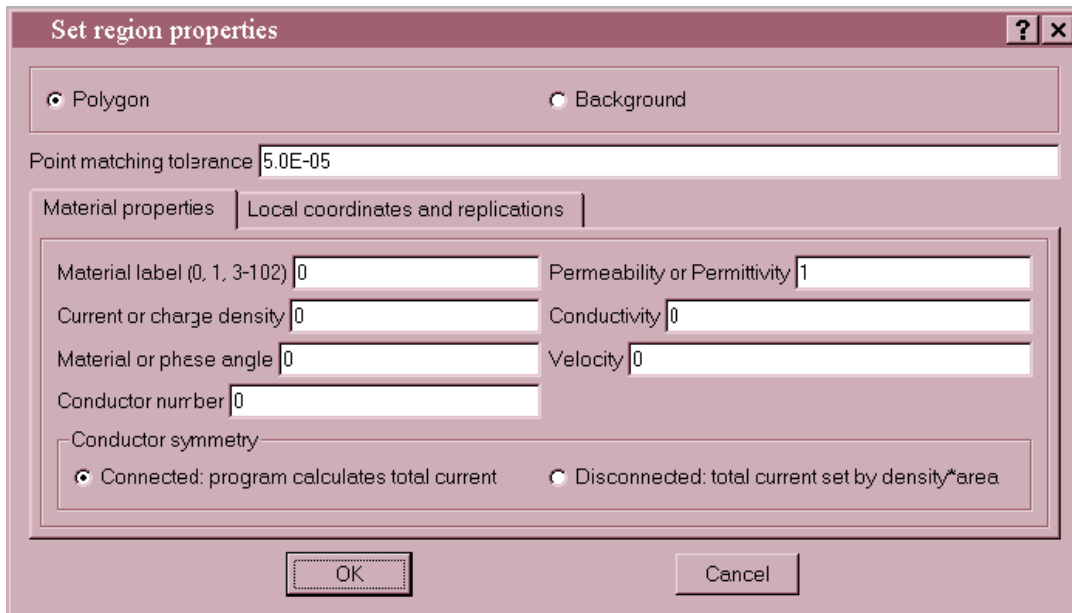
Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αν η σχεδίαση μίας περιοχής δεν έχει ολοκληρωθεί ώστε να κλείσει το πολύγωνο / περιοχή, τότε, σε περίπτωση που κλείσει το παράθυρο της εντολής **Draw**, η σχεδίαση που έχει προηγηθεί, ακυρώνεται.

Μια περιοχή μπορεί να είναι μια «δευτέρου πλάνου» περιοχή η οποία καλύπτει όλο το χώρο του προβλήματος. Στο σχήμα 4.5 φαίνεται ο χαρακτηρισμός μιας περιοχής σαν περιοχή «δευτέρου πλάνου» με την επιλογή “background”:



Σχήμα 4.5: Χαρακτηρισμός μιας περιοχής σαν περιοχή «δευτέρου πλάνου» (background)

Οι άλλες περιοχές είναι μη επικαλυπτόμενα πολύγωνα που προσδιορίζουν τα άλλα υλικά στο πρόβλημα. Για τις περιοχές αυτές επιλέγουμε το χαρακτηρισμό “polygon” (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Χαρακτηρισμός μιας περιοχής σαν πολύγωνο (polygon)

Σε μαγνητικές διατάξεις για παράδειγμα, μια περιοχή μπορεί ν' αναπαριστά ένα από τα ακόλουθα:

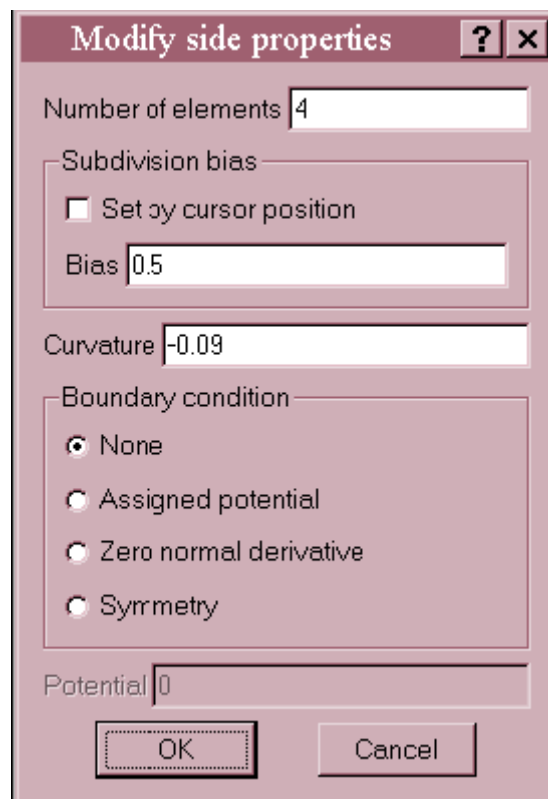
- ελεύθερος χώρος
- ένας αγωγός με προκαθορισμένη ή επαγόμενη πυκνότητα ρεύματος
- μαγνητικό υλικό με γραμμικά ή μη γραμμικά χαρακτηριστικά.

Μια ειδική περιοχή κενού πρέπει να καθοριστεί για την διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του στάτη και του ρότορα περιστρεφόμενων μηχανών για το PC OPERA- 2d/RM.

Όλες οι ιδιότητες των υλικών και οι οριακές συνθήκες αποθηκεύονται με την κάθε περιοχή. Εξαίρεση σε αυτό αποτελούν οι μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ πυκνότητας ροής και έντασης πεδίου που αποθηκεύονται ως πίνακες τιμών, οι οποίοι συνδέονται με τις

περιοχές με κωδικούς αριθμούς υλικών. Τέτοιοι ΒΗ πίνακες τιμών προσδιορίζονται και μορφοποιούνται με την εντολή **BH data**[27].

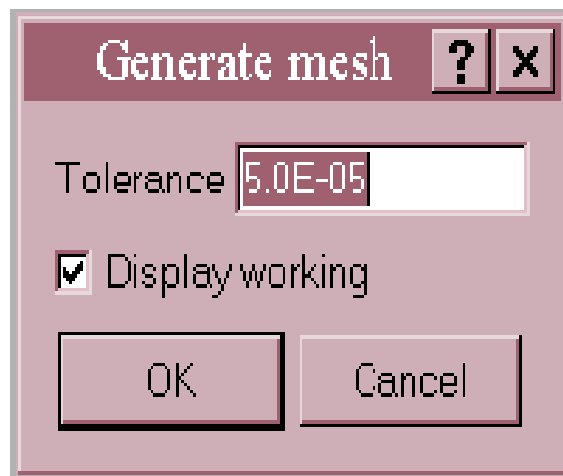
Για διατάξεις με επαναλαμβανόμενες περιοχές υπάρχουν εντολές αντιγραφής, οι οποίες δημιουργούν πολλαπλά αντίγραφα της περιοχής με τις ίδιες ιδιότητες υλικού. Οι περιοχές μπορούν να αντιγραφούν με την εντολή **Make copies of regions**. Μέσα σε κάθε περιοχή, η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτόματη, χρησιμοποιώντας σαν εισαγόμενα δεδομένα τις συντεταγμένες των κορυφών, τις καμπυλότητες και τις υποδιαίρεσεις των πλευρών. Στο σχήμα 4.7 βλέπει κανείς ότι είναι δυνατή η κατά βούληση μεταβολή του μεγέθους της καμπυλότητας που φέρει μια πλευρά ενός πολυγώνου (curvature), καθώς και των πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος που αντιστοιχούν σε αυτήν (number of elements).



Σχήμα 4.7: Καθορισμός της καμπυλότητας και των στοιχείων μιας πλευράς

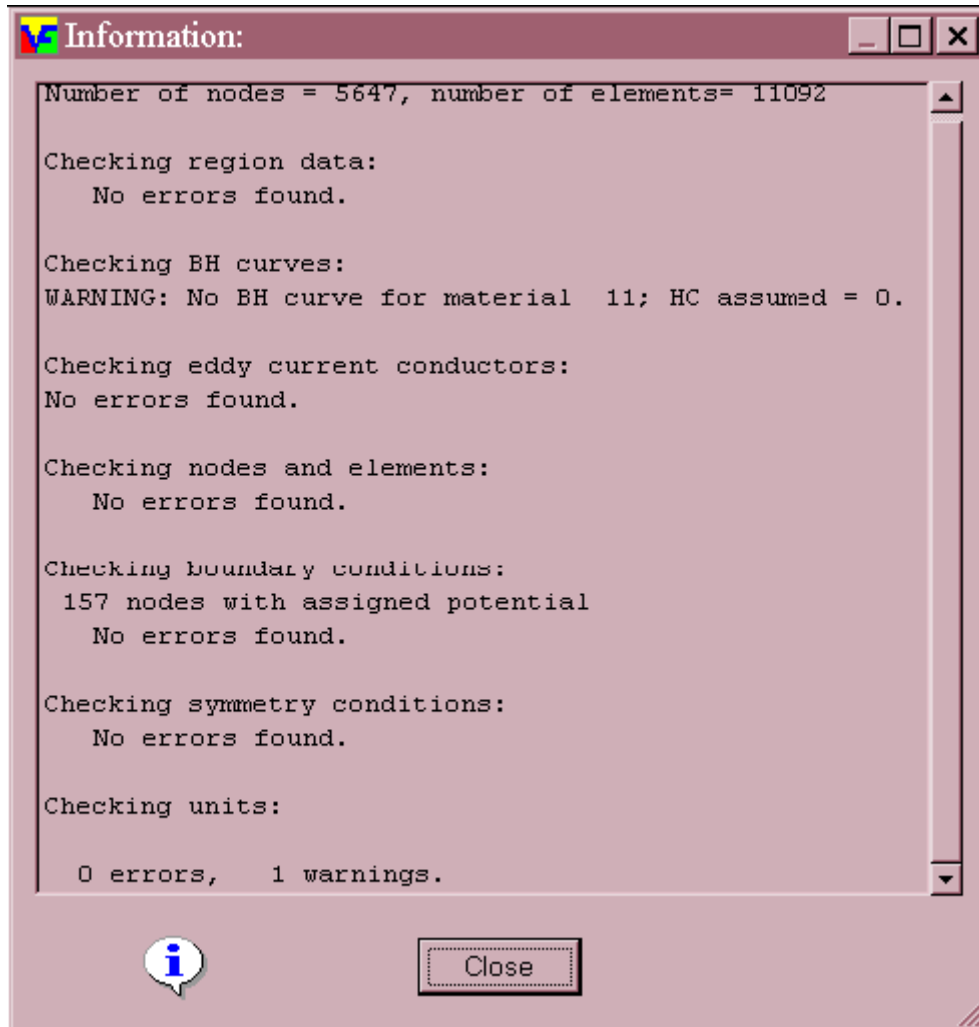
Υπάρχουν δύο κατηγορίες σχημάτων των περιοχών, τα τετράπλευρα και γενικά πολύγωνα. Το πλέγμα μέσα στα τετράπλευρα δημιουργείται από μετασχηματισμό σε μοναδιαίο τετράγωνο και κανονική υποδιαίρεση. Το πλέγμα είναι κατ' αυτό τον τρόπο προβλεπόμενο και ο χρόνος δημιουργίας του μικρός.

Το πλέγμα μέσα στα πολύγωνα δημιουργείται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που βασίζεται στον τριγωνισμό Delaunay. Εσωτερικοί κόμβοι προστίθενται, αν είναι απαραίτητο, για να επιτύχουν μεγέθη στοιχείων που διαφέρουν λίγο εκατέρωθεν των περιοχών και σχήματα στοιχείων που είναι κατά το δυνατό περίπου ισόπλευρα. Τα πολύγωνα επιτρέπουν σε μεγάλες περιοχές χώρου, ειδικά κοντά στα όρια να πλεγματοποιούνται με τον ελάχιστο αριθμό περιοχών. Το πλέγμα δημιουργείται με την εντολή **Generate mesh**, οπότε εμφανίζεται το εικονίδιο του σχήματος 4.8, ενώ, ύστερα από τη διαμόρφωσή του τελευταίου κάνει την εμφάνισή του ένα ενημερωτικό εικονίδιο που πληροφορεί το χρήστη για το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν σχηματιστεί (number of elements), αλλά και για τον αριθμό των κόμβων (number of nodes) του πλέγματος (Σχήμα 4.9)[27].



Σχήμα 4.8: Η εντολή δημιουργίας πλέγματος generate mesh

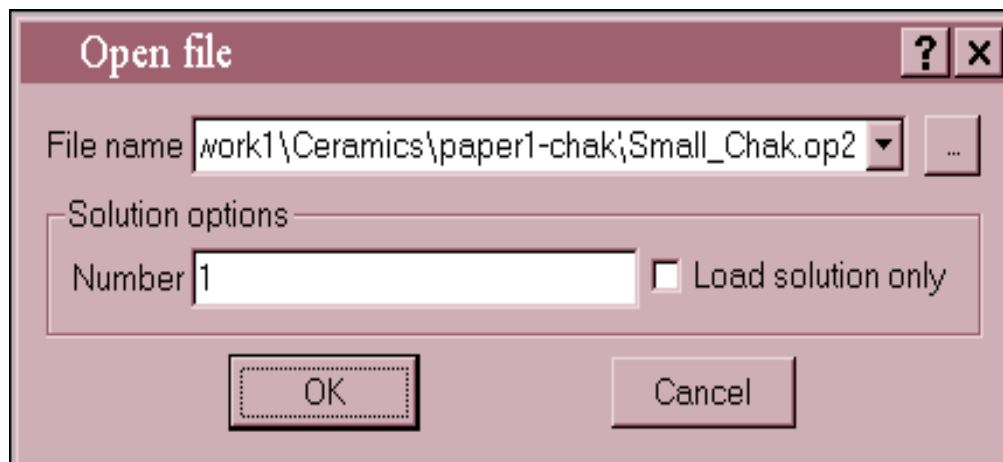
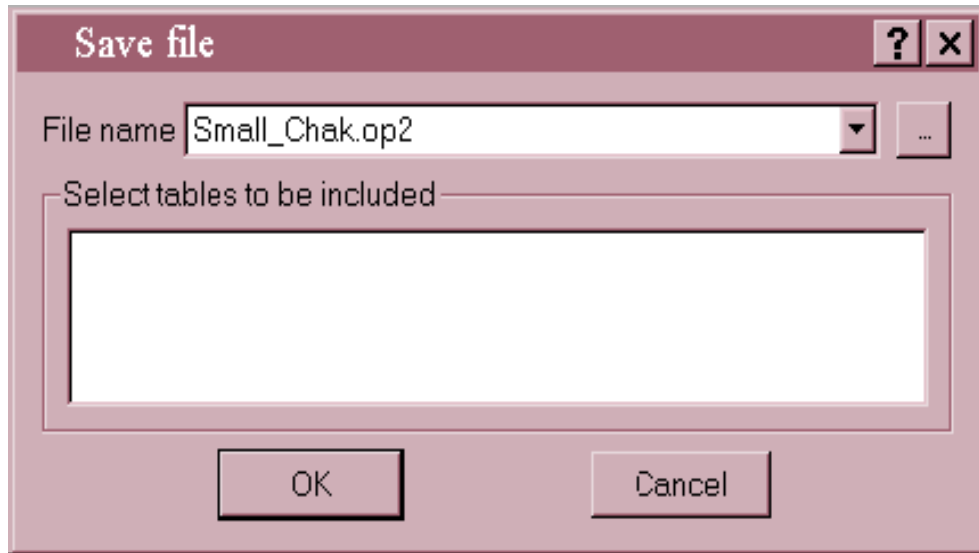




Σχήμα 4.9: Το παράθυρο που εμφανίζεται μετά τη δημιουργία του πλέγματος

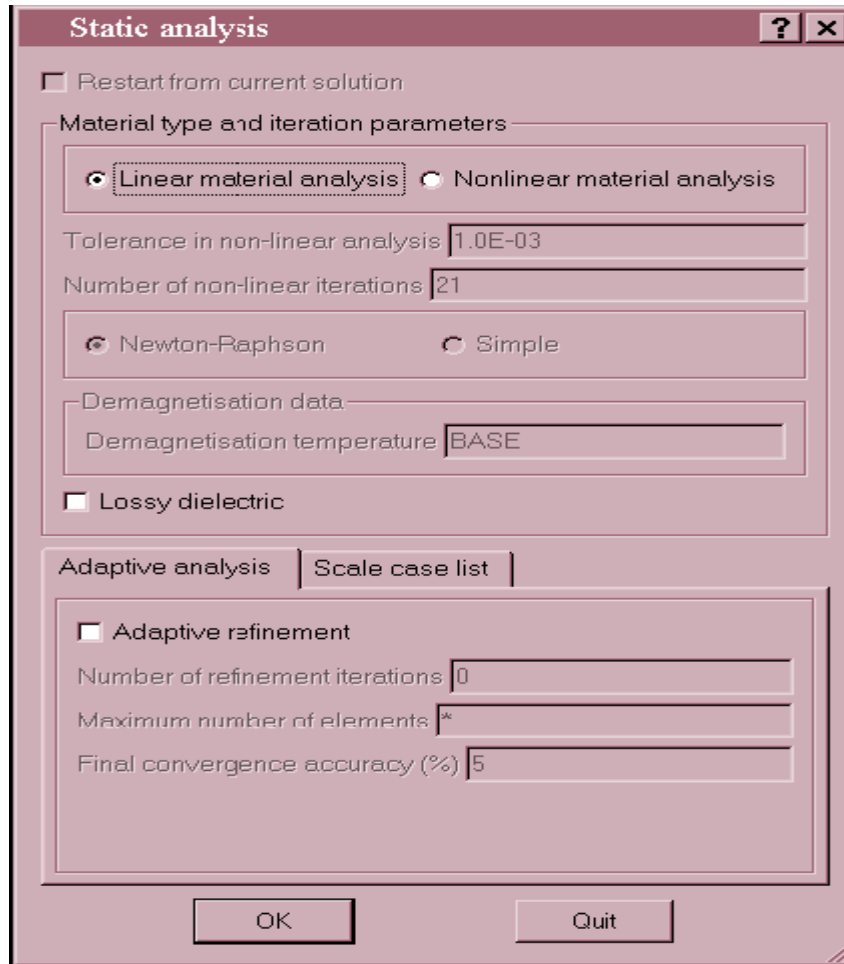
Οι περιοχές χρησιμοποιούνται επίσης στη μετ-επεξεργασία ως οι μικρότερες μονάδες της περιοχής στην οποία μπορεί να γίνει ολοκλήρωση (εντολή **Field Integrals**).

Το OPERA-2d , κατά την προ-επεξεργασία, εκτός από τις εντολές δημιουργίας και επίδειξης του πλέγματος (**Generate mesh** και **Display mesh**), διαθέτει, επίσης, εντολή επίδειξης των δεδομένων της περιοχής, (**List region data**), όπως, επίσης, και εντολές αποθήκευσης (**Save**) και ανάγνωσης (**Open**) αρχείων οι οποίες διακρίνονται στα εικονίδια του σχήματος 4.10.



*Σχήμα 4.10: Τα εικονίδια που εμφανίζονται κατά την αποθήκευση (save) και την ανάγνωση (open) ενός αρχείου*

Όπως φαίνεται, τα αρχεία αποθηκεύονται με τη μορφή (.op2). Πριν αποθηκευτεί ένα αρχείο δεδομένων πρέπει να καθοριστεί το είδος της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση ανάλυσης για ηλεκτροστατικό πεδίο, η εντολή που επιλέγεται είναι η **Static analysis** (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Εντολή ανάλυσης για ηλεκτροστατικό πεδίο

Δεν είναι απαραίτητη περαιτέρω αλληλεπίδραση πριν τρέξουμε το πρόγραμμα ανάλυσης, το οποίο μπορεί να τρέξει χωρίς να «βγούμε» από τον προ- και τον μετ-επεξεργαστή.

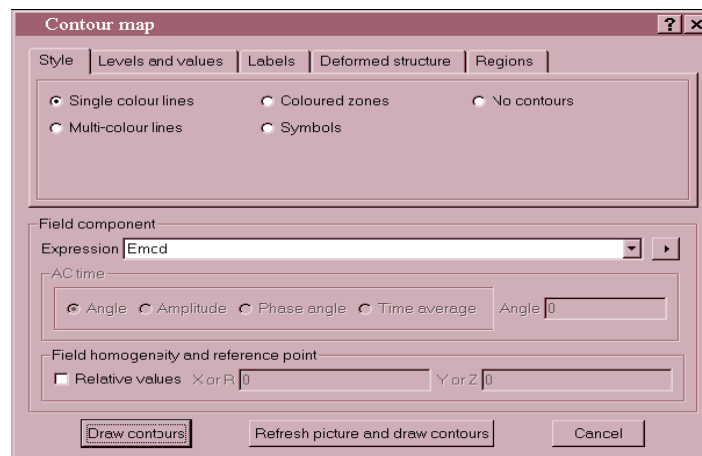
### 4.3.3 Ανάλυση

Για την παροχή των επιπρόσθετων πληροφοριών που είναι απαραίτητες για κάθε πρόγραμμα ανάλυσης, χρησιμοποιείται η εντολή Start **analysis**, η οποία επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει στοιχεία όπως: ανοχή σύγκλισης, σημεία χρονικής εισόδου, μη γραμμικό επαναληπτικό τύπο κλπ. Μετά από αυτό τα προγράμματα ανάλυσης δεν χρειάζονται πρόσθετες πληροφορίες από τον χρήστη. Τα προγράμματα δημιουργούν

αρχεία αποτελεσμάτων που περιέχουν ένα αντίγραφο των δεδομένων και της λύσης και ένα αρχείο που περιέχει διαγνωστικά [26].

#### 4.3.4 Μετ-επεξεργασία (Post-processing)

Ο προ- και ο μετ-επεξεργαστής, OPERA-2d/PP, μπορεί να διαβάσει αρχεία αποτελεσμάτων από τα προγράμματα ανάλυσης, να εμφανίζει και να επεξεργάζεται λύσεις. Οι λύσεις αποτελούνται από τις τιμές του δυναμικού που λαμβάνονται στους κόμβους του πλέγματος, καθώς και από τις τιμές των στοιχείων του πλέγματος για το ρεύμα, την πυκνότητα φορτίου, τη διαπερατότητα ή την επιτρεπτότητα. Οποιαδήποτε απλή πεδιακή ποσότητα (δυναμικό, ένταση πεδίου, πυκνότητα ροής, πυκνότητα ρεύματος κλπ) μπορεί να εμφανίζεται σε σημεία, (με την εντολή **Fields at a point**), κατά μήκος γραμμών, (με την εντολή **Fields along a line**) ή με τη μορφή δυναμικών γραμμών ή χρωματικών περιοχών που υπερτίθενται στο σχήμα της διάταξης σαν περιγράμματα στις περιοχές. (με την εντολή **Contour map**). Το αντίστοιχο εικονίδιο διακρίνεται στο σχήμα 4.12.



*Σχήμα 4.12: Με την επιλογή “single colour lines” το ηλεκτρικό πεδίο είναι δυνατό να παρασταθεί μέσω των δυναμικών γραμμών*

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αλγεβρικές εκφράσεις τέτοιων πεδιακών ποσοτήτων.

Πρόσθετη επεξεργασία μπορεί να πάρει την μορφή ολοκληρώσεων κατά μήκος γραμμών ή πάνω σε περιοχές (με την εντολή **Fields along region sides**), δίνοντας τιμές για δυνάμεις, αποθηκευμένες ενέργειες κλπ, ή υπολογισμό τροχιάς σωματιδίων.

Η πρώτη απαίτηση για μια πεδιακή τιμή από τον μετ-επεξεργαστή δείχνει στο πρόγραμμα να εκτελέσει «μέση τιμή πεδίου». Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων δίνει παραγώγους δυναμικού ασυνεχείς από το ένα στοιχείο στο επόμενο. Η διαδικασία «μέσης τιμής πεδίου» βρίσκει την μέση τιμή κάθε στοιχείου που περικλείει ένα κόμβο και εφαρμόζει αυτή τη μέση τιμή στον κόμβο (οι φυσικές ασυνέχειες διατηρούνται). Οι επιλεγείσες μέσες τιμές χρησιμοποιούνται σε όλες τις εντολές του μετ-επεξεργαστή, αλλά μερικές εντολές μπορούν να χρησιμοποιήσουν και τις κανονικές τιμές (αυτές που δεν έχουν υποστεί τη διαδικασία «μέσης τιμής»). Σύγκριση των «μέσων τιμών» και των κανονικών τιμών πεδίου επιτρέπει μια εκτίμηση των τοπικών και ολικών σφαλμάτων στη λύση. Αυτές οι εκτιμήσεις σφάλματος υπολογίζονται ακολουθώντας τη διαδικασία «μέσης τιμής» του πεδίου και μπορούν να εμφανιστούν με τον ίδιο τρόπο που εμφανίζονται τα πεδία.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία B και H, μπορούν επίσης να υπολογισθούν με την ολοκλήρωση των μαγνητίσεων και των πυκνοτήτων ρεύματος σε κάθε στοιχείο.

#### **4.4 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων**

Για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους (partial differential equations, PDE) χρησιμοποιήθηκε αρχικά η λεγόμενη μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite – difference method, FDM) όπου το πεδίο της λύσης χωριζόταν σε πλέγμα διακριτών σημείων ή κόμβων. Στη συνέχεια η PDE γραφόταν σε κάθε κόμβο και γινόταν αντικατάσταση των παραγώγων με λόγους (πηλίκα) πεπερασμένων διαφορών. Αν και μια τέτοια σημειακή μέθοδος προσεγγισμού γίνεται εύκολα κατανοητή, παρουσιάζει πλήθος μειονεκτημάτων. Ιδιαίτερα, είναι δύσκολο να εφαρμοστεί για συστήματα με

ακανόνιστη γεωμετρία, ασυνήθιστες συνοριακές συνθήκες, ή μη ομογενή σύσταση του στοιχείου.

Ακολούθησε ως βελτιωμένη εναλλακτική μέθοδος η λεγόμενη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite-element method, FEM), η οποία είναι πιο κατάλληλη για τέτοια συστήματα. Αντίθετα, με την FDM, στην FEM χωρίζουμε το στοιχείο λύσης σε “στοιχεία” απλής μορφής. Για καθένα από τα στοιχεία αυτά μπορούμε να κάνουμε προσεγγιστική επίλυση της PDE. Την συνολική λύση την βρίσκουμε από τη “συνάρμωση” (assembling) των επιμέρους λύσεων παίρνοντας υπόψη τη συνέχεια στα σύνορα όπου αλληλοσυνδέονται τα στοιχεία. Επομένως, με την FEM η PDE επαληθεύεται με κατά τμηματικό τρόπο.

Με άλλα λόγια, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό λύσης των μερικών διαφορικών ή ολοκληρωτικών εξισώσεων που είναι δύσκολο να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους [26]. Οι μερικές διαφορικές και ολοκληρωτικές εξισώσεις περιγράφουν ένα πεδίο είτε άμεσα με τις μεταβλητές του πεδίου αυτού π.χ. την πυκνότητα μαγνητικής ροής  $\mathbf{B}$  είτε χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση που σχετίζεται με το πεδίο μέσω των grad και div. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να εφαρμοστεί γενικά σε οποιοδήποτε πρόβλημα με οποιοδήποτε είδος μη γραμμικότητας. Βασίζεται στην διαίρεση του χώρου στον οποίο ικανοποιείται η εξίσωση σε μικρά στοιχεία όγκου (τα πεπερασμένα στοιχεία). Μέσα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο χρησιμοποιείται ένα απλό πολυώνυμο που προσεγγίζει την λύση.

Η γενική ιδέα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του χώρου.

Όπως έχει αποδειχτεί και επαληθευτεί, η χρησιμοποίηση στοιχείων και όχι ορθογωνικού πλέγματος αποτελεί καλύτερη προσέγγιση συστημάτων με ακανόνιστα σχήματα. Επιπλέον, τιμές του αγνώστου είναι δυνατό να δημιουργούνται συνεχώς κατά μήκος ολόκληρου του πεδίου επίλυσης και όχι σε μεμονωμένα σημεία.

#### 4.4.1 Γενική μεθοδολογία

Παρότι οι μαθηματικές πράξεις είναι σημαντικά περισσότερες στα δισδιάστατα προβλήματα απ' ό τι στα μονοδιάστατα, η επέκταση της FEM σε δισδιάστατα προβλήματα είναι εννοιολογικά παρόμοια με τις μονοδιάστατες εφαρμογές. Άρα, η διαδοχή των ενεργειών μας θα είναι η εξής [28]:

##### α) Διακριτοποίηση

Το βήμα αυτό αφορά στη διαίρεση του πεδίου επίλυσης σε πεπερασμένα στοιχεία. Τα σημεία τομής των γραμμών που αποτελούν πλευρές στοιχείων ονομάζονται κόμβοι (nodes) και αυτές καθ' εαυτές οι πλευρές ονομάζονται κομβιακές γραμμές ή έδρες.

##### β) Εξισώσεις στοιχείων

Το επόμενο βήμα είναι η ανάπτυξη των εξισώσεων που προσεγγίζουν τη λύση κάθε στοιχείου. Αυτό γίνεται σε δύο βήματα. Πρώτα, πρέπει να επιλέξουμε μία κατάλληλη συνάρτηση με άγνωστους συντελεστές την οποία θα χρησιμοποιήσουμε ώστε να προσεγγίσουμε τη λύση. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τους συντελεστές έτσι ώστε η συνάρτηση να προσεγγίζει τη λύση κατά βέλτιστο τρόπο

##### γ) Επιλογή των προσεγγιστικών συναρτήσεων

Συχνά χρησιμοποιούνται πολυώνυμα, λόγω του εύκολου μαθηματικού χειρισμού τους. Για την μονοδιάστατη περίπτωση παίρνουμε το πρωτοβάθμιο πολυώνυμο, ή ευθεία γραμμή.

$$u(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x \quad (4.1)$$

όπου  $u(x)$  είναι η εξαρτημένη μεταβλητή,  $\alpha_0$  και  $\alpha_1$  σταθερές, και  $x$  η ανεξάρτητη μεταβλητή. Η συνάρτηση αυτή πρέπει να περνά από τις τιμές της  $u(x)$  στα ακραία σημεία του στοιχείου στις θέσεις  $x_1$  και  $x_2$ . Άρα

$$u_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 \quad (4.2)$$

$$u_2 = \alpha_0 + \alpha_1 x_2$$

όπου  $u_1 = u(x_1)$  και  $u_2 = u(x_2)$ . Λύνοντας το σύστημα των δύο αυτών εξισώσεων με τον κανόνα του Cramer, βρίσκουμε

$$a_0 = \frac{u_1 x_2 - u_2 x_1}{x_2 - x_1} \quad (4.3)$$

$$a_1 = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1}$$

Αντικαθιστούμε τις παραπάνω τιμές στην εξ.(4.1) και κάνοντας πράξεις τη γράφουμε στην μορφή

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 \quad (4.4)$$

όπου,

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \quad \text{και} \quad (4.5)$$

$$N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (4.6)$$

Η εξ (4.4) ονομάζεται *προσεγγιστική συνάρτηση* ή *διαμορφική συνάρτηση* (shape function) και οι  $N_1, N_2$  *συναρτήσεις παρεμβολής* (interpolation functions). Στην πραγματικότητα, η εξ. (4.4) αποτελεί πολυώνυμο παρεμβολής Lagrange πρώτου βαθμού. Αποτελεί ένα μέσο πρόβλεψης των ενδιάμεσων τιμών μεταξύ των δοσμένων τιμών  $u_1$  και  $u_2$  στους κόμβους. Πρέπει να επισημανθεί ότι το άθροισμα των συναρτήσεων παρεμβολής είναι πάντα ίσο με ένα.

Η παράγωγος της εξ. (4.4) είναι

$$\frac{du}{dx} = \frac{dN_1}{dx} u_1 + \frac{dN_2}{dx} u_2 \quad (4.7)$$

και παραγωγίζοντας τις εξ. (4.3) και (4.4) καταλήγουμε στην εξίσωση



$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{x_2 - x_1} (-u_1 + u_2) \quad (4.8)$$

Με άλλα λόγια , πρόκειται για λόγο δύο διαφορών και παριστάνει την κλίση της ευθείας που συνδέει τους κόμβους.

Το ολοκλήρωμα εκφράζεται ως

$$\int_{x_1}^{x_2} u \, dx = \frac{u_1 + u_2}{2} (x_2 - x_1) \quad (4.9)$$

Δηλαδή προέκυψε ο γνωστός τύπος εμβαδού τραπεζίου.

*δ) Βέλτιστη προσαρμογή της συνάρτησης στη λύση*

Μετά την επιλογή της συνάρτησης παρεμβολής , πρέπει να αναπτυχθεί η εξίσωση που διέπει τη συμπεριφορά του στοιχείου. Η εξίσωση αυτή παριστάνει μία προσαρμογή της συνάρτησης στη λύση της υποκείμενης διαφορικής εξίσωσης. Για το σκοπό αυτό έχουμε στη διάθεση μας διάφορες μεθόδους. Μεταξύ των πιο συνήθων είναι η άμεση μεθοδολογία , η μέθοδος των σταθμητών καταλοίπων και η μεταλλακτική. Το αποτέλεσμα όλων αυτών των μεθόδων είναι ανάλογο με την προσαρμογή σε καμπύλη. Ωστόσο, αντί να προσαρμόζουμε συναρτήσεις σε δεδομένα, οι μέθοδοι αυτοί προκαθορίζουν σχέσεις μεταξύ των αγνώστων της εξ.(4.4) που επαληθεύουν την υποκείμενη PDE κατά βέλτιστο τρόπο.

Από μαθηματική άποψη, οι εξισώσεις των στοιχείων που προκύπτουν συχνά αποτελούν ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων που σε μητρική μορφή είναι

$$[k]\{u\} = \{F\} \quad (4.10)$$

Όπου  $[k]$  το **μητρώο δυσκαμψίας** (stiffness matrix) ή **στοιχειακή μήτρα** (element property),  $\{u\}$  ένα διάνυσμα στήλη των αγνώστων στους κόμβους και  $\{F\}$  ένα διάνυσμα στήλη που εκφράζει την επενέργεια των εξωτερικών επιρροών που ασκούνται στους κόμβους.

#### ε) Συναρμολογή

Αφού βρεθούν οι εξισώσεις των επιμέρους στοιχείων θα πρέπει να διασυνδεθούν ή να συναρμολογηθούν ώστε να χαρακτηρίζουν την ενιαία συμπεριφορά του όλου συστήματος. Η διαδικασία της συναρμολογής (assembly process) διέπεται από την αρχή της συνέχειας. Δηλαδή, οι λύσεις εφαπτών (contiguous) στοιχείων συναρμόζονται έτσι ώστε οι άγνωστες τιμές (και μερικές φορές και οι παράγωγοι) στους κοινούς τους κόμβους να είναι ισοδύναμες. Έτσι, η ολική λύση θα είναι συνεχής.

Όταν συναρμολογηθούν όλες οι επιμέρους παραλλαγές της Εξ. (4.11), το όλο σύστημα εκφράζεται σε μητρωϊκή μορφή ως:

$$[K] \{u'\} = \{F'\} \quad (4.11)$$

Όπου  $[K]$  είναι το συστημικό μητρώο δυσκαμψίας και  $\{u'\}$  και  $\{F'\}$  διανύσματα-στήλες για τους αγνώστους και τις εξωτερικές δυνάμεις.

#### στ) Συνοριακές συνθήκες

Η εξ.(4.11) πρέπει να τροποποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις συνοριακές συνθήκες του συστήματος. Οι ρυθμίσεις αυτές οδηγούν στη σχέση

$$[K^{TM}] \{u'\} = \{F'^{TM}\} \quad (4.12)$$

#### ζ) Επίλυση

Η επίλυση της εξ.(4.12) μπορεί να γίνει με μεθόδους της μητρωϊκής άλγεβρας, λόγου χάρι με την μέθοδο LU. Σε πολλές περιπτώσεις τα στοιχεία μπορούν να σχηματιστούν ώστε οι εξισώσεις που προκύπτουν να είναι **ταινιόσχημες** (banded). Έτσι, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις υψηλής απόδοσης μεθόδους που υπάρχουν για τέτοια συστήματα.

#### η) Μετεπεξεργασία

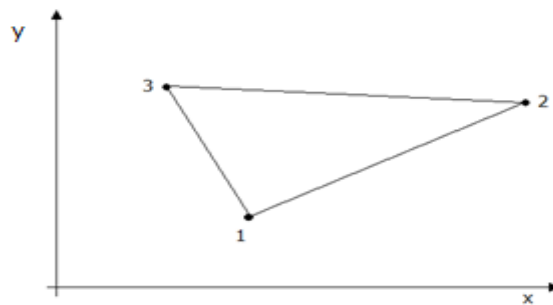
Μετά την εύρεση μιας λύσης μπορεί να απεικονιστεί σε μορφή πίνακα ή να κάνουμε την γραφική της παράσταση. Επιπλέον, μπορούν να βρεθούν κι άλλες δευτερεύουσες μεταβλητές.

#### 4.4.2 Διδιάστατα Προβλήματα

Παρότι οι μαθηματικές πράξεις αυξάνουν, η επέκταση της FEM σε διδιάστατα προβλήματα είναι εννοιολογικά παρόμοια με τις μονοδιάστατες εφαρμογές.

##### α) Διακριτοποίηση

Για το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιούνται συνήθως διάφορα απλά στοιχεία όπως τρίγωνα ή τετράπλευρα. Οι περισσότερες εφαρμογές υλοποιούνται με τρίγωνα όπως φαίνεται και στο πιο κάτω σχήμα (σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Τριγωνικό στοιχείο

##### β) Στοιχιακές εξισώσεις

Όπως και στη μονοδιάστατη περίπτωση, το επόμενο βήμα είναι να βρεθεί μία εξίσωση που να προσεγγίζει τη λύση του στοιχείου. Για τριγωνικό στοιχείο, η πιο απλή μέθοδος είναι να χρησιμοποιηθεί το γραμμικό πολυώνυμο.

$$u(x,y) = \alpha_0 + \alpha_{1.1} x + \alpha_{1.2} y \quad (4.13)$$

όπου  $u(x,y)$  είναι η εξαρτημένη μεταβλητή,  $\alpha_i$  οι συντελεστές, και οι  $x, y$  οι ανεξάρτητες μεταβλητές. Η συνάρτηση αυτή πρέπει να περνά από τις τιμές της  $u(x,y)$  στους κόμβους  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  και  $(x_3, y_3)$  του τριγώνου. Άρα,

$$u_1 = \alpha_0 + \alpha_{1.1} x_1 + \alpha_{1.2} y_1$$

$$u_2 = \alpha_0 + \alpha_{1.1} x_2 + \alpha_{1.2} y_2$$

$$u_3 = \alpha_0 + \alpha_{1.1}x_3 + \alpha_{1.2}y_3$$

ή σε μητρωϊκή μορφή

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_{1.1} \\ \alpha_{1.2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$$

Από την οποία βρίσκουμε :

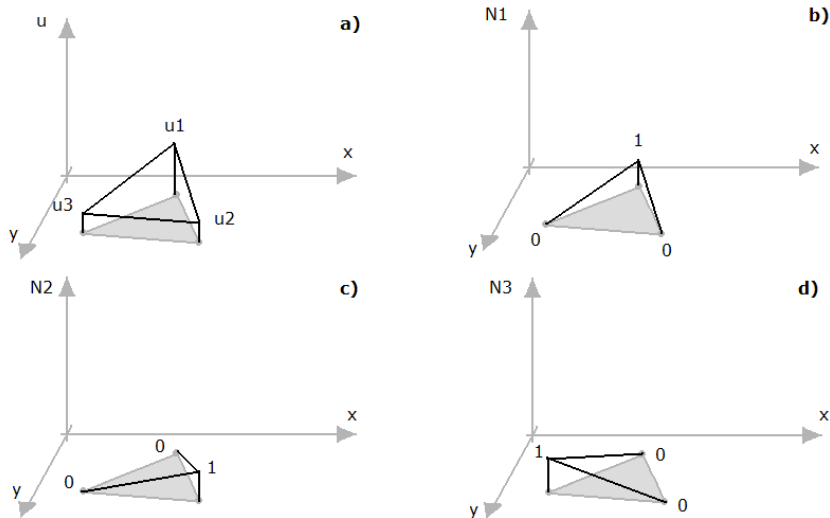
$$\alpha_0 = \frac{1}{2A_\varepsilon} [u_1(x_2y_3 - x_3y_2) + u_2(x_3y_1 - x_1y_3) + u_3(x_1y_2 - x_2y_1)] \quad (4.14)$$

$$\alpha_{1.1} = \frac{1}{2A_\varepsilon} [u_1(y_2 - y_3) + u_2(y_3 - y_1) + u_3(y_1 - y_2)] \quad (4.15)$$

$$\alpha_{1.2} = \frac{1}{2A_\varepsilon} [u_1(x_3 - x_2) + u_2(x_1 - x_3) + u_3(x_2 - x_1)] \quad (4.16)$$

Όπου  $A_\varepsilon$  είναι το εμβαδό του τριγωνικού στοιχείου, δηλαδή

$$A_\varepsilon = \frac{1}{2} [(x_2y_3 - x_3y_2) + (x_3y_1 - x_1y_3) + (x_1y_2 - x_2y_1)]$$



Σχήμα 4.14: Γραμμική προσέγγιση τριγωνικού στοιχείου. Οι αντίστοιχες συναρτήσεις παρεμβολής φαίνονται στα b) έως d).

