



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

**Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παραγόμενου  
από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Δ. Πιπής

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Γεώργιος Π. Φώτης

Αθήνα, Μάιος 2005



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

123

## Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παραγόμενου από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Δ. Πιπής

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Γεώργιος Π. Φώτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25<sup>η</sup> Μαΐου 2005.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάιος 2005

*Στην οικογένειά μου*

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# Περίληψη

---

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας η διερεύνηση του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Η μελέτη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χρήζει ιδιαίτερας προσοχής λόγω των επαγόμενων τάσεων που δημιουργεί και που μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα δοκιμών που διενεργούνται σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2.

Για αυτό το λόγο και προκειμένου να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη και μετρήθηκε το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης χρησιμοποιώντας δυο διαφορετικά μοντέλα γεννητριών. Οι μετρήσεις οι οποίες διεξήχθησαν έγιναν με εμπορικούς αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου και όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής (Pellegrini target) ήταν πάνω σε μονωτικό υλικό. Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγιναν εκφορτίσεις επαφής για τάσεις  $\pm 2$  kV ενώ πραγματοποιήθηκαν και κάποιες εκφορτίσεις μέσω αέρα.

Το αποτέλεσμα των παραπάνω πειραμάτων ήταν ότι διαφορετικές ηλεκτροστατικές γεννήτριες παράγουν στα ίδια σημεία διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Επιπλέον καταγράφηκε η μείωση της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης.

## Λέξεις κλειδιά

---

Ηλεκτρομαγνητική ατρωσία, γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, Πρότυπο IEC 61000-4-2, ένταση ηλεκτρικού πεδίου, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, ανηχοϊκός θάλαμος, αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου, εκφορτίσεις αέρος, εκφορτίσεις επαφής.

# Abstract

This diploma thesis attempts to investigate the radiating electric field, which is produced by electrostatic discharges. The study of the produced electromagnetic field is very crucial to be made, due to the fact that the induced voltages may affect the test results, which are conducted according to the IEC 61000-4-2.

For this reason and in order to study the behavior of the strength of the electric field an experimental setup was constructed and the produced electric field was measured for various distances from the discharge point, using two different ESD generators. The measurements, which were conducted, were made using commercial electric field probes, when the Pellegrini target was mounted on an insulating material. The experiment was made for contact discharges at  $\pm 2$  kV and for a limited number of air discharges.

The results of this experiment were that for the same point from the discharge point different electrostatic discharge generators was producing different electric field, during the ESD event. Also, it was observed that the maximum values of the electric field strength was induces as the distance from the discharge point was increased.

---

## Key words

Electromagnetic immunity, ESD generators, IEC 61000-4-2, Electric field strength, Pellegrini target, electrostatic discharge (ESD), anechoic chamber, electric field probes, air discharge, contact discharge.

# Περιεχόμενα

	<b>Σελίδα</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	i
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	iv
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση</b>	
1.1 Γενικά για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα	1
1.2 Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic charge)	3
1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	3
1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής	6
1.3 Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και τα μέτρα προστασίας που μπορούν να ληφθούν	7
1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	7
1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού	8
1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση	9
1.4.1 Γενικά	9
1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Πρότυπο IEC 61000-4-2</b>	
2.1 Σκοπός	13
2.2 Εξοπλισμός δοκιμών	13
2.2.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκκενώσεων	14
2.2.2 Περιγραφή του χώρου δοκιμών	16
2.2.3 Διάταξη δοκιμών	17
2.3 Παράμετροι που ελέγχονται από το Πρότυπο IEC-61000-4-2	17
2.4 Τι ορίζει το ANSI για τις κυματομορφές του ρεύματος εκφορτίσεως	18
2.4.1 Δοκιμές ESD μέσω αέρα ή επαφής	18
2.4.2 Ρεύμα ESD σύμφωνα με το πρότυπο ANSI	19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b>	
3.1 Σκοπός	21
3.2 Το ηλεκτρικό δίπολο	21
3.3 Πεδιακή ανάλυση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	22
3.3.1 Αναλυτική επίλυση –Εγγύς και μακρινό πεδίο	22
3.4 Η μεταβολή του πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση	24
3.5 Η ενέργεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	27
3.6 Ανασκόπηση πειραματικών δεδομένων	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Πειραματική διάταξη</b>	
4.1 Εισαγωγή	31
4.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων	31
4.3 Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης	31
4.3.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)	33
4.3.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433	33
4.3.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438	35

4.3.2	Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης	38
4.3.3	Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας	38
4.3.4	Εξασθενητής (attenuator)	39
4.3.5	Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B	39
4.3.6	Αισθητήρες μέτρησης της έντασης E του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	41
4.3.7	Θωρακισμένος θάλαμος (transient immunity room)	42
4.3.8	Εποπτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης	43
4.4	Ανακατασκευή ρεύματος	43
4.5	Ανακατασκευή ηλεκτρικού πεδίου	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Πειραματικά αποτελέσματα</b>		
5.1	Εισαγωγή	47
5.2	Γραφικές παραστάσεις	47
5.2.1	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-433	48
5.2.2	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-433	62
5.2.3	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-438	67
5.2.4	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-438	81
5.2.5	Εκφορτίσεις μέσω αέρα υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-433	85
5.2.6	Εκφορτίσεις μέσω αέρα υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-438	89
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Σύγκριση αποτελεσμάτων</b>		
6.1	Εισαγωγή	91
6.2	Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των δυο γεννητριών σε διάφορα σημεία για εκφορτίσεις επαφής	91
6.2.1	Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2 kV	91
6.2.2	Συγκρίσεις για τάση φόρτισης -2 kV	94
6.3	Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικά σημεία από το σημείο εκφόρτισης	97
6.3.1	Γεννήτρια NSG-438	97
6.3.2	Γεννήτρια NSG-433	98
6.4	Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε ισαπέχοντα σημεία από το σημείο εκφόρτισης αλλά, σε διαφορετικές κατευθύνσεις	100
6.4.1	Γεννήτρια NSG-438	100
6.4.2	Γεννήτρια NSG-433	103
6.5	Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο ίδιο σημείο για εκφορτίσεις αέρα και εκφορτίσεις επαφής	106
6.6	Μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου (E) συναρτήσει του χρόνου για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση $\pm 2\text{KV}$ με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438	111

6.7	Συμπεράσματα	113
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>	<b>Η επόμενη μέρα</b>	116
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	117



# Πρόλογος

---

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Πιππή Κωνσταντίνου για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που παράγεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και έγιναν μετρήσεις που παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης και σε διαφορετικούς άξονες. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν τοποθετημένος πάνω σε μονωτικό υλικό. Οι εκφορτίσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν ήταν κυρίως εκφορτίσεις επαφής για τάσεις  $\pm 2$  kV ενώ έγιναν και κάποιες εκφορτίσεις μέσω αέρα. Στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων στο MATLAB έγινε επεξεργασία των μετρήσεων, σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο και συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί, που θα μας επιτρέψουν να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο που θα εξετάσουμε. Επίσης αναφερόμαστε στους τρόπους με τους οποίους δημιουργείται η ηλεκτροστατική φόρτιση και στα μέτρα τα οποία μπορούν να ληφθούν προκειμένου να προστατεύσουμε τον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό μας.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2. Το Πρότυπο αυτό σχετίζεται με τη μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκκενώσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα. Επίσης γίνεται αναφορά στο Πρότυπο ANSI C63[1].16 1993, που αποτελεί την αντίστοιχη έκδοση του IEC 61000-4-2 σύμφωνα με τα Αμερικανικά Πρότυπα και παρουσιάζονται οι κύριες διαφορές τους.

Το **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βάση το στοιχειώδες ηλεκτρικό δίπολο και δίνονται οι αναλυτικές εκφράσεις τόσο για το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο. Επίσης, παρουσιάζονται στοιχεία

από μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν σχετικά με το πώς μεταβάλλεται το πεδίο σε συνάρτηση με την απόσταση και την κατεύθυνση σε σχέση με το σημείο εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφει την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και τον εργαστηριακό εξοπλισμό που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Επίσης γίνεται αναφορά στη διαδικασία ανακατασκευής του ρεύματος, καθώς και του ηλεκτρικού πεδίου που παράγονται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E) που παρουσιάζονται προέκυψαν κυρίως από εκφορτίσεις επαφής με τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 για τάσεις  $\pm 2$  kV ενώ υπάρχουν και γραφήματα για κάποιες εκφορτίσεις μέσω αέρα. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων στο MATLAB.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται σε κοινά διαγράμματα οι συγκρίσεις μεταξύ των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 και γίνεται αναλυτική περιγραφή των συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτά.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** αναφερόμαστε στα μελλοντικά πειράματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου να αποκτήσουμε μια όσο γίνεται πιο ολοκληρωμένη εικόνα πάνω στο θέμα του παραγόμενου πεδίου από ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον Ι. Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για τη συμπαράστασή του και το ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον που μου παρείχε.

Τον Γ. Π. Φώτη, Υποψήφιο Διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την βοήθεια, καθοδήγηση και συμπαράστασή του, καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της μελέτης.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που πρόθυμα προσέφερε τη βοήθειά του και τις γνώσεις του πάνω σε θέματα προγραμματισμού που αφορούσαν τη διπλωματική μου εργασία και κυρίως πάνω σε θέματα του προγράμματος MATLAB

Τους συναδέλφους μου κ.κ. Λεονάρδο Στεφάνου και Ιωάννη Ζαφειρόπουλο, με τους οποίους συνεργάστηκα καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και αντάλλαξα χρήσιμες πληροφορίες για να φτάσει η παρούσα εργασία στην τελική της μορφή.

Την κυρία Ηλία Λέτα υπεύθυνη του εργαστηρίου για την βοήθεια στην πραγματοποίηση του πειράματος και της χρήσης του εξοπλισμού.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα τον κο Ηλία Χρήστο για την τεχνική υποστήριξη στην διεξαγωγή του πειράματος.

Τέλος δεν θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

### 1.1 Γενικά για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC), αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με σκοπό τη δυνατότητα αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά. Εάν επιτυγχάνεται αυτό τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο.

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων πριν περίπου έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και όλες οι προοπτικές δείχνουν ότι τα επόμενα χρόνια θα αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική ανησυχία, καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας.

Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξη τους.

Σύμφωνα με το IEEE [1]

*Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα* (EMC) είναι η ικανότητα μιας διάταξης μιας συσκευής ή ενός συστήματος, να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σε αυτό το περιβάλλον.

Είναι χρήσιμο να δοθούν στο σημείο αυτό οι ορισμοί των όρων που συναντώνται στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα:

*Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα* (Electromagnetic susceptibility) είναι η αδυναμία μιας διάταξης ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ανοσίας.

*Ανοσία ή Ατρωσία* (Immunity level) σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της/του με την παρουσία μιας ηλεκτρικής διαταραχής.

*Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας* (Electromagnetic Compatibility Level): Η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μια διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.

*Στάθμη Ανοσίας ή Ατρωσίας* (Immunity level) είναι η μέγιστη στάθμη μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.

*Όριο Ανοσίας ή Ατρωσίας* (Immunity Limit) είναι η καθορισμένη στάθμη ανοσίας.

*Περιθώριο Ανοσίας ή Ατρωσίας* (Immunity Margin) είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ανοσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

*Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας* (Electromagnetic Compatibility Margin): Είναι ο λόγος της στάθμης ανοσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος ως προς μία στάθμη διαταραχής αναφοράς.

*Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή* (Electromagnetic Interference): Είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μίας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή ίδιου του μέσου διάδοσης.

Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με τη συχνότητα, αλλά οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι όταν αντιμετωπίσει κανείς ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, είναι σημαντικό να έχει στο νου του ότι θα υπάρχει πιθανόν μία περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης μία αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων μέσα στην οποία θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών. Συνεπώς λοιπόν η συχνότητα και το μέγεθος παίζουν σημαντικούς ρόλους.

## 1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)

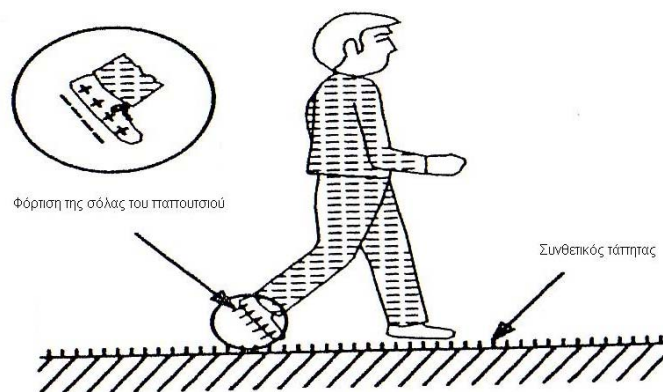
Η ηλεκτροστατική φόρτιση δημιουργείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι όταν κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο ενώ βρίσκονται σε επαφή (π.χ. ένα αέριο που κινείται ως προς ένα στερεό ή ένα στερεό σε επαφή με ένα άλλο στερεό) συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία [1], [2]. Ο δεύτερος είναι η φόρτιση εξ επαγωγής.

### 1.2.1 Τριβηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια αποχωριστούν, θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια γίνεται φορτίζεται αρνητικά. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 kV, με αποθηκευόμενες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές.

Ο όρος τριβηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.

Η τριβηλεκτρική σειρά γενικά δεν προλέγει τη σωστή πολικότητα της φόρτισης που παρατηρείται σε κάθε περίπτωση. Το αν ένα υλικό φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται στην τριβηλεκτρική σειρά του Πίνακα 1.1 που ακολουθεί όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).



Σχήμα 1.1 : Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο

Η φόρτιση εξ επαφής είναι ο πιο κοινός τρόπος εμφάνισης στατικού φορτίου. Άλλοι τρόποι, όπως μία δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση corona είναι επίσης δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η απότομη μεταφορά αυτού του φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο όταν πρόκειται για αντίθετα φορτισμένα σώματα και όταν αυτά βρεθούν σε πολύ κοντινή απόσταση λέγεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 1.2.

Η σχετική θέση του υλικού στην τριβοηλεκτρική σειρά είναι μόνο ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. Δυο υλικά τα οποία είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μπορούν να δημιουργήσουν μία ευρεία στατική φόρτιση.

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και κυρίως από την υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας τόσο πιο συχνές είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά πιο ήπιες μορφής. Αντίθετα όταν υπάρχει αυξημένη ξηρασία η συχνότητα των εκφορτίσεων είναι μικρότερη, αλλά οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλος χρόνος ανόδου). Επιβλαβής τάσεις μπορεί ακόμα να δημιουργηθούν ακόμα και 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

Μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι:

- Εκρήξεις σε υπέρ-δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους.
- Ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους.
- Εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροσκαφών.
- Βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που παράγονται από διαφορετικά γεγονότα φαίνονται στον Πίνακα 1.3. Γενικά είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ	
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ
Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυαλί Ανθρώπινα μαλλιά Νάιλον Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι Ξύλο Ατσάλι	Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο , Χαλκός , Ασήμι Ανοξειδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλαίνιο PVC TEFLON Λάστιχο σιλικόνης

Πίνακας 1.1 : Τριβοηλεκτρική σειρά

Συντελεστές παραγωγής της φόρτισης	Συντελεστές εκφόρτισης
Σχετική θέση στην τριβοηλεκτρική σειρά	Αγωγιμότητα των υλικών
Επιφάνεια επαφής	Σχετική υγρασία
Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών	Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών
Βαθμός διαχωρισμού	Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού

Πίνακας 1.2 : Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		
	10%	40%	55%
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35	15	7,5
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο βινυλίου	12	5	3
Κινήσεις ενός εργαζομένου στο γραφείο	6	0,8	0,4

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)

Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [3], [4] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

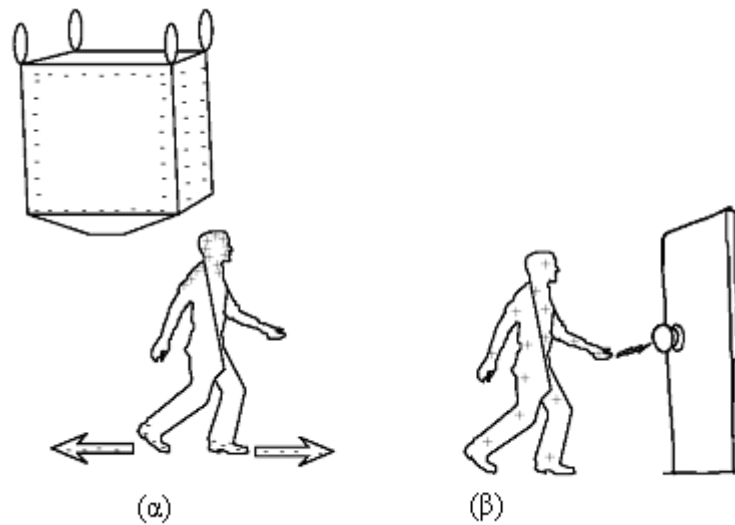


Η ηλεκτροστατική φόρτιση είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος για τις ηλεκτρονικές διατάξεις η οποία μπορεί να διαταράξει ή και να καταστρέψει ακόμη, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συστήματα τα οποία βρίσκονται κοντά σε αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε από τα παροδικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος.

### 1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Μερικές φορές η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να μη γίνει με το τριβηλεκτρικό φαινόμενο [5], αλλά μπορεί να γίνει εξ επαγωγής. Συγκεκριμένα όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (όπως για παράδειγμα όταν βρίσκεται δίπλα σε ένα φορτισμένο σώμα) τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό θα τείνουν να χωριστούν, κατευθυνόμενα είτε προς αυτό είτε από αυτό. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο και της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της αγώγιμης σύνδεσης. Έτσι, το αντικείμενο θα αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό ακολουθεί το Σχήμα 1.2 στο οποίο φαίνεται ένας άνθρωπος (πολύ καλός αγωγός) δίπλα σε μια μεγάλη δεξαμενή η οποία περιέχει ένα μεγάλο φορτίο αρνητικής πολικότητας. Τα αρνητικά με τα θετικά φορτία διαχωρίζονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω των υποδημάτων και του δαπέδου. Τελικά το ανθρώπινο σώμα φορτίζεται θετικά αντίθετα από το γειτνιάζον αντικείμενο. Επομένως όταν ο άνθρωπος πλησιάσει με το θετικό φορτίο που έχει αποκτήσει την πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2β.



Σχήμα 1.2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής

### 1.3 Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και τα μέτρα προστασίας που μπορούν να ληφθούν

#### 1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Όπως έχει προαναφερθεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση παρατηρείται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους [2]. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορεί να λάβουν χώρα:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα και στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.
- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματά τους είναι μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.

- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

### 1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η προστασία από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορεί να γίνει τόσο με προληπτικά μέτρα, όσο και με μέσα που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματά τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν [2]. Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα από την τριβή δύο μονωτικών υλικών ή από την τριβή ενός μονωτικού και ενός αγωγού. Άρα για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή είναι επιβεβλημένη, με ένα αγώγιμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [6] με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [7] ανέπτυξαν κάποιες προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των  $10^7 \Omega$  και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

Η προστασία των συσκευών από τις ηλεκτροστατικές φορτίσεις όταν αυτές έχουν πλέον συμβεί μπορεί να γίνει με την λήψη των ακόλουθων μέτρων:

- Πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, της οποίας σκοπός είναι η αποτροπή δευτερευόντων εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οι οποίες θα εξασφαλίζουν μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον των πεδίων εξ επαγωγής.
- Εγκατάσταση των συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο πλαίσιο (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Για αυτό προκειμένου να είναι αποτελεσματικές πρέπει τα πλαίσια να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα μέσω των οποίων οι κύριες εκφορτίσεις μπορεί να λάβουν χώρα, είτε άμεσα στα εσωτερικά κυκλώματα ή έμμεσα σε μια προεξοχή, διακόπτη ή μπουτόν, τα οποία διαπερνούν το πλαίσιο.

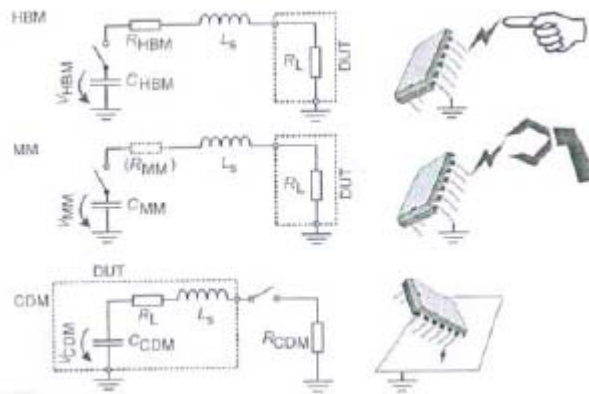
Το μέγιστο δυναμικό το οποίο μπορεί να αναπτύξει ένα ανθρώπινο σώμα είναι 25 kV. Εάν ένα άτομο πλησιάσει κάποιο μέρος του σώματός του, το οποίο συνηθέστερα είναι το δάκτυλό του, πλησιέστερα από 1 cm, μακριά από το κύκλωμα, τότε δεν θα συμβεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εφόσον η διάσπαση του αέρα γίνεται στα 30 kV. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας κυκλωμάτων από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η τοποθέτησή τους σε ένα αγωγίμο πλαίσιο, το οποίο δεν έχει οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα στα τοιχώματά του.

## 1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

### 1.4.1 Γενικά

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να μπορέσουν να εκτιμήσουν την επίδραση που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [2], [6], [8]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (Human Body Model – HBM), το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM).

Απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από της δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα.



Σχήμα 1.3 : Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [6].

Θεωρώντας  $R_{ESD}$  τη συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης  $R_L$  της υπό εξέταση συσκευής (Device Under Test- DUT),  $C_{ESD}$  την χωρητικότητα ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση  $V_{ESD}$  και  $L_S$  την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

$$L_S \frac{d^2 i}{dt} + R_{ESD} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{ESD}} i = 0 \quad (1.1)$$

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t), \text{ για } \alpha > \omega_0 \quad (1.2)$$

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t), \text{ για } \alpha < \omega_0 \quad (1.3)$$

όπου  $\alpha = \frac{R_{ESD}}{2L_S}$  ο συντελεστής απόσβεσης και  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_{ESD}}}$  η συχνότητα ταλάντωσης.

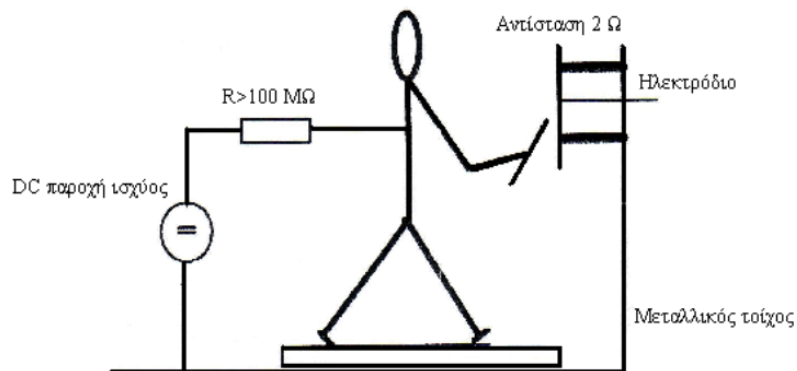
Παραδείγματα για τις τυπικές παραμέτρους και των τριών μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Παράμετρος	HBM	MM	CDM
$V_{ESD}$	4000 V	200 V	500 V
$R_{HBM} / R_{MM} / R_{CDM}$	1,5 kΩ	5 Ω	10 Ω
$C_{ESD}$	100 pF	200 pF	10 pF
$L_S$	500 nH	750 nH	750 nH
$R_L$	10Ω		
$I_{ESD}$	2,6 A	2,8 A	10,4 A
$t_{rise} (10\% / 90\%)$	≈ 7 ns	≈ 11 ns	≈ 0,3 ns
$A$	$1,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,1 \times 10^8 s^{-1}$	$10 \times 10^8 s^{-1}$
$\omega_O$	$0,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,8 \times 10^8 s^{-1}$	$30 \times 10^8 s^{-1}$
FWHM	≈ 120 ns	≈ 26 ns	≈ 0,7ns

Πίνακας 1.4 : Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [6]

#### 1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model

Από πολλές μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετικούς ανθρώπους [9] είναι ξεκάθαρο ότι δημιουργήθηκαν πολλές διαφορετικές αποδεκτές κυματομορφές. Ο χρόνος ανόδου αυτών των κυματομορφών κυμαίνεται μεταξύ 100 ps έως 30 ns. Οι άνθρωποι νοιώθουν μια εκφόρτιση, μόνον όταν η τάση είναι περίπου 3 kV ή μεγαλύτερη.

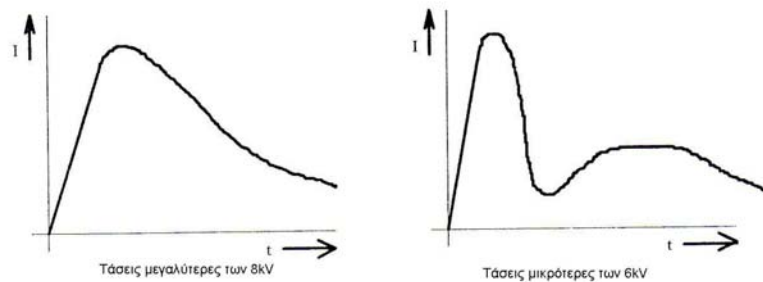


Σχήμα 1.4 : Διάταξη μετρήσεων για εκφορτίσεις ανθρωπίνου σώματος

Μια ανάλυση των αποτελεσμάτων από μετρήσεις που έχουν παρθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.4 δίνουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Η αντίσταση της επιδερμίδας  $R$  είναι περίπου  $150\Omega$  έως  $1000\Omega$  (χωρίς ο άνθρωπος να κρατά κάποιο μεταλλικό αντικείμενο όπως κλειδιά, μαχαίρι, βίδα, κ.τ.λ).
- Ανθρώπινη χωρητικότητα περίπου  $150\text{ pF}$ .
- Τάσεις πάνω από  $15\text{ kV}$  υπολογισμένες με το καθιερωμένο μέγεθος και τη χωρητικότητα του ανθρώπου.

Η κυματομορφή της εκφόρτισης βρέθηκε να είναι πολύ διαφορετική από άνθρωπο σε άνθρωπο και επίσης από μέτρηση σε μέτρηση. Δυο ακραία παραδείγματα φαίνονται στο Σχήμα 1.5:



Σχήμα 1.5 : Διάφορες κυματομορφές εκφορτίσεων (ns)

# Κεφάλαιο 2

## Πρότυπο IEC 61000-4-2

### 2.1 Σκοπός

Το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 [10] περιγράφει την μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκκενώσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης. Το Πρότυπο ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του εκφορτιζόμενου ρεύματος, τα επίπεδα δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία με την οποία η δοκιμή του Προτύπου αυτού θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά.

### 2.2 Εξοπλισμός δοκιμών

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός [11] για την πραγματοποίηση δοκιμών ηλεκτροστατικών εκκενώσεων είναι ο ακόλουθος:

- Κλωβός Faraday για τοποθέτηση του εξοπλισμού μετρήσεων.
- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκκενώσεων (ESD generators).
- Παλμογράφος με εύρος τουλάχιστον 1 GHz.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Εξασθενητής.
- Ομοαξονικό καλώδιο για υψίσυχνα σήματα.
- Βολτόμετρο συνεχούς υψηλής τάσης ( $R_i > 30 \text{ G}\Omega$ ).

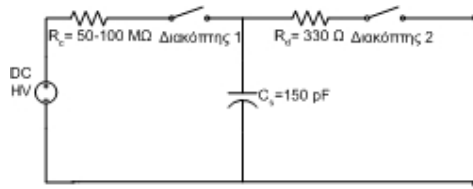


### 2.2.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκκενώσεων

Το αρχικό Πρότυπο που δημιουργήθηκε για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ήταν το IEC 801-2 [12] το οποίο αναθεωρήθηκε και έφτασε στην τελική του μορφή σαν IEC 1000-4-2 [13] και στην Ευρωπαϊκή του έκδοση είναι γνωστό σαν EN 61000-4-2 [10]. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (εκκενώσεων) που περιγράφεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model). Το κύκλωμά της όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.1 το απαρτίζουν:

- Ο πυκνωτής ενταμίευσης ( $C_s$ ).
- Το τροφοδοτικό υψηλής τάσης.
- Η αντίσταση φόρτισης ( $R_c$ ).
- Η αντίσταση εκκένωσης ( $R_d$ ).
- Ο διακόπτης εκκένωσης που είναι τυπικά ένα ρελέ διακένου.

Οι δοκιμές συμμόρφωσης απαιτούν μη συνεχόμενες εκκενώσεις. Για διερευνητικούς λόγους μπορεί να γίνονται συνεχείς εκκενώσεις. Γι' αυτό η γεννήτρια πρέπει να έχει την δυνατότητα συνεχών εκκενώσεων με ρυθμό μέχρι και 20 ανά δευτερόλεπτο (20 Hz). Το Πρότυπο απαιτεί την εφαρμογή και θετικών και αρνητικών εκκενώσεων. Συνεπώς η γεννήτρια πρέπει να διαθέτει και τις δύο πολικότητες ή να υπάρχουν δύο διαφορετικές γεννήτριες (μία για θετικές και μία για αρνητικές εκφορτίσεις). Η τάση εκκένωσης εξαρτάται από τον τύπο της εκκένωσης. Για εκκενώσεις επαφής (contact discharge) η μέγιστη τάση δοκιμών είναι 8 kV. Για εκκενώσεις στον αέρα (air discharge), η τάση δοκιμών φτάνει τα 15 kV. Η γεννήτρια πρέπει να παρέχει τις τιμές αυτές κατ' ελάχιστον. Το κρίσιμο σημείο στη κατασκευή της γεννήτριας παίζει το ηλεκτρόδιο και το κύκλωμα εκκένωσης προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες κυματομορφές εκκένωσης με χρόνο ανόδου μεταξύ 0,7 και 1 ns. Για τις εκκενώσεις επαφής χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο με οξύ άκρο ενώ για τις εκκενώσεις διακένου ηλεκτρόδιο με στρογγυλό άκρο. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται μια κυκλωματική αναπαράσταση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκκενώσεων.



Σχήμα 2.1: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκκενώσεων.

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τάση εκκένωσης: 200 V..15 kV εκφόρτιση αέρος

200 V..8 kV επαφής

Ηλεκτρόδια εκκενώσεων: επαφής / τοξοειδούς Πολικότητα: Θετική/ αρνητική

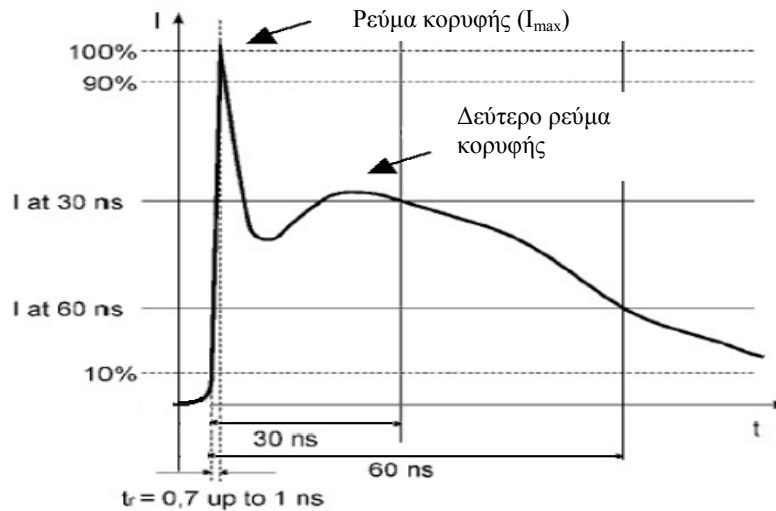
Πυκνωτής εκκένωσης  $C_s=150$  pF

Αντίσταση εκκένωσης  $R_d=330$  Ω

Αντίσταση φόρτισης  $R_c=50-100$  MΩ

Λειτουργία: μονές εκκενώσεις /συνεχείς εκκενώσεις (έως 20 Hz)

Ηλεκτρόδια εκκενώσεων: επαφής / τοξοειδούς



Σχήμα 2.2: Η κυματομορφή του ρεύματος κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2.

Ο παλμός σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 2.2 μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος το οποίο ονομάζεται και «αρχική

κορυφή» (Initial Peak) προέρχεται από την εκφόρτιση του χεριού, ενώ η δεύτερη προέρχεται από την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής προέρχεται είναι μεταξύ 0,7 ns και 1 ns, ενώ το πλάτος του εξαρτάται από την τάση φόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκκενώσεων.

O D. Pommerenke δημοσίευσε [14] την εξίσωση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης η οποία φαίνεται στη σχέση (2.2):

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^\eta}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^\eta} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^\eta}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^\eta} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_4}} \quad (2.1)$$

όπου οι  $k_1$ ,  $k_2$  δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$k_1 = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.2)$$

$$k_2 = e^{-\frac{\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.3)$$

Η μορφή των παραπάνω σχέσεων δεν είναι οριστική, αλλά βρίσκονται ακόμα υπό συζήτηση και ενδέχεται να οριστικοποιηθούν στην επόμενη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2.

### 2.2.2 Περιγραφή του χώρου δοκιμών

Το εύρος των διαταραχών από τις ηλεκτροστατικές εκκενώσεις είναι μεγάλο και εκτείνεται μέχρι την περιοχή VHF. Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις προβλέπεται να γίνονται σε θωρακισμένο θάλαμο. Το δοκίμιο και η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκκενώσεων τοποθετούνται εντός του θωρακισμένου θαλάμου μεταβατικών διαταραχών (transient immunity room). Ο βοηθητικός εξοπλισμός βρίσκεται στον θάλαμο ελέγχου (control room). Κατά την διάρκεια των δοκιμών η πόρτα του θαλάμου μεταβατικών διαταραχών είναι κλειστή.

### 2.2.3 Διάταξη δοκιμών (test set-up)

Η διάταξη δοκιμών αποτελείται από την γεννήτρια δοκιμών, το δοκίμιο (EUT) και τα βοηθητικά όργανα και εξοπλισμό που απαιτείται για την εκτέλεση άμεσων και έμμεσων ηλεκτροστατικών εκκενώσεων. Το δοκίμιο τοποθετείται και συνδέεται σύμφωνα με τις λειτουργικές απαιτήσεις. Τηρείται απόσταση 1 m κατ' ελάχιστον μεταξύ του δοκιμίου και των τοίχων του εργαστηρίου ή άλλης μεταλλικής κατασκευής. Το δοκίμιο συνδέεται με το σύστημα γείωσης σύμφωνα με τις οδηγίες και απαιτήσεις εγκατάστασης. Δεν επιτρέπεται πρόσθετη γείωση. Το καλώδιο της γείωσης (πράσινο-κίτρινο) της γεννήτριας συνδέεται στο εδαφικό επίπεδο αναφοράς. Το συνολικό μήκος του καλωδίου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2 m.

#### Επιτραπέζιος εξοπλισμός

Ο επιτραπέζιος εξοπλισμός τοποθετείται στο ειδικά διαμορφωμένο ξύλινο τραπέζι, ύψους 0,8 m με επικολλημένο το οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (HCP) διαστάσεων 1,6 m x 0,8 m από χαλκό.

#### Επιδαπέδιος εξοπλισμός

Το δοκίμιο και τα καλώδια πρέπει να απομονώνονται από το εδαφικό επίπεδο αναφοράς με ένα μονωτικό στήριγμα πάχους 0,1 m. Τυχόν πόδια στήριξης του δοκιμίου παραμένουν στη θέση τους.

## 2.3 Παράμετροι ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Οι παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται είναι:

- Ρεύμα κορυφής
- Χρόνος ανόδου
- Χρόνος καθόδου παλμού
- Γραμμικότητα τάσης

Δίνεται ο κατωτέρω πίνακας σύμφωνα με την παράγραφο 6.2 του προτύπου IEC 61000-4-2:

Επίπεδο	Ένδειξη τάσης kV	Ρεύμα κορυφής ( $\pm 10\%$ ) A	Χρόνος ανόδου με διακόπτη εκκένωσης $t_r$ (ns)	Ρεύμα στα 30 ns ( $\pm 30\%$ ) A	Ρεύμα στα 60 ns ( $\pm 30\%$ ) A
1	2	7.5	0.7-1	4	2
2	4	15	0.7-1	8	4
3	6	22.5	0.7-1	12	6
4	8	30	0.7-1	16	8

Πίνακας 2.1: Επίπεδα τάσεων δοκιμών

## 2.4 Τι ορίζει το πρότυπο ANSI για τις κυματομορφές του ρεύματος εκφορτίσεως

Στο πρότυπο ANSI (American National Standard Institute) C63.16.1993 [15] οι τύποι εκκένωσης για την παραγόμενη ηλεκτροστατική εκφορτίση είναι οι ακόλουθοι:

- Εκκενώσεις από το ανθρώπινο σώμα προς μεταλλικά σώματα (hand metal).
- Εκκενώσεις μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων (metallic furniture).

Αυτές οι δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για δοκιμές μέσω αέρα ή επαφής.

### 2.4.1 Δοκιμές ESD μέσω αέρα ή επαφής

Οι μέθοδοι προσομοίωσης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον αέρα ή σε επαφή έχουν επιλεγεί ως οι πιο κατάλληλοι για τον καθορισμό των αποτελεσμάτων που δημιουργούνται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παρόλα αυτά κάθε ένα από τα παραπάνω είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οπότε θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να αποφασιστεί ποιο είδος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης θα χρησιμοποιηθεί. Έτσι:

- Για δοκιμές σε μεταλλικές επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δυο μέθοδοι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που αναφέρονται παραπάνω.

- Για δοκιμές σε μονωτικές επιφάνειες η επικρατούσα μέθοδος είναι η εκφόρτιση μέσω αέρα.
- Όταν επιχειρούμε έμμεσα τέστ ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χρησιμοποιώντας επίπεδα ζεύξης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε εκφορτίσεις μέσω αέρα είτε μέσω επαφής αλλά οι εκφορτίσεις επαφής προτιμούνται λόγω της ικανότητας της για επαναληπτικότητα.

#### 2.4.2 Ρεύμα ESD σύμφωνα με το πρότυπο ANSI

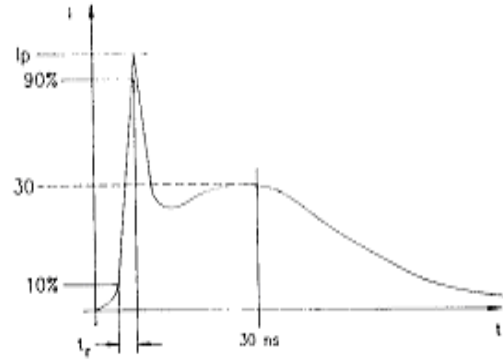
Οι γεννήτριες ESD οι οποίες είναι ικανές να παράγουν τις κυματομορφές που φαίνονται στο Σχήμα 2.3 πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθούν τις προδιαγραφές για κάθε επαναλαμβανόμενο ρυθμό εκκένωσης που είναι σύμφωνος με τα πειράματα. Το Πρότυπο ANSI ορίζει για την κυματομορφή του ρεύματος, για διαφορετικές περιοχές εκφόρτισης, τις ακόλουθες τρεις κυματομορφές:

Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ESD σύμφωνα με το πρότυπο ANSI είναι τα ακόλουθα:

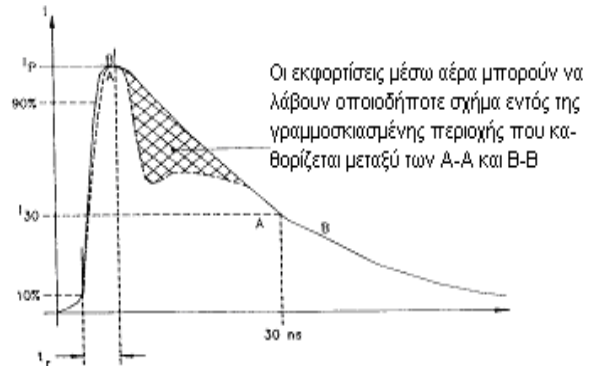
- Ρεύμα φορτίσεως ( $I_{ch}$ ):  $\leq 3.5$  mA (dc) σε κάθε τάση φόρτισης.
- Τάση εξόδου: τουλάχιστον 1-6 kV για εκφορτίσεις επαφής και 2-15 kV για εκφορτίσεις μέσω αέρα.
- Ακρίβεια στην τάση εξόδου:  $\pm 5\%$
- Πολικότητα της τάσης εξόδου: και οι δύο πολικότητες της εκφόρτισης πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των ερευνητικών ελέγχων για να καθοριστούν τα αποτελέσματα που δημιουργούνται στα υπό εξέταση δοκίμια.

Χρόνος κρατήματος (holding time): τουλάχιστον 5 sec.

Κυματομορφή ρεύματος για εκφορτίσεις γεννητριών ESD σε τάσεις μικρότερες από 4 KV



Κυματομορφή ρεύματος για εκφορτίσεις σε τάσεις μεταξύ 4-10 KV



Κυματομορφή ρεύματος για εκφορτίσεις σε τάσεις άνω των 10 KV



Σχήμα 2.3: Κυματομορφές ρεύματος για εκφορτίσεις σε διαφορετικές τάσεις σύμφωνα με το πρότυπο ANSI.

