



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

Σπανιάς Α. Χρυσοβαλάντης

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέποντες: Δρ. Βασιλική Θ. Κονταργύρη
Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2010



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

Σπανιάς Α. Χρυσοβαλάντης

Εγκρίθηκε από την πενταμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουλίου 2010

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

.....
Φ. Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....
Σπανιάς Χ. Χρυσοβαλάντης
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Σπανιάς Χ. Χρυσοβαλάντης, 2010.
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 τηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον 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.

Στην Οικογένεια μου

Πρόλογος

Τα καθοδικά αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται ευρέως για την προστασία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και του εξοπλισμού τους, από τις υπερτάσεις (εσωτερικές και εξωτερικές). Η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς το τμήμα του αλεξικεραύνου που βρίσκεται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης καταπονείται περισσότερο. Η μοντελοποίηση του καθοδικού αλεξικεραύνου μέσω κατάλληλου υπολογιστικού πακέτου και ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής του δυναμικού μπορεί να συνεισφέρει στον αποτελεσματικότερο και οικονομικότερο σχεδιασμό των καθοδικών αλεξικεραύνων. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ηλεκτρικό πεδίο και την κατανομή του δυναμικού σε ένα αλεξικέραυνο είναι η γεωμετρία των μερών που απαρτίζουν ένα αλεξικέραυνο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των υλικών.

Αναλυτικά:

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι εσωτερικές και οι εξωτερικές υπερτάσεις οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εκτενής αναφορά γίνεται στο φαινόμενο του κεραυνού.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μια παρουσίαση του καθοδικού αλεξικεραύνου ως μέσο προστασίας από υπερτάσεις.

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

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και οι τιμές που λήφθηκαν κατά την διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων. Παρουσιάζονται επίσης όλα τα διαστάτα και τρισδιάστατα μοντέλα που προσομοιώθηκαν με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA μαζί με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τους. Οι προσομοιώσεις και οι τιμές των μετρήσεων συγκρίνονται και τα αποτελέσματα των συγκρίσεων αυτών αναλύονται και σχολιάζονται.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** επισημαίνονται τα συμπεράσματα τα οποία προήλθαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και τις προσομοιώσεις που δημιουργήθηκαν με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA 2D και 3D. Γίνεται μια γενικότερη εκτίμηση των αποτελεσμάτων και προτείνεται περαιτέρω μελέτη των δοκιμών αυτών.

Τέλος σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Στον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του ΕΜΠ για την εμπιστοσύνη την οποία έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην κ. Κονταργύρη Βασιλική, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό ΕΜΠ για την καθοδήγησή της καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής και την συνεχή αρωγή της στην εκμάθηση του προγράμματος PC OPERA.

Στον κ. Χρήστο Αθ. Χριστοδούλου Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών ΕΜΠ και υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ για την πολύτιμη καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια του, τον χρόνο τον οποίο διέθεσε, την στήριξη και την άψογη συνεργασία την οποία είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Στους κ. Χρήστο Ηλία και Γιαννακά Άρη για την τεχνική υποστήριξη κατά την διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών.

Στους φίλους μου Παππά Γιούλη, Κοντό Επαμεινώνδα και Γεωργίου Γεώργιο για την αμέριστη ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Στον θείο μου Χαραλαμπούδη Τάκη για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια που μου προσέφερε κατά την διάρκεια της πενταετούς φοιτήσεώς μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Τέλος, στην οικογένεια μου, που στάθηκε δίπλα μου και με στήριξε κατά την διάρκεια της πενταετούς φοίτησης μου στο ΕΜΠ.

Σπανιάς Χρυσοβαλάντης

Ιούλιος 2010

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εξωτερικές και εσωτερικές υπερτάσεις	1
1.1 Εξωτερικές υπερτάσεις – Στοιχεία και χαρακτηριστικά κεραυνών	1
1.1.1 Γενικά περί κεραυνού	1
1.1.2 Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη	1
1.1.3 Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων	3
1.1.4 Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων	5
1.1.5 Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων	7
1.1.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό	8
1.1.7 Παράμετροι κεραυνού	9
1.1.8 Κεραυνική στάθμη – Ισοκεραυνικές καμπύλες	9
1.1.9 Αποτελέσματα κεραυνού	11
1.2 Εσωτερικές υπερτάσεις	12
Βιβλιογραφία	13
Κεφάλαιο 2: Καθοδικά αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης	14
2.1 Εισαγωγή	14
2.2 Είδη καθοδικών αλεξικέραυνων	14
2.2.1 Καθοδικά αλεξικέραυνα με διάκενα	14
2.2.2 Καθοδικά αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα	20
Βιβλιογραφία	26
Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση	27
3.1 Το πρότυπο IEC 60099-4	27
3.1.1 Γενικά	27
3.1.2 Μοντελοποίηση καθοδικού αλεξικεραύνου	28
3.1.3 Μοντελοποίηση των συνοριακών συνθηκών	29
3.1.4 Διαδικασία υπολογισμού	29
3.2 Μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής του δυναμικού σε καθοδικά αλεξικέραυνα από διάφορους ερευνητές	32
Βιβλιογραφία	42
Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις	44
4.1 Εισαγωγή	44
4.2 Το εξεταζόμενο δοκίμιο	45
4.3 Υπολογισμός της κατανομής του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου με την δισδιάστατη έκδοση του PC OPERA	47
4.3.1 Το πραγματικό μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου	47
4.3.2 Αλλαγές στην γεωμετρία της μη γραμμικής αντίστασης	57
4.3.3 Μελέτη δυσμορφιών στο πραγματικό μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου	83
4.3.4 Πίνακες σύγκρισης αποτελεσμάτων	95
4.4 Υπολογισμός της κατανομής του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου με την δισδιάστατη έκδοση του PC OPERA	98
4.5 Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο	112
4.5.1 Πειραματική διάταξη	112

4.5.2 Μετρήσεις	114
4.5.3 Γραφική σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων	125
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα, Παρατηρήσεις και Επόμενη Μέρα	144
Παραρτήματα	
Παράρτημα Α: Περιγραφή πεδιομέτρων και αισθητήρων	146
A.1 Narda EFA-200/EFA-300	146
A.1.1 Χαρακτηριστικά	146
A.1.2 Προετοιμασία οργάνων για μετρήσεις	147
A.1.3 Στοιχεία ελέγχου και εμφάνιση	150
A.2 PMM 8053A	152
A.2.1 Χαρακτηριστικά	152
A.2.2 Εγκατάσταση του EHP-50B στο πεδίομετρο	156
A.2.3 Ενεργοποίηση του EHP-50B στο 8053A	157
A.2.4 Λειτουργία του πεδιομέτρου 8053A	158
Βιβλιογραφία	161
Παράρτημα Β: Το υπολογιστικό πακέτο PC OPERA	162
B.1 Εισαγωγή	162
B.2 Επισκόπηση	162
B.3 Σχεδιασμός μοντέλων	163
B.3.1 Παραμετροποίηση μοντέλου	164
B.3.2 Επιλυτής σφαλμάτων/προβλημάτων	164
B.4 Ολοκληρωμένες σχεδιαστικές λύσεις συγκεκριμένων εφαρμογών	168
B.4.1 Μετ-επεξεργασία αποτελεσμάτων	168
B.4.2 Βελτιστοποίηση των μοντέλων	168
B.4.3 Δημιουργία βιβλιοθήκης μοντέλων από τον χρήστη	169
B.5 PC OPERA 2D	169
B.5 PC OPERA 3D	177
Βιβλιογραφία	192
Παράρτημα Γ: Αβεβαιότητα μετρήσεων	193
Γ.1 Εισαγωγικά	193
Γ.2 Από το σφάλμα στην αβεβαιότητα	194
Γ.3 Κατηγοριοποίηση αβεβαιοτήτων (Τύπου Α & Τύπου Β)	195
Γ.4 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου Α	197
Γ.5 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου Β	199
Γ.6 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας	201
Γ.7 Συνδυασμός αβεβαιοτήτων – Νόμος διάδοσης αβεβαιοτήτων	201
Γ.8 Υπολογισμός αβεβαιότητας	201
Γ.8.1 Παράγοντες αβεβαιότητας για το μαγνητικό πεδίο	202
Γ.8.2 Παράδειγμα υπολογισμού αβεβαιότητας για το μαγνητικό πεδίο	202
Γ.8.3 Παράγοντες αβεβαιότητας για το ηλεκτρικό πεδίο	203
Γ.8.4 Παράδειγμα υπολογισμού αβεβαιότητας για το ηλεκτρικό πεδίο	203
Βιβλιογραφία	205

Περίληψη

Τα καθοδικά αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης παρέχουν προστασία στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έναντι των εσωτερικών και εξωτερικών υπερτάσεων που εμφανίζονται. Η σωστή λειτουργία των καθοδικών αλεξικεραυνών εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και του εξοπλισμού του.

Καταλυτικό ρόλο στην σχεδίαση, στην λειτουργία και την συμπεριφορά ενός καθοδικού αλεξικέραυνου έχει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από αυτό όπως επίσης και η κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ). Η ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης έχει ως αποτέλεσμα την καταπόνηση των μερών του καθοδικού αλεξικέραυνου που είναι πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη σημείων με υψηλή ένταση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να οδηγήσει σε διάτρηση των πτερυγίων του καθοδικού αλεξικέραυνου καθώς και σε υπερπηδήσεις. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τόσο το ηλεκτρικό πεδίο όσο και το δυναμικό που αναπτύσσονται μέσα και γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο είναι η γεωμετρία των μερών που απαρτίζουν το καθοδικό αλεξικέραυνο και οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διενεργούνται μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο, οι οποίες συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξάγονται με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA (2D και 3D).

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την άμεση εξάρτηση της κατανομής του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου από την γεωμετρία των μερών του καθοδικού αλεξικέραυνου, διενεργήσαμε μερικές αλλαγές στο σχήμα και στο μέγεθος της μη γραμμικής αντίστασης και του υαλώδους περιβλήματος, και συγκρίναμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο μεταξύ τους όσο και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του πραγματικού μοντέλου.

Τέλος, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να καταδείξει την ύπαρξη κάποιας δυσλειτουργίας, δυσμορφίας ή σφάλματος στο καθοδικό αλεξικέραυνο. Γι' αυτό τον λόγο, στην παρούσα διπλωματική εργασία, δημιουργήθηκαν και προσομοιώθηκαν ένα καθοδικό αλεξικέραυνο με έντονη ρύπανση και υγρασία στα πτερύγιά του και ένα άλλο με σπασμένο το ένα του πτερύγιο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με αυτά του πραγματικού μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά:

Καθοδικό αλεξικέραυνο, μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ), ένταση ηλεκτρικού πεδίου, δυναμικό, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

Abstract

The surge arrester of medium and high voltage provides protection in the systems of electric energy against the internal and exterior hypervoltages that are presented. The right function of the surge arresters ensures the smooth operation of the system as well as his equipment.

Not only does the electric field strength around the surge arrester, but also the distribution of the potential and the electric field at length of ZnO varistor play vital role in the designing, the operation and finally, in the behavior of a surge arrester. The uneven distribution of potential and electric field at length of ZnO varistor (non linear resistor) results in the extra charge of the parts of the arrester that are located more near to high voltage electrode. Furthermore, the existence of points with high intensity of electric field can lead to perforation of polymeric housing of the arresters and to surmounting. The parts that consist the geometry of surge arrester and their electric attributes influence the electric field and the voltage distribution in and around the arrester.

In the present work are held measurements of the electric field strength around the arrester which are compared with the results of the simulations that were carried out with the use of software package PC OPERA (2D and 3D).

Moreover, taking into consideration the direct dependence of voltage distribution and electric field strength from the geometry of the arrester, we held certain changes in form and size of non linear resistor (ZnO varistor) and glass fiber housing. We compared the results that came out so much between them, as with those that conjured from the simulation of the real model.

Finally, the electric field strength around the surge arrester can show the existence of some disfunctions or malformations. In order to prove it in the present work, one surge arrester with intense pollution and humidity over his polymeric housing and another with broken polymeric housing, were both created and simulated. The results of these simulations were compared with those of real model.

Key words:

Surge arrester, non linear resistor (ZnO varistor), electric field strength, voltage distribution, finite element method.

Κεφάλαιο 1

Εξωτερικές και εσωτερικές υπερτάσεις

1.1.Εξωτερικές υπερτάσεις - Στοιχεία και χαρακτηριστικά κεραυνών

1.1.1.Γενικά περί κεραυνού

Η κεραυνική εκκένωση μπορεί να οριστεί ως μια μορφή ηλεκτρικής διάσπασης, χαρακτηριζόμενη από υψηλό ρεύμα, που συμβαίνει σε πολύ μεγάλα διάκενα. Ο κεραυνός εμφανίζεται όταν κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας επιτυγχάνει μια ηλεκτρική φόρτιση αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά πεδία που συνδέονται με τη φόρτιση να προκαλούν την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα.

Ο κεραυνός αποτελείται από ένα οπτικό φαινόμενο, την αστραπή, που οφείλεται στην πυράκτωση των μορίων του αέρα, και από το καθαρά ηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή τη ροή των ηλεκτρικών φορτίων, που συνοδεύεται από τη βροντή, εξαιτίας της απότομης εκτόνωσης των αερίων της περιοχής [1].

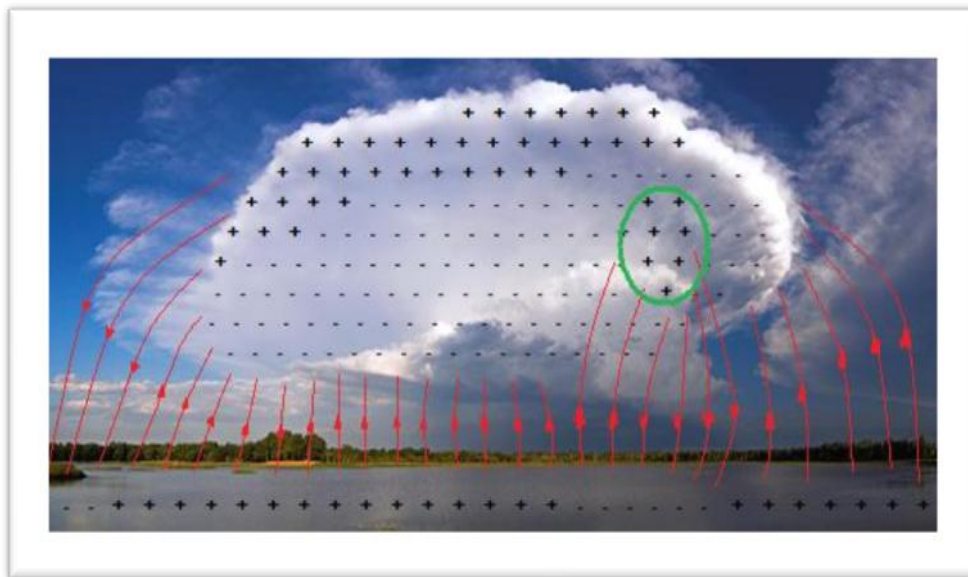
1.1.2.Διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορτίων στα νέφη

Έως σήμερα δεν υπάρχει συμφωνία αναφορικά με το μηχανισμό ηλεκτρίσης ενός νέφους καταιγίδας. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο διαφορετικές θεωρίες: εκείνη που βασίζεται στην φόρτιση σταγονιδίων του νέφους, που συμβαίνει μόλις αρχίσει η πτώση τους προς τη γη και σε εκείνη που βασίζεται στη μεταφορά φορτίων σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας με ανοδικά ρεύματα που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές [2].

Τρία φαινόμενα τα οποία μπορεί να υποτεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο κατά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων είναι το φαινόμενο της διασποράς, το φαινόμενο της ισχυρής ψύξεως και το φαινόμενο της διαρρήξεως [3]. Σύμφωνα με τα φαινόμενα αυτά και συνοψίζοντας τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρισμένου νέφους μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

α) Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία και των δύο πρόσημων σε ίσες ποσότητες που καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Δηλαδή η

φόρτιση ενός νέφους δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας διαχωρισμός φορτίων. Τα σύννεφα παρουσιάζουν κατά κανόνα στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας, που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες C και στο πάνω μέρος τους ένα φορτίο θετικής πολικότητας. Έτσι, στο χώρο μεταξύ σύννεφου και γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν στη γη πάνω σε επαγόμενα φορτία, αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχουν τα φορτία του σύννεφου (Σχήμα 1.1).



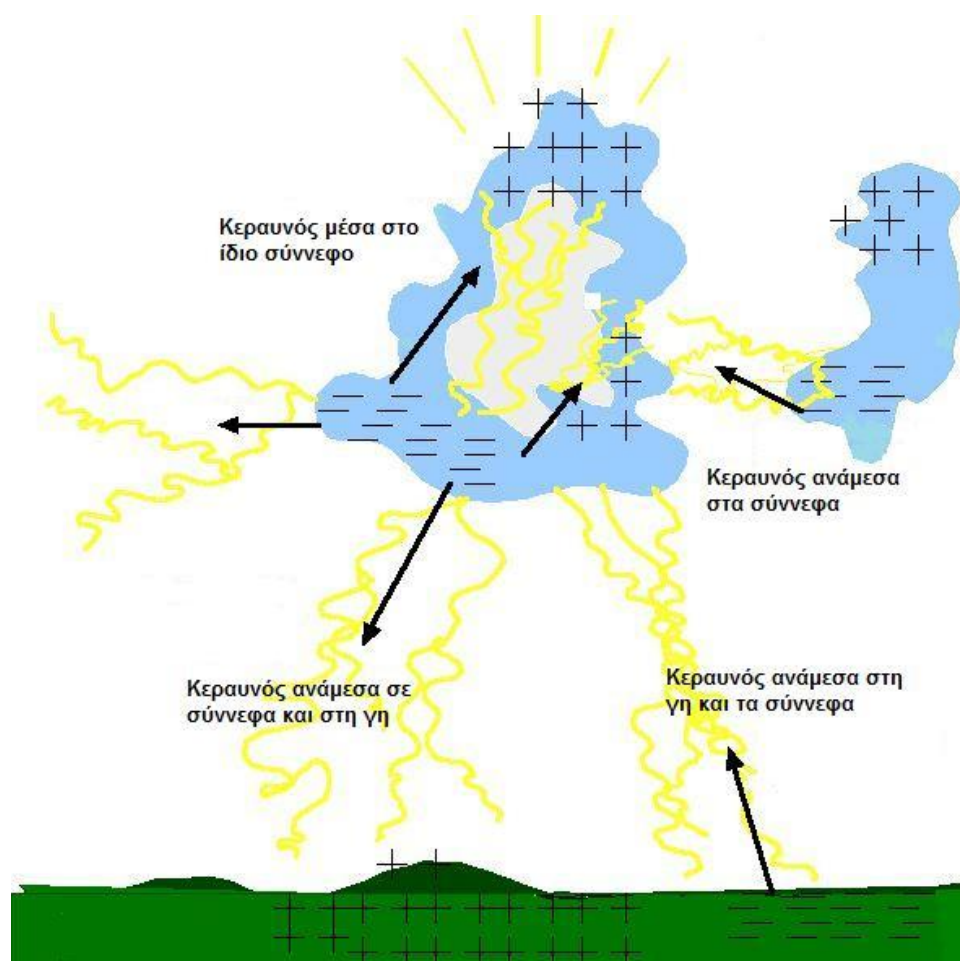
Σχήμα 1.1: Κατανομή του φορτίου εντός του νέφους και ηλεκτρικό πεδίο νέφους-γης.

β) Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των προσήμων δημιουργούν μια συγκεχυμένη εικόνα μέσα στο σύννεφο, που διαρκώς μεταβάλλεται, γεγονός που εμποδίζει τη συστηματική ταξινόμηση των ηλεκτρικών καταστάσεων που μπορούν να επικρατούν μέσα σ' ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο.

γ) Ο διαχωρισμός των φορτίων μέσα στο σύννεφο συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (από μερικά πρώτα λεπτά της ώρας έως μισή ώρα περίπου).

1.1.3.Κατηγορίες κεραυνικών εκκενώσεων

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (Σχήμα 1.2)[3,4,5]:



Σχήμα 1.2: Τα είδη των κεραυνών και η κατανομή του φορτίου στα νέφη κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας.

α) Μεταξύ σύννεφου και γης ή και αντίστροφα: Οι κεραυνοί αυτοί (Σχήμα 1.3) παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, ή πλησίον της γης, οπότε έχουμε εκκένωση ανερχόμενη. Σαν πολικότητα της εκκένωσης μεταξύ σύννεφου και γης λαμβάνεται εκείνη του φορτίου του κάτω μέρους του νέφους, που την προκάλεσε, με το 80% περίπου των κεραυνών να είναι αρνητικής πολικότητας [3].



Σχήμα 1.3: Κεραυνός μεταξύ συννέφου και γης

β) Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα: Οι κεραυνοί μέσα στα νέφη είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος εκφορτίσεως. Στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές από μερικές εκατοντάδες έως 1000 Amperes. Η διαδικασία συμβαίνει μέσα στο νέφος και έξω από το νέφος φαίνεται σαν διαχέουσα λαμπρότητα που τρεμοσβήνει.



Σχήμα 1.4: Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα

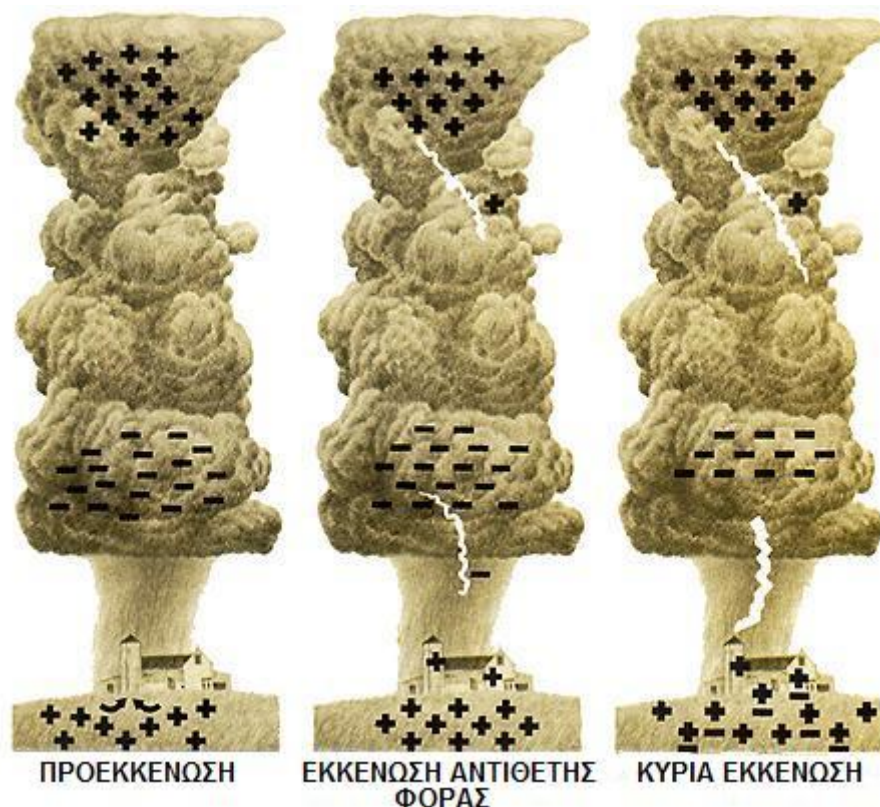
γ) Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα: Κεραυνοί αυτού του τύπου εκδηλώνονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km και μικρότερο των 12 km. Οι κεραυνοί αυτοί έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου, έως και 40 km.



Σχήμα 1.5: Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα

1.1.4.Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων

Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας διακρίνουμε τις τρεις ακόλουθες φάσεις κεραυνικής εκκένωσης (Σχήμα 1.6) [3-5]:



Σχήμα 1.6: Οι τρεις φάσεις κεραυνικής εκκένωσης κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας.

α) Προεκκένωση:

Το ηλεκτρισμένο νέφος λίγο πριν από μια κεραυνική εκκένωση εμφανίζεται μακροσκοπικά σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο, εξαιτίας του οποίου επάγονται στο έδαφος πεδία με ένταση πάνω από 5kV/m. Στις παρυφές περιοχών του νέφους με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές. Οι υψηλές αυτές εντάσεις, συνδυαζόμενες με τη μικρή πυκνότητα του αέρα και μερικούς άλλους παράγοντες που προκαλούν πρόσθετη τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το πρώτο βήμα για την έναρξη μιας ηλεκτρικής εκκένωσης.

Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός ενός οχετού, ο οποίος ακολουθεί τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Ο οχετός ακολουθεί την κατεύθυνση που θα προκαλέσει την ηλεκτρική σύνδεση και αλληλοεξουδετέρωση των δύο ετεροσήμων φορτίων. Αν οι γραμμές μεγίστης πεδιακής έντασης κατευθύνονται προς το έδαφος, ο οχετός θα κατευθυνθεί προς αυτό [2].

Η προεκκένωση ξεκινάει από κάποια περιοχή του σύννεφου όπου το ηλεκτρικό πεδίο θα αποκτήσει πολύ μεγάλες τιμές, της τάξεως των μερικών εκατοντάδων V/m. Δημιουργείται έτσι ένας αγωγίμος δρόμος (οχετός), ο οποίος τροφοδοτείται συνέχεια με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από το σύννεφο. Έχουμε, κατά συνέπεια, τη δημιουργία υψηλού ηλεκτρικού πεδίου που σε μια διαδικασία ανακύκλωσης συμβάλλει στην προώθησή του προς τη γη. Έτσι, η προεκκένωση, αφού ξεκινήσει, αναπτύσσεται από μόνη της στο χώρο του ηλεκτρικού πεδίου, εφόσον τροφοδοτείται από την πλευρά του σύννεφου με μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου.

(Ενδέχεται να υπάρχουν και διακλαδώσεις του αγωγίμου οχετού, οι οποίες, όμως, δεν απολήγουν σε γεφύρωσή του προς τη γη, λόγω του ότι δεν υπάρχει διαθεσιμότητα μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων).

β) Εκκένωση αντίθετης φοράς:

Η διαμήκης πτώση τάσεως κατά μήκος του οχετού προεκκένωσης διαφέρει στις διάφορες θέσεις του. Έτσι, ο οχετός προεκκένωσης εμφανίζεται σαν μια μεταλλική προεξοχή που επεκτείνεται από το σύννεφο προς το έδαφος.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης και ιδίως στο άκρο του προς το έδαφος, είναι πολύ μεγάλη και υπερβαίνει κατά πολύ την πεδιακή ένταση που απαιτείται για τον ιονισμό του αέρα από κρούσεις (γύρω στα 30kV/cm).

Για αυτό το λόγο, ο οχετός περιβάλλεται διαρκώς από ένα μανδύα Corona (στεμματοειδούς εκκενώσεως), που εκτείνεται μερικά μέτρα γύρω από αυτόν. Το πάχος του μανδύα αυτού είναι μεγαλύτερο στο προς το έδαφος άκρο του οχετού και αυξάνει όσο η κεφαλή του οχετού πλησιάζει προς το έδαφος. Καθώς τώρα ο οχετός κατέρχεται στη γη, αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο της γης. Έτσι, είναι δυνατό να δημιουργήσει ένα φαινόμενο τύπου Corona, το οποίο καταλήγει σε μια ανερχόμενη εκκένωση, η οποία τείνει να συναντήσει τον κατερχόμενο οχετό, οπότε και έχουμε πλήρη γεφύρωση του διακένου αέρα, δηλαδή κεραυνικό πλήγμα.

Η απόσταση που θα πρέπει να φτάσει η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού για να ξεκινήσει από τη γη η εκκένωση αντίθετης φοράς χαρακτηρίζεται σαν απόσταση εναύσεως.

γ) *Κύρια εκκένωση:*

Στην τελευταία αυτή φάση, η οποία εξελίσσεται με ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα, έχουμε γεφύρωση της αποστάσεως μεταξύ νέφους και γης. Ήδη προϋπάρχει αγώγιμος οχετός προεκκενώσεως που παίρνει τη μορφή ενός πλήρους οχετού εκκενώσεως. Τα κυκλοφορούντα ρεύματα δια μέσου του οχετού είναι της τάξεως των 10-100kA, με κλίσεις μετώπου της τάξεως των 20-100kA/μs, ενώ η διάρκεια ροής των ρευμάτων αυτών είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων μs. Το μήκος του κεραυνικού οχετού εξαρτάται από το ύψος που βρίσκεται το αντίστοιχο καταγιδοφόρο νέφος, ενώ όταν πρόκειται για κεραυνό που λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο νεφών, εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των αντιστοιχών νεφών. Σε περίπτωση που έχουμε κεραυνοπληξία προς γη, το μήκος των κεραυνικών οχετών είναι της τάξεως λίγων χιλιομέτρων το πολύ.

Η διάμετρος ενός οχετού εκκενώσεως είναι της τάξης των μερικών εκατοστών, γιατί από μόνο του το πλάσμα, λόγω του μαγνητικού πεδίου, αποσυμπιέζεται. Η μεγάλη λαμπρότητα του ηλεκτρικού τόξου εξηγεί και το γεγονός ότι ο κεραυνικός οχετός συχνά οδηγεί σε παροδικές θαμβώσεις.

1.1.5. Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων

Σαν πολικότητα εκκενώσεως λαμβάνεται η πολικότητα φορτίου του κάτω μέρους του σύννεφου που προκάλεσε την εκκένωση.

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις μπορούν να διακριθούν αναλόγως της πολικότητάς των σε [2-6]:

α) *Θετικές εκκενώσεις*, που αποτελούνται από μία μόνο εκφόρτιση διάρκειας από 0.1 έως 2 ms. Η διάρκεια μετώπου αυτών κυμαίνεται μεταξύ 20 και 50 ms, το δε εύρος του ρεύματος εκφορτίσεως που αντιπροσωπεύουν μπορεί να υπερβεί τα 100 kA, ενώ η μέση κλίση μετώπου είναι 2 kA/μs.

β) *Αρνητικές εκκενώσεις*, που αποτελούνται συνήθως από τρεις ή και περισσότερες διαδοχικές εκφορτίσεις. Η διάρκεια όλου του φαινομένου, κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και

1 ms. Η διάρκεια μετώπου και το εύρος της πρώτης εκφορτίσεως είναι μικρότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για θετικές εκκενώσεις (διάρκεια μετώπου 10 έως 15 μ s). Για τις μετά την πρώτη εκφορτίσεις το μεν εύρος είναι λίγο μικρότερο από αυτό της πρώτης, η δε διάρκεια μετώπου είναι σημαντικά μικρότερη κυμαινόμενη μεταξύ 0.5 και 1 μ s. Η κλίση μετώπου για την πρώτη εκφόρτιση υπερβαίνει τα 20 kA/ μ s, ενώ για τις επόμενες είναι πολύ μεγαλύτερη (τάξεως 40 kA/ μ s). Στον ελλαδικό χώρο, όπου το κλίμα είναι εύκρατο, το 80 έως 90% των ατμοσφαιρικών εκκενώσεων είναι αρνητικές.

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις, ανάλογα με την πορεία της προεκκενώσεως διακρίνονται σε:

α) *Ανερχόμενες*, όταν η προεκκένωση αρχίζει από το έδαφος και κατευθύνεται προς το νέφος και

β) *Κατερχόμενες*, όταν η προεκκένωση αρχίζει από το νέφος.

Σε μέρη επίπεδα, χωρίς ιδιαίτερες προεξοχές, πλειοψηφούν οι κατερχόμενες εκκενώσεις. Αντίθετα ανερχόμενες εκκενώσεις δημιουργούνται εκεί που υπάρχουν υψηλά και αιχμηρά αντικείμενα (π.χ. ένας πυλώνας στην κορυφή ενός βουνού).

1.1.6. Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό

Σε μια περιοχή με εύκρατο κλίμα τα χαρακτηριστικά του κεραυνού επηρεάζονται από την ορογραφική κατάσταση της περιοχής. Στις ορεινές περιοχές, η ένταση του ρεύματος του κεραυνού, όπως και το σχετικό φορτίο, είναι μικρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μικρή απόσταση γης - νέφους προκαλεί εκκενώσεις στη γη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία φορτίσεως του νέφους και στο ότι το μικρό σχετικά μήκος του αγωγού του κεραυνού έχει σαν επακόλουθο τη συσσώρευση ενός μικρού μόνο φορτίου κατά μήκος αυτού.

Ο αριθμός των εκκενώσεων στις ορεινές περιοχές είναι πάντοτε μεγαλύτερος από εκείνο στις πεδινές. Στις πεδινές περιοχές, όπου η απόσταση νέφους - γης είναι μεγαλύτερη σημειώνονται λιγότερες εκκενώσεις, αλλά με υψηλή ένταση ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σχετικά σπάνια το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο, ώστε να επιτρέπει κεραυνό νέφους - γης. Η μεγάλη ένταση ρεύματος οφείλεται στην παρουσία νεφών πολύ φορτισμένων και οχτών εκκενώσεως μεγάλου μήκους.

Επίσης, σημαντικό ρόλο στη δημιουργία κεραυνικών εκκενώσεων παίζει και η εποχή. Το καλοκαίρι λόγω σημαντικού ύψους των νεφών από το έδαφος πολλές εκκενώσεις πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους ή μεταξύ νεφών. Αυτό έχει σαν συνέπεια μία απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους.

1.1.7. Παράμετροι κεραυνού

Μια κεραυνική εκκένωση χαρακτηρίζεται από δύο κατηγορίες παραμέτρων: η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικές με την ιδιοσυστασία της εκκένωσης, τη διάρκεια των ρευμάτων και τα διαστήματα όπου το ρεύμα είναι μηδενικό κατά την εκδήλωση πολλαπλών εκκενώσεων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετιζόμενες με τα κεραυνικά ρεύματα, των οποίων η διάρκεια είναι μικρότερη από λίγα ms. Οι σημαντικότερες παράμετροι είναι οι ακόλουθες [2-6]:

α) Η μέγιστη τιμή ρεύματος, η οποία προκαλεί υπερπήδηση μονωτήρων και καταστροφή των μονωτικών υλικών, εξαιτίας της ανύψωσης του δυναμικού του πληγέντος σημείου.

β) Η μέγιστη κλίση μετώπου του ρεύματος $\left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$, η οποία καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόγχους κυκλωμάτων και τάσεις που αναπτύσσονται σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρικά στοιχεία του συστήματος πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών.

γ) Το μεταφερόμενο φορτίο $\int_0^{\infty} i(t)dt$, το οποίο ευθύνεται για την τοπική τήξη και τη διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.

δ) Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$, ποσότητα ανάλογη της εκλυόμενης από το κεραυνικό πλήγμα ενέργειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων).

1.1.8. Κεραυνική στάθμη – Ισοκεραυνικές καμπύλες

Κεραυνική στάθμη (T) συγκεκριμένου τόπου ονομάζεται το πλήθος των ημερών καταιγίδας που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο τόπο σε ένα χρόνο, ενώ ως μέρα καταιγίδας χαρακτηρίζεται εκείνη κατά τη διάρκεια της οποίας ακούγεται μία τουλάχιστον βροντή.

Ισοκεραυνική καμπύλη ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια κεραυνική στάθμη.

Από την κεραυνική στάθμη υπολογίζεται η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km^2 που πέφτουν στο έδαφος σε ένα συγκεκριμένο τόπο. Από σύγκριση του αριθμού κεραυνών N_g , που καταγράφηκαν με ειδικούς μετρητές εκκενώσεων προς γη, με τις ημέρες καταιγίδων κάθε έτος, έχουν διατυπωθεί διάφορες απλές μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στα N_g και T . Η διαφορά μεταξύ αυτών των σχέσεων έγκειται στο γεγονός ότι, η κάθε μια τους βασίζεται σε πειραματικές παρατηρήσεις σε συγκεκριμένη περιοχή συλλογής των δεδομένων. Παρακάτω δίνονται μερικές από αυτές τις σχέσεις, εκ των οποίων η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη είναι η (1.6), που διατυπώθηκε από τον A.J.Eriksson. Η σχέση αυτή προτείνεται και από το IEEE [7, 8], καθώς προκύπτει από συνεκτίμηση παρατηρήσεων σε πολλές περιοχές:

$$N_g = \frac{T}{5} \quad (1.1)$$

$$N_g = \frac{T}{7} \quad (1.2)$$

$$N_g = 0.19 \cdot T \quad (1.3)$$

$$N_g = 0.15 \cdot T \quad (1.4)$$

$$N_g = 0.13 \cdot T \quad (1.5)$$

$$N_g = 0.04 \cdot T^{1.25} \quad (1.6)$$

όπου N_g είναι η πυκνότητα των κεραυνών ανά έτος και km^2

και T είναι οι ημέρες καταιγίδας.

1.1.9.Αποτελέσματα κεραυνού

Τα κυριότερα αποτελέσματα του κεραυνού στις γραμμές μεταφοράς συνοψίζονται στα παρακάτω [3]:

α) *Θερμικές επιδράσεις:*

Σύμφωνα με το νόμο του Joule, η εκλυόμενη ενέργεια υπό μορφή θερμότητας κατά τη δίοδο κεραυνού δια μέσω αντιστάσεως R , είναι:

$$W = R \cdot \int i^2(t) dt \quad (1.7)$$

πράγμα που κάνει προφανές το γεγονός ότι η ύπαρξη μεγαλύτερης αντίστασης προκαλεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων υπερθερμάνσεων. Συνέπειες αυτού του γεγονότος είναι συντήξεις σε αγωγούς κεραιών και σε λεπτά χαλύβδινα σύρματα. Από παρατηρήσεις προκύπτει, επίσης, ότι δέντρα και ογκώδεις οικοδομές καταστρέφονται μηχανικώς από την πτώση κεραυνών. Στις περιπτώσεις αυτές, η παραγόμενη θερμότητα δεν είναι αρκετή για να προκαλέσει πυρκαγιά, είναι όμως αρκετή για να προκαλέσει εξάτμιση της υγρασίας στην περιοχή του ρεύματος του κεραυνού. Λόγω της πυκνότητας του υλικού, ο παραγόμενος ατμός δεν μπορεί να απαχθεί στην ατμόσφαιρα, οπότε διαστέλλεται βίαια και προκαλεί διάρρηξη του δέντρου ή του τοίχου.

β) *Υπερπήδηση κεραυνού:*

Η υπερπήδηση κεραυνού παρουσιάζεται λόγω της μεγάλης πτώσης τάσεως κατά τη διάβαση του κεραυνού προς τη γη και κατά τη διέλευση του κεραυνού μέσω αγωγού μεγάλης αυτεπαγωγής, λόγω αδράνειας της ταχύτητας μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.

γ) *Ακουστικές επιδράσεις:*

Κατά την διάρκεια του κεραυνού αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική δράση (δυνάμεις), με αποτέλεσμα ο μανδύας αέρα, που περιβάλλει τον οχετό, να συμπιέζεται. Η ηλεκτροδυναμική υπερπίεση είναι περίπου 2-3 ατμόσφαιρες. Με το που εξασθενίζει το κεραυνικό ρεύμα, εξασθενίζει και η υπερπίεση και έτσι ο θερμός πυρήνας του κεραυνού εκρήγνυται και προκαλεί βροντή.

δ) Χημικά αποτελέσματα:

Κατά τη διέλευση του κεραυνού μέσα από τον αέρα, τα μέταλλα και το έδαφος, έχουμε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιων χημικών φαινομένων. Στον αέρα σχηματίζονται όζον και νιτρώδη ή νιτρικά οξέα, τα οποία χρησιμεύουν στον εμπλουτισμό του λιπάσματος του εδάφους. Όταν ο κεραυνός διέλθει μέσα από μέταλλο, όπως για παράδειγμα διαμέσου του αγωγού του αλεξικεραύνου, δημιουργείται τοπική θέρμανση που προσβάλλει την επιφάνεια και δημιουργεί τις προϋποθέσεις για αυξημένη διάβρωση (χωρίς, βέβαια, να σημαίνει ότι το αλεξικέραυνο καθίσταται άχρηστο). Τέλος, στη θέση διαβάσεως από τον αγωγό στο έδαφος, μπορούν να συμβούν χημικές διεργασίες, προκαλούμενες από ηλεκτρολυτικά υλικά που βρίσκονται στο έδαφος.

1.2.Εσωτερικές υπερτάσεις

Οι εσωτερικές υπερτάσεις που αναπτύσσονται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο καθορίζονται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τη δομή και τον τρόπο της εκμετάλλευσής του. Οι εσωτερικές υπερτάσεις επιβάλλονται και στον εξοπλισμό εισόδου των υποσταθμών, επειδή δε τυχόν εσωτερικό σφάλμα ή έρπουσα εκκένωση στον εξοπλισμό αυτό δημιουργεί πολύ σοβαρότερα προβλήματα από ότι τα σφάλματα στη γραμμή μεταφοράς, είναι προφανές ότι η μόνωση μιας γραμμής μεταφοράς δεν πρέπει να είναι ανώτερη από τη μόνωση του εξοπλισμού του υποσταθμού. Αντιθέτως, μέσω της μείωσης της μόνωσης μιας γραμμής μεταφοράς είναι δυνατόν να αυξηθεί η προστασία του εξοπλισμού του υποσταθμού [4]. Οι εσωτερικές υπερτάσεις διακρίνονται σε δυναμικές και χειρισμού ανάλογα με το μηχανισμό γενέσεώς τους, τη διάρκεια και το μέγεθός τους. Οι δυναμικές υπερτάσεις περιλαμβάνουν [3]:

- Την ηλεκτρίση ανοικτής γραμμής,
- Το σφάλμα γης και
- Το φαινόμενο συντονισμού.

Κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο ενός διακόπτη και την κατά συνέπεια αλλαγή της συνδεσμολογίας ενός δικτύου διαδίδονται σ' αυτό υπερτάσεις με σύνθετη κυματομορφή, οι οποίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου και του διενεργούντος τον χειρισμό διακόπτη, είναι δυνατόν να φτάσουν σε πολύ υψηλές

τιμές. Αυτού του είδους οι υπερτάσεις είναι οι υπερτάσεις χειρισμού και εμφανίζονται κατά:

- Τη διακοπή ρευμάτων βραχυκυκλώματος,
- Τη διακοπή μικρών επαγωγικών ρευμάτων,
- Τη διακοπή χωρητικών ρευμάτων,
- Τη ζεύξη, απόζευξη και επανάζευξη ανοικτών γραμμών και
- Τον ετεροχρονισμό φάσεων κατά τη ζεύξη επαγωγικών φορτίων.

Βιβλιογραφία

- [1] www.elemko.gr
- [2] R.H. Golde, “Lightning – Physics of lightning”, vol.1, pp.85-89, Academic Press, London, 1977.
- [3] Ι.Α. Σταθόπουλος, “Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989.
- [4] Π. Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Αθήνα 1994
- [5] V.Cooray, “The Lightning Flash”, IEE Power & Energy Series 34
- [6] Μιχ. Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Εκδ. Οικονομικών, Αθήνα 2005
- [7] IEEE Working Group Report, “Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – Updates to Analytical Models”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, July 1993
- [8] IEEE Std 1243-1991, “Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines”, June 1997

Κεφάλαιο 2

Καθοδικά αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης

2.1.Εισαγωγή

Τα καθοδικά αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών μεταφοράς και διανομής και των υποσταθμών από υπερτάσεις. Τα καθοδικά 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 καθοδικού αλεξικέραυνου είναι [1,2]:

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

2.2.Είδη καθοδικών αλεξικέραυνων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι καθοδικών αλεξικέραυνων (με ή χωρίς διάκενα), τα οποία λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο: παρουσιάζουν, δηλαδή μεγάλη αντίσταση της τάξης των MΩ σε κανονική λειτουργία, ενώ σε περίπτωση υπέρτασης η αντίσταση μειώνεται σε μερικά Ω. 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) [2-4].

2.2.1.Καθοδικά αλεξικέραυνα με διάκενα

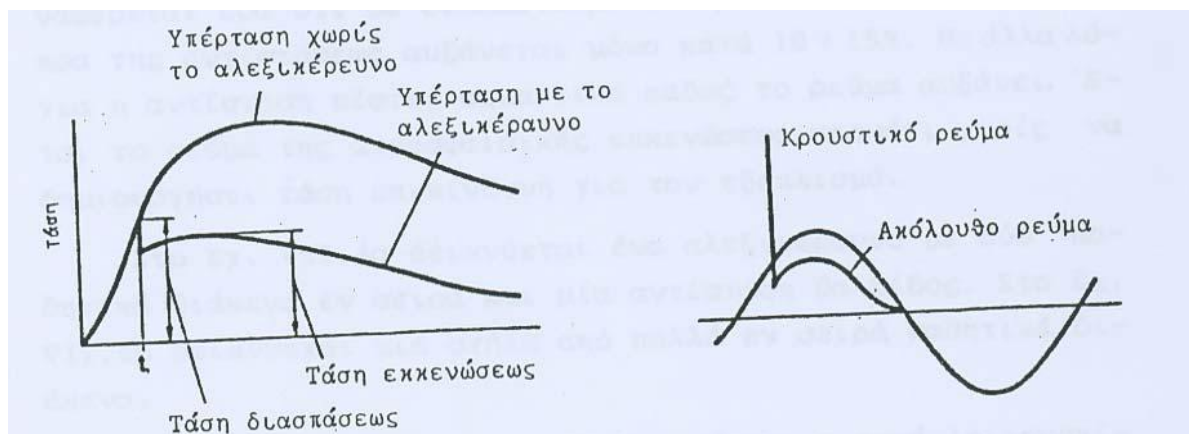
Αυτού του τύπου τα αλεξικέραυνα αποτελούνται από μια σειρά διακένων (σπινθηριστών) σε σειρά με μια μη γραμμική αντίσταση, περικλειόμενα σε κατάλληλο μονωτικό περίβλημα. Τα διάκενα -τα οποία πρέπει να έχουν όσο γίνεται περισσότερο ομοιογενές πεδίο, ούτως ώστε η τάση διάσπασής τους να είναι ανεξάρτητη 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:

$$I = k \cdot U^a \quad (2.1)$$

όπου k και a είναι 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 [1-4].



Σχήμα 2.1: Αρχή λειτουργίας αλεξικέραυνου και διακοπή ακόλουθου ρεύματος [1]

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των αλεξικέραυνων είναι τα ακόλουθα [5]:

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.

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 100kV/μsec για κάθε 12kV της ονομαστικής τάσης του αλεξικέραυνου, αλλά όχι παραπάνω από 1200kV/μsec (π.χ. για 21kV, η κλίση είναι $21/12 \times 100 = 175 \text{ kV}/\mu\text{sec}$).

- **100%**: Είναι η κορυφή της ελάχιστης τάσης κρουστικού κύματος ορισμένης μορφής (1.2/50μsec), για την οποία όσες φορές κι αν επιβληθεί, έχουμε διάσπαση του αλεξικεραύνου.
- **50% (κρίσιμη)**: Είναι η κορυφή της τάσης κρουστικού κύματος (1.2/50μsec) που, όταν επιβληθεί επανειλημμένως, θα προκαλέσει διάσπαση του αλεξικεραύνου στο 50% των περιπτώσεων.
- **0%**: Είναι η κορυφή της μέγιστης τάσης κρουστικού κύματος ορισμένης μορφής (1.2/50μsec), για την οποία όσες φορές κι αν επιβληθεί, δεν έχουμε διάσπαση του αλεξικεραύνου.

Για κάθε σημείο της καμπύλης τάσης διάσπασης του αλεξικέραυνου-χρόνου, τετημημένη 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 (μορφής 8/20μsec).

δ. Τάση διάσπασης βιομηχανικής συχνότητας (50 Hz): Είναι η ενδεικνυμένη τιμή της ελαχίστης τάσης βιομηχανικής συχνότητας 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 (8/20μsec), 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 4/10μsec, που μπορεί να εκκενώνει το αλεξικέραυνο.

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

Υπάρχουν δύο τύποι διακένων: Τα συμβατικά ή παθητικά διάκενα και τα ενεργητικά διάκενα[1, 3]. Μια διάταξη με παθητικά διάκενα αποτελείται από ηλεκτρόδια χωρισμένα με τεμάχια στεατίου και με μη γραμμικές αντιστάσεις κατανομής μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στα διάκενα αυτά υπάρχει, επίσης, μία διάταξη προϊόντισμού, 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 [1-6].

Μια διάταξη 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 πλεονεκτήματα των καθοδικών αλεξικέραυνων με ενεργά διάκενα είναι:

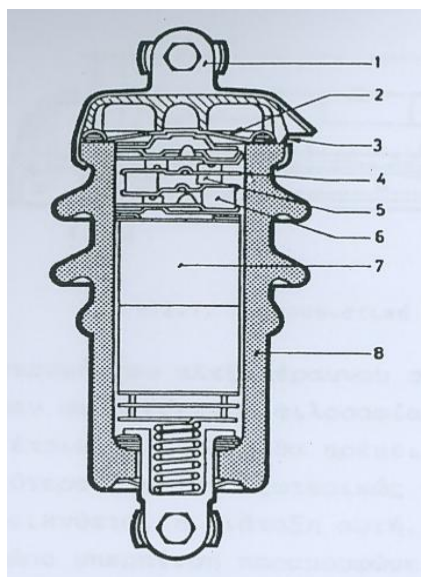
- Καλύτερη προστασία, χωρίς να έχουμε σημαντική αύξηση της ισχύος του ακόλουθου ρεύματος,
- Καλύτερη δυνατότητα σφραγίσεως και
- Δυνατότητα απορροφήσεως εκκενώσεως. μεγαλύτερης διάρκειας (σε σχέση με τα καθοδικά αλεξικέραυνα με παθητικά διάκενα)

Τα αλεξικέραυνα με ενεργά διάκενα χρησιμοποιούνται για δίκτυο ονομαστικών τάσεων μεγαλύτερων από 200kV, για τα οποία οι σχετικές στάθμες μόνωσης είναι χαμηλές και η στάθμη προστασίας σε υπερτάσεις χειρισμών είναι επίσης χαμηλή [1-6].

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 βαλβίδος, εξαρτάται από την τάση. Έτσι, τυπικά αναφέρεται εδώ ότι με διπλασιασμό του ρεύματος, η τάση 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 να δημιουργήσει τάση επικίνδυνη για τον εξοπλισμό [1-6].

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 [1-6].

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 [1].

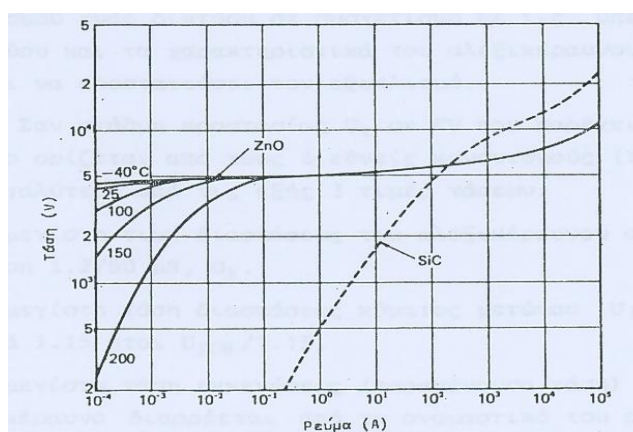


Σχήμα 2.2: Αλεξικέρανο με παθητικά διάκενα και αντίσταση βαλβίδας [1]

(1. Άνω βραχίονας, 2. Διάφραγμα και ανακουφιστική διάταξη υπερπίεσης, 3. Άνοιγμα διαφυγής αερίων, 4.

Ηλεκτρόδιο διακένου, 5. Διαχωριστικό στεατίτου, 6, 7. Αντίσταση βαλβίδας, 8. Πορσελάνη)

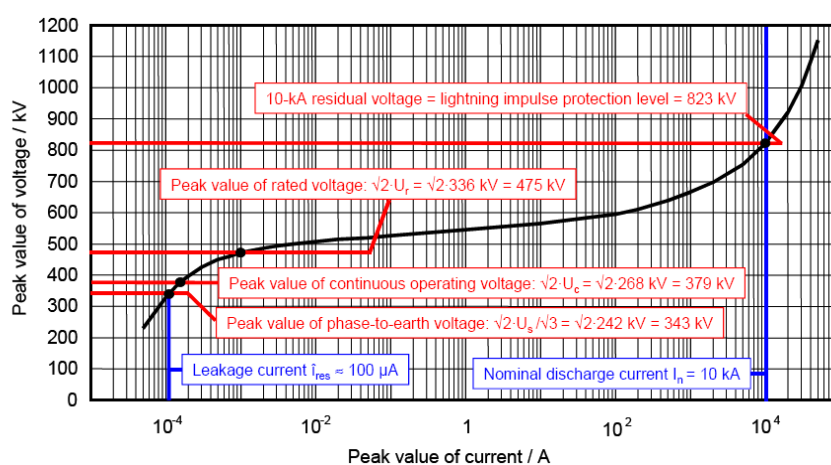
Εκτός από το ανθρακούχο πυρίτιο (SiC) που χρησιμοποιείται πάνω από 25 χρόνια σαν το βασικό υλικό για τις μη γραμμικές αντιστάσεις των αλεξικέρανων, χρησιμοποιήθηκε κατά την δεκαετία 1970-80 και το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), το οποίο σε σύγκριση με το SiC παρουσιάζει πολύ πιο έντονη μη γραμμικότητα,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



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος [1]

2.2.2. 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 (Σχήμα 2.4). Αυτή ακριβώς η έντονη μη γραμμικότητα είναι αυτή που καθιστά την κατασκευή καθοδικού αλεξικέραυνου χωρίς διάκενα [4].



Σχήμα 2.4 Χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος ενός αλεξικεραύνου 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_1 (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 $V_m > V_1$, ρέει δια αυτού μεγάλο ρεύμα, έτσι ώστε η τάση να περιορισθεί κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες στην τιμή V_m [4, 7-8].

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 μειονέκτημά τους είναι η συνεχής ροή ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας πολύ μικρής τιμής και κατά συνέπεια η απώλεια ισχύος.

Η μη γραμμική αντίσταση συνίσταται από ZnO με μικρές προσμίξεις και άλλων οξειδίων, όπως Bi₂O₃, MnO, Cr₃O₃ και Sb₂O₃. 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 σε όλη την 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 [4].

Τα κυριότερα μεγέθη που ενδιαφέρουν σε ένα αλεξικέραυνο είναι [9]:

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 η 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 ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει το αλεξικέραυνο, χωρίς να χάσει τη θερμική του σταθερότητα, δηλαδή την ικανότητά του να επανέρχεται στη θερμοκρασία που έχει υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Στο Σχήμα 2.5 και 2.6 φαίνεται η τομή ενός αλεξικέραυνου, βασικά στοιχεία του οποίου είναι η μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ) από οξείδια του ψευδαργύρου, το μονωτικό περίβλημα από πολυμερές υλικό, ένα ενδιάμεσο υαλώδες υλικό και τα

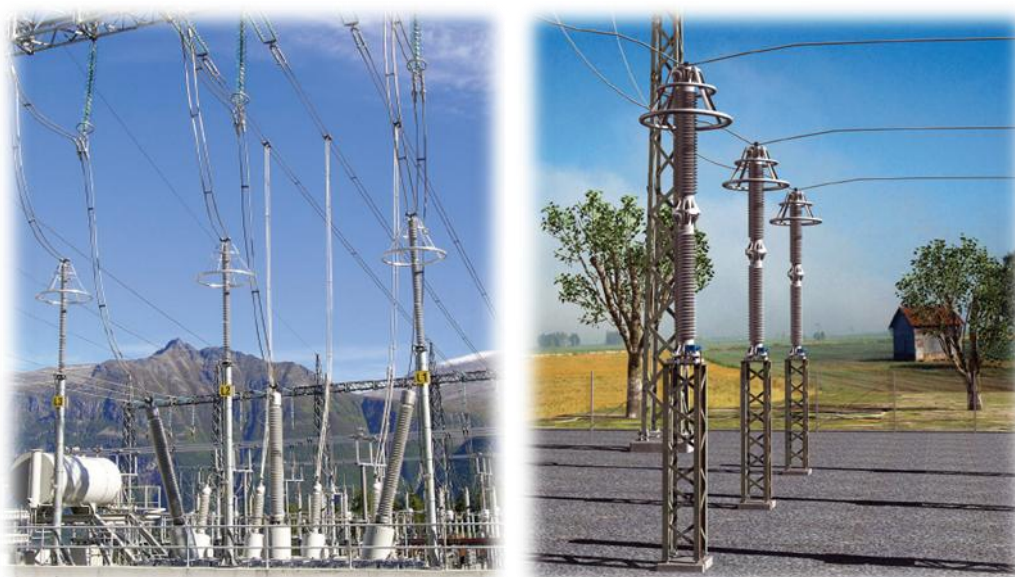
ηλεκτρόδια σύνδεσης με την υψηλή τάση και τη γη. Λόγω της ανομοιομορφίας του δυναμικού στο εσωτερικό του βαρίστορ (η οποία καταπονεί θερμικά το τμήμα του βαρίστορ που βρίσκεται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης) τοποθετούνται, ιδίως στα αλεξικέρανα 150kV και 400kV, κατάλληλα τοροειδή (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.5: Τομή αλεξικέρανου [10]

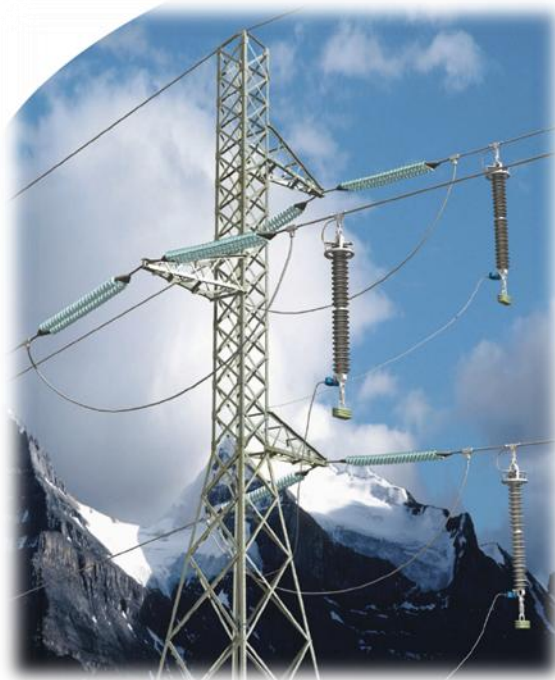


Σχήμα 2.6: Τομή αλεξικέρανου [7]

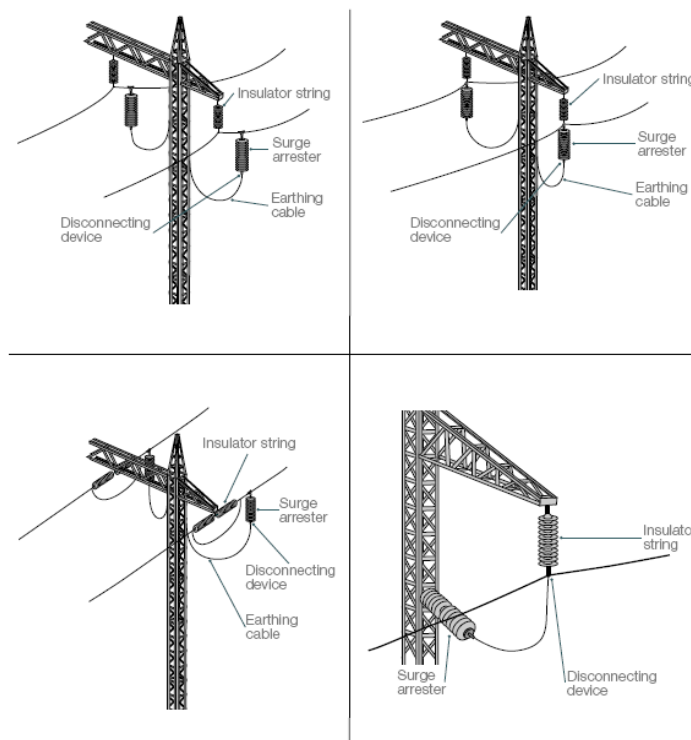


Σχήμα 2.7: Αλεξικέρανα 400kV και 150kV με τοροειδή [7]

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 2.8 και 2.9), και είναι ιδιαίτερα αναγκαία στην περίπτωση υψηλών αντιστάσεων γείωσης.



Σχήμα 2.8: Αλεξικέραυνα σε γραμμή μεταφοράς [7]



Σχήμα 2.9: Τρόποι τοποθέτησης αλεξικέραυνων σε πυλώνες γραμμών μεταφοράς [8]

Ο εξοπλισμός που συνοδεύει συνήθως τα αλεξικέραυνα είναι ο μετρητής υπερτάσεων, η συσκευή αποσύνδεσης και ο μετρητής του ρεύματος διαρροής. Οι μετρητές υπερτάσεων (Σχήμα 2.10) συνδέονται εν σειρά με το αλεξικέραυνο και καταγράφουν – με ηλεκτρομηχανικό ή ηλεκτρονικό τρόπο - πόσες φορές λειτούργησε το αλεξικέραυνο.



Σχήμα 2.10: Μετρητής Υπερτάσεων [7]

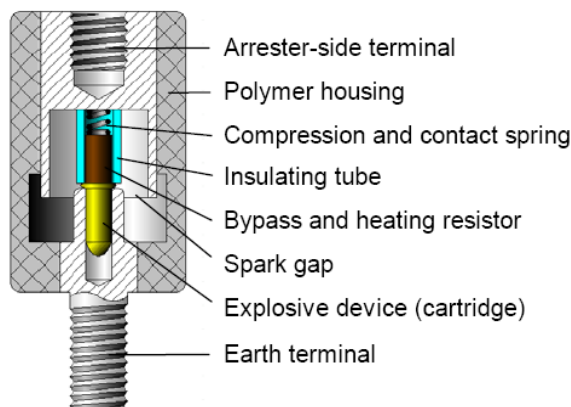
Ο μετρητής του ρεύματος διαρροής συνδέεται σε σειρά με το αλεξικέραυνο και μετράει το ολικό ρεύμα διαρροής. Η ένδειξη αυτή ωστόσο δεν έχει μεγάλη πρακτική αξία, αφού αυτό που ενδιαφέρει είναι η ωμική συνιστώσα του ρεύματος διαρροής.



Σχήμα 2.11: Μετρητής ρεύματος διαρροής [8]

Η συσκευή αποσύνδεσης (Σχήμα 2.12) αποσυνδέει το αλεξικέραυνο από το σύστημα σε περίπτωση υπερφόρτισης ή πιθανής καταστροφής του. Σε αυτήν την περίπτωση, η γραμμή μένει απροστάτευτη από υπερτάσεις. Τυπική αρχή λειτουργίας της συσκευής

αποσύνδεσης είναι ένας εκρηκτικός μηχανισμός ενεργοποιούμενος από το ρεύμα διαρροής.



Σχήμα 2.12: Συσκευή αποσύνδεσης [8]

Τα αλεξικέραυνα έχουν μεγάλη σημασία στην καλή λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και διανομής, γι' 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 [11]:

- 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.

Βιβλιογραφία

- [1] Ε. Λεκατσάς, «Θέματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΔΕΗ, Αθήνα 1985
- [2] Κ. Α. Στασινόπουλος, «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Α' Έκδοση, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1996
- [3] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1989
- [4] Μιχ. Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Εκδ. Οικονομικών, Αθήνα 2005
- [5] Οδηγία Διανομής Νο 23 «Προστασία Δικτύων ΜΤ από ατμοσφαιρικές υπερτάσεις». ΔΕΗ, Γραφείο βοηθού Γενικού Διευθυντή Διανομής, Εκδ.01/06/1988
- [6] Α. Παπαθανασίου, «Ηλεκτρικά Δίκτυα, Τόμος Α: Εναέρια Δίκτυα», Σημ. για τη Σιβιτανίδειο Σχολή, Αθήνα 1964
- [7] ABB Buyer's Guide, "High Voltage Surge Arresters", Edition 5.1, 2004-2007
- [8] V. Hinrichsen, "Metal-Oxide Surge Arresters", Siemens, 1st Edition, 2001
- [9] IEC 60099-4, "Surge Arresters: Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", second edition, 2004-2005
- [10] Διαφημιστικό έντυπο της Tyco Electronics, 2007
- [11] R.E. James, Q.Su, "Condition Assessment of high Voltage Insulation in Power System Equipment", IET Power and Energy Series 53, 1st Edition 2008

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

3.1 Το Πρότυπο IEC 60099-4 [1]

3.1.1 Γενικά

Στο Παράρτημα L του Προτύπου IEC 60099-4 (Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems) [1] περιγράφεται η διαδικασία για τον υπολογισμό της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης σε καθοδικά αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα, η οποία επηρεάζεται από:

- τις τιμές της ωμικής αντίστασης και της χωρητικότητας της μη γραμμικής αντίστασης
- τις παράσιτες χωρητικότητες προς γη και άλλα μεταλλικά αντικείμενα
- τις συνοριακές συνθήκες (εφαρμοζόμενη τάση, τάση σε άλλες συσκευές πλησίον του αλεξικεραύνου, απόσταση από αγωγούς φέροντες τάση)

Η ανομοιομορφία στην κατανομή της μειώνει τη διάρκεια ζωής του αλεξικεραύνου, καθώς το τμήμα της μη γραμμικής αντίστασης που είναι πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο της υψηλής τάσης καταπονείται περισσότερο, πράγμα που είναι εντονότερο όσο αυξάνει το ύψος του αλεξικεραύνου. Η κατανομή της τάσης μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά με χρήση κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων εξαρτώνται από το σχεδιασμό της διάταξης, τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών και τις συνοριακές συνθήκες. Λόγω της πολυπλοκότητας στις εγκαταστάσεις καθοδικών αλεξικεραύνων, συχνά απαιτούνται απλοποιήσεις και παραδοχές στο σχεδιασμό της γεωμετρίας των αλεξικεραύνων και τον καθορισμό των συνοριακών συνθηκών, για τη διευκόλυνση της προσομοίωσης και την ταχύτερη εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

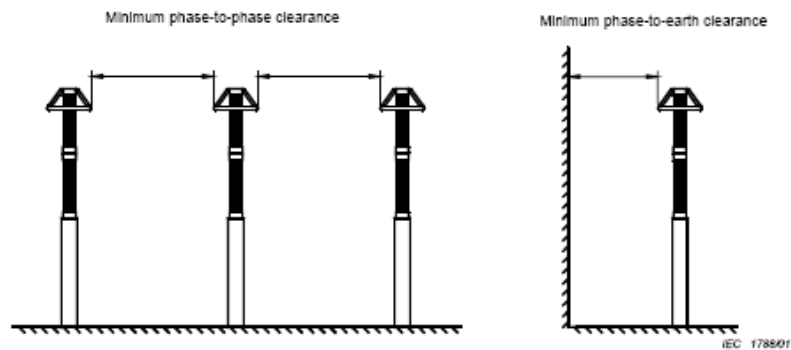
3.1.2 Μοντελοποίηση καθοδικού αλεξικεραύνου

Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των παράσιτων χωρητικότητων στην κατανομή της τάσης κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης του αλεξικεραύνου, προτείνεται διαδικασία για την σχεδίαση ενός γεωμετρικά συμμετρικού καθοδικού αλεξικεραύνου χωρίς διάκενα:

- Η μη γραμμική αντίσταση πρέπει να αναπαρίστανται με τις πραγματικές διαστάσεις και τη διηλεκτρική της σταθερά. Μια “ισοδύναμη” μη γραμμική αντίσταση μεγαλύτερης διαμέτρου δίνει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη καταπόνηση.
- Η εξωτερική μόνωση του αλεξικεραύνου μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν κύλινδρο ο οποίος έχει εσωτερική διάμετρο και πάχος ίσα με αυτά του δοκιμίου. Επίσης η διηλεκτρική σταθερά του περιβλήματος θα πρέπει να προσεγγίζει αυτή του πραγματικού, δηλαδή, της πορσελάνης ή ενός πολυμερούς. Τα πτερύγια του μονωτικού περιβλήματος μπορούν να αγνοηθούν κατά την αναπαράσταση του καθοδικού αλεξικεραύνου, αφού η επίδρασή τους στην κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης είναι αμελητέα (δε συμβαίνει το ίδιο όμως για το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το αλεξικέραυνο).
- Το ενδιάμεσο υαλώδες υλικό μεταξύ του μονωτικού περιβλήματος και της μη γραμμικής αντίστασης πρέπει να αναπαρασταθεί με τις πραγματικές του διαστάσεις και τη διηλεκτρική σταθερά.
- Τα ηλεκτρόδια μπορούν να αναπαρασταθούν με κυλίνδρους οι οποίοι έχουν διαμέτρους ίσους με τους μέγιστους εξωτερικούς διαμέτρους των πραγματικών ηλεκτροδίων και ύψη ίσα με τα πραγματικά ύψη των ηλεκτροδίων.
- Τα τοροειδή που τοποθετούνται στα καθοδικά αλεξικέραυνα για να βελτιώσουν την κατανομή της τάσης κατά μήκος την μη γραμμικής αντίστασης, μπορούν να αναπαρασταθούν με τις πραγματικές τους διαστάσεις. Αγνοώντας τα μεταλλικά μέρη που στηρίζουν τα τοροειδή, είναι πιθανόν να προκύψει μεγαλύτερη από την πραγματική καταπόνηση του αλεξικεραύνου.
- Το καλώδιο υψηλής τάσης πρέπει να αναπαρασταθεί από έναν κυλινδρικό αγωγό με διάμετρο όχι μεγαλύτερη αυτής του πραγματικού.

3.1.3 Μοντελοποίηση των συνοριακών συνθηκών

Για εγκαταστάσεις καθοδικών αλεξικεραύνων σε τριφασικά συστήματα οι συνοριακές συνθήκες καθορίζονται από τις αποστάσεις από γειωμένα αντικείμενα και αγωγούς υπό τάση. Η διαδικασία υπολογισμού μπορεί να απλοποιηθεί με την μετατροπή της πραγματικής τριφασικής, τρισδιάστατης διάταξης σε μια ισοδύναμη μονοφασική και συμμετρική ως προς έναν άξονα δισδιάστατη απεικόνιση, η οποία μπορεί να επιλυθεί με χρήση κατάλληλων λογισμικών. Η ισοδύναμη συμμετρική διάταξη προκύπτει με την μοντελοποίηση του αλεξικέραυνου στο κέντρο ενός γειωμένου κυλίνδρου, με ακτίνα η οποία καθορίζεται από την ελάχιστη απόσταση μεταξύ φάσης και γης (minimum phase-to-earth clearance), όπως αυτή συνίσταται από τον κατασκευαστή και ύψος 1,5 φορές μεγαλύτερο από το συνολικό ύψος του αλεξικέραυνου.



Σχήμα 3.1 Εγκαταστάσεις αλεξικεραύνων σε τριφασικό και μονοφασικό σύστημα [1]

3.1.4. Διαδικασία υπολογισμού

Η διαδικασία υπολογισμού και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τον τρόπο της αναπαράστασης της μη γραμμικής αντίστασης και τις ιδιότητες των υλικών. Στην περίπτωση που η μη γραμμική αντίσταση αναπαρίσταται μόνο από την χωρητικότητά της, προκύπτουν αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε μικρότερες καταπονήσεις σε σχέση με την πραγματικότητα. Εάν ληφθεί υπόψη και η ωμική συμπεριφορά της μη γραμμικής αντίστασης, επιτυγχάνεται μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση της καταπόνησης του βαριστορ.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το 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 συνιστώσες. Οι παράσιτες χωρητικότητες ως προς γη δίνονται από τη σχέση (3.1):

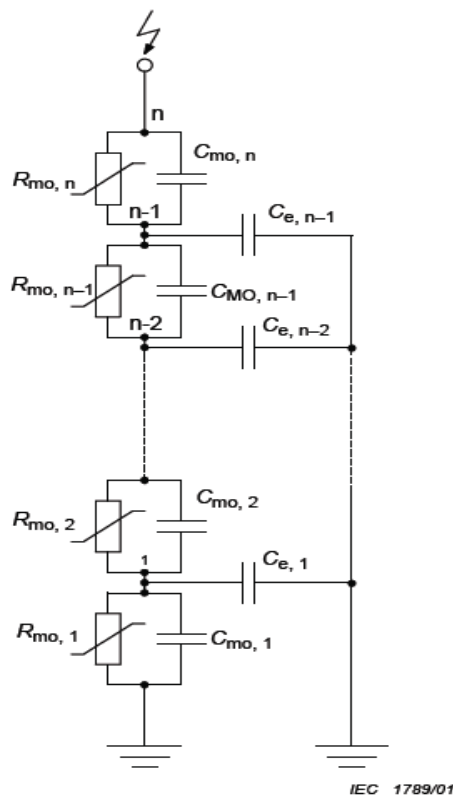
$$C_{e,x} = \frac{(U_{x+1} - U_x)C_{MO,x+1} - (U_x - U_{x-1})C_{MO,x}}{U_x} \quad (x = 1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (3.1)$$

όπου U_x η τάση του κόμβου x

$C_{MO,x}$ η χωρητικότητα ενός τμήματος x της μη γραμμικής αντίστασης

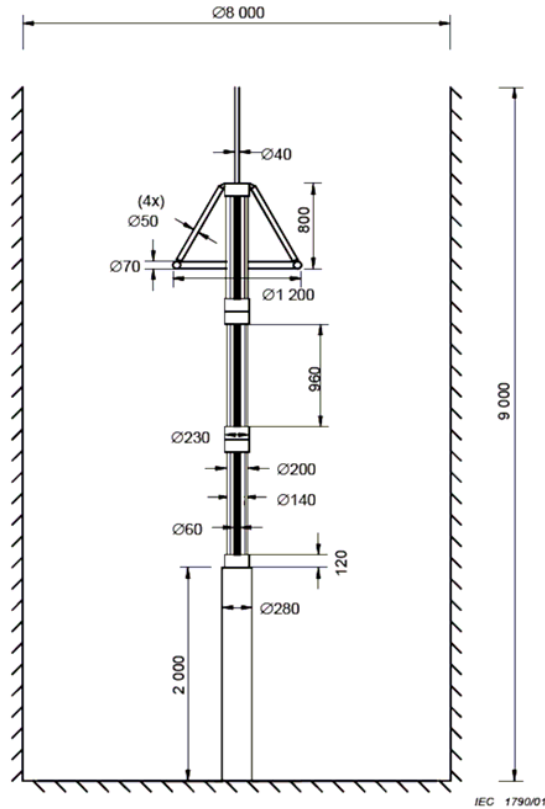
$C_{e,x}$ η παράσιτη χωρητικότητα ως προς γη του κόμβου x

n ο αριθμός των τμημάτων της μη γραμμικής αντίστασης



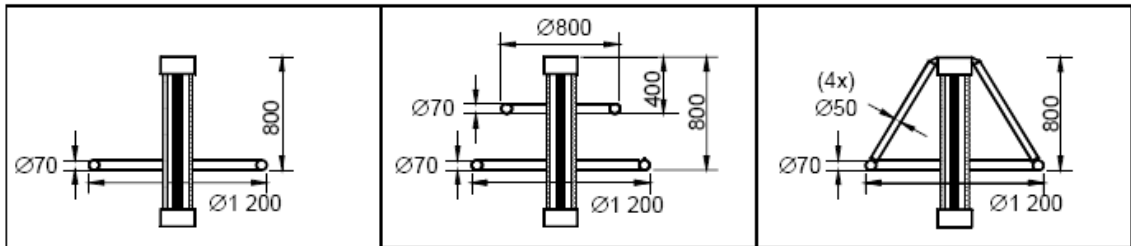
Σχήμα 3.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα καθοδικού αλεξικέραυνου [1]

Για τον υπολογισμό της κατανομής της τάσης και του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιείται είτε η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) είτε η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method). Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η γεωμετρία και οι διαστάσεις ενός αλεξικεραύνου υψηλής τάσης, ενώ στο Σχήμα 3.4 τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την αναπαράσταση του τοροειδούς.



Σχήμα 3.3: Απλοποιημένο μοντέλο καθοδικού αλεξικέραννου με πολλά τμήματα

Η διηλεκτρική σταθερά της μη γραμμικής αντίστασης είναι ίση με 800, της μόνωσης ίση με 5, ενώ η εφαρμοζόμενη τάση είναι 333kV βιομηχανικής συχνότητας



Σχήμα 3.4: Διαφορετικές αναπαραστάσεις τοροειδών (μοντέλα α, β, γ)

Τα αποτελέσματα για την μέγιστη καταπόνηση τάσης σε κάθε τμήμα φαίνονται στον Πίνακα 3.1, όπου είναι μέσος όρος αποτελεσμάτων FEM και BEM που έχουν υπολογιστεί με διάφορα υπολογιστικά πακέτα. Η καταπόνηση εκφράζεται ως ποσοστό της εφαρμοζόμενης τάσης ανά μέτρο κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης.

Πίνακας 3.1

	Μέγιστη καταπόνηση τάσης		
	Άνω τμήμα (%m)	Μεσαίο τμήμα (%m)	Κάτω τμήμα (%m)
Δισδιάστατοι υπολογισμοί			
Μοντέλο α	50	39	26
Μοντέλο β	44	40	27
Τρισδιάστατοι υπολογισμοί			
Μοντέλο α	50	37	27
Μοντέλο β	43	38	28

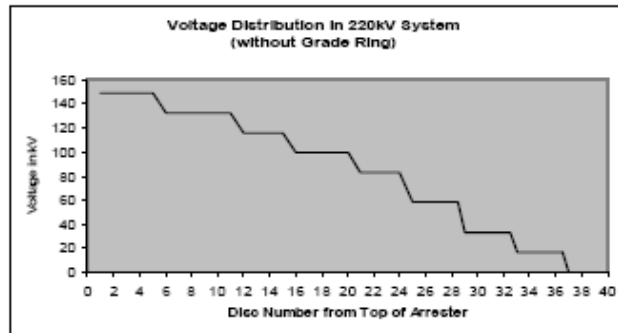
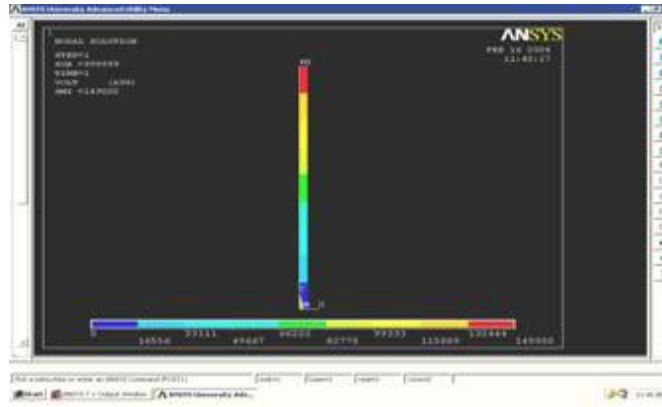
3.2. Μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου και της κατανομής του δυναμικού σε καθοδικά αλεξικέρανα από διάφορους ερευνητές

Ο R.Karthik στο [2] εφαρμόζει τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό της κατανομής του δυναμικού σε καθοδικά αλεξικέρανα υψηλής τάσης με και χωρίς τοροειδή (Σχήμα 3.5), χρησιμοποιώντας το ANSYS 7-1. Στα Σχήματα 3.6 έως 3.9 φαίνεται η κατανομή του δυναμικού για αλεξικέρανα των 220kV και 380kV.

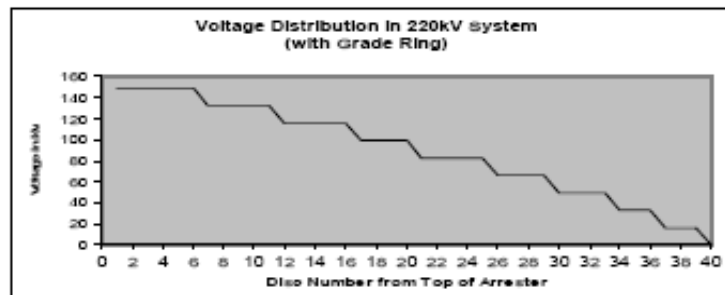
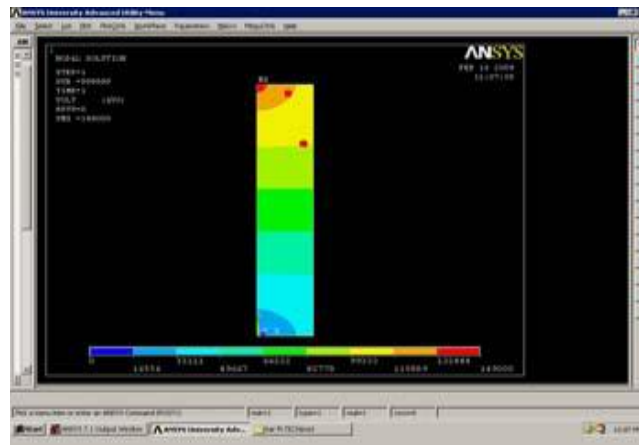


Σχήμα 3.5: Διάταξη καθοδικών αλεξικέρανων με δακτύλιους [2]

Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

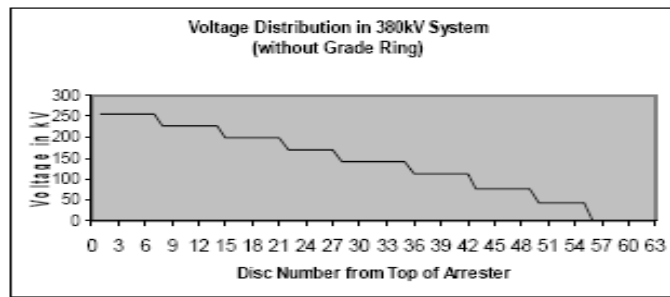


Σχήμα 3.6: Κατανομή τάσεως σε αλεξικέρανο 220kV χωρίς τοροειδή [2]

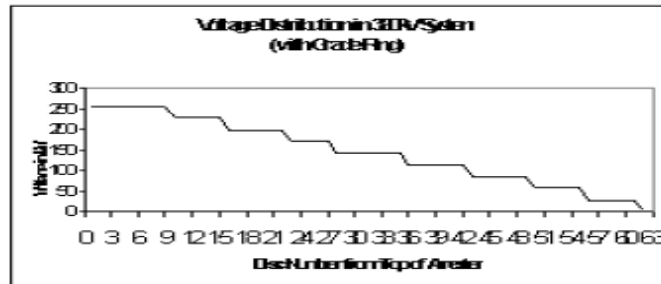
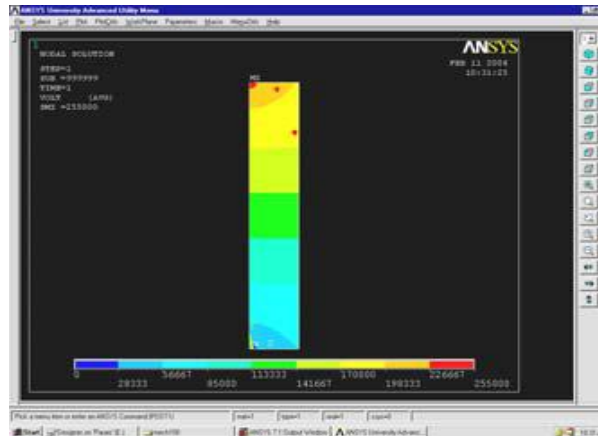


Σχήμα 3.7: Κατανομή τάσεως σε αλεξικέρανο 220kV με τοροειδή [2]

Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση



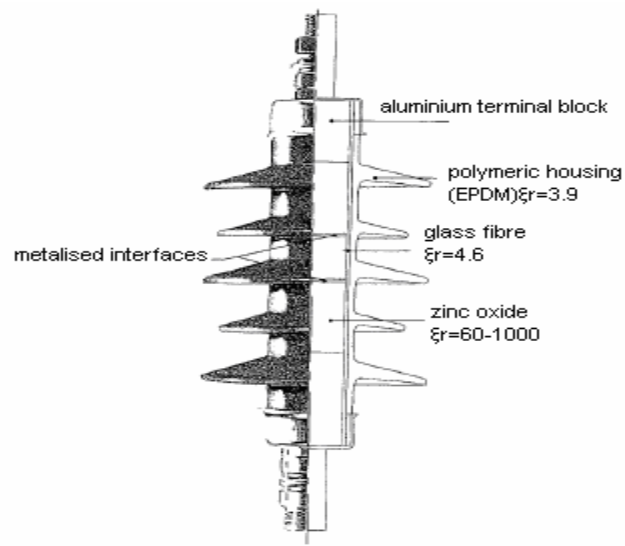
Σχήμα 3.8: Κατανομή τάσεως σε αλεξικέρανο 380kV χωρίς τοροειδή [2]



Σχήμα 3.9: Κατανομή τάσεως σε αλεξικέρανο 380kV με τοροειδή [2]

Από την παραπάνω ανάλυση φαίνεται τα τμήματα της μη γραμμικής αντίστασης που είναι πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης υφίστανται μεγαλύτερη καταπόνηση, η οποία οδηγεί σε γήρανση και υποβάθμιση της ποιότητας των δίσκων του βαρίστορ. Η εφαρμογή των τοροειδών φαίνεται να βελτιώνει την κατανομή της τάσης εντός του αλεξικεραύνου, κάνοντάς την πιο ομοιόμορφη. Η τοποθέτηση των τοροειδών είναι περισσότερο αναγκαία για αλεξικέραυνα με ονομαστική τάση άνω των 110kV.