Αν αντικαταστήσουμε τις εξ.(4.14) – (4.16) στην εξ.(4.13) βρίσκουμε

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 \quad (4.17)$$

όπου,

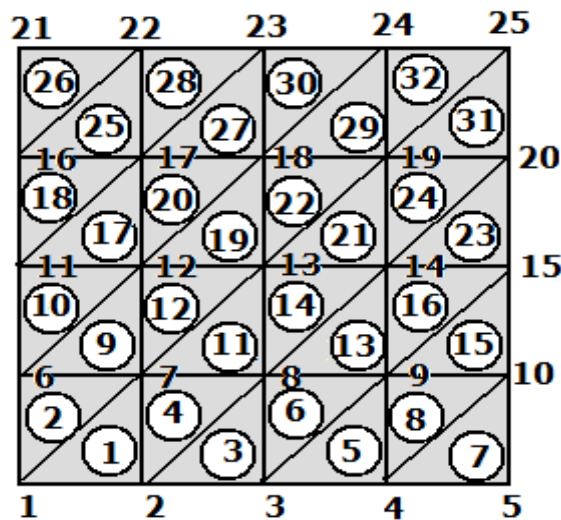
$$N_1 = \frac{1}{2A_e} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + x(y_2 - y_3) + y(x_3 - y_2)]$$

$$N_2 = \frac{1}{2A_e} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + x(y_3 - y_1) + y(x_1 - y_3)]$$

$$N_3 = \frac{1}{2A_e} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + x(y_1 - y_2) + y(x_2 - y_1)]$$

Η εξ. (4.17) μας δίνει ένα μέσο για να προβλέψουμε ενδιάμεσες τιμές για το στοιχείο με βάση τις τιμές στους κόμβους του. Στο Σχ.4.15 βλέπετε τη διαμορφική συνάρτηση καθώς και τις αντίστοιχες συναρτήσεις παρεμβολής.

Οι όροι του τελικού στοιχειακού πίνακα θα αποτελείται από χαμηλοβάθμια πολυώνυμα και σταθερές.



Σχήμα 4.15: Σύστημα αρίθμησης των κόμβων και των στοιχείων σε προσεγγισμό πεπερασμένων στοιχείων θερμαινόμενης πλάκας

### γ) Συνοριακές συνθήκες και συναρμολογή

Η ενσωμάτωση των συνοριακών συνθηκών και η συγκρότηση του συστημικού μητρώου είναι επίσης πιο σύνθετη όταν εφαρμόζουμε τη FEM σε προβλήματα δύο ή τριών διαστάσεων. Ωστόσο, όπως και κατά την απόδειξη του στοιχειακού μητρώου, η δυσκολία σχετίζεται περισσότερο με ο μηχανισμό της διαδικασίας παρά με εννοιολογική πολυπλοκότητα, π.χ. η επιβολή της συστημικής τοπολογίας η οποία είναι τετριμμένη για τη μονοδιάστατη περίπτωση αποκτά μεγάλη σημασία στις δύο ή τρεις διαστάσεις. Ειδικά, η επιλογή ενός σχήματος απαριθμησης θα υπαγορεύει την ταινιόσχημη μορφή του συστημικού μητρώου που θα προκύψει και επομένως την επιδοτικότητα με την οποία μπορεί να επιλυθεί.

### δ) Λύση και Μετεπεξεργασία

Παρότι ο μηχανισμός είναι πολύπλοκος, το συστημικό μητρώο είναι ουσιαστικά ένα σύστημα  $n$  εξισώσεων το οποίο είναι δυνατό να επιλυθεί ως προς τις τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών στους  $n$  κόμβους.

#### 4.4.3 Αναλυτική μεθοδολογία

Αφετηρία της ανάλυσης αποτελεί η εξίσωση Poisson που περιγράφει το δυναμικό σε μια διάσταση:

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \varphi = \rho \quad (4.18)$$

Η συνάρτηση δυναμικού μπορεί να είναι ένα ηλεκτροστατικό δυναμικό. Σε αυτή την περίπτωση, το  $\rho$  θα είναι γραμμική πυκνότητα φορτίου. Για να οριστεί το δυναμικό χρειάζονται οριακές συνθήκες που μπορεί να είναι είτε τιμές του δυναμικού, είτε της παραγωγού του, για παράδειγμα:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \quad (4.19)$$

Για την λύση της εξίσωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος διαιρείται σε στοιχεία όγκου. Μέσα σε κάθε τέτοιο στοιχείο το δυναμικό θα προσεγγίζεται από το γραμμικό πολώνυμο:

$$\varphi(x) = \alpha + \beta \cdot x \quad (4.20)$$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό θα είναι συνεχές στο χώρο, παρ' όλο που η παράγωγος του μπορεί να είναι ασυνεχής αν και η επιτρεπτικότητα  $\epsilon$  είναι ασυνεχής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να μπορεί να δείξει αυτή την συμπεριφορά έτσι είναι βολικό η εξίσωση (4.20) να χαρακτηρίζεται από τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους του στοιχείου και να χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές για άλλα πολυώνυμα που έχουν κοινό κόμβο.

Μια περαιτέρω απλοποίηση μπορεί να γίνει τροποποιώντας την εξίσωση (4.20) με όρους κομβικών συναρτήσεων  $N_i$  που καθορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} N_i(x) &= 1, \quad x = x_i \\ N_j(x) &= 0, \quad x = x_j, \quad j \neq i \end{aligned} \quad (4.21)$$

όπου  $x_i$  είναι η  $x$  συντεταγμένη του κόμβου  $i$ .

Η εξίσωση (4.20) μπορεί τώρα να πάρει την μορφή:

$$\varphi(x) = N_1(x) \cdot \varphi_1 + N_2(x) \cdot \varphi_2 \quad (4.22)$$

Οι συναρτήσεις  $N_i$  εκφράζονται σε όρους τοπικών συντεταγμένων μέσα στο στοιχείο. Χρησιμοποιώντας το σύστημα τοπικών συντεταγμένων  $\xi$  οι συναρτήσεις  $N_i$  γράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2}(1 - \xi) \\ N_2 &= \frac{1}{2}(1 + \xi) \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$-1 \leq \xi \leq 1$$

Οι συναρτήσεις  $N_i$  κάθε κόμβου ορίζονται μόνο εντός των στοιχείων που περιλαμβάνουν αυτόν τον κόμβο και είναι μηδενικές εκτός των στοιχείων αυτών.

Η μέθοδος υπολογισμού του δυναμικού  $\varphi$  με χρήση χαρακτηριστικών τιμών δυναμικού των κόμβων και συναρτήσεων  $N_i$  αποτελεί τη βάση, στην οποία πολλές εναλλακτικές διαδικασίες μπορούν να στηριχθούν για την επίλυση της εξίσωσης (4.19). Οι μέθοδοι διακύμανσης (variational methods), ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστών βαρύτητας (weighted residual) είναι τρεις από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Οι συντελεστές βαρύτητας έχουν διαδεδομένη εφαρμογή σε προγράμματα λογισμικού προκειμένου να υλοποιηθεί μία αριθμητική επίλυση. Μία προσεγγιστική επίλυση ως προς  $\varphi$  καθορίζεται από την απαίτηση να ικανοποιείται η παρακάτω συνάρτηση:

$$\int W(\nabla \cdot \varepsilon \nabla \varphi - \rho) \cdot dx = 0 \quad (4.24)$$

όπου  $W$  είναι η συνάρτηση βάρους, από την οποία παίρνει το όνομά της και η μέθοδος.

Ολοκληρώνοντας την (4.24) κατά τμήματα, προκειμένου να μειωθεί η τάξη της διαφορίσης που εφαρμόζεται στο  $\varphi$ , προκύπτει μια προσεγγιστική λύση για το δυναμικό  $\varphi$ :

$$\int_a^b (\nabla W \cdot \varepsilon \nabla \varphi + W \rho) dx - \left[ W \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] = 0 \quad (4.25)$$

όπου  $a, b$  τα όρια ολοκλήρωσης της εξίσωσης.

Η εξίσωση (4.25) οδηγεί κατευθείαν σε αριθμητικό υπολογισμό της λύσης χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία και τις συναρτήσεις  $N_i$  που εξηγήθηκαν πιο πάνω. Η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης πλεονεκτεί έναντι των άλλων, αφού οι συναρτήσεις  $W$  και  $\varphi$  δε χρειάζονται συνεχή παραγωγή και επιπλέον καθορίζονται εύκολα οι φυσικές οριακές συνθήκες στην επιφάνεια της περιοχής  $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ .

Ο τομέας από  $a$  έως  $b$  διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι δίνουν ένα συνδυασμό ανεξάρτητων συναρτήσεων βάρους. Από αυτές τις συναρτήσεις βάρους



μπορούν να αναπτυχθούν εξισώσεις με την απαίτηση ότι η εξίσωση (4.25) ικανοποιείται για κάθε συνάρτηση βάρους.

Η εξίσωση για τη συνάρτηση βάρους  $W_i$  θα εξαχθεί από την:

$$\sum_j \left( \int_{\alpha}^b (\nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j \varphi_i + N_i \rho) dx \right) - \left[ N_i \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] = 0 \quad (4.26)$$

για όλα τα στοιχεία που περιέχουν τον κόμβο  $i$ .

Παίρνοντας όλες τις εξισώσεις για τις διαφορετικές συναρτήσεις βάρους θα έχουμε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που σε μητρική μορφή γράφονται ως:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{\Phi} = \mathbf{S} \quad (4.27)$$

όπου  $\mathbf{K}$  ο πίνακας των συντελεστών,  $\mathbf{\Phi}$  το διάνυσμα των άγνωστων τάσεων στους κόμβους και  $\mathbf{S}$  το διάνυσμα των οριακών συνθηκών ή των πυκνοτήτων φορτίου.

Οι συντελεστές στον πίνακα  $\mathbf{K}$  έχουν τη μορφή:

$$K_{ij} = \int_{\alpha}^b \nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j dx \quad (4.28)$$

Αξίζει να σημειωθεί, ότι, παρ' όλο που η ολοκλήρωση στην εξίσωση (4.28) γίνεται για όρια από  $a$  έως  $b$ , μόνο τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και τους δύο κόμβους  $i$  και  $j$  συνεισφέρουν.

Οι εξισώσεις στη σχέση (4.27) συχνά δεν είναι γραμμικές επειδή η επιτρεπτότητα  $\varepsilon$  εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, που προφανώς δεν είναι γραμμική.

Για την επίλυση αυτών των μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson. Δίνεται μια αρχική τιμή στα δυναμικά  $\mathbf{\Phi}_n$  και υπολογίζεται μια νέα λύση  $\mathbf{\Phi}_{n+1}$  επιλύοντας το γραμμικοποιημένο Ιακωβιανό σύστημα:

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n - J_n^{-1}R_n \quad (4.29)$$

όπου το υπόλοιπο  $R_n$  δίνεται από την:

$$R_n = K_n \cdot \Phi_n - S_n \quad (4.30)$$

και η Ιακωβιανή  $J_n$  από την:

$$J_n = \frac{\partial}{\partial \Phi_n} (K_n \cdot \Phi_n - S_n) \quad (4.31)$$

Με διαδοχικές επαναλήψεις της μεθόδου Newton-Raphson προσεγγίζεται η ζητούμενη τιμή του δυναμικού.

#### 4.4.4 Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων

Οι χρήστες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να αποδείξουν ότι το μοντέλο είναι σύμφωνο με το φυσικό πρόβλημα [26]. Στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι συχνά δυνατό να εκτελεστούν απλοί υπολογισμοί, οι οποίοι δίνουν μία σειρά απαντήσεων που αποτελούν ένα σημαντικό μέρος της ανάλυσης. Μέχρι να αποδειχτεί η ακρίβεια του μοντέλου, δεν είναι σκόπιμο να εξετάζονται τα λάθη λόγω ασυνέχειας. Προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Επίλυση του απλούστερου δυνατού προβλήματος, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας γραμμικά υλικά ή υλικά με μοναδιαία ή μεγάλη σχετική διαπερατότητα ή επιτρεπτότητα.
- Έλεγχος ότι η λύση έχει την αναμενόμενη συμμετρία.

- Έλεγχος ότι η λύση συμφωνεί με τις προβλέψεις που προέκυψαν μέσω της απλής γραμμικής ολοκλήρωσης (εφ' όσον είναι εφαρμόσιμη η προσέγγιση της άπειρης διαπερατότητας)
- Εάν το πεδίο είναι χρονομεταβλητό, κρίνεται σκόπιμος ο έλεγχος ότι οι σταθερές του χρόνου συμφωνούν τα μοντέλα ισοδυνάμων κυκλωμάτων.

#### 4.4.5 Συναρτήσεις λάθους

Το πρόγραμμα PC OPERA-2d χρησιμοποιεί τεχνικές εκτίμησης λάθους προκειμένου να υπολογίσει το τοπικό και το καθολικό λάθος του πεδίου, που παράγεται από επιλύσεις μέσω δυναμικού. Κατά την προ- και την μετ-επεξεργασία το τοπικό λάθος (σε μονάδες πυκνότητας ροής) και το *rms* λάθος μπορούν να προσεγγιστούν μέσω των συναρτήσεων του συστήματος ERROR και RMSERROR. Οι τιμές του *rms* λάθους υπολογίζονται από το πρόγραμμα με δύο τρόπους:

- «RMS λάθος του συνολικού προβλήματος» είναι η τιμή που αποθηκεύεται στη μεταβλητή του συστήματος RMSERROR. Αυτή υπολογίζεται μέσω των σχετικών λαθών σε κάθε στοιχείο.
- «RMS λάθος με βάρη» χρησιμοποιεί τα μεγέθη των στοιχείων ως βάρη στους υπολογισμούς, ώστε τα μικρότερα στοιχεία να έχουν μικρότερη συμμετοχή στην τιμή του λάθους.

#### 4.5 Συνοριακές συνθήκες

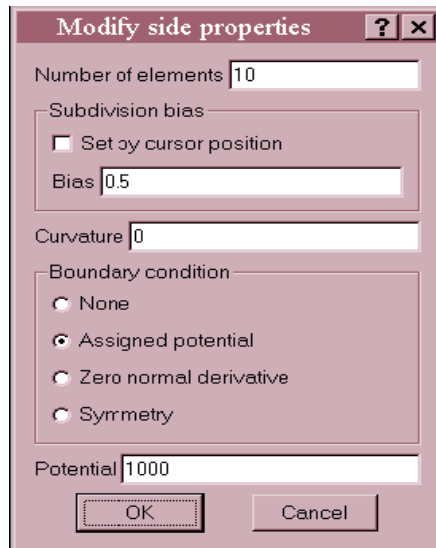
Οι συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται για δύο λόγους, αφ' ενός παρέχουν τον τρόπο ώστε να μειωθεί το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων κατά την αναπαράσταση συμμετρικών προβλημάτων και αφ' ετέρου προσεγγίζουν το μαγνητικό πεδίο σε μεγάλες αποστάσεις από τη διάταξη.

Τα προβλήματα συμμετρίας και τα συμμετρικά πεδία υποδηλώνονται με συνοριακές συνθήκες δυναμικού εφαρμοζόμενες στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Οι απλούστεροι τύποι συνοριακών συνθηκών είναι:

<b>ΑΠΛΕΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ</b>		
<b>Συμμετρικό πεδίο</b>	<b>Βαθμοτό δυναμικό</b>	<b>Διανυσματικό δυναμικό</b>
$H_n = 0$ ή $B_n = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$	$A = constant$
$H_t = 0$ ή $B_t = 0$	$\varphi = constant$	$\frac{\partial A}{\partial x} = 0$

*ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Απλές συνοριακές συνθήκες*

Στο ηλεκτροστατικό πεδίο οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων πρέπει να προσδιοριστούν με συνοριακή συνθήκη δυναμικού ( $v = value$ ). Στο σχήμα 4.13 φαίνεται η διαδικασία αυτή μέσω της εντολής “assigned potential”.



Σχήμα 4.13: Ορισμός δυναμικού

Εκτός από αυτή την περίπτωση, οι υπόλοιπες συνοριακές συνθήκες που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα πρέπει να εφαρμόζονται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Η συνθήκη που εφαρμόζεται από το πρόγραμμα, εάν καμία συνθήκη δεν οριστεί σε μία εξωτερική επιφάνεια, είναι:

<b>ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ</b>		
<b>Συμμετρικό πεδίο</b>	<b>Βαθμοτό δυναμικό</b>	<b>Διανυσματικό δυναμικό</b>
$H_n = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$	
$B_t = 0$	$\varphi = \text{constant}$	$\frac{\partial A}{\partial x} = 0$

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: Αυτόματα εφαρμοζόμενες συνοριακές συνθήκες

## 4.6 Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιεί το PC OPERA-2d

### 4.6.1 Μαγνητοστατική και δινορρέυματα

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $\mathbf{H}$ ) και η πυκνότητα ρεύματος ( $\mathbf{J}$ ) συνδέονται με τη σχέση:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.15)$$

ενώ η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $\mathbf{E}$ ) συνδέεται με την πυκνότητα μαγνητικής ροής ( $\mathbf{B}$ ) με την σχέση:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\mathbf{B}}{\tau} \quad (4.16)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας μαγνητικής ροής ( $\mathbf{B}$ ) ισούται με μηδέν :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.17)$$

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της διαπερατότητας ως εξής:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot (\mathbf{H} - \mathbf{H}_c) \quad (4.18)$$

όπου  $\mathbf{H}_c$  η δύναμη κάθε μόνιμου μαγνήτη.

Η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της έντασης ηλεκτρικού πεδίου και της αγωγιμότητας  $\sigma$  με την σχέση:

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (4.19)$$

Το διάνυσμα μαγνητικού δυναμικού ( $\mathbf{A}$ ) ορίζεται ως:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.20)$$

και το βαθμωτό δυναμικό ( $\varphi$ ) ως:

$$\mathbf{H} = -\nabla\varphi \quad (4.21)$$

#### 4.6.2 Ηλεκτροστατική

Η διηλεκτρική μετατόπιση ( $\mathbf{D}$ ) και η πυκνότητα φορτίου συνδέονται με την σχέση:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4.22)$$

και η ένταση ηλεκτρικού πεδίου και η επιτρεπτότητα συνδέονται με τη διηλεκτρική μετατόπιση μέσω της:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad (4.23)$$

Το ηλεκτρικό δυναμικό ( $V$ ) ορίζεται ως:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4.24)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας ρεύματος ( $\mathbf{J}$ ) ισούται με μηδέν:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4.25)$$

## 4.7 Στατική ανάλυση

Η στατική ανάλυση των πεδίων του PC-OPERA επιλύει σταθερό μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο. Το μοντέλο μπορεί να περιέχει υλικά με μη γραμμική διαπερατότητα  $\mu$  ή επιτρεπτότητα  $\epsilon$  σε σύστημα καρτεσιανών ή κυλινδρικών συντεταγμένων. Μπορούν επίσης να λυθούν και άλλοι τύποι πεδίων όπως, για παράδειγμα, πεδία που περιγράφονται από μη-γραμμικές εξισώσεις Poisson ή από ροή ηλεκτρικών ρευμάτων.

### 4.7.1 Οι εξισώσεις που επιλύονται

Το OPERA-2d/St υπολογίζει το βαθμωτό ή διανυσματικό δυναμικό που καθορίζεται από μια μη γραμμική εξίσωση Poisson [26]. Το διανυσματικό δυναμικό συνήθως χρησιμοποιείται για ανάλυση μαγνητικών πεδίων επειδή τα αποτελέσματα του βαθμωτού δυναμικού δεν μπορούν να περιέχουν ρεύμα σαν πηγή των πεδίων, ωστόσο αν ένα μοντέλο έχει σαν διέγερση μόνο οριακές συνθήκες ή μόνιμους μαγνήτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο μορφές δυναμικού. Η εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί στην περίπτωση μαγνητοστατικού πεδίου που χρησιμοποιεί διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό είναι η εξής:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \vec{H}_c \right) = \vec{j} \quad (4.26)$$

Η αντίστοιχη εξίσωση στην περίπτωση υπολογισμού βαθμωτού δυναμικού είναι:

$$\nabla \mu (\nabla \phi - \mathbf{H}_c) = \rho \quad (4.27)$$

Η τιμή του  $\rho$  πρέπει να είναι μηδενική για το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό, ενώ εάν το  $\phi$  είναι βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό τότε το  $\rho$  είναι πυκνότητα φορτίου. Ο όρος  $\mathbf{H}_c$  παριστάνει μόνιμους μαγνήτες για ανάλυση μαγνητικών πεδίων και ηλεκτρήτες για ανάλυση ηλεκτρικών πεδίων.



#### 4.7.2 Προετοιμασία για επίλυση με το OPERA-2d/St

Τα δεδομένα που χρειάζονται για την ανάλυση ενός μοντέλου εισάγονται με την εντολή **Solution type**. Ο χρήστης μπορεί να δώσει τις πιο κάτω εντολές:

- Γραμμική ή μη γραμμική λύση

Για γραμμική επίλυση χρησιμοποιείται η τιμή της επιτρεπτότητας που δίνεται ως παράμετρος της περιοχής ενώ για μη γραμμική επίλυση (μη γραμμικά υλικά) χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές BH ή DE.

- Καθορισμός ή όχι του πλέγματος

Με αυτή την εντολή ο χρήστης επιλέγει αν το πλέγμα ορίζεται αυτόματα από την ανάλυση ή αν ορίζεται από τον χρήστη. Αν το πλέγμα ορίζεται από τον χρήστη τότε μπορούν να δοθούν:

- Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων
- Ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων
- Τελική ακρίβεια σύγκλισης %
- Συντελεστής κλίμακας. Ο συντελεστής κλίμακας πολλαπλασιάζει τις τιμές των φορτίων, της πυκνότητας ρεύματος και τις μη μηδενικές οριακές συνθήκες.
- Νέα λύση ή φόρτωση της ήδη υπάρχουσας

### 4.7.3 Επίλυση προβλήματος με το OPERA-2d/St

Η επίλυση προβλημάτων με την στατική ανάλυση γίνεται από το κύριο μενού του προγράμματος και ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

- Εισάγεται το αρχείο του μοντέλου που είναι σε μορφή (.op2)
- Επιλογή στατικής ανάλυσης
- Επεξεργασία αρχείου (.op2)
- Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο μορφής (.st)
- Έξοδος από το πρόγραμμα ανάλυσης

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ανοίγουμε το αρχείο μορφής (.st) που έχει δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ανάλυσης.

## Κεφάλαιο 5

### Πειραματική διάταξη και Εργαστηριακές δοκιμές

#### 5.1 Σκοπός και βασικές αρχές των μετρήσεων

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη για τη λήψη μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο μέσης τάσης και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ με χρήση κατάλληλων διακριβωμένων οργάνων. Η μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου, όπως έχει καταδειχθεί από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διηλεκτρική συμπεριφορά των αλεξικεραυνών για λόγους, οι οποίοι συνοψίζονται κυρίως στα εξής:

- η γνώση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο του αλεξικέραυνου, καθώς και το υλικό κατασκευής του, επηρεάζουν τη σχεδιάσή του. Είναι απαραίτητο να αποφεύγονται οι μεγάλες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν, υπό κατάλληλες συνθήκες, στη δημιουργία μερικών εκκενώσεων, στην εμφάνιση υπερπήδησης ή, ακόμη και, στη διάτρηση του αλεξικέραυνου,
- η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, από την οποία διέρχονται οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με την περιοχή τοποθέτησης των αλεξικεραυνών, στην επιφάνειά τους επικάθεται υγρασία ή θαλάσσια άλμη ή ακαθαρσίες, που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, ή συνδυασμός των ανωτέρω και μεταβάλλουν την κρίσιμη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση των ανωτέρω συνθηκών ρύπανσης στο ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τύπου αλεξικέραυνου,
- η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλεται, όταν στο αλεξικέραυνο παρουσιαστεί κάποιο ελάττωμα ή βλάβη (μόνιμη ή παροδική).

Η σύγκριση των τιμών του ηλεκτρικού πεδίου ενός ελαττωματικού αλεξικεραύνου με τις αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου σε έναν υγιές ίδιου τύπου μπορεί να συνεισφέρει στην ανίχνευση βλαβών.

Αντίστοιχα, η μελέτη της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης σε ένα αλεξικέραυνο αποτελεί σημαντικό παράγοντα για το σχεδιασμό ενός αλεξικέραυνου, για τους εξής λόγους:

- η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σχετίζεται άμεσα με την καταπόνηση, που υφίσταται το αλεξικέραυνο κατά τη λειτουργία του.
- η προσπάθεια ομοιόμορφης κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης οδηγεί σε βέλτιστη αξιοποίηση των υλικών και συνεπώς σε μείωση του κόστους.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε καθοδικά αλεξικέραυνα μέσης τάσης, οι οποίες εν συνεχεία θα συγκριθούν με αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA. Παρακάτω παρουσιάζονται οι δοκιμές και οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου στο αλεξικέραυνο που είχαμε στην διάθεσή μας.

## 5.2 Εξεταζόμενο δοκίμιο

Το προς εξέταση δοκίμιο είναι ένα αλεξικέραυνο των 10 kA με τα εξής χαρακτηριστικά:

<b>Μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας</b>	30 kV		
<b>Ονομαστική τάση</b>	24 kV		
<b>Παραμένουσα τάση</b>	<b>1/20μs</b>	<b>5 kA</b>	78,19 kV
		<b>10 kA</b>	82,99 kV
		<b>20 kA</b>	91,87 kV
	<b>1/60μs</b>	<b>20 kA</b>	90,24 kV

Το αλεξικέραυνο είναι κατασκευής της General Electrics και αποτελείται από μη γραμμικές αντιστάσεις από οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO χωρίς διάκενα. Οι μη γραμμικές αντιστάσεις (βαρίστορ) περικλείονται σε περίβλημα από πολυμερές υλικό.



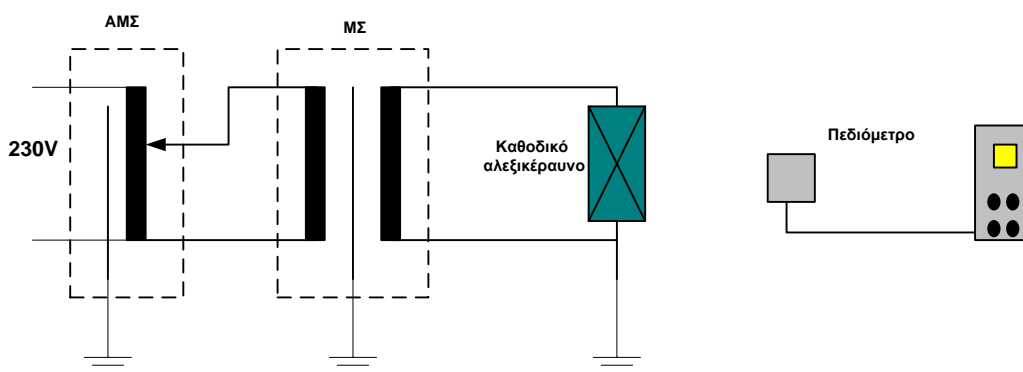
Σχήμα 5.1: Το προς μέτρηση αλεξικέραυνο

### 5.3 Συνδεσμολογία

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε :

- Τράπεζα χειρισμών
  - Messwardler\_Bau GmbH Bamberg,
  - Schalt\_und Regelpult,
  - F. –Nr. 389961
- Αυτομετασχηματιστής (230V/0...230V)
- Σταθεροποιητής εναλλασσόμενης τάσης
  - Wechselspannung – stabilisator 3 kW
  - AC Voltage Regulator WS - 30
- Μετασχηματιστής
  - Messwardler\_Bau GmbH Bamberg,
  - F.Nr72/441819,
  - Λόγος Μετασχηματισμού 220V/100kV
  - Συχνότητα 50 Hz
- Πεδιόμετρο

- PMM 8053A
- Αισθητήρας (probe) PMM EHP 50B
- Ψηφιακό Βολτόμετρο
- Οπτική ίνα

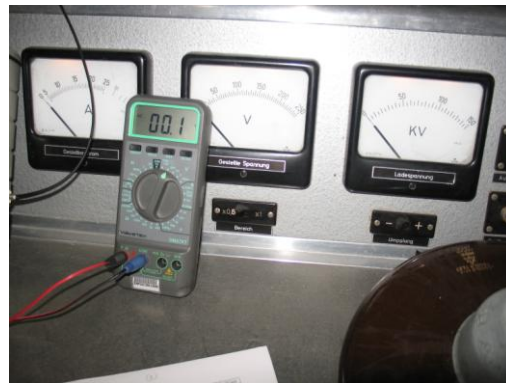


*Σχήμα 5.2 : Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο*

Η διάταξη (Σχήμα 5.2) περιλαμβάνει έναν αυτομετασχηματιστή, ενσωματωμένο στην τράπεζα χειρισμών, (Σχήμα 5.3), η είσοδος του οποίου συνδέεται, μέσω ενός σταθεροποιητή, στην παροχή της Δ.Ε.Η. (230V, 50Hz) και η έξοδος του τροφοδοτεί ένα μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού 220V/100kV. Μέσω της τράπεζας χειρισμών εφαρμόζαμε εναλλασσόμενη τάση, την οποία ελέγχαμε με την βοήθεια του ψηφιακού βολτομέτρου. Ο αισθητήρας του πεδιομέτρου, ο οποίος συνδέθηκε μέσω οπτικής ίνας με το πεδιόμετρο, τοποθετήθηκε σε διάφορες θέσεις του χώρου πλησίον του αλεξικεράυνου, όπου μετρήθηκε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης τάσης.



Σχήμα 5.3: Τράπεζα χειρισμών.



Σχήμα 5.4: Φωτογραφίες από την τράπεζα χειρισμών

### 5.3.1 Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε το πεδιομετρο PMM 8053A και ο αισθητήρας (probe) PMM EHP 50B [29], τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικής ίνας. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου και του αισθητήρα. Το σημείο που ήταν τοποθετημένο το αλεξικέραυνο θεωρήθηκε ως το σημείο ( $X=0$ ,  $Y=0$ ,  $Z=0$ ) του χώρου.

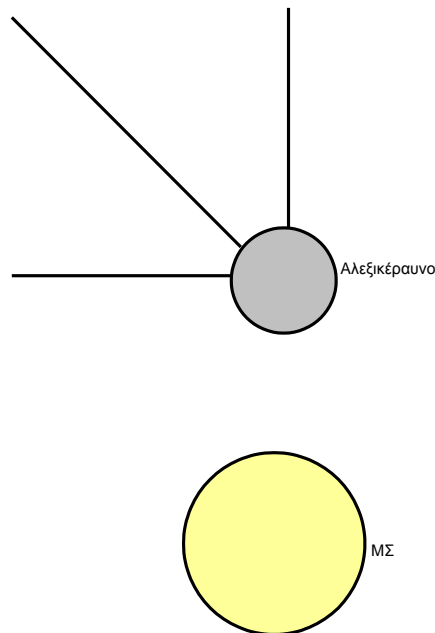
Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε έξι θέσεις του οριζοντίου επιπέδου XOY ( $Z=0$ ),

- $R = 200 \text{ cm}$

- $R = 170 \text{ cm}$
- $R = 140 \text{ cm}$
- $R = 110 \text{ cm}$
- $R = 80 \text{ cm}$
- $R = 50 \text{ cm}$

για τους παρακάτω άξονες,

- $X = R, Y = 0,$
- $X = 0, Y = R$
- $\varphi = 45^\circ$



Σχήμα 5.5: Κάτοψη δοκιμής

Με τη βοήθεια του πεδιομέτρου μετρήθηκε το μέτρο των τριών συνιστωσών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ( $E_x, E_y, E_z$ ), καθώς και η συνολική τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E_t$ , η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$E_t = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$



Η εφαρμοζόμενη τάση στο αλεξικέραυνο ήταν ίση με 12 kV, 13,2 kV και 16,5 kV για την κάθε θέση του πεδιομέτρου.

#### 5.4 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στους πιο κάτω πίνακες:

##### Άξονας X

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	11	200	0	14,434	46,814	197,32	202,3
13,2	11	200	0	15,167	49,138	208,06	211
16,5	11	200	0	19,463	62,395	263,81	272,7
12	11	170	0	22,007	66,420	304,63	311,3
13,2	11	170	0	23,262	70,344	322,56	330,9
16,5	11	170	0	29,374	88,549	401,82	417,4
12	11	140	0	35,891	119,73	483,75	497,5
13,2	11	140	0	37,287	124,34	501,33	518,3
16,5	11	140	0	47,189	156,99	633,48	656,1
12	11	110	0	63,957	211,10	815,48	844,4
13,2	11	110	0	67,549	234,83	862,63	888,3
16,5	11	110	0	85,780	296,75	1088,5	1135
12	11	80	0	110,06	467,44	1497,7	1559
13,2	11	80	0	115,81	490,99	1559	1632
16,5	11	80	0	148,48	624,34	1780,4	1845
12	11	50	0	207	1263	3260	3491
13,2	11	50	0	216	1318	3414	3674
16,5	11	50	0	276	1678	4351	4690

Πίνακας 5.1 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα X σε ύψος 11 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	17,5	200	0	14,766	74,357	206,41	228,7
13,2	17,5	200	0	15,534	67,929	207,04	248,3

16,5	17,5	200	0	19,725	86,691	262,71	268,5
12	17,5	170	0	20,911	93,189	293,78	308,8
13,2	17,5	170	0	22,246	98,602	310,27	323,8
16,5	17,5	170	0	27,733	125,04	394,59	419,8
12	17,5	140	0	31,743	168,08	458,62	484,6
13,2	17,5	140	0	33,636	175,33	479,94	515,4
16,5	17,5	140	0	42,902	224,08	611,81	652,9
12	17,5	110	0	61,185	318,25	768,71	551
13,2	17,5	110	0	63,651	330,24	798,44	878,8
16,5	17,5	110	0	81,429	422,31	1026,4	1111
12	17,5	80	0	87,722	678,07	1401,2	1549
13,2	17,5	80	0	93,750	715,27	1484,8	1581
16,5	17,5	80	0	119,29	916,61	1666,2	1906
12	17,5	50	0	169	1800	2988	3478
13,2	17,5	50	0	180	1880	3142	3666
16,5	17,5	50	0	231	2452	4009	4632

Πίνακας 5.2 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα X σε ύψος 17,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	22,5	200	0	13,962	77,407	193,14	209,7
13,2	22,5	200	0	14,722	81,708	203,85	221,2
16,5	22,5	200	0	18,750	105,6	261,71	282,3
12	22,5	170	0	21,379	114,67	292,59	307,8
13,2	22,5	170	0	22,513	114,77	295,22	317,4
16,5	22,5	170	0	28,306	155,29	386,8	417,5
12	22,5	140	0	36,887	202,84	436,04	436,5
13,2	22,5	140	0	39,758	214,35	461,07	516,9
16,5	22,5	140	0	49,607	274,24	588,59	652,9
12	22,5	110	0	48,982	390,7	722,48	822,4
13,2	22,5	110	0	51,535	412,12	762,74	857
16,5	22,5	110	0	66,36	525,63	974,99	1112

12	22,5	80	0	93,569	833,64	1342,2	1597
13,2	22,5	80	0	98,804	877,68	1395,2	1626
16,5	22,5	80	0	129	1154	1860	2193
12	22,5	50	0	127	2234	2798	3583
13,2	22,5	50	0	134	2353	2954	3737
16,5	22,5	50	0	169	2968	3753	4768

Πίνακας 5.3 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα X σε ύψος 22,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	32,5	200	0	13,585	100,18	199,46	203,6
13,2	32,5	200	0	14,157	104,26	208,62	229,8
16,5	32,5	200	0	16,247	126,3	266,4	295,2
12	32,5	170	0	18,250	151,46	279,86	318,8
13,2	32,5	170	0	18,157	159,25	293,07	334
16,5	32,5	170	0	24,071	201,72	371,66	408,3
12	32,5	140	0	26,49	267,85	423,19	500,9
13,2	32,5	140	0	27,933	282,89	451,23	533,5
16,5	32,5	140	0	34,947	356,96	569,53	673,3
12	32,5	110	0	38,757	513,7	692,16	779,9
13,2	32,5	110	0	41,470	546,12	734,14	894,9
16,5	32,5	110	0	52,661	689,36	930,58	1161
12	32,5	80	0	53	1122	1270	1686
13,2	32,5	80	0	55	1174	1327	1724
16,5	32,5	80	0	71	1484	1569	2017
12	32,5	50	0	82	2893	2470	3419
13,2	32,5	50	0	89	3071	2632	3942
16,5	32,5	50	0	94	3864	3156	4710

Πίνακας 5.4 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα X σε ύψος 32,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	40,5	200	0	3,881	127,88	187,72	240,6
13,2	40,5	200	0	5,386	114,21	186,1	252,6

16,5	40,5	200	0	6,791	143,31	233,14	277,9
12	40,5	170	0	6,056	176,17	270,62	321,5
13,2	40,5	170	0	6,337	176,68	262,56	345,9
16,5	40,5	170	0	8,222	226,92	335,65	406,2
12	40,5	140	0	18,753	289,12	371,05	473,1
13,2	40,5	140	0	21,55	309,83	396,05	496,9
16,5	40,5	140	0	27,494	394,73	505,02	643,2
12	40,5	110	0	30,606	521,37	569,04	771,2
13,2	40,5	110	0	31,449	541,01	594,45	804,3
16,5	40,5	110	0	38,364	705,71	763,66	1040
12	40,5	80	0	94,066	1266,2	1096,17	1577
13,2	40,5	80	0	97	1342	1250	1854
16,5	40,5	80	0	126	1462	1354	1997
12	40,5	50	0	270	2654	1979	3350
13,2	40,5	50	0	289	2727	1896	3525
16,5	40,5	50	0	364	3434	2388	4165