# Κεφάλαιο 3

## Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 3.1 Σκοπός

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βάση το στοιχειώδες ηλεκτρικό δίπολο και θα δοθούν οι αναλυτικές εκφράσεις τόσο για το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο. Επίσης θα παρουσιαστούν στοιχεία από μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν σχετικά με το πώς μεταβάλλεται το πεδίο σε συνάρτηση με την απόσταση κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

### 3.2 Το ηλεκτρικό δίπολο

Ο πρώτος σπινθήρας που θα υπάρξει κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παράγει μεγάλες τιμές στη μεταβολή του ρεύματος  $\frac{\partial i(t)}{\partial t}$ , όπου  $i(t)$  είναι το ρεύμα που παράγεται κατά την εκφόρτιση. Η μεταβολή του ρεύματος  $\frac{\partial i(t)}{\partial t}$  παίζει σημαντικότατο ρόλο στα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο αρχικός αυτός σπινθήρας εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα του αντικειμένου που παράγει την εκφόρτιση, που στην περίπτωσή μας είναι η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Έχουν διαπιστωθεί τα εξής σχετικά με το αρχικό στάδιο της εκφόρτισης:

- α) Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα προσέγγισης του σώματος που θα προκαλέσει την εκφόρτιση τόσο πιο απότομες είναι οι μεταβολές των καμπυλών του ρεύματος.
- β) Υψηλότερες τάσεις εκφόρτισης απαιτούν υψηλότερες ταχύτητες προσέγγισης του στόχου, ώστε να επιτευχθούν πολύ γρήγορα φαινόμενα.



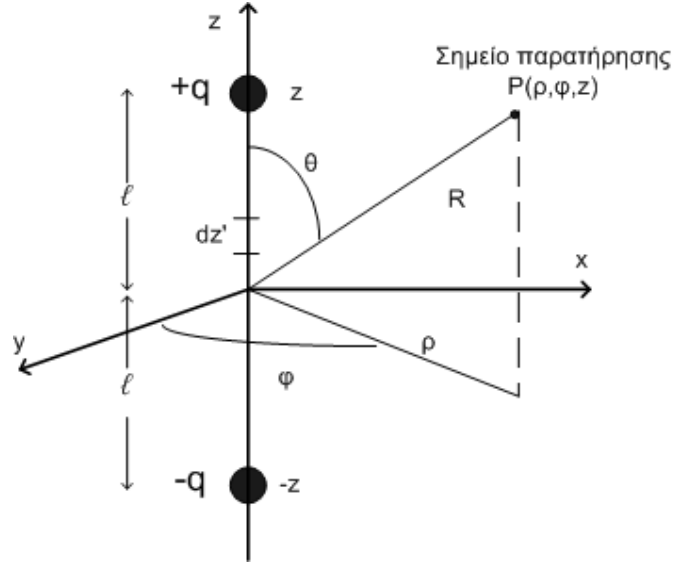
Το μοντέλο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να περιγράψουμε την ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο [16, 17]. Το σύστημα συντεταγμένων που θα χρησιμοποιηθεί είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες λόγω της γεωμετρίας του προβλήματος. Το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο τοποθετείται κατά μήκος του άξονα  $z$ , με το κέντρο του στην αρχή  $O$  του συστήματος συντεταγμένων. Τα σημειακά φορτία  $+q$ ,  $-q$  προσομοιώνουν τις συνθήκες που επικρατούν ακριβώς πριν συμβεί η εκφόρτιση, τη στιγμή  $t = 0$ , όταν έχουμε την κατάσταση ενός ηλεκτροστατικού δίπολου. Αμέσως με την αρχή του φαινομένου, το δίπολο εκφορτίζεται διαμέσου του αγωγίμου δρόμου μήκους  $2\ell$  που δημιουργείται ανάμεσα στα δυο φορτία. Έτσι γραμμικό ρεύμα, θεωρούμενο ως θετική κίνηση αρνητικών φορτίων (ή αρνητική θετικών φορτίων), χρονικά μεταβαλλόμενο θα αρχίσει να ρέει στον αγωγίμο δρόμο μήκους  $2\ell$ .

### 3.3 Πεδιακή ανάλυση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει εκτενή ανάλυση του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Χρησιμοποιώντας σαν μαθηματικό εργαλείο τις εξισώσεις του Maxwell οι P.F Wilson and M.T. Ma [16], εξήγαγαν αναλυτικές εκφράσεις για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

#### 3.3.1 Αναλυτική επίλυση – Εγγύς και μακρινό πεδίο

Το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο τοποθετείται κατά μήκος του άξονα  $z$ , με το κέντρο του στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων (σημείο  $O$ ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι το κυλινδρικό λόγω της συμμετρίας του προβλήματος. Το φορτίο  $+q$  βρίσκεται σε ύψος  $z$ , οπότε το είδωλό του βρίσκεται στο  $-z$ . Τα χρονομεταβλητά πεδία μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [18]. Η εκφόρτιση γίνεται πάνω στο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 που παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.1: Ηλεκτρικό δίπολο ευρισκόμενο πάνω από επίπεδο

Οι αναλυτικές εξισώσεις για την ένταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου [16],  $\vec{E}$  και  $\vec{H}$  αντιστοίχως είναι:

$$\vec{E} = E_\rho \cdot \vec{\alpha}_\rho + E_z \cdot \vec{\alpha}_z \quad (3.1)$$

$$E_\rho = \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{\rho \cdot z}{R^2} \left( \frac{3 \cdot i(z, t - \frac{R}{c})}{c \cdot R^2} + \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right) \quad (3.2)$$

$$E_z = \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \left( \left( \frac{3 \cdot z^2}{c \cdot R^4} \cdot \frac{1}{c \cdot R^2} \right) \cdot i(z, t - \frac{R}{c}) + \left( \frac{z^2}{c^2 \cdot R^3} \cdot \frac{1}{c^2 \cdot R} \right) \cdot \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right) \quad (3.3)$$

$$H_\phi(\rho, z, t) = \frac{d}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\rho}{R} \left( \frac{i(z, t - \frac{R}{c})}{R^2} + \frac{1}{c \cdot R} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right) \quad (3.4)$$

όπου  $R$  είναι η απόσταση του σημείου εκφόρτισης από το σημείο παρατήρησης ( $\rho$ ,  $\phi$ ,  $z$ ),  $c$  η ταχύτητα του φωτός),  $d=2\ell$  το μήκος του αγώγιμου δρόμου που δημιουργείται ανάμεσα στα δυο φορτία,  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $\alpha_z$ ,  $\alpha_\rho$  τα

μοναδιαία διανύσματα στο σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων  $\rho$  η προβολή του μήκους  $R$  πάνω στο επίπεδο  $xy$ .

### 3.4 Η μεταβολή του πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

Ο D. Pommerenke [19] έχει ασχοληθεί με τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση και στηριζόμενος στη σχέση (3.4) αναφέρει πώς αυτή μπορεί να τροποποιηθεί προκειμένου να περιγραφεί καλύτερα το μαγνητικό πεδίο σε μακρινές και κοντινές αποστάσεις. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, η σχέση (3.4) δείχνει ότι υπάρχουν δυο βασικές περιοχές για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο:

- Η περιοχή του εγγύς πεδίου στη οποία επικρατεί το ρεύμα  $i(z, t - \frac{R}{c})$  και
- Η περιοχή του μακρινού πεδίου στην οποία επικρατών όρος είναι η

$$\text{παράγωγος του ρεύματος } \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t}.$$

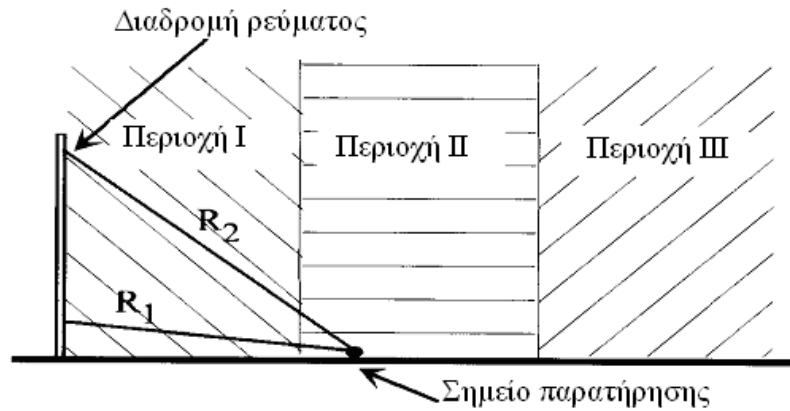
Στην ίδια εργασία του ο D. Pommerenke [19] έχει μελετήσει τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης. Εάν η παράγωγος του ρεύματος δεν είναι επικρατούσα, δηλαδή  $\frac{\partial i}{\partial t} = 0$  τότε το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 3.5:

$$H_{\phi}(\rho, z, t) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \rho} \cdot \frac{\ell}{\sqrt{\rho^2 + \ell^2}} \quad (3.5)$$

Αντίθετα όταν  $\rho \gg \ell$  ή  $\rho \ll \ell$  ισχύει ο νόμος του Ampere και το μαγνητικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 3.6:

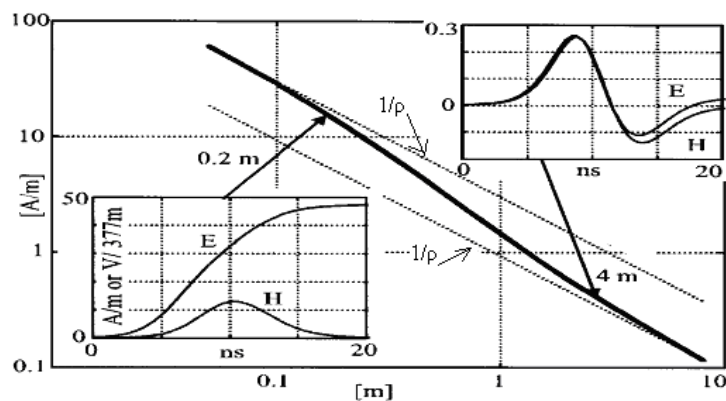
$$H_{\phi}(\rho, z, t) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \rho} \quad (3.6)$$

Στο μαγνητικό πεδίο μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2: Μεταβολή του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης

Στην περιοχή I το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται συναρτήσει του παράγοντα  $1/\rho$ . Οι κυματομορφές ρεύματος και πεδίου είναι σχεδόν ίδιες. Στην περιοχή II το πεδίο μεταβάλλεται συναρτήσει του παράγοντα  $1/\rho^2$  ενώ στην περιοχή III βάση του  $1/\rho$ . Στα Σχήματα 3.3 και 3.4 φαίνεται η μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για απόσταση από 0.1 m ως 10 m. Στο Σχήμα 3.3 εμφανίζεται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για εκφορτίσεις αέρα, όπου το ρεύμα μεταβάλλεται ως τη μέγιστη τιμή του με αργό ρυθμό ( $t_r=4$  nsec) ενώ στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για εκφορτίσεις αέρα, όπου το ρεύμα εκφόρτισης μεταβάλλεται πολύ γρήγορα ( $t_r=377$  psec). Άλλωστε οι διαφορετικοί χρόνοι ανόδου είναι απόλυτα λογικοί εφόσον στις εκφορτίσεις αέρα το ρεύμα εκφόρτισης είναι κάθε φορά διαφορετικό και εξαρτάται από τα μήκη τόξου, την υγρασία και την ταχύτητα προσέγγισης του πιστολιού.

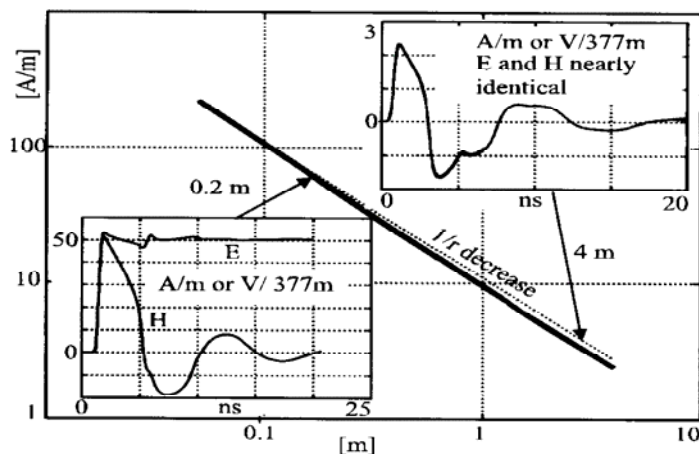


Σχήμα 3.3: Μεταβολή της κορυφής του μαγνητικού πεδίου από το σημείο εκφόρτισης συναρτήσει της απόστασης.

Στο Σχήμα 3.3 έχουμε ανάπτυξη τόξου σε απόσταση 2,7 mm από το δοκίμιο υπό τάση 10 kV και ο χρόνος ανόδου του ρεύματος είναι αργός της τάξης των 4 nsec. Το ηλεκτρικό πεδίο φθάνει τη μέγιστη τιμή του μετά από 20 nsec και με χρόνο ανόδου 10 nsec για την κοντά στο δοκίμιο περιοχή. Σε μακρινότερες αποστάσεις ο χρόνος ανόδου τόσο για το μαγνητικό όσο και για το ηλεκτρικό πεδίο είναι της τάξης των 4 nsec. Οι περιοχές I, II και III μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν. Στην περιοχή κοντά στο δοκίμιο οι κυματομορφές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι πολύ διαφορετικές αλλά στην απόσταση των 4 m παρουσιάζονται σχεδόν ίδιες.

Κοντά στο σφαιροειδές το πεδίο μειώνεται βάσει του παράγοντα  $1/r$  και συνεπώς βρισκόμαστε στην περιοχή I. Σε απόσταση γύρω στα 0.2 m το πεδίο αρχίζει να μειώνεται γρηγορότερα σύμφωνα με το λόγο  $1/r^2$  οπότε βρισκόμαστε στην περιοχή II. Από τα 2 m και μετά η μείωση ακολουθεί το λόγο  $1/r$  οπότε έχουμε περάσει στην περιοχή III.

Στο Σχήμα 3.4 έχουμε ανάπτυξη τόξου σε απόσταση 1.22 mm από το δοκίμιο υπό τάση 10 kV ενώ έχουμε γρήγορο χρόνο ανόδου του ρεύματος της τάξης των 377 psec.



Σχήμα 3.4: Μεταβολή της κορυφής του μαγνητικού πεδίου από το σημείο εκφόρτισης συναρτήσει της απόστασης

Σε αυτή την περίπτωση το πεδίο μειώνεται βάσει του παράγοντα  $1/r$  λόγω της παραγώγου της σχέσης (3.4) που αρχίζει πλέον να κυριαρχεί κοντά στο σφαιροειδές. Η αλλαγή της κυματομορφής η οποία καθορίζεται από το ρεύμα σε κοντινές αποστάσεις και την παράγωγο του σε μακρινότερες όπως φαινόταν στην

προηγούμενη περίπτωση όπου είχαμε αργό χρόνο ανόδου του ρεύματος εδώ δεν είναι πλήρως ορατή.

### 3.5 Η ενέργεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

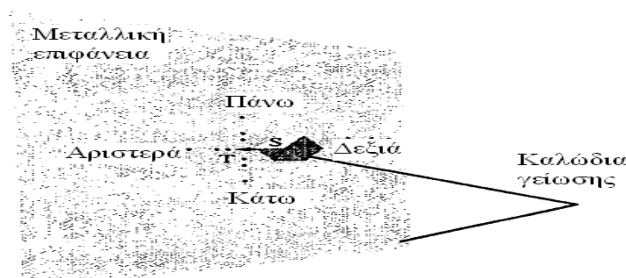
Ο Jan Sroka [20] έχει ασχοληθεί με τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής εκφόρτισης από ένα φορτισμένο ανθρώπινο σώμα προς ένα δοκίμιο. Λίγο πριν την πραγματοποίηση της εκκένωσης έχουμε την ανάπτυξη ενός ηλεκτροστατικού πεδίου μεταξύ των δακτύλων του ανθρώπινου σώματος που θα έρθει σε επαφή με το δοκίμιο και του δοκιμίου. Η υψηλή τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να προκαλέσει ιονισμό των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το πρώτο βήμα για τη δημιουργία της ηλεκτρομαγνητικής εκκένωσης. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός αγωγίμου δρόμου μεταξύ του δακτύλων του ανθρώπινου σώματος και του δοκιμίου είτε βρεθούν πολύ κοντά είτε έρθουν σε επαφή. Το αναπτυσσόμενο ρεύμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με μεγάλη πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας και έτσι εξηγείται το γεγονός ότι μέρος της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου μετατρέπεται σε ενέργεια του μαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια το ρεύμα θα προχωρήσει στα αγωγίμα εξαρτήματα μεταφέροντας το φορτίο σε αυτά. Το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται. Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και η μείωση του ηλεκτρικού πεδίου διαδίδονται κατά μήκος των αγωγίμων επιφανειών με την ταχύτητα του φωτός.

Ο παραπάνω τύπος κύματος δεν μπορεί να μεταφέρει αρκετή ενέργεια σε μακρινές αποστάσεις. Εξαιτίας του σχήματος των αγωγίμων επιφανειών το κύμα διασκορπίζεται έτσι ώστε ένα μέρος του να διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο ενώ ένα άλλο να υφίσταται ανάκλαση στις παραπάνω επιφάνειες. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε αναπτύσσονται διαφορετικά κέντρα ενέργειας κάθε ένα από τα οποία θα εκφορτιστεί ξεχωριστά.

Όπως γνωρίζουμε η κυματομορφή του ρεύματος παρουσιάζει ένα δεύτερο μέτωπο κατά την εκφόρτιση. Το δεύτερο αυτό μέτωπο στα παραπάνω κέντρα ενέργειας η εκφόρτιση των οποίων μπορεί να πάρει χρόνο αφού το κύμα ταξιδεύει από και προς την αγωγή επιφάνεια και ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη διάρκεια του παλμού.

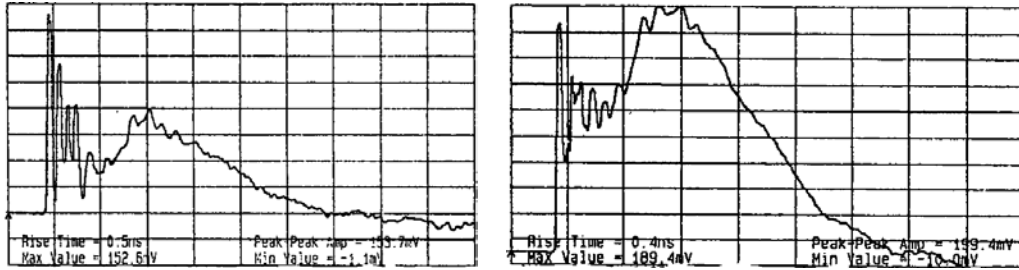
### 3.6 Ανασκόπηση πειραματικών διατάξεων

Όπως έχει παρατηρηθεί από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές διατάξεις το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δεν είναι συμμετρικό γύρω από το στόχο τα δε αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζουν διαφορές ανάλογα με τις μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιούμε. Ο Jan Sroka [20] μέτρησε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο σε 12 διαφορετικά σημεία γύρω από το στόχο χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο τύπο probes και ειδικότερα τα probes της Prodyn ενώ στη συνέχεια πραγματοποίησε τις ίδιες σειρές μετρήσεων με τα probes κατασκευής του D. Pommerenke. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζουμε τη μετρητική διάταξη που χρησιμοποίησε καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο.



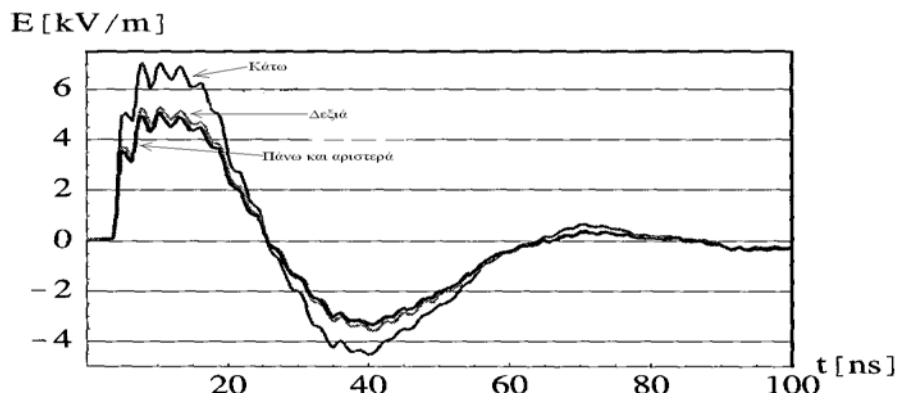
Σχήμα 3.5: Διάταξη για τη μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου γύρω από το στόχο

Τα σημεία που αναφέρονται στο Σχήμα 3.5 ως πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά σχετίζονται με τη θέση που έχουν αυτά ως προς τον τρόπο που τοποθετείται η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκκενώσεων πάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Όσο αφορά το μαγνητικό πεδίο συναρτήσει του χρόνου είναι ανάλογο του ρεύματος. Στην πραγματικότητα για το εγγύς στο σημείο εκκένωσης σημείο οι δύο ποσότητες είναι ανάλογες η μια με την άλλη. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις υπάρχει μια σχετική διαφοροποίηση στις δυο ποσότητες η οποία οφείλεται στη μεταβολή του ρεύματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μαγνητικό πεδίο δεν είναι συμμετρικό στα σημεία γύρω από το στόχο. Παρότι η πρώτη κορυφή έχει το ίδιο ύψος για τα σημεία που βρίσκονται πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά του σημείου εκφορτίσεως το ύψος της δεύτερης κορυφής είναι μεγαλύτερο για τα σημεία που βρίσκονται στο κάτω και στο δεξί μέρος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6:



Σχήμα 3.6: Αριστερά το μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 10cm στο πάνω σημείο ενώ δεξιά το μαγνητικό πεδίο στην ίδια απόσταση στο δεξί σημείο.

Η συμπεριφορά του ηλεκτρικού πεδίου [21] είναι διαφορετική από αυτή του μαγνητικού όσο αφορά τη χαρακτηριστική του ρεύματος. Στο Σχήμα 3.7 φαίνονται οι μετρούμενες τιμές για τα σημεία πάνω, κάτω, δεξιά και αριστερά του σημείου εκκένωσης.



Σχήμα 3.7: Το ηλεκτρικό πεδίο ( $E$ ) σε απόσταση 10cm από το σημείο εκκένωσης στα σημεία πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.7 στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου υπάρχει μεγαλύτερη συμμετρία στην χαρακτηριστική όσον αφορά τις τέσσερις κατευθύνσεις. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στην κάτω θέση και ιδιαίτερα στο ανώτερο και στο κατώτερο σημείο αυτής όπου η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου παρουσιάζεται μεγαλύτερη από τις άλλες τρεις κατευθύνσεις.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω αναφέρονται στις μετρήσεις που έγιναν από τον Jan Sroka με την χρήση των probes της Prodyn. Μια δεύτερη σειρά μετρήσεων που πραγματοποίησε ο ίδιος με τα probes του D. Pommerenke έδωσε σχεδόν παρόμοιες κυματομορφές για το ηλεκτρικό και για το μαγνητικό πεδίο. Οι όποιες



διαφορές ανάμεσα στις κυματομορφές που προέκυψαν από τους δυο αυτούς τύπους probes εστιάζονται περισσότερο στην μικρότερη τραχύτητα του πλάτους του μαγνητικού πεδίου με τα probes του D. Pommerenke και στο γεγονός των υψηλότερων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με τα παραπάνω probes.

# Κεφάλαιο 4

## Πειραματική διάταξη

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Επίσης γίνεται αναφορά στη διαδικασία ανακατασκευής του ρεύματος, καθώς και του ηλεκτρικού πεδίου που παράγονται κατά τη διάρκεια του πειράματος

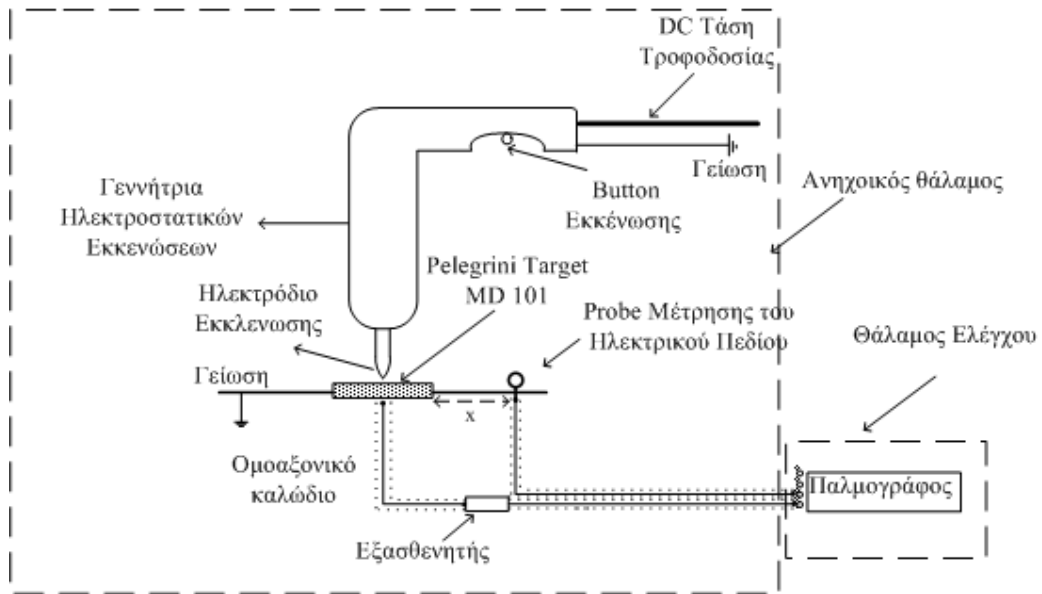
### 4.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων

Για την διεξαγωγή των δοκιμών που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκκενώσεων (ESD generators).
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας.
- Εξασθενητές (attenuators).
- Παλμογράφος TDS 7254B.
- Αισθητήρες της έντασης E του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.
- Ανηχοϊκός θάλαμος.

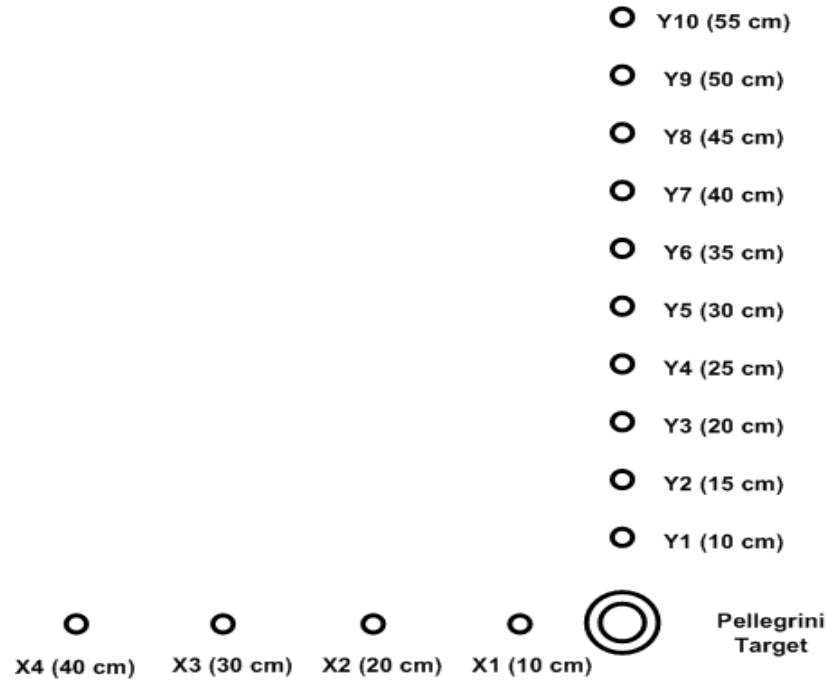
### 4.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος καθώς και του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.



Σχήμα 4.1: Η πειραματική διάταξη

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο TDS 7254B, ο οποίος περιλαμβάνει 4 κανάλια και το εύρος ζώνης του κυμαίνεται από dc έως 2,5 GHz. Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες της εταιρίας Schaffner τη NSG-433 και τη NSG-438. Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκκένωσης καθώς και τα παραγόμενα πεδία και να πάρουμε τις κυματομορφές τους θα πρέπει να εξασθενήσουμε τα αντίστοιχα σήματα και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε τον εξασθενητή της Tektronix (011-0059-03). Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 ως Pellegrini target δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχυόμενο ρεύμα κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Στη διάταξη χρησιμοποιείται ο MD 101 της Schaffner. Για τις ανάγκες μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήσαμε το probe HZ-11 της εταιρίας Rohde-Schwarz και συγκεκριμένα το μοντέλο 904 (ball probe) διαμέτρου 3,6 cm. Το probe τοποθετήθηκε σε διαδοχικές αποστάσεις προς δυο κατευθύνσεις οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκκένωσης. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζουμε τις θέσεις που τοποθετήσαμε το probe για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 4.2: Θέσεις probe για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου

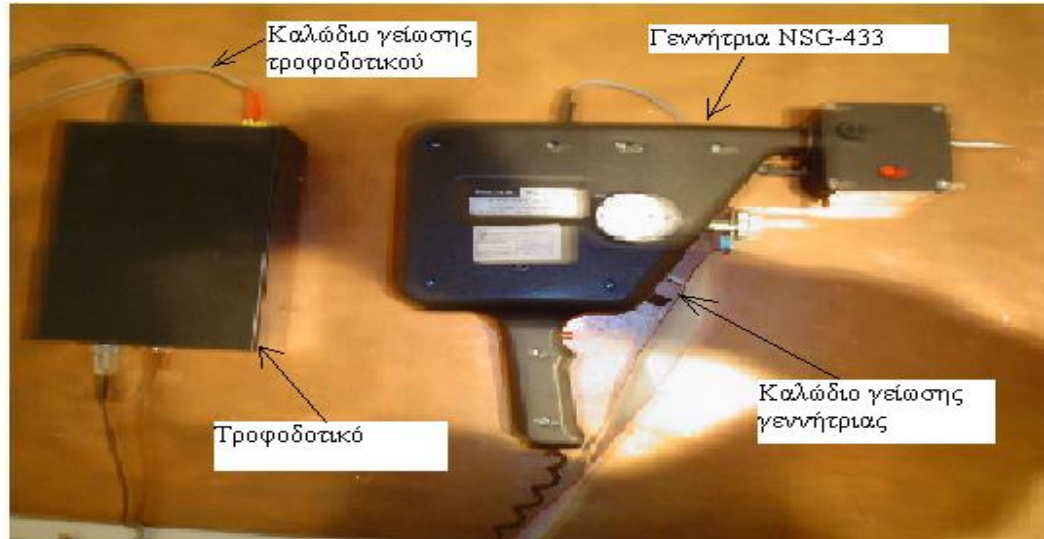
Τέλος προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία γειτονικών συστημάτων το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχοικό θάλαμο ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως 1 GHz.

#### 4.3.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες της εταιρείας Schaffner τη NSG-433 [22] και τη NSG-438 [23]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε μιας από αυτές.

##### 4.3.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.3 παράγει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις της τάξης των  $\pm 18$  kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στο πιστόλι μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο το οποίο δείχνει την τάση εκκένωσης.



Σχήμα 4.3: Η γεννήτρια NSG-433

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση, υγρασία και θερμοκρασία καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκκένωσης. Η NSG-433 χρησιμοποιεί μια συσκευή η οποία ονομάζεται προσαρμοστής εκκένωσης επαφής (Contact Discharge Adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Ο προσαρμοστής εκκένωσης επαφής καθώς και η ακίδα για την πραγματοποίηση των εκκενώσεων μέσω αέρα φαίνονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ακίδες για εκκενώσεις μέσω αέρα και επαφής για την γεννήτρια NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκκενώσεων που πραγματοποιούνται.

#### 4.3.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30 kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η οθόνη είναι οθόνη αφής οπότε οι όποιοι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτής.



Σχήμα 4.5: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

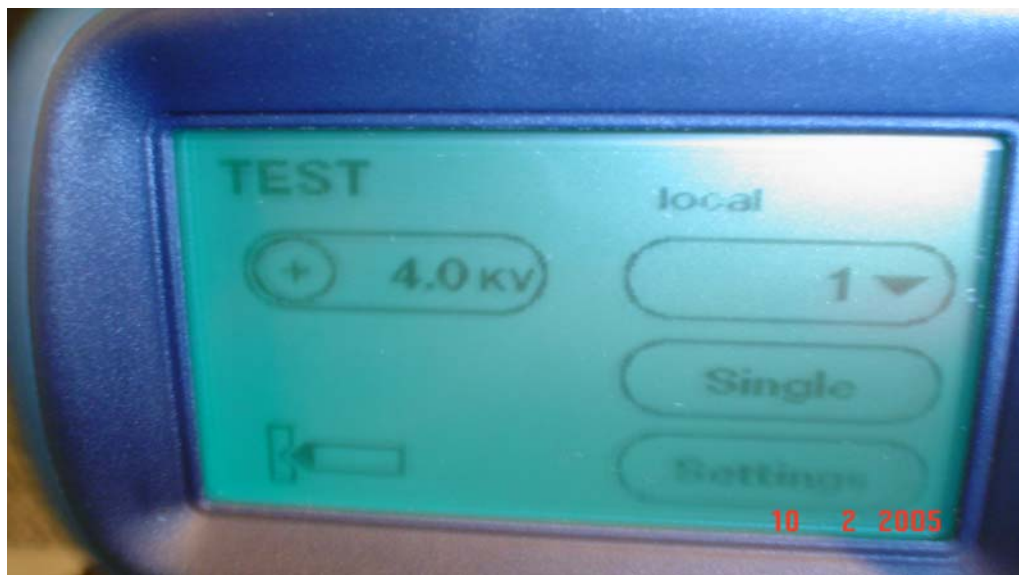
Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.6 και περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την γεννήτρια και τον ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 μπουτόν (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock)
- Το «πιστόλι» στο οποίο βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος ή επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στην λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό (CPW1027) το οποίο έχει σαν είσοδο του 100-250 Vac, 50-60 Hz, 1 A και δίνει στην βασική μονάδα 24 Vdc, 2,3 A.



Σχήμα 4.6: Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα μπουτόν και τις ενδεικτικές λυχνίες

Όταν η γεννήτρια είναι έτοιμη για λειτουργία στην οθόνη αφής εμφανίζεται το μενού που φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Από την οθόνη αφής μπορούμε να επιλέξουμε την πολικότητα και την τιμή της τάσης εκφόρτισης που θέλουμε να κάνουμε, καθώς και τη λειτουργία της γεννήτριας σε θετική ή αρνητική πολικότητα (+ ή -). Επίσης προσέχουμε η ένδειξη στην οθόνη να δείχνει τη μορφή της εκκένωσης που θα πραγματοποιήσουμε. Αν θέλουμε να κάνουμε εκφορτίσεις επαφής και στην οθόνη υπάρχει το σύμβολο εκφόρτισης μέσω αέρα τότε από το Menu Settings επιλέγουμε Discharge και διαλέγουμε το contact.



Σχήμα 4.7: Το μενού στην οθόνη αφής της NSG-438

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δυο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-433 και NSG-438 που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

	<b>NSG-433</b>	<b>NSG-438</b>
Πυκνωτής εκκένωσης $C_s$	150 pF $\pm$ 10%	150 pF
Αντίσταση εκκένωσης $R_d$	330 $\Omega$ $\pm$ 10%	330 $\Omega$
Αντίσταση φόρτισης $R_c$	100 M $\Omega$	50 M $\Omega$
Τάση εξόδου $V_0$	2-18 kV για εκφορτίσεις στον αέρα 2-9 kV για εξ επαφής εκφορτίσεις	200V-30 kV για εκφορτίσεις στον αέρα και για εκφορτίσεις εξ επαφής
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική
Χρόνος κρατήματος απλής φόρτισης (90% $V_0$ )	>5 sec	>5 sec
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης ( $t_r$ )	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις $\leq$ 8 kV 0,7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις $\leq$ 8 kV 0,7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις
Μέγιστο ρεύματος ( $\pm$ 30%)	2 kV: 7,5A $\pm$ 10% 4 kV: 15A $\pm$ 10% 6 kV: 22,5A $\pm$ 10% 8 kV: 30A $\pm$ 10%	
Τάση τροφοδοσίας	100/120/220/240 VAC, 50-60 Hz	100/120/220/240 VAC, 50-60 Hz
Κατανάλωση	25 VA	25 VA
Θερμοκρασία λειτουργίας	5-40 $^{\circ}$ C	5-40 $^{\circ}$ C
Υγρασία λειτουργίας	20%-80%	20%-80%
Μέγιστη ενέργεια εκφόρτισης	24 mJ	

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων



### 4.3.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης [11] δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχυόμενο ρεύμα από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Είναι γνωστός και σαν Pellegrini target. Στη διάταξη θα χρησιμοποιήθηκε ο MD 101 της Schaffner. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζουμε τον ομοαξονικό προσαρμοστή που χρησιμοποιήσαμε.



Σχήμα 4.8: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 101

### 4.3.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns. Συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται τα ομοαξονικά καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατάλληλα για μεταφορά σήματος υψηλής συχνότητας (RF, Radio Frequency). Από τα τέσσερα ομοαξονικά καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν ένα καλώδιο συνδέει τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης με το βύσμα στην εσωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου του ανηχοϊκού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο κανάλι του παλμογράφου. Τα υπόλοιπα δυο χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου με ανάλογο τρόπο, έτσι ώστε ένα καλώδιο να συνδέει το probe με ένα όμοιο με το παραπάνω βύσμα στην εσωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου του ανηχοϊκού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο άλλο κανάλι του παλμογράφου.