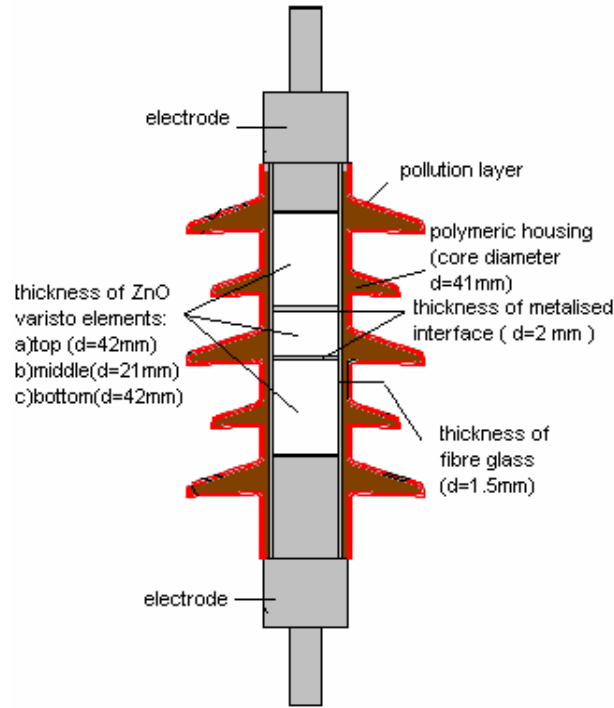
Στο [3] εξετάζεται η επίδραση της ρύπανσης στην επιφάνεια των αλεξικεραύνων στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού, με χρήση του προγράμματος Femlab. Στο Σχήμα 3.10 δίνονται κατασκευαστικές λεπτομέρειες για το προς εξέταση δοκίμιο των 15kV.



Σχήμα 3.10: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του καθοδικού αλεξικεραύνου [3]

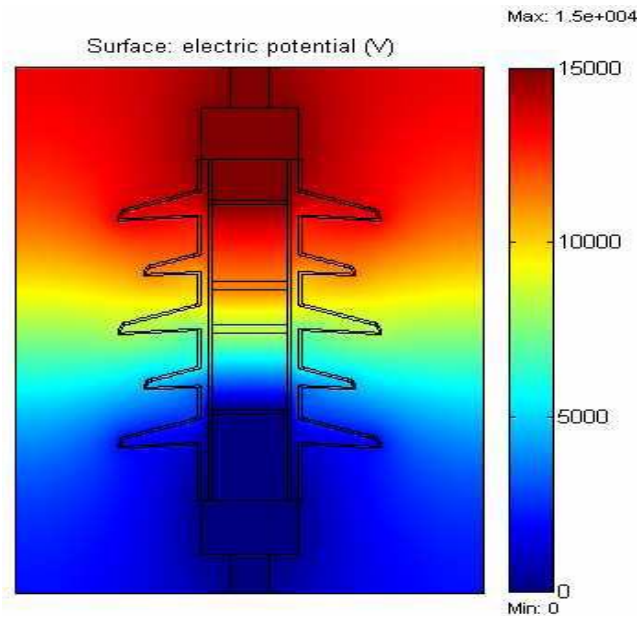
Το μονωτικό περίβλημα του αλεξικέραυνου είναι υλικό EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=3,9$. Η μη γραμμική αντίσταση αποτελείται από τρία τμήματα συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ μεταξύ μόνωσης και βαρίστορ υπάρχει υαλώδης ίνα (glass fibre) με $\epsilon_r=4,6$.

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η γεωμετρία του δοκιμίου.

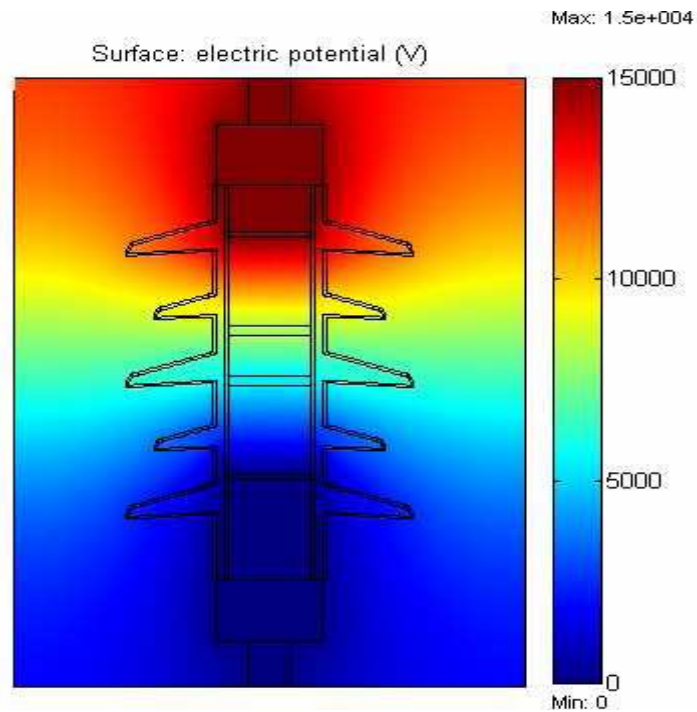


Σχήμα 3.11: Γεωμετρία καθοδικού αλεξικέραννου 15kV [3]

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού του δυναμικού που γίνεται με την χρήση του προγράμματος FEMLAB παρουσιάζονται στα δύο Σχήματα 3.12 και 3.13.

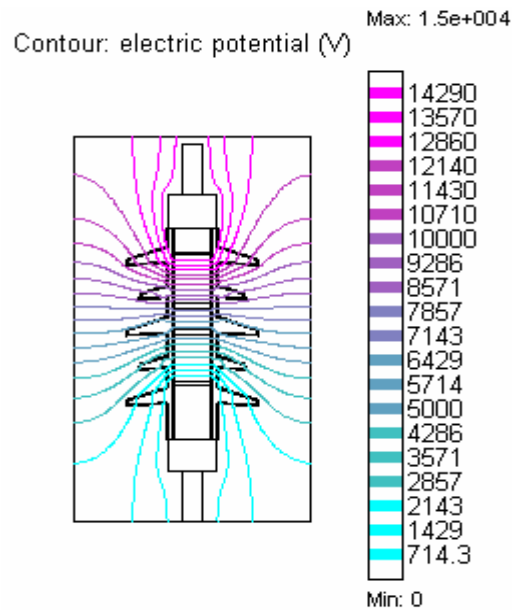


Σχήμα 3.12: Κατανομή τάσης με παρουσία ρύπανσης (αγωγιμότητα στρώματος σκόνης $\sigma=70\mu S$) [3]

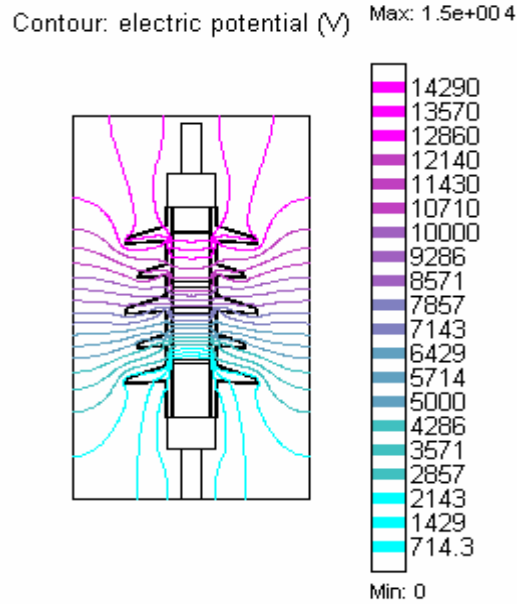


Σχήμα 3.13: Κατανομή τάσης χωρίς την παρουσία ρύπανσης [3]

Τα Σχήματα 3.13 και 3.14 δυναμικές γραμμές εντός και εκτός του αλεξικεραύνου υπό την παρουσία και μη ρύπανσης αντίστοιχα.

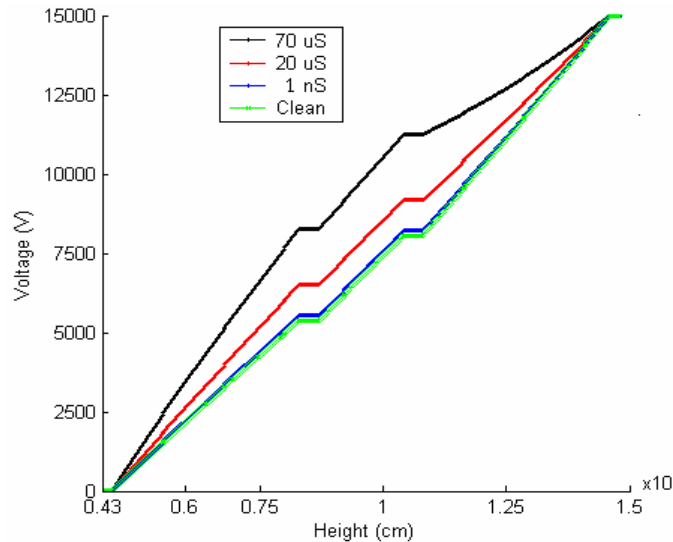


Σχήμα 3.14: Ισοδυναμικές καμπύλες για καθοδικό αλεξικέραυνο 15kV χωρίς ρύπανση [3]



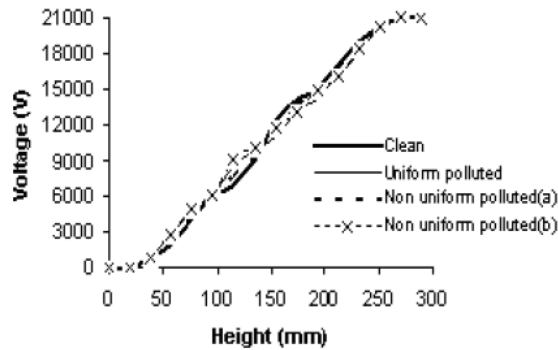
Σχήμα 3.15: Ισοδυναμικές καμπύλες για καθοδικό αλεξικέραυνο 15kV με ρύπανση[3]

Στην περίπτωση της μελέτης της κατανομής της τάσης σε ένα καθοδικό αλεξικέραυνο παρουσία ρύπανσης, έχουν θεωρηθεί τρία διαφορετικά επίπεδα αγωγιμότητας του στρώματος της σκόνης: $\sigma=70\mu\text{S}$, $\sigma=20\mu\text{S}$, $\sigma=1\text{nS}$. Το σχήμα 3.16 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.



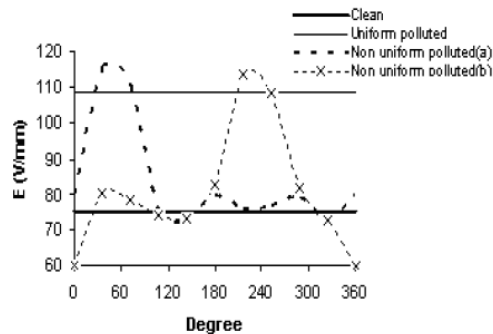
Σχήμα 3.16: Κατανομή της τάσης κατά μήκος του βαρίστορ (ZnO)[3]

Η επίδραση της ρύπανσης στην κατανομή του πεδίου και του δυναμικού έχει μελετηθεί και στο [4] για διάφορες τιμές αγωγιμότητας της ρύπανσης χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη έκδοση του PC-Opera. Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η κατανομή της τάσης συναρτήσει του ύψους του αλεξικεραύνου χωρίς ρύπανση, με ομοιόμορφη ρύπανση ($\epsilon_r = 18$, $\sigma = 20 \mu S$) και ανομοιόμορφη ρύπανση ((α) $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ $\epsilon_r = 18$, $\sigma = 20 \mu S$, (β) $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ $\epsilon_r = 18$, $\sigma = 20 \mu S$, $180^\circ < \varphi < 270^\circ$ $\epsilon_r = 650$, $\sigma = 70 \mu S$)



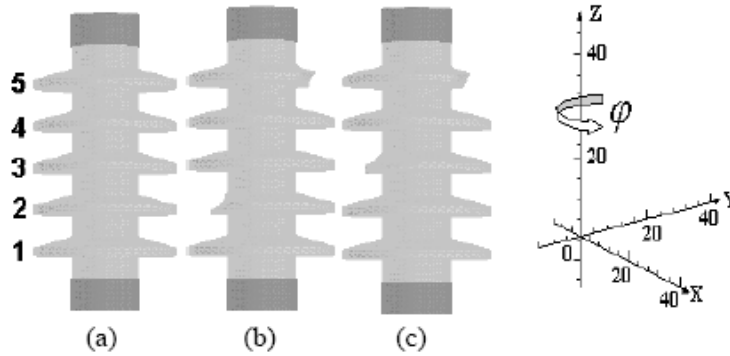
Σχήμα 3.17: Κατανομή της τάσης συναρτήσει του ύψους [4]

Στο Σχήμα 3.18 φαίνεται το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση 75mm από το άξονα του δοκιμίου και ύψος 220mm.



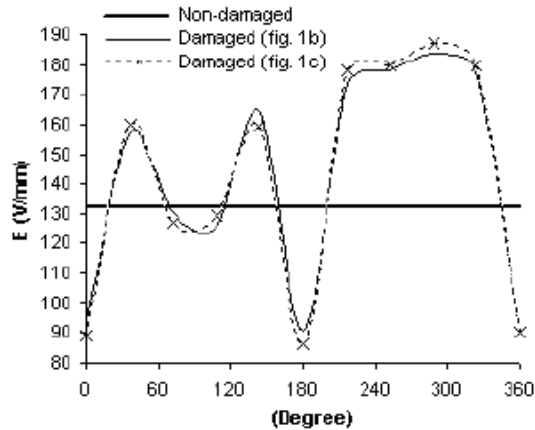
Σχήμα 3.18: Ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το αλεξικέραυνο [4]

Η ίδια ερευνητική ομάδα εξέτασε την κατανομή δυναμικού και πεδίου σε δοκίμια με σπασμένα πετρώγια της εξωτερικής μόνωσης (Σχήμα 3.19) [5].



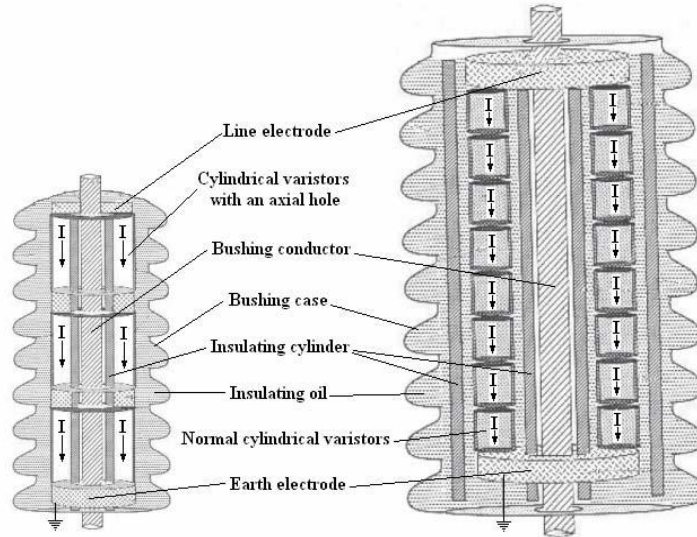
Σχήμα 3.19 Αλεξικέραυνα με σπασμένα πετερύγια [5]

Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 346mm και απόσταση 20mm από τον άξονα του δοκιμίου.

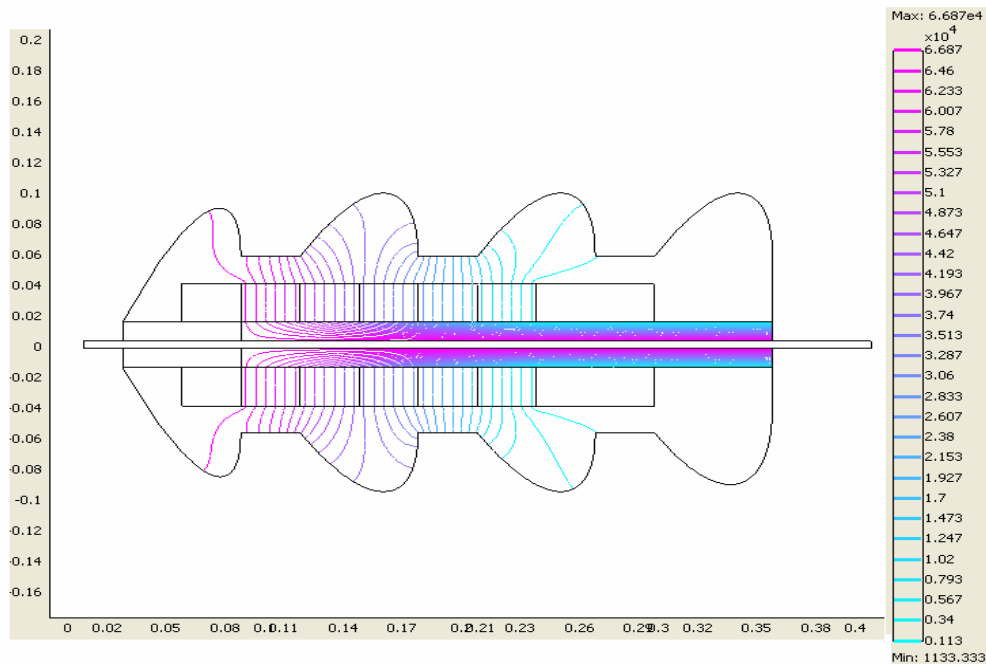


Σχήμα 3.20 Μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο [5]

Στο [6] προτείνεται η εγκατάσταση (ενσωμάτωση) των αλεξικέραυνων στο εσωτερικό των μονωτήρων των μετασχηματιστών, τοποθετώντας στο κέντρο της μη γραμμικής αντίστασης σωλήνα με μονωτικό έλαιο. (Σχήμα 3.21) Στο [5] εξετάζεται η κατανομή του πεδίου και του δυναμικού σε αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης (Σχήμα 3.22) στο κέντρο των οποίων υπάρχει ένας κύλινδρος με μονωτικό λάδι, που συνεισφέρει στην καλύτερη απαγωγή της θερμότητας και αυξάνει τη διάρκεια ζωής του αλεξικεραύνου. Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με το πρόγραμμα Cosmol Multiphysics.



Σχήμα 3.21: Διατάξεις καθοδικών αλεξικεραάνων: μέση τάση (αριστερά) και υψηλή τάση (δεξιά)[6]



Σχήμα 3.22: Το ηλεκτρικό πεδίο και οι ισοδυναμικές γραμμές σε ένα καθοδικό αλεξικέρανο μέσης τάσης με σωλήνα ελαίου[6]

Στο [7] εξετάζεται η επίδραση της θέσης και των διαστάσεων των τοροειδών στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η βέλτιστη κατανομή επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση των τοροειδών στο 75%-86% του ύψους των αλεξικεραύνου.

Στο [8] επιχειρείται ο υπολογισμός της τάσης κατά μήκος αλεξικεραύνων υψηλής τάσης, με χρήση ενός συνδυασμού μιας παραλλαγής της μεθόδου ισοδυνάμων φορτίων και κυκλωματικής επίλυσης. Δημιουργείται ένα ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα με τη μέθοδο των ισοδυνάμων φορτίων, το οποίο στη συνέχεια επιλύεται με Kirchoff. Ωστόσο πρόκειται για χρονοβόρα μέθοδο, δύσκολα εφαρμόσιμη, καθώς απαιτείται προσδιορισμός των φορτίων σε διάφορες θέσεις και μεγάλος αριθμός πράξεων με πίνακες, όχι με κάποια αυτοματοποιημένη διαδικασία (όπως στα διάφορα υπολογιστικά πακέτα) αλλά προγραμματισμένα από το χρήστη.

Βιβλιογραφία

- [1] IEC 60099-4, “Surge Arresters: Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems”, second edition, 2004-2005.
- [2] R.Karthik, “A novel analysis of voltage distribution in Zinc Oxide arrester using finite element method”, International journal of recent trends in Engineering, Vol.1, No.4, May 2009
- [3] F.Tighilt, A.Bayadi, “Computed voltage distribution in ZnO arrester under pollution by finite element method”, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP’2007
- [4] B. Vahidi R. Shariati Nasab J.S.Moghani, “Analysis of Electric Field and Voltage Distribution Zno Surge Arrester for Polluted Condition”, Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005
- [5] B.Vahidi, R.Shariati Nasab, J.Sh. Moghami. S.A.Kashi, S.H.Hosseinian, “Three Dimensional Analyses of Electric Field and Voltage Distribution on ZnO surge arrester with Broken Sheds”, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia and Pacific Dalian, China

- [6] M.Meshkatoddini, “Study of the Electric Field Intensity in Bushing Integrated ZnO Surge Arresters by Means of Finite Element Analysis”, Proceedings of the COSMOL Users Conference 2006 Boston
- [7] U.Kumar, V.Mogaveera, “Voltage distribution studies on ZnO arresters”, IEE Generation, Transmission and Distribution, Vo.149, Issue 462, PP.457-462, July 2002
- [8] S.J.Han, J.Zou, S.Q.Gu, J.L. He, J.S. Yuan, “Calculation of the potential distribution of high voltage metal oxide arrester by using an improved semi-analytic Finite Element Method”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.41, no.5, May 2005, pp.1392-1395

Κεφάλαιο 4

Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

4.1.Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη, η διαδικασία λήψης των μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από ένα καθοδικό αλεξικέραυνο μέσης τάσης και ο υπολογισμός της συνολικής αβεβαιότητας που συνοδεύει κάθε μέτρηση. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ με την χρήση κατάλληλων διακριβωμένων οργάνων και συγκρίνονται με τιμές που προκύπτουν με προσομοιώσεις του καθοδικού αλεξικεραύνου με χρήση του 2d και 3d PC Opera.

Η μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου, όπως προκύπτει και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι ιδιαίτερα σημαντική και χρήσιμη καθώς:

- Η γνώση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται τόσο στο εσωτερικό, όσο και στον περιβάλλοντα χώρο του αλεξικέραυνο είναι απαραίτητη, προκειμένου κατά τη σχεδίαση να αποφεύγονται μεγάλες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη εμφάνιση, αρχικά, μερικών εκκενώσεων και τελικά σε υπερπήδηση ή και διάτρηση της μόνωσης του αλεξικεραύνου.
- Η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, που βρίσκεται τοποθετημένο το καθοδικό αλεξικέραυνο. Ανάλογα με την περιοχή τοποθέτησης των αλεξικεραυνών, είναι δυνατόν στην επιφάνειά τους να εμφανιστεί υγρασία ή θαλάσσια άλμη ή ακαθαρσίες, που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, ή συνδυασμός των ανωτέρω, οι οποίες με την σειρά τους μεταβάλλουν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και την κατανομή του δυναμικού. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η επίδραση των ανωτέρω συνθηκών ρύπανσης στο ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τύπου αλεξικέραυνο,
- Η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταβάλλεται, όταν το αλεξικέραυνο παρουσιάσει κάποια αλλαγή στη γεωμετρία του (σπάσιμο πτερυγίου ή κάποια διάτρηση).

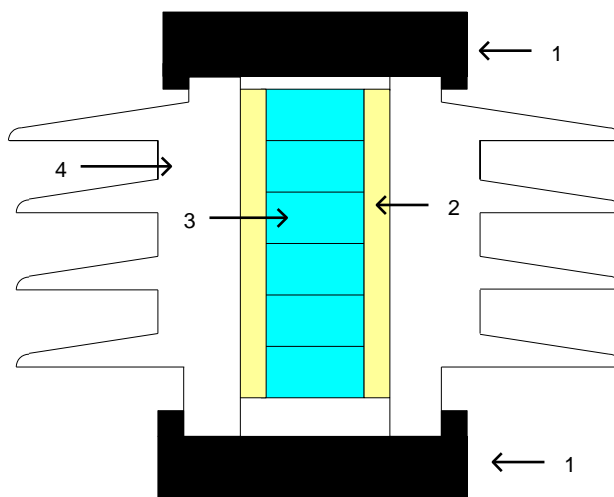
Εξίσου σημαντική για το σχεδιασμό ενός αλεξικέρανου είναι και η μελέτη της κατανομής της επιβαλλόμενης τάσης, καθώς:

- Η κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης σχετίζεται άμεσα με την καταπόνηση, που υφίσταται το αλεξικέρανου κατά τη λειτουργία του, καθώς τα τμήματα της μη γραμμικής αντίστασης που βρίσκονται εγγύτερα του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης καταπονούνται περισσότερο.
- Η προσπάθεια για ομοιοόμορφη κατανομή του δυναμικού, συνεπάγεται βέλτιστη αξιοποίηση των υλικών και συνεπώς μείωση του κόστους.

4.2. Το εξεταζόμενο δοκίμιο

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η τομή ενός καθοδικού αλεξικεραύνου χωρίς διάκενα. Βασικά μέρη του αλεξικεραύνου είναι:

- τα ηλεκτρόδια υψηλής τάσης και γης
- η στήλη της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ)
- ένα ενδιάμεσο υαλώδες υλικό
- η εξωτερική μόνωση



Σχήμα 4.1 Τομή ενός καθοδικού αλεξικεραύνου χωρίς διάκενα: 1. ηλεκτρόδια, 2. βαρίστορ, 3. ενδιάμεσο υαλώδες υλικό, 4. μόνωση

Το προς εξέταση δοκίμιο αποτελείται από ένα καθοδικό αλεξικέραυνο χωρίς διάκενα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4.1: Ηλεκτρικά και Μηχανικά χαρακτηριστικά του εξεταζομένου αλεξικεραύνου

Μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας (MCOV)	13.2 kV		
Ονομαστική τάση (Rated Voltage)	16.5 kV		
Παραμένουσα τάση (Residual Voltage)	8/20μs	5 kA	78.19 kV
		10 kA	82.99 kV
		20 kA	91.87 kV
	1/60μs	20 kA	90.24 kV
Μόνωση	Silicon rubber		
Αριθμός πτερυγίων	6		

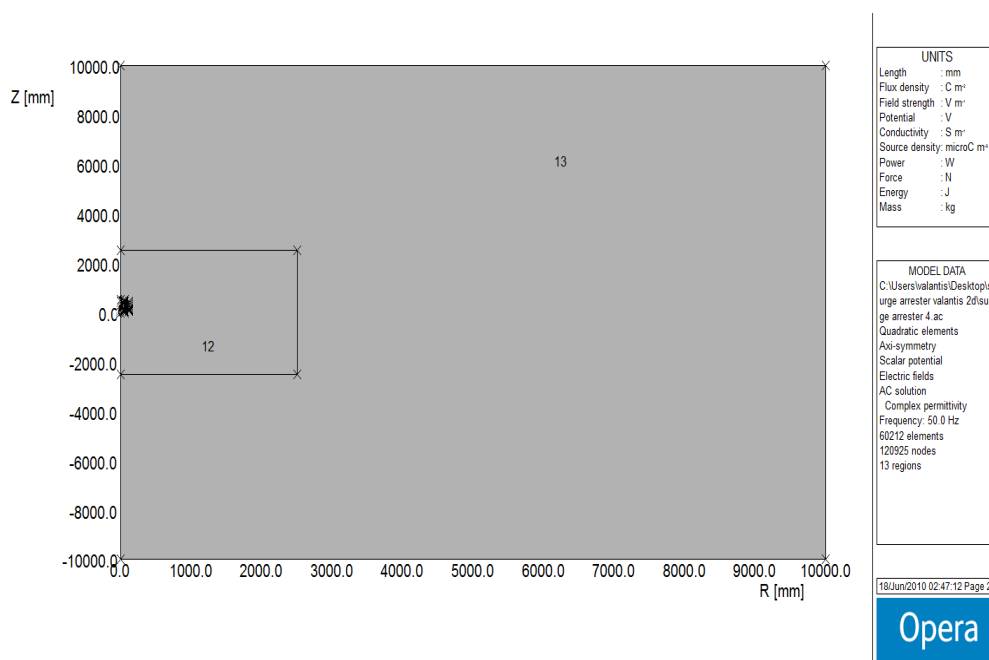


Σχήμα 4.2: Το καθοδικό αλεξικέραυνο που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων

4.3.Υπολογισμός της κατανομής του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου με την δισδιάστατη έκδοση του PC Opera

4.3.1.Το πραγματικό μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου

Το πρόβλημα πεδιακής ανάλυσης του αλεξικέραυνου είναι τρισδιάστατο, επειδή, όμως, παρουσιάζει αξονική συμμετρία μπορεί να επιλυθεί και με την χρήση του δισδιάστατου πακέτου του προγράμματος 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 σχεδίαση, η επεξεργασία, η προσομοίωση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων στην δισδιάστατη έκδοση του προγράμματος PC OPERA περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.



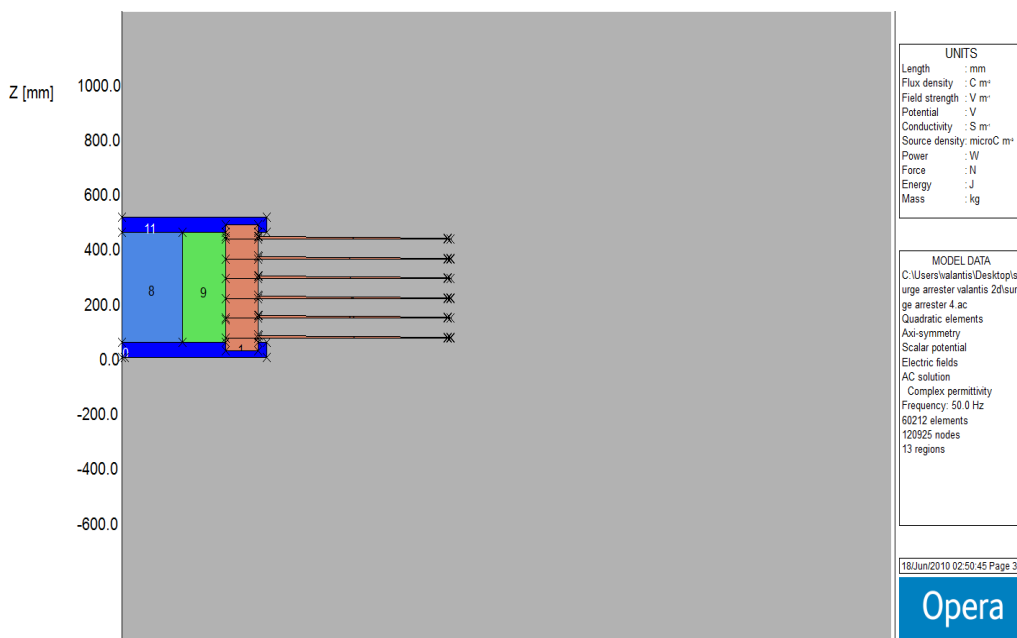
Σχήμα 4.3: Το μοντέλο του καθοδικού αλεξικέραυνου και ο χώρος που το περιβάλλει

Η περιοχή 8 των Σχημάτων 4.3 και 4.4 αποτελείται από την μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ) από οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), του οποίου η διηλεκτρική σταθερά είναι $\epsilon_r=100$. Η περιοχή 9 αποτελείται από το υαλώδες υλικό (glass fiber) που περιβάλλει το βαρίστορ με $\epsilon_r=4.6$. Οι περιοχές 10 και 11 είναι τα ηλεκτρόδια του καθοδικού αλεξικεραύνου αντίστοιχα για τα οποία τέθηκε $\epsilon_r = 1000$ και $\sigma = 10^6$ S/m. Στο ηλεκτρόδιο 11 εφαρμόζονται ξεχωριστά τρία επίπεδα εναλλασσόμενης τάσης (12, 13.2 και 16.5kV RMS), ενώ στο ηλεκτρόδιο 10 εφαρμόζεται μηδενικό δυναμικό. Τέλος, οι περιοχές 1 έως 7 είναι το εξωτερικό περίβλημα από πολυμερές μονωτικό υλικό με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 3,9$, ενώ η περιοχή 13 (και 12) είναι ο αέρας που περιβάλλει το μοντέλο με $\epsilon_r = 1$.

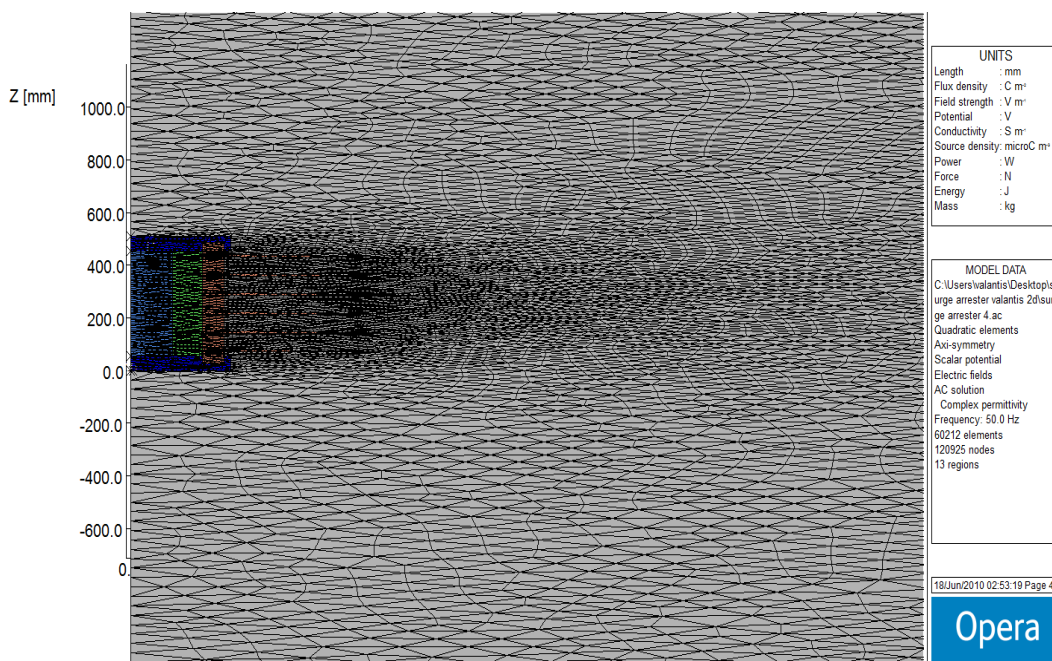
Το αλεξικέραυνο τοποθετήθηκε στο κέντρο ενός ορθογωνίου, του οποίου το μήκος είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από την ακτίνα του αλεξικέραυνου (Σχήμα 4.3). Ο ορισμός της συγκεκριμένης ορθογωνικής διάταξης είναι απαραίτητος, καθώς οριοθετεί ένα εξωτερικό όριο στο πρόβλημα, αφού στην περίμετρο του ορθογωνίου θεωρείται ότι είναι το πλέον απομακρυσμένο σημείο (άπειρο), όπου το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θεωρούνται μηδενικά. Το μέγεθος του ορθογωνίου (Σχήμα 4.3, 10m x 10m) αποδείχτηκε ότι είναι ικανοποιητικό, καθώς με δοκιμές βρέθηκε ότι μεγαλύτερο μέγεθος ορθογωνίου δεν αυξάνει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Κατά τη σχεδίαση, κρίθηκε αναγκαία η πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή κοντά στο αλεξικέραυνο, γι' αυτό και ορίστηκε επιπλέον μια πιο μικρή ορθογώνια περιοχή αέρα, η περιοχή 12 (Σχήμα 4.3, 2.5m x 2.5m) με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 60212 στοιχεία και 120925 κόμβοι. Είναι φανερό από το Σχήμα 4.5 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 ώστε να αποφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια.



Σχήμα 4.4: Το μοντέλο του καθοδικού αλεξικέραυνου σε δισδιάστατη μορφή



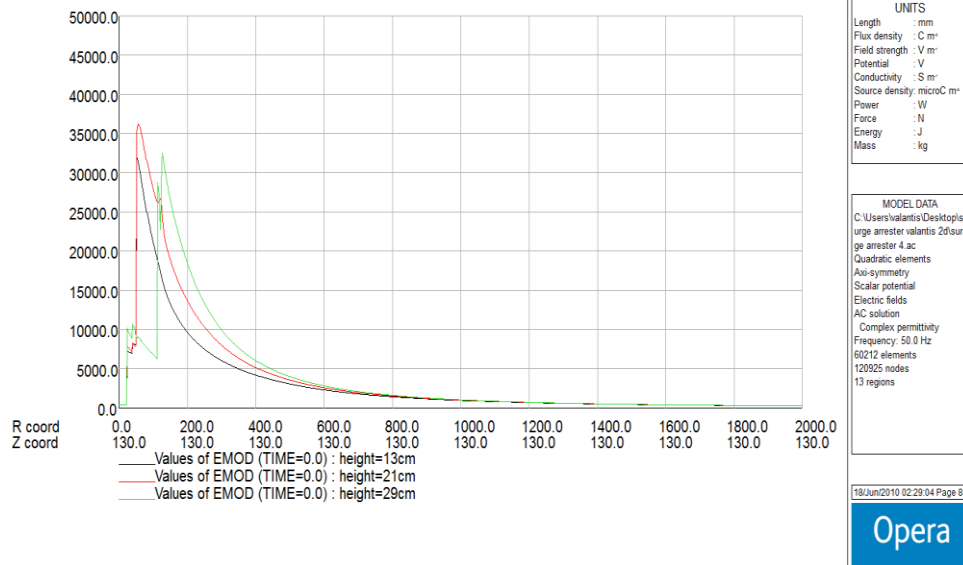
Σχήμα 4.5: Το πλέγμα που δημιουργείται από το PC OPERA 2D πριν την έναρξη της προσομοίωσης

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα και η επεξεργασία των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν και για τα τρία επίπεδα τάσης (Σχήματα 4.6 έως 4.20). Παρουσιάζονται αναλυτικά η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ), καθώς και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε τρεις οριζόντιους άξονες με ύψη 13, 21 και 29cm αντίστοιχα, από το επίπεδο του εδάφους.

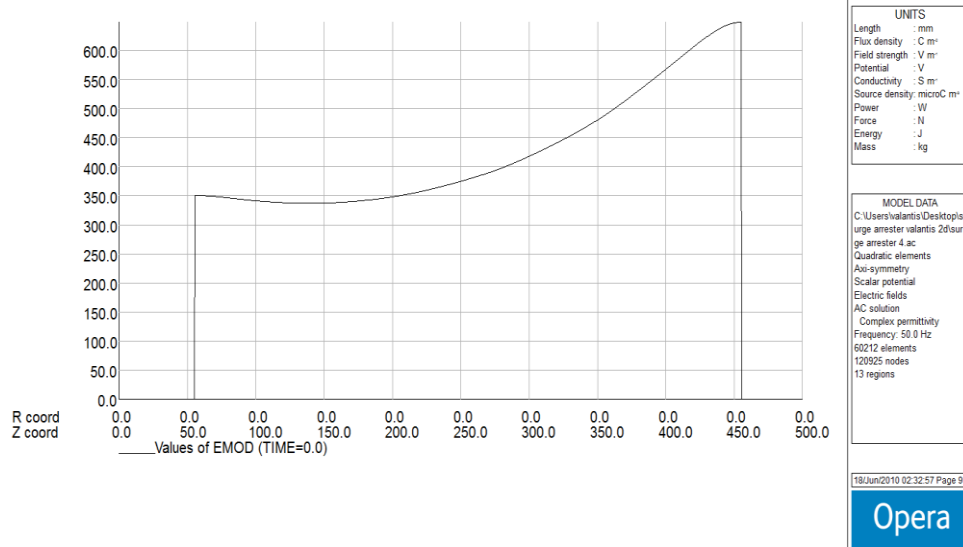
Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, διαπιστώνεται η ανομοιομορφία της κατανομής τόσο του δυναμικού όσο και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ. Αυτό επιβεβαιώνει τα όσα έχουν προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 3 της Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης. Για την επίτευξη πιο ομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης χρησιμοποιούνται τοροειδείς δακτύλιοι.

Στα Σχήματα 4.6 έως 4.20 που ακολουθούν παρουσιάζονται, το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για διάφορες θέσεις γύρω και μέσα από το καθοδικό αλεξικέραυνο.

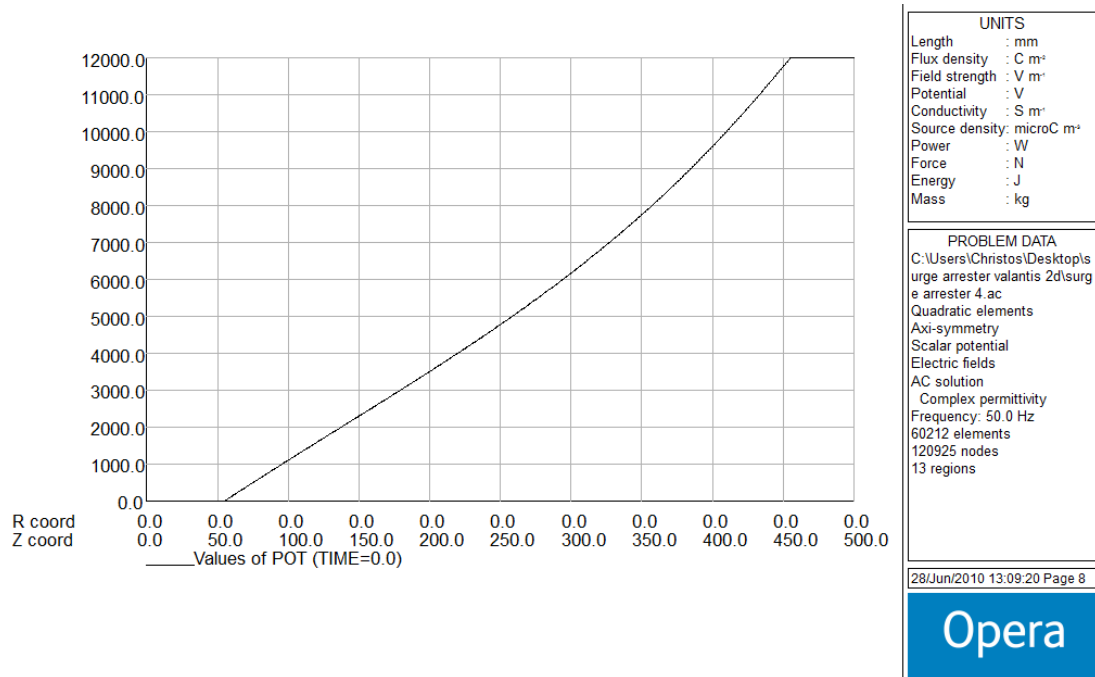
Τάση 12kV



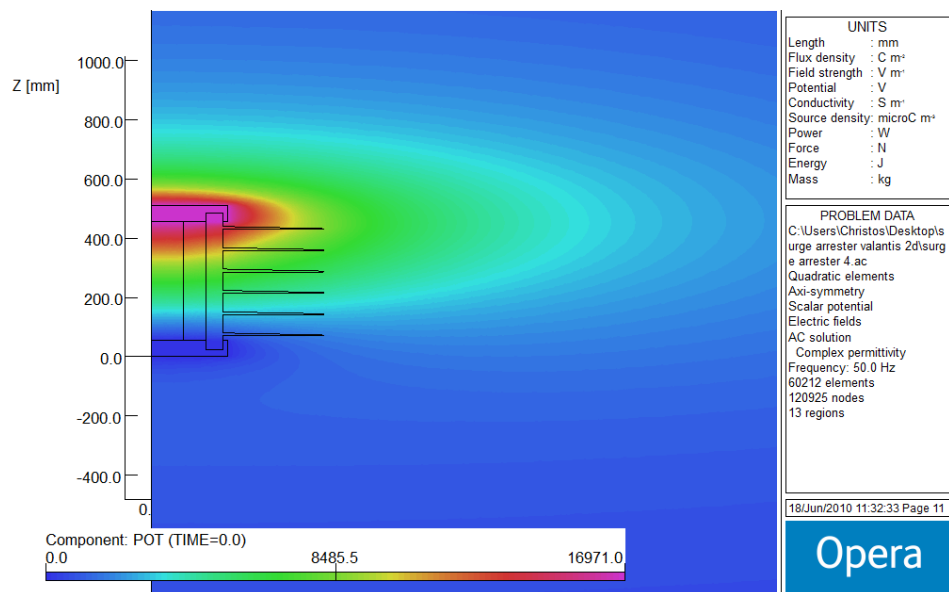
Σχήμα 4.6: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα, για τάση 12kV



Σχήμα 4.7: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 12kV

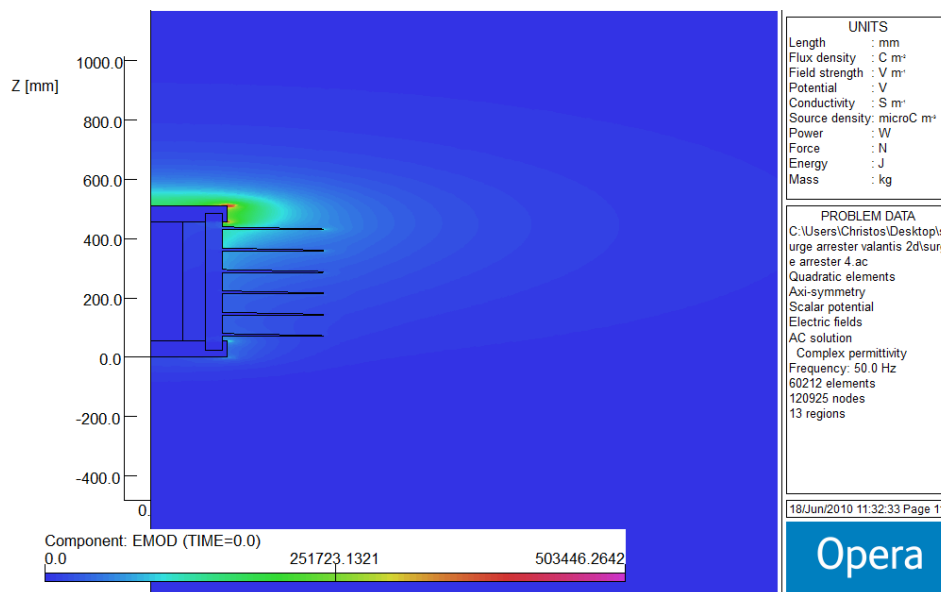


Σχήμα 4.8: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέρανου για τάση 12kV



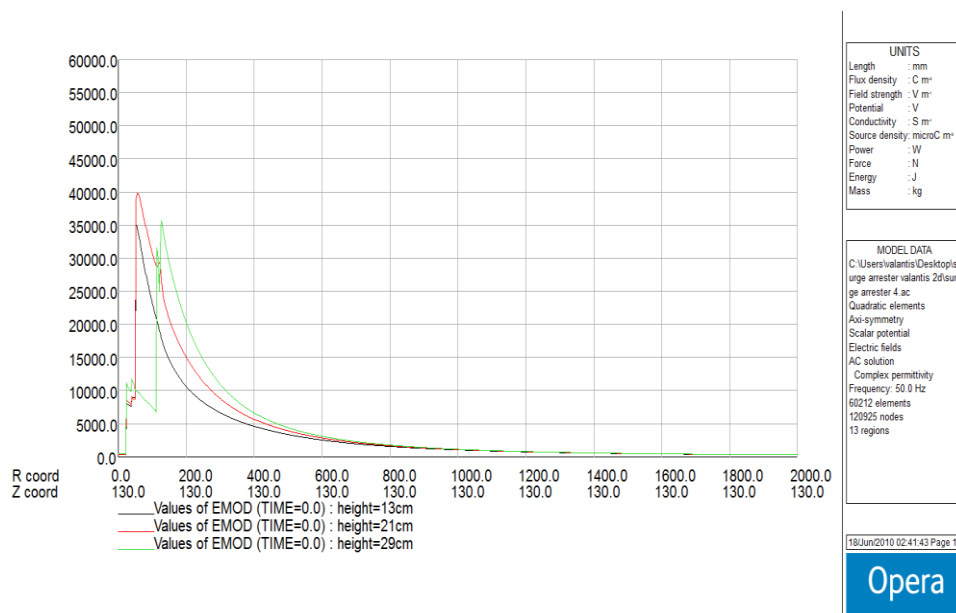
Σχήμα 4.9: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

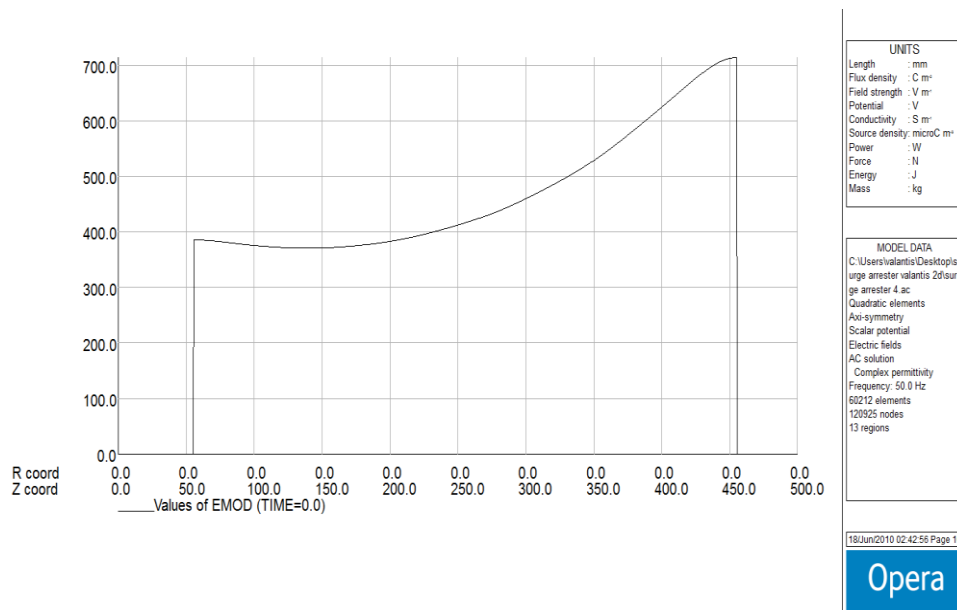


Σχήμα 4.10: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 12kV

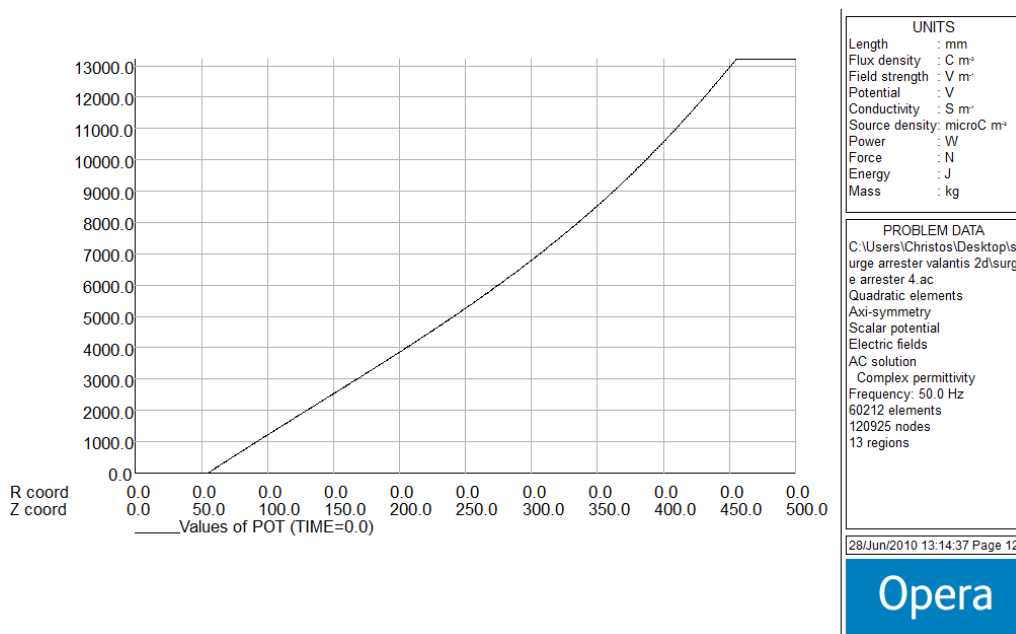
Τάση 13.2kV



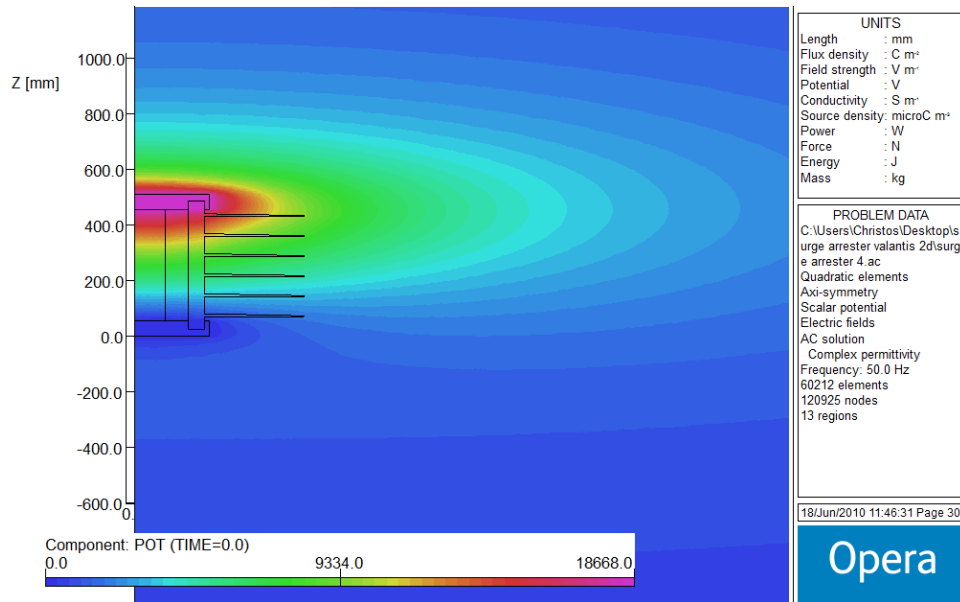
Σχήμα 4.11: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα, για τάση 13,2kV



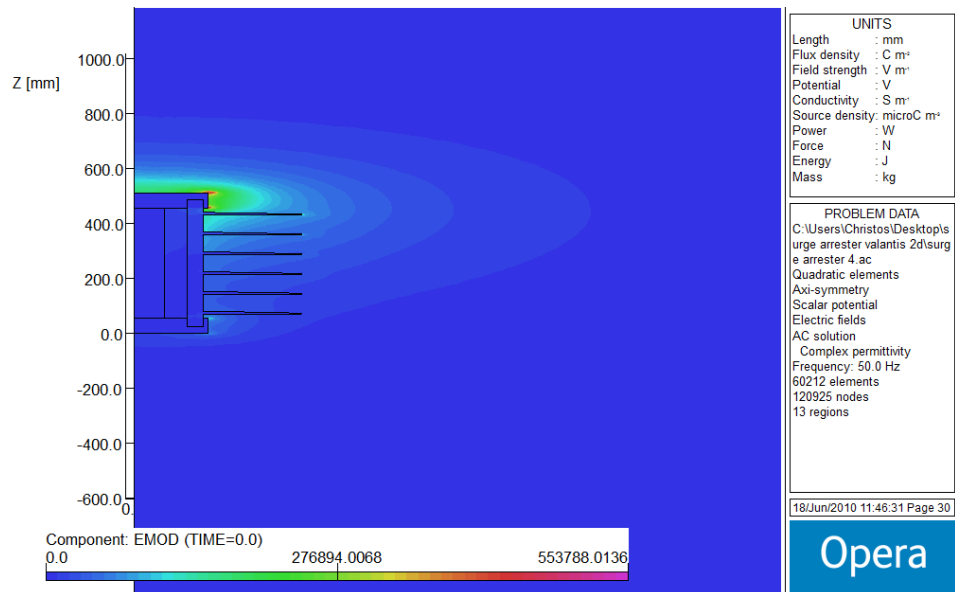
Σχήμα 4.12: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραυνου για τάση 13,2kV



Σχήμα 4.13: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραυνου για τάση 13,2kV

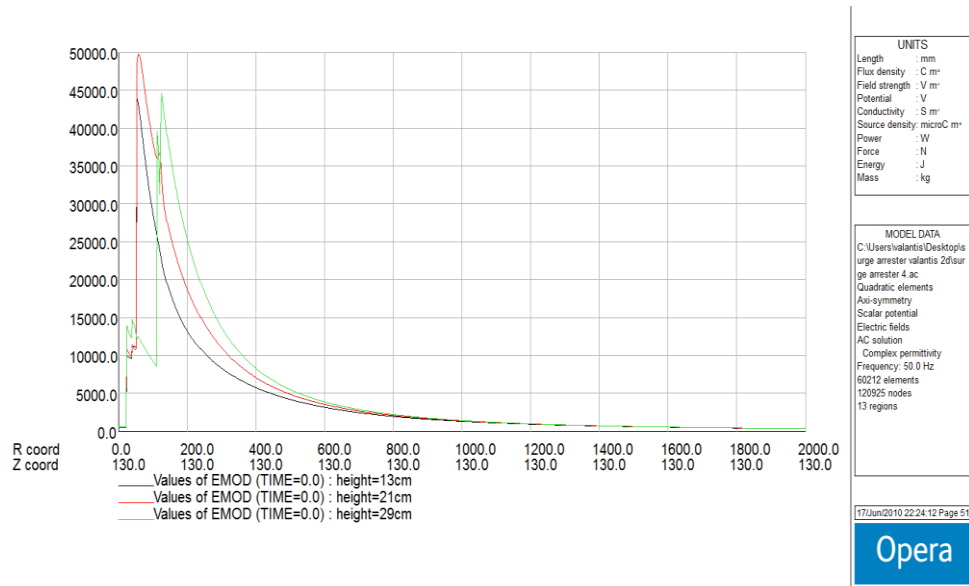


Σχήμα 4.14: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV

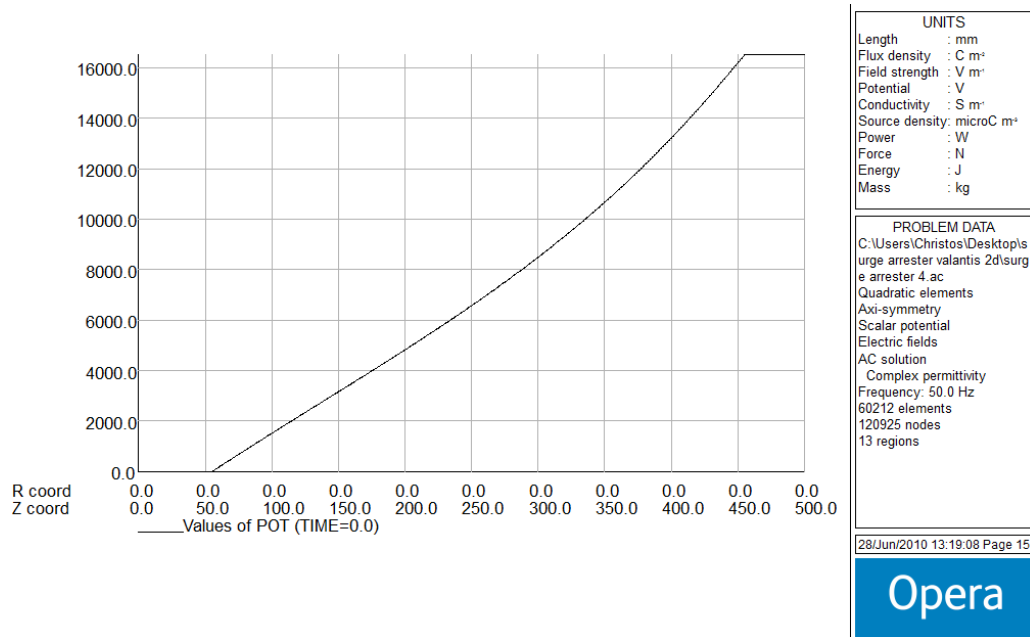


Σχήμα 4.15: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV

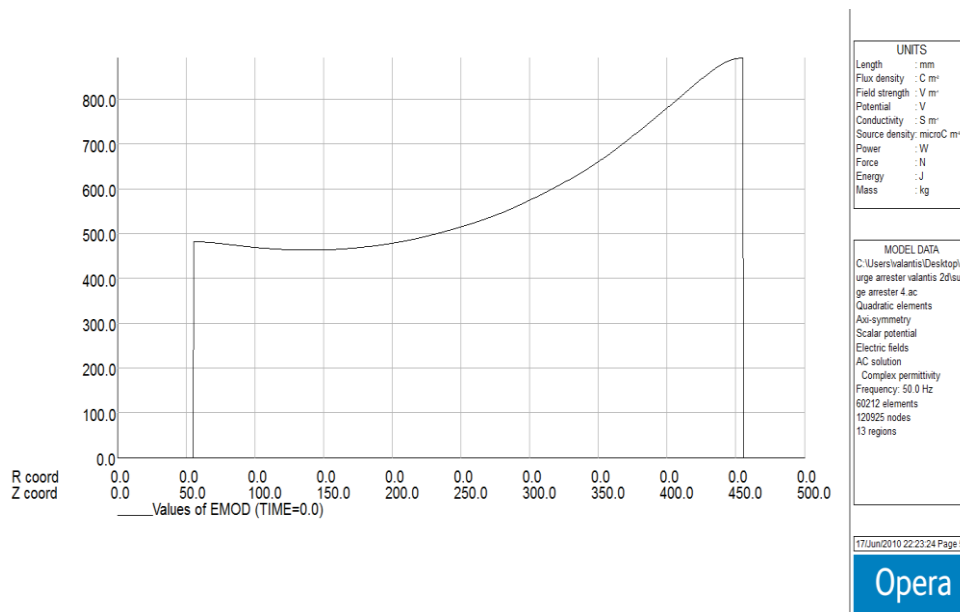
Τάση 16.5kV



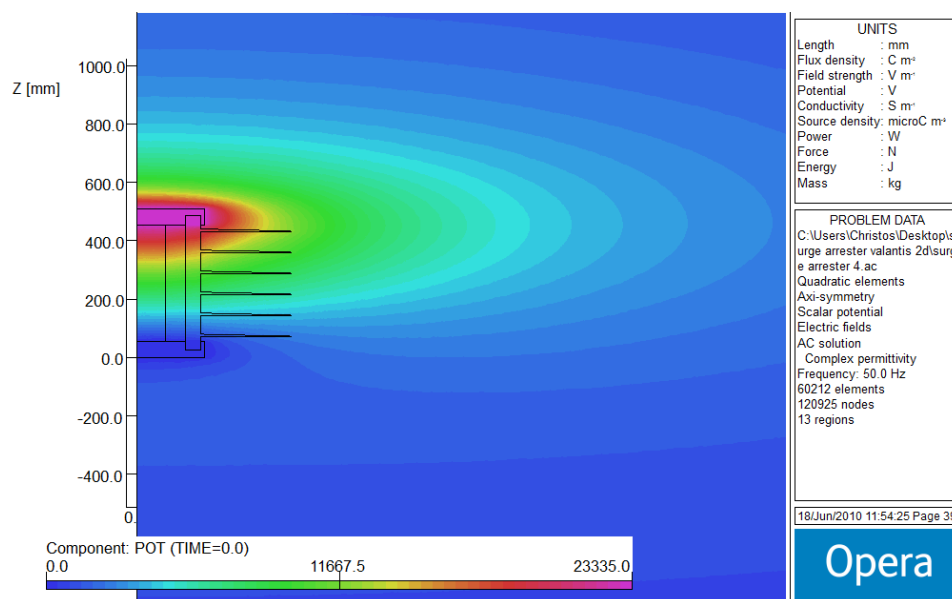
Σχήμα 4.16: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 16,5kV



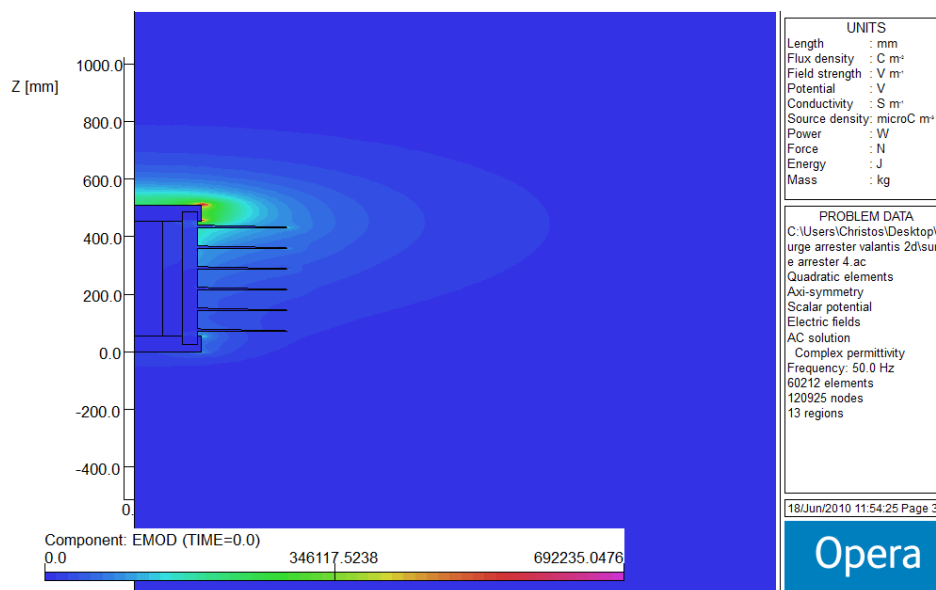
Σχήμα 4.17: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 16,5kV



Σχήμα 4.18: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέρανου για τάση 16,5kV



Σχήμα 4.19: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 16,5kV



Σχήμα 4.20: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 16,5kV

4.3.2.Αλλαγές στη γεωμετρία της μη γραμμικής αντίστασης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις μοντέλων καθοδικών αλεξικεραυνών των οποίων οι μη γραμμικές αντιστάσεις (βαρίστορ) έχουν υποστεί αλλαγές στην γεωμετρία τους. Όπως και στο αρχικό μοντέλο αλεξικεραυνού έτσι και εδώ παρουσιάζονται η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ καθώς και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο.

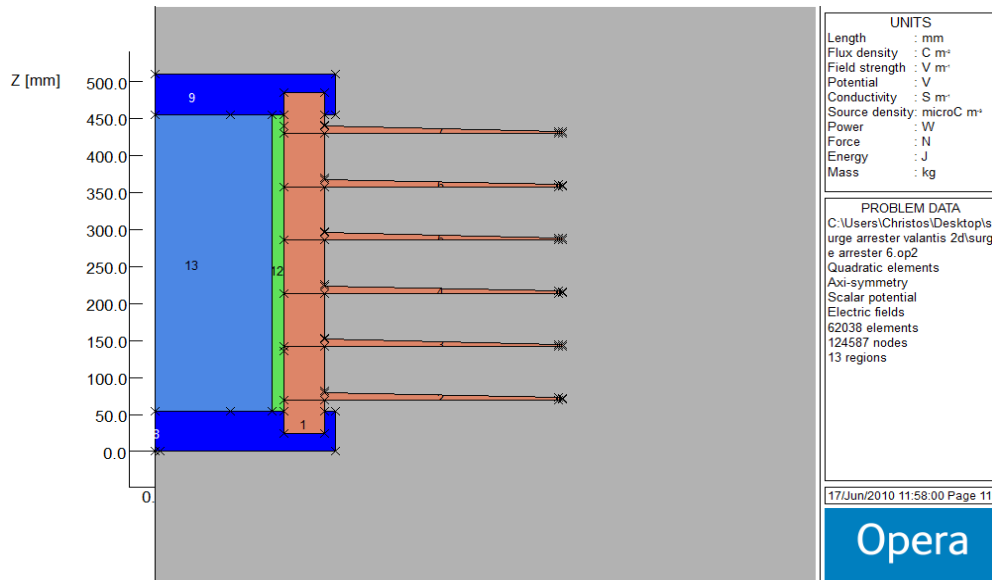
Μοντέλο 1 – Λεπτό υαλώδες περίβλημα

Στο παρόν μοντέλο (Σχήμα 4.21) το υαλώδες περίβλημα του μοντέλου του καθοδικού αλεξικεραυνού σχεδιάζεται αρκετά λεπτό και ταυτόχρονα η ακτίνα του βαρίστορ μεγαλώνει. Το μοντέλο προσομοιώνεται και τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται εκτενώς στα σχήματα 4.22 έως 4.36. Η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ παραμένει ανομοιόμορφη.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο είναι μεγαλύτερη αυτής του πραγματικού.

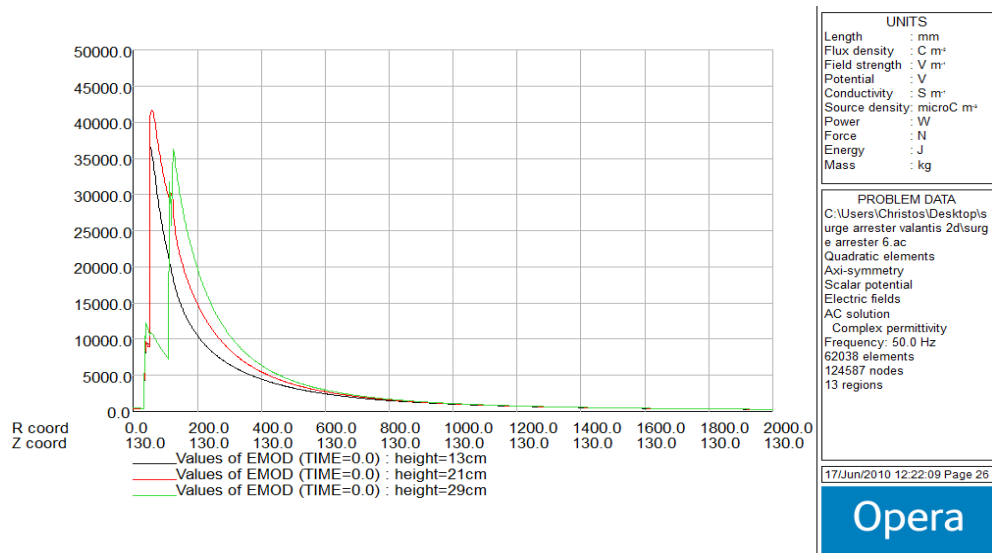
Επιπλέον, λαμβάνουμε τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στους τρεις οριζόντιους άξονες γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο σε ύψη 13, 21 και 29 cm από το επίπεδο του

εδάφους για τα τρία επίπεδα τάσης 12, 13.2 και 16.5kV. Οι τιμές αυτές παρατίθενται στους Πίνακες 4.2 έως 4.10 όπου και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις του πραγματικού αρχικού μοντέλου και των υπόλοιπων μοντέλων που παρουσιάζονται πιο κάτω.