Πίνακας 5.5 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα X σε ύψος 40,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	48,5	200	0	8,032	145,97	194,93	240
13,2	48,5	200	0	8,533	127,15	186,13	255,5
16,5	48,5	200	0	10,798	162,84	237,78	288,3
12	48,5	170	0	1,080	221,62	269,32	350,6
13,2	48,5	170	0	1,113	214,77	265,87	366,5
16,5	48,5	170	0	1,412	269,59	307,34	383,9
12	48,5	140	0	4,487	337,51	365,19	497,2
13,2	48,5	140	0	4,7	368,92	386,23	519
16,5	48,5	140	0	5,842	471,69	489,72	640,2
12	48,5	110	0	18,44	628,75	564,93	845,4
13,2	48,5	110	0	18,633	677,1	590,28	898,4
16,5	48,5	110	0	24,729	871,55	754,09	1137
12	48,5	80	0	13	1334	933	1603
13,2	48,5	80	0	13	1404	958	1649
16,5	48,5	80	0	16	1587	1242	2016

12	48,5	50	0	146	3251	1600	3626
13,2	48,5	50	0	152	3468	1660	3804
16,5	48,5	50	0	198	4452	2120	4874

Πίνακας 5.6 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα X σε ύψος 48,5 cm

### Άξονας Y

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	11	0	200	13,081	64,898	340,74	347,1
13,2	11	0	200	13,872	68,738	360,72	367,5
16,5	11	0	200	17,703	87,904	458,57	460,9
12	11	0	170	19,461	102,19	482,65	493,7
13,2	11	0	170	19,792	107,11	514,18	501,4
16,5	11	0	170	26,088	135,09	529,75	540,7
12	11	0	140	32,269	159,39	721,67	704,6
13,2	11	0	140	33,845	167,71	761,51	778,9
16,5	11	0	140	40,881	214,98	978,27	891,9
12	11	0	110	35,041	267,48	1105,06	1138
13,2	11	0	110	36,881	285,31	1180,8	1214
16,5	11	0	110	48,269	365,91	1508,1	1552
12	11	0	80	61,158	531,63	1706,8	1783
13,2	11	0	80	64,898	561,28	1709,3	1842
16,5	11	0	80	83,620	692,89	1804,7	1934
12	11	0	50	110	1257	3601	3706
13,2	11	0	50	118	1318	3760	4069
16,5	11	0	50	147	1673	4768	5055

Πίνακας 5.7 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα Y σε ύψος 11 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	17,5	0	200	1,254	92,641	333,71	348,7
13,2	17,5	0	200	1,289	97,520	349,33	368,3
16,5	17,5	0	200	2,081	124,36	445,56	463,2
12	17,5	0	170	3,488	140,68	476,22	497,1
13,2	17,5	0	170	3,760	148,69	491,12	512,5

16,5	17,5	0	170	5,059	188,01	628,45	651,6
12	17,5	0	140	5,891	226,54	696,56	738,8
13,2	17,5	0	140	6,220	243,42	739,52	769,1
16,5	17,5	0	140	7,541	304,89	930,37	988,2
12	17,5	0	110	9,470	386,21	1057,9	1131
13,2	17,5	0	110	10,356	407,98	1121	1181
16,5	17,5	0	110	13,676	518,11	1420	1525
12	17,5	0	80	22,925	777,34	1634,4	1807
13,2	17,5	0	80	24,265	829,01	1678	1864
16,5	17,5	0	80	31,278	1050,1	1778	2060
12	17,5	0	50	33	1859	3,422	3852
13,2	17,5	0	50	36	1945	3586	4068
16,5	17,5	0	50	48	2475	4568	5069

Πίνακας 5.8 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα Y σε ύψος 17,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	22,5	0	200	12,874	112,33	326,4	305,4
13,2	22,5	0	200	13,399	118,18	344,56	364,2
16,5	22,5	0	200	17,264	151,65	441,23	466,8
12	22,5	0	170	16,689	170,29	465,1	487,1
13,2	22,5	0	170	17,522	178,51	484,21	516,3
16,5	22,5	0	170	22,513	226,01	622,64	663
12	22,5	0	140	19,665	253,64	679,9	725,9
13,2	22,5	0	140	19,422	284,47	714,25	737,8
16,5	22,5	0	140	25,722	365,38	911,17	907,7
12	22,5	0	110	47,658	466,74	1029,9	1131
13,2	22,5	0	110	50,776	497,65	1097,6	1206
16,5	22,5	0	110	63,577	624,79	1371,9	1520
12	22,5	0	80	80,828	944,72	1652	1901
13,2	22,5	0	80	85,659	996,01	1678,9	1969
16,5	22,5	0	80	107	1327	2365	2678
12	22,5	0	50	196	2266	3241	3960
13,2	22,5	0	50	201	2323	3407	4128
16,5	22,5	0	50	258	3016	4319	5275

Πίνακας 5.9 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα Y σε ύψος 22,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	32,5	0	200	35,486	141,89	251,87	287
13,2	32,5	0	200	37,862	150,54	267,64	299,7
16,5	32,5	0	200	45	187,21	337,31	388,3
12	32,5	0	170	60,883	210,71	383,65	422,6
13,2	32,5	0	170	65,987	221,61	405,72	458,1
16,5	32,5	0	170	72,35	268,07	513,89	584,1
12	32,5	0	140	86,136	353,47	593,61	678,4
13,2	32,5	0	140	91,176	371,37	623,02	725,4
16,5	32,5	0	140	113,87	470,18	791,67	897,7
12	32,5	0	110	121,14	436,92	836,86	949,8
13,2	32,5	0	110	121,06	678,07	968,27	1188
16,5	32,5	0	110	158,58	869,13	1227,3	1453
12	32,5	0	80	238	1209	1596	2013
13,2	32,5	0	80	247	1362	1701	2134
16,5	32,5	0	80	271	1541	2162	2654
12	32,5	0	50	290	2930	2873	4111
13,2	32,5	0	50	314	3213	3077	4358
16,5	32,5	0	50	391	4050	3939	5664

Πίνακας 5.10 : Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα Y σε ύψος 32,5cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	40,5	0	200	101,47	214,65	360,11	431,9
13,2	40,5	0	200	106,68	225,82	377,71	451,1
16,5	40,5	0	200	136,14	291,37	489,75	585,6
12	40,5	0	170	124,88	317,29	498,64	601,9
13,2	40,5	0	170	133,41	332,26	524,48	650,4
16,5	40,5	0	170	157,95	410,4	656,73	790,2
12	40,5	0	140	163,82	471,05	711,46	869
13,2	40,5	0	140	183,8	503,67	757,31	896,8
16,5	40,5	0	140	235,76	639,82	957,14	1184
12	40,5	0	110	280,6	752,79	1062,5	1332
13,2	40,5	0	110	281,35	840,59	1138,8	1443
16,5	40,5	0	110	377,26	1077,2	1445,7	1794
12	40,5	0	80	217	1500	1549	2167
13,2	40,5	0	80	405	1516	1641	2270
16,5	40,5	0	80	457	1867	2083	2835
12	40,5	0	50	930	3233	2498	3395
13,2	40,5	0	50	1011	3391	2633	4348

16,5	40,5	0	50	1295	4317	3366	5584
------	------	---	----	------	------	------	------

Πίνακας 5.11 : Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα Y σε ύψος 40,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	X(cm)	Y(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	48,5	0	200	60,92	195,63	234,6	310
13,2	48,5	0	200	60,762	203,68	245,93	324,7
16,5	48,5	0	200	78,825	260,18	309,52	399,1
12	48,5	0	170	75,24	290,73	353,23	462
13,2	48,5	0	170	78,240	303,26	365,81	473,9
16,5	48,5	0	170	96,311	383,12	467,87	612,8
12	48,5	0	140	120,65	476,84	527,17	720,9
13,2	48,5	0	140	125,46	498,08	549,85	751,2
16,5	48,5	0	140	159,87	634,47	697,5	930,6
12	48,5	0	110	122,92	779,25	773,39	1104
13,2	48,5	0	110	158,12	905,54	827,25	1214
16,5	48,5	0	110	158,55	1007,6	1043,8	1459
12	48,5	0	80	195	1806	1313	2242
13,2	48,5	0	80	227	1846	1374	2288
16,5	48,5	0	80	283	2354	1757	2836
12	48,5	0	50	274	4104	2197	4746
13,2	48,5	0	50	291	4295	2299	4880
16,5	48,5	0	50	373	5445	2909	6176

Πίνακας 5.12 : Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο στον άξονα Y σε ύψος 48,5 cm

**Άξονας  $\phi = 45^\circ$**

Τάση (kV)	Z(cm)	r(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	11	200	15,474	42,957	219,81	226,5
13,2	11	200	16,254	45,396	231,24	236,2
16,5	11	200	20,668	57,802	295,07	301,6
12	11	170	22,145	69,632	326,72	320,9
13,2	11	170	23,032	72,868	340,99	353,7
16,5	11	170	26,482	94,469	443,54	450,5
12	11	140	35,303	113,29	499,02	519,5
13,2	11	140	36,887	120,48	531,63	527,1



16,5	11	140	46,314	152,66	651,3	638,3
12	11	110	39,572	211,95	809,28	835,9
13,2	11	110	46,763	217,15	845,26	874
16,5	11	110	62,163	282,68	1073,4	1111
12	11	80	77,628	447,9	1434,5	1504
13,2	11	80	85,962	478,65	1521,5	1597
16,5	11	80	84,561	579,71	1721,6	1818
12	11	50	127	1154	3042	3256
13,2	11	50	127	1206	3187	3410
16,5	11	50	166	1548	4083	4344

Πίνακας 5.13 : Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο

στον άξονα  $\varphi = 45^\circ$  σε ύψος 11 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	r(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	17,5	200	12,999	62,674	215,2	224,6
13,2	17,5	200	13,807	63,299	223,42	232,6
16,5	17,5	200	17,584	83,858	287,01	289,1
12	17,5	170	20,319	100,41	317,53	333,6
13,2	17,5	170	20,191	104,93	334,41	351
16,5	17,5	170	26,892	126	409,78	429,5
12	17,5	140	14,595	159,02	486,01	511,8
13,2	17,5	140	16,924	166,4	514,96	541,4
16,5	17,5	140	22,596	213,93	647,29	682
12	17,5	110	38,97	314,05	782,90	834,5
13,2	17,5	110	41,233	331,28	821,77	896,4
16,5	17,5	110	52,946	426,39	1057,4	1132
12	17,5	80	69,084	685,22	1425,2	1540
13,2	17,5	80	70,929	714,36	1503,3	1665
16,5	17,5	80	92,292	913,59	1559,4	1831
12	17,5	50	69	1760	2955	3412
13,2	17,5	50	74	1835	3101	3472
16,5	17,5	50	96	2354	3951	4389

Πίνακας 5.14 : Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο

στον άξονα  $\varphi = 45^\circ$  σε ύψος 17,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	r(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	22,5	200	8,982	76,849	211,24	227,7
13,2	22,5	200	9,358	80,542	222,52	239,5
16,5	22,5	200	12,272	102,38	280,25	298,5
12	22,5	170	13,842	123,7	312,9	336,2
13,2	22,5	170	14,708	130,04	326,24	350,8
16,5	22,5	170	18,660	165,00	416,45	446,8
12	22,5	140	22,895	202,27	480,39	520,2
13,2	22,5	140	24,218	215,36	506,01	550,3
16,5	22,5	140	30,554	270,76	643,82	673
12	22,5	110	31,394	383,33	755,32	841,2
13,2	22,5	110	33,087	404,3	798,92	902,3
16,5	22,5	110	42,665	515,12	1017,1	1141
12	22,5	80	41,927	810,75	1215,4	1472
13,2	22,5	80	45,101	860,59	1401,4	1644
16,5	22,5	80	58	1099	1821	2128
12	22,5	50	51	2117	2727	3439
13,2	22,5	50	50	2262	2937	3707
16,5	22,5	50	64	2867	3714	4679

Πίνακας 5.15 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο

στον άξονα  $\varphi = 45^\circ$  σε ύψος 22,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	r(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	32,5	200	14,831	103,9	183,73	211,4
13,2	32,5	200	15,865	109,89	195,68	224,9
16,5	32,5	200	20,162	140,32	247,16	276,8
12	32,5	170	24,415	160,84	276,04	319,9
13,2	32,5	170	25,179	168,32	289,48	335,7
16,5	32,5	170	31,208	210,51	369,86	423,4
12	32,5	140	39,669	268,41	426,12	505,1
13,2	32,5	140	40,524	275,43	452,74	531,4
16,5	32,5	140	53,098	359,17	581,41	628,7
12	32,5	110	50,578	519,26	698,02	867,6
13,2	32,5	110	53,017	542,05	741,09	920,3

16,5	32,5	110	65,281	698,45	948,05	1113
12	32,5	80	103,28	1044,3	1214,7	1602
13,2	32,5	80	110	1116	1295	1748
16,5	32,5	80	137	1428	1654	2168
12	32,5	50	198	2814	2491	3755
13,2	32,5	50	209	2975	2650	3983
16,5	32,5	50	263	3786	3363	4984

Πίνακας 5.16 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο στον άξονα  $\varphi = 45^\circ$  σε ύψος 32,5 cm

Τάση (kV)	Z(cm)	r(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	40,5	200	0,028	126,53	196,01	232,9
13,2	40,5	200	3,919	132,43	210,34	248,6
16,5	40,5	200	5,363	169,17	263,10	315,1
12	40,5	170	10,116	185,49	282,92	338,4
13,2	40,5	170	10,662	207,25	301,36	365,6
16,5	40,5	170	12,326	266,47	383,98	467,5
12	40,5	140	22,599	316,25	426,82	518,4
13,2	40,5	140	23,294	332,25	454,11	553,4
16,5	40,5	140	29,772	423,88	570,77	713,7
12	40,5	110	28,260	594,42	673,61	894,1
13,2	40,5	110	29,940	608,07	706,35	933
16,5	40,5	110	38,107	793,01	884,9	1139
12	40,5	80	54	1236	1117	1659
13,2	40,5	80	57	1311	1178	1757
16,5	40,5	80	72	1648	1498	2219
12	40,5	50	224	2724	1969	3369
13,2	40,5	50	235	3110	2095	3758
16,5	40,5	50	301	3944	2660	4767

Πίνακας 5.17 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο

στον άξονα  $\varphi = 45^\circ$  σε ύψος 40,5

Τάση (kV)	Z(cm)	r(cm)	Ex(V/m)	Ey(V/m)	Ez(V/m)	E(V/m)
12	48,5	200	11,722	145,27	190,04	239,4
13,2	48,5	200	15,994	152,81	201,21	245
16,5	48,5	200	20,405	195,52	251,89	314,5

12	48,5	170	26,979	230,21	280,73	363,1
13,2	48,5	170	26,911	239,95	292,38	370,2
16,5	48,5	170	35,760	304,98	371,75	442,6
12	48,5	140	61,367	365,91	408,94	558,3
13,2	48,5	140	64,958	391,8	433,81	589
16,5	48,5	140	81,889	490,88	542,88	728,6
12	48,5	110	122,17	653,22	613,48	904,5
13,2	48,5	110	126,26	684,28	648,88	951,4
16,5	48,5	110	165,41	880,64	819,7	1188
12	48,5	80	154	1337	962	1654
13,2	48,5	80	164	1409	1016	1745
16,5	48,5	80	178	1741	1296	2178
12	48,5	50	414	3096	1584	3499
13,2	48,5	50	438	3262	1665	3686
16,5	48,5	50	554	4183	2090	4616

Πίνακας 5.18 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο

στον άξονα  $\varphi = 45^\circ$  σε ύψος 48,5 cm

Ακολουθως, σε μερικές από τις παραπάνω θέσεις , μετρήσαμε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από το αλεξικέραυνο, όταν δεν εφαρμοζόταν τάση , δηλαδή εν κενώ,για να δούμε πόσο επηρεάζει ο μετασχηματιστής την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου.

## ΕΝ ΚΕΝΩ

### Άξονας X

Τάση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	11	200	0	3,054	6,846	34,715	0,107	5,266	11,585	0,258	1,755	4,388
13,2	11	200	0	3,213	7,115	36,168	0,112	5,473	12,041	0,268	1,824	4,560
16,5	11	200	0	4,062	9,146	43,556	0,144	7,035	15,477	0,345	2,345	5,863
12	11	170	0	4,672	11,124	68,432	0,175	8,556	18,823	0,419	2,852	7,130
13,2	11	170	0	4,699	11,572	70,565	0,182	8,901	19,582	0,436	2,967	7,418
16,5	11	170	0	4,769	12,485	72,125	0,196	9,603	21,127	0,471	3,201	8,003
12	11	140	0	4,862	12,987	73,511	0,451	8,117	17,857	0,398	2,705	6,763
13,2	11	140	0	5,508	13,652	80,532	0,474	8,532	18,770	0,259	2,844	7,110
16,5	11	140	0	6,871	14,243	86,765	0,495	8,901	18,514	0,270	2,967	7,418
12	11	110	0	5,369	13,402	82,38	0,465	8,376	17,422	0,254	2,792	6,980
13,2	11	110	0	5,394	13,349	87,622	0,464	8,343	17,353	0,253	2,781	6,953
16,5	11	110	0	7,217	17,654	110,72	0,613	11,033	22,949	0,334	3,677	9,193
12	11	80	0	4,394	10,421	112,145	0,543	6,513	13,547	0,197	2,171	5,428
13,2	11	80	0	4,723	11,782	131,532	0,744	8,932	18,579	0,273	3,002	7,505
16,5	11	80	0	7,968	18,081	135,124	0,942	11,3	24,860	0,342	3,766	9,415
12	11	50	0	3,964	8,444	133,132	0,440	5,277	11,609	0,419	1,759	5,277
13,2	11	50	0	4,146	9,568	139,123	1,196	5,98	13,156	0,475	1,993	5,979
16,5	11	50	0	4,385	10,392	162,244	1,299	6,495	14,289	0,515	2,165	6,495

Πίνακας 5.20 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο, εν κενώ, στον άξονα X σε ύψος 11 cm (όπου,  $E_{trx1}, E_{try1}, E_{trz1}$  = Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται εν κενώ, όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται στην κανονική του θέση για τους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα,  $E_{trx2}, E_{try2}, E_{trz2}$  = Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται εν κενώ, όταν ο μετασχηματιστής απέχει από το αλεξικέρανο απόσταση ίση με  $d = 185$  cm, για τους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα,  $E_{trx3}, E_{try3}, E_{trz3}$  = Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται εν κενώ, όταν ο μετασχηματιστής απέχει από το αλεξικέρανο απόσταση ίση με  $d = 270$  cm, για τους άξονες X, Y, Z αντίστοιχα.)

Το ίδιο ισχύει και για του επόμενους πίνακες για το ηλεκτρικό πεδίο εν κενώ.

Τάση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	17,5	200	0	1,224	9,142	35,081	0,144	7,032	15,471	0,345	2,344	5,860
13,2	17,5	200	0	1,345	9,738	37,259	0,153	7,491	16,480	0,367	2,497	6,242
16,5	17,5	200	0	1,683	12,287	47,275	0,193	9,452	20,793	0,463	3,151	7,876
12	17,5	170	0	1,743	10,724	51,412	0,168	8,249	18,148	0,404	2,750	6,874
13,2	17,5	170	0	1,883	11,567	56,124	0,182	8,898	19,575	0,436	2,966	7,415
16,5	17,5	170	0	1,731	12,233	59,295	0,192	9,410	20,702	0,461	3,137	7,842
12	17,5	140	0	1,912	14,631	61,754	0,625	11,255	24,760	0,552	3,752	9,379
13,2	17,5	140	0	2,012	15,543	65,266	0,664	11,956	26,304	0,362	3,985	9,963
16,5	17,5	140	0	2,241	17,68	69,754	0,756	13,600	28,288	0,412	4,533	11,333
12	17,5	110	0	2,256	18,59	74,269	0,794	14,300	29,744	0,433	4,767	11,917
13,2	17,5	110	0	3,091	19,43	83,805	0,830	14,946	31,088	0,453	4,982	12,455
16,5	17,5	110	0	4,197	25,322	107,47	1,082	19,478	40,515	0,590	6,493	16,232
12	17,5	80	0	5,132	23,462	125,653	1,504	18,048	37,539	0,547	6,016	15,040
13,2	17,5	80	0	5,652	25,65	129,542	1,644	19,731	41,040	0,598	6,577	16,442
16,5	17,5	80	0	6,012	27,087	133,667	1,736	20,836	45,840	0,631	6,945	17,363
12	17,5	50	0	6,003	14,268	135,754	0,915	10,975	24,146	0,871	3,658	10,975
13,2	17,5	50	0	5,652	14,983	137,967	2,305	11,525	25,356	0,549	2,305	6,915
16,5	17,5	50	0	4,124	15,286	140,745	2,352	11,758	25,869	0,560	2,352	7,055

Πίνακας 5.21 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο, εν κενώ, στον άξονα X σε ύψος 17,5 cm

Τάση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	22,5	200	0	1,119	10,534	34,977	0,165	8,103	17,827	0,415	2,824	7,060
13,2	22,5	200	0	1,126	10,535	37,013	0,166	8,124	17,873	0,412	2,801	7,003
16,5	22,5	200	0	1,32	13,44	47,27	0,211	10,338	22,744	0,519	3,532	8,830
12	22,5	170	0	1,567	15,82	55,523	0,248	12,169	26,772	0,598	4,063	10,158
13,2	22,5	170	0	1,765	16,312	58,723	0,256	12,547	27,603	0,617	4,198	10,495
16,5	22,5	170	0	1,841	17,598	60,763	0,276	13,536	29,779	0,662	4,502	11,255
12	22,5	140	0	2,012	18,401	68,525	0,639	11,5	25,300	0,515	3,5	8,750
13,2	22,5	140	0	2,514	18,927	75,123	0,657	11,829	26,024	0,348	3,828	9,570
16,5	22,5	140	0	2,718	20,48	78,235	0,711	12,8	26,624	0,382	4,2	10,500
12	22,5	110	0	3,445	22,405	81,043	0,778	14,003	29,126	0,429	4,723	11,808
13,2	22,5	110	0	3,585	23,57	83,274	0,818	14,731	30,640	0,453	4,988	12,470
16,5	22,5	110	0	3,636	29,389	106,33	1,020	18,368	38,205	0,557	6,124	15,310
12	22,5	80	0	3,785	23,411	115,985	1,219	14,631	30,432	0,447	4,92	12,300
13,2	22,5	80	0	3,875	24,528	123,523	1,278	15,33	31,886	0,465	5,11	12,775
16,5	22,5	80	0	3,951	25,819	128,952	1,345	16,136	35,499	0,500	5,502	13,755
12	22,5	50	0	3,991	27,542	134,623	1,434	17,213	37,869	1,411	5,925	17,775
13,2	22,5	50	0	4,012	27,908	139,624	3,488	17,442	38,372	1,418	5,956	17,868
16,5	22,5	50	0	3,915	28,11	144,461	3,587	17,936	39,459	1,428	5,997	17,991

Πίνακας 5.22 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο, εν κενώ, στον άξονα X σε ύψος 22,5 cm

Τύση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	32,5	200	0	1,142	23,748	40,431	0,323	15,832	34,830	0,776	5,277	13,193
13,2	32,5	200	0	1,221	23,927	44,124	0,325	15,907	34,995	0,780	5,302	13,256
16,5	32,5	200	0	1,391	25,809	47,865	0,351	17,206	37,853	0,843	5,735	14,338
12	32,5	170	0	1,664	27,315	58,647	0,372	18,21	40,062	0,893	6,070	15,175
13,2	32,5	170	0	1,712	30,524	61,787	0,421	20,619	45,362	1,011	6,873	17,183
16,5	32,5	170	0	2,011	35,266	70,873	0,480	23,511	51,724	1,153	7,837	19,593
12	32,5	140	0	2,223	48,642	86,455	1,802	32,428	71,342	1,590	10,809	27,023
13,2	32,5	140	0	2,514	61,231	92,452	2,268	40,821	89,806	1,237	13,607	34,018
16,5	32,5	140	0	2,532	67,575	99,145	2,503	45,05	93,704	1,365	15,017	37,542
12	32,5	110	0	3,668	66,465	114,513	2,462	44,31	92,165	1,343	14,770	36,925
13,2	32,5	110	0	3,871	78,465	123,978	2,906	52,31	108,805	1,585	17,437	43,592
16,5	32,5	110	0	4,01	80,881	134,523	2,996	53,921	112,156	1,634	17,974	44,934
12	32,5	80	0	3,924	88,815	157,135	4,934	59,21	123,157	1,794	19,737	49,342
13,2	32,5	80	0	3,998	93,543	189,132	5,693	68,31	142,085	2,070	22,770	56,925
16,5	32,5	80	0	4,012	90,762	196,512	5,434	65,21	143,462	1,976	21,737	54,342
12	32,5	50	0	4,221	87,456	199,414	4,876	58,51	128,722	4,644	19,503	58,510
13,2	32,5	50	0	4,345	89,674	205,104	12,342	61,71	135,762	4,898	20,570	61,710
16,5	32,5	50	0	4,654	70,393	212,914	12,424	62,12	136,664	2,958	12,424	37,272

Πίνακας 5.23: Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα X σε ύψος 32,5 cm



Τύση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	40,5	200	0	0,826	23,849	105,381	0,328	15,899	35,127	0,31	5,503	14,02
13,2	40,5	200	0	1,146	25,064	111,267	0,344	16,709	37,089	0,323	5,935	14,769
16,5	40,5	200	0	1,445	26,973	136,332	0,431	17,982	45,444	0,429	6,341	18,744
12	40,5	170	0	1,289	28,847	127,62	0,276	19,231	42,54	0,382	6,456	15,937
13,2	40,5	170	0	1,348	30,777	134,547	0,283	20,518	44,849	0,377	6,826	16,81
16,5	40,5	170	0	1,749	38,876	171,45	0,377	25,917	57,15	0,507	8,634	21,267
12	40,5	140	0	3,99	39,554	163,767	1,152	26,369	54,589	0,653	4,42	19,981
13,2	40,5	140	0	4,585	41,391	173,484	1,148	27,594	57,828	0,64	8,616	21,055
16,5	40,5	140	0	5,85	52,88	220,428	1,573	35,253	73,476	0,873	11,354	26,648
12	40,5	110	0	2,572	53,424	343,664	2,268	35,616	73,12	0,992	11,397	27,013
13,2	40,5	110	0	2,643	56,717	363,2442	2,416	37,811	77,286	1,159	11,345	27,148
16,5	40,5	110	0	3,224	71,481	460,3368	3,1	47,654	97,944	1,545	14,582	29,686
12	40,5	80	0	4,703	65,792	461,8831	4,274	43,861	98,273	1,997	12,267	33,038
13,2	40,5	80	0	4,665	70,136	490,304	4,444	46,757	104,32	2,097	12,876	33,765
16,5	40,5	80	0	4,146	88,145	616,922	5,443	58,763	131,26	2,708	16,393	43,938
12	40,5	50	0	4,445	78,815	614,995	9,047	52,543	130,85	3,588	13,951	42,067
13,2	40,5	50	0	4,689	115,124	643,007	10,166	54,821	136,81	3,296	13,766	43,559
16,5	40,5	50	0	4,748	143,674	829,879	10,861	68,416	176,57	4,235	17,48	55,261

Πίνακας 5.24: Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα X σε ύψος 40,5 cm

Τάση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	48,5	200	0	1,243	26,486	102,765	1,535	17,657	34,255	0,31	5,623	15,321
13,2	48,5	200	0	1,542	27,993	108,177	1,616	18,662	36,059	0,332	6,012	16,022
16,5	48,5	200	0	1,652	35,472	137,025	2,068	23,648	45,675	0,463	6,534	26,312
12	48,5	170	0	1,592	31,766	127,284	1,407	21,177	42,428	0,421	6,721	19,221
13,2	48,5	170	0	1,712	35,081	132,621	1,494	23,387	44,207	0,401	6,998	21,032
16,5	48,5	170	0	1,943	40,353	164,616	1,581	26,902	54,872	0,624	8,123	26,152
12	48,5	140	0	2,542	45,692	161,157	2,426	30,461	53,719	1,018	8,861	20,396
13,2	48,5	140	0	2,603	48,071	171,672	2,511	32,047	57,224	1,667	10,602	20,352
16,5	48,5	140	0	2,644	61,866	215,121	3,352	41,244	71,707	2,145	13,473	27,53
12	48,5	110	0	3,474	61,853	335,7022	4,451	41,235	71,426	2,196	12,686	26,255
13,2	48,5	110	0	3,542	65,993	354,3236	4,614	43,995	75,388	2,259	12,882	27,725
16,5	48,5	110	0	3,953	81,264	447,0687	5,264	54,176	95,121	3,031	13,555	33,714
12	48,5	80	0	3,231	79,652	462,9265	6,689	53,101	98,495	1,258	15,553	34,139
13,2	48,5	80	0	3,432	83,885	485,604	7,128	55,923	103,32	1,627	15,477	34,23
16,5	48,5	80	0	3,654	106,893	621,105	8,993	71,262	132,15	1,842	20,627	46,173
12	48,5	50	0	3,431	95,673	608,321	12,072	63,782	129,43	3,642	16,735	43,979
13,2	48,5	50	0	3,832	141,494	653,253	12,72	67,378	138,99	3,711	16,733	46,062
16,5	48,5	50	0	4,142	182,001	826,777	16,401	86,667	175,91	5,018	19,014	58,826

Πίνακας 5.25: Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα X σε ύψος 48,5 cm

## Άξονας Y

Τάση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	11	0	200	11,536	11,62	67,216	0,182	8,938	19,665	0,438	2,979	7,449
13,2	11	0	200	12,132	12,182	70,627	0,191	9,371	20,616	0,459	3,124	7,809
16,5	11	0	200	15,444	15,496	90,195	0,243	11,920	26,224	0,584	3,973	9,933
12	11	0	170	20,653	10,843	100,132	0,170	8,341	18,350	0,409	2,780	6,951
13,2	11	0	170	24,542	12,556	117,134	0,197	9,658	21,249	0,473	3,219	8,049
16,5	11	0	170	29,098	14,529	132,591	0,228	11,176	24,588	0,548	3,725	9,313
12	11	0	140	36,934	13,524	157,132	0,578	10,403	22,887	0,510	3,468	8,669
13,2	11	0	140	42,123	14,542	170,412	0,621	11,186	24,610	0,339	3,729	9,322
16,5	11	0	140	57,522	15,678	189,024	0,670	12,060	25,085	0,365	4,020	10,050
12	11	0	110	67,119	7,537	222,75	0,322	5,798	12,059	0,176	1,933	4,831
13,2	11	0	110	76,448	8,208	240,96	0,351	6,314	13,133	0,191	2,105	5,262
16,5	11	0	110	94,752	10,367	305,59	0,443	7,975	16,587	0,242	2,658	6,646
12	11	0	80	98,421	13,565	312,421	0,870	10,435	21,704	0,316	3,478	8,696
13,2	11	0	80	102,432	14,685	315,555	0,941	11,296	23,496	0,342	3,765	9,413
16,5	11	0	80	104,222	16,831	326,542	1,079	12,947	28,483	0,392	4,316	10,789
12	11	0	50	108,431	17,012	337,413	1,091	13,086	28,790	1,039	4,362	13,086
13,2	11	0	50	110,123	17,894	341,142	2,753	13,765	30,282	0,655	2,753	8,259
16,5	11	0	50	113,987	18,524	349,841	2,850	14,249	31,348	0,679	2,850	8,550

*Πίνακας 5.26 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο, εν κενώ, στον άξονα Y σε ύψος 11 cm*

Τάση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	11	0	200	14,344	16,198	65,353	0,254	12,460	27,412	0,611	4,153	10,383
13,2	11	0	200	14,301	17,27	69,212	0,271	13,285	29,226	0,651	4,428	11,071
16,5	11	0	200	19,093	21,679	88,636	0,340	16,676	36,688	0,817	5,559	13,897
12	11	0	170	22,243	19,124	93,543	0,300	14,711	32,364	0,721	4,904	12,259
13,2	11	0	170	24,543	20,532	100,413	0,322	15,794	34,746	0,774	5,265	13,162
16,5	11	0	170	28,913	21,941	111,038	0,344	16,878	37,131	0,827	5,626	14,065
12	11	0	140	33,235	20,432	123,953	0,873	15,717	34,577	0,770	5,239	13,097
13,2	11	0	140	36,542	22,458	134,592	0,960	17,275	38,006	0,523	5,758	14,396
16,5	11	0	140	39,589	24,983	146,918	1,068	19,218	39,973	0,582	6,406	16,015
12	11	0	110	41,746	26,097	154,33	1,115	20,075	41,755	0,608	6,692	16,729
13,2	11	0	110	44,491	27,702	160,95	1,184	21,309	44,323	0,646	7,103	17,758
16,5	11	0	110	56,138	34,45	205,83	1,472	26,500	55,120	0,803	8,833	22,083
12	11	0	80	59,509	32,974	216,934	2,114	25,365	52,758	0,769	8,455	21,137
13,2	11	0	80	63,594	33,485	224,592	2,146	25,758	53,576	0,781	8,586	21,465
16,5	11	0	80	69,534	37,634	245,936	2,412	28,949	63,688	0,877	9,650	24,124
12	11	0	50	73,543	35,697	251,149	2,288	27,459	60,410	2,179	9,153	27,459
13,2	11	0	50	78,345	38,694	266,654	5,953	29,765	65,482	1,417	5,953	17,859
16,5	11	0	50	84,533	39,591	272,911	6,091	30,455	67,000	1,450	6,091	18,273

Πίνακας 5.27 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ,

στον άξονα Y σε ύψος 17,5 cm

Τάση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	17,5	0	200	16,35	18,036	66,05	0,283	13,874	30,522	0,680	4,625	11,562
13,2	17,5	0	200	16,578	20,848	68,943	0,327	16,037	35,281	0,786	5,346	13,364
16,5	17,5	0	200	21,799	26,559	88,958	0,417	20,430	44,946	1,001	6,810	17,025
12	17,5	0	170	20,915	25,325	97,128	0,398	19,481	42,858	0,955	6,494	16,234
13,2	17,5	0	170	24,592	27,149	109,542	0,426	20,884	45,944	1,024	6,961	17,403
16,5	17,5	0	170	27,149	28,528	119,593	0,448	21,945	48,278	1,076	7,315	18,287
12	17,5	0	140	31,239	30,532	130,549	1,305	23,486	51,670	1,151	7,829	19,572
13,2	17,5	0	140	34,034	31,491	138,919	1,346	24,224	53,292	0,734	8,075	20,187
16,5	17,5	0	140	37,513	32,099	146,539	1,372	24,692	51,358	0,748	8,231	20,576
12	17,5	0	110	45,984	35,962	153,43	1,537	27,663	57,539	0,838	9,221	23,053
13,2	17,5	0	110	45,242	35,767	160,29	1,529	27,513	57,227	0,834	9,171	22,928
16,5	17,5	0	110	61,921	48,303	207,27	2,064	37,156	77,285	1,126	12,385	30,963
12	17,5	0	80	66,012	49,199	215,519	3,154	37,845	78,718	1,147	12,615	31,538
13,2	17,5	0	80	70,592	51,124	226,901	3,277	39,326	81,798	1,192	13,109	32,772
16,5	17,5	0	80	77,582	52,998	234,959	3,397	40,768	89,689	1,235	13,589	33,973
12	17,5	0	50	89,203	54,135	240,491	3,470	41,642	91,613	3,305	13,881	41,642
13,2	17,5	0	50	100,249	55,21	247,539	8,494	42,469	93,432	2,022	8,494	25,482
16,5	17,5	0	50	114,134	57,198	260,491	8,800	43,998	96,797	2,095	8,800	26,399

Πίνακας 5.28 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ,

στον άξονα Y σε ύψος 22,5 cm

Τύση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	32,5	0	200	22,7265	21,6432	72,655	0,340	16,649	36,627	0,816	5,550	13,874
13,2	32,5	0	200	23,04342	25,0176	75,8373	0,393	19,244	42,337	0,943	6,415	16,037
16,5	32,5	0	200	30,30061	31,8708	97,8538	0,500	24,516	53,935	1,202	8,172	20,430
12	32,5	0	170	29,07185	30,39	106,8408	0,477	23,377	51,429	1,146	7,792	19,481
13,2	32,5	0	170	34,18288	32,5788	120,4962	0,511	25,061	55,133	1,228	8,354	20,884
16,5	32,5	0	170	37,73711	34,2336	131,5523	0,537	26,334	57,934	1,291	8,778	21,945
12	32,5	0	140	43,42221	36,6384	143,6039	1,566	28,183	62,003	1,382	9,394	23,486
13,2	32,5	0	140	47,30726	37,7892	152,8109	1,615	29,069	63,951	0,881	9,690	24,224
16,5	32,5	0	140	52,14307	38,5188	161,1929	1,646	29,630	61,630	0,898	9,877	24,692
12	32,5	0	110	63,91776	43,1544	168,773	1,844	33,196	69,047	1,006	11,065	27,663
13,2	32,5	0	110	62,88638	42,9204	176,319	1,834	33,016	68,673	1,000	11,005	27,513
16,5	32,5	0	110	86,07019	57,9636	227,997	2,477	44,587	92,742	1,351	14,862	37,156
12	32,5	0	80	91,75668	59,0388	237,0709	3,785	45,414	94,462	1,376	15,138	37,845
13,2	32,5	0	80	98,12288	61,3488	249,5911	3,933	47,191	98,158	1,430	15,730	39,326
16,5	32,5	0	80	107,839	63,5976	258,4549	4,077	48,921	107,627	1,482	16,307	40,768
12	32,5	0	50	123,9922	64,962	264,5401	4,164	49,971	109,936	3,966	16,657	49,971
13,2	32,5	0	50	139,3461	66,252	272,2929	10,193	50,963	112,119	2,427	10,193	30,578
16,5	32,5	0	50	158,6463	68,6376	286,5401	10,560	52,798	116,156	2,514	10,560	31,679

Πίνακας 5.29 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα Y σε ύψος 32,5 cm

Τύση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	40,5	0	200	29,544	22,292	145,310	0,350	17,148	37,726	0,841	5,716	14,290
13,2	40,5	0	200	29,956	25,768	151,675	0,405	19,822	43,608	0,972	6,607	16,518
16,5	40,5	0	200	39,391	32,827	195,708	0,515	25,251	55,553	1,238	8,417	21,043
12	40,5	0	170	37,793	31,302	213,682	0,491	24,078	52,972	1,180	8,026	20,065
13,2	40,5	0	170	44,438	33,556	240,992	0,527	25,812	56,787	1,265	8,604	21,510
16,5	40,5	0	170	49,058	35,261	263,105	0,554	27,124	59,672	1,330	9,041	22,603
12	40,5	0	140	56,449	37,738	287,208	1,613	29,029	63,864	1,423	9,676	24,191
13,2	40,5	0	140	61,499	38,923	305,622	1,663	29,941	65,869	0,907	9,980	24,951
16,5	40,5	0	140	67,786	39,674	322,386	1,695	30,519	63,479	0,925	10,173	25,432
12	40,5	0	110	83,093	44,449	329,107	1,900	34,192	71,118	1,036	11,397	28,493
13,2	40,5	0	110	81,752	44,208	343,822	1,889	34,006	70,733	1,030	11,335	28,338
16,5	40,5	0	110	111,891	59,703	444,594	2,551	45,925	95,524	1,392	15,308	38,271
12	40,5	0	80	119,284	60,810	462,288	3,898	46,777	97,296	1,417	15,592	38,981
13,2	40,5	0	80	127,560	63,189	486,703	4,051	48,607	101,103	1,473	16,202	40,506
16,5	40,5	0	80	140,191	65,506	503,987	4,199	50,389	110,856	1,527	16,796	41,991
12	40,5	0	50	161,190	66,911	515,853	4,289	51,470	113,234	4,085	17,157	51,470
13,2	40,5	0	50	181,150	68,240	530,971	10,498	52,492	115,482	2,500	10,498	31,495
16,5	40,5	0	50	206,240	70,697	558,753	10,876	54,382	119,641	2,590	10,876	32,629