#### 4.3.4 Εξασθενητής (attenuator)

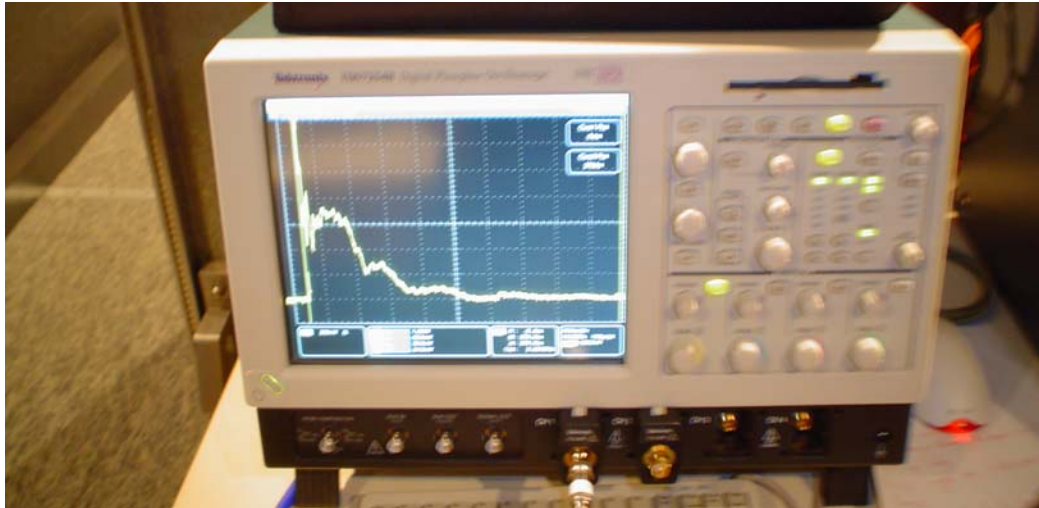
Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε την κυματομορφή του το σήμα πρέπει να εξασθενήσει, ώστε να μην κινδυνέψει να καταστραφεί το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix με εύρος ζώνης από dc έως 2 GHz, με εξασθένηση 20 dB και αντίσταση 50 Ω. Ο εξασθενητής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Εξασθένηση 20 dB σημαίνει υποβίβαση του σήματος 10 φορές, εφ' όσον κατά τα γνωστά ισχύει  $20dB = 20 \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right)$ . Ο εν λόγω εξασθενητής φαίνεται στο Σχήμα 4.9 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.9: Ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03

#### 4.3.5 Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Ο παλμογράφος αυτός, που είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix, λειτουργεί στα 2,5 GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο EN 61000-4-2 για παλμογράφο τουλάχιστον 1 GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη με ανάλυση 1024 x 768, 3,5 floppy για δισκέτα και CD Recorder για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 7254S παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10 ενώ μερικά από τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα 4.2 που ακολουθεί:

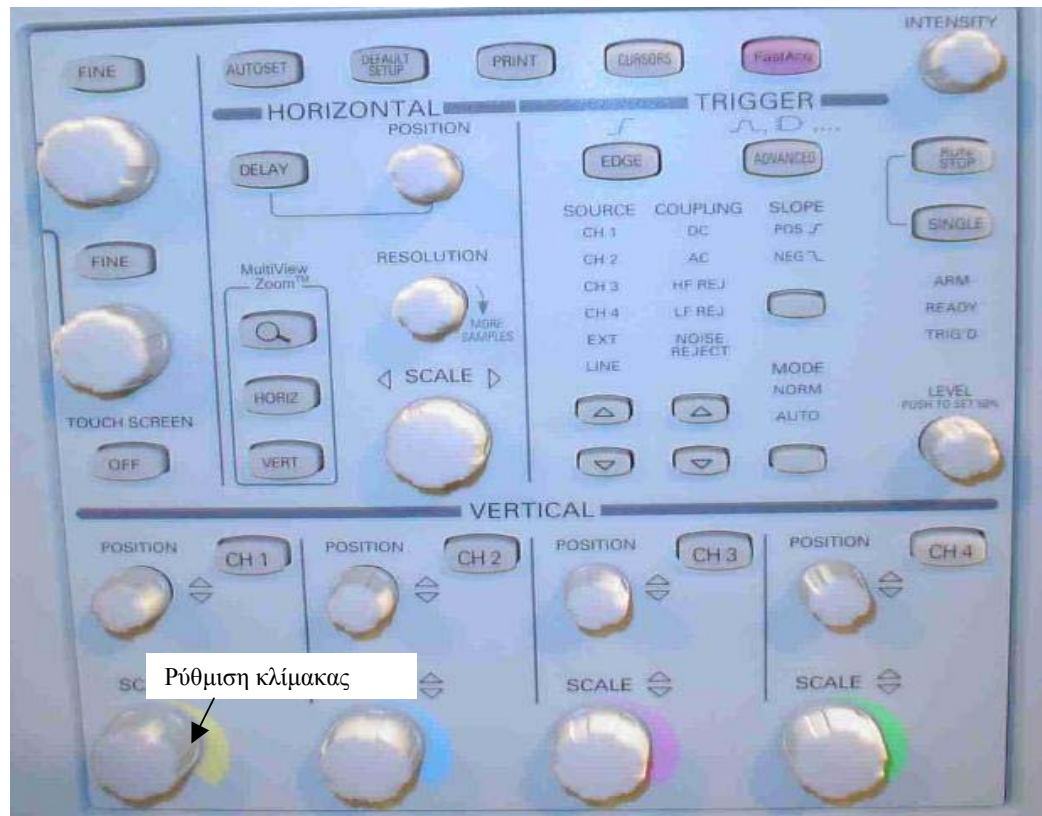


Σχήμα 4.10: Ο παλμογράφος TDS 7254B

Κανάλια Εισόδου	4
Εύρος ζώνης	2,5 GHz
Χρόνος ανόδου από το 10% στο 90%	130 ps
Χρόνος ανόδου από το 20% στο 80%	83 ps
Ακρίβεια DC κέρδους	$\pm 2\% + (2\% \times \text{offset})$
Σύζευξη εισόδου	DC, GND
Αντίσταση εισόδου	$50\Omega \pm 2,5\%$
Ευαισθησία εισόδου στα 50 Ω	2 mV/div έως 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bit
Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω	$< 1 V_{\text{RMS}}$ για $r < 100 \text{ mV/div}$ , $< 5 V_{\text{RMS}}$ για $r \geq 100 \text{ mV/div}$
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch1	20 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch2	10 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch3	5 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch4	1 Gs/sec

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B

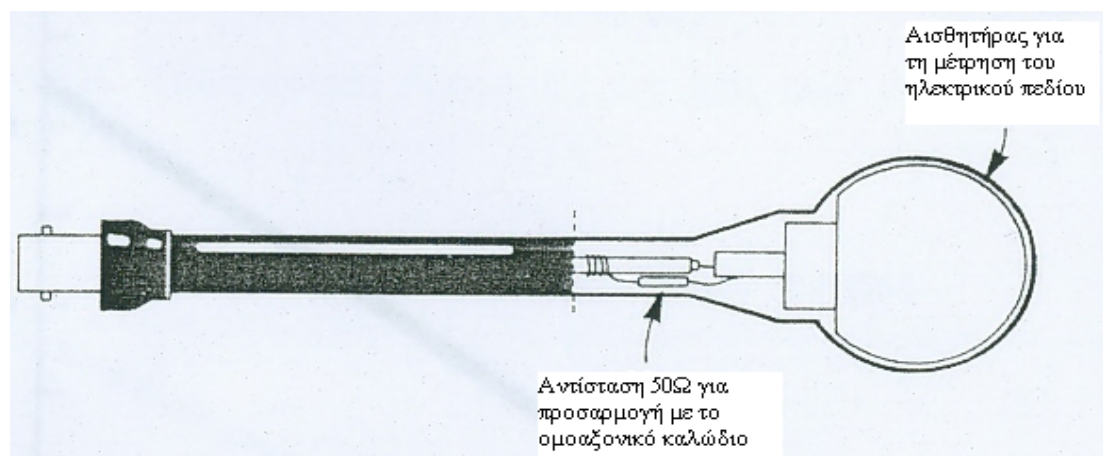
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι το κάθε κανάλι του παλμογράφου αντέχει μέγιστη τιμή ρεύματος μέχρι 5 V (rms τιμή) οπότε πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεχτικοί και να χρησιμοποιείται πάντα ο εξασθενητής.



Σχήμα 4.11: Κομβία του παλμογράφου TDS 7254B

#### 4.3.6 Probe για μέτρηση της έντασης $E$ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Το probe το οποίο χρησιμοποιούμε για την μέτρηση της έντασης  $E$  του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι το μοντέλο 904 της εταιρείας Rohde-Schwarz και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Το probe για τη μέτρηση της έντασης  $E$  του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Το παραπάνω probe χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου για σήματα έως 2,5 GHz. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 4.12 το probe περιλαμβάνει αντίσταση 50 Ω για προσαρμογή με το ομοαξονικό καλώδιο ενώ ο κεντρικός αγωγός του εκτείνεται και προσκολλάται στο σφαιρικό probe (ball probe) διαμέτρου 3,6cm. Το σφαιρικό probe χρησιμοποιείται για τη συλλογή του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Εξαιτίας της απουσίας επαγόμενου ρεύματος εντός του probe (δεν υπάρχει βρόχος) δεν επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι το probe που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου μετράει την παράγωγο της διηλεκτρικής μετατόπισης  $dD/dt$  και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου προκύπτει έμμεσα από αυτή όπως παρουσιαστεί παρακάτω.

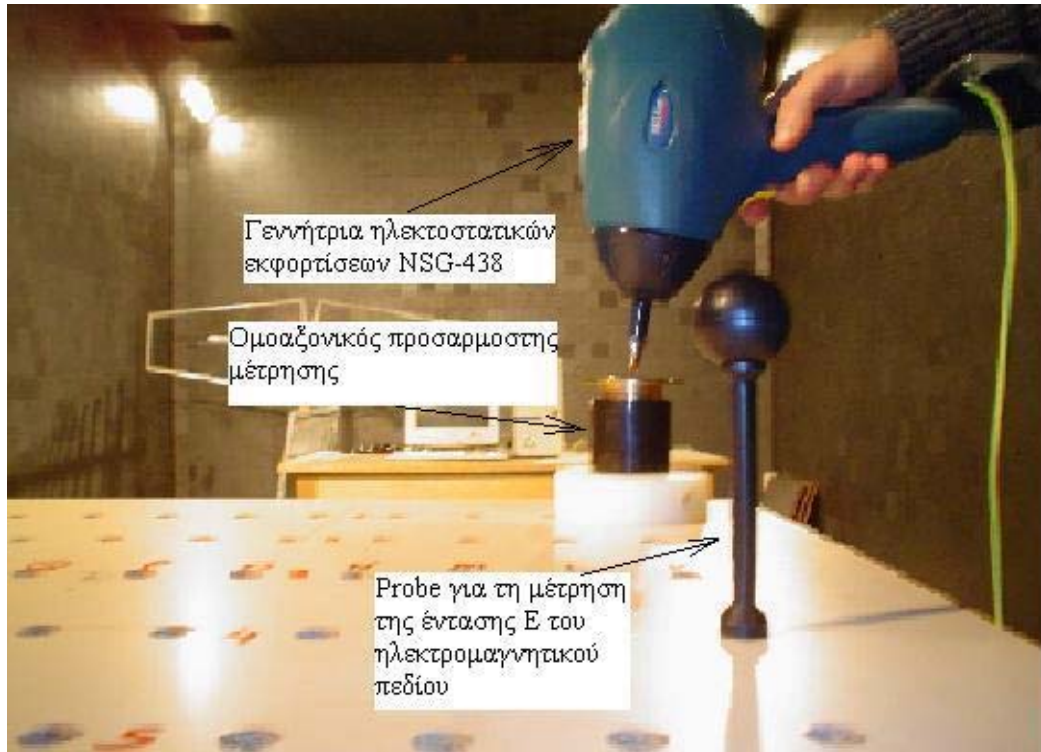
#### 4.3.7 Θωρακισμένος θάλαμος (transient immunity room)

Προκειμένου να εξαλείψουμε τις παρεμβολές που προκαλεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση στον εξοπλισμό καταγραφής (παλμογράφος), χρησιμοποιείται θωρακισμένος θάλαμος μεταβατικών διαταραχών. Ο παλμογράφος βρίσκεται στο θάλαμο ελέγχου (control room) διαστάσεων 3,2 x 2,5 x 3,3 m<sup>3</sup>. Ο θωρακισμένος θάλαμος του εργαστηρίου που θα χρησιμοποιηθεί στην πειραματική διάταξη είναι ο Lingren-Rayproof Series 81. Ο θάλαμος αυτός έχει διαστάσεις 3,5 x 6,5 x 3,3 m<sup>3</sup>, τα τοιχώματά του οποίου είναι κατασκευασμένα από φερρίτη (μαλακός σίδηρος), υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό τις παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές (EMI- Electromagnetic Interferences). Ο θάλαμος αυτός αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως και 1 GHz.



#### 4.3.8 Εποπτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης

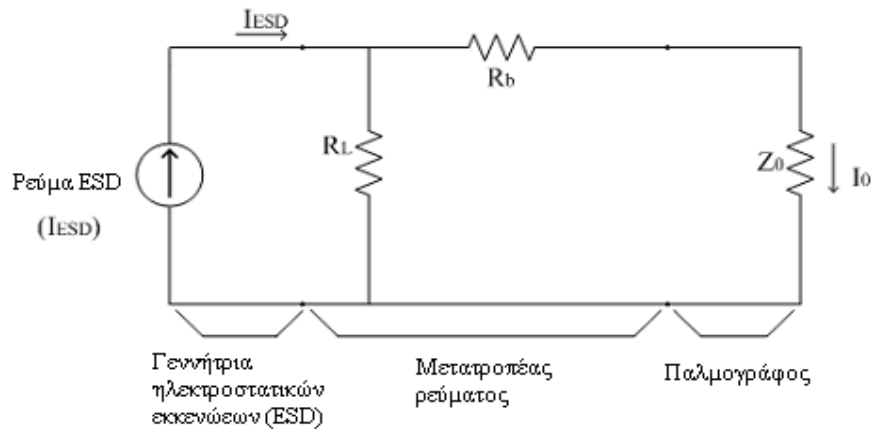
Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια εκφόρτισης αέρος. Διακρίνεται η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438, ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης τοποθετημένη πάνω σε μονωτικό υλικό και το probe για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε σημείο του άξονα X και απόσταση 30 cm από το στόχο.



Σχήμα 4.13: Η πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια εκφόρτισης αέρος.

#### 4.4 Ανακατασκευή ρεύματος

Στον παλμογράφο, αυτό που μετράται είναι η τάση και όχι το ρεύμα που χρειάζεται να γνωρίζουμε προκειμένου να υπολογιστούν οι τέσσερις παράμετροι του, οπότε είναι αναγκαία η ανακατασκευή του ρεύματος μέσω της τάσης. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα [25] της μετρητικής διάταξης στην dc ανάλυση το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.14 και το οποίο περιλαμβάνει την γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον ομοαξονικό μετατροπέα και τον παλμογράφο. Στο Σχήμα 4.14 συμβολίζεται ως  $R_L$  η αντίσταση φόρτισης του ομοαξονικού προσαρμοστή, ως  $R_b$  η αντίσταση εκκένωσης και  $Z_0$  η ονομαστική αντίσταση προσαρμογής του ομοαξονικού καλωδίου, η οποία είναι 50 Ω.



Σχήμα 4.14: Το ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην dc ανάλυση

Το ρεύμα εκφόρτισης δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{ESD} = \frac{C \cdot V_R}{Z_0} \quad (4.1)$$

$$C = C_{CT} \cdot C_A \quad (4.2)$$

$$C_{CT} = \frac{I_{ESD}}{I_0} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L} \quad (4.3)$$

όπου  $I_{ESD}$  είναι το πλάτος του ρεύματος εκφόρτισης,  $V_R$  η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση εξαιτίας του ρεύματος  $I_0$ .  $C$  είναι ένας συντελεστής μετατροπής, ενώ  $C_{CT}$  και  $C_A$  είναι οι συντελεστές μετατροπής του ομοαξονικού προσαρμοστή και του εξασθενητή αντίστοιχα. Επειδή ο εξασθενητής είναι 20 dB το σήμα εξασθενείται 10 φορές ( $C_A=10$ ). Οι τιμές των  $R_L$  και  $R_b$  μπορούν να βρεθούν μετρώντας την dc αντίσταση του ομοαξονικού προσαρμοστή. Παρ' όλο που οι τιμές αυτές υπάρχουν διαθέσιμες κάτι τέτοιο πρέπει να αποφεύγεται, ώστε οι μετρήσεις να είναι όσο το περισσότερο ακριβείς. Η αντίσταση φόρτισης  $R_L$  είναι η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού ηλεκτροδίου (δίσκου) και του εξωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και είναι ίση με 2.005 Ω Η  $R_b$  είναι η αντίσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και ισούται με 48.246 Ohms. Για τον υπολογισμό αυτών των δύο τιμών ( $R_L$  και  $R_b$ ) γίνονται 20 μετρήσεις και εξάγεται ο μέσος όρος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η

αβεβαιότητα της μέτρησης Τελικά με υπολογισμούς βρίσκεται ότι 1 Volt στον παλμογράφο αντιστοιχεί σε ρεύμα εκφόρτισης 10 A.

#### 4.5 Ανακατασκευή ηλεκτρικού πεδίου

Όπως και κατά τη μέτρηση του ρεύματος ο παλμογράφος μετράει τάση έτσι και κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση να μετατραπεί σε μονάδες ηλεκτρικού πεδίου. Το probe που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μετράει την παράγωγο της διηλεκτρικής μετατόπισης  $dD/dt$  σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_0 = 10 \cdot R \cdot A_{eq} \cdot \frac{dD}{dt} = R \cdot A_{eq} \cdot \frac{d(\epsilon_0 \cdot E)}{dt} \quad (4.4)$$

$$A_{eq} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (4.5)$$

όπου  $V_0$  είναι η έξοδος του probe σε Volt,  $A_{eq}$  η ισοδύναμη επιφάνεια του σε  $m^2$ ,  $r$  η ακτίνα του σφαιρικού probe και  $R$  η αντίσταση των  $50\Omega$  για την προσαρμογή με το ομοαξονικό καλώδιο. Επίσης  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού η τιμή της οποίας είναι  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{Cb}^2/\text{Nm}^2$ . Το 10 στη σχέση 4.4 προέρχεται από τη χρήση του attenuator ο οποίος εξασθενεί το σήμα κατά 20 db δηλαδή 10 φορές. Μετά από πράξεις και δεδομένου ότι η διάμετρος του probe για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι 3,6 cm προκύπτει η ακόλουθη ισότητα:

$$\frac{dE}{dt} = 5.548 \cdot 10^{12} \cdot V_0 \quad (4.6)$$

Βάση της σχέσης (4.6) υπολογίζεται η παράγωγος του ηλεκτρικού πεδίου. Μετά από την ολοκλήρωση της παραγωγού της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab προκύπτει το ζητούμενο ηλεκτρικό πεδίο  $E$ . Τα βήματα τα οποία ακολουθούμε από τη στιγμή που αποθηκεύουμε τις μετρήσεις που αφορούν το πεδίο στον παλμογράφο μέχρι την τελική απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  στο πρόγραμμα Matlab παρουσιάζονται παρακάτω:

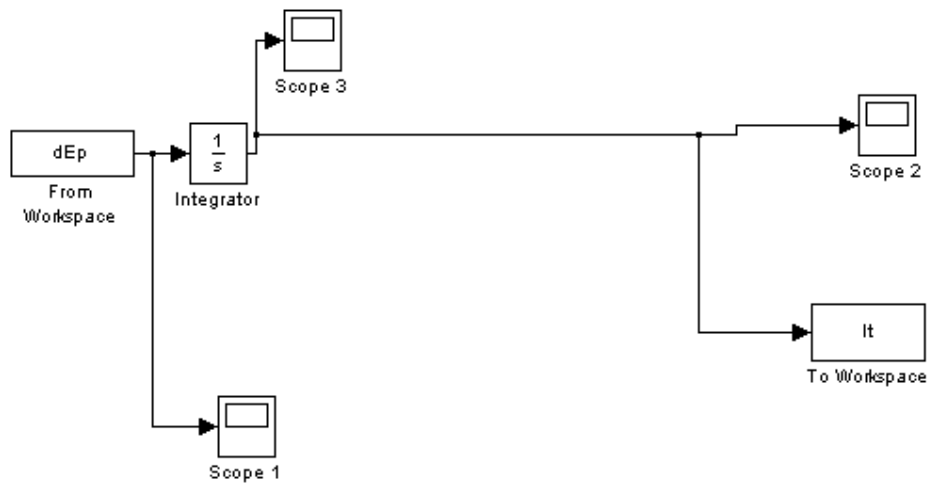
- Η μέτρηση στον παλμογράφο σώζεται σαν dEp.csv το οποίο στη συνέχεια το μετατρέπουμε σε αρχείο txt μέσω του προγράμματος Excel. Αφού το ανοίξουμε με το Excel διαγράφουμε τα πρώτα σχόλια του αρχείου και



αντικαθιστούμε όλα τα κόμματα στους αριθμούς με κενό (space). Το αρχείο το σώζουμε σαν αρχείο txt οριοθετημένο με tab με το όνομα dEp.txt. Με αυτόν τον τρόπο το αρχείο μπορεί να διαβαστεί από το πρόγραμμα Matlab.

- Κατόπιν ολοκληρώνουμε το αρχείο dEp.txt με το πρόγραμμα Integration\_E που είναι πρόγραμμα στο simulink λαμβάνοντας το αρχείο της ολοκλήρωσης Ep.txt.

Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται το περιβάλλον του simulink στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση του σήματος:



Σχήμα 4.15: Το περιβάλλον του simulink στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση του σήματος

- Τέλος η σχεδίαση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E (σε kV/m) συναρτήσει του χρόνου γίνεται με το πρόγραμμα Matlab.

# Κεφάλαιο 5

## Πειραματικά αποτελέσματα

### 5.1 Εισαγωγή

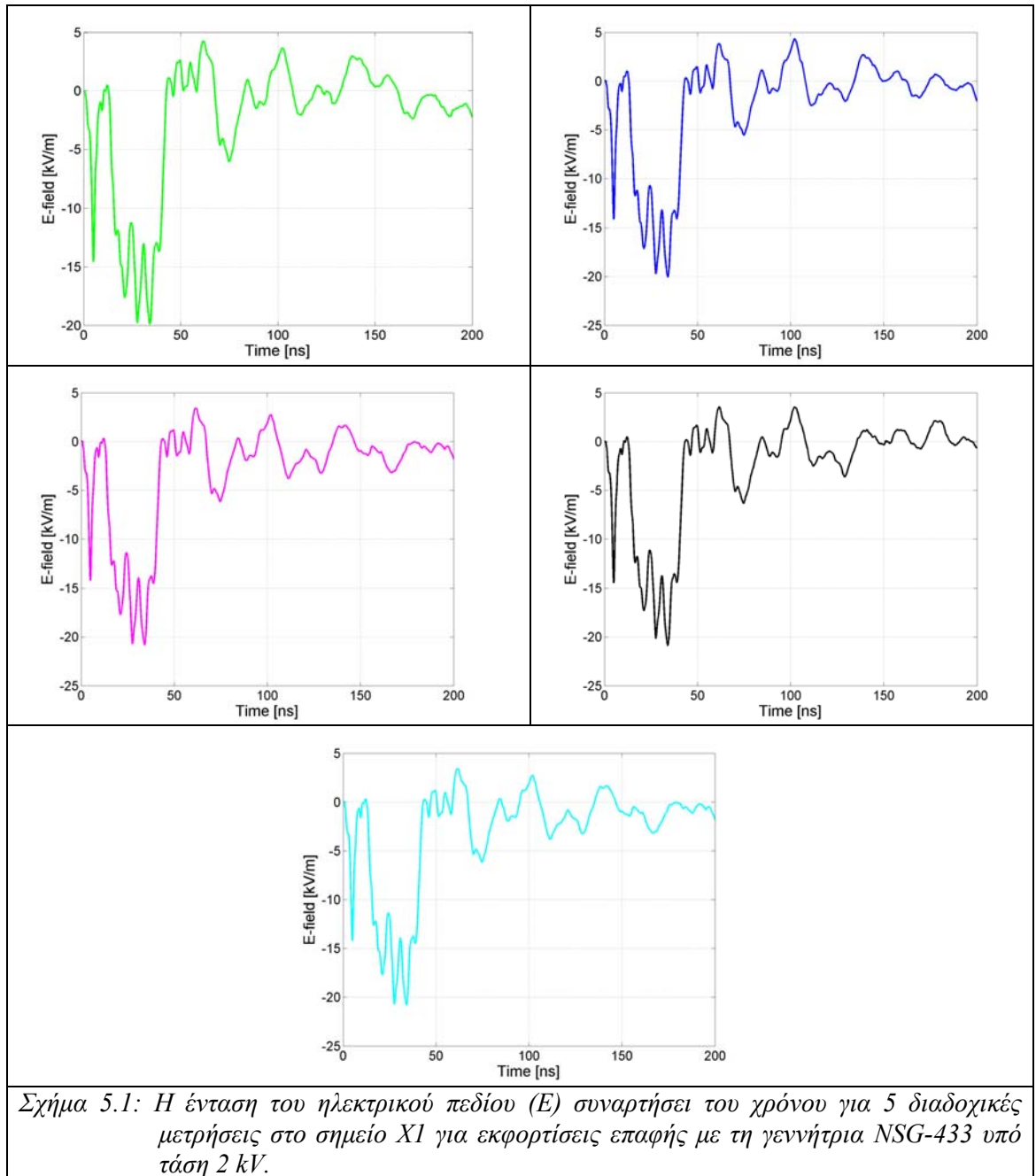
Στην πειραματική διάταξη, που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 4, πραγματοποιήθηκαν εκφορτίσεις με δυο γεννήτριες της εταιρίας Schaffner και συγκεκριμένα με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Οι εκφορτίσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν ήταν κυρίως εκφορτίσεις επαφής για τάσεις  $\pm 2$  kV ενώ έγιναν και κάποιες εκφορτίσεις μέσω αέρα. Οι γραφικές παραστάσεις για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων παρουσιάζονται παρακάτω.

### 5.2 Γραφικές παραστάσεις

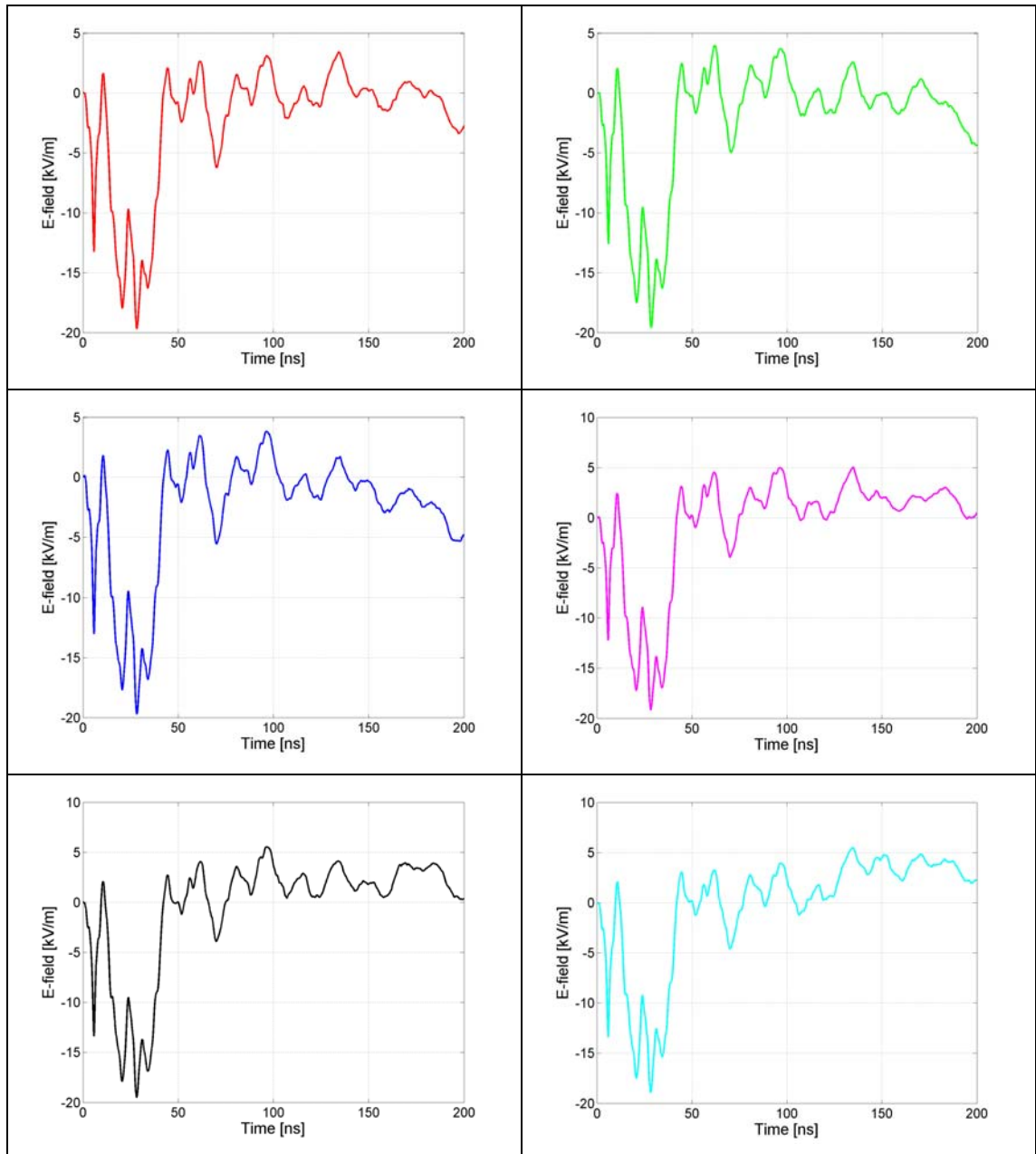
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε μια σειρά από γραφήματα που αφορούν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο παρατήρησης. Το probe για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου τοποθετήθηκε σε διαδοχικές αποστάσεις προς δυο κατευθύνσεις οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκφόρτισης και συμβολίζονται ως άξονες X και Y αντίστοιχα. Στον άξονα X οι μετρήσεις έγιναν σε αποστάσεις 10, 20, 30, και 40 cm από το σημείο εκφόρτισης ενώ στον άξονα Y οι μετρήσεις έγιναν ανά 5 cm και συγκεκριμένα σε αποστάσεις 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 και 55 cm. Οι αποστάσεις αυτές έχουν παρουσιαστεί στο Σχήμα 4.2 του κεφαλαίου 4. Τα γραφήματα που προέκυψαν ύστερα από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα Matlab για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 υπό τάσεις  $\pm 2$  kV είναι τα ακόλουθα:

### 5.2.1 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-433

- **Σημείο X1 (10 cm)**

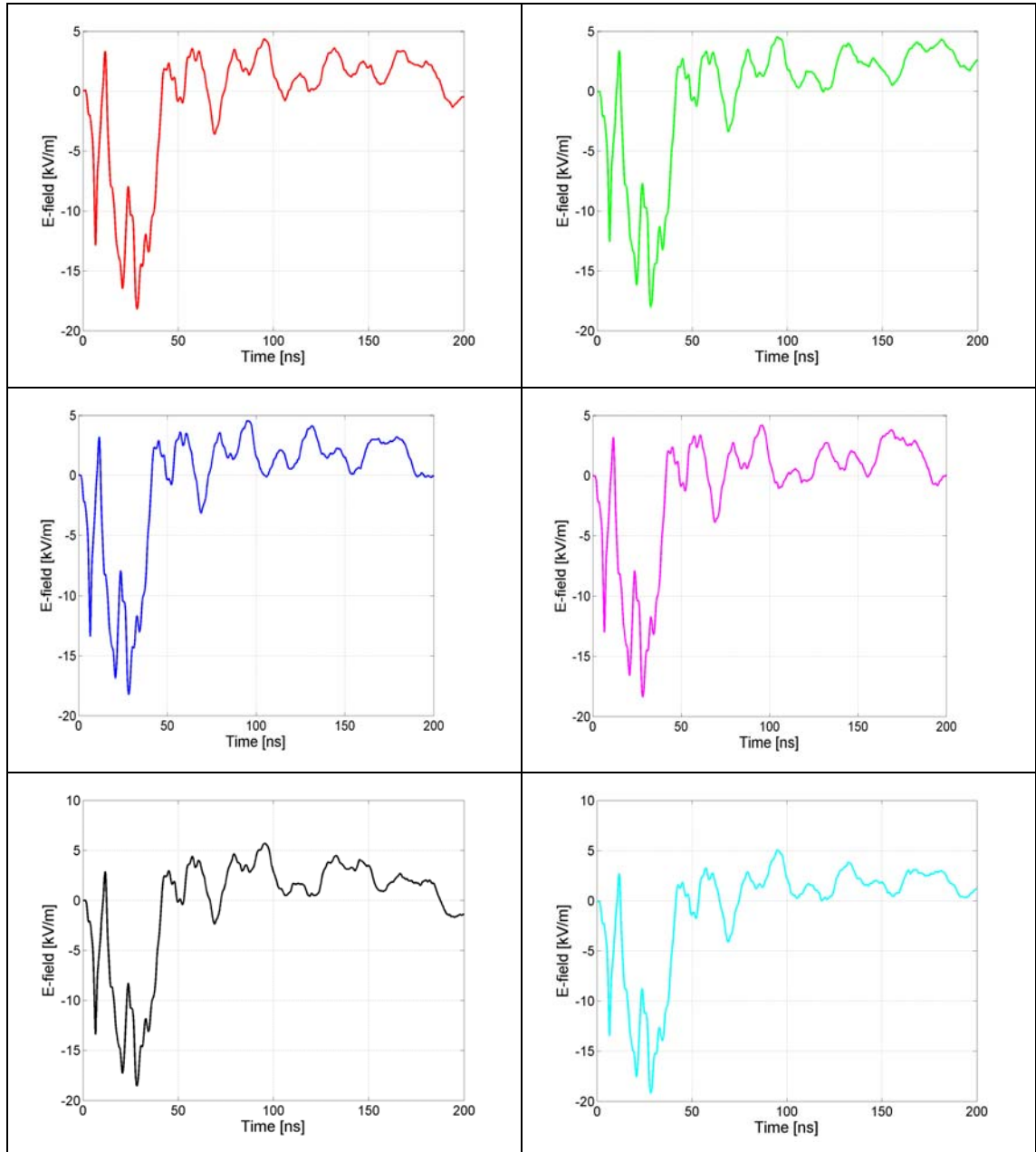


- **Σημείο X2 (20 cm)**



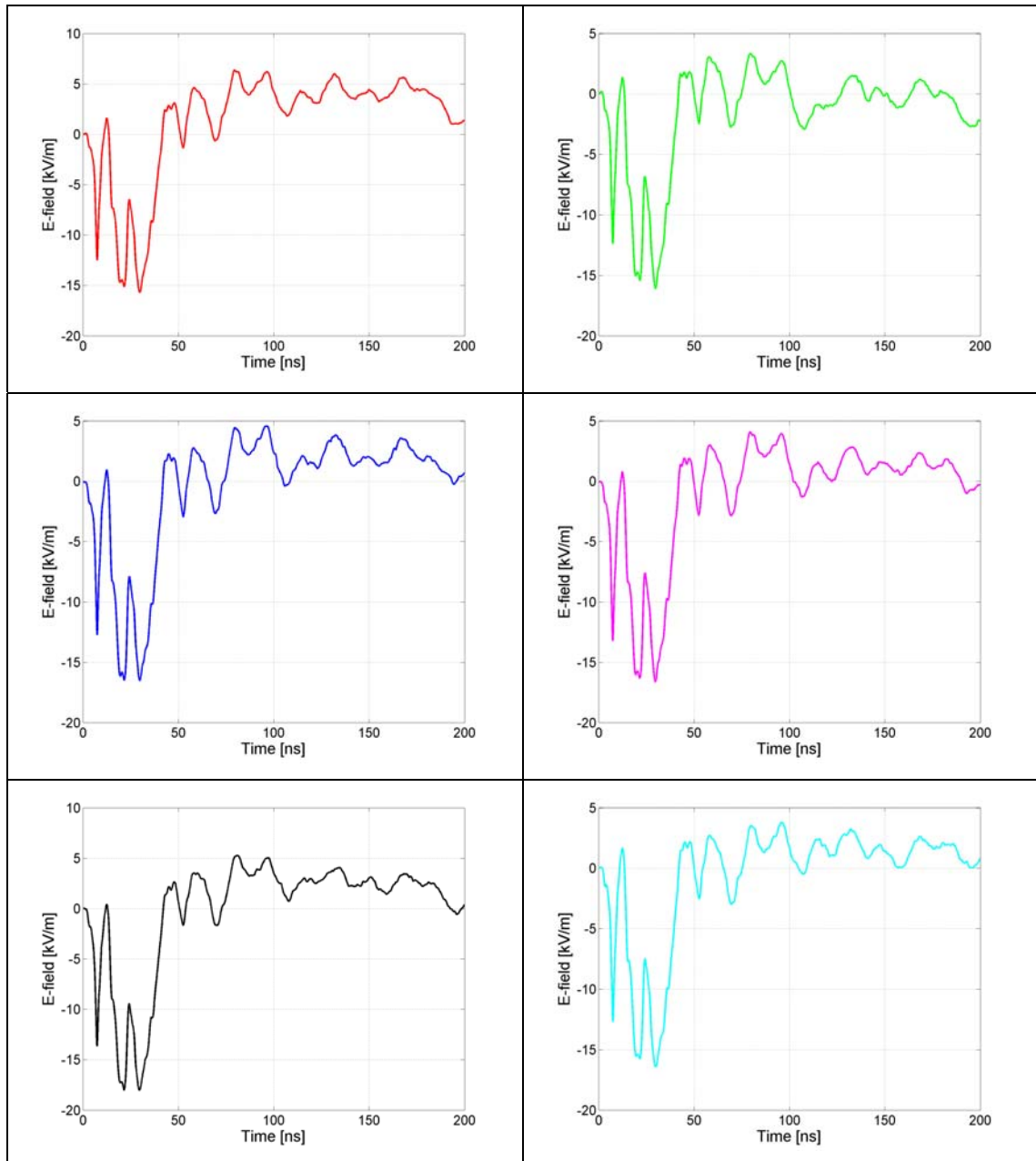
Σχήμα 5.2: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο X3 (30 cm)**



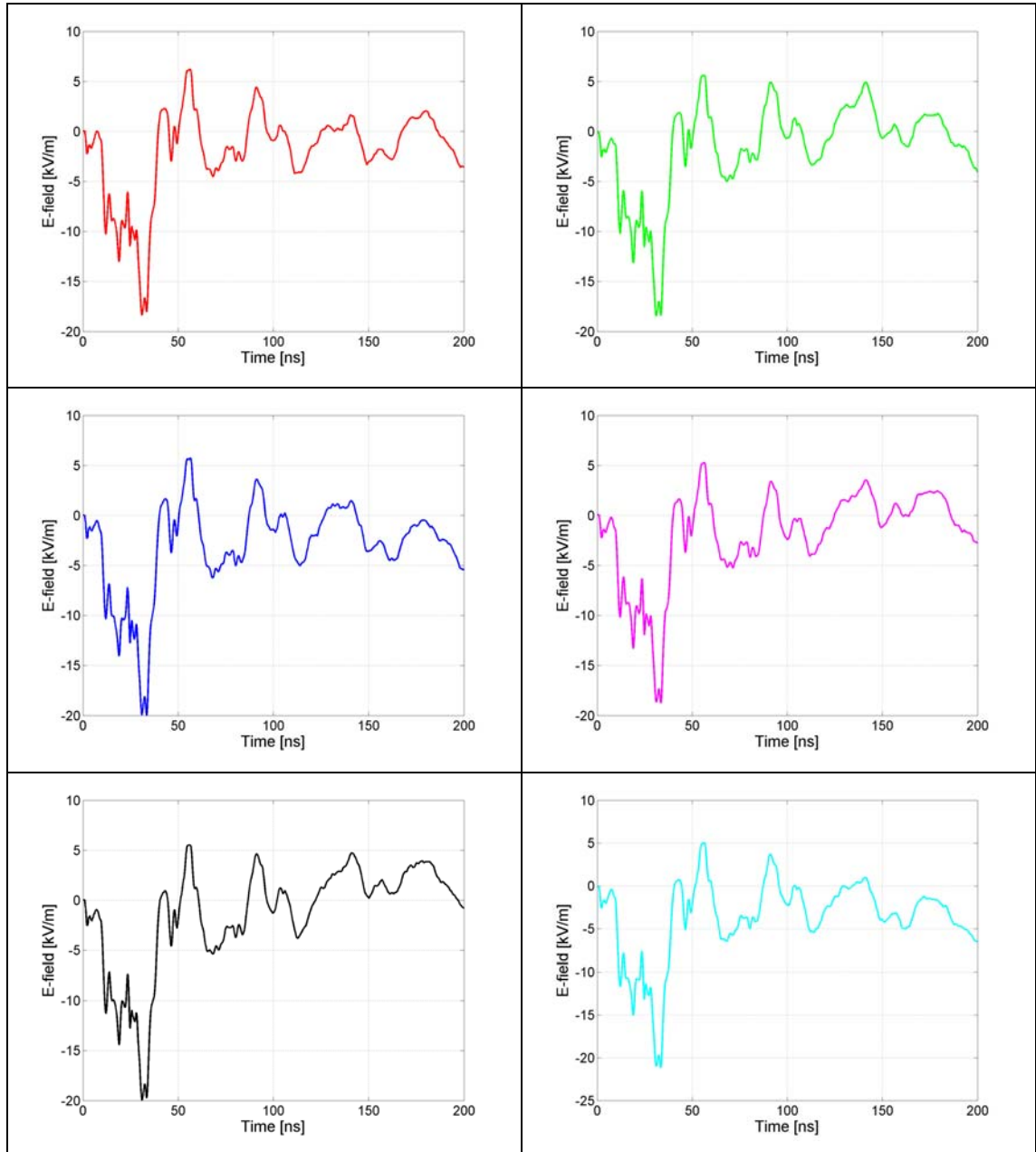
Σχήμα 5.3: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο X4 (40 cm)**



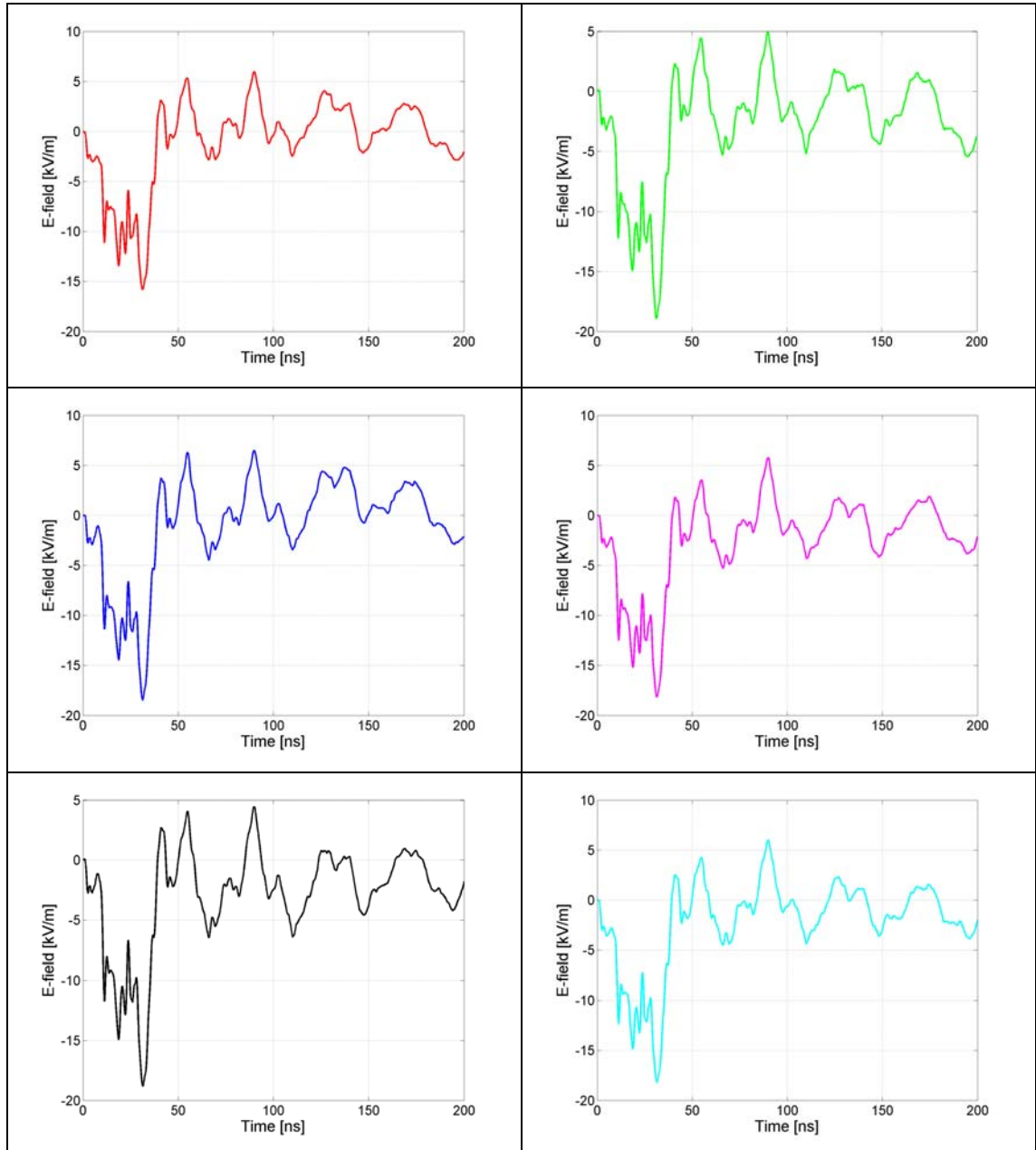
Σχήμα 5.4: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y1 (10 cm)**