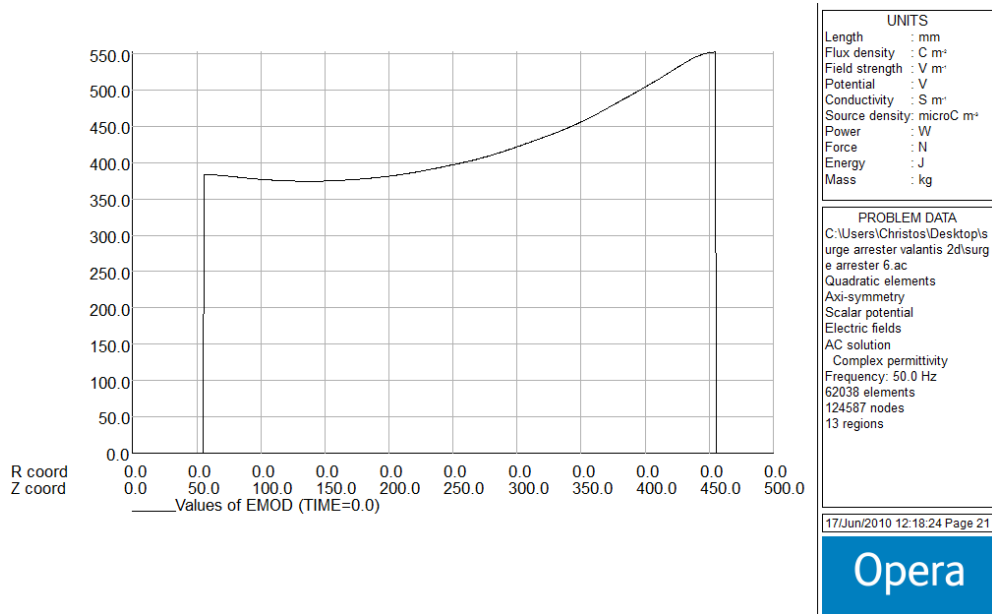


Σχήμα 4.21: Μοντέλο καθοδικού αλεξικέρανου με λεπτό υαλώδες περίβλημα (Μοντέλο 1)

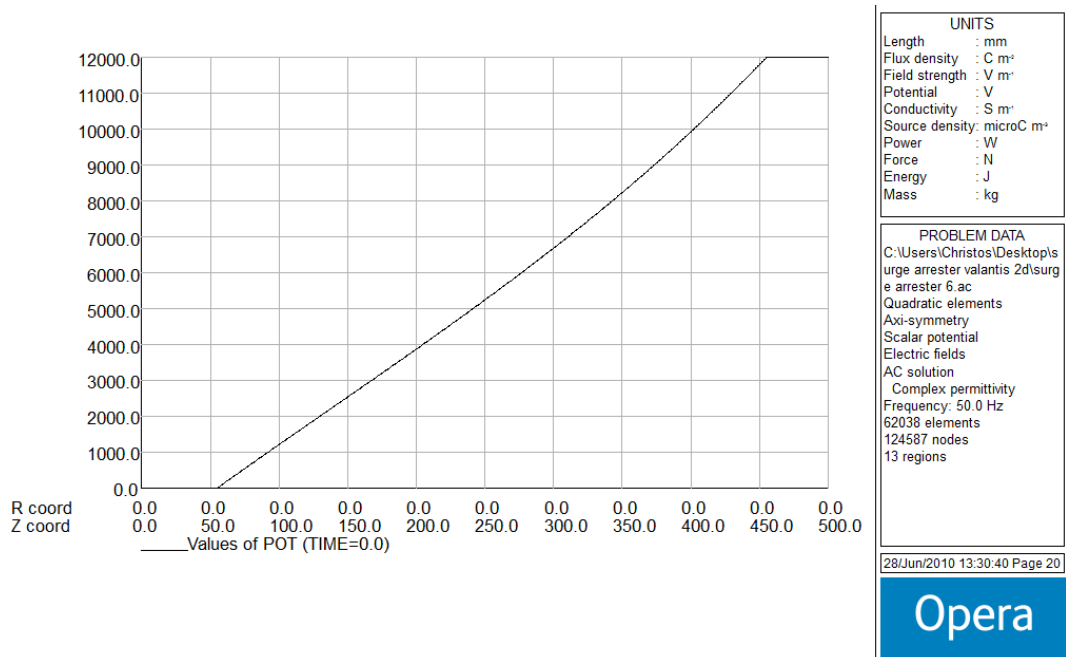
12kV



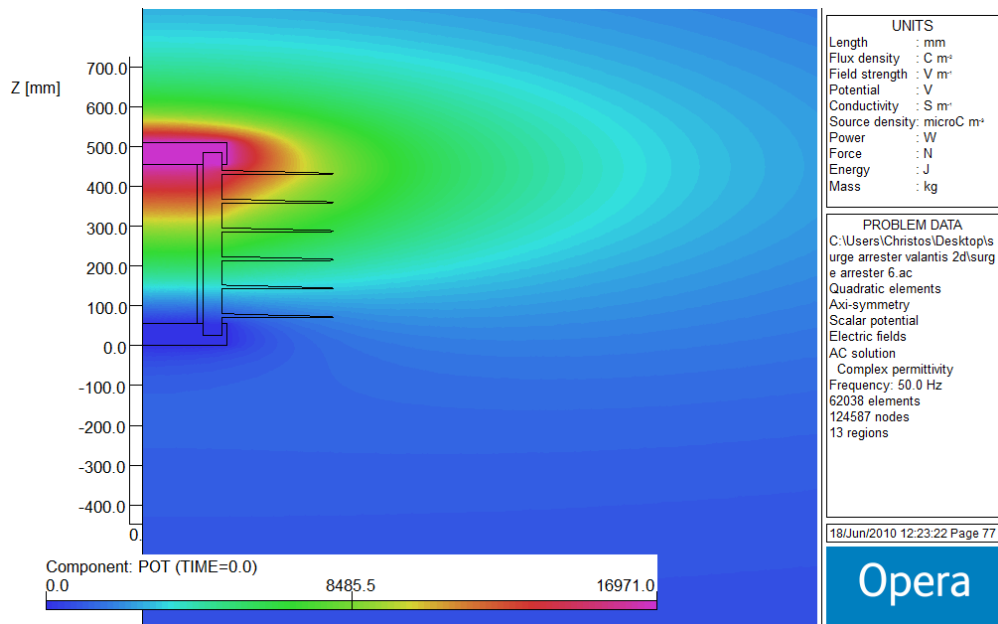
Σχήμα 4.22: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 12kV για λεπτό υαλώδες περίβλημα



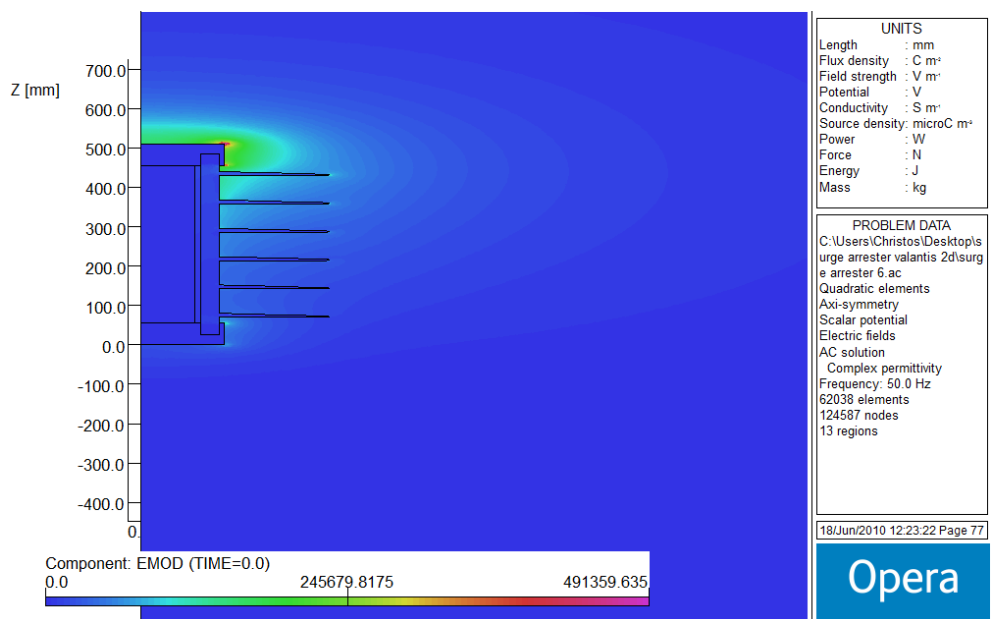
Σχήμα 4.23: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 12kV για λεπτό υαλώδες περίβλημα



Σχήμα 4.24: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 12kV για λεπτό υαλώδες περίβλημα

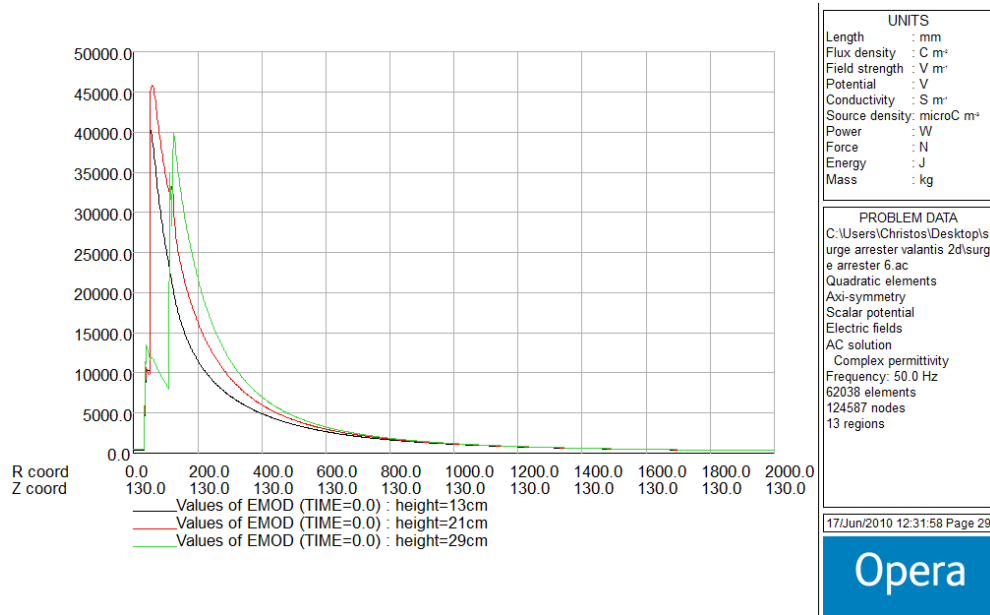


Σχήμα 4.25: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 12kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα

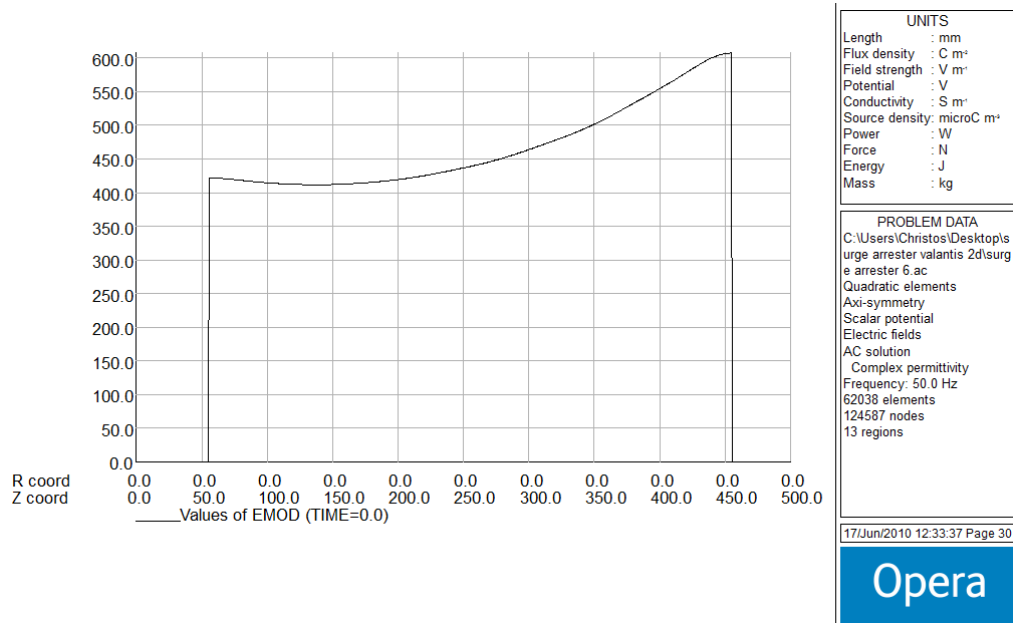


Σχήμα 4.26: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 12kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα

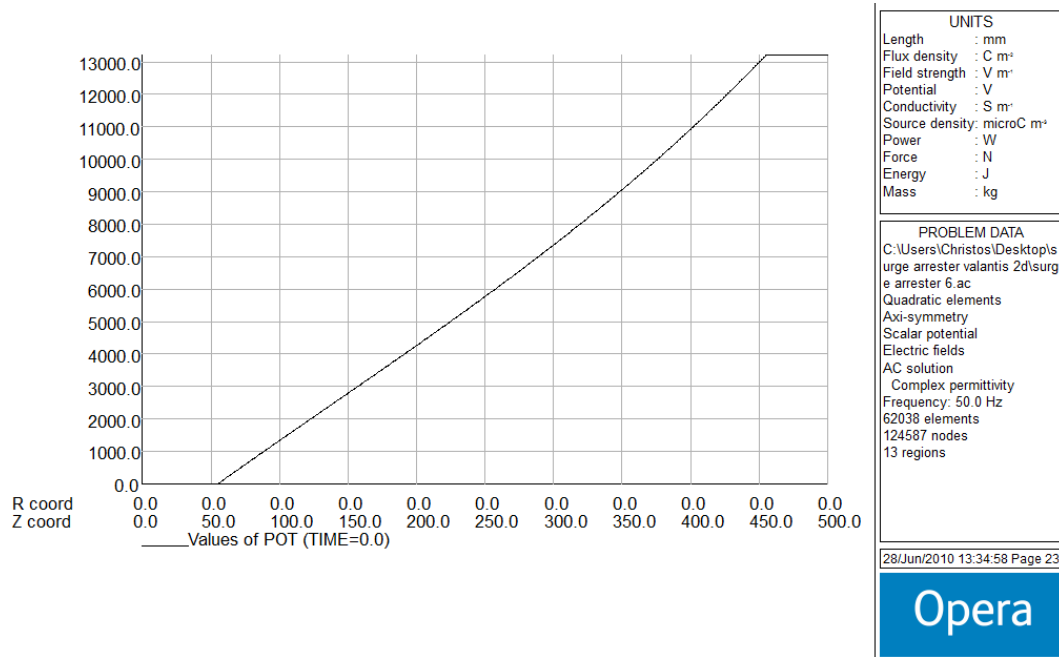
13.2kV



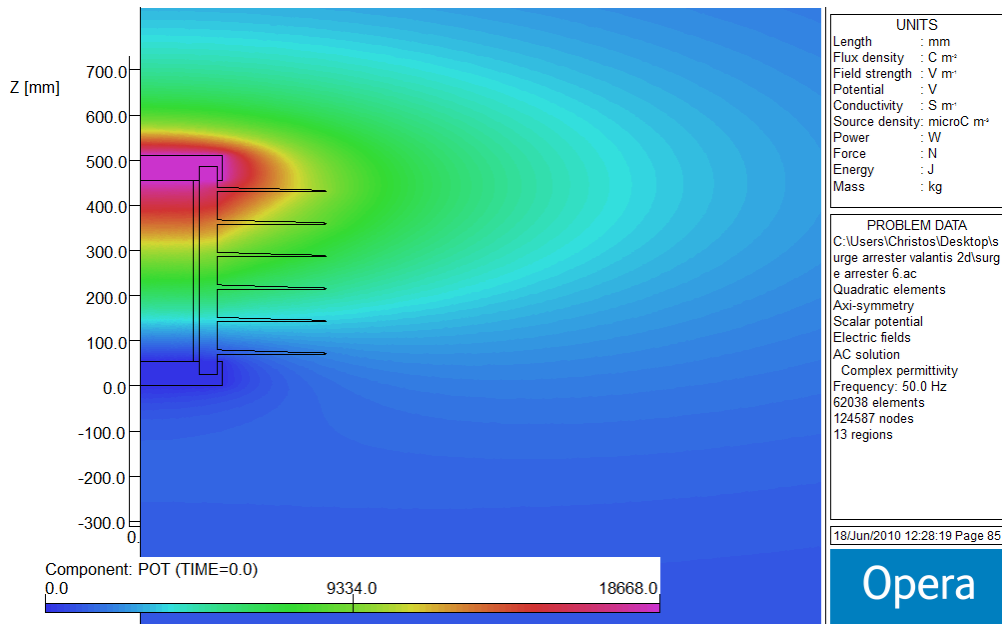
Σχήμα 4.27: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 13,2kV για λεπτό βαλώδες περίβλημα



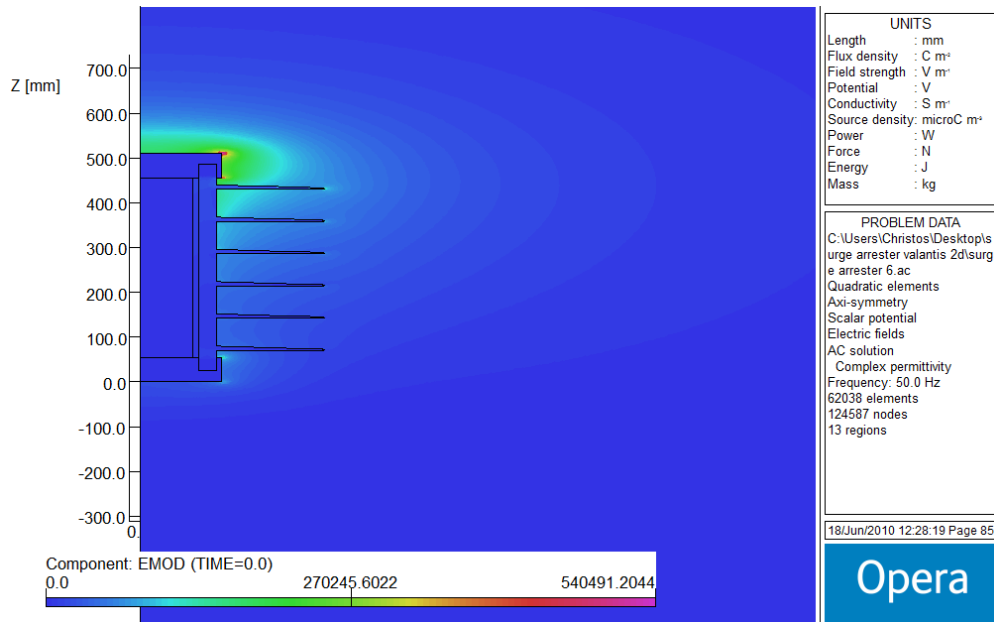
Σχήμα 4.28: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραυνου για τάση 13,2kV για λεπτό βαλώδες περίβλημα



Σχήμα 4.29: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέρανου για τάση 13,2kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα

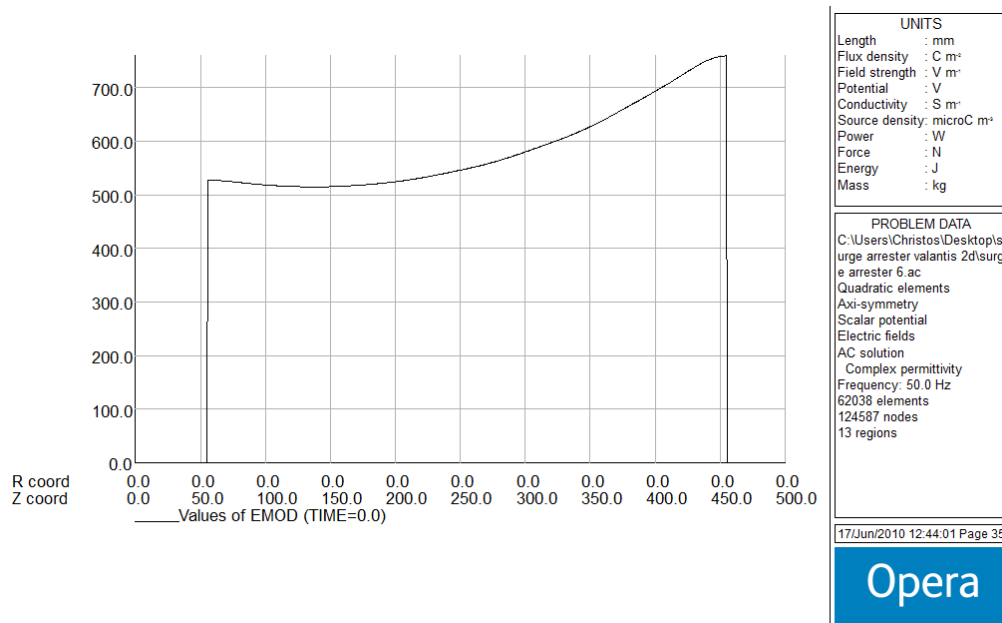


Σχήμα 4.30: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα

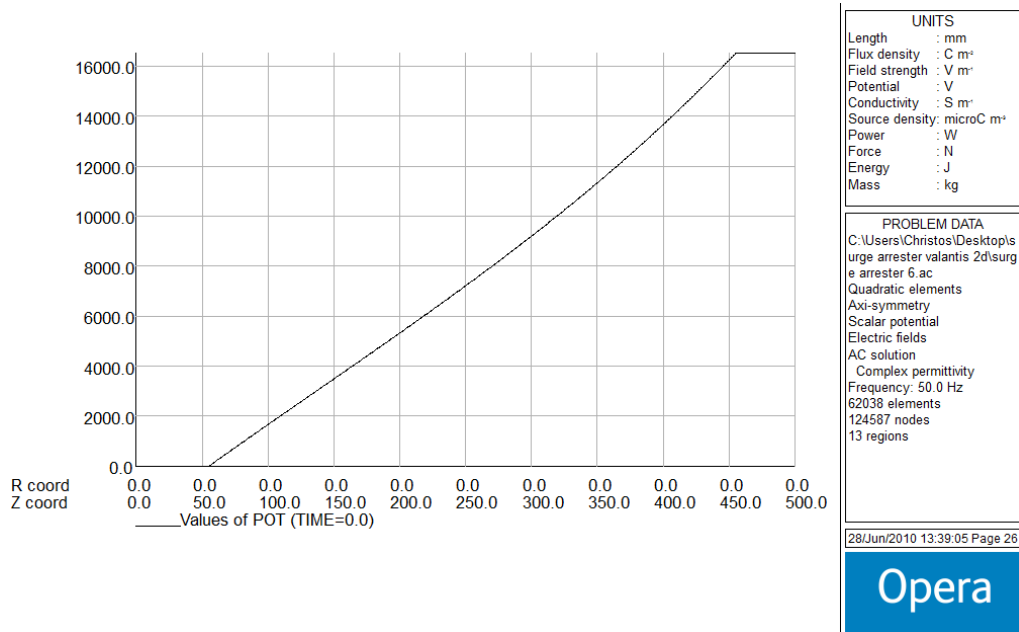


Σχήμα 4.31: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 13,2kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα

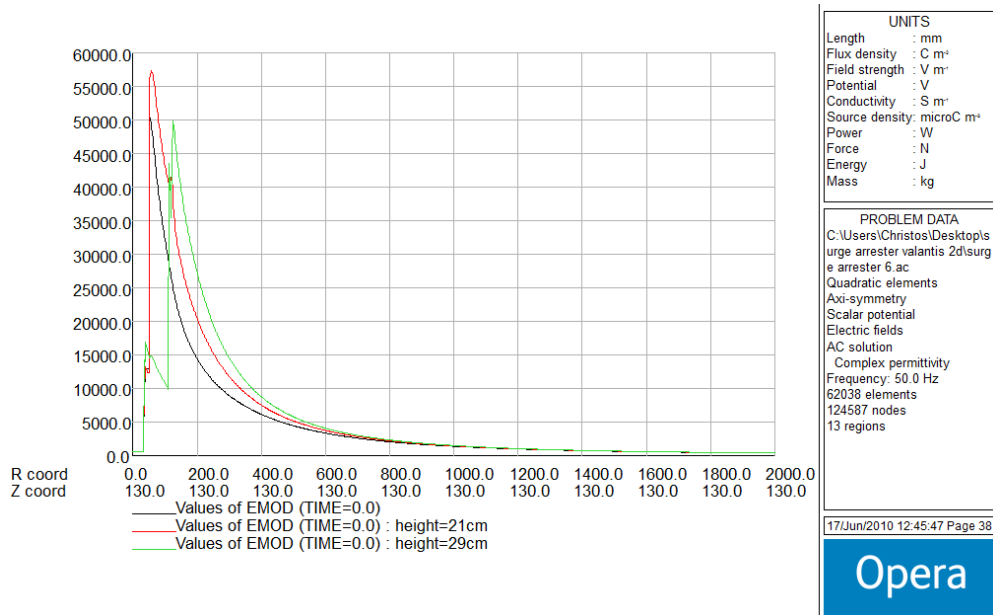
16.5kV



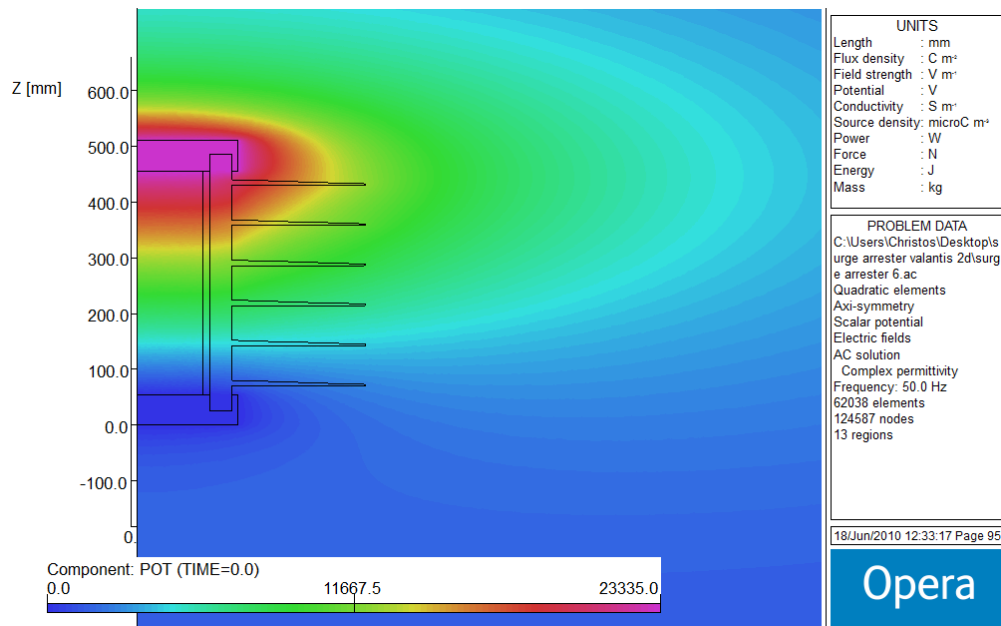
Σχήμα 4.32: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραυνο για τάση 16,5kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα



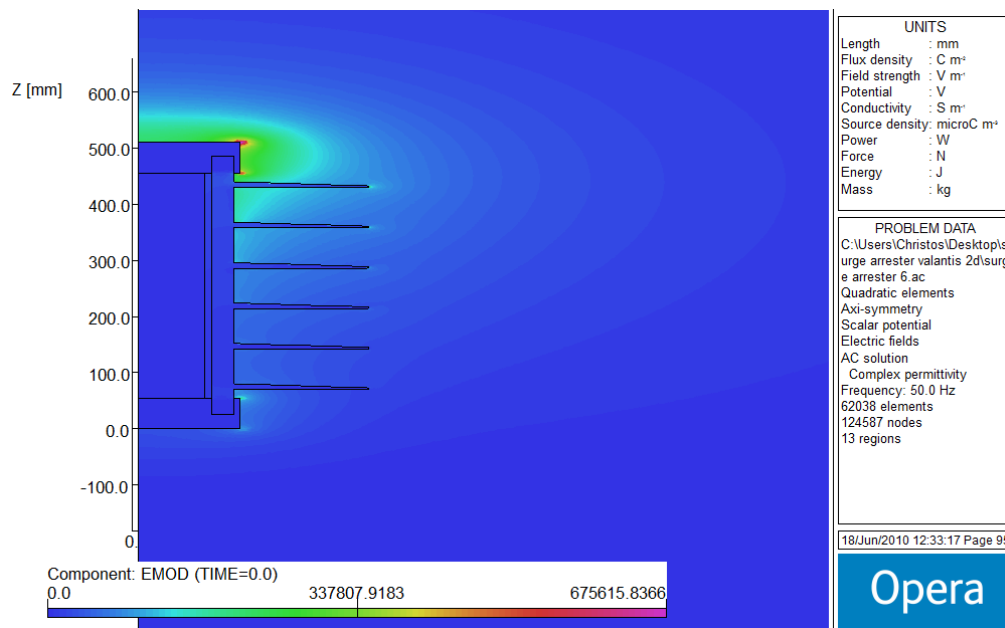
Σχήμα 4.33: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραυνου για τάση 16,5kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα



Σχήμα 4.34: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 16,5kV για λεπτό ναλώδες περίβλημα



Σχήμα 4.35: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 16,5kV για λεπτό υαλώδες περίβλημα



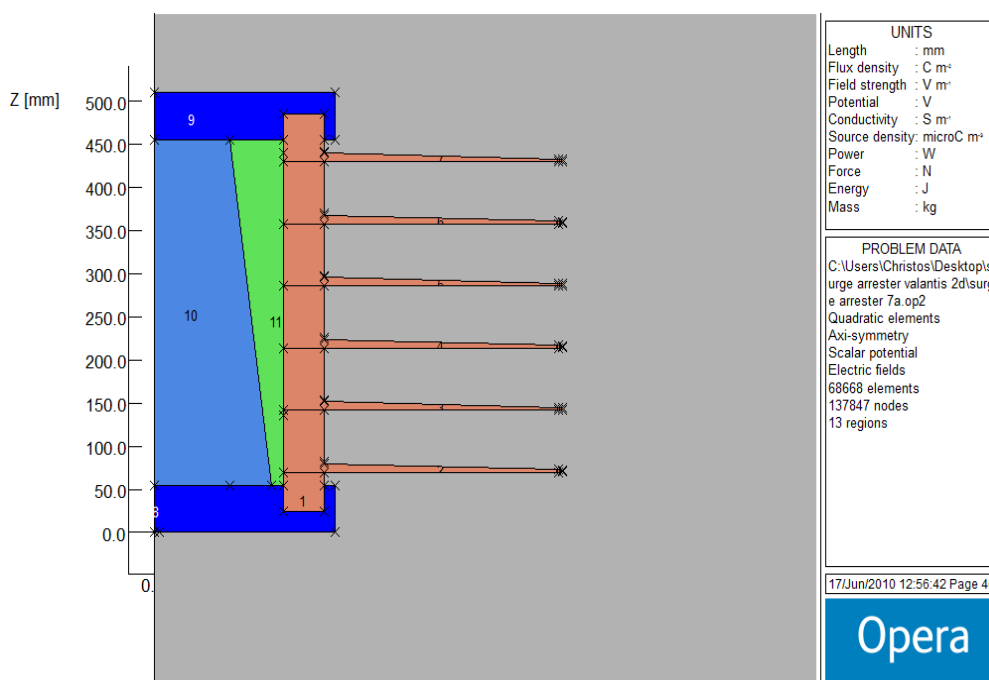
Σχήμα 4.36: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 16,5kV για λεπτό υαλώδες περίβλημα

Μοντέλο 2 – Ανομοιομορφο μήκος ακτίνας βαρίστορ (περίπτωση 1)

Στο παρόν μοντέλο (Σχήμα 4.37) η ακτίνα της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικεραυνού έχει μεταβλητό μήκος το οποίο είναι ανάλογο του ύψους. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.37, η ακτίνα του βαρίστορ μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος του. Το μοντέλο προσομοιώνεται και τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.37 έως 4.52.

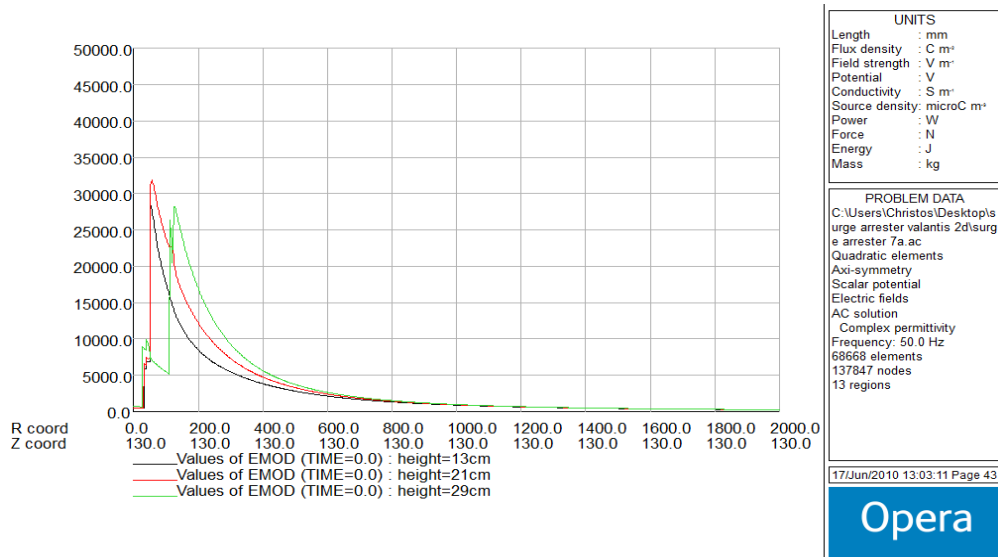
Η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ παραμένει ανομοιομορφη.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο είναι μεγαλύτερη αυτής του πραγματικού στα μεγάλα ύψη και μικρότερη στα μικρά. Στους Πίνακες 4.2 έως 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στους τρεις οριζόντιους άξονες γύρω από το μοντέλο σε ύψη 13, 21 και 29 εκατοστόμετρα, για τα τρία επίπεδα τάσης 12, 13.2 και 16.5kV.

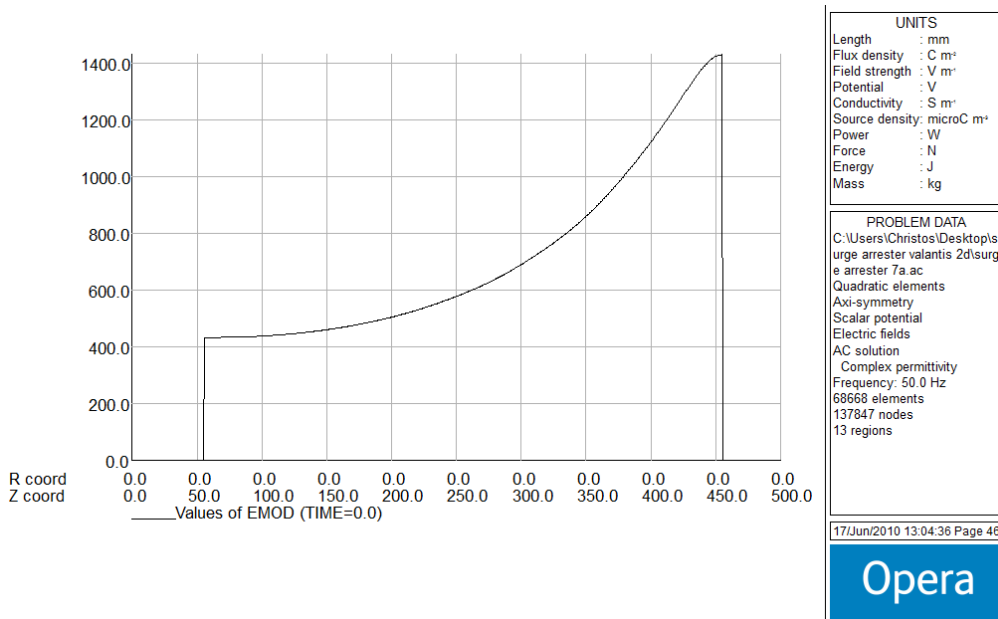


Σχήμα 4.37: Μοντέλο καθοδικού αλεξικέραυνου με ανομοιομορφία στο πάχος του υαλώδους περιβλήματος και της μη γραμμικής αντίστασης (Μοντέλο 2)

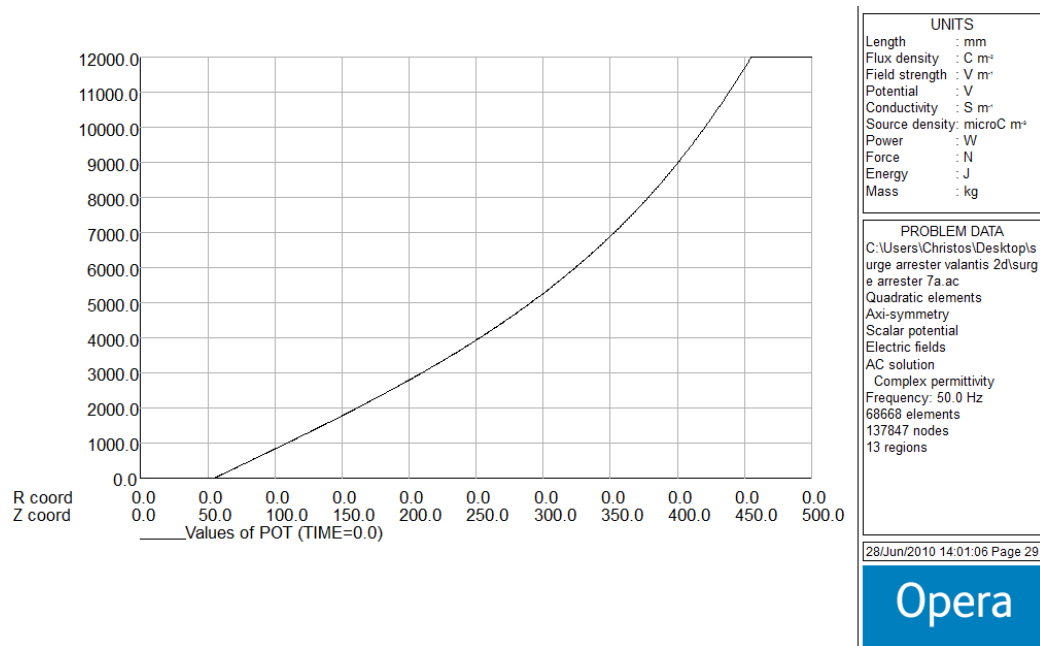
Τάση 12kV



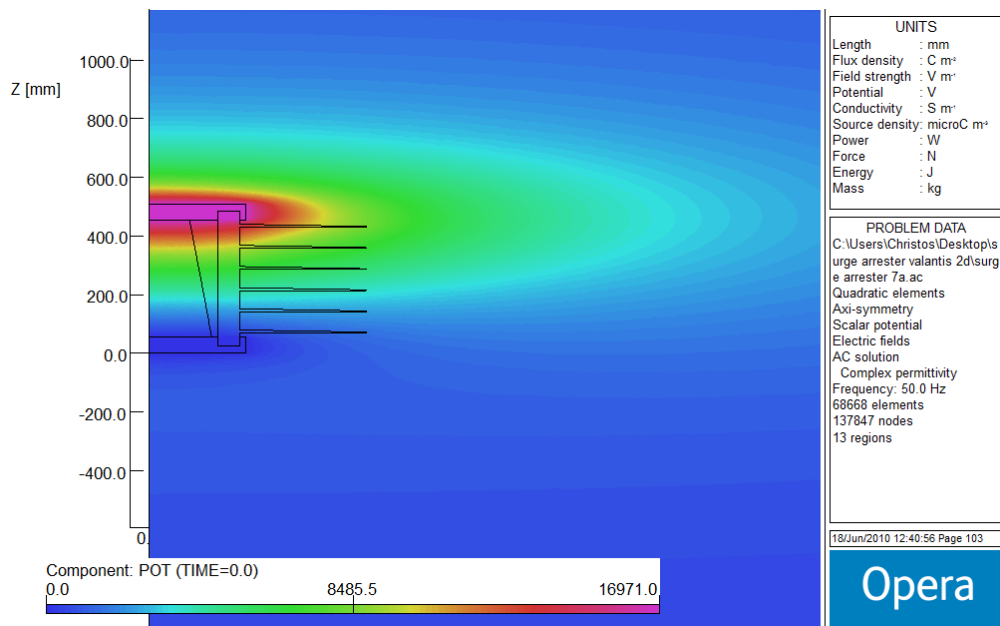
Σχήμα 4.38: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 12kV για ανομοιομόρφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



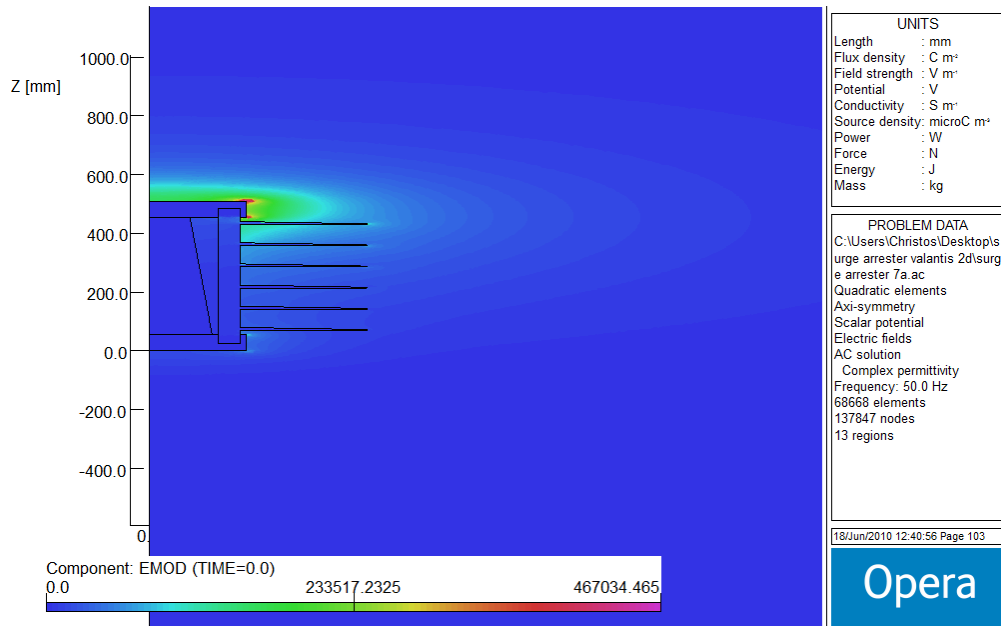
Σχήμα 4.39: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 12kV για ανομοιομόρφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



\ Σχήμα 4.40: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 12kV για ανομοιομορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

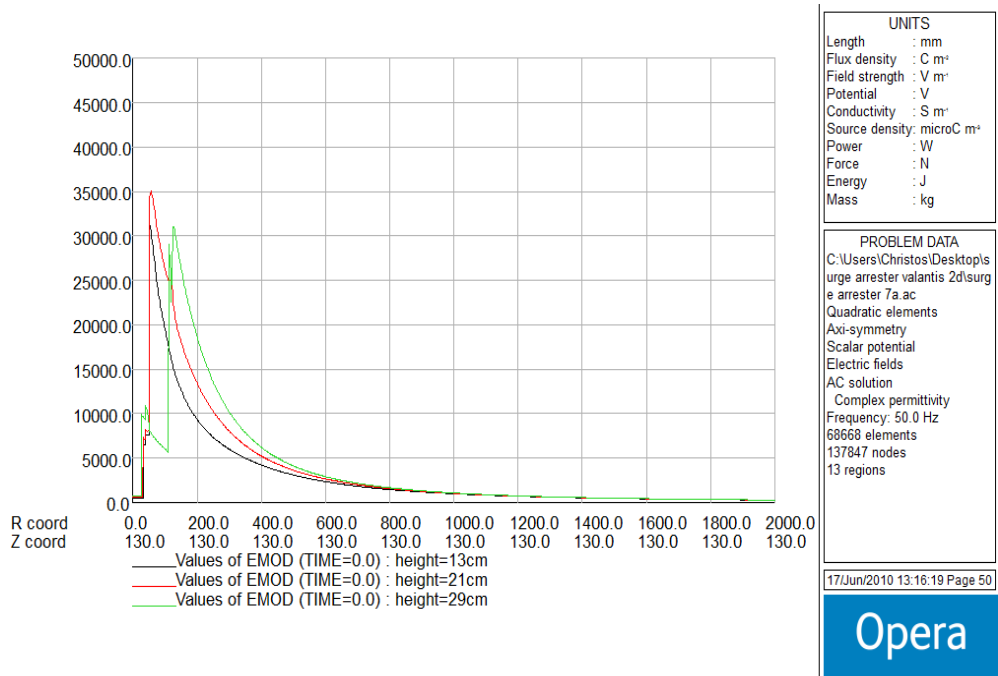


Σχήμα 4.41: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέραννο για τάση 12kV για ανομοιομορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

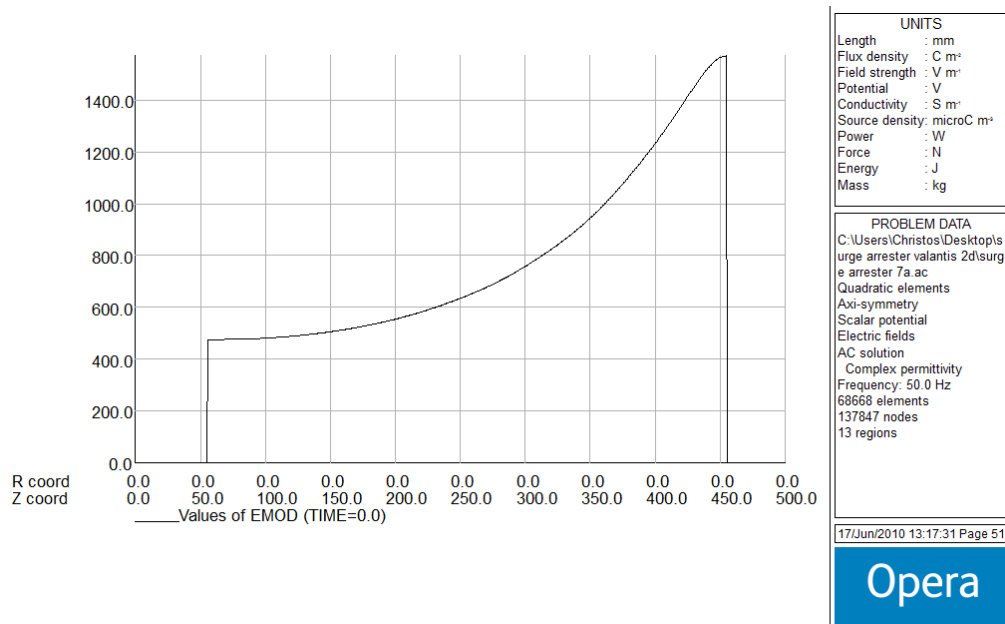


Σχήμα 4.42: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

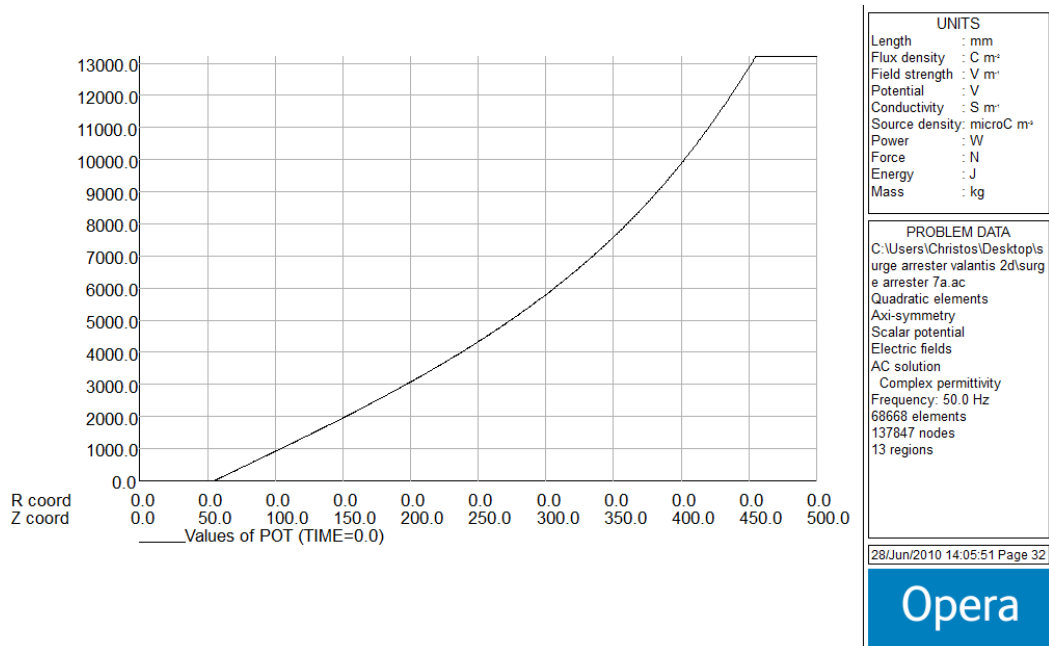
Τάση 13.2kV



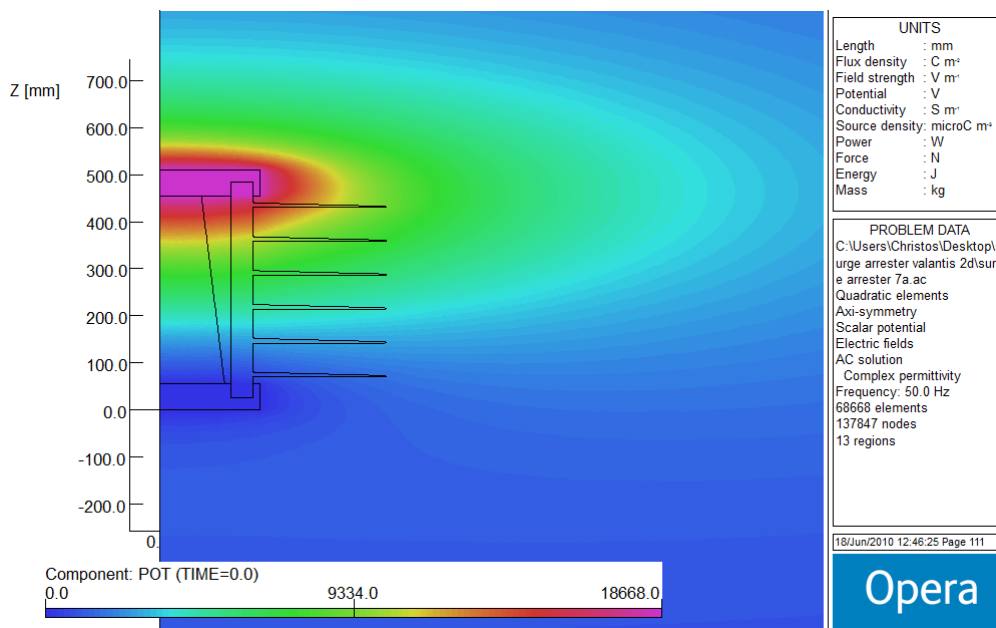
Σχήμα 4.43: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



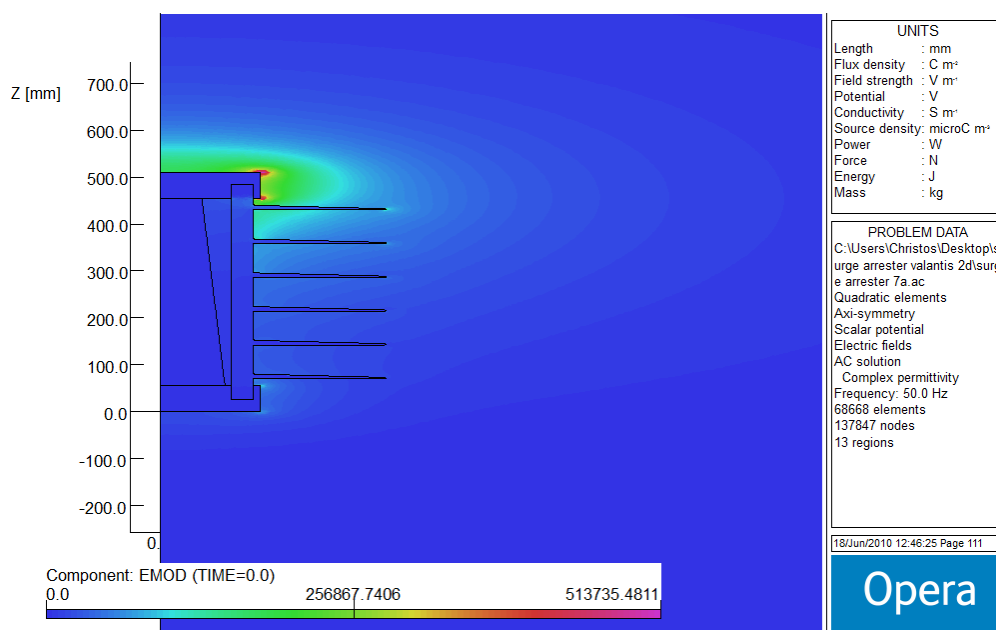
Σχήμα 4.44: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.45: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

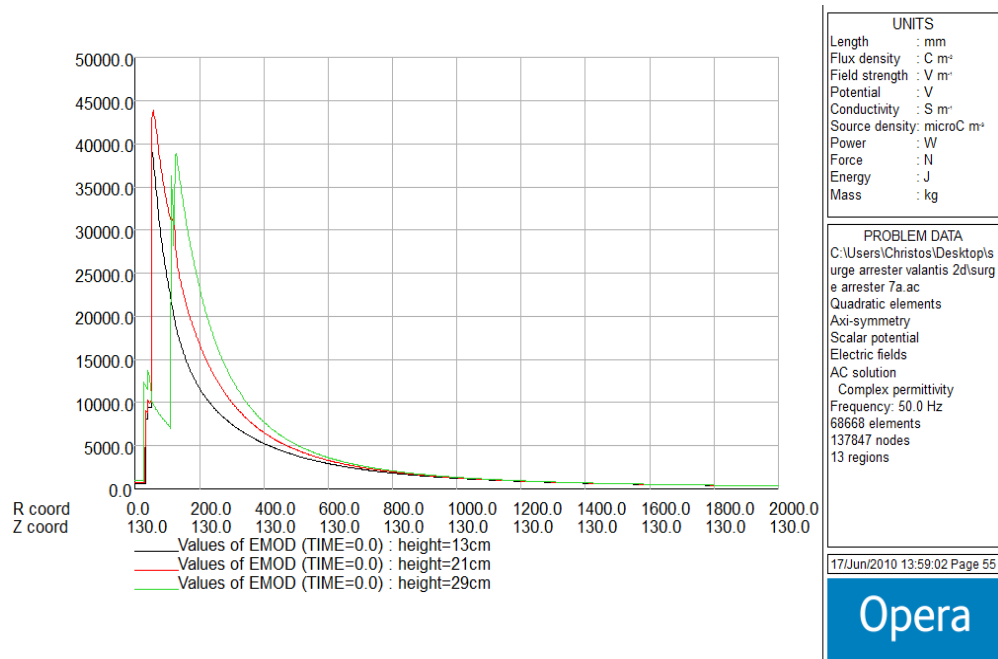


Σχήμα 4.46: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

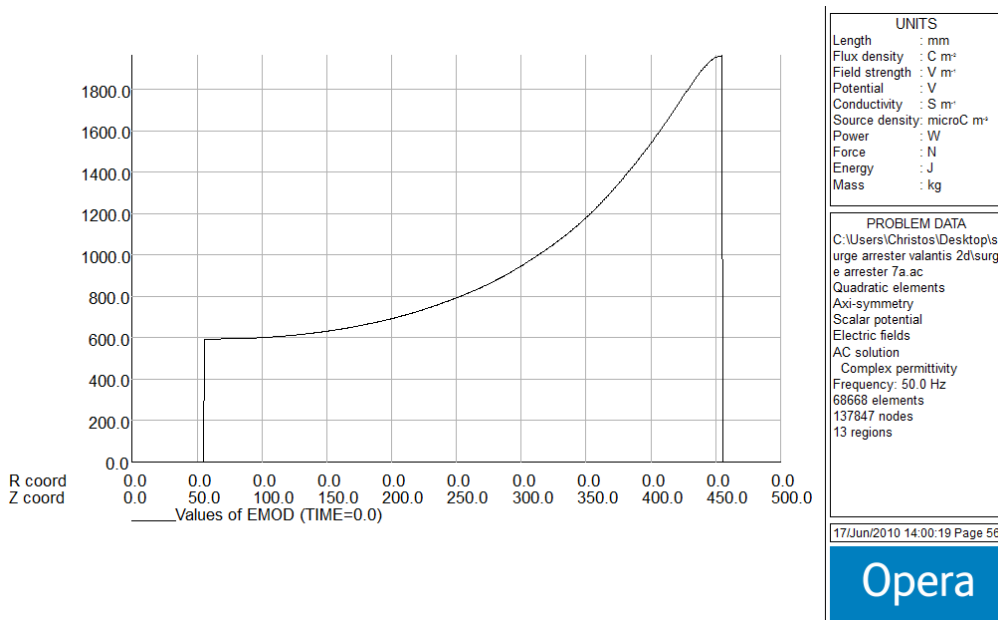


Σχήμα 4.47: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

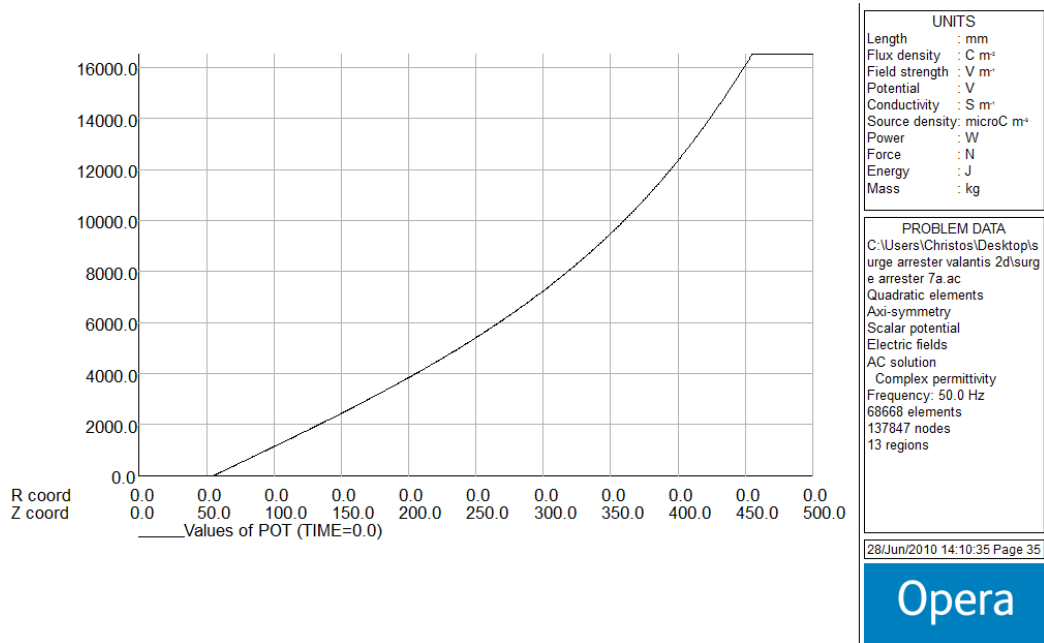
Τάση 16.5kV



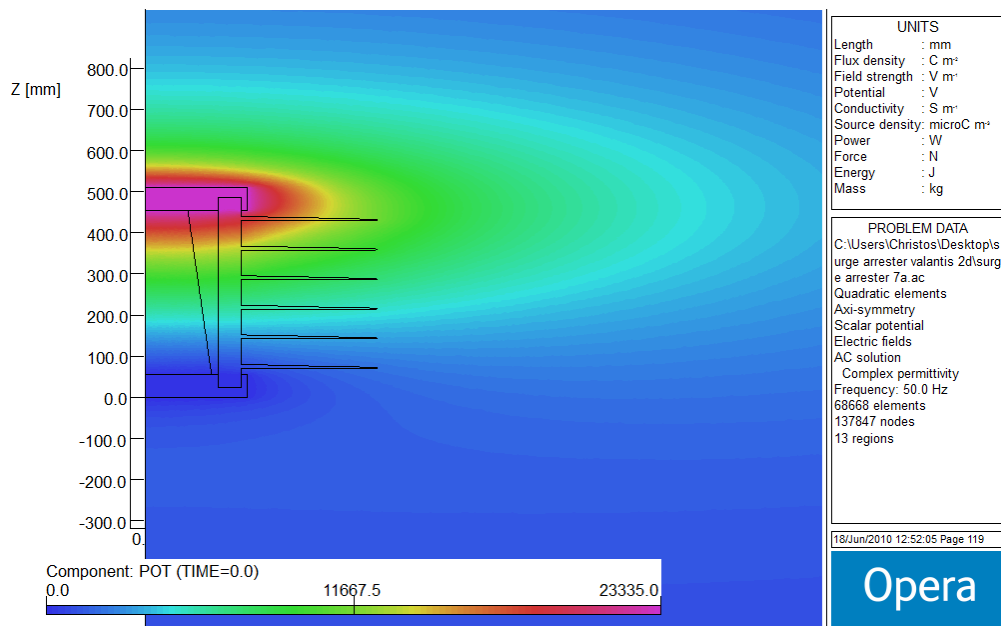
Σχήμα 4.48: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



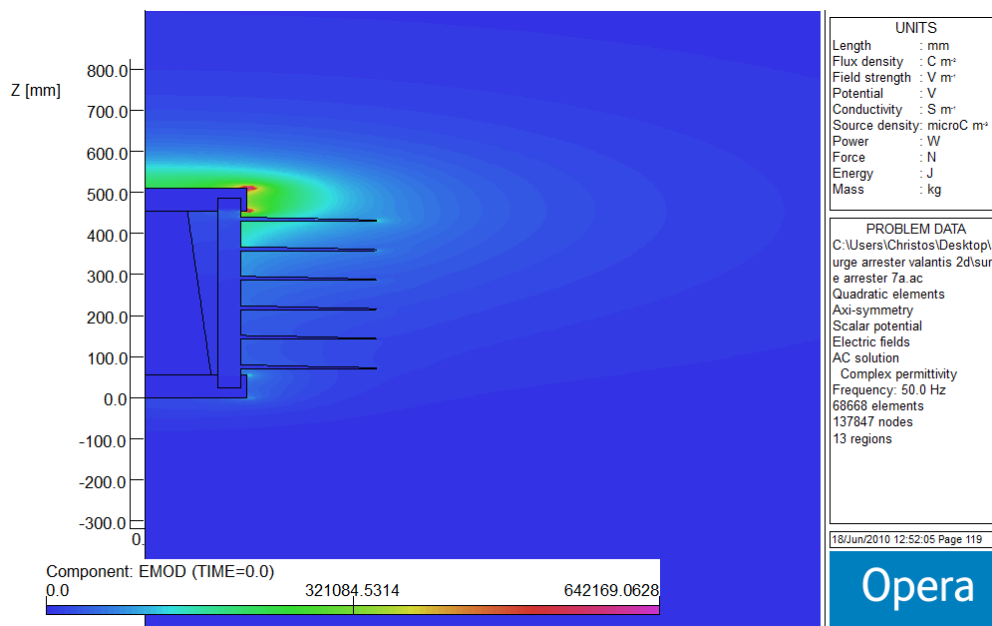
Σχήμα 4.49: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 16,5 kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.50: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.51: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέραννο για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



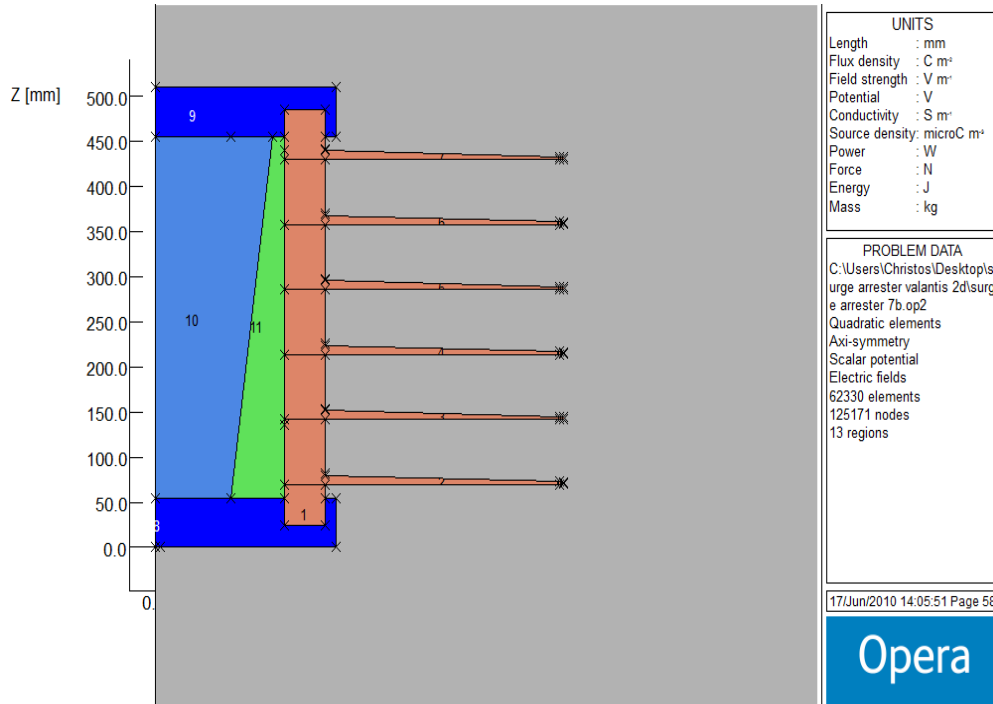
Σχήμα 4.52: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

Μοντέλο 3 – Ανομοιόμορφο μήκος ακτίνας βαρίστορ (περίπτωση 2)

Στο παρόν μοντέλο (Σχήμα 4.53) η ακτίνα της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικεραύνου έχει μεταβλητό μήκος το οποίο είναι ανάλογο του ύψους όπως και στο Μοντέλο 2. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.53, η ακτίνα του βαρίστορ αυξάνεται όσο αυξάνεται το ύψος του. Το μοντέλο προσομοιώνεται και τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.53 έως 4.68.

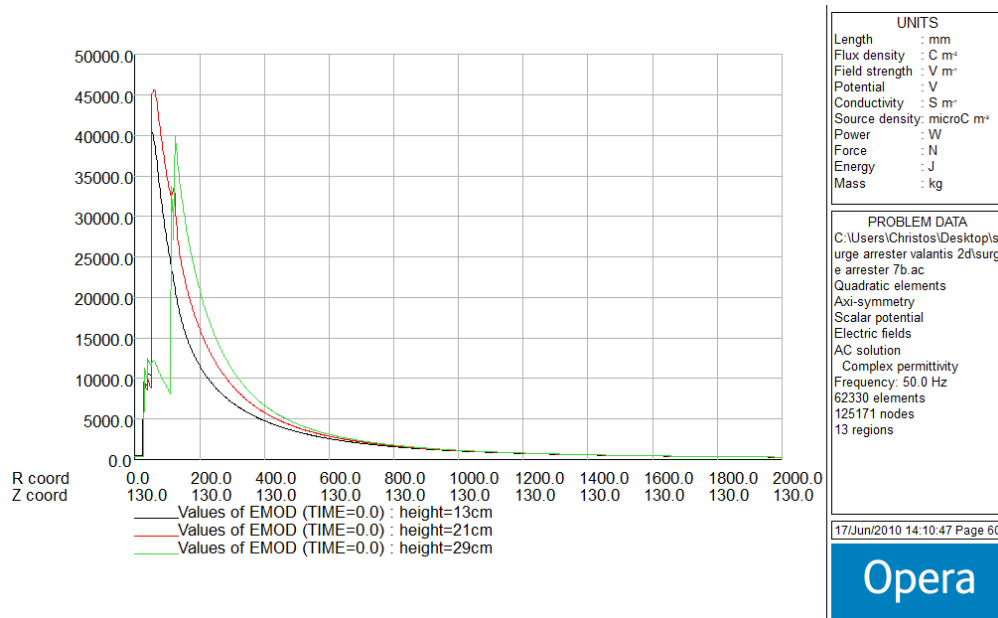
Η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ γίνεται σχεδόν ομοιόμορφη.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο είναι μεγαλύτερη αυτής του πραγματικού στα μικρά ύψη και μικρότερη στα μεγάλα. Στους Πίνακες 4.2 έως 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στους τρεις οριζόντιους άξονες γύρω από το μοντέλο σε ύψη 13, 21 και 29 εκατοστόμετρα, για τα τρία επίπεδα τάσης 12, 13.2 και 16.5kV. Οι συγκεκριμένες τιμές είναι μεγαλύτερες αυτών του πραγματικού αφού τα ύψη στα οποία λήφθηκαν είναι σχετικά μικρά.

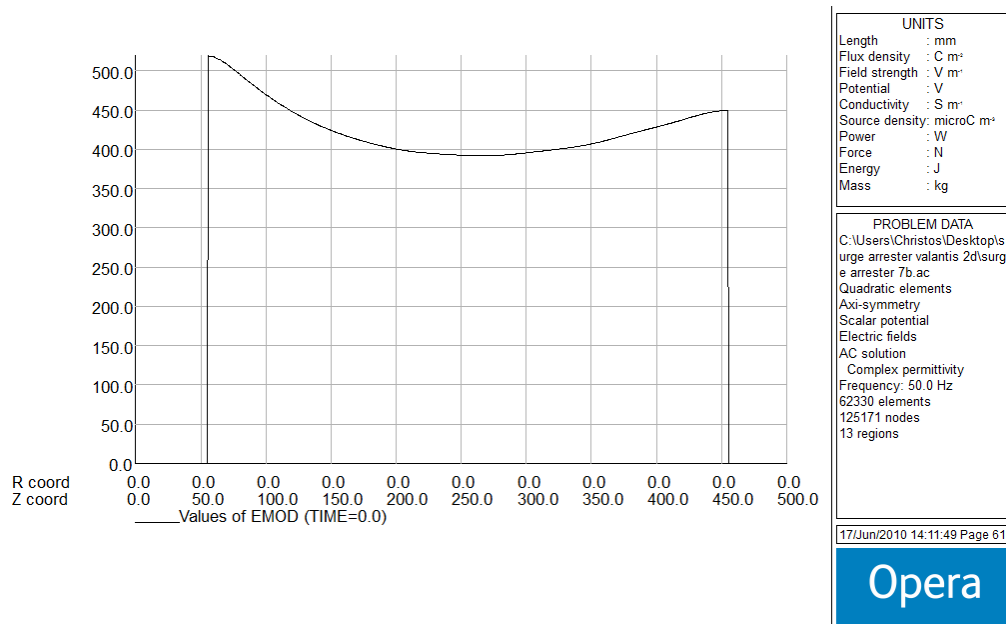


Σχήμα 4.53: Μοντέλο καθοδικού αλεξικέραννου με ανομοιομορφία στο πάχος του υαλώδους περιβλήματος και της μη γραμμικής αντίστασης (Μοντέλο 3)

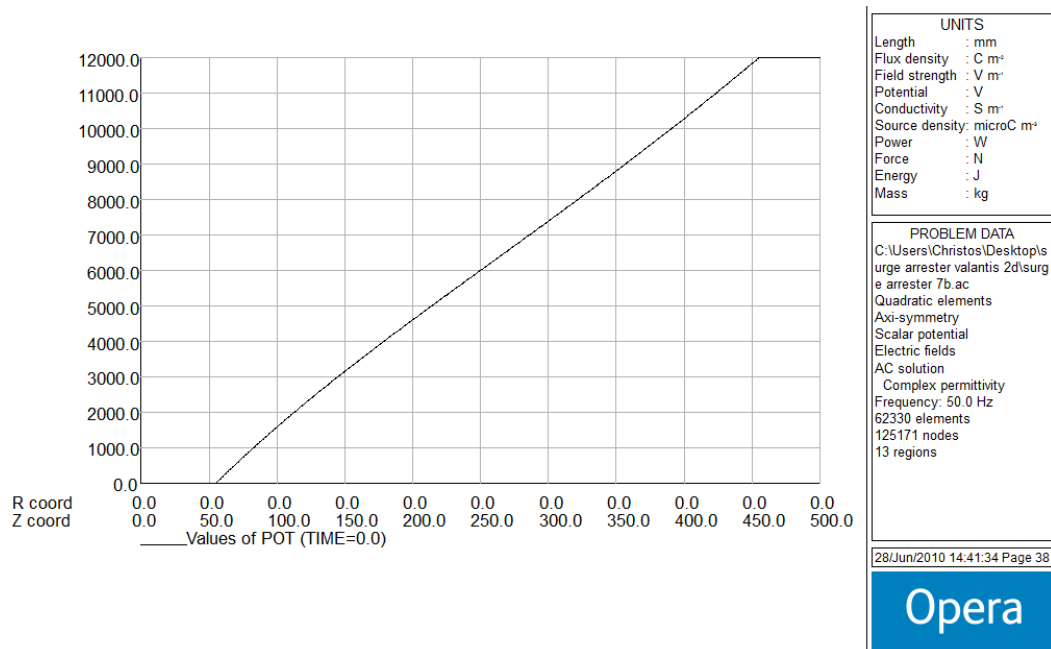
Τάση 12kV



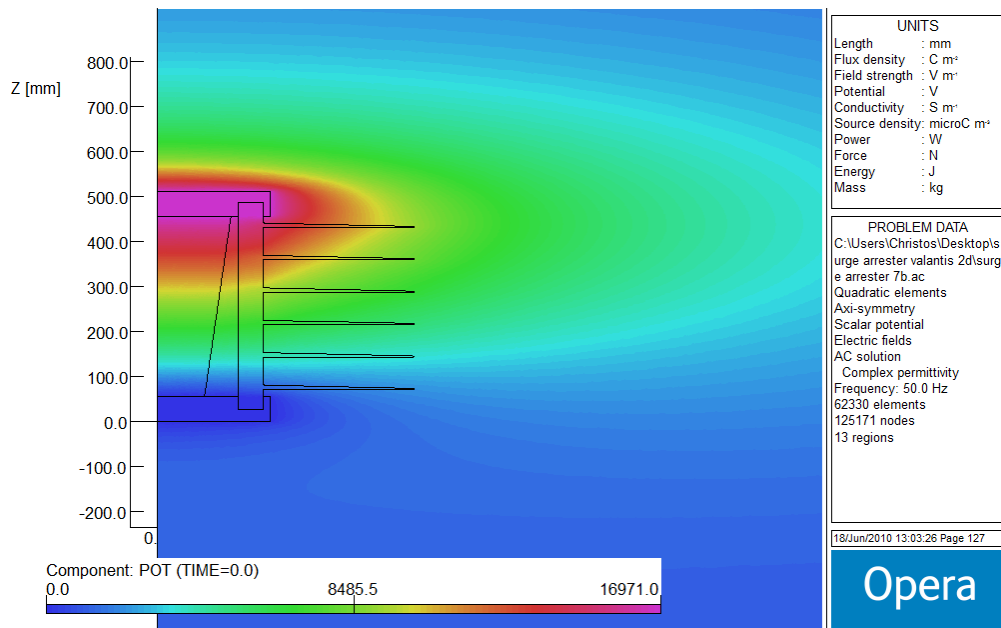
Σχήμα 4.54: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 12kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



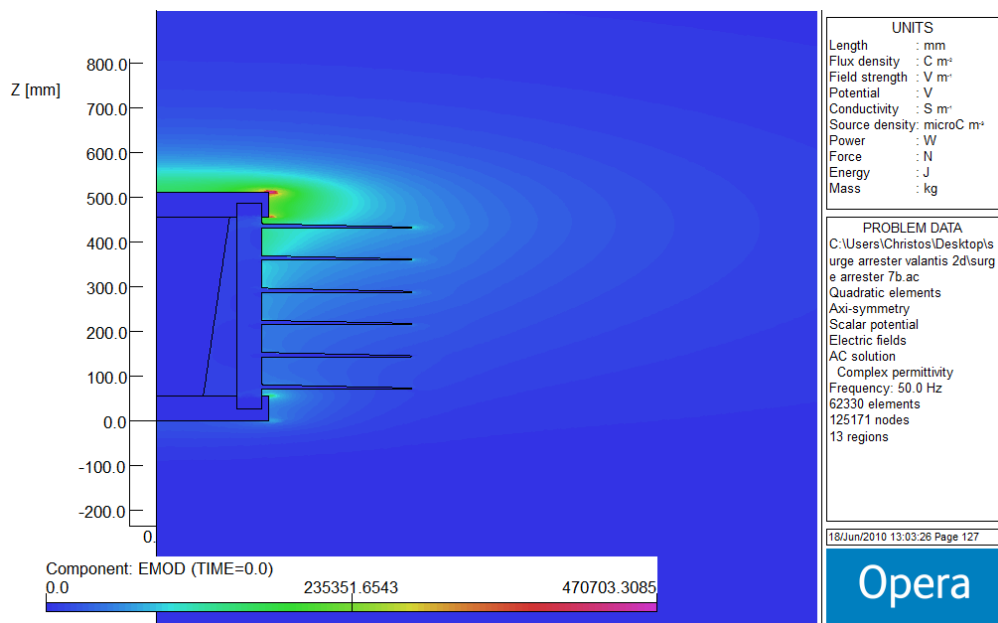
Σχήμα 4.55: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 12kV για ανομοιομόρφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.56: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 12kV για ανομοιομόρφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

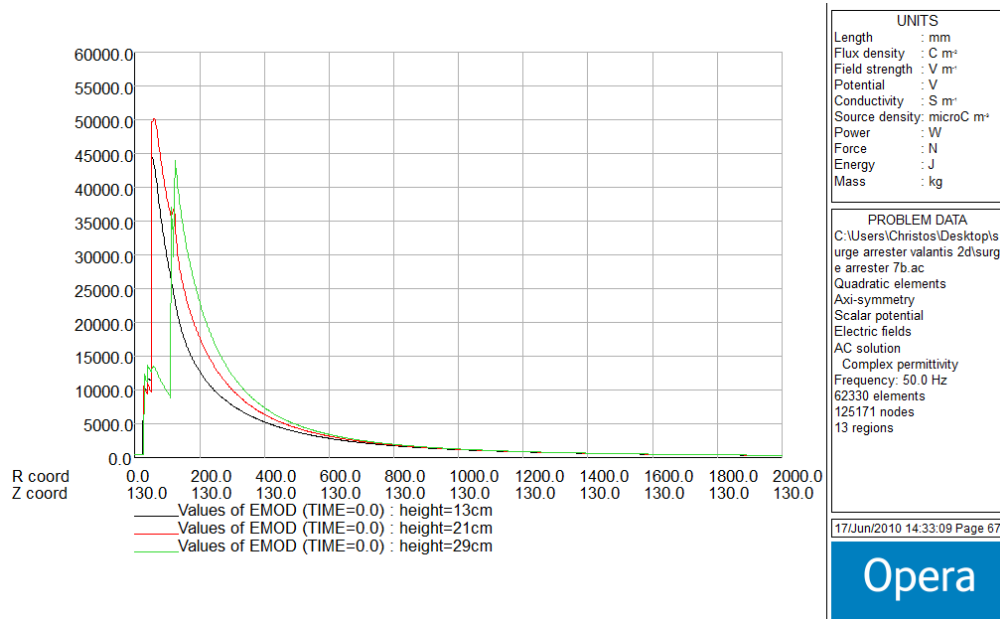


Σχήμα 4.57: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

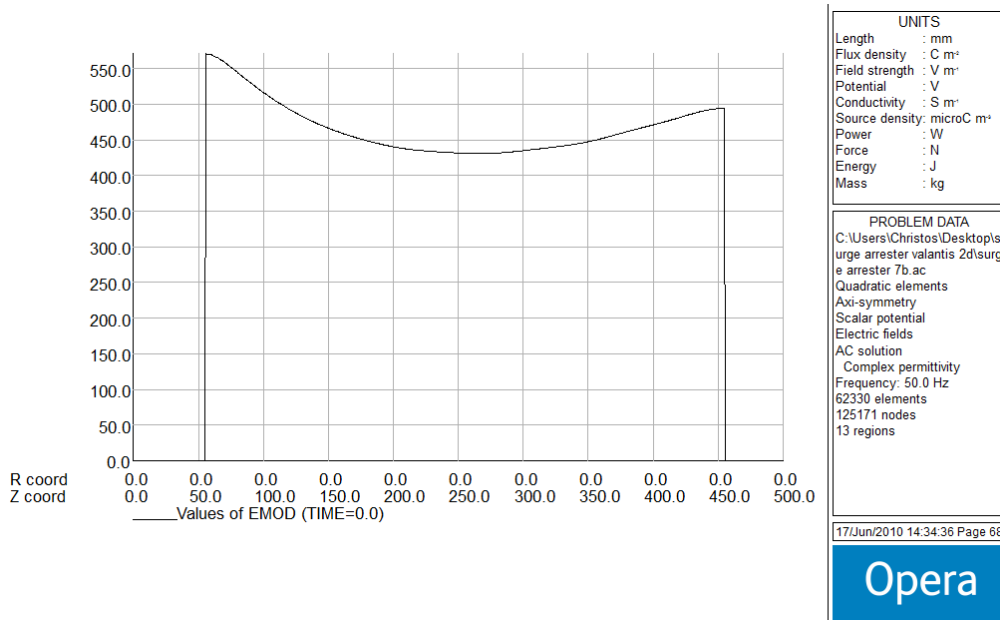


Σχήμα 4.58: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

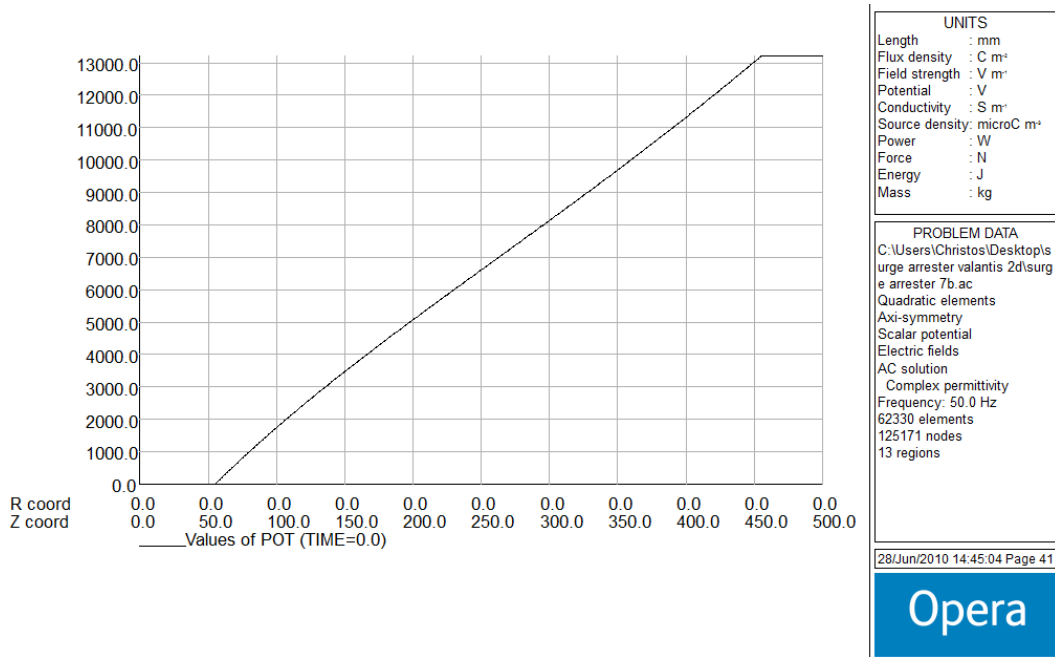
Τάση 13.2kV



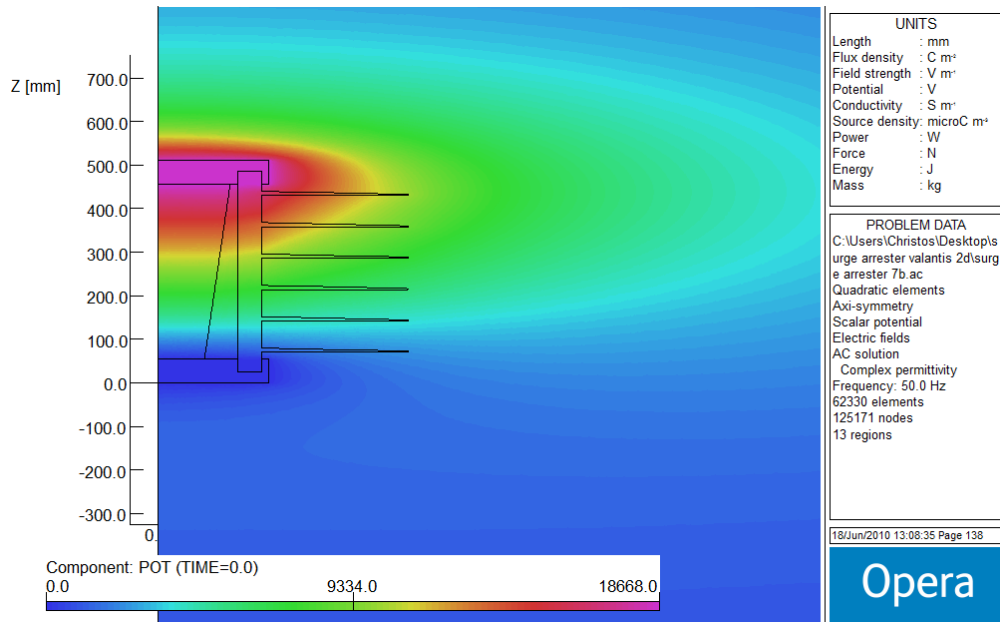
Σχήμα 4.59: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



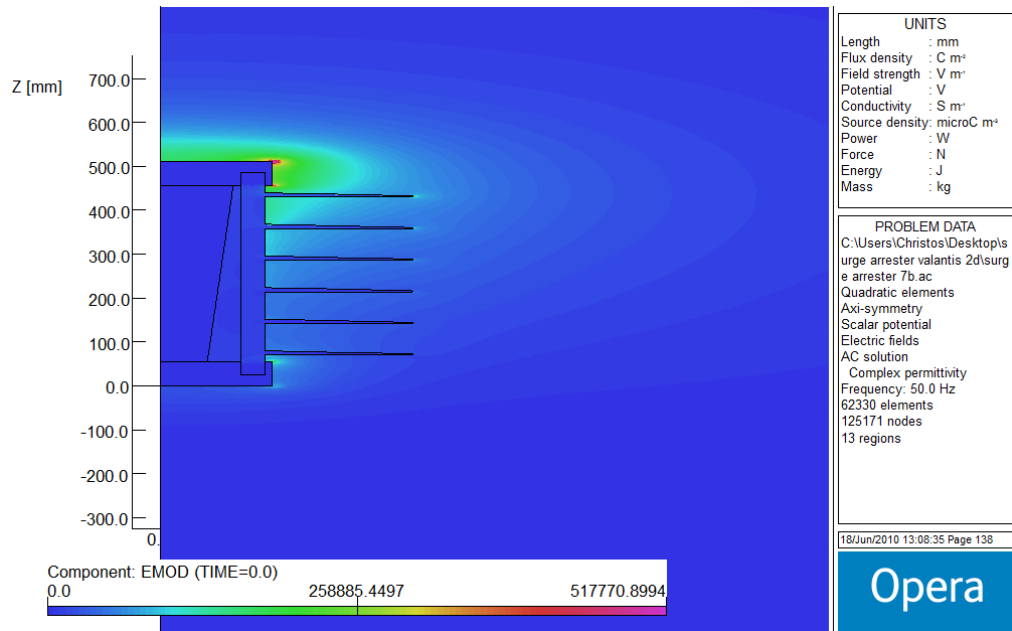
Σχήμα 4.60: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.61: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

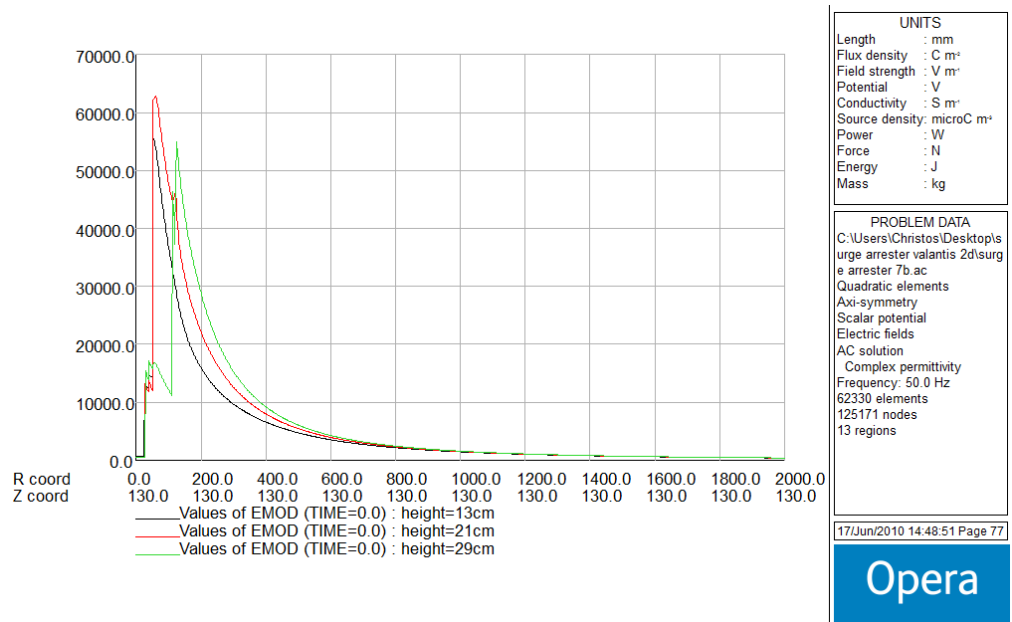


Σχήμα 4.62: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέραννο για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

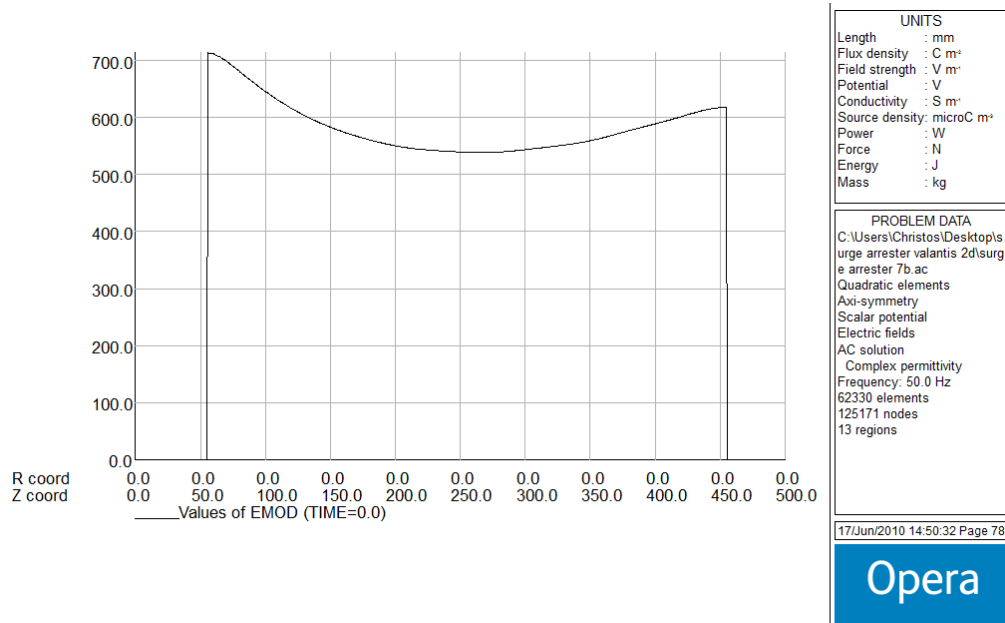


Σχήμα 4.63: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

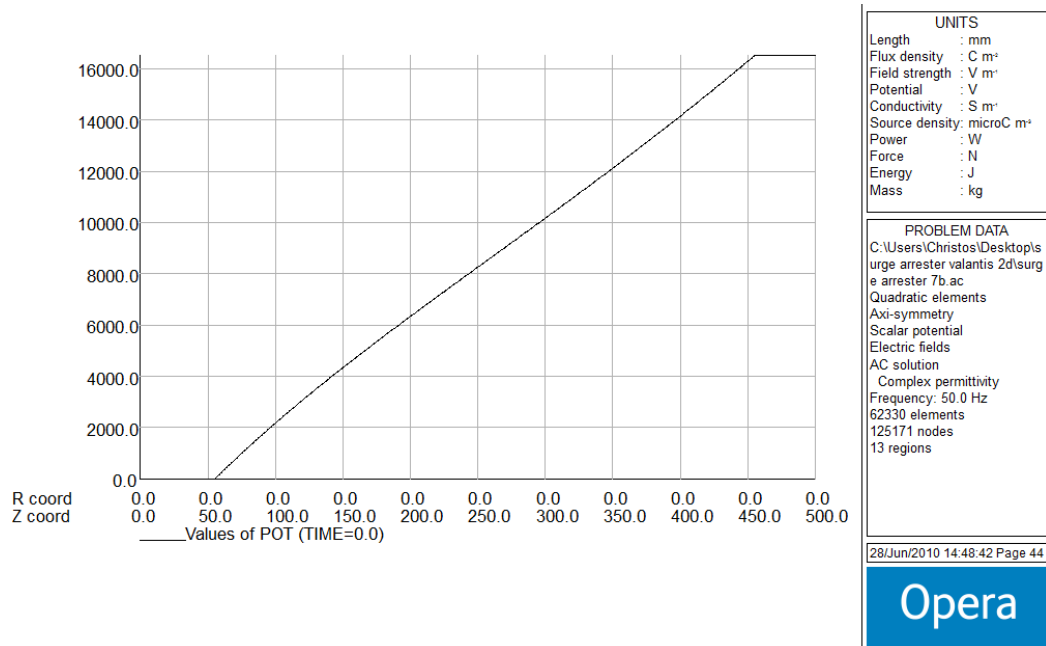
Τάση 16.5kV



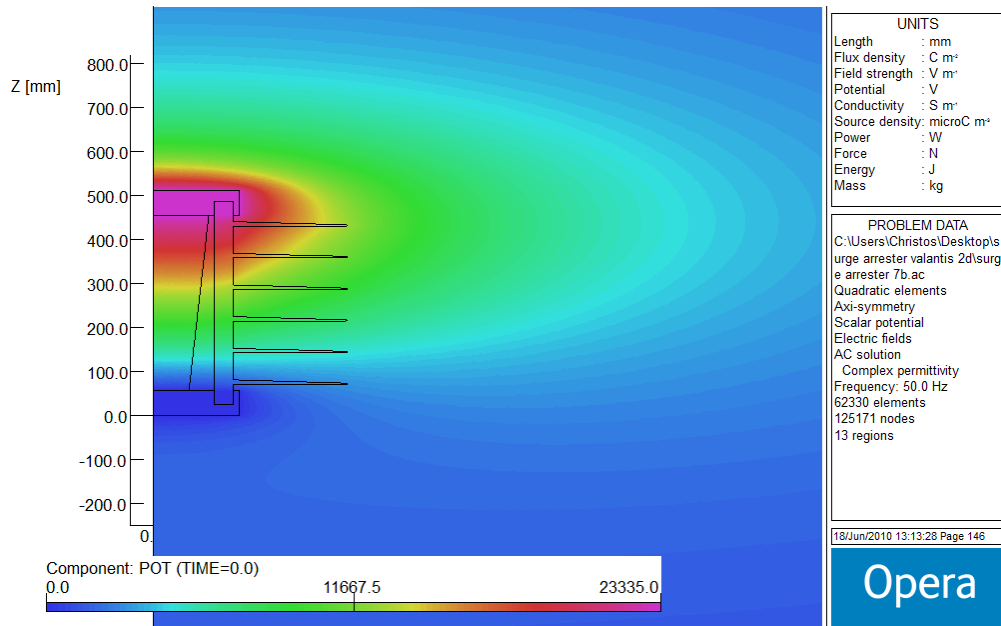
Σχήμα 4.64: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



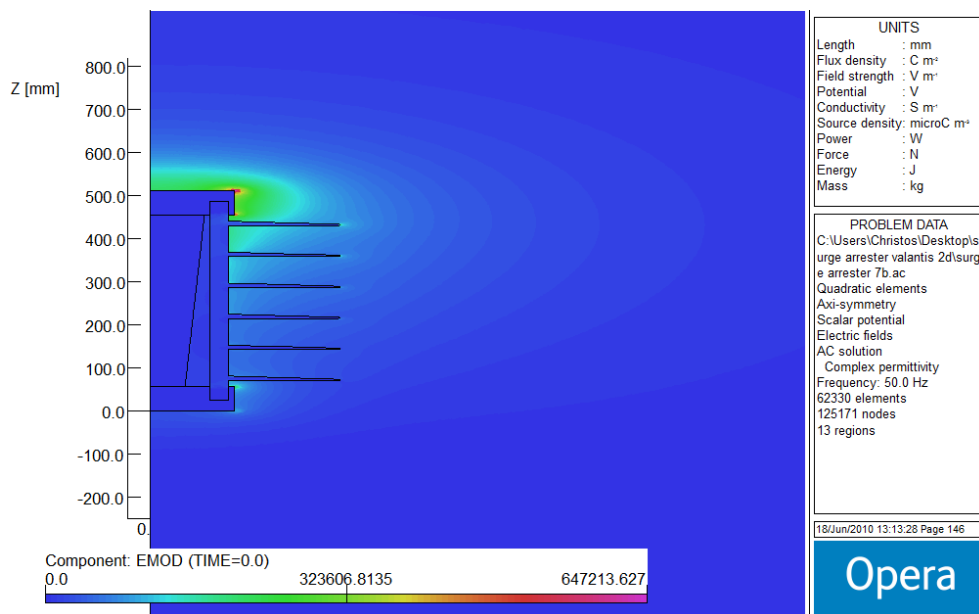
Σχήμα 4.65: Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.66: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) του καθοδικού αλεξικέραννου για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.67: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)



Σχήμα 4.68: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 16,5kV για ανομοιόμορφο πάχος βαρίστορ (περίπτωση 1)

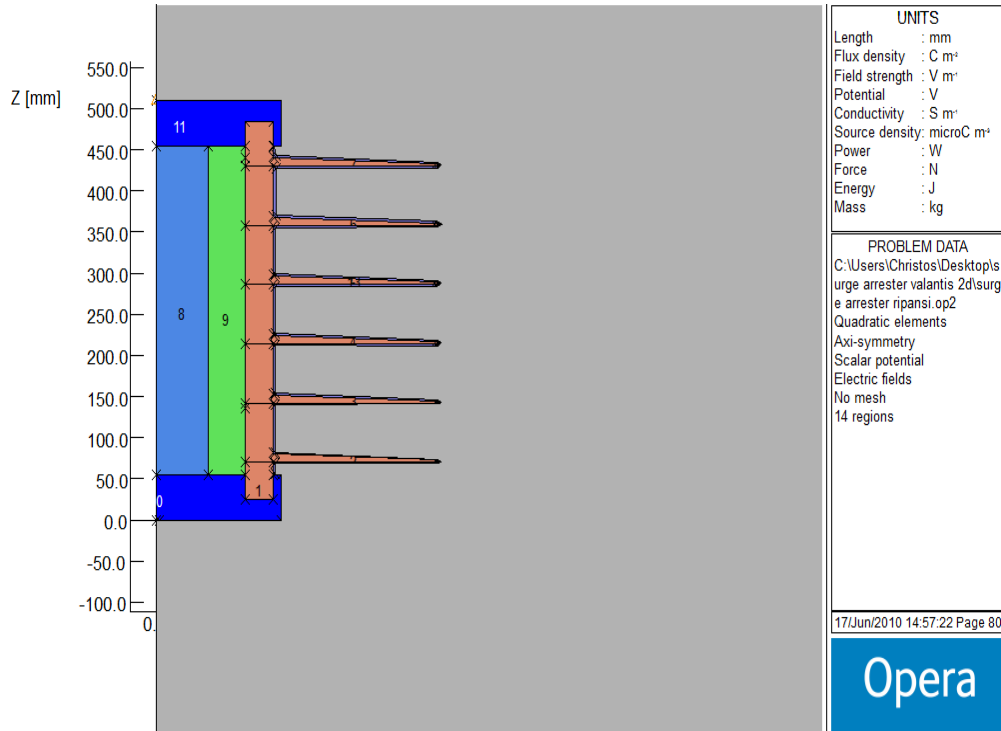
4.3.3.Μελέτη δυσμορφιών στο πραγματικό μοντέλο του καθοδικού αλεξικέραυνου

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που έχουν γίνει σε δύο μοντέλα του πραγματικού καθοδικού αλεξικεραύνου, τα οποία όμως έχουν σχεδιαστεί με κάποιες δυσμορφίες. Ο σκοπός της μελέτης αυτών των περιπτώσεων είναι να διαφανεί, μέσω των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, το πώς επηρεάζεται η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ και το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο. Όπως και στο πραγματικό μοντέλο αλεξικεραύνου έτσι και εδώ παρουσιάζονται η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ καθώς και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο.