Πίνακας 5.30 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα Y σε ύψος 40,5 cm

Τύση (kV)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	48,5	0	200	32,4989	22,738	232,496	0,357	17,491	38,480	0,857	5,830	14,576
13,2	48,5	0	200	32,95209	26,283	242,6794	0,413	20,218	44,480	0,991	6,739	16,848
16,5	48,5	0	200	43,32987	33,483	313,1322	0,526	25,757	56,664	1,263	8,586	21,464
12	48,5	0	170	41,57275	31,928	341,8906	0,501	24,560	54,032	1,204	8,187	20,466
13,2	48,5	0	170	48,88152	34,227	385,5878	0,537	26,329	57,923	1,291	8,776	21,941
16,5	48,5	0	170	53,96407	35,966	420,9674	0,565	27,666	60,865	1,356	9,222	23,055
12	48,5	0	140	62,09376	38,492	459,5325	1,645	29,609	65,141	1,451	9,870	24,675
13,2	48,5	0	140	67,64938	39,701	488,9949	1,697	30,539	67,187	0,925	10,180	25,450
16,5	48,5	0	140	74,56459	40,468	515,8173	1,729	31,129	64,749	0,943	10,376	25,941
12	48,5	0	110	91,4024	45,338	526,5718	1,938	34,875	72,541	1,057	11,625	29,063
13,2	48,5	0	110	89,92752	45,092	550,1153	1,927	34,686	72,147	1,051	11,562	28,905
16,5	48,5	0	110	123,0804	60,897	711,3506	2,602	46,844	97,434	1,420	15,615	39,036
12	48,5	0	80	131,2121	62,026	739,6612	3,976	47,712	99,242	1,446	15,904	39,760
13,2	48,5	0	80	140,3157	64,453	778,7242	4,132	49,579	103,125	1,502	16,526	41,316
16,5	48,5	0	80	154,2097	66,816	806,3793	4,283	51,397	113,073	1,557	17,132	42,831
12	48,5	0	50	177,3088	68,249	825,3651	4,375	52,499	115,498	4,167	17,500	52,499
13,2	48,5	0	50	199,2649	69,604	849,5538	10,708	53,542	117,792	2,550	10,708	32,125
16,5	48,5	0	50	226,8642	72,111	894,0051	11,094	55,470	122,033	2,641	11,094	33,282

Πίνακας 5.31 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο, εν κενώ, στον άξονα Y σε ύψος 48,5 cm



Άξονας  $\varphi = 45^\circ$

Τάση (kV)	Z (cm)	R (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	11	200	3,219	5,876	31,513	0,092	4,520	9,944	0,222	1,507	3,767
13,2	11	200	3,427	6,213	33,094	0,098	4,779	10,514	0,234	1,593	3,983
16,5	11	200	4,255	7,845	42,228	0,123	6,035	13,276	0,296	2,012	5,029
12	11	170	4,871	8,345	53,145	0,131	6,419	14,122	0,315	2,140	5,349
13,2	11	170	5,235	9,124	58,124	0,143	7,018	15,441	0,344	2,339	5,849
16,5	11	170	6,934	10,194	62,241	0,160	7,842	17,251	0,384	2,614	6,535
12	11	140	6,012	11,249	66,642	0,481	8,653	19,037	0,424	2,884	7,211
13,2	11	140	7,126	12,511	71,546	0,535	9,624	21,172	0,292	3,208	8,020
16,5	11	140	8,018	13,084	77,913	0,559	10,065	20,934	0,305	3,355	8,387
12	11	110	8,481	13,799	80,025	0,590	10,615	22,078	0,322	3,538	8,846
13,2	11	110	9,214	14,525	84,215	0,621	11,173	23,240	0,339	3,724	9,311
16,5	11	110	11,29	18,811	107,19	0,804	14,470	30,098	0,438	4,823	12,058
12	11	80	10,923	16,153	113,598	1,035	12,425	25,845	0,377	4,142	10,354
13,2	11	80	11,912	17,421	120,513	1,117	13,401	27,874	0,406	4,467	11,167
16,5	11	80	12,356	18,646	126,532	1,195	14,343	31,555	0,435	4,781	11,953
12	11	50	15,512	17,124	132,451	1,098	13,172	28,979	1,045	4,391	13,172
13,2	11	50	17,654	18,012	138,412	2,771	13,855	30,482	0,660	2,771	8,313
16,5	11	50	19,432	20,413	144,124	3,140	15,702	34,545	0,748	3,140	9,421

Πίνακας 5.32 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα  $\varphi=45^\circ$  σε ύψος 11 cm

Τάση (kV)	Z (cm)	R (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	17,5	200	3,541	7,898	30,962	0,124	6,075	13,366	0,298	2,025	5,063
13,2	17,5	200	3,563	8,552	32,733	0,134	6,578	14,473	0,322	2,193	5,482
16,5	17,5	200	4,817	11,056	41,252	0,174	8,505	18,710	0,417	2,835	7,087
12	17,5	170	5,024	10,912	42,41	0,171	8,394	18,466	0,411	2,798	6,995
13,2	17,5	170	5,812	11,515	46,134	0,181	8,858	19,487	0,434	2,953	7,381
16,5	17,5	170	6,008	12,994	50,091	0,204	9,995	21,990	0,490	3,332	8,329
12	17,5	140	5,912	13,711	53,134	0,586	10,547	23,203	0,517	3,516	8,789
13,2	17,5	140	6,311	13,99	59,135	0,598	10,762	23,675	0,326	3,587	8,968
16,5	17,5	140	7,009	15,012	64,513	0,642	11,548	24,019	0,350	3,849	9,623
12	17,5	110	6,731	16,081	77,37	0,687	12,370	25,730	0,375	4,123	10,308
13,2	17,5	110	11,561	19,136	82,716	0,818	14,720	30,618	0,446	4,907	12,267
16,5	17,5	110	14,774	24,507	104,79	1,047	18,852	39,211	0,571	6,284	15,710
12	17,5	80	16,531	25,521	111,11	1,636	19,632	40,834	0,595	6,544	16,360
13,2	17,5	80	17,412	26,015	118,431	1,668	20,012	41,624	0,606	6,671	16,676
16,5	17,5	80	19,134	27,871	124,512	1,787	21,439	47,166	0,650	7,146	17,866
12	17,5	50	21,523	26,998	122,894	1,731	20,768	45,689	1,648	6,923	20,768
13,2	17,5	50	23,511	28,023	131,413	4,311	21,556	47,424	1,026	4,311	12,934
16,5	17,5	50	24,513	30,004	149,532	4,616	23,080	50,776	1,099	4,616	13,848

*Πίνακας 5.33 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα  $\varphi=45^\circ$  σε ύψος 17,5 cm*

Τάση (kV)	Z (cm)	R (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	22,5	200	2,812	9,981	31,185	0,157	7,678	16,891	0,376	2,559	6,398
13,2	22,5	200	2,968	10,759	33,402	0,169	8,276	18,208	0,406	2,759	6,897
16,5	22,5	200	3,765	13,734	41,815	0,216	10,565	23,242	0,518	3,522	8,804
12	22,5	170	4,223	14,511	43,589	0,228	11,162	24,557	0,547	3,721	9,302
13,2	22,5	170	5,012	16,001	48,532	0,251	12,308	27,079	0,603	4,103	10,257
16,5	22,5	170	5,999	17,523	53,679	0,275	13,479	29,654	0,661	4,493	11,233
12	22,5	140	6,126	18,521	59,674	0,791	14,247	31,343	0,698	4,749	11,872
13,2	22,5	140	6,932	19,798	65,653	0,846	15,229	33,504	0,461	5,076	12,691
16,5	22,5	140	7,819	21,12	71,534	0,903	16,246	33,792	0,492	5,415	13,538
12	22,5	110	8,011	23,299	78,476	0,996	17,922	37,278	0,543	5,974	14,935
13,2	22,5	110	8,764	23,888	82,474	1,021	18,375	38,221	0,557	6,125	15,313
16,5	22,5	110	11,51	30,298	104,2	1,295	23,306	48,477	0,706	7,769	19,422
12	22,5	80	12,542	31,549	109,634	2,022	24,268	50,478	0,735	8,089	20,224
13,2	22,5	80	13,935	31,999	115,639	2,051	24,615	51,198	0,746	8,205	20,512
16,5	22,5	80	14,682	33,001	121,623	2,115	25,385	55,848	0,769	8,462	21,154
12	22,5	50	15,951	34,438	127,654	2,208	26,491	58,280	2,102	8,830	26,491
13,2	22,5	50	17,912	35,918	136,163	5,526	27,629	60,784	1,316	5,526	16,578
16,5	22,5	50	20,543	38,765	144,613	5,964	29,819	65,602	1,420	5,964	17,892

Πίνακας 5.34 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα  $\varphi=45^\circ$  σε ύψος 22,5 cm

Τύση (kV)	Z (cm)	R (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	32,5	200	2,531	11,977	34,304	0,188	9,213	20,269	0,452	3,071	7,678
13,2	32,5	200	2,671	12,911	36,742	0,203	9,931	21,849	0,487	3,310	8,276
16,5	32,5	200	3,389	16,481	45,997	0,259	12,678	27,891	0,621	4,226	10,565
12	32,5	170	3,801	17,413	47,948	0,273	13,395	29,468	0,657	4,465	11,162
13,2	32,5	170	4,511	19,201	53,385	0,301	14,770	32,494	0,724	4,923	12,308
16,5	32,5	170	5,399	21,028	59,047	0,330	16,175	35,585	0,793	5,392	13,479
12	32,5	140	8,515	22,225	65,641	0,950	17,096	37,612	0,838	5,699	14,247
13,2	32,5	140	9,635	23,758	72,218	1,015	18,275	40,205	0,554	6,092	15,229
16,5	32,5	140	10,868	25,344	78,687	1,083	19,495	40,550	0,591	6,498	16,246
12	32,5	110	11,135	27,959	86,324	1,195	21,507	44,734	0,652	7,169	17,922
13,2	32,5	110	12,182	28,666	90,721	1,225	22,050	45,865	0,668	7,350	18,375
16,5	32,5	110	15,999	36,358	114,620	1,554	27,967	58,172	0,847	9,322	23,306
12	32,5	80	17,433	37,859	120,597	2,427	29,122	60,574	0,882	9,707	24,268
13,2	32,5	80	19,370	38,399	127,203	2,461	29,538	61,438	0,895	9,846	24,615
16,5	32,5	80	20,408	39,601	133,785	2,539	30,462	67,017	0,923	10,154	25,385
12	32,5	50	22,172	41,326	140,419	2,649	31,789	69,936	2,523	10,596	31,789
13,2	32,5	50	24,898	43,102	149,779	6,631	33,155	72,941	1,579	6,631	19,893
16,5	32,5	50	28,555	46,518	159,074	7,157	35,783	78,723	1,704	7,157	21,470

Πίνακας 5.35 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα  $\varphi=45^\circ$  σε ύψος 32,5 cm

Τάση (kV)	Z (cm)	R (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	40,5	200	3,493	14,373	37,734	0,226	11,056	24,323	0,542	3,685	9,213
13,2	40,5	200	3,686	15,493	40,416	0,243	11,918	26,219	0,584	3,973	9,931
16,5	40,5	200	4,676	19,777	50,596	0,310	15,213	33,469	0,746	5,071	12,678
12	40,5	170	5,245	20,896	52,743	0,328	16,074	35,362	0,788	5,358	13,395
13,2	40,5	170	6,225	23,041	58,724	0,362	17,724	38,993	0,869	5,908	14,770
16,5	40,5	170	7,451	25,233	64,952	0,396	19,410	42,702	0,951	6,470	16,175
12	40,5	140	11,751	26,670	72,206	1,140	20,516	45,134	1,006	6,839	17,096
13,2	40,5	140	13,297	28,509	79,440	1,218	21,930	48,246	0,665	7,310	18,275
16,5	40,5	140	14,998	30,413	86,556	1,300	23,394	48,660	0,709	7,798	19,495
12	40,5	110	15,367	33,551	94,956	1,434	25,808	53,681	0,782	8,603	21,507
13,2	40,5	110	16,811	34,399	99,794	1,470	26,461	55,038	0,802	8,820	22,050
16,5	40,5	110	22,078	43,629	126,082	1,864	33,561	69,807	1,017	11,187	27,967
12	40,5	80	24,058	45,431	132,657	2,912	34,947	72,689	1,059	11,649	29,122
13,2	40,5	80	26,730	46,079	139,923	2,954	35,445	73,726	1,074	11,815	29,538
16,5	40,5	80	28,163	47,521	147,164	3,046	36,555	80,421	1,108	12,185	30,462
12	40,5	50	30,597	49,591	154,461	3,179	38,147	83,923	3,028	12,716	38,147
13,2	40,5	50	34,359	51,722	164,757	7,957	39,786	87,529	1,895	7,957	23,872
16,5	40,5	50	39,406	55,822	174,982	8,588	42,940	94,467	2,045	8,588	25,764

Πίνακας 5.36 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα  $\varphi=45^\circ$  σε ύψος 40,5 cm

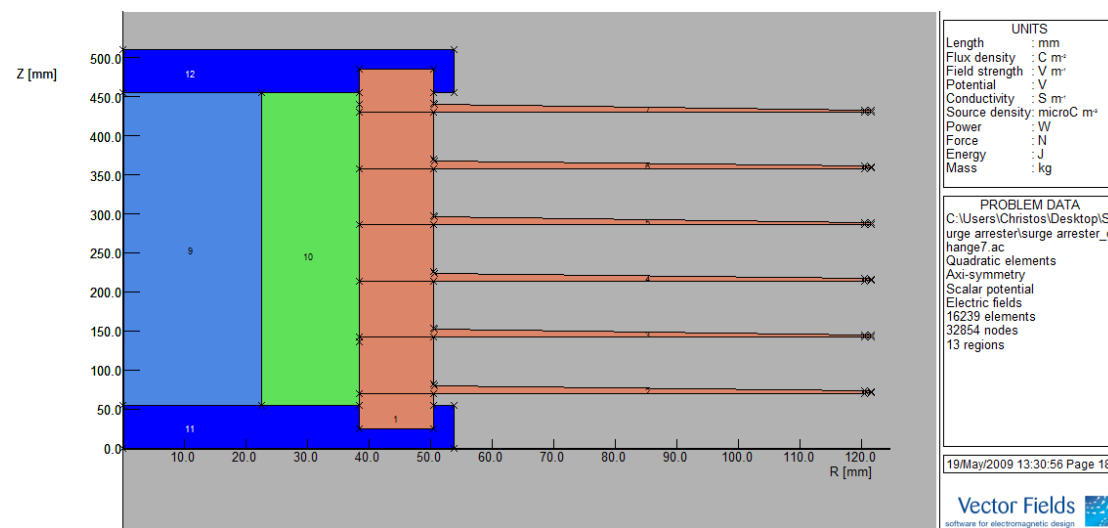
Τύση (kV)	Z (cm)	R (cm)	Extr1 (V/m)	Eytr1 (V/m)	Eztr1 (V/m)	Extr2 (V/m)	Eytr2 (V/m)	Eztr2 (V/m)	Extr3 (V/m)	Eytr3 (V/m)	Eztr3 (V/m)
12	48,5	200	2,733	17,247	41,507	0,271	13,267	29,188	0,650	4,422	11,056
13,2	48,5	200	2,885	18,592	44,458	0,292	14,301	31,463	0,701	4,767	11,918
16,5	48,5	200	3,660	23,732	55,656	0,373	18,256	40,162	0,895	6,085	15,213
12	48,5	170	4,105	25,075	58,017	0,394	19,288	42,435	0,946	6,429	16,074
13,2	48,5	170	4,872	27,650	64,596	0,434	21,269	46,792	1,043	7,090	17,724
16,5	48,5	170	5,831	30,280	71,447	0,475	23,292	51,243	1,142	7,764	19,410
12	48,5	140	16,452	32,004	79,426	1,368	24,619	54,161	1,207	8,206	20,516
13,2	48,5	140	18,617	34,211	87,384	1,462	26,316	57,895	0,797	8,772	21,930
16,5	48,5	140	20,999	36,495	95,212	1,560	28,073	58,393	0,851	9,358	23,394
12	48,5	110	21,514	40,261	104,452	1,721	30,970	64,417	0,938	10,323	25,808
13,2	48,5	110	23,537	41,278	109,773	1,764	31,753	66,046	0,962	10,584	26,461
16,5	48,5	110	30,911	52,355	138,690	2,237	40,273	83,768	1,220	13,424	33,561
12	48,5	80	33,683	54,517	145,923	3,495	41,936	87,227	1,271	13,979	34,947
13,2	48,5	80	37,424	55,294	153,916	3,545	42,534	88,471	1,289	14,178	35,445
16,5	48,5	80	39,430	57,026	161,880	3,655	43,866	96,505	1,329	14,622	36,555
12	48,5	50	42,838	59,509	169,907	3,815	45,776	100,707	3,633	15,259	45,776
13,2	48,5	50	48,105	62,066	181,233	9,549	47,743	105,035	2,273	9,549	28,646
16,5	48,5	50	55,171	66,986	192,480	10,306	51,528	113,361	2,454	10,306	30,917

Πίνακας 5.37 : Μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο, εν κενώ, στον άξονα  $\varphi=45^\circ$  σε ύψος 48,5 cm

### Προσομοίωση ηλεκτρικού πεδίου και κατανομής δυναμικού με το πρόγραμμα PC OPERA

#### 6.1 Εισαγωγή της Γεωμετρίας στο PC OPERA-2d

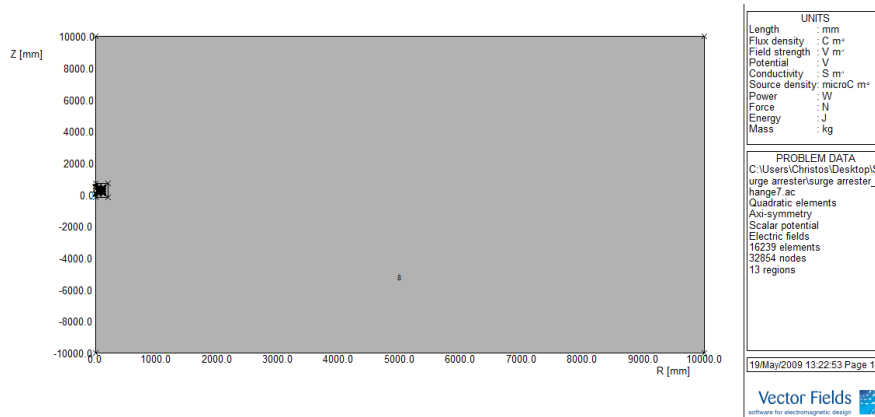
Το πρόβλημα πεδιακής ανάλυσης του αλεξικεραυνού είναι τρισδιάστατο, επειδή, όμως, παρουσιάζει αξονική συμμετρία μπορεί να επιλυθεί από το δισδιάστατο πρόγραμμα PC OPERA, καθώς οι παράμετροι που υπολογίζονται σε ένα επίπεδο διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας έχουν την ίδια τιμή σε οποιοδήποτε άλλο επίπεδο, επίσης, διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας. Η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Σχεδίαση του αλεξικεραυνού στο PC OPERA

Η περιοχή 9 του Σχήματος 6.1 αποτελείται από το βαρίστορ (μη γραμμική αντίσταση, από οξειδία του ψευδαργύρου ZnO), του οποίου η διηλεκτρική σταθερά είναι  $\epsilon_r=800$  και  $\sigma=10^{-4}$  S/m. Η περιοχή 10 αποτελείται από υαλώδες υλικό (glass fiber) με  $\epsilon_r = 4.6$  και  $\sigma = 0,01$  S/m. Οι περιοχές 11 και 12 είναι οι αγωγοί που αποτελούνται από σίδηρο, για τον οποίο τέθηκε  $\epsilon_r = 10^6$  και  $\sigma = 10^4$  S/m. Στο ηλεκτρόδιο 2 εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση 12 kV (rms), ενώ το ηλεκτρόδιο 4 είναι σε μηδενικό δυναμικό. Τέλος, οι περιοχές 1-7 είναι το εξωτερικό περίβλημα, το οποίο αποτελείται από πολυμερές μονωτικό υλικό με  $\epsilon_r = 5$  και  $\sigma = 0,01$  S/m.

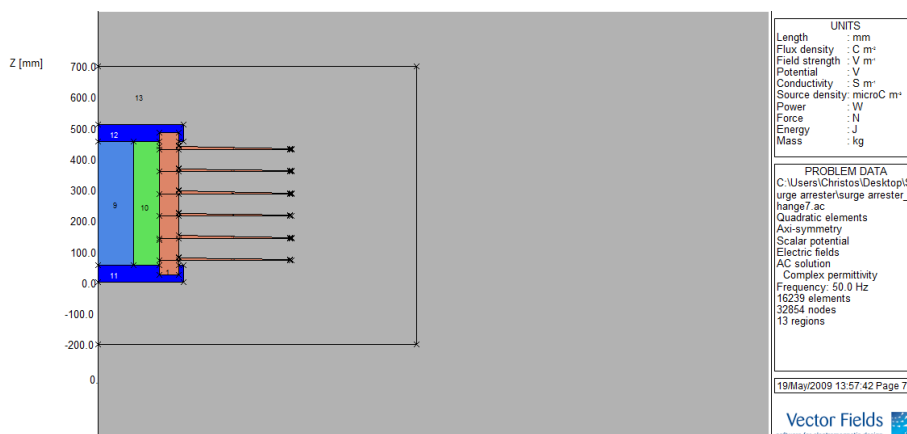
Το αλεξικέραυνο τοποθετήθηκε σε ένα ορθογώνιο πλαίσιο, του οποίου το μήκος είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από την ακτίνα του αλεξικέραυνου (Σχήμα 6.2), στην περίμετρο του οποίου θεωρείται ότι είναι το άπειρο. Το μέγεθος του ορθογωνίου αποδείχτηκε ότι είναι ικανοποιητικό, καθώς με δοκιμές βρέθηκε ότι μεγαλύτερο μέγεθος ορθογωνίου δεν αυξάνει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6.2: Ορθογωνικό περίβλημα σε «άπειρη» απόσταση από το αλεξικέραυνο

## 6.2 Δημιουργία Πλέγματος

Κάθε γραμμή του αλεξικέραυνου χωρίστηκε σε κατάλληλο αριθμό τμημάτων, έτσι ώστε πλησίον του αλεξικεραύνου το πλέγμα να είναι πυκνότερο (κρίσιμη περιοχή του προβλήματος). Για να επιτύχουμε πυκνότερο πλέγμα κοντά στο αλεξικέραυνο ορίστηκε επιπλέον μια πιο μικρή ορθογώνια περιοχή (Σχήμα 6.3).

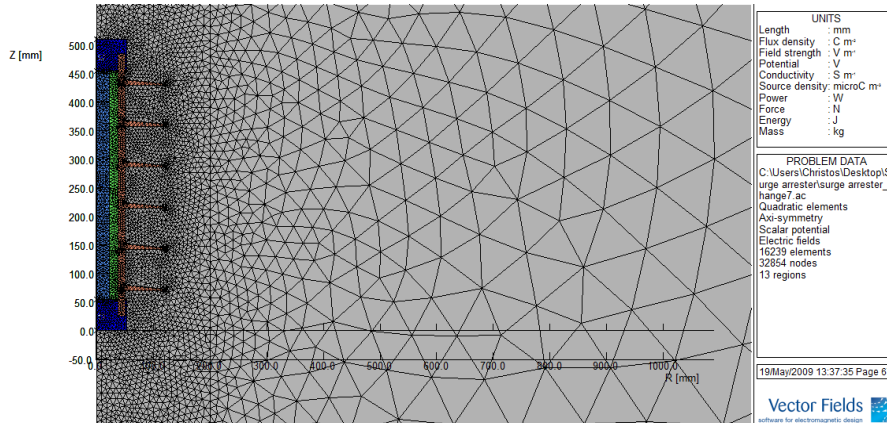


Σχήμα 6.3: Το αλεξικέραυνο με την πιο μικρή ορθογωνική περιοχή γύρω από αυτό για να επιτευχθεί πυκνότερο πλέγμα κοντά στο αλεξικέραυνο

Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 16239 στοιχεία και 32854 κόμβοι. Είναι φανερό από το



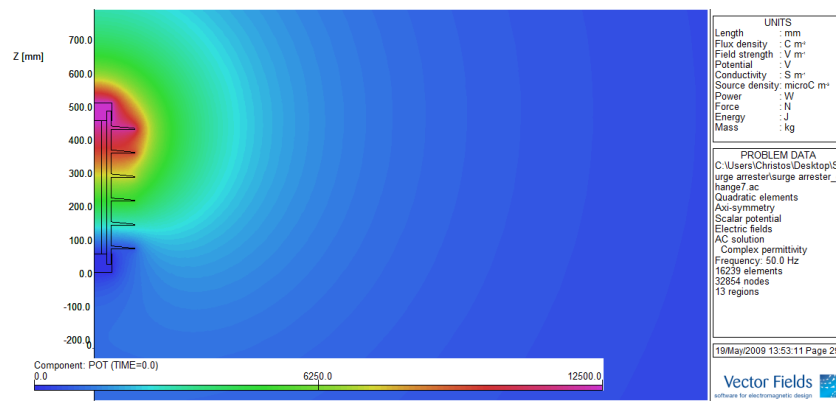
Σχήμα 6.4 ότι κοντά στο αλεξικέραυνο, στην περιοχή που ορίστηκε από το μικρό ορθογώνιο, όπου και ενδιαφέρει η κατανομή του πεδίου και του δυναμικού το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό.



Σχήμα 6.4: Το πλέγμα της διάταξης

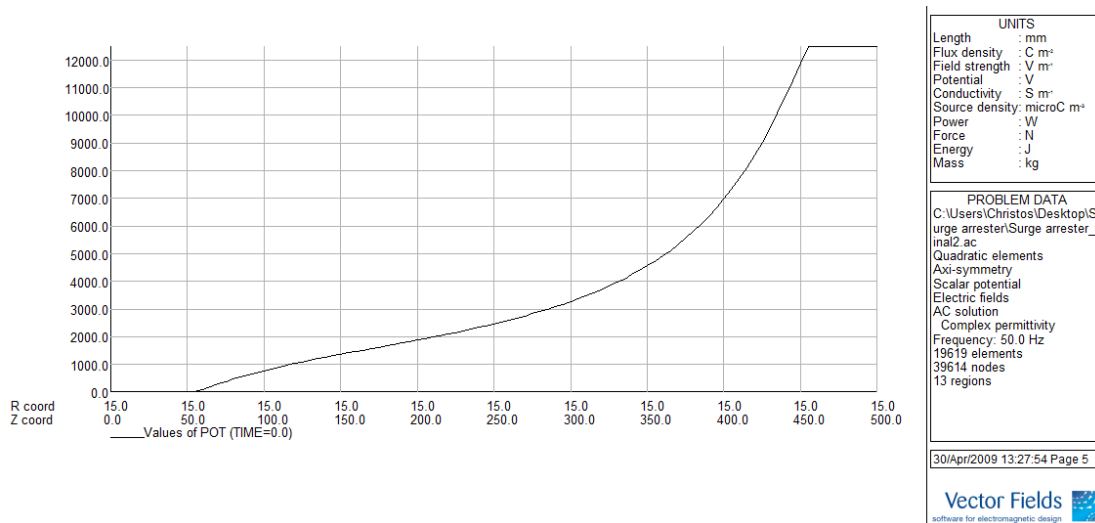
### 6.3 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραύνου και γύρω από αυτό.



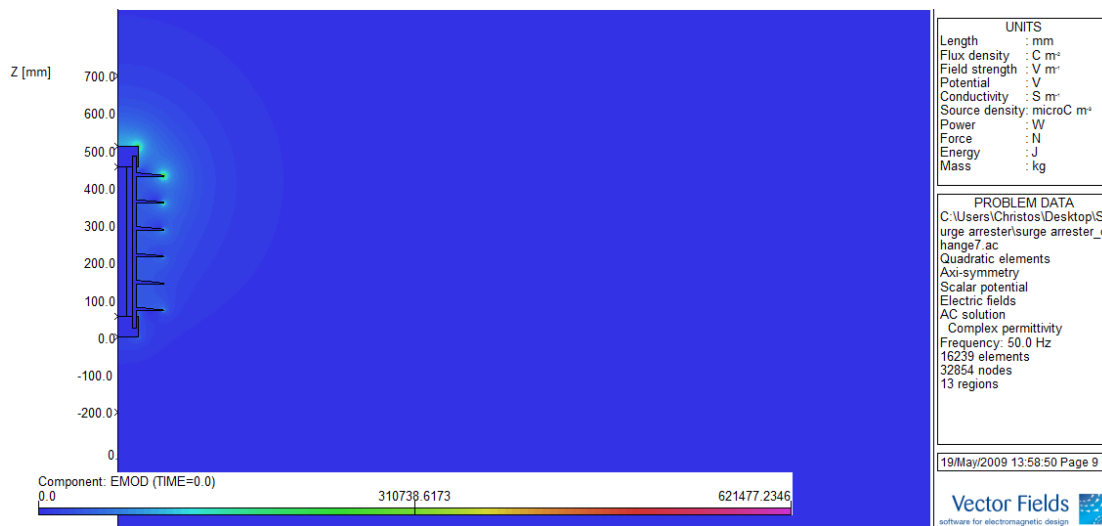
Σχήμα 6.5: Κατανομή του δυναμικού

Όπως αναμενόταν το δυναμικό δεν ισοκατανέμεται μέσα στο βαρίστορ δεν είναι ίση, με αποτέλεσμα τα τμήματα που βρίσκονται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης καταπονούνται περισσότερο, από αυτά που βρίσκονται κοντά στο γειωμένο ηλεκτρόδιο. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 6.6.



Σχήμα 6.6: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.



Σχήμα 6.7: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου

Στα σχήματα 6.8 – 6.13 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm, 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα. Από τις γραφικές που προέκυψαν από το PC OPERA σημειώσαμε την τιμή του ηλεκτρικού πεδίου για τις αποστάσεις 20cm, 50 cm, 70 cm, 110 cm, 140 cm, 170 cm και 200 cm κατά μήκος του άξονα X και τις συγκρίναμε με

τις πειραματικές τιμές που πάρθηκαν με τη χρήση του πεδιομέτρου και την μετακίνησή του γύρω από το αλεξικέραυνο για τις αποστάσεις και τα ύψη που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

Συγκεκριμένα, στην τελική πειραματική τιμή του ηλεκτρικού πεδίου καταλήξαμε χρησιμοποιώντας την εξίσωση 6.1:

$$E_{\text{πειρ}} = \sqrt{(E_x - E_{x\text{trav}})^2 + (E_y - E_{y\text{trav}})^2 + (E_z - E_{z\text{trav}})^2} \quad (6.1)$$

Όπου,

$E_x$ = η συνιστώσα X του μετρούμενου ηλεκτρικού πεδίου,

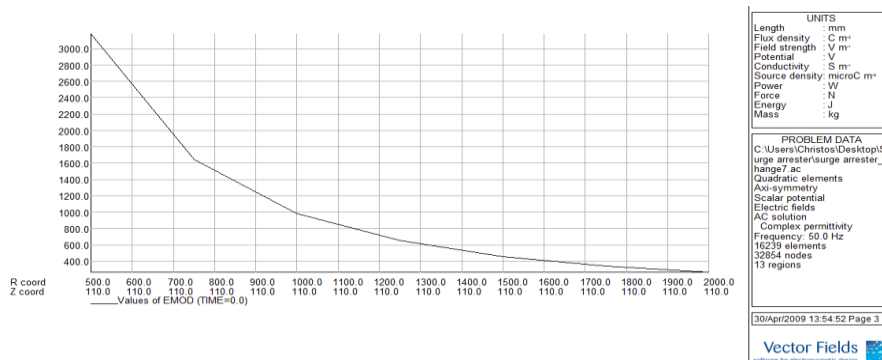
$E_y$ = η συνιστώσα Y του μετρούμενου ηλεκτρικού πεδίου,

$E_z$ = η συνιστώσα Z του μετρούμενου ηλεκτρικού πεδίου,

$E_{x\text{trav}}$ = η συνιστώσα X του ηλεκτρικού πεδίου εν κενώ, που δημιουργείται λόγω της τάσης που υπάρχει στον μετασχηματιστή,

$E_{y\text{trav}}$ = η συνιστώσα Y του ηλεκτρικού πεδίου εν κενώ, που δημιουργείται λόγω της τάσης που υπάρχει στον μετασχηματιστή,

$E_{z\text{trav}}$ = η συνιστώσα Z του ηλεκτρικού πεδίου εν κενώ, που δημιουργείται λόγω της τάσης που υπάρχει στον μετασχηματιστή.



Σχήμα 6.8: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 11 cm

Πίνακας 6.1 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελεσμάτων του OPERA  
για το ύψος  $Z = 11\text{ cm}$  και τάση  $V = 12\text{ kV}$

R(cm)	$E_x(\text{V/m})$	$E_y(\text{V/m})$	$E_{45^\circ}(\text{V/m})$	$E_{\text{OPERA}}(\text{V/m})$	Relative Error 1	Relative Error 2	Relative Error 2
200	185,768	314,644	208,905	262,85	-41,493	16,461	-25,823
170	280,181	451,102	309,880	359,71	-28,385	20,260	-16,080
140	465,929	675,977	480,975	521,82	-11,996	22,805	-8,492
110	808,226	1058,300	799,269	826,85	-2,304	21,870	-3,451
80	1529,190	1676,275	1453,752	1475,63	3,503	11,970	-1,505
50	3453,753	3691,787	3197,325	3180,74	7,905	13,843	0,519

Όπου,

$E_x$  = Το ηλεκτρικό πεδίο που μετρήσαμε στον άξονα X για τις πιο πάνω αποστάσεις,

$E_y$  = Το ηλεκτρικό πεδίο που μετρήσαμε στον άξονα Y για τις πιο πάνω αποστάσεις,

$E_{45^\circ}$  = Το ηλεκτρικό πεδίο που μετρήσαμε στον άξονα  $\varphi = 45^\circ$  για τις πιο πάνω αποστάσεις,

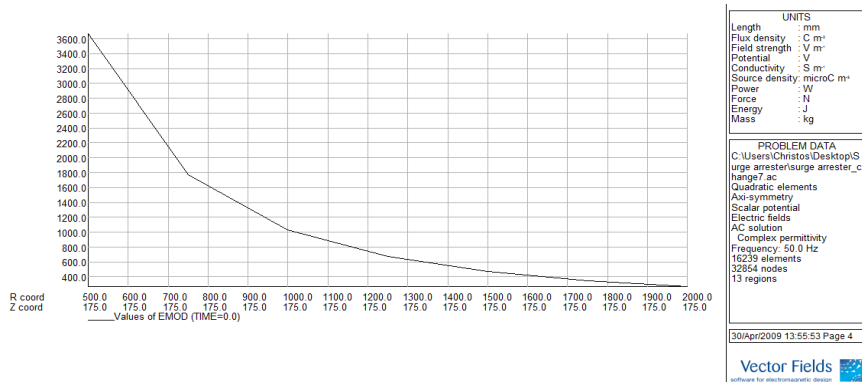
Relative Error 1= Το επί τοις εκατό σφάλμα μεταξύ  $E_{\text{πειρ1}}$  και  $E_{\text{OPERA}}$ ,

Relative Error 2= Το επί τοις εκατό σφάλμα μεταξύ  $E_{\text{πειρ2}}$  και  $E_{\text{OPERA}}$ ,

Relative Error 3= Το επί τοις εκατό σφάλμα μεταξύ  $E_{\text{πειρ3}}$  και  $E_{\text{OPERA}}$ .