Σχήμα 5.5: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

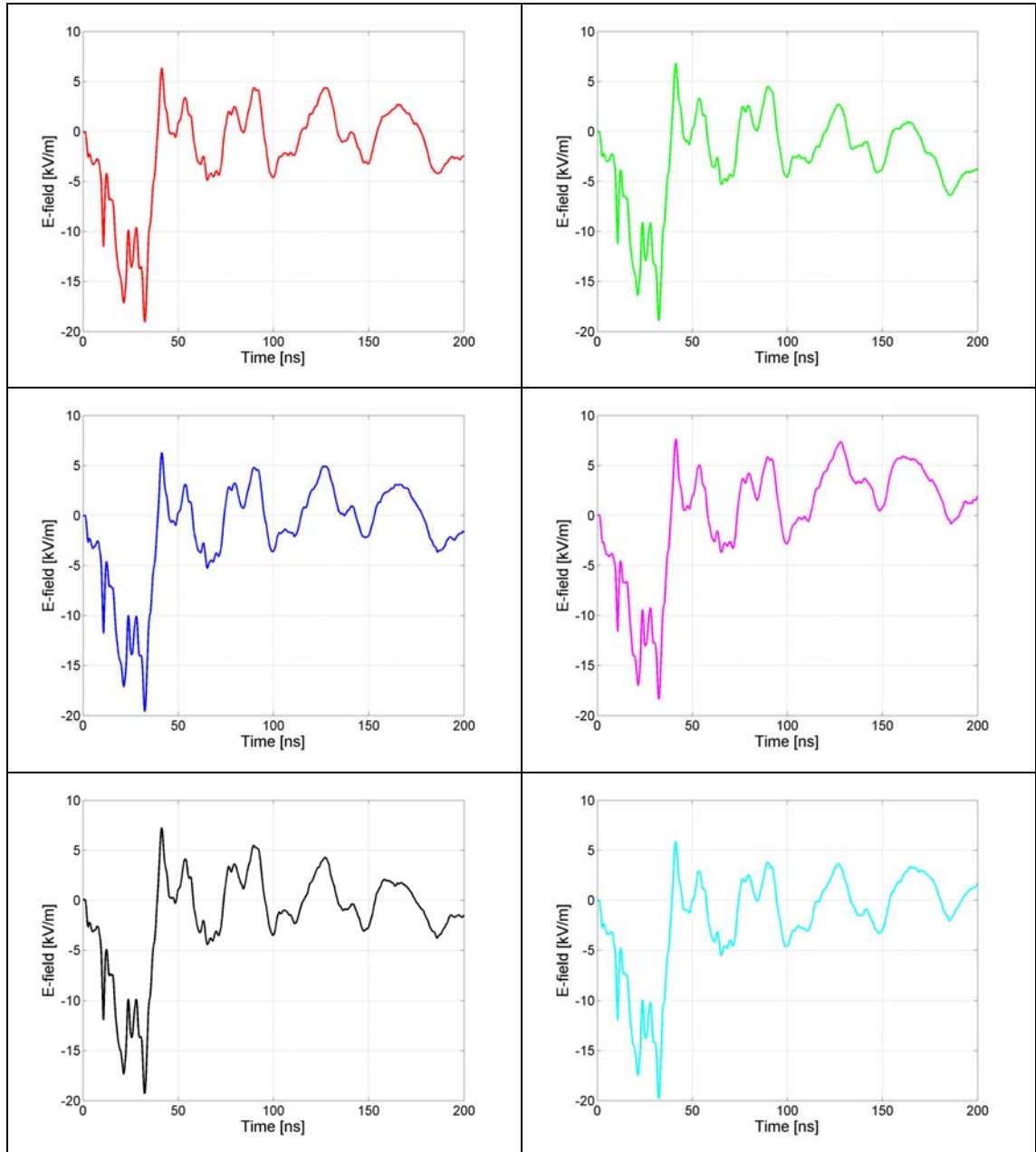
- **Σημείο Y2 (15 cm)**



Σχήμα 5.6: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

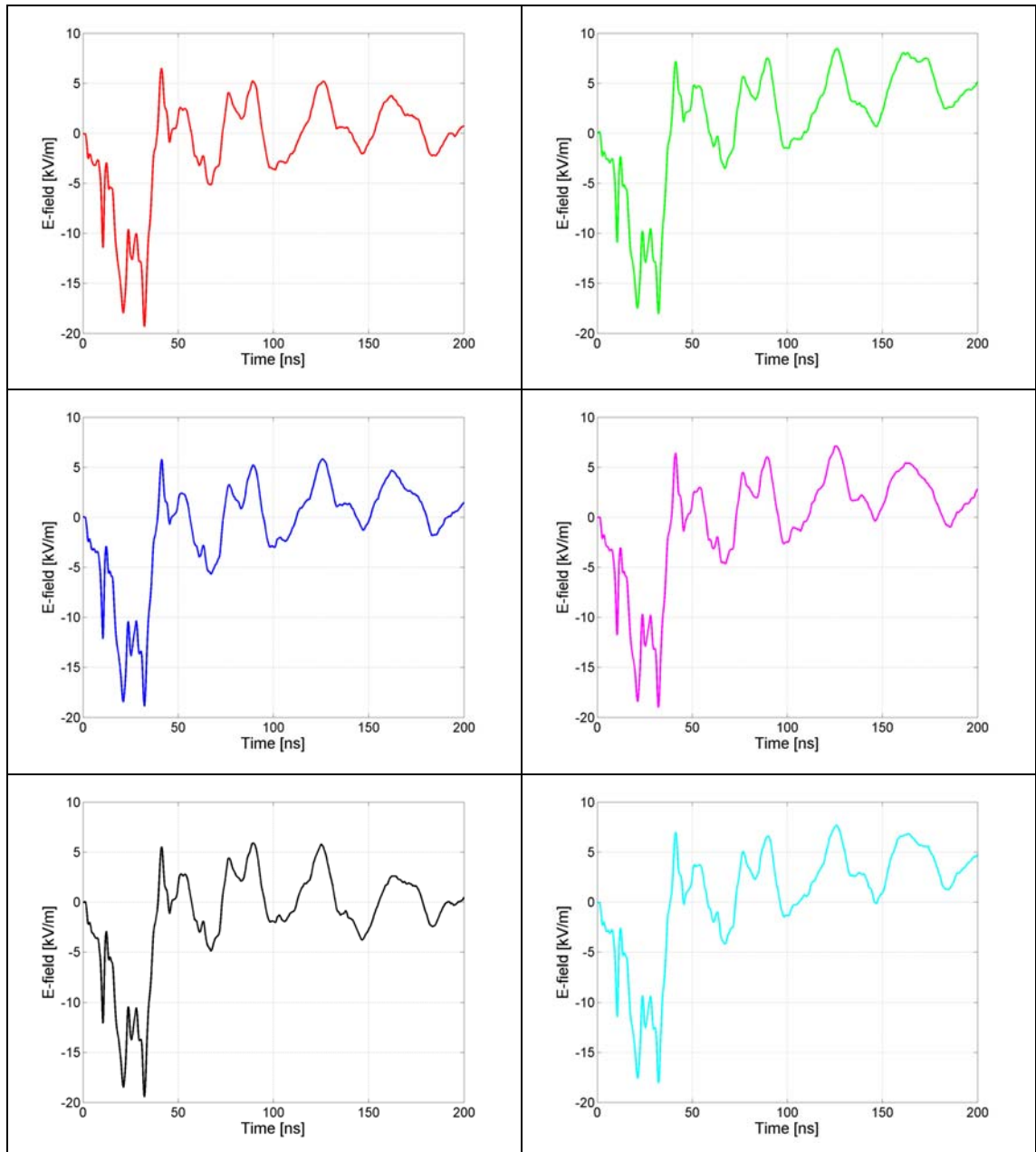


- **Σημείο Y3 (20 cm)**



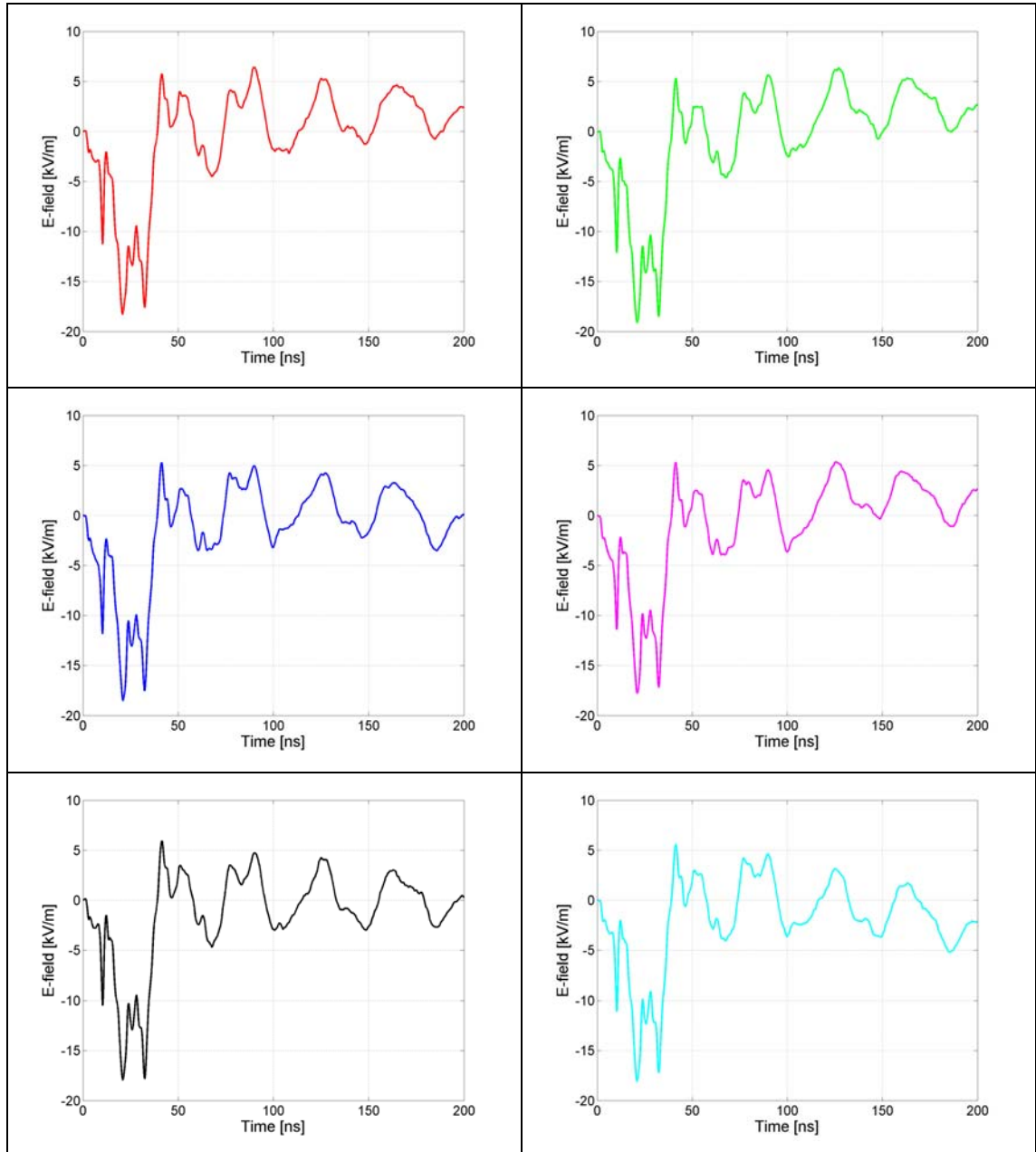
Σχήμα 5.7: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y4 (25 cm)**



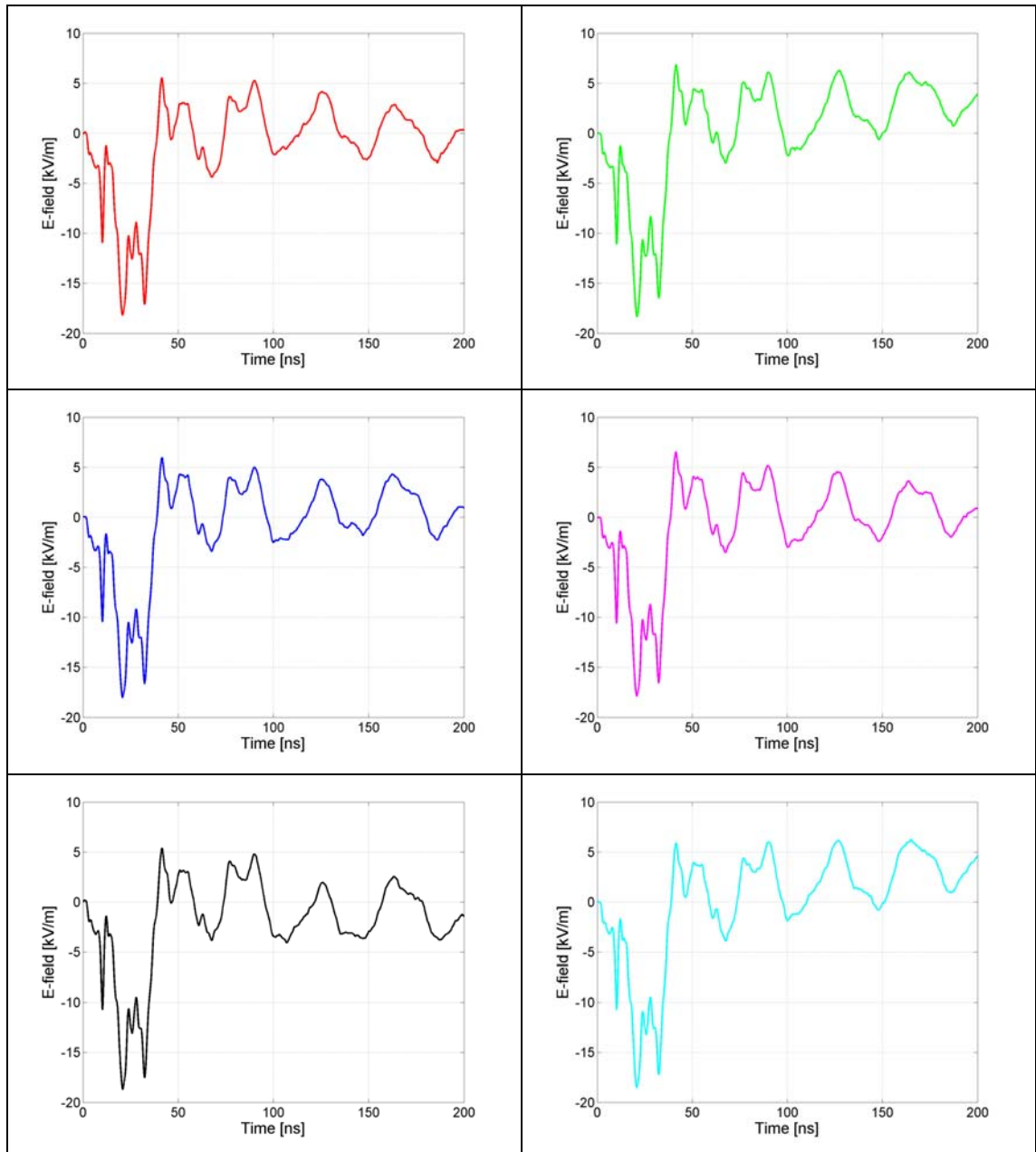
Σχήμα 5.8: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y5 (30 cm)**



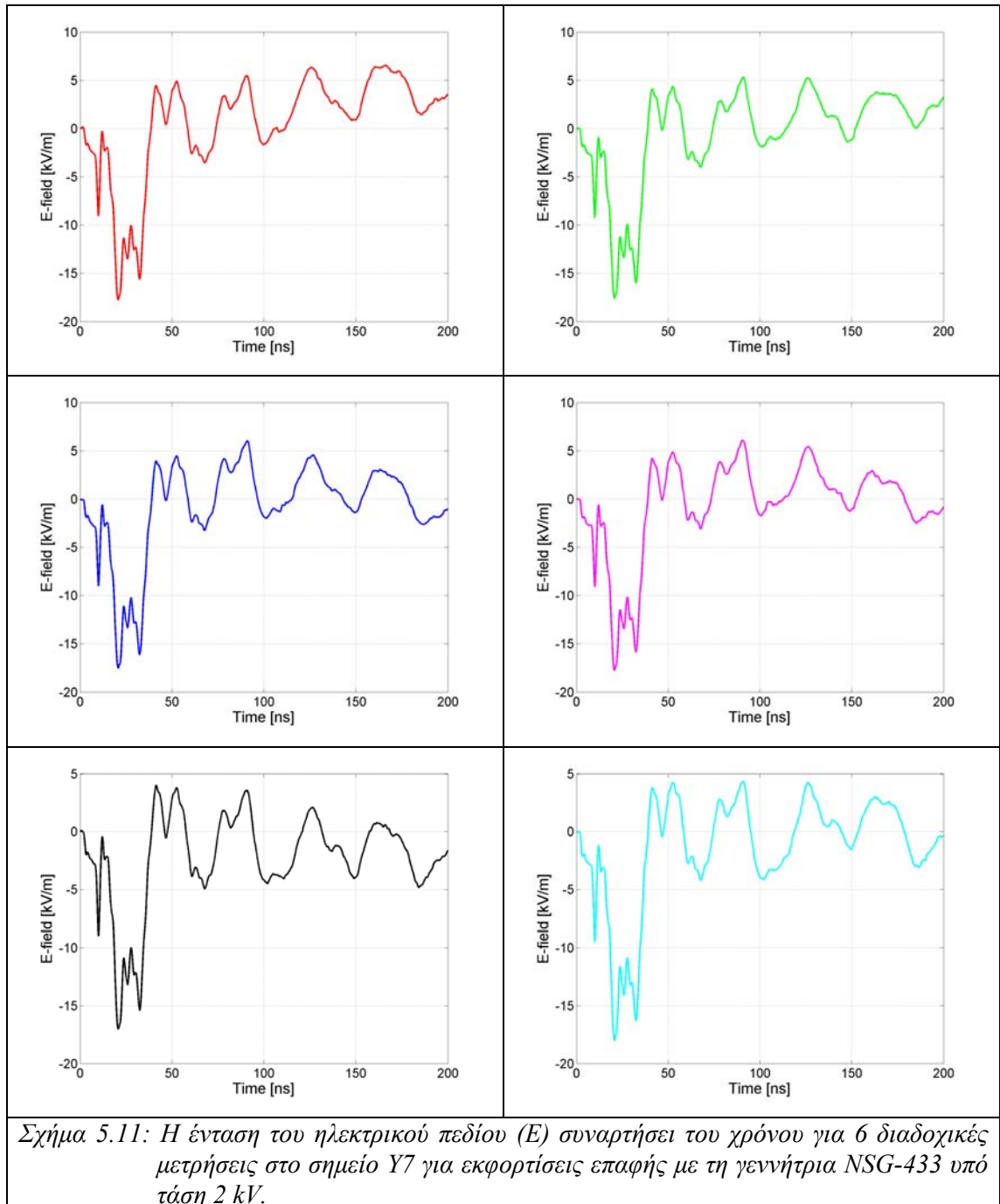
Σχήμα 5.9: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y5 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Υ6 (35 cm)**

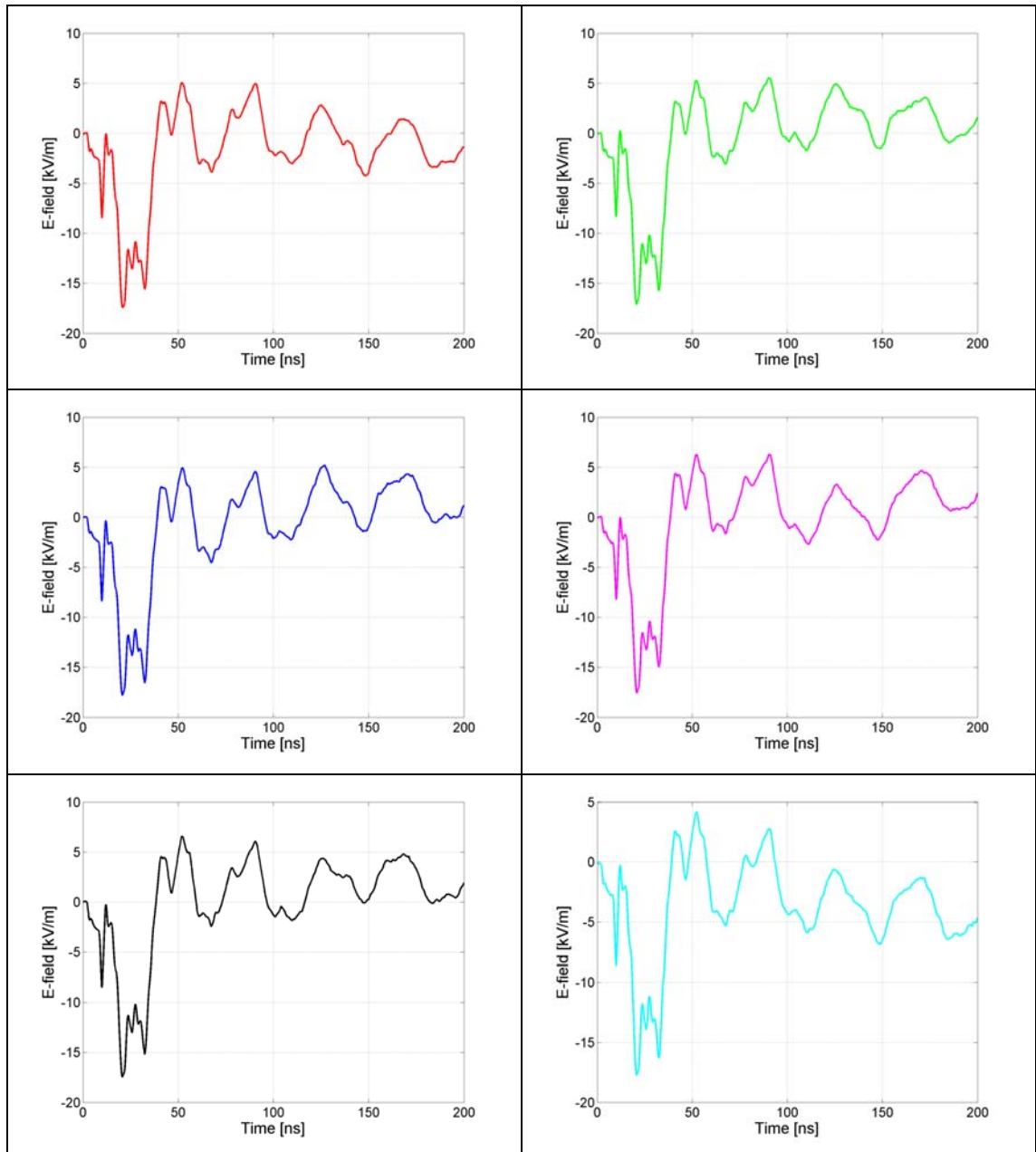


Σχήμα 5.10: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Υ6 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y7 (40 cm)**

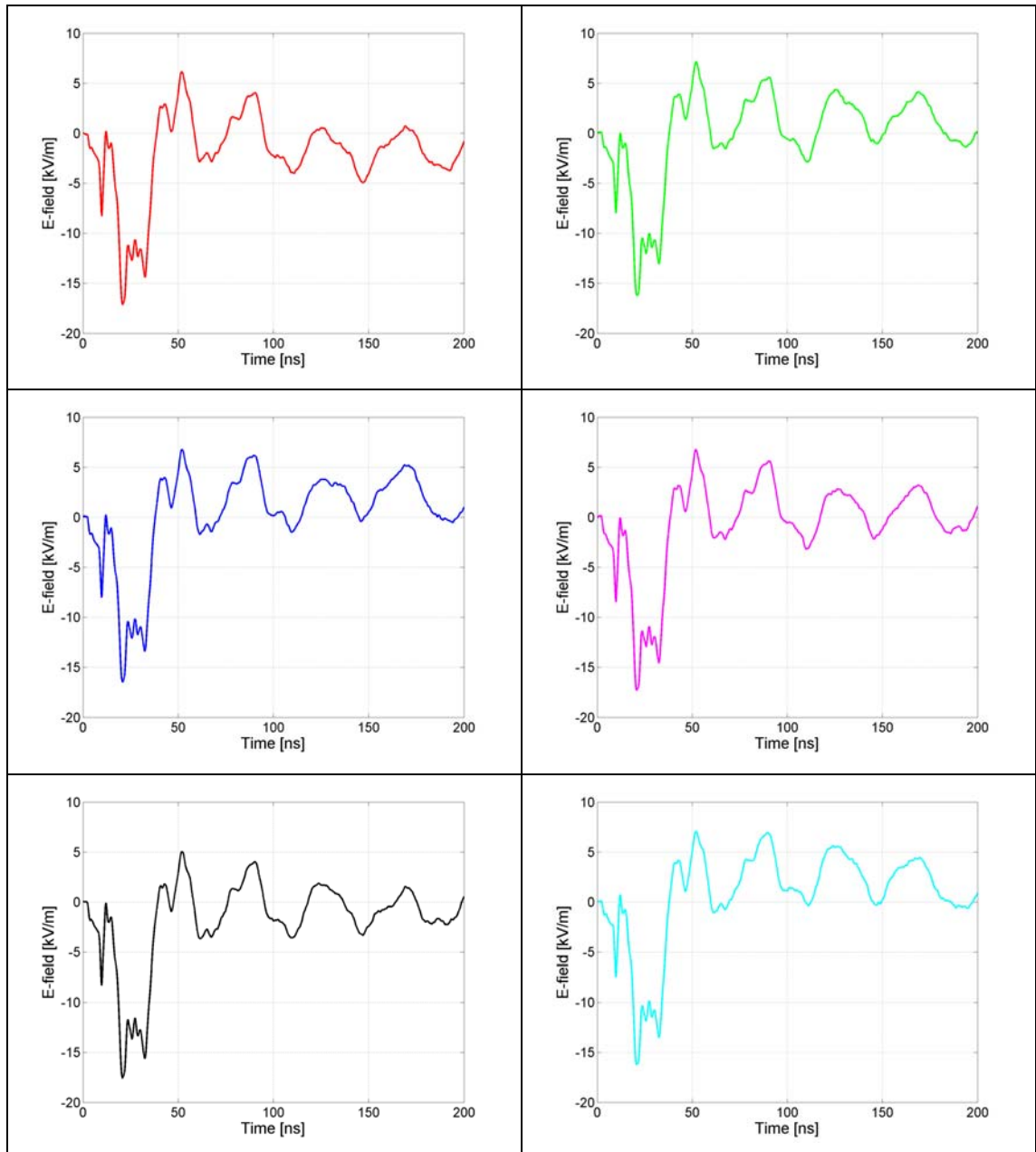


- **Σημείο Y8 (45 cm)**



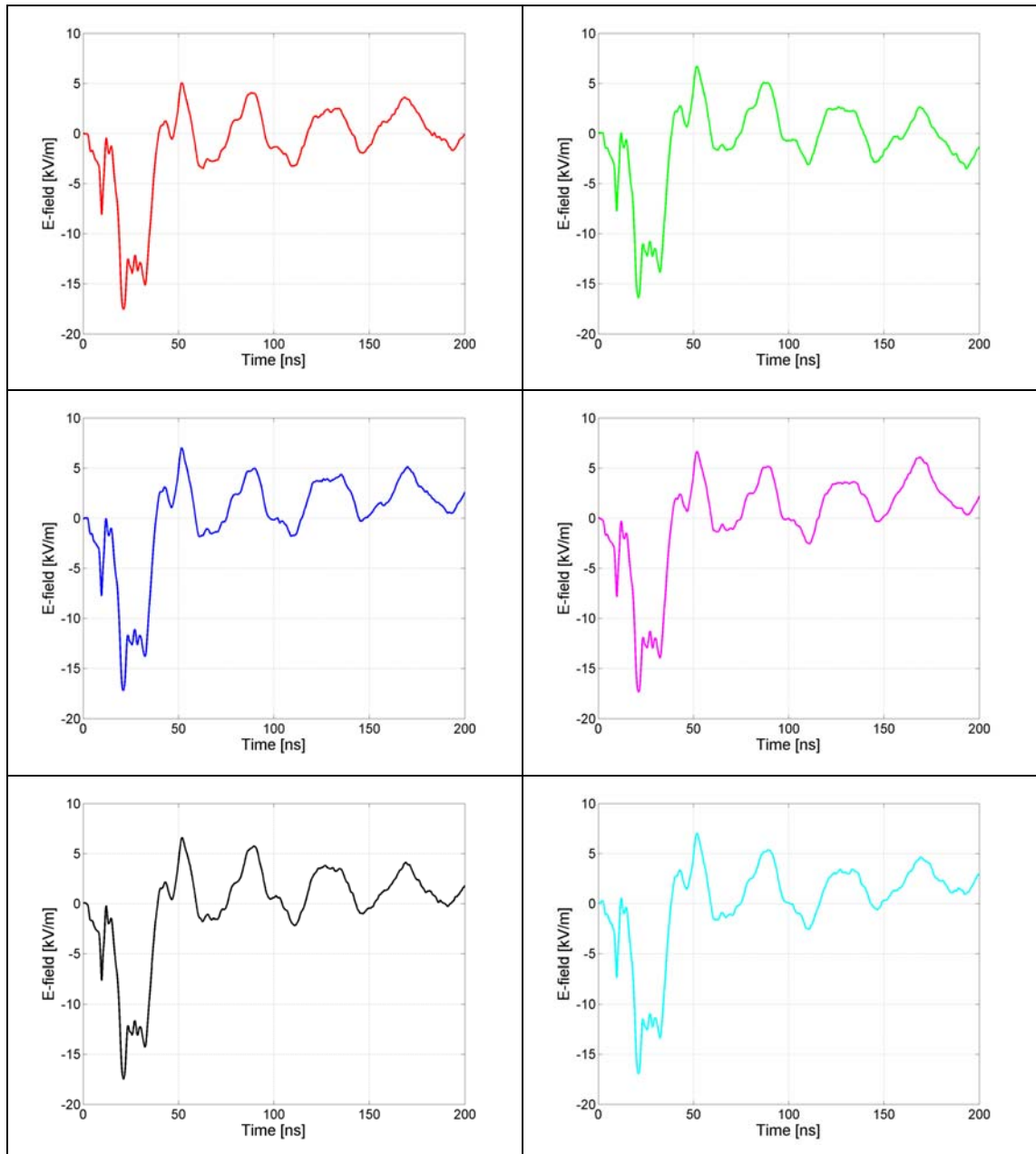
Σχήμα 5.12: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y8 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y9 (50 cm)**



Σχήμα 5.13: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y9 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y10 (55 cm)**

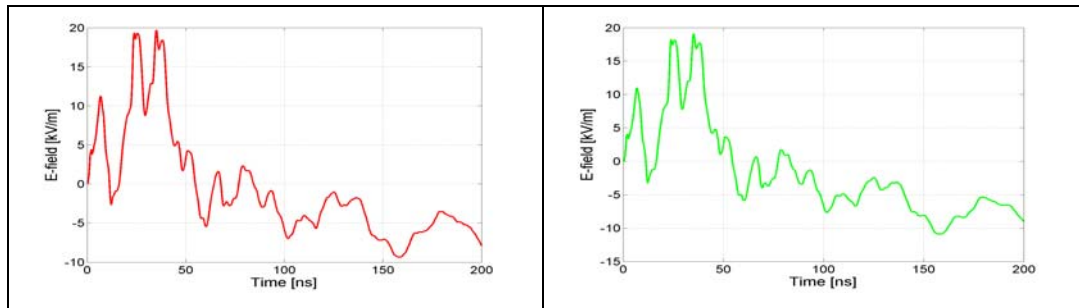


Σχήμα 5.14: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y10 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.



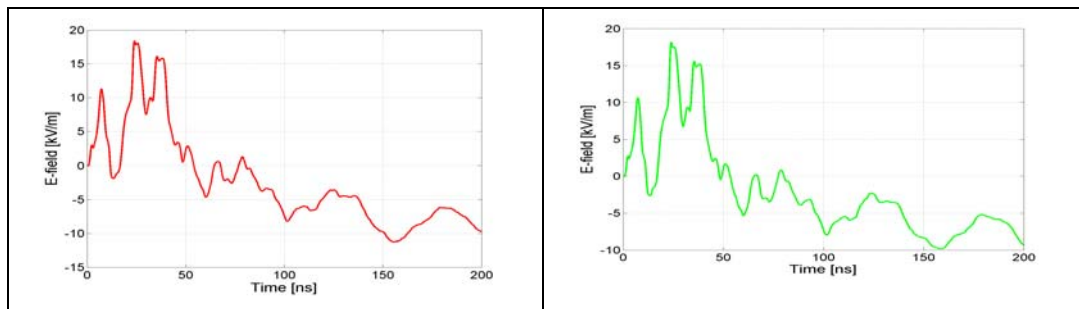
### 5.2.2 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-433

- **Σημείο X1 (10 cm)**



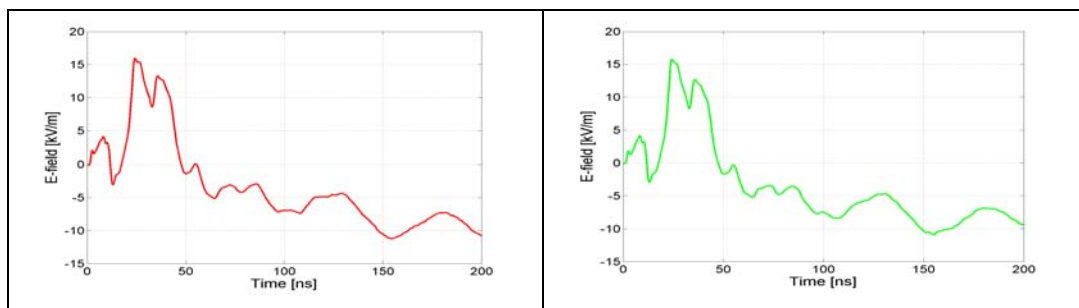
Σχήμα 5.15: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο X2 (20 cm)**



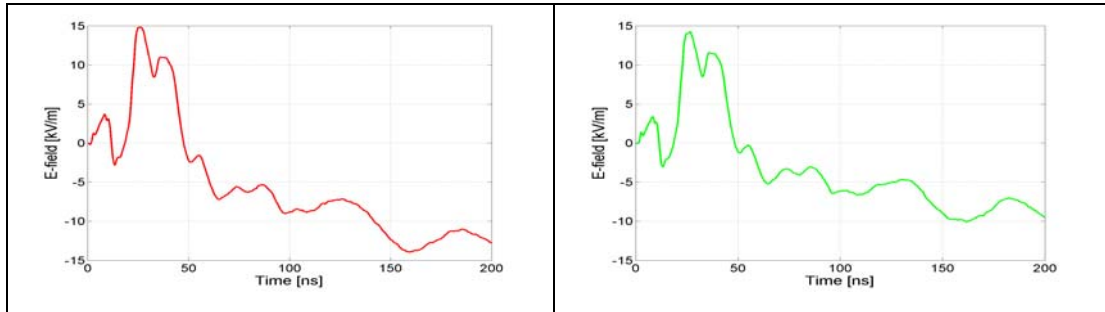
Σχήμα 5.16: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο X3 (30 cm)**



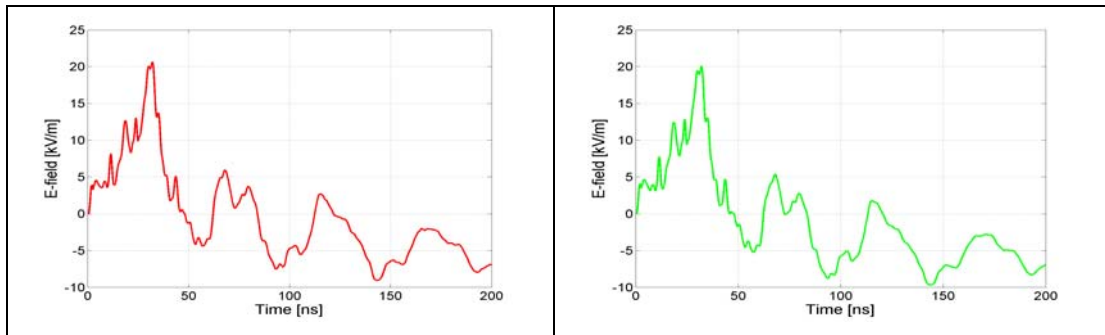
Σχήμα 5.17: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο X4 (40 cm)**



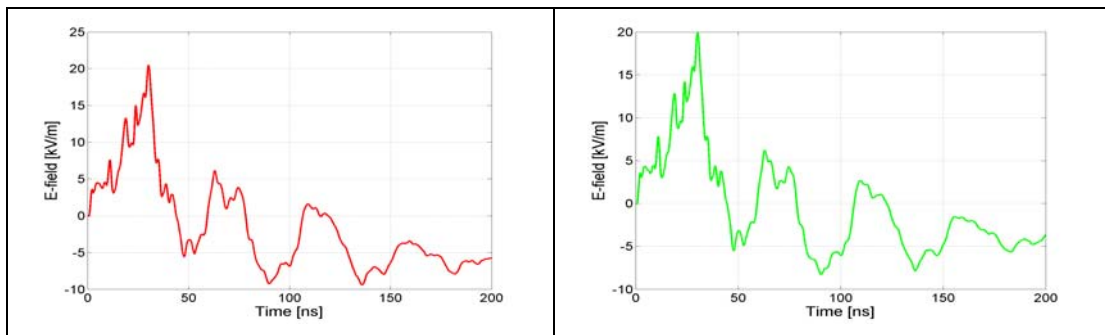
Σχήμα 5.18: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y1 (10 cm)**



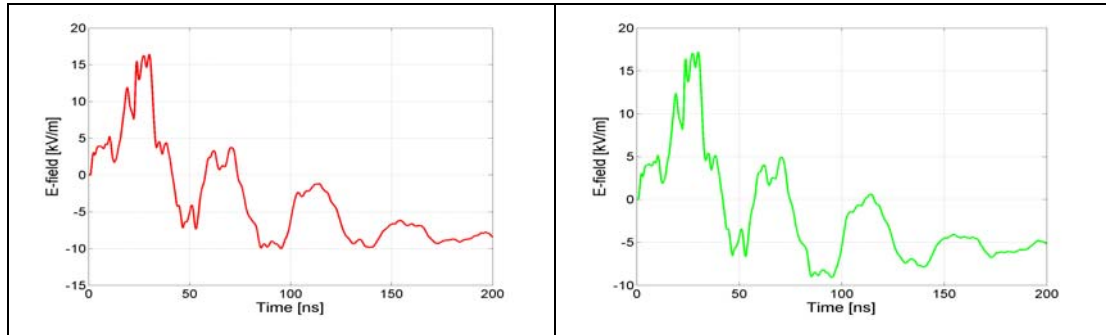
Σχήμα 5.19: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y2 (15 cm)**



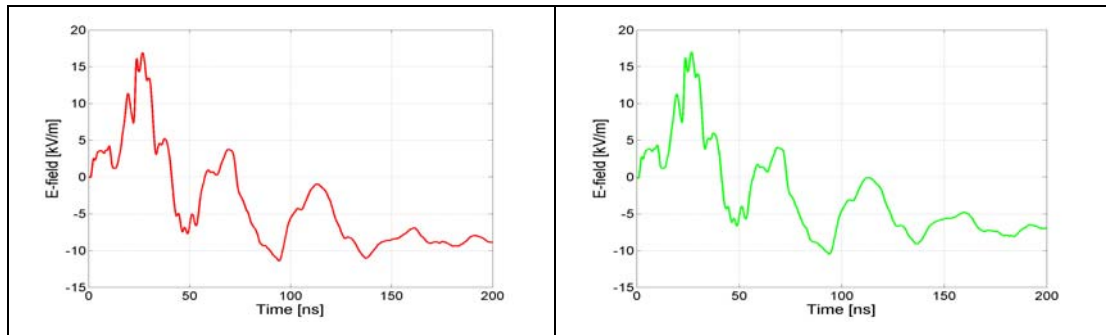
Σχήμα 5.20: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y3 (20 cm)**



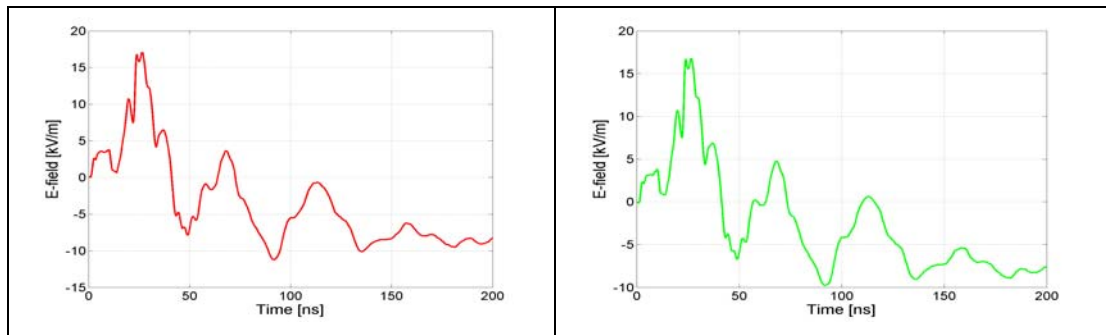
Σχήμα 5.21: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2\text{ kV}$ .