Μοντέλο 4 – Καθοδικό αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια

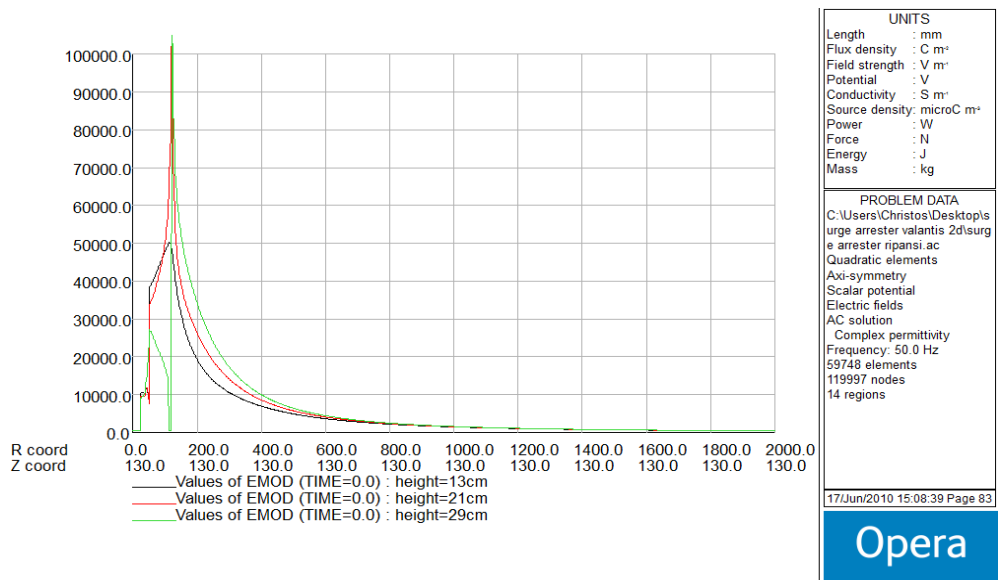
Στο μοντέλο της παρούσας παραγράφου, τοποθετείται στα πτερύγια του καθοδικού αλεξικεραύνου ένα ομοιόμορφο στρώμα ρύπανσης και υγρασίας (Σχήμα 4.69). Το στρώμα ρύπανσης και υγρασίας έχει διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=20$ και αγωγιμότητα $\sigma=10\text{S/m}$ (έντονα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά) με σκοπό να διαφανεί η έντονη εξάρτηση του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού από την ύπαρξη ή μη υγρασίας και ρύπανσης στα πτερύγια του αλεξικεραύνου. Στα Σχήματα 4.69 έως 4.78 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έχουν διενεργηθεί για τα τρία επίπεδα τάσης.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής του πραγματικού και αυτό παρατηρείται λόγω της έντονης ρύπανσης και υγρασίας που συγκεντρώνεται στα πτερύγια του μοντέλου. Όπως φαίνεται και στα σχήματα που ακολουθούν, οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι πάρα πολύ μεγάλες κοντά στα πτερύγια του καθοδικού αλεξικεραύνου με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης μερικών εκκενώσεων ή ακόμα και διάτρησης των πτερυγίων. Επιπλέον, στους Πίνακες 4.2 έως 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στους τρεις οριζόντιους άξονες γύρω από το μοντέλο σε ύψη 13, 21 και 29 εκατοστόμετρα, για τα τρία επίπεδα τάσης 12, 13.2 και 16.5kV. Οι συγκεκριμένες τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες αυτών του πραγματικού γεγονός που επιβεβαιώνει τα όσα έχουν προαναφερθεί.

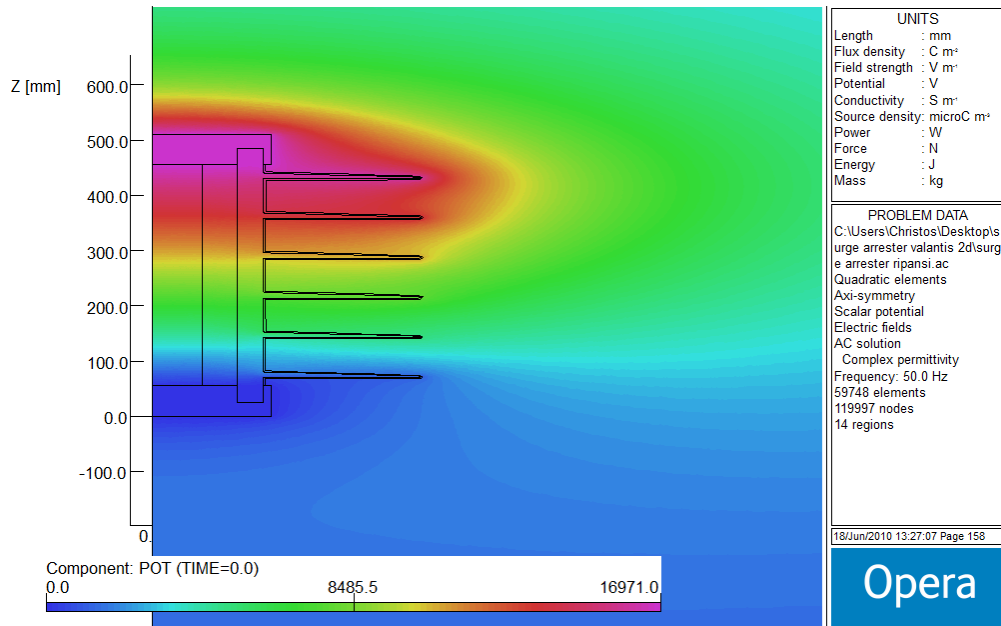


Σχήμα 4.69: Μοντέλο του υπό μελέτη καθοδικού αλεξικέρανου με ανομοιόμορφο στρώμα ρύπανσης και υγρασίας (Μοντέλο 4)

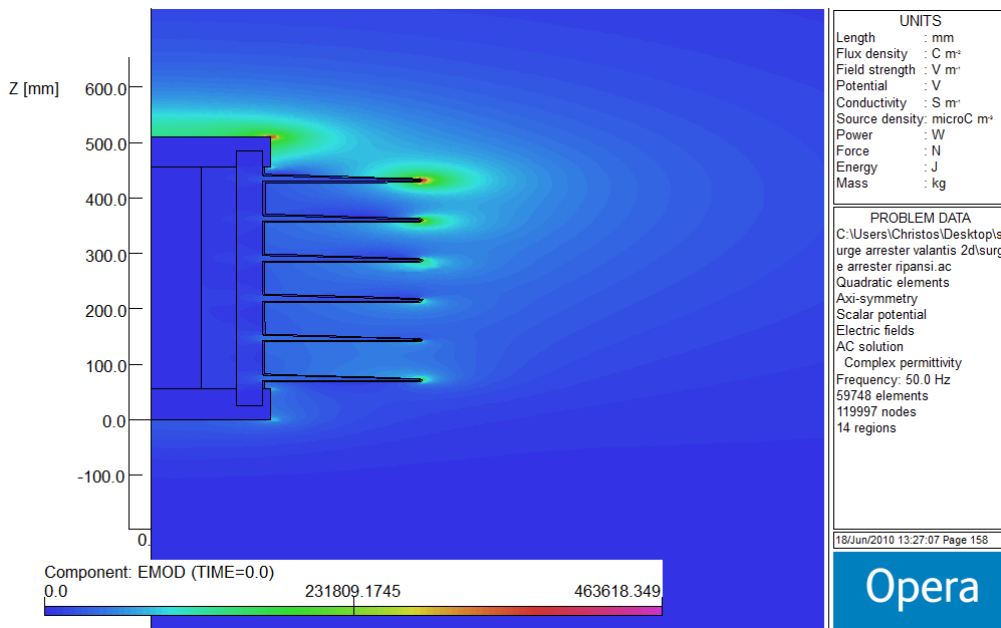
Τάση 12kV



Σχήμα 4.70: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 12kV σε αλεξικέρανο με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα περύγια

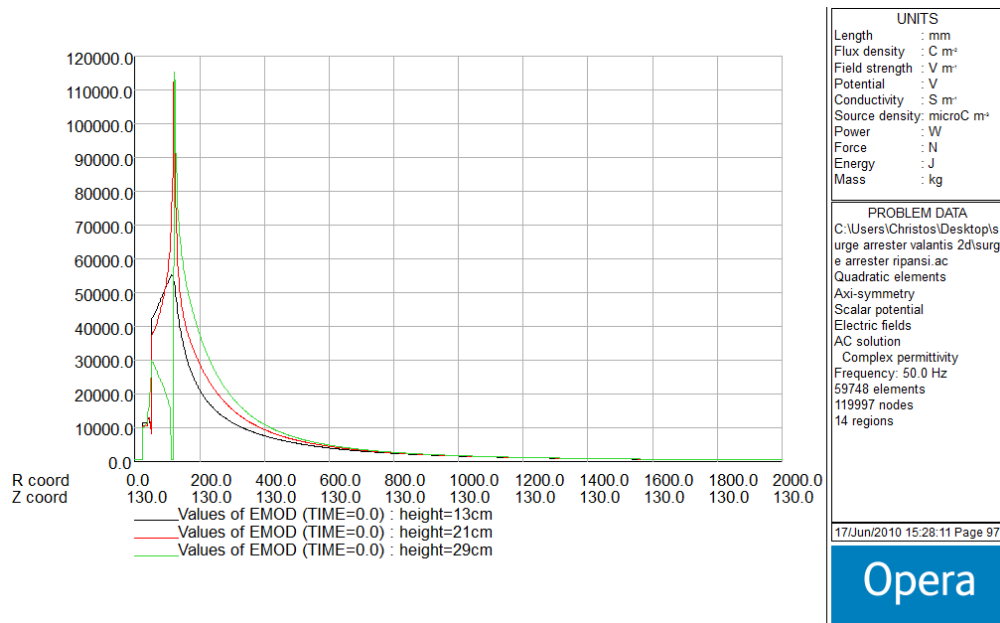


Σχήμα 4.71: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα πτερύγια

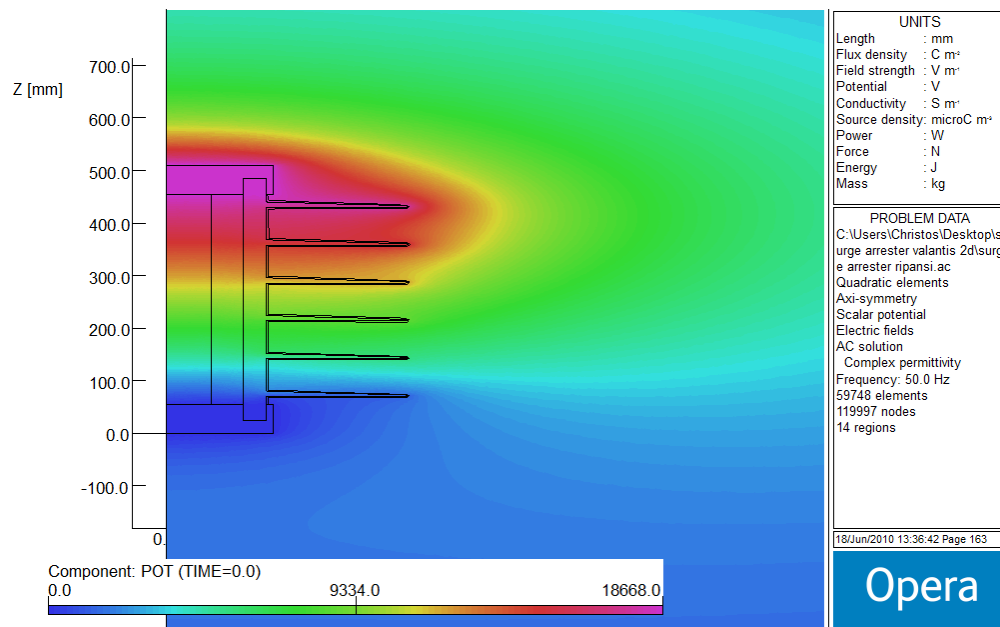


Σχήμα 4.72: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα πτερύγια

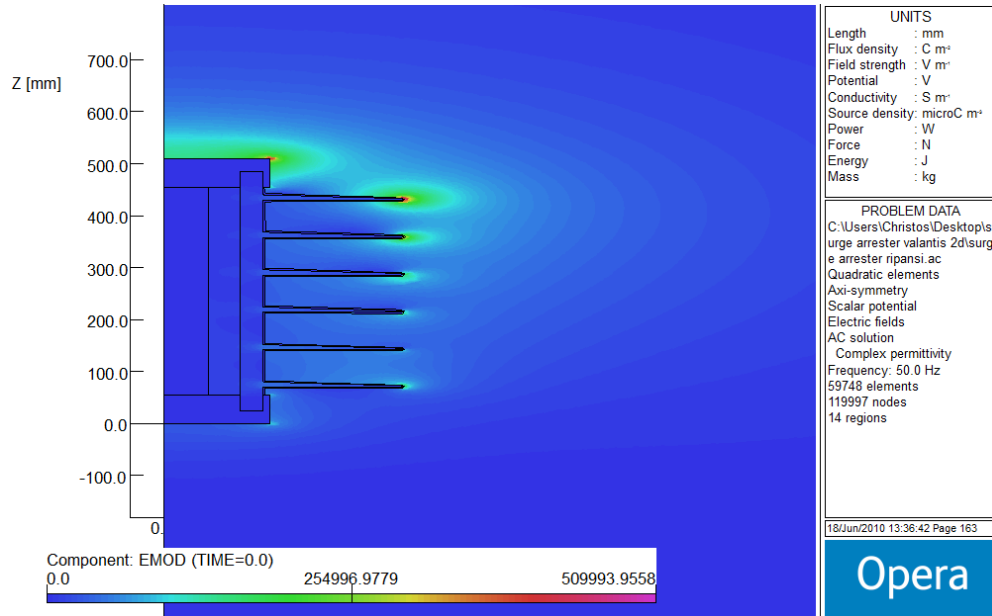
Τάση 13.2kV



Σχήμα 4.73: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 13,2kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα πτερύγια

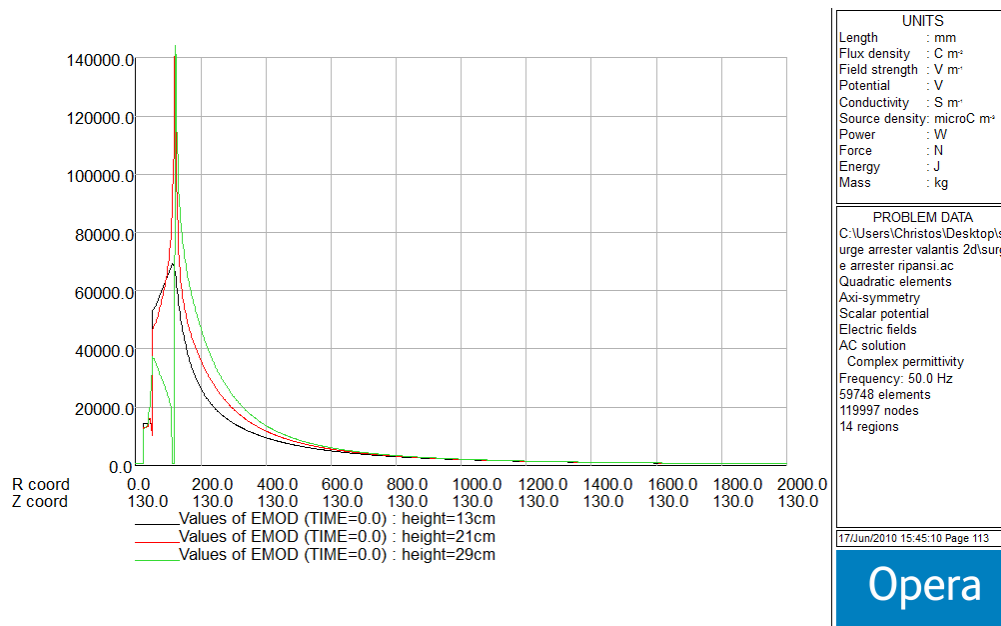


Σχήμα 4.74: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα πτερύγια

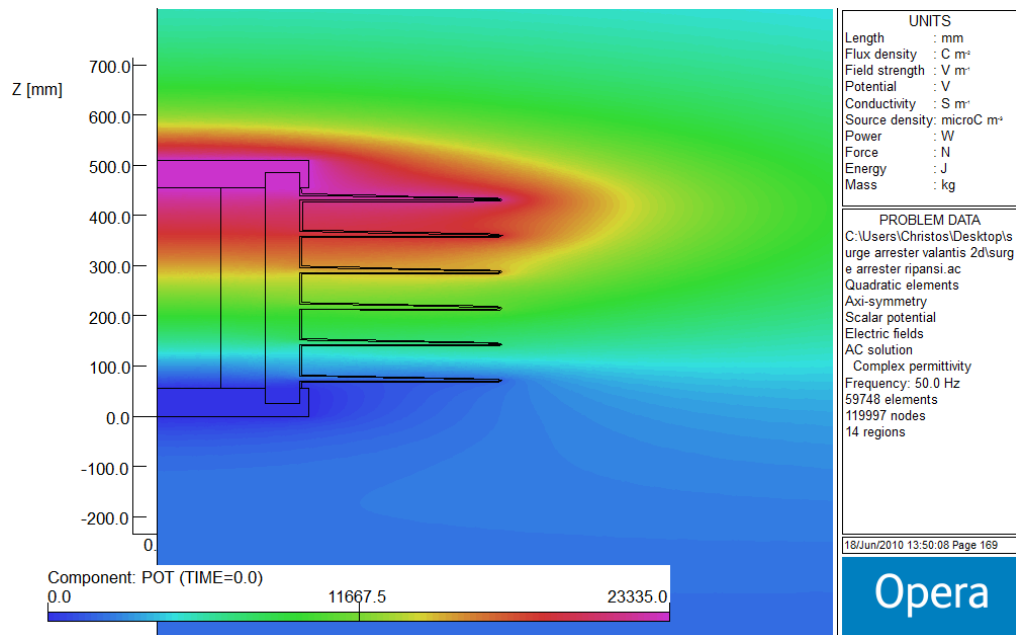


Σχήμα 4.75: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα περύγια

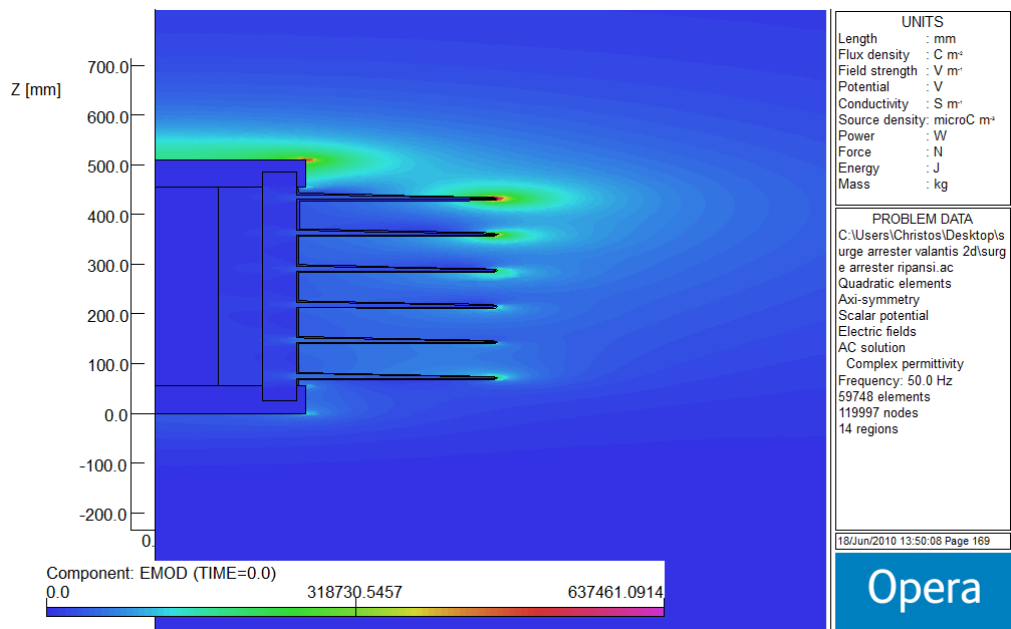
Τάση 16.5kV



Σχήμα 4.76: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 16,5kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα περύγια



Σχήμα 4.77: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 16,5kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα πτερύγια



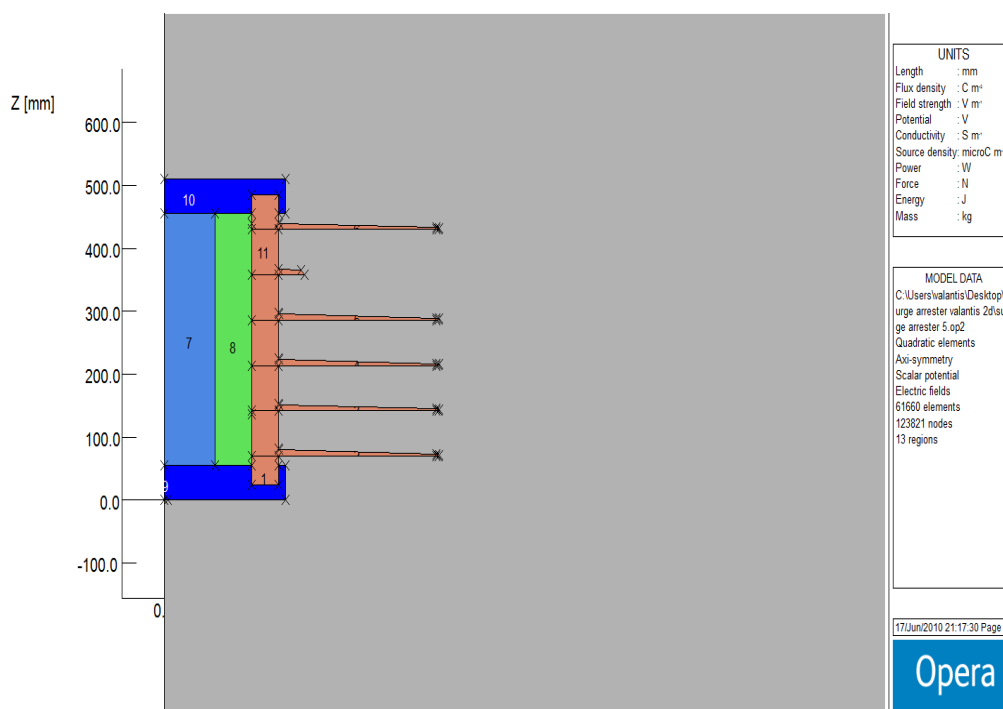
Σχήμα 4.78: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 16.5kV με στρώμα ρύπανσης και υγρασίας στα πτερύγια

Μοντέλο 5 – Καθοδικό αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο

Στην παρούσα παράγραφο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου του καθοδικού αλεξικεραύνου, του οποίου όμως το ένα πτερύγιό του είναι σπασμένο (Σχήμα 4.79). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να διαφανεί η εξάρτηση του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού από την ύπαρξη ή μη κάποιας δυσμορφίας στο αλεξικέραυνο. Στα Σχήματα 4.80 έως 4.89 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έχουν διενεργηθεί για τα τρία επίπεδα τάσης.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο μεταβάλλεται ελαφρώς σε σχέση με αυτή του πραγματικού. Παρόλα αυτά, στην περιοχή κοντά στο σπασμένο πτερύγιο οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνουν μεγάλες τιμές (μεγαλύτερες αυτών που προκύπτουν στο πραγματικό μοντέλο), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μερικές εκκενώσεις ή ακόμα και σε διάτρηση κάποιου γειτονικού πτερυγίου.

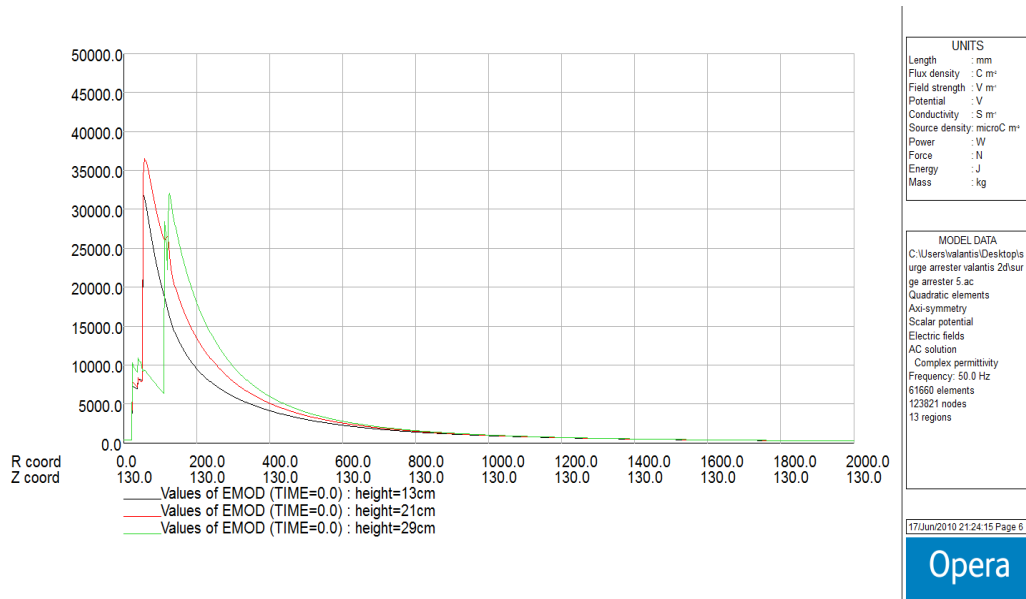
Στους Πίνακες 4.2 έως 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στους τρεις οριζόντιους άξονες γύρω από το μοντέλο σε ύψη 13, 21 και 29cm, για τα τρία επίπεδα τάσης 12, 13.2 και 16.5kV.



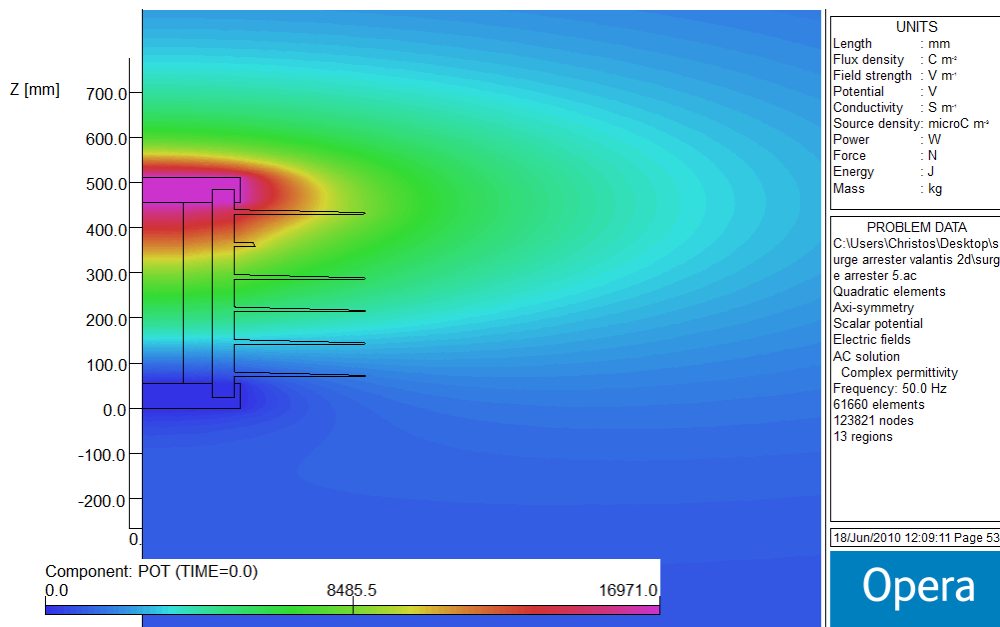
Σχήμα 4.80: Μοντέλο του υπό μελέτη καθοδικού αλεξικέραυνου με σπασμένο το ένα πτερύγιο

(Μοντέλο 5)

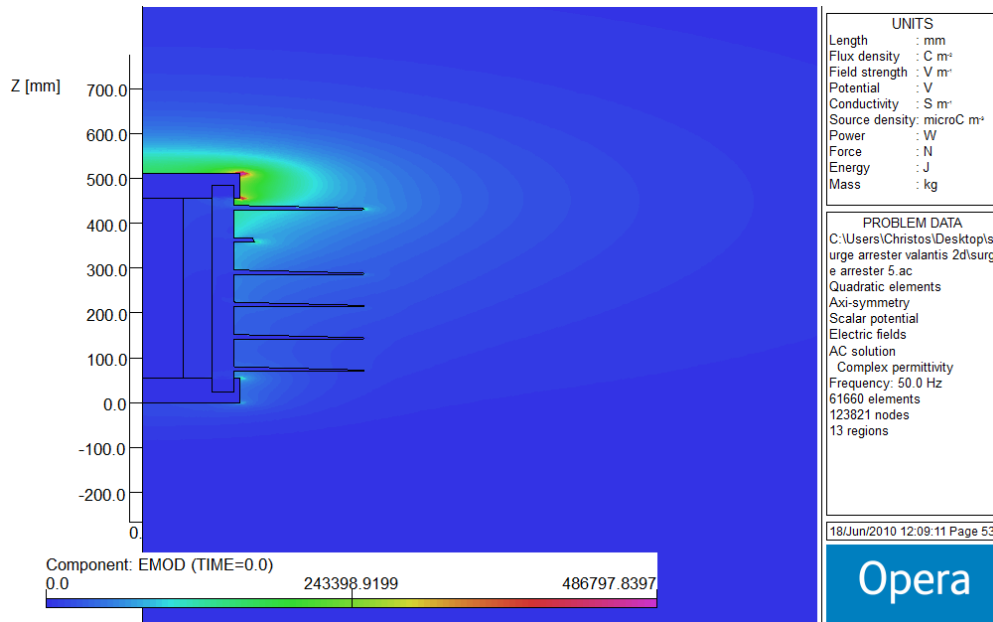
Τάση 12kV



Σχήμα 4.81: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 12kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πετερύγιο

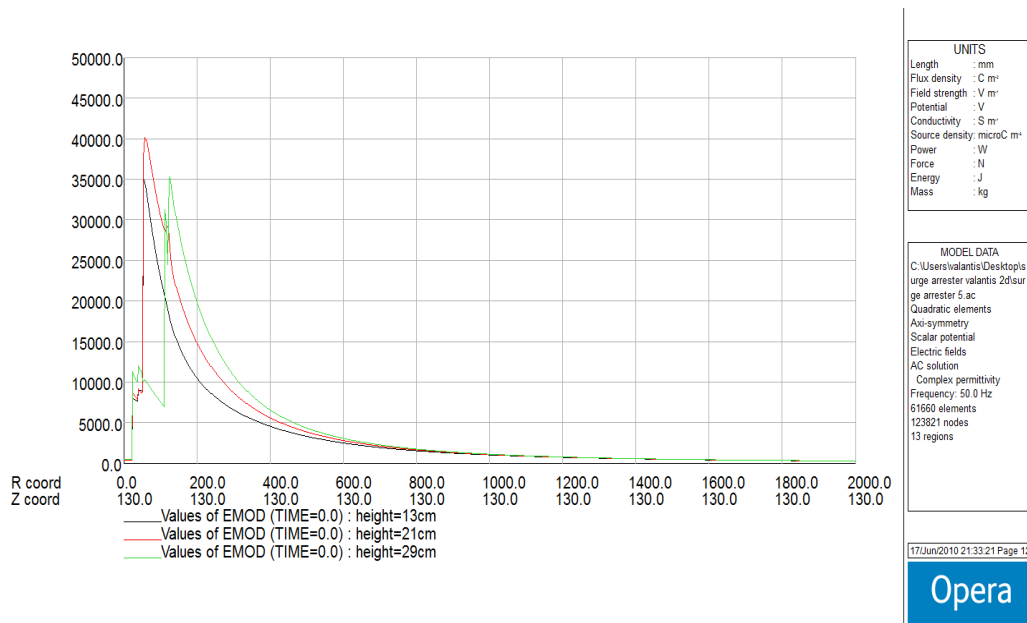


Σχήμα 4.82: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πετερύγιο

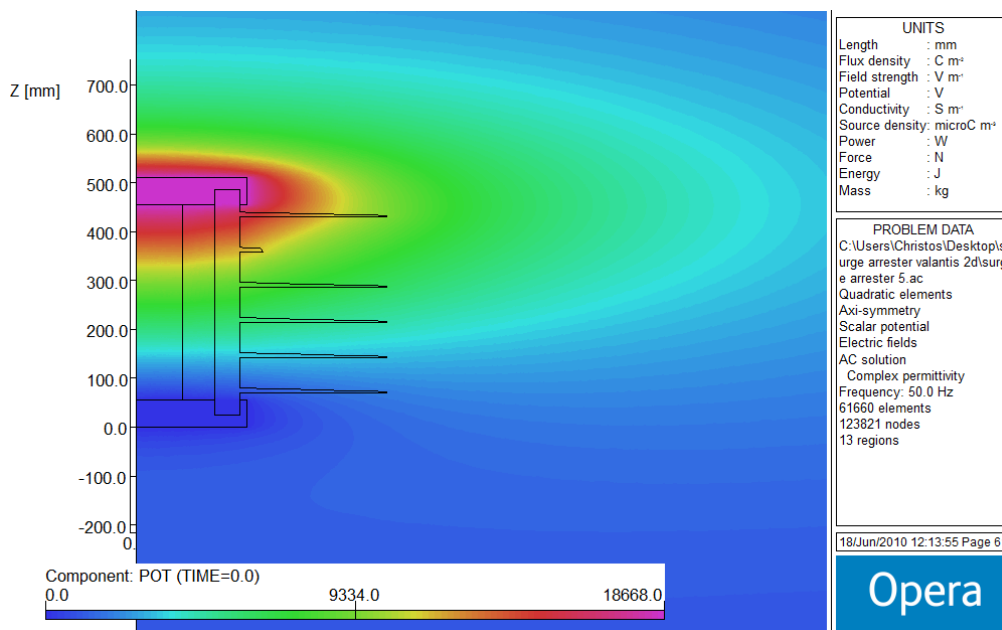


Σχήμα 4.83: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 12kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πτερόγιο

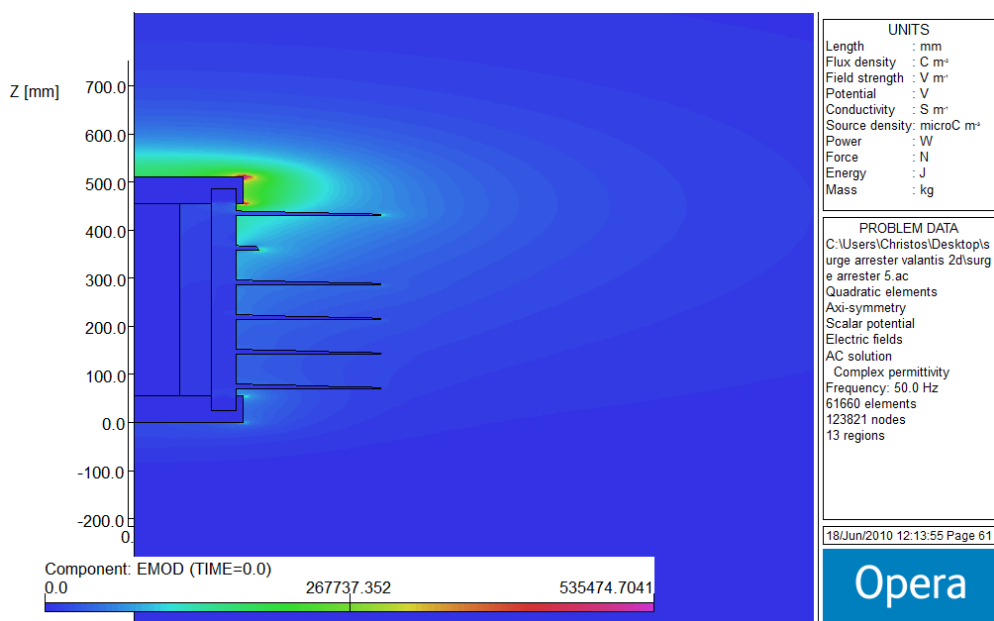
Τάση 13.2kV



Σχήμα 4.84: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 13,2kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πτερόγιο

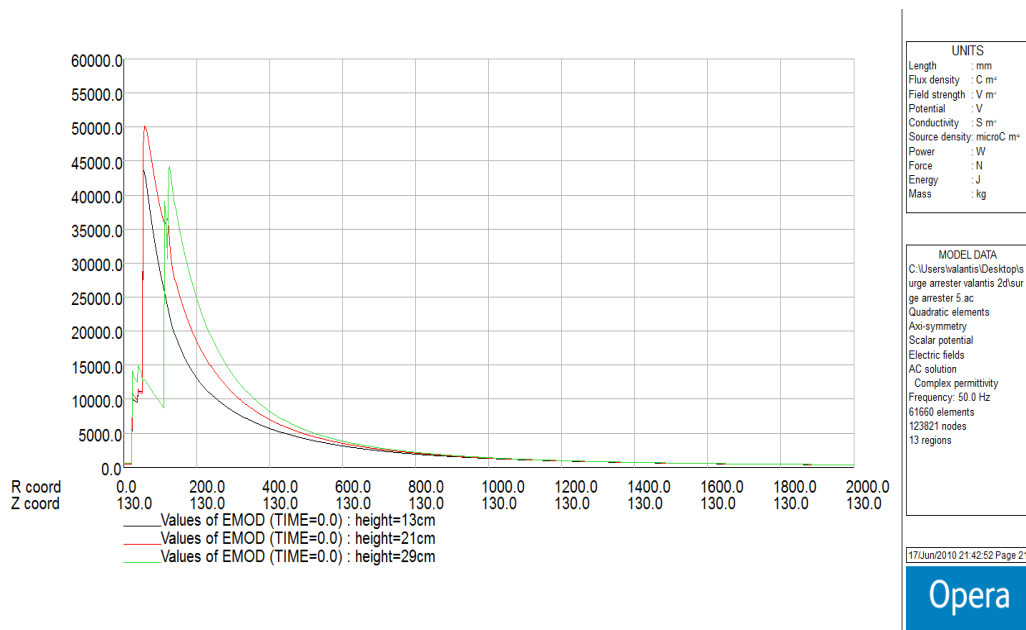


Σχήμα 4.85: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πτερύγιο

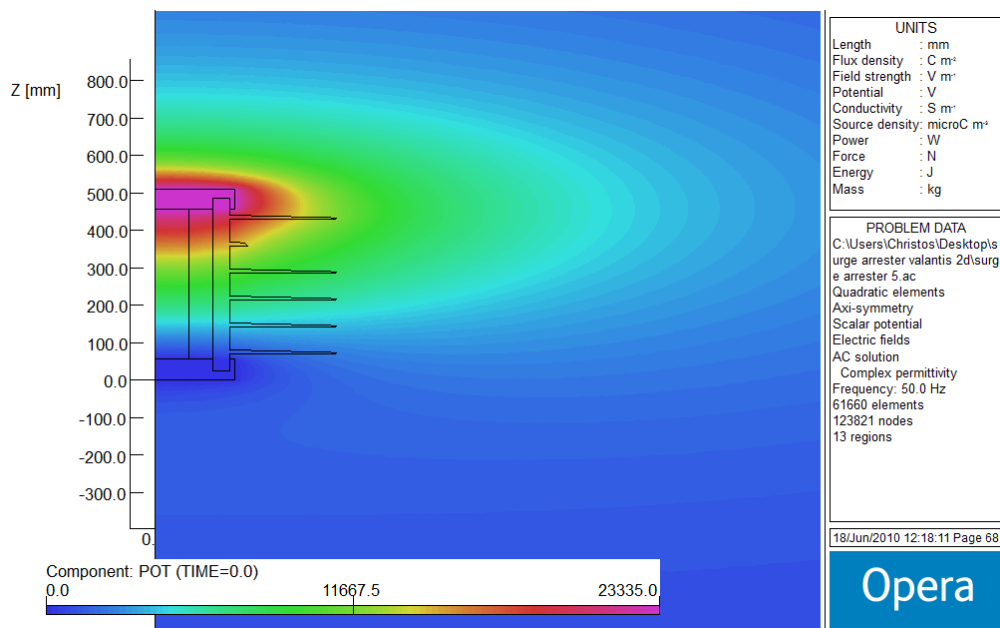


Σχήμα 4.86: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 13,2kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πτερύγιο

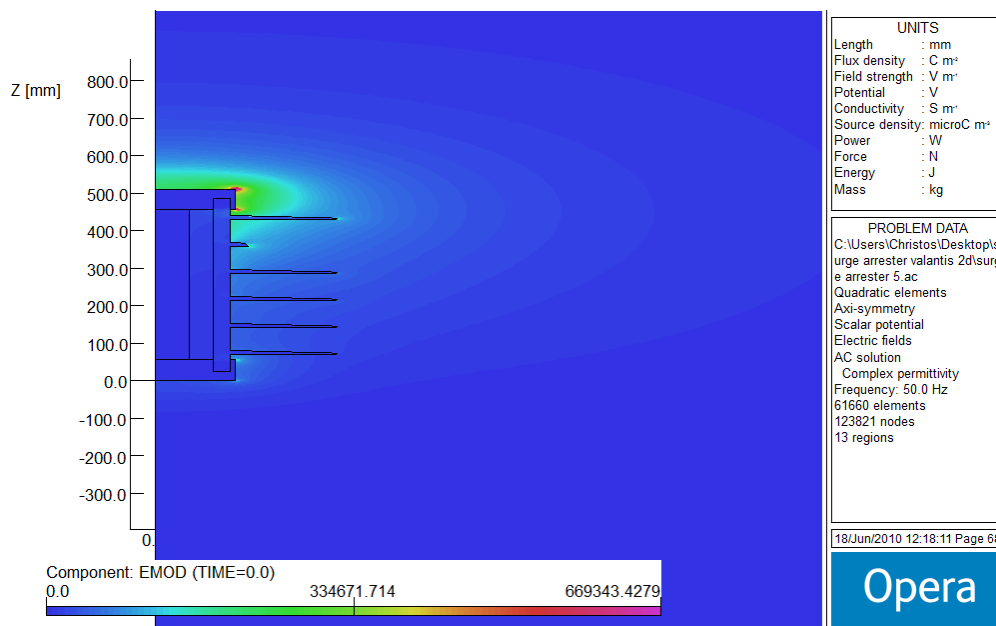
Τάση 16.5kV



Σχήμα 4.87: Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στους οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστά αντίστοιχα για τάση 16,5kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πετερόγιο



Σχήμα 4.88: Το δυναμικό γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 16,5kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πετερόγιο



Σχήμα 4.89: Το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από το καθοδικό αλεξικέρανο για τάση 16,5kV σε αλεξικέρανο με σπασμένο πτερόγιο

4.3.4. Πίνακες σύγκρισης αποτελεσμάτων

Πιο κάτω παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο όπως αυτές έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν στο πραγματικό μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου και στα πέντε προαναφερθέντα μοντέλα. Οι τιμές έχουν ληφθεί σε τρεις οριζόντιους άξονες για ύψη 13, 21 και 29 εκατοστόμετρα από το έδαφος και για τα τρία επίπεδα τάσης (12, 13.2 και 16.5kV).

Πίνακας 4.2: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 13cm και τάση 12kV

H=13cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	254,1	252.26	380.95	266.41	238.81	279.52
1.7	348,49	345.9	523.65	365.46	327.34	383.57
1.4	505,95	502.2	763.34	530.99	474.85	557.75
1.1	796,45	790.39	1210.53	836.84	746.11	880.03
0.8	1414,17	1403.21	2184.7	1490.55	1319.78	1571.49
0.5	3041,65	3014.28	4893.08	3229.67	2808.2	3435.7

Πίνακας 4.3: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 21cm και τάση 12kV

H=21cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	257,38	255.5	385.59	269.78	242.01	282.88
1.7	354,6	352.03	532.47	371.77	333.36	389.98
1.4	519	515.1	782.13	544.35	487.63	571.20
1.1	828,68	822.78	1258.64	870.23	778	913.78
0.8	1518,79	1506.69	2343.55	1597.72	1422.33	1680.81
0.5	3543,95	3509.84	5715.54	3750.59	3294.03	3962.9

Πίνακας 4.4: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 29cm και τάση 12kV

H=29cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	259.89	257.98	389.15	272.32	244.53	285.4
1.7	359.35	356.69	539.04	376.62	338.06	394.76
1.4	529.06	525.06	796.29	554.59	497.61	581.44
1.1	854.59	848.08	1294.95	896.18	803.32	939.78
0.8	1603.54	1590.63	2465.41	1684.09	1506.09	1766.3
0.5	3984.02	3945.98	6378.99	4199.04	3732.44	4408.54

Πίνακας 4.5: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 13cm και τάση 13.2kV

H=13cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	279.51	277.48	418.83	293.04	262.69	307.47
1.7	383.33	380.51	576.04	402	360.07	421.93
1.4	556.53	552.42	839.86	584.06	522.33	613.53
1.1	876.08	869.42	1331.94	920.49	820.71	968.03
0.8	1555.57	1543.52	2403.03	1639.6	1451.75	1728.63
0.5	3345.79	3315.67	5381.89	3552.67	3089	3779.25

Πίνακας 4.6: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 21cm και τάση 13.2kV

H=21cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	283.12	281.05	423.86	296.75	266.21	311.16
1.7	390.05	387.24	585.7	408.94	366.69	428.97
1.4	570.89	566.61	860.79	598.77	536.39	628.32
1.1	911.54	905.06	1384.75	952.23	855.8	1005.16
0.8	1670.65	1657.36	2577.5	1757.5	1564.55	1848.88
0.5	3898.33	3860.76	6286.14	4125.69	3623.42	4359.17

Πίνακας 4.7: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 29cm και τάση 13.2kV

H=29cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	285.88	283.78	427.68	299.54	268.97	313.94
1.7	395.28	392.38	593.08	414.27	371.86	434.24
1.4	581.97	577.58	876.42	610.03	547.37	639.58
1.1	940.04	932.89	1424.7	985.77	883.65	1033.75
0.8	1763.88	1749.69	2711.49	1852.5	1656.69	1942.92
0.5	4382.4	4340.49	7016.27	4618.97	4105.67	4849.37

Πίνακας 4.8: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 13cm και τάση 16,5kV

H=13cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	349.39	346.85	523.76	366.31	328.36	384.33
1.7	479.16	475.64	730.03	502.5	450.09	527.41
1.4	695.67	690.53	1049.72	730.1	652.92	766.91
1.1	1095.11	1086.78	1664.31	1150.64	1025.9	1210.04
0.8	1944.46	1929.41	3003.92	2049.49	1814.68	2160.78
0.5	4182.24	4144.58	6728.73	4440.77	3861.25	4724.07

Πίνακας 4.9: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 21cm και τάση 16.5kV

H=21cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	353.9	351.31	530.2	370.95	332.77	388.95
1.7	487.57	484.08	732.14	511.18	458.37	536.22
1.4	713.62	708.27	1075.62	748.48	670.48	785.4
1.1	1139.42	1131.32	1730.36	1196.56	1069.75	1256.44
0.8	2088.32	2071.7	3222.51	2196.86	1955.69	2311.1
0.5	4872.91	4825.94	7858.89	5157.03	4529.26	5448.96

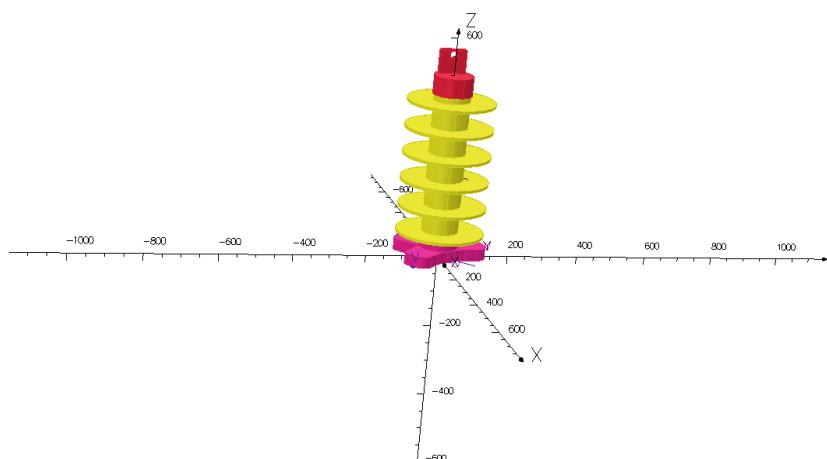
Πίνακας 4.10: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου στον οριζόντιο άξονα με ύψος 29cm και τάση 16.5kV

H=29cm	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με σπασμένο πτερύγιο	Μελετούμενο Καθοδικό Αλεξικέραυνο με ρύπανση και υγρασία στα πτερύγια	Μοντέλο 2 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 3 (μεταβλητή ακτίνα βαρίστορ)	Μοντέλο 1 (λεπτό υαλώδες περίβλημα)
R(m)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
2	357.35	354.73	535.08	374.43	336.22	392.43
1.7	494.11	490.47	741.13	517.84	464.83	542.8
1.4	727.46	721.97	1095.15	762.56	684.22	799.48
1.1	1175.05	1166.11	1780.57	1232.24	1104.56	1292.18
0.8	2204.86	2187.11	3389.99	2315.61	2070.86	2428.65
0.5	5478	5425.61	8770.8	5773.65	5132.07	6061.72

4.4.Υπολογισμός της κατανομής του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου με την τρισδιάστατη έκδοση του PC Opera

Το πρόβλημα πεδιακής ανάλυσης του καθοδικού αλεξικέραυνου, εκτός από την δισδιάστατη επίλυσή του, έχει επιλυθεί και με την χρήση του τρισδιάστατου πακέτου του προγράμματος PC OPERA. Το μοντέλο σχεδιάστηκε λεπτομερώς έχοντας ως σκοπό την, όσο πιο πιστή γίνεται, αναπαράσταση του πραγματικού καθοδικού αλεξικεραυνού (Σχήμα 4.90). Η σχεδίαση, η επεξεργασία, η προσομοίωση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων στην τρισδιάστατη έκδοση του προγράμματος PC OPERA περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

20/????/2010 23:40:55



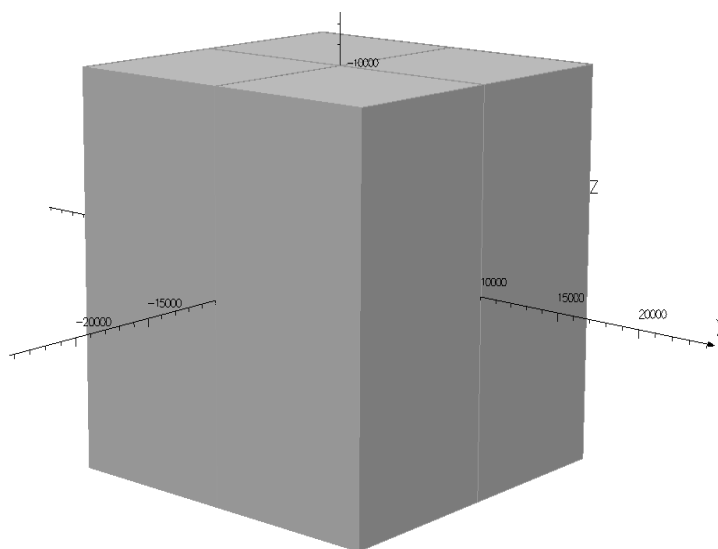
Opera

Σχήμα 4.90: Το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραυνού σε τρισδιάστατη μορφή.

Στα μέρη που απαρτίζουν το τρισδιάστατο μοντέλο δόθηκαν τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όπως και στο δισδιάστατο. Η μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ), το υαλώδες περίβλημα (glass fiber), τα πτερύγια από πολυμερές μονωτικό υλικό και ο αέρας έχουν διηλεκτρική σταθερά ϵ_r 100, 4.6, 3.9 και 1 αντίστοιχα. Τα ηλεκτρόδια υψηλής τάσης και γης του καθοδικού αλεξικεραυνού έχουν διηλεκτρική σταθερά 1000 και αγωγιμότητα $\sigma=10^6$ S/m.

Με την ίδια φιλοσοφία, όπως και στο δισδιάστατο πακέτο του PC OPERA, το μοντέλο περιβάλλεται από μια κυβική περιοχή αέρα. Η περιοχή αυτή του αέρα, έχει διαστάσεις 10m x 10m (όπως ακριβώς είχε τεθεί και στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου) και στα όριά της μπορούμε να ορίσουμε, με μεγάλη ακρίβεια, ότι το δυναμικό και το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδενικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γειωμένο ηλεκτρόδιο του μοντέλου ενώνεται με την εξωτερική επιφάνεια του χώρου αυτού (ισοδυναμική σύνδεση). Το πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραυνού συμπεριλαμβανομένου και του χώρου που το περιβάλλει παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.91.

20/??/2010 23:39:38

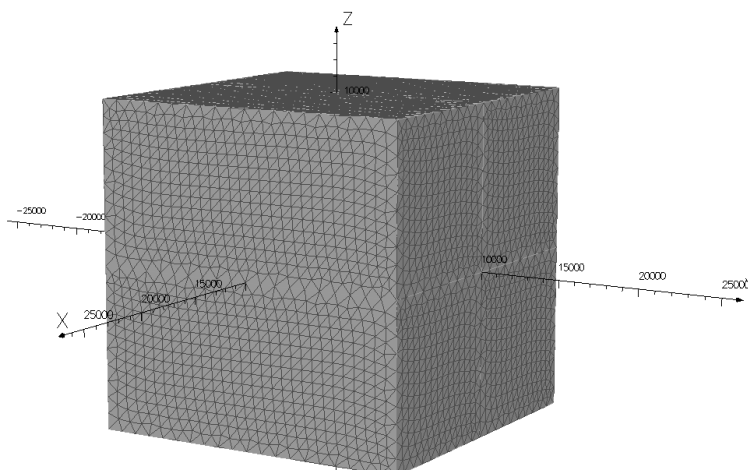


Opera

Σχήμα 4.91: Το πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραυνού

Στο Σχήμα 4.92 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 1323551 στοιχεία και 226167 κόμβοι. Το πλέγμα τέθηκε τόσο πυκνό με σκοπό την επίτευξη μέγιστης ακρίβειας στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Όπως και στο δισδιάστατο μοντέλο έτσι και στο τρισδιάστατο, το πλέγμα ορίστηκε αρκετά πυκνότερο στις περιοχές κοντά στο αλεξικέραυνο.

20/7/2010 23:42:00



Opera

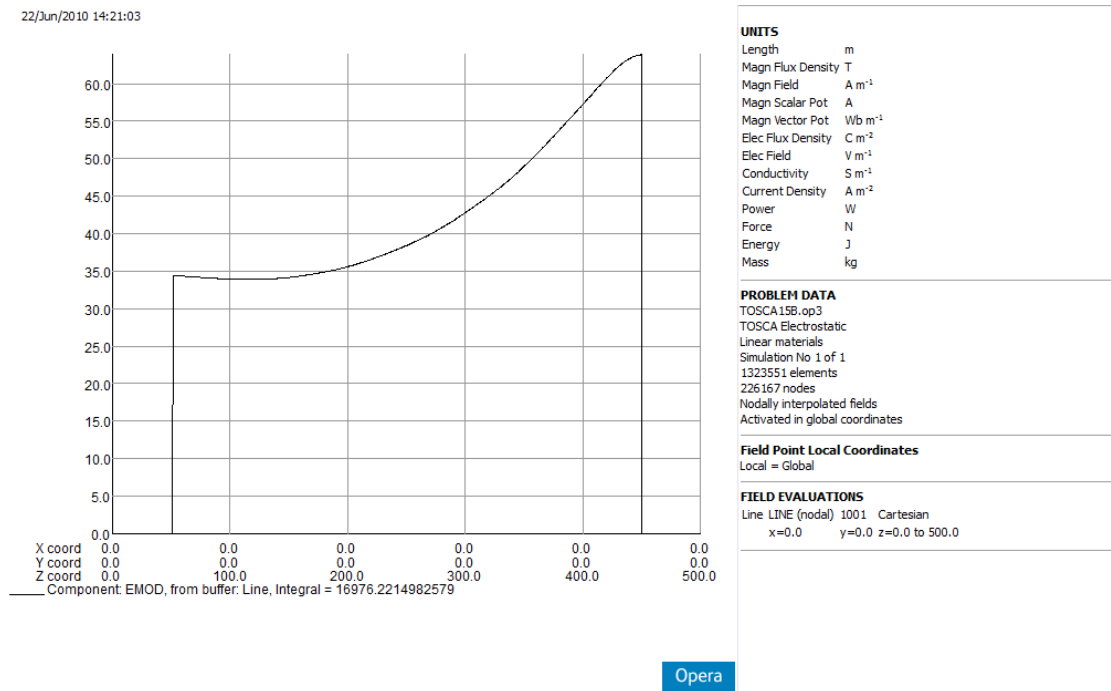
Σχήμα 4.92: Το πλέγμα του τρισδιάστατου μοντέλου του καθοδικού αλεξικεραύνου

Για την προσομοίωση του μοντέλου, εφαρμόζουμε στο άνω ηλεκτρόδιο τρία διαφορετικά επίπεδα τάσης ξεχωριστά (12 kV, 13.2 kV και 16.5kV). Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση και ανάλυση του μοντέλου λαμβάνουμε την κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ) καθώς και τις τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στις θέσεις γύρω από το αλεξικέραυνο όπου λήφθηκαν και πειραματικές μετρήσεις. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν στην Παράγραφο 4.5 και συγκρίνονται τόσο με τις πειραματικές μετρήσεις όσο και με τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου που προέκυψαν από την δισδιάστατη προσομοίωση.

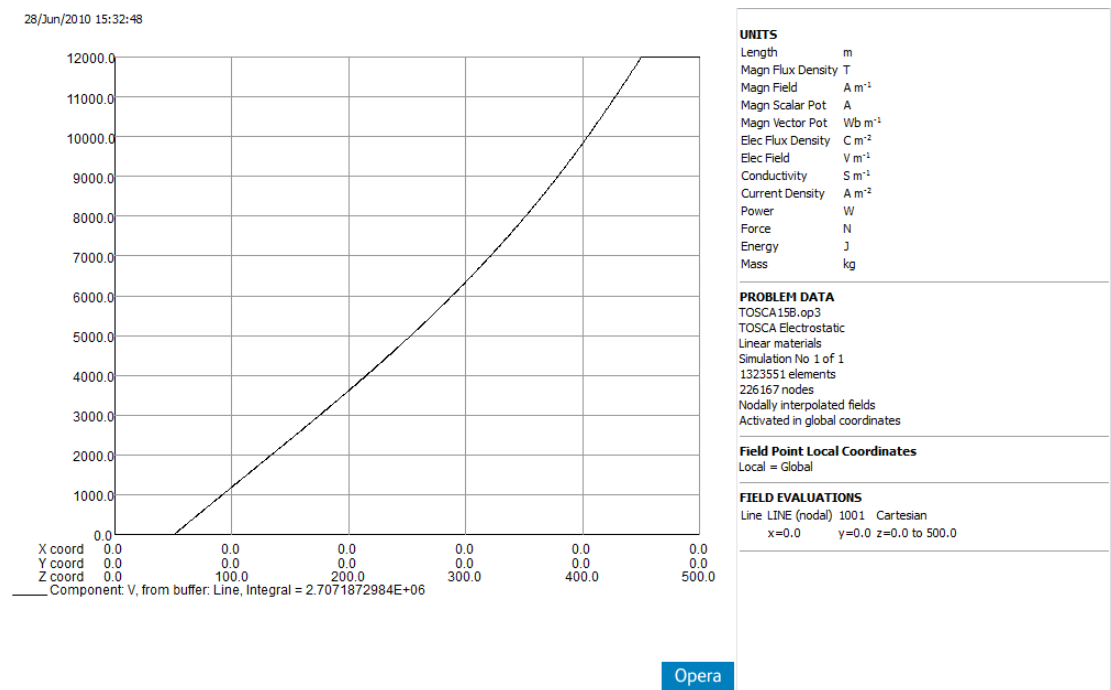
Επιπλέον, παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα οι κατανομές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε τρία οριζόντια επίπεδα με ύψος 13, 21 και 29 cm από το έδαφος (στους οριζόντιους αυτούς άξονες έχουν διενεργηθεί οι πειραματικές δοκιμές) για τα τρία επίπεδα τάσης (12 kV, 13.2 kV και 16.5kV).

Παρακάτω παρουσιάζονται για το κάθε επίπεδο τάσης αναλυτικά τα αποτελέσματα (Σχήματα 4.93 έως 4.113) που προέκυψαν από την προσομοίωση και την ανάλυση του μοντέλου.