Το επί τοις εκατό σφάλμα υπολογίζεται από την πιο κάτω εξίσωση :

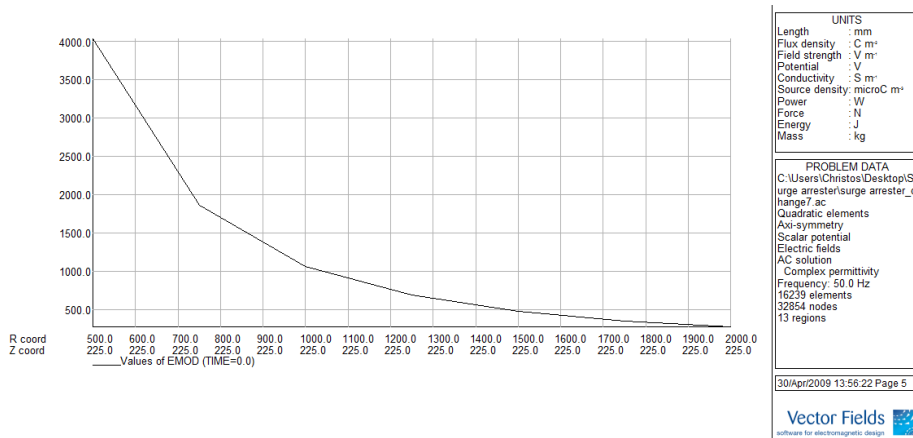
$$\text{Relative Error} = \frac{E_{\text{πειρ}} - E_{\text{OPERA}}}{E_{\text{πειρ}}} \cdot 100 \quad (6.2)$$



Σχήμα 6.9: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 17,5 cm

Πίνακας 6.2 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελεσμάτων του OPERA για το ύψος  $Z = 17,5$  cm και τάση  $V = 12$  kV

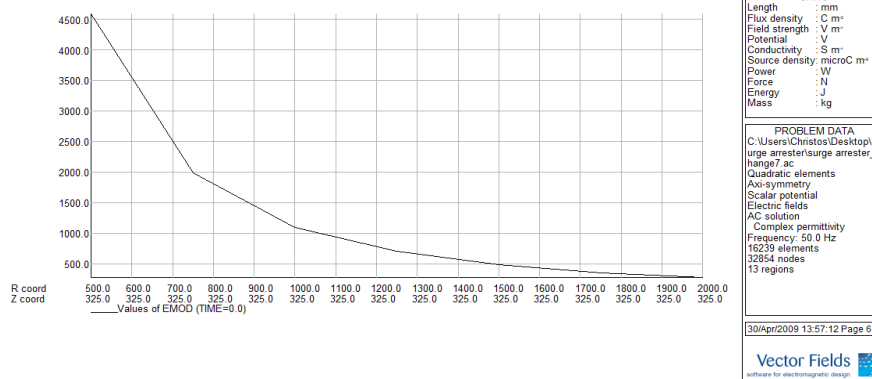
R(cm)	$E_x$ (V/m)	$E_y$ (V/m)	$E_{45^\circ}$ (V/m)	$E_{OPERA}$ (V/m)	Relative Error 1	Relative Error 2	Relative Error 3
200	200,116	310,301	207,173	265,68	-32,76	14,380	-28,241
170	282,451	448,759	309,785	365,05	-29,244	18,653	-17,840
140	456,077	673,841	481,672	536,67	-17,671	20,357	-11,418
110	793,758	1053,554	805,244	857,1	-7,980	18,647	-6,440
80	1498,741	1712,868	1524,660	1565,77	-4,472	8,588	-2,696
50	3438,620	3783,693	3376,453	3670,19	-6,734	3,000	-8,700



Σχήμα 6.10: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 22,5 cm

Πίνακας 6.3 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελεσμάτων του OPERA για το ύψος  $Z = 22,5 \text{ cm}$  και τάση  $V = 12 \text{ kV}$

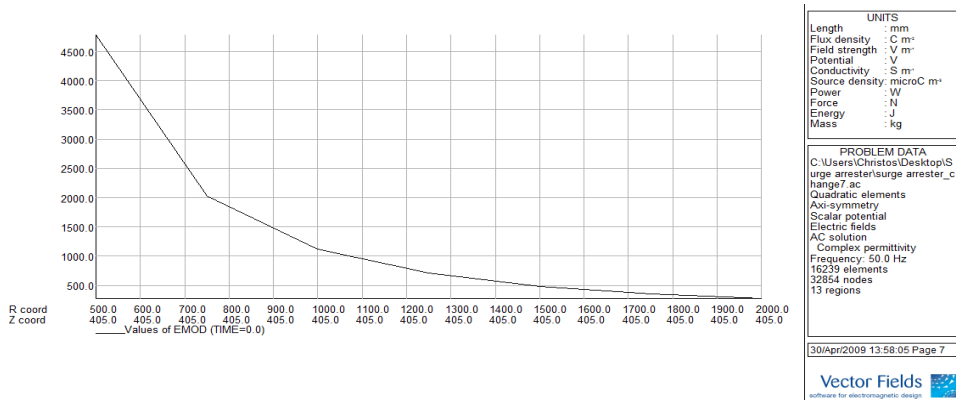
R(cm)	$E_x$ (V/m)	$E_y$ (V/m)	$E_{45^\circ}$ (V/m)	$E_{OPERA}$ (V/m)	Relative Error 1	Relative Error 2	Relative Error 3
200	187,372	307,225	205,567	227,29	-21,304	26,018	-10,567
170	282,420	440,618	309,094	369,39	-30,794	16,165	-19,507
140	446,674	655,511	485,205	544,74	-21,955	16,898	-12,270
110	780,545	1050,173	801,575	874,39	-12,023	16,738	-9,084
80	1530,354	1793,387	1399,741	1635,6	-6,877	8,798	-16,850
50	3522,646	3835,283	3382,468	4033,34	-14,497	-5,164	-19,243



Σχήμα 6.11: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος  $32,5 \text{ cm}$

Πίνακας 6.4 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελεσμάτων του OPERA για το ύψος  $Z = 32,5 \text{ cm}$  και τάση  $V = 12 \text{ kV}$

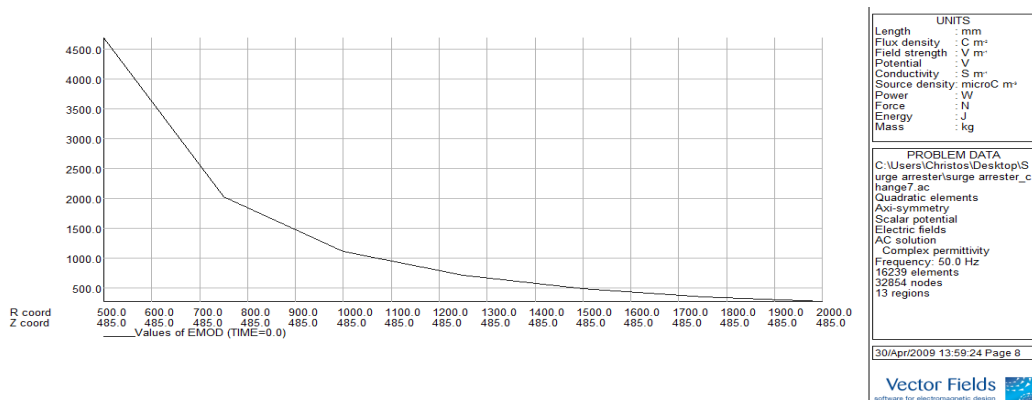
R(cm)	$E_x$ (V/m)	$E_y$ (V/m)	$E_{45^\circ}$ (V/m)	$E_{OPERA}$ (V/m)	Relative Error 1	Relative Error 2	Relative Error 3
200	190,578	247,793	206,558	270,66	-42,02	-9,228	-31,033
170	277,199	379,438	288,992	375,70	-35,534	0,985	-30,004
140	433,155	616,930	463,960	557,36	-28,674	9,656	-20,131
110	772,807	857,971	820,300	903,82	-16,953	-5,344	-10,182
80	1576,342	1891,705	1536,533	1739,69	-10,362	8,036	-13,222
50	3679,699	3981,391	3688,833	4587,12	-24,660	-15,214	-24,352



Σχήμα 6.12: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 40,5 cm

Πίνακας 6.5 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελεσμάτων του OPERA για το ύψος  $Z = 40,5$  cm και τάση  $V = 12$  kV

R(cm)	$E_x$ (V/m)	$E_y$ (V/m)	$E_{45^\circ}$ (V/m)	$E_{OPERA}$ (V/m)	Relative Error 1	Relative Error 2	Relative Error 3
200	231,079	367,143	208,138	271,97	-27,778	25,923	-30,668
170	308,023	512,497	302,456	378,39	-30,993	26,167	-25,106
140	454,839	750,399	484,975	562,38	-29,433	25,056	-15,961
110	755,129	1196,464	841,414	917,72	-29,254	23,297	-9,069
80	1500,612	1995,091	1591,854	1739,32	-26,735	23,336	-9,264
50	3240,589	4010,396	3287,274	4585,12	-22,727	-14,331	-39,481



Σχήμα 6.13: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 48,5 cm

Πίνακας 6.6 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αποτελεσμάτων του OPERA για το ύψος  $Z = 48,5 \text{ cm}$  και τάση  $V = 12 \text{ kV}$

<b>R(cm)</b>	<b>E<sub>x</sub>(V/m)</b>	<b>E<sub>y</sub>(V/m)</b>	<b>E<sub>45°</sub> (V/m)</b>	<b>E<sub>OPERA</sub>(V/m)</b>	<b>Relative Error 1</b>	<b>Relative Error 2</b>	<b>Relative Error 3</b>
200	193,824	233,248	210,843	262,14	-35,246	-12,387	-24,329
170	288,571	349,476	323,382	368,87	-27,826	-5,549	-14,066
140	421,697	575,694	499,354	563,36	-33,593	2,142	-12,818
110	724,782	941,762	840,089	919,8	-26,907	2,332	-9,488
80	1479,748	2043,302	1572,130	1775,22	-19,968	13,120	-12,918
50	3564,699	4471,371	3417,689	4688,83	-31,535	-4,863	-37,193

#### 6.4 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε τροποποιημένα αλεξικέραυνα

Στη συνέχεια θα αναλυθούν και θα υπολογισθούν οι κατανομές του ηλεκτρικού πεδίου σε ρυπασμένα αλεξικέραυνα, καθώς και σε αλεξικέραυνα με σπασμένα πτερύγια. Η πιο σημαντική μελέτη σ' αυτό το κεφάλαιο όμως, είναι η μελέτη του δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνα με ανομοιόμορφο βαρίστορ και πτερύγια ούτως ώστε να δούμε αν κάποιες απ' αυτές τις αλλαγές μπορούν να συμβάλουν στην ίση και ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού, πετυχαίνοντας μία ισορροπημένη καταπόνηση του αλεξικέραυνου.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι περιοχές του βαρίστορ (μη γραμμική αντίσταση) από οξειδία του ψευδαργύρου (ZnO), του υαλώδες υλίου (glass fiber), των αγωγών που αποτελούνται από σίδηρο και του εξωτερικού περιβλήματος από πολυμερές μονωτικό υλικό, έχουν την ίδια διηλεκτρική σταθερά και  $\sigma$  με το αλεξικέραυνο που εξετάστηκε πιο πάνω, δηλαδή,

- Βαρίστορ :  $\epsilon_r=800$  και  $\sigma=10^{-4} \text{ S/m}$
- Υαλώδες υλικό (glass fiber) :  $\epsilon_r = 4.6$  και  $\sigma = 0,01 \text{ S/m}$
- Αγωγοί :  $\epsilon_r = 10^6$  και  $\sigma = 10^4 \text{ S/m}$
- Εξωτερικά περιβλήματα (περύγια) :  $\epsilon_r = 5$  και  $\sigma = 0,01 \text{ S/m}$

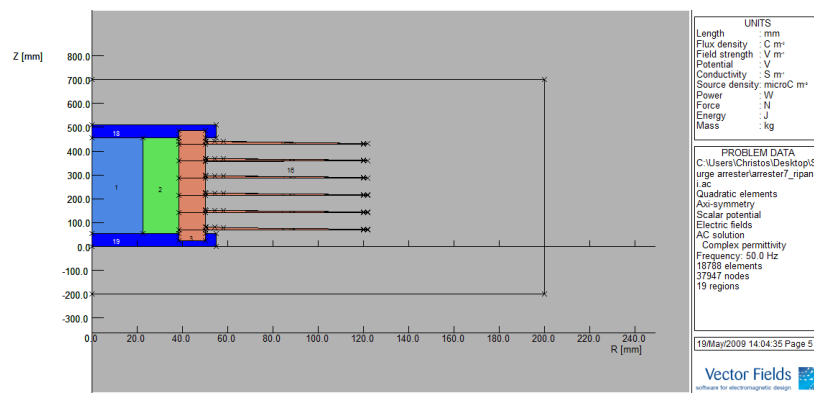


Στο ηλεκτρόδιο 2 εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση 12 kV (rms), ενώ το ηλεκτρόδιο 4 είναι σε μηδενικό δυναμικό.

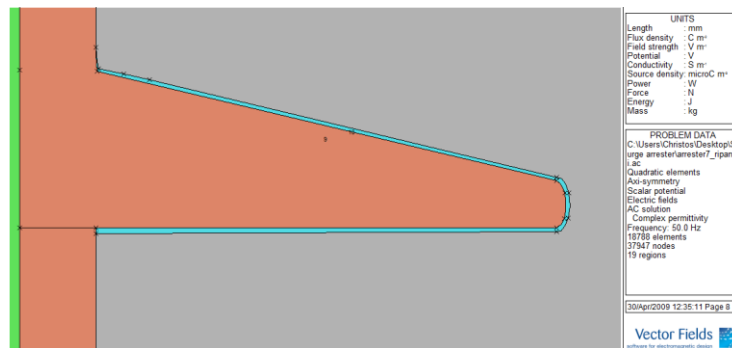
#### 6.4.1. Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε ρυπασμένο αλεξικέραυνο

Πιο κάτω μελετήθηκε, με τη χρήση του PC OPERA, ο υπολογισμός και η κατανομή του δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου στο αλεξικέραυνο που αναλύσαμε πιο πάνω, τοποθετώντας σ' αυτό ένα λεπτό στρώμα ρύπανσης στα περύγια. Το στρώμα ρύπανσης που τοποθετήσαμε (περιοχές 10 – 15 ) είχε διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r = 650$  και  $\sigma = 0,05$  S/m.

Στα σχήματα 6.14 και 6.15 φαίνεται η σχεδίαση του ρυπασμένου αλεξικέραυνου.

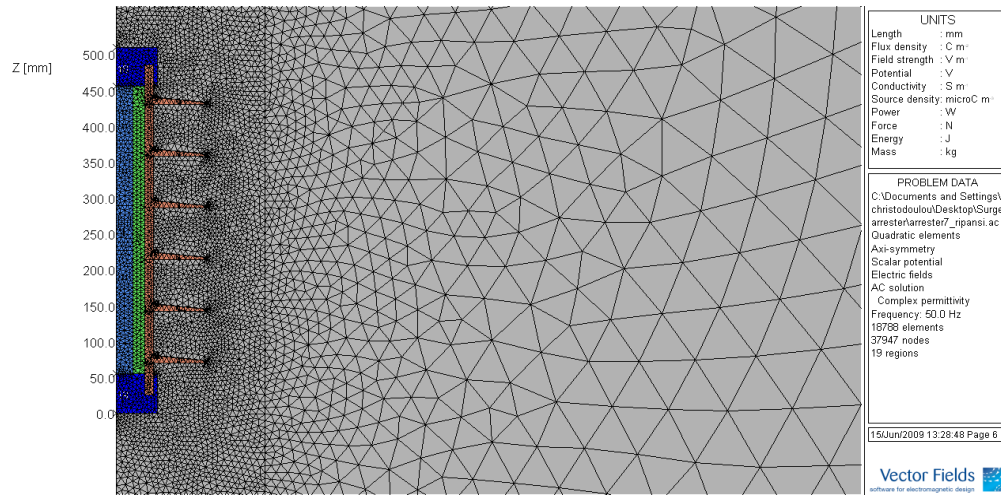


Σχήμα 6.14: Σχεδίαση του ρυπασμένου αλεξικέραυνου στο PC OPERA



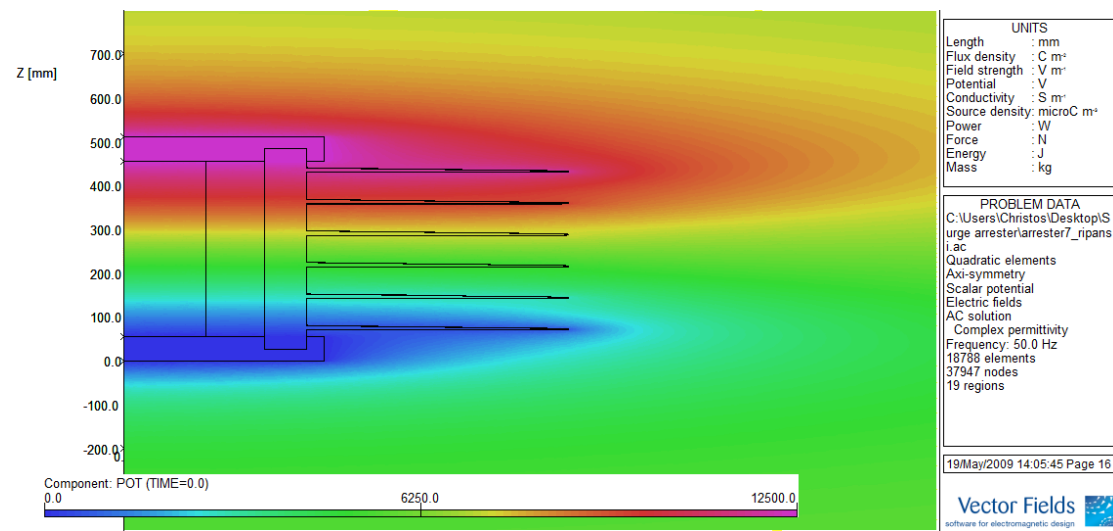
Σχήμα 6.15: Σχεδίαση της ρύπανσης του αλεξικέραυνου στο PC OPERA

Στο Σχήμα 6.16 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 18788 στοιχεία και 37947 κόμβοι.



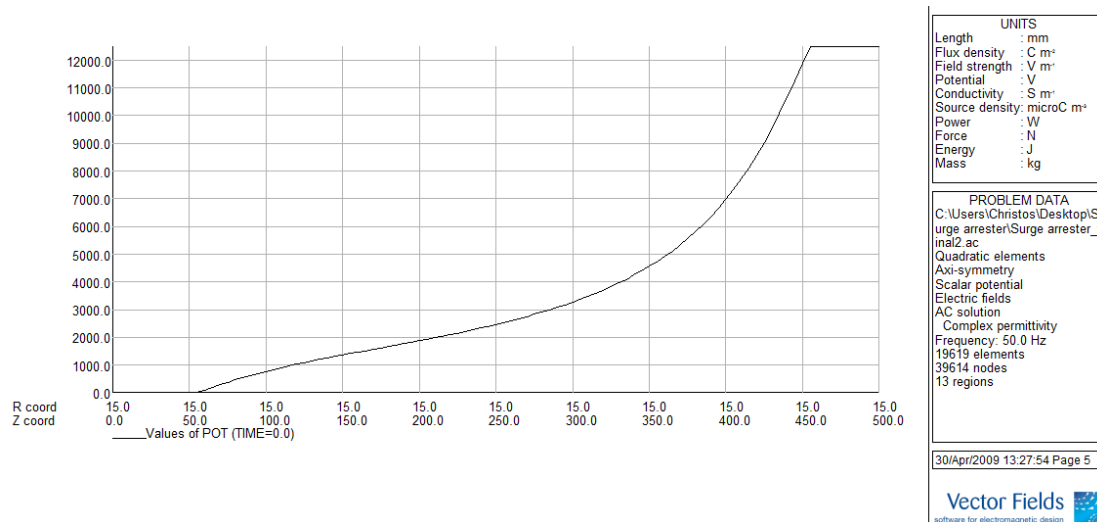
Σχήμα 6.16: Το πλέγμα της διάταξης

Στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραύνου και γύρω από αυτό.



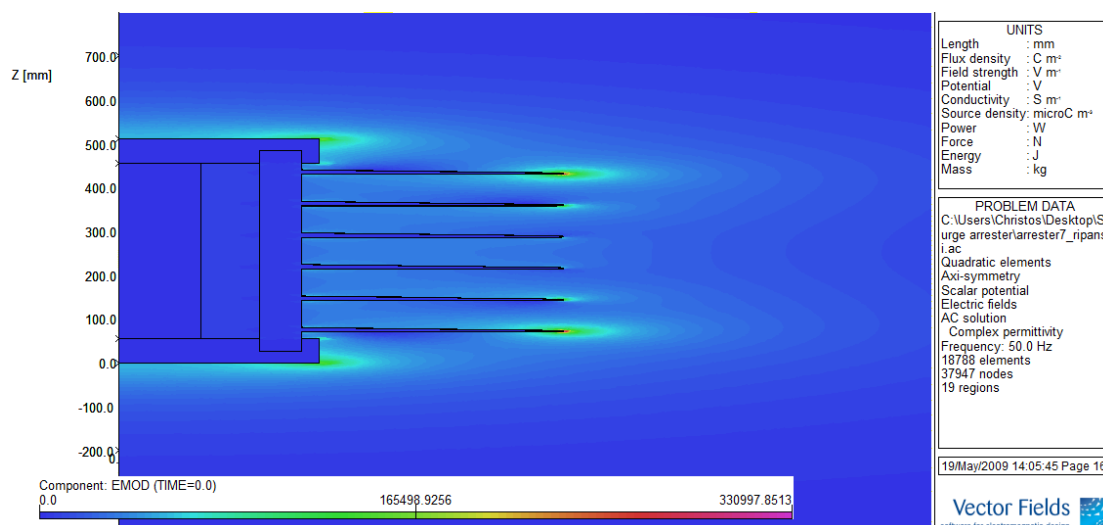
Σχήμα 6.17: Κατανομή του δυναμικού στο αλεξικέραυνο με ρυπασμένα πτερύγια

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.18 φαίνεται η κατανομή του δυναμικού στο βαρίστορ.



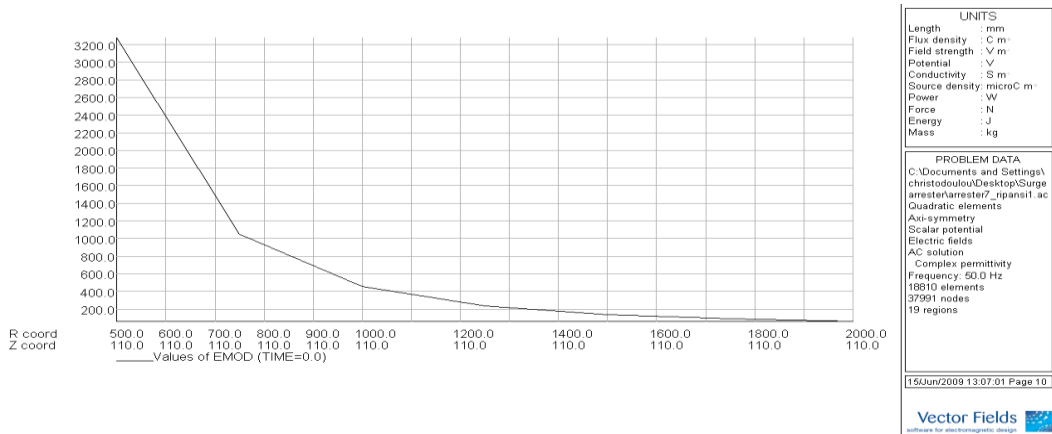
Σχήμα 6.18: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

Στο Σχήμα 6.19 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.

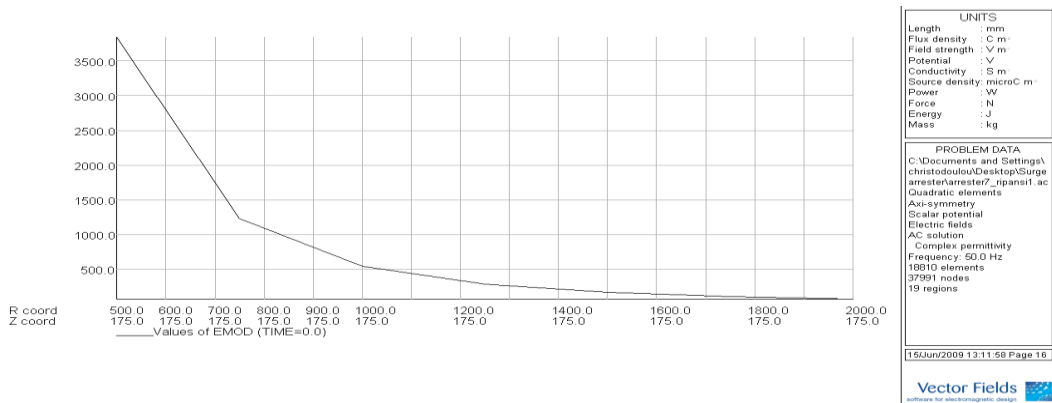


Σχήμα 6.19: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο αλεξικέραυνο με ρυπασμένα πτερύγια

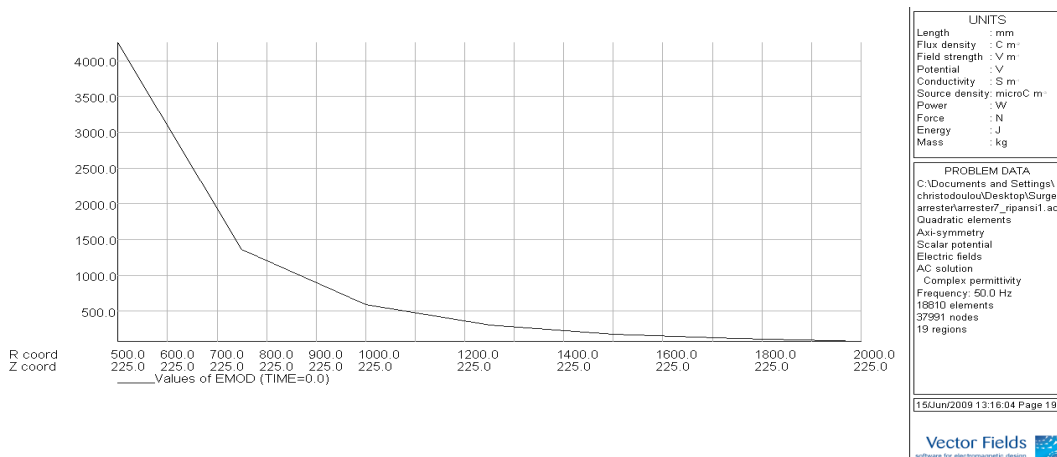
Στα σχήματα 6.20 – 6.25 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm, 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα.



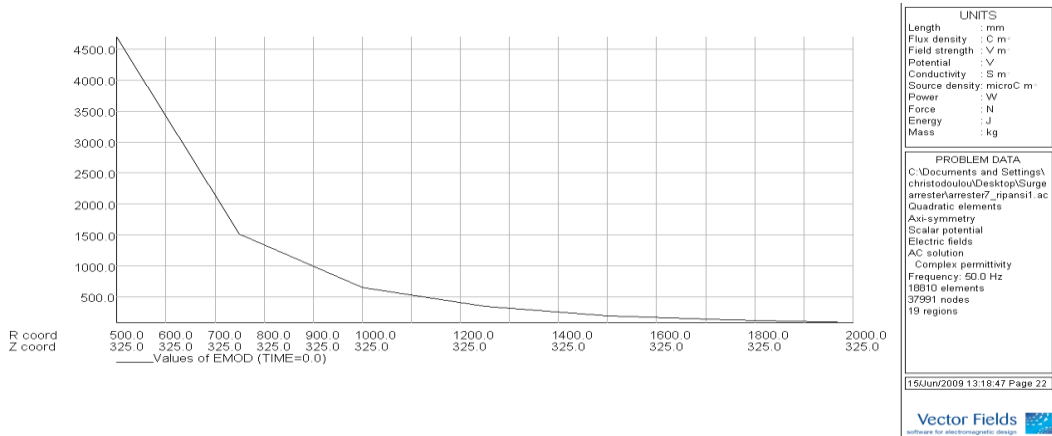
Σχήμα 6.20: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 11 cm



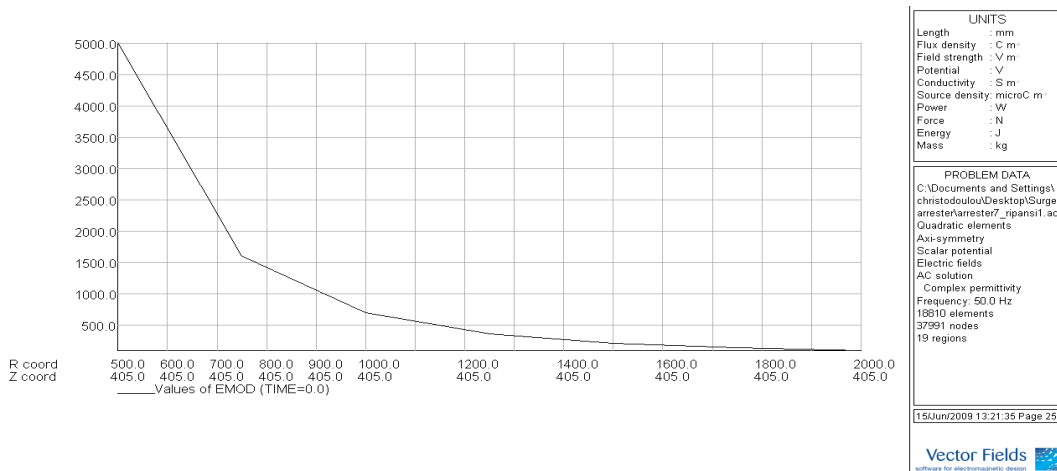
Σχήμα 6.21: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 17,5 cm



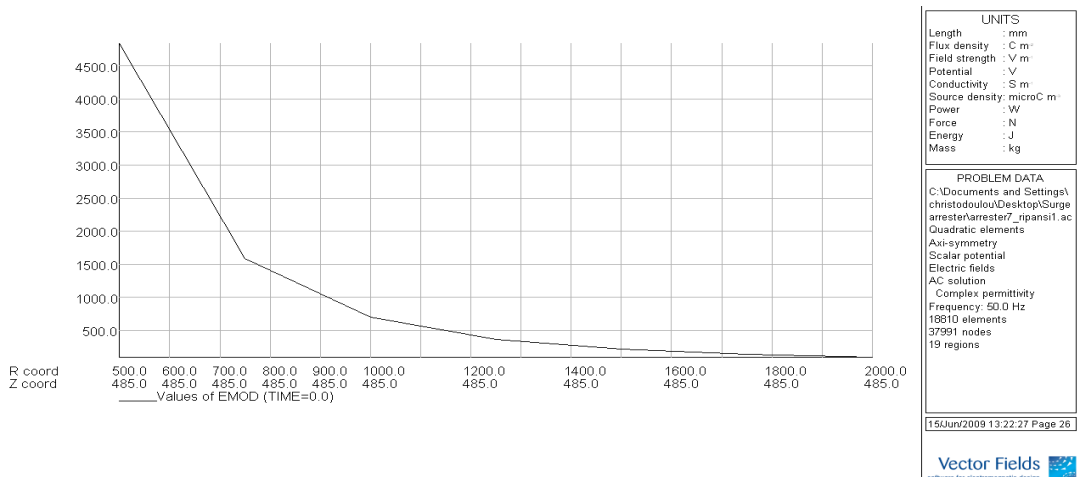
Σχήμα 6.22: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 22,5 cm



Σχήμα 6.23: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 32,5 cm



Σχήμα 6.24: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 40,5 cm

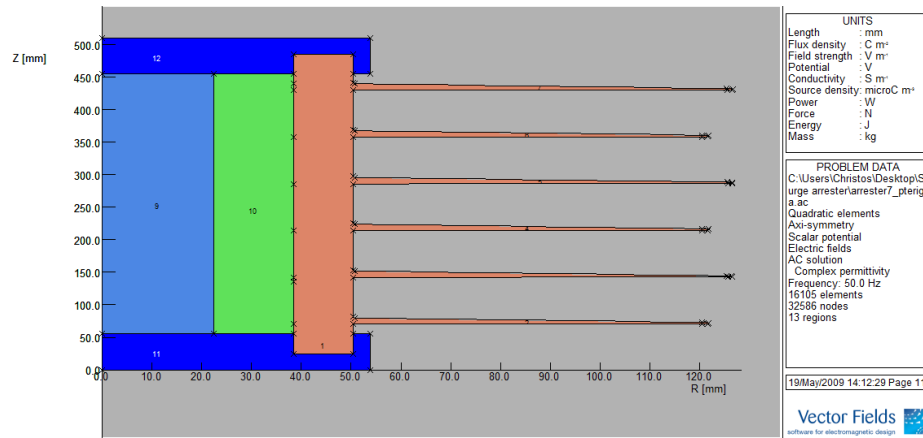


Σχήμα 6.25: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 48,5 cm

#### 6.4.2. Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με ανομοιόμορφα πτερύγια

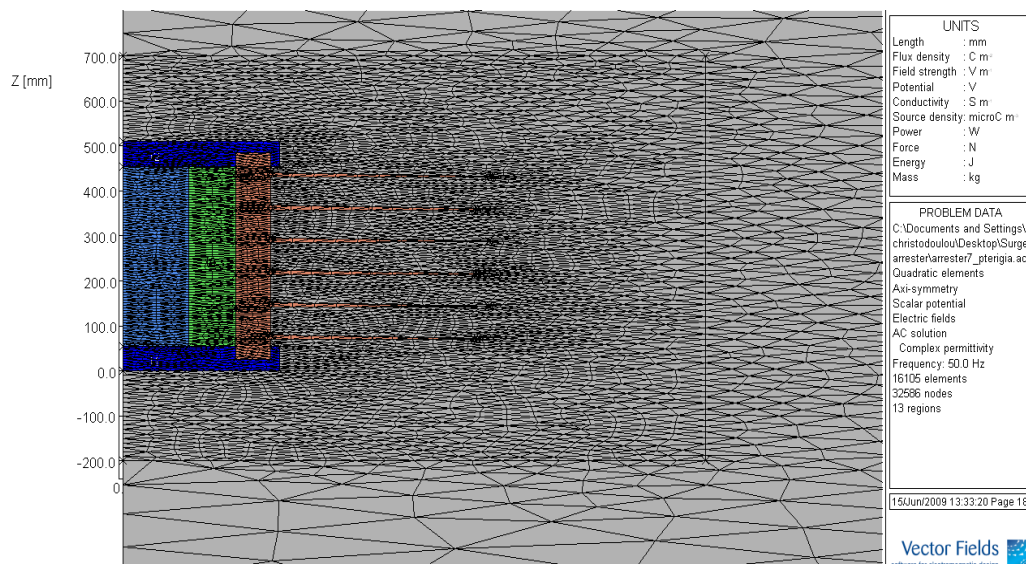
Στη συνέχεια υπολογίστηκε με χρήση του PC OPERA η κατανομή του δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με άνισα και ανομοιόμορφα πτερύγια.

Στο σχήμα 6.26 φαίνεται η διάταξη του σχήματος.



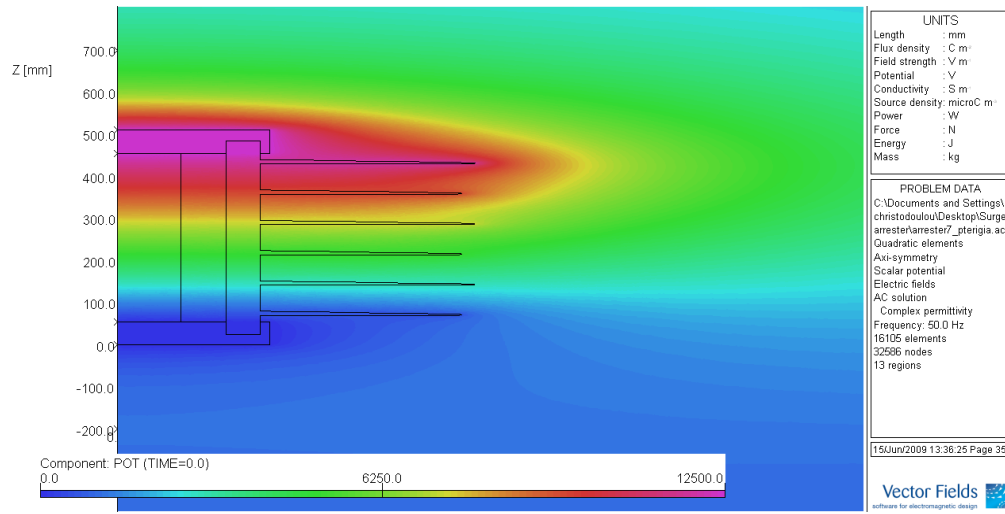
Σχήμα 6.26: Σχεδίαση αλεξικέραυνου με άνισα και ανομοιόμορφα πτερύγια στο PC OPERA

Στο Σχήμα 6.27 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 16105 στοιχεία και 32586 κόμβοι.



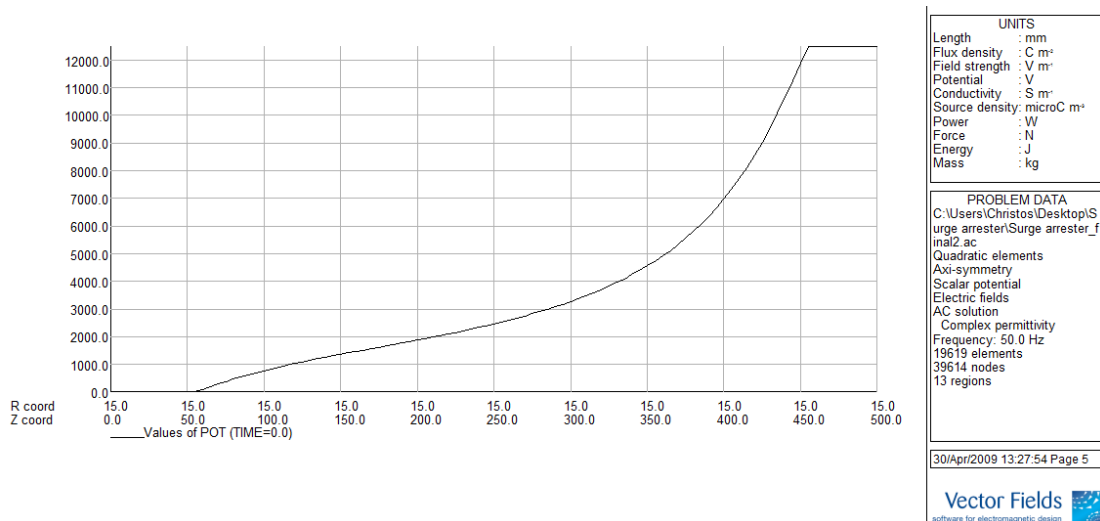
Σχήμα 6.27: Το πλέγμα της διάταξης

Στο Σχήμα 6.28 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραυνού και γύρω από αυτό.



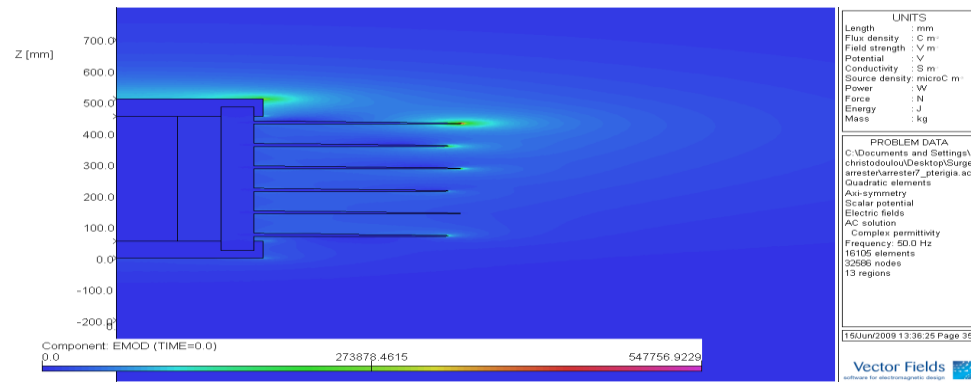
Σχήμα 6.28: Κατανομή του δυναμικού σε αλεξικέραυνο με άνισα και ανομοιόμορφα περύγια

Όπως αναμενόταν η κατανομή του δυναμικού μέσα στο βαρίστορ δεν είναι ίση, και τα τμήματα που βρίσκονται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης καταπονούνται περισσότερο. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 6.29.



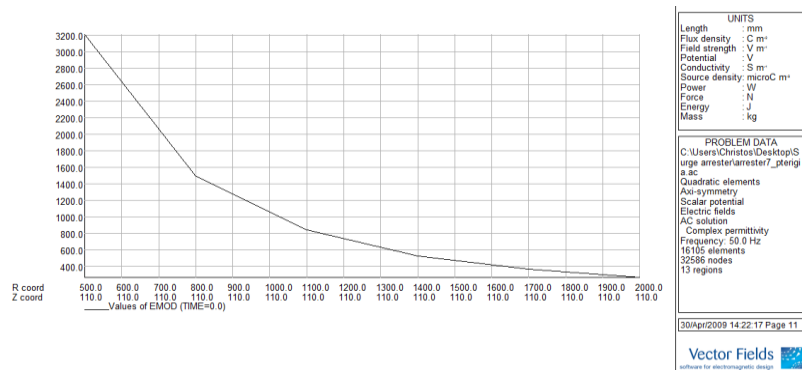
Σχήμα 6.29: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

Στο Σχήμα 6.30 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.

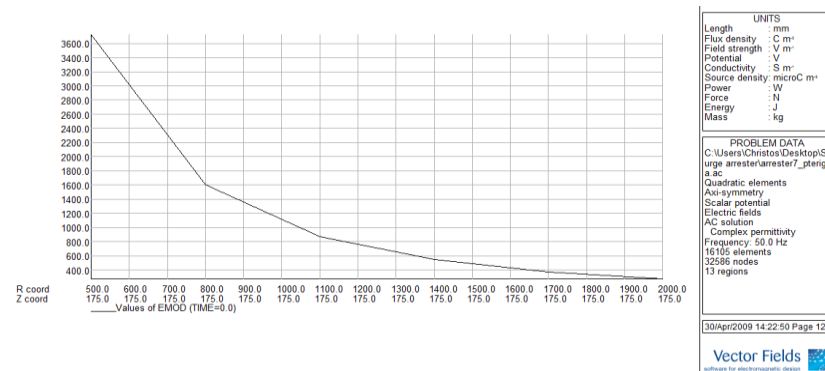


Σχήμα 6.30: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέρανο με άνισα και ανομοιόμορφα πετρώγια

Στα σχήματα 6.31 – 6.36 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm, 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα.