- **Σημείο Y4 (25 cm)**



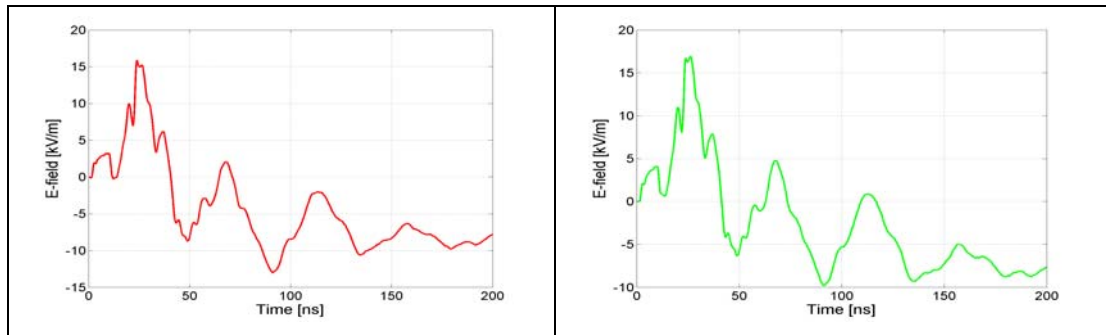
Σχήμα 5.22: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2\text{ kV}$ .

- **Σημείο Y5 (30 cm)**



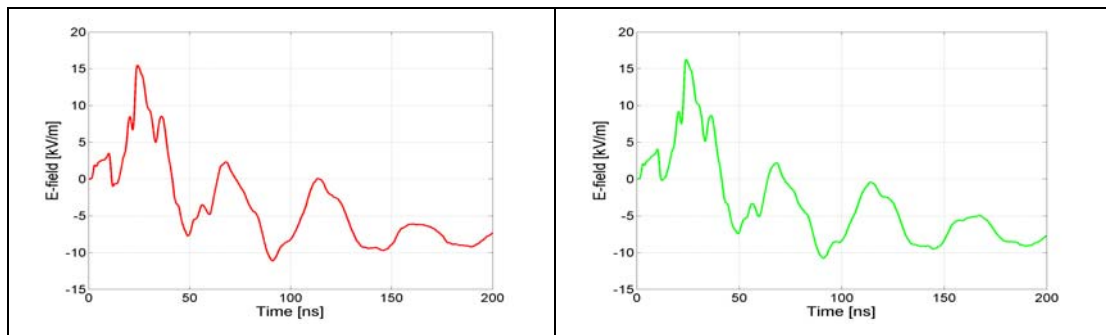
Σχήμα 5.23: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y5 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2\text{ kV}$ .

- **Σημείο Y6 (35 cm)**



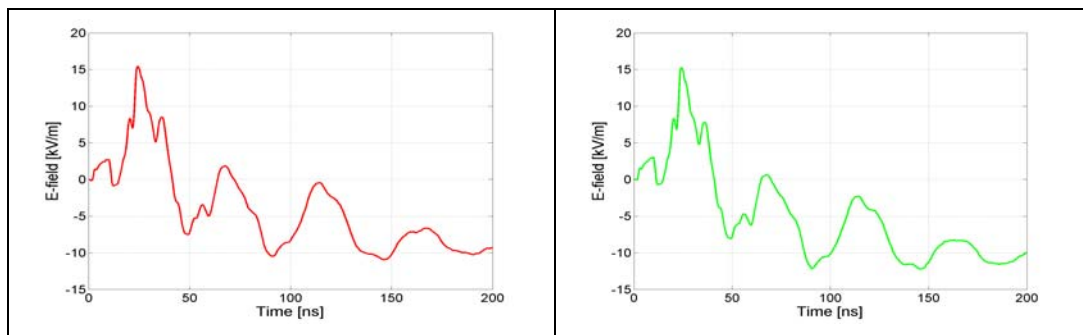
Σχήμα 5.24: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y6 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y7 (40 cm)**



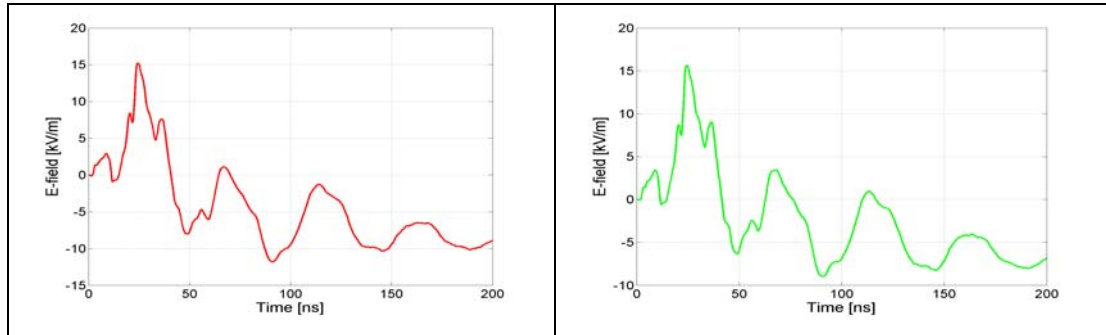
Σχήμα 5.25: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y7 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y8 (45 cm)**



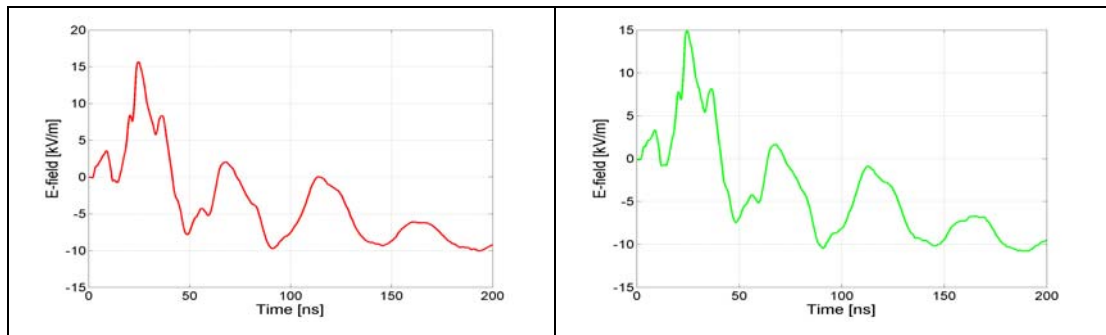
Σχήμα 5.26: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y8 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y9 (50 cm)**



Σχήμα 5.27: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y9 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

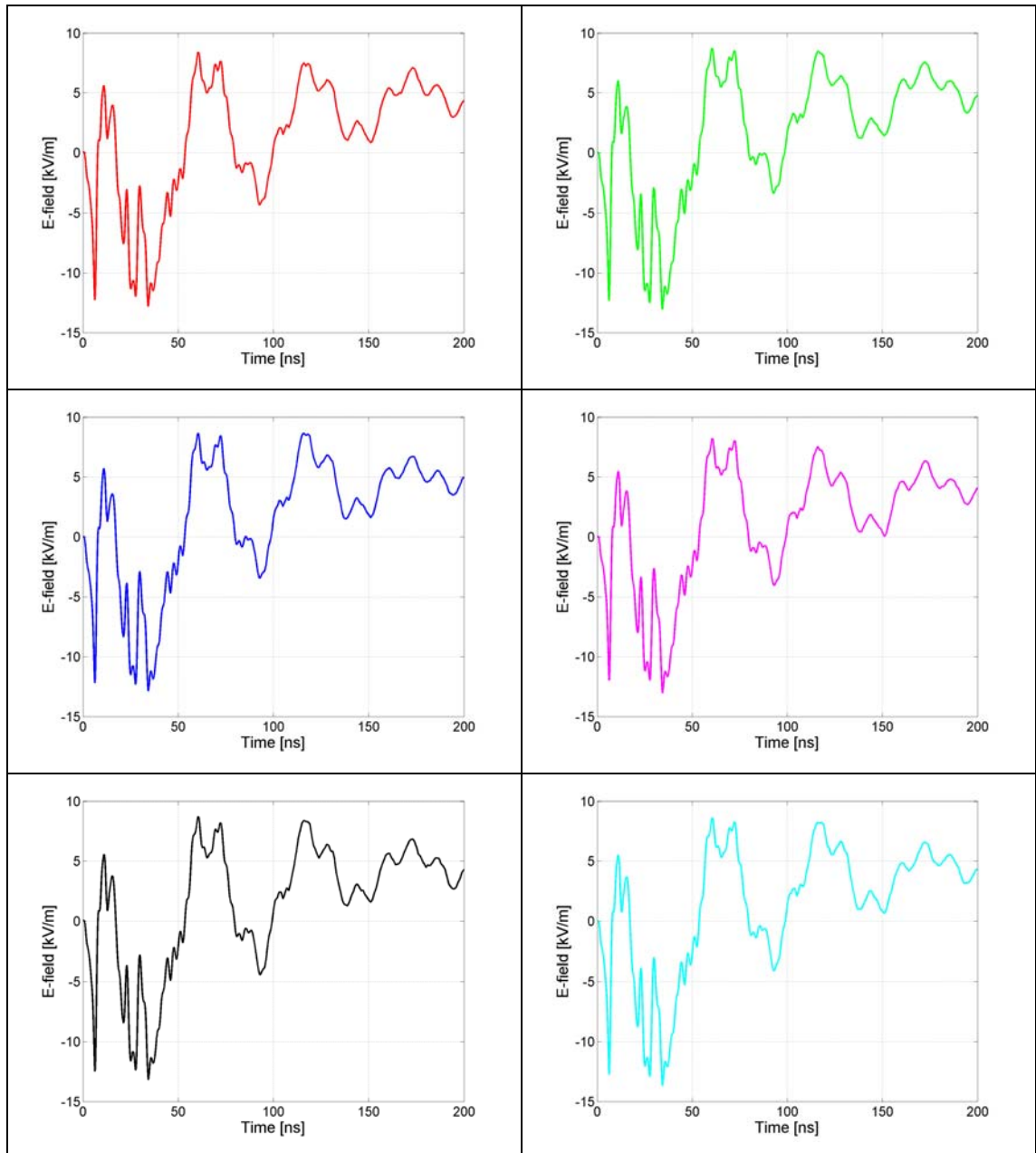
- **Σημείο Y10 (55 cm)**



Σχήμα 5.28: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y10 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

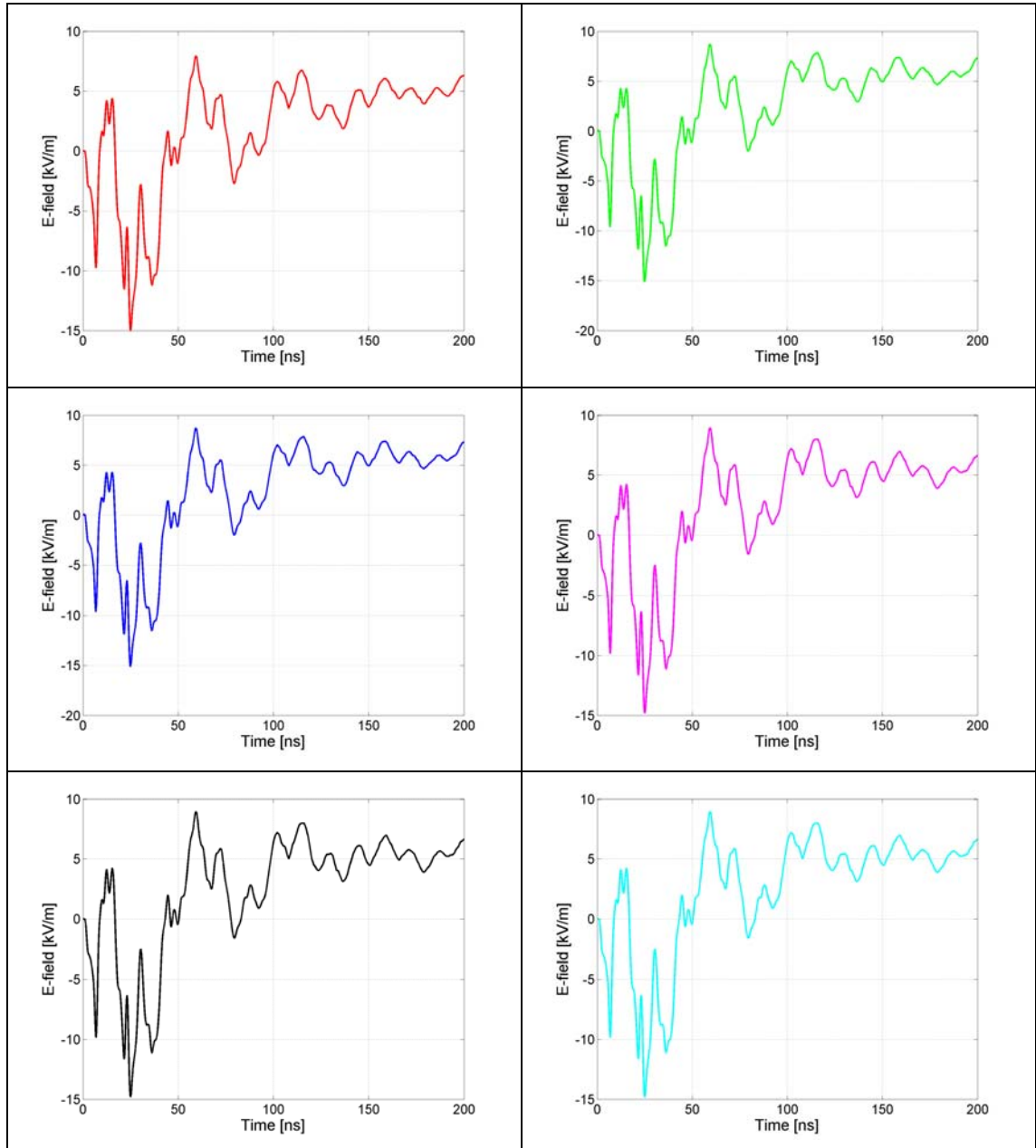
### 5.2.3 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-438

- Σημείο X1 (10 cm)



Σχήμα 5.29: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

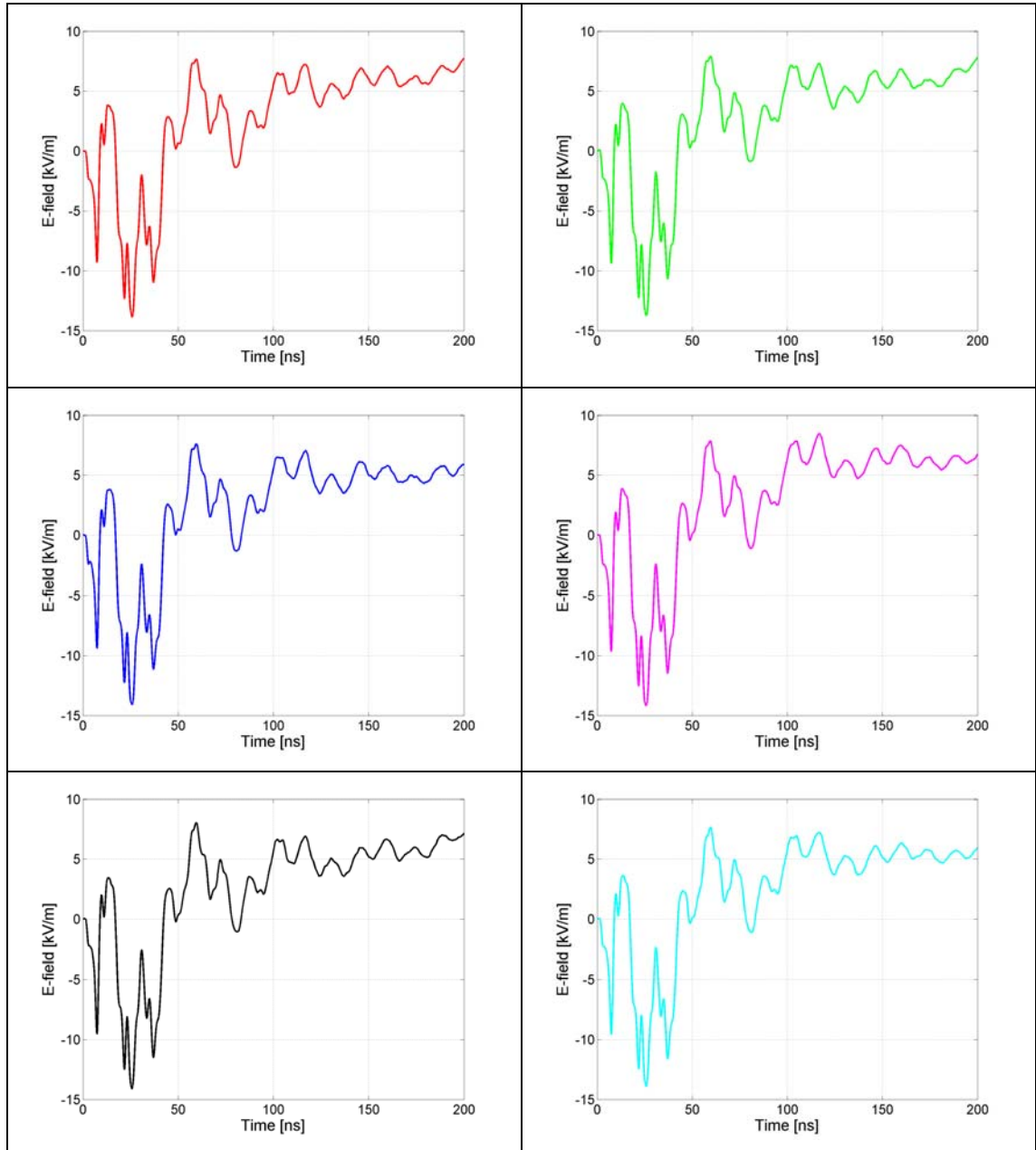
- **Σημείο X2 (20 cm)**



Σχήμα 5.30: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.



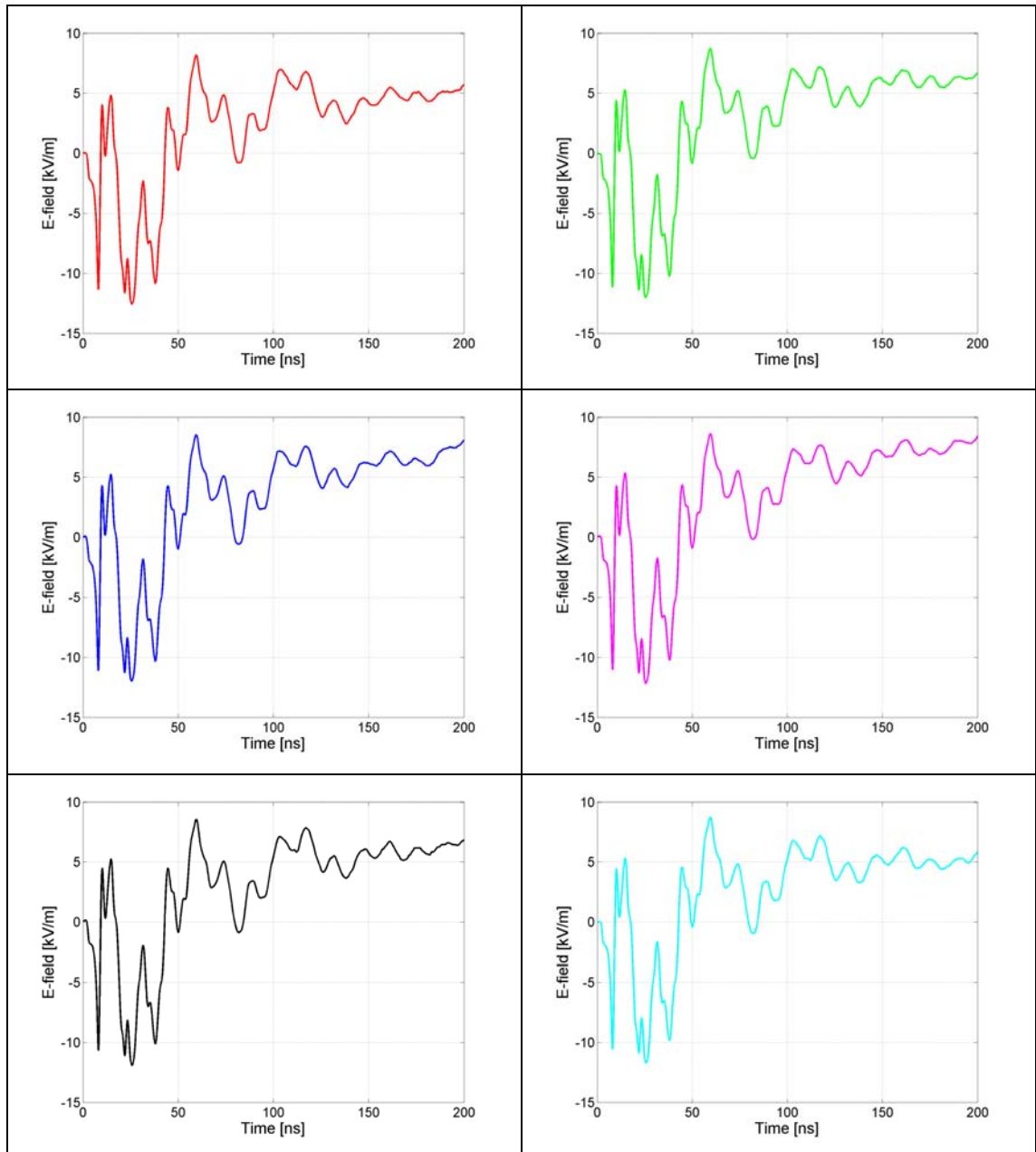
- **Σημείο X3 (30 cm)**



Σχήμα 5.31: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

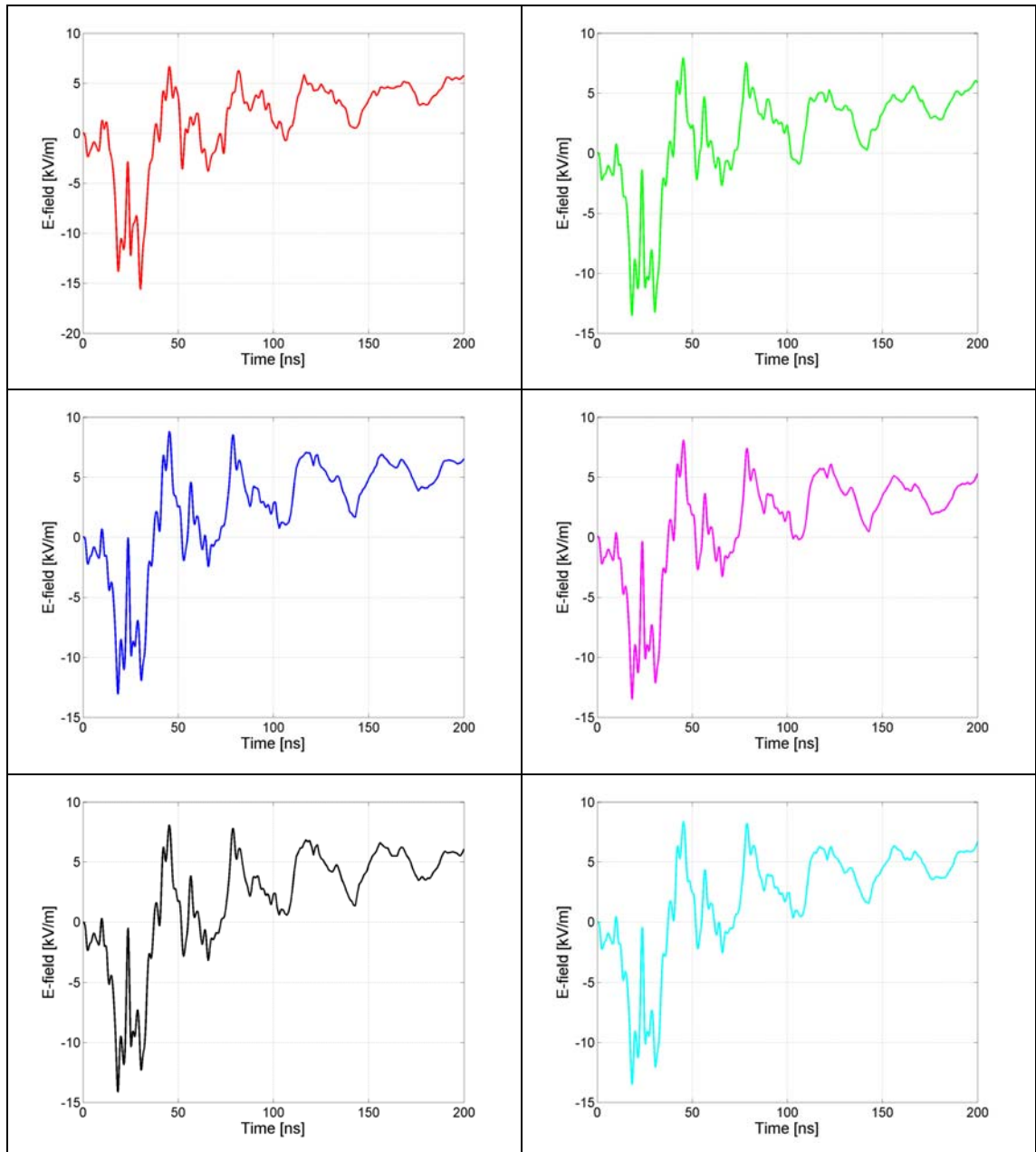


- **Σημείο X4 (40 cm)**



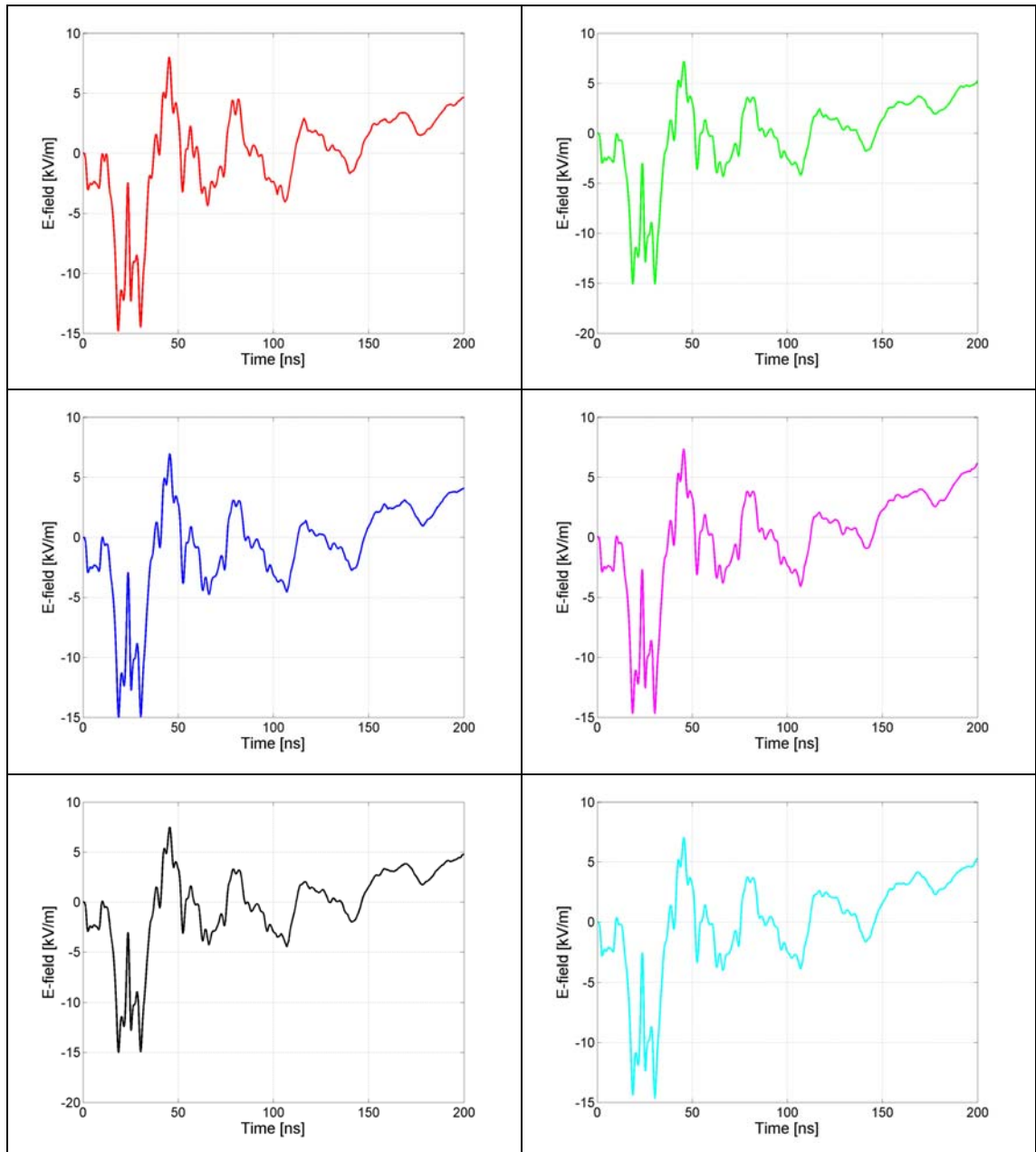
Σχήμα 5.32: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο X4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y1 (10 cm)**



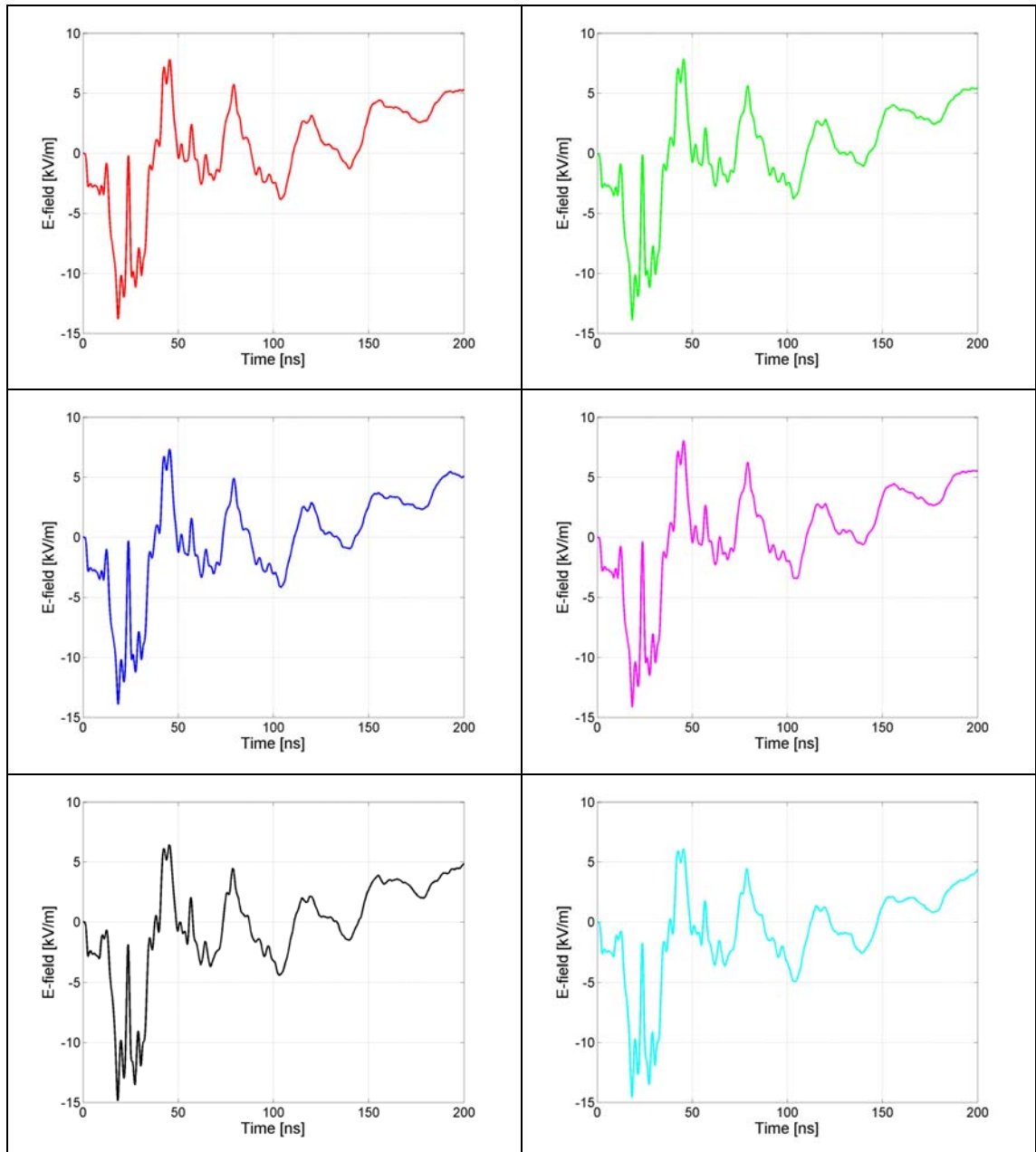
Σχήμα 5.33: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y2 (15 cm)**



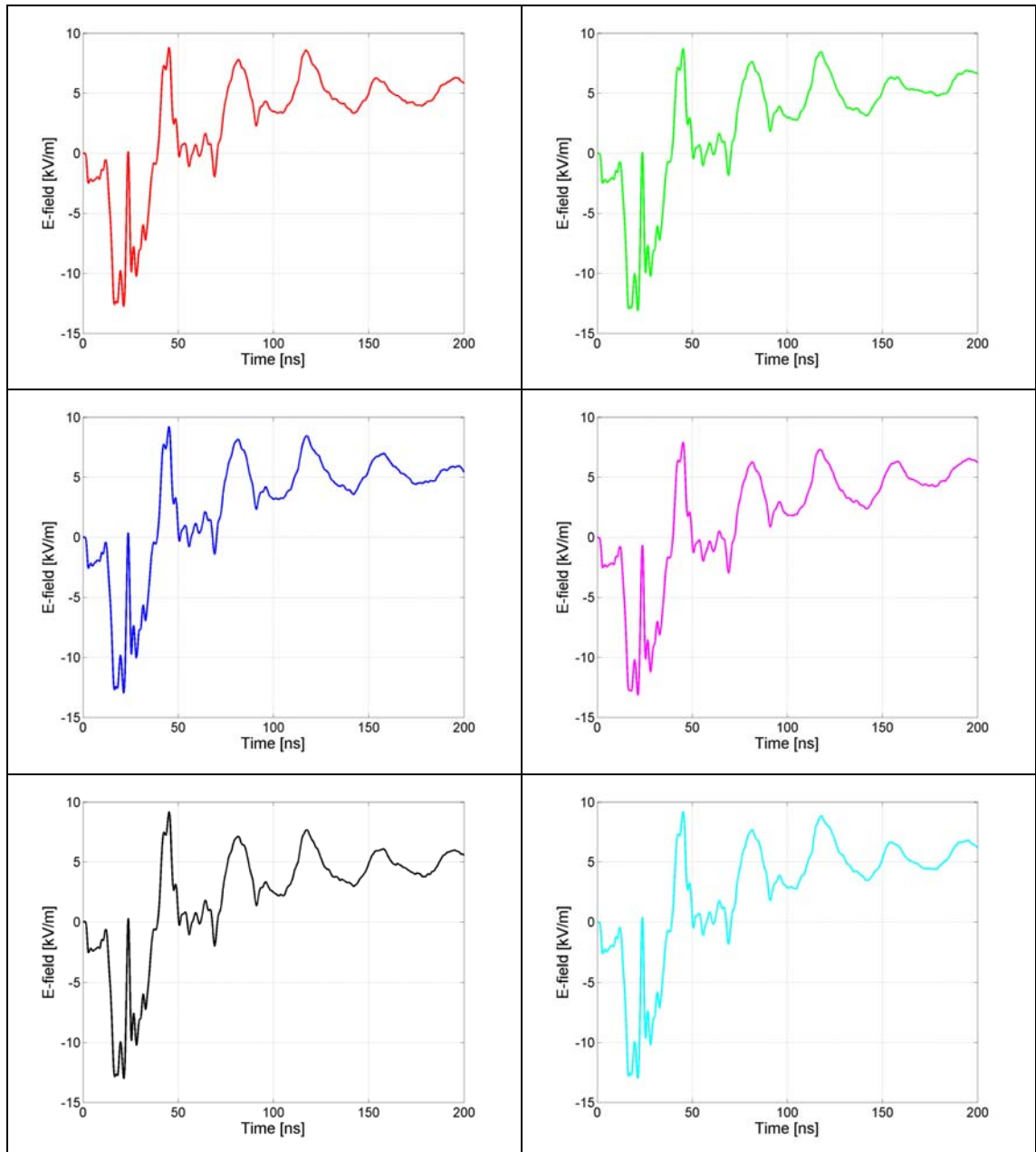
Σχήμα 5.34: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y3 (20 cm)**



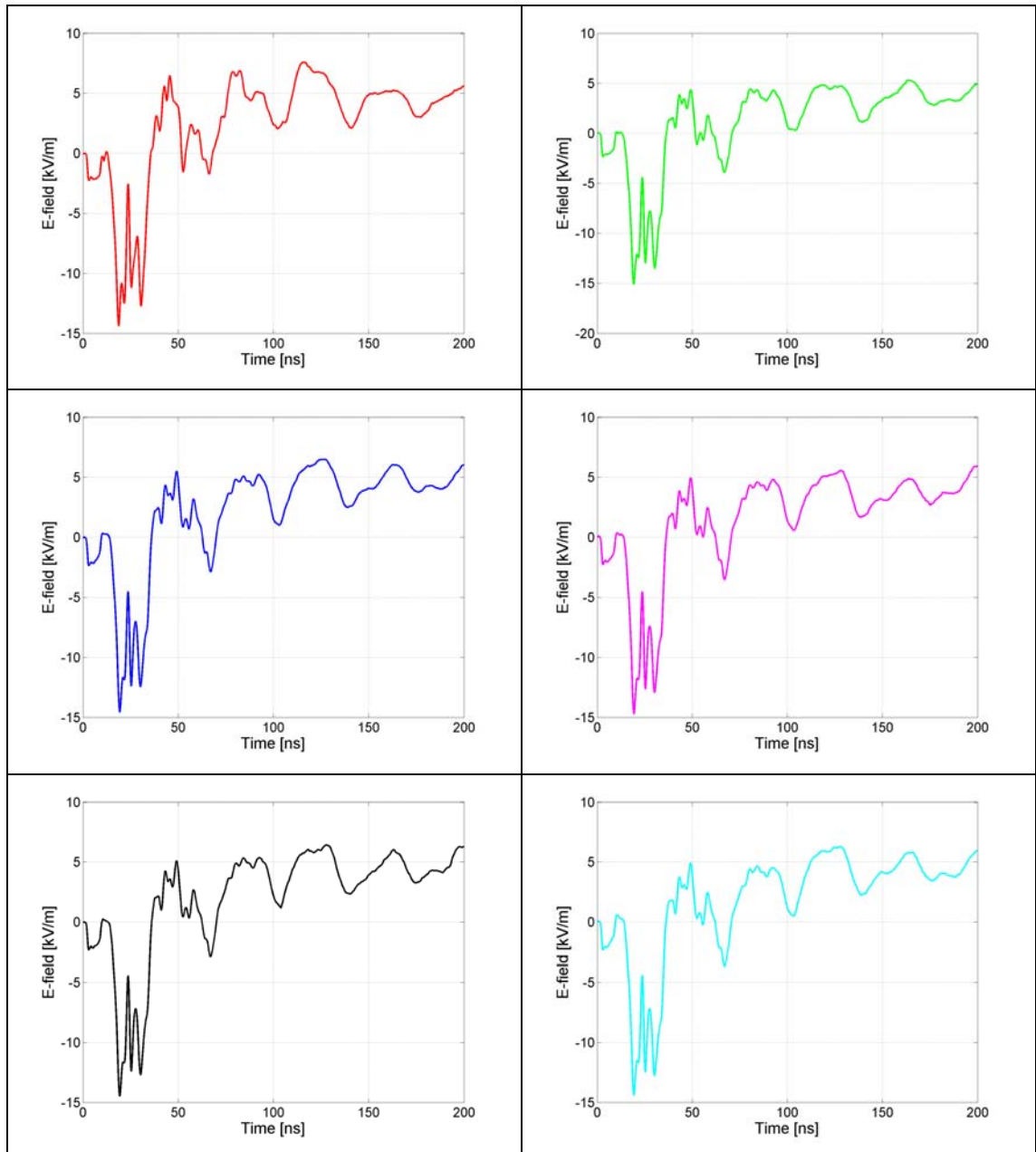
Σχήμα 5.35: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y4 (25 cm)**