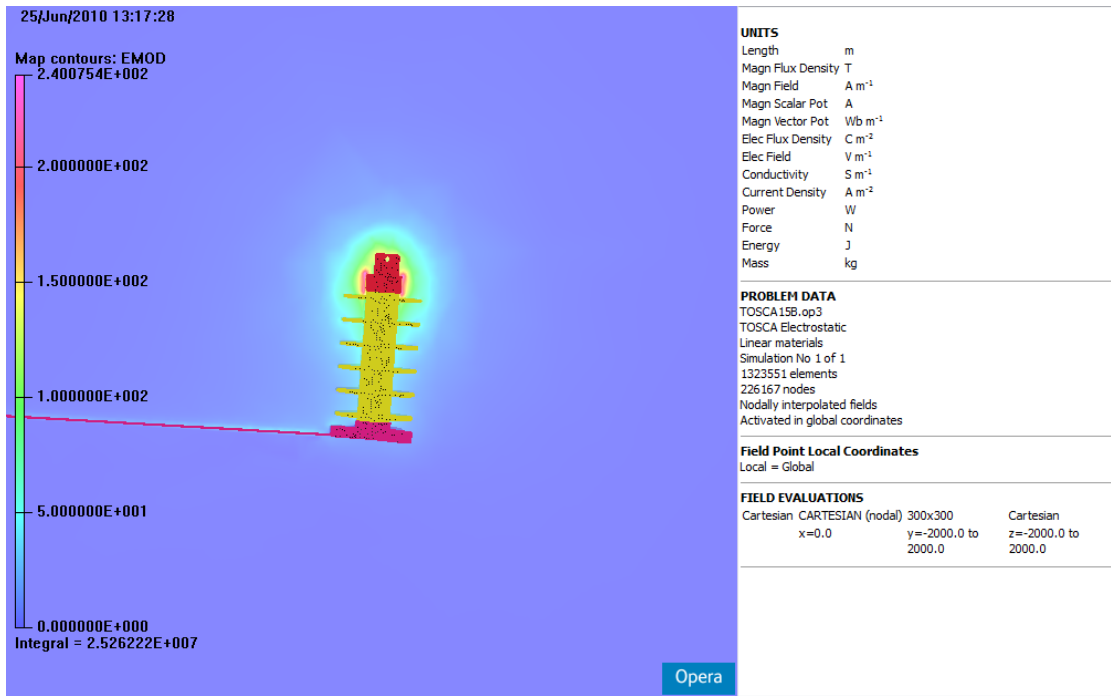
Τάση 12kV



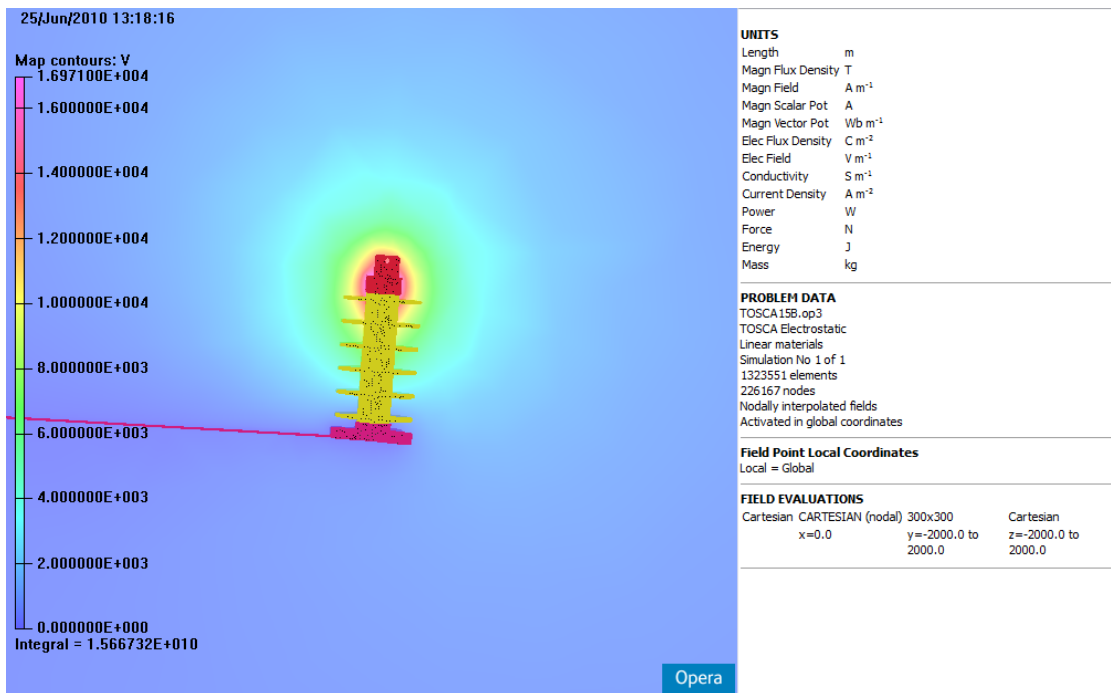
Σχήμα 4.93: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ για τάση 12kV



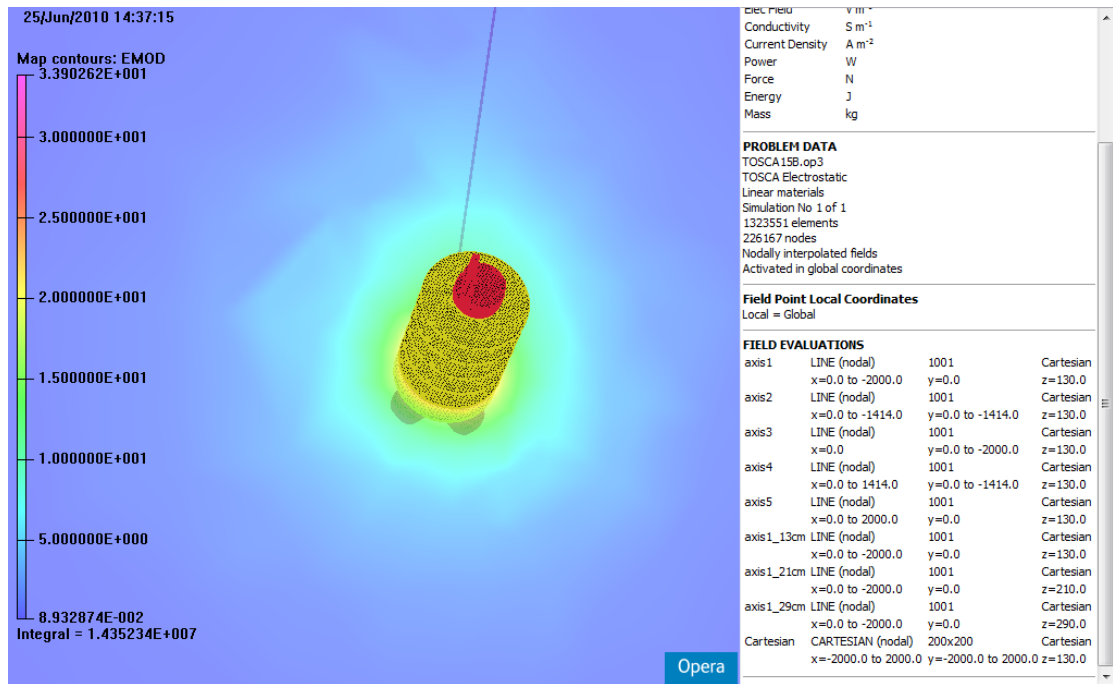
Σχήμα 4.94: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ για τάση 12kV



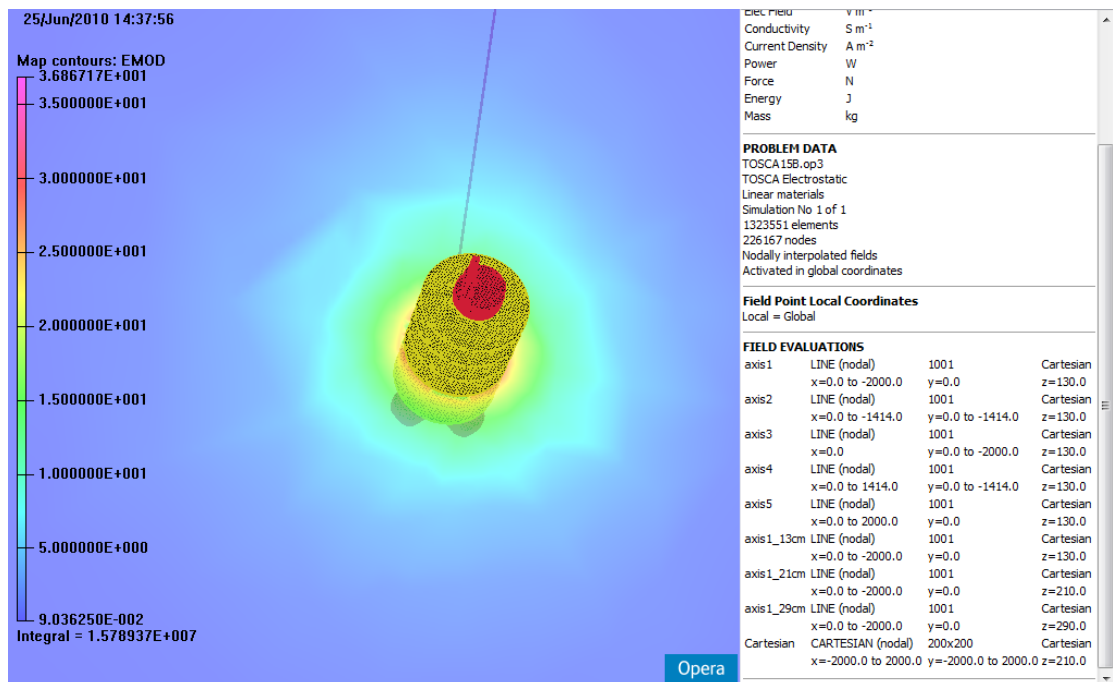
Σχήμα 4.95: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου για τάση 12kV



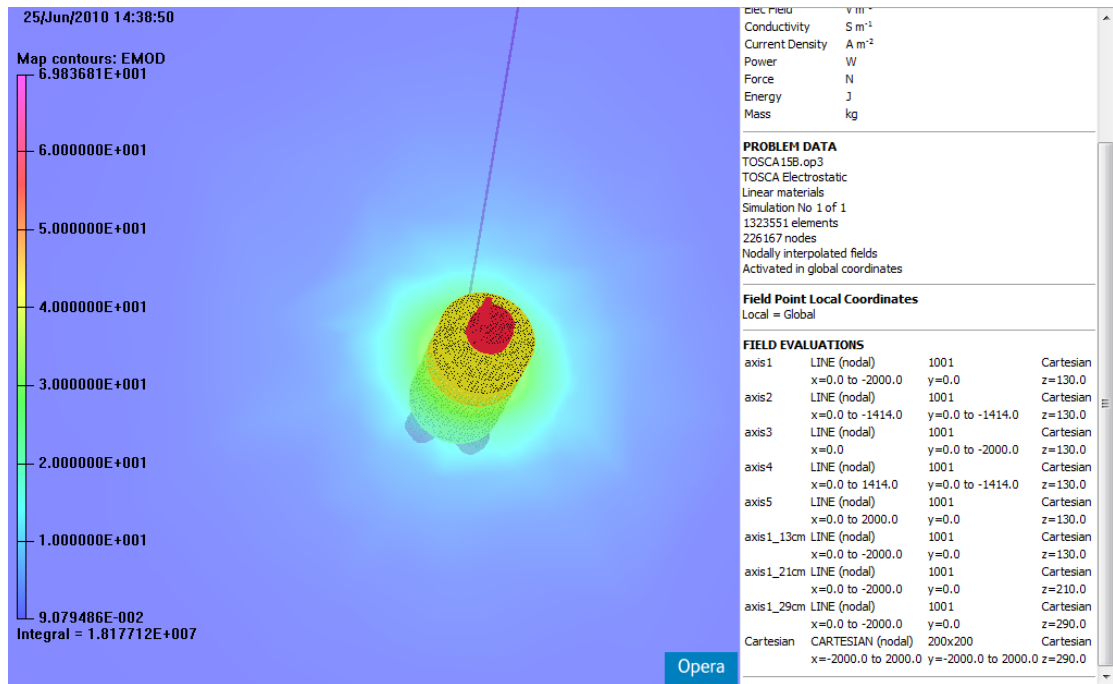
Σχήμα 4.96: Δυναμικό γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου για τάση 12kV



Σχήμα 4.97: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 13cm για τάση 12kV

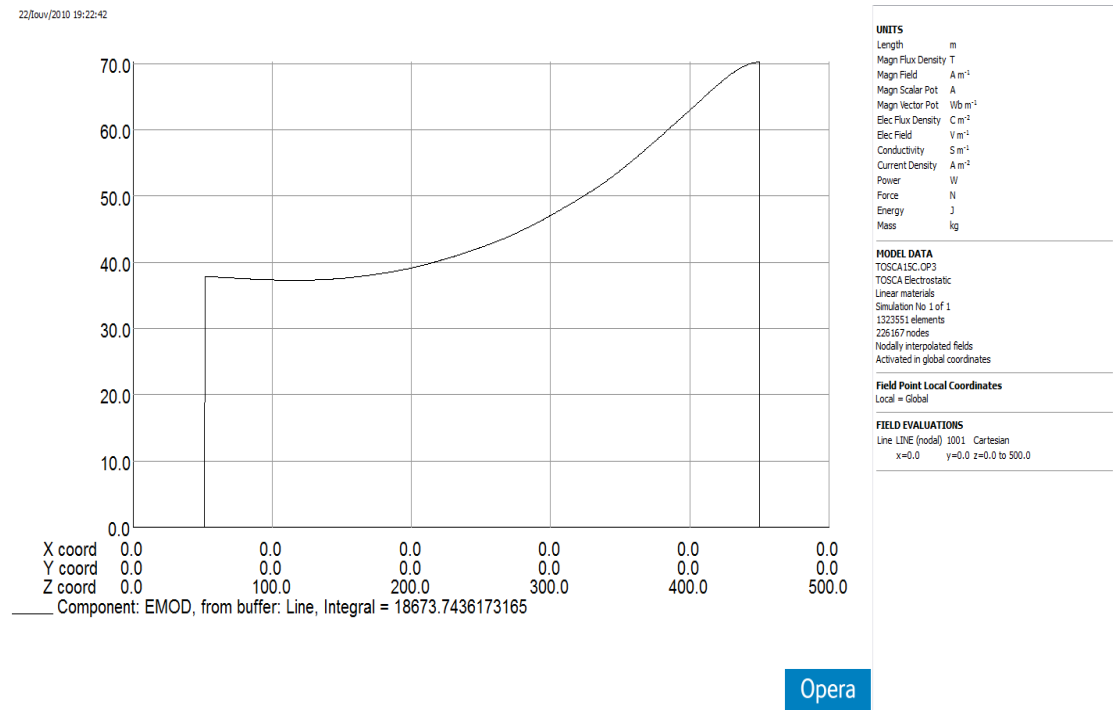


Σχήμα 4.98: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 21cm για τάση 12kV

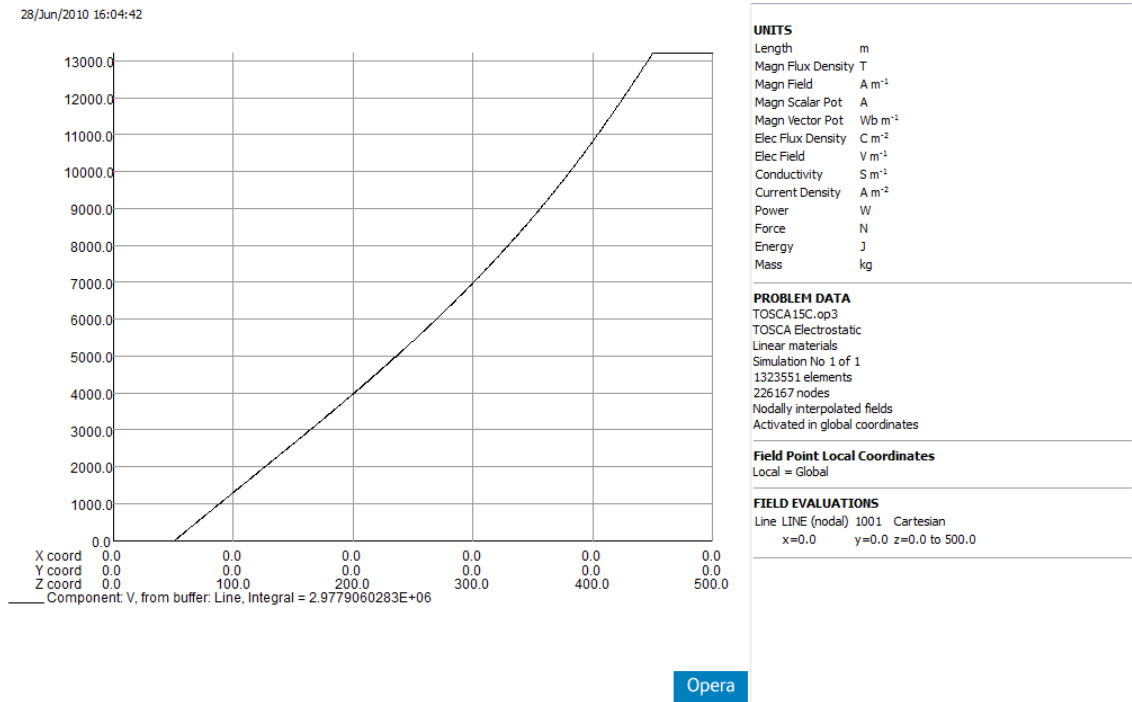


Σχήμα 4.99: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 29cm για τάση 12kV

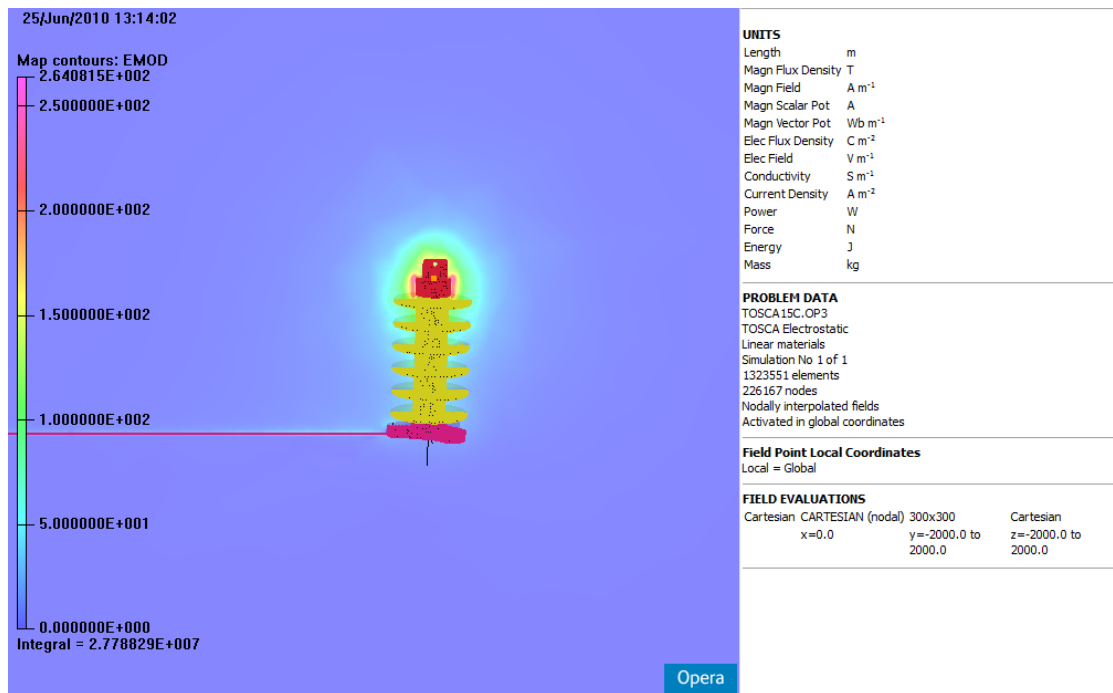
Τάση 13,2kV



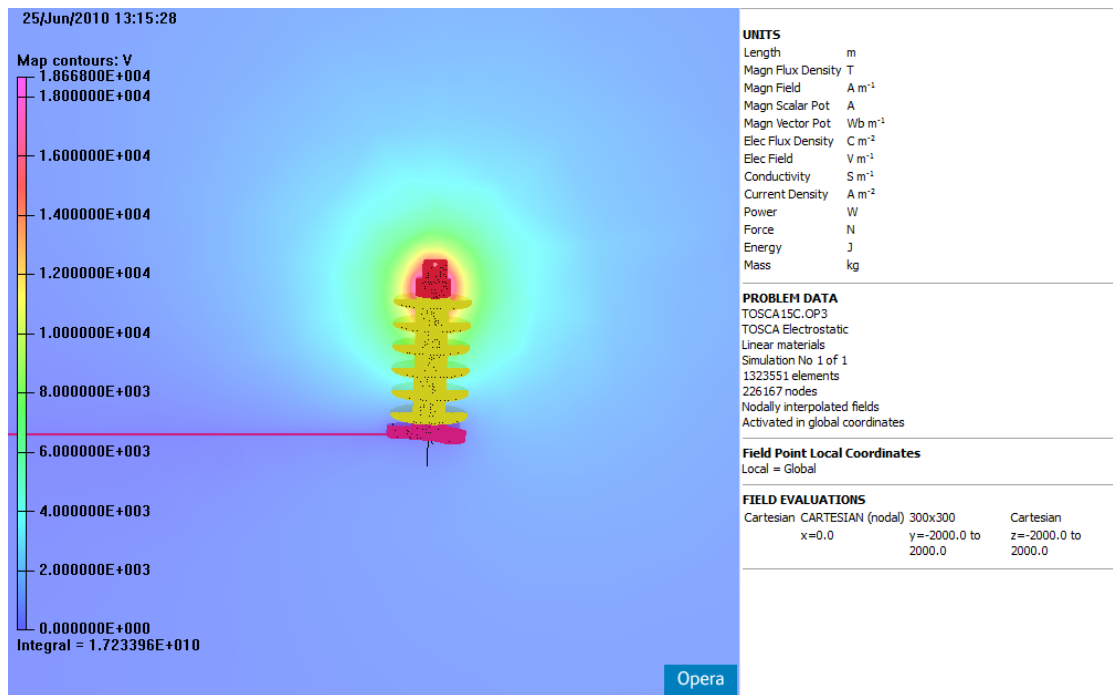
Σχήμα 4.100: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ για τάση 13.2kV



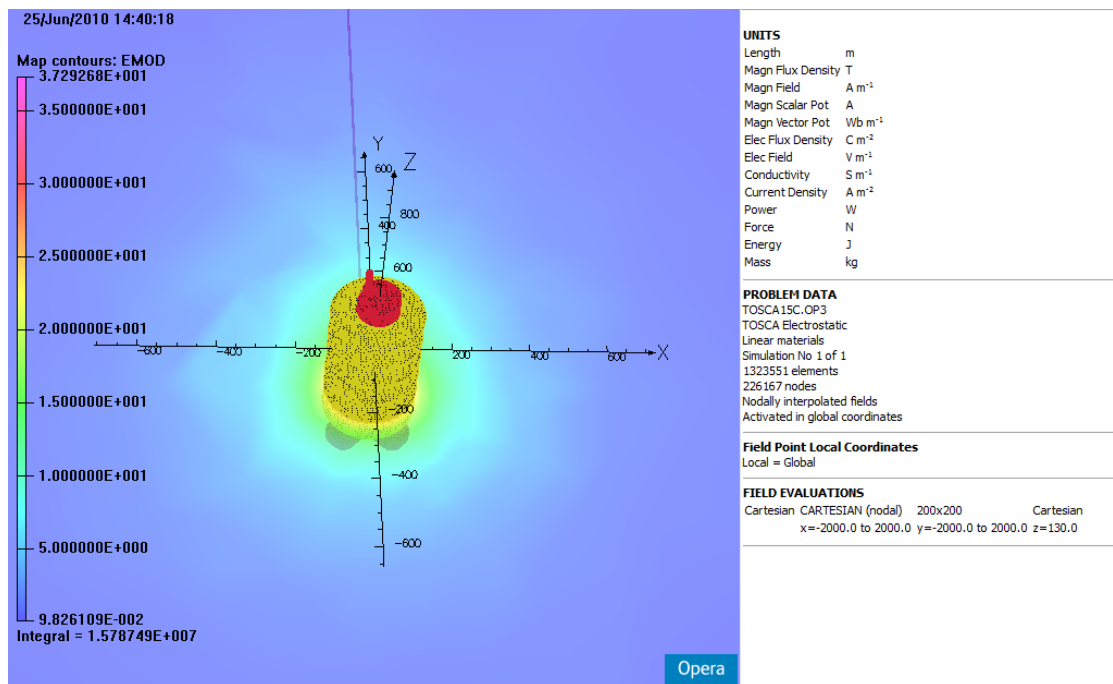
Σχήμα 4.101: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ για τάση 13.2kV



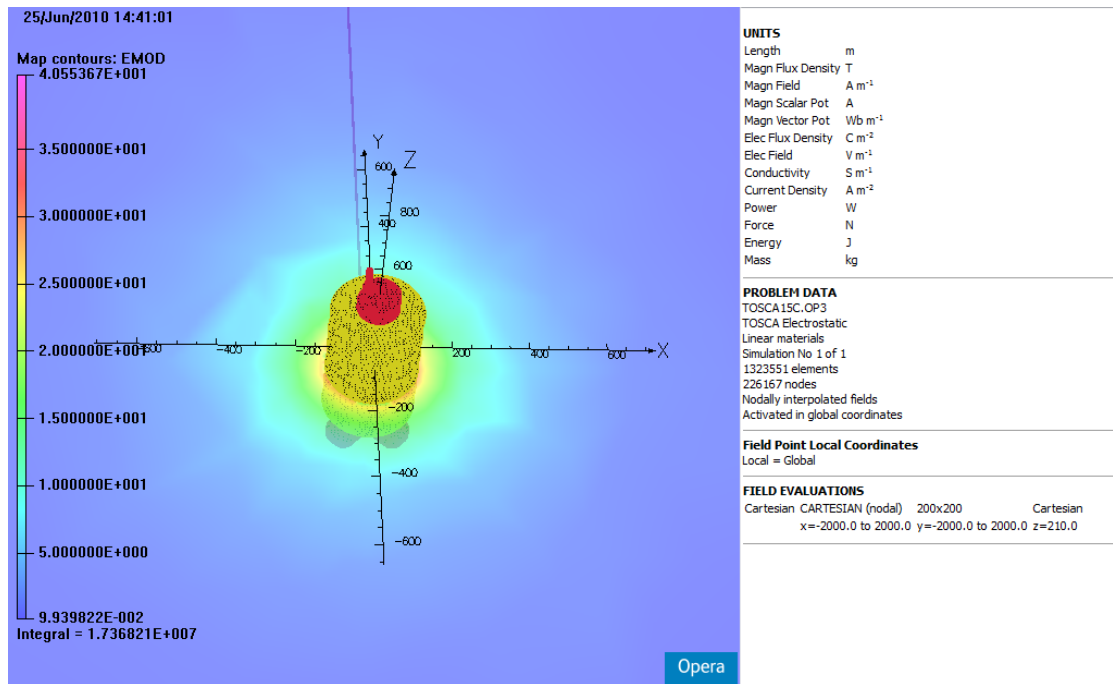
Σχήμα 4.102: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου για τάση 13.2kV



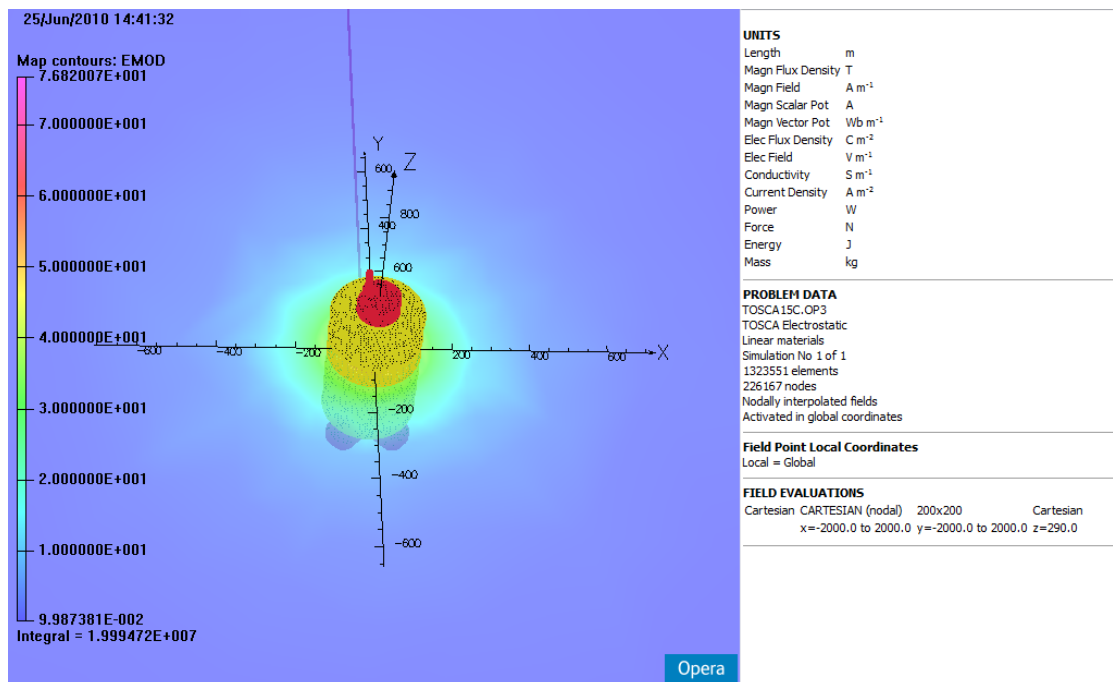
Σχήμα 4.103: Δυναμικό γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου για τάση 13.2kV



Σχήμα 4.104: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 13cm για τάση 13.2kV

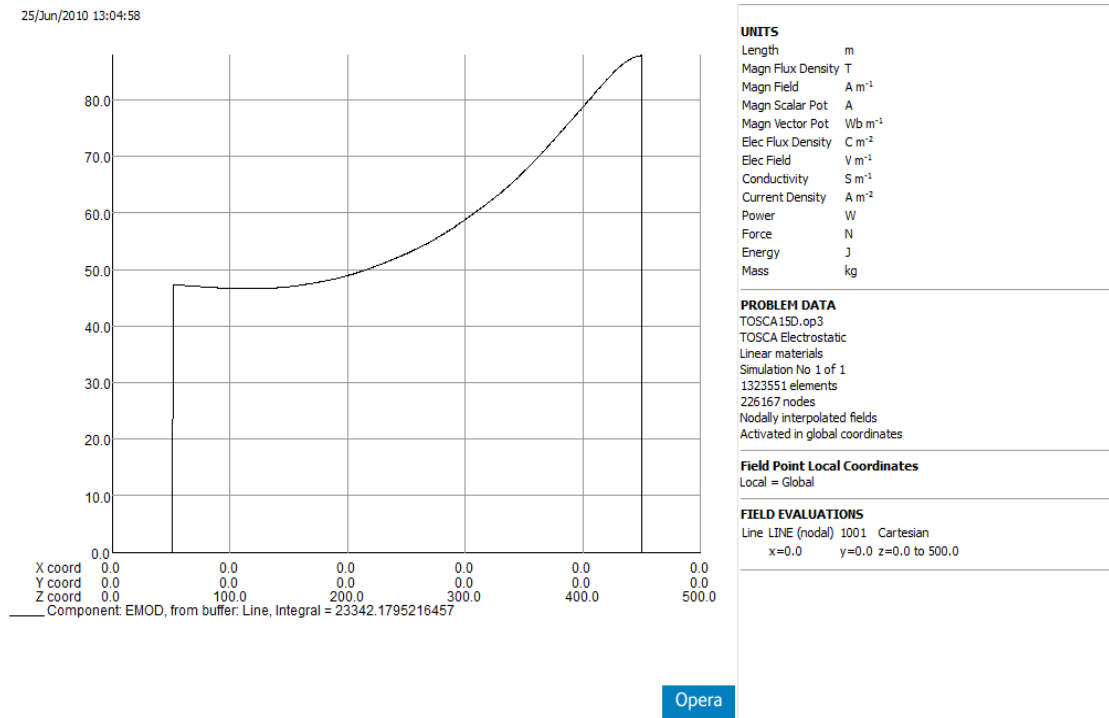


Σχήμα 4.105: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 21cm για τάση 13.2kV

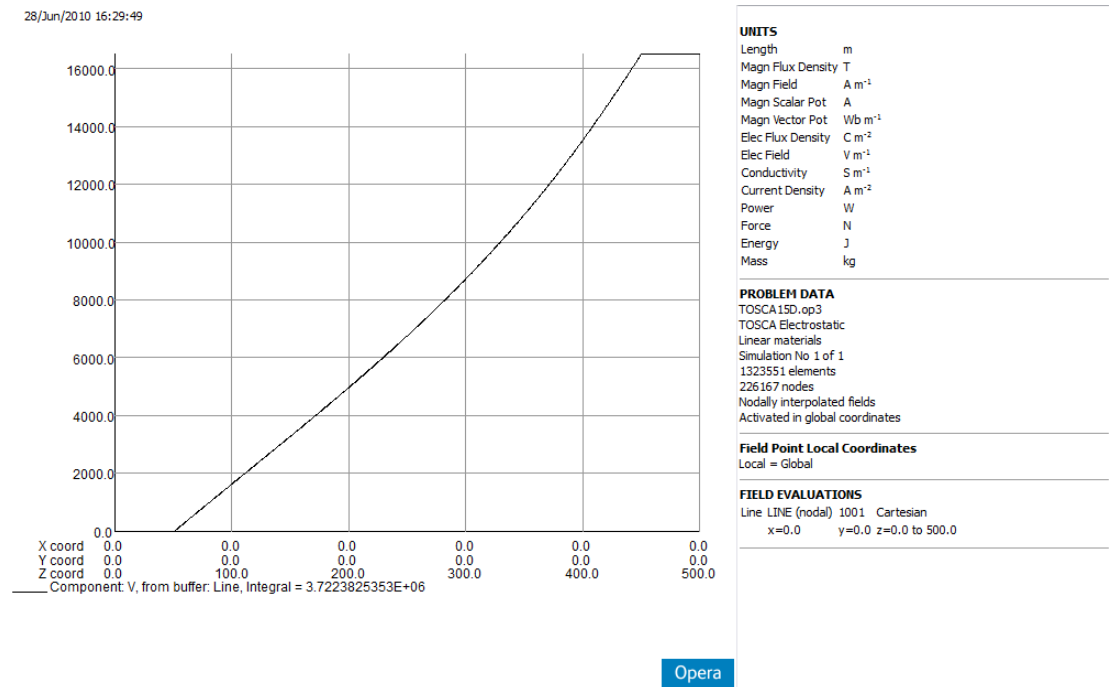


Σχήμα 4.106: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 29cm για τάση 13.2kV

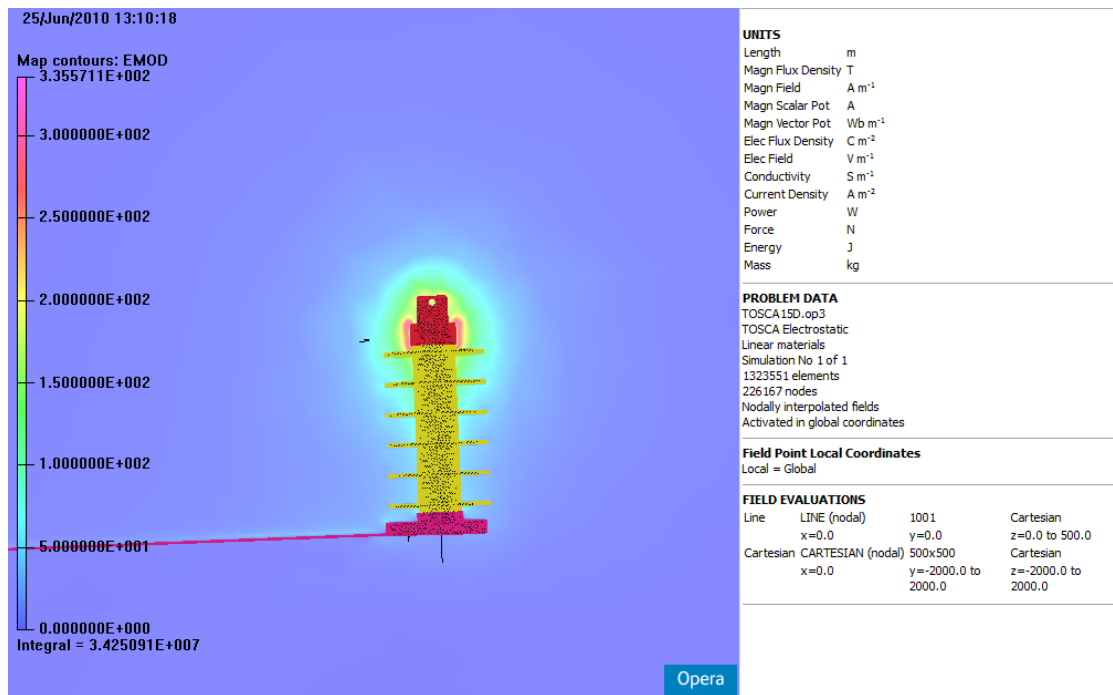
Τάση 16.5kV



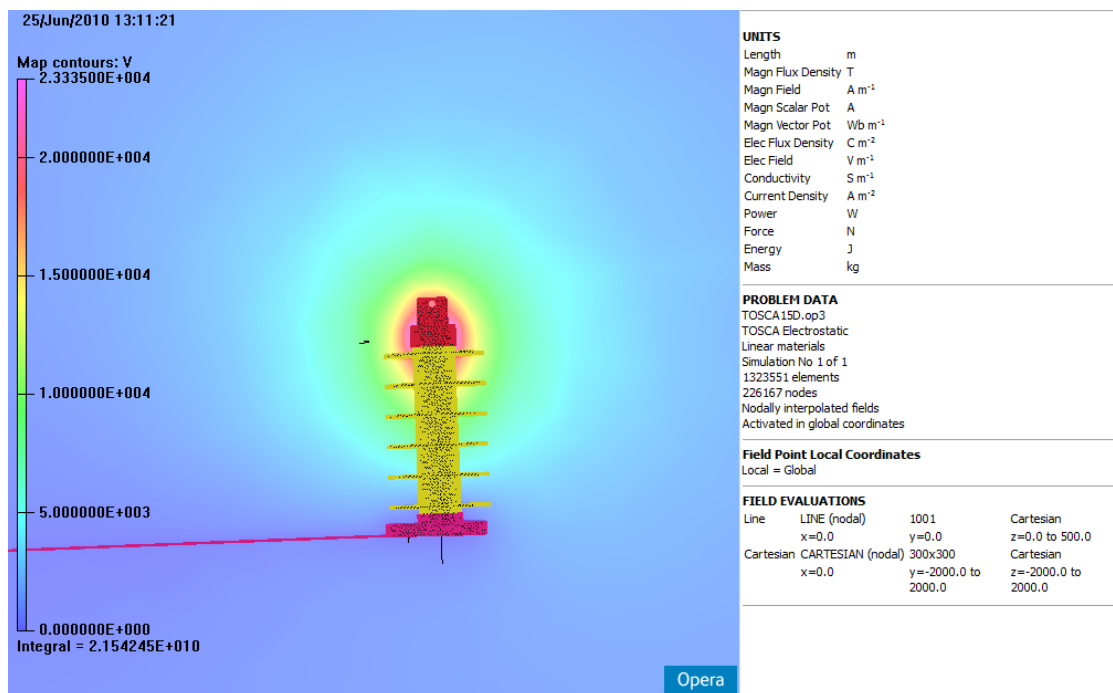
Σχήμα 4.107: Κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του βαρίστορ για τάση 16.5kV



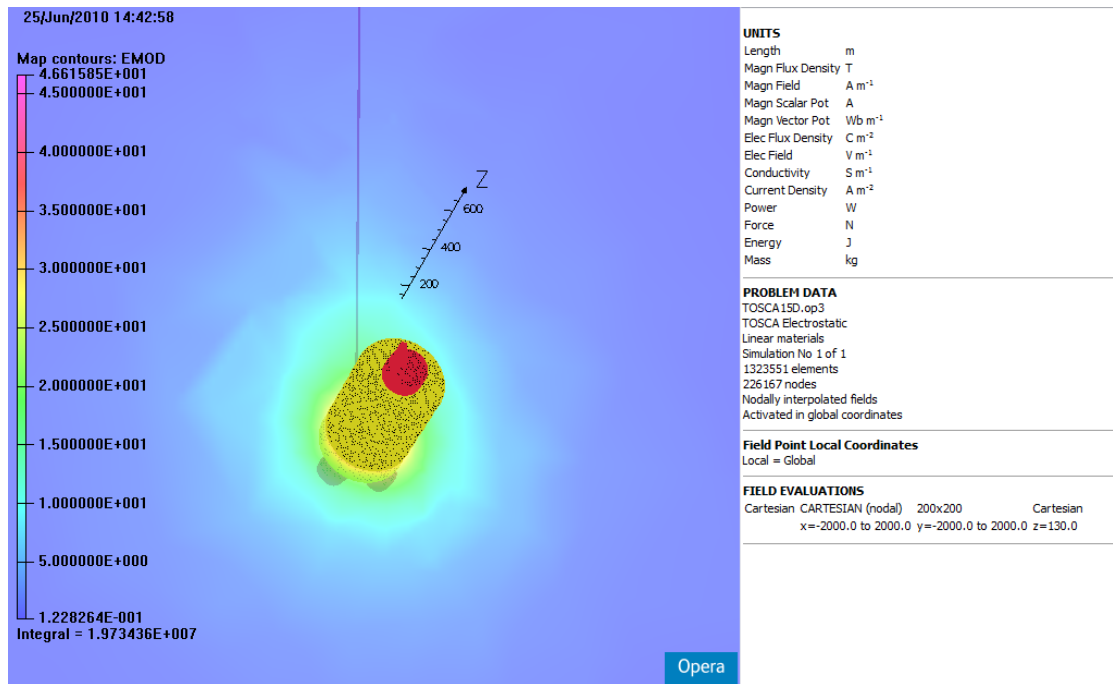
Σχήμα 4.108: Κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ για τάση 16.5kV



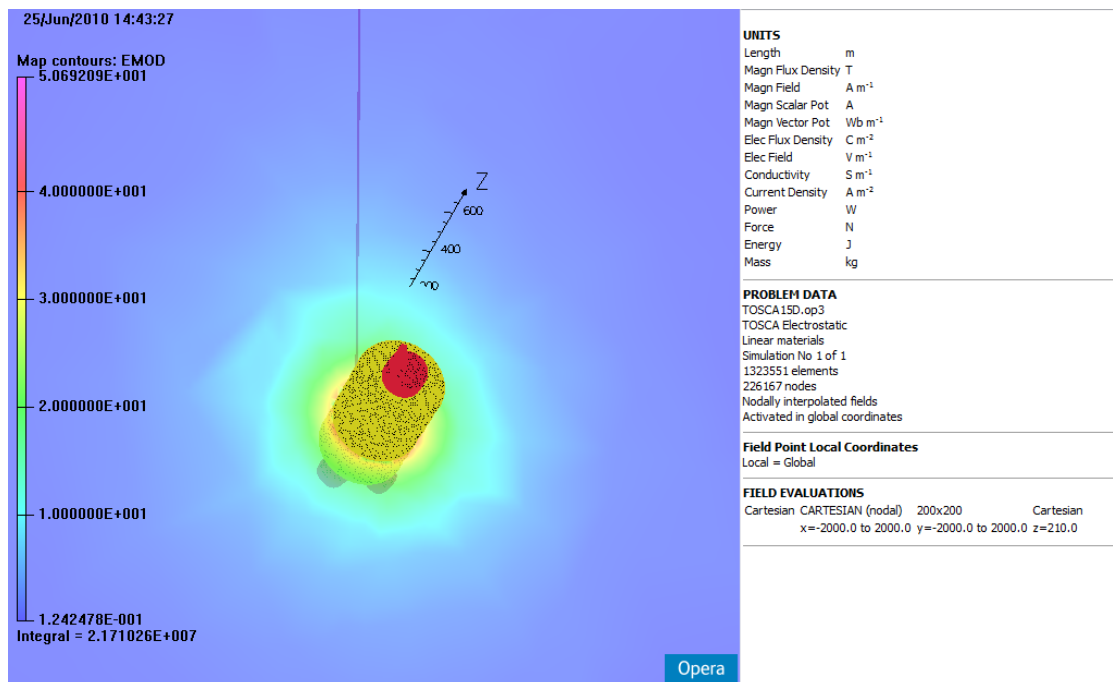
Σχήμα 4.109: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου για τάση 16.5kV



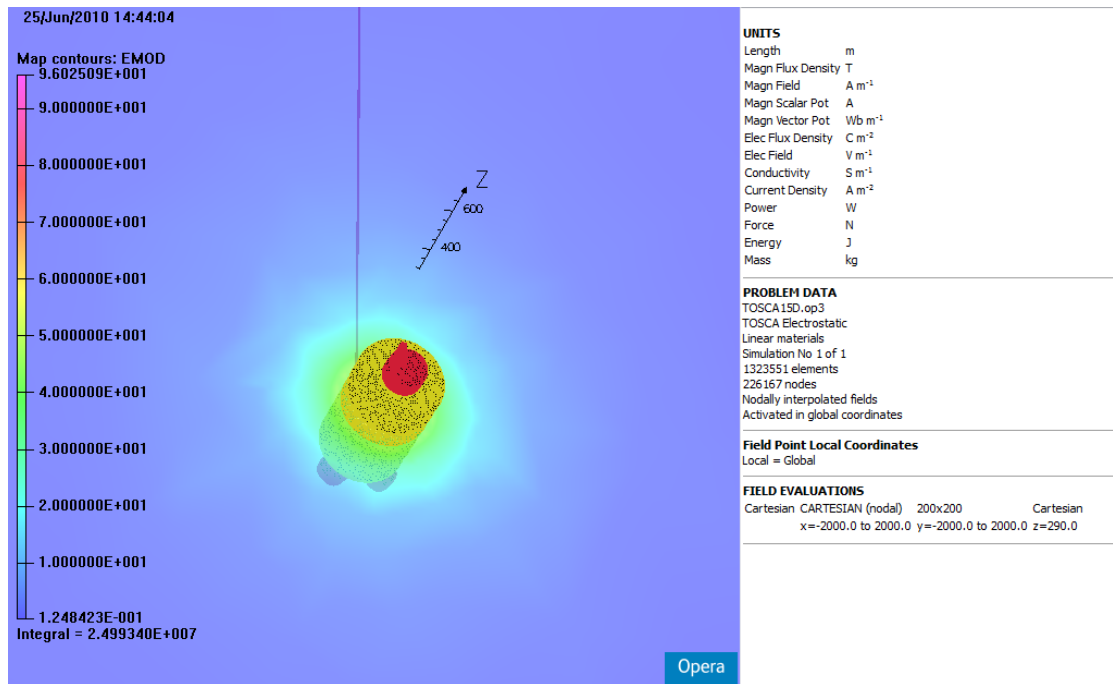
Σχήμα 4.110: Δυναμικό γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου για τάση 16.5kV



Σχήμα 4.111: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 13cm για τάση 16.5kV



Σχήμα 4.112: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 21cm για τάση 16.5kV

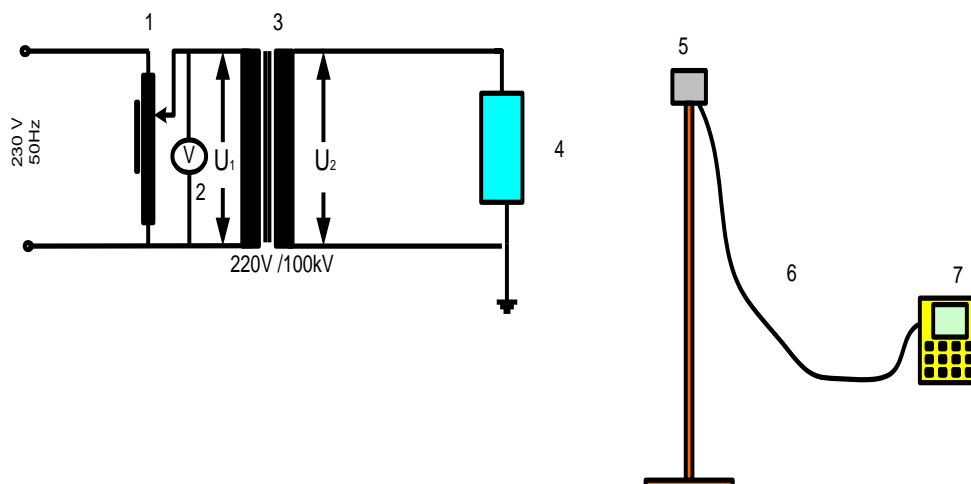


Σχήμα 4.113: Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου σε οριζόντιο επίπεδο με ύψος 29cm για τάση 16.5kV

4.5.Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο

4.5.1.Πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 4.114 παρουσιάζεται η διάταξη για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο.



Σχήμα 4.114: Η πειραματική διάταξη των οργάνων για την διεξαγωγή των μετρήσεων:

1. Αυτομετασχηματιστής (230/0...230V),
2. Ψηφιακό Βολτόμετρο
3. Μετασχηματιστής με λόγο 220V/100kV
4. Καθοδικό αλεξικέραυνο (βλ. Πίνακα 4.1)
5. Αισθητήρας πεδιομέτρου (Narda EFA-300, EHP-50B)
6. Οπτική ίνα
7. Πεδιόμετρο (Narda EFA-300, PMM 8053)

Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά διακριβωμένα πεδιόμετρα (Narda EFA-300, PMM 8053A). Στα Σχήματα 4.115 και 4.116 φαίνονται τα δύο πεδιόμετρα. Στο Παράρτημα Α περιγράφεται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος χειρισμού και λήψης των μετρήσεων για κάθε όργανο.

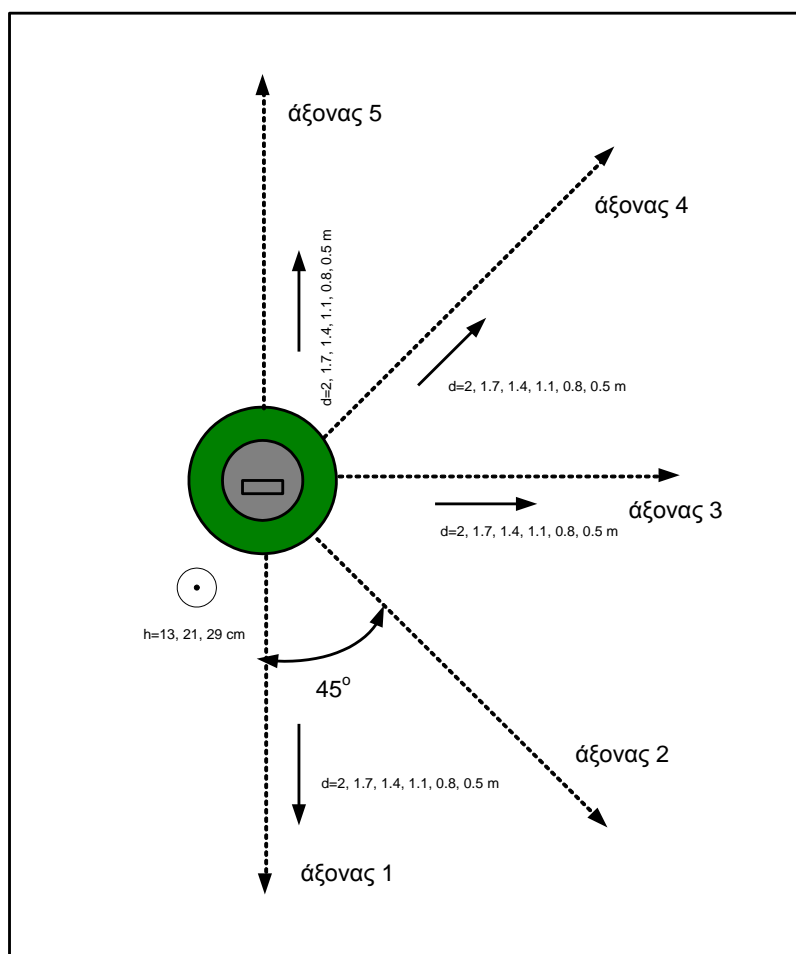


Σχήμα 4.115: Πεδιόμετρο NARDA



Σχήμα 4.116: Πεδιόμετρο PMM

Οι αισθητήρες των πεδιομέτρων μετακινήθηκαν σε καθορισμένες θέσεις στο χώρο, κατά μήκος 5 διαφορετικών αξόνων στο οριζόντιο επίπεδο και σε διαφορετικά ύψη (Σχήμα 4.117)



Σχήμα 4.117: Θέσεις μέτρησης του πεδίου στο χώρο

4.5.2.Μετρήσεις

Παρακάτω ακολουθούν όλες οι μετρήσεις που έχουν ληφθεί στο εργαστήριο για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο για κάθε επίπεδο τάσης ξεχωριστά. Η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στον κάθε ένα από τους πέντε άξονες οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μετρήσεων, θα συμβολίζεται με E_i για τον άξονα i αντίστοιχα. Στους πίνακες που ακολουθούν, συμπεριλαμβάνονται επίσης, οι τιμές των αβεβαιοτήτων των δύο οργάνων (βλέπε παράρτημα Γ), οι τιμές της έντασης ηλεκτρικού πεδίου όπως αυτές έχουν προκύψει από τις προσομοιώσεις (2D και 3D) και τα αντίστοιχα σχετικά τους σφάλματα.

Για τον υπολογισμό των σχετικών σφαλμάτων λαμβάνονται ως ορθές οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου που λαμβάνονται πειραματικά με την χρήση των δύο πεδιομέτρων. Ο τύπος υπολογισμού που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σχετικών σφαλμάτων είναι:

$$\sigma = [(E_{\text{πειρ.}} - E_{\text{προσ.}}) / E_{\text{πειρ.}}] \times 100\%$$

Τάση 12kV

Άξονας 1										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E_1	u_1	E_1^*	u_1^*	E_{2D}	σ_1	σ_2	E_{3D}	σ_1	σ_2
2	214.5	4.42	220.5	9.22	254.1	-18.46	-15.24	204.06	4.87	7.46
1.7	331	4.59	349.7	9.35	348.49	-5.28	0.35	318.68	3.72	8.87
1.4	537.7	4.76	562.8	9.50	505.95	5.90	10.10	443.57	17.51	21.19
1.1	909.5	4.89	981.5	9.27	796.45	12.43	18.85	718.53	21.00	26.79
0.8	1663	4.98	1947	9.80	1414.17	14.96	27.37	1320.04	20.62	32.20
0.5	3803	5.05	4256	9.34	3041.65	20.02	28.53	3148.97	17.20	26.01

Άξονας 2										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E_2	u_2	E_2^*	u_2^*	E_{2D}	σ_1	σ_2	E_{3D}	σ_1	σ_2
2	200.9	4,57	216,2	9,73	254,1	-26,48	-17,53	208,34	-3,70	3,64
1,7	304,9	4,72	328,8	9,37	348,49	-14,30	-5,99	270,5	11,28	17,73
1,4	493,6	4,87	534,2	9,67	505,95	-2,50	5,29	462,53	6,29	13,42
1,1	844,3	4,99	935,7	9,67	796,45	5,67	14,88	690,61	18,20	26,19
0,8	1646	5,08	1833	9,74	1414,17	14,08	22,85	1308,11	20,53	28,64
0,5	3739	5,14	4276	9,51	3041,65	18,65	28,87	2932,29	21,58	31,42

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 3										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ [*]	u ₃ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	195,2	4,45	217,6	9,55	254,1	-30,17	-16,77	195,5	-0,15	10,16
1,7	300,9	4,63	332,6	9,36	348,49	-15,82	-4,78	282,29	6,18	15,13
1,4	489,1	4,81	544,5	9,64	505,95	-3,45	7,08	414,36	15,28	23,90
1,1	825,5	4,94	936,9	9,16	796,45	3,52	14,99	743,02	9,99	20,69
0,8	1625,3	5,05	1716	9,85	1414,17	12,99	17,59	1312,41	19,25	23,52
0,5	3726	5,11	4139	9,56	3041,65	18,37	26,51	3027,28	18,75	26,86

Αξονας 4										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	184,7	4,32	188,9	9,24	254,1	-37,57	-34,52	193,28	-4,65	-2,32
1,7	284,5	4,46	298,7	9,42	348,49	-22,49	-16,67	276,43	2,84	7,46
1,4	465,9	4,62	470,6	9,91	505,95	-8,60	-7,51	382,15	17,98	18,80
1,1	795,1	4,76	832,7	9,22	796,45	-0,17	4,35	637,3	19,85	23,47
0,8	1548,1	4,86	1563	9,66	1414,17	8,65	9,52	1217,05	21,38	22,13
0,5	3432	4,93	3545	9,82	3041,65	11,37	14,20	2815,3	17,97	20,58

Αξονας 5										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	190	4,37	191,5	9,23	254,1	-33,74	-32,69	199,17	-4,83	-4,01
1,7	293,4	4,52	306,3	9,41	348,49	-18,78	-13,77	310,38	-5,79	-1,33
1,4	478,8	4,68	490,7	9,82	505,95	-5,67	-3,11	429,52	10,29	12,47
1,1	807,4	4,79	818,7	9,23	796,45	1,36	2,72	697,64	13,59	14,79
0,8	1584,1	4,89	1606	9,62	1414,17	10,73	11,94	1255,83	20,72	21,80
0,5	3551	4,94	3637	9,77	3041,65	14,34	16,37	3109,16	12,44	14,51

Αξονας 1										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ [*]	u ₁ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	221,5	4,43	235,3	9,19	257,38	-16,20	-9,38	208,85	5,71	11,24
1,7	340,3	4,60	355,9	9,34	354,6	-4,20	0,37	317,7	6,64	10,73
1,4	554,3	4,77	591,3	9,44	519	6,37	12,23	439,04	20,79	25,75
1,1	924,2	4,89	1017	9,41	828,68	10,34	18,52	798,97	13,55	21,44
0,8	1681	4,98	2031	9,73	1518,79	9,65	25,22	1362,86	18,93	32,90
0,5	3987	5,05	4696	9,26	3543,95	11,11	24,53	3653,25	8,37	22,21

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 2										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ [*]	u ₂ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	216,2	4,60	229,7	9,15	257,38	-19,05	-12,05	207,58	3,99	9,63
1,7	330,9	4,75	347,5	9,34	354,6	-7,16	-2,04	274,16	17,15	21,11
1,4	534,7	4,89	572,6	9,57	519	2,94	9,36	480,72	10,10	16,05
1,1	908,2	5,00	995,8	9,69	828,68	8,76	16,78	726,63	19,99	27,03
0,8	1702	5,08	1912	9,67	1518,79	10,76	20,57	1400,09	17,74	26,77
0,5	3991	5,14	4468	9,45	3543,95	11,20	20,68	3069,13	23,10	31,31

Αξονας 3										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ [*]	u ₃ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	206,5	4,47	229,6	9,19	257,38	-24,64	-12,10	194,89	5,62	15,12
1,7	316,9	4,65	352,8	9,33	354,6	-11,90	-0,51	291,52	8,01	17,37
1,4	510,5	4,82	569,2	9,58	519	-1,67	8,82	420,31	17,67	26,16
1,1	859,1	4,95	986,2	9,14	828,68	3,54	15,97	786,32	8,47	20,27
0,8	1651,1	5,05	1879	9,70	1518,79	8,01	19,17	1461,85	11,46	22,20
0,5	3835	5,11	4421	9,47	3543,95	7,59	19,84	3667,06	4,38	17,05

Αξονας 4										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	192,5	4,33	205,9	9,19	257,38	-33,70	-25,00	193	-0,26	6,27
1,7	301,3	4,48	308,8	9,40	354,6	-17,69	-14,83	283,27	5,98	8,27
1,4	483,2	4,63	506,4	9,77	519	-7,41	-2,49	402,13	16,78	20,59
1,1	826,9	4,77	855,1	9,21	828,68	-0,22	3,09	642,37	22,32	24,88
0,8	1595	4,87	1610	9,49	1518,79	4,78	5,67	1356,93	14,93	15,72
0,5	3432	4,93	3483	9,86	3543,95	-3,26	-1,75	3223,14	6,09	7,46

Αξονας 5										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	201	4,39	218,1	9,42	257,38	-28,05	-18,01	202,13	-0,56	7,32
1,7	303,2	4,53	317,4	9,39	354,6	-16,95	-11,72	308,76	-1,83	2,72
1,4	495,8	4,69	501,7	9,78	519	-4,68	-3,45	425,26	14,23	15,24
1,1	851,9	4,80	891,4	9,18	828,68	2,73	7,04	773,68	9,18	13,21
0,8	1649	4,89	1681	9,89	1518,79	7,90	9,65	1340,69	18,70	20,24
0,5	3619	4,94	3689	9,74	3543,95	2,07	3,93	3312,28	8,48	10,21

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 1										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ [*]	u ₁ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	224.4	4.44	253.2	9.72	259.89	-15.82	-2.64	213.96	4.65	15.50
1.7	342.4	4.60	383.8	9.30	359.35	-4.95	6.37	320.12	6.51	16.59
1.4	566.1	4.77	619.5	9.39	529.06	6.54	14.60	436.92	22.82	29.47
1.1	960.3	4.90	1082	9.10	854.59	11.01	21.02	885	7.84	18.21
0.8	1740	4.98	2080	9.69	1603.54	7.84	22.91	1448.5	16.75	30.36
0.5	4050	5.05	4759	9.25	3984.02	1.63	16.28	4036.08	0.34	15.19

Αξονας 2										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ [*]	u ₂ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	221,5	4,60	250,9	9,16	259,89	-17,33	-3,58	207,17	6,47	17,43
1,7	336,2	4,75	390,4	9,28	359,35	-6,89	7,95	278,43	17,18	28,68
1,4	540,5	4,89	632,4	9,45	529,06	2,12	16,34	459,84	14,92	27,29
1,1	911	5,00	1086	9,11	854,59	6,19	21,31	747,33	17,97	31,19
0,8	1771	5,09	2067	9,56	1603,54	9,46	22,42	1501,54	15,22	27,36
0,5	4129	5,14	4659	9,41	3984,02	3,51	14,49	3197,41	22,56	31,37

Αξονας 3										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ [*]	u ₃ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	213,5	4,48	257,4	9,28	259,89	-21,73	-0,97	197,62	7,44	23,22
1,7	323,5	4,66	393,2	9,28	359,35	-11,08	8,61	302,68	6,44	23,02
1,4	523,1	4,83	632,1	9,45	529,06	-1,14	16,30	423,53	19,03	33,00
1,1	869,9	4,95	1054	9,39	854,59	1,76	18,92	820,59	5,67	22,15
0,8	1653	5,05	2046	9,58	1603,54	2,99	21,63	1589,62	3,83	22,31
0,5	3981	5,11	4586	9,42	3984,02	-0,08	13,13	4116,63	-3,41	10,23

Αξονας 4										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	203	4,35	208,1	9,26	259,89	-28,02	-24,89	192,97	4,94	7,27
1,7	310	4,49	338,7	9,35	359,35	-15,92	-6,10	287,36	7,30	15,16
1,4	501,1	4,64	547,5	9,64	529,06	-5,58	3,37	416,64	16,85	23,90
1,1	839,7	4,77	859,9	9,47	854,59	-1,77	0,62	650,43	22,54	24,36
0,8	1601	4,87	1653	9,93	1603,54	-0,16	2,99	1447,07	9,61	12,46
0,5	3798	4,93	3845	9,67	3984,02	-4,90	-3,62	3805,54	-0,20	1,03

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 5										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	202.6	4.39	212.7	9.24	259.89	-28.28	-22.19	205.33	-1.35	3.46
1.7	304.3	4.53	310.8	9.40	359.35	-18.09	-15.62	309.29	-1.64	0.49
1.4	494.8	4.69	503.2	9.78	529.06	-6.92	-5.14	422.54	14.60	16.03
1.1	841.9	4.80	850.3	9.21	854.59	-1.51	-0.50	854.04	-1.44	-0.44
0.8	1585	4.89	1593	9.71	1603.54	-1.17	-0.66	1420.89	10.35	10.80
0.5	3681	4.95	3762	9.83	3984.02	-8.23	-5.90	3568.47	3.06	5.14

Τάση 13,2kV

Αξονας 1										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ [*]	u ₁ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	243.6	4.47	233.1	9.32	279.51	-14.74	-19.91	224.47	7.85	3.70
1.7	375	4.64	368.1	9.33	383.33	-2.22	-4.14	350.55	6.52	4.77
1.4	609.9	4.79	601.2	9.42	556.53	8.75	7.43	487.93	20.00	18.84
1.1	1050.6	4.91	1040.3	9.30	876.08	16.61	15.79	782.82	25.49	24.75
0.8	1831.3	4.99	1996	9.75	1555.57	15.06	22.07	1444.04	21.15	27.65
0.5	4052	5.05	4662	9.26	3345.79	17.43	28.23	3463.84	14.52	25.70

Αξονας 2										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ [*]	u ₂ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	221.3	4,60	222,9	9,69	279,51	-26,30	-25,40	229,17	-3,56	-2,81
1,7	338,6	4,75	345,5	9,34	383,33	-13,21	-10,95	297,54	12,13	13,88
1,4	541,5	4,89	566,9	9,58	556,53	-2,78	1,83	508,78	6,04	10,25
1,1	927,1	5,01	972,6	9,15	876,08	5,50	9,92	751,67	18,92	22,72
0,8	1810,7	5,09	1843	9,73	1555,57	14,09	15,60	1430,92	20,97	22,36
0,5	4016	5,14	4512	9,44	3345,79	16,69	25,85	3225,51	19,68	28,51

Αξονας 3										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ [*]	u ₃ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	213,5	4,48	225,9	9,26	279,51	-30,92	-23,73	215,05	-0,73	4,80
1,7	323,5	4,66	349,1	9,33	383,33	-18,49	-9,81	310,52	4,01	11,05
1,4	523,1	4,83	566	9,59	556,53	-6,39	1,67	455,79	12,87	19,47
1,1	869,9	4,95	996,3	9,28	876,08	-0,71	12,07	809,32	6,96	18,77
0,8	1653	5,05	1879	9,70	1555,57	5,89	17,21	1435,64	13,15	23,60
0,5	3981	5,11	4296	9,50	3345,79	15,96	22,12	3323	16,53	22,65

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 4										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	204,5	4,35	227,2	9,26	279,51	-36,68	-23,02	212,61	-3,97	6,42
1,7	284,5	4,46	316,1	9,39	383,33	-34,74	-21,27	304,08	-6,88	3,80
1,4	514,7	4,65	571,8	9,57	556,53	-8,13	2,67	420,36	18,33	26,48
1,1	874,7	4,78	971,8	9,29	876,08	-0,16	9,85	693,03	20,77	28,69
0,8	1700,5	4,87	1789,2	9,78	1555,57	8,52	13,06	1330,75	21,74	25,62
0,5	3758	4,93	3955	9,62	3345,79	10,97	15,40	3096,81	17,59	21,70

Αξονας 5										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	209.5	4.40	230.2	9.26	279.51	-33.42	-21.42	219.08	-4.57	4.83
1.7	325.1	4.56	357.1	9.32	383.33	-17.91	-7.35	341.42	-5.02	4.39
1.4	522.3	4.70	567.7	9.58	556.53	-6.55	1.97	472.47	9.54	16.77
1.1	903.9	4.81	951.4	9.31	876.08	3.08	7.92	759.4	15.99	20.18
0.8	1739.7	4.90	1831.2	9.74	1555.57	10.58	15.05	1373.4	21.06	25.00
0.5	3928	4.95	4131	9.56	3345.79	14.82	19.01	3420.05	12.93	17.21

Αξονας 1										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ [*]	u ₁ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	234.8	4.45	248.8	9.22	283.12	-20.58	-13.79	229.74	2.16	7.66
1.7	365.8	4.63	386.6	9.29	390.05	-6.63	-0.89	349.47	4.46	9.60
1.4	593.7	4.79	634.8	9.44	570.89	3.84	10.07	482.94	18.66	23.92
1.1	1002.5	4.91	1046	9.25	911.54	9.07	12.85	870.86	13.13	16.74
0.8	1954.9	5.00	2109	9.54	1670.65	14.54	20.78	1491.14	23.72	29.30
0.5	4307	5.05	4843	9.37	3898.33	9.49	19.51	4018.56	6.70	17.02

Αξονας 2										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ [*]	u ₂ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	236,2	4,63	242,3	9,60	283,12	-19,86	-16,85	228,34	3,33	5,76
1,7	362,7	4,78	370,3	9,31	390,05	-7,54	-5,33	301,57	16,85	18,56
1,4	595	4,92	603,8	9,50	570,89	4,05	5,45	528,79	11,13	12,42
1,1	1002,5	5,02	1048,5	9,81	911,54	9,07	13,06	791,29	21,07	24,53
0,8	1950,8	5,10	1990	9,62	1670,65	14,36	16,05	1532,1	21,46	23,01
0,5	4429	5,14	4529	9,44	3898,33	11,98	13,93	3376,03	23,77	25,46

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 3										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ [*]	u ₃ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	228,5	4,51	243,8	9,33	283,12	-23,90	-16,13	214,38	6,18	12,07
1,7	350,7	4,69	370,9	9,31	390,05	-11,22	-5,16	320,67	8,56	13,54
1,4	563,5	4,85	599,6	9,51	570,89	-1,31	4,79	462,34	17,95	22,89
1,1	947,7	4,97	1044,4	9,82	911,54	3,82	12,72	856,95	9,58	17,95
0,8	1823,1	5,06	1935	9,65	1670,65	8,36	13,66	1600,03	12,24	17,31
0,5	4105	5,11	4513	9,44	3898,33	5,03	13,62	4033,75	1,74	10,62

Αξονας 4										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	214,5	4,36	225,7	9,38	283,12	-31,99	-25,44	212,3	1,03	5,94
1,7	327,7	4,51	341,3	9,35	390,05	-19,03	-14,28	311,6	4,91	8,70
1,4	528,8	4,66	545,1	9,64	570,89	-7,96	-4,73	442,34	16,35	18,85
1,1	903,6	4,78	982,1	9,90	911,54	-0,88	7,18	698,6	22,69	28,87
0,8	1755,1	4,88	1867,1	9,71	1670,65	4,81	10,52	1484,61	15,41	20,49
0,5	3962	4,94	4042,8	9,59	3898,33	1,61	3,57	3534,16	10,80	12,58

Αξονας 5										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	218,9	4,42	235,3	9,35	283,12	-29,34	-20,32	222,35	-1,58	5,50
1,7	333,3	4,57	361,2	9,32	390,05	-17,03	-7,99	339,64	-1,90	5,97
1,4	545,4	4,71	569,9	9,58	570,89	-4,67	-0,17	467,78	14,23	17,92
1,1	938,8	4,82	1011,2	9,86	911,54	2,90	9,86	843,05	10,20	16,63
0,8	1803,5	4,90	1935,4	9,65	1670,65	7,37	13,68	1466,75	18,67	24,21
0,5	3999	4,95	4101,5	9,57	3898,33	2,52	4,95	3643,49	8,89	11,17

Αξονας 1										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ [*]	u ₁ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	247,5	4,47	267,7	9,13	285,88	-15,51	-6,79	235,36	4,91	12,08
1,7	373,7	4,64	395,6	9,29	395,28	-5,77	0,08	352,13	5,77	10,99
1,4	614,1	4,80	665,1	9,33	581,97	5,23	12,50	480,61	21,74	27,74
1,1	1002	4,91	1116	9,09	940,04	6,18	15,77	965,49	3,64	13,49
0,8	1896,2	4,99	2164	9,63	1763,88	6,98	18,49	1585,34	16,39	26,74
0,5	4406,3	5,05	4941	9,22	4382,4	0,54	11,31	4439,67	-0,76	10,15

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Άξονας 2										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ [*]	u ₂ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	242,9	4,64	267,6	9,63	285,88	-17,69	-6,83	227,88	6,18	14,84
1,7	368,1	4,78	413,1	9,26	395,28	-7,38	4,31	306,27	16,80	25,86
1,4	591,4	4,91	672,2	9,38	581,97	1,59	13,42	505,82	14,47	24,75
1,1	994,7	5,02	1113	9,32	940,04	5,50	15,54	836,05	15,95	24,88
0,8	1909,6	5,09	2119	9,53	1763,88	7,63	16,76	1643,69	13,92	22,43
0,5	4439,3	5,14	4827	9,37	4382,4	1,28	9,21	3517,13	20,77	27,14

Άξονας 3										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ [*]	u ₃ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	235	4,52	267,4	9,28	285,88	-21,65	-6,91	217,38	7,50	18,71
1,7	355	4,70	414,2	9,26	395,28	-11,35	4,57	332,95	6,21	19,62
1,4	573,3	4,85	668,3	9,39	581,97	-1,51	12,92	465,88	18,74	30,29
1,1	962,1	4,97	1084	9,77	940,04	2,29	13,28	894,65	7,01	17,47
0,8	1818	5,06	2096	9,55	1763,88	2,98	15,85	1740,57	4,26	16,96
0,5	4322,9	5,12	4724	9,39	4382,4	-1,38	7,23	4528,26	-4,75	4,14

Άξονας 4										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	223,4	4,37	231,4	9,36	285,88	-27,97	-23,54	212,27	4,98	8,27
1,7	340,2	4,52	371,2	9,31	395,28	-16,19	-6,49	316,1	7,08	14,84
1,4	553,2	4,67	592,1	9,52	581,97	-5,20	1,71	458,3	17,15	22,60
1,1	921,2	4,79	942,2	9,97	940,04	-2,05	0,23	707,47	23,20	24,91
0,8	1758,2	4,88	1801,3	9,77	1763,88	-0,32	2,08	1583,77	9,92	12,08
0,5	4147,8	4,94	4211,1	9,53	4382,4	-5,66	-4,07	4186,07	-0,92	0,59

Άξονας 5										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	221,7	4,42	237,1	9,34	285,88	-28,95	-20,57	225,86	-1,88	4,74
1,7	334,8	4,57	364,7	9,31	395,28	-18,06	-8,38	340,22	-1,62	6,71
1,4	542,5	4,71	549,6	9,63	581,97	-7,28	-5,89	464,79	14,32	15,43
1,1	923,5	4,82	987,2	9,90	940,04	-1,79	4,78	931,44	-0,86	5,65
0,8	1754,1	4,90	1811,4	9,76	1763,88	-0,56	2,62	1554,97	11,35	14,16
0,5	4054,1	4,95	4369	9,48	4382,4	-8,10	-0,31	3925,3	3,18	10,16

Τάση 16,5kV

Αξονας 1										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ *	u ₁ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	306.3	4.56	295.3	9.31	349.39	-14.07	-18.32	280.58	8.40	4.98
1.7	467	4.71	456.5	9.24	479.16	-2.60	-4.96	438.18	6.17	4.01
1.4	764.6	4.85	743.6	9.25	695.67	9.02	6.45	609.91	20.23	17.98
1.1	1318.4	4.95	1289.6	9.42	1095.11	16.94	15.08	958.53	27.30	25.67
0.8	2297.9	5.01	2505	9.45	1944.46	15.38	22.38	1785.05	22.32	28.74
0.5	5093	5.06	5836	9.25	4182.24	17.88	28.34	4329.81	14.99	25.81

Αξονας 2										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ *	u ₂ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	277.2	4.68	263.9	9.25	349.39	-26.04	-32.39	286.47	-3.34	-8.55
1.7	419.5	4.82	429.9	9.25	479.16	-14.22	-11.46	371.93	11.34	13.48
1.4	679.9	4.95	705	9.34	695.67	-2.32	1.32	635.97	6.46	9.79
1.1	1164.9	5.04	1214.4	9.32	1095.11	5.99	9.82	919.58	21.06	24.28
0.8	2263.9	5.11	2119	9.53	1944.46	14.11	8.24	1768.64	21.88	16.53
0.5	5009	5.15	4827	9.37	4182.24	16.51	13.36	4031.88	19.51	16.47

Αξονας 3										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ *	u ₃ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	270.8	4.59	286.6	9.20	349.39	-29.02	-21.91	268.81	0.73	6.21
1.7	414.4	4.75	442	9.24	479.16	-15.63	-8.41	388.15	6.33	12.18
1.4	668.4	4.89	720.5	9.32	695.67	-4.08	3.45	569.74	14.76	20.92
1.1	1132	5.00	1246.3	9.30	1095.11	3.26	12.13	911.65	19.47	26.85
0.8	2242.3	5.08	2365	9.42	1944.46	13.28	17.78	1774.55	20.86	24.97
0.5	4990	5.12	5372	9.27	4182.24	16.19	22.15	4162.49	16.58	22.52

Αξονας 4										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ *	u ₄ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	256.9	4.42	277.7	9.22	349.39	-36.00	-25.82	265.76	-3.45	4.30
1.7	392.2	4.57	403.5	9.27	479.16	-22.17	-18.75	380.1	3.09	5.80
1.4	636.8	4.71	701.3	9.34	695.67	-9.24	0.80	525.45	17.49	25.07
1.1	1106.2	4.82	1195.4	9.34	1095.11	1.00	8.39	846.29	23.50	29.20
0.8	2127	4.89	2195	9.49	1944.46	8.58	11.41	1643.44	22.73	25.13
0.5	4706	4.94	4789	9.38	4182.24	11.13	12.67	3871.02	17.74	19.17

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 5										
H=13cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ *	u ₅ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	265	4.49	284.1	9.34	349.39	-31.85	-22.98	273.86	-3.34	3.60
1.7	401.8	4.63	431.3	9.25	479.16	-19.25	-11.10	426.77	-6.21	1.05
1.4	659.1	4.75	678.4	9.37	695.67	-5.55	-2.55	590.58	10.40	12.95
1.1	1121.7	4.85	1195.6	9.34	1095.11	2.37	8.40	929.25	17.16	22.28
0.8	2193.9	4.92	2231.1	9.48	1944.46	11.37	12.85	1696.75	22.66	23.95
0.5	4931	4.96	5004	9.33	4182.24	15.18	16.42	4275.07	13.30	14.57

Αξονας 1										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ *	u ₁ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	298.2	4.55	311.3	9.26	353.9	-18.68	-13.68	287.17	3.70	7.75
1.7	459.6	4.71	478.7	9.22	487.57	-6.09	-1.85	436.84	4.95	8.74
1.4	741.8	4.84	790.3	9.25	713.62	3.80	9.70	603.67	18.62	23.62
1.1	1254.5	4.94	1313	9.26	1139.42	9.17	13.22	1068.57	14.82	18.62
0.8	2460.7	5.02	2621	9.33	2088.32	15.13	20.32	1843.92	25.07	29.65
0.5	5430	5.06	6075	9.44	4872.91	10.26	19.79	5023.19	7.49	17.31

Αξονας 2										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ *	u ₂ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	297.4	4,71	305,7	9,68	353,9	-19,00	-15,77	285,43	4,02	6,63
1,7	459,6	4,85	457,6	9,23	487,57	-6,09	-6,55	376,97	17,98	17,62
1,4	741	4,96	754,8	9,28	713,62	3,70	5,46	660,99	10,80	12,43
1,1	1251,5	5,05	1265	9,23	1139,42	8,96	9,93	969,12	22,56	23,39
0,8	2443,2	5,11	2455	9,38	2088,32	14,53	14,94	1895,12	22,43	22,81
0,5	5542	5,15	5657	9,24	4872,91	12,07	13,86	4220,03	23,85	25,40

Αξονας 3										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ *	u ₃ *	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	287,1	4,61	304,2	9,69	353,9	-23,27	-16,34	267,98	6,66	11,91
1,7	440,7	4,77	458	9,23	487,57	-10,64	-6,46	400,84	9,04	12,48
1,4	707,7	4,91	758,6	9,28	713,62	-0,84	5,93	577,92	18,34	23,82
1,1	1180,4	5,00	1265	9,23	1139,42	3,47	9,93	1051,19	10,95	16,90
0,8	2278,4	5,08	2427	9,39	2088,32	8,34	13,95	1980,03	13,10	18,42
0,5	5142	5,12	5623	9,24	4872,91	5,23	13,34	5042,19	1,94	10,33

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις και Προσομοιώσεις

Αξονας 4										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
	R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁
2	266,7	4,43	275,3	9,80	353,9	-32,70	-28,55	265,37	0,50	3,61
1,7	411,8	4,58	437,2	9,24	487,57	-18,40	-11,52	389,5	5,42	10,91
1,4	663,8	4,72	691,2	9,36	713,62	-7,51	-3,24	552,92	16,70	20,01
1,1	1140,2	4,82	1184,6	9,26	1139,42	0,07	3,81	853,25	25,17	27,97
0,8	2209,4	4,90	2298,3	9,44	2088,32	5,48	9,14	1835,76	16,91	20,13
0,5	5002	4,94	5089	9,32	4872,91	2,58	4,25	4417,7	11,68	13,19

Αξονας 5										
H=21cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
	R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁
2	275,7	4,50	294,3	9,72	353,9	-28,36	-20,25	277,93	-0,81	5,56
1,7	422	4,64	456,2	9,23	487,57	-15,54	-6,88	424,55	-0,60	6,94
1,4	690,2	4,76	701,4	9,34	713,62	-3,39	-1,74	584,73	15,28	16,63
1,1	1175,2	4,85	1205,3	9,25	1139,42	3,04	5,47	1033,81	12,03	14,23
0,8	2256,7	4,92	2298,7	9,44	2088,32	7,46	9,15	1813,44	19,64	21,11
0,5	4990	4,96	5098,7	9,32	4872,91	2,35	4,43	4554,36	8,73	10,68

Αξονας 1										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
	R(m)	E ₁	u ₁	E ₁ [*]	u ₁ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁
2	310,5	4,56	332,5	9,35	357,35	-15,09	-7,47	294,2	5,25	11,52
1,7	467,9	4,71	505,8	9,21	494,11	-5,60	2,31	440,16	5,93	12,98
1,4	762	4,85	835,5	9,18	727,46	4,53	12,93	600,77	21,16	28,09
1,1	1262,8	4,94	1379	9,50	1175,05	6,95	14,79	1186,86	6,01	13,93
0,8	2360,8	5,01	2692	9,38	2204,86	6,61	18,10	1961,67	16,91	27,13
0,5	5538,3	5,06	6125	9,12	5478	1,09	10,56	5549,59	-0,20	9,39

Αξονας 2										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
	R(m)	E ₂	u ₂	E ₂ [*]	u ₂ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁
2	306	4,72	335,9	9,06	357,35	-16,78	-6,39	284,85	6,91	15,20
1,7	464	4,85	516,8	9,20	494,11	-6,49	4,39	382,84	17,49	25,92
1,4	742,8	4,96	832,4	9,22	727,46	2,07	12,61	632,28	14,88	24,04
1,1	1247,3	5,05	1384	9,06	1175,05	5,79	15,10	1025,07	17,82	25,93
0,8	2391,7	5,11	2570	9,35	2204,86	7,81	14,21	2034,61	14,93	20,83
0,5	5566,1	5,15	6042	9,19	5478	1,58	9,33	4396,41	21,01	27,24

Άξονας 3										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₃	u ₃	E ₃ [*]	u ₃ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	294,1	4,62	339,1	9,58	357,35	-21,51	-5,38	271,73	7,61	19,87
1,7	445,8	4,78	522	9,20	494,11	-10,84	5,34	416,19	6,64	20,27
1,4	721,3	4,91	831,7	9,22	727,46	-0,85	12,53	582,36	19,26	29,98
1,1	1204,1	5,01	1356	9,20	1175,05	2,41	13,34	1108,31	7,96	18,27
0,8	2283,5	5,08	2630	9,33	2204,86	3,44	16,17	2155,71	5,60	18,03
0,5	5429,1	5,12	5906	9,21	5478	-0,90	7,25	5660,33	-4,26	4,16

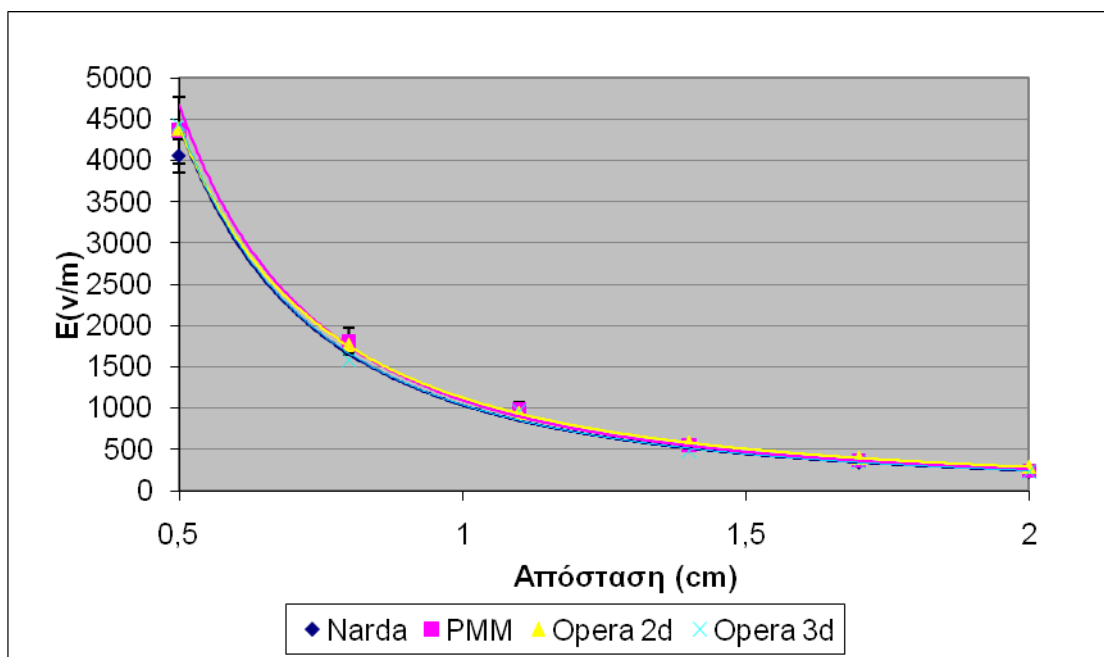
Άξονας 4										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₄	u ₄	E ₄ [*]	u ₄ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	280,9	4,45	290,6	9,74	357,35	-27,22	-22,97	265,33	5,54	8,70
1,7	427,6	4,59	441,3	9,24	494,11	-15,55	-11,97	395,12	7,60	10,46
1,4	687,4	4,73	704,3	9,34	727,46	-5,83	-3,29	572,87	16,66	18,66
1,1	1153,6	4,82	1189,9	9,25	1175,05	-1,86	1,25	864,34	25,07	27,36
0,8	2215,5	4,90	2276,3	9,45	2204,86	0,48	3,14	1959,71	11,55	13,91
0,5	5245,8	4,95	5321,1	9,28	5478	-4,43	-2,95	5232,59	0,25	1,66

Άξονας 5										
H=29cm	NARDA		PMM		PC OPERA 2D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM	PC OPERA 3D	Σχετικό Σφάλμα NARDA	Σχετικό Σφάλμα PMM
R(m)	E ₅	u ₅	E ₅ [*]	u ₅ [*]	E _{2D}	σ ₁	σ ₂	E _{3D}	σ ₁	σ ₂
2	279,4	4,51	301,2	9,70	357,35	-27,90	-18,64	282,33	-1,05	6,26
1,7	423,5	4,64	453,5	9,23	494,11	-16,67	-8,95	425,28	-0,42	6,22
1,4	683,8	4,76	711,1	9,33	727,46	-6,38	-2,30	580,99	15,04	18,30
1,1	1161,8	4,85	1199,8	9,25	1175,05	-1,14	2,06	1144,3	1,51	4,63
0,8	2194,9	4,92	2210,5	9,49	2204,86	-0,45	0,26	1923,71	12,36	12,97
0,5	5072,8	4,96	5119,3	9,31	5478	-7,99	-7,01	4906,62	3,28	4,15

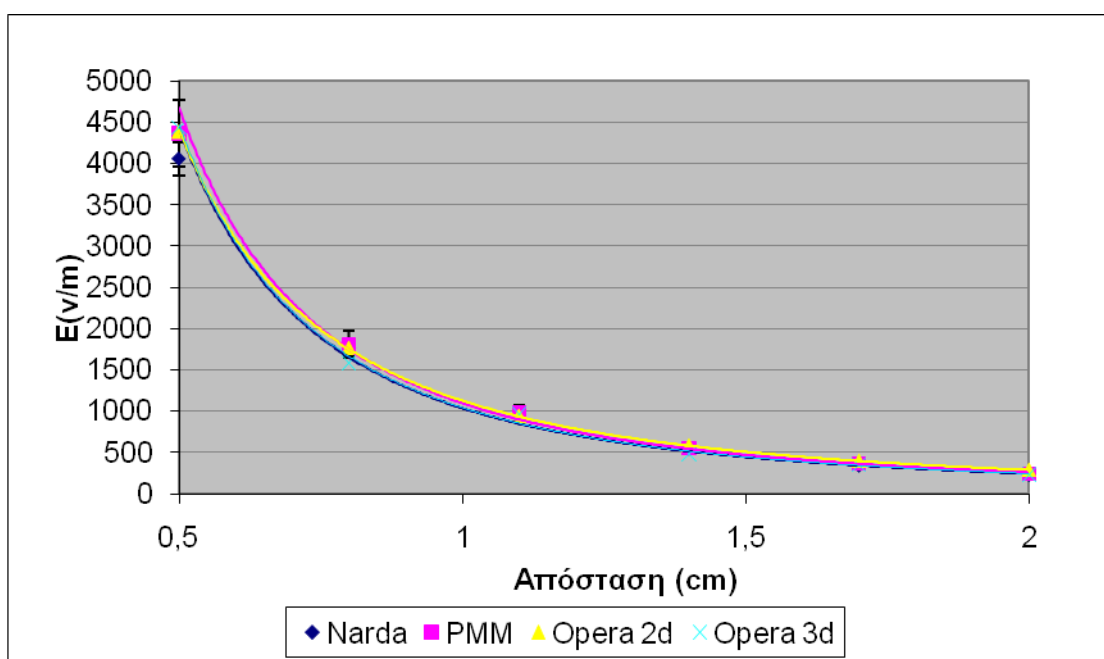
4.5.3.Γραφική σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων

Στην παρούσα παράγραφο συγκρίνονται γραφικά τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την δισδιάστατη και την τρισδιάστατη προσομοίωση του πραγματικού μοντέλου του καθοδικού αλεξικεραύνου.

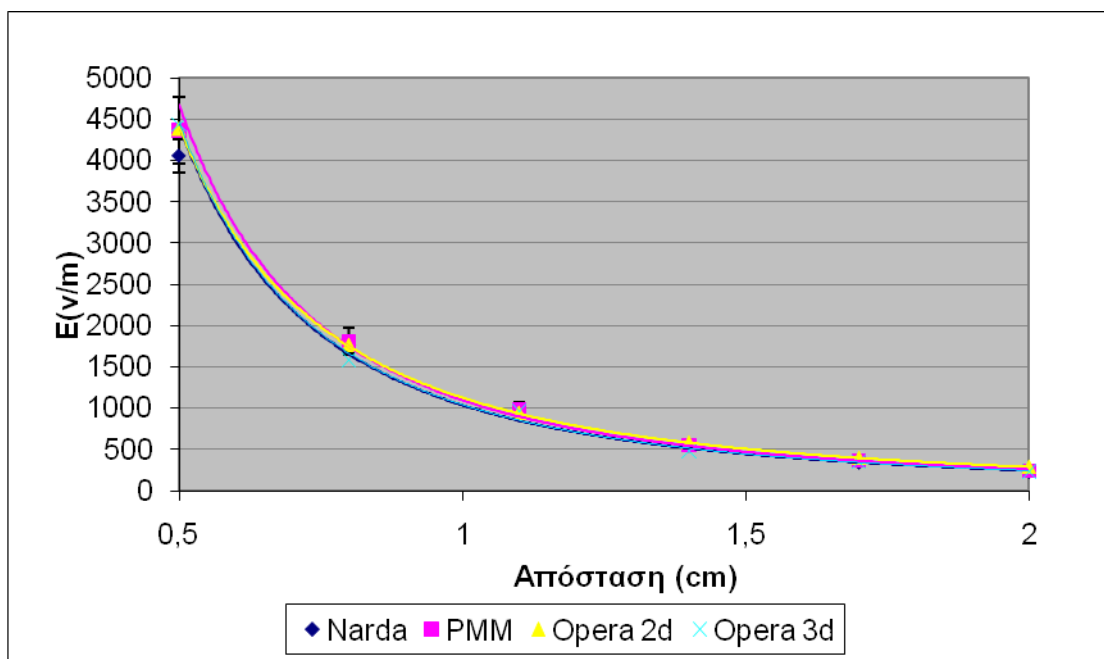
Στα Γραφήματα 4.1 έως 4.15 που ακολουθούν συγκρίνονται γραφικά οι πειραματικές τιμές (πεδίομετρο NARDA και PMM 8053A) με τις τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις (2D και 3D) για τον κάθε άξονα και το κάθε ύψος με εφαρμοζόμενη τάση 13.2kV.