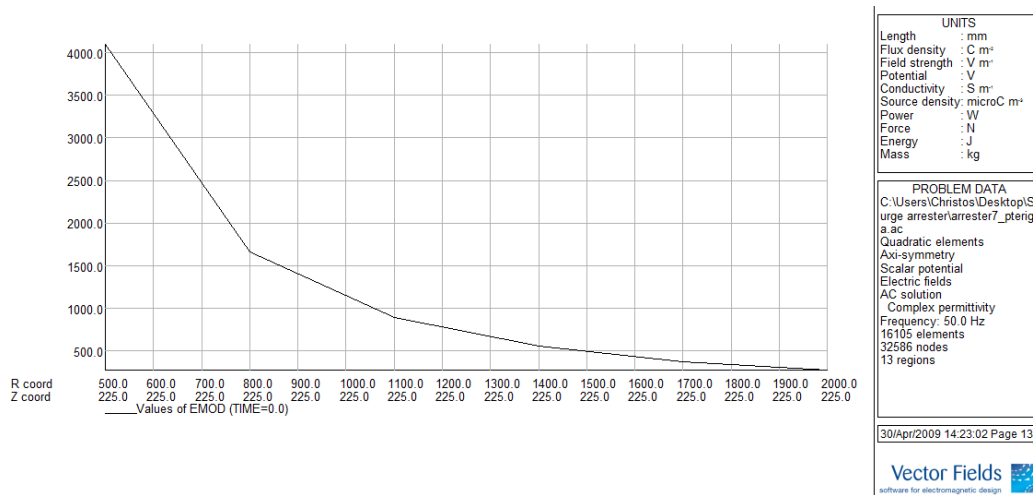


Σχήμα 6.31: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 11 cm

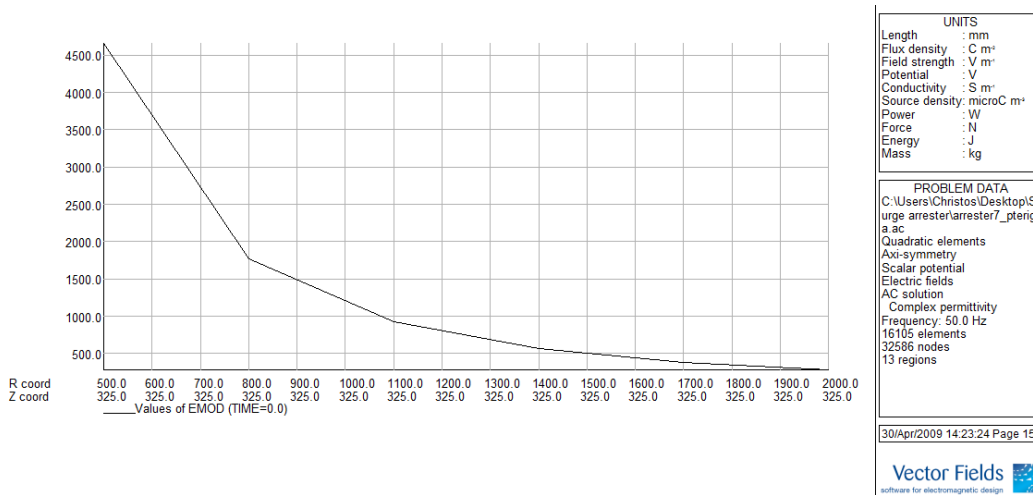


Σχήμα 6.32: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 17,5 cm

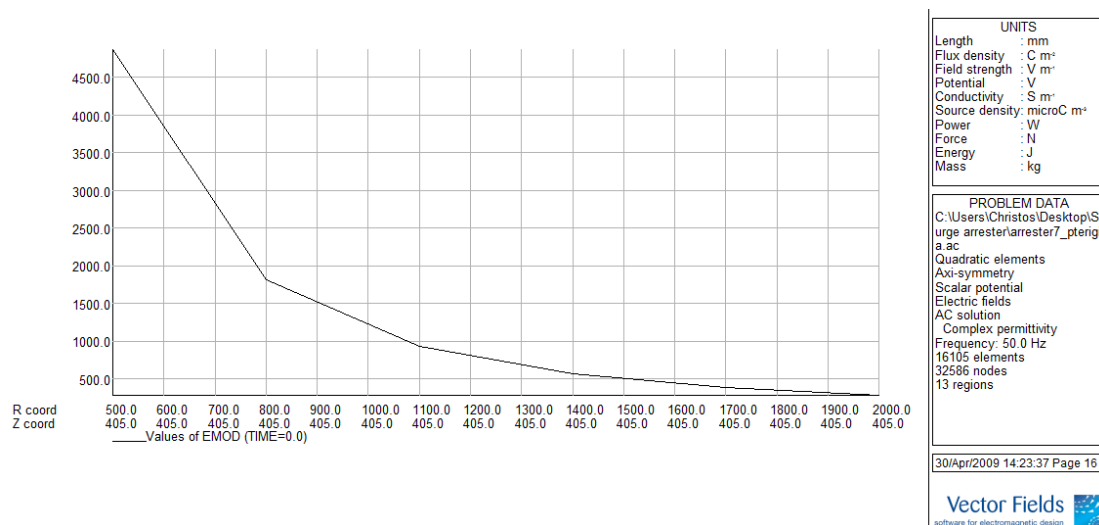




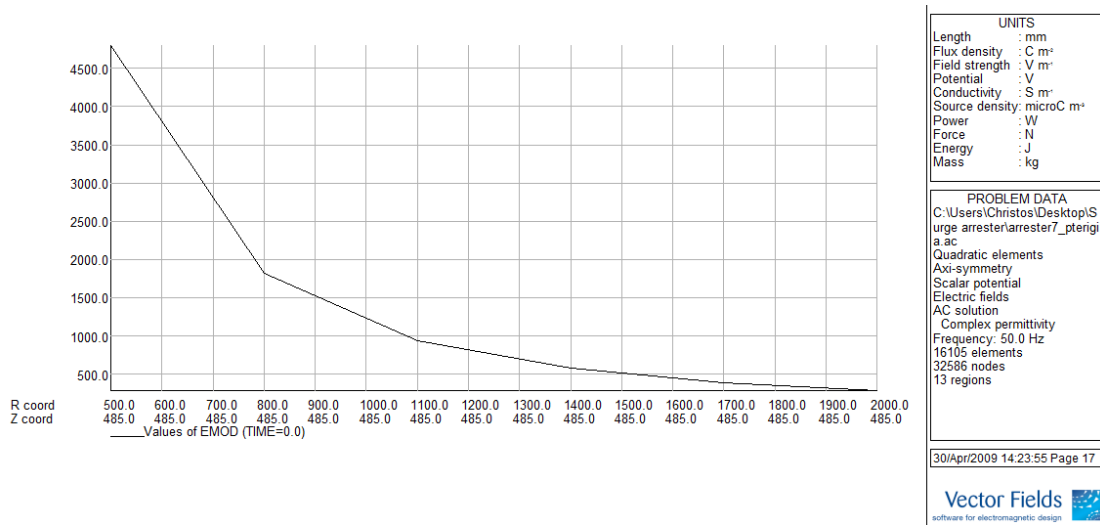
Σχήμα 6.33: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 22,5 cm



Σχήμα 6.34: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 32,5 cm



Σχήμα 6.35: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 40,5 cm



Σχήμα 6.36: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 48,5 cm

6.4.2. Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με σπασμένα πετερύγια

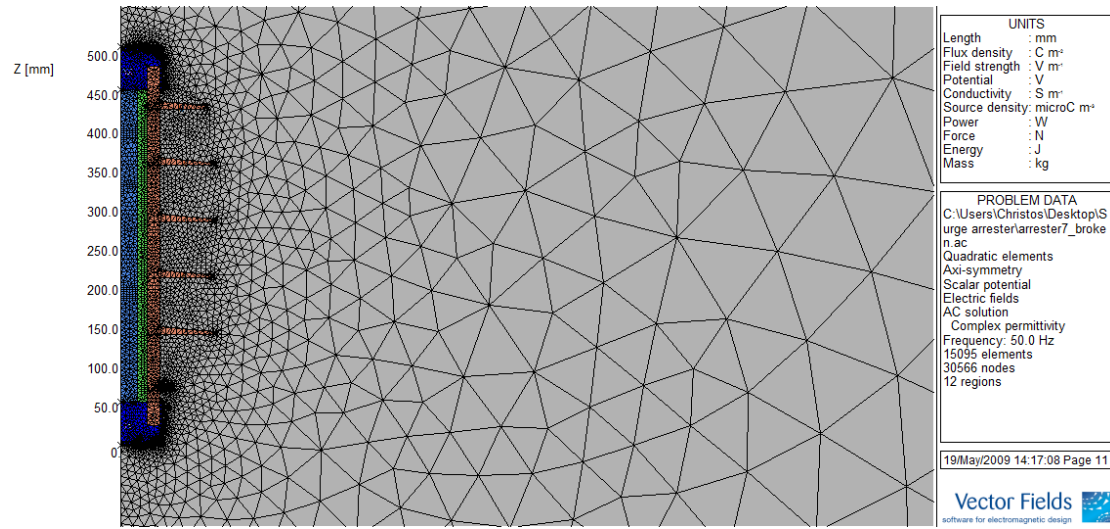
Στη συνέχεια υπολογίστηκε με χρήση του PC OPERA, ο υπολογισμός και η κατανομή του δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με κάποια σπασμένα πετερύγια.

Στο σχήμα 6.37 φαίνεται η διάταξη του σχήματος.



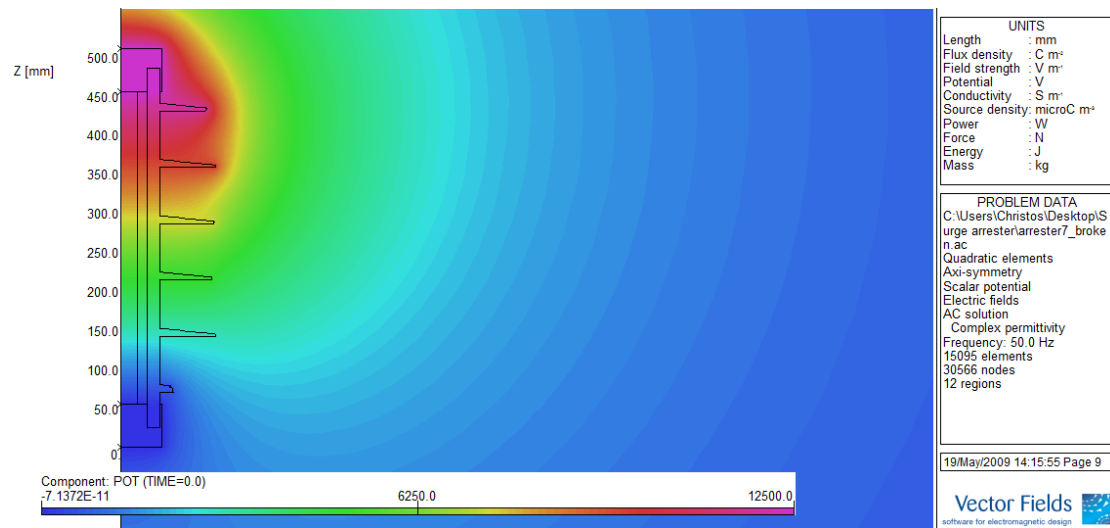
Σχήμα 6.37: Σχεδίαση αλεξικέραυνου με σπασμένα πετερύγια στο PC OPERA

Στο Σχήμα 6.38 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 15095 στοιχεία και 30566 κόμβοι.



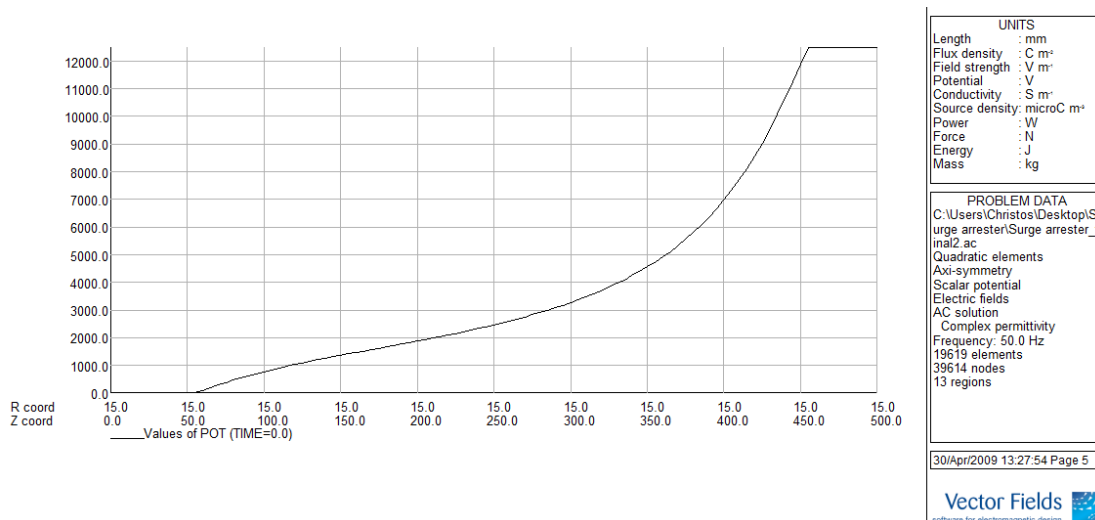
Σχήμα 6.38: Το πλέγμα της διάταξης

Στο Σχήμα 6.39 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραύνου και γύρω από αυτό.



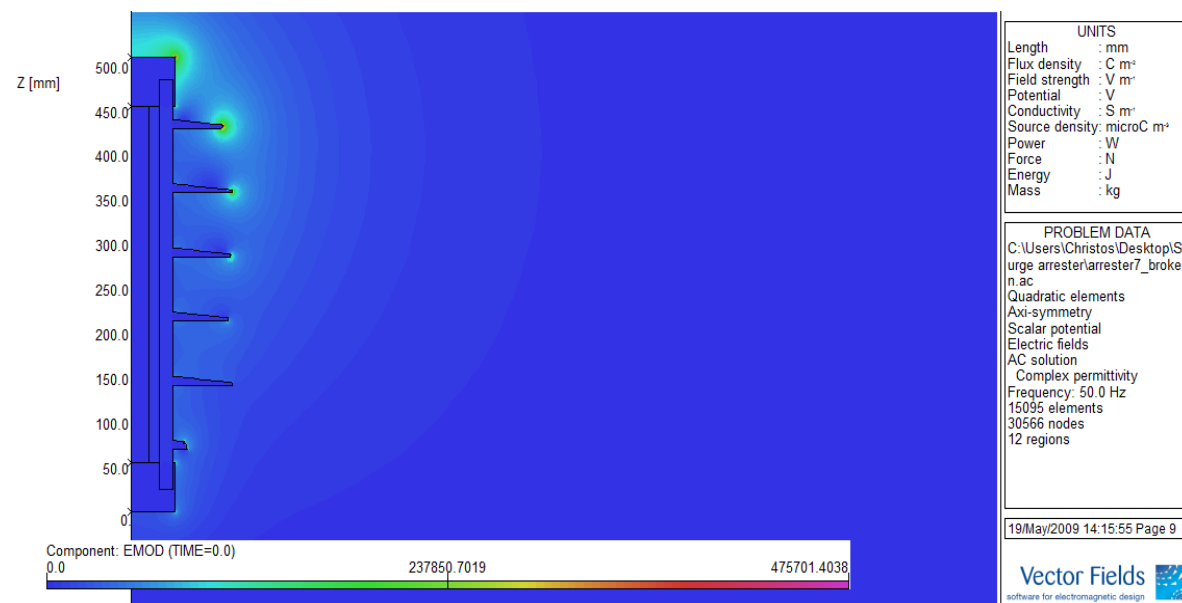
Σχήμα 6.39: Κατανομή του δυναμικού σε αλεξικέραυνο με σπασμένα περύγια

Η ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 6.40.



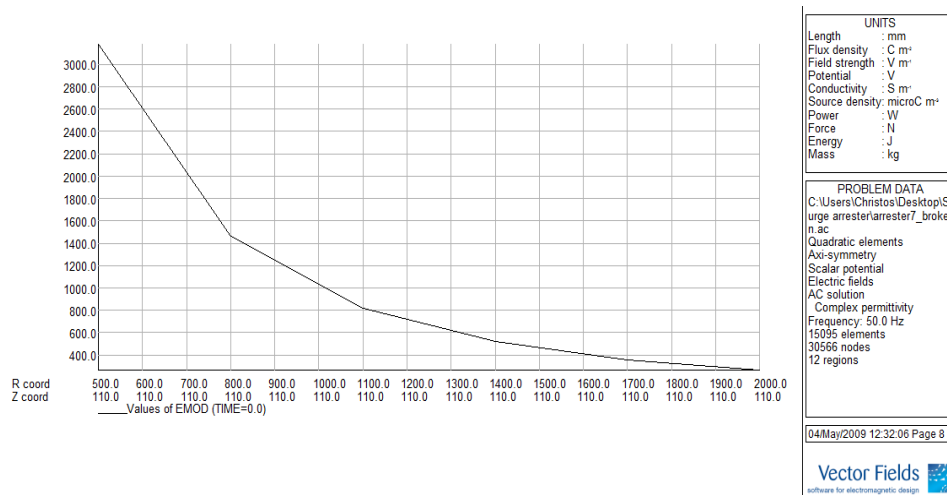
Σχήμα 6.40: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

Στο Σχήμα 6.41 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.

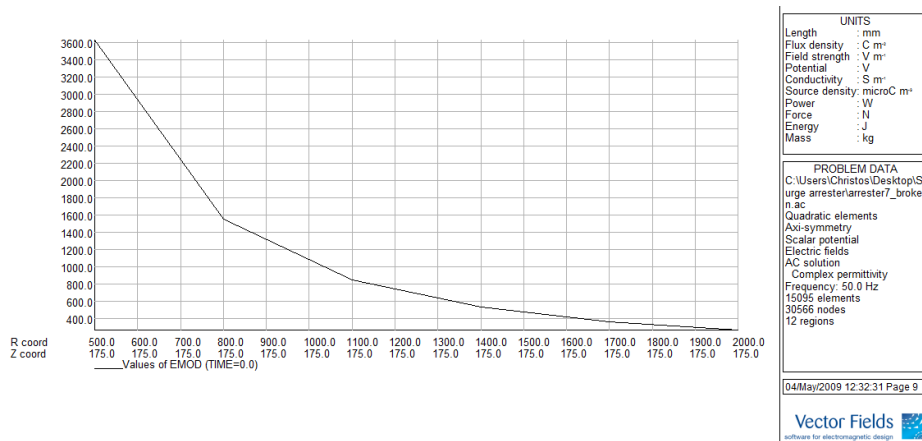


Σχήμα 6.41: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με σπασμένα περυσία

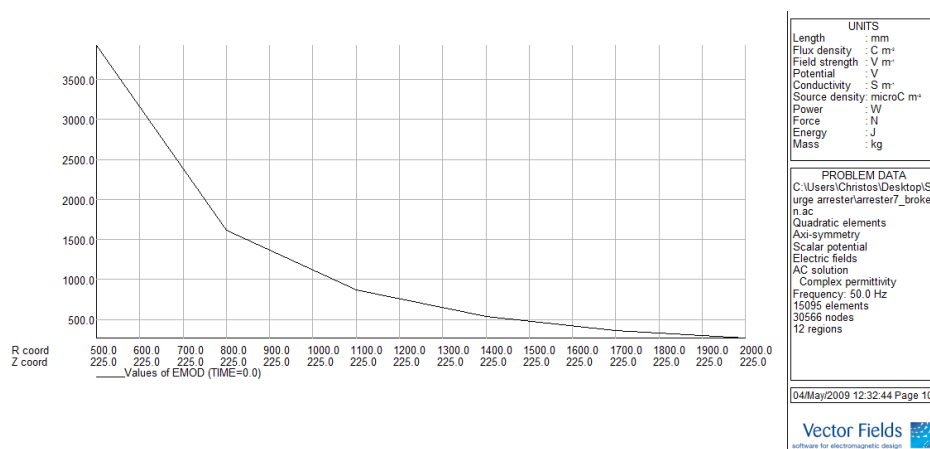
Στα σχήματα 6.42 – 6.47 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm, 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα.



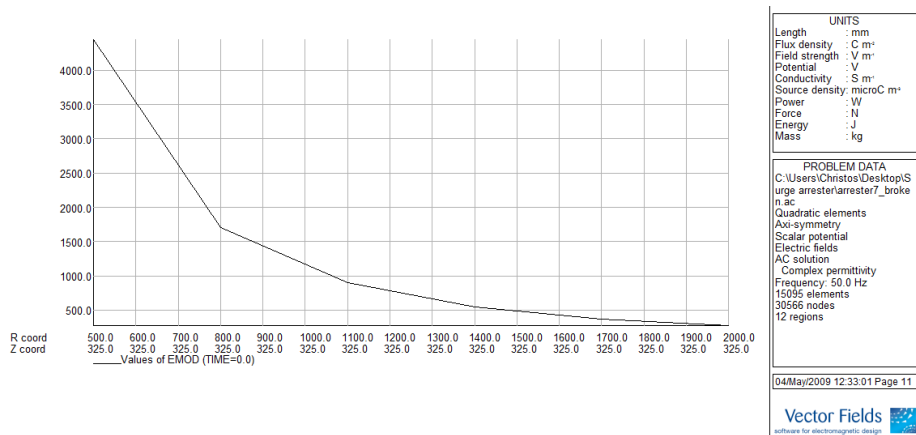
Σχήμα 6.42: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 11 cm



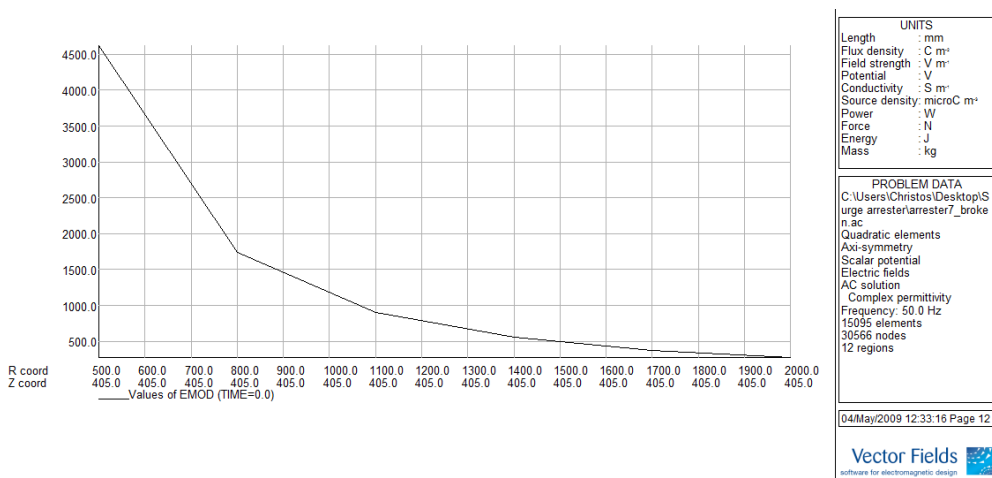
Σχήμα 6.43: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 17,5 cm



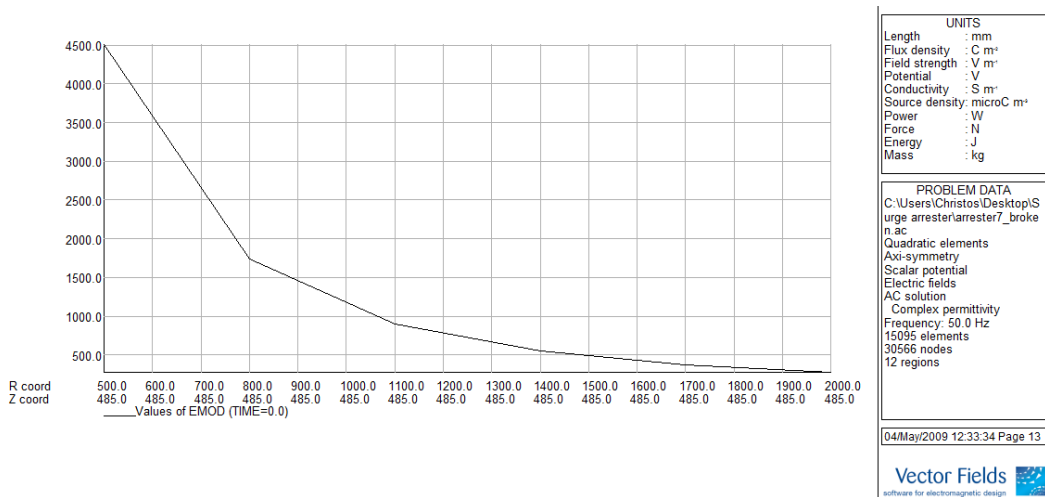
Σχήμα 6.44: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 22,5 cm



Σχήμα 6.45: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 32,5 cm



Σχήμα 6.46: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 40,5 cm

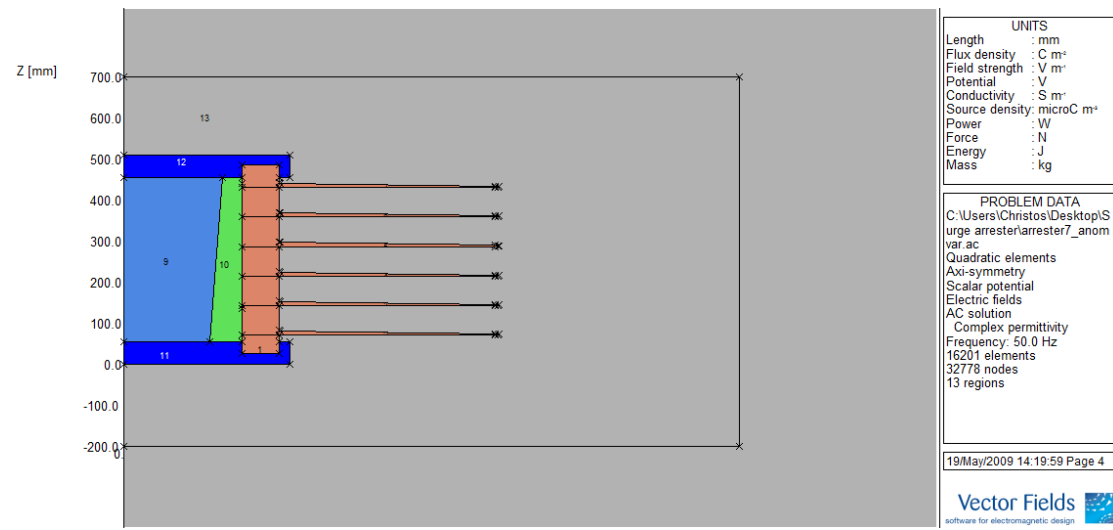


Σχήμα 6.47: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 48,5 cm

### 6.4.3. Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού και Ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνα με ανομοιόμορφο βαρίστορ

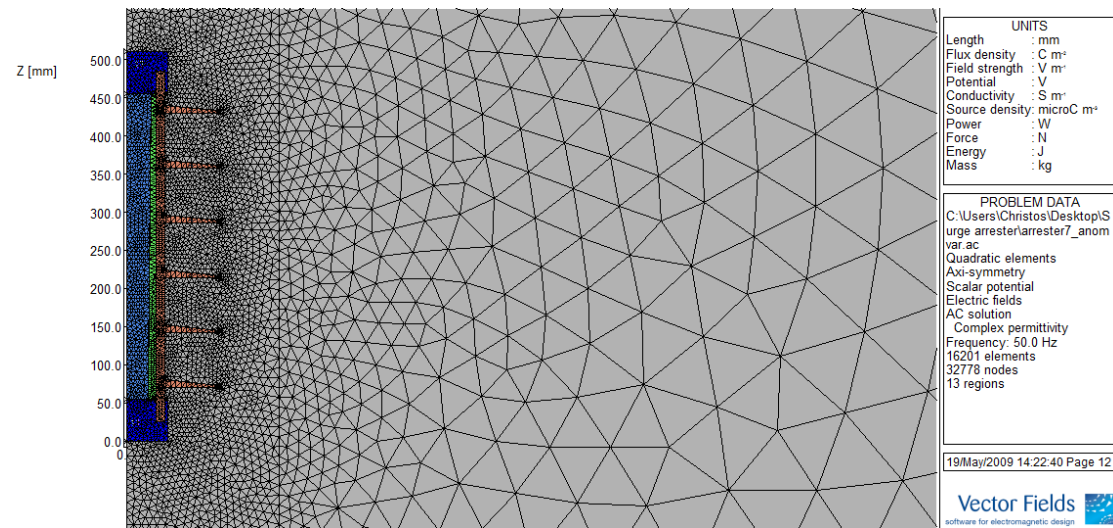
Πιο κάτω παρουσιάζονται διάφορες τροποποιήσεις του βαρίστορ (μη γραμμική αντίσταση) από οξειδίο του ψευδαργύρου (ZnO) και μελετούμε την αλλαγή στην κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου.

A) Η πρώτη αλλαγή του βαρίστορ που υλοποιήσαμε στο PC OPERA φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



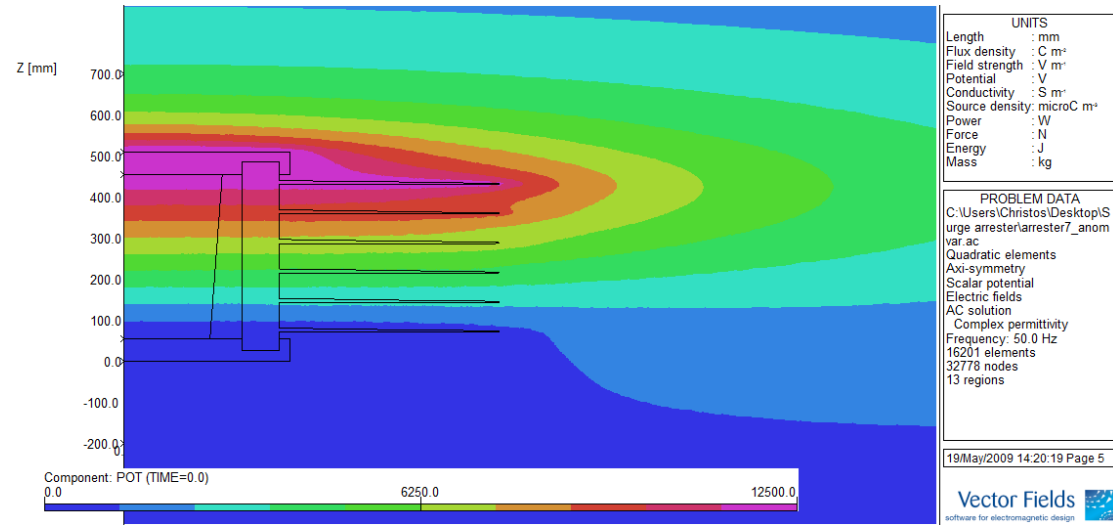
Σχήμα 6.48: Σχεδίαση αλεξικέραυνου με ανομοιόμορφο βαρίστορ στο PC OPERA

Στο Σχήμα 6.49 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 16201 στοιχεία και 32778 κόμβοι.



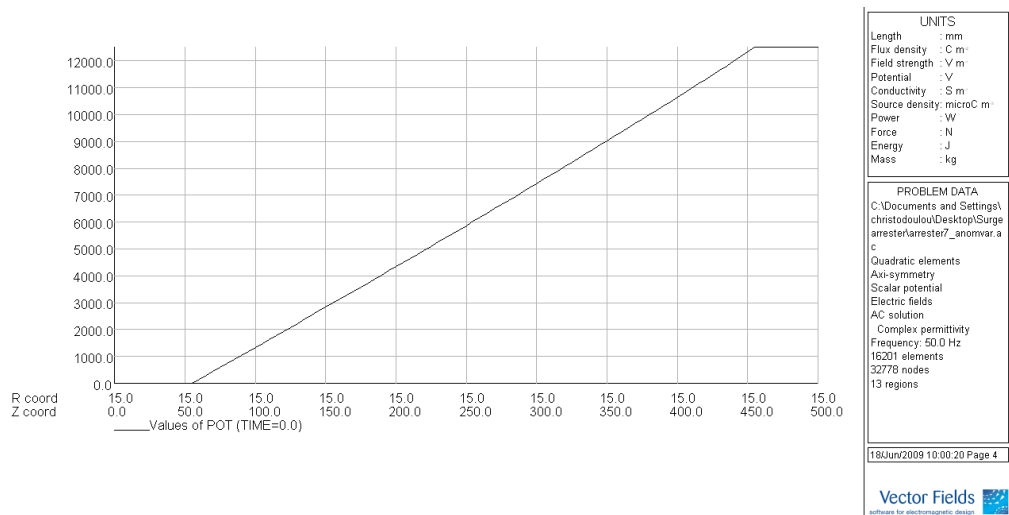
Σχήμα 6.49: Το πλέγμα της διάταξης

Στο Σχήμα 6.50 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραυνού και γύρω από αυτό.



Σχήμα 6.50: Κατανομή του δυναμικού σε αλεξικέραυνο με ανομοιόμορφο βαρίστορ

Το δυναμικό μέσα στο βαρίστορ φαίνεται να είναι πιο ομοιόμορφο, αν και βλέπουμε ότι τα τμήματα που βρίσκονται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης καταπονούνται και πάλι λίγο περισσότερο. Η πιο ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού που επιτυγχάνεται φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 6.51.



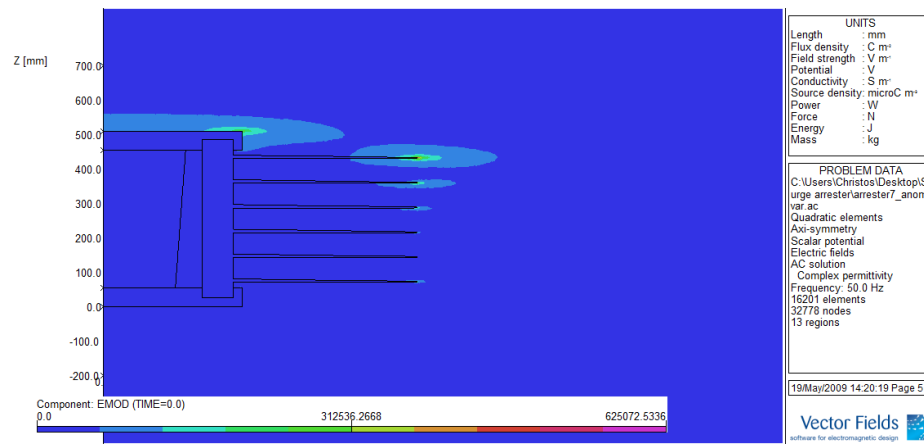
Σχήμα 6.51: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

Απ' ότι βλέπουμε πιο πάνω η κατανομή του δυναμικού γίνεται ομοιόμορφη, αφού το διάγραμμά μας κλίνει περισσότερο προς ευθεία. Η πρώτη μας αλλαγή έφερε



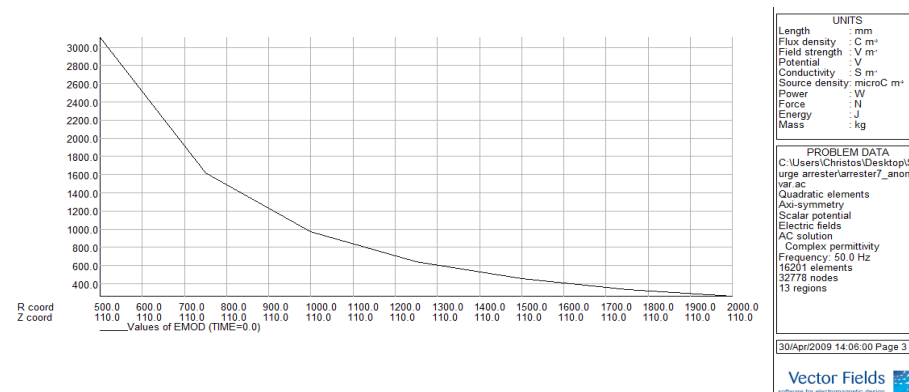
ελπιδοφόρα αποτελέσματα τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν στο μέλλον. Όμως οι αλλαγές αυτές στο βαρίστορ, μπορούν να επιφέρουν κατασκευαστικές και οικονομικές δυσκολίες με αποτέλεσμα η κατασκευαστική εταιρεία να μην έχει κερδοφόρα αποτελέσματα για την ανάλογη ομοιομορφία του δυναμικού.

Στο Σχήμα 6.52 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.

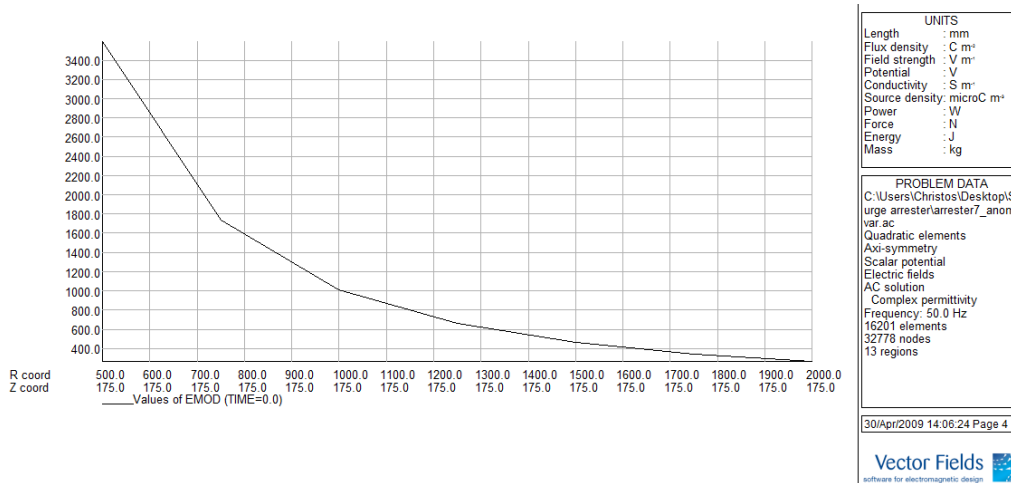


Σχήμα 6.52: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με ανομοιομορφο βαρίστορ

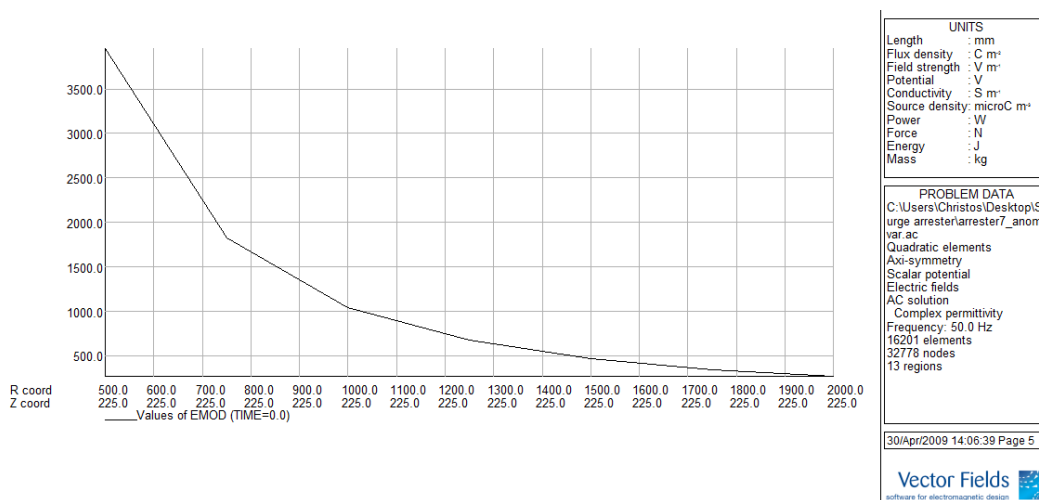
Στα σχήματα 6.53 – 6.58 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm, 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα.