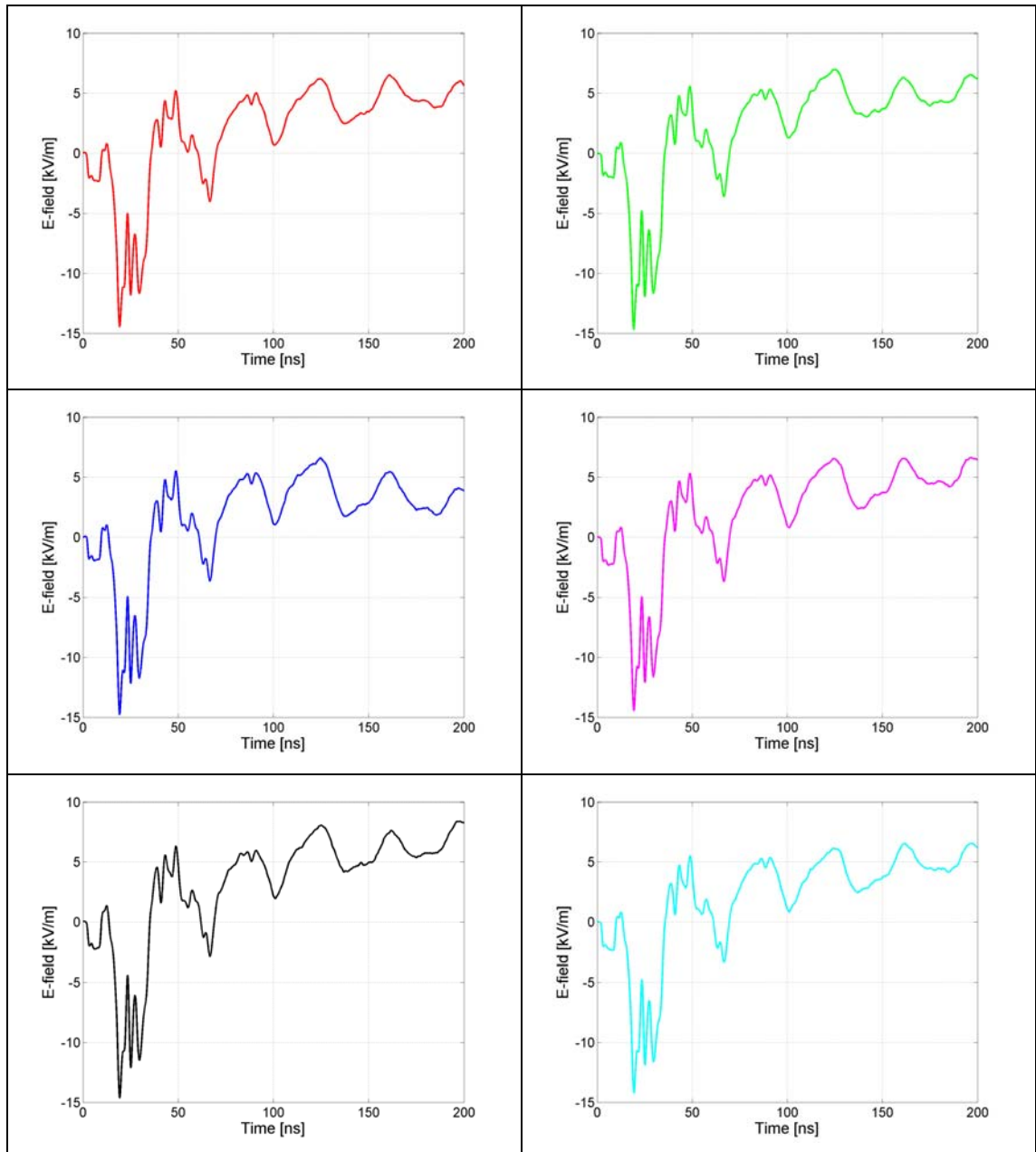
Σχήμα 5.36: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y5 (30 cm)**



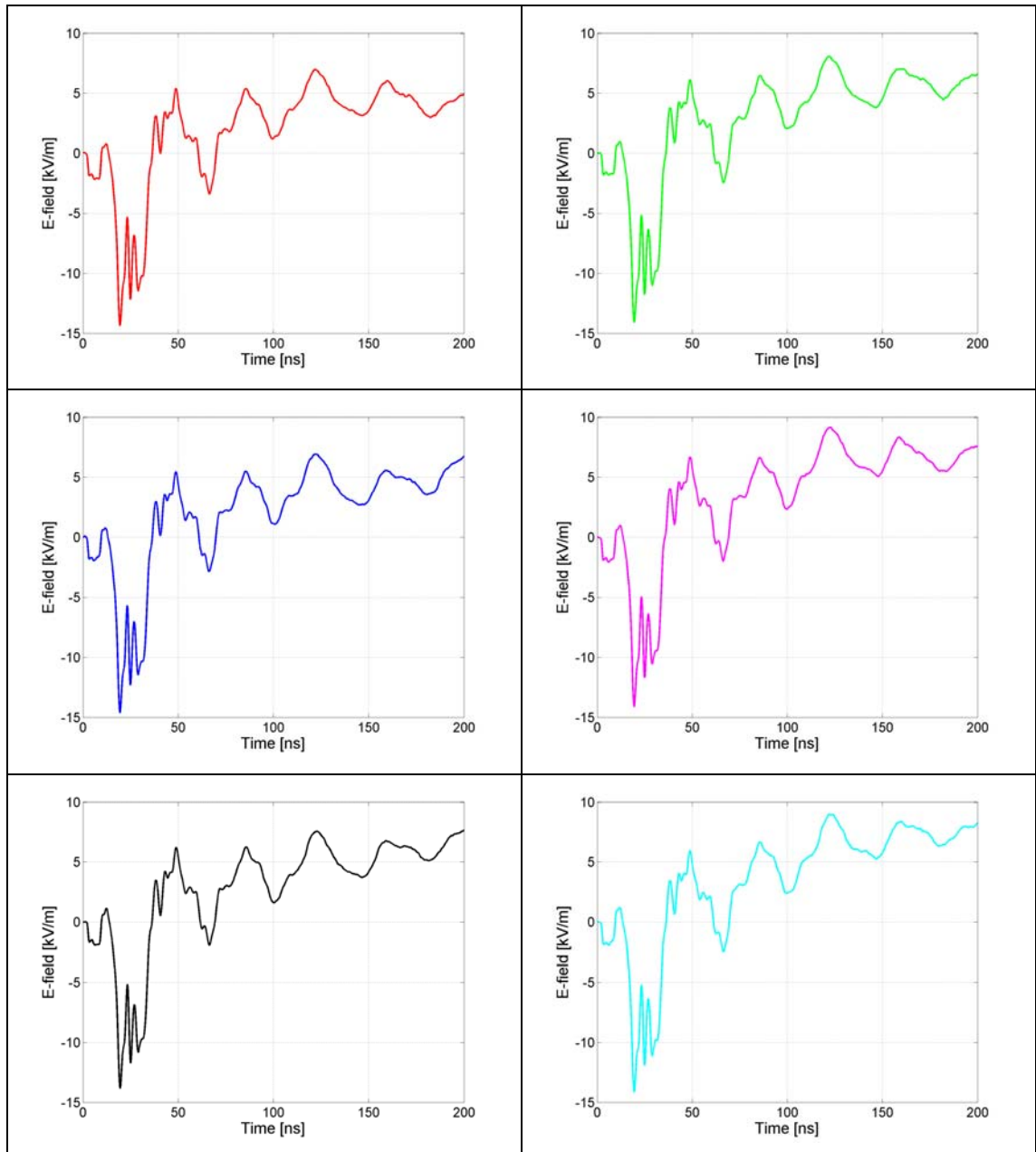
Σχήμα 5.37: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y5 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Υ6 (35 cm)**



Σχήμα 5.38: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Υ6 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

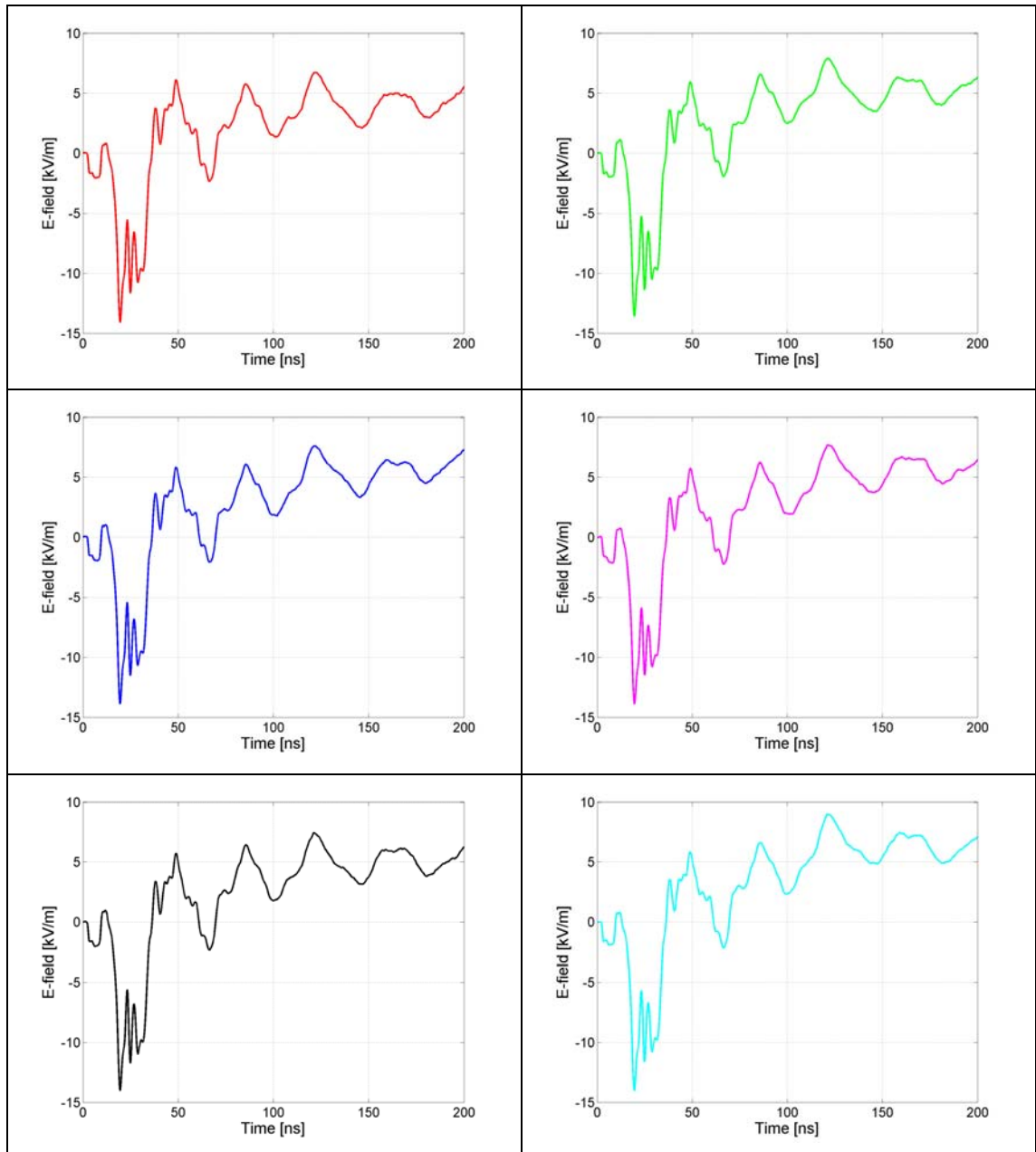
- **Σημείο Y7 (40 cm)**



Σχήμα 5.39: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y7 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

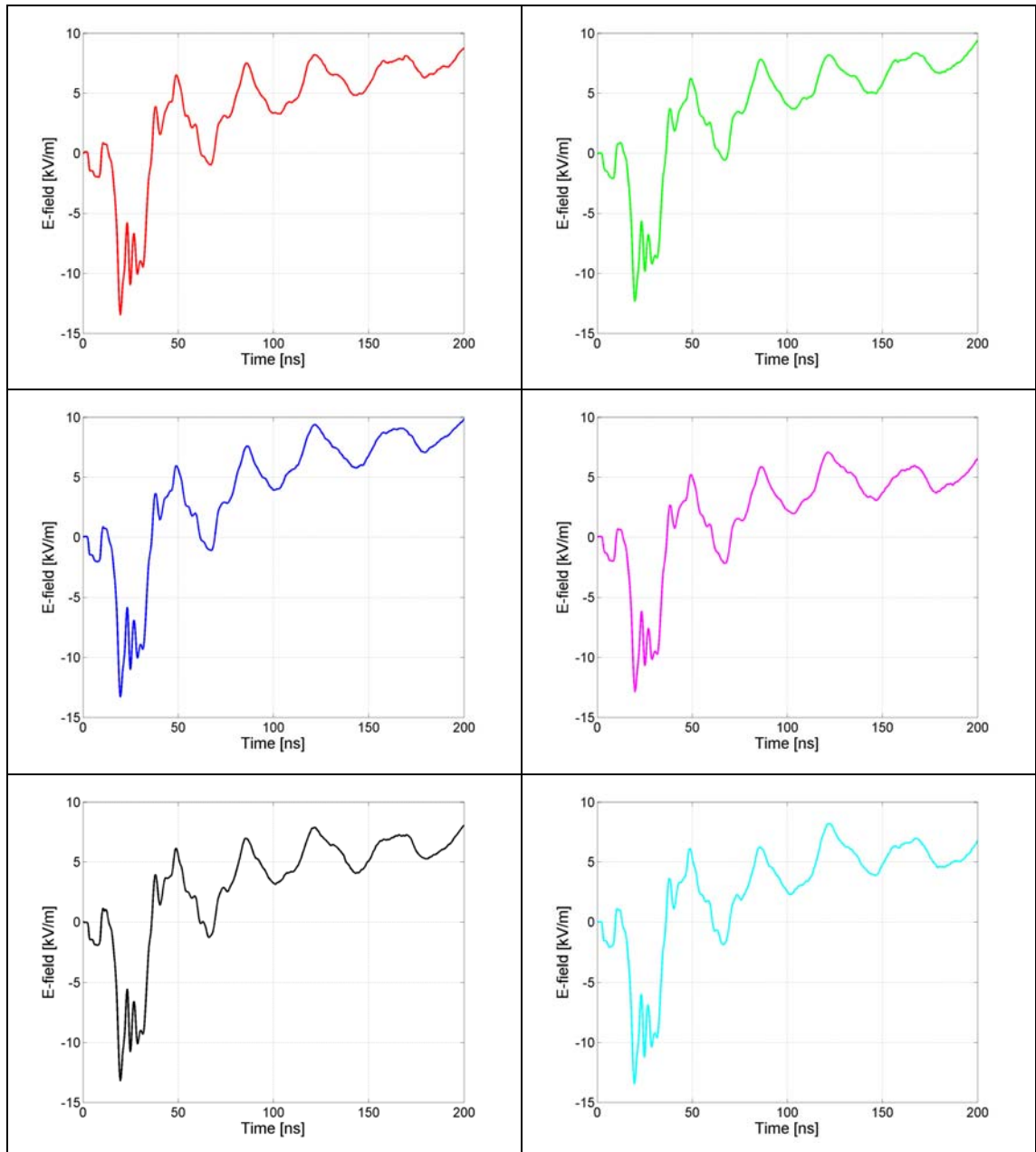


- **Σημείο Y8 (45 cm)**



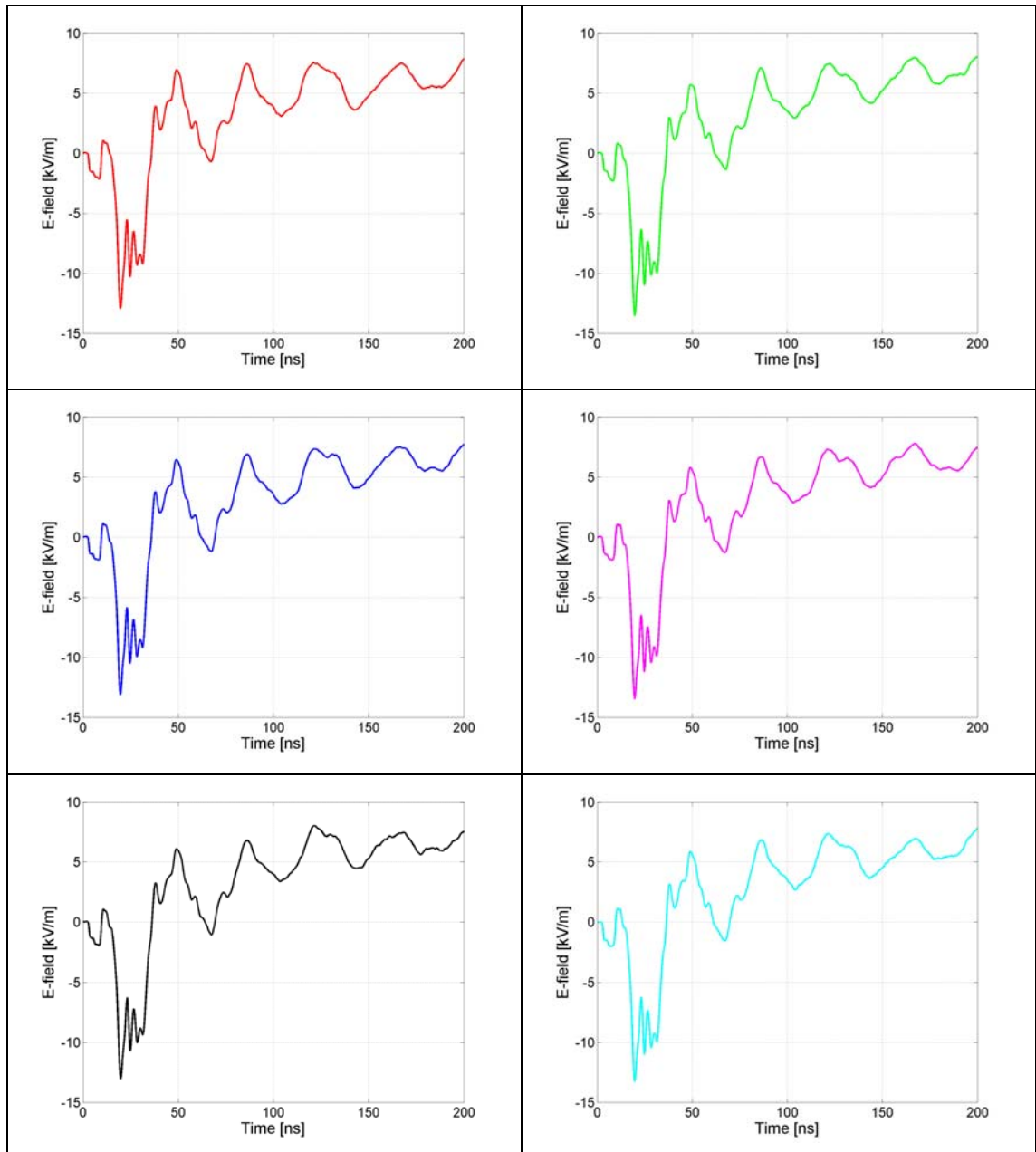
Σχήμα 5.40: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y8 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y9 (50 cm)**



Σχήμα 5.41: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y9 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

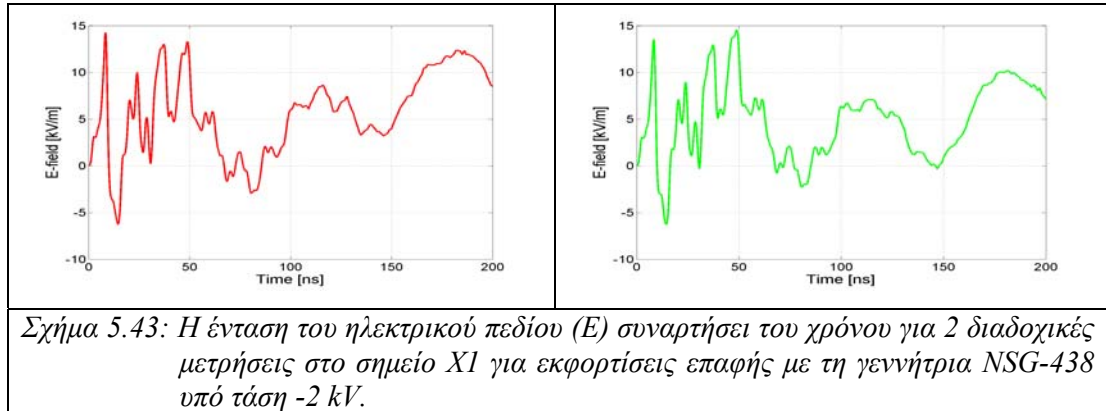
- **Σημείο Y10 (55 cm)**



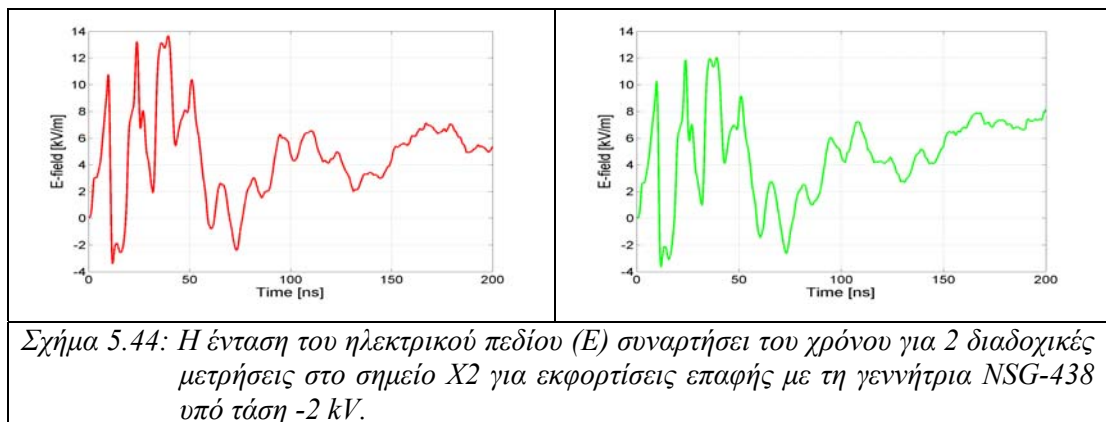
Σχήμα 5.42: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y10 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

### 5.2.4 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-438

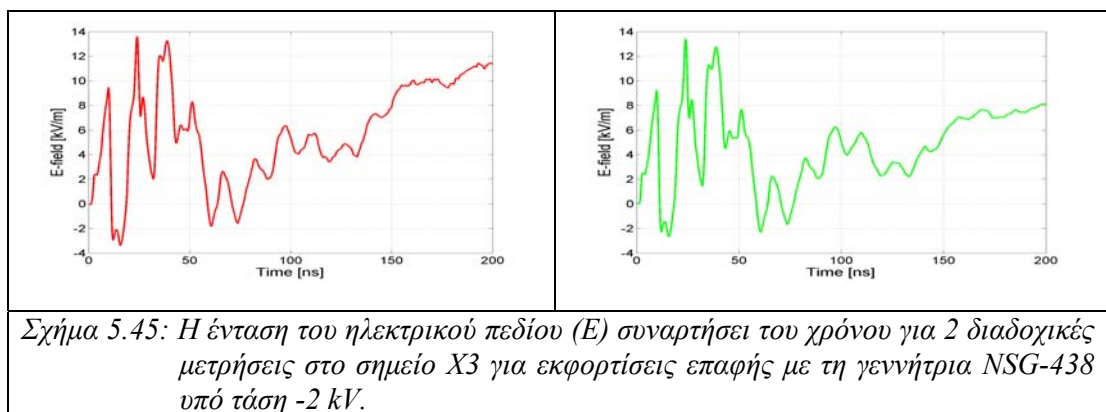
- **Σημείο X1 (10 cm)**



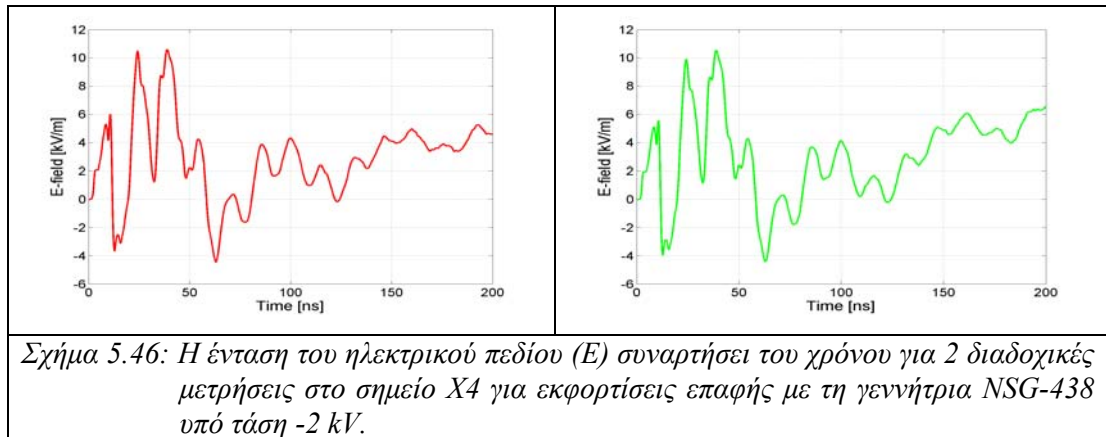
- **Σημείο X2 (20 cm)**



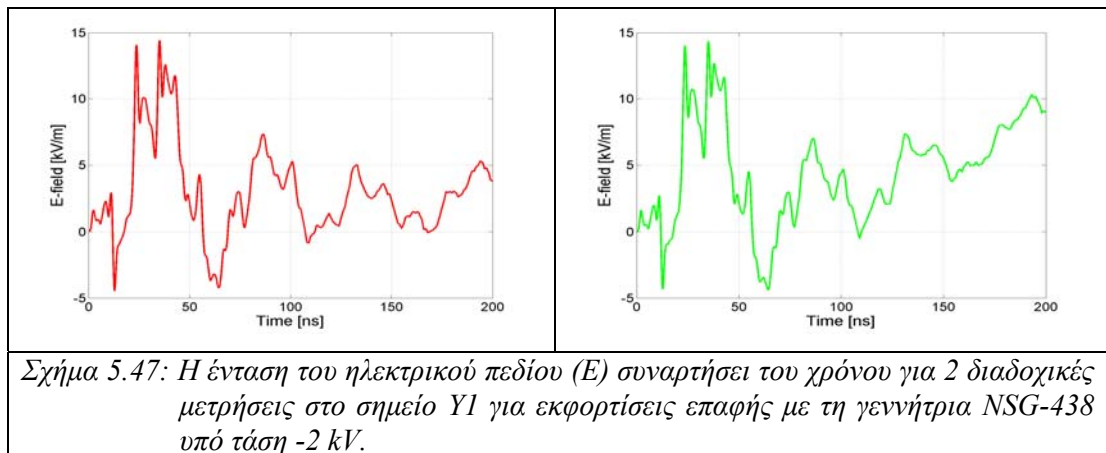
- **Σημείο X3 (30 cm)**



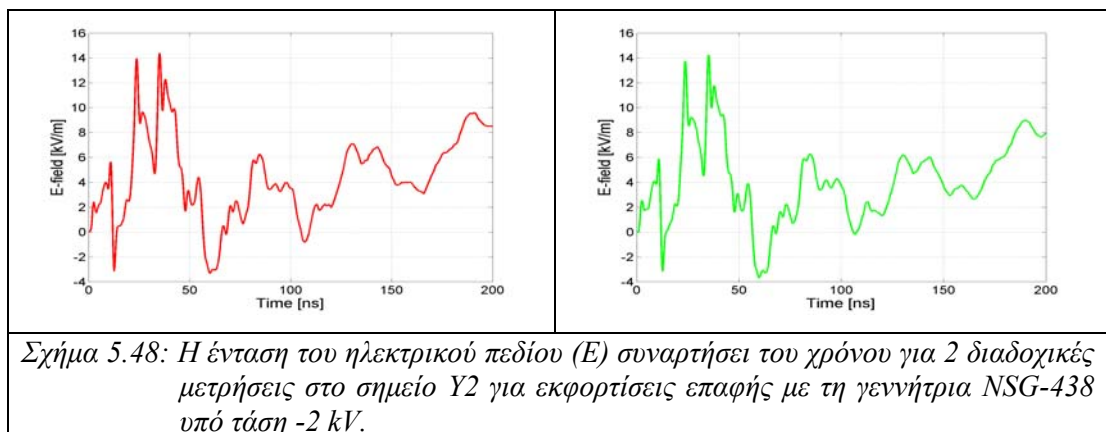
- **Σημείο X4 (40 cm)**



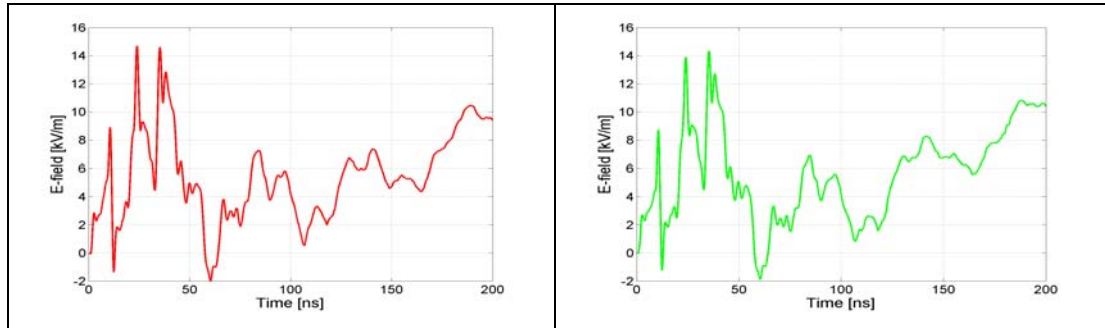
- **Σημείο Y1 (10 cm)**



- **Σημείο Y2 (15 cm)**

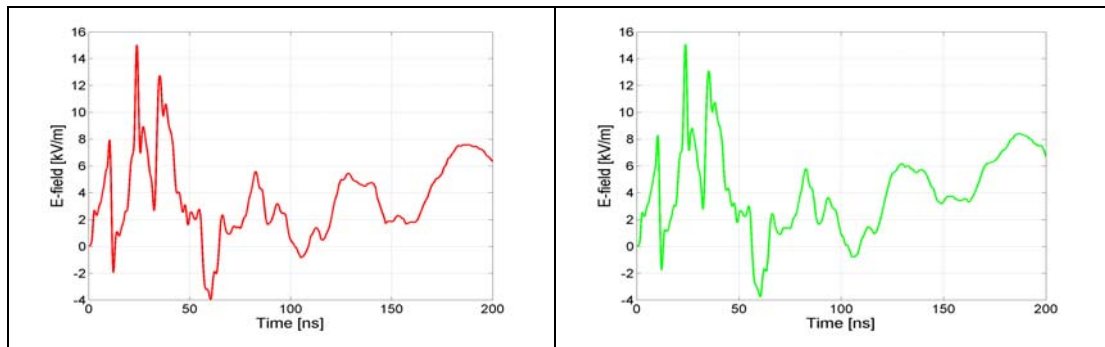


- **Σημείο Y3 (20 cm)**



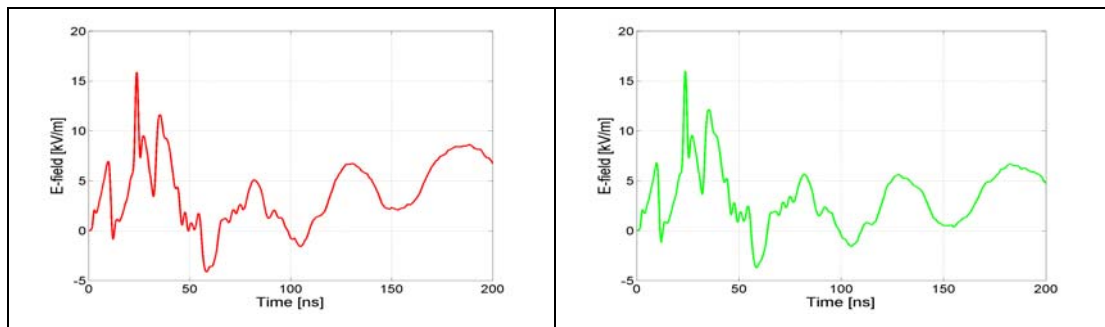
Σχήμα 5.49: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y4 (25 cm)**



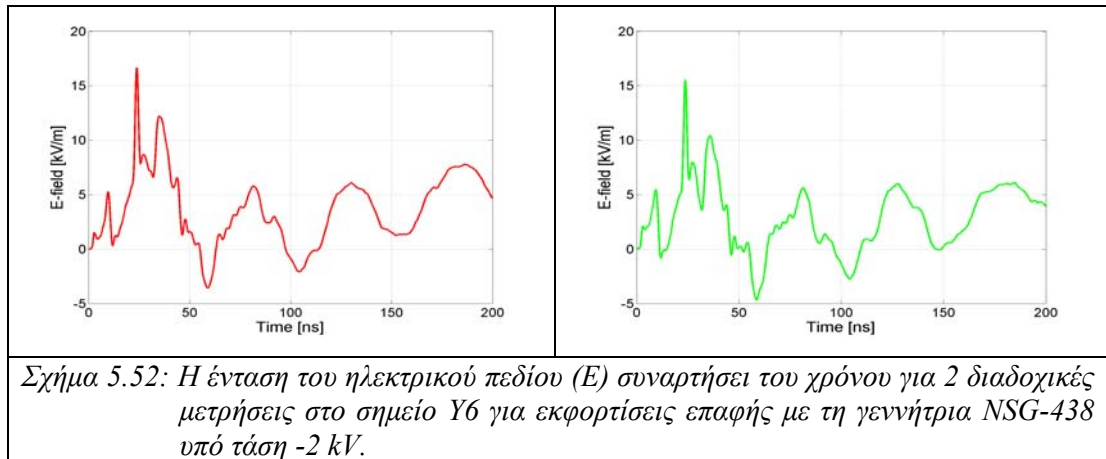
Σχήμα 5.50: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y5 (30 cm)**

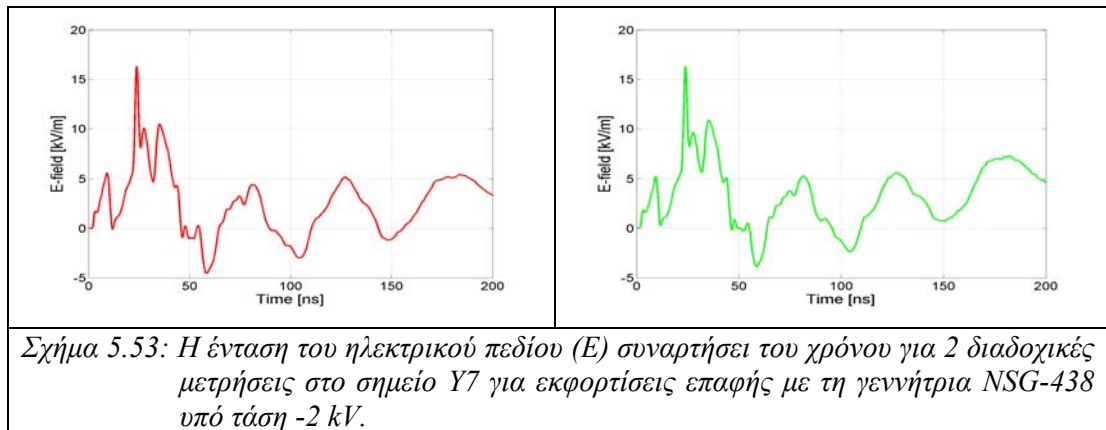


Σχήμα 5.51: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y5 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

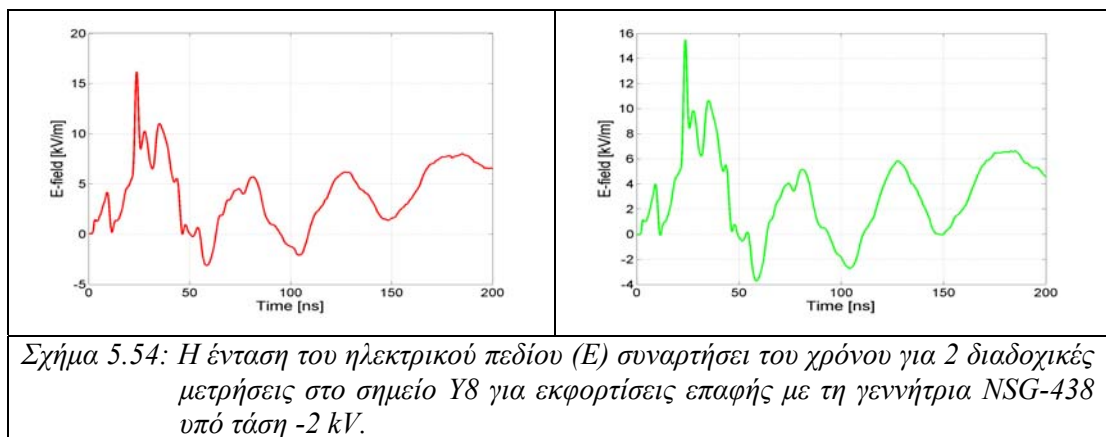
- **Σημείο Y6 (35 cm)**



- **Σημείο Y7 (40 cm)**

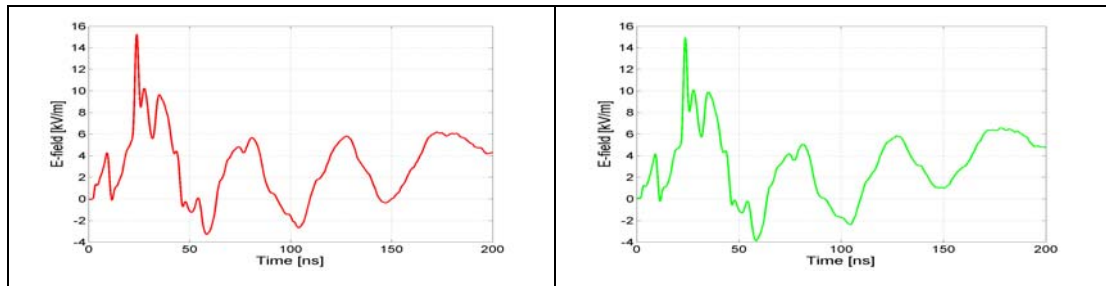


- **Σημείο Y8 (45 cm)**



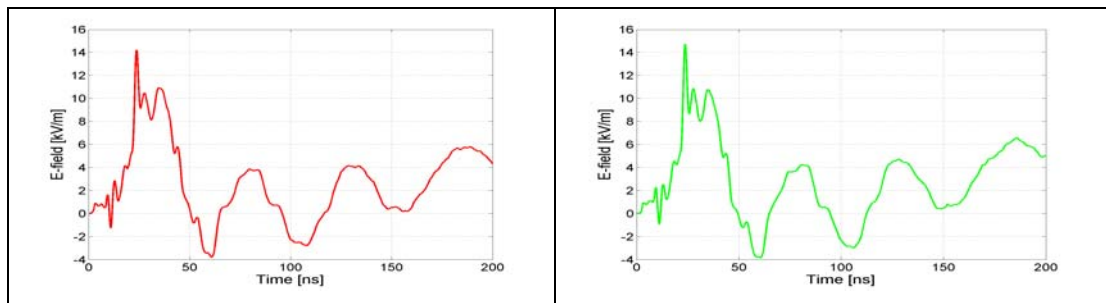


- **Σημείο Y9 (50 cm)**



Σχήμα 5.55: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y9 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

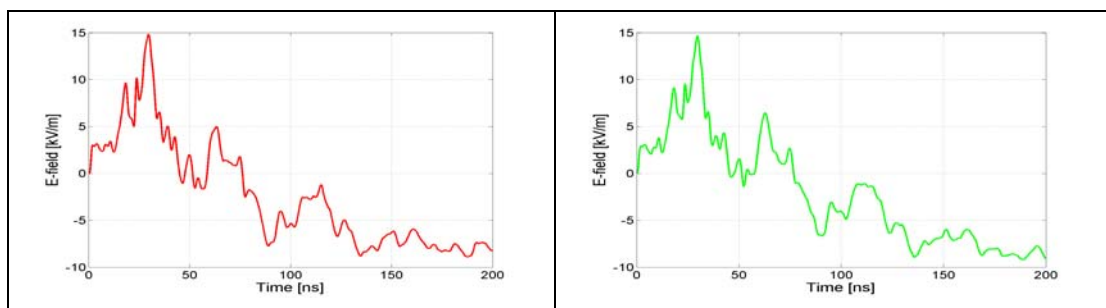
- **Σημείο Y10 (55 cm)**



Σχήμα 5.56: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y10 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

### 5.2.5 Εκφορτίσεις μέσω αέρα υπό τάση $-2$ kV με τη γεννήτρια NSG-433

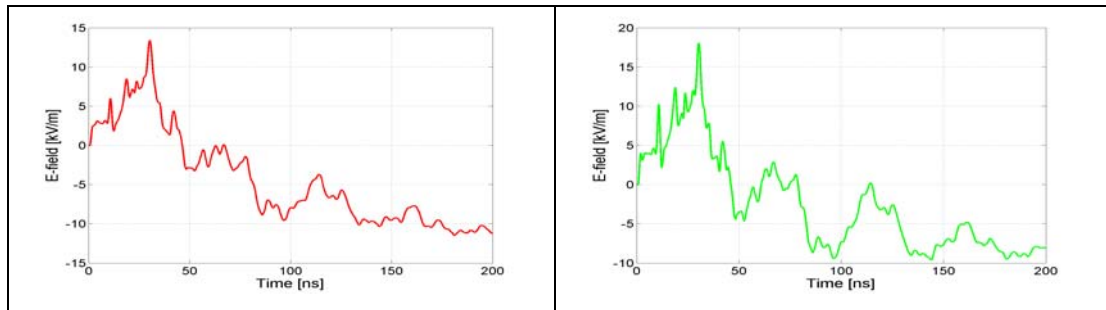
- **Σημείο Y1 (10 cm)**



Σχήμα 5.57: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y1 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