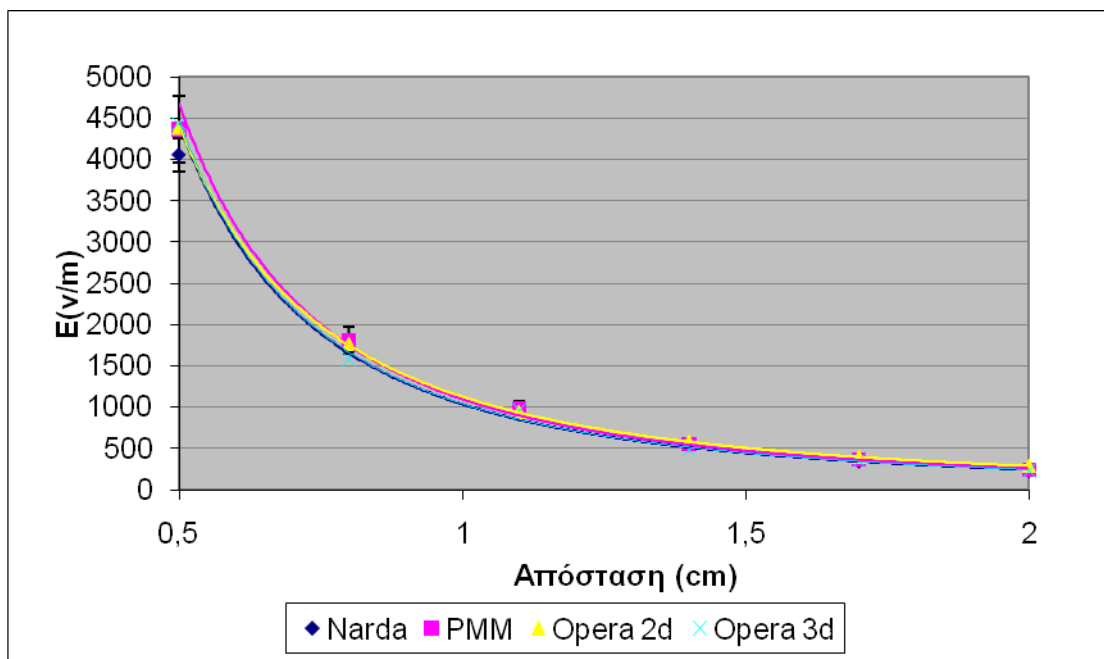
Γράφημα 4.1: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 1 και για ύψος 13cm



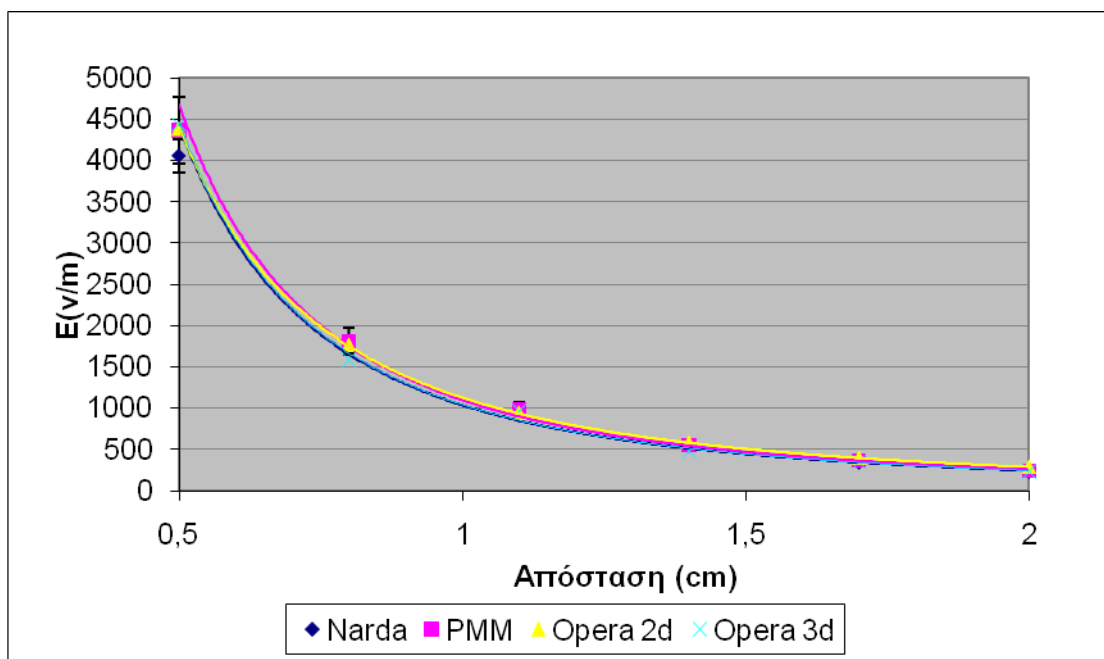
Γράφημα 4.2: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 1 και για ύψος 21cm



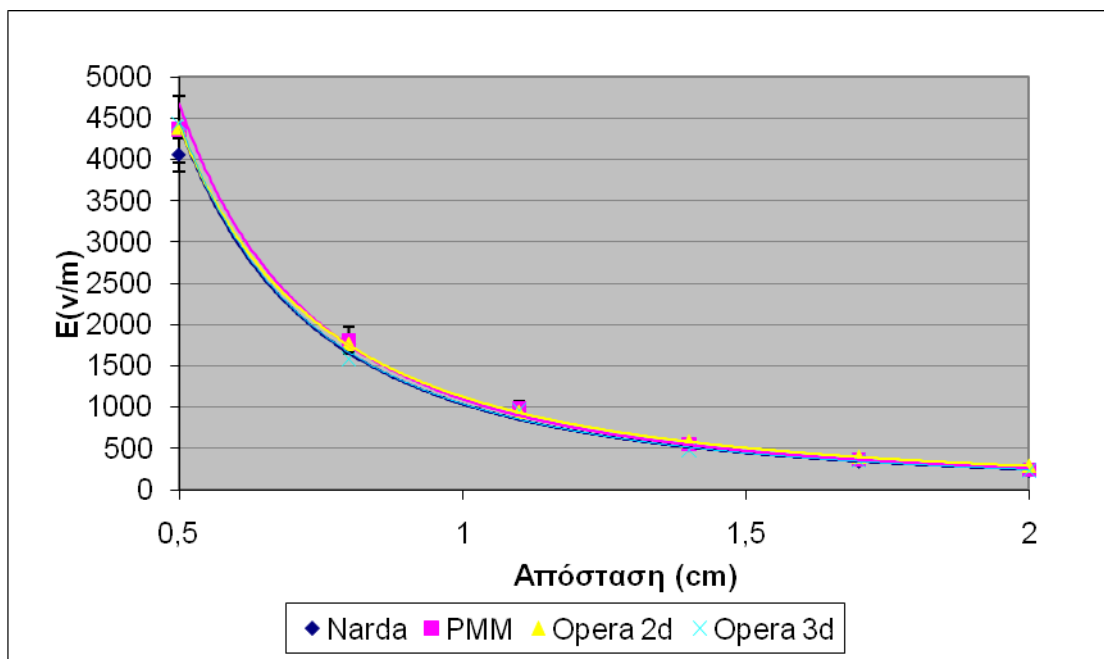
Γράφημα 4.3: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 1 και για ύψος 29cm



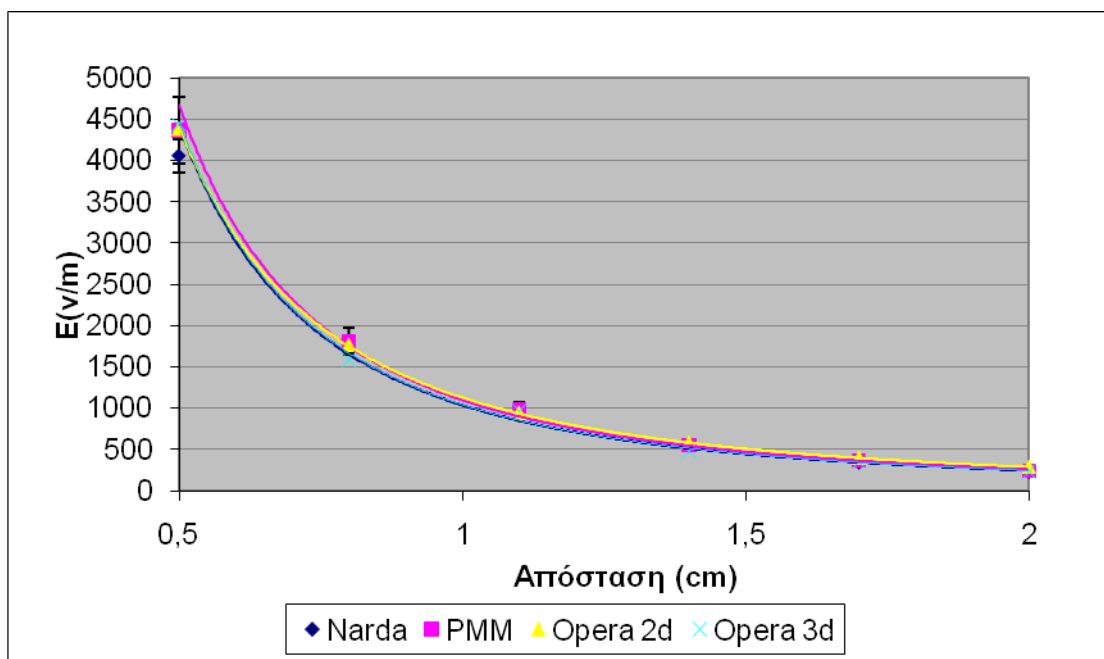
Γράφημα 4.4: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 2 και για ύψος 13cm



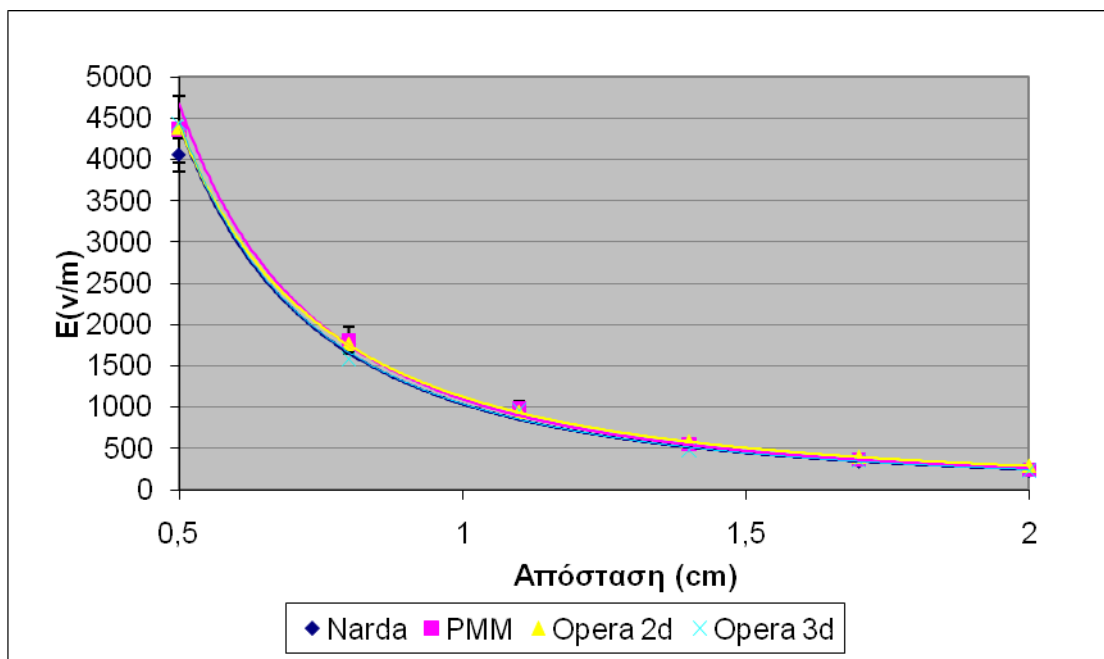
Γράφημα 4.5: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 2 και για ύψος 21cm



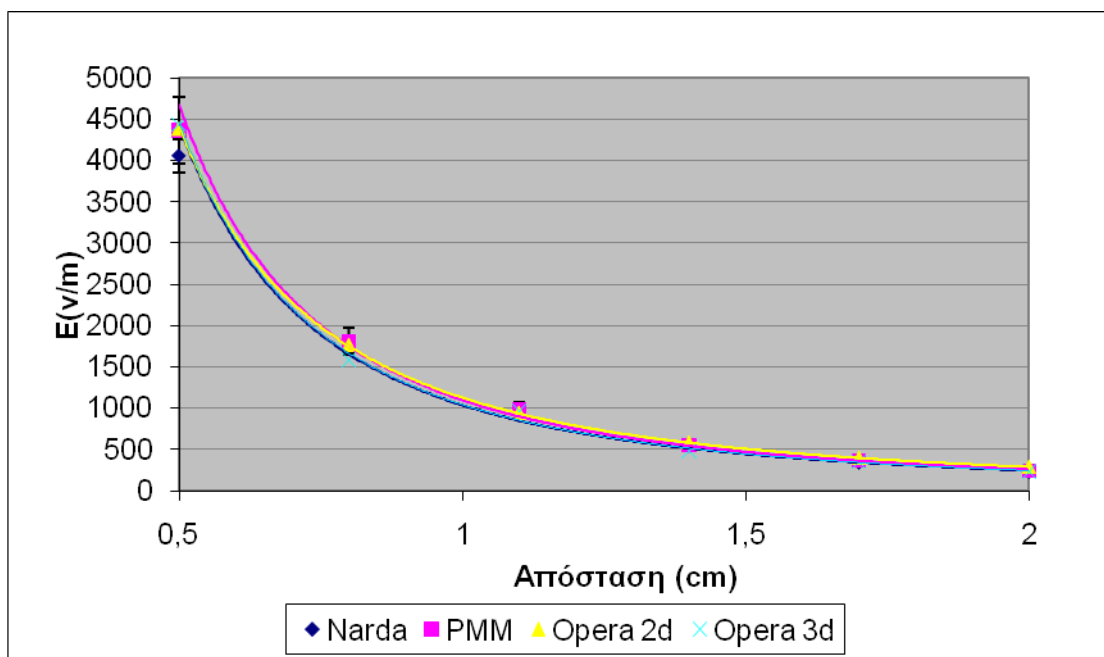
Γράφημα 4.6: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 2 και για ύψος 29cm



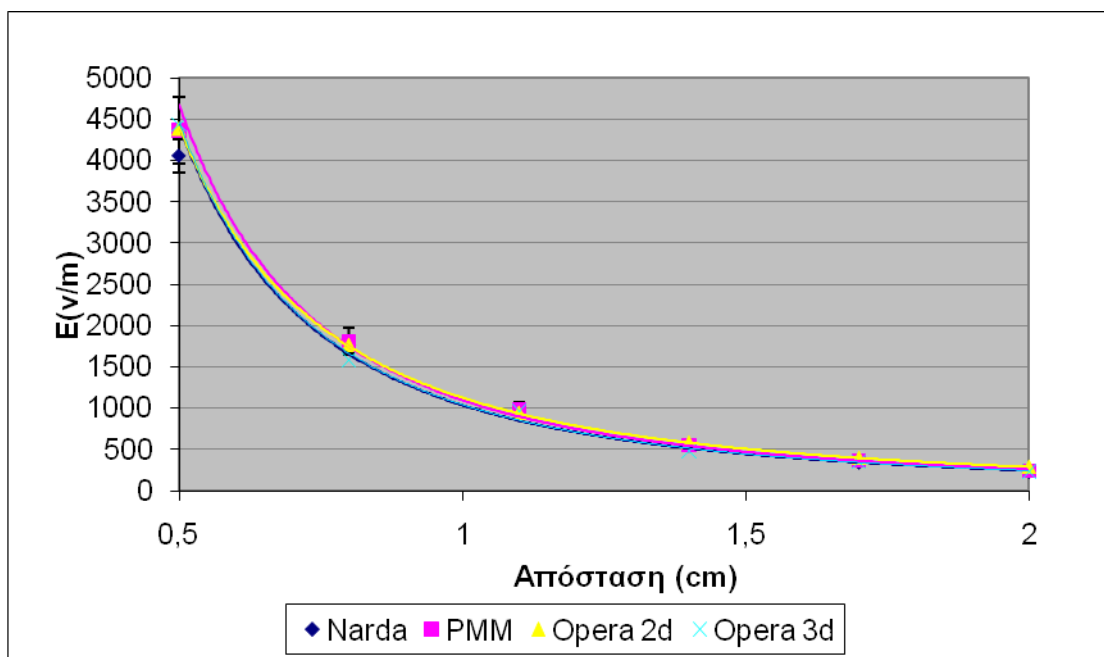
Γράφημα 4.7: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 3 και για ύψος 13cm



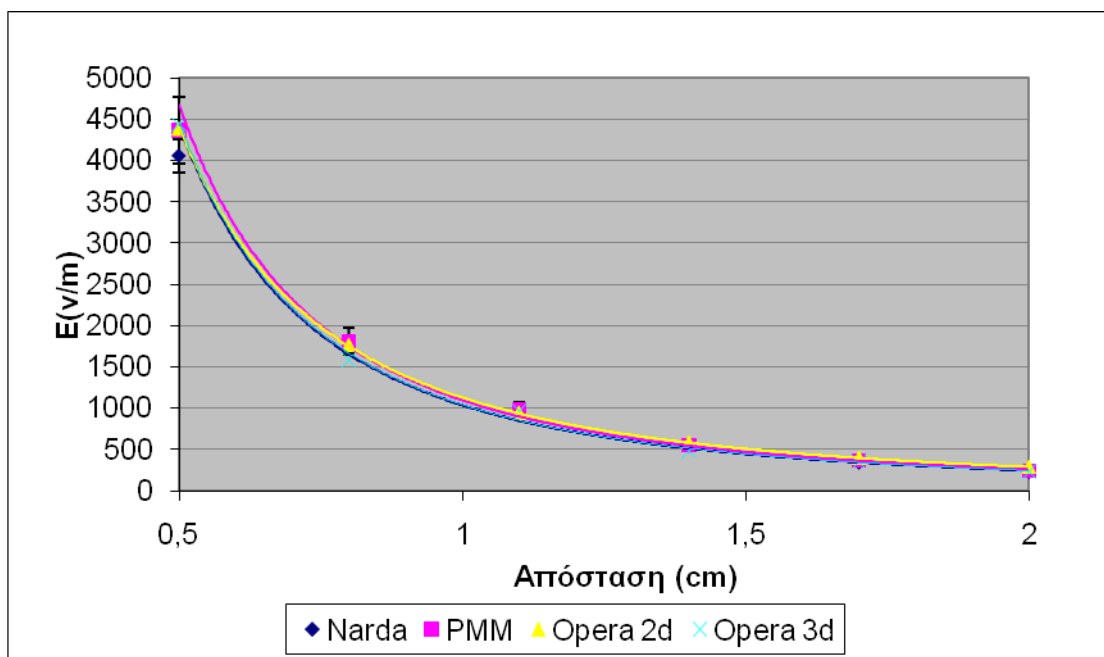
Γράφημα 4.8: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 3 και για ύψος 21cm



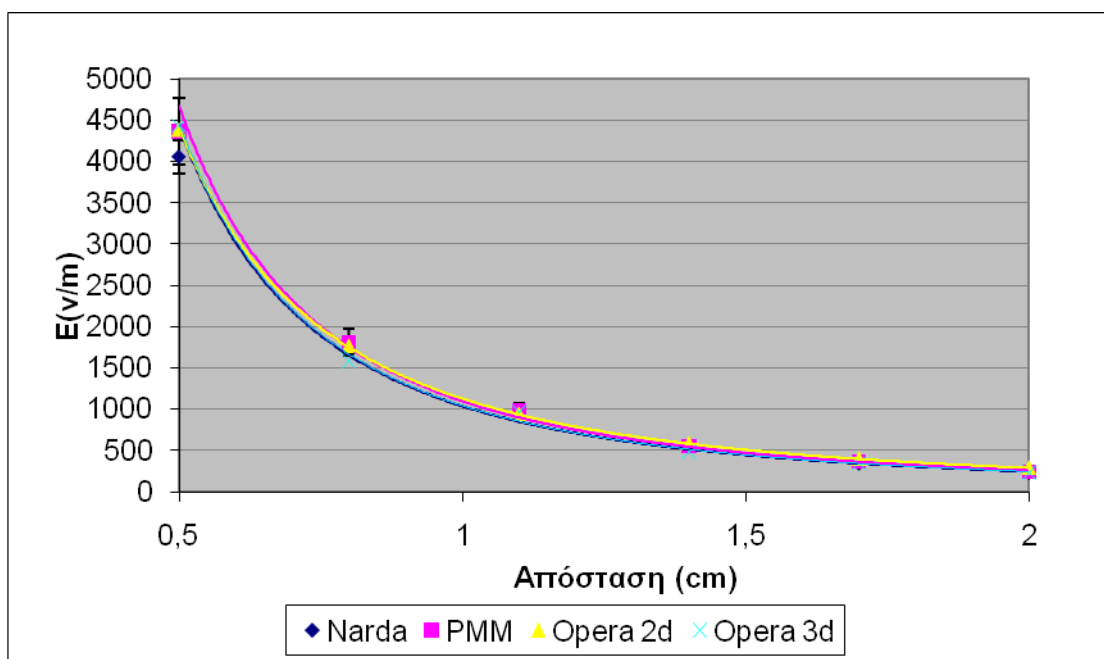
Γράφημα 4.9: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 3 και για ύψος 29cm



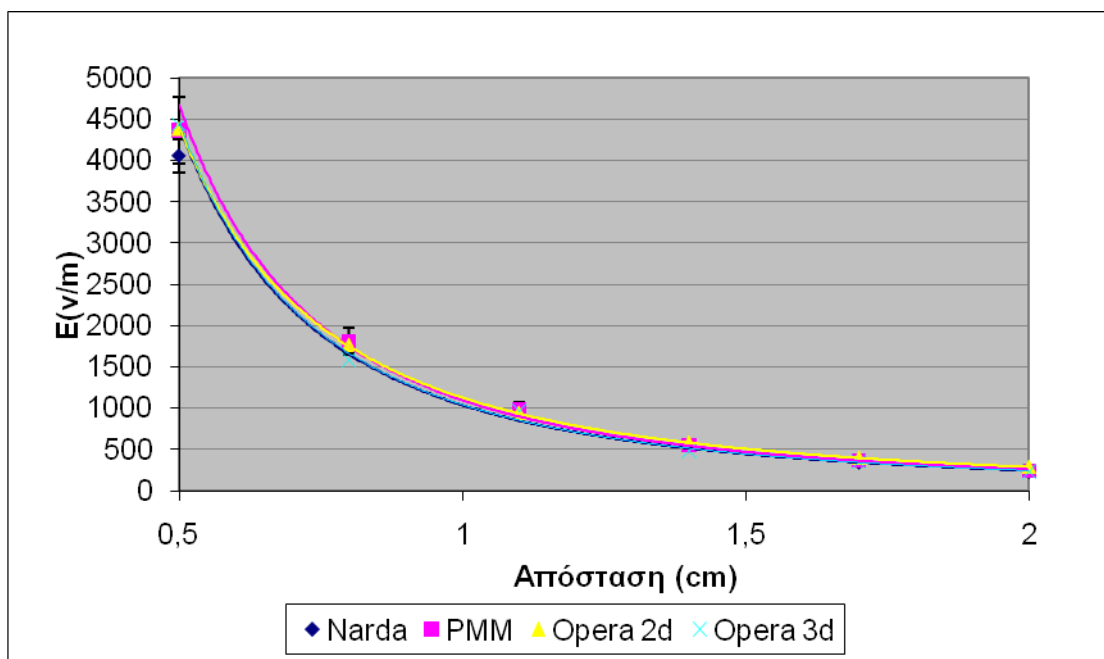
Γράφημα 4.10: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 4 και για ύψος 13cm



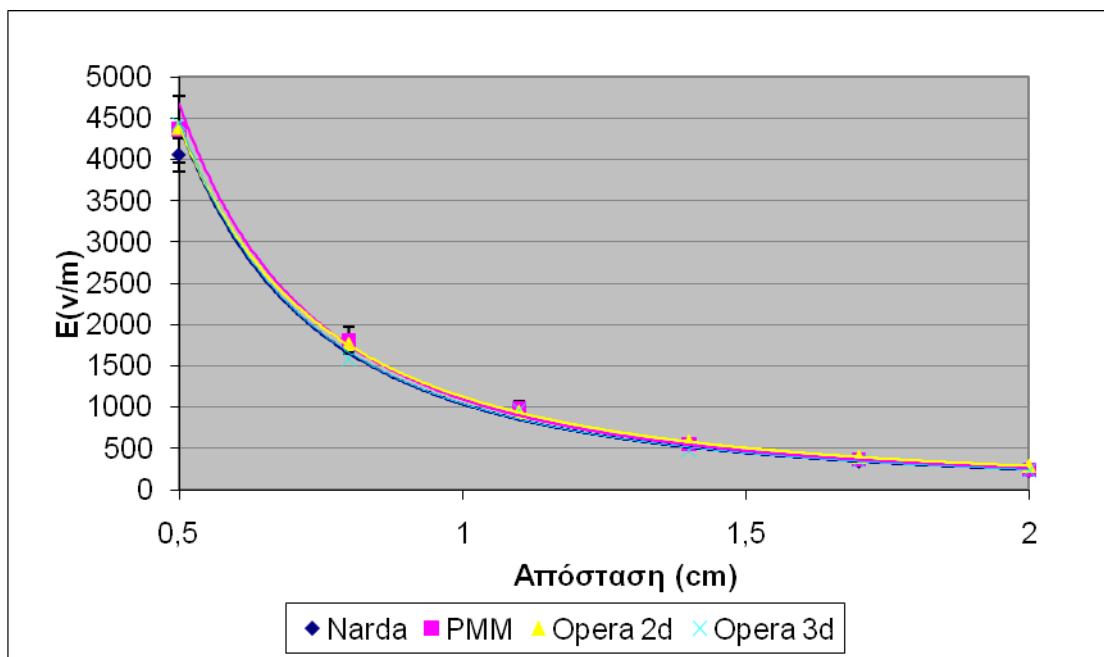
Γράφημα 4.11: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 4 και για ύψος 21cm



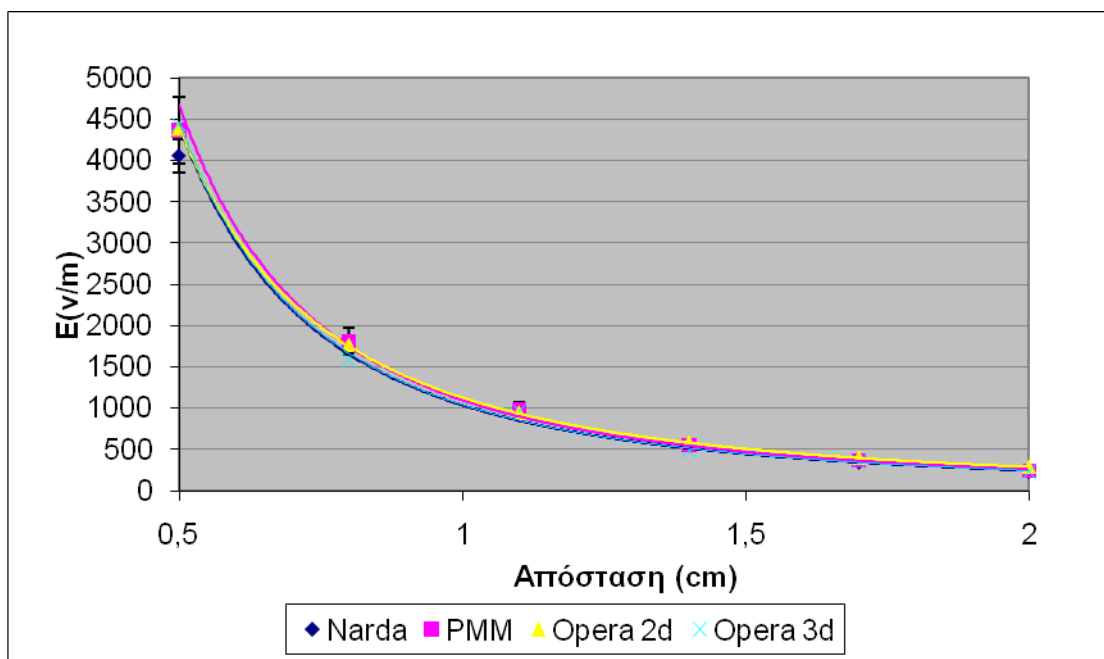
Γράφημα 4.12: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 4 και για ύψος 29cm



Γράφημα 4.13: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 5 και για ύψος 13cm

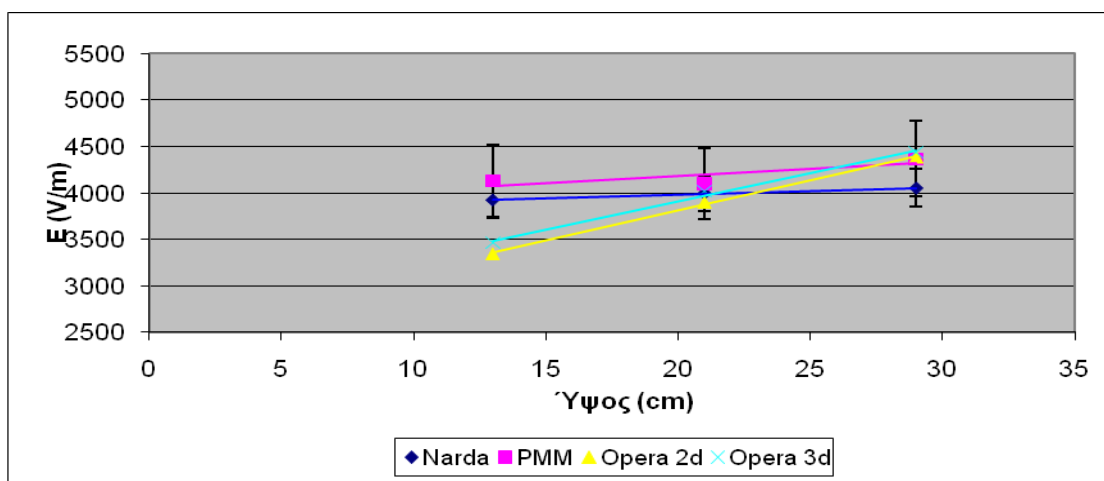


Γράφημα 4.14: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 5 και για ύψος 21cm

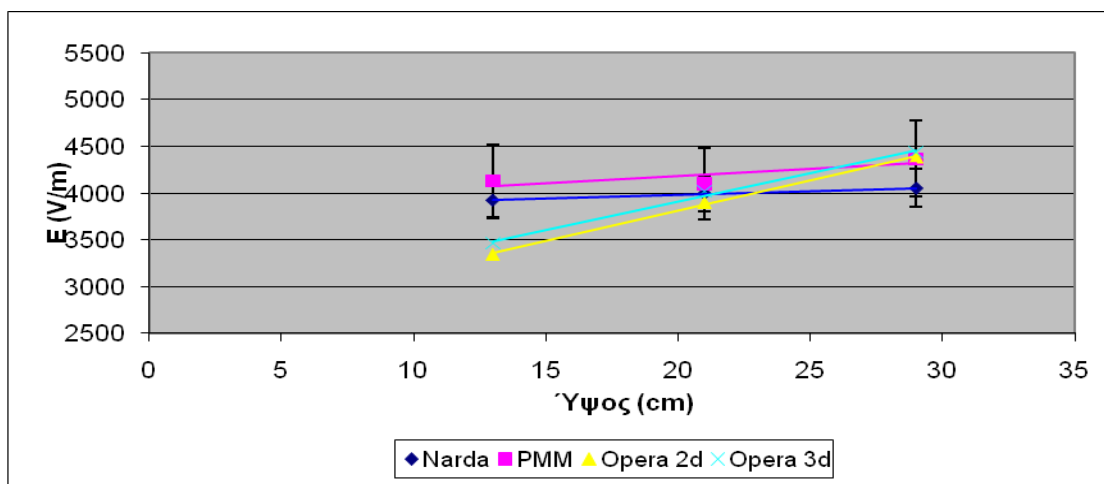


Γράφημα 4.15: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον άξονα 5 και για ύψος 29cm

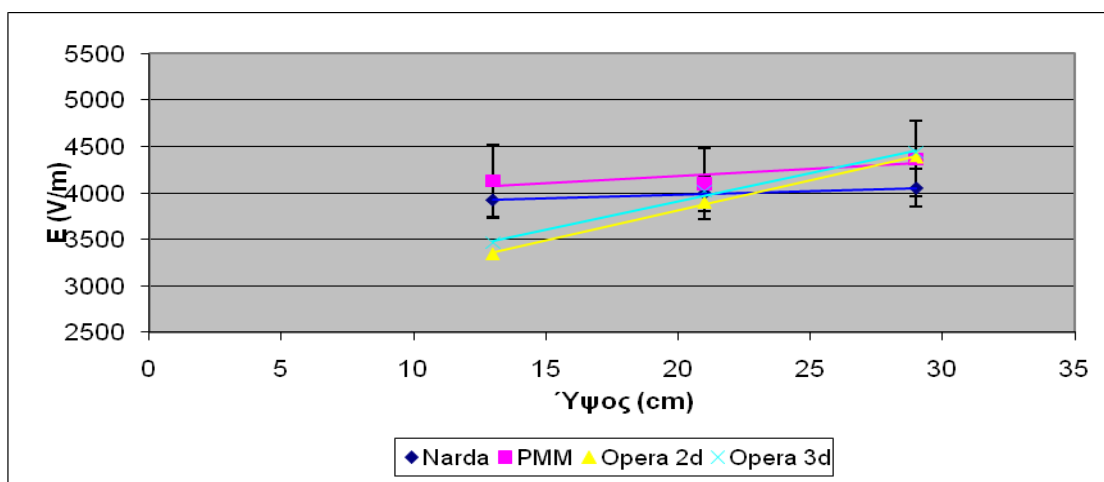
Στα Γραφήματα 4.16 έως 4.45 παρουσιάζονται γραφικά οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τον κάθε άξονα και απόσταση από το μοντέλο συναρτήσει του ύψους. Στις γραφικές παραστάσεις συγκρίνονται οι τιμές που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις με τα πεδίομετρα NARDA και PMM 8053A καθώς και οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις (2D και 3D), για επίπεδο τάσης 13.2kV.



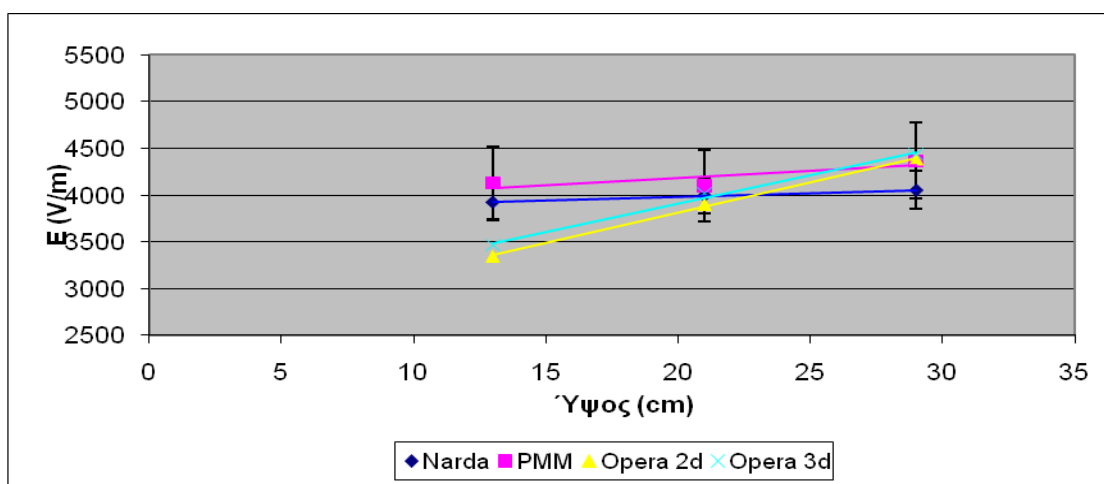
Γράφημα 4.16: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.5m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 1



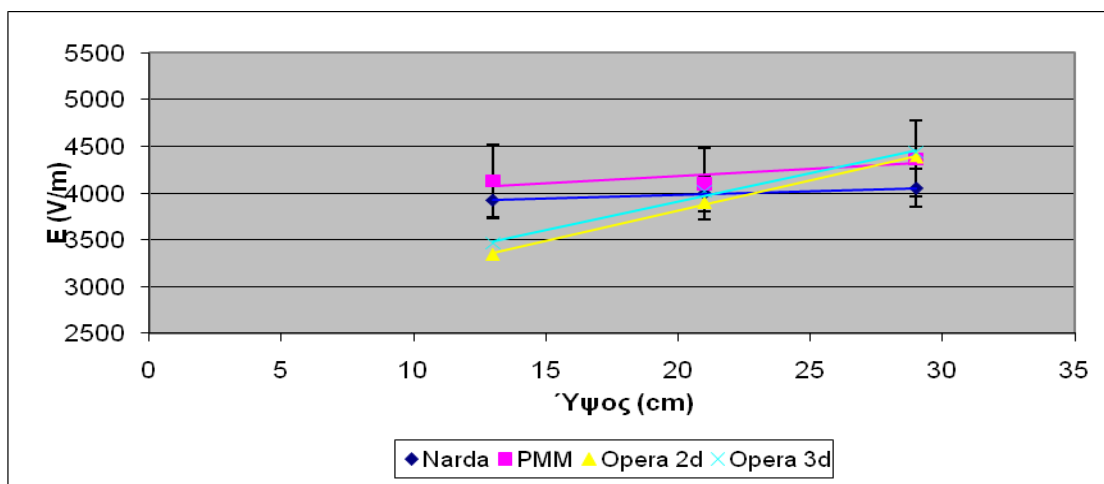
Γράφημα 4.17: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.5m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 2



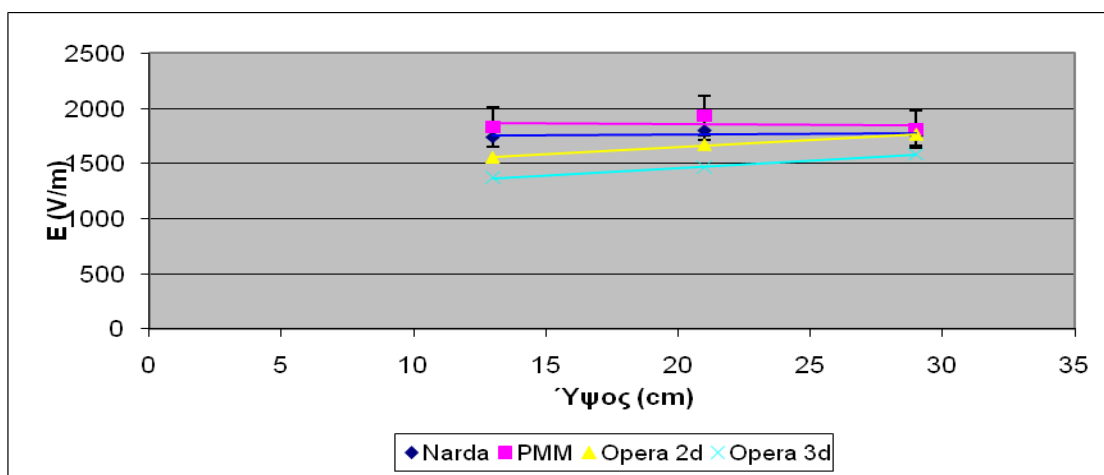
Γράφημα 4.18: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.5m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 3



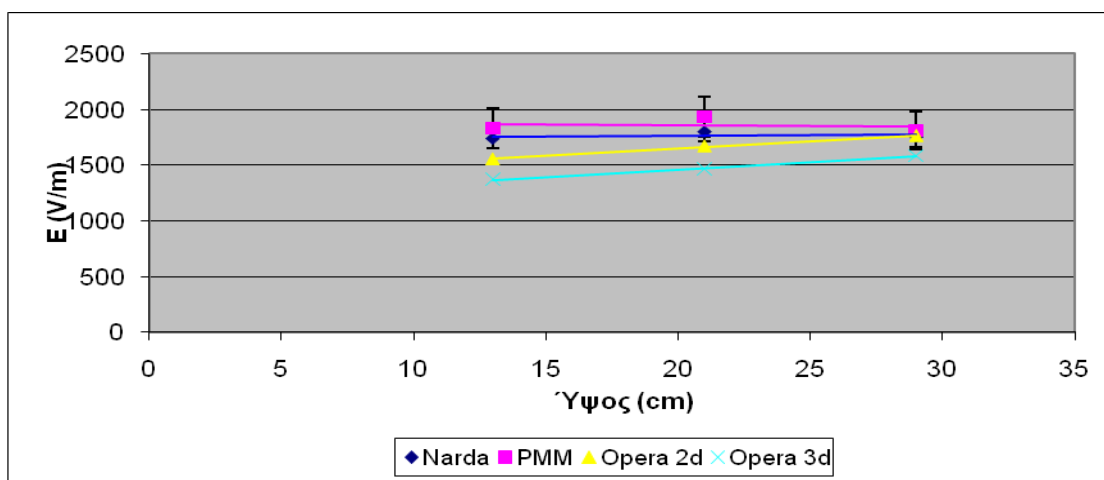
Γράφημα 4.19: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.5m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 4



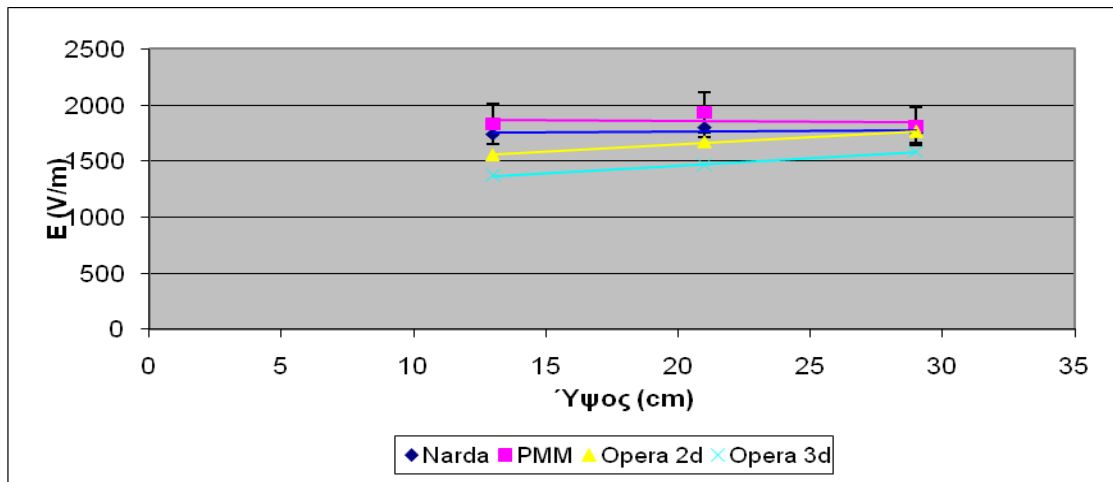
Γράφημα 4.20: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.5m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 5



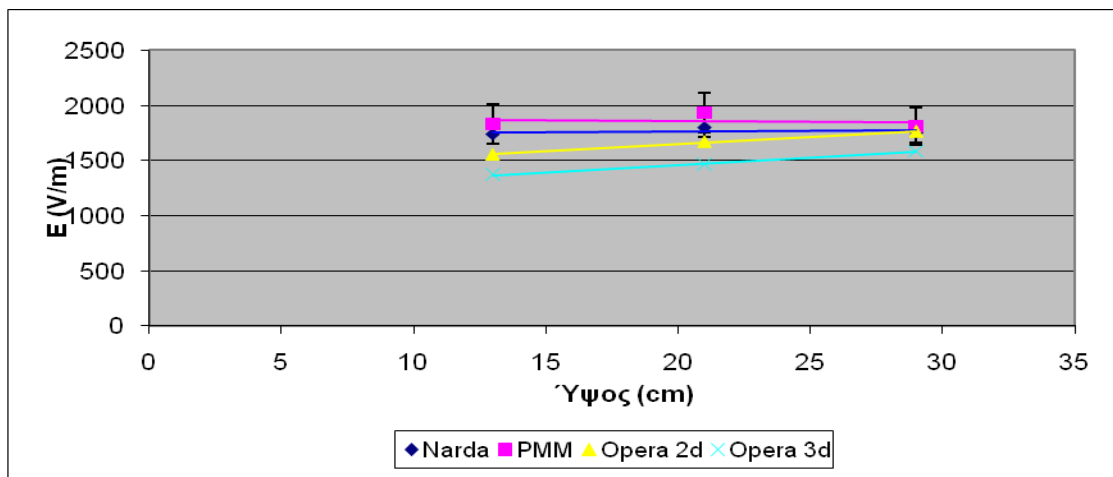
Γράφημα 4.21: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.8m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 1



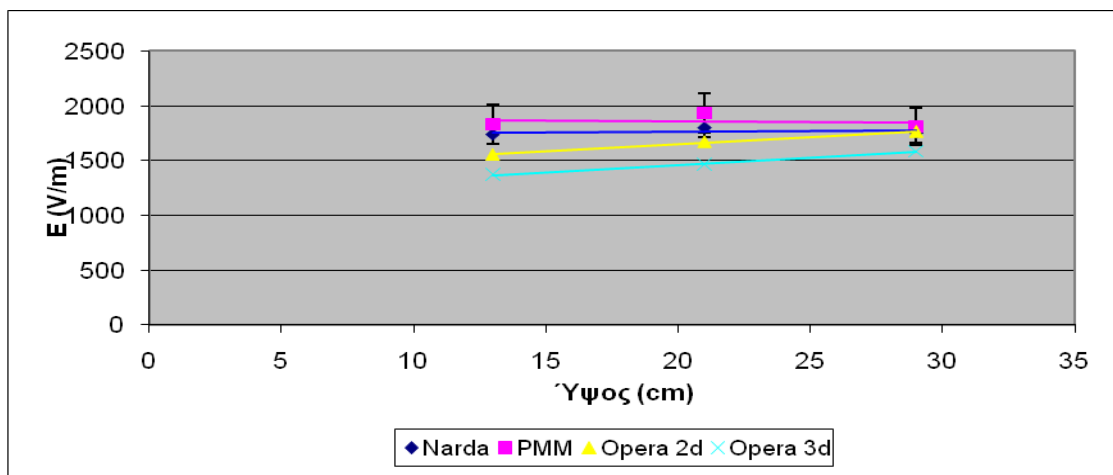
Γράφημα 4.22: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.8m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 2



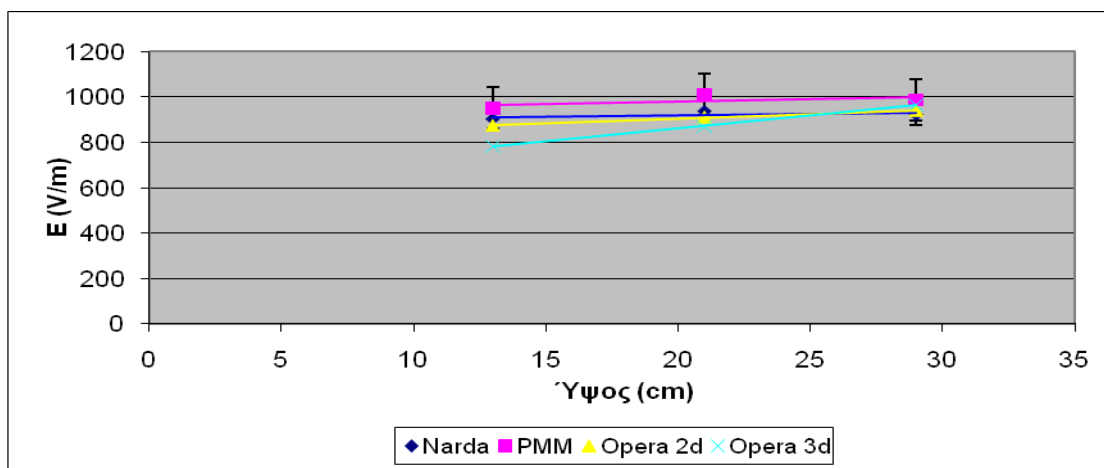
Γράφημα 4.23: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.8m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 3



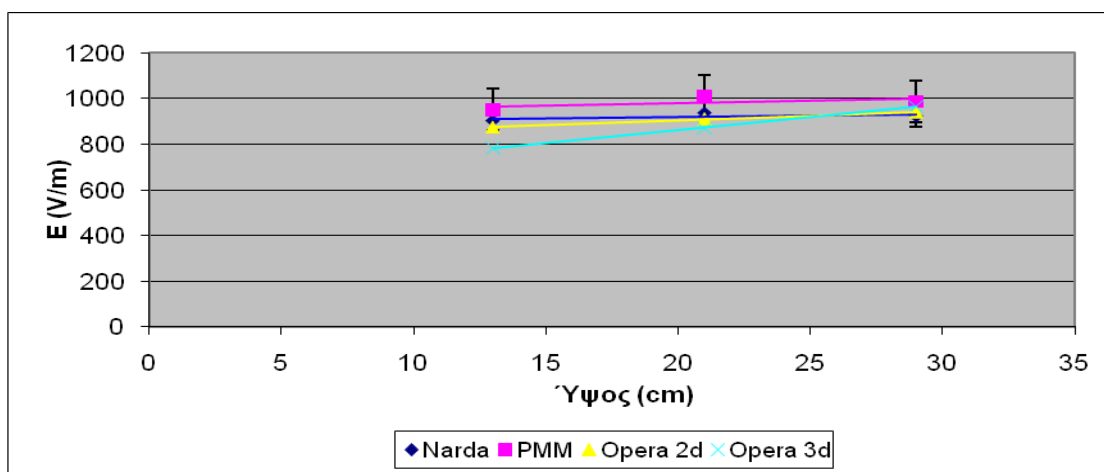
Γράφημα 4.24: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.8m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 4



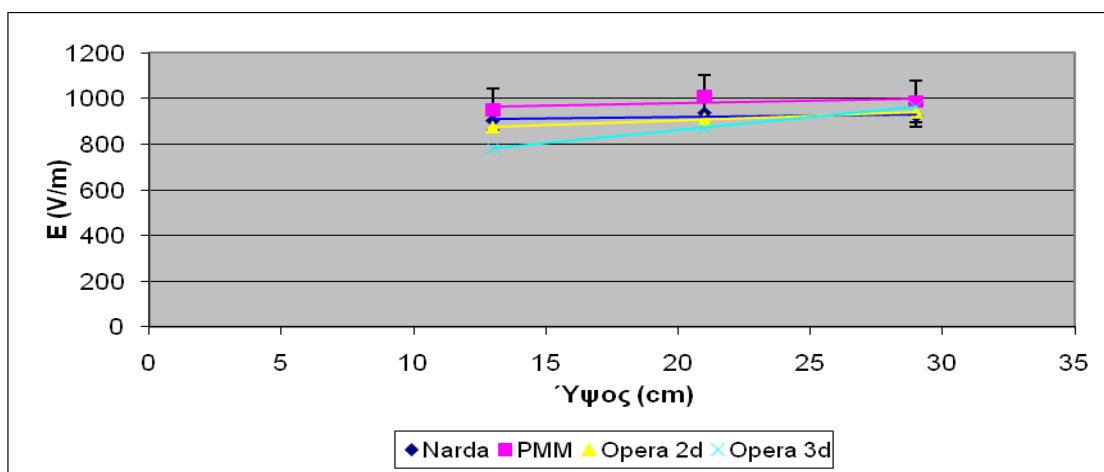
Γράφημα 4.25: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 0.8m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 5



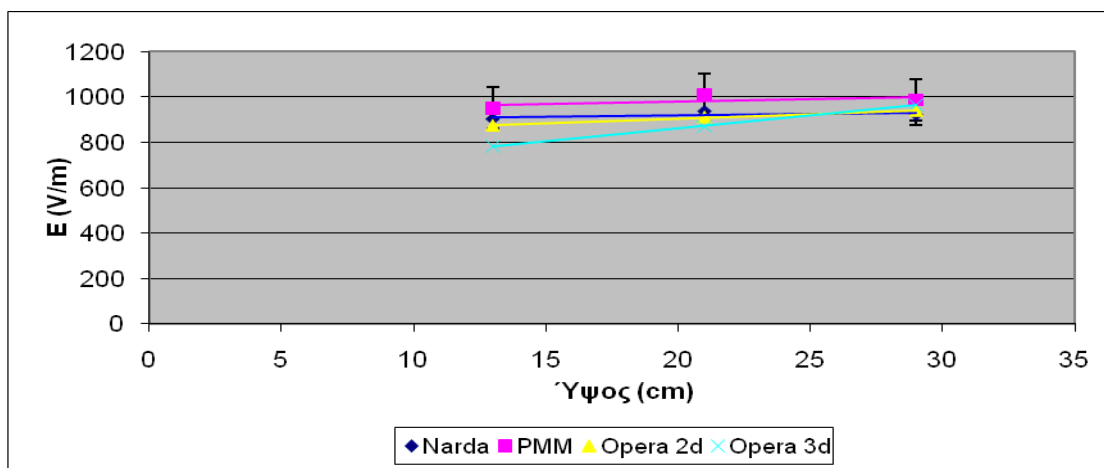
Γράφημα 4.26: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.1m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 1



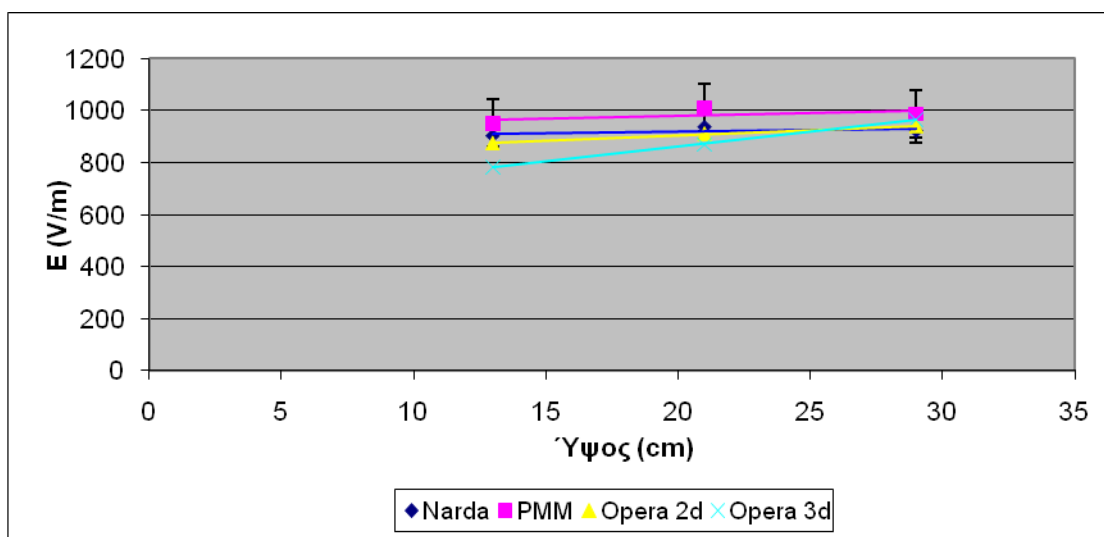
Γράφημα 4.27: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.1m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 2



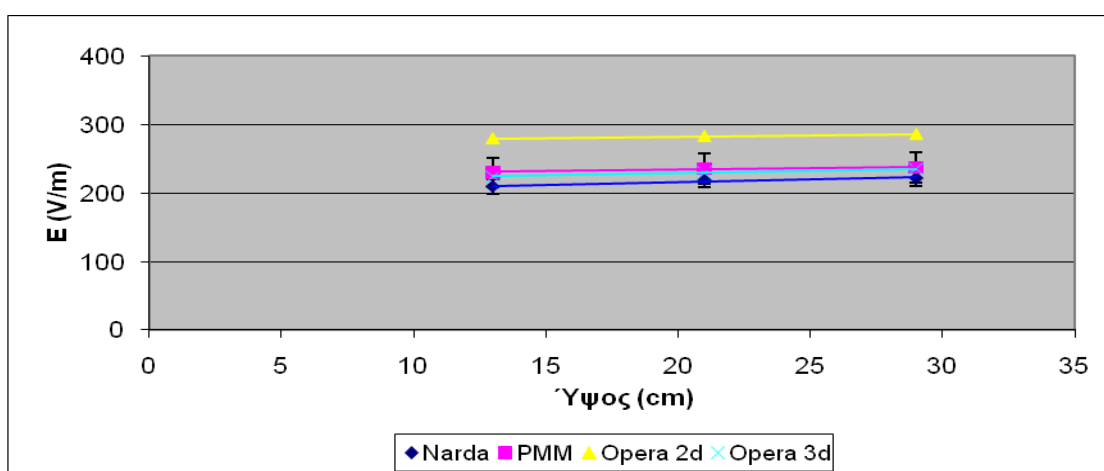
Γράφημα 4.28: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.1m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 3



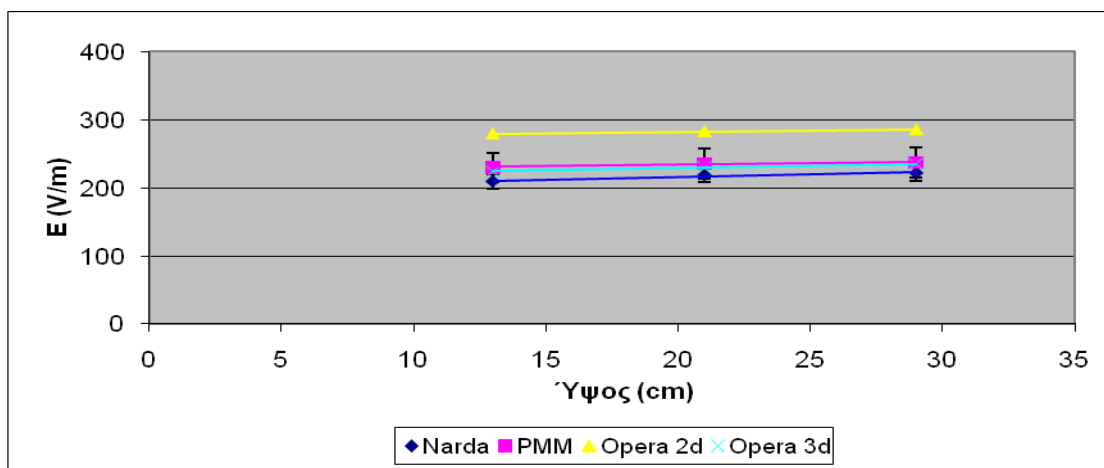
Γράφημα 4.29: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.1m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 4



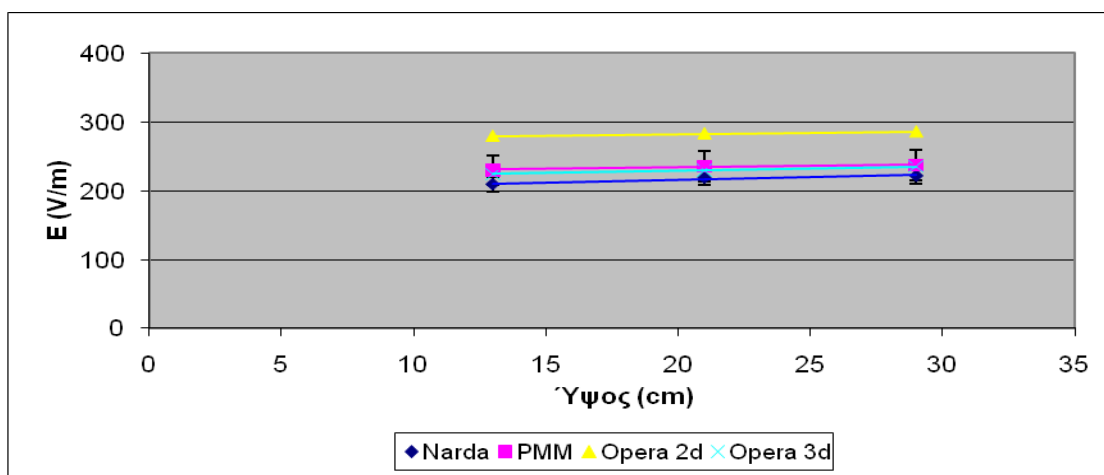
Γράφημα 4.30: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.1m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 5



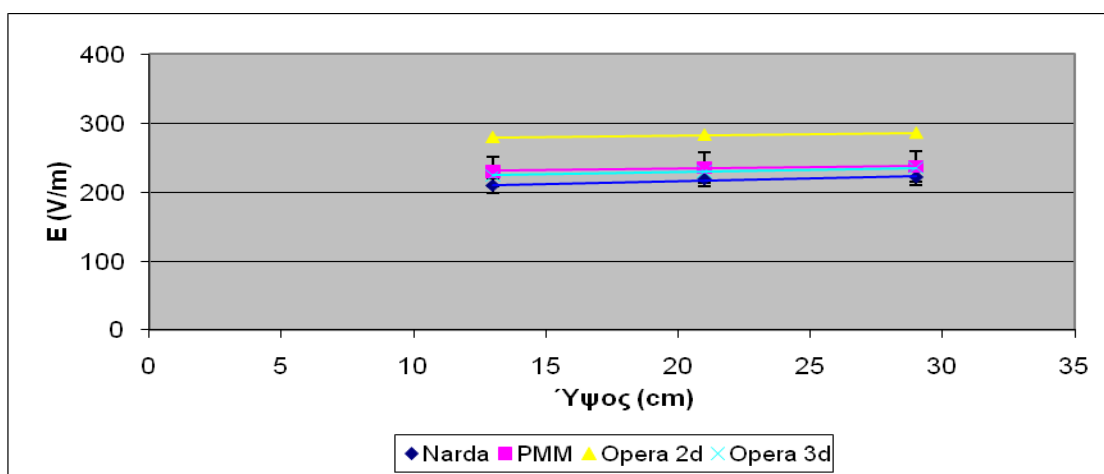
Γράφημα 4.31: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.4m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 1



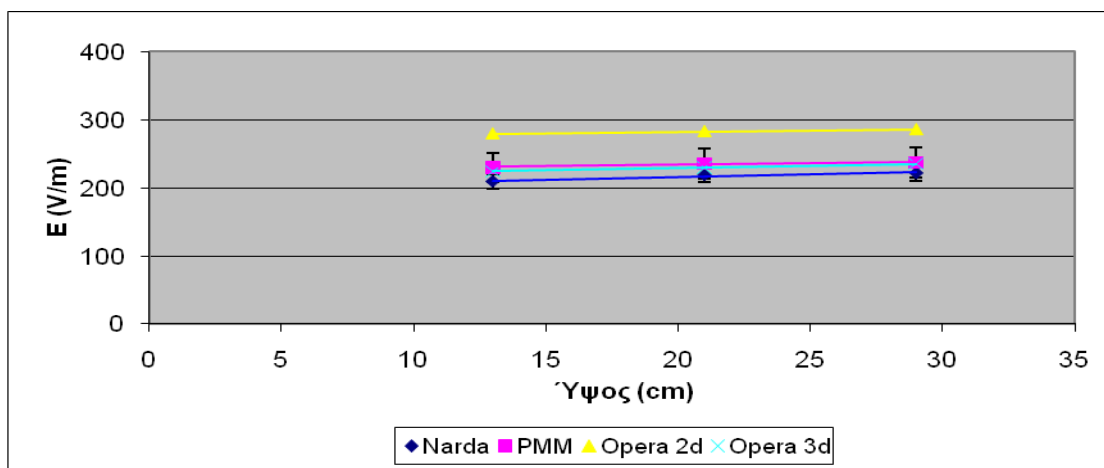
Γράφημα 4.32: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.4m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 2



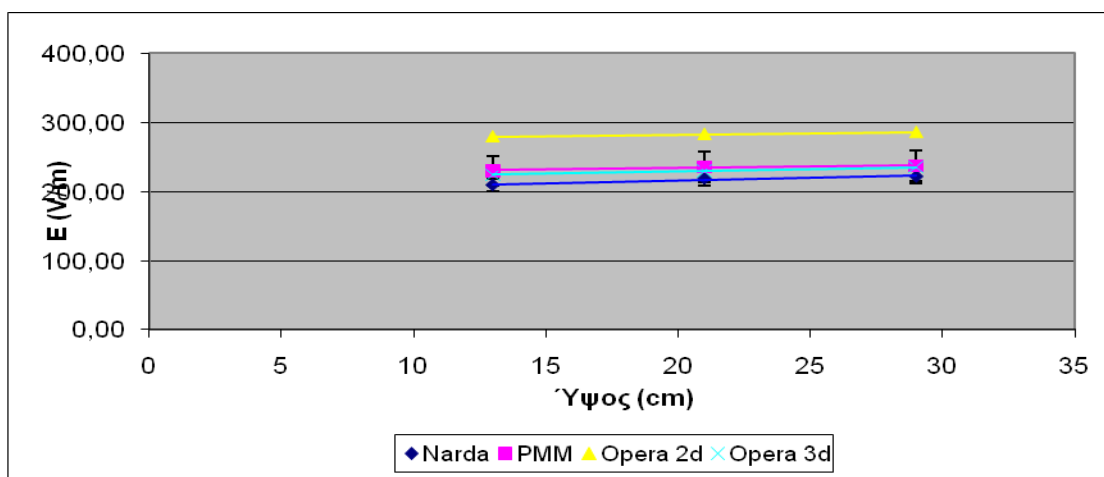
Γράφημα 4.33: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.4m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 3



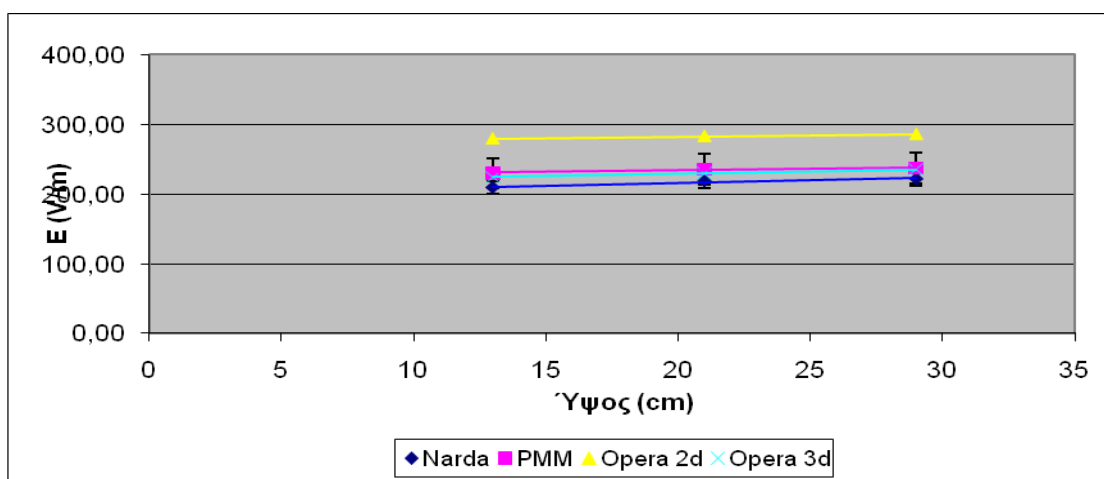
Γράφημα 4.34: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.4m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 4



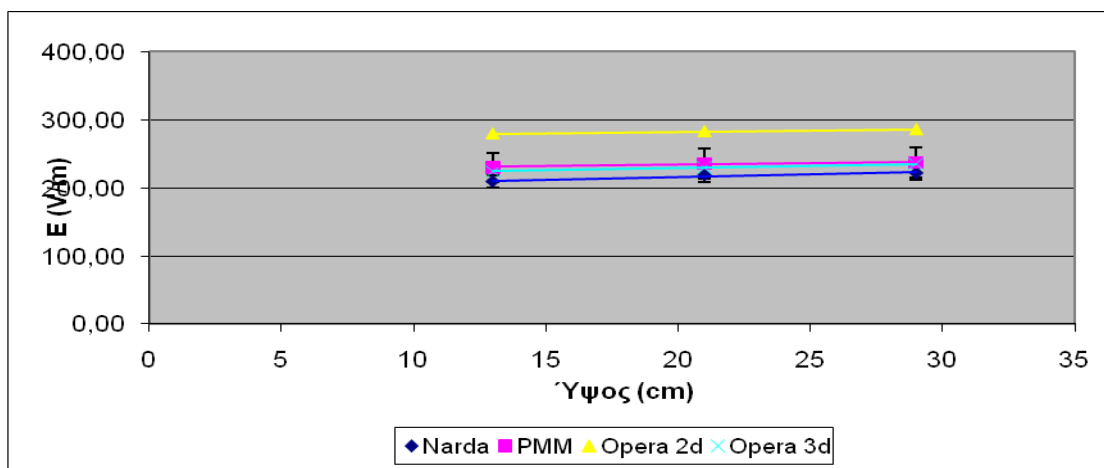
Γράφημα 4.35: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.4m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 5



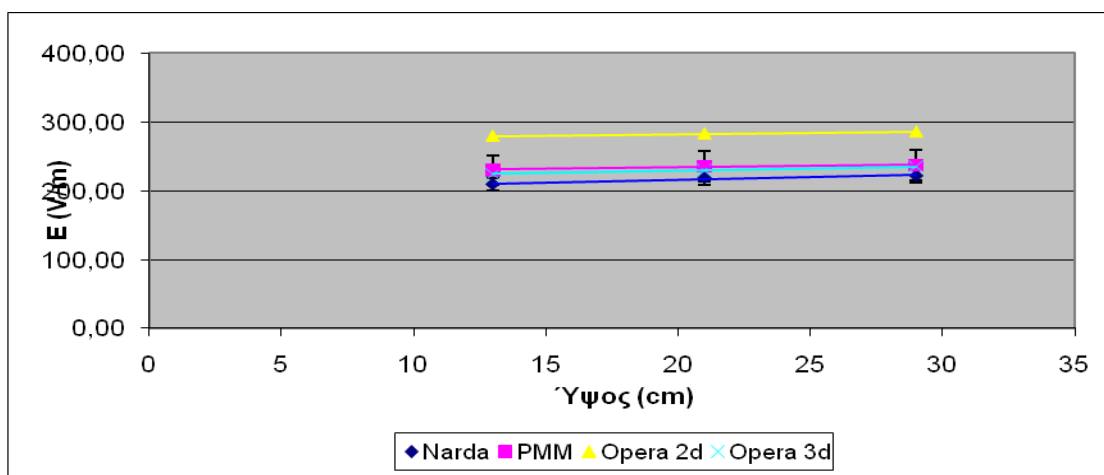
Γράφημα 4.36: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.7m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 1



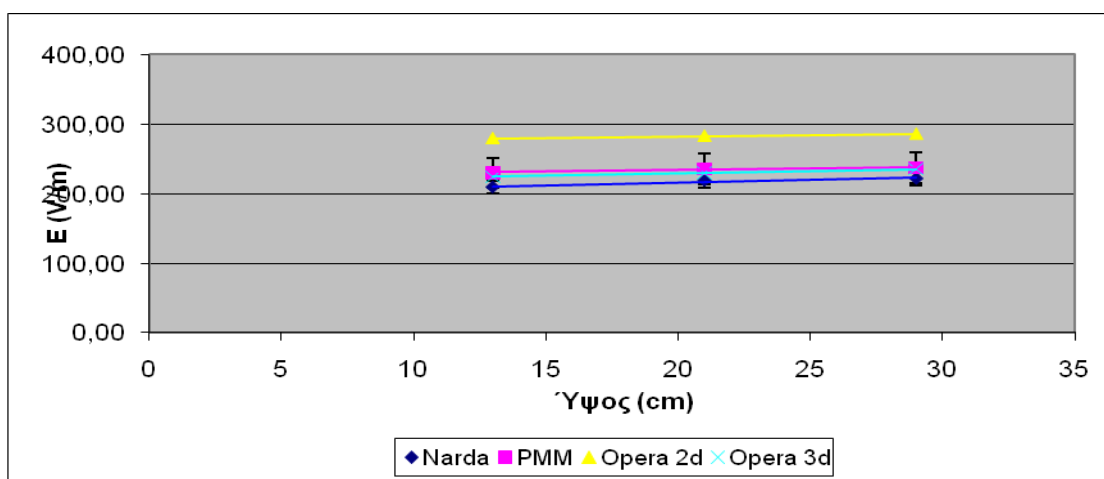
Γράφημα 4.37: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.7m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 2



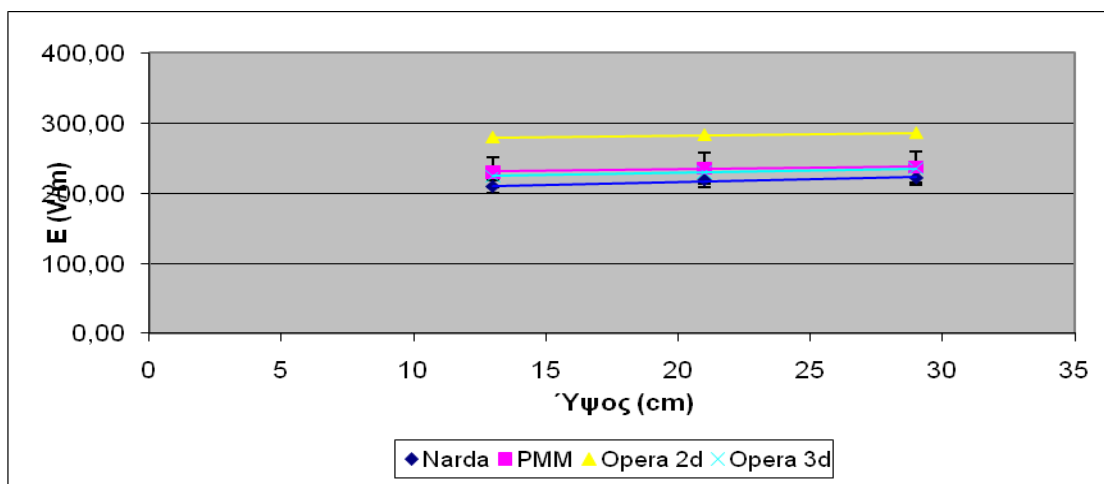
Γράφημα 4.38: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.7m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 3



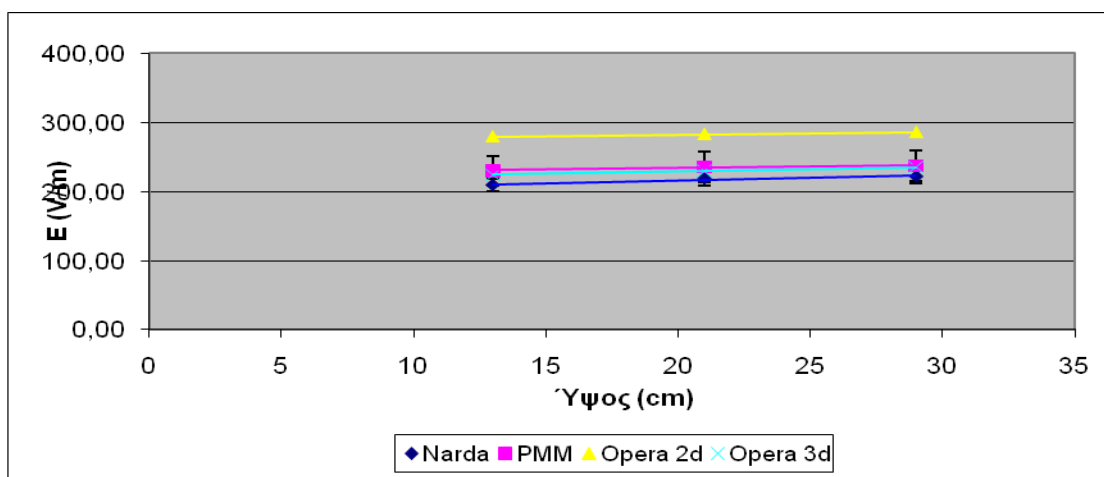
Γράφημα 4.39: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.7m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 4



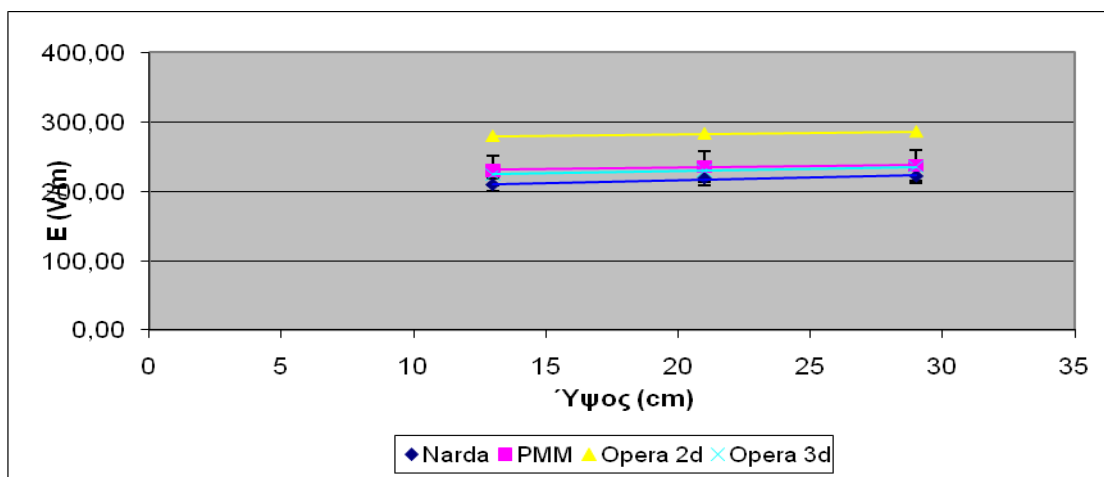
Γράφημα 4.40: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 1.7m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 5



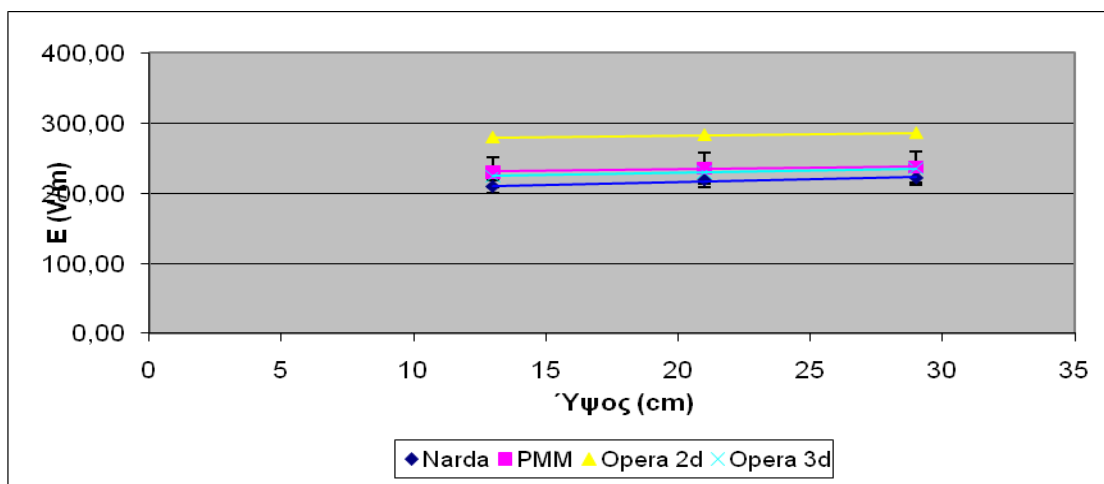
Γράφημα 4.41: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 2m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 1



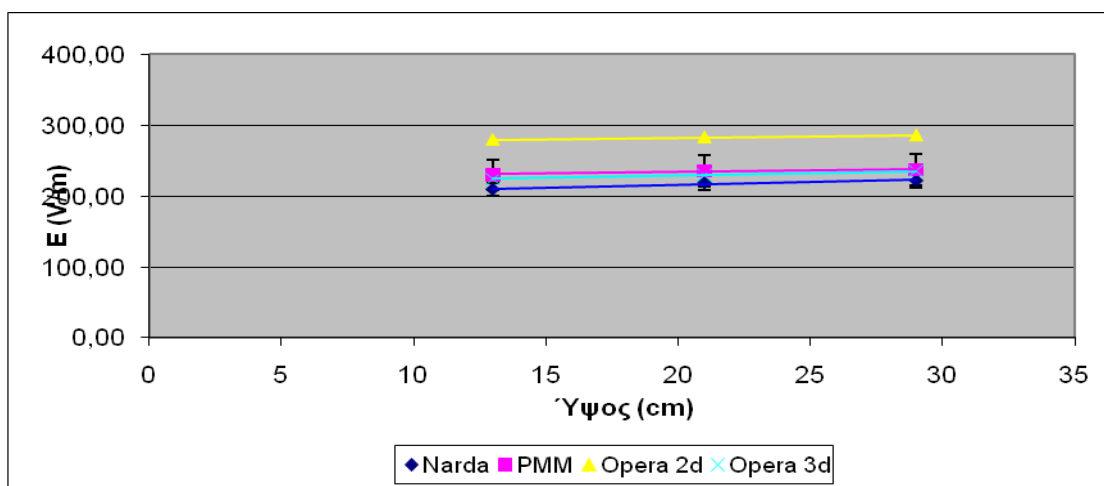
Γράφημα 4.42: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 2m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 2



Γράφημα 4.43: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 2m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 3



Γράφημα 4.44: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 2m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 4



Γράφημα 4.45: Οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση 2m από το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύνου στον άξονα 5

Κεφάλαιο 5

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 δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων του αλεξικεραυνού με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA. Παρατηρήθηκε, ότι οι πειραματικές μετρήσεις είχαν μια απόκλιση από τις τιμές των προσομοιώσεων, παρουσιάζοντας έτσι ένα σφάλμα τάξης μέχρι και 30%. Οι αιτίες που πιθανόν να συμβάλλουν στην δημιουργία του σφάλματος είναι οι εξής :

- Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από τον περιβάλλοντα χώρο του εργαστηρίου
- Σχεδιασμός του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου μοντέλου του αλεξικεραυνού στο PC OPERA
- Σφάλματα και ακρίβειες οργάνων
- Μεταλλικά γειωμένα αντικείμενα στον περιβάλλοντα χώρο του εργαστηρίου (ακόμα και παρουσία διερχόμενων ανθρώπων) που επηρεάζουν την μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου
- Σχεδίαση συστήματος γείωσης εργαστηρίου
- Η ένδειξη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου δεν παραμένει σταθερή
- Διακύμανση τάσης
- Σφάλμα μέτρησης εφαρμοζόμενης τάσης στο πρωτεύον

Επιπλέον, δοκιμάστηκαν διάφορες αλλαγές στο εσωτερικό του αλεξικεραυνού και συγκεκριμένα στην μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ), ούτως ώστε να πετύχουμε μια πιο ομοιόμορφη και βελτιωμένη κατανομή της τάσης και του ηλεκτρικού πεδίου.

Μελετήθηκε, επίσης, η επιρροή που έχει στην κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η ρύπανση στην εξωτερική μόνωση του αλεξικέραυτου και σπασίματα στα πτερύγια.

Τελειώνοντας, πρέπει να αναφερθεί ότι οι αλλαγές αυτές που βελτίωσαν την λειτουργία του αλεξικεραύτου, παρόλο που φαίνεται να βελτιώνουν την κατανομή του δυναμικού και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του μοντέλου, χρειάζεται περαιτέρω τεχνικοοικονομική μελέτη, σχετικά με το αν είναι εφικτή και πρακτικά εφαρμόσιμη μια τέτοια αλλαγή.

Επόμενο βήμα είναι η δοκιμή και άλλων σχεδιαστικών αλλαγών (τόσο στο δισδιάστατο όσο και στο τρισδιάστατο μοντέλο), όχι μόνο στην μορφή της μη γραμμικής αντίστασης (βαρίστορ), αλλά και στη γεωμετρία του αλεξικέραυτου και στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμο να δοκιμαστεί ένα μεγάλο εύρος τιμών για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (διηλεκτρική σταθερά και αγωγιμότητα) των μερών που απαρτίζουν το μοντέλο του καθοδικού αλεξικεραύτου.

Παράρτημα Α

Περιγραφή πεδιομέτρων και αισθητήρων

A.1.Narda EFA-200/EFA-300 [1]

A.1.1.Χαρακτηριστικά

Οι αναλυτές πεδίων EFA-200 και EFA-300 είναι συσκευές που μετρούν πεδία χαμηλών συχνοτήτων σε ένα εύρος συχνοτήτων από 5Hz έως 32kHz.