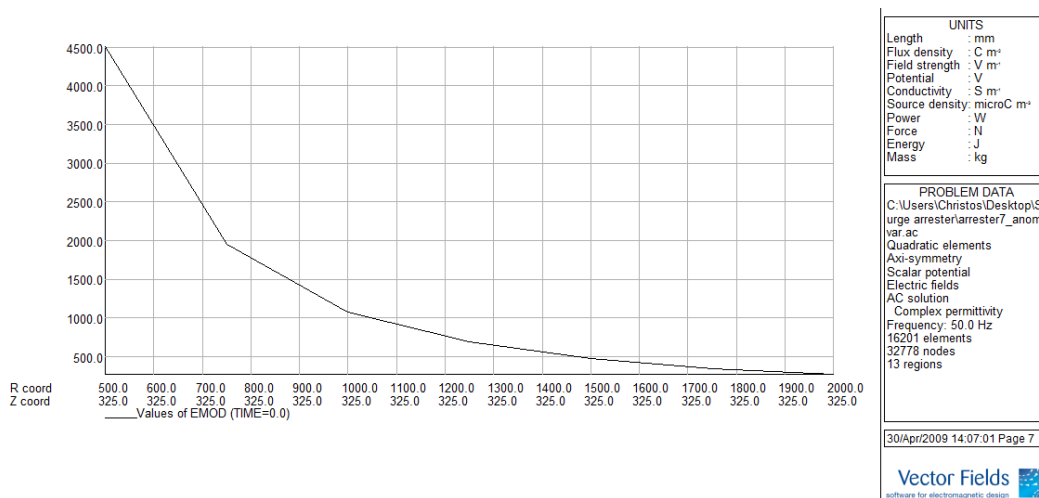
Σχήμα 6.53: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 11 cm



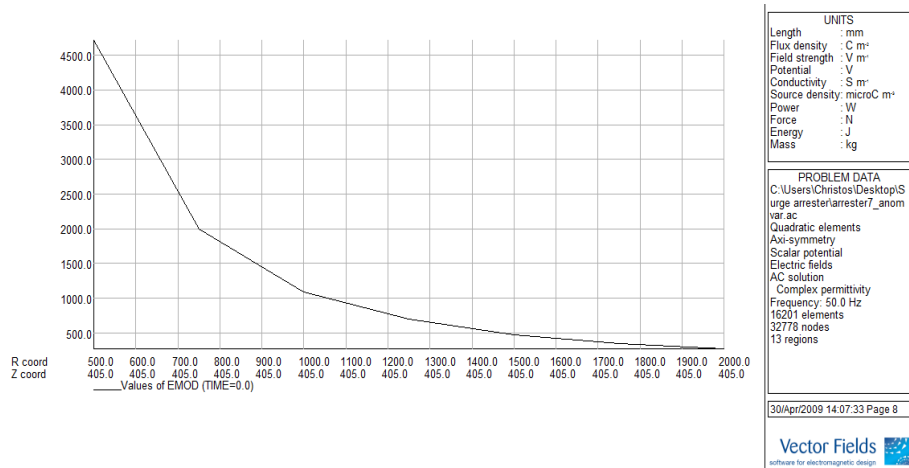
Σχήμα 6.54: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 17,5 cm



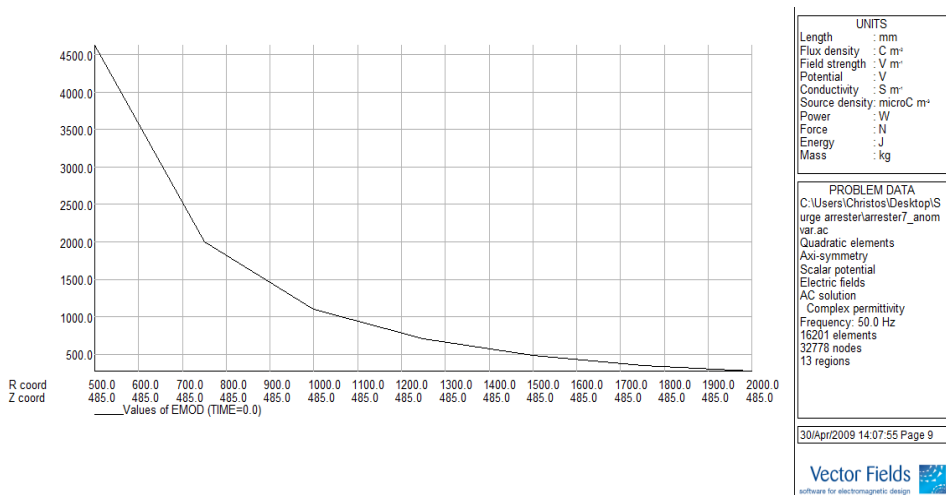
Σχήμα 6.55: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 22,5 cm



Σχήμα 6.56: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 32,5 cm

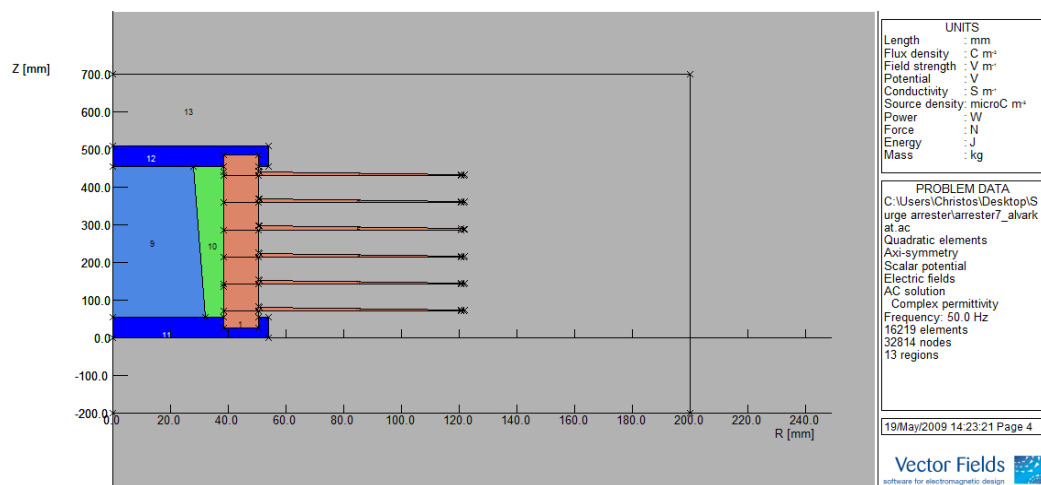


Σχήμα 6.57: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 40,5 cm



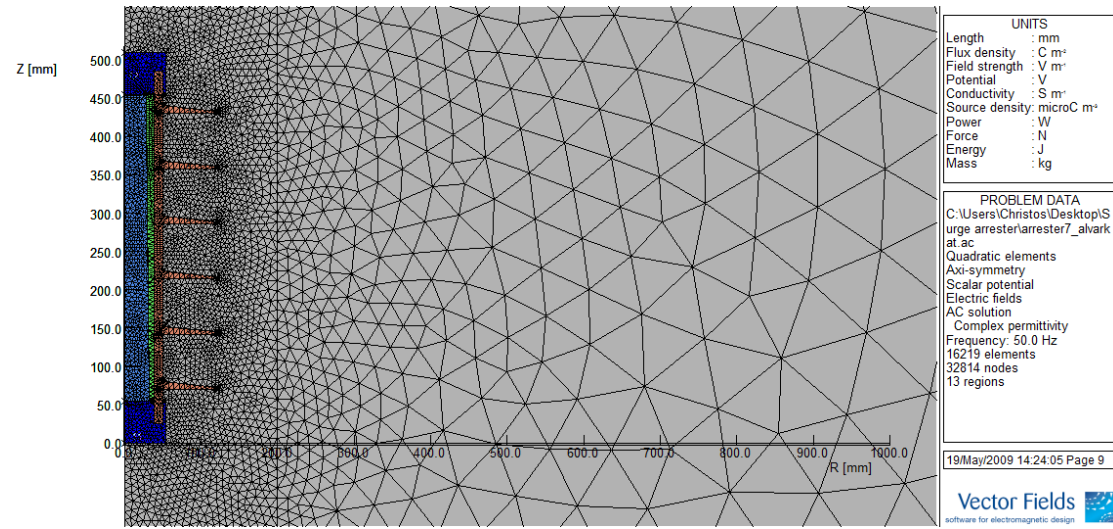
Σχήμα 6.58: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 48,5 cm

Β) Η δεύτερη διάταξη που σχεδιάσαμε για την μελέτη μας φαίνεται στο σχήμα 6.59.



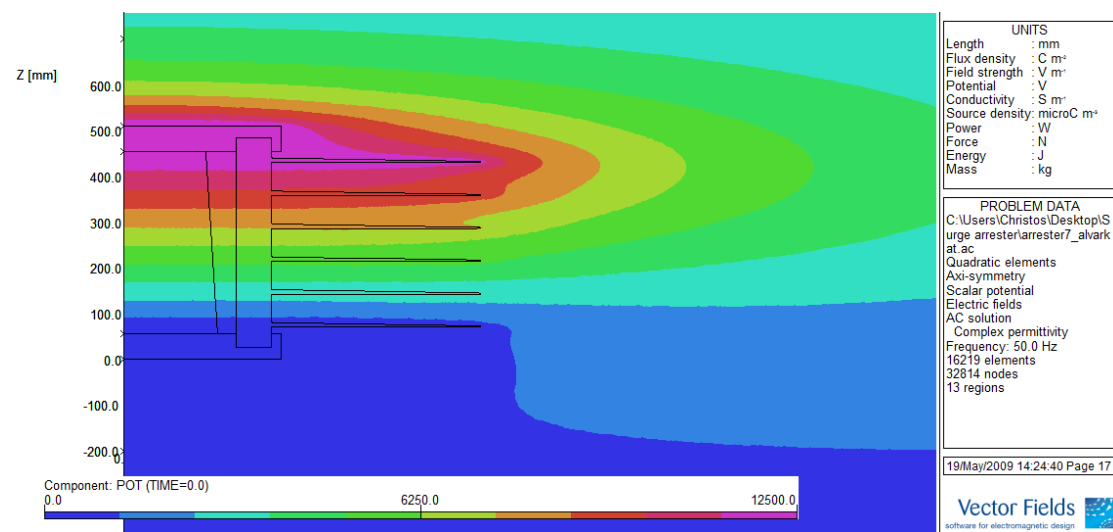
Σχήμα 6.59: Σχεδίαση αλεξικέρανου με ανομοιόμορφο βαρίστορ στο PC OPERA

Στο Σχήμα 6.60 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 16219 στοιχεία και 32814 κόμβοι.



Σχήμα 6.60: Το πλέγμα της διάταξης

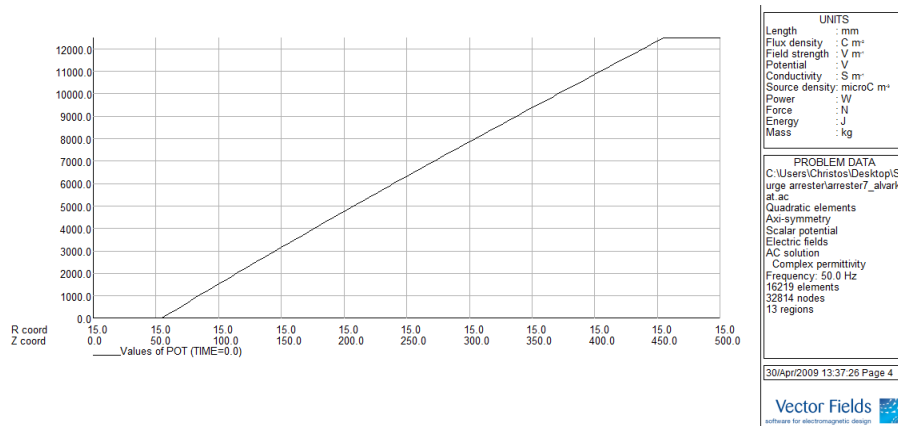
Στο Σχήμα 6.61 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραύνου και γύρω από αυτό.



Σχήμα 6.61: Κατανομή του δυναμικού σε αλεξικέραυνο με ανομοιόμορφο βαρίστορ

Όπως και στην προηγούμενη αλλαγή, βλέπουμε ότι η κατανομή του δυναμικού μέσα στο βαρίστορ είναι ίση και πιο ομοιόμορφη, όμως και πάλι τα τμήματα που βρίσκονται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης καταπονούνται λίγο

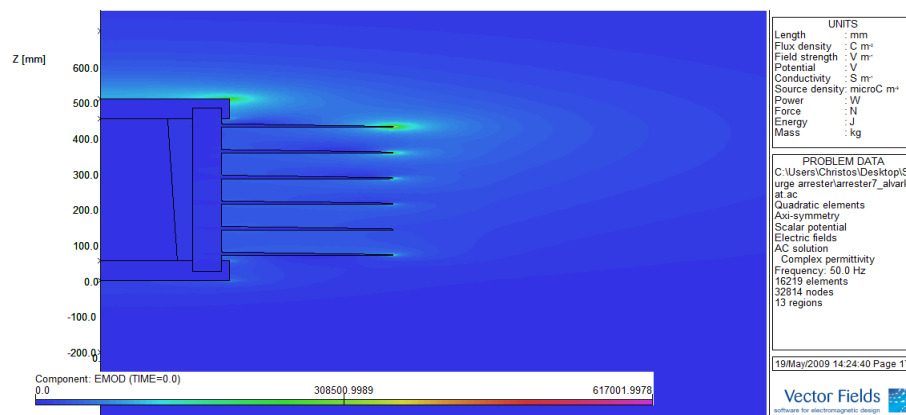
περισσότερο. Η πιο ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού που επιτυγχάνεται φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 6.62.



Σχήμα 6.62: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

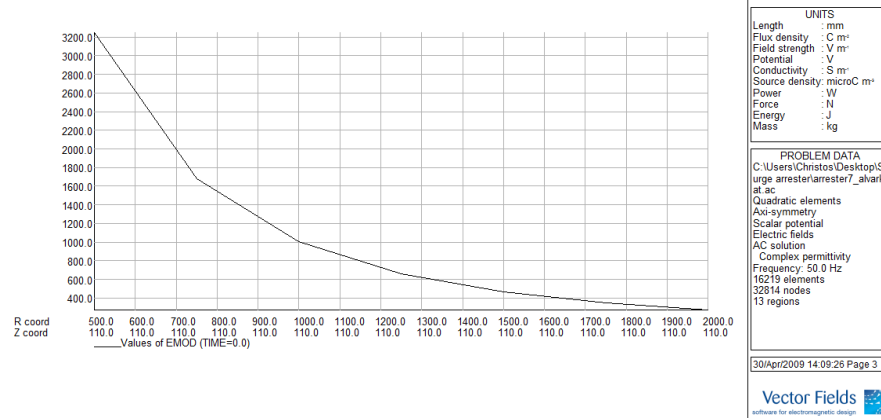
Βλέπουμε ότι με μια παρόμοια αλλαγή με την πρώτη, αλλά με τη μεγάλη πλευρά του βαρίστορ προς τα κάτω, φέρουμε παρόμοια αποτελέσματα σχετικά με την ομοιομορφία του δυναμικού και πάλι όμως δεν ξέρουμε αν οι οικονομικές και κατασκευαστικές δυσκολίες επισκιάζουν το πλεονέκτημα της ομοιομορφίας του δυναμικού. Αυτό είναι κάτι που, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω θα πρέπει να προβληματίσει τις κατασκευαστικές εταιρείες και με κατάλληλες έρευνες να καταλήξουν σε βέλτιστες λύσεις.

Στο Σχήμα 6.63 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.

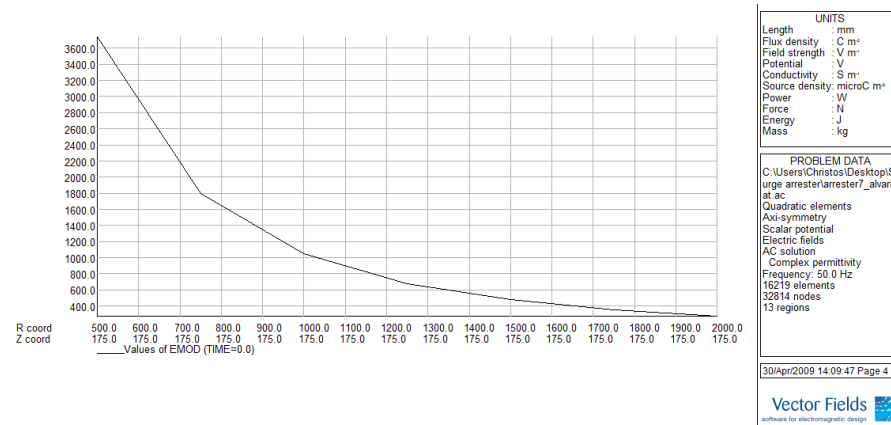


Σχήμα 6.63: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου, σε αλεξικέραυνο με ανομοιόμορφο βαρίστορ

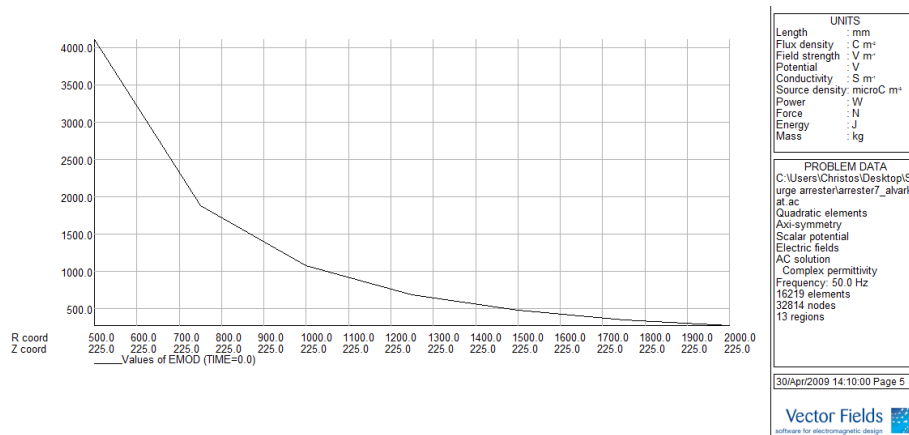
Στα σχήματα 6.64 – 6.69 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm, 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα.



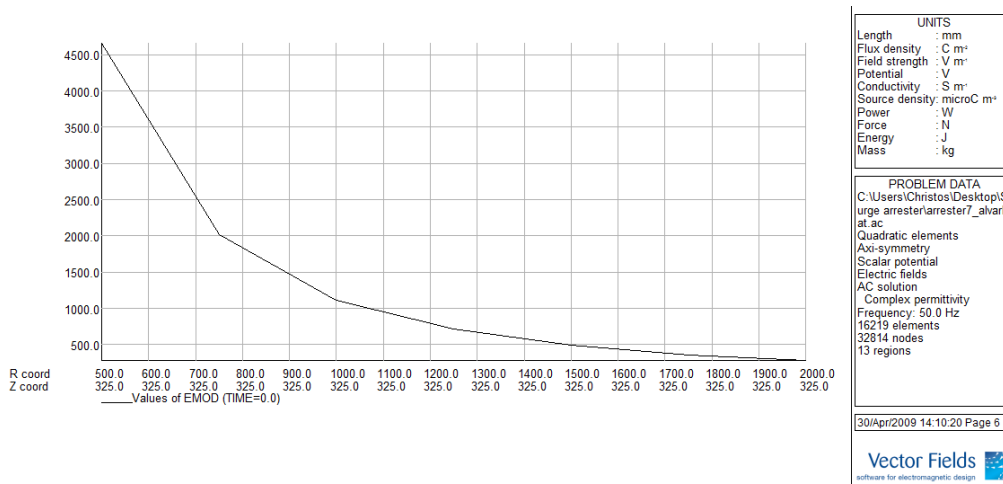
Σχήμα 6.64: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 11 cm



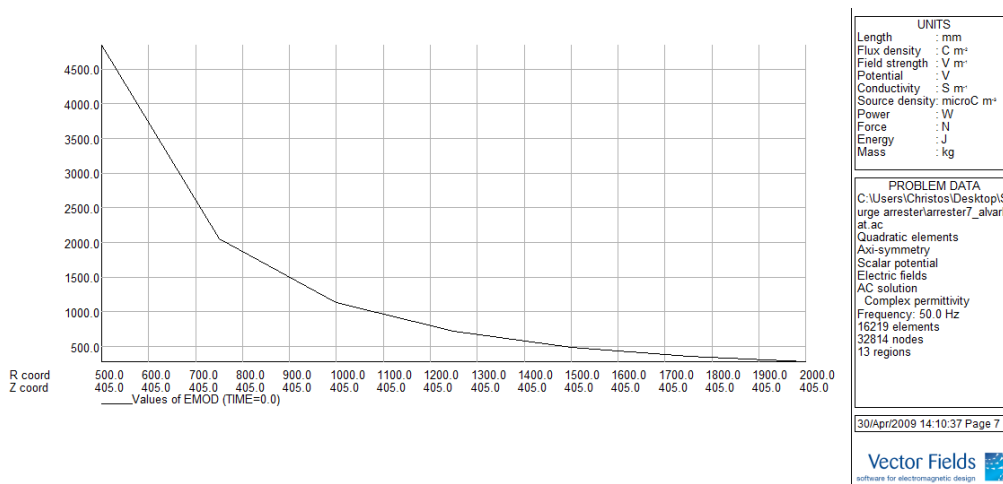
Σχήμα 6.65: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 17,5 cm



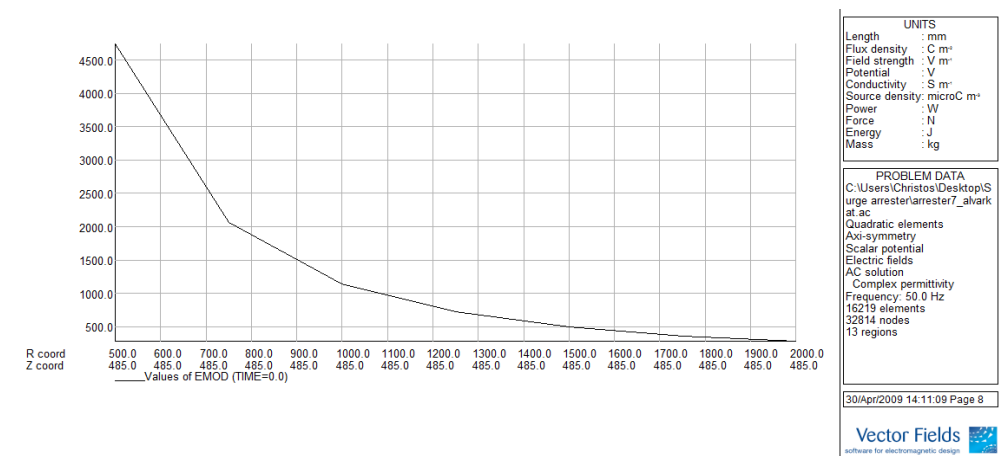
Σχήμα 6.66: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 22,5 cm



Σχήμα 6.67: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 32,5 cm

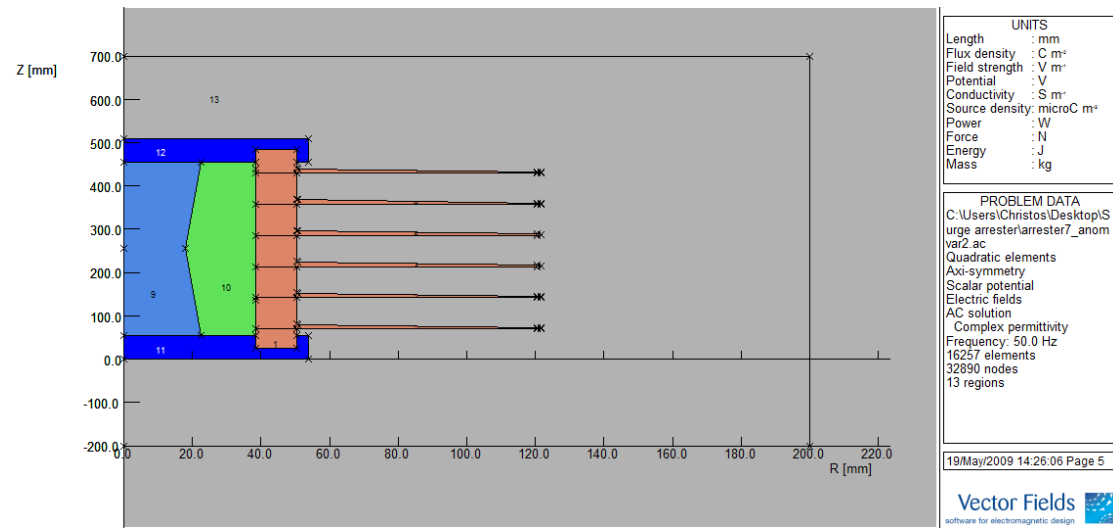


Σχήμα 6.68: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 40,5 cm



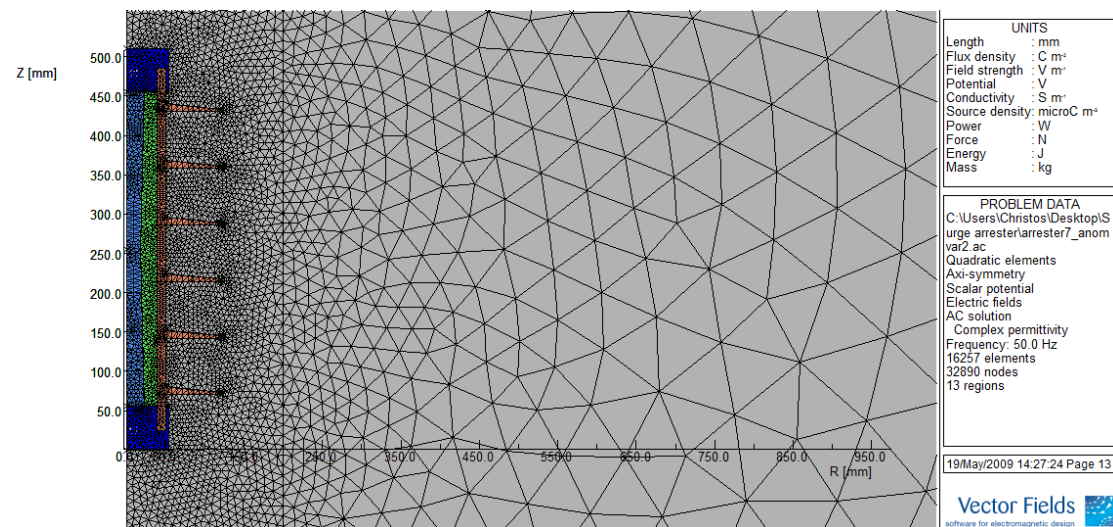
Σχήμα 6.69: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 48,5 cm

Γ) Η διάταξη που θα μελετηθεί παρακάτω, φαίνεται στο σχήμα 6.70.



Σχήμα 6.70: Σχεδίαση αλεξικέραννου με ανομοιόμορφο βαρίστορ στο PC OPERA

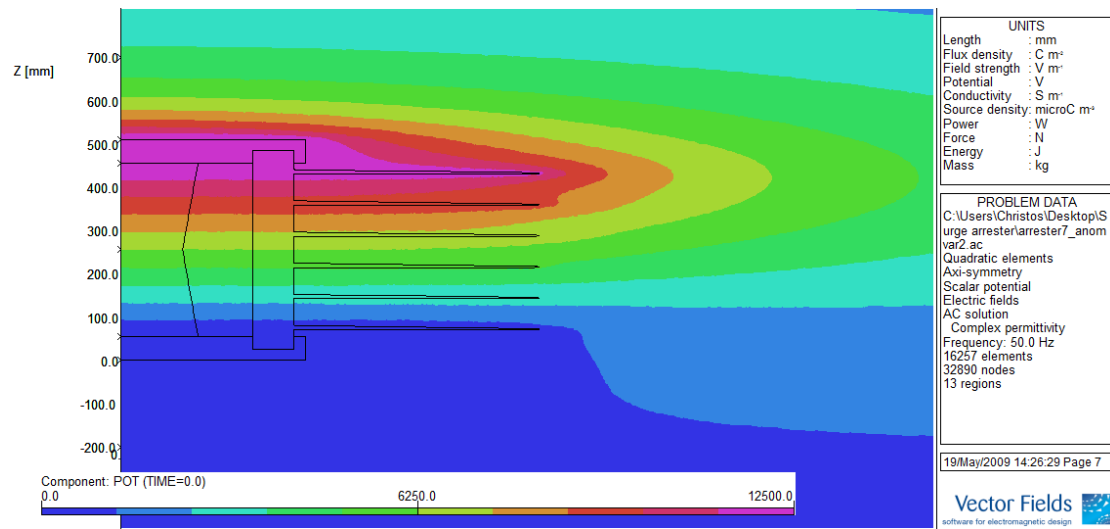
Στο Σχήμα 6.71 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 16257 στοιχεία και 32890 κόμβοι.



Σχήμα 6.71: Το πλέγμα της διάταξης

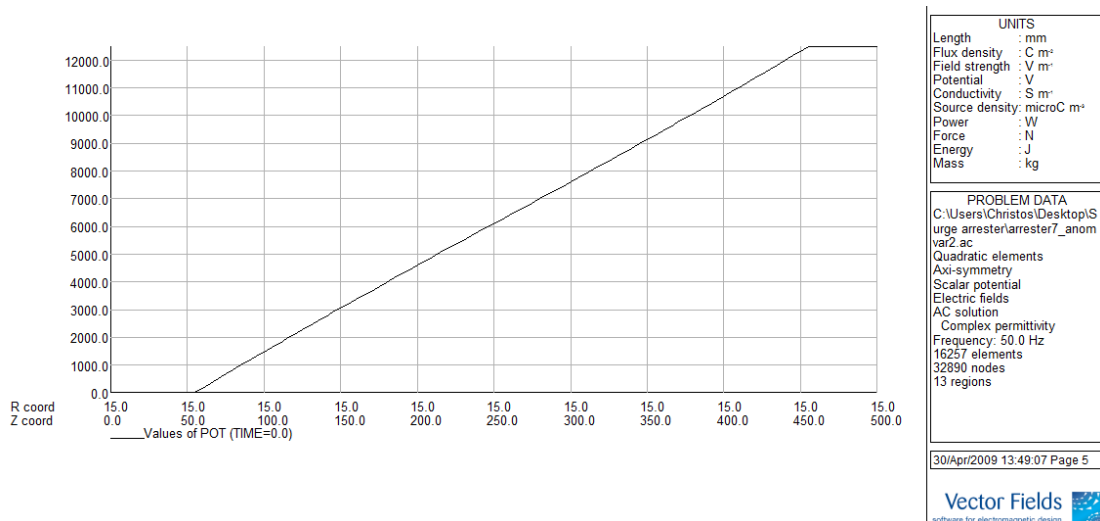
Στο Σχήμα 6.72 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικερανού και γύρω από αυτό.





Σχήμα 6.72: Κατανομή του δυναμικού σε αλεξικέραυνο με ανομοιόμορφο βαρίστορ

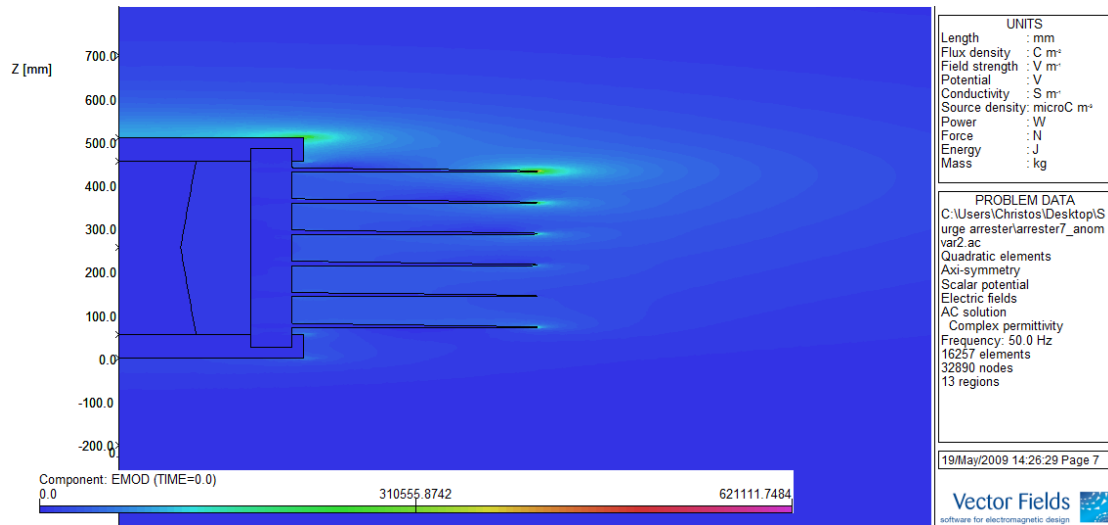
Βλέπουμε και εδώ, όπως και πριν, την ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού μέσα στο βαρίστορ. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 6.73.



Σχήμα 6.73: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

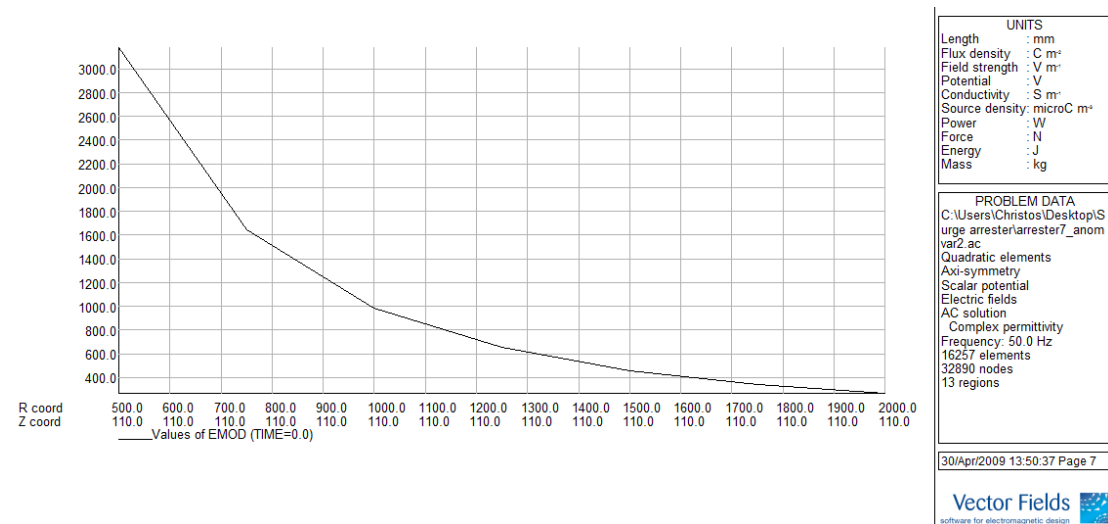
Φαίνεται ξεκάθαρα και εδώ, ότι το δυναμικό έχει μια ομοιομορφία και η κατανομή του είναι ευθεία. Για να πετύχουμε αυτή την ανομοιομορφία όμως, χρησιμοποιήσαμε ένα πιο πολύπλοκο σχήμα στο βαρίστορ και έμμεσα και στο υαλώδες υλικό, που κάνει την κατασκευή πιο δύσκολη και χρονοβόρα από τις προηγούμενες αλλαγές. Επίσης είναι δύσκολο να διατηρηθεί η αναλογία αυτού του σχήματος με αποτέλεσμα πολλές φορές να καταλήξουμε σε σφάλματα στην κατασκευή και ακολούθως στην κατανομή του δυναμικού.

Στο Σχήμα 6.74 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.

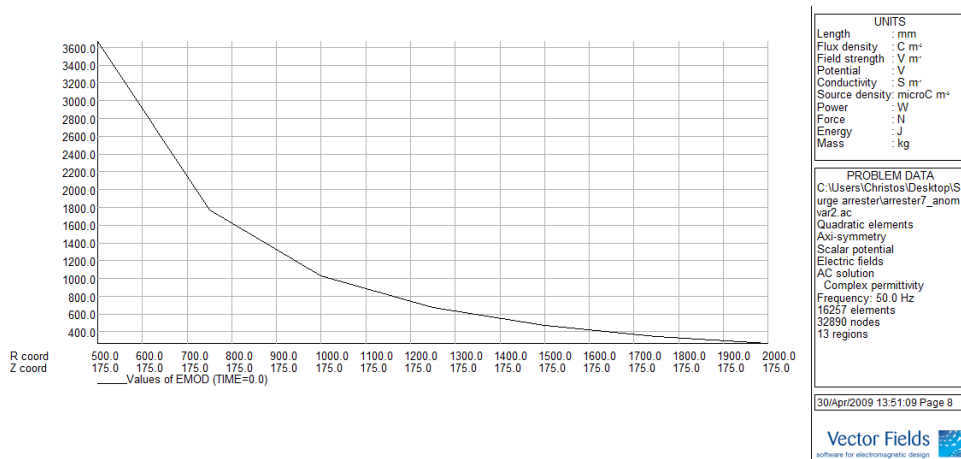


Σχήμα 6.74: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με ανομοιομορφο βαρίστορ

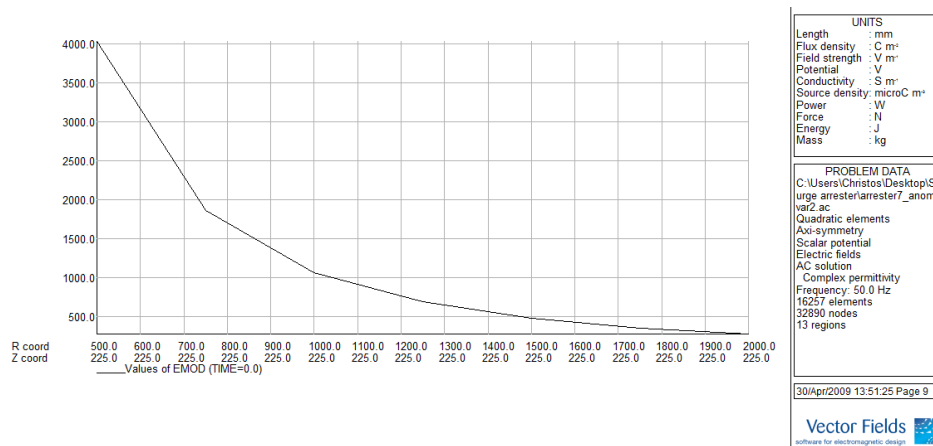
Στα σχήματα 6.75 – 6.80 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm , 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα.