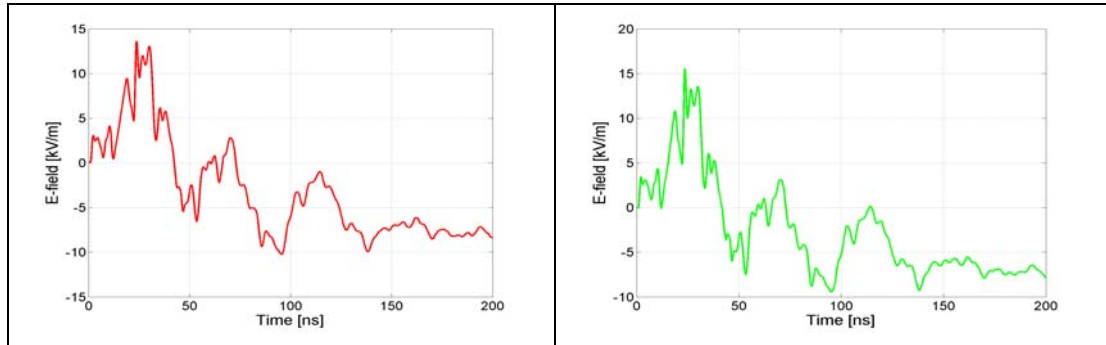


- **Σημείο Y2 (15 cm)**



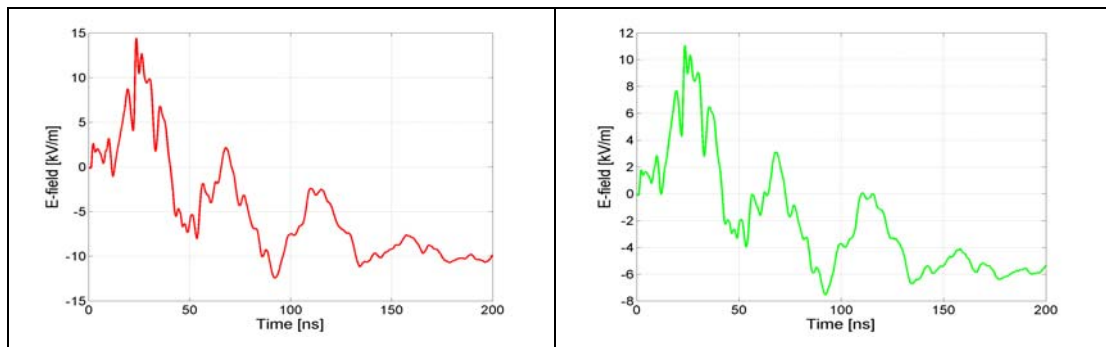
Σχήμα 5.58: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y2 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y3 (20 cm)**



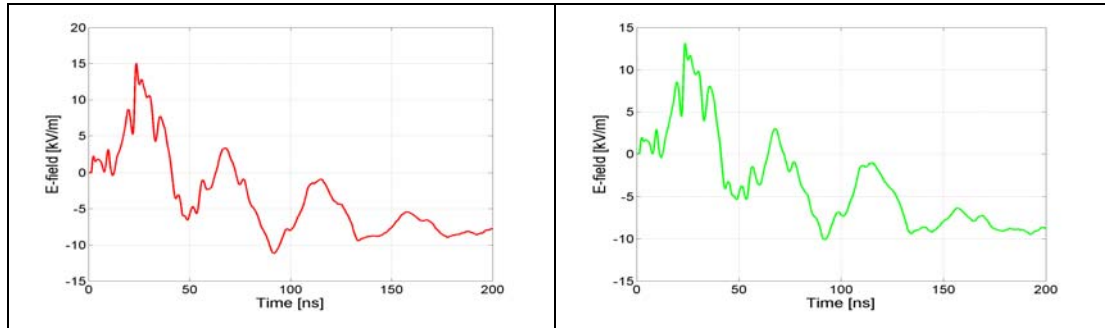
Σχήμα 5.59: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y3 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y4 (25 cm)**



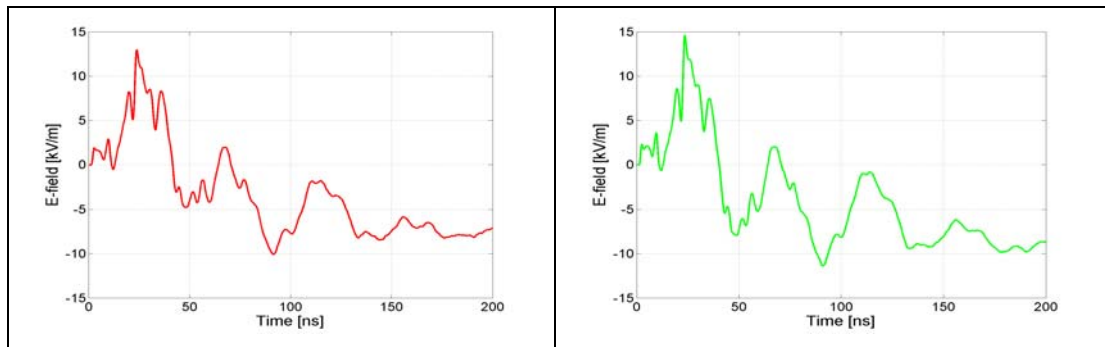
Σχήμα 5.60: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y4 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y5 (30 cm)**



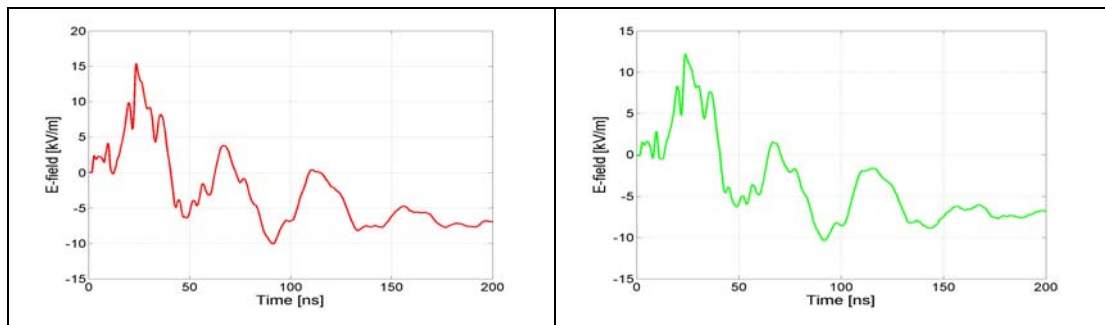
Σχήμα 5.61: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y5 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y6 (35 cm)**



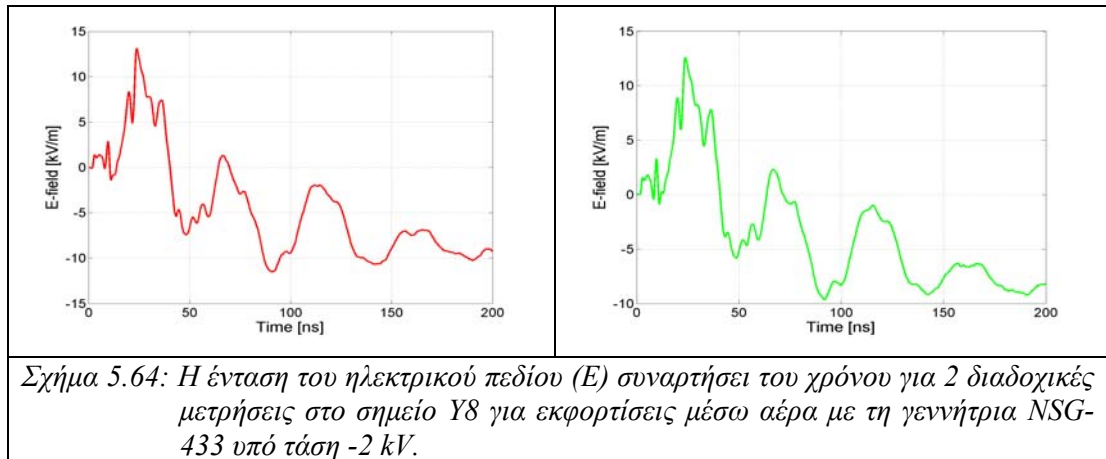
Σχήμα 5.62: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y6 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- **Σημείο Y7 (40 cm)**

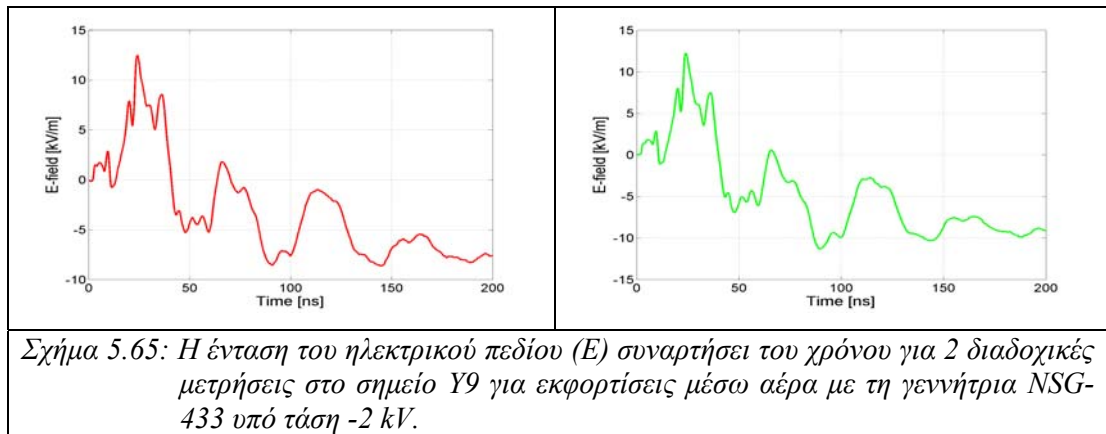


Σχήμα 5.63: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y7 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

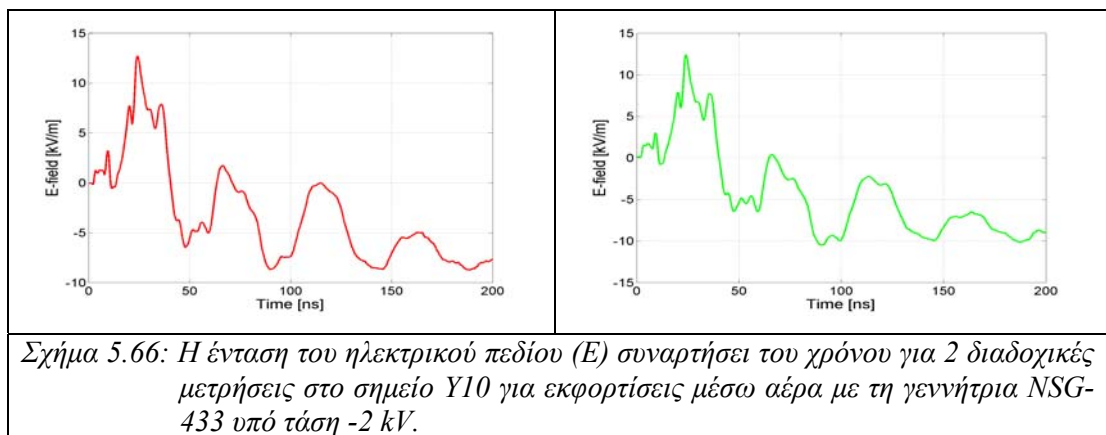
- **Σημείο Y8 (45 cm)**



- **Σημείο Y9 (50 cm)**

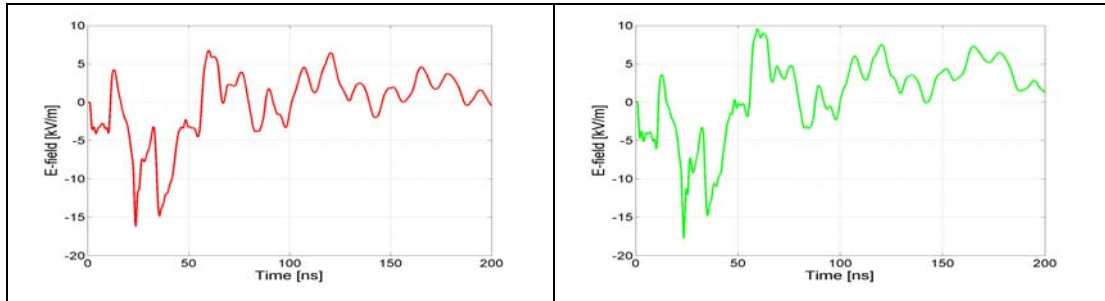


- **Σημείο Y10 (55 cm)**



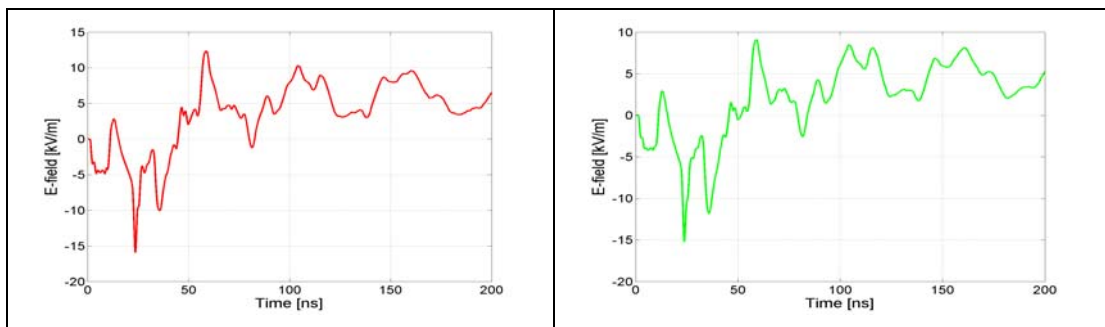
### 5.2.6 Εκφορτίσεις μέσω αέρα υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-438

- **Σημείο Y1 (10 cm)**



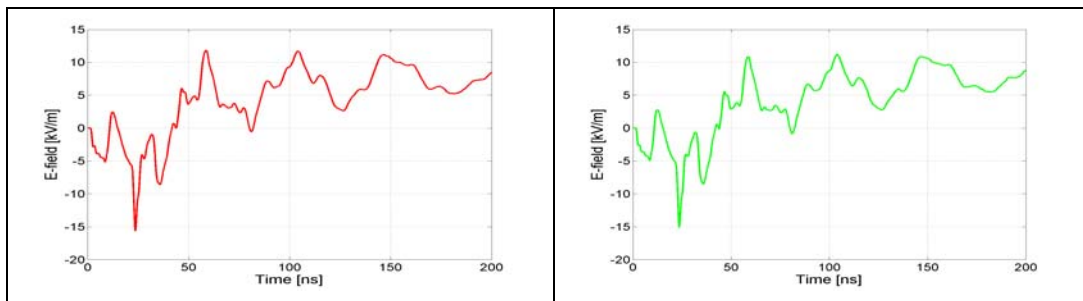
Σχήμα 5.67: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y1 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y3 (20 cm)**



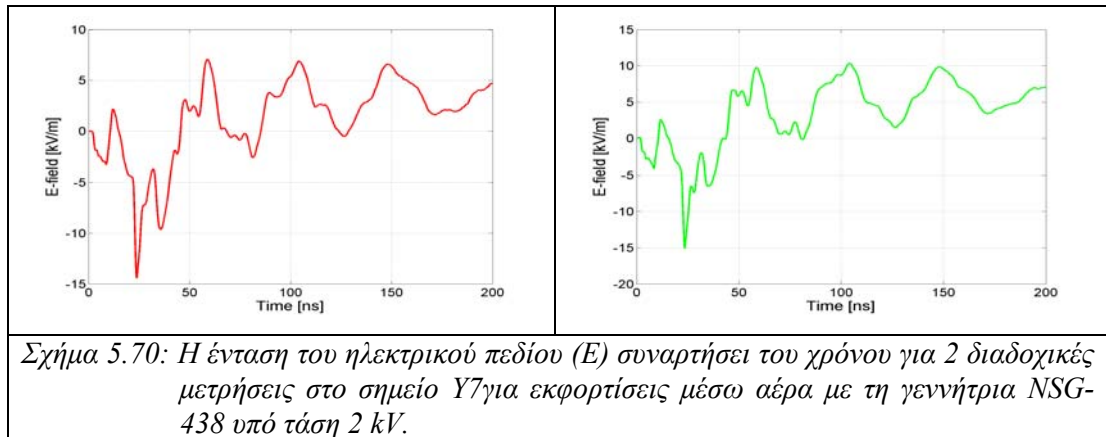
Σχήμα 5.68: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y3 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y5 (30 cm)**

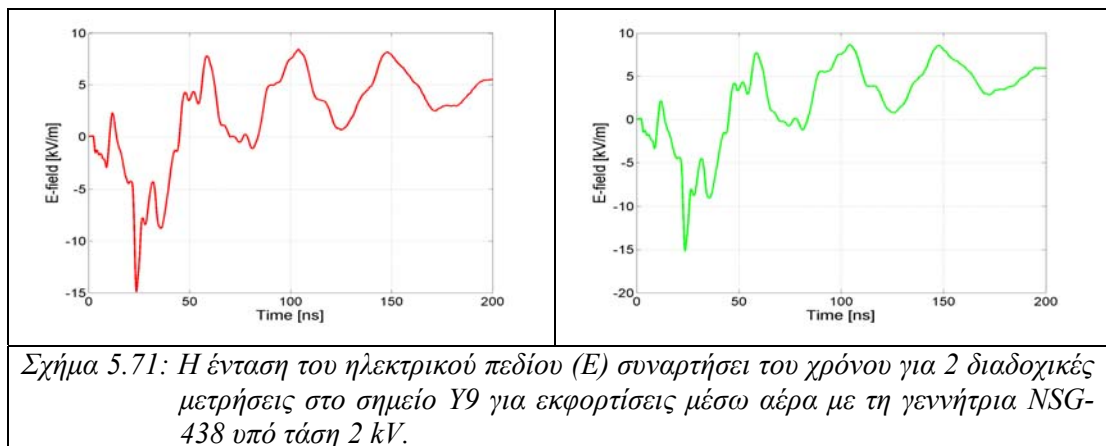


Σχήμα 5.69: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 2 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο Y5 για εκφορτίσεις μέσω αέρα με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- **Σημείο Y7 (40 cm)**



- **Σημείο Y9 (50 cm)**



# Κεφάλαιο 6

## Σύγκριση αποτελεσμάτων

### 6.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις δυο γεννήτριες που χρησιμοποιήσαμε, για δυο τάσεις εκφόρτισης και για όλες τις αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκρίσεις των αποτελεσμάτων αυτών, καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

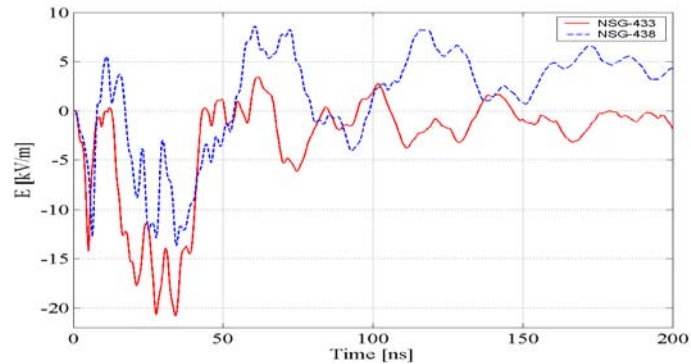
### 6.2 Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των δυο γεννητριών σε διάφορα σημεία για εκφορτίσεις επαφής

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκρίσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των δυο γεννητριών σε διάφορα σημεία για εκφορτίσεις επαφής, ώστε να βρεθούν τυχόν διαφορές τους.

#### 6.2.1 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2 kV

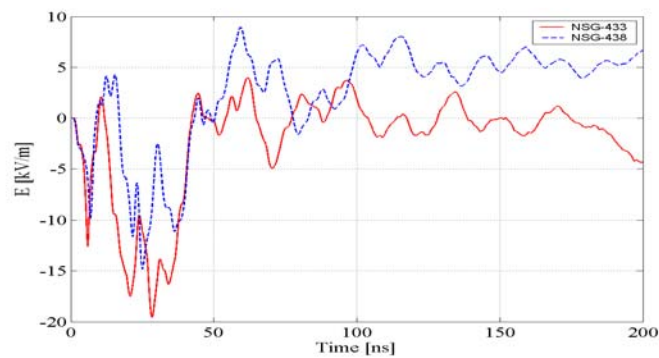
Παρακάτω παρουσιάζονται συγκρίσεις για το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο των δυο γεννητριών σε διάφορες αποστάσεις και διαφορετικές κατευθύνσεις για τάση φόρτισης +2 kV. Όπως παρατηρούμε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετά την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος της τάξης των 10 nsec περίπου, παρουσιάζει ένα απότομο βύθισμα που φτάνει έως και τα -20 kV για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 ενώ για τη NSG-438 είναι της τάξης των -14 kV περίπου. Βέβαια το μέγεθος του βυθίσματος εξαρτάται από την απόσταση και έτσι αυτό μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Κοινό χαρακτηριστικό των γραφημάτων είναι ότι το πεδίο που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 είναι ισχυρότερο από αυτό της NSG-433 όσον αφορά τις θετικές τιμές.

- **Σημείο X1 (10 cm)**



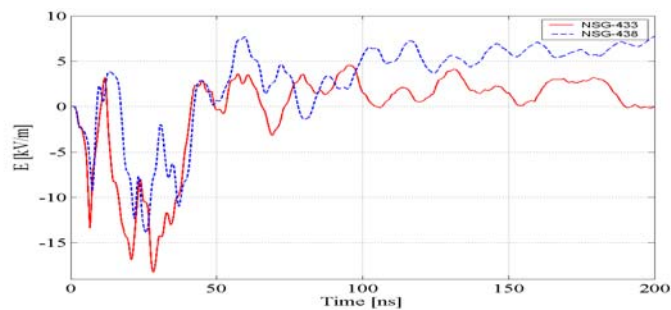
Σχήμα 6.1: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X1 (10 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο X2 (20 cm)**



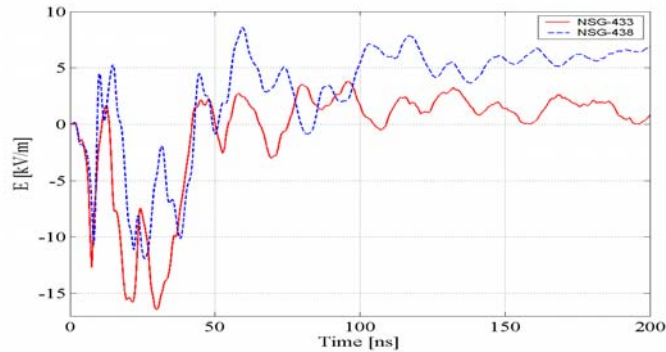
Σχήμα 6.2: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X2 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο X3 (30 cm)**



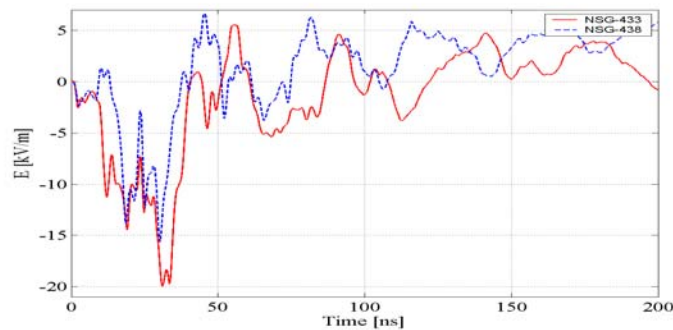
Σχήμα 6.3: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X3 (30 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο X4 (40 cm)**



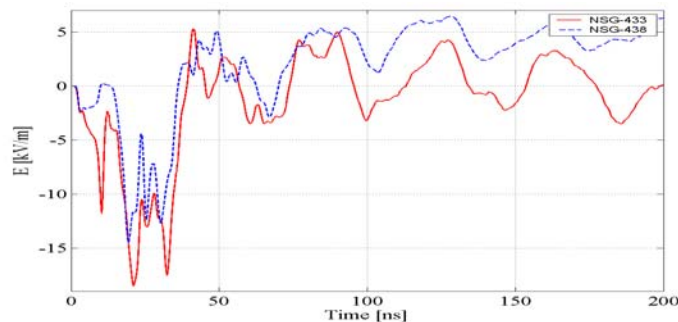
Σχήμα 6.4: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X4 (40 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο Y1 (10 cm)**



Σχήμα 6.5: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y1 (10 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

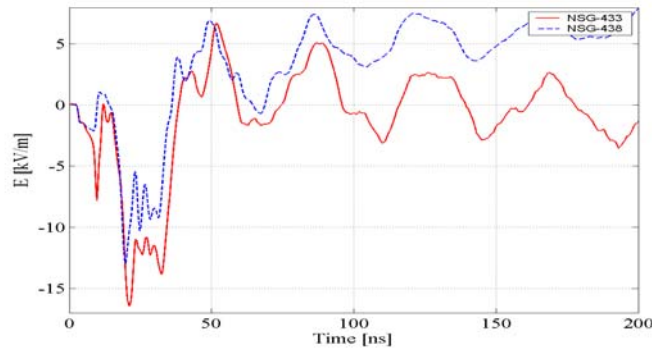
- **Σημείο Y5 (25 cm)**



Σχήμα 6.6: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y5 (25 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.



- **Σημείο Y10 (55 cm)**

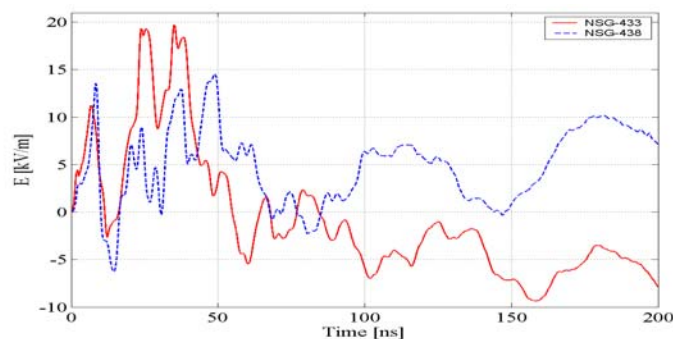


Σχήμα 6.7: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y10 (55 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

### 6.2.2 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης -2 kV

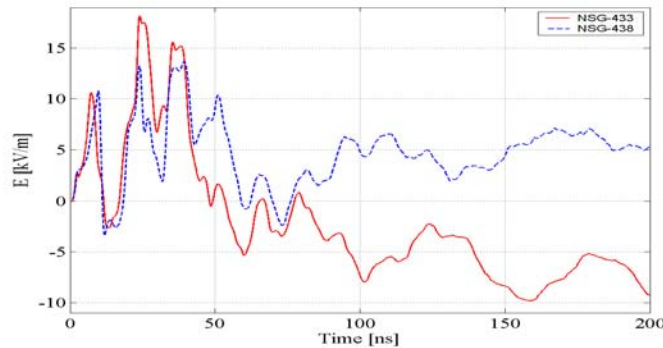
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για αρνητική τάση φόρτισης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το απότομο βύθισμα που παρουσιάστηκε στην περίπτωση που είχαμε θετική τάση φόρτισης στις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων έχει αντικατασταθεί από μια απότομη κορυφή της ίδιας περίπτωσης κατ' απόλυτη τιμή τάξης μεγέθους. Τα γραφήματα λόγω της αρνητικής πολικότητας των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι αντεστραμμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα γραφήματα για τα ίδια σημεία με θετικές εκφορτίσεις.

- **Σημείο X1 (10 cm)**



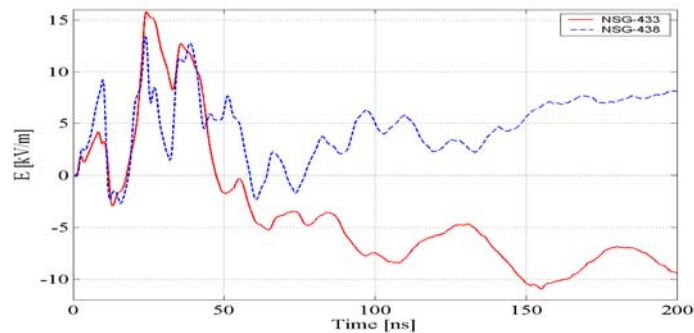
Σχήμα 6.8: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X1 (10 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο X2 (20 cm)**



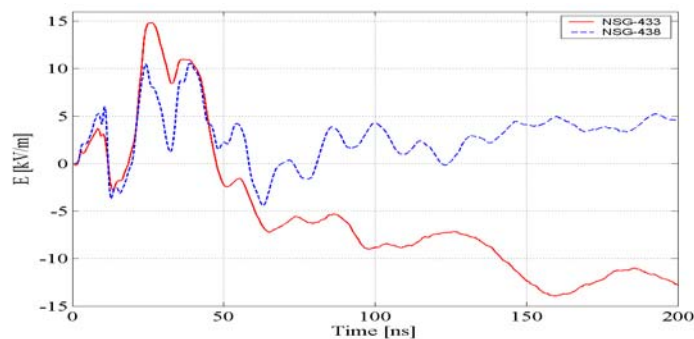
Σχήμα 6.9: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X2 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο X3 (30 cm)**



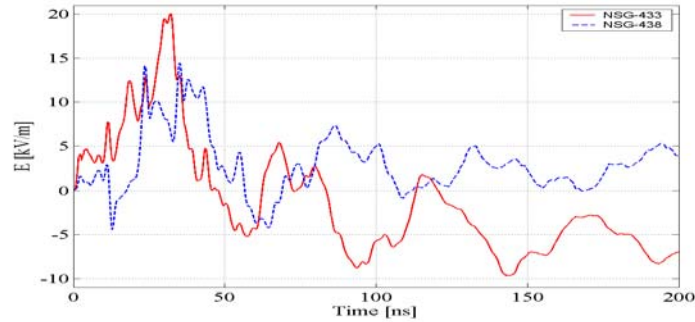
Σχήμα 6.10: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X3 (30 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο X4 (40 cm)**



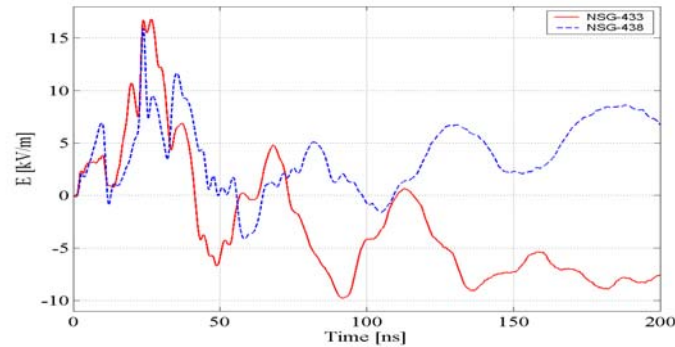
Σχήμα 6.11: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο X4 (40 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y1 (10 cm)**



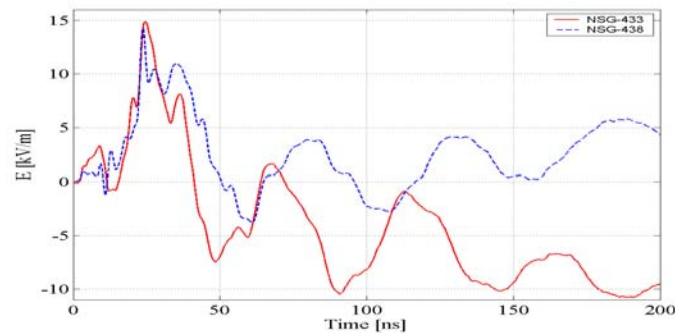
Σχήμα 6.12: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y1 (10 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y5 (25 cm)**



Σχήμα 6.13: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y5 (25 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y10 (55 cm)**



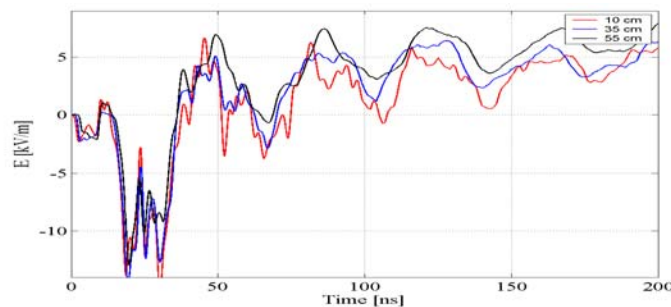
Σχήμα 6.14: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y10 (55 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

### 6.3 Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικά σημεία από το σημείο εκφόρτισης

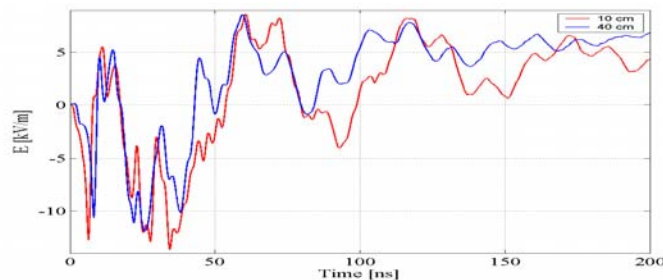
Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται συγκρίσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης για την κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ξεχωριστά. Οι συγκρίσεις γίνονται για 3 σημεία στον άξονα Y και για 2 σημεία στον άξονα X.

#### 6.3.1 Γεννήτρια NSG-438

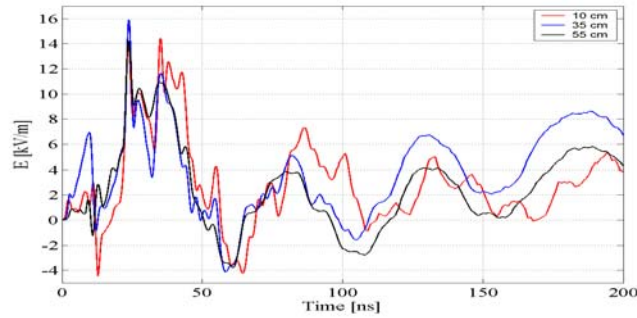
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438. Όπως φαίνεται παρακάτω τα γραφήματα παρουσιάζουν περισσότερες αιχμές για τα κοντινές στο σημείο εκφόρτισης αποστάσεις. Επιπλέον παρατηρείται μείωση της κατ' απόλυτης μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης.



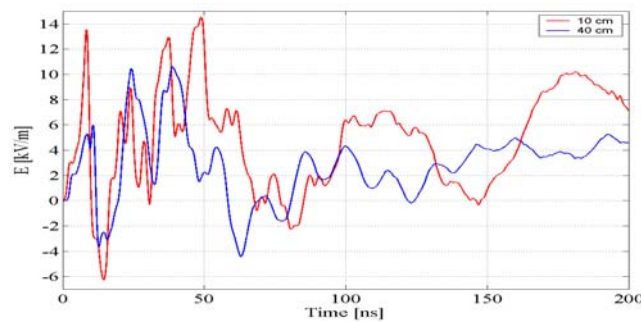
Σχήμα 6.15: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία Y1, Y5, Y10 (10 cm, 25 cm, 55 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.



Σχήμα 6.16: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X1, X4 (10 cm, 40 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.



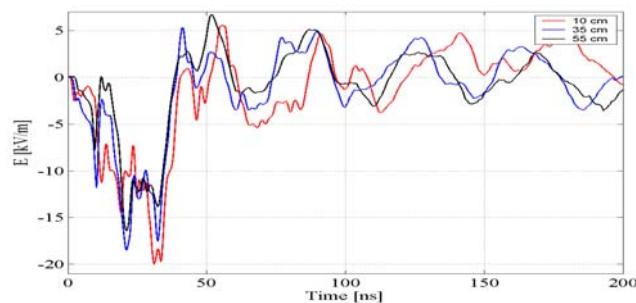
Σχήμα 6.17: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία  $Y1$ ,  $Y5$ ,  $Y10$  (10 cm, 25 cm, 55 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.



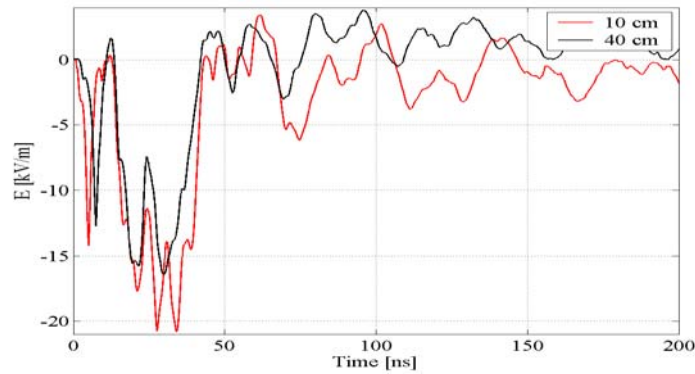
Σχήμα 6.18: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία  $X1$ ,  $X4$  (10 cm, 40 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.

### 6.3.2 Γεννήτρια NSG-433

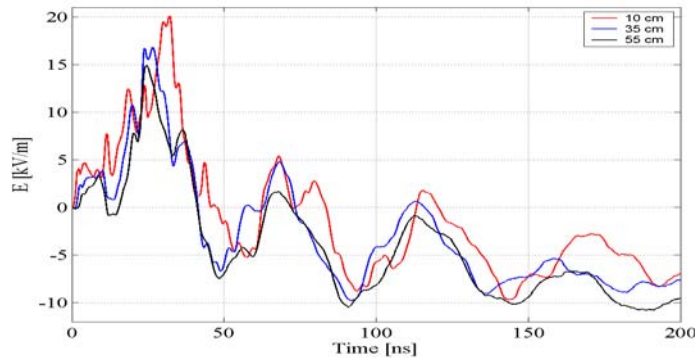
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433. Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης παραγράφου.



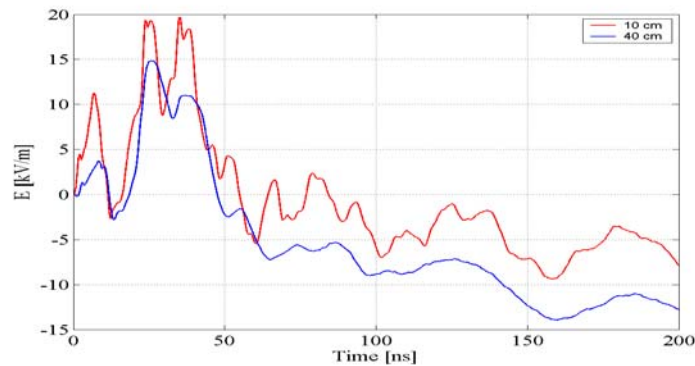
Σχήμα 6.19: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία  $Y1$ ,  $Y5$ ,  $Y10$  (10 cm, 25 cm, 55 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV.



Σχήμα 6.20: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία  $X1$ ,  $X4$  (10 cm, 40 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV.



Σχήμα 6.21: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία  $Y1$ ,  $Y5$ ,  $Y10$  (10 cm, 25 cm, 55 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.



Σχήμα 6.22: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία  $X1$ ,  $X4$  (10 cm, 40 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

#### 6.4 Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε ισαπέχοντα σημεία από το σημείο εκφόρτισης αλλά σε διαφορετικές κατευθύνσεις

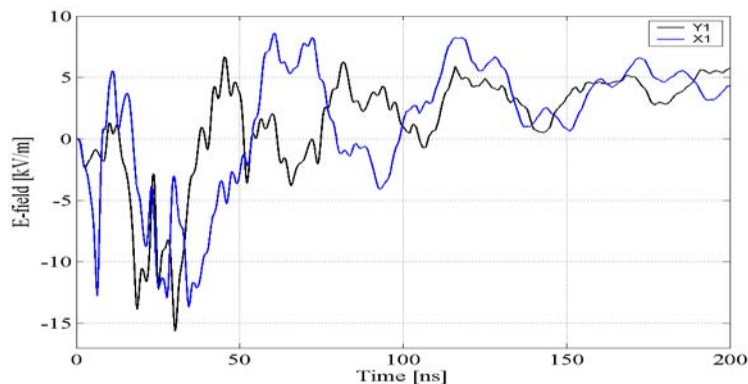
Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε ισαπέχοντα σημεία από το σημείο εκφόρτισης αλλά σε διαφορετικές κατευθύνσεις με κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ξεχωριστά.

##### 6.4.1 Γεννήτρια NSG-438

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε ισαπέχοντα σημεία από το σημείο εκφόρτισης αλλά σε διαφορετικές κατευθύνσεις με κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 για τάσεις +2 kV και -2 kV αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται στα γραφήματα που ακολουθούν, το πεδίο κατά την κατεύθυνση του άξονα Y είναι ελαφρώς ισχυρότερο κατ' απόλυτη τιμή από αυτό που αναπτύσσεται κατά την κατεύθυνση του άξονα X.

#### Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2 kV

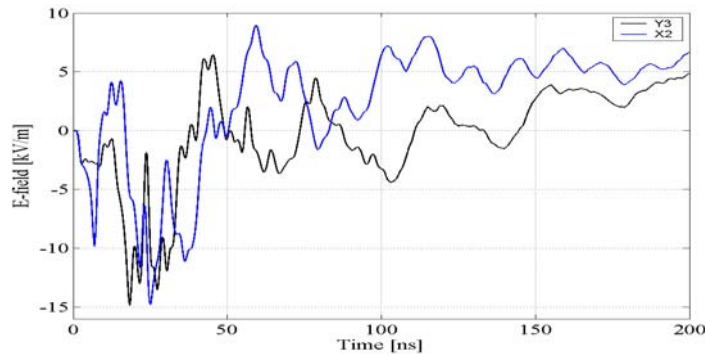
- Σημεία X1 Y1 (10 cm)



Σχήμα 6.23: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X1 και Y1 (10 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

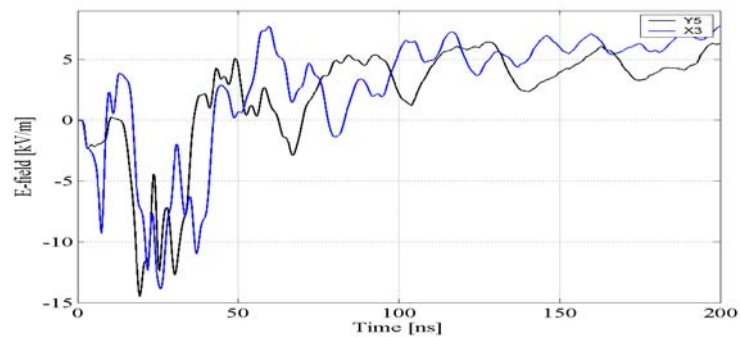


- **Σημεία X2 Y3 (20 cm)**



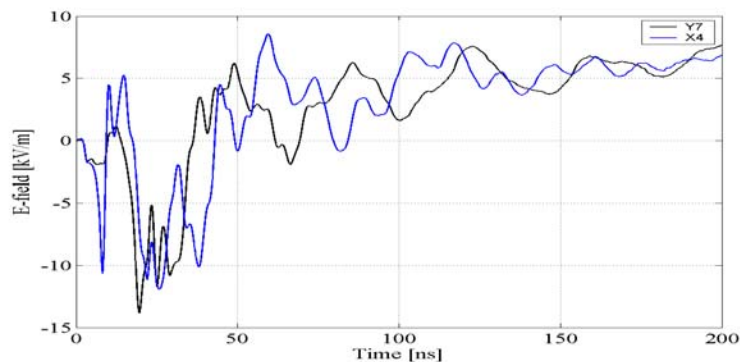
Σχήμα 6.24: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X2 και Y3 (20 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημεία X3 Y5 (30 cm)**



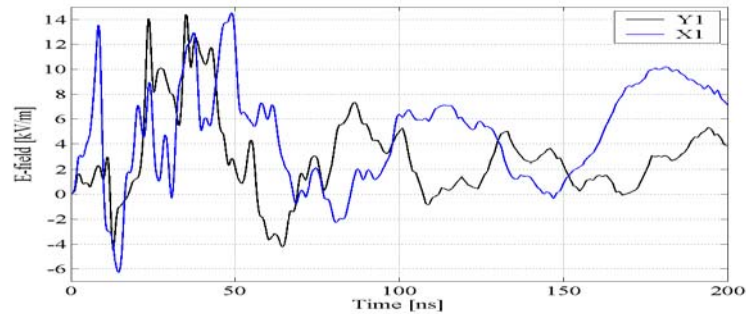
Σχήμα 6.25: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X3 και Y5 (30 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημεία X4 Y7 (40 cm)**

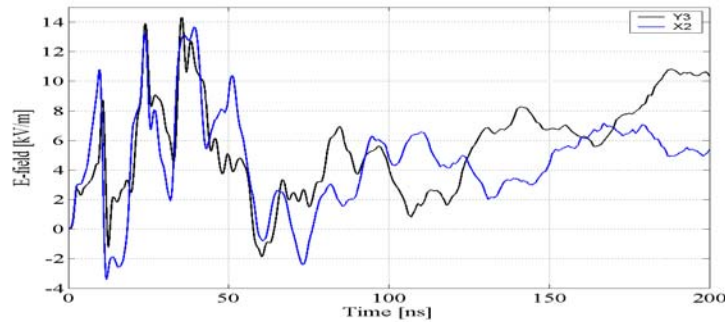


Σχήμα 6.26: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X4 και Y7 (40 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

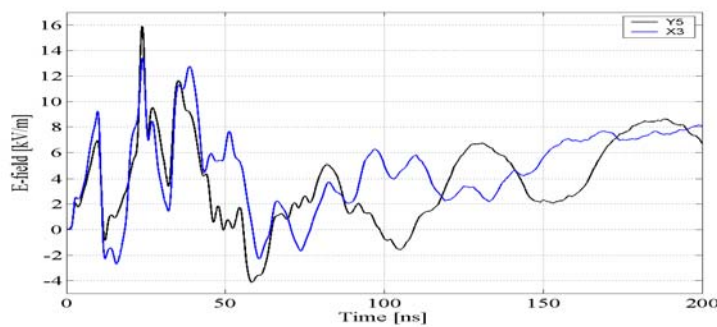


**Συγκρίσεις για τάση φόρτιση -2 kV**• **Σημεία X1 Y1 (10 cm)**

Σχήμα 6.27: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X1 και Y1 (10 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.

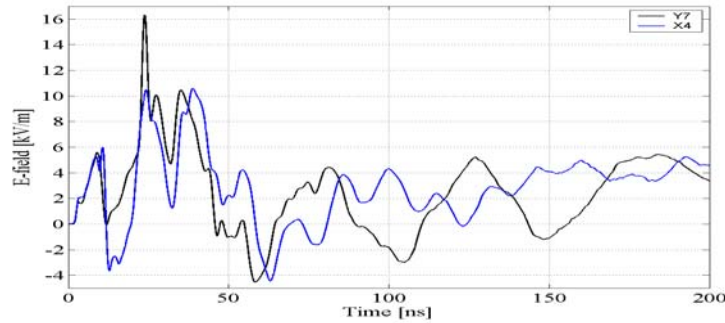
• **Σημεία X2 Y3 (20 cm)**

Σχήμα 6.28: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X2 και Y3 (20 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.

• **Σημεία X3 Y5 (30 cm)**

Σχήμα 6.29: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X3 και Y5 (30 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημεία X4 Y7 (40 cm)**



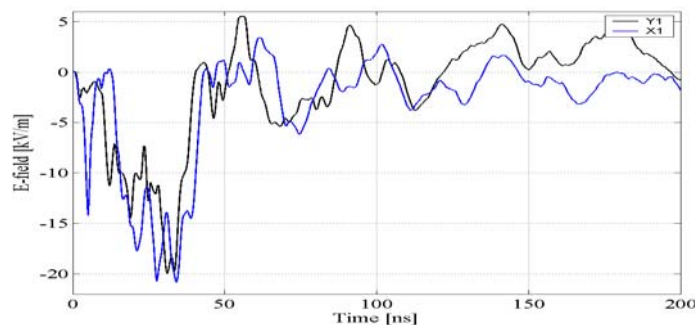
Σχήμα 6.30: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X4 και Y7 (40 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.

#### 6.4.2 Γεννήτρια NSG-433

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε ισαπέχοντα σημεία από το σημείο εκφόρτισης αλλά σε διαφορετικές κατευθύνσεις με κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 για τάσεις +2 kV και -2 kV αντίστοιχα. Όσον αφορά τη σύγκριση της μέγιστης κατ' απόλυτης τιμής μεταξύ των δυο αξόνων αυτή δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές όπως στην περίπτωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 όπου κατά την κατεύθυνση του άξονα Y το πεδίο ήταν ελαφρώς ισχυρότερο κατ' απόλυτη τιμή από αυτό στην κατεύθυνση του άξονα X.

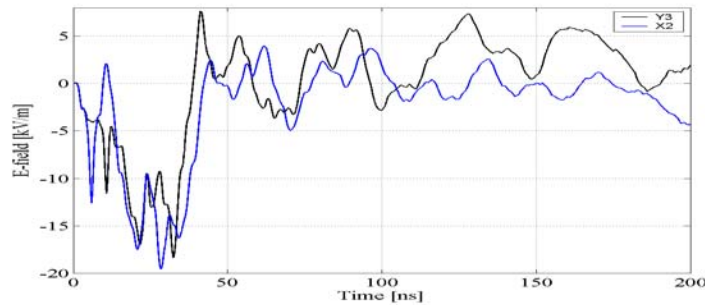
#### Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2 kV

- **Σημεία X1 Y1 (10 cm)**



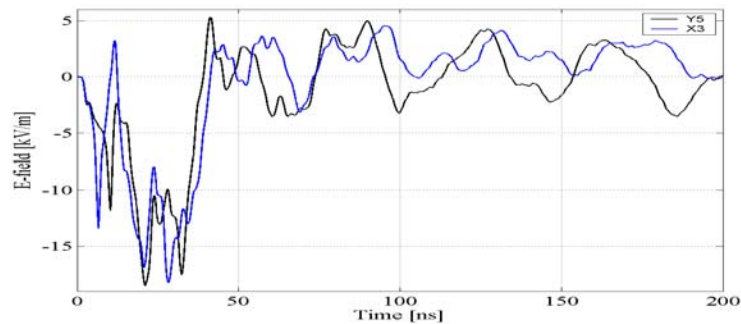
Σχήμα 6.31: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X1 και Y1 (10 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV.

- **Σημεία X2 Y3 (20 cm)**



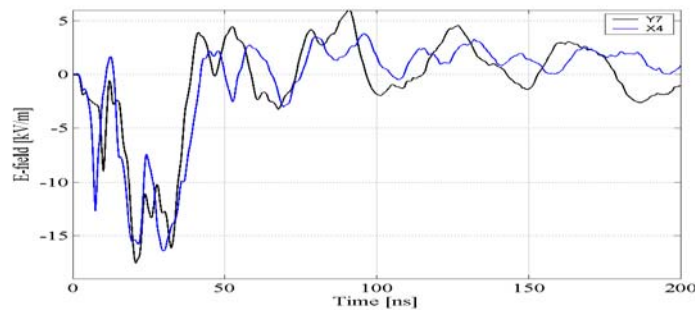
Σχήμα 6.32: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X2 και Y3 (20 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV.

- **Σημεία X3 Y5 (30 cm)**



Σχήμα 6.33: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X3 και Y5 (30 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV.

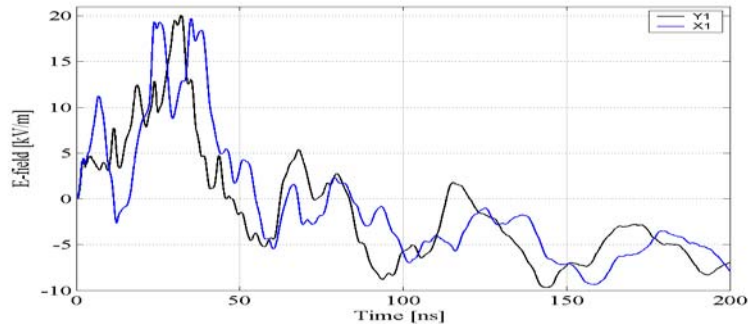
- **Σημεία X4 Y7 (40 cm)**



Σχήμα 6.34: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X4 και Y7 (40 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV.

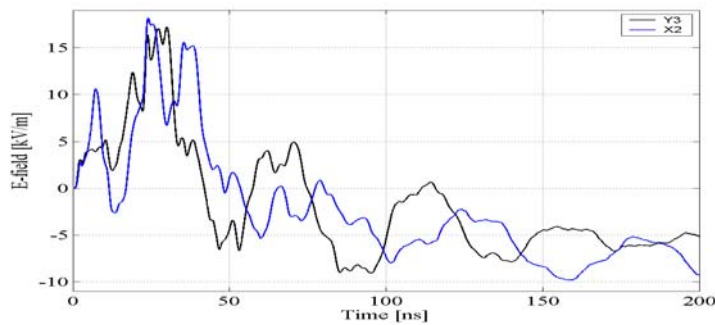
### Συγκρίσεις για τάση φόρτισης -2 kV

- Σημεία X1 Y1 (10 cm)



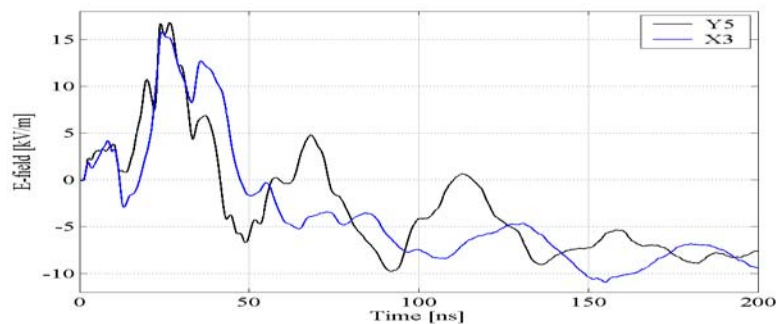
Σχήμα 6.35: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X1 και Y1 (10 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- Σημεία X2 Y3 (20 cm)



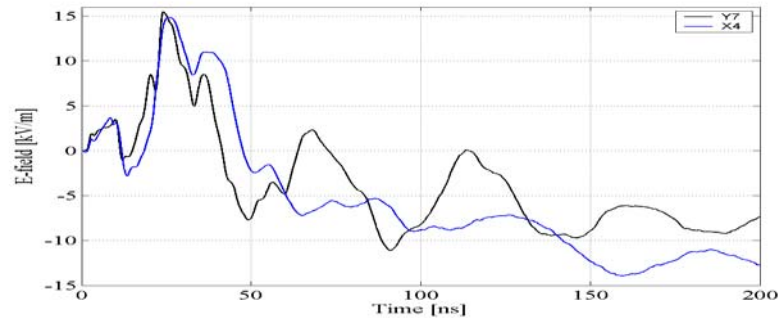
Σχήμα 6.36: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X2 και Y3 (20 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- Σημεία X3 Y5 (30 cm)



Σχήμα 6.37: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X3 και Y5 (30 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημεία X4 Y7 (40 cm)**



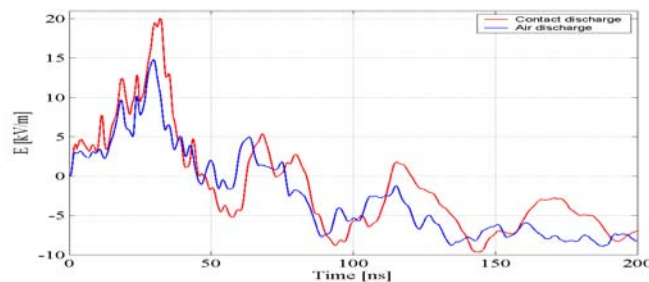
Σχήμα 6.38: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία X4 και Y7 (40 cm από το στόχο) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

### 6.5 Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο ίδιο σημείο για εκφορτίσεις αέρα και εκφορτίσεις επαφής

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκρίσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για εκφορτίσεις αέρα και εκφορτίσεις επαφής στο ίδιο σημείο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην περίπτωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 έχει υψηλότερη τιμή για εκφορτίσεις επαφής, ενώ στην περίπτωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 αυτό συμβαίνει για εκφορτίσεις αέρα. Όσο αφορά τη μορφή των αντίστοιχων γραφημάτων αυτή είναι σχεδόν πανομοιότυπη πράγμα το οποίο είναι λογικό αφού χρησιμοποιήθηκε η ίδια γεννήτρια για τους δύο τύπους εκφόρτισης και μετρήθηκε το πεδίο σε ίσες αποστάσεις από αυτό.

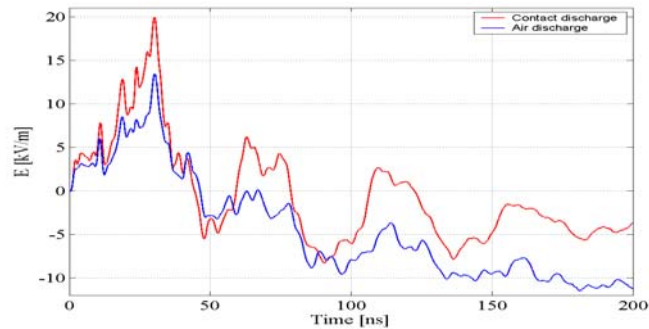
#### **Γεννήτρια NSG-433**

- **Σημείο Y1 (10 cm)**



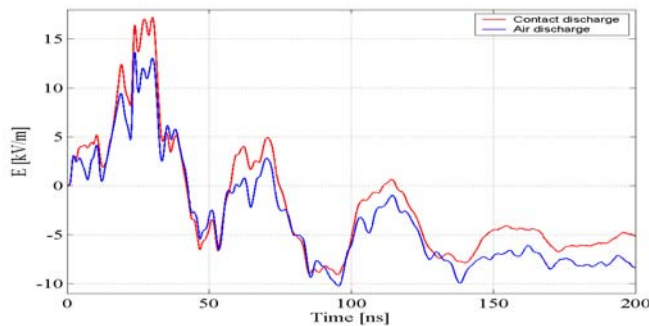
Σχήμα 6.39: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y1 (10 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y2 (15 cm)**



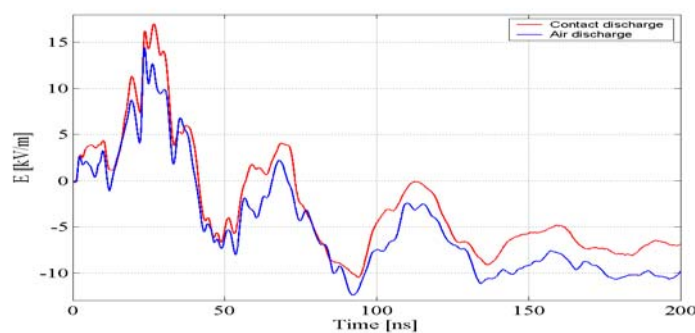
Σχήμα 6.40: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y2 (15 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y3 (20 cm)**



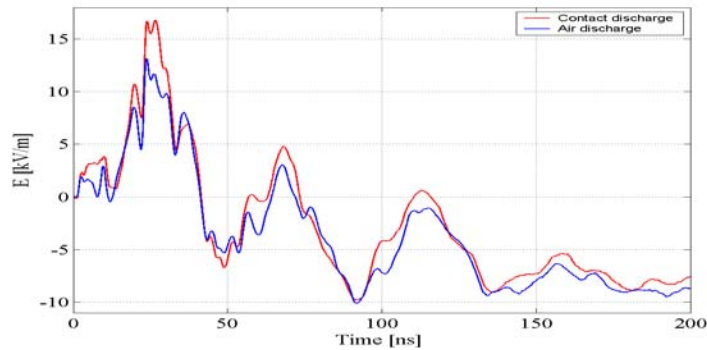
Σχήμα 6.41: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y3 (20 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y4 (25 cm)**



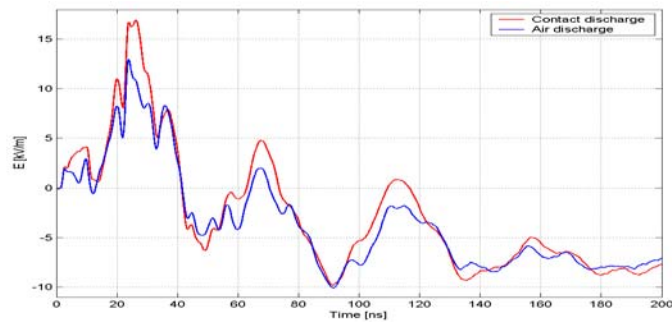
Σχήμα 6.42: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y4 (25 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y5 (30 cm)**



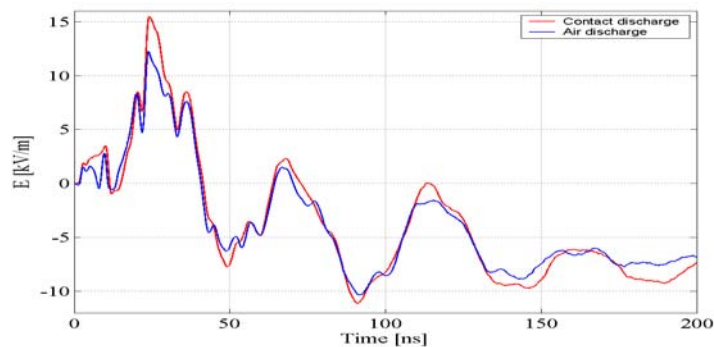
Σχήμα 6.43: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y5 (30 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y6 (35 cm)**



Σχήμα 6.44: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y6 (35 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

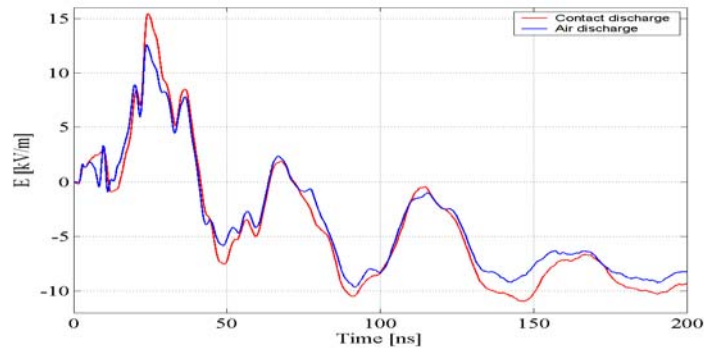
- **Σημείο Y7 (40 cm)**



Σχήμα 6.45: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y7 (40 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

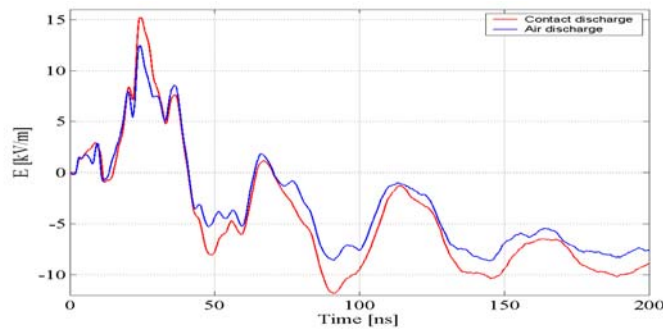


- **Σημείο Y8 (45 cm)**



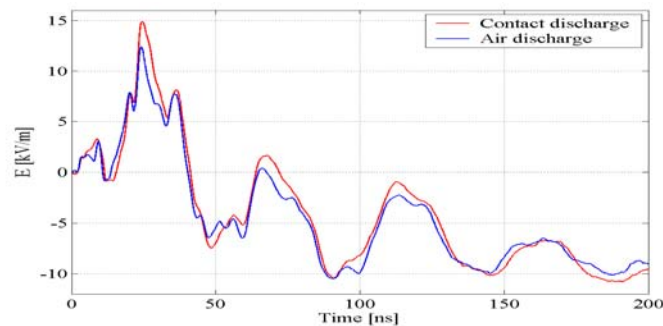
Σχήμα 6.46: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y8 (45 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y9 (50 cm)**



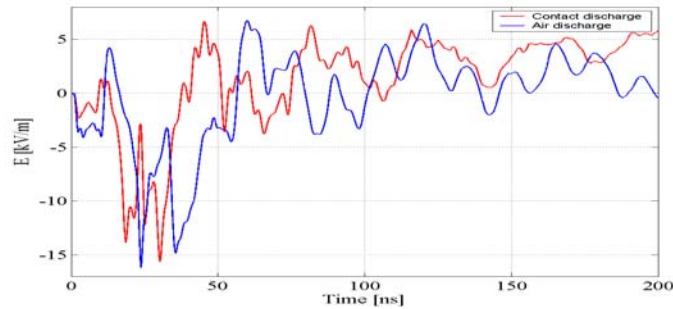
Σχήμα 6.47: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y9 (50 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο Y10 (55 cm)**

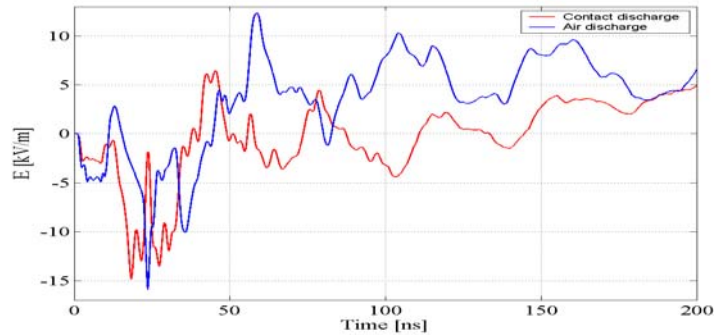


Σχήμα 6.48: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y10 (55 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

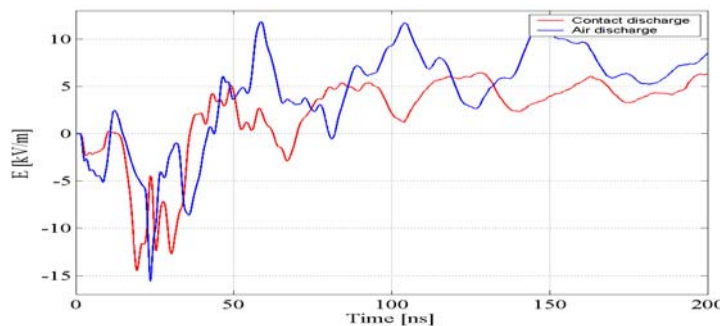


**Γεννήτρια NSG-438**• **Σημείο Y1 (10 cm)**

Σχήμα 6.49: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y1 (10 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

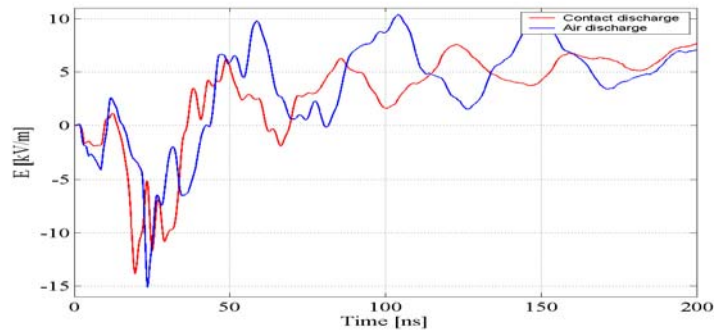
• **Σημείο Y3 (20 cm)**

Σχήμα 6.50: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y3 (20 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

• **Σημείο Y5 (30 cm)**

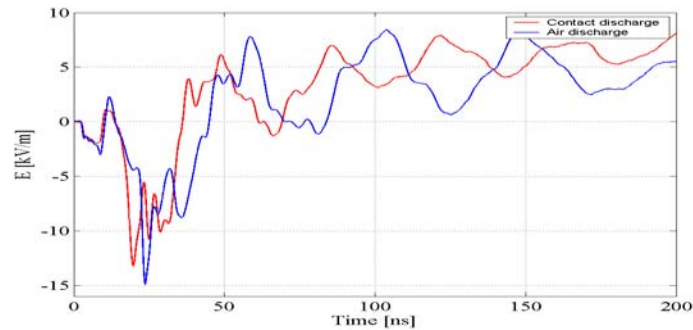
Σχήμα 6.51: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y5 (30 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο Y7 (40 cm)**



Σχήμα 6.52: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y7 (40 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

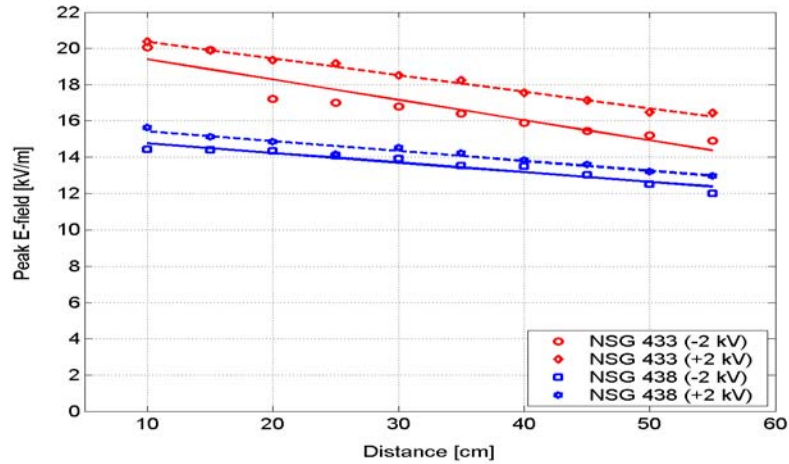
- **Σημείο Y9 (50 cm)**



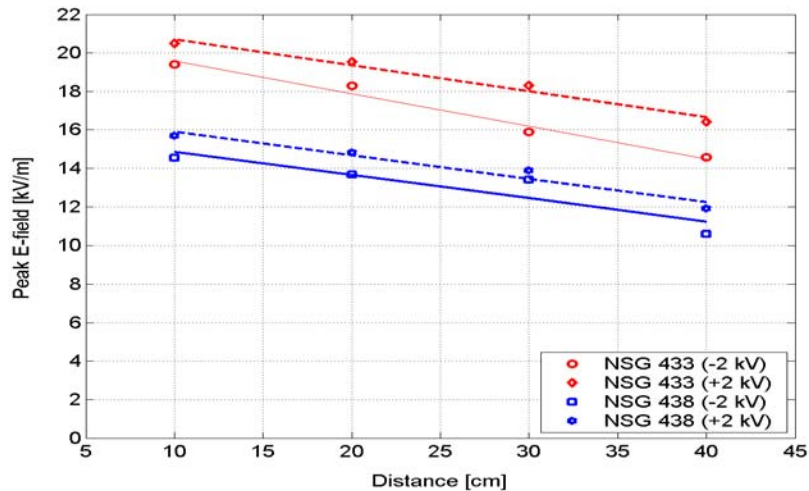
Σχήμα 6.53: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο Y9 (50 cm) για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

## 6.6 Μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει της απόστασης για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση $\pm 2$ kV με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση  $\pm 2$  kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου όσον αφορά την απόλυτη τιμή του μειώνεται σχεδόν γραμμικά όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης.

**Σύγκριση στον άξονα Y**

Σχήμα 6.54: Μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει της απόστασης στα σημεία Y1 (10 cm), Y2 (15 cm), Y3 (20 cm), Y4 (25 cm), Y5 (30 cm), Y6 (35 cm), Y7 (40 cm), Y8 (45 cm), Y9 (50 cm) και Y10 (55 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση  $\pm 2$  kV.

**Σύγκριση στον άξονα X**

Σχήμα 6.55: Μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει της απόστασης στα σημεία X1 (10 cm), X2 (20 cm), X3 (30 cm) και X4 (40 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση  $\pm 2$  kV.

## 6.7 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στα γενικά χαρακτηριστικά της μορφής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτή προκύπτει από τα γραφήματα και θα γίνει σχολιασμός των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τις συγκρίσεις των γραφημάτων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν ως εξής:

- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετά την παρέλευση ενός μικρού χρονικού διαστήματος της τάξης των 10 nsec περίπου, παρουσιάζει ένα απότομο βύθισμα στην περίπτωση των εκφορτίσεων θετικής πολικότητας ενώ αντίθετα στην περίπτωση των εκφορτίσεων αρνητικής πολικότητας το βύθισμα αυτό αντικαθίσταται από μια απότομη κορυφή. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι το απότομο βύθισμα (αν πρόκειται για θετικές εκφορτίσεις) ή η απότομη κορυφή (αν πρόκειται για αρνητικές εκφορτίσεις) που παρουσιάζεται στα πρώτα nsec ακολουθεί αντίθετης μορφής πολικότητα από την πολικότητα της εκφόρτισης. Στη συνέχεια η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται λαμβάνοντας θετικές και αρνητικές τιμές.
- Στα Σχήματα 6.1 έως 6.14 παρουσιάστηκαν τα γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 σε ίσες αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης τόσο κατά την κατεύθυνση του άξονα X όσο και κατά την κατεύθυνση του άξονα Y. Όπως προκύπτει από τα γραφήματα, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 είναι ισχυρότερη κατ' απόλυτη τιμή από την αντίστοιχη της NSG-438. Η υψηλότερη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της γεννήτριας NSG-433 παρουσιάζεται τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές τάσεις φόρτισης.
- Στα Σχήματα 6.15 έως 6.22 έγινε σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης και συγκεκριμένα κατά την κατεύθυνση του άξονα Y σε αποστάσεις 10, 25 και 55 cm ενώ κατά την κατεύθυνση του άξονα X σε αποστάσεις 10 και 40 cm. Η μορφή των γραφημάτων κοντά στο σημείο εκφόρτισης παρουσιάζει περισσότερες αιχμές λόγω του ισχυρού πεδίου ενώ όσο απομακρυνόμαστε από αυτό οι αιχμές στη

μορφή των γραφημάτων εξομαλύνονται. Επιπλέον παρουσιάζεται μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στα απομακρυσμένα σημεία σε σχέση με αυτά κοντά στο σημείο εκφόρτισης.

- Στα Σχήματα 6.23 έως 6.38 έγινε σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε ισαπέχοντα σημεία στο σημείο εκφόρτισης αλλά σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Κύριο χαρακτηριστικό των γραφημάτων αυτών είναι ότι το απότομο βύθισμα (αν πρόκειται για θετικές εκφορτίσεις) ή η απότομη κορυφή (αν πρόκειται για αρνητικές εκφορτίσεις) που παρουσιάζεται στη μορφή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά τα πρώτα nsec διαρκεί περισσότερο στα σημεία του άξονα X. Όπως παρατηρήθηκε και στα γραφήματα που παρουσιάστηκαν το πεδίο που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 είναι ισχυρότερο κατ' απόλυτη τιμή στην κατεύθυνση του άξονα Y σε σχέση με αυτό που μετράται στην κατεύθυνση του άξονα X. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται και στη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 όπου οι μέγιστες απόλυτες τιμές του πεδίου στις δυο κατευθύνσεις είναι σχεδόν ίδιες. Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παρουσιάζουν διαφορετική κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο και επίσης υπάρχει και διαφορά όσο αφορά την ίδια γεννήτρια στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται σε ισαπέχοντα σημεία από το σημείο εκφόρτισης. Ανάλογο συμπέρασμα έχουμε παρατηρήσει και στα γραφήματα που προκύπτουν από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί από τον Jan Sroka [20] και που έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3.
- Στα Σχήματα 6.39 έως 6.53 παρουσιάστηκαν τα γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής στο ίδιο σημείο. Όπως φαίνεται από τα γραφήματα, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ισχυρότερη για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 ενώ αυτό δε συμβαίνει και με τη γεννήτρια NSG-438 όπου το πεδίο είναι ισχυρότερο κατ' απόλυτη τιμή για εκφορτίσεις αέρα. Η μορφή των γραφημάτων για την ίδια γεννήτρια είναι σχεδόν πανομοιότυπη. Βέβαια η σύγκριση του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου για την ίδια απόσταση, αλλά για διαφορετικού τύπου εκφόρτιση (αέρος-επαφής) δεν είναι απόλυτα σωστό να γίνεται. Αυτό συμβαίνει λόγω της αδυναμίας επαναληψιμότητας των εκφορτίσεων αέρος. Όταν

έχουμε εκφορτίσεις αέρος το ρεύμα που παράγεται δεν είναι της ίδιας μορφής κάθε φορά. Αυτό συμβαίνει γιατί στις εκφορτίσεις αέρα το μήκος του δημιουργούμενου ηλεκτρικού τόξου είναι διαφορετικό και ποικίλει ανάλογα με την υγρασία, την ταχύτητα προσέγγισης του πιστολιού στο στόχο και την κατεύθυνση της ακίδας. Το γεγονός αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση των εκφορτίσεων επαφής, όπου υπάρχει επαναληψιμότητα των εκφορτίσεων αυτών.

- Τέλος στα Σχήματα 6.54 και 6.55 απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση  $\pm 2$  kV με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται γραμμικά όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Επίσης οι απόλυτες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της γεννήτριας NSG-433 είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες της NSG-438 τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές τάσεις φόρτισης και κατά τους δύο άξονες παρατήρησης.
- Όπως προαναφέρθηκε μπορεί μια γεννήτρια να παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο στην ίδια απόσταση και στην ίδια κατεύθυνση. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι κάθε γεννήτρια έχει διαφορετικό κύκλωμα το οποίο ανάλογα με τη θωράκιση που έχει η συσκευή παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο.
- Όμως και η ίδια γεννήτρια ανάλογα με την κατεύθυνση με την οποία μετράμε το ηλεκτρικό πεδίο που παράγει είναι διαφορετικό. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η γεννήτρια έχει εσωτερικό κύκλωμα το οποίο ανάλογα με τον προσανατολισμό του δίνει διαφορετικά αποτελέσματα ως προς το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο.
- Το διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο που παράγει η κάθε γεννήτρια έχει σαν αποτέλεσμα οι επαγόμενες τάσεις σε γειτνιάζοντα σημεία να είναι επίσης διαφορετικές. Αυτό συνεπάγεται ένα δοκίμιο (EUT) το οποίο εξετάζεται από τη μια γεννήτρια να περνάει το τεστ σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 ενώ με την άλλη να αποτυγχάνει. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει την αναγκαιότητα μελέτης του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις διάφορες γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ώστε στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου να υπάρξουν οδηγίες κατασκευής των γεννητριών αυτών, που θα καθορίζουν τα όρια τα οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των παραγόμενων πεδίων.

# Κεφάλαιο 7

## Η επόμενη μέρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν μετρήσεις και συγκριτικά αποτελέσματα του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιώντας δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Γενικότερα η μέτρηση του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι μια πρόκληση. Όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία [27] τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις ανάλογα με το είδος της πειραματικής διάταξης και τα probes που θα χρησιμοποιηθούν.

Οι μετρήσεις οι οποίες διεξήχθησαν έγιναν με τα probes της εταιρίας Rohde-Schwarz και όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν πάνω σε μονωτικό υλικό. Στο μέλλον θα πρέπει για την ίδια διάταξη που περιγράφηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία να γίνουν μετρήσεις με τα ίδιες κατασκευής probes και όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος σε γειωμένη μεταλλική πλάκα. Επίσης οι μετρήσεις για το παραγόμενο πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, χρησιμοποιώντας πάλι τις ίδιες γεννήτριες θα πρέπει να γίνουν όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος σε γειωμένη μεταλλική πλάκα και χρησιμοποιώντας διαφορετικού τύπου probes, ώστε να είναι δυνατόν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των δυο πειραματικών διατάξεων.

Επίσης θα πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όχι μόνο όταν η γειωμένη μεταλλική πλάκα είναι στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (HCP) αλλά και στο κατακόρυφο επίπεδο σύζευξης (VCP) ώστε να βρεθούν αν υπάρχουν διαφορές. Επιπλέον στα εργαστηριακά πειράματα που θα ακολουθήσουν θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης, ώστε η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης να διερευνηθεί και να βρεθεί βάση ποιου παράγοντα φθίνει. Τέλος πεδιακή ανάλυση και προσομοίωση της διάταξης θα μπορούσε να γίνει μέσω κατάλληλου υπολογιστικού πακέτου, ώστε να διαπιστωθούν και να εξηγηθούν τυχόν αποκλίσεις μεταξύ θεωρίας και πειράματος.

---

## Βιβλιογραφία

---

- [1] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [2] Theodore Dangelmayer, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [3] European Standard EN 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2001.
- [4] ΕΛΟΤ EN 61000.06.01: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικίσιμα, εμπορικά και ελαφρής βιομηχανίας περιβάλλοντα”, 2001.
- [5] Paul Cartwright, “Electrostatic Hazards in the aerosol industry”, διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp>.
- [6] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “ Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.
- [7] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esdjournal.com/techpaper/sfowler/esd97/esd97.htm>.
- [8] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, “Dielectric characteristics of materials- Electrostatic Discharge”, November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf>.
- [9] Martin Lutz, “The determination of the immunity to electrostatic discharge ‘ESD’ with transient 1000 generator”, EMC Partner, Seminar 1999.
- [10] European Standard IEC 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic EMC Publication”, 2001.



- [11] Γεώργιος Π. Φώτης, “Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και απωσία εξοπλισμού ισχύος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση”, Ενδιάμεση Κρίση του Υπομήφιου Διδάκτορα Γεωργίου Π. Φώτη, Ιούλιος 2004.
- [12] IEC 801-2, Electromagnetic compatibility for industrial process measurement and control equipment, Part 2: Electrostatic discharge requirement, 1991.
- [13] IEC 1000-4-2, International Standard, 1995.
- [14] Kai Wang, David Pommerenke, Ramachandran Chundru, Tom Van Doren, James L. Drewniak, Ashwin Shashindranath, “Numerical Modelling of Electrostatic Discharge Generators”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no.2, May 2003, pp. 258-271.
- [15] ANSI C63 16\_1993\_American National Standard guide for ESD test methodologies and criteria for electronic equipment, 1993.
- [16] P. F. Wilson and M. T. Ma, “Field radiated by electrostatic discharges”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 33, no. 1, Feb. 1991, pp. 10 – 18.
- [17] O. Fujiwara “An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge”, IEICE Transactions on Communications, vol. E79-B, no.4, April 1996, pp. 483 – 489.
- [18] Roman Jobara, David Pommerenke, D. Karkashadze, P. Shubitidze, R. Zaridze, S. Frei, Martin Aidam “Computer Simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, no.1, February 2000, pp. 54-65.
- [19] D. Pommerenke, ESD : What has been achieved, what is less understood, IEEE Symposium on EMC, Minneapolis, August 2002, pp. 895-900.
- [20] Jan Sroka and Leuchtman Pascal, “Transient field simulation of electrostatic discharge (ESD) in the calibration setup (acc. IEC 61000-4-2)”, IEEE International Symposium on EMC, 21-25 August 2000, pp. 443-448.
- [21] Jan Sroka and Leuchtman Pascal, “Enhanced field simulations and measurements of the ESD calibration setup”, IEEE International Symposium on EMC, 13-17 August 2001, pp.1273-1278.
- [22] Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.

- [23] Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438, Instruments Schaffner, Publ. 601-242A.
- [24] G. P. Fotis, I. F. Gonos, I A .Stathopoulos, “An Approach to the Better Understanding of the Experimental Setup for the Verification of the ESD Generators”, έγινε δεκτό και θα παρουσιαστεί στο Διεθνές Συνέδριο Υψηλών Τάσεων (ISH 2005) στις 25-29 Αυγούστου 2005 στο Πεκίνο.
- [25] Jan Sroka and Leuchtmann Pascal, “Transient field simulation of electrostatic discharge (ESD) in the calibration setup (acc. IEC 61000-4-2)”, IEEE International Symposium on EMC, 21-25 August 2000, pp. 445.