Όλες οι λειτουργίες του οργάνου είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να παρέχουν ευκολία στην χρήση υπό συνθήκες εργασίας. Η λειτουργία έχει καθοριστεί έτσι ώστε τα όργανα να μπορούν να ρυθμιστούν όσο πιο απλά γίνεται με την χρήση πλήκτρων λειτουργίας και πλήκτρων μενού. Τα πλήκτρα του μενού χρησιμοποιούνται για την εναλλαγή μεταξύ των τεσσάρων κύριων μενού που παρέχει η συσκευή: MODE, CONFIGURATION, MEMORY και USER.

Το πλήκτρο MODE δίνει πρόσβαση σε πέντε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας οι οποίοι τρόποι μπορούν να ενεργοποιηθούν ξεχωριστά οποιαδήποτε στιγμή χρειάζονται, ώστε να μπορεί ο χρήστης να προσαρμόσει την συσκευή του σε συγκεκριμένο έργο άμεσα.

Το πλήκτρο MEM επιτρέπει την καταγραφή ενός συνόλου μετρήσεων σε ένα προκαθορισμένο χρονικό όριο ή την αποθήκευση των μετρηθείσων τιμών σε έναν πίνακα και την ανάκληση αποθηκευμένων μετρήσεων που απαιτούνται.

Το πλήκτρο CONF επιτρέπει την πρόσβαση σε επιπρόσθετες λειτουργίες όπως η ενεργοποίηση του συναγερμού/ειδοποίησης, την εισαγωγή ημερομηνίας και ώρας καθώς και την επιλογή του ορίου των αποθηκευμένων καμπυλών.

Τα πλήκτρα λειτουργιών χρησιμοποιούνται σε όλα τα μενού για να ενεργοποιούν την πρόσβαση σε επιπλέον μετρητικές λειτουργίας.

Οι αισθητήρες EFA-200 και EFA-300 έχουν ως κύρια διαφορά τα αντικείμενα μέτρησης. Ο αισθητήρας EFA-200 χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ ο EFA-300 για την μέτρηση του μαγνητικού.



Σχήμα Α.1: Το πεδιόμετρο, οι αισθητήρες και η οπτική ίνα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μετρήσεων

A.1.2. Προετοιμασία οργάνων για μετρήσεις

Μετρήσεις Μαγνητικού Πεδίου:

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων μαγνητικού πεδίου είναι διαθέσιμα τρία είδη αισθητήρων για χρήση σε διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος ή διαφορετικούς σκοπούς μέτρησης:

- *Ενσωματωμένος αισθητήρας μαγνητικού πεδίου:* Χρησιμοποιείται για ανιχνεύσεις και γρήγορες μετρήσεις πεδίων. Η ακρίβεια του αισθητήρα αυτού είναι περίπου 6%.
- *Εξωτερικός αισθητήρας μαγνητικού πεδίου με διάμετρο 3cm:* Ο μικρός αυτός αισθητήρας χρησιμοποιείται σε μετρήσεις, όπου ο χρήστης θέλει να επισημάνει με ακρίβεια την τιμή του μαγνητικού πεδίου σε μια στενή ή δύσκολα προσβάσιμη περιοχή. Η ακρίβεια του αισθητήρα αυτού είναι περίπου 6%.
- *Εξωτερικός αισθητήρας μαγνητικού πεδίου με εμβαδόν διατομής 100cm²:* Ο αισθητήρας αυτός χρησιμεύει για μετρήσεις που συμμορφώνονται με το πρότυπο VDE 0848. Η μεγάλη του επιφάνεια εξουδετερώνει τις επιδράσεις μικρών πεδίων που προέρχονται από δινορρεύματα και εγγύαται πολύ ακριβείς μετρήσεις. Η ακρίβεια του αισθητήρα αυτού είναι περίπου 3%.

Προτού ξεκινήσουμε τις μετρήσεις μας πρέπει να συνδέσουμε τον αισθητήρα μαγνητικού πεδίου στην κεντρική μονάδα του πεδιομέτρου. Ο αισθητήρας τοποθετείται/βιδώνεται στην ειδική υποδοχή επάνω στο πεδιόμετρο. Έχοντας ελέγξει ότι οι μπαταρίες του πεδιομέτρου είναι επαρκώς φορτισμένες για την διεξαγωγή των μετρήσεων, ανάβουμε το πεδιόμετρο πατώντας το πλήκτρο ON. Η κεντρική μονάδα τίθεται σε λειτουργία και το πράσινο φωτάκι που δείχνει ότι η συσκευή είναι ενεργοποιημένη ανάβει. Εν συνεχεία ξεκινάει ο έλεγχος λειτουργίας. Εφόσον ο έλεγχος λειτουργίας διεκπαιρωθεί με επιτυχία στο όργανο

επανακτούνται οι ρυθμίσεις της τελευταίας μέτρησης, ακούγεται ένας χαρακτηριστικός ήχος και εμφανίζεται στο πεδιομέτρο η οθόνη μέτρησης. Το όργανο είναι τώρα έτοιμο να ξεκινήσει μετρήσεις.



Σχήμα Α.2: Χρήση πεδιομέτρου και αισθητήρα EFA 200 για μετρήσεις μαγνητικού πεδίου

Μετρήσεις Ηλεκτρικού πεδίου (EFA 300):

Αντίθετα με τις μετρήσεις μαγνητικού πεδίου, οι μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου εύκολα επηρεάζονται από παρόντα άτομα ή αντικείμενα που βρίσκονται στον χώρο γύρω από τον αισθητήρα. Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιείται:

- Αισθητήρας (probe) του ηλεκτρικού πεδίου τοποθετημένος επάνω σε έναν τρίποδα.
- Κεντρική μονάδα του πεδιομέτρου
- Οπτική ίνα που χρησιμοποιείται για την διασύνδεση του αισθητήρα με το την κεντρική μονάδα του πεδιομέτρου.

Η μονάδα ηλεκτρικού πεδίου είναι ένα ανεξάρτητο όργανο μέτρησης το οποίο αναλαμβάνει όλες τις διαδικασίες, μετρήσεις και αποθηκεύσεις δεδομένων. Η κεντρική μονάδα EFA-300 χρησιμοποιείται μόνο ως τηλεχειριστήριο σε αυτήν την διάταξη, ενώ επιπρόσθετα μπορεί να προβεί σε άλλες μετρήσεις εφόσον οι ρυθμίσεις έχουν γίνει.

Για την χρήση της μονάδας μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί. Ο αισθητήρας έχει άριστα ισοτροπικά χαρακτηριστικά και δεν χρειάζεται να ευθυγραμμιστεί ακριβώς. Επιπλέον, τα όργανα που χρησιμοποιούνται για μια ολοκληρωμένη μέτρηση πεδίου (κεντρική μονάδα, αισθητήρας, οπτική ίνα) πρέπει να είναι απολύτως στεγνά για την διεξαγωγή της μέτρησης. Επίσης οποιοδήποτε αντικείμενο βρίσκεται εντός του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να διαταράξει τις μετρήσεις.

Προτού ξεκινήσουμε τις μετρήσεις μας, στερεώνουμε επάνω στον τρίποδα τον αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου. Εν συνεχεία συνδέουμε την κεντρική μονάδα με τον αισθητήρα χρησιμοποιώντας την οπτική ίνα η οποία τοποθετείται στις κατάλληλες υποδοχές των οργάνων. Κατά την χρήση και συναρμολόγηση της διάταξης μέτρησης αποφεύγουμε το δίπλωμα ή το τέντωμα της οπτικής ίνας. Με το που ενεργοποιήσουμε την κεντρική μονάδα, αυτή ανιχνεύει τον αισθητήρα και ρυθμίζεται για μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου αυτόματα. Η κατάσταση του αισθητήρα και η ένδειξη του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζονται στην οθόνη της κεντρικής μονάδας. Ο ενσωματωμένος αισθητήρας μαγνητικού πεδίου ή ο εξωτερικός αισθητήρας που μπορεί να είναι συνδεδεμένα στην κεντρική μονάδα απενεργοποιούνται.





Σχήμα Α.3: Χρήση πεδιομέτρου και αισθητήρα EFA 300 για μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου

Α.1.3.Στοιχεία ελέγχου και εμφάνισης

Πληκτρολόγιο

Πλήκτρο	Λειτουργία
ON/OFF	<ul style="list-style-type: none"> Ενεργοποιεί την συσκευή με τις ρυθμίσεις που προϋπήρχαν την τελευταία φορά που η συσκευή απενεργοποιήθηκε Επανεκκινεί το όργανο σε περίπτωση σφάλματος έχοντας πατημένο το πλήκτρο ON για περίπου 3 δευτερόλεπτα
F1, F2, F3, F4	<p>Τα πλήκτρα F1, F2, F3 και F4 παρέχουν κατευθείαν πρόσβαση στις διάφορες λειτουργίες και μενού.</p> <ul style="list-style-type: none"> Η λειτουργία αλλάζει με βάση τον τρόπο λειτουργίας και το τρέχον μενού της συσκευής Οι τρέχουσες λειτουργίες απεικονίζονται στα πεδία της οθόνης ακριβώς επάνω από τα πλήκτρα αυτά
RUN	<p>Το πλήκτρο RUN</p> <ul style="list-style-type: none"> Ξεκινάει την διαδικασία της μέτρησης απευθείας Ξεκινάει και σταματάει την διαδικασία μέτρησης στις μεθόδους μέτρησης «Φάσματος FFT» και «Ανάλυσης Αρμονικών» Επιτρέπει την επιστροφή στο μενού μέτρησης
SAVE	<ul style="list-style-type: none"> Ενεργοποιεί στο μενού μνήμης (MEM) την διαδικασία αποθήκευσης Αποθηκεύει προσωπικά σύνολα δεδομένων, καμπύλες φάσματος και λίστες αποτελεσμάτων
^	<p>Το πλήκτρο ^ (πάνω) χρησιμοποιείται για την εισαγωγή αριθμητικών δεδομένων ή την επιλογή μενού.</p>
v	<p>Το πλήκτρο v (κάτω) χρησιμοποιείται επίσης για την εισαγωγή αριθμητικών δεδομένων ή την επιλογή μενού.</p>
>	<p>Το πλήκτρο > (επόμενο) χρησιμοποιείται για την μετακίνηση του κέρσορα από το παρών αριθμητικό πεδίο στο επόμενο.</p>
ESC	<p>Επιτρέπει την μεταπήδηση μας από το μενού στο οποίο βρισκόμαστε στο αμέσως προηγούμενο/υψηλότερα ιεραρχικά μενού του οργάνου.</p> <ul style="list-style-type: none"> Απορρίπτει μια αλλαγή σε μια αριθμητική καταχώρηση Απορρίπτει μια αλλαγή σε μια επιλογή
ENTER	<p>Επιβεβαιώνει κάποια καταχώρηση και μας βγάζει από το τρέχον μενού.</p> <ul style="list-style-type: none"> Επιβεβαιώνει μια επιλογή από μια λίστα, καταχωρήσεις και αλλαγές σε αριθμητικές τιμές Ανοίγει υποδεέστερα μενού Ανοίγει πεδία καταχώρησης για αριθμητικές τιμές Επιλέγει μια εκ των πιθανών καταστάσεων μιας λειτουργίας (function)
USER	<p>Το πλήκτρο αυτό μας μεταφέρει στο μενού του χρήστη</p> <ul style="list-style-type: none"> Αποθηκεύει έως και τέσσερις διαφορετικές ρυθμίσεις που έχει δημιουργήσει ο χρήστης Ανοίγει τις ρυθμίσεις του χρήστη (user setup) και τις ρυθμίσεις του εργοστασίου (factory default settings)
MEM	<p>Το πλήκτρο αυτό μας μεταφέρει στο μενού μνήμης</p> <ul style="list-style-type: none"> Επιλέγει : <ul style="list-style-type: none"> Ακολουθίες μετρήσεων ελεγχόμενες από χρονόμετρο (λαμβάνουν δηλαδή σε ένα χρονικό διάστημα που έχει καθορίσει ο χρήστης)


	<ul style="list-style-type: none"> - Τιμές μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα • Εμφανίζει τα αποθηκευμένα σύνολα δεδομένων • Διαγράφει προσωπικά σύνολα δεδομένων του χρήστη ή ολόκληρη την μνήμη δεδομένων του οργάνου.
CONF	<p>Το πλήκτρο αυτό μας μεταφέρει στο μενού διαμόρφωσης (Configuration menu)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Επιτρέπει: <ul style="list-style-type: none"> - Την επιλογή της λειτουργίας ηχητικής ειδοποίησης - Την επιλογή μονάδας μέτρησης - Την επιλογή της τρέχουσας τιμής τεκμηρίωσης - Την ρύθμιση της ημερομηνίας και της ώρας - Την προσαρμογή της λίστας συχνοτήτων - Την επιλογή προτύπων - Την επιλογή αξόνων μέτρησης - Την ανάγνωση οδηγιών συντήρησης • Κρατώντας πατημένο το πλήκτρο μέχρι να ακουστεί ένας διπλός ηχητικός παλμός, μπορούμε να επανατοποθετήσουμε το όργανο στις αρχικές του ρυθμίσεις και να διαγράψουμε όλα τα δεδομένα των μετρήσεων.
MODE	<p>Το πλήκτρο αυτό μας μεταφέρει στο μενού μεθόδων (mode menu)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Επιλέγει μεθόδους λειτουργίας
	Ανάβει και σβήνει το φως της οθόνης του οργάνου.
	Ενεργοποιεί την λειτουργία αντίθεσης (contrast function) του οργάνου.

Οθόνη

Το πεδιομετρο της NARDA έχει οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) και το περιεχόμενο και η διαμόρφωσή της διαφέρει πολύ ανάλογα με την τρέχουσα μέθοδο λειτουργίας του οργάνου.

Φωτισμός Οθόνης

Η οθόνη του πεδιομέτρου περιλαμβάνει και φωτισμό ο οποίος διευκολύνει τον χρήστη στην διεξαγωγή μετρήσεων. Ο φωτισμός όμως αυτός χρειάζεται αρκετή ενέργεια για να λειτουργήσει γι' αυτό και πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι απαραίτητος.

Ο φωτισμός της οθόνης ανάβει πατώντας το πλήκτρο  και σβήνει αυτόματα μετά από ένα λεπτό ή πατώντας ξανά αυτό το πλήκτρο.

Αντίθεση Οθόνης

Για να ρυθμίσουμε την αντίθεση στην οθόνη του οργάνου που χρησιμοποιούμε πατούμε το πλήκτρο αντίθεσης (το σχήμα του οποίου παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα). Με τα πλήκτρα κατεύθυνσης (πάνω/κάτω) ρυθμίζουμε την αντίθεση στο σημείο που εμείς θέλουμε. Πατώντας ένα οποιοδήποτε άλλο πλήκτρο του οργάνου εκτός από τα πλήκτρα κατεύθυνσης το μενού αντίθεσης κλείνει και επιστρέφουμε στο μενού που βρισκόμασταν πριν [27].

Βασικές μονάδες ένδειξης

Ένδειξη	Λειτουργία
Ο ON	Όταν η φωτεινή ένδειξη ON είναι πράσινη τότε το όργανο είναι έτοιμο για χρήση.
Ο CHARGE	Όταν η φωτεινή ένδειξη CHARGE είναι κίτρινη τότε η μπαταρία του οργάνου φορτίζεται. <ul style="list-style-type: none"> • Συνεχής ένδειξη κατά την διάρκεια της φόρτισης • Αναβοσβήνει αργά όταν υπάρχει κάποιο σφάλμα κατά την διάρκεια της φόρτισης • Αναβοσβήνει γρήγορα όταν η μπαταρία έχει τεθεί βραδεία φόρτιση
Ο ALARM	Η φωτεινή ένδειξη ALARM είναι κόκκινη: <ul style="list-style-type: none"> • Κατά την διάρκεια ελέγχου • Εάν η τιμή κατωφλίου για την ενεργοποίηση της ειδοποίησης ξεπεραστεί
	Η ενσωματωμένη στο πεδίομετρο ηχητική ειδοποίηση (BEEP ALARM) μεταδίδει: <ul style="list-style-type: none"> • Συνεχή ηχητικό παλμό, εάν η τιμή κατωφλίου για την ενεργοποίηση της ειδοποίησης ξεπεραστεί • Συνεχή ηχητικό παλμό, εάν η τιμή της μέτρησης που λάβαμε είναι εκτός πεδίου τιμών της μέτρησης • Δύο ηχητικούς παλμούς μετά από έναν επιτυχή έλεγχο • Δύο ή τρεις ηχητικούς παλμούς μετά από μια εμφάνιση σφάλματος

A.2.PMM 8053A [2]

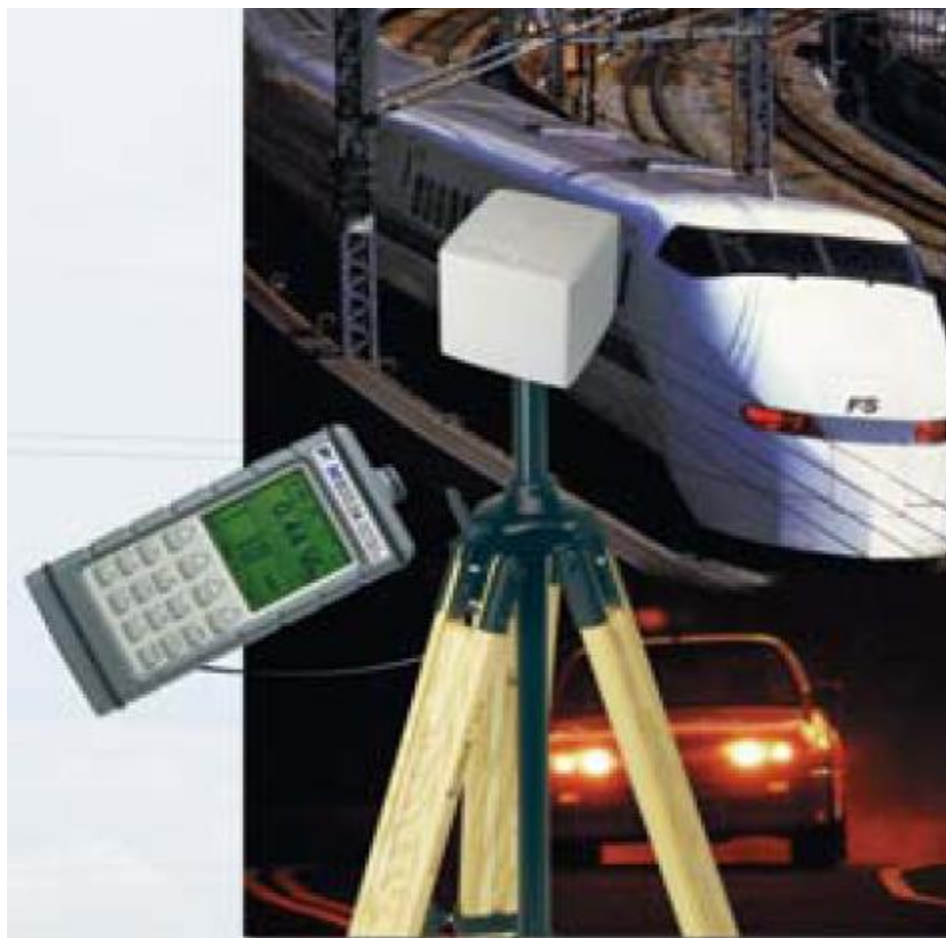
A.2.1.Χαρακτηριστικά

Το δεύτερο διακριβωμένο πεδίομετρο που έχει χρησιμοποιηθεί για την διεξαγωγή μετρήσεων γύρω από το καθοδικό αλεξικέραυνο που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι το PMM 8053A. Όπως και το NARDA έτσι και το PMM 8053A διαθέτει ένα αναλυτή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, τον PMM EHB 50B (Σχήμα Α9) που μπορεί να μετρήσει πεδία συχνοτήτων από 5Hz έως 100 kHz.

Το PMM 8053A, το οποίο φαίνεται στο σχήμα Α.8, χρησιμοποιείται για την μέτρηση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων διαφόρων συχνοτήτων σε εφαρμογές όπως είναι τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι βιομηχανίες, οι σιδηρόδρομοι, οι σταθμοί τηλεπικοινωνιών, οι υποσταθμοί τάσης, τα νοσοκομεία κτλ (Σχήματα Α.4-Α7).



Σχήμα Α.4: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε γραμμές μεταφοράς



Σχήμα Α.5: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε σιδηρόδρομους



Σχήμα Α.6: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε υποσταθμούς τάσης



Σχήμα Α.7: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα



Σχήμα Α.8: Το πεδιοόμετρο PMM 8053A



Σχήμα Α.9: Ο αισθητήρας PMM EHP 50B

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου και του αισθητήρα αντίστοιχα.

Τεχνικά χαρακτηριστικά πεδιομέτρου PMM 8053A

Εύρος συχνότητας	5Hz-40GHz
Μονάδες μέτρησης	V/m, kV/m, $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, mW/cm^2 , W/m^2 , A/m, nT, μT , 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 72x72mm, 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	108x240x50mm
Βάρος	1,07kg

Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα (probe) 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
Ευσαιθησία	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	

A.2.2.Εγκατάσταση του EHP 50B στο πεδίομετρο

Ο αισθητήρας EHP-50B συνδέεται στο πεδίομετρο 8053A με τη βοήθεια οπτικής ίνας, γεγονός το οποίο επιτρέπει το χειρισμό του πεδιομέτρου εκτός του πεδίου δοκιμών. Συγκεκριμένα, για την εγκατάσταση του probe EHP-50B, συνδέουμε α)την οπτική ίνα η οποία παρέχεται με το probe, στην υποδοχή του αισθητήρα με την επιγραφή OPTIC LINK, φροντίζοντας το βύσμα να ταιριάζει στην υποδοχή, β)και το άλλο άκρο της οπτικής ίνας στην υποδοχή με την επιγραφή OPTIC LINK του PMM 8053A.

Ο συνδυασμός PMM EHP-50B μπορεί τώρα να ενεργοποιηθεί πατώντας το κόκκινο κουμπί POWER για ένα δευτερόλεπτο. Τότε το 8053A και το EHP-50B θα ξεκινήσουν να επικοινωνούν. Το EHP-50B θα αρχίσει να φορτώνει όλα τα εσωτερικά δεδομένα στο 8053A και στην οθόνη είναι πιθανό να εμφανιστεί ο τύπος του probe (EHP-50B) που συνδέθηκε και ο εσωτερικός τύπος του λογισμικού του.

A.2.3.Ενεργοποίηση του EHP-50B στο 8053A

Μετά τη σύνδεση της οπτικής ίνας είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση του αισθητήρα EHP-50B, ώστε να αναγνωριστεί ο τύπος του από το πεδιόμετρο. Για να ενεργοποιήσουμε τη σύνδεση, χρησιμοποιούμε το PMM 8053A ως εξής:

- Πιέζουμε το κουμπί SET για να ενεργοποιηθεί ένα παράθυρο από το οποίο οι κύριες παράμετροι και ρυθμίσεις μπορούν να επιλεγούν.
- Επιλέγουμε την εντολή SERIAL.
- Επιλέγουμε OPTICAL.

Με βοήθεια όλων αυτών των ρυθμίσεων γίνεται δυνατή μέσω της οπτικής ίνας, η σύνδεση και η αναγνώριση του EHP-50B από το 8053A.



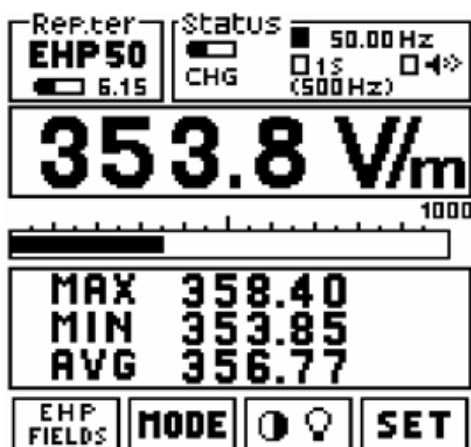
Σχήμα Α.10: Ένδειξη αναγνώρισης αισθητήρα από το πεδιόμετρο

Αφού γίνει η απαραίτητη σύνδεση, ο τύπος του probe, EHP-50B, θα εμφανιστεί στην οθόνη του μετρητή, στο πάνω αριστερό πλαίσιο με την επιγραφή Rep.ter.



A.2.4.Λειτουργία του πεδιομέτρου 8053A

Κατά τη λειτουργία του πεδιομέτρου μία τυπική οθόνη είναι αυτή του Σχήματος Α.11



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

- Στην πρώτη γραμμή του σχήματος Α.11 στο αριστερό πλαίσιο απεικονίζεται, όπως είδαμε, ο τύπος του probe που συνδέθηκε στο πεδιόμετρο και η φόρτιση της μπαταρίας.



- Στην πρώτη γραμμή του σχήματος Α.11 στο δεξί πλαίσιο φαίνεται το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του PMM 8053A και μια ένδειξη σήματος κινδύνου. Επίσης, απεικονίζεται η συχνότητα στην οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις καθώς και η συχνότητα καταγραφής των μετρήσεων από το πεδιόμετρο.



- Στη δεύτερη γραμμή του σχήματος Α.11 αναγράφεται η ψηφιακή τιμή της ένδειξης του οργάνου σύμφωνα με την ισχύουσα μονάδα μέτρησης. Αυτή η ένδειξη υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

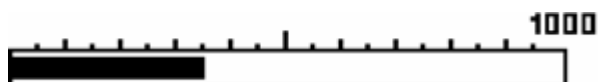
$$V / \text{μολικό} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} .$$

Επίσης μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε τη μονάδα μέτρησης για το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο με δυο διαφορετικές κλίμακας τιμές μέσω ενός κομβίου που βρίσκεται στην πέμπτη γραμμή του σχήματος Α.11:

**EHP
FIELDS**

Επομένως, για το ηλεκτρικό πεδίο υπάρχουν οι επιλογές: α)1k=1000V/m και β)100k=100kV/m ενώ για το μαγνητικό οι επιλογές : α)100μ=100μT και β)10m=10mT.

- Στην τρίτη γραμμή του σχήματος Α.11 αναγράφεται η αναλογική τιμή της ένδειξης του οργάνου η οποία μπορεί να είναι γραμμική ή λογαριθμική.



- Στην τέταρτη γραμμή και με την ενεργοποίηση του κουμπιού MODE (βρίσκεται στην πέμπτη γραμμή), το πεδιομέτρο έχει τις εξής δυνατότητες απεικόνισης των αποτελεσμάτων:



- ABS %: παρουσιάζονται οι τρεις ανυσματικές συνιστώσες του μετρούμενου πεδίου σε απόλυτες και ποσοστιαίες τιμές.

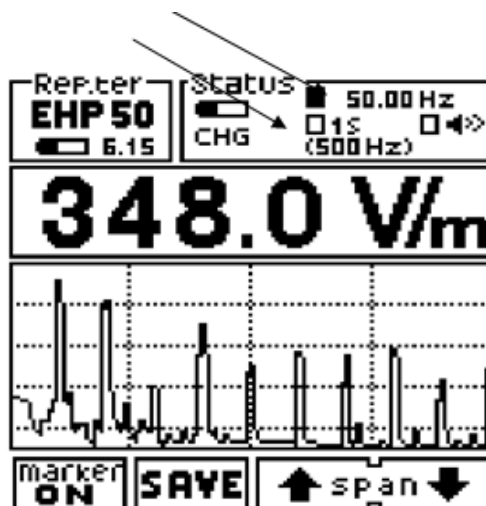
X	274.64	ABS	X	64.0	%
Y	115.75		Y	11.3	
Z	177.97		Z	24.6	

- 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). Παρακάτω δίνονται οι αναλυτικοί τύποι υπολογισμού για τους αριθμητικούς και τετραγωνικούς μέσους όρους.

$$AVG = \frac{1}{T} \int_0^T [E(t)] dt$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [E(t)]^2 dt}$$

- SPECT MODE: Σε αυτή τη λειτουργία, το EHP-50B παρουσιάζει μια FFT (γρήγορος μετασχηματισμός Fourier) ανάλυση μεταξύ των επιλεγμένων SPAN και εμφανίζει τα αποτελέσματα στην οθόνη του 8053A. Η υψηλότερη συχνότητα σήματος παρουσιάζεται στην πρώτη σειρά ενώ το set value του SPAN παρουσιάζεται στις αγκύλες του πλαισίου STATUS.



- DATA LOGGER: ο χρήστης αποθηκεύει τα δεδομένα των μετρήσεων και τα σώζει σε ένα αρχείο. Όλα τα αρχεία είναι αριθμημένα προοδευτικά και περιλαμβάνουν α) ημερομηνία και ώρα που ξεκίνησαν οι μετρήσεις β) τη μέση τιμή των μετρήσεων γ) την τιμή του κάθε μεμονωμένου δεδομένου δ) τα σχόλια του χρήστη.

Με βάση το σχήμα Α.4, στην πέμπτη γραμμή εκτός των επιλογών EHP FIELDS και MODE έχουμε τα εξής :



Το τρίτο κατά σειρά κουμπί μας δίνει τη δυνατότητα να προσαρμόσουμε το φωτισμό της οθόνης με βάση το περιβάλλον φωτισμό έτσι ώστε να βλέπουμε καλύτερα την οθόνη.



Το τέταρτο κατά σειρά κουμπί επιτρέπει στο χρήστη να επέμβει και να επιλέξει βασικές παραμέτρους και ρυθμίσεις για τις μετρήσεις. Πατώντας λοιπόν το SET εμφανίζεται στην οθόνη ο παρακάτω πίνακας:

Alarm	O F F
RMS	Last 32 SMPs
Freq	Highest
Span	1 kHz
Serial	Optical
Logger	1s sample
Log.End	Manual
Bar	Logarithmic
AutoOFF	Disabled
Time	15.54.03
Date	24.09.99

Below the table are four navigation buttons: an up arrow, a down arrow, a left-right arrow, and a blank button.

- Alarm: Με αυτή τη λειτουργία, όταν το μετρούμενο πεδίο υπερβεί την τάση κατωφλίου, ενεργοποιούνται κάποιες διαδικασίες, οι οποίες μας ειδοποιούν για αυτή την υπέρβαση.
- Μπορούμε να επιλέξουμε RMS ή AVG πατώντας τα βελάκια στο κάτω μέρος της σελίδας. Επίσης, μπορούμε εμείς να θέσουμε το χρονικό εύρος υπολογισμού των δυο παραπάνω μεγεθών.
- Freq: σε αυτή τη λειτουργία υπάρχουν δυο επιλογές, wideband και highest.
- Span: Δυνατότητα επιλογής φάσματος
- Serial: Υπάρχουν δυο επιλογές ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του πεδιομέτρου με το probe. Αν η σύνδεση είναι καλωδιακή τότε επιλέγουμε 'wired', ενώ αν η σύνδεση έγινε μέσω οπτικής ίνας επιλέγουμε 'optical'.
- Logger: Καθορισμός δειγματοληψίας για τη λειτουργία απόκτησης και αποθήκευσης μετρήσεων πεδίου για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Log.End: αυτή η λειτουργία καθορίζει πόσος χρόνος απαιτείται για την απόκτηση των στοιχείων.
- Bar: σε αυτό το πεδίο επιλέγουμε γραμμική ή λογαριθμική κλίμακα στην αναλογική μπάρα.
- AutoOFF: το πεδιομέτρο μπορεί να σβήσει χειροκίνητα ή αυτόματα, αφού αυτό ήταν ενεργό για μια καθορισμένη χρονική διάρκεια, χωρίς να χρειαστεί να πατήσουμε κάποιο κουμπί. Αυτή η λειτουργία είναι ιδιαίτερα σημαντική στην μείωση κατανάλωσης μπαταρίας.
- Time: σε αυτό το πεδίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ώρα.
- Date: σε αυτό το πεδίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ημερομηνία.

Βιβλιογραφία

[1] Narda EFA-200/EFA-300 users manual

[2] PMM 8053A users manual

Παράρτημα Β

Το υπολογιστικό πακέτο PC OPERA

Β.1.Εισαγωγή

Το PC OPERA είναι ένα από τα σπουδαιότερα υπολογιστικά πακέτα στον κόσμο για την ανάλυση στατικών και μεταβλητών στον χρόνο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Είναι διαθέσιμο εδώ και περίπου δύο δεκαετίες και ενσωματώνει άψογα την επιστήμη του ηλεκτρομαγνητισμού. Το PC OPERA έχει κατασκευαστεί για να παρέχει μεγάλη ακρίβεια στην προσομοίωση, και επίσης αποδοτική εκτέλεση, επιτρέποντας έτσι στα σύνθετα προβλήματα να επιλυθούν γρήγορα σε έναν προσωπικό υπολογιστή γραφείου.

Η πλήρης αλυσίδα εργαλείων του PC OPERA επιταχύνει την ηλεκτρομαγνητική σχεδίαση, ενώ τα μοναδικά προγράμματα επίλυσης παρέχουν την ίδια στιγμή μέγιστη ακρίβεια στα αποτελέσματα δημιουργώντας έτσι ισχυρές, πρωτότυπες, εικονικές εγκαταστάσεις για να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση.

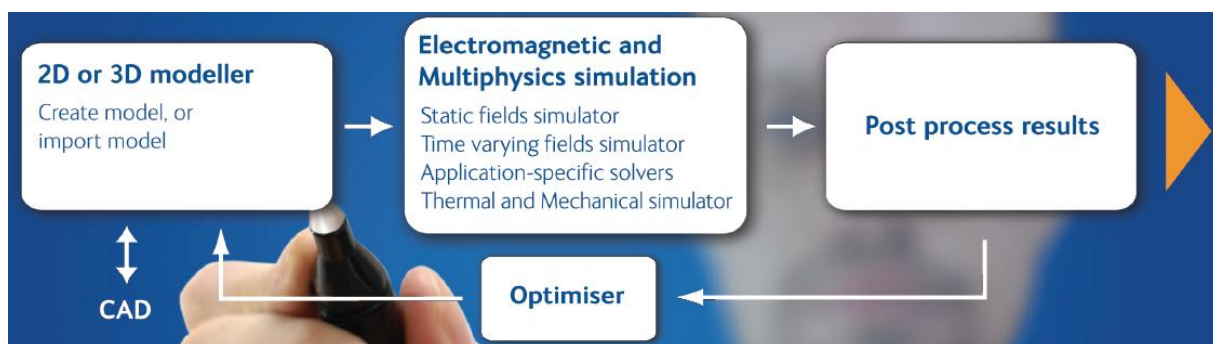
Β.2.Επισκόπηση

Το PC OPERA προσφέρει μια πλήρη αλυσίδα εργαλείων για την δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών σχεδίων, την προσομοίωση των και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Δύναται να εγκατασταθεί τόσο σε πλατφόρμες των 32 bits όσο και των 64 bits. Αποτελείται από έναν πανίσχυρο σχεδιαστή (modeler) για δισδιάστατη (2D) και τρισδιάστατη (3D) σχεδίαση μοντέλων (είναι εφικτή και η προσθήκη μοντέλων από προγράμματα CAD) καθώς και με μια επιλογή από εργαλεία προσομοίωσης εξειδικευμένων πεπερασμένων στοιχείων:

- Στατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία (TOSCA tool)
- Χαμηλής συχνότητας, μεταβλητά στον χρόνο ηλεκτρομαγνητικά πεδία
- Υψηλής συχνότητας, μεταβλητά στον χρόνο ηλεκτρομαγνητικά πεδία
- Θερμική και δυναμική ανάλυση
- Σχεδιασμός γραμμικών και περιστρεφόμενων μηχανών
- Υπεραγωγίμος μαγνήτης σβέσης
- Δέσμες σωματιδίων συμπεριλαμβανομένων χωρικών φαινομένων φόρτισης

- Μαγνήτιση/Απομαγνήτιση μόνιμων μαγνητών
- Μαγνητική υστέρηση ελαφρώς μαγνητικών υλικών
- Ανάλυση ηλεκτρικών πεδίων σε αγωγή-διηλεκτρικά μέσα

Μετά από την προσομοίωση, ένας μετ-επεξεργαστής (post-processor) επιτρέπει στους χρήστες να δουν και να αναλύσουν την προσομοίωση, και να εκτελέσουν κάποιους πρόσθετους υπολογισμούς. Η μετέπειτα βελτίωση των σχεδίων είναι εύκολη, καθώς οι παράμετροι του μοντέλου μπορούν να αλλάξουν για να διερευνηθούν διαφορετικές περιπτώσεις. Τα σχέδια μπορούν επίσης να βελτιωθούν αυτόματα με την βοήθεια του Optimiser του PC OPERA. Το PC OPERA είναι διαθέσιμο σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη έκδοση για την οικονομία και την ταχύτητα του σχεδίου.



Σχήμα Β.1: Ένα απλό μπλοκ διάγραμμα της λειτουργίας του PC OPERA

B.3.Σχεδιασμός μοντέλων

Μέρη ή ολόκληρα μοντέλα συστημάτων μπορούν να εισαχθούν μέσω προγραμμάτων σχεδίασης CAD ή να σχεδιαστούν με την χρήση του modeler στο PC OPERA. Μερικές από τις δυνατότητες του PC OPERA είναι:

- Προηγμένες εγκαταστάσεις σχεδιασμού μοντέλων σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη μορφή
- Εισαγωγή σχεδίων από προγράμματα σχεδίασης CAD (πολλές επιλογές)
- Δισδιάστατη σχεδίαση με την χρήση του ποντικιού (για ακόμα γρηγορότερη σχεδίαση)
- Μη γραμμικές, ανισοτροπικές και πολύ-φυσικές ιδιότητες υλικών
- Δημιουργία ΒΗ καμπυλών με βιβλιοθήκη υλικών
- Εξωτερικό περιβάλλον του κυκλώματος με την δυνατότητα καθορισμού των λεπτομερειών των μηχανημάτων
- Αγωγοί σε τρισδιάστατη μορφή για επιπλέον ακρίβεια

- Αυτόματη δημιουργία πλέγματος για την υλοποίηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

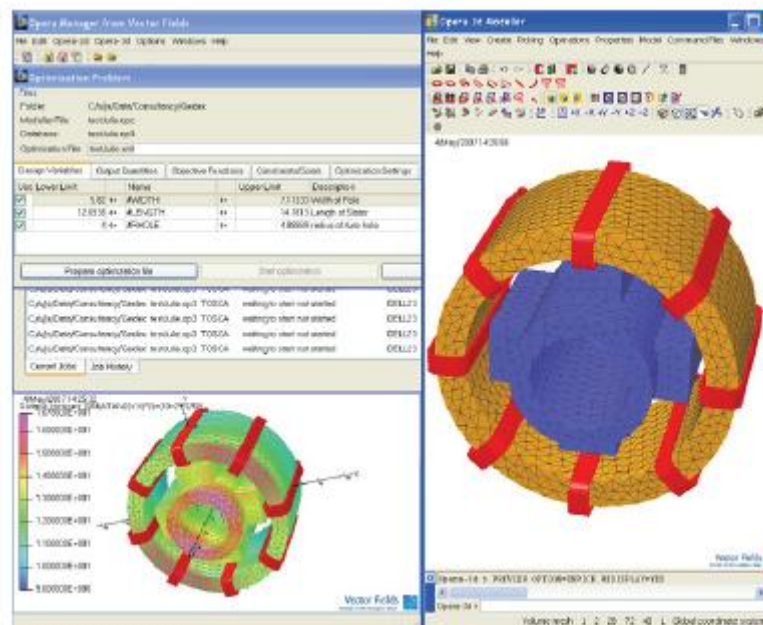
B.3.1. Παραμετροποίηση μοντέλου

Ένα βασικό πλεονέκτημα του PC OPERA είναι η δυνατότητα να μετατρέπει οποιαδήποτε διάσταση ενός μοντέλου σε μια παράμετρο. Αυτό επιτρέπει την διεξαγωγή διαφόρων ερευνών που εκτελούνται, για να βελτιστοποιήσουν ένα σχέδιο απλά με την μεταβολή των εν λόγω τιμών. Ένα μοντέλο στο PC OPERA περιέχει ένα πλήρες ιστορικό των εντολών που το δημιούργησαν. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να τροποποιήσουν το αρχείο και να το επανεκτελέσουν. Με άλλα λόγια δημιουργείται ένα πρότυπο μοντέλο που μπορεί να υποστεί διάφορες τροποποιήσεις με ευκολία, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στον χρήστη για δημιουργία παραπλήσιων μοντέλων

B.3.2. Επιλυτής σφαλμάτων/προβλημάτων

Το PC OPERA μπορεί να αγοραστεί σε δισδιάστατη ή τρισδιάστατη έκδοση. Και στις δύο περιπτώσεις το πρόγραμμα θα αναπαράγει αυτόματα το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, με την επιλογή προσαρμογής του πλέγματος για την επίτευξη της απαιτούμενης ακρίβειας της λύσης στην δισδιάστατη περίπτωση (2D) και την αναφορά του αναμενόμενου σφάλματος στην τρισδιάστατη περίπτωση (3D). Όταν ο σχεδιασμός του μοντέλου τελειώσει το πρόγραμμα είναι έτοιμο να προσομοιώσει διάφορα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Το PC OPERA προσφέρει μια επιλογή από επιλυτές σφαλμάτων/προβλημάτων (solvers) για να ταιριάζει το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών και φυσικών εφαρμογών. Οι επιλυτές σφαλμάτων/προβλημάτων που προσφέρονται από το PC OPERA παρατίθενται παρακάτω:

- Επιλυτής σφαλμάτων/προβλημάτων στατικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων
- Επιλυτής σφαλμάτων/προβλημάτων χαμηλής συχνότητας, μεταβλητών στον χρόνο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων
- Επιλυτής σφαλμάτων/προβλημάτων υψηλής συχνότητας, μεταβλητών στον χρόνο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων
- Επιλυτής σφαλμάτων/προβλημάτων θερμικής και δυναμικής ανάλυσης



Σχήμα Β.2: Παράδειγμα σχεδιασμού, προσομοίωσης και ανάλυσης ενός μοντέλου στο PC OPERA 3D

Β.4.Ολοκληρωμένες σχεδιαστικές λύσεις συγκεκριμένων εφαρμογών

Το μοναδικό λογισμικό του PC OPERA προσφέρει έτοιμες για χρήση, σχεδιαστικές λύσεις συγκεκριμένων προβλημάτων τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

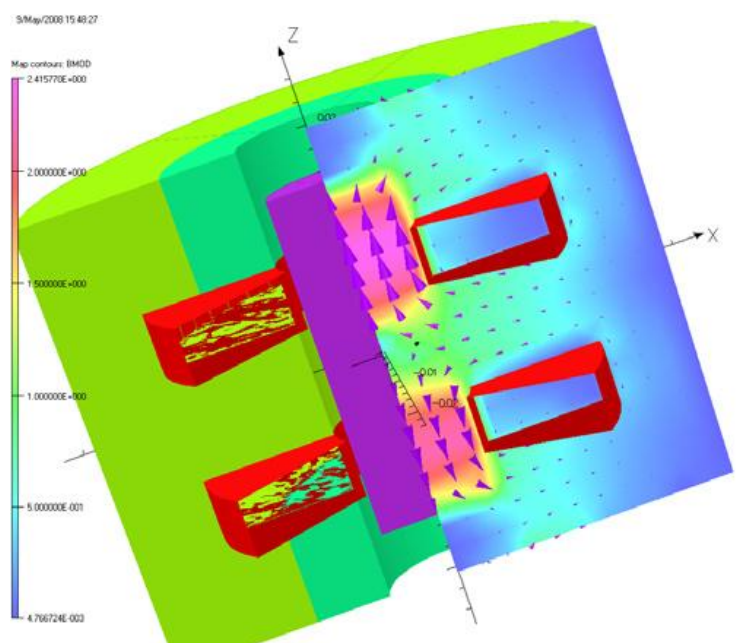
- *Κινητήρες:* Μια πολύ αξιόπιστη λύση για την ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της γραμμικής ή περιστροφικής κίνησης. Περιλαμβάνει βοήθεια για σχεδίαση καμπυλών και γρήγορη προσομοίωση ενός μέρους μιας συμμετρικής διάταξης.
- *Υπεραγωγίμες διατάξεις:* Εφαρμογή σε υπεραγωγίμους μαγνήτες και πηνία (MRI, NMR) η οποία περιλαμβάνει την θερμική συμπεριφορά της διάταξης συνδυάζοντάς την με τα παραγόμενα δινορεύματα.
- *Φαινόμενα χωρικών φορτίων*
- *Μόνιμοι μαγνήτες:* Το PC OPERA προσομοιώνει με ακρίβεια την διαδικασία μαγνήτισης/απομαγνήτισης συμπεριλαμβάνοντας τα θερμοκρασιακά φαινόμενα που εμφανίζονται και επιτρέπει στα μοντέλα μαγνητών να προσομοιώνονται περαιτέρω σε διάφορα λειτουργικά περιβάλλοντα.
- *Διηλεκτρικά υλικά:* Προσθήκες για ανάλυση στατικών ή μεταβλητών στον χρόνο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων για διηλεκτρικά υλικά με χαμηλή αγωγιμότητα όπως αυτά

των μονωτήρων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

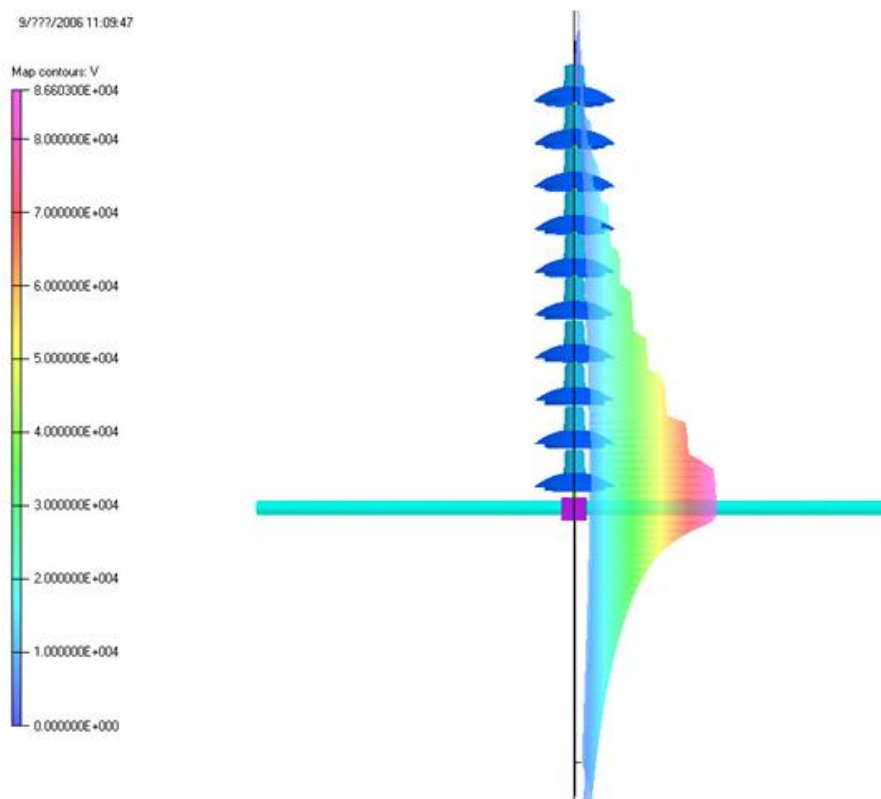
- *Μοντέλα μαγνητικής υστέρησης:* Χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των απωλειών και των αλλαγών στις οποίες υπόκεινται τα πεδία λόγω της μαγνητικής υστέρησης ενός υλικού.

Το PC OPERA είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό που δίνει την ευκαιρία στον χρήστη του να προσομοιώσει διάφορες εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είτε για ερευνητικούς είτε για κατασκευαστικούς σκοπούς. Τα πεδία εφαρμογών με των οποίων την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση ασχολείται το PC OPERA παρατίθενται πιο κάτω:

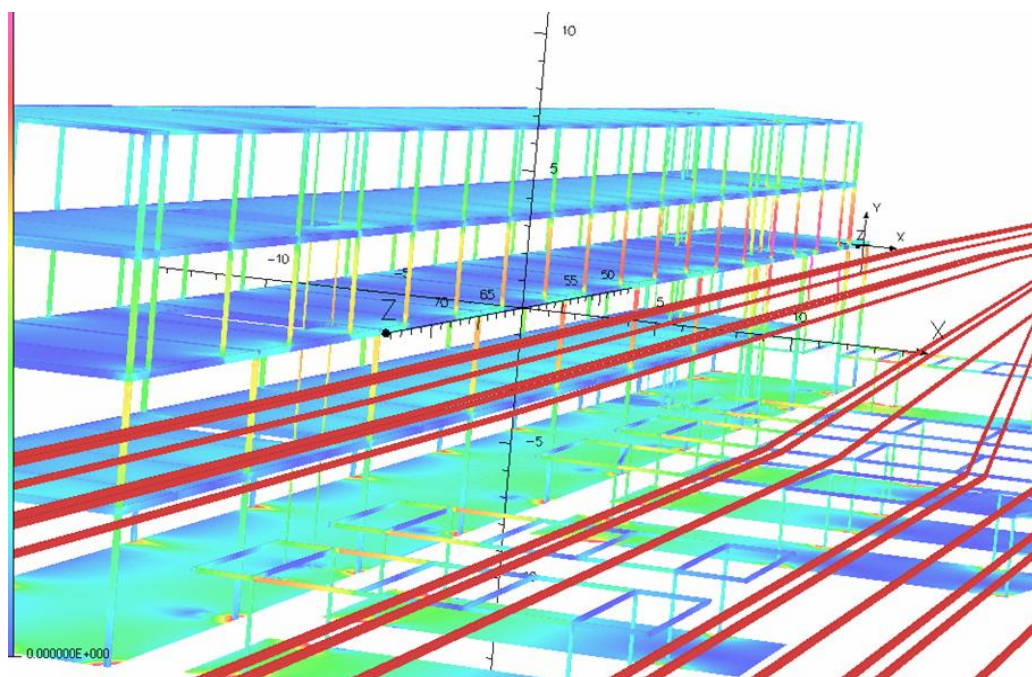
- *Ηλεκτρομηχανολογικές συσκευές και συσκευές μετατροπής ενέργειας:* Γραμμικοί κινητήρες, ανιχνευτές θέσης, ενεργοποιητές κίνησης, περιστροφικοί κινητήρες, γεννήτριες
- *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας:* αγωγοί μεταφοράς, μονωτήρες στήριξης ή ανάρτησης, καθοδικά αλεξικέραυνα, μετασχηματιστές κτλ.
- *Μεταφορές/Συγκοινωνίες:* σιδηρόδρομοι, ηλεκτρομαγνητικό φρενάρισμα κτλ (εφαρμογές που έχουν σχέση με το πεδίο της Ηλεκτρομαγνητικής Πρόωσης και Ανάρτησης).
- *Νοσοκομειακές εφαρμογές:* Ακτινολογικά μηχανήματα, μαγνητικοί τομογράφοι, ηλεκτρονική μικροσκοπία/λιθογραφία, υπεραγώγιμα πηνία κτλ.



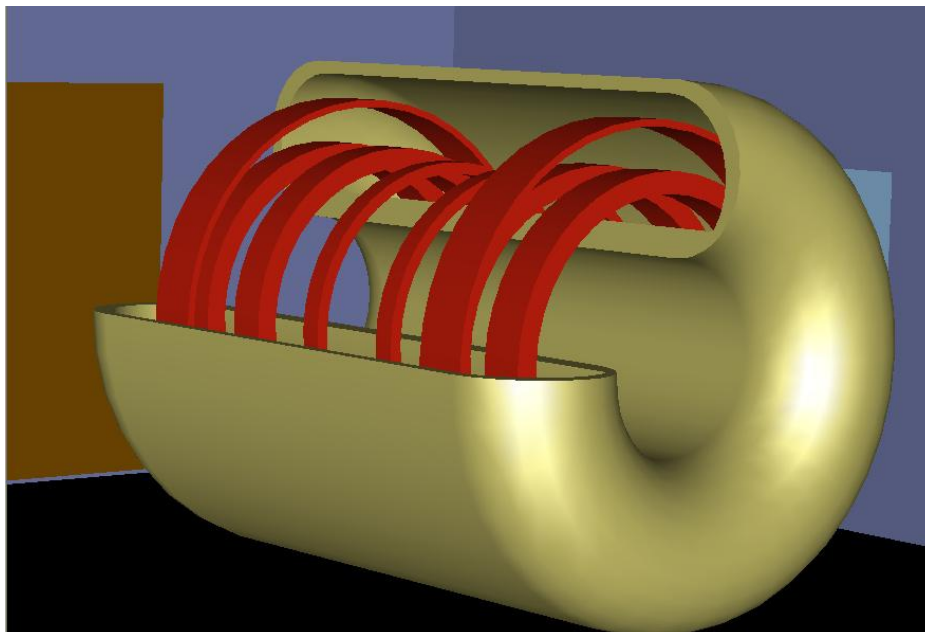
Σχήμα Β.3: Η ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ενός γραμμικού κινητήρα στο PC OPERA 3D



Σχήμα Β.4: Η κατανομή της τάσης σε έναν μονωτήρα στήριξης όπως αυτή προέκυψε μετά από ανάλυση στο PC OPERA 2D



Σχήμα Β.5: Μια τρισδιάστατη άποψη της κατανομής του μαγνητικού πεδίου σε έναν σιδηροδρομικό σταθμό



Σχήμα Β.6: Το τρισδιάστατο μοντέλο της μονάδας GANTRY ενός μαγνητικού τομογράφου στο PC OPERA

B.4.1. Μετ-επεξεργασία αποτελεσμάτων (Post-Processing)

Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση, το PC OPERA περιλαμβάνει έναν μετ-επεξεργαστή που απλοποιεί την ανάλυση των αποτελεσμάτων, και ενημερώνει τον χρήστη για την ύπαρξη ή μη βελτίωσης του σχεδιασμού. Πέρα από την εμφάνιση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, την θερμοκρασία και την κατανομή του δυναμικού, υπάρχουν επιπλέον λειτουργίες για την απεικόνιση και άλλων μεγεθών (δυνάμεων, απωλειών ενέργειας, αποθήκευσης ενέργειας), καθώς και για τον υπολογισμό και την εμφάνιση των τροχιών των σωματιδίων μέσω των οποίων υπολογίζονται τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.

B.4.2.Βελτιστοποίηση των μοντέλων

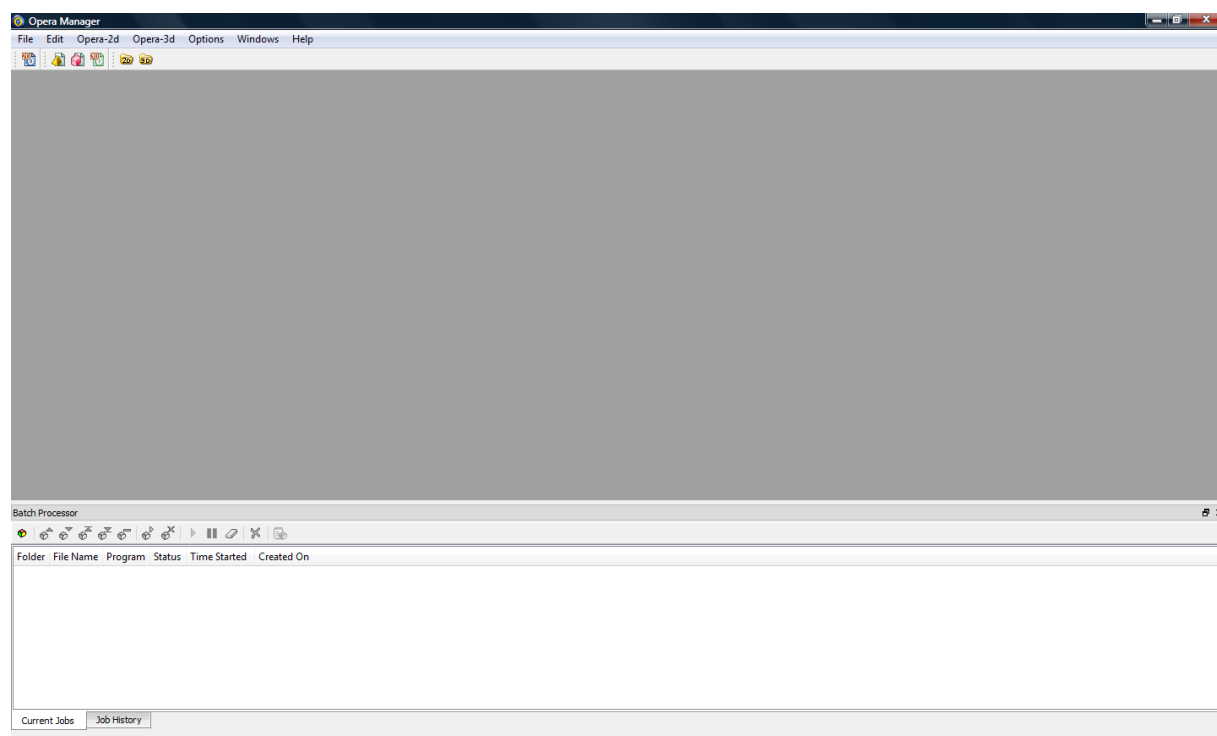
Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους και να προσομοιώσει το μοντέλο του και να δει τα προκύπτοντα αποτελέσματα. Αυτή η δράση μπορεί να εκτελεσθεί και αυτόματα χρησιμοποιώντας την προαιρετική οντότητα που προσφέρεται από το PC OPERA τον Optimiser στον οποίο είναι ενσωματωμένοι διάφοροι αλγόριθμοι που επιλέγονται αυτόματα ανάλογα με το πρόβλημα.

B.4.3. Δημιουργία βιβλιοθήκης μοντέλων από τον χρήστη

Το PC OPERA επιτρέπει την δημιουργία μακροεντολών οργάνωσης για να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία σχεδιασμού. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει, να τρέξει και να αναλύσει τα σχέδιά του με καθορισμένους από αυτόν διαλόγους και επιλογές για την εισαγωγή των διαστάσεων, ιδιότητες των υλικών και επιλογές προσομοίωσης. Τα στοιχεία των μοντέλων μπορούν να σωθούν για να διαμορφώσουν μια βιβλιοθήκη σχεδίων. Εάν οι παράμετροι των σχεδίων αυτών αποθηκεύονται στις βιβλιοθήκες με αυτά, οι βασικές διαστάσεις μπορούν να τεθούν πρακτικά (ως παράμετροι/μεταβλητές) καθώς φορτώνονται, δίνοντας έτσι στον χρήστη τα μέσα να παράγει τα σχέδια του γρήγορα.

B.5. PC OPERA 2D

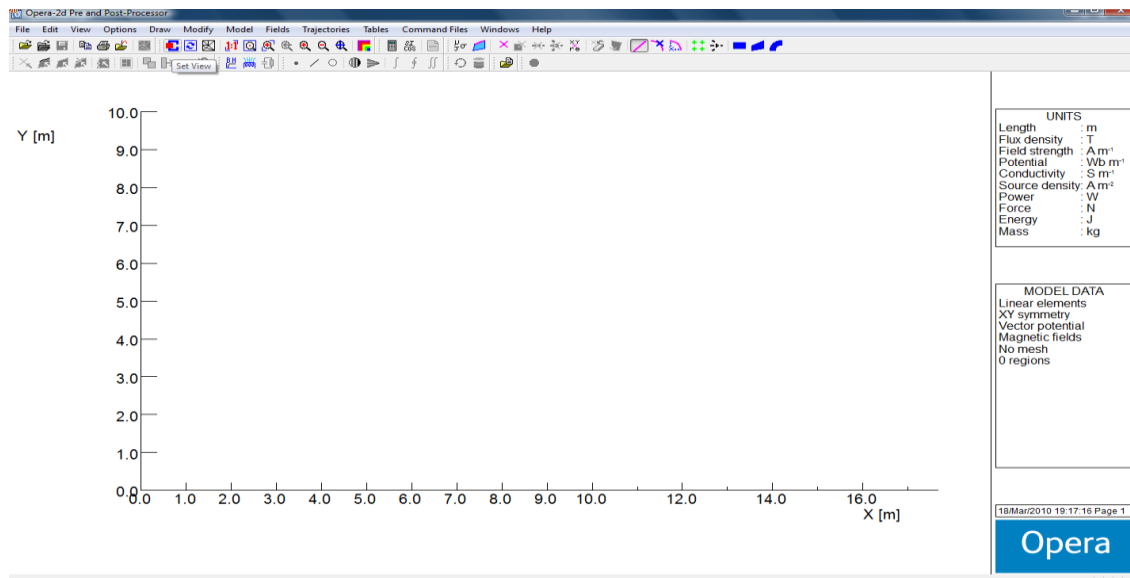
Η περιγραφή της λειτουργίας του PC OPERA 2D θα γίνει με τον σχεδιασμό του καθοδικού αλεξικέραυνου που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Καταρχήν, αφού εισάγουμε την άδεια του προγράμματος για την δισδιάστατη σχεδίαση, ανοίγουμε το Opera Manager και στην οθόνη μας εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο.



Σχήμα Β.7: Opera Manager

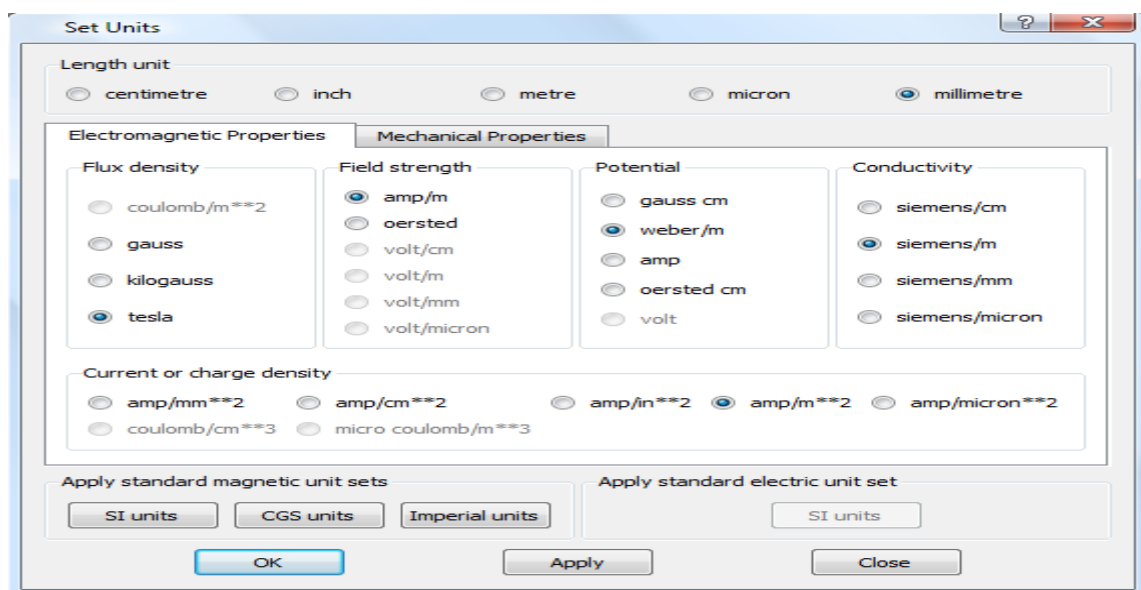
Στην συνέχεια, επιλέγοντας με το ποντίκι, το εικονίδιο για το δισδιάστατο σχέδιο που βρίσκεται στην μπάρα εργαλείων ή αντίστοιχα στην γραμμή εντολών τις επιλογές Opera

2d/Pre and Post-Processor, ανοίγουμε το παράθυρο της δισδιάστατης σχεδίασης το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



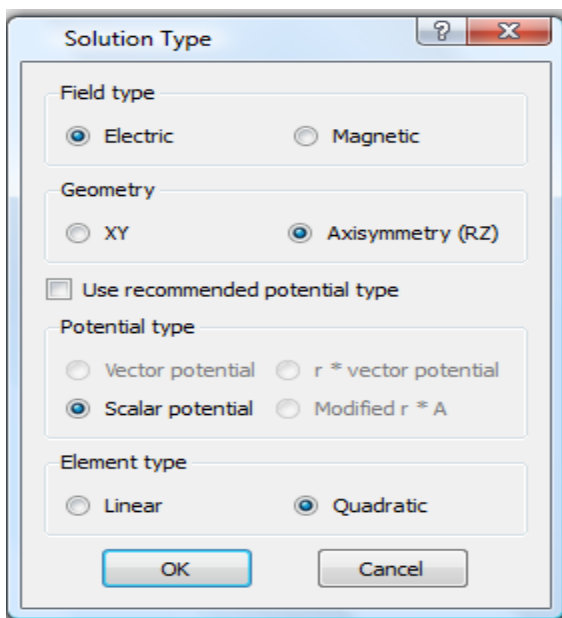
Σχήμα Β.8: Opera 2d Pre and Post-Processor

Ανοίγοντας το παράθυρο αυτό είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε την σχεδίαση μας χρησιμοποιώντας όλα τα εργαλεία σχεδίασης που μας προσφέρει το λογισμικό πακέτο του PC OPERA. Προτού όμως ξεκινήσουμε την σχεδίαση καθορίζουμε τις μονάδες μέτρησης με τις οποίες θα εργαστούμε. Επιλέγοντας το εικονίδιο της εντολής Set Units ή μέσω της γραμμής εντολών από την επιλογή Options ανοίγουμε το παράθυρο για τον καθορισμό των μονάδων μετρήσεως. Το παράθυρο αυτό φαίνεται παρακάτω έχοντας επιλέξει τις μονάδες μέτρησης που θα χρησιμοποιήσουμε στο παράδειγμά.



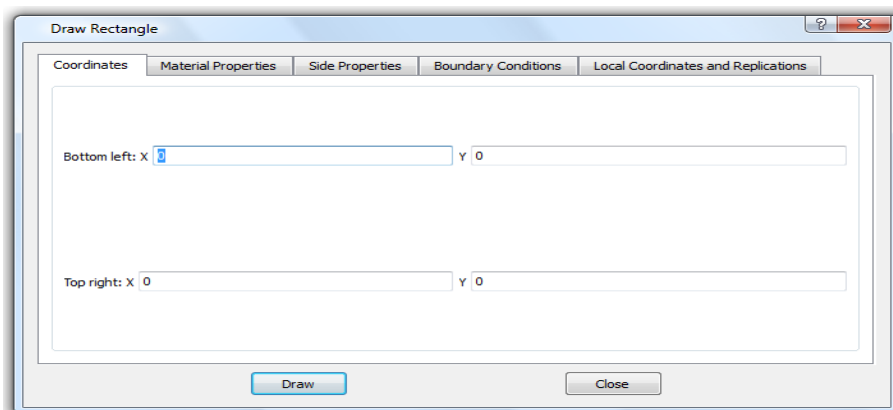
Σχήμα Β.9: Set Units

Αφού καθορίσουμε τις μονάδες μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο προχωρούμε στην επιλογή της ανάλυσης που θέλουμε να διεξάγουμε. Από την γραμμή εντολών κάνοντας την επιλογή Model/Solution Type ανοίγουμε το παράθυρο που μας ενδιαφέρει. Το παράθυρο αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα έχοντας ήδη επιλεγμένα αυτά που χρειαζόμαστε για το παράδειγμά μας.



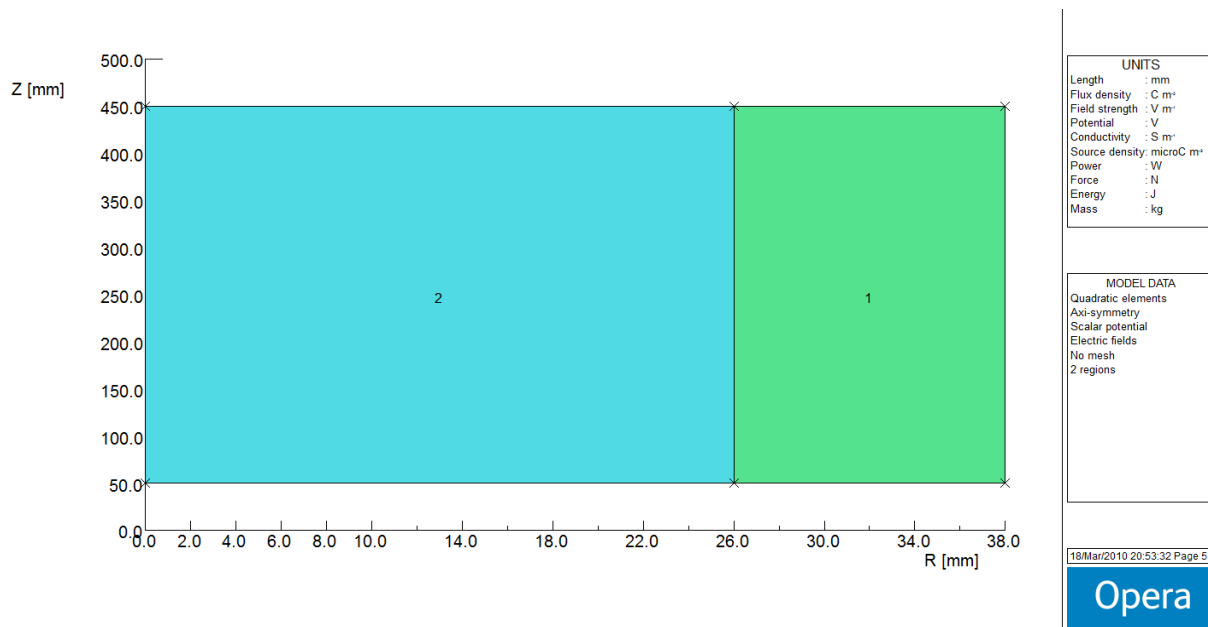
Σχήμα Β.10: Solution Type

Ξεκινούμε την σχεδίαση του αλεξικέραυνου σχηματίζοντας αρχικά το βαρίστορ (μη γραμμική αντίσταση) και το υαλώδες υλικό που τα περιβάλλει. Τα σχήματα τους είναι ορθογώνια γι' αυτό για ευκολία θα χρησιμοποιηθεί η εντολή Draw Rectangle που βρίσκεται στην μπάρα εργαλείων και στην ομάδα εντολών Draw στην γραμμή εντολών. Πατώντας το εικονίδιο της εντολής εμφανίζεται αμέσως ένα παράθυρο το οποίο σε κατευθύνει για την εκτέλεση της εντολής.



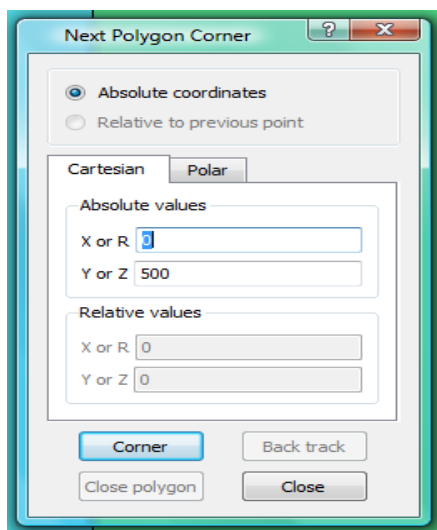
Σχήμα Β.11: Draw Rectangle

Στο παράθυρο αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να καθορίσει τις διαστάσεις του ορθογωνίου που θέλει να εισάγει (ορίζοντας τις συντεταγμένες των δύο απέναντι γωνιών του), να ορίσει τον τύπο και τις ιδιότητες του υλικού, τις ιδιότητες των πλευρών του και τις συνοριακές συνθήκες του.



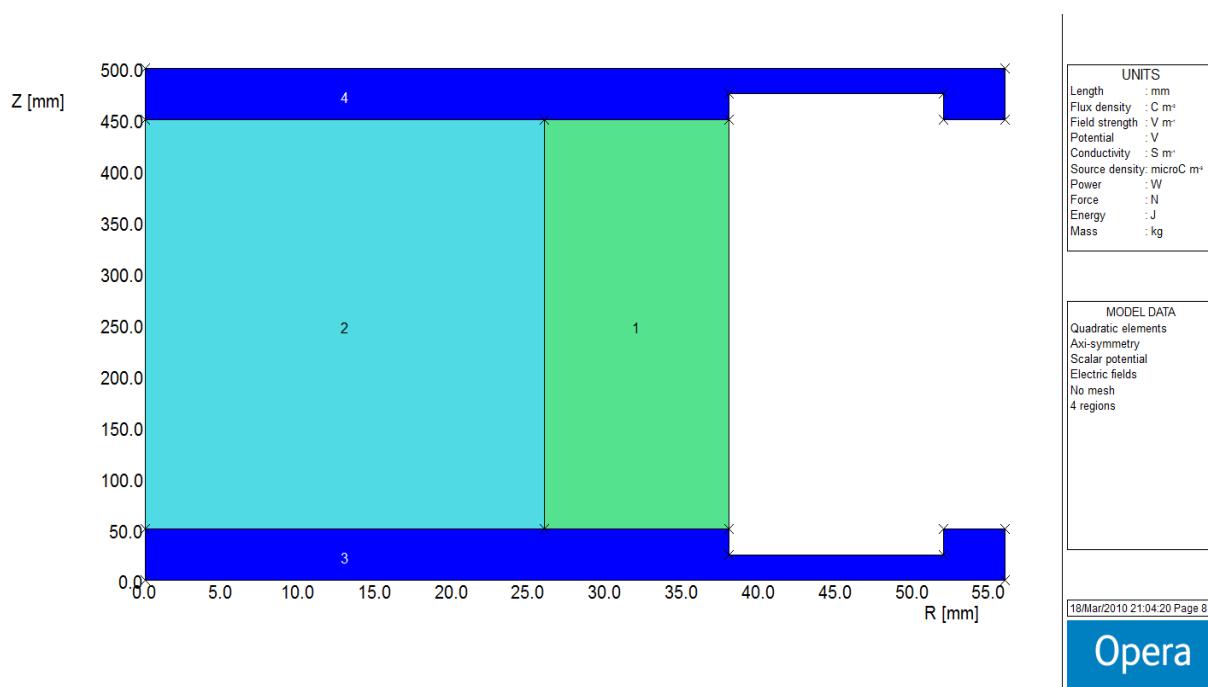
Σχήμα Β.12: Το βαρίστορ και το υαλώδες περίβλημα της διάταξης

Συνεχίζουμε την σχεδίαση με τον σχεδιασμό των δύο ηλεκτροδίων από αλουμίνιο του αλεξικέραυτου. Χρησιμοποιούμε την εντολή Enter Corner Coordinates που βρίσκεται τόσο στην μπάρα εντολών όσο και στην γραμμή εντολών. Με την επιλογή της εντολής αυτής ανοίγει το σχετικό παράθυρο και ο χρήστης έχει την δυνατότητα να καθορίζει σημεία του πολυγώνου που θέλει να σχεδιάσει.



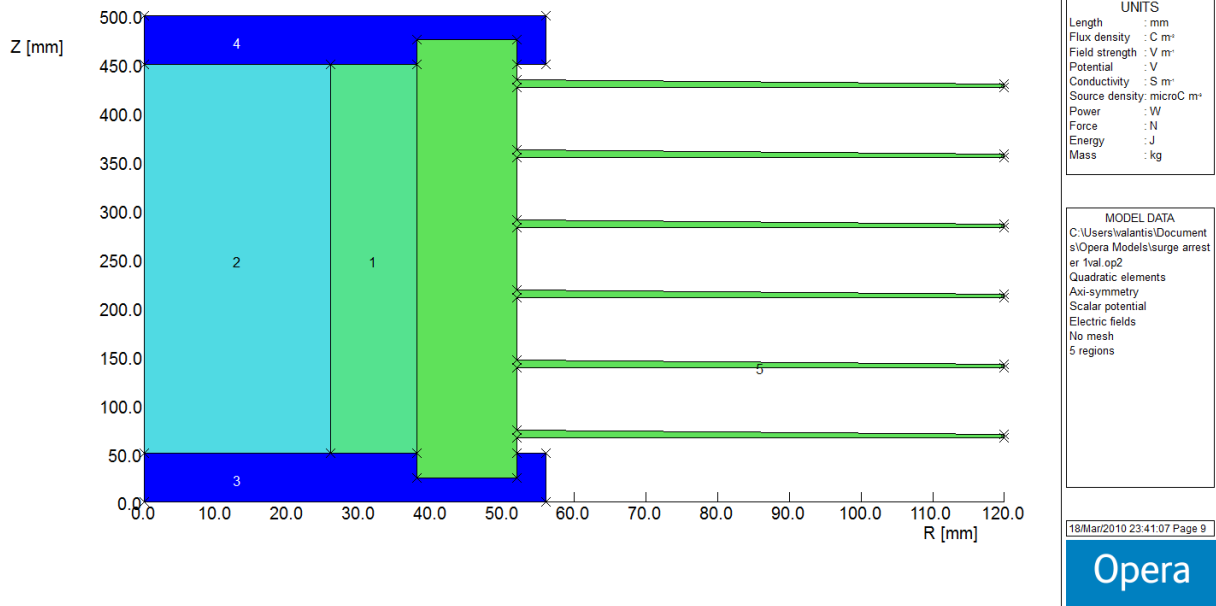
Σχήμα Β.13: Enter Corner Coordinates

Ο χρήστης του προγράμματος έχει την δυνατότητα να σχεδιάσει τα δύο ηλεκτρόδια με την χρήση βοηθητικών γραμμών (construction lines). Αφού εισάγει με την βοήθεια της εντολής Construction Lines τις βοηθητικές γραμμές που χρειάζεται, ο χρήστης δύναται να σχεδιάσει ένα οποιοδήποτε σχήμα κάνοντας χρήση των εντολών Create a new corner at cursor (or Grid Point), Pick An Existing Point, Pick on Nearest Construction Line, Pick at Nearest Construction Line Intersection, Enter Corner Coordinates, Erase Last Side, Close Polygon, Draw Straight Sides, Draw curved sides with mid side points και Draw curved sides around a centre ή συνδυασμό των πιο πάνω. Για διευκόλυνση της σχεδίασης μπορεί να ενεργοποιηθεί το πλέγμα του Opera 2D με την χρήση της εντολής Grid. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το σημείο στο οποίο βρίσκεται μέχρι τώρα η διαδικασία σχεδίασης.



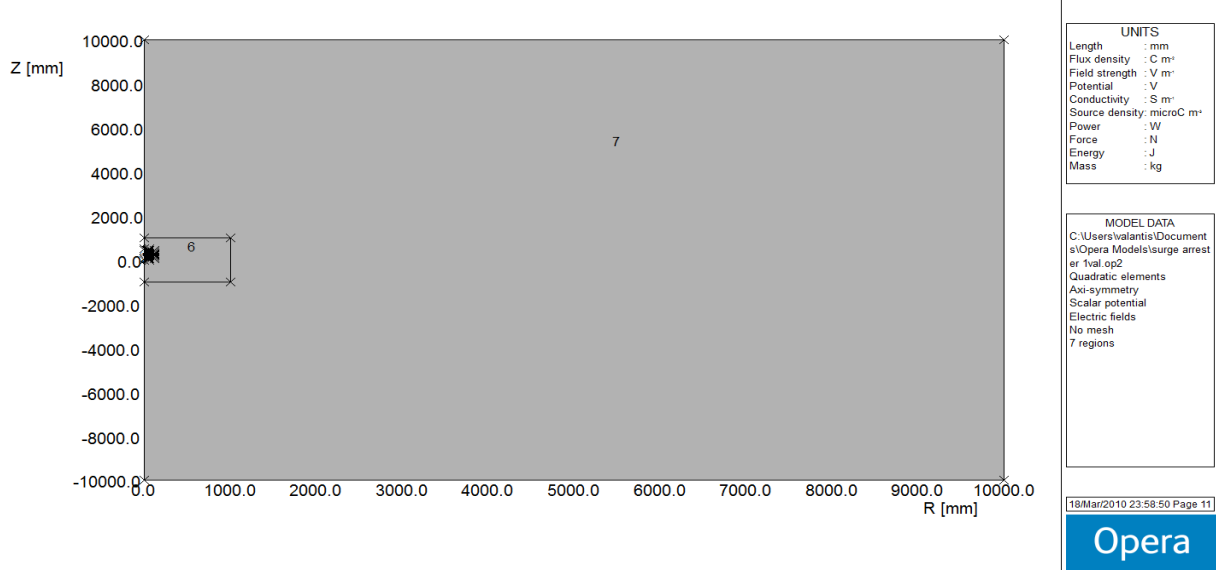
Σχήμα Β.14: Εξέλιξη σχεδίασης του καθοδικού αλεξικέραννου

Με τον ίδιο τρόπο θα σχεδιάσουμε τα περύγια του καθοδικού αλεξικέραννου. Ο αλγόριθμος σχεδίασης που επιλέγεται είναι απόφαση του χρήστη του προγράμματος, με μόνο κριτήριο επιλογής την επίτευξη του επιθυμητού στόχου. Η εξέλιξη της σχεδίασης παρουσιάζεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα Β.15: Εξέλιξη σχεδίασης καθοδικού αλεξικέρανου συμπεριλαμβανομένων και των περυγίων του

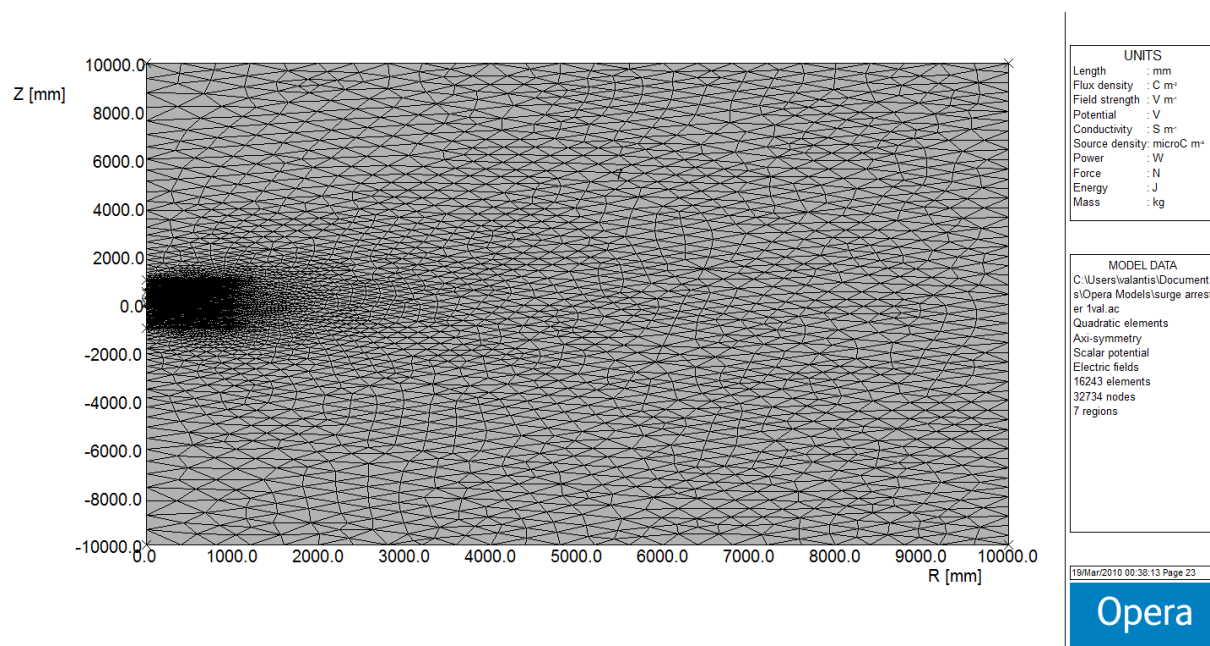
Εν συνεχεία, θα σχεδιαστεί γύρω από το μοντέλο μας ο περιβάλλον αέρας. Η σχεδίαση του αέρα όμως εσωκλείει κάποιες ιδιαιτερότητες αφού όταν θα πρέπει να δημιουργήσουμε το πλέγμα υπολογισμού για την διάταξη μας, αυτό πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο και επιπρόσθετα αρκετά πυκνό κοντά στο καθοδικό αλεξικέρανο. Γι' αυτόν τον λόγο θα δημιουργήσουμε δύο περιοχές περιβάλλοντος αέρα, η μια μεγαλύτερη από την άλλη δίνοντας όμως στην κάθε μια διαφορετικές οριακές συνθήκες (το θέμα αυτό θα συζητηθεί πιο κάτω).