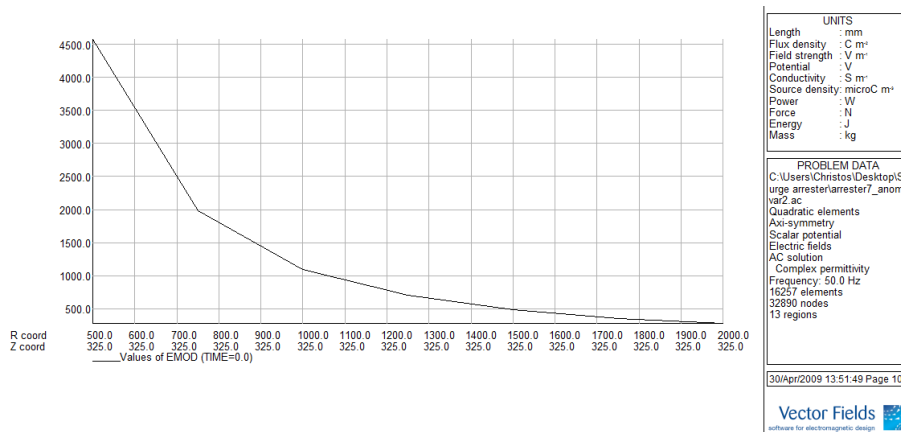
Σχήμα 6.75: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 11 cm



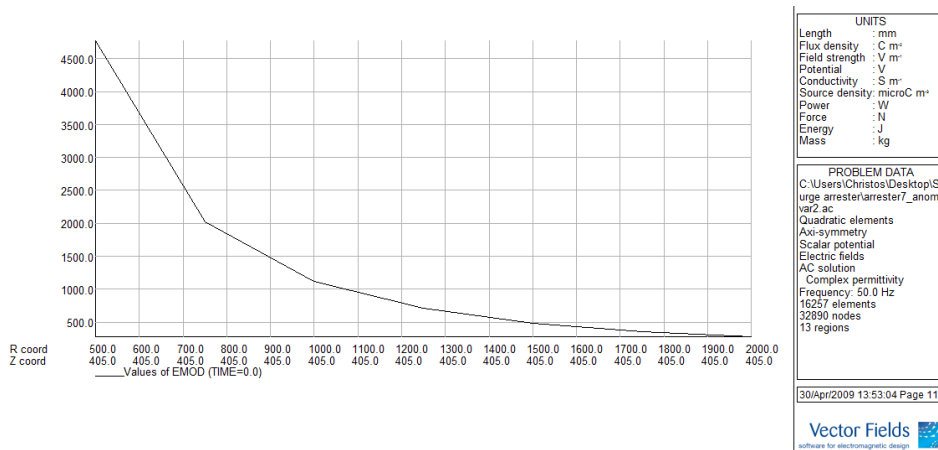
Σχήμα 6.76: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 17,5 cm



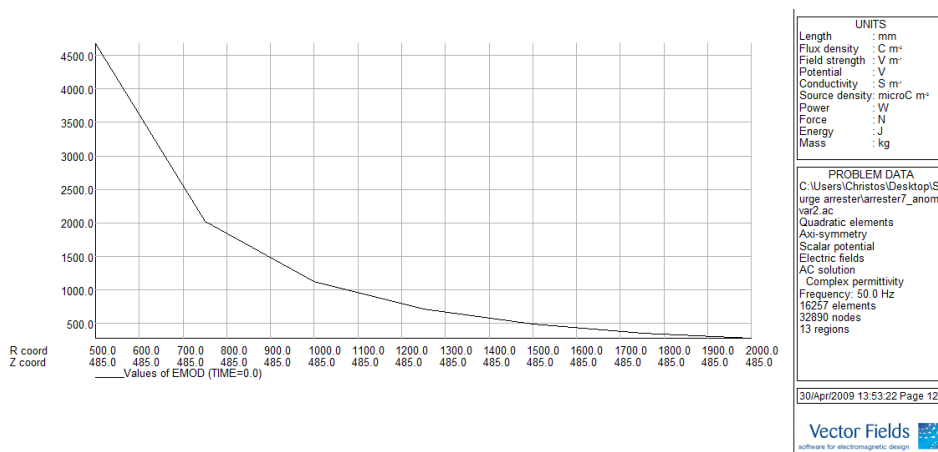
Σχήμα 6.77: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 22,5 cm



Σχήμα 6.78: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 32,5 cm

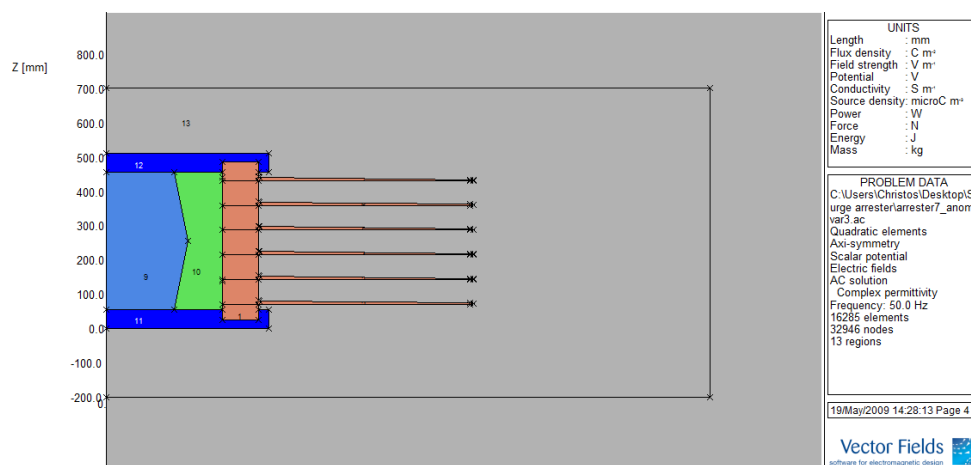


Σχήμα 6.79: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 40,5 cm



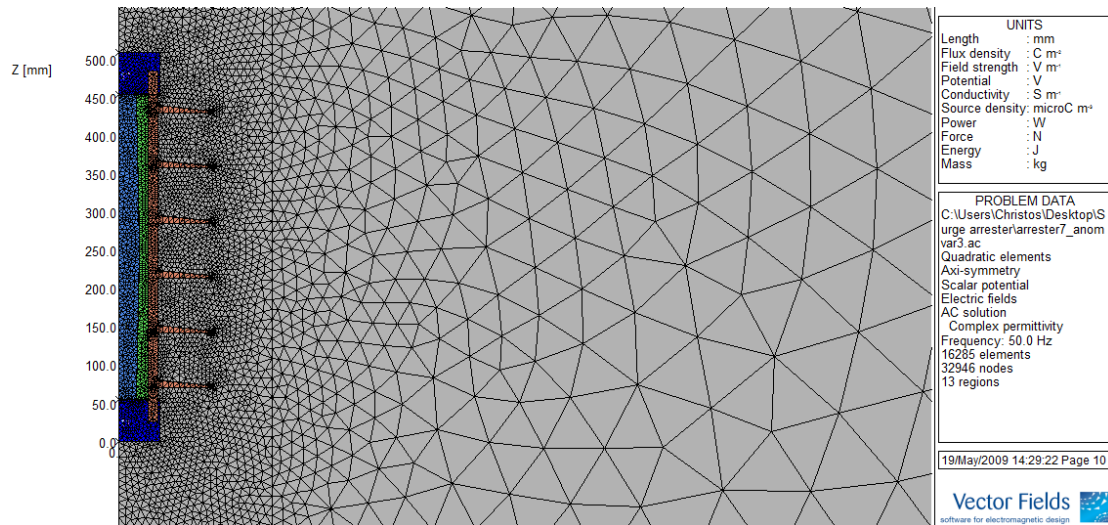
Σχήμα 6.80: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 48,5 cm

Δ) Η τέταρτη αλλαγή που πραγματοποιήσαμε στο βαρίστορ φαίνεται πιο κάτω στο σχήμα 6.81.



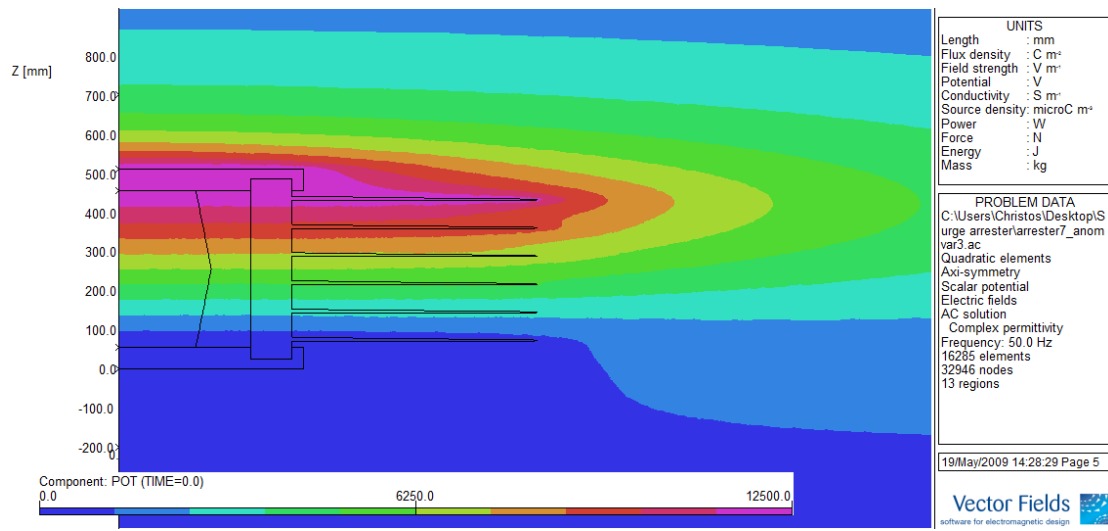
Σχήμα 6.81: Σχεδίαση αλεξικέρανου με ανομοιόμορφο βαρίστορ στο PC OPERA

Στο Σχήμα 6.82 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 16285 στοιχεία και 32946 κόμβοι.



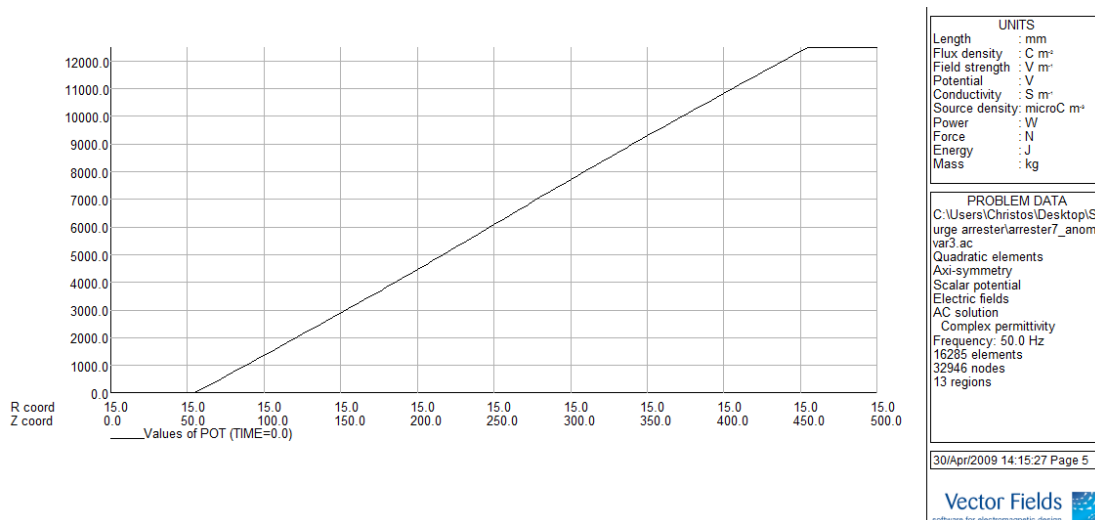
Σχήμα 6.82: Το πλέγμα της διάταξης

Στο Σχήμα 6.83 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραυνού και γύρω από αυτό.



Σχήμα 6.83: Κατανομή του δυναμικού σε αλεξικέραυνο με ανομοιόμορφο βαρίστορ

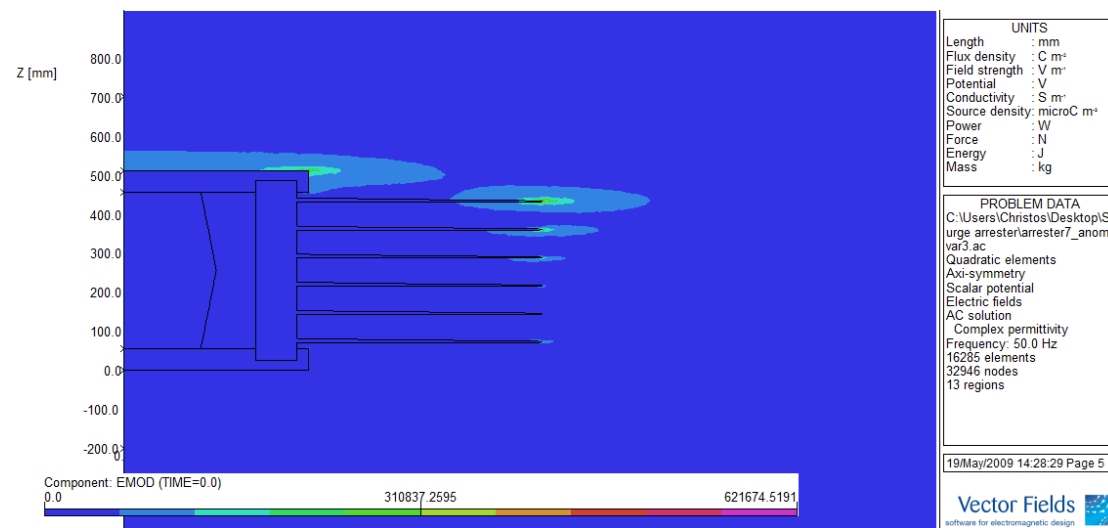
Έχουμε πετύχει και εδώ μια πιο ομοιόμορφη και ίση κατανομή, η οποία φαίνεται καλύτερα στο διάγραμμα του Σχήματος 6.84.



Σχήμα 6.84: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ

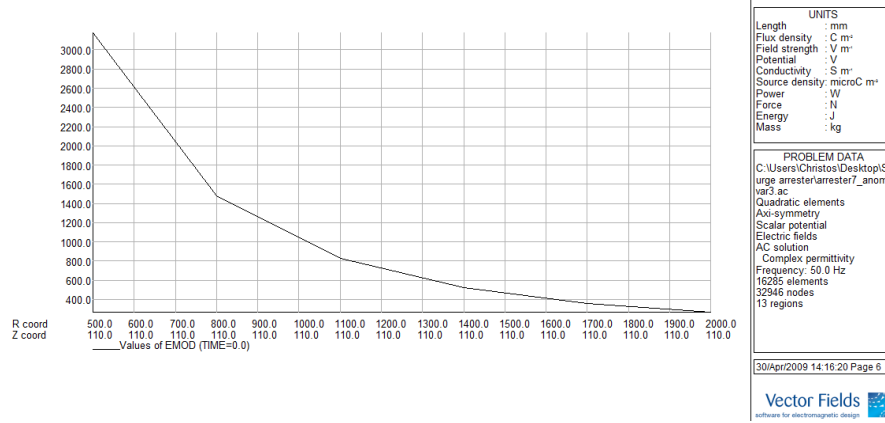
Όπως και πριν όμως, η δυσκολία και η πολυπλοκότητα αυτού του σχήματος μπορεί να σταθεί εμπόδιο στην υλοποίησή του. Με τις κατάλληλες δοκιμές και πειράματα μπορούμε με σιγουρία να καταλήξουμε στο πιο απλό και εύκολο σχήμα, που δημιουργεί την καλύτερη και αποτελεσματικότερη ομοιομορφία.

Στο Σχήμα 6.85 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο.

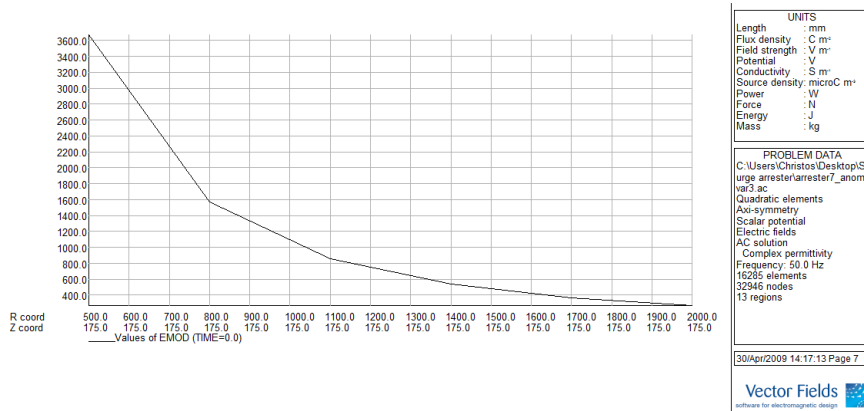


Σχήμα 6.85: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε αλεξικέραυνο με ανομοιομορφο βαρίστορ

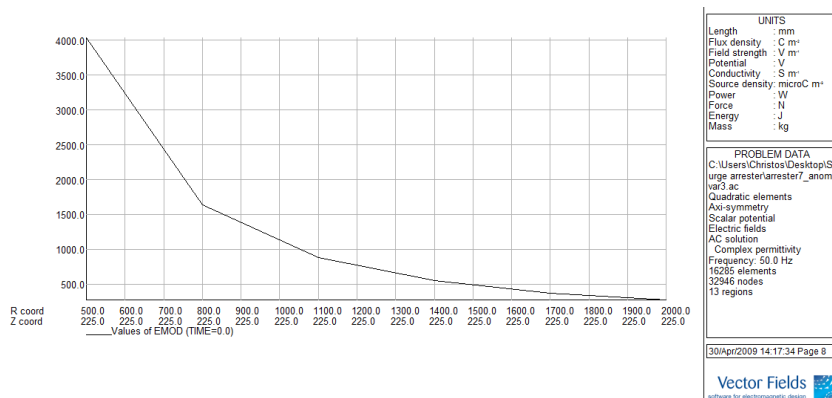
Στα σχήματα 6.86 – 6.91 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για τα συγκεκριμένα ύψη 11 cm , 17,5 cm , 22,5 cm , 32,5 cm, 40,5 cm και 48,5 cm, αντίστοιχα.



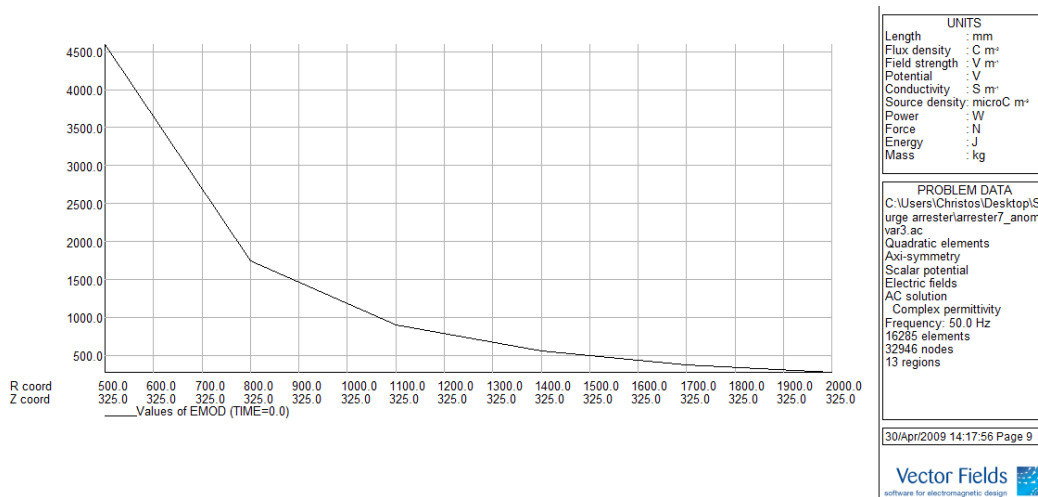
Σχήμα 6.86: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 11 cm



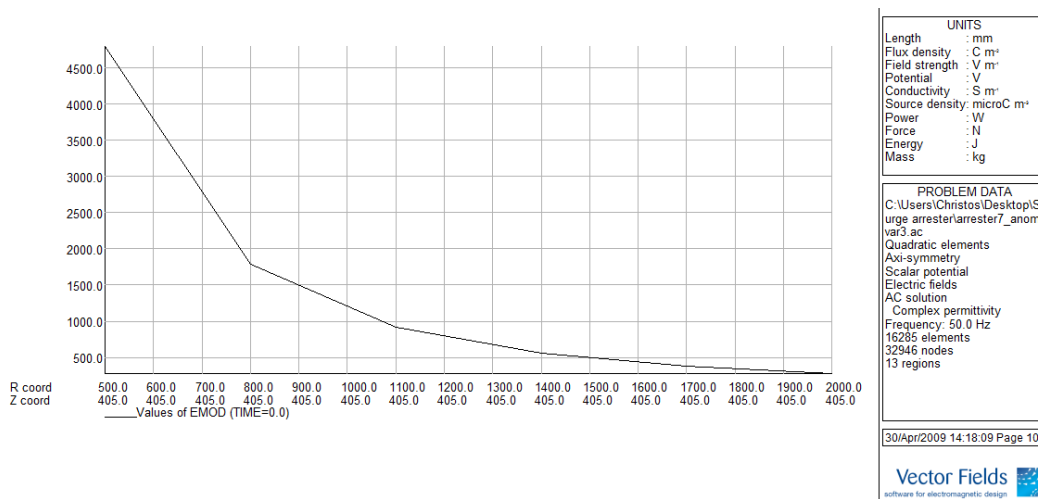
Σχήμα 6.87: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 17,5 cm



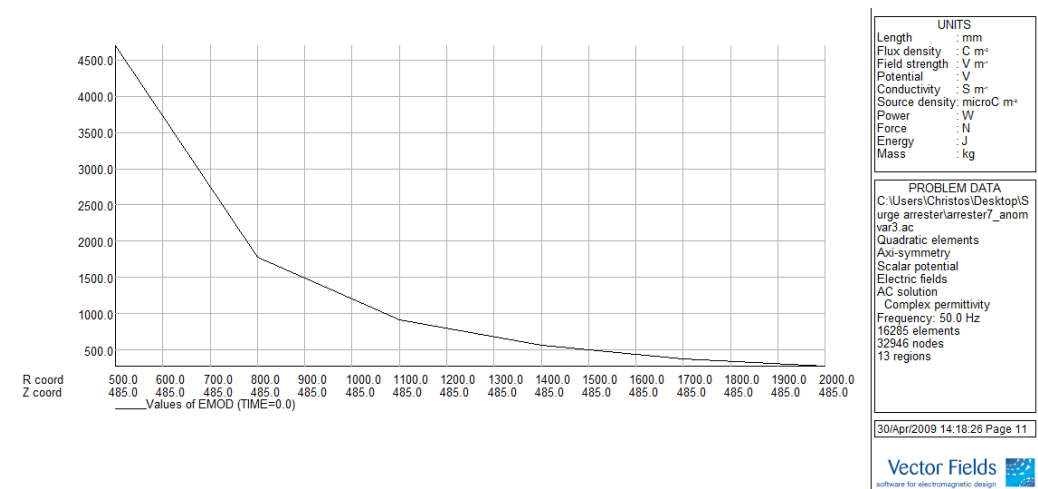
Σχήμα 6.88: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 22,5 cm



Σχήμα 6.89: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 32,5 cm



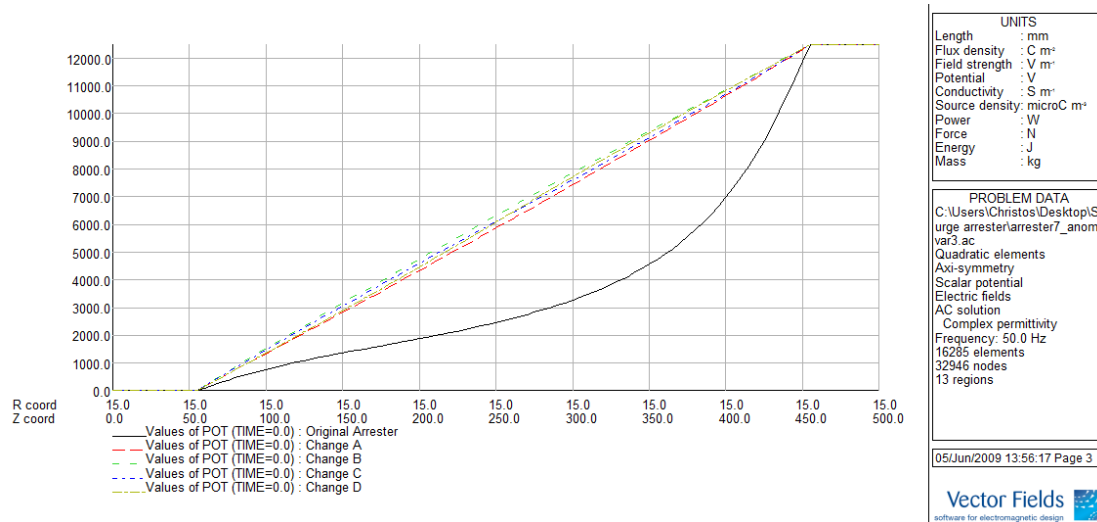
Σχήμα 6.90: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 40,5 cm



Σχήμα 6.91: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέρανο για ύψος 48,5 cm



Στο Σχήμα 6.92 παρουσιάζεται η κατανομή του δυναμικού για το δοκίμιο και για τα τροποποιημένα αλεξικέραυνα, όπου φαίνεται ότι η κατανομή του δυναμικού γίνεται πιο ομοιόμορφη (γραμμική). Βέβαια, πρέπει να ελεγχθούν και άλλες παράμετροι, όπως το κόστος και η μηχανική αντοχή.



Σχήμα 6.92: Σύγκριση κατανομής δυναμικού μεταξύ του δοκιμίου και των τροποποιημένων αλεξικεραύνων

## 6.5 Συμπεράσματα – Επέκταση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μία πρώτη προσπάθεια για την πεδιακή ανάλυση ενός αλεξικεραύνου μέσης τάσης. Συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές με αυτές από τις προσομοιώσεις ένα σφάλμα της τάξης του 30%. Το σφάλμα αυτό πιθανόν να οφείλεται στους παρακάτω λόγους :

- Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο εργαστήριο
- Αβεβαιότητα μετρήσεων και πειραματικών οργάνων
- Μη λεπτομερές σχεδίαση στο PC OPERA

Αποδεχόμενοι το παραπάνω μέσο σφάλμα ανεκτό, θεωρούμε ότι και οι καμπύλες της κατανομής δυναμικού που προκύπτουν από προσομοίωση είναι αξιόπιστες (τουλάχιστον ως προς τη μορφή).

Η κατανομή του δυναμικού δεν είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του βαρίστορ, με αποτέλεσμα τα τμήματα που είναι κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης να καταπονούνται περισσότερο. Για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού, έχουν εφαρμοσθεί αλλά και αναζητούνται νέοι τρόποι για την ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας δοκιμάστηκαν νέοι σχεδιασμοί στη μη γραμμική αντίσταση του αλεξικέραυτου, και δείχθηκε ότι οδηγούν σε ομοιόμορφη (γραμμική) κατανομή του δυναμικού. Οι αλλαγές αυτές, θα μπορούσαν να ελεγχθούν και στην πράξη από εταιρίες κατασκευής αλεξικέραυνων, όπου θα καταδειχθεί η ορθότητα των θεωρητικών αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, λαμβάνοντας υπόψη και παράγοντες, όπως το κόστος και η μηχανική αντοχή.

### Συμπεράσματα, Παρατηρήσεις και Επόμενη Μέρα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορες θέσεις γύρω από ένα καθοδικό αλεξικέραυνο μέσης τάσης, και τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από προσομοιώσεις με χρήση του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA. Παρατηρήθηκε ότι, οι πειραματικές μετρήσεις (συνυπολογίζοντας το ηλεκτρικό πεδίο το οφειλόμενο στον μετασχηματιστή) είχαν μια απόκλιση από τις τιμές της προσομοίωσης, παρουσιάζοντας έτσι ένα σφάλμα τάξης έως και 30%. Οι αιτίες που πιθανόν να συμβάλλουν στη διαφορά μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι:

- Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από τον περιβάλλοντα χώρο
- Ανακρίβεια κατά τον σχεδιασμό του αλεξικέραυνου στο PC OPERA
- Σφάλματα και ανακρίβειες στα όργανα και στον μετασχηματιστή που χρησιμοποιήσαμε κατά την εκτέλεση των μετρήσεων

Δοκιμάστηκαν, επίσης, διάφορες αλλαγές στο σχεδιασμό του αλεξικέραυνου και συγκεκριμένα στη μη γραμμική αντίσταση, ούτως ώστε να πετύχουμε μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της τάσης. Μελετήθηκε, επίσης, η επιρροή που έχει στο ηλεκτρικό πεδίο και την κατανομή του δυναμικού η ρύπανση στην εξωτερική μόνωση του αλεξικεραύνου και σπασίματα στα πτερύγια της μόνωσης.

Τελειώνοντας, πρέπει να αναφερθεί ότι οι αλλαγές αυτές που βελτίωσαν την κατανομή του δυναμικού, παρόλο που φαίνεται να βελτιώνουν την κατανομή του δυναμικού στο εσωτερικό του αλεξικεραύνου, χρειάζεται περαιτέρω τεχνοοικονομική μελέτη, σχετικά με το πόσο είναι εφικτή και πρακτικά εφαρμόσιμη μια τέτοια αλλαγή.

Επόμενο βήμα είναι η δοκιμή και άλλων σχεδιαστικών αλλαγών, όχι μόνο στη μορφή του βαρίστορ, αλλά και στη γεωμετρία του αλεξικεραύνου και στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Επίσης, η προσομοίωση με την τρισδιάστατη έκδοση του PC Opera ενδεχομένως να οδηγήσει σε ακριβέστερα αποτελέσματα.

## Παράρτημα Α

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΔΙΟΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (PROBE)

Στο παρόν Παράρτημα περιγράφεται περιληπτικά ο τρόπος λειτουργίας του πεδιομέτρου PMM 8053A, σε συνδυασμό με τον αισθητήρα (probe) PMM EHP 50B (Σχήματα Α.1 – Α.3).



Σχήμα Α.1: Πεδιόμετρο.



Σχήμα Α.2: Αισθητήρας (probe).



Σχήμα Α.3: Σύνδεση πεδιομέτρου με την οπτική ίνα.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου και του αισθητήρα παρουσιάζονται στους Πίνακες Α.1 και Α.2 αντίστοιχα.

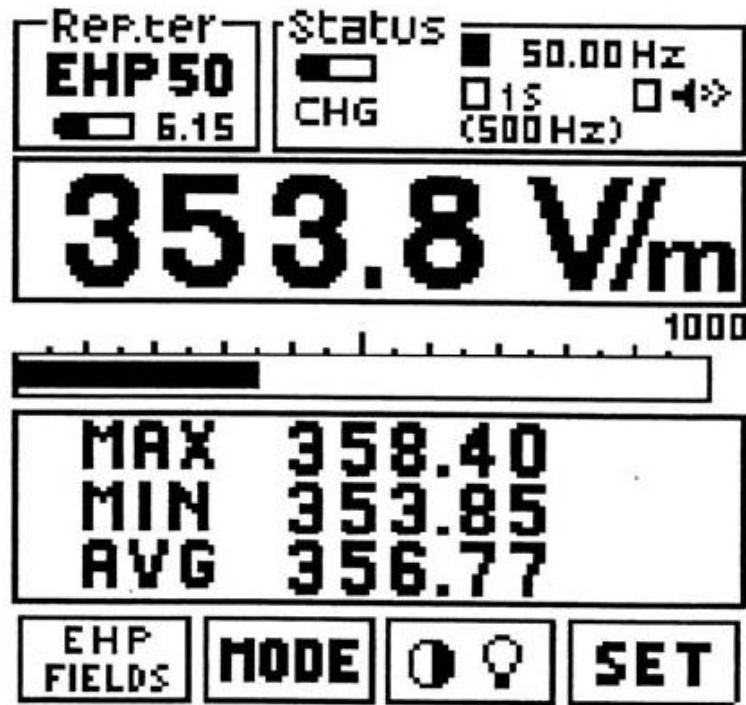
Πίνακας Α.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου PMM 8053A.

Εύρος συχνότητας	5Hz-40GHz
Μονάδες μέτρησης	V/m, kV/m, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , $\text{mW}/\text{cm}^2$ , $\text{W}/\text{m}^2$ , A/m, nT, $\mu\text{T}$ , mT
Μέτρηση πεδίου	X, Y, Z σε απόλυτες τιμές, επί τοις εκατό και συνολικό
Χρόνος	Εσωτερικό ρολόι
Εσωτερική μνήμη	Έως 32700 μετρήσεις
Έξοδος	Οθόνη LCD 72×72mm, RS232
Είσοδος	Απ' ευθείας ή μέσω οπτικής ίνας
Εσωτερική μπαταρία	Επαναφορτιζόμενες NiMH μπαταρίες (5·1,2V)
Χρόνος λειτουργίας	24 ώρες
Χρόνος επαναφόρτισης	< 4 ώρες
Τροφοδοσία	DC, 10-15V, $I \approx 500\text{mA}$
Θερμοκρασία λειτουργίας	-10°C έως 40°C
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-20°C έως 70°C
Μέγεθος	108×240×50mm
Βάρος	1,07kg

Πίνακας Α.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα PMM EHP-50B.

	Ηλεκτρικό πεδίο	Μαγνητικό πεδίο
Εύρος συχνότητας	5Hz-100kHz	
Επίπεδο κλίμακας	0.01V/m-100kV/m	1nT-10mT
Υπερφόρτιση	200kV/m (@50Hz)	20mT (@50Hz)
Ανάλυση	0.001V/m	1nT
Ευαισθησία	0.01V/m	1nT
Απόλυτο σφάλμα	± 0.5dB (50Hz, 1 kV/m)	± 0.5dB (50Hz, 0.1mT)
Ομαλότητα (40Hz-10kHz)	± 0,5dB	± 0,5dB
Γραμμικότητα (50Hz)	± 0,2dB (1V/m-100kV/m)	± 0,2dB (200nT-10mT)
SPAN	100Hz, 200Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 10kHz, 100kHz	
Συχνότητα έναρξης	1,2% του SPAN	
Συχνότητα λήξης	ίση με του SPAN	
Απόρριψη ηλ. πεδίου	-	>20dB
Απόρριψη μαγν. πεδίου	>20dB	-
Βαθμονόμηση	Εσωτερική	
Σφάλμα θερμοκρασίας	0.05dB/ °C	
Διαστάσεις	96×96×115mm	
Βάρος	525g	
Εσωτερική μπαταρία	Επαναφορτιζόμενες NiMH μπαταρίες (5·1,2V)	
Χρόνος λειτουργίας	>10 ώρες>150 ώρες σε χαμηλής ισχύος λειτουργία	
Χρόνος επαναφόρτισης	< 4 ώρες	
Εξωτερική DC τροφοδότηση	DC, 10-15V, I≈200mA	
Σύνδεση οπτικής ίνας	> 80m	
Ενημέρωση λογισμικού	Μέσω σειριακής θύρας	
Αυτόματος έλεγχος	Αυτόματα όταν ανάβει	
Θερμοκρασία λειτουργίας	-10°C έως 40°C	
Θερμοκρασία αποθήκευσης	-20°C έως 70°C	

Ο αισθητήρας EHP-50B συνδέεται στο πεδιόμετρο 8053A με τη βοήθεια οπτικής ίνας, γεγονός το οποίο επιτρέπει το χειρισμό του πεδιομέτρου εκτός του πεδίου δοκιμών. Μετά τη σύνδεση της οπτικής ίνας είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση του αισθητήρα, ώστε να αναγνωριστεί ο τύπος του από το πεδιόμετρο. Κατά τη λειτουργία του πεδιομέτρου μία τυπική οθόνη είναι αυτή του Σχήματος Α.4.



Σχήμα Α.4: Οθόνη του πεδιομέτρου κατά τη λειτουργία του.

Κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου υπάρχουν δύο κλίμακες: 1kV/m και 100kV/m, ενώ κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου οι κλίμακες είναι: 100μΤ και 10mT.

Το πεδιόμετρο έχει τις εξής δυνατότητες απεικόνισης των αποτελεσμάτων:

1. ABS ή %: Παρουσιάζονται οι τρεις ανυσματικές συνιστώσες του μετρούμενου πεδίου σε απόλυτες και ποσοστιαίες τιμές.
2. MIN-MAX/AVG, MIN-MAX/RMS: Παρουσιάζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές εκφρασμένες ως αριθμητικοί μεσοί όροι (AVG) ή ως τετραγωνικοί μεσοί όροι (RMS). Οι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού για τους αριθμητικούς και τετραγωνικούς μέσους όρους δίνονται από τις σχέσεις:

$$AVG = \frac{1}{T} \int_0^T |E_{(t)}| dt \quad (A.1)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |E_{(t)}|^2 dt} \quad (A.2)$$

3. SPECT MODE: Παρουσιάζεται η ανάλυση Fourier (FFT) της κυματομορφής της έντασης του πεδίου.

## Βιβλιογραφία

- [1] Μιχαήλ Γ. Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Αθήνα 2005.
- [2] Τεχνικό Άρθρο Νόησης (Κέντρο Διάδοσης Επιστημών και Μουσείο Τεχνολογίας), Αθήνα 2007.
- [3] Earle R. Williams, “The Electrification of Thunderforms”, USA, November 2008.
- [4] Γιώργος Μαλλιώτης, «Μετασχηματιστές», Μετάδοση Ισχύος, Αθήνα 2007.
- [5] Π.Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Αθήνα 1994
- [6] Ι.Α. Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Αθήνα 1989.
- [7] Ε.Λεκατσάς, «Θέματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΔΕΗ, Αθήνα 1985.
- [8] Κ.Α.Στασινόπουλος, «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Α' Έκδοση, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1996.
- [9] Ι.Α.Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Εκδ.Συμεών.
- [10] Μιχ.Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Εκδ. Οικονομικών, Αθήνα 2005.
- [11] Οδηγία Διανομής Νο 23 «Προστασία Δικτύων ΜΤ από ατμοσφαιρικές υπερτάσεις».ΔΕΗ, Γραφείο βοηθού Γενικού Διευθυντή Διανομής, Εκδ.01/06/1988.
- [12] Α.Παπαθανασίου, «Ηλεκτρικά Δίκτυα, Τόμος Α: Εναέρια Δίκτυα», Σημ. για τη Σιβιτανίδειο Σχολή, Αθήνα.
- [13] ABB Buyer's Guide, “High Voltage Surge Arresters”, Edition 5.1, 2004-2007.
- [14] V. Hinrichsen, “Metal-Oxide Surge Arresters”, Siemens, 1<sup>st</sup> Edition, 2001.
- [15] IEC 60099-4, “Surge Arresters: Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”, second edition, 2004-2005.
- [16] Διαφημιστικό έντυπο της Tyco Electronics.
- [17] R.E. James, Q.Su, “Condition Assessment of high Voltage Insulation in Power System Equipment”, IET Power and Energy Series 53, 1<sup>st</sup> Edition 2008.
- [18] Annex L (informative), «Guide for the determination of the voltage distribution along metal-oxide surge arresters», IEC:2004 60099-4, “Metal-oxide surge arrester without gaps for a.c systems”.
- [19] Mohammad R.Meshkaddini,Shahid Abbaspour(PWUT) University of Technology,Tehran,Iran, «Study of the Electric Field Intensity in Bushing Integrated



ZnO Arresters By Means of Finite Element Method», Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006 Boston.

[20] M.R.Meshkatoddini, “Investigation of the Influence of Different Parameters on Maximum Electric Field Intensity in a Distribution Surge Arrester”, Paper 142, ISEI-2006 (International Symposium on Electrical Insulations), June (2006), Toronto, Canada.

[21] B. Vahidi, R. Shariati Nassab, J. Sh. Moghani, S. H. Hosseinian, Amirkabir University of Technology Tehran-Iran, Dept. of Electrical Engineering, «Electric Field and Voltage Distribution on ZnO Surge Arrester»,IEEE 2004

[22] U. Kumar, and V. Mogaveera, “Voltage distribution studies on Zno arresters”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 140, No. 4, pp 457-462, July 2002.

[23] S.J.Han ,School of Science, Xidian University, Xi’an, S.Q.Gu, J.L.He, J.S.Yuan Department of Electrical Engineering, Tsinghua University , Beijing , China, «Calculation of the potential Distribution of High Voltage Metal Oxide Arrester by Using an Improved Semi – Analytic Finite Element Method», IEEE Transactions on magnetic, Vol.41,No.5, May 2005.

[24] V. M. Machado, “Axisymmetric eddy current problems using a special hybrid FE/BE method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3, pp.1143–1146, May 2003.

[25] M. V. K. Chari, “Elecromagnetic field computation of open boundary problems by a semi-analytic approach,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 23, no. 5, pp. 3566–3567, Nov. 1987.

[26] Imre Sebestyen, “Electric field calculation for HV insulators using domain-decomposition method”, IEEE Transactions on magnetics, vol. 38, no. 2., March 2002.

[27] Εγχειρίδιο του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA

[28] 3. S.Chapra, «Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων», Εκδ. Φούντας.

[29] PMM 8053A: System for the electromagnetic fields measurement, User’s Manual, PMM 2004.