Σχήμα Β.16: Τελική μορφή διάταξης του καθοδικού αλεξικέρανου

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού προχωρούμε στον καθορισμό των συνοριακών συνθηκών των περιοχών του μοντέλου. Οι συνοριακές συνθήκες όπως και οι υπόλοιπες ιδιότητες του μοντέλου μας μπορούν να αλλάξουν με την χρήση των εντολών που υπάρχουν στην γραμμή εντολών, στο πεδίο Modify. Οι κυριότερες από αυτές τις εντολές είναι οι ακόλουθες: Modify corner by picking, Modify side by picking, Modify region by picking, Split side into two, Set boundary conditions by picking, Region groups, Make copies of regions, Move regions, Erase regions και Undo last modify. Στο δικό μας μοντέλο θέλουμε η τάση στο πάνω ηλεκτρόδιο να είναι 12500V ενώ στο κάτω 0V. Επιπλέον στην εξωτερική περιοχή αέρα, στις μακρινές από το καθοδικό αλεξικέραυνο πλευρές του πολυγώνου ορίζουμε το δυναμικό ως μηδενικό.

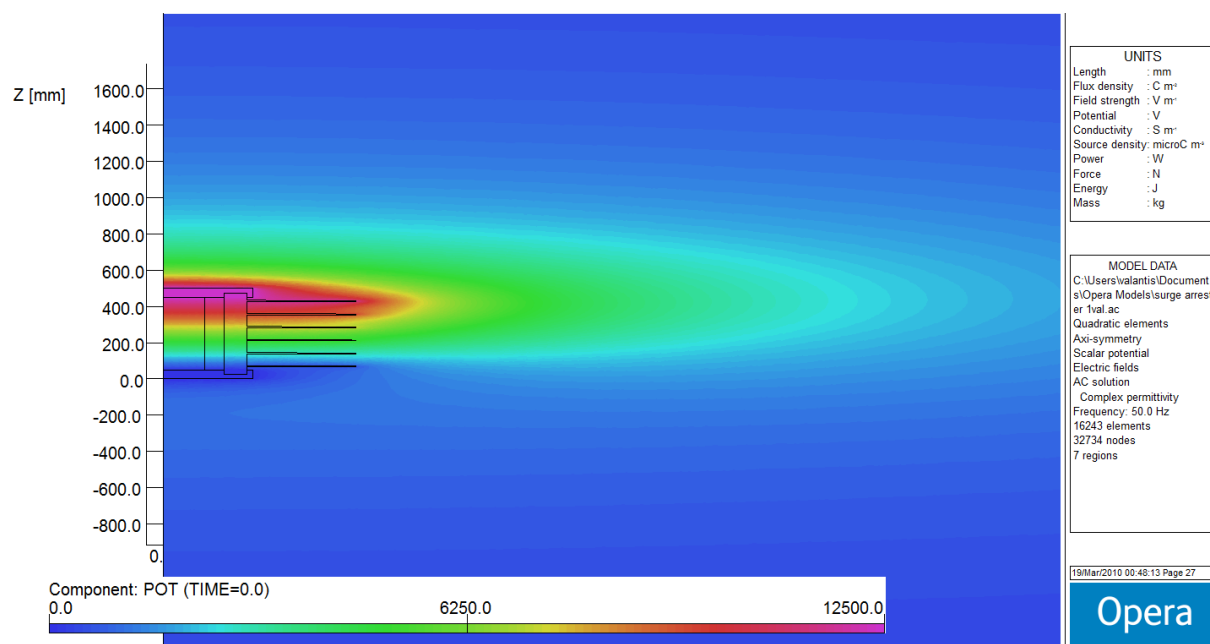
Αφού ολοκληρώσουμε τον καθορισμό των οριακών συνθηκών του μοντέλου μας είμαστε έτοιμοι να επιλέξουμε την ανάλυση την οποία θέλουμε να διεξάγουμε μέσω της εντολής Analysis Options που βρίσκεται στο πεδίο εντολών Model. Για το μοντέλο του παραδείγματός μας επιλέγουμε την Steady-State Ac Analysis. Μετά την επιλογή της ανάλυσης είμαστε έτοιμοι να αναπαράγουμε το πλέγμα του μοντέλου μας με την εντολή Generate Mesh και εν συνεχεία να το εμφανίσουμε στην οθόνη μας με την εντολή Display Mesh.



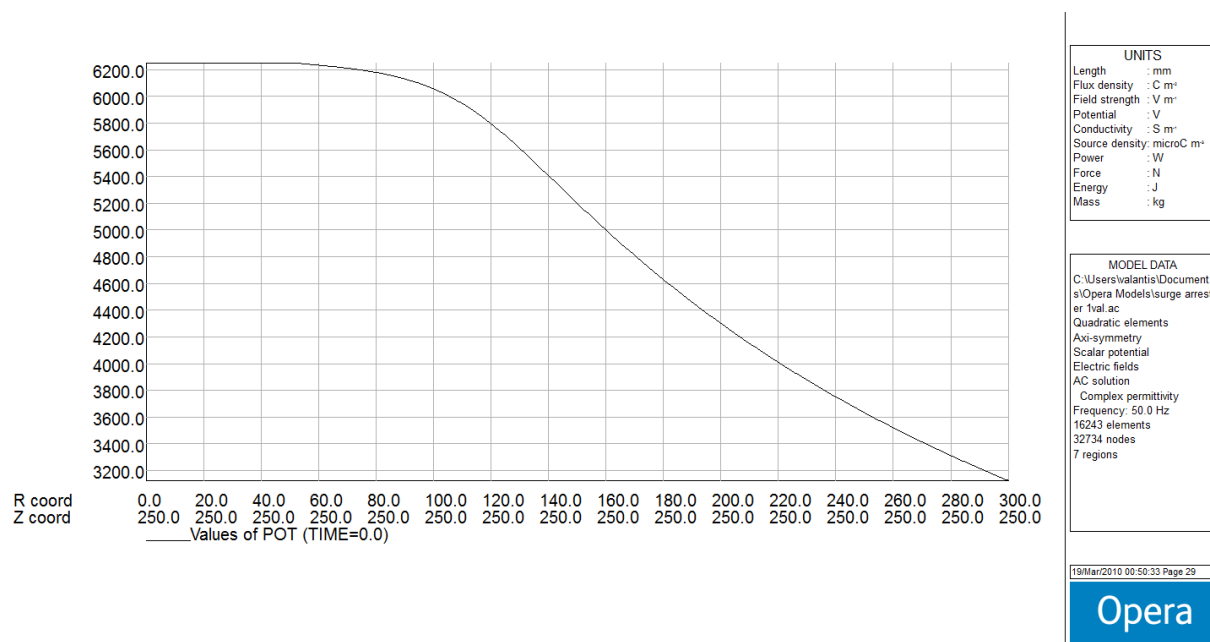
Σχήμα Β.17: Το πλέγμα του μοντέλου του καθοδικού αλεξικέραυνο

Μετά την αναπαράγωγή του πλέγματός μας προχωρούμε στην ανάλυση του πλέγματος αφού πρώτα κάνουμε αποθήκευση (κάνοντας χρήση της εντολής Save). Για την διεξαγωγή της ανάλυσης επιλέγουμε Start Analysis δημιουργώντας ένα αρχείο something.ac. Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης του μοντέλου το πρόγραμμα PC OPERA μας δίνει την

δυνατότητα να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματά της με γραφικές παραστάσεις, ισοδυναμικές καμπύλες, ζώνες χρωμάτων κτλ. Μερικά αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την ανάλυση του μοντέλου μας παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα Β.18: Χρωματικές ζώνες κατανομής της τάσης στο καθοδικό αλεξικέραυνο



Σχήμα Β.19: Κατανομή της τάση σε ύψος 25cm του καθοδικού αλεξικέραυνου

Άλλες σημαντικές εντολές που προσφέρονται από το PC OPERA για την παρουσίαση αποτελεσμάτων ανάλυσης είναι και οι ακόλουθε: Fields at a point, Fields along a line, Fields around a circular arc, Contour map, Vector map, Field integrals along a line, Field integrals around a circular arc και Field integrals over regions [1].

B.6.PC OPERA 3D

Εισαγωγή

Το Opera-3d (**OP**erating environment for **E**lectromagnetic **R**esearch and **A**nalysis, δηλαδή ένα λειτουργικό περιβάλλον για ηλεκτρομαγνητική έρευνα και ανάλυση) είναι ένα σύστημα προ- και μετ- επεξεργασίας για γνωστά προγράμματα ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, που είναι τα εξής: TOSCA, ELEKTRA, SCALA, CARMEN, SOPRANO και TEMPO. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τη βασική μέθοδο που χρησιμοποιείται σε αυτά τα προγράμματα ανάλυσης. Αυτή η ευρέως διαδεδομένη τεχνική για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτεί ειδικές τροποποιήσεις για να εφαρμοστεί σε υπολογισμούς ηλεκτρικού πεδίου. Αυτές οι τροποποιήσεις υποστηρίζονται από τον Μοντελοποιητή (Modeller) και τον Προ-Επεξεργαστή του Opera-3d. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τον καθορισμό σύνθετης γεωμετρίας με αγωγούς και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών συμπεριλαμβανομένων μη-γραμμικών και μη-ισοτροπικών περιγραφών, αλλά και γραφικών παραστάσεων για τον έλεγχο των δεδομένων.

Ομοίως, ο Μετ-Επεξεργαστής του Opera-3d παρέχει τα απαραίτητα μέσα για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Μέσω αυτού μπορούν να αποτυπωθούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη που αφορούν κάθε πρόβλημα (π.χ. ένταση ηλεκτρικού πεδίου, δυναμικό, ρεύμα ή δύναμη) είτε πάνω στο μοντέλο είτε με γραφικές παραστάσεις. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, υπάρχουν έξι πακέτα ανάλυσης, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

TOSCA

Το πακέτο αυτό επιλύει προβλήματα μη-γραμμικών μαγνητοστατικών ή ηλεκτροστατικών πεδίων και προβλήματα ροής ρεύματος σε τρεις διαστάσεις. Παραδείγματα εφαρμογής του πακέτου αυτού είναι :

- οι μαγνήτες MRI (Magnetic Resonance Imaging magnets)
- κινητήρες και γεννήτριες
- διακόπτες

ELEKTRA

Το πακέτο αυτό αναλύει χρονικά εξαρτώμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων των δινορρευμάτων σε τρεις διαστάσεις. Υπάρχουν τρεις δυνατότητες ανάλυσης. Το πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε:

- μετασχηματιστές
- προβλήματα επαγωγής θερμότητας (induction heating)
- αγωγοί πετρελαίου και αερίου

SCALA

Το πακέτο αυτό αναλύει ηλεκτροστατικά πεδία λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του φορτισμένου χώρου που δημιουργείται από δέσμες φορτισμένων σωματιδίων. Παραδείγματα εφαρμογής του πακέτου :

- σωλήνες καθοδικών ακτινών (cathode ray tubes)
- εκπομπή plasma (plasma emission)
- επίπεδες οθόνες

CARMEN

Το πακέτο αυτό αναλύει μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε στρεφόμενες (rotating) μηχανές με σταθερή ταχύτητα ρότορα. Το πακέτο μπορεί να εφαρμοστεί σε:

- κινητήρες και γεννήτριες
- αισθητήρες θέσης

SOPRANO

Το πακέτο αυτό αναλύει ηλεκτρομαγνητικά πεδία υψηλών συχνοτήτων σε τρεις διαστάσεις.

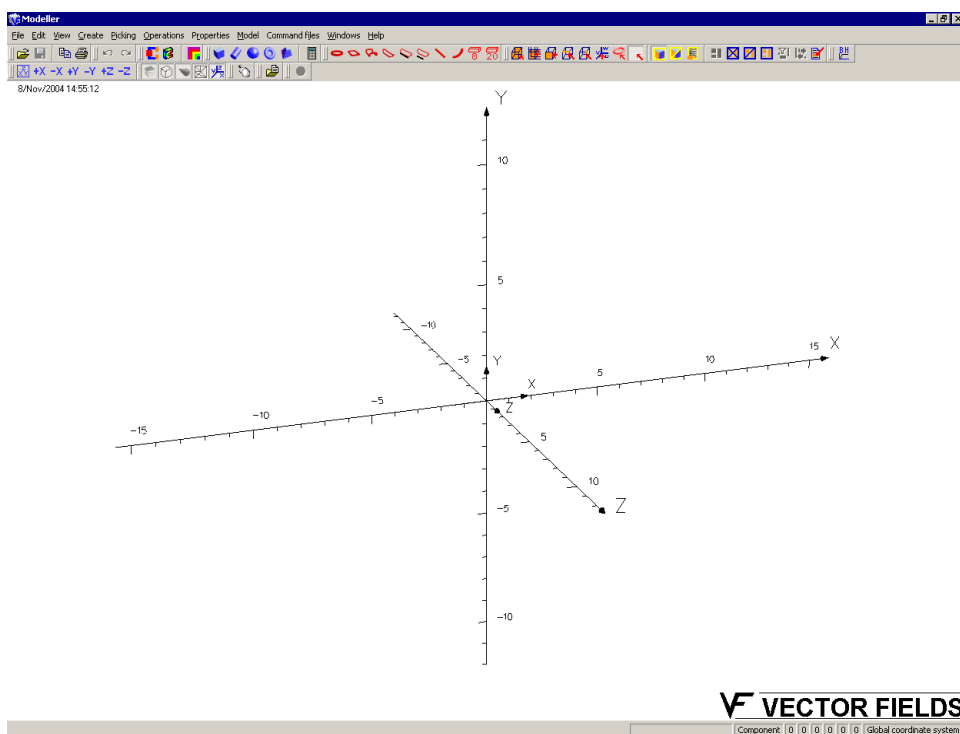
TEMPO

Το πακέτο αυτό αναλύει μεταβαλλόμενα και σταθερά θερμικά πεδία που δημιουργούνται από ηλεκτρομαγνητική θέρμανση (heating) και εξωτερικές πηγές θέρμανσης.

Ο Μοντελοποιητής του Opera-3d

Ο Μοντελοποιητής παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων, με στόχο την περαιτέρω ανάλυσή τους και τη μετ-επεξεργασία τους. Στο Μοντελοποιητή, οποιαδήποτε καθορισμένα αντικείμενα μπορούν να μετασχηματιστούν ή να ενωθούν μεταξύ τους. Βασικά αντικείμενα, όπως κύβοι, κύλινδροι, σφαίρες, κώνοι, πυραμίδες, πολυεδρικά πρίσματα και τοροειδή, μπορούν να δημιουργηθούν σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο. Αφού δημιουργηθούν, μπορούν να μετακινηθούν σε άλλη επιθυμητή θέση. Επίσης, μπορούν να συγχωνευτούν ή να αφαιρεθούν από άλλα αντικείμενα στο χώρο, ώστε να δημιουργηθούν πιο σύνθετα

γεωμετρικά μοντέλα. Αυτή η τεχνική μοντελοποίησης επιτρέπει σε πολλά μοντέλα να δημιουργηθούν από τα βασικά γεωμετρικά σχήματα. Η γεωμετρία του μοντέλου μπορεί να γίνει πιο περίπλοκη, χρησιμοποιώντας πιο προοδευτικές τεχνικές, όπως για παράδειγμα, τη σάρωση μιας επιφάνειας στο χώρο κατά τη διεύθυνση ενός διανύσματος (εντολή Sweep face). Όταν ξεκινά ο Μοντελοποιητής, εμφανίζονται στην οθόνη, σε τρισδιάστατη εικόνα, οι τρεις άξονες (x,y,z), όπως φαίνεται στο σχήμα Β.20.



Σχήμα Β.20 :Η αρχική εικόνα στον Μοντελοποιητή, χρησιμοποιώντας τα Microsoft Windows.

Στην κορυφή της οθόνης φαίνεται η γραμμή εργαλείων, από την οποία μπορεί να γίνει η όλη επεξεργασία της επιθυμητής γεωμετρίας. Επιπλέον, στο Μοντελοποιητή μπορούμε να εισάγουμε εντολές, για τη δημιουργία του μοντέλου, από το πληκτρολόγιο. Αυτό γίνεται επιλέγοντας από το πεδίο Windows → Preferences και κατόπιν, συμπληρώνοντας το κουτί διαλόγου που εμφανίζεται κάτω από το τρισδιάστατο σύστημα αξόνων.

1. Τοπολογία στο Μοντελοποιητή

Κελί (cell)

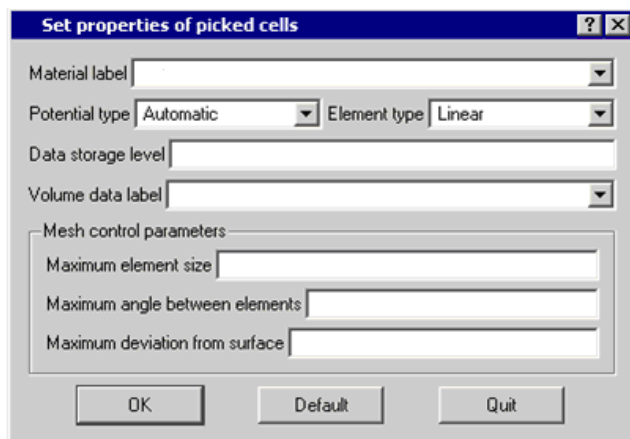
Ένα κελί αποτελεί έναν κλειστό όγκο του χώρου που περιορίζεται από ένα ή περισσότερα τοιχώματα. Η νοητή γραμμή που ενώνει δύο οποιαδήποτε σημεία μέσα στο κελί δεν τέμνει

καμιά επιφάνεια. Οι ιδιότητες του κελιού ανατίθενται σε αυτό από το πεδίο Properties → Cell properties, όπως φαίνεται στο σχήμα Β.20.

Ένα κελί μπορεί να έχει τα εξής δεδομένα που να αποδίδονται σε αυτό:

- Μια ετικέτα υλικού (material label).
- Είναι μια ετικέτα που χρησιμοποιείται για να αναφέρεται στις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με το κελί. Όταν δημιουργείται ένα κελί, έχει αυτόματα την ετικέτα air (αέρας), δηλαδή έχει τις εξής ιδιότητες: $\mu=\mu_0$, $\varepsilon=\varepsilon_0$, $\sigma=0$. Ακόμα, αυτόματα έχει Potential type: Automatic και Element type: Linear. Όμως, μπορεί να ανατεθεί σε κάθε κελί διαφορετική ετικέτα. Στη συνέχεια, και προτιμότερο είναι να γίνει μετά τη δημιουργία του πλέγματος, προσδιορίζονται οι ιδιότητες κάθε ετικέτας, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, η επιτρεπτότητα, η αγωγιμότητα και τυχόν θερμικές ιδιότητες. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της ετικέτας γίνεται από το πεδίο Model → Set material properties.
- Τύπος δυναμικού (Potential type (TOTAL, REDUCED, VECTOR)). Στο Tosca electrostatics, χρησιμοποιείται ο τύπος TOTAL.
- Τύπος στοιχείου (γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, και τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού). Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως Element type (LINEAR, QUADRATIC).
- Ετικέτα που σχετίζεται με τις ιδιότητες του συγκεκριμένου όγκου (Volume properties label).
- Αυτή η ετικέτα συνδέεται με τα κελιά και αποθηκεύει άλλου είδους δεδομένα που αφορούν το κελί. Αυτά περιλαμβάνουν ταχύτητα, τοπικό προσανατολισμό και άλλους παράγοντες.
- Παράμετροι που σχετίζονται με το πλέγμα που δημιουργείται στο κελί αυτό (Mesh control parameters). Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το μέγιστο μέγεθος του πλέγματος που δημιουργείται στο κελί.
- Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.
- Όταν γίνονται πράξεις μεταξύ σωμάτων, τα κελιά που δημιουργούνται σχηματίζονται από το συνδυασμό των αρχικών κελιών. Σε μια τέτοια περίπτωση, δεν είναι ξεκάθαρο ποιά από τα αρχικά δεδομένα θα καθορίσουν τα τελικά δεδομένα του προκύπτοντος κελιού. Το data storage level χρησιμοποιείται για την επίλυση ακριβώς αυτού του

προβλήματος, καθώς το τελικό κελί θα αποκτήσει τελικά τις ιδιότητες εκείνου του κελιού με την υψηλότερη τιμή στο πεδίο data storage level. Όταν στο πεδίο αυτό τα αρχικά κελιά έχουν την ίδια τιμή, τότε το αποτέλεσμα είναι αμφίβολο.



Σχήμα Β.20: Τρόπος ανάθεσης ιδιοτήτων ενός κελιού.

Σώμα (body)

Ένα σώμα αποτελείται από κορυφές (σημεία), γραμμές, επιφάνειες και κελιά. Όλα τα αντικείμενα μέσα στο σώμα είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους, όσον αφορά στη γεωμετρία τους. Έτσι, τα μέλη ενός σώματος δεν μπορούν να μετακινηθούν, χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση αυτής της μετακίνησης σε αυτά. Για παράδειγμα, ένα σώμα μπορεί να περιέχει δύο κελιά. Το κάθε κελί από αυτά καταλαμβάνει το δικό του χώρο. Η μετακίνηση του ενός κελιού μέσα στο σώμα μπορεί να προκαλέσει την αλληλοεπικάλυψη των κελιών, η οποία θα έκανε τα κελιά αυτά άκυρα (invalid). Παρόλα αυτά, εάν υπάρχουν δυο σώματα, καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα κελί, είναι επιτρεπτό να αλληλοεπικαλύπτονται τα σώματα αυτά, αφού δεν υπάρχει καμιά σύνδεση μεταξύ των σωμάτων.

Η βασική διαφορά μεταξύ ενός κελιού και ενός σώματος είναι το γεγονός ότι ένα κελί είναι ένας όγκος του μοντέλου, ενώ ένα σώμα είναι μια ιεραρχημένη σύνθεση κελιών, επιφανειών, γραμμών και σημείων. Ένα σώμα, δηλαδή, αποτελεί ένα υπερσύνολο ενός κελιού.

Δεδομένα επιφάνειας

Οι ιδιότητες μιας επιφάνειας ανατίθενται σε αυτήν από το πεδίο Properties → Face properties. Μια επιφάνεια μπορεί να έχει τα εξής δεδομένα που να συνδέονται με αυτήν:

- Ετικέτα συνοριακής συνθήκης (boundary condition label).
- Αυτή η ετικέτα χρησιμοποιείται για το μετέπειτα προσδιορισμό των ιδιοτήτων της επιφάνειας αυτής από το πεδίο Model → Set boundary conditions.

- Τύπος στοιχείου (γραμμικός, δηλαδή α' βαθμού, και τετραγωνικός, δηλαδή β' βαθμού). Στο πρόγραμμα αναφέρεται ως Element type (LINEAR, QUADRATIC).
- Παράμετροι που σχετίζονται με το πλέγμα που δημιουργείται στην επιφάνεια αυτή (Mesh control parameters). Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το μέγιστο μέγεθος του πλέγματος που δημιουργείται στην επιφάνεια.
- Layering, που χρησιμοποιείται για να δημιουργεί λεπτά στρώματα σε οποιαδήποτε ή και στις δύο πλευρές της επιφάνειας, με στόχο τη μεγαλύτερη λεπτομέρεια κατά τη δημιουργία του πλέγματος στις πλευρές αυτές. Εφαρμόζεται ιδιαίτερα σε προβλήματα όπου οι «λεπτές» γεωμετρίες θεωρούνται σημαντικές.
- Ένα πεδίο υπό την ονομασία data storage level.
- Όπως και στα κελιά, η ένωση των επιφανειών δημιουργεί αμφίβολο αποτέλεσμα. Έτσι, θα διατηρηθούν τα δεδομένα εκείνης της επιφάνειας με το μεγαλύτερο data storage level.

Δεδομένα γραμμής

Από το πεδίο Properties → Edge Properties, μπορούμε να ορίσουμε και τις ιδιότητες κατά μήκος μιας επιλεγθείσας γραμμής.

Στο Μοντελοποιητή είναι απαραίτητο να τεθούν ιδιότητες των υλικών των κελιών, πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος, ιδιότητες του όγκου, καθώς και οριακές συνθήκες στις επιφάνειες των σωμάτων. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται όταν δημιουργείται η βάση δεδομένων για την ανάλυση του μοντέλου, με απώτερο σκοπό τη μετ-επεξεργασία του.

Πριν το σχηματισμό του τελικού μοντέλου, τα σώματα θα συγχωνευτούν σε ένα ενιαίο σώμα, για να διασφαλιστεί ότι η τοπολογία σχηματίζει μια ενιαία και έγκυρη δομή.

Τα βασικά σχήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, δημιουργούνται κάθε φορά στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων. Μπορούν να οριστούν τοπικά συστήματα συντεταγμένων και ένα από αυτά επιλέγεται να είναι το τρέχον (αυτό στο οποίο εργαζόμαστε) σύστημα. Όλα τα βασικά σχήματα, αλλά και οι μετασχηματισμοί που εφαρμόζονται σε αυτά, δημιουργούνται πάντα στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων.

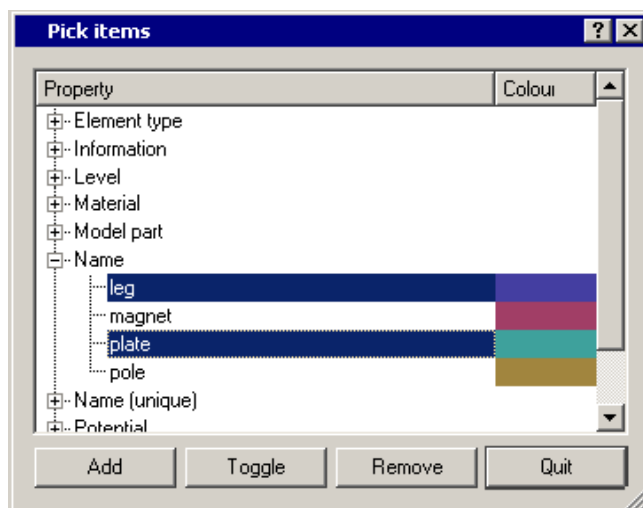
Επιπλέον, μπορεί να δημιουργηθεί και μια ορισμένη ομάδα αγωγών μέσα από ξεχωριστές εντολές, όπως RACETRACK και BEDSTEAD και άλλες. Αυτοί οι αγωγοί δεν αποτελούν

φυσικό κομμάτι του μοντέλου και δεν περιλαμβάνονται στο πλέγμα. Μπορούν όμως να επιλεγούν για να μετασχηματιστούν, να αντιγραφούν ή να επανατοποθετηθούν στο χώρο.

Η λειτουργία της αντιγραφής (εντολή Copy) μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα επιλεγμένα σώματα για να δημιουργήσει αντίγραφα των σωμάτων αυτών. Εάν έχει επιλεγεί ένα κελί, αυτό μπορεί να αντιγραφεί μόνο του και η διαδικασία δημιουργεί ένα καινούριο σώμα που περιέχει αυτό το μοναδικό κελί που έχει αντιγραφεί. Στα μοντέλα που προσομοιώθηκαν, πρώτα δημιουργήθηκε ο ένας δίσκος του μονωτήρα και στη συνέχεια, με την εντολή Copy και με κατάλληλη μετατόπιση (Displace) στον άξονα z, δημιουργήθηκε ο επιθυμητός αριθμός δίσκων για κάθε μοντέλο.

2.Επιλογή σύμφωνα με τις ιδιότητες (picking by attribute)

Κάθε οντότητα μπορεί να έχει δεδομένα που αφορούν τις ιδιότητές της. Αυτά τα δεδομένα ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της οντότητας κάθε φορά. Για παράδειγμα, ένα σώμα έχει ένα όνομα που συνδέεται με αυτό, καθώς και μια ομάδα ετικετών που μπορούν να εφαρμοστούν. Ένα κελί έχει μια ετικέτα που υποδεικνύει από τι υλικό είναι φτιαγμένο το κελί (material label), μια ετικέτα όγκου, έναν αριθμό που καθορίζει το μικρότερο μέγεθος του πλέγματος σε αυτό το κελί, αλλά και άλλες ετικέτες. Η εντολή Pick εκμεταλλεύεται αυτά τα χαρακτηριστικά (ιδιότητες) για να αναγνωρίσει τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα μοντέλο, με στόχο την τροποποίηση ή τη θέαση του μοντέλου. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται ο τρόπος που επιλέγεται οποιαδήποτε οντότητα σε ένα μοντέλο.



Σχήμα Β.21: Επιλογή οντοτήτων σύμφωνα με τις ιδιότητές τους.

3. Τροποποίηση της γεωμετρίας των αντικειμένων

Η κύρια εντολή για την τροποποίηση της γεωμετρίας είναι η εντολή Transform. Αυτή η εντολή εφαρμόζεται σε σώματα. Όλες οι τροποποιήσεις (μετασχηματισμοί) γίνονται στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων. Οι διαθέσιμοι μετασχηματισμοί είναι οι εξής:

- Παράλληλη τοποθέτηση του αντικειμένου (Translation).
- Περιστροφή του αντικειμένου γύρω από ένα διάνυσμα (Rotation).
- Απεικόνιση του ειδώλου ενός σώματος (Reflection).
- Αύξηση ή μείωση ενός σώματος υπό κλίμακα (Scale).

Πιο πολύπλοκες γεωμετρικές αλλαγές μπορούν να εφαρμοστούν σε σώματα, χρησιμοποιώντας τις εντολές μορφοποίησης. Στις εντολές μορφοποίησης περιλαμβάνονται οι εξής:

- Η εντολή Bend, κατά την οποία ένα σώμα λυγίζει μέσω μιας κατάλληλης γωνίας.
- Η εντολή Morph, κατά την οποία εφαρμόζεται στο σώμα οποιαδήποτε μορφοποίηση υπό μορφή συνάρτησης.
- Η εντολή Stretch, κατά την οποία οποιοδήποτε κομμάτι του σώματος επιμηκώνεται μεταξύ δύο σημείων που έχουν επιλεγθεί.
- Η εντολή Twist, κατά την οποία οποιοδήποτε κομμάτι του σώματος στρίβει (κάμπτεται) μεταξύ δύο σημείων που έχουν επιλεγθεί.

4. Δημιουργία σύνθετων σωμάτων

Πιο πολύπλοκες δομές μπορούν να κατασκευαστούν, χρησιμοποιώντας την εντολή Combine (συνδυασμός) από το πεδίο Operations του Μοντελοποιητή. Οι πράξεις άλγεβρας Boole που είναι δυνατόν να γίνουν μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων είναι οι εξής:

- Η εντολή Union, που ενώνει τα σώματα, ώστε το τελικό σώμα να έχει τα χαρακτηριστικά των αρχικών σωμάτων (πριν την ένωση).
- Η εντολή Intersection, κατά την οποία παραμένει στο μοντέλο μόνο ο κοινός όγκος των αρχικών σωμάτων που επιλέχθηκαν.
- Η εντολή Subtraction, όπου αφαιρούνται από το πρώτο σώμα που επιλέχθηκε, όσα σώματα επιλέχθηκαν κατόπιν. Δηλαδή, σε αυτή την εντολή παίζει ρόλο η σειρά

επιλογής των σωμάτων. Προϋπόθεση αποτελεί, φυσικά, το πρώτο σώμα να έχει κοινό όγκο με τα υπόλοιπα. Η εντολή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία όλων των μονωτήρων που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

- Η εντολή Trim, όπου αφήνει ανέπαφα όλα τα επιλεγμένα σώματα, εκτός από το πρώτο, του οποίου «κόβει» τις άκρες, έτσι ώστε το σώμα αυτό να μην αλληλεπικαλύπτεται με τα άλλα.
- Η εντολή Cutaway, όπου αφήνει ανέπαφο το πρώτο επιλεγμένο σώμα και «κόβει» τις άκρες των άλλων σωμάτων, ώστε να μην υπάρχει αλληλεπικάλυψη.

Σε όλες τις λειτουργίες υπάρχει η δυνατότητα να κανονικοποιηθεί το αποτέλεσμα (regularisation), με στόχο να αφαιρεθούν εσωτερικές επιφάνειες που σχηματίστηκαν από τις «πράξεις» μεταξύ των σωμάτων.

5. Προετοιμασία ενός μοντέλου πριν τη δημιουργία του πλέγματος

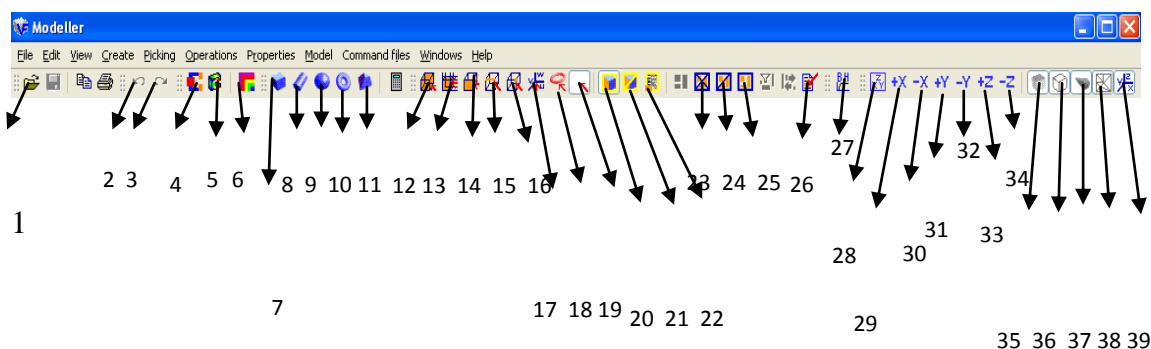
Για τη δημιουργία ενός συνεχούς πλέγματος σε όλο τον όγκο του χώρου που μοντελοποιείται, είναι απαραίτητο να έχει δημιουργηθεί ένα ενιαίο σώμα. Αυτό το σώμα αποτελείται από πολλαπλά κελιά, τα οποία έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Για να γίνει πιο εύκολη η μοντελοποίηση, είναι προτιμότερο να προκύψουν πολλά απλά σώματα, τα οποία να μπορούν εύκολα να μετακινηθούν ή να τεθούν υπό κάποια επιθυμητή κλίμακα. Για να γίνει η μετάβαση από τα πολλά σώματα σε ένα ενιαίο σώμα, στο οποίο να μπορεί να δημιουργηθεί πλέγμα, χρησιμοποιούμε την εντολή Create Model Body από το πεδίο Model. Αυτή η εντολή δημιουργεί ένα αντίγραφο για κάθε ένα σώμα του μοντέλου και τα ενώνει, χρησιμοποιώντας μια πράξη (άλγεβρας Boole) ένωσης χωρίς κανονικοποίηση, για να διασφαλιστεί η διατήρηση των εσωτερικών ιδιοτήτων των υλικών και των συνόρων μεταξύ των υλικών. Το ενιαίο σώμα που σχηματίζεται θα έχει τις ιδιότητες που καθορίζονται από τα συστατικά μέρη του ενιαίου σώματος. Οι ιδιότητες αυτές προσαρμόζονται, όπου αυτό είναι απαραίτητο, για να ληφθούν υπόψη οι αντιθέσεις μεταξύ των υλικών, εκμεταλλεύοντας την τιμή του πεδίου data storage level. Το ενιαίο σώμα που έχει σχηματιστεί είναι πλέον έτοιμο για να δημιουργηθεί πλέγμα στην επιφάνεια και τον όγκο του. Εάν το μοντέλο δεν είναι σωστό, τότε θα εμφανιστεί κάποιο εικονίδιο στο Μοντελοποιητή κατά τη δημιουργία του πλέγματος, στο οποίο θα αναφέρεται η ύπαρξη κάποιου λάθους στο μοντέλο. Για τη διόρθωση του λάθους, πρέπει καταρχήν να καταργηθεί το ενιαίο σώμα με την εντολή Delete Model Body από το πεδίο Model. Στη συνέχεια, με την εντολή Check από το πεδίο Operations, ίσως να εντοπιστεί το σφάλμα αυτό,

επιλέγοντας κάποιον αριθμό σωμάτων μαζί, για να διαπιστωθεί εάν αυτά αλληλεπικαλύπτονται. Να σημειωθεί ότι το μοντέλο, πριν τη δημιουργία του πλέγματος, έχει την κατάληξη .opc.

Κατά τη δημιουργία του μοντέλου, για να περιοριστεί ο χώρος του μοντέλου και για να αποτυπώνει η προσομοίωση όσο το δυνατόν καλύτερα το αντίστοιχο πραγματικό μοντέλο, καλό είναι να χρησιμοποιηθεί μια περιοχή αέρα (background-air). Κατά την προσομοίωση των μονωτήρων θέσαμε το δυναμικό να είναι ίσο με μηδέν στην εξωτερική επιφάνεια του background, θεωρώντας ότι το δυναμικό στο άπειρο είναι μηδενικό. Οποιοδήποτε σώμα (κύβος, κύλινδρος, σφαίρα και άλλα σώματα) μπορεί να αποτελέσει μια περιοχή αέρα, αρκεί κατά τη δημιουργία του κελιού αυτού να ανατεθεί σε αυτό η ονομασία background.

Στο Μοντελοποιητή είναι δυνατή η αυτόματη δημιουργία τετραεδρικού πλέγματος μέσω της εντολής Generate Surface Mesh από το πεδίο Model. Αντίθετα, στον Προ-Επεξεργαστή είναι δυνατή η δημιουργία τόσο τετραεδρικού όσο και εξαεδρικού πλέγματος. Στην πραγματικότητα, η δημιουργία εξαεδρικών στοιχείων παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια, όσον αφορά στα αποτελέσματα της ανάλυσης, σε σχέση με τα τετραεδρικά στοιχεία. Σε προβλήματα όπου η ακρίβεια είναι πολύ σημαντική, προτιμάται η δημιουργία εξαεδρικού πλέγματος στον Προ-Επεξεργαστή. Όμως, επειδή μας συμφέρει η δημιουργία του μοντέλου στο Μοντελοποιητή, μια λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν να αυξήσουμε τον αριθμό των τετραεδρικών στοιχείων του πλέγματος, μικραίνοντας την τιμή του πεδίου Maximum element size κατά την κατασκευή των κελιών, στα οποία ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Φυσικά, η λύση αυτή έχει το μειονέκτημα ότι οδηγεί στην αύξηση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος.

Στο σχήμα Β.22 φαίνεται η γραμμή εργαλείων στο Μοντελοποιητή και παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος χρήσης του Μοντελοποιητή μέσω αυτής.



Σχήμα Β.22 : Η γραμμή εργαλείων του Μοντελοποιητή.

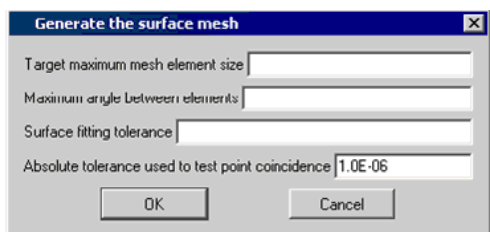
- 1: Άνοιγμα ενός ήδη υπάρχοντος αρχείου (load a data file).
- 2: Undo (remove the last change to the model) (εναλλακτικά, Edit→ Undo)
- 3: Redo (re-apply a change which has been undone)
- 4: Παρέχει τη δυνατότητα για επιλογή οντοτήτων προς επίδειξη.
- 5: Ελέγχει την επίδειξη της γεωμετρίας του μοντέλου (Controls the display of the geometry).
- 6: Δυνατότητα αλλαγής χρώματος των υλικών του μοντέλου.
- 7: Δημιουργία κύβου ή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.
- 8: Δημιουργία κυλίνδρου, κώνου ή ελλειψοειδούς κυλίνδρου.
- 9: Δημιουργία σφαίρας.
- 10: Δημιουργία τοροειδούς.
- 11: Δημιουργία πρίσματος ή πυραμίδας n-πλευρών.
- 12: Επιλογή σώματος.
- 13: Επιλογή κελιού.
- 14: Επιλογή επιφάνειας.
- 15: Επιλογή ακμής.
- 16: Επιλογή κόμβου.
- 17: Χρησιμοποιείται για την επιλογή ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων (Coordinate systems button). Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 20.
- 18: Χρησιμοποιείται για την επιλογή αγωγών. Πρέπει να είναι επιλεγμένο το κουμπί 20.
- 19: Αναίρει την επιλογή των κουμπιών 17 και 18.
- 20: Επιλογή οντότητας (pick entity toolbutton). Αυτό το κουμπί πρέπει να είναι πατημένο, πριν την επιλογή κάποιας από τις εξής οντότητες: σώμα, κελί, επιφάνεια, ακμή ή κομβός.
- 21: Πατώντας αυτό το κουμπί και επιλέγοντας κατόπιν κάποια από τις οντότητες 10 ή 11 ή 12 ή 13 ή 14, τότε επιλέγοντας κάποια οντότητα από το μοντέλο, αυτή θα εξαφανιστεί, οπτικώς μόνο, από την οθόνη.
- 22: Επίδειξη των ιδιοτήτων που έχουν τεθεί στην επιλεγθείσα οντότητα (Show entity properties).
- 23: Με το πάτημα αυτού του κουμπιού αναιρείται η επιλογή των ήδη επιλεγμένων οντοτήτων (Reset picked entities).

- 24: Επιλογή αφαίρεσης της επιλεγθείσας οντότητας από τη θέαση του μοντέλου (Hide entity toolbarbutton).
- 25: Με αυτή την εντολή, όλες οι κρυμμένες οντότητες γίνονται πάλι ορατές (Unhide entities).
- 26: Επιλογή οντότητας μέσω των ιδιοτήτων της (Pick by property).
- 27: Αφορά την permeability (μ) στο Set material properties σε μαγνητοστατικής φύσεως προβλήματα (Set BH curve properties).
- 28: Με αυτή την εντολή, επιστρέφουμε στην αρχική θέαση (initial view) του μοντέλου, ώστε αυτό να φαίνεται ολόκληρο στην οθόνη.
- 29: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα x.
- 30: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα x.
- 31: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα y.
- 32: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα y.
- 33: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα z.
- 34: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα z.
- 35-39: Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων κομματιών του μοντέλου.

6. Δημιουργία του πλέγματος

Η εντολή δημιουργίας του πλέγματος είναι έγκυρη, μόνο αφού έχει δημιουργηθεί το ενιαίο σώμα.. Η δημιουργία του πλέγματος είναι μια διαδικασία δύο σταδίων. Αρχικά, δημιουργείται το επιφανειακό πλέγμα, χρησιμοποιώντας την εντολή Generate surface mesh από το πεδίο Model. Το μέγεθος του επιφανειακού πλέγματος δημιουργείται από τις πληροφορίες που έχουν δοθεί για κάθε κελί στο πεδίο maximum element size. Το πλέγμα στις επιφάνειες των κελιών δημιουργείται διαδοχικά. Κατά τη δημιουργία του επιφανειακού πλέγματος, το εξωτερικό περίβλημα κάθε επιφάνειας, στην οποία δημιουργείται το πλέγμα, φωτίζεται έντονα με ροζ χρώμα. Για πολύπλοκα μοντέλα, όπως και οι αλυσίδες των μονωτήρων που προσομοιώσαμε, ο χρόνος δημιουργίας του πλέγματος είναι αρκετά μεγάλος. Πάντως, αυτός ο χρόνος μπορεί να μειωθεί αρκετά, εάν ελαχιστοποιήσουμε το παράθυρο του Μοντελοποιητή. Κατόπιν, με την εντολή Generate volume mesh από το πεδίο Model, δημιουργούνται τα τετραεδρικά στοιχεία όγκου στο χώρο του μοντέλου. Η δημιουργία του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου είναι εφικτή, εφόσον υπάρχει έγκυρο επιφανειακό πλέγμα. Μετά και το πέρας της επιτυχούς δημιουργίας του πλέγματος στον όγκο του μοντέλου, το μοντέλο αποθηκεύεται

με την κατάληξη .opcb. Τυχόν αλλαγές στην τοπολογία του μοντέλου θα καταστρέψουν το πλέγμα. Επίσης, είναι δυνατόν να επιστρέψουμε σε παλαιότερο πλέγμα με την εντολή Undo, αλλά τα πλέγματα πριν από αυτό, θα έχουν διαγραφεί. Στο σχήμα Β.23 παρουσιάζονται τα δύο στάδια δημιουργίας του πλέγματος του μοντέλου.



(α)



(β)

Σχήμα Β.23: Δημιουργία πλέγματος (α) στην επιφάνεια του μοντέλου και (β) στον όγκο του μοντέλου.

7. Προετοιμασία του μοντέλου για ανάλυση

Σε αυτό το στάδιο, και προτιμότερο είναι να γίνει μετά τη δημιουργία του πλέγματος, προσδιορίζονται οι ιδιότητες κάθε ετικέτας, όπως η μαγνητική διαπερατότητα, η επιτρεπτότητα, η αγωγιμότητα και τυχόν θερμικές ιδιότητες του κάθε υλικού που χρησιμοποιείται στο εκάστοτε μοντέλο. Στα υλικά τίθενται οι ιδιότητές τους από το πεδίο Model→Set material properties. Στις επιφάνειες τίθενται οριακές συνθήκες από το πεδίο Model→Set boundary conditions. Τέλος, τίθενται και σε όγκους ιδιότητες από το πεδίο Model→Set volume properties.

8. Ανάλυση του μοντέλου

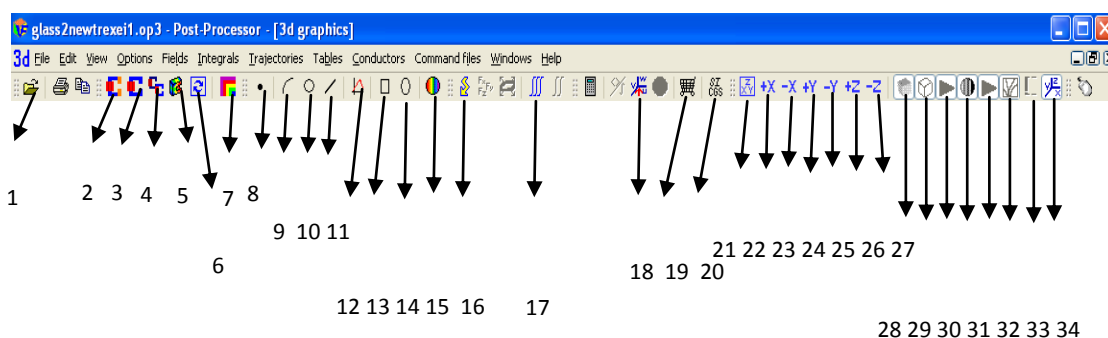
Από το πεδίο Model→Analysis settings επιλέγουμε όποιο πρόγραμμα ανάλυσης επιθυμούμε. Κατά την προσομοίωση των μονωτήρων, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα επίλυσης *Tosca electrostatics*. Κατόπιν, δημιουργούμε τη βάση δεδομένων του μοντέλου από το πεδίο Model→Create analysis database. Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε τις μονάδες κατασκευής του μοντέλου. Στα μοντέλα των μονωτήρων, επιλέξαμε το πεδίο SI (mm) για μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την επίλυση.

Μπορούμε να αποθηκεύσουμε το μοντέλο με το πλέγμα του και με τις έως τώρα αλλαγές που έχουν γίνει μέσω της εντολής File→Save model with mesh. Το τελικό στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιείται μέσω του πεδίου Model→Start Analysis.

9.Μετ-Επεξεργασία

Μετά το πέρας και αυτής της διαδικασίας, μπορούμε απευθείας να ανοίξουμε το παράθυρο του Μετ-Επεξεργαστή μέσω του Μοντελοποιητή με την εντολή Model→Launch Post Processor και να δούμε τα αποτελέσματα που επιθυμούμε, όπως την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου και γύρω από αυτό. Το αρχείο αυτό είναι πλέον αποθηκευμένο στο Μετ-Επεξεργαστή με κατάληξη .op3 και μπορούμε να το ανοίγουμε οποιαδήποτε στιγμή, για να λάβουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. 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 χρωματισμένων περιοχών (με την εντολή Contour map).

Στο σχήμα Β.24 φαίνεται η γραμμή εργαλείων στο Μετ-Επεξεργαστή και παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο τρόπος χρήσης του Μετ-Επεξεργαστή μέσω αυτής.



Σχήμα Β.24: Η γραμμή εργαλείων του Μετ-Επεξεργαστή.

- 1: Άνοιγμα ενός .op3 αρχείου για λήψη γραφικών και μη αποτελεσμάτων.
- 2: Επιλογή συγκεκριμένων κομματιών του μοντέλου προς επίδειξη στην οθόνη του Μετ-Επεξεργαστή (select parts of model to be displayed).
- 3: Κάνοντας αυτή την επιλογή, στην οθόνη εμφανίζονται όλα τα υλικά του μοντέλου εκτός από τον αέρα (Default select and refresh).

- 4: Γίνεται μόνο ανανέωση της εικόνας στο Μετ-Επεξεργαστή, χωρίς να γίνει κάποια αλλαγή σε προηγούμενες επιλογές όσον αφορά στην επίδειξη του μοντέλου.
- 5: Η επιλογή αυτή επιτρέπει την απεικόνιση μέσω χρωμάτων της μαγνητικής επαγωγής, του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού ή της διηλεκτρικής μετατόπισης πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου(3d display button).
- 6: Ανανέωση της εικόνας του μοντέλου.
- 7: Παρέχει τη δυνατότητα αλλαγής των χρωμάτων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.
- 8: Μέσω αυτής της εντολής, υπολογίζεται απευθείας η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, του δυναμικού, της μαγνητικής επαγωγής ή της διηλεκτρικής μετατόπισης σε ένα σημείο με συγκεκριμένες συντεταγμένες που καθορίζονται από το χρήστη (Fields at a point).
- 9: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός τόξου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες των άκρων και του κέντρου του.
- 10: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος ενός κυκλικού τόξου. Ο χρήστης καθορίζει τις συντεταγμένες του κέντρου, αλλά και την ακτίνα του.
- 11: Υπολογίζεται η τιμή του επιθυμητού ηλεκτρικού ή μαγνητικού μεγέθους κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής.
- 12: Μέσω αυτής της επιλογής, η οποία ακολουθείται από την 8, 9, 10 ή 11, απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος.
- 13: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός καρτεσιανού επιπέδου, πάνω στο οποίο, με το κουμπί 15 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a cartesian patch).
- 14: Με αυτή την εντολή καθορίζονται από το χρήστη οι συντεταγμένες ενός πολικού επιπέδου, πάνω στο οποίο, με το κουμπί 15 απεικονίζεται στο επίπεδο αυτό το επιθυμητό ηλεκτρικό ή μαγνητικό μέγεθος κάθε φορά (Fields on a polar patch).
- 15: Με αυτή την εντολή απεικονίζεται γραφικά το επιθυμητό μέγεθος πάνω σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, που έχει οριστεί πρώτα με τις εντολές 13 και 14. Το μέγεθος αυτό απεικονίζεται είτε ως χρωματισμένες περιοχές (zone map) είτε ως ιστόγραμμα (histogram) είτε ως γραμμές (lines) (Contour or vector map).
- 16: Παρέχει τη δυνατότητα να υπολογιστούν, μέσω της ολοκλήρωσης του όγκου του μοντέλου, διάφορα παράγωγα μεγέθη της γεωμετρίας, όπως η δύναμη, η ενέργεια και η χωρητικότητα (Energy, power and force button).
- 17: Ολοκλήρωση οποιασδήποτε επιθυμητής ποσότητας (μεγέθους) σε οποιονδήποτε όγκο του μοντέλου.

- 18: Υπολογισμός κάποιου μεγέθους σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.
- 19: Έλεγχος ποιού σύστημα μεταβλητών είναι διαθέσιμο για τους υπολογισμούς πεδίου.
- 20: Με αυτή την επιλογή, παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής μονάδων στο Μετ-Επεξεργαστή.
- 21: Επιτρέπει την ολοκληρωμένη θέαση του μοντέλου στην οθόνη (Initial view toolbar).
- 22: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα x.
- 23: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα x.
- 24: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα y.
- 25: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα y.
- 26: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του θετικού άξονα z.
- 27: Θέαση του μοντέλου κατά μήκος του αρνητικού άξονα z.
- 28-34: Επιτρέπουν ή αποτρέπουν τη θέαση κάποιων κομματιών του μοντέλου.

Προγράμματα ανάλυσης

Τα προγράμματα ανάλυσης ενσωματώνουν τους αλγόριθμους για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τις σύγχρονες διαδικασίες αριθμητικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργεί τη βάση για τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα προγράμματα ανάλυσης. Αυτή η τεχνική επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων απαιτεί ειδικές βελτιώσεις, ώστε να εφαρμοστεί σε υπολογισμούς ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ο Μοντελοποιητής και ο Προ-Επεξεργαστής του Opera-3d παρέχουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, τον καθορισμό σύνθετων γεωμετριών με αγωγούς, τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών, συμπεριλαμβανομένων λόγου χάρη μη-γραμμικότητας και ανισοτροπικότητας, καθώς και τη γραφική επίδειξη των αποτελεσμάτων [2].

Βιβλιογραφία

[1] PC OPERA 2D users manual

[2] PC OPERA 3D users manual

Παράρτημα Γ

Αβεβαιότητα μετρήσεων

Γ.1.Εισαγωγικά

Η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα μιας μέτρησης αποτελούσε στο παρελθόν περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη και λιγότερο μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης τρόπων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίησης της ποιότητας αυτής. Τις τελευταίες όμως δεκαετίες έγινε επιτακτική η ανάγκη για έναν κοινά αποδεκτό και έγκυρο τρόπο «μέτρησης» της ποιότητας μέτρησης, αφού έχει μεγάλη σημασία τα όργανα όχι μόνο να μετράνε σωστά, αλλά και να είναι γνωστό το πόσο σωστά μετράνε. Το ζητούμενο λοιπόν είναι η αποδοχή ενός ενιαίου μηχανισμού αποτίμησης της ποιότητας μέτρησης, δηλαδή της αβεβαιότητας (uncertainty) [1].

Κάθε μέτρηση, ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκειται σε σφάλματα και επομένως το αποτέλεσμα μιας μέτρησης εμπεριέχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Με τον όρο αβεβαιότητα προσδιορίζεται το εύρος τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης τιμής από το όργανο (\pm) μέσα στο οποίο βρίσκεται η «αληθινή» ή «πραγματική» τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Είναι φανερό ότι βασικό πρόβλημα της μετρολογίας είναι η εύρεση της «αληθινής» τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Παλαιότερα, η χρήση του όρου ακρίβεια προσδιόριζε τη μέγιστη απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την «αληθινή», ως εάν η «αληθινή» τιμή να ήταν απολύτως γνωστή. Εάν αυτό ήταν αληθές, τα προβλήματα της μετρολογίας θα είχαν επιλυθεί. Αντί για αυτό προσπαθούμε να προσεγγίσουμε το «σύννεφο» που περιβάλλει την «αληθινή» τιμή με όρους στατιστικής [2].

Επομένως, σήμερα είναι κοινά αποδεκτό μια ποσοτική δήλωση σχετική με οποιοδήποτε μέγεθος δεν μπορεί να είναι πλήρης εάν δεν περιλαμβάνει, εκτός από το αποτέλεσμα της μέτρησης, μια αναφορά στην αβεβαιότητα που συνοδεύει το αποτέλεσμα αυτό. Το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στις πληροφορίες ποσοτικού προσδιορισμού ενός μεγέθους υπακούει σε μια διπλή αναγκαιότητα : αφενός επισημαίνεται στο χρήστη της μέτρησης η πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων, επιστώντας την προσοχή του στον πεπερασμένο χαρακτήρα της γνώσης μας για μια συγκεκριμένη ποσότητα, αφετέρου δίνεται μια ποσοτική

εκτίμηση του διαστήματος μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, καθώς και της πιθανότητας να βρίσκεται η αληθής αυτή τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος αυτού [1-3].

Γ.2. Από το σφάλμα στην αβεβαιότητα

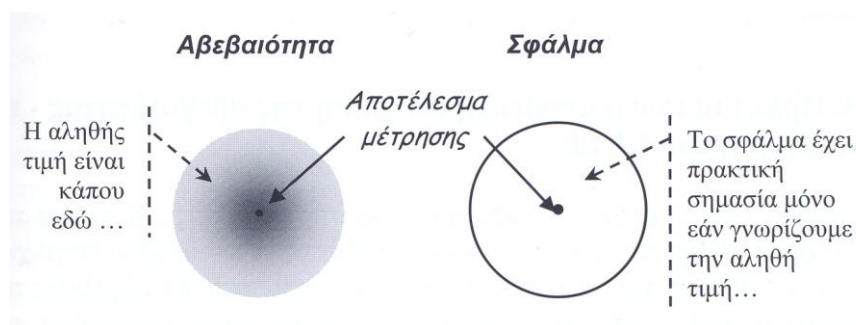
Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μιας αληθούς τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη λέξη αληθής χρησιμοποιείται το αόριστο άρθρο «μια» και όχι το οριστικό «η» για να τονιστεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερες από μία τιμές συμβατές με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους και ότι δεν μπορούμε να ξέρουμε ποια είναι η αληθής τιμή. Δηλαδή το σφάλμα είναι εξ ορισμού μια μη προσδιορίσιμη αφηρημένη έννοια, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την αληθή αλλά άγνωστη τιμή ενός μεγέθους [1].

Τα σφάλματα διακρίνονται σε συστηματικά και τυχαία. Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση ή χρήση των οργάνων, στην παράβλεψη ορισμένων φαινομένων, στον μη απόλυτο έλεγχο των συνθηκών του πειράματος, στον παρατηρητή ή σε άλλα εξωτερικά αίτια. Η αιτία των συστηματικών σφαλμάτων είναι γνωστή, όχι και όμως και η τιμή τους, ενώ υπακούουν σε φυσικούς νόμους. Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται στην έλλειψη ευαίσθητης απόκρισης του οργάνου ή του παρατηρητή, σε φαινόμενα όπου το ίδιο το σύστημα χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις, σε εξωτερικό «θόρυβο» ή σε στατιστικές διαδικασίες. Τα τυχαία σφάλματα έχουν άγνωστη αιτία και τιμή, δεν υπακούουν σε φυσικούς νόμους, ενώ μελετώνται στη θεωρία σφαλμάτων [3, 4].

Με τον όρο σφάλμα, λοιπόν, δεν εννοούμε την απόκλιση της μέτρησης από τη θεωρητικά αποδεκτή τιμή. Η έννοια του σφάλματος αναφέρεται στην αβεβαιότητα των μετρήσεων την οποία δεν μπορούμε να διορθώσουμε. Ακόμα και αν επαναλάβουμε τις μετρήσεις δεν μπορεί να εξαλειφθεί, μπορεί όμως να οδηγήσει σε μια κατανομή των μετρούμενων μεγεθών που μπορούν να αναλυθούν στατιστικά. Πρέπει επομένως το σφάλμα να διαφοροποιείται προσεκτικά από την αβεβαιότητα, η οποία αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Τελικά το σφάλμα δεν έχει ιδιαίτερα πρακτική χρησιμότητα, αφού εκφράζει τη διαφορά της αληθούς τιμής, που δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε, από μια μέτρηση, για την αξιοπιστία της οποίας δε διαθέτουμε καμία

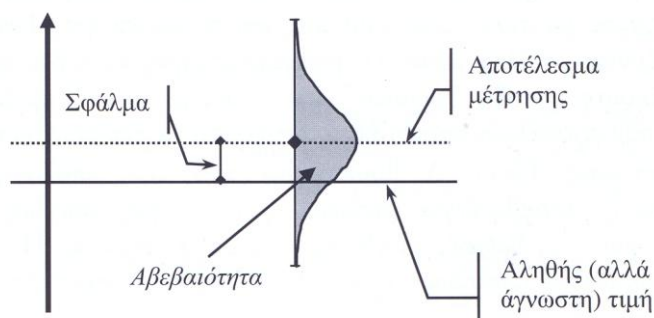
ένδειξη. Το σφάλμα αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών [1, 3].

Σε αντιδιαστολή με τον αφηρημένο χαρακτήρα του σφάλματος, η αβεβαιότητα ορίζεται πρακτικά –σύμφωνα με τον Guide to the expression of uncertainty (GUM)- ως παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος.



Σχήμα Γ.1 : Η αβεβαιότητα, συγκρινόμενη με το σφάλμα, δίνει μια θολή αλλά ρεαλιστική εικόνα για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Σχηματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η τοποθέτηση του σφάλματος στο επίκεντρο της προσοχής έχει τις ρίζες της σε μια ντετερμινιστική προσέγγιση, ενώ η αβεβαιότητα συνδέεται με μια στοχαστική προσέγγιση [1].

Η πληροφορία επομένως που διαθέτουμε για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης αφορά όχι μόνο στην εκτιμώμενη καλύτερη προσέγγιση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά και στη διασπορά των πιθανών τιμών που το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να έχει, με επίγνωση της αδυναμίας να εντοπιστεί η μία και μοναδική αληθής τιμή [1].



Σχήμα Γ.2 : Σφάλμα και αβεβαιότητα

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ένα αποτέλεσμα μέτρησης μπορεί τελικά να εμπεριέχει μικρό (αλλά άγνωστο) σφάλμα και να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα, όπως και αντίστροφα, μπορεί να χαρακτηρίζεται από μικρή αβεβαιότητα αλλά στην πραγματικότητα

το σφάλμα να είναι μεγάλο. Αυτό που απαιτείται είναι η διατύπωση ενός διαστήματος $\Delta X = (x_a, x_b)$, μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή με μια λιγότερο ή περισσότερο σημαντική πιθανότητα p , αποκαλούμενη πιθανότητα κάλυψης (coverage probability) ή επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level). Για τις συνήθεις κατανομές πιθανοτήτων η επιλογή ενός διαστήματος ΔX εκατέρωθεν της αναμενόμενης τιμής x_e , οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα εμπιστοσύνης. Εάν επιζητείται μεγαλύτερη πιθανότητα κάλυψης, είναι αναγκαία η αύξηση του διαστήματος, πολλαπλασιάζοντας αντίστοιχα την τυπική αβεβαιότητα με ένα συντελεστή κάλυψης k , η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος της κατανομής $f(x)$ και από το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης. Το γινόμενο $U_x = k u_x$ ονομάζεται διευρυμένη αβεβαιότητα και το τελικό αποτέλεσμα διατυπώνεται ως $x_e \pm U_x$ [1, 4].

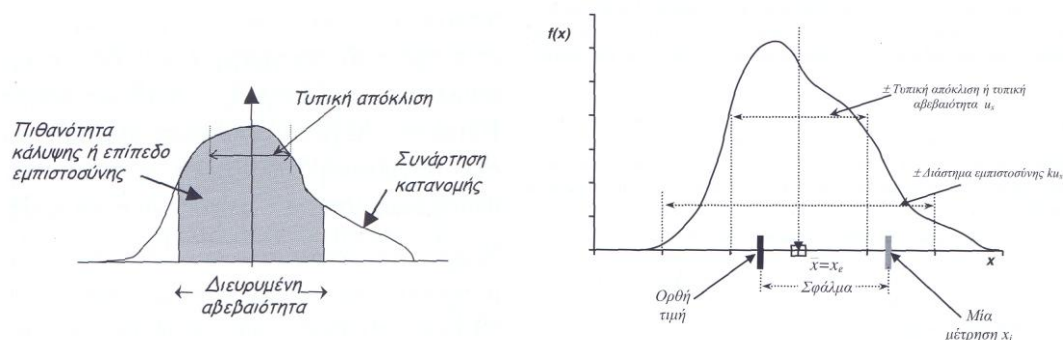
Πέρα λοιπόν από την πιθανότερη τιμή, απαιτείται η γνώση της τυπικής απόκλισης σ_x των πιθανών τιμών, αλλά και πληροφορίες για το είδος της κατανομής $f(x)$, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η τυπική αβεβαιότητα $u_x = \sigma_x$ και το διάστημα $(x_e - k u_x, x_e + k u_x)$, μέσα στο οποίο περιέχεται η ορθή αλλά άγνωστη τιμή για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης, το οποίο ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή κάλυψης k , που εξαρτάται με τη σειρά του από την επιθυμητή πιθανότητα εμπιστοσύνης [2].

Γ.3.Κατηγοριοποίηση αβεβαιοτήτων (Τύπου Α & Τύπου Β)

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν περιορίζεται σε καμία περίπτωση στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αφού πρόκειται για μία στοχαστική μεταβλητή και η αποδιδόμενη τιμή χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί είτε ως τυπική απόκλιση της συνάρτησης κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα, και αποκαλείται τότε «τυπική αβεβαιότητα», είτε ως διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή, με μια ορισμένη στάθμη σιγουριάς ή εμπιστοσύνης, και αποκαλείται «διευρυμένη αβεβαιότητα».

Πρέπει να τονισθεί ότι, η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την ποιότητα μίας μέτρησης και πιο συγκεκριμένα το αποτέλεσμά της. Δεν αφορά άμεσα τα παρατηρούμενα μεγέθη, τα οποία είναι δεδομένα και ανεξάρτητα από τη δυνατότητα του παρατηρητή να τα προσεγγίσει. Η αβεβαιότητα αφορά πάντα μια συγκεκριμένη τιμή, όπως αυτή εκτιμήθηκε κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, σύμφωνα με συγκεκριμένη διαδικασία, και χαρακτηρίζει τη γνώση που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Είναι επομένως δυνατόν, κάποιος άλλος να

δώσει μια άλλη εκτίμηση τόσο για την τιμή του ίδιου μεγέθους όσο και για την αβεβαιότητα που συνοδεύει την τιμή αυτή.



Σχήμα Γ.3 ,Γ. 4 : Κατανομή πιθανοτήτων των πιθανών τιμών μιας μεταβλητής [1]

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους : οι αβεβαιότητες **τύπου Α**, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους, και οι αβεβαιότητες **τύπου Β**, που υπολογίζονται με άλλα μέσα. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν αντιστοιχεί στη διάκριση μεταξύ «τυχαίων» και «συστηματικών» αβεβαιοτήτων [1-5].

Οι συνιστώσες **τύπου Α** προκύπτουν από τη μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος, ενώ είναι συχνά απαραίτητη και η γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance).

Οι συνιστώσες **τύπου Β**, παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Η τυπική αυτή αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση της αντίστοιχης μεταβλητότητας, η ύπαρξη της οποίας υφίσταται ως υπόθεση.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα προκύπτει από το συνδυασμό όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενων με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων.

Γ.4.Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου Α

Η αβεβαιότητα τύπου Α (random uncertainty, σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC 60-2, 1994, Amendment 1 High Voltage Test Techniques, Part 2 : Measuring Systems, Annex H Procedure for estimating uncertainty in High Voltage measurements) χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα x μιας μέτρησης προκύπτει από τις τιμές x_i , $i=1,2,\dots,n$ των n ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας μη μεταβαλλόμενης ποσότητας X , κάτω από

ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας, χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης χαρακτηριζόμενα από αμελητέα απόκλιση στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η μέτρηση.

Οι αβεβαιότητες τύπου A υπολογίζονται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και για λόγους πρακτικούς όσο και στατιστικούς προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις [5]:

α) U_r για μικρό αριθμό μετρήσεων (π.χ. 10)

Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$U_r = \frac{ts_r}{\sqrt{n}}$$

όπου t : συντελεστής Student (Student's factor)

P : το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level)

s_r : τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων που δίνεται από τη σχέση

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}$$

όπου n : ο αριθμός των μετρήσεων

x_i : οι μετρηθείσες τιμές

x_m : η μέση τιμή των μετρήσεων

Πίνακας Γ.1 : Τιμές του συντελεστή Student 't' για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης συναρτήσει του αριθμού των μετρήσεων[5]

n \ P%	68,3	90	95	99,7
2	1,84	6,31	12,7	-
3	1,32	2,92	4,30	-
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
∞	1,00	1,65	1,96	3,00

β) U_r μεγάλο αριθμό μετρήσεων ($n \gg 10$)

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (που είναι και αυτό που ζητείται συνήθως) και για ένα δείγμα με περισσότερες από 10 μετρήσεις ($n \gg 10$), ο συντελεστής Student t μπορεί να αντικατασταθεί από το συντελεστή κάλυψης k. Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα της μέσης τιμής είναι :

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n}}$$

γ) Χρησιμοποίηση προϋπάρχουσας γνώσης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν υφίσταται προηγούμενη πληροφορία για τη συμπεριφορά του οργάνου ή της μεθόδου μέτρησης. Η πληροφορία αυτή αφορά μια ήδη γνωστή τυπική απόκλιση s_r , η οποία υπολογίστηκε από μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων παρόμοιου μεγέθους, σε παρόμοιες συνθήκες μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή αντί να χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση του μικρού τρέχοντος δείγματος μετρήσεων, χρησιμοποιείται η παλαιότερα υπολογισμένη s_r και η αβεβαιότητα λαμβάνεται ίση με :

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n_2}}$$

Γ.5. Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B

Αβεβαιότητα τύπου B (systematic uncertainty) έχουμε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα υπολογίζεται αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους, έτσι ώστε να οικοδομηθεί μια εικόνα για την πιθανή κατανομή των τιμών του μεγέθους. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατόν να προέρχονται από :

- πιστοποιητικά διακρίβωσης
- δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις
- εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση
- χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης

- υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου [1]

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου Β είναι :

$$U_s = k \cdot s_s = k \cdot \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2}$$

όπου s_{sa} η τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής και s_{sg} η τυπική απόκλιση στην περίπτωση κανονικής κατανομής.

Όταν η διαθέσιμη πληροφορία αφορά μόνο στα όρια $\pm a$ ανάμεσα στα οποία κυμαίνεται το αναμενόμενο σφάλμα, χωρίς να υπάρχουν ειδικότερες ενδείξεις για την κατανομή ανάμεσα στα όρια αυτά, τότε η υποτιθέμενη κατανομή είναι ομοιόμορφη (ορθογώνια) και η τυπική

απόκλιση είναι ίση με : $s_{sa} = \frac{a}{\sqrt{3}}$. Στην περίπτωση που έχουμε n ανεξάρτητες κατανομές η

τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$s_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}}$$

Όταν η αβεβαιότητα δίνεται μαζί με ένα επίπεδο εμπιστοσύνης, τότε πρέπει να υποθεθεί ότι έχουμε κανονική κατανομή. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι της τάξης του 95% , η τιμή

του συντελεστή k είναι 2 και η τυπική απόκλιση είναι : $s_{sg} = \frac{U_{95}}{2}$. Έτσι η εξίσωση (5.15)

γίνεται :

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_{95}}{2}\right)^2}$$

Η γενική μορφή της εξίσωσης (5.15) γίνεται :

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_m}{k_m}\right)^2}$$

όπου U_1 έως U_m είναι οι αβεβαιότητες (calibration contribution) με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης

k_1 έως k_m οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης [5]

Γ.6. Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας

Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$u_{total} = \sqrt{U_r^2 + U_s^2}$$

Γ.7. Συνδυασμός αβεβαιοτήτων – Νόμος διάδοσης αβεβαιοτήτων

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους Y πραγματοποιείται έμμεσα, δηλαδή στη βάση απευθείας μετρήσεων μιας σειράς πρωτογενών μεγεθών X_i , $i=1,2,\dots,N$. Η μετρούμενη κάθε φορά τιμή y_i του Y προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών x_1, x_2, \dots, x_N των πρωτογενών μεγεθών μέσω μιας συνάρτησης $Y=M(X_1, X_2, \dots, X_N)$ η οποία αντιπροσωπεύει το φυσικό μοντέλο συσχέτισης των μετρούμενων στην πράξη με το προς μέτρηση μέγεθος.

Ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων (law of error propagation) προκύπτει από την ανάπτυξη σε $1^{η}$ τάξης σειρά Taylor της συνάρτησης $M(Y)$ γύρω από το σημείο της μέτρησης $y_e=M(x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{Ne})$. Η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα (standard combined uncertainty) γύρω από την τιμή μέτρησης δίνεται από την παρακάτω σχέση, γνωστή και ως νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων [1] :

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial M}{\partial x_i} \frac{\partial M}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

όπου u_{x_i} είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους X_i και $u(x_i, x_j)$ είναι η συμμεταβλητότητα μεταξύ X_i και X_j .

Συνήθως στις δοκιμές τα μεγέθη X_1, X_2, \dots, X_N θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και η παραπάνω σχέση γράφεται : [26]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2$$

Γ.8.Υπολογισμός αβεβαιότητας

Γ.8.1.Παράγοντες αβεβαιότητας για το μαγνητικό πεδίο

1. Το σφάλμα μέτρησης του οργάνου ($\Delta E_{READING}$): Ο κατασκευαστής του κάθε οργάνου δίνει το σφάλμα μέτρησης για το μαγνητικό πεδίο.
2. Το σφάλμα διακρίβωσης ($\Delta E_{CALIBRATION}$): Αυτό δίνεται στο πιστοποιητικό διακρίβωσης του οργάνου. Στο πιστοποιητικό διακρίβωσης γίνεται αναφορά σε βαθμό εμπιστοσύνης (95%), $k=2$ και η κατανομή λαμβάνεται ως κανονική.
3. Η αβεβαιότητα μέτρησης ανομοιογενούς μαγνητικού πεδίου (ΔE_{FIELD}): (βλέπε Β.1.1 του Προτύπου) προκύπτει από την απόσταση μέτρησης και την ακτίνα του ανιχνευτή.

Γ.8.2.Παράδειγμα υπολογισμού αβεβαιότητας για το μαγνητικό πεδίο

Δίνεται παράδειγμα υπολογισμού της αβεβαιότητας για τα δύο πεδίομετρα:

Πίνακας Γ.1: Υπολογισμός αβεβαιότητας μαγνητικού πεδίου για το Narda EFA 300

Παράγων αβεβαιότητας X_i	x_i (%)	Κατανομή	Συντελεστής κατανομής	$u(x_i)$	c_i	Τυπική Αβεβαιότητα $u_i(y)$	$u^2(y)$	Πηγή
$\Delta E_{READING}$	3	ορθογώνια	1,73	1,73	1	1,73	3	Manual
$\Delta E_{CALIBRATION}$	1	κανονική	2	0,5	1	0,5	0,25	Πιστοποιητικό
ΔE_{FIELD}	0,9	ορθογώνια	1,73	0,52	0,991	0,515	0,265	Πρότυπο (Πίνακας Β1)
U_B	$U_B = \sqrt{\Delta E_{READING}^2 + \Delta E_{CALIBRATION}^2 + \Delta E_{FIELD}^2}$					1,87	3,515	
Επαναληψιμότητα (U_A)	1,37	κανονική	1	1,37	1	1,37	1,88	
Συνολική ΔU	$\Delta U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$					2,32		

Η επαναληψιμότητα (%) προκύπτει από μετρήσεις. Κάνουμε N μετρήσεις (π.χ. 5) και

υπολογίζεται από τη σχέση: $U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \cdot \frac{100}{\mu}$

1	2	3	4	5	μ	σ
0,391μT	0,372μT	0,395μT	0,402μT	0,380μT	0,388μT	0,0119μT

Διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty):

$$U = k * u(\Delta U) = 2 * 2,32 = \pm 4,64 \% \text{ (το } k=2 \text{ μας δίνει βαθμό εμπιστοσύνης 95\%)}$$

Για το πεδίομετρο PMM 8053 με τον αισθητήρα EHP-50C ο υπολογισμός αβεβαιότητας μαγνητικού πεδίου έχει γίνει στη σελίδα 6 του εγχειριδίου της NARDA (ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD ANALYZER, EHP-50C, Narda, 09-09 - EHP-50C) και είναι η διευρυμένη αβεβαιότητα (με $k=2$ που για κανονική κατανομή μας δίνει βαθμό εμπιστοσύνης 95%) δίνεται στον πίνακα 2:

Πίνακας Γ.2: Υπολογισμός αβεβαιότητας μαγνητικού πεδίου για το PMM 8053 με τον αισθητήρα EHP-50C

Συχνότητα	Εύρος μαγνητικού πεδίου	Διευρυμένη αβεβαιότητα
50Hz	0,1 μ T to < 0,3 μ T	4,2
	0,3 μ T to < 10,0 μ T	3,5
	10,0 μ T to < 100 μ T	4,3
	100 μ T to 500 μ T	4,8
40Hz – 10kHz	0,1 μ T to < 0,3 μ T	6,7
	0,3 μ T to > 10,0 μ T	6,3

Γ.8.3. Παράγοντες αβεβαιότητας για το ηλεκτρικό πεδίο

1. Το σφάλμα μέτρησης του οργάνου ($\Delta E_{READING}$): Ο κατασκευαστής του κάθε οργάνου δίνει το σφάλμα μέτρησης για το ηλεκτρικό πεδίο.
2. Το σφάλμα διακρίβωσης ($\Delta E_{CALIBRATION}$): Αυτό δίνεται στο πιστοποιητικό διακρίβωσης του οργάνου. Στο πιστοποιητικό διακρίβωσης γίνεται αναφορά σε βαθμό εμπιστοσύνης (95%), $k=2$ και η κατανομή λαμβάνεται ως κανονική.
3. Η αβεβαιότητα μέτρησης ανομοιογενούς ηλεκτρικού πεδίου (ΔE_{FIELD}): (βλέπε Β.2.8 του Προτύπου) προκύπτει από την απόσταση μέτρησης και την ακτίνα του ανιχνευτή.

Γ.8.4. Παράδειγμα υπολογισμού αβεβαιότητας για το ηλεκτρικό πεδίο

Δίνεται παράδειγμα υπολογισμού της αβεβαιότητας για τα δύο πεδίομετρα:

Η επαναληψιμότητα (%) του ηλεκτρικού πεδίου για το Narda προκύπτει από μετρήσεις.

Κάνουμε N μετρήσεις (π.χ. 5) και υπολογίζεται από τη σχέση: $U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \cdot \frac{100}{\mu}$

1	2	3	4	5	μ	σ
22,52 V/m	21,30 V/m	22,41 V/m	21,21 V/m	20,72 V/m	21.632 V/m	0.793 V/m

Πίνακας Γ.3: Υπολογισμός αβεβαιότητας ηλεκτρικού πεδίου για το Narda

Παράγων αβεβαιότητας X_i	x_i (%)	Κατανομή	Συντελεστής κατανομής	$u(x_i)$	c_i	Τυπική Αβεβαιότητα $u_i(y)$	$u^2(y)$	Πηγή
$\Delta E_{\text{READING}}$	3	ορθογώνια	1,73	1,73	1	1,73	3	Manual
$\Delta E_{\text{CALIBRATION}}$	1	κανονική	2	1	1	1	1	Πιστοποιητικό
ΔE_{FIELD}	0,9	ορθογώνια	1,73	0,52	0,991	0,515	0,265	Πρότυπο (Πίνακας B1)
U_B	$U_B = \sqrt{\Delta E_{\text{READING}}^2 + \Delta E_{\text{CALIBRATION}}^2 + \Delta E_{\text{FIELD}}^2}$					2,065	4,265	
Επαναληψιμότητα (U_A)	3,66	κανονική	1	3,66	1	3,66	13,43	
Συνολική ΔU	$\Delta U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$					4,21	17,70	

Διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty):

$$U = k * u(\Delta U) = 2 * 4,21 = \pm 8,42 \% \text{ (το } k=2 \text{ μας δίνει βαθμό εμπιστοσύνης 95\%)}$$

Για το πεδιόμετρο PMM 8053 με τον αισθητήρα EHP-50C ο υπολογισμός αβεβαιότητας ηλεκτρικού πεδίου έχει γίνει στη σελίδα 6 του εγχειριδίου της NARDA (ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD ANALYZER, EHP-50C, Narda, 09-09 - EHP-50C) και είναι η διευρυμένη αβεβαιότητα (με $k=2$ που για κανονική κατανομή μας δίνει βαθμό εμπιστοσύνης 95%) δίνεται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας Γ.4: Υπολογισμός αβεβαιότητας ηλεκτρικού πεδίου για το PMM 8053 με τον αισθητήρα EHP-50C

Συχνότητα	Εύρος ηλεκτρικού πεδίου	Διευρυμένη αβεβαιότητα
50Hz	10 V/m to 500 V/m	8,2
	10 V/m to <100 kV/m	8,8
40Hz – 10kHz	10 V/m to <500 V/m	9,9

Βιβλιογραφία

- [1] Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα»,
Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων
- [2] Άρθρο του Δρ. Α. Λευκόπουλου, Διευθυντή τομέα διακρίβωσης & διευθυντή
εργαστηρίου θερμοκρασίας της C3T, «Αβεβαιότητα μετρήσεων»
- [3] Νικόλαος Ι. Θεοδώρου, «Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τεύχος Ι : Κλασσικές μετρήσεις»,
Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2000
- [4] <http://physlab.phys.uoa.gr> Ιστοσελίδα του εργαστηρίου φυσικής του Τμήματος
Φυσικής του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών
- [5] IEC 60-2, 1994, Amendment 1 High Voltage Test Techniques, Part 2 : Measuring
Systems, Annex H Procedure for estimating uncertainty in high voltage
measurements